

A.2 広域 DGPS と MSAS

坂井 丈泰 (電子航法研究所)

sakai@enri.go.jp

A.2.1 はじめに

衛星航法システムのひとつである GPS は、カーナビの普及にともない今や測位システムの代表として社会的にも広く認知されるに至った。手軽に正確な位置を測定できることが GPS の特徴であり、軽量・コンパクトな受信機が安価に入手できることは周知のとおりである。

GPS の測位精度を向上させる手法のひとつに、ディファレンシャル GPS (differential GPS; DGPS) 方式がある。これは位置が既知の基準局受信機における測位誤差を利用して移動局受信機の誤差を補正する方式であって、基準局からそれほど遠くない範囲内では GPS の測位誤差が場所によらずほぼ同様となる性質を利用するものである。単一の基準局を用いるディファレンシャル GPS 方式は狭域 DGPS (local-area differential GPS: LADGPS) とも呼ばれ、おおむね基準局から 100 km 程度までの範囲内では有効な方式である。

狭域 DGPS の有効範囲を超える場合は、広域 DGPS (wide-area differential GPS: WADGPS) 方式による補正が可能である。これは大陸規模の広い範囲で適用可能なディファレンシャル補正情報で、衛星クロック・軌道、電離層伝搬遅延、対流圏伝搬遅延といった誤差要因別にそれぞれの補正情報を生成・伝送することにより有効範囲を広げるものである。広域 DGPS 方式による補正情報を生成するにはサービス対象とする地域全体をカバーするように複数の基準局を配置する必要があるが、一組の補正情報のみでサービスエリア全体を一気に補正対象とできる特長を持つ。

ディファレンシャル補正情報の伝送媒体としては狭域 DGPS では無線通信回線あるいは携帯電話回線が多く利用されるが、広大なサービスエリアをカバーする広域 DGPS 方式では静止衛星の利用が有効

である。すなわち、広域 DGPS 方式による補正情報を静止衛星から直接放送することでサービスエリア内のユーザの測位精度を改善するもので、我が国では MSAS (MTSAT satellite-based augmentation system) と呼ばれるシステムが利用可能となりつつある。ユーザは、MSAS (あるいは SBAS) 対応の受信機を利用することで、日本全国どこでもディファレンシャル補正情報を受信・適用することができる。

本チュートリアルでは、広域ディファレンシャル GPS 方式の概要を述べ、また我が国における実用システムである MSAS を紹介することとする。

A.2.2 (狭域) DGPS 方式

広域 DGPS を説明する前に、よりシンプルな方式である狭域の DGPS について述べておくことにする。補正情報の伝送フォーマットが規格化され広く利用されていることもあり、単に DGPS といえばこちらの方式を指すのが普通である。

GPS の誤差要因のうちの大部分は受信機を設置する場所に関係なく共通に現れるから、離れた場所にある複数の受信機が同じ影響を受けることになる。このことを利用すると、既知の地点に GPS 受信機を固定して誤差を測定すれば、この誤差情報により離れた地点の GPS 受信機に生じる誤差を推定し、補正することができる。

このように、既知の地点で GPS の誤差を測定し、これを利用して誤差の補正を図る方式をディファレンシャル GPS という。ディファレンシャル GPS では、既知地点に固定される受信機を基準局 (reference station, base station)、移動するユーザ受信機を移動局 (rover station) と呼ぶ。

基準局で測定される衛星 j までの擬似距離 $PRM_{j,R}$ は、真の距離 $R_{j,R}$ と次のような関係が

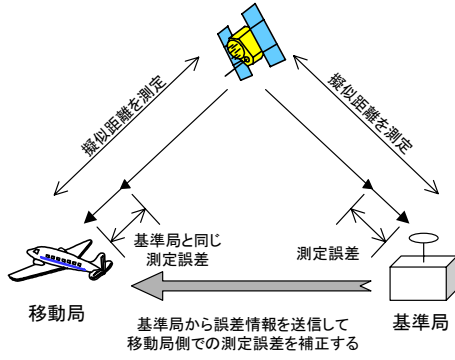


図 1: ディファレンシャル GPS

ある．

$$PRM_{j,R} = R_{j,R} + S_j + G_R + \xi_{j,R} \quad (1)$$

誤差成分のうち、 S_j は衛星 j に起因する誤差、 G_R は基準局アンテナの位置に依存する誤差であって、 $\xi_{j,R}$ はそのどちらでもなく観測毎に生じるランダム誤差とする．

基準局については位置があらかじめわかっているから、真の距離 $R_{j,R}$ は計算により求められる．したがって、誤差成分だけを $PRM_{j,R} - R_{j,R} = S_j + G_R + \xi_{j,R}$ のように取り出すことができる．移動局側ではこの誤差を擬似距離から差し引くことになるから、誤差の符号を逆にすれば衛星 j に関するディファレンシャル補正值 PRC_j が得られる．

$$\begin{aligned} PRC_j &= -(PRM_{j,R} - R_{j,R}) \\ &= -S_j - G_R - \xi_{j,R} \end{aligned} \quad (2)$$

一方、移動局で測定される擬似距離は、

$$PRM_{j,U} = R_{j,U} + S_j + G_U + \xi_{j,U} \quad (3)$$

となっている．移動局の場合は真の距離 $R_{j,U}$ は未知であり、誤差成分だけを直接取り出すことはできない．基準局で生成されたディファレンシャル補正值（式（2））を適当な伝送媒体により受信したならば、これを適用して移動局における誤差成分を補正することが可能となる．このためには、移動局で観測される擬似距離 $PRM_{j,U}$ に、ディファレンシャル補正值を加えればよい．

$$PR_{j,U} = PRM_{j,U} + PRC_j$$

$$= R_{j,U} + (G_U - G_R) + (\xi_{j,U} - \xi_{j,R}) \quad (4)$$

$PR_{j,U}$ が補正済みの擬似距離であり、移動局受信機はこれを用いて測位計算を実行する．つまり、 S_j の項がキャンセルし、衛星に起因する誤差は取り除かれることになる．これがディファレンシャル GPSの基本的な原理であって、大部分の誤差を取り除くことができる．受信機側の位置により決まる $G_{j,U}$ はキャンセルせず、基準局と移動局における誤差の差の成分が現れることになる．

