

人工衛星の測位への利用 —準天頂衛星初期運用成功から持続測位構築に向けて—

齋藤雅行* 吉河章二***
 瀧口純一** 浅里幸起†
 岡本丈史* 寺田弘慈††

Utilization of Satellite for Navigation—Aiming at Construction of QZS Navigation System from Success of Initial Operation—
 Masayuki Saito, Junichi Takiguchi, Takeshi Okamoto, Syoji Yoshikawa, Koki Asari, Koji Terada

要 旨

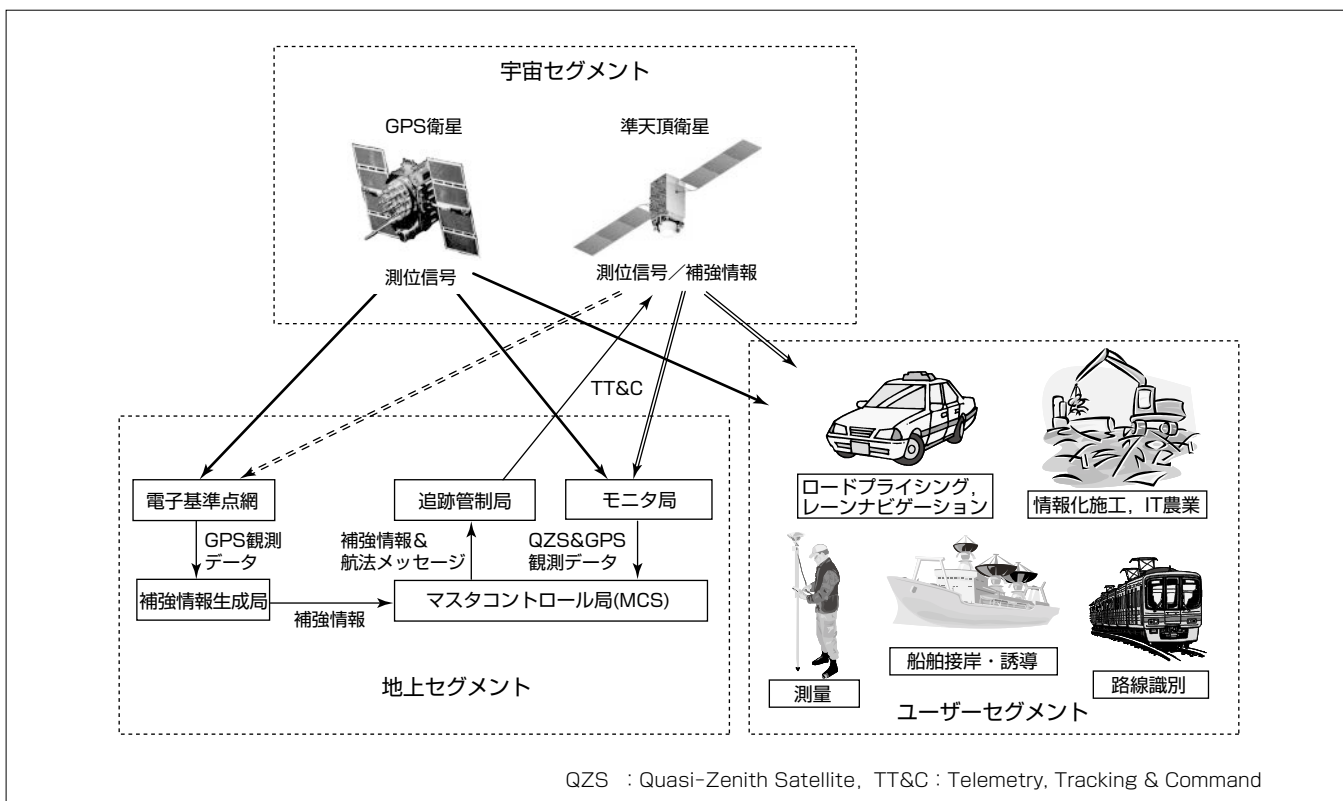
現在、GPS(Global Positioning System：全地球測位システム)測位はカーナビなどで広く使われているが、都市部では、高層ビルなどによって測位信号が遮られて、測位率が著しく劣化する。また、GPS衛星から受信機まで電波が到達する経路には、電離層や対流圏での電波特性の変化によって電波伝搬の遅延が生じる。これによって、GPS衛星と受信機までの距離の測定誤差が生じ、位置精度が劣化するため、航空機、船舶等の各種移動体の位置管理システムを現状のGPSのみで構築するには問題がある。

