資料２

GNSSによる地殻変動推定における
時間分解能向上のための技術開発

資料２－１：終了時評価書（研究者が記入）

資料２－２：成果公表リスト

資料２－３：説明資料

資料２－４：終了時評価書（分科会委員が記入）

資料２－５：提案時資料

資料２－１

研究課題終了時評価書

１．研究課題名：GNSSによる地殻変動推定における時間分解能向上のための技術開発

２．研究期間：平成２６年 ４月　　～　平成２９年３月　（３年間）

３．予算：特別研究経費　18,517千円　（３年間の総額）

４．成果の概要

（１）キネマティックGNSS時系列の誤差低減技術の開発

キネマティック GNSS 時系列の支配的な誤差要因である、観測点周辺の地物からの信号反射の影響によるマルチパス誤差について、建物などの固定された地物が原因で誤差の時間変化が少ない場合、ある時期の位相残差をスタックしたものをキネマティック GNSS 解析時の補正量として利用することで測位安定性が向上することを確認した。また、樹木が原因の場合など、誤差の時間変化が顕著な場合について、位相残差が大きな仰角・方位角を手動で抽出し、そこから到来する電波を解析に使用しないようマスクをかけることで測位安定性が向上することを確認した。更に、それぞれについて GNSS 解析ソフトウェアの改修を行い、リアルタイムキネマティック解析に適用可能とした。

（２）キネマティックGNSS時系列から地殻変動を抽出・モデル化する技術の開発

地震や火山活動による地殻変動は複数の観測点で共通信号として現れることに着目し、経験的直交関数解析及び独立成分分析と呼ばれる統計的手法で、GNSSキネマティック測位の座標時系列を時空間的に相関があるパターン（モード）の重ね合わせで表現した上で、地殻変動に関連するモードのみを抽出することにより地殻変動を高精度に抽出を行う手法を開発した．箱根火山周辺のGNSS観測点のキネマティックGNSS時系列に独立成分分析を適用した結果、火山性地殻変動が高い精度で抽出できることを確認した。

（３）リアルタイムキネマティック GNSS 時系列から迅速に地殻の状態を推定する（プロトタイプ）システムの構築

①地震時地殻変動の迅速なモデル化

まず、地震による地殻変動をモデル化するソフトウェアを開発した。開発したソフトウェアは、矩形断層すべりおよび三角要素に基づくプレート境界滑り分布の推定を行うものであり、従来のソフトウェアに比べ、高速（プレート境界すべりでも15秒程度）で動作するように設計されている。次に、開発したソフトウェアを測地観測センターが開発しているREGARDシステム（津波予測のための迅速な地震規模推定のため、リアルタイムキネマティックGNSS時系列から即時的に断層モデルを推定するシステム）に組み込んだ。また、東北地方太平洋沖地震を想定したシミュレーションを行い、地震発生後150秒後程度で適切な地震規模の推定が可能であることを示した。さらに、本システムの実運用を行い、平成28年熊本地震（Mj7.3）発生時にリアルタイムでの断層モデル推定に成功した。

②火山性地殻変動の迅速なモデル化

火山性地殻変動の力源をモデル化するソフトウェアを開発した。開発したソフトウェアは、多

様な形状の力源のモデル化が可能であること、また、山岳地域で地殻変動を計算する際に問題となる地形効果を補正することができること、アンサンブルカルマンフィルタにより、力源の状態変化（位置、形状、圧力等）を逐次推定可能なこと、などの特徴を有する。また、開発したソフトウェアを用いて2000年三宅島噴火の際のマグマ貫入イベントの前後の地殻変動を分析し、マグマだまりの挙動を詳細に明らかにした。さらに、開発したソフトウェアをもとに、リアルタイムキネマティックGNSS時系列から火山性地殻変動の力源の状態変化を逐次推定するシステムを構築した。

５．当初目標の達成度

（１）当初計画における目標

本研究は、過去の地震や火山活動に関して、GNSS解析技術を高度化し、得られるGNSS時系列から時間分解能5分程度で5㎜程度の地殻変動情報を抽出する技術を開発すること、また、リアルタイムGNSS解析技術を高度化した上で、得られるGNSS時系列データから、迅速に火山活動時のマグマの状態等を推定するプロトタイプシステムを開発し、火山活動の推移等の監視に寄与することを目標とする。

（２）最終達成度

本研究では、キネマティックGNSS解析技術の高度化手法として、位相残差に基づく補正および仰角・方位角マスクによる遮蔽という２つの手法を解析時に適用することで、キネマティックGNSS時系列を高精度化した。次に、主成分分析および独立成分分析に基づき地殻変動情報を目標どおりの高い精度で抽出する手法を開発した。さらに、それらの技術を適用した上で、リアルタイムキネマティックGNSS時系列から即時的に断層モデルおよび地震規模を推定するシステムおよび火山性地殻変動の力源の状態変化（位置、形状、圧力など）を逐次推定するプロトタイプシステムを構築した。

以上のことから、研究の当初目標は十分達成されたと言える。

６．成果公表状況

研究報告書	3 件
発表論文	7 件
学会発表	13 件
特許等	0 件

７．成果活用の見込み

本研究で開発された地震による地殻変動から迅速に断層モデルおよび地震規模を推定するソフトウェアについては、「津波予測支援システム(REGARD)」に組み込まれて実運用されており、今後は関係省庁と連携して津波被害の軽減に活用される。

また、本研究で開発された火山性地殻変動逐次モデリングプロトタイプシステムは、宇宙測地研究室および地殻変動研究室で運用され、火山活動が活発化した際のマグマの状態等の推定に活用される。

８．達成度の分析

（１）有効性の観点からの分析

本研究で開発した、本研究で開発された地震による地殻変動から迅速に断層モデルを推定するソフトウェアについては、「津波予測支援システム(REGARD)」に組み込まれて実運用されており、今後関係省庁と連携して津波被害の軽減に活用される。また、本研究で開発した火山性地殻変動逐次モデリングプロトタイプシステムは、火山噴火予知連絡会等への情報提供のため用いられ、火山活動の把握等への貢献が期待される。よって本研究の成果は防災上有効なものである。

（２）効率性の観点からの分析

リアルタイムキネマティックGNSS時系列から迅速に地震すべりおよび地震規模の推定を行うシステムについては、測地観測センターで開発している「津波予測支援システム(REGARD)」に本研究で開発したソフトウェアを組み込むことで、効率的な開発が実行できた。

火山活動に伴う地殻変動源推定ソフトウェアの開発においては、一部機能について既存のプログラムの提供を受け、それを組み込むことで効率的に開発が実行できた。

９．残された課題と新たな研究開発の方向

本研究で開発した火山性地殻変動逐次モデリングプロトタイプシステムで用いられているリアルタイムキネマティックGNSS解析は、干渉測位法を用いているが、対象とする火山を増やした場合、観測点数の増加に伴う計算負荷の増大が懸念される。

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 8331)　FAX：029-864-2655　e-mail：munekane-h96nu@mlit.go.jp

代表担当者：宇宙測地研究室　宗包　浩志

資料２－２

平成２６年度～平成２８年度特別研究
「GNSS による地殻変動推定における時間分解能向上のための技術開発」
に関わる成果公表リスト

［研究報告書］（3 件）

・国土地理院調査研究年報（平成 26 年度，平成 27 年度，平成 28 年度（予定））

［発表論文］（7 件）

（査読付き）（4 件）

Kawamoto, S., Y. Ohta, Y. Hiyama, M. Todoriki, T. nishimura, T. Furuya, Y. Sato, T. Yahagi, and K. Miyagawa: REGARD: A new GNSS-based real-time finite fault modeling system for GEONET, J. Geophys. Res., in press.

Kawamoto, S., Y. Hiyama, Y. Ohta, and T. Nishimura (2016): First result from the GEONET real-time analysis system (REGARD): the case of the 2016 Kumamoto Earthquakes, Earth, Planets and Space, in press.

Kawamoto, S., K. Miyagawa, T. Yahagi, M. Todoroki, T. Nishimura, Y. Ohta, R. Hino, and S. Miura (2015): Development and Assessment of Real-Time Fault Model Estimation Routines in the GEONET, IAG Symposia, 45, doi: 10.1007/1345_2015_49.

