5. GNSS 解析ソフトウェアのマルチ GNSS 対応

Development of Multi-GNSS Analysis Software for Precise Surveying

古屋 智秋*・酒井 和紀*・万所 求*・辻 宏道*
宮川 康平*・畑中 雄樹*・宗包 浩志*・川元 智司*

*Tomoaki FURUYA, Kazuki SAKAI, Motomu MANDOKORO
Hiromichi TSUJI, Kohei MIYAGAWA, Yuki HATANAKA
Hiroshi MUNEKANE and Satoshi KAWAMOTO*

Abstract : Although multiple GNSS constellations such as GPS, GLONASS, and Galileo are now being realized, there are few analysis software for precise surveying that can handle multi-GNSS data including Japanese Quasi Zenith Satellite System (QZSS). The Geospatial Information Authority of Japan (GSI) launched a 4-year project from 2011 to develop and standardize a precise positioning technique that can fully utilize the potential of multi-GNSS data including QZSS for surveys in urban canyons or rapid detection of crustal deformation after large earthquakes. After a brief review of general GNSS software packages, this paper focuses on the status and findings of GSI's multi-GNSS project.

1. はじめに

カーナビ等で幅広く利用されている米国の GPS の近代化をはじめ、日本の準天頂衛星（以下、「QZSS」という。）、ロシアの GLONASS、欧州連合の Galileo などの整備・運用が着実に進められ、各衛星測位システム（以下、「衛星系」という。）の間の互換性や相互運用性についても調整が進んでいる。こうした中、複数の衛星系を組み合わせることで一体のものとして利用することにより、ビル街や山間部といった上空視界が限られ GPS だけでは衛星数が不足して測位できない地域でも、衛星測位が可能になることが期待される。

しかし、測量や地殻変動監視に必要な cm 級の精密測位において、複数の衛星系のデータを組み合わせ、測位精度の安定性・信頼性を確保しつつ迅速に測位解を得るためには、衛星系の仕様や信号特性により生じる様々な系統誤差を適切に補正することが必要である。

本稿では、まず一般的な GNSS 解析ソフトウェアの現状を述べた後、国土地理院が進めているマルチ GNSS データを統合利用する技術開発プロジェクト

の成果に基づき、各衛星系を組み合わせる際に考慮すべきバイアスやその補正方法について述べる。

2. 解析ソフトウェアの GNSS 対応状況

GNSS データを処理する解析ソフトウェアには、測

表-1 主な解析ソフトウェアの GNSS 対応状況。各ソフトウェアの HP 又は国土地理院登録機種一覧簿により調査（平成25年8月現在）

開発者		ソフトウェア名	対応する衛星系
測量用	トプコン	GNSS-PRO v7.43	GPS, GLONASS
	ニコン・トリニプル	TBC-Japan Survey Lite v1.4.1.0	GPS, GLONASS
	Leica	Geo Office v8.3	GPS, GLONASS
	JAVAD	Justin Ver. 1.102.136.1	GPS, GLONASS
学術用	Bern 大学	Bernese version 5.2	GPS, GLONASS, Galileo
	MIT, Scripps 海洋研究所	GAMIT/GLOBK Release 10.5	GPS
	JPL	GIPSY-OASIS II	GPS, GLONASS
	東京海洋大学 (高須知二氏)	RTKLIB ver. 2.4.2	GPS, QZSS, GLONASS, Galileo

*国土地理院

量機器メーカーが受信機とともに提供するソフトウェアの他に大学や研究機関が開発した、BerneseやGAMIT等の汎用の学術ソフトウェアがある。主な解析ソフトウェアのGNSS対応状況を表-1に示す。

いずれもGPSに加えGLONASSへの対応は進んでいるが、QZSSやGalileo等の新しい衛星系への対応はまだ十分ではない。

平成25年4月1日から施行された公共測量の「作業規程の準則」では、新たにQZSSをGPSの補完衛星として利用する方式を可能とした（国土地理院企画部技術管理課，2013）。この時点でQZSSを処理できる解析ソフトウェアはRTKLIBのみであったが、測量の実務者にとっては学術用のRTKLIBでは公共測量で用いられるGNSS測量手簿や記簿に必要なパラメータの出力ができないという問題がある。

