

高精度移動測位のための位相差による
マルチパス検知手法を用いた衛星選択に関する研究

平成 26 年 1 月

日本大学大学院理工学研究科博士後期課程
社会交通工学専攻
池 田 隆 博

論文要旨

平成 26 年 1 月

申請者 日本大学大学院理工学研究科博士後期課程社会交通工学専攻

池田 隆博

運転支援システムの開発において車両周囲の情報取得は重要な要素であるが、車線維持制御など、走行位置に応じたシステムの実現には、高精度な車両の位置情報が不可欠である。位置情報の取得手段としては、カーナビゲーション等に用いられる GPS (Global Positioning System) を中心とした衛星測位システムがある。中でも、干渉測位方式の一種である RTK (Real-time Kinematic) 法は、移動体をリアルタイムに cm オーダーの精度で測位可能な手法であり、高精度な車両位置情報の取得に適している。

GPS をはじめとする衛星測位システムは、将来的には現状よりも多くの衛星が利用可能になるものと想定される。既に GPS のほか、ロシアが運用する GLONASS (Global Navigation Satellite System) は全世界で実用可能な衛星数に達しており、日本、欧州なども自国の衛星測位システムの開発が進行している。衛星測位では、測位方式に関わらず 4 機以上の衛星電波を受信する必要があるが、このような複数の衛星系から電波を受信できる場合、利用可能な衛星数が飛躍的に増加し、上空が開けていない場所でも測位の可能性が高まる。上空視界を十分に確保できない場所は、都市部の道路上などで頻繁に見受けられるが、複数衛星系の併用により、このような場所でも利用可能率の向上が期待できる。

しかし、衛星数が増加しても解決できない問題として、衛星から直接届く電波の他に、建物の壁面等に当たって反射した電波、建物を回折した電波が届く現象であるマルチパスがある。マルチパスの影響により、干渉測位方式による高精度な測位手法でも数 cm オーダーの誤差を生じることがあり、状況によっては、m オーダーの誤差を生じる場合がある。ゆえに、複数衛星系の併用による衛星数増加の効果を最大限に生かすには、マルチパスによる誤差の低減が不可欠であることは明らかである。

そこで本論文は、高精度測位における利用可能性低下の主要因である、マルチパスの影響を受ける受信電波を検知する手法を提案し、反射波と回折波を含む受信電波の排除を目的とした衛星選択効果を受信アンテナの静止時と移動時で検討した。その結果を基に、提案した衛星選択手法によって、どのような効果が得られるのかを明らかにした。

本論文は、8 章から構成されており、各章の内容は次の通りである。

「第 1 章 序論」では、本研究の背景と目的、本論文の構成を述べた。

「第 2 章 衛星測位システムの概要と測位技術」では、衛星測位システムとその測位技術について整理し、衛星測位における基本的な誤差要因をまとめた。まず、現在運用されている GPS

と GLONASS の特徴について整理し、送信される電波について調べた。次に、干渉測位方式の原理について調べ、mm オーダーの精度が得られる要因を確認するとともに、本方式に含まれる各々の測位法の特徴について整理した。衛星測位における誤差要因については、電波が大気中を伝搬している間に受ける電離層と対流圏による遅延誤差について整理し、衛星電波の周波数と伝搬距離に依存することを確認した。また、受信機雑音とマルチパスによる測定値誤差について整理し、マルチパスによる距離測定値誤差は、反射波の強さと直接波に対する反射波の遅延に依存することを確認した。

「第3章 衛星測位におけるマルチパス誤差とその削減」では、第2章で述べたマルチパスの既存の削減技術について整理し、本研究の位置付けを明らかにした。まず、受信機内部の関連処理によるマルチパス抑制技術について整理を行った。衛星電波捕捉時の関連処理によって、受信電波に含まれる反射波の影響を m オーダーまでは抑制できることを確認し、衛星からの直接波が受信できない不可視衛星からの回折波等については抑制が困難であることを指摘した。次に、受信機から出力される観測値に含まれる信号強度を用いたマルチパス検知手法について整理した。マルチパスの影響を受ける受信電波の信号強度は直接波よりも弱まるため、この特性を用いることで回折波の検知が可能となる。しかし、直接波と反射波が含まれる可視衛星からの受信電波については、双方の電波が同位相、逆位相による受信により強度の増減が生じ、反射波の位相によっては、直接波の信号強度と同値となることを指摘した。また、受信機からの観測値を用いない手法として、衛星位置と地物位置から衛星の可視条件を判断してマルチパスを推定する手法を整理した。不可視衛星からの受信電波は、回折波と反射波で構成され、衛星の可視性からマルチパスを推定できる。しかし、可視衛星からの反射波の状況が考慮できないため、可視性のみでマルチパスを判断することは困難であることを指摘した。

上記の内容より、マルチパスの検知について、不可視衛星からの回折波等については検知が可能であるものの、直接波が届く可視衛星からの反射波については、電波伝搬の特性から検知することは困難であるといえる。干渉測位による高精度測位では、mm~cm オーダーで衛星と受信機間の距離算出を行うため、可視衛星からの反射波の検知は不可欠である。よって、本論文ではマルチパスを含む受信電波の観測値に着目し、従来手法とは異なるマルチパス検知手法を提案することとした。

「第4章 提案するマルチパス検知手法」では、衛星電波の周波数の違いによりマルチパスの影響が異なる点に着目し、受信機による搬送波測定値の位相差からマルチパスを検知する手法を提案した。GPS と GLONASS は、周波数の異なる 2 種類の電波を送信しており、本論文では、双方の衛星に対応した 2 周波受信機を用いて、マルチパスの影響を含む観測値と含まない観測値を同時取得した。マルチパスの影響を含む観測値では、受信した反射波、回折波の位相により異なる測定誤差が得られることから、周波数の異なる L1 波と L2 波では搬送波位相の変化量に差が生じるものと考えられる。取得した双方の観測値から位相変化量の差 (DPC: Difference of Phase

Change) を算出し、マルチパスの影響を受ける環境で異なる傾向が得られるか確認した。可視衛星の受信電波に反射波が含まれる場合、双方の観測値で得られた DPC が異なる結果を示し、不可視衛星からの受信電波についても同様の傾向が確認された。本章では、この DPC を用いて新たなマルチパス検知手法の考え方を示し、マルチパスの影響を受ける受信電波の削減効果を確認した。

「第 5 章 マルチパス検知手法の検証」では、第 4 章の結果を基に、具体的なマルチパス検知手法を構築した。移動局の観測値から得られた信号強度と DPC について、基準局の観測値から得られた同データの差を求めることで、信号強度の差 (DSS : Difference of Signal Strength) と位相変化量の差の較差 (DDPC : Double Difference of Phase Change) によるマルチパス検知指標を構築し検証を行った。まず、DSS によるマルチパス検知を検証した。その結果、不可視衛星からの受信電波については、DSS の低下を確認し、直接波と反射波を同時受信する可視衛星からの受信電波については、DSS の上下動が 0dBHz を中心に生じることを確認した。この傾向は、第 3 章で示した信号強度の傾向と一致しており、DSS を用いることで、不可視衛星からの回折波等を検知できることを確認した。次に、DDPC によるマルチパス検知を検証した。その結果、不可視衛星からの受信電波、直接波と反射波を含む可視衛星からの受信電波について、指標値が 0mm から離れることがわかった。この結果は、回折波と反射波の双方のマルチパスに対応できることを示しており、前述の電波を検知する上で有効な手法であると結論付ける。

「第 6 章 静止時における衛星選択の効果」では、第 5 章で述べたマルチパス検知手法を基に使用する衛星の選択を行い、基線解析で得られた結果から衛星選択効果を検証した。衛星選択後、基線解析に必要な衛星数が得られる場合、全観測衛星を使用した場合よりも、基準座標からの誤差が 20mm 以内となる高精度解が増加し、測位精度が改善できることを示した。また、本研究で提案した DDPC による指標を含めて衛星の選択を行うことで、基線解析に必要な衛星数を確保できる場合、測位精度がさらに改善できることを示した。このことから、DDPC によるマルチパス検知手法は、高精度な測位解を安定して取得する上で有効な手法であると結論付ける。

「第 7 章 移動時における衛星選択の効果」では、車両の移動時に得られた観測値に対して、マルチパス検知指標に基づく衛星の選択を行い、基線解析で得られた解の軌跡を確認した。その結果、基線解析に必要な衛星数が得られる場合、正確な走行軌跡を再現できる割合が増加することを確認した。DSS と DDPC を合わせて衛星の選択に用いることで、特に周囲を高層建物で囲まれマルチパスが発生しやすい環境において顕著に高精度解の取得率を改善できることから、移動測位への高精度化に寄与するものと考えられる。

「第 8 章 結論」では、搬送波の位相差を用いてマルチパスを検知する手法を提案し、実際に取得した観測値に適用した結果、反射波と回折波の双方の電波に対して検知できることを述べた。また、信号強度による手法と組み合わせて衛星を選択することで、静止時、移動時を問わず高精度測位時の精度を改善することが可能となり、提案手法は高精度移動測位において衛星選択指標

の一つになりえることを述べた。本論文の成果を受けて、マルチパス検知による衛星選択手法の有効性が確認されたことで、移動体測位の高精度化に大きく前進すると考える。

目 次

第 1 章 序論	1
1-1 研究背景	1
1-2 研究目的	3
1-3 論文の構成	4
第 1 章 参考・引用文献	6
第 2 章 衛星測位システムの概要と測位技術	7
2-1 GPS の概要	7
2-1-1 GPS の構成要素	7
2-1-2 GPS の信号構成	8
2-2 GLONASS の概要	11
2-2-1 GLONASS の構成要素	11
2-2-2 GLONASS の信号構成	12
2-3 衛星測位システムによる高精度測位技術	14
2-3-1 衛星測位の種類	14
2-3-2 干渉測位の原理	15
2-3-3 スタティック方式	19
2-3-4 キネマティック方式	21
2-3-5 リアルタイムキネマティック方式 (RTK 方式)	22
2-3-6 GLONASS 併用による測位への影響	25
2-4 電波伝搬による誤差	26
2-4-1 電離層遅延	26
2-4-2 対流圏遅延	29
2-5 測定値誤差	32
2-5-1 受信機雑音	32

2-5-2	マルチパス	32
2-6	まとめ	33
第2章	参考・引用文献	34
第3章	衛星測位におけるマルチパス誤差とその削減	35
3-1	信号構造とマルチパス誤差	35
3-1-1	受信機設計	35
3-1-2	デジタル信号の相関処理	36
3-1-3	弁別関数	38
3-1-4	遅延間接信号	39
3-2	マルチパスによる衛星電波の伝搬特性	42
3-2-1	反射波	42
3-2-2	回折波	49
3-2-3	衛星の可視条件とマルチパスの影響	51
3-3	衛星の可視条件による誤差電波の推定	53
3-3-1	地物位置情報を用いた推定方法	53
3-3-2	画像データを用いた推定方法	57
3-4	まとめ	59
第3章	参考・引用文献	60
第4章	提案するマルチパス検知手法	61
4-1	受信機から出力される観測値の傾向	61
4-1-1	観測値の評価方法	62
4-1-2	直接波による受信電波からの観測値	64
4-1-3	直接波と反射波による受信電波からの観測値	72
4-1-4	反射波と回折波による受信電波からの観測値	78
4-2	搬送波位相変化量の差によるマルチパス検知効果の検証	82
4-2-1	検証の概要	82

4-2-2	マルチパスの影響を受ける衛星電波の検証結果	83
4-3	位相変化量の差に基づいた利用衛星の選択とその効果の検証	87
4-3-1	検証の概要	87
4-3-2	衛星選択条件	88
4-3-3	観測点別における各測位解の取得結果	89
4-3-4	観測点別における測位精度の検証結果	90
4-4	まとめ	97
第4章	参考・引用文献	98
第5章	マルチパス検知手法の検証	99
5-1	観測量を用いたマルチパス検知	99
5-1-1	信号強度を用いたマルチパス検知手法	99
5-1-2	搬送波位相変化量の差によるマルチパス検知手法	104
5-2	まとめ	114
第6章	静止時における衛星選択の効果	115
6-1	検証の概要	115
6-2	静止時における衛星選択効果の検証結果	118
6-2-1	DSSとDDPCの算出結果の確認	118
6-2-2	衛星選択による基線解析結果	127
6-3	まとめ	158
第7章	移動時における衛星選択の効果	159
7-1	検証の概要	159
7-2	移動時における衛星選択効果の検証結果	162
7-2-1	低速移動による検証	162
7-2-2	一般道路走行による検証	182
7-3	まとめ	190

第 8 章 結論	191
8 - 1 本研究の成果	191
8 - 2 今後の展望	192
謝辞	194

図表の一覧

第 1 章 序論	1
表 1-1 運転支援の種別毎による要求精度	1
表 1-2 対象システムおよび制御内容に対する要求位置精度	2
表 1-3 各衛星系の運用衛星数.....	2
第 2 章 衛星測位システムの概要と測位技術	7
図 2-1 GPS システムの全体構成	7
表 2-1 GPS 衛星の主要な特徴	10
表 2-2 GLONASS 衛星の主要な特徴	13
図 2-2 衛星測位方式の種類.....	14
表 2-3 各衛星測位方の特徴.....	14
図 2-3 搬送波位相の検出と位相の積算.....	15
図 2-4 行路差と受信機一重位相差.....	17
図 2-5 行路差の差と二重位相差.....	17
図 2-6 未知点座標の測定方法.....	18
図 2-7 衛星移動を利用した整数不定性の探索	19
図 2-8 RINEX ファイルの構成	20
図 2-9 RINEX による観測データファイルの一例	20
図 2-10 キネマティック方式における測位方法	21
図 2-11 リアルタイムキネマティック方式の構成	22
表 2-4 RTCM フォーマットの主な改版内容	22
表 2-5 RTCM バージョン 2.3 の主なメッセージタイプ	23
図 2-12 RTCM バージョン 2.x のメッセージ構造	23
表 2-6 CMR フォーマットの packets 定義	24
表 2-7 観測方式による使用衛星数.....	25
表 2-8 疑似距離と搬送波位相の変化.....	28

図 2-13 衛星測位におけるマルチパスとなる信号	33
---------------------------------	----

第 3 章 衛星測位におけるマルチパス誤差とその削減

35

図 3-1 受信機の機能ブロック図	35
図 3-2 受信機の追尾ループ構成図	37
図 3-3 マルチパス信号の影響を受けた相関関数 ($d = T_c$)	40
図 3-4 マルチパス信号の影響を受けた相関関数 ($d = T_c/4$)	40
図 3-5 マルチパス信号の影響を受けない相関関数	41
図 3-6 衛星測位におけるマルチパス環境	42
図 3-7 GPSL1 波, L2 波における $g < 0.3$ となる接地角と S_h の関係	43
図 3-8 フレネルゾーンの説明	43
図 3-9 GPSL1 波, L2 波における d_2 と R_1 の関係	44
図 3-10 直接波+反射波と反射波のみの相関関数	45
図 3-11 逆位相の反射波を受信した相関関数	45
図 3-12 2 波モデル (直接波と大地反射波)	46
図 3-13 GPS 衛星と地球の幾何学的配置	47
図 3-14 GPSL1 波, L2 波における直接波と反射波を同時受信した場合の受信電力	48
図 3-15 単一ナイフエッジ回折	49
図 3-16 GPSL1 波, L2 波におけるナイフエッジ回折損	50
図 3-17 衛星の可視条件と想定される受信電波	51
図 3-18 3 次元レーザースキャナ (Riegl 社製: LMS-Z420i)	54
図 3-19 3 次元点群データによる地物の表現 (日本大学工学部船橋キャンパス)	54
図 3-20 点群座標の変換イメージ	55
図 3-21 天空図による衛星位置の表示 (RTKLIB Ver. 2.4.2 を使用)	55
図 3-22 地物位置と投影面の位置関係	56
図 3-23 投影対象となる地物の点群データ	56
図 3-24 点群データの投影結果	56
図 3-25 点群データによる地物位置と衛星位置	57

図 3-26	IR-ODV 画像を用いた可視衛星の判別手法	57
第 4 章	提案するマルチパス検知手法	61
図 4-1	衛星別の測定値を用いたマルチパス検知の例	61
図 4-2	アンテナ設置位置と遮蔽環境（日本大学工学部船橋キャンパス）	62
図 4-3	アンテナ設置状況（左 A0：遮蔽なし 右 B2：北遮蔽）	62
図 4-4	評価対象とする衛星の軌道（左：GPS 右：GLONASS）	64
図 4-5	直接波による GPS の信号強度と衛星仰角	65
図 4-6	直接波による GLONASS の信号強度と衛星仰角	66
図 4-7	GPS による疑似距離変化量と衛星仰角	66
図 4-8	GLONASS による疑似距離変化量と衛星仰角	67
図 4-9	GPS による搬送波位相変化量と衛星仰角	67
図 4-10	GLONASS による搬送波位相変化量と衛星仰角	68
表 4-1	GPS:11 番における疑似距離変化量と搬送波位相変化量	68
表 4-2	GLONASS:18 番における疑似距離変化量と搬送波位相変化量	69
図 4-11	直接波による GPS の疑似距離変化量の差と仰角	69
図 4-12	直接波による GPS の搬送波位相変化量の差と仰角	70
図 4-13	直接波による GLONASS の疑似距離変化量の差と仰角	71
図 4-14	直接波による GLONASS の搬送波位相変化量の差と仰角	71
図 4-15	地物の天空図（B2：北遮蔽）	73
図 4-16	衛星軌道と観測点 B2 における地物位置（左：GPS 右：GLONASS）	73
図 4-17	直接波と反射波による GPS の信号強度と衛星仰角	74
図 4-18	直接波と反射波による GLONASS の信号強度と衛星仰角	74
図 4-19	直接波と反射波による GPS の疑似距離変化量の差と仰角	75
図 4-20	直接波と反射波による GPS の搬送波位相変化量の差と仰角	75
図 4-21	反射波の有無による GPS の搬送波位相変化量の差と仰角	76
図 4-22	直接波と反射波による GLONASS の疑似距離変化量の差と仰角	76
図 4-23	直接波と反射波による GLONASS の搬送波位相変化量の差と仰角	77

図 4-24	反射波の有無による GLONASS の搬送波位相変化量の差と仰角	77
図 4-25	反射波と回折波による GPS の信号強度と衛星仰角	78
図 4-26	反射波と回折波による GLONASS の信号強度と衛星仰角	78
図 4-27	反射波と回折波による GPS の疑似距離変化量の差と仰角	79
図 4-28	反射波と回折波による GPS の搬送波位相変化量の差と仰角	80
図 4-29	反射波と回折波による GLONASS の疑似距離変化量の差と仰角	80
図 4-30	反射波と回折波による GLONASS の搬送波位相変化量の差と仰角	80
表 4-3	観測点 B2~B7 の地物天空図と遮蔽率	82
図 4-31	観測点 B2~B7 のアンテナ設置状況 (2011 年 11 月 5 日~7 日)	83
図 4-32	観測点 B2 における GPS のマルチパス検証結果	84
図 4-33	観測点 B2 における GLONASS のマルチパス検証結果	84
図 4-34	観測点 B4 における GPS のマルチパス検証結果	85
図 4-35	観測点 B4 における周囲の地物の位置関係	85
図 4-36	観測点 B4 における GLONASS のマルチパス検証結果	86
表 4-4	GPS における DPC の傾向	86
表 4-5	GLONASS における DPC の傾向	87
図 4-37	観測点 B4~B7 の可視衛星における平均値較差の分布検討結果	88
図 4-38	観測点 B4~B7 の可視衛星における標準偏差較差の分布検討結果	88
表 4-6	GPS のみによる測位解の割合 (単位: %)	89
表 4-7	GPS+GLONASS による測位解の割合 (単位: %)	89
図 4-39	解析条件別による Fix 解の取得割合	90
図 4-40	観測点 B2 における平均 Fix 解の時系列変化	92
図 4-41	観測点 B2 における解析使用時の衛星数の時系列変化	93
図 4-42	観測点 B2 における PDOP の時系列変化	93
図 4-43	観測点 B4 における平均 Fix 解の時系列変化	94
図 4-44	観測点 B4 における解析使用時の衛星数の時系列変化	94
図 4-45	観測点 B4 における PDOP の時系列変化	95
表 4-8	GPS のみによる Fix 解の概略精度内となる平均値の割合 (単位: %)	95

表 4-9	GPS+GLONASS による Fix 解の概略精度内となる平均値の割合 (単位: %)	95
-------	--	----

第 5 章 マルチパス検知手法の検証 99

図 5-1	アンテナ設置状況 (B3: 南遮蔽)	100
図 5-2	地物の天空図 (B3: 南遮蔽)	100
図 5-3	衛星軌道と観測点 B3 における地物位置 (左: GPS 右: GLONASS)	101
図 5-4	観測点 B2 における GPS の DSS 算出結果	102
図 5-5	観測点 B2 における GLONASS の DSS 算出結果	102
図 5-6	観測点 B3 における GPS の DSS 算出結果	103
図 5-7	観測点 B3 における GLONASS の DSS 算出結果	103
図 5-8	観測点 B2 における GPS の DDPC 算出結果	106
図 5-9	観測点 B2 における GPS の DDPC 算出結果	107
図 5-10	観測点 B3 における GPS の DDPC 算出結果	107
図 5-11	観測点 B3 における GLONASS の DDPC 算出結果	108
図 5-12	観測点 B2 における GPS の移動平均 DDPC 算出結果	109
図 5-13	観測点 B2 における GLONASS の移動平均 DDPC 算出結果	110
図 5-14	観測点 B2 における DPC 絶対値を用いた GPS の DDPC 算出結果	111
図 5-15	観測点 B2 における DPC 絶対値を用いた GLONASS の DDPC 算出結果	111
図 5-16	観測点 B2 における DPC 絶対値を用いた GPS の移動平均 DDPC 算出結果	112
図 5-17	観測点 B2 における DPC 絶対値を用いた GLONASS の移動平均 DDPC 算出結果	112

第 6 章 静止時における衛星選択の効果 115

図 6-1	観測点位置と遮蔽環境	115
表 6-1	観測点周囲の概観と地物天空図	116
図 6-2	衛星選択効果の検証の流れ	117
図 6-3	評価対象とする GPS 衛星の軌道と各観測点の地物位置	119
図 6-4	評価対象とする GLONASS 衛星の軌道と各観測点の地物位置	119
図 6-5	観測点 B2 における GPS の DSS 算出結果 (2011 年 11 月 13 日)	120

図 6-6	観測点 B2 における GPS の DSS 算出結果 (2011 年 11 月 6 日)	120
図 6-7	観測点 B2 における GPS の移動平均 DDPC 算出結果 (2011 年 11 月 13 日)	121
図 6-8	観測点 B2 における GPS の移動平均 DDPC 算出結果 (2011 年 11 月 6 日)	121
図 6-9	観測点 B3 における GPS の DSS 算出結果 (2011 年 11 月 14 日)	122
図 6-10	観測点 B3 における GPS の DSS 算出結果 (2011 年 11 月 7 日)	122
図 6-11	観測点 B3 における GPS の移動平均 DDPC 算出結果 (2011 年 11 月 13 日)	123
図 6-12	観測点 B3 における GPS の移動平均 DDPC 算出結果 (2011 年 11 月 7 日)	123
図 6-13	観測点 B2 における GLONASS の DSS 算出結果 (2011 年 11 月 13 日)	124
図 6-14	観測点 B2 における GLONASS の移動平均 DDPC 算出結果 (2011 年 11 月 13 日)	125
図 6-15	観測点 B3 における GLONASS の DSS 算出結果 (2011 年 11 月 14 日)	125
図 6-16	観測点 B3 における GLONASS の移動平均 DDPC 算出結果 (2011 年 11 月 14 日)	126
表 6-2	各観測点の Fix 解の取得率 (単位: %)	127
図 6-17	観測点 B2 における GPS のマルチパス検知結果	128
図 6-18	観測点 B2 における GLONASS のマルチパス検知結果	128
図 6-19	観測点 B2 における時間帯別の Fix 解取得率	129
図 6-20	観測点 B2 における時間帯別の平均衛星数と最小衛星数	129
図 6-21	観測点 B2 における基線解析結果の時系列分布	130
図 6-22	観測点 B2 における Fix 解の時系列分布	130
図 6-23	観測点 B2 における時間帯別の 2-D RMS 算出結果	131
図 6-24	観測点 B2 における時間帯別に正確な Fix 解が得られた割合	131
図 6-25	観測点 B3 における GPS のマルチパス検知結果	132
図 6-26	観測点 B3 における GLONASS のマルチパス検知結果	132
図 6-27	観測点 B3 における時間帯別の Fix 解取得率	133
図 6-28	観測点 B3 における時間帯別の平均衛星数と最小衛星数	133
図 6-29	観測点 B3 における DDPC 基準値変更による Fix 解取得率	134
図 6-30	観測点 B3 におけるシナリオ 3, 4 の衛星数の推移	134
図 6-31	観測点 B3 におけるシナリオ 4 の PDOP の推移	134
図 6-32	観測点 B3 における基線解析結果の時系列分布	135

図 6-33	観測点 B3 における Fix 解の時系列分布	135
図 6-34	観測点 B3 における時間帯別の 2-D RMS 算出結果	136
図 6-35	観測点 B3 における時間帯別に正確な Fix 解が得られた割合	136
図 6-36	観測点 B4 における GPS のマルチパス検知結果	137
図 6-37	観測点 B4 における GLONASS のマルチパス検知結果	137
図 6-38	観測点 B4 における時間帯別の Fix 解取得率	138
図 6-39	観測点 B4 における時間帯別の平均衛星数と最小衛星数	138
図 6-40	観測点 B4 における DDPC 基準値変更による Fix 解取得率	139
図 6-41	観測点 B4 におけるシナリオ 3, 4 の衛星数の推移	139
図 6-42	観測点 B4 におけるシナリオ 4 の PDOP の推移	139
図 6-43	観測点 B4 におけるシナリオ 4 の衛星数の推移	140
図 6-44	観測点 B4 における基線解析結果の時系列分布	140
図 6-45	観測点 B4 における Fix 解の時系列分布	141
図 6-46	観測点 B4 における時間帯別の 2-D RMS 算出結果	141
図 6-47	観測点 B4 における時間帯別に正確な Fix 解が得られた割合	142
図 6-48	観測点 B5 における GPS のマルチパス検知結果	143
図 6-49	観測点 B5 における GLONASS のマルチパス検知結果	143
図 6-50	観測点 B5 における時間帯別の Fix 解取得率	144
図 6-51	観測点 B5 における時間帯別の平均衛星数と最小衛星数	144
図 6-52	観測点 B5 における DDPC 基準値変更による Fix 解取得率	145
図 6-53	観測点 B5 におけるシナリオ 4 の PDOP の推移	145
図 6-54	観測点 B5 におけるシナリオ 4 の衛星数の推移	145
図 6-55	観測点 B5 における基線解析結果の時系列分布	146
図 6-56	観測点 B5 における Fix 解の時系列分布	146
図 6-57	観測点 B5 における時間帯別の 2-D RMS 算出結果	147
図 6-58	観測点 B5 における時間帯別に正確な Fix 解が得られた割合	147
図 6-59	観測点 B6 における GPS のマルチパス検知結果	148
図 6-60	観測点 B6 における GLONASS のマルチパス検知結果	148

図 6-61	観測点 B6 における時間帯別の Fix 解取得率	149
図 6-62	観測点 B6 における時間帯別の平均衛星数と最小衛星数	149
図 6-63	観測点 B6 における基線解析結果の時系列分布	150
図 6-64	観測点 B6 における Fix 解の時系列分布	150
図 6-65	観測点 B6 における時間帯別の 2-D RMS 算出結果	150
図 6-66	観測点 B6 における時間帯別に正確な Fix 解が得られた割合	151
図 6-67	観測点 B7 における GPS のマルチパス検知結果	152
図 6-68	観測点 B7 における GLONASS のマルチパス検知結果	152
図 6-69	観測点 B7 における時間帯別の Fix 解取得率	153
図 6-70	観測点 B7 における時間帯別の平均衛星数と最小衛星数	153
図 6-71	観測点 B7 における DDPC 基準値変更による Fix 解取得率	154
図 6-72	観測点 B7 におけるシナリオ 3, 4 の衛星数の推移	154
図 6-73	観測点 B7 におけるシナリオ 4 の衛星数の推移	154
図 6-74	観測点 B7 における基線解析結果の時系列分布	155
図 6-75	観測点 B7 における Fix 解の時系列分布	155
図 6-76	観測点 B7 における時間帯別の 2-D RMS 算出結果	156
図 6-77	観測点 B7 における時間帯別に正確な Fix 解が得られた割合	156
第 7 章	移動時における衛星選択の効果	159
図 7-1	各走行コースと基準局設置位置	160
図 7-2	アンテナ設置状況 (左 基準局アンテナ 右 移動局アンテナ)	160
表 7-1	各マルチパス検知指標の基準値	161
図 7-3	経路 A における各走行区間の概略図	162
表 7-2	経路 A における各区間のデータ取得概要	162
図 7-4	経路 A における全観測衛星使用時の基線解析結果	163
図 7-5	経路 A における全観測衛星使用時の解析衛星数	164
図 7-6	経路 A における観測衛星の DSS 算出結果 (L1 波)	164
図 7-7	経路 A における観測衛星の DSS 算出結果 (L2 波)	165

図 7-8	経路 A における観測衛星のDDPC算出結果	165
図 7-6	経路 A における観測衛星のDSS算出結果 (L1 波)	164
図 7-7	経路 A における観測衛星のDSS算出結果 (L2 波)	165
図 7-8	経路 A における観測衛星のDDPC算出結果	165
図 7-9	モバイルマッピングシステム (Trimble 社製 : MX-8)	166
図 7-10	各走行区間の 3 次元点群データと走行経路	167
図 7-11	A-1 区間における全観測衛星使用時の基線解析結果	167
図 7-12	A-1 区間における観測衛星数の推移	168
図 7-13	A-1 区間における衛星選択時の基線解析結果	168
図 7-14	セッション 1 の 1 周目における測位結果の改善効果 (A-1 区間)	169
図 7-15	セッション 1 の 2 周目における測位結果の改善効果 (A-1 区間)	169
図 7-16	A-2 区間の点群データと全観測衛星使用時の基線解析結果	170
図 7-17	A-2 区間拡大図	170
図 7-18	A-3 区間における全観測衛星使用時の基線解析結果	171
図 7-19	A-3 区間における観測衛星数の推移	171
図 7-20	A-3 区間における衛星選択時の基線解析結果	172
図 7-21	A-3 区間におけるシナリオ 3 での解析衛星数の推移	172
図 7-22	セッション 2 の 1 周目における測位結果の改善効果 (A-3 区間)	173
図 7-23	各地点における測位結果の改善効果 (左 : A 地点 右 : B 地点)	173
図 7-24	A-4 区間における全観測衛星使用時の基線解析結果	174
図 7-25	A-4 区間における観測衛星数の推移	175
図 7-26	A-4 区間における衛星選択時の基線解析結果	175
図 7-27	A-4 区間におけるシナリオ 3 での解析衛星数の推移	176
図 7-28	セッション 2 の 1 周目における測位結果の改善効果 (A-4 区間)	176
図 7-29	A-5 区間における全観測衛星使用時の基線解析結果	176
図 7-30	A-5 区間における観測衛星数の推移	178
図 7-31	A-5 区間における衛星選択時の基線解析結果	178
図 7-32	セッション 2 の 2 周目における測位結果の改善効果 (A-5 区間)	179

図 7-33	Fix 解取得地点における測位結果の改善効果	179
表 7-3	セッション 1 における取得した解の割合と Fix 解の改善率 (単位: %)	180
表 7-4	セッション 2 における取得した解の割合と Fix 解の改善率 (単位: %)	180
図 7-34	経路 B における各走行区間の概略図	182
図 7-35	経路 B における全観測衛星使用時の基線解析結果	183
図 7-36	経路 B における全観測衛星使用時の解析衛星数	183
図 7-37	経路 B における観測衛星の DSS 算出結果 (L1 波)	184
図 7-38	経路 B における観測衛星の DSS 算出結果 (L2 波)	184
図 7-39	経路 B における観測衛星の DDPC 算出結果	185
図 7-40	B-1 区間における全観測衛星使用時の基線解析結果	186
図 7-41	B-1 区間における衛星選択時の基線解析結果	187
表 7-5	B-1 区間における取得した解の割合と Fix 解の改善率	187
図 7-42	B-2 区間における全観測衛星使用時の基線解析結果	188
図 7-43	B-2 区間における衛星選択時の基線解析結果	189
表 7-6	B-2 区間における取得した解の割合と Fix 解の改善率	189

第1章 序論

1-1 研究背景

近年、自動車の運転支援システムのニーズは世界的に高まっており、車線逸脱防止等のドライバーの負担軽減を目的としたものから、自動ブレーキ等の事故の防止に重きを置いたものまで様々な技術開発が行われ、急速に普及している。これらのシステムは、カメラ画像やミリ波レーダー等により収集される車両周囲の情報が重要な要素であり、これに、正確な地図情報や高精度な車両位置情報が加わることで、交差点での一時停止支援や車線維持制御など、走行位置に応じた高度な運転支援システムの実現が期待される。車両の位置情報を取得するための手段としては、カーナビゲーション等の位置表示に用いられている、GPS (Global Positioning System) を中心とした衛星測位システムが挙げられる。その精度は、測位方式によって様々であるが、干渉測位方式の一つである RTK (Real-time Kinematic) 法は、移動体をリアルタイムに cm オーダーの精度で測位可能な手法であり、高精度な車両の位置情報の取得に適していると考えられる¹⁾。

運転支援における位置情報の利用目的は、表 1-1 のように分類でき、各々のサービスに求められる精度も様々である。走行経路案内および走行環境情報提供については、車両の縦横方向に関わらず m オーダーの精度が求められており、これは、リアルタイム解析可能な衛星測位方式の一つである DGPS (Differential GPS) を用いることで達成可能な精度である。一方、走行操作補助については、車両の横方向に対して数 cm の精度が求められており、これには、RTK による高精度な測位方式が必要となる。操作補助において、対象システム別に求められる位置精度を表 1-2 に示す。車両の縦方向制御が必要となる車間距離制御等については、精度±1.0m の車両の位置情報が必要となるが、横方向制御を必要とする車線維持制御等については、±5.0cm の精度が必要となることがわかる。

GPS をはじめとする衛星測位システムは、近い将来、新たな衛星系の実用化により、現状よりも多くの衛星が利用可能になるものと想定される。2013年現在、衛星測位システムは、アメリカが運用する GPS に加え、ロシアが運用する GLONASS (Global Navigation Satellite System)

表 1-1 運転支援の種別毎による要求精度²⁾

種別	対称範囲	要求精度	空間解像度
経路案内	車道部(市街地, 平野部, 山間部, トンネル含む)	縦 : 15m程度 横 : 10m程度	10m以下
走行環境情報提供		縦 : 10m程度 横 : 1m程度	1m以下
走行操作補助		縦 : 1m程度 横 : 数cm程度	数cm以下

表 1-2 対象システムおよび制御内容に対する要求位置精度³⁾

対象システム	制御内容	位置精度	絶対/相対
隊列走行	車線維持制御	±5.0cm	相対
	レーンチェンジ	±5.0cm	相対
	車間距離制御(車車間通信併用)	±1.0m	相対
	隊列形成	±1.0m	絶対
運転支援	追突防止制御(車車間通信併用)	±1.0m	相対
	交差点衝突防止(車車間通信併用)	±1.0m	相対
自動運転	車線維持制御(レーンマーカーなし)	±5.0cm	絶対

表 1-3 各衛星系の運用衛星数⁴⁾

衛星測位システム	運用国・組織	運用・計画衛星数
GPS	アメリカ	24機+予備8機
GLONASS	ロシア	24機
Galileo	EU	30機
BeiDou	中国	35機
QZSS	日本	4機

が全世界で実用可能な衛星数に達しており、今後、新たな民生専用電波の追加など、システムの近代化を推進している。また、EUが計画するGalileo、中国が計画するBeiDou、そして日本が計画する準天頂衛星システム(QZSS: Quasi-Zenith Satellite System)についても試験運用を開始しており、2020年頃のシステムの完成を目標に開発が進行している。これらの衛星測位システムが予定通りに完成した場合、全部で120機以上の測位衛星が利用可能となり(表1-3)、全衛星系を併用することで、都市部や山間部などの衛星電波が遮蔽されやすい環境下でも、位置情報の取得に必要な衛星数を観測する可能性がある⁴⁾。

衛星測位システムを利用者側の立場から考えると、GPSだけでなく複数の衛星系を併用して測位ができれば、衛星の可視率改善による利便性の向上が期待できる。衛星測位を行うには、測位方式に関わらず4機以上の衛星から電波を受信する必要がある。都市部の道路上など上空が開けていない場所では、一つの衛星系で4機以上の衛星観測条件を達成するのは困難である。しかしながら、複数の衛星系の電波を受信して測位ができる場合、上記でも述べたが、利用可能な衛星数が飛躍的に増加するため、4機以上の衛星を観測できる可能性が増大し、上空視界の悪い場所でも測位が可能となる。実際には、各衛星系が準拠する時系と、衛星の配置条件によっては、4機以上の衛星を観測しても観測が困難となる場合があるが、都市部の交差点など部分的に低い高度角まで上空が開いているような場所では、複数衛星系を併用することで空の隙間に衛星が現れる確率が上昇するため、複数衛星系による併用測位は有効な手段である。

都市部などの上空視界の悪い場所では、上記でも述べたように、複数の衛星系を併用することで利便性の向上が期待できる。しかし、衛星数が増加しても解決できない問題として、マルチパスの影響を受ける受信電波の増加がある。マルチパスとは、建物の壁面にあたって反射した電波、建物を回折した電波等がアンテナに届く現象であり、衛星測位では誤差要因の一つとなっている。これは、測位方式に関わらず全ての衛星測位の精度に影響し、干渉測位方式による高精度な測位手法でも、測位時に数 cm オーダーの誤差を生じることがあり、状況によっては、高精度測位そのものが困難となり m オーダーの精度となる場合がある。ゆえに、複数衛星系の併用による可視率の改善効果を最大限に生かすには、マルチパス誤差の低減が不可欠であり、観測可能な全ての衛星を使用するのではなく、測位計算に使用する衛星電波を事前に選択する手法等が求められる。

1-2 研究目的

本研究では、高精度測位における利便性低下の主要因である、マルチパスの影響を受ける受信電波を検知し、RTK 方式に対応した衛星選択手法を構築することを目的とした。さらに、マルチパスの影響を受ける受信電波を排除して測位計算を行った場合、どの程度利便性が向上するのか、解析結果と観測衛星数等の測位条件を合わせて検証を行った。検証条件は、基準点測量等の高精度を必要とする測量作業を想定した静止時と、研究背景でも述べたように、高精度な車両の位置情報の取得を想定した移動時である。なお、衛星測位システムについては、GPS と GLONASS の 2 つを対象とした。

1-3 論文の構成

本論文は第1章から第8章で構成しており、各章の概要を次に示す。

「第1章 序論」では、本研究の背景と目的、本論文の構成を述べた。衛星測位システムの併用に関する利点と誤差要因となるマルチパスについて示し、それを受けて本研究の目的を明らかにした。

「第2章 衛星測位システムの概要と測位技術」では、現在運用中である GPS と GLONASS の概要について説明し、干渉測位方式とその誤差要因について説明する。測位方式については、解析等に使用されるデータフォーマットについても交えながら述べる。誤差要因については、電離層と対流圏による遅延誤差、受信機雑音とマルチパスによる測定値誤差の発生とその低減について明らかにする。

「第3章 衛星測位におけるマルチパス誤差とその削減」では、衛星測位においてマルチパス誤差が発生するメカニズムを受信機の内部処理の流れを交えながら述べ、さらに、反射波や回折波といったマルチパスとなる電波の伝搬特性について説明する。受信機内部処理によるマルチパスの抑制と観測値の一つである信号強度を用いたマルチパス検知についても言及し、さらに、衛星位置と地物位置からマルチパスを含む衛星電波を推定する手法を説明する。

「第4章 提案するマルチパス検知手法」では、第3章の内容を踏まえ、受信機から出力される観測値を使用し、マルチパスを検知する手法の提案を行う。マルチパスの影響を受けるものと想定される遮蔽物付近の観測点と、周囲に地物のないマルチパスの影響を受けない観測点に受信機を設置し、信号強度、疑似距離、搬送波位相データの取得を行いその傾向を比較する。周波数の異なる L1 波と L2 波の搬送波位相変化量の差の算出結果を確認することで、マルチパスの影響を受ける受信電波の検知が可能となることを示した。また、前述の内容を踏まえて簡易的な衛星選択手法を構築し、マルチパス除去を目的とした衛星選択効果を予め確認した。

「第5章 マルチパス検知手法の検証」では、第4章で示した受信機から出力される観測値の傾向を用いて、マルチパス検知手法を構築し、その検証を行う。マルチパスを検知する指標は2つであり、一つは信号強度を用いた指標、もう一つは位相変化量の差を用いた指標である。どちらも、基準局の観測値から得られた信号強度と位相変化量の差を基準値として指標を算出した。算出された指標の傾向に加え、衛星位置とその可視条件を確認することで、提案した手法がマルチパスの検知に有効であることを示した。

「第6章 静止時における衛星選択の効果」では、第5章で示したマルチパス検知手法を用いて実際に使用する衛星の選択を行い、その効果を基線解析結果より確認する。得られた解の割合、基準値からの分布のほか、解析に使用される衛星数を確認することで、提案手法を用いた場合の影響を分析している。マルチパスを含む受信電波を除外することで、高精度な測位解が得られる時間帯が増加することを述べるとともに、マルチパス検知手法と解析に使用する衛星数と関係についても示した。

「第7章 移動時における衛星選択の効果」では、車両の移動時に得られた観測値に対して、マルチパス検知指標による衛星選択を行い、その結果について説明している。遮蔽状況に応じて走行経路を分割し、各々の区間に対して衛星選択効果を分析している。マルチパスの影響を含む受信電波を除外することで、車両が走行した位置を正確に求めることができていることを述べている。また、観測可能な衛星数の少ない経路では、衛星選択効果が得られない場合が生じることも述べており、第6章で示した静止時の検証結果と同様、衛星選択後、基線解析に必要な衛星数を確保できる環境であれば、提案手法は有効な手段になると結論付けている。

「第8章 結論」では、各章の検証結果を踏まえ、位相変化量の差を利用した指標はマルチパスを検知できることに加え、マルチパスを含む受信電波の除去により測位結果の改善効果が得られることを述べる。また、これらの結果を受けて、提案したマルチパス検知手法は高精度移動測位において衛星選択指標の一つになりうることを述べ、最後に今後の展望を述べる。

第1章 参考・引用文献

- 1) 機械システム振興協会，日本自動車研究所：移動体用高精度位置標定システムに関する調査研究報告書（要旨），pp.10-12，2005.3.
<http://www.jari.or.jp/Portals/0/ja/kankohbutsu/hokoku/its/jissy/abstract/ichi04.pdf>
（入手 2012.7）
- 2) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：ハイブリッド型位置特定に関する技術資料，pp.2_2-2_6，2006.10.
- 3) 青木啓二，蓮沼茂，伊藤寛，鈴木尋善，野本和則，阿久津英作：自動運転・隊列走行分野における位置認識技術，日本自動車研究所 ITS 研究部，2013.3.
http://www.eiseisokui.or.jp/ja/pdf/seminar_01/01.pdf?PHPSESSID=aa9b22cf5acc97e3d092c748a1c7364c（入手 2013.12）
- 4) 土屋淳，辻宏道：GNSS 測定の基礎，日本測量協会，pp.17-24，2008.3.

第2章 衛星測位システムの概要と測位技術

2-1 GPSの概要

2-1-1 GPSの構成要素

GPSとは、地球を周回する衛星から送信される電波を地上の受信機で受信することにより、衛星から受信機までの距離を算出し、同時に電波内に含まれる衛星の位置情報をもとに受信機の3次元位置（緯度、経度、高さ）を計算するシステムである。衛星の運用を含めた全体の構成としては、図2-1に示すようにスペースセグメント、コントロールセグメント、そしてユーザセグメントの3つのセグメントから構成されている。スペースセグメントとはGPS衛星で構成され、コントロールセグメントは衛星の運用管理を司る地上施設、ユーザセグメントは軍用と民生のGPS受信機と開発に関連した活動で構成される。

(1) スペースセグメント

GPS衛星は、地上約20,200kmのほぼ円軌道を約11時間58分の周期で周回する24衛星より構成される。衛星は、赤道面に対して55°に傾斜（軌道傾斜角）した6つの軌道面に配置されており、各々に4機の主衛星と、1~2機の予備衛星を配備している。各衛星は2つの文字コードで識別されており、文字は軌道面（A~F）を数字は軌道面における衛星番号（主衛星は1~4、予備衛星は5~6）を識別する。現在の衛星配置では、上空の開けている場所にいるほとんど全てのユーザが、いつでも4衛星から8衛星を同時に観測することができ、場合によっては9衛星以上を観測することができる。

(2) コントロールセグメント

コントロールセグメントの心臓部は主制御局（master control station : MCS）であり、アメ

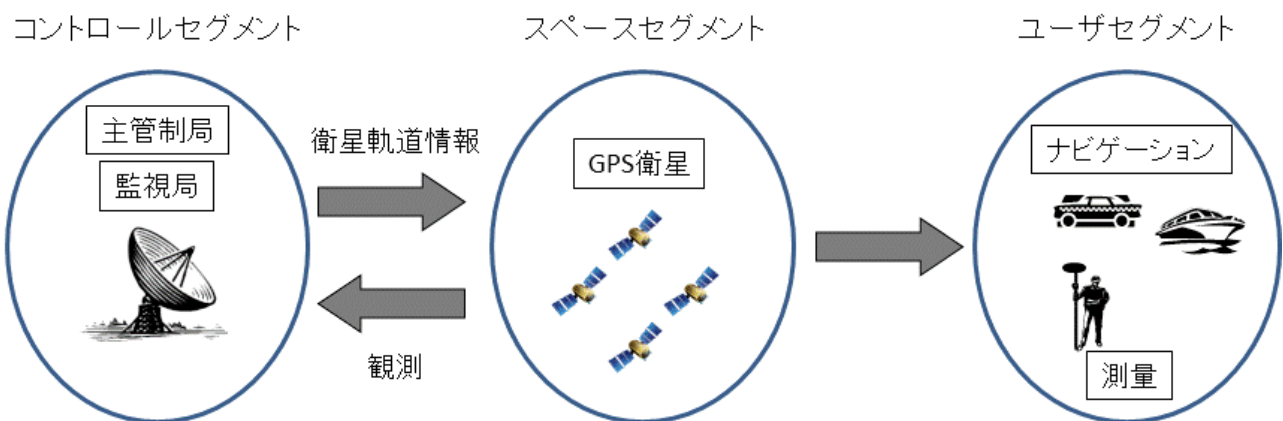


図2-1 GPSシステムの全体構成

リカ合衆国のコロラドスプリングスにあるシュライバー空軍基地にある。主制御局では、システムの運用、衛星への指令と制御を行っており、主な機能は以下の通りである。

- 衛星軌道の監視
- 衛星健康状態の監視と維持
- GPS 時間の維持
- 衛星のエフェメリス（軌道情報）と時計パラメータの推定
- 衛星の航法メッセージの更新
- 軌道を維持するために衛星を少し操縦する指令
- 故障した衛星を補うための配置転換

衛星の信号は、ケープカナベラル、ハワイ、コロラドスプリングス、南大西洋のアセンション島、インド洋のディエゴ・ガルシア、北太平洋のクワジャリに置かれた監視局により連続的に追跡されている。これら監視局は無人のものが多く、主制御局から遠隔で運用するため、主にセシウム標準を持つ数台の GPS 受信機、気象観測装置、そして地上回線と衛星回線経由で主制御局へ測定値を伝送するための通信装置で構成される。

（３） ユーザセグメント

GPS の民生利用が大規模に拡大したのは集積回路の革新に負うところが非常に大きい。1980 年代中盤には最初に精密測位用に設計された受信機が発売されたが、10 万ドル以上の価格であった。現在では、もっと高性能な受信機でも 1 万ドル以下で得ることができ、ナビゲーション等の高精度を必要としない受信機であれば、さらに安価な価格で入手することができる。

上記にも示したが、GPS 受信機は大きく分類すると、単独測位用受信機と干渉測位用受信機がある。前者は受信機 1 台で測位する方式で測位精度は 10m 程度であり、自動車や船舶のナビゲーションに用いられる。後者は受信機を 2 台以上用いて受信機間の基線を測位する方式であり、前者と比較し数 ppm の精度が得られるため測地と測量に利用される。

2-1-2 GPS の信号構成

（１）GPS の送信電波

GPS 衛星から送信される電波は、L1 波（搬送波周波数：1575.420MHz）と L2 波（搬送波周波数：1227.600MHz）という 2 種類の搬送波であり、これらの電波には、受信機から衛星までの距離を測るため 2 種類のデジタル信号が変調して送信されている。各々のデジタル信号は、C/A（Clear and Acquisition code）コード、P コード（Precision code）と呼ばれ、各衛星に 0 と 1 の固有の系列を割り当てることで衛星電波の識別を可能としている。この系列は、PRN コードと

呼び、数学的に配列を考慮することで、全ての衛星が干渉することなく同一の周波数で送信できる特性を持っている。これを符号分割多元接続（CDMA：Code Division Multiple Access）方式という。

C/A コードの系列については、チップと呼ばれる 1023bit の固有の系列であり、繰り返し周期が 1ms (10^{-3} s) である。これに対応して、波長は約 300m であり、チップレートは 1.023MHz である。一方、P コードの系列については、チップレートは 10.23MHz で、C/A コードの 10 倍であり、波長は約 30m である。P コードの波長は、C/A コードよりも短いため距離測定はより精密になる。なお、C/A コードは民生ユーザに対して開放されているが、L1 波にのみ変調されており、P コードは L1 波、L2 波の両方に変調されているが、アメリカ合衆国の軍関係者にのみ利用を限定すべく、Y コードと呼ばれる P コードの暗号化版を送信している。

上記のデジタル信号のほか、L1 波には航法メッセージが C/A コードに重畳されて送信されている。メッセージは二進数で、衛星の健康状態、エフェメリス (ephemeris：衛星の位置と速度)、衛星時計補正パラメータ、そして配備されている全ての衛星のアルマナック (almanac：精度の悪いエフェメリス) より構成されている。メッセージ全体を読むには、12.5 分の受信時間が必要であり、測位に欠かすことのできない衛星のエフェメリスと衛星時計補正パラメータは、30 秒毎に繰り返し送信されている¹⁾。

(2) GPS 衛星の種類と近代化

GPS 衛星には、ブロック I、ブロック II、ブロック II A、ブロック II R、ブロック II R-M、ブロック II F、ブロック III といったさまざまなタイプがある。現在、地球を周回している GPS 衛星はブロック II シリーズであり、搭載されたルビジウム (Rb) やセシウム (Cs) を用いた原子時計により極めて正確な周期で電波と信号を地上に向けて送信している。ブロック II シリーズに関しては、1989 年から打ち上げが行われており、1990 年からはブロック II に相互通信機能を追加したブロック II A (A は advanced：進歩の意)、1997 年からはブロック II A の通信機能を強化したブロック II R (R は replenishment：補充の意) の打ち上げが行われた。2005 年以後、ブロック II R-M (M は Modernized：近代化の意) という新軍用測位コード (M コード) と新民生測位符号 L2C (CM, CL) を搭載した衛星の打ち上げが行われた。

衛星の設計寿命は限られているため、衛星を更新して近代化することが可能となる。近代化の骨子は以下の諸点に要約される。

- 近代化の過程で軍民用とも現在の受信機の動作を保証
- 新軍用測位コード (M コード) の開設
- 軍専用波 L2 の一般開放
- 新民生専用波 L5 (1176.450MHz) の開設
- 民生用新測位符号と新工法データの開設

M コードの開設, および L2 の民生測位符号 L2C の一般開放については, 上記に示したブロック II R-M から開始されている. L2C 公開以前の L2 波も, 実質的に使用されてはいるが, 暗号化された P (Y) コードに対して無理な処理を行う必要があり, 受信感度が低くなる問題があった., 新民生専用波 L5 については, 近年打ち上げられたブロック II F (F は follow on : 後に続くの意) より搭載されており, 民生測位符号 L5C の放送が開始されている. 今後, L1 搬送波に新たな民生測位符号 L1C を搭載したブロック III が投入される予定であり, 2030 年頃までに軌道上の全ての衛星から近代化信号が放送される予定である. 表 2-1 に GPS 衛星の主要な特徴を示す²⁾.

表 2-1 GPS 衛星の主要な特徴²⁾

主要衛星数、予備衛星数	24衛星、予備8衛星
軌道面数	6面(各面に5~6衛星配置)
軌道高度	約20,200km
軌道の離心率	ほとんど0(円軌道)
軌道傾斜角	55°
周期	約11時間58分
搭載原子時計	ルビジウム、セシウム
時系	GPS時
信号方式	CDMA
衛星の設計寿命	ブロック II、II A : 7.5年 ブロック II R、II R-M : 10年 ブロック II F : 12年
無料開放される搬送波	L1 : 搬送波周波数 = 1575.420MHz L2 : 搬送波周波数 = 1227.600MHz L5 : 搬送波周波数 = 1176.450MHz
測位符号	C/A : 民生用コード P(Y) : 軍用コード M : 新軍用コード L1C : L1の民生コード L2C : L2の民生コード L5C : L5の民生コード

2-2 GLONASS の概要

2-2-1 GLONASS の構成要素

GLONASS とは、GPS と同様に衛星からの電波を地上の受信機で受信し 3 次元位置を計算するシステムである。また、システムの全体構成についても同様にスペースセグメント、コントロールセグメント、そしてユーザセグメントの 3 つに分けられる。ここでは、GPS と異なるスペースセグメントとコントロールセグメントについて説明する。

(1) スペースセグメント

GLONASS 衛星は、GPS よりも低い地上約 19,100km の円軌道を約 11 時間 15 分の周期で周回する 24 衛星より構成される。衛星は、赤道面に対して 64.8° に傾斜した 3 つの軌道面に配置されており、各々に 8 機の稼働衛星と 1~2 機の予備衛星を配置している。現在の衛星配置では、地球上の 99% の範囲で少なくとも 5 衛星の同時、連続的な観測が可能である。

(2) コントロールセグメント

コントロールセグメントは、システム管制センター、中央シンクロナイザー、TT&C (Telemetry, tracking and command) 局の 3 つに分けられている。

1) システム管制センター

主管制御局となるシステム管制センターは、モスクワの南西部約 70km の krasnoznamensk 宇宙センターに設置されており、GLONASS の運用とコントロールセグメント全体の機能を調整している。

2) 中央シンクロナイザー

中央シンクロナイザーは、モスクワの Schelkovo に置かれており、GLONASS 時に関する責任を負っている。中央シンクロナイザーでは、2 種類の観測が行われており、1 つは衛星までの距離観測で電波による数 m 精度の観測であり、もう 1 つは、衛星から送信される航法減法と中央シンクロナイザーの信号比較で、 1×10^{-13} の精度で時刻と位相が比較観測されている。これらの観測値より、衛星時計の時刻と位相のオフセット量が決定あるいは予測され、その予測値を 1 日に 1 回は衛星に送信している。

3) TT&C

TT&C 局はサンクトペテルブルクとモスクワの Schelkovo、シベリアの Yenisseyk、極東の komsomolsk-na-Amure の 4 箇所に設置されている。また、TT&C 局の補足施設として、5 つの

レーザー局が komsomolsk-na-Amure とカザフスタンの Balkhash, ウクライナの Evpatoria と Ternopol, ウズベキスタンの Kitab に置かれている。これらの役割は衛星の追尾監視と管制センターからの情報の衛星への伝送である。

2-2-2 GLONASS の信号構成

(1) GLONASS の送信電波

GLONASS から送信される電波は、GPS と同様に L1 波と L2 波であり、測位符号も C/A コードと P コードであるが、その内容は全く異なる。もっとも大きな違いは、衛星の信号を区別するのに、周波数分割多元接続 (FDMA : Frequency Division Multiple Access) 方式が使われている点である。これにより、GLONASS は衛星ごとに異なる周波数で搬送波を送信しており、各々衛星には、次式で定義される周波数が割り当てられる。

$$f_{L1} = (1602.0 + 0.5625k) \quad (2-1)$$

$$f_{L2} = (1246.0 + 0.4375k) \quad (2-2)$$

f_{L1} : L1周波数帯 (MHz) f_{L2} : L2周波数帯 (MHz) k : チャンネル番号

2013 年現在、周波数チャンネルは $k = -7 \sim +6$ の内の 12 チャンネルが使われている。主衛星 24 機に対してチャンネル数が不足しているが、同じ軌道面上で対極的な位置にいる衛星に同じチャンネル番号を割り当てることで解決している。そのため、予備衛星に対しては、チャンネル番号を割り当てておらず、電波の送信は行われていない。

C/A コード、P コードの系列については、FDMA 方式のため、全ての衛星で同じ PRN コードが使われている。また、チップレートは、C/A コードで 0.511MHz、P コードで 5.110MHz と GPS のおよそ半分であり、L1 波、L2 波の両方に変調が行われている。なお、P コードについては、GPS と同様に軍関係者にのみ利用を限定する軍用測位コードであるが、現在は実質的に解禁されている。

航法メッセージについては、C/A コードと P コードにそれぞれ異なるメッセージで変調されており、スーパーフレームとフレームで構成されている。どちらも、衛星の軌道情報、補正情報等が含まれており、P コードの航法メッセージは、C/A コードよりも多くの精密情報が含まれている。メッセージの送信は、C/A コードは 30 秒毎、P コードは 10 秒毎に繰り返し行われており、全ての衛星の情報の送信には、C/A コードの場合 2.5 分、P コードの場合 12 分かかる。

(2) GLONASS 衛星の種類と近代化

GLONASS 衛星には、グロナス、グロナス-M、グロナス-K、グロナス-KM といったタイプがある。現在、地球を周回している GLONASS 衛星はグロナス-KM を除く 3 タイプであり、セシ

ウムを用いた高精度な原子時計が搭載されている。グロナスについては、1982年に最初の衛星が打ち上げられており、2003年からはグロナスの設計寿命を7年に延ばしたグロナス-M（MはModified：修正の意）、2011年にCDMA方式のL3波を追加したグロナス-Kが打ち上げられた。GLONASSの近代化の骨子は以下の諸点に要約される。

- 設計寿命の長い新型衛星の投入
- 民生用波L3の開設
- CDMA方式の検討

設計寿命については、グロナス-Mより7年以上となり、GPSのブロックII以降と同等の寿命を確保している。また、民生用波L3、CDMA方式の検討については、グロナス-Kより開始しており、今後配備予定の衛星としてグロナス-KMが計画されている。表2-2にGLONASS衛星の主要な特徴を示す²⁾。

表 2-2 GLONASS 衛星の主要な特徴²⁾

主要衛星数、予備衛星数	24衛星、予備5衛星
軌道面数	3面(各面に8~10衛星配置)
軌道高度	約19,100km
軌道の離心率	ほとんど0(円軌道)
軌道傾斜角	64.8°
周期	約11時間15分
搭載原子時計	セシウム
時系	GLONASS時(UTC:協定世界時)
信号方式	FDMA
衛星の設計寿命	グロナス : 3年 グロナス-K : 7年 グロナス-M : 10年
無料開放される搬送波	L1 : 搬送波周波数 = 1602.000MHz L2 : 搬送波周波数 = 1246.000MHz L5 : 搬送波周波数 = 1204.704MHz
測位符号	C/A : 民生用コード P : 軍用コード

2-3 衛星測位システムによる高精度測位技術

2-3-1 衛星測位の種類

衛星測位による方式は、大きく2つに分けられ、受信機1台で測位を行う単独測位方式と、受信機を2台以上用いて誤差を取り除く相対測位方式がある。相対測位とは、2台の受信機を用いて点間の基線ベクトルを求めるものであり、この方式を用いることで電離層・対流圏の影響による伝搬遅延を含めた誤差を打ち消すことができ、高精度に測位することができる。中でも、相対測位のうち搬送波を用いた干渉測位では、mmオーダーの極めて高精度な測位が可能となる。図2-2、表2-3に測位方式の種類と特徴を示す⁴⁾。

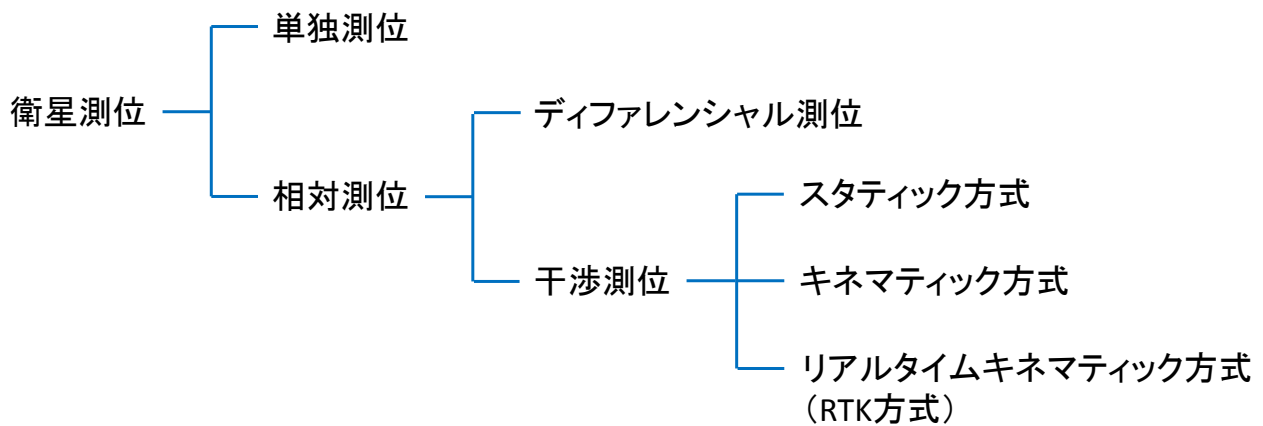


図2-2 衛星測位方式の種類⁴⁾

表2-3 各衛星測位方式の特徴⁴⁾

仕様	単独測位	相対測位			
		ディファレンシャル測位	干渉測位		
			スタティック方式	キネマティック方式	リアルタイムキネマティック方式 (RTK方式)
観測時間	リアルタイム	リアルタイム	20分～2時間	リアルタイム	リアルタイム
水平精度	約10m	約0.5m～2m	5mm+1ppm・D	20mm+2ppm・D	20mm+2ppm・D
観測信号	コード	コード	搬送波	搬送波	搬送波
特徴	小型・安価	中精度が容易に得られる	高精度測位 (静止)	移動体を高精度測位 (後処理)	移動体を高精度測位 (リアルタイム)

2-3-2 干渉測位の原理

(1) 搬送波位相測定値

ここでは、搬送波を用いて測位を行う干渉測位について説明する。

受信機で得られる搬送波位相測定値は、衛星から受信した搬送波の位相と、受信機が生成した搬送波の位相との測定瞬間時における差である。いかなるタイミングで受信した位相も、搬送波の伝搬時間から放送時の位相に関連させることができる。よって、搬送波位相測定値は、衛星から受信機までの直接の距離情報ではなく、伝搬時間にあいまいさを含んだ測定値である。

まず、衛星と受信機間の相対運動がなく、双方の時間が完全に同期している場合を考える。この場合、搬送波位相測定値は1サイクルの余り値に固定されており、衛星受信機間の距離は、未知のサイクル数と測定された1サイクルの余りの和として計算される。しかし、受信機が検出できるのは、0 から 2π までの位相角、すなわち波数の小数部の値であり、全サイクル数、すなわち波数の整数部の値に関する情報は含まれていない。この未知の情報は、整数不定性 (integer ambiguity) と呼ばれている。

次に、衛星と受信機間の距離差が1波長ごとに大きくなるように動いている間、搬送波位相が追尾されている場合を考える。搬送波位相測定値は増加したサイクル数と移動が始まる前に測定された1サイクルの余りとの和として計算される。そのため、受信機では搬送波位相を測定するために位相ロックを行い、受信した搬送波と生成した搬送波との初期位相差を測定し、その後、測定間での変化分を追跡する。この変化分を一定時間積分することにより、衛星と受信機間の波数の変化量を計測することができる。干渉測位用受信機の機能の概念図を図2-3に示す。干渉

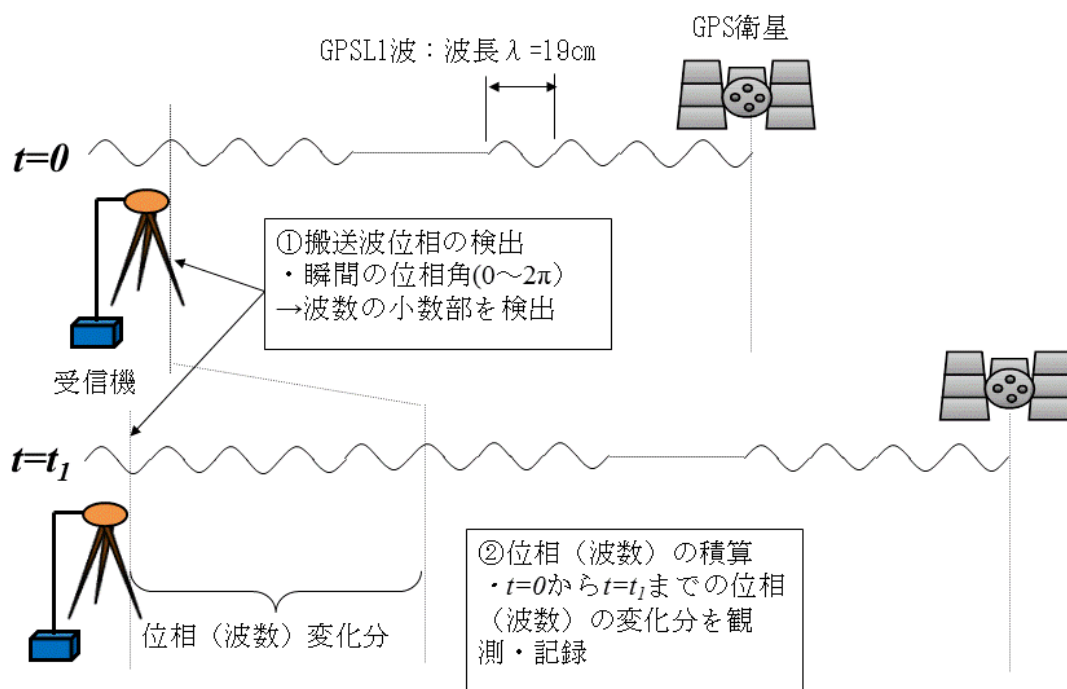


図 2-3 搬送波位相の検出と位相の積算⁵⁾

測位用受信機では、ある時刻からある時刻までの変化分、すなわち積算値が観測値であり、干渉測位の基本的なデータ処理では、ある程度の時間、衛星電波を観測して積算値データを多数揃えて解析する手法がとられる。

一方、位相積算値は、さきほどでも述べたように、伝搬時間にあいまいさを含んだ測定値であり、これは、受信機時計の誤差と衛星時計の誤差によるものである。干渉測位用受信機では衛星からの搬送波を受信機時計のタイミングに合わせて位相角を測定しており、これには受信機時計の誤差が含まれている。また、衛星からの搬送波到達のタイミングには衛星時計の誤差が含まれている。さまざまな測定誤差、時計の誤差、初期位相のオフセットを考慮すると、位相は次のように表される。

$$\phi(t) = \lambda^{-1}[r + I_\phi + T_\phi] + \frac{c}{\lambda}(\delta t_u - \delta t^s) + N + \varepsilon_\phi \quad (2-3)$$

$\phi(t)$: 時刻 t での位相 (Cycle) λ : 波長 (m) r : 衛星受信機間の距離 (m)

I_ϕ : 電離層遅延 (m) T_ϕ : 対流圏遅延 (m) c : 光速 (m/s)

δt_u : 受信機時計誤差 (s) δt^s : 衛星時計誤差 (s)

N : 整数不定性 ε_ϕ : 初期位相のオフセット

時計の誤差の大きさは数 ns (10⁻⁹s) であり、電波の進む距離に直すと 1m 前後の誤差に相当する。単独測位等の m オーダーの精度であれば無視できるレベルではあるが、mm オーダーの精度を持つ干渉測位では誤差として扱う必要がある¹⁾⁵⁾。

(2) 差分観測による時計誤差の消去

受信機時計、および衛星時計の誤差を消去するためには、距離の差分をとる操作を行う。そのため、受信機 2 台 (受信機 A, 受信機 B)、衛星 2 機 (衛星 1, 衛星 2) の組合せを基本に考える。まず、時刻 $t = t_1$ における衛星 s 、受信機 u 間の真の距離 $\rho(s; u)$ は、次のように表される。

$$\rho(s; u) = \{N(s; u) + \phi(s; u)\}\lambda - c\delta t_u - c\delta t^s \quad (2-4)$$

$\rho(s; u)$: 真の距離 (m) $N(s; u)$: 整数不定性 $\phi(s; u)$: 位相積算値

一方、 $\rho(s; u)$ は衛星と受信機の座標から、次の式で表すことができる。

$$\rho(s; u) = \{(X_u - X_s)^2 + (Y_u - Y_s)^2 + (Z_u - Z_s)^2\}^{1/2} \quad (2-5)$$

X_u, Y_u, Z_u : 受信機の 3次元座標 (m) X_s, Y_s, Z_s : 衛星の 3次元座標 (m)

なお、任意の時刻における衛星 1 および衛星 2 の座標 (X_1, Y_1, Z_1) , (X_2, Y_2, Z_2) は航法メッセー

ジの情報から求められる。

ここで、式(2-4)から衛星1と受信機Bの距離から、衛星1と受信機Aとの距離の差をとると、次のように表される。

$$\begin{aligned} \rho(1;B) - \rho(1;A) &= \{N(1;B) - N(1;A)\}\lambda + \{\phi(1;B) - \phi(1;A)\}\lambda \\ &\quad -c(\delta t_{uB} - \delta t_{uA}) \end{aligned} \quad (2-6)$$

式(2-6)より、差をとることで衛星時計の誤差の項が消えることがわかる。この距離差を行路差と呼び、位相積算値の差を受信機間一重位相差と呼ぶ(図2-4)。

同様に衛星2と受信機Bの距離から、衛星2と受信機Aの距離との差をとり、その結果を式(2-6)から引くと、次のように表される。

$$\begin{aligned} \rho(2;B) - \rho(2;A) - \rho(1;B) + \rho(1;A) \\ &= \{N(2;B) - N(2;A) - N(1;B) + N(1;A)\}\lambda \\ &\quad + \{\phi(2;B) - \phi(2;A) - \phi(1;B) + \phi(1;A)\}\lambda \end{aligned} \quad (2-7)$$

式(2-7)は、行路差の差を表しており、衛星時計の誤差に加えて受信機時計の誤差の項が消えることがわかる。このとき、位相積算値の差の項を二重位相差という(図2-5)。

(3) 二重位相差による未知点座標の算出

式(2-7)より、受信機Aの位置を既知とすると、左辺は $\rho(1;A)$ と $\rho(2;A)$ は既知であり、未知数は $\rho(1;B)$ と $\rho(2;B)$ に含まれる、受信機Bの3次元座標(X_B, Y_B, Z_B)の3個となる。一方、右辺は整数不定性の項と位相積算値の項である。整数不定性を別途の計算により求められたとすると、

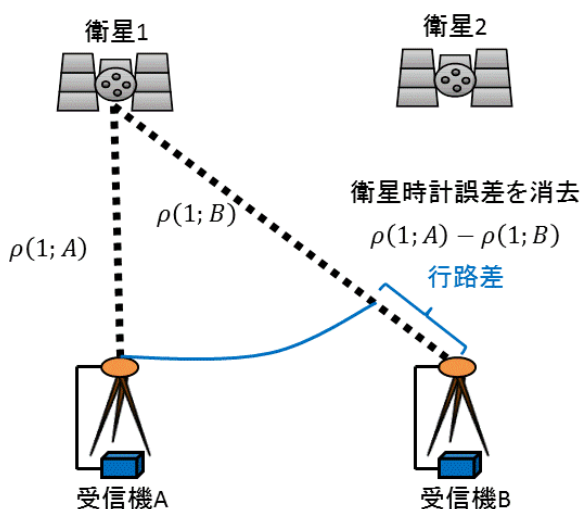


図2-4 行路差と受信機一重位相差⁵⁾

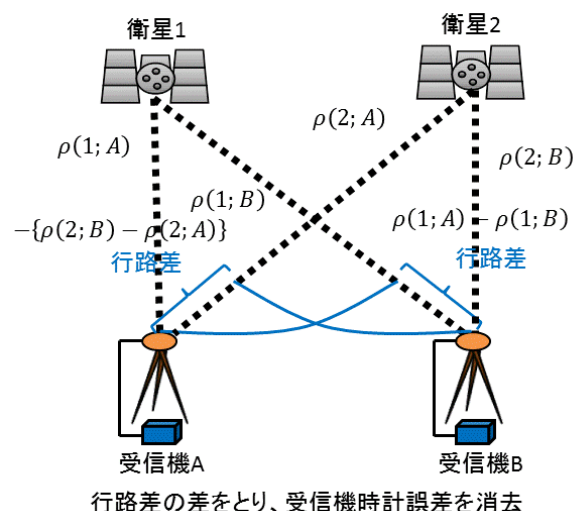


図2-5 行路差の差と二重位相差⁵⁾

位相積算値の項は観測値であり既知であるため、式(2-7)に含まれる未知数は3個である。3個の未知数を解くには、式(2-7)で示される二重位相差の方程式を3個以上つくる必要がある。観測する衛星数を n とすると、線形独立な二重位相差の式は $n-1$ 個となり、未知数を解くためには4機以上の衛星から電波を受信する必要がある(図2-6)。

未知点座標の算出には複数の時刻での観測値から二重位相差を計算し最小二乗法で求める。二重位相差を求めるには両方の受信機で同時に同じ衛星を観測する必要がある。

(4) 整数不定性の推定

整数不定性については、ディファレンシャル測位による観測距離によりある程度絞り込まれる。ディファレンシャル測位による観測距離は精度0.5m程度で求めることができる。GPSのL1波を例に考えると、L1波の波長は約19cmであることから、整数不定性の候補はディファレンシャル測位の観測距離から求まる N に対して ± 3 の範囲に絞り込まれる。その組合せ毎に式(2-7)を最小二乗法によって計算し、残差が最小となる組合せを決定する。その際、推定値に対して統計的な検証を行い、衛星と受信機間の距離変化に伴い計算を繰り返しても大きく変化しない場合、その推定値を波数の整数値として確定する。このような整数不定性 N を求めることを初期化という。なお、推定値に対して良好な検証結果が得られない場合は実数値のままとなる。

整数不定性 N が確定すると、式(2-7)から受信機Bの3次元座標が求められる。整数不定性 N が整数値として確定した場合の解をFix(フィックス)解と呼び、バイアス値が実数値のままの場合の解をFloat(フロート)解と呼ぶ。Float解となる要因は、観測時間が短い場合や衛星電波の受信状態など、観測条件が十分でない場合に起因する。Fix解の精度は5mm~20mmであり、Float解の精度は10cm~数mになるため、測量等の実務ではFix解のみが用いられる⁵⁾。

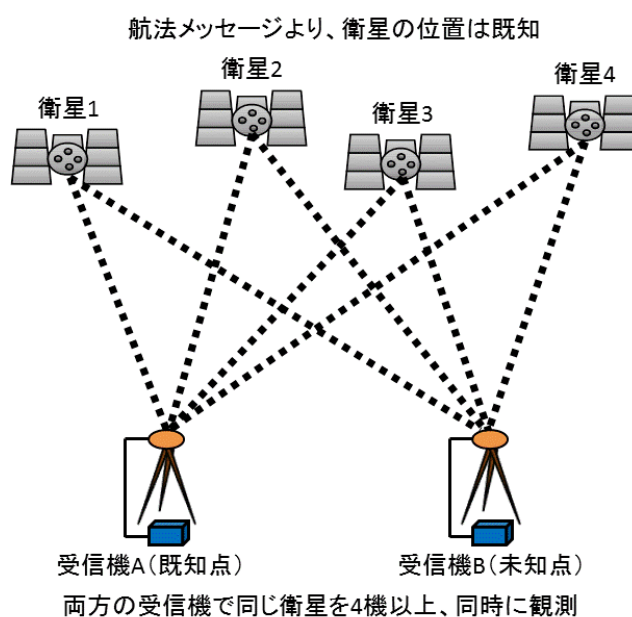


図2-6 未知点座標の測定方法⁵⁾

2-3-3 スタティック方式

3次元位置座標が既知の点と計測したい未知の点に受信機を複数台設置し、搬送波位相積算データを中心とする観測データを既知点と未知点で同時に取得して後処理で測位計算を行う方式である。データ取得間隔（エポックという）を30秒以下に設定して積算値の記録を行い、観測終了後に既知点、未知点の観測データをパソコンに転送して、データ取得時毎に観測衛星の3次元座標計算と二重位相差の計算を行う。そして、式(2-7)から最小二乗法により測位計算を行い未知点座標の計算を行う。なお、観測の開始から終了までの一連の流れをセッションという。

整数不定性の推定は、スタティック方式の場合、衛星の移動を利用して行う。図2-7に示すように整数不定性の組合せ毎の未知点座標の候補は、搬送波の波長毎の立体格子点でイメージされる。真の未知点座標は衛星が移動しても動かないという性質を使って整数不定性と未知点座標の決定を行う。この方式では、衛星が十分移動する必要があるため、通常は60分、既知点と未知点の基線長が10km以上の場合は120分以上の観測を行う。長時間の観測データが平均化されるため、測位精度は干渉測位の中で最も高い。測位精度はL1波、L2波を受信可能な2周波受信機の場合、 $5\text{mm} + 1\text{ppm} \cdot D$ （Dは基線長）となる。なお、観測衛星が5機以上の場合、エポックを15秒以下、観測時間を20分以上として行う短縮スタティック方式もある⁵⁾。

なお、観測データについては、基本的には受信機に依存した独自フォーマットとなるが、近年では、データ交換を容易にするため、独自フォーマットをRINEXフォーマット（Receiver independent exchange format: 受信機に依存しない交換用データフォーマット）に変換するソフトウェアを各受信機メーカーが公開している。RINEXフォーマットは、1989年に最初に定義され、バージョン2.00よりGLONASSも扱えるように拡張された。2013年現在、RINEXの最新バージョンは3.02であり、GPS、GLONASSの新生用波に加えて、Galileo、BeiDou、QZSSのシ

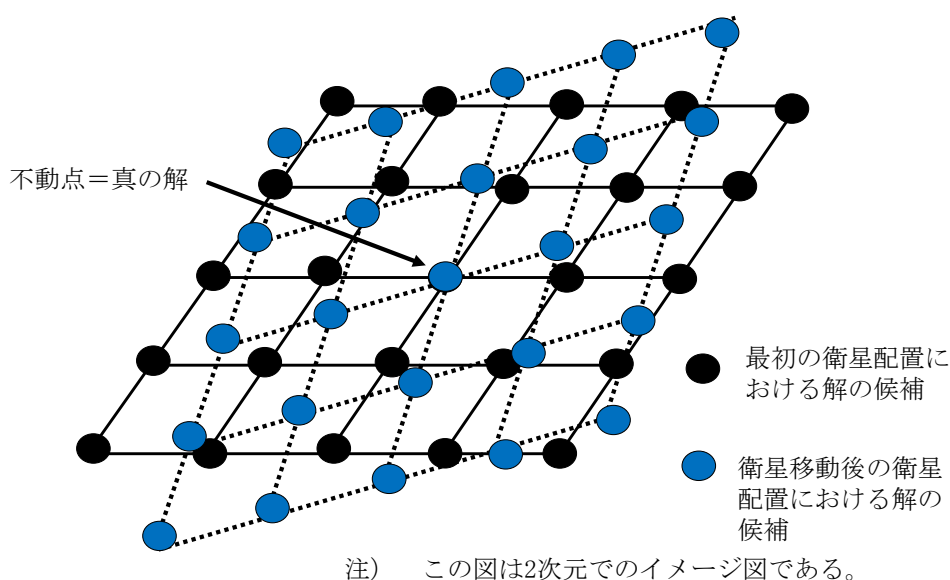


図2-7 衛星移動を利用した整数不定性の探索⁵⁾

システムにも対応している 3)6).

