

研究課題終了時評価表

1. 研究課題名：GPSによる地殻変動監視の信頼性向上のための大気擾乱の影響評価に関する研究
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 25,268千円 （3年間の総額）

4. 成果の概要

（1）小スケールの大気擾乱と測位誤差の関連性の解明

GEONETによる地殻変動監視において、定常解析では除去されない小スケールの大気擾乱に起因する誤差について、気象庁メソモデルを元に高分解能数値気象モデルを生成し、大気擾乱に伴うみかけ変動を推定する手法を構築した。その手法を、GEONETの定常解析で得られた変動において大気擾乱による誤差が疑われた事例に適用すると、解析による変動を再現するみかけ変動が推定され、その発現機構が実観測と対応していることが明らかとなり、構築した手法が小スケールの大気擾乱に起因するみかけ変動推定に有効であることが示された。

次に、構築した手法によって推定されるみかけ変動の信頼性を分析するため、観測値との適合性を定量的に評価する手法を構築した。この手法を用いて、GEONETによる地殻変動監視において有意な地殻変動が認められない時期の解析結果について、みかけ変動推定値の適合性の調査を全国網羅的に行った。その結果、小スケールの大気擾乱による誤差を生じうる電子基準点は限定的であり、その点ごとに特定の気象条件において、みかけ変動推定値の適合性が高くなることが明らかとなった。そこで、開発されたみかけ変動推定手法について、推定値の気象条件に対する信頼度の高低を電子基準点ごとにとりまとめ、品質情報集として整備した。GEONETによる監視において地殻変動と大気擾乱による誤差の混在する事例について、みかけ変動の推定を行い、品質情報集から抽出される、観測時の気象条件に対応する電子基準点ごとの信頼度を適用すると、GEONETによる変動観測について大気擾乱の影響の有無を適切に判断できることが示された。したがって、品質情報集から観測時の気象条件に対応する電子基準点ごとの情報を抽出することで、みかけ変動推定値に対する信頼度を与えることが可能となった。

（2）大気擾乱影響評価システムの構築

（1）で構築した大気擾乱に伴うみかけ変動推定手法と、観測時の気象条件を選定することで品質情報集から対応する信頼度を抽出するツールを組み込み、GEONETの迅速解析、緊急解析に対応するみかけ変動を信頼度つきで推定する処理が2時間以内で完了するシステムを開発した。さらに、ユーザーが大気擾乱の影響を分析する対象の設定と、大気擾乱の影響の検討するための図等の表示選択を簡易に行うためのツールを追加することで、GEONETの定常解析、緊急解析結果において大気擾乱の影響判断を可能とするシステムのプロトタイプが3月末までに構築される予定である。

5. 当初目標の達成度

（目標）

本研究では、GEONETによる地殻変動監視において、大気擾乱が測位誤差に与える影響を評価することにより、早期のかつ信頼性の高い地殻変動把握に寄与することを目的とし、高分解能数値気象モデルを用いて、大気擾乱と測位誤差の関連性を明らかにするとともに、大気擾乱

による測位誤差への影響を評価することが可能なプロトタイプシステムを構築することを目標とした。具体的には、以下の項目を設定した。

- ・高分解能数値気象モデルの生成・みかけ変動推定手法の構築
- ・大気擾乱に伴うみかけ変動推定の適合性評価手法の構築
- ・適合性の網羅的調査と品質情報の整備
- ・大気擾乱影響評価システムのプロトタイプ構築

(達成度)

気象庁メソモデルを用いて高分解能数値気象モデル生成、みかけ変動推定手法を開発した。GEONETの定常解析において大気擾乱に伴う誤差が疑われた事例に適用すると、GEONETの定常解析で観測された誤差に対応する大気擾乱に伴うみかけ変動が再現されること、その誤差の発現機構が地形に起因する小スケールの大気擾乱によって生じていることが明らかとなった。したがって、開発すべきシステムに適用可能な手法が構築されており、目標を達成した。

つぎに、開発された手法によって推定されるみかけ変動について、観測された誤差に対する適合性を定量的に評価する手法を開発した。まず、観測された変動と推定されたみかけ変動のそれぞれについて、点ごとに有意な大きさをもつかどうかを判定する。つぎに、空間分布する二種類のベクトル・データ間で、点ごとに、周囲の4点における相対ベクトル（差ベクトル）の空間パターンの一致度を数値化する指標を開発し、観測変動と推定変動の間において、いずれも有意な大きさをもつ点について指標を算出し、空間パターンの一致度を数値化し、適合性を判定する。その際、みかけ変動の推定においてはその値にスケール差（大、小）を生じることを許容するため、空間パターンの算出では、点ごとに、周囲の観測点におけるベクトル差をとり、その大きさの平均値で規格化された相対ベクトルを用いる。この手法の適用により、観測変動について、点ごとに、“みかけ変動である”、“みかけ変動による疑い”、“不明”と判定可能となった。

数値気象モデルを用いた手法では、実際には生じていない大気擾乱に伴うみかけ変動を誤って推定する場合があります、また、みかけ変動の推定に誤差の見積もりを与えることができない。大気擾乱の影響を判断するためには、みかけ変動の推定値に信頼性情報が必要である。そこで、構築された適合性評価手法を用いて、GEONETによる地殻変動観測について、全国網羅的な調査を行い、品質情報集が整備され、擾乱の影響を受けやすい電子基準点ごとに、みかけ変動の推定値について、対応する気象条件における信頼性の判断に活用可能となった。想定される本手法の適用状況として、地殻変動と大気擾乱によるみかけ変動の混在が疑われた、2011年11月24日浦河沖の地震における北海道地方のGEONET観測を事例として検証した。その結果、みかけ変動の推定値と該当する気象条件時の信頼性から、大気擾乱に伴うみかけ変動である点、みかけ変動が疑われる点が有効に判別された。したがって、本手法によるみかけ変動の推定と観測時の気象条件に対応する信頼度を出力することで、大気擾乱影響評価を実行する有効なシステムが開発可能となり、目標が満たされた。なお、調査においてみかけ変動の推定の信頼度が高い事例について、推定値を用いた誤差軽減効果を（3月末までに）評価する予定である。

大気擾乱影響評価システムについては、高分解能数値気象モデルの生成、みかけ変動推定、影響評価の一連の解析処理を約2時間で完了する環境を整備した。今後、ユーザーが解析条件設定を行う機能、品質情報集から信頼度を抽出する機能、結果を選択表示する機能を追加してシステムを構築し、3月までに性能評価を行う予定であり、目標が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
学会発表	4 件
特許等	0 件

(研究期間終了後) 論文執筆を予定している。

7. 成果活用の見込み

本研究で開発された大気擾乱影響評価システムのプロトタイプは、測地観測センターの地殻変動監視業務において、地震発生時や火山活動時、有意な変動が観測された時に試験的に利用され、GEONETの定常解析結果に対し大気擾乱の影響の有無を判断するための参考資料として活用される予定である。それにより、観測された変動から大気擾乱によるみかけ変動(の疑い)を考慮して地殻変動情報を読み取ることにつながり、信頼性の高い地殻変動把握に寄与すると期待される。

また、特別研究「地殻変動監視能力向上のための電子基準点誤差分析の高度化に関する研究」(H24～H26) に活用される予定である。

8. 達成度の分析

(1) 有効性の観点からの分析

本システムを小スケールの地殻変動把握に利用するには、イベントの発生から2時間以内で、大気擾乱の影響の有無を判断することが必要である。大気擾乱による誤差と地震に伴う地殻変動の混在が疑われた事例についてシステムを適用し、大気擾乱に伴うみかけの変動の推定とその信頼度の高低情報の出力結果により、GEONETからの地殻変動観測における大気擾乱の影響の有無の判断が、2時間以内で可能であることが示された。この結果、求められる要件を満たす、有効なシステムとして完成された。

(2) 効率性の観点からの分析

高分解能数値気象モデルの生成及びみかけ変動推定手法については、既存のソフトウェアを活用することにより効率的に開発することができた。また、大気擾乱に伴うみかけ変動の推定と観測誤差との適合性調査については、その手法を構築した後に実施した網羅的な分析調査を外注により行い、さらに、ユーザーが容易に利用できるシステムのプロトタイプを開発するため、最終的なシステム設計を測地観測センターとの協議により行ったことにより、効率的に実施することができた。

9. 残された課題と新たな研究開発の方向

高分解能数値気象モデルに基づく推定により、小スケールの大気擾乱によるみかけ変動を確実に補正することは困難であるが、小スケールの大気擾乱に伴う影響は観測値に方位依存性のある(異方性)残差として生じることが明らかになった。小スケールの大気擾乱に伴う測位誤差を軽減するためには、異方性を取り入れた大気マッピング関数が効果的である可能性が想定され、今後、そのような手法開発の有効性について、一般のGNSS測量への効果も含め検討を行う予定である。

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8342) FAX : 029-864-2655

平成 22 年度～平成 24 年度特別研究
「GPS による地殻変動監視の信頼性向上のための大気擾乱の影響評価に関する研究」
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〕

以下の論文執筆を予定

（査読付き）

「高分解能数値気象モデルを用いた GNSS 解析の誤差発生メカニズムの解明」（仮題）

〔学会等発表〕

- ・ 石本正芳、宗包浩志(2010):数値気象モデルによる測位誤差シミュレーション結果の整合性評価、日本地球惑星科学連合 2010 年大会.
- ・ 石本正芳、宗包浩志、小林知勝(2011):高分解能数値気象モデルを用いて再現された測位誤差について、日本地球惑星科学連合 2011 年大会.
- ・ 石本正芳、宗包浩志(2011): 高分解能数値気象モデルを用いて再現された測位誤差とその原因について、日本測地学会第 116 回講演会.
- ・ 石本正芳（2012）:高分解能数値気象モデルを用いた大気遅延誤差診断の有効性、日本地球惑星科学連合 2012 年大会.

