資料１－１

研究課題終了時評価表

１．研究課題名：世界測地系における国内位置基準の監視の高度化に関する研究

２．研究期間：平成２２年４月　～　平成２５年３月　（３年間）

３．予算：特別研究経費 22,858千円　（３年間の総額）

４．成果の概要

（１）VLBI観測とGEONET観測を時系列的に統合する解析技術の開発

世界測地系において非定常変動を考慮した国内位置基準の時系列監視を行う手法として、全ての電子基準点（GEONET）に対して以下の手法を開発した：１）GEONETの通常処理の解析(F3解)をグローバルGPS解析に整合させ、世界測地系における電子基準点の日々の座標値を推定する、２）推定された電子基準点の日々の座標値をもとに、定常変動に加え、地震時変動、余効変動、季節変動などの非定常変動をモデル化し、位置時系列を推定する。

次に、上記手法の有効性を評価するため、国内VLBIとの整合性を検証した。１）国内VLBI観測データを最新の物理モデルを用いて再解析し、世界測地系における国内VLBI局の座標値を推定した。２）全ての国内VLBI基線について、コロケーションにより結合されている最寄りのGPS観測点の世界測地系における座標値を用い、コロケーションデータと組み合わせて同一基線の解を求め、両者の整合性を評価したところ、いずれの基線においても有意な差はなく、ほぼ1cmの精度で整合することが分かった。以上のことから、開発された手法により、全ての電子基準点について世界測地系における国内位置基準が1cm程度の精度で監視できることを明らかにした。

（２）シミュレーション評価によりVLBI2010仕様に対応した国内VLBI観測の技術指針のとりまとめ

VLBI2010仕様に異なる様式で対応させた国内VLBI観測を設定し、数値シミュレーションにより多様な観測条件のもとでの局位置の推定精度を調査し、要求精度に応じた観測パターンを国内VLBI観測の技術指針としてとりまとめた（予定）。その実現においては、VLBI観測のシミュレーターを導入し、多様な観測条件下における局位置の推定精度を効率的に評価するためのシステムを整備した。さらに、そのシステムを用い、VLBI2010仕様に対応可能な範囲において、アンテナ駆動速度、受信感度、周波数帯域、チャンネル数（バンド数）などを可変パラメータとして設定し、多様な観測条件での局位置の推定精度を評価した。

５．当初目標の達成度

（目標）

本研究は、世界測地系における日本の位置基準を監視する手法を高度化することを目的とし、以下の目標を設定して研究を進めた。

（１）VLBI観測とGEONET観測を時系列的に統合する解析技術の開発

（２）シミュレーション評価によりVLBI2010仕様に対応した国内VLBI観測の技術指針のとりまとめ

（達成度）

（１）GEONETの通常処理の解析(F3解)を適切な変換でグローバルGPS解析に整合させ、その座標値から定常変動・非定常変動をモデル化する手法を構築し、それを用いることで、国内VLBIによる世界測地系における位置情報と整合する世界測地系における国内位置基準の位置時系列を安定的に求める事が可能であることを明らかにした。以上のことから目標は達成された。

２）VLBI観測データを生成するVLBIシミュレーターを導入し、多様な条件下で局位置の推定精度を効率的に評価するためのシステムを整備した。つぎに、そのシステムを用い、VLBI2010仕様に対応可能な国内VLBI観測における条件下で、アンテナ駆動速度、受信感度、周波数帯域、チャンネル数（バンド数）などを可変パラメータとして多様、多量な設定でシミュレーションを行い、全ての国内観測局についての局位置の推定精度を評価した。得られた結果を元に、3月までに、要求精度に応じた観測パターンを、国内VLBI観測の技術指針としてとりまとめる。以上のことから目標は達成される見込みである。

６．成果公表状況

研究報告書　　３件
発表論文　　０件
口頭発表　　２件
特許等　　０件
（研究期間終了後）２件の論文執筆を予定している。

７．成果活用の見込み

本研究で確立した世界測地系における非定常変動を考慮した国内位置基準の時系列監視手法を用い、今後継続的に日本の測地基準系の監視に活用される予定である。また、本研究で取りまとめた国内 VLBI 観測の技術指針は、院内の国内 VLBI 検討委員会に資料として提供され、将来の国内 VLBI 観測についての方針策定に活用されることが見込まれる。

８．達成度の分析

（１）有効性の観点からの分析

世界測地系でのGEONET位置の平滑化された時系列について、観測技術固有の系統誤差を評価するため、コロケーション観測を用いて、VLBIグローバル解と座標解を直接比較した分析を行い、両者に有意な差はなく1cm程度の精度で整合することを示した。すなわち、本研究で開発された手法は、VLBIとGEONETの統合解析と等価であり、世界測地系における国内位置基準を監視する上で、有効であることを示した。

また、高精度なシミュレーションを効率的に評価するシステムを整備し、国内VLBI観測について、様々な観測条件によって達成される精度とそれに必要な設備の改造部分を技術指針としてとりまとめ、将来の国内VLBI観測の方針策定にとって有効な情報が提供され、目標を達成できた。

（２）効率性の観点からの分析

世界測地系における非定常変動を考慮した国内位置基準の時系列監視手法の開発に際しては、電子基準点の通常処理の解析（F3解）を利用し、GEONETデータを再解析することなく、効率よく時系列監視を行う手法を採用した。また、VLBI2010に対応した国内VLBI観測の技術指

針のとりまとめに際して、多様、多量のシミュレーションデータを用いた精度評価を実施したが、VLBI観測データを生成するシミュレーターとして、ウィーン工科大学で開発されたVLBI解析ソフトウェア「VieVS」を活用し、さらに、精度評価において高速にデータを検索、抽出できるシステムを整備することで、効率的にシミュレーションの評価をとりまとめることができた。

９．残された課題と新たな研究開発の方向

本研究において、既存の国内VLBI観測局における装置の部分改造を想定した対応について、群遅延量による解析を行い、評価結果を技術指針としてとりまとめることができた。VLBI2010仕様に完全互換である国内観測局を想定する場合には、更に高精度化するために新たに導入される予定である位相遅延量によるシミュレーション解析について、電離層遅延量の擾乱を高精度に考慮して実行する必要があるが、今回行うことができていない。これは、2GHz~14GHzもの超広帯域な受信データに対して、電離層補正等を考慮した上で整数値バイアスを推定する解析技術は、世界的にもまだ研究開発フェーズであり、実際の観測事例もないために実現できていないことが一因である。今後、広帯域位相遅延量による解析技術が実現した後に、評価を行う予定である。また、本研究で開発した世界測地系における非定常変動を考慮した国内位置基準の時系列監視手法を発展させ、現行成果の網羅的な評価及び大規模地殻変動の発生に対応する成果改訂手法の検討に取り組む予定である。

10．その他、課題内容に応じ必要な事項

特になし。

11．提案課・室名、問合せ先

国土地理院 地理地殻活動研究センター 宇宙測地研究室
TEL：029-864-1111(内8333)　　FAX：029-864-2655

資料１－２

平成 22 年度～平成 24 年度特別研究
「世界測地系における国内位置基準の監視の高度化に関する研究」
に関わる成果公表リスト

［研究報告書］

・国土地理院調査研究年報（平成 22 年度，平成 23 年度，平成 24 年度（予定））.

［発表論文］

（査読付き）

以下の学術論文執筆を予定。

「国内VLBI観測のシミュレーションによる評価」（仮題）

「非定常地殻変動を考慮した局所座標系の構築について」（仮題）

（査読無し）

［学会等発表］

・高島和宏(2011)：国内 VLBI 観測シミュレーションの試行、日本測地学会第 116 回講演会.

・高島和宏(2012)：世界測地系における日本国内の位置基準監視の高度化に向けた VLBI-GPS 統合解析手法の検討、日本測地学会第 118 回講演会.

［その他］

資料１－３

世界測地系における国内位置基準の監視の高度化に関する研究

国土地理院地理地殻活動研究センター
宇宙測地研究室

イントロダクション

国内位置基準

国土の位置は、測量の骨格となる基準点（特に電子基準点：GEONET）の世界測地系における座標値として管理

- 国家測量成果：
  特定の時点（元期）における基準点の位置（座標値）
- 位置の経年変化への対応
  GEONETの通常処理（F3：1日平均）による
  定常的地殻変動情報から（元期以降の）
  変化量を年1回調整　（セミ・ダイナミック補正）

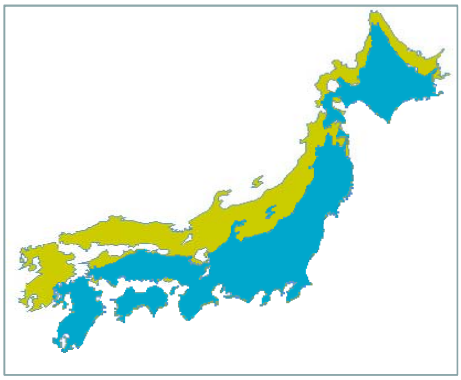
- つくばでの国際VLBI観測，IGS（国際GNSS事業）点観測：
  世界測地系の国際的基盤となる測地基準系（ITRF）が日本においても実現，維持

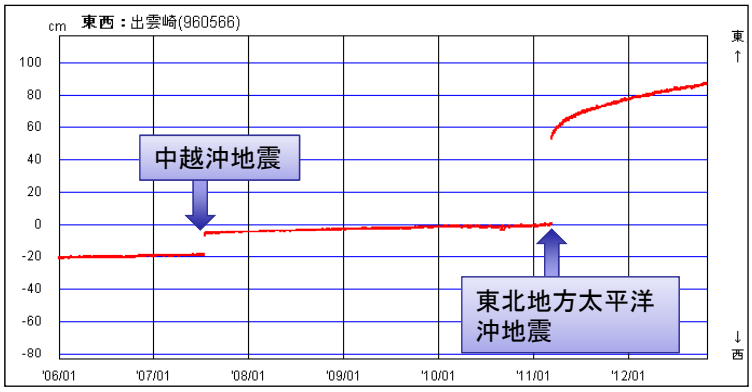
＊本研究：骨格となる基準点として全国を網羅するGEONETを対象とする

背景（1）時間経過に伴う国家測量成果の劣化

国土地理院

- 日本列島は定常的なプレート運動で、年間数cmで移動
- 地震活動、火山活動で非定常的な地殻変動も激しい
- GEONET：GNSS連続観測，国際・国内VLBIの繰り返し観測

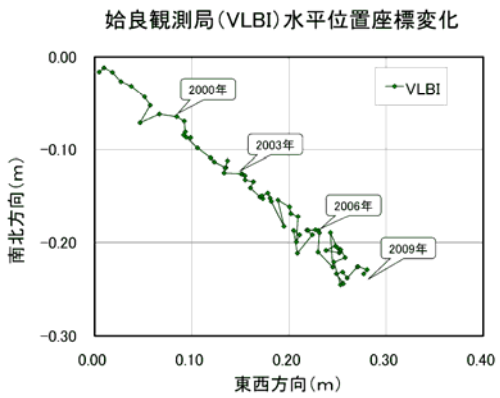


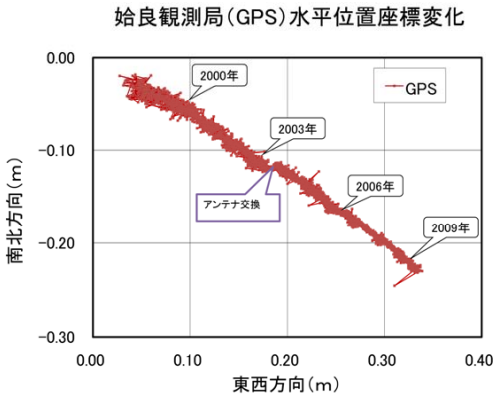


- 世界測地系の中で、国内位置基準を非定常変動を考慮して時系列的に捉え、監視することが必要

国土地理院

観測原理の異なる技術（VLBI、GNSS）により、世界測地系で非定常変動を考慮して、時系列的に整合した位置を捉える手法が必要
しかし、現時点ではそのような手法は確立されていない