また、表-1の解析ソフトウェアは、RTKLIBでQZSSとGPSを解析する場合を除き、同じ衛星系間でのみ位相差を取る解析（以下、「混合解析」という。）を行っている。この場合、複数の衛星系を利用する場合、各衛星系で最低2機観測している必要がある。つまり、GPS3機+GLONASS1機のように合計4機の衛星が観測できている場合でも、混合解析ではGPSとGLONASSで位相差を取らないため測位ができないことになる。

もし、異なる衛星系間でも位相差を取る解析（以下、「統合解析」という。）が可能になると、どの衛星系の組み合わせでも合計4機が観測できればよく、測位可能領域がさらに広がることになる。

3. マルチGNSS統合解析に向けて

このため、国土地理院では、国土交通省総合技術開発プロジェクト「高度な国土管理のための複数の衛星測位システム（マルチGNSS）による高精度測位技術の開発（平成23～26年度）」として、QZSSを含む複数の衛星系を統合的に利用し、短時間で高精度測位を行うために必要となる技術開発を行い、マルチGNSSによる高精度測位技術を公共測量に適用するための標準化に取り組んでいる。開発が必要となるのは、①異なる衛星系間のバイアスを処理する技術、②L5信号を含む複数の周波数信号を組み合わせで解析を高速化する技術、③受信機特性を推定・処理する技術等である。

最終的なアウトプットは、マルチGNSSを利用した公共測量の作業規程であるが、その副産物としてマル

チGNSSの統合解析が可能な測量用ソフトウェアができあがる予定である。プロジェクトの状況や成果は国土地理院のプロジェクトHPを参照されたい（http://www.gsi.go.jp/eiseisokuchi/gnss_main.html）。

ここでは、今までの技術開発の成果を基に、各衛星系を組み合わせで精密測位を行う際に考慮すべき事項について述べる。

3.1 座標系の違いによる影響

各衛星系の準拠座標系を表-2に示す。GPS、QZSS、Galileoの座標系の間の系統誤差は2cm以下であり、基線解析においては無視できる。一方、GLONASSの座標系はGPSの座標系との間に、40cm～数mの差がある。この差は、基線解析において精密暦を使う場合、GLONASSの座標系の変換が必要な量である。放送暦を用いた解析では、暦の精度に対して、この差は無視できるので、変換の必要はない。しかし、精密単独測位（PPP）では、全ての組み合わせにおいて座標系の変換が必要である。

3.2 時刻系の違いによる影響

各衛星系の時刻系を表-3に示す。10～300ns程度の時刻系の差は、二重位相差で消去できることから、基

表-2 各衛星系の準拠座標系

	準拠座標系	ITRFとの系統誤差
GPS	WGS84	1cm程度の精度で一致 (Misra, P. & P. Enge, 2006)
QZSS	JGS (日本衛星測位測地系)	WGS84及びGTRFとの差は2cm以下 (宇宙航空研究開発機構, 2013)
GLONASS	1) PZ-90 2) PZ90.02(2007/9/20～)	変換パラメータ (Chu, T., 2010) (AIC, 2009) より, 1) WGS84との差は最大10m 2) WGS84との差は40cm
Galileo	GTRF	2cm (1σ)の精度で一致 (Gendt, G., et al., 2011)

表-3 各衛星系の時刻系

	時刻系	UTCに対するバイアス
GPS	GPST	閏秒+10ns
QZSS	QZSST	閏秒+20ns以下
GLONASS	GLONASST	3時間+300ns
Galileo	GST	閏秒+50ns (目標)

線解析では補正の必要はない。しかし、座標系と同様に PPP では全ての組み合わせで時系の補正が必要となる。

3.3 測位信号の特性の違いによる影響

3.3.1 GLONASS 受信機チャンネル間バイアス

GLONASS データを処理する場合には、まず GLONASS 受信機チャンネル間バイアス (Inter Frequency Bias。以下、「IFB」という。) の補正が必要となる。IFB は、GLONASS 特有の FDMA 方式 (衛星によって信号の周波数を少しずらし、衛星番号を識別する方式) で送信される信号を受信した際、受信機の群遅延特性の周波数依存性に伴い発生するバイアスであり、その大きさは受信機種によって異なる。そのため、異なる受信機種間における GLONASS を含む解析では補正をする必要がある。

実観測データより 4 機種 6 台の受信機について推定した IFB を表-4 に示す。JAVAD Delta-G3T, Trimble NetR9 同士の差は観測ノイズに比べ十分小さく、IFB は受信機種で一定と考えられる。