〔その他〕

以下の技術資料の執筆を予定

「GEONET における大気擾乱影響評価システムの構築」（仮題）

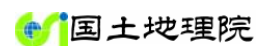
GPSによる地殻変動監視の信頼性向上のための 大気擾乱の影響評価に関する研究

国土地理院 地理地殻活動研究センター
宇宙測地研究室



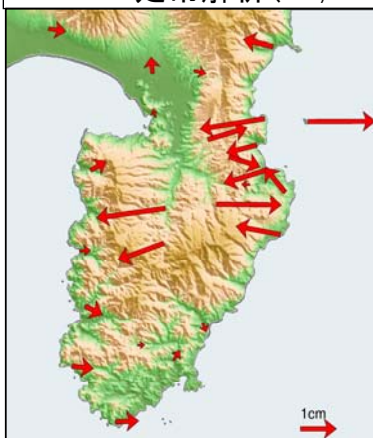
Geospatial Information Authority of Japan

本研究の背景

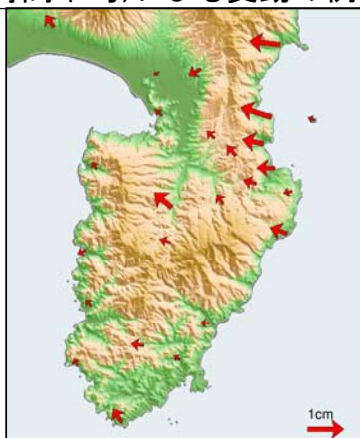


- GEONETによる地殻変動監視において、内陸の浅い地震や火山活動時等の変動に **小スケール** (数時間、約30km以下) で大きな **測位誤差** が疑われる場合がある
- 現状では **データの蓄積を待つ** の判断を要し、関係機関に地殻変動情報を速やかに提供できない

GEONET定常解析 (F3, 24時間平均) による変動の例



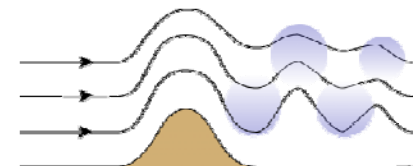
2006/7/2 地殻変動?



2006/7/3 前日は誤差

特徴:

- 一時的な変動
- 地形起伏の激しい所に多い
- 低気圧通過など気象擾乱時の発現が多い
- 発生の頻度が高い

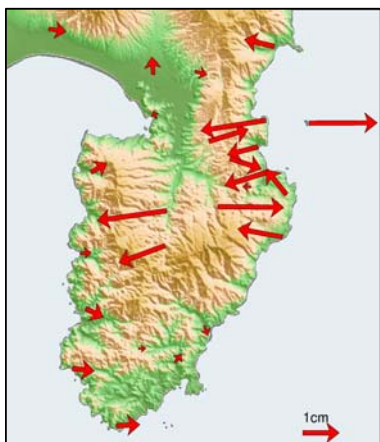


先行研究: 山岳波などの時・空間スケールの小さな大気擾乱による測位誤差が主因と指摘

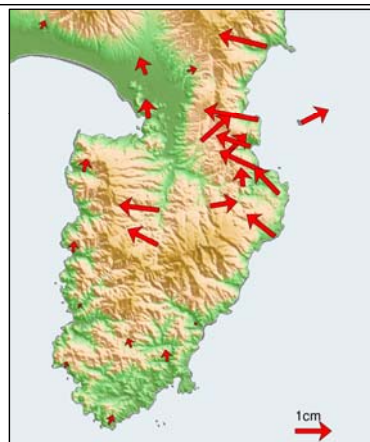
小スケールの地殻変動情報を速やかに把握し、関係機関に提供するためには、GEONET定常解析で除去されない **小スケールの大気擾乱に伴う測位誤差に対応する必要がある**

先行研究: 小スケールの大気擾乱が疑われる測位誤差が、**高分解能数値気象モデルを用いることにより定性的に再現できる**場合があることがわかった

GEONET定常解析による変動



高分解能数値気象モデルを用いて推定したみかけの変動



特徴:

- 定性的に観測値を再現
- **大気擾乱による測位誤差が再現できない場合、誤った推定をする場合がある**
-
- 確実な誤差補正手法の開発は困難かもしれないが、大気擾乱による誤差の懸念の高低を判断する情報が取得できる可能性

高分解能数値気象モデルにより、小スケールの大気擾乱に伴うみかけ変動推定手法を開発し、**大気擾乱による誤差の可能性の高低を判断可能**とする技術開発

Slide 3

本研究の目的と目標

目的

GEONETによる地殻変動監視において、**大気擾乱が測位に与える影響を評価することにより、早期のかつ信頼性の高い地殻変動の把握に寄与**

目標

1. 小スケールの大気擾乱と測位誤差との関連性の解明

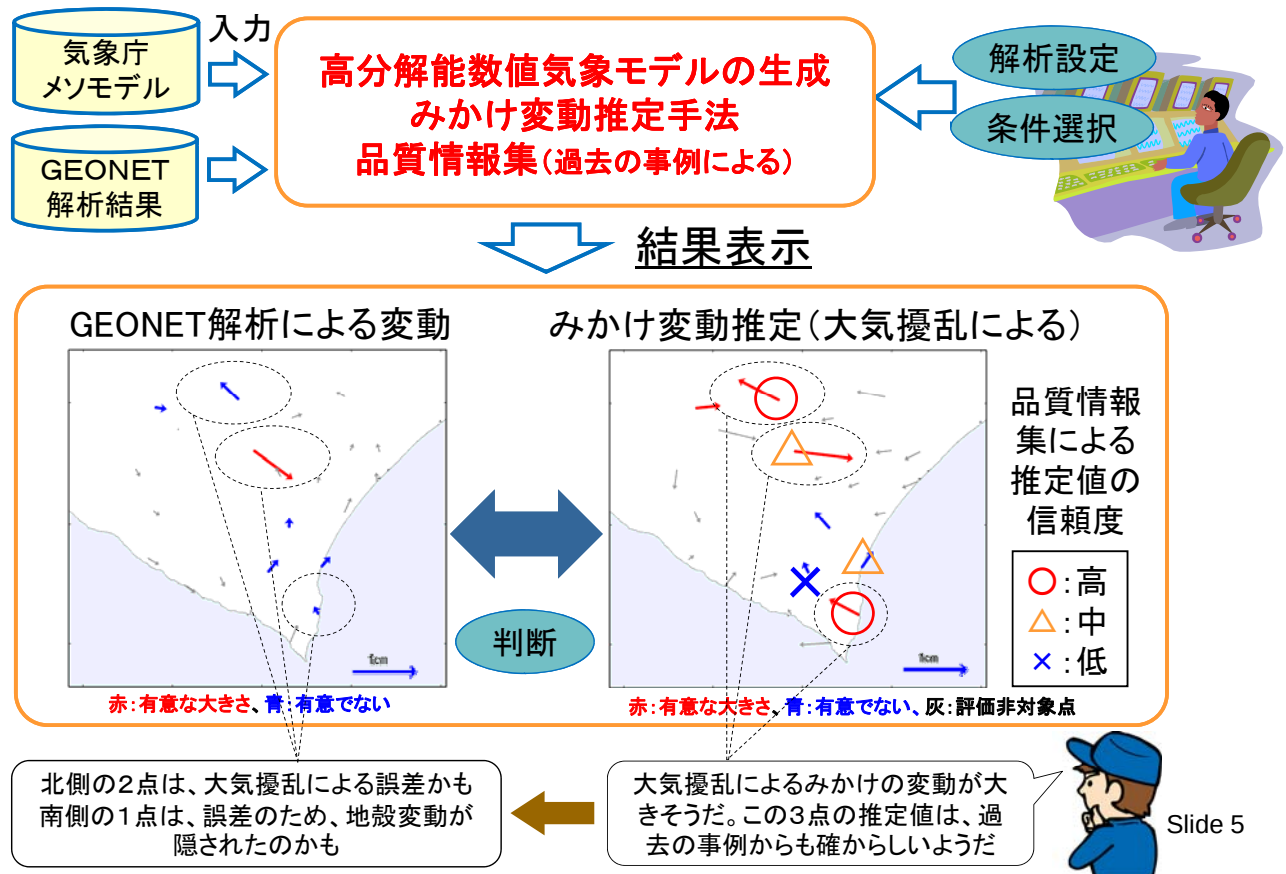
- 気象庁メソモデルを元に**高分解能数値気象モデルの生成**と小スケールの**大気擾乱に伴うみかけ変動を推定する手法の構築**
- みかけ変動推定値の**信頼度**をとりまとめた**品質情報集の整備**

2. 大気擾乱影響評価システムの構築

- 1で構築した手法を組み込み、GEONETの**迅速解析**(Q3:6時間平均、3時間毎)・**緊急解析**(S3:2-3時間平均)に対応する、**みかけ変動推定結果を算出、表示**するシステムのプロトタイプを開発
- **2時間以内**に処理可能な性能が必要

研究期間 平成22年度～平成24年度
予算 特別研究経費 25,268千円

Slide 4



1. 小スケールの大気擾乱と測位誤差との関連性の説明

1) 高分解能数値気象モデルの生成・みかけ変動推定手法の構築

- ・気象庁メソモデルを元に高分解能数値気象モデルを生成
- ・GEONET定常解析で除去されない小スケールの大気擾乱に起因するみかけ変動を推定

2) みかけ変動推定値の信頼度の整備(品質情報集)

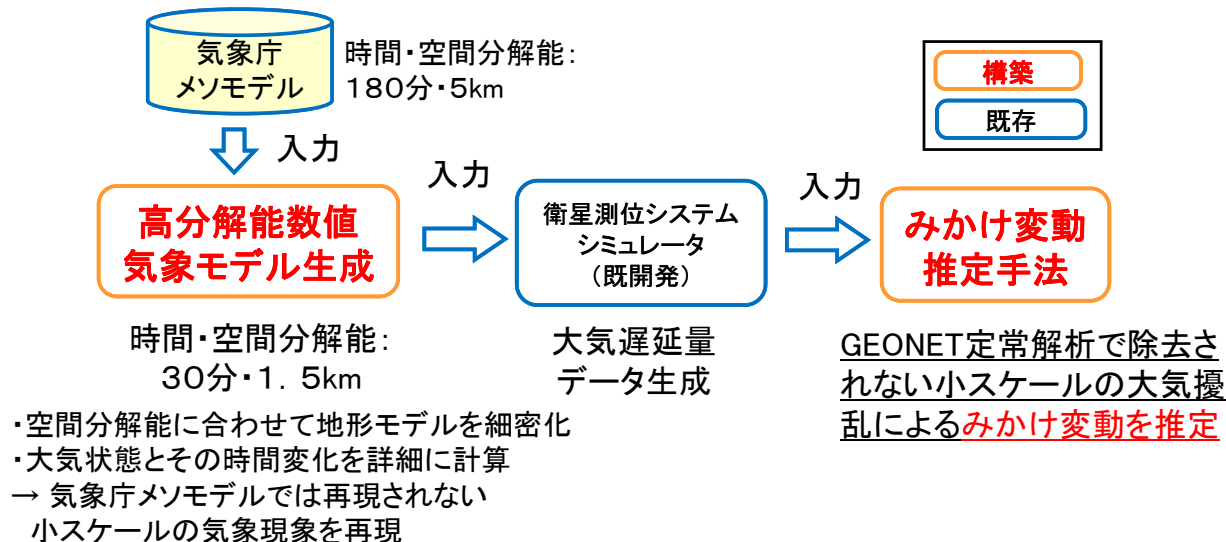
みかけ変動推定値を用いて大気擾乱の影響を判断するためには、みかけ変動の推定値に対する信頼性情報が必要

