

アメリカの宇宙安全保障の確保  
宇宙の兵器に関するFASパネルのレポート  
2004年9月

# Ensuring America's Space Security

Report of the FAS Panel on  
Weapons in Space



**September 2004**



<p><b>Acknowledgements</b></p> <p>This report is the product of more than a year-long study conducted by the FAS's Panel on Weapons in Space. The Panel greatly appreciates the efforts of those who presented informative briefings to it; this report would not have been possible without their contributions. The presenters and four meetings at which they spoke are listed in Appendix 2.</p> <p>Others deserve our thanks as well. George Lewis provided thorough, thoughtful comments on the first draft. Josh Kellar at FAS helped to research small satellites. Kellar provided valuable assistance in organizing the four Panel meetings, writing parts of the report and final editing. Professor Ted Postol at M.I.T. initiated some of the analysis on satellite vulnerability. Heidi La Bash of the Security Studies Program at M.I.T. helped with editing the report. Finally the Panel thanks Subrata Ghoshroy for his untiring dedication as Executive Director throughout this entire project. His hard work, initiating this study, assembling the Panel, identifying and organizing the presenters, and writing and editing the report, are fully appreciated. Ghoshroy wants to extend special thanks to Professor John Holdren at the John F. Kennedy School of Government, where he spent his sabbatical from the General Accounting Office.</p> <p>The Panel thanks the Federation of American Scientists for sponsoring the study, particularly Henry Kelly, President and Michael Levi, Director of the Strategic Security Project. The Panel also thanks the John D. and Catherine T. MacArthur Foundation and the Ploughshares Fund for providing the resources that made the study possible.</p> <p>Leonard Weiss, Chairman October 2004</p>	<p><b>謝 辞</b></p> <p>このレポートは宇宙における兵器に関する FAS のパネルにより指揮された 1 年間以上のスタディの成果である。パネルは情報を多く含むブリーフィングを提示した人々の努力に大きな感謝を持っている。このレポートは彼等の寄与なしには実現しなかったものである。ブリーフィングを行った人々とかれらがしゃべった 4 つの会合は付録 2. にリストしてある。</p> <p>他の人々にも感謝している。George Lewis は第 1 版のドラフトに全体にわたり思慮深いコメントをしてくれた。FAS の Josh Kellar は小型衛星の調査の支援をしてくれた。Kellar は 4 つのパネル会合を組織化すること、レポートの一部を書き、最終の編集をする上で貴重な支援をしてくれた。M. I. T. の Ted Postol 教授は衛星のぜい弱性のいくつかの解析を手ほどきしてくれた。M. I. T. の安全保障研究プログラムの Heidi La Bash はレポートの編集で支援してくれた。</p> <p>最後にパネルは Subrata Ghoshroy にこのプロジェクト全体にわたって、倦むことなく主査に献身してくれたことに感謝する。</p> <p>このスタディを開始することに、パネルを召集することに、講演者を設定し、組織化することに、そして、このレポートを書き、編集することに彼のハードワークには大きな感謝をしている。</p> <p>Ghoshroy は会計局のサバティカルで政府の John F. Kennedy School にいた John Holdren 教授に特別の感謝を贈りたい。</p> <p>パネルはスタディの後援をしてくれたアメリカ科学者連盟に、特に、Henry Kelly, 理事長と Michael Levi, 戦略安全保障プロジェクト・ディレクタに感謝をする</p> <p>パネルはまた、John D. and Catherine T. MacArthur 財団と Ploughshares 基金にこのスタディを可能にしてくれた資金を提供いただいたことに感謝をしたい。</p> <p>Leonard Weiss, 会長 2004年 10月</p>
---	--

まえがき	Foreword	iv
エグゼクサマリ	Executive Summary	1
第一節：背景：		
1.0 宇宙の兵器化に関する論議	Section 1: Background: The Debate over Weaponizing Space	5
第二節：..		
2.0 宇宙活動の歴史的発展	Section 2: Historic Growth of Space Activities	9
2.1 宇宙資産で提供されるサービス	a. Services Provided by Space Assets	9
2.2 商業宇宙資産の軍事利用	b. Military Use of Commercial Space Assets	10
第三節：米国宇宙システム：脆弱性と脅威	Section 3: U.S. Space Systems: Vulnerabilities and Threats	11
3.1 序文	Introduction	11
3.2 可能性のある兵器レスポンスをもつ脅威	Threats with Possible Space Weapons Response	11
3.2.1 小型衛星	a. Small Satellites	11
3.2.2 対衛星用地上兵器	b. Ground-based Anti-satellite Weapons	12
3.2.3 高高度核爆発	c. High-altitude Nuclear Explosion	17
3.3 宇宙兵器としては扱わない脅威	Threats That Cannot be Addressed by Space Weapons	23
3.3.1 GPS信号を含め衛星リンクの妨害	a. Jamming of Satellite Links Including GPS Signals	23
3.3.2 高分解能画像のコントロール	b. Control of High-Resolution Imagery	24
3.3.3 軌道のデブリ	c. Orbital Debris	25
3.4 GPS衛星群の欠損	Loss of GPS Constellation	30
第四節：米国宇宙システムの防衛	Section 4: Protecting U.S. Space Systems	31
4.1 兵器化の事例	The Case for Weaponization	31
4.1.1 ラムズフェルド宇宙委員会レポート	a. The Rumsfeld Space Commission Report	31
4.1.2 宇宙兵器に関連する計画	b. Space Weapons-Related Programs	33
4.1.3 兵器化に対する選別された論議	c. Selected Arguments for Weaponization	34
4.2 兵器化への代替	Alternatives to Weaponization	37
4.2.1 脆弱性の緩和	a. Mitigating Vulnerabilities	37
4.2.2 抑止は変化したか？	b. Has Deterrence Changed?	37
4.2.3 宇宙に関する国際道路法	c. International Rules of the Road for Space	38

4.2.4 宇宙監視の改善			
	d. Improve Space Surveillance	.....	39
<b>参照文献</b>	<b>Endnotes</b>	.....	<b>40</b>
<b>略語と用語</b>	<b>Glossary of Acronyms and Terms</b>	.....	<b>42</b>
<b>付録</b>	<b>APPENDICES</b>	.....	<b>52</b>
<b>一般</b>	<b>General</b>		
付-1	パネルメンバとスタッフの略歴	Appendix 1 .....	Biographies of Panel Members and Staff
付-2	パネル会合とプレゼンタ	Appendix 2 .....	Panel Meetings and Presenters
<b>技術関連</b>	<b>Technical</b>		
付-A	宇宙の問題	Appendix - A .....	Issues in Space - Daniel Hastings
付-B	衛星攻撃兵器	Appendix - B .....	Anti-Satellite Weapons - Geoffrey Forden
付-C	高高度核爆発による衛星への脅威	Appendix - C .....	Satellite Threat due to High-altitude Nuclear Detonation - Dennis Papadopoulos
付-D	GPSカバレッジの感受性	Appendix - D .....	Sensitivity of GPS Coverage - Geoffrey Forden
付-E	軌道上のデブリ解析	Appendix - E .....	Orbital Debris Analysis - John Remo
付-F	潜在的敵の能力	Appendix - F .....	Capabilities of Potential Adversaries
	1. 中国		1. China - Hui Zhang
	2. ロシア		2. Russia - Pavel Podvig
	3. 北朝鮮		3. North Korea - David Wright
付-G	ブースト・フェイズ・ミサイル防衛に関するAPSレポートに対するコメント	Appendix - G .....	Commentary on the APS Report on Boost-Phase Missile Defense - John Remo

**宇宙の兵器に関するFASパネル      The FAS Panel on Weapons in Space**

Leonard Weiss, Chair  
Phillip E. Coyle III  
Charles A. Fowler  
Robert A. Frosch  
Ivan Kaminow  
C.Kumar N. Patel  
John L. Remo  
Ian Roxborough  
Lawrence Scheinman  
Ray Williamson  
Jill Wittels

**スタッフ      Staff**

Subrata Ghoshroy - Executive Director and Editor  
Josh Kellar - Research Assistant  
Heidi La Bash- Assistant Editor

<p>Foreword</p> <p>The urgent national debate about placing weapons in space has been stirred by three recent developments. First was the release of the January 11, 2001 Report of the Commission to Assess United States National Security Space Management and Organization, chaired by then Secretary of Defense-designate, Donald Rumsfeld; the Rumsfeld Commission warned of a potential "Space Pearl Harbor" and inferred that placing weapons in space could be a response. Second, in 2002 the United States withdrew from the Anti-Ballistic Missile Treaty, thereby removing one of the key legal barriers to deploying weapons in space. Finally, increased use of space assets has contributed significantly to the overwhelming advantage enjoyed by the U. S. military, making those assets an increasingly attractive target to potential competitors and causing some to argue that placing weapons in space can deter such threats. In response, in December 2002 the Federation of American Scientists assembled a panel of distinguished scientists and engineers, including academics and former high-level government officials, to assess the security benefits of space weaponization. Recognizing that the rate of technological and political change makes long-term prediction difficult, the Panel limited its analysis to whether the United States should weaponize space in the next five to ten years. In particular, the Panel examined in detail the question of how best to protect the space assets of the United States in this period, considering space-based and non space-based counters to the most likely threats. The Panel's charter was to consider carefully the arguments of proponents and opponents of weaponizing space, to make original technical analysis of some critical issues, and to provide the public and policymakers with a detailed summary of its findings, conclusions, and recommendations. As part of its investigation the Panel heard testimony at four meetings from current and former military officials, independent researchers, academics, and representatives of non-governmental organizations involved with space and military policy.</p> <p>Testimony was taken from Randy Correll, Richard DalBello, Richard Garwin, Laura Grego, Daniel</p>	<p>まえがき</p> <p>最近の3つの開発によって兵器を宇宙に配置することに関し、緊急の国家としての論議を巻き起こした。第一は2001年1月11日の国防長官に任命され委員長を務めたドナルドラムズフェルドによる米国の安全保障宇宙マネジメントと組織のアセスメント委員会の報告書の発表であった。ラムズフェルド委員会は潜在的な「宇宙真珠湾」を警告した。そして宇宙へ兵器を配置することが対応になりうることを示唆した。第二は2002年に米国はABM条約を撤回したことである。これにより、宇宙へ兵器を配備する鍵となる法律の障害の1つが取り除かれた。最後が宇宙資産の利用増大が米軍が享受している溢れるほどの利点に相当に寄与してきたことであり、これら資産は潜在的な競合者に増々魅力のある目標となり、宇宙に兵器を配置することでこのような脅威を阻止できることである。これに答えて、宇宙の兵器化の安全保障上の利点を事前評価するため2002年12月に米国科学者連盟は学界と政府の元高官を含む著名な科学者と技術者からなる委員会を召集した。技術的そして政治的变化により長期の予測は困難であることを認識しつつ、米国は今後5年から10年以内に宇宙を兵器化するべきかどうかに関し委員会の分析を限定した。特に、委員会はもっともあり得る脅威に宇宙ベースそして宇宙以外にベースをもつ対抗手段を考慮し、この期間に米国の宇宙の資産を守るのに最上の方法は何かを詳細に調べた。委員会の任命は宇宙の兵器化の推進者と反対者の議論を注意深く考慮することであった。重要問題のもとになる技術分析を行うため、公衆と政策立案者に判明事項と結論及び推奨事項の詳細な要約を提供するためであった。</p> <p>調査の一部として現在と過去の軍の担当者、独立の研究者、学界、及び宇宙と軍事政策に関連する非政府組織の代表者からの証言を聴取した。</p> <p>証言は Randy Correll, Richard DalBello, Richard Garwin, Laura Grego, Daniel Hastings, Peter Hayes, Theresa Hitchens, Michael Krepon, Jeffrey Lewis, Dennis Papadopoulos, Pavel Podvig, Ted Postol, Robert Preston, John Remo, David Wright, and Qiu Yong から得た。</p>
--	--

<p>DalBello, Richard Garwin, Laura Grego, Daniel Hastings, Peter Hayes, Theresa Hitchens, Michael Krepon, Jeffrey Lewis, Dennis Papadopoulos, Pavel Podvig, Ted Postol, Robert Preston, John Remo, David Wright, and Qiu Yong. A list of the panels and presenters follows the main report.</p> <p>This report therefore represents over a year of investigation and analysis. It broadly represents the views of the Panel. While not every member agrees with every conclusion, the members are unanimous that, at this juncture, it is unwise and unnecessary to deploy weapons in space. It recommends the issue be revisited in five years to update this assessment.</p>	<p>パネルとブリーフィングを行った人のリストがメインレポートのあとにある。</p> <p>このレポートは1年以上にわたる調査と分析の結果である。レポートはパネルの見方をおおよそ代表している。1つ1つの結論にメンバー一人一人が同意しているわけではないが、この重大時期に兵器を宇宙に配備するのは愚かで不要ということでは満場一致しているということである。</p> <p>5年以内に、この事前評価をアップデートするため問題を再度、取上げることを推奨する。</p>
--	--

## Terms

## 用語

<p>The Panel took the term "weaponization" to mean the placement of weapons in orbit that could attack targets in space or on the ground.</p> <p>A Glossary of terms and abbreviations follows the main report.</p>	<p>パネルは用語「兵器化(ウェポナイゼーション)」を軌道に兵器を配置して宇宙または地上の目標を攻撃することができるようにすることを意味するとした。</p> <p>用語と略語がメインレポートのあとにある。</p>
---	--



## Executive Summary

The overwhelming advantage enjoyed today by U. S. forces comes about in part through U.S. use of space. The U.S. military uses satellites for traditional support functions, such as intelligence, communication, and navigation, and to support new military capabilities, such as guiding precision munitions and enabling "network-centric warfare" through remote command centers and live video links from the battle-field.

How best to maintain these advantages is a key question facing the U.S. military.

In January 2001 the Rumsfeld Commission asserted that "the U.S. must develop the means both to deter and to defend against hostile acts in and from space. This will require superior space capabilities. "Some have taken this to mean that the United States must develop space weapons.

Agreeing that it is critical that the U.S. maximize the security of its space assets, the Panel considered the key threats to U.S. space systems over the next five to ten years and examined the best counter to each threat (See Tables A and B). In particular, the Panel sought to determine whether deploy-ing weapons in space was the best counter to any plausible threats.

After considering a wide range of vulnerabilities of U.S. space assets and the capabilities of various space-based weapons, the Panel unanimously concluded that it was not in the security interests of the United States to place weapons in space in the next five years. The Panel also considered the usefulness of utilizing space weapons to attack ground targets.

It was unanimous in concluding that ground-based weapons are more effective, more technically feasible, and carry a lower financial and political cost than do space-based weapons. While the Panel emphasized the technical aspects of space weaponization, it also considered the political implications of placing weapons in space.

It concluded that in cases where ground-based weapons offer equivalent capabilities, then U.S. strategic interests are better served by avoiding placement of weapons in space. The Panel's findings are summarized in the pair of tables below. Table A represents significant threats to U.S. space systems in the near term, that conceivably could be countered by weapons deployed in space. Table B describes threats to space assets that cannot be mitigated by space weapons.

## エグゼクサマリ

米軍が享受している圧倒的な利点は米が宇宙を利用していることに起因している。米軍は伝統的な支援機能例えば、インテリジェンス、通信、そして航法に、新しい軍事能力の支援、例えば精密誘導弾や遠隔司令センタを通じたNCW ネットセントリック・ウォーフェアを可能にするため、そして戦場からの生ビデオリンクに衛星を利用している。

これら利点をどのように維持できるかは米軍の直面する鍵となる質問である。

2001年1月ラムズフェルド委員会が主張したのは、米国は宇宙において、また宇宙からの脅威の行動を抑止・防衛する手段を開発せねばならないとした。これには卓越した宇宙の能力が必要とされる。人によっては米国は宇宙兵器を開発せねばならないことを意味すると受取った。

米国が宇宙の資産の安全を最大限に使うことが重要であることに同意したとして、パネルは、次の5年から10年に米国の宇宙システムの鍵となる脅威を考慮し、それぞれの脅威にどのように対抗するのがベストかを調べた。(表AとBを参照)

特にパネルは宇宙に兵器を配備することが如何なるもっともらしい宇宙の兵器に対しても最上の対抗手段なのかを決めることを追究した。

米国の宇宙資産の広い範囲のぜい弱性と様々な宇宙ベースの兵器の能力を考慮した上で、パネルは満場一致で次の5年間は宇宙に兵器を配置することは米国の安全保障の利益にかなわないと結論した。

パネルは地上目標の攻撃に宇宙兵器を利用することの有用性についても検討した。地上にある兵器の方がもっと効果的であり、もっと技術的に実現性があることそして宇宙配備の兵器に比べて経済的に政治的により低いコストであることも全員の合意となった。

パネルが判ったことは以下の2つの表にまとめてある。表Aは宇宙に配備した兵器で概念的に対抗でき、近い将来の米国の宇宙システムへの顕著な脅威を表している。表Bは宇宙兵器では低減できない宇宙資産への脅威を記載している。



The Panel agreed that, even for threats that could in theory be countered by space-based weapons, they are not the most effective means. The Panel did not assess either space-based interceptors or space-based directed energy weapons fielded by a nation hostile to the United States, because, within the time frame of five to ten years, it concluded that no foreign country is likely to deploy space-based interceptors or directed energy weapons. However, because one cannot preclude the future emergence of such threats, the Panel recommends that R&D on such weapons should continue, though not at a level commensurate with early deployment.

パネルが同意したのは、理論的に宇宙配備の兵器で対抗できる脅威に関してさえもそれらはもっとも有効な手段とはならないということに同意した。パネルは米国に対して脅威となる国が配備した宇宙配備の迎撃機や宇宙配備の指向性エネルギー兵器は事前評価しなかった。なぜなら、5年から10年という期間内に宇宙配備の迎撃機あるいは指向性エネルギー兵器を配備しそうな外国の国はないと結論したからである。しかし、将来のこういった脅威が出現する可能性を否定することはできないので、パネルはこのような兵器の研究開発の継続を推奨するが、早期の配備を開始するレベルではないように求める。

Table A: 宇宙兵器で対抗できるであろう脅威 Threats possibly countered by space weapons

脅威 (検出困難順) Threats in order of decreasing detection difficulty	脅威の成熟度 Threat maturity	インパクト Impact	最上の低減戦略 Best mitigation strategy
小型衛星 ・宇宙地雷 Small satellites/ space mines	同一軌道宇宙地雷技術は未だ利用できない Co-orbital space mine technology not yet available to threat countries	静止軌道にある1機以上の衛星に対する損害。デブリは多くの衛星に損害を与える可能性がある Damage to one or more satellites in GEO. Resulting debris may damage many satellites.	国際条約が宇宙の「道路法」を支配している。検証と強制には宇宙監視の改善が必要。 International treaty governing "rules of the road" in space. Improved space surveillance for verification and enforcement.
地上型指向性エネルギー兵器 Ground-based directed energy ASAT	LEO衛星を撃つことが可能 Can hit satellites in LEO.	脆弱な衛星特に偵察衛星には一時的または永久的損害に、Temporary or permanent damage to vulnerable satellites, particularly reconnaissance satellites	検出センサ、防護回路及び電子/光システムの搭載。ASAT禁止の国際条約。報復の段取り、制裁。 Installation of detection sensors, protective circuits and electro/optic systems. International treaty banning ASAT. Retaliatory steps, sanctions.
地上型機械エネルギー衛星攻撃兵器 Ground-based kinetic energy antisatellite weapon (ASAT)	LEO衛星を撃つことが可能 Can hit satellites in LEO.	各発射は単一の衛星に損害を与え得る。 Each launch can damage a single satellite.	重大な際は、代替衛星の即応打上げ。射場の従来型の攻撃。ASAT国際禁止条約。 Quick launch of replacement satellite, if critical. Conventional attack on launch site. International treaty banning ASAT.
宇宙の核爆発 Nuclear explosion in space	SCUDタイプミサイルをもつ国はLEO衛星に被害を与えられる Countries with SCUD-type missile can damage LEO satellites.	視準線の衛星には即損傷。全ての低軌道衛星は1週間から1月に亘る。 Immediate damage to satellites in line of sight. All LEO satellites over a period of weeks to months	適切な耐放射線レベルの評価支援の改良モデル。耐放射線軍事衛星。代替衛星の即応打上げ。 Improved models to help estimate appropriate radiation hardening levels. Radiation-hardened military satellites. Quick launch of replacement satellites.

Table B: 宇宙兵器で対抗できない脅威 Threats that cannot be addressed by space weapons

脅威 (検出困難順) Threats in order of decreasing detection difficulty	脅威の成熟度 Threat maturity	インパクト Impact	最上の低減戦略 Best mitigation strategy
GPS 信号の妨害 Jamming of GPS signals	局地的妨害利用可能 Localized jamming available	GPS は頑健であり、局地的妨害の影響は小さい。 GPS system quite robust. Effect of local jamming small.	GPS 誘導兵器は頑健に作られている。平和時の違反者への制裁。 GPS guided weapons are being made robust. Sanction offenders in peacetime.
衛星リンクの妨害 Jamming of satellite links	広帯域妨害装置が利用できる Wide band jammers available	商用衛星は感受性が高い。 Commercial satellites susceptible	国際基準、制裁、軍事行動の究極脅威を通じた強制。 Enforcement through international norms and sanctions, and eventual threat of military action.
軌道上デブリ Orbital Debris	適用範囲外 N/A	低軌道にある宇宙兵器からの軌道デブリは現在深刻な問題ではない。静止軌道では深刻となり得る。Orbital debris from space weapons in LEO not now a serious problem. Could be serious in GEO.	よりすぐれた監視、ロケット部品の廃棄処分の国際管理、宇宙汚染への罰則。 Better surveillance, international control of disposal of rocket components, penalties for littering in space.

<p>Because of the especially important role played by the Global Positioning System (GPS) constellation of satellites, a section of this report is devoted to threats to the GPS.</p> <p>Analysis showed that the system is relatively well-protected, because it can sustain the loss of up to four satellites without losing coverage. Furthermore, the fact that GPS satellites are at high altitude drastically lowers the number of countries that could take direct action against them. The Panel recommends U.S. development of a quick-launch capability to be able to further protect the GPS and other critical space systems if they come under threat.</p> <p>The Panel's conclusions and recommendations follow.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>o Space weapons do not constitute the best mitigating strategy to any of the perceived threats to space assets: ground-based anti-satellite weapons, jamming, space mines, orbital debris, or a high-altitude nuclear explosion.</li> <li>o No space weapons should be deployed by the United States in the next five years, although R&amp;D should continue at an appropriate level so that the United States is not caught by surprise.</li> <li>o The U.S. should ensure that critical space systems are redundant and placed in multiple orbital planes to reduce the damage caused by losing an individual satellite.</li> <li>o Critical military infrastructure in low earth orbit should be hardened against radiation to increase survivability in the event of a high-altitude nuclear</li> </ul>	<p>GPS 衛星のコンステレーションが果たす役割が特に重要なため、このレポートの節は GPS への脅威に当てられた。</p> <p>解析の結果ではシステムは比較的うまく守られていることが判った。それは、カバレッジを失わずに4つの衛星まで失ってもシステムが維持できるからである。</p> <p>さらに、高高度に GPS 衛星がある事実は、衛星に対して直接のアクションをとることのできる国の数を非常に少なくしている。パネルは脅威に曝された時には、さらに GPS とその他の重要な宇宙システムを守ることができるよう米国が即応打上げの能力を開発することを推奨する。</p> <p>パネルの結論と推奨は：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>*宇宙兵器は宇宙資産への如何なる認知されている脅威：地上型衛星攻撃兵器、妨害、宇宙機雷、軌道デブリ、あるいは高高度核爆発に対する最上の低減戦略</li> <li>*次の5年間には米国は宇宙兵器を配備するべきではない。しかし米国が不意を襲われることのないように適切なレベルで研究開発は継続すべきである。</li> <li>*米国は個々の衛星を失うことで生じる損害を低減するため、重要な宇宙システムが冗長で複数の軌道面に配置されることを確保すべきである。</li> <li>*低軌道の重要な軍事インフラは高高度の核爆発の際に残存性を増すため、放射線に対し強化す</li> </ul>
--	---

<p>explosion.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>o Quick launch capabilities should be developed in order to replace critical space infrastructure if it is threatened or disabled.</li> <li>o The U.S. should take the initiative to secure verifiable international agreements, including "rules of the road" that make clearer what is considered threatening activity in space.</li> <li>o The U.S. should continue to improve its space monitoring capabilities and space situational awareness to prevent stealthy hostile actions and further reduce the threat posed by background orbital debris.</li> <li>o The threat posed by small satellites is not well understood. A thorough technical study should be undertaken to assess the magnitude of this threat over the next ten years. In particular, the study should investigate the minimum requirements in fuel and mass for various orbital maneuvers, how much support from ground stations they would require, and the homing and stealth capabilities of small satellites.</li> <li>o The panel developed a rigorous analytical model of the hazard posed by orbital debris. Based on this model the panel determined that suborbital and low earth orbit explosions will not generate debris fields that are significant hazards to space infrastructure. Such debris fields could result from the interception of ballistic missiles in space or from the direct destruction of satellites. Assets in geostationary orbit, however, are much more closely packed and explosions at or near this orbit could potentially cause debris fields that would be extremely dangerous to military and commercial assets.</li> <li>o To improve confidence in models of the debris problem, the panel recommends that the appropriate government agencies undertake or commission studies to better correlate the current fragmentation models with more precise measurements.</li> <li>o The panel recommends that a similar study be commissioned in five years to assess how changes in the political and technological landscape may have altered the arguments for and against space weaponization.</li> </ul>	<p>べきである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>*脅威に曝されるか無力化された際に重要な宇宙のインフラを置き換えるため即応打上げ能力を開発すべきである。</li> <li>*米国は何が宇宙において脅威となる活動と考えられるかをより明確にする「道路法(rules of the road)」を含め、検証できる国際協定を確保するイニシアティブをとるべきである。</li> <li>*米国は隠密的な敵の行動を防止し、背景の軌道デブリで起こされる脅威のさらなる低減のため宇宙モニタリング能力と宇宙での状況認識(SSA)を改善し続けるべきである。</li> <li>*小型衛星で引き起される脅威は良く理解されていない。次の10年の間にわたってこの脅威の大きさを事前評価する包括的な技術スタディを請負うべきである。スタディは様々な軌道マヌーバに対する燃料と質量の最少の要求事項、地上局からどの程度の支援を必要とするか、そして小型衛星の対象に向かう能力とステルス性を調べるべきである。</li> <li>*パネルは軌道のデブリによって引き起される危険の厳密で解析的なモデルを開発した。このモデルに基づきパネルは準軌道と低軌道の爆発が宇宙のインフラに顕著な危険となるデブリフィールドを発生しないことを結論づけた。このようなデブリフィールドは宇宙での弾道ミサイルの迎撃または衛星の直接的な破壊から発生し得る。しかしながら、静止軌道の資産は近接して存在するので、この軌道または近傍での爆発は潜在的に軍事及び商用の資産に極度に危険となる潜在的なデブリフィールドの原因となり得る。</li> <li>*デブリ問題のモデルの確信を改善するため、パネルは適切な政府省庁が現在の断片モデルをもっと精密な計測とより良い相関をとるための検討作業を請負うか委員会スタディを行うことを推奨する。</li> <li>*パネルは類似のスタディを5年内に実施することを推奨する。政治的、技術的なランドスケープ(景色)の変化は、宇宙の兵器化への賛否の議論を変化させたかもしれない。</li> </ul>
--	---

**Background:  
The Debate over Weaponizing Space**

The launch of the Sputnik – the first artificial earth-orbiting satellite – on October 4, 1957 by the Soviet Union marked the beginning of intense superpower space rivalry with the US that lasted throughout the Cold War. Both superpower militaries recognized the value of space as the ultimate high ground and a wave of hundreds of satellite launches commenced.

The launches were primarily dominated by military missions, but civilian scientific exploration of space also grew. The Soviet military controlled both military and civilian space activities, but the United States created the National Aeronautics and Space Administration (NASA), separating civilian and military space endeavors.

There was fierce competition between the United States and the Soviet Union in both civilian and military missions. Even as the United States landed the first human on the moon, the Soviet Union chalked up records for the longest human space flight, as well as for the first docking of two ships in space.

With the revolution in computers and telecommunications, a new element entered the space arena: commercial utilization. The growth in this sector has been dramatic in the last two decades. Highly capable military satellites are expensive, but commercial satellites can be built for much less. Miniaturization of electronics, efficient power sources, and growth in computing power made smaller satellites possible and thus affordable also to many countries of the world. While the commercial satellite market is dominated by telecommunications, other applications, such as telemedicine and earth imagery, are beginning to take hold. The demand for broadband services, although slower than earlier projected, is expected to grow. Another aspect of the present satellite market is the growth of dual-use systems in which military and commercial users share the services offered by a single satellite. In fact, the bulk of U.S. military communications is now carried by commercial satellites.

**第1節 背景：**

**1.0 宇宙の兵器化に関する論議**

1957年10月4日、ソ連によって打上げられたスプートニク1号 世界初の地球周回人工衛星 は、冷戦時代を通じて米との超大国による宇宙覇権競争の始まりであった。2つの超大国の軍隊は宇宙覇権が強力な優位性を構築すると考え、よって幾多の衛星打上げが開始された。

衛星の打上げは当初、その目的を主に軍事任務によって支配されていたが、民間用の科学的宇宙探査も拡大していった。ソ連軍は軍事・民間両方の宇宙活動を管理していたが、米はNASAを設立し、民間と軍事それぞれの宇宙開拓活動を分割した。

民間および軍事の両任務において米ソは熾烈な競争を繰広げた。米が最初に人類を月に立たせると、ソ連は有人宇宙飛行の長時間記録を達成し、2つの宇宙船を初めて宇宙空間でドッキングさせた。

コンピュータおよび電気通信技術の革命とともに、宇宙開発に新たな要素が加わった：商業利用である。この分野における拡大は最近20年間で劇的に変化した。高性能な軍事衛星は高価だが、商用衛星ははるかに安価で製造ができる。電子部品の小型化、電源供給の効率化、およびコンピュータ能力の進化が衛星の小型化に寄与し、價格的にも世界中の多くの国々で導入できるようになった。商用衛星の市場が電気通信分野で支配されている間、遠隔治療や地球撮像などの新たな可能性が確立し始めていた。ブロードバンド・サービス向けの需要については、当初の計画より遅れてはいるものの、今後拡大すると考えられている。現在の衛星市場における新たな局面として、軍事・民間の両ユーザが1つの衛星を共用する多目的衛星システムの拡大がある。実際、米軍における通信の多くは商用衛星を介して行われている。

米ソを含む、当時の国連加盟国のほとんどが署名し



The landmark 1967 Outer Space Treaty that was signed by most members of the U.N., including the United States and the Soviet Union, prohibited the use of space for stationing any weapons of mass destruction. It also banned the moon and other celestial bodies from being used for military purposes. In fact, the first U.S. – U.S.S.R. Strategic Arms Limitation Treaty (SALT) signed in 1972 enshrined a promise by each country not to attack the other’s “national technical means of verification,” a euphemism for photo-reconnaissance satellites possessed by both sides. The two superpowers recognized and agreed that satellite reconnaissance was of fundamental importance for maintaining a credible nuclear deterrent and for reducing uncertainty in decision making by each knowing what the other was doing.<sup>1</sup>

In the late 1950s and early 1960s the United States and the Soviet Union conducted a series of atmospheric tests<sup>2</sup>, the most notable being the 1.4 magaton explosion at an altitude of 400 km in the South Pacific, called Starfish.<sup>3</sup>

The United States carried out Starfish in 1962. It brought to light the harmful effects of a high-altitude nuclear explosion (HANE). Three satellites were reportedly temporarily put out of commission by the bombardment of energetic particles created by the nuclear reaction. Nuclear weapons tests in the atmosphere and beyond have been banned since 1963 after adoption of the Partial Test Ban Treaty. However, the effects from the Starfish test created concern that a rogue nation could carry out such an explosion to damage U.S. satellites.

Notwithstanding treaties and pronouncements, both sides maintained research and development in anti-satellite weapons technology (ASAT) programs. Both the United States and the Soviet Union experimented with ground-based kinetic interceptors, lasers, and microwave weapons. According to Albert Wheelon, who was Deputy Director of the CIA and directed the first U.S. reconnaissance satellite program known as Corona, the United States established two anti-satellite systems in the Pacific Ocean in 1963, and kept them in operation for almost ten years. The United States also developed an ASAT that was to be launched from an F-15

た 1967 年の宇宙条約では、宇宙における大量破壊兵器の基地建設を禁止している。条約はまた、月またはその他天体を軍事目的に利用することを禁止している。実際、1972 年に署名された米ソ間の戦略兵器制限交渉 (SALT) では、一方の国が他方の “国家の技術的な検証手段” を攻撃しない旨、正式に記しているが、これは両国が写真偵察衛星を保有していることを婉曲表現している。2 つの超大国は信憑性のある核抑止力を維持すべく、またお互いが何をしているのかを認識した上で判断するための不確実要素を低減すべく、衛星による偵察が重要性の基盤を成していると認識し、同意した。<sup>1</sup>

1950 年代後半および 1960 年代初期には米ソはこぞって大気中核実験<sup>2</sup>を行った。もっとも有名なのが “スターフィッシュ<Starfish>” と呼ばれる、南太平洋上の高度 400km 地点にて 1.4 メガトンの爆破を行う大気核実験である。<sup>3</sup>

米はスターフィッシュを 1962 年に実施した。この実験で、高高度核爆発 (HANE) という有害な効果が白日に曝された。報告では、3 機の衛星が核反応によって生成されたエネルギー粒子の照射によって一時的に動作停止されたということである。大気中および大気圏外での核兵器実験は、部分的核実験禁止条約の採択後、1963 年以來禁止されている。しかしスターフィッシュ実験の影響として、ならず者国家が同様の爆発を起こして米国の衛星に被害を与えることができるという懸念を生み出した。

各条約および宣言にもかかわらず、米ソ両国は衛星攻撃兵器技術 (ASAT) プログラムの研究開発を続けた。米ソ両国とも地上配備のキネティック迎撃兵器、レーザおよびマイクロ波兵器の実験を行った。元 CIA の副長官で最初の米偵察衛星プログラム “コロナ” を指揮したアルバート・ウィーロン氏によると、米は 1963 年に太平洋上において 2 つの衛星攻撃システムを構築し、ほぼ 10 年間に亘って任務を遂行していた。米はまた、F-15 戦闘機から発射して低軌道 (LEO) 衛星を撃墜する ASAT を開発した。この技術では 2 段階の 2,600 ポンドロケットおよびターミナルからの誘導向けに赤外線センサが採用された。このシステムは 1985 年に 3 回飛行実験

aircraft to hit low earth orbit (LEO) satellites. This technology employed a two-stage 2,600 lb. rocket and an infrared sensor for terminal guidance. This system was flight tested three times in 1985, once against an orbiting target.<sup>4</sup> The Soviets also flight tested a co-orbital anti-satellite system that was successful in 11 out of 26 tests in orbit.<sup>5</sup> Space-based weapons such as kinetic or directed energy interceptors have also been studied. However, neither the Soviet Union nor the United States has retained an ASAT system, although no treaty governing space operations bans such systems.

In 1972, the Anti-Ballistic Missile (ABM) Treaty between the United States and the Soviet Union outlawed development and testing of any missile defense system that was mobile, sea-based, or space-based. It also prohibited any space-based components that incorporate “other physical principles” such as the laser. However, in 2002 the United States exercised its option to withdraw unilaterally from the Treaty.

It is clear that both sides observed restraint in their pursuit of anti-satellite weaponry in general and space weapons in particular. The restraint was derived from the consensus that everyone’s satellites are highly vulnerable. Again, in Wheelon’s opinion, the United States was capable of destroying Soviet satellites with its ASAT systems based in Kwajalein Atoll and Johnston Island, systems which were established in 1963. The Soviets could do the same to the Corona, the first U.S. spy satellites in LEO, with their nuclear-tipped ABM system around Moscow.<sup>6</sup>

“Militarization” vs. “Weaponization”

The military applications of satellites were primarily in the areas of intelligence gathering, reconnaissance, navigation, and communications. In addition, both the United States and the Soviet Union created an early warning system to detect and track each other’s intercontinental ballistic missile launches. The militaries of both countries have fielded many single satellites and whole orbital formations that, according to Russian political analyst Andrei Kislyakov, can be described as “general-purpose military space systems.”

を行い、そのうち1回は実際に周回軌道をとっている標的に対して行われた。<sup>4</sup> ソ連もまた共通周回軌道衛星攻撃システムの実験を行い、26回の実験中11回の成功を収めた。<sup>5</sup> キネティックまたは直接エネルギー迎撃兵器などの宇宙配備兵器も研究された。しかしながら、それらシステムを規制する宇宙運用条約なるものがなかったにもかかわらず、ソ連も米も ASAT システムを保持しつづけることはしなかった。

1972年には、米ソ間で締結された ABM 条約によって移動式、海上配備式および宇宙配備式のミサイル防衛システムについて、それらの開発および実験を禁止した。ABM 条約はまた、所謂レーザのような“その他の物理的原理”を応用した機器の宇宙配備も禁止した。しかし、2002年に米は同条約を一方向的に廃棄するという選択を実行した。

米ソ両国とも、衛星攻撃兵器全般、特に宇宙兵器開発に自制心を持っていたことは明白である。衛星はおしなべて攻撃対象になりやすいという認識がそのような自制心を生んだようだ。ウィーロン氏の意見を再確認すると、米は1963年にクワジェリンおよびジョンストン島に配備された ASAT システムでソ連の衛星を破壊する機能を有していた。同様にソ連も、モスクワ周辺に配備された核弾頭を持つ ABM システムを用いて米初の低軌道 (LEO) 式スパイ衛星であるコロナに対して攻撃が可能であった。<sup>6</sup>

“軍事化” vs. “兵器化”

衛星の軍事的な主用途は情報収集、偵察、航法および通信の分野にあった。加えて、米ソ両国は早期警戒システムを開発してお互いの大陸弾道ミサイル発射を感知、追跡していた。両国の軍隊は多数の衛星を打上げ、ロシアの政治アナリストであるアンドレイ・キスルヤコフ氏によると、“多目的軍事宇宙システム”と称される周回軌道編隊を形成した。それゆえ、所謂宇宙の“軍事化”というものは初めて衛星を打上げた日からすでに始まっていたと考えることもできる。しかしキスルヤコフ氏が指摘しているように、“たとえ軍事指向であったとしても、敵対する標的と交戦したり、“宇宙空間”また

Therefore, one could speak generally of the so-called “militarization” of space, which has existed since the days of the first launches. But as Kislyakov correctly points out, “Although military-oriented, they are not weapons since they are not intended to engage hostile targets and do not pose an offensive threat in of “from space.”<sup>7</sup> This is an important demarcation between militarization and weaponization.

Throughout the Cold War, satellites were not openly used during warfare for tactical purposes such as active targeting or guidance of weapons. The situation changed in a marked way with the new weapons introduced in the first Gulf War in 1991 – the significant deployment of precision satellite-guided weapons and use of satellite communications for tactical purposes such as relaying information from AWACS, JSTARS, and more recently from unmanned aerial vehicles such as the Predator.

Yet while militarily very useful, the Global Positioning System (GPS) constellation is not a space weapon. For the purposes of this Panel’s work, we have adopted the term “weaponization” of space to mean the placement of actual weapon systems in space. The Panel recognizes that there are various functions that space weapons can perform. The major ones are attack on satellites, attack on ground assets, and interception of missiles in either boost-phase or in mid-course.

The Panel recognizes the fact that satellites or satellite systems are vulnerable to attacks from many different sources by multiple means other than space-based weapons. The sources include ground-based anti-satellite weapons, jamming of communication links, attacks on satellite earth stations, and even detonation of a nuclear weapon in space. The report discusses these vulnerabilities and threats and examines mitigation strategies.

