

IV. 屋外実証実験

1. 準天頂衛星からの配信を模した技術実証実験

1.1. 概要

国土地理院では、平成 15 年度から平成 22 年度までの計画で国土交通省総合技術開発プロジェクト「準天頂衛星による高精度測位補正に関する技術開発」を進めており、平成 19 年度までに、準天頂衛星の LEX 信号を利用した高精度測位補正情報生成・配信装置および受信装置を開発した。

平成 20 年度には、開発した装置の精度検証試験として、開発目標の測位精度が保たれているか、測位精度の地域依存性がないか等の検証を効率的に行うため、緯度や経度に偏りがないよう全国の 5 つの代表的地区を抽出し、各地区で設定した参照基準点からの基線長が 0km (近傍)、5km、10km、20km、50km の地点で、静止衛星の通信機能を利用することで準天頂衛星からの補正情報の配信を模した実証実験を実施した。また、基線長だけでなく季節差についても評価するため、異なる 2 回の時期で観測を行い、概ね開発目標の精度に近い良好な結果が得られた。

平成 21 年度は、前年度の実証実験の結果を踏まえ、本システムの適用限界の調査等を目的として下記の条件下における実証実験を実施した。

(1) 季節差が測位精度に及ぼす影響検証

夏季・冬季における大気等の状態差による影響調査

(2) 長距離基線における精度検証

参照基準点からの距離に応じた測位精度検証

(3) 領域境界における精度及び整合性の評価

領域境界上での精度検証と、隣り合う各領域からの補正情報を利用した測位結果の整合性の確認

(4) 標高差のある山岳部での精度検証

周囲の電子基準点との標高差が大きい地域での精度検証

測位補正情報を利用した既存の測位方式としてネットワーク型 RTK-GPS 法がある。これは、携帯電話網を介して測位補正情報を配信し、二周波 GPS 受信機の観測データと合わせて測位を行う方式であるが、

- ・二周波 GPS 受信機は一周波 GPS 受信機に比べて高価である
- ・携帯電話の不通地域では利用できない

といった課題もある。そのような背景を踏まえ、二周波 GPS 受信機に比べて安価である一周波 GPS 受信機の観測で、日本全域において 15 分程度の観測から準リアルタイムに水平方向でセンチメートル級の測位精度を実現することを目標として、‘準天頂衛星から配信される測位補正情報を用いた準スタティック法（以下、「QZS-QS 法：Quasi-static positioning with GPS correction data via QZS LEX channel」という。）を開発した（図 1-1）。

開発開始当初は、準天頂衛星に搭載予定であった 1 Mbps 程度の送信レートの放送機能を用いて測位補正情報を送信する計画であったが、その後の政策変更等により準天頂衛星が測位機能に限定され、補正情報を配信するための実験用信号も 2 kbps 程度の LEX 信号を利用する仕様に変更されたため、QZS-QS 法用に送信する測位補正情報のデータ量も当初計画の 1/500 とし、LEX 信号用に収まるよう設計変更をしている（図 1-3）。

開発された測位補正技術は、参照基準点の観測データ、測位誤差の要因となる対流圏遅延補正量や電離層遅延補正量等を LEX 信号を用いて配信し、受信局側でその情報を受信・測位するものである。開発に際しては、以下の要件を設定している。

- ① 電子基準点のリアルタイムデータを利用する
- ② 準リアルタイムで基線解析可能である補正情報を生成・配信する
- ③ 測位補正情報の伝送速度を LEX 信号に対応した 1,695bps 以内に収める
- ④ 電離層遅延補正量及び対流圏遅延補正量については、各々の時間・空間変化の特性を考慮した補正情報モデルを生成して適用する
- ⑤ 測位補正情報を適用することにより水平精度センチメートル級の測位精度を実現する
- ⑥ 15 分程度の観測で測位精度を満たす
- ⑦ 通信エラーに強い配信フォーマットとする

これらを踏まえ開発された測位補正技術の概要を以下に示す。

- ① 全国を 12 の領域に分け、電子基準点のリアルタイムデータとインターネット経由で取得する IGS 超速報暦等を用いて、測位処理に適用するための補正情報（参照基準点情報、衛星軌道・時計情報、対流圏遅延補正情報、電離層遅延補正情報）を生成する。
- ② 高精度補正情報の配信手段として、準天頂衛星の LEX 信号またはその他の衛星や地上通信網（1 Mbps 程度の転送速度を想定）の 2 種類に対応できるものとする。
- ③ 測位点において、LEX 受信機または通信機器を用いて測位補正情報を取得すると共に、1 周波 GPS 受信機での GPS 観測を実施する。
- ④ 受信した補正情報を 1 周波（L1）の GPS 観測データに適用して測位処理を行う。測位処理の方法は電子基準点を参照基準点とした相対測位法とし、二重位相差アンビギュイティの整数化を行う。

また、これらの測位を行うための装置として、平成 19 年度までに「準天頂衛星による測位補正情報生成・配信装置（以下、「SHS」という。）及び測位補正情報受信・測位装置（以下、「SJS」という。）」を開発した。

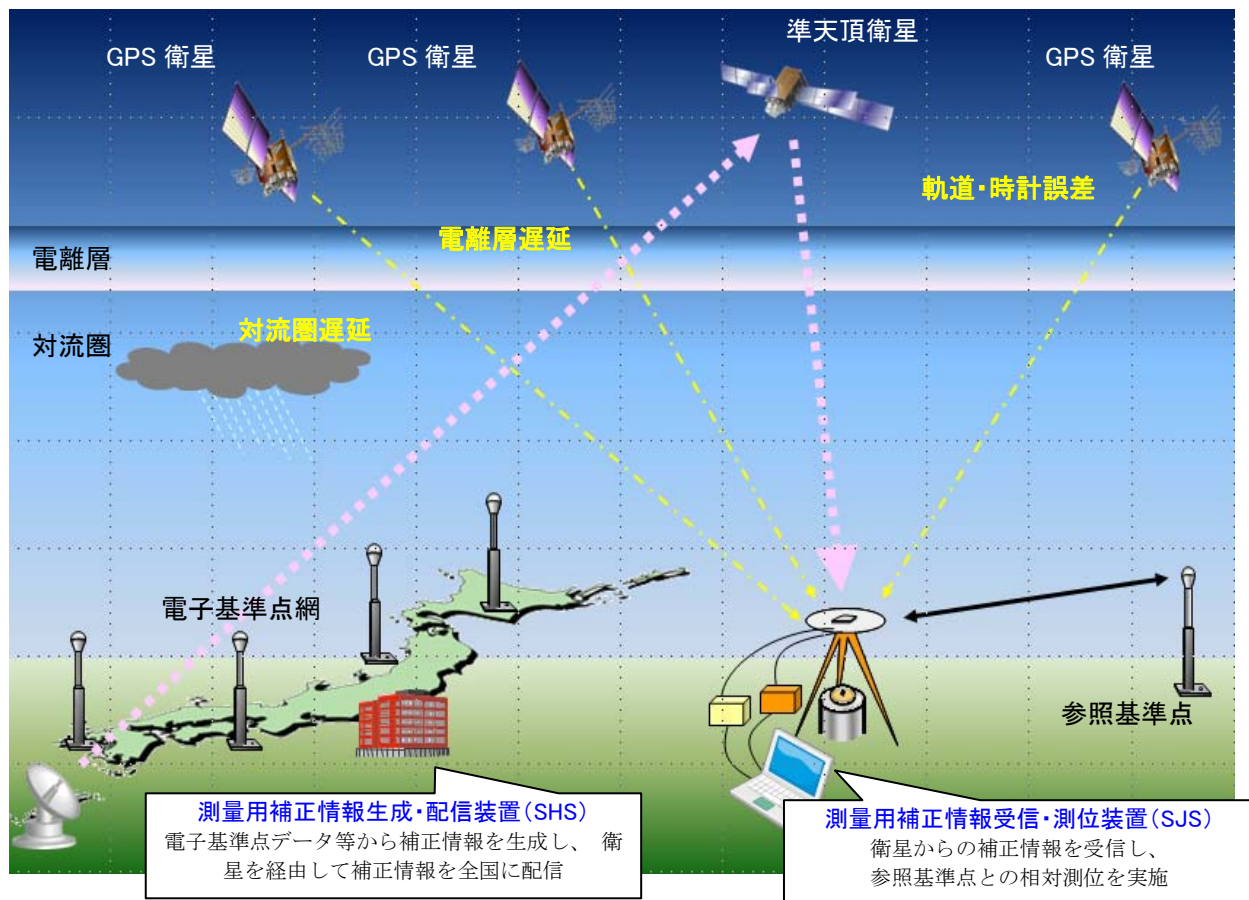


図 1-1 開発した測位補正技術のイメージ図

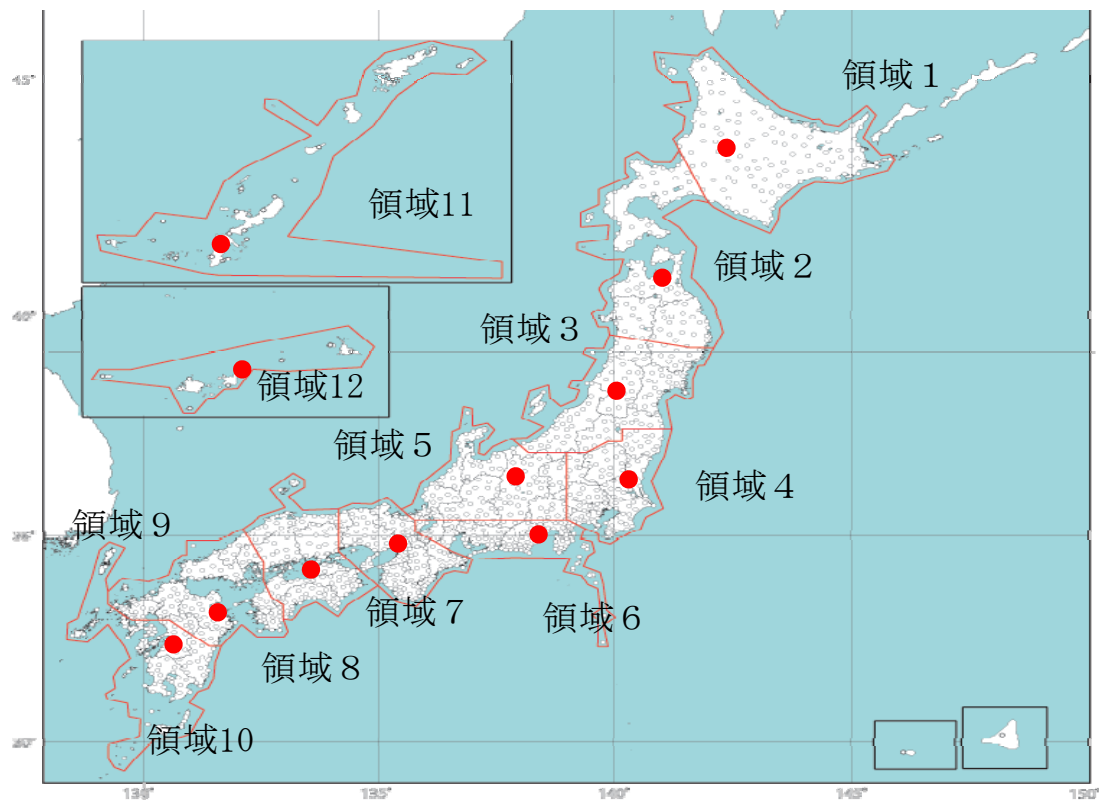


図 1-2 全国 12 領域及び参照基準点の分布

補正情報	配信	特徴と配信する情報
①参照基準点観測情報	30秒毎	<ul style="list-style-type: none"> ・全国を12の領域に分割 ・各領域の中央に参照基準点を1つ配置 ・参照基準点のGPSデータ(L1)
②衛星軌道・時計情報、電離層グリッド間隔情報	240秒毎	<ul style="list-style-type: none"> ・衛星の軌道情報(IGS超速報層を補間) ・衛星の時計情報(全国20点の電子基準点データから推定)
③対流圏遅延補正情報	240秒毎	<ul style="list-style-type: none"> ・全電子基準点の推定湿潤大気遅延量(各電子基準点上空の水蒸気量相当)
④電離層遅延補正情報	120秒毎	<ul style="list-style-type: none"> ・全国12領域毎に推定 ・グリッドデータ(0.3×0.4°) ・衛星毎に作成(最大8衛星分)

図 1-3 LEX 信号により配信される測位補正情報

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
参照基準点					衛星軌道、時計補正情報+電離層グリッド間隔情報																		電離層1						
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
参照基準点								電離層2				電離層10																	
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
参照基準点								電離層5				電離層8				電離層9													
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120
電離層11						参照基準点				電離層4				電離層6				電離層7				電離層12							
121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150
参照基準点						対流圏遅延補正情報																		電離層1					
151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180
参照基準点						電離層2				電離層10																電離層3			
181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210
参照基準点								電離層5				電離層8				電離層9													
211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240
電離層11						参照基準点				電離層4				電離層6				電離層7				電離層12							

図 1-4 測位補正情報の LEX 信号への割付イメージ

1.2 実証実験結果の評価方法

1.2.1 Fix 解及び Not Fix

QZS-QS 法では、測位時に必要な衛星数・エポック数が得られなかった場合や、SJS での解析時にアンビギュイティの推定に失敗した場合には測位解が得られない。このような場合を‘Not Fix’と定義し、測位解が出た場合と区別して扱う。測位解が得られたものを‘Fix 解’と定義し、全体の観測数に対する Fix 解が得られた観測数の割合を Fix 率として評価する（式 1-1）。

$$Fix率 = \frac{\text{測位解が得られた観測数}}{\text{全体の観測数}} \times 100 \quad (\text{式 1-1})$$

1.2.2 RMS による測位精度評価

平成 20 年度及び 21 年度の実証実験で得られた QZS-QS 法の測位精度を評価する再の基準座標として、分配器を用いて同一アンテナ・同時帯に観測を実施したスタティック観測データを用い、参照基準点との相対測位にて解析した値を用いている。なお、解析ソフトには精密基線解析ソフトである GAMIT を用いている。この基準座標と QZS-QS 法の Fix 解の測位結果との差分を求め、その差分の 2 乗和を測位解の数で割ったものの平方根をとって測位精度を評価する（式 1-2）。なお、ここで求められる値は一般に RMS（Root Mean Squarer）と呼ばれる。

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_0)^2}{n}} \quad (\text{式 1-2})$$

(X_0 : 基準座標、 X_i : QZS-QS 法の i 番目の測位結果、 n : 測位解の数 (母集団))

1.2.3 センチメートル級測位が実現できている Fix 解の割合

前述の RMS は測位精度を評価する際に広く利用される指標の一つであるものの、母集団中に非常に大きな外れ値があった場合、その値の影響で RMS 値が大きくなり現れる可能性がある。そこで、RMS とは別に実際に測量等で利用できる解が得られる割合を評価するため、Fix 解のうち、基準座標から水平方向、上下方向にそれぞれ 10cm 以内に収まった測位解の割合を算出する（式 1-3）。

$$cm\text{級測位解の割合}[\%] = \frac{\text{基準値から10cm以内の測位解数}}{\text{Fix解の数}} \times 100 \quad (\text{式 1-3})$$

1.3 平成 20 年度技術実証実験における評価項目及び評価基準

平成 19 年度までに開発されたシステムの性能を評価するため、平成 20 年度から同システムを用いた現地での技術実証実験を実施している。本節では、平成 20 年度の技術実証実験における評価項目及び評価基準について簡単にレビューする。

1.3.1 観測地域差の検証

QZS-QS 法では測位補正情報をリアルタイムに生成する必要があるため、SHS では全国を 12

の領域に分けて分散処理を行っている。各領域による測位精度の違い等について検証するため、緯度や領域形状等を考慮し、以下の5地区において試験観測を実施した。

- (1) 旭川地区（領域1）
- (2) つくば地区（領域4）
- (3) 金沢地区（領域5）
- (4) 大分地区（領域9）
- (5) 石垣地区（領域12）

参照基準点からの距離に対する依存性を検証するため、各地区内で相対測位の基準となる参照基準点（電子基準点）を設定し、同点から約0 km（近傍）、5 km、10km、20km、50kmの基線長にある既設の基準点等で試験観測を実施した（図 1-5）。観測は上記5点の各点で同時刻に開始・終了し、同一アンテナからの信号を分配し並行で観測を行ったスタティック解の値を基準座標として精度評価を行った。

試験観測の結果から、各地区での Fix 率は石垣地区を除いて 90%を超える値となり、さらに Fix した測位解についてはほぼ 100%の確率で基準座標から 10cm 以内に収まっていることが確認された。石垣地区については Fix 率が約 86%と他地区より若干低い結果となったが、この理由としては、島嶼部による電子基準点の配点分布の偏在による測位補正情報の精度低下が考えられる。但し、Fix 解が得られた場合には他地区の結果と同様、基準座標からほぼ 10cm の範囲に収まっている。全地区において、水平方向、上下方向の RMS はそれぞれ 1~6cm、2~10cm 程度となっており、開発目標の精度が達成できていることが確かめられた。

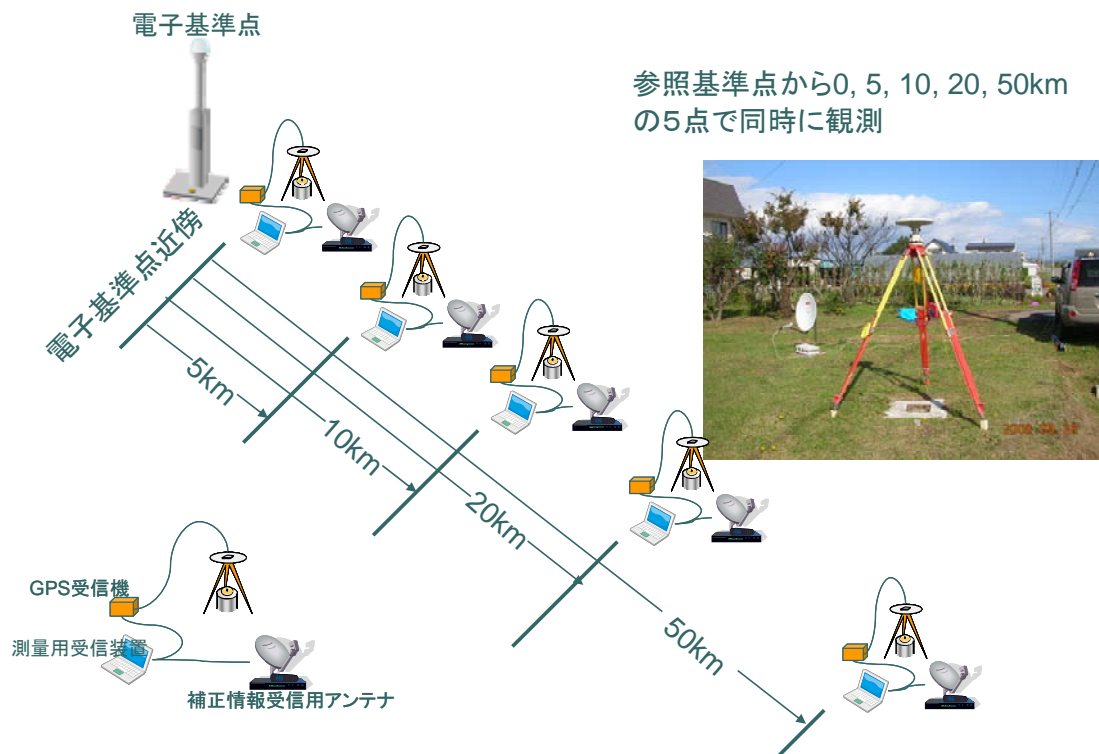


図 1-5 平成 20 年度の技術実証実験の模式図

1.3.2 季節差の検証

測位補正情報として配信される電離層遅延補正量や対流圏遅延補正量等は、季節、時間帯或

いは観測時の気象条件等で変化する可能性がある。そこで、これらの条件の違いが測位補正情報に及ぼす影響を検証するため、0と同じ5地区で、可能な限り時期をずらして再度の観測を実施した。

観測の結果、金沢地区で系統的な誤差が見られたものの、その他の地区については明確な精度の差はほぼ見られなかった。但し、平成20年度に実施した技術実証実験の2回の観測時期が9月、12月と3ヶ月程度しか間隔が空いていないため、より条件の違いが大きく異なる時期での検証の必要性について指摘された。

1.4 平成21年度技術実証実験における評価項目

平成20年度の技術実証実験において、標準的な条件化では各地区で概ね良好な測位結果が得られたことから、平成21年度の実証試験では、より極端な条件下での観測を実施し、QZS-QS法の適用限界と課題を抽出すること等を目的に、以下の評価項目を設定した。

(1) 季節差の検証

平成20年度の実証実験では異なる2時期での観測結果に有意な差が見られなかったものの、観測実施時期が9月と12月で3ヶ月しか間隔が空いていなかったため、より電離層・気象等の環境の差が大きい夏季と冬季に観測を実施し、季節差による影響について追加検証する。

(2) 長距離基線での測位精度検証試験

平成20年度の実証実験では、各代表地区において参照基準点の近傍から50kmまでの地点において試験観測を実施し、概ね目標精度を達成できていることを確認した。QZS-QS法では、12に分けられた各領域において、参照基準点からの基線長が最大で300km弱になる場合があることから、より基線長が長くなった場合の精度検証を実施する。

(3) 領域境界の整合性

QZS-QS法では、観測点が属する領域を観測時の単独測位値で決定するが、領域境界で観測をする場合、単独測位値の精度の関係で、観測点の属する領域が、本来の領域ではなく隣接する領域だと判断される可能性がある。そのような場合においても、測位時にはどちらの補正情報を用いても整合した解が求められる必要がある。そこで、領域境界上に観測点を選点し、隣り合う領域からの補正情報を用いた測位解の精度について評価するとともに、それぞれの解の整合性を検証する。

(4) 標高差のある山岳部での検証

受信した対流圏遅延補正情報を測位に利用する際、SJS内では、観測点から半径70km以内の電子基準点による補正量を抽出し、距離による重み付けをした空間内挿を行うことにより観測点上空の遅延量を推定している。この補正量生成のために使用される周囲の電子基準点と観測点の間の標高差が大きい場合には、空間内挿により得られる標高と実際の標高に差が生じ、結果として大気遅延推定量が本来の値とずれる場合が発生し得る。そこで、周囲の電子基準点との標高差がある山岳部にて試験観測を実施して精度検証を実施するとともに、相対測位の基準点となる参照基準点についても、本来の参照基準点とは別に標高差のある2点を仮に設定し、その影響についても評価する。

1.5 季節差による測位精度検証試験

平成20年度の検証試験では、「旭川地区」、「つくば地区」、「金沢地区」、「大分地区」、「石垣島地区」の5地区で、時期を分けて2回の試験観測を実施し、その間では測位精度に時期の違いによる顕著な差がないことが確認された。しかし、観測実施時期が9月、12月と3ヶ月しか間隔が空いていなかったため、より季節差の大きい8月、1月の2回の観測を行い、測位精度

に及ぼす影響について調査した。また、観測地区として、夏季・冬季の気象条件の差が顕著である旭川地区にて観測を実施した。

1.5.1 地区及び観測点の選定

平成 21 年度の観測地区として、高緯度に位置し、電離層及び対流圏の状態が夏冬で非常に大きくなると考えられる旭川地区を選んだ（図 1-6）。また、同地区での観測点については、観測点の周辺環境による誤差要因を最小にすることを目的に、平成 20 年度の実証実験時に使用した点と同じ点とした（表 1-1、図 1-7）。

