

平成 30 年 度

修 士 学 位 論 文

低コスト GNSS 受信機の
cm 級測位への利活用に関する研究

東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科

専攻名 海運ロジスティクス専攻

学籍番号 1755009

氏名 高橋 漱

指導教官 久保信明 准教授

提出日：2019 年 1 月 31 日（木）

目次

第 1 章	序論	
1.1	はじめに	4
1.2	研究背景と目的	7
第 2 章	GNSS 受信機の紹介と実験データの概要	
2.1	使用した GNSS 受信機	9
2.2	実験データについて	10
2.3	解析方法について	12
第 3 章	実験データの結果と考察	
3.1	オープンスカイ環境での静止点測位	14
3.2	周囲が構造物に囲まれた悪環境での静止点測位	17
3.3	建設現場等を想定した低速の移動体測位	21
3.4	標準的な都市部での高速の移動体測位	24
3.5	結果を踏まえた代替可能性に関する考察	27
第 4 章	低コスト GNSS 受信機を利用した特定の悪環境下でのアプリケーション	
4.1	悪環境下でのアプリケーション（構造物壁面での RTK）	30
4.2	解析ソフトウェアと提案手法について	31
4.2.1	RTKLIB による解析	32
4.2.2	提案手法による解析	32
4.3	実験概要と解析設定	35
4.4	実験結果と評価	37
4.4.1	提案手法による測位結果	37
4.4.2	市販受信機の測位性能評価	39
4.4.3	追加の実験	40
4.4.4	リアルタイムの実験	42
第 5 章	低コスト GNSS 受信機を利用する測量等で生じる課題	
5.1	既存の GNSS 測量	44
5.2	座標ずれの問題	47
5.2.1	GEONET の F3 解と低コスト GNSS 受信機を使用した RTK	47
5.2.2	ネットワーク型 RTK システムで使用される座標	47
5.2.3	F3 解とネットワーク型 RTK システムで使用される座標の違い	48
5.2.4	セミ・ダイナミック補正	48
5.3	座標ずれを軽減する方法	50

5.4 補正した測位結果と考察	53
第6章 総括	
6.1 まとめ	56
謝辞	57
付録と参考文献等	58

第1章 序論

1.1 はじめに

全地球測位システムとしてよく知られている GPS (Global Positioning System) は、1970 年代にアメリカ合衆国の国防総省によって軍事目的で開発され、現在ではその名を知らない人はいないほど、全地球規模のインフラシステムとして世界中で広範囲に利用され続けている。今日までに、GPS の機能に類似した測位衛星システムが先進国を中心に世界各地で独自に開発されており、ロシアの GLONASS、欧州連合の Galileo、中国の BeiDou (以下、BDS と表記)、そして日本の QZSS がある。なお、インドが自国向けに開発し、2013 年から運用準備に入っている IRNSS と呼ばれる衛星測位システムも存在するが、周波数帯域が L5 帯のみの送信信号形式であり、機能の面で GPS などへのアクセスが保障されておらず、サービス範囲も特定の地域に絞られている。上述の測位衛星システムは、一般に GNSS (Global Navigation Satellite System) と総称されており、GPS や GLONASS、Galileo のように全地球をサービス範囲にしているものと、QZSS や IRNSS のように一部の地域のみをサービス範囲としている RNSS (Regional Navigation Satellite System) に分類されるものがある。

QZSS (和名：準天頂衛星システム)は、2000 年代に国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA)によって開発され、2010 年に初号機が打ち上げられてから安定的に衛星測位サービスを提供し続けている。QZSS は日本や東南アジア地域、オセアニア地域を主なサービス対象範囲としており、和名にある「準天頂」という名前が示すように、一日の決められた時間帯に、日本の上空を高仰角の位置で長い時間維持するように軌道が設計されている。このため、都心部のビル街や山間部において、高精度測位のために必要な衛星数の向上に大きく寄与し、QZSS を測位に使用した時の高精度測位の利便性向上に関する多くの研究が既になされている^[1]。さらには天頂方向の QZSS の信号は他の比較的低い仰角を有する衛星群から放たれた信号と比較して電離層内や対流圏内の伝搬距離が短いことから、信号強度の劣化が少ないという性質を有するため、日本だけでなく東南アジア地域でも信頼性の高い情報の恩恵を享受することができる。2017 年中に、同軌道に 2 機 (PRN は 194 番と 195 番) と 1 機の静止衛星 (PRN は 199 番) が投入され、2018 年の 11 月 1 日から新たな高精度測位のための補強機能を含めた L6 帯信号等が正式にサービスインしたことにより、少なくとも 1 機は一日の全時間帯で高仰角の位置に存在する、高付加価値なシステムとなった。2025 年までには、東南アジア上空における QZSS の 7 機体制が予定されており、全時間帯で高仰角の位置に 4 機は存在するシステムになることが内閣府より公表されている。上記の効果により、ますますその効用や東南アジア地域・オセアニア地域における

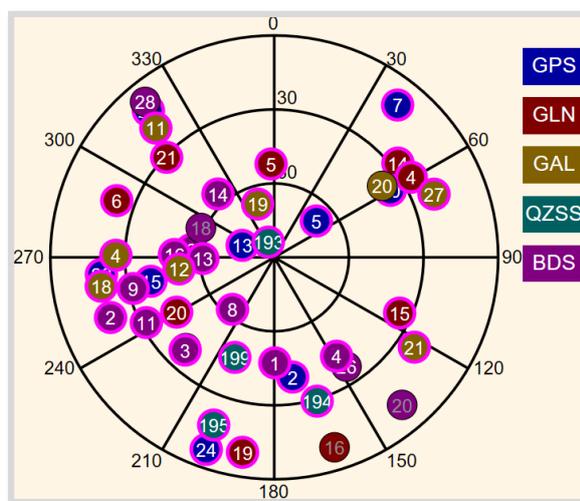


図 1.1 可視衛星の様子 2018/12/26 01:00:00 UTC

利用の普及が期待されている。

2019年現在、地球上のどの地域でも、上空が構造物等で遮蔽されていない開けた環境(以下、オープンスカイ環境と表記)であれば、マルチGNSSで常時20機以上の衛星の信号が利用可能になっている。10年ほど前まではGPSのみや、GLONASSと組み合わせた測位が評価されてきたが、現時点では可視状態の衛星を可能な限り利用して行うマルチGNSS測位が、高精度測位を行う上では必然の状況となっている。前頁の図1.1は2018年現在、東京海洋大学海洋工学部構内(東京都江東区越中島)にある第4実験棟の屋上から見える可視衛星の様子を示したスナップショットである。また、2017年と2018年中に打ち上げられた、世界各国の衛星の一覧を以下に示す(表1.1と表1.2)²⁾。2017年と2018年の打ち上げられた衛星を見ると、勢いよく各国の測位衛星が増加していることが分かる。また、東南アジア地域では、南西方面にBDSの静止衛星が常時4機以上は存在しているため、BDSを測位に使用することで、基本的には精度や利便性が向上することが知られている。なお、BDSは、QZSSと同様に、2018年12月27日に正式に世界に対してグローバル測位サービスを開始した。2019年1月現在、中国は既に36機のBDSを稼働させている。

表 1.1 新たに打ち上げられた衛星の一覧 (2018年)

打上日付・時刻(UTC)	衛星	軌道	打上場所	備考
2018/01/11 23:18	BDS-3M7, 3M8	MEO	Xichang, China	C27, C28
2018/02/12 05:03	BDS-3M3, 3M4	MEO	Xichang, China	C21, C22
2018/03/29 17:56	BDS-3M9, 3M10	MEO	Xichang, China	C29, C30
2018/04/11 22:34	IRNSS-1I(NavIC)	IGSO	Satish Dhawan SC, India	55E
2018/06/16 21:30	GLONASS-M(756)	MEO	Plesetsk, Russia	R05
2018/07/09 20:58	BDS-2I7	IGSO	Xichang, China	C16
2018/07/25 11:25	Galileo FOC-19, 20, 21, 22	MEO	Kourou, French Guiana	E36, E13, E15, E33
2018/07/29 01:40	BDS-3M5, 3M6	MEO	Xichang, China	C23, C24
2018/08/24 23:52	BDS-3M11, 3M12	MEO	Xichang, China	C25, C26
2018/09/19 14:07	BDS-3M13, 3M14	MEO	Xichang, China	C32, C33
2018/10/14 04:23	BDS-3M15, 3M16	MEO	Xichang, China	C34, C35
2018/11/01 15:57	BDS-3G1Q	GEO	Xichang, China	C59
2018/11/03 20:17	GLONASS-M(757)	MEO	Plesetsk, Russia	R15
2018/11/18 18:00	BDS-3M17, 3M18	MEO	Xichang, China	C36, C37
2018/12/24 13:51	GPS-III SV01	MEO	Cape Canaveral, US	G??

表 1.2 新たに打ち上げられた衛星の一覧 (2017 年)

打上日付・時刻(UTC)	衛星	軌道	打上場所	備考
2017/05/17 11:54	SES-15(WAAS)	GEO	Kourou, French Guiana	-
2017/06/01 00:17	QZS-2	IGEO	Tanegashima, Japan	J02
2017/08/19 05:29	QZS-3	GEO	Tanegashima, Japan	J07
2017/08/30 13:30	IRNSS-1H	IGSO	Satish Dhawan SC, India	Failed
2017/09/22 00:02	GLONASS-M(525)	MEO	Plesetsk, Russia	R14
2017/10/09 22:01	QZS-4	IGSO	Tanegashima, Japan	J03
2017/11/05 11:45	BDS-3M1, 3M2	MEO	Xichang, China	-
2017/12/12 18:36	Galileo FOC-15, 16, 17, 18	MEO	Kourou, French Guiana	E21, E25, E27, E31

上記の世界各国の衛星の配備や衛星システムの近代化と同時に、GNSS 受信機の業態においても近年大きな変遷が見られている。昨今、cm の精度で位置が分かる RTK (Real-Time Kinematic) が内部のエンジンで計算して出力可能な高性能の低コストの多周波対応 GNSS 受信機をスイスの企業である u-blox 社が販売しはじめたことにより、多くの分野で低コスト GNSS 受信機が測量級 GNSS 受信機の代替物となりうる可能性が指摘されはじめています。低コスト GNSS 受信機は、ユーザビリティ等の面で測量級 GNSS 受信機に劣る部分はあるが、測量級 GNSS 受信機とほぼ同一の機能を併せ持ちながら、販売価格帯は測量級 GNSS 受信機が数百万円以上であるのに対して数千円から数万円程度と、2 桁以上安価である。既に低コスト GNSS 受信機の性能評価結果が報告されている^{[3][4]}。まさに昨今は低コスト GNSS 受信機が測量級 GNSS 受信機に取って代わる過渡期といっても過言ではない。価格帯と精度の観点から低コスト GNSS 受信機が測量級 GNSS 受信機の市場範囲に及んでいるイメージ図を以下に示す (図 1.2)。コンシューマレベルの低コスト GNSS 受信機が多周波対応になっている以上、測量級 GNSS 受信機を使用するインセンティブが薄れ始めている。

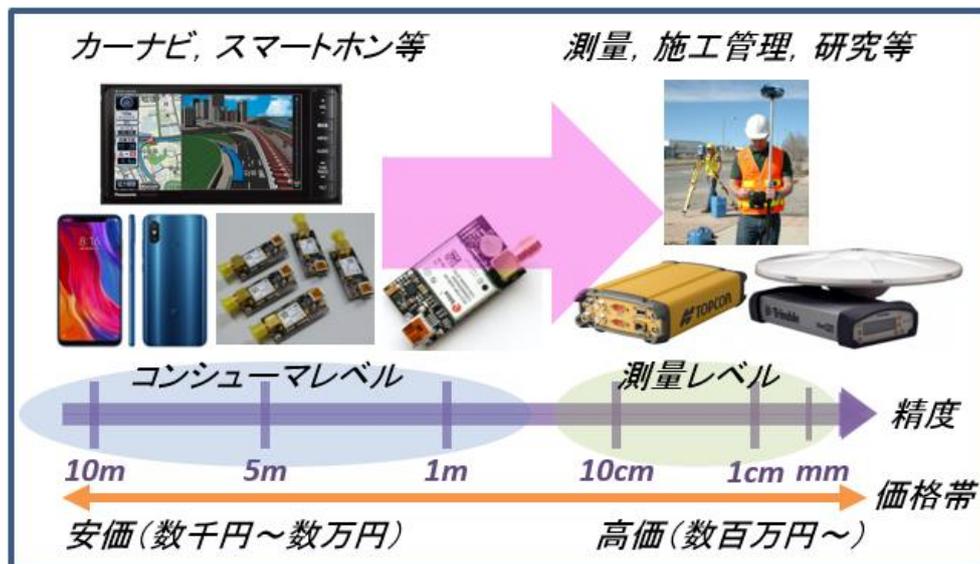


図 1.2 GNSS 受信機の精度と価格帯

1.2 研究背景と目的

近年、国土交通省が打ち出した、i-Construction という名目のコンセプトにより、建設現場のオペレーションや施工管理等で ICT 技術が積極的に導入され始めている⁵⁾。ICT 技術の利活用は、20 年以上も昔から各建機メーカーやゼネコン、測量会社で取り組まれてきた重要なテーマではあるが、現場で実用に至った画期的な事例はそれほど多くはない。一方、近年の通信技術や UAV 等の要素技術の飛躍的な進歩により、「建設現場の生産性革命」という綱領が 2016 年に国土交通省の i-Construction 委員会により提示され、2016 年度は「生産性革命元年」と名付けられており、現場での運用に ICT 技術を活用することが規定された。上記の綱領が情報化施工の皮切りとなり、2018 年度は綱領が打ち出されてから 3 年目ということから、上記業種に関連する大手企業が本格的な運用準備に入っており、部分的には既に新技術や新システムが導入されている(図 1.3)。

既存の建設現場で、精密な位置情報を得るために RTK を利用している建機等のシステムでは、数百万円規模の価格帯で、L1 帯、L2 帯などの複数周波数帯の信号受信に対応した(以下、多周波対応と表記)測量級 GNSS 受信機が導入されており、高コストゆえに企業が現場へ導入できる数量には当然限りがある。現場の人員の安全確保やマシンの自動運転を見据えた正確な位置情報を把握するシステムという観点では、マシン一台一台に GNSS 受信機と GNSS アンテナを導入する必要があり、稼働台数の多い建機や重機の制御、及び現場の人員管理には信頼性の高い大量の低コスト GNSS 受信機が確実に必要とされる。

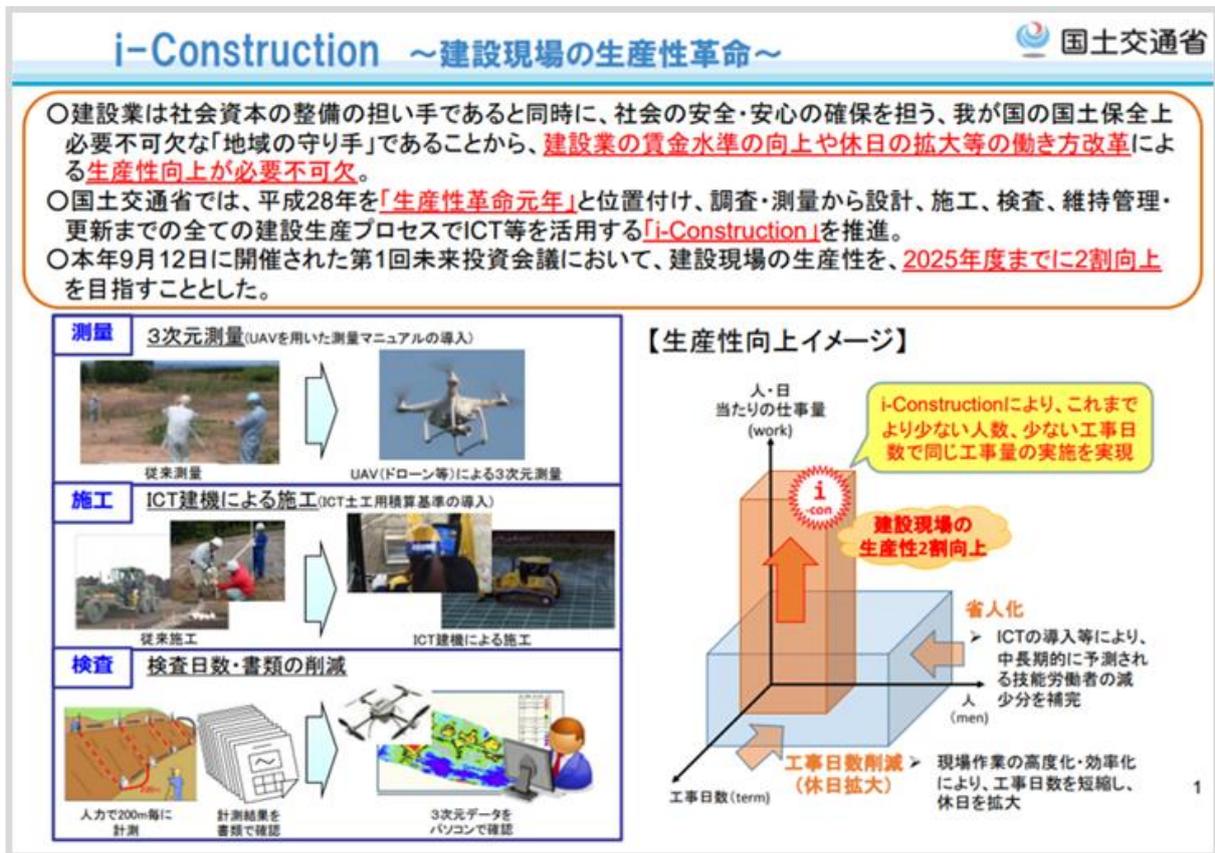


図 1.3 建設現場等の施工管理への ICT 技術の導入

多周波対応の GNSS 受信機の低コスト化は 1.1 節で触れたように、GNSS 受信機市場において重要な持続的イノベーションであり、建設や測量の分野では GNSS 測位の占める規模の割合が ICT 技術の中で比較的大きいため、低コスト化による経済波及効果は極めて大きいといえる。よって、本研究では、建設や測量の分野を対象とし、測量級 GNSS 受信機に対してどの程度代替可能であるのかを調査した。また、特定の悪環境下における一周波対応低コスト GNSS 受信機を利用した RTK の利便性を向上させるアルゴリズムの紹介、及び測量で実際に低コスト GNSS 受信機を利用する際の課題とその解決方法についても本稿で触れる。

本論文の構成を以下に記述する。2 章では、取り扱う GNSS 受信機や GNSS アンテナの紹介と実験データ及び解析方法の概要を述べる。3 章で各データの後処理及びリアルタイムの比較用解析結果を示し、実験結果に関する考察を行った。4 章では上述の特定の悪環境下における低コスト GNSS 受信機を利用した RTK の利便性を向上させるアルゴリズムの紹介し、5 章では低コスト GNSS 受信機を利用する測量等で生じる課題とその解決方法を示す。最後に 6 章で本論文をまとめる。

第2章 GNSS 受信機の紹介と実験データの概要

2.1 GNSS 受信機について

本研究では、建設現場の重機等に搭載される衛星測位機器（GNSS 受信機）として高いシェアを誇る、Trimble 社（米国）製の「NetR9」と「SPS855」を低コスト GNSS 受信機との比較に用いる多周波測量級 GNSS 受信機として選択した。低コスト GNSS 受信機に関しては、u-blox 社製の単一周波数帯（L1 帯）に対応した「NEO-M8P」と、昨今 u-blox 社から販売され始めた、多周波数対応の「ZED-F9P」を選択した。GNSS 受信機と各 GNSS 受信機に対応する GNSS アンテナに関する詳細は以下の表 2.1 に示す。

表 2.1 データの取得に使用した GNSS 受信機と対応する GNSS アンテナ

評価対象	使用した GNSS 受信機の名称		使用した GNSS アンテナの名称	
多周波対応測量級受信機 GNSS 受信機 (移動局)	Trimble 社 NetR9(左) SPS855(右)	 	NovAtel 社(左) GPS-703-GGG TOPCON 社(右) CR-G5	 
一周波対応低コスト GNSS 受信機 (移動局)	u-blox 社 NEO-M8P(左) NEO-M8T(右)	 	Tallysman 社(左) TW4721 TOPCON 社(右) CR-G5	 
多周波対応低コスト GNSS 受信機 (移動局)	u-blox 社 ZED-F9P		u-blox 社(左) ANN-MB シリーズ TOPCON 社(右) CR-G5	 
多周波対応測量級 GNSS 受信機 (基準局)	Trimble 社 NetR9		Trimble 社 Zephyr2 Geodetic	

2.2 実験データについて

GNSS 受信機に応じて、データとして扱える衛星システムや周波数帯が異なるため、各受信機の利用可能な衛星の信号の概略を本節で述べる。

多周波対応測量級 GNSS 受信機である NetR9 と SPS855 に関しては、測位に使用可能な衛星システムが、GPS, QZSS, Galileo, GLONASS, BDS の全種類である。また、多周波対応低コスト GNSS 受信機である ZED-F9P も同様に全種類の衛星システムが使用可能である。一周波対応低コスト GNSS 受信機である NEO-M8P に関しては、使用可能な衛星システムが、GPS, QZSS, BDS の組み合わせか、GPS, QZSS, GLONASS の組み合わせである。それぞれの GNSS 受信機が対応できる周波数帯の帯域名やコード名を以下の表 2.2 から表 2.4 に示す。

表 2.2 対応する周波数の帯域名とコード名 (NetR9, SPS855)

衛星システム	受信可能な帯域名と中心周波数(MHz) $k=-7\sim+12$	コード名
GPS, QZSS	$L1(1575.42), L2(1227.6), L5(1176.45)$	$C/A(L1), L2C(L2), L2P(L2)$
Galileo	$E1(1575.42), E5a(1176.45), E5b(1207.14)$	
GLONASS	$G1(1602+k*9/16), G2(1246+k*7/16), G3(1202.025)$	$C/A(G1), P(G1), C/A(G2)$
BDS	$B1(1561.098), B2(1207.14), B3(1268.52)$	

表 2.3 対応する周波数の帯域名とコード名 (NEO-M8P)

衛星システム	受信可能な帯域名と中心周波数(MHz) $k=-7\sim+12$	コード名
GPS, QZSS	$L1(1575.42)$	C/A
GLONASS	$G1(1602+k*9/16)$	C/A
BDS	$B1(1561.098)$	

表 2.4 対応する周波数の帯域名とコード名 (ZED-F9P)

衛星システム	受信可能な帯域名と中心周波数(MHz) $k=-7\sim+12$	コード名
GPS, QZSS	$L1(1575.42), L2(1227.6)$	$C/A(L1), L2C(L2)$
Galileo	$E1(1575.42), E5b(1207.14)$	
GLONASS	$G1(1602+k*9/16), G2(1246+k*7/16)$	$C/A(G1), C/A(G2)$
BDS	$B1(1561.098), B2(1207.14)$	

SPS855 に関しては、受信機の最新ファームウェアの更新ができていないため、QZSS の 199 番衛星や 2018 年中に新たに打ち上がった BDS 衛星 (日本上空で 3 機以上の MEO) が復号できない。ZED-F9P に関しては、受信可能な GPS と QZSS の L2 帯信号が L2C のみであり、L2P は受信できない。また、受信機の仕様上と考えられるが、日本上空に常に 4 機は存在している BDS の静止衛星 (GEO) が受信できないという特徴がある。Galileo 衛星の信号で受信できる周波数帯は E1 帯と E5b 帯である。それぞれの測位衛星の送信する信号の周波数帯を示す図を以下に示す (図 2.1)。以下の解析において、後処理解析については、どの周波数帯を利用したか明示するが、リアルタイムの受信機内蔵の RTK エンジンについては、どの周波数帯の信号を測位計算に利用しているか詳細には分からないことを明記しておく。

性能評価用の実験データは、以下の 4 種類の環境で取得した。オープンスカイ環境だけでなく、建設現場や測量現場で問題になりそうな環境下でデータを取得した。

- ① 周囲に遮蔽物のないオープンスカイ環境下 (静止データ, 東京海洋大学構内)
- ② 反射波や回折波等の影響が支配的な環境下 (静止データ, 東京海洋大学構内)
- ③ ビル等の障害物や木等が存在する環境下 (移動体データ, 東京海洋大学構内)

- ④ ビルや高架等が存在する都市部一般道路の環境下（移動体データ，東京海洋大学より台場付近までの走行）

2.3 解析方法について

解析は平等な条件で行うことが極めて重要である。そのため、実験データの後処理解析では高精度測位のオープンソースとして広く知られている「RTKLIB」を利用した（図 2.1 と図 2.2）⁶⁾。RTKLIB は東京海洋大学情報通信工学研究室の産学連携研究員である高須知二氏が開発したフリーでダウンロード可能な GNSS 測位計算ソフトウェアである。解析に利用したバージョンは ver.2.4.3 b31 である。なお、国土地理院で開発され公開されている GSILIB でも同様の解析が可能である⁷⁾。使用する解析ソフトウェアに加えて、解析条件も極めて重要である。平等な条件での比較を行うために、解析条件は以下を標準的な設定値として、すべて同じに設定した。解析条件の概要と、実際の設定画面の図を以下に示す（図 2.1）。以下に示した設定値以外はすべてデフォルトの値とした。

- マスク角： 15 度
- 測位に使用する衛星の最低信号強度： 35[dB-Hz] (L1 帯について)
- RTK のアンビギュイティ決定方法： 瞬時 AR (1 エポックのデータのみを利用する方法)
- 擬似距離と搬送波位相の雑音比： 100 対 1

