複数測位信号によるマルチパス検知と 高精度測位時の精度に関する研究

池田 隆博¹・佐田 達典²

¹正会員 日本大学助手 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:ikedatakahiro@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

衛星測位システムは、QZSSやGalileo等の測位衛星に加え、既存のGPSについてもL2C等の新たな民生信号の運用など利用可能な衛星電波が増加しつつある。衛星電波の増加により、従来よりも良質な観測データの取得が期待されるが、これらの効果を測位に生かすには、マルチパス等の誤差を含む衛星電波の除去が重要となる。本研究では、筆者らが提案したマルチパス検知手法にGPSのL2C、GLONASSのL1P信号を加え、実際の観測データからマルチパスを含む衛星電波を検知可能か検証した。その結果、マルチパスの影響を含む衛星電波の検知が従来の測位信号と同様に可能であること、マルチパス検知時の指標を新たに追加し衛星選択を行うことでFix解の取得割合が増加し測位精度が向上する場合が確認された。

Key Words : GPS, GLONASS, Multipath, Carrier Phase, Signal Strength

1. はじめに

近年、衛星測位システムは、日本の測位衛星である準天頂衛星 (QZSS : Quasi-Zenith Satellite System) の運用やEUが運用するGalileoの打ち上げ等により増加傾向にある。また、既存の衛星測位システムであるGPS (Global Positioning System) についても、従来の測位信号であるL1C/A, L2P(Y)に加え、新たな民生信号であるL2Cを搭載した測位衛星の運用など、近代化が進みつつある¹⁾。

利用可能な衛星系が増加した場合、衛星電波が遮蔽されやすい都市部や山間部でも測位に必要な衛星数が確保できる確率が上昇し、従来のGPSとGLONASS (Global Navigation Satellite System) を用いた場合よりも測位可能な箇所が増加する可能性が挙げられる。また、新たな測位信号が利用可能となることで、従来よりも信号強度の高い測位信号が利用可能となり、地物によるの反射波の影響の低減が期待される。しかしながら、衛星測位においてこれらの効果を生かすには、マルチパス等の測位誤差を含む衛星電波をなるべく測位計算に使用しないことが重要となる。今後、複数測位信号を用いた衛星測位では、このマルチパスの影響を考慮した測位計算が必要になるものと想定される。

マルチパスの影響を受ける衛星電波を削減および検知する方法としては、既に他の著者から報告が行われて

おり、GNSS受信機内部の相關器幅を工夫した技術²⁾³⁾、衛星電波の信号強度の特性を用いた方法⁴⁾、マルチパスの影響を受けた際の搬送波位相の推移を用いた方法について述べられている⁵⁾。また、筆者らも信号強度に加え搬送波位相の変化量を用いた手法について報告しており、衛星電波選択による高精度測位時の測位率向上について述べている⁶⁾。信号強度と搬送波位相については、GNSS受信機から得られる観測値であるため、受信可能な測位信号が増加した場合、従来の測位信号と組合せることでマルチパスの影響を受ける衛星電波の検知率が向上する可能性がある。

本研究では、GPSの測位信号であるL1C/A, L2P(Y), L2C, GLONASSの測位信号であるL1C/A, L1P, L2Pに着目し、複数測位信号を用いた場合のマルチパス検知効果について検証を行った。本稿では、測位信号別に算出したマルチパス検知指標を用いて条件別に基線解析を実施し、測位結果に含まれるFix解の取得割合からマルチパス検知効果の検証を行った。また、条件別の基線解析結果から精度評価を行ったのでその結果を報告する。

2. マルチパスの影響を受ける衛星電波の検知

マルチパスの影響を受ける衛星電波は、図-1に示すよ

図-1 回折波と反射波による伝搬経路の概要

うに遮蔽物からの回り込みにより受信する回折波、遮蔽物と地物からの反射により受信する反射波の2種類が考えられる。どちらも直接波に対して伝搬経路の増加、遮蔽物の電気的な特性による信号強度の減衰が生じるため、得られる衛星電波の観測データは直接波と比較し異なる結果が得られるものと想定される。よって本研究では、マルチパスの影響を受ける衛星電波の検知に、GNSS受信機から得られる信号強度（Carrier to Noise Ratio：搬送波電力雑音比）と搬送波位相を用いて行うものとする⁹⁾。

