

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

(平成15年度～平成22年度)

技術開発プロジェクトチーム

プロジェクト代表者 矢来 博司

(国土地理院測地観測センター)

## 目的

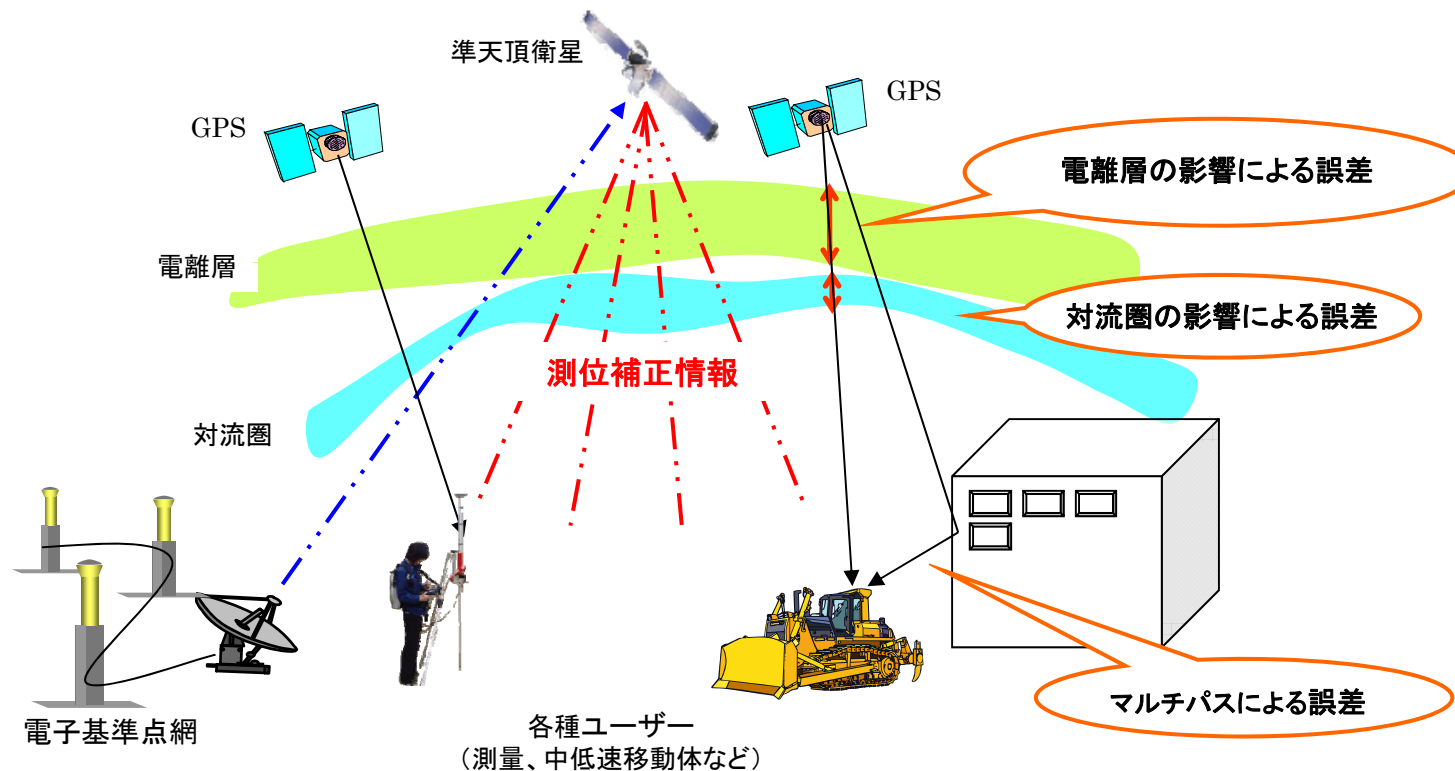
- ・準天頂衛星システムの利用による、測位情報利用地域の拡大、高精度測位サービスの実現及び移動体への適用を実現する

## 効果

- ・高精度測位サービスの実現による国民生活の安全性・利便性の向上（交通、防災、測量、国土管理等の分野への利用が期待）
- ・民間活力の活用による新産業創出等の経済活性化

## 内容

- ・中低速移動体（作業用車両等）へのRTK-GPS適用化技術等の開発 <国土技術政策総合研究所>
- ・準天頂衛星システムの精密測量への応用技術の研究開発 <国土地理院>
- ・次世代電子基準点に関する研究開発 <国土地理院>
- ・高精度測位補正等技術（精密測量等向け）の実証実験 <国土地理院>



## — 中低速移動体と測量における高精度測位 —

プロジェクト開始当初の現状	技術開発目標
<p><b>&lt;中低速移動体&gt;</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>高精度だが電波障害等に弱いRTK-GPS技術の移動体への適用 利用率、測位精度、継続性に問題</li> </ul> <p><b>&lt;測量&gt;</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>準天頂衛星等の次世代測位衛星を用いた測量の標準的な方法や精度管理等が未確定</li> <li>電子基準点が次世代測位衛星に対応していない</li> <li>スタティック測量は観測時間が60分</li> <li>現在のネットワーク型RTK-GPSに制約 サービス域が限定(携帯電話使用) 双方向通信方式 2周波測量機は高価</li> </ul>	<p><b>&lt;中低速移動体(作業車両等)へのRTK-GPS適用化技術開発&gt;</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>都市部、山間部でも連続した高精度測位を可能とする要素技術を開発</li> </ul> <p><b>&lt;精密測量への応用技術の研究開発&gt; <u>GPS補完</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>衛星測位シミュレータを開発し、これを用いて次世代測位衛星も含めた精密測量作業規程(案)をまとめる</li> </ul> <p><b>&lt;次世代電子基準点に関する研究開発&gt; <u>GPS補強</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>準天頂衛星の放送機能等を利用した高精度測位補正技術の開発 10分程度の観測時間で測位解を得る 全国でサービス可能 センチメートル級の測位 放送方式(片方向通信) 安価な1周波測量機に対応</li> </ul> <p><b>&lt;高精度測位補正情報等技術の実証実験&gt;</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>静止衛星及び準天頂衛星実機を用いた実験 実験を通して測量作業マニュアル(案)を作成する</li> </ul>

期間延長後

※RTK-GPS: Real Time Kinematic GPS。GPS電波の位相差を用いてリアルタイムで高精度に測位する方式。

## 平成18年3月31日 測位・地理情報システム等推進会議における決定事項(抜粋)

平成18年2月、民間が準天頂衛星の「通信・放送の事業化」断念を受けて、内閣府の「測位・地理情報システム等推進会議\*」は、準天頂衛星システム計画の推進に係る基本方針を以下のとおりとした。

1. まず、**官が主体**となって準天頂衛星システム**計画**を立ち上げる
2. 準天頂衛星システムには**S帯の機能を持たせず**に、**L帯のみのシステム**(補完、補強に利用)とする。
3. **官が中心となって1機の準天頂衛星**(平成21年度に打上げ目標)の**技術実証を行う**。
4. 実機による第1段階(**技術実証・利用実証**)は、**文部科学省がとりまとめ担当となり、総務省、経済産業省、国土交通省の協力を得て計画を推進する。**

第2段階は、第1段階の結果の評価を行った上で、初号機を含めた3機の準天頂衛星による**システム実証を実施する。**

## 平成19年5月30日 地理空間情報活用推進基本法(抜粋)

(衛星測位に係る研究開発の推進等)

第二十一条 **国は、衛星測位により得られる地理空間情報の活用を推進するため、衛星測位に係る研究開発並びに技術及び利用可能性に関する実証を推進するとともに、その成果を踏まえ、衛星測位の利用の促進を図るために必要な施策を講ずるものとする**

