

# (18) 移動時のGNSS測位における 誤差電波の除去効果に関する研究

池田 隆博<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 日本大学助教 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

近年のGNSS測位では、利用可能な衛星系の増加に加え、各衛星から送信される電波の周波数帯についても増加傾向にあるため、バイアス決定を必要とする干渉測位方式において、Fix解の取得率の改善が想定される。一方で、RTK等の移動時による干渉測位では、観測環境が常に変化するため、反射波や回折波等の誤差電波を送信する衛星も時々刻々変化し、リアルタイムに受信電波の状況を確認する必要がある。本研究では、移動時に取得した衛星電波観測データに対して、信号強度と搬送波位相変化量による誤差電波の判別手法を適用し、Fix解の取得率の改善が可能か検証を行った。

**Key Words :** GNSS, precise positioning, signal strength, carrier phase, fix solution

## 1. はじめに

近年のGNSS測位において、GPS、GLONASSに加えて、QZSS等の運用により、干渉測位におけるバイアス決定に必要な衛星数を大幅に上回る環境が整いつつある。このため、遮蔽物からの反射波や回折波等による誤差電波の除去を行っても、基線解析に必要な衛星数を確保できる可能性がある。一方で、RTK等の移動時による干渉測位では、遮蔽物位置が時々刻々と変化するため、反射波や回折波等の誤差電波の受信状況についても常に変化し、リアルタイムに誤差の有無を判別する手法が必要となる。

誤差電波を判別する手法としては、筆者らが静止測位時において、信号強度と搬送波位相変化量を用いた手法について検証しており、誤差を含む衛星を基線解析から排除することで、Fix解の取得率が改善することを確認している<sup>1)</sup>。そこで、本研究では、移動測位時においても本手法を適用することで、静止時と同様にFix解の取得率の改善が可能か検証を行った。

## 2. 誤差を含む衛星電波の判別手法

GNSS測位における誤差電波としては、遮蔽物や地面からの反射、および遮蔽物からの回折により受信する2種類の電波が想定される。反射については直接波と反射波による合成、回折については伝搬経路の増加による信

号強度の低下が生じるため<sup>2)</sup>、直接波と比較し、搬送波位相による測定値や信号強度については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、誤差を含む衛星電波の判別に信号強度と搬送波位相変化量を用いて行うものとする。

まず、信号強度による回折波の判別については、単一ナイフエッジ回折モデルの理論を適用する。GNSS衛星と受信アンテナ間の見通し線付近に遮蔽物が存在する場合、(1)式の回折パラメータが $-0.7 \leq v$ となるとき、衛星電波の回折損 $J(v)$  (dBHz) は(2)式で近似される<sup>2)</sup>。

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

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

$v$  : 回折パラメータ  $\lambda$  : 衛星電波波長 (m)

$h$  : 見通し線と遮蔽物先端との距離 (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)

上記の式より、見通し線と遮蔽物先端が交わる場合 ( $h = 0$ )、 $v = 0$ となり、回折損 $J(v)$ は6dBHzとなる。

また、見通し線が遮蔽物先端以下となり、直接波が受信できない状況下では、 $h > 0$ となり、回折損 $J(v)$ はさらに大きくなる。よって、信号強度を用いた誤差電波の判

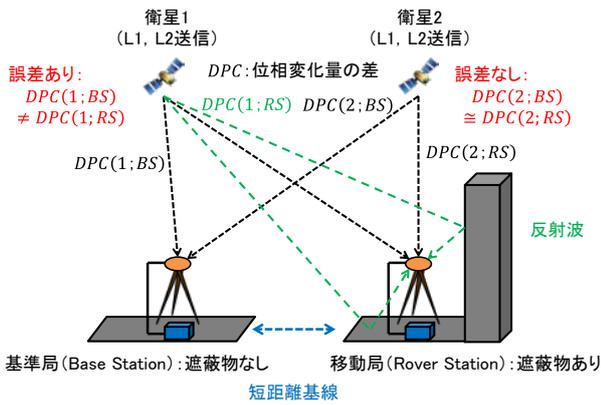


図-1 搬送波位相変化量の差による誤差電波の判別

別については、(3)式に示すように移動局と、周囲に遮蔽物のない環境下に設置した基準局とで観測された同衛星の信号強度の差 (Difference of Signal Strength : 以下DSS) を求めることで、判別が可能になるといえる。

$$DSS = SS_{RS} - SS_{BS} \quad (3)$$

$SS_{RS}$  : 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)