電子基準点ごとに、特定の条件ではみかけ変動推定値の再現性が高いと想定

- ・みかけ変動推定値の適合性を全国網羅的に調査
 - － みかけ変動推定値について、観測された変動との適合性を定量的に評価する手法(適合性評価手法)を構築
 - － 適合性が異なると想定される地域や気象条件分けを行い、その条件ごとに網羅的に調査
- ・特定の条件下での適合性の高低が特徴づけられれば電子基準点ごとに信頼度としてとりまとめ、品質情報集として整備

1-1) 高分解能数値気象モデルの生成・みかけ変動推定手法の構築 国土地理院

- ・気象庁メソモデルを入力データとし、高分解能数値気象モデルの生成手法
- ・GEONET定常解析で除去されない小スケールの大気擾乱に起因するみかけ変動の推定手法を構築



Slide 7

1-2) みかけ変動推定値の信頼度の整備: 適合性評価手法の構築 国土地理院

個々の事例ごとに、みかけ変動推定値と観測された変動値に対する適合性を定量的に評価する手法を構築

適合性評価手法

有意な大きさの変位 (閾値以上を○)		空間パターンの一致度 (一致する場合を○)	適合性評価結果
観測変動値	みかけ変動推定値		
○	○	○	みかけ変動
○	○	×	みかけ変動の疑い
○	×	(評価非対象)	不明

大きさの有意判定の閾値は、みかけ変動推定値の適合性から

- ・観測変動値では、 3σ (F3解析: 5.4mm、Q3解析: 10.5mm)
 - 地殻変動の監視する上でも妥当な大きさ
- ・みかけ変動推定値は、 2σ (24時間解析: 3.6mm、6時間解析: 4.4mm) に設定

Slide 8

1-2) みかけ変動推定値の信頼度の整備: 適合性の網羅的調査と品質情報集の整備

- ・小スケールの大気擾乱は地形起伏により、特定の地区、観測点に影響を与えると想定 → 大気擾乱の影響を受けやすい地域(影響域)を特定
- ・GEONETにおいて有意な地殻変動が認められない時期のGEONET定常解析結果(F3解析結果、Q3解析結果)を対象として実施
- ・異なる気象条件ごとに適合性を分析し、適合性の高低を電子基準点ごとに信頼度としてとりまとめ(品質情報集を整備)

気象条件分け

天気図で判断可能な、特徴的な条件として8種類に分ける

	気象分類
条件①	温帯高気圧
条件②	温帯低気圧
条件③	停滞前線(梅雨、秋雨)
条件④	冬型、寒気の流入
条件⑤	小笠原高気圧
条件⑥	台風、熱帯低気圧
条件⑦	大気的不安定
条件⑧	①～⑦以外

＜品質情報集のとりまとめイメージ＞

観測点	条件①	条件②	条件③	...
0001	—	×	○	...
0002	×	○	△	...
0003	○	○	○	...
0004	—	—	△	...
...	...	...	...	...

適合性評価結果の「みかけ変動」及び「みかけ変動の疑い」の割合で区別

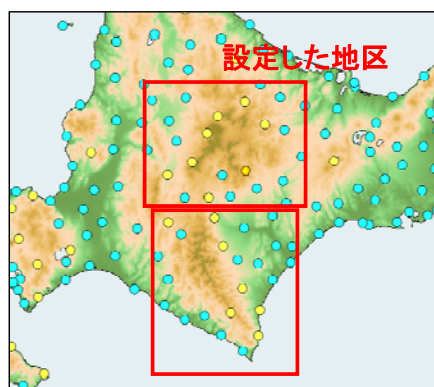
○: 75%以上、△: 40%～75%、×: 40%未満、
—: 有意な変動なし

Slide 9

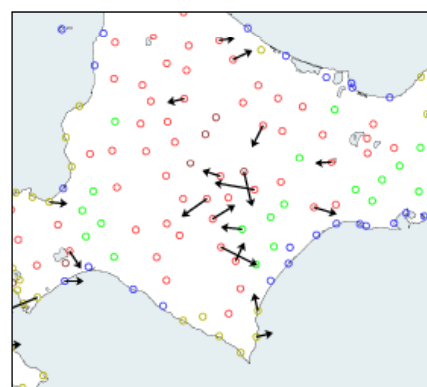
大気擾乱の影響域の設定

大気擾乱の影響を受けやすい地域(影響域)を特定するために、GEONET定常解析(F3、Q3; 2010年1年間)のばらつき(RMS)とみかけ変動推定値のばらつき(RMS)、及びGEONET定常解析による変動の特徴を調査

黄色:
大気擾乱の
影響がある点
青色:
影響がない点



GEONET F3解析結果のRMS分布



GEONET F3解析結果において、大気擾乱によるみかけの変動が観測された時の変動

- ・大気擾乱の影響を受けやすい電子基準点は限定的 ← 評価対象点
- ・大気擾乱の影響を受ける観測点(RMSの大きい観測点)は、山岳域に集中
- ・同じエポックで誤差が生じる地域にまとまりがある

以上の特徴により、大気擾乱の影響を受ける電子基準点、誤差が生じる地域のまとまりのある全国30地区を大気擾乱の影響域として設定

Slide 10

適合性評価手法により適合性を調査し、地区、気象条件ごとにとりまとめ

気象条件ごとの適合性評価を集計した結果(日高周辺地区の例)

電子基準点	条件①	条件②	条件③	条件④	条件⑤	条件⑥	条件⑦	条件⑧
0521	-	-	○	-	-	-	-	×
0532	-	○	△	○	○	-	-	△
0789	○	○	○	○	○	△	-	○
0793	-	-	△	○	-	-	-	△
0887	×	△	○	-	-	-	-	○
...	...	...	...	...	...	...	...	...

○: 75%以上、△: 40%~75%、×: 40%未満、-: 有意な変動なし

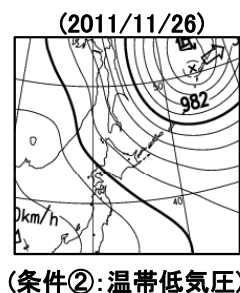
⑦(大気的不安定)では、小スケールの大気擾乱が生じない
観測点「0532」では、気象条件②、④、⑤で適合性が高い: 電子基準点ごとに、特定の気象条件において適合性が高い → 信頼度として活用可能

○ → 信頼度: 高
△ → 信頼度: 中
× → 信頼度: 低
- → 擾乱なし

Slide 11

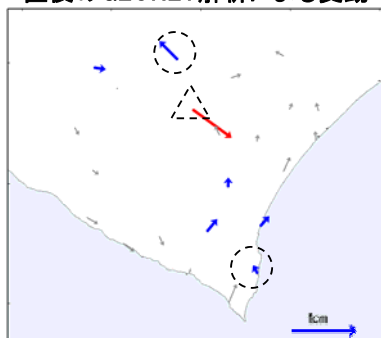
大気擾乱の影響評価手法の検証

影響評価の良否及び処理時間を検証するため、地震発生時で大気擾乱の影響の混在が疑われた事例について、開発された大気擾乱影響評価手法を適用
2011年11月24日の浦河沖の地震(M6.2)の例

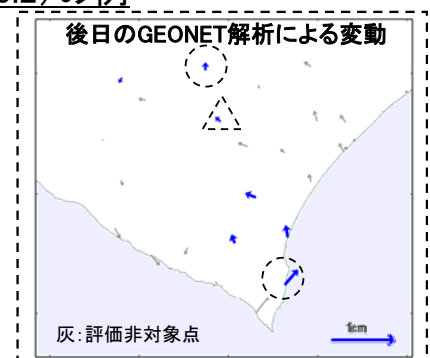
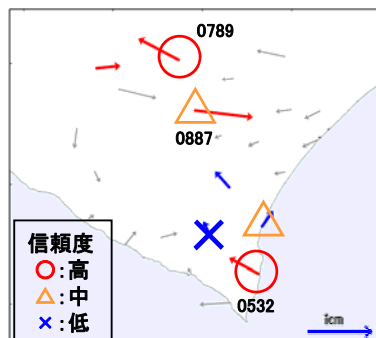


電子基準点	条件①	条件②	条件③
0521	-	-	○
0532	-	○	△
0789	○	○	○
0793	-	-	△
0887	-	△	○

直後のGEONET解析による変動



みかけ変動推定結果



大気擾乱の影響評価

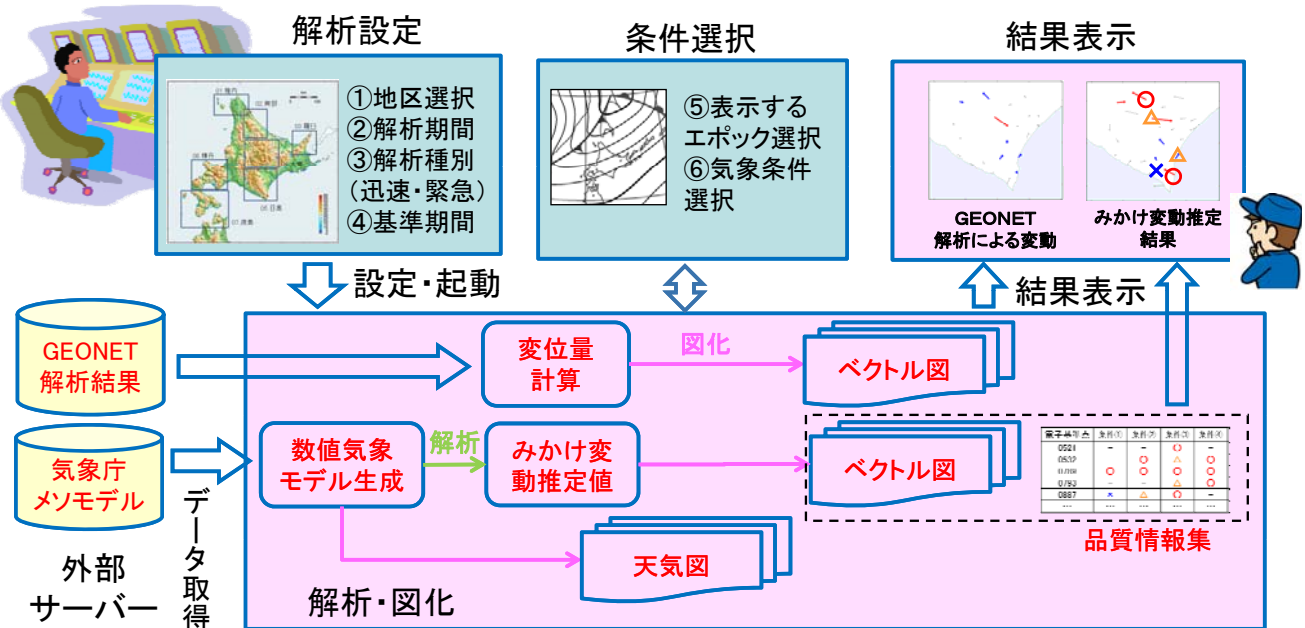
- ・全処理を1.2時間で終了
 - ・観測点「0789」「0532」はみかけ変動
 - ・観測点「0887」みかけ変動の疑い
 - 後日の解析結果との比較
- 影響評価手法の妥当性を確認