\* 測位・地理情報システム等推進会議:平成17年9月(発足)~平成20年6月、以後「地理空間情報活用推進会議」と名称変更

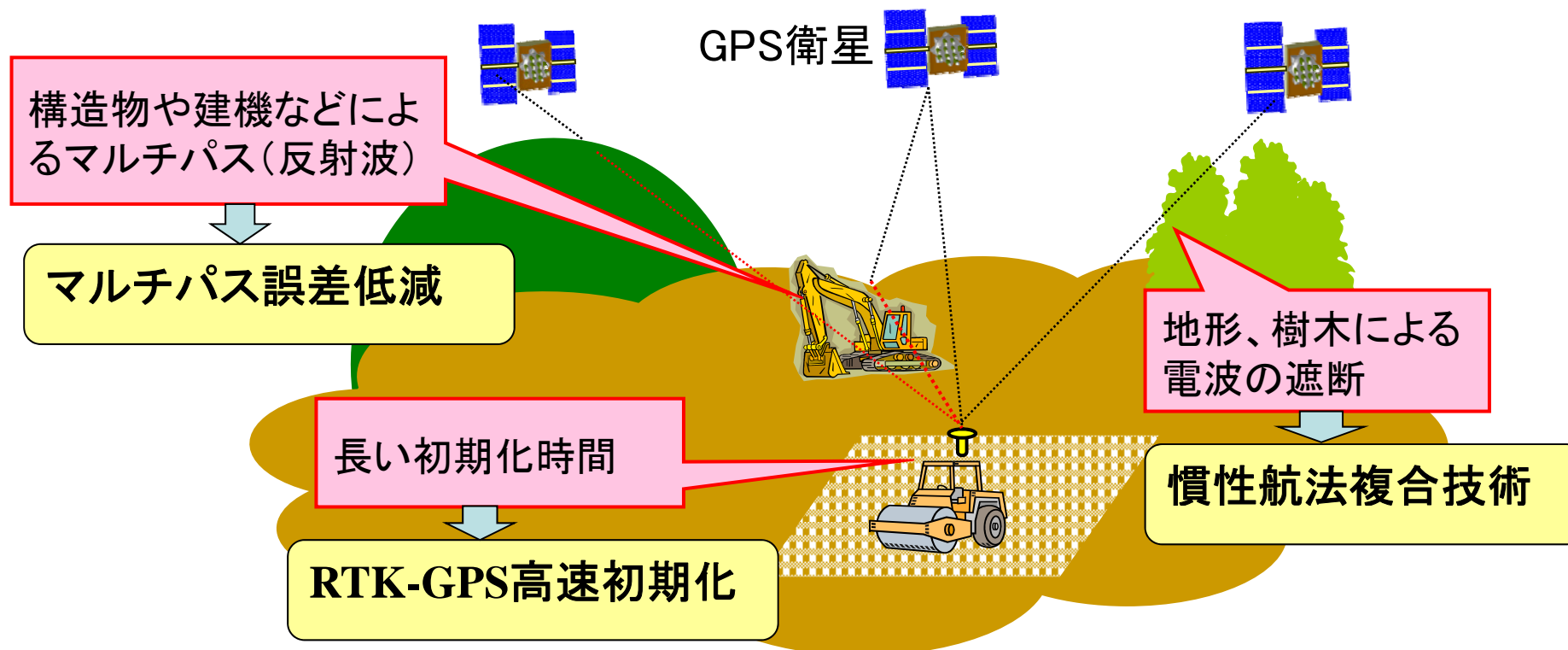
# 技術開発計画の全体構成

H15年度	H16年度	H17年度	H18年度	H19年度	H20年度	H21年度	H22年度
← 当初の技術開発期間					← 延長期間		
調査検討計画	基本検討	技術開発要素	プロトタイプ開発	実証実験	実証実験 及び 技術開発		
シミュレータ完成 補完機能の効果 等評価	シミュレータ補強版 完成 衛星利用配信確認 TEC比較	補正情報S帯1M 仕様作成	L帯プロトタイプ完成 衛星測位シミュレ ータ要件定義	L帯改良班完成	送受信・測位率等 確認 RTK-GPS技術資料	受信・測位率等確認	マニュアル(素案) 報告書
		3月31日 測位・地理情報 システム推進会議 3月中旬評価	S帯からL帯へ 8月中間評価	取りまとめ	当初打上げ予定	変更打上げ予定	みちびき打上げ 3月事後評価
III 中低速移動体へのRTK-GPS適用化技術の開発				(国総研)	技術資料		
RTK-GPS高速初期化技術の開発				開発技術の実証実験			
慣性航法複合技術の開発				延期			
マルチパス誤差低減技術の開発				8月2日 延期 9月11日 延期			
I 準天頂衛星システムの精密測量への応用技術の研究開発				精密測量作業 マニュアル案報告			
衛星測位シミュレータの開発		精密測量への応用技術の研究		GPS補完			
精密測量への応用技術の研究		精密測量への応用技術の開発		衛星測位 シミュレータ			
II 次世代電子基準点に関する研究開発				GPS補強			
次世代電子基準点の基本事項調査		追加:L帯精度評価		IV 高精度測位補正等技術(精密測量等 向け)の実証実験			
次世代電子基準点更新手法の検討		次世代電子基準点の開発		補正情報構築			
				公共測量作業 マニュアル素案			
				静止衛星を利用した実証実験			
				実機による実証実験とマニュアル案作成			
				最終報告			

# Ⅲ 中低速移動体へのRTK-GPS適用化技術の開発

## 都市部・山間部等におけるRTK-GPS適用技術の開発

- ・作業車両などの中低速移動体において、都市部・山間部でも連続した高精度測位を可能とするRTK-GPS適用化技術の開発を行った。
- ・以下の3つの技術開発を行った。
  - ①マルチパス誤差低減技術の開発
  - ②RTK-GPS高速初期化技術の開発
  - ③慣性航法複合技術の開発
- ・上記3技術の有効性を検証するため、開発した技術を適用した高精度測位ソフトウェアを試作し、シミュレーション実験および屋外実験を行い、開発技術の評価を行った。



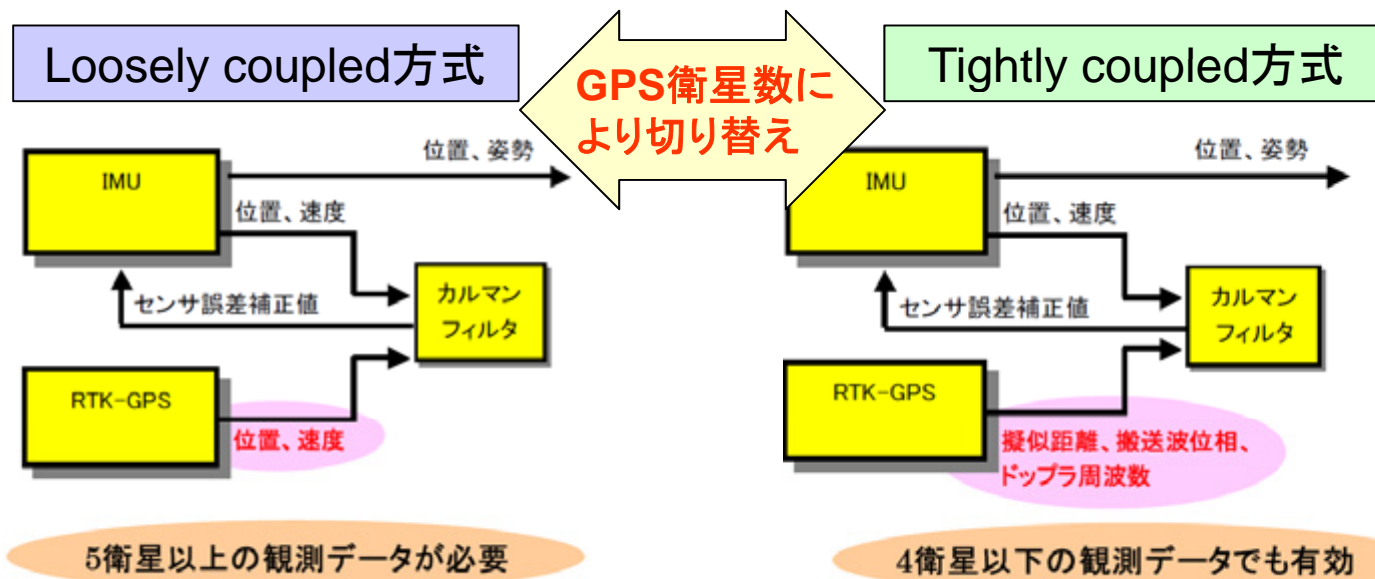
# Ⅲ 中低速移動体へのRTK-GPS適用化技術の開発

## 慣性航法複合技術の概要(開発技術の例)

上空視界が良好でない場所では、RTK-GPS測位と慣性航法装置を組み合わせた慣性航法複合演算方式が有効であるが、RTK-GPS測位演算結果の位置、速度を用いる「Loosely coupled方式」と、RTK-GPS観測の生データである擬似距離、搬送波位相データを直接使用する「Tightly coupled方式」があり、下表のとおりそれぞれ長所・短所が存在する。

