

衛星型 GNSS 補強システムにおける対流圏遅延補正方式^{*1}

Tropospheric Delay Correction of GNSS Signals for Satellite-Based Augmentation System

武 市 昇^{*2}・坂 井 丈 泰^{*2}・福 島 荘之介^{*2}・伊 藤 憲^{*2}
Noboru TAKEICHI, Takeyasu SAKAI, Sounosuke FUKUSHIMA and Ken ITO

Key Words: Navigation, Global Navigation Satellite System, Augmentation System, Tropospheric Delay

Abstract: A strategy to realize the tropospheric delay correction in satellite based augmentation systems is presented. The tropospheric delay is one of the major error sources of the GNSS signals. It is attempted to generate the correction information from the numerical weather prediction data to realize the tropospheric delay correction in real-time for mobile positioning. To introduce the correction information into the satellite based augmentation system, the amount of the correction data must be minimized without degrading the correction accuracy. In this paper, through several statistical evaluations using the long-term observation data, the appropriate contents and the data amount of the correction message are investigated. It is shown that the correction message should consist of the information of the tropospheric zenith delay and its average gradient in height. The amount of the correction data is also successfully minimized, and users in the region of Japan can receive the sufficient correction information by receiving only 3 messages. The results of the analyses clearly show the feasibility of the presented strategy.

1. は じ め に

GPS 衛星などの衛星を用いた航法システムの精度および信頼性を向上させる手段の一つに、静止衛星型衛星航法補強システム (SBAS: Satellite Based Augmentation System) が挙げられる^{1,2)}。この補強システムでは、GPS を用いた高精度な測位を実現するため、GPS 信号の誤差源である衛星軌道、衛星クロック、電離圏遅延の補正情報を静止衛星を経由して送信している。また、最近では準天頂衛星を利用した高精度測位補正技術³⁾ も計画されている。航法衛星を用いた全地球的な航法システムは GNSS (Global Navigation Satellite System) と呼ばれるので、本論文では衛星を用いた補強システムを衛星型 GNSS 補強システムと呼ぶ。

GNSS 信号の誤差源には、前述の衛星軌道・衛星クロック・電離圏遅延の他に、対流圏を通過する際に生じる対流圏遅延があることが知られているが、この補正誤差は他の誤差源と比較して小さい。そのため、これまでの衛星航法システムにおいてはあらかじめ定められたモデルによる補正が実施されており、時間的・空間的な変化を考慮した積極的な補正は試みられていない。しかし、補正技術の発展により衛星軌道、衛星クロック、電離圏遅延に含まれる誤差を精度良く補正できるようになり、準天頂衛星を利用した高精度測位補正技術においては、これまでの研究でサブ

メートル級の測位精度を達成できる見通しを得ている⁴⁾。そして、全体の誤差に含まれる対流圏遅延による誤差が相対的に大きくなっているため、対流圏遅延補正を新たに導入することによりさらに高精度な測位補正を実現することができると期待されている。このような高精度測位補正情報を含むメッセージは、L1-SAIF (L1 Sub-meter class Augmentation with Integrity Function) と呼ばれ、準天頂衛星を経由して送信することにより日本国内の広い地域での高精度測位補正が可能となる。

本論文では、衛星型 GNSS 補強システムにおいて対流圏遅延補正を実現するため、補正情報の生成方式を示しその有効性および実現性を明らかにする。まず測位誤差への対流圏遅延の影響および補正方式の原理と性質について示す。次に、対流圏遅延と関連のあることが知られている気象の情報をを用い対流圏遅延の補正情報を生成する方法およびその有効性を示す。また、それを実際の衛星を経由して送信することのできるよう、所要データ量の最小化を試み、具体的に L1-SAIF メッセージへの適用を検討しその実現性を示す。

2. 対流圏遅延とその補正方式

2.1 対流圏遅延の概要 GNSS 信号が衛星から地上のユーザに到達するまでの間に電離圏および対流圏を通過する際に、それぞれ電離圏遅延および対流圏遅延と呼ばれる遅延が発生する。このうち、電離圏内では遅延量が周波数によって変わるため、二周波の GNSS 信号を受信することによって電離圏遅延量を求めることができる一方、中性大

^{*1} © 2007 日本航空宇宙学会

平成 18 年 11 月 10 日、第 50 回宇宙科学技術連合講演会において発表。平成 19 年 4 月 5 日原稿受理

^{*2} 電子航法研究所

気による対流圏遅延量は GNSS 信号の観測のみでは直接には計測することができない。また、対流圏遅延量は気温、気圧および水蒸気圧などによって変化するので、季節および時刻によって常に変化するだけでなく、台風や寒冷前線の通過時には局地的に大きく変化してしまい、これらが大きな測位誤差を生じる原因になり得る。したがって、高精度な測位補正を実現するためには、対流圏遅延を時間的かつ空間的に精度良く補正することが望ましいと考えられる。