Munekane, H., J. Oikawa, and T. Kobayashi (2016): Mechanisms of step-like tilt changes and very long period seismic signals during the 2000 Miyakejima eruption: Insights from Kinematic GPS, J. Geophys. Res., doi:10.1002/2016JB012795.

（査読無し）(3 件)

川元智司，檜山洋平，古屋智秋，佐藤雄大，太田雄策，西村卓也，等々力賢 (2016): 電子基準点リアルタイム解析システム（REGARD）プロトタイプの開発，国土地理院時報, 128.

Kawamoto, S., B. Miyahara, Y. Hiyama, Y. Sato, T. Furuya, Y. Ohta, T. Noshimura, and M. Todoriki (2016): Real-time GNSS positioning system REGARD for rapid earthquake moment estimates, Proceedings of FIG 2016.

Kawamoto, S., Y. Hiyama, R. Kai, F. Suga, K. Yamaguchi, T. Furuya, S. Abe, and N. Takamatsu (2016): Crustal deformation due to the Kumamoto Earthquake revealed by GEONET, Bulletin of GSI, in press.

［学会等発表］（13 件）

Kawamoto, S., K. Miyagawa, T. Yahagi, M. Todoroki, T. Nishimura, Y. Ohta, R. Hino, and S. Miura (2014):Development and reliability of Real-time fault model estimation routines in the GEONET real-time processing system, paper presented at GENAH 2014, Matsushima, Japan.

Munekane, H. (2014): The Very-Long-Period Seismic Signals at Miyake-Jima Volcano during the Caldera Formation Revisited: Insights from GPS Observations, paper presented at GENAH 2014, Matsushima, Japan.

宗包浩志(2014)：三宅島 2000 年噴火のカルデラ形成期に観測された 50 秒パルス力源の再検討 -キネマティック GPS 解析から分かったこと-，2014 年度火山学会秋季大会.

宗包浩志(2014)：三宅島 2000 年噴火のカルデラ形成期に観測された 50 秒パルス力源の再検討 -キネマティック GPS 解析から分かったこと-，日本測地学会第 122 回講演会.

Munekane, H. (2014): Kinematic GPS analysis gives new insights on the origin of the very-long-period seismic signals at Miyake-jima volcano during the caldera formation, paper presented at 2014 AGU Fall meeting, San Francisco.

川元智司・宮川康平・佐藤雄大・西村卓也・太田雄策・日野亮太・三浦哲・等々力賢(2015): GEONET リアルタイム解析システム（REGARD）による地震規模即時推定，地球惑星科学連合大会 2015 年大会.

Kawamoto, S., K. Miyagawa, Y. Sato, T. Nishimura, Y. Ohta, R. Hino, and S. Miura, and M. Todoroki (2015):Real-time Earthquake Magnitude Estimation by the GEONET real-time analysis system: REGARD, paper presented at IUGG 2015, Prague, Czech.

宗包浩志(2015)：三宅島 2000 年噴火のカルデラ形成期に観測された 50 秒パルスの力源の再検討（２）--三軸楕円体モデル--，2015 年度火山学会秋季大会.

川元智司・宗包浩志（2015)：位相残差を用いた GNSS キネマティック解析の誤差低減の試み，日本測地学会第 124 回講演会.

川元智司・檜山洋平・佐藤雄大・古屋智秋・太田雄策・西村卓也・等々力賢（2016）：GNSS リアルタイム解析による地殻変動の即時把握：GEONET リアルタイム解析システム（REGARD）の開発，日本地球惑星科学連合 2016 年大会.

川元智司・檜山洋平・国土地理院 GEONET グループ（2016）：GEONET によって検出された平成 28 年熊本地震による地殻変動，日本地球惑星科学連合 2016 年大会.

宗包浩志(2016)：三宅島 2000 年噴火前後の地殻変動力源の再検討，2016 年度火山学会秋季大会.

川元智司・檜山洋平・高松直史・太田雄策・西村卓也（2016）：GEONET リアルタイム解析システム REGARD による平成 28 年熊本地震におけるリアルタイム断層推定，日本測地学会第 126 回講演会.

［その他］（0 件）

資料２－３

GNSSによる地殻変動推定における時間分解能向上のための技術開発

【研究期間】
平成26年4月～平成29年3月（3年間）
【予算】
特別研究経費　18,517 千円（３年間の総額）

国土地理院 地理地殻活動研究センター
宇宙測地研究室
宗包　浩志

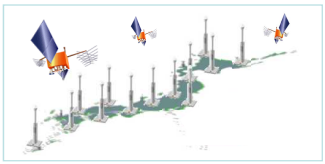
国土地理院
Geospatial Information Authority of Japan

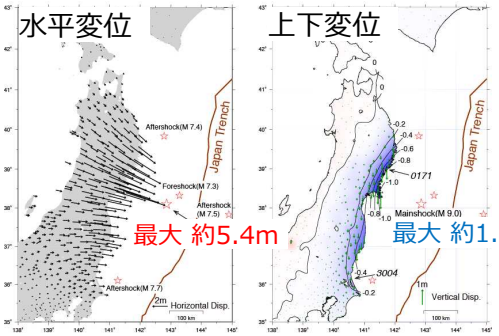
本研究の背景・必要性

国土地理院

国土地理院では、電子基準点等によって地殻変動を監視し、得られた情報を政府の委員会等に提供している

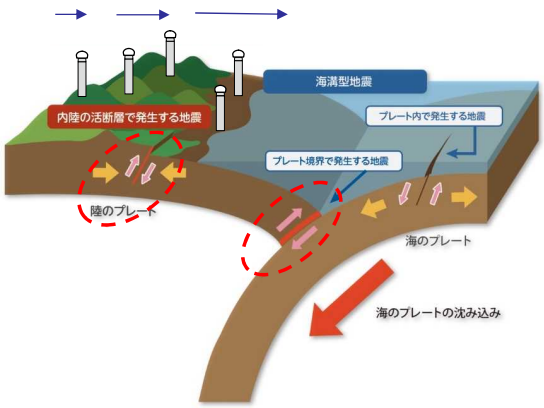
国土地理院が展開する電子基準点網（GEONET）





東北地方太平洋沖地震による地殻変動

地殻変動



GEONETの定常解析（提案時）

解析の種類	解析に用いるデータ（時間分解能）	解の間隔	データ取得後、解が出るまでの時間	水平精度（座標再現性の代表的な値）
F3（最終解）	24時間RINEX	1日	2～3週間後	2～3mm
R3（速報解）	24時間RINEX	1日	2日後	2～3mm
Q3（迅速解）	6時間RINEX	3時間	約3～９時間後	1cm