	Loosely coupled方式	Tightly coupled方式
長所	GPS衛星が5機以上の時には高精度な誤差補正が可能	GPS衛星が4機以下でも誤差の増大を抑えられる
短所	電波の遮断等によりGPS衛星が4機以下になると加速度的に誤差が増大	GPS衛星が5機以上の時の精度はLoosely coupled方式に劣る

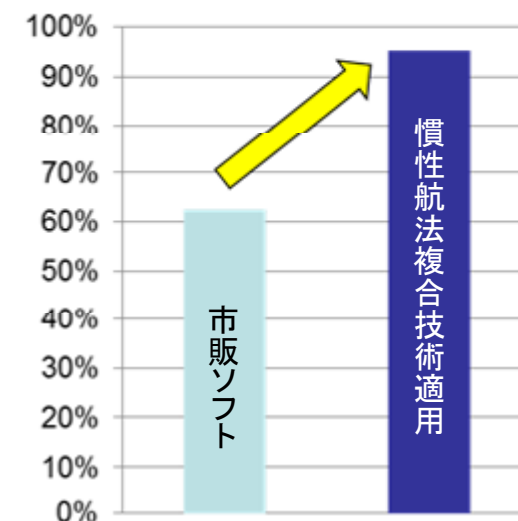
GPS可視衛星数によって方式を切替え、最適な演算方式を選択する



## 屋外実験による効果実証

屋外実験にて、慣性航法複合技術適用ソフトと従来の市販ソフトの利用率を比較したところ、利用率が大幅に向上した。

利用率: 実験における全稼働時間のうち、RTK-GPS搭載建機の位置が決定し、かつ推定誤差が20cm以内である時間の割合



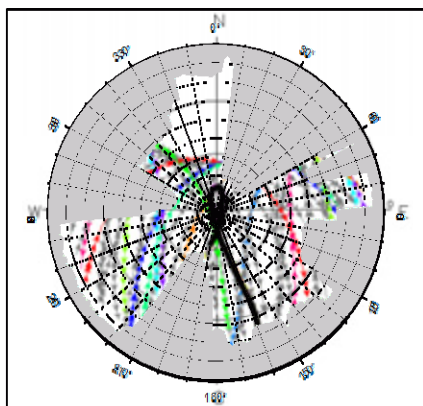
グラフ: 推定誤差が20cm以内である時間の割合

## 衛星測位シミュレータの開発

準天頂衛星等の次世代測位衛星を用いた測量の精度について検討

(実機がないため)

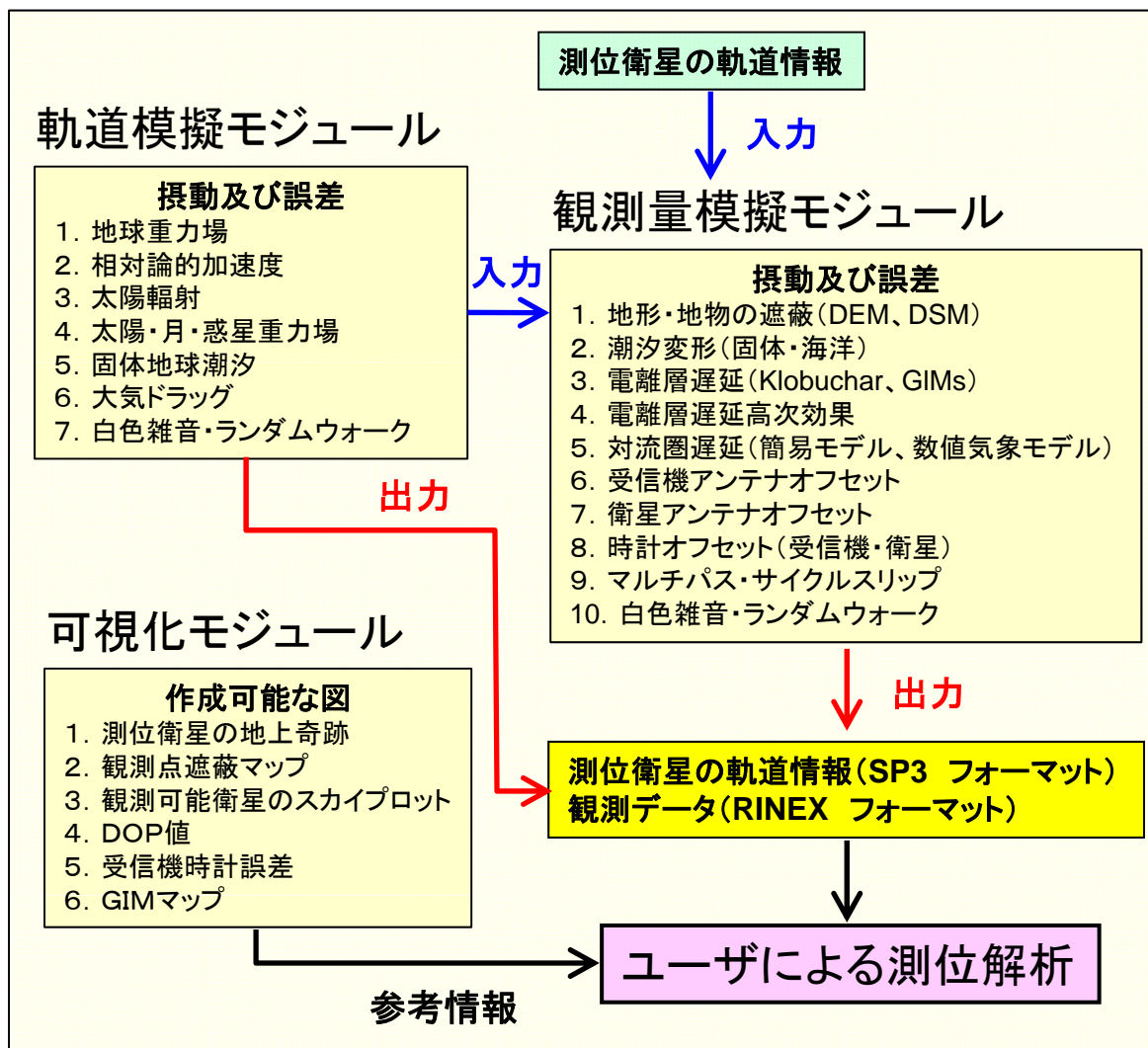
シミュレーションにより評価



観測点(★印)遮蔽マップ  
観測可能衛星のスカイプロット

任意の衛星について、現実の観測環境をなるべく反映した測位誤差の推定が必要

## 開発した衛星測位シミュレータ





## 精密測量への応用技術の研究・開発

開発した衛星測位シミュレータを用いて、様々な条件での観測を模擬し、準天頂衛星による補完効果を検討

準天頂衛星: 3機

地域: 都市部、山岳部、平地部

ケース: 気象擾乱、電離層擾乱の大小 等

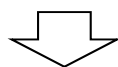
(気象、電離層による誤差は、適切な誤差量を実際の観測データに基づいて検討)



図 都市部(東京都心部)