RINEX には、観測データファイル、航法メッセージファイル、気象データファイルなどが存在し、ASCII 形式のファイルに記録される。それぞれのファイルは、図 2-8 に示すようにヘッダ一部とデータ部からなり、観測データファイルの場合、ヘッダ一部には受信機名、観測開始時刻、衛星システムに応じた観測コードが定められ、データ部には追尾中の衛星数、観測コードに応じた疑似距離、搬送波位相、信号強度等の基本的な観測値が含まれている。また、観測値の前に衛星システムの識別子と衛星番号 (PRN コードなど) を含めることで、RINEX では衛星の識別を可能にしている。図 2-9 に RINEX3.02 の観測データファイルの一例を示す。

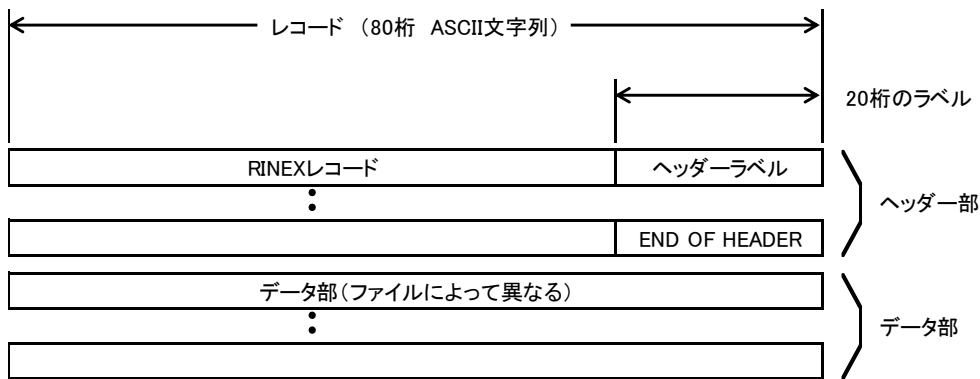


図 2-8 RINEX ファイルの構成 7)

<pre> 3.02 OBSERVATION DATA M (MIXED) RINEX VERSION / TYPE SPS855 4.81 Receiver Operator 18-OCT-13 05:35:27 PGM / RUN BY / DATE CREFO001 MARKER NAME GEODETTIC MARKER TYPE GNSO Observer Survey Agency OBSERVER / AGENCY 5222K85752 Trimble SPS855 4.81 REC # / TYPE / VERS TRM55971.00 NONE ANT # / TYPE 0.0000 0.0000 0.0000 APPROX POSITION XYZ 0.0001 0.0000 0.0000 ANTENNA: DELTA H/E/N G 12 C1C L1C S1C C2W L2W S2W C2X L2X S2X C5X L5X S5X SYS / # / OBS TYPES R 9 C1C L1C S1C C1P L1P S1P C2P L2P S2P SYS / # / OBS TYPES E 9 C1X L1X S1X C5X L5X S5X C7X L7X S7X SYS / # / OBS TYPES J 12 C1C L1C S1C C1X L1X S1X C2X L2X S2X C5X L5X S5X SYS / # / OBS TYPES C 9 C2I L2I S2I C7I L7I S7I C6I L6I S6I SYS / # / OBS TYPES 1.000 INTERVAL 2013 10 18 5 35 27.00000000 GPS TIME OF FIRST OBS G L2X -0.25000 SYS / PHASE SHIFT R L1P 0.25000 SYS / PHASE SHIFT R L2C -0.25000 SYS / PHASE SHIFT J L2X -0.25000 SYS / PHASE SHIFT GIOVE-A if present is mapped to satellite ID 51 COMMENT GIOVE-B if present is mapped to satellite ID 52 COMMENT DBHZ SIGNAL STRENGTH UNIT END OF HEADER > 2013 10 18 5 35 27.00000000 0.0000000000000 R06 21144968.016 8 112833612.88418 49.100 21144967.566 7 112833579.88217 47.600 R07 19193158.992 8 102742495.95218 49.300 19193158.164 8 102742483.97518 48.400 G02 24765792.008 7 130145139.26117 42.300 24765799.961 4 101411846.40614 24.600 G04 21280605.633 7 111830361.62817 47.700 21280611.398 6 87140579.30216 37.500 R23 23354075.906 7 124928574.53717 43.300 23354075.098 7 124928570.53517 42.200 R08 21631942.953 7 115838498.96617 47.700 21631940.586 7 115838488.98317 46.600 G12 24949812.664 6 131112135.11716 38.100 24949820.996 3 102165352.13513 21.300 R21 20260360.984 8 108417270.90618 50.200 20260358.754 8 108417263.90918 48.100 R20 23931429.453 6 127972087.77016 37.300 23931428.477 5 127972036.75415 35.200 R22 19599384.063 8 104622851.88218 52.200 19599383.160 8 104622843.89818 50.000 G17 20237623.445 8 106349429.94518 51.100 20237628.281 7 82869706.79117 44.600 G28 23573706.586 6 123880584.17816 40.000 23573716.793 3 96530331.29113 22.900 G13 22557709.391 7 118541643.77017 45.800 22557715.434 5 92370181.45615 30.800 G10 21741481.859 7 114252337.53317 46.500 21741489.047 5 89027861.71115 35.100 J01 38702994.219 8 203385585.25018 48.400 38702996.293 8 203385593.25218 50.000 G01 24146253.648 6 126889425.57416 41.600 24146265.852 4 98874921.83314 24.700 G32 25360925.258 6 133272528.68016 40.500 25360933.566 3 103848745.90213 21.300 G20 21917714.750 7 115178361.11817 47.700 21917719.727 5 89749387.35115 34.200 G23 22104965.625 8 116162397.96918 48.200 22104969.203 6 90516181.70516 36.000 C01 37176164.922 6 193586055.06016 39.900 C04 37615536.000 6 195873960.42816 39.200 > 2013 10 18 5 35 28.00000000 0.0000000000000 R06 21145594.656 8 112836954.825 8 49.100 21145593.148 7 112836921.822 7 47.900 R07 19193127.352 8 102742328.684 8 49.500 19193126.523 8 102742316.686 8 48.600 </pre>	<p>RINEXバージョン、受信機名、観測日時等</p> <p>衛星システムに応じた観測コード</p> <p>ヘッダ一部</p> <p>データ部</p> <p>観測値：疑似距離、搬送波位相、信号強度 (データの並びは観測コードに対応)</p> <p>観測値の前に識別子(アルファベット1文字)と衛星番号(数字2文字)を表示</p>
---	---

図 2-9 RINEX による観測データファイルの一例

2-3-4 キネマティック方式

既知点に基準局の受信機を設置し、ユーザの受信機は移動局として移動しながら順次位相積算値データを取得し、後処理で基準局と移動局のデータを用いて測位計算を行う方式である。

整数不定性の推定は、キネマティック方式の場合、受信機が移動するため、スタティック方式のような衛星の移動を利用した方法は使用できない。そのため、従来は移動局が基準局から出発する方法と、アンテナスワップという既知点の近傍に仮点を設けて固定アンテナと移動アンテナを入れ替えて数秒ずつ観測する方法が用いられていたが、現在ではさらに効率の良い OTF (on the fly: オンザフライ) の実用化によって、そちらの推定手法が主に用いられている。OTF とは、移動局のいかなる運動形態（静止、移動）にも対応できるという意味であり、任意の場所に移動しながらでも短時間で整数不定性を解く方法の総称である（図 2-10）。

OTF では、最小二乗法を用いて整数不定性を推定する場合、上記でも述べたように長時間の衛星観測による方法は使用できないため、観測衛星数を増やして処理を行う。すなわち、数エポックのデータでも最小二乗法による処理ができるように最低でも 5 衛星以上を観測する必要がある。また、短時間で整数不定性を決定するには、組合せの探索範囲をさらに小さく絞り込む必要がある。これには、周波数の異なる搬送波の位相差により生成されるワイドレーンを用いることで組合せ数を絞り込み、探索時間を削減することができる。このワイドレーンを生成するため、キネマティック方式では L1 波、L2 波が受信可能な 2 周波受信機を必要とし、測位精度は $20\text{mm} + 2\text{ppm} \cdot D$ となる。使用する受信機は、スタティック方式などで使用するものと同じ機器で観測可能であり、エポックも測位方式の特性上短く設定することができる。通常は 1 秒間隔（1Hz）であるが、受信機の性能、基線解析に用いるソフトウェアによってはさらに短いエポック（0.1 秒間隔：10Hz や 0.02 秒間隔：50Hz など）に設定することもできる。

なお、キネマティック方式において、移動局の速度が速いことにより、受信記録が追従できないのではないかと懸念は理論的にはほとんどない。地上用受信機をそのままジェット機やロ

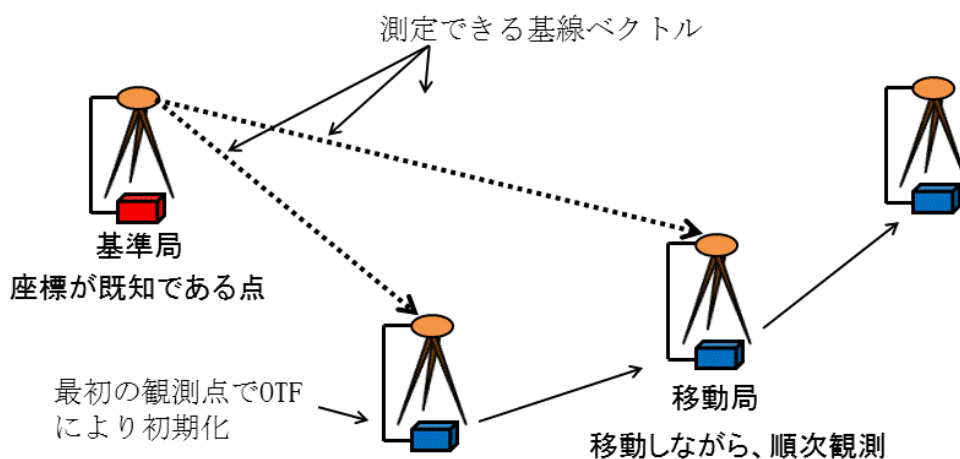


図 2-10 キネマティック方式における測位方法²⁾

ケット等に搭載すると、受信データ処理部分の搬送波のドップラー効果補償ルーチンの許容数値範囲を超過して動作不能となることはあり得るが、関連部分のファームウェア、ハードウェアに対して対応策をとることで解決できる。受信機で記録している搬送波位相は、光の速度に匹敵するほどの速度でなければ、十分に追従、処理可能である²⁵⁾。

2-3-5 リアルタイムキネマティック方式 (RTK 方式)

上記のキネマティック方式を実時間で行う方式である。図 2-11 に示すように基準局はその観測したデータを通信システム介して移動局へ伝送し、移動局ではそのデータを使用し、リアルタイムに移動局の干渉測位計算を行い結果が出力される。使用する受信機は、キネマティック方式と同様に L1 波、L2 波が受信可能な 2 周波受信機であり、測位精度は $20\text{mm} + 2\text{ppm} \cdot D$ となる。また、基準局から移動局までのデータ送信については、いくつかの受信機メーカーが独自フォーマットを作り出しているが、1985 年以降、米国海上無線技術委員会の特別委員会 104 の勧告により標準化されている。この標準化は RTCM フォーマットと呼ばれ、現在公開されている RTCM フォーマットは、バージョン 2.x と 3.x である。

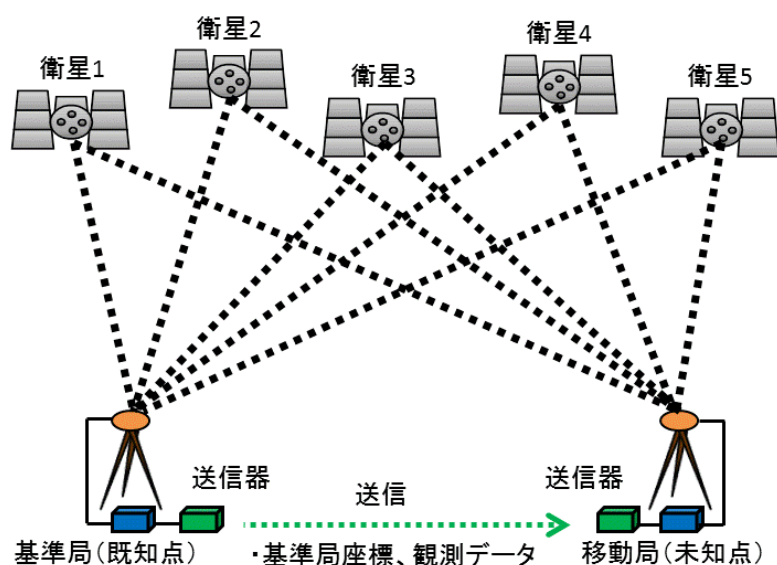


図 2-11 リアルタイムキネマティック方式の構成⁵⁾

表 2-4 RTCM フォーマットの主な改版内容⁷⁾

バージョン	改版内容
2.0	ディファレンシャル測位用の疑似距離補正
2.1	RTK疑似距離+搬送波、および同補正量を含むメッセージの追加によりRTKに対応
2.2	2.1にGLONASSに関連したメッセージを追加
2.3	2.2に使用アンテナの定義を追加
3.0	ネットワークRTKの対応

表 2-5 RTCM バージョン 2.3 の主なメッセージタイプ³⁾

メッセージタイプ	内容
1	ディファレンシャル補正量
2	デルタディファレンシャル補正量
3	GPS基準局パラメータ
9	限定ディファレンシャル補正量
10	Pコードのディファレンシャル補正量
11	GPS C/AコードL1、L2デルタ補正量
15	電離層遅延メッセージ
17	GPS放送暦
18	RTK搬送波位相
19	RTK疑似距離
20	搬送波位相補正量
21	疑似距離補正量
31	グロナスのディファレンシャル補正量
32	グロナスの基準局パラメータ
59	送信者メッセージ

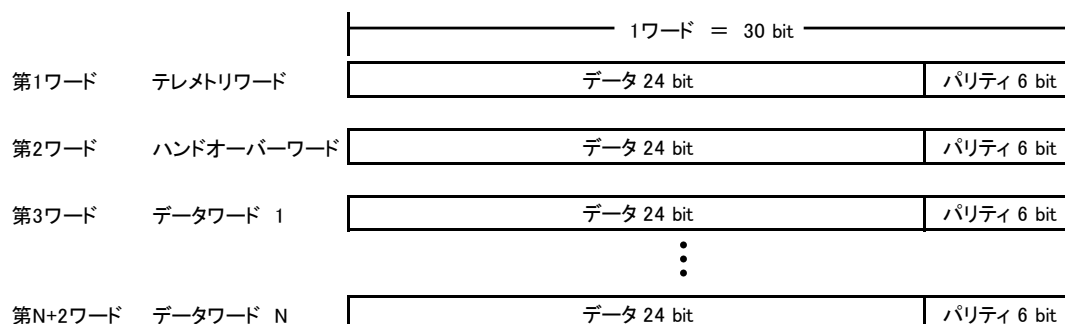


図 2-12 RTCM バージョン 2.x のメッセージ構造⁷⁾

RTCM バージョン 2.x は、1990 年にディファレンシャル測位用の疑似距離補正情報のために定められたのが始まりであり、当時はバージョン 2.0 として公開された。以後、表 2-4 に示すように RTK 測位対応、GLONASS 対応が行われ、現在はバージョン 2.3 まで公開されている。バージョン 2.3 では、64 種類のメッセージタイプがあり、その主な内容は表 2-5 に示す通りである。メッセージは 30bit のワードの連なりでできており、ワードの最後の 6bit はパリティビットである（図 2-12）。それぞれのメッセージはヘッダーで始まり、ヘッダーの第 1 ワードは、プリアンブル、メッセージタイプ、基準局識別が含まれ、第 2 ワードには、時刻符号、通し番号、メッセージ長、基準局のヘルス指標が含まれている。メッセージによっては、第 3 ワードがこれらのヘッダーに付け加わり、以後はデータワードとなる。

一方、RTCM バージョン 3.x は、情報伝送を効率化し、パリティの完全性を増すために定義されており、特に大量のデータを扱う RTK とネットワーク型 RTK を考えて設計されている。メ

メッセージは 8bit のプリアンブルと 10bit の識別子、ヘッダーの 6bit の空からできている。なお、ネットワーク型 RTK とは、電子基準点 3 点に囲まれた領域内の移動局に対して仮想の基準点の観測値を作成し、その観測値を移動局へ放送して基線解析を行う方式である。データ提供はインターネット経由等で行われ、RTCM フォーマットをインターネットで送信するためのフォーマットとして NTRIP (Networked transport of RTCM via Internet protocol) フォーマットが定義されている³⁾。

なお、RTCM 以外のフォーマットとしては CMR/CMR+フォーマットがある。これは、Trimble 社によって開発されたプロトコルであるが、他のメーカー製受信機でも対応した機種が確認できる。CMR では、RTK 測位のために以下の 3 つのメッセージタイプが定義されている⁷⁾。

- 観測データ (Measurements) (Message Type 0) :
搬送波位相及び疑似距離観測値
- 基準局位置 (Reference Station Location) (Message Type 1) :
WGS84 座標系による基準局 (Reference Station) 位置及びアンテナオフセット
- 基準局の説明 (Reference Station Description) (Message Type 2) :
テキストによる基準局名の情報

観測データは 1 秒周期で送信され、基準局の位置及び説明は 10 秒周期で交互に送信される。また、各データは表 2-6 に示す 6 バイトの packets ヘッダー及び packets テイルの間で送信される。

表 2-6 CMR フォーマットの packets 定義⁷⁾

	パラメータ	バイト数	内容
packets ヘッダー	STX	1	送信開始
	ステータス	1	ステータスバイト
	タイプ	1	CMRメッセージタイプ: 0-観測データ; 1-基準局位置; 2-基準局情報
	長さ	1	メッセージ長
データヘッダー		6	エポック時間、時計のステータス等
データ本体		定義による	定義されたCMRメッセージデータ
packets テイル	チェックサム	1	チェックサム
	ETX	1	送信終了

2-3-6 GLONASS 併用による測位への影響

前節でも述べたが、GPS と GLONASS では、放送する搬送波の周波数はもちろん、信号方式、準拠する時系について、それぞれの方式は大きく異なる。この違いは、m オーダーの精度である単独測位、ディファレンシャル測位ではほとんど無視できる内容であるが、mm オーダーの精度である干渉測位では大きな問題となる。

まず、準拠する時系については、時計誤差の消去において問題となる。干渉測位では時計誤差の消去に差分処理が用いられ、これは、受信機 2 台、衛星 2 機の組合せで式 (2-6)、式 (2-7) より消去できる。しかし、衛星の組合せが GPS と GLONASS の 1 機ずつの場合、二重位相差の結果に、双方の衛星が準拠する時間のズレがそのまま含まれてしまい、完全に時計誤差を消去することが困難となる。そのため、併用測位において時計誤差を消去するには、同じシステムの衛星が 2 機必要となり、GLONASS が 1 機観測できる場合、もう 1 機の GLONASS 衛星が観測できる状況にならなければ、干渉測位における GPS と GLONASS の併用測位は不可能となる。

また、信号方式の違いについては、測位結果において誤差増加の懸念となる。アンテナ、および受信機内の回路による遅延は周波数に依存しており、FDMA 方式を採用する GLONASS では衛星毎に影響が異なるため、アンテナ、受信機の事前検討が重要となる。また、この影響はアンテナや受信機を製造する各メーカーの技術力に依存する要素が若干なりともあり、当然ながら、同一メーカーの機器を揃えて測位を行ったほうが影響は少なくなる²⁾。表 2-7 より、公共測量作業規程の準則に記述されている衛星測位による基準点測量の基準を示す。GLONASS を併用して測位を行う場合、GPS と GLONASS をそれぞれ 2 機以上観測し、加えて、同一機器メーカーの受信機を使用するよう記載がなされていることがわかる⁸⁾。

表 2-7 観測方式による使用衛星数⁸⁾

GNSS衛星の組合せ		スタティック方式	短縮スタティック方式 キネマティック方式 RTK方式 ネットワーク型RTK方式
GPS衛星のみ		4衛星以上	5衛星以上
GPS衛星及びGLONASS衛星		5衛星以上	6衛星以上
摘要	① GLONASS衛星を用いて観測する場合は、GPS衛星及びGLONASS衛星を、それぞれ2衛星以上を用いること。 ② GLONASS衛星を用いて観測する場合は、同一機器メーカーのGNSS測量機を使用すること。 ③ スタティック方式による10km以上の観測では、GPS衛星のみを用いて観測する場合は5衛星以上とし、GPS衛星及びGLONASS衛星を用いて観測する場合は6衛星以上とする。		

2-4 電波伝搬による誤差

式(2-3)の搬送波位相には、電波が大気中を伝搬している間に受ける遅延量、電離層遅延と対流圏遅延の項が含まれている。大気の状態は、季節や時刻等により変化し、遅延量も様々であるが、天頂方向で対流圏遅延が2mから2.4m程度となる。一方、電離層遅延は周波数帯でも異なり、数m以上にもおよぶ。これは、衛星が低高度の場合さらに大きくなり、干渉測位においては無視できない誤差量となる。ここでは、電離層と対流圏による遅延について説明する。

2-4-1 電離層遅延

(1) 電離層と位相の進み

地上約100kmから約1000kmまでの高さに及んでいる電離層は、電離された気体(自由電子とイオン)の存在する領域である。電離層は、異なる高度に存在するいくつかの層(D, E, F1, F2と呼ばれる)により構成されており、衛星測位において影響するのは、地上約200kmから上のF2層である。電離層の状態は主として太陽活動の強さによって決定し、物理的な性質は昼と夜で大きく変化する。太陽が昇ってくると、紫外線は気体分子(高高度では水素やヘリウム、低高度では酸素や窒素)をイオンや自由電子に分離しはじめる。地方時で午後2時頃のピークに至るまで、電子密度は上昇し、自由電子数は減少する。また、季節や太陽の活動に依存して大きな変動が見られることもある²⁾。

電離層内における無線信号の伝搬速度は、その経路における総電子数(TEC: total electron content)に依存している。総電子数とは、受信機から衛星までに伸びている1m²の断面積を持つチューブの中の総電子数を全て足したもののことであり、次のように表される。

$$\text{TEC} = \int_S^R n_e(l) dl \quad (2-8)$$

$n_e(l)$: 信号経路上で変化する電子密度

式(2-8)より、積分は衛星から受信機までの信号経路に沿って行われている。電離層を通過する経路の長さは天頂方向において最も短くなり、TECは鉛直方向(TECV)において最も少なくなる。また、電離された気体は電波にとっては分散性媒質となり、周波数 f の電波における屈折指数は以下の式で表される。

$$n_p \approx 1 - \frac{40.3n_e}{f^2} \quad (2-9)$$

n_p : 位相の屈折指数 n_e : 電子密度

実際の屈折指数は1をわずかに下回る値 (GPSL1波の場合は約0.99998)であり電離層における搬送波の位相速度は、真空中の光速を超え、精密な位置を求める場合に影響を受けることになる。この影響は、屈折指数の式より、電離層を信号が伝搬するときに受ける余分な位相遅延量 $\delta\tau_p$ (秒)を計算することができる。

$$\begin{aligned}\delta\tau_p &= \frac{1}{c} \int_S^R (n_p(l) - 1) dl \\ &= -\frac{1}{c} \int \frac{40.3n_e(l)}{f^2} dl = -\frac{40.3 \cdot TEC}{cf^2}\end{aligned}\tag{2-10}$$

式(2-10)より、位相遅延量は負の値であり、位相は進むことがわかる。位相の進み具合は信号経路における電子数に直接比例している。式(2-3)で I_ϕ として示した位相遅延量(m)は、以下の式で表される。

$$I_\phi = c \cdot \delta\tau_p = -\frac{40.3 \cdot TEC}{f^2}\tag{2-11}$$

(2) 傾斜係数

電離層幾何モデルは、地球をとりまく薄い殻であると考えられる。電離層を通過する信号経路の長さは上空の衛星の位置により変化し、衛星の仰角が低いほど経路長が長くなり TEC も大きくなる。横方向の自由電子密度の勾配がないと仮定すると、鉛直方向の TEC について、信号経路に沿った TEC の簡単かつコンパクトな性質と、より長い経路を説明するための乗数を得ることができる。その乗数を傾斜係数 (obliquity factor) と呼ぶ。

電離層の平均的な高度(h_I)は通常 300~400km の範囲内である。電離層通過点 (IPP : Ionosphere pierce point) は高度 h_I での球形の殻と衛星への視線方向との交点として定義される。電離層を通る経路長に関して、天頂角 ϑ での TEC に対する TECV は、次のように表される。

$$TEC(\vartheta) = \frac{1}{\cos \vartheta'} \cdot TECV\tag{2-12}$$

ここで、 ϑ と ϑ' はユーザの位置と電離層通過点における衛星の天頂角を表している。 $(\cos \vartheta')^{-1}$ の項は傾斜係数と定義され、ユーザの場所での衛星の天頂角に関しては、正弦法則を利用し、次の式で表すことができる。

$$\frac{\sin \vartheta}{(R_E + h_I)} = \frac{\sin \vartheta'}{R_E} \quad (2-13)$$

R_E : 地球の平均半径

また、天頂角 ϑ に対する電離層の傾斜係数は以下の式となる。

$$OF_I(\vartheta) = \left[1 - \left(\frac{R_E \sin \vartheta}{R_E + h_I} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2-14)$$

OF_I の値は天頂方向で1、仰角5度前後で3をとり、その範囲内で変化する。

電離層を通過する電波伝搬の内容をまとめると以下のように要約することができる。

- 搬送波が電離層内を通過中は位相が進む。すなわち、搬送波位相を本来よりも短く測定してしまう。
- 位相の進みは信号の伝搬経路に沿った TEC の量に比例する。
- 電離層を通過する信号の経路長は、衛星の仰角に依存し、傾斜係数と呼ばれる値を利用して考慮されている。

ただし、搬送波位相の測定値については、観測データのフォーマットより、電離層遅延による距離の減少を増加に換算する場合もある。前述した RINEX フォーマットでは、距離の減少を増加に換算しており、受信機内部と RINEX による観測値では、表 2-8 に示す関係が成り立つ¹⁾。

表 2-8 疑似距離と搬送波位相の変化⁷⁾

衛星と受信アンテナ間の距離	受信機内部		RINEX	
	疑似距離	搬送波位相	疑似距離	搬送波位相
増加	増加	減少	増加	増加
短縮	減少	増加	減少	減少

2-4-2 対流圏遅延

(1) 乾燥大気と水蒸気による遅延量

対流圏とは乾燥空気（酸素や窒素）および水蒸気から構成され、乾燥空気は数百 km の高度で徐々に希薄になり、水蒸気の全ては海面から約 12km 以下の高度で存在している。また、電波に対して分散性を持たず、大気による屈折率は海拔 0 メートル地点で 1 よりわずかに大きい程度であり、対流圏上端ではより 1 に近くなる。対流圏での信号の伝搬速度は自由空間よりも低く、衛星と受信機間の距離は実際よりも長くなる。その値は、衛星の高度角に依存し、搬送波の周波数に関わらず全て共通の遅延となる。この遅延量は測定値から推定することはできないため、修正はモデルに頼ることになる。

対流圏遅延量の範囲は、その経路に沿った気体の屈折率に依存する。気体の屈折率は、乾燥大気の成分と水蒸気の成分の和として表現することができ、以下の式で表すことができる。

$$N = N_d + N_w \quad (2-15)$$

N : 気体の屈折率 N_d : 乾燥大気の屈折率 N_w : 水蒸気の屈折率

また、対流圏の屈折による経路長の増加分 (m) は、以下の式で表すことができる。

$$\begin{aligned} \tilde{T} &= 10^{-6} \int N(l) dl = 10^{-6} \int [N_d(l) + N_w(l)] dl \\ &= \tilde{T}_d + \tilde{T}_w \end{aligned} \quad (2-16)$$

\tilde{T} : 経路長の増加分 (m) \tilde{T}_d : 乾燥大気遅延量 \tilde{T}_w : 水蒸気遅延量

式 (2-16) の積分は信号経路に沿って行われ、電離層を通過する信号伝搬で想定したように、信号経路の屈曲を無視し、減少した信号速度による遅延量の増加にのみ注目する。

対流圏のモデルは、信号経路に沿った乾燥大気や水蒸気の屈折率を推定し、式 (2-16) から全ての遅延について推定することを試みている。空気中の屈折率は、その温度と乾燥大気および水蒸気分圧に依存している。空気中の乾燥大気あるいは水蒸気による屈折率の近似式は、以下の通りである。

$$N_d = 77.64 \frac{P}{T} \quad (2-17)$$

$$N_w = 3.73 \cdot 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (2-18)$$

P : 大気圧 ($mbar$) e : 水蒸気分圧 ($mbar$) T : 湿度 ($kelvin$)

屈折率と対流圏遅延量は、信号の伝搬経路に沿った圧力、温度、湿度の情報から正確に決定することができる。それらの測定値は、アンテナ位置での気象状態を測定し、気体の法則あるいは経験的なモデルを使用して求める方法から、気象測定器等により入手する方法がある。しかしながら、実際の測位において気象の測定は現実的ではなく、アンテナ位置における緯度、高度およびその日の標準大気モデルから得られる平均定期的な気象状態に基づいて、対流圏遅延の推定を行っている。

対流圏遅延は、次の2ステップで推定を試みる。

① 乾燥大気($\tilde{T}_{z,d}$)および水蒸気($\tilde{T}_{z,w}$)による天頂方向に関連した遅延量から天頂方向の遅延量(\tilde{T}_z)の推定を行う。

$$\tilde{T}_z = \tilde{T}_{z,d} + \tilde{T}_{z,w} \quad (2-19)$$

② 仰角(E)の関数として天頂方向の遅延量を特徴づけるための傾斜係数(マッピング関数)の定義を行う。

$$\tilde{T}_z(E) = \tilde{T}_{z,d} \cdot m_d(E) + \tilde{T}_{z,w} \cdot m_w(E) \quad (2-20)$$

m_d : 乾燥大気のマッピング関数 m_w : 水蒸気のマッピング関数

以下に、乾燥大気および水蒸気による遅延量を推定するモデル例と、マッピング関数のモデル例を示す。

(2) 対流圏モデル

対流圏モデルの1つとして、観測点における気圧、温度、湿度を与えて導出されるザースタモイネンモデルがある。乾燥大気と水蒸気の遅延量は以下の式で表される。

$$\tilde{T}_{z,d} = 0.002277(1 + 0.0026 \cos 2\phi + 0.00028H)P_0 \quad (2-21)$$

$$\tilde{T}_{z,w} = 0.002277 \left(\frac{1255}{T_0} + 0.05 \right) e_0 \quad (2-22)$$

ϕ : 緯度 H : アンテナ海拔高 P_0 : 全圧 T_0 : 湿度 e_0 : 水蒸気分圧

このモデルは、ここでは無視されている修正項を付加することで改良されてきている。

(3) マッピング関数

乾燥大気と水蒸気の構成要素の両方に対する単純なモデルは、 $1/\sin E$ である。このモデルは平坦な地球と対応しており、低仰角衛星に対しては不十分な近似である。より正確なモデル例は以

下の式で表される.

$$m(E) = \frac{1}{\sqrt{1 - (\cos E/1.001)^2}} \quad (2-23)$$

また, 乾燥大気と水蒸気による遅延量のためのマッピング関数は以下の式で表される.

$$m_d(E) = \frac{1}{\sin E + \frac{0.00143}{\tan E + 0.0445}} \quad (2-24)$$

$$m_d(E) = \frac{1}{\sin E + \frac{0.00035}{\tan E + 0.017}} \quad (2-25)$$

衛星仰角が低くなると傾斜係数は急激に増加する. 低仰角では, 15° で 4, 10° で 6, 5° で 10 であり, 対流圏の傾斜係数は, 電離層よりも低仰角で非常に大きな値となる. これは, 電離層と対流圏を通る経路長によるものである¹⁾.

2-5 測定値誤差

前節で示した電離層と対流圏による遅延は、干渉測位では無視できない誤差量であるが、観測点間の基線長が短いとき、大気の状態は似通っているため、両点の遅延量はほぼ同じ値と見なすことができる。短い基線長がどれ位かは大気の状態により異なるが、目安としては 10km 程度であり、式 (2-7) に示す二重位相差により大気遅延はかなり相殺することができる。しかし、受信機関連の雑音、およびマルチパスについては消去できない。ここでは、これらの誤差要因について説明する。

2-5-1 受信機雑音

疑似距離測定値と搬送波位相測定値は、受信機雑音と呼ばれるランダムな測定雑音によって影響を受けている。受信機雑音とは、信号に関係なく、GPS の帯域において、アンテナで受信される電波による放射を全てカバーしている広い意味であり、アンテナ、増幅器、ケーブル、受信機からの雑音、マルチアクセス雑音（他の衛星系の信号からの干渉）、量子化雑音のことである。

受信機では、完全に信号波形の変化を追うことはできず、遅延と歪みが存在する。干渉信号が存在しない場所でも、受信機は、ランダムに変動する雑音が加わった信号を見ることになる。最終的な結果として、信号の細かい構造は雑音によって、特に信号対雑音比が低いときは覆われる可能性がある。測定値の誤差は、受信機雑音に起因し、信号強度に応じて変化し、よって衛星仰角に応じても変化する¹⁾。

2-5-2 マルチパス

マルチパスとは、2 つ以上の経路を通過してアンテナに到達する信号の現象である。典型的に、アンテナは直接波と周辺の建物や地表から反射される 1 つ以上の反射波を受信している (図 2-13)。反射波は、直接波よりも遅延しており、強度も弱まっている。これ以後の搬送波位相測定値は、受信された信号を全て加算したものとする。マルチパスによる距離測定値誤差は、反射波の強さと直接波に対する反射波の遅延に依存している。

マルチパスを防ぐ主要な方法は、反射物から離してアンテナを設置することであるが、それはいつも可能とは限らない。マルチパスによる効果は、アンテナ設計段階において、いくつかのタイプの反射による寄与分を下げることによって軽減される（例えば、地面からの反射など）。その効果は、受信機における信号処理の段階においても軽減させることができる。実際にマルチパスを免れるための対策は、信号構造にも組み込まれており、例えば GPS による信号では、1.5 チップ以上遅延してくる反射波は、受信機の相関処理において抑制される。これは、C/A コードに対する自己相関は、1.5 チップ以上長い遅延に対してほぼ 0 となることに起因しており、そのよ

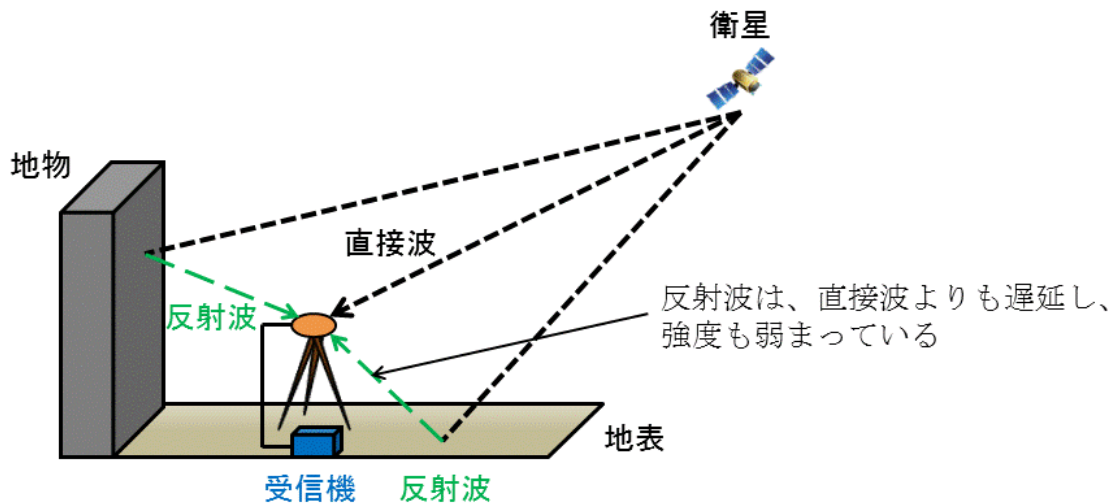


図 2-13 衛星測位におけるマルチパスとなる信号¹⁾

うな遅延は、C/A コードの場合、遅延経路長が約 450m に相当する。一方、1.5 チップ以下で遅延してくる反射波の影響は、反射波の遅延の大きさと振幅に依存している。なお、疑似距離測定値による典型的なマルチパス誤差は、1m から 5m 以上に及ぶことがある。一方、搬送波位相測定値のマルチパス誤差は、疑似距離よりも 2 桁程度小さい値 (1cm~5cm) である¹⁾。

2-6 まとめ

本章では、衛星電波と干渉測位方式の概要に加え、電波伝搬やその他の要因によって生じる誤差についてまとめた。

搬送波を用いた干渉測位では、差分処理によって整数不定性を求めることにより mm~cm オーダーの精度を有する測位解が得られるが、衛星からの受信電波には様々な誤差の影響を受けている。誤差については主に 3 つに分類でき、衛星と受信機による時計誤差、電離層と対流圏による遅延誤差、受信機の雑音やマルチパスによる測定値誤差である。時計誤差については、二重位相差による差分処理によって除去することができ、遅延誤差についても、基準局と移動局の設置位置を工夫することで相殺することができる。しかし、測定値誤差の一つであるマルチパスは、アンテナ周知の建物や地表からの反射波により生じるため、他の誤差要因と異なり消去することは困難である。ゆえに、高精度な衛星測位を実現するには、マルチパスによる誤差を低減することが不可欠であるといえる。

第2章 参考・引用文献

- 1) Pratap Misra and Per Enge : Global Positioning System Signals, Measurements, and Performance Second Edition, Gnga-Jamuna Press , pp.32-38 , pp.151-154 , pp.162-164, pp.171-177, 2006.3.
- 2) 土屋淳, 辻宏道 : GNSS 測定の基礎, 日本測量協会, pp.18-21, pp.137-138, pp.182-184, pp.262-264, 2008.3.
- 3) 西修二郎 : GNSS のすべて, 古今書院, pp.165-166, pp.292-298, pp.370-372, 2010.2.
- 4) 日本測量協会 : 月刊「測量」別冊 GPS フロンティア, pp.12-13.
- 5) 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.89-96, 2005.8.
- 6) 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, 2013.4.
<http://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/data/format/rinex302.pdf> (入手 2013.9)
- 7) 国土地理院 : 高度な国土管理のための複数の衛星測位システム (マルチ GNSS) による高精度測位技術の開発, pp.4-28-4-36, pp.4-53-4-81, 2012.2.
<http://www.gsi.go.jp/common/000068240.pdf> (入手 2013.9)
- 8) 日本測量協会 : 公共測量作業規定の準則, pp.10-15, 2011.12.

第3章 衛星測位におけるマルチパス誤差とその削減

3-1 信号構造とマルチパス誤差

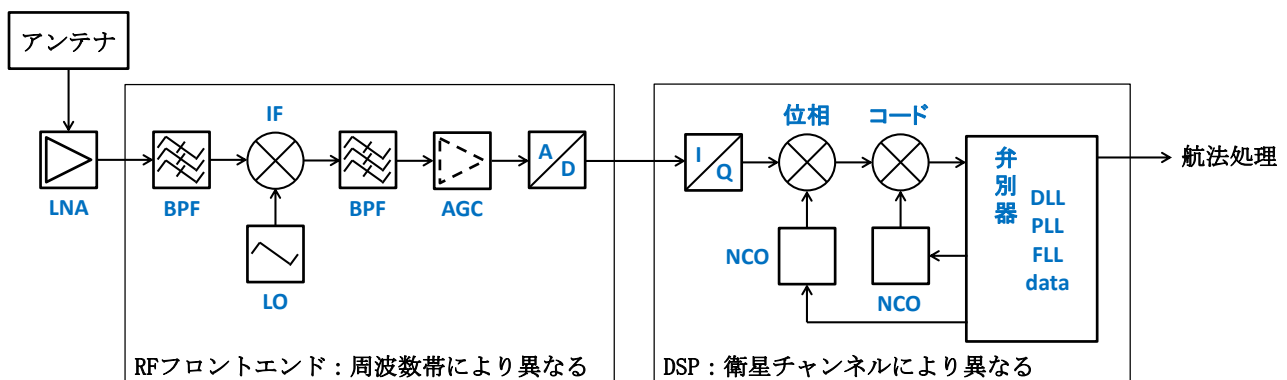
マルチパスによる距離測定値誤差は、前章でも述べたように、反射波の強さと直接波に対する反射波の遅延に依存している。マルチパスを免れるための対策としては、衛星から送信される電波の構造に組み込まれており、受信機の相関処理によって抑制することができる。ここでは、その抑制方法を述べる。

3-1-1 受信機設計

一般的な衛星測位用受信機は、機能毎に構成されており、主にアンテナから受信した電波を中間周波数に変換しアナログ信号をデジタル変換する RF フロントエンド部、デジタル信号から疑似距離、搬送波位相等の情報を出力するデジタル信号処理部 DSP (Digital signal processor)、そして、航法メッセージ等から衛星位置と受信機の位置と速度、時刻を計算する航法処理部に分けられる。図 3-1 に受信機の機能ブロック図を示す。

RF フロントエンド部では、アンテナで受信された衛星電波を低雑音アンプ LNA で増幅し、バンドパスフィルター (BPF : Band-pass filter) を通った後、受信信号周波数を中間周波数 IF (Intermediate frequency) に変換される。変化後は、自動利得制御器 AGC により、信号処理に適正なレベルに正規化され、A/D 変換が行われる。

デジタル信号処理部 DSP では、RF フロントエンド部から送られた信号と受信機で生成された信号との相関を取り、コードや搬送波位相等の観測値をコード追尾ループや搬送波追尾ループで取り出される。この追尾ループが、マルチパスの抑制について要となる部分である¹⁾²⁾。



3-1-2 デジタル信号の相関処理

デジタル信号処理部 DSP では、処理の第一段階で、RF フロントエンド部で変調された信号を衛星別に専用のチャンネルに割り当てられる。全てのチャンネルからは、疑似距離、搬送波位相測定値、航法メッセージ等の測位において必要となる情報が出力される。

受信機の核となる部分は、受信信号と受信機で生成されたレプリカ信号との相関処理である。デジタル信号処理部 DSP に送られる入力信号は、複数衛星からの信号とマルチパス、干渉波、ノイズの重なり合ったものである。この入力信号は、次のように表せる。

$$\begin{aligned}
 s(t) &= \sum_{r=1}^k s_r(t + \tau_r) + n(t) + i(t) \\
 &= \sum_{r=1}^k \sqrt{2P_r} c_r(t + \tau_r) d_r(t + \tau_r) \cos(2\pi(f^s - f_l + \delta f_r)(t + \tau_r)) \\
 &\quad + n(t) + i(t)
 \end{aligned}
 \tag{3-1}$$

$s(t)$: 複数衛星の入力信号 k : 衛星数 s : 受信信号 τ : コード遅延

n : ガウス型の白雑音 i : 干渉波 P : 受信信号の電力 c : コード信号

d : 航法データ $f^s - f_l + \delta f_r$: 中間周波数 δf_r : 周波数オフセット

衛星の同期補足 (acquisition) については、自己相関関数が最大になるものを探すことで行われ、同期補足後は、相関を最大に保ちながら衛星の同期保持 (tracking) が行われる。ここで、相関について簡単に説明する。相関関数については、以下の式で定義される。

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s_1(t) s_2(t + \tau) dt
 \tag{3-2}$$

これは、2つの信号 $s_1(t)$, $s_2(t)$ がどの程度一致しているかを、2つの信号の間の時間のズレ τ の関数として表したものである。どちらも周期が T であるかのような周期的な関数の場合、相関関数は、以下の式で定義される。

$$R(\tau) = \int_0^T s_1(t) s_2(t + \tau) dt
 \tag{3-3}$$

相関係数 $R(\tau)$ が小さい場合、信号の関数直交性が高いことを示しており、信号関数が完全に直交していれば、 $R(\tau) = 0$ となる。また、 $s_1(t) = s_2(t)$ であれば、式 (3-2) は自己相関関数になる。

受信信号とレプリカ信号との相関をとるには、受信機で生成された2つの搬送波と3つのコー

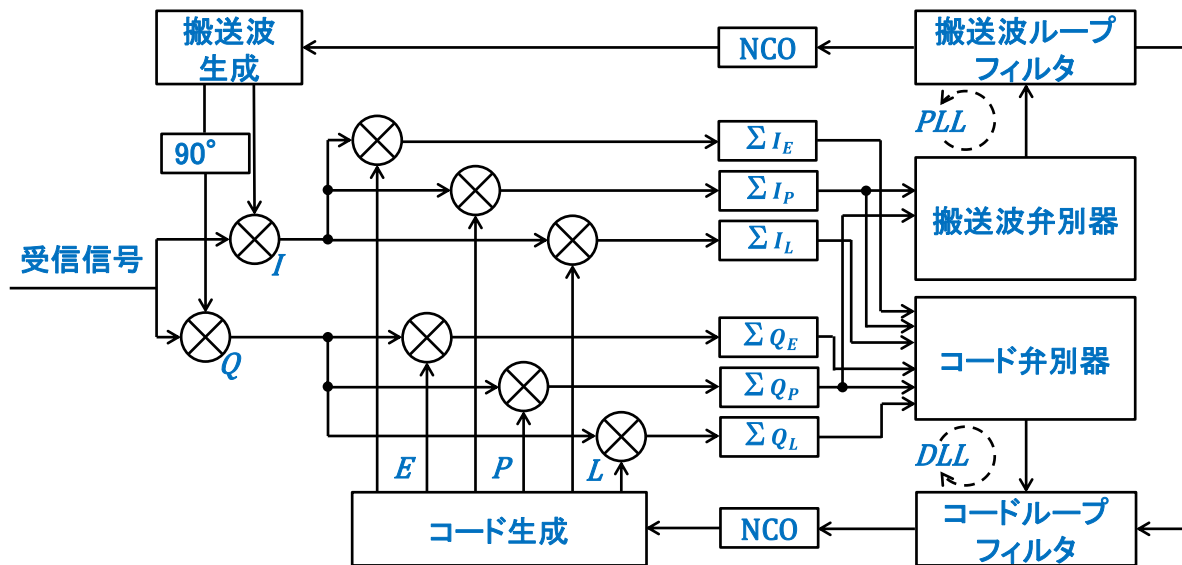


図 3-2 受信機の追尾ループ構成図¹⁾

ドにより行われる。生成された 2 つの搬送波は、同相 I (In-phase) 信号と位相が 90° ずれた直交 Q (Quadrature) 信号であり、これは、受信信号との位相のずれにより相関値が小さくなる影響を弱めるために必要となる。影響を弱めるためには、I, Q 信号でそれぞれ受信信号との相関をとり、双方の結果の和を求めることで対処できる。なお、この過程における信号のエネルギーは子損されている。

一方、生成された 3 つのコードは、それぞれ時間をシフトさせており、進み (E : early) 相関、即時 (P : prompt) 相関、遅れ (L : late) 相関を作るのに使われる。I, Q チャンネルでの進み相関と遅れ相関 (I_E, I_L, Q_E, Q_L) は、コード追尾ループでのみ使われ、即時相関 (I_P, Q_P) は、搬送波追尾ループで使われる。なお、即時相関は、衛星の同期補足の際にも使われており、I, Q チャンネルでの相関積分を二乗したものの和 ($I_P^2 + Q_P^2$) は、入力信号と生成したレプリカ信号との相関を決める同期検出器で使われる。同期検出器での補足が開始されると、フィードバック制御ループ (feedback control loop) で搬送波とコードの追尾が始まる。図 3-2 に追尾ループの構成図を示す。

位相同期ループ (PLL : Phase lock loop) は受信機で生成される搬送波の位相を衛星からの搬送波位相に合わせ、遅延同期ループ (DLL : Delay lock loop) は受信機で生成されるコード信号を衛星からのコードに合わせる。これらの追尾ループは、ドップラーシフトやコード遅延、周波数オフセットに全て対応できなければならない。受信機で生成されるレプリカ信号を入力信号に合わせていく操作は、PLL と DLL で平行して行われる¹⁾³⁾。

3-1-3 弁別関数

受信機内では、先ほどでも述べたように、受信信号と生成したレプリカ信号とで相関がとられるため、理論的には、双方の信号は同じものであるべきであることがわかる。しかしながら、式(3-1)でも示すように、実際の受信信号は雑音や干渉波の影響を受けているため、同じにはならない。そのような状況下で自己相関関数の最大値を検出するには、次のような弁別関数が用いられる。

$$\frac{dR(\tau)}{d\tau} \approx \delta R(\tau) = \frac{R\left(\tau + \frac{d}{2}T_C\right) - R\left(\tau - \frac{d}{2}T_C\right)}{dT_C} \quad (3-4)$$

d : 相関器幅 T_C : 短形パルスの幅

これは、進み相関と遅れ相関の係数に基づいており、DLLにおいても同様の理論に基づいて解析が行われている。相関関数の最大値を検出するには、弁別関数が0になるところを探すことで得ることができる。

ここで、DLLについても少し触れておく。DLLでは、図3-2で示したように、I、Qチャンネルでの進み相関と遅れ相関 (I_E, I_L, Q_E, Q_L) 用いて受信信号の相関値を計測している。相関関数の正確な形は雑音等により未知であるため、相関器幅 d を持つ弁別器関数が使われる。標準的な相関器では、1チップの相関器幅が使われ、場合によってはこれよりも狭い相関器幅が使用されることもある。狭い相関器幅を利用する利点については、次の項で説明する。

コード弁別器関数は、航法データによる位相遷移の影響を受けないように設計されており、コヒーレントタイプのDLL弁別器関数は、単純なものは以下の式で表せる。

$$D_C = (I_E - I_L) \text{sign}(I_P) \quad (3-5)$$

ここで、 $\text{sign}(I_P)$ は、航法データのビット変調に相当するものである。なお、コヒーレントタイプのDLLとは、図3-2のようにコードと搬送波の両方を追尾するタイプのDLLであり、コードと搬送波を組み合わせる技術はコヒーレントな追尾と呼ばれる。一方、搬送波を追尾しないタイプのDLLはノンコヒーレントタイプのDLLとなり、他の補助的な情報が必要となる。ノンコヒーレントな弁別器としては、進み遅れ電力弁別器や内積弁別器があり、これは二乗技術を使って航法データの位相遷移を除去している。この場合の弁別器関数は、以下の式になる¹⁾。

$$D_{nc} = (I_E - I_L)I_P + (Q_E - Q_L)Q_P \quad (3-6)$$

3-1-4 遅延間接信号

式(3-1)より、受信電波に対して、レプリカ信号や他の衛星信号、干渉波の間で信号の直交性がない場合、それに対応して相関値にピークができる。自己相関関数の最大値を検出し、衛星の同期補足、その後の同期保持を行うということは、このピークを追尾することにある。しかし、受信電波にマルチパスによる遅延信号が含まれる場合、レプリカ信号との相関は歪まされることになる。相関が歪まされると、信号の追尾に誤差が生じ、結果的にコード追尾ループや搬送波追尾ループで取り出されるコードや搬送波位相等による観測値にも誤差が含まれることになる。

まず、受信電波にマルチパスが含まれる場合を考える。衛星からの直接信号にマルチパスによる遅延信号重なった場合の受信信号は、以下の式で表される。

$$s_r(t) = s_d(t) + \beta s_m(t + \tau_m) \quad (3-7)$$

$s_r(t)$: 受信信号 $s_d(t)$: 直接信号 $s_m(t)$: マルチパス信号
 β : マルチパス信号の制動係数 τ_m : 受信時間 t に対する遅延

この受信信号に対して、生成されたレプリカ信号との相関をとると、以下のようになる。

$$\begin{aligned} R_r(\tau) &= \int_0^T s_r(t) s_l(t + \tau) dt \\ &= \int_0^T s_d(t) s_l(t + \tau) dt + \int_0^T \beta s_m(t + \tau_m) s_l(t + \tau) dt \\ &= R_d(\tau) + R_m(\tau) \end{aligned} \quad (3-8)$$

$R_d(\tau)$: 直接信号の相関係数 $R_m(\tau)$: マルチパス信号の相関係数

ここで、 $R_d(\tau)$ と $R_m(\tau)$ は分離することは困難であるため、弁別関数が0になるところを見つけるには、一般的に $R_r(\tau)$ が使われる。

図3-3にマルチパス信号の影響を受けた相関関数を示す。直接信号による相関と比較すると、弁別関数を0にする τ_0 の位置がずれていることがわかる。 τ_0 の位置は、マルチパス信号の遅延時間 τ_m や遅延信号の制動係数 β 、相関器幅 d によって変わるため、相関器幅の狭い弁別器関数を使うことで、直接信号に対する τ_0 の位置のずれが小さくなり、結果としてマルチパスの影響を減らすことになる(図3-4)。

ここで、前章で示した、GPS信号の1.5チップ以上の遅延信号を抑制できる仕組みを簡単に説明する。標準的な相関器の相関器幅は、先ほど述べたように1チップであり、マルチパス信号が直接波に対して影響を及ぼすには、マルチパスによる相関値の上昇ポイントが少なくとも $\tau = d/2$ 以内となる必要がある。一方、上昇ポイントが $\tau = d/2$ 以上となる場合、図3-5に示すような状態

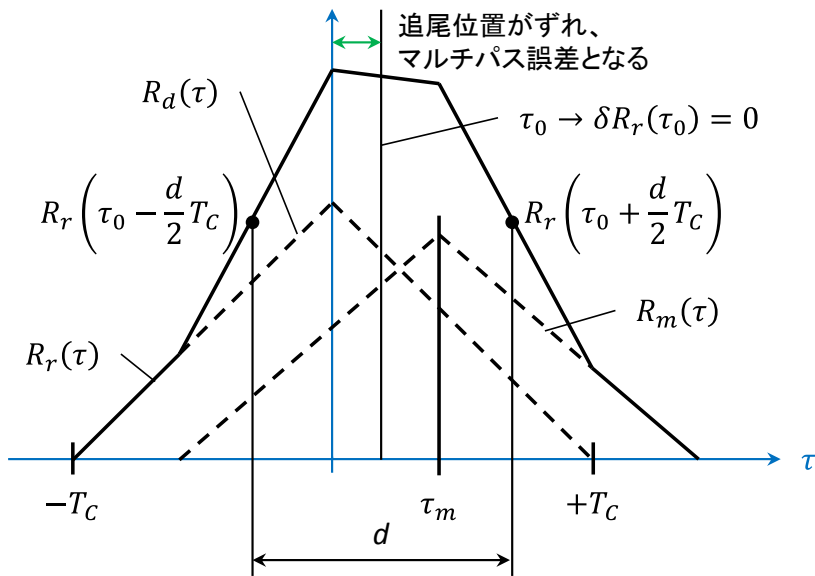


図 3-3 マルチパス信号の影響を受けた相関関数 ($d = T_C$)¹⁾

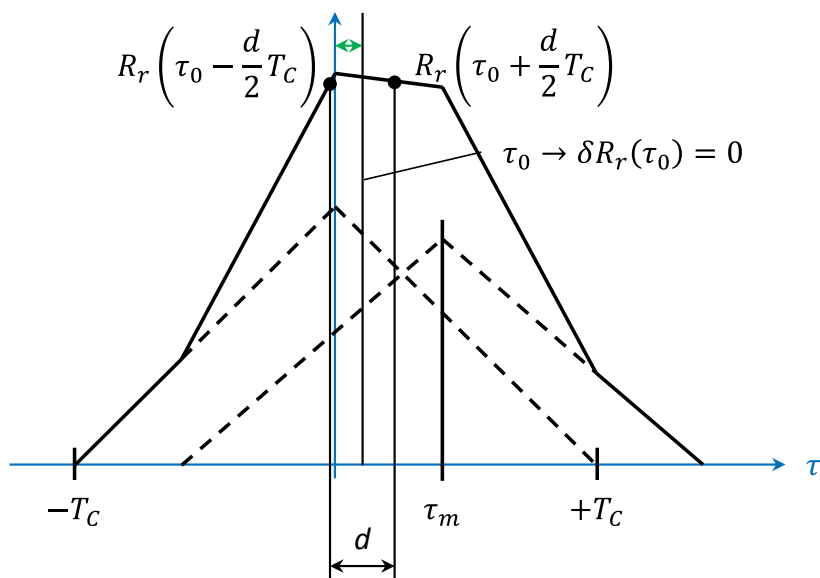


図 3-4 マルチパス信号の影響を受けた相関関数 ($d = T_C/4$)¹⁾

となり、マルチパス信号による遅れが相関器に入力されないことになる。これを式で表すと以下のようになる¹⁾。

$$\tau_m \geq T_C + \frac{d}{2} \tag{3-9}$$

C/A コードのチップ幅 T_C は $1\mu\text{s}$ (約 300m) であり、相関器幅 d は $1\mu\text{s}$ であるため、上記の結果は、 $\tau_m \geq 1.5$ となる。よって、 1.5 チップ以上 (約 450m) 遅延してくる反射信号は、受信機の相関処理によって抑制されることになる。また、式 (3-9) より相関器幅の値が $1\mu\text{s}$ より小さくな

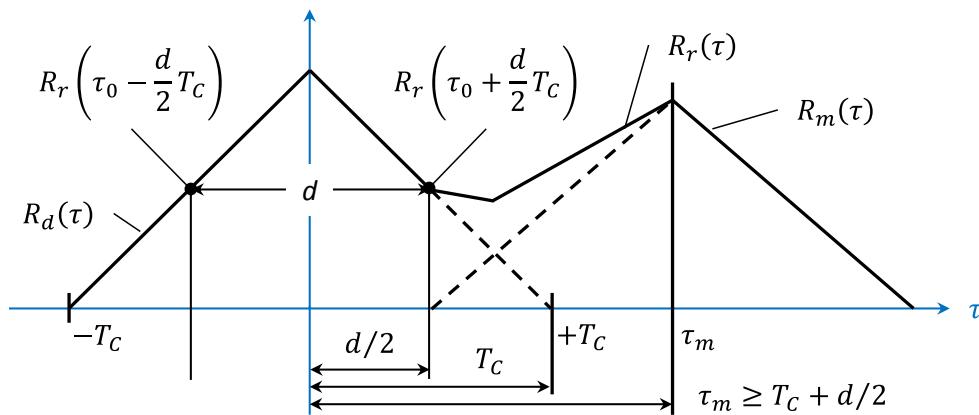


図 3-5 マルチパス信号の影響を受けない相関関数⁴⁾

ると、1.5 チップ以下の遅延信号にも対応でき、チップ幅が C/A コードよりも狭い P コード ($T_c = 0.1\mu\text{s}$) では、 $1\mu\text{s}$ の相関器幅で 45m 以上の遅延信号の影響を受けないことがわかる⁴⁾。

これらの内容より、マルチパスの影響を小さくする方法の一つとしては、相関器幅を狭くすることであることがわかる。相関器幅を狭めるこの技術は、Narrow Correlator と呼ばれており、1990 年代に発表、実用化が行われている⁵⁾。また、その他の試みとして、遅延回路を拡張しマルチパス排除を強化した Strobe Correlator、直接波とマルチパスの振幅、遅延、位相を同時に推定してマルチパスによる誤差を削減する MEDLL (Multipath Estimating Delay Lock Loop) 等が同年代付近にて発表されており、ほとんどの技術は既に実用化されている。現在販売される測量用の高精度受信機では、類似の技術を利用、または独自の技術を開発し実装することで、マルチパスの抑制を行っている。

3-2 マルチパスによる衛星電波の伝搬特性

衛星から送信される電波は電磁波であり、その伝搬はさまざまな物理現象により異なったものとなる。衛星電波に関わらず、送信側と受信側の見通し確保が困難な通信の場合、送信アンテナからの電波は周囲の地物や建物などで反射や回折を受け、さまざまな経路を通して受信点に到達する。このような伝搬は多重波伝搬、またはマルチパス伝搬と呼ばれている⁶⁾。

衛星測位におけるマルチパスの例を図3-6に示す。衛星電波の伝搬は、受信機周囲の地物位置と衛星位置により決定し、測位環境によっては、建物からの反射や回折といった直接波とは異なる経路で伝搬した電波を受信する。反射波や回折波のようにマルチパスの影響を受ける電波は、前章でも述べたように、直接波よりも遅延し、強度も弱まっている。この2つの特性は、マルチパスを述べるうえで重要な要素であり、前節で述べた関連処理によるマルチパスの抑制に加えて、信号強度を用いてマルチパスを判別する試みも行われている⁷⁾。

ここでは、衛星電波における反射波および回折波の特徴について述べるとともに、マルチパスの影響を受ける電波強度の特性についても説明する。

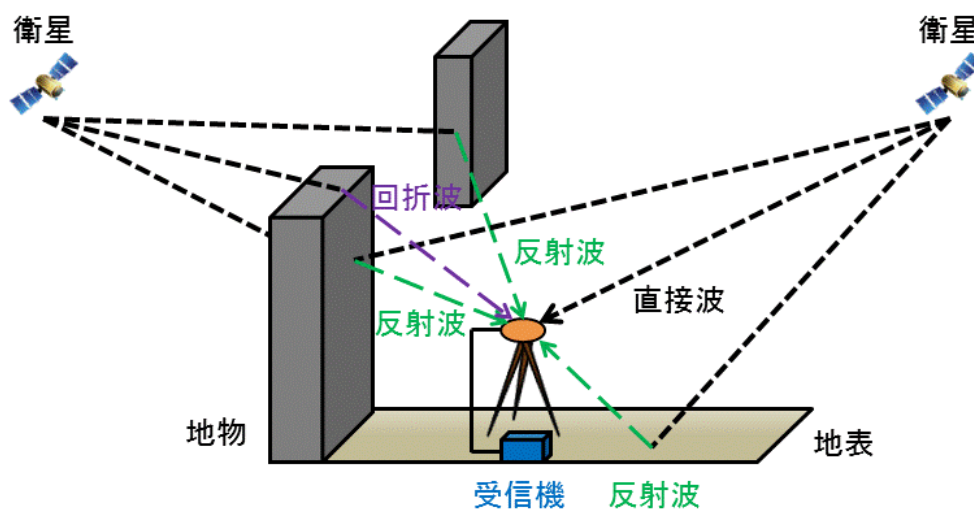


図3-6 衛星測位におけるマルチパス環境

3-2-1 反射波

衛星電波の反射波は、散乱した反射と鏡面的な反射の2つの成分に分けられる。散乱は一般的な反射であり、電磁波のエネルギーが媒質の不均一さのために、さまざまな方向に散らばることをいう。一方、鏡面的な反射とは、電磁波が滑らかな表面によって反射されるときに起こる現象であり、入射波と反射波は境界面法線に対して対称的になる。このとき、粗い表面では拡散的な反射が起きる。滑らかな表面と粗い表面の違いについては、大地表面凹凸の尺度として用いられる、以下に示すレイリーの粗さ基準で示される¹⁾。

$$g = \frac{4\pi S_h}{\lambda} \sin \Psi \quad (3-10)$$

g : レイリーの粗さ基準 S_h : 第一フレネルゾーン内凹凸高の標準偏差
 λ : 波長 Ψ : 接平面に対する接地角

式 (3-10) より、一般に $g < 0.3$ であれば、表面は滑らかであると考えられる。実際に衛星電波が地面から鏡面反射する状況を考えて、GPS の L1 波 (波長 : 約 19cm) および L2 波 (波長 : 約 24cm) を例とした場合、図 3-7 のような関係が成り立つ。接地角が低いほど、 S_h の値が高くなる傾向にあり、表面が粗くとも鏡面反射が起こりやすいことが予想される。なお、ビル等の地物からの鏡面反射を考えた場合は、衛星の仰角が高いほど鏡面反射が起きやすいという結果となるが、実際の測位において、高仰角衛星からのマルチパスはほとんど起きないため、接地角 45° 以上にて示される S_h の値に対して鏡面反射が起こることが予想される。

式 (3-10) で示したフレネルゾーンについても述べておく。図 3-8 に示すように、送信点 T と受信点 R との間に点 C を考え、TC と CR の距離を d_1 および d_2 、電波波長を λ 、C を通り TR に垂直な内点に点 M を考える。点 T および R を二つの焦点とする回転楕円体のうち、 n を正整数

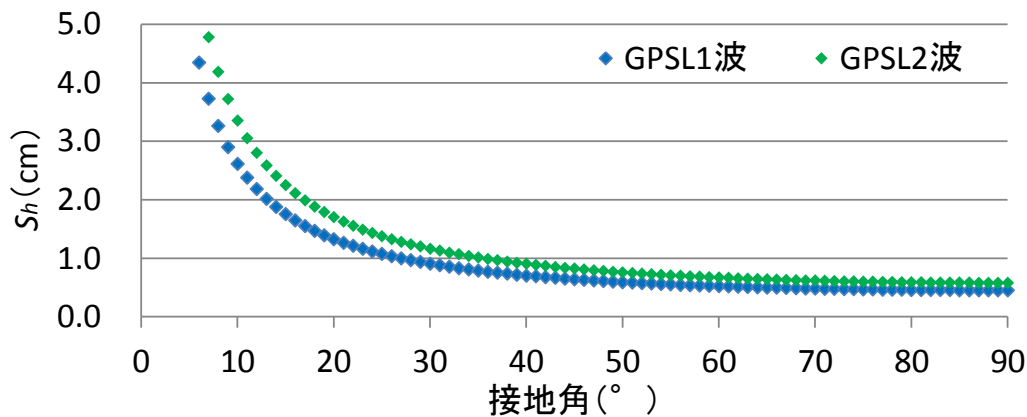


図 3-7 GPS L1 波, L2 波における $g < 0.3$ となる接地角と S_h の関係

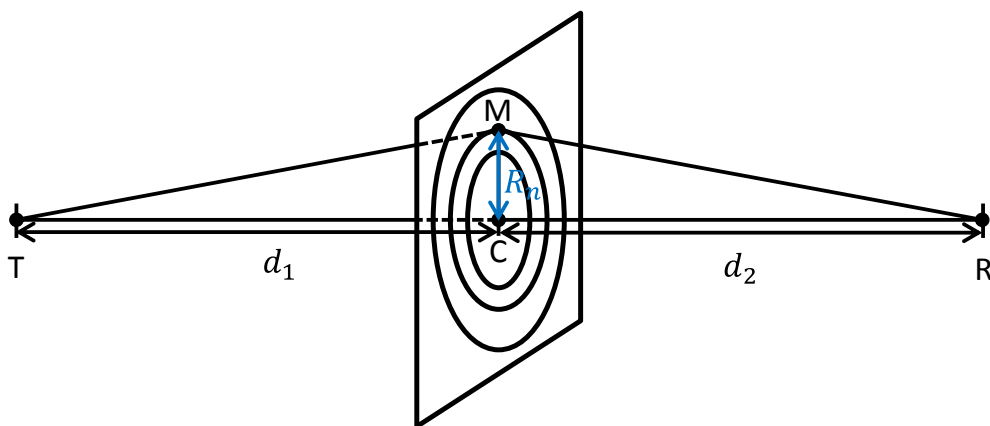


図 3-8 フレネルゾーンの説明⁶⁾

として次式を満たすものを第 n フレネル回折楕円体 (Fresnel ellipsoid) という。

$$TM + MR - TR = \frac{n\lambda}{2} \quad (3-11)$$

CM を含む平面内において第 n と第 $n-1$ フレネル回折楕円体とによって囲まれる帯状の部分を第 n フレネルゾーンといい、その半径 R_n は次式で与えられる。

$$R_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (3-12)$$

送信点 T と受信点 R との間のフレネルゾーン内に建物や木などの遮蔽物が存在する場合、電磁波のエネルギーが十分伝達されない事になり、受信電波の強度を下げる要因となる。そのため、フレネルゾーンは、反射波や回折波の特性を計算する上での重要なパラメータとなる。

レイリーの粗さ基準と同様、実際の衛星電波を受信する状況を考える。GPS の L1 波と L2 波を例として、 d_1 に GPS 衛星の軌道高度 (20,200m) を適用し、 d_2 に各々の値を与えて第 1 フレネルゾーン計算すると、図 3-9 のような結果が得られる。衛星から受信点までの見通し線上において、受信点から d_2 の地点に半径 R_1 の円内に障害物があると、衛星からの信号強度は低下することが予想される。この関係は、 d_2 の距離が短いほど影響は大きくなるため、衛星測位においては、アンテナを遮蔽物から離して設置したほうが良いといえる。

衛星測位において、反射波を受信する状況では、式 (3-7) のように直接波とマルチパスである反射波を同時受信する場合と反射波のみを受信する 2 通りが考えられる。反射波のみを受信する場合は、図 3-10 に示すように、受信機内の相関処理において遅延信号を追尾してしまうため、直接波と反射波の加算信号よりもマルチパスによる誤差は大きく、信号強度も直接波よりも弱くなるものと想定される。一方、直接波と反射波を同時受信する場合は、直接波に対して反射

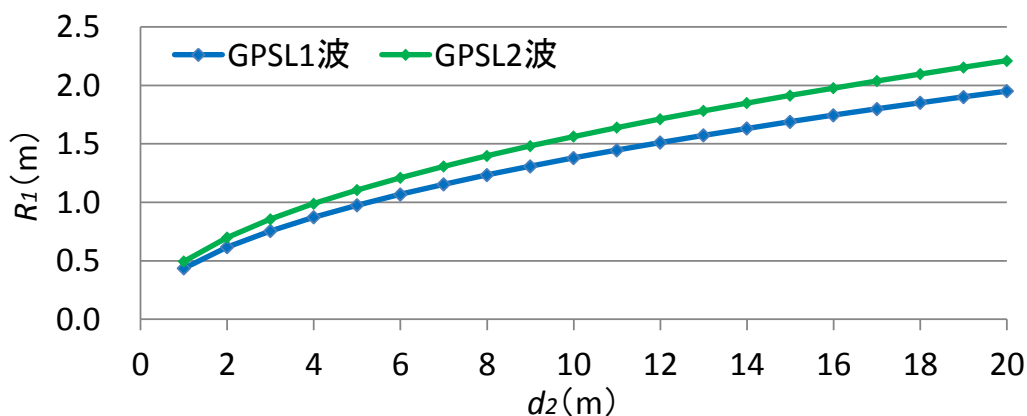


図 3-9 GPS L1 波, L2 波における d_2 と R_1 の関係

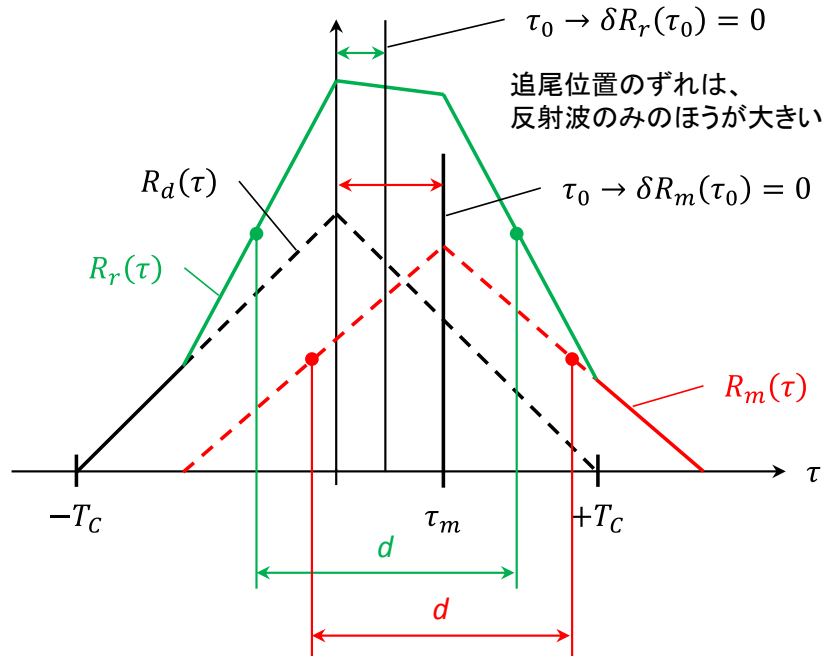


図 3-10 直接波+反射波と反射波のみの相関関数

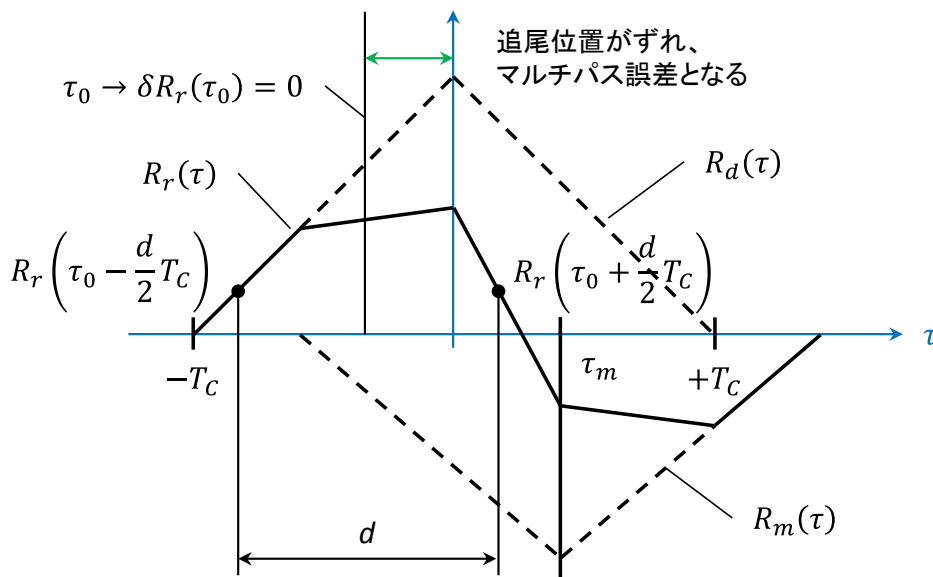


図 3-11 逆位相の反射波を受信した相関関数

波が同位相で到達する場合と逆位相で到達する場合の 2 通りが考えられ、信号強度も直接波よりも強くなる場合と弱くなる場合の 2 通りが想定される。図 3-11 は、直接波に対して反射波が逆位相で受信した場合の相関関数の例である。同位相で受信した場合は、図 3-3、または図 3-4 に示す相関関数となり、受信信号は、直接波と反射波の加算信号であるため、同位相の場合は直接波よりも信号強度が強くなる。一方、逆位相の場合は、図 3-11 に示す受信信号より、直接波よりも信号強度が弱くなる。なお、逆位相の場合で弁別関数が 0 になる位置を探した場合、追尾位置は直接波の相関ピーク位置よりも左側となり、反射波が同位相の場合の追尾位置とは逆となる。

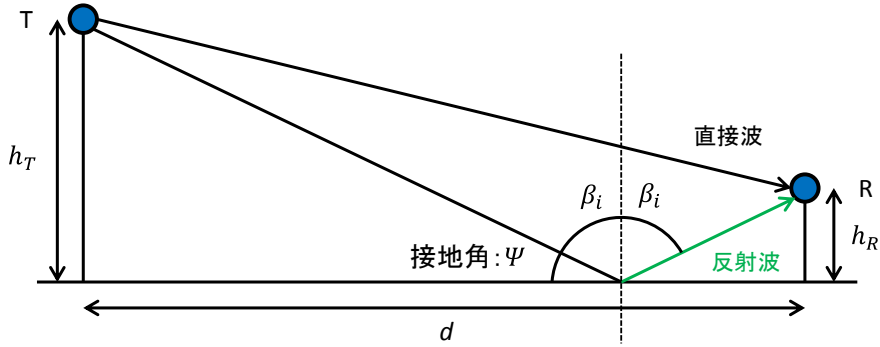


図 3-12 2 波モデル（直接波と大地反射波）⁶⁾

この場合、追尾ループで取り出されるコード等の距離測定に関する観測値は、直接波よりも短い結果となる。

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 波モデル等の多重波伝搬を表現するモデルを用いて傾向を確認することができる。2 波モデルでは、図 3-12 に示すような平面大地からのマルチパスを表現する。見通し内伝搬の中でも最もシンプルなケースであり、送受信のアンテナ高 \$h_T\$、\$h_R\$ に対して距離 \$d\$ が十分大きいとき、受信信号の強度は以下の式で表される。

$$E = |E_d \{1 + \gamma \exp(-j\delta\varphi)\}| \quad (3-13)$$

\$E\$: 受信信号の強度 \$E_d\$: 直接波の信号強度 \$\gamma\$: 反射係数 \$\delta\varphi\$: 位相差

ここで、位相差については、直接波と反射波の行路差 \$\delta l\$ に波数 \$k\$ を乗じることで求められるため、以下の式で計算できる。

$$\delta\varphi = k \cdot \delta l = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \left\{ \sqrt{(h_T + h_R)^2 + d^2} - \sqrt{(h_T - h_R)^2 + d^2} \right\} \quad (3-14)$$

また、反射係数についても説明する。反射係数とは、入射波の振幅を 1 としたときの反射波の振幅を表した値であり、電磁波が円偏波である衛星電波では、水平偏波と垂直偏波の双方の反射係数を考える必要がある。平面大地の反射係数については、以下の式で表される⁶⁾。

$$R_0 = \frac{\sin \Psi - \sqrt{C}}{\sin \Psi + \sqrt{C}} \quad (3-15)$$

水平偏波 : \$C \equiv \varepsilon - \cos^2 \Psi\$ 垂直偏波 : \$C \equiv (\varepsilon - \cos^2 \Psi) / \varepsilon^2\$

\$\varepsilon = \varepsilon_r(f) - j60\lambda\sigma(f)\$

\$\varepsilon\$: 複素誘電率 \$\varepsilon_r(f)\$: 大地の比誘電率 \$\sigma(f)\$: 大地の導電率

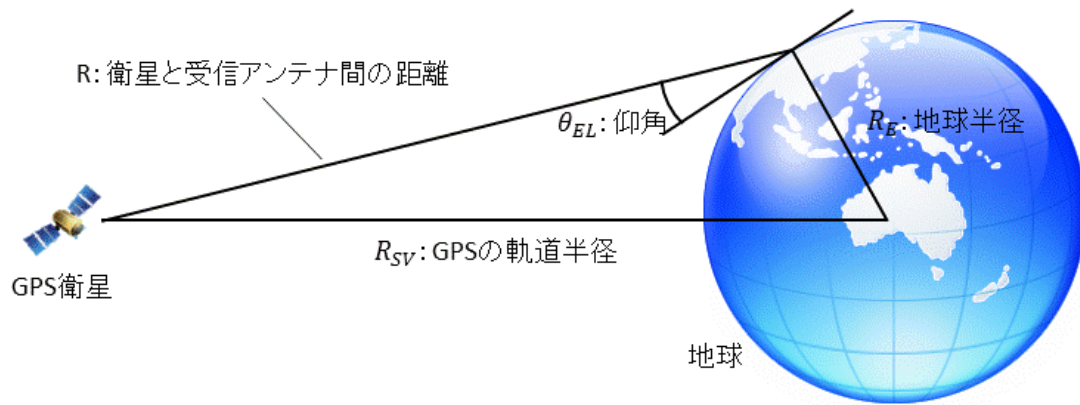


図 3-13 GPS 衛星と地球の幾何学的配置⁴⁾

式 (3-15) より、反射係数は、接地角と電波の波長、反射物となる媒質の複素誘電率によって値は-1~+1の間で変化し、接地角が 0° の場合、偏波に関わらず-1になることがわかる。マイナスの反射係数は、位相が 180° 変化したことを表しており、-1の場合、入射角と同じ振幅かつ 180° 位相が変化して反射した場合を示している。

次に、実際の衛星電波における信号強度を考える。GPSのL1波とL2波を対象とし、まず、直接波の信号強度について、ここでは衛星電波の受信電力を適用する。衛星から地上までの受信電力レベルの最小値は、送信電力や伝送損失、アンテナ利得によって異なるが、バンド幅20.46MHzのブロックII R-M・II FのGPS衛星において、L1波のC/Aコードで-158.5dBW、L2波のL2Cコードで-160.0dBWとなる⁸⁾。送信アンテナ高 h_T および距離 d については、衛星と受信アンテナ間の距離 R を算出し、距離 R と衛星の仰角から求める。距離 R は以下の式で求められ、GPS衛星と地球の幾何学的配置は図3-13に示すような関係となる⁴⁾。

$$R = -R_E \sin \theta_{EL} + \sqrt{R_E^2 (\sin^2 \theta_{EL} - 1) + R_{SV}^2} \quad (3-16)$$

$$R_E \approx 6371 \times 10^3$$

$$R_{SV} \approx 26560 \times 10^3$$

$$R : \text{衛星と受信アンテナ間の距離 (m)} \quad \theta_{EL} : \text{衛星の仰角 (}^\circ\text{)}$$

$$R_E : \text{地球半径 (m)} \quad R_{SV} : \text{GPSの軌道半径 (m)}$$

式 (3-16) は、衛星の仰角の関数であり、衛星位置に応じたアンテナ高 h_T および距離 d は、以下の式で求められる。

$$h_T = R \sin \theta_{EL} \quad (3-17)$$

$$d = R \cos \theta_{EL} \quad (3-18)$$

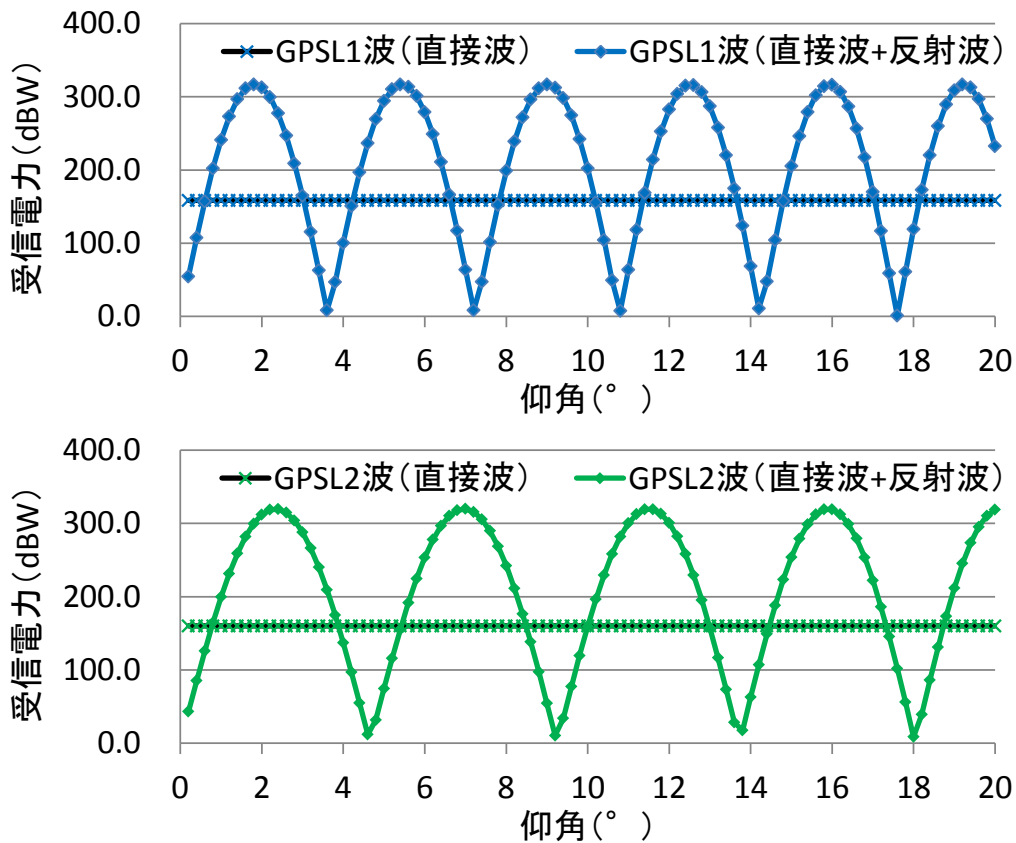


図 3-14 GPSL1 波, L2 波における直接波と反射波を同時受信した場合の受信電力

算出した h_T , d に加え, 受信アンテナ高 h_R を 1.5m, 反射係数 γ を-1として L1 波と L2 波の受信信号の電力を求める. なお, $\gamma = -1$ の場合, 受信信号の強度 E , 位相差 $\delta\varphi$ は, 以下の式で表すことができる⁶⁾.

$$E = 2 \left| E_a \sin \frac{\delta\varphi}{2} \right| \quad (\gamma = -1 \text{ のとき}) \quad (3-19)$$

$$\delta\varphi = \frac{4\pi h_T h_R}{\lambda d} \quad (3-20)$$

上記の式より, 直接波と反射波を同時受信した場合の受信電力を求めると図 3-14 のような結果が得られる. 直接波の電力に対し, 仰角の変化すなわち経路差の変化によって, 受信強電力が強まる場合と弱まる場合が交互に訪れることがわかる. 実際の測位においては, 受信アンテナの利得により, 直接波の受信電力は衛星位置に応じて変化し, 反射物となる媒質に応じて反射係数も変化するが, 鏡面反射が起きるような測位環境であれば, 受信電力は図 3-14 のような傾向が得られるものと考えられる. また, この傾向は直接波と反射波の位相差によって発生するため, 信号強度についても同様のものが想定される. よって, 信号強度の傾向を追跡することで, 相関処理では抑制できないマルチパスの有無を確認することができるものと考えられる. しかしなが

ら、受信アンテナから見た衛星の移動は緩やかなものであり、また、マルチパスの影響を受ける信号の強度が直接波に対して増減する関係上、直接波のみの場合と信号強度がほとんど同じになる場合が発生する。図 3-14 を見てもわかるように、位相差によっては、受信電力が直接波のみの場合と直接波と反射波を同時受信した場合で同じ値となる個所が確認できる。この場合でも、マルチパス誤差は起きるため、衛星位置によっては、信号強度でもマルチパスの有無を確認できない観測時間帯が発生するものと想定される。

3-2-2 回折波

電波が障害物などをかすめたときに幾何学的に直進しないで、影の部分に回り込む現象を回折という。このような現象により、受信点 R から送信点 T に対して視通できない場所でも衛星電波の受信が可能となる。回折した電波は、当然ながら直接波よりも伝搬距離は長くなるため遅延信号となり、回折波のみの受信となる場合、反射波のみの受信と同様にマルチパスによる誤差は大きくなるものと想定される。また、回折により信号強度の損失（回折損）が生じるため、直接波よりも信号強度が低下するものと考えられる。

回折波を受信した場合の信号強度の特性については、単一无限長ナイフエッジ回折モデル等の地物による回折を表現するモデルを用いて傾向を確認することができる。単一无限長ナイフエッジ回折は、図 3-15 に示すように、送受信点間に山岳などの障害物があり、その伝搬方向に垂直な方向の長さが無限であると近似できる場合の回折損を表現する。ここで、回折パラメータ v は、次式で定義される。

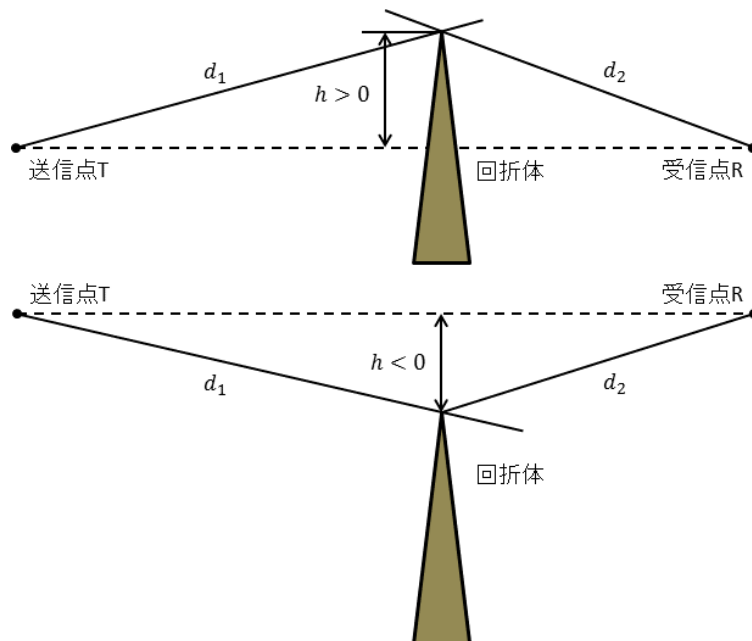


図 3-15 単一ナイフエッジ回折⁶⁾

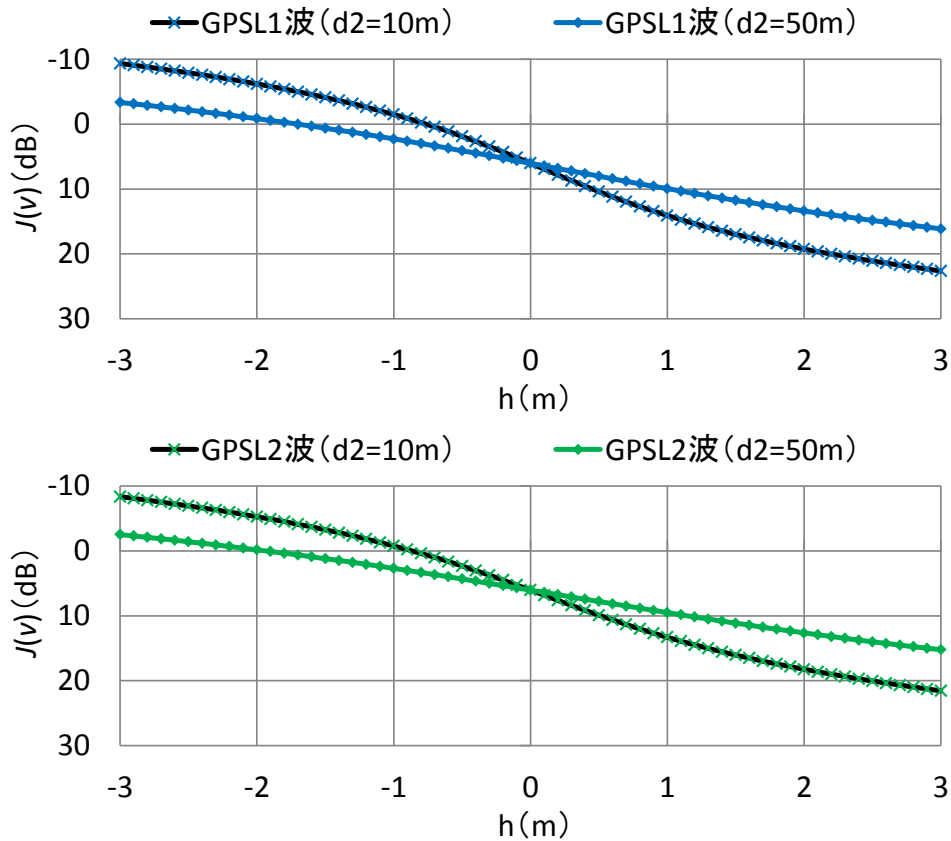


図 3-16 GPSL1 波, L2 波におけるナイフエッジ回折損

$$v \equiv h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} \quad (3-21)$$

v : 回折パラメータ h : 障害物頂上と送受信点見通し線との距離 (m)

d_1 : 送信点と障害物頂上との距離 (m) d_2 : 受信点と障害物頂上との距離 (m)

ここで, h は頂上が見通し線以下にある場合を負とし, d_1 と d_2 は実用上は見通し線上の障害物位置までの距離で近似される場合が多い. また, 見通し線と障害物頂上が交わる場合, 波長, 送受信点と障害物頂上との距離に関わらず, 回折パラメータは 0 となることがわかる. 回折損 $J(v)$ (dB) は次式で近似される⁶⁾.

$$J(v) = 6.9 + 20 \log \left(\sqrt{(v - 0.1)^2 + 1} + v - 1 \right) \quad (-0.7 \leq v) \quad (3-22)$$

実際の衛星電波による回折損を考える. GPS の L1 波と L2 波を例として, d_1 に GPS 衛星の軌道高度 (20,200m), d_2 に 10m と 30m を適用し, h に各々の値を与えて回折損を求めると, 図 3-16 のような結果が得られる. L1 波, L2 波ともに d_2 の距離が短いほど, 回折損は大きくなる傾向が見られ, 実際の衛星測位においては, アンテナを遮蔽物から離して設置したほうが回折波の影響を小さくできるといえる. また, L1 波, L2 波ともに $h = 0$ のとき, 送受信点と障害物頂上との距

離に関わらず回折損 $J(v)$ 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、信号強度の値より回折波によるマルチパスの有無を確認することができるものと考えられる。

3-2-3 衛星の可視条件とマルチパスの影響

反射波、回折波による衛星電波の伝搬特性について説明してきたが、これらの電波は直接波とは異なる経路を通して伝搬するため、直接波が受信できない環境、すなわち衛星と受信アンテナの見通し線上に障害物がある環境でも受信することがわかる。衛星と受信アンテナを視通できる場合を可視衛星、視通できない場合を不可視衛星と表現すると、不可視衛星から受信する電波は、反射波と回折波による遅延信号のみによる加算信号となる。一方、可視衛星からは、直接波を受信でき、衛星位置と遮蔽物となる地物位置によっては、反射波、または回折波を含んだ加算信号となる。図 3-17 に衛星位置から想定される受信電波を示す。

この場合、明らかにマルチパス誤差を含んでいるのは、不可視衛星の受信電波であり、測位計算上、使用しないほうが望ましいといえる。疑似距離を使用する単独測位、ディファレンシャル測位では測位誤差の原因となりうる。また、搬送波位相を使用する干渉測位では、整数不定性を推定する際に使用するディファレンシャル測位による観測距離に誤差が含まれているため、初期化が完了できず、Fix 解が得られない可能性がある。

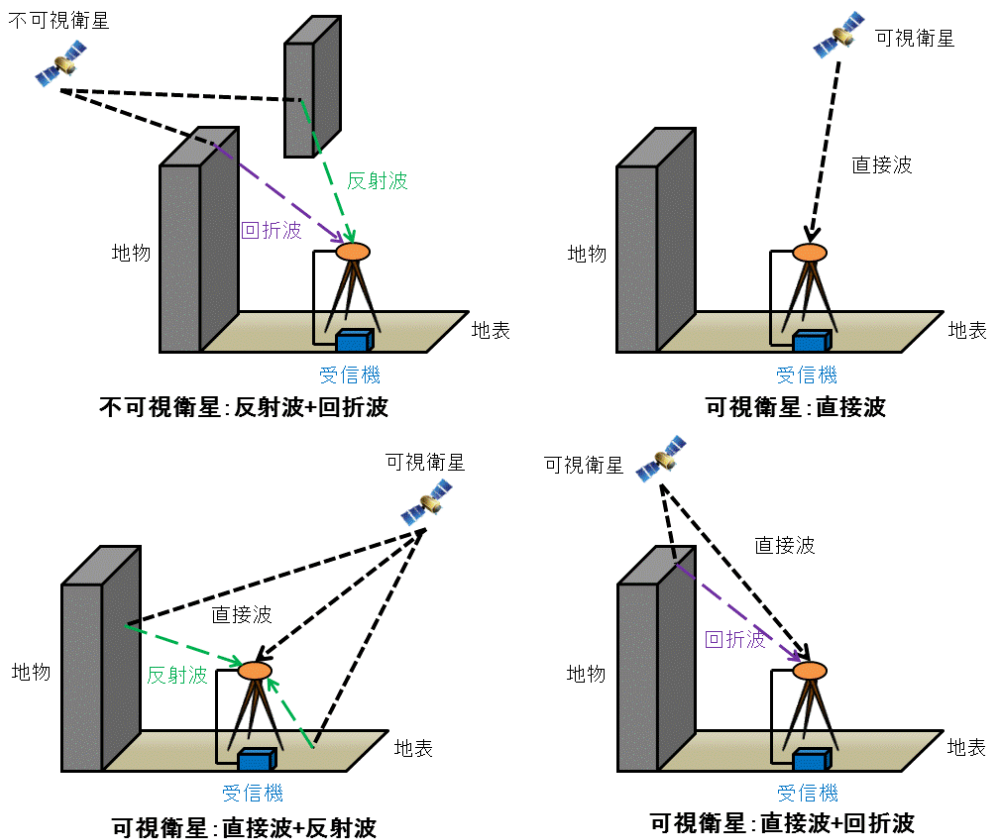


図 3-17 衛星の可視条件と想定される受信電波

衛星の可視条件を判断する方法として、受信機から出力される観測値から判断する場合、信号強度が効果的であると考えられる。回折波の伝搬特性を見てもわかるように、障害物頂上と送受信点の見通し線が交わる場合、回折損は電波の周波数等に関わらず約 6dB となり、さらに $h > 0$ 、すなわち不可視衛星となった場合、図 3-16 でも示したように回折損がさらに大きくなる。よって、信号強度の値を追跡することで、衛星の可視条件をおおよそ把握することができると考えられる。また、そのほかの方法として、遮蔽物となる地物位置と衛星位置を組み合わせることで、衛星の可視条件を直接判断する方法があるが、これは次の節で述べる。

3-3 衛星の可視条件による誤差電波の推定

3-3-1 地物位置情報を用いた推定方法

不可視衛星からの受信電波はマルチパスの影響を含んでおり、衛星の可視条件を判断する方法として、受信機から得られる観測値の一つである信号強度が効果的であることを先ほど述べた。ここでは、信号強度以外の方法で衛星の可視条件を判断する方法を述べる。

衛星と受信アンテナの見通し線上の障害物の有無を判断する場合、少なくとも以下の2つの情報が必要になると考えられる。

- 衛星の位置情報
- 受信アンテナと周囲の地物の位置関係

衛星の位置情報については、受信電波の航法メッセージに含まれるエフェメリス、およびアルマナックにより入手することができ、アルマナックについては、インターネット上から入手することもできる。例えばGPSについては、米国沿岸警備隊ナビゲーションセンターのHPよりアルマナックを公開しており、また、受信機メーカーの一つであるTrimble社のHPにおいても、GPS等のアルマナック情報を入手することができる。

受信アンテナと周囲の地物の位置関係については、地物の位置 (X_s, Y_s, Z_s) が既知の場合、受信アンテナの位置情報 (X_r, Y_r, Z_r) を与えることで計算により求めることができる。衛星の可視条件を判別する場合、衛星位置については、受信アンテナ位置における方位角と仰角で表現される場合が多いため、地物位置についても同様に、方位角（真北を 0° とする方向角）と仰角を以下の式より算出する。

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{Y_s - Y_r}{X_s - X_r} \right) \quad (3-23)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{Z_s - Z_r}{\sqrt{\{(X_s - X_r)^2 + (Y_s - Y_r)^2\}}} \right) \quad (3-24)$$

φ : 地物の方位角 ($^\circ$) θ : 地物の仰角 ($^\circ$)

上記の式より得られた地物の方位角と仰角に対して、衛星の方位角と仰角の比較を行う。同方位角において、地物の仰角が衛星の仰角よりも高くなる場合、その衛星は不可視であると判断することができる。しかしながら、この方法で衛星の可視性を判断する場合、地物位置と受信アンテナ位置の取得が不可欠となる。アンテナ位置については、衛星電波の観測値から得られた単独測位等の結果を用いることができるが、地物位置については、建物や樹木など種類・形状は様々



図 3-18 3次元レーザースキャナ（Riegl社製：LMS-Z420i）



図 3-19 3次元点群データによる地物の表現（日本大学工学部船橋キャンパス）

であり，容易に取得することはできない．この問題に対処した方法として，筆者が一部関わった研究である，3次元レーザースキャナ（図 3-18）により取得された3次元点群データによって地物の位置情報を取得する方法がある．

3次元レーザースキャナとは，対象物に対してレーザーを連続照射し，スキャナから地物までの距離と角度を高精度に求める機器である．広範囲かつ高密度に対象物の計測が可能であり，さらに，計測エリア内に人が立ち入る必要もないため，崖面などの危険箇所や高層ビル等の高い位置の地物に対しても有効である．取得した点群データは，各々の点に対して (X, Y, Z) の3次元の座標を持っているため，図 3-19 に示すように，建物や樹木等の地物を詳細に表現することが

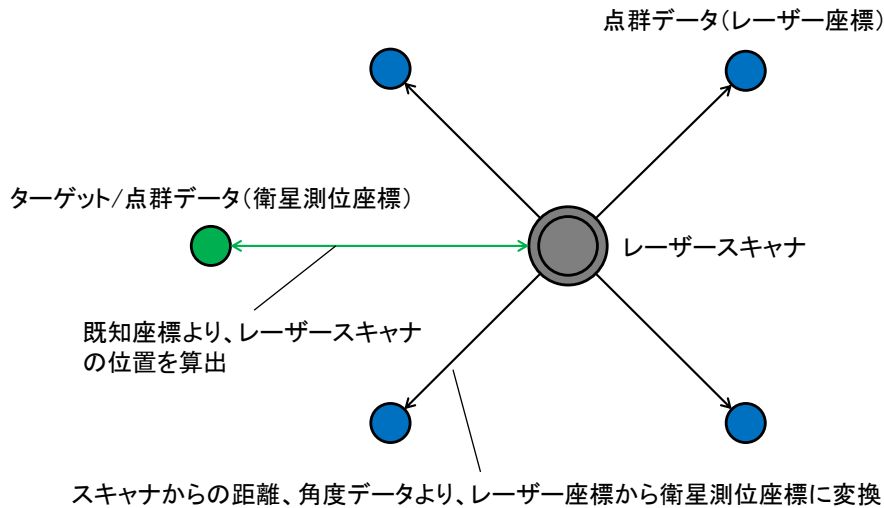


図 3-20 点群座標の変換イメージ

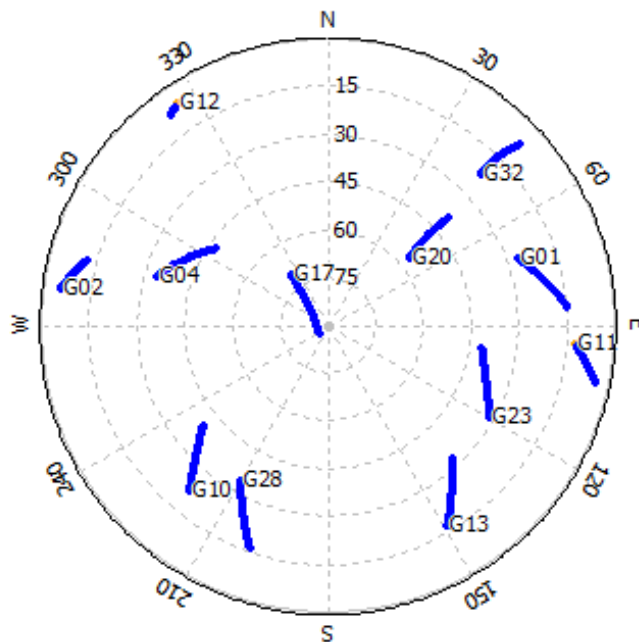


図 3-21 天空図による衛星位置の表示 (RTKLIB Ver.2.4.2 を使用)

できる。また、点群データの座標値は、用途に応じて変更することができる。例えば、レーザー扫描仪の計測エリア内において、既知点上に計測用のターゲットを設置することで、計測した全ての点群データを既知点座標に関連づけることができる (図 3-20)。そのため、衛星測位で得られる座標値と容易に合わせることができる。

以上の方法を用いることで、地物の位置情報が取得でき、アンテナの位置情報を与えることで、各々の点データに対して、式 (3-23)、式 (3-24) より地物の方位角と仰角が算出できる。なお、地物位置と衛星位置の比較については、両者を同一の天空図に表示することで視覚的に判別する手法が構築されている。衛星位置の表示については、図 3-21 に示すように天頂を中心とする半球空間で表現される天空図であることが多く、地物位置についても同様の表示を行うこと

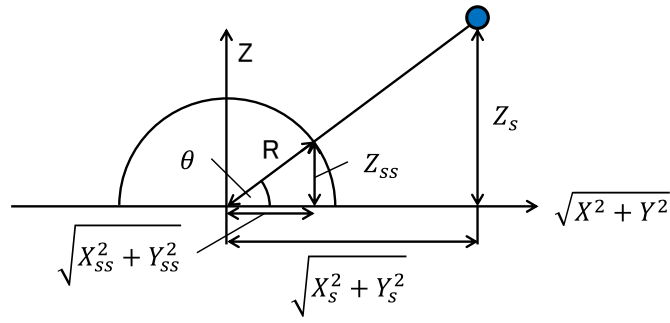


図 3-22 地物位置と投影面の位置関係

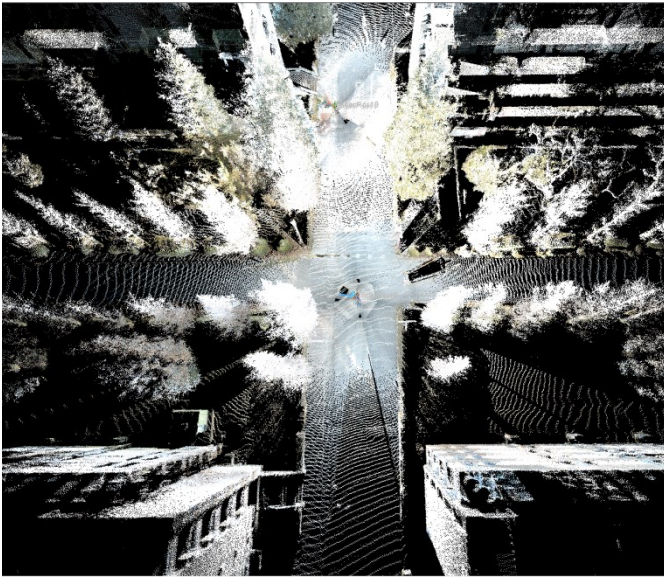


図 3-23 投影対象となる地物の点群データ

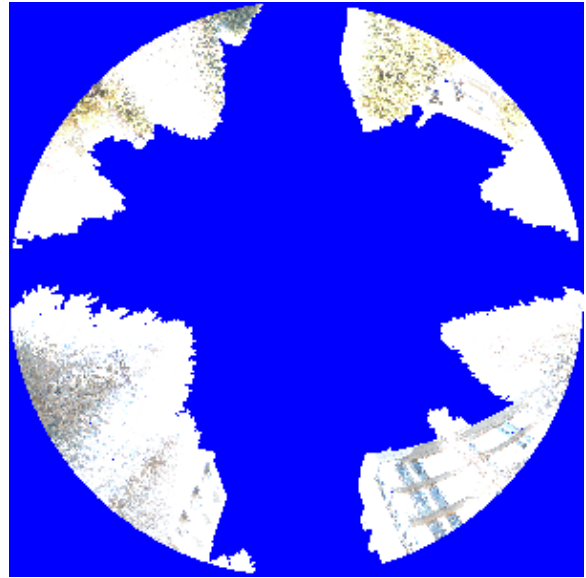


図 3-24 点群データの投影結果

で、視覚的な表現が可能になると考えられる．地物の表示方法については、図 3-22 に示すように半径の長さが既知である半球体の表面に地物を投影するものとし、方位角別に以下の式を地物座標に対して適用する．

$$\theta = \tan^{-1} \frac{Z_s}{\sqrt{X_s^2 + Y_s^2}} \quad (3-25)$$

$$\sqrt{X_{ss}^2 + Y_{ss}^2} = R \cos \theta \quad (3-26)$$

$$Z_{ss} = R \sin \theta \quad (3-27)$$

(X_{ss}, Y_{ss}, Z_{ss}) : 投影後の地物座標 R : 投影物となる半球体の半径

実際に点群データを用いて投影を行った例を示す．図 3-23 に示すように、道路が直角に交わる十字路と斜め方向に建物や樹木による地物がある場合の点群データを用意して投影を試みる．図 3-24 に点群データの投影結果を示す．図 3-23 より、斜め方向に点在する地物が図 3-24 でも

● :GPS衛星(観測可能) ● :GPS衛星(観測不能)

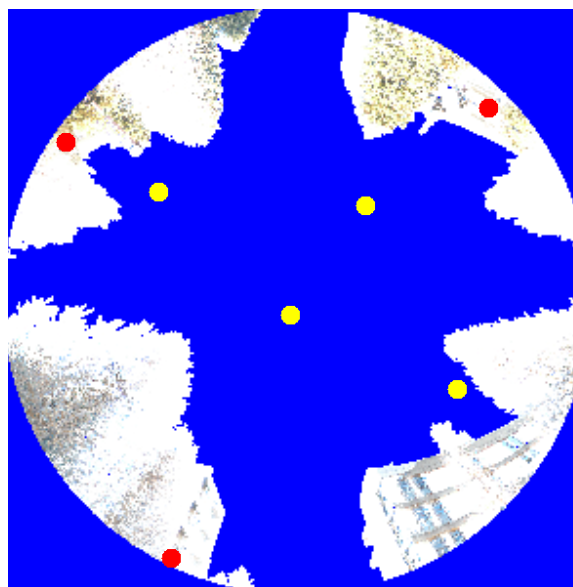


図 3-25 点群データによる地物位置と衛星位置

同位置に表示されており，道路上は上空が開けていることがわかる．また，図 3-21 と同様に天頂方向を中心とした天空図であるため，衛星の位置情報を重ねることで，衛星の可視条件を判断することが可能となる（図 3-25）⁹⁾．

なお，本項で述べた手法は，本研究において，信号強度による回折波の判別と後述するマルチパス判別手法の検証において使用している．対象となる衛星の可視条件を判断するため，アンテナ位置を中心に地物の方位角と仰角を点群データから算出した．

3-3-2 画像データを用いた推定方法

ここでは，3次元の地物位置情報を用いない衛星可視条件の推定方法について述べる．前項で述べた手法は，3次元の地物位置情報を用いて，アンテナ位置における地物の方位角と仰角を算出し，天空図上に地物位置と衛星位置の情報を重ねることで衛星の可視条件を判断する方法である．しかし，3次元点群データを使用する関係上データ容量が膨大となり，静止測位や移動測位を行う際の観測状況をシミュレーションする場合は有効であるが，現地の RTK 測位等による実時間観測に適用するのは困難である．そこで，地物の位置情報に関して容量の小さいデータの使用が考えられる．先ほど述べたように，地物と衛星の位置情報を重ね合わせることで衛星の可視条件を判断することが可能なことから，カメラにより取得した画像データを天空図状に加工することで地物位置を判別することができるものと考えられる．

早稲田大学理工学研究所の鈴木らが行った研究では，不可視衛星からの電波を赤外全周映像（IR-ODV: Infrared Omni-Directional Vision）を用いて判別しており，タイトカップリングによる慣性センサ複合（TC-GPS/INS）による移動体の位置推定を行っている．不可視衛星を棄却

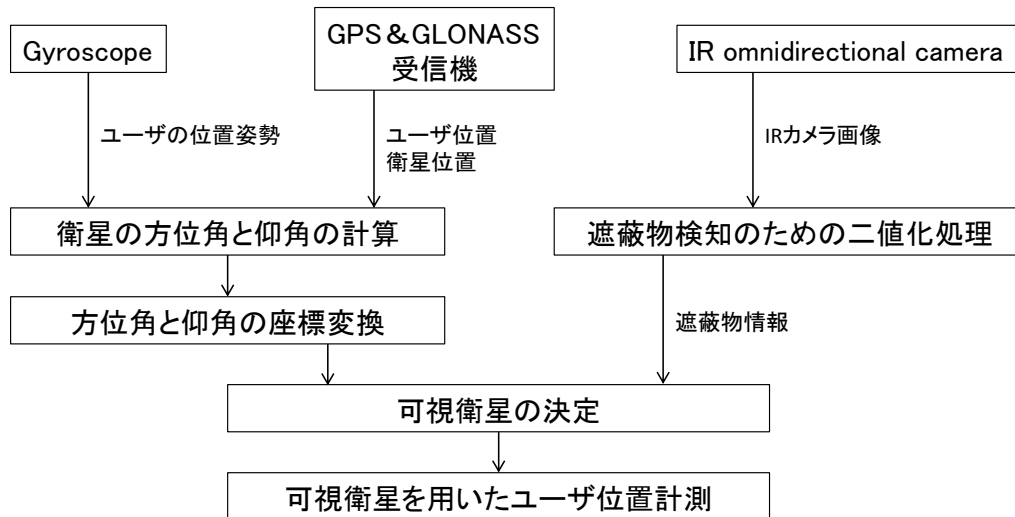


図 3-26 IR-ODV 画像を用いた可視衛星の判別手法

することで、マルチパスによる大きな誤差を削減し、位置推定精度の向上が静止時、移動時ともに確認されている。

研究手法の概要について説明する（図 3-26）。まず、GPS と GLONASS の統合型受信機により車両と衛星の位置を算出し、さらに、ジャイロによって車両の位置姿勢を推定することで、各々の衛星の方位角と仰角を求める。また、車両に設置した IR カメラにより周囲の撮影を同時に行い、電波遮蔽物となる地物の検出を行う。このとき、IR カメラにより撮影された画像は、大気と地物との透過率の差から天頂方向の障害物は白色に、空は黒色で表示される。この画像に対し、二値化処理を行うことで衛星を遮蔽する地物位置情報を抽出することが可能となる。衛星の方位角と仰角は、この二値化画像上にプロットするため座標変換が行われ、最後に、これら 2 つのデータを組み合わせることで衛星の可視性の判断が可能となり、可視衛星のみを用いた衛星測位が可能となる¹⁰⁾。

ここまで、IR-ODV を用いた衛星可視条件の判別方法について述べてきた。GPS と GLONASS による不可視衛星からの電波を受信した場合でも、提案手法を用いることで、誤差の大きい衛星を除外して測位計算が行えることがわかった。今後、GPS、GLONASS だけでなく、QZSS 等の新たな測位システムにも対応できれば、有用性をさらに高めることができると思われる。

3-4 まとめ

本章では、受信機内部における衛星電波の処理とマルチパスの関係について整理し、マルチパスとなる反射波、回折波の電波の伝搬特性について述べた。衛星測位におけるマルチパスの誤差とは、衛星からの受信電波と受信機内部の生成電波による追尾位置のズレのことであり、これにより、衛星と受信アンテナ間の距離に誤差が含まれることになる。マルチパスの影響を抑制する方法としては、受信機内部の相関器の工夫があり、現在販売されている高精度な測量用受信機の多くは様々な方法によりマルチパスの抑制が図られている。しかしながら、完全にマルチパスの影響をゼロとすることは現状において困難であり、不可視衛星からの受信電波に対しては、相関処理とは異なる方法で除去する必要がある。

不可視衛星からのマルチパスについては、回折波の信号強度の特性、衛星位置と遮蔽物位置を組み合わせることで検知できる可能性がある。しかし、可視衛星からの反射波によるマルチパスに対しては、直接波と反射波による電波伝搬の特性から検知することは困難であると考えられる。また、干渉測位による高精度測位を考慮した場合、mm～cm オーダーで距離算出を行うことになるため、同レベルの精度でマルチパスを検知する必要があるといえる。

本章の内容を踏まえて、マルチパスの検知について可視衛星からの反射波によるマルチパスにも対応した手法を提案し、手法の検証と干渉測位方式への適用も踏まえて、以降の論文では述べるものとする。

第3章 参考・引用文献

- 1) 西修二郎 : GNSS のすべて, 古今書院, pp.52-62, pp.72-83, pp.135-137, 2010.2.
- 2) 土屋淳, 辻宏道 : GNSS 測定の基礎, 日本測量協会, pp.153-154, 2008.3.
- 3) Bradford W. Parkinson, James J. Spilker Jr. : Global Positioning System: Theory and Applications Volume I , pp.329-335, pp.372-375, 1996.
- 4) Pratap Misra and Per Enge : Global Positioning System Signals, Measurements, and Performance Second Edition, Ganga-Jamuna Press, pp.395-396, pp.421-422, 2006.3.
- 5) 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.
- 6) 細矢良雄 : 電波伝搬ハンドブック, pp.19-20, pp.23-24, pp.125-126, 1999.1.
- 7) 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.
- 8) Global Positioning System Directorate Systems Engineering & Integration Interface Specification IS-GPS-200, 2011.9.
<http://www.navcen.uscg.gov/pdf/IS-GPS-200F.pdf> (入手 2013.10)
- 9) Tatsunori Sada, Hideaki Fukumori, Tetsuya Shimizu, and Tetsuhiro Ishizaka : Method to Simulate the Type of RTK Solution by Evaluating the Visibility of Satellites using 3D Point Cloud Data of Surrounding Obstacles , 2010 International Symposium on GPS/GNSS, pp.269-272, 2010.10.
- 10) Taro Suzuki, Mitsunori Kitamura, Yoshiharu Amano, and Takumi Hashizume : High-Accuracy GPS and GLONASS Positioning by Multi-path Mitigation using Omnidirectional Infrared Camera, IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.311-316, 2011.

