研究課題終了時評価表

１．研究課題名：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

２．研究期間：平成２４年４月　～　平成２７年３月　（３年間）

３．予算：特別研究経費 23,202千円　（３年間の総額）

４．成果の概要

（１）地面反射マルチパスの定量的評価手法の確立

GPS受信機SNRデータに含まれる振動成分を抽出し、そこから地面反射マルチパスによる搬送波位相誤差を計算する手法を開発した。また、計算された搬送波位相誤差を、アンテナ位相特性モデルに組み込むことで、汎用的なGNSS解析ソフトウェアを用いて地面反射マルチパスによる座標誤差を定量的に評価する手法を開発した。さらに、GPS受信機SNRが取得されるようになった2008年以降、全電子基準点において地面反射マルチパスによる座標誤差を計算し、地面反射マルチパスに関する電子基準点の品質情報としてとりまとめた（予定）。地面反射マルチパスによる座標誤差は、（２）の電子基準点誤差分析システムの入力データの一つとして、電子基準点座標時系列に含まれる誤差の判別のため活用される（予定）。

（２）電子基準点誤差分析システムの構築

先行研究において評価した電子基準点座標時系列誤差（大気擾乱・大気荷重・海洋荷重・陸水荷重）および（１）の地面反射マルチパスによる座標誤差に加え、電子基準点座標時系列誤差の判別に有効な入力情報を検討した。電子基準点に設置されている傾斜計記録、電子基準点のキネマティックGPS座標時系列、GPS受信機SNRの日平均値時系列の有効性について検討した結果、いずれも電子基準点の品質の判断や、誤差源の特定に関して有効な情報であることを明らかにした。

以上を踏まえ、地殻変動監視において通常とは異なるシグナルが検出された際、今後推移を見守るべき変動か、あるいは誤差かの判断を支援する電子基準点誤差分析システムを構築した。電子基準点誤差分析システムは、GEONETの定常解析で計算される電子基準点の座標時系列に対し、上述の時系列に加え、比較用の別ソフトウェアによる座標時系列なども入力とし、両者を比較したり、スペクトル計算や主成分・独立成分分析などの分析を加えたりすることで、電子基準点の座標時系列の誤差の有無を評価可能とするシステムである。電子基準点誤差分析システムは、実際の地殻変動監視業務において通常とは異なるシグナルが検知されたときに、監視に当たっている職員が手軽に操作できるよう、GUI上で直感的に操作できるように設計されている。

５．当初目標の達成度

（１）当初計画における目標

本研究では、中長期的な地殻変動の監視において通常とは異なるシグナルが検出された際、今後推移を見守るべき変動かどうかの判断を下すための判断材料を提供するため、地面反射マルチパス誤差を定量的に評価する手法を開発するとともに、先行研究で開発したGPS時系列誤差推定手法と統合し、全国の電子基準点の観測データの誤差特性を簡便に分析できるシステムを構築することを目標とした。

（２）最終達成度

GPS受信機SNRデータから汎用的なGNSS解析ソフトウェアを用いて地面反射マルチパスによる座標誤差を定量的に評価する手法を開発し、GPS受信機SNRが取得されるようになった2008年以降、全電子基準点において地面反射マルチパスによる座標誤差を計算し、地面反射マルチパスに関する電子基準点の品質情報としてとりまとめた。また、GEONETの定常解析で計算される電子基準点の座標時系列に対し、前述の地面反射マルチパスによる座標誤差に加え、先行研究により明らかにされた座標時系列誤差や、比較用の別ソフトウェアによる座標時系列なども入力とし、両者を比較したり、スペクトル計算や主成分・独立成分分析などの分析を加えたりすることで、GEONET定常解析で計算される電子基準点の座標時系列の誤差の有無を評価できる電子基準点誤差分析システムを構築した。

電子基準点誤差分析システムは、中長期的な地殻変動の監視において通常とは異なるシグナルが検出された際、監視に当たる者が手軽に操作して、今後推移を見守るべき変動かどうかの判断を下すための判断材料を提供するものであり、当初目標が達成されたといえる。