まず、回折の影響を受ける衛星電波の検知には、信号強度の特性を示す単一ナイフエッジ回折のモデルを適用する。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、(1)式に示す回折パラメータが $-0.7 \leq v$ となる際、衛星電波の回折損 $J(v)$ (dBHz) は(2)式で近似される¹⁰⁾。

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

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

v ：回折パラメータ

h ：見通し線と遮蔽物先端との距離 (m)

λ ：衛星電波波長 (m)

d_1 ：衛星と遮蔽物先端との距離 (m)

d_2 ：受信アンテナと遮蔽物先端との距離 (m)

ここで、 h は遮蔽物先端が見通し線以下となる場合を負とし、見通し線と遮蔽物先端が交わる場合、 h は0mとなる。 $h = 0$ のとき、衛星電波波長に関わらず回折損 $J(v)$ は約6dBHzとなり、 $h > 0$ の場合、回折損はさらに大きくなるため、信号強度により回折波の影響を確認することができるものと考えられる。

次に、反射の影響を受ける衛星電波の検知については、搬送波の位相変化量の特性からマルチパス検知に有効な指標の算出を行う。衛星系に関わらず送信される衛星電波については、信号強度、搬送波周波数の異なる2種類以上を送信しており、電離層遅延、マルチパスによる影

図-2 位相変化量の差 (DPC) によるマルチパス検知

響を受ける場合、各々で異なる傾向が生じる¹¹⁾。搬送波位相の変化量については、位相差に正確な光速を乗じ、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¹²⁾、同衛星から送信される2種類の搬送波間の位相変化量の差 (Difference of Phase Change：以下DPC) は(3)式で求められる。

$$DPC = \left| (\phi_{t-1}^{L1} - \phi_{t-1}^{L2}) \frac{c}{f_{L1}} - (\phi_t^{L1} - \phi_t^{L2}) \frac{c}{f_{L2}} \right| \quad (3)$$

ϕ ：位相積算値 (cycle) t ：時刻 (s)

$L1$ ：第1周波数 $L2$ ：第2周波数

c ：光速 ($c=299792458$ m/s) (m/s)

f ：搬送波周波数 (Hz)

(3)式で得られるDPCには、1周波と2周波の双方の電波で生じた電離層遅延、マルチパスによる誤差が含まれる。しかし、電離層遅延が影響する基線長は10km以上の長距離基線が目安であるため、近距離基線であれば、影響を無視できるものと期待される⁹⁾。よって、基線長10km以内となる受信機間で得られた観測値からDPCを求めると、マルチパスによる誤差が含まれなければ双方で類似した結果が得られるものと想定される。

位相変化量の差を用いたマルチパス検知では、図-2に示すように、観測点周囲に遮蔽物がない基準局から得られた観測値と、観測位置に設置した移動局から得られた観測値からDPCを算出し、(4)式に示すように基準局側のDPCを基準値として、位相変化量の差の較差 (Double Difference of Phase Change：以下DDPC) を求めるものとする。

$$DDPC = DPC_{RS} - DPC_{BS} \quad (4)$$

DPC_{RS} ：移動局で得られた位相変化量の差 (m)

DPC_{BS} ：基準局で得られた位相変化量の差 (m)

また、先ほど示した信号強度によるマルチパス検知についても同様に、(5)式に示すように基準局側の信号強度を基準値として、信号強度の差 (Difference of Signal

Strength : 以下DSS) を求めるものとする.

$$DSS = SS_{RS} - SS_{BS} \quad (5)$$

SS_{RS} : 移動局で得られた信号強度 (dBHz)

SS_{BS} : 基準局で得られた信号強度 (dBHz)

このDSS, DDPCを本研究におけるマルチパスの影響を受ける衛星電波を検知する指標として使用するものとする.

