

5 衛星測位

5 Satellite Positioning

5-1 世界の衛星測位システムの開発計画と利用動向

5-1 Development Status of the World's GNSSs and the Trend of the Satellite Positioning Utilization

中村真帆 浜 真一

NAKAMURA Maho and HAMA Shin'ichi

要旨

2010年現在、世界各国で全地球航法衛星システム(GNSS: global navigation satellite system)が続き構築されつつあり、10年後には地球の周りに100機を超える多数のGNSS衛星が整備されることになるという。特にアジア経度帯では以前から運用されている米GPS(global positioning system)とロシアのGLONASS(GLObal NAVigation Satellite System)に加え、日本のQZSS(quasi-zenith satellite system)、中国のCompass/Beidou-2が打ち上げを開始しており、世界に先駆けて見える衛星の数が増える見込みである。このような複数のGNSSを同時に受信し利用できる環境を、巨大なインフラとして考えるMulti-GNSSという概念が近年台頭してきている。Multi-GNSS時代に期待される衛星測位利用のあらましと、最近設立されたMulti-GNSS Asia(MGA)による国際ワークショップの様子などから世界の動向を報告する。

In 2010, some Global Navigation Satellite Systems (GNSSs) has been constructing and there will be over 100 navigation satellites around the Earth. In particular, Asia longitude area will be the most viewable area from the navigation satellites because of the GLONASS (GLObal NAVigation Satellite System), QZSS (quasi-zenith satellite system) and Compass / Beidou-2 in next 10 years. This paper introduces the activities of the each GNSSs and the trend of the Multi-GNSS utilizations.

[キーワード]

GNSS, QZS, Multi-GNSS Asia, 時刻比較
GNSS, QZS, Multi-GNSS Asia, Time transfer

1 世界の衛星測位システム

古来長い歴史の中で発達した航海術は星を頼りに位置を決めたが、星はいつも見えるとは限らず、晴天のもとでしか安全な航海はできなかった。衛星測位とは人工の星を上空に配置したものであり、光でなく電波を用いることから天気に関わらず測位が可能となる。電波は座標系によらない既知の

速度(光速)で伝わることから、信号の伝搬時間を測定することで送信者と観測者との距離を決定できる。原理的には位置が分かっている3つの送信局からの距離が分かれば、3辺測量により観測者の位置を知ることができるが、送信及び受信側の時計が正確に同期されていなければならない。実際の衛星測位において受信機の位置を求めるには、緯度、経度、高さ及び時刻の4パラメータを

決める必要があり、衛星は最低4機必要となる。また観測される擬似距離には電離圏、大気及び水蒸気遅延、あるいはマルチパスも含まれることに注意しなければならない。地球上のどこにいても4機以上の可視衛星を確保するには、GPSのように数十機の衛星を地球の回りに周回させる必要がある。このような全地球上で衛星測位を可能にするシステムを全地球航法衛星システム(GNSS: global navigation satellite system)と呼ぶ。

GNSSによる衛星測位はGPS(global positioning system)やGLONASS(GLObal NAVigation Satellite System)など軍事目的で開発されてきたが、最近ではどこにいても位置情報を得られる社会的なインフラとして、人々に大きな利便性を与えるようになってきている。各国において独自のGNSSやRegional Navigation Satellite System(RNSS)を備えることは、諸外国の経済や有事の影響を受けない安定なサービスの提供を目指すもので、国力を示す技術の1つでもある。

以下に現在計画されている世界のGNSS及びRNSSについて、打ち上げ予定数や信号の特徴などを示す。現在各GNSSともシステム構築の過渡期にあたり、今後10年程度で数は増大していく見込みである。NICTが時刻管理系を担当している日本初の測位衛星システムであるQZSSについても概要を述べる。なお信号の詳細については計画段階の情報も含むため今後変更されることもある。

1.1 GPS

GPS衛星数は全球でのサービスのためには24機必要だが、最近では衛星寿命が10年以上と長く、2010年7月時点では31基が運用されている。既にBlock-I衛星は全て引退し、現在の構成はIIA衛星(Rb2台とCs2台を搭載)が11台、IIR(Rb3台)が12台(うちL2C信号を放送するIIR-Mは7台)、L5信号も放送するIIFが1台となっている。なおSA機能(民生信号の意図的な精度低下)は2000年5月以降中止され、今後もこの機能は使わないと発表されている。

今後、L1C信号を放送するBlock-III衛星が2014年から打ち上げられる予定で、24機揃うのは2021年度の予定となっている。Block-IIIでは耐妨害性能の強化、捜索救難(search and rescue)機能の追加も予定されている。表1にGPSの民生用信号の概要をまとめた[1]。民生信号の変調方式は2相位相変調(BPSK: binary phase shift keying)が用いられている。

またGPSの時系であるGPST(GPS time)はUTC(UNSO)に10ns以内で同期されており、座標系は地球中心地球固定(ECEF: earth-centered, earth-fixed)の直交座標系を定義する、世界測地系1984(WGS84: World Geodetic System 1984)を使用している。