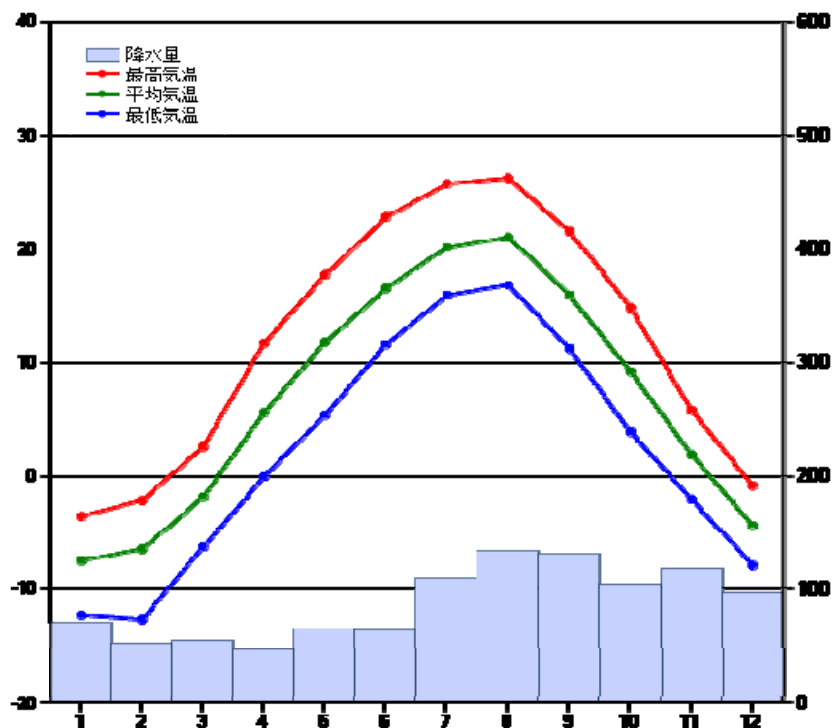


図 1-6 旭川市の気象（データは 30 年の平均値） <http://weather.time-j.net/>

表 1-1 旭川地区における季節差の検証点一覧

参照基準点からの基線長	観測点	市町村名
約 30 m (近傍)	旭川市街区多角点 30D16 (偏)	旭川市
約 5 km	四等三角点「下兵村」	旭川市
約 10 km	四等三角点「宇園」	旭川市
約 20 km	3 級基準点 H18-3-011	比布町
約 50 km	2 級基準点 天塩川 H17-No.114	士別市

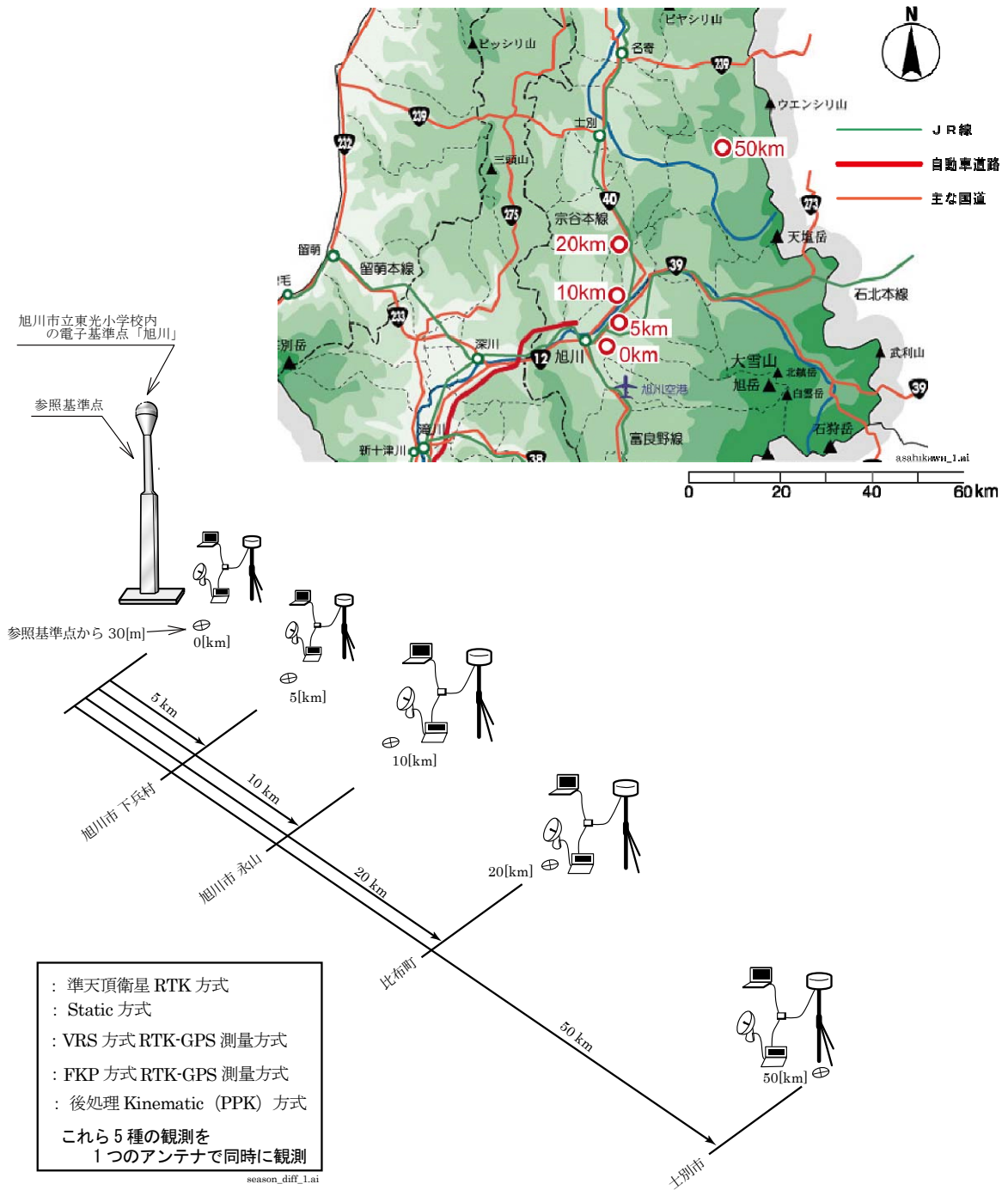


図 1-7 旭川地区における季節差検証点の分布（上）及び参照基準点との関係イメージ（下）

1.5.2 観測機器構成

図 1-7 の各観測点において、図 1-8 に示す機器構成で観測を実施した。アンテナからの信号を分配増幅器で分配し、QZS-QS 法、NW 型 RTK (VRS 方式・FKP 方式)、Static 方式、PPK 方式の 5 方式での測位計算或いは信号のロギングを実施した。なお、「1.6 長距離基線での測位精度検証試験」及び「1.8 山岳部における測位精度検証試験」でも同様の機器構成で観測を実施している。

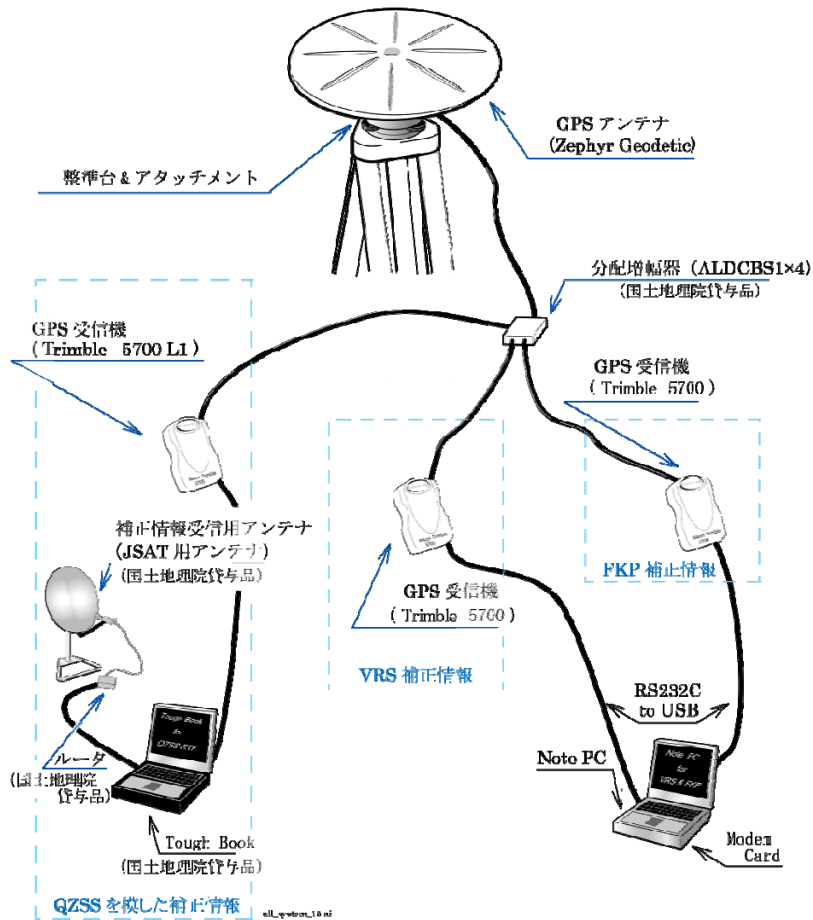


図 1-8 現地観測機器の構成

1.5.3 観測結果

(1) 基準座標からの水平分布

各測点で得られた測位結果について、参照基準点からの距離別に、スタティック解を基準とした2次元分布をそれぞれ $\pm 1000\text{mm}$ 、 $\pm 200\text{mm}$ の範囲で図示したものを図 1-9 から図 1-13 に示す。どの観測点においてもほぼ基準座標から10cm以内で測位できていることが分かる。

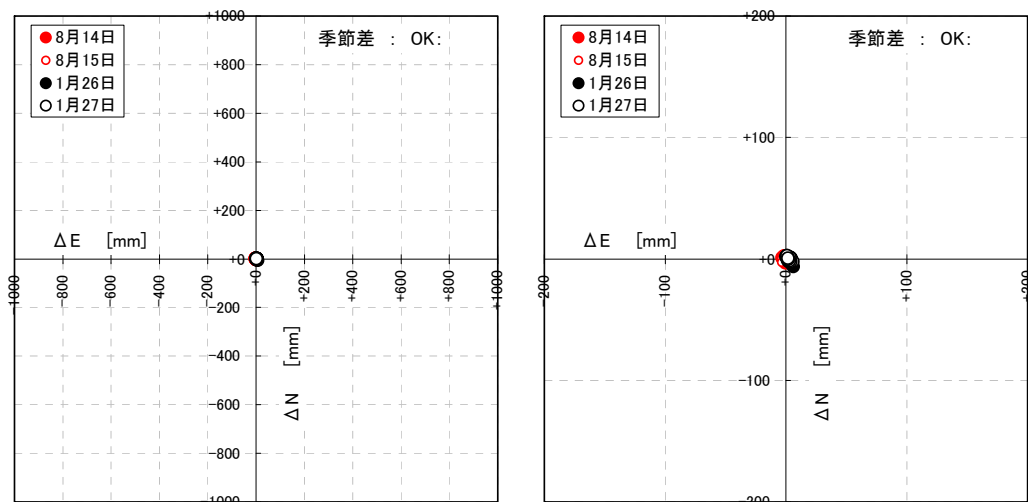


図 1-9 季節差検証結果の水平分布 (参照基準点近傍)

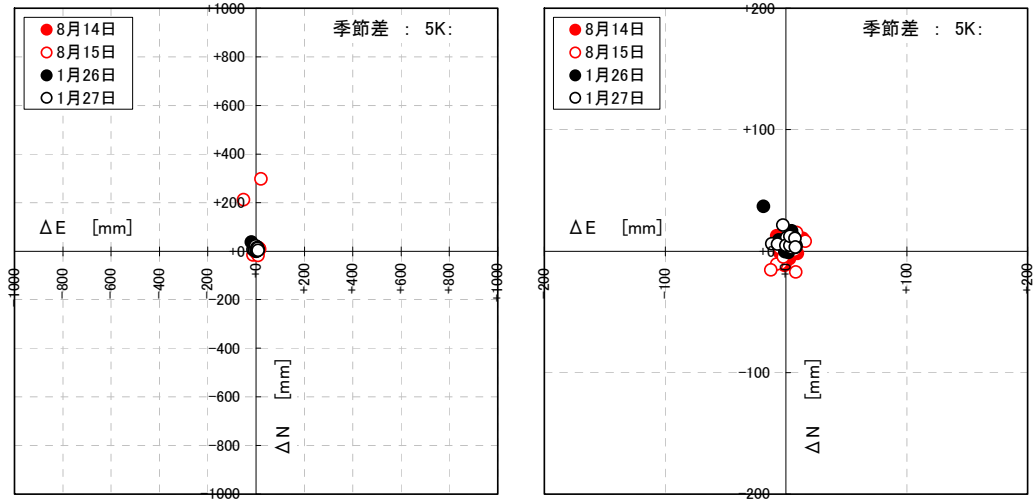


図 1-10 季節差検証結果の水平分布 (約 5km)

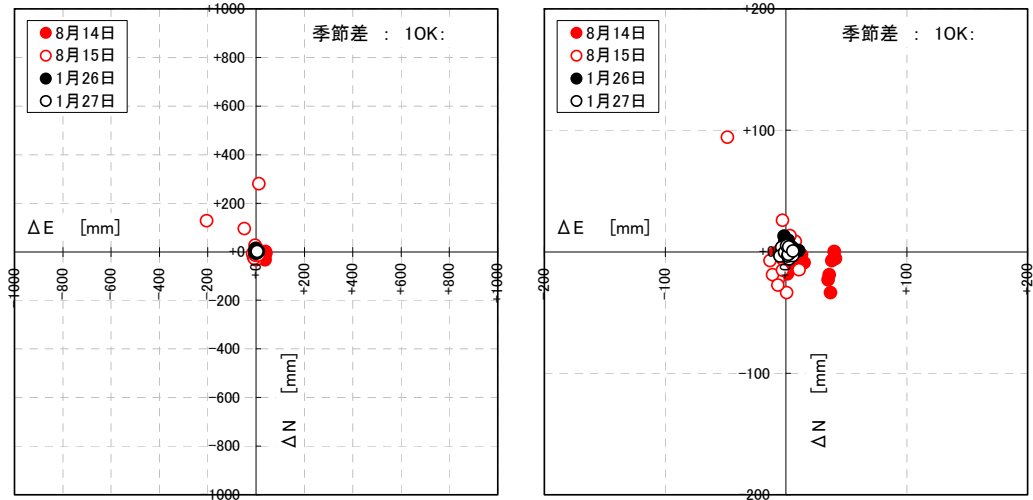


図 1-11 季節差検証結果の水平分布 (基線長 : 約 10km)

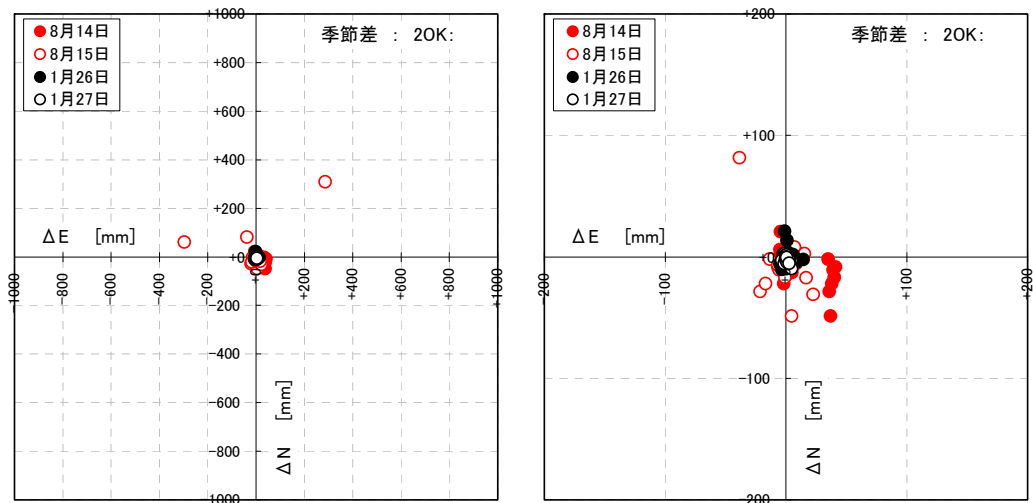


図 1-12 季節差検証結果の水平分布 (基線長 : 約 20km)

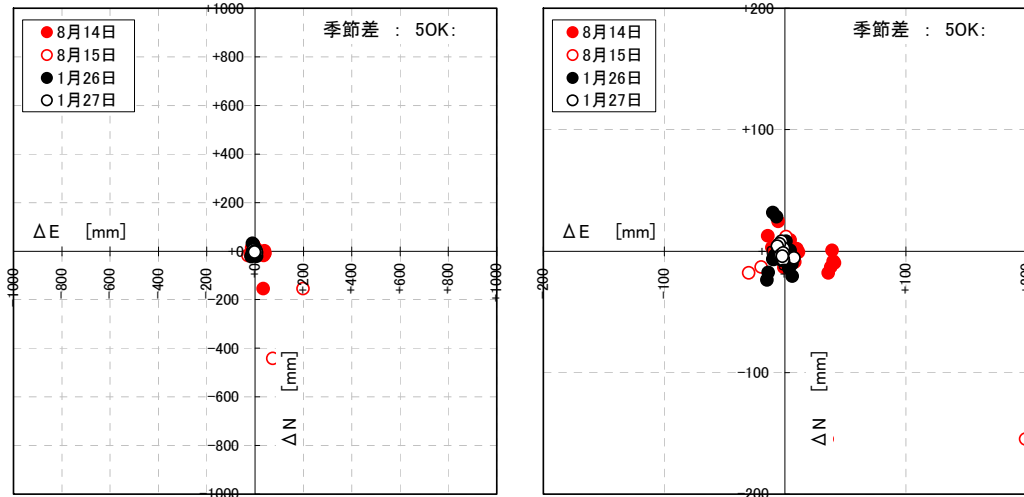


図 1-13 季節差検証結果の水平分布（基線長：約 50km）

(3) 季節差の検証試験結果総括

平成 21 年度に実施した季節差の検証試験の観測結果の総括表を表 1-2 に、また参考として平成 20 年度の検証試験の結果を表 1-3 に示す。これらの結果について以降の項で考察する。

表 1-2 季節差の検証試験結果総括表（平成 21 年度）

観測点	観測日	参照基準点	観測数	notFix	Fix	Fix率	RMS		Fix解の10cm以内割合			
							ΔS[mm]	ΔU[mm]	ΔS<=100mm	ΔS率[%]	ΔU<=100mm	ΔU率[%]
0km	8/14・15	旭川	62	5	57	91.9%	1.1	3.0	57	100.0%	57	100.0%
	1/26・27		59	15	44	74.6%	1.5	4.9	44	100.0%	44	100.0%
	計		121	20	101	83.5%	3.0	12.0	101	100.0%	101	100.0%
5km	8/14・15		53	10	43	81.1%	53.9	38.6	41	95.3%	41	95.3%
	1/26・27		53	14	39	73.6%	6.7	16.9	39	100.0%	39	100.0%
	計		106	24	82	77.4%	41.9	34.9	80	97.6%	80	97.6%
10km	8/14・15		62	9	53	85.5%	50.5	36.7	50	94.3%	51	96.2%
	1/26・27		59	12	47	79.7%	2.5	8.3	47	100.0%	47	100.0%
	計		121	21	100	82.6%	39.6	27.7	97	97.0%	98	98.0%
20km	8/14・15		62	13	49	79.0%	72.4	91.8	47	95.9%	46	93.9%
	1/26・27		53	13	40	75.5%	4.1	11.0	40	100.0%	40	100.0%
	計		115	26	89	77.4%	57.1	69.1	87	97.8%	86	96.6%
50km	8/14・15	62	19	43	69.4%	76.2	105.6	41	95.3%	41	95.3%	
	1/26・27	58	16	42	72.4%	7.5	14.0	42	100.0%	42	100.0%	
	計	120	35	85	70.8%	56.9	76.0	83	97.6%	83	97.6%	

表 1-3 季節差の検証試験結果総括表（平成 20 年度）（参考）

観測点	観測日	参照基準点	観測数	notFix	Fix	Fix率	RMS		Fix解の10cm以内割合			
							ΔS[mm]	ΔU[mm]	ΔS<=100mm	ΔS率[%]	ΔU<=100mm	ΔU率[%]
0km	9/26・27	旭川	56	0	56	100.0%	2.8	4.0	56	100.0%	56	100.0%
	12/23・24		48	0	48	100.0%	49.5	38.7	48	100.0%	47	97.9%
	計		104	0	104	100.0%	33.9	26.6	104	100.0%	103	99.0%
5km	9/26・27		52	5	47	90.4%	9.8	12.2	47	100.0%	47	100.0%
	12/23・24		45	6	39	86.7%	30.1	44.3	38	97.4%	38	97.4%
	計		97	11	86	88.7%	21.6	31.2	85	98.8%	85	98.8%
10km	9/26・27		56	4	52	92.9%	16.2	40.6	52	100.0%	51	98.1%
	12/23・24		51	4	47	92.2%	7.7	12.8	47	100.0%	47	100.0%
	計		107	8	99	92.5%	12.9	30.7	99	100.0%	98	99.0%
20km	9/26・27		56	6	50	89.3%	14.8	17.6	50	100.0%	50	100.0%
	12/23・24		51	3	48	94.1%	8.0	12.0	48	100.0%	48	100.0%
	計		107	9	98	91.6%	12.0	15.1	98	100.0%	98	100.0%
50km	9/26・27	56	8	48	85.7%	12.7	17.9	48	100.0%	48	100.0%	
	12/23・24	48	6	42	87.5%	15.1	18.2	42	100.0%	42	100.0%	
	計	104	14	90	86.5%	13.9	18.1	90	100.0%	90	100.0%	

(3) Fix 率

参照基準点からの距離と Fix 率との関係を図 1-14 に示す。平成 20 年度の観測結果と比較して、平成 21 年度の観測では全体的に Fix 率が低くなっており、最低で約 70%となっている。季節差の観点からは、基線長が短い点で若干差が見られるものの、全体的には今回観測した 2 時期で顕著な差は見られていない。

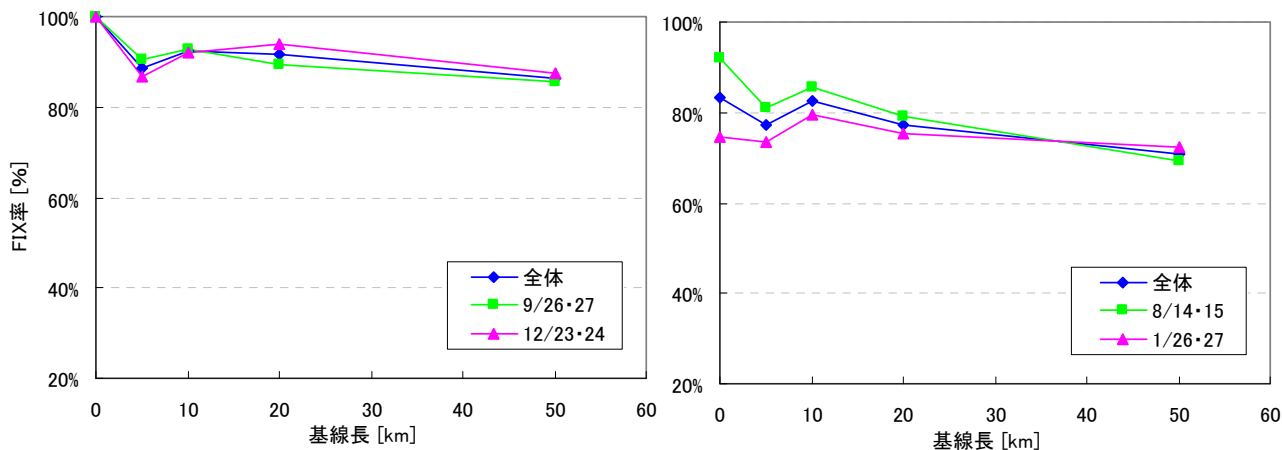


図 1-14 季節差検証試験の Fix 率の結果。左図が平成 20 年度、右図が平成 21 年度結果

(4) 水平・上下方向の RMS 及び Fix 解の cm 級測位解の割合

試験観測結果から得られた各観測点における水平方向及び上下方向の RMS の結果を図 1-15 に示す。また、Fix 解のうち、基準座標から水平、上下方向にそれぞれ $\pm 10\text{cm}$ 以内に収まっている測位解の割合を図 1-16 に示す。