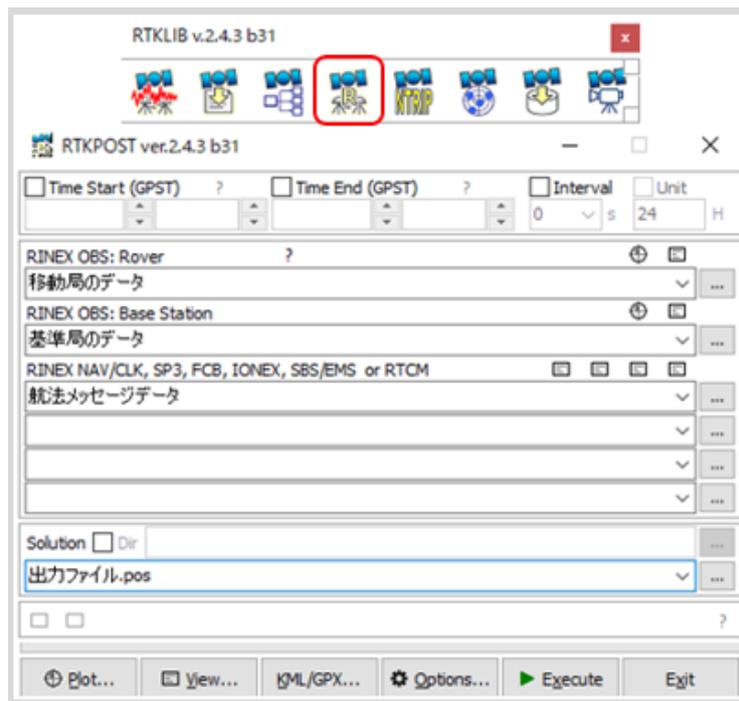


図 2.1 RTKLIB の後処理解析機能である RTKPOST (ver.2.4.3 b31)

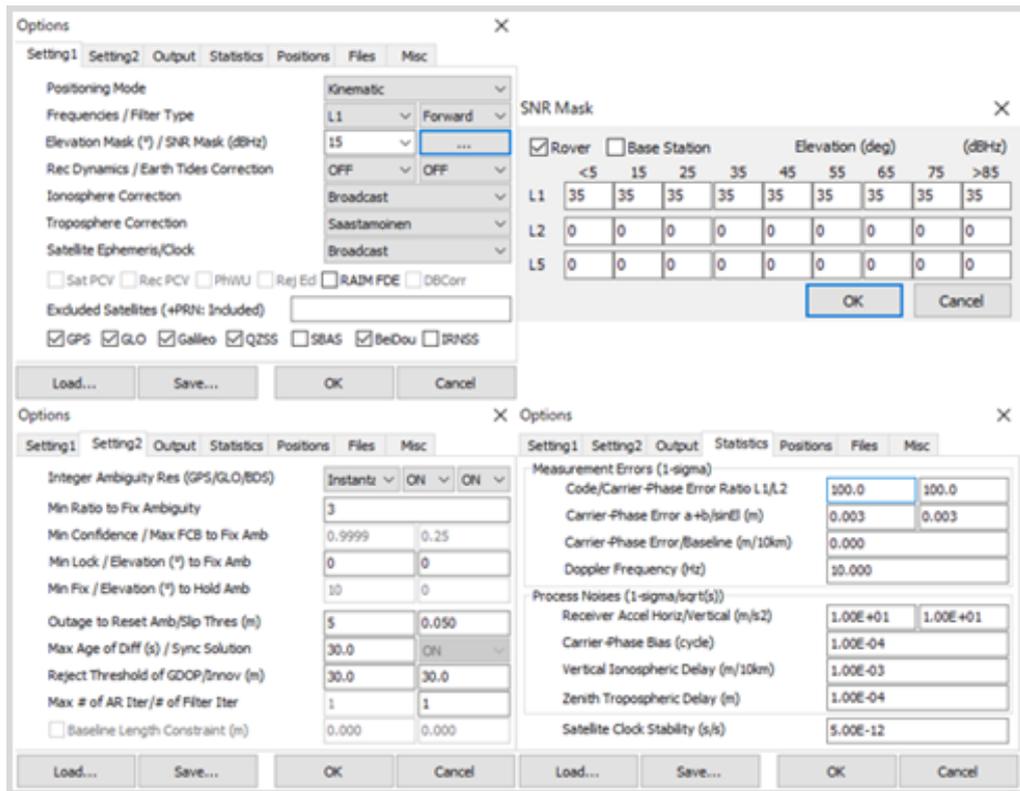


図 2.2 RTKPOST の設定画面

リアルタイムの解析は、主に SPS855 と ZED-F9P の 2 つの受信機で実施した。基準局のアンテナは同一とし、東京海洋大学第 4 実験棟の屋上に設置しているアンテナである。この 1 つのアンテナから NetR9 受信機にケーブルが接続されており、Ntrip サーバー経由で補正データを送信した。補正データの形式は、RTCM3.2 MSM7 GPS/GLONASS/GALILEO/BDS/QZSS とした。補正データは移動局側に設置したスマートホンのテザリングで受信し、ノート PC 経由でそれぞれの受信機へ入力した。受信機の RTK エンジンの設定に関しては、移動体測位向けのデフォルトの値を採用した。

第3章 実験データの結果と考察

この章では、4種類の実験の概要とそれぞれの受信機で得た観測データを用いた RTK の後処理解析結果を示す。併せて、2.2 節で示した②から④の実験についてはリアルタイムの測位結果も示した。

3.1 オープンスカイ環境での静止点測位

はじめに、建物の屋上での静止点測位（短距離基線）を評価した。実験場所は東京海洋大学海洋工学部（東京都江東区越中島）の構内にある第4実験棟屋上であり、屋上に設置されている GNSS アンテナからの信号を、分配器を使用して3つに分岐し、基準局、移動局ともに2章の2.1 節で示した3種類のGNSS受信機を用いてGNSSの生データ（以下、RAWデータと表記）を取得した。実験状況と基準局と移動局のGNSSアンテナの写真を以下に示す(図3.1と図3.2)。2018年12月15日の4時45分(UTC)から24時間分(86400エポック)のデータを1[Hz]で取得した。標準的なオープンスカイ環境においては、GPSとQZSSのみの衛星システムの利用でも、日本上空では測位に利用可能な衛星として常時8機以上は存在するため、通常のマルチGNSSのRTKでは、Fix率（搬送波位相のアンビギュイティが解かれ、位置が1[cm]のレベルの精度で特定される割合）が非常に高いことが分かっている。特に多周波対応GNSS受信機に関しては、性能として差が見られないため、Fix解の精度に焦点を当てた。測位に使用した衛星システムは、NetR9とZED-F9PがGPS/QZSS/Galileo/GLONASSで、NEO-M8PがGPS/QZSS/BDSである。

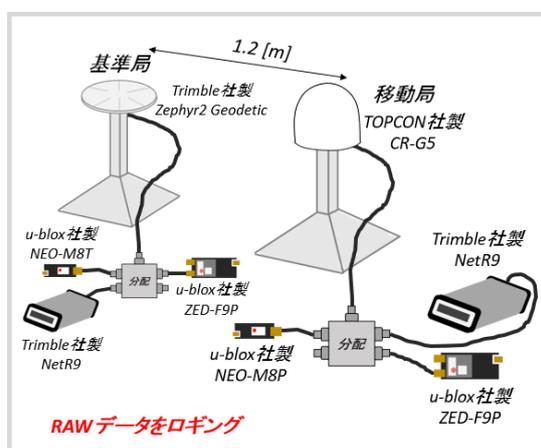


図 3.1 実験状況（屋上の静止点測位）



図 3.2 屋上の静止点測位で使用した GNSS アンテナ

多周波対応測量級 GNSS 受信機である NetR9 で取得した RAW データの後処理による結果を以下に示す(図3.3と図3.4)。基準局のデータと移動局のデータはともに NetR9 を使用して取得されたものである。いずれの図においても、Fix 解のみを示しており、座標原点はあらかじめ分かっている移動局のアンテナの精密位置を表している。なお、アンテナの精密位置に関しては、国土地理院により公開されている、近傍の電子基準点（東京千代田）の F3 解（日々の座標値）を基準に RTK 解の平均位置を採用している。Fix 率は 99.98[%]であり、アンテナの精密位置が

ら 10[cm]以内にある解の割合を表す信頼性に関しては 100[%]であった。Fix 解のみの水平方向の誤差の標準偏差は 0.0024[m]と極めて良好な値であった。

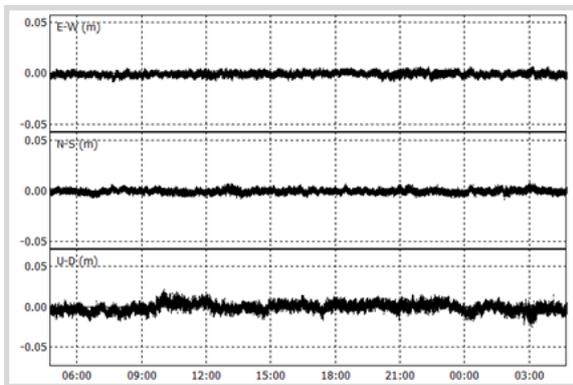


図 3.3 経度/緯度/高さの時系列推移 (NetR9)

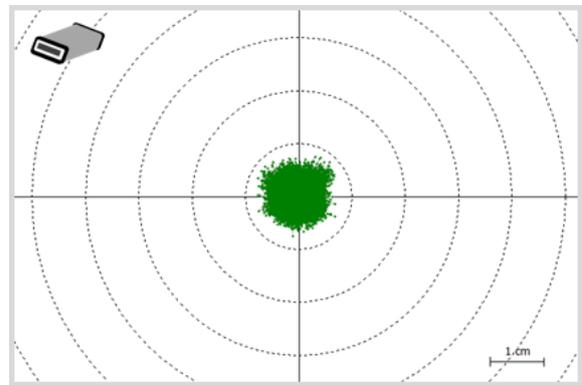


図 3.4 水平方向のプロット図 (NetR9)

一周波対応低コスト GNSS 受信機である NEO-M8P で取得した RAW データの後処理による結果を以下に示す(図 3.5 と図 3.6). 基準局のデータは NEO-M8T, 移動局のデータは NEO-M8P を使用して取得されたものである。Fix 率は 99.99[%]となり、信頼性に関しては 100[%]であった。水平方向の誤差の標準偏差は 0.0025[m]と測量級 GNSS 受信機と同等に極めて良好な値であった。

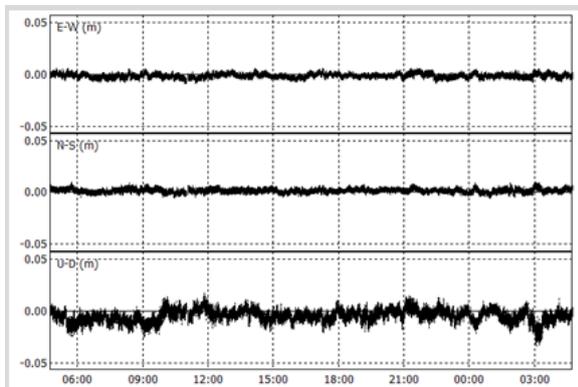


図 3.5 経度/緯度/高さの時系列推移 (NEO-M8P)

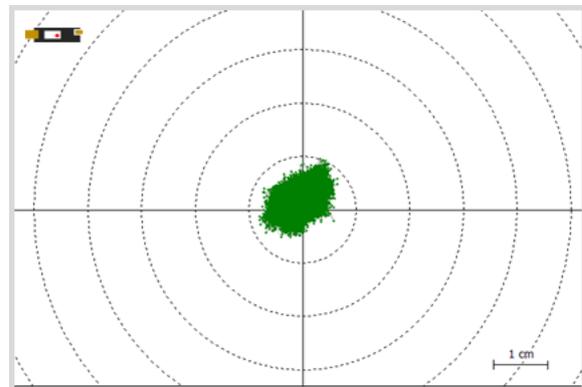


図 3.6 水平方向のプロット図 (NEO-M8P)

多周波対応低コスト GNSS 受信機である ZED-F9P で取得した RAW データの後処理による結果を以下に示す(図 3.7 と図 3.8). 基準局のデータと移動局のデータはともに ZED-F9P を使用して取得されたものである。Fix 率は 99.98[%]であり、信頼性に関しては 100[%]であった。Fix 解のみの水平方向の誤差の標準偏差は 0.0023[m]と測量級 GNSS 受信機と同様に極めて良好な値であった。

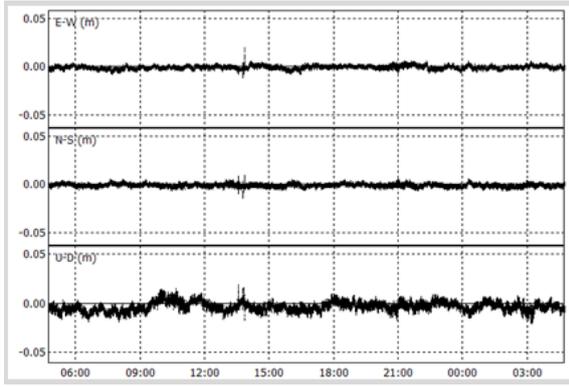


図 3.7 経度/緯度/高さの時系列推移 (ZED-F9P)

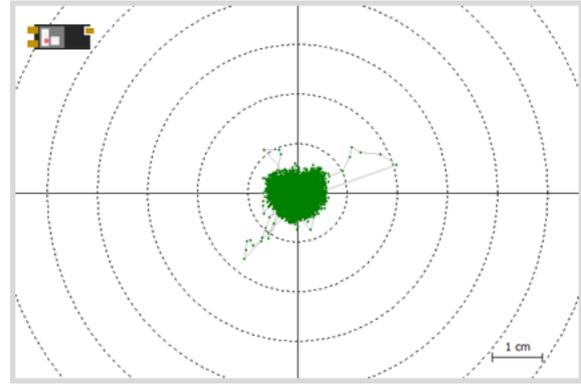


図 3.8 水平方向のプロット図 (ZED-F9P)

上記の結果より，オープンスカイ環境においては，多周波対応であれば低コスト GNSS 受信機を利用しても測量級 GNSS 受信機と同じ性能を得られることが分かった．また，一周波対応の低コスト GNSS 受信機に関しても，BDS を利用することで測位に利用可能な衛星数が大幅に増加し，多周波対応 GNSS 受信機と同等の性能が得られることが分かった．

3.2 周囲が構造物に囲まれた悪環境での静止点測位

都市部等で、測量業者が実際に測量すべき地点は 3.1 節で示したようなオープンスカイ環境ばかりではなく、建物等の構造物に電波伝搬経路が部分的に遮蔽された、衛星測位にとって厳しい地点が数多く存在する。東京海洋大学海洋工学部の構内で、同様のマルチパス波の影響が多くある環境で、2018 年 12 月 25 日の 12 時 00 分（日本時間）から 24 時間分（86400 エポック）の静止点測位（短距離基線）のデータを 1[Hz]で取得し、RTKLIB を利用して後処理解析による評価を行った。3.1 節と同様に、基準局、移動局ともに 3 種類の GNSS 受信機を用いて GNSS の RAW データを取得した。GNSS アンテナに関しては、移動局はそれぞれの GNSS 受信機に対応した GNSS アンテナを使用している。以下に移動局の実験状況と GNSS アンテナの写真を示す（図 3.9 と図 3.10）。基準局は 3.1 節と同様である。後処理解析の設定に関しては、3.1 節で使用された設定と同一のものを採用している。測位に使用した衛星システムは、NetR9 と ZED-F9P が GPS/QZSS/Galileo/GLONASS/BDS で、NEO-M8P が GPS/QZSS/BDS である。

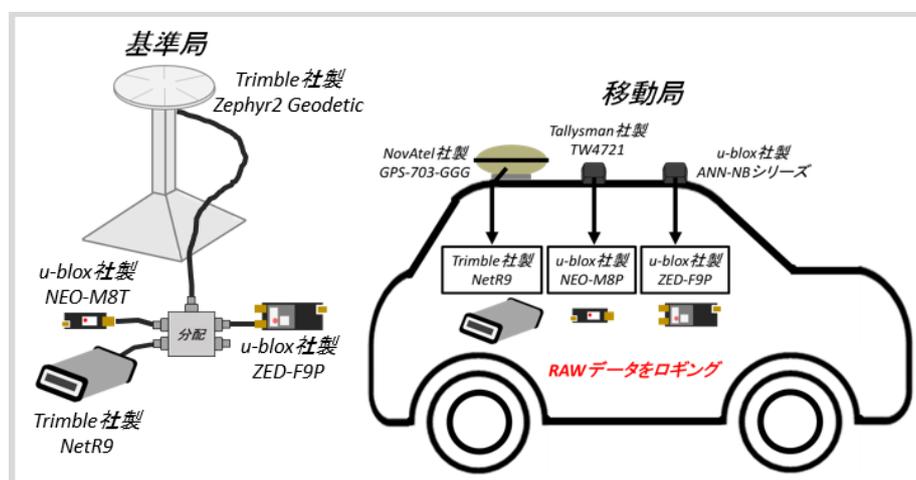


図3.9 実験状況（悪環境下での静止点測位）



図3.10 実験風景と移動局のGNSSアンテナ

多周波対応測量級 GNSS 受信機である NetR9 で取得した RAW データの後処理による結果を以下に示す（図 3.11 と図 3.12）。基準局のデータと移動局のデータはともに NetR9 を使用して取得されたものであり、いずれの図においても、座標原点は全 Fix 解の平均位置を表している。

Fix 率は 17.03[%]であり、真の位置から大きく逸脱したミス Fix 解は生じなかった。Fix 解のみの水平方向の誤差の標準偏差は 0.012[m]であった。また、信頼性は 100[%]であった。

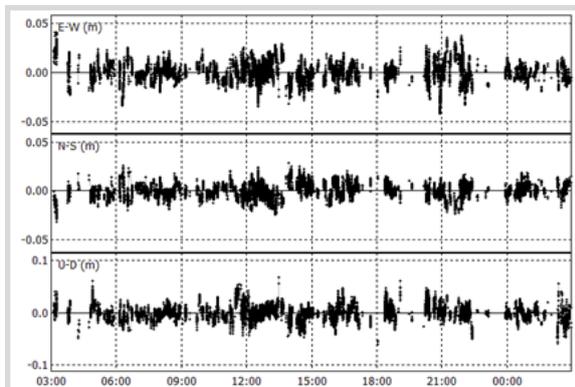


図 3.11 経度/緯度/高さの時系列推移 (NetR9)

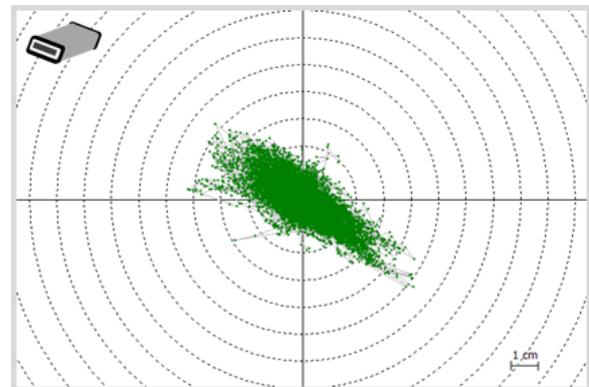


図 3.12 水平方向のプロット図 (NetR9)

一周波対応低コスト GNSS 受信機である NEO-M8P で取得した RAW データの後処理による結果を以下に示す (図 3.13 と図 3.14)。基準局のデータは NEO-M8T を使用して取得されたものである。Fix 率は 1.53[%]であり、Fix 解のみの水平方向の誤差の標準偏差は 4.52[m]であるため、信頼性は 55.39[%]と極めて低い値であった。

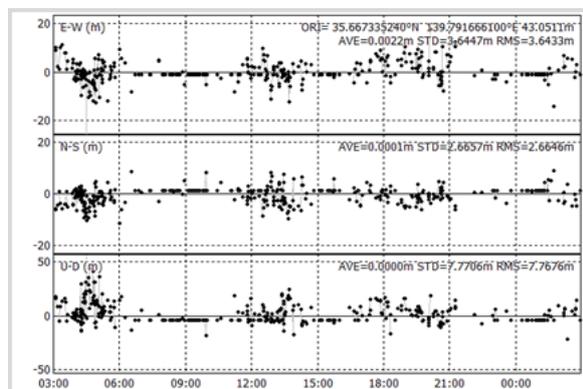


図3.13 経度/緯度/高さの時系列推移 (NEO-M8P)

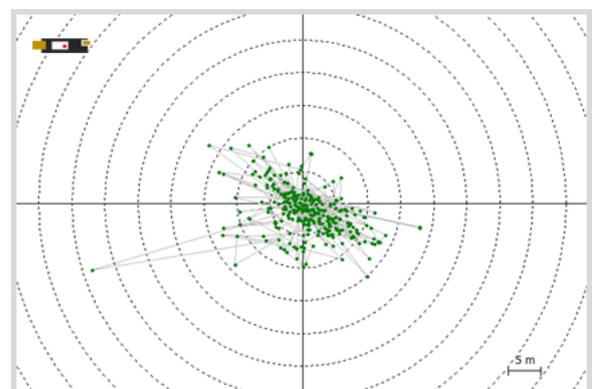


図3.14 水平方向のプロット図 (NEO-M8P)

多周波対応低コスト GNSS 受信機である ZED-F9P で取得した RAW データの後処理による結果を以下に示す (図 3.15 と図 3.16)。基準局のデータと移動局のデータはともに ZED-F9P を使用して取得されたものである。Fix 率は 2.47[%]であり、真の位置から大きく逸脱したミス Fix 解は生じなかった。Fix 解のみの水平方向の誤差の標準偏差は 0.012[m]であった。多周波対応測量級 GNSS 受信機との Fix 率の差は、やや大きい結果となった。Fix 率にやや大きな差がでた理由の 1 つは、擬似距離の精度が、測量級 GNSS 受信機と比較して、低コスト GNSS は良くないことが挙げられる。今回は 1 エポックの観測データのみでの RTK の性能をチェックしているため、1 エポックでの擬似距離の精度に RTK の性能が依存し、その結果として RTK の Fix 率が低下していると考えられる。この 24 時間での擬似距離のみを使用した DGNSS の水平方向の精度に関しては、標準偏差で NetR9 が 3.27[m], NEO-M8P が 5.51[m], そして ZED-F9P が 3.99[m]であった。RTK の測位結果と同様に以下に水平方向の DGNSS の測位結果も示す (図 3.17 から

図 3.19). 多周波対応 GNSS 受信機の結果と比較して, 一周波対応低コスト GNSS 受信機の擬似距離の精度が低いことが DGNSS の結果より分かる. 図 3.19 から図 3.21 においては, 同様に全 Fix 解の平均位置を表している.

