

GPS の概観とそのアキレス腱

A Sketch of GPS and its Achilles' Tendon

原 宣一

Norikazu Hara

概要

GPS の測位方式は衛星からの距離測定である。距離測定には電波の到達時間を測定している。電波の到達時間を測定するためには原子時計の正確さが必要である。移動体の小型受信機に原子時計は積めないで、受信機の時計誤差を一つの未知数として取り扱う。4 機以上の GPS 衛星からの測位電波を同時に受信し、4 元連立方程式を解くことで位置と時間を同時に得る。衛星の位置は軌道情報から正確に計算する必要がある。電波伝播の遅延誤差要因など、各種誤差要因をすべて計算に入れて精度を上げている。現在、GPS は極めて順調に運用されているが、過去に起こった不具合の実例を見ると GPS の弱点を知ることができる。これらを改善するために、GPS 近代化計画が進行中であり、今後の GPS 衛星打上げ計画もほぼ 15 年先まで確定している。GPS の民間ユーザの一人として、米国におけるカーナビ実体験談を添える。

1. はじめに

昨年、GPS に関連して米国カリフォルニア州ロス・アンジェルスに長期出張する機会を得た。この間、カーナビ付のリース・カーで通勤すると共に、休日には近郊旅行にも使用した。そしてカーナビの便利さを改めて認識した。

GPS とは Global Positioning System のアクロニム（頭字語）であり、文字通り全地球測位システムと訳されている。GPS は米国が軍事用に開発したシステムであるが、当初からその一部が民生用に無料で開放されている。民生用としては測地用受信機、船舶用など多くの応用分野があるが、現時点で数量が多いのはカーナビ用受信機である。そのカーナビに関しては、GPS 本家の米国を差し置き、日本製が凌駕している。携帯電話にも GPS アンテナが組み込ま

れるようになっている。もはや衛星測位の代名詞として GPS はインターネット、ケータイに次ぐ社会インフラの地位を占めつつある。

2. GPS の測位原理の概要

大昔の人は自分の位置を知るために北極星の方角を見た。近代に入って、船舶は岸边に近づくと灯台の光の方角を見て自船の位置を推定した。このように、自分の位置を知るために、基準となる何か既知のものが「どの方向に見えるか」、つまり方位を測定することが常道であった。相手の位置を知る目的であっても、例えば空港のレーダは距離だけでなく機影の方位を見ている。ロケットの飛翔に際しても追尾トランスポンダから戻ってくる電波を受けるためのアンテナの向き、つまり上下角と方位データを見てい

る。ただし、ロケットや衛星の追尾方式は昔から R&RR (Range and Range Rate: 距離及び距離変化率) で、距離測定は行っている。

GPS は衛星からの距離だけを測定して自分の位置を知るシステムである。方位データを全く使用しないところに最大の特徴があると言って良いだろう。距離情報だけで自分の位置を推定する方法は、ピタゴラスの定理で式を立て、連立方程式を解くことになる。これは4元連立2次方程式になり、単純な連立1次方程式ではない。従って、掃きだし法などの「まともな」方法では解けない。コンピュータによる繰り返し計算で収束解を求めることになる。しかし、幸いこの計算の収束は早い。

平面上に A、B の2点があって、それらの位置座標 $A(x_1, y_1)$ 、 $B(x_2, y_2)$ は既知であるとする。さて、同じ平面上にあるもう一つの未知の点 $C(x, y)$ から、これらの2点までの距離が何らかの測定によって l_1 、 l_2 であると判ると、C 点の位置はピタゴラスの定理を使った式二つを連立させて解くことによって決めることができる。連立方程式は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 &= l_1^2 \\ (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 &= l_2^2 \end{aligned} \right\} \cdots (1)$$

未知数が x 、 y と二つあるが式も二つあるので解が求まる。

ただし、この連立方程式の解は二つあるので、何らかの方法で推定し、C 点の位置を決める必要がある。二つの解のどちらかが明らかに選べない場合は、例えば既知のもう一点 $D(x_3, y_3)$ からの距離 l_3 を測定して、もう一つの式を立て、これを満たすのはどちらであるか調べれば良い。

