²⁰⁾静止時におけるGPSとGLONASSを用いた 高精度測位の衛星選択効果に関する研究

池田 隆博1・佐田 達典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) E-mail:ikeda.takahiro@trpt.cst.nihon-u.ac.jp

²正会員 日本大学教授 理工学部交通システム工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1) E-mail:sada@trpt.cst.nihon-u.ac.jp

衛星測位システムとしてはGPSとGLONASSが正式運用されており、複数衛星系の併用により衛星電波 が遮蔽されやすい環境でも測位に必要な衛星数が得られる可能性が挙げられる.しかし、周囲に遮蔽物が 存在する場所では、マルチパスの影響を受けた衛星電波を取得しやすく、公共測量等の高精度を必要とす る測量作業では、マルチパスの影響を含まない衛星電波を取得することが重要となる.本研究では、高精 度測位に対応した衛星選択手法を構築するため、信号強度と搬送波の位相変化量の差からマルチパスの影 響を受ける衛星電波を判別する手法を検討し、実際の観測値から誤差電波を判別可能か検証した.その結 果、回折波に加えて反射波の影響を受ける衛星電波の判別できる可能性が確認された.

Key Words : GPS, GLONASS, Precise Positioning, Multipath, Carrier Phase

1. はじめに

現在,衛星測位システムとしては,GPSとGLONASS が正式運用されており,公共測量作業規程の準則におい ても併用測位に関する記述がなされている¹⁾.また, 国土地理院が管理を行う電子基準点についても,2012年 7月より,従来のGPSに加えGLONASSや準天頂衛星の観 測データの提供を開始しており,今後,衛星測位のイン フラ整備に伴い,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.

併用測位に伴う衛星数増加効果としては、衛星電波 が遮蔽されやすい環境でも測位に必要な衛星数が得られ る可能性が挙げられる.高層ビルが点在する都市部など、 従来GPSのみでは困難とされてきた箇所でも測位できる 可能性がある.しかしながら、周囲に遮蔽物が存在する 場所では、マルチパスによる誤差を含んだ衛星電波を取 得しやすく、干渉測位方式による測量作業おいて、測位 に必要な衛星数を観測しているにも関わらずFix解が得 られない場合がある.そのため、公共測量等の高精度を 必要とする測量作業においては、なるべくマルチパスの 影響を含まない衛星電波を取得することが重要となる.

マルチパスの削減手法としては、既に他の著者が報告されており、受信機内部の相関器を工夫した手法としては、Narrow Correlator²⁾, MEDLL (Multipath Estimating

Delay Lock Loop) ³⁾ 等の技術が示されている.また,その他の手法として,衛星電波観測データに含まれる信号 強度等の数値データを用いた手法⁴⁾,遮蔽物位置と衛 星位置からマルチパスの影響を受ける衛星電波を判別す る手法等が提案されている⁵⁾.

本研究では、マルチパスの影響を受ける衛星電波の信 号強度の傾向に着目し、高精度測位に対応した衛星選択 手法の構築を検討する.本稿では、まずマルチパスとな る反射波及び回折波による衛星電波への影響について記 述し、その特性からマルチパスの影響を受ける衛星電波 の判別方法を提案する.次に、実際に誤差電波を判別可 能かその検証結果を示し、最後に、提案手法を用いて衛 星選択を行った場合、観測時間帯のFix解の取得割合が 増加した結果を示す.

著者らは,既存研究⁶⁾でマルチパスの影響を受ける 衛星電波の判別方法の検討を行ったが,本研究では信号 強度の値も新たに含めて衛星選択手法の構築,および衛 星選択効果の検証を行ったのでその結果を報告する.

2. 衛星電波に対するマルチパスの影響

マルチパスとなる衛星電波は、図-1に示すように遮蔽 物を回り込む回折波のみを受信する場合、衛星からの直



図-1 回折波と反射波によるマルチパスの概要

接波と遮蔽物からの反射波を同時受信する場合の2つが 想定される.回折波および反射波は、伝搬経路の増加、 また、遮蔽物の電気的な特性等の要因により、衛星電波 の信号強度は直接波と異なる傾向を示すため、各々の状 況に応じた特性を把握することでマルチパスが影響する 衛星電波を判別することができるものと考えられる.

まず、回折波を受信した場合の信号強度の特性を単 ーナイフエッジ回折のモデルを用いて確認する.衛星と 受信アンテナ間の見通し線付近に遮蔽物がある場合,衛 星電波の回折損はvが-0.7より大きいとき(1)式と(2)式で表 される⁷⁾.

$$J(v) = 6.9 + 20 \log \left(\sqrt{(v - 0.1)^2 + 1} + v - 1 \right) (1)$$

$$v \equiv h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}\right)}$$
(2)

J(v):回折損(dB) v:回折パラメータ h:見通し線-ナイフエッジ先端間の距離(m) λ:衛星電波波長(m)

- d₁: 衛星とナイフエッジ先端間の距離(m)
- d2:受信アンテナとナイフエッジ先端間の距離(m)

ここで、衛星-受信アンテナ間の見通し線とナイフエ ッジの先端が交わる場合、hは0(m)となるため、衛星 電波の波長に関わらず回折損は約6(dB)となる.よっ て、遮蔽物により回折波のみ受信となる衛星電波につい ては、各々の受信機で同時観測された同衛星の信号強度 を比較することで判別は可能であると考えられる.

