

## 4. 衛星系の組み合わせに関する調査・検討

### 4.1. GLONASS チャンネル間バイアスの変化とその変化量が測位解の精度及び安定性に与える影響の調査・検討

GLONASS の FDMA 方式により発生する GLONASS チャンネル間バイアス (IFB : Inter Frequency Bias) について、異なる受信機メーカーの組み合わせそれぞれで補正値を求め、その値が温度変化、アンテナ種類、受信機ファームウェアバージョン、受信機再起動、受信機個体差等により変化が発生しないか調査した。また、変化が発生した場合、その変化量が測位解の精度及び安定性に与える影響について調査した。

#### 4.1.1. GLONASS チャンネル間バイアスの推定方法

GLONASS チャンネル間バイアスの推定には、ANTTOOL 2.1 を用いて、異なる受信機メーカーの GNSS 受信機の組み合わせによる基線で観測することで推定した。IFB 推定のアルゴリズムは「平成 23 年度衛星系の組合せに関する調査検討業務」報告書を参照されたい。

#### 4.1.2. データの観測

観測は、東京海洋大学越中島キャンパス第 4 実験棟の屋上にアンテナを設置して行った。2 組以上の受信機により静止した状態で観測した。

異なる受信機メーカーの組み合わせとして、表 4-1 の 4 機種 6 台の受信機と 2 機種 3 台のアンテナを使用した。各受信機の略称を表 4-2 の通りとする。全ての観測で JAVAD(G) 受信機を基線解析の基準点とした。ターゲット点は 1 つのアンテナをスプリッタで分配し、各受信機と接続した。アンテナは、基準点、ターゲット点とも同一機種のアンテナ NovAtel GPS 703 GGG を使用した。アンテナ交換の影響調査の条件のみ、ターゲット点を Trimble GNSS Choke Ring アンテナに交換した。

様々な観測条件が IFB に与える影響を調査するために、表 4-3 の 6 通りの条件で観測を行った。上空視界はオープンスカイ環境とした。

各観測条件と観測日は表 4-4 の通りである。なお、受信機個体差の影響は、各観測で Trimble NetR9 受信機をターゲット点で 2 台使用し、この 2 台を比較することで調査した。また、観測の際に受信機内部温度を測定した。

表 4-1 観測に使用した受信機・アンテナと対応衛星系

受信機			
メーカー	型式	数量	GNSS 対応
JAVAD	DELTA	2 台	GPS (L1,L2,L5) GLONASS (L1,L2) QZSS (L1,L2,L5)
Trimble	NetR9	2 台	GPS (L1,L2,L5) GLONASS (L1,L2) QZSS (L1,L2,L5)
TOPCON	NET-G3A	1 台	GPS (L1,L2,L5) GLONASS (L1,L2) QZSS (L1,L2,L5)
Leica	GRX1200+ GNSS	1 台	GPS (L1,L2,L5) GLONASS (L1,L2)
アンテナ			
メーカー	型式	数量	
NovAtel	GPS 703 GGG	2 台	GNSS (L1,L2,L5)
Trimble	GNSS Choke Ring Antenna	1 台	GNSS (L1,L2,L5)

表 4-2 受信機略称

メーカー	型式	数量	略称
JAVAD	DELTA	2 台	Javad(G) Javad(T)
Trimble	NetR9	2 台	Trimble(G) Trimble(H)
TOPCON	NET-G3A	1 台	Topcon
Leica	GRX1200+ GNSS	1 台	Leica

表 4-3 観測条件

#	基線長	条件	説明
1	0m、1m	(基準)	比較の基準となる観測
2	1m	アンテナ交換	アンテナの機種が異なる影響調査
3	1m	温度変化	温度変化による影響調査
4	1m	受信機再起動	受信機再起動による影響調査
5	1m	FW 変更	受信機ファームウェア変更による影響調査
6	1m	受信機個体差	同一機種の受信機個体差による影響調査

表 4-4 観測条件と観測日

観測条件	観測日時
0m 基線	2012 年 11 月 20 日 0 時<GPST>から 24 時間
アンテナ交換	2012 年 11 月 21 日 2 時<GPST>から 22 時間
1m 基線	2012 年 11 月 22 日 2 時<GPST>から 22 時間
温度変化	2012 年 11 月 26 日 2 時<GPST>から 22 時間
受信機再起動	2012 年 11 月 27 日 2 時<GPST>から 22 時間
FW 変更	2012 年 11 月 28 日 0 時<GPST>から 22 時間
1m 基線 (2 回目)	2012 年 12 月 1 日 0 時<GPST>から 72 時間

基準となる観測条件は表 4-5 の通りである。なお、0m 基線は、1 つのアンテナをスプリッタで分配し 6 台の受信機と接続し、同時に観測した。1m 基線は、ターゲット点のアンテナをスプリッタで分配し 5 台の受信機と接続し、同時に観測した。

各観測条件の観測は、基準となる観測方法から各観測条件に合わせて以下のように変更し実施した。

- アンテナ交換  
ターゲット点のアンテナを NovAtel GPS 703 GGG から Trimble GNSS Choke Ring に交換し、Trimble NetR9 受信機 1 台で観測。
- 温度変化  
ターゲット点の受信機 5 台を屋外に設置された収納箱に入れ、外気の温度変化による影響の中で観測。
- 受信機再起動  
GPS 時間の 9 時（日本時間 18 時）にターゲット点の受信機を再起動して観測。
- FW 変更  
Trimble NetR9 受信機のファームウェアをバージョン 4.61（2012 年 8 月リリース）から古いバージョン 4.17（2010 年 8 月リリース）へダウンして観測。

表 4-5 基準観測条件の観測設定

項目	基準点	ターゲット点
アンテナ設置場所	東京海洋大学越中島キャンパス	第4実験棟屋上
受信機設置場所	東京海洋大学越中島キャンパス	第4実験棟屋内
受信機	Javad(G)	Javad(T) Trimble(G) Trimble(H) Topcon Leica
アンテナ	NovAtel GPS 702 GGG	
サンプリング間隔	1秒	
仰角マスク	5度	
捕捉衛星、信号	GPS L1 (C/A), L2 (P(Y)), L5 (I, Q) GLONASS L1 (C/A), L2 (P) QZSS L1 (C/A), L2 (C), L5 (I, Q) ※Leica 受信機以外	

受信機内部温度の測定は、Trimble NetR9 受信機 2 台と TOPCON NET-G3A 受信機について、受信機内部温度を取得する受信機コマンドを 5 分ごとに受信機へ送信することによって取得した。なお、温度変化の観測条件で約 1 日観測を行い、受信機内部温度を測定した結果、図 4-1 の通り温度は異なるものの 1 日の観測で同じ変化を示したことから、Trimble NetR9 受信機 2 台のうち 1 台 Trimble(H)の測定結果を整理して評価に使用した。

