(76) 複数測位信号を用いたマルチパス検知と高精度測位の測位率に関する研究

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:ikeda.takahiro@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BeiDou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QZSSの運用や中国が運用するBeiDou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．

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建物や樹木付近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を用いた測位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，衛星電波の強度上昇等の効果により，良質な観測データの取得が期待されている．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検知し，なるべく測位計算に使用しないことが重要となる．

マルチパスの影響を受ける衛星電波を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いるが，筆者らは，信号強度と搬送波位相の変化量を用いた手法について報告している[1)]．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，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．これらの影響を受ける衛星電波の検知には，信号強度と搬送波位相の変化量の特性から行うものとする．

まず，回折波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$-0.7 \leq \nu$となる際，衛星電波の回折損$J(\nu)$（dB）は(2)式で近似される[2)]．

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

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

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0（m）となる．$h=0$のとき，衛星電波波長に関わらず回折損$\mathrm{J}(v)$は約6dB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，反射波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は，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響を受ける場合，双方の位相変化量について異なる結果が得られる．位相変化量については，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，衛星から送信される1周波と2周波の位相変化量の差（Difference of Phase Change：以下DPC）は(3)式で求められる．

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

DPC：位相変化量の差（m）　$\emptyset$：位相積算値（cycle）
$L1$：1周波　$L2$：2周波　t：時刻（s）
c：光速（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[3]．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-1に示すように，観測点周囲に遮蔽物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（以下$DDPC$）を求めるものとする．

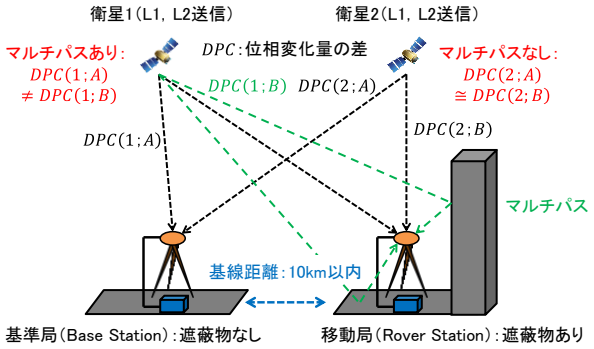

図-1　位相変化量の差（DPC）によるマルチパス検知

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

$DDPC$：位相変化量の差の較差（m）
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，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．

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

DSS：信号強度の差（dBHz）
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検知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$DDPC$について，GPSのL1C/AとL2P(Y)，GLONASSのL1C/AとL2Pによる組合せについて検証を行っており，今回はGPSのL1C/AとL2C，GLONASSのL1PとL2Pでそれぞれ指標を算出し，従来方式との比較を行った．

(2)　検証方法

観測データの取得は，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遮蔽環境の異なる7点の観測点上で実施し，観測点A0を基準局，観測点B2~B7を移動局として同時間帯による同時測位を実施した．使用した受信機は，基準局，移動局ともにニコン・トリンブル社製Trimble NetR8であり，実験日時は2011年11月19日，20日，22日の10:00～16:30の時間帯である．

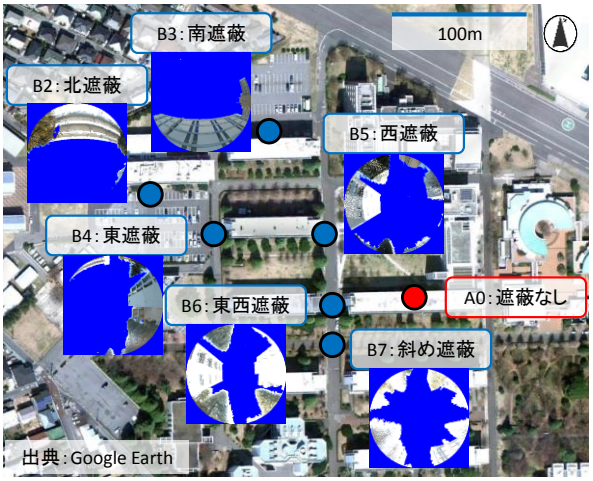

図-2　観測値の取得位置

検証方法としては，基準局と移動局の同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．

(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信号を天頂付近で受信できた観測点B7について行うものとする．

