

デブリの本質の理解に向けて

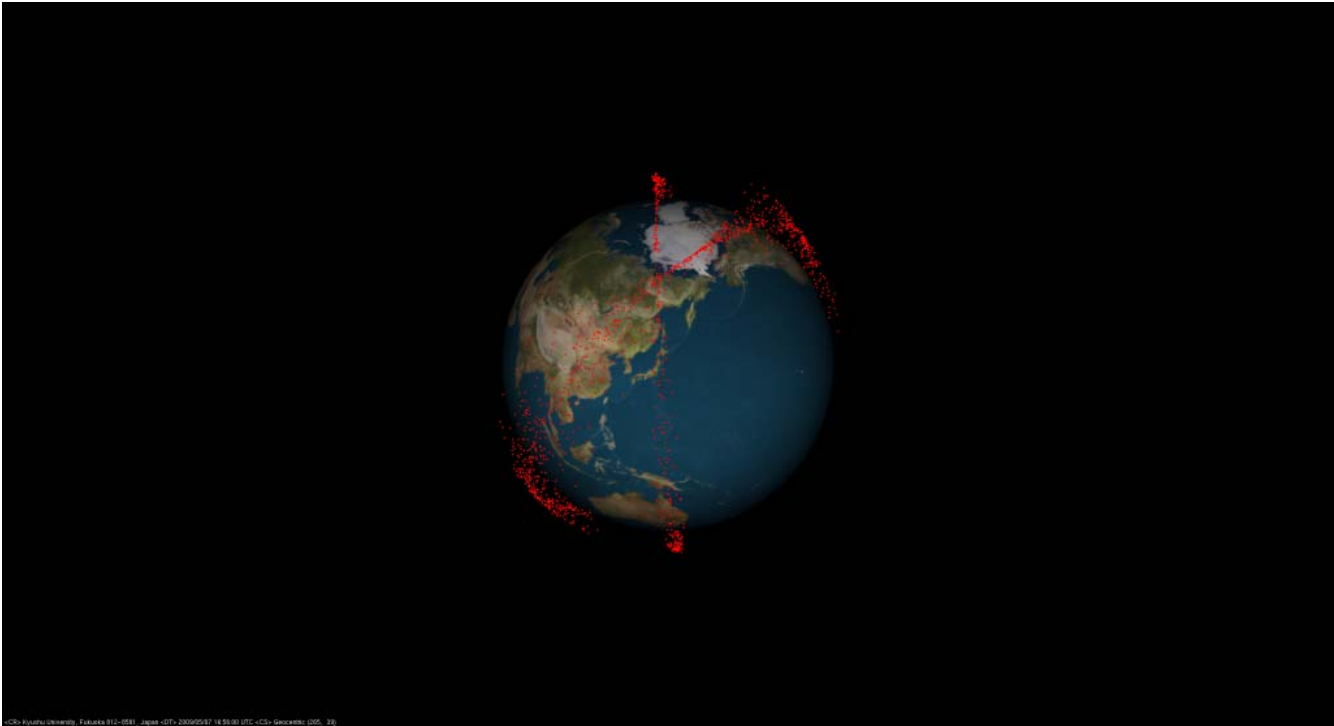
(有)QPS研究所
八坂哲雄

つ い最近、東京の品川で「人類の持続的宇宙開発利用のための国際シンポジウム」が開かれ、日米欧の研究者、政策担当者の参加にふくめ、日本政府要人の出席もあったそうである。1990年代初めに「デブリ研究会」を立ち上げた時から考えると文字通り隔世の感がある。当時は、「あんまりそんな話を広めると、宇宙開発の足を引っ張ることになる」との忠告めいた脅迫がひそかにささやかれる等、世の中は決して一色ではなかった。今は、デブリと言えやお茶の間の格好の話題であるだけでなく、宇宙開発の現場でも「なく子も黙る」最優先課題となっている。学生が作る小型衛星でさえも、デブリ低減のガイドラインに合致するよう涙ぐましい努力をしている。

小型衛星といえば、一時、デブリを作り出す元凶のように言われた時がある。確かに小型衛星は寿命が短いうえに、軌道制御の能力を持ったものはまれであるから、打ち上げてから数年でデブリの仲間入りをしてしまう。しかも、何個もまとめて打ち上げられることが多いので確かに目立つ。デブリの問題は素人わかりがするうえ、スポットの当て方によってさまざまな問題を浮かび上がらせることができる。一体問題の本質は何なのか、じっくり考えてみないと本当の問題を見逃してしまう可能性がある。