赤: 有意な大きさ、青: 有意でない、灰: 評価非対象点 赤: 有意な大きさ、青: 有意でない、灰: 評価非対象点

開発された手法により、有効な大気擾乱の影響評価が可能

Slide 12

2. 大気擾乱影響評価システムの構築



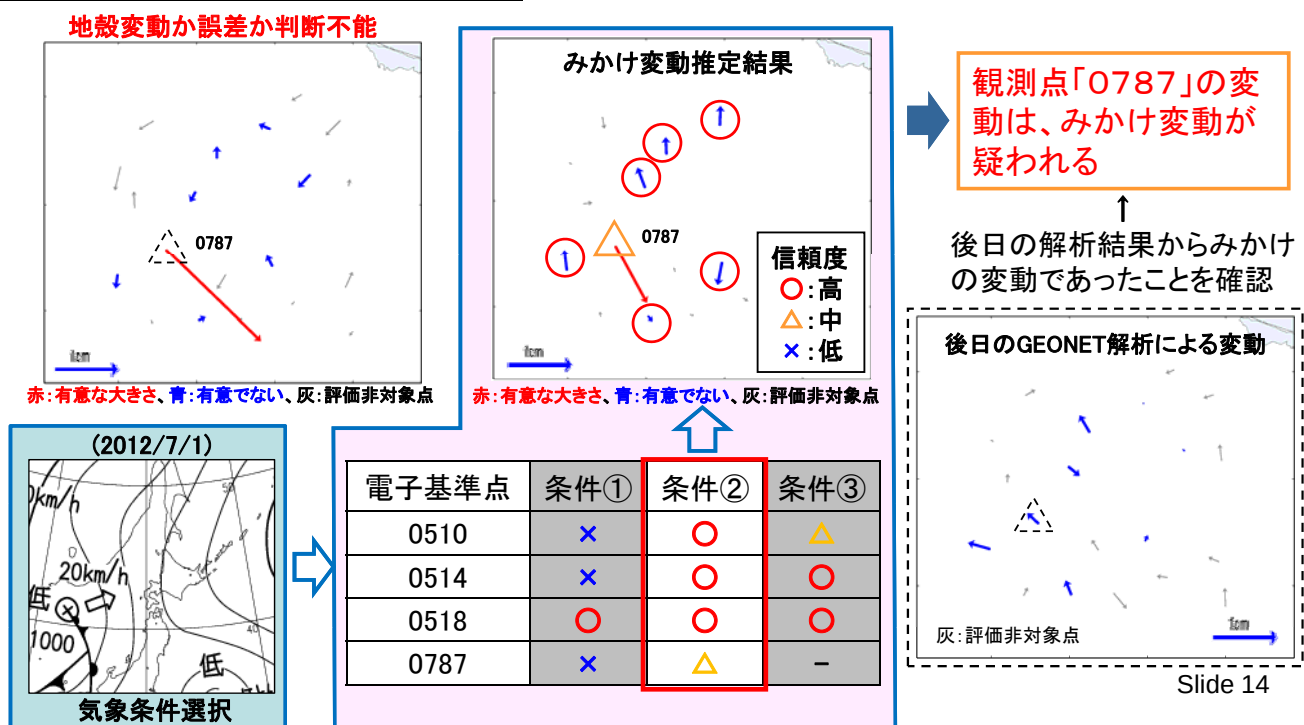
- ・大気擾乱の影響評価に有効な、**みかけ変動推定値**と観測時の気象条件に対応する**信頼度**を出力するシステムを構築
- ・GEONET**迅速解析**、**緊急解析**に対応し、解析・図化処理は2時間以内で完了
- ・ユーザーによる解析設定、信頼度の抽出機能、結果を選択表示する**機能を追加**し完成予定

Slide 13

実際の地殻変動監視への大気擾乱影響評価システムの適用試験 — 十勝岳周辺 —

2012年6月30日から7月5日にかけて十勝岳において火山ガスの噴出等の火山活動が認められた際に、**電子基準点「上富良野(0787)」**で南向きの変動を観測した事例にシステムを適用

2012年6月30日 18:00 Q3解析による変動



Slide 14

活用

- 本研究で開発されたプロトタイプシステムは、測地観測センターの地殻変動監視業務において、地震発生時や火山活動時、有意な変動が観測された時のGEONETの解析結果に対し、大気擾乱の影響の有無の判断のための参考資料として活用（H25年度より）
- 特別研究「地殻変動監視能力向上のための電子基準点誤差分析の高度化に関する研究」（H24～H26）に活用

波及効果

- 小スケールの大気擾乱に伴う測位誤差を軽減するためには、異方性を取り入れた大気マッピング関数が効果的である可能性が想定され、今後、そのような手法開発の有効性について、一般のGNSS測量への効果も含め検討を行う予定である

Slide 15

達成度の分析

（１）有効性の観点からの分析

- システムの適用事例において、GEONETによる地殻変動監視に対し、大気擾乱の影響の有無の判断が、2時間以内に可能であることを確認
→ 処理時間に関する要件を満たす、有効なシステムが完成

（２）効率性の観点からの分析

- 高分解能数値気象モデルの生成及びみかけ変動推定手法に、既存ソフトウェアを活用
- 網羅的な適合性調査を外注により実施
- システムのプロトタイプの設計については、ユーザーである測地観測センターと協議して実施
→ 以上により、効率的に研究を実施

Slide 16

1. 小スケールの大気擾乱と測位誤差との関連性の解明

- 1) 高分解能数値気象モデルの生成、みかけ変動推定手法を構築
 - ・気象庁メソモデルを元に高分解能数値気象モデルの生成
 - ・GEONET定常解析で除去されない小スケールの大気擾乱によるみかけ変動を推定する手法を構築
- 2) みかけ変動推定値の信頼度の整備(品質情報集)
 - ・みかけ変動推定値の適合性を定量的に評価可能な手法を構築
 - ・適合性評価手法による全国網羅的な調査を実施
 - ・みかけ変動推定値の信頼度として、観測点ごと、気象条件ごとにとりまとめ、品質情報集として整備
 - ・みかけ変動推定値及びその信頼度により、適切な大気擾乱の影響評価が可能
 - ・誤差軽減効果については、3月までに評価予定

Slide 17

2. 大気擾乱影響評価システムの構築

- ・大気擾乱の影響評価に有効な、みかけ変動推定値と観測時の気象条件に対応する信頼度情報を出力するシステムを構築
- ・GEONET迅速解析、緊急解析に対応し、解析処理を2時間以内で完了
- ・ユーザーによる解析設定、信頼度の抽出機能、結果を選択表示する機能を構築し完成予定

Slide 18

Slide 19

高分解能数値気象モデルの生成及びみかけ変動の推定方法

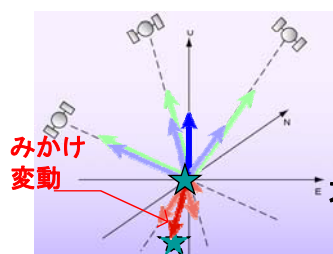
国土地理院

① 高分解能数値気象モデルの生成

- ・気象庁メソモデル(空間分解能5km、時間分解能3時間)を入力データ(初期値・境界値)として使用
- ・空間分解能1.5km、時間分解能30分のデータを生成

② みかけ変動の推定手法

- ・①のデータから、衛星測位システムシミュレータ(宗包他、2008)を用いて、観測点－衛星間の大気遅延量を計算
- ・計算した大気遅延量を観測量として、天頂遅延量、遅延勾配、みかけ変動を最小二乗法により推定
- ・マッピング関数は、NMF(Niell、1996)を使用
- ・天頂遅延量、遅延勾配は30分毎に推定

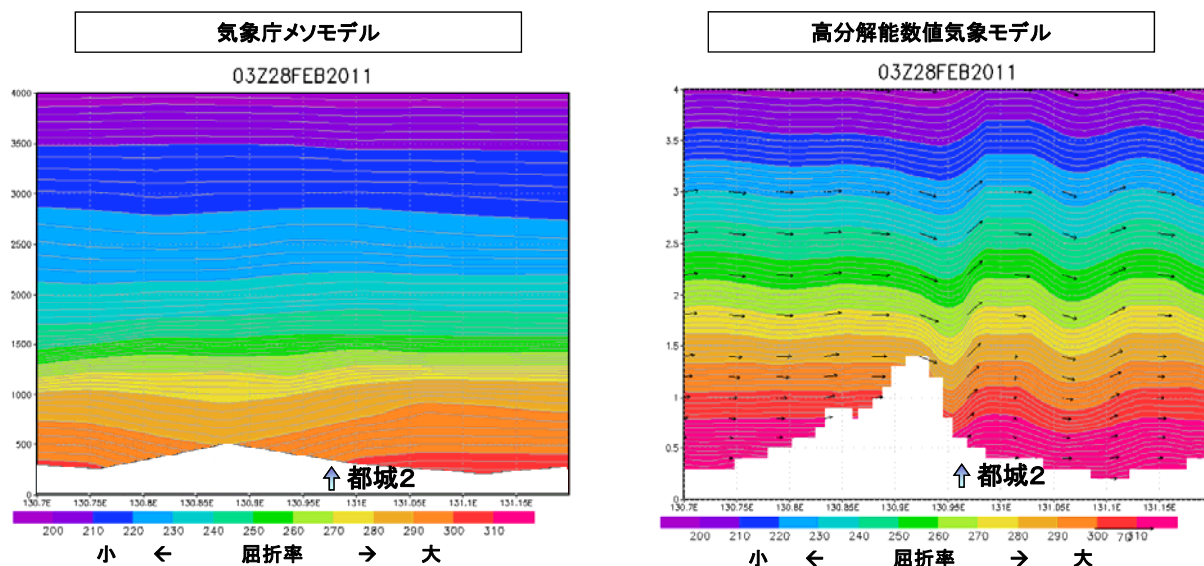


$$\Delta \rho_i^\ell = \underbrace{\Delta L_{apr,i}(z_i^\ell)}_{\text{大気遅延量}} + \underbrace{\Delta L_{u,i} \cdot m(z_i^\ell)}_{\text{アプリオリ}} + \underbrace{\Delta \vec{\rho} \cdot \vec{E}(\alpha_i^\ell, z_i^\ell)}_{\text{天頂遅延量・マッピング関数}} + \underbrace{\delta_i}_{\text{みかけ変動}}$$