我々は3次元空間に住んでいる。空間内に3点 A、B、C があって、これらの3点が一直線上に並んでいないとき、同じ空間内にある未知

の点 D の位置は、D から既知の3点までの距離が判ると、同じようにピタゴラスの定理から3つの式が書けて3元連立2次方程式となる。2次方程式が2つの根を持つことは代数学の基本定理である。この解はやはり二つあるので、同じく他の要素からどちらかを選ぶことになる。

ある地点から発射された電波を受けると折り返しその地点に電波を発射する装置はトランスポンダと呼ばれ、航空機などが搭載している。衛星がこの機器を積んでいると、地上からその衛星に電波を発射し、送り返された電波を地上で受けるまで、電波が往復するのに掛かった時間を計ることで衛星までの距離を知ることができる。

しかし、この方法では電波を発射するための装置が大掛りになってしまう。あるいは衛星が地上から発信された微弱な電波を受けるために大きなアンテナが必要になってしまう。

そこで衛星から発射する電波（これを測位用電波という）を受けるだけで電波の到達時間を計ることが考えられた。これは米国空軍の研究所（DARPA）の成果で、測位用電波に L 帯を使い、擬似乱数（PRN: Pseudo Random Number）でスペクトラム拡散（SS: Spread Spectrum）変調をかけ、正確な時間情報をその電波に乗せる方式が見つけられた。PRN のコードは電波に時間目盛りを付けるようなものである。これを受信した正確な時間が判ると到達に要した時間が判ることになる。

正確な時間測定が必要な理由は、電波の速度が光速と同じく $1\text{ns} (10^{-9}\text{秒})$ で 30cm 、 $1\mu\text{s}$ なら 300m 進むからである。つまり、測定時間に $1\mu\text{s}$ の誤差があるということは、距離に換算すると 300m もの誤差があるということである。

GPS 衛星の時計は原子時計でなくても地上

局から頻繁に校正電波を受ければ高精度を保てるかもしれない。しかし、米国海軍の研究結果であるが、幸いにも宇宙機搭載用のセシウム原子時計（CAFS: Cesium Atomic Frequency Standard）を開発することができた。

GPS 衛星から発射された電波の正確な受信時間を知るために、地上の受信機も原子時計級の精度の時計が必要である。しかし、個々の受信機がすべて原子時計を持たねばならないとしたら GPS は用途が極めて限定された高価なシステムに終わっていたであろう。受信機の時計は誤差 Δt を含むものとして、これを位置座標の x 、 y 、 z と同列の 4 番目の未知数とみなすのである。測定した時間から計った衛星までの距離にはいずれも Δt に光速 c を乗じた誤差分の距離 $c\Delta t$ が共通に加わっている。未知数が 4 個であるから 4 つの方程式を連立させれば解が求まることになる。未知数の数とその数だけ独立な式が立てられると未知数を解くことができる。

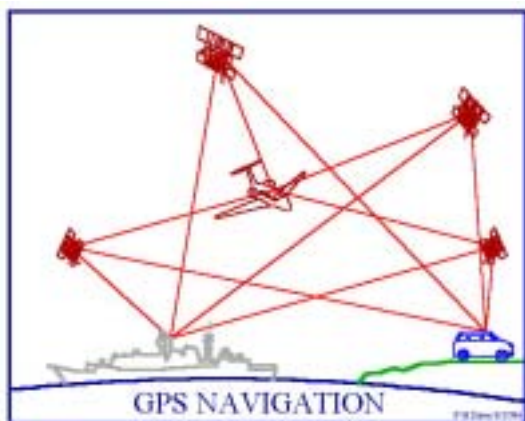


図-1 GPS 測位概念

つまり、同時に 4 機の衛星から電波を受信すれば、自分の位置と正確な時間が求まることになる。受信機の時計誤差をどの衛星に対しても共通の未知数とみなすことが GPS を成功させた要因であると言っても過言でない。図-1 は

