

(57) GPS と GLONASS における高精度測位の利用衛星選択効果に関する研究

Study on the Effect of Satellite Selection of High Accuracy Positioning using GPS and GLONASS

池田隆博¹・佐田達典²

Ikeda Takahiro and Sada Tatsunori

抄録： 衛星測位分野では、GPS のほかに GLONASS など利用可能な衛星の増加により、複数衛星を利用した測位が今後想定される。しかし、衛星の増加によりマルチパス等の誤差を含む衛星電波の増加も考えられ、事前に衛星電波の状態を把握し測位に使用する衛星を選択することが求められる。本研究では、マルチパスの影響を受ける衛星電波を判別するため、衛星の1周波、2周波搬送波の距離変化の差を使用して判別を行い、それをもとに測位に利用する衛星を選択し測位性能の検証を行った。その結果、搬送波の距離変化を用いることで、マルチパスの影響を受ける衛星電波の判別が可能であること、マルチパスの影響を受ける衛星電波を使用しないことで、Fix 解の取得率の向上が確認された。

キーワード： GPS, GLONASS, 干渉測位, マルチパス, 搬送波, 測位解, 測位精度

Keywords : GPS, GLONASS, Interferometric Positioning, Multipath, Carrier, Solution, Positioning Accuracy

1. はじめに

我が国の衛星測位分野では、米国が運用する GPS (Global Positioning System) の利用が主流であるが、2010 年 9 月に、国産の衛星測位システムである準天頂衛星システムの打ち上げが行われ、また、2011 年にロシアが運用する GLONASS (Global Navigation Satellite System) が全世界をカバーする 24 衛星に達するなど、利用可能な衛星が増加しつつある。また、一公共測量一作業規定準則¹⁾において、GLONASS の利用方法が明記されるなど、今後複数衛星系を併用した測位が一般的になるものと想定される。

しかしながら、利用可能な衛星が増加した場合、衛星電波の遮蔽されやすい環境でも測位に必要な衛星数を得られる可能性があるが、マルチパスなどの誤差を含む衛星電波の増加が懸念される。また、複数衛星系を併用して測位を行う場合、双方で衛星電波の周波数帯及び準拠する時系が異なる可能性があり、この違いが測位結果に影響を及ぼす可能性がある。そのため、公共測量など高精度を必要とする作業においては、観測可能な衛星電波の状態を事前に把握し、測位計算に使用する衛星を選択することが求められる。

本研究では、利用衛星選択による効果を明らかにするため、遮蔽環境の含む観測点と含まない観測点で、GPS と GLONASS の衛星電波観測データの収集を行った。得られたデータより、マルチパスの影響を受ける衛星電波を判別し、高精度測位における衛星選択効果について「GPS のみ」と「GPS+GLONASS」の場合で検討したので、その結果を報告する。

2. 干渉測位の概要

基準点測量等の公共測量では、干渉測位方式が使用される。干渉測位とは、既知点と未知点に受信機を設置し、双方で同時に取得された衛星の搬送波の位相積算値に対して差分処理を行うことで、点間の基線ベクトルを求める方式である。

差分処理には、図-1 に示すように衛星 2 機、受信機 2 機の組合せを基本に行い、衛星に対する各受信機との行路差により、衛星・受信機時計の誤差が消去され 5mm~20mm の高精度な測位結果が得られる²⁾。なお、未知点座標の算出には、4 機以上の衛星から電波を受信する必要がある。さらに差分処理を行うため、準拠する時系が同一である必要がある。そのため、GPS 測位時に GLONASS を併用する場合、準拠する時系が異なるため、少なくとも GLONASS 衛星を 2 機観測する必要がある。

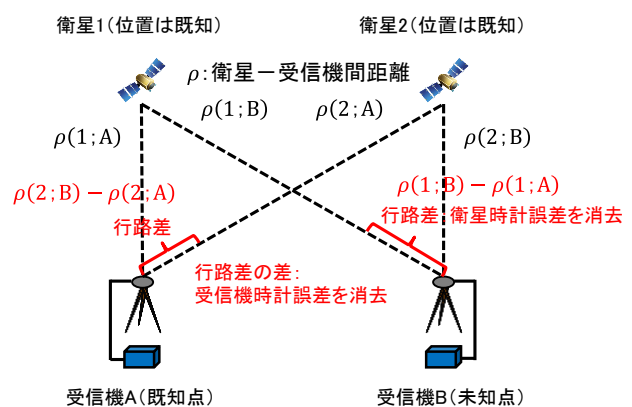


図-1 干渉測位における差分処理²⁾

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 : ikeda.takahiro@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. マルチパスによる誤差電波の判別手法