シミュレーション結果に基づく準天頂衛星による**補完効果**

- ・上空視界の悪い条件で測位時間率が顕著に改善
- ・準天頂衛星により、測量での仰角制限を緩和できる可能性



**実機利用以前に観測地点を評価**

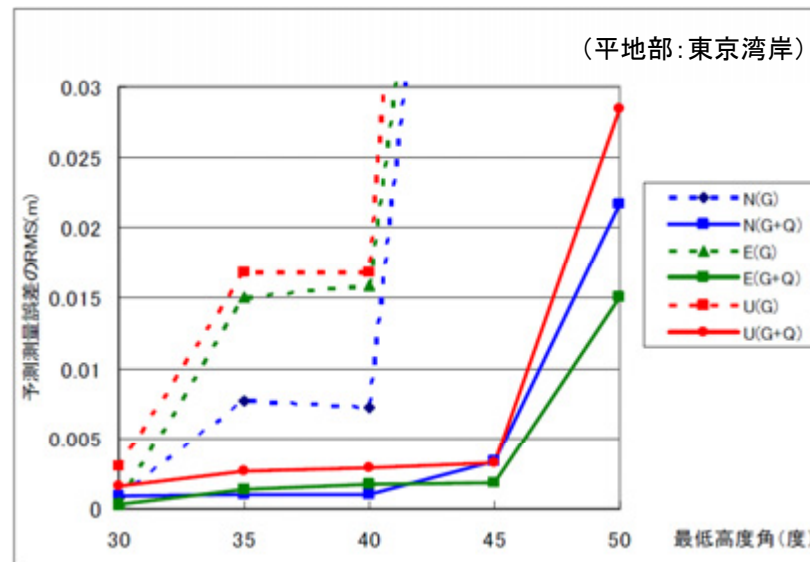


図 最低高度角と予測測量誤差(1日分から計算)のRMS (2km基線)

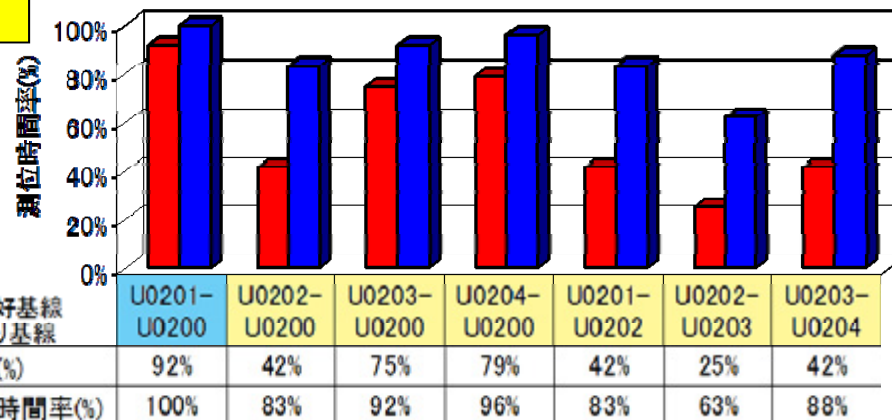
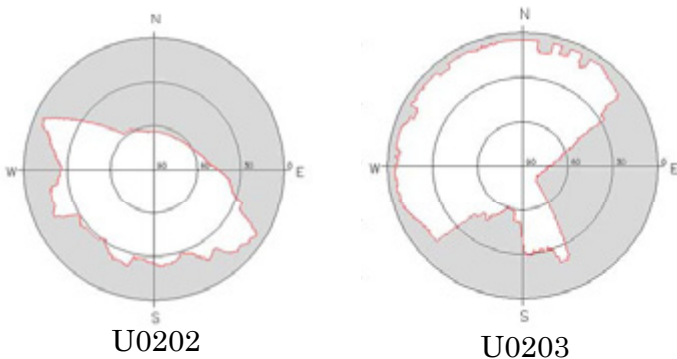


図 測位時間率 (PDOP < 6, 都市部) (2km基線)

## II 次世代電子基準点に関する研究開発

### 電子基準点を利用した測位補正情報生成・配信技術の開発

#### GPS測量の現状と課題

精度 (水平)	携帯電話圏内 (国土の6割)	携帯電話圏外 (国土の4割(山間部等))
1cm ↑ ↓ 10cm	スタティック法(静止測量) 観測 1時間~  ネットワーク型RTK法等 観測時間 数分~	効率的な手法がない

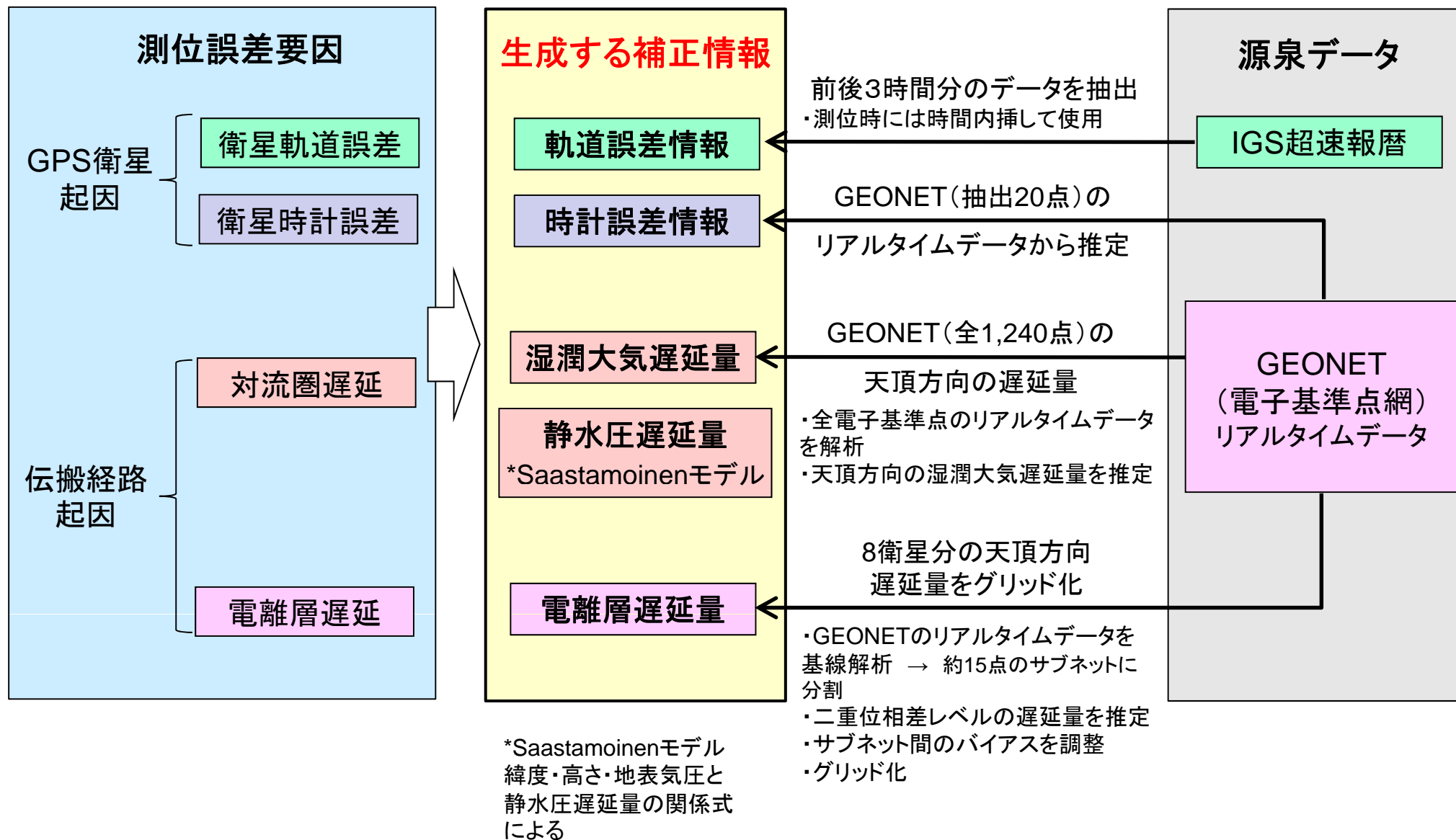
課題: 携帯電話が利用できない地域において、一定精度を確保しつつ、短時間で効率的に測量を行うための手法が存在しない。