準天頂衛星は、常時高い仰角にある測位衛星として、GPS衛星と同様の測位信号を送信することによって、GPS衛星と組み合わせて、幾何学的配置(Geometrical Dilution of Precision：GDOP)が改善される。同時に、準天頂衛星か

ら高精度の補強情報を放送すれば、いつでもどこでも高精度測位サービスが受けられるようになる。

本稿では、アプリケーションを想定した実フィールドで、準天頂衛星初号機“みちびき”の補完・補強機能の効果を評価した結果について述べる。補完機能に関しては、都市部で、GPSのみに比べて、準天頂衛星を組み合わせることによって、2～3倍の測位率改善を確認した。補強機能に関しては、静止測位と移動体測位を実施し、日本全国でセンチメートル級の測位精度を確認した。

今後、準天頂衛星を利用することによって、測量、情報化施工、IT農業や高精度レーンナビゲーション等の多種多様なサービスが期待される。



準天頂衛星測位システム

モニタ局は、衛星の測位信号を常時モニタし、通信回線を介して観測データをマスタコントロール局(MCS)に伝送する。MCSで衛星の軌道決定や時刻管理を行い、航法メッセージを作成する。電子基準点網は、GPSから送られる測位信号を観測し、GPS観測データを補強情報生成局に伝送する。補強情報生成局では、電子基準点網で観測したGPS観測データを用いて補強情報を作成する。航法メッセージや補強情報は、MCSから追跡管制局を経由して準天頂衛星へ向けてアップリンクされる。利用者は、GPS衛星と準天頂衛星から送られる測位信号を観測するとともに、準天頂衛星から送られる補強情報を受信して高精度な測位を行う。

なお、現在、電子基準点網は準天頂衛星の観測データを配信できないため、測位補強情報はGPS対応のみである。

1. ま え が き

GPSは、米国が開発した衛星航法システム(GNSS：Global Navigation Satellite System)で、現在、身近にはカーナビゲーションに広く使われているほかに、船舶や航空機の航法支援、測量や地盤監視等に用いられている。衛星航法システムは、複数の測位衛星が位置などの情報を含む航法メッセージを重畳した測位信号を地上に向けて電波送信(放送)し、その測位信号を受信した受信機が自己の位置を求めるもので、測位衛星群(宇宙セグメント)とそれらを管制するいくつかの地上局(地上セグメント)及び利用者側の受信機を含むアプリケーションシステム(ユーザーセグメント)から構成される。GPSのほかに、ロシアのGLONASS(Global Navigation Satellite System)が現在実運用中で、日本の準天頂衛星システム、欧州のGalileo、中国のCompass、インドのIRNSS(Indian Regional Navigational Satellite System)が開発中である。

GNSSにおける位置測定の原理は、測位衛星から送信される測位信号を測定点においた受信機で受信して、測位衛星と測定点との距離を求め、三角測量の原理で測定点の位置を求めるものである。測定点の座標値(x, y, z)と受信機時計誤差を未知数として求めるため、測位するためには通常4機以上の測位衛星が必要となる。GPS衛星は、6つの軌道面に各々4機配置の合計24機の衛星と予備の衛星が地球を周回しているが、時間帯によって日本上空での可視衛星数が減少し、測位精度に影響する衛星の幾何学的配置が劣化する場合があります。高精度でかつ安定な測位がすべての時間帯でできないのが現状である。さらに、高層ビル、高架、樹木や歩道橋等、測位衛星との見通しを遮蔽する建造物が多々ある都心部では測位率が著しく劣化する。また、測位衛星から受信機まで電波が到達する経路には、電離層や対流圏での電波特性の変化によって電波伝搬の遅延が生じる。これによって、測位衛星と受信機までの距離の測定誤差が生じ、位置精度が劣化する。そのため、航空機、船舶等の各種移動体の位置管理システムを現状のGPSのみで構築するには問題がある。