は“宇宙から”の攻撃的な威力にならない限り、兵器とは言えない。”<sup>7</sup> これは軍事化と兵器化との境界にある重要な区切りである。

米ソ冷戦を通じて衛星は、戦略的武力衝突をしていた時代のアクティブ照準または誘導兵器のように堂々とは運用されてはいなかった。1991年の最初の湾岸戦争において導入された新しい兵器は状況を一変させた。精密衛星誘導兵器、およびAWACSやJSTARS、最近ではプレデタ等の無人機からの情報を中継する目的で、戦略的衛星通信が大々的に導入された。

軍用としても非常に有効ではあるが、GPS衛星は宇宙兵器ではない。本パネルの作業での検討課題として、宇宙の“兵器化<Weaponization>”を採上げ、宇宙空間における現実の兵器システムの位置付けを考える。本パネルでは、宇宙兵器が持つ様々な能力を認識している。主能力は衛星を攻撃すること、地上設備を攻撃すること、およびブーストフェイズまたはミッドコースのミサイルを迎撃することである。

本パネルは、衛星および衛星システムは宇宙配備の兵器以外の多種にわたる手段によるさまざまな源から攻撃をうける対象になることを認識している。これらの源には地上衛星攻撃兵器、通信リンクの妨害、地上衛星基地への攻撃および宇宙空間での核兵器による爆発も含まれている。レポートではこれら衛星の脆弱性および脅威について論じ、脅威低減策の検証を行う。



## Historic Growth of Space Activities: Services Provided by Space Assets

Growth in military, civilian, and commercial uses of space has been dramatic in the four decades since the beginning of the space age. More than 2,700 non-military satellites orbit the earth today.<sup>8</sup> While nearly 85% of these satellites belong to the United States and the former Soviet states combined, there are also now many other-space faring nations, including China, Japan, and India. Furthermore, several developing countries are joining the growing list of countries that have their own satellites launched. Today's satellites carry out a wide range of activities. Table-1<sup>9</sup> lists the various non-weapon applications of satellites, which include commercial, civil, and military satellites. Table-2 shows the major commercial applications in different orbits.

### Table-1 Non-weapon Space Operations

- Geodesy
- Astronomy
- Navigation
- Surveillance
- Meteorology
- Space Stations
- Communications
- Lunar Exploration
- Earth Observation
- Search and Rescue
- Manned Orbital Shuttles
- Space Physics Research
- Interplanetary Exploration
- Microgravity Experimentation

### Table-2 Examples of Commercial Uses in GEO, MEO, and LEO

- GEO: Altitude 22,223 miles

- DBS/DARS
- Satellite Broadband
- Broadcast and Cable Distribution
- Telephony
- Mobile Communications

- MEO: Altitude > 609 miles

- Mobile Communications
- GPS

- LEO: Altitude 400 – 1,600 miles

- Mobile Communications
- Satellite Broadband

## 第2節：宇宙活動の歴史的発展： 2.1 宇宙資産(アセット)で提供されるサービス

軍、民間および商用での宇宙利用の発展は、宇宙時代の始まり以来、40年間で劇的な変化を遂げた。今日では2,700以上の非軍事衛星が地球を周回している。<sup>8</sup> これら衛星の約85%が米および旧ソ連に属しているが、中国、日本およびインドを含むその他多くの宇宙を享受する国家がある。さらにいくつかの発展国は、自国で衛星打上げが可能なまでに発展しているリストの仲間入りをしている。今日の衛星は広範囲の活動を行う。Table-1<sup>9</sup> 資料では、商用、民間用および軍事衛星を含む衛星の様々な非兵器用途を列記している。Table-2 資料では異なる周回軌道における主な商業用途を記載している。

### Table-1 非兵器的な宇宙利用

- 測地学
- 天文学
- 航法(ナビゲーション)
- 監視
- 気象学
- 宇宙基地
- 通信
- 月探査
- 地球観測
- 探索救助活動
- 有人周回軌道シャトル
- 宇宙物理学研究
- 惑星探査
- 微小重力実験

### Table-2 静止軌道<GEO>、中軌道<MEO>および低軌道<LEO>における商業利用の事例

-GEO：高度 22,223 マイル

- DBS/DARS
- 衛星ブロードバンド
- 放送および有線放送配信
- 電話通信
- 移動通信

-MEO：高度 609 マイル以上

- 移動通信
- GPS

-LEO：高度 400 ~ 1,600 マイル

- 移動通信
- 衛星ブロードバンド

## Military Use of Commercial Space Assets

The growth rate in the utilization of space in U.S. military affairs has been staggering. For example, in the 1991 Gulf War, 92% of the bombs were unguided and 8% were laser guided. By contrast, nearly 60% of the bombs dropped on Afghanistan in 2001 and 2002 were either laser or GPS guided. Moreover, this dependency on satellites is limited not only to the guided missiles or bombs. It encompasses the whole operation of war fighting from foxhole to the Pentagon by virtue of its reliance on information. During Desert Storm or the first Gulf War, the total bandwidth required for information exchange was 100 megabits per second (Mbps), while the war in Afghanistan required 250 Mbps although it involved only 10% of the forces deployed during Desert Storm.<sup>10</sup> Largely commercial geo-synchronous satellites perched high above the earth at nearly 23,000 miles provide nearly all of this bandwidth. The commercial satellites provide the U.S. military with an unparalleled advantage over its adversaries in its ability to apply overwhelming force without significantly risking its assets or the lives of its troops. At the same time, the critical dependence of the United States on space is apparent to an adversary.

While the growth in commercial satellites has come primarily from the explosion in telecommunications in general, in the last few years there has also been dramatic demand for commercial satellite imagery, which is quickly catching up with the resolution offered by the secret intelligence satellites of the United States and the former Soviet Union. This development is of increasing concern to the United States for not only security reasons, but possibly other reasons as well.<sup>11</sup>

The most precise imagery now available in the commercial market has resolution of 0.6m panchromatic, 2.5m color. Space Imaging's Ikonos and OrbImage's Orbview 3 provide 0.8 and 1.0 panchromatic imagery, respectively. Non-U.S. satellites deliver somewhat lower resolution. Panchromatic resolution is expected to improve to 50cm or less in the next few years.<sup>12</sup>

## 2.2 商業宇宙資産の軍事利用

米軍における宇宙利用の増加率は膨大なものである。例えば、1991年の湾岸戦争時、爆弾の92%は誘導なしで、8%はレーザ誘導であった。反して、2001年および2002年のアフガニスタン侵攻時には約60%の爆弾をレーザまたはGPS誘導であった。もっといえば、このような衛星への依存度は誘導ミサイルまたは誘導爆弾に限られたものではない。フォックスホールからペンタゴンまで、(衛星を利用して収集された)情報に対する信頼性のおかげで戦闘時の任務すべてを網羅している。砂漠の嵐作戦、または最初の湾岸戦争時には情報交換のために100Mbpsの処理能力が要求されたが、アフガニスタンでの戦闘時には、砂漠の嵐作戦時より10倍の兵力が投入されたとはいえ、250Mbpsが要求された。<sup>10</sup> 概して商用静止衛星は地上約23,000マイルの高度に位置しているが、この処理能力量をほぼカバーできる。商用衛星は米軍に、自軍の装備または兵士の命への多大なリスクなしに圧倒的な武力を投入できることを可能にし、敵に比し強力な優位を与える。同時に、米の宇宙に対する重大な依存性はあらゆる敵に明らかとなっている。

商用衛星の発展は、概して電気通信網の拡大から始まったものであるが、ここ数年は商用衛星の撮像に需要が大きく傾き、その撮像分解能は米および旧ソ連の機密情報衛星のそれに匹敵するものになりつつある。この発展は、単に安全保障面にとどまらず、同様に他の面においても、米の懸念を増大させた。<sup>11</sup>

現在の商業分野におけるもっとも精密な撮像分解能はパナクロ0.6m、カラー2.5mである。スペース・イメージングのイコノスおよびオーブイメージのオーブビュー3はそれぞれ0.8と1.0パナクロの画像である。米以外の衛星は幾分低分解能である。パナクロ分解能は今後数年のうちに50cm以下まで向上すると予想されている。<sup>12</sup>

## SECTION 2 United States Space Systems: Vulnerabilities and Threats

### Introduction

We simply cannot afford to defend against all possible threats. We must know accurately where the threat is coming from and concentrate our resources in that direction. Only by doing so can we survive the cold war."- Edwin Land, founder of the Polaroid Corporation and father of U.S. satellite reconnaissance.

Land's prophetic statement quoted above is as valid today as it was during the height of the Cold War nearly five decades ago. The Killian panel established by President Eisenhower in 1954 to assess the Soviet ICBM capabilities, of which Land was a member, warned in its final report: "We must find ways to increase the number of hard facts upon which our intelligence estimates are based, to provide better strategic warning, to minimize surprise in the kind of attack, and to reduce the danger of gross overestimation or gross under estimation of the threat."

With regard to the threats to U.S. space assets, it is crucial to understand both the threats and the ramifications of the proposed counters to the threats. It is just as crucial that the policy debate distinguish between vulnerability and a threat.

The latter implies intent to do harm. It is important to recognize that just because satellites are vulnerable to ground-based missiles, laser or radiation from a high-altitude nuclear explosion, it does not necessarily mean that there are credible threats that might exploit those vulnerabilities. But in the future what is a vulnerability and what is a threat could change. For that reason, the Panel addressed these issues looking ahead five years and recommends a reassessment at that time.

The preceding discussion is intended to provide a perspective on how the FAS

Panel tried to assess some of the major threats. It made its assessments on the basis of available scientific evidence and at times its own analysis.

### Threats with Possible Space Weapons Response

#### a. Small Satellites

Small, lightweight satellites are making space accessible to an increasingly large number of countries. Generally, this development could be viewed as both stabilizing and desirable. But from the perspective of U.S. national security, expanding international access to space could be viewed as a threat. A number of

## 第3節 米国宇宙システムの脆弱性と脅威

### 3.1 序論

ポラロイド社の創立者で米国衛星偵察の父と呼ばれるEdwin Landは

「我々は可能性のあるすべての脅威に対し防衛する余裕は無い。我々は脅威がどこから来るか正確に知り、その方向に我々の資源を集中させなければならない。そうすることだけが冷戦を生残ることができる方法である。」と述べている。

Landのこの予言は約50年前の冷戦真っ最中においてだけでなく今日も価値ある言葉である。1954年にソビエトのICBMの能力を評価するためにアイゼンハワー大統領が設立したKillian委員会は、Landもそのメンバであるが、最終報告書で次のように警告している。

「より優れた戦略的警戒を可能とし、奇襲攻撃を極限するため、そして実際の脅威の過大評価または過小評価の危険性を低めるため、我々の情報判断の基盤となる確実な事実の数を増やす方法を見つけないといけない。」

米国宇宙資産への脅威については、脅威及びそれに対する反撃の影響の両方を理解することがきわめて重要である。同様に政策論議で脆弱性と脅威の相違を明確にすることも極めて重要である。後者は損害を与えようとする意図を含む。衛星は地上配備のミサイル、レーザまたは高高度における核爆発による放射線に脆弱であることを認識することが重要で、必ずしもこれらの脆弱性を利用する明確な脅威が存在するというわけではない。しかし、将来は何が脆弱であるか、変化する脅威は何かということが重要である。そのため、委員会は、5年先の状況を着目し、その時点で再評価するよう勧告している。

最初の議論は、FAS委員会がいくつかの主要な脅威をどのように評価したかということについての全体像を示すためのものである。委員会は、利用可能な科学的根拠とそのときの独自の分析に基づいて評価した。

### 3.2 可能性ある宇宙兵器レスポンスを持つ脅威

#### 3.2.1 小型衛星

小型で軽い衛星により、宇宙にアクセスができる国が大幅に増えている。一般にはこの開発は当を得ておりまた望ましいように見受けられる。

しかし米国の安全保障全体から見ると拡大する国際的な宇宙へのアクセスは、脅威としてみな

<p>statements in an Appendix to the report of the Rumsfeld Space Commission suggested such views:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>o "Advances in miniaturization and the proliferation of space technologies create opportunities for many countries to enter space with small, lightweight, inexpensive and highly capable systems that can perform a variety of missions."</li> <li>o "Microsatellites can perform satellite inspection, imaging and other functions and could be adapted as weapons."</li> <li>o "There are examples of plans to use microsatellite technology to develop and deploy long-duration orbital ASAT interceptors."</li> <li>o "The Sing Tao newspaper recently quoted Chinese sources as indicating that China is secretly developing a nanosatellite ASAT weapon called "parasitic satellite." The sources claim this ASAT recently completed ground testing and that planning was underway to conduct testing in space. The Chinese ASAT system is covertly deployed and attached to the enemy's satellite. During a conflict, commands are sent to the ASAT that will interfere or destroy the host satellite in less than one minute."</li> </ul>	<p>し得る。ラムズフェルド宇宙委員会の報告書の付属文書には種々の記述がありそこでは次のような見解を提示している。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・小型化技術の進展及び宇宙技術の拡散は、多様な任務を実行できる小型で軽量、安価な高性能システムにより、多くの国に宇宙に参入できる機会を与えるようになる。</li> <li>・マイクロ衛星は衛星の点検、イメージング及び他の機能を実行できる兵器として活用できる。</li> <li>・長期軌道上 ASAT インターセプタを開発及び配備するためマイクロ衛星技術を使用する計画例がある。</li> <li>・香港の新聞星島日報が、最近中国が秘密裏に寄生衛星と呼ばれるナノ衛星 ASAT 兵器を開発していることを示す中国の情報を報じた。情報源によるとこの ASAT は最近地上試験を終え、現在は宇宙での試験の準備中であるという。中国の ASAT システムは、密かに配備され敵の衛星に取り付けられる。紛争時、ASAT に指令が送られ、1 分以内にホスト衛星を妨害するかまたは爆破する。</li> </ul>
---	--

<p><b>b. Ground Based Anti-Satellite Weapons</b></p> <p>Attacks on satellites with Scud-like ballistic missiles that do not have homing capabilities would have low probability of success, and would be limited to only the lowest altitude satellites.<sup>28</sup></p> <p>Such an attack with a conventional warhead containing shrapnel would need to place the debris cloud in the direct path of the satellite. This would require fairly precise tracking—a capability available only to highly sophisticated militaries.</p> <p>Satellites in low earth orbit (LEO) are also vulnerable to laser illumination that could potentially cause loss of power due to solar cell degradation as discussed in Dr. Geoffrey Forden's article "Anti-Satellite Weapons" found in Appendix B. Even low power lasers can cause permanent damage to satellites with large optics, typical of many reconnaissance satellites. A U.S. experiment in 1997 demonstrated that even a low power laser with output much lower than a megawatt-class laser could saturate an infrared detector whose wavelength was in-band with the laser.</p> <p>To attack satellites in geo-synchronous orbits, interceptors cannot be fired directly from the earth; they would need to be fired from low earth orbits</p>	<p><b>3.2.2 対衛星用地上兵器</b></p> <p>誘導機能のないスカッド型弾道ミサイルによる衛星攻撃は、成功確率が低く超低軌道衛星だけに限られる。注28</p> <p>このような通常の榴散弾弾頭の攻撃では、衛星の実際の飛行経路にデブリ群を撒くようにする必要があり、この手法は、高い技術力をもつ軍隊のみが使用可能な非常に精度の高い追尾機能が求められる。</p> <p>低軌道衛星はまた、レーザー照射にも弱く、付録 B の Dr. Geoffrey Forden の文献 "Anti-Satellite Weapon" に示されるように、照射により太陽電池の劣化で電力低下をきたすこともある。</p> <p>多数の偵察衛星に使用されているような大型光学系を有する衛星に対しては、低出力レーザーでも衛星システムに恒久的な損傷を与えることが出来る。1997年に行われた米の実験では、メガワット級より遥かに低い出力のレーザーでも、レーザーの波長帯に感度をもつ赤外検出器を飽和させることが出来た。</p> <p>静止軌道衛星に対しては、地上からの直接発射で攻撃することは出来ず、低軌道から攻撃機を発</p>
---	--



(LEO).

The closing velocities at semi and geosynchronous orbits are about 1.4 kilometers per second, making homing followed by a direct impact or fragmentation warhead feasible.

Homing could be achieved using optical systems that function at visible wavelengths. Such optical sensors are commercially available and do not require cooling. Since satellites are almost always illuminated by the sun, the use of such sensors should not create severe operational constraints. In addition, the small velocities required for transfer from low to high-earth orbits means that anti-satellite vehicles launched into low-earth orbit could be relatively light.

This type of technology is not now available to countries such as North Korea, Iran, or Libya.

射させる必要がある。

準静止及び静止軌道における接近速度は約1.4 km/s であるため、攻撃機自動誘導が可能で、衛星に直撃又は弾頭片破碎をもたらす。

誘導装置は、可視光学システムを用いて実現の見込みがある。このシステムに使用する光学センサは民生品が利用でき、特別に冷却する必要はない。衛星は、ほぼ常時太陽光に照射されているため、センサ使用に当たっては、厳しい運用制約はない。更に、低軌道から高軌道への遷移に必要な速度が小さいことは、低軌道へ打上げられる対衛星攻撃用飛翔体が相対的に軽量に出来ることを意味する。このような技術は、北朝鮮やイラン、リビアといった国には、現時点ではまだない。

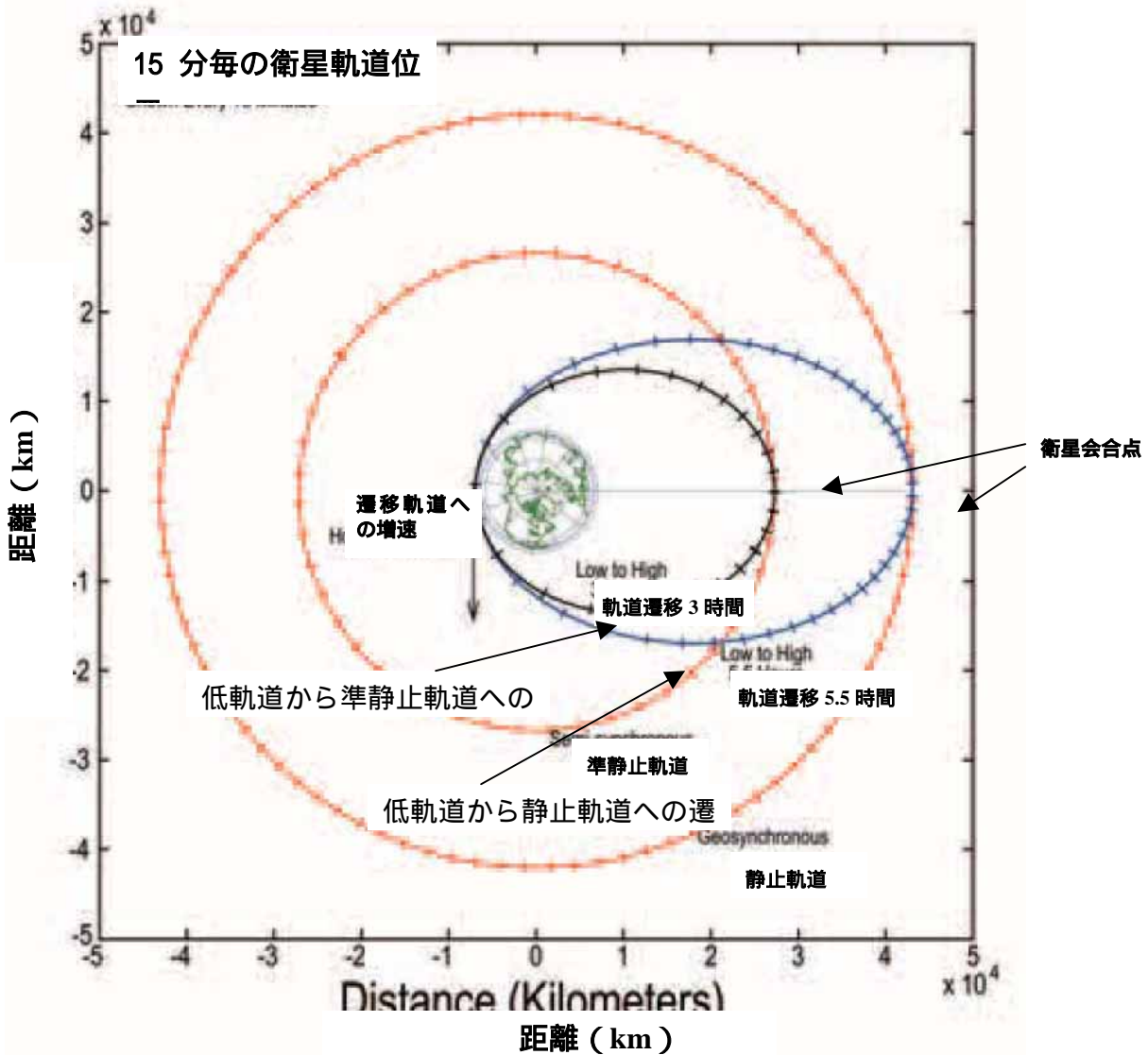


図 1. 衛星攻撃に使用される低軌道から高軌道への遷移軌道

Figure 1 shows the transfer orbits that would be necessary to attack satellites in higher orbits. Figure 2 shows the estimated capabilities of North Korean missiles in reaching targets in low earth orbits, more specifically, the estimated near vertical trajectories of North Korean Scud-C and Nodong missiles. It can be seen that the Scud-C is only capable of reaching an altitude of about 300 kilometers with a payload of 250 kilograms while the Nodong can potentially carry 1000 kilograms to about 500 kilometers altitude.

図 1 は、高軌道衛星の攻撃に必要な遷移軌道を示す。  
 図 2 は、北朝鮮ミサイルが低軌道上の目標物に到達するまでの予測性能-具体的には、スカッド-C、ノドンの垂直方向予測軌道-を示す。  
 この図からスカッド-C ミサイルは、ペイロード 250Kg で到達高度約 300Km の性能でしかないの比べ、ノドンは、1 t のペイロードを高度 500Km にまで運搬可能である。

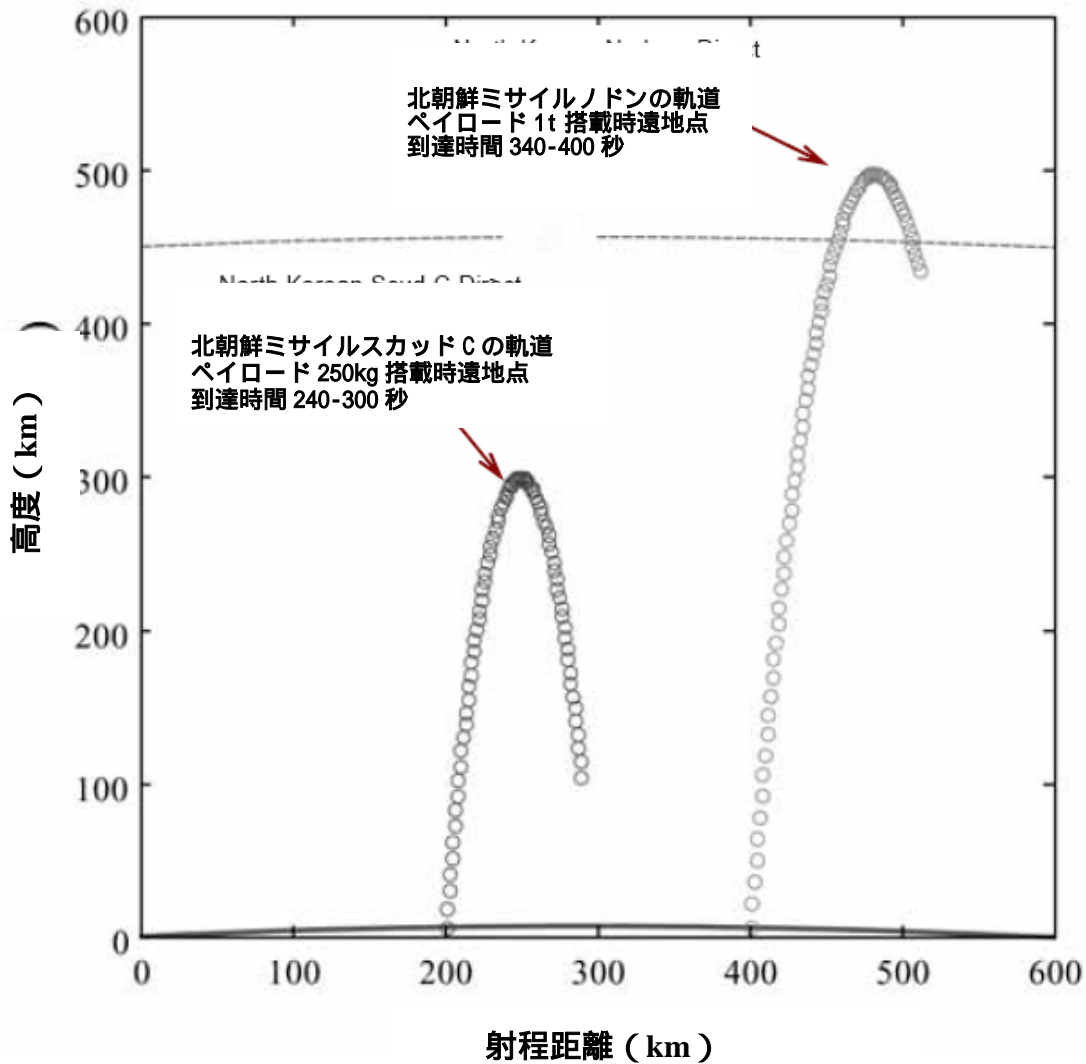


図 2. 衛星直接攻撃時の北朝鮮弾道ミサイルスカッド C とノドンの最大高度と遠地点到達時間

Since residual atmospheric drag is significant at 300 kilometer altitude, photo-reconnaissance satellites would probably operate at altitudes higher than 300 kilometers. North Korea could therefore only reach satellite operational altitudes with a Scud in the event that a photo-reconnaissance satellite was in an orbit lower than 300 km. A Nodong would have to be used if they were to attempt to attack a reconnaissance satellite stationed above 300 km. The locations of both the Scud-C and Nodong are shown at 5-second intervals. It takes the Scud-C about four to five minutes (240 to 300 seconds) to reach apogee while the Nodong takes some six to seven minutes (360 to 420 seconds) to apogee. This time to apogee is long enough that even a very minor maneuver of the reconnaissance satellite (one to two meters per second) after the launch of a Nodong will greatly

高度 300Kmでは残留大気の影響が大きく、写真撮影用偵察衛星は高度 300Km 以上で運用されている。従って北朝鮮がスカッドミサイルを用いて写真撮影用偵察衛星高度に到達できるのは、衛星が高度 300Km 以下の軌道に入った時だけ可能となる。300Km 以上の高度にある偵察衛星を攻撃しようとするれば、ノドンを使用することになる。

図 2 にスカッド-C とノドンの位置を 5 秒間隔で示す。

スカッド-C では、遠地点高度到達に 4~5 分 (240-300 秒)、ノドンでは 6~7 分 (340-400 秒) かかる。遠地点高度到達までの時間は十分にあるため、ノドン発射後、偵察衛星をほんの僅かにマヌーバ(1~2m/s)するだけでも、ノドンからの攻撃による衛星の被害を受ける可能性を大幅



<p>reduce the chances of the Nodong doing any damage to the satellite in an attack. It would be quite straightforward for the US to detect launches at engine ignition, which would then make it possible to issue maneuver orders to an approaching reconnaissance satellite minutes before the Nodong could reach the satellite's orbital altitude.</p> <p>Capabilities of North Korean missiles are further analyzed in David Wright's article in the Appendix F of this report.</p> <p>The Panel concludes that the threat posed by ground-based ASATs is best countered by ensuring redundancy of critical systems, developing quick launch capabilities to field replacements, using conventional forces to destroy enemy launch sites, and, if proven effective, utilizing land- and sea-based missile defenses.</p>	<p>に低減できる。</p> <p>米が、ミサイルのエンジン点火を検知することは極めて当然のことで、この情報により、ノドンが偵察衛星の軌道高度に到達する寸前に、当該衛星にマヌーバ指令を出すことが可能となる。</p> <p>北朝鮮ミサイルの性能については、付録 F David Wright の文献に詳細に分析されている。</p> <p>パネルの結論は以下の通りである。対衛星用地上兵器がもたらす脅威への最善策は、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・クリティカルシステムに対する冗長性確保、</li> <li>・置換機配備のための即時打上げ能力の開発、</li> <li>・敵打上げサイト破壊のための通常軍の使用、</li> <li>・効率性が認められるなら陸上及び海上ミサイル防衛基地の利用である。</li> <li>・</li> </ul>
---	--

### c. High Altitude Nuclear Explosion

A much-discussed threat is that of a high altitude nuclear explosion to knock out virtually all satellites in low earth orbit. The threat arises from the so-called "Christofilos Effect," named after the physicist Nicholas Christofilos, who worked at what is now the Lawrence Livermore National Laboratory in California. He theorized that high-altitude nuclear explosions (HANE) might create artificial radiation belts around the earth, which might supercharge the Van Allen belts.<sup>29</sup>

A HANE also produces an electromagnetic pulse (EMP) whose existence has been known since the 1950s when nuclear weapons were being developed and tested in the atmosphere. EMP effects are primarily a concern for ground systems such as electrical power and communications networks. EMP is primarily a "line of sight" effect, and consequently the dominant cause of damage to satellites near a HANE would be prompt nuclear radiation from the blast. The dominant cause of wide-spread damage to space systems is due to the "pumping" of the Van Allen radiation belts.

To test Christofilos's theory, the United States conducted a set of atmospheric tests in 1958 called Argus, in which three modest warheads were exploded at altitudes of 100, 182, and 466 miles. An additional test called Starfish exploded a 1.4 megaton warhead at an altitude of 300 miles near the equator in the middle of the Pacific Ocean. The explosion supercharged the Van Allen belt and created artificial belts 100 to 1000 times stronger than normal space radiation belts.

The high energy electrons damaged the solar arrays of several satellites and caused three of them to fail. The electromagnetic pulse generated by the test led to power surges in electrical cables in Hawaii, blowing fuses, streetlights, and circuit breakers.

Residual radiation from the experiment lingered in the magnetosphere for nearly seven years."<sup>30</sup>

What happened was that the high-energy charged particles, electrons, protons, and heavier ions from the blasts were injected into the Van Allen radiation belts that surround the earth and were trapped by the earth's magnetic field. The lifetime of these particles can be long, on the order of months, if not years. Satellites in low earth orbits that are

### 3.2.3 高々度核爆発

多くの議論を行った脅威は、高々度における核爆発である。そのような爆発が起これば、低軌道のすべての衛星が致命傷を負うことになる。この脅威は、カリフォルニアのローレンス・リバモア国立研で働いていた物理学者、ニコラス・クリストフィロスから名を取った、いわゆる「クリストフィロス効果」から生じるものである。クリストフィロスは、高々度核爆発（HANE）が地球を取巻く人工の放射線帯を作り、ヴァン・アレン帯をより強力なものとしてしまうかもしれないことを理論づけた。（注29）

HANE はまた、電磁パルス（EMP）も作り出す。この存在は、1950年代に核兵器が開発され、大気中で爆発実験をされた時から知られている。EMP効果は、基本的に、電力や通信網のような地上システムにとっての不安事項である。EMPにはまた「視準線効果」がある。HANE 近辺の衛星に与えるダメージの主因は、爆風から生じる放射線ということになる。宇宙システムへの広範な損害の主因は、ヴァン・アレン帯への「ポンピング」によるのである。

クリストフィロス効果を実験するために、米は1958年にアルガスと銘打った一連の大気圏内核爆発実験を行った。その実験で米は、100マイル、182マイル、そして466マイルの異なる高度で三つの核弾頭を爆発させた。Starfish（ヒトデ）と名付けられた追加実験では、太平洋の真ん中、赤道付近上空300マイルで1.4メガトンの核爆発が行われた。核爆発はヴァン・アレン帯を強め、通常の宇宙放射線帯の百倍から千倍も強力な人工放射線帯を作り出したのである。

高エネルギー電子は衛星の太陽電池を破損し、衛星3機が機能停止する原因となった。実験によって生じた電磁パルスは、ヒューズ、街灯やブレーカを飛ばし、ハワイの電線にサージ（電流の急激な増減）を引き起した。

実験によって生じた残留放射能は、ほぼ7年にわたって磁気圏にとどまった。（注30）

ここで起こったのは、高エネルギー化した粒子、電子、陽子、および爆風によって生まれた重イオンが、地球を囲んでいるヴァン・アレン帯に注入され、地球磁界がそれらを捉えてしまったということである。これらの粒子の寿命は、年単位ほどではないにせよ、月単位で長期化する。こうした粒子に直撃される低軌道衛星は、短期間のうちに、設計上の許容量を超えて放射線を被曝してしまう。

Satellites in low earth orbits that are bombarded by these particles could accumulate doses of radiation in excess of their design limits within a short period of time.

Dennis Papadopoulos of the University of Maryland, a recognized expert on the HANE threat, briefed the panel on July 10, 2003. (See Appendix C.) According to Papadopoulos, at least seven satellites were temporarily disabled within a few months of the Starfish test.<sup>31</sup>

He also stated that the "pumped" belts lasted until the early 1970's. Dr. Hans Mark, a well-known physicist and a former Deputy Administrator of NASA, in his article cited earlier, said that Starfish put a number of satellites only temporarily out of commission.<sup>32</sup>

In 2001, the Defense Threat Reduction Agency (DTRA) conducted a study called HALEOS to assess the HANE threat. (See figure from the report below.)

The study concluded that "one low-yield (10-20 kt), high-altitude (125-300 km) nuclear explosion could disable—in weeks to months—all LEO satellites not specifically hardened to withstand radiation generated by that explosion."

HANE 脅威の専門家として知られるメリーランド大のデニス・パパドポロスは、2003年6月10日にパネルブリーフィングを行っている。(付録C参照)パパドポロスによれば、Starfishテストから数カ月以内に、少なくとも衛星3機が一時的に機能を停止してしまっている。(注31)

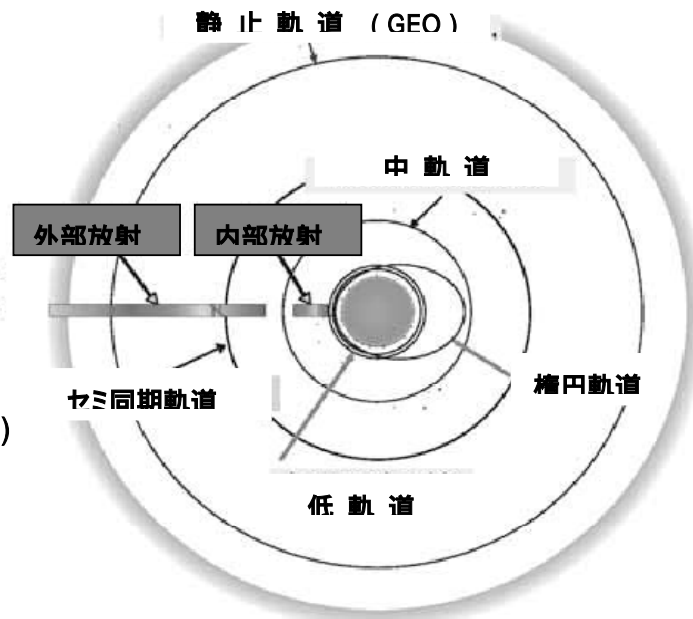
パパドポロスはまた、「エネルギーを注入された」帯が1970年代初めまで続いていたと述べている。著名な物理学者であり、NASAの次長も務めていたハンス・マーク博士は、先に引用した論文で、Starfishテストは、一時的にせよ多くの衛星を使用不能にしてしまったことを記している。(注32)

2001年には、防衛脅威低減局(DTRA)が、HANE脅威を評価するためにHALEOSと名付けた研究を実施している。(以下の図を参照)

本研究の結論は、「10から20キロトンの小型核を125から300キロメートル程度の高々度で爆発させると、そのような爆発によって生じる放射線への防護を特に施していないすべての低軌道衛星は、数週間から数ヶ月にわたって機能を停止させることができる。」というものであった。

# 問題は何か？

- ・LEO衛星コンステレーションは、将来、政府・商用・及び軍用ユーザに重要性が増す。
- ・核兵器の拡散とより長距離の弾道ミサイルの能力が継続すると  
かわれる
- ・1個の小型の(low-yield, 10-20 kt),高々度(125-300km)核爆発は数週間から数カ月にわたって,その爆発で発生する放射線に耐えるように特別に強固にしてい  
ない  
全てのLEO衛星を機能停止



極端に理想化された自然のラジエーション・ベルト  
各々の衛星の軌道の傾きは表示の目的のためにゼロとしてある。

While perhaps there is agreement in the scientific community on the phenomenology of "pumping" of the radiation belts, there is disagreement about the accuracy of the computer models that predict the radiation levels. The authors of the HALEOS report admit that predictions from models have significant uncertainties.

The report states that indeed they are "based on limited high-altitude testing" and have an uncertainty in the computation of post-explosion radiation density at any point in LEO space by a factor of 4 to 10. However, the report says that the uncertainty in the total amount of absorbed dose is reduced by "orbital averaging" over time as satellites pass repetitively through the "hot" bands over days, weeks, and months.  
34

But others familiar with the codes believe that the projected flux levels could be off by an order of magnitude or higher.

The FAS Panel reviewed this report and found further uncertainty in how the model computes the total radiation dose. The HANE-produced total dose accumulation comes from two sources: the prompt radiation of the nuclear explosion and the subsequent

放射線帯の「ポンピング」という現象に関して、科学界ではおそらく意見の一致が見られる一方で、放射線のレベルを予測するコンピュータモデルの正確性に関しては意見の対立がある。HALEOS 報告書の著者達は、モデルから導かれる予測がかなり不完全な物であることを認めている。

報告書は、それが「限られた高々度実験に基づいており」、低軌道における爆発後の放射線密度のコンピュータ計算に4から10の係数で不確実であると述べている。しかし、報告書は、総吸収線量の不確実性は、衛星が何日も、何週間も、そして何ヶ月も「ホットな」放射線帯を繰返して通過するという「軌道平均化」によって小さくなると考えている。(注34)

しかし、コンピュータ・プログラムに精通した別の者達は、考えられたフラックスレベルが一桁小さいか、もしくは高いと信じている。

FASのパネルはこの報告書を検討し、総吸収線量計算モデルにより大きな不確実性があると考えた。HANEは、二つの源から総吸収線量の蓄積をもたらす。ひとつは核爆発の急激な放射線であり、もうひとつはその後に生じる放射線帯の



pumping of the radiation belts. However, the prompt radiation affects only the small fraction of the LEO satellite fleet that would be in the line of sight of the weapon, whereas the other LEO satellites will be affected only by the charged particles entering the Van Allen belt. It is not clear whether this difference is taken into account in calculating the total accumulated dose for these satellites.

The other crucial factor in the HALEOS's study prediction that all LEO satellites will fail is its assumption about their level of hardening. The HALEOS study assumed that satellites were designed to withstand two times the natural background flux. If the cumulative dose due to HANE exceeded this limit, it assumed the satellites would be destroyed.

However, the simple fact that most satellites have weathered the vagaries of natural space radiation so well over time indicates their normal design hardening is better than assumed. Military satellites in LEO are much more hardened,

whereas the hardness of commercial platforms may vary. It is noteworthy that natural background radiation does vary significantly over time and yet not many satellites are known to have failed due to this variability.

For example, under natural background radiation conditions in LEO, the peak flux for electrons with energy greater than 1 MeV ranges from  $10^4$  for the outer radiation belt to  $10^6$  for the inner. Enhanced solar flux is said to have resulted in  $>1$  MeV electron flux to reach  $10^8$  particles/sq cm sec. Coincidentally, this is the same magnitude that is computed by the model due to a high-altitude nuclear explosion one day after the burst over Korea.<sup>35</sup>

A few years ago, damage due to solar flux to a commercial satellite was reported, which resulted in a loss of all pager signals for several hours on the West Coast.