GPSのさまざまな誤差要因について、それぞれディファレンシャル GPSにより補正できるかどうかを表 1にまとめた．衛星軌道誤差については基準局と移動局にほぼ共通に現れるのでディファレンシャル処理により補正できるが、基準局と移動局との間の距離（基線長）が長くなると、共通性が減少することから補正精度が低下する．衛星クロックの影響は基準局と移動局の位置関係によらず共通に現れるので、良好に補正ができる．

電離層遅延についても、基線長がそれほど長くなければ（数百 km 以下程度）ディファレンシャル補正が可能であるが、太陽活動が活発で電離層の変動が激しいと補正精度が低下する．対流圏遅延も基本的にはディファレンシャル処理により補正できるが、受信機の置かれている高度により遅延量が変わるため、モデルによる補正で高度の影響を除くことが必要である．

一方、マルチパスについてはディファレンシャル処理による補正ができない．これは、マルチパス誤差は受信機の周囲の電波環境により決まるため、基準局と移動局に共通に現れる誤差ではないことによる．また、受信機内部で発生する誤差についても、共通な誤差成分ではないから補正はできない．これらの誤差については、ディファレンシャル処理により基準局側の誤差の影響も受け、単独測位方式の場合と比べてむしろ誤差が増加することになる．

なお、狭域 DGPS については補正情報の伝送フォーマットが規格化されており、RTCM-SC104 勧告方式 /1/ が標準的に用いられている．DGPS と

表 1: DGPS により補正できる誤差要因

誤差要因	補正可否	コメント
衛星軌道	○	長基線では精度低下
衛星クロック		よく補正できる
電離層遅延	○	活動が激しいと精度低下
対流圏遅延		高度差に注意が必要
マルチパス	×	補正できない
受信機雑音	×	補正できない

いえばこのフォーマットを指すことが多く、安価な受信機であっても対応しているのが普通といえる。

A.2.3 広域ディファレンシャル GPS 方式

狭域 DGPS の場合は、電離層遅延および対流圏遅延については基準局と移動局で同一との仮定がある。すなわち、式 (4) において

$$S_j = B_j + E_j + I_j + T_j \quad (5)$$

$$G_R = G_U = 0 \quad (6)$$

とみなされており、この仮定が成り立つ範囲内においてはマルチパスおよび受信機雑音以外の誤差が補正されることとなる。なお、 B_j は衛星クロック誤差、 E_j はエフェメリス誤差（衛星位置誤差）、 I_j は電離層遅延、 T_j は対流圏遅延を意味し、添え字の j は衛星 j に関する誤差を表す。

基準局と移動局の間の距離が長くなるとこうした仮定は次第に成り立たなくなり、ディファレンシャル補正をしても測位精度が改善されないようになる。図 2 は、IGS mtka（東京都調布市）を基準局とし、国内の IGS 局のそれぞれを移動局に見立てて DGPS 補正処理をした結果であって、1 日間の平均位置の真位置に対する誤差を表示してある。基準局からの距離が長くなるにしたがい、測位精度が低下する様子がわかる。

こうした状況を防ぎ、広い範囲のユーザに対して有効なディファレンシャル補正を行うには、誤差要因のそれぞれについて個別のディファレンシャル補正情報を（ユーザ受信機の位置の関数として）与えればよい。式 (4) のディファレンシャル補正が

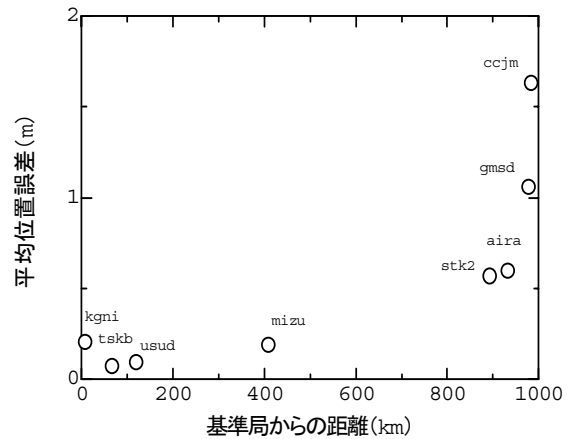


図 2: 狭域 DGPS の測位精度（2005 年 11 月 14 日、基準局=IGS mtka）。

有効でなくなる原因は基準局と移動局の間の距離が長くなることで一部の誤差成分が共通でなくなることにあるから、そのような誤差要因については移動局の位置に応じて適切な補正値を適用できるようにするのである。すなわち、式 (5) ではすべての誤差要因をまとめてひとつの補正値としていたが、これを誤差要因別に分解してそれぞれの補正値を生成するのであって、このような補正方式をベクトル補正（vector correction）とも呼ぶ。

ベクトル補正を実現するためには、それぞれの誤差要因についてたとえば次のようにモデル化する（GPS の誤差要因については /2/ など）。

衛星クロック誤差 — 移動局の場所によらず、各衛星については一定値とする。

エフェメリス誤差 — エフェメリス情報により計算される衛星位置の真の位置からの差がエフェメリス誤差であり、その直交座標表現を補正値とする。移動局にとっては、このうちの移動局から衛星への視線方向成分（内積）が測距誤差となる。