水平、上下成分とも RMS は約 10cm 以下に収まっており、開発目標精度を満足していると言えるものの、冬季に比べて夏季の観測結果の RMS が大きく出る結果となった。但し、表 1-2 及び図 1-16 を見ると、基準座標から $\pm 10\text{cm}$ の範囲に収まっている解の割合は夏季の観測結果でも 95%を超えており、何らかの理由で大きく出た外れ値の影響で RMS が大きく算出され、Fix 解については今回の観測時期の範囲でも概ね基線長及び季節差による測位精度の顕著な違いは見られていないことが示唆される。

なお、実際の観測時に上記の外れ値を除外する手段としては、①単独測位値の精度を考慮して初期座標からの閾値を設定し、それを超える測位解を不採用とする、②複数セットの観測を実施し、セット間較差に制限を設けることにより再現性を担保する等の方法が考えられる。

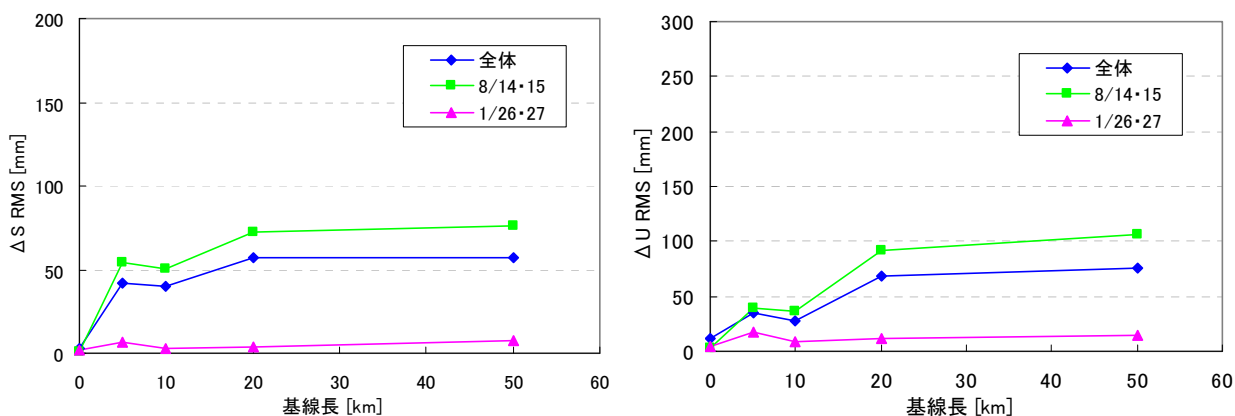


図 1-15 季節差検証試験の水平方向 RMS (左) 及び上下方向 RMS (右)

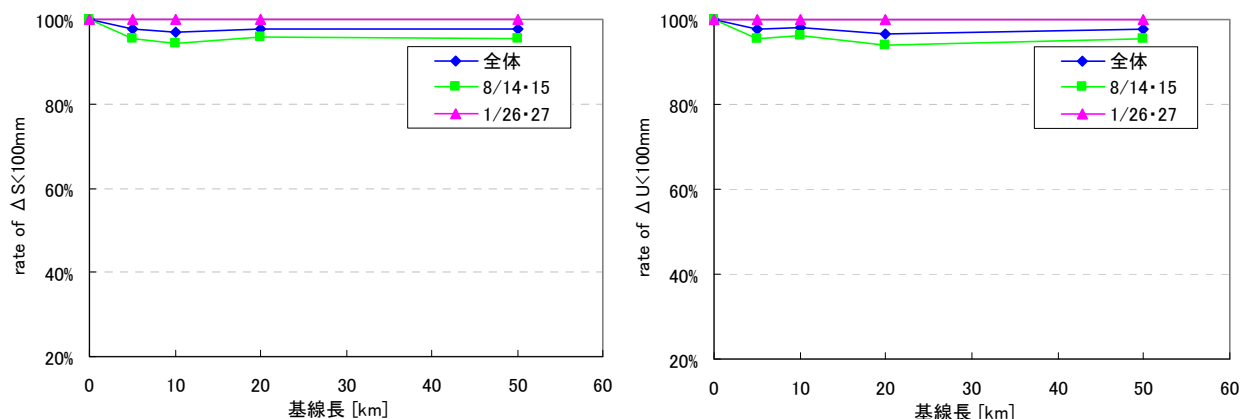


図 1-16 Fix 解のうち基準座標から±10cm 以内の解の割合（左図：水平方向、右図：上下方向）

1.6 長距離基線での測位精度検証試験

1.6.1 概要

平成 20 年度の実証実験では、各代表地区において参照基準点の近傍から 50km までの基線長での試験観測を実施し、QZS-QS 法が概ね開発時の目標精度を達成できていることを確認したが、実際には 12 に分けられた各領域において、参照基準点からの基線長は最大で 300km 弱になる場合があることから、参照基準点からの基線長が長距離となった場合の測位精度を検証するため、領域 1（北海道地区）において、参照基準点からの距離が約 0km（近傍）、100km、150km、200km、250km となる地点で観測を実施し、基線長と測位精度の関係について検証を行った。

1.6.2 地区及び観測点の選定

領域 1 の参照基準点である電子基準点「旭川」から、道北方面、道東方面にそれぞれ基線長が約 0km（近傍）、100km、150km、200km、250km の地点を目安に観測点を選定した（図 1-17）。道北方面については、測位補正情報が周囲の電子基準点からの補間により作成されるような場所を選定し（表 1-4）、道東方面については、電子基準点が陸側にしかなく、電離層遅延補正量が外挿により計算されることになる海岸部を選んで選定した（表 1-5）。また、標高差がほとんどない海岸部で観測することにより、標高差による影響の軽減も期待される。なお、標高差による測位結果の影響については、1.8 で別途評価している。

表 1-4 道北方面の観測点一覧

基線長	観測点名	観測点状況	市町村名
近傍	旭川	旭川市街区多角点 30D16（偏）	旭川市
約 80km	美深	木杭	美深町
約 150km	幌延	木杭	幌延町
約 200km	稚内	木杭	稚内市

表 1-5 道東方面の観測点一覧

基線長	観測点名	観測点	市町村名
近傍	旭川	旭川市街区多角点 30D16（偏）	旭川市
約 150km	網走	木杭	網走市
約 180km	釧路	木杭	
約 240km	相泊	木杭	
約 280km	納沙布	木杭	

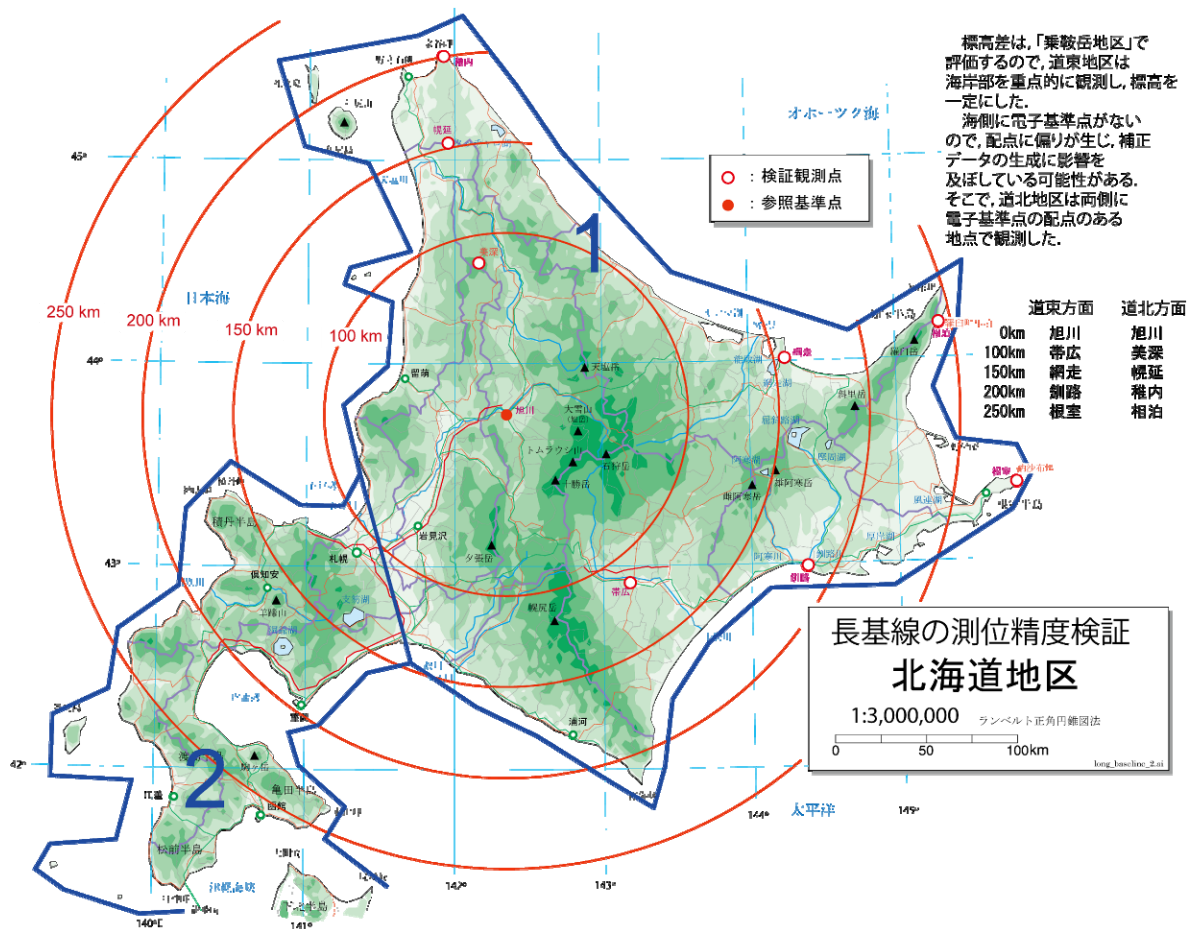


図 1-17 長基線の精度検証試験の配点図

1.6.3 観測機器構成

観測は図 1-8 と同じ機器構成で実施し、アンテナからの信号を分配増幅器で分配し、QZS-QS 法、NW 型 RTK (VRS 方式・FKP 方式)、Static 方式、PPK 方式の 5 方式での測位計算、あるいは信号のロギングを実施した。

1.6.4 観測結果

(1) 基準座標からの水平分布

各測点で得られた測位結果について、参照基準点からの距離別にスタティック解を基準とした 2 次元分布を、 $\pm 1\text{m}$ 、 $\pm 20\text{cm}$ の範囲で道北方面(図 1-18～図 1-21)、道東方面(図 1-22～図 1-26)それぞれについて示す。道北方面の結果ではほぼ基準座標から 10cm 以内で測位できているのに対し、道東方面では 10cm を外れる解が多く出る結果となった。

○道北方面

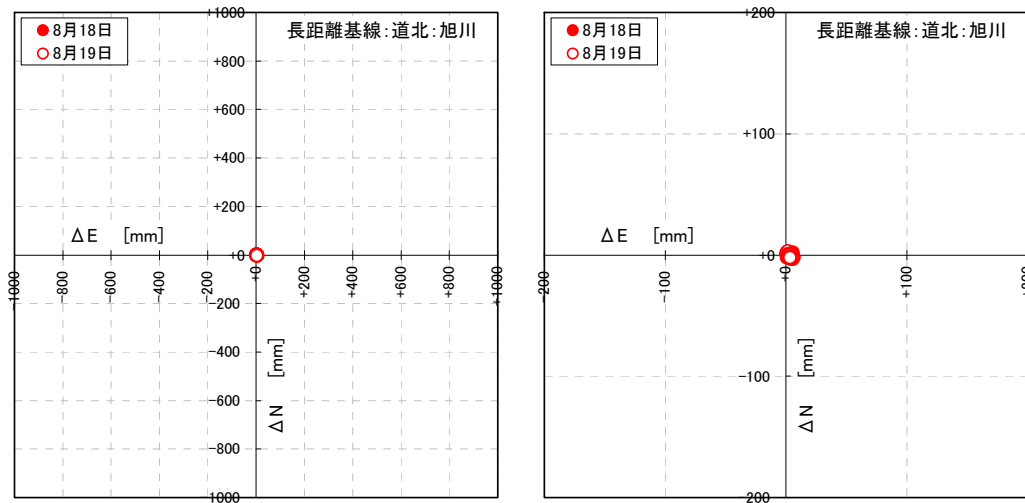


図 1-18 長基線検証結果の水平分布 (道北方面:「旭川」(参照基準点近傍))

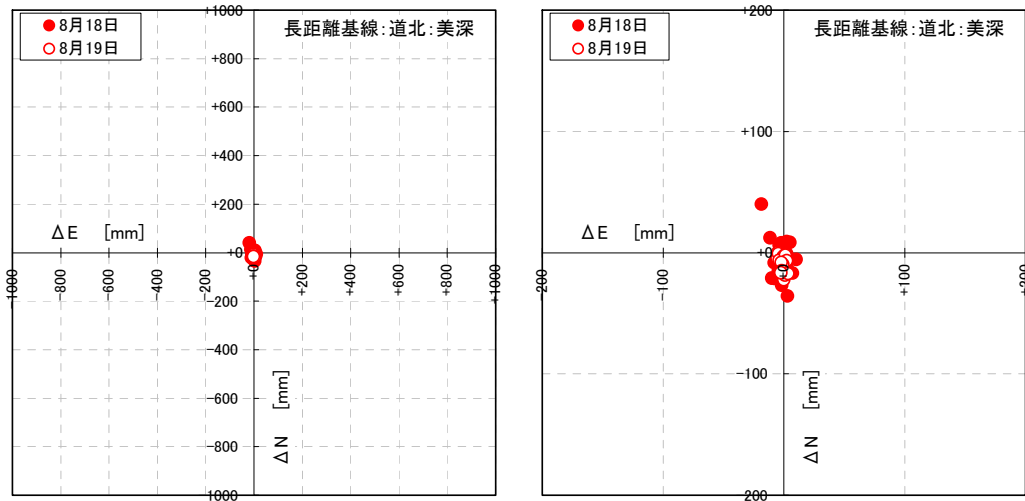


図 1-19 長基線検証結果の水平分布 (道北方面:「美深」(基線長約 80km))

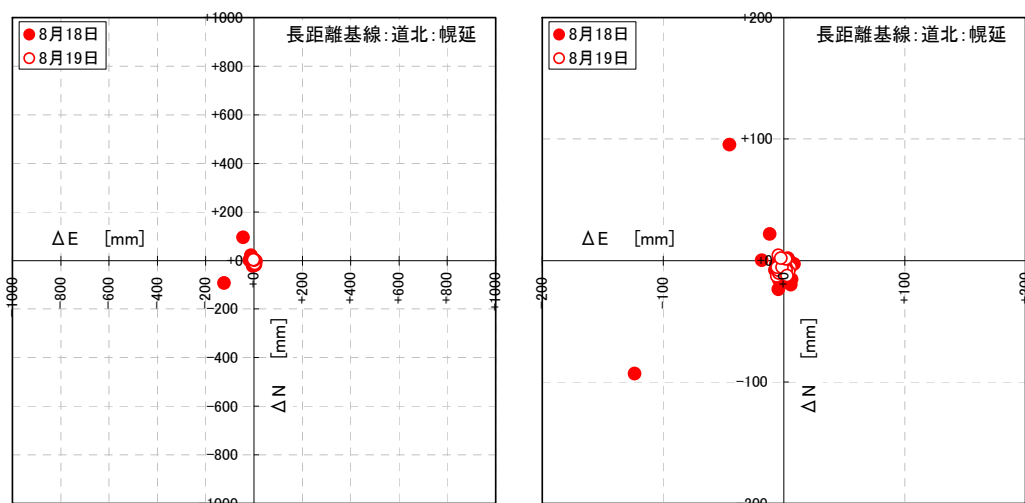


図 1-20 長基線検証結果の水平分布 (道北方面:「幌延」(基線長約 150km))

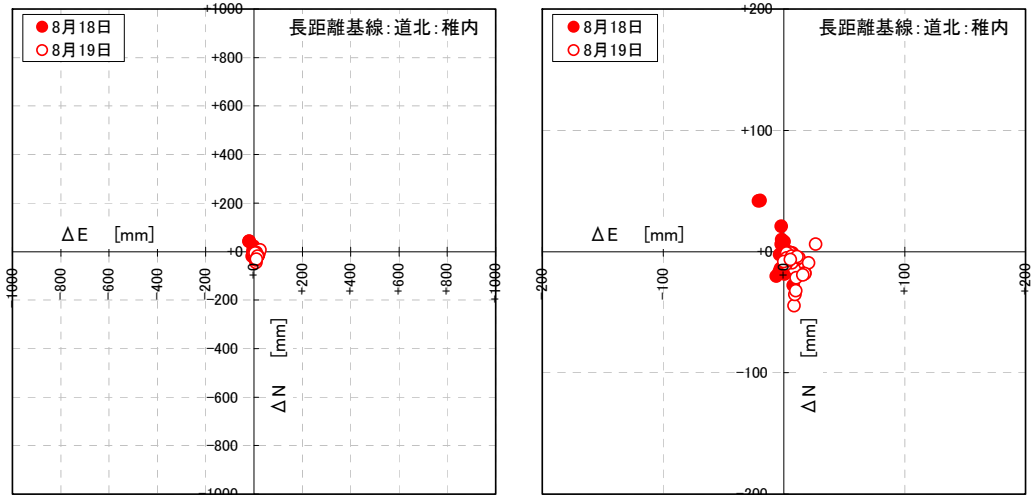


図 1-21 長基線検証結果の水平分布（道北方面：「稚内」（基線長約 200km））

○道東方面

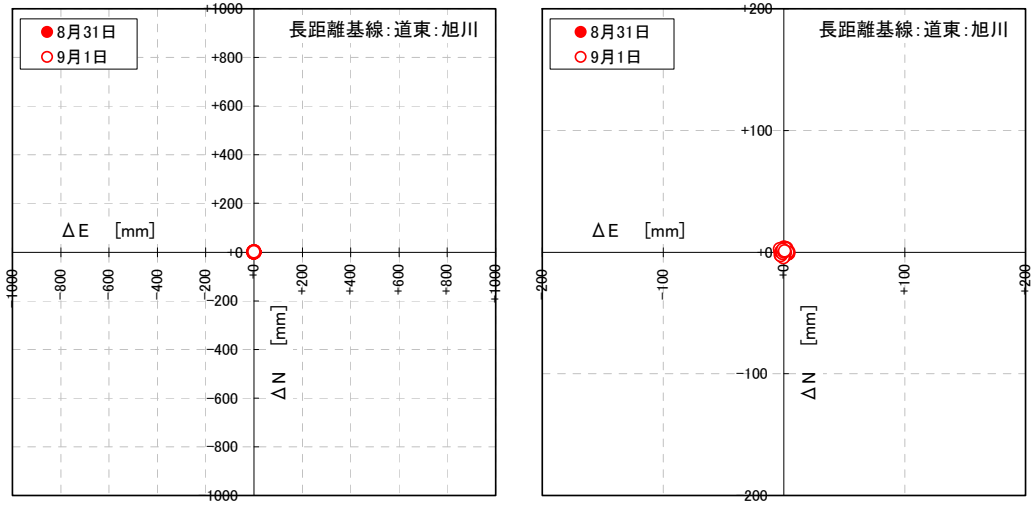


図 1-22 長基線検証結果の水平分布（道東方面：「旭川」（参照基準点近傍））

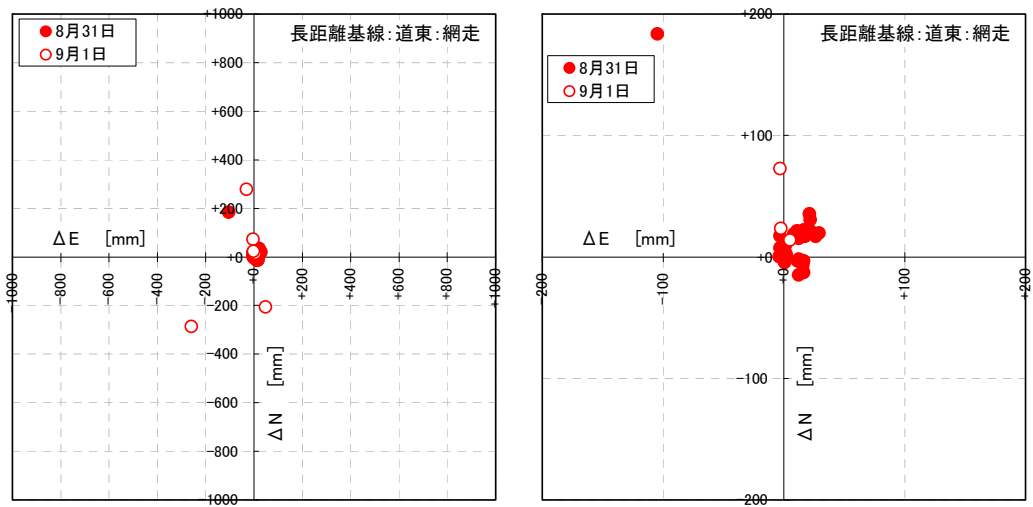


図 1-23 長基線検証結果の水平分布（道東方面：「網走」（基線長約 150km））

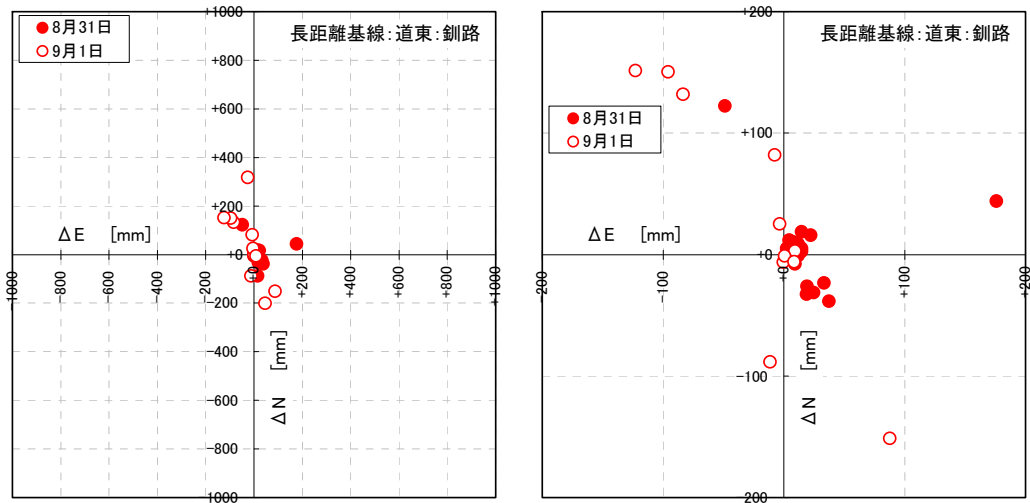


図 1-24 長基線検証結果の水平分布（道東方面：「釧路」（基線長約 180km））

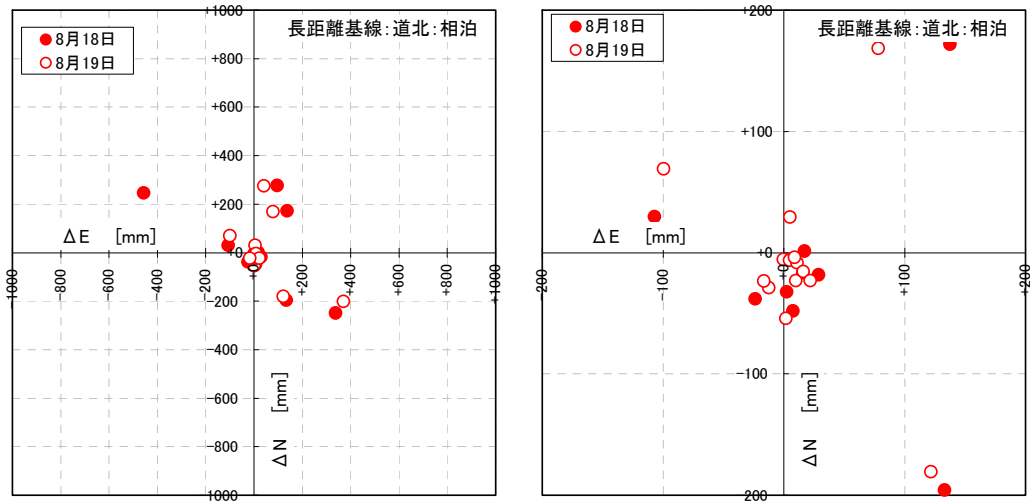


図 1-25 長基線検証結果の水平分布（道東方面：「相泊」（基線長;約 240km））

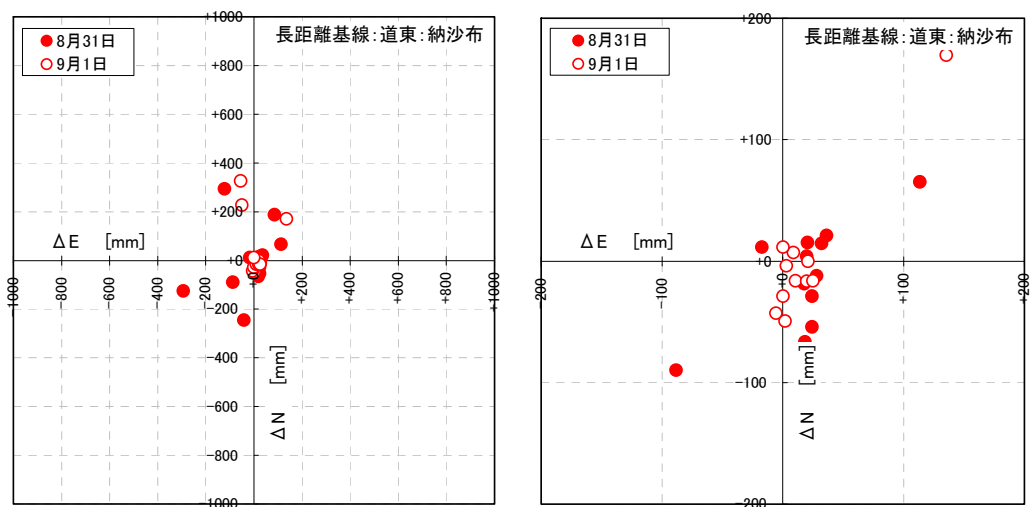


図 1-26 長基線検証結果の水平分布（道東方面：「納沙布」（基線長約 280km））

(2) 長距離基線の検証試験結果総括

長距離基線の検証試験の観測結果のうち、道北方面の結果を表 1-6 に、道東方面の結果を表 1-7 にそれぞれ示す。これらの結果について以降の項で考察する。

表 1-6 長距離基線の測位精度検証試験総括表 (道北方面)