Papadopoulos says that according to the office of the U.S. National Security Space Architect, in 16 years as many as "13 satellites have been lost that can be clearly attributed to natural enhancement (flux of  $10^8$  particles/sq cm sec) of MeV electrons."<sup>36</sup>

In fact, Baker et al. in 1998, cited also by Papadopoulos, merely said that three spacecraft were damaged between 1994 and 1998 by the enhanced solar flux.

The Panel requested a briefing from DTRA to confirm some of these data, but could not locate a presenter who could receive permission to talk to the Panel.

In a written answer to questions from the Panel, Papadopoulos said that he believed that a fully

ポンピングである。しかし、核爆発に伴う急激な放射線は、爆発の視準線上にある低軌道衛星群に対し、ごく小さな影響を及ぼすだけである。他方、それ以外の低軌道衛星は、ヴァン・アレン帯に入った荷電粒子によってのみ影響を受けることになる。衛星の総吸収線量を計算する際にこの差異を考慮するかどうかは明確ではない。

すべての低軌道衛星が機能停止に陥るという HALEOS 研究予測の他の重要な問題は、その防護レベルに関する仮定である。HALEOS 研究は、衛星は自然界の背景放射線量の二倍に耐えるように設計されていると仮定する。HANE によって総吸収線量がこの限界を越えてしまうと、衛星は破壊されると考えるのである。

しかしながら、殆どの衛星が、長い期間にわたって予測のつかない自然の宇宙放射線に曝されているという単純な事実は、通常の設計が施している防護は考えている以上に良好なものであることを示している。軍事用の低軌道衛星ともなれば、より強い防護が施されている。一方、商業用プラットフォームの強度は様々である。自然の放射線量も時により様々であるが、この多様な放射線量が原因となって機能を停止した衛星はそう多く知られてはいないことは注目すべきである。

例えば、低軌道における自然放射線量条件下では、1 MeV より強い電子のフラックスピークは、外帯で 10 の 4 乗から内帯の 10 の 6 乗である。より強い太陽によるフラックスは 1 MeV を越えて、粒子数が毎秒 1 平方センチ当たり 10 の 8 乗個に達するといわれている。これは同時に、韓国上空での高々度爆発翌日のモデル計算と同じ強さである。(注 35)

数年前には、太陽によるフラックスによる商業衛星へのダメージが報告された。それは、米西海岸地域で、数時間にわたってすべてのポケベル信号が消えたというものである。

パパドポロスは、全米安保宇宙アーキテクト・オフィスによれば、16 年間に「衛星 13 機もが (毎秒 1 平方センチ当たり 108 個の粒子のフラックス) MeV 級の電子の自然増加に起因して失われた」という。(注 36)

事実、パパドポロスの引用では、ベイカー等が 1998 年に、1994 年から 98 年の間に、太陽によるフラックス増加によって 3 機の宇宙機が損害を受けたと述べているという。

パネルは、こうしたデータを確認するため、DTRA からの報告を求めたが、本パネルにて発言する許しを得られる報告者を見つけることができなかった。

パネルからの質問に対する回答文書において、パパドポロスは、完全にシールドされた GPS 衛星であれば、120 から 180 ヶ月の寿命を持つと考えたと述べている。

shielded GPS satellite had a lifetime of 120 to 180 months.

Citing the DTRA's HALEOS study, he noted that a nuclear explosion would cause the flux level at to go up 100 times from 106 electrons/sq. cm./sec to 108 electrons/sq. cm./sec. From this he predicted by linear extrapolation that a LEO satellite with an equivalent shielding of a GPS satellite would last only 1.2 to 1.8 months, concluding that shielding was not a solution. This is in contrast to the finding of the DTRA study, which states that the cost of hardening LEO satellites to withstand the enhanced radiation would be about 2-3% of the cost of a satellite.

The Panel concludes that radiation hardening against both immediate radiation and against cumulative doses from the radiation belts is a reasonable option. However, there are always tradeoffs between the degree of shielding and associated cost on the one hand and added weight and loss of payload on the other. Many factors influence the radiation hardness of a satellite. In some cases, minor design changes from parts selection to component shielding can affect the radiation tolerance.

In other cases, there may not be any practical amount of shielding that will do the job.

To account for the uncertainties in the model, the DTRA's HALEOS report included this cautionary note: LEO satellites may be damaged by HANE "if the models are right." The report also considered the radiation dose for one-fourth the rate of accumulation to reflect the lower end of the uncertainty and stated that, if the model is off by that much, "HANE may not have much impact on LEO satellite lifetimes."<sup>38</sup>

Given that the finding of the DTRA report suggests a modest 2%-3% increase in satellite cost could harden the satellites to withstand the increased flux levels, the Panel suggests implementing this shielding as a prudent precaution. In light of the disagreement about the effectiveness of the shielding, however, the panel recommends a study to improve existing models of a HANE and determine the risk to radiation hardened satellites.

The FAS Panel is aware that some U.S. military satellites are being hardened adequately and recommends that hardening of individual military and commercial satellites, especially commercial satellites used by the military, be taken into account before the government puts them to any critical use. It is important to note that the GPS satellites, which are at 20,000-km altitude, are designed to survive a million-rad dose of total radiation over a 10-year lifetime. Moreover, the cost of shielding GPS satellites is reported to be 1% of the program cost.<sup>37</sup>

考えると述べている。

パドポロスは、DTRA の HALEOS 研究を引用し、核爆発が、フラックスのレベルを毎秒 1 平方センチ当り 10 の 6 乗電子から 10 の 8 乗にまで 100 倍にも増加させる原因となると指摘し、このことから、GPS 衛星と同様のシールドを施した低軌道衛星は、僅かに 1.2 から 1.8 ヶ月しか保たないことを、直線外挿法によって予測している。結論として、こうしたシールドは解決策とはならない。このことは、DTRA 研究における発見とは対照的である。DTRA 研究によれば、強まった放射線に耐えうるように低軌道衛星を強化する費用は、衛星費用の僅かに 2 ~ 3 % であるとしているのである。

パネルは、以下のように結論づけた。急激な放射線及び放射線帯からの蓄積線量に対して強化を行うことは合理的な選択肢である。

しかしながら、シールドの程度とそれに伴う費用との間、また、増加する重量と搭載可能量との間には常にトレードオフが存在する。多くの要因が衛星の放射線への強化に影響を与える。ある場合には、部品選定からコンポーネント・シールドまでの小さな設計変更が、放射線許容量への影響を及ぼしうる。

他方、どの程度ならば十分に機能するのかと言う点に関しては、実際の量が分からない。

モデルの不確実性を考慮するため、DTRA の HELIOS 報告書は、このような注意書きを付した。「もし、このモデルが正しければ」低軌道衛星は HANE によって影響を受けうる。報告書はまた、不確実性を最も小さく反映させて放射線量の蓄積率を 4 分の 1 にして考察し、もし、モデルが大きく外れているのであれば「HANE は、低軌道衛星の寿命にさほど大きな影響を与えない」とも述べている。(注 38)

DTRA 報告書が、衛星費用に 2 ~ 3 % 上乗せするだけで増大するフラックスレベルに耐えられると示唆しているのであれば、パネルはこのシールド実行は賢明な予防措置であると指摘する。しかし、シールドの効果に関して意見の不一致があることに鑑みて、パネルは、既存の HANE モデルを改良し、放射線防御された衛星リスクを決定することを推奨する。

FAS パネルは、米軍衛星の中には、適切に強化がなされている物があることを知っており、個々の軍事衛星、及び特に軍が使用する通信衛星の強化を、政府がこれらの衛星利用に大きく依存する前に行うべく考慮するよう推奨する。高度 2 万キロを周回する GPS 衛星は、100 万ラドの放射線量に耐えて 10 年以上の寿命を持つように設計されていることを指摘することは重要である。さらに、GPS 衛星のシールド費用は、プログラム全体費用の 1 % でしかないことが報告されている。(注 37)

<p>The GPS constellation consists of 24 satellites, which are spread over different orbital planes at an altitude of 20,000 kilometers. To substantially degrade the GPS, the satellites have to be attacked individually, which is difficult to do.</p> <p>The satellites are also hardened against nuclear effects and have on-orbit spares.</p> <p>The robustness of the GPS constellation has been analyzed by Geoffrey Forden and is reported in Appendix D. The analysis shows that the GPS constellation is robust to the extent that it can lose up to four satellites and yet only suffer from periodic loss of function at any place. As stated earlier, this robustness makes the vulnerability of the GPS constellation to ASAT-type attacks rather small.</p> <p>The Panel concludes that the best way to counter the near-term threat posed by a rogue state such as North Korea detonating a nuclear weapon in space is not to deploy space-based missile defenses, but rather to ensure that critical space satellites in LEO are radiation hardened to appropriate levels, to destroy missile launch sites in the event of war, and, if proven effective, to deploy ground- and sea-based missile defenses.</p>	<p>GPS 衛星群は衛星 24 機からなっており、それらの衛星は、高度 2 万キロの異なる軌道面を周回している。GPS を劣化させるためには個々の GPS 衛星を攻撃しなくてはならないが、そのような攻撃は難しい。</p> <p>衛星はまた、核の影響からも強化されており、さらに軌道上に予備衛星を有している。</p> <p>GPS 群がいかに耐久性を有しているかについては、ジェフリー・フォードンが分析し、それを付録 D に示している。分析は、GPS 群は、衛星 4 機が失われるまで耐えられ、しかも、いかなる地点においても周期的な機能停止を起こすだけであることを指摘している。先に述べたように、この耐久性は、キラー衛星からの攻撃に対し GPS 群の脆弱性をかなり小さなものにしていく。</p> <p>パネルは、宇宙空間で核兵器を爆発させようとする北朝鮮の如きならず者国家がもたらす短期的な脅威に対抗する最高の方法は、ミサイル防衛システムを宇宙に配備することではないと考える。むしろ、低軌道を周回する重要な衛星を適切なレベルで放射線防護すること、戦争となった際にミサイル発射基地を破壊すること、そして、もし効果的と証明されれば、地上型と海上型のミサイル防衛システムを配備すべきであると結論する。</p>
--	---



## Threats Which Cannot be Addressed by Space Weapons

### a. Jamming of Satellite Links Including GPS Signals

The U.S. military is responding to GPS jamming vulnerability by developing upgraded capabilities to the GPS signal, new bands, and increased signal strength. In addition, GPS dependent military systems are adding anti-jamming capability as well as back-up terminal guidance.

The U.S. military, as well as the entire world economy, makes extensive use of commercial satellite communications, which are essentially all based in geostationary earth orbits (GEO). While such distant orbits make these satellites relatively immune from the physical threats lower earth orbit (LEO) satellites might face, their distance-coupled with the economic factors that drive the industry-actually make them more susceptible to electronic jamming. Instead of jamming the receiver on the ground, as a radio jammer would attempt when trying to block a ground-based transmitter, the satellite-signal jammer attacks by trying to overwhelm the signal sent to the satellite, which then rebroadcasts that jammed signal back to earth. The recent jamming from Cuba of National Iranian TV (NITV), a station operated by an Iranian dissident group based in Los Angeles, demonstrates the viability of such a threat.

A further analysis of these issues is included in Appendix D in an article by Geoffrey Forden.

## 3.3 宇宙兵器としては扱われない脅威

### 3.3.1 GPS 信号を含む衛星リンクへの妨害

米軍はGPS妨害の脆弱性に対し、GPS信号の改良、あたらしい周波数帯の開発、および信号強度の増大により対応しようとしている。さらにGPSに依存した軍事システムにはバックアップ終末誘導とともに対妨害能力を付加しつつある。

米軍は世界のあらゆる経済組織と同様、商用衛星通信を広く利用しようとしている。この通信衛星は本質的にはすべて静止軌道(GEO)衛星である。この高度の軌道においては、衛星は低軌道(LEO)衛星からの物理的な攻撃を受けにくいとはいえ、その距離(産業界を動かす経済要素とともに)は電子的妨害をさらに受けやすくなっている。

地上受信器への妨害の代わりに地上設置の送信機をブロックしようとするとき、衛星へ送信する信号を乗っ取って攻撃しようとするだろう。乗っ取られて妨害された信号は地上へ再放送される。

最近の国立イランテレビ(NITV)のキューバからの妨害では、ロスアンジェルズに基地のあるイランの反体制グループにより運用されている基地から、そのような脅威の可能性を実証している。

この問題についてのさらに詳細な検討は、ジェフリー・フォーデンが書いた記事の付録Dにある。

## b. Control of High-Resolution Imagery

The resolution of commercially available satellite imagery is improving rapidly. One- or two-meter resolution imagery is available from the Ikonos satellite operated by the U.S. company Imaging Sciences, Inc., as well as from the Russian SPIN-21 and the Israeli EROS-1A.

Another U.S. company, Digital Globe, Inc., launched in 2001 the QuickBird Imaging satellite, which is reportedly capable of acquiring panchromatic (black and white) images with 61- cm. resolution and multi-spectral images with 2.44 meter resolution.<sup>1</sup> Space Imaging is planning to launch a panchromatic sensor with 50 cm resolution in 2004.<sup>2</sup>

The proliferation of high-resolution imagery presents opportunities for adversaries to target U.S. forces and facilities in forward deployed positions.

Nevertheless,

the military utility of the imagery to the so-called rogue nations or terrorist organizations needs careful examination.

During the first Gulf War, the United States obtained the cooperation of France and Russia and denied all commercial satellite imagery to Iraq. Such imagery could have shown troop movements involved in the "left hook" operation.

The ability to exert shutter control over commercial satellites in times of conflict will remain an important priority for the U.S. military. Processing and interpreting images requires expertise, which may or may not be readily available.

An assessment of which actors could benefit from commercially available satellite imagery and to what extent they could benefit might help bound the problem.

## 3.3.2 高分解能衛星の制御

商用で利用可能な衛星画像の分解能は急速に向上しつつある。1~2m 分解能の画像が米国のイメージング・サイエンス社（訳注）により運用されるイコノス衛星から入手可能である。またロシアの SPIN-21 やイスラエルの EROS-1A から同様である。

もうひとつの米国会社であるデジタルグローブ社は 2001 年にクイックバード観測衛星を打上げた。この衛星は 61cm 分解能のパンクロマティック（白黒）画像と、2.44m 分解能マルチスペクトル画像を取得する。

スペース・イメージング社は 2004 年に分解能 50cm のパンクロマティックセンサを打上げることを計画している。

高分解能衛星が急増すれば、前線に展開している米軍と施設をターゲットとする機会を敵に与えることになる。それにもかかわらず、いわゆるならず者国家やテロリスト組織に対してそのような画像の軍事的利用に対して注意深く検証が必要である。

第一次湾岸戦争の間、米は仏と露の協力を得て、イラクへの商用衛星画像輸出を禁止した。その画像は「レフトフック」作戦における部隊の移動を示しただろう。

紛争時において商用衛星をシャッターコントロールする能力は米軍の重要な優先権として残る。画像の処理と判読には専門知識が必要であり、すぐに利用できるかもしれないしできないかもしれない。

だれが商用衛星画像から利益を得られるかの評価、またどの程度利益を得られるかの評価はこの問題範囲を限定する助けになるかもしれない。

(訳注) 上記、イメージングサイエンス社は Space Imaging のミズプリ? また、Space Imaging は 2005 年、Orbimage に買収され GeoEye というブランドになった。)

### c. Orbital Debris

The issue of orbital debris in low earth orbit (LEO) is relevant to debate on space-based weapons from two perspectives: the first is the generation of additional debris from the destruction of ballistic missiles; the second is the threat to the orbiting weapons themselves from the background debris, which consists of parts of rockets and satellites, and the natural meteoroid background. While debris from missile intercepts is transient, background debris is semi-permanent.

Moreover, the background flux is several orders of magnitude larger than the transient flux. It is shown in Appendix E that over a period of a year or more the threat from the background debris poses a considerable hazard to space assets in LEO. However, it is not seriously enhanced by effects from a ballistic missile interception and destruction. These risks are not thought to be great enough to pose a serious operational risk to the overall space based interceptor systems effectiveness. A combination of shielding, orientation, system redundancy and replacement should be capable of overcoming all but the most catastrophic transient random events. There is, however, the issue of maintenance for assets deployed in space where they will be constantly degraded by collisions with smaller (< 1 cm) debris and meteoroid particles. From this perspective, space based weapons do not have the advantage of ground and sea based weapons which are safely sequestered. Based on current information regarding the anticipated levels and types, orbital debris does not appear to be a critical factor in the debate over the viability of deploying space weapons. Debate over the efficacy of such weapons should be based first and foremost on their technical feasibility and reliability, cost, and a host of other factors which are beyond the scope of this chapter. The APS study of the boost-phase missile defense (2003) has raised the issue that there are uncertainties in the assessment of debris generation from interception of ballistic missiles in space. The interception of BMs or BMWs in space may cause a (self-sustaining) "chain-reaction" that over an extended period of time will destroy many satellites (Primack 2001). Others contend that debris generation from BM interception is negligible (Canavan 2003, Johnson 2003).

To address this issue, the FAS Panel supported a study to determine the OD effects from space based interception of BMWs, in a post-boost or mid-course phase in space, and for BMs during the launch phase. Since the interaction thought to generate the most debris is that from a high speed (~ 10 km/s relative impact velocity) mechanical impact by a kinetic kill

### 3.3.3 軌道上デブリ

宇宙配備の武器に関して、地球低軌道(LEO)におけるスペースデブリ(OD)の問題は、次の2つの観点から討議することが適切である。1つは、弾道ミサイルの迎撃破壊による新たなデブリの生成である。もう1つは、武器自体に対してロケット・衛星の部品や自然の流星塵などからなる背景デブリの脅威があることである。ミサイル迎撃から生じるデブリを防ぐことは一時的であるが、背景デブリは半永久的である。

さらに、デブリの背景フラックスは一時的なフラックスより数桁大きい。一年あるいはそれ以上の期間で、LEOの宇宙機に対して背景デブリが相当の脅威であることは、付録Eで示されている。しかしながらそれは、弾道ミサイル迎撃及び破壊によって著しく増大されるわけではない。これらの危険は、宇宙配備の迎撃システム全体の有効度に対して多大な運用上の危険性があるとは考えられない。デブリ防御、進路決定、システムの冗長性および置換えなどを組み合わせることで、最も壊滅的で一時的なランダム事象を除いて克服できるようにすべきである。しかしながら、宇宙資産の維持の上で、より小さな(<1cm)デブリ及び流星塵の衝突によって衛星の機能が定常的に低下するという問題がある。この観点から、宇宙配備の武器は、地上や海上に安全に隠されて配備された武器のような利点を持たない。予期されるレベルおよびタイプに関する現在の情報に基づいて、宇宙兵器展開の実行可能性を検討する上で、スペースデブリは重大な要因であるようには見えない。そのような武器の効能についての討論は、第一にそれらの技術的可能性および信頼度、コスト、および本章の範囲外の他の多くの要因に基づくべきである。上昇段階のミサイル防衛(2003)に関するAPS研究は、宇宙で弾道ミサイルを迎撃した時のデブリ生成の評価に不確実性があるという問題を提起した。宇宙での弾道ミサイル(BM)または弾道ミサイル兵器(BMW)の迎撃は、長期間に多くの衛星を(自律的に)破壊する「連鎖反応」を引き起こすかもしれない(Primack 2001)。他方、BM迎撃によるデブリ生成は無視できると主張するものもある(Canavan 2003, Johnson 2003)。

この問題を扱うために、FAS パネルは、上昇後あるいは宇宙飛行中の BMW の宇宙迎撃や上昇フェーズにおける BM のためにスペースデブリの影響を決定する研究を支援した。大部分のデブリを生成すると考えられる相互作用が「運動エネルギー兵器」(KKV)による高速(~10km/sの相対衝撃速度)の機械的な衝撃なので、この種の衝撃からの破片生成はある程度詳細に研究・分析された。そのような相互作用から生成された破片



impact velocity) mechanical impact by a kinetic-kill vehicle (KKV), fragment generation from this type of impact was studied and analyzed in some detail. The number and velocity of the fragments generated from such an interaction depends on many parameters such as the trajectory of the ballistic missile, relative sizes of the interceptor KKV and missile, densities and structural (including inhomogeneities) properties, relative impact velocity, and other factors. However, empirically derived computational guidelines exist, which estimate relationships between the number and size of the fragments generated from a high speed collision, and are used in Appendix E.

Our study's conclusion was that because a boost-phase interception by either a KKV or a high power laser will be so destructive from exploding fuel, it would most likely prevent the ballistic missile from reaching a sufficiently high altitude in LEO to be capable of generating a significant amount of orbital debris. Based on statistical kinetic modeling, the few fragments that might explode with an extremely high (escape) velocity in the upper atmosphere would not significantly increase the debris background. The energy to generate these fragments is initially derived from the available interaction energy within the center of mass impact interaction and subsequently from the exploding fuel. However, the atmospheric drag effects on these irregularly surfaced fragments will rapidly reduce their velocity and they will just fall to earth. For this reason, it is unlikely that either a KKV or a laser kill in the boost-phase will create an OD problem.

Unlike an interception in the boost-phase, where a laser can trigger secondary explosions and subsequent fragmentation, a laser-kill in a post-boost or mid-course interception is very difficult to achieve. The missile warhead is significantly less vulnerable to infrared laser energy, from such weapons as the proposed Airborne Laser than the boost vehicle and its components, which are the targets in the boost-phase interception. Therefore, the worst case scenario for OD generation is expected to be that from a KKV impacting a missile warhead at a hypervelocity, i.e.  $\sim 7\text{-}10\text{ km/s}$  in the mid-course or post boost phase of its trajectory.

In this analysis, there is an implicit assumption that the nuclear warhead would not be set off by the interaction and it would render the nuclear weapon incapable of detonating as designed; however, radioactive fallout is likely to occur. This is a good assumption because the triggering of a nuclear weapon requires a precise sequence of interactions. If the high explosive charge designed to initiate the nuclear reaction detonates without actually initiating a nuclear reaction, additional fragmentation along with

の数および速度は、弾道ミサイルの軌道、迎撃用 KKV とミサイルの相対的なサイズ、密度および構造(不均質性を含む)の属性、相対的な衝撃速度その他の因子など多くのパラメータに依存する。しかしながら、経験的にもたらされた計算ガイドラインが存在し、高速衝突から生成された破片の数およびサイズの関係が評価される。(付録 E の中で用いられている。)

私たちの研究の結論は、KKV または高出力レーザーのいずれかによって上昇段階で迎撃することで、燃料を爆発させて大破でき、同時に BM が LEO の十分高い高度に達して大量のスペースデブリを生成することを防ぐと考えられる、ということである。統計的運動モデリングに基づいて、超高層大気中で非常に高い(脱出)速度で爆発するかもしれない少数の破片は、デブリ背景を著しく増加させることはないだろう。これらの破片を生成するエネルギーは、最初に、質量中心での衝撃相互作用と引続いて爆発する燃料による相互作用エネルギーに由来する。しかしながら、不規則な表面を持つ破片に対する大気の抗力の影響により、破片の速度は急速に低下し、地球へ落ちるだろう。このため、上昇段階での KKV あるいはレーザー兵器のいずれかが、スペースデブリ問題を引起こすとは考えられない。

レーザーが二次爆発およびそれに続く破砕を引起こすことができる上昇段階での迎撃と異なり、上昇後または宇宙飛行中の迎撃でレーザーにより破壊することは非常に困難である。ミサイル弾頭は、提案された空中配備レーザーのような武器からの赤外線レーザーのエネルギーに対して比べて、上昇段階での迎撃の標的となる打上げロケットやその部品よりもそれほど脆弱ではない。したがって、スペースデブリ生成の最悪のシナリオは、軌道を飛行中あるいは上昇後の段階において超高速(7~10km/s)で KKV からミサイル弾頭に衝撃を与えることであると予想される。

本分析では、核弾頭が相互作用によって爆発させられず、設計されたように起爆できない核兵器にするだろうという暗黙の仮定がある。しかしながら、放射性降下物(死の灰)が生じる可能性がある。核兵器の引金を引くには相互作用の正確なシーケンスが要求されるので、これはよい仮定である。原子核反応の起爆用に設計した高性能爆薬が、実際の原子核反応は起こさずに爆発するなら、放射性降下物を伴う追加的な破砕が生じるだろう。これは核兵器(NW)の制御不能の破壊に伴う避けられない問題である。高性能爆薬によって引起こされた破砕の加速および範囲の拡大は計算することができるが、そのような爆発の可能性や影響はミサイル

radioactive fallout would result, an unavoidable problem associated with the uncontrolled destruction of NWS. The additional velocity changes and ranges of the high explosive-induced fragmentation can be computed, but are not taken into consideration in this report because the possibility of and effects from such explosions will strongly depend on the detailed designs of both the missile warhead and the weapon. Of course, if a nuclear warhead detonates in space and there is radioactive fallout, the results could be severe to all the satellites and other assets within the radiation region. The fallout would also result in a radioactive debris cloud that would impact a large area of the earth.

Based on the analysis of a KKV impacting a ballistic missile warhead in either a post-boost or the mid-course phase, and assuming that the mass of the BMW is assumed to be much greater than the mass of the KKV, we obtained the following results:

1. Compared to the background orbital debris and meteoroid flux, the number of fragments generated in each impact (equivalent to 100,000 g, the assumed weight of the KKV,) would be negligible compared to the number of background particles (Johnson 2001). The region of interception, low-Earth orbit (LEO) is vast,  $\sim 10^{12} \text{ km}^3$ .
2. The vast majority of fragment velocities are low enough to produce debris that would be considered sub-orbital, essentially following a dispersed variation of the original warhead's center of mass trajectory. The fragments would be a transient orbital phenomenon. The only satellites or SBI platforms that would be encountered by the sub-orbital debris are those within the immediate volume swept out by the transient debris cone. There would be no noticeable long-term effect.
3. There can be certain synchronous scenarios in localized regions in LEO where deliberate KKV impacts can generate an anomalous increase in the debris flux. But to generate a sufficiently high level of flux in order to create a kinetic "chain reaction" that could sequentially destroy satellites in LEO, would be extraordinarily difficult. Even a massive ( $\sim 100$ ) missile interception is not likely to set off a mechanical "chain reaction."

Overall, assuming 500 space-based interceptor platforms, the probability that a single satellite within the entire LEO population will be hit by a fragment weighing 1 gram or larger fragment of SOD is about one in five. The number of hits on another SBI platform by debris from other SBI impacts is about two. So in this case of "fratricide" one could expect to lose two SBI platforms from the total number; one of which may already have been launched its KKV's.

が、そのような爆発の可能性や影響はミサイル弾頭および武器の両方の詳細設計に強く依存するので、この報告書では考慮しない。もちろん、核弾頭が宇宙で爆発し、放射性降下物がある場合、放射地域内のすべての衛星及びその他の宇宙資産に厳しい影響を与える。降下は、さらに、地球の広い範囲に大きな影響を及ぼす放射性的のデブリ・クラウドにもなるだろう。

上昇後あるいは宇宙飛行中のいずれかに弾道ミサイル弾頭に衝撃を与える KKV の分析に基づいて、BMW の質量が KKV の質量よりはるかに大きいと仮定し、我々は次の結果を得た。

1 背景スペースデブリおよび流星塵のフラックスと比較して、各インパクト(仮定された KKV の重量 100,000g に等しい)で生成された破片の数は背景粒子の数と比べても無視してよい (Johnson 2001)。迎撃の領域である LEO は広大で、 $\sim 10^{12} \text{ km}^3$  である。

2 大多数の破片速度はデブリとなるには低速すぎ、元の弾頭の質量中心軌道の分散した変化に本質的に従う弾道軌道になると考えられる。破片は軌道上での一時的な現象になるだろう。一時的なデブリコーンによって掃引される体積内の衛星や宇宙配備要撃 (SBI) プラットフォームだけが弾道軌道のスペースデブリに遭遇する可能性があるものである。顕著な長期的影響はないだろう。

3 LEO の限られた領域で慎重な KKV インパクトがデブリフラックスの異常な増加を生成するということが同時に起こるシナリオがありうる。しかし、運動的な「連鎖反応」を作るために十分高レベルなフラックスを生成することは、LEO の衛星を順に破壊することになり、極端に困難だろう。大規模な ( $\sim 100$  機の) ミサイル迎撃でさえ機械的な「連鎖反応」を引起させそうもない。

全体として、500 機の SBI プラットフォームを仮定し、LEO の衛星数全体のうち単一の衛星が重さ 1 グラムまたはそれ以上の SOD (スペースデブリ) に当たる確率は、約 5 分の 1 である。ある SBI プラットフォームのデブリが別の SBI プラットフォームに当たる数は、約 2 である。したがって、この「同士討ち」の場合に、総数から 2 つの SBI プラットフォームを失うと予想できる。そのうちの 1 つは、既に打上げられた KKV である可能性がある。

これらの結果は、評価だけで宇宙戦争で現実には何が起こるか予測することはできない、と理解すべきである。要は、相互作用の数が非常に少なく、それらが実際に対 SBI の論理的相拠を

One must understand that these results are only estimates and cannot predict what will actually happen in space warfare. The main point is that the interaction numbers are so low that they really do not provide an anti SBI rationale in of themselves.

In Table 2 of Appendix D, estimates are provided for the number of collisions per year for debris with sizes 1, 0.5 and 0.1 cm, respectively, on 500 SBI platforms each with areas 10 and 50 m<sup>2</sup>. Here, a 1-cm size OD with a density of about 3 g/cm<sup>3</sup> will have a mass of about 1 gram. Meteoroid densities are typically ~ 1 g/m<sup>3</sup> or slightly less. On average, each year there is only likely to be a single platform that is significantly damaged. However, several platforms are likely to sustain minor damage if the appropriate safeguards are carried out. The meteoroid flux 0.3 cm is likely to gradually degrade several platforms. Whether and in what manner the background flux will impact the SBI mission effectiveness is uncertain.

The results of these calculations show that although most SBI platforms survive in LEO for several years there is nonetheless a process of continual degradation from background OD and meteoroids. This background flux is the single greatest threat to the optimal performance of the putative SBI platforms, and can and must be addressed. However, the primary advantage of placing SBI in LEO > 400 km altitude is that they can maintain an orbit for an extremely long period of time without having to use fuel. Other advantages of being in LEO are (if the SBI platforms are strategically deployed) the capability of intercepting BMWs as they pass by. Not only does a strategic deployment allow a range reduction which in turn reduces booster mass, but it also allows greater decision time to act. The reduction in KKV booster mass will substantially reduce launch costs (~ \$20,000/kg).

Collisions with either background orbital debris or meteoroid flux even from destruction by spacebased interceptor (SBI) is unlikely to critically damage satellites in LEO or a significant fraction of the SBI. But the continual degradation of the SBI platforms in LEO, primarily from background debris and meteoroids, will create the need to continually monitor the SBI platform systems for signs of damage that can render them non-functional at the high operational level required. If damage is detected either a repair mission or replacement launch will be required. This will create a level of uncertainty in the operational effectiveness and long term costs of a space-based weapons system, which will have to be balanced against the tactical, strategic and cost advantages of

少なく、それらが実際に対 SBI の論理的根拠を提供はしないということである。

付録 D の表 2 では、評価は、面積が 10m<sup>2</sup> と 50m<sup>2</sup> の SBI プラットフォーム 500 機への、サイズが 1cm、0.5cm 及び 0.1cm のデブリの各々の 1 年当りの衝突数を示している。ここで、約 3g/cm<sup>3</sup> の密度を備えた 1cm のサイズのデブリは、約 1 グラムの質量を持つ。流星塵の密度は典型的に ~ 1g/m<sup>3</sup> またはそれ以下である。平均では、毎年、著しく被害を受けるプラットフォームはたった 1 機だけだろう。しかしながら、適切な安全装置が実行されれば、いくつかのプラットフォームは小さな損害ですむだろう。流星塵フラックス 0.3cm はいくつかのプラットフォームの機能を徐々に低下させそうである。背景フラックスが SBI ミッションの有効性に衝撃を与えるかどうか、あるいはどのように衝撃を与えるかは不確かである。

ほとんどの SBI プラットフォームは、数年間 LEO で残存するとはいえ、これらの計算の結果は背景デブリおよび流星塵からの絶え間ない機能低下のプロセスがあることを示している。この背景フラックスは、想定している SBI プラットフォームの最適な実行に対して単一の最も大きな脅威であると位置付けられる。しかしながら、高度 400km 以上の LEO に SBI を配置することの主な利点は、燃料を使わずに非常に長期間にわたって軌道を維持できるということである。LEO にあることの他の利点は、(SBI プラットフォームが戦略的に展開された場合) 傍を通過する BMW に対する迎撃能力である。戦略的な配備は、距離範囲を小さくし、打上げ機の質量を低減させるだけでなく、作戦行動のための意思決定時間をより長く確保することを可能にする。KKV 打上げ質量の低減は本質的に打上げコストを ~ \$20,000/kg に低下させるだろう。

スペースデブリあるいは流星塵フラックスの衝突、果ては SBI による破壊でさえ LEO 衛星や、SBI の大きな部分を壊滅的に破壊するとは思えない。しかし、LEO の SBI プラットフォームが主として背景デブリ及び流星塵により絶え間なく機能低下することで、連続的に SBI プラットフォームに要求された高い運用レベルの機能を持たなくなったことを示す損害の兆候を監視する必要を生むだろう。もし損傷が検知された場合、修理ミッションあるいは置換打上げのいずれかが要求されるだろう。これは、宇宙配備武器体系の運用上の有効性及び長期的なコストにあるレベルの不確実性を生み、LEO に展開することによる戦術的・戦略的・コスト的な優位に対抗してバランスを図られなければならない。本パネルがスペースデブリ分析で達した結論は、単刀直入なモデル及び仮定に基づくものである。



deploying in LEO. The conclusions reached in the Panel's orbital debris analysis are based on straightforward models and assumptions. However, the actual design and implementation of a KKV and its potential range of interactions with a ballistic missile are complicated. Nonetheless, the Panel believes its analysis presents a fair starting point regarding this important debate.

直入なモデル及び仮定に基づくものである。しかしながら、KKV の実際の設計及び実配備、及び弾道ミサイルとの相互作用の潜在的な範囲は複雑になる。それにもかかわらず、本パネルは、その分析がこの重要な討論に関する公平な出発点を示すものと信じる。



### Loss of the GPS Constellation

The GPS constellation consists of 24 satellites, which are spread over different orbital planes at an altitude of 20,000 kilometers.

In order to substantially degrade the GPS, the satellites have to be attacked individually, which is difficult to do.

The satellites are also hardened against nuclear effects and have on-orbit spares.

The robustness of the GPS constellation has been analyzed by Geoffrey Forden and reported in Appendix D.

The analysis shows that the GPS constellation is robust to the extent that it can lose up to four satellites and yet only suffer from periodic loss of usable signal at any place.

Therefore, the vulnerability of the GPS constellation to ASAT-type attacks is rather small.

### 3.4 GPS 衛星群の欠損

GPS 衛星群は 24 機の衛星からなり、高度 20,000 km で、異なった軌道面に散らばっている。

GPS 衛星を実質的に劣化させるためには、衛星それぞれが個別に攻撃されなければならない、実行は困難である。

衛星はまた核の影響に対して強化されており、軌道上に複数の予備機をもっている。

GPS 衛星群の頑強性については Geoffrey Forden が付録 D に解析している。

この解析によれば、GPS 衛星群は最大 4 機の衛星を失うまでの頑強さを有しており、それでいてなお、ある場所において利用できる信号が周期的にロス（損失）する程度の損失である。

そのため GPS 衛星群の ASAT 型攻撃に対する脆弱性はむしろ小さい。

## Section 4: Protecting U.S. Space Systems The Case for Weaponization

### a. The Rumsfeld Space Commission Report

The National Defense Authorization Act for the fiscal year 2000 established a Commission to Assess National Security Space Management and Organization. It was chaired by Donald Rumsfeld. The report came to be known as the Rumsfeld Commission report (or alternatively as the Space Commission's report).

The Commission's report was published in January, 2001, when Rumsfeld was about to take office as the U.S. Secretary of Defense.

Below is a summary of its key findings.