VLBIとGPSの各手法による姶良観測局（鹿児島県）位置の変化

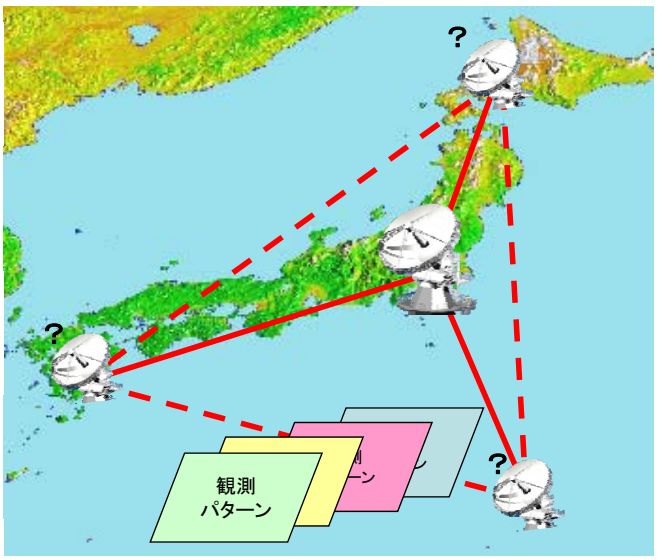
背景（2）国際VLBI観測の仕様変更

国際VLBI観測は、新たな仕様VLBI2010へ順次移行

- 一桁以上の大幅な精度向上が期待
- アンテナ駆動速度の高速化
- 観測の広帯域化

↓

各種のVLBI観測パターンの精度評価を行い、国内VLBI観測の対応策の検討が必要



研究開発の目的と目標

- 目的
  VLBI観測網とGEONETを用いて世界測地系における国内位置基準を監視する手法を構築する。

- 目標
  1. VLBI観測とGEONET観測を時系列的に統合する解析技術の開発
  2. シミュレーション評価によりVLBI2010仕様に対応した国内VLBI観測の技術指針のとりまとめ

研究期間　平成22年度～平成24年度
予算　特別研究経費　22,858千円

目標（1）VLBI観測とGEONET観測を時系列的に統合する解析技術の開発

国土地理院

① GEONET各点で世界測地系において非定常的な地殻変動をモデル化し、平滑化された正確な位置の時系列を求める手法を構築

1. GEONETの通常処理による座標値（F3解）を元に、世界測地系に準拠した日々の座標値を計算する手法
2. 1. で求められた座標値から非定常地殻変動をモデル化し、世界測地系において平滑化された各点の位置を決定する手法

② VLBI国内観測からグローバル解（世界測地系での位置）を求め、①との整合性を評価

1. 最新の解析戦略により国内VLBI観測のグローバル解析
2. コロケーション測量結果を用いて、国内VLBI観測基線について、GEONETとVLBIの整合性を比較

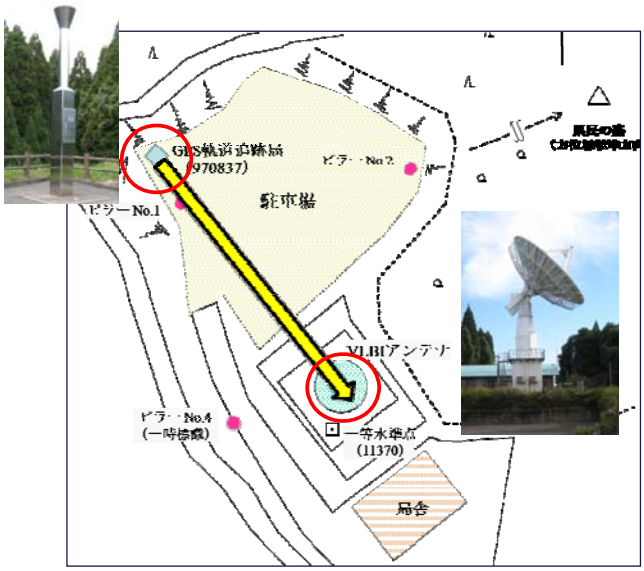
③ ①②の結果、GEONETとVLBI観測から世界測地系で整合する、非定常な地殻変動が平滑化された位置の時系列を決定する手法構築

（補足）VLBIとGPSのコロケーション測量

国土地理院

VLBIと最寄りのGEONET観測点との三次元位置関係について、地上測量による高精度な測量

GEONET



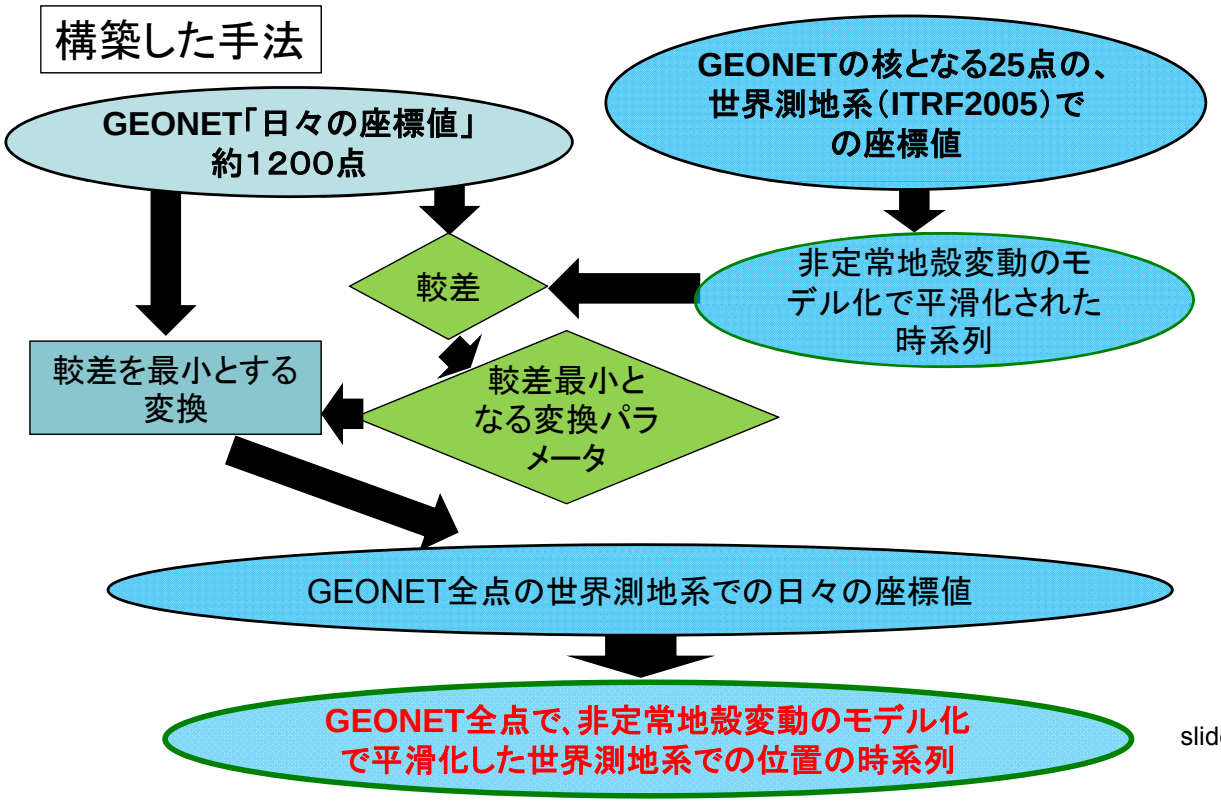
VLBI

姶良観測局の例

（1）①GEONETにおいて、世界測地系の上で日本国内の非定常的な地殻変動をモデル化し、位置の時系列を求める手法の構築

国土地理院

構築した手法



（1）①解析結果の例：世界測地系における位置

国土地理院

GEONET観測点の世界測地系における
日々の座標値（グラフの赤点）

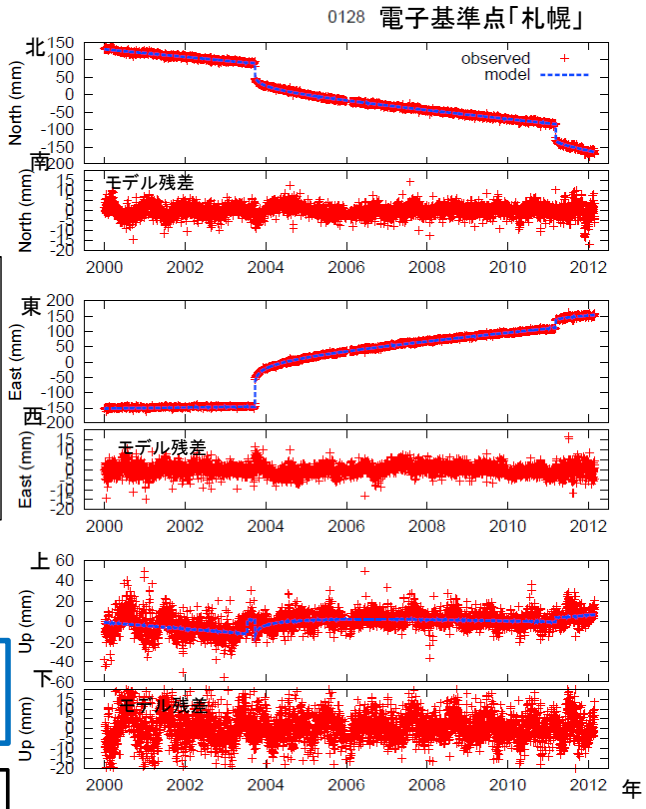
非定常な地殻変動等をモデル化

- 線形変動（地震による速度変化を許容）
- 地震時オフセット
- 余効変動（log型、exp型）
- アンテナ交換によるオフセット

座標値の平滑化

世界測地系でのGEONETの位置の、
平滑化された時系列（グラフの青線）

水平5mm、上下1cm程度の
残差でモデル化

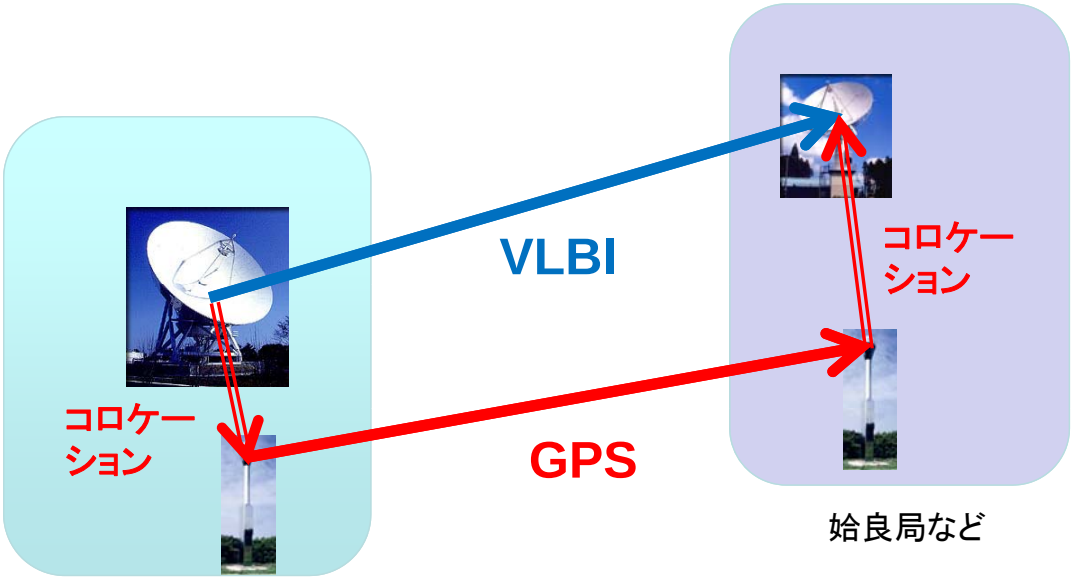


赤点：GEONETの世界測地系における日々の座標値
青線：世界測地系で非定常地殻変動のモデル化で平滑化した位置の時系列

（1）②国内VLBI観測のグローバル解を求め、①との整合性を評価

国土地理院

国内VLBI観測の基線について、VLBIグローバル解と、①の結果（同一サイト内にあるGEONET点間の解）にコロケーション測量結果を組合わせた同一基線間の解を比較