1.2 GLONASS

ロシアでは2003年から、従来よりも寿命が長く第2民生信号に対応したMシリーズの打ち上げ

表1 GPSの民生用信号一覧(BPSK: Binary Phase Shift Keying)

| 名称 | 中心周波数 [MHz] | チップレート (Mcps) | 変調方式 | GPSの対応 | 特徴 |
|--------|-------------|---------------|-----------|-------------|-----------------|
| L1-C/A | 1575.42 | 1.023 | BPSK (1) | | 最も広く利用されている民生信号 |
| L2C | 1227.60 | 1.023 | BPSK (1) | 2005年より順次対応 | 第2の民生信号 |
| L5 | 1176.45 | 10.23 | BPSK (10) | 2010年より順次対応 | 第3の民生信号 |

表2 GLONASSの民生用信号一覧

| 名称 | 中心周波数 [MHz] | チップレート (Mcps) | 変調方式 | 特徴 |
|----|---------------------|---------------|------------|-----------------------------|
| L1 | 1598.0625-1609.3125 | 0.511 | BPSK (0.5) | FDMAのため同じPRNコードを複数の周波数で送信する |
| L2 | 1242.9375-1251.6875 | 0.511 | BPSK (0.5) | FDMAのため同じPRNコードを複数の周波数で送信する |

表3 Compass/Beidou-2 の今後送信が予定されている民生用信号一覧

| 名称 | 中心周波数 [MHz] | チップレート (Mcps) | 変調方式 | 特徴 |
|------|-------------|---------------|-------------------|-----------|
| B1-C | 1575.42 | 1.023 | MBOC (6, 1, 1/11) | L1-C/A 互換 |
| B1 | | 2.046 | BOC (14, 2) | |
| B2a | 1191.795 | 10.23 | AltBOC (15, 10) | |
| B2b | | | | |
| B3 | 1268.52 | 10.23 | QPSK (10) | |
| B3-A | | 2.5575 | BOC (15, 2, 5) | |

が始まり、2010年10月現在、23台が運用され、2010年末にも24基運用に復帰する可能性がある。2015年からは、より小型・長寿命で第3民生信号を追加するKシリーズが計画されている。現在GLONASSとGPSとはL帯の周波数が異なるだけでなく、変調方式もGLONASSが周波数分割多元接続(FDMA)、GPSが符号分割多元接続(CDMA)と異なるので相互運用性を持たない。しかしGPSとの相互運用性を得るため、KシリーズではCDMAを採用するという。表2にGLONASSの民生用信号の概要をまとめた。

GLONASSの座標系は測地系の基準楕円体を用いたECEF座標系(原点は地球の重心)であるPZ-90(Parametri Zemli 1990)に準拠している。時系はUTC(SU)に1ms以内で同期しているが、うるう秒を反映しているため、うるう秒を反映しないGPS時系とは2010年9月時点で15秒の差がある[2]。

1.3 Compass/BeiDou-2

中国の測位衛星測位システム、Compass/BeiDou-2は最近急速に構築されつつあるシステムである。静止衛星軌道(GSO)に5基、準天頂軌道を含む中高度軌道(MEO)に27基を打ち上げる予定で、現在は中国を中心としたリージョナルな衛星測位システムであるが、2020年にはグローバルなサービスを実現するとしている。2010年夏現在、GSOに3基(1基はスペア)、世界で初めて(2010年8月1日)の準天頂軌道(傾斜角55度)に1基の衛星が運用されており、今後も続々と打ち上げが予定されている。信号の詳細については公

式にはICDで公開される予定だが(2012年頃の予定)国際学会などで随時紹介されている。信号の変調方式は既に打ち上げられているものは全て4相位相変調(QPSK: quadri-phase shift keying)であるが、今後はQPSK以外にも数種のBOC変調(BOC: binary offset carrier, AltBOC: Alternative BOC, MBOC: multiplexed BOC)などが採用されるという。表3には将来送信が予定されている民生信号をまとめた[3]。

座標系はChina Geodetic Coordinate System 2000(CGCS2000)を使用しているが、ITRFとの齟齬は数cmとされている。搭載原子時計はスイス製Rbと国産のRbを使用し、時系はBDT(Compass/BeiDou-time)という名でUTCと100ns以内で同期される(BDTのepoch時は2006年00d)。GPST/GST(Galileo system time)との時刻差が配信される予定だという。

1.4 GALILEO

EUはグローバルでかつGPSに頼らない衛星測位システムを2010年頃より開始すべく、2002年からGALILEO計画を開始した。膨大なコストと多国間の利害衝突のため計画は遅延しているが、2005年に試験機であるGIOVE-Aが、2008年にパシブ型水素メーザを搭載したGIOVE-Bが打ち上げられ、試験運用されている。2011年4月までに新たに4基を打ち上げIOV(in-orbit validation)に入り、2013年末にはIOVの4基に12基を加えた16基で初期運用を行うとしている。総衛星数は30基で、2017年頃にシステムが完成する計画となっている(2010年10月現在)。表4にGalileo