本技術開発において、IFB は温度や観測時間等の観測条件によって大きな変化が見られないことを確認し

表-4 GLONASS 受信機チャンネル間バイアス (IFB) の例。基準とした JAVAD Delta-G3T ①に対する各受信機の IFB (単位: cm/チャンネル)

受信機	JAVAD Delta-G3T ②	Trimble NetR9 ①	Trimble NetR9 ②	TOPCON NET-G3A	Leica GRX1200+ GNSS
L1	0.03	-0.72	-0.74	-0.5	2.98
L2	-0.04	-1.04	-1.02	-0.49	2.93

図-1 IFB 補正の効果。基準とした JAVAD Delta-G3T ① 間との基線解析の FIX 率を示す (衛星系: GPS 及び GLONASS。解析: 混合解析。測位方式: キネマティック。基線長: 1 m)

ており、あらかじめ受信機の組み合わせ毎に推定しておいた IFB を使って補正できる。図-1 は、IFB 補正の効果を示したものである。IFB を補正することで、キネマティック測位において二重位相差の整数値バイアスが整数化できた比率 (以下、「FIX 率」という。) の向上が確認できる。特に Leica GRX1200+GNSS との組み合わせでは IFB 補正の効果が高い。なお、TOPCON NET-G3A との組み合わせでは、FIX 率が若干減少しているが、これは IFB の推定精度が悪かったためと推測される。

3.3.2 衛星系間受信機ハードウェアバイアス

受信機ハードウェアバイアス (Inter System Bias。以下、「ISB」という。) は、受信機の各衛星系回路間の遅延差に起因して発生するバイアスであり、混合解析においては、二重位相差で消去できるが、統合解析においては消去できない。したがって、統合解析を行うためには、ISB を補正する必要がある。ISB は、疑似距離で発生する疑似距離 ISB と、搬送波位相で発生する搬送波位相 ISB に分けられる。

実観測データより推定した GPS-QZSS 間と GPS-GLONASS 間の疑似距離 ISB を表-5 に示す。JAVAD Delta-G3T, Trimble NetR9 同士の差は疑似

表-5 受信機ハードウェアバイアス (疑似距離 ISB) の例。基準とした JAVAD Delta-G3T ①に対する各受信機の疑似距離 ISB (単位: m)

		JAVAD Delta-G3T ②	Trimble NetR9 ①	Trimble NetR9 ②	TOPCON NET-G3A	Leica GRX1200+ GNSS
GPS-QZSS	L1	-0.086	-1.298	-1.301	0.087	-
	L2	0.001	-4.580	-4.415	-0.192	-
GPS-GLONASS	L1	-0.570	-4.257	-4.437	-28.071	16.728
	L2	-0.495	-13.377	-13.417	-34.873	17.181

表-6 受信機ハードウェアバイアス (搬送波位相 ISB) の例。基準とした JAVAD Delta-G3T に対する Trimble NetR9 の GPS-GLONASS 間の搬送波位相 ISB (単位: m)。FW: ファームウェア

観測日	2012/11/20	2012/11/22	2012/11/27	2012/11/28
観測条件	0 m 基線	1 m 基線	受信機再起動	受信機 FW 変更
L1	-0.020	-0.013	0.023	-0.076
L2	0.033	0.025	0.082	0.081

距離の観測ノイズに比べ十分小さく、擬似距離 ISB は受信機種で一定と考えられる。なお、Leica GRX1200 +GNSS は QZSS の観測ができないため、GPS-QZSS 間の擬似距離 ISB は推定していない。

擬似距離 ISB は、IFB と同様に、温度や観測時間等の観測条件によって大きな変化が見られないため、あらかじめ受信機の組み合わせ毎に推定しておいた擬似距離 ISB を使って補正することができる。

しかし、搬送波位相 ISB については、表-6 に示すように観測条件によって変化することが確認されており、この変化は搬送波位相の観測ノイズよりかなり大きいので、アンビギュイティを決定する際、搬送波位相 ISB を考慮する必要がある (Dach, et al., 2010)。なお、本技術開発においては、GPS-QZSS 間の搬送波位相 ISB は確認されず、GPS-QZSS 間は搬送波位相 ISB の補正は不要であると判断している。