#### 基本設計(技術条件)

- ・全国を対象とした放送方式による補正情報の配信
- ・GPS1周波受信機を用いた測量
- ・10分程度の観測時間で安定的なセンチメートル級の測量

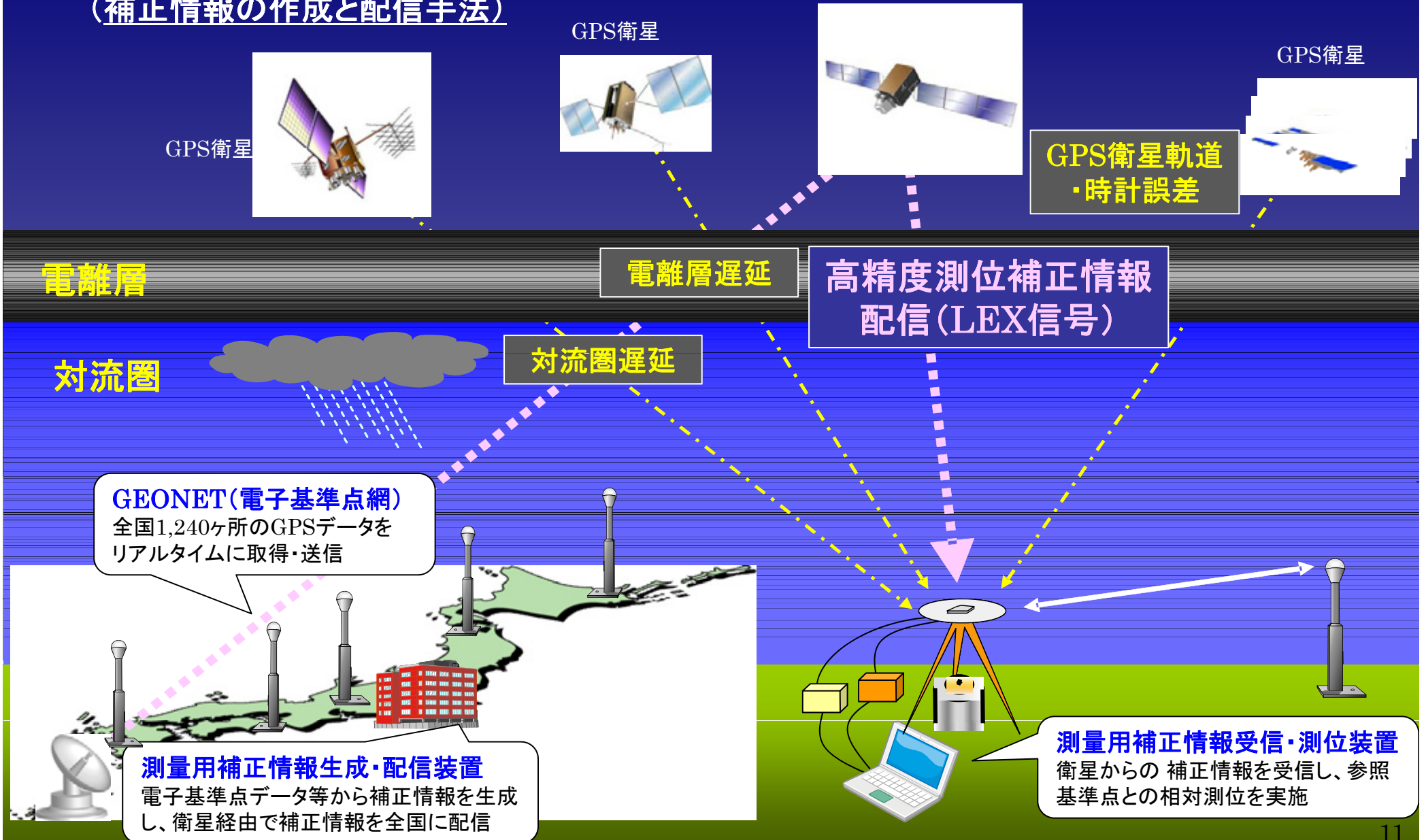
技術開発: 準天頂衛星の放送機能を活用することで、携帯電話が利用できない地域でも、効率的な測量を実施可能とする方法の開発。

## 測位補正技術の開発



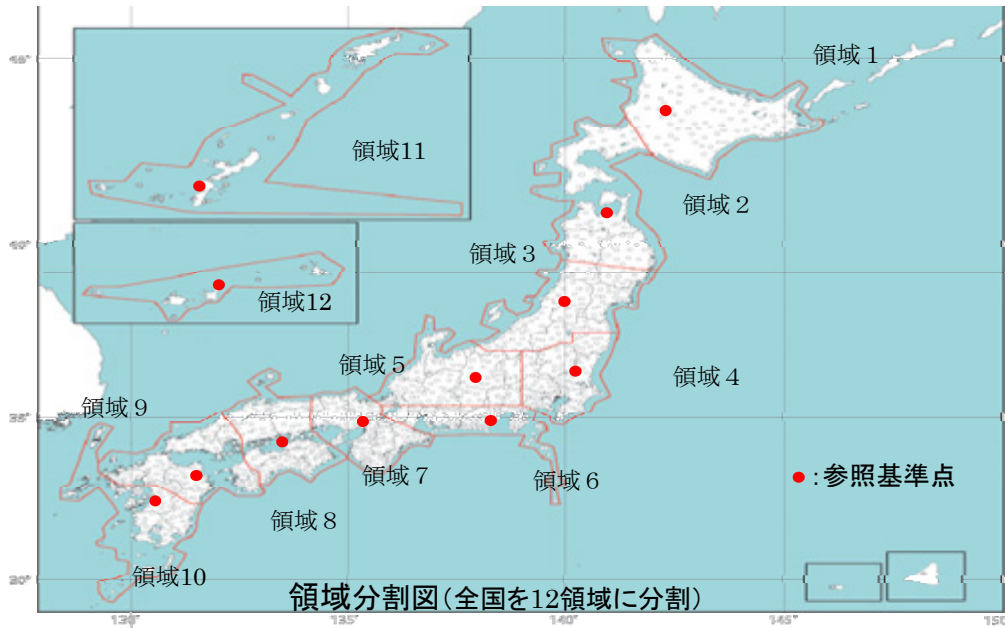
## II 次世代電子基準点に関する研究開発

開発した測量向け測位補正技術の概要  
(補正情報の作成と配信手法)



# II 次世代電子基準点に関する研究開発

## 測位補正情報受信・測位処理



測位点での1周波GPSデータ・参照基準点観測データに補正情報を組み合わせて相対測位を実施

- ・単独測位座標をもとに自分の領域を決定
- ・対応領域の参照基準点データ・補正情報を取得(補正情報は適宜時間・空間内挿)
- ・L1搬送波位相の観測方程式を設定し、カルマンフィルタを適用して二重差アンビギュイティを推定
- ・5衛星以上のアンビギュイティが解決した場合にFix解として出力、それ以外の解は破棄

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																		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
電離層1		参照基準点		電離層2										電離層10					電離層3										
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
電離層3			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
電離層1		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
電離層3		参照基準点		電離層5					電離層8					電離層9					電離層11										
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									

# Ⅱ 次世代電子基準点に関する研究開発

## S帯からL帯へ変更(L帯の併行開発)

### 補正情報(L帯)の低容量化の検討

- データ間引き
  - 配信レート
  - グリッドサイズ
  - 参照基準点数
- データ圧縮
  - 差分表現
  - アーカイブソフトウェアの利用

・参照基準点情報、電子基準点の概略座標をあらかじめ受信機側で保持しておくことで、配信レート1.5kbpsを達成

表 各補正方式における格子サイズ

補正方式	格子サイズ(経度×緯度)
S帯補正方式	0.2° × 0.15°
L帯補正方式	0.4° × 0.3°

表 各補正方式における補正情報の最適更新頻度

補正情報	S帯補正方式	L帯補正方式
参照基準点観測情報	10秒	30秒
電離層遅延補正情報	30秒	120秒
対流圏遅延補正情報	30秒	240秒
衛星軌道・時計補正情報	30秒	240秒

### 性能評価等

- 最適な観測時間の選択(S帯補正方式で10分、L帯補正方式で15分)
- 参照基準点からの距離によらない安定性
- S帯補正方式、L帯補正方式ほぼ同程度の測位誤差

## 補正情報の中身

L帯2kbps  
(LEX信号)

情報量が1/500に

S帯1Mbps

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																		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					
電離層1			参照基準点					電離層2										電離層10					電離層3											
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					
電離層3			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					
電離層1			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					
電離層3			参照基準点					電離層5										電離層8					電離層9					電離層11						
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				

表 S帯及びL帯の実験による観測時間の長さや測位誤差(沖縄地区)