その解決策として、準天頂衛星システム(Quasi-Zenith Satellite System：QZSS)は、常に天頂付近にあるもう1機のGPS衛星としての役割とともに、測位精度を向上させるための補強情報を日本全国及びその近海の利用者に放送する役割を併せ持つ。前者を、補完機能、後者を補強機能と呼ぶ。特に、日本の都市部では、高層ビルに遮られて捕捉可能なGPS衛星が制限されるので、常時高い仰角にある測位衛星があれば遮られることがないので都合が良く、そのための衛星として準天頂

衛星が適している。準天頂衛星がGPS衛星と同様の測位信号を送信すれば、GPSと組み合わせて運用することで、可視範囲内で幾何学的配置が改善される。同時に、準天頂衛星から補強情報を放送すれば、ビル街や山間地でも受信可能であるので、いつでもどこでも高精度測位サービスが受けられるようになる。

本稿では、アプリケーションを想定した実フィールドで、準天頂衛星初号機“みちびき”の補完・補強機能の効果を評価した結果について述べる。

2. 準天頂衛星測位システム

2.1 準天頂衛星測位システムの概要

準天頂衛星を利用した衛星航法システムの構成を図1に示す。地上セグメントのモニタ局は、準天頂衛星(QZS)とGPS衛星の測位信号を常時モニタし、QZS&GPS観測データとして、マスタコントロール局(MCS)に伝送する。MCSでは、各衛星の軌道決定や時刻管理を行い、航法メッセージを作成する。一方、現状の電子基準点網は、GPS観測データのための配信となっているため、補強情報生成局では、電子基準点網で受信したGPS観測データを用いてGPSの補強情報を作成する。航法メッセージと補強情報は、MCSから追跡管制局を経由して準天頂衛星へ向けてアップリンクされる。利用者は、GPS衛星と準天頂衛星から送られる測位信号を観測するとともに、準天頂衛星から送られる補強情報を受信して高精度な測位を行う。準天頂衛星は、補完機能とともに補強機能を併せ持つことが特徴である。

2.2 補完機能⁽¹⁾

2.2.1 測位信号

準天頂衛星のGPS補完サービスは、米国が運用するGPSと組み合わせ、準天頂軌道を利用して衛星の幾何学的配置を改善することによって、都市部や山間部における測位可能エリア及び時間を増大させることを目的にする。

QZSから送信するGPS補完に関する信号は、近代化GPS

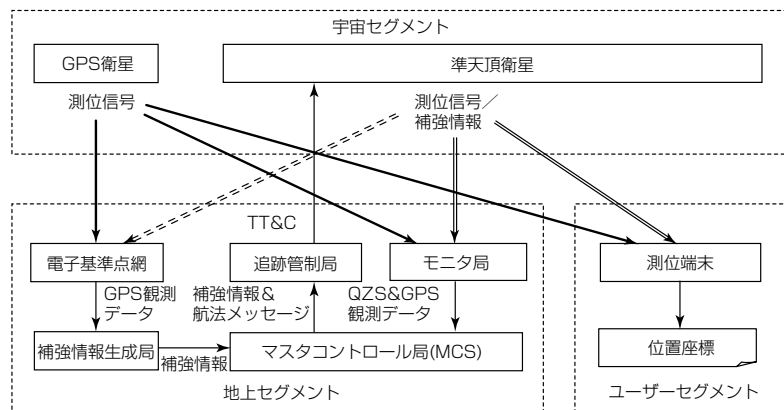


図1. 準天頂衛星測位システム

との共存性、相互運用性を確保することから、近代化GPS信号をベースとしており、L1C/A信号、L1C信号、L2C信号、L5信号を送信することとし、そこからの仕様変更を最小限に抑えることとしている。表1に準天頂衛星の測位信号を示す。

2.2.2 軌道

準天頂衛星は、1日で軌跡が元に戻る非対称8の字軌道を取り、複数機構成で日本上空で常に70°以上の高仰角を確保する軌道配置である。図2は、準天頂衛星の地表面上の軌跡であり、図3は、3機組合せの場合で、東京では、24時間常時どれか1機の仰角は70度以上が確保できる。