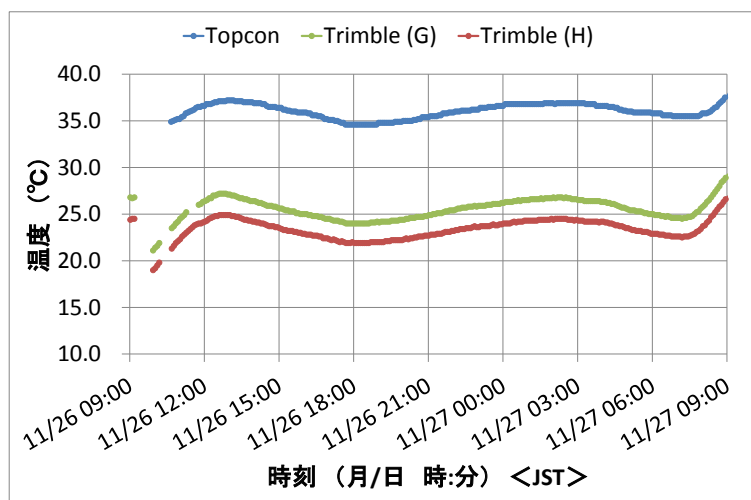


図 4-1 温度変化条件での受信機内部温度測定結果

#### 4.1.3. GLONASS チャンネル間バイアスの推定・評価

各観測条件で22時間から24時間観測したデータを使用し、ANTTOOL 2.1を用いて、Javad(G)受信機を基準としてIFBを推定した。なお、観測条件1m(2回目)は3日間連続で観測したが、1日毎にIFBを推定した。また、受信機再起動の観測条件では、受信機再起動後の約15時間のデータを使用して推定した。推定したL1、L2それぞれのIFBの値を表4-6に示す。

Javad(T)は、基準としたJavad(G)と同一機種のためIFBはないものと推測されるが、推定した結果、非常に小さい値が得られた。これは、推定誤差であると考えられる。同様に、Trimble(G)とTrimble(H)による同一機種と比較でもIFBの値は近く、個体差による違いはないものと考えられる。

推定したIFBについて、各観測条件による値の変化量をみるために、0m基線の観測条件で推定したIFBを基準とした差分をとり、さらに受信機毎に0.5cmずつずらしてプロットした図をそれぞれ、L1を図4-2に、L2を図4-3に示す。各観測条件によるIFBの値に大きな変化はみられなかった。

表 4-6 Javad (G)を基準とした IFB

L1					
IFB	Javad (T)	Trimble (G)	Trimble (H)	Topcon	Leica
0m	0.03	-0.72	-0.74	-0.50	2.98
1m	0.03	-0.91	-0.85	-0.59	2.87
1m (2回目)	-0.08	-0.71	-0.72	-0.56	2.79
1m (2回目)	-0.04	-0.73	-0.73	-0.52	2.77
1m (2回目)	0.04	-0.67	-0.63	-0.63	2.77
温度変化	0.15	-0.75	-0.69	-0.41	2.85
受信機再起動	-0.12	-0.67	-0.82	-0.68	2.71
アンテナ交換	-	-	-0.72	-	-
FW 変化	-	-	-0.62	-	-
L2					
IFB	JAVAD(T)	Trimble(G)	Trimble(H)	TOPCON	Leica
0m	-0.04	-1.04	-1.02	-0.49	2.93
1m	0.08	-0.85	-0.88	-0.52	2.82
1m (2回目)	0.01	-0.93	-0.91	-0.62	2.78
1m (2回目)	-0.02	-0.95	-0.94	-0.78	2.77
1m (2回目)	0.12	-0.88	-0.90	-0.65	2.91
温度変化	-0.01	-0.91	-0.89	-0.55	2.86
受信機再起動	0.03	-0.84	-0.75	-0.57	2.74
アンテナ交換	-	-	-0.98	-	-
FW 変化	-	-	-0.86	-	-

(単位 : cm / チャンネル)

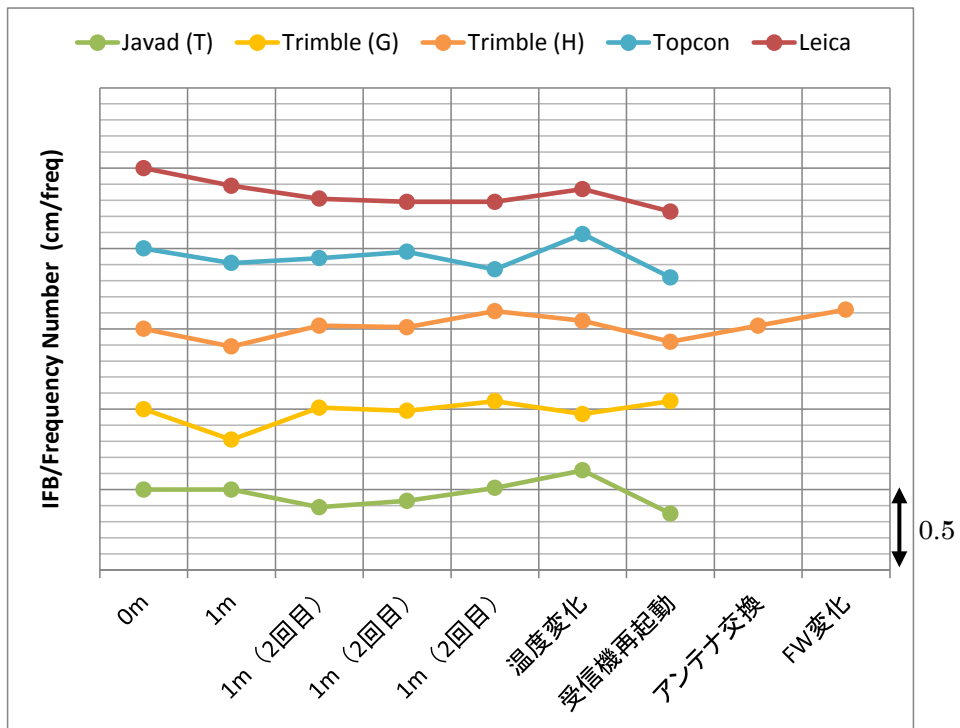


図 4-2 IFB の変化量 【L1】

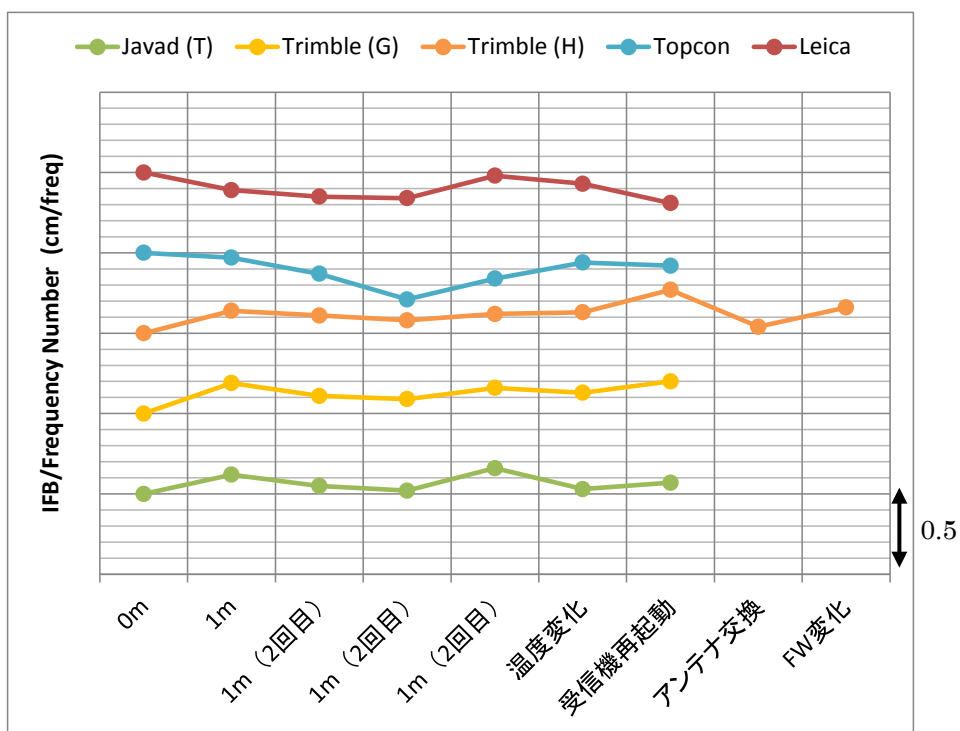


図 4-3 IFB の変化量 【L2】

本観測で測定した Trimble (H)の受信機内部温度について、11月20日から12月3日まで5分間隔で測定した結果を図4-4に示す。温度変化の観測条件以外の条件では、屋内に受信機を設置して観測していたが、一日のうちにも温度が変化していることが確認できる。これは屋内の温度変化に連動して受信機内部温度も変化しているためと推測される。厳密な温度依存性を評価するには、恒温槽に受信機を設置して一定温度で観測する等の対応が必要であると考えられる。

