

準天頂衛星「みちびき」による高精度測位補正技術

キーワード：GPS 補強機能
LEX 信号
高精度測位補正情報
一周波受信機
センチメートル級の測位

地震調査官

矢 来 博 司

準天頂衛星「みちびき」による高精度測位補正技術

1. はじめに

準天頂衛星の初号機「みちびき」が 2010 年夏に H-IIA ロケットで打ち上げられる。この準天頂衛星は、GPS 互換信号を送信し、天頂付近に配置されることで GPS 衛星の幾何学的配置を改善する（GPS 補完）、および測位補正情報を配信し、GPS による測位精度を向上させる（GPS 補強）という機能を持つ測位衛星である。

準天頂衛星システムの研究開発は関係省庁と民間の協力によって進められることになっている。国土地理院では、準天頂衛星を利用する高精度測位システムに関する技術開発のうち、地上系システムとの組み合わせによる測量向けのセンチメートル級高精度測位サービスを実現するための研究開発を行っている。本報告では、国土地理院が開発を進めている測量向けの高精度測位補正技術について紹介する。

2. 準天頂衛星システム

準天頂衛星システム（QZSS：Quasi-Zenith Satellite System）は、静止軌道と同じ公転周期で、軌道傾斜角約 45 度の軌道面を、3 機の衛星で 120 度ずつずらして配置することにより、常に 1 つの衛星が日本の天頂付近で可視となる衛星システムである。日本上空での滞留時間を長くとるために、軌道離心率を 0.1 とし遠地点を高緯度に置いていることから、地表へ投影した衛星軌道は日本付近で小さなループとなる非対称の 8 の字を描く（図-1）。

2010 年夏に打ち上げ予定の初号機の東京における可視時間帯は図-2 の通りである。仰角 60 度以上となる時間帯が 10 時間以上となり、日本上空で長く滞留することがわかる。



図-1 準天頂衛星の軌道の地表投影(宇宙航空研究開発機構, 2009)

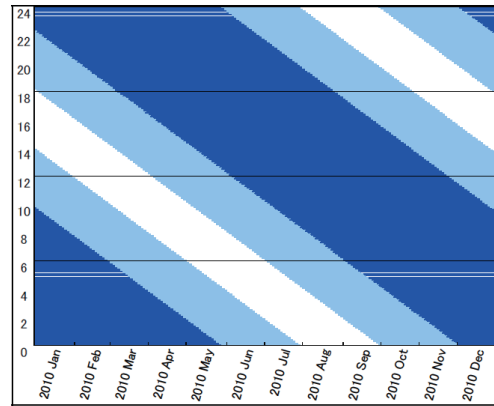


図-2 初号機の可視時間帯 (UTC) (濃い青は仰角 60 度以上、薄い青は仰角 10 度以上) (宇宙航空研究開発機構, 2009)

表-1 準天頂衛星から送信される信号

| 信号名称 | 中心周波数 (MHz) | 対応する GPS 民生信号 | 概要 |
|---------|-------------|---------------------------|---|
| L1C/A | 1575.42 | 放送中 | GPS 補完信号 既存の GPS、近代化 GPS との完全な相互運用性、共存性を確保 |
| L1C | 1575.42 | Block III (2014~) | |
| L2C | 1227.60 | Block II R-M (2005~) | |
| L5 | 1176.45 | Block II R-M (2009~, 試験中) | 高速移動体向け補強信号 |
| L1-SAIF | 1575.42 | | |
| LEX | 1278.75 | | 独自の実験用信号 (2 kbps のデータレートによる高精度補強実験) |

準天頂衛星から送信される信号(表-1)は、L1C/A や L2C など GPS 互換の測位信号、SBAS 上位互換の測位補強信号である L1-SAIF に加え、独自の実験用信号として LEX 信号が設定されている (宇宙航空研究開発機構, 2009)。

この LEX 信号を利用して、JAXA の他、国土地理院や情報通信研究機構が、準天頂衛星打ち上げ後、実機を用いた測位補強実験を予定している。ただし、2kbps というデータレートのため、複数機関で同時利用 (同時送信) することはできず、実験は機関毎に時期を変えて行われる。

