

準天頂衛星システム (QZSS) の 測位補強サービスとその利用について

一般財団法人衛星測位利用推進センター
専務理事・博士 (工学) 三神 泉

1. はじめに

日本版GPSといえば判り易い準天頂衛星「みちびき」(Quasi-Zenith Satellite System : QZSS)は、2号機が2017年6月1日、3号機が8月17日、4号機が10月10日(図1)の3連続で種子島宇宙センターから成功裏に打ち上げられ、いよいよ今年4月より4機体制の本格的な実用サービスが開始される計画である。一般財団法人衛星測位利用推進センター (SPAC)は、QZSS利用実証の環境整備のため、文部科学省からの委託において、CMAS (Centi-Meter class Augmentation System : 図2)と呼ばれる、cm級精度の測位精度を実現する測位補強信号生成システムを、2010年度に衛星から放送するタイプとして世界で初めて開発

し、同年9月に打上げられた「みちびき」初号機のL6 (1.2GHz)帯に載せて配信し、多くの利用実証試験を取りまとめて来た。測位補強信号とは、測位結果を悪化させる測位衛星そのものが持つ誤差、及び測位衛星からの電波が到来する過程の自然環境で発生する誤差を補正するための情報であり、スマホやカーナビが行う測位手法で発生する数mから10m程度の誤差を大きく改善することができる。CMASを用い2015年度までにSPACが単独で支援した実証試験の件数は115件、それ以降、準天頂衛星システムサービス株式会社 (QSS)との連携において支援した件数は42件に上る。本紙では、これらの経験に基づき、世界の測位衛星システム (GNSS)のサービスの状況、



図1 みちびき4号機の打上げシーン
http://h2a.mhi.co.jp/library/gallery/h2a_f36/index.html



図2 補強情報生成システムCMAS

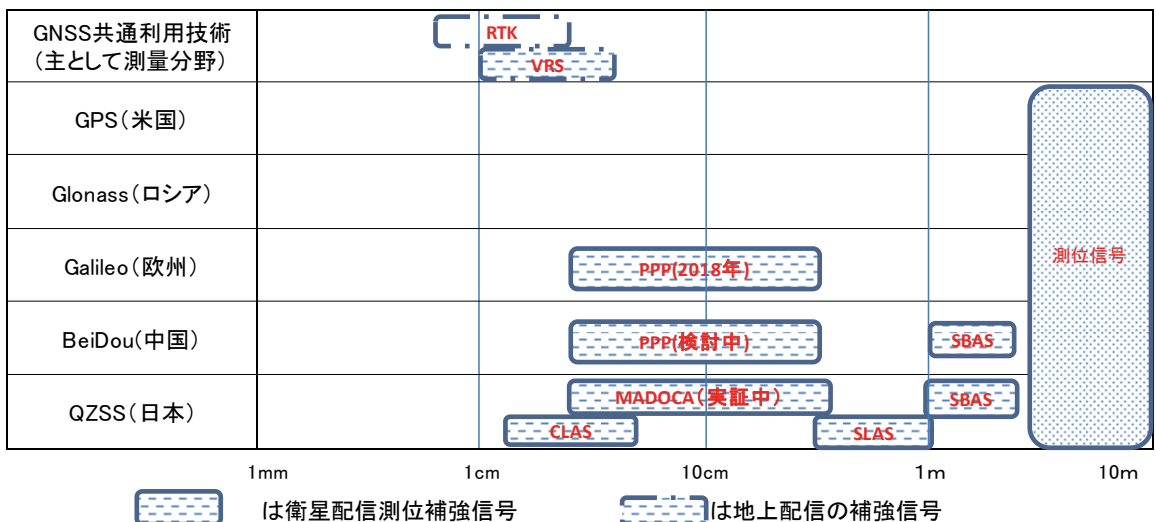
QZSSのサービスの特徴や利用方法、及びSPACが独自技術で取り組んでいるQZSSの利用拡大に関する現況等を紹介する。

