

第 11 章 測位と航法

11.1 概観

航法は移動体の正確な位置に基づいて移動体のとるべき進路を決定する技術である。人工衛星を用いたサービスは、進路を定めるのに伝統的な太陽、月や星の利用に徐々に取って変わりつつある。これらは天候に無関係に、空中と同様に陸・海上の何処でも正確で普遍的な参照システムの範囲内で位置を同定する可能性を大いに広げた。

米ソのみが世界的な衛星航法システム、すなわち、GPS と GLONASS を開発した。元来、軍用のものだが、すぐに民間応用がごく普通になった。実際、1990 年代以来、これらのシステムは、その正確さと利便性のおかげで、主要測位方法のひとつになっている。

航法は、欧州の産業経営者に、主要な宇宙応用としてすぐに認められたが、この種のシステムの財政的・技術的困難さと軍事的必要性の欠如から、欧州独自のシステムが存在しなかった。比較的関心の薄いことは、2000 年 5 月までは民間の利用者が利用できるデータは軍のデータより精度が低いながらも、全ての人に課金なしで開放されている事実によって説明できる。欧州が、もし航空や陸上の活動のための重要な応用があれば、これは戦略的依存性として見られることに本当に気づき、相互運用可能ではないが独自の補完システム開発を考慮することになったのは最近のことである。EU と ESA は 2002 年 3 月について議案を通過させ、Galileo は 2008 年には運用になる。同様に、中国の 2001 年における衛星配置の開始機の打上げと日本の原子時計等のシステム主要要素の開発のような重要分野における継続研究は、この種の宇宙開発における関心が普遍的であることを示している。

定着したシステムにとっては、状況は全く異なる。この分野で国際的なサービスを提供している唯一の国である米はその技術的優位性と軍と民の要求間の適切なバランスを保持しようとしているが、露はそのシステムの財政的支援をする国際協力を模索している。

衛星による無線測位と無線航法のために構成されたシステムは三つの部分からなる。第一の部分は、地上で、利用者に衛星のエフェメリス（軌道歴情報）を提供するとともに、地上で衛星の軌道を正確に決定（軌道決定）し、それらの位置を制御する。第二の部分は基準となるネットワークを構成する衛星で、第三は地上、海上、空中あるいは宇宙にいる利用者である。

幾つかのシステムはこの一般的シナリオに合致する。

■アップリンク・システム：各衛星に搭載される受信機は複雑でその送信は暗号化されているが、地上の送信機は単純なものである。例としては、Argos、COSPAS-SARSAT、DORISがある。

■ダウンリンク・システム：衛星は簡単なペイロードを搭載し、超高安定度クロックによる時刻信号を送信する。例としては、Transit、Kosmos-Tsikada、NAVSTAR-GPS、GLONASSがある。

移動体位置はドップラ効果による偏移から推定される。衛星は、信号の周波数および時間の関数としてその正確な位置を提供し、それが、受信機の緯度と経度を計算することを可能にしている。最良の場合では、1m未満の高精度を達成可能である。

11.2 ダウンリンク信号を用いるシステム

ユーザが位置と速度を任意の瞬間に決定できるので、衛星による航法ではこれが主要なシステムである。このようなシステムは、米ソで軍事要求を満たすためにまず開発され、その後、民間に開放された(図 11.9)。

汎地球的な航行衛星システムは、測地学、飛行機の航法、時刻同期などのいくつかの領域で用いられる。ユーザ数は増加している。このシステムに最も頼っている用途は、耕作地の監視や底引き網漁業、そして地勢の測量・地図作成である。衛星基準の航法システムは、(精度 5~20m が要求される)自動車の航法システムにも用いられている。交通量の大小に関する無線情報と組合せると、これらのシステムで経路を最適化し到達時間を適切に見積もることができる。精度向上につれ今日では、これらのサービスは飛行機の離着陸のための地上ビーコンと競合し、さらには打上げ中のロケットの監視さえ可能になっている。しかし、信頼度、特に完全性すなわち故障発生時に十分に速やかにユーザに通知するシステム能力に関して、単一システムとして使用が想定されるレベルに達していない。同時に、航法と電気通信の適用先が合併する傾向にあり、移動体電話サービスのような新市場へ参入しようとしている。

動作原理

この手のシステムとして最初に開発された Tsikada と Transit 航法システムの場合、衛星の運動は既知で、ドップラすなわち衛星がユーザに接近し通過するにつれて生じる信号周波数の見かけ上の偏移を連続計測して、ユーザ位置を計算する。これで緯度と経度がわかる(図 11.1)。衛星は連続的に 2 周波数を送信する。これらは、衛星位置と時刻基準を位相変調して送るが、ドップラ周波数偏移を計測し距離差を計算するのにも用いられる。受信機は与えられた時間間隔中に受信する信号のサイクルを計数し、相対的に観測された距離差と推定地点で観測されるであろう値とを繰返し比較する計算を行う。推定計算を繰返し行い、あらかじめ定めた閾値よりも違いが小さくなったときに計算が終了する。