次項では、国土地理院が開発を行っている高精度測位補正技術について解説する。

3. 高精度測位補正技術の開発

GPS を利用した高精度測位方式として、ネットワーク型 RTK-GPS 測位方式がある。これは、携帯電話網や無線通信網を介して補正情報を通信し、二周波 GPS 受信機を使用して行う測位補正方式であるが、二周波 GPS 受信機は一周波受信機に比べて高価である、携帯電話等の通信を利用可能な地域が限定されているなどの課題がある。そこで、低コストである一周波 GPS 受信機を用いる利用者を対象に、国内において 10 分程度の観測から準リアルタイムに水平測位精度数 cm の測量を実現する、準天頂衛星の放送機能を利用したネットワーク型 RTK-GPS 測位方式の実現を目標として開発が開始された。

なお、開発開始当初は、上述のように準天頂衛星に搭載予定であった放送機能を利用し、1 Mbps 程度の送信レートで補正情報を送信する予定であったが、政府方針により、準天頂衛星は測位機能に限定されることとなったため、LEX 信号を利用して送信することに変更された。そのため、LEX 信号で送信できる情報量（2 kbps：実効的には約 1.7 kbps）に収めるため補正情報のデータ量を当初の 1/500 とするよう設計する必要が生じた。

開発された測位補正技術は、測位誤差の要因である対流圏遅延、電離層遅延等を補正する情報を配信し、受信局側でその情報を利用して測位を行うものである。なお、開発された測位補正技術については Hatanaka et al. (2008) で詳細に記載されているので、ここでは概要の説明にとどめる。詳しくは上記論文を参照いただきたい。

3. 1 測位補正技術の概要

開発された測位補正技術に基づくシステムの概要は次の通りである。

測位方式は、全国を 12 の領域に分割し、領域毎に 1 点の参照基準点を設け（図-3）、参照基準点との間で相対測位を行うものである。

補正情報を生成・配信する装置（補正情報生成・配信装置）において、参照基準点の観測データ、衛星軌道情報、衛星時計情報、対流圏遅延モデル、電離層遅延モデルからなる補正情報を全国の電子基準点の観測データ等から生成し、準天頂衛星の LEX 信号に乗せて配信する（図-4）。

測量ユーザーは、補正情報を受信して測位を行う装置（測量用受信装置）を用い、上記の補正情報を受信し、一周波受信機で取得された GPS データと合わせて解析を行い、座標値を推定する。その場合、時刻情報を持つ、これら 4 種類の補正情報から、観測時点および位置に応じて時間・空間内挿処理を行い、補正に用いる必要がある。

なお、座標値を求めるのに必要な観測時間は約 15

分である。

3. 2 補正情報の概要

3. 2. 1 参照基準点情報

全国の 12 領域について、各領域に 1 つ参照基準点（電子基準点）を配置する。配信する情報は参照基準点の L1 擬似距離および搬送波位相であり、条件のよい 8 衛星分を選択して配信する。

3. 2. 2 衛星軌道情報・衛星時計情報

衛星軌道情報については、15 分間隔で衛星の座標値を提供している IGS 超速報暦（IGU 暦）から、観測時点を中心とする 13 エポック分を切り出して用いる。衛星時計情報については、全国に分布する約 20 点の電子基準点のデータから衛星時計誤差を推定する。

