

I-11 RTK 測位における GLONASS 併用時の測位性能に関する研究

Study on the Performance of RTK Positioning using GPS and GLONASS

池田隆博¹・佐田達典²・石坂哲宏³・千葉史隆⁴

Takahiro IKEDA, Tatsunori SADA, Tetsuhiro ISHIZAKA, Humitaka CHIBA

抄録：衛星測位では従来米国が運用する GPS が主に用いられてきたが、近年ロシアが運用する GLONASS の衛星配備が進み利用が拡大している。しかし、GPS と GLONASS ではシステム間の仕様が異なり、高精度測位を行う場合、GLONASS 併用時の測位性能を事前に把握する必要がある。本研究では、GPS と GLONASS を併用して RTK 測位を実施し、測位可能範囲、初期化時間、測位精度の比較を行った。その結果、GLONASS を併用することで観測衛星数が増加し、測位可能範囲の向上と初期化時間の短縮が示された。また、測位精度は GPS のみの場合と比較し、GLONASS 併用により系統誤差が含まれる可能性が考えられる。

Abstract: As for the satellite - based positioning system GPS has been used mainly, but GLONASS has made great progress and has come to be used in recent years. However, GPS and GLONASS are different in specification of the system. Therefore, it is necessary to understand the feature of the measurement beforehand in the case of high precision positioning by GLONASS. The authors executed the experiment on RTK operations such as availability, initialization time and positioning accuracy by GPS and GLONASS. As a result, the number of visible satellite increased because of GLONASS installation, and it was shown that the improvement of availability of fix solution and shortening initialization time. In addition, it was thought that the systematic error is included by the GLONASS compared with the case of GPS.

キーワード： GPS, GLONASS, RTK, 測位解, 初期化時間, 測位精度, 衛星数, DOP

Keywords : GPS, GLONASS, RTK, Solution, Initialization time, Positioning accuracy, Number of satellite, DOP

1. はじめに

一般的に、衛星測位では GPS (Global Positioning System) の利用が主流であり、基準点測量など測量分野のほか、応用される分野は多岐にわたる。GPS は米国が運用する衛星測位システムであり、衛星からの電波を受信することにより位置を測定することができる。衛星測位の特長としては、素早く位置情報が得られるという点が挙げられ、我が国では、カーナビゲーションや GPS 携帯電話を代表に広く認知されている¹⁾。

一方、衛星測位システムを安定して利用するには、測位に必要な衛星数を常に確保できる環境が求められる。そのため、市街地など衛星電波が遮断されやすい環境では安定した利用が難しく、上空方向に開けた場所でなければ利用が困難であるという側面がある。

衛星を利用した測位システムは、GPS 以外にも各国で開発が行われており、試験衛星の打ち上げや運用を想定したシミュレーションが行われている。中でもロシアが運用する GLONASS (Global Navigation Satellite System) は、既に部分的な運用が行われており、2010

年には全世界での測位が可能となる 24 機の衛星が揃う予定といわれている。GPS による衛星測位に対して GLONASS を併用することで観測衛星数が増加するため、衛星測位の安定性向上に有効な手段である。

しかしながら、GPS と GLONASS を併用して測位を行う場合、各々の衛星から放送される電波の周波数帯および信号方式などが異なるため、各衛星系の信号に対応した受信機が必要となる。また、搬送波を利用した高精度測位において、GPS と GLONASS を併用する場合、この信号方式の違いがシステム間のバイアスに影響を及ぼす可能性があり、GLONASS 併用時の測位性能を事前に把握する必要がある。

本研究では、GLONASS 併用時の測位性能について検討を行うため、「GPSのみ」と「GPS+GLONASS」について実時間で高精度測位が可能な RTK (Real-time Kinematic) 測位を実施した。評価対象は、測位可能範囲と初期化時間および測位精度の3つとし、それぞれ異なる実験方法で測位を実施し検討を行ったのでその結果について報告する。

1 : 学生会員 日本大学大学院 理工学研究科 社会交通工学専攻
(〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1, Tel :047-469-8147, E-mail : m9003t@trpt.cst.nihon-u.ac.jp)
2 : 正会員 博士(工) 日本大学教授 理工学部社会交通工学科 (E-mail : sada@trpt.cst.nihon-u.ac.jp)
3 : 正会員 博士(工) 日本大学助教 理工学部社会交通工学科
4 : 学生会員 日本大学理工学部 社会交通工学科

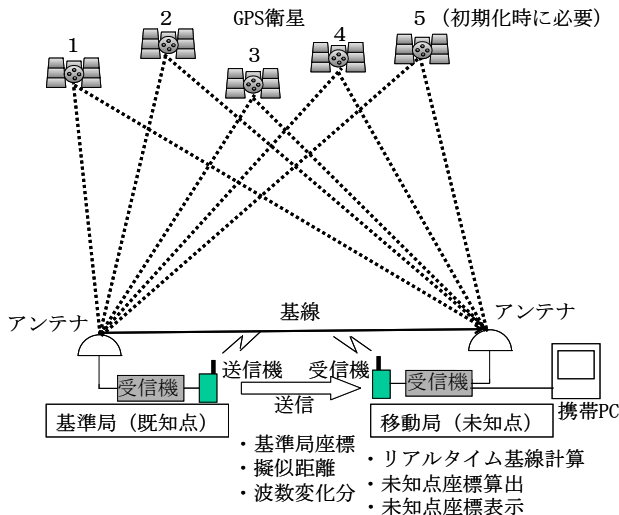


図-1 RTK 測位のシステム構成²⁾

2. RTK 測位と初期化

(1) RTK 測位の概要

RTK 測位とは、実時間で高精度（5mm～20mm）な測位が可能な干渉測位方式の一種であり、移動体に対してもリアルタイムに高精度測位が可能という特長を持つ。RTK 測位とは、図-1 に示すように基準局と移動局の2つの受信機を用いて2点間の基線ベクトルを求める方式であり、基準局の搬送波位相データを何らかの通信リンクで移動局側にリアルタイムに送信する必要がある。