2. 世界のGNSSサービスの現況

世界のGNSSサービスには、地球のほぼ全域に対するグローバルサービスと、主に自国を含む限られた領域に対するリージョナルサービスの2種類がある。米国GPS（31機）、ロシアGLONASS（24機）、欧州Galileo（14機）、中国BeiDou（7機）が前者であり、日本から豪州までのアジア太平洋地域をカバーする我が国のQZSS（4機）、インドのNavIC（現在7機）、中国BeiDou（傾斜対地同期軌道衛星7機、静止軌道衛星6機）などがあり、それぞれ互換性のあるサービスと独自サービスを展開中、もしくは準備中である。（衛星数は「みちびき公式サイト（内閣府）」から引用）。これらの測位衛星の総数は2022年までには130機を超えと言われており、日本上空を通過する全てのGNSSは、天頂角 ± 45 度の範囲にほぼ

常時10機以上の測位衛星が見えることとなる。他国の主な測位衛星（静止衛星、及び傾斜対地同期軌道衛星を除く）は、水平線から昇り可視範囲に入った後時々刻々と位置を変えて数時間で水平線に沈んで行く軌道を飛翔するが、QZSS（1号機、2号機、4号機）は、日本上空の天頂付近に約8時間滞留する準天頂衛星軌道を使用しており、各衛星が交替で天頂付近に現れるため24時間常に頭上に最低1機が見えることとなる。このため、他のGNSSと併せて測位することにより、ビルの谷間における測位が可能になるという特長を持つ。これ以外にもQZSSが実施するサービスのユニークさを示すため、図3に、測位精度面における各国サービスの現況をまとめた。

図に示すように、我が国のQZSSは最も多くの測位補強サービスを行い、主として測量・農機・建機・ロボットに適用を図るcm級、車の自動運転等に利用可能な20～30cm級、ナビや様々な用途に利用可能な数10cm～m



RTK: Real Time Kinematic、VRS: Virtual Reference Station、PPP: Preciese Point Positioning

SBAS: Satellite-Based Augmentation System、MADOCA: Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis

CLAS: Centimeter Level Augmentation Service、SLAS: Sub-meter Level augmentation Service

図3 各国のGNSSにおける測位精度のイメージ（SPAC調べ）

級、主として航空航法のためのm～数mという、屋外での測位精度面のシームレス化が実現できるものである。欧州のGalileoは、2018年中に我が国のMADCOCAと類似性が高いPPPと呼ばれる測位補強信号サービスをグローバルに無償で提供する検討を始めており、全世界で衛星配信の補強信号を使用した車、農機、建機等の自動運転に貢献するものと予想する。中国のBeiDouでもデシメートル級測位補強サービスを検討中であり、この数年で測位補強信号を利用する便利環境が一気に整う様相を呈している。また、QZSS独特のサービスと言えるCLASは、cm級（オープンスカイ環境）の測位精度を実現するものであり、国土院が管理する電子基準点網の情報を用いて補強信号を生成しL6帯でQZSSから配信する、日本が世界に先駆けて実現するものである。表1に、QZSSの全サービスを紹介する。QZSSには、衛星測位サービスに加え、災害・危機発生時に緊急メッセージを衛星からユーザに対して直接配信する2つのサービスが含まれている。L1S帯で放送され、携帯端末が受信可能な災害・危機管理通報サービスと、S帯でユーザと双方向の通信が可能な

専用送受信器を利用する衛星安否確認サービス（Q-ANPI）である。前者は、日本、オーストラリアを含むアジア太平洋地域（インド、アラスカも可能）に広く届くサービスであり、後者は、日本国内に対するサービスである。このように、QZSSは測位における我が国のインフラの機能を果たすだけでなく、地震や津波等の大規模災害の被害軽減に向けた重要な役割を果たすことが判る。

3. 測位補強サービスの受信

GNSSの測位信号を受信して測位する場合の誤差が図3のように数mあるいはそれ以上となることを、カーナビやスマホナビで体験された方が多くおられるものと予想する。この誤差要因には、ビルや地面からの電波の反射による（マルチパス）成分と、測位衛星が持つ誤差と電波の到来経路において発生する誤差の複合による成分との2つが含まれる。測位補強サービスとは、後者の誤差成分を補正するものであり、簡単にその原理を紹介する。