3. 測位信号別によるマルチパス検知指標の検証

(1) 検証概要

DSSとDDPCによるマルチパス検知指標について, GPSのL2C, GLONASSのL1P信号を用いた場合, マルチパス検知が可能か検証を行った. 筆者らは既に, GPSのL1C/AとL2P(Y), GLONASSのL1C/AとL2Pによる組合せについて, 回折によるマルチパスを主体的に受ける場合のDSSとDDPCの推移について検証を行っており, DSSについては値の低下, DDPCについては値の分布が正方向に大きくなることを確認している. 本検証では, GPSのL1C/AとL2C, GLONASSのL1PとL2Pでそれぞれ指標値を算出し, 従来の測位信号で得られる結果との比較を行った. 各測位信号の概要を表-1に示す.

(2) 検証方法

GPSとGLONASSの各測位信号の観測データ取得については, 図-3に示す日本大学理工学部船橋キャンパス内に設置した遮蔽環境の異なる7点の観測点上にGNSS受信機を設置して実施し, 観測点A0を基準局, 観測点B2~B7を移動局として同時時間帯による同時測位を実施した(図-4). 使用した受信機は, 基準局, 移動局ともにニコン・トリンプル社製Trimble NetR8であり, データ取得はRINEX3.0形式で間隔は1Hzとした. 実験日時については, 2011年11月19日, 20日, 22日の10:00~16:30の時間帯で, 基準局と各移動局との同時測位を3時間実施した. 観測点B2~B7の実験スケジュールを表-2に示す.

検証方法としては, 基準局と移動局の同時時間帯の観測値よりDSSとDDPCの算出を行い, 遮蔽物によりマルチパスの影響を受ける衛星電波について, 各々の指標の傾向の確認を行った. なお, 衛星の可視性については, 観測衛星の軌道歴より求めた仰角と方位角, 各観測点上で事前に取得した地上型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° とする方向角で行った. 点群データの取得日は, 2012年2月3日であり, 観測点B2~B7に機器を設置して周囲の地物と樹木の3次元モデルを作成した(図-5).

表-1 本検証で用いる測位信号と周波数¹²⁾

衛星	測位信号	周波数(MHz)	用途
GPS	L1C/A	1575.42	民生
	L2P(Y)	1227.60	軍用
	L2C		民生
GLONASS	L1C/A	1602.0+k*0.5625	民生
	L1P		軍用
	L2P	1246.0+k*0.4375	軍用

k: チャンネル番号= -7~+13

図-3 観測データの取得位置と周囲の遮蔽状況

図-4 実験状況 (左: 観測点A0 右: 観測点B7)

表-2 観測点B2~B7における実験スケジュール

実験日	時間帯	観測点
2011年11月19日	10:10~13:05	B7
	13:30~16:30	B6
2011年11月20日	10:10~13:05	B2
	13:30~16:30	B5
2011年11月22日	10:00~13:00	B3
	13:30~16:30	B4

(3) 検証結果

DSSとDDPCによるマルチパス検知指標の検証について, 本稿では, GPSのL2C信号を送信する衛星について, 可視条件の変化が見られた観測点B2, B7について行うものとする.

まず, 図-6に示す観測点B2で観測された衛星番号01番のGPS衛星と衛星番号24番のGLONASS衛星を対象にDSSとDDPCの算出結果を示す. 図-7より, GPSから送信される各測位信号のDSSの推移を確認すると, 衛星の仰角が 60° 以上となる0:00~1:10の時間帯では, 測位信号に関わらず約0dBHzで推移する傾向が見られる. また, 1:10~1:30の時間帯において可視条件が変化する際のDSS

図-5 3次元点群データによる地物のモデル化（観測点B2）

図-6 観測点B2における衛星軌道と遮蔽物位置

の推移を確認すると、L1C/A、L2Cでは-5dBHz~-6dBHzの範囲内となり、単一ナイフエッジ回折のモデルから得られる6dBHzの回折損と同様の傾向を示すことがわかる。一方、L2P(Y)のDSSの推移については、可視条件が変化する際のDSSの推移は-9dBHz~-10dBHzの範囲内となり、折モデルから得られる6dBHzの回折損よりも大きくなる傾向が確認された。不可視衛星からの衛星電波は、回折による電波に加え、地物からの反射による電波との合成となるため、受信電波の位相によって信号強度の増幅または減衰が生じる。L2P(Y)の信号強度の傾向については、L1C/A、L2Cと比較し移動局側の信号強度の減衰が大きく生じた可能性が考えられる。