GPS による測位概念を示したもので、航空機、船、車のどれもが GPS 衛星 4 機からの信号を受けていることが描かれている。

GPS の副産物として、GPS 受信機は電波時計よりも原理的に正確な時刻が得られる。電波時計は地上の原子時計の精度で時刻情報を発信する放送局からの電波を受けているが、腕時計などの移動する電波時計では、電波の伝播時間（ミリ秒のオーダーであるが）を修正できない。しかし、GPS 受信機は時計誤差を未知数の一つとする 4 元連立方程式を解いているので常に原子時計の精度が得られるのである。このため、GPS は遠く離れた 2 地転換の正確な時計合わせに一つの応用分野を確立している。

コロラド川を塞ぎ止めたフーバダムはアリゾナ州とネバダ州の境界にあって、この両岸で時差が 1 時間異なっている。私はこのダムをカーナビの付いた車で通ったときに、カーナビの示す時間を凝視した。そしてダムを渡って 100m ほど行き過ぎたところで時間が自動的に修正されたことを確認した。GPS の位置決め精度は 10m 前後であるから、予想したよりは表示の切り替わりが遅かった。これはカーナビのプログラム上の問題であろう。日本国内では経験できないことでもあり、カーナビの「賢さ」に感激した一瞬であった。

なお、GPS の古い衛星は CAFS を数台搭載していたが、ルビジウム原子時計（RAFS: Rubidium Atomic Frequency Standard）と両方を搭載するようになり、最近の衛星は RAFS のみに変わってきている。RAFS の方が小型で安価であり、短期安定は CAFS に勝るとの評価である。しかし、その他の要因で CAFS も存続するようである。

地上ではセシウム、ルビジウムより安定度の高い水素メーザ原子時計が開発されているが、

宇宙用水素メーザはまだ開発途上にある。

3. 測位の補正

GPS には $2^{10} - 1$ である 1023 という数字が良く出てくる。GPS 設計の基本に据えた数字である。測位電波に使われている L1 帯の中心周波数は 1575.42MHz で、L2 帯の中心周波数は 1227.6MHz であるが、これらはそれぞれ 10.23MHz の 154 倍と 120 倍になっている。

GPS の各衛星が測位電波として使う電波は全部同じ周波数である。PRN で SS 変調をかけているので PRN のコードからそれぞれの衛星を識別できる。つまり、CDMA (Code Division Multiple Access : コード分割多元接続) 方式である。但し、相互に混信を起こしにくいコードの組み合わせ数は限られていて、GPS の本来の測位コードは 37 種である。この内 5 種は地上におく擬似衛星用に確保されて、現在の GPS 衛星は 32 機まで識別できる。

GPS では L1 帯で C/A (Coarse Acquisition) コードと P (Precision) コードの 2 種類の信号が送られている。そして P コードは L2 帯でも送信されている。P コードは目盛りが細かい信号で (チップレート、10.23MHz) 最初からこれを捕まえることは難しく、最初に C/A コード (チップレート、1.023MHz) を受信して同期を取り、それを使って P コードを受信する仕組みになっている。

民生用に公開されたのは C/A コードだけであったが、手違いで P コードが民生用受信機開発メーカーに知られてしまった。測地用の民生機器では P コードも受信している機器が多い。このため、DOD (米国国防省) は必要に応じ、P コードに秘密にするための変調を加えて Y コードにすることにしている。

C/A コードだけでも測位が出来て、その測位

精度が 2 ~ 30m と DOD の予想以上に良かったため、運用モデルのブロック では、民生用にだけ意図的に精度を落とす SA (Selective Availability : 選択利用性) が加えられた。SA によってしばらく精度が 100m 程度に落とされていたが、民間からの強い要望に応え、2000 年 5 月に大統領声明でこの SA は廃止された。

測位誤差を生じる最も大きな誤差要因は電離層による電波の遅延で、この遅延量が周波数によって異なる。これを逆に利用して電離層遅延を補正するため、L2 帯でも P コードが送信されている。

L1 帯の 1 波、C/A コードしか使えなくても、電離層の昼夜による変動の大体の大きさは分かっているので、受信機で補正式を組み込むことにより、かなりの部分が補正できている。