2.2 対流圏遅延の補正方式 対流圏遅延量をユーザに送信することができれば、それをユーザ側での測位演算において擬似距離の補正に用いることにより高精度測位を実現できるようになる。したがって、対流圏遅延の補正精度は対流圏遅延量の推定精度とほぼ同等となり、また遅延量の情報をそのまま補正情報として用いることができる。

移動体の測位においては必然的にリアルタイム性が要求されるので、一般的な移動体測位では対流圏遅延量は高度のみの関数としてモデル化されていたり、SBAS においては平均的な気象を仮定し、日付、緯度および高度の関数としたモデルが用いられたりしている⁵⁾。このモデルは、標準文書の頭文字を取って MOPS モデルと呼ばれる。また、気象の実測値を利用したリアルタイムでの局地的な対流圏遅延補正も試みられている⁶⁾。衛星型 GNSS 補強システムにおける移動体の測位補正のためには、補正対象地域の任意の地点でリアルタイムに用いることのできる補正情報が必要となる。リアルタイムに補正情報を生成・送信する手段としては、気象観測値や気象数値予報の情報を利用し、その関数として遅延量を求める方式が知られている⁷⁾。本論文では、気象情報を用いる方式により対象地域の任意の地点における測位補正を可能とする補正情報の生成方式を示す。なお、解析および評価においては、国土地理院が整備する全国の電子基準点⁸⁾での観測データ⁹⁾および気象庁による実測データ¹⁰⁾を用いた。実際の運用時には、気象庁より3時間ごとに発表されている気象数値予報値¹⁰⁾を用いることができる。

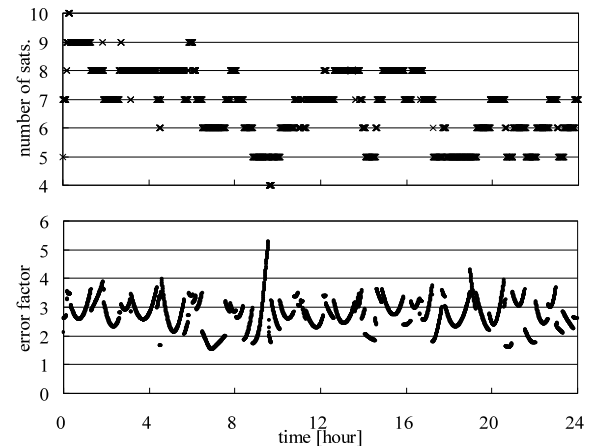
3. 対流圏遅延による測位誤差と補正精度

3.1 測位誤差への影響 通常、電磁波の対流圏遅延量は天頂方向に換算して解析・評価される。この値は天頂対流圏遅延量（Zenith Tropospheric Delay : ZTD）と呼ばれる。GNSS 測位においては、この ZTD にマッピング関数と呼ばれる係数を乗じて GNSS 信号に含まれる対流圏遅延量を求め、これにより擬似距離を補正して測位演算が実施される。マッピング関数は、各々の GNSS 信号の仰角によって決定される係数であり、仰角が低い信号ほど対流圏中を通過する距離が長くなり、その分だけ遅延量が大きくなることを表現する係数である。例えば SBAS の標準文書では、仰角を El として次式が定められている⁵⁾。

$$m(El) = \frac{1.001}{\sqrt{0.002001 + \sin^2(El)}} \quad (1)$$

第1表 各基準点での評価結果

基準点番号	誤差倍率 [rms]	最大値
940083 (高知)	2.76	23.39
940092 (長崎)	2.84	5.13
950172 (気仙沼)	2.77	5.30
950228 (世田谷)	2.88	25.64
950490 (指宿)	2.96	37.63
960750 (石垣)	3.14	14.55
960760 (宇治)	2.82	35.56
010844 (青森)	2.71	5.02



第1図 可視衛星数と誤差倍率（基準点：950172）

この他にも、単純な $\cos ec(El)$ や Niell のマッピング関数¹¹⁾ など数通りがよく知られているが、ユーザの測位演算においては任意のものを使用することができるため、本論文においては対流圏遅延量の天頂方向への換算値 ZTD を評価する。