GPS と GLONASS では、衛星が信号を送信した瞬間とユーザが信号を受信した瞬間との時刻差を計測せねばならない。この時刻差に光速を掛合わせると受信機から衛星までの距離となり、疑似距離と呼ばれる。この情報によれば、衛星を中心として計測した距離を半径とする球面上にユーザは位置する。航法メッセージには軌道暦と呼ばれる衛星の軌道に関

するパラメータが含まれている。そのため、ユーザは3機の異なる衛星から信号を受信すれば、三つの球面の交点として位置を求めることができる(図 11.2)。

しかし、理論面を脇に置くと、問題が二つある。まず、ユーザと衛星とが時刻同期をとらなければならない。地上部分は衛星群と時刻同期している(例えば、最初の GPS 時刻の基準は 1980 年 1 月 6 日が始まりであったが、1999 年 8 月 22 日に変更された)。もちろん、非常に正確な時計を調達するには多額の費用がかかるため、ユーザが GPS 時刻と正確に同期することはできない。そこで、最後の状態変数であるユーザ時計バイアスを求めるために、四番目の疑似距離の観測が必要である。二つ目の問題は、大気の影響のような付加的な遅れが距離の計測値に現れることである。航法メッセージには、厳密なバイアスを求めることはできないけれどもこれらの遅れを推定することができる補正パラメータが含まれている。したがって、航行衛星システムを用いて計算した位置は、真の位置ではない。付加的な遅れの推定精度が高いほど、計算位置も正確になる。

図 11.1 ドップラ効果 ドップラ効果は衛星速度の視線方向成分を決定するのに用いられる。衛星運動にともなう周波数偏移を、例えば与えられた時間間隔でサイクル数を数えて測定することができる。この方法は、低軌道地球周回衛星に有効であるが静止軌道には利用できない。

図 11.2 GPS の測距原理

図 11.3 GPS 受信機のブロック図

***Transit* 航行衛星システム**

海軍航行衛星システム(Transit ともいう)は世界で最初に実用化された衛星による航行サービスであった。この計画は 1960 年代初期に米海軍の弾道ミサイル潜水艦隊の精密な航法要求を満たす目的で進められた。最初の航行装置は弾道ミサイル潜水艦と航空母艦に 1962 年に搭載され、精度は 100m を上回った。他の多くの種類の海軍や科学研究のための船がこの全天候型の航法サービスを利用した。1964 年に米国防総省向けに運用を開始したが、早くも 1967 年に民間開放された。

宇宙部分は 1000km の極軌道の衛星 6 機から構成された。衛星 6 機のうち、3 機が航法サービスを行い、残り 3 機は軌道上予備機であった。最後の Transit 衛星は 1988 年 8 月に打上げられた。Transit の地上部分は地上モニタ局 3 つから構成された。これらは視野内の

衛星を追跡し、12時間毎に衛星の軌道要素を更新するために必要な追跡情報を提供した。Transit 衛星信号は、衛星群の地上制御設備としての役割を果たした、カルフォルニア Point Mugu にある NAG でモニタされた。

宇宙からの信号には衛星の軌道暦情報が含まれ、2つの周波数(150MHz と 400MHz)で絶えず放送された。周波数1つでユーザは位置決めができるが、周波数が2つあると精度が向上する。位置を計算するには、衛星がユーザに接近し通過する間、受信機で連続的にドップラ、すなわち信号の見かけ上の周波数偏移を計測する。

推測による測位精度が1周波受信で500m、2周波受信で25mであった。連続的な測位精度が1周波受信で50m、2周波受信で15mであった。

性能水準は高かったが、Transit システムはいくつかの点で制約があった。1つには、船舶の速度と方向が既知でなければならない。さらに、このシステムを連続利用することができない。衛星が比較的低高度で周回しているため、短時間しか可視が続かず、上空をあまりにも速く横切ってしまう。最後に飛行機のように受信機も高速移動する場合にはこのシステムを利用することができない。こうして Transit プログラムは、次世代 Navstar-GPS システムがこの役割を引継ぐ準備ができた、1996年12月31日にサービスを停止した。

Parus と Tsikada

Tsyklon 衛星と後に続く Parus と Tsikada 衛星のさまざまな衛星群は、Transit に似たサービスを提供した(図 11.9)。VHF 送信のドップラ偏移に基づいている(150MHz と 400 MHz)。

西側専門家によれば、ソ連の最初の航法衛星は、米側の等価なシステム Transit の8年後、1967年に打上げられた Kosmos 158 と見られている。Tsyklon(「台風」意味)として知られるこの航法衛星シリーズは、1978年まで継続し2つの異なった計画に受継がれた。

次の衛星群 Parus(「帆」の意)は軍用システムである。Parus 衛星群は、最初に1974年に Kosmos 700 で打上げられ、経度を 30° ずつずらした6軌道面を用い、 180° をカバーしている。残る経度の 180° は 45° ずつずらした4つの軌道面で構成され、民間用の Tsikada(「蟬」の意)システムが使用した。Tsikada システムは最初に1976年に Kosmos 883 で打上げられた(図 11.4)。このシリーズの最後の衛星のいくつかは、Nadezhda(「希望」の意)と呼ばれ、国際的な搜索救難システム COSPAS-SARSAT に貢献した。異なるシステムでありながら、両システムは同じ軌道位置を使用する。しかし、軍用宇宙部分は民間用宇宙