比較1：つくば一姶良

国土地理院

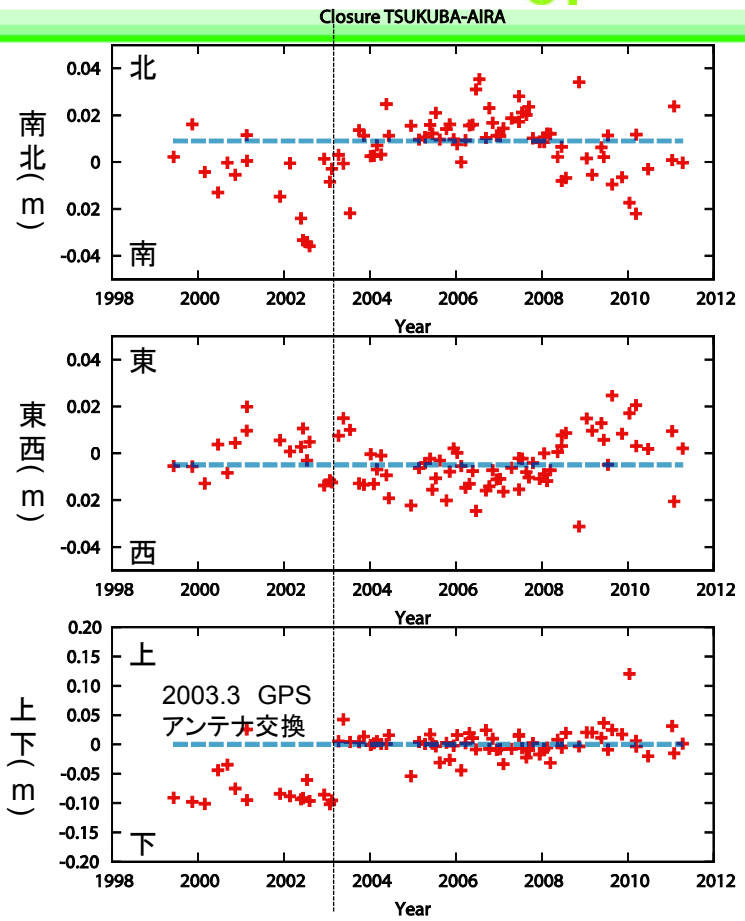
環閉合差の平均※

(北－南, 東－西, 上－下)
=(0.009, -0.005, 0.000)
(単位：m)

有意な差は見られない

※2008年に実施したコロケーション測量成果を使用

※2003年3月のGPSアンテナ交換以降の期間を対象



※10cmでアウトライヤーをカット

比較2：つくば－新十津川

Closure TSUKUBA-SHINTOTSUGAWA

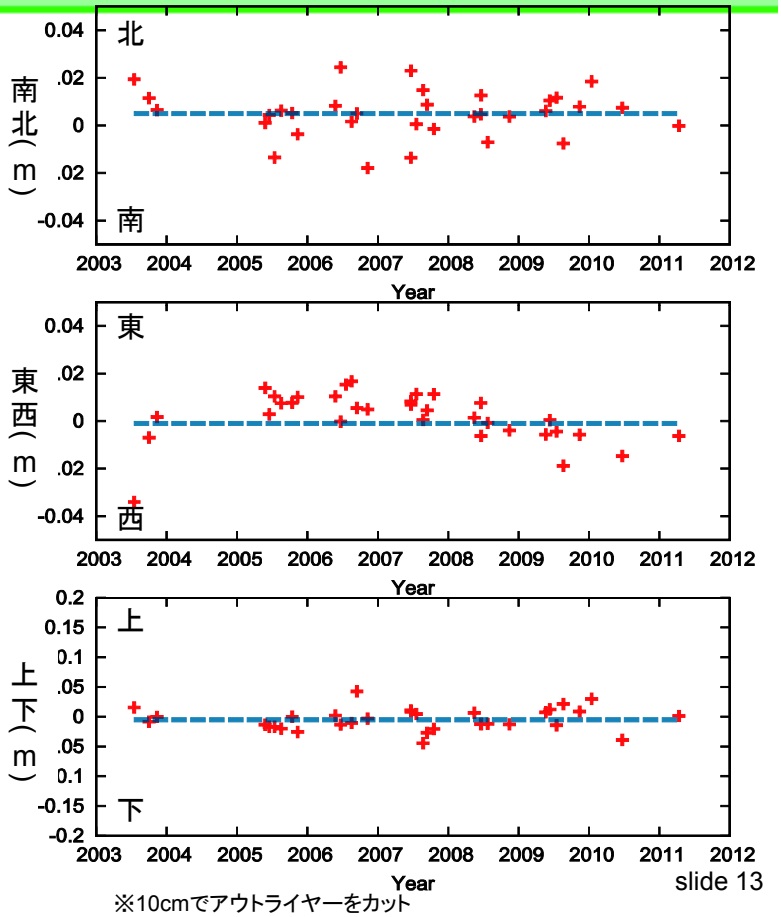
国土地理院

環閉合差の平均※
（2006年以降）

(北－南, 東－西, 上－下)
=(0.005, -0.001, -0.005)
(単位：m)

有意な差は見られない

※2010年に実施したコロケーション測量成果を使用



※10cmでアウトライヤーをカット

比較3：つくば－父島

Closure TSUKUBA-CHICHIJIMA

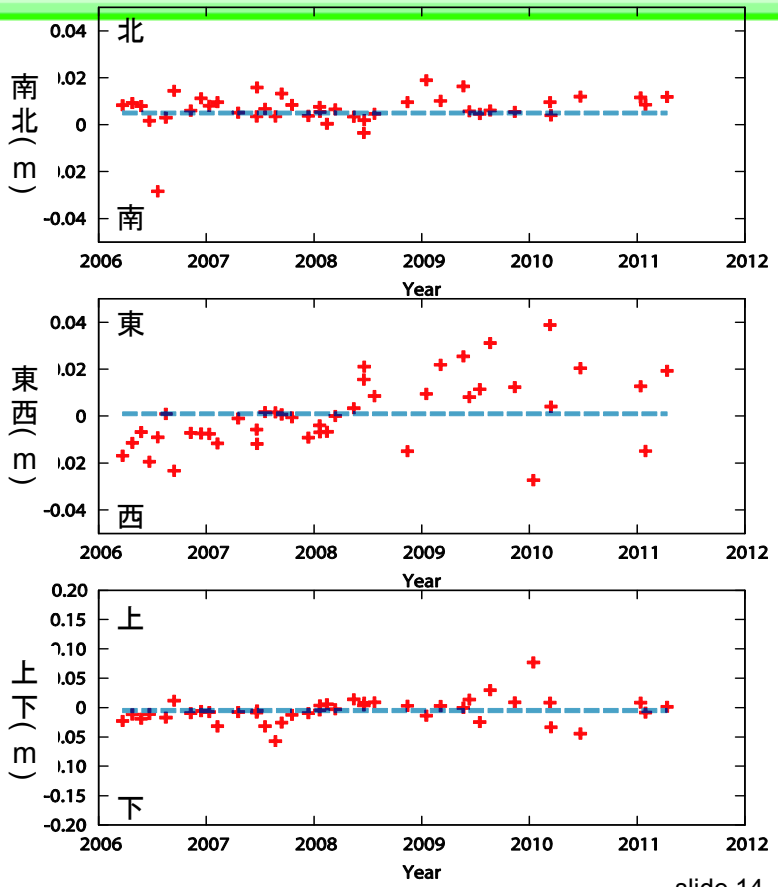
国土地理院

環閉合差の平均※

(北－南, 東－西, 上－下)
=(0.005, 0.001, -0.005)
(単位：m)

有意な差は見られない

※2013年に実施したコロケーション測量成果を使用



※10cmでアウトライヤーをカット

（1）③GEONETとVLBIで整合する、世界測地系での平滑化された位置の時系列決定手法構築

国土地理院

（1）②の比較結果：

- ①の手法で得られたGEONETの位置の時系列は、バラツキの範囲（約1cm）内でVLBIのグローバル観測と安定的に整合＝VLBIとGEONETの統合解析と等価

- GEONETと国内VLBI観測から、世界測地系において整合する、非定常地殻変動が平滑化された位置の時系列を決定する手法として、①の手法を採用

目標（1）　達成

＊今後、より高い精度での整合性が必要となった場合には、GEONETとVLBIの統合解析手法を検討する必要がある

目標（2）VLBI2010に対応した国内VLBI観測の技術指針とりまとめ

国土地理院

① 様々な観測条件下におけるVLBI観測データをシミュレートできるVLBIシミュレーターを導入すると共に、効率良く実施可能なシステムを整備

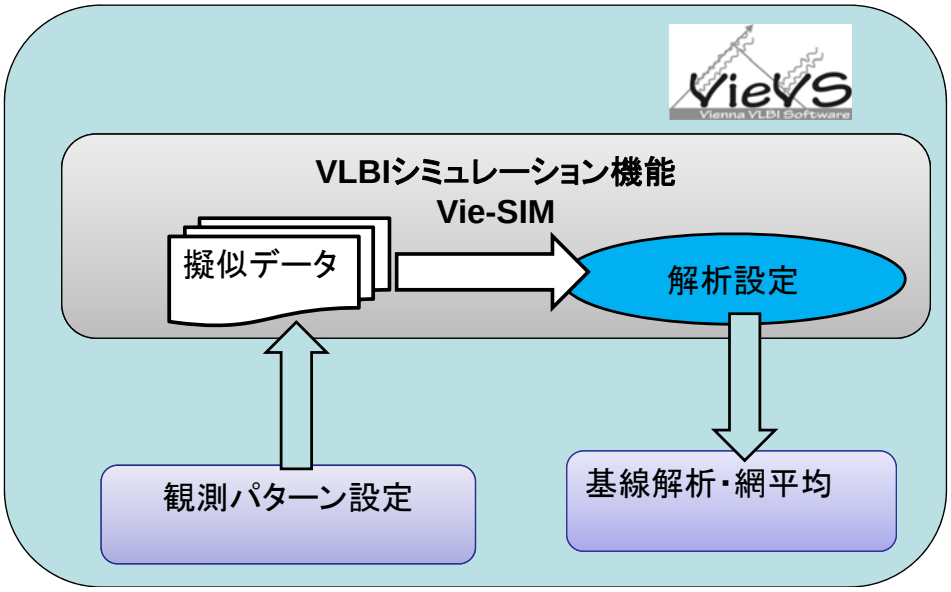
- 観測パターン：観測する準星の組み合わせ、アンテナ駆動速度、受信感度、使用する周波数配列の組み合わせ、チャンネル数（バンド数）　等の組み合わせ
- アウトプット：相関処理後のVLBI観測データ（位相差、遅延時間、変化量）

② このシステムを用いたシミュレーションにより、要求精度に応じた観測パターンをとりまとめ、国内VLBI観測の技術指針を作成

(2) ① VLBIシミュレーターの導入

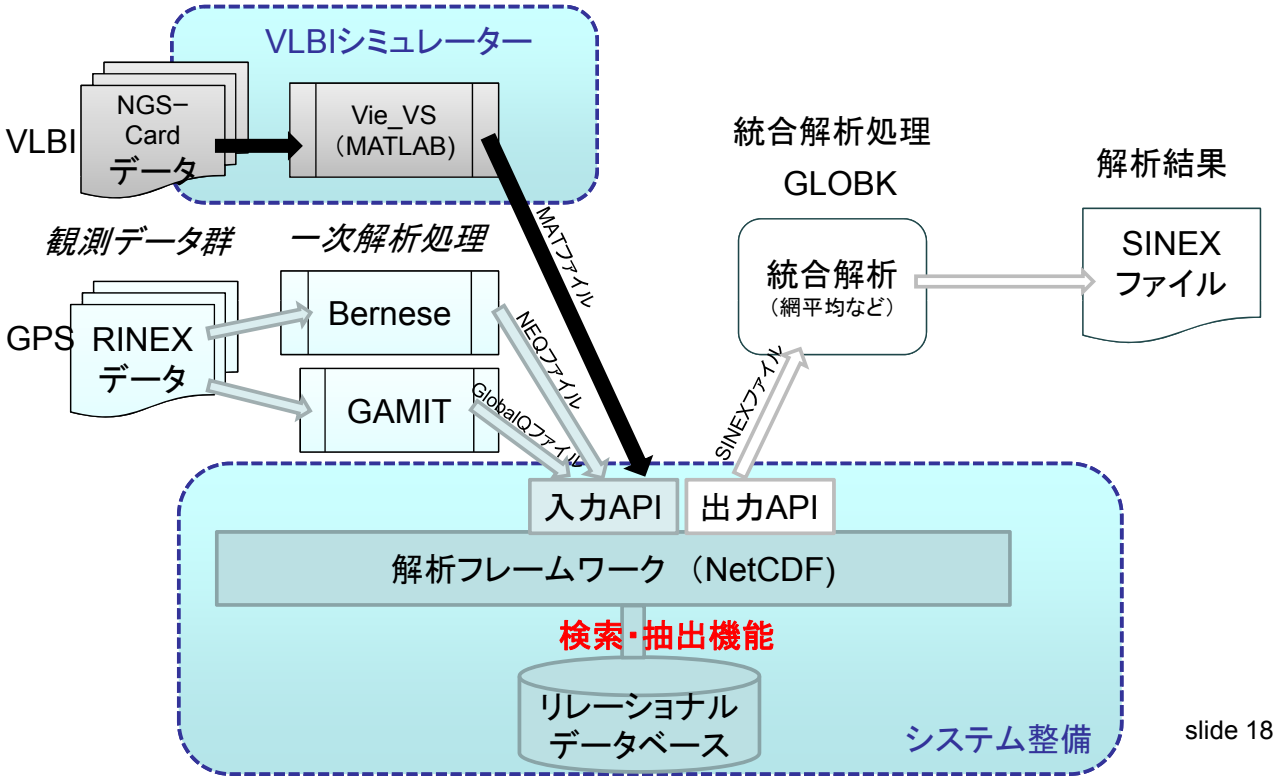
国土地理院

ウィーン工科大学で開発された
VLBI基線解析ソフトウェア「VieVS」を導入



(2) ① 多様な観測条件下におけるシミュレーションを効率良く実施可能なシステムの整備

国土地理院



(2) ② シミュレーションによる国内観測の技術指針の策定

国土地理院

シミュレーションの設定
- 観測基線： 国内VLBI観測の4局6基線
- 期間： 2000～2009年末 毎月観測
- VLBI2010仕様に対応する国内VLBIの観測パターン
  - アンテナ駆動速度 1° ～12° /秒
  - 受信感度（SEFD） 300,000～300Jy*
  - 周波数帯域の範囲 4MHz～1GHz
  - チャンネル数（バンド数） 4ch～16ch