GNSS 信号の対流圏遅延量は、天頂方向に換算しておおよそ 2.5 m 程度になる⁷⁾。MOPS モデルは気象情報を用いないモデルとしては最も精度が良いとされているが、その補正誤差は天頂方向で $\sigma = 12 \text{ cm}$ とされている⁵⁾。そして、GNSS 衛星の仰角が低くなるほど GNSS 信号が対流圏を通過する距離も長くなり、補正誤差が天頂方向の数倍以上にもなり大きな測位誤差をもたらす場合もある。

そこでまず、ZTD の推定誤差による測位誤差への影響を評価した。評価では電子基準点での実測データを用い、測位演算において ZTD を想定した値に (1) 式のマッピング関数を乗じて意図的に擬似距離に追加し、その前後の演算結果を比較した。ZTD を追加する前後の測位結果の差を、対流圏遅延による測位誤差として解釈することができ、またその大きさは追加する遅延量に比例するので、追加した ZTD に対して生じる測位誤差の倍率として影響を評価することができる。2004 年の第 226 通算日のデータを用いた評価結果を第 1 表にまとめる。また、電子基準点 950172（気仙沼）における 1 日の可視衛星数と誤差倍率の履歴を第 1 図に示す。どの電子基準点においても誤差倍率が平均 3 倍弱となり、またその最大値は 5 倍から数 10 倍となる。第 1 図に見られる誤差倍率の変化は、可視衛星数および衛星配

第 2 表 評価結果のまとめ

rms	2.87
5 倍以上	0.6%
10 倍以上	0.1%

置によるものであり、特に可視衛星数が 4 の場合に著しく高倍率となる。また、第 2 表にすべての評価結果をまとめる。全評価対象の誤差倍率のうち 0.6% で 5 倍以上、0.1% で 10 倍以上となった。

以上の評価より、対流圏遅延のみによる測位誤差は、MOPS モデルを用いた場合であっても $\sigma = 30$ cm 程度、悪条件では数 m にもなることが明らかとなった。つまり、MOPS モデルにより対流圏遅延を補正した場合であっても、その測位結果には以上のような誤差が潜在的に含まれているということである。

3.2 気象条件によるモデル化の補正精度・性質

3.2.1 各モデルの概要 本論文では、気象条件を用いた対流圏遅延量のモデルとして Saastamoinen モデル¹²⁾を用いる。これは、ZTD を観測点における気温、気圧および水蒸気圧の関数としたモデルである。また、前述の MOPS モデルを比較対象として用いた。MOPS モデルは平均的な気象および季節による変化をモデル化し、さらに測位点の緯度および標高を考慮したモデルであるが、時間的な変化は考慮されていず、1 日ごとに固定値として ZTD のモデル値が得られる。以下に各々のモデルでの ZTD の計算方法を示す。

・Saastamoinen モデル

$$\text{ZTD}_S = 2.277((1 + 0.0026 \cos 2\phi + 2.8 \times 10^{-7}h)p + (1255/T + 0.05)e) \text{ [m]} \quad (2)$$

$$p = p_r (1 - 0.000226(h - h_r))^{5.225} \text{ [hPa]} \quad (3)$$

$$T = T_r - 0.0065(h - h_r) \text{ [K]} \quad (4)$$

$$e = e_r \exp(-0.0006396(h - h_r)) \text{ [hPa]} \quad (5)$$

ただし、 h [m]、 ϕ [rad]、 T [K]、 p [hPa]、 e [hPa] はそれぞれ測位点における標高、緯度、気温、気圧、水蒸気圧であり、添字 r は気象観測点におけるそれらの値を示している。式 (3)~(5) は標準大気の高度方向の換算式であり、これにより測位点と気象観測点の高度差を補正する。

・MOPS モデル

$$\text{ZTD}_{\text{MOPS}} = d_{\text{hyd}} + d_{\text{wet}} \text{ [m]} \quad (6)$$

d_{hyd} および d_{wet} はそれぞれ乾燥大気および湿潤大気による遅延量であり、それぞれ以下の式で与えられる。

$$d_{\text{hyd}} = \left(1 - \frac{\beta h}{T}\right)^{\frac{a}{R_d \beta}} \cdot \frac{10^{-6} k_1 R_d P}{g_m} \quad (7)$$

$$d_{\text{wet}} = \left(1 - \frac{\beta h}{T}\right)^{\frac{(\lambda+1)a}{R_d \beta} - 1} \cdot \frac{10^{-6} k_2 R_d}{g_m(\lambda+1) - \beta R_d} \cdot \frac{e}{T} \quad (8)$$