次に、GPSの測位信号から得られたDDPCの検証結果を図-8に示す。まず、衛星が可視時となる時間帯については、どちらも0mmを中心に分布する傾向が確認でき、基準局と移動局で得られたDPCが類似の傾向を示していることがわかる。また、不可視時の場合、DDPCの分布は正方向に推移する傾向が確認でき、移動局側のDPCが大きくなることわかる。なお、L2Cの組合せによるDDPCでは、L2P(Y)の組合せと比較し分布範囲が狭くなるが、これは、回折波に対する地物からの反射波との合成がL2P(Y)よりも小さかった可能性が考えられる。

GPSと同様にGLONASSから送信される各測位信号のDSSとDDPCの傾向を確認する。図-9より、DSSの推移を確認すると、衛星が可視時となる時間帯では、GPSと同様に測位信号に関わらず約0dBHzで推移する傾向が見られる。また、可視条件が変化する際のDSSの推移を確認すると、こちらも測位信号に関わらず約-5dBHzで推移

図-7 GPSにおけるDSSの検証結果（観測点B2）

図-8 GPSにおけるDDPCの検証結果（観測点B2）

図-9 GLONASSにおけるDSSの検証結果（観測点B2）

図-10 GLONASSにおけるDDPCの検証結果（観測点B2）

する傾向が見られ、GPSによるL1C/A、L2Cと同様に、回折モデルによる回折損と同様の傾向が見られた。

次に、GLONASSの測位信号から得られたDDPCの検証結果を図-10に示す。まず、衛星が可視時となる時間帯について確認すると、GPSと同様に0mmを中心に分布する傾向が見られた。L1Pの組合せによるDDPCは、L1C/Aの組合せよりも分布が大きくなる傾向が見られるが、これはL1Pで得られる位相差が、L1C/Aと比較的大きいため、DDPCの分布範囲が広がったものと考えられる。不可視時となる時間帯については、GPSと同様に正方向にDDPCが分布する傾向が確認でき、L1P-L2Pの組合せのほうが、L1C/A-L2Pの場合よりも分布範囲が広がる傾向が見られた。

これらの検討結果より、衛星が不可視となり回折によるマルチパスの影響を主体的に受ける場合、測位信号に関わらずDSSは値の低下が確認された。GPSのL2P(Y)を除き、可視条件が変化する場合のDSSは-5dBHz~6dBHzの範囲内となることから、回折モデルから得られる6dBHzの回折損を閾値とすることで、回折の影響を受ける衛星電波の検知は可能であるといえる。一方、DDPCについては、可視時と不可視時で異なる傾向が確認でき、DSSと同様に回折の影響を受ける衛星電波の検知は可能であると考えられる。また、DDPC算出に用いる値が位相差であるため、伝搬経路が回折波と同様に直接波と異なる反射波についても検知が可能になるものと考えられる。

なお、観測点B2で得られた結果を基に、他の観測点でも同様の結果が得られるか比較を行った。図-11に示す観測点B7で観測された衛星番号17番のGPS衛星と衛星番号01番のGLONASS衛星を対象にDSSとDDPCの算出を行った。図-12より、GPSの測位信号におけるDSSの推移を確認すると、可視時となる時間帯では測位信号に関わらず約0dBHzと観測点B2と同様の傾向が見られるが、衛星可視条件が不可視から可視状態に推移する際のDSSの値も約0dBHzとなり、可視時の時間帯とほとんど差が