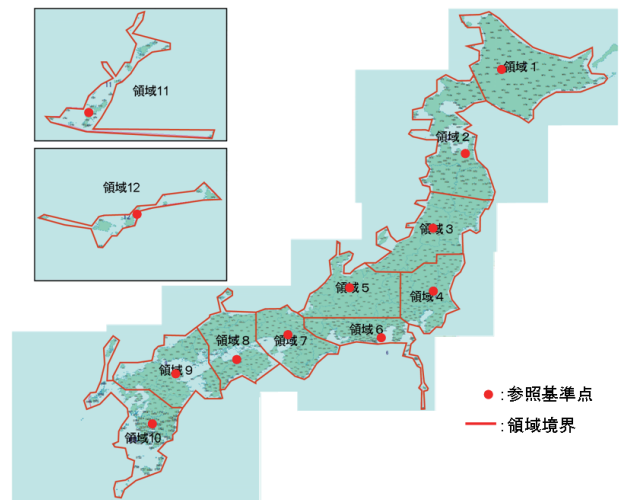


図-3 領域の分割図。全国を 12 領域に分割し、各領域に参照基準点が 1 点設定されている。

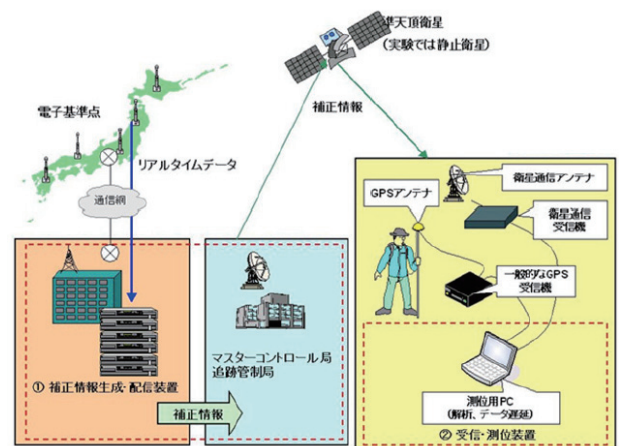


図-4 補正システムの概念図

3. 2. 3 対流圏遅延量

3. 2. 2で推定された衛星時計誤差を用いた精密単独測位法により、対流圏遅延量を全国の電子基準点毎に推定する。対流圏遅延量のうち、静水圧遅延による部分はモデルで除去し、Nie11 マッピング関数を用いて推定した水蒸気遅延量だけを補正モデルとして配信する。

3. 2. 4 電離層遅延量

全国 12 の領域について、電子基準点ごとに GPS の 2 周波のデータから各衛星の視線方向の電離層遅延量を推定し、グリッド化して参照基準点情報として配信する衛星ごとの電離層補正モデルを作成し、配信する。

3. 2. 5 LEX パッケージ化

各補正情報は、LEX 信号に乗せて配信される。パケットロスによる補正情報の欠落に対し、測位できなくなる影響を小さくすること等を考慮し、1つの LEX パケットに入る補正情報は 1 種類のみ、1 種類の補正情報は連続した LEX パケットで配信するという方針で割り付けることとした。また、配信するデータ量削減のため、補正情報のレコードごとに zip 圧縮することとした。図-5は LEX パケットへの割付のイメージである。

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
| 衛星軌道・衛星時計情報 | | | | | | | | | | | | 対流圏遅延情報 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 | 58 | 59 | 60 |
| 電離層遅延情報 | | | | | | | | | | | | 電離層遅延情報 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 |
| 電離層遅延情報 | | | | | | | | | | | | 電離層遅延情報 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 | 104 | 105 | 106 | 107 | 108 | 109 | 110 | 111 | 112 | 113 | 114 | 115 | 116 | 117 | 118 | 119 | 120 |
| 電離層遅延情報 | | | | | | | | | | | | 電離層遅延情報 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 121 | 122 | 123 | 124 | 125 | 126 | 127 | 128 | 129 | 130 | 131 | 132 | 133 | 134 | 135 | 136 | 137 | 138 | 139 | 140 | 141 | 142 | 143 | 144 | 145 | 146 | 147 | 148 | 149 | 150 |
| 対流圏遅延情報 | | | | | | | | | | | | 電離層遅延情報 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 151 | 152 | 153 | 154 | 155 | 156 | 157 | 158 | 159 | 160 | 161 | 162 | 163 | 164 | 165 | 166 | 167 | 168 | 169 | 170 | 171 | 172 | 173 | 174 | 175 | 176 | 177 | 178 | 179 | 180 |
| 電離層遅延情報 | | | | | | | | | | | | 電離層遅延情報 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 181 | 182 | 183 | 184 | 185 | 186 | 187 | 188 | 189 | 190 | 191 | 192 | 193 | 194 | 195 | 196 | 197 | 198 | 199 | 200 | 201 | 202 | 203 | 204 | 205 | 206 | 207 | 208 | 209 | 210 |
| 電離層遅延情報 | | | | | | | | | | | | 電離層遅延情報 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 211 | 212 | 213 | 214 | 215 | 216 | 217 | 218 | 219 | 220 | 221 | 222 | 223 | 224 | 225 | 226 | 227 | 228 | 229 | 230 | 231 | 232 | 233 | 234 | 235 | 236 | 237 | 238 | 239 | 240 |
| 電離層遅延情報 | | | | | | | | | | | | 電離層遅延情報 | | | | | | | | | | | | | | | | | |