各観測条件における一日の平均温度、温度差、最高温度、最低温度を表4-7と図4-5に整理した。

本観測においては、受信機内部温度とIFBの値の変化に明確な関連はみられなかった。

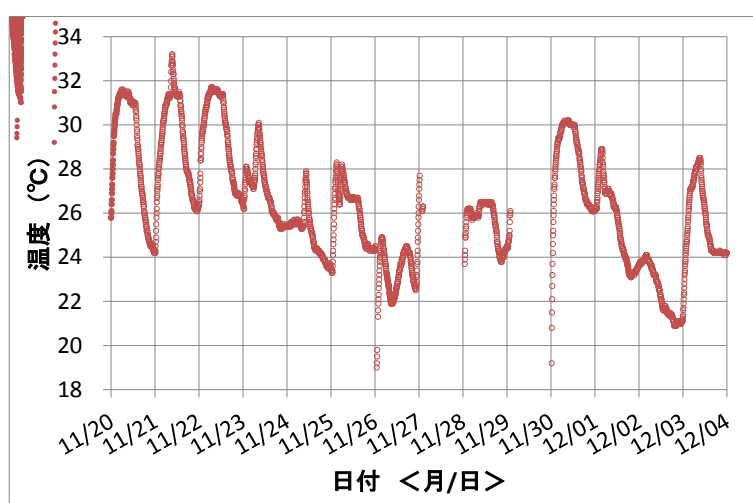


図4-4 Trimble (H)受信機内部温度計測結果

表4-7 各観測条件における平均温度、温度差、最高温度、最低温度

観測条件	平均温度	温度差	最高温度	最低温度
0m	29.0	6.0	31.6	25.6
1m	29.5	5.6	31.7	26.1
1m (2回目)	26.8	4.5	28.9	24.4
1m (2回目)	23.3	2.8	24.4	21.6
1m (2回目)	24.4	7.6	28.5	20.9
温度変化	23.7	7.5	26.5	19.0
アンテナ交換	28.6	9.0	33.2	24.2
FW 変化	26.1	2.8	26.5	23.7

(単位：°C)



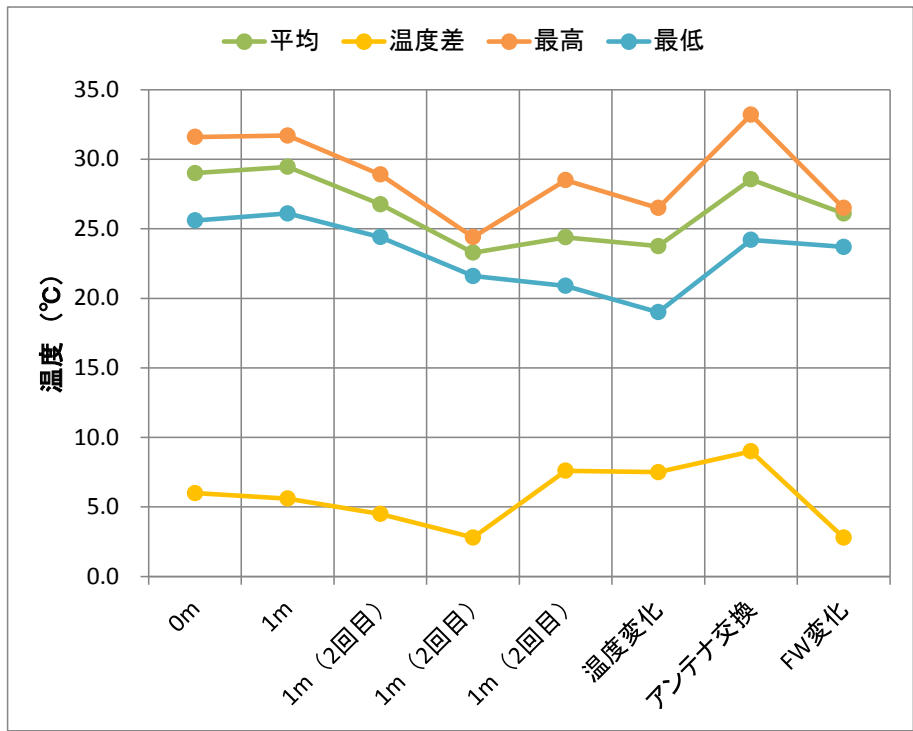


図 4-5 各観測条件における平均温度、温度差、最高温度、最低温度

#### 4.1.4. 測位解の精度及び安定性に与える影響についての調査・検討

観測条件の違いによる IFB の値に大きな変化はみられなかったため、推定した IFB を適用して表 4-3 の各観測条件で観測したデータを用いて後処理キネマティックによる基線解析を実施した。本解析では、受信機以外の誤差を無視できる 0m 基線で推定した IFB を使用した。解析に使用した IFB の値を表 4-8 に整理した。解析には「平成 23 年度衛星系の組合せに関する調査検討業務」にて RTKLIB v2.4.1 に含まれる後処理基線解析ソフトウェア RTKPOST の一部を改修し、IFB 補正に対応したソフトウェアを使用した。解析設定は表 4-9 の通りである。基線解析の基準点は全て Javad (G)とした。

衛星系の組み合わせについては、GPS のみと、GPS と GLONASS の組み合わせで IFB の適用あり・なしの 3 通りの条件で基線解析した。なお、GPS と GLONASS の組み合わせでは GPS と GLONASS で位相差を取らない「混合解析」とした。

表 4-8 解析に使用した Javad (G)基準の IFB

Javad (G)基準	Javad (T)	Trimble (G)	Trimble (H)	Topcon	Leica
L1	0.0	-0.72	-0.74	-0.50	2.98
L2	0.0	-1.04	-1.02	-0.49	2.93

(単位：cm / チャンネル)

表 4-9 基線解析 解析設定

設定項目	設定値
測位方式	後処理キネマティック基線解析（混合解析）
衛星系の組み合わせ	GPS、GPS+GLONASS
周波数	2 周波（L1、L2）
衛星暦	放送暦
エポック間隔	15 秒
仰角マスク	15 度
アンビギュイティ決定モード	Continuous
アンビギュイティ決定最小レシオ	3.0
電離層補正	Klobuchar モデル
対流圏補正	Saastamoinen モデル

後処理キネマティックによる基線解析の結果より、フィックス率と精度（RMS）についてそれぞれ受信機の組み合わせ毎に整理した。Javad (G)を基準点とした解析結果、Javad (T)を表 4-10 と図 4-6 に、Trimble (G)を表 4-11 と図 4-7 に、Trimble (H)を表 4-12 と図 4-8 に、Topcon を表 4-13 と図 4-9 に、Leica を表 4-14 と図 4-10 に示す。また、それぞれの時系列結果については「10. 付録 2」に整理した。