(2) 整数値バイアスと初期化

受信機の位置は、複数の衛星の位置情報と衛星と受信機間の距離により算出され、干渉測位では、搬送波の波数に波長を乗じることで衛星と受信機間の距離を求める。しかし、搬送波の最初の受信時では波数の小数部（位相）はわかるが、衛星と受信機間の整数部の波数は不明である。この未知の整数を整数値バイアスと呼び、これを確定することで、高精度な測位が可能となる。

整数値バイアスを確定するには、RTK 測位の場合、主に OTF (on the fly) が用いられる。OTF では、ワイドレーンの利用等によって整数値バイアスの探索範囲をある程度絞り込み、最小二乗法によって解の残差が最小となるバイアスの組合せを推定する。このとき、観測衛星が5機以上必要であり、さらに、ワイドレーンの利用に L1 帯と L2 帯の搬送波位相を受信する必要があるため2周波受信機が必要となる。

推定したバイアスの組合せに対して統計的な検証を行い、検証結果が良好であればバイアスは整数値として確定し、良好でなければバイアスは実数値となる。この整数値バイアスが確定する過程を初期化と呼び、

表-1 RTK 測位で得られる測位解

測位解	内容	概略精度
Fix解	バイアスが整数値として確定した解	5mm～20mm
Float解	バイアスが実数値の解	10cm～数m
DGPS解	ディファレンシャル測位による解	0.5m～2.0m
単独測位解	単独測位による解	10m

表-2 GPS と GLONASS の仕様比較³⁾

衛星	GPS	GLONASS
運用国	アメリカ	ロシア
設計衛星数(運用数)	24機(31機*)	24機(21機*)
軌道面	6面	3面
軌道高度	約20,000km	約19,100km
軌道傾斜角	約55°	約65°
周期	約11時間58分	約11時間15分
時系	GPS時	協定世界時
信号方式	CDMA	FDMA
搬送波	L1帯: 1575.42MHz L2帯: 1227.60MHz	L1帯: 1602.0+(K×0.5625)MHz L2帯: 1246.0+(K×0.4375)MHz K=チャンネル番号

※2010年5月現在

衛星からの電波が途切れない限り整数値バイアスは保持されるが、一瞬でも電波が途切れると再度初期化が必要となる。なお、バイアスが整数値として確定した解を Fix 解と呼び、バイアスが実数値の解を Float 解と呼ぶ。Float 解は、RTK 測位の開始直後など観測データが十分でない場合に起因する。また、基準局からの通信リンクが途切れた場合は単独測位解となり、受信機の設定によってはディファレンシャル GPS 解（DGPS 解：Differential GPS）へ移行しいずれは単独測位解となる。表-1 より RTK 測位で得られる測位解とその概略精度について示す。

3. GLONASS の併用測位

GLONASS とは、ロシアが運用する衛星測位システムであり、GPS と同精度の原子時計を搭載し、L1 帯と L2 帯の2種類の電波を送信している。しかし、表-2 に示すように準拠する時系が GPS と GLONASS で異なり、電波の送信パターンについても異なる信号方式を採用している。

時系の違いは、GPS と GLONASS を併用して干渉測位を実施する場合に問題となり、高精度な測位解を得るには、衛星系の時計時刻差（クロックオフセット）を正確に求める必要がある。これには、GLONASS 衛星の1機分の受信データを使用して、GPS との時計時刻差を算出する方法が用いられており、GLONASS が2機以上観測できる環境であれば併用測位が可能となる。そのため、GPS と GLONASS を併用した測位では、本来の観測衛星数よりも1機少ない衛星数で測位計算を行っている⁴⁾。

4. 既存研究

木本 (2009) は, GNSS ネットワーク型 RTK の実証実験を行っている⁵⁾. この実験では, 複数のメーカーの受信機を用意し, 臨時 GLONASS 対応基準局を利用した「GPS のみ」と「GPS+GLONASS」の測位が実施されている. 評価対象は, 初期化時間, 測位率, 測位精度の3つであり, GLONASS を併用することで, 初期化可能時間の改善および測位率の向上が確認されている. 一方, 測位精度については, 「GPS のみ」と「GPS+GLONASS」の測位結果に大きな差異は認められなかった. 結論として, GLONASS を併用することで測位可能エリアの拡大等が認められたが, 初期化時間と衛星数の関係や測位精度と衛星配置の影響については検証が行われていない.

また, 著者らは「GPS のみ」と「GPS+GLONASS」について, RTK 測位を用いた精度比較実験を行っている⁶⁾. この実験では, 時間帯別に精度解析を行ったほか, 衛星配置による精度劣化度を示す DOP (Dilution of Precision) についても同様に解析を行い, 衛星が与える精度への影響について検証を行った. その結果, 水平方向では「GPS+GLONASS」による精度向上が見られ, 鉛直方向では「GPS のみ」と「GPS+GLONASS」について精度は同程度であった. しかし, 本実験で使用した精度評価の指標は標準偏差であり, GPS と GLONASS のシステム間バイアスに起因した系統的誤差については検証が行われていない.

5. GPS のみと GPS+GLONASS の移動体測位実験

(1) 実験目的

GPS と GLONASS を併用することによる利点は, 観測衛星数増加による測位可能範囲の向上であると考えられる. そこで, 「GPS のみ」と「GPS+GLONASS」について RTK 測位を実施し, 得られた測位データに対する測位解毎の割合を比較することで, GLONASS 併用の有効性を検証した. なお, 衛星の電波を遮断する建物等の影響を考慮するため, あらかじめ定めたコースを電動式パーソナルトランスポートの一つであるセグウェイで移動しながら測位を行い, データ数にムラが生じないように一定速度で走行した.

(2) 実験日時・場所

実験日時は 2009 年 11 月 29 日 13:00~15:00 であり, 実験場所は, 日本大学理工学部船橋キャンパス測量実習センター周辺である. 図-2 に示すように走行コースは測量実習センターと隣接する駐車場を周回するコースである.