In accordance with its charter, the Commission concentrated on military and intelligence space operations and asserted a critical need for "national leadership to elevate space on the national security agenda." It also stated its unanimous conclusions that "the United States has an urgent interest in promoting and protecting the peaceful use of space..."<sup>3</sup>

The Commission concluded that the relative dependence of the United States on space made its space systems a potentially attractive target for attack. It warned that such an action during a crisis or conflict should not be considered an improbable act and recommended that the nation must strive to reduce its vulnerabilities, if it were to avoid what it called a "Space Pearl Harbor."<sup>4</sup>

It concluded five key areas needed immediate attention. First, space should be made a national security priority. Second, disparate U.S. space activities should be merged, especially those of the DOD and the intelligence community. Third, there should be better cooperation between the Director of the Central Intelligence Agency and the Secretary of Defense. Fourth, conflict in space is inevitable; it said that since every medium - air, land, and sea - has become an arena for conflict, space will be no different. Given this virtual certainty, "the United States must develop means both to deter and to defend against hostile acts in and from space." Finally, the Commission urged better investment in science and technology and expansion of the technical talent pool in order to maintain leadership in space.<sup>5</sup>

The Commission's report also pointed out that the

## 第4節：米国宇宙システムの防衛

### 4.1 兵器化の事例

#### 4.1.1 ラムズフェルド宇宙委員会レポート

2000 会計年度国防予算承認法により、国家安全保障宇宙管理および組織の評価委員会が組織された。この委員会の議長は Donald Rumsfeld が務めた。この委員会によるレポートは、ラムズフェルド委員会レポート（もしくは宇宙委員会レポート）として知られるようになった。委員会レポートは、Rumsfeld 氏がまさに国防長官に就任しようとしていた 2001 年 1 月に発行された。

以下にその主要な所見の概要を示す。

委員会は期限付き専従体制に基づき、軍用およびインテリジェンス宇宙運用に集中し、“宇宙関連事項を国家安全保障の議題にまで持上げるための国家的指導力”の重大な必要性を主張した。また、“米国は宇宙の平和的利用を促進し保護することに差し迫った関心を抱いている”という全会一致の結論も述べている。<sup>3</sup>

米が相対的に宇宙に依存しているため、その宇宙システムは潜在的に興味をそそる攻撃対象であると結論付けた。危機的状況や紛争中にこのような攻撃が起こるとはあり得ないと考えてはならないと委員会は警告しており、いわゆる“宇宙の真珠湾”となることを避けたいのであれば、米はその宇宙システムの脆弱性を減少させるよう力を尽さねばならないと勧告した。<sup>4</sup>

委員会は、直ちに注意を向ける必要のある 5 つの主要な分野を決論付けた。第一に、宇宙が国家安全保障の優先事項とすべきこと。第二は分かれた宇宙活動、特に DOD（国防総省）とインテリジェンス・コミュニティの宇宙活動を融合すべきこと。第三に、中央情報局および国防長官との間の連携をさらに強化すること。第四に、宇宙での紛争は不可避である。つまり、これまで空中、地上、海上は紛争の舞台となってきたが、宇宙も同様である。このような仮想的必然性を考えると、“米国は宇宙における、また宇宙からの敵対的行為に対して抑止および防衛する手段を開発せねばならない。”最後に委員会は、科学技術の分野により多くの投資をすること、そして宇宙における指導力を保つため、技術的な人材プールを拡大することを強く勧めた。<sup>5</sup>

委員会レポートでは、米が宇宙における競争に直面

<p>United States was facing competition in space and warned against potential attempts by other nations to restrict U.S. space activities through international regulations.<sup>6</sup></p> <p>The Rumsfeld report recommended that the United States should vigorously pursue space capabilities to ensure that the <i>President will have the option to deploy weapons in space...</i><sup>7</sup></p> <p>It followed up this recommendation by arguing that a deterrence strategy for space must be supported by a greater range of space capabilities, ... <i>"including weapons systems that operate in space and that can defend assets in orbit..."</i><sup>8</sup></p> <p>The Commission further identified a number of areas that need improvement, including defense and power projection in space. It argued further for the U.S. military to carry out "live fire" exercises in space to gain proficiency in space operations and to test new capabilities.</p> <p>The Commission urged the United States to assume leadership in shaping the international legal environment governing space. It emphasized that <i>"To protect the country's interests, the United States must promote the peaceful use of space."</i> Further, it said that the United States should also <i>"protect the rights of nations to defend their interests in and from space."</i></p> <p>Regarding testing of weapons in space, the report reiterated that <i>"there is no blanket prohibition in international law on placing or using weapons in space, applying force from space to earth or conducting military operations in and through space."</i> It said further that United States and most other nations interpret "peaceful" to mean "non-aggressive", which comports with customary international law allowing for routine military exercises in outer space, much like such activities on the high seas and in international airspace. However, the Commission felt that the United States needs to engage the international community to develop appropriate <i>"rules of the road"</i> for space.<sup>10</sup></p> <p>Finally, the Commission urged the United States to be cautious about agreements that are for a narrow purpose, but which, taken in the context of other treaties or regulations, may have the unintended consequences of restricting future space activities.</p>	<p>していることも指摘され、他の国が国際規則により米の宇宙活動を制限しようとする可能性がある」と警告している。<sup>6</sup></p> <p>ラムズフェルド・レポートは、<i>宇宙に兵器を配備するかどうかは大統領に決定権があること...</i><sup>7</sup>を保証するため、米が宇宙での将来性について精力的に追求するべきであると勧告している。この勧告に続き、宇宙向け抑止戦略は、<i>"宇宙で動作し軌道上の資産を防衛できる兵器システムなどの..."</i><sup>8</sup>より広範囲にわたる宇宙の将来性によりサポートされなければならないということを論じた。</p> <p>さらに委員会は、宇宙における防衛や戦力展開など、改善が必要とされる多数の領域を確認した。また、米軍が宇宙でのオペレーションに精通し、新たな可能性を試験するため、<i>"実弾発射"</i>訓練を実施するよう強く訴えている。</p> <p>委員会は、宇宙を支配する国際法的環境の構築において米が指揮をとることを強く勧めている。<i>"国益を守るため、米国は平和的宇宙利用を促進しなければならない"</i>と強調しているのである。さらに、米は<i>"宇宙における、また宇宙からの利益を防衛するため、国家の権利を保護する"</i>べきであるとも述べた。</p> <p>宇宙で兵器の試験を行うことに関し、レポートでは<i>"宇宙に兵器を配備したり宇宙で兵器を用いること、宇宙から地球へ武力を行使すること、もしくは宇宙において、また宇宙を通じて軍事作戦を遂行することを国際法で全面的に禁止してはいない"</i>ことをあらためて表明している。また、米やその他大多数の国々は<i>"平和的"</i>という言葉を<i>"非攻撃的"</i>という意味と解釈していると述べており、これは公海や国際空域での活動に酷似した宇宙空間における日常的な軍事訓練を認める慣例的な国際法に適合している。しかしながら、米は国際社会に諮って宇宙に関する適切な<i>"道路交通法"</i>を作成する必要があると委員会は感じた。<sup>10</sup></p> <p>最後に委員会は、狭い目的のために、他の条約もしくは規定を考慮して、今後の宇宙活動を予期せず制約してしまう恐れのある合意につき、米が注意を払うべきと勧告した。</p>
---	---

## b. Space Weapons-Related Programs<sup>11</sup>

\* **Near Field Infrared Experiment (NFIRE)** is a satellite designed to collect data to assist in distinguishing between a rocket body and a rocket plume. Recently the House voted to cut all funding for NFIRE, while the Senate has recommended keeping \$68 million to continue the program. NFIRE is tentatively scheduled to be launched into LEO in April 2005. In addition to conducting tracking tests, the NFIRE would contain a kill vehicle that will be fired at a test missile. For this reason NFIRE is viewed as crossing an important threshold for the United States, since it is a potential space-based anti-satellite weapon. The NFIRE onboard kill vehicle was stripped of the guidance needed to make it effective anti-satellite weapon. Nonetheless the Panel believes firing a kinetic kill vehicle in space, even on a test basis, would cross an important threshold and recommends canceling the program.

\* **Space-Based Interceptor Test Bed** is funded to develop and test plans for a lightweight space-based kinetic kill interceptor. The Missile Defense Agency (MDA) originally asked for \$119.5 million in FY 2005 to fund the test bed but received only \$10.5 million. Most of funds were redirected to land- and sea-based missile defense programs. The Panel recommends canceling the Space- Based Interceptor Test Bed in favor of sea- and land-based missile defense.

\* **Space-Based Laser** was formally cancelled as a program in 2002. The program was part of a Missile Defense Agency effort to test whether directed energy weapons could be used to destroy ballistic missiles from space. While this particular program has been cancelled, a number of directed energy initiatives remain scattered in various other programs. While the Panel feels that continued research into advanced laser capabilities is reasonable, it recommends that no spacebased lasers be deployed.

\* **Space-Based Infrared Systems (SBIRS)** consist of a number of different space tracking systems designed to enhance space-based missile warning, missile defense, battlespace characterization, and technical intelligence. Though these programs are currently over budget, the Panel feels that developing advanced space

## 4.1.2 宇宙兵器に関連する計画<sup>11</sup>

- **近接場赤外線実験 (Near Field Infrared Experiment: NFIRE)** とは、ロケット本体とロケット・プルームの判別を支援するためのデータを収集する目的で設計された衛星である。近頃下院は、上院が本計画を続行するため\$68Mの財源を確保するよう勧告するなか、NFIREに対する全予算を削減するという採決を行った。NFIREは、暫定的に2005年4月に低軌道(LEO)に打上げが予定されている。追尾試験実施に加え、NFIREには試験ミサイル目掛けて発射されるキルビークル(撃墜弾)も含まれる。これは宇宙ベースの衛星攻撃兵器となり得るため、NFIREは米にとって重要なしきい値を越えるものとして見られている。NFIREに搭載されたキルビークル(撃墜弾)からは、効果的な衛星攻撃兵器となるのに必要な誘導部分が除去された。それにもかかわらずパネルは、たとえそれが試験的なものであったとしても、宇宙においてキネティック・キル・ビークル(動的な撃墜弾)を発射することは重要なしきい値を越えることであると確信しており、この計画の中止を勧告している。
- **宇宙ベースの迎撃機テストベッド**は、軽量の宇宙ベースのキネティック・キル・ビークル(動的迎撃機計画)を開発し試験するために予算が提供された。ミサイル防衛局(MDA)は、このテストベッドに資金を供給するため、元々2005年度に\$119.5Mを要求していたが、受取ったのはわずか\$10.5Mであった。資金の大半は、陸上や海上ベースのミサイル防衛計画に供給先を変更された。海上および陸上ベースのミサイル防衛を支持し、宇宙ベースの迎撃機テストベッドは中止するよう、パネルは勧告する。
- **宇宙ベースのレーザ**は、計画としては2002年、公式に中止された。この計画は、指向性エネルギー兵器が宇宙からの弾道ミサイルの破壊に使用可能であるかを試験するための、ミサイル防衛局の取組みの一環であった。この特定の計画は中止されたが、さまざまなその他計画において多数の指向性エネルギー構想が分散して残っている。パネルは、高度なレーザ性能を引続き調査することは妥当であると考えているものの、宇宙ベースのレーザを配備しないように勧告している。
- **宇宙赤外線システム (SBIRS)** は、宇宙ベースのミサイル警戒、ミサイル防衛、バトルスペースの特徴検出、そして技術情報収集を飛躍的に向上させるため設計された、多くの宇宙追尾システムから構成されている。これらの計画は現



situational awareness is an important step toward ensuring the security of the United States. The Panel recommends that future programs should concentrate primarily on space surveillance and situational awareness, as opposed to enabling space-based missile defense, which the Panel concludes runs counter to the strategic interests of the United States.

### c. Selected Arguments for Weaponization

#### **An Excerpt from *Space-based Missile Defense: Has its Time Come?*<sup>12</sup>**

Gregory Canavan is a well-known advocate of the space-based missile defense concept known as the Brilliant Pebbles, which consists of orbiting platforms hosting light-weight interceptors. The interceptors are designed to home-in on and collide with incoming ballistic missiles in the boost phase. Canavan was invited by the FAS to address the Panel, but declined the invitation. Henry Cooper, another well known advocate of space-based missile defenses, was scheduled to address the Panel, but could not do so due to a schedule conflict.

We decided to include the following brief remark by Canavan on space policy. He was asked: "If you were the Secretary of Defense, what space policy would you recommend?" His answer concurred with the Rumsfeld Commission report. He said that the statements included in the report were tantamount to policy, that the United States has legitimate needs for space; that it should be free to address those needs; that it should be free to protect access to space and its assets in space, civilian as well as military.

He also said that he believed that the United States was on the verge of recognizing that it has a responsibility in space which is very much like the one U.S. Navy has executed to maintain order on the high seas. "Taking that principle into space, we need to recognize that space is a vital area in which we have real interests; an area in which we are willing to cooperate with other countries that share our stewardship of space."

#### **A Summary of *Space Weapons: Refuting the Critics*<sup>13</sup>**

The author Steven Lambakis is a leading proponent of weaponizing space. Below is a summary of his arguments excerpted from one of his published articles.

在予算オーバであるが、高度な宇宙での状況認識を開発させることは、米の安全保障の確保に向けた重要な一歩であるとパネルは考えている。パネルは、宇宙ベースのミサイル防衛を可能にするものに反対し、今後の計画は主として宇宙監視および状況認識に集中すべきと勧告している。パネルは宇宙ベースの、ミサイル防衛を、米の戦略上の利益に逆行するものと結論付けている。

### 4.1.3 兵器化に対する選別された論議

#### ***Space-based Missile Defense: Has its Time Come?*<sup>2</sup>からの抜粋**

Gregory Canavan は、ブリリアント・ペブルとして知られる宇宙ベースのミサイル防衛概念の支持者として有名な人物である。このブリリアント・ペブルは、軽量迎撃機を受入れる軌道プラットフォームからなるものである。迎撃機は、ブースト段階で飛来する弾道ミサイルに向かい衝突するよう設計されている。Canavan はパネルに対して講演をするよう FAS より招かれたが、その招きを辞退した。宇宙ベースのミサイル防衛のもう一人の有名な支持者である Henry Cooper がパネルに講演を行う予定であったが、スケジュールの都合でかなわなかった。

われわれは、Canavan による以下の簡単な論評を宇宙政策に盛り込むことを決定した。彼は“もしあなたが国防長官だったら、どのような宇宙政策を推奨するか”と尋ねられたが、彼の答えはラムズフェルド委員会レポートと同意見であった。彼は、レポートに盛り込まれている記述が政策と等しいものであること、米には宇宙に対する正当なニーズがあるということ、これらのニーズには自由に対応できなければならないこと、軍隊同様民間人も宇宙および宇宙資産へアクセスをすることが自由に守れなければならないということ述べた。

彼はまた、米が宇宙における自身の責任をまさに認識しようとしているところであることを確信していると語った。これは、米海軍が公海での秩序を維持するために実行したものと非常に良く似たものである。“この原理を宇宙に当てはめると、宇宙はわれわれが関心を抱く極めて重要な領域であり、宇宙の管理責務を共有する他の国々と進んで協力すべき領域であるということ認識する必要がある。”

***Space Weapons: Refuting the Critics*<sup>13</sup>の要約**  
著者である Steven Lambakis は宇宙の兵器化に対する有力な提唱者である。以下は、公表された彼の論文の一つから抜粋した論議の要約である。



Lambakis begins by asking a rhetorical question: Should space be treated any differently from the land, sea, or air? He answers in the negative by stating that in his view, despite physical differences between the earth and space environments, there should be no difference from the point of view of policy and strategy. He also says that whether or not the United States chooses to put weapons in space, it is inevitable that some other country would.

He refutes the case against weaponization by challenging the validity of some tacit assumptions made by opponents. For example, he notes that opponents say space combat would be destabilizing. Lambakis counters this assumption by saying that there is no way of knowing whether placing weapons in space would be destabilizing since we have no experience in space warfare. He asks why shots in space would be any more harmful than shots on earth. He notes, for example, that it is not self evident that a sudden loss of a communications satellite would precipitate a wider-scale war.

Lambakis also finds fault with opponents' wish to "draw a line in space;" he argues that such a line is strictly conceptual. Nothing in the tactics and strategy of war-fighting nor the logic of deterrence says there must be such a line, he adds. The example of Soviet efforts to develop the MIRV was a case in point, he says. Many people argued at the time that the Soviet MIRV nuclear weapon was a direct response to the U.S. action in developing such a weapon. But Lambakis writes that the Soviets had embarked on the MIRV program on their own and would have exploited their innovation irrespective of the U.S. action. Could we stop the historical progression of weaponry at the edge of the earth, he asks. It is a political decision, he contends, adding that the absence of universal political will means there is no practical way to enforce any treaty or law.

As for critics' assertion that the United States will lose international support if it deploys space weapons, Lambakis offers the following rebuttal. He says that when the stakes are high, the United States must act in self-defense and that our allies will judge U.S. actions appropriately. For example, despite widespread anti-Americanism, the United States was able to put together a large coalition to fight the Gulf War in 1991.

Again, he calls such widely held assumptions as

Lambakis はまず、次のような修辭的な問いかけをすることから始めている。宇宙は、陸上、海上、空中とは異なって扱われるべきか。彼は、地球上および宇宙環境には物理的な違いがあるものの、政策および戦略の観点から見ると違いはないとして、この質問に否定的に答えている。また彼は、米が宇宙への兵器の配置を選択するにせよ、しないにせよ、他にそれを選択する国が出てくることは避けられないとも述べている。

彼は、反対論者が行う暗黙の仮定の妥当性に異議を唱えることで、兵器化に対する反対を拒絶している。例えば彼は、反対論者が宇宙戦闘は不安定なものであるとしていることに言及している。Lambakis は、われわれには宇宙戦争の経験がないため、宇宙への兵器の配置が不安定なものであるかどうかを知るすべはないとして、この仮定に対抗している。彼は、宇宙での発射が地球上での発射よりもなぜ有害であるのかを問いかけている。例えば彼は、通信衛星を突然失うことがより大規模な戦争を引起すということは自明の理ではないとしている。

Lambakis はまた、“宇宙に境界線を引く”という反対論者らのあら探しをしている。つまり彼は、このような境界線は全く概念的なものであると論じているのである。どのような戦闘の戦術や戦略、あるいは戦争抑止の論理にも、このようは境界線が必要であるとは述べられていない、と彼は付け加えている。彼は、MIRV を開発しようとしたソ連の試みの例がこれにぴったりと当てはまる事例であったと述べている。当時多くの人々が、ソ連の MIRV 核兵器は米がそのような兵器を開発しようとしていたことに対する直接的な反応であったと議論した。しかし Lambakis は、ソ連は MIRV プログラムに単独で着手したのであり、米の行動とは関係なくこのようなものを開発したのである、と書いている。我々は歴史的な兵器発展を止めることができるのか、と彼は問いかけている。これは政治的決定である、と彼は強く主張し、全世界共通の政策がないということは、いかなる条約あるいは法律も施行するための実用的な手段がないということである、と付け加えている。

もし宇宙兵器を配備すれば米は国際的な支持を失うだろうという批評家らの主張に関しては、Lambakis は次のような反論を展開している。利害関係が高い場合、米は自己防衛に徹しなければならず、同盟国は米の行動を適切に判断してくれるであろう、と彼は述べている。例えば反米主義の広がりにもかかわらず、1991 年の湾岸戦争を戦うため、米は多数の連合軍を結成することができたのである。

"ASATs are destabilizing" or "space must remain a sanctuary" as old-fashioned dogmas that should not stand in the way of implementing new security policies. He referred especially to Ballistic Missile Defense, which he says ought to be viewed in the "broader context of space power."

Finally, he adds an important caveat to his arguments for weaponization by making the following statement: *"Should military requirements warrant and cost permit, space weapons could be invited to join the rest of the arsenal...."*

さらに彼は、“ASATは不安定なものである”もしくは“宇宙は聖域であり続けなければならない”とする広く行き渡った仮定を、新たな安全保障政策を実行する手段となるべきではない、時代遅れの定説であるとしている。特に彼は、彼の言う“宇宙力というものをより幅広い文脈”で考えるべき、弾道ミサイル防衛に言及している。

最後に彼は次のような発言により、兵器化に関する彼の議論に重要な警告を付け加えている。“*軍事的要求により正当化されコストが許せば、宇宙兵器も兵器庫に加えられることになるだろう。*”

## Alternatives to Weaponization

### a. Mitigating Vulnerabilities

A broad set of U.S. space vulnerabilities can be addressed by enhancing the robustness of critical space systems. This can be done by ensuring redundancy, utilizing multiple orbits and developing quick launch capabilities to replace lost satellites.

To address the threat posed by space mines, an international treaty governing the "rules of the road" for space should be established thus providing more lead time to respond to a hostile action. Improved space surveillance would greatly reduce the possibility of undetectable space mines fielded by a potential adversary.

All military satellites, particularly those in LEO, should be hardened against radiation, as suggested by the 2001 Defense Threat Reduction Agency study, "High Altitude Nuclear Detonations (HAND) Against Low Earth Orbit Satellites (HALEOS)."

### b. Has Deterrence Changed?

The stand-off between the former Soviet Union and the United States was the hallmark of the Cold War. For the United States, this unified threat scenario has been replaced by a diffuse set of threats from a few less militarily powerful nations. These new threats are militarily asymmetric as opposed to the relative parity of the Cold War stand-off.

The Cold War was characterized by deterrence, which discouraged both superpowers from preemptively attacking each other. Huge nuclear arsenals on either side ensured that significant forces could survive a nuclear first strike by the other and then deliver a devastating retaliatory strike. As unsettling as this mutual deterrence was, attempts to escape the situation were judged not only to be impossible but also to increase the danger. This realization was a key justification for the Anti Ballistic Missile Treaty of 1972, which prevented the fielding of missile defenses that could potentially undermine the retaliatory capability that was seen as integral to preventing catastrophe.

Some have argued that the concept of deterrence is no longer valid because the leaders of rogue states may not be rational. Even if they are hopelessly mismatched in military strength, they may strike out in unpredictable ways without fearing the consequences of their actions

## 4.2 兵器化への代替

### 4.2.1 脆弱性の緩和

米の広範な宇宙脆弱性は、重大な宇宙システムの頑健性を高めることにより対処することができる。これは冗長性を確保し、複数の軌道を活用し、損失した衛星と交替するため衛星を素早く打上げることのできる能力を開発することで実現される。

宇宙機雷がもたらす脅威に対応するには、宇宙に関する“道路交通法”を管理する国際条約を規定し、敵対的行為に対処するための準備期間をより長くとりなければならない。宇宙監視が向上することで、潜在的な敵対者が配備する検知不能な宇宙機雷による脅威の可能性は大幅に減少する。

防衛脅威低減局による2001年の調査“低軌道衛星(HALEOS)に対する高高度核爆発(HAND)”で提案されているように、全ての軍事衛星、特にLEOにあるこれらの衛星は、放射線に対して強化しなければならない。

### 4.2.2 抑止は変化したか？

旧ソ連と米間のにらみ合いというのは、冷戦の特徴であった。米にとって、統合的な脅威のシナリオは、軍事的にそれほど強力ではない国々からの拡散した脅威に代わった。これらの新たな脅威は、冷戦時の比較的類似した脅威とは対照的に、軍事的に非対称である。

冷戦は、両超大国がお互いに機先を制して攻撃することを阻止する、抑止という言葉で特徴づけられる。両国とも巨大な核兵器備蓄を持つことで、部隊が他方による最初の核攻撃をしのぎ、その後破壊的な報復攻撃を行うことができるということが保証された。この相互抑止は不安定なものであったので、この状況を脱するための試みは不可能であるだけでなく、危険を増大させると判断された。このような認識が、大惨事を避けるのに不可欠と考えられた、場合によっては報復能力を弱めることができるかもしれないミサイル防衛の配備を防止した、1972年の弾道弾迎撃ミサイル制限条約を正当化した主な理由である。

ならず者国家の指導者は理性的ではない場合があるため、抑止の概念はもはや通用しないと論じるものもいる。このような指導者らはたとえ軍事力が絶望的なほど比較にならないものであったとしても、自分たちの行動の結果を恐れる

ways without fearing the consequences of their actions. This argument was one of the factors in the U.S. decision to withdraw from the ABM treaty.

Even if fielding space-based missile defenses is not as destabilizing to deterrence as it once could have been, the Panel maintains that the United States should avoid deployment because of the negative repercussions they could have on U.S. space security. The Panel feels that the overwhelming military power of the United States remains a powerful deterrent against states of concern.

It is feared that North Korea, which may have a small arsenal of nuclear weapons but has no satellite assets to lose, could detonate a nuclear weapon at high altitude to inflict a large amount of damage to U.S. satellites. This scenario is invoked by some as a motivation to field space-based missile defenses.

The Panel feels that, even for a country such as North Korea, the likely retaliatory strike from U.S. forces is the principal and best deterrent against an attack on U.S. satellites. The Panel recommends as a better strategy for removing this threat, that the US satellites in LEO are radiation-hardened, that the United States have the capability to strike North Korea's liquid-fueled rockets before they are launched, and that it pursues effective and tested land- and sea-based missile defenses.

The United States is not entirely unprepared for the effects of a high-altitude nuclear explosion (HANE). Nuclear response planners during the Cold War prepared for a Soviet first strike that included an "EMP lay-down," another term for a high-altitude nuclear explosion. Consequently, much care has been taken to minimize the vulnerability of military assets in space and of the supporting infrastructure on the ground from the electromagnetic pulse effect. Survival of military satellites in a nuclear environment is a routine requirement for both critical infrastructure and equipment.

### c. International Rules of the Road for Space

The Panel was unable to examine this topic in detail, but feels that it is urgent for the United States to start a dialogue with other nations in order to establish rules of the road for space. The panel therefore finds itself in agreement with the Rumsfeld Commission's recommendation that *"the U.S. must participate actively in shaping the space legal and regulatory environment."*

A good start to developing a useful space treaty can be

ことなく予期せぬ方法で攻撃を仕掛けてくる場合がある。米が ABM 条約から離脱した要因の一つは、この議論であった。

たとえ宇宙ベースのミサイル防衛がかつてほど戦争抑止にとって不安定なものではないにしても、パネルは、そのようなミサイル防衛が米の宇宙安全保障にもたらすマイナスの影響を考え、米はその配備を避けるべきであると主張している。米の圧倒的な軍事力は、懸念すべき国々に対する強力な抑止力となるとパネルは感じている。

少量の核兵器を保有している恐れはあるが失う衛星資産を持たない北朝鮮が、米の衛星に多大な損害を負わすため、高高度で核兵器を爆発させる可能性があるという恐れがある。このようなシナリオがあるため、宇宙ベースのミサイル防衛を配備しようと掻き立てられる者がいるのである。

パネルは、たとえ北朝鮮のような国にとっても、米軍による報復攻撃があるかもしれないということが米の衛星への攻撃に対する主要な、また最良の抑止力となっていると感じている。このような脅威を取除くためのより優れた戦略として、LEO 上の米の衛星を放射線に強くし、北朝鮮の液体燃料ロケットが打上げられる前に攻撃できる能力を米が持ち、効果的な試験済陸上および海上ベースのミサイル防衛を追求するということをパネルは推奨している。

米は、高高度核爆発（HANE）に対し、全く準備をしていないわけではない。冷戦当時の核対応立案者は、高高度核爆発を表すもう一つの言葉である“EMP 擾乱”など、ソビエトによる最初の攻撃に備えていた。結果として、宇宙の軍事資産や電磁パルスが及ぼす影響からの地上での支援基盤の脆弱性を最小化するため、多大な注意が払われるようになった。このような核環境において軍事衛星が存続するということは、重要インフラおよび機器の両方にとって日常的な要求事項となっている。

### 4.2.3 宇宙に関する国際道路交通法

パネルはこの主題に関して詳細に検討することはできなかったが、宇宙に関する道路交通法を制定するため、他の国々との議論を始めることは米にとって緊急を要するものであると感じている。従ってパネルは、“米国は宇宙の法規制環境の形成に積極的に参加しなければならない”とするラムズフェルド委員会の推奨と意見を同じくしていると考えている。



found in a series of studies undertaken by the Canadian Ministry of External Affairs and International Trade between 1987 and 1991. One of the reports it published, which is entitled "Satellites Harming Other Satellites", focused narrowly in assessing the harm that one satellite can do to another.<sup>14</sup> It also explored ways in which to make "keep out zones" in space workable and cautioned against overly simplistic models.

The panel believes that the United States should conduct detailed technical studies to define the parameters of a workable space treaty. Verification of treaty compliance will not be complete, but having an internationally approved non-proliferation regime that allows for intrusive inspections on the ground, at launch sites, and possibly in orbit, will go a long way to reduce the threat posed by space mines and allow satellites to coexist peacefully.

#### **d. Improve Space Surveillance**

One of the United States' highest priorities should be to establish a fully space-based network of satellites dedicated to tracking space objects. The recent addition of a space-based sensor to the NORAD space-tracking network has remarkably improved space awareness. Given the importance to the U.S. economy of communications satellites, this system should have the explicit requirement of scanning the entire space environment out to geostationary orbit at least once every 5.5 hours, the time it takes for the transfer from a low-Earth "parking" orbit to a geostationary orbit. Such a system was analyzed by the Congressional Budget Office in 2000 and estimated to cost approximately \$550 million over ten years, including operating costs.

Organizational changes are just as important as developing a new constellation of space-surveillance assets. Currently, the U.S. space surveillance network is tied into the U.S. early-warning system. There is, therefore, a prudent reluctance to introduce new technologies (it took seven years to approve the space-based sensor currently used in the NORAD system) into the space-surveillance network. But in light of the change possible in space weapons, any new system must be able to update quickly and should therefore be separated from the system that triggers a U.S. nuclear response. Separating such a space system from our nuclear trigger would also allow the U.S. to share its observations with other countries, if such sharing is determined to be beneficial.

有益な宇宙条約作成に向けての良好なスタートが、1987年から1991年の間にカナダの外務・国際取引省が実施した一連の調査に見て取ることができる。この省が発行した報告書の一つである“他の衛星に害を与える衛星”は、ある衛星が他の衛星に対して与え得る害を評価することに綿密に焦点を当てている。<sup>14</sup> またこの報告書は、宇宙において実行可能な“立入り禁止区域”を作る方法を検討し、あまりにも単純化したモデルに対して警告もしている。

パネルは、米が詳細な技術調査を実施し、実行可能な宇宙条約のパラメータを定めるべきであると考えている。条約の遵守は完全には確認できないが、地上での立入り査察を可能にするような国際的に認められた核不拡散体制を持つことで、宇宙機雷による脅威はるかに減少し、衛星が平和的に共存できるようになる。

#### **4.2.4 宇宙監視の改善**

宇宙物体を追尾するための完全に宇宙ベースの衛星ネットワークを構築するということが、米にとっての最優先事項の一つでなければならない。NORAD（北米航空宇宙防衛司令部）の宇宙追跡ネットワークに最近宇宙ベースのセンサが追加されたことで、宇宙に対する認識が著しく改善された。米経済にとっての通信衛星の重要性を考えるとこのシステムには、静止軌道までの宇宙環境全体を少なくとも5時間30分に一度はスキャンするという明確な要求事項がなければならない。この5時間30分という時間は、低地球“パーキング”軌道から静止軌道まで転送するのにかかる時間である。このようなシステムは2000年に米連邦議会予算事務局が分析し、運用費を含め今後10年でおおよそ5億5000万ドルかかると推定された。

組織改変は、宇宙監視資産の新たな衛星群（コンステレーション）を開発するのと同様に重要である。現在米宇宙監視ネットワークは、米の早期警戒システムと結びついている。したがって、新技術を宇宙監視ネットワークに導入することにはあまり気が進まないのである（現在NORADシステムで使用されている宇宙ベースのセンサを承認するのに、7年間を費やした）。しかし宇宙兵器において見込まれる変更を踏まえて、新システムを直ちに更新できなければならず、よって米の核応答を誘発するシステムからは切離すべきである。このような宇宙システムをわれわれの核起爆装置から切離すことで、米はその観測結果の共有が有益であると判断されれば、他の国々とそれを共有することもできる。



## ENDNOTES

- 1 Mark, Hans, "Warfare in Space," in *America Plans for Space*, National Defense University Press, Washington, DC, June 1986.
- 2 Papadopoulos, Dennis, "Satellite Threat due to High-Altitude Nuclear Detonations," Presentation with the FAS Space Panel, July 10, 2003, Harvard University.
- 3 Greetssai, Vasily N., et. al., "Response of Long Lines to Nuclear High-Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP)", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 40, NO. 4, November 1998, p. 348.
- 4 Wheelon, Albert D., "Surviving in Space," Presented to the IEEE Nuclear and Space Radiation Effect Conference, Snowmass Village, Colorado, July 28, 1987.
- 5 Wheelon, Albert D. "Corona: The First Reconnaissance Satellites," *Physics Today*, February 1997, p.30.
- 6 *ibid.*
- 7 Kislyakov, Andrei, "US Missile Shield Sparks Space Arms Race Danger," *RIA Novosti*, Moscow, August 8, 2003.
- 8 *Satellite Encyclopedia*, List of states and organizations, as of July 2000.
- 9 Hughes, Peter C., "Satellites Harming Other Satellites," *Arms Control Verification Occasional Papers No.7*, External Affairs and International Trade, Canada, July 1991.
- 10 Hastings, Daniel, Briefing to the panel, Washington, DC, 20 February 2003. See Appendix A.
- 11 Nardon, Laurence, "The dilemma of satellite imagery control," *Military Technology*, Moench Verlagsgesellschaft mbH, Bonn, July 2002.
- 12 See <http://www.digitalglobe.com> for DigitalGlobe's plans for an upgraded satellite in 2006.
- 13 Quoted in "Corona: the First Reconnaissance Satellites" by Albert Wheelon, *Physics Today*, February 1997, p.24
- 14 *ibid*, p.24.
- 15 *Ibid.* Appendix: Staff Background Papers. Wilson, Tom "Threats to Space Capabilities."
- 16 *Ibid.*
- 17 *Ibid.*
- 18 *Ibid.*
- 19 Hays, Peter, "Military Space Cooperation: Opportunities and Challenges" in *Future Security in Space: Commercial, Military, and Arms Control Trade- Offs*, Monterey Institute.
- 20 Garwin, Richard, in *Pugwash Workshop on Preserving the Non-Weaponization of Space*, Castellón de la Plana, Spain, 22-24 May 2003
- 21 For extensive information on small satellites, including a description of all, or almost all, small satellites ever launched, see the small satellites homepage at [www.smallsatellites.org](http://www.smallsatellites.org).
- 22 See SSTL's homepage at [www.sstl.co.uk/](http://www.sstl.co.uk/).
- 23 See the CubeSat homepage at <http://cubesat.calpoly.edu/>.
- 24 U.S. General Accounting Office, "Space Surveillance: DOD and NASA Need Consolidated Requirements and a Coordinated Plan," *GAO/NSIAD- 98-42*, December, 1997, p. 13.
- 25 *Orbiting Satellite Automatic Launcher Main Pages*: <http://ssdl.stanford.edu/Opal/home.html>
- 26 Craig Covault, "USAF Technology Satellite Plays Tag With GPS Delta," *Aviation Week and Space Technology*, February 3, 2003, p. 39
- 27 See Cheng Ho, "China Eyes Anti-Satellite System," January 8, 2000, on the *Space Daily* website at [www.spacedaily.com/news/china-01c.html](http://www.spacedaily.com/news/china-01c.html). This story is based on an article that appeared in the *Sing Tao* newspaper on January 5, 2000.
- 28 Postol, Theodore, Unpublished analysis.
- 29 "High Risk in Low-Earth Orbit," *Jane's Defense Weekly*, 23 October 2002.
- 30 Carlowicz, Michael J. and Lopez, Ramon E., *Storms from the Sun*, The Joseph Henry Press, Washington, DC, 2002, pp. 72-73.
- 31 Papadopoulos, Dennis, *Satellite Threat due to High Altitude Nuclear Detonations*, briefing to the FAS Panel, Cambridge, Massachusetts, 10 July 2003. (Appendix C, this report)
- 32 Mark, Hans, *op. cit.*, p.18

- 33 Defense Threat Reduction Agency, High Altitude Nuclear Detonations Against Low Earth Orbit Satellites (“HALEOS”), DTRA Advanced Systems and Concepts Office, April 2001, p.4.
- 34 *ibid.*
- 35 *Ibid.*, p.12
- 36 *op cit.*
- 37 “ High Altitude Nuclear Detonations (HAND) Against Low Earth Orbit Satellites (HALEOS),” Defense Threat Reduction Agency, April 2001, p. 29.
- 38 “ High Altitude Nuclear Detonations (HAND) Against Low Earth Orbit Satellites (HALEOS),” Defense Threat Reduction Agency, April 2001, p. 13.
- 39 “ High Risk in Low-Earth Orbit,” Jane’s Defense Weekly, 23 October 2002; Rumsfeld Commission Report, 2001, p.22.
- 40 Digital Globe, Inc., Press Release, Longmont, Colorado, 18 October 2001.
- 41 Nardon, Laurence, “The dilemma of satellite imagery control,” Military Technology, Bonn, Germany, July 2002.
- 42 Executive Summary, Report of the Commission to Assess National Security Space management and Organization, 11 January 2001, p.5.
- 43 *ibid.*, p.8.
- 44 *ibid.*, p. 10.
- 45 *ibid.*, p.10.
- 46 *ibid.*, p.12.
- 47 *ibid.*, p.16.
- 48 *ibid.*, p.17.
- 49 *ibid.*, p.13.
- 50 For detailed information on FY’05 space related activities see Lewis and Cowan, Space Weapon Related Programs in the FY 2005 Budget Request, Center for Defense Information. Available at: <http://www.cdi.org/news/space-security/SpaceWeaponsFY05.pdf>
- 51 Canavan, Gregory, “Space-based Missile Defense: Has its Time Come,” Informal remarks at the George C. Marshall Institute Roundtable on Science and Public Policy, May 16, 2001.
- 52 Lambakis, Steven, “Space Weapons: Refuting the Critics”, Policy Review, The Heritage Foundation, Number 105, February/March 2001.
- 53 Hughes, Peter C. *op.cit.*

Glossary of Acronyms

略語解説

<p>ABM anti-ballistic missile                  ASAT anti-satellite                  ASATCC ASAT Control Center                  BMD ballistic missile defense                  CMC Cheyenne Mountain Complex                  DSAT defensive satellite                  DEW directed-energy weapon</p>	<p>弾道弾迎撃ミサイル                  人工衛星攻撃衛星                  人工衛星攻撃衛星コントロールセンタ                  弾道ミサイル防衛                  シヤイアン山脈集合施設                  防衛衛星                  指向性エネルギー兵器</p>
<p>FEL free-electron laser                  FOBS Fractional-Orbit Bombardment System                  GEO geosynchronous Earth orbit                  GRASER gamma-ray amplification by stimulated emission of radiation                  GSO geostationary Earth orbit                  HEO high-Earth orbit</p>	<p>自由電子レーザー                  部分軌道爆撃システム                  静止軌道                  放射線の誘導放出によるガンマ線増幅                  静止軌道                  高地球軌道</p>
<p>K degrees Kelvin                  KEW kinetic-energy weapon                  LASER Light amplification by stimulated emission of radiation; the acronym "laser" is no longer capitalized in current usage                  LEO low-Earth orbit                  LIDAR light detection and ranging                  LTBT Limited Test Ban Treaty</p>	<p>絶対温度                  運動エネルギー兵器                  放射線の誘導放出による光の増幅。「レーザー」という頭字語は現在の用法ではもはや、大文字では書かれない。                  低軌道                  光の探知と測距                  部分的核実験禁止条約</p>
<p>MW megawatt                  MeV million electron-volts                  MHV miniature homing vehicle                  MILSAT military satellite                  MV miniature vehicle                  NSSC National Space Surveillance Center                  PMOC Prototype Mission Operations Center</p>	<p>メガワット（100万ワットに相当）                  100万電子ボルト                  小型自動追尾ミサイル                  軍事衛星                  小型車両                  国家宇宙監視センタ                  プロトタイプ作戦運用センタ</p>
<p>RADAR radio detection and ranging; the acronym "radar" is no longer capitalized in current usage                  ROCC Regional Operations Control Center                  SAR synthetic aperture radar                  SPADATS Space Detection and Tracking System                  SPADOC Space Defense Operations Center                  WWMCCS World-Wide Military Command and Control System</p>	<p>電波の探知と距離計測；「レーダ」は、現在の用法では、もはや大文字では書かれない。                  地域作戦管制センタ                  合成開口レーダ                  宇宙探知追跡システム                  宇宙防衛作戦センタ                  世界軍事指揮統制センタ（訳注）</p>

（訳注）軍사용語辞典から

WWMCCS: Worldwide Military Command & Control System 全世界軍事指揮統制システム“ウィミクス”(旧称)；米国防総省、国家戦略指揮統制通信組織、米大統領府・NCA 直属の軍事戦略通信・情報処理ネットワーク、米ソ冷戦全期間を通じて SIOP の統制・実行支援、敵攻撃警戒等の広範な国家軍事戦略情報を NCA に提供、冷戦終結後 '96/10 から新システム“全地球指揮統制システム(GCCS:Global Command & Control System)”に移行

## Glossary of Terms

## 用語解説

**Ablative Shield:** A shield that evaporates when heated, absorbing energy and protecting the object which is behind it from heat damage.

**Ablative Shock:** Generation of a mechanical shock wave at the surface of an object exposed to intense pulsed electromagnetic radiation. A thin layer of the object's surface violently and boils off; the resulting vapor suddenly exerts pressure against the surface, generating a mechanical shock wave at the surface. This shock wave then propagates deeper into the object and can cause melting, vaporization, and spallation of surface material and structural failure of the object.

**ABM Treaty:** A treaty of 1972, signed and ratified by the Soviet Union and the United States, prohibiting development of many types of anti-ballistic missile systems and limiting deployments on each side to a specified number of land-based units, which use only rocket interceptors and ground-based radar.

**Acquisition:** Detection of a potential target by the sensors of a weapons system.

**Active Sensor:** One that illuminates a target, producing return secondary radiation, which is then detected to track or identify the target. An example is LIDAR.

**Adaptive Optics:** Optical systems that can be modified (e.g., by controlling the shape of a mirror) to compensate for distortions. An example is the use of information from a beam of light, passing through the atmosphere to compensate for the distortion suffered by another beam of light on its passage through the atmosphere. Used to eliminate the "twinkling" of stars in observational astronomy and to reduce the dispersive effect of the atmosphere on laser beam weapons.

**Amplified Spontaneous Emission:** See Super-radiance,

**Anti-Satellite Weapon (ASAT):** A weapon to destroy satellites in space.

**Anti-simulation:** Deceiving adversary sensors by making a strategic target look like a decoy.

**Apogee:** The maximum altitude attained by an Earth satellite.

**Ballistic Missile Defense (BMD):** A defense system that is designed to protect a territory from attacking ballistic missiles.

**Birth-to-death Tracking:** The tracking of space objects-e.g., satellites, reentry vehicles, or de-coys which simulate these-from the time that they are deployed from a booster or post-boost vehicle until they are destroyed.

**Bistatic Radar:** A radar system which has transmitters and receivers stationed at two locations; a special case of multistatic radar.

**Boost Phase:** The phase of a missile trajectory from launch to burnout of the final stage. For ICBMs, this phase typically lasts from 3 to 5 minutes, but studies indicate that reductions to the order of 1 minute are possible.

**Brightness:** In this report, the amount of power that can be delivered per unit solid angle by a directed-energy weapon.