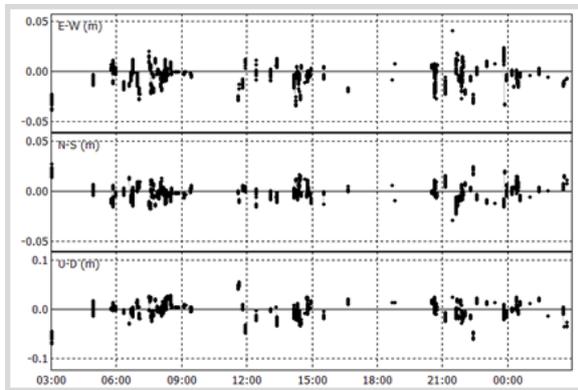


図3.15 経度/緯度/高さの時系列推移 (ZED-F9P)

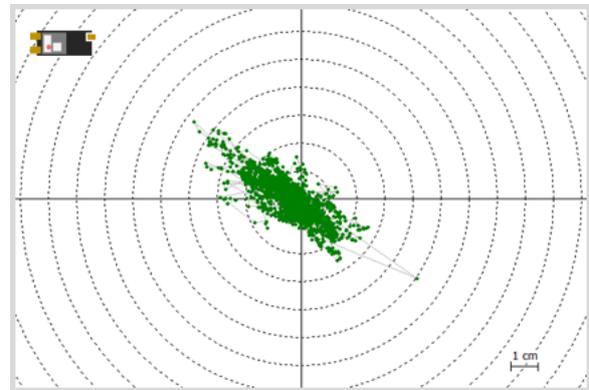


図3.16 水平方向のプロット図 (ZED-F9P)

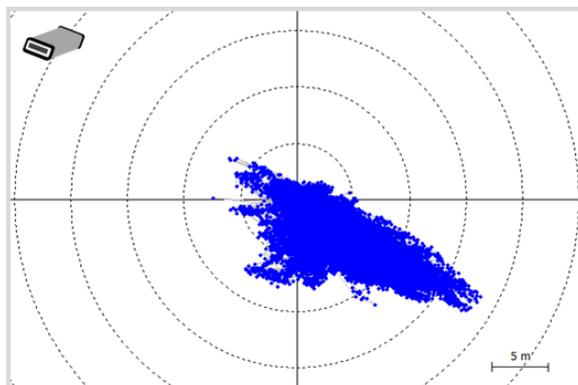


図3.17 NetR9のDGNSS結果 (水平方向)

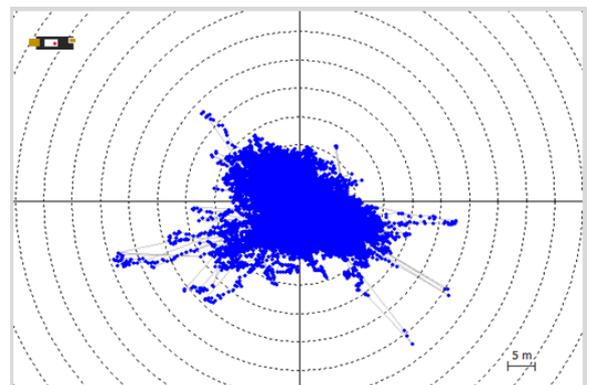


図3.18 NEO-M8PのDGNSS結果 (水平方向)

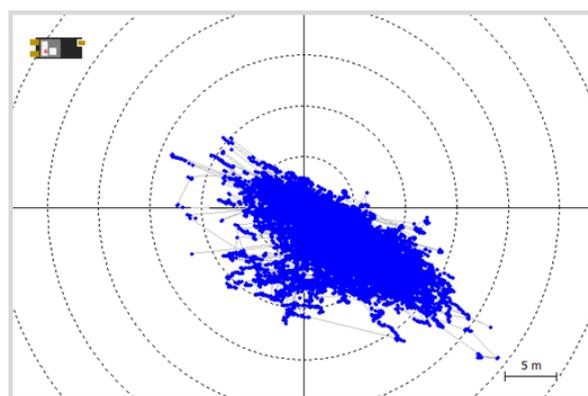


図3.19 ZED-F9PのDGNSS結果 (水平方向)

以上の結果より, 利用率を表す Fix 率は低いものの, 多周波対応低コスト GNSS 受信機を利用することで, 都市部等の構造物が多い衛星測位にとって厳しい環境でも測量級 GNSS 受信機と同等の信頼性の高い Fix 解を得ることができた. 一周波対応低コスト GNSS 受信機では, このような環境では通常の設定では正しい Fix 解を得ることができないことがわかった. なお, 正しく Fix した測位解が比較的北西と南東の方向に分散する傾向を示しているが, その方角の上空

の大部分が建物に遮蔽されたことによる衛星数の減少と DOP (Dilution of Precision) の劣化が主な要因である。上記のような環境では、建物の壁面に対して垂直の方向に解が分散することが知られている⁸⁾。

同様に、2019年1月9日の12時30分から同じ地点で24時間分(86400 エポック)、SPS855とZED-F9Pのリアルタイムのデータ(静止点測位)を1[Hz]で取得した。SPS855の出力によるFix率は83.46[%]で、Fix解のみの水平方向の誤差の標準偏差は0.292[m]であり、信頼性は73.56[%]と低かった。ZED-F9Pの出力によるFix率は48.11[%]で、Fix解のみの水平方向の誤差の標準偏差は0.031[m]であり、信頼性は99.49[%]であり、真の位置から大きく逸脱したミスFix解は生じなかった。2つの受信機の水平方向の結果を以下に示す(図3.20と図3.21)。図3.22と図3.23においては、座標原点は全測位解の平均位置を表している。Fix率が上記の後処理解析よりも高いが、カルマンフィルタ等を利用して、擬似距離の誤差を抑制することで、RTKのFix解を増加させていることが1つの要因である。実際にRTKLIBを利用して、カルマンフィルタのモードで計算すると、結果が改善されることを確認した。なお、このように建物に囲まれた環境では、魚眼カメラや精密な3D地図の情報を利用することや、観測データの品質をより効率的にチェックすることでRTKの性能が改善されることを確認している⁹⁾。注目すべき点は、多周波対応低コストGNSS受信機の方が、信頼性が高かったことである。

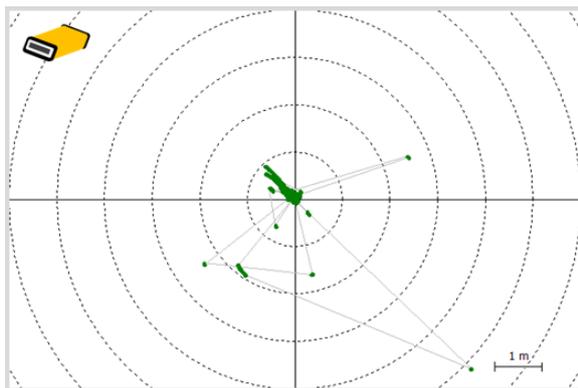


図3.20 NetR9のDGNSSS結果(水平方向)

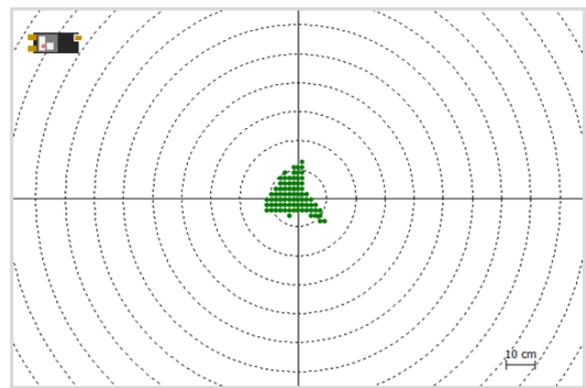


図3.21 NEO-M8PのDGNSSS結果(水平方向)

3.3 建設現場等を想定した低速の移動体測位

建設現場内での低速移動体環境相当を評価するために、東京海洋大学海洋工学部構内にて2018年12月26日に移動体（短距離基線）のデータを5[Hz]で取得し、RTKLIBを利用して後処理解析を行い、同時に受信機が内部のRTKエンジンで計算して出力することができるRTKの結果も取得した。なお、この節では、高速度で移動しない作業中の建機や重機等の位置情報、現場の人員の安全確保のための位置情報の把握という観点で精度を評価した。後処理解析の設定に関しては、3.1節の解析で使用された設定と同一のものを採用している。測位に使用した衛星システムは、NetR9とZED-F9PがGPS/QZSS/Galileo/GLONASS/BDSで、NEO-M8PがGPS/QZSS/BDSである。実験状況や使用したアンテナは3.2節と同様であり、実験車両が奏功した経路と各区間の走行環境を以下に示す（図3.22）。走行経路には、建物や木に囲まれている区間が多く存在する。図3.24の赤で示された経路を矢印の方向に実験用車両のクリープ現象（時速7～8[km]）のみの走行で5週分（43分30秒分のデータ）周回した。実験状況も以下に示す（図3.23）。



図 3.22 走行経路と各区間の電波の受信環境（低速の移動体測位）

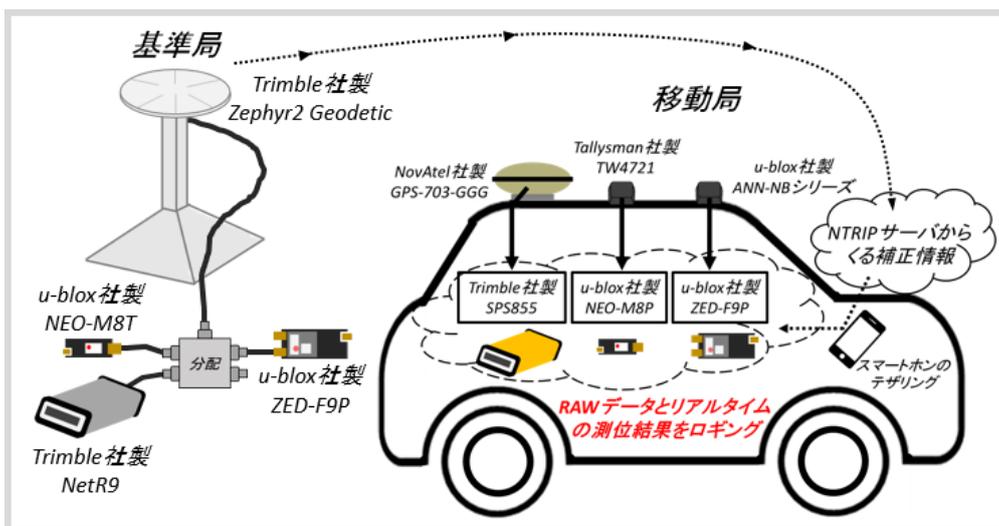


図3.23 実験状況（低速の移動体測位）

多周波対応測量級 GNSS 受信機である SPS855 で取得した RAW データの後処理による結果と受信機によるリアルタイムの測位結果を以下に示す (図 3.24 と図 3.25). 基準局のデータは前節までと同様に, NetR9 を使用して取得されたものであり, いずれの図においても, 座標原点は基準局位置を示している. 緑色のプロットが Fix 解, 黄色のプロットが Float 解, 青色のプロットが DGNSS 解を示している. RTKLIB による後処理解析の Fix 率は 61.69[%]で, GNSS 受信機によるリアルタイムの測位結果の Fix 率は 58.1[%]となった.

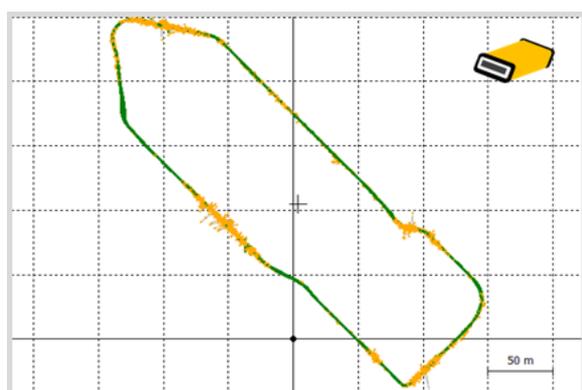


図3.24 後処理の結果 (SPS855)

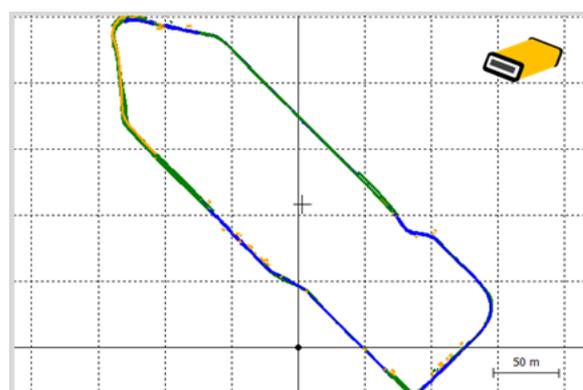


図3.25 SPS855によるリアルタイムの測位結果

一周波対応低コスト GNSS 受信機である NEO-M8P で取得した RAW データの後処理による結果と受信機によるリアルタイムの測位結果を以下に示す (図 3.26 と図 3.27). 基準局のデータは NEO-M8T を使用して取得されたものである. RTKLIB による後処理解析の Fix 率は 22.34[%]で, 受信機によるリアルタイムの測位結果の Fix 率は 8.39[%]となり, 後処理の結果と比較して, リアルタイムの結果が大分低い Fix 率となった. 比較的周囲の開けた走行区間でないと Fix していないことが分かる.

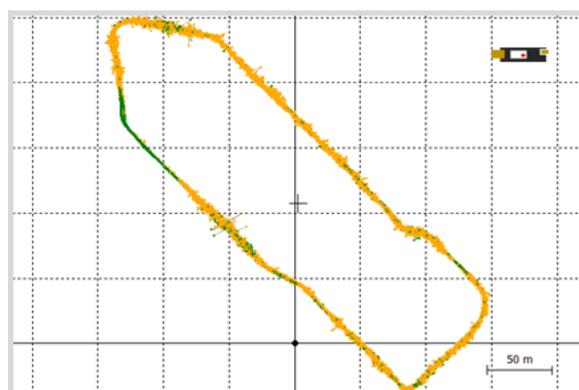


図3.26 後処理の結果 (NEO-M8P)

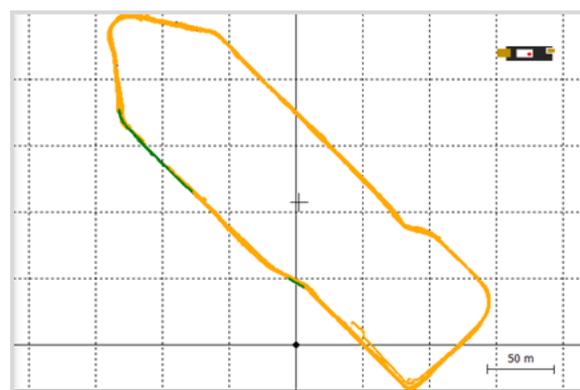


図3.27 NEO-M8Pによるリアルタイムの測位結果

多周波対応低コスト GNSS 受信機である ZED-F9P で取得した RAW データの後処理による結果と受信機によるリアルタイムの測位結果を以下に示す (図 3.28 と図 3.29). 基準局のデータと移動局のデータはともに ZED-F9P を使用して取得されたものである. RTKLIB による後処理解析の Fix 率は 52.12[%]で, 受信機によるリアルタイムの測位結果の Fix 率は 73.09[%]となり, 後処理の結果と比較して, リアルタイムの結果が高い Fix 率となった.

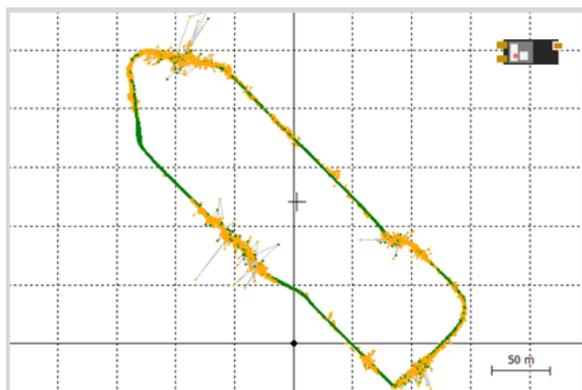


図3.28 後処理の結果 (ZED-F9P)

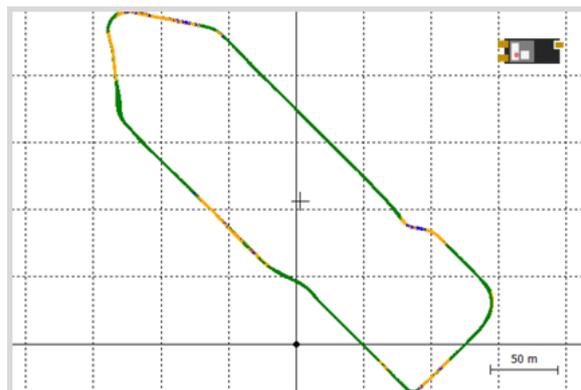


図3.29 ZED-F9Pによるリアルタイムの測位結果

同時に、後処理解析結果のミス Fix 解の割合をある程度評価するために、それぞれの同じ時刻の RTK 解の位置同士を距離差で比較した。正しい Fix 解同士であれば、この距離差は常に一定になるはずで、もしどちらかまたは両方が誤った Fix 解であれば、この距離差が大きくなる。SPS855 に使用したアンテナと ZED-F9P に使用したアンテナ間の距離は 76[cm] であり、SPS855 の Fix 解との比較を実施した。ZED-F9P に関して、同じ時刻の RTK 解同士で 10[cm] 以上逸脱した測位解は、5848 エポック中 13 エポック存在した。また、SPS855 に使用したアンテナと NEO-M8P に使用したアンテナ間の距離は 43[cm] であり、NEO-M8P に関して、同じ時刻の RTK 解同士で 10[cm] 以上逸脱した測位解は、2353 エポック中 105 エポック存在した。この結果より、完全に正しい Fix 解であるかどうかの断定はできないが、多周波対応低コスト GNSS 受信機の Fix 解の信頼性は測量級 GNSS 受信機とはほとんど変わらないことが分かる。

3.4 標準的な都市部での高速の移動体測位

3.3 節と同様に、高速道路や広い敷地を想定した建設現場での移動体において、どの程度の精度が保証されるかを評価するために、東京都江東区内及び付近の都市部にて 2018 年 12 月 20 日に移動体のデータを取得し、RTKLIB を利用して後処理解析を行った。走行経路には中層及び高層ビルが散在し、高架下も多数存在する。現場内で随時稼働している建機や重機の位置情報の把握という観点で精度を評価した。後処理解析の設定に関しては、3.1 節で使用した設定と同一のものを採用している。使用したアンテナは、2.1 節の表 2.1 には記載されていない Trimble 社製の「540AP」である。540AP から各 GNSS 受信機に対して分配器を使用して信号を分配した。本節の実験では、同時に Applanix 社の「POS LV」という装置で cm 級の精密なレファレンスとなる位置を取得していたため、そのレファレンスとなる位置を基準として、精度を評価した^[10]。走行経路に関しては、東京海洋大学海洋工学部の構内をスタート地点としており、東京都江東区お台場まで 25 分程度走行した。実験車両が走行した経路と実験状況及び実験風景を以下に示す(図 3.30 から図 3.32)。



図3.30 走行経路 (高速の移動体測位)

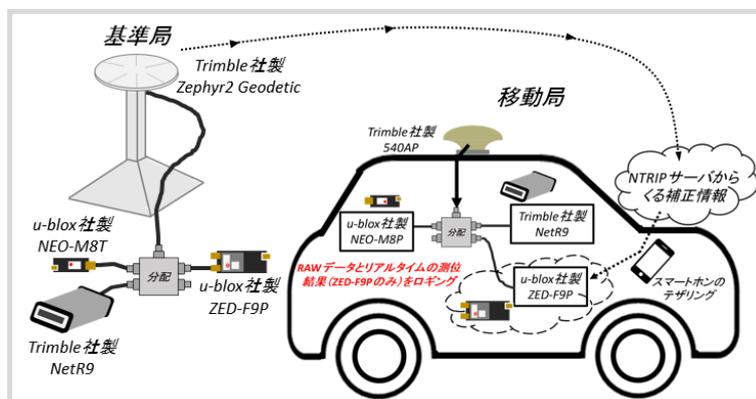


図3.31 実験状況 (高速の移動体測位)



図3.32 実験風景（高速の移動体測位）

多周波対応測量級 GNSS 受信機である NetR9 で取得した RAW データの後処理による結果を以下に示す（図 3.33）. 基準局のデータは NetR9 を使用して取得されたものである. いずれの図においても、座標原点は基準局位置を示しており、緑色のプロットが Fix 解, 黄色のプロットが Float 解, 青色のプロットが DGNSS 解を示している. RTKLIB による後処理解析の Fix 率は 65.31[%]であった.

同様に、一周波対応低コスト GNSS 受信機である NEO-M8P で取得した RAW データの後処理による結果を以下に示す（図 3.34）. 基準局のデータは NEO-M8T を使用して取得されたものである. RTKLIB による後処理解析の Fix 率は 40.77[%]であった.

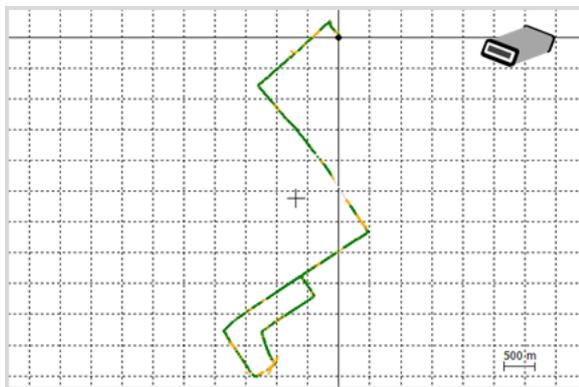


図3.33 後処理の結果（SPS855）

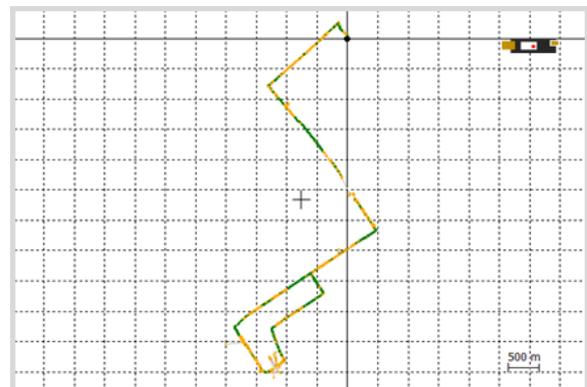


図3.34 後処理の結果（NEO-M8P）

多周波対応低コスト GNSS 受信機である ZED-F9P で取得した RAW データの後処理による結果と受信機によるリアルタイムの測位結果を以下に示す（図 3.35 と図 3.36）. 基準局のデータと移動局のデータはともに ZED-F9P を使用して取得されたものである. RTKLIB による後処理解析の Fix 率は 59.88[%]で、受信機によるリアルタイムの測位結果の Fix 率は 86.69[%]となり、後処理の結果と比較して、リアルタイムの結果が十分に高い Fix 率となった.

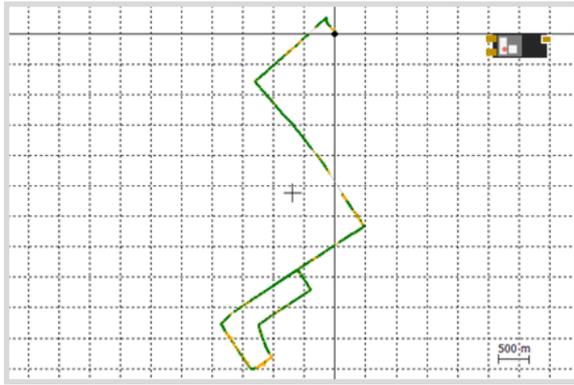


図 3.35 後処理の結果 (ZED-F9P)

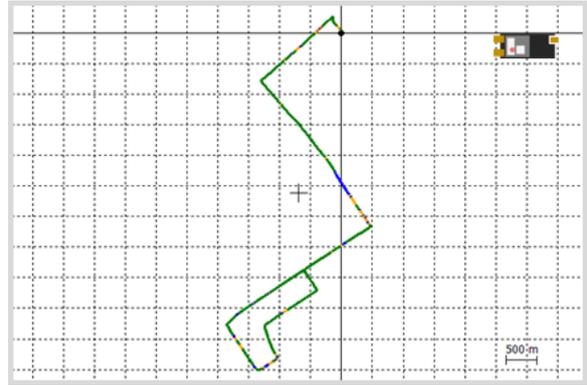


図 3.36 リアルタイムの測位結果 (ZED-F9P)

後処理解析結果の精度やミス Fix 解の割合を評価するために、前述の POS LV (図 3.37) を使用して、レファレンス位置と RTK 解の位置同士を比較した。NetR9 に関しては、レファレンスに対して標準偏差が 0.31[m]で、信頼性に関しては静止点と同様の評価 (全 Fix 解のうち、レファレンスの位置から 10[cm]以内に入っている割合) で、98.65[%]であった。ZED-F9P に関しては、標準偏差が 0.46[m]であり、信頼性に関しては 98.92[%]であった。なお、ZED-F9P のリアルタイム結果に関しては、標準偏差が 0.058[m]であり、信頼性に関しては 99.83[%]と、非常に良好な値であり、真の位置から大きく逸脱したミス Fix 解はほとんど生じなかった。



図 3.37 Applanix 社の POS LV

3.5 結果を踏まえた代替可能性に関する考察

3章で示した実験により得られた結果（RTKのFix率や精度等）を後処理結果とリアルタイム結果（括弧内）に分けて以下の表にまとめた（表3.1）。多周波対応測量級GNSS受信機を多周波対応測量級、一周波対応低コストGNSS受信機を1周波低コスト、多周波対応低コストGNSS受信機を多周波対応低コストとした。それぞれの結果は、上よりFix率、標準偏差（レファレンスとなる精密位置がある場合）、水平位置がレファレンスの精密位置より10[cm]以内の割合を示した。括弧内のリアルタイム結果は、その受信機に内蔵するRTKエンジンにより出力された結果であり、リアルタイム実験を実施した部分のみ示した。

表3.1 解析結果の比較まとめ（括弧内はリアルタイムの結果）

後処理結果	多周波測量級	一周波低コスト	多周波低コスト
周囲に遮蔽物のない、オープンスカイ環境下 (静止データ)	99.98[%] 0.0024[m] 100[%]	99.99[%] 0.0025[m] 100[%]	99.98[%] 0.0023[m] 100[%]
建物に囲まれたマルチパスの影響の大きい環境下 (静止データ)	17.03[%] (83.46[%]) 0.012[m] (0.29[m]) 100[%] (73.56[%])	1.53[%] 4.52[m] 55.39[%]	2.47[%] (48.11[%]) 0.012[m] (0.03[m]) 100[%] (99.49[%])
ビル等の障害物や木等が存在する環境下 (低速移動体データ)	61.69[%] (58.10[%]) - -	22.34[%] (8.39[%]) - -	52.12[%] (73.09[%]) - -
ビルや高架等が存在する都市部一般道路の環境下 (移動体データ)	65.31[%] 0.31[m] 98.65[%]	40.77[%] 0.86[m] 96.25[%]	59.88[%] (86.69[%]) 0.46[m] (0.06[m]) 98.92[%] (99.83[%])

オープンスカイ環境では受信機による性能差は見られなかった。すべての水平方向の標準偏差を見ると分かるように、精度にも差は見られなかった。この結果はRTKのFix解が得られた場合、低コスト受信機でもmmレベルの十分な精度が得られていることを示している。すべての受信機で水平で10[cm]以上の誤差がなかったことが分かる。マルチパス波の影響が大きな環境下の後処理解析においては、Fix率で多周波対応低コストGNSS受信機と測量級GNSS受信機の間には15[%]程度差が見られた。標準偏差については両者とも同程度であった。一周波対応低コストGNSS受信機では、まともなFix解が得られていないことが分かった。本実験場所でのリアルタイムの結果を見ると、こちらでも測量級GNSS受信機のFix率が高かった。しかしながら、Fix解の位置の精度と信頼性を比較すると、多周波対応低コストGNSS受信機の方が優れた結果となった。測量級GNSS受信機のリアルタイムの結果で、正しい精密位置より10[cm]以内の結果が74[%]しか存在しなかったため、信頼できる位置解であるとは言い難い。

移動体データの後処理解析において、多周波対応低コストGNSS受信機と測量級GNSS受信機の差に関しては、Fix率で10[%]以内には収まっており、精度に関してもほぼ同程度であるといえる。一周波対応低コスト受信機に関しては、少なくとも今回の実験コースのような環境下での使用において、測量級受信機に対する代替は難しいといえる。

特筆すべき点は、多周波対応低コストGNSS受信機のリアルタイム結果である。マルチパスの影響のある環境下では、Fix率は低いものの、測量級GNSS受信機よりも高いFix率を示した。ビルや高架などが存在する都市部一般道路の環境下においても、86.69[%]と非常に高いFix率と

あわせて信頼性を示した。以上の結果より、多周波対応低コスト GNSS 受信機は、測量級 GNSS 受信機に対して、RTK の性能はやや劣るかもしくはほぼ変わらないといえる。受信機の内部エンジンの利用を想定した場合には、むしろ多周波対応低コスト GNSS 受信機は、測量級 GNSS 受信機よりも良い結果を示していたことは事実である。

1 章で示したように、広大な敷地の測量や、重機や建機が行き交う建設現場等では、正確な位置情報を把握可能な、できる限り安価なシステムが要請されている。測量級 GNSS 受信機で対応すべきアプリケーションは残しつつも、新たに ICT 施工を行っていく上でのコスト面での課題をクリアできるため、より多くの GNSS 受信機をセンサとして利用するという意味において、多周波対応低コスト GNSS 受信機の利用価値が存在すると考えられる。