図-11 観測点B7における衛星軌道と遮蔽物位置

図-12 GPSにおけるDSSの検証結果（観測点B7）

見られなかった。このときの電波遮蔽物となる地物の種類について確認を行うと、観測点B2ではコンクリート製の建物であるのに対して、観測点B7では針葉樹であるため、衛星可視条件の変化前後では直接波を主体的に受信できていた可能性が考えられる。次に、DDPCの検証結果について確認すると、図-13より衛星が可視時となる時間帯については、測位信号の組合せに関わらず0mmを中心に分布する傾向が見られ、観測点B2と同様の結果が得られた。不可視時の推移についても、正方向にDDPCが分布する傾向が確認でき、また、L1C/A-L2Cの組合せのほうがL1C/A-L2P(Y)よりもDDPCの分布範囲が狭くなる同様の傾向が確認された。GLONASSについては、図-14よりDSSの推移について、衛星が可視時では約0dBHzで推移し、衛星が不可視から可視状態に推移する際は約-5dBHzと観測点B2で得られた結果（図-9）と同様の結果が得られた。DDPCの推移についても、可視時では0mmを中心とした分布、不可視時では正方向にDDPCが分布する傾向が観測点B2で得られた結果と同様に得られた（図-15）。なお、本検証で示したDSSと

図-13 GPSにおけるDDPCの検証結果 (観測点B7)

図-14 GLONASSにおけるDSSの検証結果 (観測点B7)

図-15 GLONASSにおけるDDPCの検証結果 (観測点B7)

DDPCによるマルチパス検知指標の推移は、他の観測時間、衛星においても同様の結果が確認された。

4. 複数信号によるマルチパス検知効果の検証

(1) 検証概要

基線解析による高精度測位において、*DSS*と*DDPC*による複数の検知指標を用いて衛星選択を実施し、測位結果に含まれるFix解の取得割合および測位精度の改善効果について検証を行った。

(2) 検証方法

検証は、前章において観測点A0と観測点B2, B3, B7による同時測位で得られた観測データを使用し、*DSS*と*DDPC*の算出結果を参考に利用衛星を選択し、「GPS+GLONASS」の衛星条件でキネマティック解析を行った。

まず、*DSS*については、先ほどの検証結果より衛星の可視条件が変化する際の値は-5dBHz~6dBHzの範囲内で推移する傾向が確認されており、理論モデルによる算出結果とほぼ一致することがわかる。よって、*DSS*の算出結果より選択する衛星の基準は、測位信号に関わらず、(5)式より得られる値が $DSS > -6\text{dBHz}$ となる衛星を選択するものとし、GPSではL1C/A, L2P(Y), L2C, GLONASSではL1C/A, L1P, L2Pで得られる*DSS*値が対象となる。

次に*DDPC*については、回折によるマルチパスの影響を主体的に受ける場合、測位信号の組合せによって分布範囲は異なるが、正方向に値が分布する傾向が確認されており、可視時における0mmを中心とする分布とは異なることがわかる。よって、*DDPC*の算出結果より選択する衛星の基準は、測位信号の組合せ別に(4)式より得られる値について、60データ毎の*DDPC*の移動平均値を求めて分布の中心位置を算出し、組合せ毎に表-3に示す閾値の範囲内となる衛星を選択するものとした。測位信号の組合せについては、GPSではL1C/A-L2P(Y), L1C/A-L2C, GLONASSではL1C/A-L2P, L1P-L2Pとなる。なお、これらの値は、天頂付近が方位に関わらず開けている観測点B7の仰角 60° 以上に飛来する衛星の移動平均*DDPC*の推移により算出した。

衛星選択時の比較条件としては、本検証では3条件を設定した。条件1では「全観測衛星使用」、条件2では「GPSのL1C/AとL2P(Y), GLONASSのL1C/AとL2Pから*DSS*と*DDPC*を算出し、各指標で設定した閾値内となる衛星のみを使用」、条件3では「前述の条件にGPSのL2C, GLONASSのL1Pを加えた全測位信号に対して*DSS*と*DDPC*を算出し、各指標で設定した閾値内となる衛星のみを使用」とした。条件に従い、算出した各測位信号の*DSS*と*DDPC*による指標値について、設定した閾値の範囲外となる時間帯の衛星をRINEX3.0形式による観測データから除去した。

表-3 測位信号の組合せ別によるDDPCの閾値 (単位: mm)