**Capital Satellite:** A highly valued or costly satellite, as

**アブレイチブ・シールド:** 加熱時に昇華作用が行われることでエネルギーを吸収し、物体が損傷するのを防ぐ被覆。

**アブレイチブ・ショック:** 強度なパルス状の電磁波に絶縁されていない物体の表面に発生する物理学的衝撃波。物体の表面の薄いレイヤが無理に沸騰する結果、蒸気は表面に対して圧力をかける。この時、表面では摩擦による波が発生する。この衝撃波は、この時、物体の深くに伝播し、表面物質の溶解、気化、破碎と構造上の破損を発生させる。

**ABM条約:** 1972年、ソ連と米により署名され批准された条約。多種類の反彈道ミサイルシステムの開発を禁止し、ロケット迎撃機と地上配置レーダのみを装備した双方の地上部隊の配置を特定の数に制限する条約。

**捕捉:** 兵器システムのセンサによる潜在的目標の探知。

**アクティブセンサ:** ターゲットを照射して、反射した二次放射線を生成して、これを検出し、目標の追跡や認識を行う。例は、ライダー。

**適応型光学系:** 歪みを直すために修正を行う光学システム(即ち、反射鏡形状をコントロールすること)。例としては、大気圏の通路で他の光線により被る歪みを直すために、そこを通過する際に光線からの情報を利用することがある。このシステムは、天文台での観測時に星の「きらめき」を減少させたり、レーザー光線兵器で大気圏の分散効果を減少させるために用いられる。

**増幅された自然放出:** "Super-radiance" を参照。

**衛星攻撃兵器(ASAT):** 宇宙で衛星を破壊する兵器。

**アンチシミュレーション:** おとりの戦略目標を作ることで、敵のセンサをだますこと。

**遠地点:** 衛星が到達する最も高い高度の地点。

**弾道ミサイル防衛網:** 弾道ミサイルを攻撃することで領土防衛に設計された防衛システム。

**バースツーデス・トラッキング:** 宇宙物体(例: 衛星、再突入機体、おとり)を追跡すること。

即ち、ブースタ、又はポストブースタの機体から軌道投入配備される時から、破壊されるまでを言う。

**バイスタチックレーダ:** 送信機と受信機を二地点に配置されたレーダシステム。

マルチスタチックレーダの特殊ケース。

**ブーストフェーズ:** 打上げから最終段の燃え尽きるまでのミサイル軌道のフェーズ。ICBMの場合、このフェーズは概して3分から5分続く。しかし、1分間のオーダの低減は可能であると幾つかの研究では示されている。

**輝度:** 本書では、ビーム兵器により単位立体角当りに発射されるパワーの量を言う。



<p>distinct from an inexpensive decoy satellite. Some decoys might be so expensive as to be considered capital satellites.</p> <p><b>Chaff:</b> Confetti-like metal foil ribbons which can be ejected from spacecraft (or terrestrial vehicles) to reflect enemy radar signals, thereby creating false targets or screening actual targets from the "View" of radar.</p> <p><b>Coherence:</b> The matching, in space (transverse) or time (temporal coherence), of the wave structure of different parallel rays of a single frequency of electromagnetic radiation. This results in the mutual reinforcing of the energy of these different components of a larger beam. Lasers and radar systems produce partially coherent radiation.</p> <p><b>Command Guidance:</b> The steering and control of a missile by transmitting commands to it.</p> <p><b>Counter-countermeasures:</b> Measures taken to defeat countermeasures.</p> <p><b>Countermeasures:</b> In this report, measures taken by the offense to overcome aspects of a BMD system.</p> <p><b>Dazzling:</b> In this report, the temporary blinding of a sensor by overloading it with an intense signal of electromagnetic radiation, e.g., from a laser or a nuclear explosion.</p> <p><b>Decoy:</b> An object that is designed to make an observer believe that the object is more valuable than is actually the case. Usually, in this report, a decoy refers to a light object designed to look like a satellite.</p> <p><b>Deep Space:</b> The region of outer space at altitudes greater than 3,000 nautical miles (about 5,600 kilometers) above the Earth's surface.</p> <p><b>Defensive Satellite (DSAT) Weapon:</b> A space-based ASAT weapon that is intended to defend satellites by destroying attacking ASAT weapons.</p> <p><b>Defensive Technologies Study Team (DTST):</b> A committee, generally known as the "Fletcher Panel," after its Chair, appointed by President Reagan to investigate the technologies of potential BMD systems.</p> <p><b>Delta-V:</b> A numerical index of the maneuverability of a satellite or rocket. It is the maximum change in velocity which a spacecraft could achieve in the absence of a gravitational field.</p> <p><b>Diffraction:</b> The spreading out of electromagnetic radiation as it leaves an aperture, such as a mirror. The degree of spread, which cannot be eliminated by focusing, is proportional to the ratio of the wavelength of radiation to the diameter of the aperture.</p> <p><b>Digital Processing:</b> The most familiar type of computing, in which problems are solved through the mathematical manipulation of streams of numbers.</p> <p><b>Directed-Energy Weapon:</b> A weapon that kills its target by delivering energy to it at or near the speed of light. Includes lasers and particle beam weapons.</p> <p><b>Discrimination:</b> The ability of a surveillance system to distinguish decoys from intended targets, e.g., certain types of satellites.</p> <p><b>Early Warning:</b> In this report, early detection of an enemy ballistic missile launch, usually by means of surveillance satellites and long-range radar.</p> <p><b>Electromagnetic Radiation:</b> A form of propagated energy, arising from electric charges in motion, which</p>	<p><b>主力衛星:</b> 高度な価値を有しコストが高い衛星。安価な、おとりの衛星とは異なる。主力衛星と判断されるほど効果なおとりも存在する。</p> <p><b>チャフ:</b> 敵のレーダ信号に反応するために宇宙船(又は地上車両)から射出される紙片のような薄い金属片。これにより、レーダの「視界」から実目標を覆い隠したり、偽目標を作る。</p> <p><b>干渉性:</b> 空間(交軸)又は時間(時間の干渉)における電磁放射の単独周波数で、異なる平行光線の波の構造が調和することを言う。この結果、より大きな光線の異なる成分のエネルギーが相互に強化される。レーザとレーダシステムは部分的に干渉性の放射を作り出す。</p> <p><b>コマンド・ガイダンス:</b> 指示の送信により行われる、ミサイルの操舵とコントロール。</p> <p><b>CCM(反対の対抗手段):</b> 対抗手段を打ち負かすために取る手段。</p> <p><b>CM(対抗手段):</b> 本書では、BMDシステムを撃破するため攻撃側により取られる手段。</p> <p><b>目くらまし(ダズリング):</b> 本書では、電磁放射の強烈な信号でオーバーロードすることによるセンサを一時的に目くらますことを言う。例えば、レーザや核爆発などで発生する。</p> <p><b>おとり(デコイ):</b> その物体が実際よりも貴重な物と観測者を信じさせるように作られたものを言う。本書では、通常、衛星のように見えるように作られた軽い物体について言う。</p> <p><b>深宇宙(ディープスペース):</b> 地球の表面から3000海里(約5600km)以上の高さの大気圏外空間域。</p> <p><b>防衛衛星兵器(DSAT):</b> 攻撃型衛星兵器を破壊することにより衛星を防御するための宇宙配備の攻撃型衛星兵器。</p> <p><b>防衛技術研究チーム(DSAT):</b> 潜在的BMDシステムの技術を調査するため議長はレーガン大統領が指名し議長に因んで「フレッチャーパネル」として一般に知られている委員会。</p> <p><b>デルタ-V:</b> 衛星又はロケットの機動性の数字の指標。宇宙船が重力場のないところで達成できる最大の速度変化である。</p> <p><b>回析:</b> 反射鏡のような開口を通る時の電磁波の拡がり。焦点を合わせることにより減少できない拡がりの度合いは、開口の直径に対する電磁波の波長に比例。</p> <p><b>デジタル処理:</b> 問題が数値の流れの数学的操作により解かれる最も親しまれているタイプのコンピュータ。</p> <p><b>指向性エネルギー兵器:</b> 光速か、それに近い速度でエネルギーを出すことにより目標を破壊する兵器。レーザや粒子ビーム兵器が含まれる。</p> <p><b>識別力:</b> おとりと意図する目標とを区別する監視システムの能力。例えば、衛星のタイプ。</p> <p><b>早期警戒:</b> 本書では、敵の弾道ミサイル発射の早期探知システムを言う。通常は、監視衛星と長距離レーダによる行われる。</p>
--	---



<p>produces a simultaneous wavelike variation in electric and magnetic fields in space. The highest frequencies (or shortest wavelengths) of such radiation are possessed by gamma rays, which originate from processes within atomic nuclei. As one goes to lower frequencies, the electromagnetic spectrum includes X-rays, ultraviolet light, visible light, infrared light, microwave, and radio waves.</p> <p><b>Electron-volt:</b> The energy gained by an electron in passing through a potential difference of 1 volt. 6.25 quintillion electron-volts equals 1 joule; 22.5 billion trillion electron-volts equals 1 kilowatt-hour.</p> <p><b>Elliptical Orbit:</b> A noncircular Keplerian orbit.</p> <p><b>Endoatmospheric:</b> Within the atmosphere; an endoatmospheric interceptor intercepts its target within the atmosphere.</p> <p><b>Ephemeris:</b> A collection of data about the predicted positions (or apparent positions) of celestial objects, including artificial satellites, at various times in the future. A satellite ephemeris might contain the orbital elements of satellites and predicted changes in these.</p> <p><b>Equatorial Orbit:</b> An orbit above the Earth's Equator.</p> <p><b>Excimer:</b> A contraction for "excited dimer"; a type of lasant. A dimer is a molecule consisting of two atoms. Some dimers-e.g., xenon chloride and krypton fluoride are molecules which cannot exist under ordinary conditions of approximate thermal equilibrium but must be created in an "excited"-i.e., energized-condition by special "pumping" processes in a laser.</p> <p><b>Exoatmospheric:</b> Outside the atmosphere; an exo-atmospheric interceptor intercepts its target in space.</p> <p><b>Fission:</b> The breaking apart of the nucleus of an atom, usually by means of a neutron. For very heavy elements, such as uranium, a significant amount of energy is produced by this process. When controlled, this process yields energy which may be extracted for civilian uses, such as commercial electric generation. When uncontrolled energy is liberated very rapidly: such fission is the energy source of uranium- and plutonium-based nuclear weapons; it also provides the trigger for fusion weapons.</p> <p><b>Fratricide:</b> In this report, the unintended destruction of some of a nation's weapons or other military systems (e.g., satellites) by others.</p> <p><b>Free-electron Laser:</b> A type of laser which does not use ordinary matter as a lasant but instead generates radiation by the interaction of an electron beam with a static magnetic or electric field. Loosely speaking, free-electron laser technology resembles and evolved from that used by particle accelerators ("atom smashers"). Lasers that are not free-electron lasers are bound-electron lasers.</p> <p><b>Functional Kill:</b> The destruction of a target by disabling vital components in a way not immediately detectable, but nevertheless able to prevent the target from functioning properly. An example is the destruction of electronics in a guidance system by a neutral particle beam.</p>	<p>ーダにより行われる。</p> <p><b>電磁放射:</b> 運動している電荷から発生する伝播エネルギーの形態。それは、空間における電磁場の波状振動を生ずる。この放射の最高周波数（又は最短波長）は、ガンマ線である。これは、原子核の中のプロセスから発生する。低周波に行くにつれ、電磁スペクトラムには、エックス線や、紫外線、可視光線、赤外線、マイクロ波、電波等が含まれる。</p> <p><b>電子ボルト:</b> 電子が1ボルトのポテンシャル差を通過する時に得られるエネルギー。6.25 × 10<sup>18</sup>電子ボルトは、1ジュールに等しい。即ち、22.5 × 10<sup>9</sup> × 10<sup>12</sup>電子ボルトは1KWhに等しい。</p> <p><b>楕円軌道:</b> 非円形のケプラー式軌道。</p> <p><b>エンドアトモスフェリック:</b> 大気圏内；大気圏内の迎撃機は大気圏内の目標を迎撃する。</p> <p><b>天体暦:</b> 天体の予想される位置（又は明らかな位置）についてのデータを集めたもの。これには、様々な将来の時間における人工衛星位置が含まれる。衛星天体暦には、衛星の軌道要因と予想される変化を含む。</p> <p><b>赤道軌道:</b> 地球の赤道にある軌道。</p> <p><b>エキシマ（「励起状態」）:</b> 「活発な二量体」の収縮；レイザントの一つのタイプ。二量体は2原子から成る分子である。幾つかの二量体、例えばキセノン塩化物とクリプトンふっ化物分子は、近似熱平衡の普通の状態では存在できないが、「活発な」即ち、レーザの特別な「ポンピング」プロセスによりエネルギーを与えられた状態で創られる。</p> <p><b>外気圏:</b> 大気圏外；外気圏の迎撃機は宇宙空間で目標を迎撃する。</p> <p><b>核分裂:</b> 原子核の分裂。通常は中性子による。ウラニウムのような非常に重い元素のため、大きな量のエネルギーがこの過程で生じる。コントロールできれば、この過程は民間の電気発電のような民生用に引出されるエネルギーを産み出す。エネルギーをコントロールしなければ、極めて短時間に解放される：この場合の分裂は、ウラニウムとプルトニウムをベースとした核兵器のエネルギー源である；これは又核分裂兵器の引き金を提供する。</p> <p><b>同志撃ち:</b> 本書では、他の国による、ある国への兵器、軍事システム（例：衛星）の意図的ではない破壊を言う。</p> <p><b>自由電子レーザー:</b> 「レイザント」のような普通の物体を使わないタイプのレーザで、代わりに静的な磁場か電気場に伴う電子線ビームの相互作用により放射能を発生させる。大まかに言えば、自由電子レーザー技術は粒子加速器（「原子破壊器」）に使用されて進化した技術に似ている。自由電子レーザーではないレーザは、束縛電子レーザーである。</p> <p><b>機能破壊:</b> 直ちに探知できない方法で重要な部品を不能にすることによる目標破壊を言う。それにも拘らず目標が適切に機能することを妨害できる。一つの例は、中性粒子線による誘導システムにおける電子エレクトロニクスの破壊である。</p>
--	---

<p><b>Fusion:</b> More specifically, nuclear fusion: The fusing of two atomic nuclei, usually of light elements, such as hydrogen. For light elements, energy is liberated by this process.</p> <p><b>Graser:</b> See Gamma-ray Laser.</p> <p><b>Gamma-ray Laser:</b> A laser which generates a beam of gamma rays; also called a graser. A gamma-ray laser, if developed, would be a type of X-ray laser; although it would employ nuclear reactions, it need not (but might) employ nuclear fission or fusion reactions or explosions.</p> <p><b>Gamma Rays:</b> X-rays emitted by the nuclei of atoms</p> <p><b>Geostationary Orbit:</b> An orbit at an altitude of 35,800 kilometers above the Earth's Equator. A satellite placed in such an orbit revolves around the Earth once per day, maintaining the same position relative to the surface of the Earth. It then appears to be stationary, and can be used as a communications relay or as a surveillance post.</p> <p><b>Geosynchronous Orbit:</b> An orbit about 35,800 km above the Equator. A satellite placed in such an orbit revolves around the Earth once per day. See Geostationary Orbit.</p> <p><b>Gray:</b> The System International unit of absorbed dose of ionizing radiation. One gray (abbreviated 1 Gy) is 1 joule of absorbed energy per kilogram of matter.</p> <p><b>Hard Kill:</b> Destruction of a target in such a way as to produce unambiguous visible evidence of its neutralization.</p> <p><b>Hardness:</b> A property of a target; measured by the power needed per unit area to destroy the target by means of a directed-energy weapon. A hard target is more difficult to kill than a soft target.</p> <p><b>High-Earth Orbit:</b> An orbit about the Earth at an altitude greater than 3,000 nautical miles (about 5,600 kilometers).</p> <p><b>Homing Device:</b> A device, mounted on a missile, which uses sensors to detect the position or to help predict the future position of a target, and then directs the missile to intercept the target. It usually updates frequently during the flight of the missile.</p> <p><b>Impulse:</b> A mechanical jolt delivered to an object. Physically, impulse is a force applied for a period of time, and the System International unit of impulse is the newton-second (abbreviated N-s). See Impulse Intensity.</p> <p><b>Impulse Intensity:</b> Mechanical impulse per unit area. The System International unit of impulse intensity is the pascal-second (abbreviated Pa-s). A conventionally used unit of impulse intensity is the "tap," which is one dyne-second per square centimeter; hence 1 tap = 0.1 Pa-s.</p> <p><b>Impulse Kill:</b> The destruction of a target, using directed energy, by ablative shock. The intensity of directed energy may be so great that that the surface of the target violently and rapidly boils off delivering a mechanical shock wave to the rest of the target and causing structural failure.</p> <p><b>Inclination:</b> The inclination of an orbit is the (dihedral) angle between the plane containing the orbit and the plane containing the Earth's Equator. An equatorial orbit has an inclination of 0° for a satellite traveling eastward or</p>	<p><b>核融合:</b> もっと詳細に言えば、核融合: 通常は水素のような、軽い元素である二つの原子核の融合。軽い元素ではエネルギーはこのプロセスにより解放される。</p> <p><b>グレイザ:</b> ガンマー線レーザー。</p> <p><b>ガンマー線レーザー:</b> ガンマー線のビームを発生させるレーザー。グレイザとも呼ばれる。ガンマー線レーザーは、もし開発されれば、X線レーザーのタイプとなる。これは核反応を使用するが、核融合とか融合反応、爆発などは適用しない。</p> <p><b>ガンマー線:</b> 原子核により放射されるX線。</p> <p><b>静止軌道:</b> 地球赤道上、35,800kmの高度にある軌道。この軌道に配置された衛星は地球の表面の同じ位置を保ちながら地球の周囲を1日一回回るので静止しているように見える。通信中継や監視ポストとして利用できる。</p> <p><b>静止軌道:</b> 赤道上の35,800kmにある軌道。この軌道に配置された衛星は一日に一度地球の周囲を回る。Geostationary Orbitを参照のこと。</p> <p><b>グレイ:</b> 電離放射線の吸収線量のシステム国際単位。1グレイ(1Gyと略)はキログラム当りの1ジュールの吸収線量である。</p> <p><b>ハードキル:</b> 無害化につき明白な目に見える証拠を生ずるような目標破壊。</p> <p><b>硬度:</b> 目標の特性; ビーム兵器により目標を破壊するために単位面積当り必要なパワーにより測定される。ハード目標はソフト目標よりも破壊が困難である。</p> <p><b>高地球軌道:</b> 3,000海里(約5,600km)よりも高い高度にある地球の軌道。</p> <p><b>ホーミング装置:</b> ミサイルに搭載された装置。目標の将来位置の探知や予測を助けるセンサを用い、目標を迎撃するようにミサイルに指示する。通常、関連情報はミサイルの飛行中に頻繁に更新される。</p> <p><b>衝撃:</b> 物体に伝えられる機械的な動揺。物理的には、衝撃は一定期間加わる力である。衝撃のSI単位は、ニュートン・セコンド(N-sと略)。</p> <p><b>衝撃の強度:</b> 単位面積当りの機械的な衝撃。衝撃の強度のSI単位は、パスカル・セコンド(Pa-sと略)。通常衝撃強度に関して用いられる単位は、「タップ」である。これは、平方cm当り1ダイン・セコンドである。即ち、1タップ=0.1Pa-sである。</p> <p><b>衝撃破壊:</b> ビーム兵器を用いたアブレイチブ・ショックによる目標破壊。ビーム兵器の強度は、非常に高いので、目標表面は猛烈かつ急速に沸騰しはがれ、目標の残り部分に物理的衝撃波を与え、構造的破壊を引き起こす。</p> <p><b>傾斜:</b> 軌道の傾斜は、軌道を含む空間と地球の赤道を含む空間との間の(上半角の)角度である。赤道の軌道は、東方向へ移動する衛星で0度の傾斜が、又は西方向で移動する衛星で180度の傾斜を有する。</p>
---	---

<p>180 ° for a satellite traveling westward. An orbit having an inclination between 0 ° and 90 ° and in which a satellite is traveling generally eastward is called a prograde orbit. An orbit having an inclination of 90 ° passes above the north and south poles and is called a polar orbit. An orbit having an inclination of more than 90 ° is called a retrograde orbit.</p> <p><b>Ionization:</b> The removal or addition of one or more electrons to a neutral atom, forming a charged ion.</p> <p><b>Isotropic:</b> Independent of direction; referring to the radiation of energy, it means "with equal intensity in all directions," i.e., omnidirectional.</p> <p><b>Joule:</b> The Systeme Internationale unit of energy. One kilowatt-hour is 3.6 million joules.</p> <p><b>Keep-out Zone:</b> A volume around a space asset, off limits to parties not owners of the asset. Keep-out zones could be negotiated or unilaterally declared. The right to defend such a zone by force and the legality of unilaterally declared zones under the Outer Space Treaty remain to be determined.</p> <p><b>Kelvin Temperature:</b> A scale of temperature on which zero degrees Kelvin (abbreviated 0 ° K) corresponds to "absolute zero." Temperature in degrees Kelvin equals temperature in degrees Celsius plus 273.16, thus ice melts at 273.16 ° K, and water boils at 373.16 ° K.</p> <p><b>Keplerian Orbit:</b> The orbit that a satellite would follow if the Earth were a uniform sphere with no atmosphere, and if other simplifying assumptions were valid. Such an orbit would be an ellipse having the center of the Earth as one focus. A special case of such an orbit is a circular orbit about the center of the Earth.</p> <p><b>Kill Assessment:</b> The detection and assimilation of information indicating the destruction of an object under attack. Kill assessment is one of the many functions to be performed by a battle management system.</p> <p><b>Kinetic-Energy Weapon:</b> A weapon that uses kinetic energy, or energy of motion, to kill an object. Weapons that use kinetic energy are a rock, a bullet, a nonexplosively armed rocket, and an electromagnetic railgun.</p> <p><b>Lasant:</b> A material that can be stimulated to produce laser light. Many materials can be used as lasants; these can be in solid, liquid, or gaseous form (consisting of molecules-including excimers- or atoms) or in the form of a plasma (consisting of ions and electrons). Lasant materials useful in high-energy lasers include carbon dioxide, carbon monoxide, deuterium fluoride, hydrogen fluoride, iodine, xenon chloride, krypton fluoride, and selenium, to mention but a few.</p> <p><b>Laser:</b> A device that produces a narrow beam of coherent radiation through a physical process known as stimulated emission. Lasers are able to focus large quantities of energy at great distances, and are among the leading candidates for BMD</p>	<p>0度と90度の間の傾斜を有する軌道、それに一般に東方向に移動する衛星は、巡行軌道と呼ばれる。90度の傾斜を有する軌道は、北極と南極の上空を通過し、極軌道と呼ばれる。90度以上の傾斜を有する軌道は、逆行軌道と呼ばれる。</p> <p><b>イオン化:</b> 中間原子に1個以上の電子を取去ったり追加することで帯電イオンを形成。</p> <p><b>等方性:</b> 方向に依存しないこと; エネルギーの放射に関して言えば、「全方向に等強度を有する」を意味する。換言すれば、全方向性。</p> <p><b>ジュール:</b> エネルギーのSI単位。1 kWhは、360万ジュール。</p> <p><b>キープアウトゾーン:</b> 資産の所有者以外の当事者は立入禁止。宇宙資産の周辺空間。キープアウトゾーンの設定は、話し合い可能だが、一方的宣言も可能。力でのゾーン防衛の権利と、大気圏外空間条約下で一方的に宣言されたゾーンの合法性が決められた。</p> <p><b>ケルビン温度:</b> 「絶対ゼロ」に対応するケルビン0度(0 ° Kと略)に関する温度の尺度。ケルビン度の温度は、セルシウス度プラス 273.16 の温度と等しい。従って、K273.16 度で氷が解け、K373.16 度で水が沸騰する。</p> <p><b>ケプラー軌道:</b> もし、地球が大気圏を持たない均一な球体で、また、他の単純化された仮定が妥当とした際に、衛星がたどる軌道。この種の軌道は地球中心を一つの焦点として有する楕円形である。この種の軌道の特殊なケースは、地球の中心を回る円形軌道である。</p> <p><b>破壊評価:</b> 攻撃下の物体の破壊を示す情報の探知と同化を言う。破壊評価は、戦闘管理システムにより行われる機能の一つである。</p> <p><b>運動エネルギー兵器:</b> 対象を破壊するために運動エネルギー、又は移動エネルギーを使う兵器。運動エネルギーとして使われる兵器は、岩石、弾丸、非爆発性の武装ロケット、電磁砲である。</p> <p><b>レイザント:</b> レーザの光を作るため刺激を与えることが出来る材料。多くの材料はレイザントとして利用できる; これらは、固体か液体か気体の形状(エキシマか原子を含む一分子から成る)になるか、或いはプラズマ(イオンか電子から成る)の形状になる。高エネルギーレーザで役に立つレイザント物質は、二酸化炭素、一酸化炭素、フッ化重水素、フッ化水素よう素、フッ化キセノン、フッ化クリプトン、及びセレンなどがある。</p> <p><b>レーザ:</b> 誘導放出として知られる物理的プロセスを通じコヒーレント放射の狭ビームを生み出すデバイス。レーザは大量のエネルギーを遠距離から集中できるので、弾道ミサイル防衛網の有効な候補である。</p>
--	---



<p>weapons.</p> <p><b>LIDAR</b>: A technique analogous to radar, but which uses laser light rather than radio or microwaves. The light is bounced off a target and then detected, with the return beam providing information on the distance and velocity of the target.</p> <p><b>Limited Test Ban Treaty</b>: The multilateral Treaty signed and ratified by the United States and the U.S.S.R. in 1963 which prohibits nuclear tests in all locations except underground.</p> <p><b>Megawatt</b>: One million watts; a unit of power. A typical commercial electric plant generates about 500 to 1,000 megawatts.</p> <p><b>MeV</b>: One million electron-volts. A unit of energy usually used in reference to nuclear processes. It is equivalent to the energy that an electron gains in crossing a potential of 1 million volts.</p> <p><b>Micron</b>: One-millionth of a meter (equivalently, one-thousandth of a millimeter). Roughly twice the wavelength of visible light.</p> <p><b>Midcourse Phase</b>: The phase of a ballistic missile trajectory in which the RVs travel through space on a ballistic course towards their targets. This phase lasts up to 20 minutes.</p> <p><b>Military Satellite (MILSAT)</b>: A satellite used for military purposes, such as navigation or intelligence gathering.</p> <p><b>Miniature Homing Vehicle (MHV)/Miniature Vehicle (MV)</b>: An air-launched direct-ascent ("pop-up") kinetic-energy ASAT weapon currently being developed and tested by the U.S. Air Force.</p> <p><b>Monostatic Radar</b>: A radar system in which the receiver and transmitter are colocated.</p> <p><b>Multistatic Radar</b>: A radar system that has transmitters and receivers stationed at multiple locations; typically, a radar system with a transmitter and several receivers, all of which are geographically separated. A special case is bistatic radar. An advantage of multistatic radar over monostatic radar is that even if transmitters- which might be detected by the enemy when operating-are attacked, receivers in other locations might not be noticed and might thereby escape attack.</p> <p><b>Obscurant</b>: A material-e.g., smoke or chaff-used to conceal an object from observation by a radio or optical sensor. Smoke may be used to conceal an object from observation by an optical sensor, and chaff may be used to conceal an object from observation by a radio sensor (e.g., radar)</p> <p><b>On-line</b>: Operating, as distinct from dormant.</p> <p><b>Orbital Elements</b>: Any set of several parameters (e.g., apogee, perigee, inclination, etc.) used to specify a Keplerian orbit and the position of a satellite in such an orbit at a particular time. Seven independent orbital elements are required particular time.</p> <p><b>Outer Space Treaty of 1967</b>: A multilateral treaty signed and ratified by both the United States and the Soviet Union. Article IV of the Outer Space treaty forbids basing nuclear weapons or other weapons of mass destruction in space.</p>	<p><b>ライダー</b>: レーダに類似した技術であり、無線電波やマイクロエーブに代わってレーザー光線を用いる。この光線は、目標で跳ね返り、探知される。この際、目標の距離と速度に関する情報をもつ反射光線を伴っている。</p> <p><b>部分的核実験禁止条約</b>: 1963年に米ソとの間で調印・批准された多国間条約で、地下以外での全核実験を禁止している。</p> <p><b>メガワット</b>: 100万ワット; 電力の単位。代表的民間電力会社の発電所では、500から1000メガワットを発電する。</p> <p><b>Mev</b>: 100万電子ボルト。核プロセスに関連して通常使用されるエネルギー単位。電子が、電位差100万ボルトを横切の際に得るエネルギーに等しい。</p> <p><b>ミクロン</b>: 1mの100万分の1(1ミリの1000分の1と同じ)。大体で言えば、可視光線の波長の2倍。</p> <p><b>ミッドコース段階</b>: 再突入飛行物体が目標に向かう弾道コースの空間を移動する弾道ミサイル軌道の段階。この段階は20分間続く。</p> <p><b>軍事衛星 (MILSAT)</b>: ナビゲーションや情報収集のような軍事目的に使われる衛星。</p> <p><b>小型誘導飛行体 (MHV)/小型飛行体 (MV)</b>: 空中で発射され上昇する「ポップアップ」運動エネルギーASAT兵器。米空軍により開発され現在テスト中。</p> <p><b>モノスタチックレーダ</b>: 送・受信機が同じ場所に配置されたレーダシステム。</p> <p><b>マルチスタチックレーダ</b>: 複数の場所に配置された送・受信機を有するレーダ・システム。一般的には、送信機と幾つかの受信機をもつレーダシステムを言う。これらの全ては地理的に分離されている。特殊なケースはバイスタチックレーダである。モノスタチックレーダに勝るマルチスタチックレーダの優位性は、例え、運用中に攻撃された時に敵に送信機が探知されても、他の場所の受信機は気づかれず、それにより攻撃を避けられる点にある。</p> <p><b>隠べい材 (オブスキュラント)</b>: 無線電波か、光学センサによる観測から物体を隠すため煙かチャフを用いる材料。煙は光学センサの観測から物体を隠すために用いられ、チャフは無線センサ(例: レーダ)による観測から物体を隠すのに用いられる。</p> <p><b>オンライン</b>: 運用中。休止中とは異なる。</p> <p><b>軌道要素</b>: 幾つかのパラメータのセット(例: 遠地点、近地点、傾斜角等)。ケプラー軌道や特定時間での軌道における衛星位置を明記するために用いられる。7つの独立した軌道要素が、特定の時間に必要とされる。</p> <p><b>1967年大気圏外空間条約</b>: 米ソにより調印・批准された多国間条約。この第4条は、宇宙における核兵器や大量破壊兵器などの配備を禁止している。</p>
--	--



<p><b>Passive Sensor:</b> One that detects naturally occurring emissions from a target for tracking and/or identification purposes</p> <p><b>Perigee:</b> The minimum altitude attained by an Earth satellite.</p> <p><b>Phased-Array Radar (PAR):</b> A radar with elements that are physically stationary, but with a beam that is electronically steerable and can switch rapidly from one target to another. Used for tracking many objects, often at great distances.</p> <p><b>Pointing:</b> The aiming of sensors or defense weapons at a target with sufficient accuracy either to track the target or to aim with sufficient accuracy to destroy it.</p> <p><b>Polar Orbit:</b> An orbit having an inclination of 90 ° .</p> <p><b>Prograde Orbit:</b> An orbit having an inclination of between 0 ° and 90 ° . See Retrograde Orbit.</p> <p><b>Pumping:</b> In this report, the raising of the molecules or atoms of a lasant to an energy state above the normal lowest state, in order to produce laser light. This results when they fall back to a lower state. Pumping may be done using electrical, chemical, or nuclear energy.</p> <p><b>Rad:</b> A unit of absorbed dose of ionizing radiation. One rad is 0.001 gray.</p> <p><b>Radar:</b> A technique for detecting targets in the atmosphere or in space by transmitting radio waves (e.g., microwaves) and sensing the waves reflected by objects. The reflected waves (called "returns" or "echos") provide information on the distance to the target and the velocity of the target and may also provide information about the shape of the target. (Originally an acronym for "Radio Detection And Ranging.")</p> <p><b>Radian:</b> A unit of angular measure. One radian is about 57.3 ° . One microradian (0.000001 radian) is the angle subtended by an object 1 meter across at a distance of 1,000 kilometers.</p> <p><b>Reaction Decoy:</b> A decoy deployed only upon warning or suspicion of imminent attack.</p> <p><b>Reentry:</b> The return of objects, originally launched from Earth, into the atmosphere.</p> <p><b>Retrograde Orbit:</b> An orbit having an inclination of more than 90 ° . See Prograde Orbit.</p> <p><b>Robust:</b> In this report, describing a system, indicating its ability to endure and perform its mission against a reactive adversary. Also used to indicate ability to survive under direct attack.</p> <p><b>Salvage-fused:</b> Describing a warhead, that is set to detonate when it is attacked. Usually refers to a nuclear warhead.</p> <p><b>Sensors:</b> Electronic instruments that can detect radiation from objects at great distances. The information can be used for tracking, aiming, discrimination, attacking, kill assessment, or all of the above. Sensors may detect any type of electromagnetic radiation or several types of nuclear particles.</p> <p><b>Shoot-back:</b> In this report, the technique of defending a space asset by shooting at an attacker.</p> <p><b>Signature:</b> Distinctive type of radiation emitted or reflected by a target, which can be used to identify</p>	<p><b>パッシブセンサ:</b> 目標の追跡や認識のために目標から自然に発生する放出を検知するセンサ。</p> <p><b>近地点:</b> 地球衛星が到達する最小限の高度。</p> <p><b>フェイズド・アレイ・レーダ (PAR):</b> 物理的に静止しているアンテナ素子を持つレーダだが、電子的にビームを走査し、一つの目標から他の目標へ素早くスイッチできる。多目標追尾に利用され、しばしば長距離で使われる。</p> <p><b>ポインティング:</b> 目標を追尾したり、又は破壊するのに十分な精度をもたせて目標に対してセンサや防衛兵器の照準を合わせること。</p> <p><b>極軌道:</b> 90度の傾斜角をもつ軌道。</p> <p><b>巡行軌道:</b> 0度と90度との間の傾斜角を有する軌道。逆行軌道を参照のこと。</p> <p><b>ポンピング:</b> 本書では、レーザ光線を作るために、通常の最低状態下で分子やレイサント原子を或るエネルギー状態に引上げることを言う。これは、より低い状態に下がる時に生じる。ポンピングは、電子や、化学、核のエネルギーを用いて行われる。</p> <p><b>ラド (Rad):</b> 電離放射線の吸収線量の単位。1ラドは、0.001グレイ。</p> <p><b>レーダ:</b> 大気圏か宇宙空間で電波(例:マイクロウエーブ)を送信したり物体が反射する波動を検知することにより目標を検知する技法。反射波(「反射」か、「エコー」と呼ばれる)は、目標への距離・速度・形状に関する情報を提供する(元来、「Radio Detection And Ranging」の頭文字である。)</p> <p><b>ラジアン:</b> 角度の単位。1ラジアンは、約57.3度。1マイクロラジアン(0.000001ラジアン)は、1,000kmの距離で1mの物体に対して張る角度である。</p> <p><b>反作用おとり:</b> 緊迫した攻撃の警告か疑いのある時のみ配置されるおとり。</p> <p><b>再突入:</b> 最初は地球から打上げられ、大気圏に戻る物体を言う。</p> <p><b>逆行軌道:</b> 90度以上の傾斜角をもつ軌道。巡行軌道を参照のこと。</p> <p><b>ロバスト(頑健性):</b> 本書では、敵対者に対するミッション遂行能力を示すシステムの説明時に使う言葉。また、直接攻撃下で生残性を示す言葉。</p> <p><b>サルベージ・フューズト:</b> 攻撃された時に起爆がセットされた弾頭について述べる状態を言う。通常は、核弾頭を言う。</p> <p><b>センサ:</b> 遠距離で物体からの反射を検知できる電子的器具。この情報は、追跡、照準、識別、攻撃、破壊評価などに使われる。センサは、幾つかのタイプの電磁放射か、幾つかのタイプの核粒子を検知する。</p> <p><b>シュート・バック:</b> 本書では、攻撃者を撃ち返すことにより宇宙の財産を守る技法。</p> <p><b>シグネチャ:</b> 目標が放出したり反射したりする放熱の区別できるタイプ。目標を区別するために利用用</p>
--	---

<p>that target.</p> <p><b>Simulation:</b> The art of making a decoy look like a more valuable strategic target. See Anti-simulation.</p> <p><b>Slew Time:</b> The time needed for a weapon to reaim at a new target after having just fired at a previous one.</p> <p><b>Smoke:</b> An obscurant which may be used in the atmosphere or in space to conceal an object from observation by an optical sensor.</p> <p><b>Soft Kill:</b> Same as functional kill</p> <p><b>Space Detection And Tracking System (SPADATS):</b> A network of space surveillance sensors operated by the U.S. Air Force.</p> <p><b>Space Mines:</b> Hypothetical devices that can track and follow a target in orbit, with the capability of exploding on command or by pre-program, to destroy the target.</p> <p><b>Stimulated Emission:</b> Physical process by which an excited molecule is induced by incident radiation to emit radiation at an identical frequency and in phase with the incident radiation. Lasers operate by stimulated emission.</p> <p><b>Superfluorescence:</b> See Superradiance.</p> <p><b>Superradiance:</b> The process used by a superradiant laser to generate or amplify a laser beam in a single pass through a lasant material, or-in the case of a free-electron laser-through an electric or magnetic field in the presence of an electron beam. Superradiance is actually a form of stimulated emission. Also known as superfluorescence, or amplified spontaneous emission.</p> <p><b>Superradiant Laser:</b> A laser in which the beam passes through the lasant only once; mirrors are not required for the operation of such a laser, as they are with more conventional lasers which are sometimes called "cavity lasers" to distinguish them from superradiant lasers. Free-electron lasers may also be superradiant; the laser beam of a superradiant free-electron laser would pass once through an electric or magnetic field (instead of a lasant) in the presence of an electron beam</p> <p><b>Synthetic Aperture Radar (SAR):</b> A radar system which correlates the echoes of signals emitted at different points along a satellite's orbit or an airplane's flight path. The highest resolution achievable by such a system is theoretically equivalent to that of a single large antenna as wide as the distance between the most widely spaced points along the orbit that are used for transmitting positions. In practice, resolution will be limited by the radar receiver's signal-processing capability or by the limited coherence of the radio signal emitted by the radar transmitter.</p> <p><b>Thermal Kill:</b> The destruction of a target by heating it, using directed energy, to the degree that structural components fail.</p> <p><b>Threat:</b> The anticipated inventory of enemy weapons and method of using them.</p> <p><b>Tracking:</b> The monitoring of the course of a moving target. Ballistic objects may have their tracks predicted by the defensive system, using several observations and physical laws.</p>	<p>の区別できるタイプ。目標を区別するために利用している。</p> <p><b>シミュレーション</b>：より高価値の戦略目標のように見えるおとりを作る技術。アンチシミュレーション参照。</p> <p><b>スルータイム</b>：以前の目標に発射した後に新しい目標に狙いを定めるのに兵器に必要な時間。</p> <p><b>スモーク</b>：光学センサの観測から物体を隠すために、大気圏か、空間で利用される隠ぺい材。</p> <p><b>ソフトキル</b>：ファンクションキルと同じ。</p> <p><b>宇宙空間探知追跡システム (SPADATS)</b>：米空軍が運用している宇宙監視センサネットワーク。</p> <p><b>宇宙機雷</b>：軌道上の目標を追尾し追従する仮想的デバイス。指令か事前プログラムで、目標破壊能力を有する。</p> <p><b>誘導放出</b>：同一の頻度と入力放射の位相で放射する入力放射により誘導される励起された分子による物理的プロセス。レーザは、励起された放射で動作する。</p> <p><b>スーパーフロレッセンス</b>：スーパーラジアンズ参照。</p> <p><b>スーパーラジアンズ</b>：レイサントな材料を通じ或いは電子ビーム存在下で電界か電磁界を通じて一回の通過で、レーザ光線を発生・拡大させたりするスーパーラジアント・レーザにより用いられるプロセス。スーパーラジアンズは、実に誘導放出の - 形態である。スーパーフロレッセンス、又は、増幅された自発の放出としても知られる。</p> <p><b>スーパーラジアント・レーザ</b>：レイサントを一度だけ通過する光線のレーザ。反射鏡はこのレーザの動作を要しない。何故なら、これらは、スーパーラジアント・レーザと区別するために「空洞レーザ」と呼ばれる更に従来のレーザに伴っている。自由電子レーザもスーパーラジアントである。即ち、スーパーラジアント・自由電子レーザのレーザ光線は、電子ビーム存在下で電界か電磁界（レイサントの代わりに）を一回通過する。</p> <p><b>合成開口レーダ (SAR)</b>：衛星軌道か航空機の飛行経路に沿って異なる点で放射される信号のエコーと相関をとるレーダシステム。このシステムにより得られる最高の分解能は、位置を送信するのに用いられる軌道に沿って最も幅広い間隔で置かれたポイント間の寸法をもつ、単独の大型アンテナのものと理論的に等しい。実用上は、レーダの受信機の信号処理能力や、レーダ送信機の送信信号の限られたコヒーレンスにより分解能は制限される。</p> <p><b>サーマルキル</b>：構造要素が破壊する程度までビームエネルギーを用いて加熱により目標を破壊すること。</p> <p><b>脅威</b>：敵の兵器とこれらを使う方法の予想されるリスト。</p> <p><b>追跡</b>：移動目標のコースを監視すること。弾道物体は、幾つかの観測と物理法則を用い防衛システムにより予測される軌跡を有する。</p>
--	---

<p><b>Warhead:</b> A weapon, usually a nuclear weapon, contained in the payload of a missile.</p>	<p><b>弾頭:</b> 通常は核兵器・ミサイルに搭載されている。</p>
<p><b>World-Wide Military Command and Control System (WWMCCS):</b> A communications network linking U.S. forces.</p>	<p><b>世界軍事司令&amp;管制システム (WWMCCS):</b> 米軍を連結するコミュニケーション・ネットワーク。</p>
<p><b>X-ray Laser:</b> A laser which generates a beam or beams of X-rays. Also called an "xraser" or "XRL."</p>	<p><b>X線レーザー:</b> X線の単一ビームか、複数ビームを発生させるレーザー。「Xレーザー」か「XRL」とも呼ばれる。</p>
<p><b>X-rays:</b> Electromagnetic radiation having wavelengths shorter than 10 nanometers (10 billionths of a meter).</p>	<p><b>X線:</b> 10nm (1mの100億分の1)より短い波長をもつ電磁放射。</p>

## APPENDICES 付録

### APPENDIX - 1 Panel Member Biographies

**Philip E. Coyle III** is a Senior Advisor to the President of the Center for Defense Information and defense consultant. He is a recognized expert on U.S. and worldwide military research, development and testing, on operational military matters, and on national security policy and defense spending.