＊いずれも、ある時間幅（6時間ないし24時間）の平均的な位置を求めるスタティックGNSS測位解である。

東日本大震災（2011年3月11日）の発生に対し、建議（※）において、地震や火山噴火の被害軽減のための取り組むべき方針が見直された

（※）地震及び火山噴火予知のための観測研究計画の見直しについて（建議）

将来の活動予測による減災・防災につなげるために取り組むべき方針は、

（１）過去に発生した地震・火山噴火の発生に至る過程の理解

（２）現況の地殻活動の的確かつ迅速な把握

高時間分解能で地殻変動の推移把握を可能とする（リアルタイム）キネマティックGNSS測位の活用が有効

＊キネマティックGNSS測位：GNSSのデータ取得間隔（１秒～30秒）で、観測局の時々刻々の位置を求める測位手法のこと

本研究の目的・目標

国土地理院

（リアルタイム）キネマティックGNSS時系列を用いて

- 地殻変動を高い時間分解能で抽出する技術の開発
- 地震・火山噴火の発生過程の理解に基づく地殻状態の迅速推定システムの開発

（１）時系列に含まれる誤差の低減技術の開発（平成26年度）

主要な誤差要因であるマルチパス誤差低減技術を開発する

（２）地殻変動を抽出する技術の開発（平成27年度）

複数の観測点に現れる共通信号に注目した地震・火山起源の地殻変動抽出手法を開発する

（３）地殻状態の迅速推定（プロトタイプ）システム構築（平成27～28年度）

（１）と（２）で開発した技術を結合し、迅速に地震や火山活動による地殻変動をモデリングする（プロトタイプ）システムを構築する

① 地震時地殻変動の迅速なモデル化
② 火山性地殻変動力源の迅速なモデル化

成果 (1):時系列に含まれる誤差の低減技術の開発

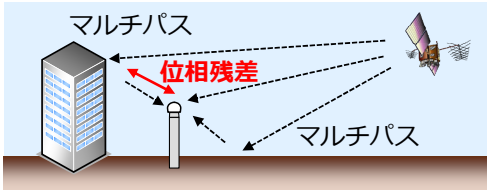
国土地理院

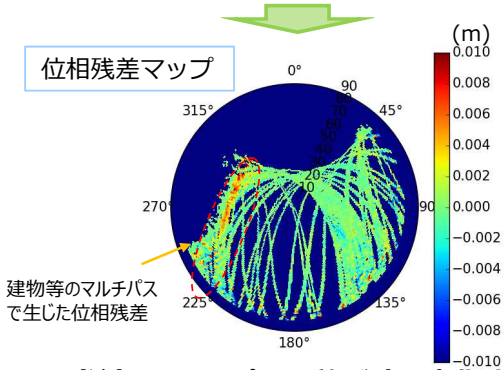
位相残差に基づくマルチパス誤差の補正手法の開発

GNSS衛星はほぼ同じ軌道面を繰り返し飛んでいる

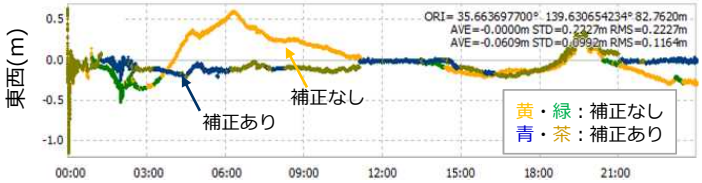
- **固定観測点**では、同じ視線方向から繰り返し受信
- 周辺地物が同じならば、同じ視線方向の衛星からのマルチパス誤差がほぼ一定

→ **位相残差マップをもとに、マルチパス誤差の補正ファイルを作成して適用**





電子基準点世田谷での例



補正	標準偏差（cm）東西/南北/上下			fix率(%)
なし	20.2	8.8	22.7	22.3
位相残差に基づく補正	**9.8**	**4.8**	**21.1**	**40.4**

特に水平成分で精度改善し、本手法の有効性を確認
→ リアルタイム解析への組み込みを行った

（注）マルチパス誤差が時間変化する場合は、マスクを作成してデータを除外（参考資料）

成果 (2): 地殻変動シグナルの抽出手法の高度化

国土地理院

地震や火山活動による地殻変動は複数の観測点で共通信号として現れる

- **主成分分析・独立成分分析**と呼ばれる統計的手法で、時空間的に相関があるパターン（モード）の重ね合わせでGNSSキネマティック測位の座標時系列を表現
- **地殻変動に関連するモードのみを抽出**することで地殻変動を高精度に抽出

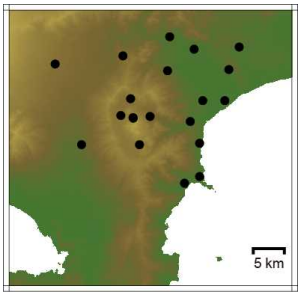
$$x_j(t) = a_{j1}s_1(t) + a_{j2}s_2(t) + \cdots + \cancel{a_{jn}s_n(t)}$$

座標時系列　第1モード　第2モード　無関係なモード

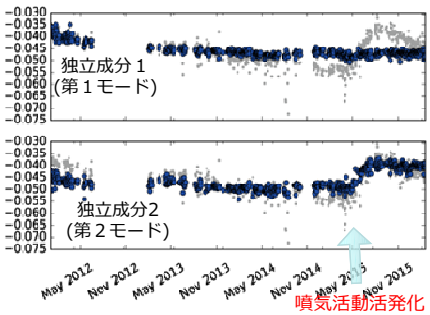
箱根火山周辺のGNSS時系列への適用例

独立成分１：東北地方太平洋沖地震の**余効変動**に対応
独立成分２：箱根火山の活動に伴う地殻変動に対応

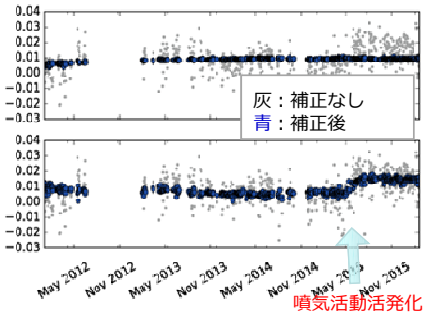
観測点配置



南北変位



上下変位



Slide 7

時系列のノイズが大幅に軽減され、本手法の有効性を確認

成果 (3): 地殻状態の迅速推定システムプロトタイプ構築

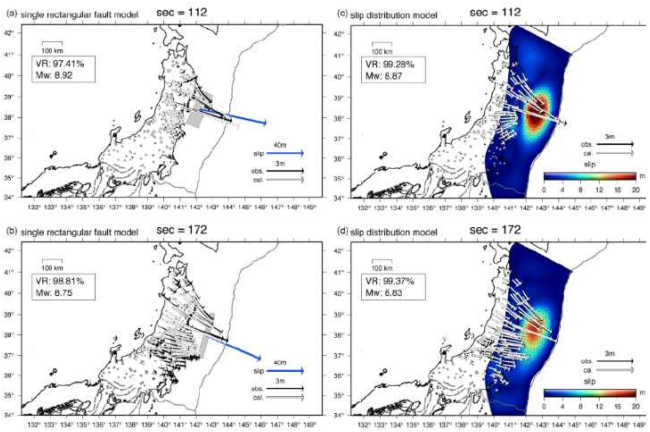
国土地理院

① 地震時地殻変動の迅速なモデル化

REGARD システムの構築

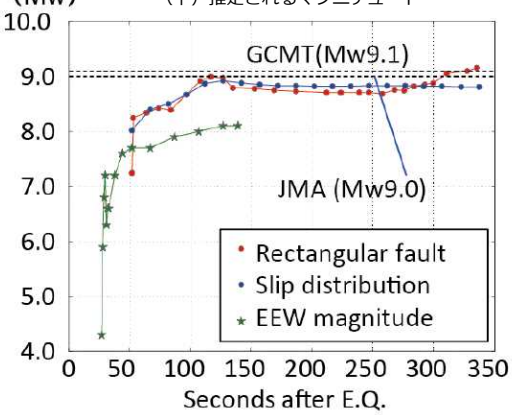
(REal-time GEONET Analysis system for Rapid Deformation monitoring)

津波予測のための適時的な地震規模推定を目指し、リアルタイムキネマティックGNSS時系列から即時的に断層モデルを推定するシステム



Kawamoto et al. (JGR, in press)

東北地方太平洋沖地震を想定したREGARDの出力
（上）推定される矩形断層およびすべり分布
（下）推定されるマグニチュード



・地震に伴う断層モデル推定ソフトウェアをREGARDへ組み込んだ。
・東北地方太平洋沖地震を想定したシミュレーションで、地震発生後150秒後程度で地震規模が推定できることを示した。

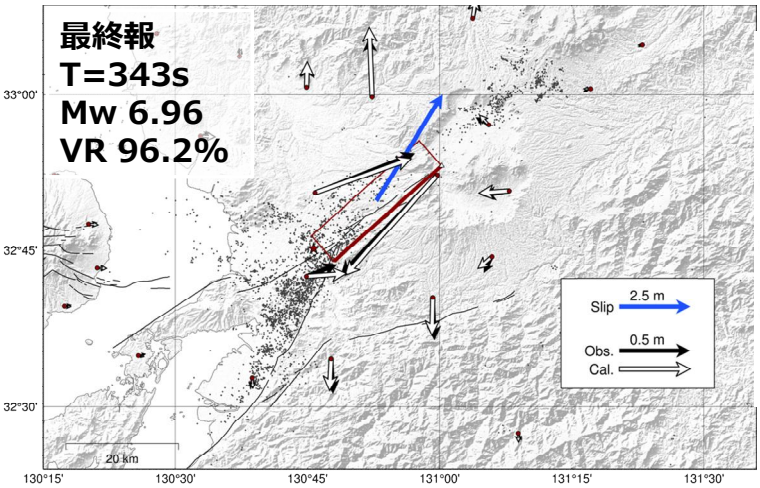
Slide 8

① 地震時地殻変動の迅速なモデル化

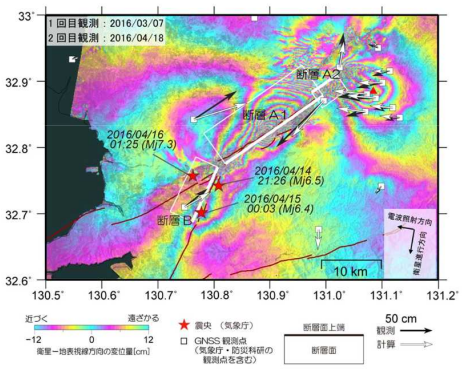
REGARD システムの構築

(REal-time GEONET Analysis system for Rapid Deformation monitoring)