L1 帯の電波は C/A 信号として PRN コード情報だけでなく、衛星の最新の軌道情報 (エフェメリス) を送信している。但し、データ・レートが 50bps しかないので、24 機の衛星軌道まで全部の情報を受信するためには 12.5 分もかかる。

4. GPS の構成

GPS は三つのセグメントから構成されている。GPS の宇宙セグメントは 24 機の GPS 衛星群を指す。これらを常時モニタして必要に応じて制御する地上施設全体を地上セグメントと称する。カーナビなど、GPS の測位電波を受け受信機を含む各種の機器がユーザ・セグメントである。

地球上で何時でもどこでも GPS の衛星が 4 機以上見えるために、GPS の衛星は軌道高度 20,200Km、軌道傾斜角 55 度で昇交点赤経 (衛星が南から北へ地球赤道面を横切る赤経) が 60 度ずれた 6 つの円軌道に各 4 機、計 24 機が配

置されている。周期はほぼ 12 時間なので地上からは前日とほぼ同じ時刻に（正確には、毎日 4 分ずつ遅れて）、同じ衛星が同じ位置に見える（図-2）。

地上セグメントは地球上でほぼ赤道に近い場所に設置された 5 箇所のモニタ局（このうち 3 局は衛星にコマンドを打って制御のできるコントロール局でもある）そしてコロラド・スプリングスにおかれた主管制局（MCS：Master Control Station）である。

当初、衛星測位の研究は米国の各軍で独自に行われていたが効率良く進めるため、空軍の下に JPO（Joint Program Office）が置かれた。Joint は「合同」の意味である。JPO はロス・アンジェルス空軍基地内にあって、民生用の宇宙セグメントを除き、GPS の衛星開発を進める原局である。民生用ユーザとして NASA（含む JPL：ジェット推進研究所）や DOT（米国運輸省）が主要ユーザである。DOT の下の FAA（米国連邦航空局）から 1 名が派遣され、JPO に常駐している。JPO は民生用 GPS ユーザに対して 2 冊のインタフェース・スペックと性能説明書、等を公開して利用の便を図っている[1]～[5]。

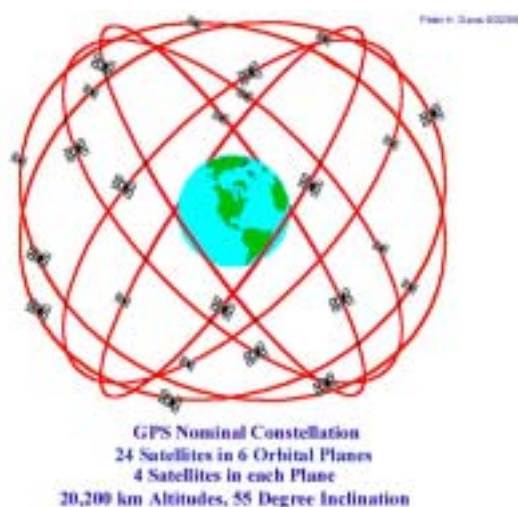


図-2 GPS の衛星 24 機の軌道

5 . GPS 衛星の軌道決定

衛星測位の原理からも判るように、受信機を持って測位をしたい地点の測位精度は、既知とされる GPS 衛星の位置決め精度に大きく左右される。このため、GPS の地上セグメントである 5 局のモニタ局は GPS 衛星からの電波を受けて常時その軌道をモニタしている。そしてデータを MCS に送付し、個々の衛星について最新の軌道情報データ（エフェメリス：短時間で変えられてしまう詳細な軌道要素）を作成し、GPS 衛星に数時間ごとに送信している。

衛星番号が判れば、それらがどの軌道を回っているのか公表（アルマナック：公称の軌道要素）されているので、大体の位置は衛星からの電波を受けなくとも計算できる。しかし、正確な位置を知るためには、GPS 衛星から送信される軌道情報が乗せられた測位信号電波を受け、受信機で解読する必要がある。