図-5 LEX パケットへの割付イメージ。1 サイクルを 240 秒としている。赤：参照基準点情報、青：衛星軌道情報・衛星時計情報、緑：対流圏遅延情報、黄：電離層遅延情報及びグリッド情報。

4. 測位実験による精度検証

2010 年 11 月頃に予定されている準天頂衛星の実機を用いた実証実験に向け、現在まで、開発された高精度測位補正情報生成・配信装置及び測量受信装置（以下、「本システム」という。）を用いた試験観測を実施している。

本システムは、前述のようにほぼ日本全国をカバーする 12 領域を対象地域としている。全国で測位精度が保たれているか（測位精度の地域依存性がないか）の検証を効率的に行うため、緯度や経度に偏りがないように試験地域を代表的地域として 5 地域選

び出し、試験観測を実施した。

また、本システムの適用限界の調査を目的として、季節による測位結果への影響、領域境界での整合性、周囲の電子基準点からの標高差が大きい地域での測位精度に関する試験観測も実施した。

4. 1 代表的地域での測位精度

緯度・経度に偏りがないように、代表的地域として北海道（旭川）、関東（つくば）、北陸（金沢）、九州（大分）、沖縄（石垣）の 5 地域を選び、試験観測を行った。

各地区において、参照基準点からの距離が 0 km（参照基準点近傍）、5 km、10 km、20 km、50 km の 5 箇所ですべて同時観測を行った（図-6）。なお、試験観測時点では準天頂衛星がまだ打ち上げられていなかったため、準天頂衛星からの補正情報送信を模して、既存の静止通信衛星（JSAT）を経由して補正情報を観測点に配信した。

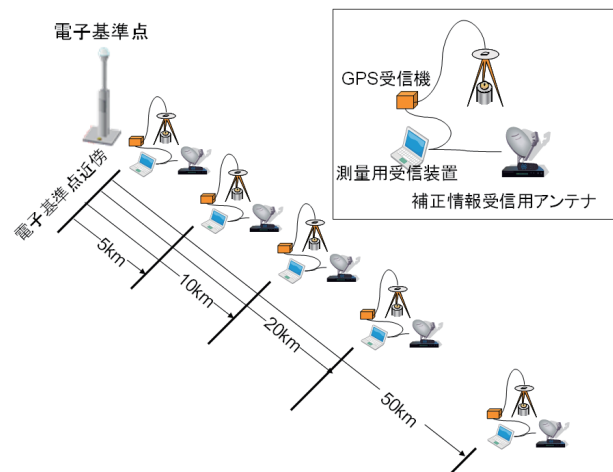


図-6 代表的地域での試験観測の概念図

測位解の精度評価については、二周波でのスタティック解析で求めた座標値を真値と仮定し、本システムで得られた測位解と比較することで精度を評価した。

試験観測の結果、FIX 率はおおむね 90% 程度、測位精度は RMS で数 cm という結果が得られた（図-7、表-2）。石垣地区を除けば、FIX 率、測位精度について他の 4 地区で大きな差は見られず、本システムの目標精度である水平成分 2 cm はほぼ達成されている。石垣地区では他の地域と比べて FIX 率、精度共にやや低い傾向となっている。この石垣地区を含む領域では電子基準点の配置が島嶼部に限定され、分布に偏りがある。そのため、補正情報の推定誤差が大きいと予想され、これが測位解の精度低下を招いている可能性がある。この石垣地区を除けば、緯度、経度によらず測位精度に大きな差はないことか