観測点	観測日	参照基準点	観測数	notFix	Fix	Fix率	RMS		Fix解の10cm以内割合			
							ΔS [mm]	ΔU [mm]	$\Delta S < 100\text{mm}$	ΔS 率[%]	$\Delta U < 100\text{mm}$	ΔU 率[%]
旭川	8/18・19	旭川	60	2	58	96.7%	4.1	6.8	58	100.0%	58	100.0%
美深	8/18・19		60	3	57	95.0%	13.2	14.7	57	100.0%	57	100.0%
幌延	8/18・19		60	4	56	93.3%	27.1	61.8	54	96.4%	55	98.2%
稚内	8/18・19		60	18	42	70.0%	20.4	31.5	42	100.0%	42	100.0%

表 1-7 長距離基線の測位精度検証試験総括表 (道東方面)

観測点	観測日	参照基準点	観測数	notFix	Fix	Fix率	RMS		Fix解の10cm以内割合			
							ΔS [mm]	ΔU [mm]	$\Delta S < 100\text{mm}$	ΔS 率[%]	$\Delta U < 100\text{mm}$	ΔU 率[%]
旭川	8/31・9/1	旭川	56	2	54	96.4%	2.8	8.2	54	100.0%	54	100.0%
網走	8/31・9/1		54	23	31	57.4%	103.8	109.1	27	87.1%	27	87.1%
釧路	8/31・9/1		56	25	31	55.4%	106.8	144.3	23	74.2%	22	71.0%
相泊	8/18・19		56	32	24	42.9%	190.4	356.8	17	70.8%	15	62.5%
納沙布	8/31・9/1		56	27	29	51.8%	140.6	127.6	20	69.0%	25	86.2%

(3) Fix 率

参照基準点からの距離と Fix 率との関係を図 1-27 に示す。

道北方面については、「稚内」観測点の結果で値が小さくなっているものの、全体として参照基準点からの基線長によらず Fix 率は 70%を超える結果となった。一方、道東方面についてはいずれの観測点でも Fix 率は 60%を切る結果となった。考えられる理由として、道東方面の観測点が海岸沿いに配置され、電離層遅延補正情報が外挿で推定されることに起因している可能性がある。

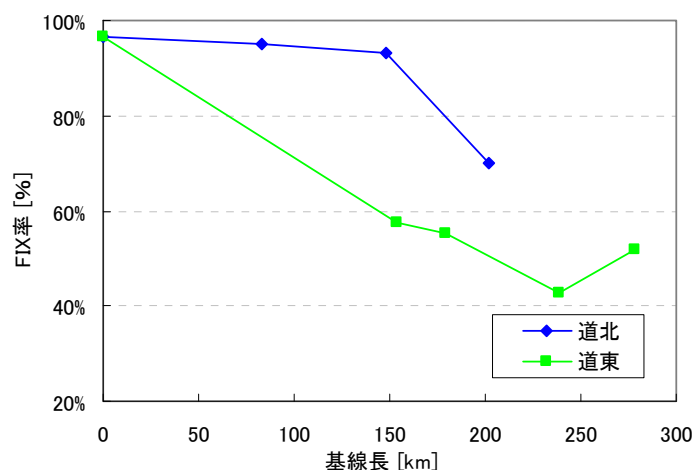


図 1-27 長基線の検証試験結果 (Fix 率)

(4) 水平・上下方向の RMS 及び Fix 解の cm 級測位解の割合

試験観測結果から得られた各観測点における水平方向及び上下方向の RMS の結果を図 1-28 に示す。また、Fix 解のうち、基準座標から水平、上下方向にそれぞれ $\pm 10\text{cm}$ 以内に収まっている測位解の割合を図 1-29 に示す。

道北方面では水平、上下成分とも RMS は 10cm 以下となり、さらに Fix 解については 95%以上で基準座標から $\pm 10\text{cm}$ の範囲で測位解が得られた。一方、道東方面ではいずれの観測点でも

水平・上下とも RMS は 10cm を超え、最大となる相泊では水平成分で約 19cm、上下成分で約 36cm と非常に大きな値となっている。また、Fix 解のうち 10cm 以下となっている割合も 90% を切っており、測位計算に使用した測位補正情報の精度が悪いことによりアンビギュイティを misFix した解が出力されている可能性が示唆される。

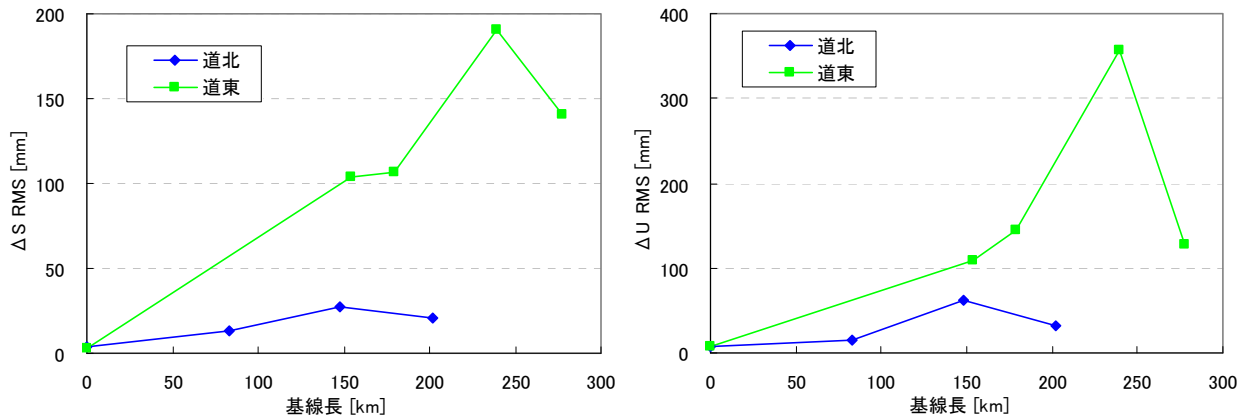


図 1-28 長基線基線検証試験の水平方向 RMS (左) 及び上下方向 RMS (右)

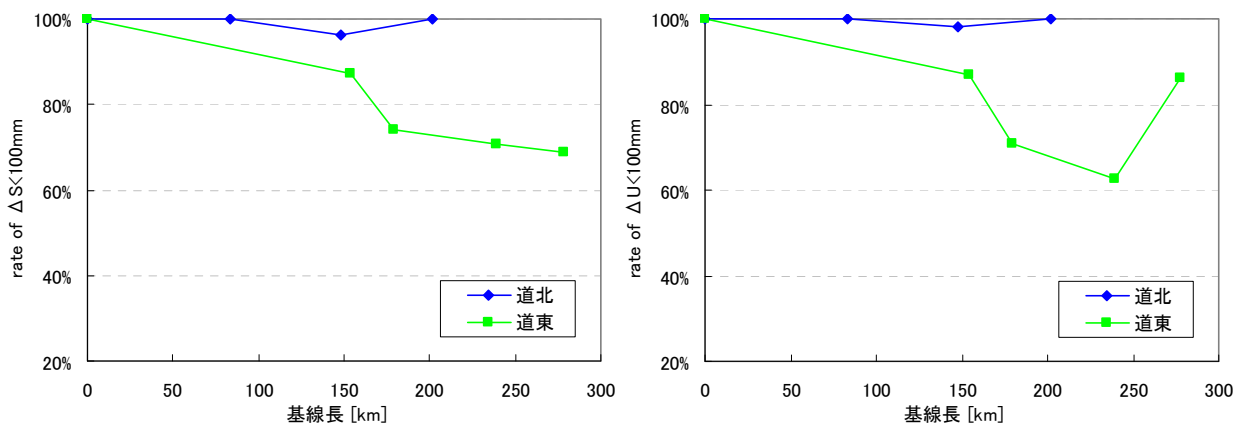


図 1-29 Fix 解のうち基準座標から ±10cm 以内の解の割合 (左図: 水平方向、右図: 上下方向)

以上の結果より、周囲に電子基準点が分布するような観測点であれば、参照基準点からの基線長によらず cm 級精度の測位が実現可能といえるものの、海岸部のように周囲の電子基準点の配点分布に偏りがある場合には測位精度が落ちる可能性が高い。電子基準点の数や設置場所には物理的な制限があるため根本的な解決は難しいが、今回実施したような単点観測法ではなく、複数点の観測結果から計算基線ベクトルを算出するような方法であれば、誤差分がキャンセルされて精度のよい観測結果が得られる可能性がある。

1.7 領域境界付近における測位精度検証試験

1.7.1 概要

QZS-QS 法では観測点が属する領域を観測時の単独測位値で決定するが、領域ごとに測位補正情報を生成する電子基準点の組み合わせが異なるため、領域境界付近では最初の単独測位値のわずかの差で利用する測位補正情報が異なる可能性がある。実際の測量作業で利用する際には、どちらの領域の測位補正情報を使用しても整合した測位結果が得られることが求められる。

そこで、領域境界上に観測点を測設し、隣接する領域の測位補正情報を用いて同時に測位解を算出してその精度及び整合性について検証を行った。なお、観測点の初期座標は通常単独測位値で自動的に設定されるが、本試験観測時には使用する測位補正情報の領域を設定するため、キーボードから手動で初期座標を入力して観測を実施している。

1.7.2 地区及び観測点の選定

試験観測を行う領域境界として、北海道地区（領域 1 と 2 の境界）、関東地区（領域 4 とその周辺の境界）、九州地区（領域 9 と 10 の境界）で観測を実施した。また、各領域の境界情報を元に、NW 型 RTK を用いて「領域境界上の検証点」を測設した（図 1-30）。なお、各測点の埋標形式は永久標識とはせず一時標識としている。

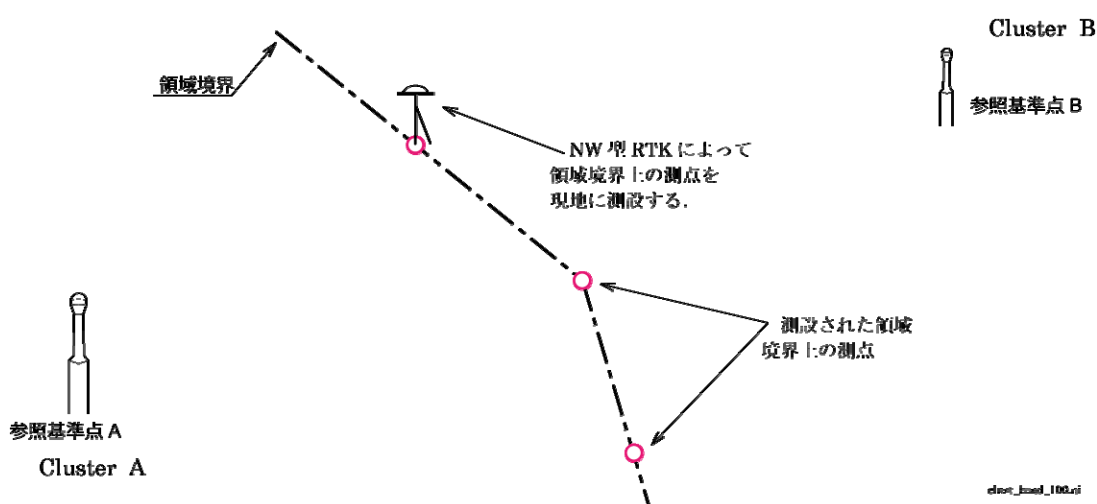


図 1-30 領域境界線上の検証点の測設

1.7.3 領域境界における整合性の検証方法

通常、QZS-QS 法では観測点の初期座標は単独測位値で与えられ、観測点の属する領域が自動的に決定されるが、本試験観測では初期座標をキーボードから直接入力することにより、意図的に使用する測位補正情報の領域を指定して測位を実施した。

まず、参照基準点 A を基準とした測位解を得るために、1 台の SJS に領域 A 側の概算座標をキーボードから入力し、領域 A の測位補正情報を使用して測位するよう設定する（図 1-31）。同時に、分配器で繋いだ別の SJS には隣接する領域 B 側の概算座標を同様にキーボードから入力し、領域 B の参照基準点 B を基準とした測位解が得られるよう設定する（図 1-32）。

これらの観測を各観測点で 2 日間実施し、各測位結果の精度及び整合性を検証した。

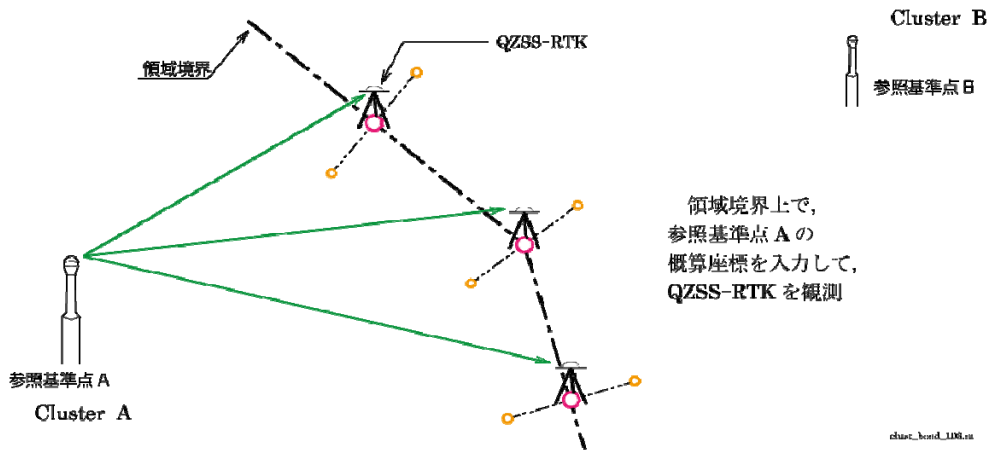


図 1-31 領域境界線上の検証点で領域 A の測位補正情報を用いて測位

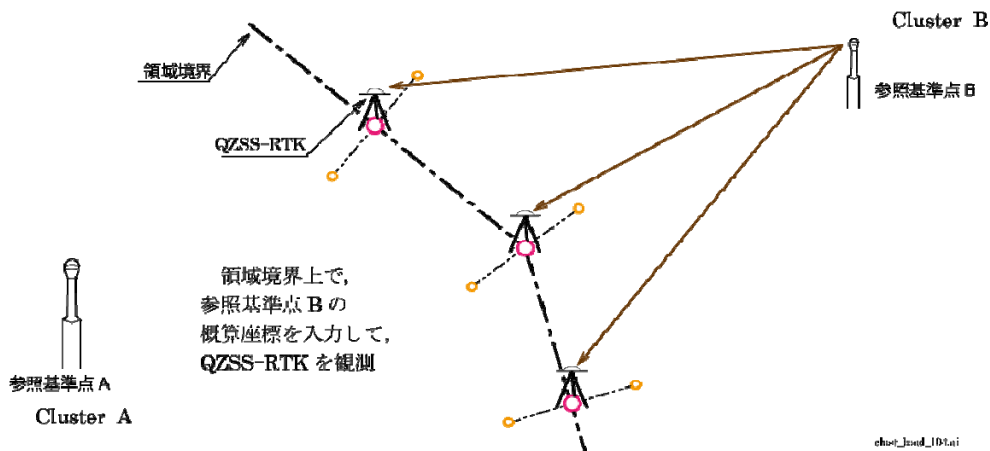


図 1-32 領域境界線上の検証点で領域 B の測位補正情報を用いて測位

1.7.4 観測機器の構成

観測機器構成を図 1-33 に示す。基本的な構成は図 1-8 と同じで、ここに SJS を 1 台追加し、観測点の所属領域及び隣接領域の測位補正情報を同時に受信して測位できるようにしている。

この構成で、QZS-QS 法に加えて、アンテナからの信号を分配増幅器で分配し、QZS-QS 法、NW 型 RTK (VRS 方式・FKP 方式)、Static 方式、PPK 方式での観測も同時に実施している。

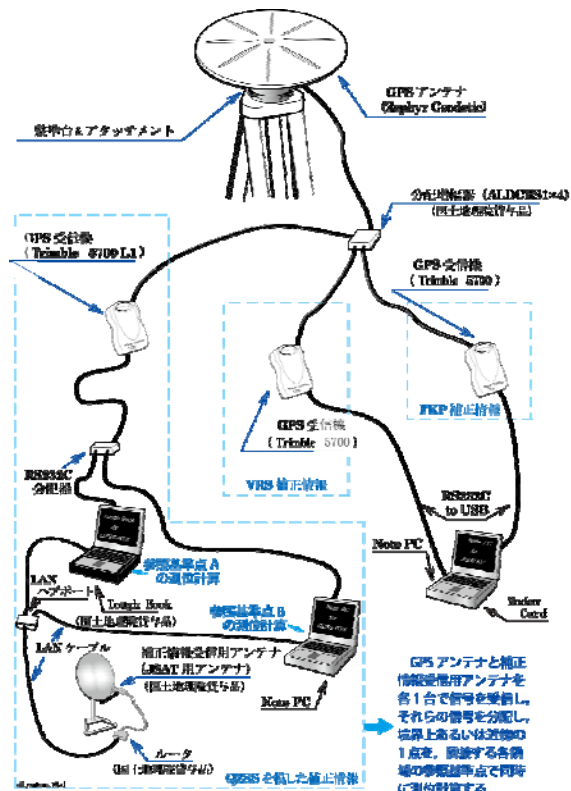


図 1-33 現地観測機器の構成 (QZS-QS 法用の SJS が 2 台)

1.7.5 北海道地区における領域境界検証結果

北海道地区では、領域 1（参照基準点：「旭川」）と領域 2（同：「野辺地」）の領域境界に 5 点を選点し、観測を実施した（図 1-34）。

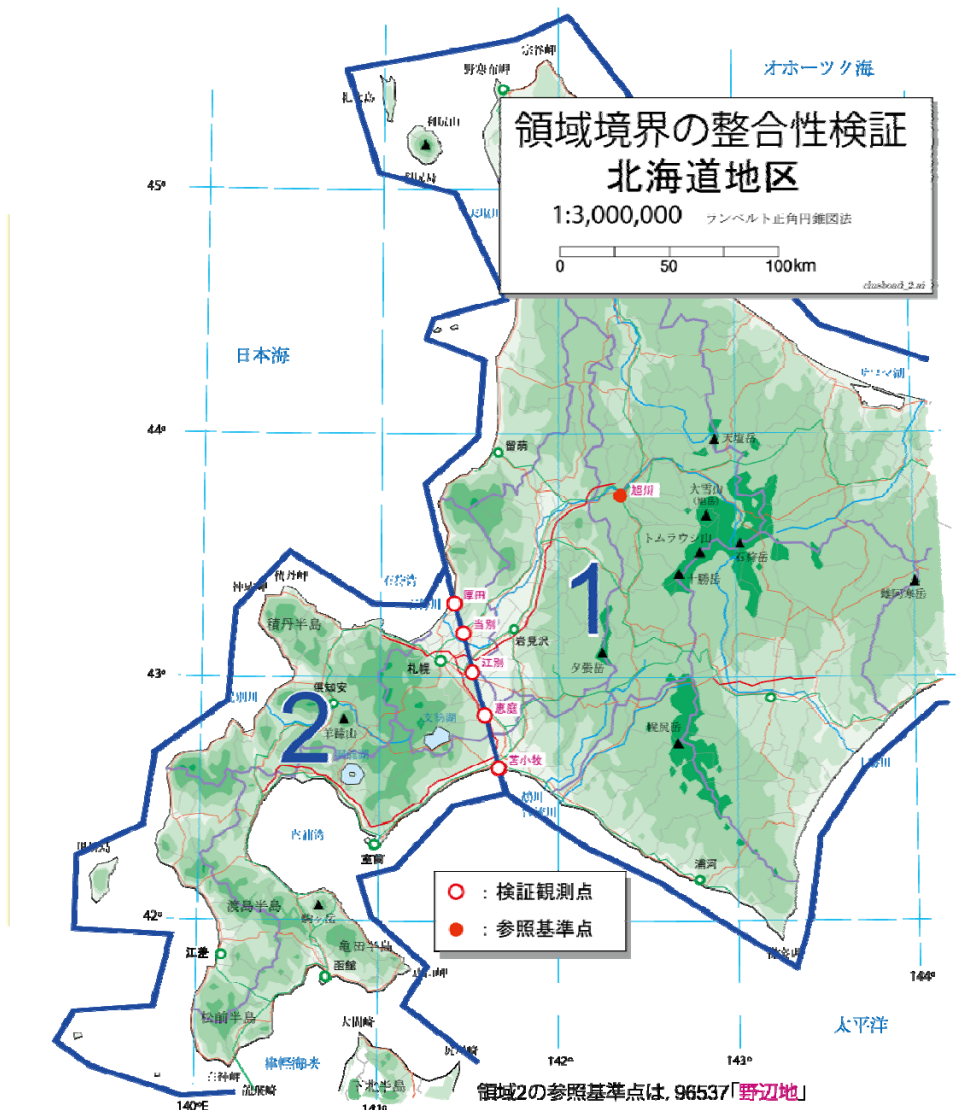


図 1-34 北海道地区における領域境界での実証実験観測点

(1) 基準座標からの水平分布

各測点で得られた測位結果について、スタティック解を基準とした 2 次元分布を図 1-35 から図 1-39 に示す。各図とも左が $\pm 1\text{m}$ 、右が $\pm 20\text{cm}$ の範囲であり、観測日毎、参照基準点毎にそれぞれプロットしている。いずれの観測点においても、使用した参照基準点に関わらず、基準座標から 10cm を超える測位解が多く出る結果となった。