現在、JPO 管轄下の GPS モニタ局は世界中に 5 局しかない。これらの地点のモニタ・データから決めたエフェメリスは必ずしも軌道精度が十分でない。そこで JPL の GDGPS（Global Differential GPS）では世界中の大学などの各種機関と契約して 60 局以上のモニタ・データから GPS 衛星のエフェメリスを作成し、ネットで配布するサービスを行っている。GDGPS を使った測位精度は数十 cm のオーダーが得られるとのことである。JPL は GDGPS に通信回線も計算機も冗長系を組んでおり、信頼性には絶大な自信を持っている。

JPO は民間ユーザーシステムの JPL の方が高い精度を提供していても、この GDGPS を軍用に採用することは出来ないとのことである。現在の GPS モニタ局のようにすべて軍の施設内に設置されたものでないと、安心できないらしい。但し、JPO は精度向上にモニタ局の増加

が有効であることは認識しており、今後局数を 2 倍、3 倍に増やす計画がある。この計画では NIMA (National Imagery and Mapping Agency) 局 (GPS モニタ用に 13 局運用中) も使うことになっている。

IGS (International GNSS Service、昔は International GPS Service)(GNSS: Global Navigation Satellite System) という非営利組織があって、世界中の衛星軌道決定の出来る機関がメンバーになっている。この組織は 200 のメンバー機関があるが、中には GPS 衛星軌道決定精度として約 10cm を誇っている解析センターもある。

[閑話] 中国の皇帝の身長

IGS の加盟機関は高精度の軌道決定能力を誇っている。GPS 衛星は高度 20,200Km の円軌道であるから、地球の重心を中心とする半径 26,5378Km の円軌道を 3.86 km/s で回っている。このある瞬間の GPS 衛星の位置を 10cm のオーダーで決められるとは驚くべき精度であると思う。

この精度を達成するために、地球の精密モデルの入手、太陽風の影響、衛星重心からアンテナ位相中心までの距離、など、考えられる誤差要因はすべて考慮して計算している。しかし、多くのモニタ局からの数多くの観測データが高精度に貢献していることは確かである。

然るに、必ずしもデータは多ければ多いほど良いというものではない。「中国の皇帝の身長」という寓話を紹介する[6]。

誤差 σ の測定値が n 個あるとき、その平均値の誤差は $\sigma / \sqrt{n}$ になるというのは中央極限定理が教えるところである。

中国の人、各人が皇帝の身長を ± 1 m の精度で推定することは誰も出来そうである。もし

住人 10 億人に推定して貰って平均を取ると誤差は 0.003 cm にしかない。

[閑話休題]

6. GPS の運用状況

GPS の原型モデルであるブロック と称されるモデルは 1978 年 2 月の最初の打ち上げから、全部で 11 機が打ち上げられた (ロケットの打ち上げ失敗の 1 機を含む) (このときは軌道傾斜角が現在と少し違って 63 度であった。) I 型モデルは既にすべて寿命が尽きており、現在は SA が組み込まれたブロック 型の衛星になっている。型は 9 機 (SVN13 から SVN21) 打ち上げられた。型の SVN12 は機体番号が与えられているが認定モデルとして残され打ち上げられていない。次に A 型が 19 機 (SVN22 から SVN40) R が 13 機 (SVN41 から SVN52、SVN42 はロケットの打ち上げ失敗) 打ち上げられた。

現時点 (2005 年 8 月現在) 型が 1 機、A 型が 15 機、R 型が 12 機で計 28 機から測位電波が送られている。24 機よりかなり多い状態になっているのは、作られた衛星が要求寿命より長く健在であったことによる。

実際、ブロック、A、R 型の運用実績は、設計寿命 7.5 年であったが長いものは 10 年を超えており、平均すると現時点で 8.2 年になっている。

そして、24 機より 27 機体制の方がより良いという論文も発表され、2003 年以降で常時 27 機以上となるように、交代の衛星が打ち上げられている。

ブロック 型は地上局からの支援がなくても 14 日間は自動運用できるように設計されている。A からは 180 日間の自動運用が出来るように改良された。コロラド・スプリングスにあ