部分に比べ倍の頻度で取替えられる。さらに、民間用宇宙部分が反対側に配置される限り、必要に応じ民間用衛星群が軍用に使用される可能性もある。Tsikada システムは露の商船艦隊に広く使用されており、ユーザ位置は精度 100m で計算できる。

Transit と異なり Parus-Tsikada システムは今なお運用されているが、衛星の取替えが特に民間側において 1993 年以降に急速に減っている。これらのシステムはユーザに緯度と経度しか提供しないし、高度も提供する GPS や GLONASS に比べ精度が遙かに劣る。

図 11.4 Tsikada-Parus システム

NAVSTAR-GPS

米国防省は 3 次元で継続的かつ一様なサービスを提供するため 1973 年にこのシステムの開発を開始した。NAVSTAR と呼ばれる衛星群への電波測距に基づいている。

GPS の宇宙部分は軌道周期が 1 2 恒星時間、高度約 20,000km の衛星 24 機で構成される。ブロック II 型衛星以降、衛星は赤道に対して傾斜角 55° を持つ(図 11.5)。この構造で地球上の任意地点から最低 5 機が常に見え、場合によっては衛星 11 機までが視野に入ることが保証される。衛星 4 機以上からの信号に基づき、受信機はユーザの緯度、経度、高度と時刻を計算することができる(図 11.3)。

このシステムは CDMA(符号分割多重接続)を使用している。宇宙機の重要な役割は 2 つの L バンド周波数 1.57542 GHz(L1)と 1.2276GHz(L2)で正確に時刻付けされた GPS 信号を送信することである。

様々な衛星が開発されている。最初の NTS は発振子と計算機を搭載して宇宙技術を調査するために使用された。ブロック I 型 NDS はアトラスロケットで打上げられた。もともとは 3 年間使用するように設計されたが、中には 10 年以上も稼働した。

最初の運用形衛星は運用形衛星ブロック II 型で、補充用衛星ブロック II-R に引継がれた。ブロック II-R 型衛星はより高い自立性と自然および人為的な放射線に対する耐性を持っている。ブロック II-R 型衛星は自立航法システムを持ち、航法メッセージ信号を機上で生成できる。

現在米当局は 2003 年から 2010 年にかけて打上げ予定の GPS ブロック II-F 衛星開発を、進めている。設計寿命 15 年で地上からのコンタクト必要性を限定するため自立性を拡張予定である。2 つの民間用信号が追加され、サービスが大幅向上し、受信機雑音が減るとと

もに、民間でも電離層遅延を正確に計算することができるようになる。

GPS の地上制御部分には次の目的がある。各衛星を限られた回数的小マヌーバで適切な軌道に保つこと、必要なときに衛星時計とペイロードの校正・調整を行うこと、GPS 衛星を追跡し航法データを生成してアップロードすること、損害の影響を最小限にとどめるため、衛星故障時には大規模再配置を行うこと。

主制御局はコロラド州の Schriever 空軍基地（かつての Falcon 空軍基地）にある。主制御局と世界に散在する残り 4 つのモニタ局は特定衛星からの航法データを同時に取得する。このデータから、主制御局は衛星の位置と時計誤差を決定できる（図 11.6）。

GPS 信号はその中に航法データが埋込まれている。そのため、ユーザ受信機は送信時における衛星時刻と位置の両方を求めることができる。GPS 衛星時刻の卓越した安定性を保証するために、冗長な原子発振器が搭載されている。2 つの信号 L1 と L2 は、両信号を受信したユーザが電離層遅延を直接計算して適切な補正を行えるように、同期して生成される。しかし、多くの民間ユーザは主周波数 (L1) にしかアクセスがない。このため、電離層状態を表すパラメータも放送メッセージの中にちりばめられている。2 つの放送メッセージはそれぞれ同時に（4 相直交位相と呼ばれる）2 つの変調をもつことができる。

現在実行されているのは、L1 周波数で 2 つの変調、L2 周波数で（秘匿されている）変調が 1 つだけである。

■C/A (Clear Acquisition) コード:これは 1.023MHz のビットレートで放送される短い擬似雑音符号である。最も重要な民間用の測距信号でつねに公開されている。この信号を利用することを標準測位業務 (SPS) と呼ぶ。常に利用可能だが、大抵は精度が劣化されている。執筆時点では C/A コードは L1 周波数でのみ使われている。

■P (Precise) コード:これは 10.23MHz で放送される非常に長い符号である。変調のバンド幅が高いため、コード測距信号がより正確である。受信信号に含まれる雑音を軽減できるが、バイアスに伴う不正確さを軽減することはできない。このサービスは精密測位業務 (PPS) と呼ばれ、軍用に用いられる。