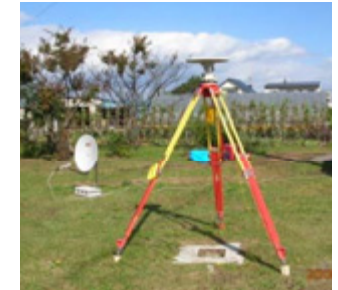
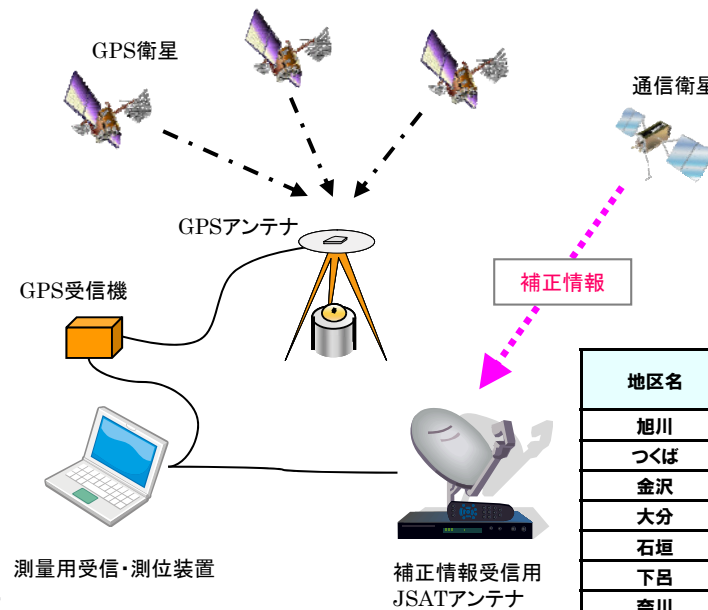
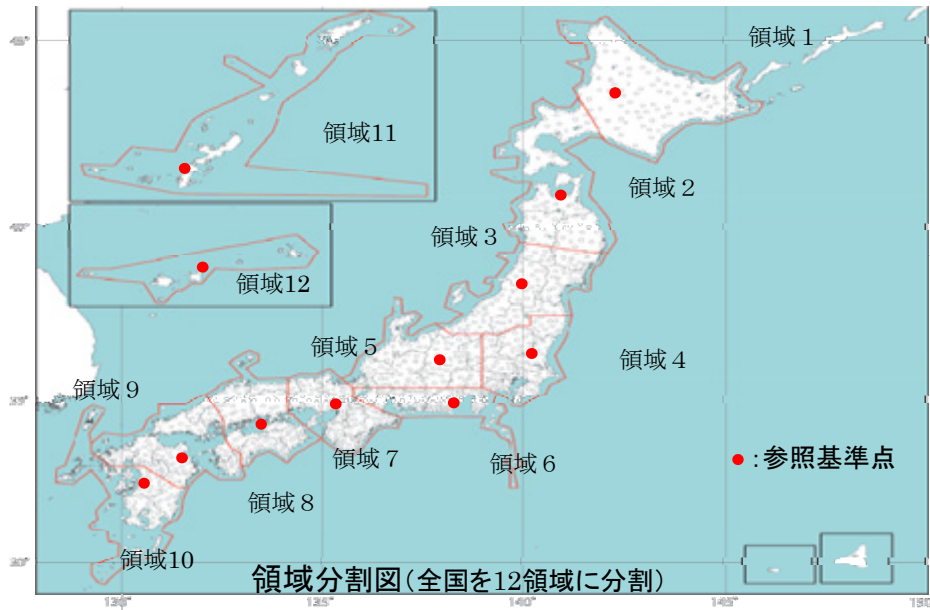
	観測時間	長基線(約90km)		短基線(約30km)	
		Fix率(%)	RMS(cm)	Fix率(%)	RMS(cm)
S帯補正方式	10分	89.5	0.7	100.0	0.6
L帯補正方式	15分	83.3	0.9	75.0	3.0

Fix率: 測位解が得られた回数/観測総数    RMS: 参照基準点とのスタティック解を基準としたバラツキ

検証の結果、L帯においてもセンチメートル級精度であることを確認

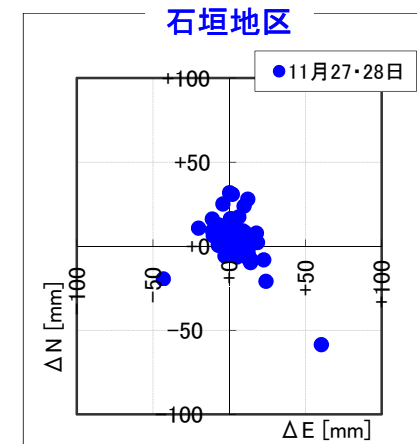
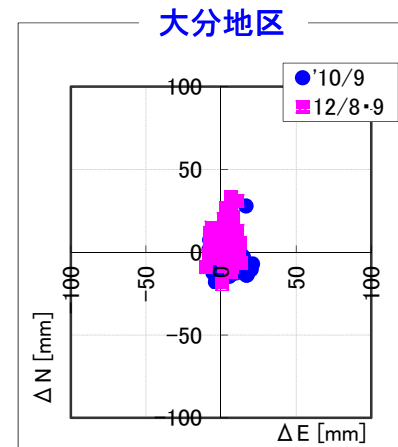
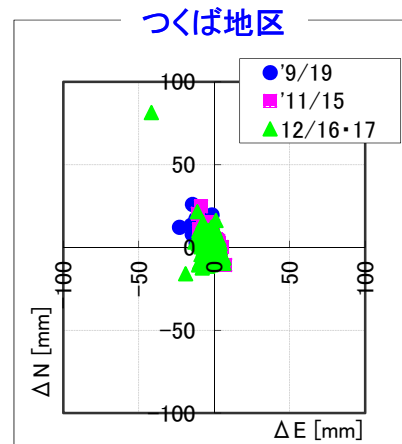
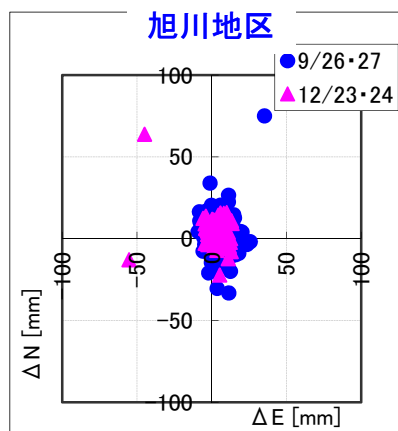
# IV 高精度測位補正等技術(精密測量等向け)の実証実験