表4 Galileoの民生用信号一覧

| 名称 | 中心周波数 [MHz] | チップレート (Mcps) | 変調方式 | 特徴 |
|-----|-------------|---------------|-------------------|-----------|
| E1 | 1575.420 | 1.023 | CBOC (6, 1, 1/11) | L1-C/A 互換 |
| E6 | 1278.750 | 5.115 | BPSK (5) | |
| E5 | 1191.795 | | AltBOC (15, 10) | |
| E5a | 1176.450 | I 10.230 | BPSK (10) | L5 に対応 |
| | | Q 10.230 | | |
| E5b | 1207.140 | I 10.230 | BPSK (10) | |
| | | Q 10.230 | | |

の民生用信号の概要をまとめた[4]。Galileoにおいても数種のBOC変調が採用されている(CBOC: composite BOCなど)。

座標系はやはり地球重心を原点とするGTRF (Galileo Terrestrial Reference Frame)が採用され、ITRFとの差異は数cmとされている。時系はTAIに準拠し、閏秒の不採用を表明していたが、現在はGPSと同様の閏秒オフセット(19秒)となっている[4]。この時系はGST (Galileo system time)と呼ばれ、ヨーロッパのいくつかのUTC時系とのアンサンブルとして生成される。

1.5 IRNSS

インドではGPSを利用した航法利用のためのSatellite Based Augmentation System (SBAS) システムであるGPS Aided Geo Augmented Navigation (GAGAN)を有するが、2006年頃より、GPSに依存しない独自の測位システムを目指してIndian Regional Navigation system (IRNSS)計画を進めている[5]。IRNSSは静止衛星3基と準天頂軌道衛星4基とを組み合わせた7衛星で構成され、準天頂軌道は赤道面に対して29°の傾斜角をつけた軌道になる。IRNSSはインド亜大陸に加え、地理的領域から1500kmを超える領域をカバーするもので、S帯(2492.08MHz)とL5帯(1176.45MHz)の2周波を供給し、10m以内の精度を目指すという。インド亜大陸には磁気赤道が通り、電離圏の影響が強いため、Sバンドを使用するものと考えられる。1周波ユーザーに向けて電離圏遅延補正情報も供給される計画である。なお変調方式はBPSK変調とBOC(5, 2)変調の2種類で送信されることになっているが、まだ計画



図1 準天頂衛星によるGPS補完

段階で変更の可能性もあるため、特に表にはまとめない。1機目の打ち上げが2011年に計画されており、2014年には完成の予定である。C帯を用いたレンジングなども計画されている。

座標系はGPSに準拠してWGS84が採用される。時系についてはIRNSS network timing centerで独自に生成される、IRNWT (IRNSS Network time)というものが計画されているという[6]。

1.6 QZSS

最後に2010年9月11日に無事初号機が打ち上げられた、QZSSの特徴と課題について述べておく。我が国初の測位衛星システムとなるQZSSは、準天頂軌道衛星3機で構成され、GPSと互換性の高い測位信号を放送する。準天頂衛星はGPSの「補完」と「補強」を目的として開発された。「補完」とはユーザーから見える可視衛星が増えることを指し(図1)、「補強」とは、GPS単独測位のみでは

表5 QZSSの民生用信号一覧

| 名称 | 中心周波数 [MHz] | チップレート (Mcps) | 変調方式 | 特徴 | GPSの対応 |
|---------|-------------|---------------|------------|--------------------------------------|-----------|
| L1-C/A | 1575.42 | 1.023 | BPSK (1) | 最も広く利用されている民生信号 | |
| L1C | 1575.42 | 1.023 | BOC (1, 1) | L1-C/A よりも広帯域・耐マルチパス | 2014年以降 |
| L2C | 1227.60 | 1.023 | BPSK (1) | 第2の民生信号 | 2005年より順次 |
| L5 | 1176.45 | 10.23 | BPSK (10) | 第3の民生信号 | 2010年より順次 |
| L1-SAIF | 1575.42 | 1.023 | BPSK (1) | SBASと類似の補強用信号 | - |
| LEX | 1278.75 | 5.115 | BPSK (5) | QZSS独自の補強用信号 GALILEOのE6信号と同じ中心周波数 | - |

得られない高精度な測位を提供する特別な測位信号を放送する技術を指す。準天頂衛星初号機を用いた実証実験として、国土地理院および電子航法研究所ではGPS測位での最大の誤差となる電離圏遅延の補正量を世界有数のGPS観測システムGEONETを参照点としてその差分から算出し、遅延情報をさらに準天頂衛星から放送する計画である[7]。以下に詳細を述べる。

1.6.1 信号

信号の変調方式はGPSと同じくBPSKであり、特に航法衛星として測位信号の誤差を補強するシステムの開発を主なテーマとして各種の実験が行われる計画である。特に実験用にLEXと呼ばれる独自の信号を有している。表5にQZSSの民生信号の一覧を示す。