る MCS を見学した人の話ではオペレータの人数が少ないことに驚いたとのことである。

7. GPS の不具合事例

GPS のユーザセグメントである受信機の不具合事例は枚挙に暇がない。これは受信機メーカーで各社各様の対応を取るべきことである。

GPS 本来の共通的な不具合問題として話題になったのが、GPS 周番号のロールオーバーである。GPS は送信情報の一つとして週番号を送信している。これは 1980 年 1 月 6 日から毎週 1 カウントし 20 年後の 1023 週を最大値として 0 に戻る。1999 年 8 月に 1024 週目が来てカウントは 0 に戻った。この週番号を利用している受信機では不具合が起こることが予想されたものである。これはコンピュータの 2000 年問題と同種のものであり、ユーザセグメントで対処すべきものであろう。

GPS の衛星側で生じる不具合には深刻なものがある。一つの衛星が突然電波を停止してしまう類の不具合であればまだその衛星が使えないだけである。運用中の衛星数が多ければ何も問題はない、しかし、2004 年 1 月 1 日に起こった SVN23 (衛星 23 号機でこの機は PRN 番号も 23) の不具合は誤信号を数時間送信し続けてしまった。原因は原子時計の不具合であった。結果的に 3 時間ほどにわたり、この衛星信号を使った測位誤差が数百 m に拡大したものである。但し、誤差が大きかったことが却って幸いしたのかも知れない。ユーザはおかしいことに気が付き、実害はなかったようである。

民間航空ではこの種の不具合を非常に気にかけている。カーナビで GPS が非常に便利で有効であることは実証されているが、航空機では未だ GPS 機器が正式な計器として認められていない理由でもある。不具合が生じたら直ちに

警告を発することが出来る能力を Integrity (完全性) といい、この要求を満たすために、GPS を補強するシステムがいくつか考えられている。補強の一つが SBAS (Satellite Based Augmentation System) で今年成功裏に打ち上げられた MTSAT (ひまわり 6 号) がこれを搭載している。

1993 年、異なったタイプの受信機を使ってデファレンシャル測位を行った場合に大きな誤差を生じることが報告された。デファレンシャル測位は測地の応用に良く使われるもので、地上の受信機の一つは既知の場所におき、同時に測位電波を受けることで他の受信機の測位精度を飛躍的に上げる使い方である。このときの不具合は異なるメーカーの二つの受信機があって、単独受信ではどちらも問題がないのに、デファレンシャル測位を行うと逆に大きな誤差を生じるというものであった。原因は GPS19 の L1 用送信機の変調異常によるものであった。

JAXA ロス・アンジェルス・オフィスはダウンタウンの高層ビル街にあって、私は帰宅にあたって夕方に地下駐車場から車を出すとホープ通りに出るのに、カーナビは必ずワンプロック東のグランド通りに居るような表示になった。カーナビにはマップ・マッチング技術が組み込まれているので、この場合の誤差の見積もりは却って難しい。二つの通りは 128m 離れているので少なくとも 70m の誤差を生じていると言えよう。

この原因は、マルチパスと言われる現象で、電波が高層ビルの壁に反射するからである。現在の GPS はマルチパスに弱いと言われている。但し、測地用の受信機では、マルチパスの影響低減が工夫されたものもある。

GPS の測位電波は地球全体に広げて放射していることから判るように非常に微弱な電波

である。スペクトラル拡散した電波の強さは雑音レベルの 1/100 から 1/1000 程度である。

一般にスペクトラル拡散は雑音に強いのであるが、C/A コードは 1.023MHz での拡散であるため、エネルギーの帯域幅は 2MHz 程度ではない。P コードの 20MHz に比べると拡散度が小さい。軍用の P コードは C/A コードを受信して同期を得るものであるから結局、ジャミング（意図的な妨害電波）にも弱いようである。

7. GPS の近代化

GPS は初号機の打ち上げから四半世紀を越えた。この間、主として原子時計の時刻保持回路の性能向上により、大幅に測位精度が向上している。しかし、現在の最新技術の観点から見るとマルチパスやジャミングに弱いとの問題点も指摘されている。

欧州は GPS の重要性を認識し、このシステムが米軍の管轄下にあることに危惧を抱いた。そこで、欧州独自の衛星測位システムを構築する計画を立て、これをガリレオ計画と名づけ 2008 年の運用を目指している。ガリレオ計画は GPS を改良したものになっている。