まず，図-3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の算出結果を示す．図-4より，GPSにおける同一周波数のL2P(Y)，L2C信号のDSSの推移を確認すると，可視時においてはどちらも-5dBHz以上となり，単一ナイフエッジ回折のモデルから得られる6dBの回折損よりも小さいことがわかる．一方，不可視時においては，L2P(Y)，L2Cともに可視時と同値となる場合が見られるが，-5dBHz以下で推移する傾向にあることがわかる． なお，これらの傾向は，GLONASSの同一周波数であるL1C/A，L1P信号のDSSの推移についても同様に確認でき（図-5），不可視衛星からの回折波による衛星電波の検知が可能であることがわかる．

DSSと同様に$DDPC$の結果を衛星別に図-6，図-7に示す．まず，GPSのL1C/A-L2P(Y)，L1C/A-L2Cの組合せで$DDPC$の推移を確認すると，可視時の場合どちらも0mmを中心に分布する傾向が確認できる．一方，不可視時の場合，正方向に分布が大きくなる傾向が確認でき，移動局側のDPCが大きくなることがわかる．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が小さくなるが，これはL2Cの信号強度がL2P(Y)よりも大

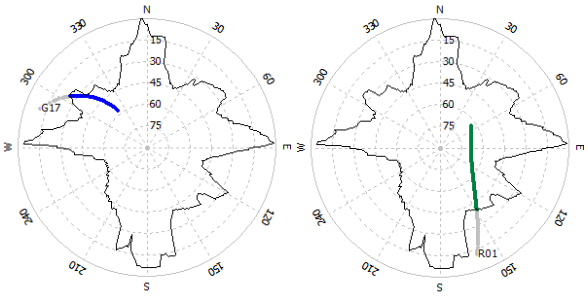

図-3　観測点B7における衛星軌道と遮蔽物位置
（左 GPS:17番　右 GLONASS:01番）

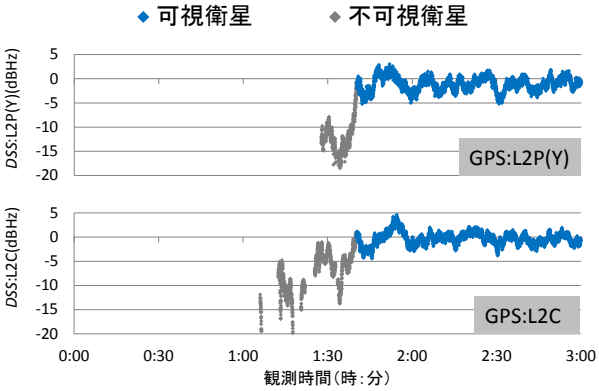

図-4　GPSのL2P(Y)とL2C信号におけるDSSの検討結果

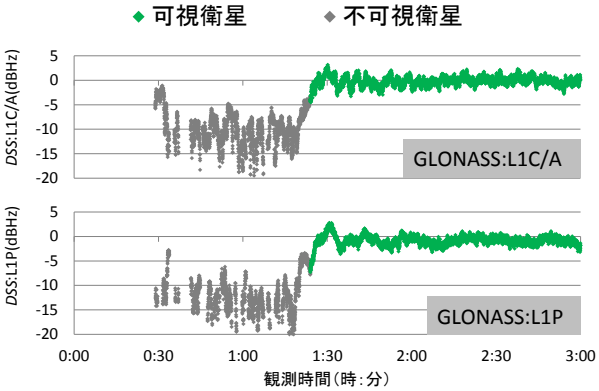

図-5　GLONASSのL1C/AとL1P信号におけるDSSの検討結果

きいため，位相の変化量が小さくなったたものと考えられる．次に，GLONASSのL1C/A-L2P，L1P-L2Pの組合せで$DDPC$の推移を確認すると，GPSと同様に可視時では，0mmを中心に分布し，不可視時では正方向に分布が大きくなる傾向が確認できる．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，L1Pの信号強度がL1C/Aと比較し小さいため，位相の変化量が大きくなった可能性が考えられる．

これらの検証結果より，GPSのL2C，GLONASSのL1P信号を用いた場合，他の信号と同様にマルチパスの影響を受ける衛星電波の検知が可能であることを確認した．$DDPC$については，可視時と不可視時で異なる傾向を示すが，GLONASSのL1Pの組合せのように分布範囲が異なる結果を示すため，各々の指標に対して閾値を設定する必要があるといえる．