第4章 提案するマルチパス検知手法

4-1 受信機から出力される観測値の傾向

受信機では、受信信号と生成したレプリカ信号の相関をとることで、追尾ループからコードや搬送波位相等の観測値が取り出される。しかし、受信信号にマルチパスによる遅延信号が含まれている場合、相関は歪まされ、本来の追尾位置からずれることになる。この信号追尾のずれがマルチパス誤差であり、受信機内の相関処理において抑制できない場合、結果としてコード追尾ループや搬送波追尾ループから取り出される観測値に誤差が含まれることになる。

以上のことから検討するに、観測値にマルチパス誤差が含まれる場合、衛星測位で使用する疑似距離や搬送波位相について、直接波による衛星電波から得られる測定値とは異なる結果が得られているものと考えられる。なお、衛星電波には第2章でも示したように、電離層と対流圏による遅延誤差に加え、受信機雑音による誤差も含まれているが、遅延誤差に関しては、観測点の基線長を短くすることで対処することができる。よって、図4-1に示すように、干渉測位と同様、基準局と移動局となる受信機を遅延誤差が大きく生じない位置関係で設置し、受信機雑音の影響をあらかじめ把握することで、マルチパスによる誤差のみを検知できる可能性がある。

ここでは、実際に受信機を用いて観測値を取得し、まず、前章で述べた信号強度の特性を用いてマルチパスの有無を確認する。次に、測定値である疑似距離や搬送波位相について、直接波による受信電波とマルチパスの影響を受けた受信電波との傾向の違いについて述べるものとする。

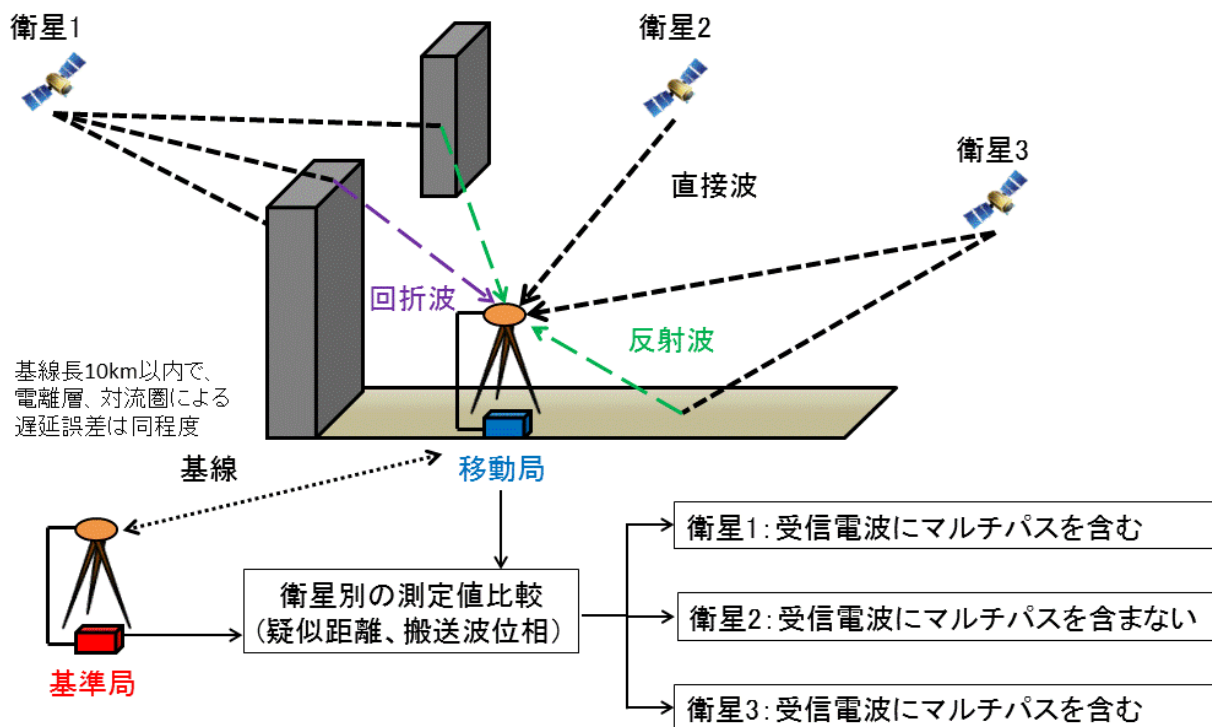


図4-1 衛星別の測定値を用いたマルチパス検知の例

4-1-1 観測値の評価方法

マルチパス誤差の有無による観測値の評価については、周囲の遮蔽環境が異なる2か所に複数衛星系の電波受信に対応したアンテナを設置し、同時測位により得られた疑似距離と搬送波位相の測定値の傾向を比較した。アンテナ設置位置は、図4-2に示す日本大学工学部船橋キャンパス内に設置した観測点上であり、今回の評価では、1台は建物の屋上による遮蔽物のない観測点（A0：遮蔽なし）、もう1台は、北方向に高さ20m程度の校舎がある観測点（B2：北遮蔽）に設置した。両観測点のアンテナ設置状況を図4-3に示す。また、受信電波の衛星系については、GPSとGLONASSの2種類とし、受信機は、双方のL1波、L2波に対応した機器として、ニコン・トリンプル社が販売するTrimble NetR8を両方のアンテナで使用した。データ取得間隔は

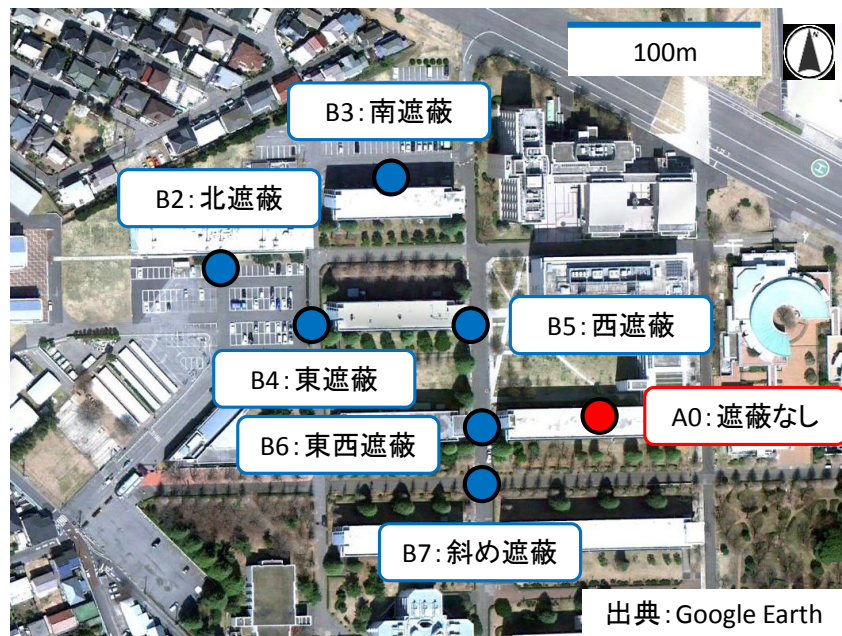


図4-2 アンテナ設置位置と遮蔽環境（日本大学工学部船橋キャンパス）



図4-3 アンテナ設置状況（左 A0：遮蔽なし 右 B2：北遮蔽）

は 1Hz であり, 観測日時は 2011 年 11 月 6 日 10:00~13:00 である. 得られた観測値については, RINEX フォーマットのバージョン 3.0 形式に変換して取得した.

RINEX に含まれる観測値については, 第 2 章でも述べたが, 観測データファイル, 航法メッセージファイル等であり, 観測データには, 観測コードに応じた疑似距離, 搬送波位相, 信号強度が含まれている. 信号強度の傾向の確認については, ファイル出力された値をそのまま使用できるが, 搬送波位相については, 整数不定性を含むデータであるため, 出力されたデータより衛星とアンテナ間の距離を算出しても正確な値とはならない. そこで, 本研究における搬送波位相の評価では, 出力された測定値の変化量を用いることにする. 電離層等による遅延誤差やマルチパス誤差は衛星位置等の観測条件により時々刻々変化するが, 整数不定性に関しては一定値であるため, 測定値を変化量とすることで整数不定性の項を無視することができる. 疑似距離についても, 出力された観測値から変化量を求めることができるので, 搬送波位相と同様に変化量を用いて評価を行うものとする.

本節における, マルチパス誤差による観測値の評価については, 以下の受信電波を対象とする.

- 直接波による受信電波
- 直接波と反射波による受信電波
- 反射波と回折波による受信電波

直接波による受信電波の観測値の評価については, 屋上の観測点に設置した受信機から得られた測定値を使用する. 周囲に遮蔽物のない環境であり, マルチパス誤差を含む電波を受信しないものと想定される. よって, 本項では, マルチパスの影響を受けない信号強度と仰角の関係について確認し, 同様に, 衛星仰角に依存する電離層と対流圏による遅延誤差の影響を疑似距離, 搬送波位相による測定値を用いて述べる. 衛星位置については, RINEX ファイルに含まれる航法メッセージから抽出した.

直接波と反射波による受信電波の観測値の評価については, 北遮蔽環境の観測点に設置した受信機から得られた測定値を使用する. 北方向に地物がある環境であり, 直接波による電波に加えて, 地物や地面からの反射波による電波を受信する環境を想定している. マルチパスによる影響は, 使用したアンテナや受信機の性能にもよるが, 今回アンテナを設置した観測点では, 付近に大きな地物があるため, 反射波, 回折波によるマルチパス誤差が大きくなる可能性がある. この項では, まず, 直接波と反射波による受信電波の信号強度について, 前章で述べた強度の増減が得られるか確認を行った. また, 反射波によるマルチパスの影響を受ける疑似距離, 搬送波位相による測定値の傾向について, 遮蔽物のない環境で得られた測定値と比較を行った.

反射波と回折波による受信電波の観測値の評価については, 先ほどと同様に, 北遮蔽環境の観測点で得られた測定値を使用する. 直接波を遮る北方向の地物から回折した電波に加えて, 周囲の地物から反射した電波を受信する環境を想定している. 本項では, 回折波の影響を受ける信号

強度について、前章で述べた強度の低下が得られるか確認を行い、次に、回折波によるマルチパスの影響を受ける疑似距離、搬送波位相による測定値の傾向を述べるものとする。

なお、同じ観測点で得られた測定値より、直接波と反射波による受信電波と反射波と回折波による受信電波を見分ける方法については、衛星の可視条件によって受信電波の構成が変化するため、前章で示した3次元点群データにより、アンテナから見た地物の方位角と仰角を算出し、衛星位置と組み合わせることで判別を行った。

4-1-2 直接波による受信電波からの観測値

(1) 観測点周囲の環境と衛星位置

観測値は、日本大学理工学部船橋キャンパスの校舎の屋上で取得したデータを使用した。観測点付近に衛星電波を遮るような大きな地物はなく、マルチパスによる電波は受信していないものと考えられる。

観測値の傾向を確認するにあたり、各々の衛星電波の観測時間、また衛星軌道により評価対象とする衛星を選択した。反射波と回折波によるマルチパスの影響も次項で述べるため、衛星位置に応じて、GPSとGLONASSで2衛星ずつ選択した。選択した衛星の軌道を図4-4に示す。衛星番号11番のGPS衛星は、観測開始時の仰角が 60° であり、天頂付近を通って仰角 45° となる推移であり、32番のGPS衛星は、仰角 10° から 50° となる推移であり、南方向から徐々に衛星高度が高くなる軌道であった。また、衛星番号04番のGLONASS衛星は、仰角 10° から 64° となる推移であり、18番のGLONASS衛星は、観測開始時の仰角が 48° であり、北方向を通って仰角 36° となる軌道であった。なお、本章以降、衛星系および番号別に衛星を表記する場合、衛星番号01のGPS衛星に対してはGPS:01番、衛星番号01のGLONASS衛星に対してはGLONASS:01番と表記する。

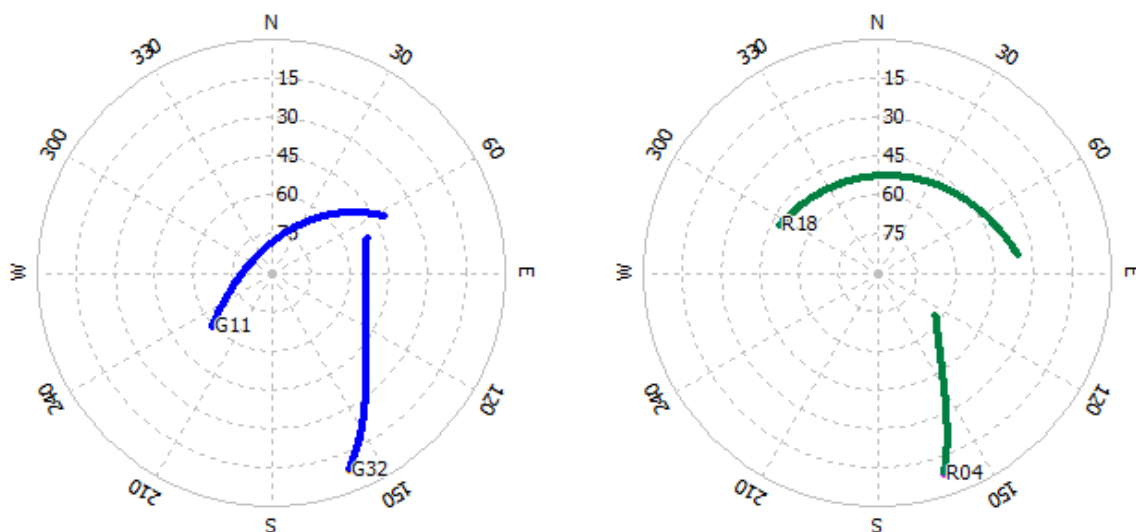


図4-4 評価対象とする衛星の軌道（左：GPS 右：GLONASS）

(2) 信号強度

GPSにおける、L1波とL2波の信号強度と仰角の推移を図4-5に示す。まず、GPS:11番について確認すると、仰角に関わらずL1波は約50dBHz、L2波は約40dBHzで一定に推移する傾向が見られた。一方、GPS:32番について確認すると、仰角45°以上となる時間帯においてはGPS:11番と同様の推移が確認できるが、45°以下となった場合、低仰角になるほど信号強度が低下し、仰角10°でL1波は約40dBHz、L2波は約20dBHzと信号強度の差も大きくなる傾向が見られた。GPSの信号強度が低下する要因としては、式(3-16)より、仰角が低くなるほど衛星と受信アンテナ間の距離は長くなるため、距離増加による伝送損失が主な要因と考えられる。また、仰角45°以上で信号強度が一定の推移となる傾向は、アンテナ利得の影響によるものと考えられる。さらに、L1波とL2波で信号強度に差が生じる要因としては、前章でも述べたようにL2波のほうがL1波よりも受信電力が低いことに加え、第2章でも述べたように、L2波の信号処理による影響が考えられる。

次に、GLONASSにおけるL1波とL2波の信号強度と仰角の推移を図4-6に示す。GLONASS:04番の傾向について確認すると、GPS:32番と同様に低仰角になるほど信号強度が低下するが、L1波とL2波で信号強度の差が大きくなるような傾向は見られなかった。また、GLONASS:18番の傾向について確認すると、仰角45°以上となる場合、L1波で約51dBHz、L2波で約47dBHzで一定に推移する傾向が見られ、仰角45°以下で徐々に信号強度が低下する傾向が見られた。GLONASSの信号強度が低下する要因としては、GPSと同様に衛星と受信アンテナ間の距離が長くなることによる伝送損失が考えられる。また、L1波とL2波で信号強度に差が生じる要因としては、グロナス-Mの受信電力レベルの最小値がL1波で-161.0dBW、L2波

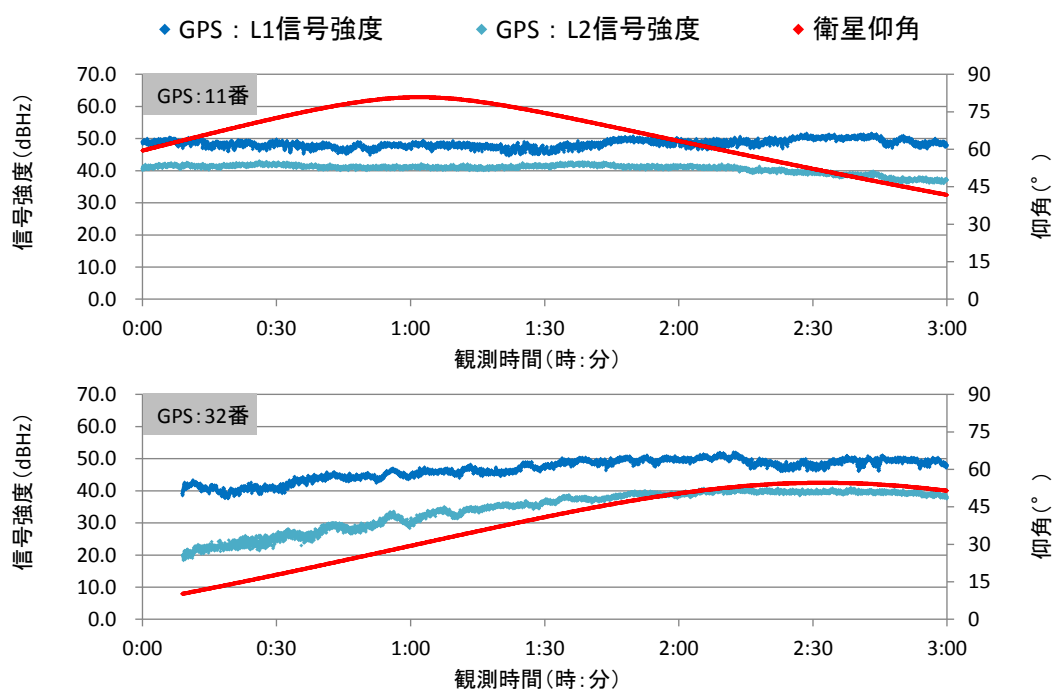


図4-5 直接波によるGPSの信号強度と衛星仰角

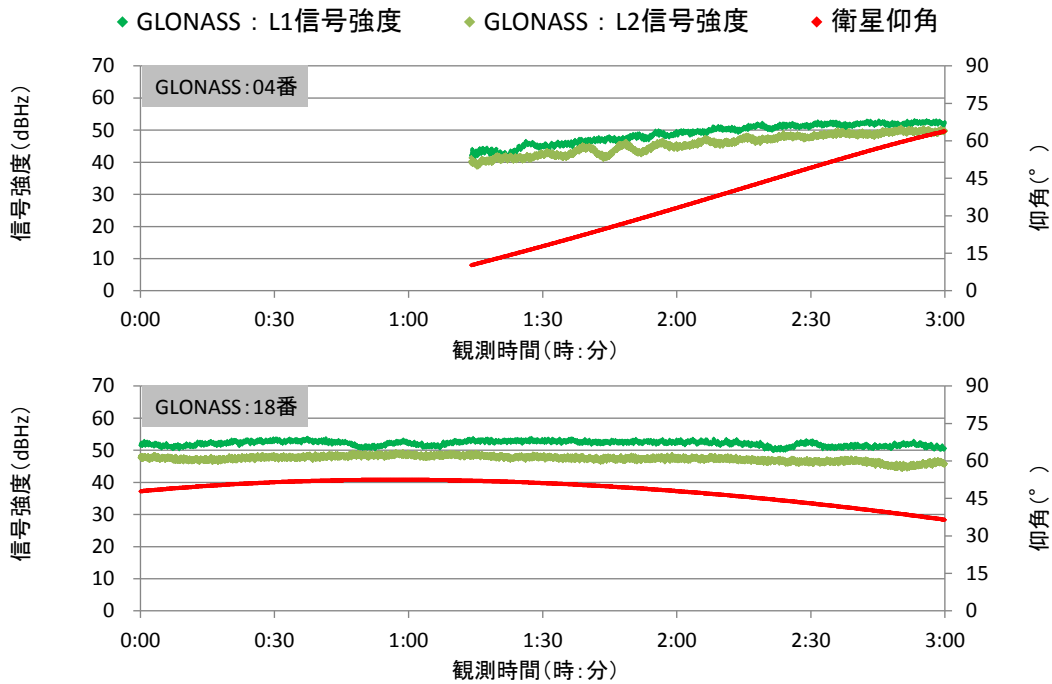


図 4-6 直接波による GLONASS の信号強度と衛星仰角

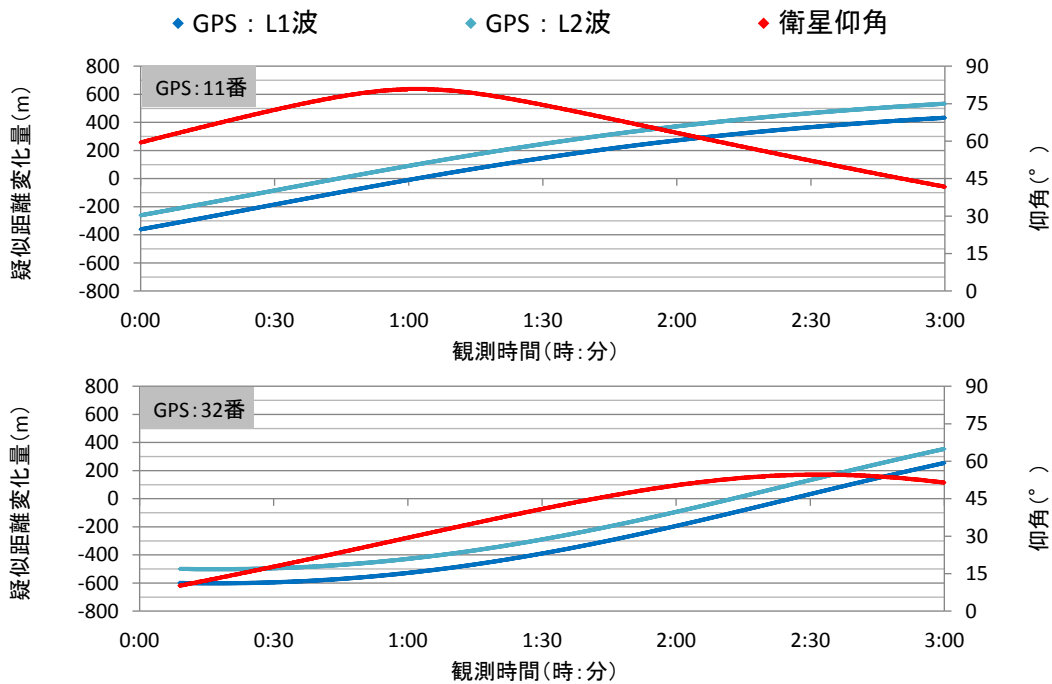


図 4-7 GPS による疑似距離変化量と衛星仰角

で-167.0dBW となるため、双方の受信電力の違いによるものと考えられる¹⁾。

(3) 疑似距離変化量と搬送波位相変化量

L1 波, L2 波による疑似距離の変化量と仰角の推移を衛星系別に図 4-7, 図 4-8 に示す。なお、この図の縦スケールの場合, L1 波と L2 波の疑似距離が重なってしまうため, L2 波の結果に 100m

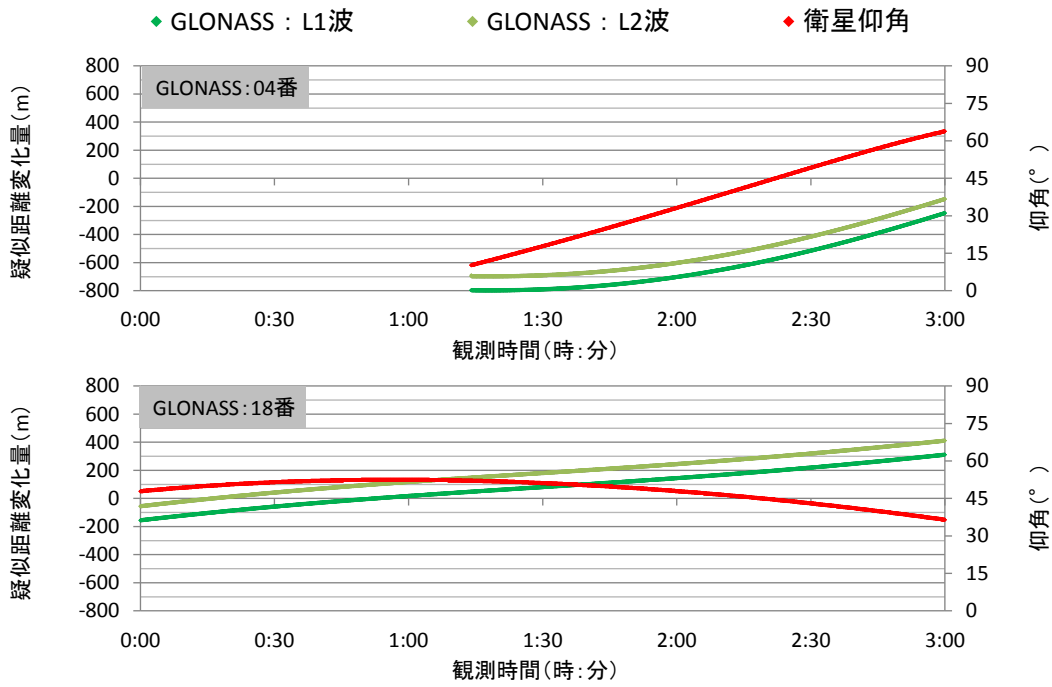


図 4-8 GLONASS による疑似距離変化量と衛星仰角

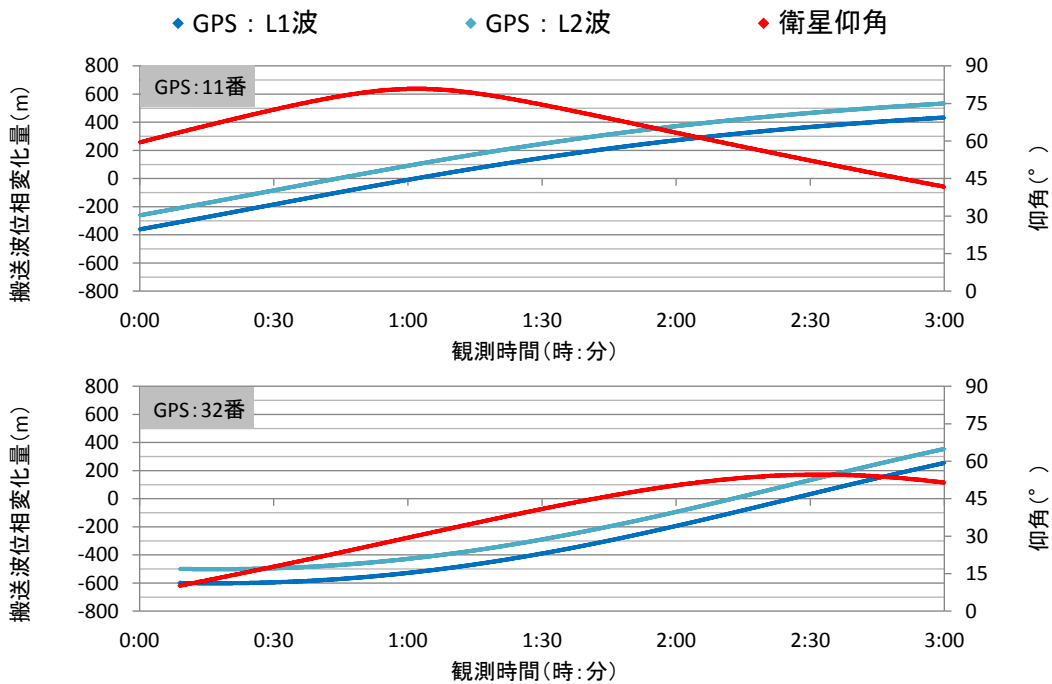


図 4-9 GPS による搬送波位相変化量と衛星仰角

のオフセットを与えている。まず、疑似距離変化量と仰角の関係を見ると、GPS、GLONASS ともに仰角が最も高くなる時間帯において L1 波の疑似距離変化量の符号が変化する

同様に搬送波位相の変化量についても衛星系別に図 4-9、図 4-10 に示す。RINEX で得られる搬送波位相の単位はサイクルではあるが、位相の変化量に正確な波長をかけると距離として表すことができる²⁾。各々の傾向を確認すると、搬送波位相変化量の符号が変化する条件など、疑似

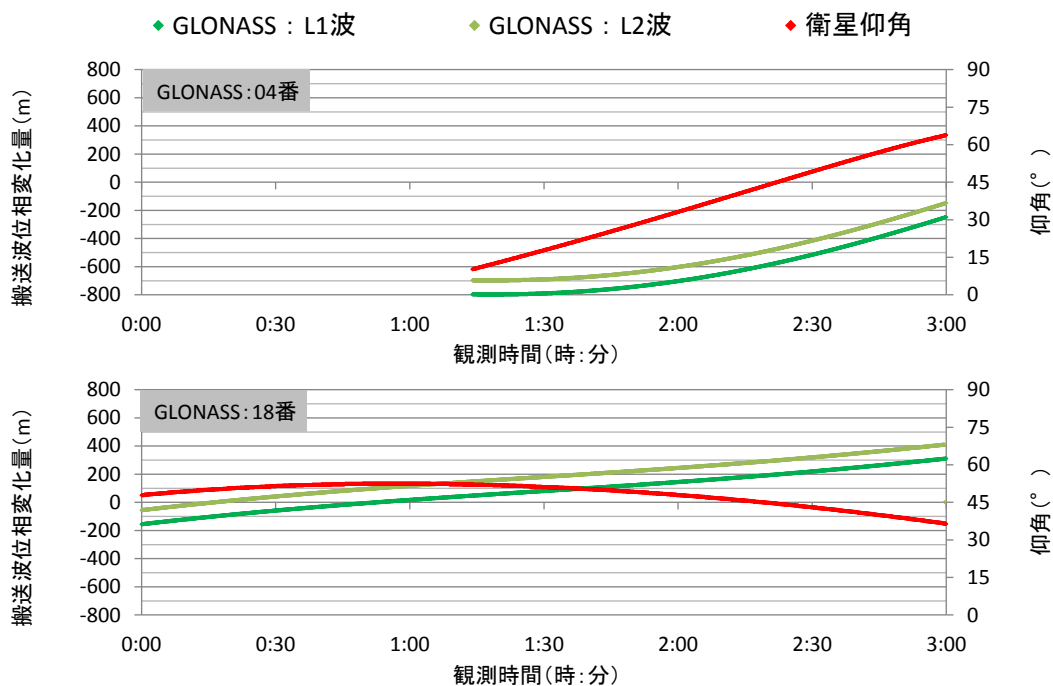


図 4-10 GLONASS による搬送波位相変化量と衛星仰角

表 4-1 GPS:11 番における疑似距離変化量と搬送波位相変化量

観測時間 (時:分:秒)	疑似距離変化量(m)		搬送波位相変化量(m)	
	L1波	L2波	L1波	L2波
1:01:43	-0.242	-0.531	-0.469	-0.469
1:01:44	-0.563	-0.305	-0.341	-0.341
1:01:45	-0.461	-0.558	-0.277	-0.277
1:01:46	0.157	0.277	-0.180	-0.180
1:01:47	-0.219	-0.395	-0.082	-0.082
1:01:48	0.203	0.036	0.007	0.009
1:01:49	-0.063	0.293	0.087	0.086
1:01:50	0.032	0.093	0.197	0.198
1:01:51	1.000	0.750	0.293	0.292
1:01:52	0.367	0.067	0.375	0.374

距離変化量と同じ傾向が見られ、また、L1 波と L2 波の搬送波位相変化量の推移についても、疑似距離変化量と大きな違いは見られなかった。そこで、各々の L1 波、L2 波の変化量を時間帯別に確認した。表 4-1 に、GPS:11 番における疑似距離、搬送波位相変化量の符号変化前後の結果を示す。L1 波と L2 波の疑似距離変化量を比較すると、m オーダーの数値は一致するものの、cm オーダー以下の数値については一致しないことがわかる。一方、搬送波位相変化量については、mm~cm オーダーの数値で一致し、L1 波、L2 波の変化量の差は mm オーダーであることがわかる。

同様に、GLONASS:18 番の疑似距離、搬送波位相変化量の符号変化前後の結果についても表 4-2 に示す。先ほどと同様に、疑似距離変化量は m オーダー、搬送波位相変化量は mm オーダーで L1 波と L2 波の数値が一致することがわかる。GPS の L1 波を例とした場合、疑似距離を生成する C/A コードの波長が約 300m であるのに対して搬送波の波長は約 19cm と短く、波長が短い

表 4-2 GLONASS:18 番における疑似距離変化量と搬送波位相変化量

観測時間 (時:分:秒)	疑似距離変化量(m)		搬送波位相変化量(m)	
	L1波	L2波	L1波	L2波
0:52:43	-0.516	0.355	-0.207	-0.207
0:52:44	-0.281	-0.293	-0.135	-0.136
0:52:45	0.258	0.344	-0.085	-0.085
0:52:46	-0.266	-0.500	-0.060	-0.060
0:52:47	0.047	0.192	-0.004	-0.004
0:52:48	0.320	0.043	0.002	0.002
0:52:49	-0.101	0.050	0.065	0.064
0:52:50	0.281	-0.062	0.084	0.086
0:52:51	0.148	1.066	0.129	0.128
0:52:52	-0.250	-0.754	0.147	0.148

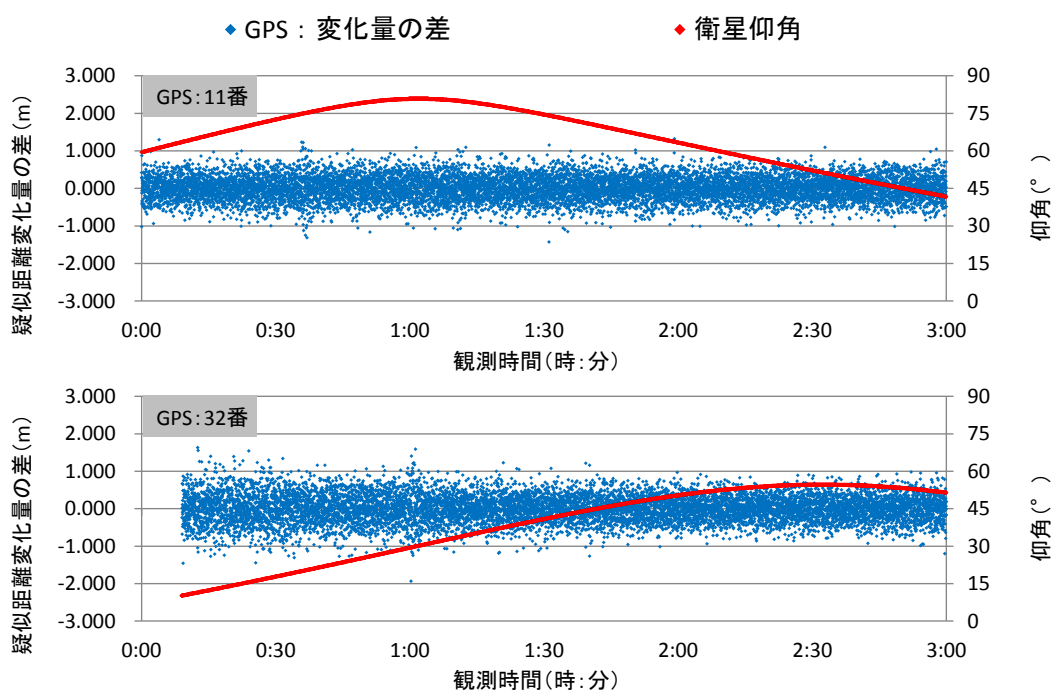


図 4-11 直接波による GPS の疑似距離変化量の差と仰角

ほど距離測定は精密になることから、双方の L1 波、L2 波の変化量の差に違いが生じたものと考えられる。

図 4-11 に、GPS 衛星の疑似距離の変化量において、L1 波から L2 波の変化量を差し引いた場合の結果と仰角との傾向を示す。疑似距離変化量について、衛星仰角の高い GPS:11 番の傾向を確認すると、変化量の差は仰角に関わらず $\pm 1\text{m}$ 範囲で分布する傾向が見られた。一方、衛星仰角の低い軌道となる GPS:32 番の傾向を確認すると、全体的には GPS:11 番と同様に変化量の差は $\pm 1\text{m}$ の範囲で分布する傾向が見られるが、仰角 30° 以下となった場合、一部の結果は範囲外となる傾向が確認できる。

次に、GPS 衛星の搬送波位相の変化量において、L1 波から L2 波の変化量を差し引いた場合の結果と仰角との傾向を図 4-12 に示す。まず、衛星仰角の高い GPS:11 番の傾向を確認すると、変化量の差は仰角に関わらず $\pm 2\text{mm}$ 以内となる傾向が見られ、疑似距離変化量と比較すると、

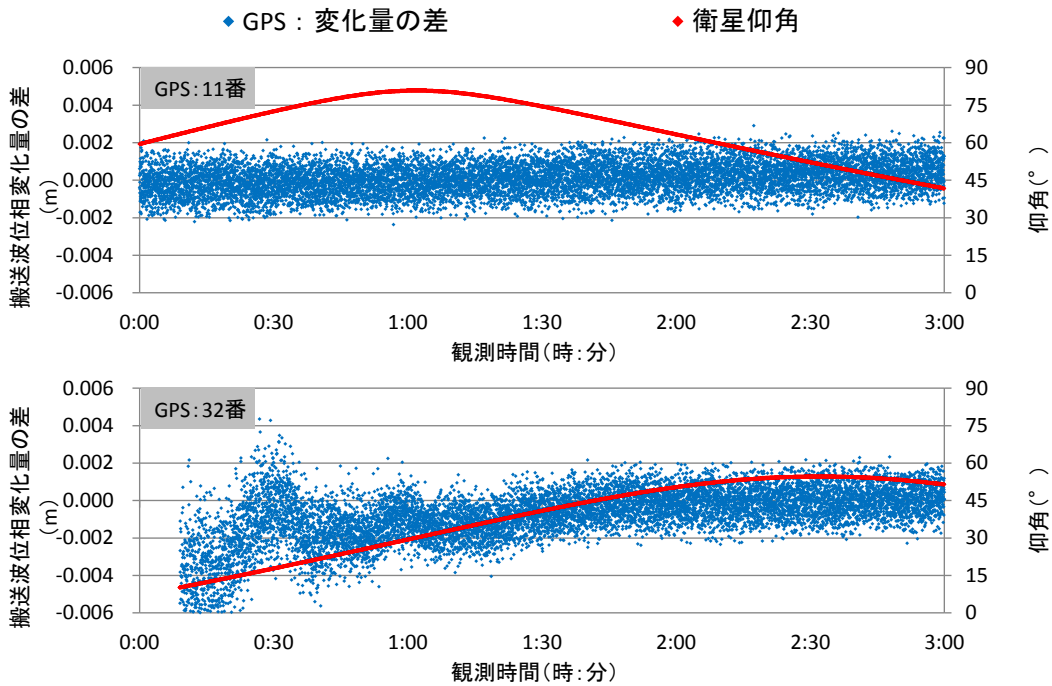


図 4-12 直接波による GPS の搬送波位相変化量の差と仰角

明らかに L1 波と L2 波の変化量の差は小さいことがわかる。一方、GPS:32 番の傾向を確認すると、仰角 45° 以上となる 1:30 以降では GPS:11 番と同様の傾向が見られるが、仰角 45° 以下となる観測時間では、変化量の差がマイナス方向に分布し、L2 波の変化量が L1 波よりも大きいことが確認できる。変化量が大きくなる要因としては、電波の周波数に応じて遅延量に変化する電離層遅延が考えられ、式 (2-11) でも示したように、周波数の低い搬送波ほど電離層内の位相は早く進むため、L1 波の周波数よりも低い L2 波のほうが電離層遅延の影響が大きいことがわかる。また、位相が進むことで、衛星とアンテナ間の距離を短く測定してしまうため、本来であれば L2 波の変化量は L1 波よりも小さくなるが、RINEX フォーマットでは、距離の減少を増加に換算するため、L2 波の変化量は L1 波よりも大きくなり、図 4-12 に示すような結果が得られたものと考えられる。

GLONASS 衛星の疑似距離、搬送波位相変化量についても GPS と同様に確認する。図 4-13 に、GLONASS 衛星の疑似距離変化量の結果と仰角の傾向を示す。疑似距離変化量について、低仰角から高仰角に推移する GLONASS:04 番の傾向を確認すると、変化量の差は仰角に関わらず一定の分布で推移する傾向が見られるが、図 4-11 の GPS による結果と比較すると、全体的に分布する範囲は大きいことがわかる。また、仰角の変化が緩やかな、GLONASS:18 番の傾向を確認すると、GLONASS:04 番と同様に一定の範囲で分布する傾向が見られるが、こちらも GPS による結果と比較すると、 $\pm 1\text{m}$ の範囲を超える場合が頻繁に確認でき、分布範囲が大きいことがわかる。GPS と GLONASS の L1 波の C/A コードを例とした場合、GPS のチップレートは 1.023MHz であり、GLONASS のチップレートは 0.511MHz である。これに対応して GPS のコード波長は約 300m 、GLONASS のコード波長は約 600m となるため、先ほど述べたように、波長が短いほ

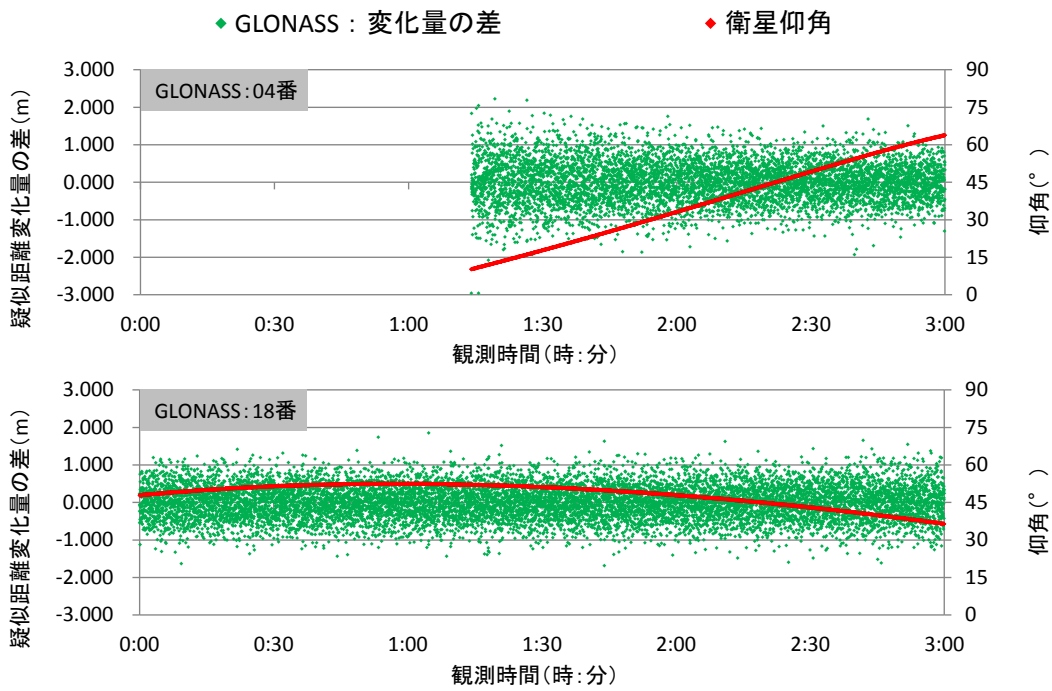


図 4-13 直接波による GLONASS の疑似距離変化量の差と仰角

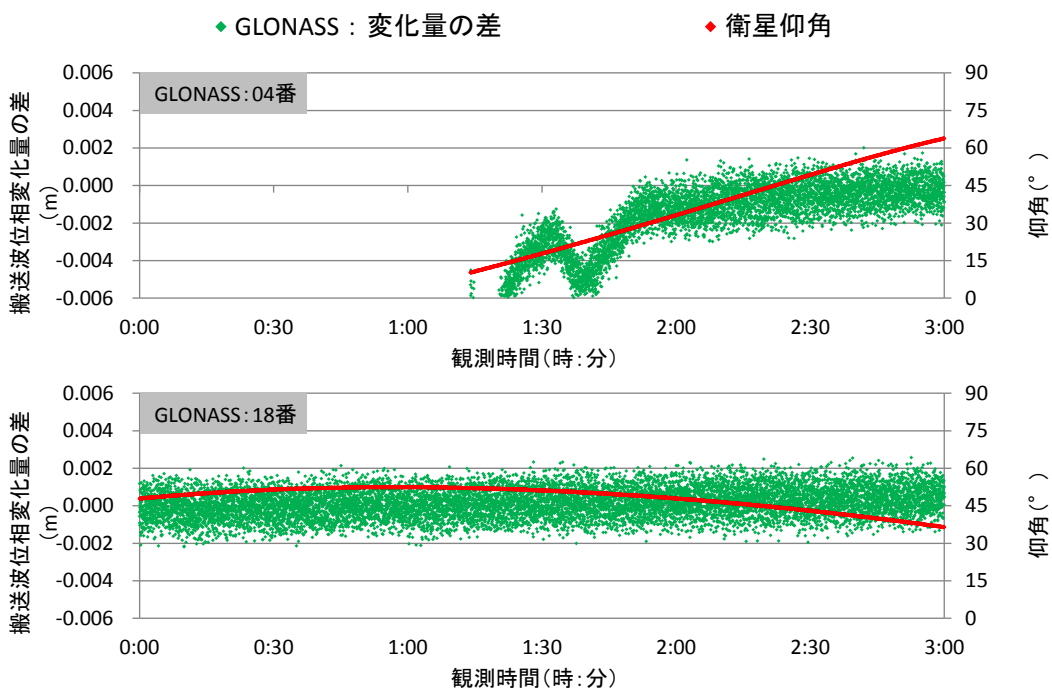


図 4-14 直接波による GLONASS の搬送波位相変化量の差と仰角

ど距離測定は精密になることから、GPS と GLONASS の変化量に差が生じたものと考えられる。

次に、GLONASS 衛星の搬送波位相変化量の結果と仰角との傾向を図 4-14 に示す。低仰角から高仰角に推移する GLONASS:04 番の傾向を確認すると、仰角 45° 以下となる時間帯で変化量がマイナスに方向に分布し、L2 の変化量が L1 よりも大きいことが確認できる。GLONASS の L1 波、L2 波の周波数も GPS と同様に L2 波のほうが低いため、電離層遅延による影響であると

考えられる。また、仰角 45° 以上の GLONASS:04 番と GLONASS:18 番の傾向を確認すると、変化量の差は $\pm 2\text{mm}$ 以内となる傾向が見られ、GPS と同様の結果が得られた。搬送波の波長は、GPS の L1 波で約 19cm 、GLONASS は FDMA 方式であるため、各々異なる波長ではあるが、L1 波で約 18.7cm ～約 18.8cm の間となるため、コード波長ほど大きな差はなく、同様の結果が得られたものと考えられる。

これらの結果より、疑似距離の変化量については、衛星仰角に関わらず L1 波と L2 波で一定の傾向となり、搬送波位相の変化量については、電離層による遅延誤差の影響が大きくなる低仰角で、L2 波の変化量が L1 波よりも大きくなる傾向が見られた。疑似距離において電離層の影響が見られない要因としては、mm オーダーの分布となる搬送波と比較し分解能が低く、m オーダーの分布となる疑似距離では確認できなかったものと考えられる。

4-1-3 直接波と反射波による受信電波からの観測値

(1) 観測点周囲の環境と衛星位置

観測値は、日本大学理工学部船橋キャンパス内において、北方向に校舎がある観測点で取得したデータを使用した。付近に衛星電波を遮る地物があるため、反射波、回折波によるマルチパスの影響を含む電波を受信するものと考えられる。

マルチパスの影響を受ける観測値の傾向を確認するにあたり、評価対象とする衛星は、前項で示した GPS:11 番と 32 番、GLONASS:04 番、18 番の 4 衛星とする。また、直接波と反射波による受信電波、反射波と回折波による受信電波を観測時間帯別の衛星の可視条件により判別を行った。同位置より取得した 3 次元点群データを用いて、受信アンテナから見た地物の方位角と仰角を算出し、衛星の軌道情報と組み合わせることで、観測時間別の衛星可視条件を調べた。点群データより作成した地物の天空図を図 4-15 に示し、評価対象となる衛星の軌道と地物の位置関係を図 4-16 に示す。GPS:11 番は、観測開始時は可視衛星であるが、天頂付近を通過後、地物によって不可視衛星となる推移であった。不可視後も衛星電波を受信が確認できるが、回折や反射によって受信したものと考えられる。GPS:32 番は、今回の観測時では常に可視衛星となるが、衛星位置からわかるように南方向から電波が入射するため、北方向にある地物からの反射波を受信しているものと想定される。GLONASS:04 番についても、南方向から電波が入射するため、GPS:32 番と同様に直接波に加えて反射波による電波を受信しているものと想定される。GLONASS:18 番は、不可視衛星から可視衛星へと可視条件が変わる軌道であり、不可視時は回折波と反射波の影響を受けたマルチパスによる誤差電波であると考えられる。

本項では、直接波と反射波の両方を受信していると予想される、GPS:32 番と GLONASS:04 番について述べるものとし、L1 波と L2 波の信号強度の傾向について確認し、同様に疑似距離と搬送波位相の変化量の差の傾向を直接波のみによる傾向を踏まえて確認した。

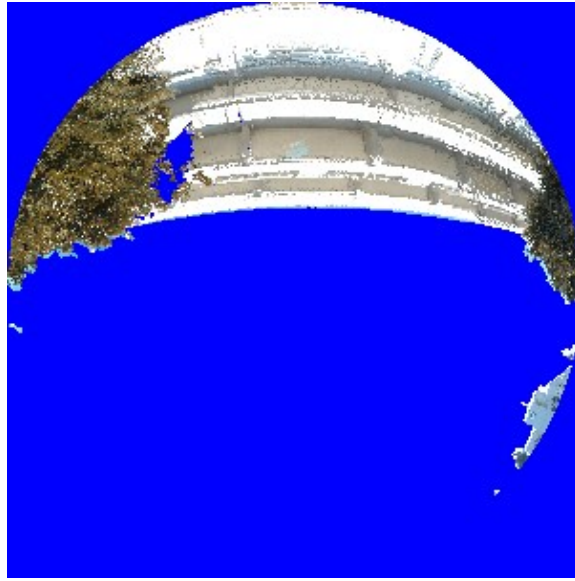


図 4-15 地物の天空図 (B2 : 北遮蔽)

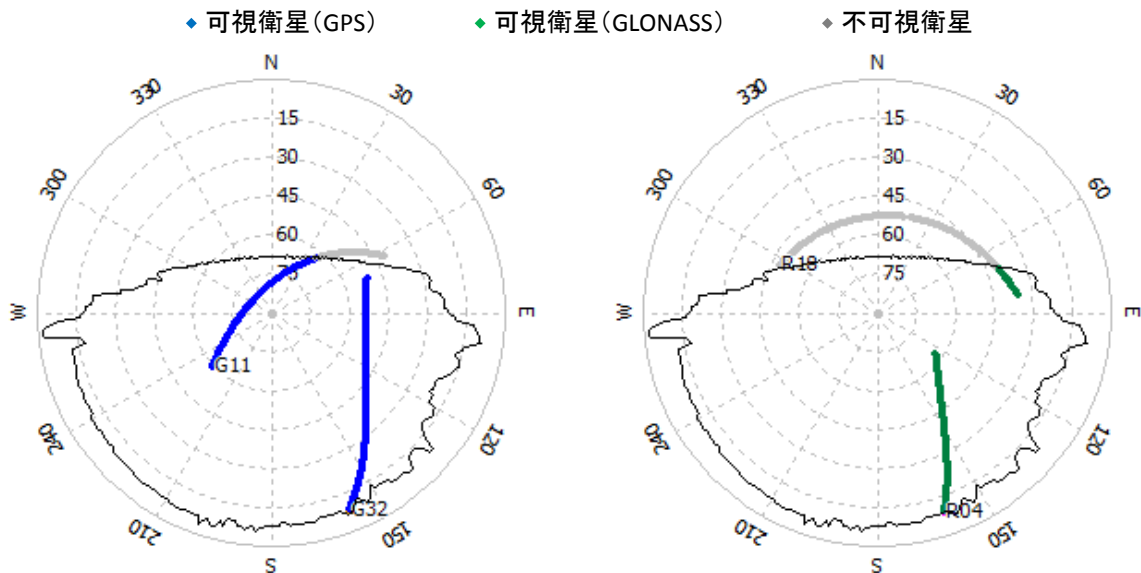


図 4-16 衛星軌道と観測点 B2 における地物位置 (左 : GPS 右 : GLONASS)

(2) 信号強度

直接波と反射波によるマルチパスの影響を受けた場合の信号強度について、GPS の L1 波と L2 波の推移を衛星仰角の推移も含めて図 4-17 に示す。遮蔽物のない観測点で使用した受信機と同一の機種を使用しているため、マルチパスによる伝送損失が生じない限り、同様の信号強度値が得られるものと考えられる。図 4-5 に示した直接波による信号強度の傾向と比較すると、低仰角時の信号強度低下、L1 波と L2 波の信号強度の差など同様の傾向が見られるが、時系列による推移を比較すると、L1 波、L2 波の双方の搬送波において、信号強度が上下動することがわかる。直接波と反射波を同時受信した場合の信号強度は、前章でも述べたように、直接波による信号強度に対して反射波との位相差により増減するため、GPS:32 番の受信電波は反射波の影響を受け

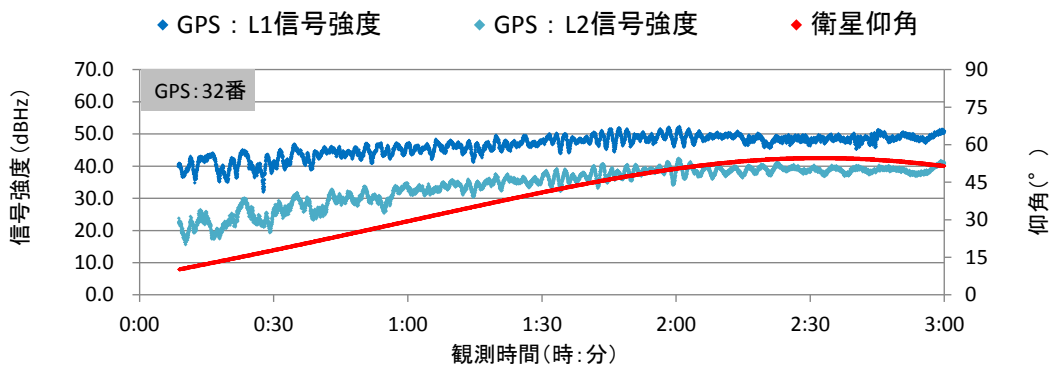


図 4-17 直接波と反射波による GPS の信号強度と衛星仰角

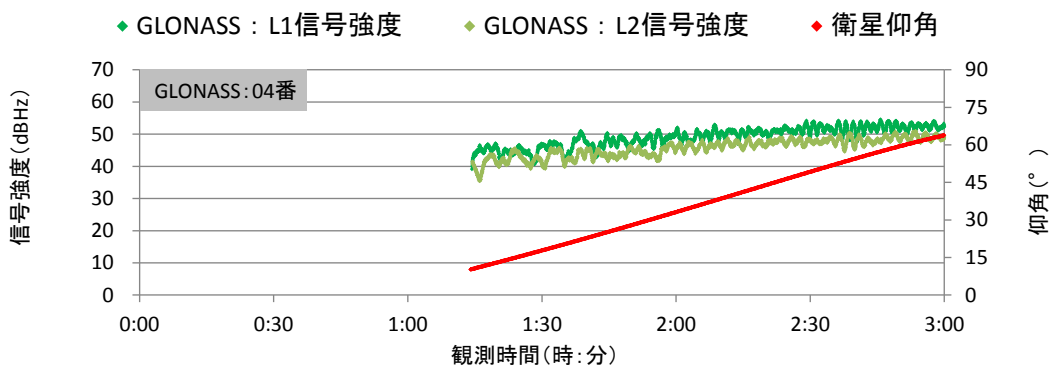


図 4-18 直接波と反射波による GLONASS の信号強度と衛星仰角

ていることがわかる。また、低仰角ほど上下動が大きくなるが、これは、低仰角時に地物位置と正対した位置関係となるため、地物からの反射波を強く受信しているものと推察される。

次に、反射波の影響を受けた GLONASS の L1 波と L2 波の信号強度の推移を衛星仰角の推移も含めて図 4-18 に示す。GPS と同様に、仰角の低下に応じて信号強度も低下し、時系列による推移を確認すると、L1 波、L2 波の信号強度の上下動が見られた。先ほどと同様、GLONASS:04 番の受信電波も反射波の影響を受けていることがわかる。

これらの結果より、観測値に含まれる信号強度の傾向から、直接波と反射波による受信電波の判別ができることがわかる。しかしながら、搬送波位相等の測定値は、受信電波の相関処理後の結果であるため、直接波に対する反射波の信号強度や位相の遅れ等によっては、受信機内の相関処理により、測定値に含まれるマルチパスの影響が小さくなる。よって、直接波と反射波の受信において、信号強度により測位に影響を及ぼす受信電波を検知する場合、前章でも述べた、直接波による受信電波と信号強度がほとんど同じになる状況も含めて困難であると考えられる。

(3) 疑似距離変化量と搬送波位相変化量

図 4-19 に、GPS:32 番の L1 と L2 の疑似距離変化量の差と仰角の傾向を示す。図 4-11 で示した直接波による疑似距離変化量の傾向と比較すると、こちらも、変化量の差について±1m の範囲で分布が見られ、また、仰角 30° 以下となった場合、±1m 以上の範囲での分布が見られるた

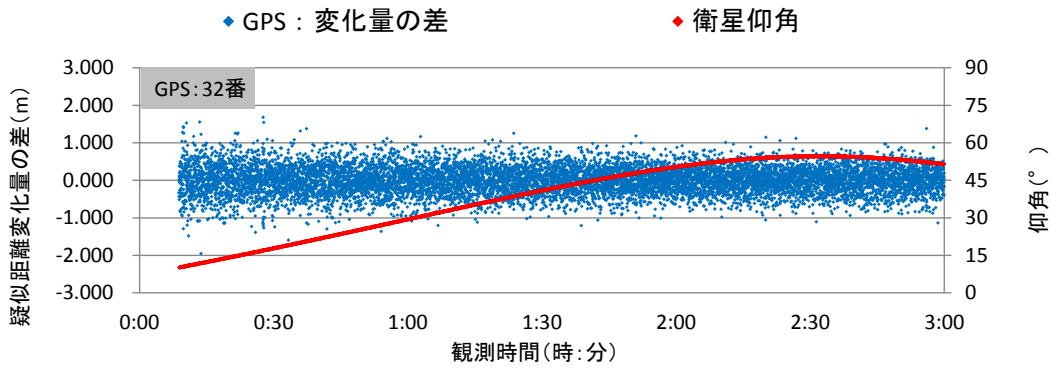


図 4-19 直接波と反射波による GPS の疑似距離変化量の差と仰角

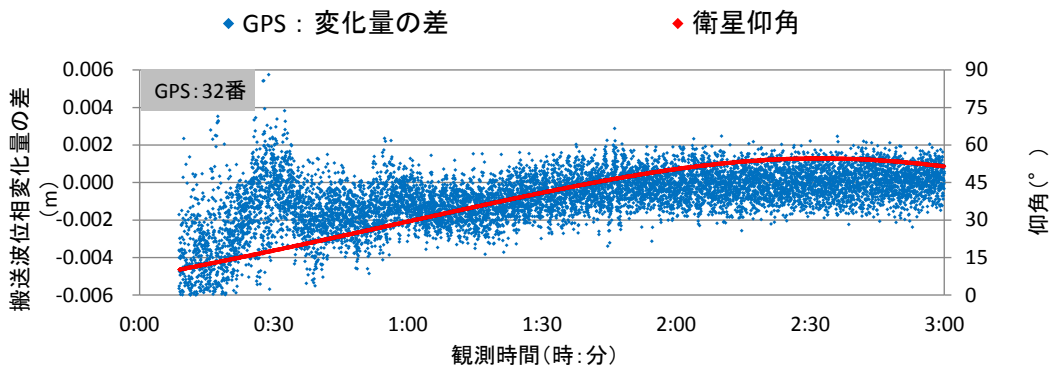


図 4-20 直接波と反射波による GPS の搬送波位相変化量の差と仰角

め、観測点位置に関わらず同様の結果が得られていることがわかる。マルチパスの影響を受けていない場合も考えられるが、電離層遅延による傾向と同様に、m オーダーの分布となる疑似距離変化量ではマルチパスによる影響を確認できない可能性がある。

次に、GPS:32 番の L1 と L2 の搬送波位相変化量の差と仰角の傾向を図 4-20 に示す。先ほどと同様に、受信電波別の傾向を確認するため、図 4-12 で示した直接波による搬送波位相変化量と比較すると、仰角 45° 以上では $\pm 2\text{mm}$ 以内の範囲で分布し、仰角 45° 以下となる観測時間帯では変化量の差がマイナス方向に分布するなど、全体的な傾向は同じになることがわかる。特に、観測時間 0:10~1:20 による低仰角での搬送波位相変化量の傾向は、0:30 頃に生じる分布の起伏など、観測位置に関わらず特徴的な傾向が確認でき、同様の電離層遅延が生じていることがわかる。基線長が短い場合、両点の遅延量は同じ値とみなすことができるため、図 4-20 で示した観測環境別の変化量の差の傾向について、図 4-12 と同様の結果が得られたものと考えられる。一方、マルチパスの影響については、図 4-21 に示すように短時間による変化量の差の傾向を確認すると、0:17 頃や 0:28 頃の分布について、遮蔽物を含む観測点のほうが大きくなる場合が見られた。電離層や対流圏による遅延誤差以外で観測値に影響を及ぼす要因としては、受信機雑音とマルチパス誤差があるが、双方の観測点で使用した受信機は、アンテナケーブル等も含めて同一機器メーカーの機種であるため、短時間で異なる雑音が発生するとは考えにくく、遮蔽物を含む観測点で得られた変化量の差の傾向は、マルチパスによって生じたものと考えられる。このとき

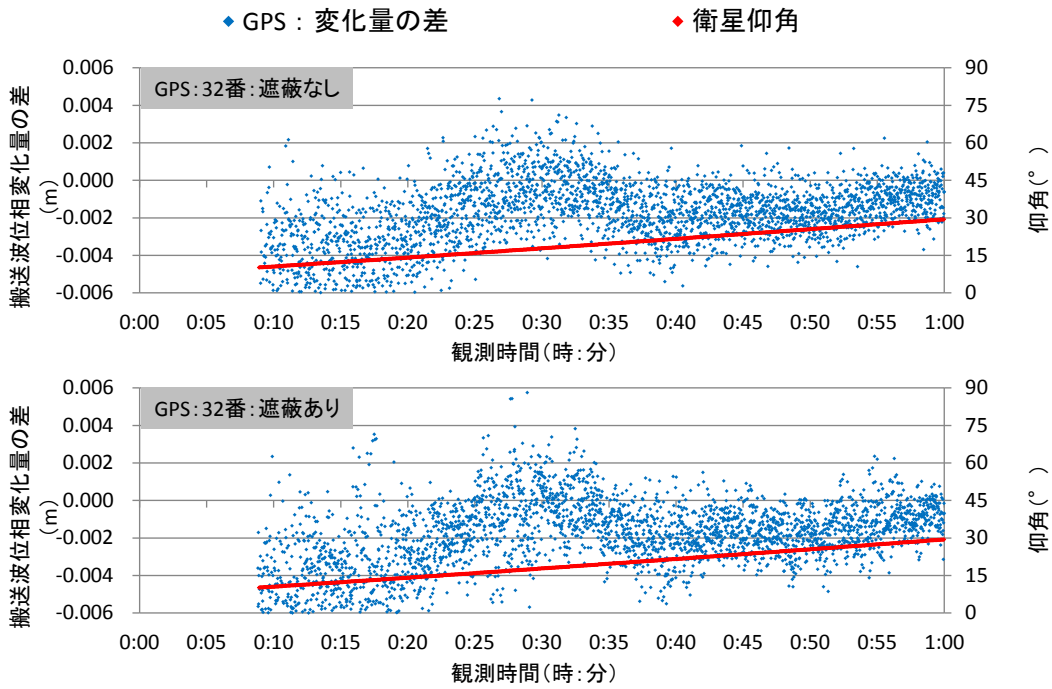


図 4-21 反射波の有無による GPS の搬送波位相変化量の差と仰角

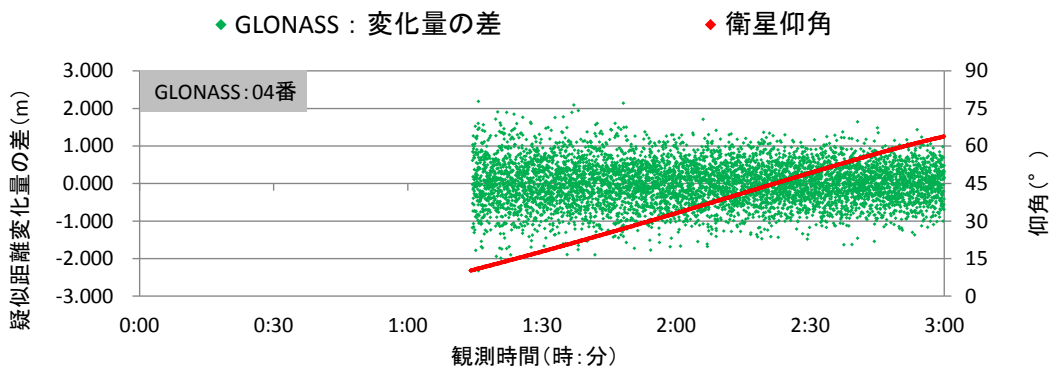


図 4-22 直接波と反射波による GLONASS の疑似距離変化量の差と仰角

の GPS:32 番の衛星位置は、方位角 153° 、仰角 17° であり、観測点付近の地物位置とは正対した位置関係となるため、地物からの反射波を受信した可能性がある。

同様に GLONASS の疑似距離と搬送波位相の変化量の結果と仰角の傾向についても確認する。GLONASS:04 番の L1 と L2 の疑似距離変化量の差と仰角の傾向を図 4-22 に示す。図 4-13 で示す直接波による疑似距離変化量の傾向と比較すると、GPS による結果よりも分布する範囲が大きいことに加え、一定の分布で推移するなど観測点位置に関わらず同等の結果が得られていることがわかる。このような結果が得られる要因としては、GPS と同様に、疑似距離変化量では m オーダーの分布となるため、mm オーダーの傾向となる電離層遅延等の誤差は確認できないものと考えられる。

GLONASS:04 番の L1 と L2 の搬送波位相変化量の差と仰角の傾向を図 4-23 に示す。図 4-14 に示した直接波による GLONASS:04 番の搬送波位相変化量と比較すると、仰角 45° 以下となる

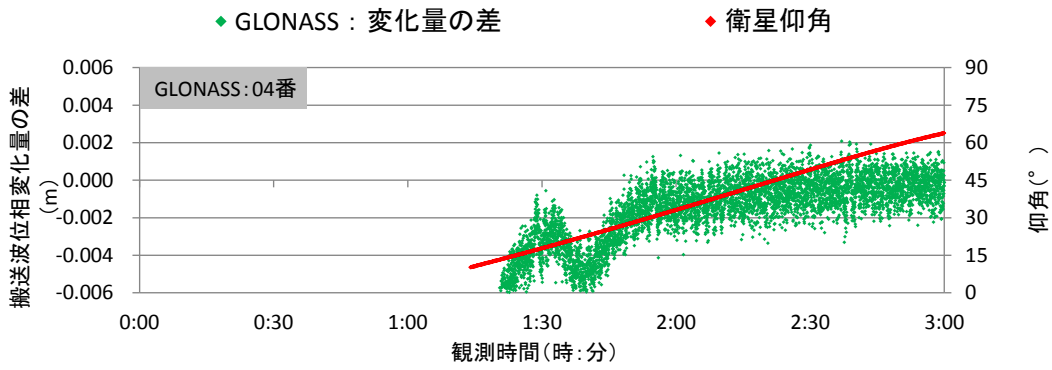


図 4-23 直接波と反射波による GLONASS の搬送波位相変化量の差と仰角

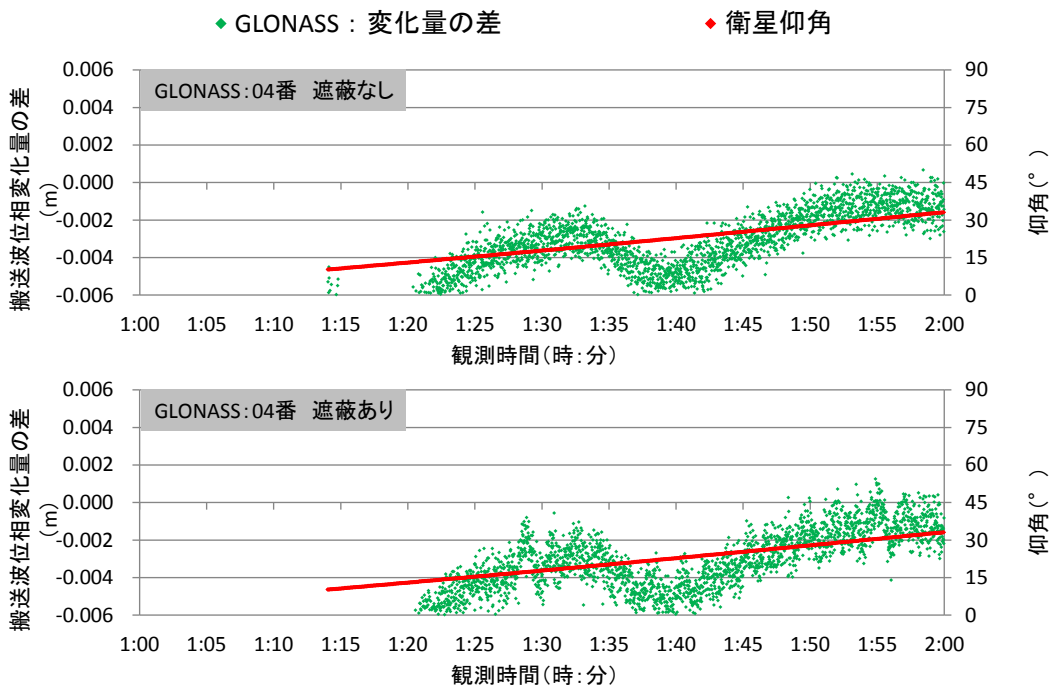


図 4-24 反射波の有無による GLONASS の搬送波位相変化量の差と仰角

時間帯ではマイナス方向への分布と起伏が見られ、仰角 45° 以上では、GPS と同様に変化量の差は $\pm 2\text{mm}$ 以内の傾向となるなど、全体的に同様の結果となることがわかる。双方の受信機間の基線長は短距離であるため、同様の電離層遅延が双方で生じ、類似の結果が得られたものと考えられる。一方、マルチパスの影響については、図 4-24 に示すように短時間による変化量の差の傾向を確認すると、1:28 頃の分布について、遮蔽物を含む観測点のほうが大きくなる場合が見られ、GPS による結果と同様にマルチパスによって生じたものと考えられる。このときの GLONASS:04 番の衛星位置は、方位角 160° 、仰角 17° であり、GPS:32 番でマルチパスが生じたものと考えられる衛星位置と幾何学的に近く、地物からの反射波を受信したのと考えられる。

これらの結果より、直接波と反射波によるマルチパス誤差を受けた観測値の傾向については、搬送波位相の変化量の差を用いることで確認できることがわかった。反射波によるマルチパス誤

差が観測値に含まれる場合、電離層等による遅延誤差と同様に搬送波位相等の測定値に含まれる。そのため、直接波から得られた搬送波位相の変化量の差と比較した場合、双方で得られる結果は異なるものとなる。

4-1-4 反射波と回折波による受信電波からの観測値

(1) 信号強度

先ほどに引き続き、本項では、反射波と回折波の両方を受信していると予想される、GPS:11番とGLONASS:18番について述べる。L1波、L2波の信号強度の傾向について確認し、疑似距離と搬送波位相の変化量の差の傾向を直接波のみによる傾向と比較した。

反射波と回折波による受信電波の信号強度について、GPSのL1波とL2波の強度の推移を衛星仰角の推移も含めて図4-25に示す。図4-5に示した直接波による信号強度の傾向と比較すると、可視時の場合、L1波で約50dBHz、L2波で約40dBHzと同様の傾向が見られるが、不可視

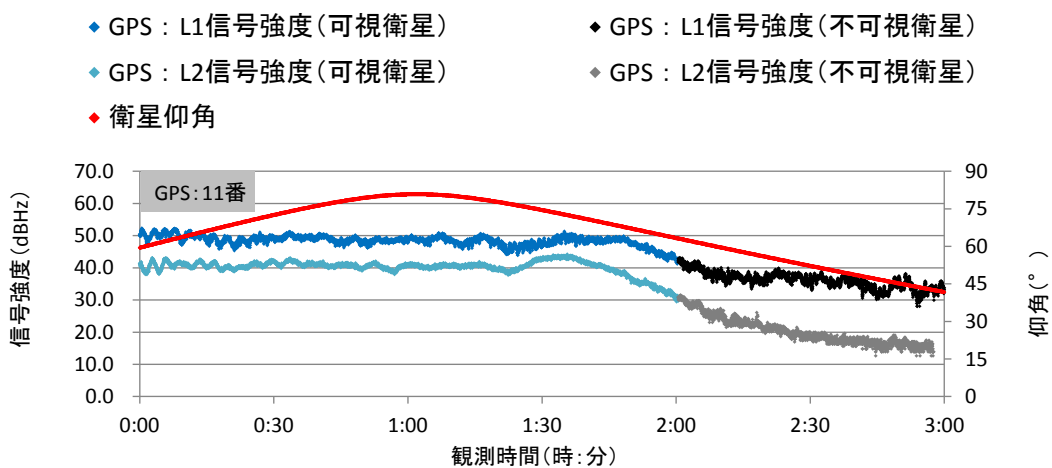


図 4-25 反射波と回折波による GPS の信号強度と衛星仰角

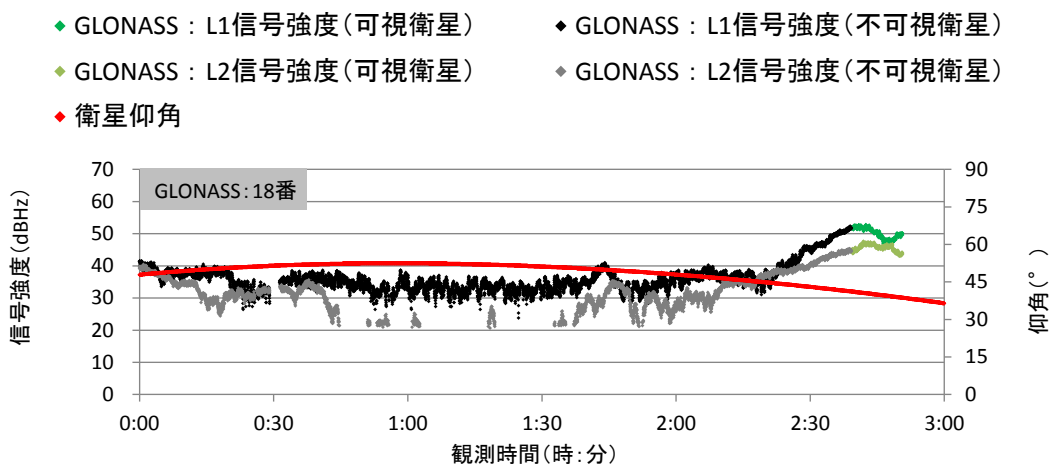


図 4-26 反射波と回折波による GLONASS の信号強度と衛星仰角

時の場合、双方の搬送波において信号強度が低下することがわかる。回折波による信号強度は、衛星と受信アンテナ間の見通し線が地物等により遮られると低下するため、GPS:11番の受信電波は回折波の影響を大きく受けていることがわかる。

次に、回折波の影響を受ける、GLONASSのL1波とL2波の信号強度の推移を衛星仰角の推移も含めて図4-26に示す。不可視時の場合、図4-6に示す直接波による信号強度よりも約20dBHz～30dBHzの損失が見られ、GPSと同様に回折波受信による影響と考えられる。また、不可視時の信号強度について上下動も確認できることから、周囲の地物により反射した電波も受信しているものと想定される。

これらの結果より、信号強度の傾向から反射波と回折波による受信電波の検知ができることがわかる。また、直接波と反射波による受信電波と異なり、マルチパスによる誤差電波のみの受信であるため、相関処理によってマルチパスの影響が小さくなるとは考えにくく、測定値に大きな誤差を含むものと想定される。よって、反射波と回折波の受信において、信号強度による測位に影響を及ぼす受信電波を検知する場合、有効な手法であると考えられる

(2) 疑似距離変化量と搬送波位相変化量

図4-27に、GPS:11番のL1とL2の疑似距離変化量の差と仰角の傾向を示す。前節と同様に、図4-11で示したGPS:11番の疑似距離変化量の傾向と比較すると、衛星が可視時のときは、変化量の差が±1mとなる同様の分布が確認できるが、衛星が不可視時のときは、分布範囲が大きくなることがわかる。疑似距離変化量の差において、直接波と反射波による受信電波と、直接波のみによる受信電波の傾向については差が見られなかったが、今回のように反射波と回折波による誤差電波のみの受信では、マルチパス誤差が直接波と反射波による受信電波よりも大きくなるため、その影響を確認できた可能性がある。

次に、GPS:11番のL1とL2の搬送波位相変化量の差と仰角の傾向を図4-28に示す。図4-12で示した直接波による搬送波位相変化量の傾向と比較すると、衛星が可視時のときは、変化量の差が±2mm以内となる同様の分布が見られた。しかし、衛星が不可視となり、反射波と回折波による誤差電波を受信する場合、変化量の差による分布範囲が明らかに大きくなることがわかる。

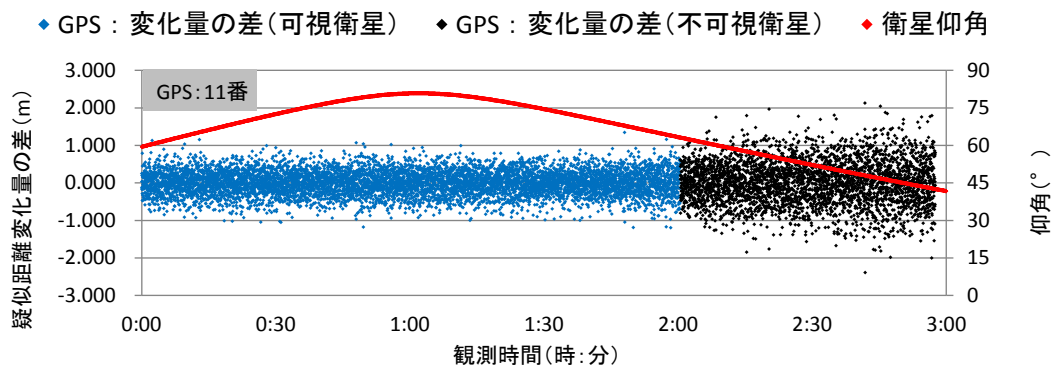


図4-27 反射波と回折波によるGPSの疑似距離変化量の差と仰角

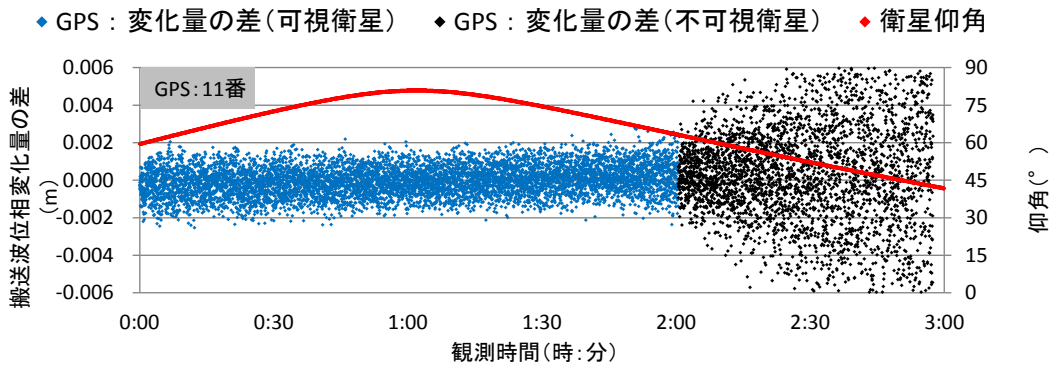


図 4-28 反射波と回折波による GPS の搬送波位相変化量の差と仰角

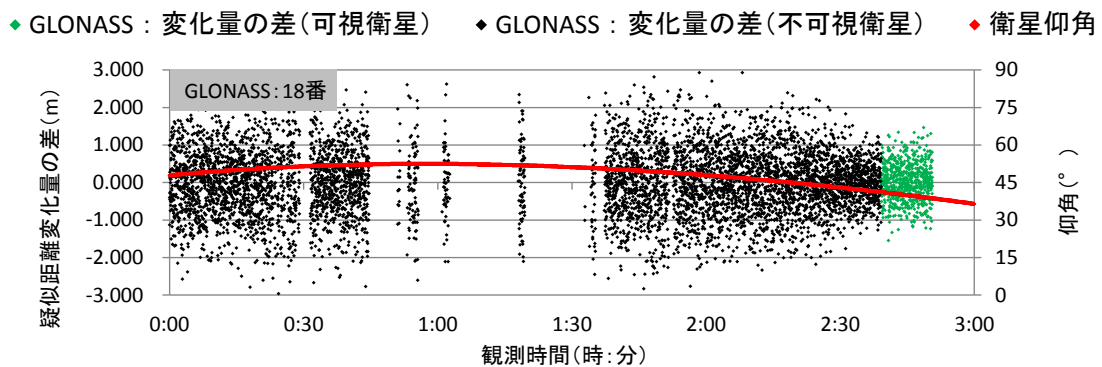


図 4-29 反射波と回折波による GLONASS の疑似距離変化量の差と仰角

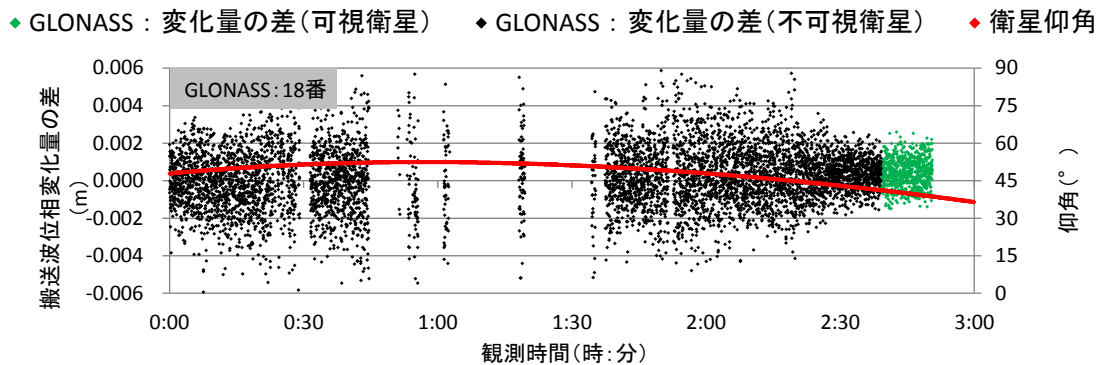


図 4-30 反射波と回折波による GLONASS の搬送波位相変化量の差と仰角

双方の結果で異なる傾向を示す要因としては、前節でも述べたようにマルチパスによるものと考えられ、反射波と回折波による受信電波の影響によるものと想定される。

GLONASS:18 番の L1 と L2 の疑似距離変化量の差と仰角の傾向を図 4-29 に示す。図 4-13 で示す直接波による疑似距離変化量の傾向と比較すると、衛星が可視時の場合、 $\pm 1\text{m}$ 前後で分布する同様の傾向が確認できるが、衛星が不可視時の場合、GPS:11 番と同様に可視環境による分布よりも大きくなるのがわかる。反射波と回折波による誤差電波の受信であるため、直接波と反射波による受信電波よりもマルチパスの影響が大きいものと考えられる。

GLONASS:18 番の L1 と L2 の搬送波位相変化量の差と仰角の傾向を図 4-30 に示す。図 4-14

に示した直接波による搬送波位相変化量と比較すると、衛星が可視時の場合、変化量の差は±2mm 以内となる傾向が見られ、不可視時の場合、変化量の差による分布範囲が可視時の時よりも大きくなることがわかる。この傾向は、**図 4-26** で示した GPS:11 番によるものと同様であり、反射波と回折波による誤差電波の影響と考えられる。

これらの結果より、反射波と回折波による電波を受信した観測値の傾向については、疑似距離、および搬送波位相の変化量の差を用いることで確認でき、直接波と反射波による受信電波よりも明確な傾向が見られた。直接波を含まないマルチパス誤差のみの受信電波であるため、受信機内の相関処理において、マルチパスの影響を抑制できなかったものと考えられる。

4-2 搬送波位相変化量の差によるマルチパス検知効果の検証

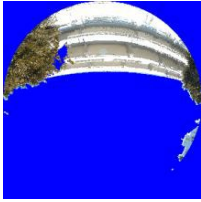
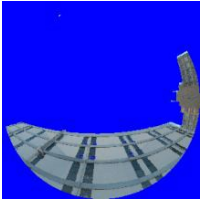
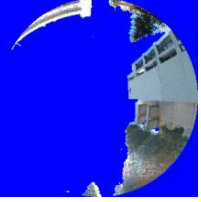
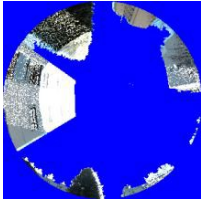
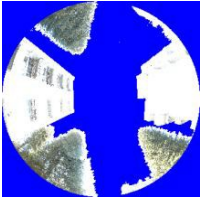
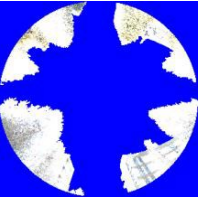
搬送波位相変化量の差（*DPC* : Difference of Phase Change）について、基準局と移動局の双方の分布推移を確認することでマルチパスの影響を受ける受信電波を検知できるものと考えられる。本節では、この*DPC*を用いたマルチパス除去効果がどの程度得られるものか事前に検証を行った。