GPS:L1C/A-L2P(Y)	± 0.30
GPS:L1C/A-L2C	± 0.25
GLONASS:L1C/A-L2P	± 0.30
GLONASS:L1P-L2P	± 0.90

解析については、RTKLIB version2.4.2を使用し、基準局側のデータは観測点A0で得られた値を使用した。一方、移動局側のデータについては、観測点B2, B3, B7で得られた値を使用して基線解析を実施した。解析時の設定条件としては、バイアス決定手法をGLONASSを併用したInstantaneous (瞬時整数バイアス決定を行う) に設定し、仰角マスクを 15° 、使用する周波数帯をL1+L2とした。また、基準局の座標値については、近傍の電子基準点の観測データを基準としたスタティック解析により求めた値を使用した。基準局座標算出に使用した受信機はニコン・トリンプル社製Trimble 5700システムであり、実施日時は、2011年2月3日の11:00~13:00である。

(3) 検証結果

図-16に、10分間毎(600データ)に観測時間を区切り時間帯別に得られた衛星選択条件別のFix解の割合を示す。なお、Fix解の判断は、キネマティック解析で得られたNMEA-0183フォーマットで記される解のフラグと移動局となる観測点の基準座標値から水平方向で20mm以内に分布する解であるかによって行った。また、基準座標値については、2011年6月18日の10:00~13:00に観測点A0を基準とするスタティック解析により得られた値を使用した。基準座標値の取得に使用した受信機は、ニコン・トリンプル社製Trimble 5700システムである。

衛星選択条件別に算出結果を比較すると、全観測衛星使用時では、観測点B2, B7においてFix解の取得割合は0%となる傾向が見られ、Fix解が全く得られない時間帯が確認された。一方、衛星選択時では、観測点B3の2:40~3:00の時間帯を除き、Fix解の取得割合が向上し、マルチパスの影響を受ける衛星電波を解析から除去することで継続した高精度測位が可能であることがわかる。また、観測点別に条件2と条件3の結果について比較を行うと、観測点B2では、衛星の選定条件が厳しい条件3のほうが、条件2よりもFix解の所得割合が約10%低下する時間帯が見られ、一方、観測点B3では差はほとんど見られず、観測点B7では、Fix解の取得割合が5%~10%増加する傾向が見られた。

図-17に、衛星選択条件別における解析時の衛星数の推移を示す。まず、観測点B2について条件別に推移を確認すると、衛星選択時にFix解が100%とならない時間帯では、衛星数が5機以下となる場合が確認でき、GPSとGLONASSを併用したキネマティック解析に必要な衛星数が得られていないことがわかる。この傾向は、観測

図-16 観測時間帯別によるFix解の取得割合

図-17 衛星選択条件別による解析衛星数の推移

点B3でも確認できるが、1:00前後の時間帯など解析に必要な衛星数を満たしているにもかかわらず、Fix解の取得割合が100%とならない場合も確認できるため、マルチパスの影響を受ける衛星を正確に検知できなかった可能性が考えられる。なお、観測点B7では、衛星選択条件が厳しい条件3においても常に6機以上の衛星が確認できるため、GPS+GLONASSの条件でキネマティック解析に必要な衛星数を満たし、Fix解の取得割合が増加したものと考えられる。Fix解の取得割合が100%とならない時間帯については、0:00~0:40の時間帯において衛星数が短

図-18 衛星選択条件別によるFix解の水平方向の乖離

時間で変動していることが確認できるため、観測点B2、B3と同様にマルチパスの影響を受ける衛星を正確に除去できなかったものと考えられる。

次に、マルチパスの影響を受ける衛星の除外による測位精度の改善効果について確認するため、条件3によりFix解の取得割合が向上した観測点B7について、衛星選択条件別の基準座標値からのFix解の乖離を水平方向、鉛直方向別に算出した。図-18より、水平方向における基準座標値からのFix解の乖離を衛星選択条件別に比較すると、衛星選択によりFix解の取得割合が増加した時間帯については、0:30~0:40、2:40~2:50の時間帯を除き20mm以内に分布する傾向が確認された。また、GPSのL2C、GLONASSのL1Pを加えてDSSとDDPCを算出し衛星選択を行った条件3では、Fix解の取得割合が増加した0:00~0:40の時間帯において、基準座標値から10mm以内に分布するFix解が増加し、測位精度が向上する傾向が確認された。この傾向は、図-19に示す鉛直方向における基準座標値からのFix解の乖離についても確認でき、測位信号を追加し衛星選択を行った条件では、0:00~0:40の時間帯において基準座標値から20mm以内に分布するFix解の増加が確認された。図-20より条件2および条件3における衛星配置を比較すると、樹木・建物により不可視となる衛星について、条件3の衛星選択指標を増やすことで除去できる時間帯が長くなっており、条件2よりもマルチパスの影響を受ける衛星が除外できていたものと考えられる。なお、マルチパス検知による衛星選択を行ったにも関わらず、1:20~1:50の時間帯で鉛直方向における基準座標値からの乖離が大きくなる傾向が確認でき