米国も GPS 近代計画を立ち上げ、GPS が今後も世界標準として使われるべく、ガリレオ計画に負けぬように努めている。この結果、最初の大きな変更がブロック R の改修で R-M である。R-M 型では 3 種の新しい信号が加えられている。それらは L1 帯と L2 帯に軍用の M コード、L2 帯に民間用の L2C コードである。M コードは BOC (Binary Offset Carrier) 変調がなされている。簡単に言うとエネルギーのスペクトル密度を 20MHz に広げ、かつ直接に補足できるように工夫された信号である。

民間用には電離層補正のために L2 帯でも

C/A コードを放送することが考えられたが、さらに精度も高くなることが期待される L2C 信号が加えられることになった。R-M は 8 機 (SVN53 から、但し機体番号と打ち上げ順序は必ずしも一致していない) 打ち上げられる。

その最初の 1 号機は 2005 年 3 月に予定されていたが、打ち上げロケットのトラブルなどもあって、現在では 9 月の中旬に延期されている。

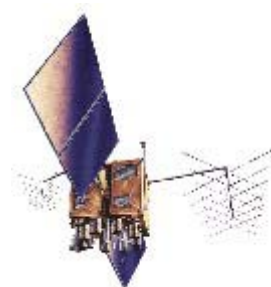


図-3 ブロック R - M

ブロック R-M の後はブロック F が打ち上げられる。F 型ではさらに民間用に新しい信号が L5 帯で放送される。L5 の周波数は 1176.45MHz (10.23MHz × 115) で、L1 帯と同様に航空用に保護された周波数帯である。

ブロック F は 19 機の打ち上げが計画されている。型は R のみロッキード・マーチンにより製造されたが、F はロックエル・インターナショナル (今はボーイング) に戻った。



図-4 ブロック F

現在ブロック の概念設計が両社により 2 年かけて並行して行われている。なお、JPO を技術的に支援しているのは非営利企業のアエロスペース社である。MITRE 社は主としてユーザ

セグメントで JPO を支援している。

ブロック 型で新たに追加される信号は L 1 帯の民間用信号で L1C と呼ばれる。L1C はガリレオも放送予定で、現在仕様の詳細が検討されているところである。2006 年 3 月にはこの仕様が正式に決定される。

現在の GPS が 2 波で 3 種の信号を放送しているのに対し、ブロック 時代になると 3 波で 8 種の信号が放送されることになる。ブロック

は最初の契約で 12 機と 2 回目の契約で 18 機の計 30 機が 2013 年から 2021 年までに打ち上げられることになっている。図-5 は現時点で見た最新の GPS 民間用測位信号の利用可能予測である。この図は JPO を支援しているスタンセル・コンサルティングのトーマス・スタンセル氏に帰属する。同氏の好意によりこの小論に掲載させて貰った。