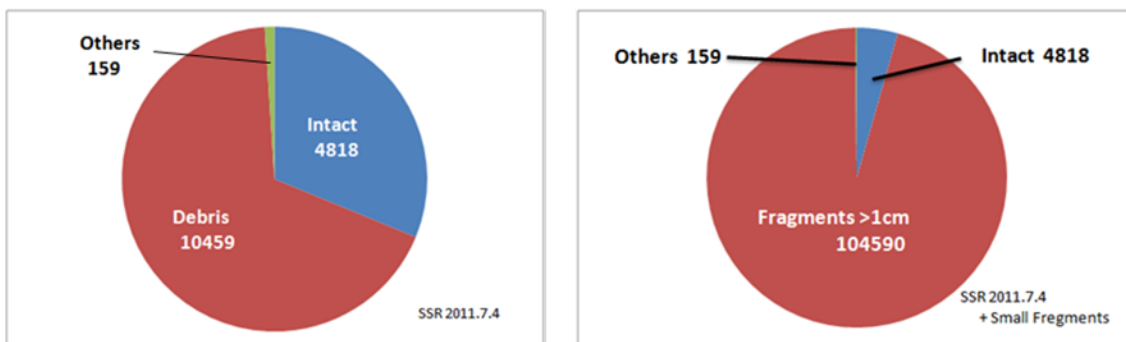
2012年2月の時点で、地球の周りには17000個の物体が存在する(米国Space Surveillance Network、SSNによる)。このうち通信衛星など稼働しているのは1000個以下しかないので、16000個強がデブリの範疇にはいる。17000個を別の見方で分類することもできる。このうち、人工衛星として打ち上げられたものは3800個、ロケット機体が2000個。しからば、残りの1万個以上の物体は何かといえば、ロケットや衛星が壊されたために生じた破片である。たとえば、2007年に中国がASAT実験を行った結果、3000個の破片が観測された。また、2009年のイリジウムとコスモスの衝突では双方が2000個の破片と化した。そもそも最初に宇宙で破壊現象が起きたのは、スプートニクが打ち上げられてから4年後の1961年である。アメリカがTrasit-4Aという衛星を無事打ち上げた2時間後、その打ち上げに使われたロケットの最上段が突然爆発した。その頃の米国では、ようやくNORADの宇宙監視網が完成し、宇宙物体のカタログが作られ始めたころである。この日、この件で一挙に物体数が3倍に増えてしまった。すなわち一つの破壊事象で、米ソの両国がそれまでに打ち上げた物体の総数の2倍に近い300個もの破片が発生したのである。それ以来現在まで、宇宙で作られた破片の数は、打ち上げた物体の数をはるかに凌駕し続けている。

以上のことから、一口にデブリといっても、その中で破片がかなりの部分を占めている事がわかる。もう一步踏み込んでみよう。今までの話はNORADから引き継がれた宇宙監視網で観測した結果で成り立っている。良く知られているように、ほぼ10cmより大きいものしか観測に引っかからない。爆発や衝突で生じる破片はいろいろのサイズがあり、小さいものほど指数関数的に数が増えることが分かっている。衝突で相手に重大な被害を与える大きさにして数センチ程度の破片であれば、10cmクラスの破片より確実に10倍多い



▲ イリジウムとコスモスの衝突によるデブリ分布(4ヶ月後)
(九州大学 花田俊也教授提供)

と考えられる。(NASAの破碎モデルでは、質量が一桁小さくなるごとに数が5.6倍となる)
まとめて図にまとめると以下のようなになる。



左の図はSSNのデータから地球を脱出したもの、軌道が分からないものを除き、打ち上げてそのままの衛星とロケット(Intact)、破片(Debris)ならびにその他(Others)に分けてそれらの数を示したもの。その他には分離したシュラウド、原子炉衛星から漏れ出た液体金属のしずく、分離の時に放出される部品が含まれる。右の図は、左の図に、さらに小さな1cm以上の大きさの破片を含めた場合の図である。これらの図から、デブリの問題とは破片の問題であることがわかる。1961年以来、爆発、衛星破壊実験、衝突によるブレークアップ現象が200回も観測されており、その結果として破片が集積したのが現在の宇宙環境である。衛星を幾つ打ち上げようと、衛星やそれを打ち上げたロケットがブレークアップ(破碎)しなければ、深刻な問題とはならない。