第4章 低コスト GNSS 受信機を利用した特定の悪環境下でのアプリケ

ーション

3章までは、測量級 GNSS 受信機と低コスト GNSS 受信機の測位解同士を比較することにより、代替可能性についてまとめた。一方、アルゴリズムの変更による悪環境下での RTK の利便性向上は重要なテーマであり、特定の悪環境下では、その環境に応じた適切な計算手法を取り入れることで、一周波対応低コスト GNSS 受信機の利用でも RTK の Fix 率や測位解の信頼性等を大きく向上させられることが分かっている。本章では、建物の壁面に対して垂直に低コスト GNSS パッチアンテナと低コスト GNSS 受信機を取り付けて、24 時間程度の測位を行い、提案手法により、実用レベルで建造物の精密な動揺のリアルタイムモニタリングができるアプリケーション例を示す。

4.1 悪環境下でのアプリケーション（建造物壁面での RTK）

企業による中層から高層建築物の杭の偽装や低層住宅の地盤沈下等の問題が報道で取り沙汰されているように、地震大国である日本では、安全の観点から地震や地すべり等が生じた時に、どの程度建築物が動揺し、移動するのか、もしくは傾斜しているのかといった情報を事前に把握しておくことが建築の分野では昔から求められている。高価な測量機器を用いれば、建物の位置は正確に分かるが、地震等の災害発生時にどれほどの動揺を引き起こすのかといった精度の高い定量的なデータを取得することは既存の手法では難しい。そこで、低コスト GNSS 受信機を用いた RTK を建造物の壁面に適用し、リアルタイムで建造物の動揺を監視できる手法を用いることで、地震等の災害発生時にどの程度の動揺が生じているのかを定量的かつ低コストで把握することが可能となる。建物の屋上で RTK を行えば、建物の屋上部分の動揺を正確に把握することはできるが^[1]、実際には高層建築物等の壁面部分が引き起こす構造力学的な複雑な動揺を把握するニーズが建築の分野では大きいため、建物の壁面での利用を研究対象とした。本節のアプリケーションでは、2章の 2.1 節でも示した、Tallysman 社製の低コストで小型の GNSS パッチアンテナを、建物の壁面に取り付け、100 ドル以下の価格帯で購入できる u-blox 社製の一周波対応低コスト GNSS 受信機 (NEO-M8T と NEO-M8P) を用いて RTK を行った。単純に壁面にアンテナを取り付けて測位を行うと、回折波の影響や衛星配置の劣化により、擬似距離による測位誤差は拡大するため、通常の RTK のアルゴリズムでは Fix 解を得ることは難しい。そういった課題を対処するアルゴリズムの改善（提案手法）を 4.2 節に、実験概要と解析設定を 4.3 節に、そして測位結果等を 4.4 節に示す。

4.2 解析ソフトウェアと提案手法について

提案手法のアルゴリズムについて言及する前に、RTKの計算において前提とする幾つかの条件について触れる。u-blox社製の受信機（NEO-M8TやNEO-M8P、ZED-F9Pなど）は、搬送波位相の受信瞬断が起きた際に立ちあがるLLI（Loss of Lock Indicator）のフラグが出力されるようになっているため、搬送波位相を使用するか否かの判定、すなわち測位計算に使用する衛星の選択に関しては、LLIを信用している。また、一般的に、構造物壁面に対して垂直にアンテナを取り付けた場合、上空視野が壁面により半分程度遮断され、特に見通し不可の衛星から伝搬してくる回折波の影響を考慮しなくてはならない。一方、壁面に接していることから、反射波が持つ搬送波位相観測値の遅延量は非常に小さいため、搬送波位相マルチパスの影響は考慮しなくてよいことが分かっている。衛星配置の偏りによりDOPの劣化に関しては、必要な精度に応じた閾値を設定することで、影響を小さく抑えることができる。また、既存の衛星選択手法として、魚眼カメラを利用した回折を起こしている衛星の判定があるが⁹⁾、u-blox社製のNEO-M8TやNEO-M8Pを用いた多くの実験結果より、捕捉した衛星のデータが回折波であるかそうでないかを判定するための最適な信号強度の閾値が約35[dB-Hz]であることが分かっているため(図4.1)、基本的上記の値を提案手法の解析の設定で採用している。さらに、壁面に対して垂直に設置することが最適な測位であるのかどうかを測るために、壁面に対して水平に設置する方法と45度傾けて設置する方法も事前実験として実施した(図4.2)。事前実験の結果より、壁面に対して垂直に設置する方法が一番良好なデータを取得できることが分かったため、一連の実験においては壁面に対して垂直の方向に設置する方法を採用している。

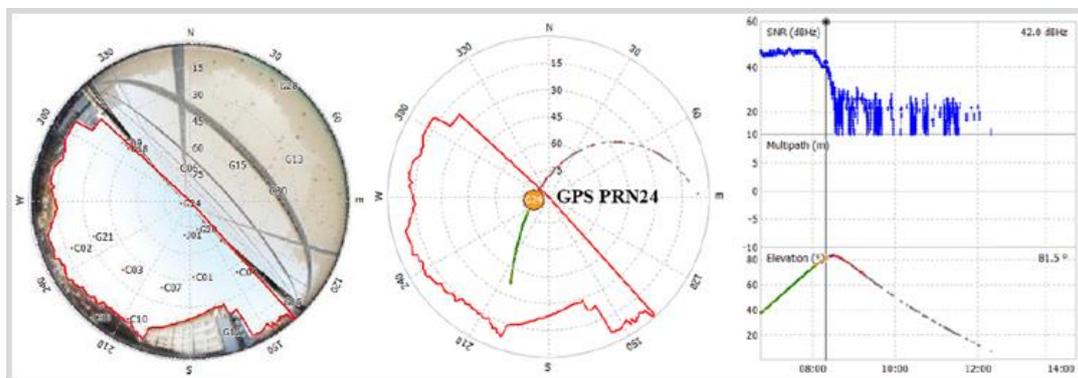


図 4.1 上空画像と NLOS 衛星の信号強度の推移

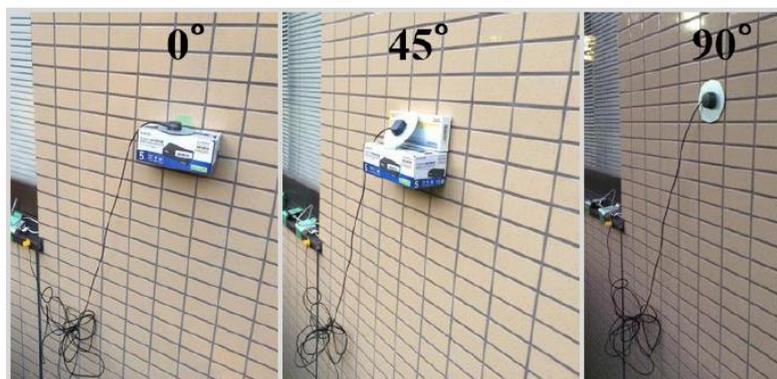


図 4.2 初期実験（壁面に対して垂直，45度，水平）

4.2.1 RTKLIBによる解析

取得したデータの解析においては、3章までの解析と同様に RTKLIB (ver. 2.4.3 b29) を使用した。RTKLIB の後処理解析機能である RTKPOST を使用し、取得したデータの解析に際してはあらゆる設定を試し、一番性能が良いと思われる結果を提案手法に対する比較材料として用いた。一般に、厳しい環境でデータを取得して RTKLIB で解析する際に、一番良好な最終結果が得られる設定を見つける作業は労力を伴うが、仰角のマスク値や信号強度のマスク値、サイクルスリップの判定値などの最適値を見つけて解析に適用すると、魚眼カメラ等を用いた時の衛星選択手法で見られる改善度合いと同等の改善が期待できることが分かっている^[8]。解析設定項目の具体的な値に関しては 4.3 節に示す。

4.2.2 提案手法による解析

提案手法の RTK アルゴリズムの大部分は、標準的な手法であり、整数値アンビギュイティを決定する LAMBDA 法や、LAMBDA 法で求められた Fix 解の信頼性を検定する Ratio テストなどを採用している。

A) Float 解とアンビギュイティ決定

標準的な RTK の計算部では、擬似距離観測値と搬送波位相観測値の二重差が計算され、二重差を利用することで、受信機と衛星固有のバイアス成分を相殺している。加えて、対流圏遅延による影響も、基準局と移動局の距離が離れていなければ（基線長約 10[km]以内）、効果的に取り除くことが可能である。二重差観測値のモデル式は以下のように定義される^[12]。

$$(1) \quad DDP = (P_{erf}^{sv1} - P_{ref}^{sv2}) - (P_{rov}^{sv1} - P_{rov}^{sv2}) = \rho_{code} + \varepsilon_{code}$$

$$(2) \quad DD\phi = (\Phi_{erf}^{sv1} - \Phi_{ref}^{sv2}) - (\Phi_{rov}^{sv1} - \Phi_{rov}^{sv2}) = \rho_{phase} + \lambda N + \varepsilon_{phase}$$

ただし、 P [m]、 Φ [m] はそれぞれ擬似距離観測値と搬送波位相観測値を表し、 ρ [m] は二重差による幾何学的距離を、 λ [m] は搬送波の波長、 N は二重差による整数値アンビギュイティ、 ε [m] はマルチパスによる影響を含んだ二重差のノイズ誤差を表す。

はじめに、三次元位置（Float 解など）と実数のアンビギュイティを決定するために、二重差観測値が利用される。Float 解の推定に関する詳細は後述の C) にて参照されたい。次に、最適化による整数値アンビギュイティ決定（AR 計算部）がなされる。AR 計算部ではコスト関数を最小化する方法で最適な整数値アンビギュイティを探索する。コスト関数は以下のように定義される。

$$(3) \quad C(N) = (N - \hat{N})^T W_N (N - \hat{N})$$

ただし、 N はコスト関数内で最小化された整数値アンビギュイティを表し、 \hat{N} は Float 解のアンビギュイティを、 W は共分散行列の逆行列を表す。

LAMBDA 法は AR 計算部で一般的に用いられる最小二乗法を根幹とした手法であり^[13]、最適な整数値アンビギュイティを決定する手法としては最も普遍的なものとして位置づけられている。

B) 整数値アンビギュイティ検証

LAMBDA 法によって整数値アンビギュイティが決定された後は、そのアンビギュイティが信頼できるか否かを検定する。幾つかの検定手法が存在するが^[4]、本アプリケーションの提案手法では標準的な Ratio テストと呼ばれる検定手法を用いる。整数最小二乗法に基づく Ratio テストは厳しい環境下で取得されたデータに対して効果的な検定手法であることが分かっている（短基線のデータを使用しているため、Ratio テストの閾値は固定値を採用した）。Ratio テストの定義では、コスト関数によって算出された Float 解のアンビギュイティ残差からの差分を用いて算出した比が、閾値以上であるかどうか比較評価される。

Ratio テストで算出される Ratio 値は以下のように定義される。

$$(4) \quad \text{Ratio} = \frac{C(N_2)}{C(N_1)} > \text{Threshold}$$

ただし、 $C(N_1)$ は候補として最有力の整数値ベクトルのコスト関数の出力値を、 $C(N_2)$ は候補として二番目に有力な整数値ベクトルのコスト関数の出力値を表し、*Threshold* は閾値を表す。上式は、算出される比が閾値よりも大きければ、その整数値アンビギュイティの組み合わせが信頼されることを意味する。設定すべき閾値は経験的に決まっており、環境に応じて 2~3 の値が通常使用される。本アプリケーションの提案手法では、閾値は 3 を採用した。

C) 悪環境下でのロバスト RTK 手法

壁面測位等の悪環境下で RTK の性能を上げるには、正しいアンビギュイティを探索するアルゴリズムに改良を施す必要がある。また、良質な衛星を選択することも非常に重要である。一般的には、Float 解のノイズ誤差を低減できるカルマンフィルタに基づく RTK 測位と信号強度に応じた衛星選択手法が用いられる。本アプリケーションの提案手法では類似の衛星選択手法を取っているが、ノイズ誤差等を除去するための手法としてカルマンフィルタは採用していない。なぜなら、通常、建造物の動揺は極めて小さく、動揺の速度も遅いといわれており、橋梁であっても一日に 10cm 以下の動揺といわれているためである。建造物の動揺を検知するという目的においては、予め動揺の程度が分かっているため、アンテナの移動量に関する制約を厳しく設定することが可能である。また、提案手法では移動局のアンテナの初期精密位置を事前に把握しておくことが極めて重要である。仮に精密位置の情報がなかったとしても、測位をしたい箇所にアンテナを取り付け、一度 RTK で正確な位置を知ることができれば、その位置を初期位置として利用することができる。壁面での RTK で最も障害となる要因が、大きな擬似距離マルチパスであり、通常アルゴリズムで RTK を行うと、結果の信頼性は低くなる。一方、予めアンテナの位置が 10cm 以内で正確に分かっているならば、既に高精度な Float 解を持っていて、それが利用可能なことと同義であるため、擬似距離観測値が利用できなくても特に問題はない。上記の手法（以下、ロバスト RTK 手法と呼ぶ）を用いることで、上空視野が半分程度遮られている環境でも、RTK 測位の性能は通常アルゴリズムと比較して劇的に向上する。また、そういった環境では、価格帯で 10,000 ドルを超えるような測量級 GNSS 受信機の内部の測位エンジンを使用したとしても、RTK の性能は非常に低下することが分かっている（4.4 節の 4.4.2 項参照）。

ロバスト RTK 手法を用いると同時に、各衛星に対して既に求められたアンビギュイティを保持する手法も同時に利用する。サイクルスリップを起こす衛星に注意しながら、予め求められて

いるアンビギュイティを利用して **Fix** 解を算出する。ロバスト **RTK** 手法で求められた位置とアンビギュイティを保持することで求められた二つの位置を確保し、その二つの位置がアンテナの精密位置である初期位置から **10[cm]**以内かどうかを調べた後、どちらかを採用し、最終的に出力する **Fix** 解の信頼性を高める。大きな地震等が起きた際は、サイクルスリップが起きていない幾つかの衛星のアンビギュイティ情報を保持でき、1秒間に数 **cm** 以上の速度で構造物が動揺していると判定できた場合は、アンビギュイティを保持することで得た **Fix** 解のみを信頼する。なお、本手法では、使用可能である衛星が最低でも **5~6** 機に満たない場合は、位置を算出することは不可能である。大きな動揺が生じた際には、高層ビルの上層では **50[cm]**をゆうに超える動揺が生じるといわれている。ロバスト **RTK** 手法においては、アンビギュイティの探索範囲の制限により、**20[cm]**を超える動揺を追尾することは難しいという理由から、上述のアンビギュイティを保持する手法も取る。提案手法のアルゴリズムのフローチャートを以下に示す (図 4.3)。

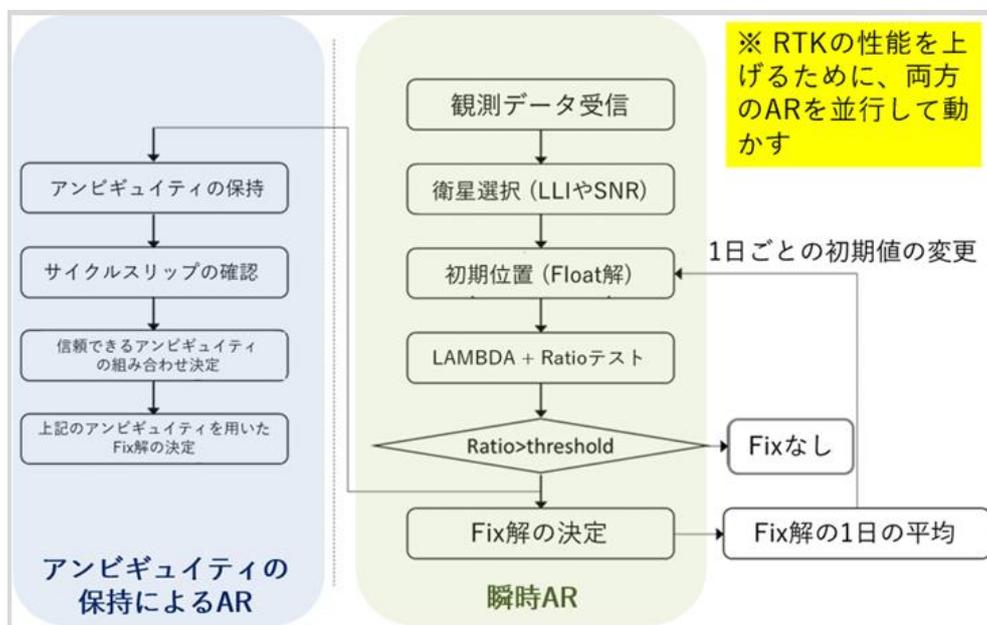


図 4.3 提案手法のフローチャート

4.3 実験概要と解析設定

2017年11月15日と16日の2日間にわたって、前述の測位実験を実施した。東京海洋大学海洋工学部の構内に存在する3号館の壁面（南西，南東，北西，北東の方角を向く壁面4箇所）を実験場所として選択し，23時間（南東，北西，北東）と24時間（南西のみ）のデータを取得した。使用した機材等の情報，アンテナ設置場所及び壁面での実験状況を以下に示す（表4.1，図4.4と図4.5）。なお，基準局のデータに関しては，3章までと同様に，同じ大学構内にある第4実験棟の屋上に設置されているGNSSアンテナから来ている信号を利用している。

表 4.1 使用機材等

測位間隔	1[Hz]
GNSS 受信機	移動局: NEO-M8T 基準局: NEO-M8T
使用衛星	RTKLIB: GPS/QZSS/BeiDou/Galileo 提案手法: GPS/QZSS/BeiDou/Galileo
アンテナ	移動局: TW4721 基準局: Zephyr2 Geodetic
その他	モバイルバッテリー，アンテナ固定用本立て等



図 4.4 アンテナ設置場所



図 4.5 実験状況（左上:南西，右上:南東，左下:北西，右下:北東）

各壁面で取得したデータを解析するにあたって採用した RTKLIB の設定値を以下に示す（表 4.2）。2 章の 2.3 節で示した設定項目と同様に、「マスク角」は使用する衛星を決める際の最低仰角を示し、「最低信号強度」は測位に使用する衛星の最低信号強度を表す。「AR のモード」は RTK のアンビギュイティ決定方法を表し、「P と C の雑音比」は擬似距離（Pseudo Range）と搬送波位相（Carrier Phase）の雑音比を意味する。

表 4.2 各壁面のデータに対する解析の設定値（RTKLIB）

	南西方向壁面	南東方向壁面	北西方向壁面	北東方向壁面
マスク角	20 度	15 度	30 度	25 度
最低信号強度	35[dB-Hz]	31[dB-Hz]	32[dB-Hz]	35[dB-Hz]
AR モード	Fix and Hold	Fix and Hold	Continuous	Fix and Hold
P と C の雑音比	500 対 1	500 対 1	500 対 1	500 対 1

同様に，提案手法で適用した解析の設定値を項目ごとに以下に示す（表 4.3）。

表 4.3 各壁面のデータに対する解析の設定値（提案手法）

	南西方向壁面	南東方向壁面	北西方向壁面	北東方向壁面
マスク角	20 度	10 度	20 度	15 度
最低信号強度	35[dB-Hz]	30[dB-Hz]	35[dB-Hz]	35[dB-Hz]
AR モード	瞬時 AR	瞬時 AR	瞬時 AR	瞬時 AR

4.4 実験結果と評価

4.4.1 提案手法による測位結果

各壁面で測位した結果を以下に表と図で示す（図 4.6～図 4.9, 表 4.4～表 4.7）。表中では、Fix 率、信頼性、測位解の真値からの水平方向のずれの標準偏差と平均を示している。南西方向の壁面の測位では 24 時間分のデータを取得したため、総エポック数は 86400 となり、他の方向の壁面の測位は 23 時間分のデータであるため、総エポック数は 82800 となる。なお、ここでは水平方向で真値から 10[cm]以内かつ高さ方向で真値から 20[cm]以内の解を信頼できる解とした。

RTK 測位解の信頼性は以下のように定義した。

$$(5) \quad \text{信頼性} = \frac{\text{信頼できるFix解の数}}{\text{全Fix解の数}} \times 100$$

RTK 測位の Fix 率は以下のように定義した。

$$(6) \quad \text{Fix率} = \frac{\text{全Fix解の数}}{\text{測位時間帯の総エポック数}} \times 100$$

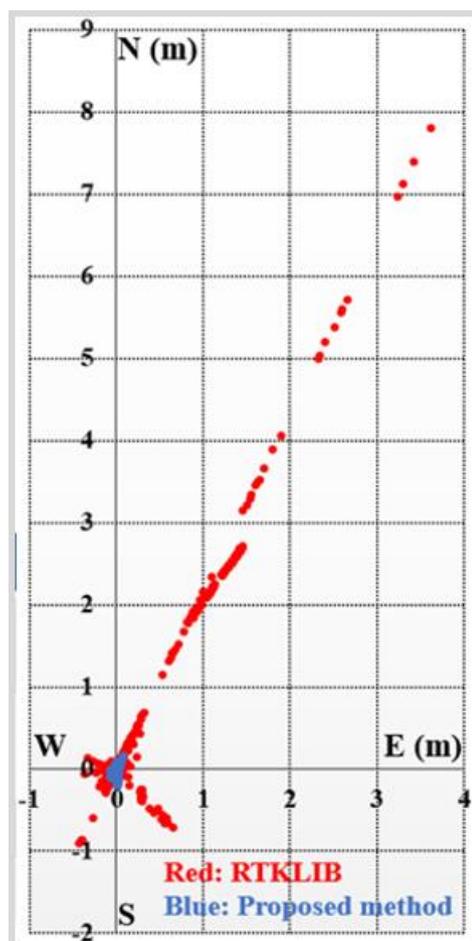


図 4.6 南西方向壁面の水平結果

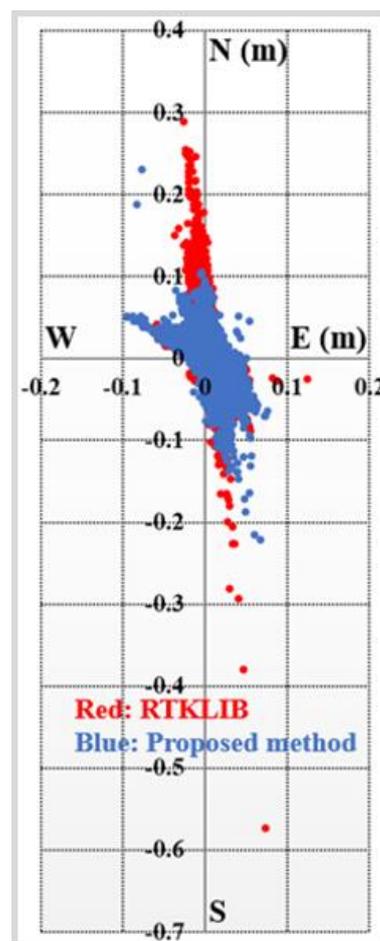


図 4.7 南東方向壁面の水平結果

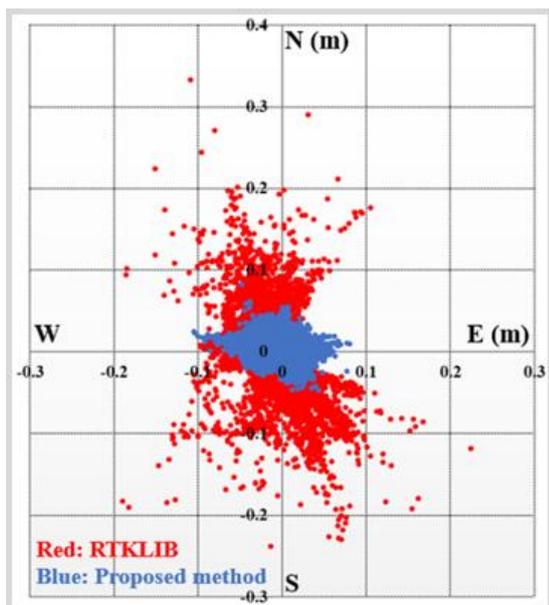


図 4.8 北西方向壁面の水平結果

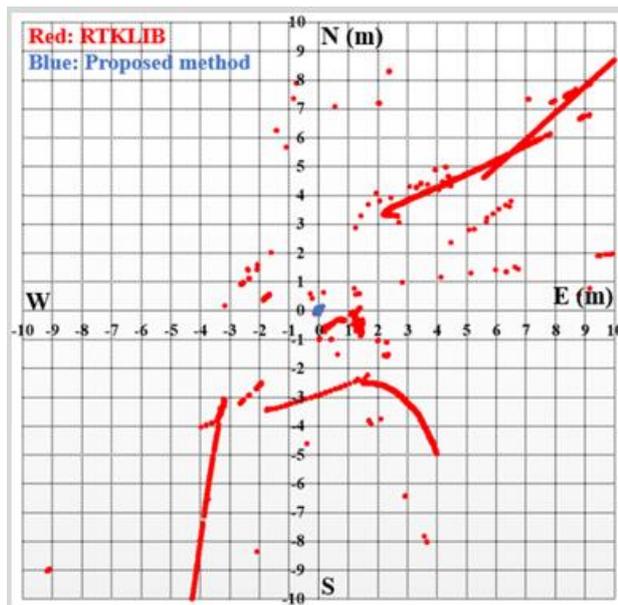


図 4.9 北東方向壁面の水平結果

表 4.4 南西方向壁面の測位結果

南西方向壁面	RTKLIB	提案手法
RTK の Fix 率	91.8[%]	98.2[%]
Fix 解の数	79314(GBQE)	84822(GBQE)
信頼性	99.15[%]	99.77[%]
信頼できる解の数	78638	84622
ずれの平均	0.021	0.012
ずれの標準偏差	0.173	0.012

表 4.5 南東方向壁面の測位結果

南東方向壁面	RTKLIB	提案手法
RTK の Fix 率	97.5[%]	96.4[%]
Fix 解の数	80697(GBQE)	79805(GBQE)
信頼性	99.66[%]	99.85[%]
信頼できる解の数	80426	79682
ずれの平均	0.012	0.008
ずれの標準偏差	0.013	0.022