リアルタイムでの運用事例：平成28年熊本地震（Mj7.3）



（参考）干渉SARのデータを取り入れた最終モデル(数週間後)



最も大きくすべった断層A1：Mw 6.96 がREGARDでモデル化されている

Kawamoto et al. (EPS, 2016)

平成28年熊本地震の際にも正常に動作し、迅速に地震規模が推定できた

②火山性地殻変動の迅速なモデル化

火山性地殻変動逐次モデリングプロトタイプシステムの構築

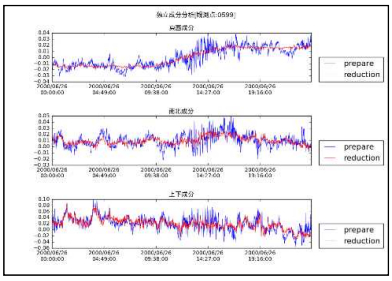
リアルタイムキネマティックGNSS時系列から火山性地殻変動の力源の状態変化（位置、形状、圧力など）を迅速に逐次推定するプロトタイプシステムを構築した*

火山性地殻変動力源逐次推定プロトタイプシステムの概要

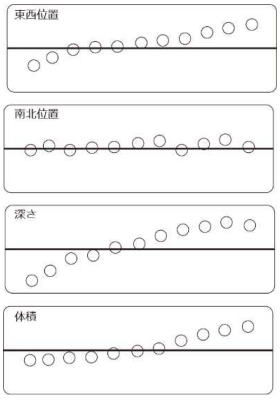
リアルタイムキネマティック測位モジュール

GEONET1秒GNSSデータ　IGS超速報暦

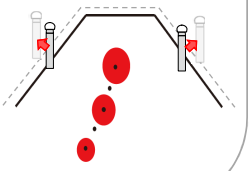
主成分分析・独立成分分析による火山性地殻変動抽出



火山性地殻変動力源の状態変化推定



火山性地殻変動から推定される力源の状態変化（位置、形状、圧力など）の逐次推定（１時間おき程度）



＊現在外注にてシステム構築中

当初目標の達成度

国土地理院

目標	実施内容
キネマティックGNSS時系列の誤差低減技術の開発	支配的な誤差要因であるマルチパスについて、位相残差による補正、仰角・方位角マスクによる遮蔽が有効であることを示し、リアルタイム解析に実装
キネマティックGNSS時系列から地殻変動を抽出する技術の開発	主成分分析、独立成分分析により地殻変動を高精度に抽出するソフトウェアを開発
地殻状態の迅速推定（プロトタイプ）システム構築	以下の(プロトタイプ）システムを構築した １）地震断層すべりおよび地震規模の即時推定システム →REGARD ２）火山性地殻変動力源の状態変化 （位置、形状、圧力など）の逐次推定プロトタイプシステム

→　目標達成の見込み

成果活用の見込み

国土地理院

1. 本研究で開発された断層モデルを推定するソフトウェアについては、平成28年度に測地観測センターの**「津波予測支援システム(REGARD)」**システムに組み込まれ稼働中であり、関係省庁と連携して**津波被害の軽減に活用**される。

2. REGARDは、地震発生時の地殻変動および断層モデルの速報のため既に活用されている（例：熊本地震）

3. 本研究で開発された火山性地殻変動逐次モデリングプロトタイプシステムは、宇宙測地研究室および地殻変動研究室で運用され、**火山活動が活発化した際の地殻変動監視における力源の状態等の推定**に活用される。

残された課題と新たな研究開発の方向

国土地理院

本研究で開発した火山性地殻変動逐次モデリングシステムで用いられている
リアルタイムキネマティックGNSS解析は干渉測位法を用いているが、
対象とする火山を増やした場合、観測点数の増加に伴う計算負荷の増大が
問題となる。