破片が生成する原因が爆発、衛星破壊実験、衝突であると前述した。爆発はロケット最終段にわずかに残された残留燃料が何らかの原因で引火するケースが多く、バッテリーの過熱が原因とされるケースもある。いずれにしる偶発的に起こる。これに対し、衛星破壊実験は意図的に破壊することであり、たちが悪い。偶発的爆発に対しては、原因の解明と技術的解決策が明らかにされてきた。国レベルや国際的な各種のガイ

ドラインはこの種の爆発の対策を詳細に規定している。衛星破壊実験は国際条約で規制することはできていないが、破片が長い間軌道にとどまるような高度での実行を自粛するよう国連のガイドラインなどで求めている。爆発と実験は過去には破片を作り出す主要因であったが、可能な対策が完備してきたので、これからは主役を衝突に交代することになる。

衝突を次の種類に分類すると対策を考える上で都合がよい。

- 1) 稼働中の衛星同士
- 2) 稼働中の衛星と非稼働衛星ないし物体(デブリ)
- 3) 非稼働衛星/物体同士

稼働中の衛星は軌道・位置の管理がなされ、軌道制御能力を持っているので、稼働中の衛星同士の衝突は注意をすれば本来避けられるもの。イリジウムのようなコンステレーションでは本来衝突の可能性は高いので、厳密な管理をすることが必須である。静止衛星でも同じく管理が常識である。ところが、自分のシステム内の衛星については管理することは当たり前でも、他の類似システムに属する衛星までモニターすることはまれである、というか、不可能である。SNNのデータから他の衛星の軌道情報は得られる。しかし、このデータを衝突解析に使うことは適切でない。衝突を取り扱うには軌道要素の中央値に加え、確率データ、いわゆるCovarianceが必要であるが、SNNは中央値しか公開していない。解決策としては単純である。アメリカがCovarianceまでを公開するか、あるいは、衛星保有機関が相互に軌道データを交換すること。後者が将来的にも有利であることは自明である。

稼働中の衛星に非稼働の物体、つまりデブリが接近する場合は事情が全く異なる。2009年のイリジウムとコスモスの衝突はこのケースである。非稼働物体はその軌道制御がもはやできず、トラポン機能も当然失われているので、通常の方法で軌道を同定することもできない。このような物体の軌道をモニターしているのは、やはりSNNである。ここでもSNNがCovarianceまで公開することが全面解決への道を開くことになるが、アメリカとしてはその方向へ動く気配はない。しかしながら、イリジウムとコスモスの衝突の結果を受けて、アメリカは次善の策として、異常接近が予測される場合にJoint Space Operation Center (JSOP) から衛星オペレーターに通知を出すようになった。この通知には双方の物体の軌道要素が詳細に記述され、オペレーターサイドではどれほどの危険性があるか自分で判断ができるようになっている。衝突回避の軌道制御をするかどうかはオペレーターサイドの判断による。

一方、非稼働物体同士に関しては、如何に精密に衝突解析が行われ、予測がされようとも、衝突を回避する手段はない。将来的にはこのケースが最も憂慮される。現在これに対処する手段としてガイドラインに含まれているのが、いわゆる25年ルールである。衛星やロケット上段は、ミッションを終えた時点から25年以内に大気圏に突入させる等の方策で軌道上から除去することが求められている。これから打ち上げられる衛星やロケットはこれに準拠したものとなるであろうが、問題はすでに軌道上にある物体の取り扱いである。何百年もの軌道寿命を持つ何トンもの大型物体がすでに数百個は存在する。何らかの回収技術を開発してより危険なものから除去してゆくことしか対処手段はない。日本をはじめとして各国ではそのような技術開発を行っており、IAC等の国際会議でもこの方面の報告と論議の場が提供されている。

このようにみると、今後避けるべき破片の生成に対しては、各種のガイドライン等で技術的な対処策が明らかになっている。また、少なくとも稼働中の衛星に対してはJSOPの自発的な通知発行によって衝突の危険性は察知され、必要な場合の対処もできるようになった。最後に残るのが非稼働物体＝デブリ同士の衝突である。JAXAにおいて導電性テザーによる物体落下などの研究が進んでいるのは確かである。しかし、これを実現するプロセス、つまり実験、実証段階から毎年数個であれ処理してゆくシステムの構築とそのための費用についてはいまだ明らかにされたことはない。技術者はそのような技術開発には熱意を持っている。問題はその技術を適用して現実的なシステム化をすること、特に、一回のオペレーションがどれくらいのコ