GPS-QZSS 間では、あらかじめ別の観測条件で推定した擬似距離 ISB で補正して統合解析したところ、擬似距離 ISB を補正することで、FIX 率が98.4%から99.2%とわずかに向上した。

図-2 は、GPS-GLONASS 間で、あらかじめ推定しておいた擬似距離 ISB と、当該データから推定した搬送波位相 ISB とで補正して統合解析したものである。観測条件によっては、擬似距離 ISB の補正だけではフィックス解とならないが、搬送波位相 ISB も補正することでフィックス解にすることができる。しかし、搬送波位相 ISB については、当該データから推定した値を用いており、あらかじめ推定した値で補正をしていない。つまり、実際には推定するパラメータを一つ増やして解析することになり、最低衛星数が5機に

図-2 ISB 補正の効果。各観測条件における JAVAD Delta-G3T と Trimble NetR9 の基線解析結果 (擬似距離: 擬似距離 ISB 補正, 搬送波: 搬送波位相 ISB 補正。衛星系: GPS 及び GLONASS。解析: 統合解析。測位方式: キネマティック)

なってしまう。このため、GPS 3 機+GLONASS 1 機のような合計 4 機の統合解析を行うためには、さらに進んだ ISB の補正手法が必要である。

なお、GPS-Galileo 間の ISB については、平成25年度の技術開発において調査を実施する予定だが、GPS-GLONASS 間と同様に擬似距離 ISB と搬送波位相 ISB が存在すると考えられる。

3.3.3 L2P(Y)-L2C 間の 1/4 周期のずれ

近代化 GPS では L2P(Y) と L2C を、QZSS は L2C を送信している。この L2P(Y) と L2C には、信号強度の違いだけでなく、位相が 1/4 周期ずれていることが知られている。この 1/4 周期のずれは、受信機種によって、内部で補正したり、出力する際に符号を調整している。そのため、この扱いが異なる受信機間で解析を行うためには、受信機種に合わせて 1/4 周期のずれを補正する必要がある。

図-3 は、GPS の L2P(Y) と L2C、QZSS の L2C を混在して解析したものである。1/4 周期のずれを補正することによって、FIX 率が大幅に向上することがわかる。

3.4 ソフトウェアの開発

以上の技術開発結果を基に、GNSS のデータを統合解析して、短時間に高精度の位置情報を取得し、測量等に適用することが可能なソフトウェア (GNSS Survey Implementation Library。以下、「GSILIB」という。)の開発を進めている。平成24年度には、予定されている機能の一部 (GPS、QZSS、GLONASS の L1、L2 信号を利用した測量計算) を実装した GSILIB のプロトタイプ (以下、「プロトタイプ」という。)を開発した。プロトタイプは、RTKLIB ver. 2.4.1 (Takasu,

図-3 1/4 周期のずれの補正効果。TOPCON NET-G3A と Trimble NetR9 の基線解析結果 (衛星系: GPS 及び QZSS。解析: 統合解析。測位方式: キネマティック。基線長: 0 m)

2011) をベースに必要な拡張を加えたものである。

3.5 今後の技術開発の計画

残された課題である搬送波位相 ISB の補正手法の開発, マルチ GNSS を用いた迅速な地殻変動把握のための高精度測位技術の開発等を行いつつ, これまで開発したプロトタイプを基に, GPS, QZSS, GLONASS, Galileo の L1, L2, L5 信号を統合して利用し, 複数基線解析にも対応した GSILIB を開発することとしている。また, これを用いた現地実証実験により, 観測地点の条件に応じた最適な衛星の組み合わせやデータ補正方法といったマルチ GNSS 高精度測位に必要な観測・解析方法を検証する。特に, 測量分野で活用できるように, 公共測量の種類に応じた最適な観測・解析方法を確立し, 作業規程の準則改正案として取りまとめる。マルチ GNSS を用いた迅速な地殻変動把握では, GEONET 等の大規模 GNSS 観測網(辻他, 2013)への適用ができる技術開発も行う予定である。また情報化施工等の分野における活用方策の検討も行う予定である。

4. まとめ

GPS 以外の新たな衛星測位システムの整備・運用が進んでいるが, GPS 及び GLONASS 以外の衛星系のデータが処理できる測量用解析ソフトウェアはまだ少ない。国土地理院では, QZSS を含む複数の衛星系を統合的に利用し, 短時間で高精度測位を行うための基礎技術の開発を進めている。この技術開発において, IFB, ISB をはじめとする様々なバイアスの存在が確認されており, マルチ GNSS を用いた統合解析の実現には, これらのバイアスの補正手法を確立させる必要がある。今後も, 産官学の関係者の協力を得ながら, 必要な技術開発に努めていく。