## 静止衛星を利用した実証実験(実機打上げ前)

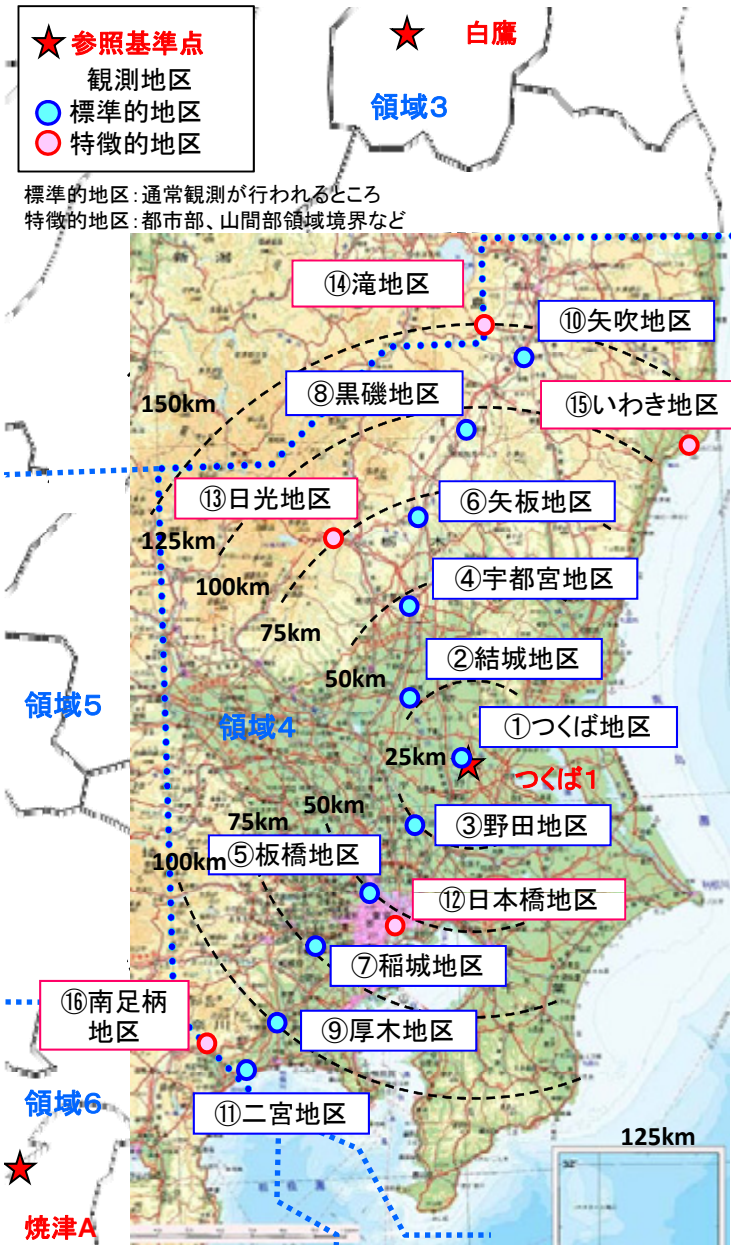


地区名	RMS (cm)		FIX率
	水平	上下	
旭川	1.2	2.2	92%
つくば	1.4	2.0	89%
金沢	5.4	5.9	92%
大分	1.9	10.7	84%
石垣	6.7	8.4	86%
下呂	2.1	3.4	97%
奈川	3.3	3.7	96%
高山	2.8	3.9	94%
冷泉小屋	3.7	5.3	93%
乗鞍	2.1	5.0	95%

地域特性、季節変化、気象条件等精度劣化させうる様々な要因があるため、多様な条件下での測位実験を行った。結果の概要は以下の通りである。  
Fix率は、概ね90%程度、測位精度は概ねセンチメートル級であった。



## 準天頂衛星実機を利用した実証実験



## 機器構成

GPS受信機  
※L1のみ受信



LEX受信機

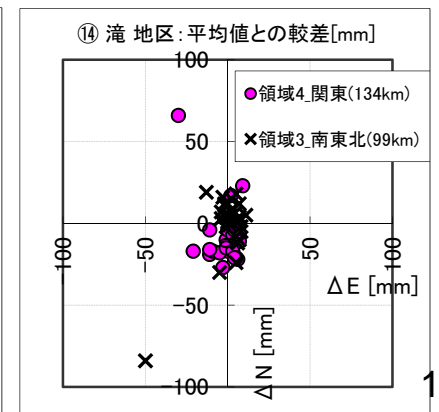
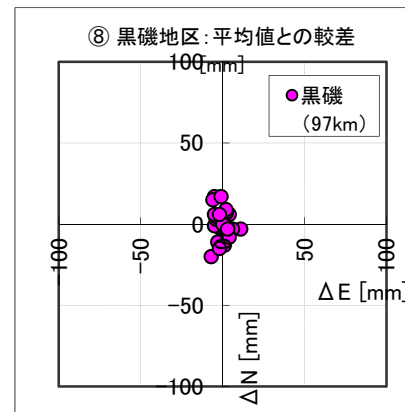
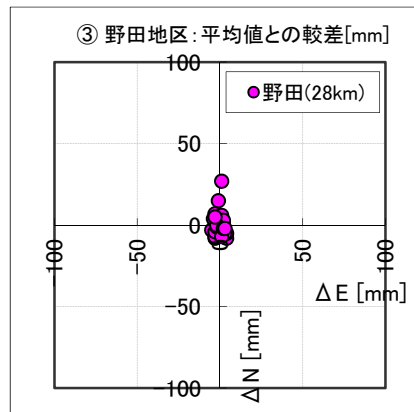
GNSSアンテナ  
※GPSのL1信号、  
準天頂衛星のLEX  
信号を受信



SJS  
(測位補正情報受信  
・測位装置PC)

参照基準点からの距離、地域差等を考慮し実証実験を行った。結果の概要は以下の通りである。

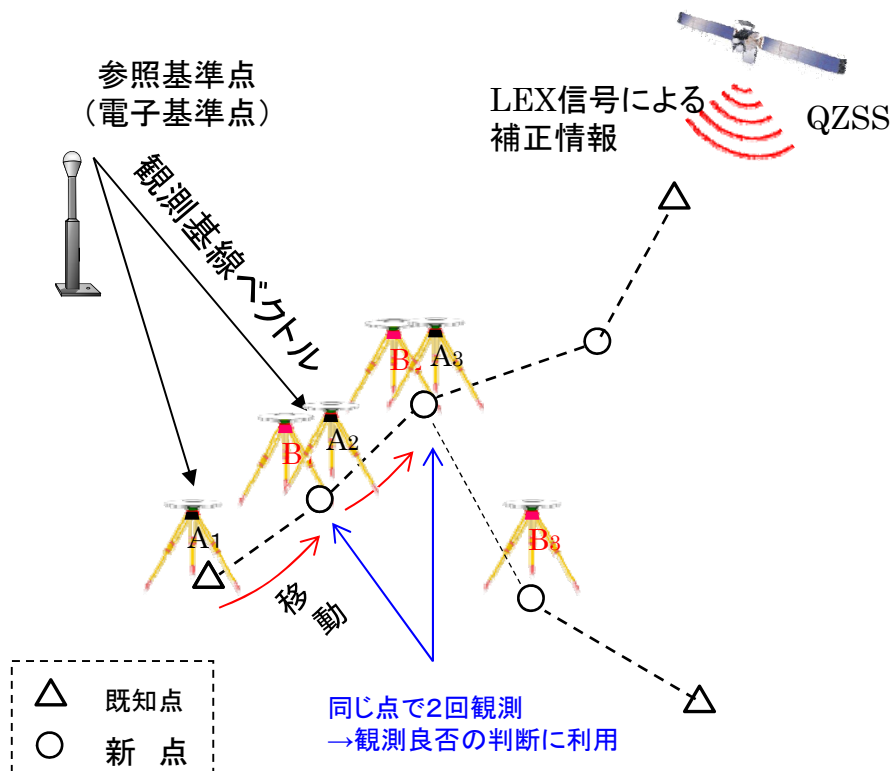
- ・測位精度は概ねセンチメートル級であった。
- ・地区によってFix率が低い場合があった。
- ・アマチュア無線等との干渉によるLEX信号の受信障害があった。





## 測量作業マニュアル(素案)

### 公共測量(基準点測量)の観測手法



- ・2台で観測点を順次移動しながら同時観測を行い、既知点、新点、交点等で構成する環閉合差  
 $(\Delta N \cdot E, \Delta U) = (20\text{mm}\sqrt{N}, 30\text{mm}\sqrt{N})$ から観測の良否を判定。
- ・各点では独立した2回の観測結果が算出されるため、そのセット間較差 $(\Delta N \cdot E, \Delta U) = (20\text{mm}, 30\text{mm})$ から良否を点検。

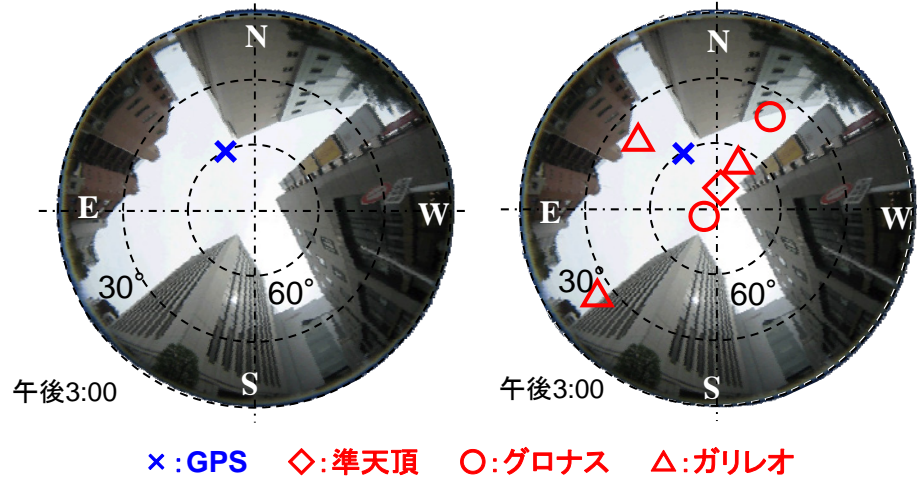
### 現行規定との比較

	作成した マニュアル(素案)	現行の準則 *NW型RTK法、 **スタティック法
受信機の台数 (基準点測量の場合)	<b>2台以上</b>	*1台以上 **3~4台
受信機の台数 (地形測量等)	<b>1台</b>	*1台
受信機の性能	<b>2級(1周波)</b>	*1級(2周波) **1級(2周波:10km以上)、 2級(1周波:10km以内)
観測時間	<b>15分以上</b>	*10秒以上 **60分以上(10km以上は 120分以上)
データ取得間隔	<b>1秒(補正情報) 30秒(GPSデータ)</b>	*1秒 **30秒以下
衛星数	<b>5衛星以上(GPS衛星)</b>	*5衛星以上(GPS衛星) **4衛星以上(GPS衛星)
作業地域	<b>全国</b>	*携帯電話サービスエリア **全国