表 4.6 北西方向壁面の測位結果

北西方向壁面	RTKLIB	提案手法
RTK の Fix 率	93.9[%]	97.4[%]
Fix 解の数	77739(GBQE)	80681(GBQE)
信頼性	99.06[%]	99.99[%]
信頼できる解の数	77006	80679
ずれの平均	0.017	0.012
ずれの標準偏差	0.019	0.009

表 4.7 北東方向壁面の測位結果

北東方向壁面	RTKLIB	提案手法
RTK の Fix 率	29.1[%]	12.5[%]
Fix 解の数	24133(GBQE)	10331(GBQE)
信頼性	35.92[%]	99.40[%]
信頼できる解の数	8669	10269
ずれの平均	20.2	0.046
ずれの標準偏差	254	0.017

図 4.6～図 4.9 は水平方向の測位結果を示しており、赤色のプロットが RTKLIB によるものであり、青色のプロットが提案手法によるものである。提案手法により、どの方角の壁面においても、RTKLIB の結果よりも信頼性の高い解が増加し、改善されていることが分かる。また、どの方角においても、信頼性は 99[%] を超える性能が得られた。北東方向の壁面で Fix 率が低いのは、他の方角と比較して衛星数が少ないことによるが、今後のマルチ GNSS の配備、低コストの多周波対応 GNSS 受信機（u-blox 社製の ZED-F9P 等）の利用により、方角による性能の差は生じなくなると思われる。

結果より、少なくとも 3～4[cm] 以上の構造物の挙動は十分に検出可能であることが分かる。加えて、地震等が起きる際はさらに大きな動揺が生じるため、動揺が生じるタイミングと動揺の振幅を正確に把握することが可能となる。さらに、一日毎の測位解の平均を取得し、長期にわたって観測を続ければ、構造物の移動量や傾斜量等を確認することも可能である。

4.4.2 市販受信機の測位性能評価

リアルタイムの RTK 測位の機能を備えた低コスト GNSS 受信機の性能を調べるために、同様の実験を 2017 年の 4 月に南東方向の同じ地点である 2 階壁面で実施した。u-blox 社製の NEO-M8P を使用し、5[Hz] の測位間隔で 1 時間程度のリアルタイムの測位結果を取得した。水平方向の測位結果を以下に示す（図 4.10）。図 4.10 の緑色のプロットは NEO-M8P の全測位解を示し、原点はアンテナの精密位置を示している。ほとんど全ての測位結果は Float 解であり、壁面での測位といった悪環境下では u-blox 社製の NEO-M8P は RTK 測位ができないことが分かった。

同様に、Trimble 社製の SPS855 測量級受信機も使用して、2017 年の 7 月に南西方向の同じ地点である 1 階壁面で実験を実施した。10[Hz]の測位間隔で 1 時間程度のリアルタイムの測位結果を取得した。水平方向の測位結果を以下に示す (図 4.11)。低コスト GNSS 受信機の結果と同様に、測量級受信機を使用しても Fix 解は得られなかった。図 4.11 では、赤のプロットが単独測位解を示し、青が DGNSS 解を、黄色が Float 解を示す。なお、原点はアンテナの精密位置を示す。

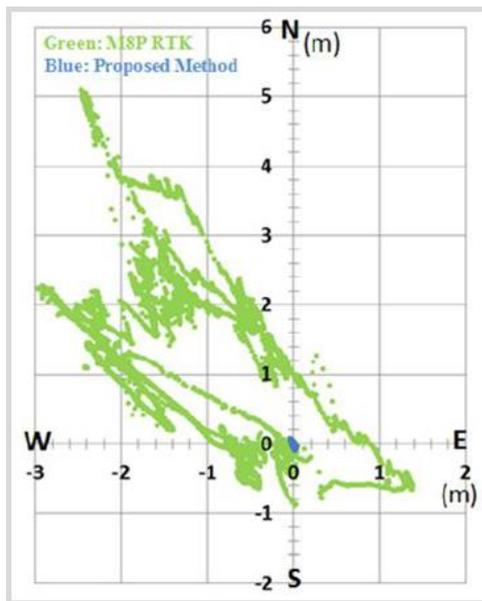


図 4.10 NEO-M8P の RTK 結果 (南東方向壁面)

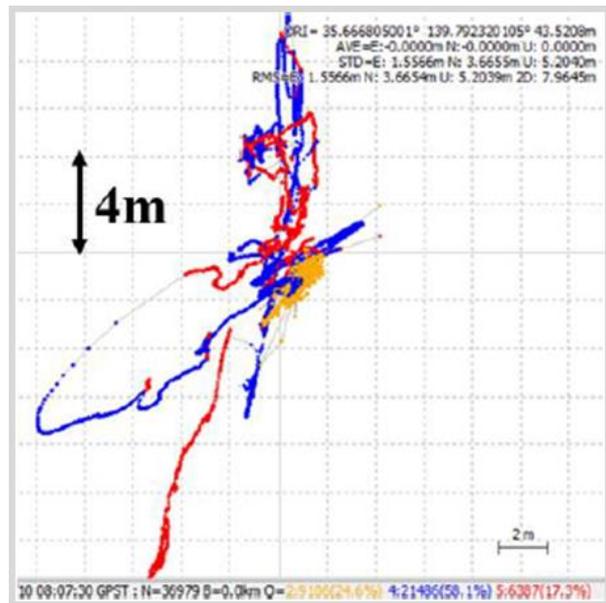


図 4.11 SPS855 の RTK 結果 (南西方向壁面)

以上の結果より、一般的に市販されている GNSS 受信機は、こういった厳しい環境での RTK には対応していないということが分かる。

4.4.3 追加の実験

前述の実験に加えて、アンテナを壁面に沿って手動で短時間動かし続け、アンテナの精密位置を Float 解として利用するロバスト RTK 手法の Fix 解がしっかりとアンテナの動きを追尾できるかどうかの検証を 2017 年 4 月に南西方向の同じ地点である 1 階壁面にて実施した。以下に実験状況を示し (図 4.12)、地面に対して水平方向に 1 分間動かし、垂直方向に 1 分間動かした時の結果も以下に示す (図 4.13 と図 4.14)。測位間隔は 5[Hz]であり、動かした幅は左右、上下ともに約 10[cm]である。

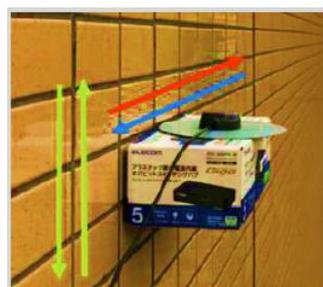


図 4.12 壁沿いに動かす実験

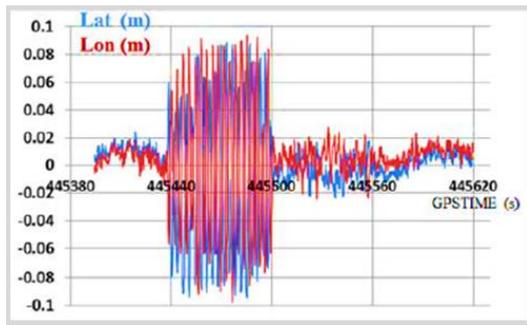


図 4.13 水平方向の移動量

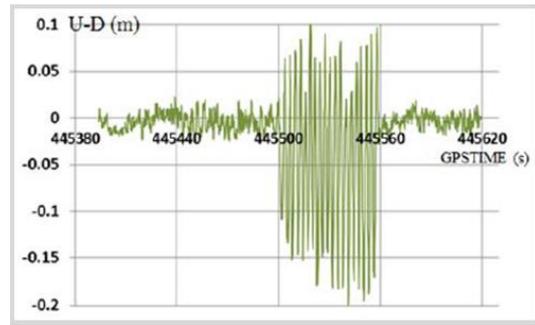


図 4.14 高さ方向の移動量

上記の結果より、水平方向、高さ方向ともにアンテナ位相中心をしっかりと追尾できていることが確認でき、この手法が有用であることが確認できた。

同様に、4.2節の4.2.2項の図4.3で示したアンビギュイティを保持する手法の性能を検証するために、さらに大きい動揺を想定した類似の実験を2018年1月に南西方向の壁面にて実施した。アンテナを移動させるために使用したポールと実験状況と、RTKLIBを解析に使用した結果とアンビギュイティ保持の手法による結果を以下に示す(図4.15～図4.18)。測位中は、アンテナ付きのポールを壁沿いに1分間動かし、弧を描くように動かした。動かした幅は約40[cm]である。測位間隔は5[Hz]であり、測位時間は3分程度である。

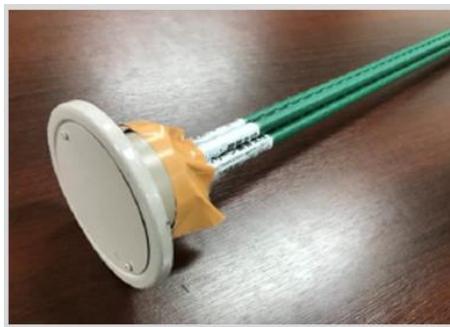


図 4.15 実験に使用したポール

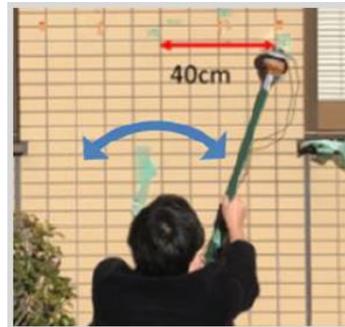


図 4.16 実験状況

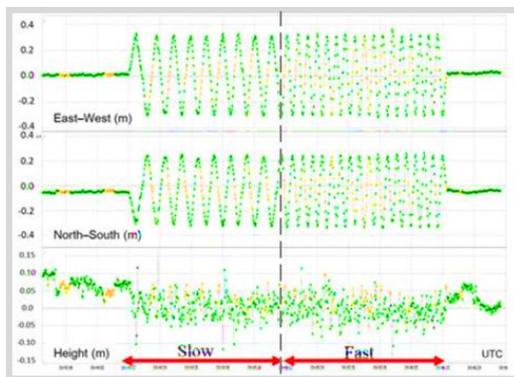


図 4.17 RTKLIB の結果

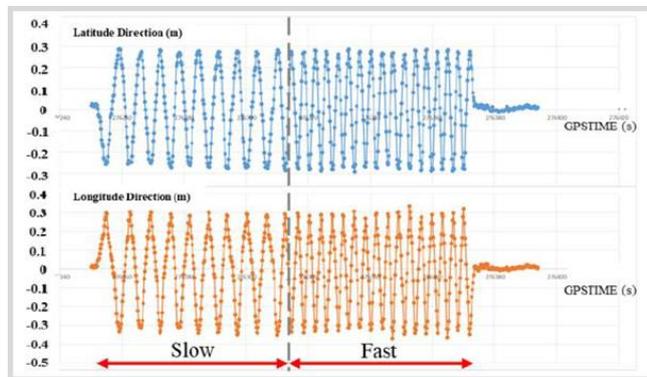


図 4.18 アンビギュイティ保持の手法による結果

図 4.17 と図 4.18 より, RTKLIB を使用して解析した結果では Float 解やミス Fix 解が見られるが, 提案手法の結果の Fix 率は 100[%]であり, ミス Fix 解も見られなかった.

4.4.4 リアルタイムの実験

4.4.3 項までの結果を踏まえ, 実用的なシステムを目指し, 2018 年の 8 月に 2 階の南東壁面に同様の方法でアンテナと受信機を設置し, リアルタイムのモニタリング試験を実施した. その際, リアルタイムの移動局のデータ取得に関しては, PC 等のシリアル通信を利用せず, サーバー側 (Ntrip サーバー) へ時々刻々の RAW データを送信し, 遠隔の PC 等で両局のデータをサーバーから受信し, RTK の計算をするというシステム構成にした. 移動局の RAW データを指定のサーバーへ送信するシステムは, u-blox 社の NEO-M8P と小型の PC である「Raspberry Pi3」, ドコモ社の携帯電話通信回線を利用する SIM カード (IIJ mio) を利用して, 別途開発した (開発した RAW データをサーバーへ送信できる小型キットに関しては後述). アンテナの設置状況と使用機材の写真を以下に示す (図 4.19). また, 同様に比較材料として RTKLIB のリアルタイム測位機能である RTKNAVI (ver. 2.4.3 b29) による測位結果も同時に取得した. RTKLIB の測位中の画面と提案手法を組み込んだソフトウェアの測位中の画面をリアルタイム測位のイメージとして以下に示す (図 4.20). 測位間隔は 2[Hz]であり, 測位時間は 10 時間である. なお, 提案手法のリアルタイム測位には Microsoft 社の統合開発環境である「Visual Studio 2010」を使用している.



図 4.19 アンテナ設置状況と使用機材

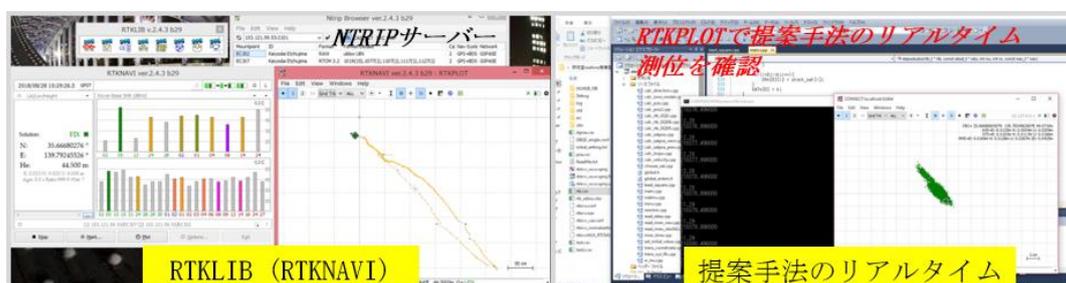


図 4.20 測位中の画面

RTKLIB によるリアルタイムの測位結果と, 提案手法によるリアルタイムの測位結果を以下に示す (図 4.21 と図 4.22 及び表 5). どちらの図のプロットも Fix 解のみを示しており, 原点はアンテナの精密位置を示している.

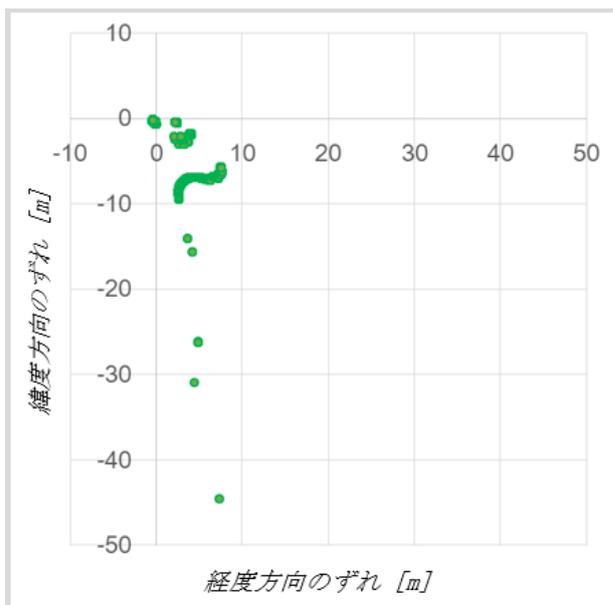


図 4.21 リアルタイムの測位結果 (RTKLIB)

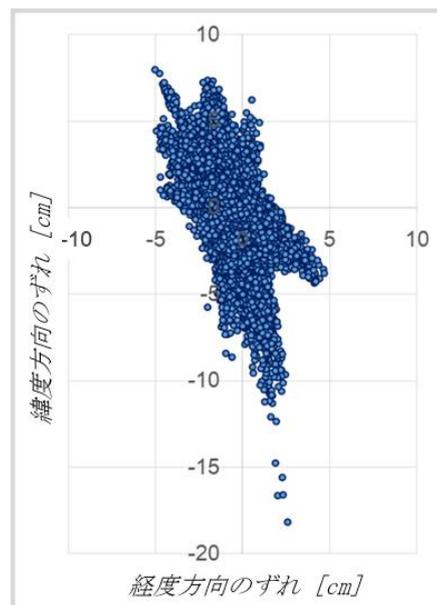


図 4.22 リアルタイムの測位結果 (提案手法)

表 5 RTKLIB と提案手法による測位結果

南東方向壁面	RTKLIB	提案手法
RTK の Fix 率	50.2[%]	97.9[%]
Fix 解の数	36144(GBQ)	70488(GBQ)
信頼性	0.00[%]	99.96[%]
信頼できる解の数	0	70460
ずれの平均	2.19	0.016
ずれの標準偏差	3.14	0.012

提案手法による結果に関しては、リアルタイムの測位でも、後処理と同程度の実用的な Fix 率と精度が得られた。一方、RTKLIB のリアルタイムの測位結果に関しては、後処理と全く同じ解析の設定を適用しているにも関わらず、非常に低い Fix 率と信頼性になった。この性能の差はどちらの局もサーバー経由で RAW データを取得しているという通信方式、もしくはリアルタイム測位と後処理測位における RTKLIB 内の細かなアルゴリズムの違いに起因するものと思われるが、原因については今後の調査で究明していきたい。

近年話題を呼んでいる IoT 分野での利用を志向し、東京海洋大学海洋工学部の情報通信工学研究室で開発した RAW データをサーバーへ送信する小型キットを以下に示す (図 4.23)。既存の RTK のシステムでは、どれも移動局が一方向的に基準局の補正データを受信し、移動局で測位計算をするという形をとっている。全体の制御用にマイコンである「Arduino MEGA」、GNSS 受信機部分に NEO-M8P、通信にドコモ社の通信回線である SIM カード (IIJ mio) を使用している。この章までに示してきたように、安価かつ小型の機器で精密な位置情報が手軽に入手可能であると、近年の IoT 時代では上記のようなサーバーへ位置情報もしくは RAW データ等を送信して、サーバー内でやり取りし、計算して遠隔でモニタリングできるようなシステムが要請される。

1章の1.2節でも触れたように、大規模な工事現場等で人員や建機・重機の位置情報を厳密に管理し、自動運転や安全支援などのシステムへの応用を図る場合、前述の機能を持った、スペースを取らない小型のキットが必要である。上記の流れをくみ、情報通信工学研究室では、RAWデータ送信キットのプロトタイプを制作し、壁面での利用のみならず、多岐にわたる分野の位置情報把握システムの研究を継続している。なお、上記の壁面でのリアルタイム測位の結果は、**Arduino MEGA**ではなく、**Raspberry Pi3**を制御しているベース部分に使用して得たものであり、実際のキットの構成はやや異なるが、RAWデータをサーバーへ送信するという機能は全く同じである。

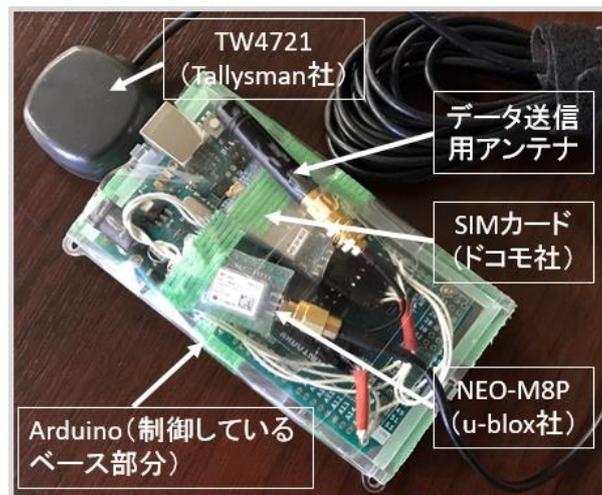


図 4.23 RAW データをサーバーへ送信する小型キット (IoT 向け)

第5章 低コスト GNSS 受信機を利用する測量等で生じる課題

3章までにまとめた測量級 GNSS 受信機に対する低コスト GNSS 受信機の代替可能性と 4章で報告した特定の悪環境下でのアプリケーション例を踏まえ、本章では、低コスト GNSS 受信機を現場での測量等で利用する際に生じる固有の課題について取り上げ、その解決方法を提案したい。

5.1 既存の GNSS 測量

既存の GNSS 測量では、2章の表 2.1 で示したような測量級 GNSS 受信機や測量級受信機に対応した測量級 GNSS アンテナが基準局、移動局ともに利用されており、一般的に測量業者が低コスト GNSS 受信機を業務で利用することはまずない。測位方式には幾つか種類があるが、日本の測量の世界では、ネットワーク型 RTK システムが最も一般的といえる。ネットワーク型 RTK システムを利用する測量には、観測に含まれる誤差を、複数もしくは近傍 1 局の電子基準点のリアルタイム観測データ等を利用して補正することで、通常の RTK ではボトルネックとなる基準局からの長距離基線の測量を可能にするという方式がある。その精度は短距離基線の RTK と同等の測位精度が期待できる^[15]。ネットワーク型 RTK システムには幾つかの方式が存在しており、上記の方式も含んだ、日本の測量業者が実施する RTK の種類を以下に列挙する^[16]。なお、括弧内に示されている多対一方式は移動局に対する基準局や基準となる観測点等が複数あることを意味し、一対一方式は移動局に対する基準局が 1 局だけであることを意味する。

- スタティック測位/短縮スタティック測位 (図 5.1)

複数の既知点（標石基準点など）と新点に GNSS アンテナと受信機を設置し、取得した観測データを基線解析ソフトウェアで解析する方式（多対一方式）

公共測量では、主に 1 級もしくは 2 級基準点の測量に利用される

- VRS 方式 (図 5.2)

VRS（仮想基準点）方式による RTK-GPS 測位であり、移動局周辺の電子基準点網から移動局近傍に仮想基準点を生成し、仮想基準点の観測データを生成して RTK を行う方式であり、測量業者は自前の基準局を設置する必要がない（多対一方式）

公共測量では、主に 3 級もしくは 4 級基準点の測量及び地形・応用測量に利用される

- 無線を使用した RTK (図 5.3)

測量業者が自前で設置した基準局の補正データを、特定の周波数帯を利用して移動局へ無線送信して RTK を行う従来の方式（一対一方式）

公共測量では、主に 3 級もしくは 4 級基準点の測量及び地形・応用測量に利用される

- サーバーを使用した RTK (図 5.4)

測量業者等が自前で設置した基準局の補正データを、携帯電話回線等を用いてサーバー経由で移動局側に送信し、RTK をする（一対一方式）

公共測量では、主に 3 級もしくは 4 級基準点の測量及び地形・応用測量に利用される

- RRS 方式 (図 5.5)

移動局に一番近接している電子基準点を基準局として、携帯電話回線等を用いてサーバー経由で移動局側に補正情報を送信し、RTK をする（一対一方式）

公共測量では、主に 3 級もしくは 4 級基準点の測量及び地形・応用測量に利用される



図5.1 スタティック測位/短縮スタティック測位

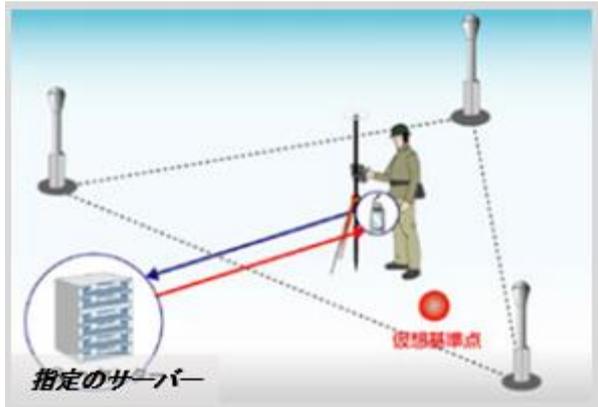


図5.2 VRS方式

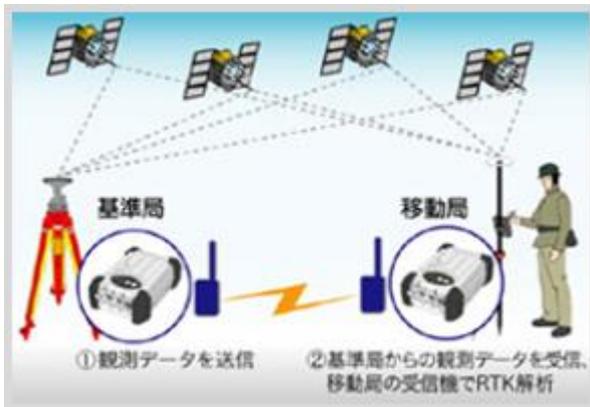


図5.3 無線を使用したRTK

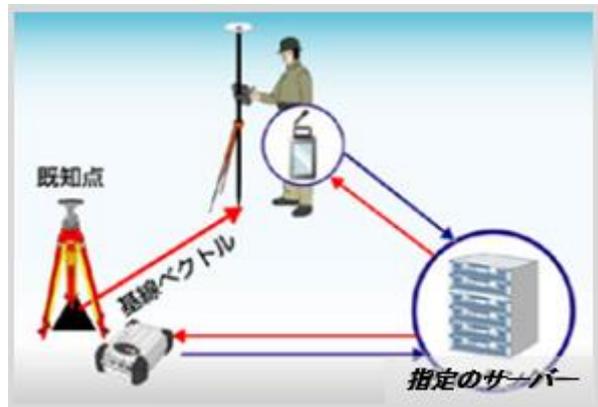


図5.4 サーバーを使用したRTK



図5.5 RRS方式

上記の測量方式は、国土地理院が配備し、運用している、日本全国に存在する約 1300 点の電子基準点と、その電子基準点のデータの品質を管理し、基準局の補正データとして配信する民間事業者が存在することによって成り立つシステムである^[7]。測量級 GNSS 受信機で測量を行う際には、配信サービスを提供する民間事業者と契約し、上記の VRS 方式や RRS 方式等の測量方式を実施するというのが一般的な方法である。以下に補正データ配信サービスを利用する場合の RTK のイメージ図を示す (図 5.6)。補正データ配信サービスは、測量級 GNSS 受信機での測量や建機・重機のオペレーションを対象にしたサービスであり、低コスト GNSS 受信機は基本的に