2.3 補強機能

2.3.1 センチメートル級測位補強システム

準天頂衛星初号機“みちびき”では、センチメートル級測位補強システムにSSR(State Space Representation)方式⁽²⁾を採用し、準天頂衛星の独自の実験用信号であるLEX信号を用いて移動体対応のセンチメートル級測位補強情報を全国に配信することができる。補強情報生成局で、電子基準点網のGPS観測データに基づいて状態空間モデル(State Space Modeling:SSM)と呼ばれる広域の動的誤差モデルを使用し、このモデルから算出した各誤差量をSSRとして生成する。さらに、このSSRを準天頂衛星LEX信号に適合させるために各誤差の物理的特性を利用して2kbpsに圧縮して、センチメートル級測位補強情報(コーデッドSSRメ

ッセージ)として準天頂衛星LEX信号を介して、日本全国に放送するものである。

2.3.2 対象地域

センチメートル級測位補強情報は、日本本土と近海を12網に分割して、くまなくカバーする。センチメートル級測位補強システムの網構成を図4に示す。

3. 準天頂衛星による効果の検証

3.1 補完機能

3.1.1 評価システム(ユーザーセグメント)

準天頂衛星からの測位信号が受信できる受信機(LEX信号受信機)を搭載した高精度GPS移動計測装置(以下“MMS(Mobile Mapping System)”という。)で、高層ビルによって衛星測位が困難な場所が多い新宿副都心及び高層ビルと細街路を含む繁華街である銀座で測位率を測定する実験を実施した⁽³⁾。MMSを用いた評価システムの構成を図5に示す。

3.1.2 準天頂衛星による測位率改善

新宿と銀座で準天頂衛星の補完機能を含めたディファレンシャル(コード差分)測位を実施した。その結果、準天頂衛星を利用することで、測位率を大きく改善できることを確認した。新宿の場合は、28.5から70.0%、銀座の場合は、39.5から69.1%となった。図6に新宿におけるGPSのみの測位結果(a)、GPS+準天頂衛星の測位結果(b)を示す。

3.1.3 INS複合による効果

高精度カーナビゲーションを目指し、準天頂衛星を利用したディファレンシャル(コード差分)測位とMEMS(Micro Electro Mechanical Systems)級INS(Inertial Navigation System)の複合測位を実施した。準天頂衛星によって70%近い測位率を確保できるようになり、残る30%については通常のカーナビゲーションで使用している低コストのジャイロスコープなどの慣性情報を取り込むことによ

表1. 準天頂衛星の測位信号

| 搬送波 | 信号名称 | PRNコード | 航法メッセージ |
|--------------------|-----------|-----------------------|-----------|
| L1 1,575.42MHz | L1-C/A信号 | C/A信号と同一のコード系列 | L1-C/Aと同様 |
| | L1C信号 | L1C信号と同一のコード系列(L1CD) | L1Cと同様 |
| | | L1C信号と同一のコード系列(L1CP) | データレス |
| | L1-SAIF信号 | C/A信号と同一のコード系列 | サブm級補強情報 |
| L2 1,227.60MHz | L2C信号 | L2C信号と同一のL2C(CM)コード | L2Cと同様 |
| | | L2C信号と同一のL2C(CL)コード | データレス |
| L5 1,176.45MHz | L5信号 | L5信号と同一のコード系列(Iチャンネル) | L5と同様 |
| | | L5信号と同一のコード系列(Qチャンネル) | データレス |
| LEX 1,278.75GHz | LEX信号 | Kasami系列 | ショートコード |
| | | | ロングコード |

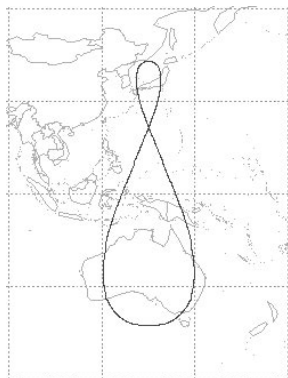


図2. 準天頂衛星の地表面上の軌跡(IS-QZSSより)