ストになり、それを何年間継続する必要があるかを考えることで、その技術そのものの評価をすることが極めて重大であろう。筆者の大まかな予測では、オペレーションを50年オーダーで継続することが必要である。その間、システムを維持・運用してゆくための費用はどれほど必要であろうか。間違いなく現在の宇宙機関、ないし、その連合体だけで行うのは困難であり、新たな国際機関が必要であろうと考える。見方によっては、民間セクターにあっても極めて魅力的な投資対象ともなろう。確実なことは、政府が強くコミットすることが必要であり、そのためには広く一般的支持が前提となること。

筆者は、Debris Indexなるものを提案してきている。これは一般の人でも宇宙物体の危険性を認識できる指標である。専門家は高度な知識とデータを用いて危険性を計算することができる。しかし、専門家がこのような評価を独占している限りは、デブリの本質の理解とこれから求められるアクションに対する国民的広がりは無理である。

注) Debris Index: ある物体が軌道上寿命の間に幾つの破片を生成するかを示す指標。

$$I_{DEB} = \alpha M \cdot A \cdot F(h) \cdot T_{Orb}$$

衝突回避運動をする場合は、

$$I_{DEB} = \alpha M \cdot A \cdot F(h) \cdot \varepsilon_{AVOI} \cdot T_{Orb}$$

ただし、 M は物体質量、 A は断面積、 T_{Orb} は軌道にとどまる年数(軌道寿命)。専門家が国際合意により提供するべきは、 $F(h)$ =高度 h におけるデブリフラックス、 α =単位質量の物体が生成しうる破片数、 ε_{AVOI} =衝突回避マヌーバー(Collision Avoidance: CA)の効果。初期的な前提で求めた代表的物体の値は次の通り。

Satellite Type	α 1/kg	Altitude km	Flux 1/year/m ²	Orbital Life year	Mass kg	Area m ²	Debris Index	
							w/o CA	CA
Typical SSO Sat	30	800	10 ⁻⁴	25	800	4	269	27
Typical GEO Sat	3	36000	10 ⁻⁶	10	2000	10	0.6	0.1
Object in SSO	30	800	10 ⁻⁴	100	2000	10	6000	N/A
Small Sat	30	800	10 ⁻⁴	25	50	0.25	0.9	N/A
Cube Sat	30	800	10 ⁻⁴	25	1	0.01	0.001	N/A

Fragments / Flux considered > 1 cm

Tentative Assumptions

$$\alpha = 30 \text{ (LEO) and } 3 \text{ (GEO), } \varepsilon_{AVOI} = 0.1$$

$$F(800) = 10^{-4} \text{ (1/year/m}^2\text{), } F(36,000) = 10^{-6} \text{ (1/year/m}^2\text{)}$$

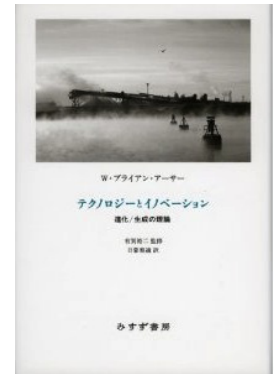
SPACE JAPAN BOOK REVIEW

衛星通信研究者が見た

Reviewer: 飯田尚志 編集顧問 AIAAフェロー

W・ブライアン・アーサー, 有賀裕二監修, 日暮雅通訳: "テクノロジーとイノベーション 進化/生成の理論", みすず書房, 2011.

(原本) W. Brian Arthur: "The Nature of Technology What Is and How It Evolves", Free Press, 2009.