図-2 実験位置図

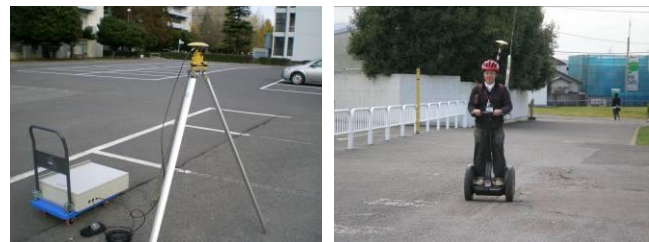


図-3 実験状況 (左: 基準局 右: 移動局)

(3) 実験方法

実験は, 図-3 に示すように基準局と移動局の2つの受信機を使用して行い, 基準局は基準点に設置し, 移動局は一定のアンテナ高で定速走行による RTK 測位を実施するためセグウェイに固定した. 基準点の座標値の算出については, 事前に周辺の電子基準点を含めたスタティック測位を実施して求めた.

実験で使用した受信機は, 基準局, 移動局ともにトプコン社製 LEGACY-E+ であり, 受信機間の通信リンクは特定小電力無線を使用した. 測位データの収集は, 受信機をノートパソコンに接続して行い, 出力データは NMEA-0183 の GGA, GSV, GSA メッセージである.

なお, LEGACY-E+ では独自フォーマットを用意しており, NMEA-0183 よりも詳細なデータが得られるメッセージがある. しかし, 出力される測位データの値は, NMEA-0183 の GGA メッセージ等で得られる値と同値であるため, 共通フォーマットである NMEA-0183 を使用した. また, 測位解の種類については, GGA メッセージのフラグにより解釈を行い, 受信不能は「0」, 単独測位解は「1」, Float 解は「5」, Fix 解は「4」と表示される.

実験方法としては, データの出力間隔を 1Hz に設定し, 衛星配置が大きく変わらないように, 走行コースを3周する毎に「GPS のみ」→「GPS+GLONASS」の順に測位条件を切り替えて RTK 測位を実施し, この作業を5回繰り返した.

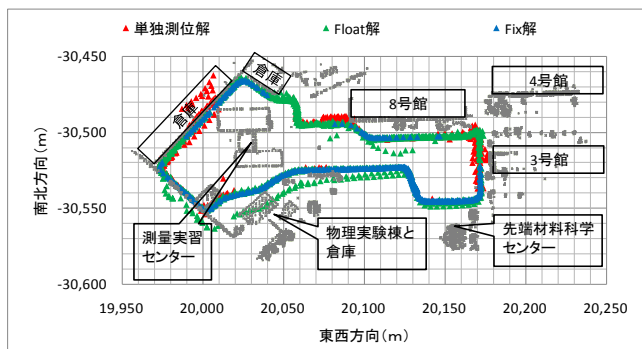


図-4 各測位解の分布 (GPSのみ)

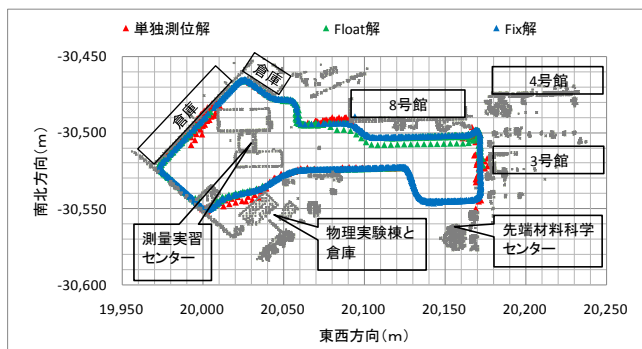


図-5 各測位解の分布 (GPS+GLONASS)

(4) 実験結果と解析

実験で得られた測位データについて、「GPSのみ」による各測位解の分布結果を図-4に示す。同様に、「GPS+GLONASS」による各測位解の分布結果を図-5に示す。「GPSのみ」と「GPS+GLONASS」について、測位解の分布を比較すると、「GPSのみ」では、校舎(3号館, 8号館)付近を通過すると、単独測位解, Float解となるが、「GPS+GLONASS」では、Fix解を保ち続ける場合が確認できる。

表-3に全測位データに対する測位解の割合を測位条件別に示す。「GPS+GLONASS」の測位割合について、「GPSのみ」の測位割合と比較した場合、単独測位解では5.5%, Float解では24.8%の減少が見られ、Fix解では30.5%の増加が見られた。Float解は初期化過程で得られる測位解であり、Fix解は初期化後の測位解であるため、測位解の差は初期化時と初期化後の観測衛星数が影響していると推察される。

次に、初期化とFloat解の測位割合の関係について調べるため、Float解のデータ数を観測衛星数別に集計した。なお、「GPS+GLONASS」については、観測位置によってGLONASS併用の有無が混在しており、クロックオフセットの関係上、観測衛星数と測位に利用する衛星数が異なる場合がある。そのため、「GPS+GLONASS」のGSAメッセージよりGPSとGLONASSの観測衛星数を確認し、本解析に限りGLONASS併用時の測位利用衛星数を「GPS衛星+(GLONASS衛星-1機)」と換算した。図-6にFloat

表-3 測位条件別における測位解の割合

測位解	GPSのみ		GPS+GLONASS	
	データ数	測位割合(%)	データ数	測位割合(%)
受信不能	5	0.2	0	0.0
単独測位解	338	16.3	219	10.8
Float解	1120	54.0	593	29.2
Fix解	610	29.4	1216	60.0
合計	2073	100.0	2028	100.0