電離層遅延 — 測距信号が電離層を通過する地点の（経緯度の）関数とする。また、衛星の仰角に

より傾斜係数（1～3 程度）を乗じる．

対流圏遅延 — 移動局位置の関数とするか、あるいは位置によらず一定とする．衛星の仰角により傾斜係数（1～10 程度）を乗じる．

広域 DGPS 補正情報としては、移動局位置に応じてこれらをそれぞれ計算するためのパラメータが含まれていればよい．

たとえば、後述する広域補強システム MSAS では表2のような補正メッセージが定義されている．メッセージタイプ 2～6 は高速補正（fast correction）、25 は長期補正（long-term correction）、26 は電離層遅延補正であって、メッセージタイプ 24 は高速補正と長期補正の両方を含んでいる．これはメッセージタイプ 2～5 に 13 衛星分の補強情報を収容できるため、補強対象の衛星がたとえば 32 の場合、26 衛星についてはタイプ 2 および 3 を、また残りの 6 衛星はタイプ 24 を使うことで、伝送効率の向上が図られる．

表中の $UDREI^j$, $GIVEI_k$ はインテグリティ情報、これら以外はすべてディファレンシャル補正情報である．後述するように、SBAS はプロテクションレベル方式により航空機航法に必要とされるインテグリティ（完全性）を満たす設計とされており、このプロテクションレベル（最大測位誤差の見積り）を計算するために用いられるのがインテグリティ情報である $/3/$ ．特に $UDREI^j$ については最大放送間隔が 6 秒と短いため、51 衛星分をまとめて放送できるメッセージタイプ 6 が用意されている．

ディファレンシャル補正情報は長期補正、高速補正、電離層遅延補正に分けられており、それぞれ衛星軌道およびクロック（変化が遅い成分）、衛星クロック（SA などの速い変化を伴う成分）、電離層伝搬遅延の補正に用いる．たとえば、長期補正情報を適用するには航法メッセージにより求めた衛星位置およびクロック補正值 $\bar{x}^j$, $\Delta \bar{t}_{SV}^j$ に補正值を加えることとされており、したがって衛星位置としては

$$\begin{bmatrix} \tilde{x}^j \\ \tilde{y}^j \\ \tilde{z}^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{x}^j + \Delta x^j \\ \bar{y}^j + \Delta y^j \\ \bar{z}^j + \Delta z^j \end{bmatrix} \quad (7)$$

また補正後の衛星クロックは

$$\tilde{t} = t_{SV}^j - (\Delta \bar{t}_{SV}^j + \Delta b^j) \quad (8)$$

を用いることとなる（ j は衛星番号、GPS ICD/4/ も参照のこと）．同様に、擬似距離については

$$\tilde{\rho}^j = \rho^j + FC^j + IC^j + TC^j \quad (9)$$

として補正することとなり、 FC^j, IC^j, TC^j はそれぞれ高速補正、電離層遅延補正、対流圏遅延補正である．前二者については SBAS から補正值が放送され、また対流圏遅延補正については SBAS では MOPS/5/ のモデルを使用するのが一般的である．

電離層伝搬遅延補正情報については、経緯度で 5 度毎に設定された IGP（ionospheric grid point）における垂直遅延量としてユーザに放送される．ユーザ側では目的とするピアースポイント位置における垂直遅延量 $I^V(\lambda, \phi)$ を周囲の IGP における垂直遅延量 I_k^V の双一次補間（bilinear interpolation）

$$I^V(\lambda, \phi) = \sum_k I_k^V \cdot \left| \frac{\lambda - \lambda_k}{5} \right| \cdot \left| \frac{\phi - \phi_k}{5} \right| \quad (10)$$

により得て（ここでは周囲の 4 IGP を用いているものとし、各 IGP の位置を (λ_k, ϕ_k) と表した）、さらに

$$\hat{I}(\lambda, \phi) = f(e) I^V(\lambda, \phi) \quad (11)$$

として視線方向の遅延量に変換する．この変換に用いられる係数（obliquity factor）は衛星の仰角 e の関数で、

$$f(e) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R_E \cos e}{R_E + H_{iono}} \right)^2}} \quad (12)$$

と定められている． R_E は地球半径、また H_{iono} は電離層高度であって SBAS では 350 km を用いる．

A.2.4 広域補強システム MSAS

GPS をそのまま利用したのでは航法システムとしての性能が不足する場合に、それを補うために追加されるのが補強システム（augmentation system）である．補強システムは GPS と一体となって動作し、ユーザが必要とする測位精度あるいは信頼性をもった航法サービスを実現する．ディファレンシャル GPS も補強システムの一つといえ、測位精度の改善を目指すものである．

表 2: SBAS (MSAS) 補正メッセージ (一部) .

タイプ	データ数	内容	範囲	単位	最大間隔
2-5	13 衛星	FC^j	± 256 m	0.125 m	60 s
		$UDREI^j$	0-15	—	6
6	51 衛星	$UDREI^j$	0-15	—	6
24	6 衛星	FC^j	± 256 m	0.125 m	60
		$UDREI^j$	0-15	—	6
	2 衛星	Δx^j	± 32 m	0.125 m	120
		Δy^j	± 32 m	0.125 m	120
		Δz^j	± 32 m	0.125 m	120
		Δb^j	$\pm 2^{-22}$ s	2^{-31} s	120
25	4 衛星	Δx^j	± 32 m	0.125 m	120
		Δy^j	± 32 m	0.125 m	120
		Δz^j	± 32 m	0.125 m	120
		Δb^j	$\pm 2^{-22}$ s	2^{-31} s	120
26	15 IGP	I_k^V	0-63.875 m	0.125 m	300
		$GIVEI_k$	0-15	—	300

現在までのところ航空分野以外ではインテグリティについての要求がそれほど厳しくなく、補強システムの機能としては測位精度の向上が中心である。具体的にはディファレンシャル GPS 方式によることとなり、船舶用中波 DGPS ビーコンをはじめさまざまなシステムが実用化されている。伝送フォーマットとしては後述の RTCM-104 あるいは独自のフォーマットが使用されて種々の無線メディアによるシステムが構築されており、インターネットによる伝送方式も検討が進められている。