サービスの対象外である。なお、一般的には、補正対象の衛星システムは GPS と GLONASS である（一部のサービスでは、QZSS も補正対象である）。

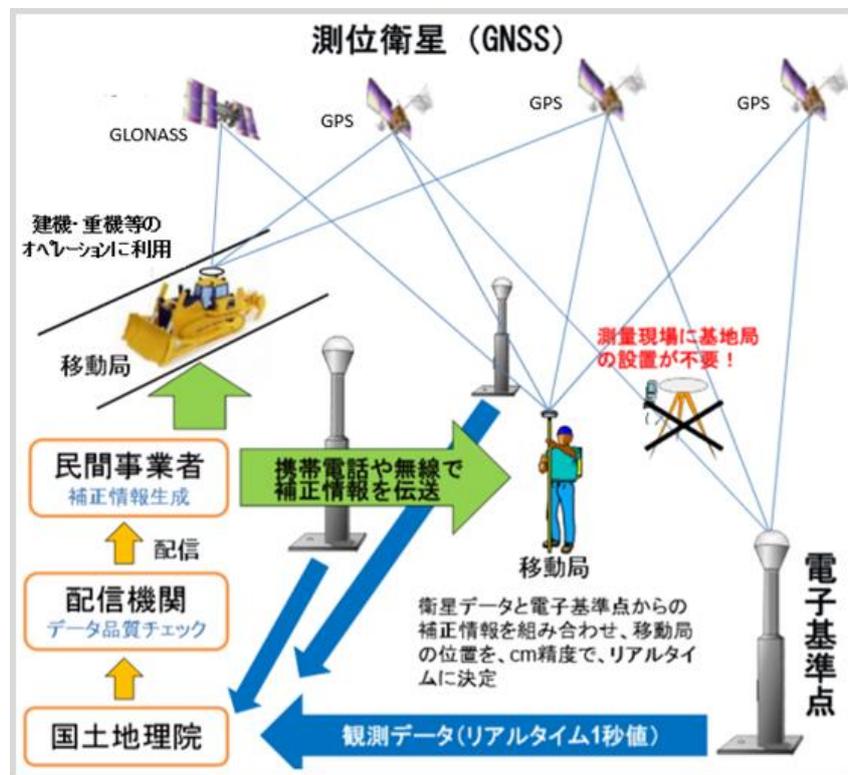


図5.6 補正データ配信サービスを利用する場合のRTKのイメージ

5.2 座標ずれの問題

5.2.1 GEONET の F3 解と低コスト GNSS 受信機を使用した RTK

通常、低コスト GNSS 受信機を使用して RTK を実施する際には、5.1 節で言及したような補正情報サービスを使用することは簡単にはできないため、例外を除き、自前の基準局を設置することが必要になる。自前の基準局を設置し、その基準局の RAW データまたは補正情報を、携帯電話回線を利用したサーバー経由で、移動局が受信することで RTK は可能になる。その際に、基準局の精密位置を事前に求める作業が必要になるが、特別な場合を除き、日本国内では国土地理院のホームページにてフリーでダウンロード可能な任意の時間帯の電子基準点（基準局）の観測データと、日々更新されている各電子基準点の精密位置を利用して RTK をする形となる。国土地理院の GEONET より日々公表されている電子基準点の精密位置は「F3 解」と呼ばれ、F3 解は国土地理院より発行されている、「GPS 連続観測システム（GEONET）の解析戦略（第 4 版）」に記載されている最終解を意味している。解析戦略第 4 版によると、解析には「Bernese GPS software Ver. 5.0」が使用されており、座標系は ITRF2005（世界測地系）で、準拠楕円体は GRS80（GNSS で使用されている WGS84 にほぼ等しい）である。GEONET の F3 解は毎日測量され、解析が行われており、測位精度は誤差が 1 年間で数 mm 以内に収まるレベルといわれている。この F3 解が、自前の基準局の精密位置を計算するのに利用されると、設置した基準局の位置は F3 解に準拠した座標となる。

5.2.2 ネットワーク型 RTK システムで使用される座標

VRS 方式や RRS 方式などのネットワーク型 RTK システムで使用される座標値は、「測地成果 2011」に基づいて算出される。測地成果 2011 は、元期において世界測地系と一致する日本国内のみで通用するローカルな座標系であり、世界測地系をある時点として、現実の地点と接点を持たせたものが測地成果 2011 である。2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動が生じた地域では、電子基準点に基づいて公共測量等の基準点測量成果は改定されなければならなくなったことにより実現した基準座標値である。座標系は ITRF2008（世界測地系）を使用しており、準拠楕円体は F3 解と同様に GRS80 を使用している。測地成果 2011 が示す元期に関しては、北海道を除く東日本地域が 2011 年 5 月 23 日であり、西日本地域が 1997 年 1 月 1 日である^[18]。それぞれの地域の対象となる元期を以下の表に示す（表 5.1）。VRS 方式や RRS 方式の座標値は測地成果 2011 により表されるため、算出される座標値は 2011 年 5 月 23 日時点（北海道を除く東日本地域）もしくは 1997 年 1 月 1 日時点（西日本地域）の位置に準拠しており、F3 解のように基準位置として毎日測量されて解析が行われることはない。なお、VRS 方式や RRS 方式の測位精度は誤差が 1 年間で数 cm 以内に収まるレベルといわれている。

表 5.1 測地成果 2011 が示す各地域の元期

測量成果の元期（基準日）	対象地域
2011 年 5 月 24 日	青森県, 岩手県, 宮城県, 秋田県, 山形県, 福島県, 茨城県, 栃木県, 群馬県, 埼玉県, 千葉県, 東京都（島嶼を除く）, 神奈川県, 新潟県, 富山県, 石川県, 福井県, 山梨県, 長野県, 岐阜県
1997 年 1 月 1 日	上記以外の地域

5.2.3 F3 解とネットワーク型 RTK システムで使用される座標の違い

5.2.1 項で言及した F3 解は、Bernese GPS software Ver. 5.0 を用いて長期間の静止点測位により毎日算出されるため、随時発生する地殻変動にも対応した座標値（いわゆる「今期」と呼ばれる座標値）を算出することができている。一方、5.2.2 項で言及した VRS 方式や RRS 方式で使用される座標値の場合、座標は測地成果 2011 に基づいており、測位解（いわゆる「元期」と呼ばれる座標値）に至るまでの間には、測位点で取得した「今期」の座標に対し、地殻変動分を考慮して「元期」の座標に戻すための処理である「セミ・ダイナミック補正（5.2.4 項にて概要を説明）」がなされている。日本列島は 4 つのプレート（北アメリカプレート、ユーラシアプレート、フィリピン海プレート、太平洋プレート）がぶつかり合う境界付近に位置しているため、世界的にみても地殻変動が非常に大きな国であり、時間の経過とともに基準点を載せた大地はプレートごと徐々に変位していく。そのため、2011 年 5 月 23 日や 1997 年 1 月 1 日時点での位置を表す測地成果 2011 と実際に測量した時点（今期）での基準点の位置は時間の経過とともに少しずつずれていく。上述の通り F3 解は地殻変動にしっかりと影響された位置を示しているため（今期座標）、セミ・ダイナミック補正のような処理はなされていない。ここで、実際の基準点の位置は F3 解により与えられると仮定すれば、VRS 方式や RRS 方式の利用で得られるセミ・ダイナミック補正処理がなされた測位解（元期座標）との間には、地域にもよるが、まさに数 cm から数十 cm のセミ・ダイナミック補正量分の系統誤差が発生することが十分に考えられる。VRS 方式や RRS 方式の利用で得られる測位解（元期座標）と F3 解（今期座標）との系統誤差は、特に水平方向に対して顕著に表れる。測量では元期座標に直された測地成果 2011 の座標系のみ利用するため、このずれ自体は通常、問題視されることはない。そのため、測量級 GNSS 受信機を使用したネットワーク型 RTK システムで一貫している測量現場等では、ずれの問題は起きえない。しかし、低コスト GNSS 受信機を利用して、F3 解準拠の精密位置を持つ自前の基準局を使用して RTK を行う場合に、既存の VRS 方式や RRS 方式等を利用して測量がなされてきた現場に持ち込んでしまうと、座標が異なることから、前述の数 cm から数十 cm のずれをそのまま許容してしまうことに繋がり、測量を行う上で大きな問題となる。よって、今期座標である F3 解もしくは F3 解準拠の座標に対し、測位点周辺におけるセミ・ダイナミック補正量を反映させ、元期座標へと戻し入れる作業により、上記の系統誤差をある程度軽減させることができるといえる。

5.2.4 セミ・ダイナミック補正

プレート境界付近に位置する日本列島においては、プレートの運動に伴う地殻変動により、各種測量の基準となる基準点の相対的な位置関係が徐々に変化し、歪みが蓄積していく。基準点の測量成果は、測地成果 2011 の元期である 2011 年 5 月 24 日（北海道を除く東日本地域）と 1997 年 1 月 1 日（西日本地域）における位置情報としているが、地殻変動の進行とともに測量成果の示す座標値と実際の位置にずれが生じてくる。GNSS を利用した測量方式の導入に伴い、遠方にある電子基準点を既知点とした測量が可能となり、歪みの影響は基準点間の距離及び元期からの経過時間に比例するため、累積する地殻変動の影響を考慮しないと、測量成果と観測結果との間に無視できない不整合が生まれる。既設基準点の測量成果を地殻変動に連動して常に改定していくダイナミックな測地系が構築できれば、測量成果と観測結果との整合性を保つことは理論的には可能である。しかし、測量成果そのものが時間とともに変動していくため、位置情報の基準と

しての安定性が失われ、社会的な混乱を招く恐れがあるばかりでなく、測量成果を頻繁に改定するために多大なコストと労力が必要になる。

上記の問題に対応するため、国土地理院は、測地成果 2011（セミ・ダイナミック補正導入時は測地成果 2000）の元期から生じた地殻変動による歪みの影響を測量の計算過程で補正するセミ・ダイナミック補正について検討し、平成 22 年 1 月から基本測量及び公共測量に導入した^[19]。測量成果に補正する場合のセミ・ダイナミック補正方法の手順の図を以下に示す（図 5.7）^[20]。VRS 方式や RRS 方式の測位解は測量成果へと補正されているため、図 5.7 内の右下の図に示されている、『元期』における座標値（測地成果 2011）に準拠している。日々測量され、最終解として更新されている F3 解は、図 5.7 内の右上の図に示されている『今期』の電子基準点位置である。そのため、5.2.3 項で言及したように、F3 解もしくは F3 解準拠の座標値に対してセミ・ダイナミック補正量を適用すれば、ある程度『元期』の座標に近づけることが可能と思われる。次節以降で、セミ・ダイナミック補正をした結果を示す。セミ・ダイナミック補正の技術的な計算の詳細については、本論文では割愛する。

実際に、VRS 方式や RRS 方式の配信事業者が採用している地殻変動の補正計算（VRS 方式や RRS 方式のシステムでいうと、日本テラサット社が採用している Trimble Pivot VRS³ Net などのアルゴリズムが有名）は、図 5.7 で示すセミ・ダイナミック補正のロジックそのものではない場合が考えられるが、本研究では、セミ・ダイナミック補正とほぼ同じ効果を持つロジックが適用されているとみなす。

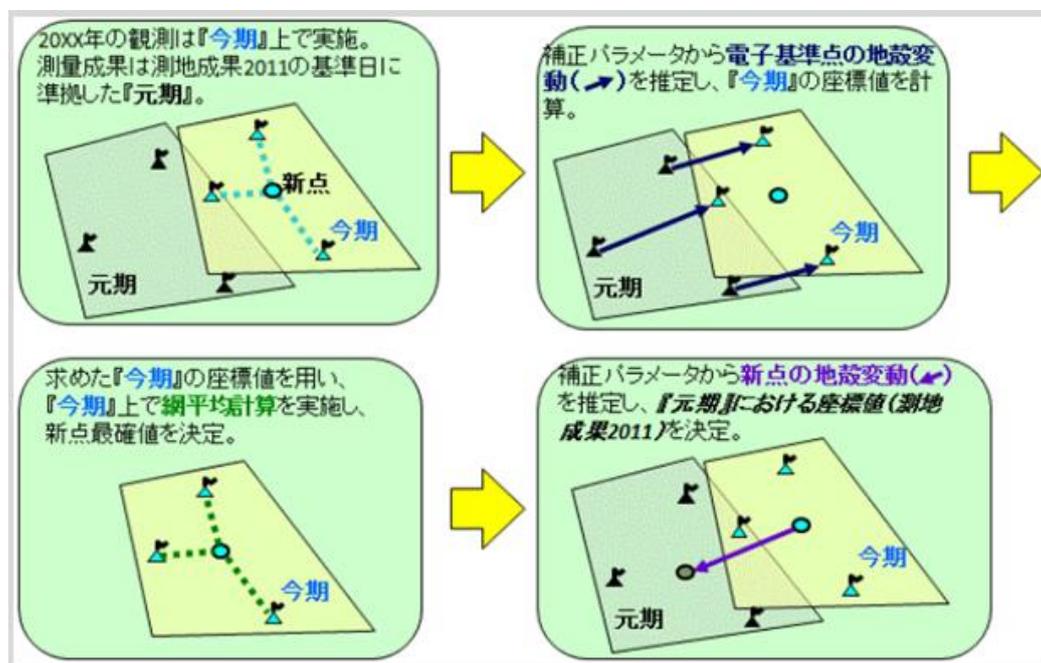


図 5.7 測量成果に補正する場合のセミ・ダイナミック補正方法の手順

5.3 座標ずれを軽減する方法

5.2 節で言及した、低コスト GNSS 受信機を F3 解準拠の座標系で実際の測量で使用する際に生じる座標ずれを抑える方法を本章で提案する。

まず、調査したい地点で静止点測位を実施し、RAW データ（観測データ）を取得する。取得した観測データを用いて F3 解に準拠した精密位置を持つ基準局との RTK（例えば電子基準点との RTK）を行い、F3 解に準拠した座標である精密位置を算出しておく。次に基線解析が可能なソフトウェアを用いて、前述の観測データに対し、近傍の電子基準点から基線解析をかける。基線解析に必要な「基準点成果表」や、「セミ・ダイナミック補正用のパラメータファイル」等は国土院のホームページよりフリーでダウンロード可能である。基線解析用のソフトウェアにより、測位した点周辺（半径約 10[km]程度）のセミ・ダイナミック補正量が分かるため、その補正量を自前で設置した基準局の精密位置（F3 解に準拠した座標）に適用することで、通常の公共測量で扱われている座標に近づけることが可能である。本研究では、セミ・ダイナミック補正量を計算するために、日立造船社の基線解析ソフトウェアである、「NS-Survey Ver 2.5.5」と「NS-Network Ver 2.5.5」を使用した（図 5.8）^[21]。本ソフトウェアは基線解析後の最終結果としてセミ・ダイナミック補正量を PDF 形式で出力することが可能である。セミ・ダイナミック補正量の計算に必要なデータの取得方法と、ソフトウェアの取り扱い方法に関しては、本論文の巻末の付録①にまとめた。

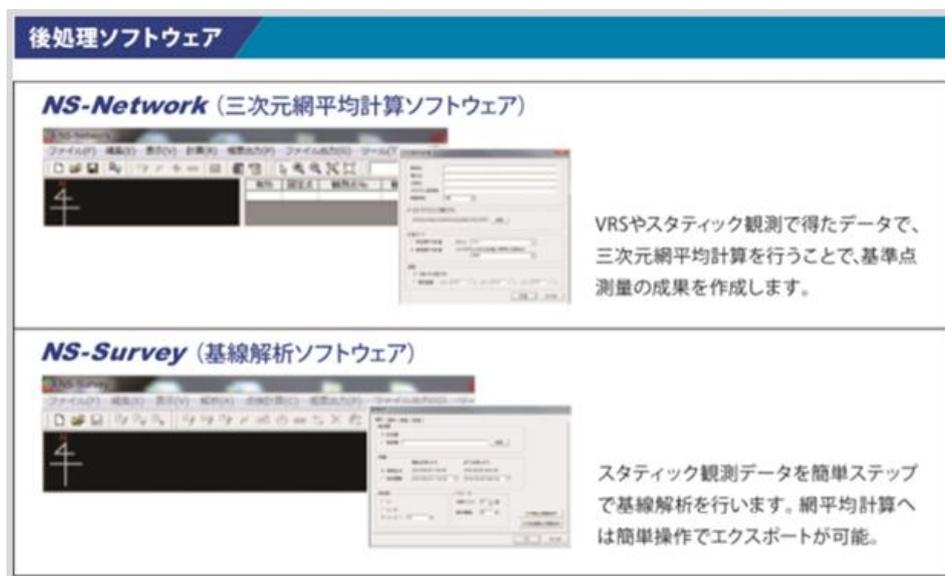


図 5.8 日立造船社の NS-Survey と NS-Network

東京海洋大学海洋工学部の構内にある第 4 実験棟屋上の GNSS アンテナを利用して、VRS 方式と RRS 方式、F3 解に準拠した精密位置を持つ基準局との RTK を比較のために実施した。使用した移動局の GNSS アンテナは、3 章の 3.1 節で示したアンテナと同一のものである。VRS 方式及び RRS 方式は、日本テラサット社の補正情報配信サービスを利用した。受信した補正情報に含まれる補正対象の衛星システムは、GPS と GLONASS である。各方式の測位結果を以下に示す（図 5.9 と図 5.10）。2019 年 1 月 22 日の午後 4 時から 5 時（日本時間）の間に 1[Hz]で 3 分間（180 エポック）ずつ GNSS 受信機による測位結果を取得した。GNSS アンテナは 3 章の 3.1 節

で示したものと同一であり、測位に使用した GNSS 受信機は Trimble 社の SPS855 受信機である。図 5.9 と図 5.10 とともに、緑色のプロットが F3 解に準拠した精密位置を持つ基準局との RTK の測位結果を表し、青色のプロットが VRS 方式による測位結果を、橙色のプロットが RRS 方式による測位解を表している。なお、いずれのデータも、取得した 3 分間の Fix 率は 100[%]であり、図 5.9 においては、VRS 方式と RRS 方式それぞれの測位解の大部分は重なっていることに注意されたい。図 5.9 の原点は測位した移動局アンテナの F3 解準拠の精密位置を示している。

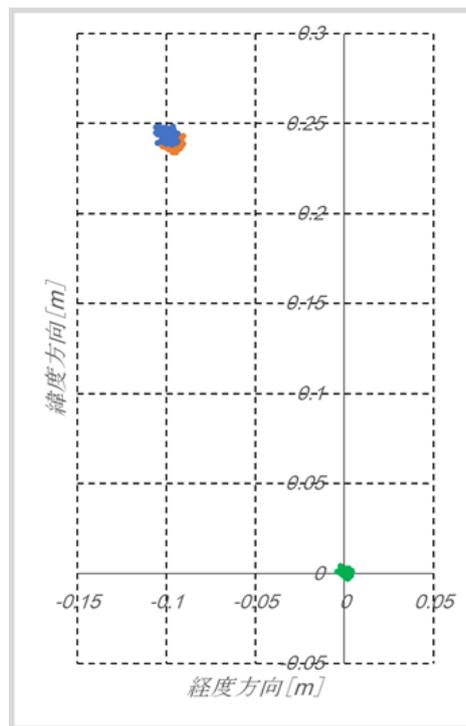


図 5.9 VRS 方式/RRS 方式/F3 解準拠の RTK の水平方向の測位結果

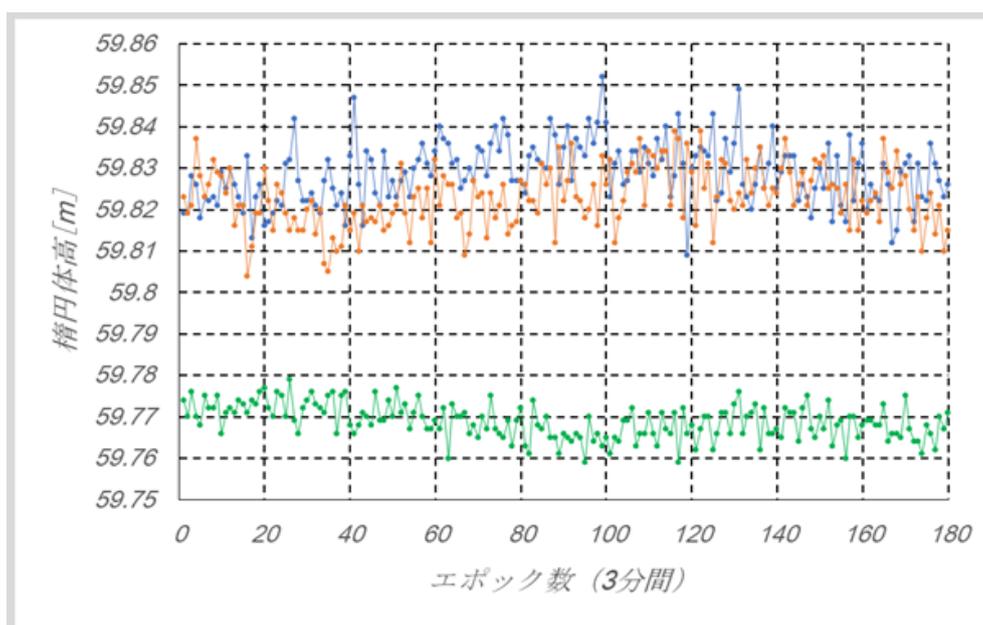


図 5.10 VRS 方式/RRS 方式/F3 解準拠の RTK の高さ方向の測位結果の時系列推移

図 5.9, 図 5.10 を見ると分かる通り, 従来の F3 解準拠の RTK の測位結果と VRS 方式と RRS 方式による RTK の測位結果それぞれの水平方向, 高さ方向ともに系統的な誤差が生じていることが分かる. この系統誤差が 5.2 章の 5.2.3 節で言及した座標ずれである. なお, VRS 方式は複数電子基準点での網平均計算による仮想基準点を使用した RTK 測位解であり, RRS 方式は近傍の電子基準点との対一の RTK 測位解である. VRS 方式や RRS 方式では, 指定サーバーに対して移動局側の位置を送信し, その位置から周辺もしくは近傍の電子基準点を割り出し, 的確な補正情報配信処理が行われている.

同様に, 多周波対応低コスト GNSS 受信機である ZED-F9P を用いて, 第 4 実験棟屋上の同じ GNSS アンテナから 1 時間分の RAW データを取得し, 前述の方法でセミ・ダイナミック補正を施した精密位置を算出し, どの程度の差が表れるかを次節にて評価する. 1 時間分のデータを取得した理由は, 使用した基線解析用のソフトウェアである NS-Survey が短時間のデータに対応していないということと, 国土地理院がフリーで提供している電子基準点のデータが, 30 秒間隔の観測データにのみ対応しているということによる.