From September 29, 1994, through January 20, 2001, Mr. Coyle was Assistant Secretary of Defense and Director, Operational Test and Evaluation, in the Department of Defense, and is the longest serving Director in the 20 year history of the Office.

Mr. Coyle has 40 years experience in research, development, and testing matters.

From 1959 to 1979, and again from 1981 to 1993, Mr. Coyle worked at the Lawrence Livermore National Laboratory in Livermore, California. From 1987 to 1993, he served as

Laboratory Associate Director and Deputy to the Laboratory Director. In recognition of his 33 years service to the Laboratory and to the University of California, the University named Mr. Coyle Laboratory Associate Director Emeritus.

During the Carter Administration, Mr. Coyle served as Principal Deputy Assistant Secretary for Defense Programs in the Department of Energy (DOE). In this capacity he had oversight responsibility for the nuclear weapons testing programs of the Department.

Mr. Coyle graduated from Dartmouth College with an MS in Mechanical Engineering (1957) and a BA (1956) and has received numerous accolades including the Defense Distinguished Service Medal by Secretary Perry and the Bronze Palm of the Defense Distinguished Service Medal by Secretary Cohen.

**Charles A. Fowler** has a BS in Engineering Physics from the University of Illinois. His work has been primarily in electronics and military systems. He has held management positions at AIL Systems, the Defense Department (DOD), Raytheon and Mitre. He is currently a consultant to government and industry. He is a former member and past Chairman of the Defense Science Board and of the Defense Intelligence Agency (DIA) Advisory Board and a former member of the Air Force Scientific Advisory Board. He is a member of the National Academy of Engineering and a Fellow of the Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), the American Institute of Aeronautics and

Astronautics (AIAA) and the American Association for the Advancement of Science (AAAS).

Among his awards are: the US Electronic Warfare Joint Service Award (1980); the DOD Medal for Distinguished Public Service (1987 and 1997); the DIA Exceptional Civilian Service Medal (1982) and the Director's Award (2001); the 1998 IEEE Pioneer Award (with Entzminger and Kenneally) for early work leading to the US JointSTARS system; and the 2001 Eugene G. Fubini Award for "providing significant contributions to DOD and National Security through outstanding scientific and technical advice."

**Robert A. Frosch** earned a BA from Columbia College in 1947, and a PhD in Physics from Columbia University in 1952. In 1956 he was appointed Director of Hudson Laboratories at Columbia University. In 1963 he became Director for Nuclear Test Detection in the Defense Department's Advanced Research Projects Agency (ARPA). In 1965 he was appointed Deputy Director of ARPA. In 1966 Dr. Frosch was appointed Assistant Secretary of the Navy (Research and Development). In 1973 he became the first Assistant Executive Director for Program of the U.N. Environment Program. In 1975 he became Associate Director for Applied Oceanography at the Woods Hole Oceanographic Institution.

From 1977-1981 Dr. Frosch was Administrator of NASA. During this period, the first space shuttle was built and

ground-tested, and spacecraft projects were begun to investigate Venus with radar imaging, and the universe with x-rays and gamma rays.

In 1981 Dr. Frosch became the first President of the American Association of Engineering Societies. From 1982-1993 he was Vice President of the General Motors Corporation in charge of Research Laboratories. In 1993 he joined the John F. Kennedy School of Government at Harvard University. Dr. Frosch is a fellow or member of a number of engineering and scientific societies. He has been awarded the Navy Distinguished Public Service Award, and the NASA Distinguished Service Medal. He has served as President of Sigma Xi, and is an Honorary Member of Eta Kappa Nu.

**Ivan Kaminow** retired from Bell Labs in 1996 after a 42-year career. He did seminal studies on electrooptic



modulators and materials, Raman scattering in ferroelectrics, integrated optics, semiconductor lasers, birefringent optical fibers, and WDM lightwave networks. Later, as Head of the Photonic Networks and Components Department, he led research on WDM components, and on WDM local and wide area networks. Earlier (1952-1954), he did research on microwave antenna arrays at Hughes Aircraft Company. After retiring from Bell Labs, he served as IEEE Congressional Fellow. He also established Kaminow Lightwave Technology to provide consulting services to technology companies and to law firms. In 1999, he served as Senior Science Advisor to the OSA. He received degrees from Union College (BSEE), UCLA (MSE) and Harvard

**C. Kumar N. Patel** is Professor of Physics and Astronomy, Chemistry, and Electrical Engineering at UCLA. From 1993 to 2000 he was the Vice Chancellor of Research at UCLA. Until March 1993, he was Executive Director, Research, Materials Science, Engineering and Academic Affairs Division at AT&T Bell Laboratories, Murray Hill, New Jersey. He is a member of the National Academy of Sciences (1974) and the National Academy of Engineering (1978). He is a fellow of the American Academy of Arts and Sciences. For his seminal contributions to lasers and quantum electronics (including his invention of the carbon dioxide laser), he has received many awards including the highest

**John L. Remo** has been the principal investigator on numerous research projects involving Quantum Optics as applied to laser resonators (Ph.D. dissertation), optical interferometry and systems design, detectors, materials sciences, high energy density continuous and pulsed (infra-red and visible laser, X-ray, neutron, and very high speed mechanical) interactions with matter, nuclear isomers, space physics, astronomy, planetary physics, meteoritics, risk management, biophysics, alternate energy utilization, and science policy issues. He holds over ten patents in laser design, sensors, and material properties and has also published over 100 refereed papers and book chapters, form

**Ian Roxborough** is Professor of Sociology and History at Stony Brook University. He has a Ph.D. in sociology from the University of Wisconsin-Madison, and has taught at the University of Glasgow and the London School of Economics. In 1997-98 he was Senior Research Fellow at the Institute for National Strategic Studies, National Defense University. His current research, "Diagnosing New Dangers: a sociology of military strategy and threat assessment," is funded by the Carnegie Corporation of New York. It focuses on the

**Lawrence Scheinman** is Distinguished Professor of International Policy at the Monterey Institute of International Studies, Adjunct Professor at Georgetown University, and retired professor from Cornell University where he also served as Director of the Program on Science, Technology

(AM, Ph.D). He has been Visiting Professor at Princeton, Berkeley, Columbia, University of Tokyo, and Kwangju University (Korea). He has written or co-edited 5 books, the most recent being Optical Fiber Telecommunications IV A&B.

Kaminow is a Life Fellow of IEEE, and Fellow of APS and OSA. He is the recipient of the Bell Labs Distinguished MTS Award, IEEE Quantum Electronics Award, OSA Townes Award, IEEE/LEOS/OSA Tyndall Award and IEEE Third Millennium Medal. He is a member of the National Academy of Engineering, Diplomate of the American Board of Laser Surgery, and Fellow of the New York Academy of Medicine.

awards of the Institute of Electrical and Electronic Engineers and the Optical Society of America. He received the National Medal of Science from President of the United States in July 1996. He is the Past President of the American Physical Society (1995) and the Sigma Xi, The Scientific Research Society (1993-1995). He co-chaired (with N. Bloembergen) the American Physical Society Study of the Science and Technology of Directed Energy Weapons. Dr. Patel is a founder and Chairman of the Board of Pranalytica, a sensor instrumentation company. He is a Director of the Newport Corporation

successful technology corporations and consulted to many others as well as to the National Laboratories, components of the Departments of Energy and Defense and NASA. In addition he has worked with the United Nations Office of Outer Space Affairs and has addressed the U.N. General Assembly Committee on the Peaceful Uses of Outer Space (COPUOUS) on the issue of hazards from Near-Earth objects. He has taught several undergraduate and graduate course and has supervised several graduate dissertations. Dr. Remo has received numerous honors and awards in recognition of his achievements.

organizational and conceptual underpinnings of U.S. military strategy and doctrine. The author of three books and numerous articles, he has published his work on military strategy in Joint Force Quarterly, the Army War College's Strategic Studies Institute monograph series, International Sociology, and elsewhere. Professor Roxborough is currently writing a book on U.S. military strategy since the end of the Cold War.

and Society and as Assistant Director and Director of the Peace Studies Program. He was the Assistant Director of the U.S. Arms Control and Disarmament Agency during the Clinton Administration, responsible for NonProliferation and Regional Arms Control and during the Carter Administration

was Principal Deputy to the Deputy Under Secretary of State for International Security, Science and Technology. In the mid 1980s he served as Senior Advisor on proliferation and arms control to the Director General of the International Atomic Energy Agency. He has written extensively on

**Leonard Weiss**, Chair, is a private consultant specializing in analysis and development of public policy issues involving technology and national security. He is a former staff director of the U.S. Senate Committee on Governmental Affairs, where, for more than two decades, he crafted and directed legislative and oversight activities involving nuclear

**Ray A. Williamson** is Research Professor of Space Policy and International Affairs in the Space Policy Institute of The George Washington University, where, among other research, he currently directs the Project on Socioeconomic Benefits of Earth Science Research. He is co-investigator of the project, "Transatlantic Defense Relations: Is There a C4ISR Technology Gap?" Previously he was a Senior Associate in the Office of Technology Assessment of the U.S. Congress, where he was project director for more than a dozen major reports on space transportation development and management policies, Earth observations, and space exploration. He is editor, with John C. Baker and Kevin

**Jill Wittels** is Corporate Vice President, Business Development for L-3 Communications, a leading merchant supplier of Intelligence, Surveillance and Reconnaissance systems and products, secure communications systems and products, avionics and ocean products, training devices and services, microwave components and telemetry, instrumentations, space and navigation products. Dr. Wittels has over 25 years of management, engineering and leadership experience. She worked for 21 years with BAE Systems and its predecessor companies, including Lockheed Martin, Loral and Honeywell. Most recently, she served as vice president and general manager of BAE Systems' Information and Electronic Warfare Systems/Infrared and

### Staff Biographies

**Subrata Ghoshroy** served as the Executive Director of the FAS Space Weapons Project while also serving as a Senior Research Associate at Harvard University's John F. Kennedy School of Government. Mr. Ghoshroy's research involves missile defense, space weaponization, and security issues in South Asia. Previously, he was a Congressional Science and Engineering Fellow with the House International Relations Committee. Later he served as a Professional Staff Member of the House Armed Services Committee.

Before moving to the policy and legislative world, Mr. Ghoshroy had worked for nearly twenty years in defense research and development specializing among others in high

**Josh Kellar** is a research associate with the Federation of

nonproliferation, arms control and international aspects of technology. Dr. Scheinman is a member of the Council on Foreign Relations and is admitted to practice before the Bar of the State of New York.

nonproliferation, energy policy, government management, and science and technology. He has held tenured professorships in Applied Mathematics and Engineering at Brown University and the University of Maryland, and has a Ph.D. from Johns Hopkins University.

O'Connell, of Commercial Observation Satellites: At the Leading Edge of Global Transparency (Washington, DC: RAND and ASPRS, April 2001), editor of Dual-Purpose Space Technologies: Opportunities and Challenges for U.S. Policymaking (Washington, DC: Space Policy Institute, July 2001), and co-editor of Space and Military Power in East Asia (Washington, DC: Space Policy Institute, December 2001). He is also the author or editor of seven books on archaeology, historic preservation, and American Indian astronomy, culture, including *Living the Sky: The Cosmos of the American Indian*.

Imaging Systems division. Dr. Wittels began her career as a systems engineer and has also served as a Congressional Fellow for the American Physical Society, a research associate at Massachusetts Institute of Technology and a senior visiting scientist for the National Academy of Sciences. Dr. Wittels received a Bachelor of Science degree in Physics from MIT in 1970 and received a PhD in Physics from MIT in 1975. She serves on the Board of Overseers for the Department of Energy's Fermi National Accelerator Lab, is a member of the American Physical Society and a member of the American Astronomical Society. Dr. Wittels presently serves on the Boards of Directors of Innovative Micro Technology Inc and eMagin Inc.

power lasers, pulse power systems, and alternative energy resources. Ghoshroy holds B.S. and M.S. degrees in electrical engineering and an MS in Public Policy. He has published technical articles in his discipline, arms control and on South Asia.

He is a Senior Defense Analyst at the United States General Accounting Office and worked on the space weapons project during a yearlong sabbatical. Prior to that, he served as the technical leader of the GAO team that investigated the results of a flight test in the National Missile Defense program, which found that the infrared sensor had malfunctioned.

American Scientists. He has a B.S. from Georgetown

University where he majored in physics and English, an MA in creative writing from Boston University, and will be a PhD candidate in materials science & engineering at

Northwestern University in the fall where he will study nanotechnology

**Heidi La Bash** received a B.S. in Journalism from the University of Kansas and now works in the Security Studies Program at the Massachusetts Institute of Technology. Research interests include Post Traumatic Stress Disorder in

women, and especially women in the military. Building on her experience working abroad in Japan and as a media analyst, she plans to continue her studies and pursue her research interests in a clinical psychology graduate program.

## **APPENDIX - 2 Summary of Briefings**

December 18, 2002:

**Dick Garwin**, Council on Foreign Relations, Direct Space Weapons; Bob Preston, RAND, Summary of Space Weapons, Earth Wars; Peter Hays, Joint Forces Quarterly, Overview of Space Weaponization Stances; Michael Krepon, Stimson Center, International Ramifications; Jeffrey Lewis,

University of Maryland, Budgetary Information on Space Weapons; Laura Grego, Union of Concerned Scientists, Tracking Satellites; Richard DalBello, Satellite Industry Association, Industry View on Space Weaponization. February 20, 2003:

**Randy Correll**, SAIC, Space Weapons and National Security Strategies; Dan Hastings, former Chief Scientist USAF, MIT, USAF Perspective; John Remo, Harvard Center

for Astrophysics, Preliminary Debris Findings. April 17, 2003:

**John Remo**, Harvard Center for Astrophysics, Continuation of Debris Findings; Qiu Young, MIT, ASAT capabilities of Brilliant Pebbles-Type System; Pavel Podvig, Princeton,

Capabilities of Small Satellites. July 10, 2003, Boston MA:

**Bob Naka**, former director NRO, Reconnaissance Issues in Space John Remo, Harvard Center for Astrophysics, Orbital Debris; Dennis Papadopoulos, University of Maryland, Effects of HANE; David Wright, Union of Concerned

Scientists, North Korean Missile Capabilities; Pavel Podvig, Princeton University, Russian ASAT capabilities; Geoffrey Forden, MIT, GPS Coverage and Robustness. January 27, 2004

Review of Preliminary Draft - Comments from Panelists

## APPENDIX A

### Issues in Space Dr. Daniel Hastings

Chair of the Air Force Scientific Advisory Board  
Talk to the Federation of American Scientists  
20th Feb 2003

It is a pleasure to be able to address this group. The Air Force has a good, coherent view of air power and its use and is working hard to bring the same level of intellectual understanding for space power and its use. These underpinnings were essential in order to properly discuss the architectures and systems necessary to fight and win conflicts of the 21st Century.

Space will continue to be the proverbial high ground for the foreseeable future.

Desert Storm and Allied Force and operations in Afghanistan showed that space assets integrated with air, ground, and sea assets can play a critical role as force enhancers in fighting and winning conflict (who would have thought of B-52s using bombs like bullets? As Gen. Myers pointed out, this is enabled by space assets.) Control of space and access to it are fundamental to economic and military security and underpin the national military strategy as directed towards JV2020. The US now depends critically on space assets and this is apparent to any adversary.

This national military strategy relies on information dominance. Information dominance means that a smaller number of assets can be forward deployed and be effective through reaching back to rear based sources of information. This trend is increasing in the use of military forces. In Desert Storm, the total bandwidth required was 100 Mbps while by Allied Force, which deployed only 10% of the Desert Storm forces; the bandwidth required of these forces was 250 Mbps. This increased bandwidth was provided largely by commercial geosynchronous satellite communications (over 75% by the end of Allied Force). In addition, currently, just one Global Hawk, which provides tremendous ISR capabilities to US forces, requires 50 Mbps, all of which is provided by commercial space communications. Thus, the US military has already placed itself in the position of being critically dependent on access to long haul communication assets. Commercial space assets have thus become key enablers for the national military strategy.

(後略)



## APPENDIX B

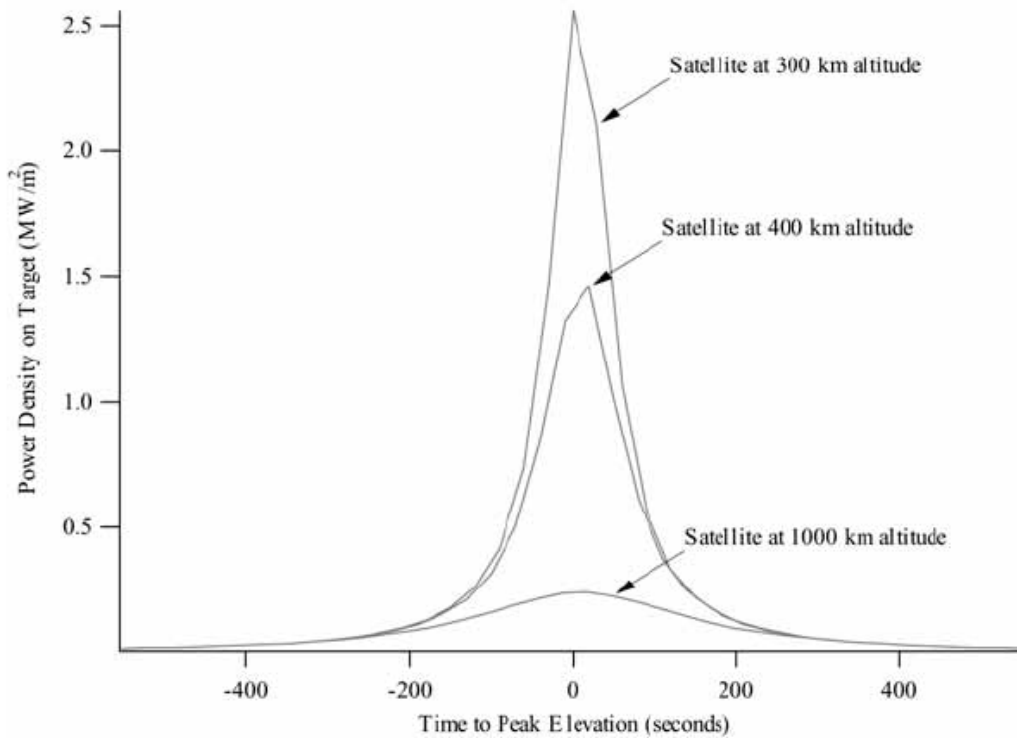
### Anti-satellite Weapons

#### Geoffrey Forden

#### Laser Attacks against Satellites

In the past, both the United States and Russia have considered using lasers in missile defense systems. Such systems, if they were actually completed, have an inherent capability against satellites in low Earth orbit. In fact, the United States tested at least the aiming capability of a ground-based laser system against a satellite and there have been media reports that China is interested in using a laser system in an anti-satellite mode. It is straightforward to

calculate the power delivered to a satellite as it passes a ground-based laser. The graph below shows the power delivered to satellites, assuming a three megawatt laser focused on the satellite using a mirror one meter in diameter. Figure 1. The power density delivered to a satellite as it transits over a ground based laser for various orbital altitudes. The orbital motion limits the time the satellite is visible and changes the range of the laser, and hence the power delivered.



(後略)

## APPENDIX C

### SATELLITE THREAT DUE TO HIGH-ALTITUDE NUCLEAR DETONATIONS

**DENNIS PAPADOPOULOS**  
UNIVERSITY OF MARYLAND  
PRESENTATION TO THE FAS SPACE PANEL  
JULY 10, 2003  
HARVARD UNIVERSITY  
CAMBRIDGE, MASSACHUSETTS

#### How Could It Happen?

- Collateral damage from regional nuclear war or TMD/NMD intercept:
  - Nuclear warning shot in a regional conflict;
  - Effort to damage adversary forces/infrastructure with electromagnetic pulse;
  - Detonation of salvage -fused warhead upon exoatmospheric intercept attempt.
  
- Deliberate effort to cause economic damage with lower likelihood of nuclear retaliation:
  - By rogue state facing economic strangulation or imminent military defeat;
  - Pose economic threat to the industrial world without causing human casualties or visible damage to economic infrastructure.

From HALEOS Study

(後略)

## APPENDIX D

### Sensitivity of GPS Coverage to Loss of One or More Satellites

Geoffrey Forden

Navigation satellites have become an immensely important asset to the United States military. Not only do U.S. ships, aircraft, and land forces use them extensively to determine position, U.S. "smart bombs"-an increasingly important aspect of U.S. power projection policy-rely on them to precisely hit both strategic and tactical targets in urban centers. If a foreign power were to eliminate this space asset, it could cause significant problems for our forces. The GPS/NAVSTAR constellation is, however, very robust both because of the altitude (roughly 20,000 km, high enough that it takes twelve hours for each satellite to complete one orbit) and the large number of satellites used, a total of 24.

This is illustrated in the figure below, which shows a snapshot of the GPS/NAVSTAR coverage over Beijing, China. The second figure below shows how many navigation satellites are visible from Beijing during a 24 hour period the time it takes both the satellite constellation and the Earth to return to the same alignment. It takes a minimum of four satellites in view of a GPS receiver, such as one in a JDAM2

equipped bomb, to determine the user's position. Of course, the accuracy of the position-determination increases if more satellites can be used and the accuracy also depends on the geometry of the satellites at the time; the optimum geometry has at least three satellites spread evenly along the horizon and the fourth directly overhead. Nevertheless, as the figure shows, an adversary can destroy a significant number of satellites and the United States would still have full coverage for a significant fraction of the day. In fact, if six satellites are destroyed the coverage only drops below the minimum number of four visible for roughly two hours. (These six satellites were not chosen randomly but were, in fact, chosen because their elimination would be the most effective at removing GPS/NAVSTAR coverage over Beijing.) The final report will include an analysis of how much the system's accuracy is degraded over those periods when the number of satellites is four or more but less than the standard constellation.

(後略)

**Orbital Debris Effects from Space-Based Ballistic Missile Interception**

John L. Remo 11/7/03  
 Quantum Resonance Inc.  
 1 Brackenwood Path.  
 Head of the Harbor, St. James, NY 11780

**Abstract:** Effects of natural(meteoroid), manufactured, and missile interception orbital debris(OD) on satellite assets are quantitatively assessed. Enhanced levels of OD generated from either ground- or space-based interceptors are not likely to significantly affect space based (satellite) assets if the OD generated from ballistic missile warhead interception is limited in mass and transit time and is essentially sub-orbital debris. The primary, low-level, threat to space based weapons and satellites appears to originate from background natural (meteoroids) and OD from previous space missions.

**1.Introduction**

Development of space-based interceptor (SBI) weapons in low Earth orbit (LEO) using mechanical impact kinetic kill vehicles(KKVs) to destroy ballistic missile warheads (BMWs) will generate debris fragments. There is concern regarding the potentially deleterious of this debris on existing satellites and SBI platforms. In addition to the potential hazard from SBI impact on BMWs are impact effects from long-term exposure to background (man-made) orbital debris(OD) and meteoroid collisions. To address these concerns geometrically based calculations estimating collisions from long-term OD and meteoroid exposure in the LEO environment as well as short term effects from SBI launched KKVs impact-generated transient sub-orbital debris(SOD) eject on satellites and SBI platforms are presented. Conclusions are drawn regarding the viability for exercising options to deploy and effectively use SBIs for post-boost phase and mid-course interception in terms of background meteoroid and OD and transient SOD effects.

**2.Assumption and Caveats**

Very high speed impact phenomenology is an extremely complex subject due primarily to the high kinetic energy interaction of several materials properties parameters in a nonlinear manner. To achieve tractable analytic

**宇宙配置大陸間弾道ミサイルの迎撃によるデブリ)の影響**

John L. Remo 2003年7月11日  
 Quantum Resonance Inc.  
 1 Brackenwood Path,  
 Head of the Harbor, St.James, NY 11780

**要旨:** 自然(流星) 人造、そしてミサイル迎撃衛星の残物の軌道上の軌道屑(以下デブリ という)の衛星資産への影響を量的に推定した。

地上または宇宙配置の迎撃物から生成された高レベルのデブリは、もし大陸間弾道ミサイル戦闘迎撃から生成されたデブリが量的に、また通過時間においてそれ程でなく、かつ軌道に乗らない屑である限りは、宇宙配置(衛星)資産に特に影響を与えそうにない。宇宙配置の武器や衛星への主要な、低レベルの脅威は、むしろバックグラウンド自然物(流星)とそれ以前の宇宙作戦からのデブリを源とするようである。

**1.はじめに**

大陸間弾道弾を破壊するための、機械的衝突撃墜弾(KKVs、以下、撃墜弾という)を使用した低地球軌道の宇宙配置迎撃兵器(SBI、以下、宇宙迎撃兵器)の開発は、デブリの破片を生成する。既存の衛星や宇宙配置迎撃兵器プラットフォームに対してこのデブリが潜在的に有害であるという危惧がある。宇宙迎撃兵器による潜在的なハザードに加えて、大陸間弾道弾へは、バックグラウンド(人工)デブリと流星の衝突への長期の露出による衝突効果がある。このような危惧を解明するために、幾何学的な考え方に基づく計算により、長期のデブリや低軌道環境における流星体への露出、ならびに短期の撃墜弾の衝突により衛星や宇宙迎撃兵器プラットフォームへ射出された一時的な低軌道屑(SOD、以下低高度デブリ)の衛星や宇宙迎撃兵器への影響が示された。

また、推進終了後の段階、あるいは中間軌道迎撃において、バックグラウンド流星体とデブリの一時的な低高度デブリ効果に関して、展開・配備する場合の選択肢の効果的な実行に関する結論が導かれた。

**2.仮定と注意事項**

超高速衝突現象論は非常に複雑なテーマで



approaches to estimate collision rates and hit probabilities on assets in LEO, assumptions regarding distributed (normative) responses of materials as described by the equations of state, energy transport under very high loading (strain) rates, and energy partitions into solid and vapor (plasma) phases must be made. Approaches to this problem have a long history in the twentieth century with substantial inroads. Further experimental work combined with (hydrocode) computer modeling and analysis is expected to make this problem more tractable.

Another uncertainty lies in accurately and reliably determining the background OD and meteoroid fluxes and their properties. Observational data regarding OD and meteoroid fluxes are uncertain over long time periods and are difficult above 1,100 km altitude. OD can be locally inhomogeneous and background meteoroid fluxes are regularly subjected to substantial intensity variations, i.e. meteoroid showers. While some of the observational uncertainties can be contained within a reasonable error range, transient effects such as intense meteoroid storms, disastrous impacts into a space station, or cataclysmic interaction with a close approaching near-Earth object can significantly alter the collision calculus. Calculations carried out in this work assume fluxes to be the long-term measured background that, unless otherwise specified, are uniformly distributed in LEO, as are satellites and SBI platforms. Density variations within LEO, impact velocity dispersions, latitude effects, inclination, variation with solar activity, and other considerations which affect density distributions are not taken into account. But non-uniform effects can be incorporated into the analytical framework as needed.

This report makes no assumptions regarding technical feasibility or operational effectiveness of SBIs as counters to perceived ballistic missile(BM) threats within the foreseeable future. Assumptions regarding SBI mass, flyout and divert velocities, lifejacket and guidance components, range, and other technical parameters are made only to carry through computations and are purely hypothetical and are not based on detailed design studies. Performance characteristics used in this computational study are not intended in any way to verify or even suggest the existence of such weapons or to support or encourage their construction, deployment, or use. It should be understood that deployment of SBIs under any circumstances is a geopolitically charged action that will

ある。それは、主として非線形のいくつかの材料の性質のパラメータの高運動エネルギー 相互作用によるからである。そして、低軌道上の物体に対する衝突率とヒット確率を推定するために、取り扱いやすい解析的アプローチを行なうためには、状態方程式によって記述された材料の反応（正規的）分布、非常に高負荷（負担）状況でのエネルギー運搬、固体と蒸気（プラズマ）過程へのエネルギー分離についての仮定がなされなければならない。この問題へのアプローチは、20世紀から、十分に長く研究されている歴史がある。この問題をより戦術的なものとするためには、（ハイドロコード）コンピュータモデル構築と解析と組み合わせられた、さらなる実験的研究が期待される。

他の非確定要素としては、バックグラウンドデブリ、流星流動、そしてそれらの性質の正確なかつ信頼のおける説明において存在する。デブリや流星流動の観測データは、長期間においては不確定であり、高度 1,100km 以上においては観測が困難である。デブリは、地域的に不均一であり、バックグラウンド流星流動は、定期的かつ本質的に、すなわち流星シャワーにより、その強度が変化する。いくらかの観測上の不正確さが、理にかなった誤差範囲で含まれているとして、集中的な流星嵐、スペースステーションへの災害的な衝突、また地球近傍物体の超接近による大影響のような短時間の影響は、衝突計算に大きな変化を与える。この作業で行われる計算においては、流動は、特定されない限りは、衛星や宇宙迎撃兵器のプラットフォームのように、宇宙の低高度軌道において一定に分布しているとして長期に測定されたバックグラウンドを仮定する。低高度軌道内の密度変化、衝突速度分散、姿勢効果、傾き、太陽活動の変化、そして他の要件という密度分布に影響する要素は考慮されていない。しかし、非定質の効果は必要に応じて解析体系の中に導入できる。

この報告書では、予想できる未来における感知した大陸間弾道ミサイル（BM）の脅威に対する迎撃としての宇宙迎撃兵器の技術的な可能性や実施上の効果については何の仮定もしていない。宇宙迎撃兵器の大きさ、飛来・離飛速度、ライフジャケットとガイダンス要素、到達距離、そして他の技術的なパラメータに関する仮定は、単純に計算を通して仮定的であり、詳細な設計研究に基づくものではない。この計算研究において使われた性能は、このような兵器を証明したり、いわんやその存在を示唆すること、またそのような兵器の開発、

significantly influence both national and international security policies. As such these actions can have unpredictable outcomes that may thwart the initial security objectives sought through emplacement of SBIs. Here technology could lead policy to an uncertain outcome. Non-proliferation and verifiable arms reduction combined with social justice in open and democratic societies are the keys to international security and world peace.

### 3. Background

Artificial space debris objects known as OD are derived from and include nonfunctional spacecraft, spent rocket bodies, discarded mission related objects, collision and explosion fragments from spacecraft and rocket bodies generated from processes either while achieving or during orbit. Most Orbital debris is confined to two regions of near-Earth space; LEO and geostationary orbit(GEO)(National Research Council 1995). Currently (August, 2003) there are - 9,000 catalogued objects in Earth orbit. The total number of tracked objects is 13,000(Johnson 2003). Because OD are fragments from objects whose orbits were dynamically designed to enter in an Earth orbit, OD orbit Earth and remain there until atmospheric drag or some other weaker perturbing force causes their orbits to decay into Earth's atmosphere. Since atmospheric drag is the principal mechanism for OD removal, debris on orbit above 600 km, where the atmosphere is tenuous, can remain there for tens, thousands, or even millions of years. OD above 600 km altitude are affected by solar-radiation pressure and solar-lunar gravitation perturbations. OD particles are subjected to a central (gravitational) force, traveling in elliptical orbits with higher velocities at perigee and lower velocity at apogee.

OD with highly eccentric orbits will travel through the upper reaches of Earth's atmosphere (their perigee) at very high velocities and be rapidly de-orbited by drag effects. While traveling slowly far above the atmosphere, they encounter negligible drag. However, in 2002 a piece of OD - 20-50cm in an eccentric orbit came off and old satellite at an altitude of 1370 km and decayed in only six weeks (Johnson 2003). Because of their large cumulative number, longevity, location, and potentially high impact velocities, the major hazard posed by OD is to spacecraft operations. The current hazard to most space activities is thought to be low especially above LEO. However, developing on non-warfare growth rates in commercial

配置、使用を支持したり奨励することを意図していない。いかなる状況下においても、宇宙迎撃兵器の展開は、国内・国際の両方のセキュリティ政策に大きく影響する地誌的問題を提示する行動であることを理解するべきである。このような行動は、宇宙迎撃兵器の非配置が目的とした初期のセキュリティ上の目的を妨げる、予測できない結果をもたらすかもしれない。このような技術が、政策を不確定な結果へと導く可能性がある。オープンかつ民主的な社会における社会的正義と組み合わせられた、非拡散かつ立証可能な兵器削減が、国際的なセキュリティと世界平和への鍵である。

### 3 . バックグラウンド

デブリとして知られている人工的な宇宙屑の物体は、機能していない宇宙船、使用済みロケット本体、処分された作戦関連物体、稼動中のまたは軌道運行中の活動から生成された宇宙船、ロケット本体からの衝突や爆発による破片などである。ほとんどのデブリは、近地球宇宙空間の2つの領域に限定される。すなわち、低軌道と静止衛星軌道(GEO)である(National Research Council 1995)。現在(2003年8月)軌道には9,000の登録された物体がある。追跡されている物体の数は、13,000である(Johnsonの2003年の論文による)。デブリは、その軌道が地球軌道にダイナミックに入るように設計された軌道体からの破片であることから、地球を周遊するとともに、大気抗力や地球の大気圏に突入させるような他の弱い乱れ力が働き軌道を失なうまでは軌道に留まる。大気の抗力は、デブリを除去する上での主要な仕組みであることから、大気が希薄である600km以上の軌道上のデブリは、何十、何百年、場合によっては何百年もそこに留まる。高度600km以上の軌道上のデブリは、求心(重力)力や楕円軌道での飛行速度(近地点においてはより速く、遠地点においてはより低速)の影響を受ける。高偏心の軌道のデブリは、地球大気の最高部を(近地点において)非常に高速度で通過し、その時の抗力効果によって急速に軌道を外れるであろう。一方、大気のはるか上方をゆっくり周遊する時は、大気の抗力は無視できる程度のものである。しかしながら、2002年において、偏心軌道の20-50cmの1つのデブリが離脱し、高度1370kmの古い衛星がたったの6週間で腐朽している。(Johnson 2003による) デブリのこれまでの蓄積量の大きさ、長命性、位置、そして高速度の衝突の可能性から、デブリによって引き起こされる主たるハザードは宇宙船の運用

and military satellites the OD level may increase to the extent that it could threaten to make some important orbital regions (primarily GEO) hazardous to space operations. About 70-80% of OD lie within 250 to 400 km and have velocities - 9 km/s. A rough estimate of the LEO OD population in terms of size and mass is provided in Table 1.

OD Size(cm)	Number	%OD	%Mass
>10	8,000	0.02	99.93
1 - 10	110,000	0.31	0.035
0.1 - 1	35,000,000	99.67	0.035

Table 1. Estimated OD Population (Interagency Rept., 1995).

Cataloged objectives make up - 99% of the OD mass. Haystack detections are - 600 - 1,600 km and radar cut-off at - 0.6 cm. Estimated LEO averaged background collision cross-section for 1 cm,  $\sigma_{1cm} \approx 4 \times 10^{-5} / y \cdot m^2$ . Since LEO extends well above 1,000 km the Haystack numbers at higher altitudes may be too low (~2x) because of radar resolution limits. For 0.5 cm particles,  $\sigma_{0.5cm} \approx 10^{-4} / y \cdot m^2$ , but may be higher. For  $OD \geq 0.1cm$  ( $\sigma_{0.1cm} \approx 8 \times 10^4 / y \cdot m^2$ ), structural damage and space erosion may become an important factor.

Since LEO extends well above 1,000 km the Haystack numbers at higher altitudes may be too low (~2x) because of radar resolution limits. For 0.5 cm particles,  $\sigma_{0.5cm} \approx 10^{-4} / y \cdot m^2$ , but may be higher. For  $OD \geq 0.1cm$  ( $\sigma_{0.1cm} \approx 8 \times 10^4 / y \cdot m^2$ ), structural damage and space erosion may become an important factor.