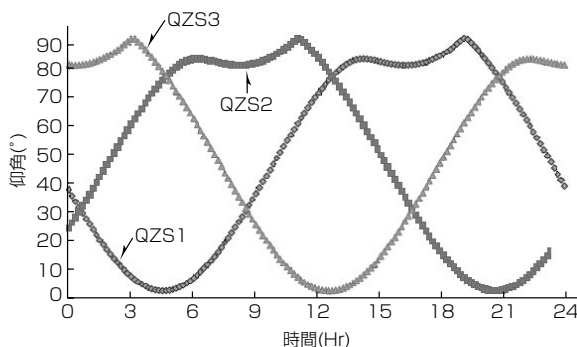


図3. 東京から見た準天頂衛星の仰角(IS-QZSSから)

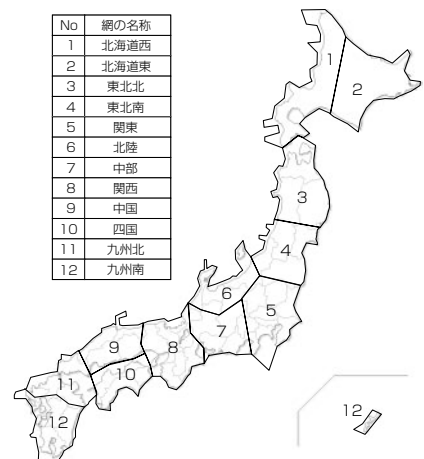


図4. センチメートル級測位補強システムの網構成

て、100%の測位率が可能である。新宿と銀座におけるINS複合測位結果をそれぞれ 図7(a), (b)に示す。測位精度は、車線判別(車線幅:3.5mの1/2以下)可能な測位精度が期待できることを確認した。図8に銀座のINS複合に

よる測位精度の評価結果を示す。

3.2 補強機能

3.2.1 評価システム(ユーザーセグメント)

低速移動体端末(LEXR)を用いて測位を行い、静止測位の精度を評価した。GPS用アンテナを測定点に設置して、GPS測位信号を受信し、同時に、準天頂衛星からの補強情報をLEX用アンテナとLEX信号受信機より受信する。GPSからのGPS観測データと準天頂衛星からの補強情報を使用して、LEXRでリアルタイムに測位計算する。システム構成を図9に示す。

3.2.2 リアルタイム静止測位

既知の測定点をLEXRで観測し、測定値と真値との差を測位誤差とした結果を図10, 図11, 表2に示す。図10は誤差の水平方向分布, 図11は誤差の緯度方向, 経度方向, 高さ方向の時間変動, 表2は誤差の統計値を示す。測定時間は2011年1月1日の11~17時の連続6時間, 観測は1秒周期である。また、地域による測位精度の差異を後処理で評価した結果を表3に示す。2010年4月19日と26日の9時, 12時, 15時の1時間連続で測位した結果である。Fix率は

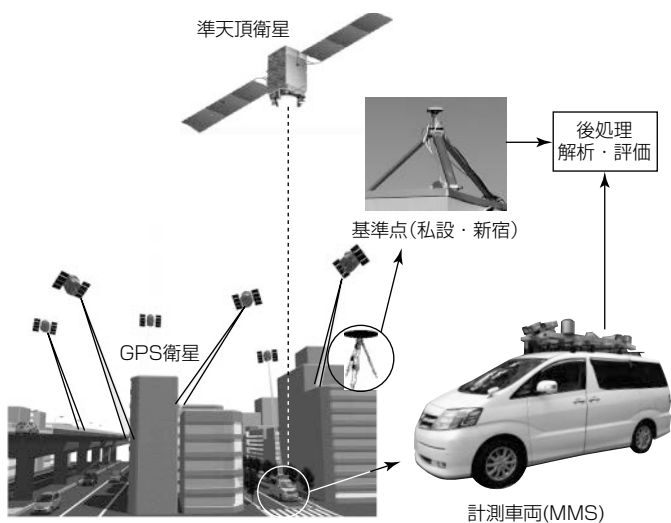
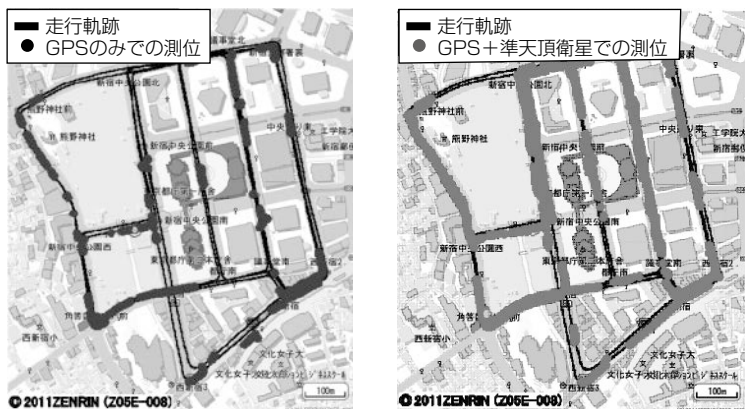