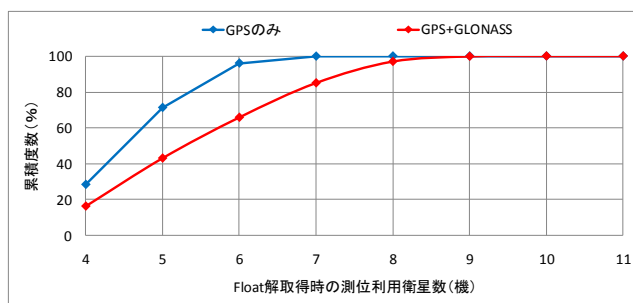


図-6 Float解取得時の測位利用衛星数累積度数

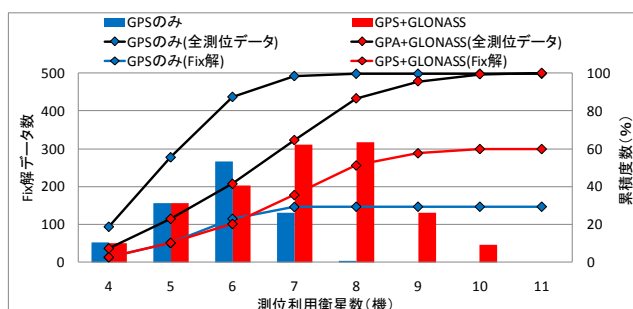


図-7 測位利用衛星数別のFix解データと累積度数

解取得時の測位利用衛星数累積度数を測位条件別に示す。測位条件別に累積度数の比較を行うと、Float解について累積度数が100%に達するのは、「GPSのみ」の場合は8衛星であるのに対して、「GPS+GLONASS」の場合は10衛星と測位利用衛星数が多いことがわかる。また、初期化ができない4衛星の割合は「GPS+GLONASS」よりも「GPSのみ」のほうが大きいことがわかる。この場合、整数値バイアスを推定できずFix解に移行できないので、「GPSのみ」のFloat解の測位割合が「GPS+GLONASS」よりも多くなった要因の一つと推察される。

次に、観測衛星数とFix解の測位割合の関係について調べるため、「GPSのみ」と「GPS+GLONASS」のFix解のデータ数を観測衛星数別に集計した。なお、「GPS+GLONASS」の観測衛星数については、図-6と同様にGLONASS併用時の測位利用衛星数を「GPS衛星+(GLONASS衛星-1機)」と換算した。図-7に測位利用衛星数別のFix解データと全測位データおよびFix解データの累積度数を測位条件別に示す。測位条件別にFix解のデータ数を測位利用衛星数別に比較すると、4~5衛星にかけてはデータ数に大きな違いは見られないが、6衛星の場合「GPSのみ」では267

データ、「GPS+GLONASS」では 203 データとなり、「GPS のみ」のほうが Fix 解のデータ数が多いことがわかる。しかし、7 衛星以降では「GPS のみ」の Fix 解のデータ数は少なくなり、「GPS+GLONASS」のほうが Fix 解のデータ数が多くなる傾向が見られる。Fix 解の取得に関しては、「GPS のみ」では 8 衛星までに対し、「GPS+GLONASS」では 10 衛星まで行われており、測位条件別に Fix 解の累積度数を比較すると、7 衛星以降から累積度数の差は大きくなる傾向が確認できる。これは、GLONASS を併用することで観測衛星数が増加し、「GPS のみ」よりも多い衛星数で Fix 解が取得できたため、「GPS+GLONASS」の Fix 解の割合が「GPS のみ」よりも多くなったものと推察される。

また、衛星数毎に占める Fix 解の割合を見るため、全測位データと Fix 解の累積度数の差を測位条件別に比較すると、「GPS+GLONASS」のほうが小さい傾向にあり、衛星数毎に占める Fix 解の割合が「GPS のみ」よりも多いことがわかる。GLONASS 併用により観測衛星数が増加しており、障害物による衛星電波遮断の影響を「GPS のみ」の場合よりも受けず、単独測位解や Float 解に移行せずに Fix 解を取得できたものと推察される。

6. GPS のみと GPS+GLONASS の初期化実験

(1) 実験目的

移動体測位実験の「GPS のみ」と「GPS+GLONASS」の測位割合について、初期化と観測衛星からの電波遮断の影響を指摘したが、初期化時間の影響も含まれると考えられる。そこで、「GPS のみ」と「GPS+GLONASS」について RTK 測位による初期化実験を実施し、初期化時間の決定要因を検討した。

(2) 実験日時・場所

実験日時は 2009 年 12 月 12 日 12:00~13:30、2009 年 12 月 13 日 11:00~12:30 であり、GLONASS 衛星が常に 2 機以上観測できる時間帯で初期化実験を実施した。実験場所は日本大学理工学部船橋キャンパス駐車場である。

(3) 実験方法

実験は、図-8 に示すように、基準局と移動局の 2 つの受信機を基準点に設置して行った。基準点の座標値の算出方法としては、移動体測位実験で使用した基準点を元に、あらかじめ用意した 2 つの未知点に対して TS 観測と水準測量を実施することで未知点位置を算出し基準点とした。

実験で使用した受信機はトプコン社製の LEGACY-E+ であり、受信機間の通信リンクは 2 つの



図-8 実験機器設置状況

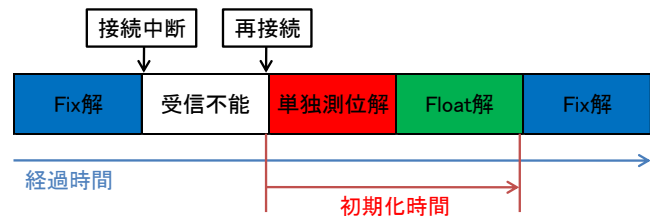


図-9 初期化時間の算出過程

受信機をデータケーブルで直結して行った。測位データの収集は、移動体測位実験と同様にノートパソコンに受信機を接続し、NMEA-0183 の GGA, GSV, GSA メッセージを出力した。

実験方法としては、まず、データの出力間隔を 1Hz に設定し、GGA メッセージのフラグにより測位状態が Fix であることを確認する。次に、移動局受信機のアンテナコードを抜いて測位状態を受信不能とし、再度アンテナコードを移動局受信機に接続する。再接続後、「単独測位解」を取得した時刻から、「Float 解」を経て「Fix 解」になるまでに要した時間を初期化時間とした(図-9)。ここで、「単独測位解」取得時の時間は整数値バイアスの探索範囲の絞り込みを行っている時間であり、「Float 解」取得時の時間は整数値バイアスを確定する時間である^{7) 8)}。