次に、搬送波位相変化量を用いた反射波と回折波の判別については、反射および回折した際の電波の影響が、周波数帯や信号強度によって異なる点に着目したものである。衛星系に関わらず、送信される測位信号は各衛星で2種類以上存在しており、測位信号を送信する搬送波間の位相変化量の差 (m) (Difference of Phase Change : 以下DPC) については(4)式で求められる。

$$DPC = \left| (\phi_t^{L1} - \phi_{t-1}^{L1}) \frac{c}{f_{L1}} - (\phi_t^{L2} - \phi_{t-1}^{L2}) \frac{c}{f_{L2}} \right| \quad (4)$$

$\phi$  : 搬送波位相積算値 (cycle)     $t$  : 時刻 (s)  
 $L1$  : 第1周波数     $L2$  : 第2周波数     $c$  : 光速 (m/s)  
 $f$  : 搬送波周波数 (Hz)

上記の式より、第1、第2周波数の双方の搬送波位相積算値は、同一衛星より取得したものであるため、誤差が生じなければDPCの値は0に近似するものと考えられる。一方、反射および回折により生じた伝搬経路による誤差のほか、電離層遅延による誤差が含まれる場合、DPCの値は大きくなるものと考えられる。ここで、電離層遅延による誤差については、基線長10km以上の長距離基線で異なる影響が生じる目安となるため、短距離基線では同一の影響が生じるものと想定される<sup>3)</sup>。よって、短距離基線の受信機同士でDPCを求めると、反射および回折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。



図-2 実験状況 (左: 基準局 右: 移動局)

表-1 衛星系別の測位信号と周波数

衛星系	測位信号と周波数	衛星系	測位信号と周波数
GPS	L1C/A: 1575.42MHz L2P(Y): 1227.60MHz L2C: 1227.60MHz L5: 1176.45MHz	GLONASS	G1C/A: 1602+k*9/16 G1P: 1602+k*9/16 G2C/A: 1246+k*7/16 k: チャンネル番号 (-7~+6)
	QZSS		L1C/A: 1575.42MHz L1C: 1575.42MHz L2C: 1227.60MHz L5: 1176.45MHz L6(LEX): 1278.75MHz

搬送波位相変化量を用いた誤差電波の判別については、図-1に示すように観測位置に設置した移動局と周囲に遮蔽物のない環境下に設置した基準局とで観測された同衛星のDPCを算出し、(5)式に示すように基準局側のDPCを基準値として搬送波位相変化量の差の較差 (Double Difference of Phase Change : 以下DDPC) を求めることで判別が可能になるといえる。

$$DDPC = DPC_{RS} - DPC_{BS} \quad (5)$$

$DPC_{RS}$  : 移動局側の搬送波位相変化量の差 (m)  
 $DPC_{BS}$  : 基準局側の搬送波位相変化量の差 (m)

### 3. 移動測位時における誤差電波の除去効果

#### (1) 観測データの取得と解析条件

移動時の干渉測位方式におけるGNSS測位において、誤差電波を送信する衛星を基線解析から除去した際の効果を検証するため、2015年11月21日において図-2に示すように基準局受信機を周囲に遮蔽物の無い観測点に設置し、移動局受信機を車両のルーフに設置して20Hzで同時測位を行った。使用した受信機は、双方ともにTrimble NetR9であり、解析対象とする衛星系はGPS、GLONASS、QZSS、Galileoの4種類である。表-1に各衛星系から取得した測位信号とその周波数について示す<sup>4)</sup>。なお、走行区間については、図-3に示すように道路周辺を建物等で遮蔽されるA区間、樹木等で道路周辺および天頂付近を遮蔽されるB区間を設定した。