測位衛星が持つ誤差とは、衛星搭載のクロック誤差、衛星の姿勢や軌道の誤差、衛星

表1 QZSSの全サービス（2018年1月現在）

信号名称	中心周波数	初号機	2、4号機	3号機	配信サービス	
		ブロックIQ	ブロックIIQ	ブロックIIG	用途	内容・特徴
		準天頂軌道 1機	準天頂軌道 2機	静止軌道 1機		
L1C/A	1575.42MHz	◎	◎	◎	衛星測位	現在測位に広く使われている測距信号
L1C		◎	◎	◎	衛星測位	L1C/Aより高精度化した測距信号で今年から適用
L1S		◎	◎	◎	サブメータ級測位補強 災害・危機管理通報	SLAS補強配信、日本全国 緊急メッセージ放送
L1Sb		-	-	◎ 2020年頃配信予定	m級測位補強	SBAS（航空機ナビゲーション用）補強信号
L2C	1227.60MHz	◎	◎	◎	衛星測位	2周波受信機の場合に現在使われる測距信号
L5	1176.45MHz	◎	◎	◎	衛星測位	2周波受信機で将来用途が広がる測距信号
L5S		-	◎	◎	m級測位補強	2周波SBAS技術実証、日本周辺
L6D	1278.75MHz	◎	◎	◎	cm級測位補強	CLAS配信、日本全国
L6E		-	◎	◎	cm～デシm級測位補強	MADCOCA技術実証、日本～アジア太平洋地域
Sバンド	2GHz	-	-	◎	衛星安否確認	緊急メッセージ放送、双方向通信

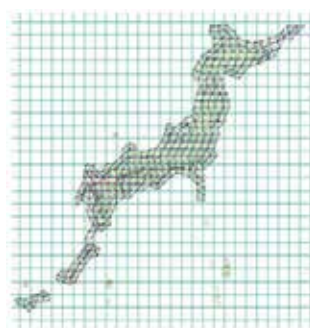
出典：みちびきウェブサイト（<http://qzss.go.jp/technical/system/pnt/>）の情報が追記

内で測位信号を放射する位置の誤差（バイアス誤差）である。地上の測位は三角測量で良いが、衛星測位でユーザ位置（ x 、 y 、 z ）3つの結果を得るためには、複数の測位衛星までの正確な距離に加え、衛星とユーザ受信機の時計の差や、衛星が毎秒1km～2kmという高速で地上に対して移動するため発生する相対論的な時間差も考慮しなければならない。衛星の姿勢や軌道の誤差に関しては、ユーザから見た方向の電波の放射位置のずれが直接的に距離の誤差になることは判りやすい。一方で、衛星とユーザを結ぶ視線軸周りの衛星の回転が、測距信号に円偏波を用いているため電波の位相の進みや遅れになるため最終的に距離誤差を発生させることは気がつきにく

い。電波の到来経路発生する誤差には、電離層と対流圏による遅延がある。前者は電離層の電子と電波の相互作用により電波の速度が遅くなるのが原因であり、最も大きな誤差を示すと共に時間的、空間的な変動が大きい。後者は、大気の屈折率により電波の速度が遅延する誤差であり、電離層に比べて小さくかつ時間変動も少ない。

これらの誤差を衛星ごとに推定し、全ての誤差補正値を配信するサービスがCLASであり、衛星の誤差補正値を配信するのがMDOCA及びPPPである。図4に、CLASの誤差補正値の配信方法のコンセプトを示す。

図4左が日本全域をカバーするサービス領域とグリッドと呼ばれる点の配置イメージ



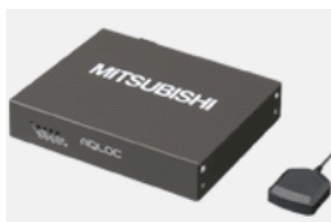
	第1網	第2網	第12網
グリッドの間隔	～60km	～60km	～60km
衛星固有の誤差補正値	全網に共通の補正値を配信			
電離層・対流圏補正値	グリッド毎に最適な異なる補正値を配信	グリッド毎に最適な異なる補正値を配信	グリッド毎に最適な異なる補正値を配信
グリッド配置イメージ (点がそれぞれのグリッド)			

M. Miya, et al., "Centimeter Level Augmentation Service (CLAS) in Japanese Quasi-Zenith Satellite System, Its Preliminary Design and Plan," ION GNSS+ 2014, 8-12 September 2014, Tampa, Florida, U.S.A.