民間航空分野においては、ICAO (international civil aviation organization: 国際民間航空機関) が最近 GNSS の標準仕様 (SARPs; standards and recommended practices) を定めたところである /6/。ここでは GNSS は人工衛星の他に機上受信機や地上モニタ施設などをも含めた定義となっていて、具体的な姿は GPS (コアシステム) に補強システムを追加した構成とされている。ICAO GNSS では、補強システムは次の 3 種類に区分されている。

SBAS satellite-based augmentation system: 静止衛星型衛星航法補強システム。静止衛星から補強情報を送信し、大陸規模の広域にわたって GPS の補強を行う。洋上航空路からターミナ

ル空域まで広い範囲の航空機を対象とした補強システムである。

GBAS ground-based augmentation system: 地上型衛星航法補強システム。地上送信局からの補正情報により、局地的に GPS を補強する。空港周辺で進入着陸中の航空機に対して補強サービスを提供する。

ABAS aircraft-based augmentation system。機上型衛星航法補強システム。航空機上で得られる情報により GPS を補強する。受信機の内部処理で実現される RAIM (receiver autonomous integrity monitoring) の他、気圧高度計や慣性センサなど GPS 以外のセンサを利用する AAIM (aircraft autonomous integrity monitoring) が含まれる。ABAS については、いまのところ詳細な規定はなされていない。

航空用広域 GPS 補強システムの標準仕様である SBAS は補強情報を静止衛星から放送するもので、実際のシステムとしては、米国の WAAS (wide area augmentation system)、欧州の EGNOS (European geostationary navigation overlay service)、そして日本の MSAS (MTSAT satellite-based augmentation system) /7, 8/ がそれぞれ整備

中である。MTSAT とは MSAS が使用する静止衛星（運輸多目的衛星：multi-functional transport satellite）のことで、ひまわり 6 号（MTSAT-1R）および 7 号（MTSAT-2）を指す。米国 FAA が開発中の WAAS は 2003 年 7 月に認証作業が完了し、実用が開始された。また、EGNOS も 2005 年 7 月より暫定的な運用を始めている。SBAS により送信される信号は、ユーザ航空機に対して (i) レンズ機能 (ii) インテグリティ情報 (iii) ディファレンシャル補正情報、を提供する。これらはすべて GPS L1 と同じ 1575.42 MHz で放送されるから、アンテナは GPS と共用できるメリットがある。

一方、GBAS は精密進入用の補強システムで、空港周辺に設置されて局地的な補強情報を航空機に送信する。これにより、SBAS では実現できない高水準の進入着陸を目指すもので、米国 FAA が LAAS (local area augmentation system) と呼んで整備する方針である。マルチパス抑制およびインテグリティ確保のため GBAS 地上局には複数の基準受信機が設置され、VHF 波により補強情報を放送する。

補強システムにおいてインテグリティを確保するためには、地上のモニタ局で GPS 信号を監視し、測距信号の精度および正当性を常時チェックすることが必要である。SBAS および GBAS では、具体的にはプロテクションレベル (protection level: 保護レベル) 方式によりインテグリティを確保する設計となっている。この方式では、現実の測位誤差がプロテクションレベルを超える確率がサービス覆域内のいたる地点でいつでもインテグリティ要求水準（たとえば 10^{-7} ）以下であることを保証することとし、このプロテクションレベルが警報限界内であればシステムは利用可能、そうでなければ利用不可として警報を出すこととする。

プロテクションレベル方式は、図 3 で説明できる。この図の横軸は現実の測位誤差、縦軸はプロテクションレベルであるから、インテグリティはこれらの関係が対角線より左の領域にある確率である。対角線より下側の領域に入ることを MI (misleading information) あるいは HMI (hazardous mislead-

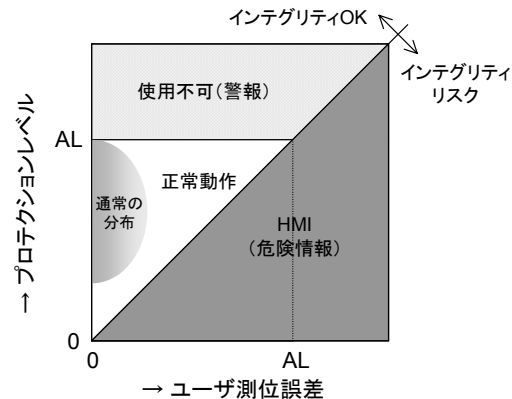


図 3: プロテクションレベル方式によるインテグリティ

ing information) 事象といい、これはインテグリティが満たされていない状況である。アベイラビリティはプロテクションレベルが警報限界内にある確率であるから、 $PL = AL$ の水平線より下側部分となる。

プロテクションレベルは水平・垂直方向について別々に計算され、それぞれ HPL (Horizontal Protection Level) および VPL (Vertical Protection Level) と称する。インテグリティが満たされるにはいずれの方向についても測位誤差がプロテクションレベルを超えてはならないから、式で表せば次のようになる ($\Pr(\cdot)$ は確率を意味する)。

$$\begin{aligned} \text{インテグリティ} &= \Pr(\text{水平測位誤差} < HPL) \\ &\quad \cdot \Pr(\text{垂直測位誤差} < VPL) \end{aligned} \quad (13)$$

SBAS および GBAS の補強情報には、プロテクションレベルを計算するための衛星毎の情報が含まれている。ユーザ受信機側ではこの情報から現在位置におけるプロテクションレベルを求め、現在受けているサービスに対応した警報限界と比較して航法の可否を判断する。放送される情報が衛星毎なのは、ユーザ受信機が実際にどの衛星を使用しているかが不明であることによる。