マルチパスの影響を受ける衛星電波の判別方法として、本研究では搬送波の電離層遅延の特性を用いる。電離層における遅延量は、衛星電波の伝搬経路における総電子数（TEC：total electron content）と電波の周波数帯に依存し、（1）の式で表される³⁾。

$$I_{\phi} = C \cdot \Delta\tau_p = -\frac{40.3 \cdot TEC}{f^2} \quad (1)$$

I_{ϕ} ：位相遅延量（m） C ：光速

$\Delta\tau_p$ ：位相遅延量（秒） TEC ：総電子数

f ：搬送波周波数

このとき、電離層の通過距離は天頂方向において最も短く、衛星が低仰角の場合、電離層の通過距離は長くなる。また、GPS 衛星では L1 と L2（GLONASS 衛星では G1 と G2）の周波数帯の異なる搬送波を送信しており、衛星仰角が低くなると、搬送波の遅延量の差は大きくなり、双方の位相変化に差が生じる。

搬送波位相の変化は、正確な光速と波長を乗じることで、衛星と受信機間の距離変化となる⁴⁾。したがって、搬送波の遅延量の差が大きい場合、（2）の式で示す 1 周波、2 周波の距離変化の差は、大きくなるものと推察される。

$$L = (\phi_t^{L1} - \phi_{t-1}^{L1}) \frac{C}{f_{L1}} - (\phi_t^{L2} - \phi_{t-1}^{L2}) \frac{C}{f_{L2}} \quad (2)$$

L ：距離変化の差 ϕ ：搬送波位相 t ：時刻（秒）

$L1$ ：1 周波 $L2$ ：2 周波

なお、電離層による遅延は、設置した受信機間の距離が数十 km の範囲内であればほぼ同一であるため、

（2）式で得られる距離変化の差は類似した結果が得られるものと考えられる。しかしながら、マルチパスによる干渉を受けた場合、衛星電波に電離層遅延以外の誤差が生じるため、異なる結果が得られるものと推察される。本研究では、遮蔽物を含む観測点と含まない観測点に受信機を設置し、得られた双方のデータから距離変化の差を求めて比較し、マルチパスの影響を受ける衛星電波の判別を行った。

4. 遮蔽環境におけるマルチパス判別実験

（1）実験概要

マルチパスの影響を受ける衛星電波の判別を行うため、図-2 に示す日本大学理工学部船橋キャンパス内に設置した、周囲に遮蔽物を含む観測点と含まない観測点の双方に 2 周波受信機を設置し（図-3）、GPS と GLONASS の衛星電波観測データの取得を同時時間帯で行った。実験日時は、2011 年 11 月 5 日～7 日 10:00～16:30 であり、データ出力を 1Hz に設定し、各観測点で 3 時間測位を実施した。使用した受信機は、

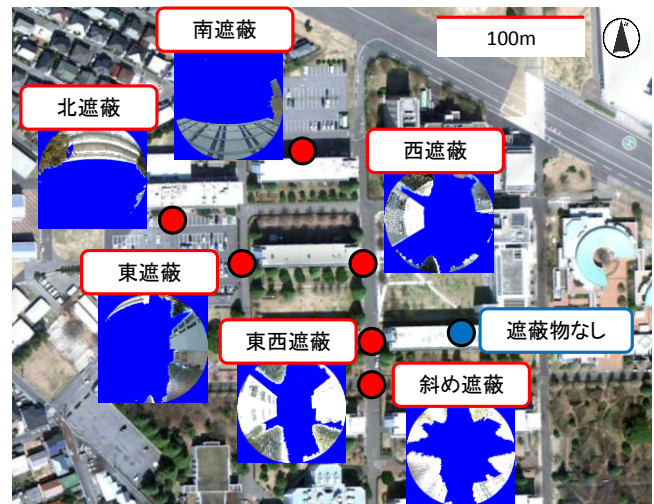


図-2 観測点位置と遮蔽状況



図-3 実験状況（左：遮蔽物なし 右：北遮蔽）

双方ともにニコン・トリニブル社製 Trimble NetR8 であり、RINEX3.0 形式によるデータを取得した。

（2）衛星位置と遮蔽物位置の関係

本稿では、北遮蔽時の結果について報告する。観測された衛星の位置と遮蔽物位置との関係を調べるため、GPS と GLONASS の Almanac データ（衛星軌道情報）と観測点周囲の遮蔽環境から、各衛星の電波を取得した時間帯の衛星位置を記入した。図-4 より、GPS と GLONASS の衛星位置と遮蔽物位置との関係を確認すると、衛星位置が遮蔽物位置より下で本来不可視であるにも関わらず、衛星電波を受信していることがわかる。これは、遮蔽物からの回折により、衛星電波を受信しているものと考えられ、マルチパスの影響を強く受けているものと推察される。