Javad の同一機種受信機同士では IFB 補正なしで GPS のみと同等の結果が得られた。一方 IFB の値の大きい Javad (G)と Leica 基線では IFB 補正なしでは 1m 基線でもフィックス解が得られなかったが、IFB 補正を適用することによりフィックス率が大幅に向上した。Javad と IFB の値に近い Trimble では IFB 補正なしでも 8 割以上のフィックス解が得られているが、同様に IFB 補正を適用することによりフィックス率が 9 割以上に向上した。また、Javad と IFB の値に近い Topcon では、逆に IFB 補正を適用することによりフィックス率が落ちる現象もみられたが、IFB の推定精度が悪かったためと推測される。

各観測条件の違いにより、IFB 補正の適用による解析結果に大きな変化はみられなかった。なお、全ての解析において、温度変化の観測条件で精度（RMS）が他の条件より悪くなっているが、これは IFB 補正の対象ではない GPS のみの解析結果でも悪いことから IFB の影響ではないと考えられる。

表 4-10 混合解析結果【Javad (T)】

Javad (T)												
観測条件	GPS のみ				IFB 補正なし				IFB 補正あり			
	FIX 率 (%)	RMS (m)			FIX 率 (%)	RMS (m)			FIX 率 (%)	RMS (m)		
		E:東西	N:南北	U:高さ		E:東西	N:南北	U:高さ		E:東西	N:南北	U:高さ
0m	100.0	0.0007	0.0009	0.0036	100.0	0.0006	0.0006	0.0036	100.0	0.0007	0.0009	0.0036
1m	99.9	0.0024	0.0031	0.0074	99.7	0.0021	0.0021	0.0065	99.9	0.0024	0.0031	0.0074
温度変化	99.8	0.0028	0.0071	0.0109	98.2	0.0022	0.0062	0.0090	99.8	0.0028	0.0071	0.0109
受信機再起動	99.9	0.0023	0.0064	0.0070	98.8	0.0020	0.0059	0.0063	99.9	0.0023	0.0064	0.0070
アンテナ交換	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FW 変化	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

表 4-11 混合解析結果【Trimble (G)】

Trimble(G)												
観測条件	GPS のみ				IFB 補正なし				IFB 補正あり			
	FIX 率 (%)	RMS (m)			FIX 率 (%)	RMS (m)			FIX 率 (%)	RMS (m)		
		E:東西	N:南北	U:高さ		E:東西	N:南北	U:高さ		E:東西	N:南北	U:高さ
0m	99.2	0.0019	0.0029	0.0066	81.8	0.0018	0.0021	0.0061	93.9	0.0018	0.0018	0.0054
1m	99.4	0.0029	0.0038	0.0088	83.0	0.0025	0.0028	0.0076	93.1	0.0024	0.0024	0.0072
温度変化	99.3	0.0032	0.0076	0.0110	82.8	0.0026	0.0067	0.0092	92.7	0.0026	0.0062	0.0091
受信機再起動	99.4	0.0030	0.0063	0.0083	87.8	0.0025	0.0059	0.0075	95.6	0.0025	0.0058	0.0073
アンテナ交換	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FW 変化	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

表 4-12 混合解析結果【Trimble (H)】

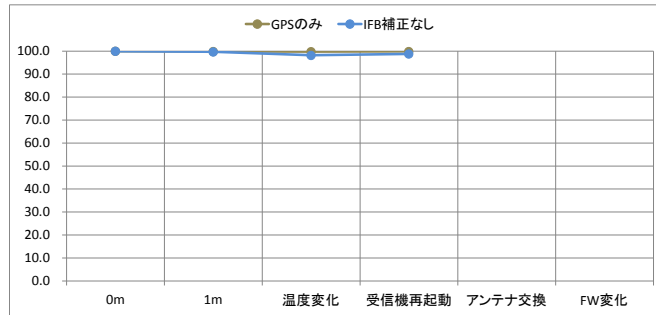
Trimble (H)												
観測条件	GPS のみ				IFB 補正なし				IFB 補正あり			
	FIX 率 (%)	RMS (m)			FIX 率 (%)	RMS (m)			FIX 率 (%)	RMS (m)		
		E:東西	N:南北	U:高さ		E:東西	N:南北	U:高さ		E:東西	N:南北	U:高さ
0m	99.2	0.0018	0.0027	0.0064	81.6	0.0017	0.0020	0.0060	93.5	0.0018	0.0017	0.0053
1m	99.5	0.0028	0.0037	0.0086	84.5	0.0024	0.0027	0.0074	93.9	0.0024	0.0023	0.0071
温度変化	99.4	0.0031	0.0075	0.0109	86.8	0.0025	0.0067	0.0091	93.4	0.0025	0.0063	0.0089
受信機再起動	99.4	0.0028	0.0063	0.0081	88.2	0.0024	0.0059	0.0074	96.0	0.0024	0.0058	0.0071
アンテナ交換	99.3	0.0025	0.0035	0.0088	83.2	0.0021	0.0028	0.0078	93.6	0.0021	0.0026	0.0074
FW 変化	99.5	0.0026	0.0070	0.0085	86.8	0.0022	0.0062	0.0078	95.1	0.0023	0.0061	0.0072

表 4-13 混合解析結果【Topcon】

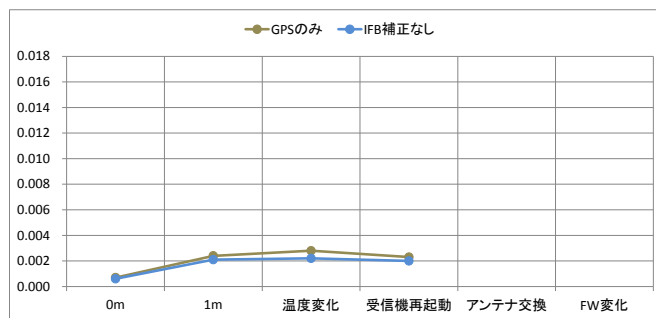
Topcon												
観測条件	GPS のみ				IFB 補正なし				IFB 補正あり			
	FIX 率 (%)	RMS (m)			FIX 率 (%)	RMS (m)			FIX 率 (%)	RMS (m)		
		E:東西	N:南北	U:高さ		E:東西	N:南北	U:高さ		E:東西	N:南北	U:高さ
0m	99.6	0.0015	0.0020	0.0051	96.7	0.0019	0.0012	0.0050	58.1	0.0017	0.0017	0.0045
1m	99.3	0.0027	0.0033	0.0079	96.6	0.0026	0.0037	0.0088	86.9	0.0027	0.0039	0.0091
温度変化	81.9	0.0027	0.0068	0.0089	81.1	0.0024	0.0064	0.0082	39.7	0.0032	0.0069	0.0089
受信機再起動	99.6	0.0028	0.0062	0.0072	97.0	0.0026	0.0060	0.0070	87.0	0.0024	0.0060	0.0070
アンテナ交換	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FW 変化	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