図4 CLASのサービス領域と補正値配信位置の概略イメージ



(株)コア MADOCA用デコーダ
www.core.co.jp/product/gnss/outline/usb_lex.html



三菱電機(株) CLAS用AQLC
www.mitsubishielectric.co.jp/news/2017/pdf/1129.pdf



マゼランシステムズジャパン(株)
 CLAS・MADOCA用受信機ボード
www.magellan.jp/item/index6.html

図5 L6帯の補強信号用受信機の例

である。グリッドとは約60km間隔で定義される点であり、電離層と対流圏の誤差補正值がその周囲で殆どそのまま適用可能なことを意味する。図4右は、全ての補正值の各グリッドに対する配信方法を示しており、沖縄付近から北海道付近までを12のサービス領域（網と呼ぶ）に分割して全網共通な衛星固有の誤差補正值を配信することに加え、網ごとに分けたグリッドに対し異なる補正值が配信されるという概念を示す。cm級精度の安定的なサービスの実現と精度改善のため、CLASが日進月歩で進化するものと考えられ、図4も今後変化する可能性がある。

CLASやMADOCAをQZSSから受信し所望の測位精度を達成するには、それぞれ専用の受信機が必要となる。図5に現在発表されている受信機を紹介する。測位補強サービスの利用を加速的に拡大するためには、より低価格で小型な多くの受信機が市場に出回る必要があり、SPACはその為の支援活動や開発を積極的に実施している。

4. 測位補強情報配信事業の実例

米国Trimble Inc.（以下トリンブル社）は、RTK受信機やVRSサービス等の開拓者であり、測量・ナビゲーション分野で最も有名な企業の1つである。トリンブル社は、2017年にCatalyst DA1という\$500のアンテナの販売と、Software Defined Receiver（SDR：ソフトウェア受信機）を用いるサービスを開始した。このサービスの概要を、公開された情報を元にSPACが推定した内容を加えて説明する。図6に測量用と考えられる受信機構成を示し図7にそのブロック図を示す。

図6に示すアンテナは口径13cm、アンテナの裏面に受信機が一体型で組み込まれ、デジタルアンテナと呼ばれる。下部に設置された受信・表示機はアンドロイドOSのスマホまたはタブレット端末である。図7に示すように、デジタルアンテナ内の受信機には搬送波受信機と補強信号用受信機が内蔵されているものと考えられ、衛星配信される測位補強サービスの場合には、補強信号を受信して補正值に変換し、搬送波受信機で観測した観測データと共にUSBインターフェースで出力す



図6 受信機構成

<https://catalyst.trimble.com/howitworks.html>

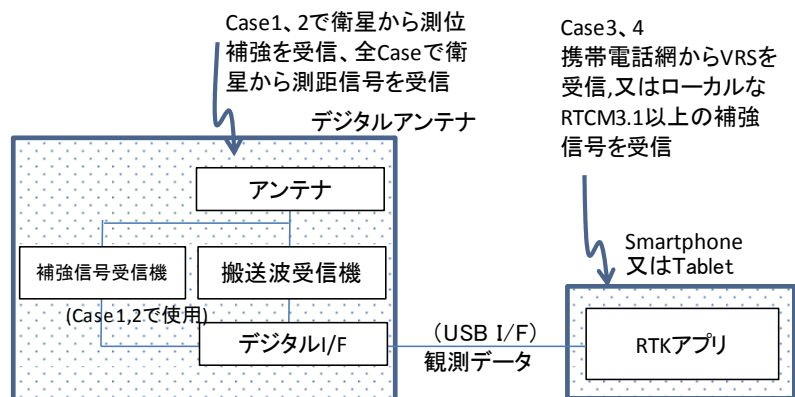


図7 受信機ブロック図（SPAC推定内容）

る。アンドロイド端末には測位計算アプリをダウンロードし、端末内で測位計算を実行して各種の表示がなされる仕組みと考えられる。地上配信の測位補強サービスの場合は、アンドロイド端末側が携帯電話網から受信する測位補強情報（VRS等）とデジタルアンテナから受信する観測データとを組み合わせたRTK演算を実行するものと見る。前者の衛星配信においては、その測位精度から衛星配信される補強情報はPPPと推定される。表3は、これらのサービスに対する課金を示す。測量用途が主と考えられるCase4においては、現在は100万円以上する測量機に対するVRSサービスの課金（日本では年間24万円程度／ユーザ）が一般的であるため、アンドロイド

表2 測位補強配信サービスの現状(米国事例)

	Case1	Case2	Case3	Case4
精度*	1m	30~75cm	10cm	1~2cm
年間費用	\$480	\$1,430	\$2,400	\$4,100