第 3 表 MOPS モデルの気象パラメータ

固定パラメータ					
Lat.	P_0 [hPa]	T_0 [K]	e_0 [hPa]	β_0 [K/m]	λ_0
15 以下	1013.25	299.65	26.31	6.30e-3	2.77
30	1017.25	294.15	21.79	6.05e-3	3.15
45	1015.75	283.15	11.66	5.58e-3	2.57
60	1011.75	272.15	6.78	5.39e-3	1.81
75 以上	1013.00	263.65	4.11	4.53e-3	1.55
季節変動パラメータ					
Lat.	ΔP [hPa]	ΔT [K]	Δe [hPa]	$\Delta \beta$ [K/m]	$\Delta \lambda$
15 以下	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	-3.75	7.00	8.85	0.25e-3	0.33
45	-2.25	11.00	7.24	0.32e-3	0.46
60	-1.75	15.00	5.36	0.81e-3	0.74
75 以上	-0.50	14.50	3.39	0.62e-3	0.30

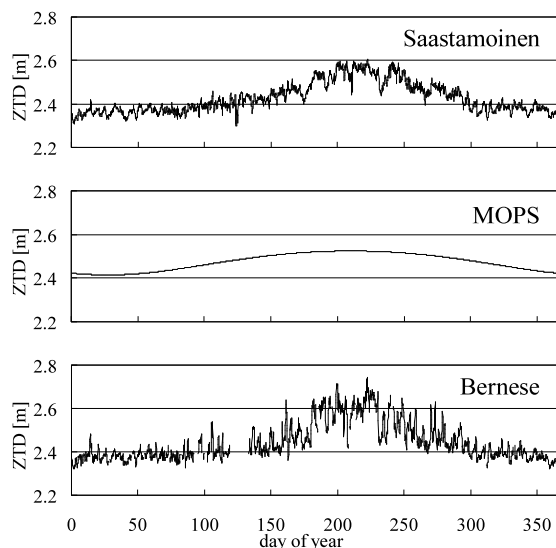
ただし、 $k_1 = 77.604$ K/mbar、 $k_2 = 382000$ K²/mbar、 $R_d = 287.054$ [J/kg/K] および $g_m = 9.784$ [m/s²] である。この他のすべてのパラメータは、次式によって定義されている。ただし、便宜上 ξ を用いてすべての変数を代表して示している。

$$\xi(\phi, D) = \xi_0(\phi) - \Delta\xi(\phi) \cdot \cos\left(\frac{2\pi(D - D_{\min})}{365.25}\right) \quad (9)$$

ここで、 $\xi_0(\phi)$ および $\Delta\xi(\phi)$ は第 3 表の値をそれぞれ南北の緯度に応じて線形補間して得られる値である。また、 D は年通算日であり、 $D_{\min}$ は北半球では $D_{\min} = 28$ 、南半球では $D_{\min} = 211$ と定義されている。MOPS モデルでは、(7) 式および (8) 式において標高による遅延量の差を表現し、(9) 式により緯度および季節による変化を表現していることに相当する。

一連の解析評価においては、電子基準点での GPS 二周波観測データおよび精密軌道暦¹³⁾を用い、Bernese¹⁴⁾を用いた解析による ZTD の推定値を事実上の正解とし、それと比較・評価した。この解析による各電子基準点での ZTD の推定誤差の分散は 1.5 cm 以内である。また以降のすべての解析・評価において、2002 年の 1 年間分のデータを用いている。一例として、横浜における気象観測値を用いた Saastamoinen モデル、MOPS モデル、および Bernese の解析結果による ZTD 推定値の 1 年間の履歴を第 2 図に示す。MOPS モデルは 1 日ごとに固定値を用いるため 1 年を通じてなだらかに変化するが、Saastamoinen モデルおよび Bernese 解析は 1 日の間の気象の変化を反映することができるため、1 年間のなだらかな変化に加えて 1 日単位の短い周期での変化も見られる。

3.2.2 各モデルの補正精度評価 まず、Saastamoinen モデルおよび MOPS モデルのそれぞれによる ZTD の推定精度を評価した。日本全国の地上気象観測点から 7 km 未満の距離にある電子基準点を選び出し、最寄りの気象観測点での観測値を式 (2)~(5) にあてはめて得た Saastamoinen モデルおよび、MOPS モデルの誤差をそれぞれ評価した。評価で用いた電子基準点の分布を第 3 図に示す。また、Saas-