表 11.1 に利用者等価測距誤差（擬似距離の計測に含まれる平均誤差）および平面内精度に及ぼす各成分の影響を m 単位で示す。

GPS サービス拡大のため、基準局ネットワークが世界で整備中である。基準局とは既知の固定位置に置かれた受信機である。サービス精度向上のため、補正量を計算し、サービス完全性にかかわる情報とともに局所的に放送する。例えば米では、米沿岸警備隊航行セ

ンタが沿岸警備隊海上 DGPS サービスを運用していて、制御センタ 2 と遠隔放送局 50 以上から構成される。このサービスは GPS に基づいて計算する位置精度と完全性を向上するため、海上向けビーコン周波数で補正信号を放送する。適切な装備をした受信機の場合、典型値として精度 10m 以上が得られ、入港や進入着陸の航法に役立っている。米の陸地部分、五大湖、プエルトリコ、アラスカの一部とハワイ、ミシシッピ川流域の一部において(1996 年以降)、岸沿いにサービスがカバーされている。

1990 年に運用が宣言されたときには、7 機が使用可能状態にあり、14 時間から 22 時間の範囲で 2 次元的なカバレッジを提供した。湾岸戦争中は GPS 衛星 15 機のおかげで連合軍はかつてない精度で位置決めし、移動し、武器発射することができた。実際、連合軍のユーザ数の急増と民間用受信機の利用増大のため、1990 年 8 月から 1991 年 7 月まで SA が抑制されていた。民間利用の巨大な潜在的可能性を斟酌して、少なくとも十年間はユーザに直接課金することなく世界中で途切れることない標準測位業務 (SPS) を国際社会が 1993 年までに利用できるようにすることを 1991 年 9 月に米は申し出た。このような申し出をする一方で、米国防総省は米の国家安全を維持する責務を引受けた。民間の利益を代表するために、1994 年に GPS 管理システムは米運輸省の管轄になり、GPS は米空域システムに組み込まれた。しかし、システムの最終的な管理権を米国防総省が保持した。

GPS 利用者数が増加し、政治的また経済的な利害が認識されるようになって、世界的な航行衛星システムの役割について世界中で見直されるようになってきた。この分野での優位を保つために米はますます民間利益を考慮するようになり、政府は 2000 年 5 月現在ですべてのユーザに軍用なみの精度を無料で利用できるようにすることを主張した。言うまでもないことだが、国家の安全保障に脅威が発生したときにはこのサービスを中断することができるよう、妨害機能を保持したままである。

図 11.5 NAVSTAR-GPS 衛星群の構成 24 衛星が 6 軌道面に配置される。

図 11.6 GPS と GLONASS の主制御局とモニタ局のネットワーク

表 11.1 GPS 測距におけるおもな遅延

■クロックバイアス：第一に、衛星は厳密に同期が取れているわけではない。補正パラメータは航法メッセージに含まれている。第二に、民間利用者に対して選択利用性の政策のもとで 2000 年 5 月まで米務省が GPS システムを故意に劣化させていた。これは、民間利用者にはランダムなバイアスを付加した劣ったサービス提供を意味した。

■軌道暦のバイアス：航法メッセージで放送される軌道パラメータは正確ではない。衛星軌道は太陽風やそのほかの現象の影響を受ける。

■大気圏のバイアス：電離層と対流圏では完全な真空中よりも放送信号がゆっくり進む。電離層遅延に対するKlobucharモデルや対流圏遅延に対するHopfieldモデルといった理論を使って民間利用者はこのような遅延を推定することができる。2周波での距離を測定することで、軍用利用者は精密に電離層遅延を決定することができる。

GLONASS

GLONASS (GLObal Navigation Satellite System) 計画は、米の類似システムと同様に、軍事的考察から起こったもので、ロシア宇宙軍 (VKS) が管理している。政治的決断は 1976 年、最初の衛星打上げが 1982 年である。1993 年には稼働と宣言されたが、実際には 1995 年まではそれが完了せず、そのときでさえも短時間運用にすぎなかった。予算上の問題から、しばしば、衛星数が 7 または 8 機で、最悪の場合 (図 11.7) では 4 機のように衛星数を減らした運用ということになった。しかし、この重要性には疑いの余地はない。このことは、少なくとも公式の宣言によれば、ロシア国防大臣の衛星数を 12 に増やし、寿命が 7 年の次世代衛星 GLONASS M を開発し、寿命 10 年の第 3 世代衛星 GLONASS K を予定するという決定により立証されている。国家的な必要性は別として、たとえ財政不足による遅延 (特に地域的システムが研究される時期の) をもたらそうとも、運用衛星の存在は露にある国際的威信を与えている。そして、その獲得技術、周波数、軌道スロットなどには一般の関心が寄せられている。同じ精神で、ロシア宇宙局 (RKA) は民間利用者または国際協力のための GLONASS の応用と開発の責任を有している。

GLONASS は完全に配置されると、昇交点が 120° 離れた 3 つの軌道の上に Uragan (または harricane) として知られる寿命が 3 から 5 年の衛星 24 機から成る。8 衛星は各平面上に同等に配置されており緯度引数 45° 間隔で分布している。フルサービスのための最小配置は 18 衛星である。衛星は 19,100km の軌道を 64.8° の軌道傾斜角で、各衛星とも約 11 時間 15 分で運行している。こうした軌道特性により、GLONASS は高緯度地域では GPS より高精度に、そして赤道地域では低精度になる。