解析については、取得した観測データに対して、誤差電波の判別手法を適用し、GPS+GLONASS+QZSS+Galileo

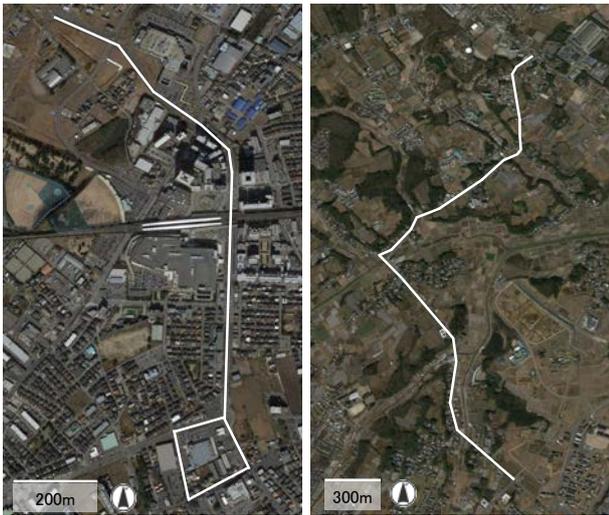


図-3 車両走行区間 (左: A区間 右: B区間)

表-2 測位信号別による移動平均DDPCの基準値 (単位:mm)

衛星系	DDPC算出時の組合せと基準値 (測位信号の組合せ: 仰角15° ~ 30° , 30° ~ 45° , 45° ~ 60° , 60° ~ )
GPS	L1C/A-L2P(Y) : 1.265, 0.846, 0.129, 0.129
	L1C/A-L2C : 0.236, 0.129, 0.129, 0.129
	L1C/A-L5 : 0.144, 0.132, 0.132, 0.132
	L2P(Y)-L2C : 0.841, 0.368, 0.368, 0.368
	L2P(Y)-L5 : 0.888, 0.231, 0.121, 0.121
	L2C-L5 : 0.177, 0.147, 0.147, 0.144
GLONASS	G1C/A-G1P : 2.648, 1.634, 1.542, 1.490
	G1C/A-G2C/A : 0.195, 0.137, 0.110, 0.086
	G1P-G2C/A : 2.671, 1.629, 1.526, 1.405
QZSS	L1C/A-L1C : 0.358, 0.358, 0.358, 0.358
	L1C/A-L2C : 0.114, 0.114, 0.114, 0.090
	L1C/A-L5 : 0.174, 0.106, 0.099, 0.090
	L1C/A-L6(LEX) : 0.109, 0.109, 0.109, 0.109
	L1C-L2C : 0.215, 0.215, 0.215, 0.215
	L1C-L5 : 0.273, 0.273, 0.273, 0.273
	L1C-L6(LEX) : 0.233, 0.233, 0.233, 0.233
	L2C-L5 : 0.144, 0.144, 0.144, 0.144
	L2C-L6(LEX) : 0.119, 0.119, 0.119, 0.119
L5-L6(LEX) : 0.144, 0.144, 0.144, 0.144	
Galileo	E1-E5a : 0.142, 0.142, 0.142, 0.142
	E1-E5b : 0.125, 0.125, 0.125, 0.122
	E1-E5 : 0.128, 0.128, 0.128, 0.113
	E5a-E5b : 0.140, 0.139, 0.139, 0.097
	L5a-L5 : 0.142, 0.142, 0.134, 0.123
	L5b-L5 : 0.148, 0.124, 0.124, 0.124

の組合せによるキネマティック解析を実施した。基線解析については、RTKLIB Version 2.4.2 p11を使用し、バイアス決定手法をGPS+GLONASSによるInstantaneous (瞬時バイアス決定手法)、仰角マスクを15°、使用する周波数帯をL1+L2+L5に設定した。

検証については、誤差電波の判別手法の適用前後で得られたFix解の取得率と座標値を算出して行った。誤差電波判別時の手法としては、後述する1.移動平均DDPCの適用、2. DSSと移動平均DDPCの双方の適用の2種類とした。