においてである。今日のほとんどの宇宙活動においてハザード発生の可能性は、特に、低軌道においては低いと考えられる。しかしながら、非戦闘用の商用および軍用の衛星の増加により、デブリがいくつかの重要な軌道域（主として静止衛星軌道）において宇宙活動のハザードとなるレベルになるかもしれない。約 70~80%のデブリは 250km から 400km の高度に存在し、その速度は約 9km/s である。低軌道の概略の推定値として、デブリの体積と量は表 1 に示すとおりである。

表 1 デブリ数量の推定値 (1995 年省庁間報告)

デブリサイズ (cm)	数量	%デブリ	%体積
>10	8,000	0.02	99.93
1 - 10	110,000	0.31	0.035
0.1 - 1	35,000,000	99.67	0.035

カタログに登録された対象は、デブリ体積の 99% を占める。ヘイスタックレーダによる検出性能は、高度 600-1,600km、約 0.6cm のレーダカットオフである。レーダカットオフ 1cm の低軌道の平均的バックグラウンド衝突断面は、 $\sigma_{1cm} \approx 4 \times 10^{-5} / y \cdot m^2$  である。低軌道は、高度 1,000km はるか上方に広がっていることから、高高度におけるヘイスタック数は、レーダ解像度の制限からたぶん非常に低い（約 2 倍）。0.5cm の分子については、 $\sigma_{0.5cm} \approx 10^{-4} / y \cdot m^2$  であるが、それは、もっと高いのではないかと思われる。大きさが 0.1cm ( $\sigma_{0.1cm} \approx 8 \times 10^4 / y \cdot m^2$ ) 以上のデブリについては、構造への被害や宇宙浸食が重要な要素となるであろう。



#### 4. Low Earth orbit region

The current international definition of LEO is that region within 2,000 km of Earth's surface where OD speeds are ~3-15 km/s. The U.S. Department of Defense sometimes uses an older definition of 5,875 km, equivalent to <225 minute period. The orbital period at an altitude of 2,000 km is ~127 minutes. The volume of LEO is usually taken as that of the whole sphere between given latitudes, i.e. a spherical symmetrical shell. Post boost and mid-phase interception of BMWs for the most part will occur in LEO objects radars provide the most sensitive method of detection and size estimation. Because radar intensity echo diminishes to the fourth power of the distance(altitude), very strong pulses are required for high altitude OD detection. The Haystack radar can see objects as small as 0.5 cm but only at a very low altitude, ~500 km.

At 1,000 km the sensitivity is probably closer to 1.0 cm and at 1,600 km the sensitivity is even less. For small debris detection operations the maximum range of Haystack ~ 2,000 km(Johnson 2003). The limiting diameters which the Haystack radar can detect depends on the type of reflecting material as well as their distance. The detection limit of the Goldstone bi-static radar operations is estimated to be about 2-3 mm. Because the radar assets are limited these measurements are only regional snapshots. From direct impact measurements of recovered areas exposed in space a very large number of OD particles - 0.01 to 0.001 cm in size were found from chemical analysis on the LDEF(Long Duration Exposed Flight) satellite panels which never achieved an altitude above 480 km. The overwhelming majority of (large) objects tracked as of Nov.1, 1995 had - 5747 cataloged objects including the International Space Station (ISS). The peak population is ~1,000 km. LEO has an average flux of material >1 cm in size  $\sim 4 \times 10^{-5}$  particles/m<sup>2</sup>/y (Johnson et al 2002) and peaked ~800 to 1,000 km. At ~1,500 km the OD travels at 7-8 km/s with widely varying inclinations. Skimming velocity atop Earth's atmosphere is ~ 7 km/s at 2,000 km. Theoretically, collision velocities in LEO can vary from 0-15 km/s. However, when discussing total population numbers for very small objects one refers to the fluxes at specific altitudes and/or inclinations rather than a generalized region. For example, the flux of 100 micron particles in the ISS orbit, normally held

#### 4 . 低軌道域

今日の低軌道の国際的な定義は、デブリの速度が約 3-5 km/s である地表から 2,000km の範囲としている。米国国防省では、ときには、5,875km、すなわち 225 分以下の周期に相当する領域という古い定義を使うこともある。2,000km の高度の軌道周期は約 127 分である。低軌道の体積は、与えられた範囲全体の領域、すなわち球の対象的殻 (shell) をいう。大陸間弾道兵器の発射後、そして中間段階での迎撃は、ほとんどの場合、低地球軌道における目標に対して発生し、レーダがその探知と大きさ推定の方法を提供する。レーダエコー強度は、距離 (高度) の 4 乗で減少するので、高高度のデブリ探知のためには非常に強いパルスを必要とする。ヘイスタックレーダは、0.5cm 程度までの小さな目標を探知できるが、約 500km までという低高度の対象に対してのみである。高度 1,000km においては、感度は大きさ 1.0cm に近いもので、高度 1,600km では、感度はそれ以下である。小さなデブリの探知作戦におけるヘイスタックレーダの最大探知範囲は、高々 2,000km までである (Johnson 2003)。ヘイスタックレーダが探知できるデブリの径の限度は、対象物の反射材料とその距離による。ゴールドストーン複数静的レーダ作戦の探知限界は、約 2-3mm と推定される。レーダ装置の配備は限定されるので、これらの測定は、地域的なスナップショットに過ぎない。宇宙におけるその他の区域の直接衝突測定からは、非常に多数の 0.01 - 0.001cm の大きさのデブリ分子が、LDEF (長期間露出飛行) の衛星パネルの化学的分析から発見された。しかし、このような測定は、480km 以上の高度では一度も行われていない。1995 年 11 月 1 日の時点において探知された (大きな) 対象物としては、国際宇宙ステーション (ISS) を含めて、5747 個が登録されている。最もデブリの存在頻度の高いのは約 1,000km の高度である。低軌道は、大きさ 1cm 以上では、約  $4 \times 10^{-5}$  分子/m<sup>2</sup>/y が平均であり、そのピークは高度 800 から 1,000km で認められる (Johnson 等、2002)。高度 1,500km ではデブリは、さまざまな軌道傾度で、速度 7-8 km/s で飛行する。地球の大気頂をかすめる速度は、高度 2,000km では約 7 km/s である。理論的には、低軌道における衝突速度は、0-15 km/s で変動する可能性がある。しかしながら、非常に小さな対象の総数について議論する場合には、一般化された領域についてというよりも、特定の高度や軌道傾度における流動を対象とする。例えば、通常 350km と 400km の間の国際宇宙ステーション軌道における 100 ミクロン分子の流動



between 350 and 400 km, is  $\sim 19/\text{m}^2/\text{y}$  (Johnson 2003). Because many of these particles have highly elliptical orbits discussion of total populations is less useful than assessing fluxes in specific orbits.

It has been suggested that in near-Earth space one must be concerned with OD accumulation and perhaps localized chain reaction effects. But, there has not been any convincing evidence or models to support this conclusion. Computational results suggest BMW trajectories that either skim the upper reaches of the Earth's atmosphere or pericenter deeper into LEO and explode or collide with a SBI can indeed generate a considerable amount of transient SOD within a volume swept out along the axis of BMW center of mass trajectory. It is shown that a self-sustaining chain reaction is highly unlikely even if numerous break-ups occur because LEO is so large and fragment debris volumes are relatively small and transient, e.g.  $<2,000\text{s}$ . SOD fragments have minimal short-term and virtually no long term effects. A very small number of fragments may achieve true OD status. If several break-ups occur in the narrow band satellites occupy along exact GEO or GPS orbits results could be different.

The ubiquity of OD in LEO is underscored by pitting and micro-cratering on spacecraft surfaces recovered from lower regions of LEO,  $\leq 600\text{ km}$ . After six years of continual exposure, 32,000 impact craters large enough to be visible to the naked eye were found on the LDEF panels, the largest of which was 0.5 cm in diameter. Subsequent analysis indicated that  $\sim 1/2$  of the larger craters were of OD origin and  $\sim 1/2$  were thought to be caused by meteoroids. These results are supported by observations of pitting on the U.S. space shuttle and Salyut and Mir space stations. Other spacecraft that had their surfaces marred by OD include the Solar maximum Mission (Solar Max). Nonetheless, uncertainty remains regarding intensity levels and particles size distributions of OD flux as a function of altitude above Earth. The US Air Force (USAF) Space Command (Colorado Springs), whose primary role is to monitor US space assets and ICBM activities uses  $\sim 30$  radar and optical sensors to track  $\sim 10,000$  OD objects, and maintains a catalog of tracked OD. Although this facility provides close approach determination and warnings for a few high-risk satellites, their systems would have to be substantially

は、 $19/\text{m}^2/\text{y}$  である (Johnson 2003)。これらの分子の多くは高楕円軌道を有するので、総数の議論は、特定の軌道における変動を評価するのに比してそれほど有用ではない。

近地球宇宙においては、デブリの増加、そして、たぶん偏在連結反応効果について注意をすべきであることがこれまでに示唆されている。しかし、これに関しては何らの説得性のある証拠またはその結論を裏付けるモデルはまだない。計算結果によると、地球大気の頂点をかすめるか低軌道に深く侵入し、宇宙迎撃兵器と衝突や爆発をする弾道軌道兵器は、弾道弾の軌道中心に沿って吹き飛ばされ実に膨大な量の短命の低高度デブリを生成する。低軌道の範囲は非常に大きいこと、分解したデブリの体積は比較的小さく短命、例えば 2,000 秒より小さい、であることから、自己維持連結反応は、もし幾つもの破裂が起きたとしてもほとんど起こりそうに無いことが示された。低高度デブリ分解物は、最小短期間であり、実質長期の影響はない。極めて少数の分解物は、真のデブリ状態を形作るかもしれない。もし、いくつかの破裂が、丁度狭帯域の衛星の静止衛星軌道または GPS の軌道にそって発生したとすると結果は違ってくる。

低軌道におけるデブリの遍在性については、600km 以下という低地球軌道の低高度の範囲から回収された宇宙船の表面における穿孔や微小クレータの発生状況から注目される。6 年間の連続的な露出の後、裸眼で可視可能な十分な大きさの、最大のもは直径 0.5cm の、32,000 の衝突クレータが LDEF パネルの上に認められた。より詳細に分析したところ、半数の大きい方のクレータはデブリに起因するもので、他の半分は流星に起因するものと考えられた。このような結果は、米国のスペースシャトル、ソユーズとミール宇宙ステーションにおける穿孔の観測によっても証明された。デブリによってその表面が傷つけられた宇宙船としては、ソーラー・マクシマム・ミッションがある。それにもかかわらず、地球上の高度の関数としてのデブリ流動の強度水準や分子の大きさの分布については未確定の部分がある。米国製の宇宙装置や弾道弾作戦のモニターを主たる役割とする米国空軍宇宙部隊(コロラドスプリング)は、約 10,000 のデブリ物体をモニターし、探知されたデブリの登録をするために約 30 のレーダと光学的センサを使用する。これは、多くの高リスク衛星への近接状況の監視や警戒を提供するためのものであるが、それらのシステムは、弾道ミサイルの宇宙配備兵器からの破片をまっとう管理

augmented (phased array and visible sensor upgrades) to manage the large number of fragments from SBI of ICBMs. A difference between the USAF and NASA approaches to OD is that the USAF considers OD to be significant if it is trackable while NASA considers smaller OD (often non-trackable) objects in its assessment models.

### 5. Twelve hour and geostationary orbits

When discussing so-called "12 hour orbits", it is important to distinguish between circular and highly elliptical geometrics. One high asset concentration band is the GPS satellite circular orbital period of ~12 hours at a mean altitude of 20,200 km. The other is composed of families of satellites using highly elliptical 12 hour orbits with perigees in LEO and apogees near 40,000 km. The official GEO altitude is 35,786 km and a nominal operating band is +/- 200 km, including the transfer corridor. The normal operating band is +/- 75 km (Johnson 2003). If the volume of GEO is constrained to about +/- 15 degrees latitude (the maximum natural drift of an uncontrolled satellite at GEO) and GEO altitude of +/- 200 km, higher OD values can be obtained. Because GEO altitudes are so high, it is militarily disadvantageous for BMWs to traverse this region unless deliberately targeted.

GEO's orbital period of ~ 24 h (~36,000 km) is synchronous with Earth's rotational period, giving these orbits enormous commercial and military importance because large Earth-based facilities are not required to track transmitting satellites. Most objects in GEO are spread along the 0 degree latitude (equator) geostationary band at very small inclinations, <5 degrees. Most OD in GEO are too far away from Earth to be detected by radar. For altitudes >1,000 km optical telescopes are used to detect reflected sunlight during the brief periods before sunrise and after sunset, assuming clear skies.

Radar is not constrained by cloudy weather as are optical telescopes. As of Nov. 1 1995 there were ~ 601 objects in GEO. The average velocity in GEO is ~3,075 km/s. The average velocities between objects in GEO varies from ~ 100 to 500 m/s, with a maximum ~ 800 m/s. There are now just over 700 spacecraft in or near GEO and more than 200 nearby rocket bodies. The flux of objects > 1 cm in GEO is not known for certain, and

ミサイルの宇宙配備兵器からの破片をもっと管理するように著しく機能強化(フェーズアレイ化やセンサの機能向上)されるべきである。米空軍とNASAのデブリへのアプローチの相違は、米空軍ではデブリを、それが追跡できれば十分であるとしているのに対し、NASAはより小さなデブリ(多くは追跡できないような大きさ)をその評価モデルで考慮にいれているところにある。

### 5 . 12 時間軌道と静止衛星軌道

いわゆる「12 時間軌道」について議論するとき、円軌道と強度の楕円軌道の幾何形状を区別することは重要である。高密度に宇宙資産が集中している宇宙帯は、GPS 衛星の円軌道であり、約 12 時間軌道で、その高度は 20,200km である。他は、強度の楕円 12 時間軌道を有し、近軌道地点では低地球軌道であり、遠軌道地点で 40,000km 近くになる衛星群である。公式の静止衛星軌道の高度は 35,786km であり、名目の運用幅は、移動地帯を含めて、±200km である。正常な運用幅は、±75km である (Johnson 2003)。もし、静止衛星軌道の容積が、±15 度緯度 (制御されない静止衛星軌道の衛星の最大自然ドリフト) と静止衛星軌道高度で ±200km に制限されるとすると、より高いデブリ値が得られるであろう。静止衛星軌道の高度は非常に高いので、大陸間弾道兵器にとっては、このような宇宙域を飛行することは、わざとそのような選択を選ばない限りは、軍事的には不利である。静止衛星軌道の約 24 時間 (約 36,000km 高度) の軌道周期は、地球の自転周期と同期しており、この軌道は、送信衛星の追尾のために大規模な地球基地の施設を必要としないことから、非常に商業的かつ軍事的な重要性を持つ。ほとんどの静止衛星軌道の施設は緯度零度の地帯 (赤道上) に広がっており、5 度以下の非常に小さな傾度で静止衛星域に位置している。静止衛星軌道におけるほとんどのデブリは、レーダで探知するには、あまりにも地球から遠方にある。1,000km 以上の高度に対しては、晴天を仮定して、日の出前と日の入り後の短時間に太陽光の反射光を利用して光学的な望遠鏡が探知に使用される。

レーダは光学的望遠鏡のように曇空に制限されない。1995 年 11 月 1 日の時点においては、静止衛星軌道には 601 の装置がある。静止衛星軌道における平均的な速度はおおむね 3,075km/s である。静止衛星軌道における装置間の速度は、おおむね 100 から 500m/s、最大で 800m/s とばらつきがある。現在、静止衛星軌道近傍には 700 以上の宇宙船とその近くに位置する 200 以上のロケット本体がある。静止衛

is highly dependent on how GEO is defined in terms of latitude and longitude. There are very few measurements between 20 and 100 cm and no reliable measurements in the range 1 to 20 cm. Objects >1 cm can be reliably measured. However, as a tough estimate, the average OD material flux in GEO for >1 cm is  $\sim 2 \times 10^{-8}$  particles/m<sup>2</sup>y (Johnson et al 2001). Although this is a very small number in terms of a baseline for establishing a sustained OD chain reaction, it is speculated that for satellites closely aligned along a common orbit, a synchronous series of explosions or collisions within a confined orbital region may lead to "orbital pile-up.

But such a chain reaction scenario hasn't been analytically demonstrated for realistic conditions. Anti-satellite(ASAT) operations against valuable satellites in GEO orbits confined to narrow (crowded) bands extending from 34,850 to 36,550 km and peaked at 35,550 km could be a problem. But GEO asset sabotage requires tremendous technical skill and substantial launch and tracking capabilities.

MEO or middle earth orbit is a sparsely populated region between LEO and GEO with only  $\sim 134$  objects(Nov.1,1995). This vast region from the end of LEO(2,000 km) to GEO( $\sim 37,000$  km)( $\sim 257 \times 10^{12}$ km<sup>3</sup>) can sequester enormous amount of OD with low probability of damaging a satellite. Above and below GEO the flux is less than  $\sim 10^{-10}$  particles/m<sup>2</sup>y or even lower. There are few satellites and booster vehicles in these elliptical orbits. Other orbits traversing MEO are highly eccentric transfer orbits.

に位置する 200 以上のロケット本体がある。静止衛星軌道における 1cm より大きな物体がどのくらいあるかは確たるものがないし、むしろそれは、静止衛星軌道を緯度経度でどのように定義するかにかかっている。20～100cm の物体については、測定データがほとんど無いし、1～20cm については、信頼のおける測定データが無い。1cm より大きな物体については、ある程度の信頼度で測定可能である。しかしながら、乱暴な推定値として、静止衛星軌道における 1 cm 以上の平均的なデブリの浮遊物は約  $2 \times 10^{-8}$  分子/m<sup>2</sup>y である(Johnson 等、2001)。デブリがチェーン反応をするベースとする数字は非常に小さいが、制限された軌道域内において同期した爆発や衝突が連続的に起れば、共通の軌道に接近して位置している衛星が「軌道座礁」を引き起こしかねないと推測される。

しかし、このようなチェーン反応のシナリオは実態に即した条件下で解析的に示された訳ではない。静止衛星軌道における価値ある衛星に対する衛星攻撃(ASAT)作戦は、34,850 から 36,550 km の高度の狭帯(混雑)域で 35,550 km でピークとなる帯域を対象としており、それは問題かもしれない。しかし、静止衛星軌道施設の破壊には、非常に高度の技術的スキル、正確な発射、トラッキング能力を要する。

MEO または中高度軌道は、低軌道と静止衛星軌道の間であって、1995 年 11 月 1 日時点でたった 134 個という、密度の薄い宇宙帯域である。この低軌道(高度 2,000 km)から静止衛星軌道(高度 37,000 km)(体積が約  $257 \times 10^{12}$ km<sup>3</sup>)の間の非常に広い宇宙域では、低確率の衛星被害で膨大な数量のデブリを引退させることができる。静止衛星軌道の上部と下部では、デブリの密度はおおむね  $10^{-10}$  分子/m<sup>2</sup>y またはそれ以下である。これらの楕円軌道の衛星や打ち上げロケットは少ない。中高度軌道を飛行している他の軌道は、強度の偏心軌道である。



## 6. Comparison of LEO and GEO

OD flux and dynamic reactions to explosions, fragmentations, and BMW interceptions in LEO differ from those in GEO. In LEO, a densely populated region between 800-1,000 km (ICBM altitude range), radar tracks orbital velocities  $\sim 7.45$  -  $7.35$  km/s, respectively, and an average collision velocity  $\sim 10$  km/s, depending on inclination. High specular removal rates, especially in lower LEO regions, minimize effects of SBI/BM warfare. In GEO OD density is much lower and more uncertain than in LEO with a much lower collision velocity range than in LEO. On the other hand in GEO there are no specular removal mechanisms; OD can linger indefinitely. But the potential for a catastrophic event and long term disastrous outcomes from single point events exists. Survival of large strategically critical satellites in GEO may be vulnerable, under certain circumstances, to a single breakup such as at least one known Titan Transtage. While other breakups near GEO may have gone undetected there are no Delta second stage in or near GEO. Fragmentations induced by a deliberate act could cause severe problems depending on the magnitude. In general, OD will tend to migrate toward the stable points on the ring while their orbital inclinations would vary slowly and periodically. Disasters in GEO would be difficult because natural OD removal processes don't exist and the great distances at which (remedial) space operations must be carried out. Within the present context of space warfare GEO is unlikely to be affected by SBI/BM warfare, but is potentially vulnerable to direct ASAT attack.

## 7. The Meteoroid Flux

Meteoroids are natural particles, debris remnants from de-volatilized comets and asteroids and are chemically analogous to the composition of comets and non-metallic meteorites, i.e. Fe, Mg, silicates. For the very fine particles meteoroid dust sizes range from  $\sim 1$  to  $1\text{mm}$  with an average density of  $\sim 0.5\text{ gm/cm}^3$  and, depending on their size, can be as high as  $1\text{ g/cm}^3$ . Since meteoroids are derived from comet and asteroid materials their density range extends to meteorite densities,  $>1\text{g/cm}^3$ . Just above Earth's atmosphere meteoroids move much faster at  $\sim 11$  to  $72\text{ km/s}$ . A  $0.3\text{ cm}$  diameter meteoroid can break a space

## 6 . 低軌道と静止衛星軌道の比較

低軌道における爆発、破断、弾道ミサイル兵器の迎撃へのデブリ流動と動的反応は、静止衛星軌道におけるそれとは異なる。低軌道では、高度  $800$  -  $1,000\text{ km}$  (ICBM の到達高度の範囲) では高密度でデブリがあり、レーダにより、それぞれの軌道傾度により軌道飛翔速度おおむね  $7.45$  -  $7.35\text{ km/s}$ 、平均的衝突速度  $10\text{ km/s}$  のものを追跡する。高反射性除去率 (rates) が、特に低軌道域においては、宇宙迎撃兵器/弾道ミサイル戦争の影響を最小限にする。静止衛星軌道においては、デブリ密度は、低軌道よりもより低く、低衝突速度で、そしてより不確率である。他方で静止衛星軌道においては、高反射性除機能が働かない。すなわち、デブリは無限にさまよう。しかし、単一の出来事による大変動が起きたり長期の災害が発生する可能性は存在する。静止衛星軌道における大規模で戦略的に重要な衛星の生存は、ある状況下では、少なくとも一般にチタン・トランステージとして知られているように、単一崩壊へと攻撃されやすい。静止衛星軌道の近傍では他の崩壊が探知されないで発生するかも知れない一方で、静止衛星軌道またはその近傍では、(デブリを地球に落下させる) デルタ第 2 ロケット問題 (Delta second stage) は存在しない。故意に引き起こされた破裂は、その規模により、厳しい問題を引き起こすかもしれない。一般に、デブリはリング上の安定点に向けて移動する傾向を持つが、一方でそれらの軌道上の傾度はゆっくりとそして周期的に変化する。静止衛星軌道における災害は、自然的なデブリ除去の過程が存在しないために、そしてそのために実施されるべき宇宙戦略が非常に地球から遠距離であることから困難である。宇宙戦争の今日の場合の中では、静止衛星軌道は宇宙迎撃兵器/弾道兵器によって影響を受けることはなさそうであるが、直接の衛星攻撃を受ける可能性は避けられない。

## 7 . 流星の流動

流星は自然の分子であり、揮発したすい星と小遊星からの残屑である。そして、化学的には、すい星と非金属隕石の成分、すなわち鉄、マグネシウム、シリカと類似している。非常に細かい微分子に関しては、流星塵の大きさは、約  $1\text{ mm}$  で、大きさにもよるが、その平均的な密度は  $0.5\text{ gm/cm}^3$  から  $1\text{ g/cm}^3$  である。流星はすい星と小遊星材料から発生するので、それらの密度は隕石の密度、すなわち  $1\text{ g/cm}^3$  以上である。地



shuttle wind screen or cause interior damage to a satellite. It is estimated ~40,000 metric tons of meteoroids enter Earth's atmosphere each year (Love and Brownlee 1993).

The probability a 1m<sup>2</sup> surface in LEO would be struck by a 1 cm meteoroid during a year is about 10<sup>-6</sup>. Because of meteoroids small size and low density simple satellite design features can often protect spacecraft against some meteoroid threats. But during a periods of intense meteoroid bombardment the meteoroid threat may be significantly enhanced, rendering this protection useless.

### 8. Collision Rates from Background OD and Meteoroid Flux

The collision rate dN/dt of background OD and meteoroid flux is defined as

$$\text{Collision rate } dN/dt(y^{-1}) = S\sigma A \quad (1)$$

S=number of satellites, σ=orbital debris cross section (1/m<sup>2</sup>y) and A=average satellite area (m<sup>2</sup>). Table 2 summarizes observations for three OD sizes and for meteoroid sizes >0.03 cm in LEO. At the ISS orbit, meteoroid flux becomes greater than the OD flux for particles <0.5 cm. Also listed are potential OD and meteoroid impact effects on satellites. Actual effects depend on where a satellite is hit and its protection.

OD Size	*(1/m <sup>2</sup> y)	A(m <sup>2</sup> )	Collisions/y	Result
≥1 cm	4 x 10 <sup>-5</sup>	10	0.2	
		50	1	severe damage
≥0.5	10 <sup>-4</sup>	10	0.5	
		50	2.5	damage
≥0.1	8 x 10 <sup>-4</sup>	10	4.0	
		50	20	degradation
Meteoroid size				
≥0.3	2 x 10 <sup>-4</sup>	10	1	
		50	5	damage

\*Cross-sectional flux of a given size and larger (Johnson et al 2001)

Table 2. Orbital Debris Flux in LEO.

Table 2 provides the average annual collision rate for three OD sizes and one meteoroid size reference for 500 SBI platforms in LEO with areas of 1 and 50 m<sup>2</sup>.

Damage will depend on how well the satellite is protected and where and what velocity the impact occurs.

### 9. Collision, Fragmentation and Vaporization

Enormous amounts of energy released during high speed impacts rapidly initiate a very complicated sequence of events depending on the relative density, mass, (size)

度は隕石の密度、すなわち 1g/cm<sup>3</sup>以上である。地球の大気の下層上部では、流星は、11~72 km/s という速度で、非常に早く飛翔する。0.3cm の直径の流星は、スペースシャトルの窓のスクリーンを破壊し、衛星の内部に損害を与える。毎年、40,000 トンの流星が地球の大気圏に突入していると推定される (Love と Brownlee による、1993)。低軌道における 1m<sup>2</sup> 当たりの年間の 1cm の流星による衝突の確率は、10<sup>-6</sup> である。流星は小さくまた密度が低いことから、単純な衛星設計によって宇宙船を流星からの恐怖に対して防御できる。しかし、集中的な流星落下の期間においては、流星による恐怖は十分に大きくなり、この防御が無効になることもあると思われる。

### 8. バックグラウンドデブリと流星流動からの衝突確率

バックグラウンドデブリと流星流動との衝突率 dN/dt は、次のように定義される。

$$dN/dt(y^{-1}) = S\sigma A \quad (1)$$

ここで、S=衛星の数、σ=デブリの断面 (1/m<sup>2</sup>y)、A=平均的な衛星面積 (m<sup>2</sup>)。表 2 は、3つのデブリの大きさに関する観測結果のまとめおよび低軌道における 0.03 cm 以上の流星の大きさを示す。ISS の軌道では、0.5 cm 以下の分子に関しては、流星の流動はデブリにおけるそれよりもより大きくなる。また、表 2 には、可能性のあるデブリと衛星への流星の衝突効果について表示している。実際の効果は、衛星のどこに当たり、それがどのように防御されているかによる。

表 2 低地球軌道におけるデブリ流動

デブリサイズ	*(1/m <sup>2</sup> y)	A(m <sup>2</sup> )	衝突/年	結果
≥1 cm	4 x 10 <sup>-5</sup>	10	0.2	
		50	1	被害甚大
≥0.5	10 <sup>-4</sup>	10	0.5	
		50	2.5	被害あり
≥0.1	8 x 10 <sup>-4</sup>	10	4.0	
		50	20	分解
流星サイズ				
≥0.3	2 x 10 <sup>-4</sup>	10	1	
		50	5	被害あり

\*そのサイズがより大きな横断面流動 (Johnson 等、2001)

表 2 は、1 m<sup>2</sup> と 50 m<sup>2</sup> の面積で、低軌道における 500 の宇宙迎撃兵器プラットフォームに関して、3つのデブリサイズと 1つの流星のサイズについて、平均的な年衝突率を示す。被害は衛星が如何に防御されているか、そしてどの程度の速度で衝突が起きたかによる。

events depending on the relative density, mass (size), strength, and thermodynamic properties of the interactants. Because the energy per kilogram far exceeds the vaporization energy a plasma process evolves. Analysis suggests a 5 kg mass impactor undergoes massive vaporization at a relative impact velocity of 10-12 km/s. If the target is far more massive than the impactor, much of the impactor energy is partitioned into self-melting and vaporization(Lawrence 2003). It is convenient to assume for the purposes of this simple study to assume that if BMW and KKV materials are similar roughly equivalent BMW and KKV masses will be vaporized with the bulk of the more massive BMW remaining solid. One must also understand that if the BMW has a hardened, ablative coating, the amount of fragmentation may not be commensurate with the KKV. Also, one must take into account debris generated from impacting some of the decoys which would be dissimilar to the BMW materials. Table 3 describes impact phenomenology in terms of energy partition regimes.

- 3-5km/s(4.5-12.5 x 10<sup>6</sup>J/kg): Solid fragmentation dominates with some melting and little vaporization.
- >5km/s(>12.5 X 10<sup>6</sup> J/kg): Major portions are melted with some vaporization.
- >7km/s(>25.9 X 10<sup>6</sup>J/kg): Vapor(plasma) dominates impact process.

Table 3. High Energy Density Impact Regimes. High speed impact processes are divided into three groups according to the amount of energy released at impact and the collective processes through which this energy is transformed.

Energy distributions for a 500 kg BMW target mass traveling at 7 km/s and five KKV's with masses of 0.001, 1, 5, 10, and 50 kg impacted head-on at 3 km/s are given in Table 4.

KKVmass	0.001	1	5	10	50 kg
E <sub>Total</sub>	12.25	12.28	12.37	12.50	13.48 x 10 <sup>9</sup> J
E <sub>Int</sub>	0.05	49.9	247.5	490.2	2,272.7 x 10 <sup>6</sup> J
E <sub>Int</sub> /MKKV	50	49.9	49.5	49	45.4 x 10 <sup>6</sup> J/kg
v <sub>rms</sub>	2.61	2.60	2.59	2.57	2.43 km/s

Table 4. Fragment velocities from a 10 km/s impact as a function of KKV mass. Total interaction energies, E<sub>Int</sub> interaction energies/kg, E<sub>Int</sub> /MKKV, and rms velocities, v<sub>rms</sub> of fragments ejected from a KKV/BMW impact at a relative velocity of 10 km/s are listed as a function of

## 9 . 衝突、破断、そして蒸発

高速の衝突では極めて多量のエネルギーが解放されるので、相互作用物の相対的な密度、体積(大きさ)、力、熱力学的性質により、非常に複雑な現象過程を経る。キログラム当たりのエネルギーは気化エネルギーをはるかに超えるので、プラズマ過程が展開する。解析結果によると、5kg の大きさの衝突物は相対的な衝突速度 10 - 12km / s で多量の気化を引き起こす。もし、このような衝突物より、もっと大きなターゲットの場合は、ほとんどの衝突物のエネルギーは、自己融解と気化に分離される(Lawrence 2003)。ここでの単純な研究のためには、もし弾道兵器と撃墜弾の材料が概略同様であると仮定すると、弾道兵器と撃墜弾の材料と概略同程度のかさの気化と残存固体が生成されると仮定するのが便利である。また、もし弾道兵器が硬化塗装されている場合には、破片への分解の程度は撃墜弾とはかけ離れたものとなるかもしれないという点に留意しなければならない。また、弾道兵器材料と同様でないであろう誘惑物の衝突によって生成された屑を考慮に入れなければならない。

表 3 は、エネルギー分離レジメにおける衝突現象を示す。

表 3 高エネルギー密度衝突レジメ。高速度衝突過程は、衝突時において開放されたエネルギーの量により、そしてそのエネルギーが変換される集合過程により、3 グループに分類される。

- 3-5km/s(4.5-12.5 x 10<sup>6</sup>J/kg): 幾らかの溶解とわずかの気化状態が主要な固体断片化
- >5km/s(>12.5 X 10<sup>6</sup> J/kg): わずかの気化でほとんどが溶解物質化
- >7km/s(>25.9 X 10<sup>6</sup>J/kg): 気体(プラズマ)化した物質が主体の衝突過程

7 km / s で飛行中の 500kg の弾道兵器目標物体と 3 km / s で突入した 0.001、1、5、10 そして 50kg の大きさの物体の 5 つの撃墜弾のエネルギー分布を表 4 に示す。

表 4 撃墜弾の大きさの関数としての断片の速度。相対速度 10 km/s で衝突する撃墜弾 / 弾道兵器衝突から噴出した破片の総計相互作用エネルギー、E<sub>Int</sub> 相互作用エネルギー/kg, E<sub>Int</sub> / 撃墜弾量, そして速度の標準偏差, v<sub>rms</sub> を撃墜弾量の関数として示す。

撃墜弾量	0.001	1	5	10	50 kg
E <sub>Total</sub>	12.25	12.28	12.37	12.50	13.48 x 10 <sup>9</sup> J

relative velocity of 10 km/s are listed as a function of KKV mass.

Increasing KKV mass slightly reduces available kinetic energy/kg and therefore the mean velocities of non-vaporized fragments. For 5 kg KKV's all but  $\sim 0.25 \times 10^9 \text{ J}$  is of the total energy ( $49.5 \times 10^6 \text{ J/kg}$ ) is available to fragment, melt, and establish a plasma vapor that propel fragments from the main BMW body. The respective average fragment velocities achieved from the 5 and 50 mass KKV's are 2.60 and 2.43 km/s. The highest velocity is achieved by a 1 g KKV at 2.61 km/s.

Substantially increasing KKV mass only slightly reduces fragment velocities but generates an order of magnitude more SOD. If the KKV mass is kept below 5 kg, SOD flux will be low (i.e. it is arbitrarily assumed that there will be  $\sim 50,000$  lg particles vs.  $500,000$  lg particles for a 50 kg interceptor). A small and fast KKV can minimize SOD and enhance interception capabilities while minimizing lift costs. For  $M=500$ ,  $m=5\text{kg}$ ,  $V=7\text{km/s}$  and  $v=3\text{km/s}$ , BMW trajectory perturbation is  $\Delta V \approx 30\text{m/s}$ . Over 1,000s target location is changed by  $\sim 30$  km. If equal amounts (5kg each) of BMW target and KKV material are vaporized at  $\sim 8 \times 10^6 \text{ J/kg} \times 10\text{kg}$  crushing, fragmentation, melting, vaporization energy,  $\sim 8 \times 10^7 \text{ J}$  is extracted. Also, if it is assumed that high pressure shock waves generate fifty kg of fragments from the BMW,  $\sim 168 \times 10^6 \text{ J}$  remain to accelerate fragments, at a root mean square fragment velocity of  $\sim 2.59$  km/s.

Energy distributions for a 500 kg BMW target mass traveling at 7 km/s and five KKV's with masses of 0.001, 1, 5, 10, and 50 kg impacted head-on at 3 km/s are given in Table 4.

### 10. Impact ejecta velocity and possible orbits

At extremely high impact velocities a very small fraction of plasma propelled ejecta may actually exceed the relative impact velocity, but generally remaining below 1.5 x impact velocity. The statistical distribution of this small fraction of particles can be determined by applying the error function to the root mean square (rms) velocity. For a small impactor that does not break up the target, spray angles are likely to be more confined, there is generally a small angle of spray with most ejecta leaving the target along the opposite vector of the initial impactor. Impact between two commensurate bodies have large spray angles for both large and small OD particles.

$E_{\text{Int}}$	0.05	49.9	247.5	490.2	$2,272.7 \times 10^6 \text{ J}$
$E_{\text{Int}}/\text{撃墜弾量}$	50	49.9	49.5	49	$45.4 \times 10^6 \text{ J/kg}$
$V_{\text{rms}}$	2.61	2.60	2.59	2.57	2.43 km/s

撃墜弾の大きさが増加すると使える kg 当りの運動エネルギー幾分減少し、それゆえ気化しない破片の平均速度も同様である。5kg の撃墜弾に関しては、総計エネルギー ( $49.5 \times 10^6 \text{ J/kg}$ ) のほとんど  $\sim 0.25 \times 10^9 \text{ J}$  が、弾道兵器の主体から断片を離脱させ、断片化、溶解、そしてプラズマ気体の生成のために使われる。5 と 50kg の量の撃墜弾からのそれぞれの平均的断片速度は、2.60 と 2.43km/s である。最高速度は 1g の撃墜弾で 2.61km/s に達する。

大きく撃墜弾の量が増加したとしても、断片の速度はほんの少し減少するだけで、低高度デブリの量のオーダを増加させる。もし撃墜弾の量を 5kg 以下に抑えたとすると、低高度デブリの流動率は低い (すなわち、50kg 衝突物に関しては、約 50,000 の 1g 分子と 500,000 の 1g 分子) 小さなそして早い撃墜弾は、低高度デブリを最小限化するとともに、打ち上げ経費を最小にしながら衝突 (命中) 確率を高める。  $M = 500$ ,  $m=5\text{kg}$ ,  $V=7\text{km/s}$  and  $v=3\text{km/s}$ , 弾道兵器の軌道誤差は  $\Delta V \approx 30\text{m/s}$  である。高度 1,000km 以上に対して、標的位置は 30 km 程度変化する。もし弾道兵器と撃墜弾材料が同じ量 (それぞれ 5kg) が約  $8 \times 10^6 \text{ J/kg} \times 10\text{kg}$  衝突で気化されたとすると、 $\sim 8 \times 10^7 \text{ J}$  が断片化、溶解、気化エネルギー化される。また、弾道兵器から 50kg の断片から高圧力のショック波が生成されたと仮定すると、 $\sim 168 \times 10^6 \text{ J}$  が  $\sim 2.59$  km/s の平均二乗根速度で破片を加速させるのに働く。

### 10. 衝突射出速度とその想定軌道

特別に高い衝突速度においては、噴出物を回転させるプラズマの極小部分は、実際に相対的には衝突速度を超えるかもしれないが、一般に 1.5 倍の衝突速度以下に留まる。分子のこの小さな部分の統計的な分布は、平均二乗根 (rms) 速度へ誤差関数を応用することにより決定できる。標的を破壊しない小さな衝突物に関しては、スプレー角に制限されるようで、最初の衝突物と反対方向のベクトルに沿って小さなスプレー角で、ほとんどの射出物が標的を離れていく。二つの同大の物体間の衝突は、大小のデブリ分子に対して大きなスプレー角を持つ。衝突物/標的の量が 1 より非常に小さい場合には、物体の中心はその弾道から大きく離れることはない。そして、衝突 (爆発) エネルギーは、相対速度において物体の衝突を弱めること



In cases where the impactor/target mass  $\ll 1$  the center of mass will not significantly deviate from its trajectory and the impact (explosive) energy is derived from the reduced mass impact at the relative velocity. In these processes the higher the ejecta velocity, the smaller is the spray angle, although this last condition is not critical to calculating the rms velocity. The velocity of fragments,  $U$ , from an asymmetrical impact can be determined as a function the SBI impact velocity, energy reflection back into the SBI which ablates the impactor and energizes the vapor. A method (Remo 2003) estimate fragment velocity based on impact energy transmission, fraction of the (KKV) ablated, and Lagrangian plasma velocity and density profiles in the impact region suggests a KKV impact into a BMW at  $\sim 10$  km/s yields a,  $v_{rms} \sim 2.5$  km/s, in close agreement with the result in part 9.

A center of mass dominated (mass BMW  $\gg$  mass KKV) radial type of impact fragmentation from an object on a sub-orbital trajectory, whether space or ground launched, confines lower velocity debris fragments within a small region of LEO defined by the sub-orbital BMW trajectory. Depending on the altitude, OD fragments are ejected over a range of angle and velocities, even if specially configured space charges are used. Some fragments at the very high velocity end of the spectrum could achieve eccentric orbits, hastening fragment de-orbiting from enhanced drag at perigee. High velocity fragmented materials directed radial away from Earth may achieve very eccentric orbital velocities and even achieve OD status. At sufficiently high velocities they may travel in a myriad of orbits, depending on their angle and velocity. It is possible that a statistically small number of higher velocity components achieve velocities  $\sim 11.6$  km/s, depending on altitude allowing trajectories across (trans-orbital) weak instability boundaries.