さて、MSAS はすでに試験信号を放送していることから、これを受信・処理して性能評価を試みた結果の一例を図 4 に示す。これは 2005 年 11 月

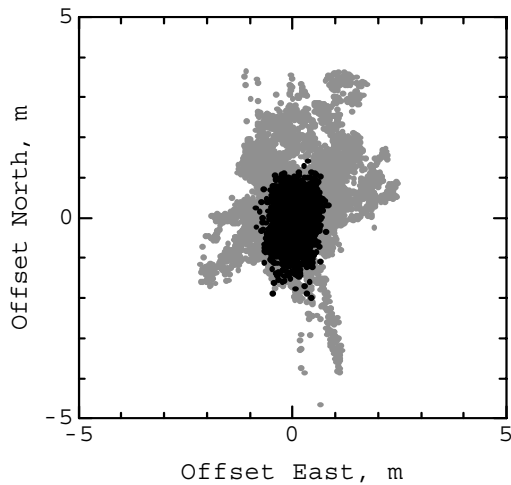


図 4: MSAS 試験信号による測位誤差の例 (2005 年 11 月 14~16 日, 高山)。

14~16 日に放送された試験信号に乗せられていた広域ディファレンシャル情報を解読し、国土地理院 GEONET の高山局 (940058) における RINEX 観測データに適用した結果である。GPS 単独では水平・垂直方向の測位精度はそれぞれ 1.39 m および 3.63 m であったが、MSAS の適用により 0.50 m あるいは 0.73 m に改善された (いずれも RMS 値による)。

また、図 5 は測位誤差とプロテクションレベルを比較した例である。上段は水平方向、下段は垂直方向に関する比較であって、いずれも横軸付近のプロットが実際の測位誤差、数十 m 付近のプロットがプロテクションレベルである。水平・垂直いずれの方向についても測位誤差がプロテクションレベルを超えることはなく、式 (13) は満たされていることがわかる。

なお、MSAS が試験信号により放送した補正メッセージおよび擬似距離データは電子航法研究所ホームページ (<http://www.enri.go.jp/sat/pro.htm>) に掲載されているので、興味のある読者は利用されたい。2006 年 7 月 3 日以降分が提供されている。

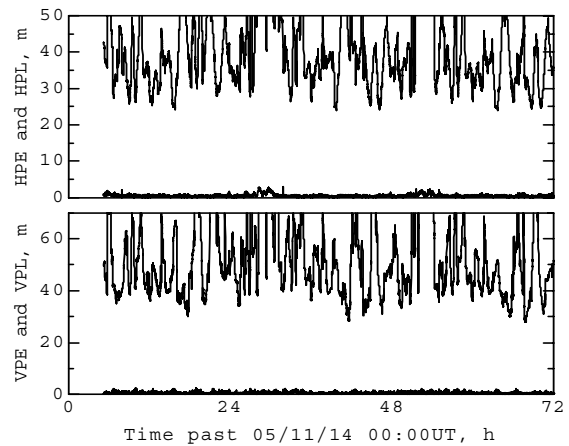


図 5: 測位誤差とプロテクションレベルの比較 (2005 年 11 月 14~16 日, 佐多)。

A.2.5 広域 DGPS 情報のインターネット配信

広域補強システムの研究開発用ツールとして、電子航法研究所では広域補強プロトタイプシステムを開発した。これは、複数の基準局における GPS 観測データを入力とし、広域ディファレンシャル補正情報を含む広域補強情報を実際に生成・出力するもので、基準局配置や補強アルゴリズム、あるいは動作パラメータをさまざまに変えて補強性能を調べるためのものである。使用している計算機は HP AlphaServer ES47 (1.0 GHz Alpha EV7×2, 8 GB RAM, Tru64 UNIX) で、プログラムはすべて C 言語で記述されている。

本プロトタイプが出力するのは SBAS 規格に従った補強メッセージで、MSAS と同一のプログラムで計算処理ができる。本来の広域補強システムはモニタ局における観測データをリアルタイムに収集・処理すべきであるが、本プロトタイプの場合は必ずしもリアルタイムに処理する必要はないことから、現在のところ当面は国土地理院 GEONET による観測データ (一般に公開されている 30 秒サンプルの RINEX ファイル) を使用している。

本プロトタイプについては動作試験を兼ねて本年 4 月より定常運用を実施しており、補強メッセー

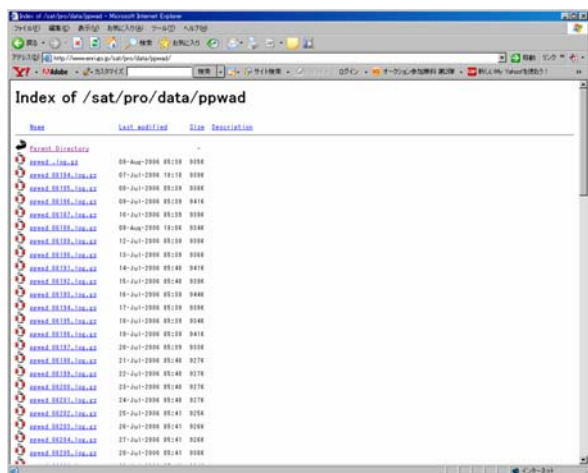


図 6: 広域補強情報ファイルの提供画面
(<http://www.enri.go.jp/sat/pro/data/ppwad/>) .