なお、直接波と反射波を同時受信した場合の信号強度 の特性については、2波モデル等を用いて傾向を確認す ることができるが、回折波の傾向と異なり、反射係数等 の不確定な要素が信号強度に影響するため、予め閾値を 定めて反射波の影響を受ける衛星電波を判別することは 困難である.そこで本研究では、搬送波の位相遅延量の 特性から、マルチパスの影響を受ける衛星電波を判別す る指標を新たに構築し、反射波の影響を受ける衛星電波 の判別を行った.



図-2 位相変化量の差によるマルチパスの判別

3. 搬送波位相を用いたマルチパス判別手法

受信機で観測される搬送波位相データは、ドップラー 効果の測定値であり、マルチパスや電離層遅延による位 相誤差は観測値として含まれることになる.よって、得 られた観測値から電離層遅延による誤差分を除去するこ とで、回折波や反射波の影響を受ける衛星電波を判別す ることが可能になると考えられる.

まず,搬送波に対する電離層遅延の影響を考える.電 離層による位相遅延量は,伝搬経路内の総電子数と周波 数に依存するため,(3)式で表される.

$$I_{\emptyset} = c \cdot \Delta \tau_{p} = -\frac{40.3 \cdot TEC}{f^{2}}$$

$$I_{\emptyset} : \dot{C} d \mu_{Z} \tilde{\omega} \equiv (m) \quad c : \mathcal{X} \bar{\omega} \quad (m/s)$$

$$\Delta \tau_{p} : \dot{C} d \mu_{Z} \tilde{\omega} \equiv (s) \quad TEC : \hat{\omega} \equiv \mathcal{X}$$

$$f : \mathfrak{W} \tilde{\omega} \tilde{\omega} \equiv \mathfrak{W}$$
(3)

測位衛星から送信される搬送波は、衛星系に関わら ずL1とL2の周波数の異なる2種類を送信しており、電離 層による位相遅延量は異なる結果が得られる.また、 L1とL2の搬送波は、衛星から同じタイミングで送信さ れており、双方の位相の変化量から電離層遅延の影響を 求めることができる.位相の変化量については、位相差 に正確な光速(*c*=299792458 m/s)を乗じ、搬送波に応じ た周波数で割ることで距離データとして得られるため、 L1、L2搬送波における位相変化量の差は(4)式で求めら れる.

$$D = \left| (\emptyset_t^{L1} - \emptyset_{t-1}^{L1}) \frac{c}{f_{L1}} - (\emptyset_t^{L2} - \emptyset_{t-1}^{L2}) \frac{c}{f_{L2}} \right|$$
(4)

D: 位相変化量の差(m)

ここで、電離層の影響は10km以下の基線長の場合は



図-3 観測値の取得位置

ほぼ同一と見なすことができるため、その範囲内に設置 された受信機の観測データより位相変化量の差(D)を 求めると、同様の結果が得られるものと想定される.し かし、図-2のように一方の受信機がマルチパスの影響を 受けている場合、電離層遅延以外の誤差が位相に含まれ るため異なる結果が得られるものと想定される.本研究 では、受信機間で得られる位相変化量の差の較差をマル チパスの影響を受ける衛星電波を判別する指標の1つと して使用する.

4. マルチパス判別手法の検証

(1) 検証概要

信号強度および位相変化量の差を用いた指標につい て、実際の観測値よりマルチパスの影響を受ける衛星電 波を判別可能か検証を行った.使用する観測値は、図-3 に示す遮蔽環境の異なる観測点B2~B7と遮蔽物を含まな い観測点A0で同時間観測により得られたものである.

検証方法としては,B2-B7で得られた観測値を移動局, A0で得られた観測値を基準局として信号強度の差と位 相変化量の差の較差を算出し,不可視衛星となり回折波 のみを受信する衛星電波と,遮蔽物に対して正対となり 反射波の影響を受ける衛星電波について,各々の指標の 傾向について確認を行った.

なお、衛星の可視性の判断については、衛星の軌道 暦により求めた仰角と方位角、予め各観測点で取得した 地上型3Dレーザースキャナによる点群データより得ら れた遮蔽物の仰角と真北を0°する方向角で行った.

(2) 検証結果

信号強度の差,および位相変化量の差の較差による指 標の検証結果について,本稿では,観測点B2で得られ



図-4 衛星軌道と遮蔽物位置(左:GPS11番 右:GPS32番)



た衛星番号11番と32番のGPS衛星の結果を示す. 双方の 衛星の軌道と遮蔽物の位置関係を図4に示す. なお,本 天空図はRTKLIB version2.4.2を用いて作成した.