図5. 補完機能の評価システム



(a) GPSのみによる測位 (b) GPS+準天頂衛星による測位

図6. 準天頂衛星による測位率向上

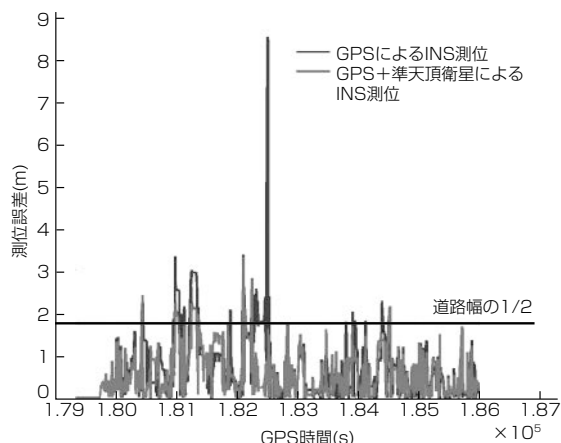


図8. INS複合による測位精度



(a) 新宿のINS複合測位 (b) 銀座のINS複合測位

図7. INS複合による効果

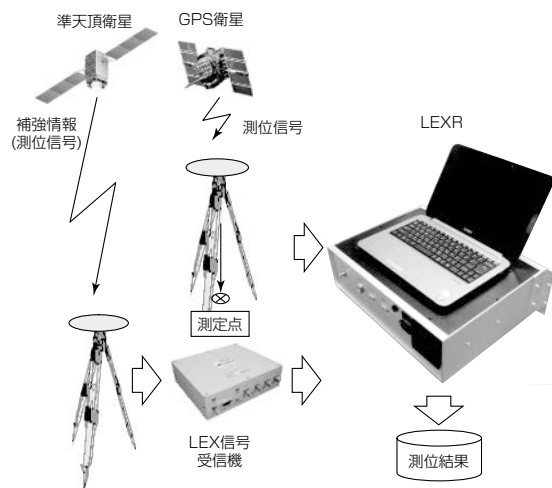


図9. 低速移動体端末(LEXR)システムの構成

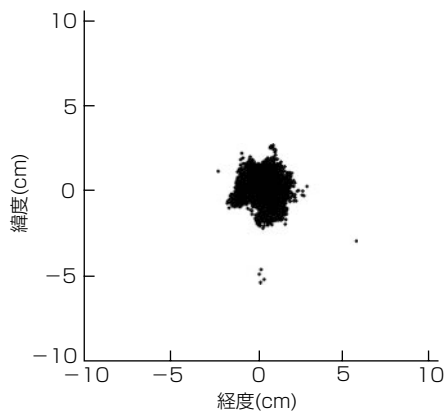


図10. 測位誤差の水平方向分布

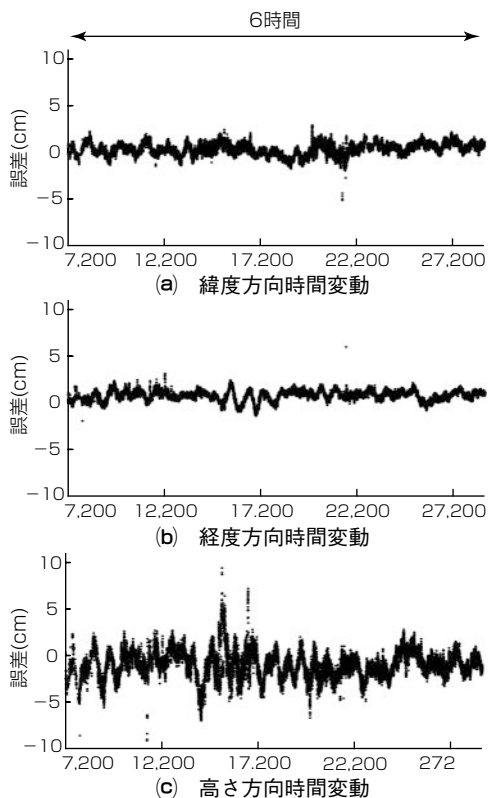


図11. 測位誤差の時間変動

観測全時間に対する測位(Fix)解が得られた時間の割合を示す。

3.2.3 リアルタイム移動体測位

LEXR, アンテナ, LEX信号受信機をMMSに搭載して、移動時の1秒ごとの車両位置を計測した。現在、測量で用いられているセンチメートル級の測位が可能なFKP(面補正パラメータ)方式⁽⁴⁾と計測結果を比較した。表4は1秒ごとの計測位置の差異を評価したものである。移動時の計測でも、現在、測量で用いられている方式と同等の性能を確認できた。

4. む す び

準天頂衛星の補完機能と補強機能を評価した。補完機能

表2. リアルタイム静止測位結果

| 評価項目 | | 精度 |
|-------|------------------|--------|
| 水平方向 | 平均誤差 | 0.9cm |
| | 標準偏差(σ) | 0.4cm |
| | 測位精度(rms) | 1.0cm |
| 高さ方向 | 平均誤差 | -1.2cm |
| | 標準偏差(σ) | 1.4cm |
| | 測位精度(rms) | 1.9cm |
| 3次元方向 | 測位精度(rms) | 2.1cm |

表3. 地域別測位精度評価結果

| 網 | 水平方向 測位精度(rms) | 高さ方向 測位精度(rms) | Fix率 |