ジを毎日生成・蓄積している。モニタ局配置は MSAS 国内局に近い 6 局で、オーソドックスなアルゴリズムおよびパラメータで運用している。生成される広域ディファレンシャル補正情報の適用により 0.3 ~ 1 m 程度の測位精度が得られ、またプロテクションレベルも正常に機能することを確認している。

ところで、定常運用により生成された広域補強情報は、日本全国で後処理ディファレンシャル GPS 用に利用可能である。すなわち、広域補強情報は日本全国で有効であるから、適当な処理プログラムがあれば、後処理により日本全国どこにおいてもディファレンシャル補正処理を行うことができる。このため、当所ではこれをインターネットを利用して一般に公開することとし、処理プログラム（ユーザ受信機シミュレータ）についても提供することとした。

データファイルは当所ホームページ (<http://www.enri.go.jp/sat/pro/data/ppwad/>) にて提供されている。図 6 はその画面イメージで、GZIP 形式で各日とも 1 M バイト弱に圧縮されている。10 月 31 日現在、2006 年 7 月 3 日以降の全日分が掲載されている。

広域補強情報を適用して測位計算を実行するプログラム「SBASPOS」も同時に提供しており、任意の RINEX ファイルを入力として後処理による広

域ディファレンシャル補正を実行可能である。今後、広域補強情報から RTCM フォーマットなどへの変換プログラムも提供する考えである。

A.2.6 おわりに

広い範囲のユーザを対象として測位精度を向上する広域ディファレンシャル GPS 方式について、通常の狭域ディファレンシャル GPS 方式との比較により原理を説明し、実用システムである MSAS を紹介した。MSAS はすでに試験信号を放送しており、来年に予定されている正式運用が開始されればディファレンシャル補正情報が全国どこでも得られることとなる（すでに一部のハンディ受信機は試験信号を利用するものもある）。

2009 年度の打上げを予定して開発が進められている準天頂衛星システムにおいても、広域補強信号が放送される計画とされている（L1-SAIF 信号）/12/。こうした広域システムの開発・応用にあたり、本チュートリアルが参考になれば幸いである。

A.2.7 補足: 狭域 DGPS 補正情報の生成

狭域 DGPS 補正情報の作成について式 (2) により原理的な説明をしたが、現実には真の距離 $R_{j,R}$ は不明であってこうした計算処理を行うことはできない。つまり、衛星位置は実際には航法メッセージから計算するしかなく、真の幾何距離はわからないのである。

航法メッセージから計算した衛星クロック誤差を $\hat{B}_j$ 、衛星・受信機間距離を $\hat{R}_{j,R}$ と表すこととする。ディファレンシャル補正值 PRC_j は、基準局受信機で測定した擬似距離

$$PRM_{j,R} = R_{j,R} - B_j + S_R + I_j + T_j + \xi_{j,R} \quad (14)$$

から、航法メッセージによる幾何距離 $\hat{R}_{j,R}$ を差し引き、また同様に得た衛星クロック誤差 $\hat{B}_j$ を加えることで求められる。受信機クロック誤差 S_R についてはそのままでもディファレンシャル補正值としては問題ないが、補正値の絶対値が大きくなることを避けるため、受信機クロックの推定値を差し引いておくのが普通である。

$$\begin{aligned}
PRC_j &= -(PRM_{j,R} - \hat{R}_{j,R} + \hat{B}_j - S_R) \\
&= (\hat{R}_{j,R} - R_{j,R}) - (\hat{B}_j - B_j) \\
&\quad - I_j - T_j - \xi_{j,R} \\
&= \Delta \hat{R}_j - \Delta \hat{B}_j - I_j - T_j - \xi_{j,R} \quad (15)
\end{aligned}$$

航法メッセージから計算される衛星クロック誤差 $\hat{B}_j$ は、真の誤差 B_j に対して $\Delta \hat{B}_j = \hat{B}_j - B_j$ だけの誤りを含んでいる。また、同様に航法メッセージから計算される衛星・基準局間距離 $\hat{R}_{j,R}$ は、真の距離 $R_{j,R}$ より $\Delta \hat{R}_j = \hat{R}_{j,R} - R_{j,R}$ だけ長くなっている。これらはいずれも数 m 程度であって、式 (15) のディファレンシャル補正値は全体として数 m ~ 数十 m 程度以内になる。

移動局受信機の擬似距離

$$PRM_{j,U} = R_{j,U} - B_j + S_U + I_j + T_j + \xi_{j,U} \quad (16)$$

を、航法メッセージの誤差 $\Delta \hat{B}_j, \Delta \hat{R}_j$ がわかるように書き直すと、次のようになる。

$$\begin{aligned}
PRM_{j,U} &= R_{j,U} - B_j + S_U + I_j + T_j + \xi_{j,U} \\
&= (\hat{R}_{j,U} - \Delta \hat{R}_j) - (\hat{B}_j - \Delta \hat{B}_j) \\
&\quad + S_U + I_j + T_j + \xi_{j,U} \quad (17)
\end{aligned}$$

航法メッセージにより求められる衛星位置を用いて $\hat{R}_{j,U}$ にもとづいて測位計算をすると、誤差 $\Delta \hat{R}_j$ と $\Delta \hat{B}_j$ の成分が測位誤差として現れることとなる。

式 (15) のディファレンシャル補正値 PRC_j を加えると、補正済み擬似距離 $PR_{j,U}$ が

$$\begin{aligned}
PR_{j,U} &= PRM_{j,U} + PRC_j \\
&= \hat{R}_{j,U} - \hat{B}_j + S_U + \xi'_{j,U} \quad (18)
\end{aligned}$$

のように得られる。 $\hat{R}_{j,U}$ は航法メッセージから計算された衛星位置と受信機の間の距離、また $\hat{B}_j$ も同様に航法メッセージによる衛星クロック補正値を意味する。つまり、この補正済み擬似距離 $PR_{j,U}$ は航法メッセージから求められる衛星位置にもとづいており、これにより測位計算を行うのであれば航法メッセージに含まれる誤差は測位結果には現れないのである。

A.2.8 付録：補強情報の生成

広域補強システムが放送する広域ディファレンシャル補正情報を生成するには、GPS の誤差要因の各成分を分離・抽出し、補強メッセージとして編集する必要がある。このような広域ディファレンシャル補正情報の生成方法について、概略を述べる /13/。なお、広域補強システムのアルゴリズムについては文献が少ないが、原理的な説明は /14/ にみられる。