5.4 補正した測位結果と考察

5.3 節で言及したように、ZED-F9P 受信機を用いて、第 4 実験棟屋上の同じ GNSS アンテナから 1 時間分の RAW データを取得した。取得したデータに対して NS-Survey で基線解析を行い、得られた移動局（第 4 実験棟屋上の GNSS アンテナ）のセミ・ダイナミック補正量を以下に示す（図 5.11）。

新点の元期座標への座標補正					
使用した補正支援ソフトウェア		NS-Network Ver 2.5.5			
使用した補正パラメータファイル		Semidyna2018.par Ver.1.0.0			
観測点No 観測点名称	座標成分	座標確定値 〔今期〕	補正量	成果値 〔元期〕	標準偏差 (m)
0002 0000	B L 標高 ジオイド高	353958.8316 1394731.9574	0.0029 -0.0095 -0.062	353958.8345 1394731.9479	

図 5.11 NS-Survey と NS-Network により算出されたセミ・ダイナミック補正量

5.3 節で示した、SPS855 を使用した、F3 解に準拠した精密位置を持つ基準局との RTK の測位結果に対し、図 5.10 に示す補正量を適用すると、VRS 方式に対する最終的なずれ量は、水平方向の距離で 0.011[m]であった。補正をかける前は水平方向の距離で 0.264[m]であった。同様に、RRS 方式に対する最終的なずれ量は、水平方向の距離で 0.009[m]であった。補正をかける前は水平方向の距離で 0.263[m]であった。高さ方向も含めた補正結果の表を以下に示す（表 5.2）。なお、水平方向の距離というのは、それぞれの方式で得た 3 分間分（180 エポック）の測位解の平均位置同士の水平方向の距離を意味している。補正をかける前とかけた後の水平方向結果のプロットと高さ方向結果の時系列推移も 5.3 節と同様に以下に示す（図 5.12 と図 5.13）。図 5.12 と図 5.13 ともに、緑色のプロットが F3 解に準拠した精密位置を持つ基準局との RTK の測位結果を補正したものを表し、青色のプロットが VRS 方式による測位結果を、橙色のプロットが RRS 方式による測位解を表している。なお、図 5.12 において各測位方式それぞれの測位解の大部分は重なっていることに注意されたい。図 5.13 の原点は測位した移動局アンテナの精密位置を示している。

表 5.2 セミ・ダイナミック補正の結果

ずれ量は絶対値で表示	セミ・ダイナミック補正前	セミ・ダイナミック補正後
VRS 方式の水平方向のずれ量	0.264 [m]	0.011 [m]
VRS 方式の高さ方向のずれ量	0.060 [m]	0.002 [m]
RRS 方式の水平方向のずれ量	0.263 [m]	0.009 [m]
RRS 方式の高さ方向のずれ量	0.054 [m]	0.008 [m]

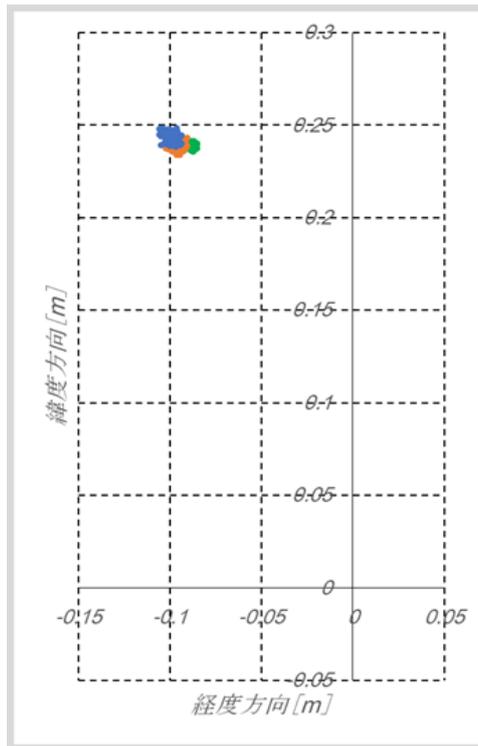


図 5.12 VRS 方式/RRS 方式/F3 解準拠の補正済み RTK の水平方向の測位結果

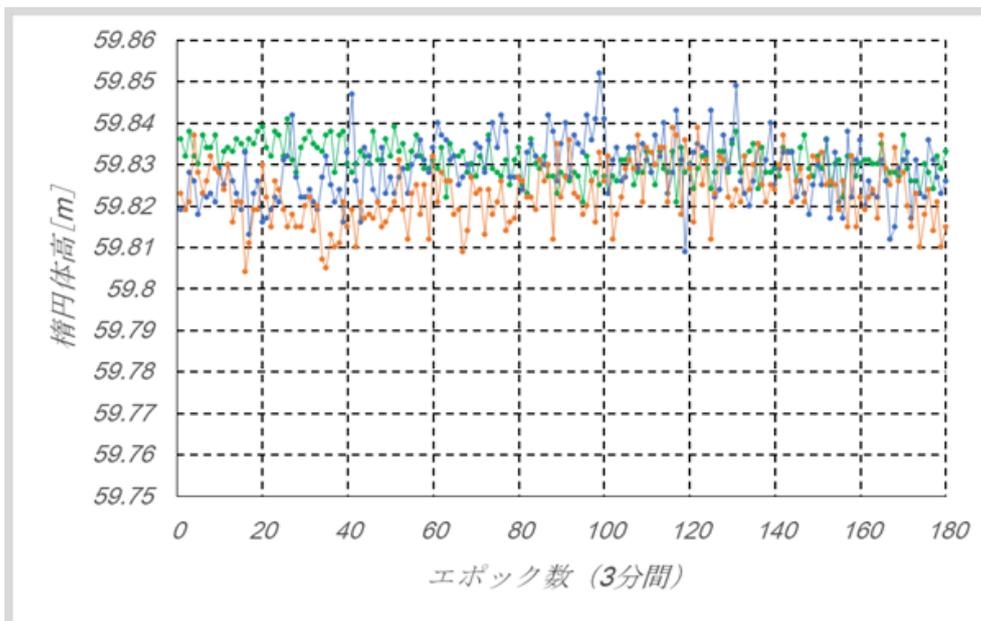


図 5.13 VRS 方式/RRS 方式/F3 解準拠の補正済み RTK の高さ方向の測位結果の時系列推移

図 5.12, 図 5.13 を見ると分かる通り, 従来の F3 解準拠の RTK の測位結果にセミ・ダイナミック補正量を加えたものと, VRS 方式と RRS 方式による RTK の測位結果それぞれの水平方向, 高さ方向ともに誤差が大きく軽減されていることが分かる. 低コスト GNSS 受信機を測量等の用途で使用しても, 適切に補正をかければ, 表 5.2 のセミ・ダイナミック補正後が示す, 「水平方向のずれ量」及び「高さ方向のずれ量」が示す精度が実現できるといえる. 正式な成果物としての測量結果を提出する際には, 測量業者による測量法等に則った方法で計測された数値を採用する

べきであるが、建設会社が建設現場で実施する日々の出来高管理や簡易的な測量等のオペレーション、さらには3章までに示した建機や重機、人の位置情報管理には上記の手法を採用しても良いといえる。事前に測量したい地域のセミ・ダイナミック補正量が分かっているならば、基準局の精密位置を補正することも可能であるし、補正量を一定値として移動局での測位結果を補正することも可能である。事前に基準局等でVRS方式やRRS方式のRTKを行って、F3解とのずれ量を直接把握することも可能であるが、少なくとも測量級GNSS受信機と補正情報サービスを使用しなければならなくなり、コストがかかるという欠点と、測量級GNSSアンテナの位相中心位置は分かっても、低コストGNSSパッチアンテナの位相中心が分からないという欠点もある。なお、実際にcm級の測量を、低コストGNSSパッチアンテナの使用で実施する場合、アンテナの位相中心位置を把握しておく必要がある。測量級アンテナとは異なり低コストのパッチアンテナは位相中心位置が公表されていない場合が多いため、アンテナ下面から何cmの位置に位相中心が存在するのかということや、幾つか利用する際には、アンテナによって位相中心位置に個体差があるのかといったことを調査する必要がある。パッチアンテナの位相中心位置の調査方法に関しては、巻末の付録②にまとめた。

複数の静止点データや移動体データ等で同様の解析を実施し、補正計算が理論的に正しいかどうか検証する作業に関しては、今後の課題としたい。

第5章 総括

5.1 まとめ

本稿の3章までは、測量級GNSS受信機の出力と低コストGNSS受信機の出力の解析結果を比較することで、現状市販されている低コストGNSS受信機が、測量級GNSS受信機に対してどの程度代替可能であるかを調査した。3章と4章で示した結果より、多周波対応低コストGNSS受信機と測量級GNSS受信機の間にはRAWデータの質及びRTKの測位性能としては、大きな差は見られなかった。さらに、受信機のリアルタイムのRTK測位性能に関していえば、多周波数対応低コストGNSS受信機の方が測量級GNSS受信機よりも性能が高いといえる結果が得られた。上記の結果を踏まえて、測量分野や建設分野で利用されている既存のシステム中の測量級GNSS受信機に対して、さらに多くのGNSS受信機をセンサとして利用する場面においては、多周波対応低コストGNSS受信機が利用可能ではないかと考えられる。今後の課題は、継続してより多くの現場実環境での性能を比較するとともに、異なる異機種間でのRTKの性能がどのように変化するかまたは変化しないのかを調査することである。

4章では、アプリケーションに特化した低コストGNSS受信機の利便性向上の例として、構造物の壁面にアンテナを取り付けるといった悪環境下でRTKを行い、構造物の動揺を監視する手法を提案した。南西、南東、北西方向の壁面の結果に関しては、Fix率や信頼性、標準偏差等の値において極めて良好な値を得ており、十分に実用レベルに達していた。可視衛星数の少ない北東方向の壁面に関しては、今後も続くマルチGNSSの近代化や低コスト多周波対応GNSS受信機の利用により、同様のFix率や信頼性を得ることができ、方角に関係なく測位が可能になると思われる。実用化を目指して実際にリアルタイムの測位実験も実施し、提案手法により後処理の結果と同程度のFix率及び精度を得ることができた。

5章では、ネットワーク型RTKシステムを利用した際の測量級GNSS受信機のRTK測位結果と、国土地理院のF3解に準拠した座標をもつ基準局を利用した多周波数対応低コストGNSS受信機のRTK測位結果との間に生じる座標ずれの問題を提起した。基線解析ソフトウェア等により、基準局や移動局周辺一帯のセミ・ダイナミック補正量を把握することができ、補正計算により、測量級GNSS受信機を用いるネットワーク型RTKシステムを利用しなくとも、同じ座標系の利用を低コストGNSS受信機の測位結果から実現できる可能性を示した。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、様々な観点から丁寧にご指導くださった、東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科・情報通信工学研究室の、久保信明先生に深く感謝いたします。

清水建設株式会社の技術研究所（東京都江東区）におられる山口範洋氏と横島喬氏には、本研究の着想や動機、細かなアドバイス等をいただきました。ここに感謝の意を表したいと思います。

情報通信工学研究室に所属する産学連携研究員の Zhang Yize 博士や社会人博士後期課程の皆様、後輩達には日ごろから多くの示唆をいただきました。

研究室でお世話になったすべての方々に厚く御礼を申し上げます。

付録と参考文献等

付録①

日立造船社の NS-Survey, NS-Network の取り扱い方法

セミ・ダイナミック補正量が算出可能なソフトウェアである、日立造船社の NS-Survey, NS-Network の取り扱い方法を以下にまとめる。

- ・まず、u-blox 等の受信機で取得したデータを RTKCONV で RINEX に変換する↓

Options

RINEX Version 2.11 Station ID 0001 RINEX Name

RunBy/Obsv/Agency

Comment

Maker Name/#/Type 0000 0001

Rec #/Type/Vers

Ant #/Type

Approx Pos XYZ 0.0000 0.0000 0.0000

Ant Delta H/E/N 0.0000 0.0000 0.0000

Scan Obs Types Iono Corr Time Corr Leap Sec

Satellite Systems Excluded Satellites

GPS GLO Galileo QZSS SBAS BeiDou

Observation Types Frequencies

C L D S L1 L2 L5/L3 L6 L7 L8 [Mask...]

Option Debug OFF

- Optionsは上記の通りに設定し、設定が済んだら「OK」をクリックして「Convert」をクリックする
- 変換したデータと同じ階層に.180と.18Nという拡張子のファイルが作られる

- ・ NS-Survey を起動し、事前にダウンロードしたファイル等の設定を済ませる↓

帳票出力(P) ファイル出力(G) ツール(T) ヘルプ(H)

オプション(O)...

種類 モード セッション名 観測点No 観測点名称 詳

オプション

帳票 | 許容値 | 基準解析 | インポート | 変換パラメータ | 詳細設定 |

デフォルトで使用するジオイドモデルファイル:
[esiegeo2011_ver2.asc (ジオイドファイルのパスを指定)]

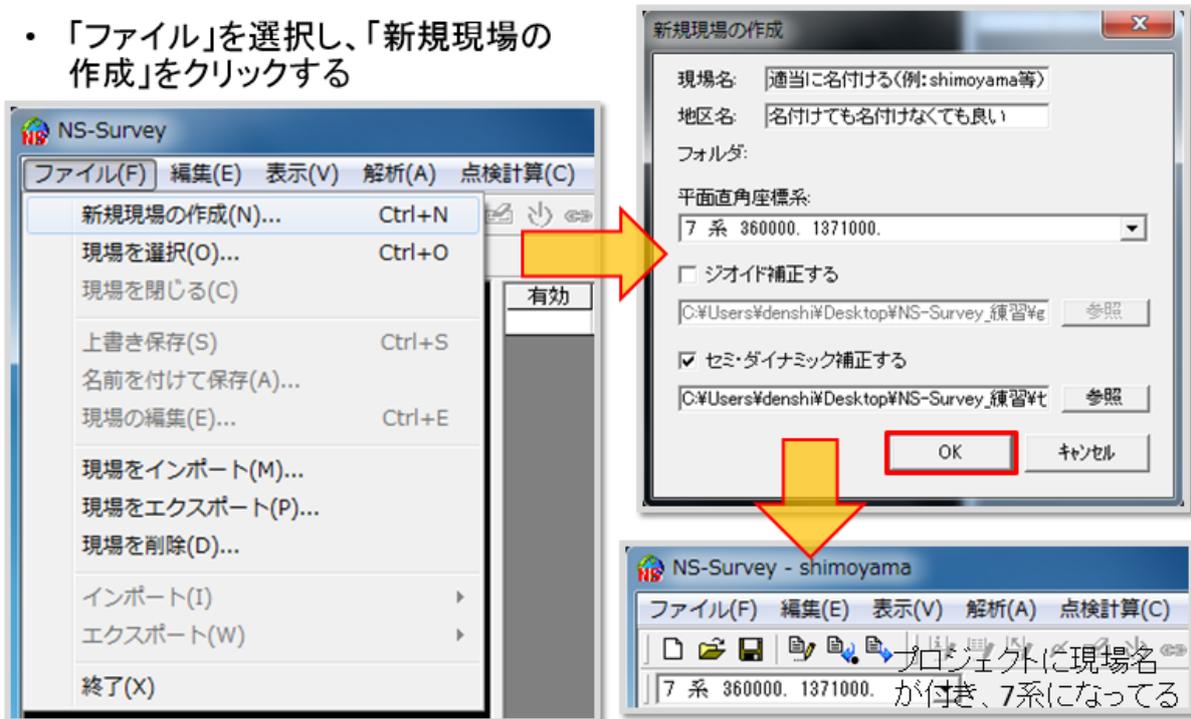
デフォルトで使用するセミ・ダイナミック補正パラメータファイル:
[Semidyna2018.par (セミ・ダイナミック補正のパスを指定)]

・ ダウンロードしたジオイド補正用のファイルとセミ・ダイナミック補正用のファイルのパスを参照で指定する

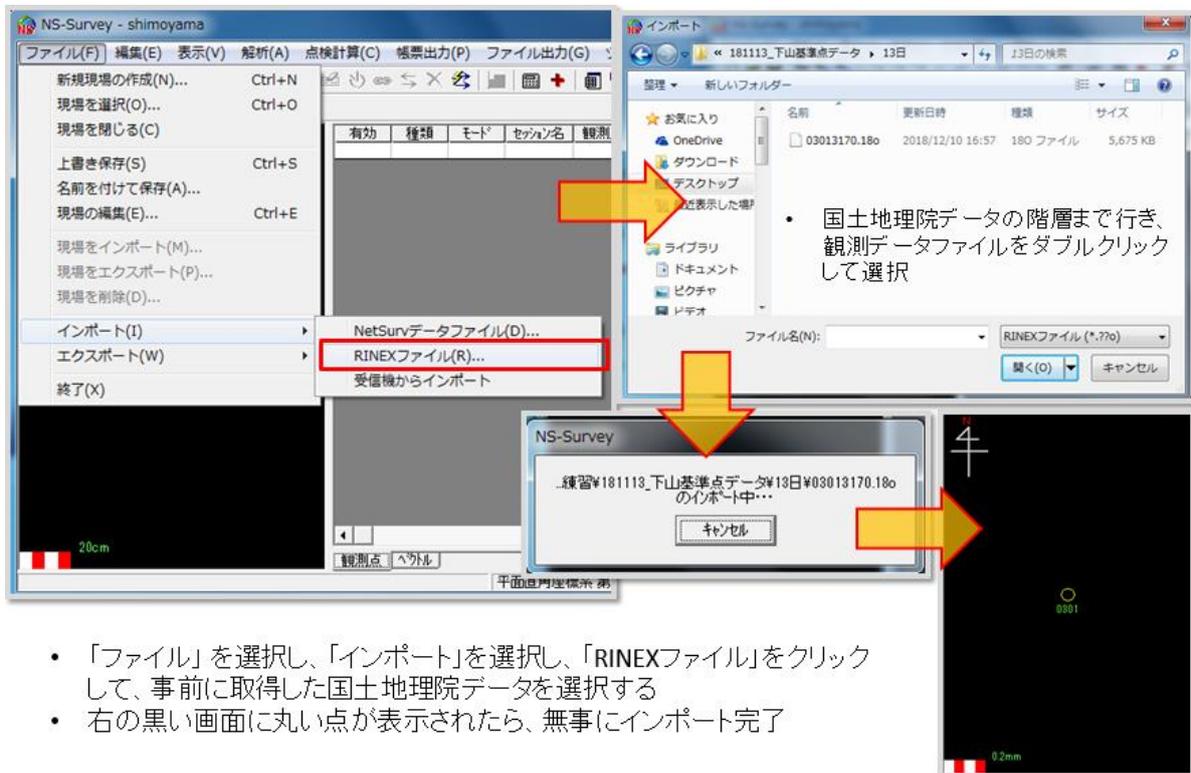
・ はじめに細かい設定を済ませておく

- ・「現場名」,「地区名」には適当に分かりやすい名前を入れる↓
- ・平面直角座標系には測位点に適したものを入れる（東京の場合は9系など）↓
- ・「セミ・ダイナミック補正する」にのみチェックを入れる↓

- ・「ファイル」を選択し、「新規現場の作成」をクリックする



- ・国土地理院のデータをインポートする↓



- ・「ファイル」を選択し、「インポート」を選択し、「RINEXファイル」をクリックして、事前に取得した国土地理院データを選択する
- ・右の黒い画面に丸い点が表示されたら、無事にインポート完了

- 解析したい測位点のデータをインポートする↓

測位点データの階層まで行き、観測データファイルをダブルクリックして選択

観測点を登録中...

観測点情報の編集(1)...
観測データの編集(D)...
基準ベクトルの編集(L)...
セッション名の変更(S)...
偏心設定(C)...
精度(O)...
有効(V)
無効(M)
採用(A)
点検(H)
重複(F)
反転(R)

- 国土院データがインポートできたら、同様に測位点データもインポートする
- 無事にインポートできると、右の黒い画面(左)のようになる(基線が必ず表示される)
- 矢印がもし電子基準点の方を向いている場合は、矢印をマウスオーバーし、右クリックで「反転」を選択し、測位点に矢印の先が向くようにする

- 電子基準点を固定点に指定する↓

矢印が測位点の方を向いていれば問題ない

電子基準点を選択した状態で、「編集」の「観測点情報の編集」をクリックする

観測点情報の編集(1)...

観測点No: 0301
観測点名称: 電子基準点の名称(例: 下山 等)

固定点指定 (注記) 設定座標は公開成果値、元期座標値で入力してください

緯度経度
緯度: *** * ** *
経度: *** * ** *
精度: *** * ** *

平面直角
X: _____ m
Y: _____ m

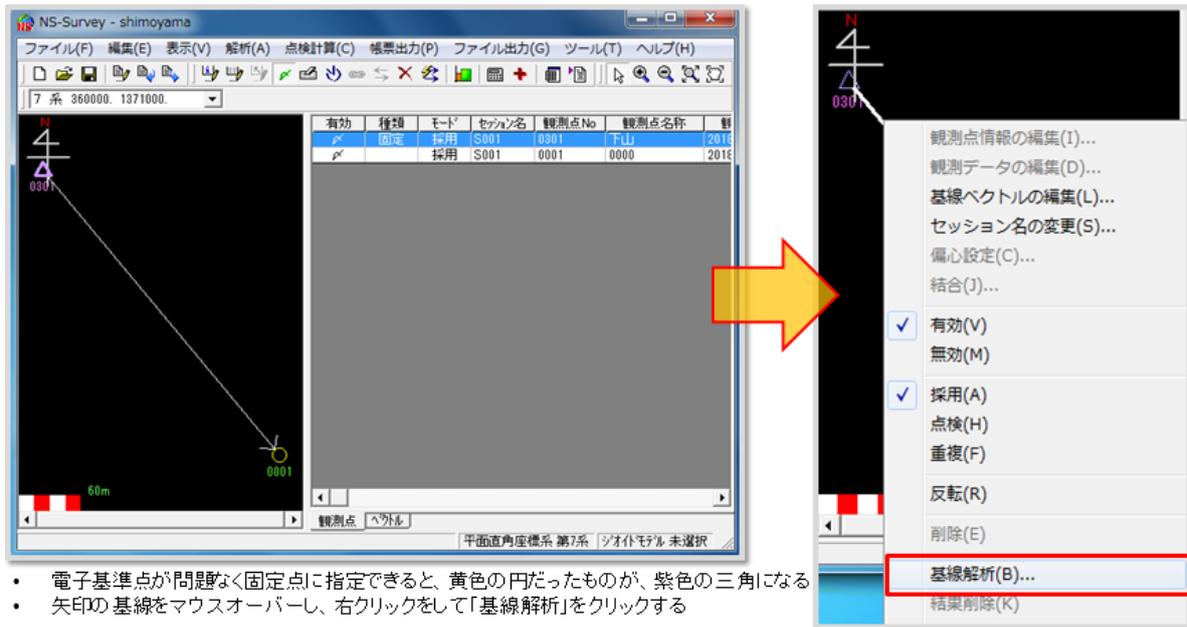
楕円体高
C: [*****] m

OK キャンセル

基準点コード	記号番号	緯度	X (m)	縮尺係数	1/5万図名
EL0227434002		350222.9796	-106050.875	0.999902	筑前
電子基準点	下山	4371647.3889	13345.677		

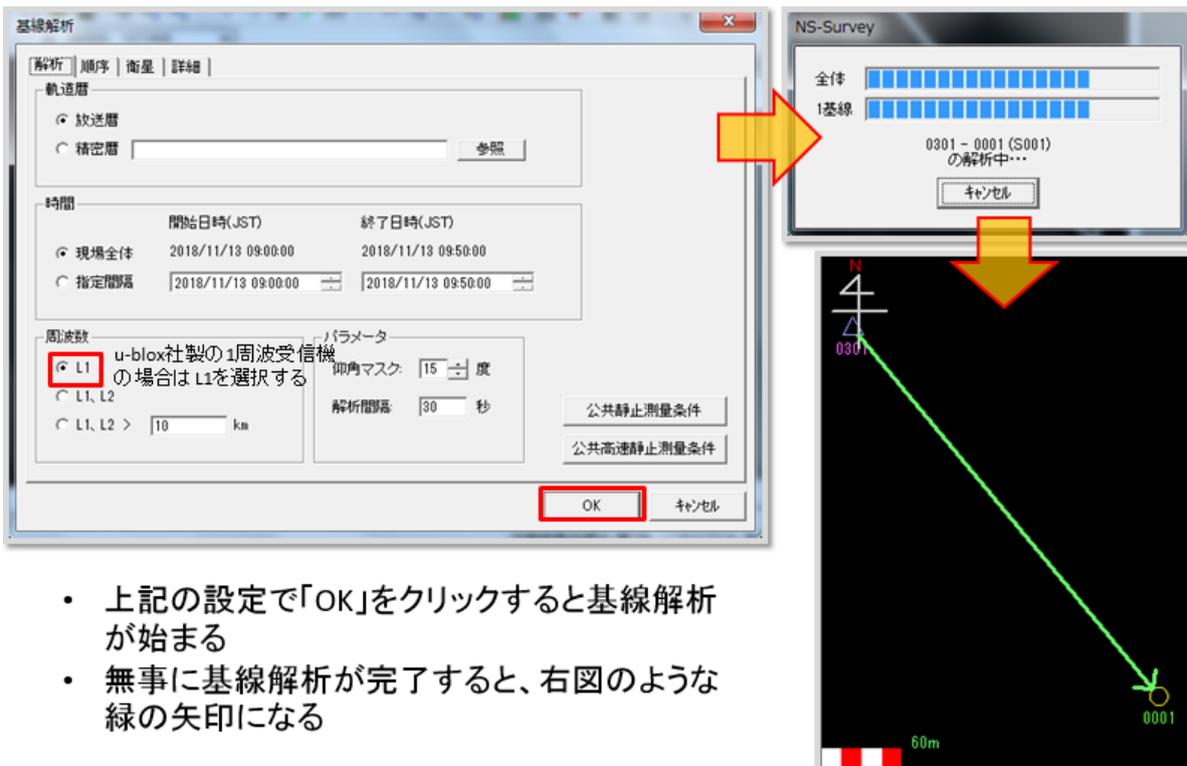
- 電子基準点の名称を「観測点名称」に入力し、「固定点に指定」(赤枠)にチェックを入れる
- 事前に入手した基準点成果表通りの緯度、経度、楕円体高(赤枠)を正確に入力し、「OK」をクリックする

- 電子基準点から測位点に対して基線解析を行う①↓



- 電子基準点が問題なく固定点に指定できると、黄色の円だったものが、紫色の三角になる
- 矢印の基線をマウスオーバーし、右クリックをして「基線解析」をクリックする