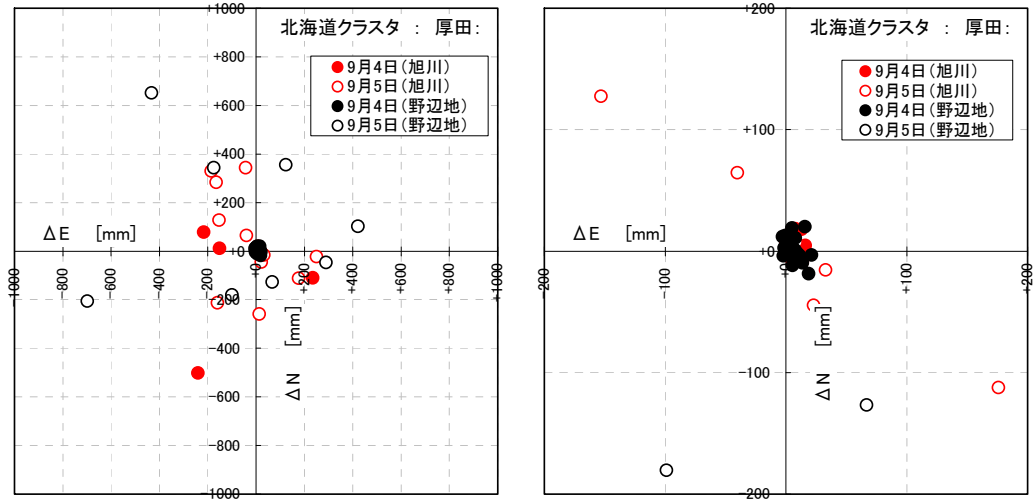


図 1-35 領域境界上での測位結果 (北海道地区:「厚田」)

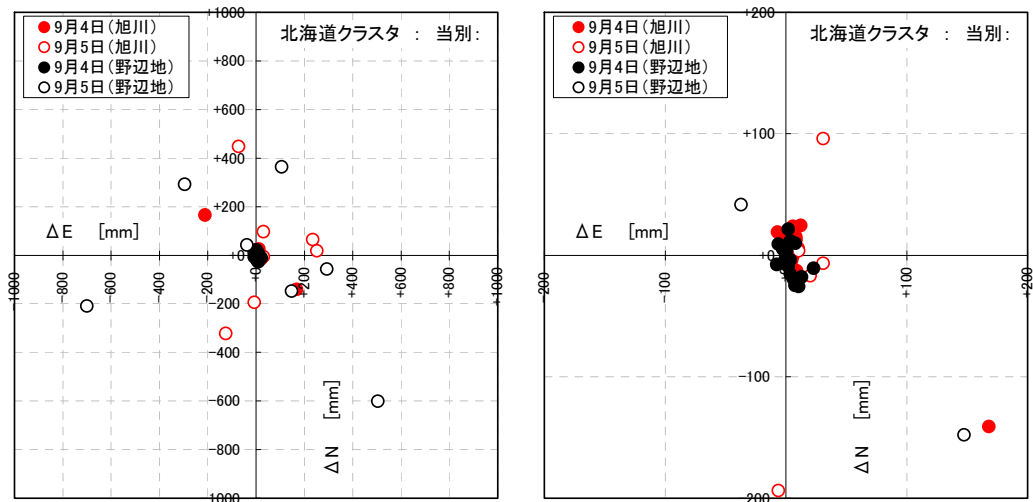


図 1-36 領域境界上での測位結果 (北海道地区:「当別」)

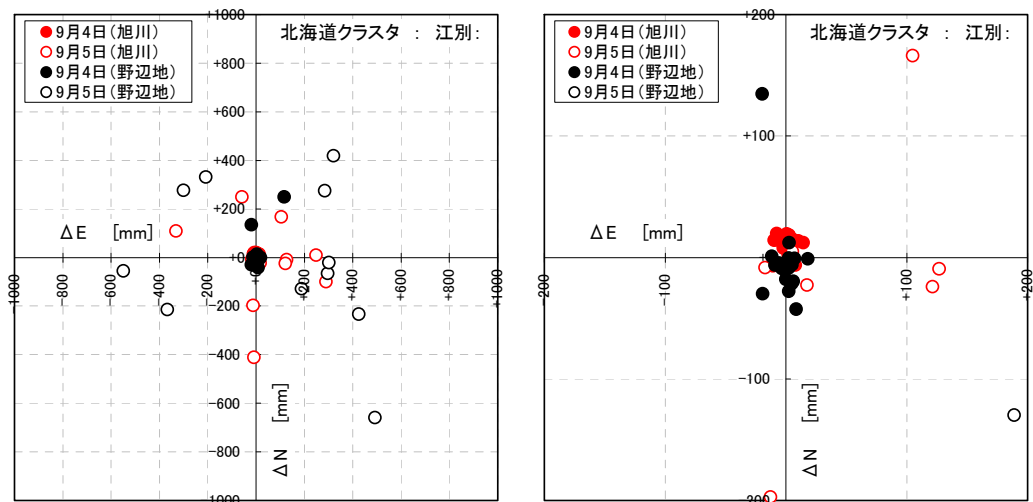


図 1-37 領域境界上での測位結果 (北海道地区:「江別」)

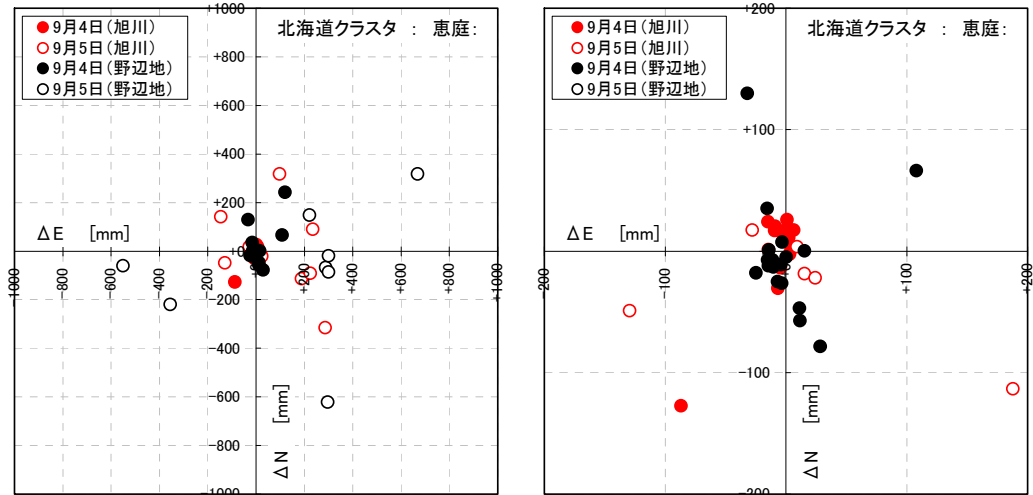


図 1-38 領域境界上での測位結果（北海道地区：「恵庭」）

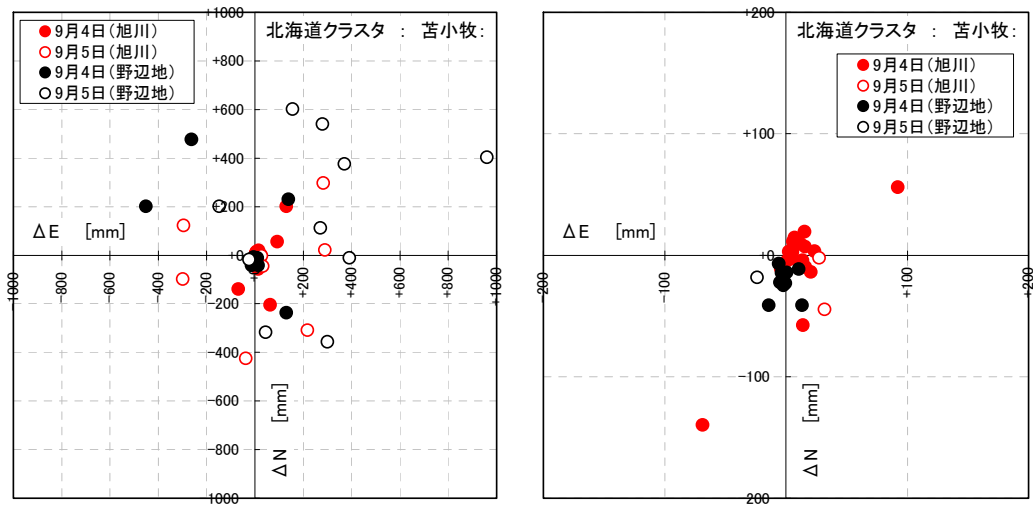


図 1-39 領域境界上での測位結果（北海道地区：「苫小牧」）

(2) 北海道地区における領域境界検証試験結果総括

北海道地区における領域境界での検証試験結果の総括表を表 1-8 に示す。これらの結果について以降の項で考察する。

表 1-8 北海道地区領域境界の検証試験結果総括表

観測点	観測日	参照基準点	観測数	notFix	Fix	Fix率	RMS		Fix解の10cm以内割合			
							ΔS[mm]	ΔU[mm]	ΔS<=100mm	ΔS率[%]	ΔU<=100mm	ΔU率[%]
恵庭	9/4・5	旭川	58	28	30	51.7%	136.0	185.4	22	73.3%	23	76.7%
		野辺地	58	30	28	48.3%	265.7	365.0	17	60.7%	16	57.1%
厚田	9/4・5	旭川	58	28	30	51.7%	193.4	240.8	18	60.0%	19	63.3%
		野辺地	58	28	30	51.7%	266.1	335.5	21	70.0%	20	66.7%
江別	9/4・5	旭川	58	28	30	51.7%	144.5	177.2	21	70.0%	23	76.7%
		野辺地	58	27	31	53.4%	283.4	296.5	18	58.1%	19	61.3%
当別	9/4・5	旭川	58	31	27	46.6%	151.7	185.3	19	70.4%	19	70.4%
		野辺地	58	33	25	43.1%	253.5	175.3	19	76.0%	19	76.0%
苫小牧	9/4・5	旭川	58	29	29	50.0%	178.9	197.4	19	65.5%	22	75.9%
		野辺地	58	34	24	41.4%	452.6	534.2	10	41.7%	12	50.0%

(3) Fix 率

各観測点における Fix 率について、それぞれ利用した参照基準点毎に集計した結果を図 1-40 に示す。いずれの参照基準点についても Fix 率は 60%を切っており、昨年度の検証試験結果よりも大幅に低い結果となった。考えられる理由として、1.6 で考察した海岸部での観測結果と同様、内陸の点ではあるが領域境界のため測位補正情報を生成するための電子基準点が一方に偏在しているため、測位補正情報が外挿で推定されることに起因している可能性がある。

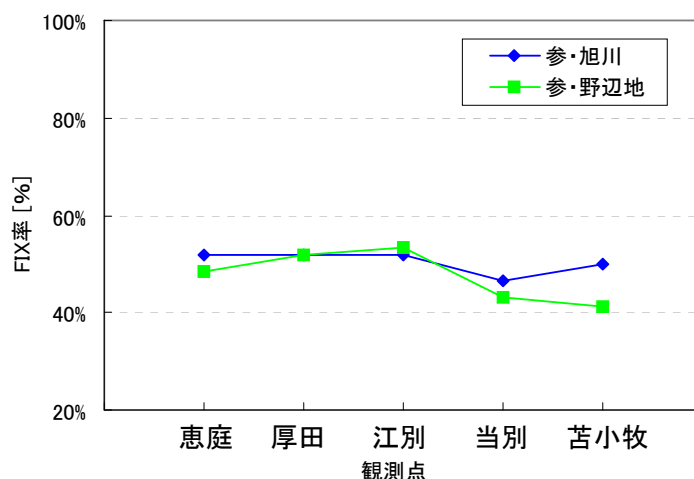


図 1-40 北海道地区での領域境界検証試験結果 (Fix 率)

(4) 水平・上下方向の RMS 及び Fix 解の cm 級測位解の割合

試験観測結果から得られた各観測点における水平方向及び上下方向の RMS の結果を図 1-41 に示す。また、Fix 解のうち、基準座標から水平、上下方向にそれぞれ±10cm 以内に収まっている測位解の割合を図 1-42 に示す。

領域 1 の測位補正情報を使用した場合で RMS が水平成分で約 10~20cm、上下成分で約 20cm、領域 2 の測位補正情報を使用した場合で水平成分が 25cm 以上、上下成分が 20~60cm となっており、他の実証実験結果よりも大きな値となった。また、Fix 解で 10cm に収まっている割合も 80%を切っており、測位時に正しいバイアス推定ができていない可能性を強く示唆している。

これらの解の精度低下の理由として、1.6 の海岸部での検証結果同様、参照基準点からの基線長によるものではなく、測位補正情報自身の精度が低い可能性が挙げられる。本検証で測設した各点は領域境界部に位置しており、内陸部であってもシステム上の設定で周囲全ての電子基準点を利用した内挿処理により生成された測位補正情報ではなく、いずれか片側の電子基準点データからの外挿処理により生成されるため、海岸部と同様の影響が出ていると考えられる。

ただし、物理的に電子基準点の配点が制限される海岸部と異なり、陸域の領域境界についてはシステム上の領域設定により観測点が制限されているだけであり、測位補正情報生成時の領域範囲を拡大することにより、測位補正情報の精度を上げられる可能性がある。

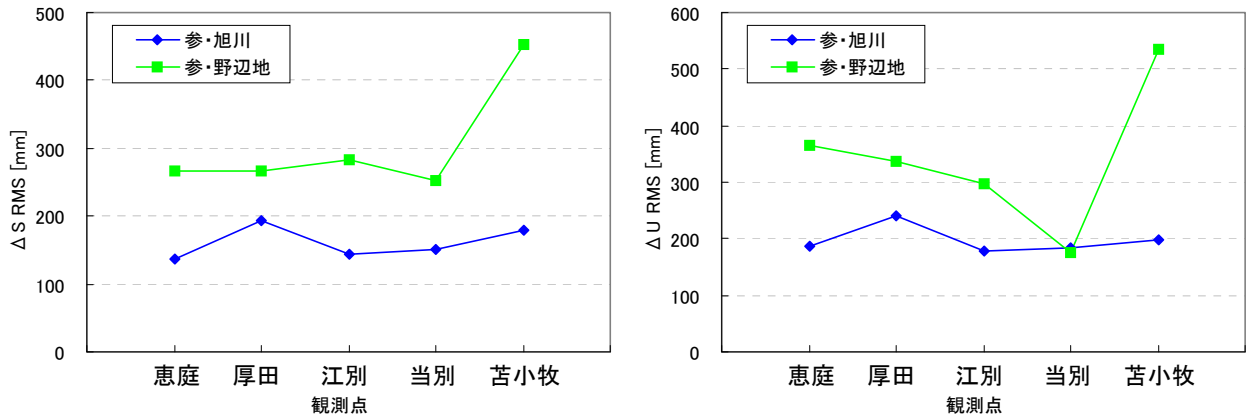


図 1-41 北海道地区での領域境界検証試験の水平方向 RMS (左) 及び上下方向 RMS (右)

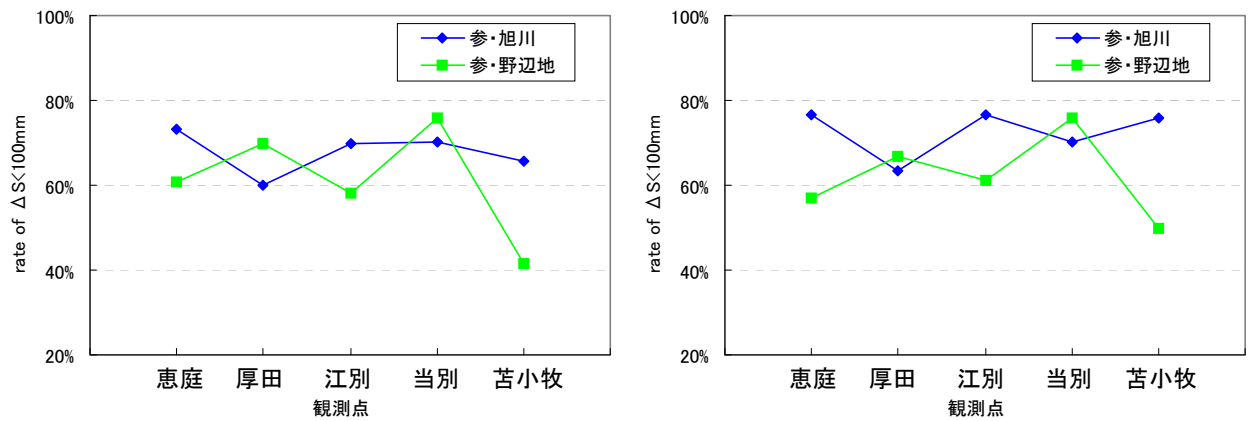


図 1-42 Fix 解のうち基準座標から±10cm 以内の解の割合 (左図：水平方向、右図：上下方向)

1.7.6 関東地区における領域境界検証結果

関東地区では、領域4（参照基準点：「つくば1」）の周辺に隣接する領域3（同：「白鷹」）、領域5（同：「豊科」）、領域6（同：「焼津」）の領域境界に5点を選点し、観測を実施した（図 1-43）。

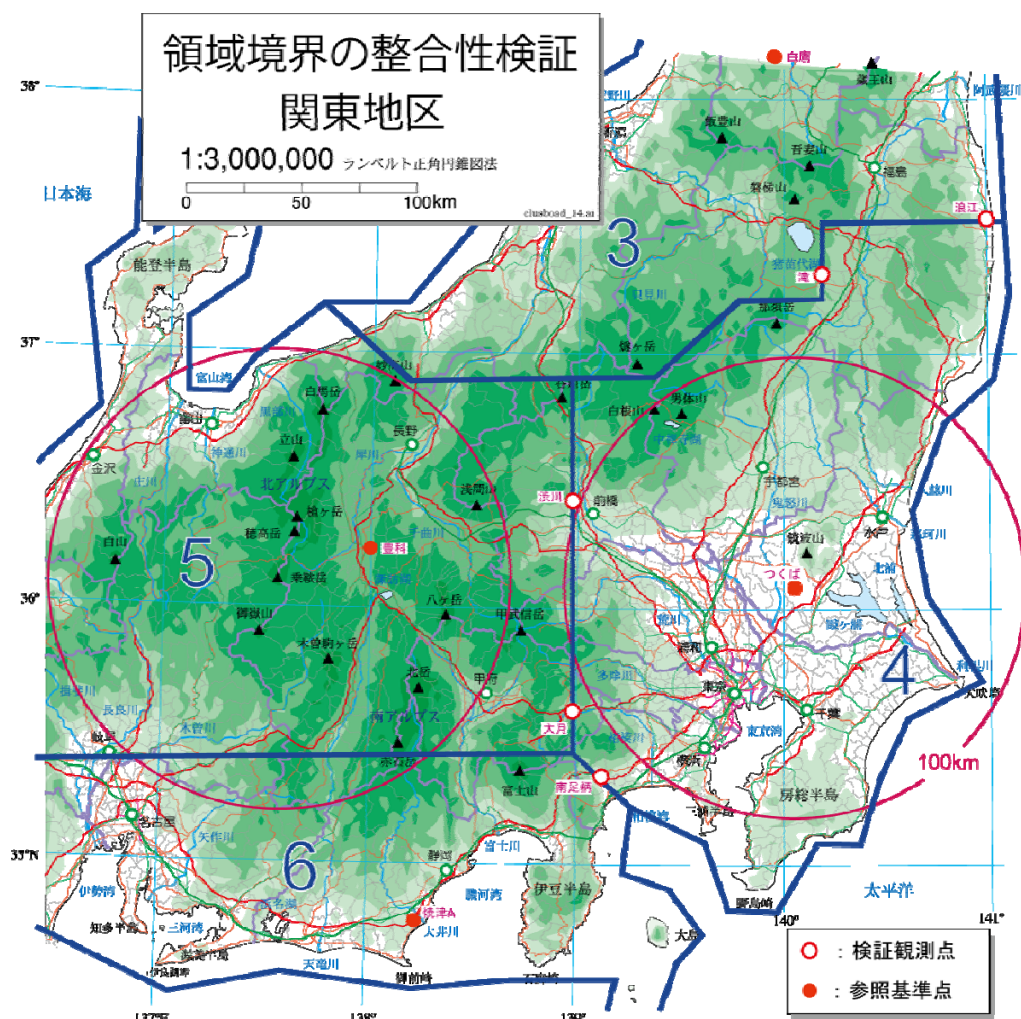


図 1-43 関東地区における領域境界での実証実験観測点

1.7.7 観測結果

(1) 基準座標からの水平分布

各測点で得られた測位結果について、スタティック解を基準とした2次元分布を図 1-44 から図 1-48 に示す。各図とも左が±1m、右が±20cm の範囲であり、観測日毎、参照基準点毎にそれぞれプロットしている。北海道地区と同様、いずれの観測点においても、使用した参照基準点に関わらず基準座標から 10cm を超える測位解が多く出る結果となっている。特に「浪江」観測点では、「白鷹」を参照基準点とした領域3の測位補正情報を利用した測位で Fix 解が1つしか得られなかった（表 1-9）