Slide 13

以下参考資料

国土地理院

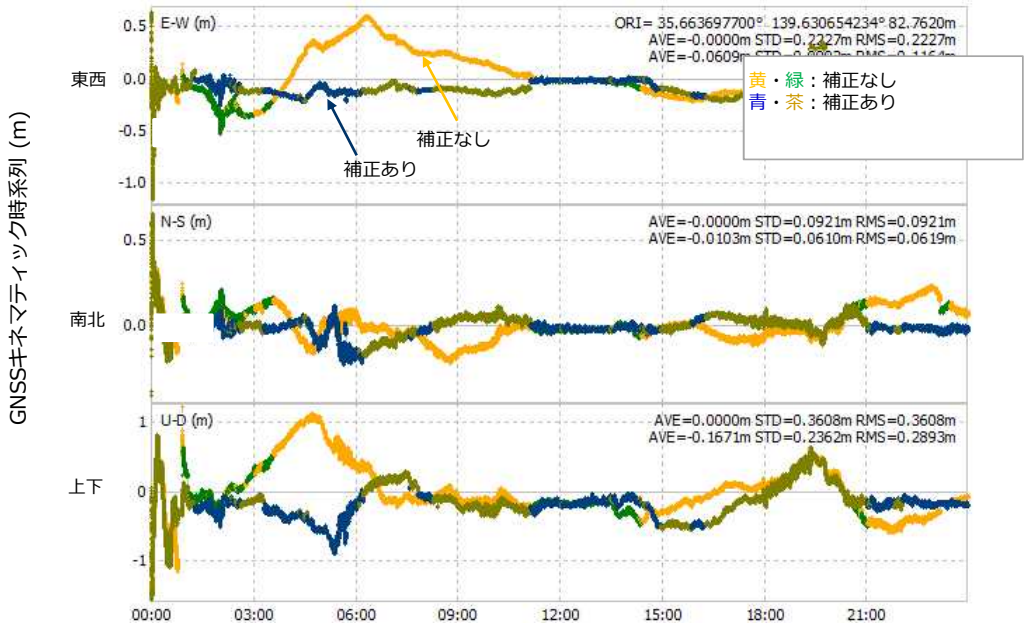
Slide 14

成果 (1):時系列に含まれる誤差の低減技術の開発

国土地理院

位相残差に基づくマルチパス誤差の補正手法の開発
補正結果の拡大図

電子基準点世田谷



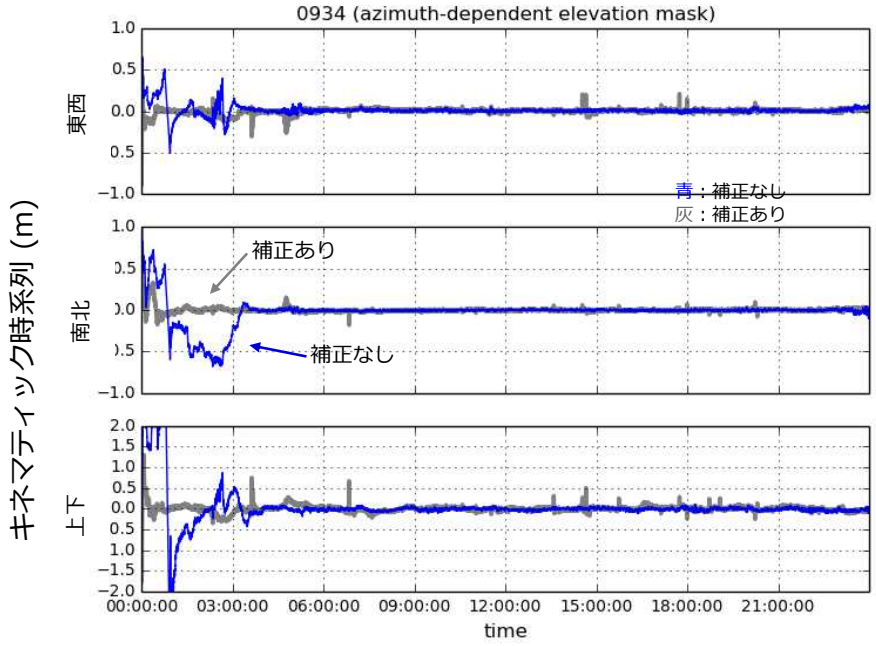
Slide 15

成果 (1): キネマティックGNSS時系列の高精度化

国土地理院

仰角・方位角マスクの適用によるマルチパス誤差低減手法の開発
適用結果拡大図

電子基準点山形



Slide 16

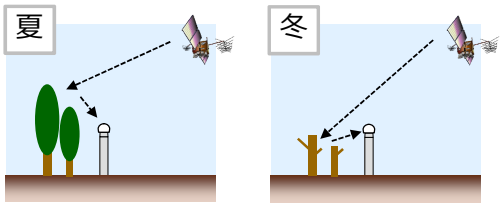
位相残差マップに基づく仰角・方位角マスクの開発

植生などが原因の場合、マルチパス誤差が一定とは限らない

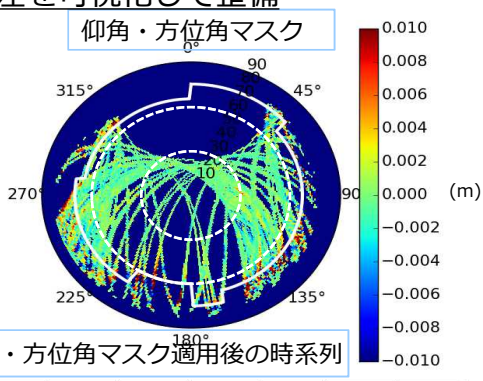
- ただし、残差が大きな方向はほぼ一定

→ **残差が大きな方向からのデータを解析で用いないよう、仰角・方位角マスクを作成して適用**

電子基準点ほぼ全点においてマルチパス誤差を可視化して整備

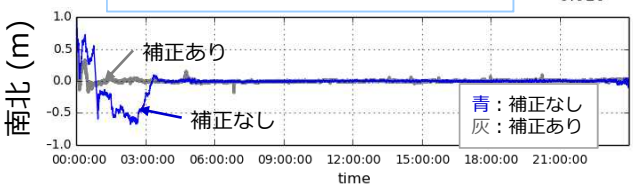


仰角・方位角マスク



上空視界（電子基準点山形）

仰角・方位角マスク適用後の時系列



方位角・仰角マスクの有効性を確認

→ リアルタイム解析への組み込みを行った

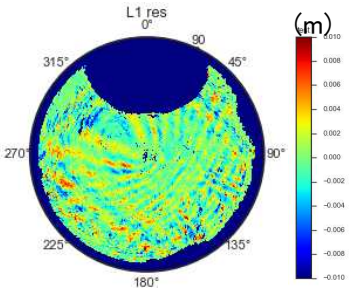
Slide 17

仰角・方位角マスクの開発

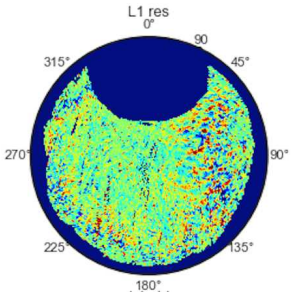
電子基準点ほぼ全点においてマルチパス誤差を可視化して整備

非常に詳細なマルチパス環境が把握可能に

「P長崎」



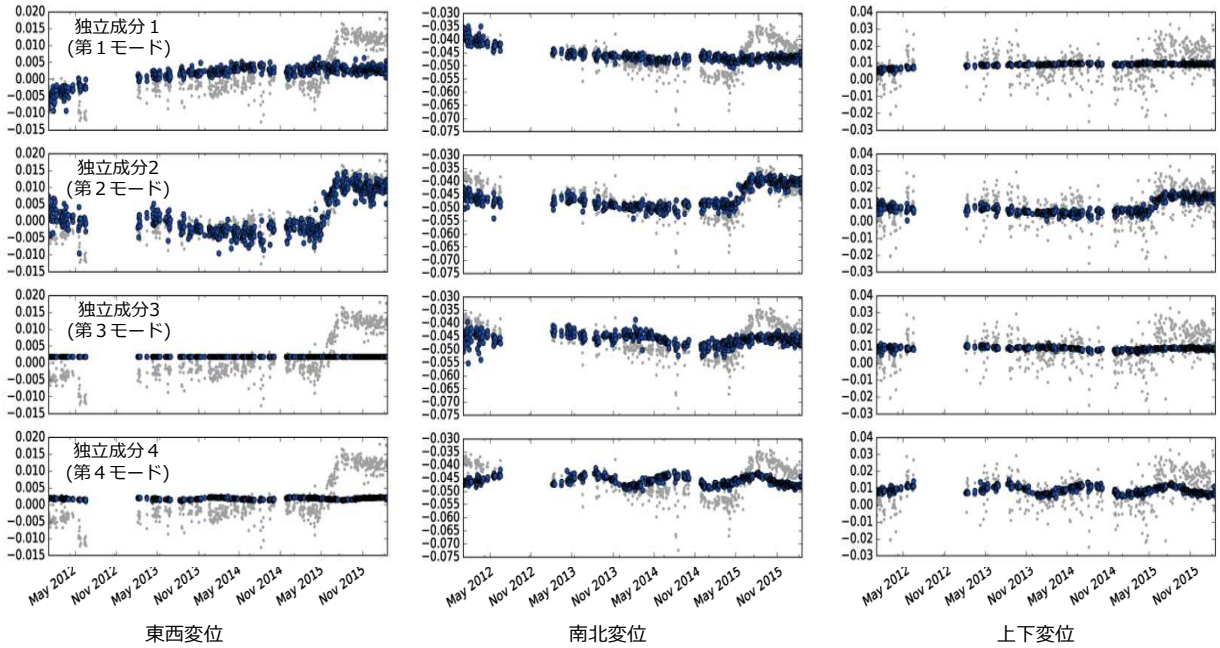
「山之内」



Slide 18

成果 (2): 地殻変動シグナルの抽出・モデリング手法の高度化

箱根火山周辺のGNSS時系列への適用例（全成分）



成果 (3): 地殻状態の迅速推定システムプロトタイプ構築

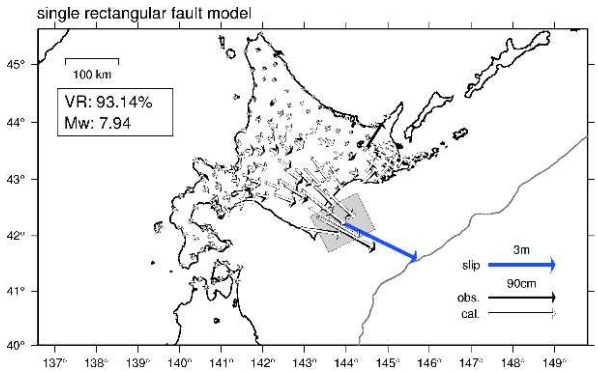
国土地理院

① 地震時地殻変動の迅速なモデル化

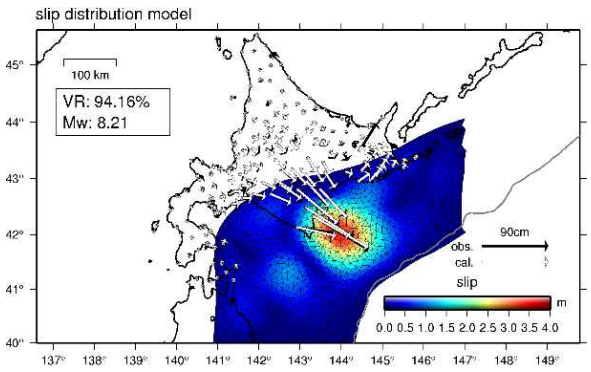
1) 地震に伴う断層モデル推定ソフトウェアの開発

- 単一矩形断層モデルによる断層パラメータ推定