６．成果公表状況

研究報告書	3件
発表論文	3件
学会発表	6件
特許等	0件

７．成果活用の見込み

（１）活用見込み

〇完成された電子基準点誤差分析システムは、国土地理院の地殻変動監視業務において、電子基準点座標解の誤差の有無の評価に用いられ、監視業務の効率化のため活用される

2. 〇本研究で得られた電子基準点誤差情報は、外部の地殻変動情報ユーザ（防災関係者、研究者コミュニティーなど）に地殻変動情報に含まれる誤差情報について注意を喚起するために活用される

〇本研究で整備した電子基準点誤差データベースは、外部（当初は専門家向けを想定）に試験的に提供され、地殻変動研究等に活用される

〇本研究の成果によりとりまとめられた電子基準点の品質に関する情報は、地殻変動研究において、地殻変動のモデル化や地殻変動検知能力の評価の高度化のため活用される

〇本研究で開発した誤差分析ツール（主成分分析/独立成分分析;位相残差マップ作成など）は、現在宇宙測地研究室で実施中の特別研究（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)において活用される

（２）活用実績

本研究の成果は、以下の国土地理院事業へ活用された。

・地殻変動監視事業への活用：いくつかの電子基準点において、2013年以降上下成分に周期的な変動が観測された事例について、GPS受信機SNRの分析により、同じタイミングでSNRの急落が見られることを明らかにするとともに、同じくSNRの急落が見られる電子基準点をリストアップし、そのうち一部の電子基準点で同様の周期的な変動が観測されることを明らかにした。

８．達成度の分析

（１）有効性の観点からの分析

本研究の成果により、電子基準点の座標時系列に生じた変化について、誤差によるものか、実際の地殻変動なのかを判断するための材料を提供することが可能となる。こうした情報を活用することで、継続的に重点的に監視すべき観測点数を限定することができるため、本研究は地殻変動監視の効率化のため有効なものであったと言える。また、この情報は地殻変動情報利用者（地震調査委員会等の防災関係者、研究コミュニティーなど）に対し、地殻変動情報に含まれる誤差情報についての注意を喚起する際活用されるため、本研究は地殻変動情報の有用性の向上のため有効であったと言える。

また、本研究の成果により、電子基準点の品質に関する情報が提供可能である。こうした情報は、地殻変動研究において、より現実的な地殻変動のモデル化や地殻変動検知能力の評価を可能とするものであり、有効なものであるといえる。

（２）効率性の観点からの分析

電子基準点誤差分析システムの開発にあたっては、先行研究において開発したGPS時系列誤差推定手法を活用するとともに、分析のためのツールについて、汎用のオープンソースのツールを積極的に導入することで、効率的に開発を実現することができた。 また、電子基準点誤差分析システムは、地殻変動監視業務での活用が想定されており、GUIを活用した使いやすいシステムである必要があったが、GUI化については、プログラミングに精通している企業に外注することで効率的に完成することができた。

９．残された課題と新たな研究開発の方向

本研究により、電波環境の変化（GPS受信機SNRの変化）と、電子基準点の座標時系列の誤差との関連が見られる事例が複数明らかになった。今後、事例を網羅的に洗い出すとともに、そのメカニズムについて詳細に調査する必要がある

外部の地殻変動情報ユーザ向けの電子基準点誤差情報としては、地殻変動情報の品質に関する指標がより必要とされるため、本研究で取得された電子基準点誤差情報を元に地殻変動情報の品質に関する指標を導出する手法について更に検討を進める必要がある

キネマティックGPS時系列については、現在GPS衛星のみを用いて計算されているが、電子基準点誤差の解明のためにはより高精度の時系列が必要である。キネマティックGPS時系列の高精度化のためにはGPS以外の衛星系（GLONASS, Galileo, QZSなど）もあわせて解析することが有効であることが指摘されており、今後、適切な解析手法を検討する必要がある。

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8341)　　FAX：029-864-2655　　e-mail：munekane@gsi.go.jp

担当者：宇宙測地研究室　宗包　浩志

平成２４年度～平成２６年度特別研究
「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」
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 24 年度，平成 25 年度，平成 26 年度予定）

［発表論文］

（査読付き）（３件）

・Munekane, H.(2012): Coseismic and early postseismic slips associated with the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake sequence: The EOF analysis of GPS kinematic time series, Earth Planets Space, 64(12), 1077-1091.