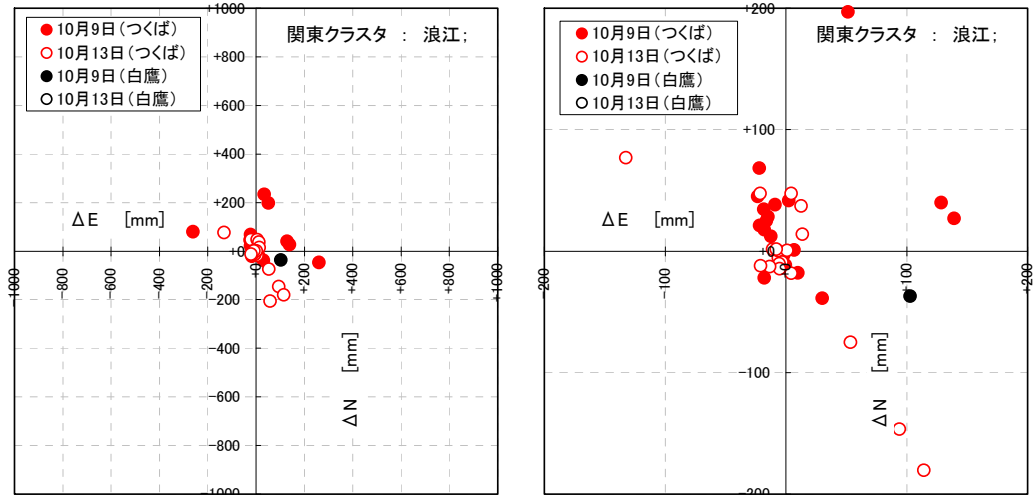


図 1-44 領域境界上での測位結果（関東地区：「浪江」）

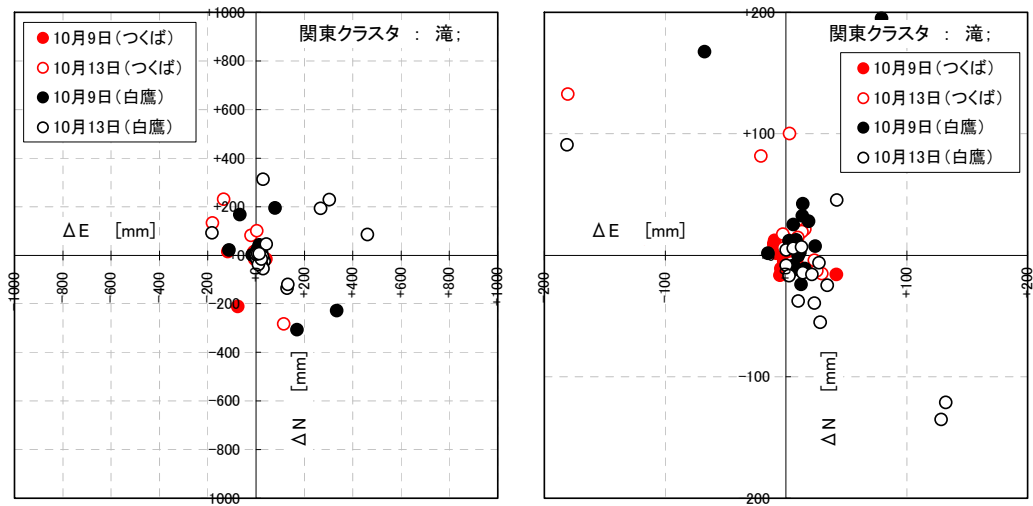


図 1-45 領域境界上での測位結果（関東地区：「滝」）

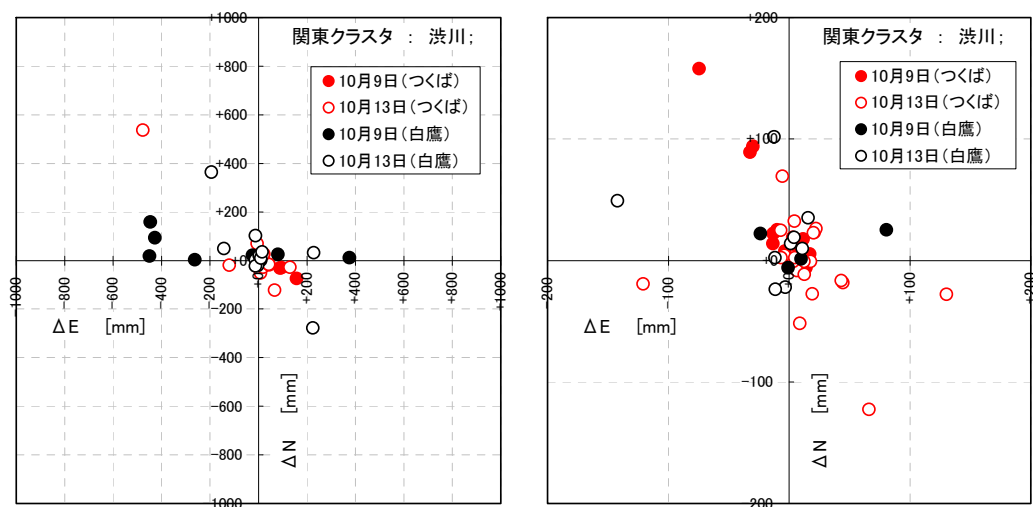


図 1-46 領域境界上での測位結果（関東地区：「渋川」）

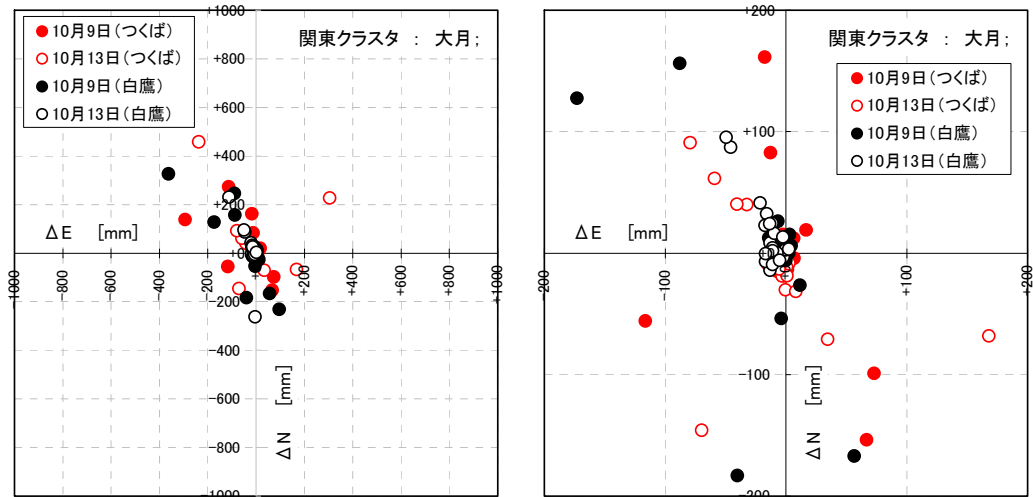


図 1-47 領域境界上での測位結果（関東地区：「大月」）

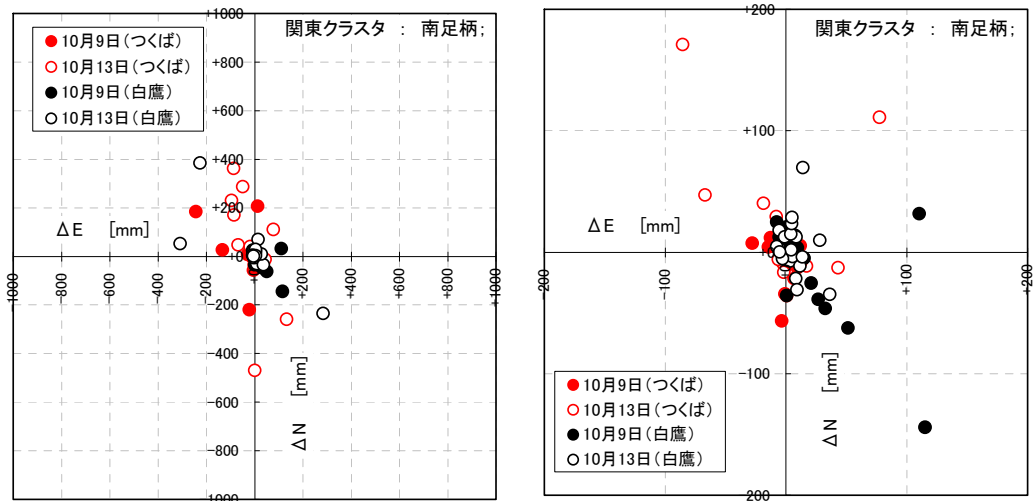


図 1-48 領域境界上での測位結果（関東地区：「南足柄」）

(2) 関東地区の領域境界の検証試験結果総括

関東地区における領域境界での検証試験結果の総括表を表 1-9 に示す。これらの結果について以降の項で考察する。

表 1-9 関東地区の領域境界の検証試験結果総括表

観測点	観測日	参照基準点	観測数	notFix	Fix	Fix率	RMS		Fix解の10cm以内割合			
							ΔS[mm]	ΔU[mm]	ΔS<=100mm	ΔS率[%]	ΔU<=100mm	ΔU率[%]
渋川	10/9・13	つくば	58	19	39	67.2%	128.1	95.2	34	87.2%	31	79.5%
		豊科	58	32	26	44.8%	364.1	327.1	11	42.3%	11	42.3%
大月	10/9・13	つくば	56	17	39	69.6%	148.7	156.8	27	69.2%	30	76.9%
		豊科	56	12	44	78.6%	124.5	100.6	34	77.3%	34	77.3%
滝	10/9・13	つくば	58	13	45	77.6%	82.5	75.2	39	86.7%	38	84.4%
		白鷹	58	19	39	67.2%	166.3	214.9	27	69.2%	27	69.2%
南足柄	10/9・13	つくば	58	12	46	79.3%	137.4	144.2	35	76.1%	34	73.9%
		焼津	58	10	48	82.8%	103.1	133.7	43	89.6%	33	68.8%
浪江	10/9・13	つくば	58	15	43	74.1%	103.7	123.2	33	76.7%	32	74.4%
		白鷹	58	57	1	1.7%	-	-	0	0.0%	0	0.0%

(3) Fix 率

各観測点における Fix 率について、それぞれ利用した参照基準点毎に集計した結果を図 1-49 に示す。領域 4 (参照基準点:「つくば 1」)の測位補正情報を利用した場合の Fix 率は約 70~80%、隣接する測位補正情報を利用した場合の Fix 率は「大月」、「滝」、「南足柄」の各観測点では同程度であるが、「渋川」、「浪江」での観測結果は 50%を下回っており、特に「浪江」では 1つの Fix 解しか得られなかった。「浪江」の場合は海岸部に近いためその影響が含まれている可能性があるが、「つくば 1」を参照基準点とした場合には他の地域と同程度の Fix 率となっているため、別の原因である可能性もある。

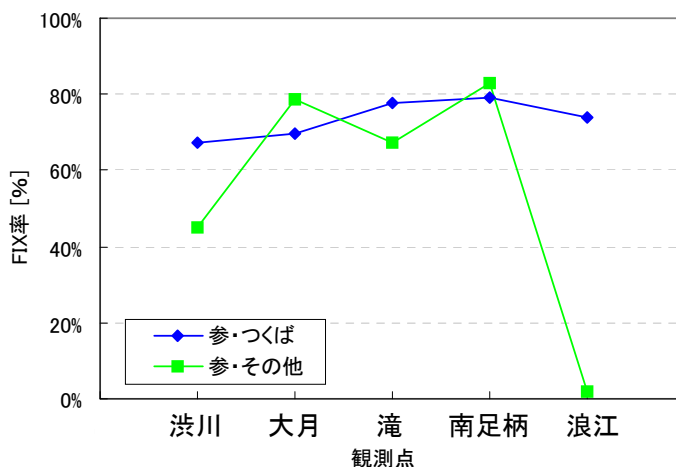


図 1-49 関東地区での領域境界検証試験結果 (Fix 率)

(4) 水平・上下方向の RMS 及び Fix 解の cm 級測位解の割合

試験観測結果から得られた各観測点における水平方向及び上下方向の RMS の結果を図 1-50 に示す。また、Fix 解のうち、基準座標から水平、上下方向にそれぞれ±10cm 以内に収まっている測位解の割合を図 1-51 に示す。なお、Fix 解が 1つしか得られなかった、「白鷹」を参照基準点とした「浪江」の測位結果は集計から除いている。

領域 4 の測位補正情報を使用した場合で RMS が水平・上下成分とも約 8~15cm、隣接する領域の測位補正情報を使用した場合で水平・上下成分とも約 10~35cm の結果となった。また、Fix 解のうち基準座標から 10cm に収まっている割合も約 80%から下回っている。

これらの解の精度低下の理由としては、北海道地区での結果と同様、観測点が領域境界部に位置していることで補正情報が外挿処理で生成されることの影響を受けていると考えられる。対応方法として、補正情報生成時の領域範囲を拡大することによる補正情報の精度向上が考えられる。

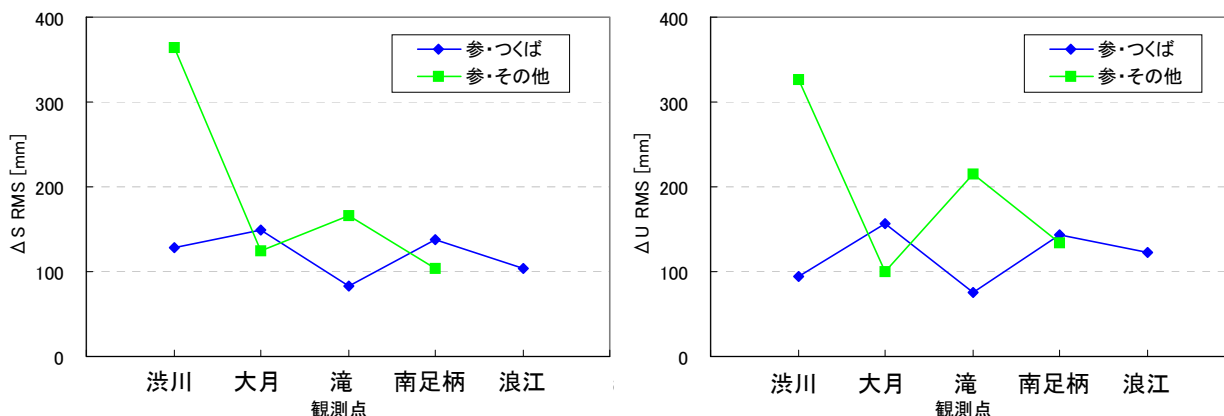


図 1-50 関東地区の領域境界の水平方向 RMS (左) 及び上下方向 RMS (右)

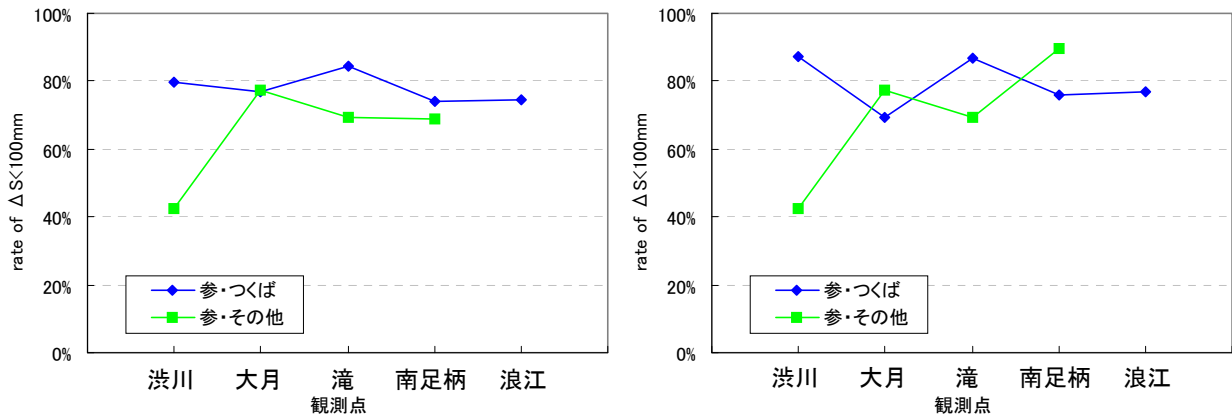


図 1-51 Fix 解のうち基準座標から±10cm 以内の解の割合 (左図：水平方向、右図：上下方向)

1.7.8 九州地区における領域境界検証結果

九州地区では、領域 9 (参照基準点：佐賀関) 及び領域 10 (同：熊本相良) の領域境界に 5 点を選点し、観測を実施した (図 1-52)。

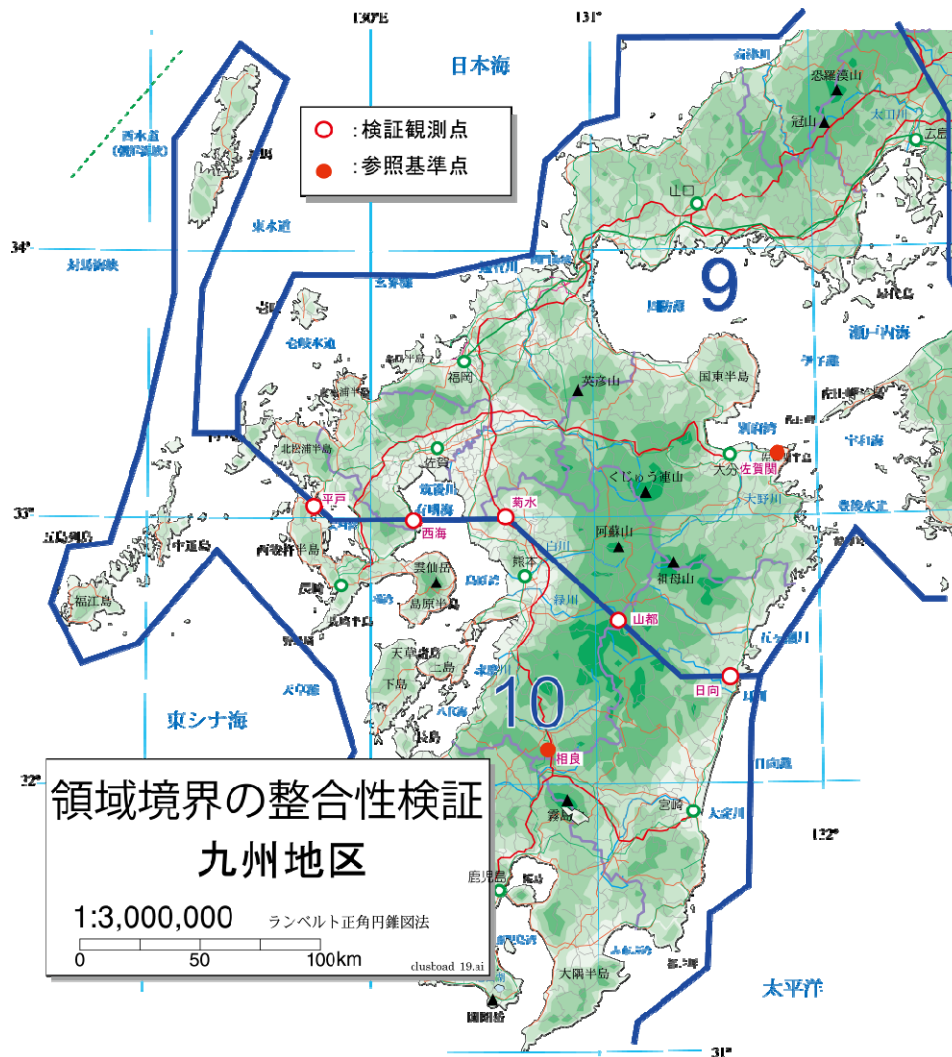


図 1-52 九州地区における領域境界での実証実験観測点

1.7.9 観測結果

(1) 基準座標からの水平分布

各測点で得られた測位結果について、スタティック解を基準とした2次元分布を図 1-53 から図 1-57 に示す。各図とも左が±1m、右が±20cm の範囲であり、観測日毎、参照基準点毎にそれぞれプロットしている。北海道地区や関東地区の結果同様、いずれの観測点においても、使用した参照基準点に関わらず基準座標から 10cm を超える測位解が多く出る結果となっている。