謝 辞

本技術開発にあたっては, 次の有識者から貴重な助言を頂いた: 綾田春樹・渋谷彰氏(衛星測位利用推進センター), 市川隆一氏(情報通信研究機構), 大坪俊通教授(一橋大学), 加藤照之教授(東京大学地震研究所), 河口星也・細谷素之氏(電子基準点を利用したリアルタイム測位推進協議会), 小暮聡氏(宇宙航空研究開発機構), 坂井丈泰氏(電子航法研究所), 杉本明・橋本靖彦氏(日本測量機器工業会), 長谷川浩司氏(日

本測量調査技術協会), 日置幸介教授(北海道大学), 安田明生名誉教授(東京海洋大学)。また技術開発の実施にあたっては, 以下の組織の協力を得た: 朝日航洋株式会社, 株式会社パスコ, 東京海洋大学, 日本電気株式会社, 日立造船株式会社, 富士通株式会社, 三菱スペース・ソフトウェア株式会社, 立命館大学。ここに記して感謝する。

参考文献

- 宇宙航空研究開発機構, 2013, 準天頂衛星システムユーザインタフェース仕様書 (IS-QZSS ver. 1.5).
- 株式会社ニコン・トリンブル, Trimble Business Center—Japan Survey Lite.
http://www.nikon-trimble.co.jp/products/software/business_center_japan_survey_lite.html (accessed 16 Aug. 2013)
- 国土地理院, 高度な国土管理のための複数の衛星測位システム (マルチ GNSS) による高精度測位技術の開発.
http://www.gsi.go.jp/eiseisokuchi/gnss_main.html (accessed 16 Aug. 2013)
- 国土地理院, 登録機種一覧簿.
<http://psgsv2.gsi.go.jp/koukyou/kihon/kisyu/index.htm> (accessed 16 Aug. 2013)
- 国土地理院企画部技術管理課, 2013, 公共測量作業規程準則における公共測量での GNSS の利用方法とその技術的背景, 写真測量とリモートセンシング, 52(3), 110-113.
- 辻 宏道他, 2013, 電子基準点の GNSS 対応の現状と計画, 写真測量とリモートセンシング, 52(3), 114-120.
- ライカジオシステムズ株式会社, LGO(ライカ・ジオ・オフィス).
http://www.leica-geosystems.co.jp/jp/LGO_4611.htm (accessed 16 Aug. 2013)
- AIC, 2009, AERONAUTICAL INFORMATION CIRCULAR OF THE RUSSIAN FEDERATION.
http://aviadocs.net/aip/aic/aic-2009-04_eng.pdf (accessed 16 Aug. 2013)
- AIUB, Bernese GNSS Software.
<http://www.bernese.unibe.ch> (accessed 16 Aug. 2013)
- Chu, T., 2010, Assisted GNSS—Traditional and

- Vectorized: Implementation and Performance Results, Proceedings of the 23rd International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2010), pp. 1605–1614.
- Dach, R. et al., 2010, Combining the Observations from Different GNSS, In Proceedings of EUREF 2010 Symposium.
http://www.bernese.unibe.ch/publist/2010/artproc/rd_EUREF10.pdf (accessed 16 Aug. 2013)
- Gendt, G. et al., 2011, GGSP: Realisation and maintenance of the Galileo Terrestrial Reference Frame, *Advances in Space Research*, 47, 174–185.
- JAVAD, Justin.
<http://javad.com/jgnss/products/software/justin.html> (accessed 16 Aug. 2013)
- JPL, GIPSY-OASIS.
<https://gipsy-oasis.jpl.nasa.gov/> (accessed 16 Aug. 2013)
- Misra, P. and P. Enge, 2006, *Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance Second Edition*. (測位航法学会訳, 精説 GPS 基本概念・測位原理・信号と受信機 改訂第2版, 2010)
- MIT, GAMIT-GLOBK.
<http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk> (accessed 16 Aug. 2013)
- Takasu, T., 2011, RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning.
<http://www.rtklib.com/rtklib.htm> (accessed 16 Aug. 2013)