図-19 衛星選択条件別によるFix解の鉛直方向の乖離

図-20 衛星選択条件別による利用衛星の配置
(観測時間0:00~0:40 左:条件2 右:条件3)

るが、衛星配置の鉛直精度劣化度を示すVDOP (Vertical dilution of precision)を確認すると、条件1では1.6~3.1, 条件2では1.9~5.7, 条件3では2.2~5.8の間で推移することが確認された。同時時間帯における衛星選択時のVDOP値について大きくなる傾向が見られるため、鉛直方向の衛星配置条件悪化によるものと考えられる。

これらの検証結果より、複数の測位信号を用いてDSSとDDPCによるマルチパス検知を実施し、解析時の観測データから使用する衛星を選択することで、Fix解の取得割合が増加することがわかった。また、衛星選択後にキネマティック解析に必要な衛星数を満たすことで、Fix解の測位精度が水平、鉛直方向に関わらず向上する傾向が確認された。しかしながら、解析に必要な衛星数を満たしているにも関わらずFix解が得られない場合、マルチパスの影響を受ける衛星を除去しても基準座標値からの乖離が大きくなる場合も確認された。これらの要

因と考えられるVDOPの改善については、QZSSやGalileo等の利用可能な衛星系の併用によりマルチパスの影響を受けない衛星の増加、鉛直方向の衛星配置条件の改善が必要であるといえる。

5. 結論

本研究では、複数測位信号を用いた場合のマルチパス検知効果について確認するため、DSSとDDPCによるマルチパス検知手法に新たにGPSのL2C、GLONASSのL1P信号を加えて回折波等の影響を受ける衛星電波が検知可能な検証を行った。

まず、DSSとDDPCによるマルチパス検知指標の検証では、各々の測位信号の検証結果より以下の点が明らかになった。

- 1) 衛星が不可視となり、マルチパスの影響を受ける衛星電波について、DSSはGPS、GLONASSの測位信号に関わらず値が小さくなる傾向が確認された。また、衛星の可視条件が変化する際のDSSの推移を確認すると、GPSのL2P(Y)を除き-5dBHz~6dBHzの範囲内となるため、閾値を設定することで、マルチパスの影響を受ける衛星電波の検知は可能であると考えられる。
- 2) DDPCについて、可視時の場合は測位信号の組合せに関わらず0mmを中心に分布する傾向が見られた。一方、不可視時の場合は、正方向に値が分布する傾向が見られたが、測位信号の組合せによって分布範囲が異なる傾向が見られた。マルチパスの影響を受ける衛星電波を検知するには、測位信号の組合せに応じて閾値を設定する必要がある。

次に、検証結果より得られたDSSとDDPCの傾向により、マルチパスの影響を受ける衛星の除外を行い、検知指標が増加した場合の効果について確認を行った結果、以下の点が明らかになった。

- 1) マルチパスの影響を受ける衛星電波を除去することで、全観測衛星を使用した場合よりもFix解の取得割合が増加し、高精度測位が可能となる時間帯が増加することがわかった。また、DSSとDDPC算出時の測位信号を増やすことで、マルチパスの影響を受ける衛星電波の検知率が向上し、Fix解の取得割合がさらに増加した。
- 2) マルチパスの影響を受ける衛星電波を解析に使用しないことで、水平方向、鉛直方向ともに測位精度が向上することを確認した。一方で、衛星選択により衛星配置条件が悪化し、測位精度が低下する場合も