表 4-14 混合解析結果【Leica】

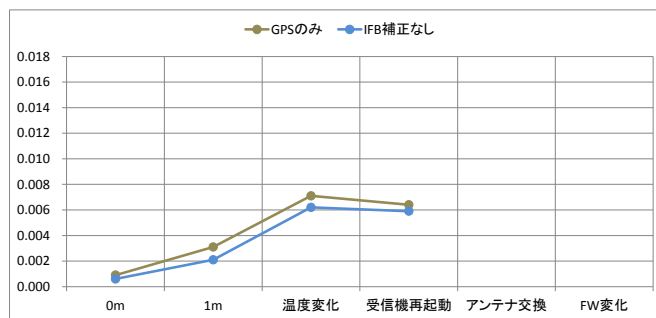
Leica												
観測条件	GPS のみ				IFB 補正なし				IFB 補正あり			
	FIX 率 (%)	RMS (m)			FIX 率 (%)	RMS (m)			FIX 率 (%)	RMS (m)		
		E: 東西	N: 南北	U: 高さ		E: 東西	N: 南北	U: 高さ		E: 東西	N: 南北	U: 高さ
0m	99.7	0.0023	0.0025	0.0078	55.0	0.0018	0.0038	0.0082	88.1	0.0016	0.0025	0.0055
1m	99.5	0.0027	0.0033	0.0078	0.0				73.3	0.0025	0.0033	0.0072
温度変化	99.4	0.0029	0.0079	0.0104	0.8	0.0067	0.0172	0.0158	73.2	0.0026	0.0069	0.0101
受信機再起動	99.6	0.0028	0.0062	0.0073	0.0				81.6	0.0024	0.0060	0.0073
アンテナ交換	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FW 変化	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



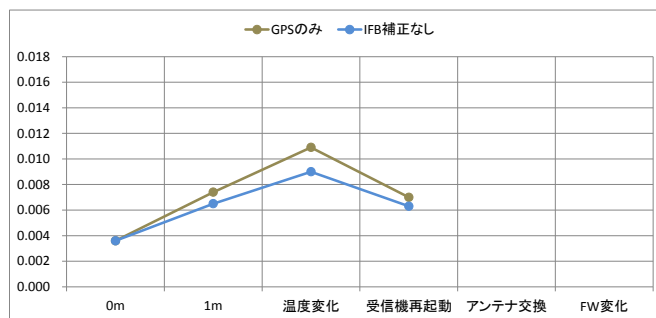
フィックス率 (単位: %)



RMS (東西方向) (単位: m)

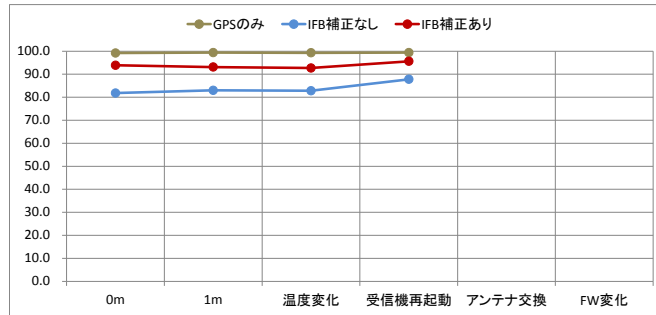


RMS (南北方向) (単位: m)

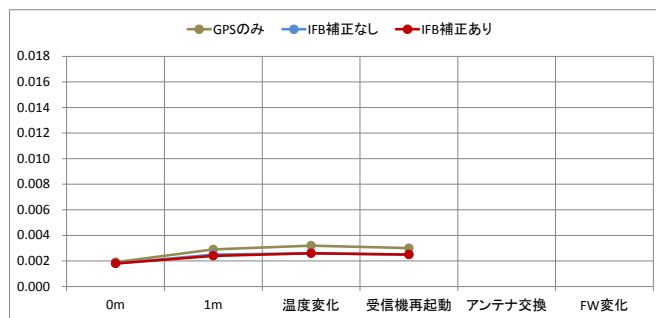


RMS (高さ方向) (単位: m)

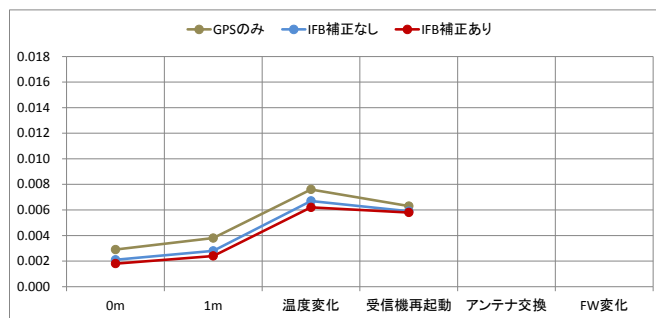
図 4-6 混合解析結果【Javad (T)】



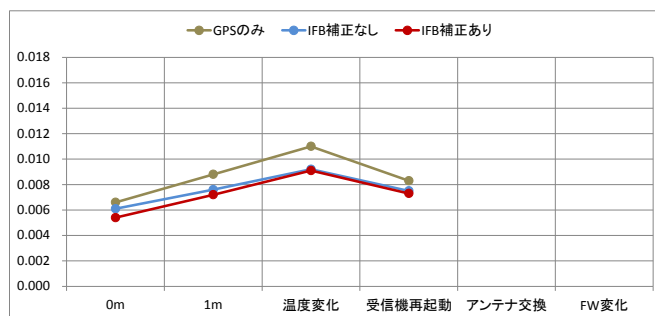
フィックス率 (単位: %)



RMS (東西方向) (単位: m)

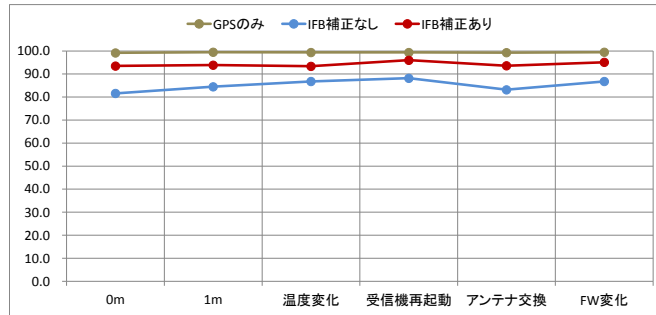


RMS (南北方向) (単位: m)

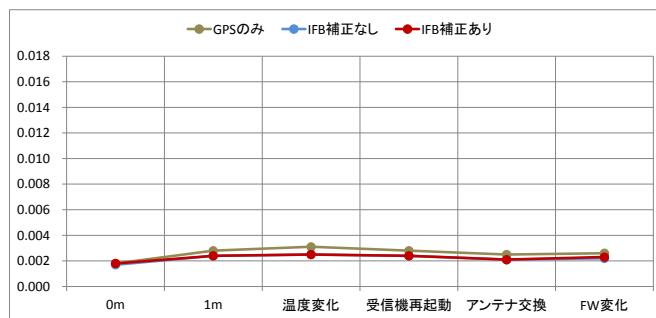


RMS (高さ方向) (単位: m)

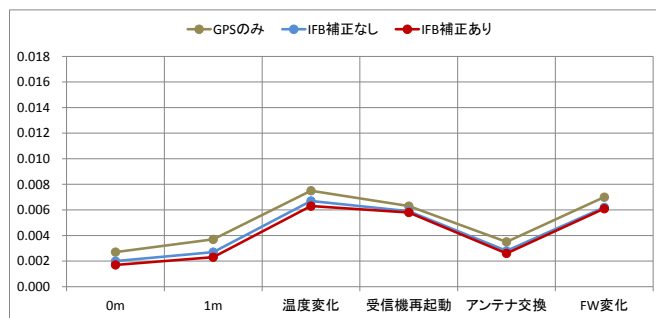
図 4-7 混合解析結果【Trimble (G)】



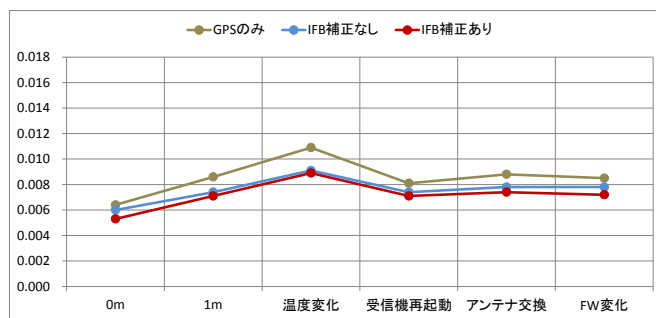
フィックス率 (単位: %)