・Munekane, H. (2013): Sub-daily noise in horizontal GPS kinematic time series due to thermal tilt of GPS monuments, J. Geod., 87(4), 393−401, doi: 10.1007/s00190-013-0613-8.

・Munekane, H., J. Oikawa, and T. Kobayashi (2014): Kinematic GPS analysis gives new insights into the mechanism of very long period seismic signals observed during the 2000 Miyakejima eruption, submitted to J. Geophys. Res.

（査読無し）

［学会等発表］

宗包浩志（2012）：キネマティック GPS 時系列に含まれる電子基準点の熱傾斜に伴う水平測位誤差について，日本測地学会第 118 回講演会.

H. Munekane (2013): Thermal tilts of GPS monuments: A case study of the Japanese GEONET monuments, paper presented at IAG scientific assembly.

宗包浩志（2013）：精密単独測位法によるキネマティック GPS 座標時系列の再現性評価，日本測地学会第 120 回講演会.

H. Munekane, J. Oikawa, and T. Kobayashi (2014): The very-long-period seismic signals at Miyake-jima volcano during the caldera formation revisited: insights from GPS observations, paper presented at GENAH2014.

宗包浩志・及川純・小林知勝（2014）：三宅島 2000 年噴火のカルデラ形成期に観測された 50 秒パルスの力源の再検討 －キネマティック GPS 解析から分かったこと －，2012 年度日本火山学会秋季大会.

宗包浩志・及川純・小林知勝（2014）：三宅島 2000 年噴火のカルデラ形成期に観測された 50 秒パルスの力源の再検討 －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.

［その他］

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

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

研究期間と予算

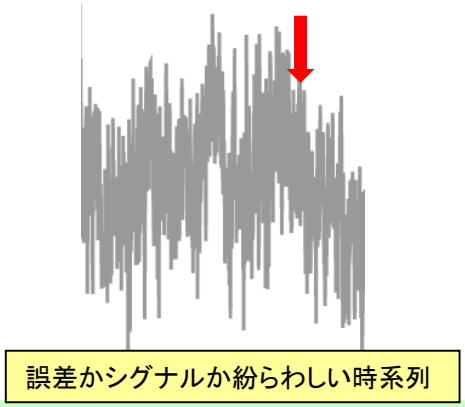
【研究期間】
平成24年4月～平成27年3月（3年間）

【予算】
特別研究経費23，202千円（3年間の総額）

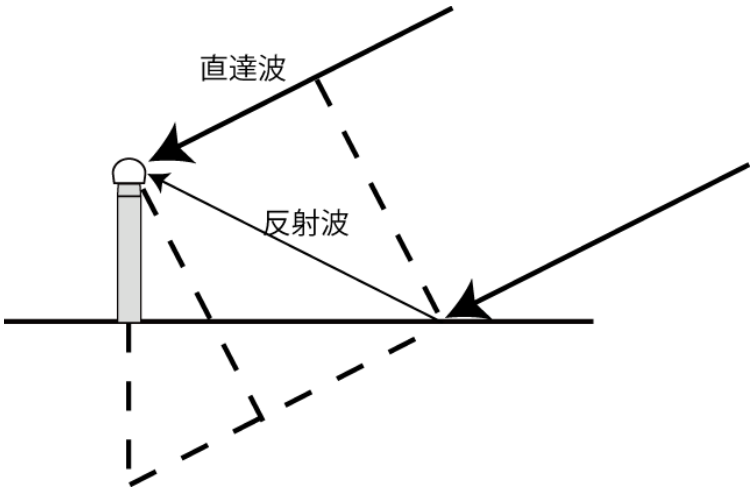
研究背景

①地殻変動の監視において通常とは異なるシグナルが検出された際
今後推移を見守るべき変動か、あるいは誤差かの判断を行う必要
→もし誤差ならば重点的な監視は不要
→誤差ならば地殻変動情報の利用者（防災、研究者コミュニティーなど）に適切に注意喚起が必要