本書の著者 (W.B.Arthur) については, 私が参考文献[1]で web2.0 のことを書いた中で, インターネットが現れたことが産業革命の黎明期と酷似しているとの見解を引用したこともあり, 注目していた。本書は技術開発とイノベーションについて論じていることと, 本書の中には当然宇宙開発関係も引用されていることから Space Japan Review の書評として適するものと考えた。W.B.Arthur は, 電気工学を学んだ後, 経済学に進み, 複雑系理論の開拓者のひとりとして知られるといわれることである。サンタフェ研究所招聘教授, パロアルト研究所客員研究員でもある。同氏は大の飛行機好きであるとともに, 旧式の無線機器も好きとのことで, 我々にも身近に感じられる方ではないかと想像している。

本書の主たる主張は, 参考文献[2][3]の書評にあるように, 技術が経済に貢献するという従来の見方を逆転させ, 技術は生物のように, 自律的に進化発達するもので, 経済はその結果でしかないというものである。技術は, 既存の技術の組み合わせから新しい技術が生み出され, その技術の構成要素も技術であるという。このように考えると, 技術も複雑系の一つとなるということである。経済学の素人の私にとってはそのことは成る程と思うに止め, 以下ではむしろ本書で書かれている通信技術者・研究者に興味あることについて紹介したい。

まず, 科学と技術はどのような関係にあるかである。技術は応用科学だという考えもあるが, W.B.Arthur は違った考えを持つ。科学と技術は互いにしっかりと結びつき, 技術は科学の中に織り込まれ, 科学は観測と推論による洞察を得る手法と装置を技術から供給されるからであるという。技術は科学の応用だなどという, 設計が上流で製造が下流だということと同じように, 私は予て科学が上流で, 技術が下流だというようなニュアンスを感じ, 違和感を感じていたのだが, W.B.Arthur の考え方は私の違和感を一掃するものである。

また, 本書では技術が技術の組み合わせで発展していく例としてレーダが何度も取り上げられている。私は学生のときはレーダを研究対象としていたので興味があるのだが, レーダ以前では, 1930 年代, 海峡を越えてイギリスに接近してくる航空機を, 5m 弱のコンクリート製の大型音響ミラーと極めて聴覚の鋭い人間が, 32km 程度先の音を検知していたということである。この技術が電気信号技術により第2次世界大戦では遙かに有効なレーダとなった。レーダの基本である大電力送信管について, 以下のように述べられている。1940 年にジョン・ランドール (John Randall) とハリー・ブート (Harry Boot) は, 空洞マグネトロンを思いついた。原理は何かのヒントから導き出されるもので, ランドールが書店で見たヘルツ (Heinrich Hertz) の本からシリンダー型共振空洞という発想を得たということである。

さて, 本書で宇宙関連は, プロジェクトがきわめて複雑な場合, つまり, 一つの技術の直接的利用から何段階か進んだ構成要素から形作られる技術の例として挙げられている。例えば, 火星探査車は, 駆動モータとデジタル回路, 通信システム, ステアリングサーボ, カメラ, 車輪を組み合わせたものであり, また, 月への宇宙計画では, 様々な先行技術から習得したものから組み立てられている。

さらに, 新しいものを作りあげるプロセスであるイノベーションについては, 四つのメカ

ニズムがあるとしている。つまり、無数の細かな進歩と調整が積み重なった技術における新解決策、根源的に新しい技術、新技術に追加して発展する技術、技術本体全体である。イノベーションのこれらのさまざまな側面はどれも重要であり、単に独創性というだけのものとは違う。イノベーションが創発されるのは人々が複数の問題、とくに十分識別された諸問題に直面したときだということである。つまり、あらゆる手段に没頭した人々がようやく解決策を思い付いたとき、イノベーションが生まれる。このイノベーションは技術の発展とも進化ともとらえられ、例として挙げられているのは、1900年代初めの三極管の発明で、無線信号の受信感度を高める実験を行っていたリー・ド・フォレスト (Lee De Forest) は、二極管に第3の電極を挿入してみるにより三極管を得た。これは当時の無線信号にとっては待望の発明であった。

また、本書では、技術自身が進化論と同じように、自己生産しているとする。そうすると、止まることなく発達しつづける技術発展が終焉するのかどうかである。W.B.Arthur は終焉を否定する。理由は2つある。第1は、たえずニーズが開発され、新現象の発見の可能性があれば、技術の開発を永続的に駆動させるのに十分である。第2は、技術には必ず問題の種があり、しかも複数ある場合が多い。石炭を原料とする燃料技術の採用が地球温暖化を招き、環境に優しいエネルギーである原子力の採用が放射線廃棄物の問題を引き起こした。問題があれば解決策が生まれ、また問題が出るという現象は、今後もずっと変わりそうにはない。この現象がある限り、技術は休むことなく変化せざるを得ない。本書では、技術を手放すことは人間であることをやめることなのであり、技術は人間を形成する上で大きな役割を果たしているとする。