RMS (東西方向) (単位: m)



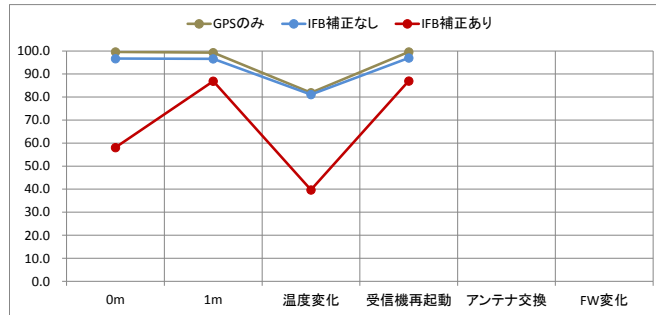
RMS (南北方向) (単位: m)



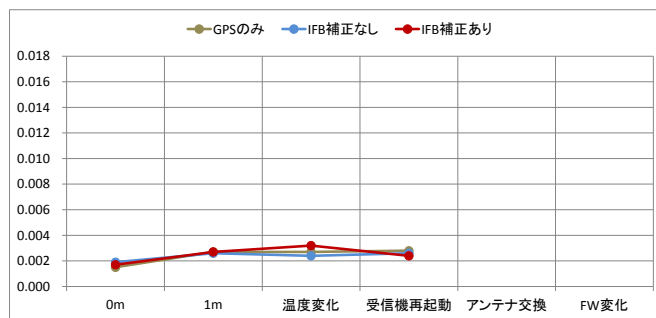
RMS (高さ方向) (単位: m)

図 4-8 混合解析結果【Trimble (H)】

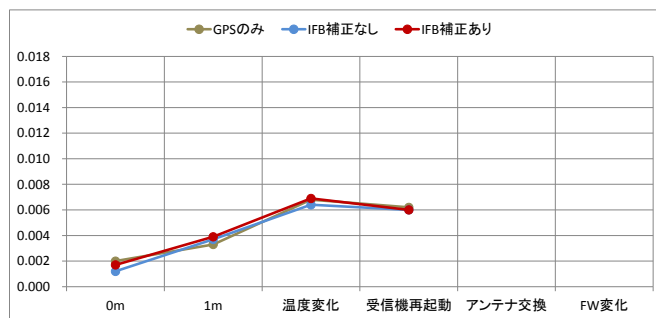




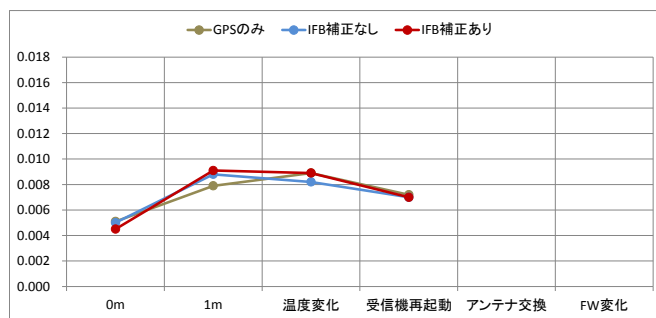
フィックス率 (単位: %)



RMS (東西方向) (単位: m)

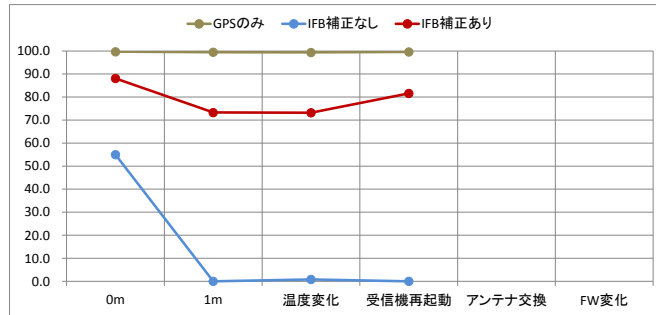


RMS (南北方向) (単位: m)

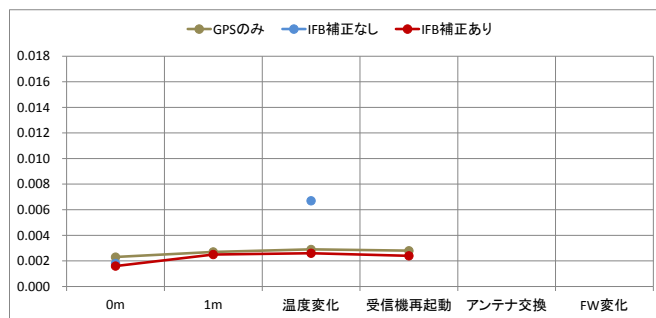


RMS (高さ方向) (単位: m)

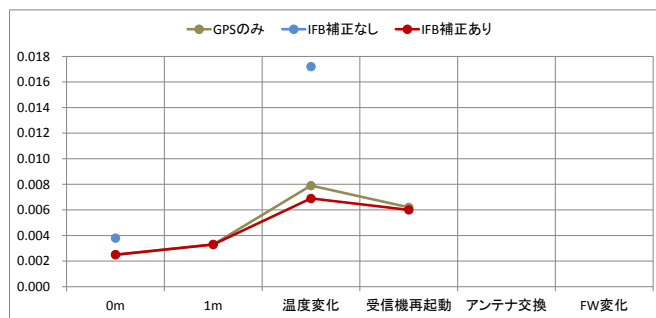
図 4-9 混合解析結果【Topcon】



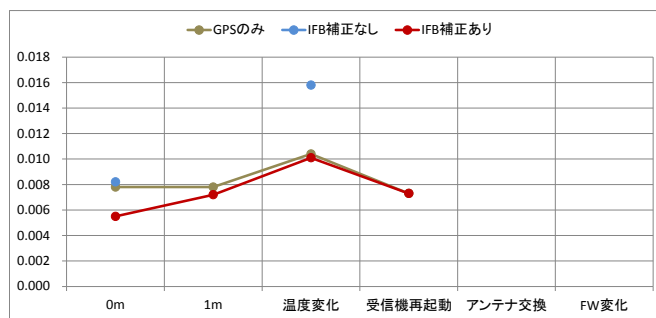
フィックス率 (単位: %)



RMS (東西方向) (単位: m)



RMS (南北方向) (単位: m)



RMS (高さ方向) (単位: m)

図 4-10 混合解析結果【Leica】

## 4.2. GPS と GLONASS 間で位相差を取ることを可能にする方法の調査・検討

### 4.2.1. GPS と GLONASS 間で位相差を取ることを可能にする方法の調査

GPS と GLONASS 間で位相差を取る解析（以下、「統合解析」という。）においては、従来の GPS と GLONASS 間で位相差を取らない解析（以下、「混合解析」という。）で考慮していない衛星系間の受信機ハードウェアバイアス（ISB : Inter System Bias）は大きな誤差要因となる。ここで、基線解析において ISB の推定・補正方法を中心に文献調査し、リアルタイム解析において GPS と GLONASS 間で位相差を取ることを可能にする方法をまとめた。