（3）マルチパスの影響を受ける衛星電波の検討

GPS と GLONASS のマルチパスの影響を受ける衛星電波を判別するため、PRN 番号毎（GPS は「G」、GLONASS は「R」と示す）に 1 周波と 2 周波の距離変化の差を算出し、遮蔽物を含む場合と含まない場合で同時時間帯の算出結果の較差を求めた。図-5、図-6 より、1 分間毎（データ数：60）に算出結果の較差平均値と標準偏差を求めて傾向を確認すると、平均値については、GPS、GLONASS とともにほとんどの衛星は 1.0mm 以内と大きな変化は見られなかった。一方、標準偏差については、0mm 付近で推移する場合と、1.0mm 以上の大きな値を示す場合の 2 種類の傾向が確認できる。図-4 より衛星位置との関連性を確認する

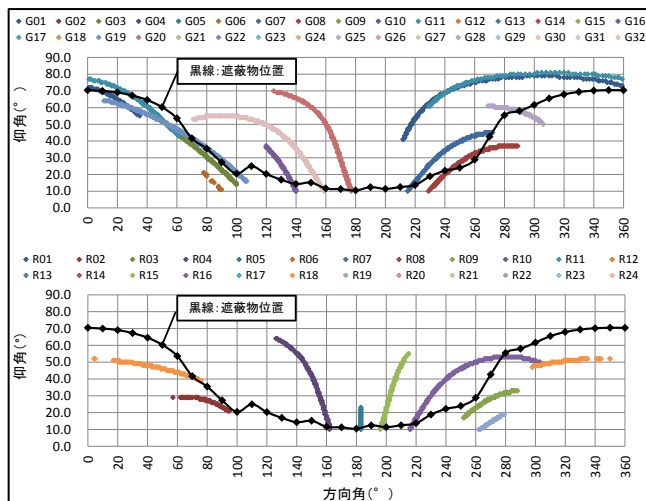


図-4 電波受信できた衛星位置と遮蔽物位置
(上: GPS 下: GLONASS)

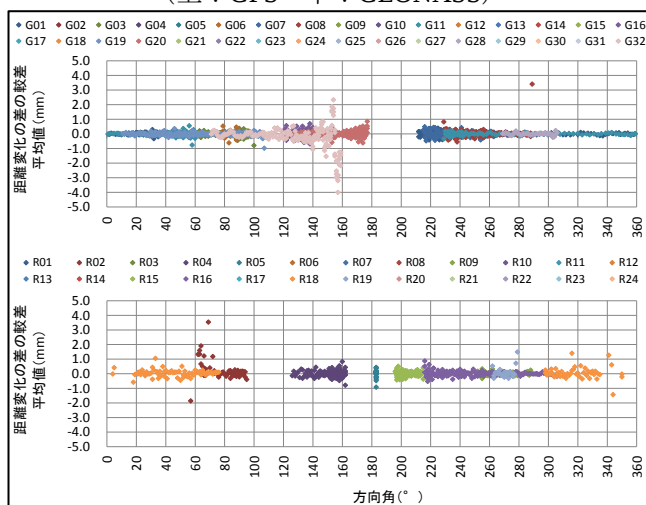


図-5 距離変化の差の較差平均値
(上: GPS 下: GLONASS)

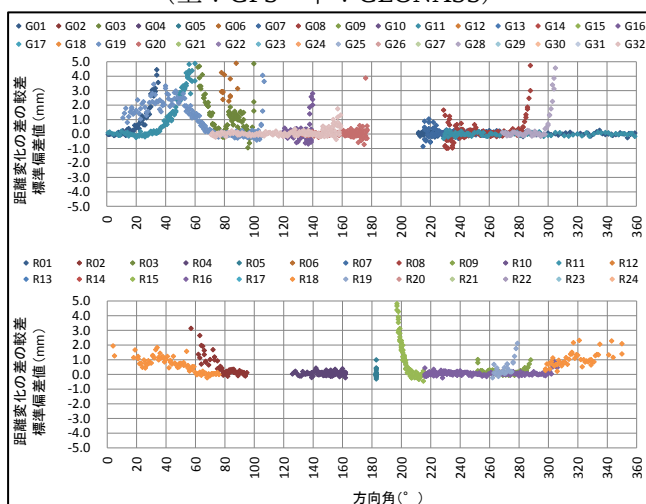


図-6 距離変化の差の較差標準偏差値
(上: GPS 下: GLONASS)