- 三角要素による断層すべり分布推定

矩形断層モデル



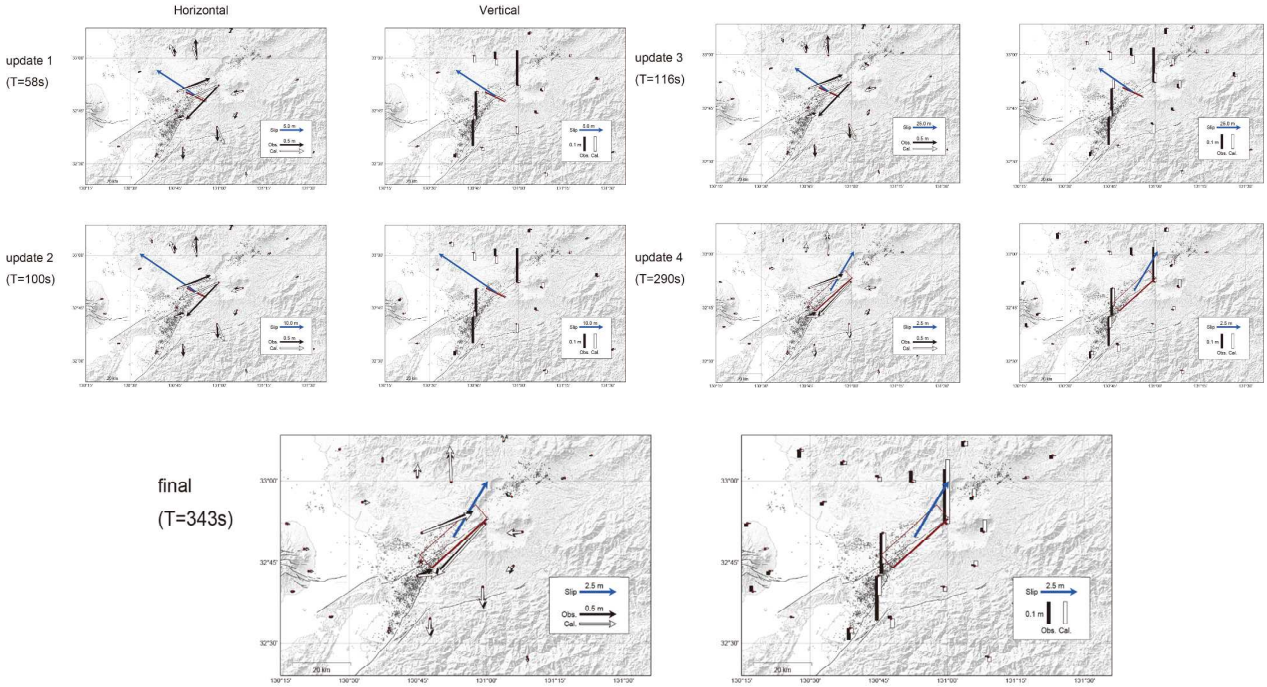
すべり分布モデル



2003年十勝沖地震に適用した例

発震後168秒後の矩形断層モデルおよび断層すべり分布モデル

成果 (3): 地殻状態の適時的推定システムのプロトタイプ構築



Kawamoto et al. (2016) Figure S1を改変

成果 (3): 地殻状態の迅速推定システムプロトタイプ構築

国土地理院

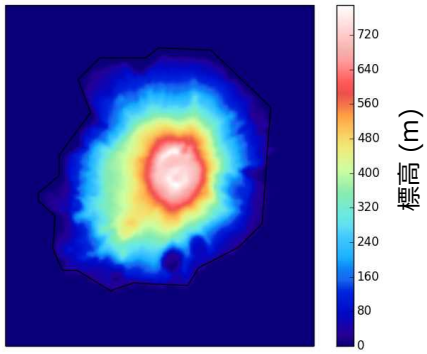
②火山性地殻変動の迅速なモデル化

1)火山活動に伴う地殻変動源推定ソフトウェアpydeformの開発

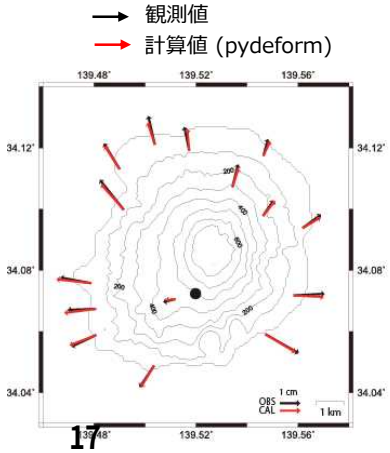
- 摂動法による地形補正（Williams & Wadge, 2000）
- 多様な地殻変動源の表現
  - ✓ 球状圧力源（茂木モデル）、回転楕円体、三軸楕円体、ダイク、シルなど
- 力源の状態変化（位置、形状、圧力など）の逐次推定機能

キネマティックGNSS解析による地殻変動をpydeformで解析することで、三宅島2000年噴火前後のマグマだまりの挙動を明らかにした

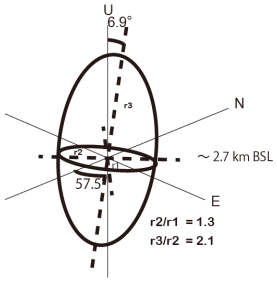
地形補正に使用する地形



キネマティックGNSSによる変位



推定された
三軸楕円体圧力源



Munekane et al.
(JGR, 2016)

達成度の分析

国土地理院

（１）有効性の観点からの分析

- 本研究で開発した、地震による地殻変動から適時的に断層モデルを推定するシステムは、「津波予測支援システム(REGARD)」として稼動しており、関係機関と連携して津波被害の軽減に活用される予定である。また、本研究で開発した火山性地殻変動力源の状態変化逐次推定システムは、火山噴火予知連絡会等への情報提供のため用いられ、火山活動の把握等への貢献が期待される。よって本研究の成果は防災上有効なものである。

（２）効率性の観点からの分析

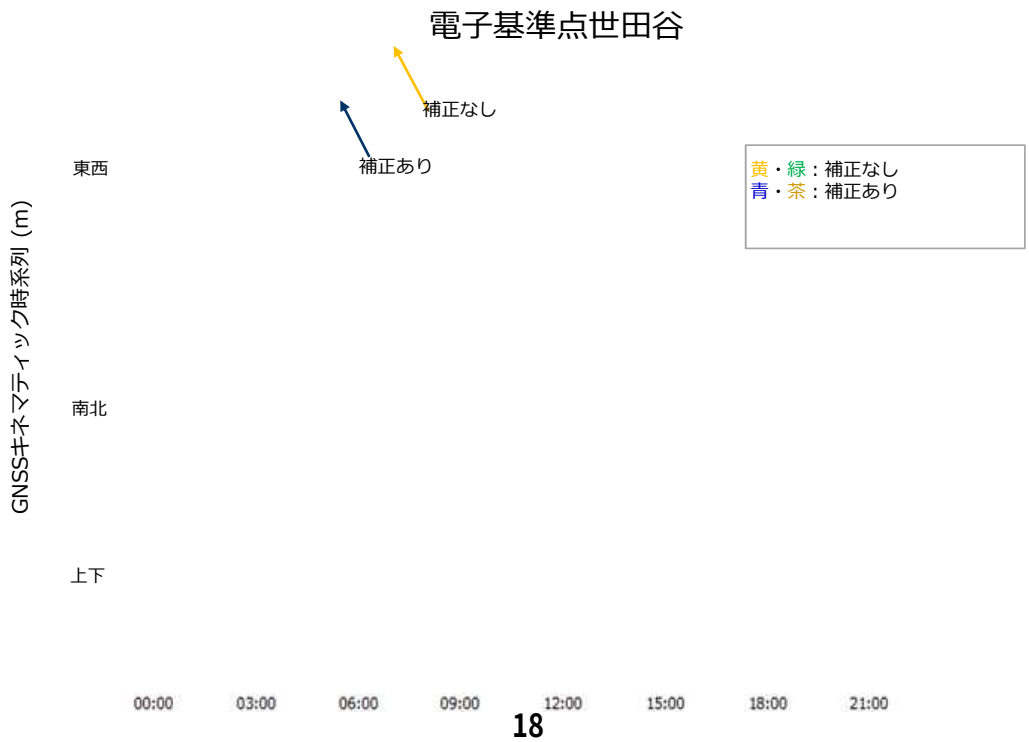
- 適時的な地震すべりの推定を行うシステムについては、測地観測センターで運用しているリアルタイムキネマティックGNSS解析システムに組み込むことで、効率的な開発が実行できた。
- 火山性地殻変動のモデリングソフトウェアの開発における地形補正について、既存のプログラムの提供を受け、それを組み込むことで効率的に開発が実行できた。