図-5に信号強度を用いたマルチパス判別手法の検証結 果を示す.本手法では、観測点A0で得られた信号強度 を基準値として、観測点B2で得られた信号強度との差 を算出している.まず、不可視衛星となり回折波のみを 受信していると想定される信号強度値については、単一 ナイフエッジ回折のモデルにより得られた回折損と値が ほぼ一致する傾向が見られた.一方、反射波の影響を受 けていると想定される信号強度値については、天頂付近 に位置する衛星の信号強度値と比較すると、ばらつきが 大きくなる傾向が見られたが、影響を受けている正確な 時間帯については判別できなかった.

次に,位相変化量によるマルチパス判別手法の検証結 果を図-6に示す.不可視衛星となり回折波のみを受信し ていると想定される位相変化量による指標値については, 可視衛星の場合の時間帯と比較し値の分布が大きくなる 傾向が見られた.また,反射波の影響を受けていると想 定される位相変化量による指標値についても,不可視衛 星の場合と同様に値の分布が大きくなる傾向が見られた.

これらの検証結果より,マルチパスの影響を受ける 衛星電波の判別について,信号強度よる指標では回折波



の判別が可能であることが確認された.また,位相変化 量の差による指標では,回折波,反射波の双方に対応で きる可能性が確認された.よって,双方の指標はマルチ パスの影響を受ける衛星電波の判別に用いることができ ると考えられる.

5. 高精度測位における衛星選択効果の検証

(1) 検証概要

高精度測位において、マルチパスの影響を受ける衛星 電波の判別結果をもとに利用衛星を選択した場合、どの 程度の測位環境の改善効果が得られるか検証を行った.

検証方法としては、①全衛星を使用した場合、②衛星 の軌道暦と3D点群データから不可視衛星を排除した場 合、③信号強度で回折波を排除した場合、④信号強度+ 位相変化量の差で回折波と反射波を排除した場合の4つ の衛星選択条件について、それぞれ「GPS+GLONASS」 の条件で衛星を選定しキネマティック解析を行った.解 析には、RTKLIB Version2.42を使用し、評価は測位結果 に含まれるFix解の割合について検討を行った.

なお、信号強度と位相変化量の差による各指標の閾値 の設定については、信号強度はナイフエッジ回折モデル の計算結果より-6dBHz以上の衛星を使用した.一方、位 相変化量の差については、図-7より、マルチパスの影響 を受けている時間帯でも、影響を受けない場合と指標が 同値となる場合が確認できるため、60データ毎の移動平 均値を求め、その結果より0.5mm未満となる衛星を使用 した.

(2) 検証結果

衛星選択条件別の測位解の取得割合について、本稿で は観測点B5の解析結果を示す.表-1より、衛星選択条件 別に測位解の割合を確認すると、衛星を選択することで、

表-1 観測点B5における測位解の割合(単位:%)

衛星選択条件	測位不能	Float	Fix
全衛星使用	6.6	67.0	26.3
軌道暦+3D点群データ	0.0	9.9	90.1
信号強度	0.1	9.6	90.3
信号強度+位相変化量の差	0.0	8.7	91.3

明らかにFix解の割合が増加する傾向が見られた.また, 信号強度と位相変化量の差による指標で衛星を選択した 場合,Fix解の取得割合は他の手法と比較し最も大きく なる傾向が見られた.これは,位相変化量の差による指 標で,他の手法では判別できない反射波によるマルチパ スの影響を含む衛星電波を除去できたためと考えられる.

6. 結論

本研究では、高精度測位に対応した衛星選択手法を構築するため、信号強度とL1、L2搬送波位相による位相変化量の差を用いて、マルチパスの影響を受ける衛星電波の判別方法を検討した.その結果、信号強度は回折波、位相変化量の差は回折波と反射波の影響を受ける衛星電波の判別が可能であることが確認された.また、この判別手法を用いて衛星電波を選択し、キネマティック解析を行った結果、信号強度と位相変化量の差による指標を併用した場合、Fix解の取得割合が最も増加する傾向が見られた.今後は、静止時のほか、移動時の場合についても本手法が適用可能か検討を行う予定である.

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.
- A. J. Van Dierendonck, P. Fenton and T. Ford : Theory and Performance of Narrow Correlator Spacing in a GPS Receiver, Navigation, J. Institute of Navigation, Vol.39, No.3, Fall 1992.
- B. Townsend, DJ van Nee, P. Fenton, and K. Van Direenconk : Performance Evaluation of the Multipath Estimating Delay Lock Loop, ION GPS-94, Salt Lake City, 1994.
- 4) 久保信明,安田明生:定点測位におけるコードマル チパス誤差の削減について,電子情報通信学会論文 誌 B, Vol.J86-B, No.1, pp.104-112, 2003.
- 5) Taro Suzuki, Mitsunori Kitamura, Yoshiharu Amano and Takumi Hashizume: High-Accuracy GPS and GLONASS Positioning by Multipath Mitigation using Omnidirectional Infrared Camera, IEEE International Conference on Ro-botics and Automation, pp.311-316, 2011
- 他田隆博, 佐田達典: 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, 土木情 報学シンポジウム講演集, Vol 37, pp.209-212, 2012.
- 7) 細矢良雄:電波伝搬ハンドブック, pp.23-24, 1999.