|------|-------------------|-------------------|------|
| 北海道西 | 1.2cm | 3.0cm | 96% |
| 東北 | 1.1cm | 2.8cm | 98% |
| 関東 | 1.3cm | 2.7cm | 98% |
| 関西 | 1.2cm | 3.0cm | 97% |
| 中国 | 1.3cm | 2.8cm | 97% |
| 四国 | 1.4cm | 2.9cm | 98% |
| 九州南 | 1.2cm | 3.2cm | 97% |
| 平均 | 1.2cm | 2.9cm | 97% |

表4. 移動体を用いた測位精度(FKP方式との比較)

| 評価項目 | | 差異 |
|------|------|-------|
| 水平方向 | 平均 | 0.6cm |
| | 標準偏差 | 1.2cm |
| 高さ方向 | 平均 | 1.4cm |
| | 標準偏差 | 1.9cm |

は、GPS衛星のみの場合に比べ、準天頂衛星を組み合わせることによって、測位率が大幅に改善できた。また、補強機能は、従来の測量で用いられている方式と同等の性能を確認できた。

今後、測量、情報化施工、IT農業や高精度レーンナビゲーション等の多種多様なサービスが期待される。

なお、補強機能については、文部科学省の平成21年度地球観測技術等調査研究委託事業“準天頂衛星システム利用促進に向けた測位端末及びシミュレータの開発・整備”による委託業務の成果である。

参 考 文 献

- (1) 宇宙航空研究開発機構, 準天頂衛星システムユーザインタフェース仕様書(IS-QZSS) 1.2版 (2010)
- (2) 齋藤雅行, ほか: 「みちびき」を利用したセンチメートル級測位補強システムの開発, 第54回宇宙科学技術連合講演会 (2010)
- (3) 「みちびき」による補完効果の都市部における実証実験の結果について,
http://www.jaxa.jp/projects/sat/qzss/index_j.html
- (4) 白井澄夫: FKP方式による高精度GPS測位サービス, 日本航海学会 GPS研究会, 61~66 (2004)