*Jy（ジャンスキー）： 数値が小さいほど、高感度

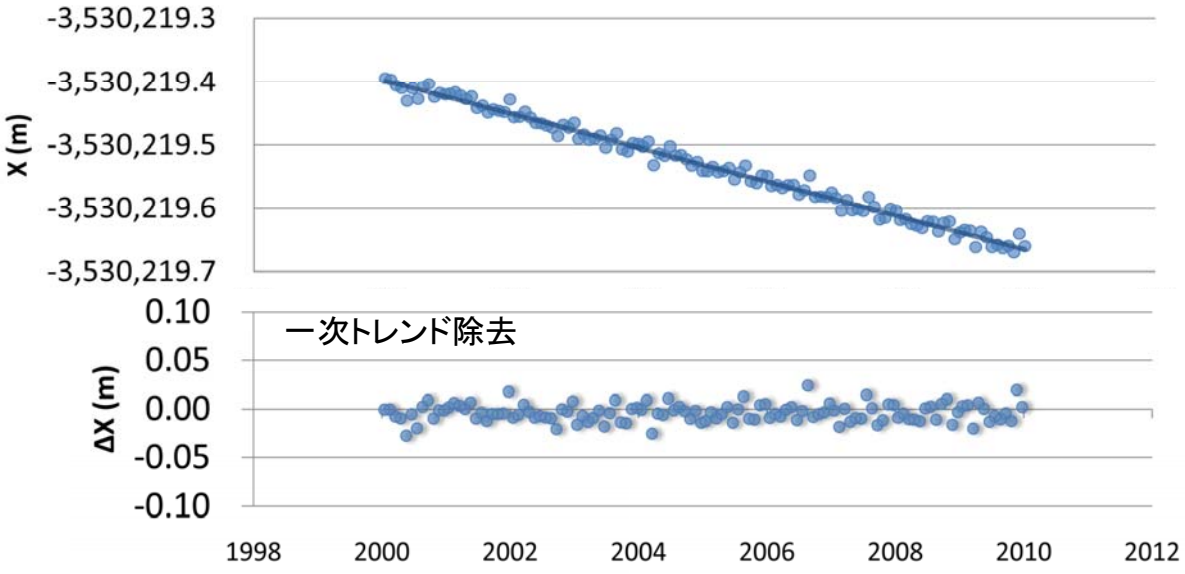
【参考】		【参考】		【参考】	
現行 国内VLBI観測局	(姶良・父島)	現行 つくばVLBI観測局		建設中 石岡VLBI観測局	
駆動速度	3° /秒	駆動速度	3° /秒	駆動速度	12° /秒
受信感度	10,000Jy	受信感度	300Jy	受信感度	2,500Jy
周波数帯域	64MHz	周波数帯域	64MHz	周波数帯域	1,000MHz
チャンネル数	8ch	チャンネル数	8ch	チャンネル数	4ch

VLBIシミュレーション結果の評価例

国土地理院

シミュレーションによる、世界測地系における観測局の座標位置の精度

精度：各観測局位置座標のリピータビリティ 姶良観測局位置 X座標



国内VLBI観測の技術指針のとりまとめ（1）

国土地理院

国内VLBI観測の技術指針抜粋 （バンド幅512MHz)

観測パターン	地方局観測条件項目	地方局アンテナ駆動速度	地方局アンテナ受信感度*	周波数帯域×チャンネル数	基準局 つくば32m or 石岡13m	地方局水平位置のRMS
A	既設地方局	3° /秒	10,000Jy	512MHz (64MHz×8ch)	つくば(300Jy)	6.09mm
A’	既設地方局	3° /秒	10,000Jy	512MHz (64MHz×8ch)	石岡(2500Jy)	8.90mm
B	アンテナ受信感度向上	3° /秒	2,500Jy	512MHz (64MHz×8ch)	つくば(300Jy)	4.70mm
C	アンテナ駆動速度向上	12° /秒	10,000Jy	512MHz (64MHz×8ch)	石岡(2500Jy)	7.02mm

国内VLBI観測の技術指針のとりまとめ（2）

国土地理院

国内VLBI観測の技術指針抜粋 (バンド幅4,000MHz)

観測パターン	地方局観測条件項目	アンテナ駆動速度	アンテナ受信感度	周波数帯域×チャンネル数	基準局 つくば32m or 石岡13m	水平成分のRMS
D	バンド幅向上	3° /秒	10,000Jy	4GHz (1GHz×4ch)	石岡(2500Jy)	7.03mm
E	受信感度＆バンド幅向上	3° /秒	2,500Jy	4GHz (1GHz×4ch)	石岡(2500Jy)	5.17mm
F	VLBI2010仕様	12° /秒	2,500Jy	4GHz (1GHz×4ch)	石岡(2500Jy)	1.23mm
G	極小型アンテナ＆バンド幅向上	12° /秒	300,000Jy	4GHz (1GHz×4ch)	石岡(2500Jy)	8.38mm

(2) ③ シミュレーションによる国内観測の技術指針の策定

国土地理院

- (2)①および②により導入したシステムを用いて、様々な観測条件下における局位置の推定精度を評価(実施中)

⬇

- 要求精度に応じた国内VLBI観測の技術指針

目標(2) 達成見込

成果の活用・波及効果

国土地理院

活用

- GEONETについて、世界測地系における平滑化した位置の時系列と、日々の座標値との比較の継続による、国内の位置基準の監視 (平成25年度～)
- VLBI2010仕様に対応した、将来の超長基線測量(国内VLBI観測)についての方針の策定

波及効果

- 大規模地殻変動の発生に対応する成果改訂のための計算手法および品質評価手法の確立や、発災時の円滑な成果改訂に役立つ
- 本研究で開発した、VLBIシミュレーションを行うシステムは、 国土地理院以外の観測局との共同観測においても、最適な観測計画の立案や精度の予想に貢献すると考えられる。

研究の有効性・効率性

国土地理院

- 有効性

　世界測地系でのGEONET位置の平滑化された時系列とVLBI座標解を比較し、両者に有意な差はなく1cm程度の精度で整合することを示した。本手法は、世界測地系における国内位置基準を監視する上で、有効である。

　高精度なシミュレーションシステムを整備し、国内VLBI観測条件によって達成される精度とりまとめ、将来の国内VLBI観測の方針策定にとって有効な情報が提供された。

- 効率性

　時系列監視手法の開発に際しては、電子基準点の通常解析結果（F3解）を利用し、再解析することなく、効率よく時系列監視を行う手法を採用した。

　国内VLBI観測のシミュレーションデータを用いた精度評価に際しては、シミュレータとして、ウィーン工科大学で開発されたVLBI解析ソフトウェア「VieVS」の活用と、高速にデータを検索、抽出できるシステム整備により、効率的に評価をとりまとめることができた。

まとめ

国土地理院

1. VLBI観測とGEONET観測を時系列的に統合する解析技術の開発

- ✓ 非定常的な地殻変動をモデル化して平滑化したGEONETの位置の時系列は、約1cmの精度でVLBIのグローバル観測と整合
- ✓ GEONET解析手法により求めた時系列位置座標により国内位置基準の監視が1cm精度で可能

2. シミュレーション評価によりVLBI2010仕様に対応した国内VLBI観測の技術指針のとりまとめ

- ✓ 様々な観測条件下におけるVLBI観測データをシミュレートできるVLBIシミュレーターを導入
- ✓ 多様な観測条件下におけるシミュレーションを効率良く実施可能なシステムを整備
- ✓ 要求精度に応じた観測パターンをとりまとめ、国内VLBI観測の技術指針を作成

謝辞

本研究には、ウイーン工科大学開発のVLBI解析ソフトウェア「VieVS」を使用した。ここに謝意を表する。

以下、参考資料

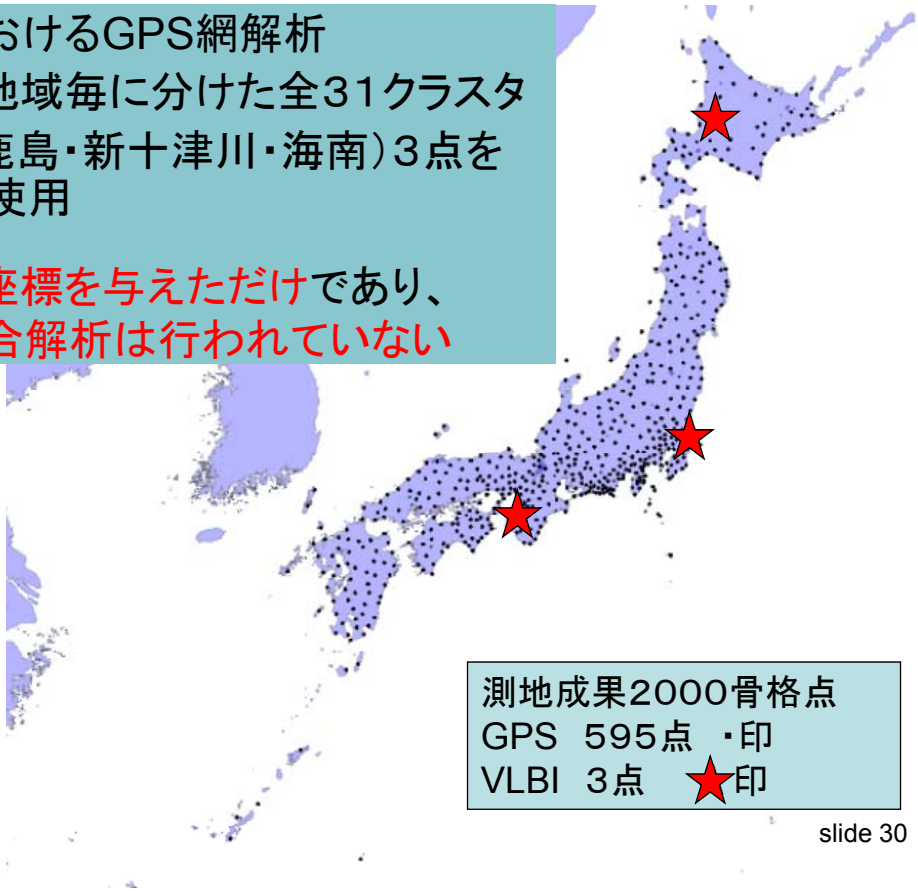
（参考）先行研究

- 測地成果2000（JGD2000）構築
  - 平成9～14年度
- VLBIとGPSの高精度コロケーションに関する研究
  - 平成11～13年度
- 測地基準系精密保持手法に関する研究
  - 特に、つくば地域の上下変動
  - 平成17～21年度
- 一般研究　複数宇宙測地技術の相互比較による高精度測地基準系維持に関する研究
  - 平成20～21年度