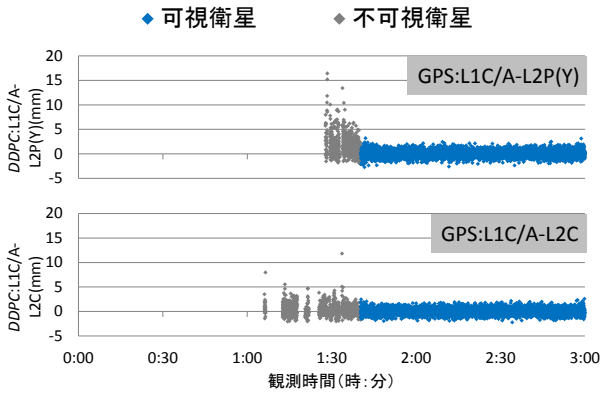

図-6　GPSのL2P(Y)とL2C信号における$DDPC$の検討結果

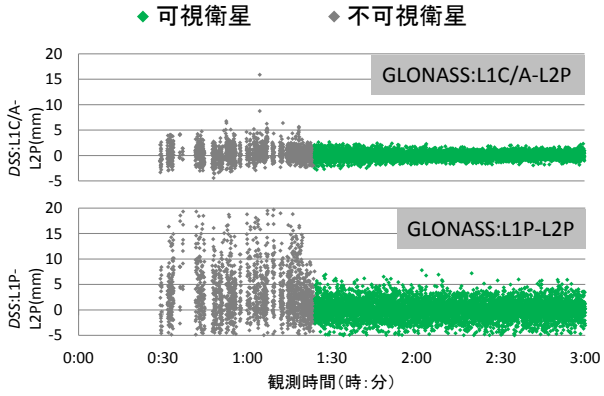

図-7　GLONASSのL1C/AとL1P信号における$DDPC$の検討結果

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

マルチパス検知において，複数の検知指標を用いて衛星選択を実施し，基線解析を行った場合の効果について検証を行った．

検証方法としては，①全観測衛星使用，②GPSのL1C/AとL2P，GLONASSのL1C/AとL2PからDSSと$DDPC$を算出し，マルチパスの影響を受けない衛星電波のみを使用，③新たにGPSのL2C，GLONASSのL1Pを加えてDSSと$DDPC$を算出し，衛星選択を行った場合の3つの条件について，それぞれ「GPS+GLONASS」の衛星条件でキネマティック解析を行った．解析には，RTKLIB Version2.4.2を使用し，検証には測位結果に含まれるFix解の割合を観測時間帯別に算出し検証を行った．

なお，各指標の閾値の設定については，DSSの場合-6dBHz以上の衛星を使用するものとし，$DDPC$については，60データ毎の移動平均値を求め，**表-1**に示す閾値以内となる衛星を使用するものとする．これらの値は，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．

(2)　検証結果

図-8に，観測時間帯別に得られた測位結果に含まれるFix解の割合を示す．衛星選択条件別に算出結果を比較すると，0:00~0:40の時間帯において，条件③適用時のFix解の割合が条件②よりも5%~10%増加する傾向が見られた．条件③適用時の利用衛星数の推移を確認すると，常に7衛星以上の利用が確認できるため，マルチパスの影響を受ける衛星電波の除去に加え，GPS+GLONASSの条件でキネマティック解析に必要な6衛星以上を満たしたことで，Fix解の取得割合が増加したものと考えられる．

表-1　各$DDPC$による指標の閾値（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

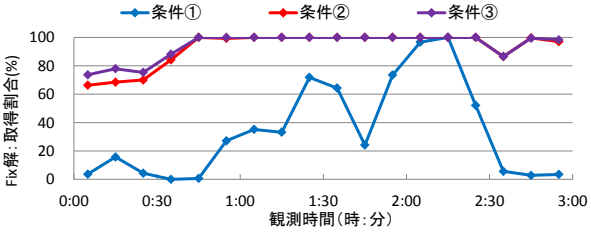

図-8　観測時間帯別によるFix解の取得割合

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，既存手法のDSSと$DDPC$に新たにGPSのL2C，GLONASSのL1P信号を加えて検証を行った．その結果，どちらの手法もマルチパスの影響を受ける衛星電波の検知が可能であることを確認し，$DDPC$は組合せた衛星の信号強度によって分布範囲が異なる可能性があることを確認した．また，衛星選択条件別に解析時の利用衛星を選定しキネマティック解析を行った結果，選定後に解析に必要な衛星数を満たす場合，マルチパス検知指標を増やすことでFix解の取得割合が増加する傾向が見られた．今後は，QZSS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についても検討を行う予定である．

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)　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, 土木学会論文集 F3Vol.69No.2, p.I_98-I_109, 2014.
2)　細矢良雄：電波伝搬ハンドブック, pp.23-24, 1999.
3)　土屋淳，辻宏道：GNSS 測量の基礎，日本測量協会，pp.182-183. 2008.