衛星はシステム制御センタ (Golitsyno 2、Moscow 地域) とロシア内の指令追跡局 (主要 5 局は Moscow、St. Petersburg、Eniseisk、Komsomoslk-na-Amure と Balkhash にある)

の地上の複合体により運用されている。制御部分は GLONASS 衛星群の状態監視と、航法データのアップロードと軌道パラメータ修正をおこなっている。

宇宙部分と利用者装置とのインターフェイスは L バンドの無線回線である。各 GLONASS 衛星は 2 種の信号を送信する。すなわち、L バンドの 2 つの周波数帯 (L1=1.6GHz と L2=1.2GHz) の標準精度 (SP) 信号と高精度 (HP) 信号である。周波数分割多重接続 (FDMA) を用いて、各衛星はそれ固有の周波数で信号を送ることができる。しかし、ある衛星は同一の周波数を用いるが、軌道上で地球に対して正反対の位置に配置されており利用者からは決して同時に見えることはないようになっている。各衛星は次の周波数で定まる周波数チャンネルを有している： $1602\text{MHz} + K \cdot 562.5\text{kHz}$ と $1246\text{MHz} + K \cdot 437.5\text{kHz}$ 。

GLONASS 受信機は少なくとも衛星 4 機からの航法信号を自動的に受信し、擬似距離と速度を測定する。衛星の信号から航法信号を同時に選択し処理する。受信機のコンピュータは受信機による全ての入力データ処理をつかさどり 3 次元位置座標、速度ベクトルの 3 成分、そして時刻を計算する。GPS との対比では、周波数のアクセス制限がないこと、サービスはいつでも停止できることが異なる。

運用原理は GPS のそれと基本的には同じなので、両システムの混成受信機を製作するのは困難ではない。しかし、相互運用性を達成するには、双方のシステムが独自の国家時刻尺度を用い、衛星位置を表すための異なる座標系を使用している事実に対応した調整処理が必要である。

ディファレンシャル GLONASS の研究は、システムが設置された 1970 年代に開始された。これが本気で再考されたのは、1990 年代の初めにディファレンシャル GPS が広がった時のみであったが、これは GLONASS には選択利用性 (SA) がなく、その標準精度は殆どの海や航空の利用者には十分な精度の 10m 程度であることから説明できる。初めの好まれた傾向は、直径で約 80km の限定地域内で 1m より良い精度を提供する局地的ディファレンシャル・システム (LADS) 開発であった。このシステムは航空管制官や船会社などの特定利用者向けのもだったが、後に 3,500km にわたって精度 5~10m の地域レベルのシステム (RADS) に拡張された。財政的束縛がこれらを領土全域に拡張するのを不可能としたため、宇宙機の制御複合体の地上インフラを用いて広域ディファレンシャル・システム (WADS) を構築するためにもう一つの方法が考えられた。様々なディファレンシャル・システムと調整し、米による United ディファレンシャル・システム (UDS) の枠組みを取込むよう準備して、1994 年、ディファレンシャル GLONASS の概念が、VKS、RSK およびロシア運輸省により作ら

れた。これは、LADS、RADS、それに WADS と 3 つのレベルを提供している。各レベルは他のレベルと独立運用するようになっており、3 つの組合せは定められた性能を満たすように設計されている。

衛星型補強システム (SBAS)

GPS の性能レベルは新たな応用への道を開くとともに現存の地上の航法システムに置き換わる全地球的航法衛星システム (GNSS 1) を作る構想を導くことになった。これは現存する能力を衛星型補強システム (SBAS) により改善することで達成される。幾つかのシステム、すなわち、米の WAAS、欧州の EGNOS、日本の MSAS は国際的な出資者の利便のために設置されている。GNSS2 は、欧州の Galileo のような自立的かつ補足的なシステムに相当するさらに先の段階のものである。

WAAS (広域補強サービス (図 11.8)) と呼ばれる GPS 補強サービスは 1989-1990 年に研究され米国連邦航空局 (FAA) により 1991 年に構築された。このシステムはカテゴリ I 精密進入/着陸を通じて全飛行段階に対しサービスを提供する。これは GPS の宇宙部分と静止衛星を用いる。これはディファレンシャル GPS に基づいているが、北米全域に対してサービスを可能とするため補正情報を静止衛星経由で放送する。このサービスの第一目標は GPS を航空機の主要航法手段とすることである。実際、GPS は、正確なインテグリティ・パラメータが放送されないため、単独航法手段としては使用することはできない。WAAS では利用者はインテグリティに関する正確な情報と精度をより向上させる補正情報が得られる。FAA は 1994 年に、全飛行段階での衛星航法を開発・論証・実証するため国家衛星試験施設 (National Satellite Test Bed: NSTB) を作成した。1995 年以来、NSTB は拡張されてきて、米本土で基準局 18、主局 2 (一つは Virginia、もう一つは California)、無線送信施設 4 (Maryland に 1、California に 2、Washington 州に 1)、その他にカナダに基準局 3、Alaska に 5、Hawaii に 2、そして Iceland に 1 つある。