Slide 23

成果（1）:時系列に含まれる誤差の低減技術の開発

国土地理院

位相残差に基づくマルチパス誤差の補正手法の開発
補正結果の拡大図



Slide 24

資料２－４

研究課題終了時評価書

（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8331)　FAX：029-864-2655　e-mail：munekane-h96nu@mlit.go.jp
代表担当者：宇宙測地研究室　宗包　浩志

２．研究課題名

GNSS による地殻変動推定における時間分解能向上のための技術開発

３．研究期間

平成 26 年４月　～　平成 29 年３月　（３年間）

４．予算

特別研究経費　18,517　千円　（３年間の総額）

５．分科会委員

〇田部井　隆雄、高橋　浩晃、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

本研究の主たる成果は，以下の 3 つに大別できる．

(1) GNSS 電波が観測点周辺の地物で反射して生じるマルチパス誤差の影響を低減するため，あらかじめ方位角・仰角ごとに位相残差をスタックして可視化・定量化し，リアルタイムキネマティック解析時に方位角・仰角マスクとして適用した．これにより，測位解の安定性向上を確認した．

(2) 地震や火山活動に伴う地殻変動が空間的相関を持つ性質を利用して，キネマティック GNSS 測位解の時系列を主成分分析・独立成分分析することにより，変動シグナルを抽出しモデル化する技術を開発した．本手法を箱根火山周辺の地殻変動解析その他に適用した．

(3) リアルタイムキネマティック GNSS 時系列から，即時的に地震時の断層モデルや火山性地殻変動の力源モデルを推定するシステムを開発した．津波予測のための適時的な地震規模推定だけでなく，2016 年熊本地震のような内陸活断層地震の際にも正常に動作することを確認した．

７．当初目標の達成度

地震や火山活動の際に GNNS 時系列から時間分解能 5 分で 5 mm の地殻変動情報を抽出できる技術の開発を目指した．また，火山活動監視のため，得られた時系列データからマグマの状態を推定するプロトタイプシステムの開発を目指した．

仰角・方位角ごとに位相残差に基づく補正方法を適用することで，キネマティック GNSS 時系列を高精度化した．主成分分析・独立成分分析による地殻変動情報の抽出手法を開発し，リアルタイム時系列から即時的に断層モデルや火山の力源モデルを推定するシステムの開発を行った．以上により，当初目標はほぼ達成されたと判断される．

８．成果公表状況

査読付き国際誌発表論文 3 編（さらに 1 編が査読中），査読なし発表論文 2 編（さらに 1 編を準

備中)，研究報告書 3 編，学会発表等 13 件が報告されている．

９．成果活用の見込み

地震発生時の GNSS 時系列から断層モデルおよび地震規模を推定するソフトウェアはすでに「津波予測支援システム（REGARD)」に実装され，今後は関係省庁と連携して津波被害の軽減に活用されると見込まれる．火山性地殻変動を逐次モデル化するプロタイプシステムは，火山活動の際のマグマ状態監視への活用が期待される．

10．達成度の分析

本研究によりリアルタイムキネマティック GNSS 解析の精度が向上し，成果が「津波予測支援システム（REGARD)」に組み込まれて実運用されているなど，有効性と効率性の両面から十分な達成度であると判断される．

11．残された課題と新たな研究開発の方向

当初目標に掲げていた時間分解能 5 分で 5 ㎜の地殻変動を抽出する技術は，リアルタイム解析ではなお実現困難である．今後の研究開発により達成可能なのか，あるいは技術的な限界に達しているか，更なる検討を要する．

火山性地殻変動の逐次モデリングシステムに関しては，火山地域に展開する GEONET 点だけでは観測点数が不足する，他機関データのリアルタイム入力ができない，観測点数が増加した場合計算負荷が増大する，などの問題が残されている．

12．その他、課題内容に応じ必要な事項

とくになし．

13．総合評価　①．十分目標を達成できた　２．概ね目標を達成できた
３．あまり目標を達成できなかった　４．ほとんど目標を達成できなかった

資料２－５

新規研究課題提案書

１．研究課題名

GNSSによる地殻変動推定における時間分解能向上のための技術開発

２．研究制度名

特別研究

３．研究期間

平成２６年　４月　　～　平成２９年　３月　（３年間）

４．予算規模（想定）

特別研究　２１，０７６千円

（平成２６年度　7,276千円、平成２７年度　6,900千円、平成２８年度　6,900千円）

５．課題分類

（３）防災に関する研究開発

６．研究開発の背景・必要性

地震や火山現象の機構理解や推移予測のためには、地殻変動の監視が有効な手段であり、国土地理院は、その基盤的な役割を担っている。国土地理院では、全国に設置された電子基準点からなるGNSS連続観測システム（GEONET）等によって地殻変動を監視し、その結果得られる地殻変動情報や地殻活動の状況を、地震調査委員会や火山噴火予知連絡会等に提供している。

このような中、甚大な被害をもたらした東日本大震災の発生を踏まえ、地震や火山噴火の被害を軽減する上で政策的に取り組むべき方針が見直された。過去に発生した地震や火山噴火について発生に至る過程を詳細に理解するとともに、地殻活動の現況を的確かつ迅速に把握することが必要であり、これらの研究に相補的に取り組むことで将来の活動予測へとつなげるというものである。

前者については、過去に発生した事例に関して、地震発生に至るまでのプレート境界における固着の状態とゆっくりすべりの推移、噴火に至るまでのマグマの移動など、地下（地殻）の状態変化を詳細に把握する必要がある。そのためには、これまでの地殻変動情報に加え、より時間分解能の細かい地殻変動情報が必要とされる。しかし、元となるGNSS時系列の時間分解能を高めると座標時系列のばらつきが大きくなり、通常の手法では地殻変動の抽出が困難となるため、現状では、推定できる現象の時間スケールとしては１日程度が限界であった。

後者について、火山噴火の兆候などの現況の地殻変動をより適時的に捉えるためには、現状より時間分解能の細かい地殻変動情報が必要である。この場合においても、元となるGNSS時系列の精度の制約から、数時間程度の間隔で地殻の状態変化を報告しているのが現状であり、それより短い時間スケールで起こる火山噴火の兆候等を捉えきれないおそれがあった。

以上のことから、過去に発生した地殻活動について、一日より短い時間分解能で地殻の状態の変化に伴う地殻変動の推移把握を可能にするための技術開発を行うとともに、その技術を発展させ、準リアルタイムで地殻の状態を推定するためのシステムを開発することが求められている。

７．研究開発の目的・目標

本研究は、まず、過去の地震や火山活動に伴う地殻変動を細かい時間分解能で抽出する技術を開発し、それによって得られる地殻変動の推移情報を通じて地震発生や火山噴火に至る過程のメカニズムの理解に寄与すること、また、その技術を発展させ、準リアルタイムでマグマの位置などの地殻の状態を推定するシステムを開発し、より適時的に関係機関へ情報提供することができるようにすることで、火山活動の推移等の監視に寄与することを目的する。

そのため、過去の地震や火山活動に関して、GNSS解析技術を高度化し、得られるGNSS時系列から時間分解能5分程度で5mm程度の地殻変動情報を抽出する技術を開発すること、また、地殻変動の監視においては、リアルタイムGNSS解析技術を高度化した上で、得られるGNSS時系列データから、適時的に火山活動時のマグマの状態等を推定するシステムのプロトタイプを開発することを目標とする。

８．研究開発の内容

本研究では、以下の２項目の技術開発を実施する。（１）過去の地震や火山活動に伴う地殻変動を細かい時間分解能で抽出する技術の開発、（２）準リアルタイムでマグマの状態などの地殻の状態を推定するシステムの開発

より詳細な実施内容は以下の通り：

（１）過去の地震や火山活動に伴う地殻変動を細かい時間分解能で抽出する技術の開発

① 細かい時間分解能のGNSS時系列のばらつきを低減する技術の開発

細かい時間分解能でGNSS時系列を推定する場合、マルチパス等の影響で、時系列が大きくばらつき地殻変動の抽出が困難となる場合がある。そこで、先行研究により開発されたマルチパス補正手法等を適用し、GNSS時系列のばらつきを抑える技術を開発する。