最後に、本書の中で非常に興味深いことが述べられている。それは、新しい技術が発展する最前線が一つの国や地域に一極集中しているという現象があることである。例えば、産業革命はイギリス、化学工業はドイツ、ITは米国というようにである。この現象はなぜ起こるのか。技術的情報や科学的情報から技術が出現するのであれば、その知識を持つ技術者や科学者がいれば、どの国でも同様に革新的技術が生まれる筈である。この点について本書では、本物の先端技術は、知識ではない要素から生まれるとし、それを「深層的な技 (deep craft)」と呼んでいる。Deep craft は科学を踏まえてはいるが、単なる知識ではなく、複数の知の集合体で、本書にさらに具体的には書かれているが、共通認識されている信念の文化、普遍的な経験に対する暗黙の文化を結集させたところから得られるとしている。そう言えば私は思い出したのだが、ヘレニズム期の力学的知識と技能は、それ自体は、産業革命を引き起こした技術に不足のないものだったにも拘わらず産業革命は起こらなかった[4]。もっと言えば、ルネサンスはイタリアで興った。日本では何なのか、過去には多分奈良時代の仏教文化、江戸時代の元禄文化が当てはまるのかもしれない。然らば、将来はどうなのか。よく噛みしめて考える必要がある。

参考文献

- [1] 飯田尚志: "[Space Japan Opinion] Web2.0と衛星通信技術", Space Japan Review, No.50, Dec./Jan. 2006/2007 (<http://satcom.jp/35/SJOpinionJ1.pdf>).
- [2] 山形浩生: "■テクノロジーとイノベーション 進化/生成の理論 W・ブライアン・アーサー (著) 大胆に描く 技術の自律的变化", 朝日新聞(朝刊), 2011年10月30日.
- [3] 西村和雄: "この一冊 テクノロジーとイノベーション W・ブライアン・アーサー著 技術が進化する仕組み解き明かす", 日本経済新聞(朝刊), 2011年10月30日.
- [4] J.D.バナル, 鎮目恭夫訳: "歴史における科学", みすず書房, 1967.

Success Stories in Satellite Systems

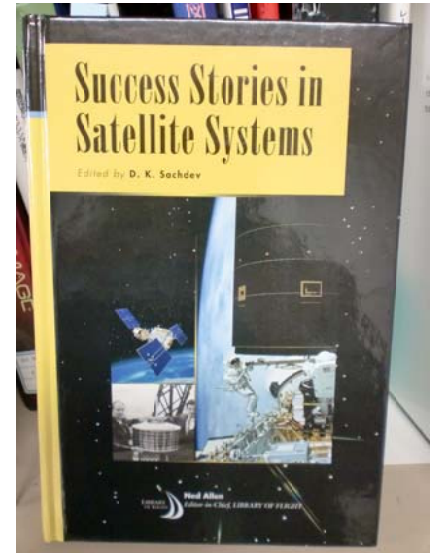
衛星システムのサクセスストーリー

首都大学東京 教授

福地 一

編集: D.K.Sachdev 出版社: AIAA 2009

米 国航空宇宙学会(AIAA)が発行するシリーズ ”The Library of Flight” の中の書籍で、衛星通信や衛星測位の黎明期をそれぞれのリーダ達がエッセイ風に回顧している。後述の目次に示すように、各章は衛星システム毎に独立しており関心のある章だけを読むということも十分可能だろう。編者の D.K.Sachdev氏は50年以上にわたって衛星システムの開発にあたっており、INTELSAT、XM Radioなどで活躍し現在は大学教員、コンサルタントとのことである。各章はその分野の著名な経験者が執筆しており章によっては、第2章など珍しい写真もあって興味深く見ることができる。日本からはJSATの永井氏らが第9章でJSATのサクセスストーリーだけでなく、衛星放送を含む日本における衛星通信の黎明期やJSATの競合他社の歴史も含めて解説をしている。日本の衛星放送システムについては、IEEEから世界初の実用衛星放送システムとしてマイルストーン賞をもらっていることからわかるように日本の誇る技術開発だったので、日本の衛星放送の章も設けてもらったらよかったと思う。昔話だけでなく、最終章の将来への展望では、衛星通信の活躍場面として、直接放送、広帯域システム、複合衛星無線システム、次世代LEO、測位などを例にとりて編者が期待と展望を述べている。