と、遮蔽物により不可視となる衛星の方向角と標準偏差値が大きくなる際の方向角が多数一致していることがわかる。不可視衛星からの衛星電波は、マルチパスの影響を強く受けているものと推察されるため、本研

究における、1周波、2周波の距離変化の差を用いたマルチパス判別手法は有効であると考えられる。

なお、GPSのPRN32衛星(G32)、GLONASSのPRN15衛星(R15)など、可視衛星にも関わらず、平均値及び標準偏差値が大きくなる場合が確認された。これは、周囲の遮蔽物からの反射による影響が考えられる。

5. 利用衛星選択による測位性能の検証

(1) 検証方法

高精度測位における利用衛星の選択効果を検証するため、マルチパスの影響を受ける衛星を使用した場合と使用しない場合とで解析を行い、結果の比較を行った。マルチパスの影響を受ける衛星の条件としては、図-5、図-6で得られた結果より、平均値、標準偏差ともに1.0mm以上となる時間帯の衛星とした。

検証方法としては、遮蔽物なしの観測点を既知点、遮蔽物を含む観測点を未知点とし、双方で得られたRINEXデータより、「GPSのみ」と「GPS+GLONASS」の条件で使用する衛星を選定し、キネマティック処理を行った。評価対象は、測位率と測位精度であり、解析により得られたFix解により検討を行った。

なお、キネマティック解析には、RTKLIB Verion2.4.1を使用し、仰角マスク15°、SNRマスク10dbHzの設定で解析を行った。また、既知点座標値には、2011年2月3日11:00~13:00に同観測点と近傍の電子基準点を含めたスタティック測位による処理により得られた結果を使用し、未知点座標値は、2011年6月18日10:00~13:00に既知点となる観測点を含めたスタティック測位による処理で得られた結果を基準値とした。

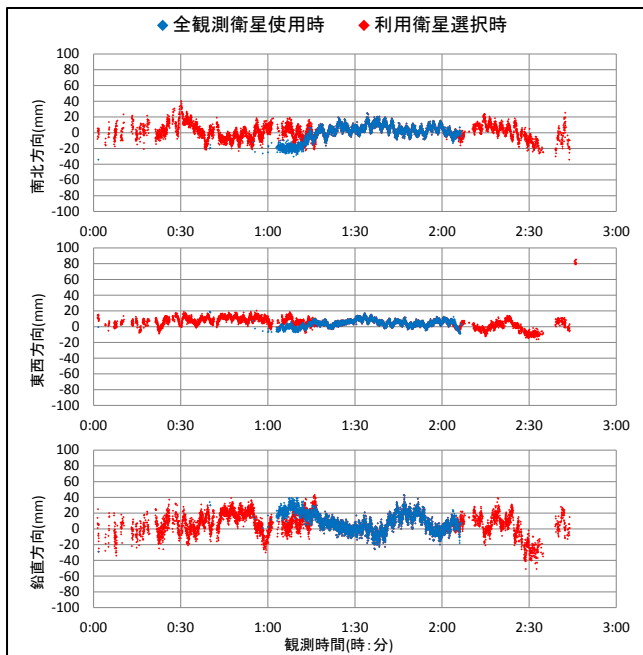
(2) 検証結果

「GPSのみ」における利用衛星選択による効果を比較するため、全観測衛星を使用した場合と、マルチパスの影響を受ける衛星を使用しない場合の解析結果について検討を行った。表-1より、双方の測位解の割合を確認すると、マルチパスの影響を受ける衛星を使用しないことで、Fix率の向上が見られた。図-7より、使用衛星の条件別に基準値からのFix解の時系列変化を確認すると、マルチパスの影響を受ける衛星を使用しないことで、全観測衛星使用時にFix解が得られない時間帯でもFix解の取得が確認された。なお、Fix解の分布は、双方ともに南北、東西で20mm以内、鉛直方向40mm以内となる傾向が確認でき、また、表-2より、双方のFix解の平均値と基準値との較差を3方向について確認すると、Fix解の概略精度である5mm~20mm以内に収まっており、利用衛星を選択しても同等の精度が得られているものと推察される。

次に、「GPS+GLONASS」における利用衛星選択による効果を比較するため、全観測衛星使用時の場合と、

表－1 GPS のみによる測位解の割合

測位解	全観測衛星使用時(%)	利用衛星選択時(%)
Fix解	36.0	67.8
Float解	64.0	32.2



図－7 GPS のみによる Fix 解の時系列変化

表－2 GPS のみによる基準値との較差平均

測位解	全観測衛星使用時(mm)			利用衛星選択時(mm)		
	南北	東西	鉛直	南北	東西	鉛直
Fix解	-15.1	-4.0	-3.5	3.9	7.2	6.5
Float解	93.5	-9.4	63.4	236.7	-54.3	133.8