4-2-1 検証の概要

マルチパスの影響を受ける受信電波の検知を行うため、周囲に遮蔽物を含む観測点と含まない観測点に複数衛星系に対応した受信アンテナおよび受信機を設置し、GPS と GLONASS による観測値の取得を同時帯で実施した。双方の受信機で得られた搬送波位相の観測値より、*DPC*を算出し、衛星位置に対する分布の傾向を確認した。

実験場所は、先ほど示した日本大学理工学部船橋キャンパス内に設置した観測点上であり、周囲に遮蔽物となる地物が点在する観測点 B2~B7 の計 6 箇所と、遮蔽物を含まない観測点 A0 の計 1 箇所である。実験日は、2011 年 11 月 5 日~7 日の 3 日間であり、観測時間帯は 10:00~13:00 と 13:30~16:30 である。観測点 B2~B7 の遮蔽物位置の確認については、同位置で取得した 3 次元点群データを用いて行った。観測点 B2~B7 の地物の天空図、および遮蔽率を表 4-3 に示す。観測点 B2, B3 は前章でも示したが、1 方向が建物による地物で遮蔽される環境である。観測点 B4~B6 では、建物のほかに樹木により 1 方向または 2 方向が遮蔽される環境であり、2 方向を遮蔽

表 4-3 観測点 B2~B7 の地物天空図と遮蔽率

観測点	B2:北遮蔽	B3:南遮蔽	B4:東遮蔽
遮蔽状況			
天空率(%)	63.1	68.3	67.0
観測点	B5:西遮蔽	B6:東西遮蔽	B7:斜め遮蔽
遮蔽状況			
天空率(%)	62.0	50.1	63.0



B2：北遮蔽



B3：南遮蔽



B4：東遮蔽



B5：西遮蔽



B6：東西遮蔽



B7：斜め遮蔽

図 4-31 観測点 B2～B7 のアンテナ設置状況 (2011 年 11 月 5 日～7 日)

される観測点 B6 は、最も天空率が低い環境となっている。観測点 B7 では、地物位置が観測点から離れており、高仰角の衛星は観測できるが、低仰角の衛星は観測が困難な環境となることが確認できる。

観測手順としては、データ取得間隔を 1Hz に設定し、各観測点で 3 時間測位を実施した。遮蔽物を含まない観測点 A0 では常に測位を実施し、遮蔽物を含む観測点 B2～B7 では、1 日目に「B7：斜め遮蔽」→「B6：東西遮蔽」、2 日目に「B2：北遮蔽」→「B5：西遮蔽」、3 日目に「B3：南遮蔽」→「B4：東遮蔽」の順で測位を行った。各観測点のアンテナ設置状況を図 4-31 に示す。なお、使用した受信機は、Trimble NetR8 であり、得られた観測値は RINEX3.0 形式に変換して取得した。

4-2-2 マルチパスの影響を受ける衛星電波の検証結果

GPS と GLONASS のマルチパスの影響を受ける受信電波を検知するため、衛星番号毎（本章では、GPS を「G」、GLONASS を「R」と示す）に DPC を算出し、遮蔽物を含む場合と含まない場合で同時間帯による算出結果の比較を行った。傾向の確認については、1 分間毎（データ数：60）に DPC の平均値と標準偏差値を算出し、各々の較差を求めて行った。また、得られた較差の傾向に対して、衛星位置と遮蔽物位置による関係を調べるため、GPS と GLONASS の衛星位置情報と、表 4-3 に示す地物天空図から遮蔽物の方位角と仰角を算出し、各衛星の電波を取得した時間帯の衛星位置を確認した。

観測点 B2 における GPS のマルチパス検証結果を図 4-32 に示す。まず、平均値の較差については、GPS:32 番について値が大きくなる傾向が見られたが、ほとんどの衛星は 0mm 付近で推

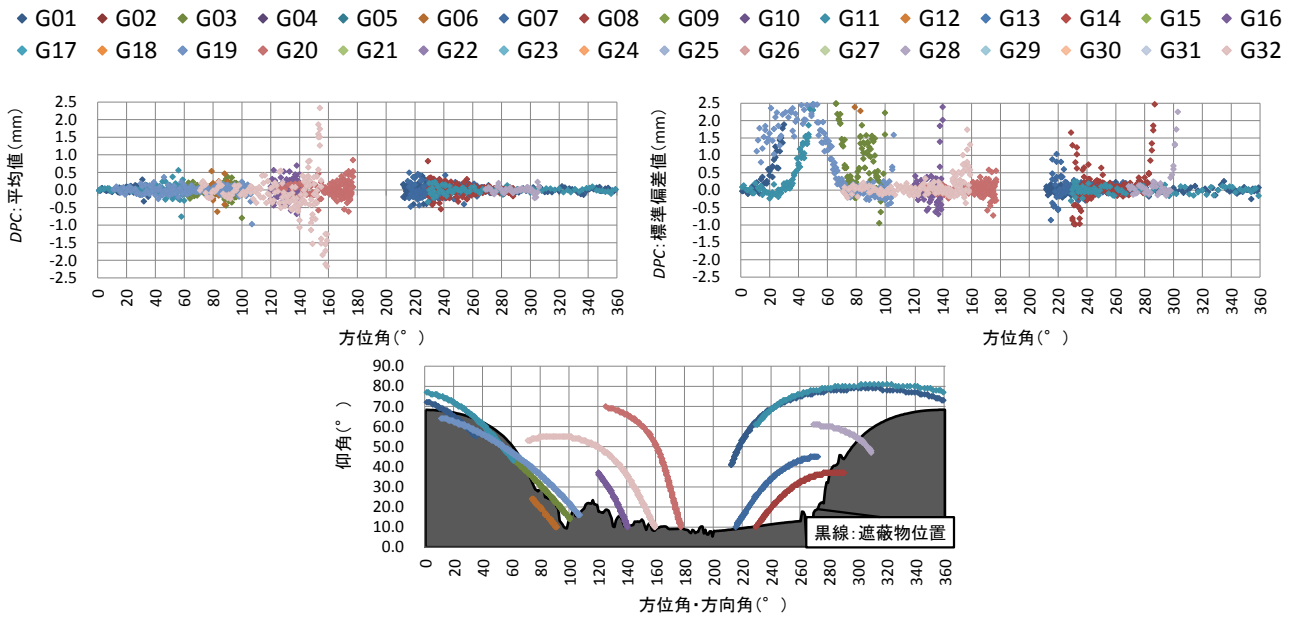


図 4-32 観測点 B2 における GPS のマルチパス検証結果

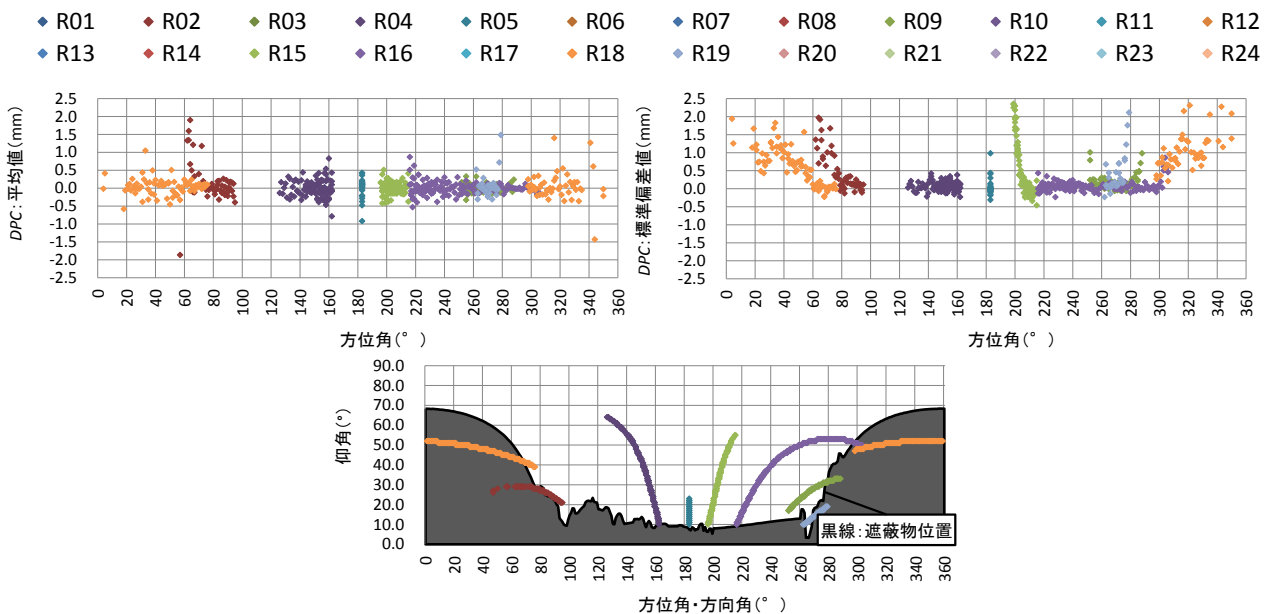


図 4-33 観測点 B2 における GLONASS のマルチパス検証結果

移しており、大きな変化は見られなかった。一方、標準偏差の較差については、0mm 付近で推移する場合と、値が大きくなる場合の 2 種類の傾向が確認された。標準偏差が大きくなる際の GPS 衛星の位置を調べると、衛星が遮蔽物により不可視となることが確認できる。不可視衛星からの受信電波は、反射波と回折波により構成されるためマルチパスの影響が大きく、受信電波にマルチパスを含む場合、DPC の分布は大きくなることがわかる。

同観測点における GLONASS のマルチパス検証結果を図 4-33 に示す。平均値の較差については、GLONASS:04 番、06 番等の南方向に飛来する衛星や、遮蔽物により不可視となる衛星につ

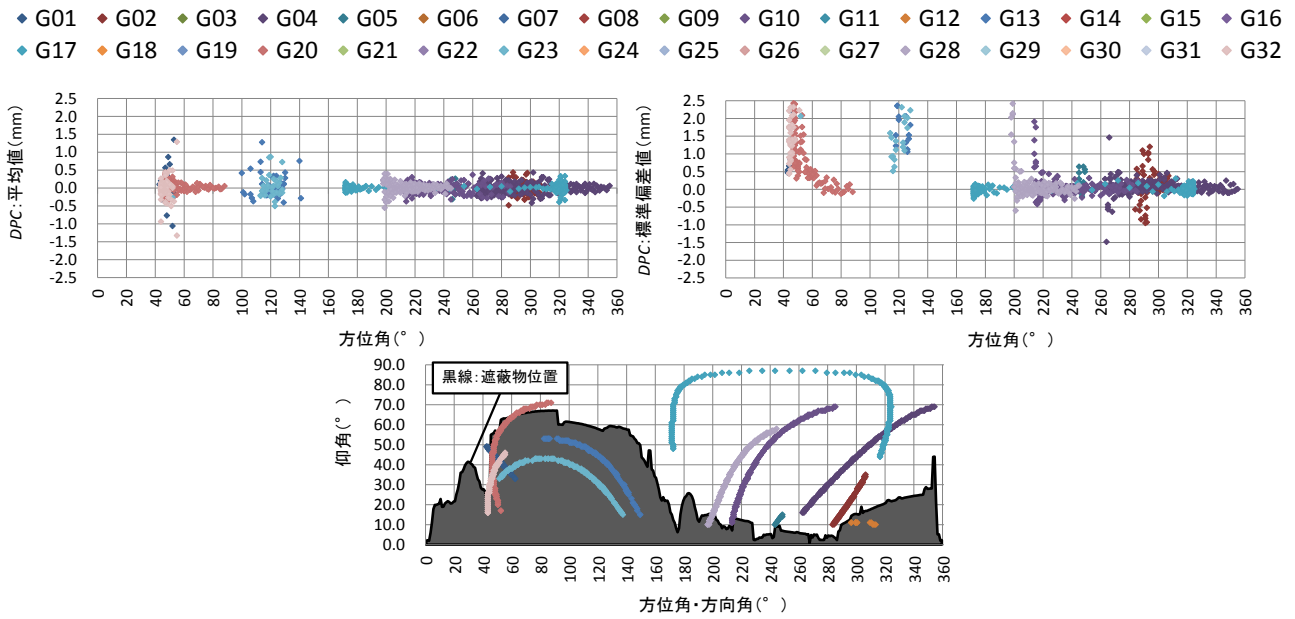


図 4-34 観測点 B4 における GPS のマルチパス検証結果

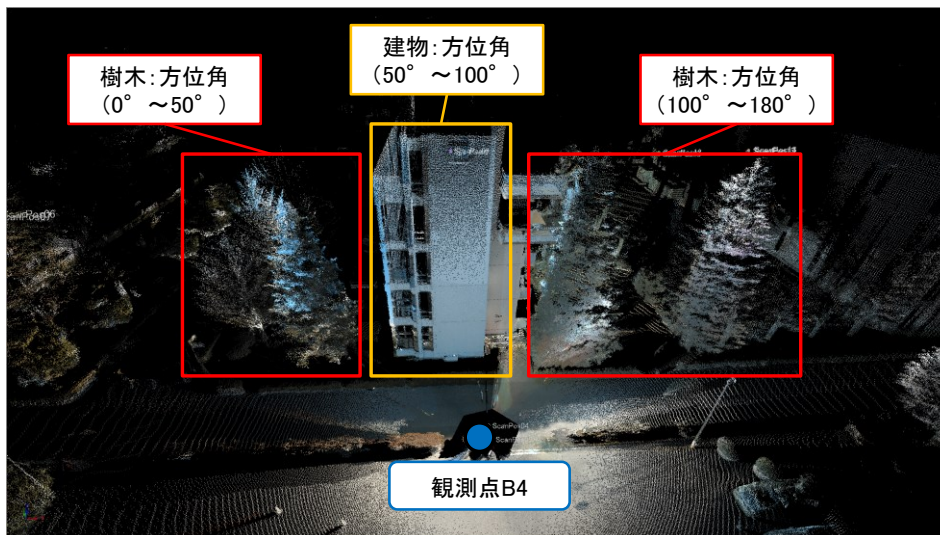


図 4-35 観測点 B4 における周囲の地物の位置関係

いて、値の分布が大きくなる傾向が見られた。また、標準偏差の較差については、GPS と同様に、衛星が不可視の際に大きくなる傾向が確認でき、GLONASS についても、受信電波にマルチパスを含む場合、DPC の分布は大きくなることわかる。

衛星が不可視時の場合に、標準偏差の較差が大きくなる傾向については、観測点 B3～B7 でも同様に確認できる。また、図 4-33 より、地物と正対する位置に衛星が飛来する場合、較差の平均値の分布が大きくなる傾向が見られたが、観測点 B3 において北方向に飛来する衛星に対して同様の傾向が確認された。

次に、地物に樹木が含まれる場合の DPC の傾向について確認する。観測点 B4 における GPS のマルチパス検証結果を図 4-34 に示す。平均値と標準偏差の較差の傾向を確認すると、衛星が可

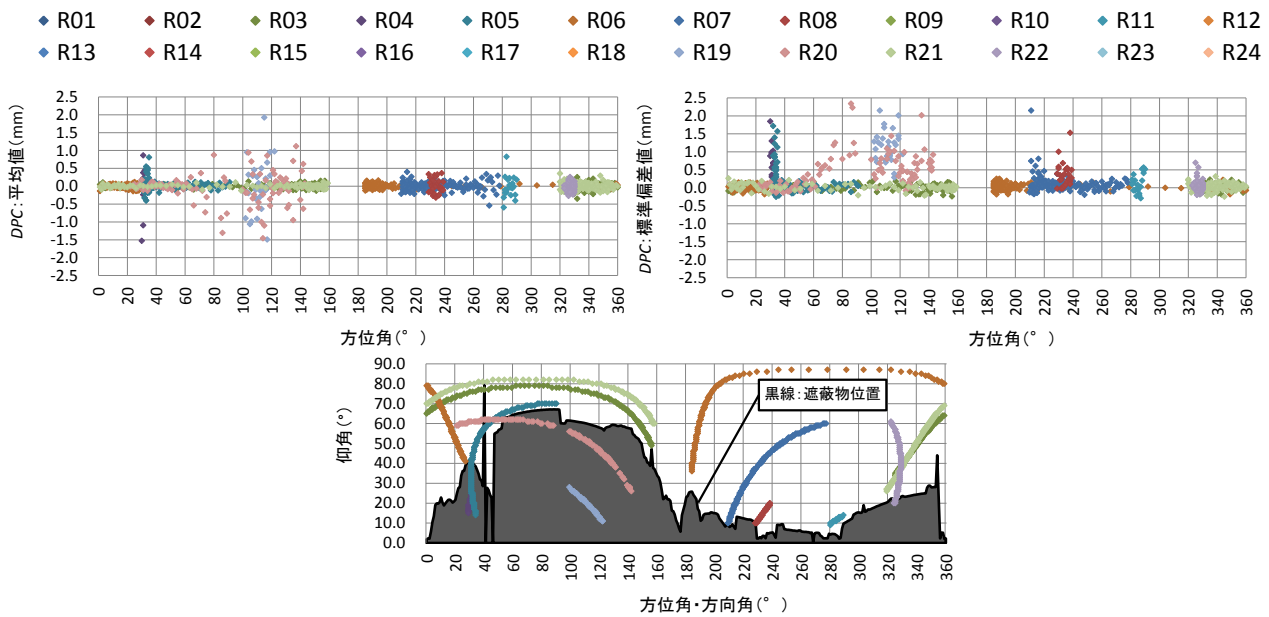


図 4-36 観測点 B4 における GLONASS のマルチパス検証結果

表 4-4 GPS における DPC の傾向

観測点	平均値 (mm)		標準偏差 (mm)	
	可視時	不可視時	可視時	不可視時
B2: 北遮蔽	0.0	0.0	0.1	2.3
B3: 南遮蔽	0.0	0.1	0.1	2.3
B4: 東遮蔽	0.0	0.1	0.1	2.8
B5: 西遮蔽	0.0	0.0	0.1	1.8
B6: 東西遮蔽	0.0	0.0	0.1	2.5
B7: 斜め遮蔽	0.0	0.0	0.0	2.0

視時の場合、双方ともに 0mm 付近で推移することがわかる。図 4-35 より、遮蔽物となる地物の種類を調べると、方位角 $50^{\circ} \sim 100^{\circ}$ の範囲では観測点 B2 と同様に建物による地物が確認できるが、反射面となる範囲は狭いことがわかる。また、方位角 $0^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 、 $100^{\circ} \sim 180^{\circ}$ の範囲では、樹木による地物を多く含むことが確認できる。樹木に対しては衛星電波の反射はほとんど生じず、反射面となる地物の範囲も狭いため、可視衛星から受信される電波は、マルチパスを含まなかったものと考えられる。この傾向は、図 4-36 に示す、同観測点の GLONASS のマルチパス検討結果についても確認された。

これらの検証結果より、衛星が不可視となり、反射波と回折波による受信電波となる場合、観測点に関わらず、平均値と標準偏差の較差の分布が大きくなる傾向が確認された。各観測点で得られた GPS と GLONASS の平均値の較差、および標準偏差の較差に対して、可視条件別にそれぞれ平均値を求めて傾向を確認すると、表 4-4、表 4-5 より、可視時の場合、GPS、GLONASS とともに全観測点で約 0mm となることがわかる。一方、不可視時の場合、標準偏差の較差において、観測点に関わらず値が大きくなる傾向が見られ、分布の大きさは、GPS のほうが大きくなる

表 4-5 GLONASS における DPC の傾向

観測点	平均値 (mm)		標準偏差 (mm)	
	可視時	不可視時	可視時	不可視時
B2: 北遮蔽	0.0	0.1	0.3	0.8
B3: 南遮蔽	0.0	0.1	0.1	0.6
B4: 東遮蔽	0.0	0.0	0.0	0.7
B5: 西遮蔽	0.0	0.0	0.0	0.7
B6: 東西遮蔽	0.0	0.1	0.0	0.5
B7: 斜め遮蔽	0.0	0.0	0.0	0.5

結果となった。以上のことから、マルチパスの影響を受ける受信電波に対して DPC を算出した場合、マルチパスの影響を受けない高仰角衛星と比較し分布が大きくなる傾向が見られ、マルチパスの検知に適用が可能であると判断した。

4-3 位相変化量の差に基づいた利用衛星の選択とその効果の検証

4-3-1 検証の概要

観測値からマルチパスの影響を受ける受信電波を除去した場合の効果を検証するため、全観測衛星の電波を使用した場合と、前節で示した DPC の傾向に基づきマルチパスの影響を受けない衛星電波のみを選択した場合とで基線解析を行った。得られた解析結果より、解析条件別に取得された各測位解の割合と測位精度を算出し、衛星選択効果の有用性を確認した。

検証は、遮蔽物なしの観測点 A0 を基準局データ、遮蔽物を含む観測点 B2~B7 を移動局データとし、得られた双方の RINEX データより「GPS のみ」と「GPS+GLONASS」の条件でキネマティック解析を実施し、得られた Fix 解を用いて測位率と測位精度を算出した。解析には、RTKLIB Version 2.4.1 を使用し、整数値バイアス決定手法を Instantaneous、解析に使用する搬送波を L1+L2 に設定した。なお、衛星選択による解析では、DPC の検証結果からマルチパスの影響を受ける衛星電波とその観測時間帯を確認し、対象となる衛星の観測値を移動局の RINEX データから消去して基線解析を行った。

キネマティック解析を行うにあたり、基準局の座標値が必要となるが、これは、2011 年 2 月 3 日に観測点 A0 に受信機を設置し、2 時間観測による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た。観測に使用した受信機は、ニコン・トリンブル社が販売する Trimble 5700 シリーズであり、近傍の電子基準点による観測データを含めて解析を行った。解析には、Trimble Total Control を使用し、電子基準点データは、白井 (3018)、花見川 (0225)、富里 (3020) の 3 点で得られたものを使用した。また、精度検証を行うにあたり、各移動局の座標値が必要となるが、これは、2011 年 6 月 18 日 10:00~13:00 に観測点 A0 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。使用した受信機は、先ほどと同様に Trimble 5700 シリー

ズである。

4-3-2 衛星選択条件

衛星を選択する基準として、本章では、遮蔽物からの反射によるマルチパスの影響を受けていないと推察される観測点 B4~B7 の可視衛星の平均値較差、および標準偏差較差の結果を参考とした。各衛星で得られた平均値、標準偏差の結果に対して絶対値を算出し、その分布範囲により選択条件を決定した。図 4-37、図 4-38 に平均値較差、標準偏差較差の分布傾向を累積度数により示す。平均値については、GPS、GLONASS ともに 1.0mm 以内となる傾向が確認でき、標準偏差値については、GPS で 3.0mm 以内、GLONASS で 2.0mm 以内となる傾向が見られた。標準偏差で示された傾向は、一部の不可視衛星も該当するが、内訳を確認すると可視時の全データに占める 1%未満のデータが約 1.0mm 以上となる結果を示しており、これらを考慮し、GPS、GLONASS において、平均値、標準偏差ともに 1.0mm 以内となる衛星を選択するものとした。

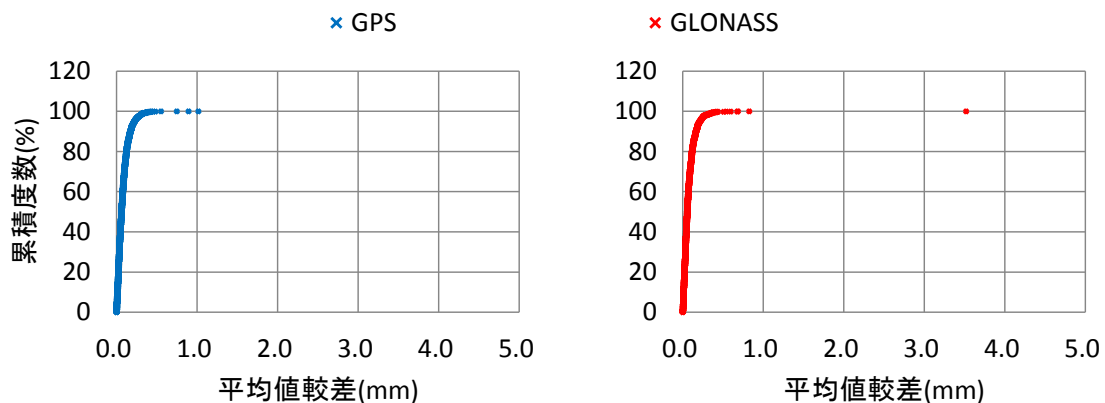


図 4-37 観測点 B4~B7 の可視衛星における平均値較差の分布検討結果

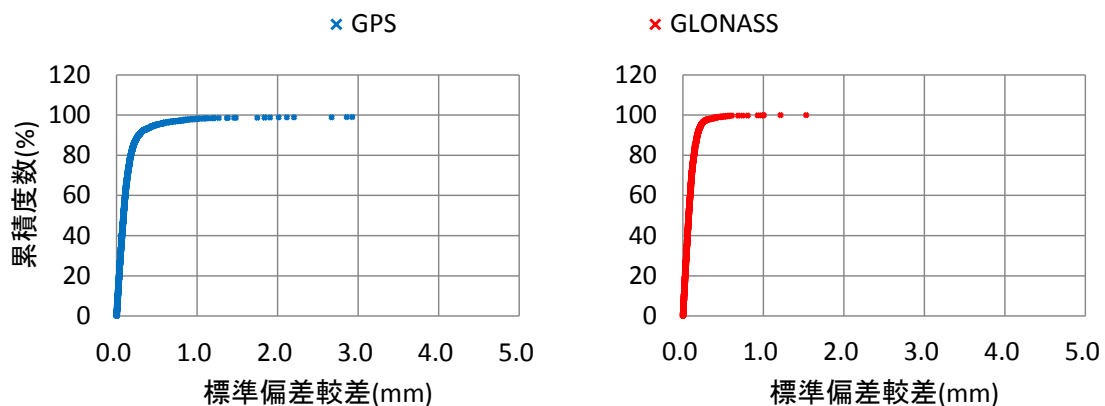


図 4-38 観測点 B4~B7 の可視衛星における標準偏差較差の分布検討結果

4-3-3 観測点別における各測位解の取得結果

マルチパスの影響を受ける受信電波の除去効果を検証するため、全観測衛星を使用した場合と、先ほどの衛星選択条件に該当する衛星を除去した場合についてキネマティック解析を行い、得られた各々の測位解の割合について検証を行った。

観測点別による「GPSのみ」の場合の測位解の割合を表4-6に示す。全観測衛星使用時と利用衛星選択時で得られた測位解の割合を確認すると、観測点B4を除く計5箇所の観測点で、Float解の取得割合低下とFix解の取得割合増加が見られた。一方、観測点B4では、Fix解、Float解の割合が低下し、測位不能となる割合が増加する傾向が確認された。これは、利用衛星選択により、解析に必要とする5衛星以上の電波が得られなかった可能性が考えられる。なお、Fix解の割合が増加した観測点B5、B6についても測位不能となる割合の増加が確認できるが、観測点B4と同様、解析に必要とする衛星数の不足が考えられる。

次に、「GPS+GLONASS」の場合の測位解の割合を表4-7に示す。双方の測位解の割合を確認すると、利用衛星を選択することにより、全観測点でFloat解の取得割合が低下し、Fix解の取得割合が増加する傾向が見られた。図4-39より、解析条件別に得られたFix解の割合を比較すると、全観測衛星使用時では、GPSのみのほうがFix解の割合が大きい観測点を多く確認できる。これは、GLONASS併用による衛星数の増加により、マルチパスの影響を受ける衛星電波が増加

表4-6 GPSのみによる測位解の割合（単位：％）

観測点	全観測衛星使用			利用衛星選択		
	測位不能	Float	Fix	測位不能	Float	Fix
B2:北遮蔽	5.6	60.5	34.0	5.6	30.4	64.0
B3:南遮蔽	0.4	58.4	41.2	0.0	35.3	64.7
B4:東遮蔽	0.0	86.4	13.5	17.3	69.9	12.8
B5:西遮蔽	1.7	65.8	32.5	15.2	25.3	59.5
B6:東西遮蔽	2.0	95.5	2.5	53.4	41.0	5.6
B7:斜め遮蔽	0.0	49.6	50.4	0.0	12.0	88.0

表4-7 GPS+GLONASSによる測位解の割合（単位：％）

観測点	全観測衛星使用			利用衛星選択		
	測位不能	Float	Fix	測位不能	Float	Fix
B2:北遮蔽	5.6	60.4	34.1	5.6	34.9	59.5
B3:南遮蔽	0.5	61.1	38.5	0.0	29.5	70.5
B4:東遮蔽	0.0	72.9	27.1	0.0	70.0	30.0
B5:西遮蔽	1.1	70.5	28.4	0.0	21.5	78.5
B6:東西遮蔽	1.3	97.4	1.3	2.4	63.2	34.4
B7:斜め遮蔽	0.0	57.4	42.5	0.0	12.0	88.0

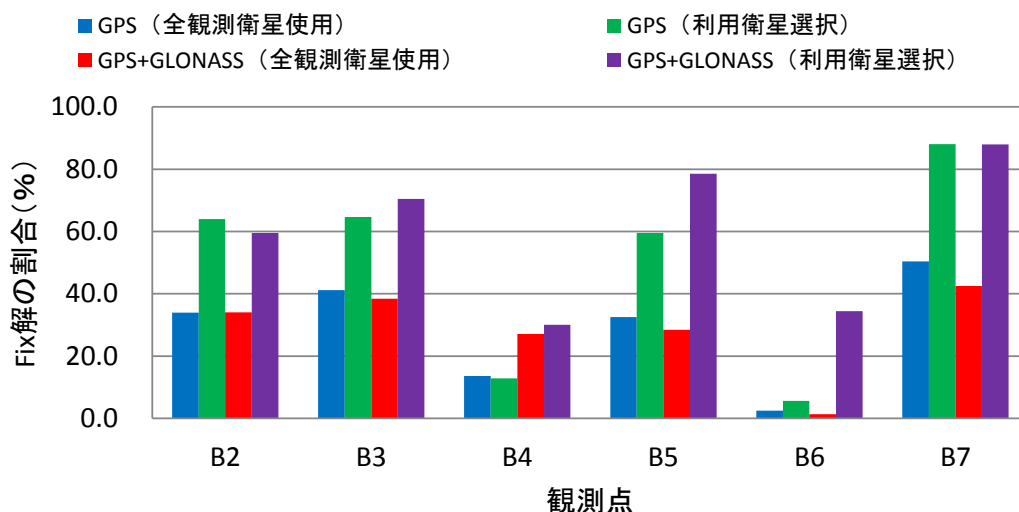


図 4-39 解析条件別による Fix 解の取得割合

したためと推察される。また、利用衛星選択時では、GLONASS 併用時の Fix 解の割合が大きくなる観測点を多く確認できるが、これは、GPS のみの場合よりも解析に使用可能な衛星が増加したためと考えられる。

これらの検証結果より、マルチパスの影響を受ける受信電波を使用しないことで、取得される Fix 解の割合が増加し、さらに、GLONASS を併用することで、GPS のみの場合よりも得られる Fix 解が増加することが確認された。なお、全観測衛星使用時では、GLONASS 併用により GPS のみよりも取得する Fix 解の割合が低下したため、併用測位による衛星数増加の利点を生かすには、的確に誤差電波を除去する必要があるといえる。

4-3-4 観測点別における測位精度の検証結果

(1) 検証方法

利用衛星選択による測位精度への影響を検証するため、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電波を除去した場合とで得られた Fix 解について精度検証を行った。精度比較については、得られた Fix 解の座標値 (X 軸, Y 軸, 標高) から、スタティック測位で得られた各観測点の座標値との差を算出し、観測開始時間から 1 分間毎に平均値を求めて行った。また、解析条件別に使用される衛星の個数とその配置についても比較を行うため、1 分間毎に衛星数と衛星配置による幾何学的な精度劣化度を示す PDOP (Position dilution of precision : 位置精度劣化係数) を求めた。

ここで、DOP について先に説明する。DOP とは、衛星測位において衛星配置が位置座標の推定精度に与える影響を数値化したものである。衛星配置と位置座標推定の関係を 2 次元で考えた場合、衛星位置は既知であるため、2 つの衛星からの距離を測定することで位置を正確に決定することができ、その位置は 2 つの衛星を中心とした円の交点となる。しかしながら、距離測定に

は、第2章でも述べたように、遅延誤差や整数不定性が含まれており、さらに、異なる衛星配置で位置座標推定の不確実性がどのように変化するか比較した場合、同じ位置に衛星が集中するほど不確実性の領域は大きくなる。この不確実性の領域を数値で示したものが **DOP** であり、値が小さいほど不確実性の領域が小さいことを示す。不確実性の領域は、観測衛星の方位角、仰角によって決定し、次の行列式に代入して求める。

$$A \cdot \delta X = \delta R \quad (4-1)$$

$$A = \begin{bmatrix} \cos E_1 \sin Az_1 & \cos E_1 \cos Az_1 & \sin E_1 & 1 \\ \cos E_2 \sin Az_2 & \cos E_2 \cos Az_2 & \sin E_2 & 1 \\ \cos E_3 \sin Az_3 & \cos E_3 \cos Az_3 & \sin E_3 & 1 \\ \cos E_4 \sin Az_4 & \cos E_4 \cos Az_4 & \sin E_4 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}, \quad \delta X = \begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \\ \delta_t \\ \vdots \end{bmatrix}, \quad \delta R = \begin{bmatrix} \delta_{r1} \\ \delta_{r2} \\ \delta_{r3} \\ \delta_{r4} \\ \vdots \end{bmatrix}$$

A : 計画行列 δX : 未知数行列 δR : 観測行列 E_i : 衛星仰角 Az_i : 衛星方位角

式(4-1)より、 δX の分散は A の逆行列を A^{-1} として以下の式で表され、各衛星の疑似距離に単位の誤差があつて、それらは相互に無関係であるとき、 $\text{Cov}(\delta R)$ は単位行列となる。

$$\text{Cov}(\delta X) = A^{-1} \cdot \text{Cov}(\delta R) \cdot (A^{-1})^T \quad (4-2)$$

$$\text{Cov}(\delta X) = (A^T \cdot A)^{-1} \quad (4-3)$$

$$(A^T \cdot A)^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} & \sigma_{xt} \\ \sigma_{yx} & \sigma_y^2 & \sigma_{yz} & \sigma_{yt} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_z^2 & \sigma_{zt} \\ \sigma_{tx} & \sigma_{ty} & \sigma_{tz} & \sigma_t^2 \end{bmatrix}$$

ここで、 σ_x^2 等は式(4-3)の対角要素であり、**DOP**は対角要素の和の平方根として定義される。**PDOP**については、以下の式で定義される²⁾。

$$\text{PDOP} = \sqrt{\{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2\}} \quad (4-4)$$

(2) 検証結果

観測点 B2 における平均 Fix 解の時系列変化を方向別に図 4-40 に示す。GPS のみ、GPS+GLONASS とともに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、全観測衛星使用時に Fix 解が得られない時間帯でも Fix 解の取得が確認できる。また、基準値からの Fix 解の分布は、GPS のみの場合、利用衛星の選択に関わらず、南北、東西方向で 20mm 以内、鉛直方向で 40mm 以内となる傾向が確認でき、図 4-41 より、解析に使用する衛星数が減少しても、測位精度に大きな影響はないことがわかる。

一方、GPS+GLONASS の場合、観測開始から 12:20 までの時間帯では、3 方向ともに GPS のみの Fix 解と同等の分布が確認できる。しかし、観測時間帯 12:30 以降では、利用衛星選択時の Fix 解の分布が大きくなり、GPS のみの場合よりも分布が大きくなる傾向が見られた。図 4-41 より衛星数を確認すると、Fix 解の分布が安定している 11:00~11:30 の時間帯では 7 機~9 機であるのに対し、12:30 以降では 8 機~10 機と多くの衛星を解析に使用していることがわかる。また、図 4-42 より PDOP を確認した場合、11:00 では 3.2 であるのに対し、12:30 では 2.1 となった。衛星の幾何学的配置が良好になるほど PDOP は低下するため、GLONASS 併用時の Fix 解

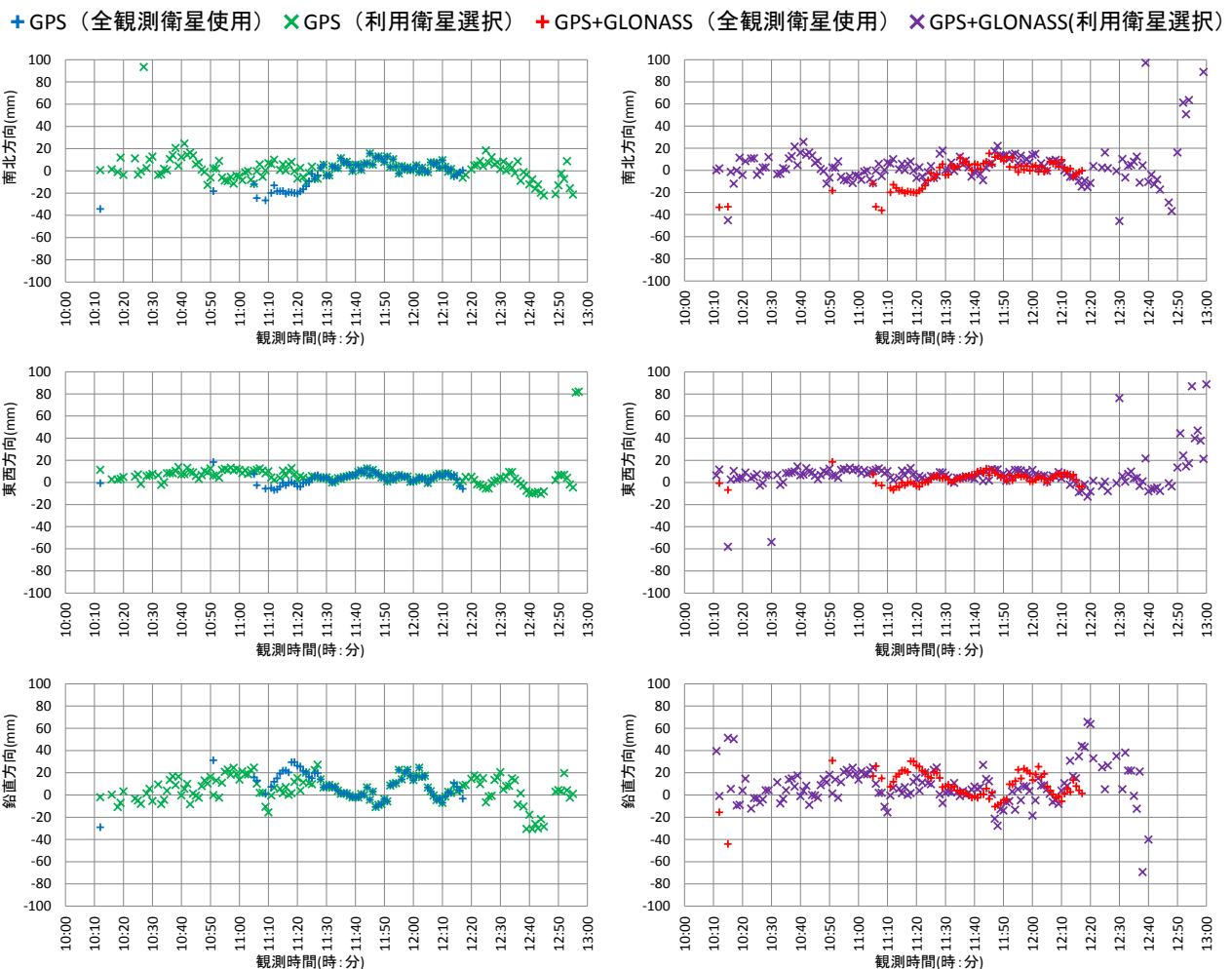


図 4-40 観測点 B2 における平均 Fix 解の時系列変化

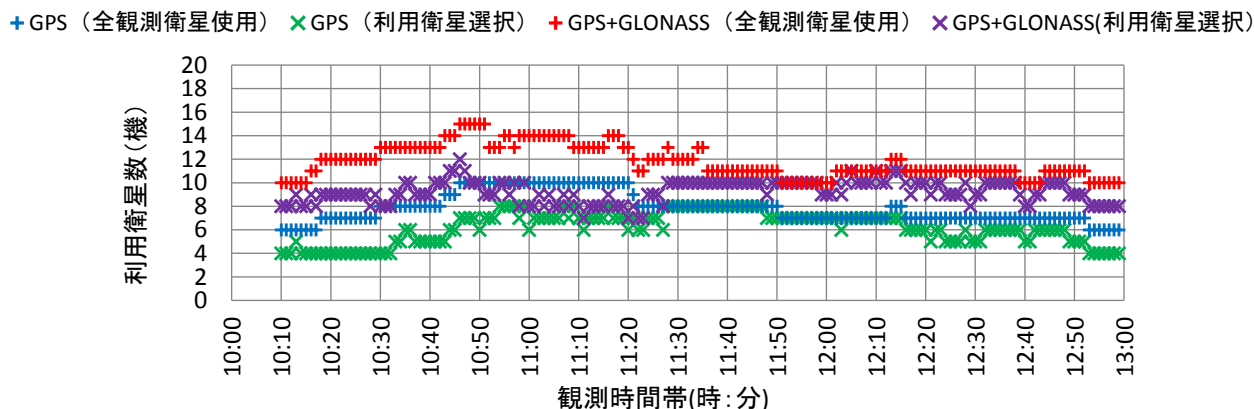


図 4-41 観測点 B2 における解析使用時の衛星数の時系列変化

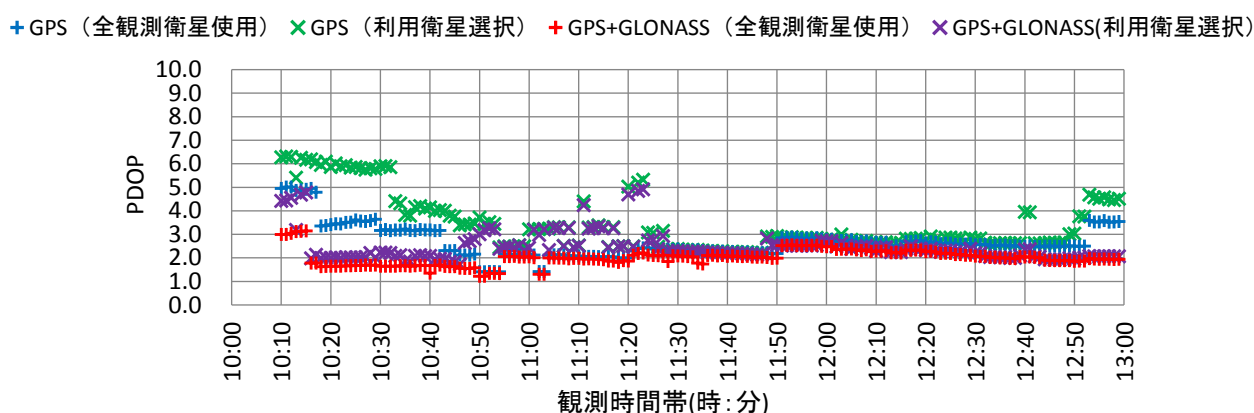


図 4-42 観測点 B2 における PDOP の時系列変化

解の分布について、衛星数と衛星配置が影響したとは考えにくい。そこで、解析に使用した GLONASS 衛星 (R04, R09, R16, R18) の位置を調べると、GLONASS:18 番について、設定した衛星選択条件内においても不可視衛星となる場合が確認された。GLONASS 衛星について、設定した衛星選択条件では、マルチパスの影響を受ける衛星電波を正確に除去しきれなかった可能性が考えられる。

利用衛星の選択により Fix 解が連続して得られる傾向は、表 4-6、表 4-7 において Fix 解の取得割合が増加した観測点において、観測点 B2 と同様の傾向が見られた。一方で、衛星選択により Fix 解の割合低下が見られた観測点 B4 では、図 4-43 より、GPS のみ、GPS+GLONASS とともに 3 方向で Fix 解の分布が大きくなる傾向が見られた。図 4-44 より解析使用時の衛星数を調べると、GPS のみの場合、利用衛星選択時において衛星数が 3 機となる時間帯が確認でき、解析に必要な衛星数を満たしていないことがわかる。また、図 4-45 より利用衛星選択時の PDOP の傾向を調べると、Fix 解が連続して得られている 14:00~15:20 の時間帯では、GPS のみの場合で 2.6~38.8 の範囲となり、観測点 B2~B3 よりも PDOP が増加する傾向が見られる。これらの結果より、GPS のみにおける Fix 解の測位割合、および分布の傾向は、解析に必要とする衛星数の不足と幾何学的な衛星配置が影響したものと推察される。なお、GPS+GLONASS については、

+ GPS (全観測衛星使用) × GPS (利用衛星選択) + GPS+GLONASS (全観測衛星使用) × GPS+GLONASS(利用衛星選択)

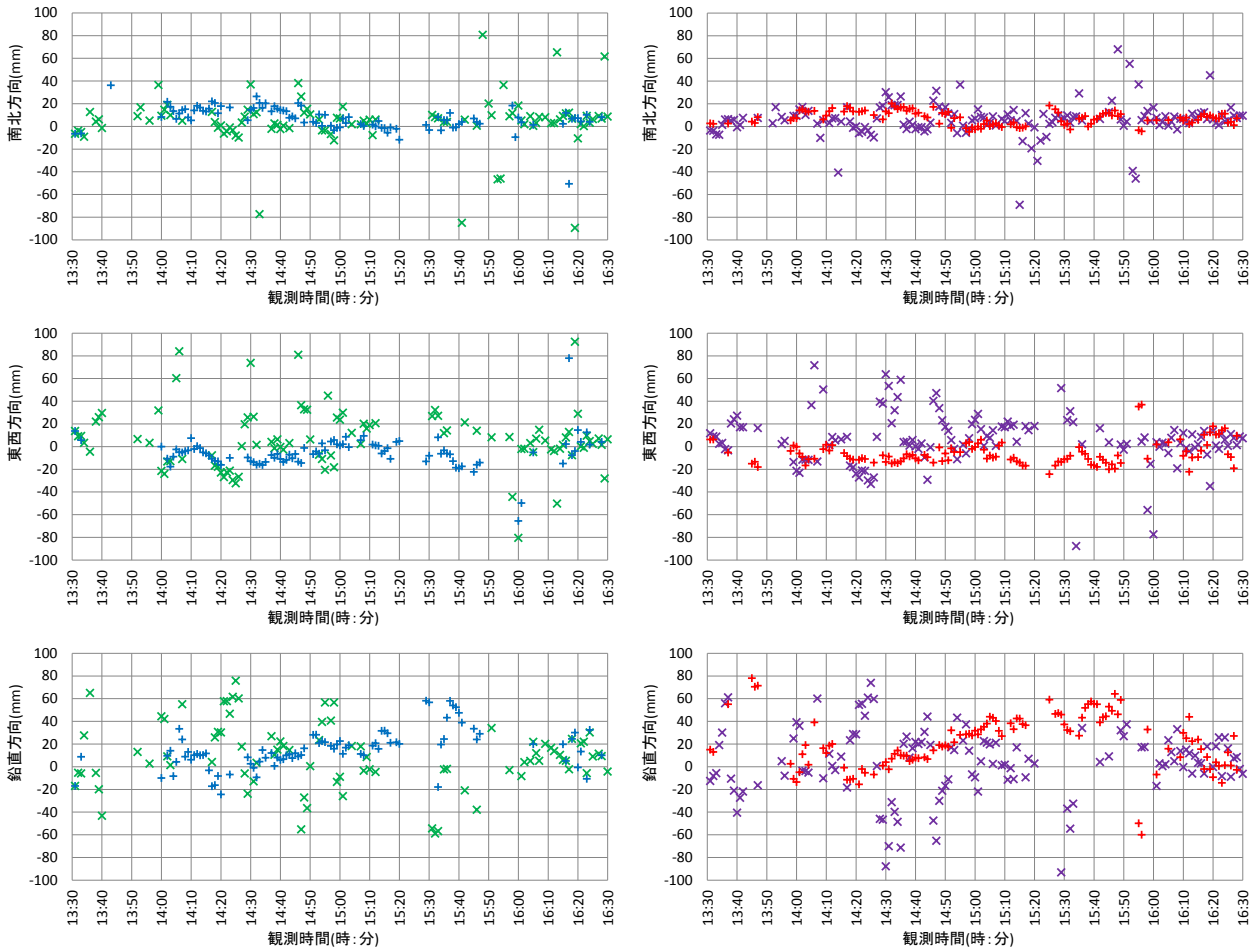


図 4-43 観測点 B4 における平均 Fix 解の時系列変化

+ GPS (全観測衛星使用) × GPS (利用衛星選択) + GPS+GLONASS (全観測衛星使用) × GPS+GLONASS(利用衛星選択)

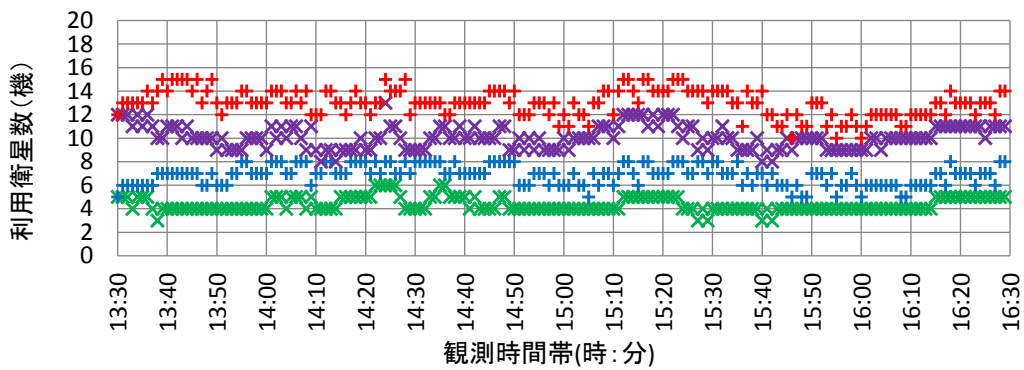


図 4-44 観測点 B4 における解析使用時の衛星数の時系列変化

利用衛星選択時でも測位に必要な衛星数が得られており、PDOP についても GPS のみと比較し常に低い値で推移することがわかる。Fix 解の分布を確認すると、GPS のみの場合と類似した傾向を示しており、GPS 側の衛星数、および衛星配置等の観測条件が影響したものと推察される。なお、この Fix 解の分布が大きくなる傾向は、観測点 B6 においても確認されており、観測点 B4

+ GPS (全観測衛星使用) × GPS (利用衛星選択) + GPS+GLONASS (全観測衛星使用) × GPS+GLONASS(利用衛星選択)

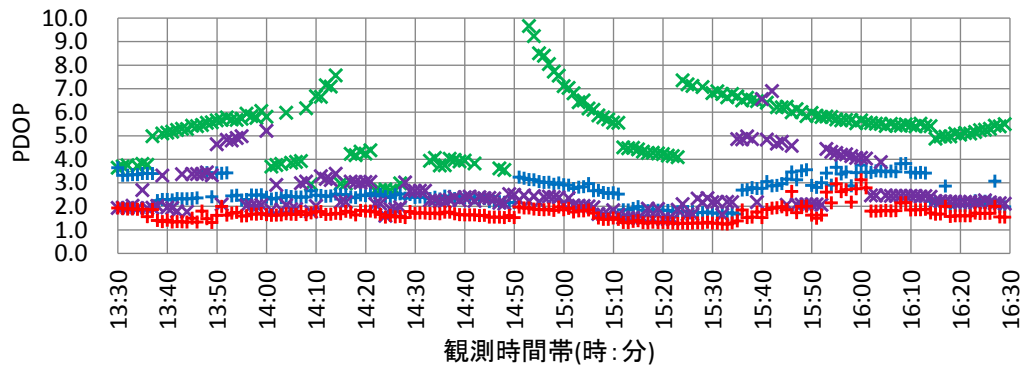


図 4-45 観測点 B4 における PDOP の時系列変化

表 4-8 GPS のみによる Fix 解の概略精度内となる平均値の割合 (単位: %)

観測点	全観測衛星使用			利用衛星選択		
	南北方向	東西方向	鉛直方向	南北方向	東西方向	鉛直方向
B2: 北遮蔽	37.2	40.0	32.2	80.6	83.3	72.8
B3: 南遮蔽	61.1	67.8	53.9	93.3	95.0	79.4
B4: 東遮蔽	47.8	48.9	32.8	49.4	32.2	26.1
B5: 西遮蔽	60.6	61.7	51.7	78.3	75.0	64.4
B6: 東西遮蔽	9.4	6.7	3.9	15.6	17.2	8.9
B7: 斜め遮蔽	76.7	75.6	42.8	98.3	95.6	71.1

表 4-9 GPS+GLONASS による Fix 解の概略精度内となる平均値の割合 (単位: %)

観測点	全観測衛星使用			利用衛星選択		
	南北方向	東西方向	鉛直方向	南北方向	東西方向	鉛直方向
B2: 北遮蔽	37.2	40.6	31.1	77.2	81.1	59.4
B3: 南遮蔽	59.4	63.9	48.9	95.0	96.7	82.2
B4: 東遮蔽	62.8	60.6	31.1	77.2	52.8	39.4
B5: 西遮蔽	58.3	58.3	45.6	91.1	88.9	66.7
B6: 東西遮蔽	8.9	10.0	6.7	26.7	26.7	13.3
B7: 斜め遮蔽	75.0	73.9	40.0	98.3	95.6	69.4

と同様に衛星選択により解析に必要な衛星数が得られないことが主な要因であった。

これらの検証結果より、利用衛星を選択することで解析に使用する衛星数は減少するものの、観測点 B2 で確認された Fix 解の分布より、解の欠損を生じることなく一定の分布範囲で長時間測位できることが確認された。しかし、観測点 B4 の解析結果より、利用衛星を選択することで Fix 解の分布が大きくなる、または解を得られない場合も確認された。表 4-8、表 4-9 より、各観測点で得られた全平均解 (データ数: 180) に対して、GPS のみ、GPS+GLONASS の条件で取得された平均 Fix 解が、Fix 解の概略精度内である 20mm 以内となる割合を方向別に示す。GPS

のみ、GPS+GLONASS とともに、観測点 B2, B3, B5, B7 では利用衛星を選択することで、平均 Fix 解が 20mm 以内となる割合は 3 方向ともに増加することがわかる。また、GPS のみと GPS+GLONASS で比較した場合、観測点 B3, B5, B7 で GLONASS 併用時のほうが、平均 Fix 解の割合は増加する傾向が見られた。観測点 B2 については、GLONASS を併用することで平均 Fix 解の割合が低下する傾向が確認でき、これは、GLONASS 衛星においてマルチパスの影響を受ける衛星電波を除去しきれなかった可能性が考えられる。

次に、観測点 B4 では、GPS のみの場合、東西、鉛直方向で平均 Fix 解が 20mm 以内となる割合は低下し、GPS+GLONASS についても、東西方向で割合は低下することがわかる。また、観測点 B6 では、GPS のみ、GPS+GLONASS とともに 20mm 以内となる平均 Fix 解の割合は増加するものの、他の観測点と比較して割合は小さいことが確認できる。観測点 B4, B6 については、マルチパスの影響を受ける衛星を使用しないことで、時間帯によっては解析に必要な衛星数が得られない場合が確認されており、幾何学的な衛星配置も含めた衛星の観測条件が影響したものと推察される。マルチパスの影響を受ける衛星電波を検知し、解析に使用可能な衛星数が少ない場合、観測値から衛星電波を除去しないといった選択も必要であるといえる。

4-4 まとめ

本章では、受信機より取得される観測値について、マルチパスの影響を受けた場合の傾向を確認し、さらに、観測値のひとつである搬送波位相を使用してマルチパスを含む受信電波を検知し、衛星選択による効果を確認した。まず、観測値である信号強度、疑似距離、搬送波位相について周囲の遮蔽環境が異なる観測点別に比較したところ、信号強度では、反射波の影響を受けていると想定される電波に対して強度値の上下動が見られ、回折波の影響を受けていると想定される電波については、直接波を受信する場合よりも強度値の低下が見られた。一方、疑似距離と搬送波位相については、マルチパスの影響を受ける場合、L1波とL2波の変化量の差について、マルチパスの影響を受けない場合よりも分布範囲が大きくなる等の異なる傾向が見られた。特に、搬送波位相についてはmmオーダーの分布となるため、疑似距離よりもマルチパスの影響を受けていると想定される電波に対して、顕著に前述の傾向が見られた。よって、搬送波位相の観測値を追跡することで、マルチパスの影響を含む受信電波を検知できるものと結論づけた。

マルチパス除去を目的とした衛星選択効果については、位相変化量の差であるDPCの算出結果に基づき、マルチパスの影響を受けない衛星電波のみを選択してキネマティック解析を行った結果、Fix解の取得割合の増加が見られた。また、GLONASSを併用することで、GPSのみの場合よりも得られるFix解がさらに増加することが確認された。誤差電波除去により、解析に使用可能な衛星数の低下、およびPDOPの増加が生じるが、基線解析に必要な衛星数を満たしていれば、Fix解の取得割合の増加に加え、その概略精度である20mm以内の精度を満たす解の割合が増加するものと考えられる。

以上より、搬送波位相変化量の差を調べることで、マルチパスの影響を含む受信電波の検知ができ、さらに、マルチパスを含む電波を除去して基線解析を行うことで、Fix解の取得数が増加することを明らかにした。以降の論文では、具体的なマルチパス検知指標の設定と、それを用いた衛星選択効果について述べるものとする。

第4章 参考・引用文献

- 1) Global Navigation Satellite System, Interface Control Document, 2008.
<http://facility.unavco.org/kb/getattachment.php?data=NzI3fGlrZDUxZW4ucGRm>
(入手 2013.10)
- 2) 土屋淳, 辻宏道 : GNSS 測定の基礎, 日本測量協会, pp.103-104, pp.160-161, pp.220-221, 2008.3.

第5章 マルチパス検知手法の検証

5-1 観測値を用いたマルチパス検知

第4章で示した異なる受信環境で得られた観測値より、反射波や回折波によるマルチパスを受信する場合、直接波による受信電波に対して、信号強度、疑似距離や搬送波位相による変化量の差について大きく影響が現れることが確認された。中でも、搬送波位相の変化量の差は、電離層遅延による特性に加えて、受信電波に含まれるマルチパスの影響も分布結果の違いより確認できしており、マルチパスを検出する手がかりになりうる。また、信号強度についても、第3章で示した反射波と回折波の特性を受信機から得られる測定値より確認できるため、マルチパスによる誤差電波を検知できるものと考えられる。そこで、本節では、各々の測定値の特性から信号強度による手法に加えて、新たに搬送波位相の変化量を用いたマルチパス検知手法を構築するものとする。

5-1-1 信号強度を用いたマルチパス検知手法

(1) 信号強度の特性とマルチパス検知手法

前節で示した、3つの観測環境によって得られたGPS衛星とGLONASS衛星の信号強度について、以下の特性が確認された。

- 低仰角により衛星と受信アンテナ間の距離が長くなると信号強度が低下する
- 仰角45°以上で信号強度は一定値で推移する
- 直接波と反射波による受信電波の信号強度は上下動する
- 反射波と回折波による受信電波の信号強度は低下する

観測点別に得られた信号強度の傾向を確認すると、天頂付近等のマルチパスの影響を受けていない受信電波の信号強度は同等の強度値を示しており、受信機間で大きな差は生じないことがわかる。また、マルチパスの影響を受けた受信電波の信号強度は、直接波による信号強度に対して異なる傾向を示すことが確認できる。よって、今回の観測のように、電離層遅延等の遅延誤差の影響が小さくなる短基線長間に受信機を設置し、うち1台を周囲に地物のない観測点に設置し基準とすることで、マルチパスの影響を受ける受信電波を検知することができるものと考えられる。実際の干渉測位においても、基準局データは電子基準点の観測値や周囲が開けた観測環境で得られた観測値を使用するため、信号強度によるマルチパス検知手法は適用可能である。信号強度を用いたマルチパス検知指標は、以下の式で算出される。

$$DSS = SS_{RS} - SS_{BS} \quad (5-1)$$

DSS : 信号強度の差 (dBHz)

SS_{RS} : 移動局における受信電波の信号強度 (dBHz)

SS_{BS} : 基準局における受信電波の信号強度 (dBHz)

移動局で得られた受信電波の信号強度に対して、基準局で得られた受信電波の信号強度との差を求めて、信号強度の差 (DSS : Difference of Signal Strength) を算出する。マルチパスによる誤差電波を含まなければ、双方で同等の強度値が得られるため、 DSS は 0dBHz 付近の値を示すものと予想される。一方、直接波と反射波による電波を受信する場合、前節で述べた信号強度の上下動が DSS でも確認され、反射波と回折波による電波を受信する場合、回折波の影響により DSS が低下するものと予想される。

(2) DSS によるマルチパス検知手法の検証

ここでは、基準局と移動局で得られる信号強度の観測値から DSS を算出し、信号強度を用いたマルチパス検知指標の有用性について、その検証結果を示す。検証に使用する観測値は、前章で示した、建物の屋上に設置した観測点 A0 と北方向遮蔽となる観測点 B2 で取得したデータを使用し、評価対象とする衛星も GPS:11 番, 32 番と GLONASS:04 番, 18 番の同様の 4 衛星とする。また、異なる観測位置でも同様の傾向が得られるか確認するため、南方向に高さ 20m 程度の地物がある観測点 (B3 : 南遮蔽) に受信機を設置し、観測点 A0 との同時観測を実施することで、検証用の観測値を取得した (図 5-1)。衛星の可視条件については、北遮蔽観測点と同様に 3 次元点群データを用いて観測点周囲の地物の方位角と仰角を算出し、衛星の軌道情報と組み合わせることで観測時間別の衛星可視条件を調べた (図 5-2)。

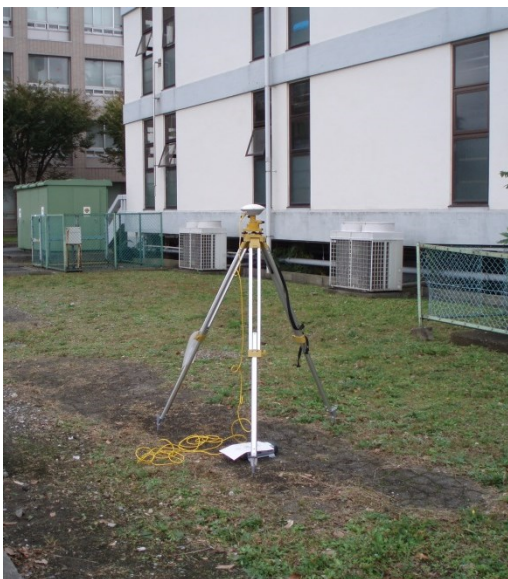


図 5-1 アンテナ設置状況 (B3 : 南遮蔽)

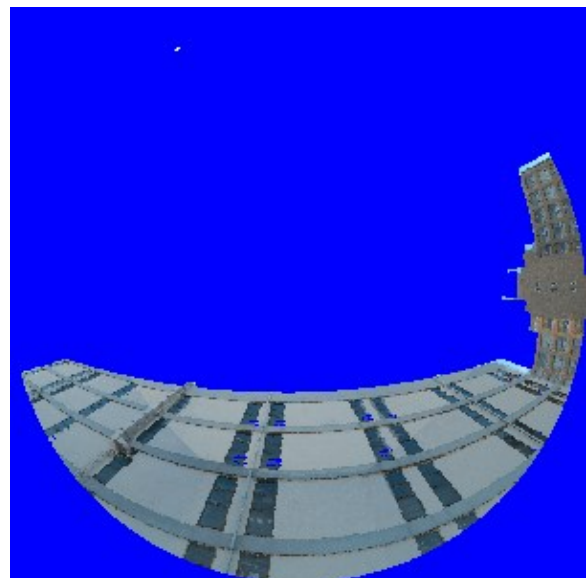


図 5-2 地物の天空図 (B3 : 南遮蔽)

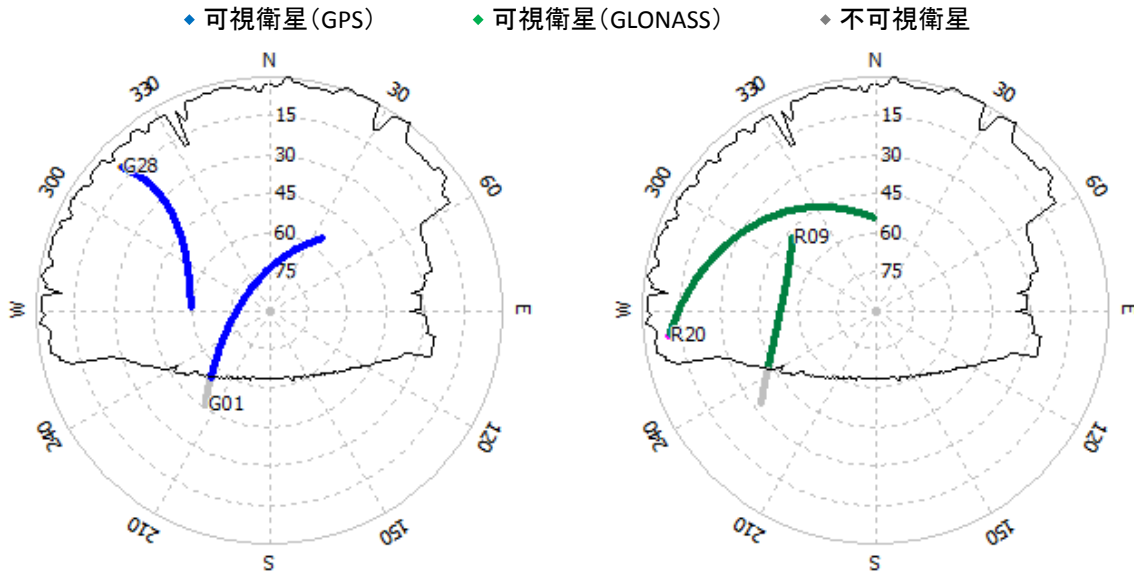


図 5-3 衛星軌道と観測点 B3 における地物位置 (左 : GPS 右 : GLONASS)

評価対象とする衛星は、直接波と反射波、反射波と回折波による受信電波に対して検証するため、地物と正対する位置に飛来する衛星と不可視となる衛星を GPS と GLONASS でそれぞれ 2 衛星選択した。選択した衛星の軌道と地物の位置関係を図 5-3 に示す。GPS:01 番は不可視衛星から可視衛星となって天頂付近を通過する軌道であり、回折波の受信が想定される。GPS:28 番は常に可視衛星となるが、北方向から電波が入射する位置関係となるため、南方向にある地物からの反射波を受信する可能性がある。GLONASS:09 番については、GPS:01 番と同様に不可視から可視へと条件が変わるため、回折波の受信が想定される。GLONASS:20 番は東方向にある地物に対して低仰角時に正対する位置関係となるため、反射波を受信する可能性がある。

図 5-4 に、観測点 B2 の観測値を移動局とする GPS の DSS 算出結果を示す。不可視衛星となり、反射波と回折波による受信電波となる GPS:11 番では、可視時に DSS は 0dBHz 付近の値を示しているのに対して、不可視時では、DSS の値が低下することがわかる。不可視直後の DSS 値を確認すると、L1 波で約 -6dBHz、L2 波で約 -10dBHz であった。第 3 章で示した回折損の傾向を確認すると、式 (3-22) より回折パラメータが 0 ($h = 0$) のとき、回折損は約 6dB となるため、GPS の L1 波は類似した傾向を示していることがわかる。一方、直接波と反射波による受信電波となる GPS:32 番では、前章の図 4-17 で示した信号強度の上下動が見られた時間帯において、DSS は 0dBHz を中心に上下動することがわかる。上下動の大きさを確認すると、L1 波、L2 波ともに ±5dBHz 程度であり、回折波の影響を受ける不可視時の信号強度よりも低下する状況は、ほとんど見られなかった。

観測点 B2 で観測された GLONASS の DSS 算出結果を図 5-5 に示す。直接波と反射波を受信する GLONASS:04 番では、GPS と同様に DSS の上下動が見られ、回折波を受信する GLONASS:18 番では、DSS の値が低下することがわかる。上下動の大きさは、L1 波、L2 波ともに ±5dBHz 程度と GPS とほとんど同じであった。一方、不可視直後の DSS 値を確認すると、L1 波で約 0dBHz、

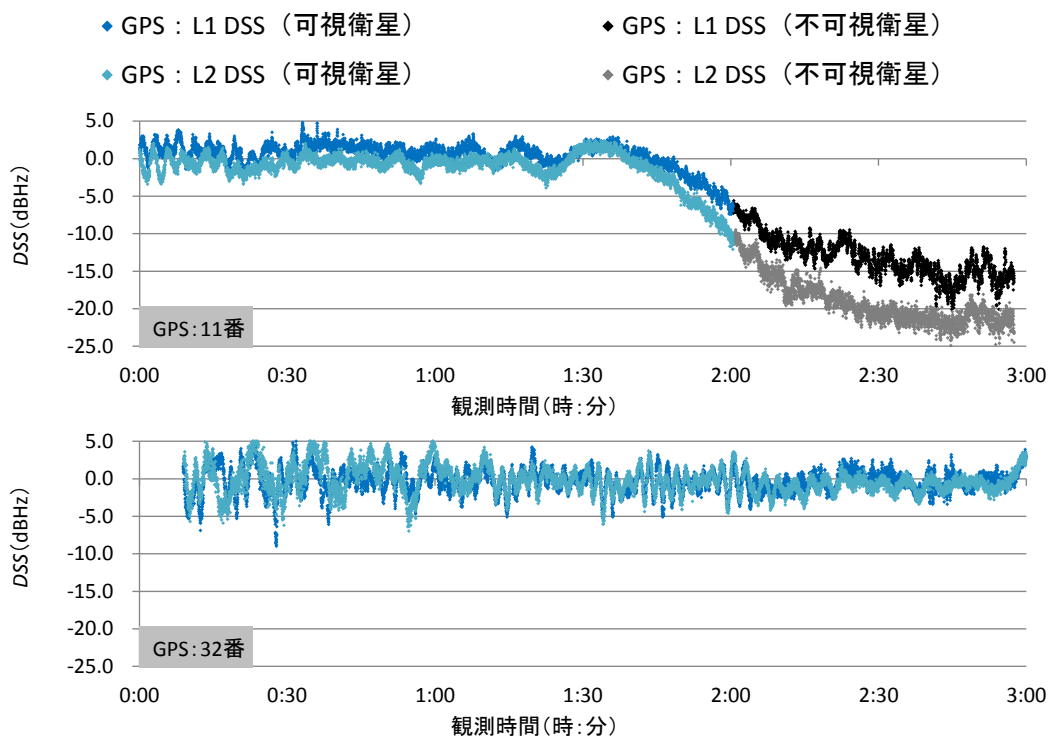


図 5-4 観測点 B2 における GPS のDSS算出結果

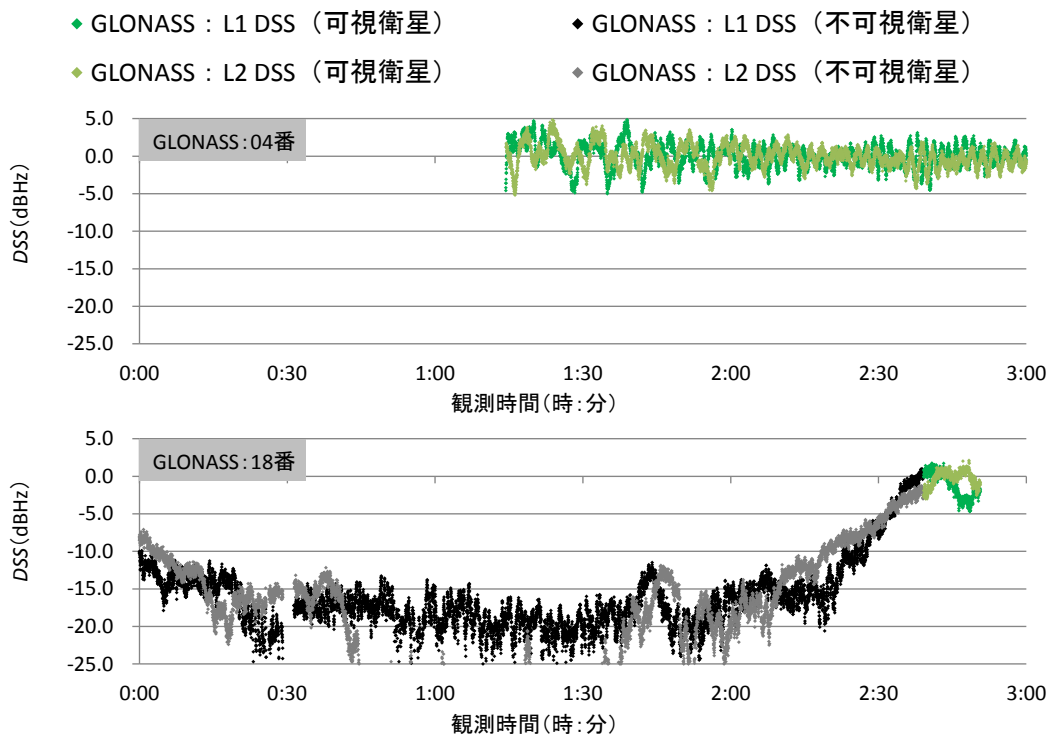


図 5-5 観測点 B2 における GLONASS のDSS算出結果

L2 波で約-2dBHz となり、可視時のDSS値と大きな差は見られなかった。

次に、観測点 B3 で得られた観測値についても、DSSに同様の傾向が見られるか確認する。図 5-6 に、観測点 B3 の観測値を移動局とする GPS のDSS算出結果を示す。図 5-4 で示した結果と

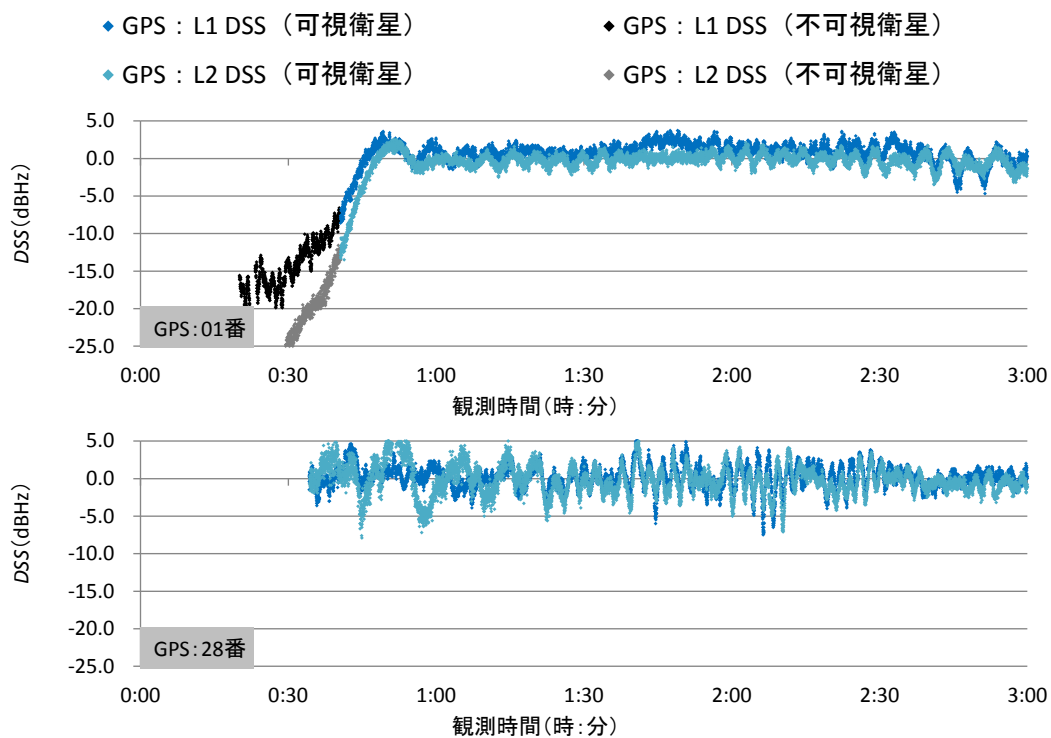


図 5-6 観測点 B3 における GPS のDSS算出結果

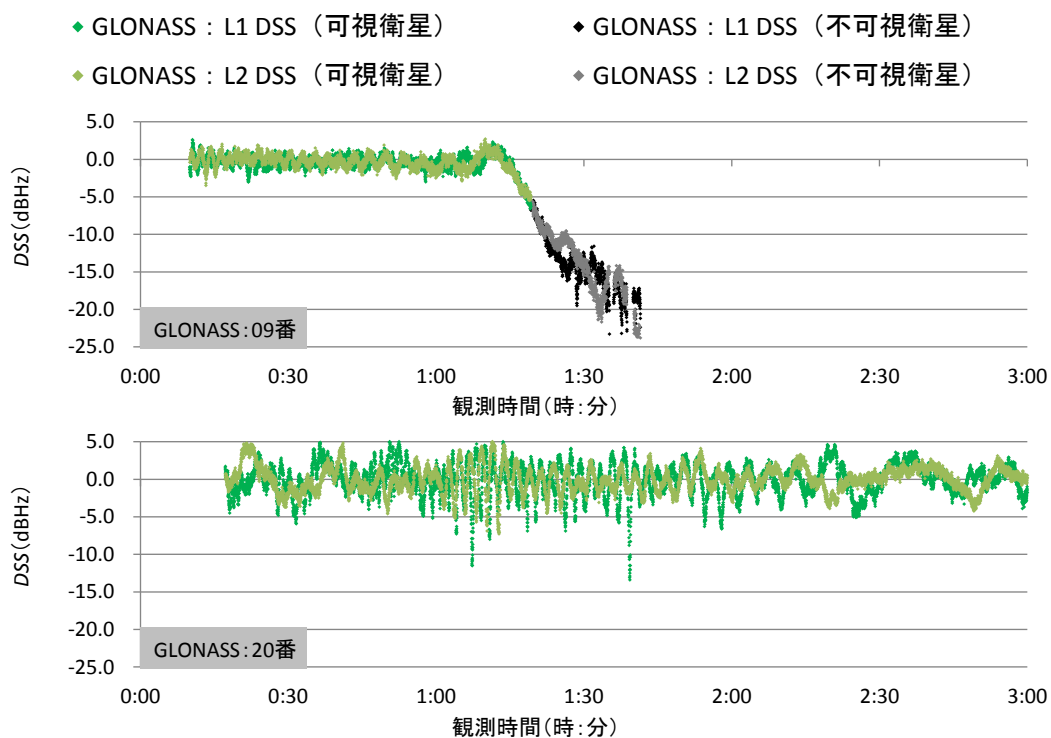


図 5-7 観測点 B3 における GLONASS のDSS算出結果

同様に、GPS:01 番においてDSSは可視時に 0dBHz 付近の値を示し、不可視時では値が低下することが確認された。不可視直後のDSS値は、L1 波で約-8dBHz、L2 波で約-13dBHz となり、観測点 B2 による GPS:11 番よりも低下することがわかるが、これは、回折波のほかに受信する反射

波の影響が想定される。また、地物の位置と正対し、直接波と反射波の受信が予想される GPS:28 番については、*DSS*の上下動が確認された。上下動の範囲は±5dBHz 程度であり、一部の時間帯で±6dBHz となる場合も見られた。

観測点 B3 で観測された GLONASS の*DSS*算出結果を図 5-7 に示す。不可視となり回折波を受信する GLONASS:09 番では、*DSS*値の低下が確認でき、直接波と反射波の受信が想定される GLONASS:20 番では、*DSS*値の上下動が見られるなど、図 5-5 で示した観測点 B2 の*DSS*値と同様の傾向が見られた。不可視直後の*DSS*値は、L1 波、L2 波ともに約-6dBHz となり、第 3 章で示した回折損と類似した結果が得られていることがわかる。また、*DSS*値の上下動の範囲は、大半の時間帯では±5dBHz 程度となるが、一部の時間帯で-10dBHz 以下となる場合が確認された。

これらの結果より、*DSS*によるマルチパス検知指標は、直接波と反射波が含まれる可視衛星からの受信電波に対しては*DSS*が上下動し、反射波と回折波で構成される不可視衛星からの受信電波に対しては*DSS*が低下する傾向が見られ、マルチパスの影響を受ける受信電波の検知ができることがわかる。しかしながら、実際の測位への適用では、直接波と反射波による可視衛星からの受信電波の場合、前節でも述べたように、相関処理等によりマルチパスの影響が小さくなる可能性があるため、適用は困難であると想定される。一方、反射波と回折波で構成される不可視衛星からの受信電波に対しては、*DSS*が低下する傾向に加え、衛星からの直接波が受信できないため、適用は可能と考えられる。

反射波と回折波による受信電波の判断基準となるパラメータを設定する場合、可視時における *DSS*値以下の値を設定する必要がある。検証結果より、可視時における *DSS*値は、反射波の影響により±約 5dBHz の上下動が確認されるため、少なくとも-5dBHz 以下にする必要があるといえる。また、不可視直後の*DSS*値を確認すると、GPS と GLONASS とともに、回折損の傾向と類似した約-6dBHz の低下が見られるため、パラメータの基準値を-6dBHz とすることで、観測値に含まれる大部分の反射波と回折波による受信電波を検知できるものと考えられる。

5-1-2 搬送波位相変化量の差によるマルチパス検知手法

(1) 搬送波位相変化量の差の特性とマルチパス検知手法

前節で示した搬送波位相変化量の差は、各々の観測環境によって得られた結果より以下の特性が確認された。

- 遅延誤差の影響が小さい場合、0mm を中心に一定の数値範囲で分布
- 低仰角により電離層遅延の影響が大きくなる場合、分布の中心位置が 0mm から離れる
- マルチパスの影響を受けた場合、反射波、回折波に関わらず分布範囲が大きくなる

電離層や対流圏による遅延誤差については、受信機間の基線長が短距離であれば同じ値と見な

すことができ、前章より図 4-20、図 4-23 で示した、直接波のみの場合とマルチパスの影響を受けた場合の搬送波位相変化量の差の推移を見ると、同様の傾向が得られていることが確認できる。一方、マルチパスの影響を受けた場合の傾向については、反射波や回折波を受信した場合でのみ発生しており、双方の測定値で異なる結果が得られることが確認できる。ゆえに、前項の DSS と同様に、受信機を電離層、対流圏の影響が同一となる基線長間に設置し、うち 1 台の設置位置を周囲に地物のない観測点とすることで、マルチパスの影響を受ける受信電波を検知できるものと考えられる。また、搬送波位相等の観測値は、第 2 章でも述べたように RTK 測位における、基準局から移動局までのデータ送信に用いる RTCM, CMR フォーマットに含まれるため、搬送波位相変化量の差を用いたマルチパス検知手法は、実時間による測位にも適用できる可能性がある。ここで、検知指標を説明するにあたり、前節で示した搬送波位相変化量の差の算出式を以下に示す。

$$DPC = (\phi_t^{L1} - \phi_{t-1}^{L1}) \frac{c}{f_{L1}} - (\phi_t^{L2} - \phi_{t-1}^{L2}) \frac{c}{f_{L2}} \quad (5-2)$$

DPC : 位相変化量の差 (m) ϕ : 搬送波位相 (cycle) t : 時刻 (s)

c : 光速 (m/s) f : 搬送波周波数 (Hz) $L1$: L1 波 $L2$: L2 波

L1 波と L2 波の双方の搬送波位相において、前エポックとの差を求めて変化量を算出し、各々の搬送波周波数に対応した波長を乗じることで、搬送波の位相変化量の差 (DPC : Difference of Phase Change) が算出される。波長は、正確な光速 ($c = 299792458$ m/s) を搬送波周波数で割ることで算出した。

基準局と移動局の双方で DPC を算出し、マルチパス検知指標を以下の式で算出する。

$$DDPC = DPC_{RS} - DPC_{BS} \quad (5-3)$$

$DDPC$: 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)

移動局で得られた位相変化量の差に対して、基準局で得られた位相変化量の差との較差を求めることで、位相変化量によるマルチパス検知指標 ($DDPC$: Double Difference of Phase Change) を算出する。反射波、回折波によるマルチパスを含まなければ、 $DDPC$ は 0mm を中心とする分布の推移が得られるものと予想される。一方、反射波や回折波による影響を受ける場合、前節で示した DPC の傾向と同様に、 $DDPC$ の分布が大きくなるものと予想される。

(2) DDPCによるマルチパス検知手法の検証

ここでは、基準局と移動局で得られた搬送波位相の観測値からDDPCを算出し、マルチパス検知指標の有用性について検証結果を示す。検証に使用する観測値は、DSSによる検証と同様に、観測点 B2 で観測された GPS:11 番, 32 番と GLONASS:04 番, 18 番, そして、観測点 B3 で観測された GPS:01 番, 28 番と GLONASS:09 番, 20 番とする。

図 5-8 に、観測点 B2 の観測値を移動局とする GPS のDDPCの算出結果を示す。まず、GPS:11 番についてDDPCの傾向を確認すると、可視時では、 $\pm 3\text{mm}$ 以内となる一定の分布による推移が見られ、不可視時では、図 4-28 と同様に分布範囲が大きくなる傾向が見られた。また、GPS:32 番では、図 4-20 よりマルチパスの影響を受けない時間帯において、GPS:11 番と同様に分布は $\pm 3\text{mm}$ 以内となる傾向が確認された。しかし、反射波の影響を受けていると想定される、0:17 頃や 0:28 頃の分布については、前後の分布と比較すると大きくなる傾向が見られるが、低仰角となる 0:00~1:00 のDDPCの分布は、マルチパスの影響の有無に関わらず、 $\pm 3\text{mm}$ 以上となることがわかる。これは、図 4-21 に示した、搬送波位相変化量の差 (DPC) の結果を見ても分かるように、得られるDPCが全体的にマイナス方向に分布することに加え、基準局と移動局のDPC値が mm 単位で完全に一致しないため、DDPCの分布が大きくなったものと考えられる。

観測点 B2 で観測された GLONASS のDDPCの算出結果を図 5-9 に示す。GLONASS:04 番についてDDPCの傾向を確認すると、図 4-23 よりマルチパスの影響を受けない時間帯では、 $\pm 2\text{mm}$ 以内で推移する傾向が見られた。また、反射波の影響を受けていると想定される、1:28 頃の分布を確認すると、プラス方向に分布が集中する傾向が見られ、GPS と同様に反射波による傾向が確認された。一方、GLONASS:18 番については、可視時では $\pm 2\text{mm}$ 以内でDDPCが分布し、不可

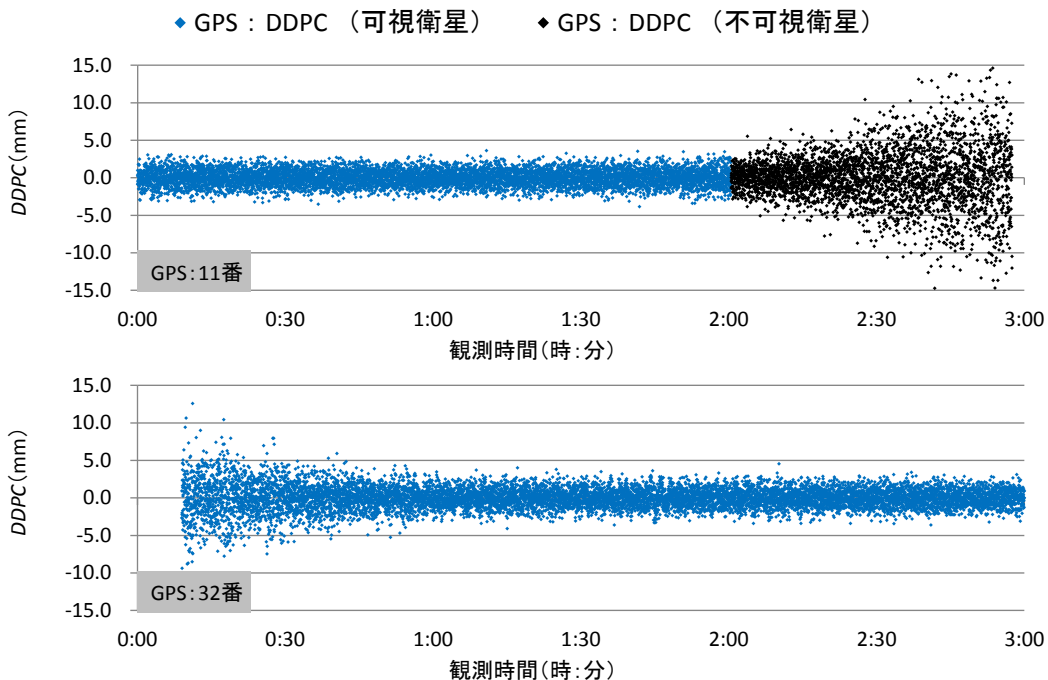


図 5-8 観測点 B2 における GPS のDDPC算出結果

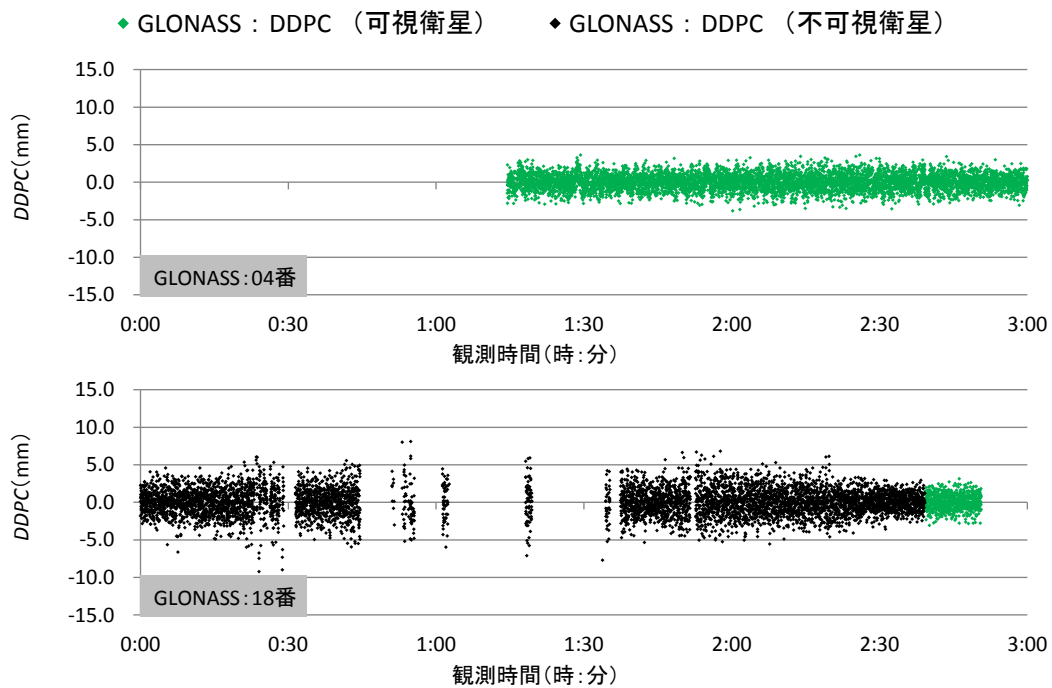


図 5-9 観測点 B2 における GPS のDDPC算出結果

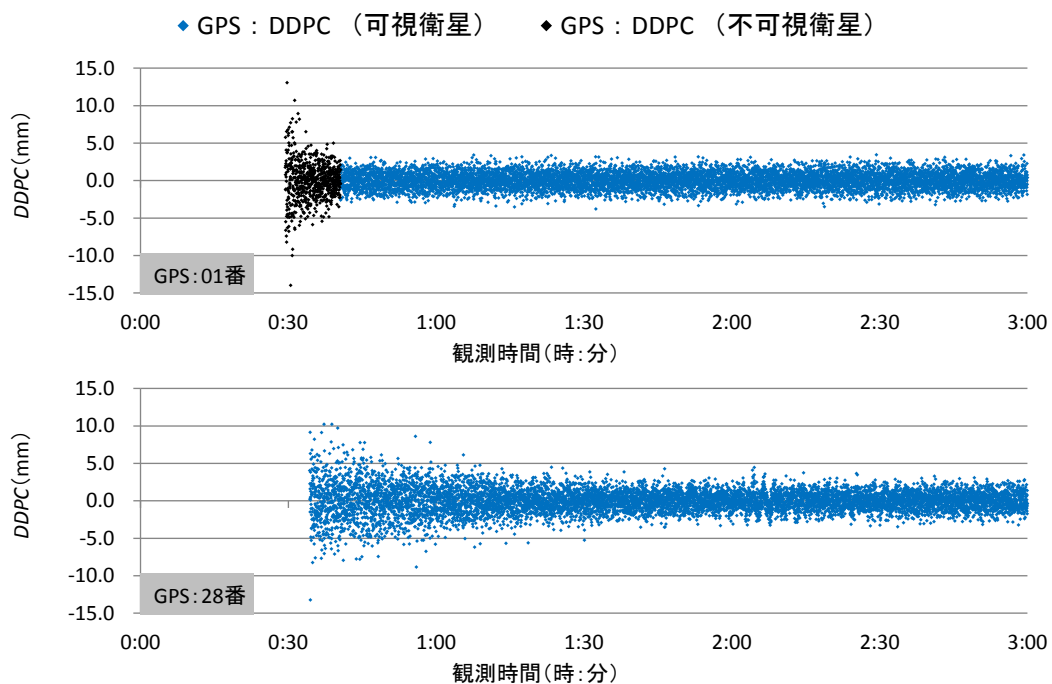


図 5-10 観測点 B3 における GPS のDDPC算出結果

視時には分布が大きくなる傾向が見られたが、GPS:11 による不可視時の傾向をみると $\pm 5\text{mm}$ 以内となるのに対し、GLONASS:18 番では $\pm 5\text{mm}$ 以下と分布が小さいことがわかる。

次に、DSSと同様に、観測点 B3 で得られた観測値についてもDDPCによる傾向を確認する。図 5-10 に、観測点 B3 の観測値を移動局とする GPS のDDPCの算出結果を示す。図 5-8 で示した結果と同様に、不可視時と低仰角時におけるDDPCの分布範囲が大きくなることに加え、天頂付近