1999 年 4 月、WAAS は、太平洋地域 (POR) と大西洋地域 (AOR-W の) INMARSAT 衛星 2 機を用いて水平精度 (95%) 3m、垂直精度 (95%) 5m を達成した。そして、その後の試験で WAAS のシステム能力の達成にむけての進展が実証された。しかし、インテグリティ信号の定量化の困難さや紛争時における軍によるジャミングのリスクなどの難点がある。これらの問題に加え、予算超過が著しく、進入・着陸時のみの航空機の誘導をする LAAS (狭域補強システム) への関心が戻った。経済的かつ産業的な関心は高く、地上システムを必ずしも除

外しない GCNSS(全地球的通信・航法・監視システム)と関連して多くの提案がなされた。

カリブおよび南米地域全域をカバーする GNSS の実施計画を作成しているチリ、メキシコおよび中南米諸国との協力で米が SBAS 航法試験設備 (navigation test bed) を開発してきた。南アフリカ、アジア/太平洋、中東諸国も SBAS 技術採用に興味を示している。

欧州諸国も GPS/GLONASS 補強システムを開発している。これは、例えばパリとニューヨーク間の飛行中、利用者が2つのシステムを切替えて使用可能とするもので、仕様は WAAS のそれと同様である。EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) と呼ばれるこのシステムは 2003 年に運用されるはずである。これはユーロコントロール、EC (European Commission)、欧州宇宙機関 (ESA) の3者のために様々な欧州の会社により開発されている。幾つかの事前研究・開発は、GPS に類似した測距サービスを放送するための衛星 (INMARSAT III) の搭載機器を開発する仏宇宙庁 (CNES) で行われた EURIDIS プロジェクトの枠内で行われてきた。視界に衛星もう一機が入ることで利用者はより高精度測位が可能になる。このサービスの他の利点は静止衛星の覆域内ではいつでもこの衛星が利用できることである。このサービスの原型は 2002 年に開始された。測距機能の運用評価は 1999 年 1 月に行われた。EURIDIS は GPS のような信号を 12m 未満の利用者等価距離誤差 (User equivalent range error) で 24 時間放送する。

静止衛星のトランスポンダが、衛星 3 機、東経 64° (インド洋地域: IOR) と西経 15.5 度 (北大西洋地域: AOR) にある 2 機の INMARSAT III 衛星と 2001 年に打上げられた欧州の Artemis 衛星に載せられている。最初の放送は 1999 年 11 月に始まった。EGNOS の試験施設には、GPS と GLONASS の信号を受ける監視局 8、補正値を計算する中央制御施設、それに利用者に INMARSAT III 上に EURIDIS システム経由で情報を放送する航法陸上地球局 (Navigation Land Earth Station: NLES) とから成る。運用サービス時には監視局 34、4 制御/統制局 4 と航法地上地球局 4 がある。目的は、西欧州をカバーする覆域 (緯度 40° ~ 60°、西経 5° ~ 東経 10°) 内で水平 8m 未満、垂直 10m 未満の測位精度を提供することである。伊の地中海試験施設 (Mediterranean Test Bed) のお蔭で INMARSAT III IOR 衛星経由で冗長の放送能力が備えられている。欧州、アフリカおよびアジアは宇宙部分の覆域内となっている。

第 3 のシステムは、日本の航空局がアジア太平洋空域をカバーするため選定した運輸多目的衛星補強システム (MSAS) である。1998 年の GPS 利用の協力に関する日米共同声明で計画の枠組みを定めている。MSAS は GPS に類似した信号を生成するための測距機能を用い

て、航空機に運輸多目的衛星（MTSAT 1R）を第 25 番目の GPS 衛星として利用させることを可能にする。事実、日本の場合は、2003 年に、国際民間航空機関（ICAO）の 1991 年の要件を満たす最初の航空航法と通信システムとなる特定衛星の開発という意味で、独自のものである。米と欧の会社が主要な技術的役割を果たしている WAAS と MSAS との類似性は共に相互運用性に深い関心を払っている点にある。このことは GNSS への日本参加を容易にしており、衛星による航法分野での独自のノウハウを所有することの経済的かつ戦略的優位性を意識していることを裏付けている。

図 11.7 GLONASS 衛星の配置

図 11.8 狭域補強サービス（LAAS）と広域補強サービス（WAAS）

図 11.9 航法および測位衛星の年表

欧州の Galileo システム

1990 年代の半ば、欧州は開発の第 2 段階を表す GNSS 2 として知られる独自の全地球測位航法システムの製作にかかることを決定した。EGNOS を通じて GPS の代替/補足となるサービスを開発するためのノウハウが得られたならば、GNSS 2 は、民間の管理下で Galileo と呼ばれる欧州衛星システムに基づくことになる。

GalileoSat は欧州宇宙機関の欧州の Galileo Initiative への具体的な貢献である。それは、宇宙部分及び関連地上部分の定義、開発そして実証を含めている。それは静止衛星で補完された宇宙部分（中軌道衛星 21 または 24 機）と EGNOS の開発の間に獲得された経験に基づく地上基盤から成る。周波数の割当、使用する宇宙機の型、航法メッセージの構成など多くの検討すべき事項が残っている。