1.6.2 時刻比較装置

準天頂衛星はNICTで開発を行った高精度時刻比較システム(TTS)(図2)を搭載している。TTSは日本の標準時UTC(NICT)に同期したQZST(QZS time)を生成し、GPSTとの差をUTCパラメータとして放送する。技術的な概要は文献[8]にあるが、衛星時刻比較は衛星測位の要の技術であり、TTSを用いるとGPSよりも高精度に時刻比較を行うことができる。時刻比較用には特別にKu帯の周波数を送受信する機能を備える。

1.6.3 軌道

QZSSは静止軌道上で軌道傾斜角45度を持たせ、8の字軌道を描くよう設計された衛星であるが、1機が日本上空で天頂付近に見えるのは1日



図2 みちびきに搭載された基準時刻管理部(TTS)

約8時間である。同一軌道上に等間隔に3機を配置して初めて24時間見えるようになる。ところで衛星の可視時間帯は1日あたり4分ずつずれていき1年で1周する。つまり1機だけでは可視時間が短いだけでなく、1年のうちで数ヶ月は夜間にしか天頂に見えない状態となってしまう。よって実用化にはさらに2機が必要となる。

また座標系としては地球の宇宙観測による計測から定義された最も高精度な座標系である国際地球基準座標系(ITRF: International Terrestrial Reference Frame)のサブセットであるJGS(日本衛星測位測地系: Japan satellite navigation Geodetic System)を採用している。

1.6.4 国際的な対応

準天頂衛星システムは、GPSとの電波干渉調整、相互運用性の確保、海外モニタ局の設置など

のため、日米 GPS 全体会合の枠を利用して 2002 年から GPS/QZSS 技術ワーキンググループを精力的に実施している。時刻管理システムとしては、GPS 時刻と QZSS 時刻との関係を調整するため、NICT・USNO の間で GPS QZS 時刻オフセット (GQTO) インターフェイス管理文書 (ICD) を制定した [9]。

さまざまな GNSS の調整の場としては国際 GNSS 委員会 (ICG) [10] がある。時刻管理に関しては、WG-D「各国・地域および国際機関の協力」の中にできた時系に関するタスクフォース」に、2009 年から参加している。

1.7 まとめ

上に紹介した各 GNSS のスペクトラム構成の比較を図 3 [11] に示しておく。また各 GNSS は座標系および時刻系はそれぞれ完全には一致しないが、どの座標系も ITRF に準拠することが合意されており、それぞれ数 cm 程度のずれしかないとされている。時系については各 GNSS で同期を取る UTC が異なるため、リアルタイムでの相互時刻比較が必要となるが、後発の GNSS では主に GPS とのタイムオフセットを計測し、放送することになる。以下に各 GNSS で使用される座標系と時系について表 6 にまとめる。

2 Multi-GNSS とは

1 に示した計画通りに順調に打ち上げが進むと、2020 年頃の世界の衛星可視数は図 4 に示すようになるという。GLONASS や Compass/Beidou-2、日本の QZSS などが集中するため、アジアの経度帯で特に衛星可視数が増大する。世界でいち早く多くの測位衛星が見えるようになるため、これらを 1 つの巨大なインフラとして利用できることが期待されている。このように複数の GNSS を同時に利活用することを、最近では Multi-GNSS という言葉で表現するようになってきている。しかし、周

表 6 各 GNSS の座標系および時系

| | 座標系 | 時系 (同期) |
|---------|----------|-------------------------|
| GPS | WGS84 | GPST (UTC (USNO)) |
| GLONASS | PZ-90 | GLONASS time (UTC (SU)) |
| COMPASS | CGCS2000 | BDT (UTC (SCL)) |
| Galileo | GTRF | GST (UTC (GST)) |
| IRNSS | WGS84 | IRNWT |
| QZSS | JGS | QZST (UTC (NICT)) |