*：マルチパス等のない最良条件下での精度
<http://www.esri.com/~media/Files/Pdfs/partners/hardware/trimble/Catalyst.pdf>

携帯端末を利用する低コスト化競争は既に始まったと言える。また、SDRは米国航法学会（ION）にてデファクトとして標準化されつつある。

5. QZSS測位補強情報の利用方法

QZSS測位補強情報の利用方法は、そのサービスが無料なことを利用して価格競争力を付与するとともに、世界にも進出可能なものでなければならない。SPACは、CLASやMADOCAの補強情報から既存のRTK測量機を駆動させるL6アダプタという概念を作り、その基本S/W（現段階ではCLAS対応）を株式会社コアの協力を得て開発に成功した。図8にそのブロック図を示す。

L6アダプタは、準天頂衛星の測位補強サービスの享受が困難と考えられていた既存のRTK受信機に対してサービスを利用可能にする受信機であり、国内だけで約2万台、世界では100万台を超えると考えられる既存RTK受信機のQZSS活用に利するものと自負している。衛星測位で得られる位置座標が我が国の地図座標とは異なるという問題に対処する

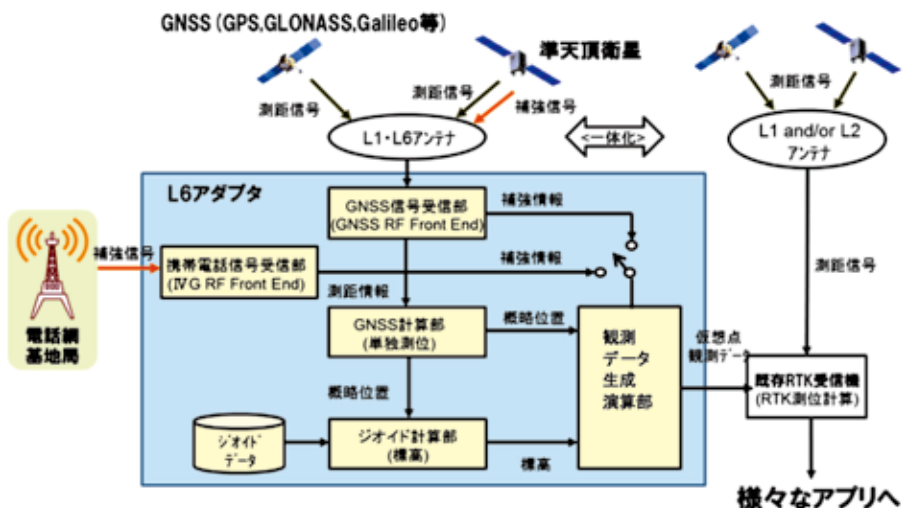


図8 L6アダプタブロック図

ため、CLAS用のL6アダプタには内部に地殻変動補正演算部を設けている。内閣府はCLASの地上配信を認めていることから、L6アダプタは電話網基地局から配信される補強信号を受信する機能も備えている。測位補強情報の地上配信が、衛星測位サービスの信頼性向上に大きく貢献することに異論を挟む余地はない。従って、測位補強情報の品質や測位精度保証等の付加価値情報を含む地上配信にL6アダプタ、あるいはそのソフトをダウンロードするスマホやタブレット端末を組み合わせ、一般ユーザがQZSSサービスを直接利用する市場が開拓できれば、QZSS利用の加速度的な拡大と受信機の大幅な低コスト化に繋がると考え、SPACは事業化を目指す協力を募っている。

6. 終わりに

QZSSは、我が国が抱える少子高齢化等の諸問題に対する解を作る1つの手段であるとともに、より便利で豊かな地理空間情報高度利用社会（G空間社会）の創出を支える重要なインフラである。CLAS等の根幹である衛星からの高精度測位サービスがISO18197として制定されたのは2015年であるが、世界の衛星測位サービスの変化や標準化の動向に対応するには、産業界がQZSSのサービスを上手にかつ徹底的に利用することはもとより、QZSSから派生するさまざまな技術やサービスに対し更なる標準化活動の展開が肝要であろう。SPACは、高精度測位衛星サービス利用推進協議会（QBIC）の牽引と、一般財団法人日本航空宇宙工業会（SJAC）殿と協調したISO標準化活動の積極的な展開により、QZSSの利用を世界に広げるために邁進中である。