目次構成

- 第1章 Overview (D.K.Sachdev)
- 第2章 Syncom: World's First Geostationary Satellite (H.A. Rosen)
- 第3章 Intelsat (C.Kullman)
- 第4章 Telesat: The First Domestic Satellite System (H. Kowalik)
- 第5章 Inmarsat : A Success Story (A.F.Ghais)
- 第6章 Thuraya Mobile Satellite System (A.S.A.Mazrooei and A.J.Morris)
- 第7章 Eutelsat: An Impressive success (G. Berretta)
- 第8章 The mouse that roared: Via LuxSat and GDL, How SES built ASTRA into the world's preeminent satellite operator (Y.Feltes)
- 第9章 The Success Story of JSAT (Y.Nagai, et al.)
- 第10章 INSAT initiates communication revolution (U.R.Rao and A. Bhaskaranarayana)
- 第11章 The DBS dimension : How U.S. DBS success (J.Scheffler and L. Covens)
- 第12章 Global positioning system: origins, early concepts, development, and design success (K.D. McDonald)
- 第13章 XM satellite radio- The first ten years: A treifecta of technology, product, and market (J.F. Dealy)
- 第14章 INTELSAT VI (F-3) reboost mission: An epochal event in the history of the commercial space industry (L.R. Dest)
- 第15章 Earth stations: From very big to very small (M. Dankberg)
- 第16章 DARPA's space history (O.Brown, F. Kennedy and W. Pulliam)
- 第17章 Potential success stories in the future (D.K.Sachdev)

JC-SAT2011報告

電子情報通信学会 衛星通信研究専門委員会
委員長 加藤寧（東北大学教授）

1. 概要

JC-SAT2011は2011年12月12、13日に愛知県名古屋市の名古屋大学にて開催された。当初JC-SAT2011は宮城県仙台市にて10月の開催を予定していたが、3月11日の東日本大震災の影響を考慮し、会場及び開催日程を変更しての開催となった。

JC-SATはJapan-Korea Joint Conference on Satellite Communicationとして、10年以上にわたって電子情報通信学会通信ソサエティ衛星通信研究専門委員会(SAT研)と韓国のKorean Society of Space Technology(KOSST)の共催により、日本と韓国の衛星通信研究者間の情報交換、相互理解の促進を目的として開催されてきた国際会議であるが、JC-SAT2011では、上記の日程変更により、韓国KOSSTメンバーの調整が困難となり、今回に限りSAT研による単独開催となった。KOSSTとの共催については、2012年以降も継続することでMOUの締結も行っているが、今回、招待講演として中国、カナダ等からも講演者を招待し、今後は日本と韓国だけでなく、より国際的な議論の場として発展させていければと考えている。

JC-SAT2011では2日間で6件の招待講演と20件の一般技術講演が行われた。参加者は延べおよそ60名であった。



▲本年度JC-SAT優秀論文賞受賞者の赤石明氏(左)と加藤寧委員長(もう一人の受賞者富樫洸氏はご欠席)

2. 講演について

本会議では以下に示す衛星に関わる幅広い分野にわたって招待講演6件を含む26件の講演が行われた。

- Satellite position and navigation
- Satellite communications for large-scale disaster mitigation
- Small and nano-satellite
- Amateur satellite
- Modulation, error correction and TPC technologies
- Sensor networks



▲JC-SAT2011の会場となった名古屋大学ES館

二日間にわたるセッションでは、それぞれの講演について積極的な議論が行われた。

第一日目にはセッション終了後に名古屋大学内にてレセプションを開催した。レセプションにはJC-SAT2011参加者のほとんどに参加いただき、活発な意見交換が行われた。レセプションの際には、今回が2回目となるJC-SAT優秀論文賞の表彰が行われ、JC-SAT2011の技術委員会により選出された講演2件に対して、表彰状と記念品の授与を行った。受賞講演は以下の2件である。

NICT赤石明他、「Development of Optically Controlled Beam-Forming Network」
鶴岡高専 富樫洸他、「A Summary of TCP-Cherry for Satellite IP Networks」

3. 今後の予定

通例では、毎年JC-SAT開催時に翌年のJC-SAT開催地や日程についての会合がSAT研、KOSSTの出席で開催されるのであるが、今回はイレギュラーな開催となったため、JC-SAT2012についての詳細は現在KOSSTと調整中である。

今後、開催日程やCall for PaperについてはSAT研ホームページ等を通じてご案内の予定である。■



▲レセプション