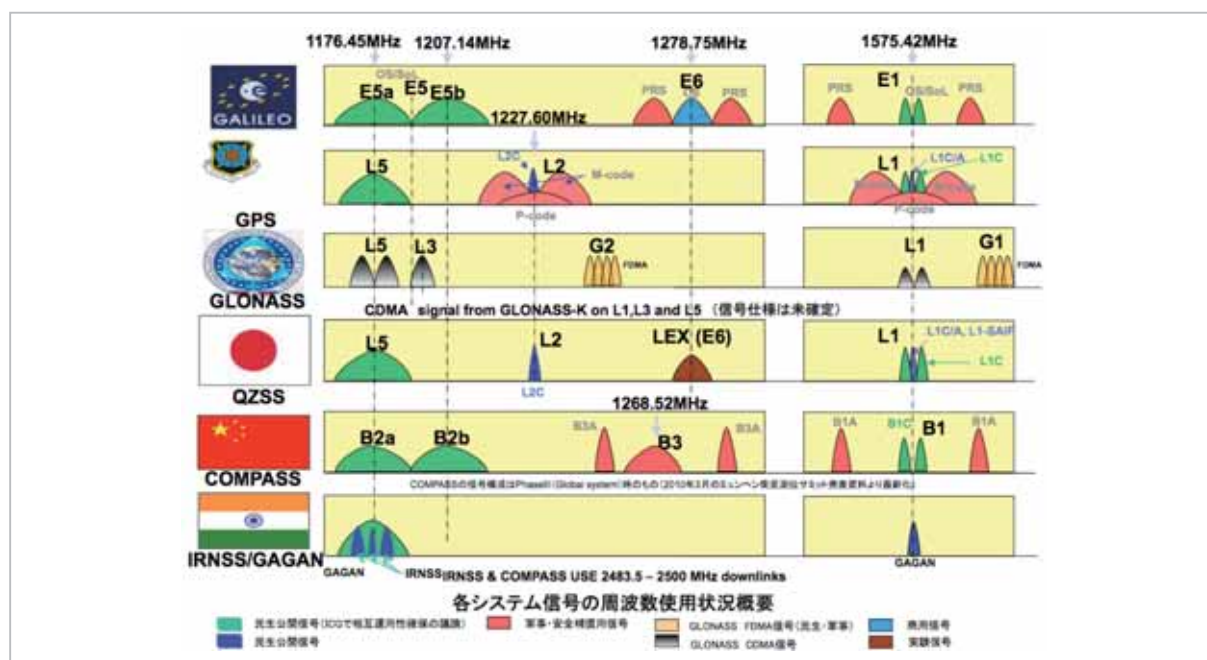


図 3 各 GNSS のスペクトラム比較図 [11]

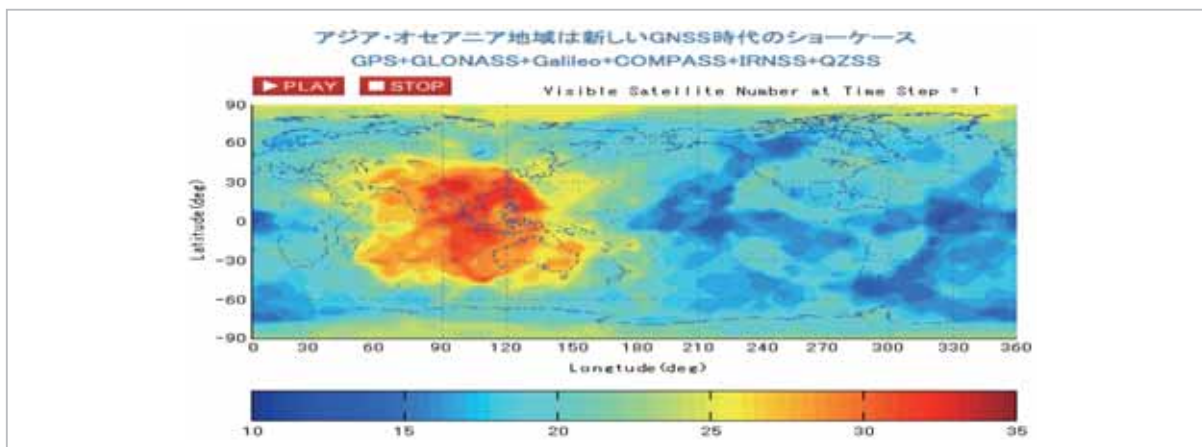


図4 2020年頃に見込まれる仰角70°以上の衛星可視数^[12]

波数や変調方式および軌道等の異なるGNSS群をMulti-GNSSとして実際に利用するには、データフォーマットの統一や技術情報の公開など国際的な協力が欠かせない。そこでいち早く測位衛星の可視数が増大するアジア経度帯において、この新しい概念的なインフラをどのように利用していくべきか、実証実験を通じた「ショーケース」としてのキャンペーン実験の呼びかけを目的として、日本やオーストラリアを中心にMulti-GNSS Asia (MGA)が2009年に設立された^[12]。

2.1 運営委員会と関連機関

東京海洋大学 安田明生教授、ニューサウスウェールズ大学 Chris Rizos 教授を筆頭に日本のJAXAなどが中心となり各地域のGNSS関連機関やIGSらが関連機関として名を連ねている。以下に主な関連機関を示しておく。

- アジア・太平洋地域宇宙機関会議 (APRSAF)
<http://www.aprsaf.org>
- GPS 民生利用連絡会議 (CGSIC)
<http://www.navcen.uscg.gov/cgsic/>
- 欧州宇宙機関 (ESA)
<http://www.esa.int/esaNA>
- タイ地理情報・宇宙技術開発機構 (GISTDA)
http://theos.gistda.or.th/home_e.html
- ロシアグローバル衛星航行システム (GLONASS)
<http://www.glonass-ianc.rsa.ru/pls/htmlldb/f?p=202:1>

- グローバル衛星航法システムに関する国際委員会 (ICG)
<http://www.oosa.unvienna.org/oosa/en/SAP/gnss/icg.html>
- 国際GNSS事業 (IGS)
<http://igsceb.jpl.nasa.gov>
- JAXA 準天頂衛星システム (QZSS)
http://www.jaxa.jp/projects/sat/qzss/index_e.html
- 衛星測位利用推進センター (SPAC)
<http://www.eiseisokui.or.jp/en/>