なお、「GPS のみ」と「GPS+GLONASS」の切り替えは、時間経過によって衛星配置が大きく変わらないように初期化を 10 回行う毎に行った。また、観測衛星数等の測位環境の影響を考慮するため、セッション毎に仰角マスクの設定を変更して初期化実験を行い、この作業を 5 回実施した。

(4) 実験結果と解析

実験で得られた初期化時間について「GPS のみ」によるセッション毎の結果を図-10 に示す。同様に、「GPS+GLONASS」によるセッション毎の結果を図-11 に示す。なお、セッション 2 の 10 回目とセッション 5 においては「GPS のみ」では観測衛星数が少なく初期化が出来なかったため「GPS+GLONASS」による

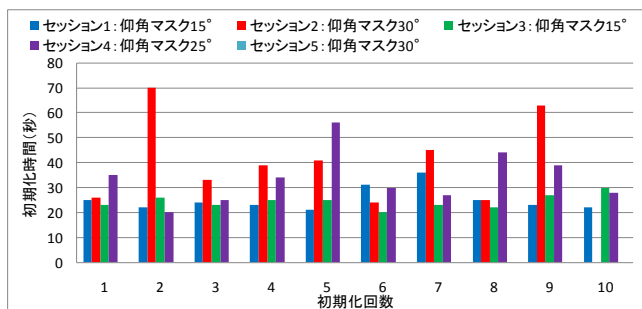


図-10 セッション毎の初期化時間 (GPSのみ)

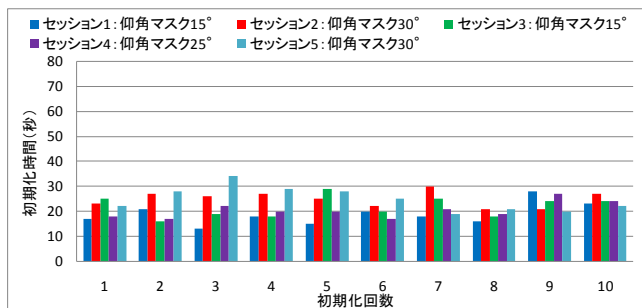


図-11 セッション毎の初期化時間 (GPS+GLONASS)

表-4 測位条件別におけるセッション毎の平均値

セッション	仰角マスク	GPSのみ			GPS+GLONASS		
		衛星数(機)	PDOP	初期化時間(秒)	衛星数(機)	PDOP	初期化時間(秒)
1	15	6.0	2.53	25.2	8.0	4.62	18.9
2	30	5.0	7.99	40.7	7.0	5.47	24.9
3	15	6.3	2.52	24.4	7.0	3.14	21.8
4	25	5.0	3.38	33.8	7.0	3.58	20.5
5	30				6.5	5.08	24.8

初期化のみ行った。図-10と図-11より「GPSのみ」と「GPS+GLONASS」について、初期化時間を比較すると、全てのセッションで「GPS+GLONASS」による初期化時間の短縮が確認できる。

表-4にセッション毎の平均初期化時間と初期化直後の観測衛星数およびPDOP (Position DOP)の平均値を示す。PDOPとは、衛星配置による3次元方向の精度劣化度を示す指標であり値が大きいほど精度劣化度が大きくなる。本実験では、GSAメッセージにより出力されるPDOP値を使用した。セッション毎に平均初期化時間を比較すると、仰角マスクの設定値が高いセッションほど初期化時間が長くなる傾向にあり、「GPSのみ」と「GPS+GLONASS」の初期化時間の差についても大きくなる傾向が見られた。観測衛星数とPDOPについて比較を行うと、仰角マスクの設定値が高いセッションほど観測衛星数が少なく、PDOP値が高い傾向にあるため初期化時間の長さはその影響を受けているものと推察される。

次に、観測衛星数と初期化時間の関係について調べた。図-12に初期化完了時の観測衛星数と平均初期化時間の関係を示す。観測衛星数が多くなると、「GPS

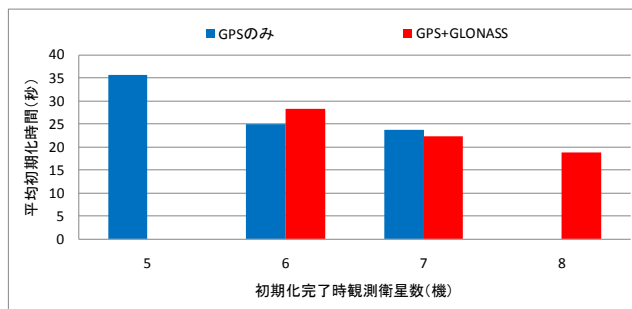


図-12 初期化完了時の衛星数と平均初期化時間

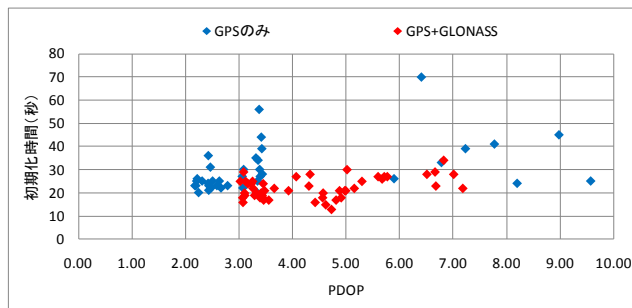


図-13 初期化完了時のPDOPと初期化時間

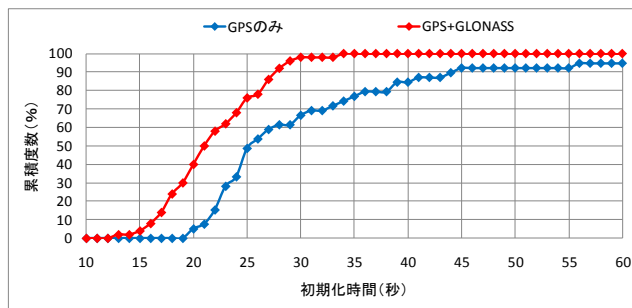


図-14 初期化時間累積度数

のみ」と「GPS+GLONASS」ともに初期化時間が短くなるのがわかる。「GPSのみ」の場合、5衛星では平均で35.6秒となるのに対し、7衛星では平均で23.7秒となり約12秒短縮される。また、「GPS+GLONASS」の場合、6衛星では平均で28.2秒となるのに対し、8衛星では、平均で18.9秒となり約9秒短縮される。なお、同観測衛星数で「GPSのみ」と「GPS+GLONASS」の平均初期化時間を比較した場合、6衛星では「GPSのみ」の方が初期化時間は若干短く、7衛星では「GPS+GLONASS」の方が初期化時間はわずかに短いという結果が得られた。しかし、GLONASS衛星が初期化時間に影響するような傾向は確認できなかった。