セキュリティもまた慎重を要する問題である。軍用周波数の考え方は、共通の防衛政策の実施が限定される度合にもよるが、欧州内に幾つかの問題を引起こす。もし GPS と Galileo の相互運用性が残れば、米国関しても困難が生じる。この点では、セキュリティの問題は欧州の戦略的独立性の概念と直接に影響する。

Galileo 計画は、構築上の技術的・財政的問題は別として、欧州の戦略的独立性を維持

しようとする欧州の決意を象徴している。この表現は、航法システムの広範な商用利用を考慮すれば、純粹に軍事的な意味よりはもっと広い意味にとるべきである。欧州の構造の複雑さに関係して、多くの難問と立向かわねばならない。それ故、組織的なレベルでは、1999年2月10日付けのGalileoに関する欧州委員会通信はEGNOS計画の拡張により影響を受ける欧州戦略の様々な局面を明らかにしている。2003年までには、後者は、測定のインテグリティの改善と自立的な航法衛星計画、Galileoの実現と同様、GPSとGLONASS衛星の状態を表示するサービスを提供するだろう。システム定義段階は1999年6月に開始された。このとき、欧州連合運輸協議会がLuxemburgで会し、運輸長官に活動の指揮を任せた。2000年にこの段階が終了したとき、欧州連合と欧州宇宙機関のための共通の法的枠組みを作るために新たな統一体を設置せねばならなかった。前者は政策の管理と計画の実施に責任を持ち、後者は管理機構を代表し技術的責任を担うことになった。2001年夏までは、ESAの運用計画と欧州条約171条による共同事業の計画を一緒にして、解決法が見出せたようである。計画の財源確保の方法も定まったように思える。官がそれによりサービスを買う民間への投資の見返りを保証する民間資金構想（Private Funding Initiative (PFI)）の概念が官民共同事業の概念に置換りそうである。後者は、基礎投資が膨大なのとGPSサービスは無料が想定されるため、現状では実現が困難であろう。

中国のシステム

2つの北斗（Beidou）航法衛星は2000年末に打上げられた。中国当局によれば、これらは静止軌道に置かれ、北斗航法システム（BNS）として知られる最初の独立の国家的システムの一部を成すものである。東経140°と東経80°に配置され、2つの衛星は列車や船舶の緯度、経度および高度を特定する。

中国はすでに、中国の製造業者が自身で製造可能と言明しているGPSやGLONASSの受信機を所有しており、新航法システムは国家的自主性を主張するためのもののようである。これは、中国が宇宙に置ける主要な立役者となるために設定した2000年11月の開発計画に属するものである。このシステムは原理的には日・欧の地域的システムと全く同等なもので、補足的な能力の設定計画は後の計画段階での自立的システムに向けての第一歩となるだろう。完全な衛星配備に伴う技術的及び財政的問題は間違いなく遅延を導き、協力計画は少なくとも部分的にはそれらを軽減することになるだろう。

11.3 アップリンク信号を使うシステム

このカテゴリに属するシステムは主にビーコンの設置や地上局への集積データの中継に使われる。これらのシステムは、他のミッションとともに衛星搭載ペイロードの一部として運用されている。

Argos

Argos システムは米仏共同（NASA/NOAA/CNES）で立上がった測位とデータ中継プログラムで、1978年に運用開始された。測位を別にすると、このシステムは環境の偵察と保護のデータも集めている。気象データ（温度、湿度、風速、海流、雪・氷の厚みなど）を集めるセンサと気象情報の一定間隔で符号化されたメッセージ送出を行う送信機が地上の固定または可動プラットフォームに設置されている。このメッセージは NOAA シリーズの太陽同期気象衛星で受信される。朝と夕方の位置にある少なくとも衛星 2 機が常に稼働している。それぞれの衛星は直径 5000km の範囲の地表から可視で、それぞれの送信用ビーコンは一日 28 回極付近と一日 6~8 回赤道付近でオーバーフローされる。

NOAA14 衛星までの衛星は 4 メッセージを同時処理できる。Argos システムは進化し、1998 年に打上げられた NOAA15 衛星、2001 年に打上げられた NOAA16 衛星は、受信機の帯域が従来の Argos の 3 倍、4 つだけではなく 8 つの同時信号を処理できる第 2 世代の Argos2 ペイロードを搭載した。Argos2 は今後 3 つの NOAA シリーズの衛星にも搭載される。この新世代システムは CNES（仏）と NASDA（日）の共同プロジェクトで 1996 年成功のうちに試験され、日本の衛星 ADEOS 2 に搭載されることになっている。今後の Argos2 の増強では、ビーコンを用いて双方向通信を行うことである。更なる開発が第 3 世代として計画されている。2003 年から Eumetsat の METOP に搭載されることになっており、これは NASDA（現 JAXA）の ADEOS 3 に非常に似たシステムである。これらの新衛星ではさらに多くのデータがさらに頻繁に供給されることにより、能力拡張することになる。