調査した文献では、ほとんど混合解析手法 [1], [2], [3], [4]が採用されている。昨年の IGS Workshop on GNSS Biases(2012)発表の中で、Wanninger (TU Dresden)と Schaer (CODE)の提案は、現段階の GLONASS バイアス補正の有効な手法とされている。以下、それぞれの概要を示す。

#### 1) Wanninger (TU Dresden)の提案

Wanninger の提案 [1], [2], [5] では、GLONASS チャンネル間バイアス (IFB) は周波数に対して線形と仮定している。また、GLONASS のアンビギュイティを容易に決定するために、解析では受信機間の一重差を用いる。短い基線の場合、GPS と GLONASS の観測モデルは次のように与える。

$$\Phi_{a,b}^{\text{GPS},i} = \rho_{a,b}^i + c\delta t_{a,b}^{\text{GPS}} + \lambda N_{a,b}^i + \varepsilon_{\phi}^{\text{GPS}} \quad 4-1$$

$$\Phi_{a,b}^{\text{GLO},j} = \rho_{a,b}^j + c(\delta t_{a,b}^{\text{GLO}} + kh_{a,b}^{\text{GLO}}) + \lambda_k^j N_{a,b}^j + \varepsilon_{\phi}^{\text{GLO}} \quad 4-2$$

ここで、 $\rho_{a,b}^i$  は衛星のアンテナ位相中心と受信機のアンテナ位相中心との幾何学距離の一重差であり、 $c$  は光速で、 $\delta t_{a,b}$  は衛星システム依存の受信機ハードウェア遅延から生じる受信機時計誤差の一重差である。 $N_{a,b}^j$  はアンビギュイティの一重差である。 $k$  は GLONASS 信号の周波数番号であり、 $h_{a,b}^{\text{GLO}}$  は GLONASS チャンネルバイアスの一重差である。

上記観測モデルに GPS と GLONASS 間の受信機ハードウェアバイアス ISB は明確に示されていないが、実際は  $\delta t_{a,b}^{\text{GPS}}$  と  $\delta t_{a,b}^{\text{GLO}}$  に含まれている形となっている。

基線解析では、事前に推定した IFB を初期値として適用し、パラメータを推定する。アンビギュイティ決定は、推定された GPS と GLONASS の一重差フロートアンビギュイティをそれぞれ二重差に変換し、整数化している。アンビギュイティを決定した後に、最終解の座標、精密な IFBなどを推定する。この手法は、RTK に適用されている。

## 2) Schaer (CODE)の提案

S. Schaer (CODE)の提案 [6], [7], [8], [9], [10]は、Bern 大が開発した Bernese の解析手法である。以下、その概要を示す。

まず、基本観測方程式は次のように表されている。

$$\emptyset = \rho - I + T + c(S + A) - c(s + a) + \lambda(P - p) + \lambda N + \varepsilon_\emptyset \quad 4-3$$

$$P = \rho + I + T + c(S + B) - c(s + b) + \varepsilon_P \quad 4-4$$

ここで、 $\emptyset$ 、 $P$ はそれぞれ搬送波位相、擬似距離であり、 $\rho$  は衛星と受信機間の幾何学距離、 $I$ と $T$ はそれぞれ電離層遅延、対流圏遅延である。 $S$ と $s$ は受信機と衛星の時計誤差、 $A$ と $a$ はハードウェア遅延による受信機と衛星の位相バイアス、 $B$ と $b$ はハードウェア遅延による受信機と衛星のコードバイアス、 $P$ と $p$ は受信機と衛星の初期位相を表している。また、 $\lambda$ と $N$ はそれぞれ波長とアンビギュイティ、 $c$ は光速、 $\varepsilon_\emptyset$ と $\varepsilon_P$ は搬送波位相と擬似距離の観測ノイズを表している。

上記観測方程式の二重差を取ると、衛星の時計誤差  $s$ 、位相バイアス  $a$ 、コードバイアス  $b$  がキャンセルされ、二重差観測方程式は次のようになる。

$$\Phi_{rq}^{ij} = \rho_{rq}^{ij} - I_{rq}^{ij} + T_{rq}^{ij} + cA_{rq}^{ij} + \lambda^i P_{rq}^i - \lambda^j P_{rq}^j + \lambda^i N_{rq}^i - \lambda^j N_{rq}^j + \varepsilon_{\Phi,rq} \quad 4-5$$

$$P_{rq}^{ij} = \rho_{rq}^{ij} + I_{rq}^{ij} + T_{rq}^{ij} + cB_{rq}^{ij} + \varepsilon_{P,rq} \quad 4-6$$

ここで、

$\rho_{rq}^{ij}$  : 二重差幾何距離

$I_{rq}^{ij}$  : 二重差電離層遅延

$T_{rq}^{ij}$  : 二重差対流圏遅延

$A_{rq}^{ij}$  : 二重差受信機ハードウェア遅延による搬送波位相バイアス

$B_{rq}^{ij}$  : 二重差受信機ハードウェア遅延による擬似距離バイアス

$P_{rq}^i$ 、 $P_{rq}^j$  : 一重差受信機初期位相

$N_{rq}^i$ 、 $N_{rq}^j$  : 一重差位相アンビギュイティ

$\lambda^i$ 、 $\lambda^j$  : 衛星  $i$  と衛星  $j$  の周波数、

受信機の初期位相  $P_r$  は衛星に依存しないので、上記受信機初期位相の一重差  $P_{rq}^i$ 、 $P_{rq}^j$  は  $P_{rq}$  と記し、また、周波数  $i$  の二重差位相アンビギュイティを抽出すると、受信機初期位相の二重差とアンビギュイティの二重差はそれぞれ次のよう変形できる。

$$\lambda^i P_{rq}^i - \lambda^j P_{rq}^j = \lambda^i P_{rq} - (\lambda^i + \lambda^j) P_{rq} = -\lambda^j P_{rq} \quad 4-7$$

$$\lambda^i N_{rq}^i - \lambda^j N_{rq}^j = \lambda^i N_{rq}^i - (\lambda^i + \lambda^j) N_{rq}^j = \lambda^i N_{rq}^{ij} - \lambda^j N_{rq}^j \quad 4-8$$

最後に、二重差観測方程式は次のようになる。

$$\Phi_{rq}^{ij} = \rho_{rq}^{ij} - I_{rq}^{ij} + T_{rq}^{ij} + cA_{rq}^{ij} - \lambda^{ij}P_{rq} + \lambda^i N_{rq}^{ij} - \lambda^{ij}N_{rq}^j + \varepsilon_{\phi,rq} \quad 4-9$$

$$P_{rq}^{ij} = \rho_{rq}^{ij} + I_{rq}^{ij} + T_{rq}^{ij} + cB_{rq}^{ij} + \varepsilon_{p,rq} \quad 4-10$$

ここで、

$N_{rq}^{ij}$  : 整数の二重差位相アンビギュイティ

$\lambda^{ij}$  : 周波数の差分、 $\lambda^{ij} = \lambda^j - \lambda^i$ 。

$\lambda^{ij}N_{rq}^j$  : SD バイアス (Single-difference bias)

SD バイアスの存在で、二重差の位相アンビギュイティは整数でなくなる。アンビギュイティを決定するには、事前に推定した SD バイアスを適用する必要がある。SD バイアスは十分小さければ (例えば 0.1 サイクル以下)、二重差アンビギュイティ  $N_{rq}^{ij}$  は整数に決定できる。