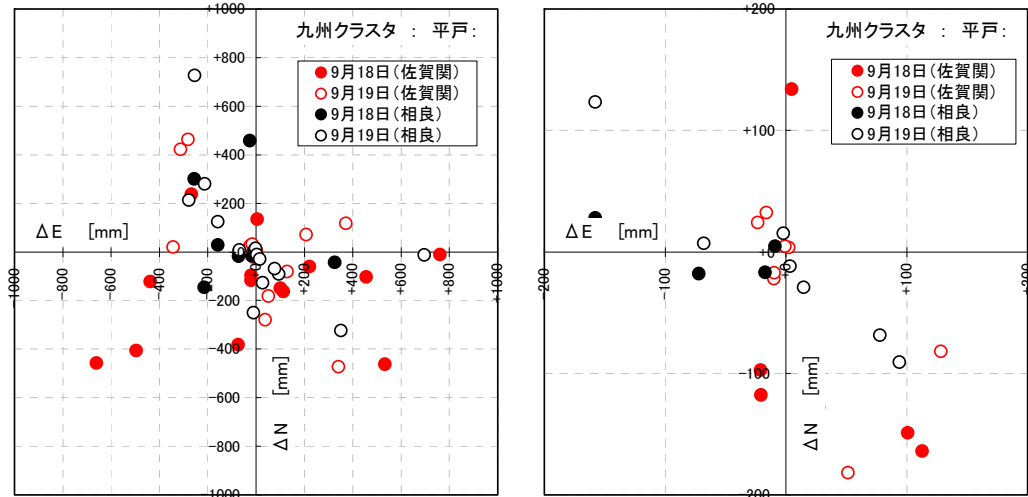


図 1-53 領域境界上での測位結果（九州地区：「平戸」）

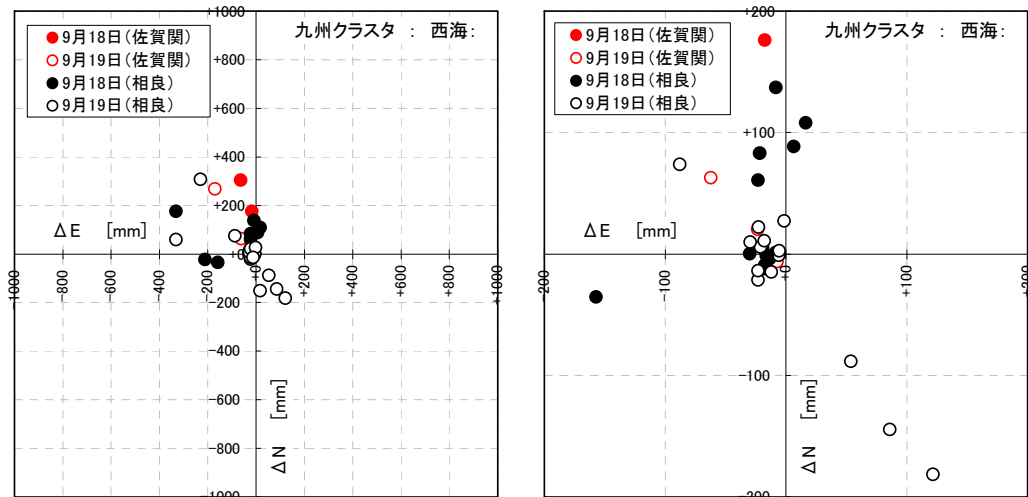


図 1-54 領域境界上での測位結果（九州地区：「西海」）

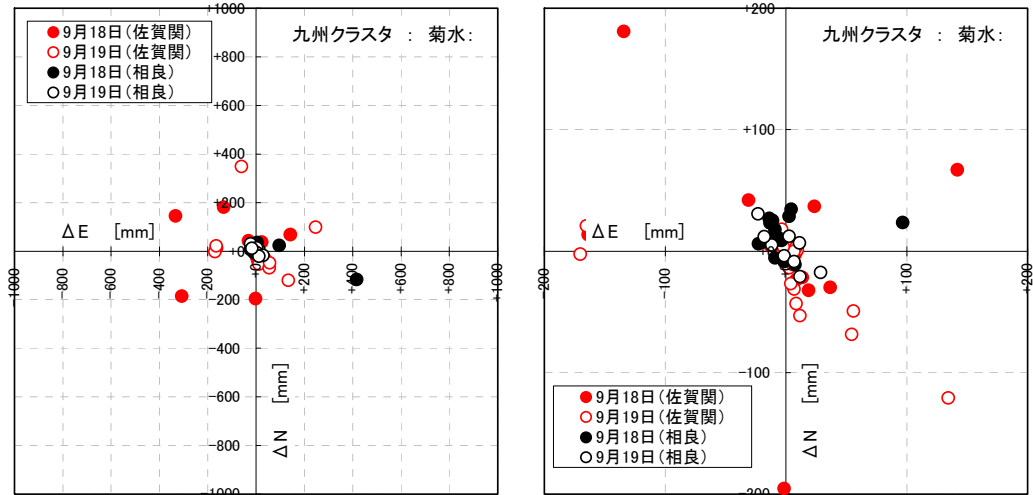


図 1-55 領域境界上の整合性の検証結果（九州地区：「菊水」）

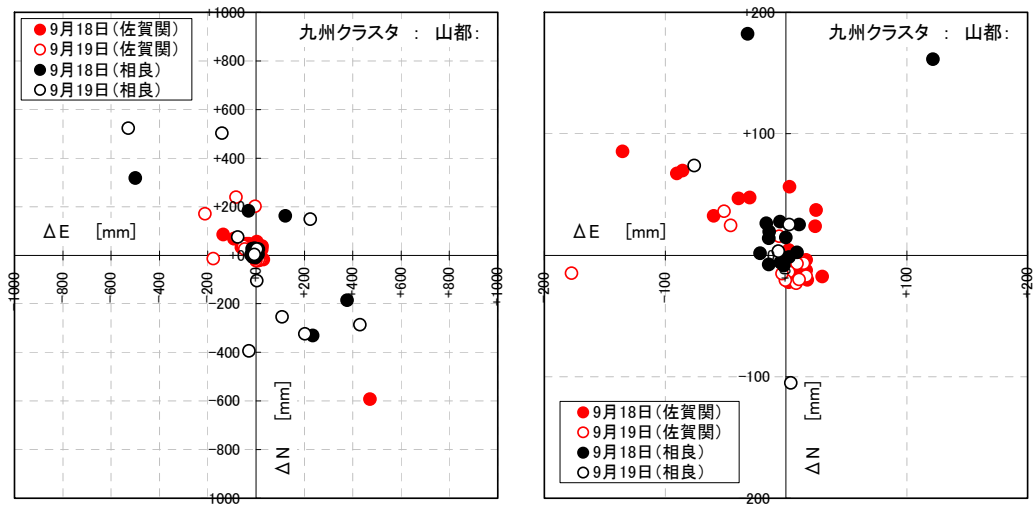


図 1-56 領域境界上での測位結果（九州地区：「山都」）

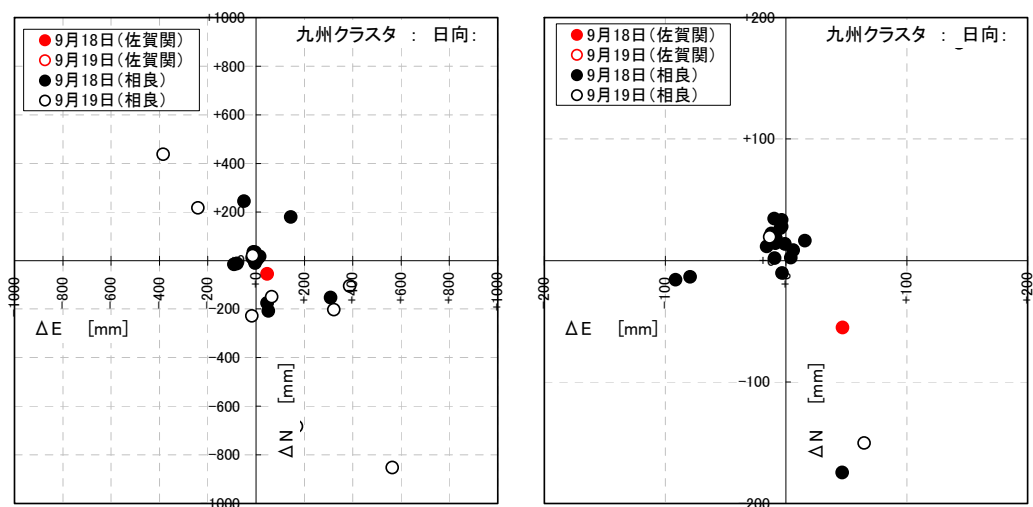


図 1-57 領域境界上での測位結果（九州地区：「日向」）

(2) 九州地区の領域境界の検証試験結果総括

九州地区における領域境界での検証試験結果の総括表を表 1-10 に示す。これらの結果について以降の項で考察する。

表 1-10 九州地区の領域境界検証試験結果の総括表

観測点	観測日	参照基準点	観測数	notFix	Fix	Fix率	RMS		Fix解のcmレベル割合			
							ΔS [mm]	ΔU [mm]	$\Delta S <= 100$ mm	ΔS 率[%]	$\Delta U <= 100$ mm	ΔU 率[%]
菊水	9/18・19	佐賀関	58	13	45	77.6%	126.3	134.1	34	75.6%	30	66.7%
		熊本相良	58	31	27	46.6%	87.9	119.4	26	96.3%	23	85.2%
山都	9/18・19	佐賀関	58	23	35	60.3%	157.3	140.6	27	77.1%	27	77.1%
		熊本相良	58	29	29	50.0%	592.4	371.0	0	0.0%	14	48.3%
西海	9/18・19	佐賀関	58	52	6	10.3%	198.9	128.0	3	50.0%	3	50.0%
		熊本相良	58	26	32	55.2%	142.9	119.2	20	62.5%	20	62.5%
平戸	9/18・19	佐賀関	58	29	29	50.0%	388.5	439.8	7	24.1%	13	44.8%
		熊本相良	58	36	22	37.9%	321.9	279.8	7	31.8%	6	27.3%
日向	9/18・19	佐賀関	58	57	1	1.7%	-	-	1	100.0%	1	100.0%
		熊本相良	58	28	30	51.7%	300.3	339.7	17	56.7%	19	63.3%

(3) Fix 率

各観測点における Fix 率について、それぞれ利用した参照基準点毎に集計した結果を図 1-58 に示す。領域 9 の測位補正情報を利用した場合の Fix 率は観測点で差が大きく、最大で約 80% であるが最低では約 2% となっている。一方、領域 10 の測位補正情報を利用した場合には観測点による大きな差はないものの、全体的に 40~50% の間で推移しており、昨年度の検証結果に比べて Fix 率が大幅に低い。観測点「日向」は海岸部、「西海」は有明海に面した点であることから、海岸部で測位補正情報の精度が落ちることも Fix 率低下の原因となっている可能性がある。

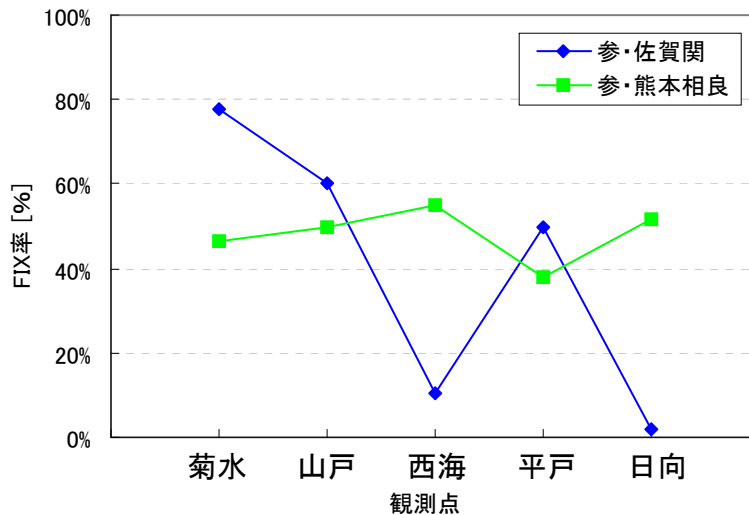


図 1-58 九州地区での領域境界検証試験結果 (Fix 率)

(4) 水平・上下方向の RMS 及び Fix 解の cm 級測位解の割合

試験観測結果から得られた各観測点における水平方向及び上下方向の RMS の結果を図 1-59 に示す。また、Fix 解のうち、基準座標から水平、上下方向にそれぞれ ± 10 cm 以内に収まっている測位解の割合を図 1-60 に示す。なお、Fix 解が 1 つしか得られなかった、「佐賀関」を参照基準点とした「日向」観測点の測位結果は集計から除いている。

領域 9 (参照基準点「佐賀関」) の測位補正情報を使用した場合は RMS が水平成分で約 10~

40cm、上下成分で約 10~40cm、領域 10（参照基準点「熊本相良」）の測位補正情報を利用した場合は水平成分で約 10~60cm、上下成分で約 10~45cm の結果となった。また、Fix 解のうち基準座標から 10cm に収まっている割合も観測点で差が大きく、「熊本相良」を参照基準点とした「菊水」の観測では水平方向で 100%に近い結果が得られているが、全体的には非常に低い値となっている。

これらの解の精度低下の理由としては、北海道地区や関東地区での検証結果と同様、観測点が領域境界部に位置していることで測位補正情報が外挿処理で生成されることの影響を受けていると考えられる。対応方法として、補正情報生成時の領域範囲を拡大することによる精度向上が考えられる。

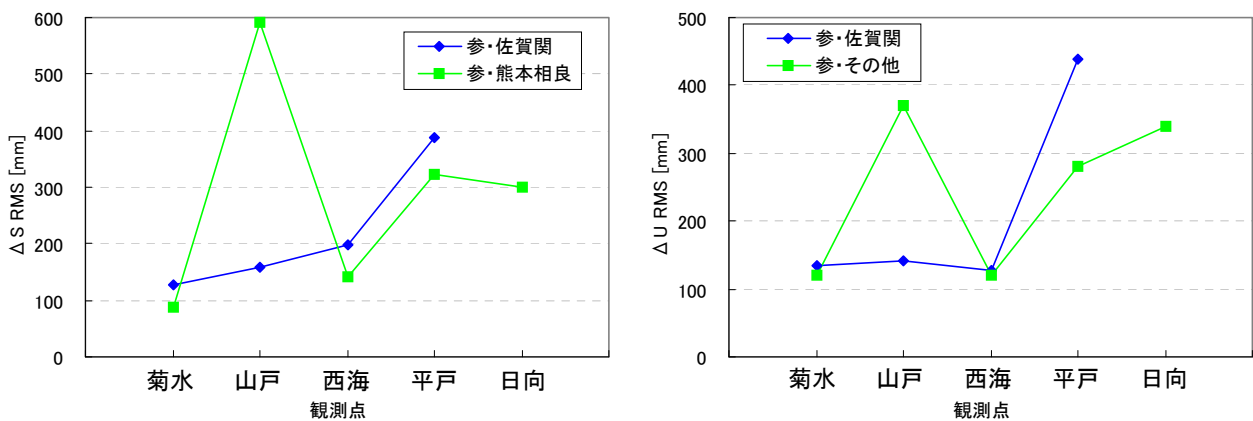


図 1-59 九州地区の領域境界の水平方向 RMS (左) 及び上下方向 RMS (右)

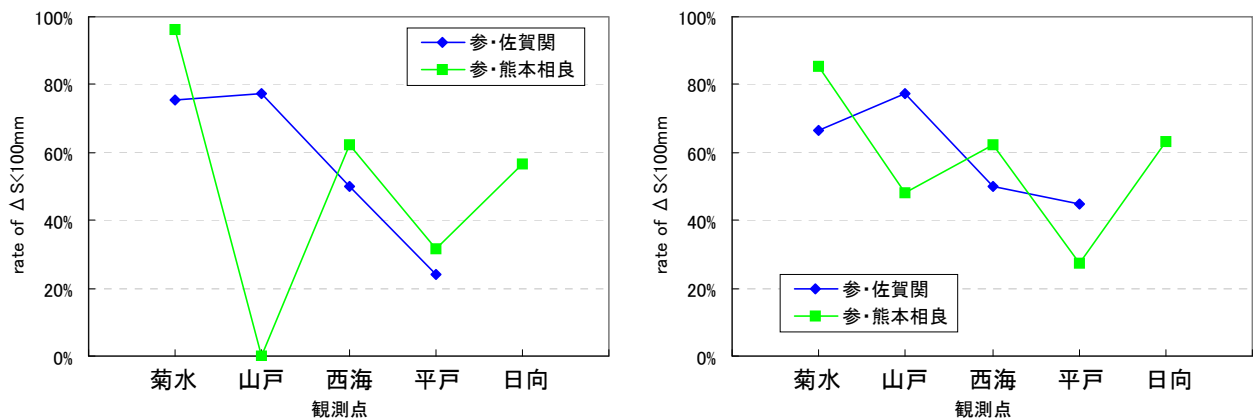


図 1-60 Fix 解のうち基準座標から±10cm 以内の解の割合 (左図：水平方向、右図：上下方向)

1.8 山岳部における測位精度検証試験

1.8.1 概要

LEX 信号で配信される対流圏遅延補正情報を測位に利用する場合、観測点から半径 70km 以内の電子基準点について、それらの上空の大気遅延量を観測点からの距離による重み付けにより空間内挿することで観測点上空の遅延量を推定して利用している。従って、補正量生成に使用される電子基準点と観測点の間に標高差があるような場合には、内挿して得られた標高と実際の標高に差が生じ、結果として推定量が現実の値よりもずれる場合が発生し得ることから、周囲の電子基準点との標高差がある乗鞍地区において試験観測を実施した。また、相対測位の基準点となる参照基準点についても、本来の参照基準点「豊科」とは別に、乗鞍地区にある 2 点を仮に設定し、その影響についても評価した。

1.8.2 地区及び観測点の選定

乗鞍地区において、観測点として 5 点を選定した。また、参照基準点として 2 点を選定した。各観測点の配点図及び標高差の模式図を図 1-61 に示す。選定した観測点の詳細について以下にまとめる。

(1) 観測点の選定

①乗鞍（標高：約 2,800m）

「東京大学 宇宙線乗鞍観測所」の敷地内に設置されている電子基準点「乗鞍岳」の近傍に一時標識を設置。本地区で最も標高の高い観測点となる。

②冷泉小屋（標高：約 2,000m）

乗鞍岳に通じる道路上の標高 2000m 付近にある宿泊施設「冷泉小屋」付近に一時標識を設置。

③奈川（標高：約 1,100m）

乗鞍岳山麓の奈川村にある電子基準点「奈川」の近傍に一時標識を設置。

④高山（標高：約 700m）

乗鞍岳西側の高山市内にある四等三角点「山越」の近傍に一時標識を設置。

⑤下呂（標高：約 350m）

下呂市内を通る県道 88 号線沿いに設置された電子基準点「下呂」の近傍に一時標識を設置。乗鞍岳から最も距離が近く、今回選定した 5 点の中では最も標高の低い観測点となる。

(2) 参照基準点の選定

①豊科（標高：約 540m）

今回観測地区として選んだ乗鞍岳地区は領域 5 に属しており、その参照基準点として設定されている「豊科」を標準的な参照基準点として設定した。なお、「乗鞍」からの距離は約 40km である。

②高根（標高：約 1300m）

観測点「乗鞍」周辺で最も標高差が小さくかつリアルタイムデータを取得している電子基準点として、「高根」を参照基準点として選定した。なお、「乗鞍」からの距離は約 16km である。

③下呂（標高：約 370m）

観測点「乗鞍」周辺で最も標高差が大きくかつリアルタイムデータを取得している電子基準点として、「下呂」を参照基準点として選定した。なお、「乗鞍」からの距離は約 44km である。

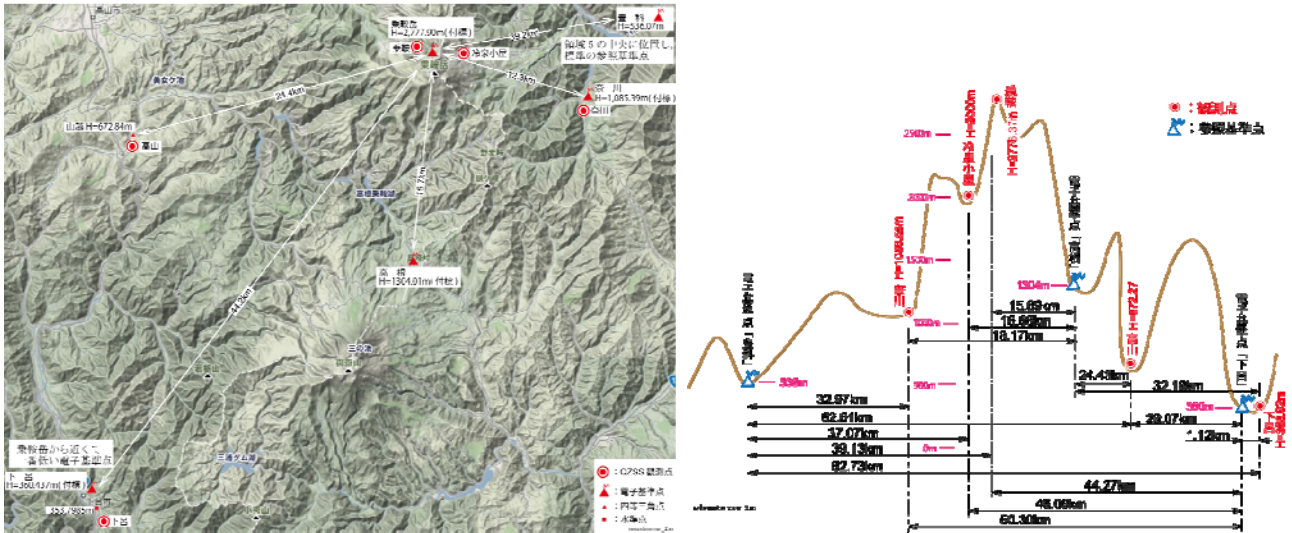


図 1-61 乗鞍岳地区における検証点の配点図 (左) 及び標高模式図 (右)

1.8.3 観測機器構成

観測機器の構成は図 1-8 と同じであり、QZS-QS 法、NW 型 RTK (VRS 方式・FKP 方式)、Static 方式、PPK 方式の 5 方式をアンテナ 1 台で分配増幅器によって各受信機に分配し観測を実施した。

1.8.4 観測結果

(1) 基準座標からの水平分布

各測点で得られた測位結果について、スタティック解を基準とした 2 次元分布を図 1-62 から図 1-66 に示す。各図とも左が $\pm 1m$ 、右が $\pm 20cm$ の範囲であり、観測日毎、設定した参照基準点毎にそれぞれプロットしている。ほぼ基準座標から 10cm 以内に分布しているものの、参照基準点として高根、下呂を利用した場合に 10cm を超える場合が多い傾向がある。

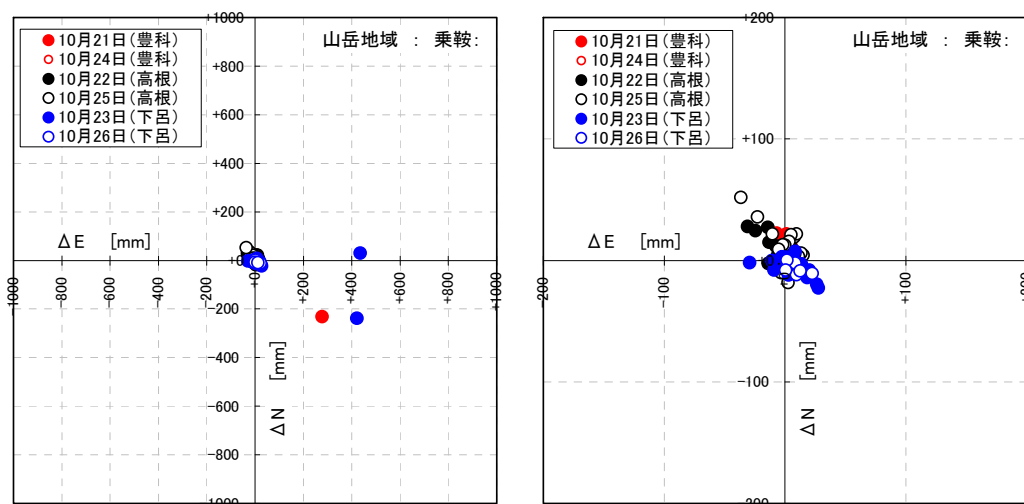


図 1-62 参照基準点との比高差による検証結果 (「乗鞍」)