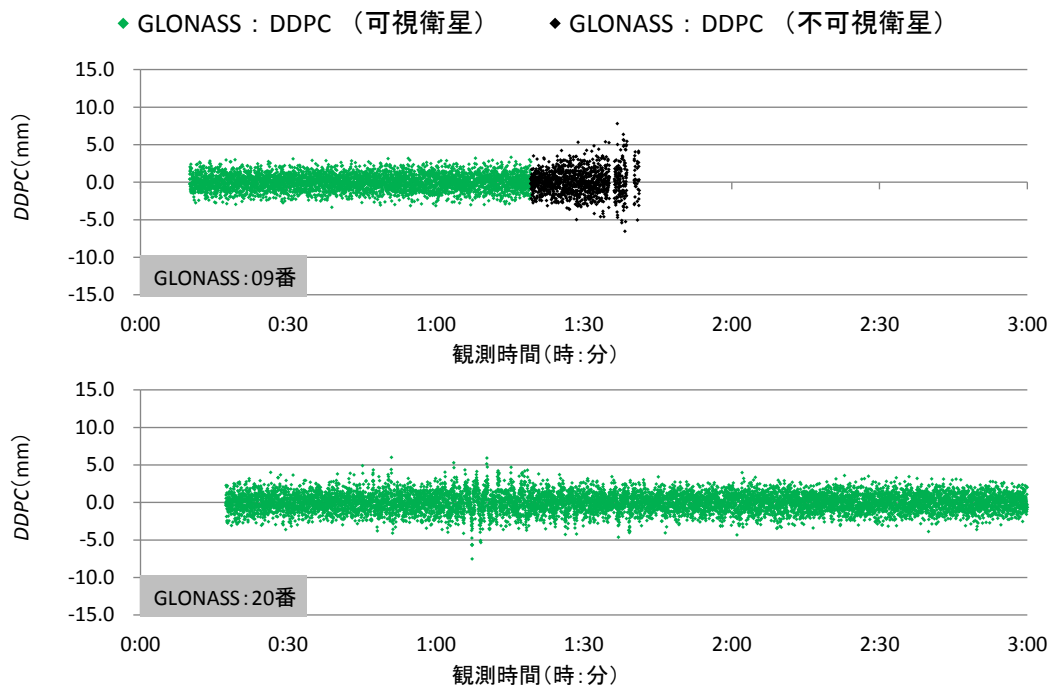


図 5-11 観測点 B3 における GLONASS の DDPC 算出結果

等のマルチパスの影響を受けていないと想定される時間帯では、 $\pm 3\text{mm}$ 以内で分布する傾向が確認された。また、GPS:28 番より、2:04 頃など DDPC が 4mm 以上となる場合が一部確認できるが、図 5-6 における信号強度の上下動が短時間で発生する時間帯と一致するため、反射波による影響によるもの想定される。図 5-11 より GLONASS の DDPC の算出結果を確認すると、図 5-7 で示した結果と同様、不可視時に分布範囲が大きくなる傾向が見られ、可視時には $\pm 2\text{mm}$ 以内で DDPC が分布する傾向が確認された。GLONASS:20 番では、可視時の分布が 2mm 以上となる時間帯が確認できるが、GPS による傾向と同様、図 5-7 において信号強度の上下動が短時間で発生する時間帯の一致するため、反射波による影響と考えられる。

これらの結果より、DDPC によるマルチパス検知指標は、反射波と回折波を含む受信電波に対して分布が大きくなり、マルチパスの影響を受ける受信電波の検知ができることがわかる。しかしながら、電離層遅延により DPC の分布範囲が大きくなる GPS では、DDPC においても低仰角時の分布範囲が大きくなり、直接波と反射波による受信電波の検知が困難であった。そのため、実際の測位に対して DDPC を適用した場合、GPS における反射波のマルチパス検知が十分に行えない可能性が考えられる。

(3) 移動平均を用いたDDPC検知手法の検証

GPSにおいて、直接波と反射波によるマルチパス検知が不十分となる要因は、電離層遅延により、基準局と移動局で得られるDPCの分布範囲が大きくなることによるものである。そこで、電離層遅延による影響が双方で同等である点に着目し、得られたDDPCに対して、移動平均を求めることとした。可視時において、マルチパスの影響を受けない時間帯では、DDPCは0mmを中心とする分布で推移するため、移動平均による結果も約0mmになるものと想定される。一方、反射波による影響を受けた場合、分布範囲が大きくなるため、移動平均による結果も異なるものが得られるものと考えられる。

図5-8で示したGPSのDDPC算出結果に対して60秒毎の移動平均を算出し、その結果を図5-12に示す。可視時においてマルチパスの影響を受けない時間帯では、 $\pm 0.5\text{mm}$ 以内の推移となり、DDPCは約0mmを示すことがわかる。一方、低仰角時では、 $\pm 0.5\text{mm}$ の範囲外となる推移が見られ、該当する時間帯を確認したところ、反射波の影響を受けていると想定される時間帯と一致した。また、GLONASSのDDPC算出結果に対して移動平均による傾向を図5-13より確認すると、可視時において、マルチパスの影響を受けると想定される1:28頃の時間帯では、1.0mm以上となる傾向が見られ、その他の時間帯では、 $\pm 0.5\text{mm}$ 以内の推移となることがわかる。

これらの結果より、DDPCに対して移動平均を用いることで、直接波のみの受信電波と直接波と反射波によるマルチパスを含む受信電波を検知できるものと考えられる。しかしながら、DDPCによる分布により検知可能であった、反射波と回折波による受信電波については、図5-12、図5-13の不可視時の傾向より $\pm 0.5\text{mm}$ 以内の推移となる場合が確認され、マルチパスの影響を受けない場合と同様の傾向となることがわかる。そこで、本項ではこの問題に対処するため、DDPC

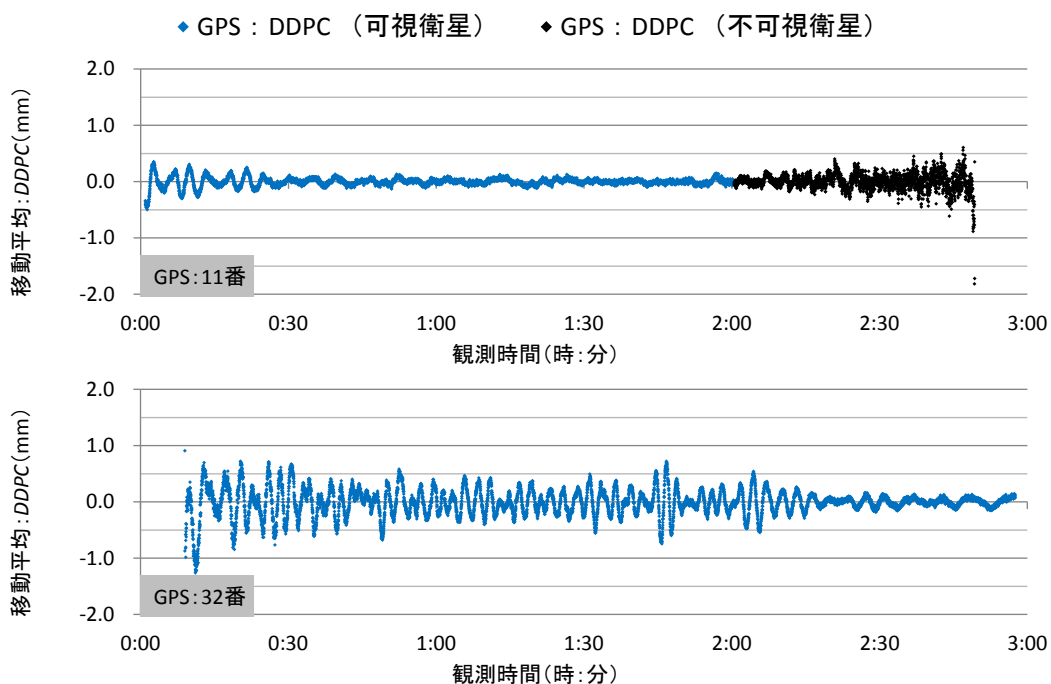


図 5-12 観測点 B2 における GPS の移動平均DDPC算出結果

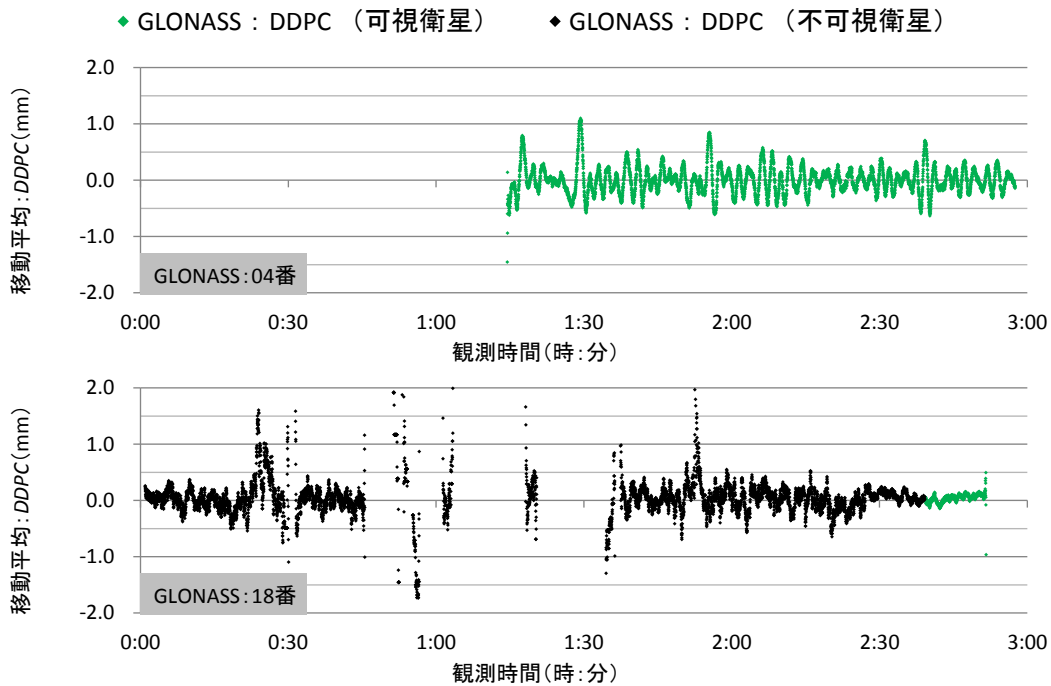


図 5-13 観測点 B2 における GLONASS の移動平均DDPC算出結果

の算出にDPCの絶対値を用いることにした。

DPCの符号は、L1波とL2波の変化量の大きさによって生じる。低仰角において、DPCの分布がマイナス方向に広がるのも、周波数の小さいL2波のほうが電離層遅延の影響が大きいためである。一方、マルチパスについては、第3章でも述べたように、直接波によって得られる測定距離よりも長くなる場合と短くなる場合の2通りがあり、これは、受信時の位相によって決定するため、波長が異なるL1波とL2波では、大小異なる搬送波位相変化量が生じる。その結果、DPCの算出において、マルチパスの影響を受ける場合、プラス方向、マイナス方向に対して分布範囲が大きくなる傾向となる。以上のことから、DPCにおけるマルチパスの影響は、L1波とL2波の変化量の差で表されるが、マルチパス検知においてDPC算出結果の符号を考慮する必要はないといえる。ゆえに、式(5-2)を以下のように変形し、得られたDPCを式(5-3)に適用した。

$$DPC = \left| (\phi_t^{L1} - \phi_{t-1}^{L1}) \frac{c}{f_{L1}} - (\phi_t^{L2} - \phi_{t-1}^{L2}) \frac{c}{f_{L2}} \right| \quad (5-5)$$

図 5-14 に、観測点 B2 におけるDPC絶対値を用いたGPSのDDPC算出結果を示す。得られたDDPCの傾向を確認すると、マルチパスの影響を受けない時間帯では、±2mm以内となる一定の分布による推移が見られた。また、反射波と回折波による受信電波となる不可視時では、プラス方向に分布する傾向となることがわかる。なお、GPS:32番の0:00～1:00の時間帯における低仰角での分布については、図 5-8 による符号を含むDPCを用いた場合と比較し、反転する傾向が見られた。これは、電離層遅延によりDPCがマイナス方向に分布するため、絶対値としたことで

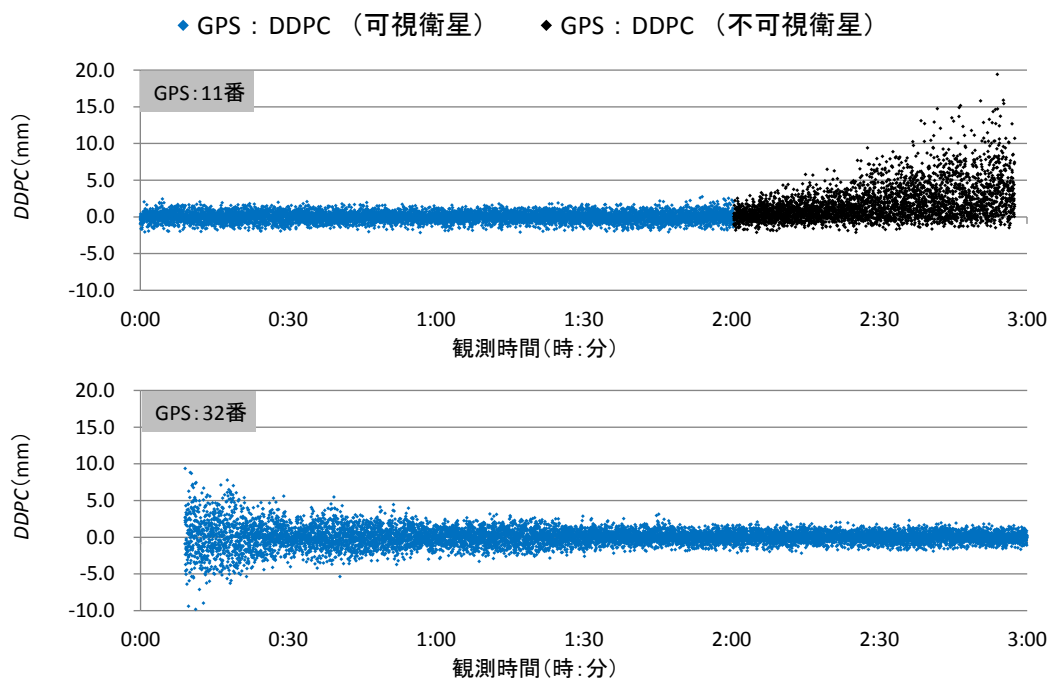


図 5-14 観測点 B2 における $DDPC$ 絶対値を用いた GPS の $DDPC$ 算出結果

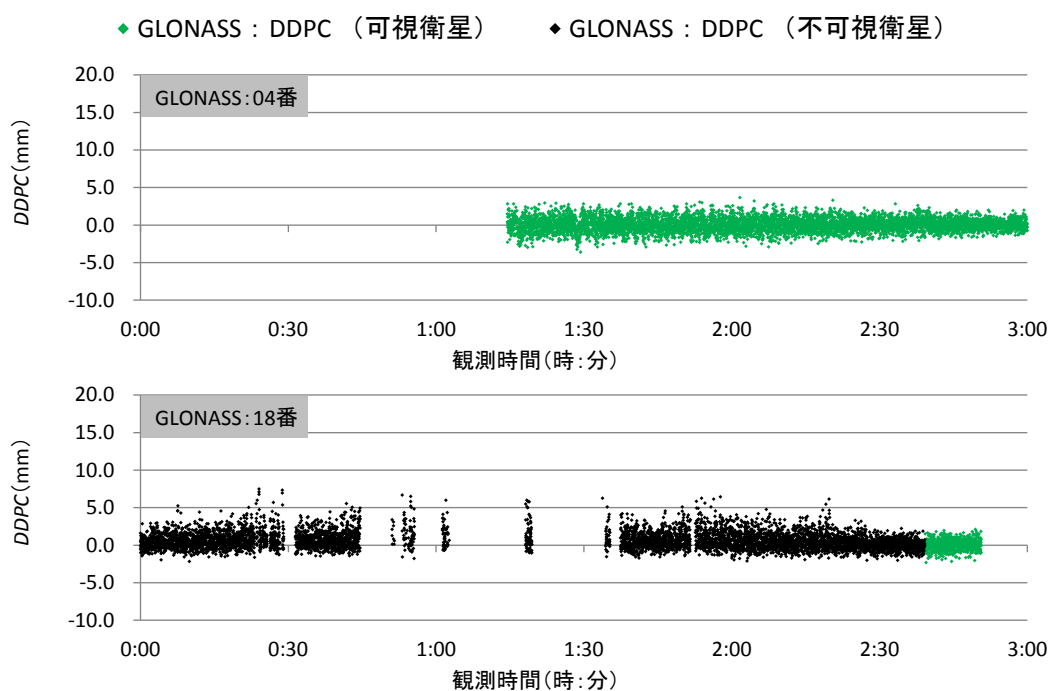


図 5-15 観測点 B2 における DPC 絶対値を用いた GLONASS の $DDPC$ 算出結果

$DDPC$ の算出結果の符号が反転したと考えられる。また、図 5-15 より GLONASS の傾向を確認すると、マルチパスの影響を受けない時間帯では、 $\pm 2\text{mm}$ 以内の分布となり、不可視時ではプラス方向の分布する傾向が確認された。

これらの $DDPC$ 算出結果に対し、先ほどと同様に 60 秒毎の移動平均を算出し、その結果を GPS については図 5-16、GLONASS については図 5-17 に示す。マルチパスの影響を受けない時間帯

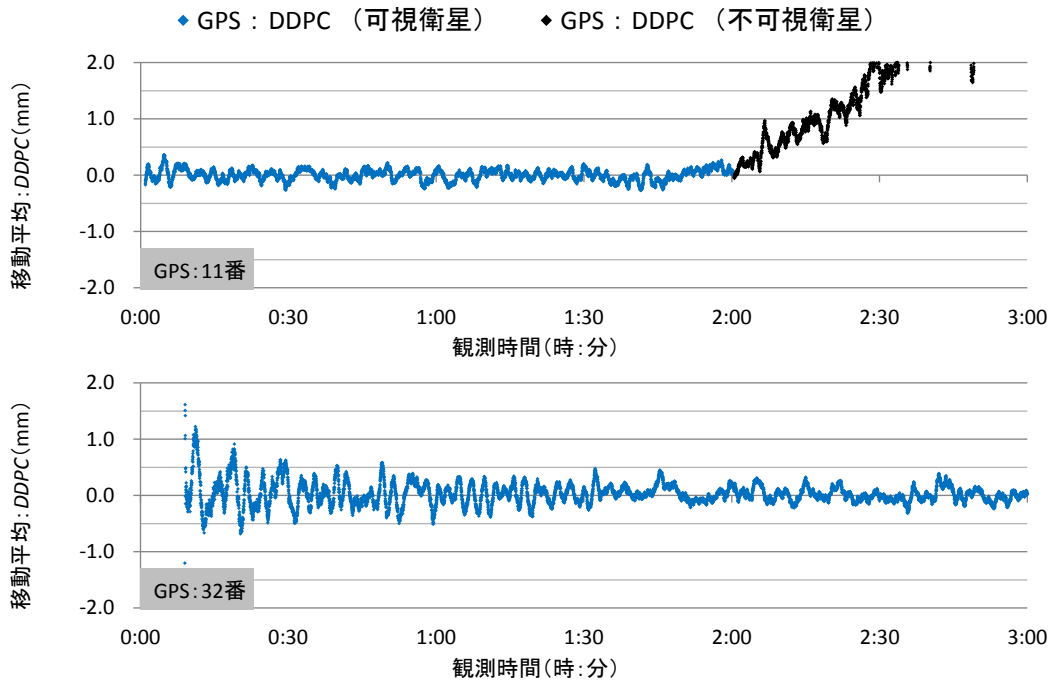


図 5-16 観測点 B2 におけるDPC絶対値を用いた GPS の移動平均DDPC算出結果

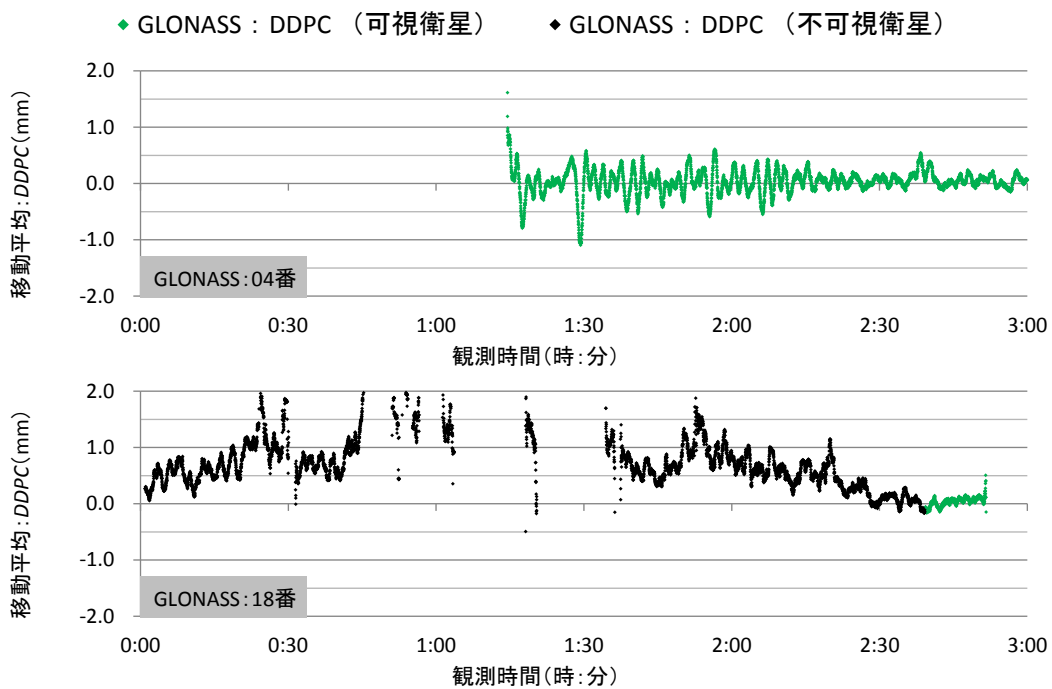


図 5-17 観測点 B2 におけるDPC絶対値を用いた GLONASS の移動平均DDPC算出結果

では、 $\pm 0.5\text{mm}$ 以内の範囲で推移する傾向が見られ、衛星が天頂付近等の高仰角の場合、 $\pm 0.3\text{mm}$ 以内のさらに狭い範囲で推移する傾向も見られた。また、低仰角において反射波の影響を受けていると想定される時間帯では、図 5-12、図 5-13 による移動平均DDPC算出結果と比較すると、符号が逆転しているが $\pm 0.5\text{mm}$ の範囲外の推移となることが確認された。不可視時については、プラス方向に算出結果が分布する傾向が見られ、マルチパスの影響を受けない時間帯と比較すると、

±0.5mm の範囲外で推移する傾向となることがわかる。

これらの結果より、*DPC*絶対値を適用した移動平均*DDPC*による検知指標を用いることで、直接波と反射波、および反射波と回折波によるマルチパスを含む受信電波を検知できることがわかる。実際の測位に対して本手法を適用した場合、衛星位置と地物位置が短時間で変化しない静止測位では、測位に影響を及ぼす誤差電波を検知できるものと考えられる。また、地物位置が常に変化する移動測位では、移動平均*DDPC*の適用は困難であると考えられるが、*DDPC*算出結果において、マルチパスの有無により異なる傾向が得られるため、ある程度の誤差電波の検知は可能であると考えられる。誤差電波の判断基準となるパラメータを設定する場合、移動平均*DDPC*では、可視時において±0.5mm の範囲内で推移する傾向が確認されるため、基準値を±0.5mm と設定し、観測に必要な衛星数が十分に取得できる場合、範囲の狭い基準値を用いることで、正確な受信電波のみを用いた測位ができるものと考えられる。

5-2 まとめ

本章では、第4章で示した信号強度と搬送波位相変化量の差を利用したマルチパス検知手法を示した。どちらも、受信機から得られる観測値から信号強度値と位相変化量の差を求め、基準局の観測値から得られた結果を基準値とし、移動局の観測値から得られた結果と比較する手法である。

信号強度の差を用いたマルチパス検知手法である*DSS*は、不可視衛星となり反射波と回折波のマルチパスの影響を受ける受信電波に対して値が低下する傾向が見られ、衛星解条件変化時の値は約-6dBHzを示すことがわかった。一方、直接波と反射波を同時受信する場合には、0dBHzを中心とした*DSS*の上下動が見られた。実際にマルチパスの影響を受ける電波を検知する場合、直接波と反射波を同時受信するような状況では、受信機内部の相関処理により誤差が抑制されるため、本来誤差の小さい電波をマルチパスの影響が大きいものとして認識する可能性があり、その逆も考えられる。なお、不可視衛星となり反射波と回折波を受信する状況では、*DSS*が低下する傾向に加え、受信電波も衛星からの直接波を含まないことから、回折波によるマルチパスを含む受信電波の検知は可能であると考えられる。

搬送波位相変化量の差を利用したマルチパス検知手法である*DDPC*は、マルチパスの影響を含む場合、指標値の分布位置が0mmから離れる、または分布範囲が大きくなることがわかった。実際にマルチパスの影響を受ける電波を検知する場合、分布位置や範囲でマルチパスの影響を判断するため、移動平均等を用いて確認する必要がある。L1波とL2波の位相変化量の差の大きさのみを考慮した、*DPC*絶対値による移動平均*DDPC*を確認した場合、回折波、反射波の影響を含むと想定される受信電波に対して検知が可能となることがわかった。

本章で構築したマルチパス検知手法を用いて、第6章並びに第7章において、静止時と移動時による衛星選択効果を検証することとする。

第6章 静止時における衛星選択の効果

マルチパスとなる受信電波は、地物等の壁面より反射する電波と、地物の影に隠れ回折する電波の2通りが考えられる。実際の測位において主に受信される電波は、直接波による受信電波、直接波+反射波による受信電波、反射波+回折波による受信電波の3通りが考えられ、第5章でも示したように、マルチパスの影響を受ける受信電波を排除して基線解析を行うことで、Fix 解の取得時間帯が増加する効果が得られることが確認されている。

本章では、第4章で示した、DSSとDDPCを用いて受信電波に含まれるマルチパスを検知し、その結果を用いた衛星選択効果について述べる。実時間による測位への適用を考慮し、観測エポック毎に上記のマルチパス検知指標を用いて誤差を含む受信電波の判別を行い、基線解析を実施した。解析結果より、Fix 解の取得時間帯と各々のマルチパス検知指標との傾向を比較し、提案手法の有用性を確認したので、その結果を報告する。

6-1 検証の概要

ここでは、DSSとDDPCを用いたマルチパス検知による衛星選択効果の検証方法について述べる。まず、検証に使用する観測値については、前章でも述べた日本大学理工学部船橋キャンパス内に設置した観測点上に受信アンテナを設置し、観測点A0と観測点B2～B7による同時測位により取得した。第4章で示した観測点位置を図6-1に再掲し、観測点周囲の概観と地物天空図を表6-1に再掲する。実験日は、2011年11月12日～14日の3日間であり、観測時間帯は10:00～13:00と13:30～16:30である。測位手順は、第5章で述べた検証時の観測手法と同様であるが、アン

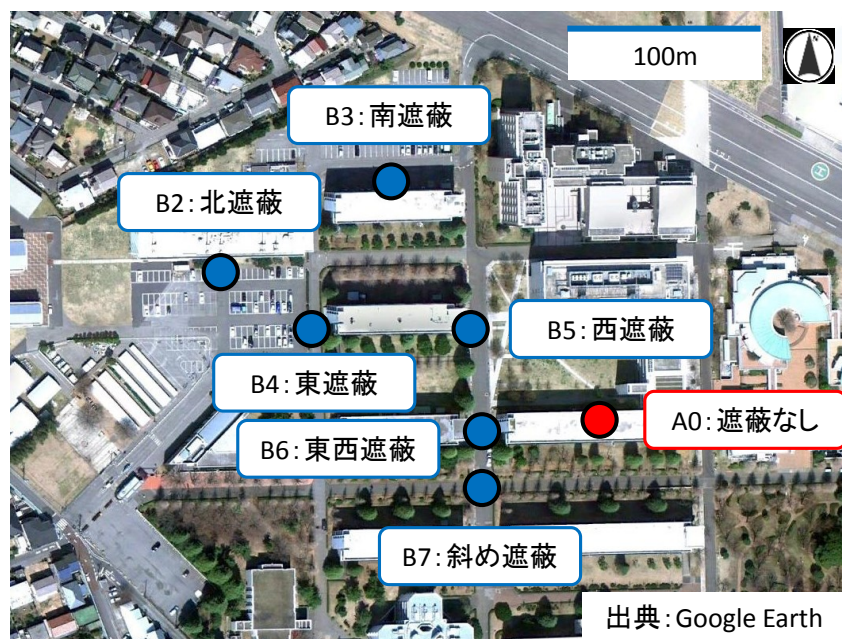
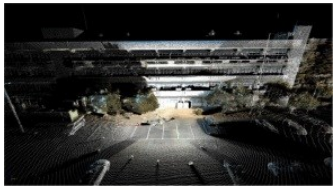
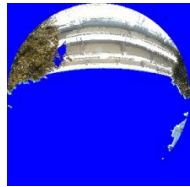

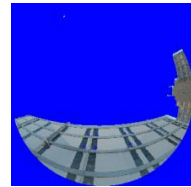

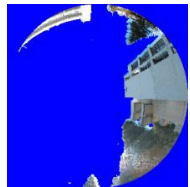

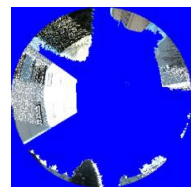
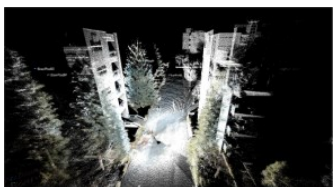





図 6-1 観測点位置と遮蔽環境

表 6-1 観測点周囲の概観と地物天空図

B2:北遮蔽		B3:南遮蔽	
概観	天空図	概観	天空図
			
B4:東遮蔽		B5:西遮蔽	
概観	天空図	概観	天空図
			
B6:東西遮蔽		B7:斜め遮蔽	
概観	天空図	概観	天空図
			

テナ高に関しては、各観測点で前回と 10cm 程度の差がある。

次に、検証方法について説明する。まず、マルチパスの影響を受ける受信電波を検知するため、同時測位により得られた観測値を用いて *DSS* と *DDPC* の算出を行った。*DSS* については、L1 波と L2 波の 2 種類、*DDPC* については、L1 波と L2 波の搬送波位相の観測値から *DPC* 絶対値を算出して求めた。得られた各指標の検知結果より、比較シナリオ別に解析に使用する衛星を時間帯別を選択し、対象外となる衛星の観測データを観測点 B2~B7 の RINEX データから消去して基線解析を行った。このとき、比較シナリオは、対象とするマルチパスに応じて以下の 3 つを設定した。

- シナリオ 1 : 衛星選択なし。
観測値にマルチパスを含む場合の基線解析であり、シナリオ 2, 3 のマルチパス検知指標による衛星選択効果を確認するためのものである。
- シナリオ 2 : *DSS* による衛星の選択。
観測値から回折波の影響を受ける電波を除去した場合の基線解析を想定。
- シナリオ 3 : *DSS* と *DDPC* による衛星の選択。
観測値から反射波と回折波の影響を受ける電波を除去した場合の基線解析を想定。

DSSとDDPCによる衛星の選択基準については、第4章で得られた各指標の検証結果を参考に、DSSはL1波、L2波ともに-6dBHz以上、DDPCは移動平均により±0.5mmの範囲内に設定して行った。選択基準外となる指標がひとつでも該当する場合、その衛星電波は基線解析に使用しないものとする。

解析については、基準局を観測点A0の観測値、移動局を観測点B2～B7の観測値とし、得られた双方のRINEXデータを用いて「GPS+GLONASS」の条件でキネマティック解析を行った。使用した基線解析ソフトウェアは、RTKLIB Version2.4.2であり、バイアス決定手法をGPSとGLONASSを併用するInstantaneousに設定し、使用する搬送波をL1+L2に設定した。基準局の座標値については、第5章で述べたスタティック解析による結果を使用した。

衛星選択効果の評価については、解析により得られたFix解の取得率と観測点B2～B7の各基準座標からの分布により行った。基準点座標については、基準局座標と同様に第5章で示したスタティック解析による結果を使用するものとする。図6-2に本検証の全体の流れを示す。

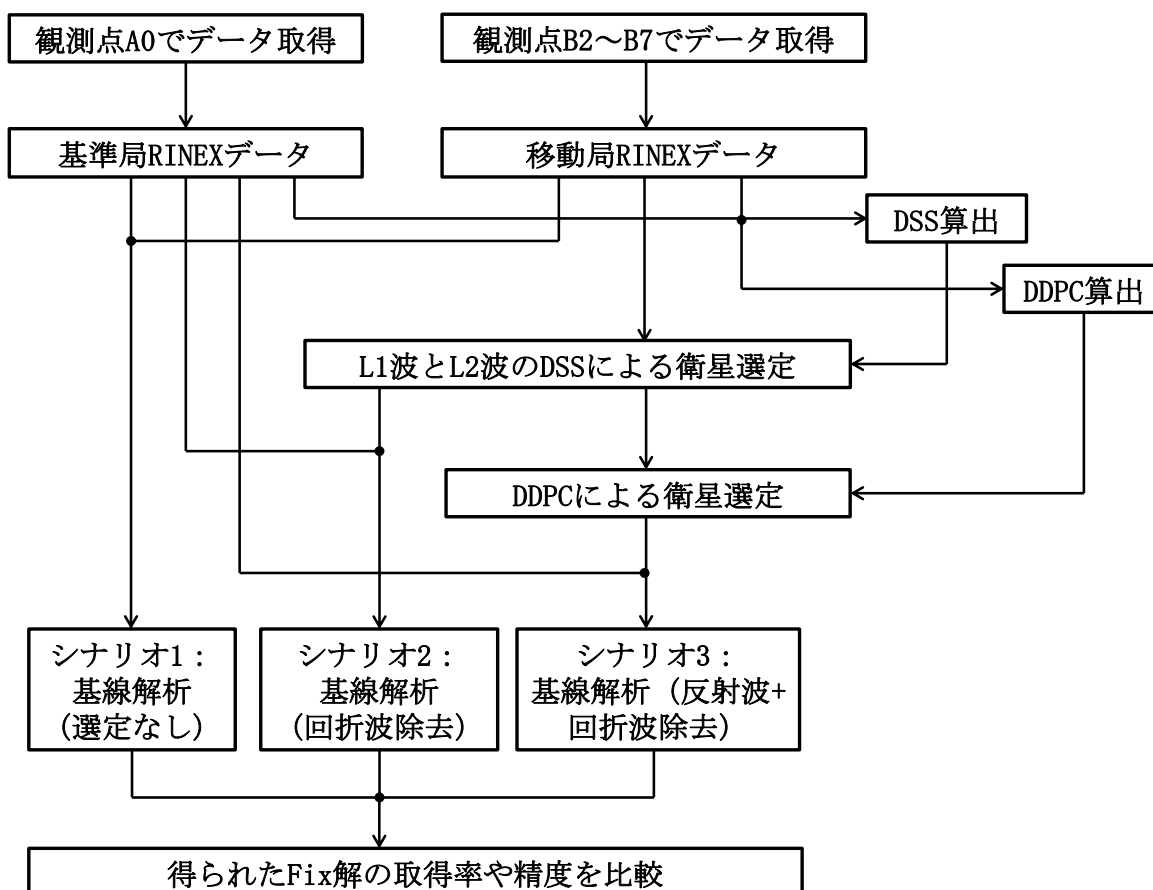


図6-2 衛星選択効果の検証の流れ

6-2 静止時における衛星選択効果の検証結果

本章において、取得データによるDSSとDDPCの算出結果と、比較シナリオに応じた衛星選択による基線解析結果について以下に示す。DSSとDDPCの傾向については、第4章でも述べたように以下の点が確認されている。

- DSS：L1 波，L2 波ともに直接波と反射波による受信電波に対してはDSSが上下動し，反射波と回折波による受信電波に対してはDSSが低下する。
- DDPC：反射波と回折波を含む受信電波に対して分布が大きくなり，DPCの絶対値をとり移動平均を求めることで，直接波と反射波，および反射波と回折波によるマルチパスを含む受信電波を検知できる

本節では，今回の検証と第4章で示した検証結果を比較することで，異なる観測日で得られた観測値についても，マルチパスの影響を受ける受信電波を同様に検知できるか確認を行い，次項で衛星選択による基線解析結果について述べるものとする。

6-2-1 DSSとDDPCの算出結果の確認

異なる観測日でも同傾向のDSSとDDPCの算出結果が得られるか検証するため，本項において評価対象とする衛星は，観測点 B2 で得られた GPS:11 番と 32 番，観測点 B3 で得られた GPS:01 番と 28 番である。これらは，第4章で示した評価衛星と同一であり，第4章の検証に用いた観測値（観測点 B2 は 2011 年 11 月 6 日，観測点 B3 は 2011 年 11 月 7 日に取得）と今回の検証に用いる観測値の取得日は 7 日間の差があることから，GPS 衛星の周期（周期：約 11 時間 58 分）の関係上の衛星位置が観測時間上で約 28 分のずれが生じる。図 6-3 に，評価対象とする GPS 衛星の軌道と地物の位置関係を示す。

なお，GLONASS 衛星については，周期が約 11 時間 15 分であるため，前回の観測と比較し約 10 時間 30 分のずれが生じている。そのため，前回の検証と同じ衛星を観測することはほとんどできないため，第4章で示した評価衛星と類似の経路を通過する衛星を対象に傾向を確認した。観測点 B2 では GLONASS:02 番と 17 番，観測点 B3 では GLONASS:16 番と 19 番を選択した。図 6-4 に評価対象とする GLONASS 衛星の軌道と地物の位置関係を示す。

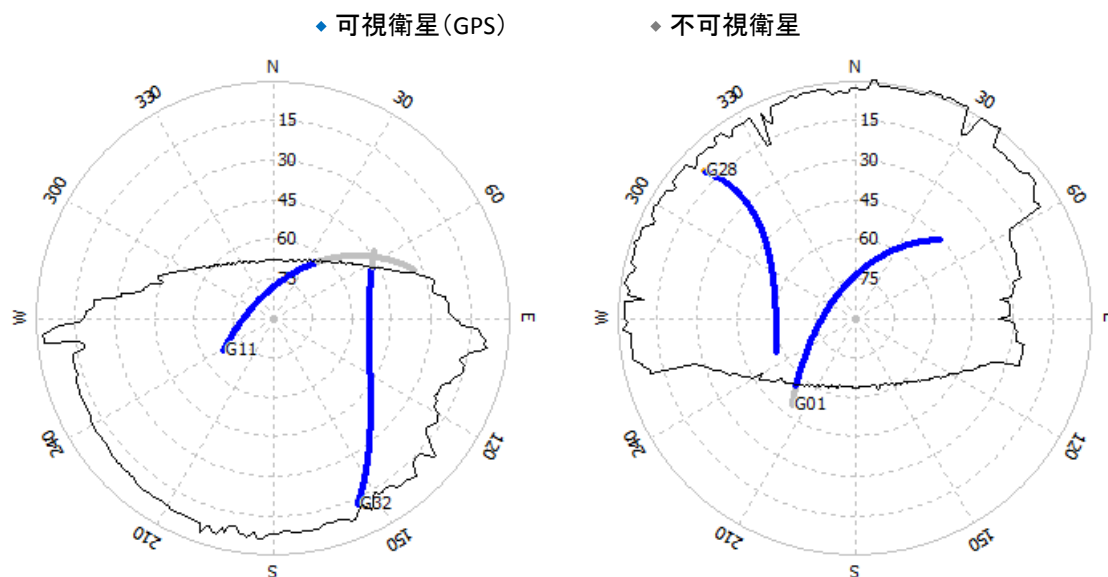


図 6-3 評価対象とする GPS 衛星の軌道と各観測点の地物位置

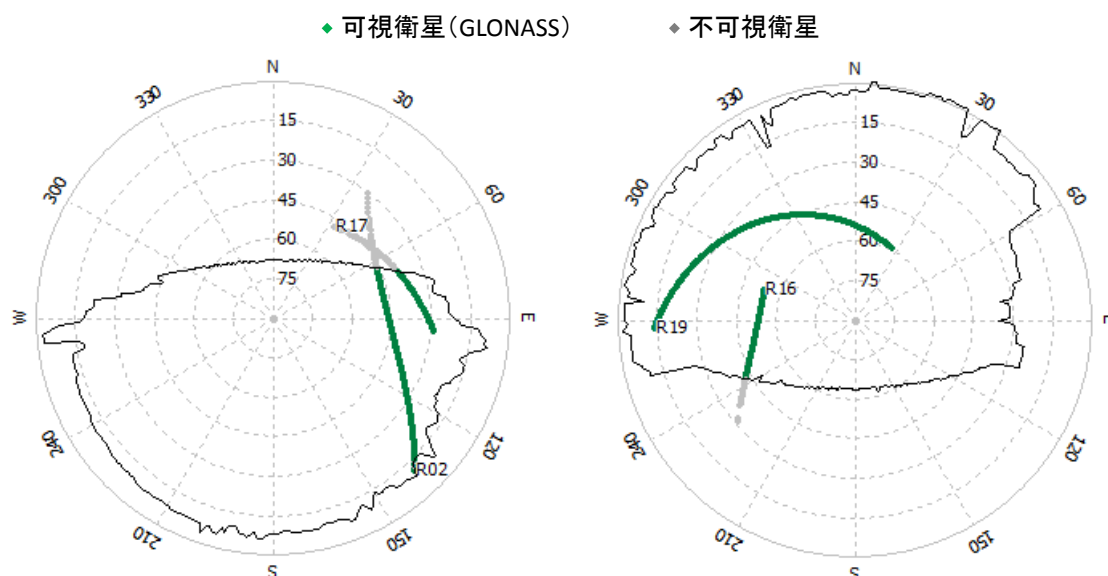


図 6-4 評価対象とする GLONASS 衛星の軌道と各観測点の地物位置

(1) GPS における DSS と DDPC の傾向

観測点 B2 における GPS の DSS の算出結果を図 6-5 に示す。双方の DSS の推移を確認すると、不可視直後の値が双方ともに L1 波で約 -6dBHz、L2 波で約 -10dBHz となることがわかる。L1 波については、第 3 章で示した回折損と類似した傾向を示しており、GPS:11 番の傾向は、第 4 章で得られた不可視直後の DSS 値と L1 波、L2 波ともに一致することがわかる。図 6-6 に、第 4 章に示した観測点 B2 における DSS 算出結果を観測時間から観測時間帯 (JST) に変更し再掲する。可視時の傾向については、GPS:11 番では 0dBHz 付近を推移し、GPS:32 番では 0dBHz を中心とした上下動が確認できる。上下動の範囲については、L1 波、L2 波ともに ±5dBHz 程度であり、図 6-5 に示す算出結果との傾向と一致することがわかる。特に、GPS:32 番については、図 6-5

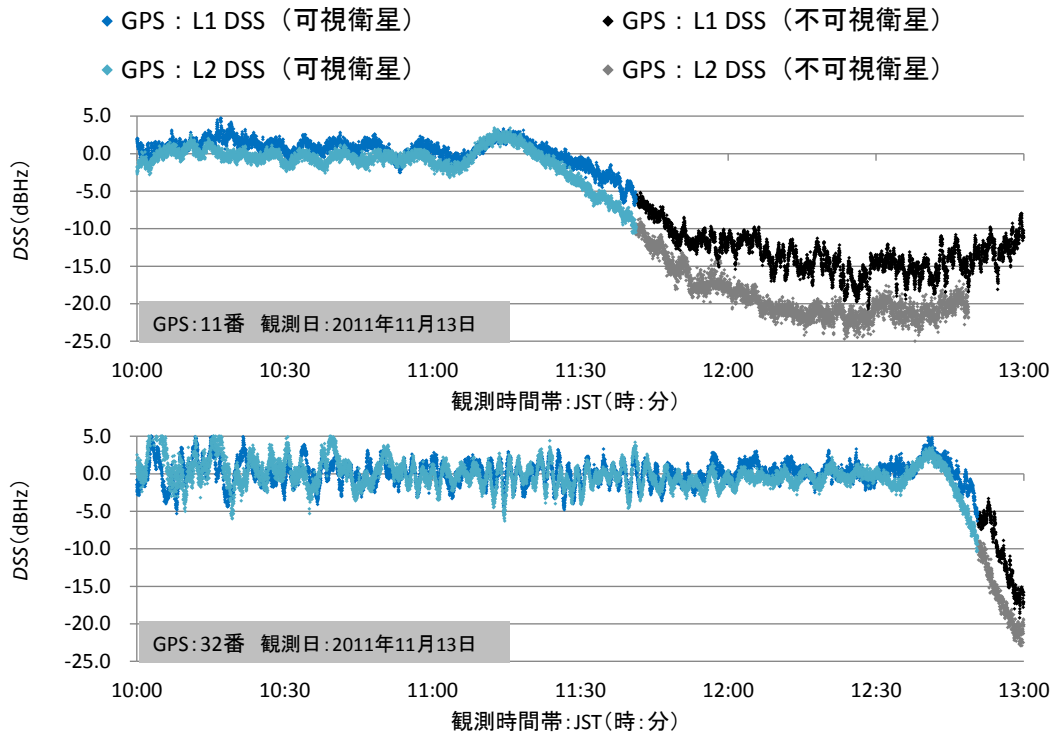


図 6-5 観測点 B2 における GPS の DSS 算出結果 (2011 年 11 月 13 日)

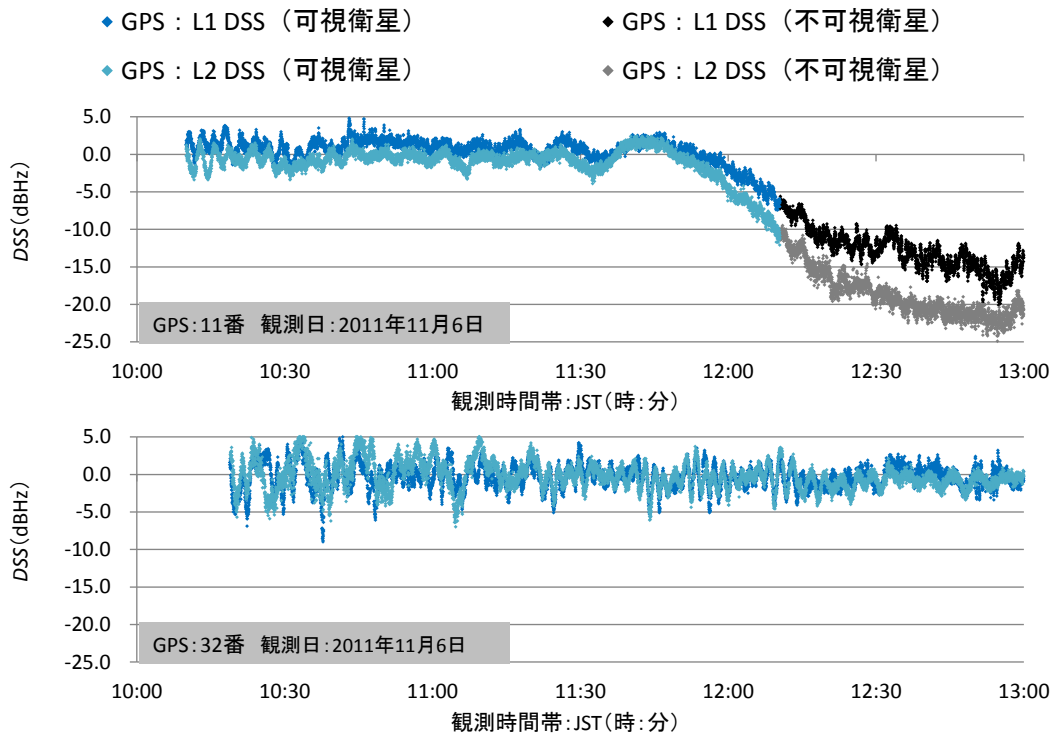


図 6-6 観測点 B2 における GPS の DSS 算出結果 (2011 年 11 月 6 日)

の結果に対して 28 分のオフセットを与えることで、数値の一致は見られないが、上下動が生じる時間帯については一致することがわかる。

観測点 B2 における GPS の移動平均 DDPC の算出結果を図 6-7 に示す。可視時の推移について確

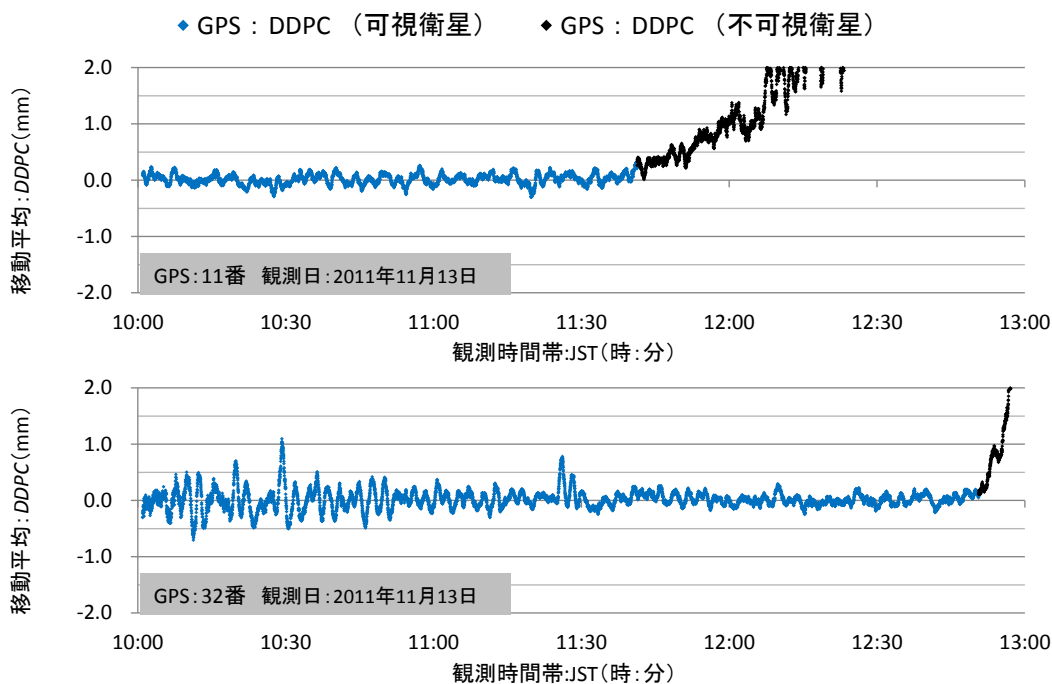


図 6-7 観測点 B2 における GPS の移動平均DDPC算出結果 (2011 年 11 月 13 日)

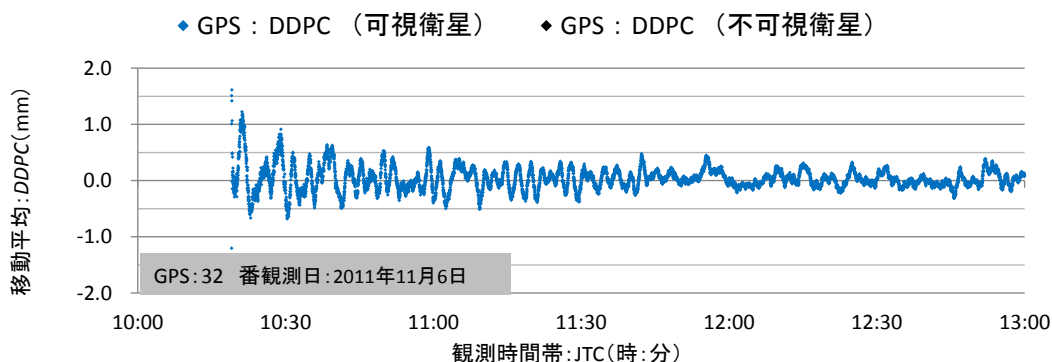


図 6-8 観測点 B2 における GPS の移動平均DDPC算出結果 (2011 年 11 月 6 日)

認すると、GPS:11番では $\pm 0.3\text{mm}$ 以内の範囲で推移する傾向が見られ、GPS:32番についても、同等の範囲での推移が見られた。しかし、GPS:32番において仰角が 45° 以下となる10:00~11:00では、分布が大きくなる時間帯が確認できる。これは、基準局と移動局において得られるDPCの分布範囲が異なることで生じる傾向であり、第4章でも述べたようにマルチパスの影響によるものと考えられる。マルチパスの影響を受けていると想定される時間帯では、第4章で示した検証結果より、 $\pm 0.5\text{mm}$ の範囲外で推移する傾向が確認されているが、図6-7においても同様の傾向をいくつか確認できる。図6-8に、第4章に示した観測点B2におけるGPS:32番のDDPC算出結果を観測時間から観測時間帯に変更し再掲する。DSSと同様に図6-7のGPS:32番の結果に対して28分のオフセットを与えることで、10:15~10:50で見られるDDPCの推移について、図6-8の結果との一致することがわかる。しかしながら、数値に関して完全な一致は見られず、地物や衛星、受信アンテナの相対的な位置関係がほぼ同じでも、観測日毎にマルチパスの影響は異なる

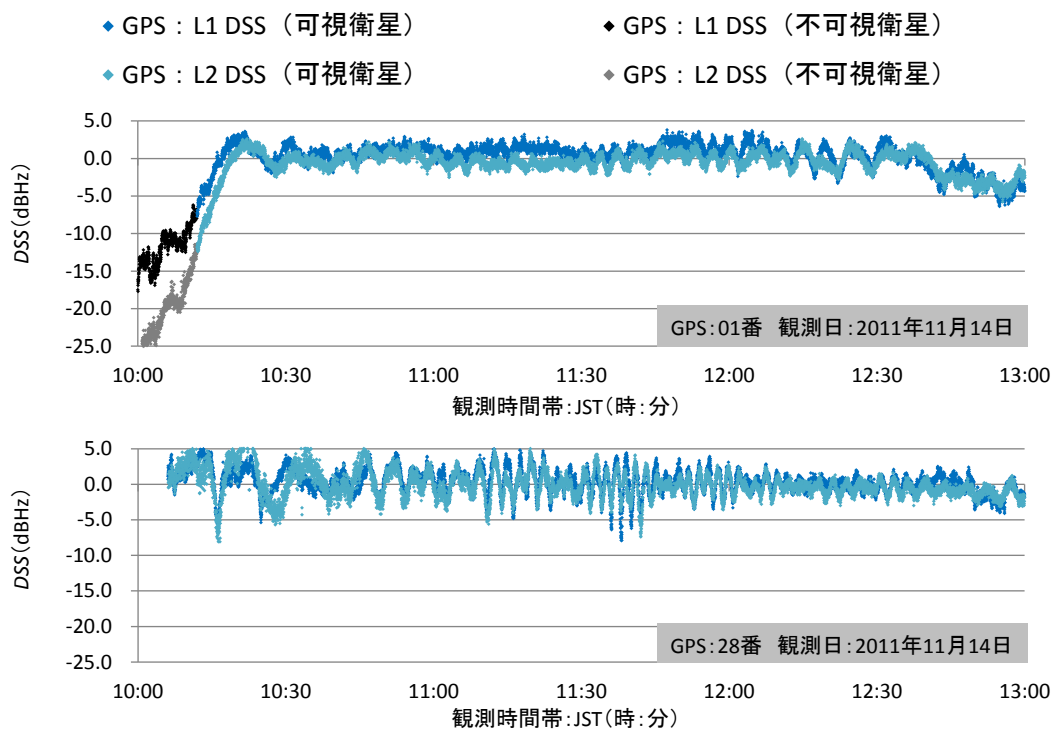


図 6-9 観測点 B3 における GPS のDSS算出結果 (2011年11月14日)

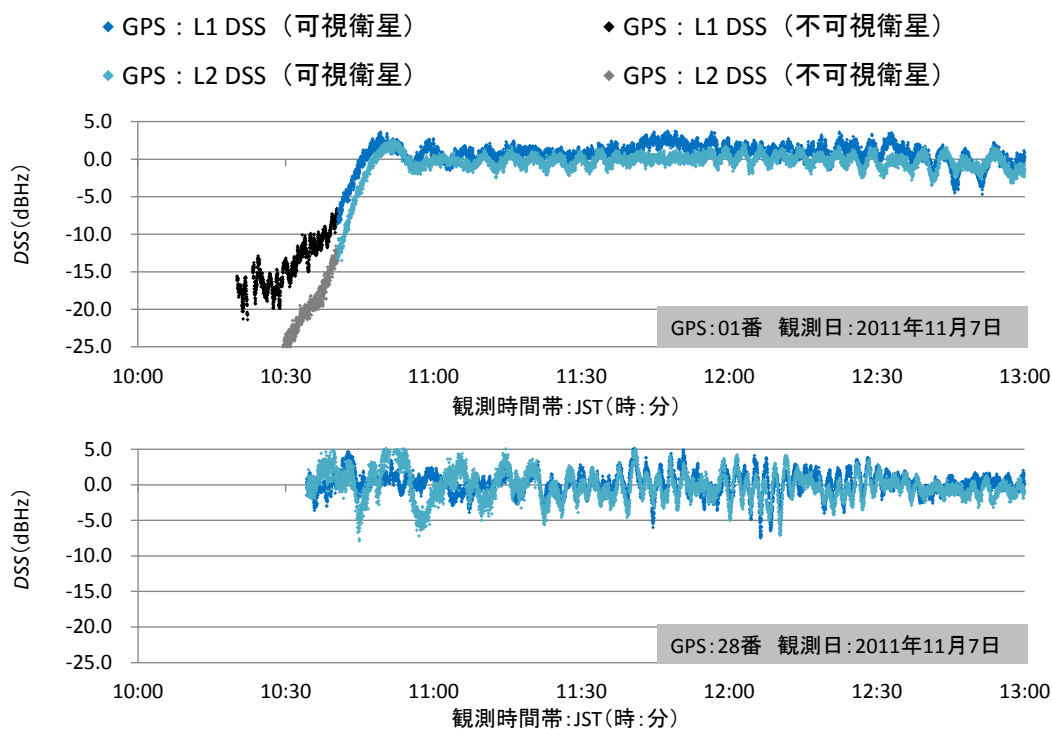


図 6-10 観測点 B3 における GPS のDSS算出結果 (2011年11月7日)

ことがわかる。

次に、観測点 B3 における GPS のDSSの算出結果を図 6-9 に示す。衛星の可視条件が変わる際のDSS値について、GPS:01 番の傾向を確認すると、L1 波で約-7dBHz、L2 波で約-12dBHz であ

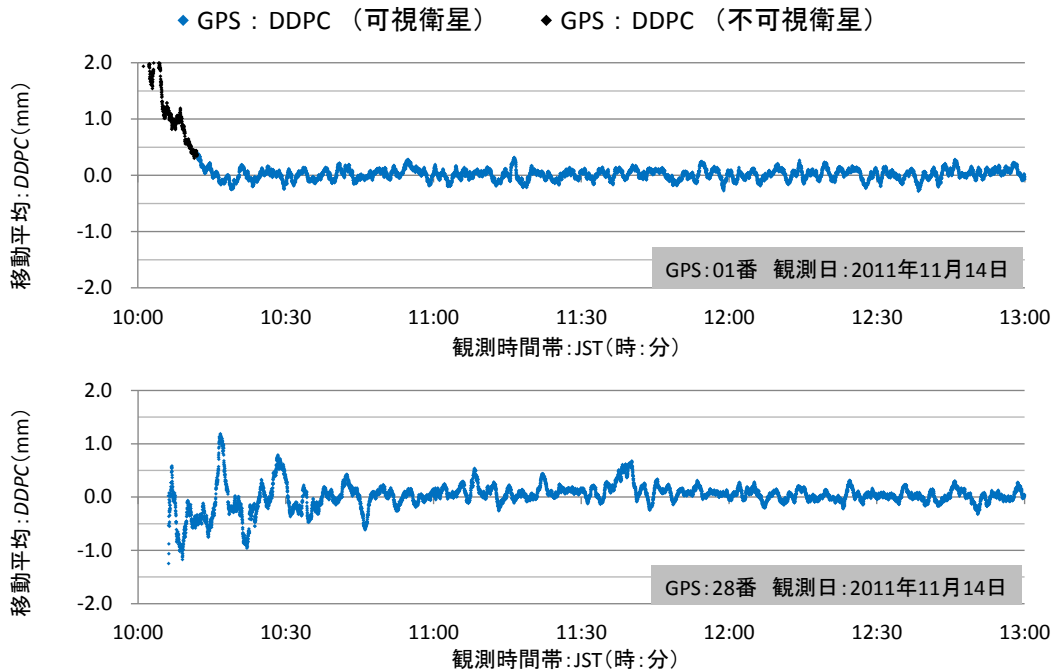


図 6-11 観測点 B3 における GPS の移動平均DDPC算出結果 (2011 年 11 月 13 日)

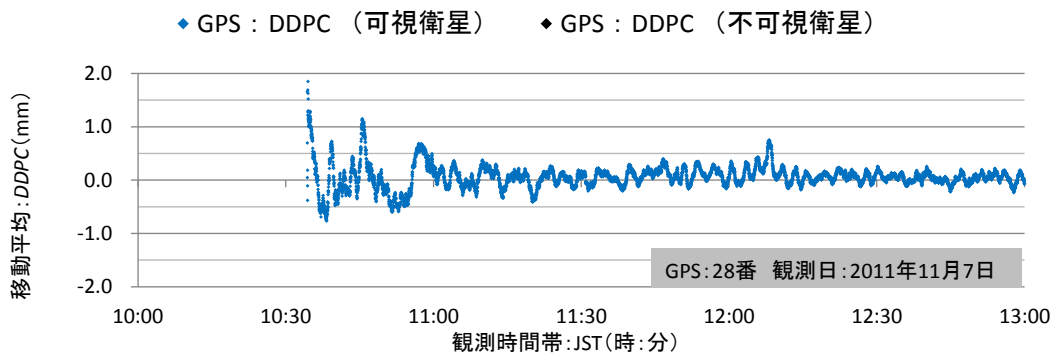


図 6-12 観測点 B3 における GPS の移動平均DDPC算出結果 (2011 年 11 月 7 日)

った。第 4 章で示した観測点 B3 における同衛星の傾向と比較すると、先ほどの観測点 B2 による結果と同様に一致が確認された。第 4 章に示した観測点 B3 における DSS 算出結果を図 6-10 に再掲する。可視時の DSS 値については、0dBHz を中心に推移する傾向が双方の衛星で確認でき、GPS:28 番では上下動が確認できるが、推移する範囲は L1 波、L2 波ともに $\pm 5\text{dBHz}$ 程度であった。DSS 値の上下動について、図 6-10 で示した GPS:28 番の傾向と比較すると、図 6-9 で示した結果に対して 28 分のオフセットを与えることで、上下動が生じる時間帯と一致することがわかる。

観測点 B3 における GPS の移動平均 DDPC の算出結果を図 6-11 に示す。可視時の推移について確認すると、GPS:01 番は $\pm 0.3\text{mm}$ 以内の範囲で推移する傾向が見られた。GPS:28 番については、低仰角時について分布が大きくなる時間帯が確認できるが、その他の時間帯では $\pm 0.5\text{mm}$ 以内の範囲で推移することがわかる。マルチパスの影響を受ける時間帯について、図 6-11 の GPS:28

番の結果に対して 28 分のオフセットを与えた場合、図 6-12 に示す結果と比較し、10:00～10:30 における分布方向や 11:40 頃に見られたプラス方向への分布について傾向が一致することがわかる。しかしながら、観測点 B2 と同様に数値に関して完全な一致は見られず、観測日によって、受信電波に含まれるマルチパスの影響が異なることがわかる。衛星が不可視となり、反射波と回折波で構成される受信電波を検知する場合、第 3 章でも述べた衛星と地物位置を用いた手法で対応はできるが、直接波+反射波による誤差を含む受信電波については、観測位置、衛星位置が同じでも影響が異なるため、各々の位置情報のみでの対応は困難であると考えられる。

(2) GLONASS における DSS と DDPC の傾向

観測点 B2 における GLONASS の DSS の算出結果を図 6-13 に示す。北方向にある地物により可視条件が変化するときの DSS を確認すると、L1 波、L2 波ともに -6dBHz となることがわかる。第 4 章で示した観測点 B2 の DSS の推移では、可視時の場合とほとんど差が見られなかったが、今回の検証では回折損と類似した傾向を示しており、GPS の DSS と同様の傾向が得られることがわかる。一方、可視時については、GLONASS:02 番の 10:00～11:15 において 0dBHz を中心とする上下動が確認でき、以降は、不可視時となるまで 0dBHz 付近の推移となることがわかる。上下動に関しては、直接波と反射波による電波を受信しているものと考えられ、分布については GPS と同様に ±5dBHz 程度の範囲で推移することがわかる。

観測点 B2 における GLONASS の移動平均 DDPC の算出結果を図 6-14 に示す。可視時の推移について確認すると、GLONASS:02 番において、DSS の上下動が見られた時間帯で DDPC の分布

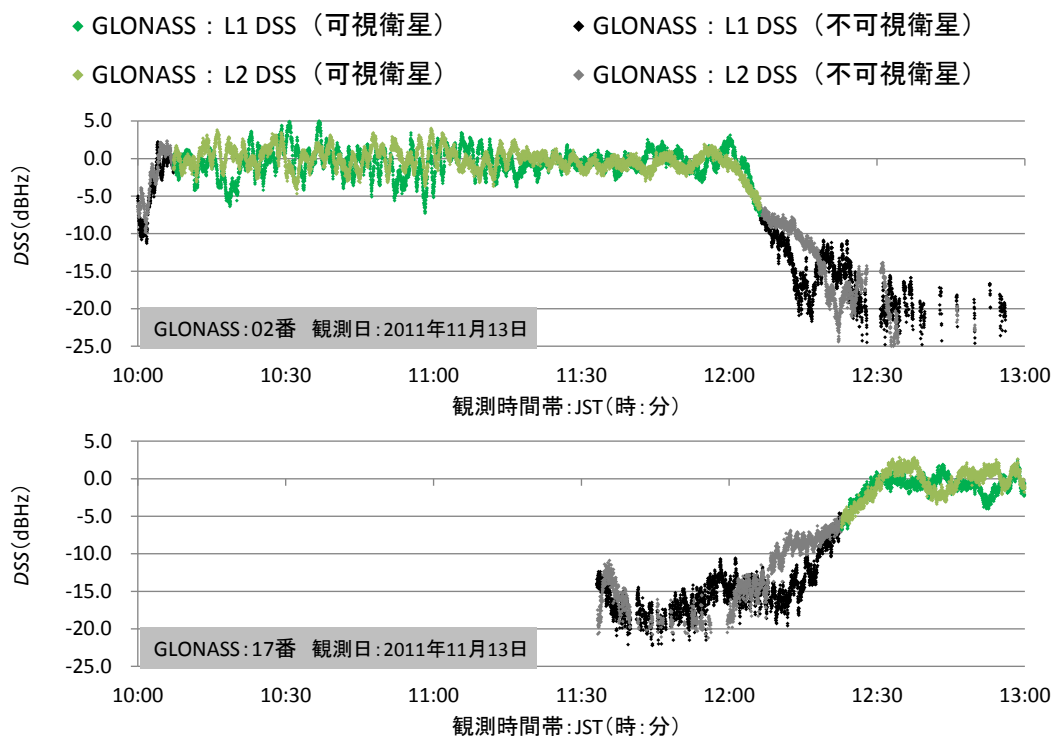


図 6-13 観測点 B2 における GLONASS の DSS 算出結果 (2011 年 11 月 13 日)

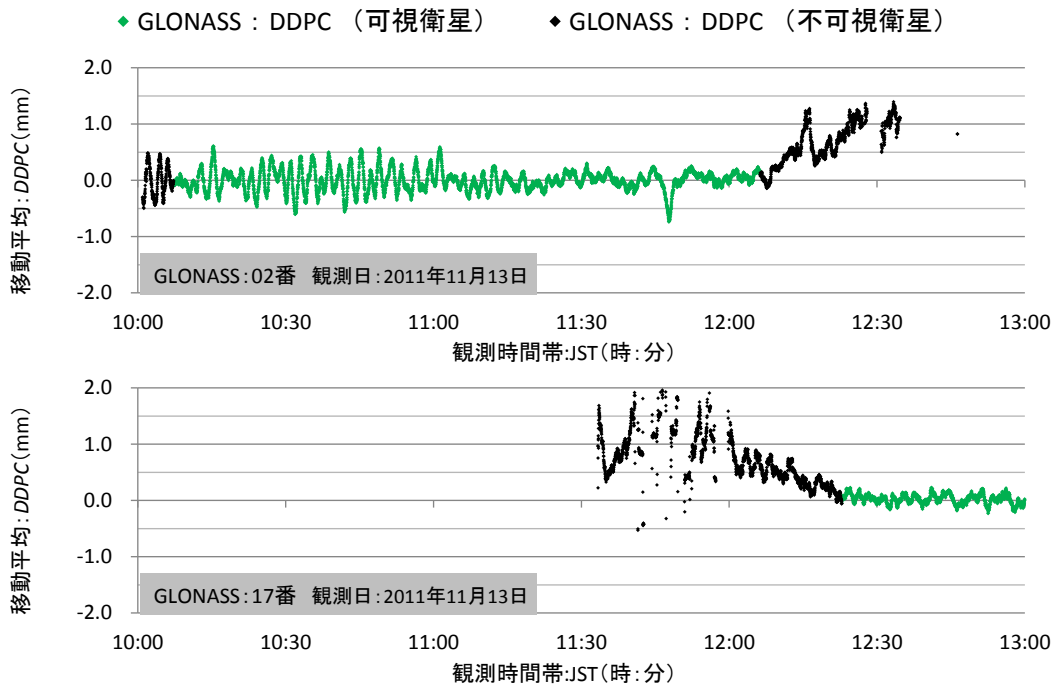


図 6-14 観測点 B2 における GLONASS の移動平均 DDPC 算出結果 (2011 年 11 月 13 日)

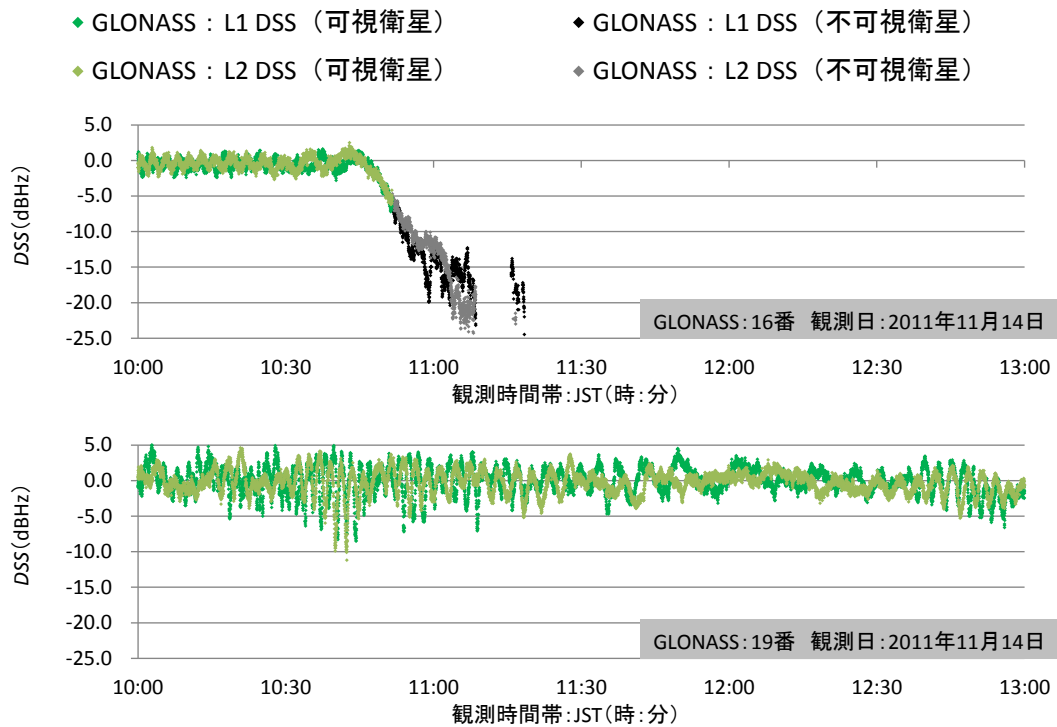


図 6-15 観測点 B3 における GLONASS の DSS 算出結果 (2011 年 11 月 14 日)

範囲が広がる傾向が見られ、マルチパスの影響を表しているものと想定される。その他の時間帯では、 $\pm 0.3\text{mm}$ 以内の範囲で推移する傾向が見られ、不可視時では、GPS による DDPC 算出結果と同様にプラス方向に算出結果が分布する傾向が見られた。

次に、観測点 B3 における GLONASS の DSS の算出結果を図 6-15 に示す。衛星の可視条件が

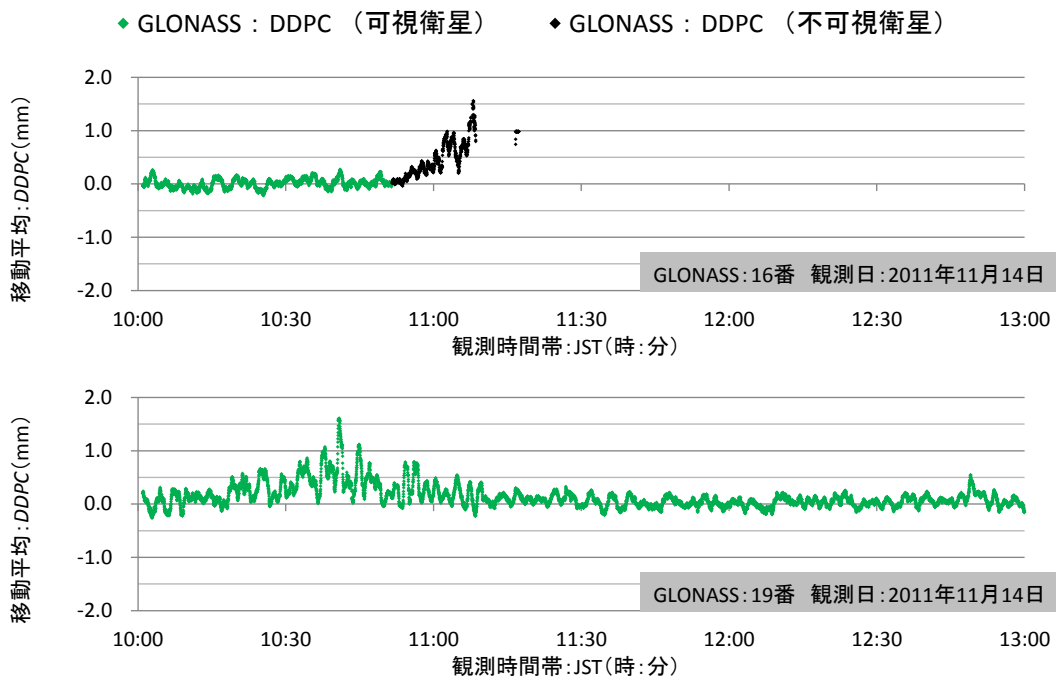


図 6-16 観測点 B3 における GLONASS の移動平均 DDPC 算出結果 (2011 年 11 月 14 日)

変わる際の DSS 値を確認すると、観測点 B2 と同様に L1 波、L2 波で -6dBHz となる傾向が見られた。可視時については、GLONASS:16 番の場合 0dBHz を中心に推移する傾向が確認でき、GLONASS:19 番の場合 DSS 値の上下動が複数時間帯で確認された。19 番衛星については、北方方向に飛来する軌道であるため、観測点に対して南方方向の地物により電波反射が生じたものと考えられる。

観測点 B3 における GLONASS の DDPC の算出結果を図 6-16 に示す。可視時の推移を確認すると、GLONASS:16 番では ±0.3mm 以内、GLONASS:19 番では 11:10 以降同様の範囲で推移する傾向が見られた。GLONASS:19 番の 10:20~11:10 の推移を確認すると、プラス方向に分布が大きくなる傾向が見られるが、DSS 算出結果より上下動が見られる時間帯であるため、直接波+反射波によるマルチパスの影響によるものと考えられる。これらの結果より、GLONASS についても、GPS と同様マルチパスの影響を含む受信電波は各指標を用いて検知することができるものと想定される。

6-2-2 衛星選択による基線解析結果

衛星選択効果の検証結果について、本項では、観測点 B2～B7 の観測値を移動局とした際に得られた Fix 解の取得率と、時系列による解の分布結果を示す。

まず、各観測点の Fix 解の取得率について、表 6-2 よりシナリオ別に結果を示す。シナリオ別に Fix 解の取得率を確認すると、DSS、DDPC によるマルチパス検知指標を用いて衛星を選択することで、全観測衛星を使用した場合（シナリオ 1）よりも得られる Fix 解が増加する傾向が見られた。これは、DSS、DDPC により回折波等のマルチパスの影響を受ける衛星電波を検知し、観測値上から排除したことによる効果と考えられる。一方、DSS のみ（シナリオ 2）と DSS+DDPC（シナリオ 3）による選択で得られた Fix 解の取得率を比較すると、観測点に関わらず差は 1% 以内となり、数値による差はほとんど見られなかった。そこで、10 分間毎（600 データ）に時間帯を区切り、時間帯別の Fix 解の取得状況について観測点別に確認を行った。なお、解の分布については、観測点 B2～B7 の基準値からの乖離を見るものとし、Fix 解の分布に対して時間帯別に 2-D RMS を求めて確認した。2-D RMS とは、基準値からの水平誤差を幾何学的距離で表すものであり、基準値を中心とした円の半径で定義される。2-D RMS の数式は以下のように表現される。

$$2-D \text{ RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\Delta x_j^2 + \Delta y_j^2)} \quad (6-1)$$

n : 標本数 (Fix 解の取得数) Δx : 南北方向の基準値からの乖離

Δy : 東西方向の基準値からの乖離

表 6-2 各観測点の Fix 解の取得率 (単位 : %)

観測点	シナリオ1: 全観測衛星使用	シナリオ2: DSS	シナリオ3: DSS+DDPC
B2:北遮蔽	26.6	78.3	77.8
B3:南遮蔽	51.4	98.3	98.3
B4:東遮蔽	30.7	93.3	93.4
B5:西遮蔽	26.3	90.8	91.2
B6:東西遮蔽	3.3	15.1	14.7
B7:斜め遮蔽	34.3	94.4	94.8

(1) 観測点 B2 : 北遮蔽観測点

北遮蔽環境下で得られた観測値を移動局として、衛星選択効果を検証した。図 6-17, 図 6-18 にDSSとDDPCによる GPS と GLONASS のマルチパス検知結果を示す。ただし、データ数が膨大であるため、本論文では 5 秒間隔で間引した結果を掲載する。各々の指標の傾向を確認すると、GPS では、1:20 前後の時間帯を除き指標の基準値外となる衛星電波を受信していることがわかる。GLONASS についても、観測開始時と 1:30 以降の時間帯で基準値外となる衛星電波を受信していることがわかる。

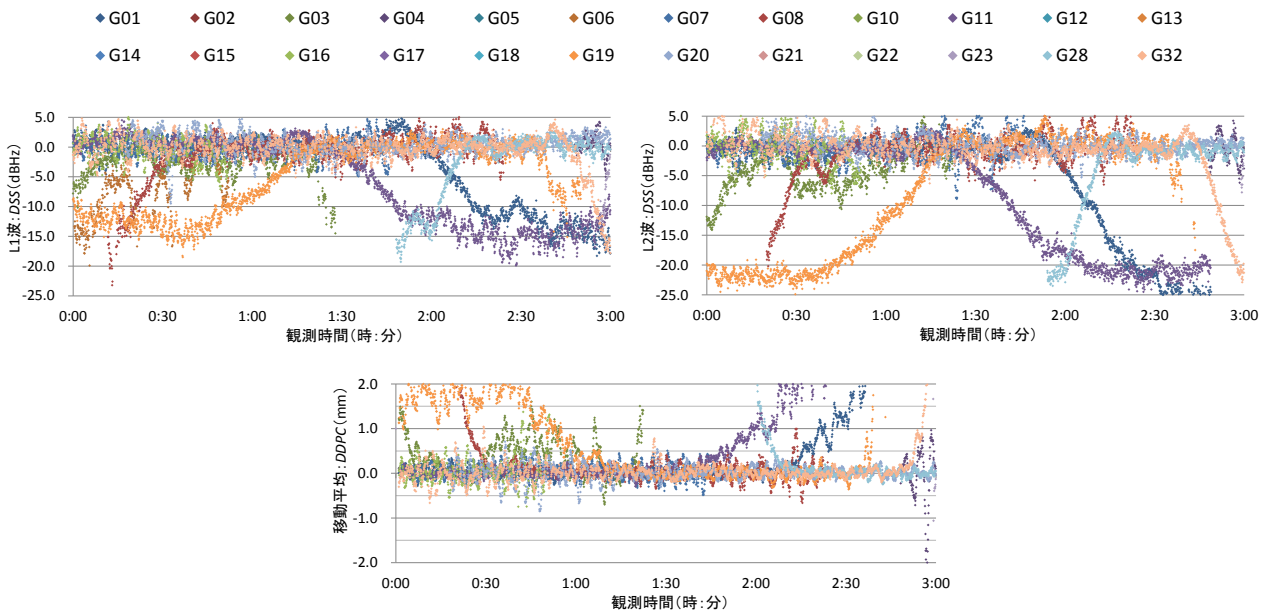


図 6-17 観測点 B2 における GPS のマルチパス検知結果

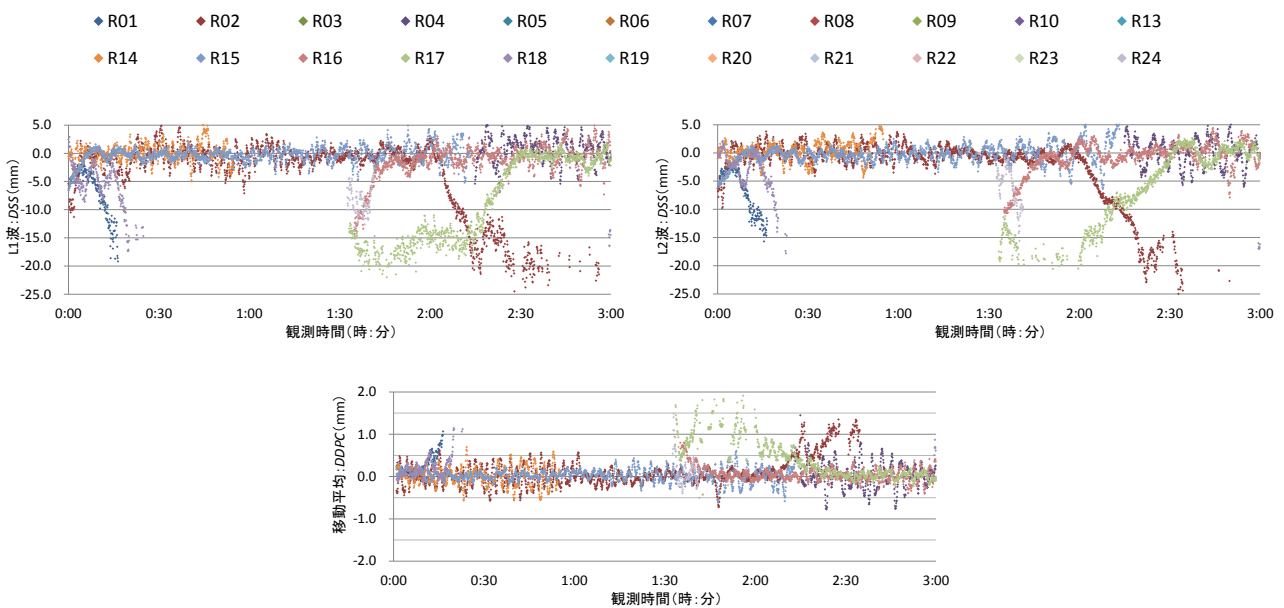


図 6-18 観測点 B2 における GLONASS のマルチパス検知結果

図 6-19 に、シナリオ別の Fix 解の取得割合を時間帯別に示す。全観測衛星使用時では、観測時間 0:00~0:50, 1:50~3:00 において Fix 率が 0%となり、高精度な測位解が得られていないことがわかる。先ほどのマルチパス検知結果と比較すると、指標が基準値外となる時間帯と Fix 率が低下する時間帯とで一致が見られるため、マルチパスの影響によるものと考えられる。一方、DSS, DDPCにより衛星を選択した場合、観測時間 0:00~2:00 において Fix 率が 80%~100%となり、実用レベルで測位できるものと想定される。2:00 以降では、Fix 率が 60%以下に低下する傾向が見られるが、図 6-20 より平均衛星数と最小衛星数を確認すると、衛星選択時において 5 衛星以下となり、解析に必要な衛星数を満たせていないことがわかる。シナリオ 2 とシナリオ 3 の Fix 率を比較すると、観測時間 2:10~2:20 において DDPC による衛星選択指標を加えた場合、DSS のみの場合に対して約 6%の低下が見られた。双方のシナリオの衛星数を確認すると、DSS+DDPC による衛星選択により平均衛星数が少なくなり、最小衛星数についても 4 機と解析時の必要数を満たしていないため、Fix 率の低下は解析時の衛星数減少によるものと考えられる。

次に、シナリオ別に得られた基線解析結果を確認した。図 6-21 に、シナリオ別の基線解析結果を示す。Float 解, Fix 解に関わらず分布を比較すると、全観測衛星使用時では、Fix 解の取得

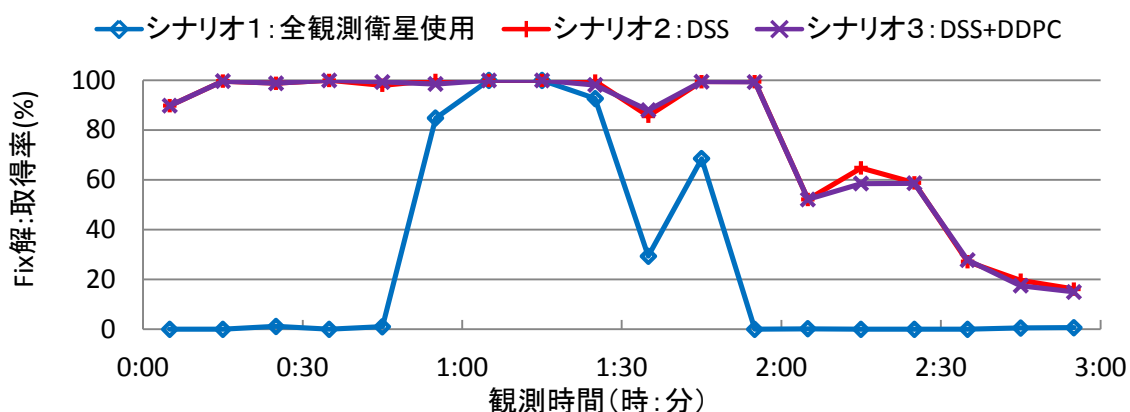


図 6-19 観測点 B2 における時間帯別の Fix 解取得率

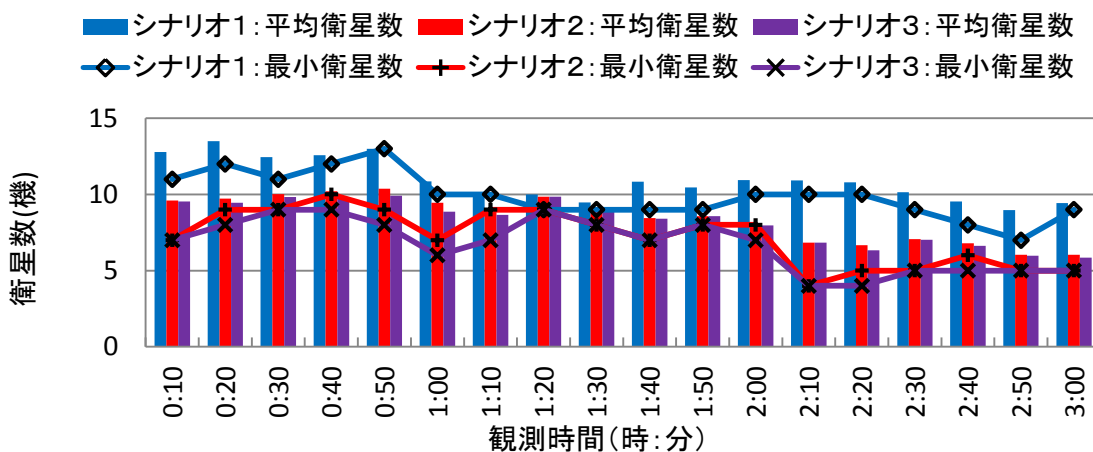


図 6-20 観測点 B2 における時間帯別の平均衛星数と最小衛星数

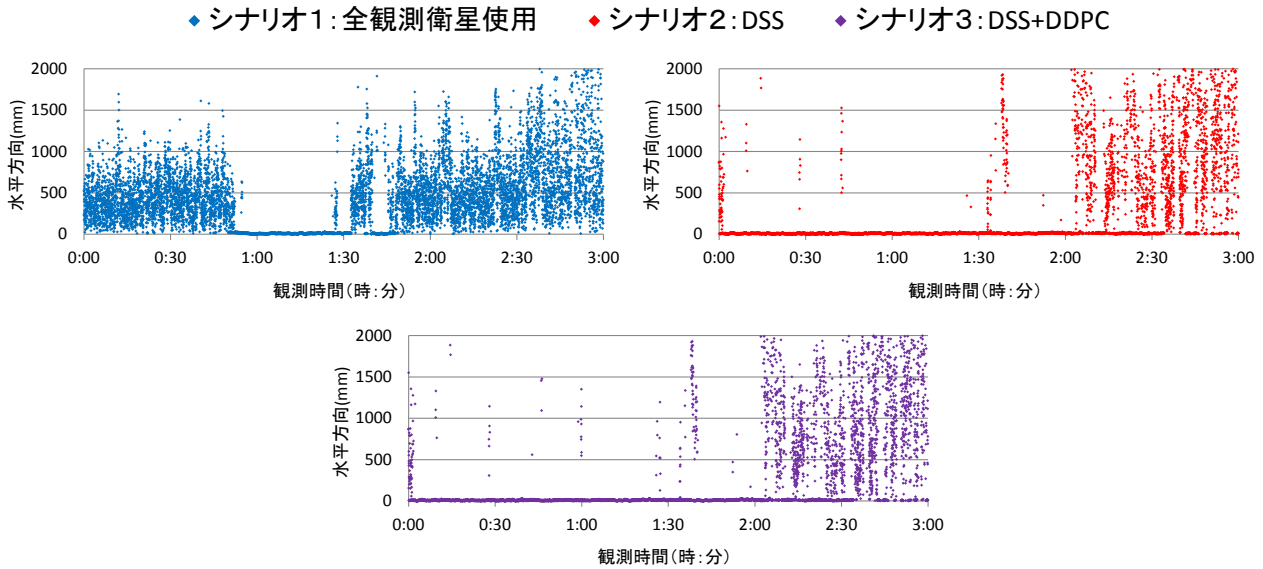


図 6-21 観測点 B2 における基線解析結果の時系列分布

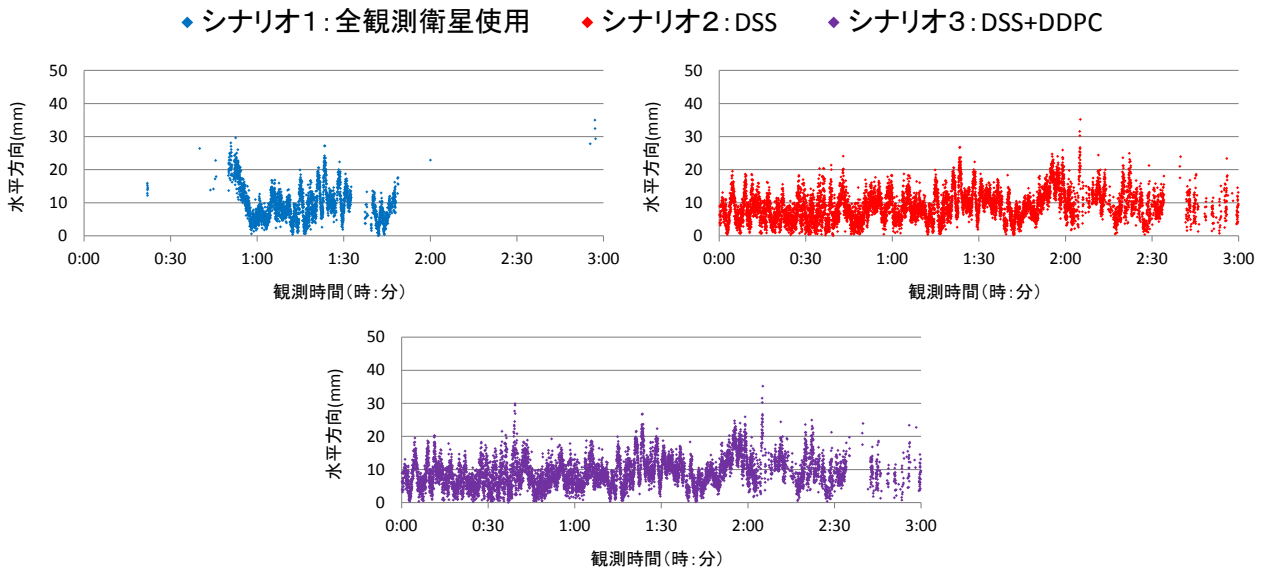


図 6-22 観測点 B2 における Fix 解の時系列分布

ができない 0:00~0:50 の観測時間において 1m 以内の分布となり、数十 cm オーダーの精度となることがわかる。序論でも述べたが、車両の自動運転等に関連した高度な位置精度を要求する ITS サービスでは、5cm オーダーの精度が求められるため、Float 解では、この要求精度を継続して達成することが困難であることがわかる。なお、衛星選択時において得られる Float 解についても、2:00~3:00 の観測時間の分布より、基準値から 1m 以上の誤差となる場合が確認できるが、2:00~2:10 の観測時間等では、全観測衛星使用で得られた Float 解よりも分布が大きくなる傾向が見られた。PDOP を確認すると、全観測衛星使用時では 2 前後の値で推移が見られるが、衛星を選択したシナリオでは、3 前後となる場合が見られるため、解析時の衛星配置が影響した可能性が考えられる。Fix 解の分布結果を図 6-22 に示す。Fix 解の分布をシナリオ別に比較すると、