2.2 MGAの活動領域

MGAでは主に3つの活動軸に沿った展開を予定している。

1. インフラとしての技術基盤の策定
2. システムの利用開発や実証
3. これらの成果の積極的なコラボレーションや情報交換を行う場の提供など
それぞれの具体例を以下にまとめる。

インフラ構築: クロックオフセット推定、時刻オフセットバイアス、電離層、対流圏遅延情報の生成など

利用開発と実証: 災害管理、高度道路交通システム、精密測位、位置情報サービス、これらの相互運用

ワークショップ組織: 年に1度程度の共同プロジェクトの議論、成果発表などを執り行うワークショップ組織である。

ワークショップについては2010年1月に第1回目の会合であるFirst Asia Oceania wok shopがタイ/バンコクで開催され参加機関の意思統一が図られた。第2回目の会議がオーストラリア/メルボルンで11月に開催される予定で、具体的な観測ネットワーク構築に向けた交流や情報交換が行われることが予想される。MGAでは上に挙げた3つの活動を次の2段階にわけて遂行するよう計画している。

2011年～2012年<実験第1段階>

マルチGNSS衛星が十分に利用可能となる前の、GPSとQZSSを利用した実験。電離圏と対流圏遅延補正情報を生成するために、既存のGPSの地域ネットワークを利用。地域用の誤差補正用メッセージを送信。

2012年～2014年<実験第2段階>

マルチGNSS衛星が十分に利用可能となった後、利用実証実験はQZSS以外のGNSSを利用したものに拡大。

2010年から実験第1段階にいたるまでの期間に、MGAはマルチGNSSをモニタするネットワークを構築する計画である。例えば多周波受信機を開発してキャンペーン実験の参加者に配布するなどが計画されているという。

3 GNSS、Multi-GNSSの具体的な利用例

ここではMulti-GNSSを利用した具体的なアプリケーションとして構想あるいは既の実証されているものをいくつか紹介する。またNICTの光・時空標準グループとして提案しているMulti-GNSSに関連する実験について最後に紹介する。

3.1 カーナビ、歩行者支援

GPSを代表するアプリケーションとしてはカーナビがあるが、可視衛星数が増えると測位精度と可視性・信頼性が向上することが期待される。カーナビでは～3m程度の精度があれば道路の区別はできるが、歩道のような狭い道でのナビゲーションは1m以内の精度が要求される。1m以内の精度を達成するためには各種誤差の影響をでき

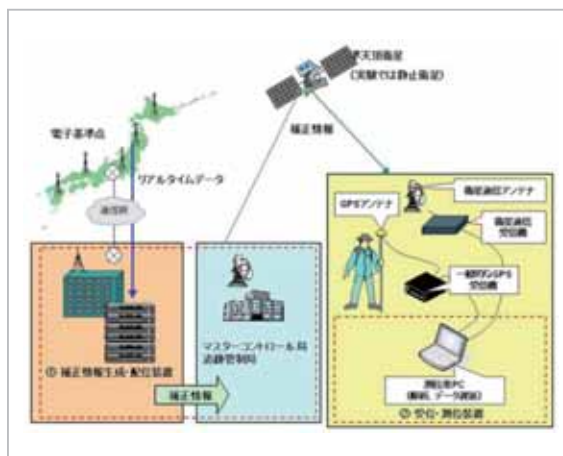


図5 電子基準点を用いた遅延量補正システム [14]

る限り除く必要があるが、汎用の1周波受信機では日々変動の大きな電離圏の影響を取り除くことは技術的に難しい。準天頂衛星では電子航法研究所や国土地理院による参照点を利用する電離圏補正情報の放送実験 [13] などが計画されており高精度な測位が一般的に使われるようになることが期待されている (図5) [14]。歩道での歩行者ナビゲーションが、いつでも安定に実現すれば、障害者や高齢者への支援利用などさまざまなサービスが考えられる。衛星測位による生活者への地理情報サービスの拡大は日本では経済産業省が掲げる政策プランである「G空間プロジェクト」[15]の一環として経済効果も期待されている。

3.2 精密農法

精密な測位がいつでも可能になると、機械などの遠隔操作も自動的に行うことができるようになる。特に農業において、広大な敷地のなかで領域ごとに異なる処理を施したい場合に、衛星画像を利用しての土地の監視、作業計画を作成するなど活用されることが期待される。また土地の色画像から土地の性質などが解析され、それぞれの土地に適した処理を決定し、位置情報を利用して土地の耕作などを遠隔操作することも可能となる (図6) [16]。