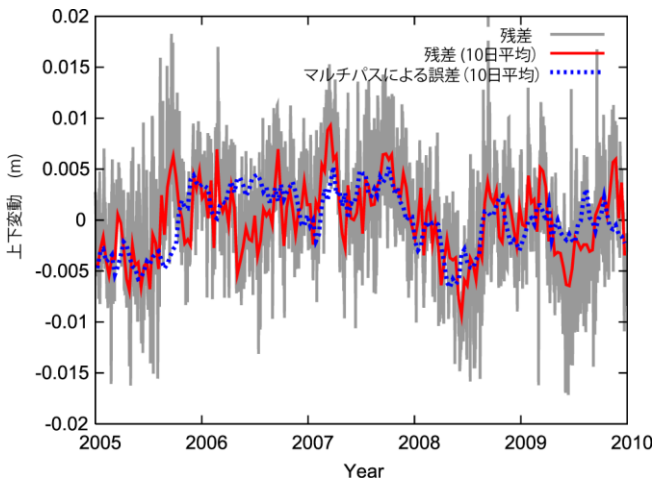
判断のため電子基準点の観測データの誤差特性に関する情報が必要



②地面から反射される電波によるマルチパス（反射波の混信）が時空間的に相関を持つ複雑な測位誤差（～1 cm）をもたらすことが明らかになったため、地殻変動監視においてどの程度影響をもたらすかについて定量的に評価する必要がある。