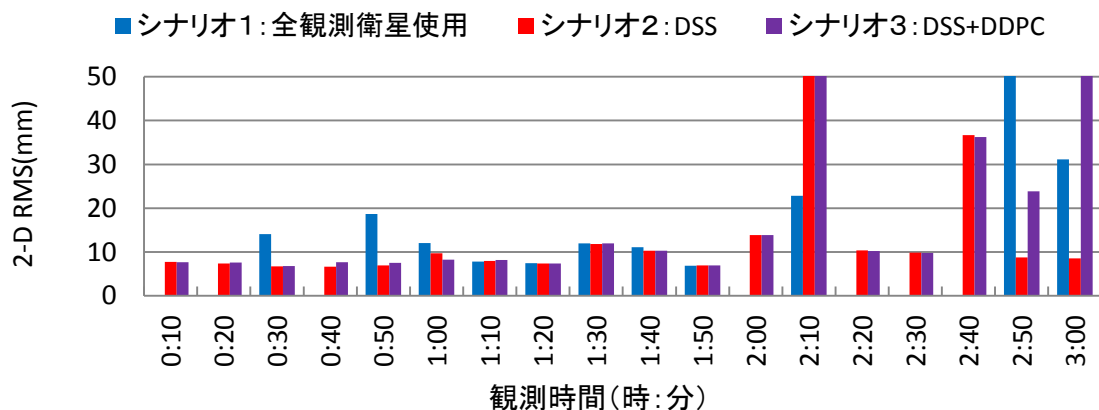


図 6-23 観測点 B2 における時間帯別の 2-D RMS 算出結果

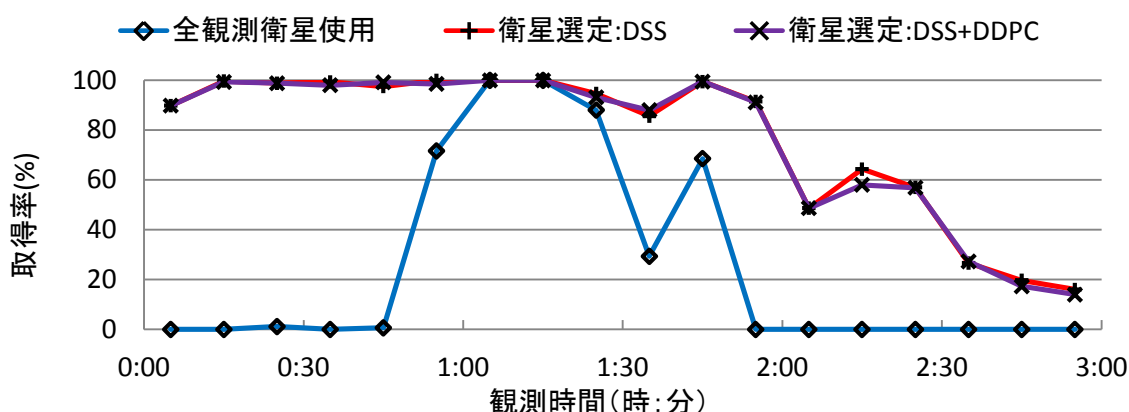


図 6-24 観測点 B2 における時間帯別に正確な Fix 解が得られた割合

0:50～1:00 の観測時間において全観測衛星使用では基準値から 20mm 以上となる場合が確認されるが、衛星を選択することで 20mm 以内の分布となり、測位精度が向上していることがわかる。また、2:00 以降の Fix 解の取得率が低下する時間帯の分布についても、衛星を選択したシナリオでは 20mm 以内となる傾向が確認された。Fix 解に対する 2-D RMS の算出結果をシナリオ別に図 6-23 に示す。先ほど述べた 0:50～1:00 の時間帯では、衛星選択により RMS 値が低下することがわかる。また、観測時間 0:00～2:00 においては、シナリオに関わらず 20mm 以内となり、公共測量等の作業において適用可能な精度で Fix 解が十分得られていることがわかる。しかし、衛星数減少により Fix 率が低下する 2:00 以降の時間帯では、RMS 値が 20mm 以上となる場合が確認でき、正しい Fix 解が得られなかった可能性が考えられる。取得した Fix 解の誤差が、概略の水平精度である 20mm 以内となる割合を時間帯別に図 6-24 に示す。グラフからは、図 6-19 で示した Fix 解の取得率と差は見られないが、図 6-23 で示した 2-D RMS の値が 20mm 以上となる時間帯のシナリオにおいて、1m 以上の誤差となる Fix 解が 1～5 個確認された。

これらの結果から、選択基準を満たす衛星数が解析時の必要数を満たしている場合、基準外の衛星を除去することで継続して Fix 解が得られるが、衛星数が必要数を満たさない場合、Fix 率は低下し、取得された Fix 解についても不正確な解が含まれることがわかった。

(2) 観測点 B3 : 南遮蔽観測点

南遮蔽環境下で得られた観測値を移動局として、衛星選択効果を検証した。図 6-25、図 6-26 に DSS と DDPC による GPS と GLONASS のマルチパス検知結果を示す。観測点 B2 の検知結果と比較すると、基準値内となる衛星電波が多く、移動局側の観測値にマルチパスの影響を受ける受信電波が少ないものと想定される。

図 6-27 に、シナリオ別の Fix 解の取得割合を時間帯別に示す。全観測衛星使用時について Fix 解の取得率を確認すると、先ほどの観測点 B2 と異なり Fix 率が 0% となる時間帯は見られないが、

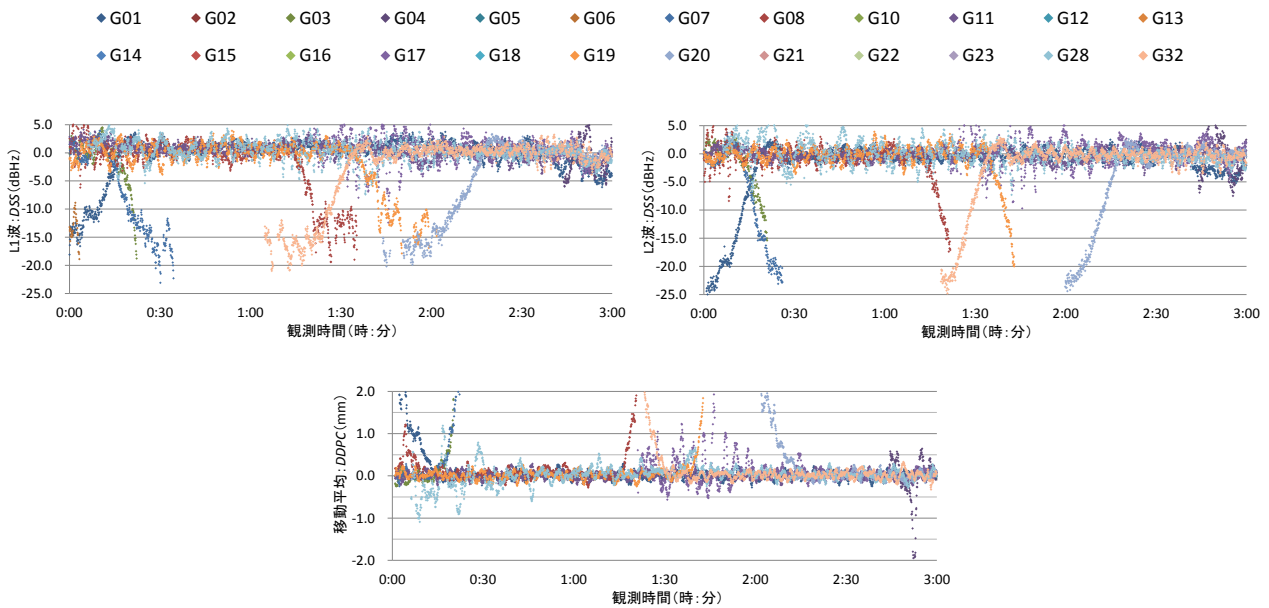


図 6-25 観測点 B3 における GPS のマルチパス検知結果

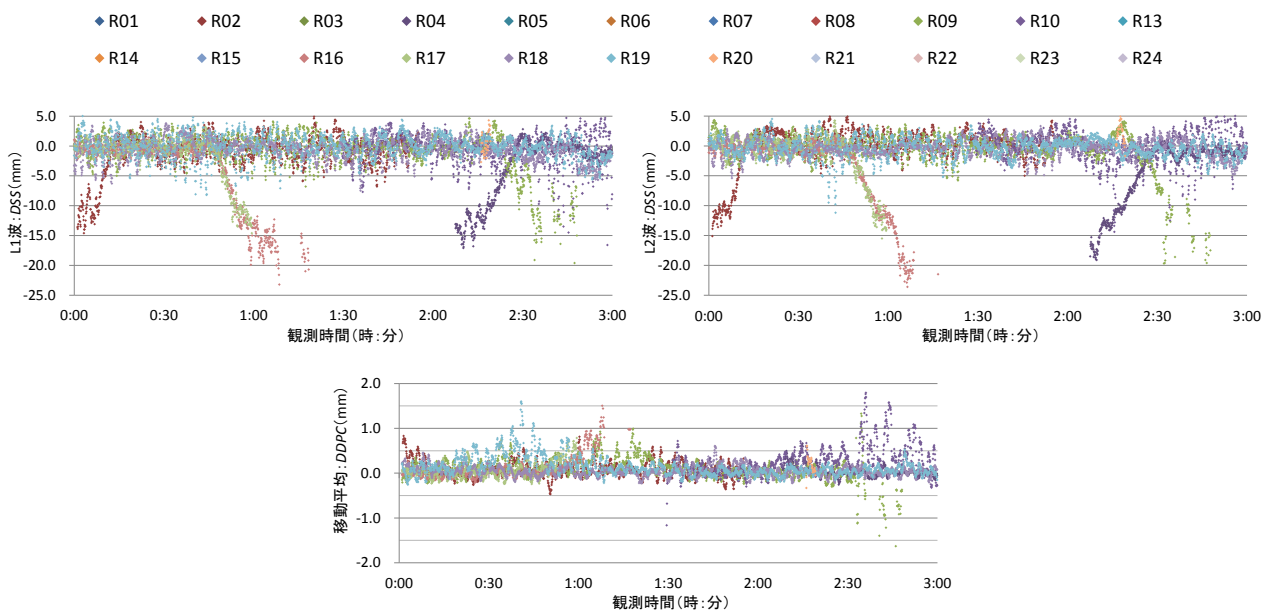


図 6-26 観測点 B3 における GLONASS のマルチパス検知結果

Float 解と Fix 解が交互に取得されるなど不安定な測位となった。マルチパス検知結果と比較すると、指標値の基準外となる衛星電波の出現と Fix 率が低下する時間帯について一致が見られ、Float 解の取得はマルチパスの影響によるものと考えられる。ゆえに、マルチパス検知結果に基づく衛星選択時のシナリオでは、観測時間 1:10~1:40 において Fix 率の低下が見られるものの、全ての時間帯で 90%以上となる傾向が見られた。

なお、Fix 率が低下した時間帯については、図 6-28 より衛星数を確認すると、最小衛星数が 7 機以上と基線解析の必要数を満たしていることがわかる。マルチパスの影響を受ける受信電波を除去しきれなかった可能性が考えられるため、DDPC の選択基準を $\pm 0.5\text{mm}$ から $\pm 0.3\text{mm}$ に変更したシナリオ 4 を新たに設定し、キネマティック解析を行った。シナリオ 4 の Fix 解取得率を図 6-29 に示す。シナリオ 3 の解析結果と比較すると、1:10~1:30 の観測時間において Fix 率は 10%~15%低下し、衛星選択によりさらに Fix 率が低下する結果となった。このときの解析衛星数を調べると、図 6-30 より 6 機以上の基線解析に必要な衛星数を取得していることがわかるが、シナリオ 3 と比較すると 2~3 機の減少が確認された。また、PDOP を GPS と GLONASS の衛星系別に算出すると、図 6-31 より GPS は 1:10~1:30 の時間帯において、8 以下で推移する場合は

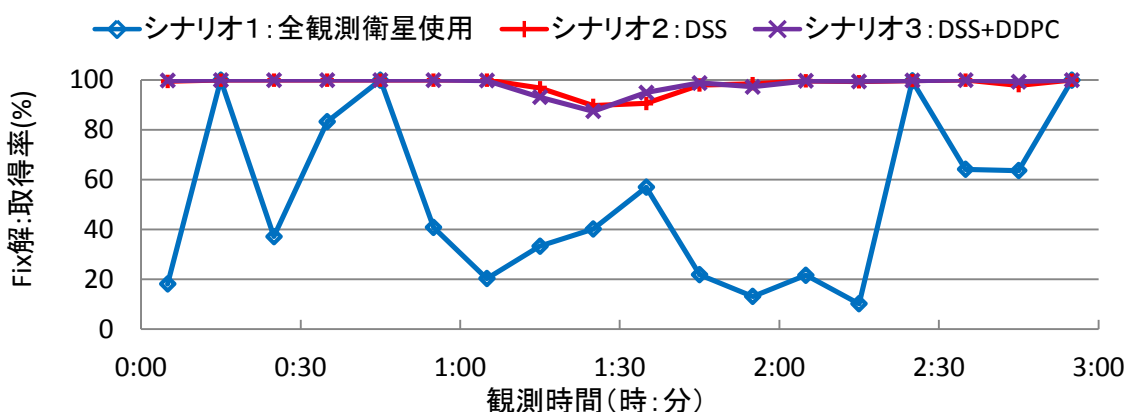


図 6-27 観測点 B3 における時間帯別の Fix 解取得率

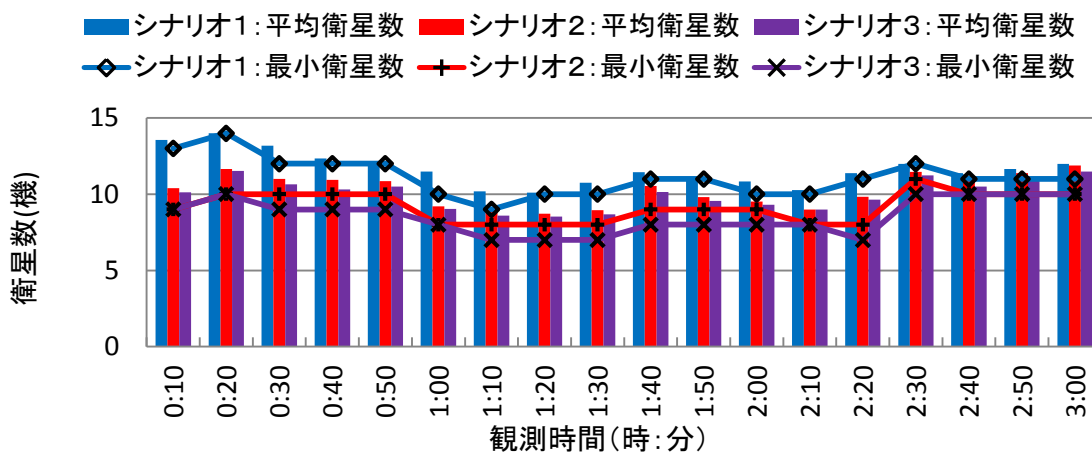


図 6-28 観測点 B3 における時間帯別の平均衛星数と最小衛星数

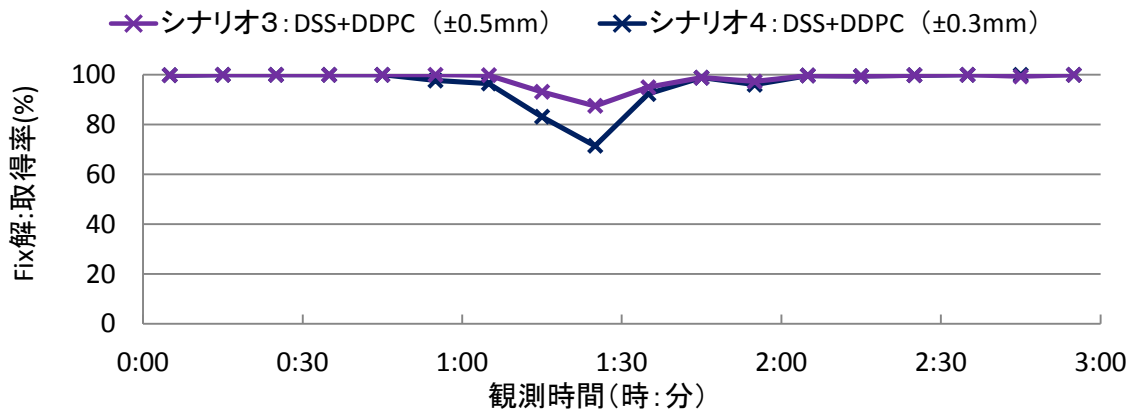


図 6-29 観測点 B3 における DDPC 基準値変更による Fix 解取得率

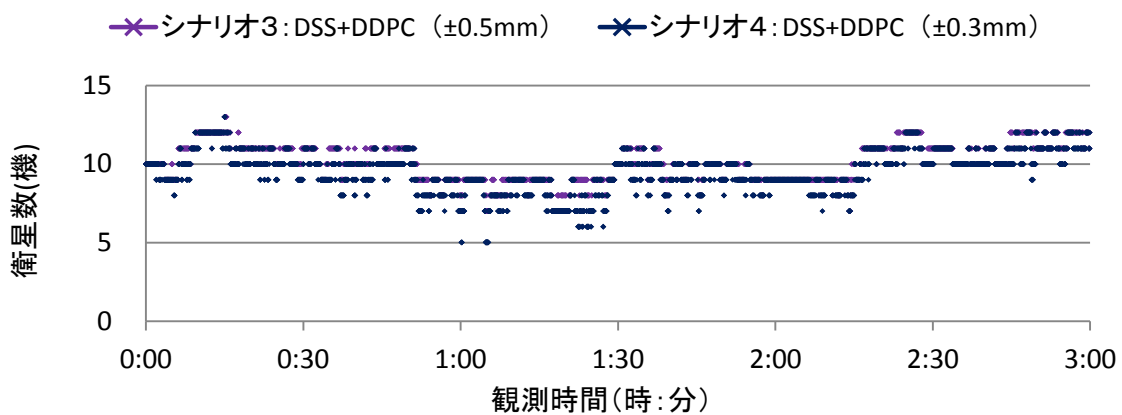


図 6-30 観測点 B3 におけるシナリオ 3, 4 の衛星数の推移

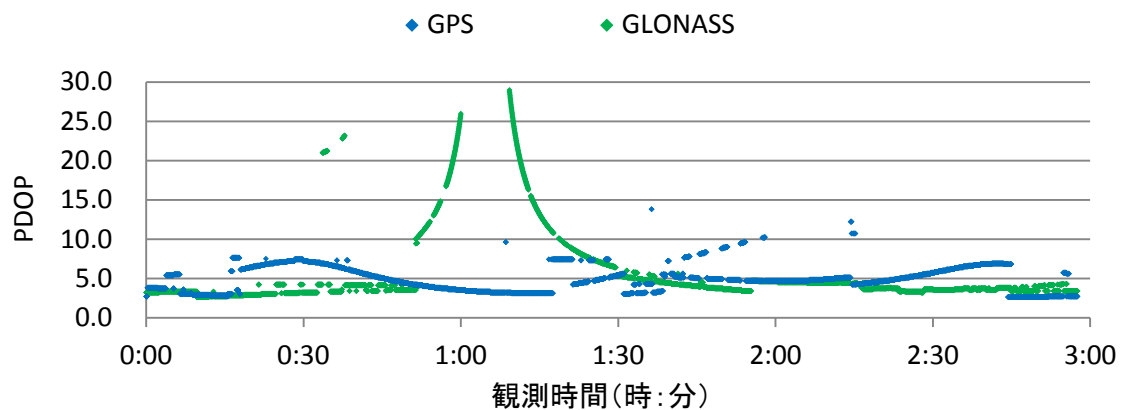


図 6-31 観測点 B3 におけるシナリオ 4 の PDOP の推移

多く見られるが、GLONASS については 1:10~1:20 の時間帯では 10 以上となり、以降も GPS より高い値で推移することがわかる。シナリオ別に得られる基線解析結果の解の種類と PDOP の推移を比較すると、シナリオ 4 で GLONASS が 3 機以下となり DOP 計算ができない時間帯に Float 解を取得する傾向が見られた。PDOP が 5 前後となる 1:30 以降では、衛星選択により Float 解となる傾向は見られないため、選択時の衛星配置が影響している可能性が考えられる。

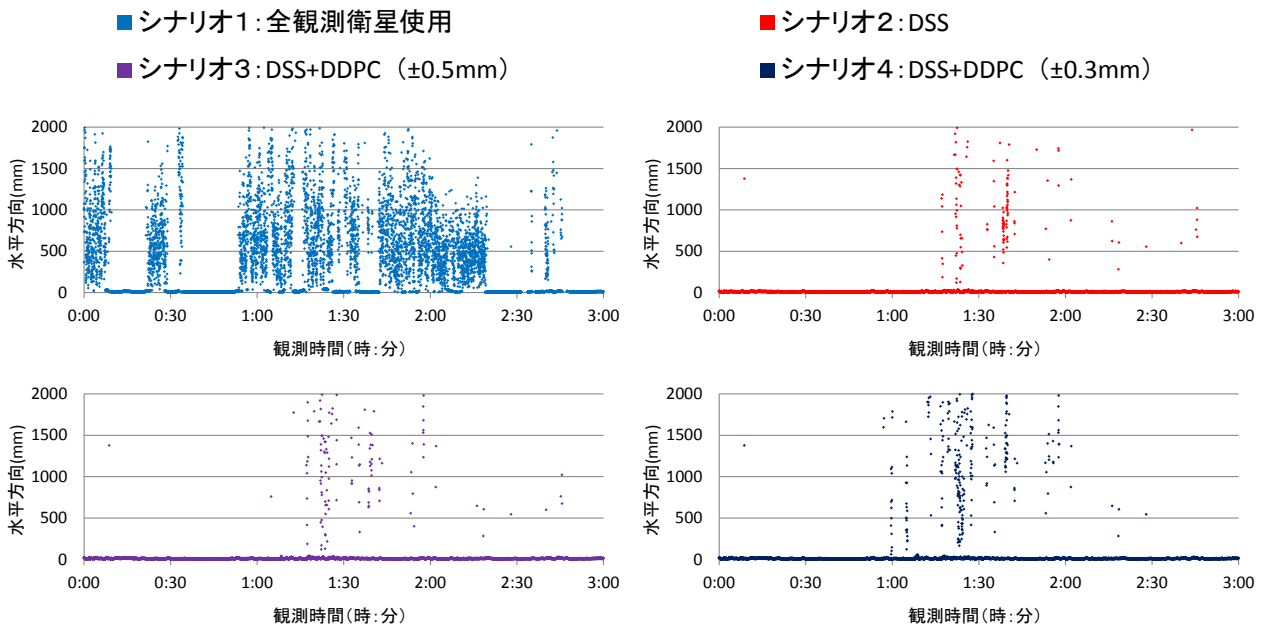


図 6-32 観測点 B3 における基線解析結果の時系列分布

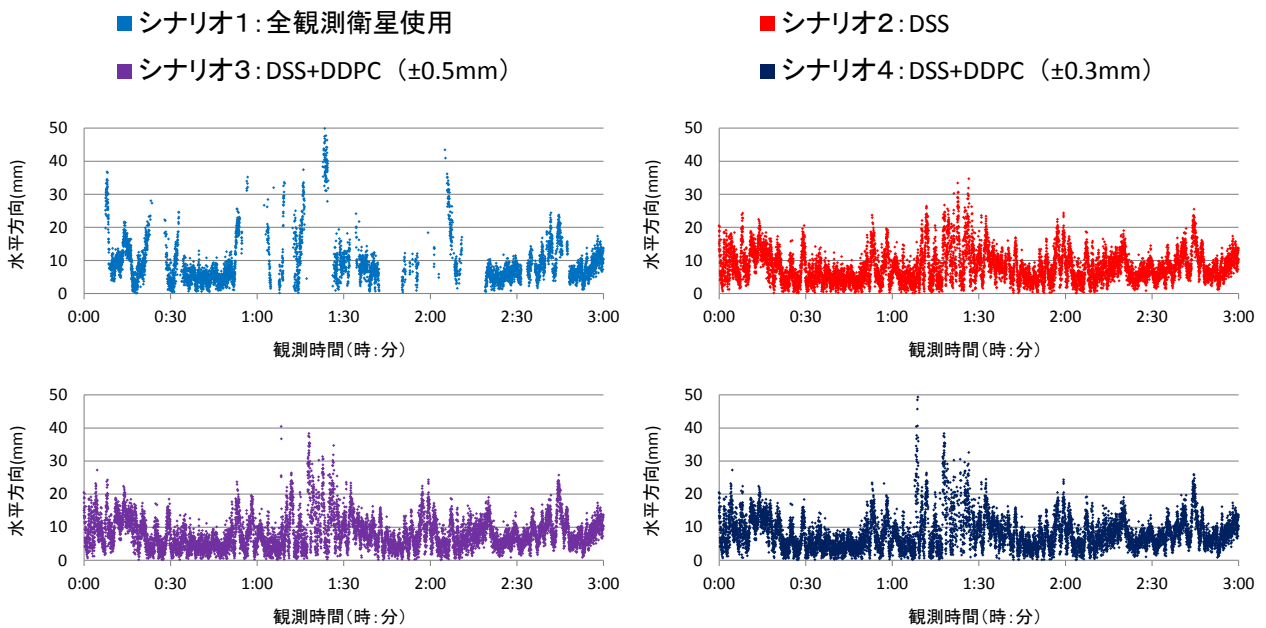


図 6-33 観測点 B3 における Fix 解の時系列分布

次に、シナリオ別に得られた基線解析結果を確認した。図 6-32 に、シナリオ別の基線解析結果を示す。観測点 B3 では、全観測衛星使用でも全ての時間帯で Fix 解の取得が確認されたが、Float 解取得時では、誤差は 1m 以上にも及ぶことがわかる。衛星選択時のシナリオでは、Fix 率の低下が見られた 1:10~1:40 の観測時間において Float 解の取得が確認でき、シナリオ 2 では 1:38 前後、シナリオ 4 では 1:23 頃に連続した Float 解の取得が確認された。前者は、シナリオ 3 より Fix 解の取得が確認されるためマルチパスを含む受信電波の影響、後者は、先ほど述べたように選択時の衛星配置が影響している可能性がある。Fix 解の分布結果を図 6-33 に示す。シナ

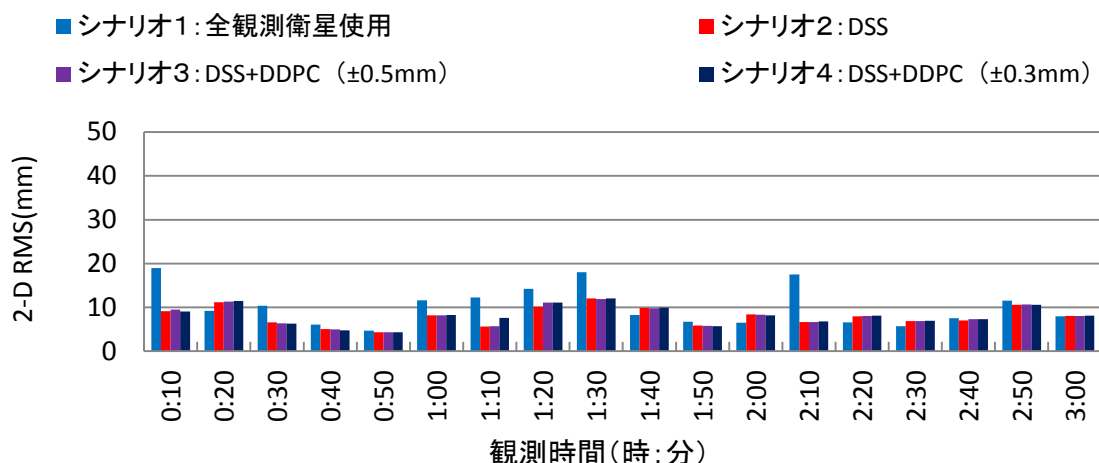


図 6-34 観測点 B3 における時間帯別の 2-D RMS 算出結果

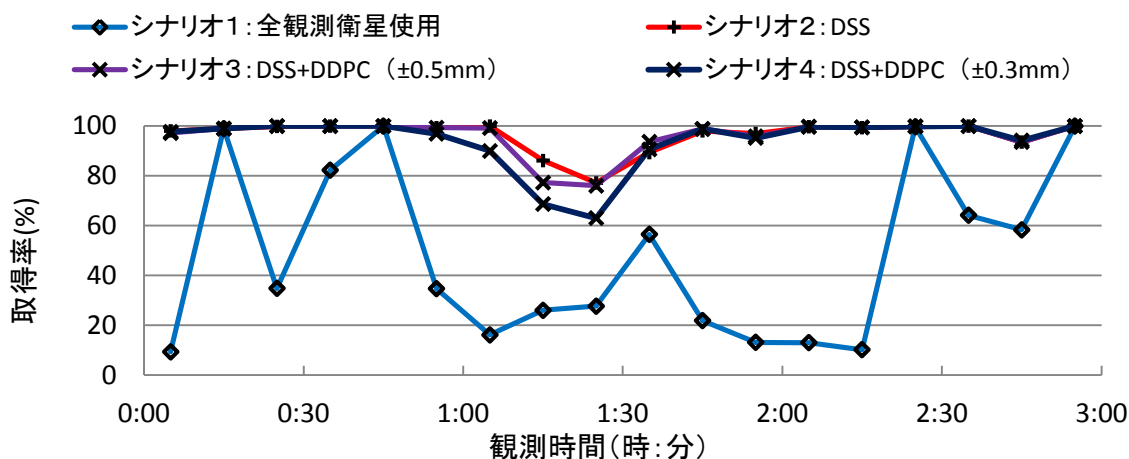


図 6-35 観測点 B3 における時間帯別に正確な Fix 解が得られた割合

シナリオ別に分布を比較すると、衛星選択時のシナリオでは、1:10～1:40の観測時間を除き、誤差は20mm以内となることがわかる。一方で、Fix率の低下が見られた1:10～1:40の時間帯では、シナリオ2のFix解が基準値から30mm以内の分布となるのに対して、DDPCの選択を含めたシナリオ3、4では基準値から40mmの分布となる場合が確認された。これは、図6-31でも示したように、DOP値が高くなることから、衛星配置が影響しているものと考えられる。Fix解に対する2-D RMSの算出結果をシナリオ別に図6-34に示す。Fix解の分布でも述べたが、衛星選択により基準値からの誤差が小さくなる傾向が見られており、全観測衛星使用時よりもRMS値が小さくなることがわかる。一部の時間帯では、衛星選択により2mm程度のRMS値の増加が見られるが、シナリオに関わらず10mm以内の傾向となるため、公共測量等の高精度を必要とする作業でも十分に適用可能な精度を有しているものと思われる。取得したFix解の誤差が、概略の水平精度である20mm以内となる割合を時間帯別に図6-35に示す。衛星選択時において、1:00～1:30の観測時間におけるシナリオ4の割合の低下が顕著であり、衛星配置の悪い環境下で衛星を選択した場合、Fix解の取得率の低下ばかりでなく解の信頼性も低下することがわかった。

(3) 観測点 B4 : 東遮蔽観測点

東遮蔽環境下で得られた観測値を移動局として、衛星選択効果を検証した。図 6-36、図 6-37 に DSS と DDPC による GPS と GLONASS のマルチパス検知結果を示す。GPS の検知結果を確認すると、1 つ以上の受信電波が基準値外となり、観測時間に関わらずマルチパスの影響を常に受けていることがわかる。GLONASS についても、2:15~2:45 の時間帯を除き、指標の基準値外となる電波を受信していることがわかる。

図 6-38 に、シナリオ別の Fix 解の取得割合を時間帯別に示す。全観測衛星使用時の Fix 率を

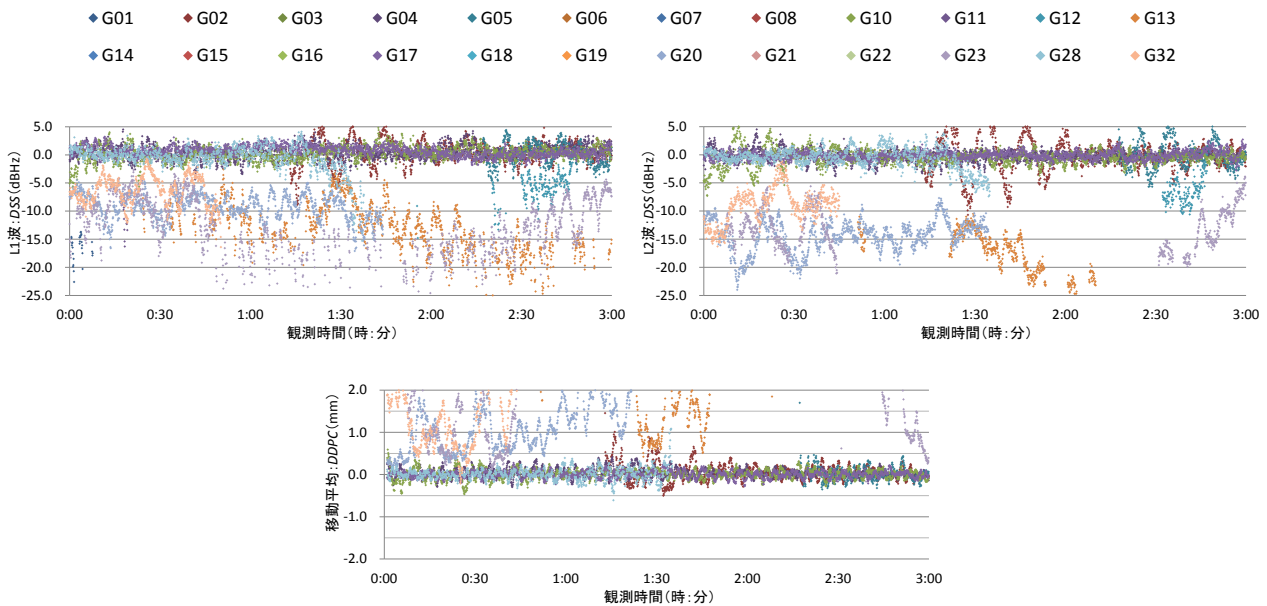


図 6-36 観測点 B4 における GPS のマルチパス検知結果

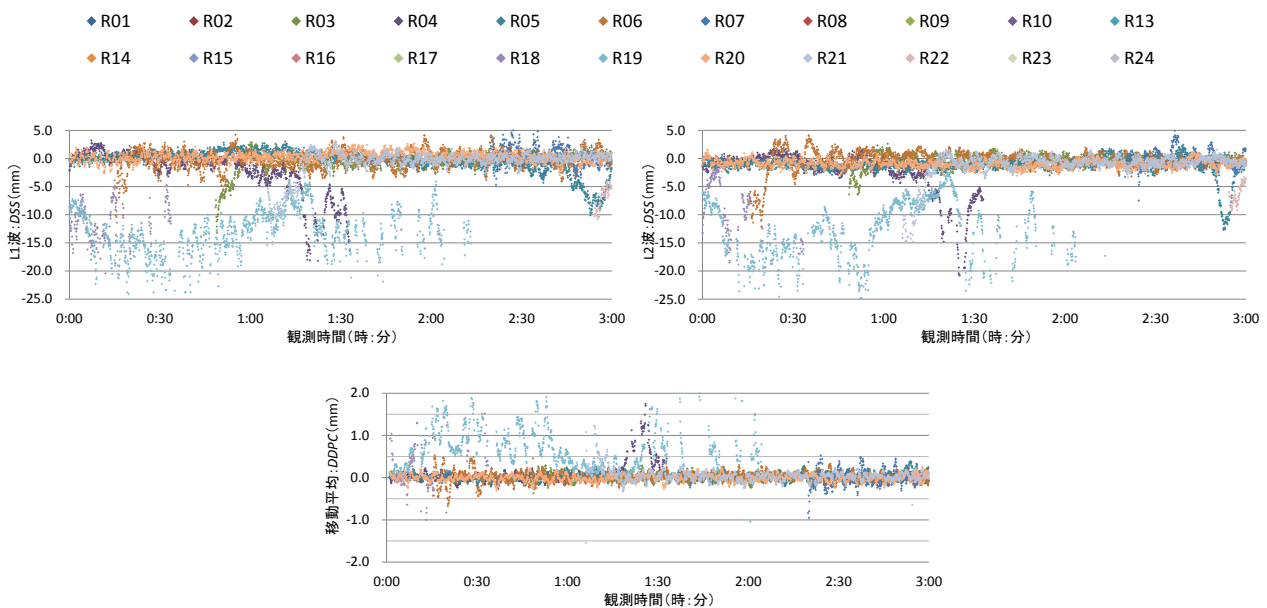


図 6-37 観測点 B4 における GLONASS のマルチパス検知結果

確認すると、マルチパスの影響を受けているにも関わらず、取得率が80%以上と高い値を示す時間帯が確認された。Fix率が向上する時間帯のDSSとDDPCを調べると、観測衛星数の減少により、基準値外となる衛星が他の時間帯と比較し低下することがわかった。したがって、該当時間の観測値に含まれるマルチパスの影響が低下したことでFix解が得られたものと考えられる。一方、衛星選択時のシナリオでは、観測時間1:10~1:20を除き80%~100%のFix率となった。

なお、Fix率が100%とならない時間帯については、図6-39より最小衛星数が8機以上と基線解析の必要数を満たしていることがわかる。観測点B3と同様にマルチパスの影響を受ける受信電波を除去しきれなかった可能性が考えられるため、DDPCの選択基準を±0.5mmから±0.3mmに変更したシナリオ4を新たに設定しキネマティック解析を行った。図6-40にシナリオ3、4のFix解取得率を示す。観測時間0:20~0:30、1:10~1:20については、シナリオ4のFix率はシナリオ3に対して約3%の低下が見られた。このときの解析衛星数を調べると、図6-41より6機以上の基線解析に必要な衛星数を満たすことが確認できる。衛星配置の影響を考慮し、GPSとGLONASSの衛星系別にPDOPを算出すると、図6-42より、観測時間0:20~0:30のGPSのPDOPは8~15で推移することがわかる。一方、1:10~1:20の時間帯では、GLONASSのPDOPが20

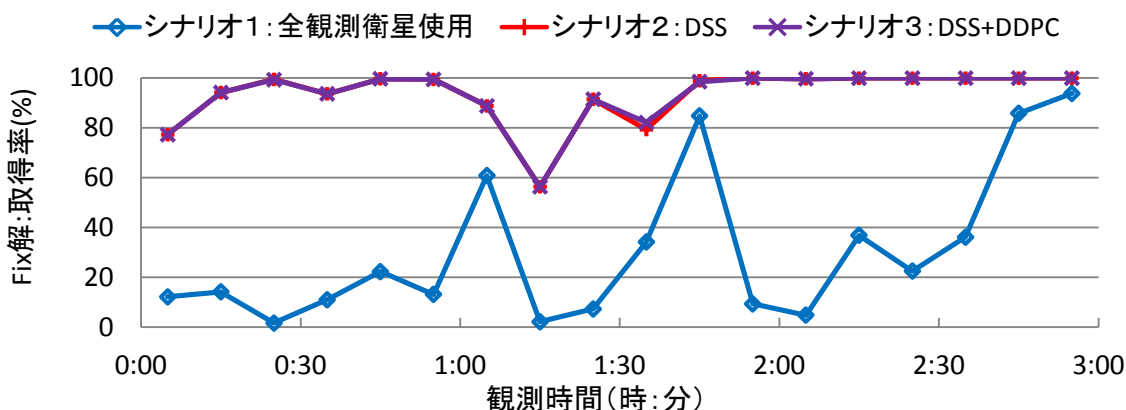


図6-38 観測点B4における時間帯別のFix解取得率

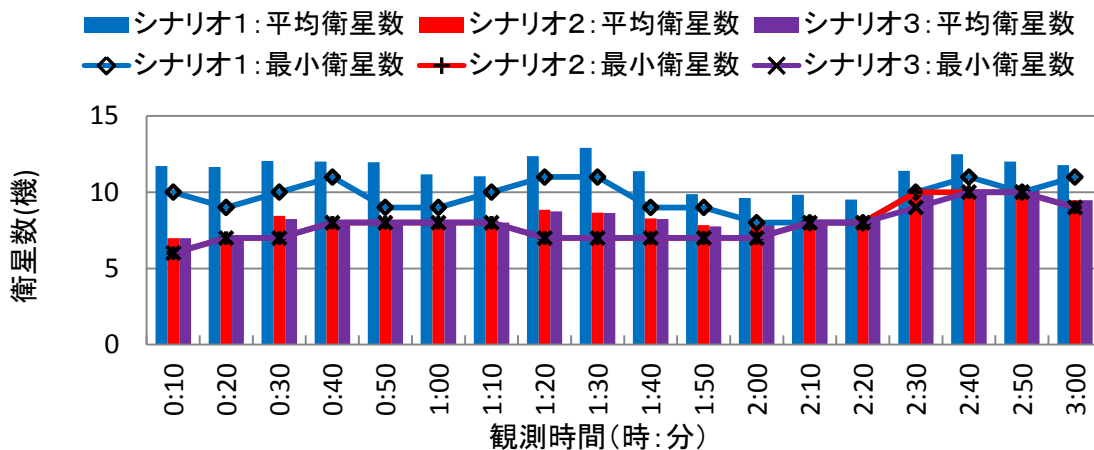


図6-39 観測点B4における時間帯別の平均衛星数と最小衛星数

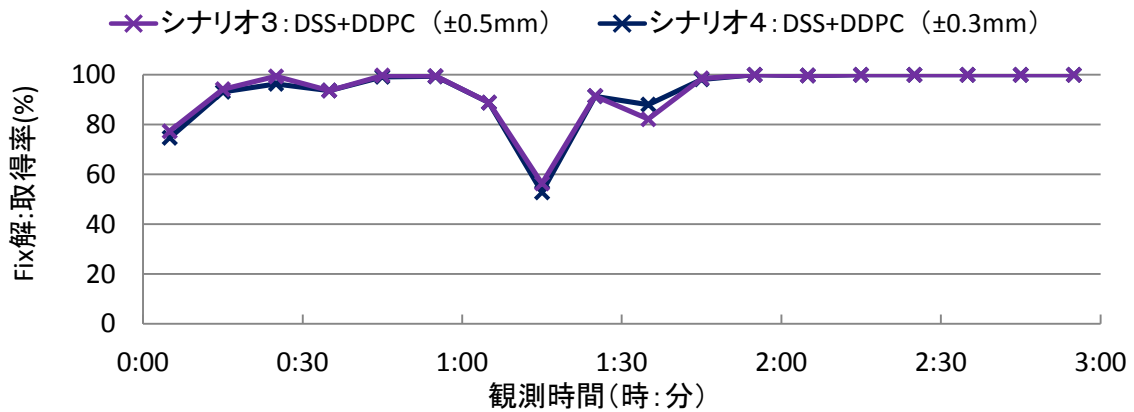


図 6-40 観測点 B4 における DDPC 基準値変更による Fix 解取得率

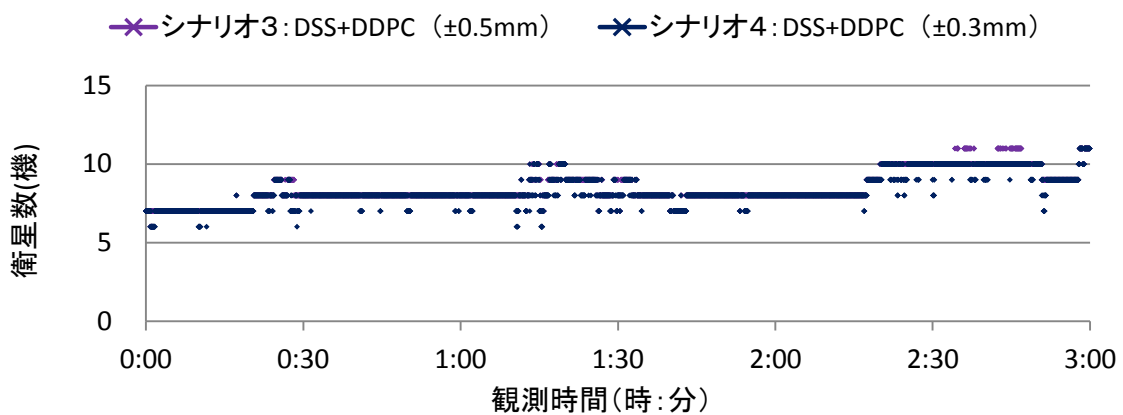


図 6-41 観測点 B4 におけるシナリオ 3, 4 の衛星数の推移

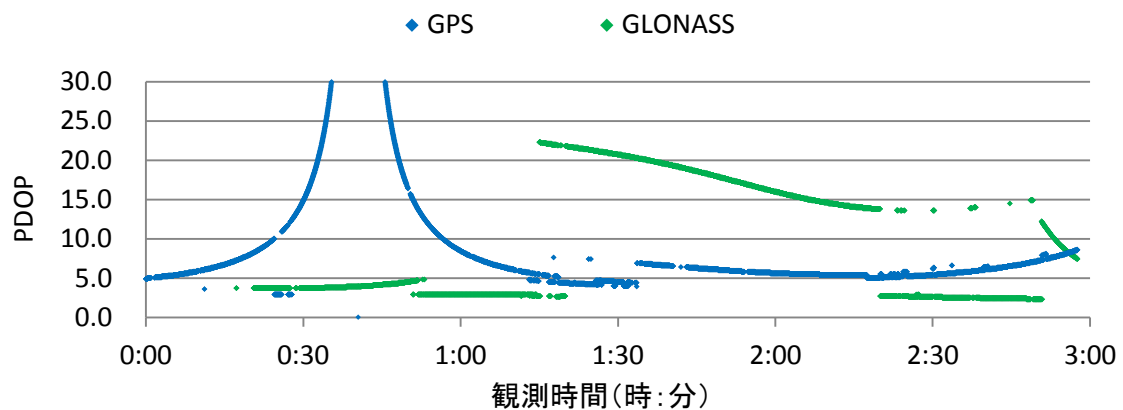


図 6-42 観測点 B4 におけるシナリオ 4 の PDOP の推移

以上と高い値で推移する傾向が見られた。しかしながら、シナリオ別に得られる解の種類と選択した衛星の種類を確認すると、0:20~0:30 の時間帯では GLONASS を、1:10~1:20 の時間帯では GPS を 1 機除去することで Float 解の取得となり、衛星配置が影響しているとは考えにくい。そこで、観測衛星数を衛星系別に確認すると、図 6-43 より Float 解を取得する時間帯で、GPS または GLONASS が 3 機以下となる傾向が見られた。観測点 B3 の検討結果より、シナリオ 4 の

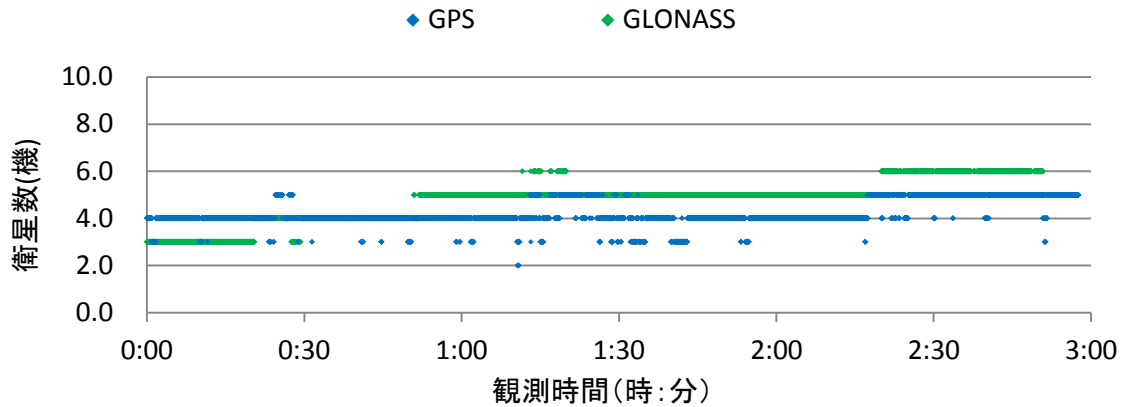


図 6-43 観測点 B4 におけるシナリオ 4 の衛星数の推移

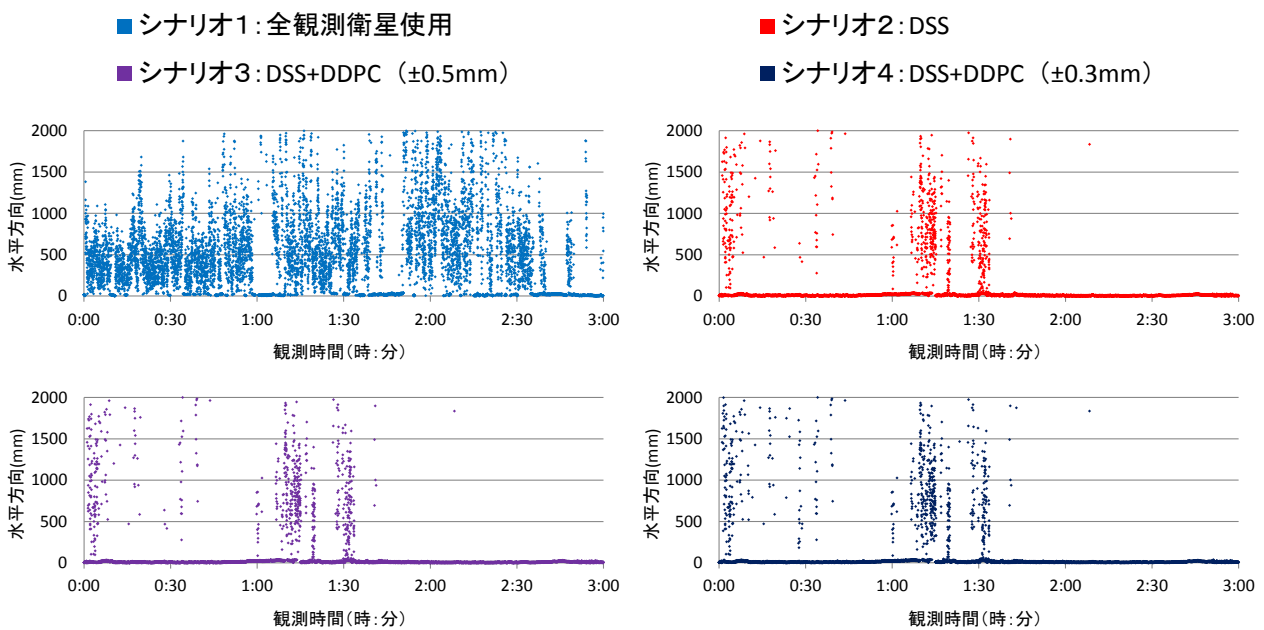


図 6-44 観測点 B4 における基線解析結果の時系列分布

Fix 率が低下した時間帯についても GLONASS が 3 機以下となる傾向が見られているため、解析に使用した衛星数が影響したものと思われる。GPS と GLONASS を併用したキネマティック解析に必要な衛星数は満たしているため、衛星除去によるサイクルスリップにより、整数不定性が正確に求められなかった可能性が考えられる。なお、1:30～1:40 の時間帯では、シナリオ 4 の Fix 率はシナリオ 3 に対して約 6% の向上が見られたが、選択により Fix 解が得られた時間帯の衛星系別の衛星数を確認すると、GPS、GLONASS とともに 4 機以上となる傾向が見られた。

次に、シナリオ別に得られた基線解析結果を確認した。図 6-44 に、シナリオ別の基線解析結果を示す。全観測衛星使用時の Float 解の分布を確認すると、観測点 B2、B3 と同様に 1m 以上の分布となることがわかるが、2:00 以降では分布がさらに大きくなることわかる。これは、図 6-39 で示した時間帯別の平均衛星数より、10 機以下と他の時間帯よりも少なくなる傾向が見られるため、その影響によるものと考えられる。衛星選択時のシナリオでは、Fix 率が 100% とな

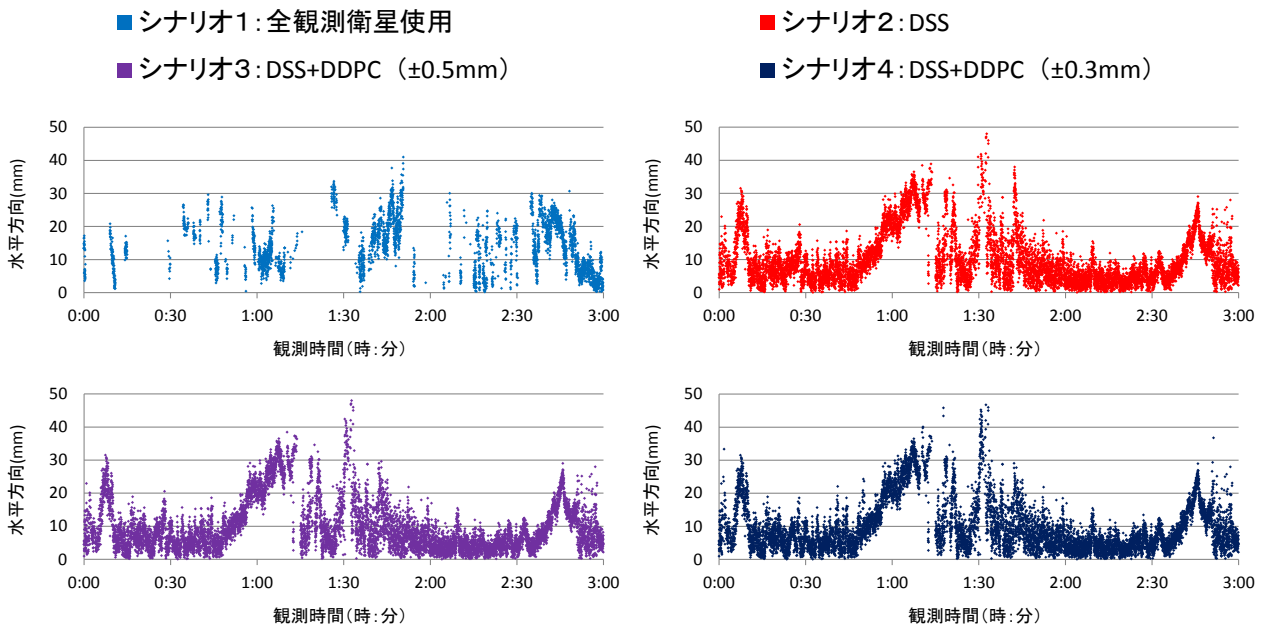


図 6-45 観測点 B4 における Fix 解の時系列分布

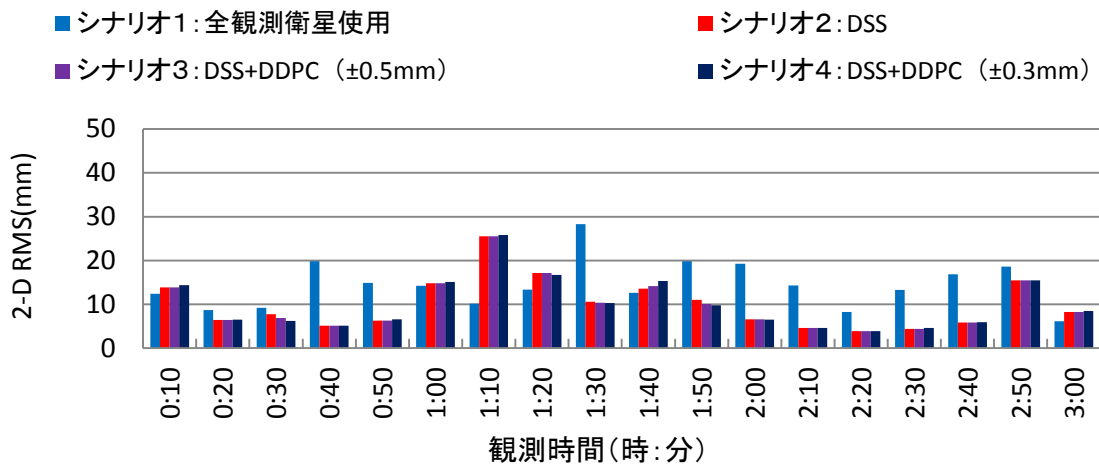


図 6-46 観測点 B4 における時間帯別の 2-D RMS 算出結果

らなかった時間帯で Float 解の取得が確認でき、基準値からの誤差は、全観測衛星を使用したシナリオと同様 1m 以上となることがわかる。Fix 解の分布結果を図 6-45 に示す。Fix 解の分布をシナリオ別に比較すると、全観測衛星使用では、継続した Fix 解の取得はほとんど確認できず、基準値からの誤差が 20mm 以上となる場合が多く確認された。一方、衛星選択時では、20mm 以内となる傾向が確認できるが、1:00～1:30、2:40～2:50 等の時間帯では、誤差が 20mm 以上となることがわかる。対象となる時間帯では、図 6-42 でも示したように PDOP 値が高くなる傾向にあるため、衛星配置による影響と思われる。Fix 解に対する 2-D RMS の算出結果をシナリオ別に図 6-46 に示す。衛星を選択することで、全観測衛星使用時よりも RMS 値が小さくなる時間帯が多く見られるが、先ほど示した時間帯では、RMS 値が高くなる傾向が見られ、取得した Fix 解の大半が 20mm 以上となる 1:00～1:10 の時間帯では、RMS 値も 20mm 以上となることがわ

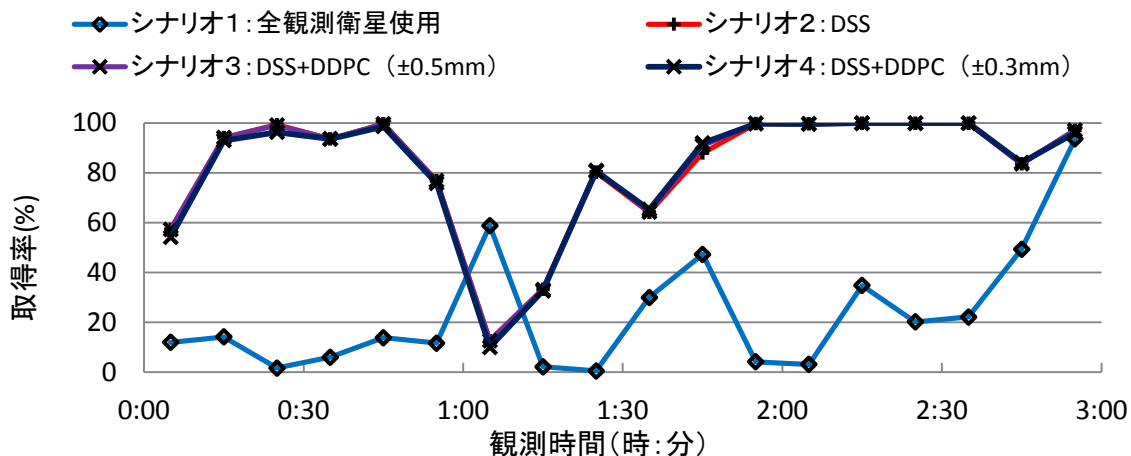


図 6-47 観測点 B4 における時間帯別に正確な Fix 解が得られた割合

かる。Fix 解の誤差が、概略の水平精度である 20mm 以内となる割合を図 6-47 より時間帯別に確認すると、1:00～1:30 の観測時間において取得率が 40%以下となる場合が見られ、概略精度内となる Fix 解の取得割合は低いことがわかる。観測点 B3 の検討結果でも述べたが、衛星配置の悪い環境下で衛星を選択した場合、Fix 解の取得率の低下に加え、解を取得しても誤差増加による信頼性の低下が想定される。

(4) 観測点 B5 : 西遮蔽観測点

西遮蔽環境下で得られた観測値を移動局として、衛星選択効果を検証した。図 6-48, 図 6-49 に DSS と DDPC による GPS と GLONASS のマルチパス検知結果を示す。GPS の検知結果を確認すると、観測点 B4 と同様に 1 つ以上の受信電波が基準値外となり、観測時間に関わらずマルチパスの影響を常に受けていることがわかる。GLONASS については、0:40~1:40 の時間帯について全ての衛星電波が基準値内となる傾向が見られた。

図 6-50 に、シナリオ別の Fix 解の取得割合を時間帯別に示す。全観測衛星使用時の Fix 解の

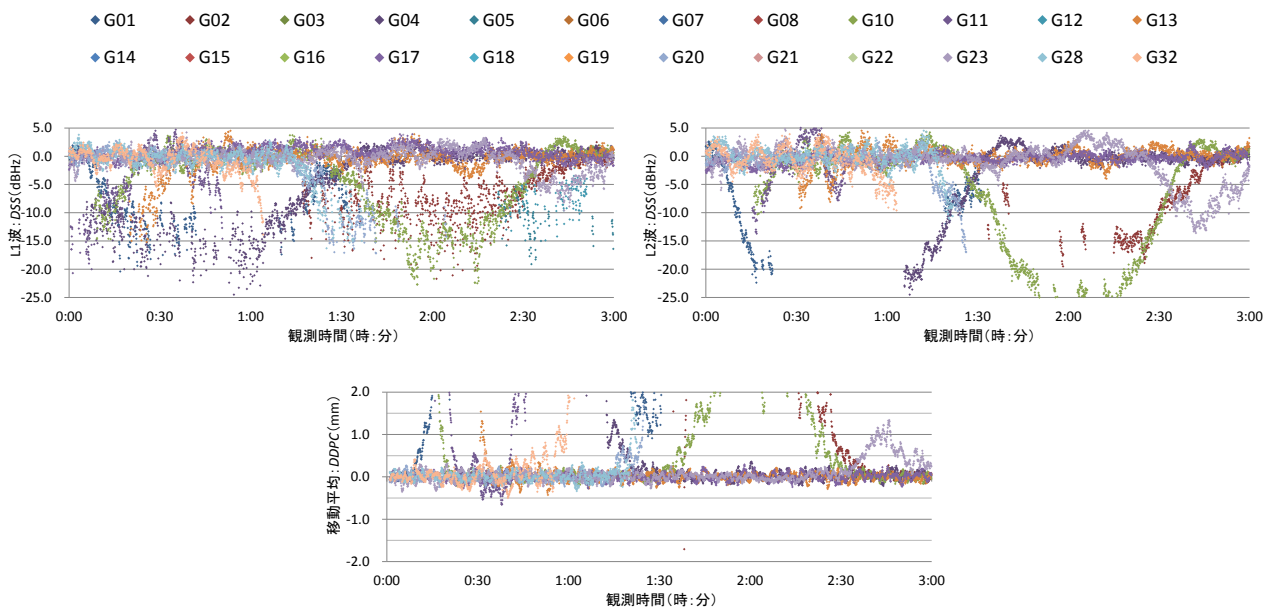


図 6-48 観測点 B5 における GPS のマルチパス検知結果

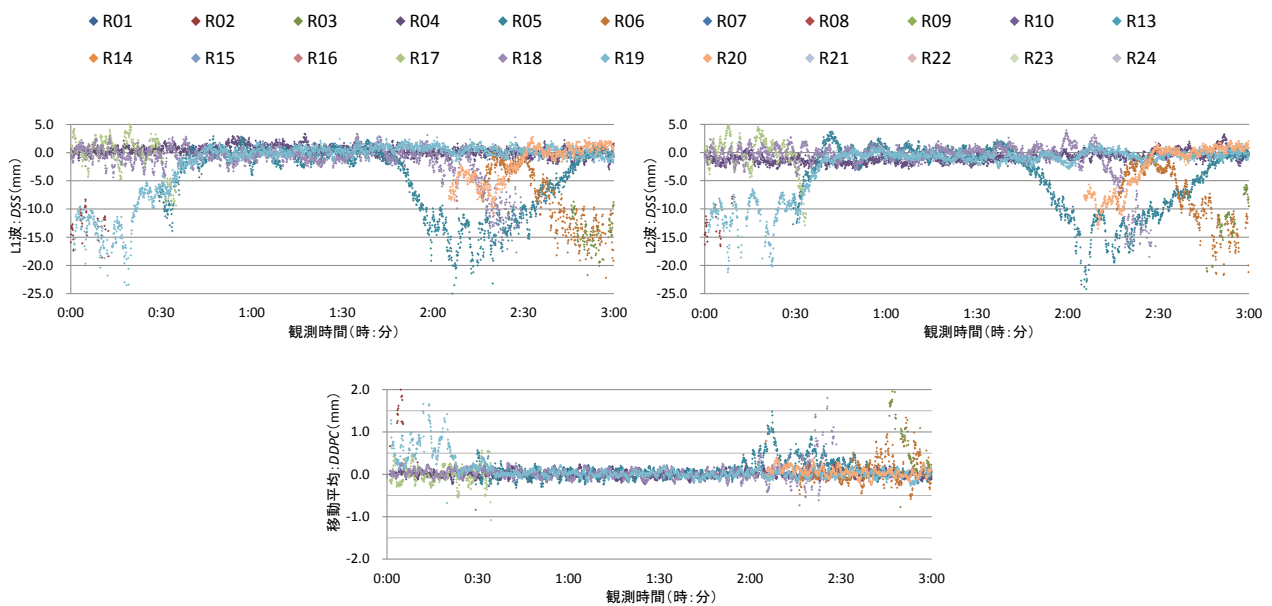


図 6-49 観測点 B5 における GLONASS のマルチパス検知結果

取得率を確認すると、0:30～1:30の時間帯でFix解の取得が確認され、2:30以降にまたFix解が得られる傾向が見られた。DSSとDDPCによるマルチパス検知結果と比較すると、Fix解の取得率が0%となる時間帯よりも基準値外となる衛星電波が少なく、GPSとGLONASSを合わせて該当電波は1機程度であった。よって、マルチパスの影響を含む受信電波の数が影響したものと想定される。衛星選択時のシナリオでは、1:50～2:20の時間帯でFix率の低下が見られるが、取得率が100%となる時間帯が連続する結果が得られた。加えて、1:30～1:40の時間帯では、DDPCによる指標を加えることで、DSSのみの場合よりもFix率が約8%向上した。

次に、衛星選択によりFix率の低下が見られた時間帯について確認した。先ほど述べた1:50～2:20の時間帯について衛星数を確認すると、図6-51より、最小衛星数は7機以上となり基線解析時の必要数を満たすことがわかる。よって、観測点B3、B4と同様にシナリオ4による基線解析を実施した。しかし、図6-52に示すように、シナリオ3によるFix解の取得率と差はほとんど見られなかった。GPSとGLONASSの衛星系別のPDOPと衛星数についても確認すると、図6-53より、1:00～1:50の観測時間ではGLONASS、1:30～2:30の観測時間ではGPSのPDOPが悪化する傾向が見られ、図6-54より、1:50～2:20の観測時間でGLONASSの衛星数が3機以

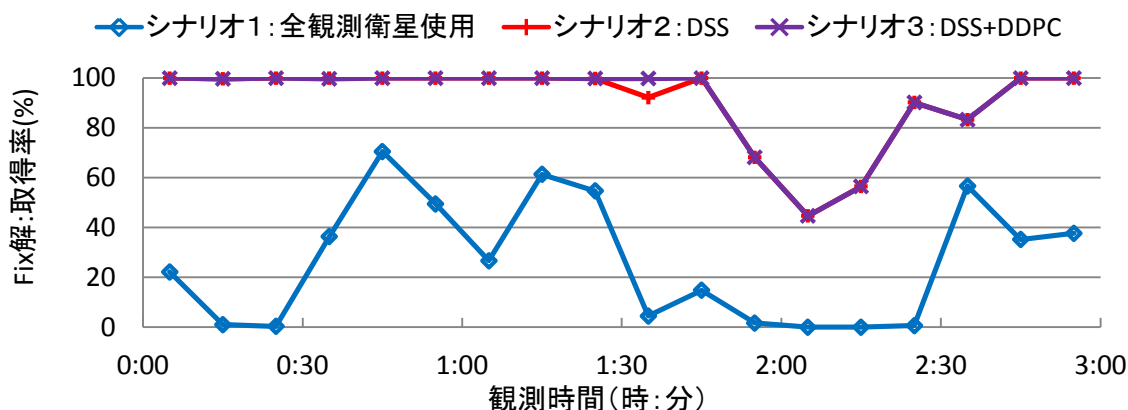


図 6-50 観測点 B5 における時間帯別の Fix 解取得率

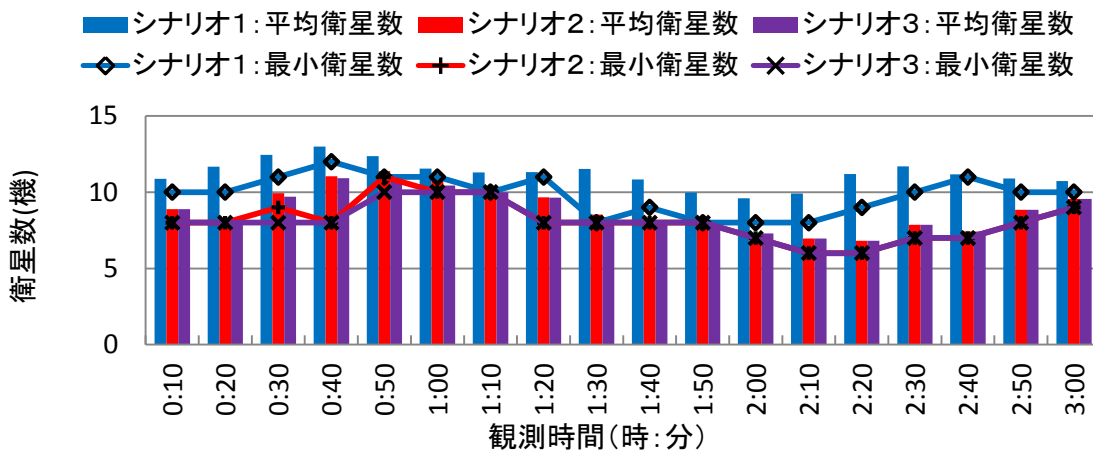


図 6-51 観測点 B5 における時間帯別の平均衛星数と最小衛星数

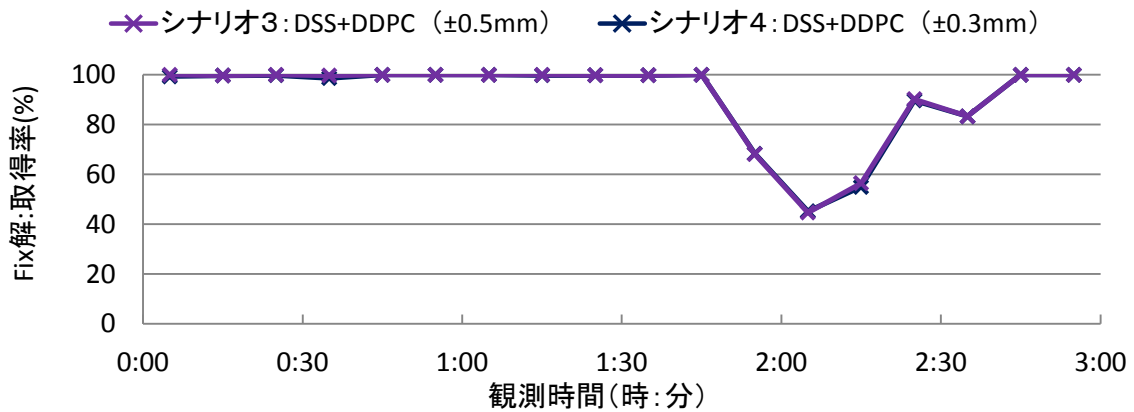


図 6-52 観測点 B5 における DDPC 基準値変更による Fix 解取得率

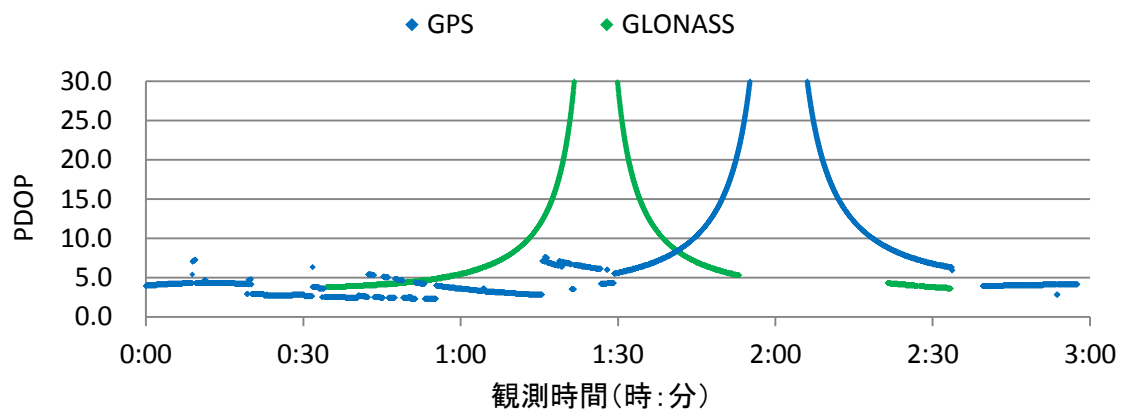


図 6-53 観測点 B5 におけるシナリオ 4 の PDOP の推移

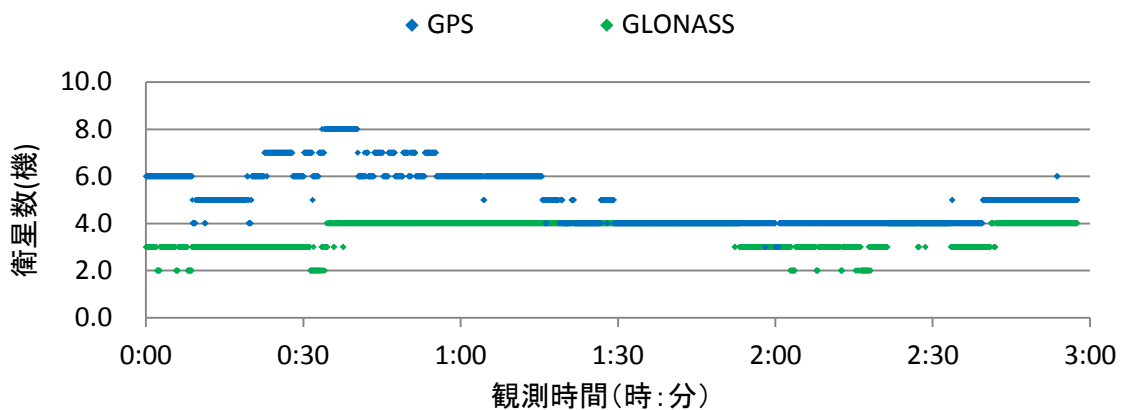


図 6-54 観測点 B5 におけるシナリオ 4 の衛星数の推移

下となることわかる。衛星選択時のシナリオにおいて、他の時間帯と比較し Fix 解が低下した 1:50～2:40 の観測時間と、衛星選択により GLONASS が 3 機以下となる時間帯については一致しており、観測点 B3, B4 についても、GPS または GLONASS が 3 機以下となった際に Float 解の取得が確認されることから、解析に使用した衛星数が影響していることがわかる。

続いて、シナリオ別に得られた基線解析結果を確認した。図 6-55 に、シナリオ別の基線解析

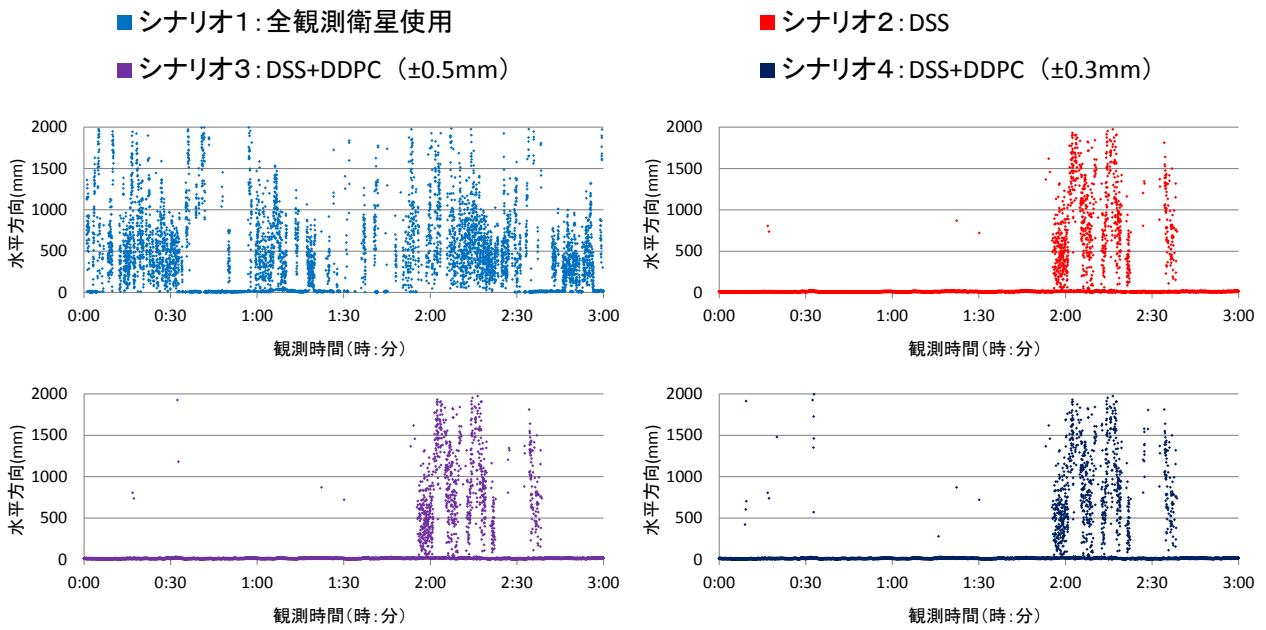


図 6-55 観測点 B5 における基線解析結果の時系列分布

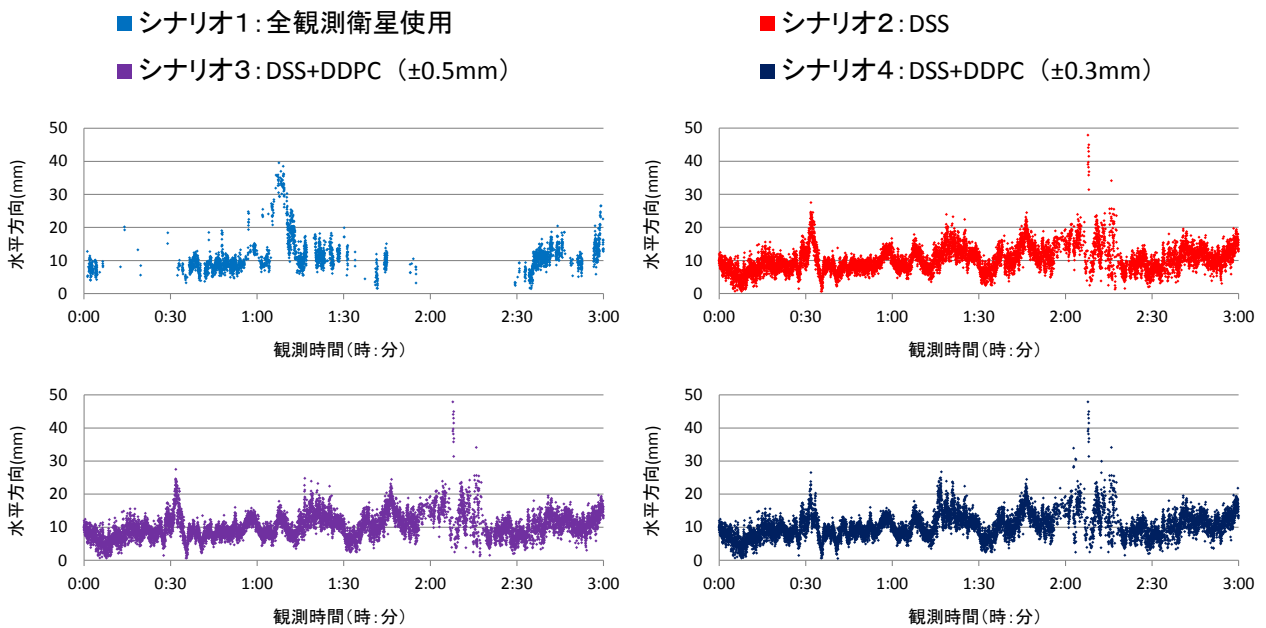


図 6-56 観測点 B5 における Fix 解の時系列分布

結果を示す。全観測衛星使用時の Float 解の分布を確認すると、他の観測点と同様に基準値から 1m 程度の誤差となることがわかる。また、シナリオ別に Float 解の分布と比較すると、観測時間 2:00~2:30 において、取得する Float 解の分布は衛星選択時のほうが大きくなる傾向が見られた。これは、図 6-53 で示した PDOP の傾向より、衛星選択時の DOP が悪化するためその影響によるものと考えられる。Fix 解の分布結果を図 6-56 に示す。Fix 解の分布をシナリオ別に比較すると、1:00~1:10 の観測時間において、全観測衛星使用時では基準値からの誤差が 20mm 以上となることがわかるが、衛星選択時のシナリオでは 20mm 以内となり Fix 解の精度が向上して

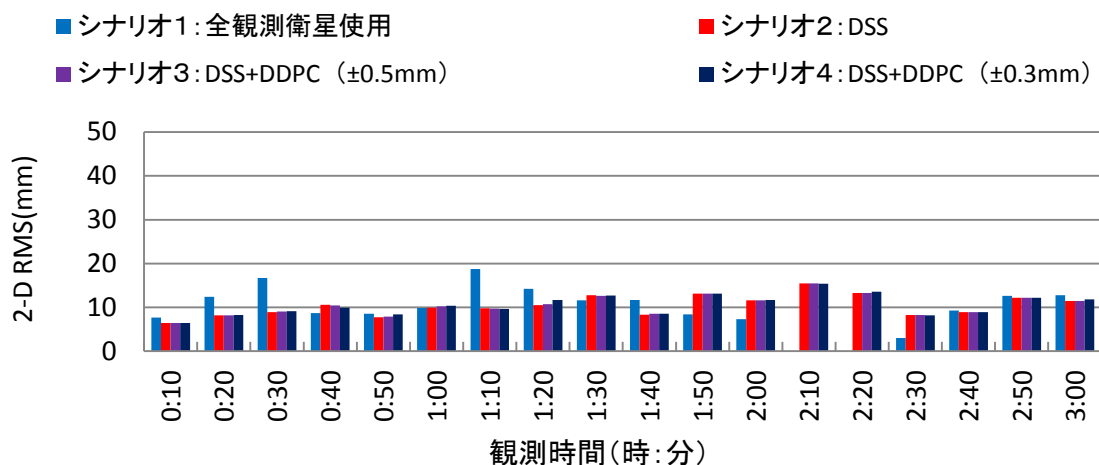


図 6-57 観測点 B5 における時間帯別の 2-D RMS 算出結果

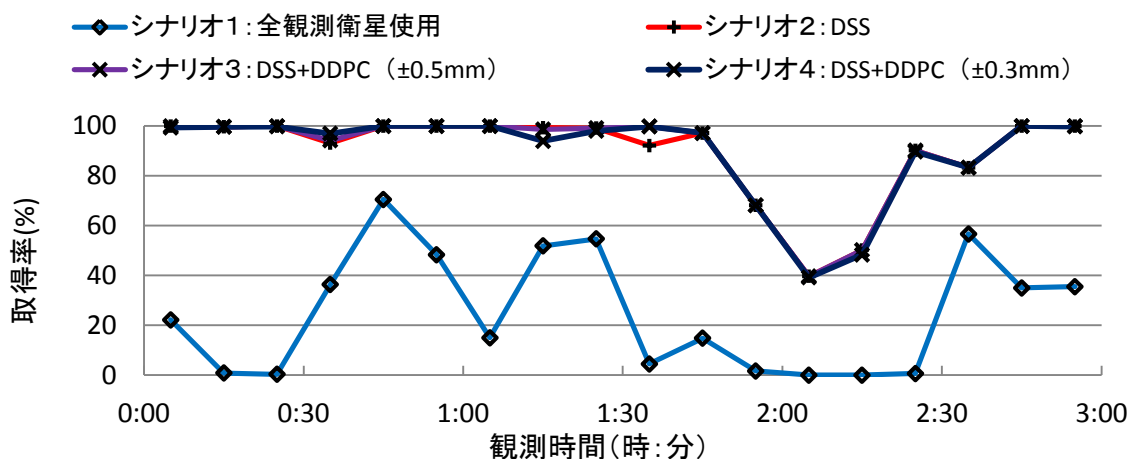


図 6-58 観測点 B5 における時間帯別に正確な Fix 解が得られた割合

いることがわかる。一方、衛星選択時のシナリオにおいて、Fix 率の低下が見られた 1:50~2:40 の観測時間では、得られる Fix 解が 20mm 以上の誤差となる場合が確認できるが、これは、図 6-53 で示したように PDOP 値の高くなるため、衛星配置が影響したものと思われる。Fix 解に対する 2-D RMS の算出結果をシナリオ別に図 6-57 に示す。衛星選択時の Fix 解の分布は、先ほど示した Fix 解の低下が見られた時間帯を除き、基準値から 20mm 以内で推移する傾向が見られており、RMS 値についても 10mm 以内と高精度な測位解が得られていることがわかる。Fix 率の低下が見られた 1:50~2:40 の時間帯については、1:50~2:20 に得られた Fix 解について、RMS 値が 10mm 以上となり、他の時間帯よりも分布が大きくなることがわかる。Fix 解の誤差が、概略の水平精度である 20mm 以内となる割合を図 6-58 より確認すると、2:00~2:20 の時間帯で、Fix 解取得率に対して約 5%の低下が確認された。観測点 B4 で確認された取得率の大幅な低下は見られないが、衛星配置の悪い環境下では、Fix 解を取得できても精度が低下する可能性がある。

(5) 観測点 B6 : 東西遮蔽観測点

東西遮蔽環境下で得られた観測値を移動局として、衛星選択効果を検証した。図 6-59, 図 6-60 に DSS と DDPC による GPS と GLONASS のマルチパス検知結果を示す。GPS, GLONASS ともに、指標の基準値外となる電波が常に複数存在していることがわかる。他の観測点と異なり 2 方向が遮蔽されたことで不可視衛星が増加し、回折波を多く受信したものと想定される。

図 6-61 に、シナリオ別の Fix 解の取得割合を時間帯別に示す。全観測衛星使用時では、Fix 率が 0% となる時間帯が多く確認でき、Fix 解が全観測時間を通してほとんど取得されなかった。マ

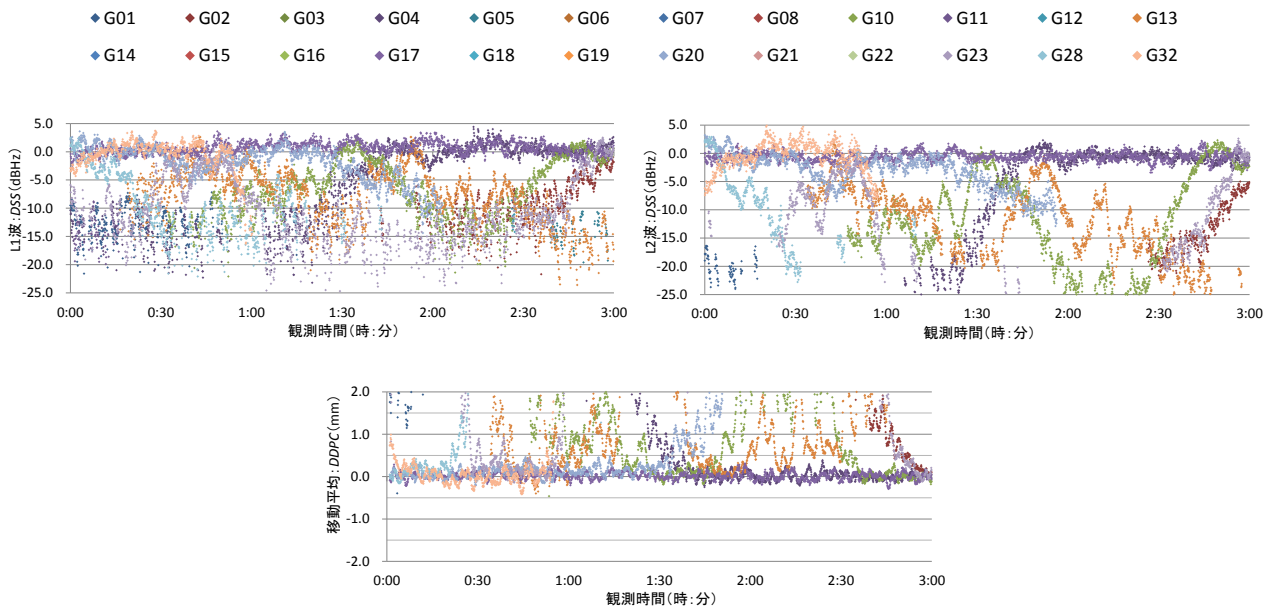


図 6-59 観測点 B6 における GPS のマルチパス検知結果

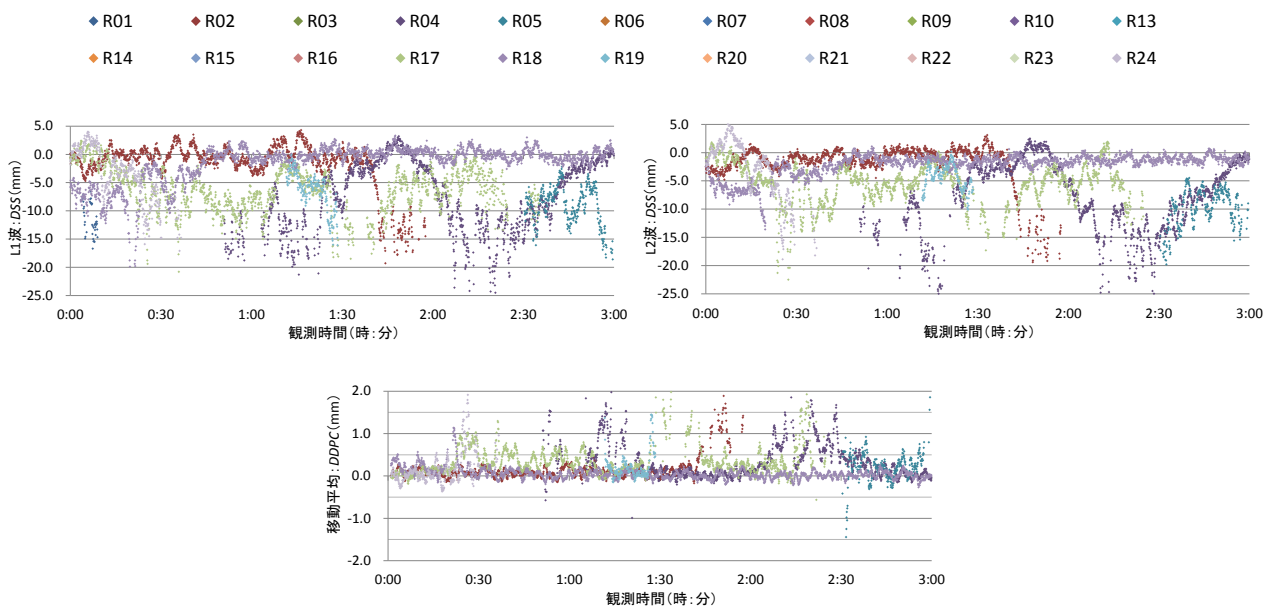


図 6-60 観測点 B6 における GLONASS のマルチパス検知結果

マルチパスの影響を受ける電波を基線解析に複数使用したためと考えられる。一方、マルチパス検知結果より衛星の選択を行った場合についても、Fix 率が 0% となる時間帯が確認された。図 6-62 にシナリオ別の平均衛星数と最小衛星数を時間帯別に示す。シナリオ 2, 3 の最小衛星数を確認すると、4~5 機で推移する傾向が見られており、解析に必要な衛星数の不足が Fix 解の取得率の低下を生じたものと考えられる。

次に、シナリオ別に得られた基線解析結果を確認した。図 6-63 に、シナリオ別の基線解析結果を示す。シナリオ毎の Float 解の分布を確認すると、衛星選択に関わらず、基準値から 1m 以上の誤差となることがわかる。また、他の観測点と比較し分布が大きくなる傾向が見られるが、これは、先ほどの Fix 解の取得率の検討でも述べたように、マルチパス、および衛星数による影響と考えられる。Fix 解の分布結果を図 6-64 に示す。シナリオに関わらず、全時間帯で基準値から 20mm 以上となる分布が確認でき、一部の Fix 解は 1m 以上の誤差となる場合が確認された。また、取得される Fix 解は Float 解と交互に得られており、継続した高精度測位が困難であった。Fix 解に対する 2-D RMS の算出結果をシナリオ別に図 6-65 に示す。衛星選択時のシナリオより、Fix 解の取得率が 90% 以上となる 2:50~3:00 の時間帯では、10mm 以下の RMS 値となることが