により引き出される。このような過程において、射出速度が高ければ高いほど、スプレー角度は小さくなる。もっとも、この最後の条件は、平均二乗根 (rms) 速度を計算する上ではそれほど重要ではない。非対称の衝突から破片の速度  $U$  は、宇宙迎撃器衝突速度、衝突物を除去し気化物をエネルギー化する宇宙迎撃兵器へのエネルギー反射の関数として決定することができる。ある方法 (Remo 2003) は、断片の速度を、衝突エネルギー伝達、撃墜弾除去の一部分、そしてラングランジェのプラズマ速度を基礎として推定する。そして、衝突部分における密度断面は、9 項における結果と極めて整合する撃墜弾は弾道兵器に、 $v_{rms} \sim 2.5$  km/s を生ずる  $\sim 10$  km/s で衝突することを示す。

宇宙からまた地上からの場合によらず、低軌道弾道上の物体主体 (弾道兵器物量が撃墜弾のそれより遥かに大きい場合) の放射状衝突破片は、低軌道弾道兵器によって決定される低軌道の小範囲内に低速度デブリ破片を生成するだけである。高度によって、もし特別に限定された宇宙攻撃がなされたとしても、デブリ破片は広い角度と速度で射出される。非常に高速度側の幾らかの破片は、近地点においては加速された引力から、破片の軌道落下を促進させる偏心的軌道となる可能性がある。地球から放射状に遠ざかるように方向付けられた高速度破片材料は、非常に偏心的な軌道速度となるかもしれないし、デブリの状態を保つかも知れない。十分に高速度の状態では、それらの角度と速度によっては、無数の軌道に入ってしまうかも知れない。統計的に少数の高速度要素は、弱い不安定境界を横切る弾道を可能とする高度によっては、 $\sim 11.6$  km/s の速度となる可能性がある。



## 11. SOD impacts on satellites in LEO

A straightforward and conservative approach is taken to compute upper limits to OD impact probabilities i.e. a "worst case scenario." For a sub-orbital trajectory, a linear model expresses the average satellite collision cross-section,  $\sigma_s$ ,

$$\sigma_s = SA(\pi g^2 u_{rms}^2) v \tau^3 / (Vol_{LEO})$$

S=number of satellites in LEO (S=6,000 for the cataloged population; the number of operational spacecraft in LEO for all nations is closer to 300), A=average area of each satellite (1 m<sup>2</sup>),  $u_{rms}$ =rms radial velocity of fragments=2.5 km/s,  $g < 1$  (~1/2) is a fragment trajectory factor associated with  $u_{rms}$ , v=velocity of the BMW (v=7 km/s),  $\tau$ =trajectory time of BM after being impacted by SBI, and  $Vol_{LEO}$ =volume of LEO.

$$SDO_{flux} = F = 4\eta v / (\pi g^2 u_{rms}^2 v \tau^3) \quad (3)$$

where  $\eta$ =# fragments/impact.

$$\text{Collision rate} = dn/dt = F = SA\eta v / Vol_{LEO} \quad (4)$$

Assuming  $\eta=50,000$  particles per SBI interaction with average mass of lg.

$$dn/dt = 2.1 \times 10^{-9} \text{ collisions/SBI hits}$$

The total number of collisions, N, per SBI hit on a BMW during the entire BMW trajectory transit,  $\tau$ , from 200 to 2,000s, is  $(4.2 - 42) \times 10^7$ /SBI hit. The collision probability, P, over  $\tau = (4.2 - 42) \times 10^7$ /SBI hit=0. For 500 platforms with 10 SBI each, the total number of SOD collisions =  $(2.1 - 21) \times 10^{-3}$ . The total collision probability = 0.0021 - 0.021. Even for 5,000 BMW hits and a 2000s SOD trajectory, the total number of hits on all satellite assets in LEO is  $21 \times 10^{-3}$  and only ~0.001 for active satellites. The assumption is the fragmented particles are a single size; a logarithmic size distribution with more smaller particles and fewer larger particles is more likely.

## 12. Sub-orbital impacts on SBI platforms: fratricide

If the SBI platforms are confined to narrow operational regions of LEO from 7,000 km and 6,500 km altitude, the SBI volume,  $Vol_{SBI} = 276 \times 10^9 \text{ km}^3$ . The SBI fragment sub-orbital volume swept out during the post impact trajectory is  $V_{Frag}$ ,

## 11. 低地球軌道における衛星への低高度デブリへの衝突

正統的かつ伝統的なアプローチでは、デブリ衝突確率の上限、すなわち「最悪のシナリオ」を計算する。低軌道の弾道では、線形モデルが次の平均的衛星衝突断面 $\sigma_s$ の推定に使われる。

$$\sigma_s = SA(\pi g^2 u_{rms}^2) v \tau^3 / (Vol_{LEO})$$

ここで、S=低軌道における衛星の数(登録された衛星データとしては、S=6,000、全世界の低軌道における使用中の宇宙船の数は約300)、A=個々の衛星の平均面積(1m<sup>2</sup>)、 $u_{rms}$ =破片の放射速度の平均二乗根=2.5 km/s、 $g < 1$  (~1/2) は  $u_{rms}$  と関連した破片の弾道要素、v=弾道兵器の速度 (v=7 km/s)、 $\tau$ =宇宙迎撃兵器によって捕らえられた後の SBM の弾道時間、 $Vol_{LEO}$ =低軌道の体積。

$$SDO_{flux} = F = 4\eta v / (\pi g^2 u_{rms}^2 v \tau^3) \quad (3)$$

ここで、 $\eta$ =破片/衝突の数。

$$\text{衝突率} = dn/dt = F = SA\eta v / Vol_{LEO} \quad (4)$$

$\eta=50,000$  と仮定すると、lg.の平均物量の宇宙迎撃兵器命中当たりの微分子は

$$dn/dt = 2.1 \times 10^{-9}$$

衝突/宇宙迎撃兵器発射全体の弾道兵器の弾道通過、200 から 2,000、の間の弾道兵器への宇宙迎撃兵器の命中当たりの衝突の総数、N、は、 $(4.2 - 42) \times 10^7$ /宇宙迎撃兵器命中である。

$\tau = (4.2 - 42) \times 10^7$ /宇宙迎撃兵器 hit=0 の元での衝突確率、P。

それぞれに10の宇宙迎撃兵器がある500のプラットフォームについて、低高度デブリの合計は、 $(2.1 - 21) \times 10^{-3}$ 。総衝突確率=0.0021 - 0.021。5,000の弾道兵器命中(ヒット)と2000の低高度デブリ弾道に対しても、低軌道における全衛星資産に対する合計ヒット数は $21 \times 10^{-3}$ である。そして、活動中の衛星については、~0.001である。ここでの、仮定は、断片化した分子は、単一の大きさであり、より小さな分子については指数関数的な大きさ、より少数のより大きな分子は同様である。

## 12. 宇宙迎撃兵器プラットフォームへの軌道以下での衝突：兄弟殺し

もし宇宙迎撃兵器プラットフォームが高度7,000と6,500kmの狭い戦略範囲に限定すると、宇宙迎撃兵器の体積は、 $Vol_{SBI} = 276 \times 10^9 \text{ km}^3$ となる。衝突後の弾道に広がる軌道にのらない宇宙迎撃兵器破片の体積

$$Vol_{Frag} = g^2 u_{rms}^2 v^3 \quad (5)$$

where  $U_{rms} = 2.5 \text{ km/s}$ ,  $Vol_{Frag} = g^2 137 \times (10^6 - 10^9) \text{ km}^3$  for sub-orbital transit times of 100 and 1,000s. A potential fratricidal scenario involves BMW destruction within a confined volume of LEO where SBI platforms reside. Here, the fragment flux is given by

$$F = \eta v / (\pi g^2 u_{max}^2 v \tau^3) \quad (6)$$

The SBI platform collision cross section is  $\sigma_{SBI} = S_{SBI}A$ , where  $S_{SBI}$  is the number of SBI platforms of area  $A$ . SBI platforms that intersect the same LEO volume as the impact fragments maximize interaction. The collisions per SBI hit/s in this “space kill zone” is

$$\begin{aligned} dn/dt &= F \sigma_p = 4\eta S_{SBI}A / \pi u^2 \tau^3 \\ &= 40 \times 10^{-8} \text{ hits/SBI-s} \end{aligned} \quad (7)$$

The total number of collisions  $N$  during passage of the SOD for each interceptor hit during the BMW trajectory transit,  $\tau = 1,000\text{s}$ , is  $40 \times 10^{-8} / \text{SBI hit}$ . The probability,  $P$ , of a hit is  $4 \times 10^{-8}$ . Again, for the 500 platforms with 10 interceptors each the probability is 2 hits. The probabilities for two, three, or four SBI platform hits are respectively;  $P_2 = 0.27$ ,  $P_3 = 0.18$ ,  $P_4 = 0.09$ . Therefore, there is almost a 10% chance that an SBI platform be hit four times and could be lost to SBI fragment fratricide. Given that there are 500 SBI platforms, this number is quite low. Even if fragment velocities were twice as high, the impact probability would not change significantly. Ironically, the 500 SBI platforms at  $50 \text{ m}^2$  surface area each provide a large target than the passive satellite assets in LEO. For active satellites the numbers are significantly lower. However, if the SBI platforms are deliberately targeted, the calculus for the hit probabilities can dramatically change. But, this is ASAT targeting and requires a different approach than outlined here. The mean free path,  $\lambda$  is the distance traveled divided by the number of collisions occurring within a given time,  $t$ ,

弾道に広がる軌道にのらない宇宙迎撃兵器破片の体積は  $V_{Frag}$  である。

$$Vol_{Frag} = g^2 u_{rms}^2 v^3 \quad (5)$$

ここで、100 秒と 1,000 秒の軌道に乗らない範囲での通過時間に対して、 $U_{rms} = 2.5 \text{ km/s}$ ,  $Vol_{Frag} = g^2 137 \times (10^6 - 10^9) \text{ km}^3$  である。可能性として「兄弟殺し」のシナリオが、宇宙迎撃兵器プラットフォームが位置する低軌道の限定された体積の中で、弾道兵器破壊に関連するかもしれない。ここで、破片流動は、次式で与えられる。

$$F = \eta v / (g^2 u_{max}^2 v^3) \quad (6)$$

宇宙迎撃兵器プラットフォームの衝突断面は、 $\sigma_{SBI} = S_{SBI}A$  であり、 $S_{SBI}$  は面積  $A$  の宇宙迎撃兵器プラットフォームの数である。衝突破片として同じ低軌道体積を横切る宇宙迎撃兵器プラットフォームは、その相互作用を最大化する。この「宇宙殺戮地帯」における秒当たりの宇宙迎撃兵器ヒット当たりの衝突は次のとおりである。

$$\begin{aligned} dn/dt &= F \sigma_p = 4\eta S_{SBI}A / \pi u^2 \tau^3 \\ &= 40 \times 10^{-8} \text{ hits/SBI-s} \end{aligned} \quad (7)$$

弾道兵器弾道通過、 $\tau = 1,000$ 、の間にヒットした個々の迎撃機の低高度デブリの通過中合計衝突数  $N$  は、 $40 \times 10^{-8} / \text{宇宙迎撃兵器ヒット}$  である。そのヒットの確率  $P$  は、 $4 \times 10^{-8}$  である。再度、それぞれに 10 迎撃機を持つ 500 のプラットフォームについては、確率は 2 ヒットである。2、3、または 4 の宇宙迎撃兵器プラットフォームのヒットの確率は、それぞれ  $P_2 = 0.27$ 、 $P_3 = 0.18$ 、 $P_4 = 0.09$  である。それゆえ、宇宙迎撃兵器プラットフォームは 4 回ヒットされ、宇宙迎撃兵器破片の兄弟殺戮の中で失われる 10% のチャンスがある。500 の宇宙迎撃兵器プラットフォームがあるという数字が与えられているが、この数字は非常に低い。もし、破片の速度が 2 倍速いとしても、衝突確率は、それほど増加しないであろう。反対に、 $50 \text{ m}^2$  表面積の 500 の宇宙迎撃兵器プラットフォームは、それぞれ低軌道における受動的な衛星資産より大きな目標を提供する。能動的な衛星に関しては、数ははるかに少ない。しかしながら、宇宙迎撃兵器プラットフォームが意識的に標的にされたとすると、命中確率の計算は劇的に変化する。しかし、これは対衛星兵器の場合であり、ここで概論を述べたのとは異なるアプローチが必要である。平均自由パス、 $\lambda$  は、ある設定された時間  $t$  の間に発生する衝突数によって飛行距離を除いた数である。すなわち、

$$\lambda = \text{distance over time} / \# \text{ satellite collision in this time} \\ = vt / F \sigma t \quad (8) \\ = \text{Vol}_{\text{LEO}} / (S A \eta) \quad (9)$$

Determination of  $\text{Vol}_{\text{LEO}}$  is critical to because  $\text{Vol}_{\text{LEO}}$  establishes the confinement of the collision process. If  $\text{Vol}_{\text{LEO}} = 10^{12} \text{ km}^3$ , and  $S = 6,000 =$  active and inactive satellites,  $A = 1 \text{ m}^2$ , and 50,000 one gram particles per KKV hit on a BMW, then  $\lambda = 33 \times 10^8 \text{ km}$ , underscoring the how difficult it is to initiate random collisions in near-Earth space. However, if interactions are confined to a limited region in LEO where fragmentation processes occur and where SBI platforms are located,  $\text{Vol}_{\text{LEO}} = 22 \times 10^6 \text{ km}^3$ . The number of interacting satellites is also proportionally smaller. The cross-section of 500 SBI platforms, each with area  $\sim 50 \text{ m}^2$ ,  $\lambda \sim 18 \times 10^3 \text{ km}$ .

### 13. Shielding against OD

Effects of OD can sometimes be mitigated to a certain extent through deployment of shielding, such as the well-known Whipple shield that typically consists of two, thin, spaced, usually aluminum, walls. This configuration and variations thereof can  $= 40 \times 10^{-8} \text{ hits/SBI-s} \quad (7)$

provide some level of protection to spacecraft from the small but prevalent high speed OD impacts. Recently, enhanced protection shields have been developed utilizing exterior bumper layers composed of hybrid fabrics woven from a combinations of ceramic fibers and high density metallic wires. Other designs include completely metallic outer layers composed of high-strength steel or copper wires. These shields are designed to have reduced weights while providing protection against OD with mass densities up to  $\sim 9 \text{ g} / \text{cm}^3$  without generating damaging secondary debris particles (NASA 2003). Other design options include light-weight woven polymer fabrics with special metallic coatings and the use of geometric shapes to provide enhanced protection for particular orientations and projections.

Improvements in the development of OD shields include using sparsely distributed wires made from shape memory metals that can be stored in small volumes and be thermally activated into pre-determined shapes once in orbit. Another

除した数である。すなわち、

$$= \text{ある時間の距離} / \text{時間中の衛星衝突数} \\ = vt / F \sigma t \quad (8) \\ = \text{Vol}_{\text{LEO}} / (S A \eta) \quad (9)$$

$\text{Vol}_{\text{LEO}}$  の決定は、 $\text{Vol}_{\text{LEO}}$  が衝突プロセスの制限を構築することから重要である。もし、 $\text{Vol}_{\text{LEO}} = 10^{12} \text{ km}^3$ , そして  $S = 6,000 =$  稼動中および非稼動の衛星,  $A = 1 \text{ m}^2$ , そして 撃墜弾当たり弾道兵器へヒットする 50,000 の 1g 分子とすると、 $\lambda = 33 \times 10^8 \text{ km}$  となり、これは近地球宇宙における無作為の衝突を解き明かすことが難しいことを強調している。しかしながら、衝突が断片化のプロセスが発生する宇宙迎撃兵器プラットフォームが位置している低軌道の限定された区域に制限されたとすると、 $\text{Vol}_{\text{LEO}} = 22 \times 10^6 \text{ km}^3$  となる。関係する衛星の数もまた、比例して小さくなる。個々の面積が  $\sim 50 \text{ m}^2$  の 500 の宇宙迎撃兵器プラットフォームの断面は、 $\sim 18 \times 10^3 \text{ km}$  である。

### 13. デブリに対する防御

デブリの影響は、通常 2 枚の薄い、空間を持つアルミの壁によって構成される良く知られた Whipple シールドのような防御壁の展開設置によって時には緩和される。このような構成やそれを変化させたものが、宇宙船を小さな、しかしよくある高速度デブリ衝突から、何らかのレベルでの防御を提供する。最近、セラミックファイバーと高密度メタリックワイヤの組み合わせによる合成繊維からなる外部バンパー層を使ってより向上した防御シールドが開発された。他には、高強度鋼や銅製ワイヤで構成された完全にメタリックな外部層を適用する設計がある。これらのシールドは、2 次的なデブリ分子の被害を発生することなく、体積密度で  $\sim 9 \text{ g} / \text{cm}^3$  までのデブリに対して防御する一方で、重さを軽減している (NASA2003)。他の設計の選択肢には、特別のメタル塗装の軽量合成ポリマー繊維や、特定の方向や射出に対して特に防御を強化する幾何学的形状を使用する方法がある。

デブリシールドの機能向上の開発には、小さな体積に格納でき、軌道に載った後に予め定められた形状に温度的に活性化させることができる形状記憶メタルからなる疎分布ワイヤの利用がある。もう一つの可能性としては、物体の表面積/体積比を最小にし、かつ防御を最大にするように、拡大された体積の中で、いくつかの物体をデブリから回避させることである。近接編隊飛行のような宇宙作戦行動が、さらに流星、デブリ、低高度デブリに対してのリスクを低減し防御を最適化するかもしれない。

possibility is that sequestering several assets within an extended volume will minimize an assets surface/volume and maximize shielding. Space maneuvers such as close-formation flying may further reduce risk and optimize shielding use against meteoroids, OD, and SOD.

#### 14. OD and ASAT Issues

It can be assumed that if a space weapon is deployed its presence will be duly noted and countermeasures will be developed, tested, and deployed. The space based weapons systems would have a high level of vulnerability. Serious ASAT warfare among space powers could create enormous amounts of OD if explosions and mechanical fragmentation occurs with the center of mass of the debris field following the trajectory of the exploded satellite. Such an action would be counter-productive in symmetric warfare because space assets would be lost rapidly and indiscriminately by both sides. Parties with high asset exposure in space are not likely to engage in ASAT unless they became desperate and are left with very limited options.

Given current missile technology proliferation it is quite plausible that rogue- or non-state entities with few or no space assets to defend could wantonly attack assets to initiate enough OD that additional satellites could be indiscriminately destroyed. If such an unlikely scenario were to occur, it may constitute a successful outcome for a rogue state. However, technologically advanced powers could use more sophisticated and subtle methods to disable ASATs without creating significant amounts of OD. Such methods include electromagnetic pulses, laser beams, foulants, low velocity penetrators, etc.

するかもしれない。

#### 14. デブリと対衛星兵器の課題

もし宇宙兵器が配備されたとなると、その存在がすぐに認識され、対抗策が開発され、テストされ、配備されるであろうと仮定できる。宇宙ベースの兵器は、極めて攻撃されやすい性質を持つ。宇宙権力者間の厳しい対衛星戦争は、もし爆発や機械的な破片化が、爆破された衛星軌道にそったデブリ場のマスの中央で起きると、大量のデブリを生成する可能性がある。宇宙資産が両者側において急速にそして無差別に失われてしまうであろうという理由から、このような行動は、対称的戦争においては反生産的であろう。宇宙における高性能資産破壊の部隊は、それらが絶望的になり、非常に限定された選択肢しか残されていない状態にならない限りは ASAT に参加しそうにはない。今日のミサイル技術の拡散状況を前提とすると、防御すべき宇宙資産を少しまたは全く保有しない悪漢または身元不明の組織が、他の衛星が無差別に破壊され十分なデブリを起こすように恣意的に資産を攻撃することは有り得ることである。もし、このような有りそうの無いシナリオが発生したとすると、悪漢国家にとって成功裏の成果を得るかもしれない。しかしながら、技術的に先行している権力者は、大量のデブリを生成させないで ASAT を無能にするためのより複雑かつ巧妙な方法を使用するかもしれない。このような技術には、電磁波パルス、レーザービーム、ファウラント（軽い衝突を起こす兵器）、低速度進入兵器等がある。



## 15. Summary of computational results

The first issue regarding OD/BMW interception issue involves fragment generation from kinematic impact into BMWs when the KKV interceptor impacts the BMW at a velocity of roughly 2.4 to 12 km/s. If BMWs are ~ two orders of magnitude in mass greater than the interceptor, it will be almost totally obliterated with of spall fragments unloading from the rear and accelerated by the plasma generated at impact. The BMW will have a crater but essentially remain intact. As KKV mass increases, more of the BMW is destroyed, but this does not necessarily indicate the impact fragments will have higher velocities.

The second point is that the overwhelming majority of fragments never achieve OD velocity but follow a transient SOD trajectory status that reduces impact probability because SOD lasts ~ 2,000s or less. A few outlying fragments may achieve true OD status and even escape from Earth's gravity, but these outlying

fragments are few and do not effect astrodynamic or strategic SBI issues. The third point is the vastness of LEO where 50,000 or 500,000 particles ~ 1 g each are quickly dispersed and have mean free paths ~  $10^9$  km. There may be local interaction in space where the particle densities are anomalously high and the mean free path is regionally reduced, but these are thought to be rare exceptions. Fourth, the chances of SOD satellite impact within the transient time frame, at most a few thousand seconds, are minimal.

## 16 . Conclusion

The generation OD and SOD fragments from SBI impacts on BMWs will not cause a significant amount of damage to Satellites and other SBI platforms in LEO. Under certain circumstances, when a concentration of SBIs is deployed, a possibility exists that some SBI platforms may be lost due to fragments ejected from BMWs impacted by KKV's. This would be a limited fratricide with only about three out of 500 platforms being lost. The

## 15 . 計算結果のまとめ

デブリ/弾道兵器衝突の課題に関する最初の課題は、撃墜弾迎撃機が弾道兵器に概略 2.4 から 12km/s の速度で動的衝突したときに生じる破片に関するものである。もし、弾道兵器が迎撃機よりその物量において、おおむね 2 乗のオーダーで大きい場合は、衝突において生成されたプラズマによって加速された、背後から射出される破片により完全に抹殺される。弾道兵器は弾孔を形成するが、本質的には完全なままである。撃墜弾の物量が増加するに従い、弾道兵器の多くの部分が破壊されるが、それは衝突した破片がより高速度であることを必ずしも示唆しない。

第 2 番目の点は、破片の大部分はデブリの速度に達しなく、低高度デブリは概ね 2,000s (秒) またはそれ以下で継続することから、短時間では低高度デブリ弾道状況に従う。少量の特異な破片は、真のデブリ状態に到達し、場合によっては地球の重力から離脱することさえあり得る。これらの特異な破片は少数であり、天体ダイナミックまたは戦略的宇宙迎撃兵器問題に影響を与えるものではない。第 3 の点は、低軌道の巨大さであり、そこでは 50,000 または 500,000 分子、個々が約 1g、が急速に発散し、~  $10^9$  km の平均自由パスを持つ。分子密度が非常に高く、平均自由パスが地域的に減じられた場所では、宇宙において地域的な相互作用があるかもしれない。しかし、これらは、まれな現象であると考えられる。第 4 の点は、長くて数千秒という一時的な時間フレームの中での低高度デブリ衛星衝突のチャンスは最小である。

## 16 . 結論

弾道兵器の宇宙迎撃兵器衝突からの生成デブリと低高度デブリ破片は、衛星や他の宇宙迎撃兵器プラットフォームに対して顕著な被害を与えるものではない。ある状況下では、宇宙迎撃兵器の集中が起きたとき、いくつかの宇宙迎撃兵器プラットフォームが、撃墜弾によって衝突された弾道兵器から射出された破片により破壊されるかもしれない。これは、500 プラットフォ

reason for this limited effect from fragment debris is that almost all but a few of the fragments become SOD and are constrained to travel close to the original BMW (ballistic) trajectory because relative to the (sub-orbital) center of mass velocity the fragment velocity is small. This trajectory would have a lifetime  $<2,000$ s and occupy a relatively small volume in LEO since the fragmented particles have a relatively small spread velocity and short sub-orbital lifetime. The combination of occupying a relatively small volume of space within a small transient period substantially reduces SOD collision cross-sections. The few high velocity fragments directed away from Earth's surface may achieve OD status but are negligible compared to the existing OD and meteoroid flux.

The (constant) background OD and meteoroid flux by far poses the greatest threat to the SBI platforms and satellites. Indeed, one could expect to have at least two to five SBI platforms damaged each year from these background fluxes. Whether this damage is would be great enough to disable the platforms will depend on the size and velocity of the impact, where on the platform it hit, and how well protected the platform and its components are. But SBI platforms must be maintained, and that could substantially add to the life costs. Ground based interceptors are not subject to such damage levels and are much easier to maintain. One may conclude that neither the presence of background OD and meteoroid flux nor SOD fragment from BMW interception will substantially affect the integrity of either satellites or SBI platforms.

There are special circumstances where OD and SOD can become hazardous to space assets in regions of space such as a cataclysmic fragmentation of the space station or deliberate ASAT warfare. Based on

ーム中の約 3 というような確度の限定された相殺である。破片屑からこのような限定された影響が生じる理由は、破片の一部を除くほとんど全てが低高度デブリになるということ、そして、それらはオリジナルの弾道兵器（弾道）軌道に近い範囲に限定され、（低軌道）物量の破片の相対速度は小さいからである。この弾道は、2,000秒より小さいライフタイムを持ち、そして、断片化された分子は、相対的に小さい拡散速度、短い低軌道のライフタイムを持ち、低軌道で相対的には小さい体積を占めるからである。宇宙において相対的に小さな物量であり、短時間のものであるということが、低高度デブリの衝突断面を顕著に削減する。地球表面から遠ざかる少数の高速破片は、デブリ状況を構成するかもしれない。しかし、既存のデブリと流星流動と比較すると無視できるものである。

コンスタントなバックグラウンドデブリと流星流動は、それよりはるかに宇宙迎撃兵器プラットフォームに対する最も大きな脅威として問題である。実際に、このようなバックグラウンド流動により、毎年少なくとも2~5の宇宙迎撃兵器プラットフォームが損害を受けることが想定される。この被害がプラットフォームを不能にさせるに十分に大きなものであるかどうかは、その大きさと衝突時の速度、プラットフォームの衝突場所、プラットフォームとその要素がどの程度良く防御されているかによる。しかし、宇宙迎撃兵器プラットフォームは、メンテナンスされなければならないし、それはライフコストを著しく増加させる可能性がある。地上ベースの迎撃機はこのような被害レベルの対象とはならないし、メンテナンスもより容易である。このようなことから、バックグラウンドデブリと流星流動も弾道兵器迎撃機からの低高度デブリ破片が、衛星や宇宙迎撃兵器プラットフォームの元の姿の保存性に顕著に影響すると結論できる。

デブリと低高度デブリが、宇宙基地の大洪水破片や故意の ASAT 戦争のような、宇宙施設に対して危害を加えるものとなる可能性のある特別の状況がある。これらでの見要の場合のシナリオは

preceding analysis for a worst case scenario, the following conclusions are drawn for satellites, SBI and other assets deployed in LEO.

1. SOD is transient, sub-orbital, and generated in relatively small amounts during SBI impact in a vast volume of space. It is unlikely that fragments from SBI impacts on BMWs will significantly contribute to the OD population in LEO or collateral damage to satellites and/or SBI platforms. SOD does not pose long term threat to operations in LEO.
2. Background OD and meteoroid fluxes pose minor but real hazards to SBI deployment. Some protection against this background flux and SOD can be achieved though hardening and orienting satellite and SBI platforms.
3. There are some cases where collateral fragmentation can achieve anomalously high SOD and OD flux level in a very narrow volume of LEO.
4. Deployment of space based weapons introduces additional maintenance, reliability, and security factors that do not exist for interceptors that are sequestered on or within the earth or sea. Shielding may provide some level of protection for space assets.

### 17. Acknowledgements

I thank N. Johnson for providing critical opinions, data, and guidance on the subject of orbital debris and P. Hammerling and P. Sforza for critical comments. This research was partially supported by a grant from the Federation of American Scientists.

### 18 . References

状況がある。これまでの最悪の場合のシナリオの解析に基づき、低軌道に配備された衛星、宇宙迎撃兵器、その他の資産について以下の結論が導ける。

1 . 低高度デブリは、膨大な宇宙空間の中で宇宙迎撃兵器の衝突の間に比較的少量、短時間、低軌道で生成される。弾道兵器への宇宙迎撃兵器の衝突からの断片が、低軌道におけるデブリの密度に顕著に影響したり、また衛星や宇宙迎撃兵器プラットフォームに副次的に被害を与えるということはあるとありそうでない。低高度デブリが低軌道における作戦に長期間の脅威を与えるということはない。

2 . バックグラウンドデブリと流星の流動が、宇宙迎撃兵器配備に対してマイナーではあるが本来のハザードとなる。このバックグラウンド流動と低高度デブリに対する何らかの防御が、衛星と宇宙迎撃兵器プラットフォームを硬化し姿勢を制御することにより実施できる。

3 . 副次的な断片化が、非常に制限された体積の低軌道において、異常に高い低高度デブリとデブリ流動レベルとなる場合がある。

4 . 宇宙ベースの兵器の配備は、地球の陸地や海に隔離した迎撃機において発生しない追加のメンテナンス、信頼性、セキュリティ要素を必要とする。防御装置が宇宙資産のあるレベルの防御を可能とする。

### 17 . 謝辞

N. Johnson には、デブリの主題に関して重要な意見、データ、指導を頂いたことに、P. Hammerling と P. Sforza に対しては、重要なコメントを頂いたことに感謝する。この研究は、部分的にアメリカ科学者協会からの助成金によって支援された。

### 18 . 参考文献

<p>Canavan,G, personal communication, 2003.  Love,S.G and Brownlee,D.E.,A Direct Measurement of the Terrestrial Mass Accrerion rate of Cosmic Dust, Science, 262, 550-553, 1993.</p> <p>Johnson,N.L.,Krosko,P.H.,Liou,J.,C.,and Anz-Meadeor,P.D.,”NASA’s New Breakup Model of Evolve,” Adv.Space Res.,vol.28,#9,1377-1384,2001.</p> <p>Johnson,N. personal communications 2003  Johnson,N, “History and consequences of on-orbit break-ups,”Advances in Space Research, vol.5,#2,11-19,1985.</p> <p>Lawrence,J.,personal communication 2003</p> <p>NASA, Technical Briefs, Sept 2003.</p> <p>National Research Council,”Orbital Debris; a technical assessment,”Gleghorn,G,chair, National Academy Press, Wash.D.C.,1995.</p> <p>Remo,J,”Impact Driven Fragment Velocities,” report delivered to LASI,2003 under consulting contract #C-8223 also submitted to Impact.Engr.,2003.</p> <p>Remo,J.I,”Orbital and Sub-orbital Debris generation in Space Warfare,” in preparation 2003 b.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Canavan,G, personal communication, 2003.</li> <li>• Love,S.G and Brownlee,D.E.,A Direct Measurement of the Terrestrial Mass Accrerion rate of Cosmic Dust, Science, 262, 550-553, 1993.</li> <li>• Johnson,N.L.,Krosko,P.H.,Liou,J.,C.,and Anz-Meadeor,P.D.,”NASA’s New Breakup Model of Evolve,” Adv.Space Res.,vol.28,#9,1377-1384, 2001.</li> <li>• Johnson,N. personal communications 2003</li> <li>• Johnson,N, “History and consequences of on-orbit break-ups,”Advances in Space Research, vol.5,#2,11-19,1985.</li> <li>• Lawrence,J.,personal communication 2003</li> <li>• NASA, Technical Briefs, Sept 2003.</li> <li>• National Research Council,”Orbital Debris; a technical assessment,”Gleghorn,G,chair, National Academy Press, Wash.D.C.,1995.</li> <li>• Remo,J,”Impact Driven Fragment Velocities,” report delivered to LASI,2003 under consulting contract #C-8223 also submitted to Impact. Engr.,2003.</li> <li>• Remo,J.I,”Orbital and Sub-orbital Debris generation in Space Warfare,” in preparation 2003 b.</li> </ul>
--	---



## APPENDIX F

### CAPABILITIES OF POTENTIAL ADVERSARIES

#### 1. China's ASAT capabilities

As a potential response to US missile defense and "space control" plans  
(DRAFT: July 1, 2003; Submitted to FAS Report )

**Hui ZHANG \***

Kennedy School of Government, Harvard University

79 J.F. Kennedy Street, Cambridge, MA 02138, USA

Phone: 617 4955710; Fax: 617 4960606

Email: [hui\\_zhang@harvard.edu](mailto:hui_zhang@harvard.edu)

China is concerned about U.S. missile defense and "space control" plans, which would lead to weaponization of outer space and stimulate a costly and destabilizing arms race. China is further concerned that the US missile defense program, as currently advertised, would neutralize China's strategic nuclear deterrent. Many Chinese firmly believe that China should take every possible means to maintain the effectiveness of its nuclear deterrence to negate the threats from missile defense and space weaponization plans. Many Chinese officials have made it clear that they would respond to space weaponization by building up its nuclear arsenals and reconsidering its participation in multilateral nuclear arms control agreements.

\*This paper is mainly based on a section in a Working Paper "Chinese Perspectives on US Space Plans" for Committee on International Security Studies, American Academy of Arts & Sciences. The author would like to acknowledge the support of Committee on International Security Studies, American Academy of Arts & Sciences. The views expressed in this paper are the author's alone and do not necessarily represent any government policy.

(後略)

## **2. Russian Military Space Capabilities**

### **Pavel Podvig**

Russia is one of the few countries that maintain extensive space industry and carry on a number of military-related space programs. In many aspects the Russian civilian and military space program is comparable to that of the United States, although sometimes in intent rather than in actual capabilities. In any event, the expertise that the Russian space program has makes it a very important player in any future space-related developments.

It should be noted, however, that the existing Russian capabilities in space should be assessed with caution, since the core of the existing Russian space program was developed during the Soviet times. Although Russia has managed to maintain some parts of the Soviet program successfully, some neglected, so not everything that existed in the Soviet Union still exists today. Some important components of the industrial and organizational infrastructure are no longer capable of supporting development of space systems.

(後略)

## APPENDIX– G

### Commentary on the APS Report on Boost-Phase Missile Defense

John L. Remo\*

One Brackenwood Path

Head of the Harbor

St. James, New York 11780

<jremo@cfa.harvard.edu>

\*Consultant to the Federation of American Scientists on Space Weaponization

April 16, 2004

**Abstract:** A brief review and summary on the recently published "Report of the American Physical Society Study Group on Boost Phase Intercept Systems for National Missile Defense" as related to space weaponization is presented. Comments on some of the findings and conclusions are also discussed.

#### Introduction

A brief review, summary, and extension of the recently published "Report of the American Physical Society (APS) Study Group on 'Boost Phase Intercept Systems for National Missile Defense'" (APS, 2003) to the Federation of American Scientists (FAS) "Report of the Advisory Committee on Space Weaponization " is presented. It is the purpose of this review to provide a link between the APS study group and the FAS advisory panel publication in order to better interpret some of the issues involved in the national missile defense (NMD). Also, in this commentary, policy issues, not addressed in the non-political APS study, are briefly discussed.

The grounding or the rationale for NMD rests upon postulated external threats to the United States (U.S.). NMD as putatively and currently envisaged does not mean to provide retaliatory cover for a first strike capability against a modern industrial nation with a substantial arsenal of nuclear, biological, and chemical (NBC) weapons. Such a nation can, in response to the development of an extensive NMD effort, simply choose to produce enough war- heads, decoys, and missiles to

(後略)

<http://www.fas.org/main/content.jsp?formAction=297&contentId=313>

**Press Coverage of FAS Briefing on Weapons in Space,**

October 7, 2004

Contact : Monica Amarelo (mamarelo@fas.org)

Last modified : April 7, 2005 9:40 AM

InsideDefense was among the media which covered the release of **Ensuring America's Space Security**, the report on how the United States can best protect our satellites by the FAS Panel on Weapons in Space.

"The bottom line of the report is that, at least for the next five years, there is no legitimate national security justification for the United States to put weapons in space- that is, in orbit around the earth," Leonard Weiss the Panel chairman said at the briefing, according to the article by InsideDefense managing editor John Liang.

The article said why the FAS study was needed.

In January 2001, a commission led by Donald Rumsfeld warned of growing threats to U.S. space assets from so-called "rogue states." The commission cited the dangers of a Pearl Harbor-style attack in space. It recommended that the President be given the option of putting weapons in space to protect U.S. assets. The article noted that Rumsfeld, upon taking over as defense secretary, put in place many of his commission's recommendations.

The article quoted Weiss as explaining that his FAS panel examined the arguments put forward by proponents of space weapons. "But in every case we identified alternative ways of mitigating vulnerabilities and addressing threats that, in our view, are superior to putting weapons in space," he said.

Weiss also asserted that none of Rumsfeld's space commission's fears had materialized. His panel asked, "Are weapons in space the best way of protecting those assets, recognizing that weaponizing space can bring unintended consequences, including the acceleration of weaponization by others"

Due to "uncertainties about the future," the FAS panel recommended that research and development on space weapons continue at an "appropriate level" to keep US options open. But "By 'appropriate,' we mean a level that does not create an unstoppable momentum toward deployment regardless of the need," Weiss explained.

InsideDefense is the online component of Inside the Pentagon publications.



## **Statement from Richard Garwin on FAS' Space Panel Report**

Contact : Monica Amarelo (mamarelo@fas.org)

Last modified : April 7, 2005 11:00 AM

<http://www.fas.org/main/content.jsp?formAction=297&contentId=316>

Statement from Richard Garwin on FAS' Space Panel Report

Contact : Monica Amarelo (mamarelo@fas.org)

Last modified : April 7, 2005 11:00 AM

### **Statement of Richard L. Garwin**

**IBM Fellow Emeritus**

**IBM Thomas J. Watson Research Laboratory**

On Ensuring America's Space Security, Report of the FAS Panel on Weapons in Space

"The FAS Panel on Weapons in Space has performed an important public service with its timely and informative report on space weapons. "

"The Panel membership includes several with important records of contribution to the national security, who are not automatically identified as arms controllers."

"The Panel's recognition that "**superior space weaponry**" is of no benefit to the United States so long as others can pose a significant threat to our military satellites is an essential point."

"The Panel opts for U.S. leadership in developing legal and practical rules for space operations, in order to maintain essential U.S. military (non-space-weapon) capabilities."

October 7, 2004

本作業は、以下の 14 名のメンバの参加により実施された（順不同、敬称略）:

レビューワ	exJASDF	笹尾 昭	a.sasao@ad.cyberhome.ne.jp
レビューワ	Hitachi	松本 光	hikari.matsumoto.uf@hitachi.com
レビューワ	NBCR	木村 靖二	kimura80@mub.biglobe.ne.jp
レビューワ	JAXA	五家 建夫	goka.tateo@jaxa.jp
AJIKO		那須 充	mi.nasu@ajiko.co.jp
Hitachi		栗田 康弘	yasuhiro.kurita.hx@hitachi.com
Hitachi		藤田 紀恵	norie.fujita.bk@hitachi.com
Imageone		葛岡 成樹	kuzuoka@imageone.co.jp
JMOS		門脇 隆	kadowaki.takashi@jmos.co.jp
Melco		鈴木 敏且	binspace2025@ybb.ne.jp
NIDS		橋本 靖明	hashimoto@nids.go.jp
NISTEP		辻野 照久	tsujino@nistep.go.jp
Zenrin		穴井 誠二	sei_ji_anai@zenrin.co.jp
Space Library		松田 光	hikaru-matsuda@space-library.com

特に栗田、藤田 両名には Sec.1 Background, Sec.2 Historic Growth of Space Architecture, Sec.4 Protecting U.S. Space Systems を、また、那須氏には、Appendix E を含め宇宙デブリ関係を、まとめて担当しドラフトを提供いただいた。それぞれのレビューワには専門的分野の観点から目を通していただいたが、五家氏には宇宙デブリに、木村氏には、核爆発に関連する部分の用語や表現に、詳細な検討をいただいたことを申し添え、各位への謝辞といたしたい。

事務局 Space Library 松田