確認された。

以上の結果より、GPSのL2C、GLONASSのL1P信号のようにDSSとDDPC算出時の測位信号を増やすことで、マルチパスの影響を受ける衛星電波の検知率が向上し、従来よりもFix解の取得割合の増加、測位精度の向上効果が得られることがわかった。一方で、衛星選択を行うことで衛星配置条件が悪化し、Fix解を取得しても鉛直方向の精度が低下する場合も確認された。この場合、QZSS等の新たな衛星系を測位に併用し、マルチパスの影響を受けない衛星電波を多く受信できる環境が必要になると考えられる。また、DDPCについては、今回の検証では移動平均により値の分布位置を確認し、マルチパスの影響を受ける衛星検知を行ったが、本手法では、観測状況が時々刻々と変化する移動体への適用は困難である。DDPCによる算出結果から、瞬時にマルチパスの影響を受ける衛星を検知する手法が必要になると考えられる。

今後は、QZSS、Galileoの測位信号のほか、GPSのL5波等のL1、L2波と異なる周波数の衛星電波を使用した場合についてもマルチパス検知、および衛星選択後の測位精度について検証を行う予定である。

謝辞：本研究は平成24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) 測位航法学会：GPS/GNSS SYMPOSIUM 2013, pp.40-41, 2013.
- 2) A. J. Van Dierendonck, P. Fenton and T. Ford : Theory and Performance of Narrow Correlator Spacing in a GPS Receiver, *Navigation, Journal of the Institute of Navigation*, Vol.39, No.3, pp.265-283, Fall 1992.
- 3) 西修二郎：GNSSのすべて、古今書院, pp.135-137, 2010.
- 4) Hung Pham Viet, Chien Dao Ngoc, Khang Nguyen Van : A Nonlinear Method of Multipath Mitigation for new GNSS signals, *2014 IEEE Fifth International Conference on Communications and Electronics (ICCE)*, pp.99-104, 2014.
- 5) 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.
- 6) Christopher J. Comp, Penina Axelrad : Adaptive SNR-Based Carrier Phase Multipath Mitigation Technique, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol.34, pp.264-276, 1998.
- 7) Jizhong Wu, Junqiang Gao, Mingfeng Li, Yongdi Wang :

- Wavelet Transform for GPS Carrier Phase Multipath Mitigation, *The 1st International Conference on Information Science and Engineering (ICISE2009)*, pp.1019-1022, 2009.
- 8) 池田隆博, 佐田達典: 静止時の高精度測位における GPS と GLONASS を用いた衛星選択効果に関する研究, 土木学会論文 F3, Vol.69No.2, p.I_98-I_109, 2014.
 - 9) 細矢良雄: 電波伝搬ハンドブック, pp.23-24, 1999.
 - 10) Werner Gurtner, Astronomical Institute of the University of Bern, Switzerland and Lou Estey, UNAVCO, Boulder Colorado, USA : RINEX The Receiver Independent Exchange Format Version 3.02, 2013.
 - 11) Pratap Misra and Per Enge : *Global Positioning System Signals, Measurements, and Performance Second Edition*, Gnga-Jamuna Press, pp.162-164, pp.421-422, 2006.
 - 12) 土屋淳, 辻宏道 : GNSS 測定の基礎, 日本測量協会, pp.182-187, p.221, pp.248-251, pp.260-263, 2008.
- (2014. 10. 27 受付)

STUDY ON THE MULTIPATH DETECTION AND PRECISE POSITIONING ACCURACY BY MULTIPLE SATELLITE SIGNALS

Takahiro IKEDA and Tstsunori SADA

As for the satellite based positioning system GPS and GLONASS has been used mainly, but QZSS and Galileo has come to be used in recent years. Also, GPS has increased the satellite to send a new positioning signal L2C. Therefore, the satellite positioning can be expected to obtain a good observation data than ever, while it is necessary to remove the satellite signal including the multipath. The authors have verified a method for determining of satellite signal of multipath using the L1C/A and L2P signal strength and the difference of phase change between satellite signal L1C/A and L2P by GPS and GLONASS in previous studies. In this study, newly added L2C signal of GPS and L1P signal of GLONASS, then verified whether detectable satellite signal including a multipath from the actual observed data. As a result, satellite signal affected by multipath can be detected similarly to the conventional positioning signal. In addition, the effect of the increase of multipath detection indicators was confirmed by the percentage of fix solution and positioning accuracy.