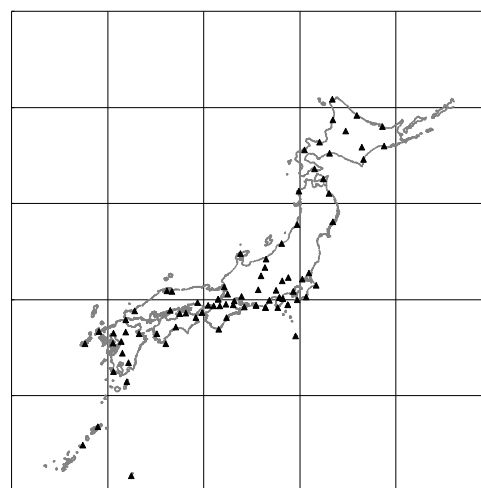
第2図 各モデルによる天頂対流圏遅延量推定値の履歴（横浜）

tamoinen モデルおよび MOPS モデルの誤差の頻度分布を第4図に示す．MOPS モデルは1日ごとの固定値を用いるため、時間や天候の変化に伴う遅延量の変化には対応できない．そのため、ある程度の差が常に生じることとなり、第4図に見られるように7 cm 程度の誤差が最頻値となる．その一方で Saastamoinen モデルは常に気象の変化を反映することができるため、1 cm 未満を最頻値とする指数分布に近い分布となっている．このことから、Saastamoinen モデルは、MOPS モデルと比較して ZTD をより適切に表現できていることが明らかである．

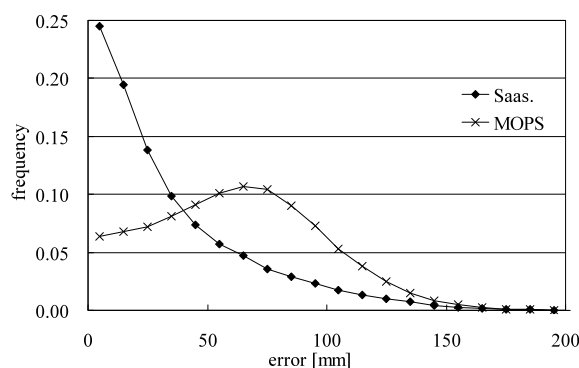
4. 衛星型補強システムにおける実現性評価

4.1 補正メッセージの制約と要求 衛星型 GNSS 補強システムでは補正メッセージの使用できるデータ量に制限があるだけでなく、移動体測位を対象とした補正メッセージであるため、ユーザが測位開始後にできるだけ速やかに十分な補正情報を得られることが要求される．そのためには、補正精度を損なわないように補正メッセージの所要データ量を最小化することが要求される．所要データ量を減らす手段の一つとして、補正対象地域内においてある程度の間隔ごとに補正情報を生成・送信し、移動体ユーザは近傍の地点での補正情報をなんらかの手段により換算して測位補正に適用する、という方式が挙げられる．また、1点あたりの所要のデータ量ができるだけ少なくなるように補正メッセージを設計する必要がある．

本論文では、準天頂衛星を用いて補正情報をユーザに送信するための L1-SAIF メッセージを具体例として想定し、衛星型 GNSS 補強システムにおける対流圏遅延補正の実現性を明らかにする．L1-SAIF メッセージは、SBAS で用いられているフォーマットに準拠することとなっている³⁾．また、250 bit からなるメッセージにより1秒ごとに補正情報のうちの一つが送信されることとなっている．1メッセージのうち、38 bit はメッセージの識別やエラー補正に



第3図 気象観測点から7 km 以内の電子基準点



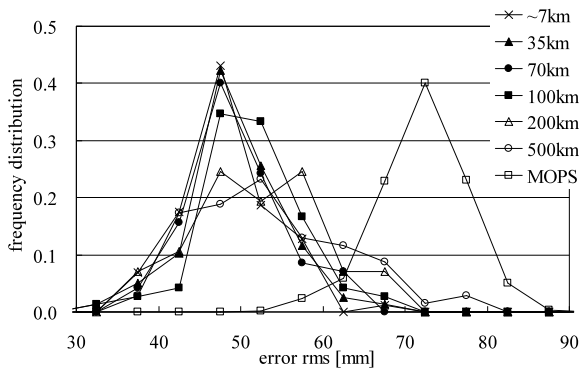
第4図 各モデルの誤差頻度分布

プリアンブル (8bit)	メッセージタイプ (6bit)	データ (212bit)	パリティ (24bit)
------------------	--------------------	-----------------	-----------------

第5図 L1-SAIF メッセージのフォーマット

用いられ、残る 212 bit が補正メッセージに割り当てられる．L1-SAIF メッセージのフォーマットを第5図に示す．

4.2 補正情報の有効範囲 まず、補正情報を生成する地点の間隔の上限を見積もるため、その補正精度の著しい劣化を避けることのできる距離の上限値を評価した．地上気象観測点から7 km 未満、35 km 程度、70 km 程度、100 km 程度、200 km 程度、500 km 程度のそれぞれの距離にある電子基準点をそれぞれ100点程度選び出し、それぞれの電子基準点における Saastamoinen モデルおよび MOPS モデルの誤差を評価した．評価結果の rms 頻度分布を第6図に示す．横軸は誤差の rms であり、縦軸はその相対頻度である．本図より、地上気象観測点から70 km までの範囲内では補正精度はほとんど劣化せず、100 km 離れた段階から劣化が顕著に見られることが分かる．この評価結果における70 km の組み合わせの Saastamoinen モデルおよび MOPS モデルの誤差 rms の平均値は、それぞれ 4.8 cm (rms) および 7.4 cm (rms) であった．さらに、Saastamoinen モデルは500 km 程度離れた場合であっても MOPS 以上の精度