Slide 20

気象庁メソモデルと高分解能数値気象モデルの比較 — 屈折率の東西方向の鉛直断面分布 —

霧島山新燃岳周辺における例



気象庁のメソモデルの分解能では表現されていない地形による擾乱が、高分解能数値気象モデルでは再現される

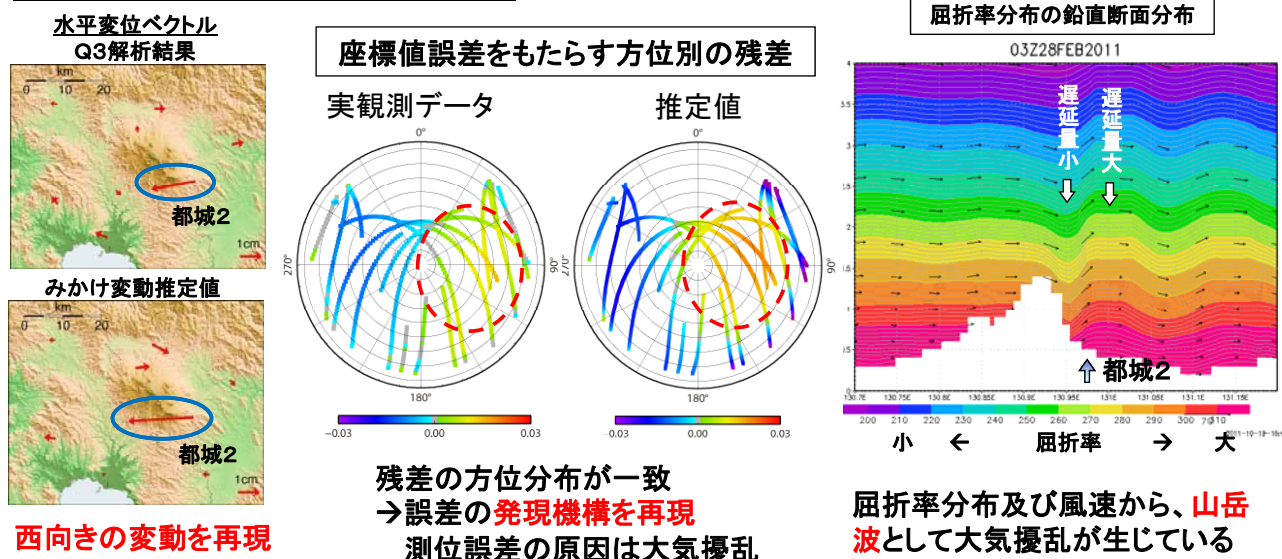
小スケールの大気擾乱を再現するためには、気象庁メソモデルを基に高分解能数値気象モデルを作成することが必要

Slide 21

1-1) 高分解能数値気象モデルの生成・みかけ変動推定手法の構築

構築したみかけ変動推定手法が、小スケールの大気擾乱に起因するみかけ変動の推定に有効であるか確認するため、GEONET定常解析で誤差が疑われた事例(2地域、10事例)について調査

結果(新燃岳周辺における例)



西向きの変動を再現

残差の方位分布が一致
→ 誤差の発現機構を再現
測位誤差の原因は大気擾乱

屈折率分布及び風速から、山岳波として大気擾乱が生じている

GEONET定常解析結果の変動を再現、発現機構が実観測と対応 → 構築した手法は小スケールの大気擾乱に起因するみかけ変動の推定に有効

Slide 22

1-2) みかけ変動推定値の信頼度の整備: 適合性評価手法の構築(1)

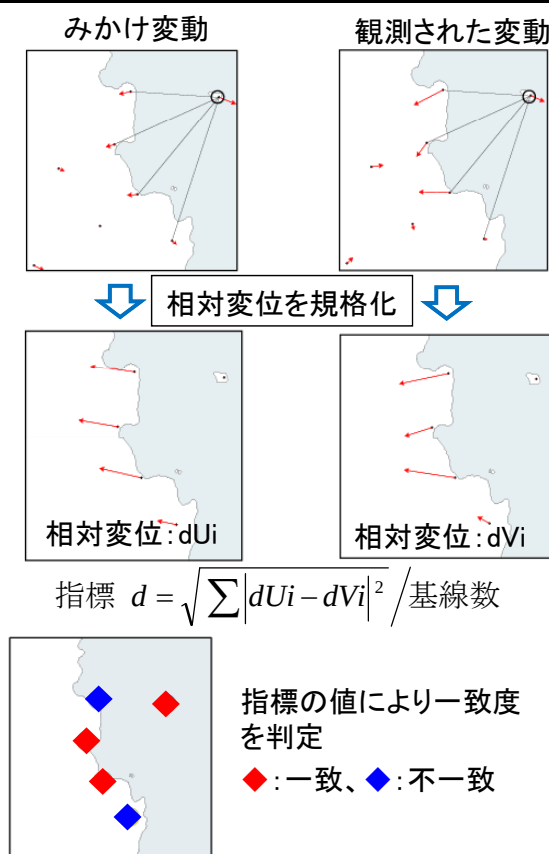
1) で構築した手法によるみかけ変動推定値の信頼度を特性分析するため、観測変動値との適合性を定量的に評価する、以下の手法を構築

- ・地殻変動を監視する上で、観測変動値、みかけ変動推定値の大きさが有意なものに対象を絞る
- ・観測変動値とみかけ変動推定値の空間パターンの一致度を評価
 周囲4点と相対ベクトル(平均振幅で規格化)の空間パターン
 数値気象モデルで再現される大気擾乱の時・空間的なずれや大きさのずれ(スケール差)を許容

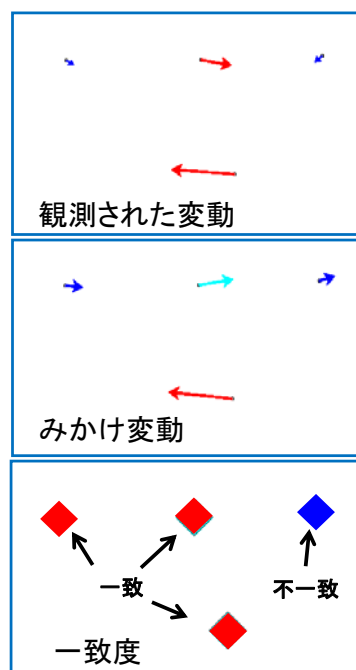
Slide 23

空間パターンの一致度の計算方法と適用例

空間パターンの一致度の計算方法



適用例

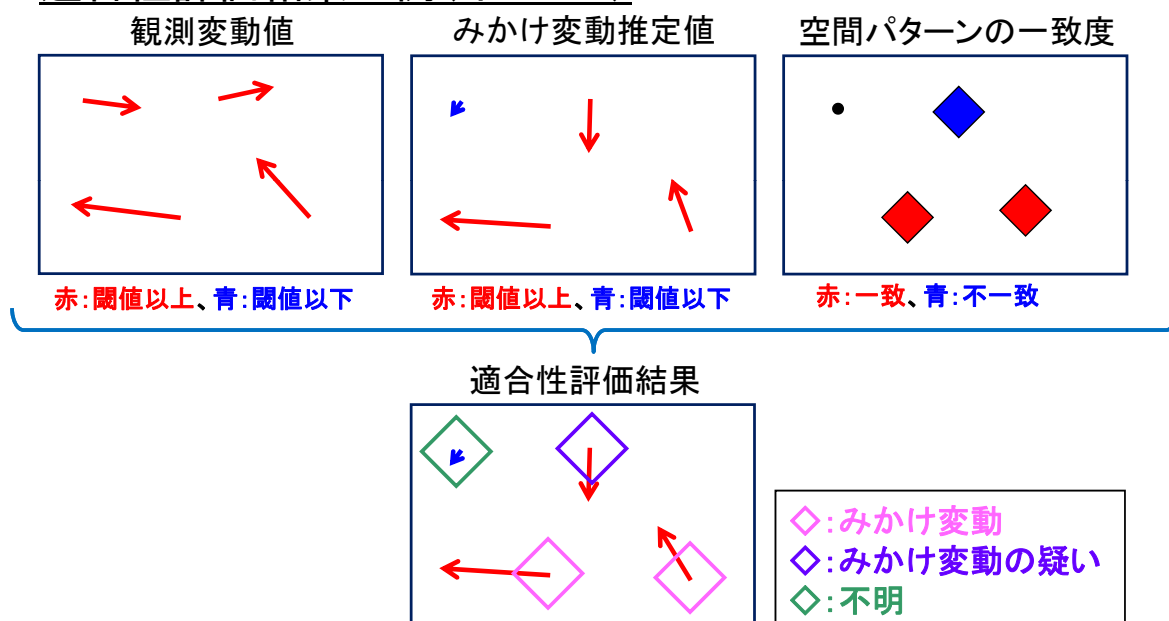


目視による一一致度と整合的な空間パターンの一一致度の計算手法を構築

Slide 24

1-2) みかけ変動推定値の信頼度の整備: 適合性評価手法の構築(2)

適合性評価結果の例(イメージ)

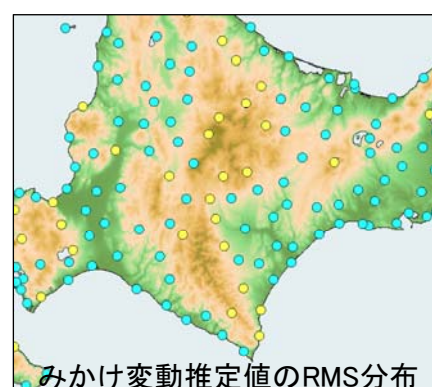
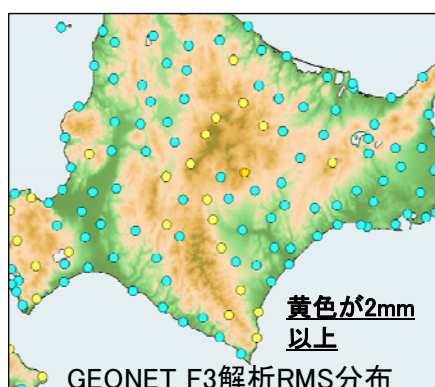