次に、初期化完了時のPDOPと初期化時間の関係について図-13に示す。「GPSのみ」の場合、PDOP値が2.00~3.00の間では、初期化時間は20秒~36秒を示すが、PDOP値が3.00~4.00の間では初期化時間は20秒~56秒を示しており、PDOP値が高くなると初期化時間が長くなる場合があることがわかる。また、「GPS+GLONASS」の場合、PDOP値が3.00~4.00の

間では初期化時間は 16 秒～29 秒を示しているが、PDOP 値が 4.00～5.00 の間では初期化時間は 13 秒～28 秒を示しており、初期化時間が短くなる場合があることがわかる。しかし、観測衛星数の場合と同様に、明確な傾向は見られなかった。

図-14 に初期化時間の累積度数を示す。測位条件別に累積度数の比較を行うと、80%を超えるのは「GPSのみ」の場合 39 秒であるのに対し、「GPS+GLONASS」の場合 27 秒であった。また、累積度数曲線の傾向についてそれぞれ比較を行うと、「GPS+GLONASS」が、常に「GPSのみ」を上回っていることがわかる。「GPSのみ」と「GPS+GLONASS」について、同観測衛星数および PDOP 値別の初期化時間の比較では明確な違いは見られなかったことから、GLONASS 併用による観測衛星数の増加が影響しているものと推察される。

7. GPS と GLONASS を利用した精度比較実験

(1) 実験目的

GLONASS 併用時の測位精度について、信号方式の違いに起因する誤差増大の影響が考えられる。そこで、「GPSのみ」と「GPS+GLONASS」に加えて「GLONASSのみ」の3つの測位条件で RTK 測位を実施し、得られた Fix 解から、測位条件別の精度特性について検討を行った。

(2) 実験日時・場所

実験日時は 2010 年 2 月 12 日 13:00～15:30 であり、GLONASS 衛星が 5 機以上飛来する時間帯で精度比較実験を実施した。実験場所は初期化実験と同様に日本大学理工学部船橋キャンパス駐車場である。

(3) 実験方法

実験は、図-15 に示すように初期化実験で利用した基準点に、基準局と移動局を設置して行った。実験で使用した受信機はトプコン社製の LEGACY-E+ であり、受信機間の通信リンクは初期化実験と同様に 2 つの受信機をデータケーブルで直結して行った。測位データの収集はノートパソコンを受信機に接続して行い、受信機からは、NMEA-0183 の GGA, GSV, GSA メッセージを出力した。

実験方法としては、データ出力間隔を 5Hz に設定し、観測環境が大きく変わらないように 3 分間隔で「GPSのみ」→「GPS+GLONASS」→「GLONASSのみ」の順に測位条件を切り替えて RTK 測位を実施し、この作業を 8 回繰り返した。

(4) 実験結果と解析

実験で得られた Fix 解について南北方向、東西方向、



図-15 実験機器設置状況

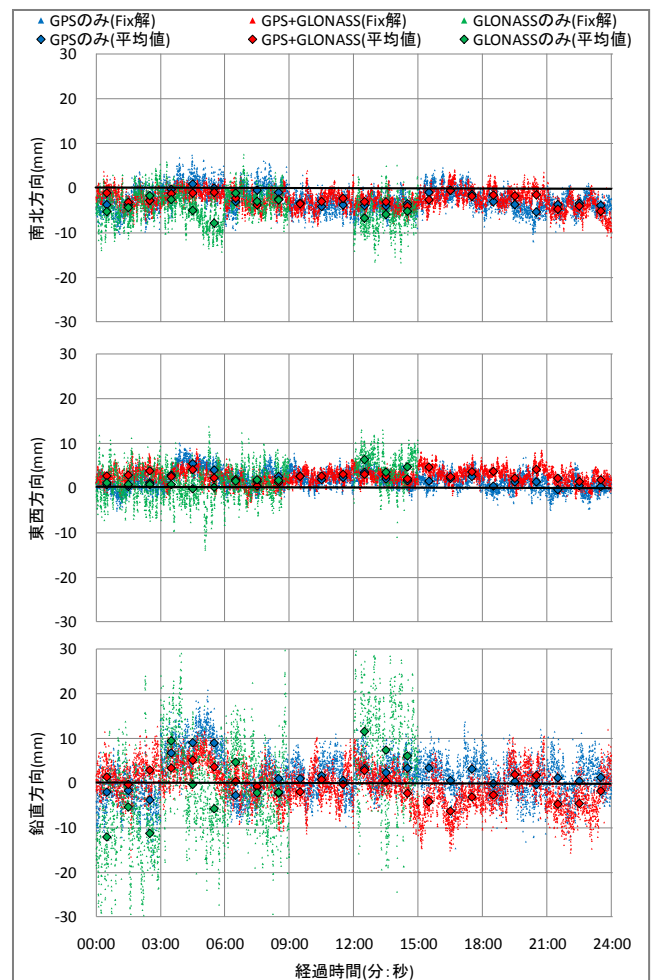


図-16 Fix 解とその平均値の時系列変化

鉛直方向別に時系列変化を表わしたものを図-16 に示す。1 分間毎に測位データを分割し、各時間帯の平均値を時系列順に見ると、南北方向の 5:00 付近では、「GLONASSのみ」の平均値が-8mm 程度となっていることが確認でき、鉛直方向においても同様に見える部分が確認できる。また、南北方向の 9:00 以降では、平均値が-3mm 程度で一定となっており、東西方向の 9:00 以降においても、平均値が 2mm 程度で一定となっていることが確認できる。