（参考）測地成果2000構築手法

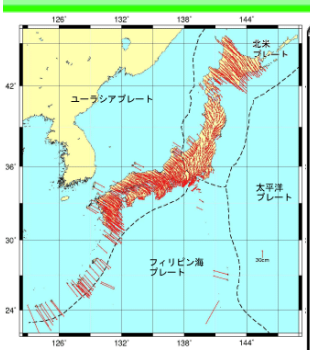
- 測地成果2000におけるGPS網解析
  - 受信機機種と地域毎に分けた全31クラスタ
  - VLBI観測点（鹿島・新十津川・海南）3点を既知点座標に使用

VLBIは既知点座標を与えただけであり、VLBI－GPS統合解析は行われていない

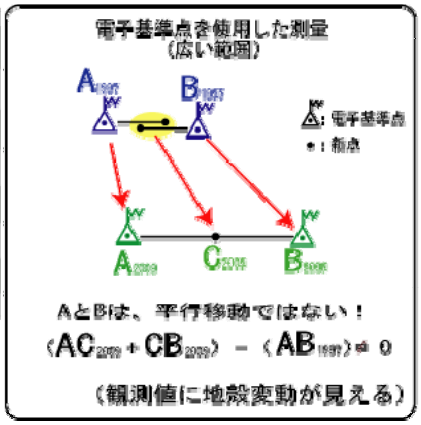


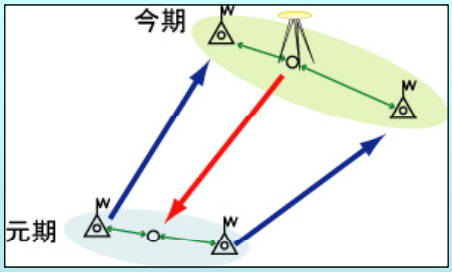
（参考）セミ・ダイナミック補正

国土地理院



地殻変動の
激しい日本列島





今期の観測から、元期において得られたであろう成果を得る

セミ・ダイナミック補正の「補正パラメータ」
元期から今期までに生じた地殻変動を表すもの。
原則として4月1日から翌年3月31日までの年度単位を適用期間とし、毎年更新する。
電子基準点でのGPS連続観測測等で検出された地殻変動量を基に作成
① 前年1月1日から12 月31 日までの1年間の「日々の座標値」（F3解）から定数項、時間に対して1次の項、半年周変動項、年周変動項からなる近似式を推定
② 求めた式を当該年の1月1日に外挿→各電子基準点の1月1日の座標値（今期の座標値）を推定
③ 今期の座標値と、測量成果の元期の座標値との差をパラメータとする
※ 地震発生時には、成果改訂後の日々の座標を使用してパラメータを求める

参考文献：国土地理院HP「セミ・ダイナミック補正」（http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/semidyna/index.htm） ※図は左記HPより引用
檜山他（2010）：セミ・ダイナミック補正の導入について, No.120, 国土地理院時報

国土地理院

（参考）GEONETのデータから、世界測地系の上で、日本国内の平滑化された位置の時系列を求める手続き

使用データ：1996-2012年のGEONET実データ

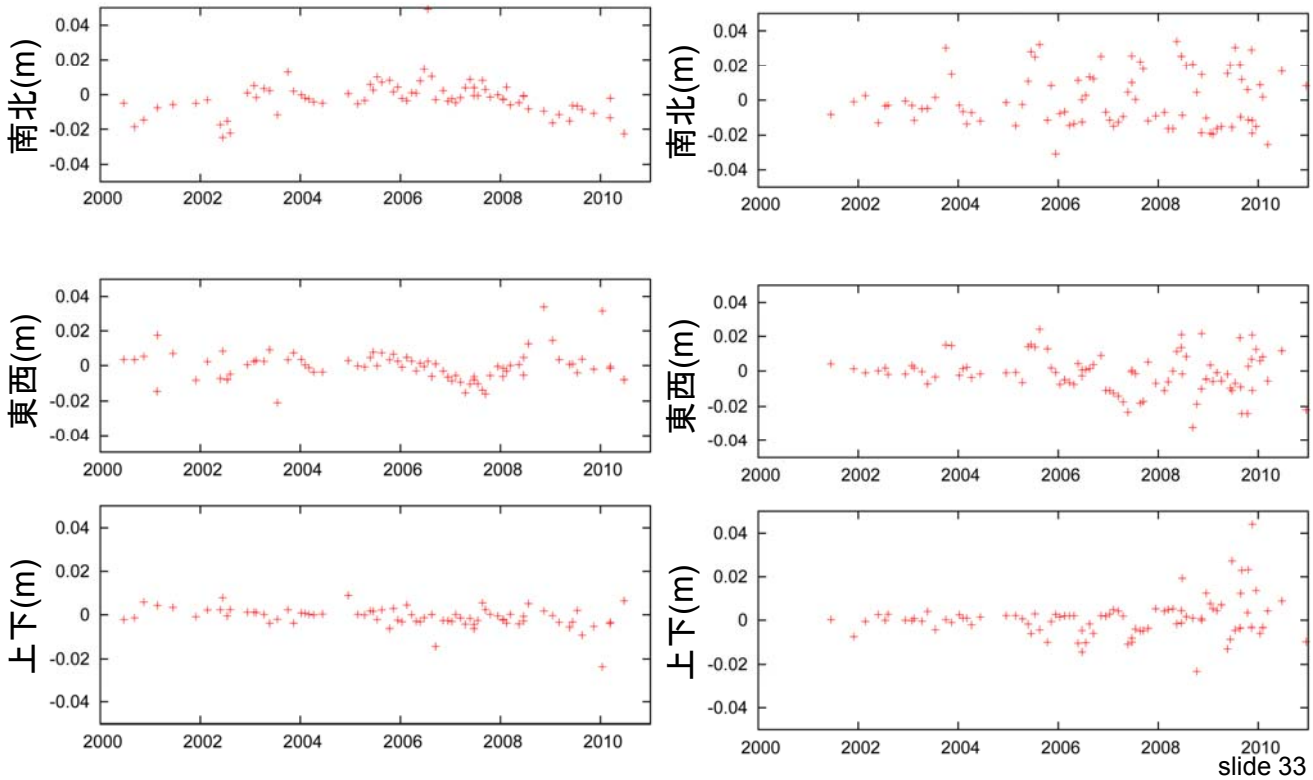
1. GEONETの中から観測点25点を選び、これをIGSの観測点25点と解析して局所的な解の時系列を求める。
2. 1. をMITのグローバル解に結合し、これらの25点についてITRF2005上の座標の時系列を生成する。
3. 2. で求めた座標の時系列を、非定常的な地殻変動をモデル化して平滑化し、GEONETの25点について、世界測地系での位置の時系列（「時系列解」とする）を推定する。
   - 線形変動（地震による速度変化を許容）、アンテナ交換によるオフセット、地震時オフセット、余効変動（log型、exp型）を考慮
4. 3. の時系列解とF3解の時系列との間でHelmert変換パラメータを推定、これを用いてGEONET全点のF3解の時系列を変換して、ITRF2005上の座標の時系列を生成する
5. GEONET全点のITRF2005上の座標の時系列を用いて、3. と同様にして、GEONET全点での時系列解を推定する。