② GNSS時系列から複数観測点で同時観測される共通信号を抽出する手法の評価・検討

すべり分布の変化などに伴う広域の地殻変動は、複数の観測点で共通する特徴をもつものであるから、統計的な手法を用い、GNSS時系列から複数観測点で同時観測される共通信号を抽出する技術（経験的直交関数法等）の評価・検討を行う。

③ 抽出された共通信号のうち、誤差の物理機構の特定およびその低減手法の開発

抽出された共通信号には、地殻変動のほか、広域に共通する特有の要因による誤差である可能性も含まれる。そのような誤差について、その物理機構を特定した上で誤差低減手法の開発を行う。

④ 抽出された共通信号のうち、地殻変動シグナルを特定する手法の開発

抽出された空間相関の変動のうち、地殻変動シグナルを特定する手法を開発するとともに、特定された地殻変動シグナルに対し地殻状態（すべり分布・マグマの位置など）の推定手法を適用し、地殻変動が適切に特定されているかの評価を行う。その結果に基づいて②～④の処理を改良し、手法の最適化を行う。

（２）準リアルタイムでマグマの状態などの地殻の状態を推定するシステムの開発

① リアルタイムキネマティックGNSS（RTK-GNSS）解析における時系列のばらつきを低減する技術の開発

RTK-GNSS解析技術においても（１）と同様に時系列がばらつき、地殻変動の抽出が困難になることがあることが知られている。そこで、（１）で開発した低減技術に加え、（マルチパスを生じやすい低仰角の測位信号となる測位衛星を用いないで）GLONASS衛星等の信号を取り入れることでばらつきを低減する技術を開発する。

② RTK-GNSS時系列を用いた地殻状態推定システムのプロトタイプの構築

GEONETの観測点を対象とし、①の技術を適用して得られるRTK-GNSS時系列から、１時間程度のデータ長に対する時間依存インバージョン手法を用いて、時間分解能5分から10分程度ごとの地殻状態を推定するシステムのプロトタイプを構築する。

９．研究開発の方法、実施体制

（１）～（２）全体は研究官が主として実施する。（１）①については、先行研究「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」の成果を活用するため、当該研究担当者の主任研究官に協力を得て実施する。（１）④、（２）②において、インバージョンによるモデル推定手法の構築については、地殻変動研究室に協力を得て実施する。構築した地殻変動シグナルの抽出手法の評価については、地殻変動のモデル化に詳しい地殻変動研究室の協力を得る。（２）②のシステムの構築は、外注により行う。

10．研究開発の種類

（２）応用研究

11．現在までの開発段階

（１）研究段階

12．想定される成果と活用方針

本研究により、過去の地震や火山活動に伴う地殻変動について、細かい時間分解能での地殻変動シグナルの抽出手法が開発される。この手法は、地殻変動研究室において、過去発生した多くの事例について、地震に伴うすべり分布の推移や火山噴火に伴うマグマの移動等のモデル化に活用され、地震前後や火山活動時において短時間で推移する過程の理解に役立つことが期待される。

また、RTK-GNSS時系列から地殻の状態を推定するシステムのプロトタイプが開発される。このシステムは、火山活動が活発化した際の地殻変動監視における、マグマの状態等の推定に活用される。その結果は、火山噴火予知連絡会等に適時的に提供され、火山活動の把握等への活用が期待される。

さらに、波及効果として、リアルタイム測位の高度化への発展が期待される。本研究で開発されたシステムによって得られる電子基準点のRTK-GNSS時系列において、地殻変動に伴う基準点位置にずれが生じたり、様々な誤差要因により安定した解が得られない場合がある。このような場合には、電子基準点を参照点とする情報化施工などのリアルタイム測位において間違った位置が推定されることが想定される。このような変動や誤差といった情報は、情報化施工などのリアルタイム測位に有効な情報となり得ることから、電子基準点を利用したリアルタイム測位の高度化につながるものと期待される。

13．研究に協力が見込まれる機関名

気象庁、国立大学法人等

14．関係部局等との調整

インバージョンによるモデル推定やシステムの構築に関しては、地殻変動研究室と協力して実施する。また、GNSSデータ、特にGLONASSのデータの利用とその解析については、測地観測センターの関係部署の協力を得ながら実施する。

15. 備考

特になし。

16. 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　　e-mail：m-ishi@gsi.go.jp
担当者名：宇宙測地研究室　石本　正芳

GNSSによる地殻変動推定における時間分解能向上のための技術開発

研究の背景・必要性

東日本大震災後の建議※において、被害を軽減する上で、早急に、重点的に取り組むべき課題として

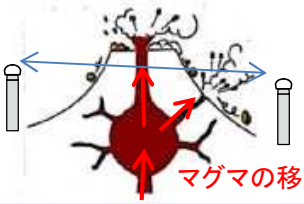
1）過去に発生した地震・火山噴火の発生に至る過程の理解

現状は推定できる現象の時間スケールが
1日程度が限界 → 時間分解能が不十分

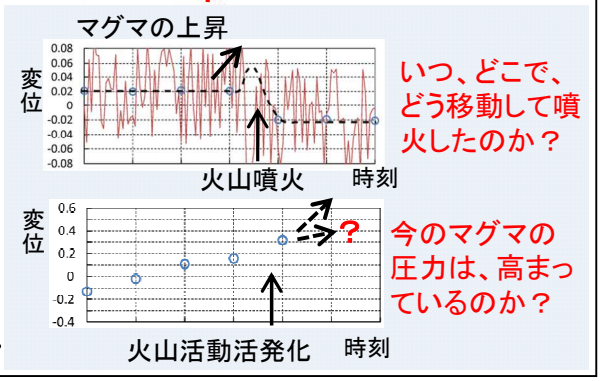
2）地殻活動の現況を的確かつ迅速に把握

現状は解の安定性が不十分
→短時間に大きく変動していく、噴火の兆候が捉えられないおそれ

※地震及び火山噴火予知のための観測研究計画の見直しについて（建議）



[火山活動の例]
地殻変動でマグマの移動を把握



GNSS時系列の現状

研究内容

本研究

1）GNSS時系列から、時間分解能5分程度で5mm程度の地殻変動を時系列的に抽出する技術の開発
2）RTK-GNSS時系列から、火山活動時のマグマの推移等を推定するシステムの開発

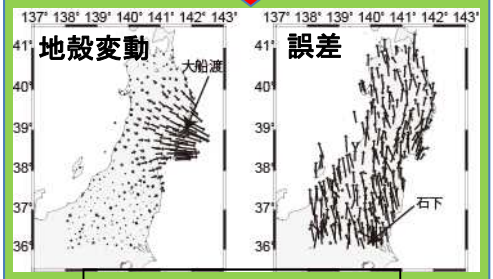
■**細かい時間分解能のGNSS時系列の誤差低減技術の開発（H26）**
細かい時間分解能のGNSS時系列におけるばらつきの低減技術の開発

■**GNSS時系列から地殻変動を細かい時間分解能で抽出する技術の開発（H27）**
同時観測される共通信号を抽出する技術を用いて地殻変動を抽出する技術の開発

■**リアルタイムキネマティックGNSS（RTK-GNSS）時系列による地殻状態推定システムのプロトタイプの構築（H28）**
RTK-GNSS時系列におけるばらつきを低減し、地殻変動源を推定するシステムの開発

地殻変動の細かな時間分解能での抽出技術の開発

細かい時間分解能のGNSS時系列



地殻変動と誤差を分離

高精度で細かい時間分解能な地殻変動情報の抽出

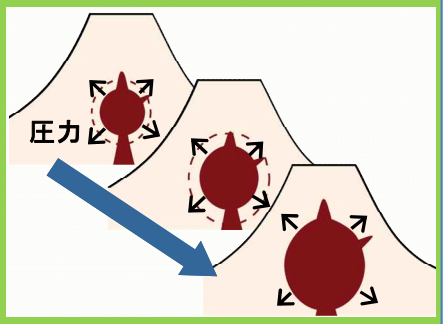
RTK-GNSS時系列による地殻状態の推定システムのイメージ

RTK-GNSS解析

誤差低減

変動源の推定

地殻状態の推移の推定結果



研究効果

地震・火山噴火における将来の活動予測に貢献

- 過去に発生した地震や火山噴火に至る、短時間で推移する過程の把握とその機構の理解
- 火山活動時における地殻変動と地殻状態の迅速な情報提供