3.3 土木建築

土木建築においても、小松建設など大規模な建設を手がける企業では、すでに衛星測位を利用した作業計画の作成や遠隔操作、自動掘削などが広

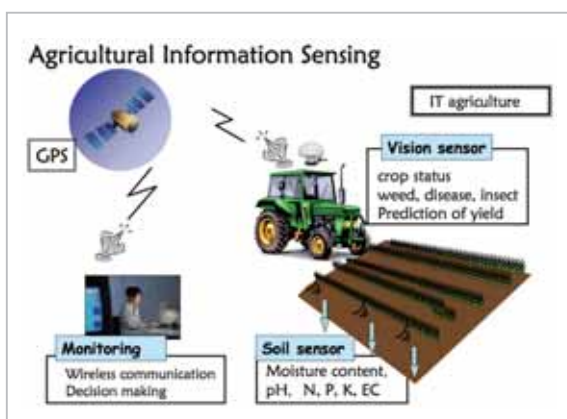


図6 衛星測位を利用した自動耕作システムイメージ [15]

用されている。このように大規模な建設において衛星から得られる位置情報を駆使することは「情報化施工」と呼ばれ一般的になりつつあり、日本の誇る技術の1つとなっている。ただし山岳地やビルの谷間での土地開発や建築では衛星の見通しが十分でなく、衛星可視数が減ってしまうという問題がある。特に夏の昼間に衛星測位ができないケースが多くあり、作業自体が中断してしまうこともあるという [17]。日本においては準天頂衛星の打ち上げにより、常時天頂付近に1つは衛星が確保できるようになり、また可視衛星数も増大が見込まれることから、将来的には安定なインフラとして機能することが期待される。

3.4 防災監視

特に中国のような広大な土地を有する国家では災害時にその場所や規模をリアルタイムに把握することが大変困難である。中国では衛星測位の防災への利用を緊急の課題としており、独自の衛星測位システム Compass/Beidou-2 を鋭意構築している。Compass/Beidou-2 の特徴は通信機能を備えた静止衛星を3機組み入れていることで、これにより常時見える衛星を増やしている。また災害時等に必須となる通信機能を持つより強固なシステムである。駅の密度が少ない長距離の鉄道や、巨大なダム建設などの場面でも無人の測位システムを大量に展開して、事故や災害の監視を行うシステムが利用されている [18]。

山岳地帯が多く、見通しの悪い土地を多く持つ日本において、準天頂衛星が通信機能を持って

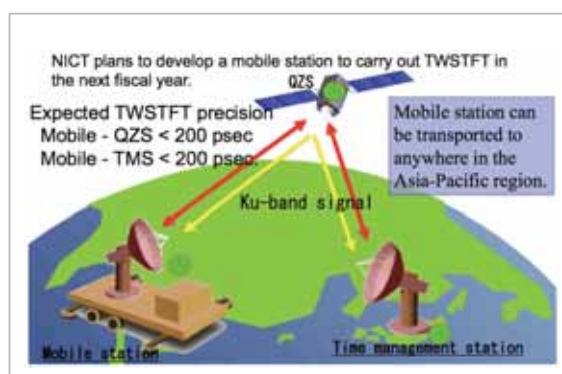


図7 可搬局を用いた長基線での時刻比較実験 [19]

ないのは残念なことであるが、通信機能を持つ静止衛星は既にいくつかあるので、これらを測位システムの一部とする考え方もある。

3.5 Multi-GNSS の実験提案の紹介

First Asia Oceania work shop には NICT の光・時空標準グループからも参加し、QZSS を用いた Multi-GNSS の枠組みでの各種実験の提案を行ってきたので紹介する [19]。

3.5.1 可搬局を用いた時刻比較実験

NICT では QZSS に搭載された時刻管理システム (TTS) を仲介とした高精度時刻比較実験を行う計画であるが、固定局は小金井と沖縄の2局のみである。そこで、任意の場所で時刻比較実験を行うため、地上時刻比較システムの可搬局を開発予定である。可搬局はトレーラー型の車両で運ぶことが出来るため、準天頂衛星が見える場所であれば基本的にどこへでも可搬局を運んで時刻比較実験を行うことができる (図7)。ただし、行き先には安定して動く原子時計が必要となる。長基線での時刻比較では、2局間の電離圏状態の違いや仰角が低い場合の対流圏の影響などが誤差を大きくする原因となるが、地球上の遠く離れた地点間で高精度な時刻比較が行えると、重力場の違いによる相対論効果など様々な物理効果を観測できる可能性がある [20]。

3.5.2 LEX 信号を用いた時刻供給実験

NICT では L 帯の実験用信号である LEX 信号を用いた実験も行う。実験は JAXA や国土地理院などの研究機関と交代で実験期間が割当てられ、専用のメッセージ ID も割り当てられる。NICT の

IDは21番で、独自のフォーマットを策定し、専用のLEX受信機を開発する。LEX信号は広帯域でチップレートが高いことが特徴である。実験では航法メッセージに自由に情報を載せることができるが、NICTではこれを用いて時刻供給実験を行う計画である。ただしLEX信号はL帯なので電離圏の影響が大きい。LEX受信機を用いた実験では、1周波ユーザーに向けた時刻供給という前提で行う計画であり、電離圏遅延補正についてはNICTの宇宙環境計測グループが開発した電離圏遅延量モデルを用いる予定である。