地面から反射される電波によるマルチパスのイメージ



GPS上下誤差時系列と、マルチパス測位誤差の比較例

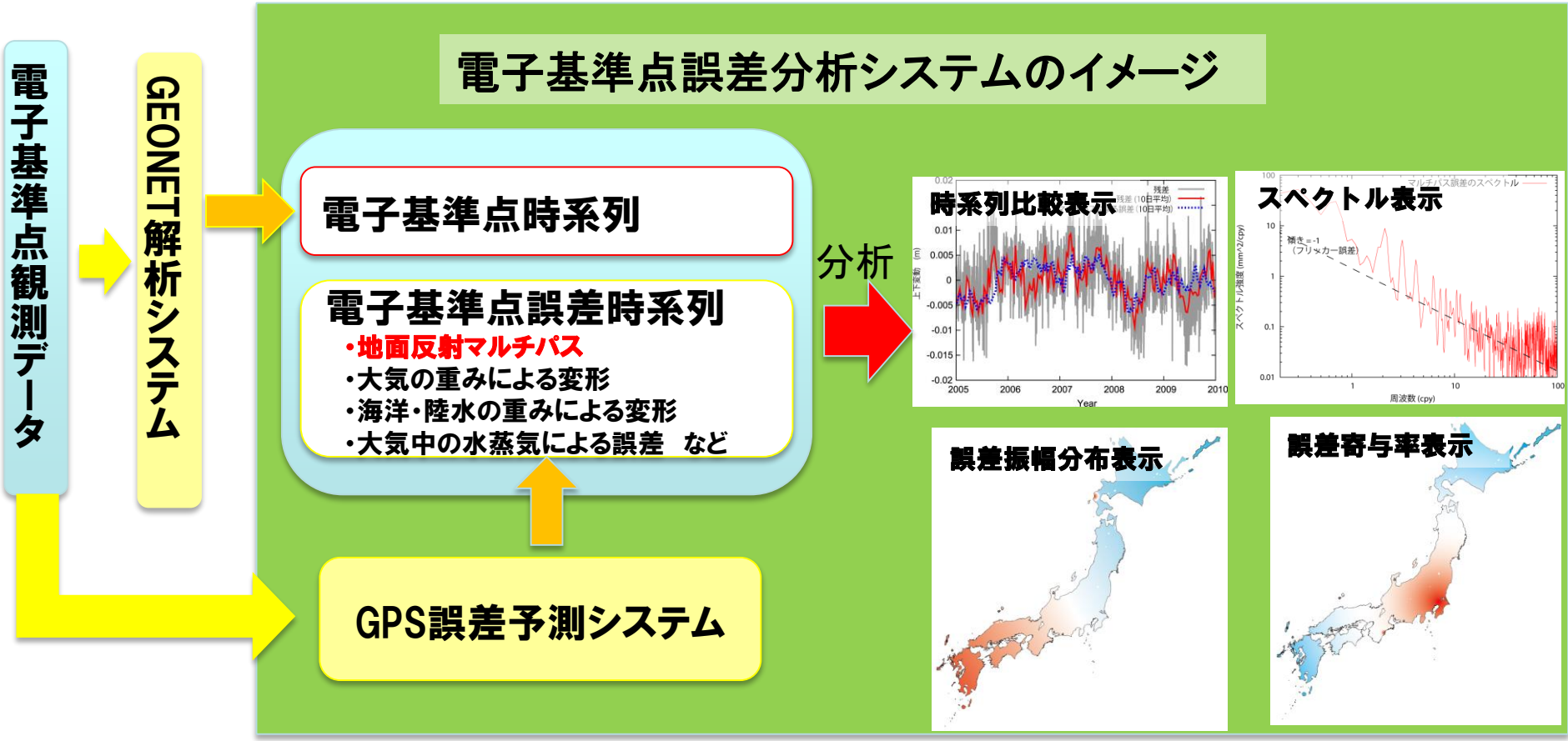
研究目的・目標

国土地理院

● 目的

１)地面反射マルチパス誤差を定量的に評価する手法を開発する

２)先行研究で開発したGPS時系列誤差推定手法と合わせ、全国の電子基準点の観測データの誤差特性を簡便に分析できるシステムを構築する



4. 成果の概要

国土地理院

成果(１)地面反射マルチパスの定量的評価手法の確立

→地面反射マルチパス評価・補正手段の構築
→各電子基準点における地面反射マルチパス誤差の定量的評価

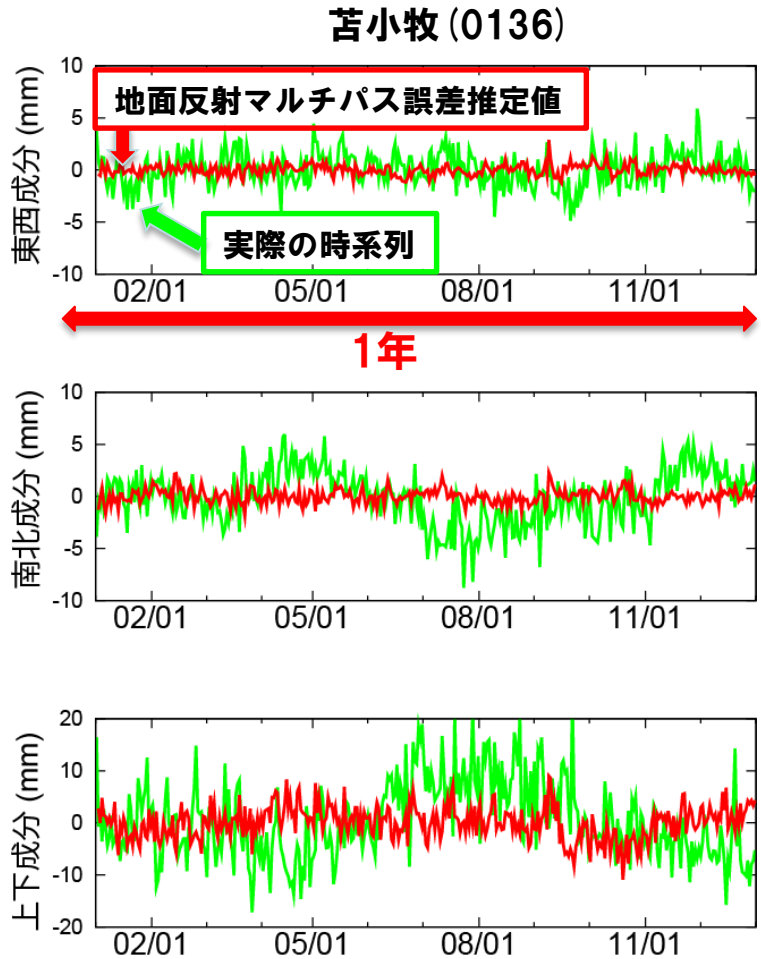
成果(２)電子基準点誤差分析システムの構築

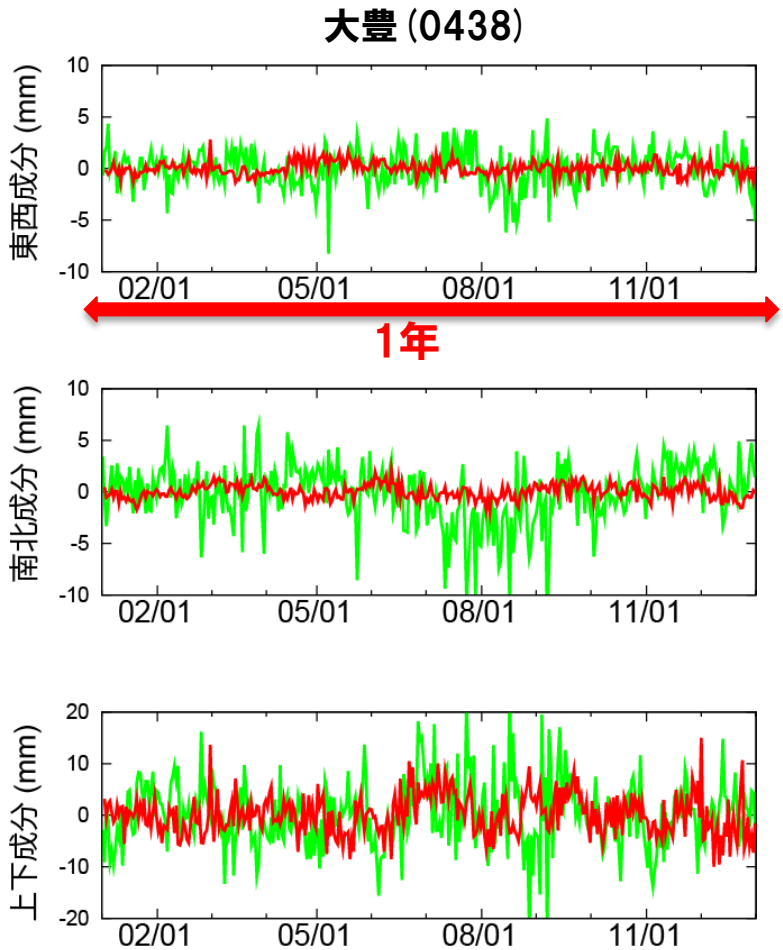