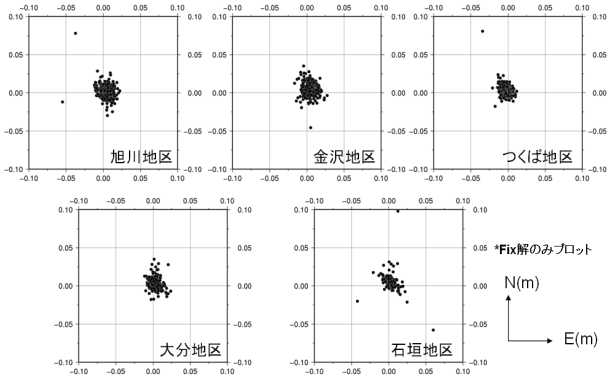


図-7 代表的地域における測位解の分布. FIX 解が得られた観測結果に対して、スタティック解からの残差をプロットしたもの. 縦軸に南北成分、横軸に東西成分、1目盛りは5cmで表現されている。

表-2 試験観測での FIX 率及び得られた測位解とスタティック方式で求めた座標値との差の RMS

| 地域 | 地区 | RMS(cm) | | | FIX率(%) |
|-------|------|---------|-----|------|---------|
| | | E | N | U | |
| 代表的地域 | 旭川 | 1.6 | 1.4 | 2.5 | 91.7 |
| | 金沢 | 1.8 | 3.1 | 5.1 | 86.3 |
| | つくば | 0.8 | 0.9 | 2.5 | 91.9 |
| | 大分 | 1.3 | 0.9 | 7.3 | 90.4 |
| | 石垣 | 5.5 | 3.9 | 8.3 | 85.9 |
| 山岳部 | 乗鞍 | 5.3 | 7.3 | 18.7 | 89.6 |
| | 冷泉小屋 | 3.3 | 3.5 | 11.5 | 84.3 |
| | 奈川 | 8.7 | 6.1 | 15.7 | 85.9 |
| | 高山 | 3.2 | 4.1 | 11.8 | 90.8 |
| | 下呂 | 7.8 | 4.8 | 14.4 | 91.4 |

ら、本システムによりほぼ全国でセンチメートル級の測位が実現できていると判断できる。

4. 2 季節変化の影響

日本では季節により気温、湿度等が大きく変化する。これらは GPS 電波の伝播速度の変化をもたらすため、測位解に影響を与える可能性がある。これら季節変化の影響を検証するため、前述の代表的地域において、大気条件の異なる二時期（夏季、冬季）に観測を行った。

二時期の観測で得られた測位解を比較したところ、季節による差は見られなかった。したがって、本システムにより適切に補正が行われているといえる。

4. 3 標高差の影響

山岳部での観測では、観測点の標高が周囲の電子基準点と大きく異なる場合がある。このような条件では、対流圏遅延の補正量が正しく推定されず、測位解に影響を与えることが予想される。

電子基準点との標高差が大きい山岳地域として、乗鞍岳周辺で試験観測を行った。試験観測の結果、代表的地域と比較してばらつきがやや大きく（図-8）、RMS で数 cm 程度、特に鉛直成分の測位精度が低いという結果が得られた（表-2）。

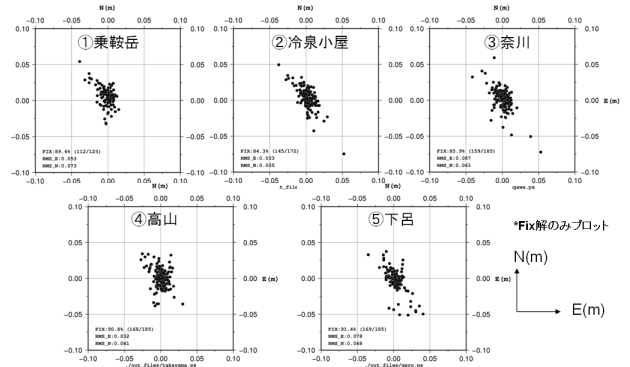


図-8 山岳地域における測位解の分布. FIX 解が得られた観測結果に対して、スタティック解からの残差をプロットしたもの. 縦軸に南北成分、横軸に東西成分、1目盛りは5cmで表現されている。