マルチパスの影響を受ける衛星を使用しない場合の解析結果について検討を行った。表－3より、双方の測位解の割合を確認すると、マルチパスの影響を受ける衛星を使用しないことで、「GPS のみ」と同様に Fix 解の取得向上が見られた。図－8より、使用衛星の条件別に基準値からの Fix 解の時系列変化を確認すると、「GPS のみ」と同様にマルチパスの影響を受ける衛星を使用しないことで、Fix 解となる時間帯の増加が確認された。しかしながら、観測時間 2:30 以降に取得された Fix 解については、分布が大きくなる傾向が見られ、また、表－4より、利用衛星選択時の鉛直方向の平均値と基準値との較差を確認すると、Fix 解の概略精度以上となる傾向が見られた。これは、解析に使用する GLONASS 衛星数、幾何学的な衛星配置が影響しているものと推察される。

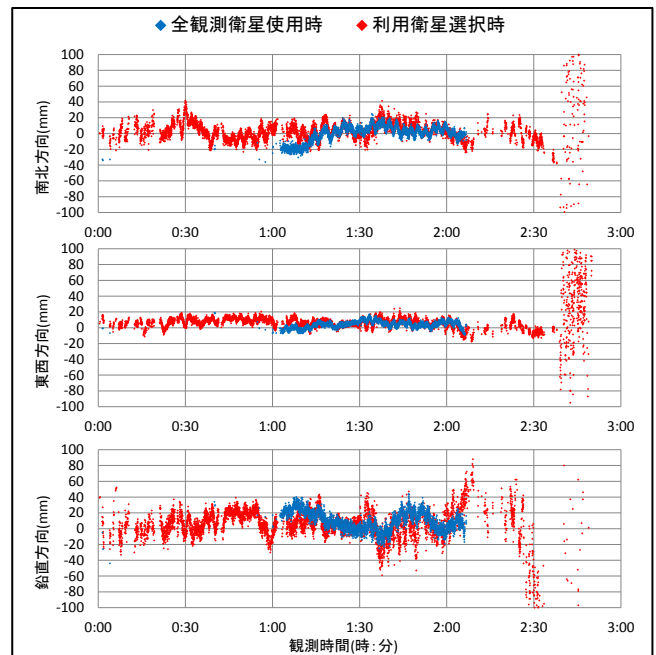
6. 結論

1 周波、2 周波搬送波の距離変化の差を用いたマルチパスの判別と、その結果から利用衛星選択による測位性能の検証を行った結果、以下の点が明らかになった。

① 方向角別による距離変化の差の較差の傾向と、マルチパスの影響を強く受けると推察される不可視衛

表－3 GPS+GLONASS による測位解の割合

測位解	全観測衛星使用時(%)	利用衛星選択時(%)
Fix解	36.1	63.0
Float解	63.9	37.0



図－8 GPS+GLONASS による Fix 解の時系列変化

表－4 GPS+GLONASS による基準値との較差平均

測位解	全観測衛星使用時(mm)			利用衛星選択時(mm)		
	南北	東西	鉛直	南北	東西	鉛直
Fix解	-2.2	2.7	7.5	12.8	9.5	48.3
Float解	2.8	-10.5	165.0	161.3	-97.7	197.0

星の方向角について、一致する傾向が見られた。

② マルチパスの影響を受ける衛星を使用しないことで、Fix 率の向上が見られた。

本研究の結果より、異なる周波数帯の距離変化によりマルチパスを判別し、その結果から影響を受ける衛星を測位に使用しないことで Fix 率の向上が見られた。一方、利用衛星選択時の GPS+GLONASS の Fix 解分布が大きくなる傾向については、測位に使用する衛星数、幾何学的な衛星配置が影響しているものと考えられるので、今後検証を行う予定である。

謝辞：本研究は平成 23 年度科学研究費助成金（基盤研究 C）23560632 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) 日本測量協会:公共測量作業規定の準則, pp.10-23, 2011 年 4 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, pp.91-92, 2005 年 8 月。
- 3) 日本航海学会 GPS 研究会:精説 GPS 基本概念・測位原理・信号と受信機, pp.123-125, 2004 年 12 月。
- 4) 土屋 淳, 辻 宏道:GNSS 測量の基礎, 日本測量協会, p.161, 2008 年 3 月。