3.5.3 ソフトウェアGNSS受信機の開発

GPSの近代化及びMulti-GNSSの時代を迎え、各国が独自の測位信号を開発し、放送を開始している。衛星測位には主にハードウェア受信機が用いられるが、ハードウェア受信機では新しい周波数に対応しにくいという問題がある。一方、昨今ではソフトウェア受信機が盛んに研究、開発されており、安価に望みの信号に対応させることができるようになってきている。ソフトウェア受信機で行う際の計算のボトルネックは大量データの相互相関処理であるが、これも最近開発の進んでいる計算用途のGPUを用いれば極めて高速に処理を行うことができる。そこでGPUを搭載した多周波対応のソフトウェア受信機を安価に開発することで、柔軟なGNSS測位を実現し、多数の観測点に展開

するなどが考えられる。NICTではVLBIサンブラなど信号のサンプリング技術は独自の開発を行ってきた経緯があり、ソフトウェア受信機開発の技術には親しみがある。多周波に対応するハードウェア受信機はまだ大変高価であるため、電離圏観測の多点展開などの用途に役立つと期待される。

4 まとめ

本稿では近年急速に構築が進められつつある複数のGNSSと日本で初めての衛星測位システムであるQZSSについてそれぞれの特徴と進捗状態について報告を行った。

また複数のGNSSを1つの巨大なインフラと見立てるMulti-GNSSをいう考え方を紹介し、Multi-GNSSとしてどんな利用が考えられ、また実現されているのかについて紹介した。特に日本を含むアジア経度帯では世界に先駆けて衛星可視数が増大する見込みであり、いち早くこれらの技術を利用することができるようになると見込まれる。またQZSSの時刻管理系を管理する機関として、NICTが計画している実験の紹介も行った。国内に世界でも有数のGPS観測網をもつ日本において、今後のGNSS利用の活発化や技術開発でのリーダーシップを期待したい。

参考文献

- 1 IS-GPS-200, <http://www.gps.gov/technical/icwg/>
- 2 Interface control document GLONASS, <http://www.glonass-ianc.rsa.ru/pls/htmlldb/f?p=202:1:2443885593045011::NO>
- 3 C. Chong, "Status of COMPASS/BeiDou Development," Stanford's 2009 PNT Challenges and Opportunities Symposium, October 21–22, 2009.
- 4 Galileo OS SIS ICD (Open service Signal-In-Space Interface Control) http://ec.europa.eu/enterprise/policies/satnav/galileo/open-service/index_en.htm
- 5 B. Krishna, "IRNSS-An overview," First Asia Oceania Regional Workshop on GNSS, Overviews of GNSS Systems.
- 6 Y. Hatanaka et al., "Development of a GPS Augmentation Technique Utilizing QZSS Broadcasting," International Symposium on GPS/GNSS 2008 in Tokyo.
- 7 N. Neelakantan, "Overview of the Timing system planned for IRNSS," ICG-5, 18–22, October 2010 in Torino, Italy.
- 8 浜真一, 高橋靖宏, 木村和宏, 伊東宏之, 雨谷純, "準天頂衛星計画," 情報通信研究機構季報, 本特集号, 5-3, 2010.

- 9 IS-QZSS, <http://qzss.jaxa.jp/is-qzss/index.html>
- 10 ICG, <http://www.oosa.unvienna.org/oosa/en/SAP/gnss/icg.html>
- 11 S. Kogure, "GNSS 最新動向 (ICG における議論の紹介)," QZSS ユーザーミーティング, 東京海洋大学, March 9 2009.
- 12 Multi-GNSS Asia, <http://www.multignss.asia/jp/index.html>
- 13 S. Kawamoto, "GPS EARTH OBSERVATION NETWORK SYSTEM (GEONET)," First Asia Oceania Regional Workshop on GNSS, A-2.
- 14 矢来, "準天頂衛星「みちびき」による高精度測位補正技術," 第 39 回国土地理院報告会, 新宿明治安田生命ホール, 2010.
- 15 G 空間プロジェクト, "<http://www.meti.go.jp/press/20080703007/20080703007.html>"
- 16 T. Kataoka, "Application of Precision Farming Technology for Oil Crop Cultivation in the People's Republic of China", First Asia Oceania Regional Workshop on GNSS, B-3.
- 17 T. Kouda, "GNSS utilization status and challenges for construction machinery," First Asia Oceania Regional Workshop on GNSS, B-5.
- 18 W. Yan, "The Innovative Applications Of Compass Navigation System In Transportation Logistics With Environmental Monitoring," First Asia Oceania Regional Workshop on GNSS, Overviews of GNSS Systems.
- 19 M. Nakamura et al., "Time dissemination experiment using the QZSS LEX signal and suggestions for other applications," First Asia Oceania Regional Workshop on GNSS, F-2.
- 20 N. Ashby, "相対論と GPS," パリティ, 2003 年 6 月号.



なかむら まほ
中村真帆

新世代ネットワーク研究センター
光・時空標準グループ専攻研究員
博士 (工学)
超高層大気、情報工学



はま しんいち
浜 真一

新世代ネットワーク研究センター
光・時空標準グループ研究マネージャー
衛星測位システム、衛星通信