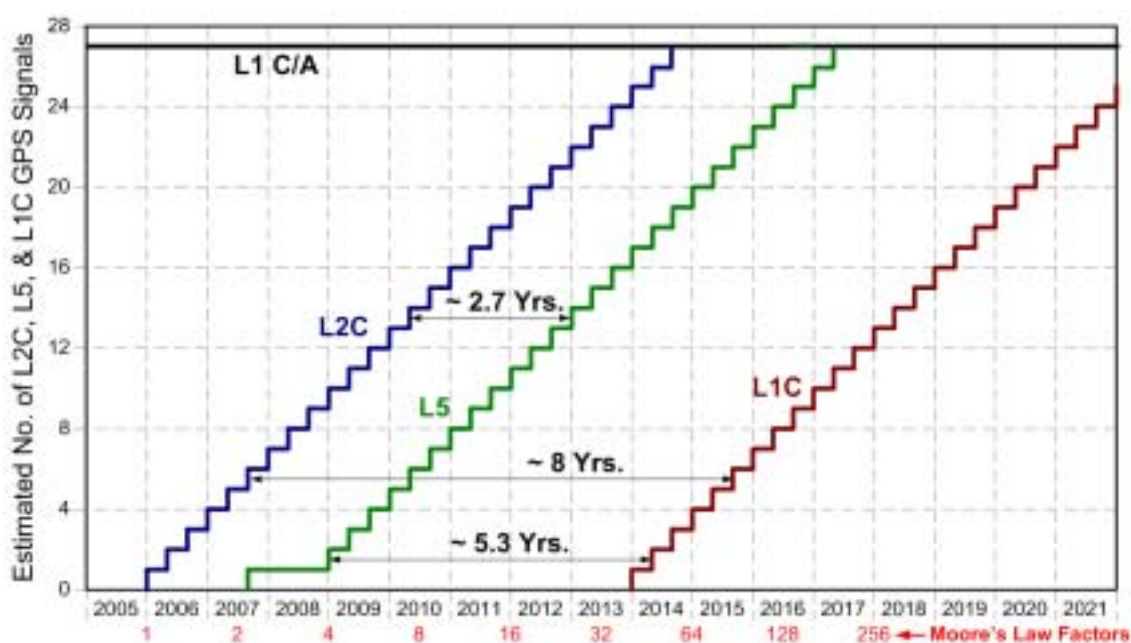


図-5 GPS の民間用測位信号利用可能予測

8. おわりに

GPS は現在の最先端技術がいくつか組み合わせられて初めて実現できたものである。それらは、宇宙用原子時計、スペクトラム拡散通信、低雑音増幅器、CPU（超小型コンピュータ）、高精度軌道決定、三軸姿勢制御衛星、などの技術である。そして人類は地球上のどこにいても、小さな受信機を持つだけで自分がどこにいるのか判る新たな能力を身につけたのである。

インターネットはDARPAの軍事研究から始まった。GPS も DARPA のスペクトラム拡散

信号による測位研究が大きな役割を果たした。軍事研究は大きな成果を得ても、軍事に留まったのでは人類に役立ったとは言い難い。民生利用にその成果を譲って初めて人類に役立つ技術と言えよう。GPS はまさにその手渡しの最中にある。

GPS の測位原理から現在の運用状況と将来計画を極めて大まかに紹介した。大まか過ぎて却ってわかりづらくなっている部分も多いと思われる。宇宙用原子時計は軌道上でのアインシュタインの相対性理論の効果により地上より進

むので、磁場をかけて補正している。詳細に見るとこのような技術的に面白い話もあるが割愛した。是非、参考に掲げた教科書、参考書を見ていただきたい[7]～[9]。なお、図 - 1、2 は[10]のホームページから借用した。

参考文献

- [1] GLOBAL POSITIONING SYSTEM STANDARD POSITIONING SERVICE SIGNAL SPECIFICATION, June 1995
- [2] IS-GPS-200D, Navstar GPS Space Segment / Navigation User Interfaces, 2004
- [3] IS-GPS-705, Navstar GPS Space Segment / User Segment L5 Interfaces, 2003
- [4] GLOBAL POSITIONING SYSTEM STANDARD POSITIONING SERVICE PERFORMANCE STANDARD, Oct. 2001
- [5] NAVSTAR GPS USER EQUIPMENT INTRODUCTION, Sep. 1996
- [6] E.T. Jaynes, “Probability Theory: Logic of Science” , 2003, Cambridge University Press
- [7] 坂井丈泰、GPS 技術入門、2003 年 2 月、東京電機大学出版局
- [8] 土屋淳・辻宏道、新・GPS 測量の基礎、2002 年 9 月、日本測量協会
- [9] 株ユニゾン、図解雑学、GPS のしくみ、2003 年 8 月、ナツメ社
- [10]http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps_f.html

(はら のりかず)



1966 東京大学工学部航空学科卒。1976FIT で OR 学科修士。1966 NAMC。C-1 の構造設計、強度、疲労試験、YS-11A の疲労寿命。1972 NASDA。N ロケット、ADEOS システム設計、JEM の安全開発保証。安全信頼性管理部長を最後に 2001 年退団。現在、JAXA 主幹開発員（非常勤）。E.T.ジェインズ「確率理論」の普及を目指す。日本航空宇宙学会、日本ロケット協会、日本信頼性学会、AIAA、ION の会員。