表-5 測位条件別における測位解の割合 (単位:%)

測位条件	受信不能	単独測位解	Float解	Fix解
GPSのみ	0.0	0.0	0.0	100.0
GPS+GLONASS	0.0	0.0	0.0	100.0
GLONASSのみ	12.5	26.0	11.0	50.5

表-6 測位条件別における RMS 値 (単位 : mm)

測位条件	南北方向	東西方向	鉛直方向
GPSのみ	3.6	2.8	5.0
GPS+GLONASS	3.3	3.2	4.5
GLONASSのみ	5.6	4.4	11.7

表-7 Fix 解取得時の衛星数と各 DOP 値の平均値

測位条件	衛星数(機)	HDOP	VDOP
GPSのみ	8.9	1.01	1.38
GPS+GLONASS	13.5	0.83	1.30
GLONASSのみ	5.0	1.65	3.24

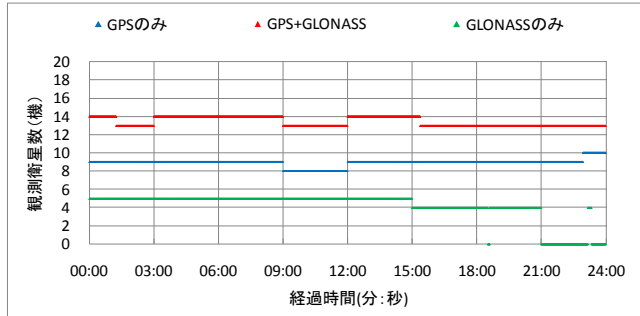


図-17 観測衛星数の時系列変化

なお、「GPS+GLONASS」の平均値の傾向について、「GPSのみ」と「GLONASSのみ」の平均値の傾向と比較すると、南北方向、東西方向では「GPSのみ」の平均値とほぼ同一の傾向を示しており、「GLONASSのみ」の平均値に関連する傾向は見られない。一方、鉛直方向では「GPSのみ」の平均値に関連した傾向は見られないが、「GLONASSのみ」でFix解が得られる時間帯では、「GPS+GLONASS」の平均値が「GPSのみ」の平均値よりも基準点座標に近い傾向にあることが確認できる。

表-5に測位条件別の測位解の割合を示す。「GPSのみ」と「GPS+GLONASS」では実験を行った全ての時間帯でFix解が得られた。一方、「GLONASSのみ」では一部の時間帯でFix解が得られず、実験開始から9:00~12:00の時間帯ではFloat解、15:00~21:00の時間帯では単独測位解を主に取得し、21:00以降は受信不能となった。図-17より観測衛星数の時系列変化を見ると、「GPSのみ」と「GPS+GLONASS」では、RTK測位に必要な衛星数5機以上を常に観測していることが確認できる。しかし、「GLONASSのみ」では15:00以降の観測衛星数が4機以下となり、初期化できない測位環境にあったことがわかる。なお、9:00~12:00の時間帯では、「GLONASSのみ」でも5機以上観測しており、初期化可能な測位環境にあるが、Float解からFix解に移行できなかったことから、整数値バイアスの推定が正常に行えなかった可能性が考えられる。

次に、Fix解の精度評価を測位条件別に行った。方向別による精度評価の指標としては、標準偏差とRMS (Root Mean Square) 値が挙げられる。しかし、Fix解の平均座標値と基準点の座標値が常に一定ではないので、分散の平方根として定義される標準偏差では、正確な精度評価はできない。一方RMS値では、基準点

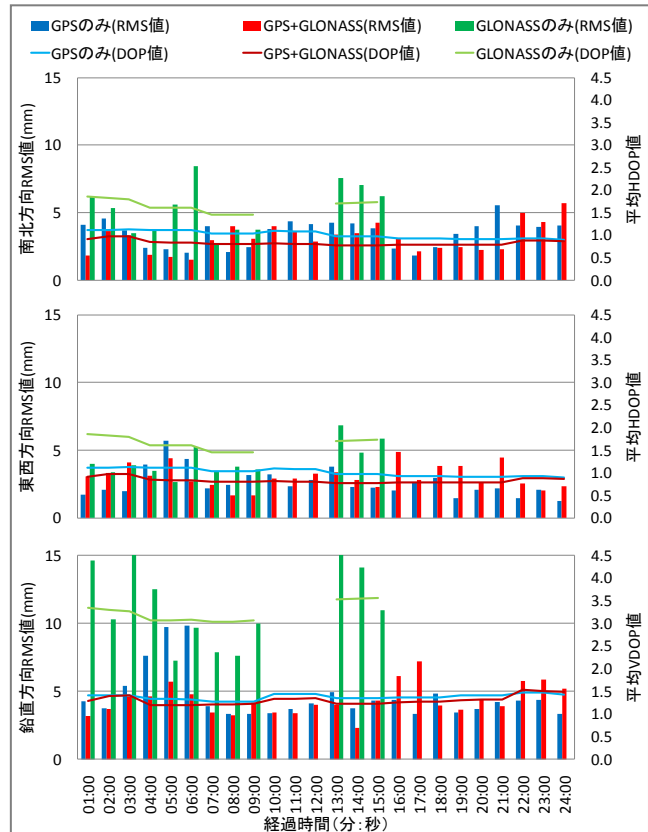


図-18 RMS 値と平均 DOP 値の時間帯別比較

の座標値を真値とした場合、全体の観測値との差を二乗平均して平方根をとるので、基準点からの誤差を表し標準偏差よりも正確な精度評価が可能と考えられる。

表-6に、各方向のRMS値を測位条件別に求めたものを示す。方向別に「GPSのみ」と「GPS+GLONASS」のRMS値を比較すると、3方向ともに0.5mm以内の差となり大きな違いは見られなかった。一方、「GLONASSのみ」のRMS値について「GPSのみ」と「GPS+GLONASS」のRMS値と比較した場合、南北方向では約2.2mm、東西方向では約1.4mm、鉛直方向では約7.0mm値が大きくなった。