高分解能数値気象モデルに基づくみかけ変動推定値と観測値との**適合性を定量的に評価する手法**を構築

Slide 25

小スケールの大気擾乱の影響を受ける電子基準点の峻別方法

- ・GEONET定常解析(F3、Q3; 2010年1年間)の線形トレンドからの**ばらつき**(RMS)とみかけ変動の**ばらつき**(RMS)を調査

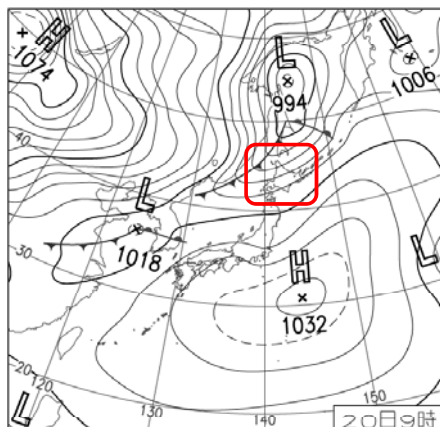


- ・RMSの大きい観測点がF3解とみかけ変動とでほぼ対応 → 大気擾乱の影響を受ける観測点
- ・GEONET定常解析のRMSの2mm以上を、大気擾乱の影響を受ける観測点として峻別

適合性調査の地区・地域分けにも活用

Slide 26

- ・気象擾乱の様式によりみかけ変動推定値の適合性が異なる可能性が高い
- ・発生する気象擾乱の様式が異なると考えられる気象条件を8種類に設定
(小スケールの大気擾乱が必ずしも生じるとは限らない)
- ・天気図を用いて分類



天気図(気象庁HPより)

着目する領域
について、
条件①～⑧に
分類

	気象分類
条件①	温帯高気圧
条件②	温帯低気圧
条件③	停滞前線(梅雨、秋雨)
条件④	冬型、寒気の流入
条件⑤	小笠原高気圧
条件⑥	台風、熱帯低気圧
条件⑦	大気的不安定
条件⑧	①～⑦以外

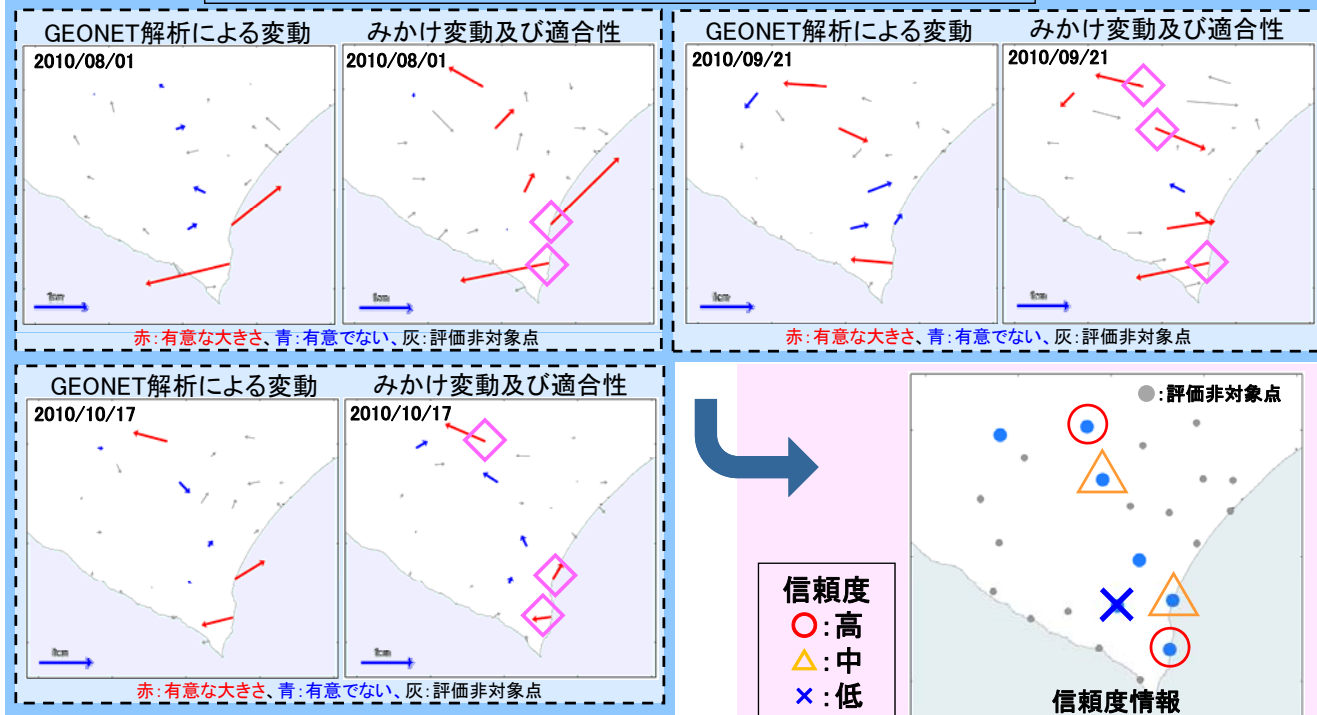
気象条件として8種類に分類し、該当する日をそれぞれ30日程度
抽出して調査を行う

Slide 27

適合性調査の気象条件ごとのとりまとめ方法

日高地区における気象条件②: 温帯低気圧の例

適合性評価結果 ○: みかけ変動、◇: みかけ変動の疑い、△: 不明

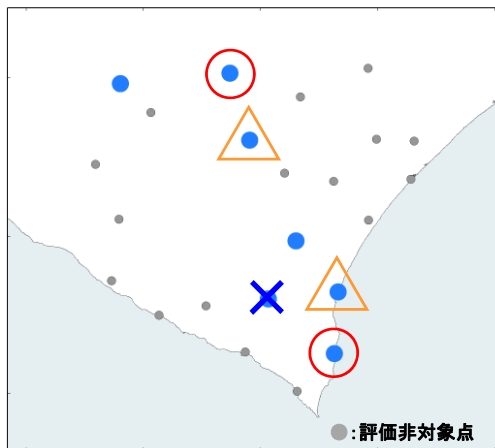


観測点ごとに適合性評価結果を集計し、「みかけ変動」及び「みかけ変動の疑い」の割合により信頼度を決定: ○: 75%以上、△: 40%～75%、×: 40%未満、一: 有意な変動なし

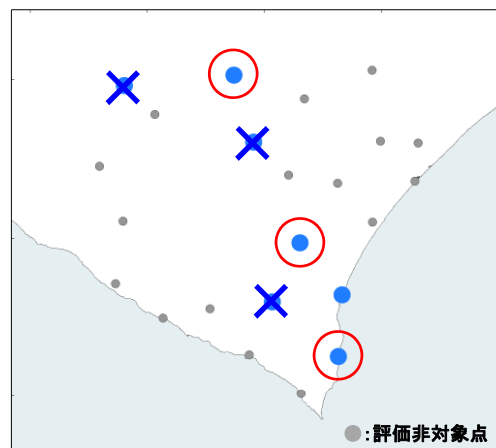
Slide 28

日高周辺地区：気象条件②温帯低気圧及び④冬型の例

気象条件②：温帯低気圧



気象条件④：冬型



みかけ変動
の信頼度
○：高
△：中
×：低

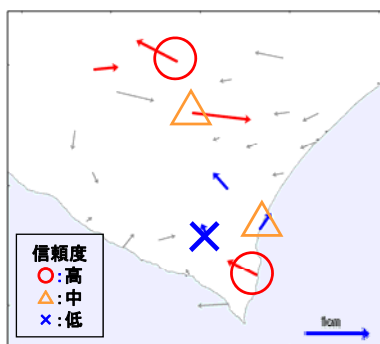
- ・観測点ごとに、みかけ変動推定値の信頼度の高い気象条件を特定
- ・大気擾乱の影響の有無の判断において、みかけ変動推定値の品質情報として活用

Slide 29

信頼度情報の妥当性の確認

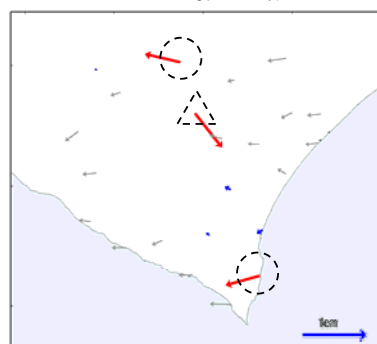
とりまとめた信頼度情報と、地震時の事例（2011年11月24日の浦河沖の地震）における適合性とを比較

みかけ変動推定結果



赤：有意な大きさ、青：有意でない、灰：評価非対象点

地震時変動を差し引いて求めたGEONET解析の誤差



赤：有意な大きさ、青：有意でない、灰：評価非対象点

地震時変動を差し引いて求めた誤差とみかけ変動との一致度及び適合性評価結果



◇：空間パターンが一致

信頼度を付与された観測点は5点：

信頼度	みかけ変動の大きさ	< - >	適合性	観測変動の大きさ
高・2点	有意		みかけ変動	有意
中・1点	有意		みかけ変動	有意
中・1点	有意でない		評価対象外	有意でない
低・1点	有意でない		評価対象外	有意でない

信頼度の付与されたみかけ変動と、今回の事例での適合性がよく対応 → 信頼度の妥当性を確認

Slide 30

地震発生時及び火山活動時において**有意な地殻変動がみられた多くの事例について**、信頼度を付与したみかけ変動による影響評価を行い、後日の観測変動と比較

調査対象

- ・2007年～2012年に発生したM6あるいは震度5弱以上の地震のうち、調査対象の30地区において有意な地殻変動があったもの
(ただし、2011年東北地方太平洋沖地震発生後の余震域で発生した地震については、内陸の規模の大きな地震のみ対象)
- ・2007年以降に、活動のあった火山(伊豆東部、新燃岳、桜島)

結果

解析種別	事例数 (エポック数)	事例数(上段)F3解析 (下段)Q3解析		観測変動の大きさ	
		みかけ変動 の大きさ	有意	有意	有意でない
F3	613(100)			26(4.2%)	91(14.8%)
Q3	4160(800)			123(3.0%)	616(14.8%)
			有意でない	9(1.4%)	487(79.4%)
				31(0.7%)	3390(81.5%)