マニュアル(素案)は、観測及び点検方法、観測精度等について実証実験結果を踏まえて作成したものである。しかし、実際の運用にはLEX信号の運用調整、補正情報配信事業の確立等の課題があるため素案とした。

# 技術開発成果の活用がもたらす効果

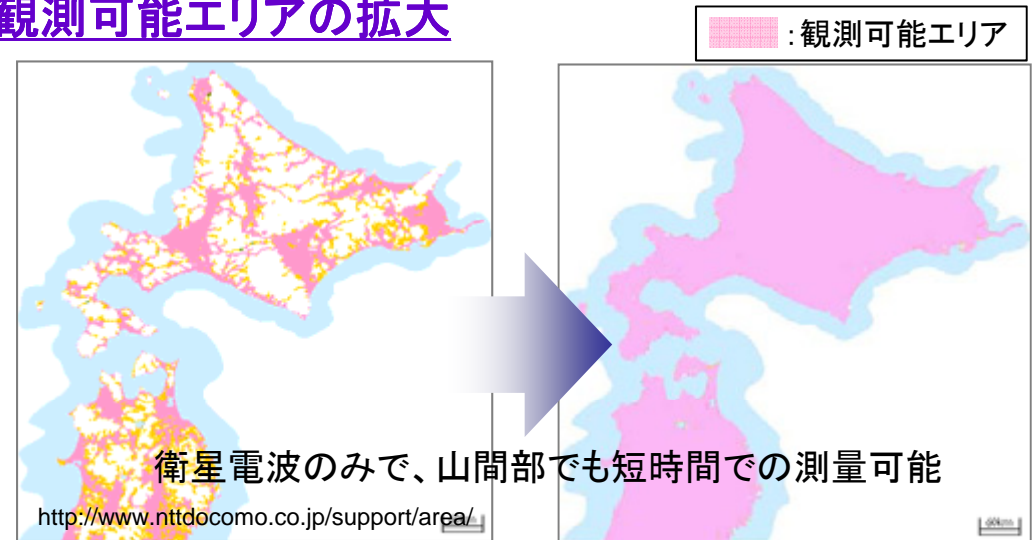
## シミュレータの活用(マルチGNSSの効果)



東京銀座 2013年7月21日の可視衛星予測

次世代衛星等様々な測位衛星のシミュレーションができ、精密測量等の手法の検討が可能となる。

## 観測可能エリアの拡大



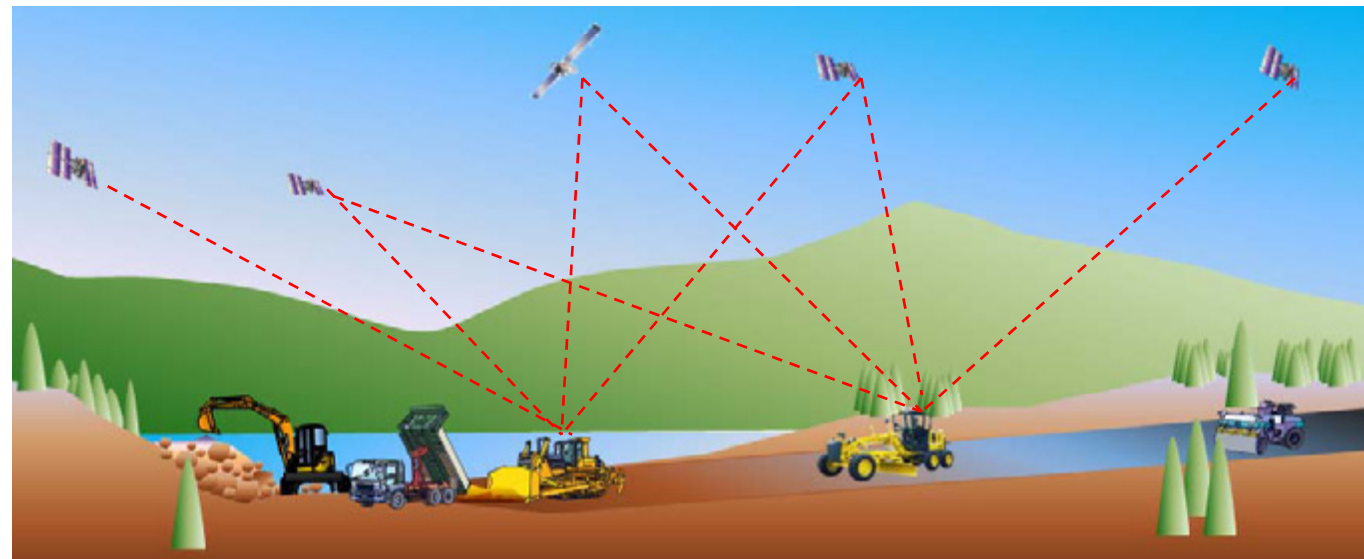
FOMA携帯を利用した場合のネットワーク型RTK法が実施できる地域

補正情報の通信に準天頂衛星を利用した場合の測量実施可能地域

全国どこでも準天頂衛星の放送機能を用いた補正情報が送信されるので、特に山間部では測量作業等のコストダウンが可能となる。

## 情報化施工など

作業車両などの中低速移動体において、都市部・山間部でも連続した高精度測位を可能とする



## ■ 必要性(科学的・技術的意義、社会的・経済的意義、目的の妥当性等)

衛星測位技術は、交通・防災・測量・国土管理等の分野への利用が期待されている。このため、都市部や山間部等で衛星からの電波が受信できない地域の解消、衛星単独の測位精度を上げ、車両の運行管理、障害者の歩行支援等に活用できることを目指す本研究開発の必要性は高い。

なお、本研究開発で取り扱った準天頂衛星システムについて、総合科学技術会議においても、関係省庁・宇宙研究開発機関・民間の適切な役割分担の下、準天頂衛星システムの開発・整備を推進することが決定されている。

## ■ 効率性(計画・実施体制の妥当性等)

実施途中で準天頂衛星システム開発の方針変更があり、計画の途中変更を余儀なくされたが、狭帯域化に合わせて補正情報を再設計し、実機による実証実験に引き継ぐなど、計画は概ね妥当であった。実施体制については、国土地理院及び国土技術政策総合研究所において課題を分担し、国交省内の関係研究機関の連携のために委員会を設置し、学識経験者からの助言や情報交換を行いつつ効率的に開発を行っており、適切な実施体制であった。

## ■ 有効性(目標の達成度、新しい知の創出への貢献、社会・経済への貢献、人材の養成等)

移動体については、都市部、山間部で連続した高精度測位を可能とする要素技術を開発した。測量については、衛星測位シミュレータを用いた検討によりGPS補完効果による観測条件の緩和の可能性を示し、開発した測位補正技術により、実際に測量作業が可能なることを実証し、測量作業マニュアル素案を作成し、当初目標とした成果をあげた。これらの成果は公開し、民間による活用が可能となっている。

## ■ 目標の達成度

A:十分に目標を達成できた

B:概ね目標を達成できた

C:あまり目標を達成できなかった

D:ほとんど目標を達成できなかった

## ■ その他

本研究開発を踏まえ、今後は準天頂衛星実機を用いたGPS補完効果の検証、他の衛星測位システムも利用した場合の測量等の検討が求められる。これらについては、国土地理院において継続して検討しているほか、総合技術開発プロジェクト「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」(H23~26)において、複数の衛星測位システムの利用について検討を進めている。