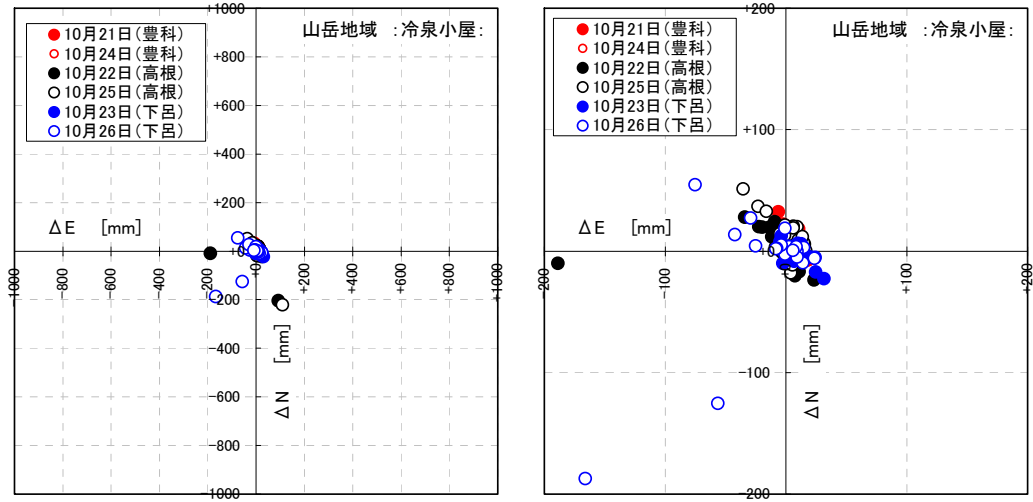


図 1-63 参照基準点との比高差による検証結果（「冷泉小屋」）

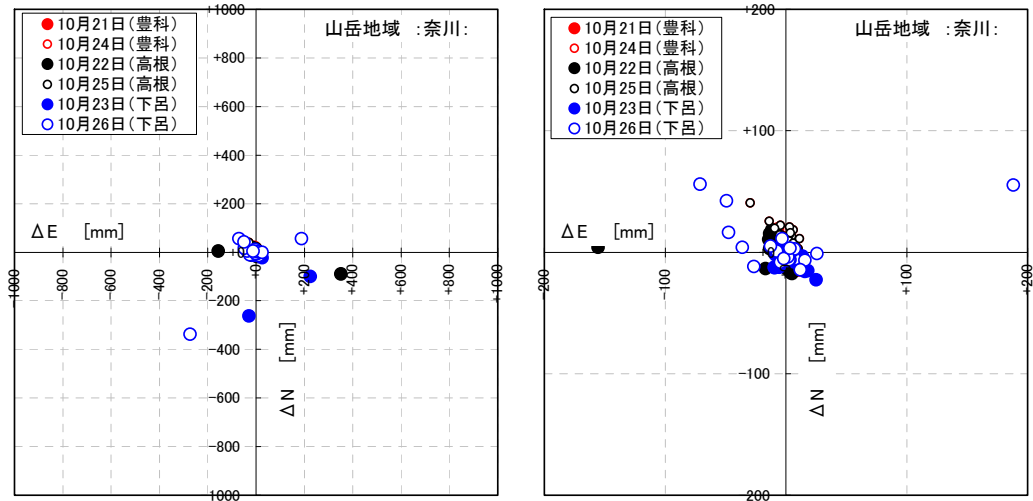


図 1-64 参照基準点との比高差による検証結果（「奈川」）

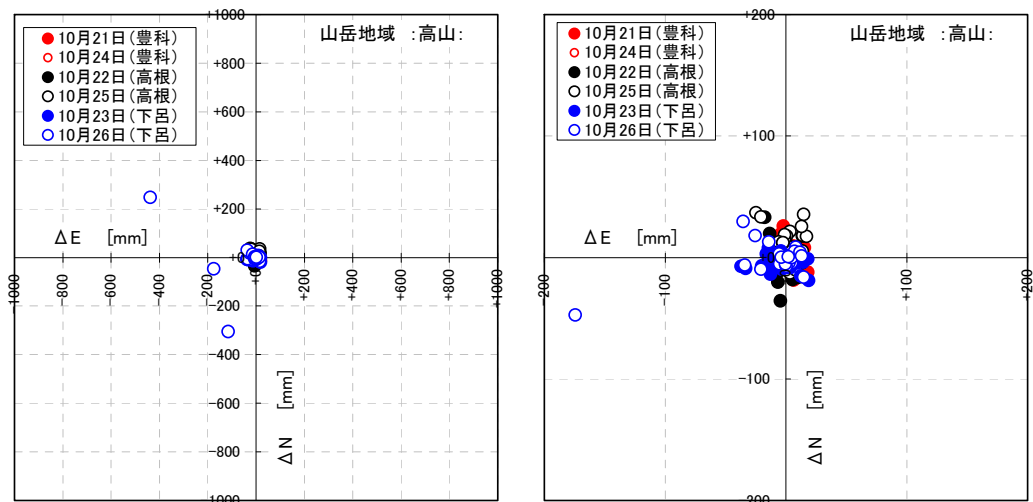


図 1-65 参照基準点との比高差による検証結果（「高山」）

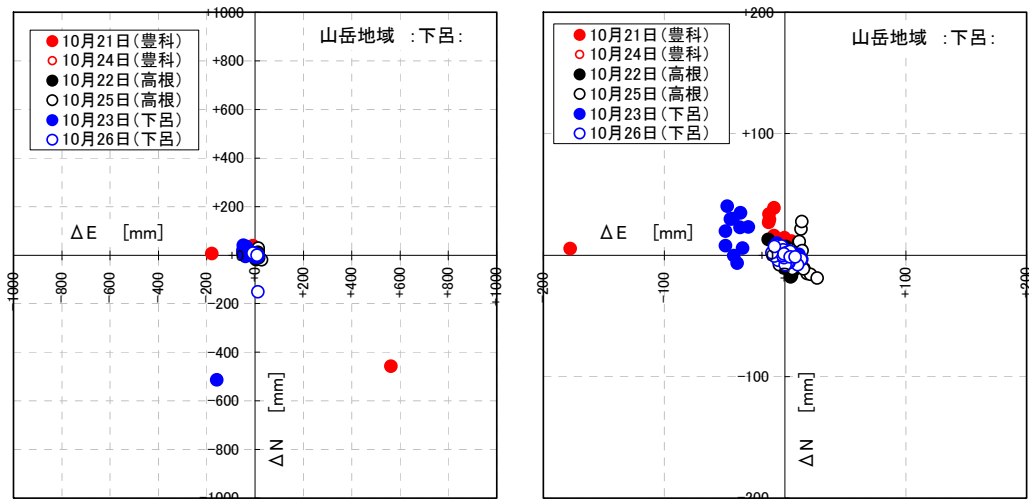


図 1-66 参照基準点との比高差による検証結果（「下呂」）

（２）山岳部での検証試験結果総括

乗鞍地区における山岳部での検証試験結果の総括表を表 1-11 に示す。これらの結果について以降の項で考察する。

表 1-11 乗鞍地区における山岳部での検証結果総括表

観測点	観測日	参照基準点	観測数	notFix	Fix	Fix率	RMS		Fix解の10cm以内割合			
							ΔS[mm]	ΔU[mm]	ΔS<=100mm	ΔS率[%]	ΔU<=100mm	ΔU率[%]
乗鞍	10/21・24	豊科	47	1	46	97.9%	56.0	123.9	45	97.8%	35	76.1%
	10/22・25	高根	48	7	41	85.4%	135.6	253.0	36	87.8%	11	26.8%
	10/23・26	下呂	30	5	25	83.3%	16.3	150.7	25	100.0%	12	48.0%
	計		125	13	112	89.6%	89.9	186.6	106	94.6%	58	51.8%
冷泉小屋	10/21・24	豊科	56	1	55	98.2%	38.1	88.9	54	98.2%	46	83.6%
	10/22・25	高根	58	7	51	87.9%	36.9	107.2	50	98.0%	31	60.8%
	10/23・26	下呂	58	19	39	67.2%	69.9	153.6	35	89.7%	13	33.3%
	計		172	27	145	84.3%	48.4	115.7	139	95.9%	90	62.1%
奈川	10/21・24	豊科	56	0	56	100.0%	13.3	22.9	56	100.0%	56	100.0%
	10/22・25	高根	58	6	52	89.7%	162.3	158.8	47	90.4%	36	69.2%
	10/23・26	下呂	58	14	44	75.9%	96.0	234.0	40	90.9%	20	45.5%
	計		172	20	152	88.4%	108.4	157.1	143	94.1%	112	73.7%
高山	10/21・24	豊科	56	3	53	94.6%	17.0	101.6	53	100.0%	36	67.9%
	10/22・25	高根	58	4	54	93.1%	15.7	49.4	54	100.0%	52	96.3%
	10/23・26	下呂	58	5	53	91.4%	87.2	172.6	50	94.3%	42	79.2%
	計		172	12	160	93.0%	52.0	118.8	157	98.1%	130	81.3%
下呂	10/21・24	豊科	56	10	46	82.1%	111.5	244.7	44	95.7%	27	58.7%
	10/22・25	高根	58	4	54	93.1%	76.8	61.3	53	98.1%	48	88.9%
	10/23・26	下呂	58	2	56	96.6%	22.2	44.7	55	98.2%	55	98.2%
	計		172	16	156	90.7%	76.7	140.3	152	97.4%	130	83.3%

（３）Fix率

各観測点における Fix 率について、それぞれ利用した参照基準点毎に集計した結果を図 1-67 に示す。参照基準点として「下呂」を利用した場合以外は、いずれも Fix 率が 80%を超える結果となり、特に参照基準点が「豊科」の場合には「下呂」を除く観測点でいずれも 90%を超えていた。この理由として、「豊科」は周囲の電子基準点との標高差が比較的少なく、山麓等の上空視界への制限も少ないのに対し、今回検証用に設定した「高根」や「下呂」は乗鞍岳地区周辺に位置し、周囲に山が迫っているため、上空視界が確保できず、結果として測位に必要な 5 衛星のデータが観測できず Fix 解が得られていない可能性がある。また、「豊科」を参照基準点とした

場合でも「下呂」での Fix 率が下がっているが、これについては、「下呂」自信が谷間に位置することに加え、周囲の電子基準点との標高差があるために、対流圏遅延補正量の推定がうまくできていなかった可能性がある。

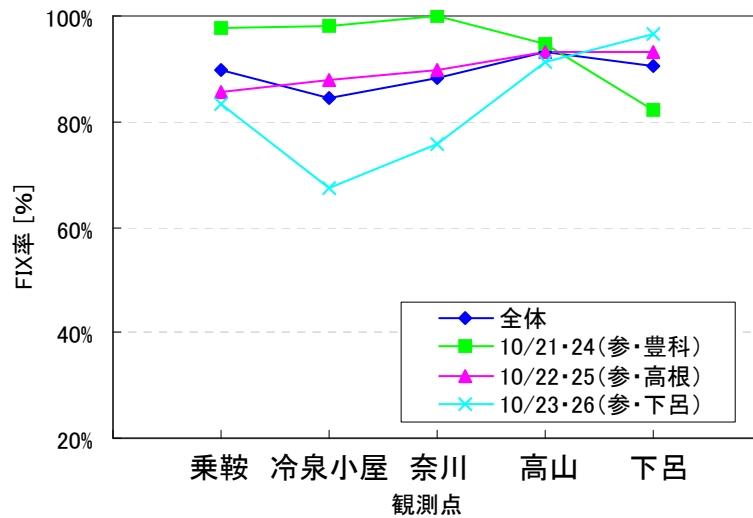


図 1-67 山岳部の検証結果 (検証点との比高と Fix 率)

(4) 水平・上下方向の RMS 及び Fix 解の cm 級測位解の割合

試験観測結果から得られた各観測点における水平方向及び上下方向の RMS の結果を図 1-68 に示す。また、Fix 解のうち、基準座標から水平、上下方向にそれぞれ±10cm 以内に収まっている測位解の割合を図 1-69 に示す。

RMS で見ると、水平成分では「高根」を参照基準点として測位した「乗鞍」、「奈川」の観測結果を除いては概ね 10cm 以内の精度に収まっているものの、上下成分では 10cm を超える観測点が多い結果となった。基準点から 10cm 以内に収まっている割合を見ても、水平成分についてはほぼ 90%を超えており、Fix 解が得られれば精度のよい測位解が得られているが、上下成分についてはいくつかのケースを除いてほぼ 80%以下となっており、測位計算に使用した測位補正情報の精度が悪いことによりアンビギュイティを misFix した解が出力されている可能性が示唆される。上下成分について顕著な傾向が見られていることから、対流圏遅延補正量の推定がうまくできていない可能性が高い。

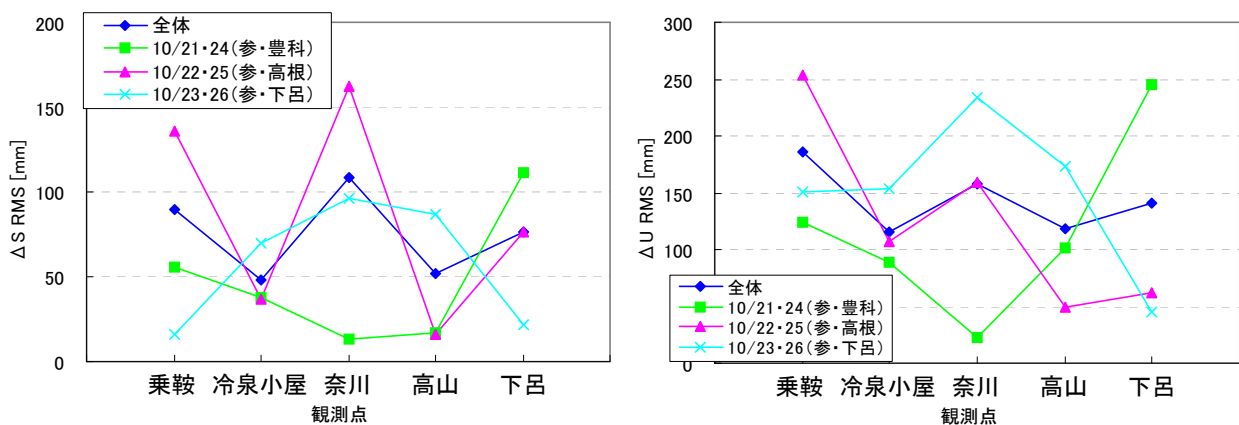


図 1-68 山岳部検証試験の水平方向 RMS (左) 及び上下方向 RMS (右)

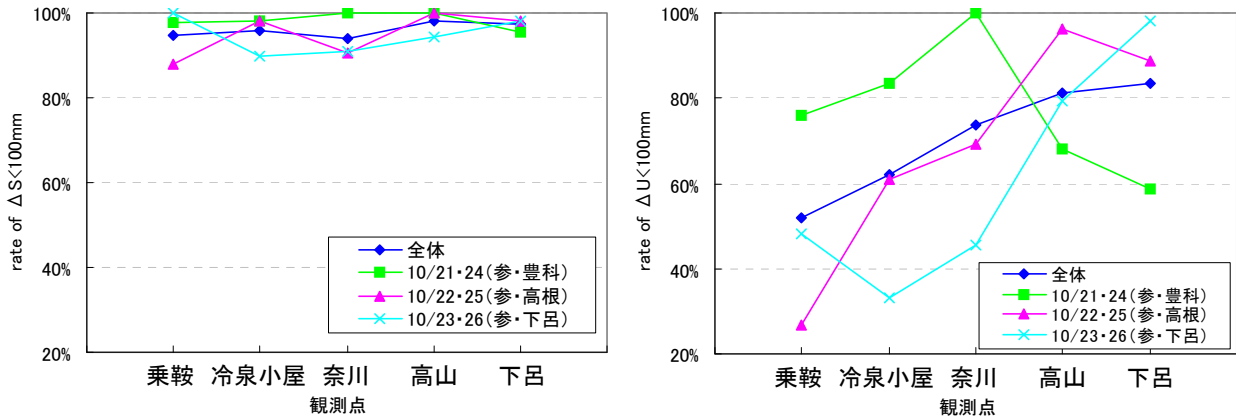


図 1-69 Fix 解のうち基準座標から±10cm 以内の解の割合 (左図：水平方向、右図：上下方向)

1.9 総括結論と今後の課題等

平成 21 年度に実施した技術実証実験で得られた観測結果についての総括結論、課題及び対応案について以下にまとめる。

(1) 季節差の検証 (1.5)

平成 20 年度の検証試験では、旭川地区、つくば地区、金沢地区、大分地区、石垣島地区の 5 地区で、時期を分けて 2 回の試験観測を実施し、その間では季節による精度の差がないことが確認された。しかし、観測時期が 9 月、12 月と比較的近い時期だったため、平成 21 年度の実証実験では、より季節差のある時期で観測を行い、測位精度に及ぼす影響について調査することを目的に、8 月、1 月の 2 回の観測を実施することとし、それぞれの時期における気象条件の差が顕著である旭川地区にて、参照基準点近傍から 50km までの 5 地点で観測を実施した。なお、これらの地点は平成 20 年度の実証実験で観測した点と同じとした。

Fix 率については、平成 20 年度の観測結果と比較して、平成 21 年度の観測結果では全体的に値が低くなっており、最低で約 70%となった。但し、季節差の観点からは概ね今回観測した 2 時期においても顕著な差は見られなかった。

RMS については、水平、上下成分とも約 10cm 以下に収まっており、当初の開発目標精度を満足していると言えるものの、冬季に比べて夏季の観測結果の RMS がやや大きく出る結果となった。但し、基準座標から±10cm の範囲に収まっている解の割合は夏季の観測結果でも 95%を超えており、何らかの理由で大きく出た外れ値の影響で RMS が大きく算出されていたことが示唆される。実際、2次元分布を見るとどの観測点においてもほぼ基準座標から水平 10cm 以内で測位解が得られており、以上のことから、Fix した解については今回の観測時期においても基線長及び季節差による測位精度の顕著な違いは見られていないと結論付けられた。

なお、実際の観測時に上記の外れ値を除外する手段としては、①単独測位値の精度を考慮して初期座標からの閾値を設定し、それを超える測位解を不採用とする、②複数セットの観測を実施し、セット間較差に制限を設けることにより再現性を担保する等の方法が考えられる。

(2) 長距離基線での測位精度検証試験 (1.6)

平成 20 年度の実証実験では、各代表地区において参照基準点の近傍から 50km までの基線長での試験観測により、QZS-QS 法が概ね開発時の目標精度を達成できていることを確認したが、実際には 12 に分けられた各領域において、参照基準点からの基線長が最大で 300km 弱になる場合があることから、参照基準点からの基線長がより長くなった場合の測位精度を把握するため、

領域1（北海道地区）において、参照基準点「旭川」から、道北、道東方面にそれぞれ基線長が約0km（近傍）、100km、150km、200km、250kmとなる地点で観測を実施し、基線長と測位精度の関係について検証を行った。道北方面については、測位補正情報が周囲の電子基準点からの補間により作成されるような場所を選点し、道東方面については、電子基準点が陸側にしかなく、電離層遅延補正量が外挿により計算されることになる海岸部を選んで選点した。

Fix率について、道北方面については、「稚内」観測点での測位結果で値が低くなっているものの、全体として参照基準点からの基線長によらずFix率は70%を超える結果となった。一方、道東方面についてはいずれの観測点でもFix率は60%を切る結果となった。考えられる理由として、道東の観測点が海岸沿いに配置され、電離層遅延補正量が外挿で推定されることに起因している可能性がある。

RMSについても、道北方面では水平、上下成分ともRMSは10cm以下に収まっている一方、道東方面ではいずれの観測点でも水平・上下ともRMSは10cmを超え、最大となる「相泊」観測点では水平成分で約19cm、上下成分で約36cmと非常に大きな値となっている。Fix解で基準座標から±10cmの範囲にある割合についても、道北方面の観測点では95%以上となったが、道東方面では90%を切っており、測位計算に使用した測位補正情報の精度が悪いことによりアンビギュイティをmisFixした解が出力されている可能性が示唆された。

以上の結果より、周囲に電子基準点が分布するような観測点であれば、参照基準点からの基線長によらずcm級精度の測位が実現可能といえるものの、海岸部のように周囲の電子基準点の配点分布に偏りがある場合には測位精度が落ちる可能性が高いと結論付けられた。

海岸部での測位補正情報の精度については、海上に電子基準点を設置することができないため根本的な解決は難しいが、もし近接する領域では測位補正情報の誤差が同じセンスで乗ると仮定すれば、今回の実証実験のように単点観測法ではなく、複数点の観測結果を引き算して計算基線ベクトルを算出することにより、誤差分がキャンセルされ精度向上が期待できる可能性がある。

（3）領域境界の整合性（1.7）

QZS-QS法では観測点が属する領域を観測時の単独測位値で決定するが、領域ごとに測位補正情報を生成する電子基準点の組み合わせが異なるため、領域境界付近では最初の単独測位値のわずかの差で利用する測位補正情報の領域が変わる可能性がある。実際の測量作業での利用を想定した場合、領域境界でどちらの領域の測位補正情報を使用したとしても、整合した測位結果が得られることが求められる。そこで、領域境界上に観測点を測設し、隣接する2領域の測位補正情報を用いて同時に算出した測位解を比較することにより、測位精度及び整合性について検証を行った。なお、観測点の初期座標は通常単独測位値で自動的に設定されるが、本試験観測時には使用する測位補正情報の領域を意図的に設定するため、キーボードから手動で初期座標を入力して観測を実施した。

試験観測を行う領域境界の地区として、北海道地区（領域1と2の境界）、関東地区（領域4とその隣接領域との境界）、九州地区（領域9と10の境界）で観測を実施した。観測点は、各領域の境界情報を元に、NW型RTKを用いて各地区5点ずつ一時標識を測設した。

北海道地区での観測結果では、領域1、2いずれの測位補正情報を利用した測位結果についてもFix率は60%を切る結果となった。RMSについても、領域1の測位補正情報を使用した場合で水平成分が約10～20cm、上下成分が約20cm、領域2の測位補正情報を使用した場合で水平成分が25cm以上、上下成分が20～60cmとなり、平成20年度の結果と比較して大きな値となった。また、Fix解で基準座標から10cmに収まっている割合も80%を切っており、測位時に正しいバイアス推定ができていない可能性を示唆する結果となった。

関東地区での観測結果も同様に、いずれの観測点においても、使用した測位補正情報の領域に関わらず基準座標から10cmを超える測位解が多く出る結果となり、特に「浪江」観測点では、

領域3の測位補正情報を利用した測位でFix解が1つしか得られない結果となった。Fix率について、領域4の測位補正情報を利用した場合の値は約70~80%、隣接する測位補正情報を利用した場合の値は、「大月」、「滝」、「南足柄」の各観測点での結果は同程度であるが、「渋川」、「浪江」観測点の場合は50%を下回っていた。「浪江」観測点の場合、観測点が海岸部に近いためその影響が含まれている可能性もあるが、領域4の測位補正情報を利用した場合には他の地域と同程度のFix率となっているため、別の原因である可能性も示唆される。RMSについては、領域4の測位補正情報を使用した場合は水平・上下成分とも約8~15cm、隣接する領域の測位補正情報を使用した場合で水平・上下成分とも約10~35cmの結果となった。また、Fix解のうち基準座標から10cmに収まっている割合もほぼ80%を下回っている。

九州地区での結果も、いずれの観測点においても、使用した測位補正情報の領域に関わらず基準座標から10cmを超える測位解が多く出る結果となった。Fix率については、領域9の測位補正情報を利用した場合には最大で約80%であるが最低では約2%と観測点で大きな差が出ている。特に、「日向」観測点や「西海」観測点では低い値となっており、それぞれ海岸部や有明海に面した点であることから、海岸部で測位補正情報の精度が落ちることが原因である可能性がある。一方、領域10の測位補正情報を利用した場合には観測点による大きな差はないものの、全体的に40~50%の低い値となった。RMSについても、領域9の測位補正情報を使用した場合はRMSが水平成分で約10~40cm、上下成分で約10~40cm、領域10の測位補正情報を利用した場合は水平成分で約10~60cm、上下成分で約10~45cmの結果となった。また、Fix解のうち基準座標から10cmに収まっている割合も観測点で差が大きく、領域10の補正領域を利用した「菊水」観測点の結果で水平成分で100%に近い結果が得られているが、全体的には非常に低い結果となった。

これら領域境界での測位解の精度低下の理由として、長距離基線の海岸部での観測結果と同様、これらの観測点が領域境界に位置するため、測位補正情報生成に利用する電子基準点が内側方向にしかなく、外挿処理により測位補正情報が生成されることによる影響を受けていると考えられる。但し、物理的に電子基準点の配点が制限される海岸部と異なり、陸域の領域境界についてはシステム上の領域設定で補正情報生成に利用する電子基準点の領域範囲を拡大することにより補正情報を内挿で生成することが可能であり、今回の実証実験で得られた課題について対応できる可能性がある。

(4) 標高差のある山岳部での検証 (1.8)

LEX信号で配信される対流圏遅延補正情報を測位に利用する場合、観測点から半径70km以内の電子基準点について、それらの上空の大気遅延量を観測点からの距離の逆数による重み付け平均により空間内挿することで観測点上空の遅延量を推定している。従って、補正量生成に使用される周囲の電子基準点と観測点の間に標高差があるような場合には、内挿により得られる観測点の標高と実際の観測点との標高に差が生じ、結果として推定された対流圏遅延量が現実の値よりもずれる場合が発生し得る。この影響について検証することを目的として、周囲の電子基準点との標高差がある乗鞍地区において、5つの観測点（「乗鞍」：標高約2,800m、「冷泉小屋」：標高約2,000m、「奈川」：標高約1,100m、「高山」：標高約700m、「下呂」：標高約350m）で試験観測を実施した。また、相対測位の基準点となる参照基準点についても、本来の参照基準点「豊科」とは別に、乗鞍地区にある2点「高根」及び「下呂」を仮設定し、参照基準点の違いによる影響についても評価した。

各観測点におけるFix率については、参照基準点として「下呂」を利用した場合以外は、いずれもFix率が80%を超える結果となり、特に参照基準点が「豊科」の場合には「下呂」を除く観測点でいずれも90%を超えていた。理由として、「豊科」は周囲の電子基準点との標高差が比較的少なく、山麓等の上空視界も開けているのに対し、今回検証用に設定した「高根」や「下呂」は乗鞍岳地区周辺に位置し、周囲に山が迫っているため上空視界が確保できず、結果として測位

に必要な5衛星のデータが観測できないためにFix解が得られなかった可能性がある。また、「豊科」を参照基準点とした場合でも「下呂」でのFix率が下がっているが、これについては、「下呂」自身が山間部に位置することに加え、周囲の電子基準点との標高差があるために、対流圏遅延補正量の推定がうまくできていなかった可能性がある。

RMSについて見ると、水平成分では「高根」を参照基準点として測位した「乗鞍」及び「奈川」観測点での観測結果を除いては概ね10cm以内の精度に収まっているものの、上下成分では10cmを超える観測点が多い結果となった。基準点から10cm以内に収まっている割合を見ても、水平成分についてはほぼ90%を超えており、Fix解が得られれば精度のよい測位解が得られているが、上下成分についてはいくつかのケースを除いてほぼ80%以下となっており、測位計算に使用した測位補正情報の精度が悪いことにより、アンビギュイティをmisFixした解が出力されている可能性が示唆される。特に上下成分についてこの傾向が顕著なことから、対流圏遅延補正量の推定がうまくできていない可能性が高い。

システム上では、観測点上空の対流圏遅延量を推定する際に、単純に周囲の電子基準点からの空間内挿で求める方法に加え、さらに観測点との標高差を考慮して補正するオプションが実装されており、この方法を用いて測位することで、今回見られた標高差のある地区での測位でも上下成分の精度を向上できる可能性がある。また、参照基準点についてはスカイプロットやサイクルスリップ等を確認することにより、より観測条件のよい電子基準点を設定することが望ましい。