上記 SD バイアスの他に、次の 3 種類の受信機ハードウェアバイアスも考慮する必要がある [11]。

1) DCB (differential code bias)

P コードと C コード間のハードウェアバイアスであり、特に L2C を受信する GPS 受信機に現れる。

2) ISB (inter-system bias)

異なる衛星系の受信回路の違いによるハードウェアバイアスであり、GPS と GLONASS 信号を同時に受信する受信機に現れる。

3) IFB (inter-frequency bias)

GLONASS 信号の周波数に依存するハードウェアバイアスであり、GLONASS 信号を受信する受信機に現れる。

搬送波位相 ISB について、Dach R, et al. (2010) [12] の評価では、L1、L2、電離層フリー (L3) の搬送波位相 ISB はいずれも時間的に安定せず、日による変化が見られる。最も安定な L1 の ISB でさえ一日最大 40ps (約 1.2cm) の変動があり、L3 の場合は最大 300ps (約 9cm) の変動も見られている。また、搬送波位相 ISB の変動は、受信機機種にもよる。このような搬送波位相 ISB 誤差は、通常考慮している搬送波位相の観測ノイズ (1mm) よりかなり大きいので、アンビギュイティを整数に決定する際、短い基線でも時間依存の搬送波位相 ISB を考慮する必要があると指摘した。文献では、次の 4 種類の解析手法を用いてポスト残差から搬送波位相 ISB を評価した。搬送波位相 ISB を 1 時間以内に一定値とした推定方法が、最も精度が高い結果となっている。

- GNSS 対応している受信機時計誤差をパラメータとする推定方法

- ・搬送波位相 ISB を定数として推定する
- ・搬送波位相 ISB を 1 時間ごとに定数として推定する
- ・GPS と GLONASS を別々に解析する

現在、IGS 解析センター（CODE, ESOC, and GFZ）が提供しているマルチ GNSS 解は一定時間内（例えば 1 時間）に搬送波位相 ISB を一定値として推定する方法が採用されている。

以上の文献調査結果から、ISB と IFB の特性及び解析手法を次のように纏める。

表 4-15 ISB と IFB の特性及び扱い方

ISB	擬似距離	位相
バイアス	一定値	モデルできない
安定性	○	×
補正方法	校正テーブルを用いる	一定時間内の定数として測位過程で推定
IFB	擬似距離	位相
バイアス	モデルできない	周波数に対して線形
安定性	×	○
補正方法	補正しない (観測ノイズレベル [1])	校正テーブルを用いる

#### 4.2.2. GPS と GLONASS 間で位相差を取ることを可能にする方法の検討

前節の文献調査の結果を参考に、以下に GPS と GLONASS 間で位相差を取ることを可能にするアルゴリズムについて記述する。

「平成 23 年度衛星系の組合せに関する調査検討業務」で纏めた基線解析のアルゴリズムを踏襲し、拡張カルマンフィルタ推定において、アンビギュイティの一重差を採用し、二重差観測方程式は次のように表す。

$$\Phi_{rq}^{ij} = \rho_{rq}^{ij} - I_{rq}^{ij} + T_{rq}^{ij} + cA_{rq}^{ij} + \lambda^i N_{rq}^i - \lambda^j N_{rq}^j + \varepsilon_{\phi,rq} \quad 4-11$$

$$P_{rq}^{ij} = \rho_{rq}^{ij} + I_{rq}^{ij} + T_{rq}^{ij} + cB_{rq}^{ij} + \varepsilon_{p,rq} \quad 4-12$$

また、簡単にするために、受信機ハードウェアバイアスには ISB と IFB のみを考慮する。周波数の異なる衛星間の二重差受信機初期位相は、完全にキャンセルできず、 $-\lambda^{ij} P_{rq}$  として残されている。この誤差は二重差受信機ハードウェア搬送波位相バイアス  $A_{rq}^{ij}$  に含めて考慮する。

GPS と GLONASS と統合する際、次の 3 種類の二重差組み合わせが可能である。

##### 1) GPS-GPS の二重差

- (1)  $\lambda^i = \lambda^j = \lambda$ 、
- (2) 二重差受信機ハードウェア遅延による 擬似距離バイアスと搬送波位相バイアスは全てキャンセルされる。

$$A_{rq}^{ij}=0, \quad B_{rq}^{ij}=0$$

##### 2) GLONASS-GLONASS の二重差

- (1)  $cA_{rq}^{ij} = (n^i - n^j)\Delta f b_{rk}$

ここで、 $n^i$ 、 $n^j$ はそれぞれ GLONASS 衛星  $i$  と  $j$  のチャンネル番号であり、 $\Delta f$ は周波数の増分である。 $b_{rk}$ は周波数に対して線形化したチャンネルバイアスであり、補正テーブルより補正する。

- (2) 二重差受信機ハードウェア遅延による 擬似距離バイアスを無視する。

$$B_{rq}^{ij} \approx 0$$

##### 3) GPS-GLONASS の二重差

- (1) 受信機ハードウェア遅延による 擬似距離バイアスは次のようになる。

$$B_{rq}^{ij} = S_{p,r} - S_{p,q}$$

ここで、 $S_{p,r}$ と $S_{p,q}$ はそれぞれ受信機 r と受信機 q の擬似距離 ISB であり、事前に求めた校正テーブルより補正する。

(2) 二重差受信機ハードウェア遅延による 搬送波位相バイアスは次のように表す。

$$A_{rq}^{ij} = S_{\emptyset,r} - S_{\emptyset,q} = S_{\emptyset}$$

ここで、 $S_{\emptyset,r}$ と $S_{\emptyset,q}$ はそれぞれ受信機 r と受信機 q の搬送波位相 ISB であり、その差分は一つの推定パラメータ $S_{\emptyset}$ とする。 $S_{\emptyset}$ の時間的変動はランダムウォークモデルを使用する。

以上より、GPS と GLONASS を統合する際、状態ベクトル  $x$  は次式で与えられる。

$$x = (r^T, Z_{W,r}, G_{N,r}, G_{E,r}, Z_{W,b}, G_{N,b}, G_{E,b}, S_{\emptyset,1}, S_{\emptyset,2}, I^T, N_1^T, N_2^T)^T \quad 4-13$$

ここで、

$r$  : 受信機アンテナ位置 (m)

$Z_{W,r}$  : 対流圏湿潤天頂遅延量 (m)

$G_E$  : 東方向対流圏遅延勾配

$G_N$  : 北方向対流圏遅延勾配

$I = (I_{rb,1}^1, I_{rb,1}^2, \dots, I_{rb,1}^m)^T$  : 垂直方向電離層遅延一重差 (m)

$N_{lj} = (N_{rb,Lj}^1, N_{rb,Lj}^2, \dots, N_{rb,Lj}^m)^T$  : 搬送波位相アンビギュイティ一重差 (cycle)

$S_{\emptyset,1}, S_{\emptyset,2}$  : L1 と L2 の搬送波位相 ISB の一重差(ns)

パラメータの推定アルゴリズムは「平成 23 年度衛星系の組合せに関する調査検討業務」でまとめたアルゴリズムと同じであるので、詳細については、「平成 23 年度衛星系の組合せに関する調査検討業務」報告書を参照されたい。

なお、今回のプロトタイプソフトウェアにおいては、上記バイアスをエポック毎に推定するのではなく、2) GLONASS-GLONASS の二重差において、あらかじめ推定した IFB の値を適用し、3) GPS-GLONASS の二重差において、あらかじめ推定した IFB と擬似距離 ISB、搬送波位相 ISB を適用することで統合解析を実現するものとした。