（参考）国内VLBI観測再解析による精度比較

国土地理院

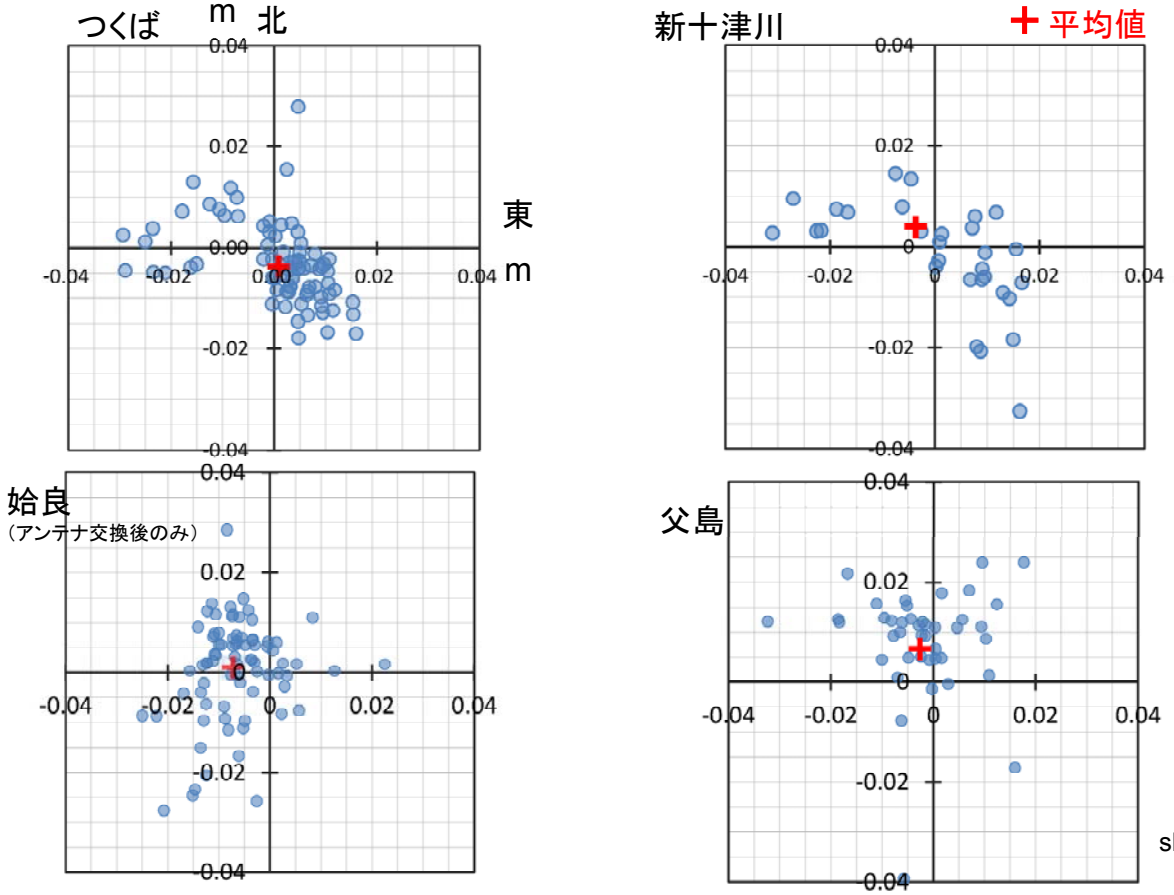
GSI再解析　　NASA GSFC 通常解析

父島VLBI観測局位置座標（上から「南北」「東西」「上下」 いずれも線形トレンド除去）



（参考）グローバル解析の差（VLBI−GPS　水平成分）

国土地理院

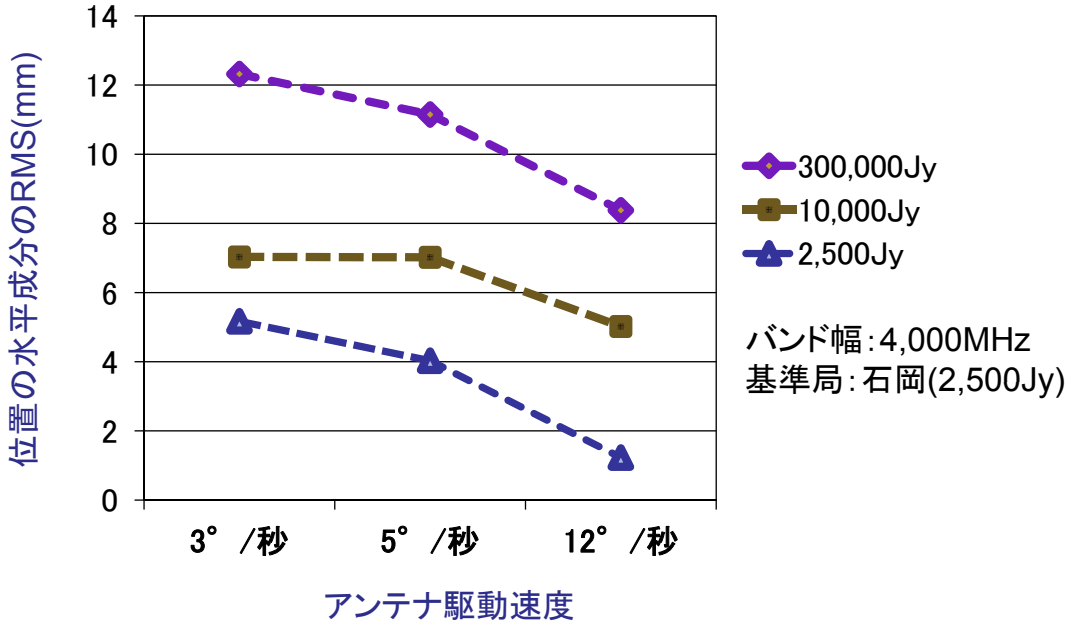


VLBIシミュレーション結果の評価例

国土地理院

シミュレーション観測の評価ポイント
（1）Group DelayのRMS
（2）各観測局位置座標のリピータビリティ

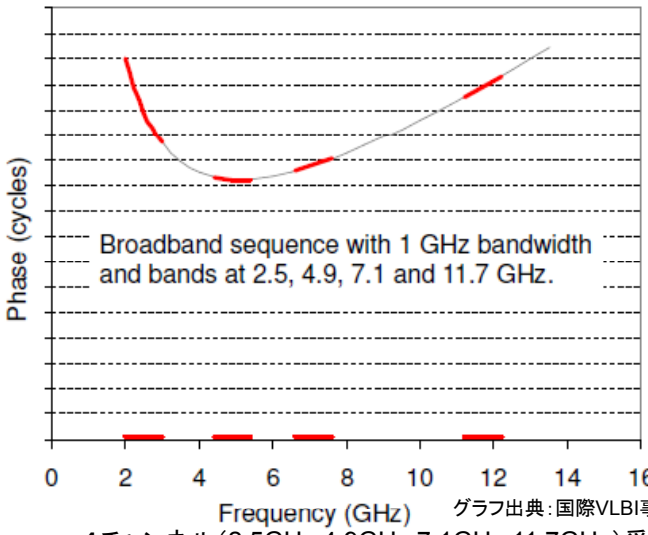
位置座標水平成分のRMS



（参考１）VLBI国際観測における従来手法と新仕様「VLBI2010」の主な違い

国土地理院

- 群遅延量（特定周波数電波の到達時刻差）を用いる手法から、チャンネル間の位相を接続した広帯域遅延量への変更。



グラフ出典：国際VLBI事業(IVS)報告書

分解能は格段に向上

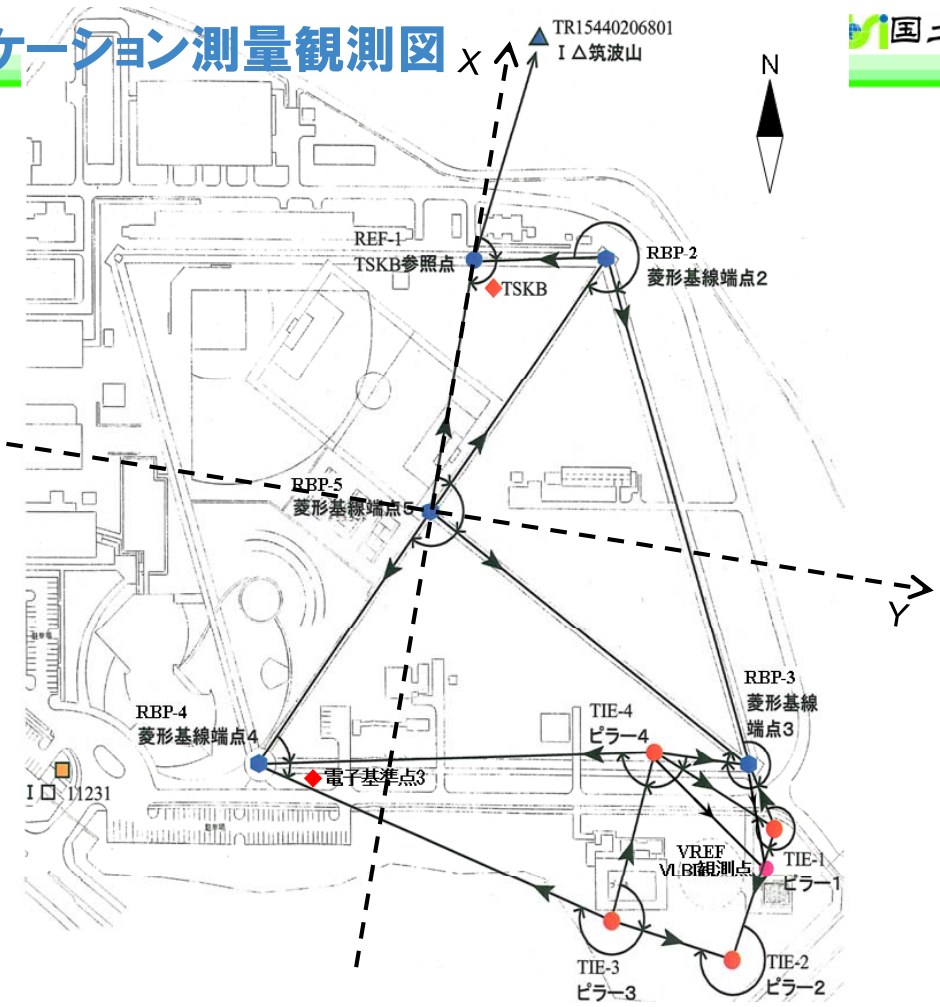
波長の整数倍の不確定性(アンビギュイティー、整数値バイアス)の発生

・・・推定ミスが生じると精度劣化を招く恐れ

4チャンネル（2.5GHz,4.9GHz,7.1GHz,11.7GHz）受信における広帯域遅延量算出のイメージ　高周波帯では波長が短いため位相差は大きくなる。電離層遅延量は、低周波帯の方が遅れが大きくなる。→グラフに示すような5GHz付近で極小となる位相補正をした上でチャンネル間の位相接続が必要となる。