第 6 図 各モデルの精度比較

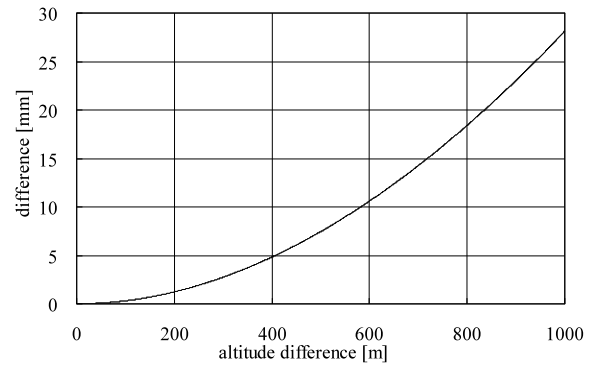
を保つことが分かる．以上より，補正情報の与えられているある地点から 70 km 以内の範囲であればその補正精度をほとんど劣化させることなく 4.8 cm (rms) 程度の精度の対流圏遅延補正を実現でき，例えばデータ欠損などの理由で最寄りの補正情報を得られない場合であっても，500 km 以内の補正情報を得られれば従来の MOPS モデル以上の補正精度を実現できるということが明らかとなった．

4.3 対流圏遅延補正メッセージの設計

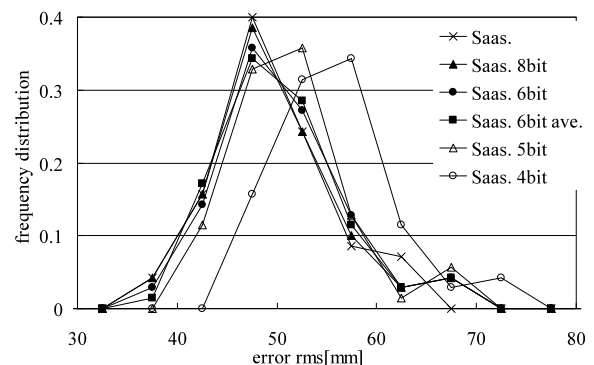
4.3.1 補正メッセージの情報 所要データ量を増加させることなく補正精度を保つ手段の一つとして，補正メッセージの表すべき遅延量の範囲を最小化することが挙げられる．これまでの解析結果によると，ZTD は季節や観測地点の標高により変化するものの，その最大値が 3 m を超えることは無く，標高の高い地域ほど減少するが国内では 2 m 弱になる程度である．そこで，本論文においては 1720 ~ 3000 mm までの 1280 mm の範囲を補正情報として送信することとした．また，式 (2) ~ (5) から分かるように，ZTD は高度差により変化する．したがって，ユーザは補正情報をその測位地点の高度に応じて修正しなければならない．そのため，補正情報には ZTD の推定値だけでなく，その高度方向の勾配も含まなければならない．ただし，ユーザ側にはあらかじめ各補正情報生成点の緯度・経度・高度の情報および補正メッセージのフォーマットが与えられていることが前提となる．遅延量勾配の値は，(2) 式より $\partial ZTD_S / \partial h|_{h=h_r}$ として得られる．したがって，補正情報を用いない測位により一度その地点でのおおよその標高 h を求め，それと (10) 式により ZTD の高度勾配を考慮した補正值 ZTD_C を得ることができる．

$$ZTD_C = ZTD_S + (h - h_r) \partial ZTD_S / \partial h|_{h=h_r} \quad (10)$$

上式により得られる遅延量と Saastamoinen モデルの差を，標高差をパラメータとして北緯 40 度，気圧 1013 hPa，気温 20°C，水蒸気圧 10 hPa，標高 30 m の場合について第 7 図に示す．この図に示すように，標高差が大きくなるに従いモデル化誤差が急速に増加するので，実際の運用時には参照する気象情報送信点の標高差に閾値を設けるなどにより，ZTD の推定に大きな誤差が生じないようにする必要がある．