みかけ変動、観測変動の大きさについて、

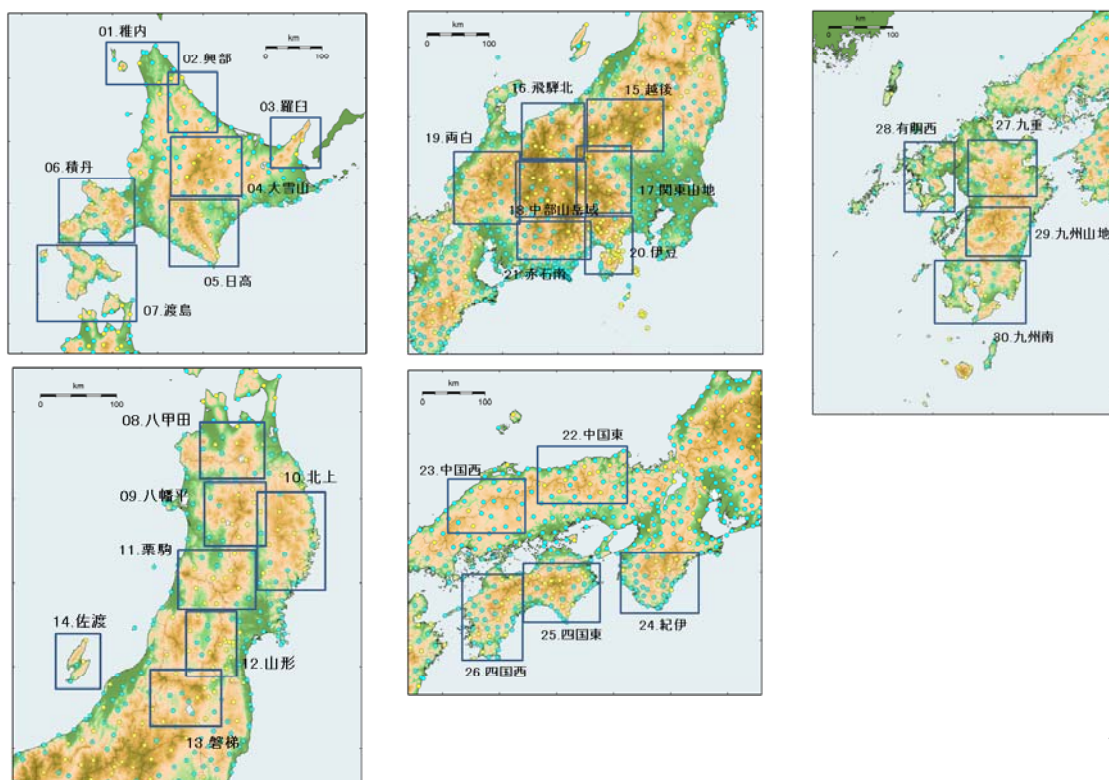
- ・「有意」あるいは「有意でない」の評価が一致:約84%
- ・みかけ変動が有意でなく、観測変動が有意:約1%
- ・みかけ変動が有意で、観測変動が有意でない:約15%

約8割の事例について正しく評価

Slide 31

大気擾乱の影響域の選定(全国30地区)

RMSの大きい観測点、誤差が生じる地域のまとまりのある**全国30地区**を大気擾乱の**影響域**として選定



Slide 32

大気擾乱

対流圏において、気圧、気温、水蒸気や風向・風速などの分布が乱れた気象状態をいい、高・低気圧、前線、台風や積乱雲など様々な時間、空間スケールの現象がある。

山岳波

大気擾乱に伴う強い風が山を越えると、風下側で大気が上下に振動し、その乱れが波打つように伝播する気象現象をいう。これに伴い、気圧、気温や水蒸気などの不均質な分布が定在波状に生じる。

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。

GEONET定常解析、緊急解析

国土地理院では、決まった処理方法により定期的に解析を行い、電子基準点の位置を算出している。この解析を定常解析という。定常解析には、迅速解析(Q3解析;6時間データを用いて3時間毎に解析)、速報解析(R3解析;24時間データを用いて1日毎に解析)、最終解析(F3解析;24時間データを用いて1週間毎に1週間分をまとめて行う最終的な解析)がある。また、地震発生直後などに、さらに早く、地殻変動を把握するために解析を行っており、この解析を緊急解析(S3解析;1~3時間データを用いて解析)という。これらの解析に基づいて得られた地殻変動情報は、関係機関に提供される。

Slide 33

用語集(2)

マッピング関数

GNSS衛星から送信される電波は大気を通過する際に遅延(大気遅延)が生じるが、GNSS衛星の仰角によって、通過する大気層の厚み(距離)が異なるため、大気遅延量は仰角に依存して変化する。この変化は仰角に依存した関数で近似することができ、この関数をマッピング関数という。精密なGNSS解析では、マッピング関数を用いて大気遅延量を推定し、除去する。マッピング関数には、いくつかの種類があり、GEONETの定常解析、緊急解析では、NMF(Niell Mapping Function; Niell,1996)という関数を用いている。また、気象条件によって、大気遅延量は仰角だけでなく方位に依存して異なる場合がある。このうち、大きな時間・空間スケールの大気擾乱によって生じる大気遅延量の方位依存性は、大気遅延の水平勾配(大気遅延勾配)で近似することができる。GEONETの解析では、マッピング関数に加え大気遅延勾配を推定し、除去している。

みかけ変動、みかけ変動推定値

マッピング関数を用いた大気遅延量の推定と大気遅延勾配の推定を行い、大気遅延量を除去した場合でも、時間・空間スケールの小さな大気擾乱による大気遅延量は、除去されない。このため、そのような場合、解析して得られた位置情報には、地殻変動がないにもかかわらず、あたかも変動があるように見えることがある。このような変動をみかけ変動と呼ぶ。

高分解能数値気象モデルを用いて、時間・空間スケールの小さな大気擾乱によって生じる大気遅延量を算出し、それに基づいてみかけ変動を推定したものをみかけ変動推定値という。

Slide 34

みかけ変動推定値の適合性

GEONETの解析による観測点の位置の変動と、それに対応して求めたみかけ変動推定値との間で、大きさと空間パターンの一致の程度を示すもの。

数値気象モデル

地形モデルを用い、大気中の仮想的な3次元の格子点における気温や気圧等の大気の状態とその時間変化を、気象観測データを使いつつ物理法則に基づく数値計算によって推定したモデル。対象とする気象現象に応じて、モデルの時間分解能と空間分解能を設定して推定を行うため、モデルで表現できる気象現象は、その分解能に依存する。

気象庁メソモデル

気象庁が天気予報業務において、数十kmスケールの気象現象を再現するために用いるモデル。全国を対象として定常運用されているものの中では、最も分解能が高い。このモデルは、新たに収集された気象観測データを用いて、3時間毎に更新される。その結果は、気象庁との協定(*)に基づき、専用回線により速やかに国土地理院に提供されている。

(*) 国土地理院と気象庁とのオンラインによる防災情報の 相互交換に関する協定

衛星測位システム・シミュレータ

国土地理院の研究で開発され、設定した観測点位置において、様々な情報(大気の状態、電離層、衛星軌道暦など)を入力データとして、GNSS衛星の軌道、及び実際のGNSS解析ソフトウェアで解析可能な観測データを模擬生成するシステム。本研究では、高分解能数値気象モデルを用いて、GNSS衛星から送信される電波が大気を通過する際の大気遅延量を算出するために用いる。

Slide 35

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8342) FAX : 029-864-2655

2. 研究課題名

GPS による地殻変動監視の信頼性向上のための大気擾乱の影響評価に関する研究

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 25, 268 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

気象庁のメソスケールをもとに高分解能数値気象モデルを生成し、GPS の大気擾乱に起因する見かけの変動の推定方法について検討した。その検討結果をもとに、短時間で大気擾乱に起因するものか否かを評価できるシステムを構築した。

7. 当初目標の達成度

GPS 観測データを解析し、見かけの地殻変動が現れた時、それが大気擾乱に起因するものである可能性がどの程度であるかという推定が行えるようになった。したがって当初目標は達成されている。

8. 成果公表状況

研究報告書 3 件、学会発表 4 件である。論文発表が期待される。

9. 成果活用の見込み

今回なされた研究成果は、地殻変動監視業務において利用可能であり、今後活用されるものである。

10. 達成度の分析

GEONET の解析データから見かけの地殻変動が得られたときに、それが大気擾乱による可能性が高いかどうかを 2 時間以内に判断できるシステムを作り上げており。有効なシステムである。また既存のソフトウェアを活用しており、効率的に研究を行っている。

11. 残された課題と新たな研究開発の方向

今回は、得られた見かけの地殻変動が、大気擾乱によって生成された可能性がどの程度あるかという段階にとどまっているので、ぜひそれを補正する手法の開発に向けて頑張っていただきたい。

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

本研究は、当初の目標は達成されている。ただ、この問題は、科学的にも重要な課題であり、得られた変動が気象の影響と考えられるか否かの評価にとどまらず、ぜひ気象影響を除去するとどのような変動になるかという研究を進めていただきたい。

※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。

新規研究課題提案書

1. 研究課題名

GPSによる地殻変動監視の信頼性向上のための大気擾乱の影響評価に関する研究

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

(3) 防災に関する研究開発

5. 研究開発の背景・必要性

国土地理院は、災害対策基本法に基づく指定行政機関としての防災活動の支援や、地震や火山活動の解明への寄与を目的として、地殻変動を監視し、関連機関等に地殻変動情報の提供を行っている。地震や火山活動に伴う地殻変動の監視は、主に全国に展開されたGEONETの観測データを速やかに解析することで実施しており、重要な役割を担っている。しかしながら、電波計測技術を応用したGPS測位結果には様々な誤差が含まれており、その誤差のため、速やかにかつ信頼性の高い地殻変動情報を提供することが困難な場合も生じている。このような状況を改善するためには、GPSに含まれる誤差の補正手法の高度化が求められる。

GPSに含まれる誤差には様々な要因があるが、これまでGEONETにより地殻変動を把握する上で、特に大気遅延に起因する誤差が問題となる場合が多かった。大気遅延に起因する誤差については、これまでの研究により、大気遅延量の推定誤差が見かけ上の季節的な上下変動を生じさせることや、大気遅延勾配の推定により前線などの広範囲に及ぶ測位誤差が大幅に軽減されることが明らかとなっている。しかし、時間、空間スケールの小さな大気擾乱に起因すると考えられる誤差が依然として見られており、地震や火山活動時における速やかな信頼性の高い地殻変動把握の妨げとなる場合がある。このことから、地震や火山活動時において早期にかつ信頼性の高い地殻変動把握を可能とするためには、時間、空間スケールの小さな大気擾乱による測位誤差への影響評価あるいは誤差軽減手法が必要とされる。

6. 研究開発の目的・目標

GPSによる地殻変動監視において、大気擾乱が測位誤差に与える影響を評価することにより、早期のかつ信頼性の高い地殻変動把握に寄与することを目的とする。そのために、高分解能な数値気象モデルを用いて、大気擾乱と測位誤差の関連性を明らかにするとともに、数値気象モデルから得られる大気状態を元に、大気擾乱による測位誤差への影響を評価することが可能なプロトタイプシステムを構築することを目標とする。

7. 研究開発の内容

- ・ 高分解能な数値気象モデルを用いて、地形などによる地域的な気象現象や急激に変化する気象現象

など特徴的な気象条件ごとに、大気擾乱と測位誤差の関連性の調査を行なう。

- ・対象領域において高分解能な数値気象モデルを生成し、影響評価のための計算が可能な環境を整備する。
- ・大気擾乱と測位誤差の関連性の調査から、数値気象モデルの有意な分解能を明らかにするとともに、特徴的な気象条件ごとに大気擾乱の測位結果への影響について数値気象モデルを用いて評価し、その有効性を明らかにし、取りまとめる。
- ・数値気象モデルを用いた大気擾乱の測位結果への影響評価を指標化する。
- ・数値気象モデルを用いた測位誤差軽減効果について評価を行う。
- ・数値気象モデル生成、影響評価計算を自動的に行い、かつ取扱いが容易なツールを備えた大気擾乱の影響評価システムのプロトタイプを構築する。