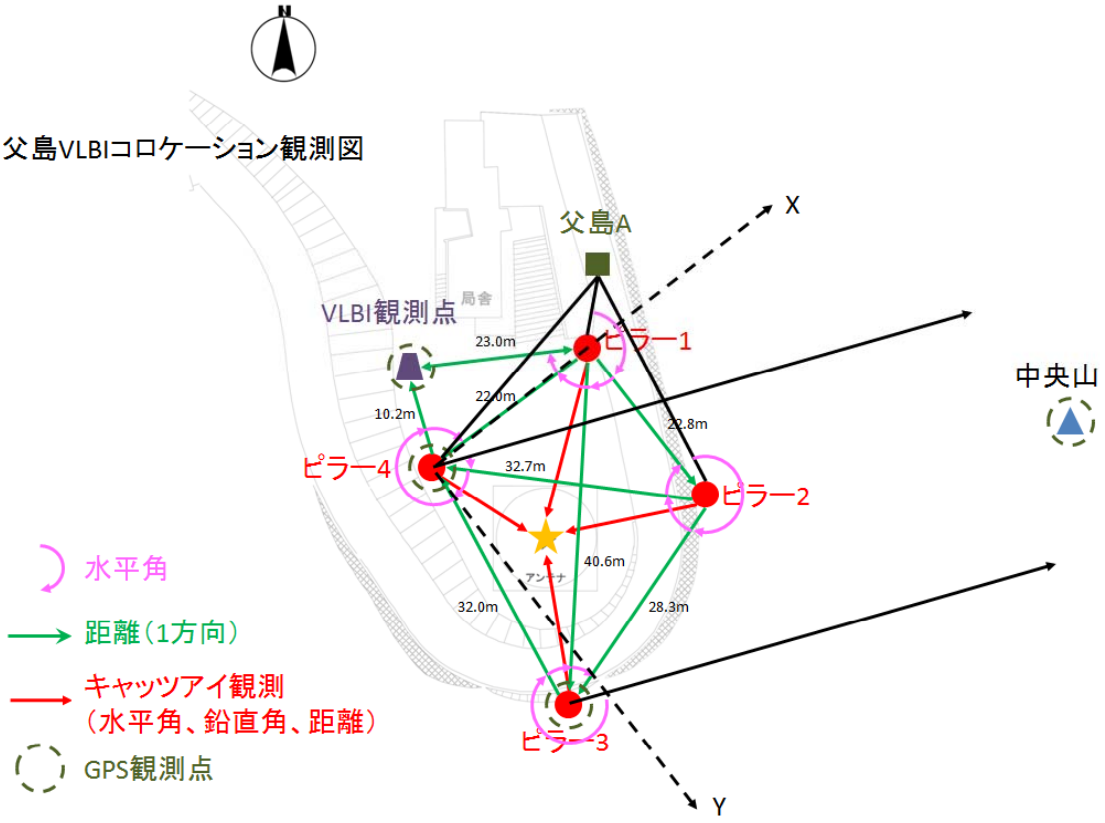
つくばコロケーション測量観測図

国土地理院

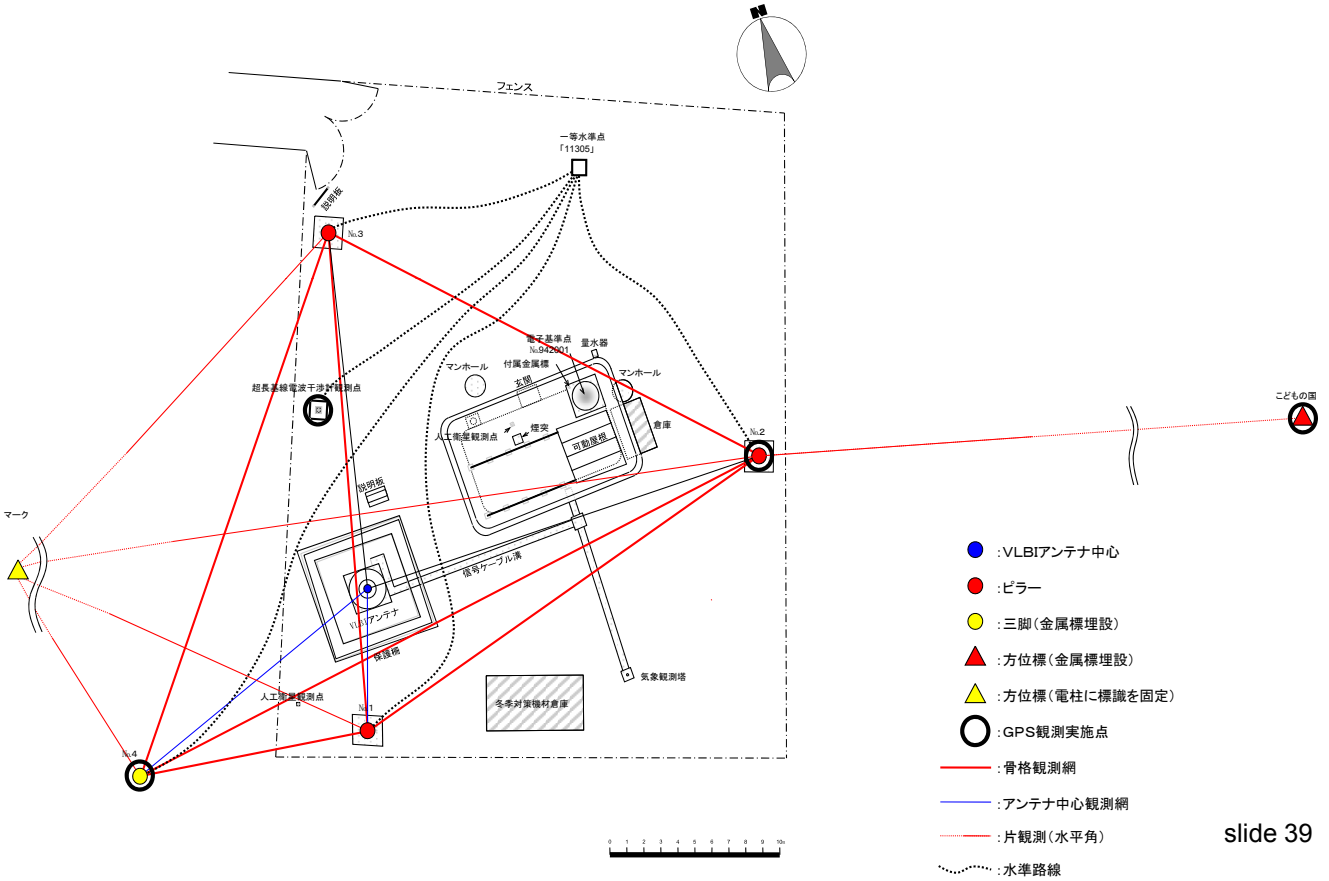


父島コロケーション測量観測図

国土地理院



新十津川コロケーション測量観測図



用語集

世界測地系	VLBIやGNSSなどを用いた宇宙測地技術による国際的な観測により、地球の正確な形状と大きさなどに基づき、国際的に高精度に決定された測地基準系。
国家測量成果	測量の基準として、与えられる特定の時点(基準日)における基準点の経度、緯度、高さの値。
GEONET:GNSS Earth Observation Network System (GNSS連続観測システム)	全国約1,240ヶ所に設置された、GNSS連続観測を行う電子基準点と、観測されたデータを収集し解析する中央局(茨城県つくば市)とで構成され、正確な位置を常時求めるシステム。わが国の高精度な測量網の構築と広域の地殻変動監視に用いられている。
セミ・ダイナミック補正	測量成果の基準日(測地成果2000:1997年1月1日、測地成果2011:2011年5月24日)以降の地殻変動による歪みの影響を、国土地理院が提供する「地殻変動補正パラメータ」を用いて、測量の計算過程で補正する方法。これにより、公表されている基準点の測量成果と新たに測量して得た観測結果との間に生じていた地殻変動の影響が軽減されるため、高精度な測量が可能となり、位置情報の一層の利活用が期待できる。
IVS:International VLBI Service (国際VLBI事業)	国際VLBI観測や技術開発等を円滑に推進するため、超長基線電波干渉法(VLBI)の観測データや解析結果を提供する非営利組織による取り組み。1999年に設立され、国際協力により世界的なVLBI観測網を運用し、観測データの解析によって地球姿勢パラメータ、観測局の位置を常時算出するほか、高精度な国際地球基準座標系の確立と保持を行っている。
IGS:International GNSS Service (国際GNSS事業)	測地学・地球物理学等の研究活動を支援するため、全世界的衛星測位システム(GNSS)の観測データや解析結果を提供する非営利組織による取り組み。1994年に国際測地学協会が国際GPS事業として設立し、2005年に国際GNSS事業へ改名。国際協力により世界的なGNSS観測網を運用し、観測データの解析によってGNSS衛星の精密暦、極位置等の地球姿勢パラメータ、観測局の位置を常時算出するほか、高精度な地球基準座標系の確立と保持を行っている。

用語集

国土地理院

VLBI：Very Long Baseline Interferometry （超長基線電波干渉法）	宇宙のはるか彼方にある星（準恒星状天体）から届く電波を、遠く離れた地点に設置された複数のパラボラアンテナで同時に受信することによって、数千キロメートルの距離をミリメートルの精度で測る技術。地球の大きさやプレート運動の様子および地球の自転の速さなど調べるために使われる。
GNSS：Global Navigation Satellite System （全世界的衛星測位システム）	地球を周回する人工衛星からの信号を用いて全球規模で位置を決定する衛星測位システムの総称であり、米国の運用するGPSが代表的。GPS以外にも、我が国の準天頂衛星システム、ロシアのGLONASS（グロナス）、ヨーロッパ連合のGalileo（ガリレオ）、中国の北斗などがある。
ITRF：International Terrestrial Reference Frame （国際地球基準座標系）	高精度な座標値を持った、宇宙測地技術観測局から成る地球基準座標系。VLBI,GNSS,SLR,DORISの４種類の宇宙測地技術を用いた国際的な観測により求められた座標値を組み合わせて算出される。
VLBI2010	国際VLBI事業（IVS)が２００９年に公表した次世代VLBI観測システムの仕様。地球規模の諸現象解明に資するため、１）1mmの位置決定精度、２）常時連続観測、３）迅速な解析結果算出を目標として設計された。
測地基準系	地球上の位置を表わすための基準。 通常、地球上の位置は、地球の形に最も近いものとして定義された回転楕円体に基づいた緯度・経度と、平均海面を基準とした高さで表現される。
基準点	電子基準点、三角点や水準点など、測量の基準となる位置情報として、緯度、経度及び高さ等を成果として有する点。

用語集

国土地理院

測地成果2000	世界測地系に基づく、我が国の測地基準点（電子基準点・三角点等の測量）成果。従来の日本測地系に基づく成果と区別するための呼称。測地成果2000での緯度・経度は、世界測地系であるITRF94座標系とGRS80（Geodetic Reference System 1980：測地基準系1980）の楕円体を基準として表している。標高については、東京湾平均海面を基準に表している。
測地成果2011	平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震とその余効変動に伴い、広域にわたって日本列島の位置が大きく変化した。そのため、日本経緯度原点及び日本水準原点の原点数値が改正されるとともに広範囲にわたって改定された測量成果。 測地成果2011は、現在、我が国の最新の測地基準点成果である。測地成果2011での緯度・経度は世界測地系であるITRF2008座標系とGRS80（Geodetic Reference System 1980：測地基準系1980）の楕円体を基準として表している。標高については、東京湾平均海面を基準に表している。
余効変動	地震後に観測される、長期間にわたって緩やかに継続する地殻変動。
環閉合／環閉合差	水準測量やGPS測量において、始点と終点が一致する路線を一周するように観測した場合の始点と終点の座標差。理論的には、環閉合差は0となるべきであるが、観測誤差などにより必ずしも0とならない。観測精度の評価に使われる重要な指標である。
VLBIシミュレーター	宇宙のはるか彼方にある星（準恒星状天体）から出される電波を想定し、設定したVLBI局間で受信される位相差、遅延時間、遅延時間変化量等の観測について、誤差を統計的に加えた上で模擬的にデータを生成するシステム。
VLBI-GPS統合解析	２つの観測局間においてVLBIとGPSのそれぞれの技術で観測を行うと、両技術の特性の違いから、観測結果（２点間の距離や方向）にわずかな違いが生じる。VLBI-GPS統合解析は、この２つの結果を統合し、観測局の地球上の正確な位置（絶対位置）を高精度に求めるための解析である。 なお、VLBI-GPS統合解析を行うためには、VLBI、GPSそれぞれによる両観測局間の観測だけでなく、同一観測局内においてVLBIアンテナとGPSアンテナ間の位置関係を求めるためのコロケーション測量結果も必要となる。

資料１－４

研究課題終了時評価表　（分科会で評価委員が記入）

１．提案課・室名問合せ先

国土地理院 地理地殻活動研究センター宇宙測地研究室

TEL：029-864-1111(内8333)　　FAX：029-864-2655

２．研究課題名

世界測地系における国内位置基準の監視の高度化に関する研究

３．研究期間

平成２２年４月　～　平成２５年３月　（３年間）

４．予算

特別研究 ２２，８５８千円（３年間の総額）

５．分科会委員

○里村　幹夫、田部井　隆雄、日置　幸介

（以下についてご記入をお願いします。）

６．成果の概要

VLBI 観測と GPS の GEONET 観測結果を時系列的に統合する研究を行った。そして開発した方法によるコロケーション観測を行うことにより、すべての電子基準点が世界測地系において 1 cm程度の精度で監視できていることが分かった。また、VLBI2010 使用に対応した国内 VLBI 観測の技術指針を取りまとめた。

７．当初目標の達成度

GEONET の通常の解析解をグローバル GPS 解析に整合させ、その座標値から定常変動・非定常変動をモデル化する方法を構築した。その結果、国内 VLBI による世界測地系における位置情報と整合する解析解が得られるようになった。また、VLBI2010 仕様での国内の VLBI 観測についてのキョクイチの推定誤差のシミューレーションを行い、要求制度に応じた観測を行う技術指針を取りまとめた。以上のことから目標はほぼ達成されている。

８．成果公表状況

研究報告書 3 件、口頭発表 2 件であり、論文発表が期待される。

９．成果活用の見込み

今回確立した手法は、今後の日本の測地系の監視に利用できる。また、VLBI 観測の技術指針は今後の VLBI 観測の方策決定に活用される。

10．達成度の分析

GEONET 観測の解析データを再解析することなく、VLBI の観測結果と適合する結果が得られていることを確認できた。また、今後の VLBI2010 仕様の観測を行うための技術的指針ができた。

11．残された課題と新たな研究開発の方向

VLBI2010 仕様の技術指針はできたが、実際に観測を行うのはこれからのことであり、観測を開始するとさまざまな問題点が浮かびあがってくることが考えられる。今後の検討が必要である。

12．その他、課題内容に応じ必要な事項
　特になし。

13．総合評価　　①．十分な成果　　２．一部不満足　　３．部分的成果　　４．失敗
　GEONET の F３解が、VLBI の座標値と１cm程度で整合していることが確認できたのは成果であった。今後の VLBI2010 仕様の観測に期待する。

※６～13 についてコメントのご記入をお願いします。13 は 1～4 のいずれかに○をし、研究成果に対する、総合評価を、記載してください。

資料１－５

新規研究課題提案書

１．研究課題名

世界測地系における新手法による国内位置基準の監視に関する研究

２．研究制度名

特別研究

３．研究期間

平成２２年　４月　　～　平成　２５年　３月　（３年間）

４．課題分類

(1)地理空間情報を円滑に整備・流通・活用するための研究開発

(4)地球と国土を科学的に把握するための研究

５．研究開発の背景・必要性

国土地理院は国家の位置基準を管理する機関として、超長基線測量（VLBI）や電子基準点測量（GPS）等により、我が国の測地基準系を維持管理している。平成 14 年に公表された測地成果 2000 では、その基準系構築において、VLBI 観測局を既知点とし、1997 年 1 月 1 日現在を元期に前後 6 日間の GPS データから求められたスタティックな測地系が採用された。しかしながら、日本列島は４つのプレート境界に位置し、火山活動や地殻変動の激しい地域であり、年月の経過とともに国家測量成果の劣化が問題となっている。そこで、その成果劣化を防ぐために、時系列データを用いてそれらの非定常変動を把握することのできる、測地基準系を監視する手法の開発が求められる。グローバル観測結果に基づいて世界測地系の中での日本列島の動きを正確に捉え、その上で国内の測地基準系を維持するには、特性の異なる VLBI と GPS の観測について、個々の技術の違いを考慮して統合する解析手法の研究に取り組む必要がある。

一方、日本の測地基準系構築の骨格となる VLBI 観測技術に関し、国際的な VLBI 観測事業（IVS）では高精度化を目指した新しい観測仕様へ近年中に移行することとなった。国内位置基準の時系列的な監視には、国際的な観測とともに、それと結合した国内観測が継続して行われる必要がある。国内 VLBI 観測について、新たな仕様による国際的な VLBI 観測網と結合した観測を継続させるため、新手法を効果的に取り入れた観測の仕様や条件を検討し、対応策を策定しなければならない。国際観測における従来手法からの最も大きな違いは、群遅延量（電波の到達時刻差）を用いる手法から、位相遅延量(電波波形の位相差)を用いる手法に変わる点である。この変更により分解能は格段に向上するが、逆に、波長の整数倍の不確定性(アンビギュイティー、整数値バイアス)を生じることとなり、その推定ミスが生じると精度劣化を招く恐れがある。したがって、その不確定性の決定率などの精度評価を行い、日本の基準点位置監視において最適な国内 VLBI 観測条件の選択や解析仕様をとりまとめることが必要である。

６．研究開発の目的・目標

本研究は、VLBI観測とGPS観測を用いて世界測地系における日本の測地基準系の位置を監視する手法を構築することを目的とする。本目的を達成するための基礎研究として、VLBI観

測とGEONET観測を時系列的に統合する解析技術の開発、新手法と従来手法によるVLBI観測とGEONET観測の統合解析をシミュレーション技術により評価し、新手法による国内VLBI観測の技術指針をとりまとめることを目標とする。

７．研究開発の内容

本研究では、世界測地系における日本列島の位置変化を監視する最適な手法として、VLBIとGPSを用いた国際および国内観測の統合解析により、国内測地基準点位置を時系列的に把握する手法を用いる。両者の統合においては、過去に蓄積された10年間以上の時系列データを用いて、個々の解析技術の違い等を検証し、それらを整合させた上で、日本列島の変動を正しく捉えられる統合解析手法を開発する。

また、VLBIシミュレーターを整備し、観測する準星の組み合わせや使用する周波数配列の組み合わせなど、多様な観測条件設定におけるシミュレーションデータの生成を行う。多条件設定下で生成したVLBIシミュレーションデータとGEONETのシミュレーションデータについて、開発した手法により運用可能な組み合わせにおいて統合解析し、日本測地基準系の監視に最適なVLBI観測条件を探索する。その結果を基に、将来の国内VLBI観測仕様提案を取りまとめる。