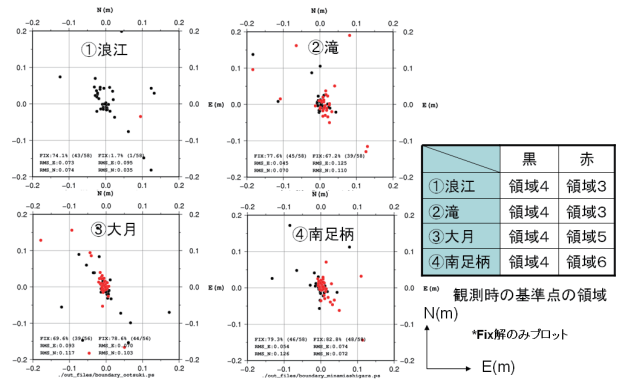


図-9 領域4とその周囲の領域との境界における測位解の分布. FIX 解が得られた観測結果に対して、スタティック解からの残差をプロットしたもの. 縦軸に南北成分、横軸に東西成分、1目盛りは10cmで表現されている。

標高差が大きい地域での精度低下、特に上下成分の精度低下については、観測点での湿潤大気遅延量の補間計算の際に、観測点と電子基準点の標高差が考慮されていないことが要因の一つである可能性がある。

4. 4 領域境界での整合性

領域境界で行われる観測では、観測点同士が空間的に近接しているにもかかわらず、各観測点が属する領域が異なるために、それぞれで異なる参照基準点・補正情報を用いて測位が行われる可能性がある。このような場合、それぞれの領域での補正情報がお互いに整合していれば問題ないが、補正情報が整合していない場合には測位結果もお互いに不整合となる可能性が高い。

上記について検証するため、領域境界で試験観測を実施した。観測の結果、領域境界では代表的地域に比べややばらつきが大きく、RMS で数 cm~10cm 程

度悪くなるという結果が得られた。ただ、双方の領域での測位結果はスタティック解を中心としたほぼ同じ領域にプロットされており(図-9)、補正情報は領域間で整合していると判断できる。

領域境界で精度が低下する要因としては、次のようなことが考えられる。領域境界付近では、電離層遅延補正情報の推定に用いる電子基準点の配置の外側となり、電離層遅延補正情報は外挿された値が適用される。外挿となる領域では補正情報の精度が低いことが予想され、これが測位解の精度低下をもたらしている可能性がある。

4. 5 測位精度について

代表的地域での試験観測の結果から、測位精度に大きな地域差は見られず、全般的に高い精度で測位できていることが明らかとなった。したがって、全国でセンチメートル級の測位が実現されていると推

察される。ただし、領域境界や標高差が大きい地域など、極端な条件では精度が低下することも明らかとなった。

試験観測により明らかとなったこれらの精度低下については、準天頂衛星の実機を用いた実証実験までに、原因の究明および解決を目指していく方針である。

5. まとめ

2010年夏に打ち上げ予定の準天頂衛星初号機「みちびき」の LEX 信号を用いた測量向けの高精度測位補正技術の開発を行っている。このシステムを用いて試験観測を行い、測位精度について検証を行った。検証の結果、領域境界や標高差が大きい地域など、極端な条件では精度が低下するものの、ほぼ全国でセンチメートル級の測位が実現できていると考えられる。

参 考 文 献

Hatanaka, Y., Y. Kuroishi, H. Munekane and A. Wada (2008): Development of a GPS Augmentation Technique, Proceedings of International Symposium on GPS/GNSS 2008 in Tokyo, Toward a New Era of Positioning Technology, Tokyo International Exchange Center, Odaiba, Tokyo, Japan, November 11-14, 2008, 1097-1103.

宇宙航空研究開発機構 (2009): 準天頂衛星システム ユーザインタフェース仕様書 (IS-QZSS), 1.1 版.