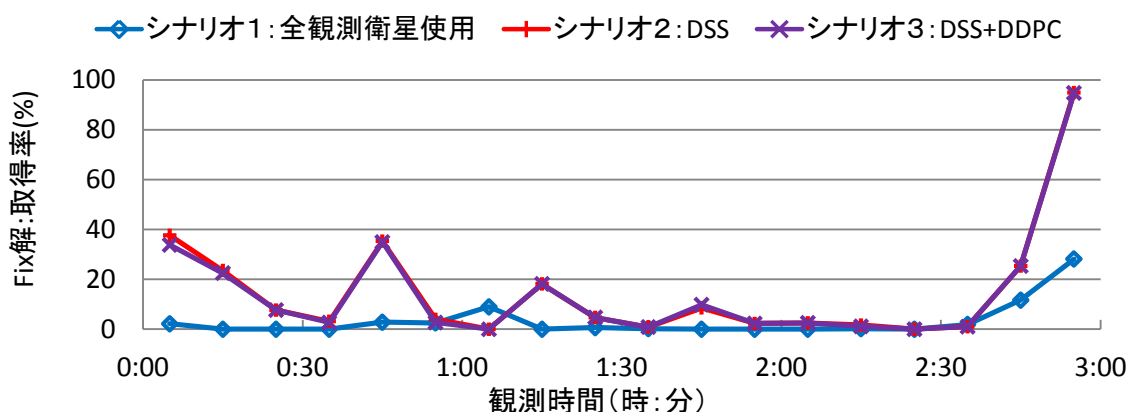


図 6-61 観測点 B6 における時間帯別の Fix 解取得率

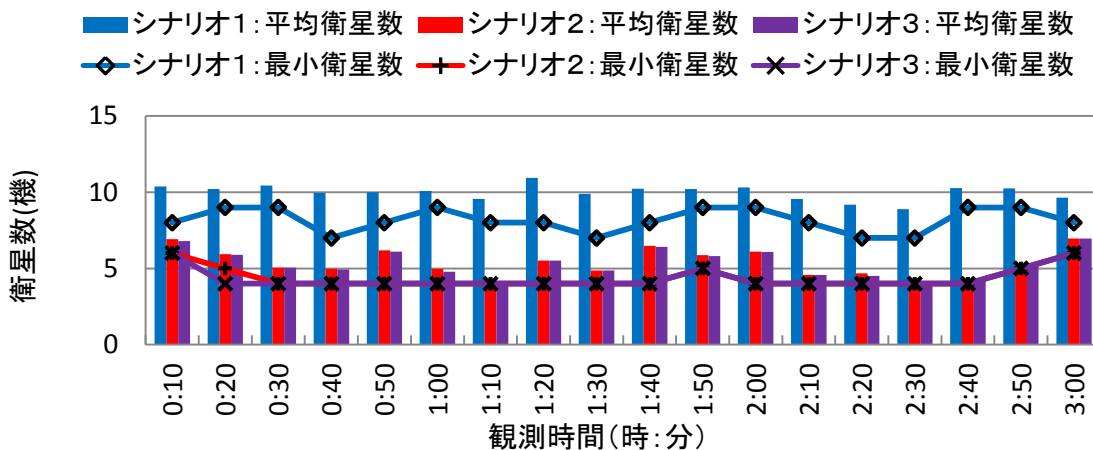


図 6-62 観測点 B6 における時間帯別の平均衛星数と最小衛星数

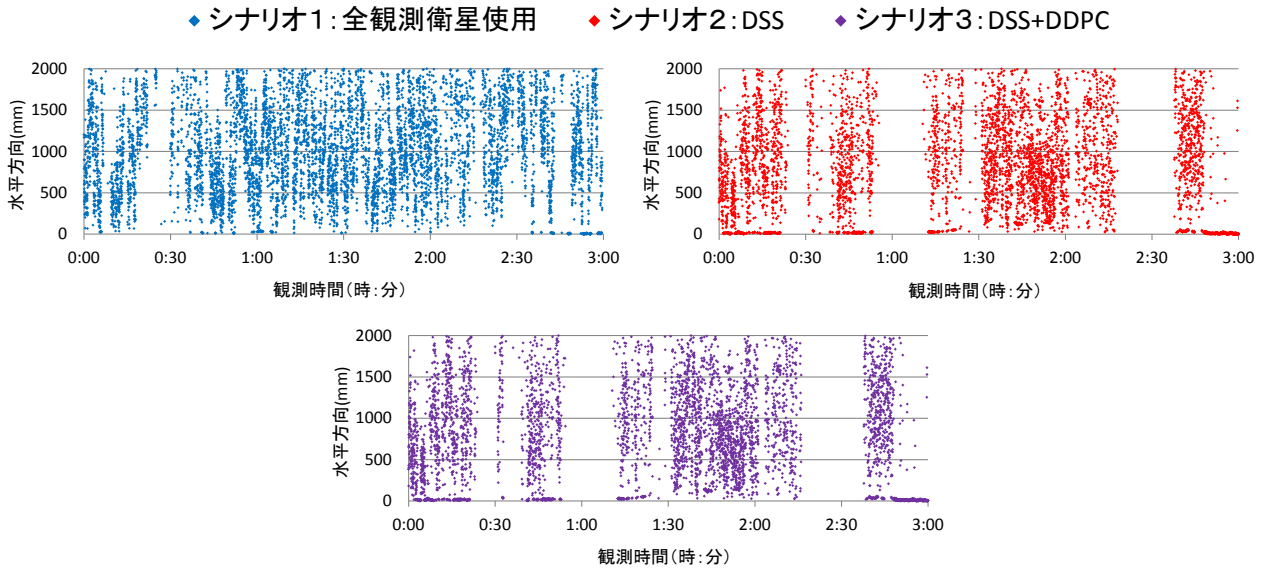


図 6-63 観測点 B6 における基線解析結果の時系列分布

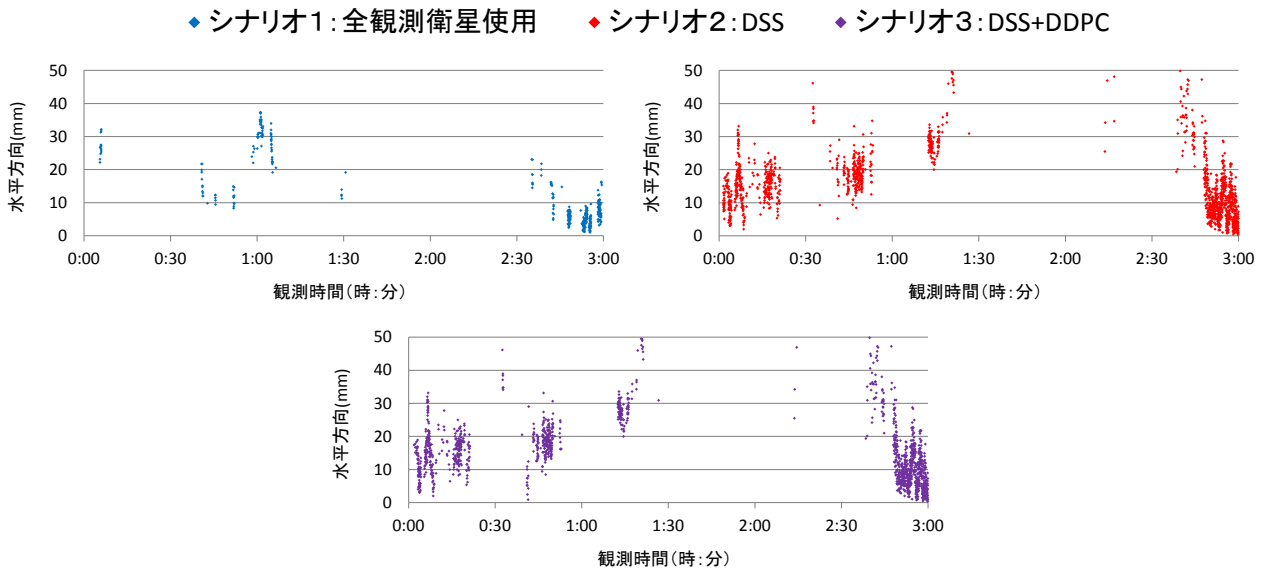


図 6-64 観測点 B6 における Fix 解の時系列分布

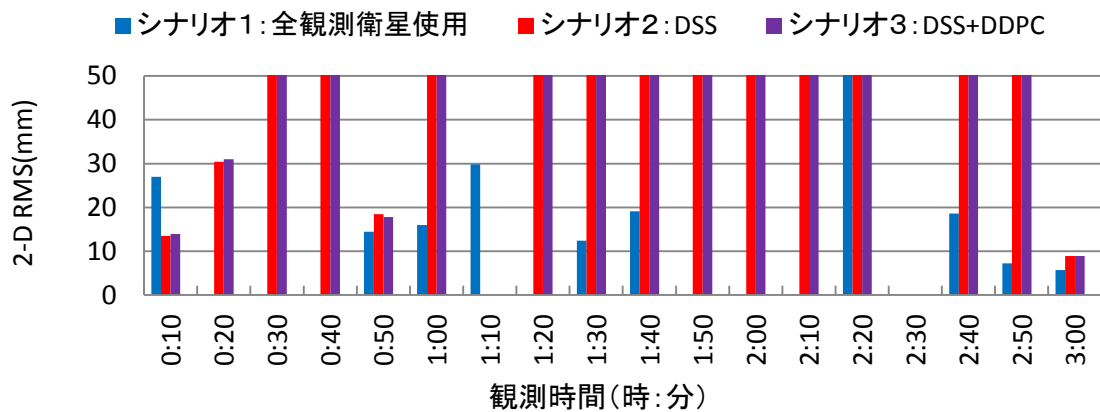


図 6-65 観測点 B6 における時間帯別の 2-D RMS 算出結果

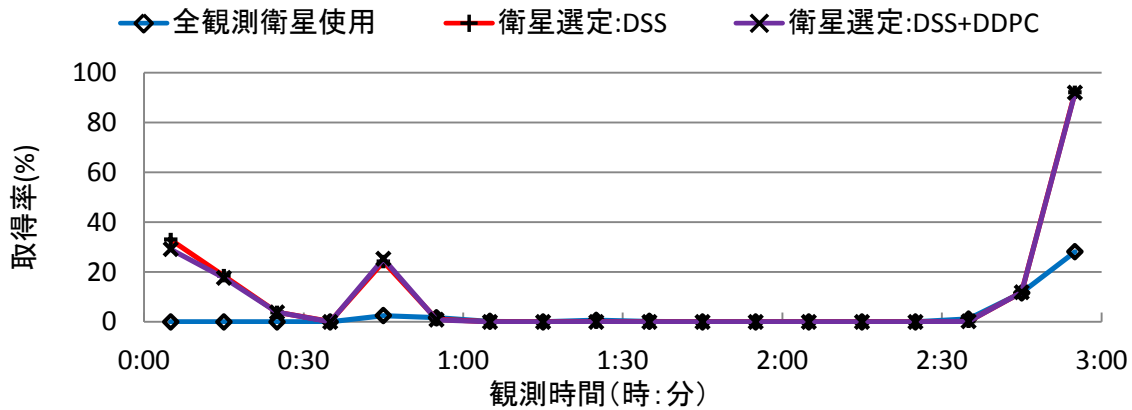


図 6-66 観測点 B6 における時間帯別に正確な Fix 解が得られた割合

わかるが、その他の時間帯では 20mm 以上となる場合が見られ、不正確な Fix 解を取得していることがわかる。Fix 解の誤差が、概略の水平精度である 20mm 以内となる割合を図 6-66 に示す。衛星選択時に 5 衛星以下となる 1:00~2:30 の時間帯について取得率は 0% となり、6 衛星以上となる 2:50~3:00 の時間帯では取得率は 90% 以上となることがわかる。2:50~3:00 の時間帯では、GPS が 3~4 機、GLONASS が 3 機の構成となり、観測点 B3, B4 で Fix 解が低下した衛星条件となるが、同時帯で選択による衛星数の変化はほとんどなく、サイクルスリップによる影響が生じなかったものと思われる。

これらの結果から、解析に使用できる衛星数が少ない場合、取得される Fix 解について不正確な解が含まれることがわかる。観測点 B6 では、他の観測点と比較し天空率が最も小さく、東西から飛来する衛星も遮蔽されるため、衛星数が不足しやすい環境である。衛星の選択により 5 衛星以下となる場合が長時間確認されたため、GPS と同電波を送信する QZSS を加えることで改善する可能性がある。

(6) 観測点 B7 : 斜め遮蔽観測点

斜め遮蔽環境下で得られた観測値を移動局として、衛星選択効果を検証した。図 6-67, 図 6-68 に DSS と DDPC による GPS と GLONASS のマルチパス検知結果を示す。GPS の検知結果を確認すると、0:00~1:30 の時間帯では基準値外となる受信電波が複数見られた。一方、GLONASS については、0:30~2:00 の時間帯で基準値外となる受信電波が観測値に複数含まれていることがわかる。

図 6-69 に、シナリオ別の Fix 解の取得割合を時間帯別に示す。全観測衛星使用時では、先ほ

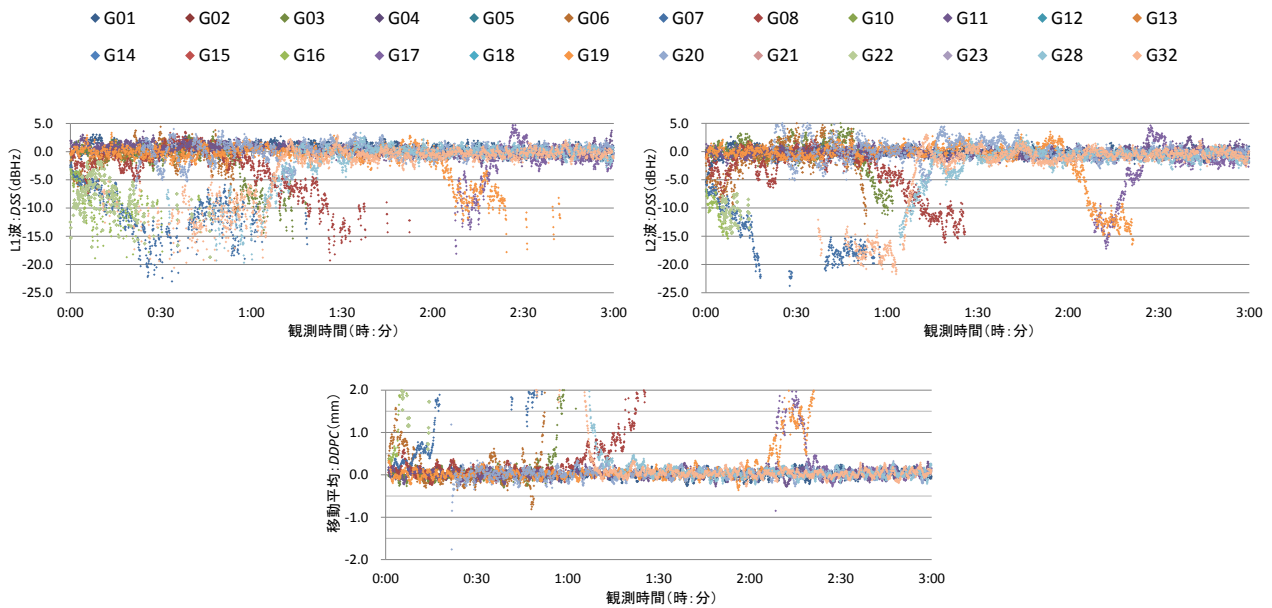


図 6-67 観測点 B7 における GPS のマルチパス検知結果

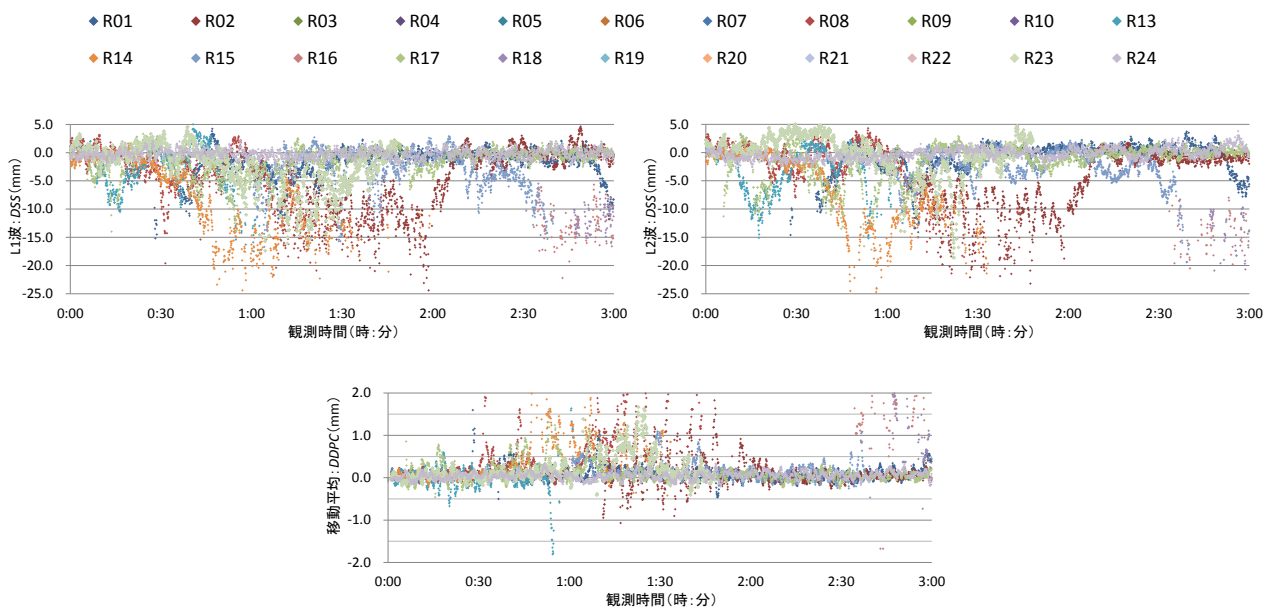


図 6-68 観測点 B7 における GLONASS のマルチパス検知結果

ど述べた指標の基準値外となる時間帯において Float 解の取得が見られ、Fix 解の取得率が低下する傾向が見られた。一方、衛星選択時のシナリオでは、観測時間 0:50~1:20 において Fix 率の低下が見られるものの、他の時間帯で 90%以上となる傾向が見られ、時間帯に関わらず実用レベルで測位できるものと想定される。

次に、衛星選択により Fix 率の低下が見られた時間帯について確認した。Fix 率が低下した時間帯の衛星数を図 6-70 より確認すると、観測時間 1:00~1:10 を除き最小衛星数が 6 機以上と解析時の必要数を満たしているため、マルチパスの影響を受ける受信電波を除去しきれなかった可能性がある。よって他の観測点と同様、DDPCの選択基準を±0.3mm としたシナリオ 4 による基線解析を実施した。図 6-71 にシナリオ 3, 4 の Fix 解取得率を示す。シナリオ 3 の最小衛星数が 5 機となる 1:00~1:10 の時間帯では、シナリオ 4 の Fix 率はシナリオ 3 に対して約 17%の低下が見られた。一方、最小衛星数 7 機の 1:10~1:20 の時間帯では、シナリオ 3 に対して約 19%の向上が見られ、シナリオ 4 の Fix 率が約 100%となった。このときの解析衛星数を調べると、図 6-72 より、1:00~1:10 の時間帯で、シナリオ 4 の衛星数が 5 機以下となる場合が見られ、解析時の必要数に達していないことがわかる。よって、シナリオ 4 における Fix 率の低下は、衛星

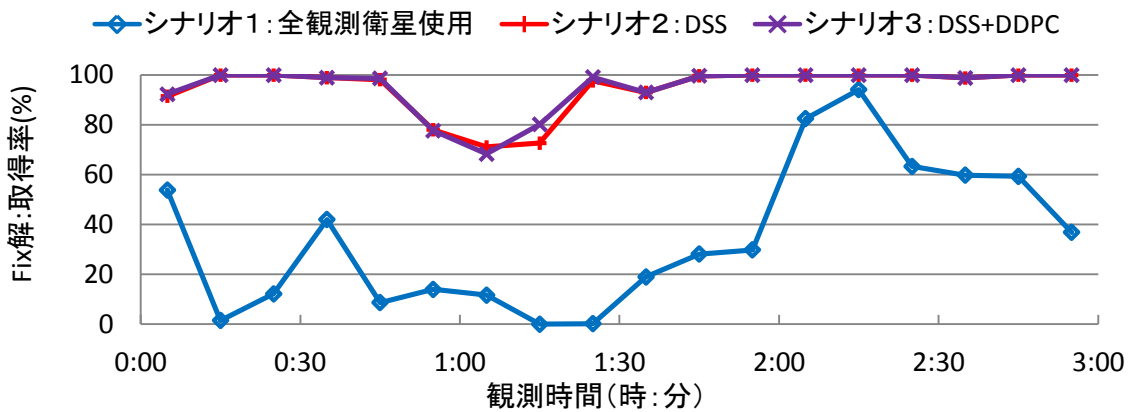


図 6-69 観測点 B7 における時間帯別の Fix 解取得率

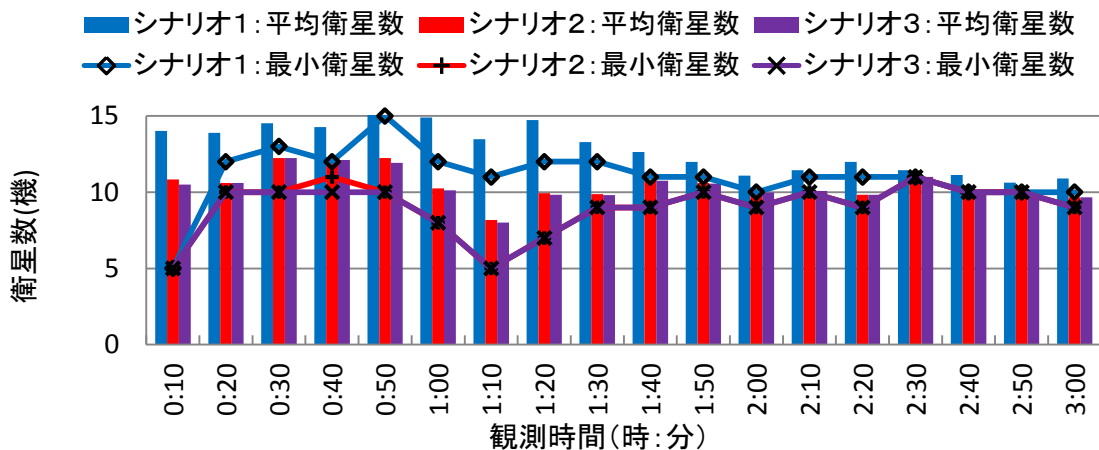


図 6-70 観測点 B7 における時間帯別の Fix 解取得率

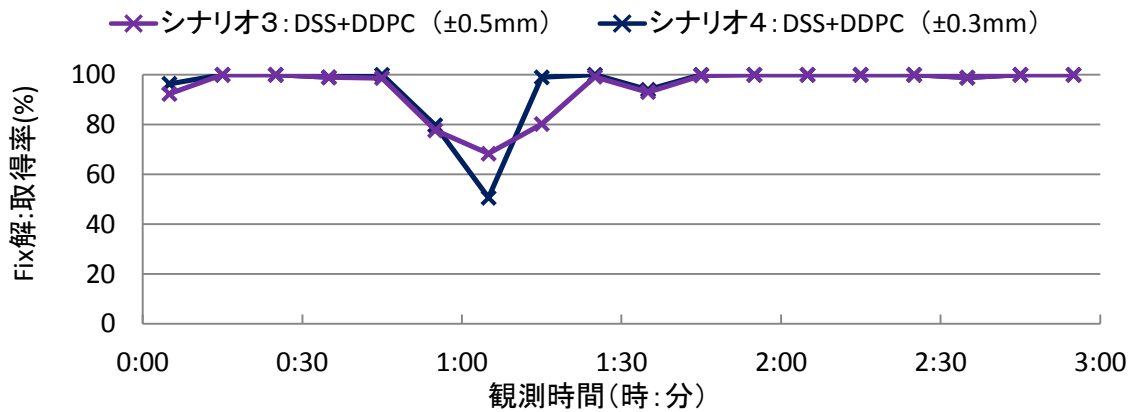


図 6-71 観測点 B7 における DDPC 基準値変更による Fix 解取得率

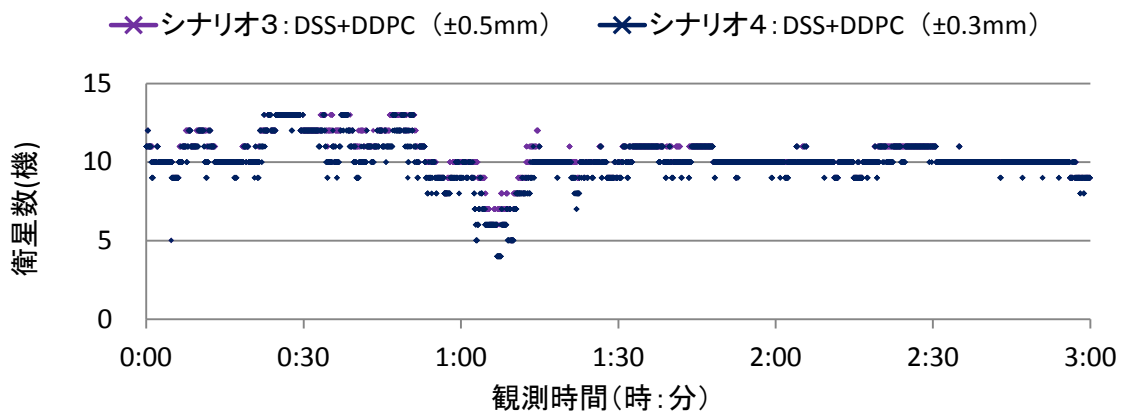


図 6-72 観測点 B7 におけるシナリオ 3, 4 の衛星数の推移

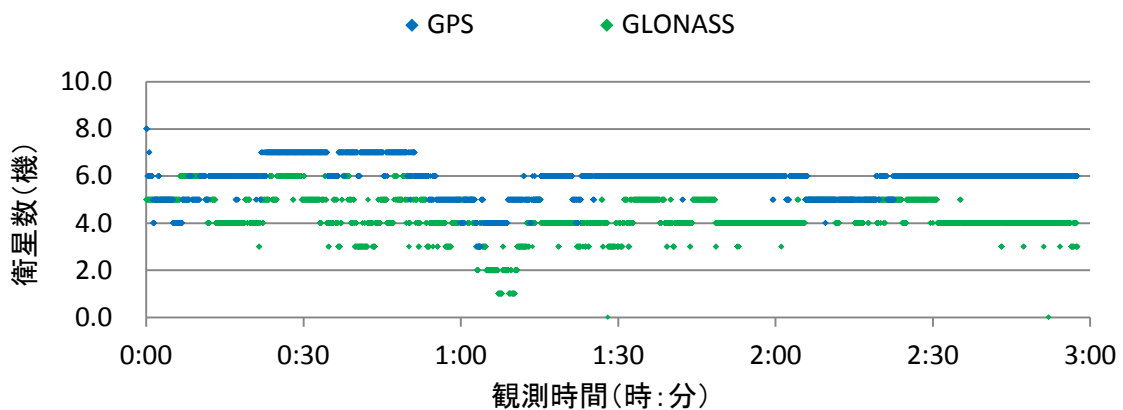


図 6-73 観測点 B7 におけるシナリオ 4 の衛星数の推移

数によるものと思われる。なお、Fix 率が向上した 1:10～1:20 の時間帯では、シナリオ 4 の衛星数は 6～10 機の推移となり、基線解析に必要な衛星数を満たしていることがわかる。GPS と GLONASS の衛星系別の衛星数についても確認すると、図 6-73 より、1:00～1:10 の時間帯では GPS は 4 機、GLONASS は 2～3 機で推移する傾向が見られるが、1:10～1:20 の時間帯では GPS は 5～6 機、GLONASS は 3～4 機で推移する傾向が確認できる。GPS 単体でも基線解析に必要な

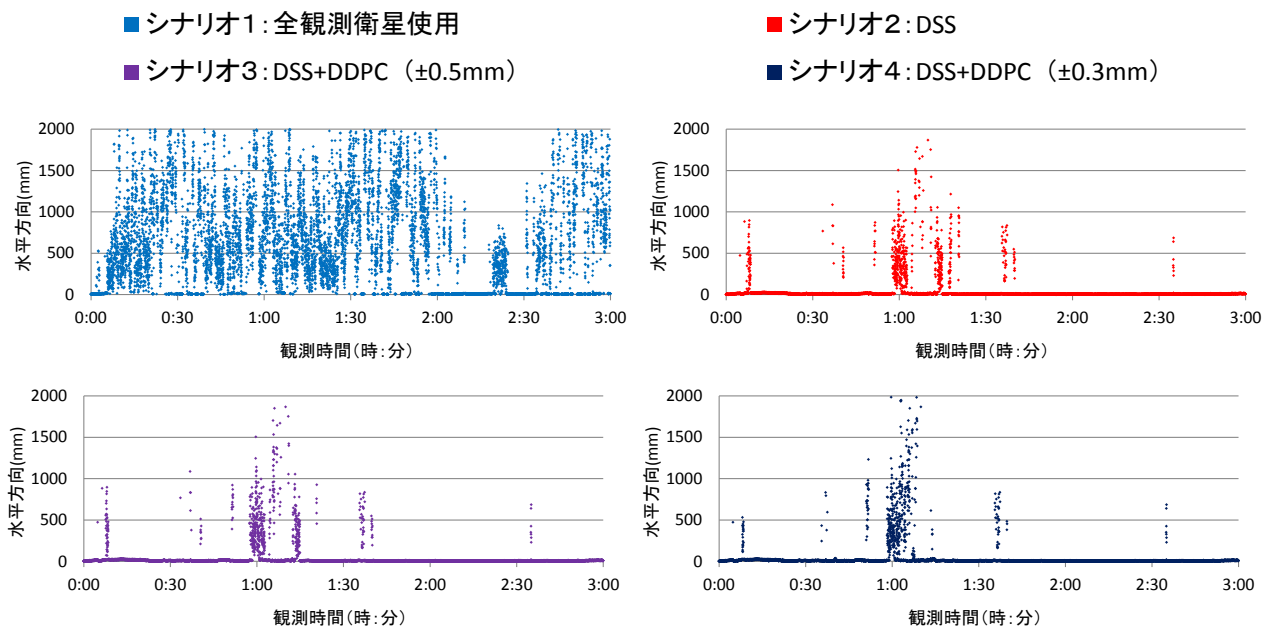


図 6-74 観測点 B7 における基線解析結果の時系列分布

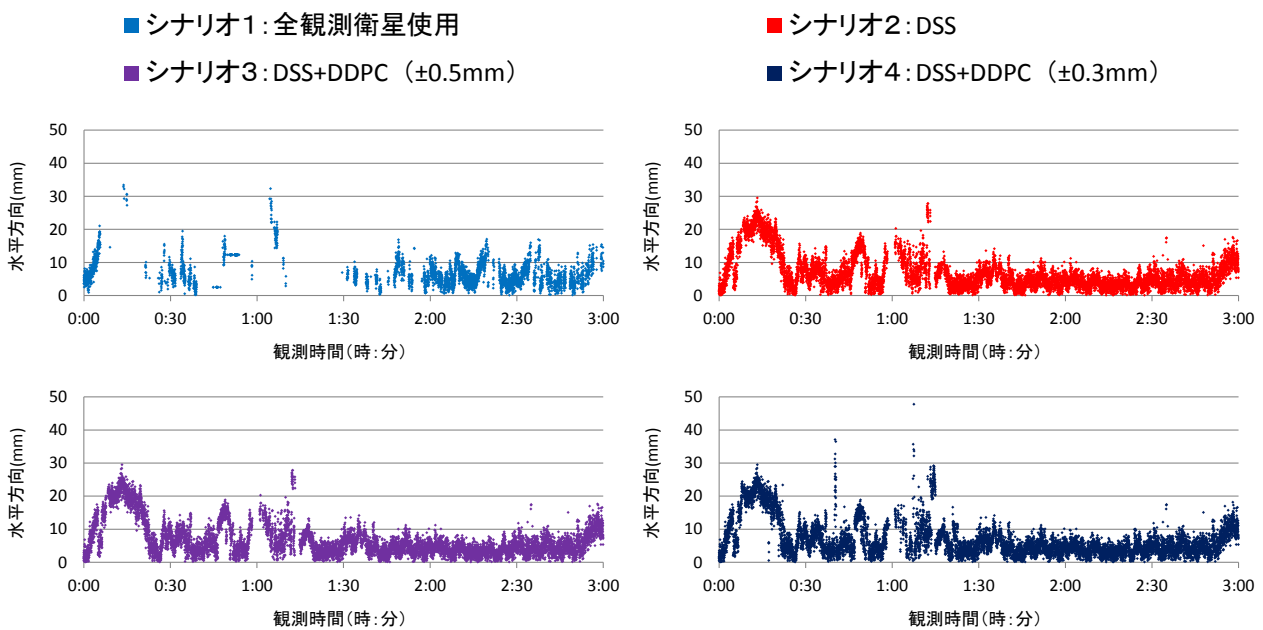


図 6-75 観測点 B7 における Fix 解の時系列分布

な衛星数が得られているため、衛星を選択しても Fix 解を安定して得られた可能性が考えられる。

続いて、シナリオ別に得られた基線解析結果を確認した。図 6-74 に、シナリオ別の基線解析結果を示す。全観測衛星使用では、Fix 解の取得率が 80%以上となる 2:00~2:20 の時間帯では、Float 解の誤差は 1m 以下となる傾向が確認でき、他の時間帯よりも分布が小さくなることがわかる。一方、衛星選択時のシナリオについては、シナリオ 4 にて Fix 率が向上した 1:10~1:20 の時間帯で大きな分布がないことがわかる。また、Float 解の分布についても、1:00~1:10 の時間帯を除き誤差は 1m 以内となることがわかる。Fix 解の分布結果を図 6-75 に示す。1:30 以降に

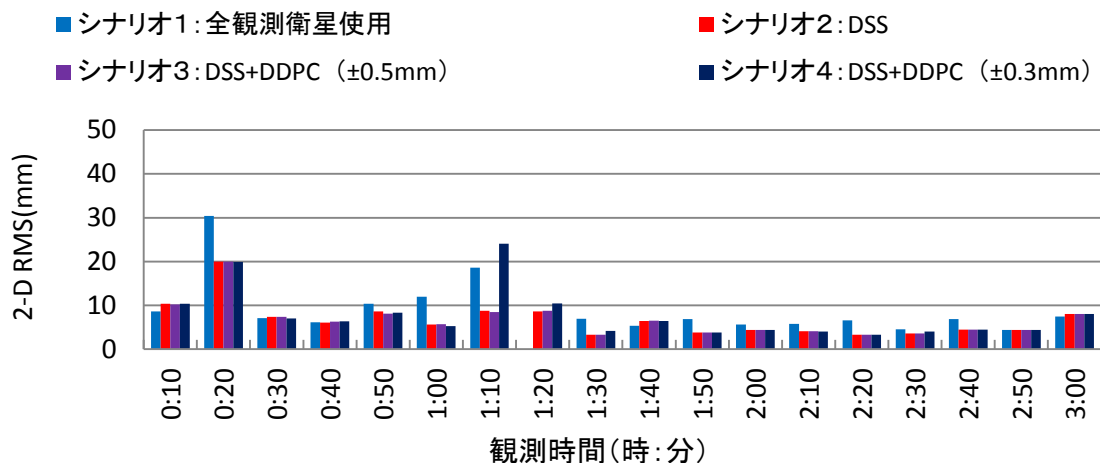


図 6-76 観測点 B7 における時間帯別の 2-D RMS 算出結果

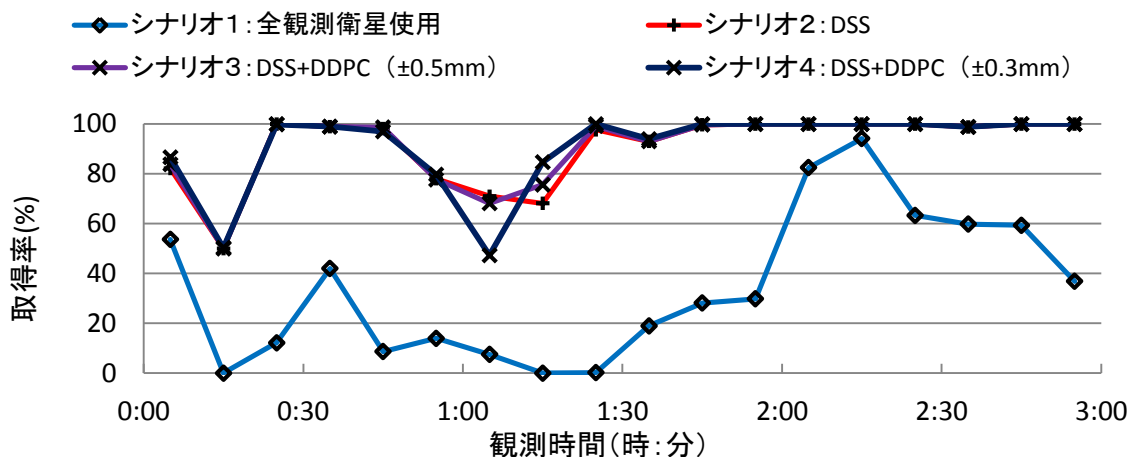


図 6-77 観測点 B7 における時間帯別に正確な Fix 解が得られた割合

取得される Fix 解については、シナリオに関わらず 20mm 以内の分布となることがわかる。0:00～1:30 の時間帯では、30mm 以上となる分布が確認されたが、基線解析に必要な衛星数は得られているため、衛星配置の悪化によるものと推察される。Fix 解に対する 2-D RMS の算出結果をシナリオ別に図 6-76 に示す。Fix 解の分布が 20mm 以内となる 1:30 以降の時間帯では、シナリオに関わらず RMS 値が 10mm 以内となることがわかる。シナリオ別の比較では、衛星の選択により Fix 率が低下した 1:00～1:10 のシナリオ 4 において、RMS 値が高くなる傾向が確認できる。Fix 解の誤差が、概略の水平精度である 20mm 以内となる割合を図 6-77 に示す。シナリオ 4 にて、衛星選択により Fix 率が約 100%となった 1:10～1:20 の時間帯で、取得率が 85%に低下する傾向が見られた。衛星選択直後に得られた解について、基準値から 20mm 以上の分布となる傾向が確認されたため、整数不定性が正確に求められなかった可能性が考えられる。

これらの結果から、衛星選択により解析に使用できる衛星数が少なくなる場合、Fix 率の低下に加え、取得される解について不正確な解が含まれることがわかる。この傾向は、観測点 B3 等の他の観測点でも同様に確認できる。一方、衛星の選択を行っても基線解析に必要な衛星数が十

分に確保できる場合、Fix 解の取得できる時間帯が増加することがわかった。しかしながら、選択直後に得られる Fix 解について、基準値からの分布が大きくなる可能性が確認された。衛星除去により、整数不定性が求められなかった可能性があり、衛星を除去しても整数不定性を正確な値で維持する方法を考案する必要があるといえる。

6-3 まとめ

本章では、*DSS*と*DDPC*によりマルチパスの影響を受ける受信電波を検知し、シナリオ別に基線解析を実施して **Fix** 解を算出した。得られた **Fix** 解の割合と各観測点の基準値からの分布より測位精度を算出し、静止時における衛星選択効果の検証を行った。

まず、*DSS*と*DDPC*の傾向については、衛星が不可視となり回折波の影響を受ける場合、*DSS*値の低下が見られ、*DDPC*は可視時と比較しプラス方向に値の分布が大きくなる傾向が見られた。また、可視時において反射波の影響を受ける受信電波については、*DSS*値は上下動する傾向が見られ、*DDPC*については天頂付近等のマルチパスの影響を受けない時間帯と比較し、分布位置が異なる傾向を示すことを確認した。さらに、第4章で示した*DSS*と*DDPC*の算出結果と比較すると、同衛星位置において本検証と同様の傾向が確認され、観測日時に関わらずマルチパスの影響を受ける受信電波を検知できることがわかった。

*DSS*と*DDPC*のマルチパス検知結果に基づいた衛星選択効果については、解析に使用する衛星を選択することにより、全観測衛星を使用した場合よりも **Fix** 解の取得率が大きく増加することがわかった。測位精度についても、**Fix** 解の時系列分布、**2-D RMS** 値による比較結果より、測位精度が向上することがわかる。衛星選択時におけるシナリオ別の比較では **GPS** と **GLONASS** の衛星数が 4 機以上となり、基線解析に必要な衛星数を十分に確保できる環境であれば、*DDPC*を衛星選択基準に含めることで、**Fix** 解の取得率がさらに向上することが確認された。よって、*DDPC*を用いた衛星選択は有効な手法となると考えられる。

しかしながら、指標値による使用衛星の選択を行ったことで、**Fix** 解の取得率低下、および不正確な **Fix** 解を取得する場合も確認された。基線解析に必要な 6 機以上の衛星数が得られているにも関わらず、**GPS**、または **GLONASS** の衛星数が 3 機以下となる時間帯で **Fix** 率の低下する傾向が観測点 **B3**、**B4** で確認されるため、衛星選択により整数不定性を正確に求められなかった可能性が考えられる。また、この傾向に関連し、衛星選択により **Fix** 率が向上した観測点 **B4**、**B7** の結果についても、シナリオ 2 と比較し **2-D RMS** が大きくなる傾向が見られている。これは、衛星選択により得られた **Fix** 解について、サイクルスリップが影響している可能性が考えられる。

整数不定性の決定、サイクルスリップの低減を図るには、今回の検証で使用した **GPS**、**GLONASS** 以外の衛星を使用し、マルチパスの影響が小さい電波を受信する必要がある。今後、準天頂衛星等の試験運用中の衛星が正式運用となり、前述の衛星電波が増加することで、*DSS*のほか、*DDPC*による衛星選択が有効な手段として使用できるものと考えられる。

第7章 移動時における衛星選択の効果

第6章において静止時における衛星選択の効果を示した。DSSおよびDDPCによるマルチパス検知指標を用いて衛星を選択することで、全観測衛星使用時よりもFix解の取得率が向上し、DDPCを用いた衛星選択を行うことで、反射波除去によりFix解をさらに取得できる場合が確認された。このときに得られるFix解の精度は、キネマティック法の概略精度である20mm以内となる場合が多く見られ、少なくとも基準値から5cm以内となる精度改善が確認された。第1章でも述べたように、車線維持支援等の走行位置に応じた高度な運転支援には5cm以下の精度が要求されており、的確にマルチパスを含む受信電波を除去することで達成可能であることは、前章の検証結果より明らかである。

本章では、衛星の可視性、地物位置が常に変化する移動時に得られた観測値に対して、DSSとDDPCによるマルチパスの検知を実施し、その結果を用いた移動測位における衛星選択効果について述べる。第6章と同様、実時間による測位を考慮し、観測エポック毎に上記のマルチパス検知指標を用いて受信電波の除去を行い、基線解析を実施した。解析結果より、Fix解の取得率を設定したシナリオ別の比較に加え、得られたFix解を用いて正確な走行軌跡が再現可能か検証を行ったので、その結果を報告する。

7-1 検証の概要

ここでは、DSSとDDPCを用いたマルチパス検知による衛星選択効果の検証方法について述べる。検証に用いる観測値については、日本大学理工学部船橋キャンパスの内外に検証用のコースを設定し、前章で示した観測点A0と自動車のループに受信アンテナを設置し同時測位によるGPSとGLONASSの観測値を取得した。各走行コースと基準局の位置関係を図7-1に、受信機アンテナの設置状況を図7-2に示す。実験日は、2012年12月2日であり、観測時間帯は11:00~12:00、13:20~14:20である。

観測手順については、データ取得間隔を1Hzに設定し、経路Aを2周走行した後、経路Bを2周走行した。これを、各観測時間帯で実施し、衛星配置が大きく異なる場合の観測値を各々の経路で2周ずつ取得した。なお、各経路の走行速度は、経路Aの場合約10km/h、経路Bの場合、一般車両や信号にもよるが10km/h~40km/hの速度域で走行した。データ取得間隔は1Hzであるため、経路Aでは測点間の距離が約3m、経路Bでは最大で約10mの間隔となる。使用した受信機は、Trimble NetR8であり、得られた観測値はRINEX3.0形式に変換して取得した。

次に、検証方法について説明する。まず、マルチパスの影響を受ける受信電波を検知するため、前章と同様に同時測位により得られた観測値を用いてDSSとDDPCの算出を行った。得られた各指標の検知結果より、比較シナリオ別に解析に使用する衛星を時間帯別に選択し、対象外となる衛星の観測データを移動局受信機より得られたRINEXデータから消去して基線解析を行った。比

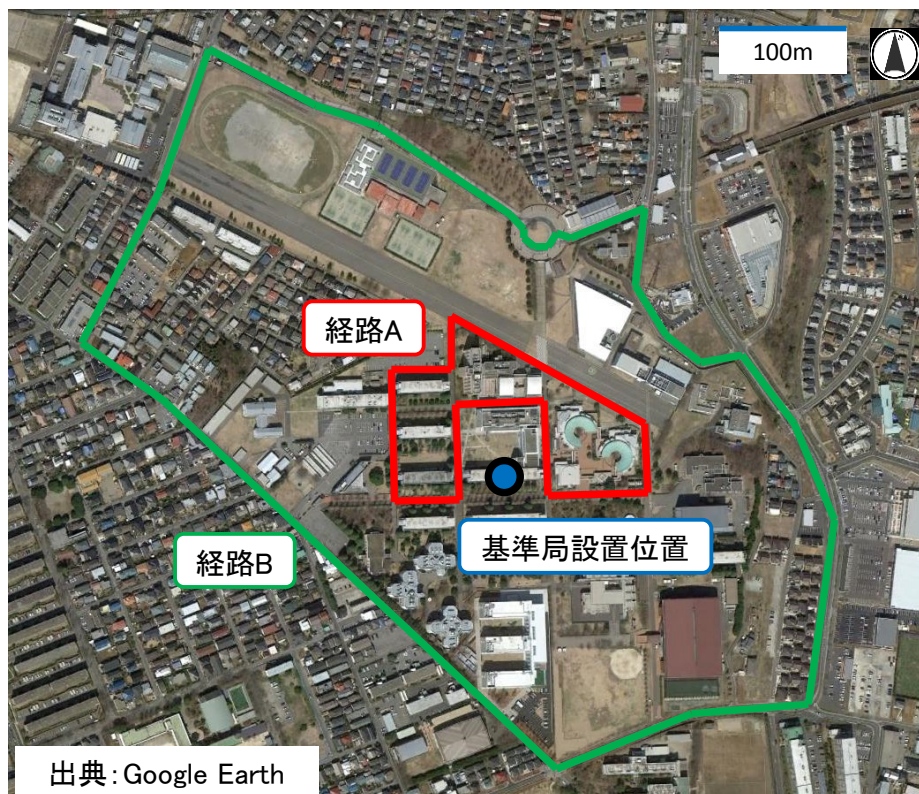


図 7-1 各走行コースと基準局設置位置



図 7-2 アンテナ設置状況 (左 基準局アンテナ 右 移動局アンテナ)

較シナリオは、静止時の衛星選択効果の検証と同様に以下の3つを設定するものとする。

- シナリオ1：衛星選択なし。
観測値にマルチパスを含む場合の基線解析であり、シナリオ2、3のマルチパス検知指標による衛星選択効果を確認するためのものである。
- シナリオ2：DSSによる衛星の選択。
観測値から回折波の影響を受ける電波を除去した場合の基線解析を想定。

- シナリオ 3 : *DSS*と*DDPC*による衛星の選択.

観測値から反射波と回折波の影響を受ける電波を除去した場合の基線解析を想定.

*DSS*と*DDPC*による衛星の選択基準については、第5章、第6章の各衛星の観測値より得られたマルチパスの影響を受けない高仰角衛星の*DSS*と*DDPC*の値を参考に設定した。2011年11月5日～7日、および2011年11月12日～14日で得られた観測点B2～B7の*DSS*、*DDPC*算出結果に対して仰角60°以上で取得した可視時の算出結果を集計し、*DSS*はその最小値を基準値とし、*DDPC*は分布の傾向でマルチパスの検知を行うため、集計値を絶対値に換算しその最大値を基準値とした。地物等によるマルチパス環境が移動により大きく変化するため、第6章で使用した移動平均による手法は使用しないものとする。表7-1に本検証で使用する各マルチパス検知指標の基準値を示す。選択基準外となる指標がひとつでも該当する場合、その衛星電波は基線解析に使用しないものとする。また、RTK法への適用を考慮し、衛星選択により干渉測位に必要な衛星数を下回る場合は、*DSS*と*DDPC*の値が基準値から大きく離れる衛星を優先的に除去し、解析に必要な衛星数以下とならないように衛星の選択を行った。選択前に必要衛星数を下回る場合はそのままとする。

解析については、基準局と移動局のRINEXデータを用いて「GPS+GLONASS」の条件でキネマティック解析を行った。使用した基線解析ソフトウェアは、RTKLIB Version2.4.2であり、バイアス決定手法をInstantaneousに設定し、使用する搬送波をL1+L2に設定した。また、「GPS+GLONASS」による解析では、バイアスの決定に関してGPSとGLONASSの双方の電波を使用するものとする。基準局の座標値については、第5章で述べたスタティック解析による結果を使用した。衛星選択効果の評価については、解析により得られたFix解の取得率とし、各経路で得られた測位解の軌跡についても確認した。

表 7-1 各マルチパス検知指標の基準値

衛星系	L1信号強度の差:DSS(dBHz)	L2信号強度の差:DSS(dBHz)	位相変化量の差の較差:DDPC(mm)
GPS	-9.8	-15.5	±4.9
GLONASS	-8.1	-11.3	±4.9

7-2 移動時における衛星選択効果の検証結果

7-2-1 低速移動による検証

経路 A 走行時に取得した観測値を移動局とし、衛星選択による効果を確認した。走行した経路の概要図を図 7-3 に示す。まず、経路 A 周辺の駐車場に実験車両を駐車し、データ取得開始後、付近の道路から経路 A に進入した。走行は、順番に 4F 建ての校舎と樹木により主に 1 方向が遮蔽される区間 (A-1)、周囲に遮蔽物となる地物がない区間 (A-2)、2F 建ての地物と樹木により 2 方向が遮蔽される区間 (A-3)、4F~5F 建ての校舎と樹木により最も上空視界が遮られる区間 (A-4)、4F 建ての校舎と樹木により主に 2 方向が遮蔽される区間 (A-5) の順で行った。

表 7-2 に各区間のデータ取得数をセッションおよび周回別に示す。区間 A-2、A-4 は人通りが多く、周回別でデータ数に差が生じているが、他の区間では 5 データ以内の差となるよう一定速度による走行でデータを取得している。

図 7-4 に、全観測衛星使用時の基線解析結果の軌跡を示す。青が Fix 解、緑が Float 解である。

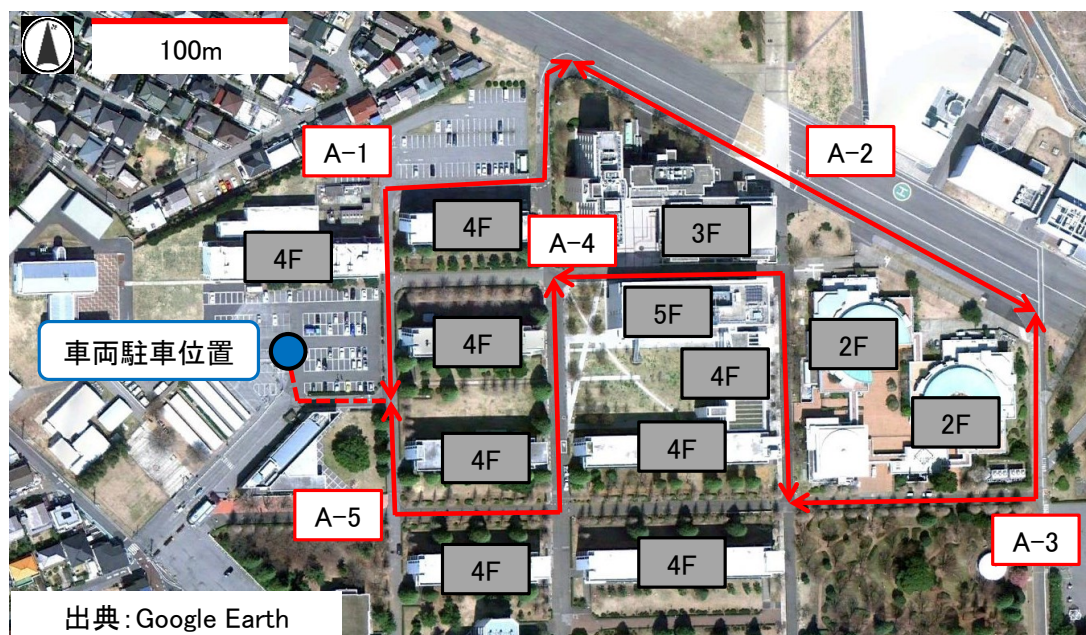
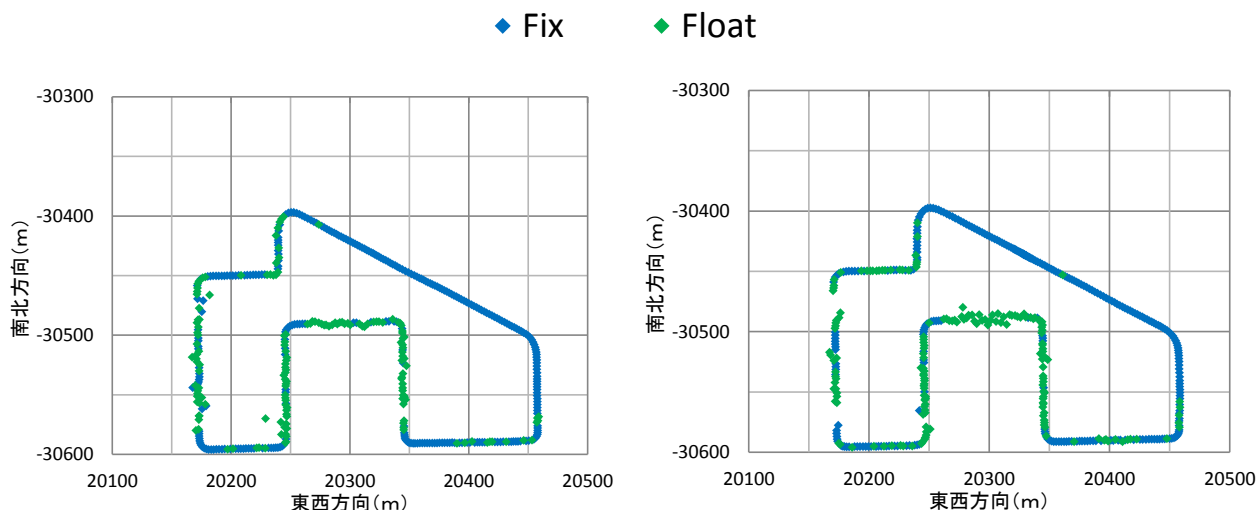


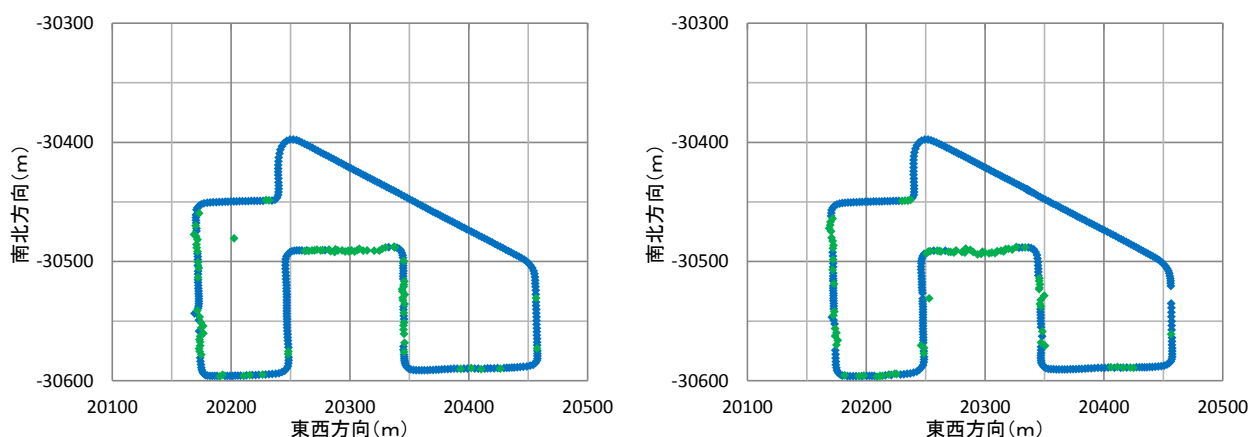
図 7-3 経路 A における各走行区間の概略図

表 7-2 経路 A における各区間のデータ取得概要

	取得時間(時:分:秒)	周回数	各区間のデータ数				
			A-1	A-2	A-3	A-4	A-5
セッション1	11:06:27~11:14:18	1	95	100	88	84	105
	11:14:19~11:22:27	2	90	123	85	87	104
セッション2	13:28:56~13:36:03	1	87	95	71	85	90
	13:36:04~13:43:08	2	84	104	73	76	88



セッション1 (左: 1周目 右: 2周目)



セッション2 (左: 1周目 右: 2周目)

図 7-4 経路 A における全観測衛星使用時の基線解析結果

る。区間毎に取得した解の種類を確認すると、A-2 区間では、セッション、周回数に関わらず Fix 解を連続取得できることがわかる。衛星数を確認すると、セッションに関わらず 10 機以上となり、遮蔽物となる地物の位置も区間経路から離れていることから、マルチパスを含む衛星電波を受信していないものと考えられる。一方、他の区間では、セッションに関わらず Float 解の取得が確認でき、解析に使用された衛星数を確認すると、図 7-5 に示すように 6 機以上の取得で Float 解となることがわかる。これは、第 6 章における全観測衛星使用時での基線解析結果と同様、マルチパスの影響によるものと考えられる。図 7-6、図 7-7 に L1 波と L2 波による DSS 算出結果を示す。図 7-5 より Fix 解が得られる時間帯では、観測衛星に関わらず DSS は一定値で分布する傾向となり、Float 解が取得される時間帯では、マイナス方向に DSS が分布することが確認できる。同様に DDPC による算出結果についても確認すると、図 7-8 より Fix 解取得時では分布が小さく、Float 解取得時では分布が大きくなることがわかる。よって、以降の検証では、各指標を基に衛星の選択を行ったシナリオ別の解析結果を比較し、衛星選択効果を検証するものとする。

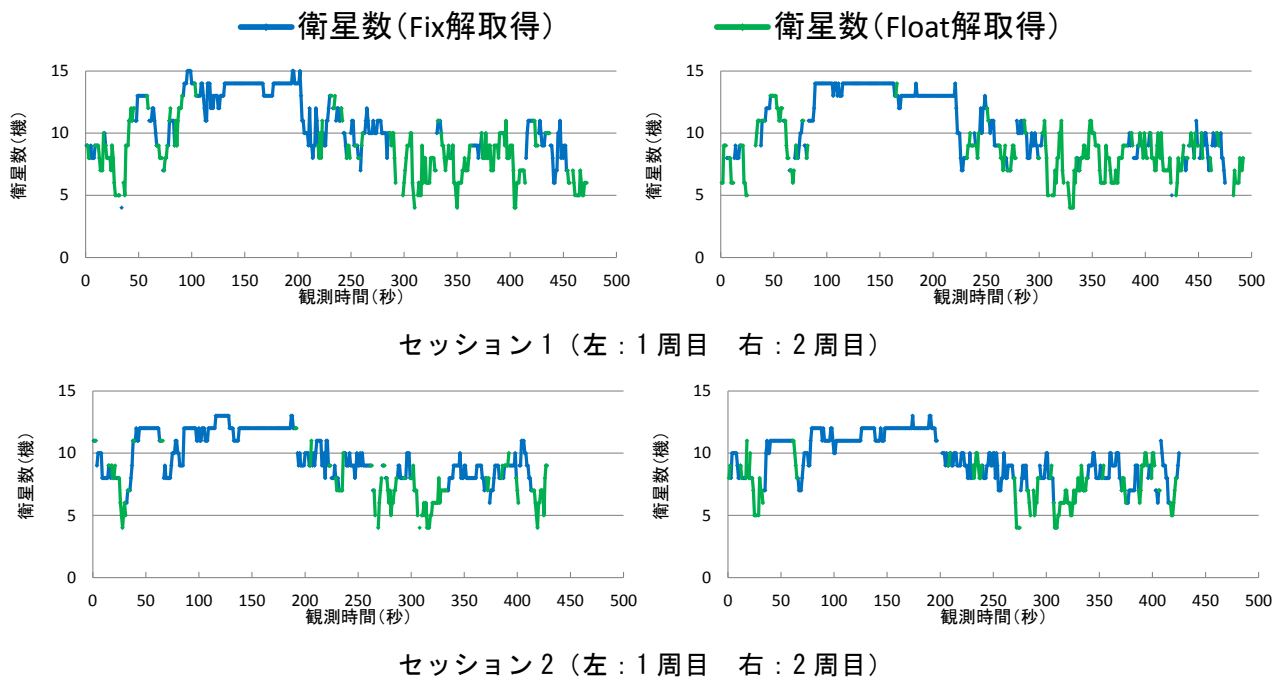


図 7-5 経路 A における全観測衛星使用時の解析衛星数

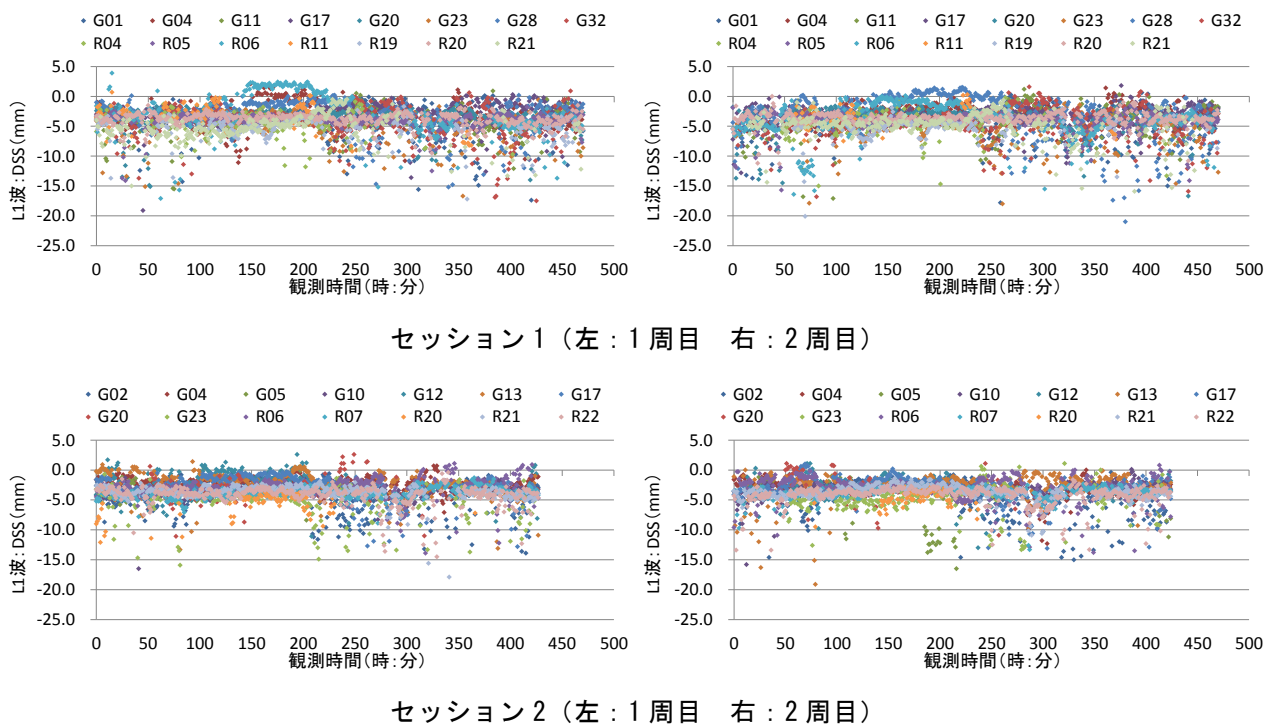
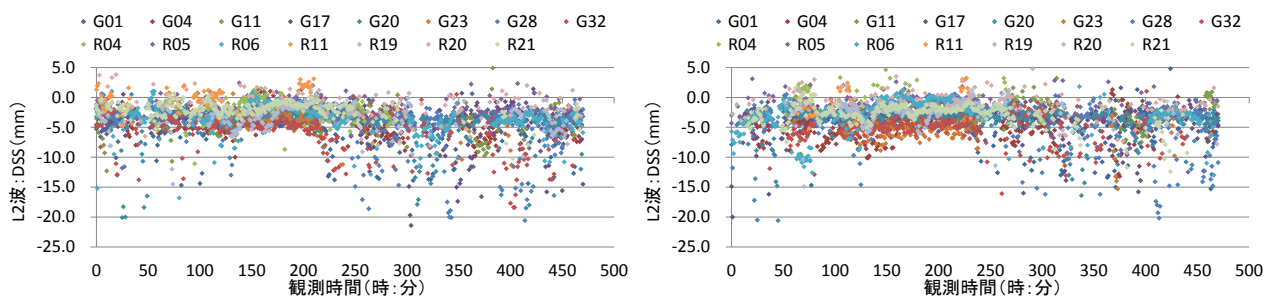
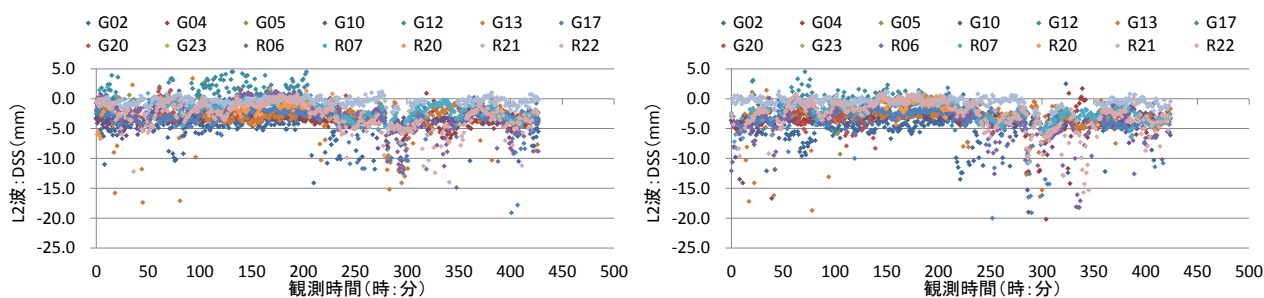


図 7-6 経路 A における観測衛星のDSS算出結果 (L1 波)

なお、取得した解の精度については、静止時のように基準値からの誤差から確認することは不可能である。そのため、Trimble 社が開発したモバイルマッピングシステム MX-8 (図 7-9) により取得された同経路とその周囲の地物の 3 次元点群データと比較することで確認を行った。MX-8 により取得された各区間の点群図を図 7-10 に示す。図中に示す赤線は走行経路である。

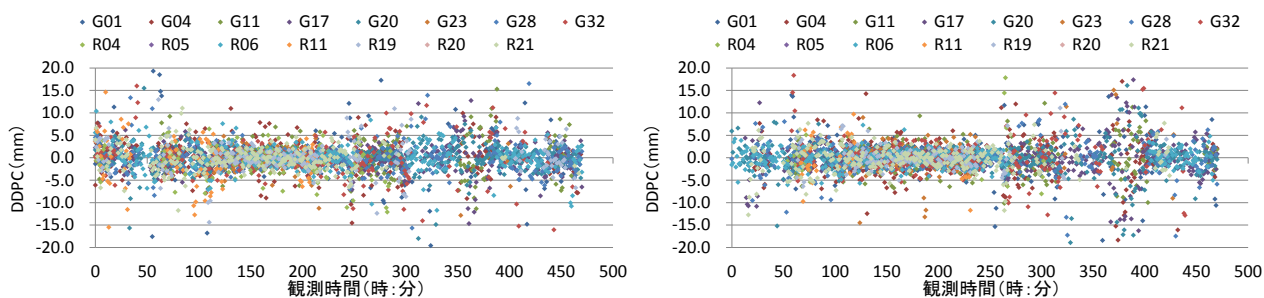


セッション1 (左: 1周目 右: 2周目)

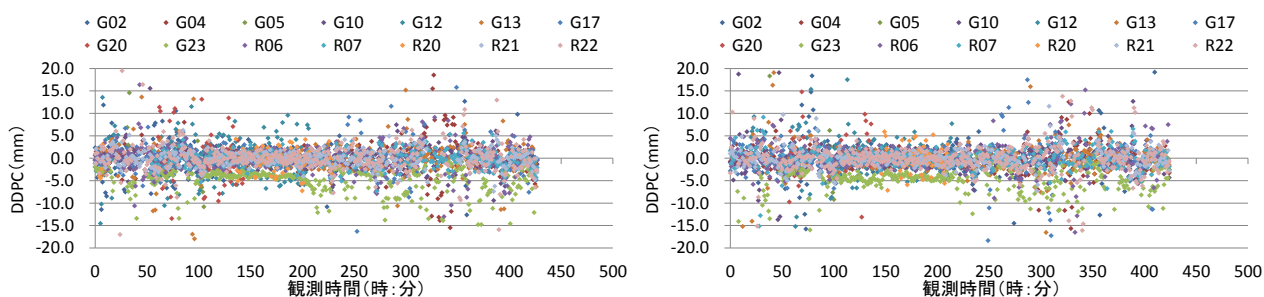


セッション2 (左: 1周目 右: 2周目)

図 7-7 経路 A における観測衛星のDSS算出結果 (L2 波)



セッション1 (左: 1周目 右: 2周目)



セッション1 (左: 1周目 右: 2周目)

図 7-8 経路 A における観測衛星のDDPC算出結果



図 7-9 モバイルマッピングシステム (Trimble 社製 : MX-8)

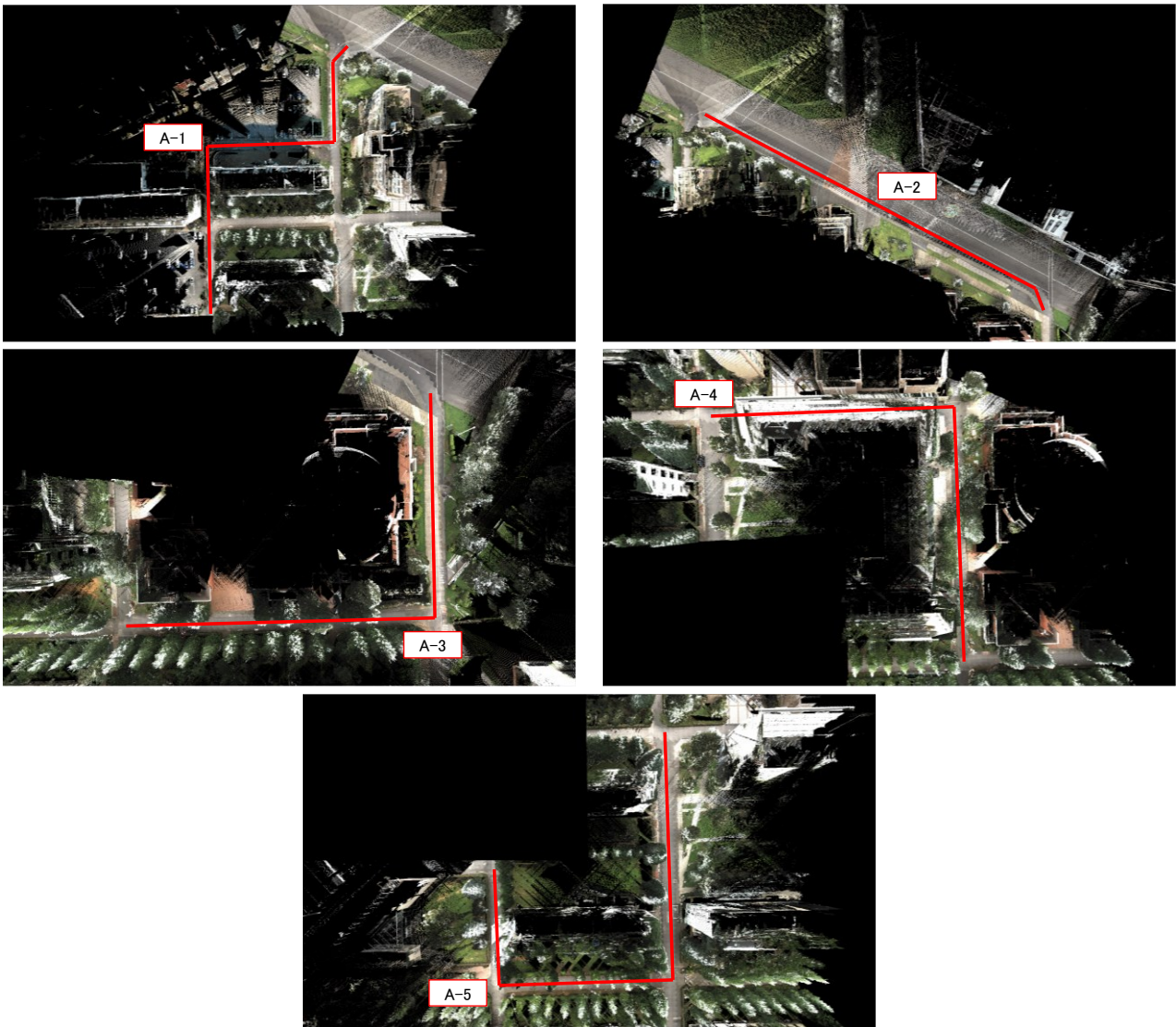


図 7-10 各走行区間の 3 次元点群データと走行経路

(1) A-1 区間経路

A-1 区間における全観測衛星使用時の基線解析結果を図 7-11 に示す。セッション 1 では周回に関わらず Fix 解と Float 解が交互に取得され、セッション 2 では校舎により東西が遮蔽される区間では Float 解となるが、他の区間では Fix 解が得られることがわかる。解析に使用される衛星数を図 7-12 に示す。衛星数の推移を見ると、5 機以下と基線解析での必要数が得られていないことがわかる。この箇所で得られる Float 解は、整数不定性の整数値が失われ取得したものと考えられる。一方、他の区間では Float 解取得時でも 10 衛星以上となる場合が確認でき、マルチパスの影響によるものと考えられる。この箇所に着目し、シナリオ 2, 3 による解析結果を確認する。

衛星選択時の基線解析結果を図 7-13 に示す。セッション 1, 1 周目の軌跡を確認すると、北方向に走行し A-2 区間へと進む経路において、Float 解の数が低下し Fix 解が増加していることがわかる。2 周目の軌跡についても、西から東に走行する経路において Fix 解の増加が見られた。

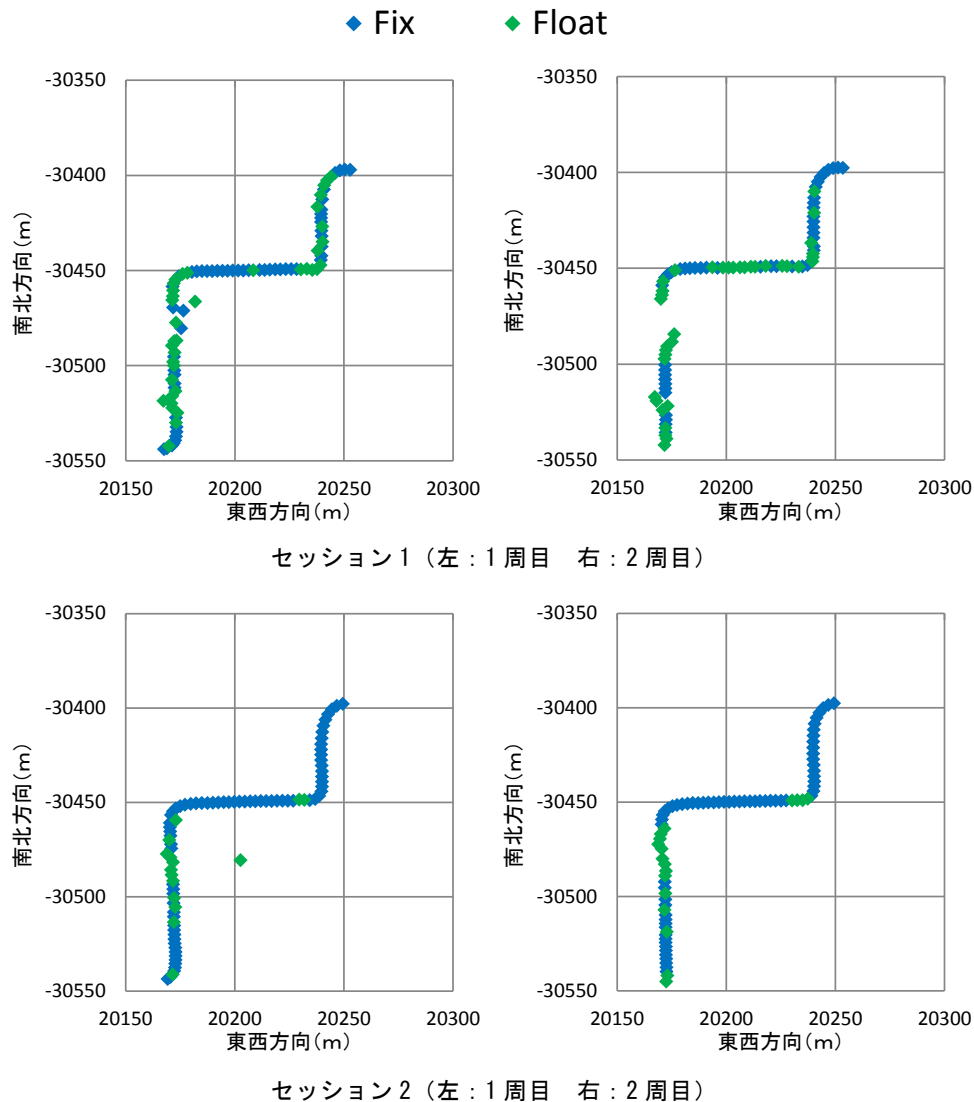


図 7-11 A-1 区間における全観測衛星使用時の基線解析結果

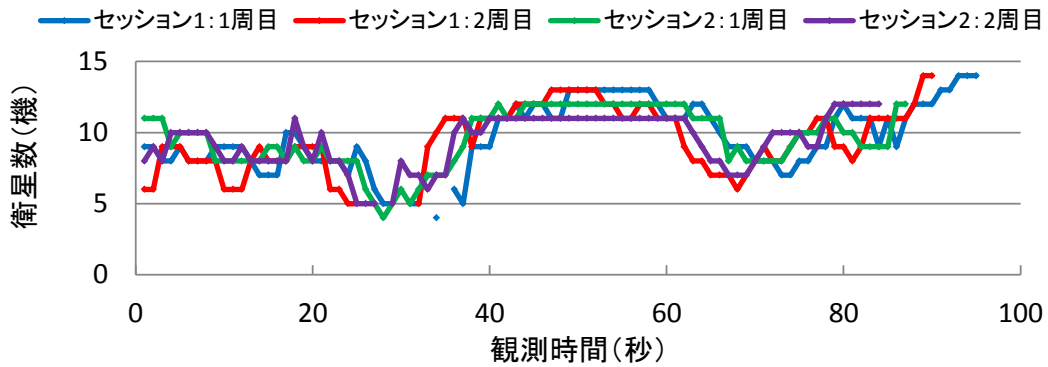


図 7-12 A-1 区間における観測衛星数の推移

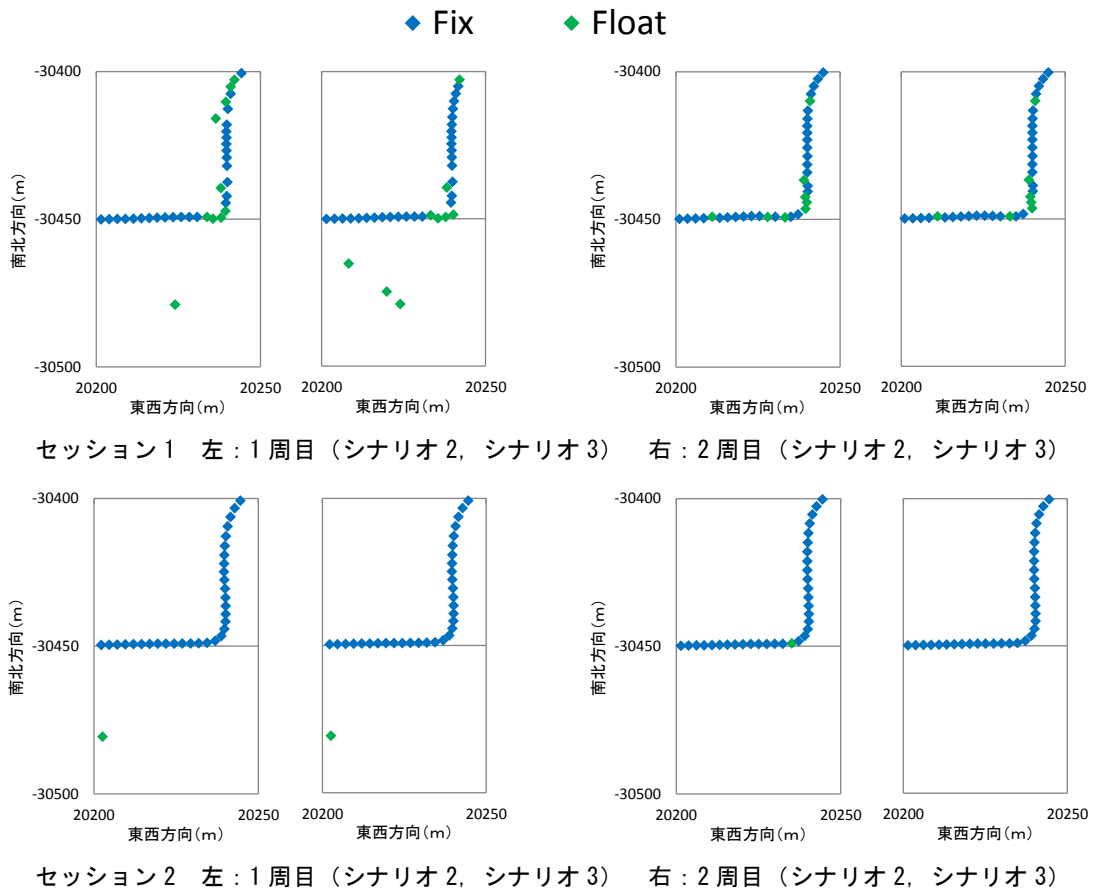


図 7-13 A-1 区間における衛星選択時の基線解析結果

しかしながら、取得した一部の Float 解は、走行経路から明らかに外れた位置で取得が確認でき、東西方向が遮蔽される区間で得られた Float 解については、シナリオ 1 による全観測衛星を使用した場合よりも分布が大きくなる傾向が見られた。衛星選択により Float 解の分布が大きくなる傾向は、第 6 章で示した静止時の衛星選択効果の検証でも見られており、静止時と同様、衛星選択による衛星配置条件の悪化が要因であると考えられる。この傾向は、セッション 2 における解の軌跡でも同様に確認された。

図 7-14 にセッション 1 の 1 周目における衛星選択による測位結果の改善効果を示す。青がシ

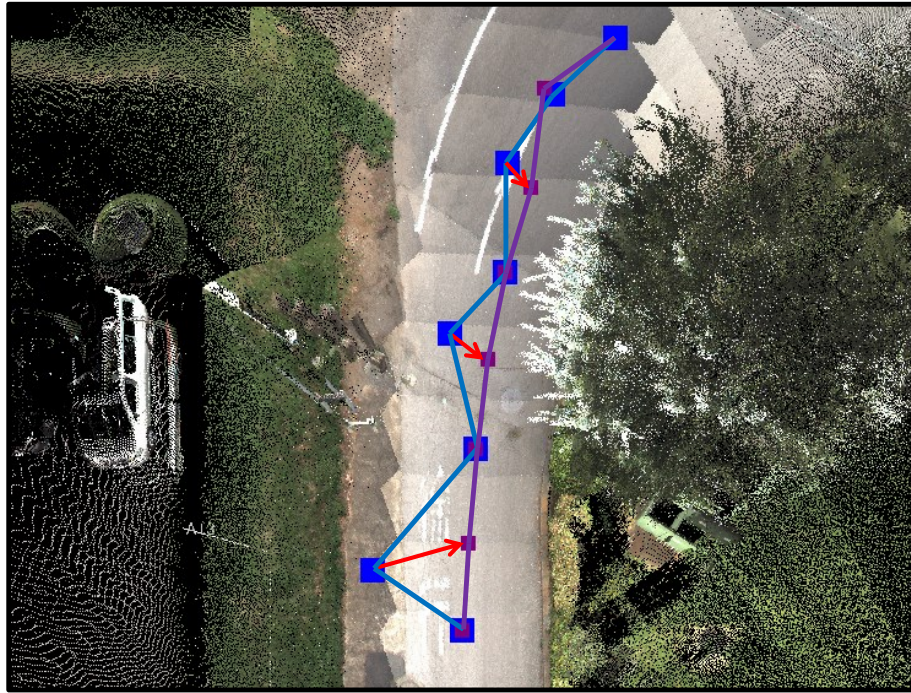


図 7-14 セッション 1 の 1 周目における測位結果の改善効果 (A-1 区間)

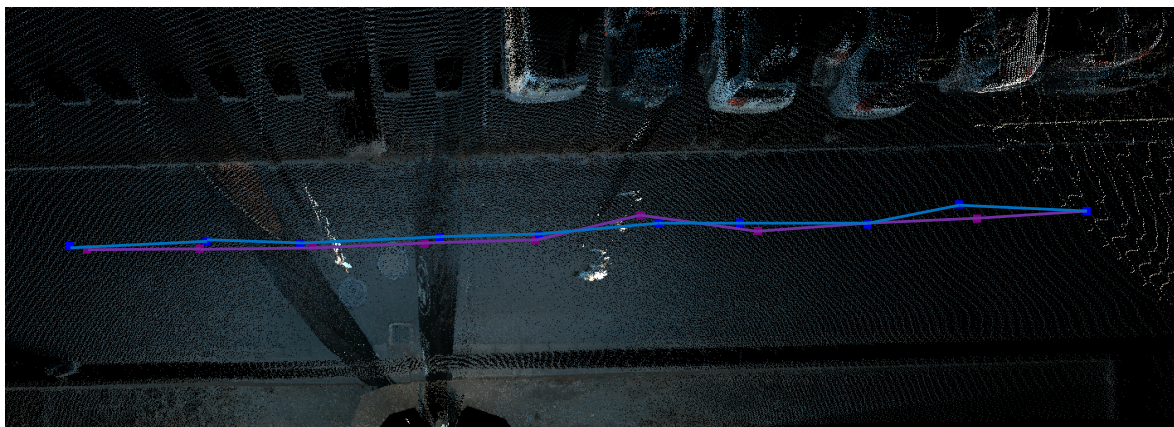


図 7-15 セッション 1 の 2 周目における測位結果の改善効果 (A-1 区間)

ナリオ 1 による全観測衛星使用時の解析結果，紫がシナリオ 3 による衛星選択時の解析結果である．全観測衛星使用時では Float 解を取得し，直線走行であるにも関わらず解が左右にぶれながらプロットされることがわかる．一方，衛星選択時では Fix 解を取得し，一定間隔で道路上に解がプロットされることが図より確認できる．図 7-15 にセッション 1 の 2 周目における衛星選択による測位結果の改善効果を示す．全観測衛星使用時では Float 解の取得となるが，道路上に解がプロットされていることがわかる．しかしながら，各々のプロット間隔を確認すると全観測衛星使用時では数十 cm のばらつきが見られるのに対して，衛星選択時では数 cm と間隔のばらつきが小さくなり，測位結果の改善が確認された．

(2) A-2 区間経路

A-2 区間では、図 7-4 でも示したように全観測衛星使用時でも連続して Fix 解が取得された経路である。DSS、DDPCによる算出結果についても、大半の衛星電波が基準値内となるためマルチパスの影響はほとんど受けていないものと考えられる。よって、本区間では得られた解を 3次元点群データと重ね合わせ、解のプロット位置を確認した。

図 7-16 に、A-2 区間で得られた全観測衛星使用時の基線解析結果を点群データ上に示す。走行区間では片側 1 車線となっており、道路幅員は約 3.5m である。全観測結果とともに、対向車線上にプロットされることなく走行車線内で解が得られていることが確認でき、Fix 解が取得できれば走行時でも正確な位置計測ができることがわかった (図 7-17)。

■ セッション1:1周目 ■ セッション1:2周目 ■ セッション2:1周目 ■ セッション2:2周目

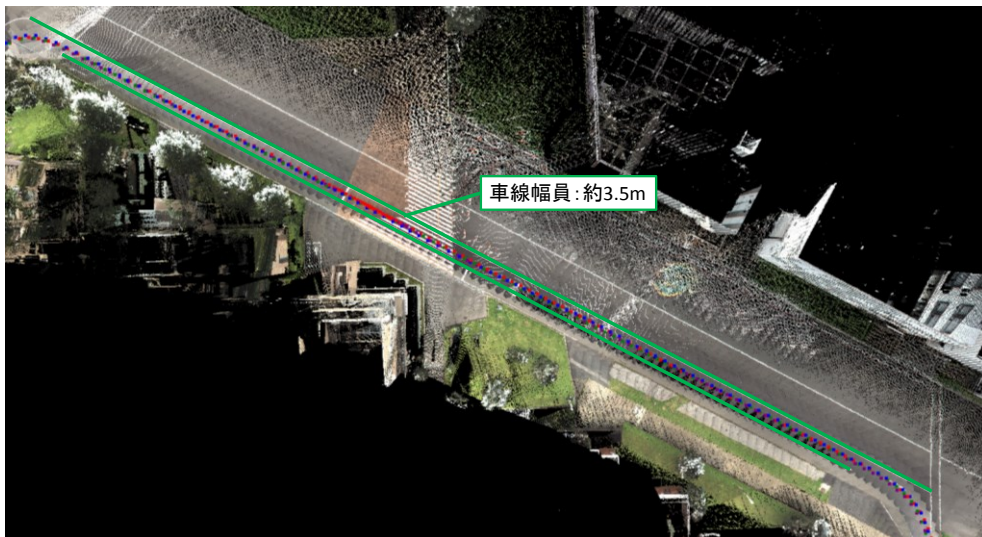


図 7-16 A-2 区間の点群データと全観測衛星使用時の基線解析結果

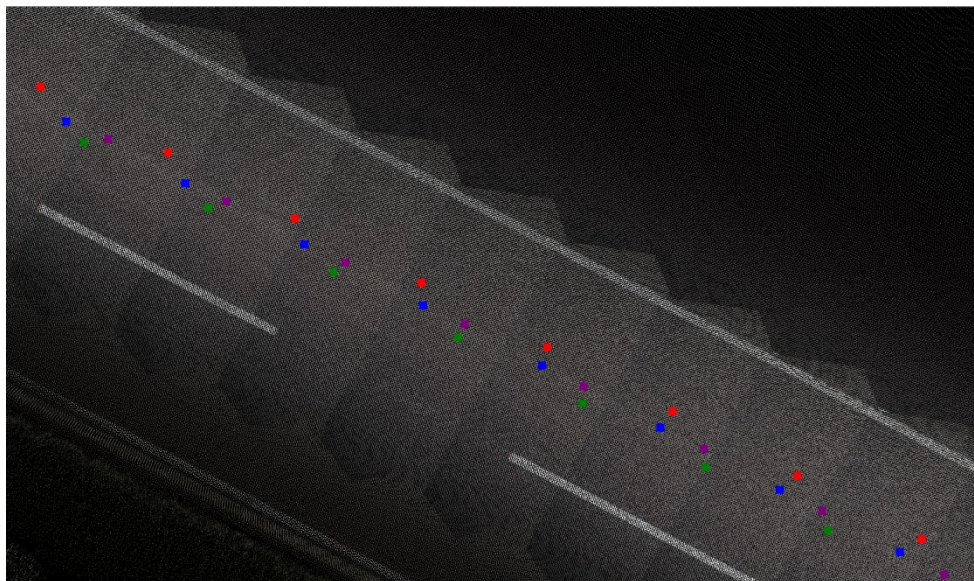


図 7-17 A-2 区間拡大図

(3) A-3 区間経路

A-3 区間における全観測衛星使用時の基線解析結果を図 7-18 に示す。南方向走行時では、セッション、周回に関わらず同位置で Float 解を取得することがわかる。また、南方向が樹木により遮蔽される西方向走行区間では、Fix 解と Float 解が交互に取得される傾向が見られた。解析に使用される衛星数を図 7-19 に示す。全セッションともに 6 機以上の衛星が観測されており、Float 解の取得はマルチパスの影響によるものと想定される。この箇所に着目し、シナリオ 2, 3 による解析結果を確認する。

衛星選択時の基線解析結果を図 7-20 に示す。セッション 1 の軌跡を確認すると、南方向に走行する経路では、DSSのみを使用したシナリオ 2 において Fix 解の増加が見られた。しかし、DSS