８．研究開発の方法、実施体制

＜研究開発の方法＞

VLBIシミュレーター整備では、IVS、NICT（情報通信研究機構）等により開発された既存のVLBIシミュレーターをもとに、新手法も含めた国内VLBI観測に適用できるように改良する。VLBIシミュレーターにより多条件設定下に生成された観測データとGEONETシミュレーションデータを用いて、開発された統合解析手法による精度評価を行い、日本測地基準系の最適な監視が見込まれる、新手法による国内VLBI観測の仕様をとりまとめる。

＜研究開発の実施体制＞

主任研究官１名が主体となり、VLBIシミュレーター整備に関してはIVS、NICT等との協力、VLBI及びGEONET観測データ収集に関しては国土地理院測地部及び測地観測センターとの連携、各種測地技術の解析手法に関しては各技術に精通した研究室長及び主任研究官、研究官との協力体制により実施する。

９．研究開発の種類

(1)基礎研究

10．現在までの開発段階

(1)研究段階

新手法によるVLBI技術を活用した基準系構築手法に関しては、統合解析手法も含めて新たに研究を必要とする段階である。

11．想定される成果と活用方針

VLBI 観測と GEONET 観測により、日本の測地基準系を時系列的に監視可能な統合解析技術が確立する。新手法による国内 VLBI 観測仕様である超長基線測量作業規程（案）がとりまとめられ、新手法 VLBI 技術を導入した将来の国内 VLBI 観測についての方針策定に資する。

これにより、国際 VLBI 観測網と結合した国内 VLBI 観測の継続を図り、世界測地系における国内位置基準の監視を進め、日本の測地基準系の構築及び精密保持に寄与する。

12. 研究に協力が見込まれる機関名

独立行政法人情報通信研究機構、海上保安庁海洋情報部、独立行政法人自然科学研究機構国立天文台、独立行政法人産業技術総合研究所、独立行政法人防災科学技術研究所、東京大学地震研究所、韓国国土地理情報院、国際VLBI事業

13. 関係部局等との調整

情報通信研究機構及び国際VLBI事業から既存のVLBI一提供について協力要請する。　宇宙測地技術による観測を実施している海上保安庁海洋情報部と本研究成果の検証に用いるためのデータ交換について調整をはかる。

14. 備考

特になし

15. 提案課・室名、問合せ先

国土地理院地理地殻活動研究センター宇宙測地研究室
茨城県つくば市北郷１番
TEL：029-864-1111(内線8333)　　FAX：029-864-2655

新規研究課題事前評価表

１．研究課題名

世界測地系における新手法による国内位置基準の監視に関する研究

２．研究制度名

特別研究

３．研究期間

平成２２年　４月　　～　平成　２５年　３月　（３年間）

４．研究開発の方向の妥当性

平成 21 年度からの国土地理院研究開発基本計画の重点研究開発課題(1)②「位置情報基盤の維持・管理・提供の高度化のための研究開発」及び(4)②「地球と国土の科学的把握に基づく測地基準系の高度化に関する研究」に位置づけられる。本課題は、測地基準系の維持・品質の向上のため、VLBI、GPS、水準測量等の異なる測地観測について整合性を向上させた統合解析を行う手法の研究開発及び地球表層流体の挙動や固体地球との相互作用など地球ダイナミクスの解明や、それによる地殻の非定常な変動の把握に関する研究を通じて、実用化に向けた知見・成果等が得られることに目的があり、本研究の方向は、国土地理院研究開発基本計画に照らし合わせ、適切である。

５．国内・国際的研究状況を踏まえての実施の妥当性

国際VLBI事業における測地VLBIの具体的な新手法が、2009年（平成21年）4月に提案され、国際的なVLBI観測事業は新しい仕様へ順次移行することとなった。国際測地基準系と整合した高度な日本の測地基準系の監視を実現するためには国際VLBI観測網と結合した国内VLBI観測を継続して行うことが必要であり、国内VLBI観測について、国際観測の新手法への移行に対応する方策を検討しなければならない。そのため、国内VLBI観測局において国際的な新しい仕様をそのまま導入することが適切か、どのように適合させることが有効かを評価し、国内VLBI観測の仕様をまとめることが必須である。また、観測の継続を図るためには、本研究を今開始することが時宜を得ている。

本研究は、国際的な動向を踏まえており、適時性もあることから実施は妥当である。

６．背景・必要性の妥当性

平成14年の測地成果2000の導入から７年が経過し、地殻変動等に伴う成果劣化が課題としてあげられてきた。また、平成19年に「地理空間情報活用推進基本法」が制定され、測地基準点成果は位置情報サービス等の測位に関する分野など国民生活の基盤的情報としての活用の更なる拡大が期待され、世界測地系における測地基準系の精密維持に対する必要性も高まっている。したがって、我が国の日本の測地基準系を精密に監視する手法を開発する本課題は妥当である。

７．目標設定の妥当性

世界測地系における基準点位置の精密な監視には、国際地球基準系の構築、維持で実行されているように、VLBIやGPSなど、異なる特性を持つ複数の宇宙測地技術による国際、国内観測を

統合的に解析することが必要である。複雑なプレート収れん境界に位置する我が国においては、定常的および非定常的な地殻変動が複雑に生じているため、VLBIとGPSによる国際観測と結合した国内観測を継続するとともに、それらの観測からプレート境界に特有なものを含め変動を精密に把握するために時系列的な観点による統合的な解析手法の開発が必須となる。本課題では、VLBI観測とGEONET観測の時系列的に整合した統合解析手法を開発するとともに、我が国の測地基準系の監視の骨格をなす国内VLBI観測を継続させるために必要となる、国際VLBI観測の大きな仕様変更に対応可能であり、また、監視目的に最適化された国内VLBI観測の仕様を提案することが目標とされている。これらは、本課題の必要性に合致しており、妥当である。

８．国土地理院が実施すべき妥当性

本課題は我が国の測地基準系の維持に必要な研究開発であり、国家の位置基準を管理する機関として国土地理院が実施すべきである。

９．内容、方法、実施体制の妥当性

＜内容の妥当性＞

季節変化や地殻変動等の激しい日本列島の基準点位置を世界測地系において監視するためには、特性の異なるVLBIとGPS観測について、国際観測と結合した国内観測を含め、時系列的に整合した統合解析手法が欠かせない。そのため、国際、国内観測を含めた実観測データに基づき、整合性に着目して開発を行うことは妥当である。

今後導入が見込まれる新手法VLBI技術について、シミュレーション手法により事前に品質を評価し、国内観測における対応仕様や作業規程に指針を与えることは、国際VLBI観測と結合した国内VLBI観測を継続するため、時期も含めて妥当である。更に、シミュレーション手法により生成された多条件設定下のVLBIデータとGPSデータを統合解析することにより精度評価を行うことは、日本の測地基準系監視の観点から将来の国内VLBI観測について最適な指針を与えることが可能となるため、妥当な内容である。

＜方法の妥当性＞

実データを用いる開発方法は、モデル化されていない変動を明らかにし、特性の異なるVLBIとGPS観測を時系列的により高品位に統合解析する手法開発を可能とするものであり、VLBIとGPSの国際、国内観測について既に10年以上のデータ蓄積があることから、妥当である。国内VLBI観測における新手法観測仕様の検討について、既存観測施設では新手法に基づく実データを取得することができないため、シミュレーションデータを用いた統合解析による評価を行うことは、国際VLBI観測と結合した国内VLBI観測を継続する観点から、研究方法として妥当である。また、新手法を取り入れたVLBIシミュレーター整備において、既存のVLBIシミュレーターを改造することにより実行する方法は、効率性の面で妥当である。

＜実施体制の妥当性＞

宇宙測地研究室では、GNSSシミュレーションデータを生成する衛星測位システムーを開発するなど、各測地技術に精通した研究者を有しており、協力体制下で実施することにより十分な成果を得られることが期待できる。また、一般研究「複数宇宙測地技術の相互比較による高精度測地基準系維持に関する研究(H20-21)」を通じて、統合解析技術の基礎的な知見を有している。さらに省内、他機関との連携も含まれており、研究に必要な情報やデータを入手できる見込みであることから、実施体制は妥当である。

10. 省内他部局等との調整の状況

海上保安庁海洋情報部は、国土地理院では有していない宇宙測地技術の一つである人工衛星レーザ測距（SLR）下里局を有しており、本研究を推進するに当たり、参考情報として、データ提供等の協力依頼を行う予定である。

11. 他省庁、異分野等との連携方針等

国際VLBI事業、独立行政法人情報通信研究機構、独立行政法人自然科学研究機構国立天文台、独立行政法人産業技術総合研究所、独立行政法人防災科学技術研究所、東京大学地震研究所等の宇宙測地技術や地殻変動解析技術を有している機関と情報交換を実施する方針である。また、韓国国土地理情報院では、測地VLBI観測局の建設に着手しており、日本国内のVLBI観測網との連携を検討する予定である。

12. 成果活用方針の妥当性

世界測地系における我が国の正確な位置は、測量地図分野のみならず、航法や位置情報サービス等の測位に関する分野においても幅広く必要とされる基盤情報である。位置情報を正確に知るニーズは非常に高まってきており、そのような時代背景をふまえて、基本測量長期計画では、「①位置情報基盤の確立」の中で、「イ　基準となる座標系の維持管理と多様な座標系への対応」が掲げられている。本研究課題成果は、国際および国内 VLBI 観測事業及び GEONET 観測と組み合わせて、世界測地系における国内位置基準の監視を実行するためのものであり、それにより日本の測地基準系の構築・及び精密保持に活用され、我が国の位置情報基盤の高度化に寄与し、社会的ニーズとも合致しているため妥当である。

13. その他、課題内容に応じ必要な事項

特になし

14. 提案課・室名、問合せ先

国土地理院　地理地殻活動研究センター　宇宙測地研究室
茨城県つくば市北郷１番
TEL：029-864-1111(内線8333)　　FAX：029-864-2655

世界測地系における新手法による国内位置基準の監視に関する研究

世界測地系における測地基準系の維持

プレート運動等により基準点位置は数cm/年の割合で変化 → 位置変化の監視が必要

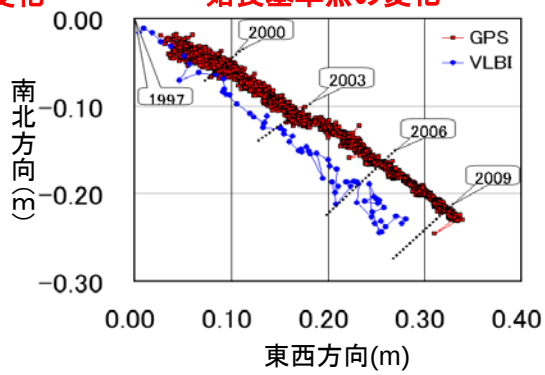
監視を行うための条件（課題）

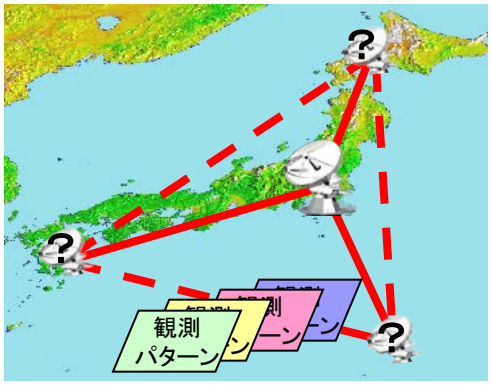
- 国際・国内VLBI観測とGEONET観測の組み合わせの実現（整合性の確保）
- 国際VLBI観測の新手法に対応した国内VLBI観測のあり方の検討

変化の監視 → 課題 → **観測の整合性確保**　　**新手法VLBIに対応した国内観測**

1997～2009年の絶対位置変化

姶良基準点の変化





研究の範囲

VLBI－GPS統合解析手法の開発（ソフト開発）

VLBIシミュレータ（既存ソフト改良）

解析手法の確立

位相差、遅延時間、変化量等

観測パターンごとのデータ

シミュレーションデータ

各データ取り出し

GEONET シミュレーションデータ

シミュレーションデータによる統合解析

観測パターンごとの精度評価・条件決定

国内VLBI観測の仕様・作業規程（案）作成

研究成果活用

新手法対応VLBIによる国内観測、位置変化の監視

↓

将来の日本の測地基準系の構築