次に、RMS値とDOPとの関係を調べるため、表-7にFix解取得時の衛星数とHDOP(Horizontal DOP)、

VDOP (Vertical DOP) の平均値を測位条件別に示す。ここで、HDOP, VDOP とは、前者が水平方向の精度劣化度を、後者が鉛直方向の精度劣化度を示す指標であり、値が大きいほど対応する方向の解のばらつきは大きくなる傾向にある。本実験では、GSA メッセージにより出力される HDOP, VDOP の値を使用した。測位条件別に観測衛星数と DOP 値を比較すると、「GPS+GLONASS」の方が観測衛星数は多く、HDOP と VDOP の値が小さくなる傾向が見られた。しかし、東西方向の RMS 値を比較すると、「GPS+GLONASS」より「GPS のみ」の方が値は小さいという結果が得られており、GLONASS 併用により系統誤差の影響を受けていると考えられる。なお、「GLONASS のみ」の RMS 値については、その他の測位条件と比較して観測衛星数が少なく、HDOP と VDOP の値が大きくなる傾向が見られるので、測位環境の違いによる影響が大きいと推察される。

次に、測位データを 1 分間毎に分割し、各時間帯の RMS 値と HDOP, VDOP の平均値を求めた。時間帯別の RMS 値と平均 DOP 値を図-18 に示す。「GPS のみ」と「GPS+GLONASS」について DOP の関係を見ると、表-7 と同様に「GPS+GLONASS」の方が全時間帯を通して HDOP, VDOP の値が小さい傾向にあることがわかる。DOP 値が小さいほど解のばらつきは小さくなる傾向にあるため、図-16 より平均値を中心とした際の Fix 解のばらつきは、「GPS+GLONASS」のほうが最も小さいといえる。しかし、RMS 値の関係を見ると、DOP 値と同様の傾向は見られず、時間帯によっては「GPS+GLONASS」のほうが「GPS のみ」よりも RMS 値が大きい場合が確認できる。このような傾向が見られる時間帯では、系統誤差が生じているものと推察されるが、本実験で得られた測位データは短時間であり、系統誤差が生じる明確な要因は特定できなかった。

8. 結論

本研究では、GLONASS 併用時の測位性能について検討するため、「GPS のみ」と「GPS+GLONASS」について RTK 測位を実施した。評価対象は、GLONASS 併用時の観測衛星数増加の効果を考慮して、測位率と初期化時間および測位精度の 3 つを対象とした。

なお、検証実験は「GPS+GLONASS」の併用測位を行うため GLONASS 衛星が 2 機以上観測できる測位環境で実施した。得られた実験結果を解析した結果、以下の点が明らかになった。

① 移動体測位実験による測位割合の解析では、「GPS のみ」の Fix 解の割合が 29.4% であるのに対して、「GPS+GLONASS」の Fix 解の割合は 60.0% となり、GLONASS 併用によって測位可能範囲の向上

が示された。これは、GLONASS 併用によって観測衛星数が増加し、障害物によって電波が遮断されても、初期化や整数値バイアスの保持に必要な衛星数を観測できたためと考えられる。

- ② 「GPS のみ」と「GPS+GLONASS」の初期化時間を比較した場合、「GPS+GLONASS」による初期化時間の短縮が確認された。初期化実験の決定要因について検討した結果、「GPS のみ」と「GPS+GLONASS」ともに観測衛星数が増加すると初期化時間が短くなる傾向が見られ、GLONASS 併用による観測衛星数の増加が影響したものと考えられる。
- ③ 「GPS のみ」と「GPS+GLONASS」の精度比較実験の結果を比較した場合、GLONASS を併用することで衛星配置が改善され、Fix 解のばらつきは小さくなった。しかし、RMS 値による比較では、「GPS+GLONASS」のほうが「GPS のみ」よりも値が大きくなる場合が確認され、複数衛星系の併用に起因した系統誤差が含まれる可能性が考えられる。

本研究の結果より、GLONASS 併用によって観測衛星数が増加し、測位可能範囲の拡大および初期化時間の短縮が確認された。一方、測位精度については、系統誤差が含まれる可能性が考えられるが、明確な要因は特定できなかった。

系統誤差については、測位に利用する GLONASS 衛星の数や DOP を考慮した検証を行うことで、明らかにできると考えられる。したがって、今後は GLONASS 衛星を複数観測可能な条件で測位を実施し、仰角マスクおよび観測衛星をあらかじめ指定して精度検証を進める予定である。

謝辞：本研究は平成 21 年度科学研究費補助金基盤研究 C (20560495) の助成を受けた。ここに記して謝意を申し上げる。

参考文献

- 1) 安田明生：月刊「測量」別冊 GPS フロンティア，日本測量協会，p.12，2004 年 2 月
- 2) 近津博文，熊谷樹一郎，佐田達典，鹿田正明，淵本正隆：空間情報工学概論，日本測量協会，p.95，2005 年 8 月
- 3) 土屋 淳，辻 宏道：GNSS 測量の基礎，日本測量協会，p.21，p.87，p.262，2008 年 3 月
- 4) Leica Geosystems：System 1200 Newsletter - No.36 GLONASS，< http://www.leica-geosystems.com/downloads/123/zz/general/general/newsletters/System1200_36_GLONASS_en.pdf >，(入手 2010 年 5 月)
- 5) 木元昭則：GNSS ネットワーク型 RTK 測位の実証実験報告，GPS/GNSS SYMPOSIUM 2009，pp.161-164，2009 年

11月

- 6) 池田隆博, 佐田達典: GPS と GLONASS を併用した RTK 測位の精度に関する研究, 応用測量論文集, vol.20, pp.5-14, 2009年6月
- 7) 佐田達典, 池田隆博, 会田亮介: RTK-GPS の初期化時間の決定要因に関する研究, 土木情報利用技術論文集, Vol.18, pp.125-136, 2009年10月
- 8) 池田隆博, 佐田達典: GPS と GLONASS を用いた RTK 測位の初期化時間に関する研究, 土木情報利用技術論文集, Vol.18, pp.137-144, 2009年10月

(2010.5.28 受付)