A.2.8.1 モニタ局の測定値

まず、モニタ局 $i = 1, \dots, N$ が時刻 t_i に測定した GPS 衛星 $j = 1, \dots, M$ に関する擬似距離を

$$\rho_i^j(t_i) = R_i^j - b^j + B_i + I_i^j + T_i^j + M_i^j \quad (19)$$

と表すことにする。ここで、 ρ_i^j ：擬似距離、 R_i^j ：真距離 ($R_i^j = |\mathbf{x}^j(t_i - d_i^j) - \mathbf{x}_i|$)、 b^j ：衛星クロック誤差、 B_i ：受信機クロック誤差、 I_i^j ：電離層伝搬遅延、 T_i^j ：対流圏伝搬遅延、 M_i^j ：マルチパス誤差、である。衛星位置 $\mathbf{x}^j(\cdot)$ については、受信時刻 t_i (各モニタ局で異なることに注意) における ECEF 直交座標系で表現する。この計算には伝搬時間 d_i^j が必要で、

$$d_i^j = [\rho_i^j(t_i) + b^j - B_i - I_i^j - T_i^j] / c \quad (20)$$

から求める。

受信機クロック誤差 B_i は、各モニタ局の位置が既知であることを利用して解くことができる。また、対流圏伝搬遅延については適当なモデル式により十分な精度で補正でき、また電離層伝搬遅延量は二周波による測定データを利用して直接知ることができる。こうして大気遅延を除き、衛星クロック誤差については GPS 航法メッセージに含まれる補正パラメータを適用すると、補正済みの擬似距離として

$$\bar{\rho}_i^j = R_i^j - \Delta b^j + \Delta B_i + M_i^j \quad (21)$$

が得られる。 Δb^j は衛星クロック補正パラメータの誤差成分であって、広域ディファレンシャル補正情報の衛星クロック補正量に対応する。

A.2.8.2 長期補正情報

さて、ベクトル方式による広域ディファレンシャル補正情報を与えるためには、擬似距離 $\bar{\rho}_i^j$ に含まれる衛星位置誤差とクロック誤差を分離する必要がある。航法メッセージ（エフェメリス）による衛星位置を $\bar{\mathbf{x}}^j(t_i - d_i^j) = \mathbf{x}^j(t_i - d_i^j) - \Delta \mathbf{x}^j$ 、モニタ局 i の位置を $\mathbf{x}_i$ と表すと、擬似距離 $\bar{\rho}_i^j$ の近似的な誤差成分を

$$\Delta \rho_i^j = \bar{\rho}_i^j(t_i) - \left| \bar{\mathbf{x}}^j(t_i - d_i^j) - \mathbf{x}_i \right| \quad (22)$$

と書けるから、これを観測量として次の観測方程式をつくる。

$$H \cdot \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{X} \\ \Delta \mathbf{B} \end{bmatrix} = [\Delta \rho_1^1 \ \Delta \rho_1^2 \ \cdots \ \Delta \rho_N^M]^T \quad (23)$$

未知数ベクトルは $\Delta \mathbf{X} = [\Delta x^1 \ \Delta y^1 \ \Delta z^1 \ \Delta b^1 \ \cdots \ \Delta x^M \ \Delta y^M \ \Delta z^M \ \Delta b^M]^T$ 、 $\Delta \mathbf{B} = [\Delta B_1 \ \cdots \ \Delta B_N]^T$ であって、 $\Delta \mathbf{x}^j = [\Delta x^j \ \Delta y^j \ \Delta z^j]^T$ はエフェメリスに含まれる衛星位置誤差である。

観測行列 H は

$$H = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial \rho_1^1}{\partial \Delta \mathbf{x}^1} \right)^T & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \left(\frac{\partial \rho_1^2}{\partial \Delta \mathbf{x}^2} \right)^T & -1 \\ \vdots & & & & \vdots & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ & & & \vdots & & \vdots & & \\ \cdots & \left(\frac{\partial \rho_N^M}{\partial \Delta \mathbf{x}^M} \right)^T & -1 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

であって、衛星位置誤差と擬似距離の関係は

$$\frac{\partial \rho_i^j}{\partial \Delta \mathbf{x}^j} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \rho_i^j}{\partial \Delta x^j} \\ \frac{\partial \rho_i^j}{\partial \Delta y^j} \\ \frac{\partial \rho_i^j}{\partial \Delta z^j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\bar{x}^j - x_i}{|\bar{\mathbf{x}}^j - \mathbf{x}_i|} \\ \frac{\bar{y}^j - y_i}{|\bar{\mathbf{x}}^j - \mathbf{x}_i|} \\ \frac{\bar{z}^j - z_i}{|\bar{\mathbf{x}}^j - \mathbf{x}_i|} \end{bmatrix} \quad (25)$$

から得られる。

式(23)はカルマンフィルタにより解くことになるが、状態変数はいずれも軌道情報及びクロック誤差を意味するので、時定数は比較的長く（数時間程度）してよい。衛星軌道・クロックの補正情報としては、状態変数 $\Delta \mathbf{X}$ がそのまま対応する。

カルマンフィルタにより得られる共分散行列 P は、衛星クロック誤差と軌道誤差の相関関係を表している。これらの誤差は衛星間では相関がないものと考えてよいから、衛星 j のみに関する要素を取り出して P^j と書くことにする（ 4×4 行列）。軌道誤差は視線方向成分しか測距誤差として寄与しないことからサービスエリア内におけるユーザ位置によってこれらの誤差の現れ方が異なることになるが、メッセージタイプ28でこの共分散関係 P^j が放送されることにより、ユーザ位置に応じた視線方向成分の算出が可能となる。

実際に補正情報としてユーザに放送するにあたっては、エフェメリス情報の変更に対応する必要がある。GPS航法メッセージにはIODE（issue of data, ephemeris）が含まれており、エフェメリス情報が増改された場合にはIODEも変わるものとなっている。このため、メッセージタイプ24及び25の軌道補正情報には適用すべきエフェメリスのIODE番号を併記し、ユーザ側で正しく対応付けられるようになっている。