Argos は、海岸から離れたプラットフォームや船との通信から、ウミガメ・鳥類・熊・イルカ・鯨のような野生動物の科学的な行動調査まで多くの分野に応用されている。このシステムはヴァンデ・グローブ単独世界一周レースのようなヨットレースでの監視の役割を通じよく知られるようになった。

5000 を超える登録されているビーコンとおよそ 60 カ国におよぶ 200 以上の永久利用者

があり、このシステムは現在余裕のない状態で稼働している。このシステムは米仏の全体処理センタと、衛星中継されたメッセージを直ちに処理する地域受信局と結ばれた地域センタを通じ 20 分以内にデータを供給できる（図 11.11）。

COSPAS-SARSAT

COSPAS-SARSAT プログラムは遭難と位置情報を提供することにより世界中で捜索・救助活動向上を目指し国際的な努力の結果できたものである。露のシステム COSPAS は、もともと SARSAT プログラム（Search And Rescue Satellite Aided Tracking：追跡を援助する捜索と救助のための衛星）とともに生まれ、米、仏、カナダが共同運営している。最初の露の COSPAS の中継器は 1982 年 6 月に民生用航法衛星 Kosmos1383 に搭載され、軌道上に置かれた。一方、最初の西側の SARSAT は 1983 年 3 月に米の衛星 TIROS N に搭載された。その後、一連の米衛星 NOAA 極軌道衛星と露の Nadezhda 極軌道衛星が打上げられ、連続的なビーコン配置を確保した、COSPAS-SARSAT が運用段階であり、永続的な管理組織が準備できたと宣言されたのは 1988 年だけである。同時に Inmarsat の枠組みの中での合意が、全海洋遭難救助システム（GMDSS）に統合された専用捜索・救助衛星システムを設立した。

そのときから、ノルウェー、英、フィンランド、ブルガリア、印、スウェーデン、伊を含む 24 ヶ国がメンバとなり、システムの地上設置の構成要素を提供するのに関わった。1982 年と 2000 年の終りの間にこのシステムは主に海上で、11,000 人以上の人々の救助に貢献した。

Argos のようにこのシステムは 1 方向通信を使い、ビーコンは衝撃や、浸水や、可能なときは手動で起動される。今日、LEOSAR と GEOSAR という 2 つの補助システムが作られている。LEOSAR は米の低軌道衛星 NOAA と露の比較的 low 高度（850km）の衛星 Nadezhda のドップラ効果の設備を利用している。このシステムは地上設備 LEOLUT（LEO Local User Terminal）の周囲半径 3000km の地理的領域から信号を集中できる。

GEOSTAR は米の静止衛星 GEOS East と West、印の静止衛星 Insat のトランスポンダを利用している。Insat はインド洋をカバーし、GEOS は大西洋、太平洋をカバーしている。これらの衛星は永続的な監視はできるが、地球との相対位置が変わらないため遭難ビーコンの位置を決めるドップラ効果は使えない。遭難者がビーコンからメッセージを符号化することが可能であれば、あるいはビーコンが GPS を使って位置を計算することができれば、または位置が可能な遅延量とともに LEOSAR システムから引出せれば、位置を確認すること

ができる。

2000年の初め、25万のビーコンが GEOSAR と LEOSAR へのアップリンクに周波数 406MHz を使っていて、60万のビーコンが LEOSAR へのアップリンクだけに周波数 121.5MHz を使っていた。2009年に一方の周波数が取消される計画である。

DORIS

DORIS(衛星により統合されたドップラ Orbitography と電波測位:Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite)は仏の組織(仏宇宙局 CNES、Groupement de Recherches Geodesiques et Spatiales GRGS、the Institut Geographique National)により開発された。このシステムは軌道の正確な決定とビーコンの位置決めのために設計されている。衛星軌道は地上局から送信される2つの周波数(400MHz と 2GHz)を使ってドップラ遷移の測定により計算される。2周波が使用されるのは信号が電離層を通過するとき生じる誤差を低減するためである。このシステムは地表に均等配置された約50の orbitography 用ビーコンを必要とする。これらのビーコンは軌道決定される衛星に信号を送信し、精度 10cm オーダが達成されている。DORIS の装置は SPOT 2、SPOT 3、SPOT 4 衛星と TOPEX-POSEIDON に継続して搭載されてきている。後者の場合には、きわめて優れた精度で半径 2cm 以内の軌道計算が可能であった。このシステムは Jason と Envisat1 の両方に搭載されることになっている。

一旦軌道が正確に決定されると、必要であれば関連する Argos のビーコンのおおよその位置を使って、地球中心世界座標系に対して精度 10cm 以内ですでに数 km 以内に配置されているビーコンの位置を見つけられるようになった。

実時間軌道計算が可能な搭載ソフトと組み合わせることによって、DORIS は自律的な衛星航法に対して使うことができる。この枠内で、編隊飛行衛星内での相対位置を確立するとき、GPS に対する選択肢の1つとして考えることもできる。このことは、欧州と国際的なレベルでのこのシステムへの関心の増大をもたらしている。