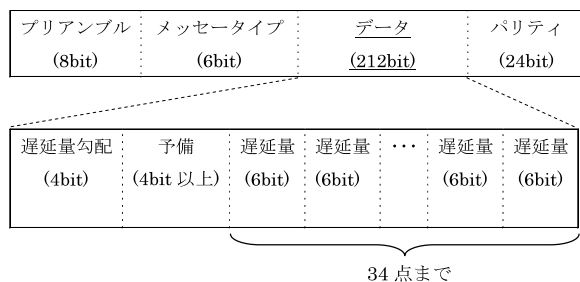
第 7 図 線形化 Saastamoinen モデルの誤差



第 8 図 量子化された遅延量の誤差評価

4.3.2 補正メッセージの所要データ量 補正メッセージとして実装するためには，補正情報を量子化する必要がある．そこで地上気象観測点から 70 km 前後の距離にある電子基準点を用い，量子化に伴う補正精度の劣化を評価した．基準点での ZTD の 1720 ~ 3000 mm までの 1280 mm の範囲を 4 ~ 8 bit で量子化し，遅延量勾配については $-0.24 \sim -0.56$ mm/m の範囲を 4 bit で量子化した．誤差の rms を第 8 図にまとめる．この結果より，6 bit までの量子化であれば，量子化しない場合とほぼ同等の精度を保つことが明らかとなった．さらに，高度勾配の補正量は対流圏遅延量と比べれば小さいため，含まれる誤差も小さいものと考えられる．そこで，第 3 図に示す電子基準点を用い，その平均から全国での平均的な遅延量勾配を求め，それをすべての補正情報の高度補正に用いた場合も同様に評価した．その結果を第 8 図に Saas. 6 bit ave. として示している．全国で共通の遅延量勾配を用いた場合であっても，地点ごとに個別の高度勾配を与えた場合と比較してほとんど誤差が増加していないことが分かる．したがって，遅延量の高度勾配値に全国共通の値を導入することにより，望ましい精度を保ちながら 1 点あたりの所要データ量を 4 bit 低減することができることが明らかとなった．

4.3.3 メッセージ設計 これまでの検討に基づいた補正メッセージの例を第 9 図に示す．補正データに用いることのできる 212 bit のうち，先頭の 4 bit を遅延量勾配に割り当て，それ以降に 6 bit の遅延量データを 34 点分含むことができる．さらに 4 bit 確保しているが，ここには天頂遅延



第9図 L1-SAIF での対流圏遅延補正メッセージ案

量の信頼性および誤差の情報等を割り当てることが可能である。

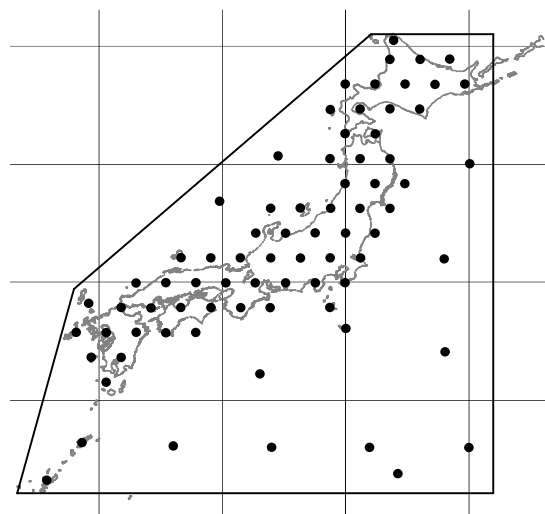
有効範囲の評価においては、500 km 離れた基準点での補正情報によっても気象情報方式と同等以上の精度を得られることが明らかとなっている。したがって、一つの補正メッセージ内にできるだけ全国に分散した地点の情報を送信することにより、最初の1メッセージを受信するのみでMOPSモデル以上の高精度な測位を実現できるものと考えられ、順次メッセージを受信するたびに測位精度を向上させることができ、全メッセージの受信により5 cm (rms) 程度のZTDの補正精度を得られるようになると考えられる。

4.3.4 補正メッセージ送信点の検討 ここまでの評価結果から、地上気象観測点から70 km 程度以内であれば十分な補正精度を実現できることが分かっている。そこで、準天頂衛星を用いた高精度測位実験の対象領域を具体例とし、その領域をすべて包含するように補正情報の送信点を設けた場合の所要データ量を見積もった。もっとも効率よく実験領域を包含するためには、1辺が140 kmの正六角形の各頂点および中心に情報送信点を配置すればよい。このようにして実験領域内のすべての国土を半径70 kmの円で包含し、海上については任意の点から200 km以内に送信点が含まれるように補正情報生成点を配置した場合の組み合わせを第10図に示す。伊豆諸島、沖縄諸島および小笠原諸島についてはそれぞれ1~2点ずつ生成点を設定した。この場合、補正情報の送信点は76点となるので、わずか3回の補正メッセージにより十分な対流圏遅延の補正情報を全実験領域に送信することができることが明らかとなった。