表-3 走行区間別によるFix解の取得率 (単位:%)

走行区間	全観測衛星使用	移動平均DDPC	DSS+ 移動平均DDPC
A	77.0	81.4	87.5
B	84.1	86.3	86.0

## (2) 誤差電波判別時の基準値の設定

DSSとDDPCによる誤差を含む衛星電波を判別する基準値の設定について、DSSの場合、回折モデルより得られる見通し線と遮蔽物先端が交わる際の回折損6dBHzを参考とし、(3)式より得られる値が-6dBHzを下回る場合、基線解析から対象衛星を排除するものとする。一方、DDPCについては、(4)式の第1, 第2周波数の測位信号の組合せ別に得られたDDPCの算出値に対して600データ毎に移動平均DDPCを算出し、衛星仰角に応じて算出値が表-2に示す基準値を上回る場合、基線解析から対象衛星の排除を行うものとする。移動平均DDPCの基準値の算出については、周囲に遮蔽物のない環境下に基準局と移動局を短距離基線となるように設置し、同時観測により得られたデータから仰角の範囲毎に移動平均DDPCの推移を求めて算出した。なお、観測日は2014年7月16日、23日であり、使用した受信機は移動測位と同様にTrimble NetR9を使用した。

## (3) 解析条件別によるFix解の取得

各走行区間におけるFix解の取得率について、解析時に用いた誤差電波の判別手法別に表-3に示す。まず、A区間について条件別に比較すると、誤差電波の判別手法を基線解析前に適用することで、Fix解の取得率が向上する傾向が見られた。また、誤差電波の判別にDSSと移動平均DDPCを組み合わせることで、Fix解の取得率がさらに向上する結果が得られた。移動平均DDPCについては、今回の検証では600データ毎に算出を行っているため、瞬時に発生する誤差電波に対して対応できなかった可能性が考えられる。図-4にA区間で取得したFix解のプロットを条件別に示す。移動平均DDPC単独による条件では、全観測衛星使用時にFix解が途切れる経路において、取得改善の効果が見られるが、連続してFix解を取得できるまでには至っていない。一方、DSSと移動平均DDPCを組合せた条件では、基線解析に必要な衛星数を取得できない経路を除き、連続してFix解を取得する傾向が複数の経路で見られた。DSSについては、1データ毎の算出結果より誤差の有無を判断するため、瞬時に誤差電波に対して対応できたものと考えられる。

次に、B区間についてFix解の取得率を条件別に比較する。A区間と同様に誤差電波の判別手法を基線解析前に適用することで、Fix解の取得率が向上する傾向が見られたが、改善効果は約2%と大きな差は見られなかった。