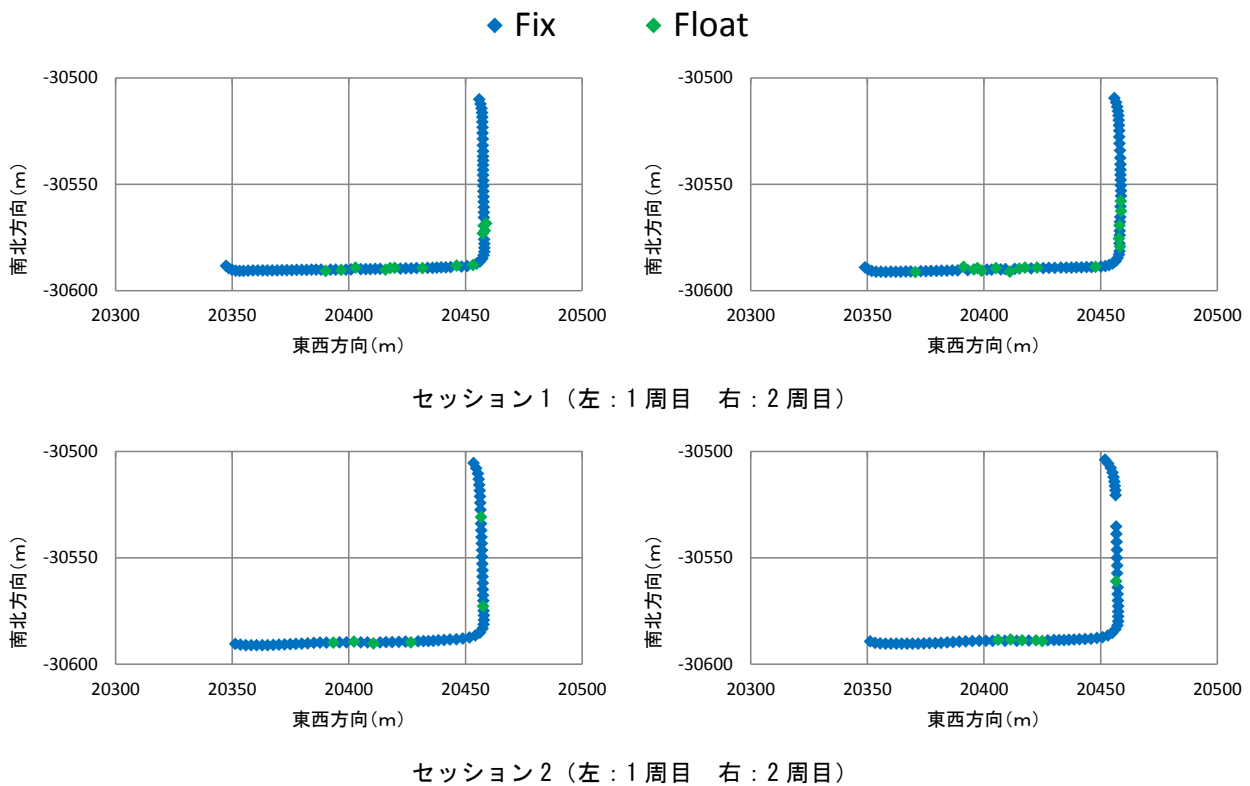


図 7-18 A-3 区間における全観測衛星使用時の基線解析結果

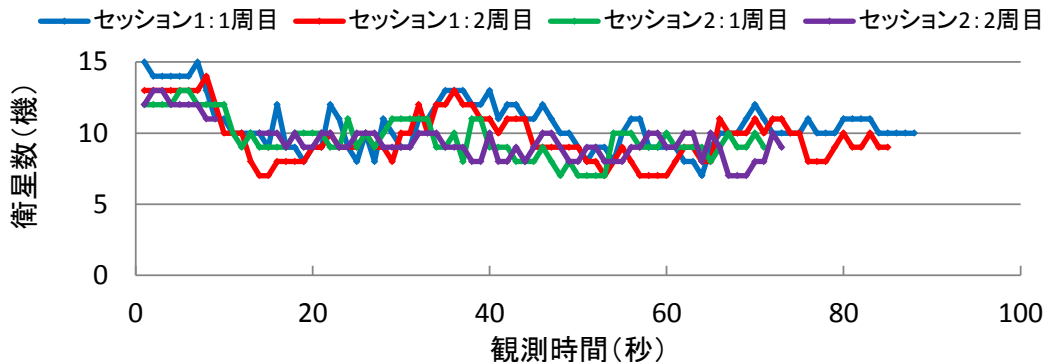


図 7-19 A-3 区間における観測衛星数の推移

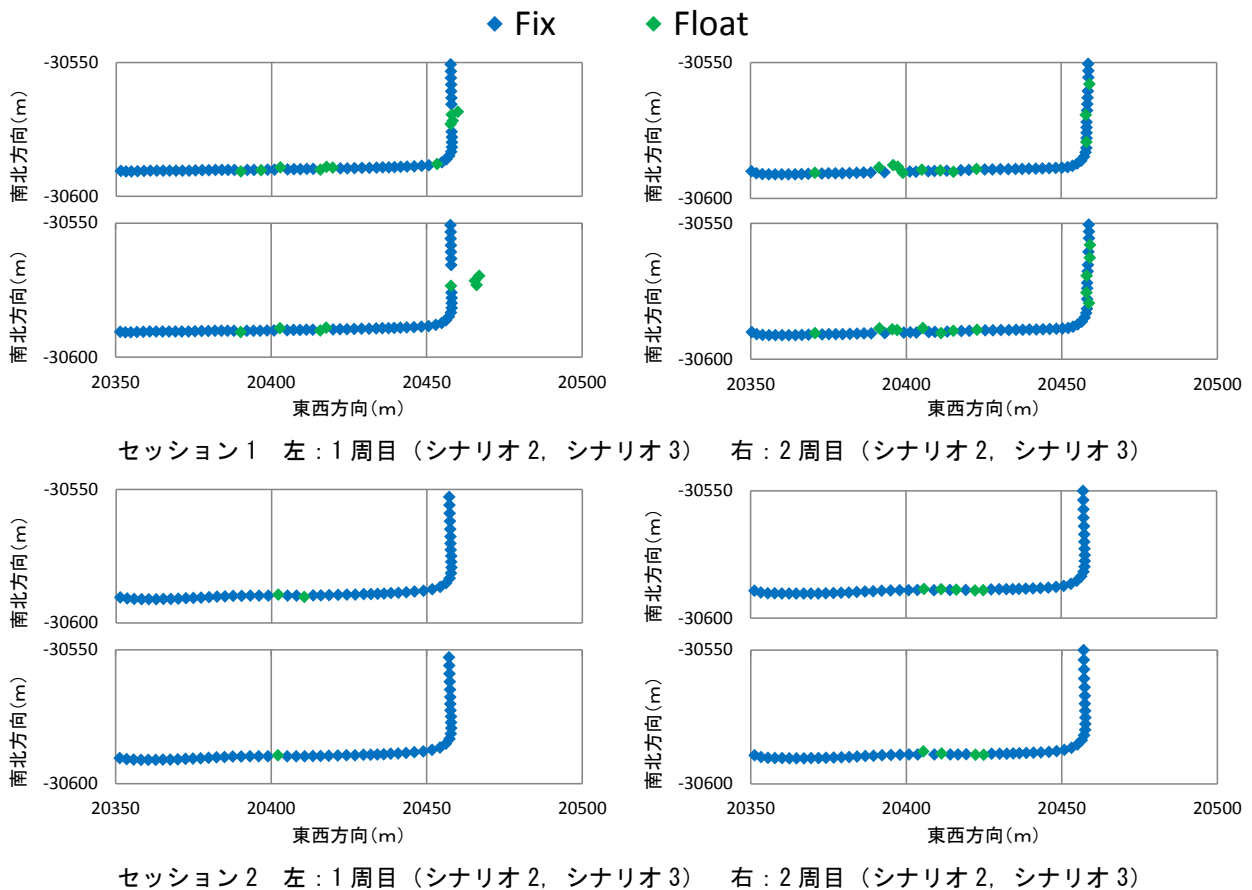


図 7-20 A-3 区間における衛星選択時の基線解析結果

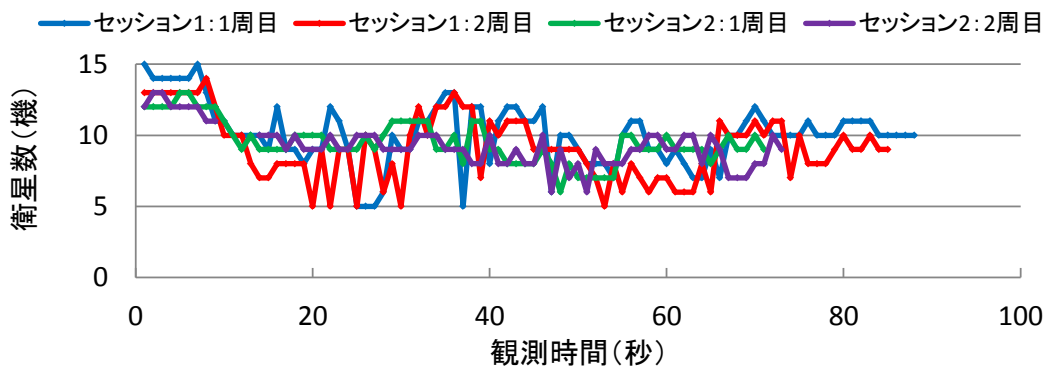


図 7-21 A-3 区間におけるシナリオ3での解析衛星数の推移

とDDPCの双方を使用したシナリオ3では、取得した Float 解が明らかに走行経路から外れた位置にプロットされる場合と、シナリオ2の結果に対して Float 解が増加する場合が見られた。Float 解取得時の PDOPを確認すると、シナリオ2では周回数に関わらず 2.5~5.0 の値となるのに対して、シナリオ3では 5.0 以上となるため、衛星選択による配置条件の悪化が原因と考えられる。一方、セッション2の軌跡では、南方向への走行経路において全観測衛星使用時に Float 解が得られた位置で Fix 解の取得が確認でき、また、西方向に走行し A-4 区間へと進む経路においても Fix 解の取得増加が確認された。シナリオ3による選択後の衛星数をセッション別に比

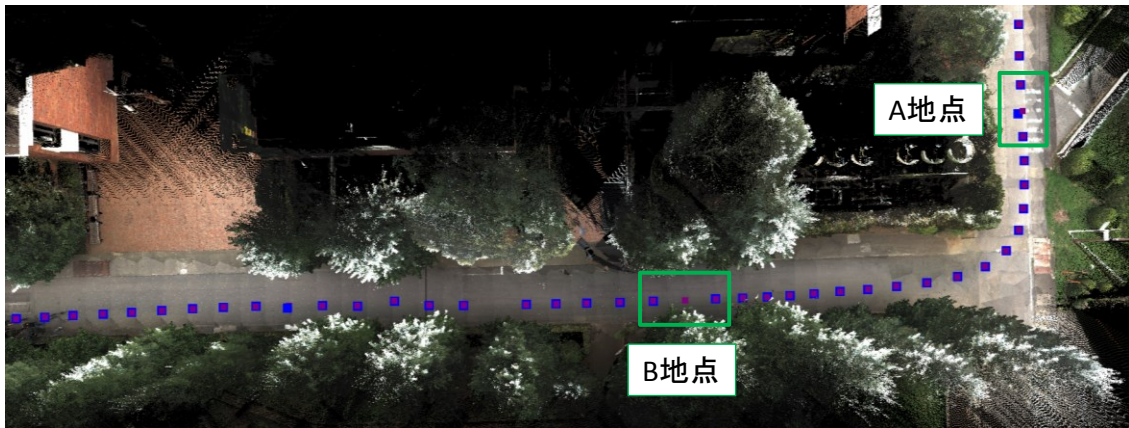


図 7-22 セッション 2 の 1 周目における測位結果の改善効果 (A-3 区間)

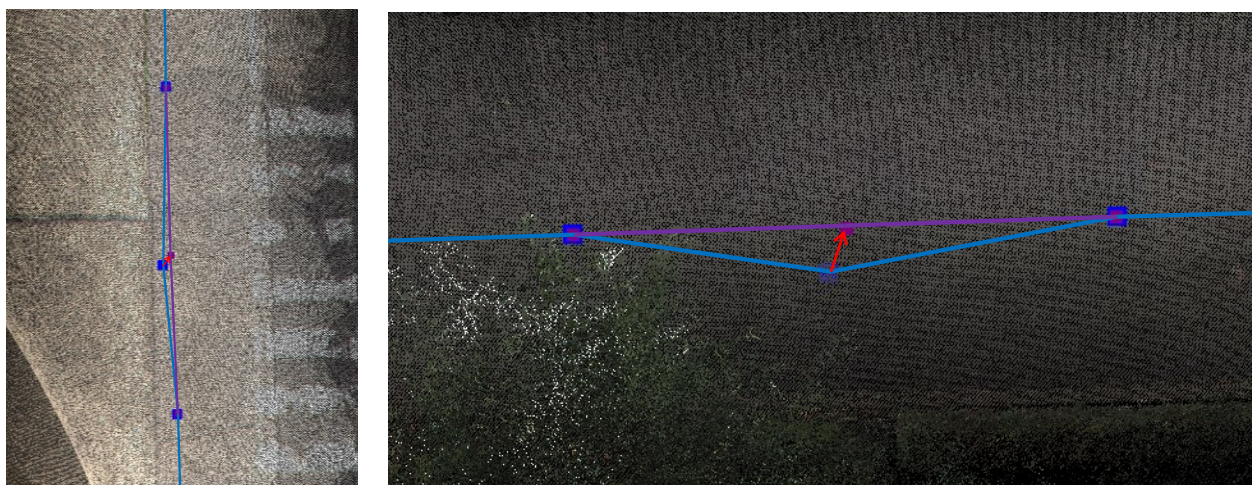


図 7-23 各地点における測位結果の改善効果 (左 : A 地点 右 : B 地点)

較すると、図 7-21 より、全観測衛星使用時に Float 解が得られた箇所では、セッション 2 のほうがセッション 1 よりも解析時の使用衛星数が多いことがわかる。セッション 2 において衛星選択による効果が得られた要因は、解析時の衛星数によるものと思われる。

図 7-22 にセッション 2 の 1 周目における衛星選択による測位結果の改善効果を示す。A-1 区間と同様、青がシナリオ 1 による全観測衛星使用時の解析結果、紫がシナリオ 3 による衛星選択時の解析結果である。シナリオ 1 による全観測衛星使用時でも Fix 解を多く取得できたため、A-1 区間のような明確な改善効果は見られなかったが、衛星選択により Float 解から Fix 解となった地点を確認すると、左右または上下にぶれてプロットされていた解が、直線上に解が並ぶようにプロットされていることがわかる (図 7-23)。特に B 地点では、シナリオ 1 で得られた Float 解について、走行した路面よりも低い位置でプロットされていたが、衛星選択により前後の解と同位置となり改善が見られた。

(4) A-4 区間経路

A-4 区間における全観測衛星使用時の基線解析結果を図 7-24 に示す。セッション 1 では、区間の始点と終点付近を除き、得られる解のほとんどが Float 解となることがわかる。一方、セッション 2 では、北方向への走行経路において Fix 解の取得が一部見られるが、西方向に走行し A-5 区間へと進む経路では、セッション 1 と同様に Float 解の取得となることがわかった。解析に使用される衛星数を図 7-25 に示す。他の区間で得られる衛星数と比較すると、セッション 2 では常に 10 機以下となり、本区間での衛星の観測が困難であることがわかる。また、セッション、周回数に関わらず、観測衛星数が GPS+GLONASS で 6 機以下、GPS のみでも 5 機以下になる場合が確認でき、衛星選択を行う以前に基線解析に必要な衛星数が得られない場合が見られた。

衛星選択時の基線解析結果を図 7-26 に示す。まず、セッション 1 の軌跡を確認すると、1 周目ではシナリオ 2、3 とともに Fix 解の増加は見られず、Float 解の分布がシナリオ 1 よりも大きくなる傾向が見られた。2 周目についても、北方向、西方向の走行ともに Float 解の分布が大きくなることがわかる。次に、セッション 2 の軌跡を確認すると、1 周目では北方向への走行経路

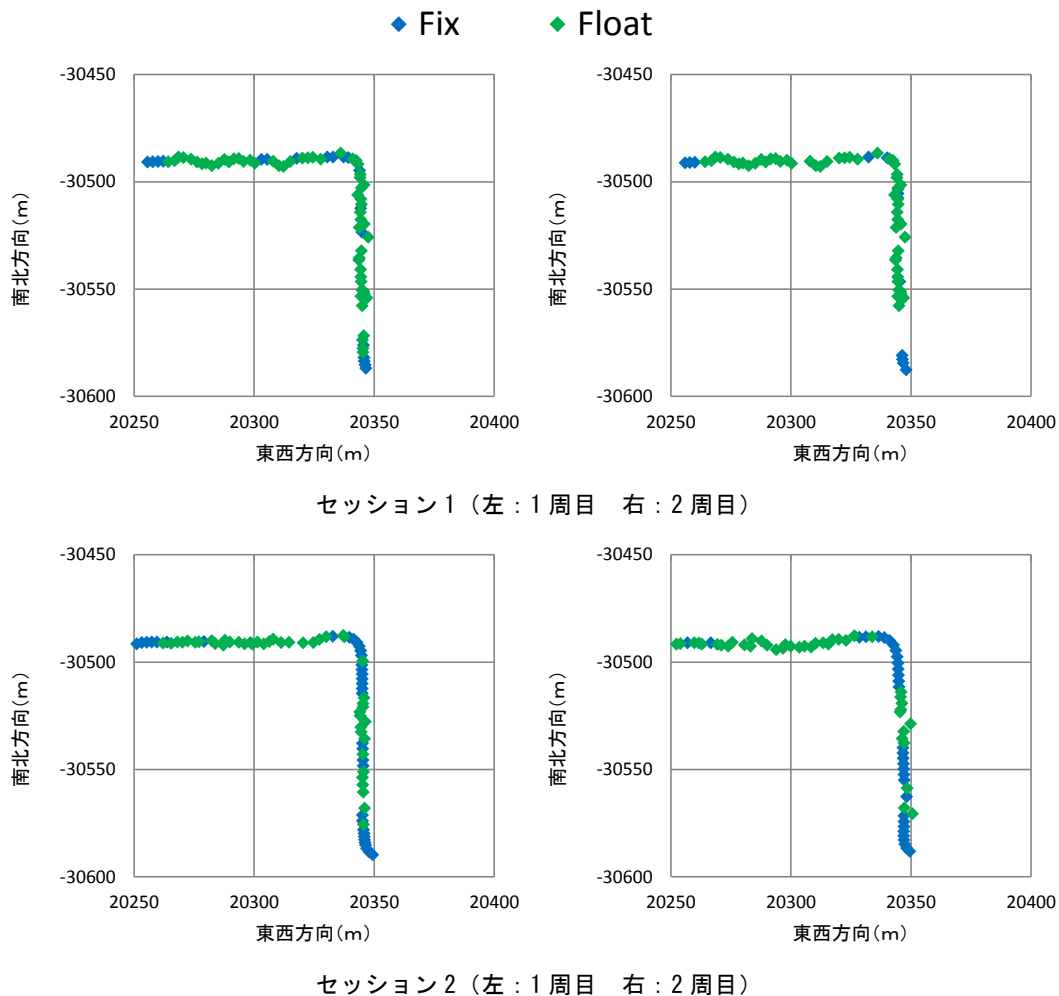


図 7-24 A-4 区間における全観測衛星使用時の基線解析結果

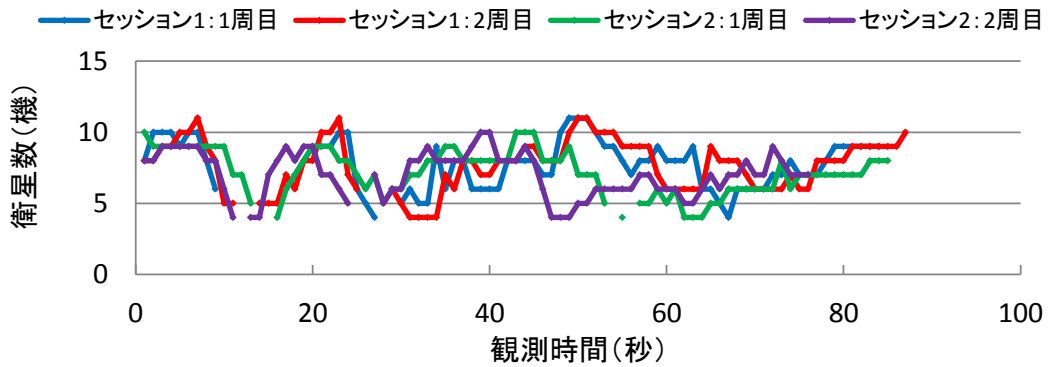
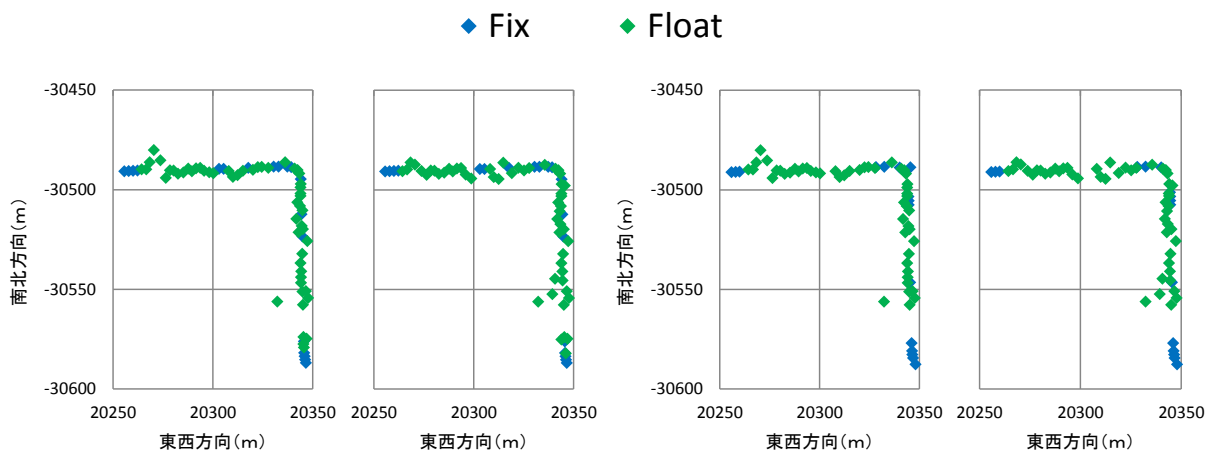
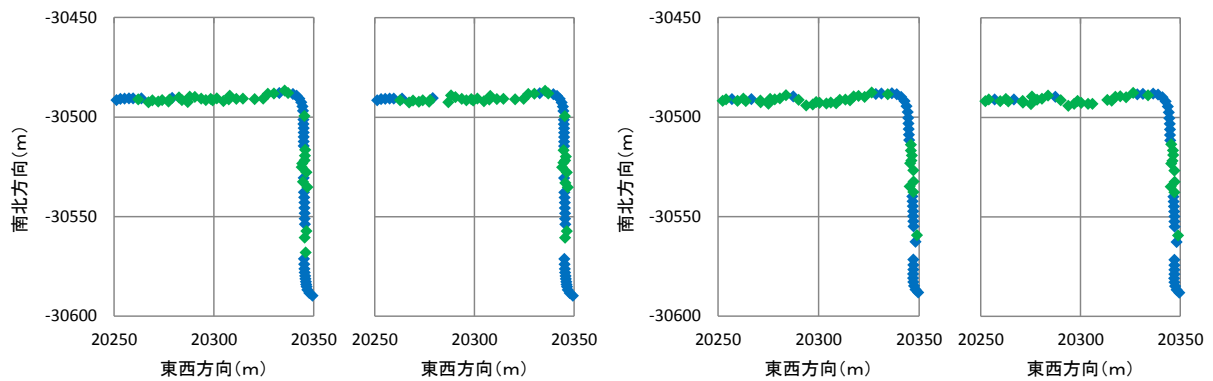


図 7-25 A-4 区間における観測衛星数の推移



セッション 1 左 : 1 周目 (シナリオ 2, シナリオ 3) 右 : 2 周目 (シナリオ 2, シナリオ 3)



セッション 2 左 : 1 周目 (シナリオ 2, シナリオ 3) 右 : 2 周目 (シナリオ 2, シナリオ 3)

図 7-26 A-4 区間における衛星選択時の基線解析結果

において Fix 解の増加が見られ衛星選択効果が確認できたが、西方向の走行ではシナリオ 1 と同様の結果となることがわかる。2 周目では、北方向への走行経路についてシナリオ 1 でも Fix 解の取得できており、衛星選択による効果はほとんど見られなかった。シナリオ 3 による選択後の衛星数をセッション別に図 7-27 に示す。北方向への走行経路となる観測時間 0 秒～50 秒前後の衛星数を調べると、セッション 2 のほうがセッション 1 よりも解析衛星数が多くなることがわ

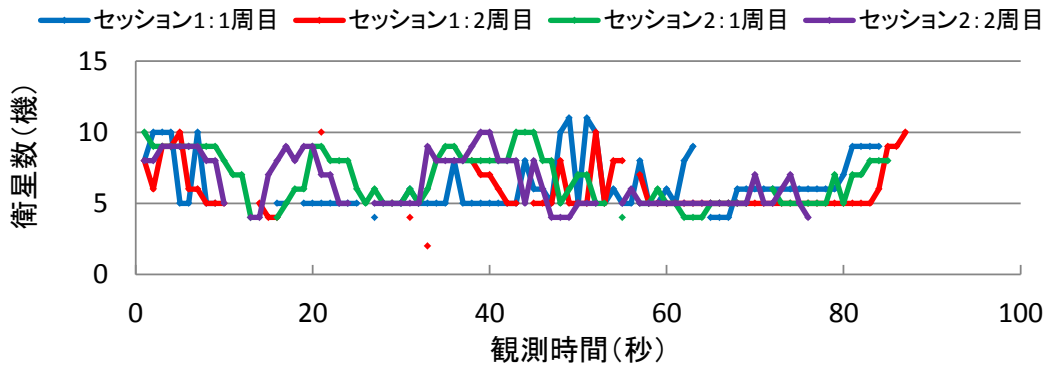


図 7-27 A-4 区間におけるシナリオ 3 での解析衛星数の推移

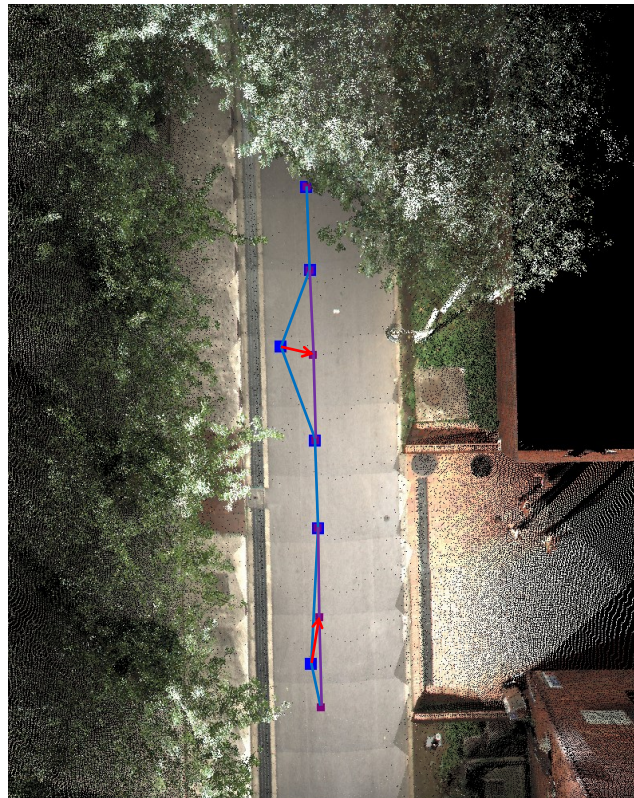


図 7-28 セッション 2 の 1 周目における測位結果の改善効果 (A-4 区間)

かる。よって、同走行経路における Fix 解の増加は解析時の衛星数によるものと考えられる。一方、西方向への走行経路となる観測時間 50 秒以降の衛星数を調べると、セッションに関わらず 4 ~ 6 衛星での推移となることがわかる。これは、基線解析に必要な衛星数以下とならないよう選択を行った結果であり、実際には DSS, DDPC による指標の基準外となるものも含まれている。選択基準内となる衛星数を調べたところ、基線解析に必要な衛星数以下となる場合がほとんどであり、中には、観測された全衛星が指標の基準値外となる場合も見られた。セッション 1 における Float 解の分布範囲が大きくなる傾向は、全観測衛星を使用するシナリオ 1 に対して衛星数が減少したことに加え、マルチパスを含む受信電波も解析に使用したためと考えられる。

図 7-28 にセッション 2 の 1 周目における衛星選択による測位結果の改善効果を示す。青がシ

ナリオ 1, 紫がシナリオ 3 による衛星選択時の解析結果である. 衛星選択により Fix 解を取得したことで, 道路上を直進しながらプロットできていることが確認できる.

(5) A-5 区間経路

A-5 区間における全観測衛星使用時の基線解析結果を図 7-29 に示す. セッション 1 では, 区間の始点では Fix 解を取得することが確認できるが, 南方向への走行経路となった際に Float 解となることがわかる. また, 西方向への走行経路となった場合は, Fix 解の取得が確認できるが, Float 解と交互に取得され安定した測位はできないことがわかった. 一方, セッション 2 では, 南方向の走行経路では Fix 解を連続して取得され, 西方向の走行経路ではセッション 1 と同様に Float 解と Fix 解の両方が取得された. 解析に使用される衛星数を図 7-30 に示す. 北方向への走行経路となる観測時間 0 秒~40 秒前後の衛星数を調べると, GPS+GLONASS の基線解析に必要な 6 機以上の衛星数となるため, セッション 1 による Float 解はマルチパスの影響によるものと考えられる. また, 40 秒以降の西方向への走行時における衛星数を調べると, 本経路においても 6 機以上の衛星数となることがわかった. ゆえに, 西方向走行経路で得られる Float 解について

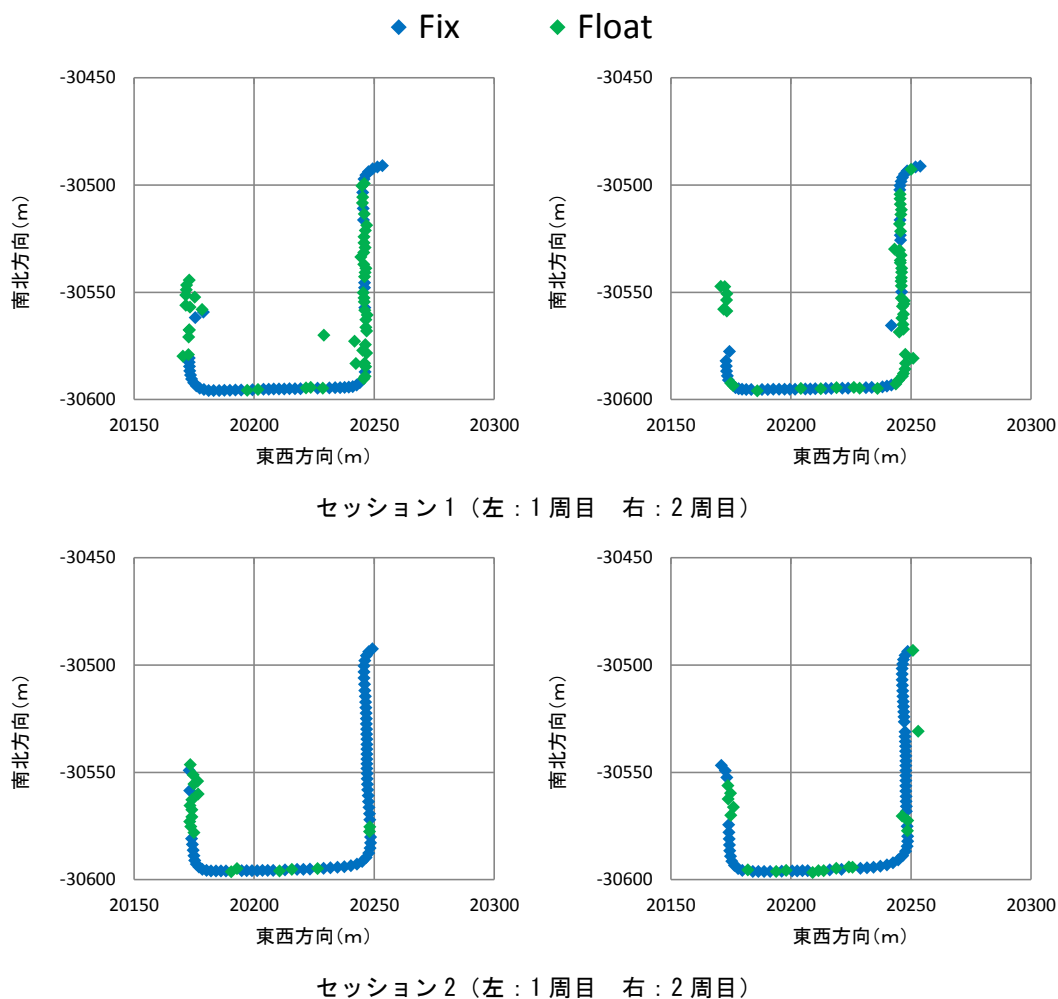


図 7-29 A-5 区間における全観測衛星使用時の基線解析結果

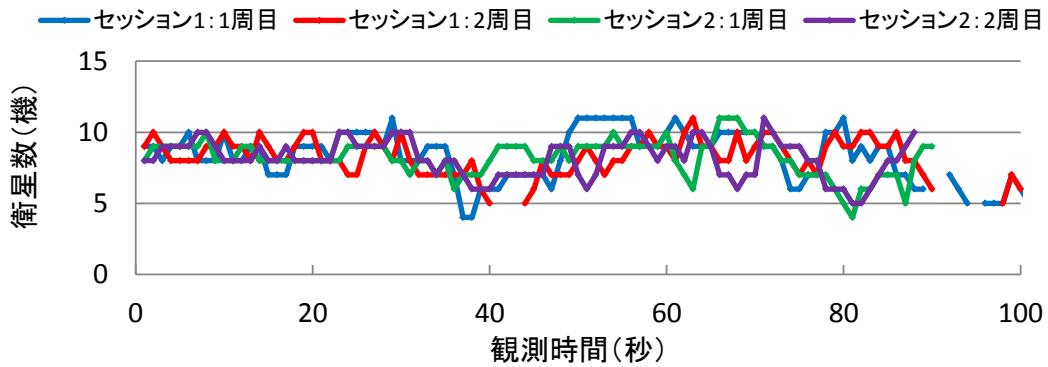


図 7-30 A-5 区間における観測衛星数の推移

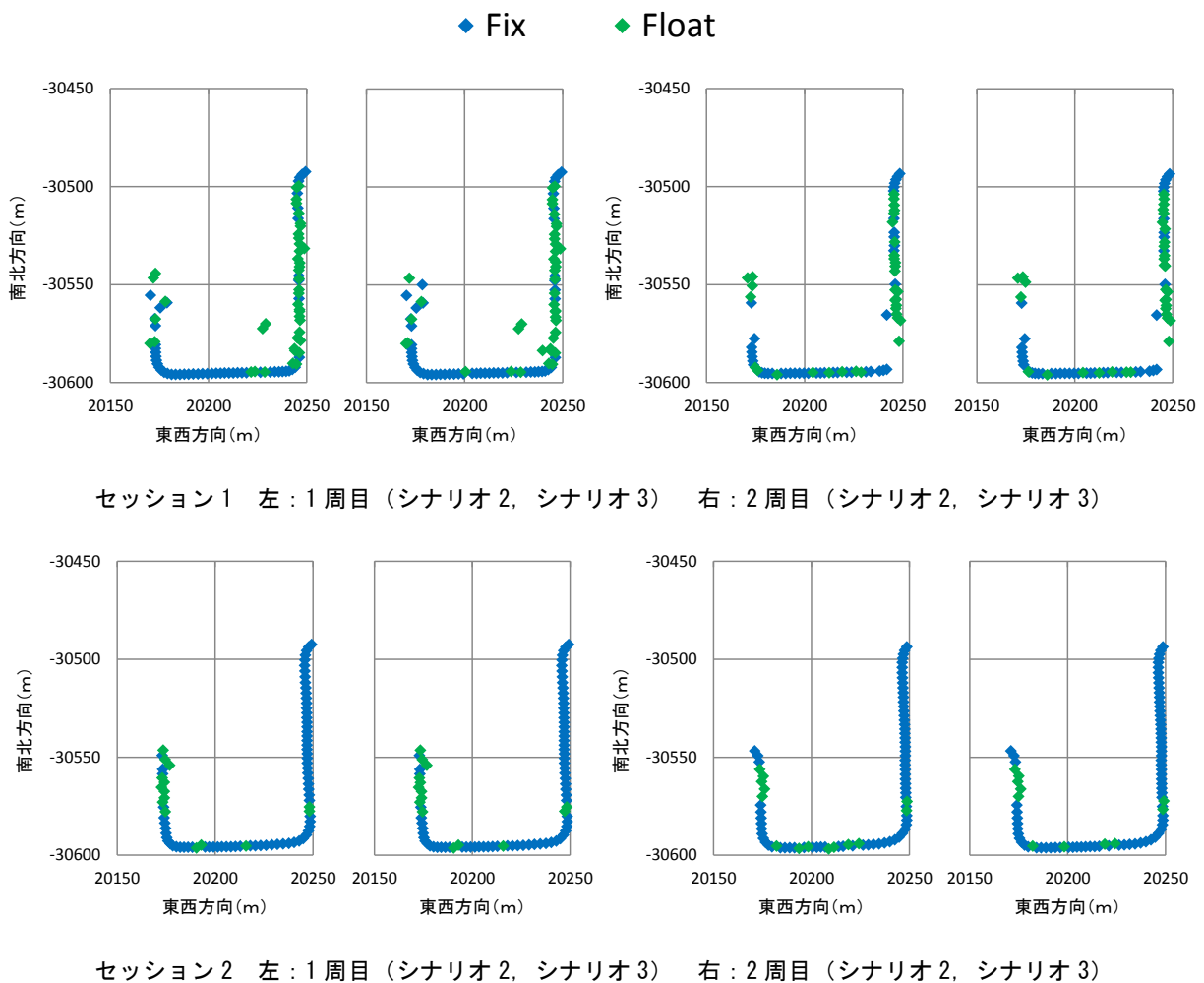


図 7-31 A-5 区間における衛星選択時の基線解析結果

もマルチパスの影響と想定される。なお、走行経路が変わる際と区間終点付近において衛星数が 5 機以下となる場合が見られるが、同時間の周囲の地物を確認すると建物や樹木によって東西が遮蔽されるため、衛星電波の遮蔽によるものと考えられる。

衛星選択時の基線解析結果を図 7-31 に示す。まず、セッション 1 の軌跡について確認すると、1 周目ではシナリオ 2, 3 について南走行、西走行で Fix 解の増加は見られなかった。終点付近

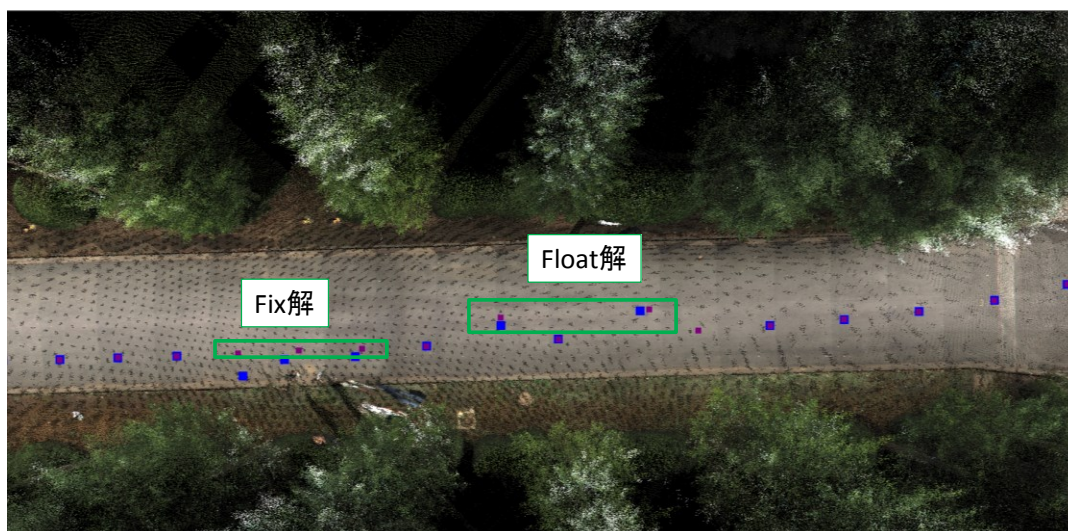


図 7-32 セッション 2 の 2 周目における測位結果の改善効果 (A-5 区間)

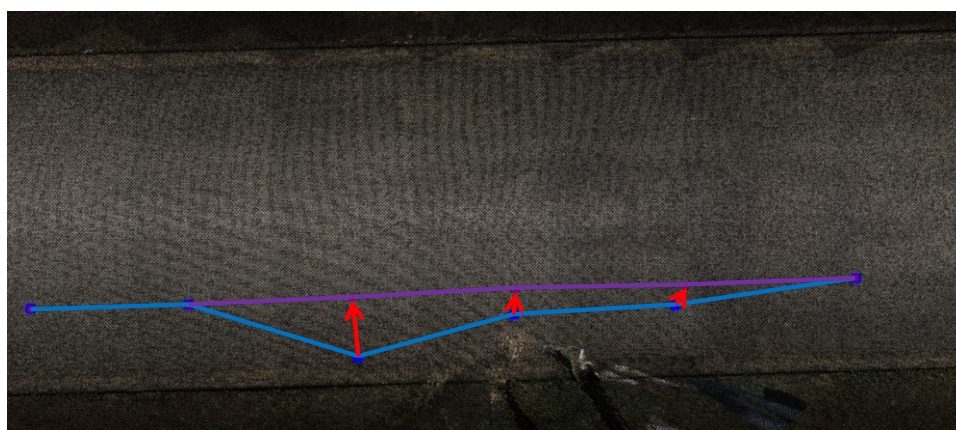


図 7-33 Fix 解取得地点における測位結果の改善効果

において Fix 解の増加は見られるものの、同地点付近で取得される Float 解と同様に左右に大きくぶれたプロットとなるため、間違った整数不定性で求められているものと考えられる。2 周目については、南走行、西走行でそれぞれ 1~2 点の Fix 解の増加が見られたが、地物により東西が遮蔽される位置において測位不能となり、西走行の始点付近まで解が得られなかった。次にセッション 2 の軌跡について確認すると、1 周目ではシナリオ 2, 3 ともに西方向への走行経路において 2 点の Fix 解の増加が見られた。2 周目についても、シナリオ 3 では南方向、西方向の双方の走行経路で Fix 解の増加が確認された。

図 7-32 に、セッション 2 の 2 周目における衛星選択による測位結果の改善効果を示す。青がシナリオ 1, 紫がシナリオ 3 による衛星選択時の解析結果である。衛星選択時において Float 解を取得する場合、直線走行しているにも関わらず図中に示すように上下にぶれたプロットとなることがわかる。一方、選択により Fix 解を取得した箇所では、図 7-33 に示すように、シナリオ 1 で走行経路の端にプロットされていた解が、直線上に並ぶようにプロットされており、衛星選択による改善効果が得られていることがわかる。

表 7-3 セッション 1 における取得した解の割合と Fix 解の改善率（単位：％）

A-1区間	1周目			2周目		
	Fix	Float	改善率	Fix	Float	改善率
シナリオ1:衛星選定なし	56.8	40.0	-	51.1	41.1	-
シナリオ2:DSS	62.1	34.7	5.3	64.4	27.8	13.3
シナリオ3:DSS+DDPC	65.3	30.5	8.4	65.6	26.7	14.4
A-2区間	1周目			2周目		
	Fix	Float	改善率	Fix	Float	改善率
シナリオ1:衛星選定なし	99.0	1.0	-	99.2	0.8	-
シナリオ2:DSS	99.0	1.0	0.0	100.0	0.0	0.8
シナリオ3:DSS+DDPC	99.0	1.0	0.0	100.0	0.0	0.8
A-3区間	1周目			2周目		
	Fix	Float	改善率	Fix	Float	改善率
シナリオ1:衛星選定なし	85.2	14.8	-	81.2	18.8	-
シナリオ2:DSS	87.5	12.5	2.3	85.9	14.1	4.7
シナリオ3:DSS+DDPC	90.9	9.1	5.7	84.7	15.3	3.5
A-4区間	1周目			2周目		
	Fix	Float	改善率	Fix	Float	改善率
シナリオ1:衛星選定なし	22.6	67.9	-	14.9	79.3	-
シナリオ2:DSS	22.6	65.5	0.0	18.4	64.4	3.4
シナリオ3:DSS+DDPC	22.6	64.3	0.0	18.4	55.2	3.4
A-5区間	1周目			2周目		
	Fix	Float	改善率	Fix	Float	改善率
シナリオ1:衛星選定なし	47.6	49.5	-	41.3	48.1	-
シナリオ2:DSS	52.4	41.0	4.8	44.2	33.7	2.9
シナリオ3:DSS+DDPC	54.3	39.0	6.7	43.3	33.7	1.9

表 7-4 セッション 2 における取得した解の割合と Fix 解の改善率（単位：％）

A-1区間	1周目			2周目		
	Fix	Float	改善率	Fix	Float	改善率
シナリオ1:衛星選定なし	82.8	17.2	-	77.4	21.4	-
シナリオ2:DSS	90.8	9.2	8.0	83.3	15.5	6.0
シナリオ3:DSS+DDPC	89.7	10.3	6.9	86.9	11.9	9.5
A-2区間	1周目			2周目		
	Fix	Float	改善率	Fix	Float	改善率
シナリオ1:衛星選定なし	100.0	0.0	-	100.0	0.0	-
シナリオ2:DSS	100.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0
シナリオ3:DSS+DDPC	100.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0
A-3区間	1周目			2周目		
	Fix	Float	改善率	Fix	Float	改善率
シナリオ1:衛星選定なし	91.5	8.5	-	86.3	8.2	-
シナリオ2:DSS	97.2	2.8	5.6	87.7	6.8	1.4
シナリオ3:DSS+DDPC	98.6	1.4	7.0	89.0	5.5	2.7
A-4区間	1周目			2周目		
	Fix	Float	改善率	Fix	Float	改善率
シナリオ1:衛星選定なし	42.4	52.9	-	42.1	53.9	-
シナリオ2:DSS	48.2	47.1	5.9	43.4	51.3	1.3
シナリオ3:DSS+DDPC	48.2	44.7	5.9	43.4	48.7	1.3
A-5区間	1周目			2周目		
	Fix	Float	改善率	Fix	Float	改善率
シナリオ1:衛星選定なし	78.9	21.1	-	78.4	21.6	-
シナリオ2:DSS	83.3	16.7	4.4	83.0	17.0	4.5
シナリオ3:DSS+DDPC	83.3	16.7	4.4	86.4	13.6	8.0

経路 A で得られた観測値に対して、衛星選択による効果を検証した結果、全観測衛星使用時に Float 解となる経路において Fix 解の取得を確認することができた。また、3次元点群データと解の分布を比較した場合、走行経路上に Fix 解がプロットされていることが確認でき、衛星選択

により得られた **Fix** 解についても正確な値を得ていることがわかった。表 7-3、表 7-4 に、経路 A の各区間で得られた解の割合と **Fix** 解の改善率を示す。衛星を選択することで **Fix** 解の取得率が改善することが各区間で確認でき、*DSS*と*DDPC*による移動時のマルチパス検知結果に基づいた衛星選択効果を示すことができた。静止時と同様に、回折波や反射波によるマルチパスの影響を含む受信電波を排除できるものと考えられる。しかし、基線解析に必要な衛星数が得られない箇所では本手法を適用することはできず、また、マルチパス検知指標の基準値内となる衛星が基線解析の必要数を満たさない場合、改善効果をほとんど得ることはできない。GPS、GLONASS だけでなく、準天頂衛星等の併用により、衛星選択後も解析に十分な電波を受信できる場合、有効な手法となる可能性がある。

7-2-2 一般道路走行による検証

経路 A に続き、経路 B 走行時に取得した観測値を移動局として、衛星選択による効果を確認した。走行した経路の概要図を図 7-34 に示す。観測開始位置は、図中に示す駐車場出口付近であり、そこから経路 B に進入した。走行は、日本大学船橋キャンパス周囲の道路を反時計回りでを行い、民家等により遮蔽される区間 (B-1) と上空視界が比較的開けている区間 (B-2) を走行した。

図 7-35 に、全観測衛星使用時の基線解析結果の軌跡を示す。青が Fix 解、緑が Float 解である。区間毎に取得した解の種類を確認すると、セッション 1 では B-1 区間で Float 解の取得が確認でき、B-2 区間では取得する解のほとんどが Fix 解となることがわかる。また、セッション 2 では B-1 区間での Fix 解の取得数が増加し、B-2 区間ではセッション 1 と同様 Fix 解を連続取得できることがわかる。図 7-36 に、経路 B における全観測衛星使用時の解析衛星数を示す。セッション 1 では、衛星数が 4 機~15 機と広範囲で変化が見られ、Float 解の取得は解析に必要な衛星数の不足とマルチパスの影響の双方が要因として含まれているものと考えられる。一方、セッション 2 では、衛星数の変化は主に 6 機~13 機であり、セッション 1 よりも範囲が小さいことがわかる。これは、セッション 2 における観測衛星が、セッション 1 よりも全体的に高仰角で



図 7-34 経路 B における各走行区間の概略図

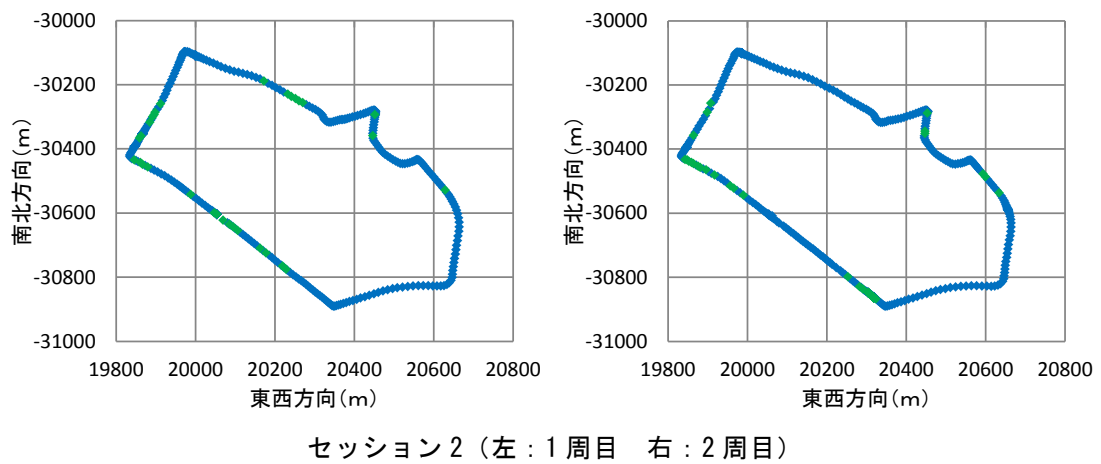
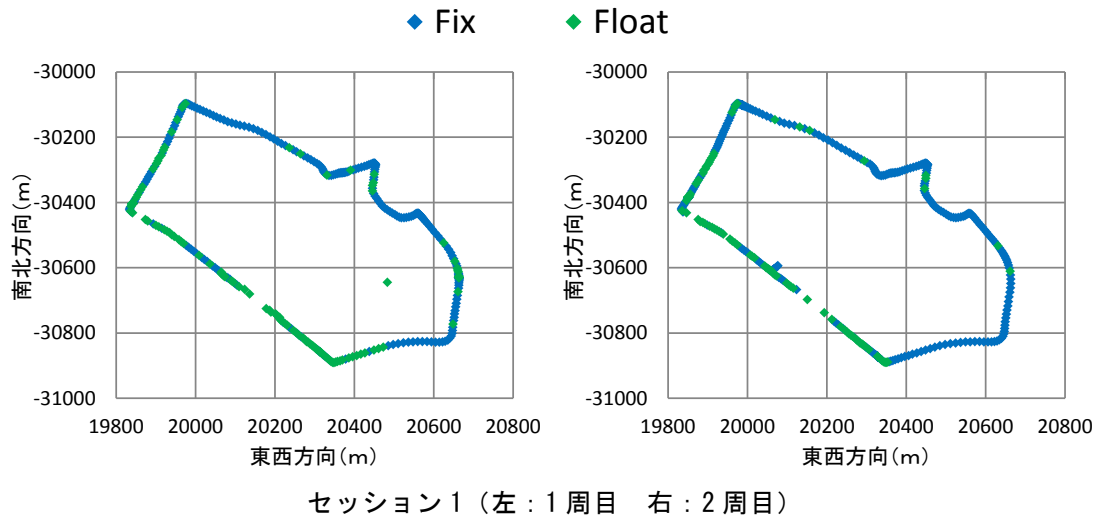


図 7-35 経路 B における全観測衛星使用時の基線解析結果

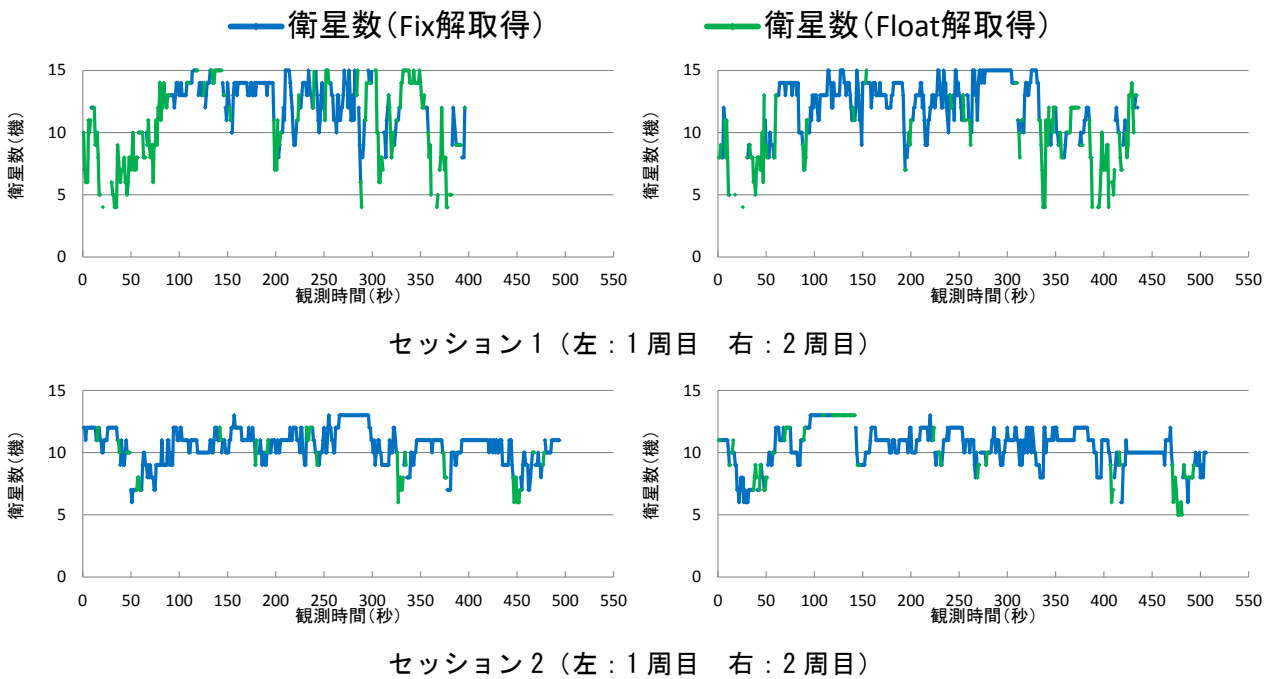
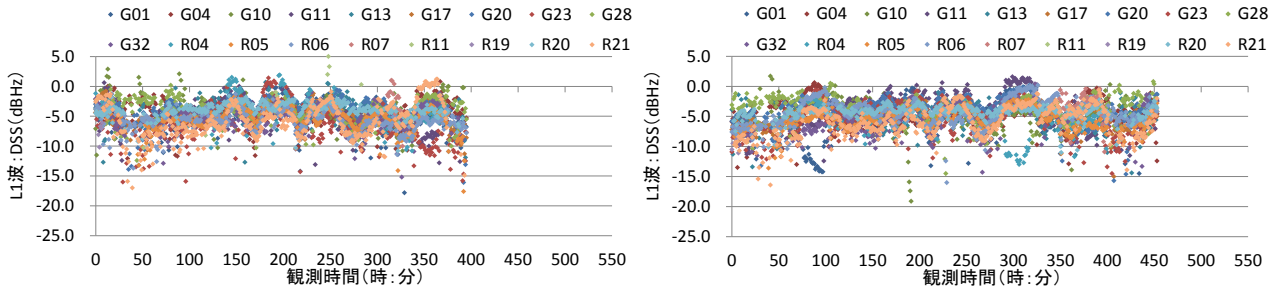
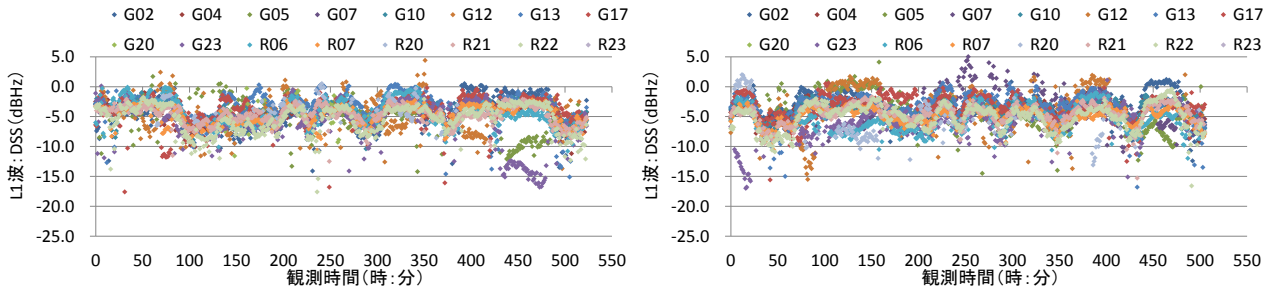


図 7-36 経路 B における全観測衛星使用時の解析衛星数

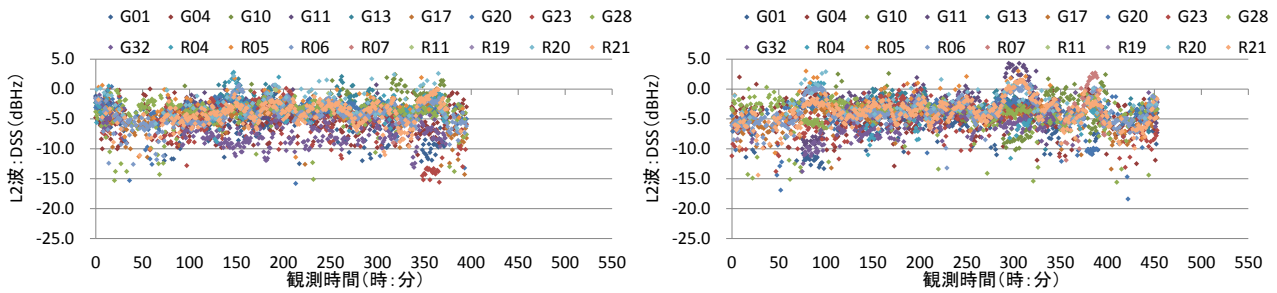


セッション1 (左: 1 周目 右: 2 周目)

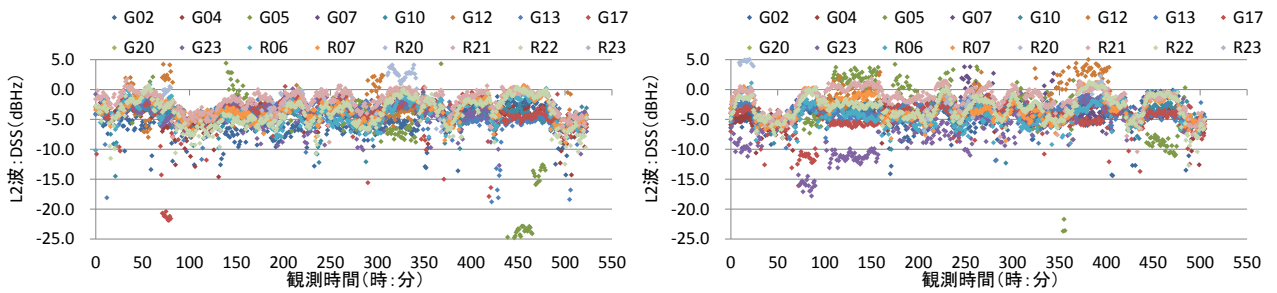


セッション2 (左: 1 周目 右: 2 周目)

図 7-37 経路 B における観測衛星のDSS算出結果 (L1 波)



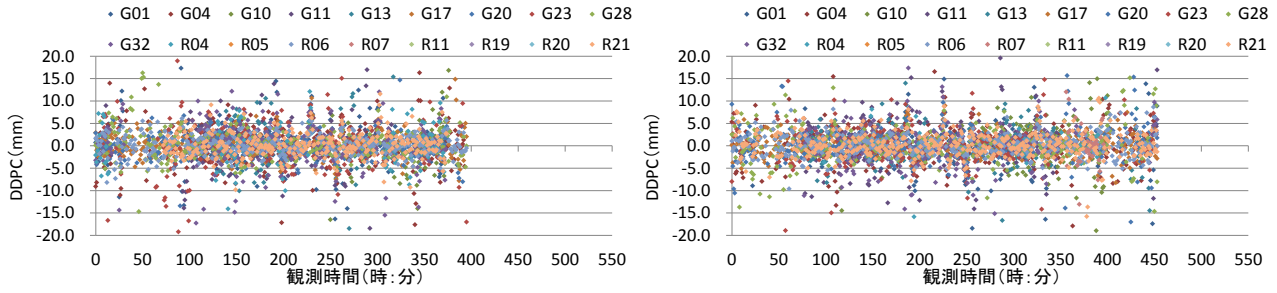
セッション1 (左: 1 周目 右: 2 周目)



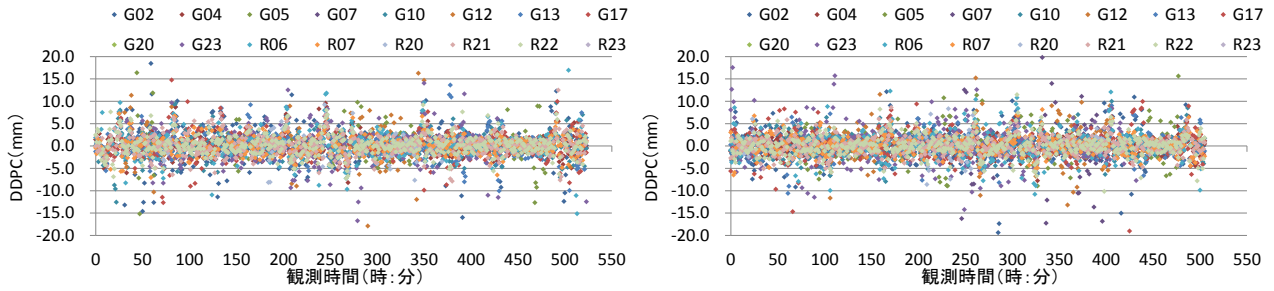
セッション2 (左: 1 周目 右: 2 周目)

図 7-38 経路 B における観測衛星のDSS算出結果 (L2 波)

あるためであり、本セッションの Float 解取得はマルチパスの影響によるものと考えられる。図 7-37、図 7-38 に L1 波と L2 波による DSS 算出結果を示す。セッション 1 において Float 解と Fix 解を取得する時間帯を比較すると、区間の開始と終了の地点で DSS が低くなる傾向が確認できる。



セッション1 (左: 1 周目 右: 2 周目)



セッション1 (左: 1 周目 右: 2 周目)

図 7-39 経路 B における観測衛星の DDPC 算出結果

図 7-39 に DDPC 算出結果を示す。セッション 1 と 2 を比較すると、Float 解の取得が多いセッション 1 のほうが分布は大きいことがわかる。以降は、経路 A と同様にシナリオ別の衛星選択および基線解析を実施し、衛星選択効果を検証するものとする。

(1) B-1 区間経路

B-1 区間における全観測衛星使用時の基線解析結果を図 7-40 に示す。セッション 1 では、先ほど述べたように Float 解の取得が確認でき、周回数に関わらず同地点で、Fix 解や Float 解、測位不能となることがわかる。Float 解取得の要因については、図 7-36 でも示したように、衛星数が 4 機～15 機の間で推移するため、基線解析時の衛星数不足とマルチパスによる影響の 2 種類が考えられる。一方、セッション 2 では全体的に Fix 解の取得数が増加しており、セッション 1 と比較するとマルチパスの影響が小さいものと考えられる。衛星数についても、セッション 1 よりも多く観測されており、衛星電波の受信環境が良好であることがわかる。しかしながら、取得数は少ないものの Float 解が一部で確認できるため、マルチパスの影響を受けているものと考えられる。

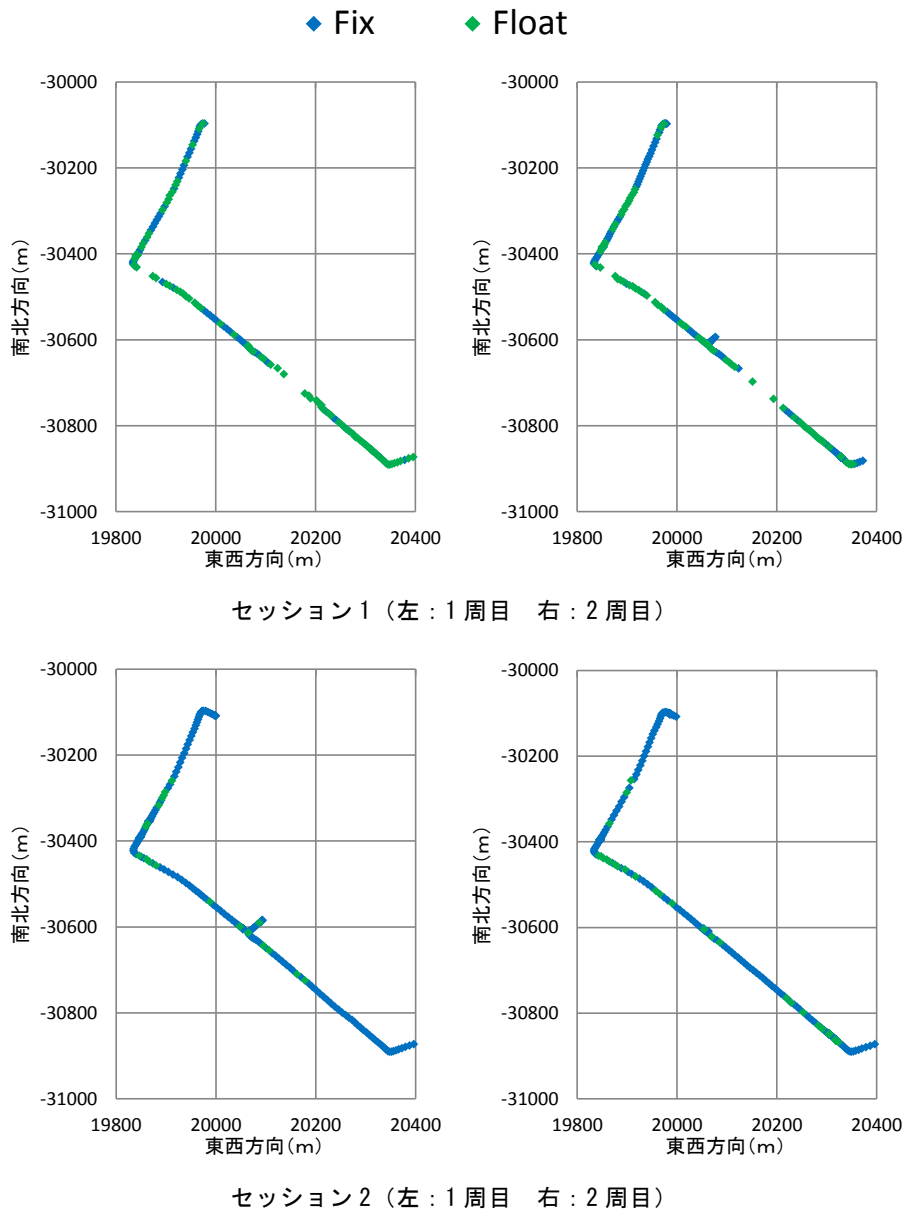
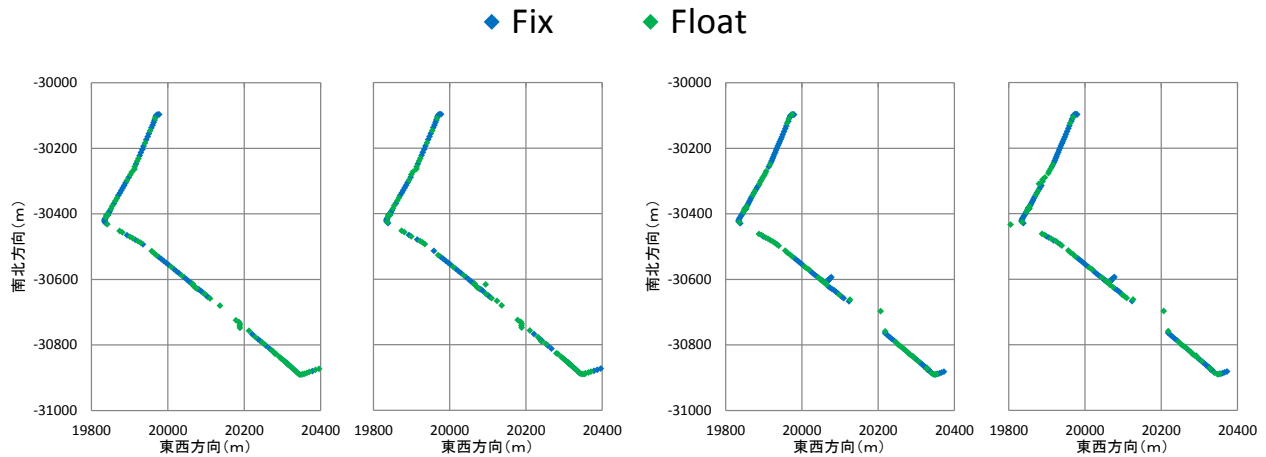
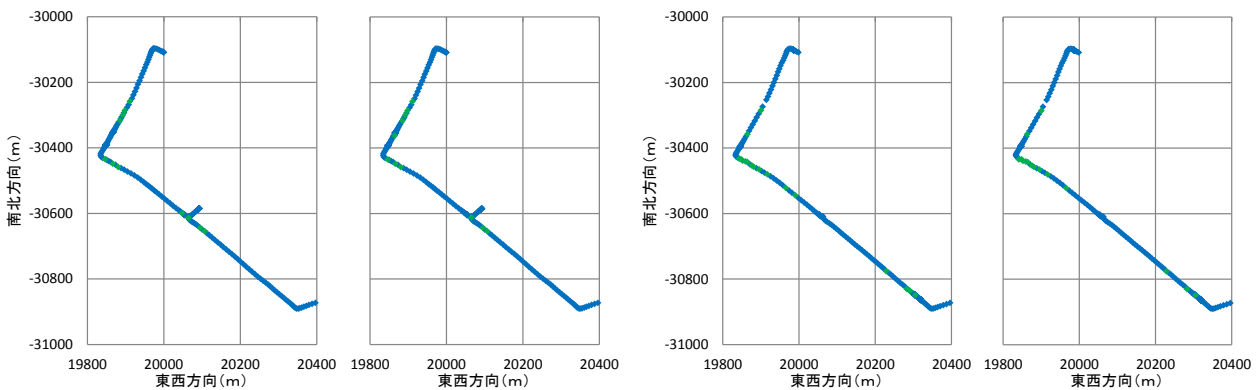


図 7-40 B-1 区間における全観測衛星使用時の基線解析結果



セッション1 左：1周目（シナリオ2, シナリオ3） 右：2周目（シナリオ2, シナリオ3）



セッション2 左：1周目（シナリオ2, シナリオ3） 右：2周目（シナリオ2, シナリオ3）

図 7-41 B-1 区間における衛星選択時の基線解析結果

表 7-5 B-1 区間における取得した解の割合と Fix 解の改善率

セッション1	1周目			2周目		
	Fix	Float	改善率	Fix	Float	改善率
シナリオ1:衛星選定なし	36.5	57.7	-	57.1	35.8	-
シナリオ2:DSS	48.7	42.9	12.2	62.1	28.8	5.0
シナリオ3:DSS+DDPC	46.6	41.3	10.1	62.1	28.3	5.0
セッション2	1周目			2周目		
	Fix	Float	改善率	Fix	Float	改善率
シナリオ1:衛星選定なし	93.6	6.4	-	84.3	15.7	-
シナリオ2:DSS	96.3	3.7	2.7	94.3	5.3	10.1
シナリオ3:DSS+DDPC	96.3	3.7	2.7	95.0	4.7	10.7

衛星選択時の基線解析結果を図 7-41 に示す。セッション 1 については、表 7-5 に示すように衛星選択により Fix 解の取得数が増加することが確認できるが、図中のプロットを比較した場合、シナリオ 1 による全観測衛星使用時の結果とほとんど差は見られなかった。走行時における観測衛星数と DSS, DDPC により除去対象となる衛星数を確認したところ、GPS+GLONASS の基線解析に必要な 6 衛星以上を得られない場合が多く見られ、マルチパスの影響を含む受信電波を含めて解析を行ったことで結果に差が見られなかったものと考えられる。一方、セッション 2 につい

では、こちらも表 7-5 より Fix 解の取得数が増加することが確認できるが、プロット図においても、車両駐車位置付近の道路において Fix 解の取得改善が見られた。選択後も基線解析に必要な衛星数を確保できるため、経路 A の検証でも述べたように、十分に電波を受信できる場合に有効な手法になると考えられる。

(2) B-2 区間経路

B-2 区間における全観測衛星使用時の基線解析結果を図 7-42 に示す。セッション 1, 2 ともに Fix 解の連続取得が確認できるが、一部の経路で Float 解の取得が見られる。衛星数については、図 7-36 で示したように、GPS+GLONASS の基線解析に必要な 6 機以上となるため、マルチパスが影響していることがわかる。

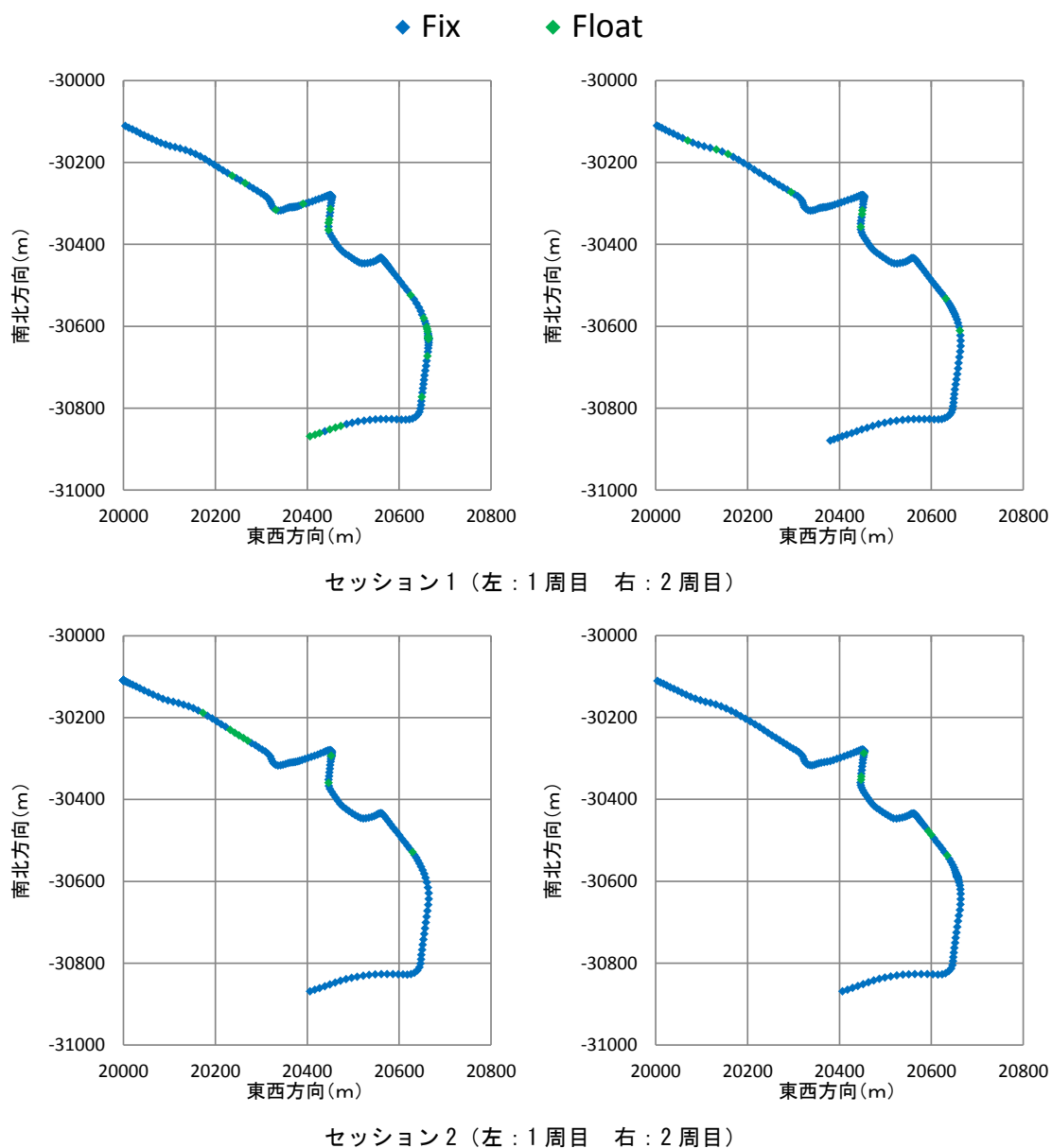


図 7-42 B-2 区間における全観測衛星使用時の基線解析結果

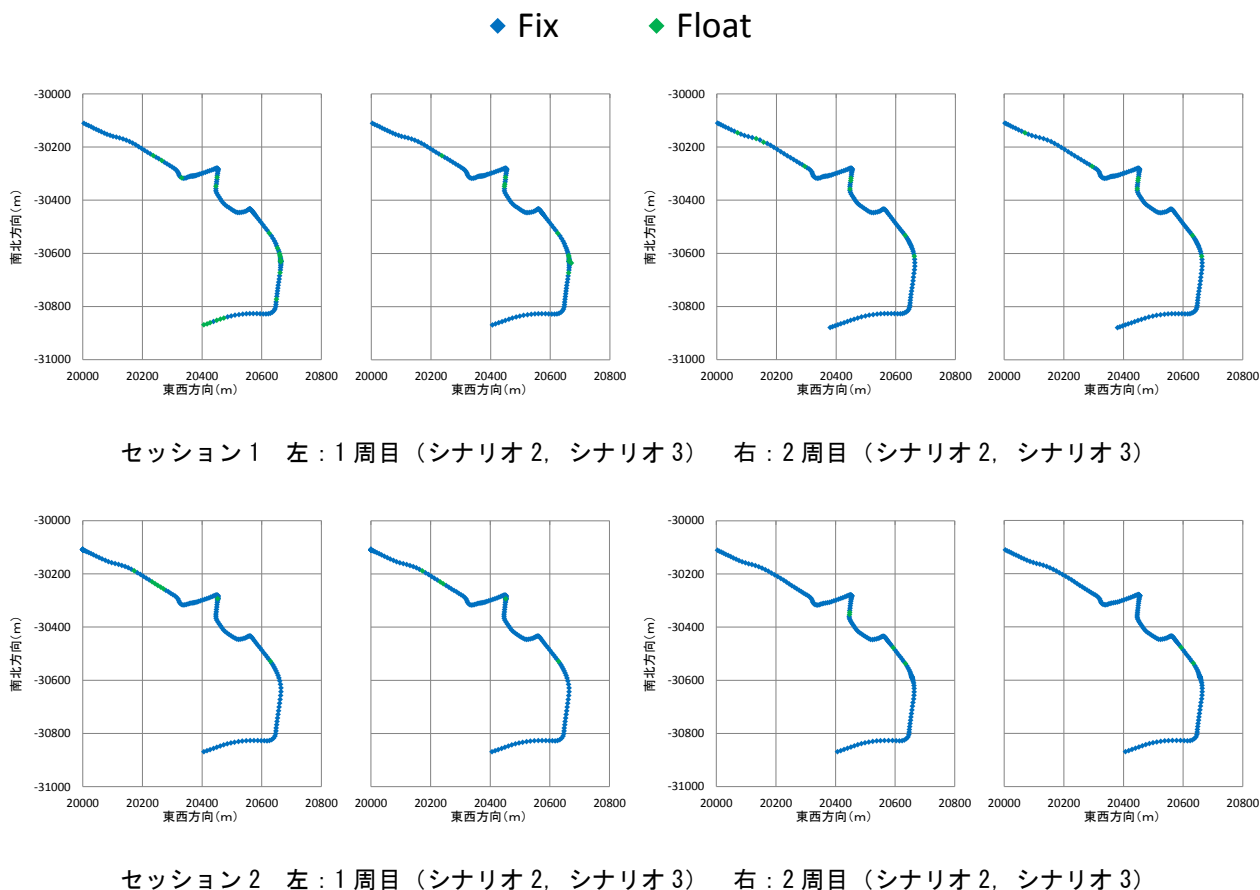


図 7-43 B-2 区間における衛星選択時の基線解析結果

表 7-6 B-2 区間における取得した解の割合と Fix 解の改善率

セッション1	1周目			2周目		
	Fix	Float	改善率	Fix	Float	改善率
シナリオ1:衛星選定なし	87.1	12.9	-	95.7	4.3	-
シナリオ2:DSS	89.1	10.9	2.0	95.7	4.3	0.0
シナリオ3:DSS+DDPC	94.0	6.0	7.0	96.7	3.3	1.0
セッション2	1周目			2周目		
	Fix	Float	改善率	Fix	Float	改善率
シナリオ1:衛星選定なし	95.5	4.5	-	96.8	3.2	-
シナリオ2:DSS	96.0	4.0	0.5	97.9	2.1	1.1
シナリオ3:DSS+DDPC	97.5	2.5	2.0	98.9	1.1	2.1

衛星選択時の基線解析結果を図 7-43 に示す。衛星選択により、シナリオ1で Float 解となる箇所について Fix 解を得ることが確認でき、DSSとDDPCの双方を使用したシナリオ3のほうが、改善効果が大きく表れていることがわかる。各セッション、周回毎の Fix 解の改善率を調べると、表 7-6 よりシナリオ3では全ての観測値で改善効果が得られていることがわかる。走行時における観測衛星数とDSS、DDPCにより除去対象となる衛星数を確認したところ、選択後もGPS+GLONASSの基線解析に必要な6衛星を常に上回る傾向が見られた。マルチパスの影響を含む受信電波を除去したことにより、Fix 解の取得数が増加したものと考えられる。

7-3 まとめ

本章では、移動時に得られた観測値に対して、*DSS*と*DDPC*によるマルチパスを含む受信電波の判別を行い、*RTK*法への適用を考慮した衛星選択をシナリオ別に実施し基線解析を行った。得られた **Fix** 解の割合と走行経路上の解の軌跡を確認することで、車線維持等の運転支援システムへの適用を目的とした移動時の測位における衛星選択効果の有効性を検証した。

遮蔽環境の異なる経路毎に観測値を区切り、シナリオ別の解の軌跡を比較した場合、衛星選択による **Fix** 解の取得数増加が見られた経路と、取得される **Float** 解が全観測衛星使用時よりも大きく分布される場合の2つの傾向が確認された。*DSS*、*DDPC*により選択基準内となる衛星の数を調べると、**Fix** 解が得られる経路では選択後も基線解析に必要な衛星数を満たすことが確認でき、**Float** 解の分布が大きくなる経路では選択基準を満たす衛星が少なく、マルチパスを含むと想定される受信電波を使用して基線解析を行っていることがわかる。よって、衛星選択後、基線解析に必要な衛星数を確保できる環境であれば、静止時と同様にマルチパスを含む受信電波の除去は有効な手段になると考えられる。また、シナリオ別の比較より、*DSS*と*DDPC*を選択基準としたシナリオ3では、衛星選択後、基線解析に必要な衛星数を確保できる経路において最も **Fix** 解の取得数が増加する傾向が見られた。加えて、走行経路を表現する3次元点群データ上に取得した解をプロットした場合、正確な走行軌跡を再現できることが確認でき、運転支援システム等の移動時の測位において、*DDPC*によるマルチパス検知、および指標値を参考としたマルチパス除去は有効な手段であると考えられる。

なお、衛星選択により **Fix** 解が得られなかった経路については、マルチパスが影響しない受信電波の数が主な課題となっている。今回の検証では、観測値の取得時間帯を変更してセッション1と2を実施し、観測衛星数の少ないセッション1では **Float** 解となる経路もセッション2では **Fix** 解が得られるといった状況が見られた。しかしながら、経路AのA-4区間のように極めて上空視界の悪い環境では、セッションに関わらず、解析に必要な衛星数を観測できない場合が見られた。実際の都市部においても、道路周辺の地物が高ければ、マルチパスのほか衛星数不足により解析不能となる場合が考えられるため、準天頂衛星等のGPS、GLONASS以外の衛星を併用し基線解析が可能な段階まで衛星数を増やす必要がある。解析に必要な衛星数が得られる環境となれば、セッション2で **Fix** 解が得られた経路と同様に、マルチパスを含む受信電波を除去することで、上空視界の悪い環境でも **Fix** 解を取得できる可能性がある。

第8章 結論

8-1 本研究の成果

本論文では、測位誤差となる反射波と回折波の双方のマルチパスに対応するため、搬送波の位相変化量の差を用いたマルチパス検知手法を新たに提案し、衛星位置、可視条件を踏まえた提案手法の検証を行った。また、受信アンテナの静止時と移動時で得られた観測値に対して、提案したマルチパス検知手法に基づく衛星選択を行い、その効果について検証を行った。本章では、第2章以降の得られた成果を章ごとに示す。

「第2章 衛星測位システムの概要と測位技術」では、衛星電波と干渉測位方式の概要に加え、電波伝搬やその他の要因によって生じる誤差についてまとめた。干渉測位の誤差要因の一つであるマルチパスについては、電離層、対流圏による遅延誤差と比較し消去が困難な要素であり、高精度な衛星測位を実現するには、マルチパスによる誤差を低減することが不可欠であることがわかった。

「第3章 衛星測位におけるマルチパス誤差とその削減」では、第2章で示したマルチパスについて、受信機内部における衛星電波の処理を交えてその影響を示し、加えて、マルチパスとなる反射波、回折波の伝搬特性について示した。受信機内部の相関処理によって、マルチパスを抑制することが可能であること、信号強度の特性を用いて回折波を含む受信電波を判別できる可能性を明らかにした。一方で、直接波と反射波の双方を含む可視衛星からの受信電波については、電波伝搬の特性から検知することは困難であることを示した。

「第4章 提案するマルチパス検知手法」では、受信機から得られる観測値を用いたマルチパス検知手法を構築するため、マルチパスの影響を受ける受信電波の信号強度、疑似距離、搬送波位相の測定値と、マルチパスの影響を受けない同測定値の傾向を確認した。本章では、L1波とL2波の周波数帯の異なる搬送波位相について、マルチパスの影響を含む場合、各々の位相変化量に差が生じることを示し、位相変化量の差であるDPCを確認することで、マルチパスの影響を含む受信電波を判別できるものと結論づけた。また、この検証結果を基に衛星の選定を行いキネマティック法による基線解析を行った結果、Fix解の取得数の増加が見られ、さらに、GPSとGLONASSを併用することで、GPSのみの場合よりもFix解の取得数がさらに増加することが確認された。

「第5章 マルチパス検知手法の検証」では、第4章で示した信号強度と搬送波位相変化量の差であるDPCの検証結果をもとに、具体的なマルチパス検知手法の構築を行った。まず、信号強度の差であるDSSを用いたマルチパス検知手法では、回折波が含まれるものと想定される受信電波に対して値の低下が見られ、同電波に対する検知はDSSを用いることで可能であることを示した。一方、位相変化量の差を利用したDDPCによる検知手法では、受信電波にマルチパスの影響が含まれる場合、指標値が0mmから離れる、または分布範囲が大きくなることがわかった。移動平

均によるDDPCの分布位置を確認することで、マルチパスの影響を含むと想定される受信電波に対して、天頂付近等のマルチパスの影響を含まない場合と異なる傾向を示すことから、回折波、反射波を含む受信電波の検知に対応できるものと結論付けた。

「第6章 静止時における衛星選択の効果」では、第5章で示したマルチパス検知手法を基に、解析に使用する衛星の選択を行い、得られる解の種類と基準値からの分布より静止時における衛星選択効果の検証を行った。その結果、DSSとDDPCにおける基準値外となる衛星を除去し基線解析を行うことで、全観測衛星を使用した場合よりもFix解の取得数が増加し、解の精度についても向上することが確認された。加えて、衛星選択時の衛星数と得られた基線解析結果を比較することで、基線解析に必要な衛星数を十分に確保できる環境であれば、DDPCを衛星選択基準に含めることで、DSSのみの場合よりもFix解の取得数が増加することを確認した。よって、DDPCを用いたマルチパス検知手法による衛星選択は、高精度な測位解を安定して取得する上で有効な手段であると結論づけた。

「第7章 移動時における衛星選択の効果」では、車両の移動時に取得した観測値を移動局データとして、第6章と同様にマルチパス検知手法に基づく衛星選択効果を検証した。その結果、DSSとDDPCにより衛星選択を行い、基線解析に必要な衛星数を満たす条件であれば、Fix解の取得数が増加し、同解を途切れることなく連続取得できることを確認した。加えて、走行経路の座標値と得られたFix解を比較すると、正確な走行軌跡を再現できることを確認した。マルチパス検知に基づく衛星選択により高精度解であるFix解の取得率を改善できることから、移動体測位への高精度化に寄与するものと考えられる。

以上より、搬送波位相変化量の差を利用したDDPCによるマルチパス検知指標は、回折波および反射波の双方のマルチパスに対して検知できる可能性を示し、干渉測位による高精度な衛星測位において、マルチパスを含む受信電波を検知し除去することで、測位精度の面で改善効果が得られることがわかった。また、DSSのみでは検知できないマルチパスについても、DDPCを適用することで検知が可能となり、Fix解の取得数や精度面において改善効果が得られることを確認し、静止測位だけでなく、移動体測位への高精度化に大きく前進すると考える。

8-2 今後の展望

上記の成果を受けて、今後は、次のような研究を進める必要があると考えられる。まず、RTK法によるリアルタイムな高精度測位に適用することを考慮し、マルチパス検知手法による指標値の算出から衛星選定までの流れの自動化が挙げられる。基準局から移動局へのデータ送信に使用されるRTCM, CMRフォーマットには、DDPCやDSSの算出に必要な搬送波位相と信号強度の観測値が含まれているため、受信機が基線解析を行う前の処理段階に組み込むことで運用が可能になるものと考えられる。このほか、基線解析に必要な衛星数、基線解析から衛星を除外することで発生するサイクルスリップへの対処についても考慮していかなければならない。

次に、実際に運転支援システムとして RTK 法とマルチパス検知手法を適用する場合、基準局となる観測値の取得方法を考案する必要がある。本論文で提案したマルチパス検知手法は、電離層と対流圏による遅延誤差を同一と見なすことができる 10km 以下の基線長が適用条件となる。今回の検証では、基準局となる観測値を周囲に遮蔽物のない観測点で取得を行ったが、国土地理院が維持管理を行う電子基準点で得られた観測値を基準局として扱うことで、移動局となる車両位置に関わらず提案手法が適用可能になるものと考えられる。電子基準点は、日本全国に約 20km 間隔で設置されているため、前述の遅延誤差に対して対処が可能である。また、2013 年 5 月 10 日より従来の GPS に加えて、GLONASS と QZSS の観測値の提供を全国で開始しており、複数衛星系による併用測位にも対応が可能である。一方、移動局への観測値の送信については、その方法や基線長によって遅延が生じるため、最適な送信方法について考案し、その検証を行う必要があると考えられる。このほか、トンネル内等の衛星電波を受信できない経路では、カメラ画像等の衛星電波を用いない既存の位置情報取得技術が必要となるため、これら複数技術の組合せについても検討しなければならない。

さらに、提案したマルチパス検知手法の今後の展開としては、QZSS 等の新たな衛星系の電波のほか、GPS の新民生信号である L5 波等を使用した検証が挙げられる。今回の検証で使用した GPS と GLONASS については、DSS、DDPC による指標の傾向に関して類似の結果が得られたが、今後一般利用が可能となる新たな衛星系についても十分検証する必要があると考えられる。本論文における衛星選択効果の検証においても、観測可能な衛星数の少なさにより解析が困難となる状況が見られたため、先ほどの自動化も含めて重要なテーマであると考えられる。また、ブロック II F 以降の GPS や QZSS 等については、L1 波、L2 波のほか L5 波の送信が行われており、これらの衛星に対しては、DDPC の算出時の組合せを新たに増やすことができる。マルチパスを含む受信電波の検知を指標の分布位置で確認する DDPC では、算出時の組合せを増やすことで、その検知精度を向上できるものと考えられる。

最後に、干渉測位方式による高精度な衛星測位を必要とする分野に対して十分に検証を行い、さらに測位結果が必要となる状況についても検討を行うことで、本研究で得られた成果を一層深められるものと期待する。

謝辞

本研究を博士論文としてまとめるにあたっては、多くの方々からご指導、ご協力をいただきました。厚く御礼申し上げます。

日本大学理工学部交通システム工学科教授・佐田達典先生には、まず、本研究のテーマを頂けたことに深く感謝いたします。研究当初はおぼろげであった方向性も次第に定まり、今日に至りました。本研究に対しても終始格別なるご指導をいただいたことに心より感謝し、厚く御礼申し上げます。

また、副査をお引き受けてくださいました同交通システム工学科教授・福田敦先生には、著者に不足していた交通工学の観点から有益な助言をいただくとともに、本研究の位置づけを明確にする広い視点から様々なご指導をいただきました。厚く御礼申し上げます。

同じく副査をお引き受けてくださいました同交通システム工学科教授・轟朝幸先生には、ご多忙の中論文の内容、並びに発表資料の構成に関して有益な助言を頂きました。ご相談に乗っていただき深く感謝いたします。

さらに東京大学大学院工学系研究科教授・清水英範先生には、本論文の副査を引き受けていただき、執筆、並びに内容に関するご相談に乗っていただき深く感謝いたします。また、研究者としての姿勢をご教示いただいたことに、厚く御礼申し上げます。

日本大学理工学部交通システム工学科教授・藤井敬宏先生をはじめ、社会交通工学専攻の皆様には専攻内の説明会において本研究に対する有益なご指摘をいただきました。厚く御礼申し上げます。本研究の要でもある衛星測位に関連したテーマは、学部4年時から今日に至るまで継続的に取り組んできた内容でもあり、本研究の遂行はこれまでの研究活動をまとめる上で重要な意味を持つものであった。改めて心より感謝申し上げます。

株式会社フィールドテックの村山盛行氏、福森秀晃氏には、キャンパス内の3次元点群データの取得に関してご協力を頂き、また、研究内容に関してご指摘をいただきました。深く御礼申し上げます。

株式会社タクモの清水哲也氏には、RTK測位等の衛星測位のシステム構成に関するご指導、3次元点群データ取得など広くご協力を頂きました。お忙しい中ご協力いただき、心より感謝申し上げます。

日本大学理工学部交通システム工学科助教の石坂哲宏氏には、研究活動に対して大変お世話になりました。誠に有難う御座います。また、研究室の千葉史隆氏（現・三井住友建設）、竹下裕貴氏、船戸智也氏をはじめとして、本研究のデータ収集に関してご協力を頂きました。この場をお借りして御礼申し上げます。

本研究は、ここに記しきれない多くの方々のご支援を得て成立しており、また、頼もしいご協力があったからこそ、最後までまとめることが出来たと思います。この場をお借りして、改めて感謝申し上げます。

最後に，大学生活の物心両面にわたり支えて頂いた両親に心より感謝します。

2014年1月
池田隆博