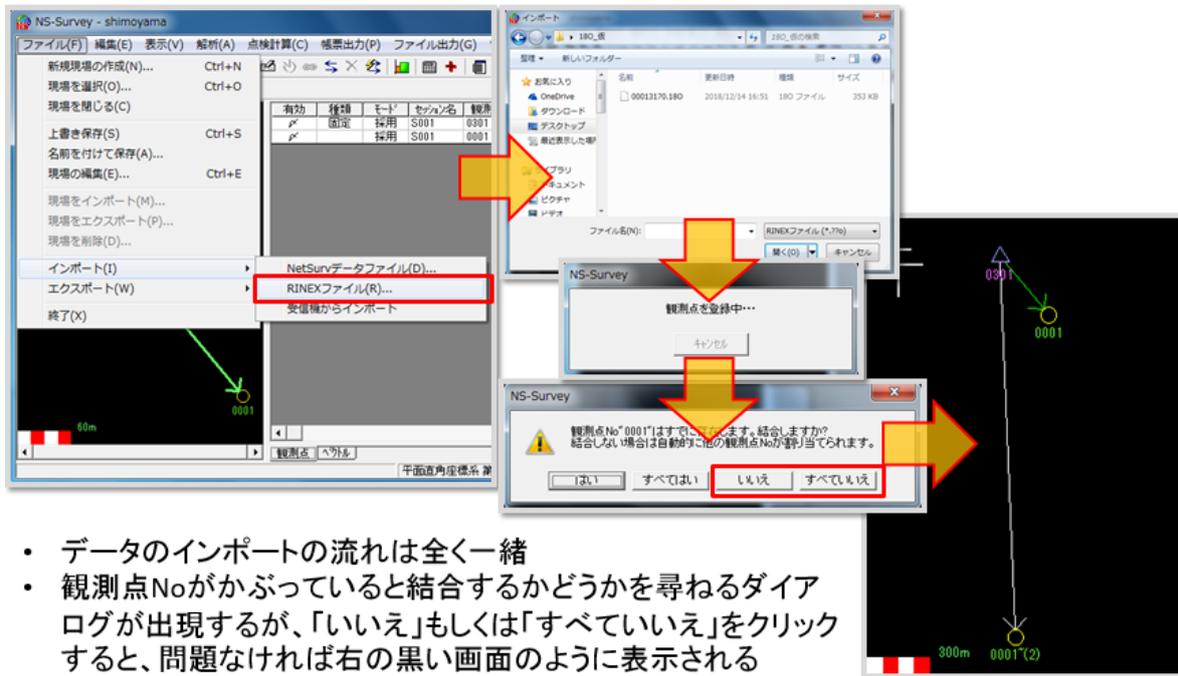
- 電子基準点から測位点に対して基線解析を行う②↓



- 上記の設定で「OK」をクリックすると基線解析が始まる
- 無事に基線解析が完了すると、右図のような緑の矢印になる

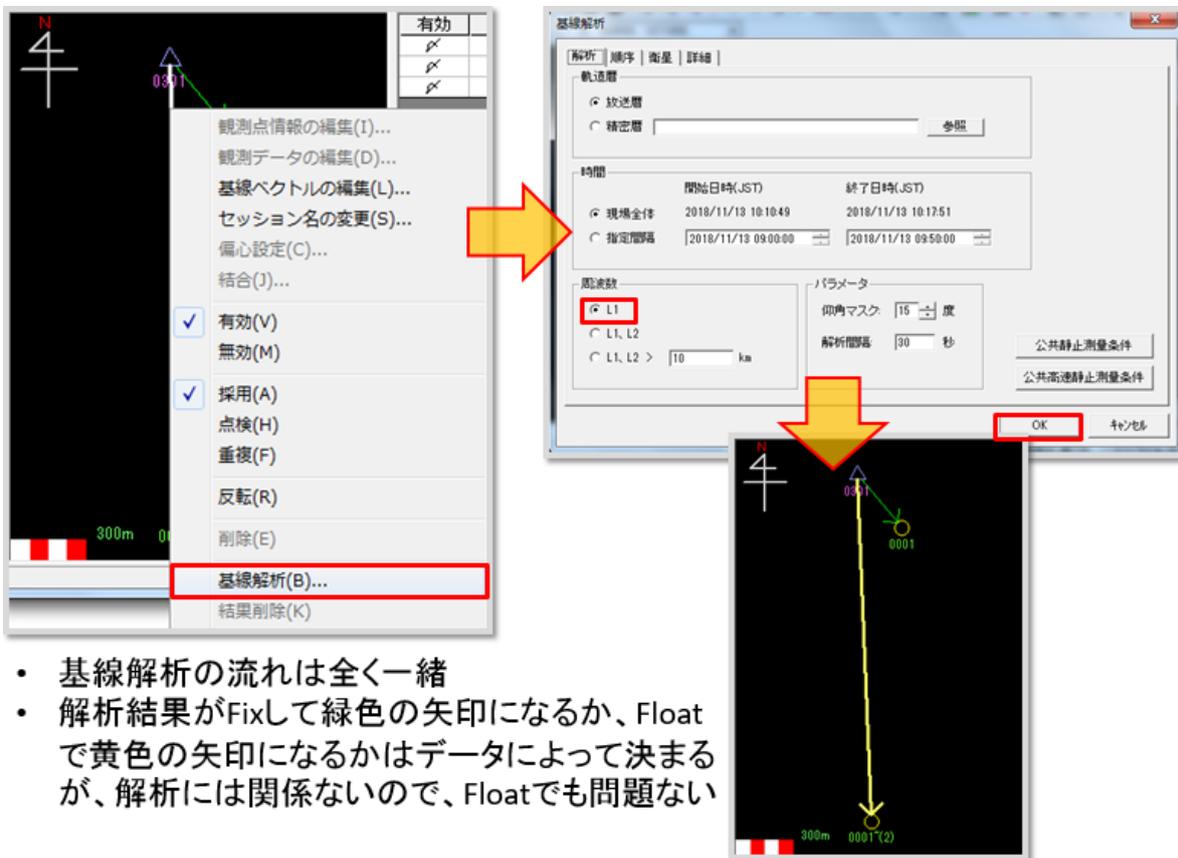
・他の測位点のデータ（どんなデータでも良い）もインポートする①↓

- ・ NS-Survey、NS-Networkを使った解析の仕様上、インポートして基線解析しなくてはならない測位点のデータが2つ以上必要であるため(基準点との1対1の基線解析は珍しいため)、測位の時間帯がかぶっていればどんなデータでもよいので、とにかく適当にインポートする



- ・ データのインポートの流れは全く一緒
- ・ 観測点Noがかぶっていると結合するかどうかを尋ねるダイアログが出現するが、「いいえ」もしくは「すべていいえ」をクリックすると、問題なければ右の黒い画面のように表示される

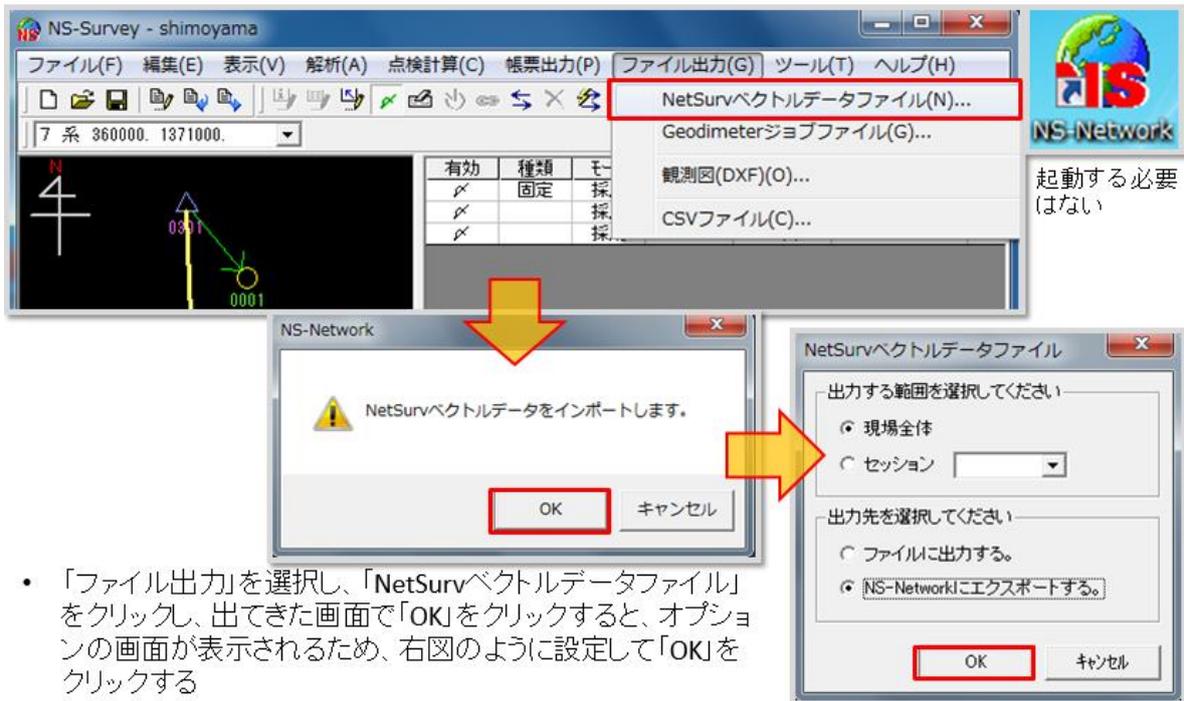
・他の測位点のデータ（どんなデータでも良い）もインポートする②↓



- ・ 基線解析の流れは全く一緒
- ・ 解析結果がFixして緑色の矢印になるか、Floatで黄色の矢印になるかはデータによって決まるが、解析には関係ないので、Floatでも問題ない

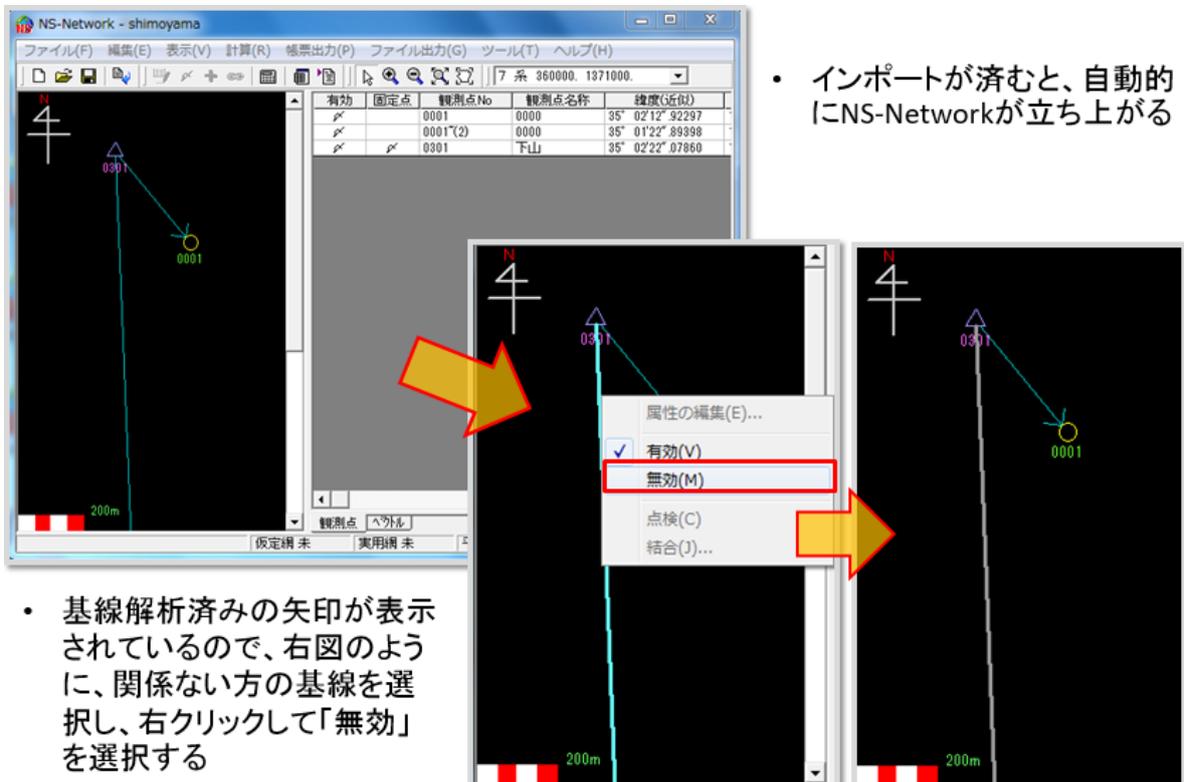
・結果を NS-Network にインポートする↓

- ・ 基線解析した結果をNS-SurveyからNS-Networkへインポートする
- ・ NS-Network上でセミ・ダイナミック補正を計算し、PDFで最終結果を出力する



- ・ 「ファイル出力」を選択し、「NetSurveyベクトルデータファイル」をクリックし、出てきた画面で「OK」をクリックすると、オプションの画面が表示されるため、右図のように設定して「OK」をクリックする

・ NS-Network 内でセミ・ダイナミック補正量を計算する①↓



- ・ 基線解析済みの矢印が表示されているので、右図のように、関係ない方の基線を選択し、右クリックして「無効」を選択する

- ・ NS-Network 内でセミ・ダイナミック補正量を計算する②↓

「計算」の「三次元網平均計算」をクリックするとオプションの画面が現れる

「セミ・ダイナミック補正する」にチェックを入れ、参照でパラメータファイルの階層まで行き、ファイルを選択する

实用網平均計算を選択する

設定が済んだら、「計算」をクリックする

- ・ セミ・ダイナミック補正量を出力する①↓

左のような計算終了のダイアログが出現したら、セミ・ダイナミック補正が完了したことを意味する

チェックボックスにチェックを入れて、「OK」をクリックする

- ・ セミ・ダイナミック補正が完了したら、結果をPDFで確認するために、「帳簿出力」を選択し、「今期→元期補正表」をクリックする
- ・ 出力する点を選択し、「OK」をクリックすると、セミ・ダイナミック補正値が表示される

- ・セミ・ダイナミック補正量を出力する②↓

新点の元期座標への座標補正

使用した補正支援ソフトウェア : NS-Network Ver 255

使用した補正パラメータファイル : Semidyne2018par Ver.1.0.0

観測点No 観測点名称	座標成分	座標確定値 (今期)	補正量	成果値 (元期)	標準偏差 (m)
0001	B	3502129169	0.0060	3502129229	
0000	L	13718565144	-0.0087	13718565057	
	標高		-0.119		
	ジオイド高				

表示されている補正量が、まさにRTK解の
平均値に対するセミ・ダイナミック補正量
である

- ・ 出力結果が表示されたら、「PDFへ出力」をクリックし、PDFファイルを任意のフォルダに保存する

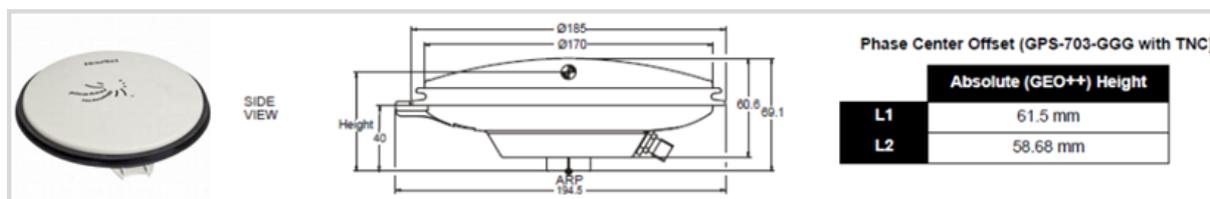
上記に示されている補正量が、4章で言及した F3 解に適用すべき値である。

※電子基準点の観測データや航法メッセージデータ、基準点成果表、セミ・ダイナミック補正用のパラメータファイル、ジオイド補正用のファイル等はすべて国土地理院のホームページにて、フリーでダウンロード可能である。

付録②

Tallysman Wireless 社の TW4721 アンテナの位相中心調査

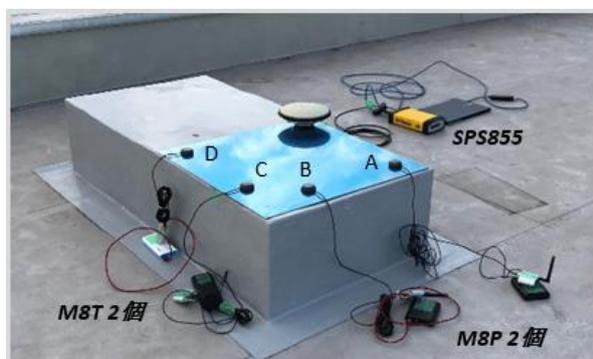
測量級 GNSS 受信機向けに販売されている測量級 GNSS アンテナはアンテナの位相中心 (RTK の Fix 解の位置) が公表されている。公表されている位相中心情報として、本調査で使用した NovAtel 社製の GPS-703-GGG アンテナを例として以下に示す (図 i) [22]。一方、低コスト GNSS 受信機向けに販売されている低コスト GNSS パッチアンテナの位相中心は、一般的にあまり公表されていない。低コスト GNSS 受信機と低コスト GNSS パッチアンテナの組み合わせで測量等を行う場合、位相中心の位置を知っておくことは重要である。そこで本付録では、測量級 GNSS アンテナで RAW データを取得し、RTK をして得た位相中心位置を頼りに、低コスト GNSS アンテナの位相中心がどこに存在するのかを調査した。2018 年 12 月 10 日に実施し、実験場所は東京海洋大学海洋工学部 (東京都江東区越中島) の構内にある第 4 実験棟屋上である。14 時 40 分 (日本時間) から 1 時間分 (3600 エポック) データを取得した。使用した機材を以下の表に示す (表 i)。使用した低コスト GNSS 受信機である Tallysman 社製の TW4721 には位相中心位置の高さに個体差によるばらつきがある可能性が考えられるため、4 つを本調査に使用した。実験状況も以下に示す (図 ii と図 iii)。mm の精度を測りたい場合、多少の傾斜でも大きな影響が出るため、鉄板の上に水平器を置き、鉄板面が水平状態であることを事前に確認した。



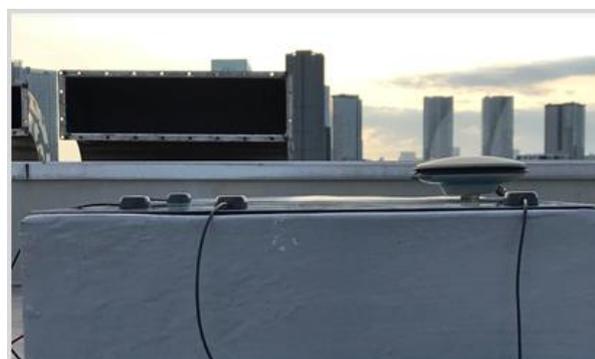
図i GPS-703-GGGアンテナの位相中心情報

表 i 使用機材

	GNSS アンテナ	GNSS 受信機
測量級	NovAtel 社 GPS-703-GGG	Trimble 社 SPS855
低コスト	Tallysman 社 TW4721 (4 つ)	u-blox 社 NEO-M8P, NEO-M8T (2 つずつ)



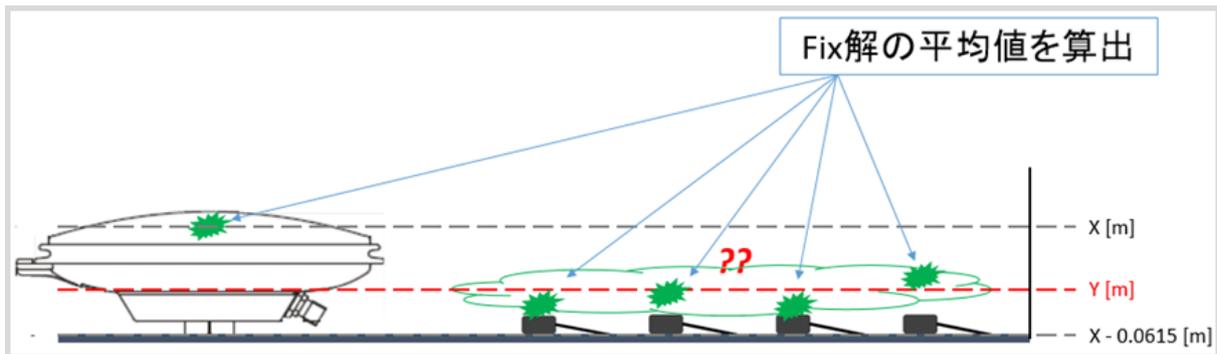
図ii 実験状況 (全体図)



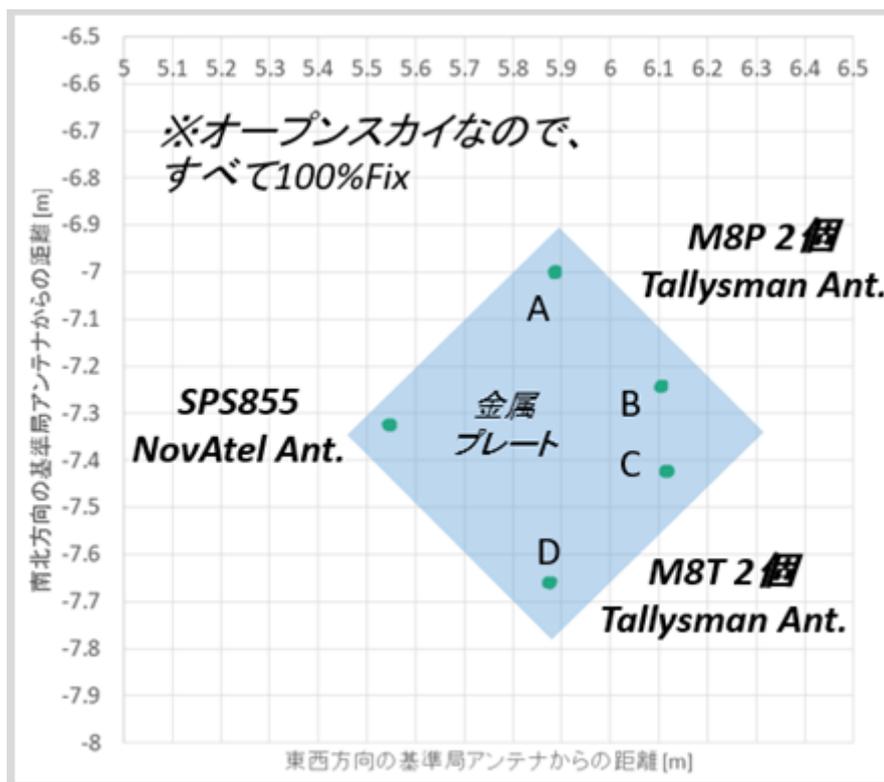
図iii 実験状況 (横から)

評価方法と測位結果（Fix 解の水平プロット図）を以下に示す（図 iv と図 v）。

1. 測位結果より分かるのは、X[m]と Y[m]という楕円体高であるが、NovAtel アンテナの位相中心位置の高さは分かっているので、アンテナを置いている金属板の表面の高さも分かる（ $X - 0.0615[m]$ ）。
2. よって、 $Y - (X - 0.0615)[m]$ を計算すれば、Tallysman アンテナの位相中心位置が算出できる。
3. 事前にメジャーで計測した Tallysman アンテナ上面の物理的な高さは $0.015[m]$ のため、アンテナ上面より、どの程度位相中心位置がずれているかも分かる。



図iv 評価方法



図v Fix解の水平プロット図

測位した結果、NovAtel アンテナの Fix 解の平均値の楕円体高は $59.3393[m]$ であったため、この結果から位相中心位置の高さ分を引いた値は $59.3393 - 0.0615 = 59.2778[m]$ となり、鉄板表面

の高さが 59.2778[m]と分かる. それぞれの Tallysman アンテナの Fix 解の平均値の楕円体高は, A が 59.2816[m], B が 59.2741[m], C が 59.2804[m], D が 59.2798[m]であった.

それぞれの Tallysman アンテナの位相中心位置の楕円体高から, 上記の数値を引くと,

$$A: 59.2816 - 59.2778 = 0.0038[m] = 3.8[mm]$$

$$B: 59.2741 - 59.2778 = -0.0037[m] = -3.7[mm]$$

$$C: 59.2804 - 59.2778 = 0.0026[m] = 2.6[mm]$$

$$D: 59.2798 - 59.2778 = 0.0020[m] = 2.0[mm]$$

となった. 事前にメジャーで計測した Tallysman アンテナ上面の物理的な高さが 15[mm]程度なので, アンテナ内部に埋まっているか, アンテナの下面よりも下に存在していることが分かった.

なお, 今回の実験では, 4つの Tallysman 社製の TW4721 の位相中心の平均値は下面から 1.2[mm]であった. cm レベルの個体差がないことが本調査で確認でき, 1[cm]以下の精度が必要な測量等の用途においても Tallysman 社製の低コスト GNSS パッチアンテナは十分に実用的なレベルであることも分かった.

引用及び参考文献等

- [1] Yize Zhang, Nobuaki Kubo, Junping Chen, Hu Wang, and Jiexian Wang, “Assessment of the Contribution of QZSS Combined GPS/BDS Positioning in Asia-Pacific Areas”, CSNC2018 (Harbin, China)
- [2] 測位衛星による高精度測位の研究開発,
<http://gpspp.sakura.ne.jp/index.shtml>
- [3] CQ 出版, トランジスタ技術, 2018 年 1 月号
<https://toragi.cqpub.co.jp/tabid/862/Default.aspx>
- [4] CQ 出版, トランジスタ技術, 2019 年 2 月号
<https://toragi.cqpub.co.jp/tabid/897/Default.aspx>
- [5] 国土交通省 i-Construction 委員会, “建設現場の生産性革命” 平成 28 年,
<http://www.mlit.go.jp/common/001127288.pdf>
- [6] RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning
<http://www.rtklib.com/>
- [7] マルチ GNSS 解析ソフトウェア「GSILIB」の公開
<http://datahouse1.gsi.go.jp/gsilib/gsilib.html>
- [8] S. Takahashi, N. Kubo, N. Yamaguchi, and T. Yokoshima, “Real-Time Monitoring of Structure Movements Using Low-Cost, Wall-Mounted, Hand-held RTK-GNSS Receivers,” Proceedings of the 31st International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2018), pp. 2074-2086, 2018.
- [9] Hiroko Tokura, Nobuaki Kubo, “Efficient Satellite Selection Method for Instantaneous RTK-GNSS in Challenging Environments” Trans. Japan Soc. Aero. Space Science, Vol.60 No.4 pp. 221-220, 2017
- [10] applanix, “POS LV”
<https://www.applanix.com/jp/products/poslv.htm>
- [11] Akihito YOSHIDA, Yukio TAMURA, Masahiro MATSUI and Sotoshi ISHIBASHI “MEASUREMENT OF WIND-INDUCED RESPONSE OF BUILDINGS USING RTK-GPS AND INTEGRITY MONITORING” Journal of Structural and

Construction Engineering (Transactions of AIJ), Volume 68 (2003) Issue 571 Pages 39-44

- [12] Misra, P., and Enge, P. “Global Positioning System: Signals, Measurements and Performance Second Edition”. Lincoln, MA: Ganga-Jamuna Press, 2006.
- [13] Teunissen PJG “The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: a method for fast GPS integer ambiguity estimation” Journal of Geodesy 70.1-2.1995
- [14] Verhagen, S. “The GNSS integer ambiguities: estimation and validation” TU Delft, Delft University of Technology, 2005.
- [15] 国土地理院ホームページ, “GNSS を利用した測定のいろいろ”,
<http://www.gsi.go.jp/denshi/denshi45009.html>
- [16] 株式会社国際海洋開発, “VRS-GPS を使う”,
<http://www.ko-marine.com/service/rand/vrs/vrs.htm>
- [17] 国土地理院ホームページ, “ネットワーク型 RTK 測量について”
<http://www.gsi.go.jp/common/000080891.pdf>
- [18] 齊藤詠子, “船舶運航者の高精度測位に対する意識調査および海上における高精度単独測位の精度評価と防災対策への応用提案”
- [19] 檜山洋平, 森下遊, 山尾裕美, 湯通堂亨, 越智久巳一, 岩田昭雄, “セミ・ダイナミック補正の導入について”
<http://www.gsi.go.jp/common/000056984.pdf>
- [20] 国土地理院ホームページ, “セミ・ダイナミック補正”
<http://www.gsi.go.jp/sokuchikijun/semidyna01.html>
- [21] 日立造船株式会社, NetSurv RE 紹介ページ,
http://esurv.hitachizosen.co.jp/pdf/NetSurv_RE.pdf
- [22] NovAtel 社, “Antennas GPS-703-GGG”
<https://www.novatel.com/assets/Documents/Papers/GPS-703-GGG.pdf>