8. 研究開発の方法、実施体制

数値気象モデルの生成においては一般に利用可能な既存ソフトウェアを利用し、大気遅延量の計算においては、国土地理院において開発された衛星測位システムシミュレータを活用する。担当は、GPS解析に精通した主任研究官2名の協力のもと、気象分野に関する知識を有する研究官1名が主となって行う。

9. 研究開発の種類

(2) 応用研究

10. 現在までの開発段階

(1) 研究段階

11. 想定される成果と活用方針

大気擾乱の測位誤差への影響評価が可能なプロトタイプシステムが構築される。このシステムを地殻変動監視に活用することにより、Q3解析やR3解析の定常解析や緊急解析結果における大気擾乱による測位誤差を評価することが可能となり、地殻変動把握の信頼性の向上に寄与することが期待される。

波及効果として、一般のGPS測量への応用や、本研究を通して得られた小スケールの大気擾乱と測位誤差の関連性、数値気象モデルを用いた測位結果への影響評価の有効性に関する知見が、GPSや大気遅延が誤差要因となる他の宇宙測地技術における測位精度向上に寄与することが期待される。

12. 研究に協力が見込まれる機関名

気象庁、独立行政法人情報通信研究機構、独立行政法人防災科学技術研究所、財団法人電力中央研究所、国立大学法人筑波大学等

13. 関係部局等との調整

測地観測センター地殻監視課

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8342)

FAX : 029-864-2655

新規研究課題事前評価表

1. 研究課題名

GPSによる地殻変動監視の信頼性向上のための大気擾乱の影響評価に関する研究

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

「国土地理院研究開発基本計画」のうち、重点研究開発課題の5-(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」において、GPS等GNSSによる測量の活用を図るため、各種の誤差の低減に関する研究開発を行い、測量等において必要な知見・成果等が得られることを目指すとされている。また、5-(3)-③「防災に資する地盤変動・地形情報の抽出の高度化に関する研究開発」において、地盤変動の状況をより迅速かつ高精度に把握するため、地盤変動の把握技術の高度化を図るとされている。以上から、本研究の方向性は妥当である。

5. 国内・国際的研究状況を踏まえての実施の妥当性

国土地理院では、大気遅延に起因する誤差については、これまでに大気遅延量の推定誤差が見かけ上の季節的な上下変動を生じさせることや、大気遅延勾配の推定により前線などの広範囲に及ぶ測位誤差が大幅に軽減されることを明らかにした。しかし、時空間スケールの小さい誤差については未だ解決されていない。また、大気遅延誤差の軽減手法として、数値気象モデルを用いた研究が国内外で行われているが、上記のような小スケールの誤差に関する研究はほとんど行われていない。

一方、国土地理院において開発した衛星測位システムシミュレータにより数値気象モデルから測位誤差の再現が可能な環境が整備されている。また、数値気象モデルの生成のためのソフトウェアを手軽に扱うことが可能となっていることから、小スケールの誤差を対象として研究を行う環境が整っており、本研究を実施することは妥当である。

6. 背景・必要性の妥当性

建議「地震及び火山噴火予知のための観測計画の推進について」のうち、3-(2)「宇宙技術等の利用の高度化」において、GPSによる地殻変動観測の高精度化のため、電離層及び大気による遅延誤差の補正手法について高度化を図るとされている。本研究で実施する大気遅延誤差の影響評価は、大気遅延誤差の補正手法の高度化に寄与するものであり、本研究の必要性は妥当である。

7. 目標設定の妥当性

大気擾乱による測位誤差の影響評価を可能とするためには、大気擾乱と測位誤差の関連性が明らかでなければ評価することはできない。また、早期にかつ信頼性の高い地殻変動の把握に活用するためには、大気擾乱による測位誤差の影響評価を複雑な手続きを必要とせずに実施するためのシステムが必要である。したがって、本研究の目標設定は妥当である。

8. 国土地理院が実施すべき妥当性

国土地理院は、防災や地震・火山活動の解明のためにGEONETによる地殻変動観測を実施しており、地震

や火山活動等が発生した場合には早期にかつ信頼性の高い地殻変動情報を提供することが求められる。本研究は、国土地理院が提供する地殻変動情報の信頼性向上に寄与するものであるので、国土地理院で実施することは妥当である。また、これまでに、大気遅延誤差に関する研究や、衛星測位システムシミュレータの開発等を実施しており、本研究を効率的に実施する環境が整っていることから、国土地理院が実施することは妥当である。

9. 内容、方法、実施体制の妥当性

- ・大気擾乱と測位誤差の関連性を明らかにし、大気擾乱が測位誤差に及ぼす影響を評価することを可能とすることは、地殻変動の把握の信頼性向上に寄与できる。また、容易に取扱うことができる影響評価システムを構築することは、災害時の迅速な対応が求められる際に重要であることから、本研究の実施内容は妥当である。
- ・既存の開発成果および既存のソフトウェアを活用するので、数値気象モデルの高分解能化およびシステム構築を効率的に行うことが可能である。
- ・GPS解析に精通した研究者および気象分野に関する知識を有する研究者が協力して本研究を実施するので、実施体制は妥当である。

10. 省内他部局等との調整の状況

本研究で必要となる気象庁によるメソスケール数値気象モデルについては、測地観測センターから提供を受けている。また、地殻変動監視の上で大気擾乱の影響が問題となるケースに関する情報交換を行っている。

11. 他省庁、異分野等との連携方針等

数値気象モデルの生成にあたっては、気象庁、国立大学法人、電力中央研究所等において実績があるので、数値気象モデルに関する情報交換を行って進める予定である。また、情報通信研究機構においては、数値気象モデルから大気遅延計算手法に関して情報交換を行って進める予定である。

12. 成果活用方針の妥当性

地震発生時や火山活動時においては、早期に地殻変動を把握するために、Q3解析やR3解析の定常解析や緊急解析結果が用いられるが、このような解析結果では、大気擾乱に起因すると考えられる誤差が含まれ、早期の判断を妨げられる場合がある。本研究によって構築されるシステムは、このような場合で有効であるので、GEONETによる地殻変動把握に活用することは妥当である。また、一般のGPS測量や他の宇宙測地技術においても、大気擾乱による誤差は大きな誤差要因となっているので、成果の活用方針は妥当である。

13. その他、課題内容に応じ必要な事項

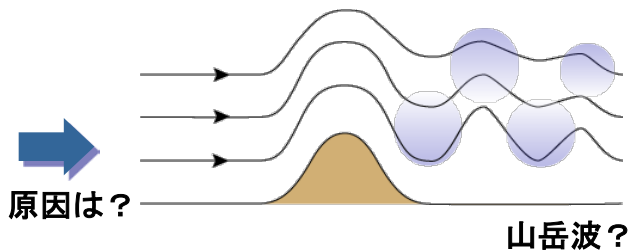
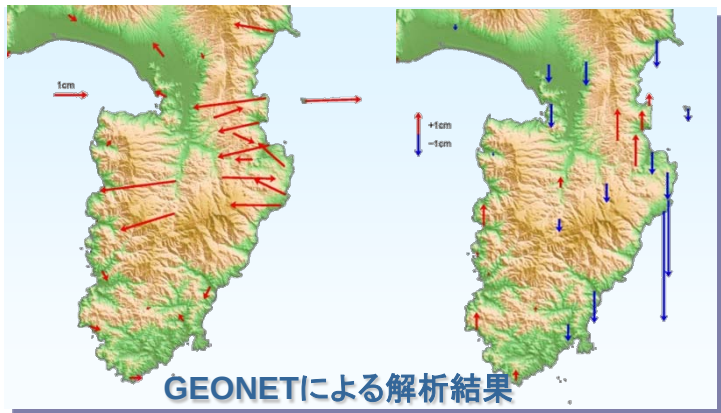
特になし

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8342) FAX : 029-864-2655

GPSによる地殻変動監視の信頼性向上のための 大気擾乱の影響評価に関する研究

GEONETによる地殻変動監視 → 関係機関に地殻変動情報の提供



急激な気象変化、山岳波などの局所的な気象現象等の時間・空間スケールの小さな大気擾乱による大気遅延誤差は未解決

大きな測位誤差が疑われ、地殻変動が速やかに把握できない場合がある

研究内容

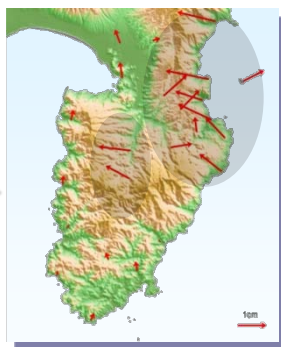
本研究

■ 小スケール大気擾乱と測位誤差との関連性解明

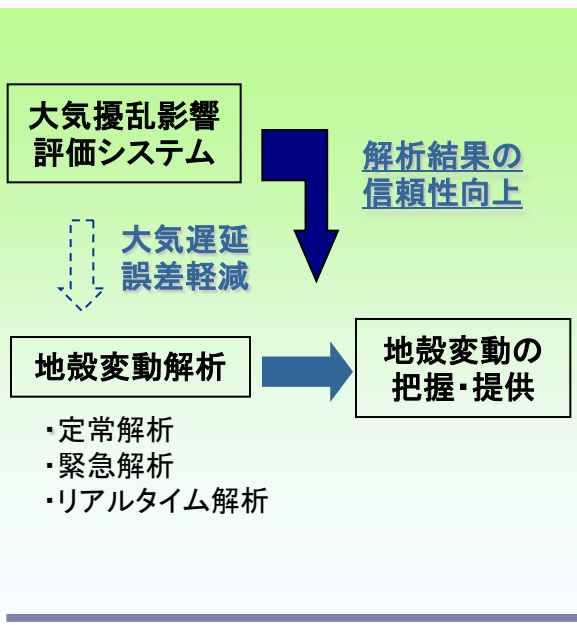
- ・ 高分解能数値気象モデルを利用
- ・ 数値気象モデルによる測位結果への影響評価の有効性の取りまとめ
- ・ 影響評価の指標化
- ・ 測位誤差軽減効果の評価

■ 大気擾乱影響評価システムの構築

- ・ 数値気象モデルの生成
- ・ 大気遅延量の推定
- ・ 大気擾乱の影響評価



数値気象モデルから再現した測位誤差パターン



研究効果

早期のかつ信頼性の高い地殻変動の把握

波及効果

- 一般測量等の観測時間の短いGPS測位の精度向上
- GPS以外の宇宙測地技術の精度向上