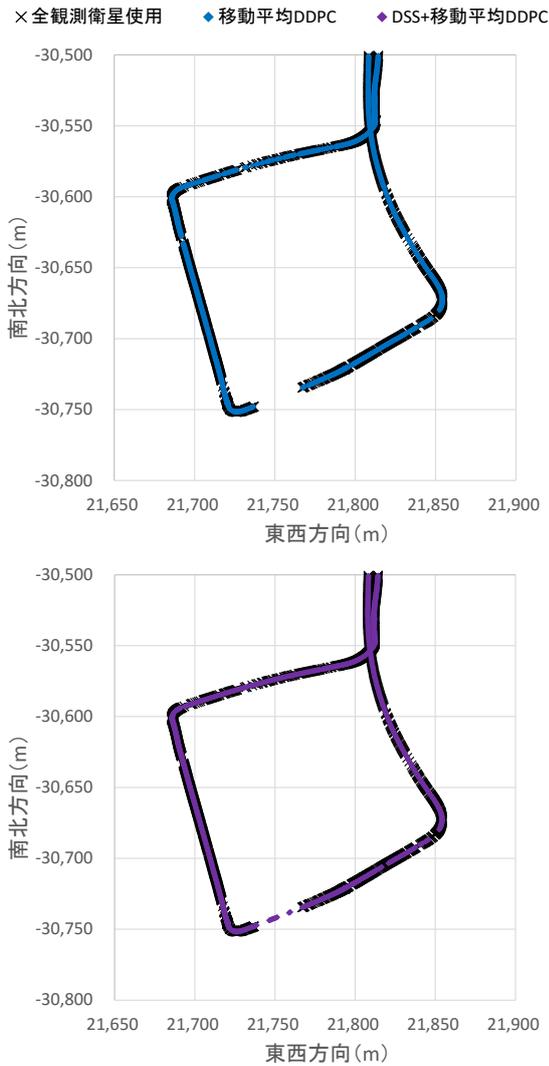


図4 A区間におけるFix解のプロット

図-5にB区間で取得したFix解のプロットを条件別に示す。移動平均DDPC単独、DSSと移動平均DDPCを組合せた条件の双方で、Fix解の取得改善の効果が見られたが、一方で、全観測衛星使用時よりもFix解が得られない経路も確認された。全観測衛星使用時にFix解が途切れる経路において、誤差電波判別後の観測データを確認すると、解析に必要な衛星数を下回る場合が確認されており、誤差を含まない衛星電波の取得が困難であったものと考えられる。

#### 4. 結論

本研究では、移動時の干渉測位においてDSSとDDPCによる誤差を含む衛星電波の判別を実施し、誤差電波を除去することで、Fix解の取得率の改善が可能か検証を行った。その結果、移動平均DDPC単独による条件では、全観測衛星使用時と比較しFix解の取得率の改善は見られたが、一部の経路では連続してFix解を取得するまで

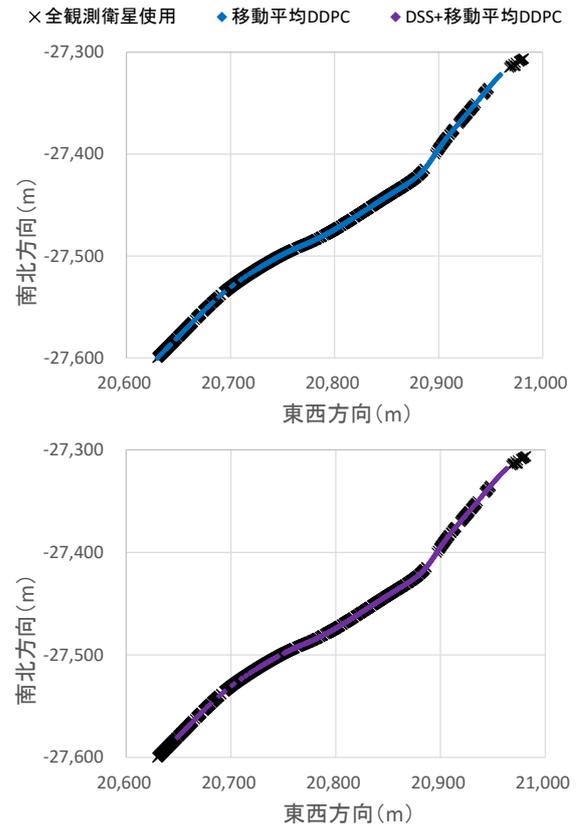


図5 B区間におけるFix解のプロット

には至らなかった。一方で、DSSを併用した条件では、移動平均DDPC単独よりもFix解の取得率の改善が見られ、基線解析に必要な衛星数を取得できない経路を除き、連続してFix解を取得する傾向が確認された。

移動平均DDPCについては、今回の検証では600データを使用して算出を行ったため、瞬時に発生する誤差電波に対しては対処できなかったものと考えられる。今後は、移動平均を算出する際のデータ数に加えて、1データ毎に算出されるDDPCの値を確認し、誤差電波を判別する手法について検討を行う予定である。

**謝辞：**本研究は平成27年度科学研究費助成金（若手研究B）15K18139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：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, 土木学会論文集F3, Vol.70(2014)No.2, pp.II\_17-II\_26, 2014.
- 2) 細矢良雄：電波伝搬ハンドブック, pp.23-24, pp.125-126, 1999.
- 3) 土屋淳, 辻宏道：GNSS測定の基礎, 日本測量協会, 2008.
- 4) 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.