5. まとめと今後の課題

本論文においては、衛星型GNSS補強システムにおける対流圏遅延補正について、補正情報の生成方法および実現性のある補正メッセージの設計方法を示した。移動体の測位補正に適用するためには補正情報をリアルタイムに生成しなければならない。補正情報を衛星を経由して送信するためには望ましい補正精度を確保しながらも送信可能なデータ量の制約を満たすような補正メッセージを設計しなければならない。そこで、リアルタイムでの補正情報の生成を可能とするために気象情報を用いることとした。

長期間の実測データを用いた評価・検討により、気象情報から対流圏遅延量およびその高度勾配を求め、補正メッ



第10図 対流圏遅延補正情報送信点（実線で囲まれた領域が実験対象）

セージには全国で共通の高度勾配を適用することにより補正精度を劣化させることなく所要データ量を最小化できることを明らかにした。さらに、日本の国土上での対流圏遅延補正情報の有効範囲を評価し、大きな精度劣化の生じない上限を明らかにすることにより所要の補正情報の総量を最小化した。また、実際に開発されているシステムへの適用を具体的に想定した検討により、衛星型GNSS補強システムにおける対流圏遅延補正の実現性を明確に示した。気象情報を用いて補正情報を生成することにより、対流圏遅延量の時間的な変動や地理的条件による差をより詳細に補正することが可能となり、MOPSモデルなど、従来から用いられているモデルと比較してより高精度な補正を実現することができた。以上の対流圏遅延の補正情報の生成方法および補正メッセージの設計手法は、本論文で想定した日本国土を中心とする領域だけでなく、他の任意の地域においても適用することができるものと考えられる。また、本論文における補正メッセージの設計方法は、他の方法により生成された補正情報から補正メッセージを設計する際にも適用することができるものと考えられる。

本稿では実現性のある補正方式の一つを示すことができたが、この他にも例えばより詳細なマッピング関数の適用、補完された関数形式による遅延量補正の適用、GNSS観測網のデータを用いた解析による対流圏遅延量の高精度準リアルタイム解析など、様々な手法が挙げられる。今後これらの課題に取り組み、衛星型補強システムを用いた実証実験を実施する予定である。

参考文献

- 1) International Standards and Recommended Practices, Aeronautical Telecommunications, Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation, Vol. I, International Civil Aviation Organization, Montreal, Canada, 2002.
- 2) 星野尾一明：静止衛星によるGPS補強システム，GPSシンポジウム'97テキスト，日本航海学会，東京，1997，pp. 91-118.
- 3) Ito, K., Fukushima, S., Arai, N. and Sakai, T.: Highly-Accurate Positioning Experiment Using a Quasi-Zenith

- Satellite System at ENRI, Proc. WSANE, Daejeon, Korea, 2005.
- 4) Sakai, T., Fukushima, S., Arai, N. and Ito, K.: Implementation of Prototype Satellite-Based Augmentation System (SBAS), IGNSS2006, Gold Coast, Australia, 2006.
 - 5) RTCA: Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment, RTCA/DO-229C, 2001.
 - 6) Wang, J. J. and Wang, J.: Tropospheric Delay Estimation for Pseudolite Positioning, The 2004 Int'l Symposium on GNSS/GPS, Sydney, Australia, 2004.
 - 7) Spilker Jr., J. J.: Tropospheric Effects on GPS, Global Positioning System: Theory and Applications, Vol. 1, AIAA, Washington, DC., 1996, pp. 517–546.
 - 8) 国土地理院 GEONET グループ: GPS 連続観測システム “GEONET” とその展望, 日本測地学会誌, **50** (2004), pp. 53–65.
 - 9) (財)日本測量協会: <http://www.jsurvey.jp/>
 - 10) (財)気象業務支援センター: <http://www.jmbc.or.jp/>
 - 11) Niell, A. E.: Global Mapping Functions for the Atmosphere Delay at Radio Wavelengths, J. Geophys. Res., **101**, B2 (1996), pp. 3227–3246.
 - 12) Saastamoinen, J.: Contributions to the Theory of Atmospheric Refraction, In three parts, Bulletin Géodésique, No. 105, pp. 279–298; No. 106, pp. 383–397; No. 107, pp. 13–34, 1973.
 - 13) International GNSS Services: <http://igscb.jpl.nasa.gov/>
 - 14) Bernese GPS Software: <http://www.bernese.unibe.ch/>