A.2.8.3 高速補正情報

長期補正情報は比較的時定数の長い（数10分以上）誤差成分に対応しており、SA（selective availability）に代表されるような周期の短い誤差要因には対応できない。これを補正するために用いられるのが高速補正情報であり、長期補正適用後になお残る衛星毎の擬似距離誤差を、すべてのモニタ局について加重平均することで求める。

$$FC^j = - \sum_{i=1}^N w_i \left(\bar{\rho}_i^j - \left| \bar{\mathbf{x}}^j + \Delta \mathbf{x}^j - \mathbf{x}_i \right| + \Delta b^j - \Delta B_i \right) / \sum_{i=1}^N w_i \quad (26)$$

$$w^{-1} = \sigma_{\rho_i^j}^2 + \begin{bmatrix} \frac{\partial \rho_i^j}{\partial \Delta \mathbf{x}^j} \\ -1 \end{bmatrix}^T P^j \begin{bmatrix} \frac{\partial \rho_i^j}{\partial \Delta \mathbf{x}^j} \\ -1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

実際にはカルマンフィルタで処理することとなり、 FC^j の共分散行列からインテグリティ情報UDREI^jを生成する。

軌道及びクロックの補正情報 $\Delta x^j, \Delta b^j$ については、ユーザ側の処理と同様に、 IODC 番号を介して正しくエフェメリスに対応付けられている必要がある。すなわち、エフェメリスが変更された場合にあっては、高速補正值に不連続な変化がないように配慮しなければならない。

A.2.8.4 電離層伝搬遅延補正

電離層遅延補正情報を作成する方法はいくつか考えられるが、本プロトタイプではまず米国 WAAS で採用されているプレーナフィット (planar fit) 方式 /9/ を実装した。この方式では、 IGPK の周辺における電離層垂直遅延量 $I_k^V(\lambda, \phi)$ を経緯度に関する一次式でモデル化する。

$$I_k^V(\lambda, \phi) = a_0 + a_1(\lambda - \lambda_k) + a_2(\phi - \phi_k) \quad (28)$$

λ_k, ϕ_k は IGPK の経緯度である。係数 $\{a_0, a_1, a_2\}$ は、モニタ局により観測された IGP 周辺の電離層遅延量 I_i^j を用いて、

$$\begin{bmatrix} \hat{a}_0 \\ \hat{a}_1 \\ \hat{a}_2 \end{bmatrix} = (G^T W G)^{-1} G^T W \begin{bmatrix} \vdots \\ I_i^j / f(e_i^j) \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (29)$$

より定める。行列 G は電離層遅延量の測定値が得られたピアースポイント (経緯度 λ_i^j, ϕ_i^j とする) の IGP 位置に対する幾何学的関係を表し、次のように与える。

$$G = \begin{bmatrix} \vdots \\ 1 & \lambda_i^j - \lambda_k & \phi_i^j - \phi_k \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (30)$$

モニタ局では、二周波の観測データを利用して

$$I_i^j = \frac{\rho_i^{j,(L1)} - \rho_i^{j,(L2)}}{1 - \gamma} + \frac{1}{1 - \gamma} (\eta_i + \tau^j) \quad (31)$$

より電離層遅延量を直接測定する。ここで、 $\gamma = (f_{L1}/f_{L2})^2$ 、また η_i, τ^j はそれぞれ衛星側及び受信機側の周波数間バイアス (interfrequency bias; ハードウェアバイアスあるいは $L1/L2$ バイアスなどとも呼ばれる) である /10, 11/。

参考文献

- /1/ *RTCM Recommended Standard for Differential GNSS*, Version 2.2, RTCM SC-104, Paper 194-93/SC104-STD, Jan. 1998.
- /2/ 坂井丈泰, GPS 技術入門, 東京電機大学出版局, Feb. 2003.
- /3/ 坂井丈泰, “航空用衛星航法システムの信頼性”, 信頼性 (日本信頼性学会誌), vol. 28, no. 1, pp. 23–32, Jan. 2006.
- /4/ Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces, Interface Specification, IS-GPS-200, Rev. D, Dec. 2004.
- /5/ Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment, DO-229C, RTCA, Nov. 2001.
- /6/ *International Standards and Recommended Practices, Aeronautical Telecommunications*, Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation, vol. I, ICAO, Nov. 2002.
- /7/ 今村純: “運輸多目的衛星用衛星航法補強システム (MSAS) の概要”, 日本航海学会 GPS シンポジウム 2002, pp. 81–85, Nov. 2002.
- /8/ 真鍋英記, “運輸多目的衛星用衛星航法補強システム (MSAS) の整備状況”, GPS/GNSS シンポジウム, pp. 59–63, Nov. 2005.
- /9/ T. Walter, *et.al.*, “Robust Detection of Ionospheric Irregularities,” Proc. 13th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS), pp. 209–218, Salt Lake City, UT, Sept. 2000.
- /10/ B. Wilson, C. Yinger, W. Feess, and C. Shank, “New and improved: The broadcast interfrequency biases,” GPS World, pp. 56–66, Sept. 1999.
- /11/ 坂井丈泰, “GPS による電離層全電子数観測のためのバイアス誤差推定法”, 電子情報通信学会論文誌, vol. J88-B, no. 12, pp. 2382–2389, Dec. 2005.
- /12/ 坂井丈泰, “準天頂衛星サブメータ級補強機能の性能評価”, GPS/GNSS シンポジウム, pp. 65–72, Nov. 2005.
- /13/ 坂井丈泰, 松永圭左, 星野尾一明, “GPS 広域補強プロトタイプシステムの開発”, 電子情報通信学会技術研究報告, SANE, May 2006.
- /14/ C. Kee, “Wide Area Differential GPS,” Global Positioning System: Theory and Applications, vol. II, pp. 81–115, AIAA, 1996.