①電子基準点座標時系列誤差の判別に有効な入力情報の検討
→　電子基準点傾斜計
→　位相残差マップとキネマティックPPP解
→　GPS受信機SNR時系列

②電子基準点誤差分析システムの構築(外注作業中)
→　ユーザーが容易に電子基準点の誤差に関する情報をGUIで取得可能とするシステムの構築

成果(１)地面反射マルチパスの定量的評価手法の確立

国土地理院





標準偏差[SE, SN, SU] = [0.50, 0.67, 3.2] mm　　[0.63, 0.69, 3.9] mm

- **予察的知見**
  - ✓ **水平成分は誤差要因としては無視できる(標準偏差1mm以下)**
  - ✓ **鉛直成分は、標準偏差で3-4mm程度であり、観測点によっては、誤差要因として寄与が大きい(0438: 大豊など)**

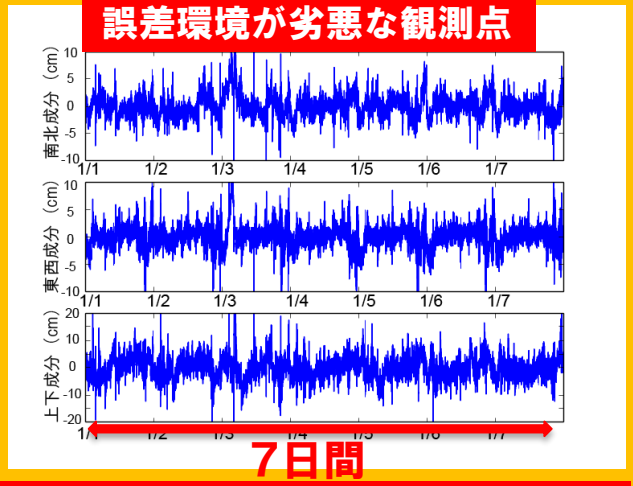
成果(２)電子基準点誤差分析システムの構築

国土地理院

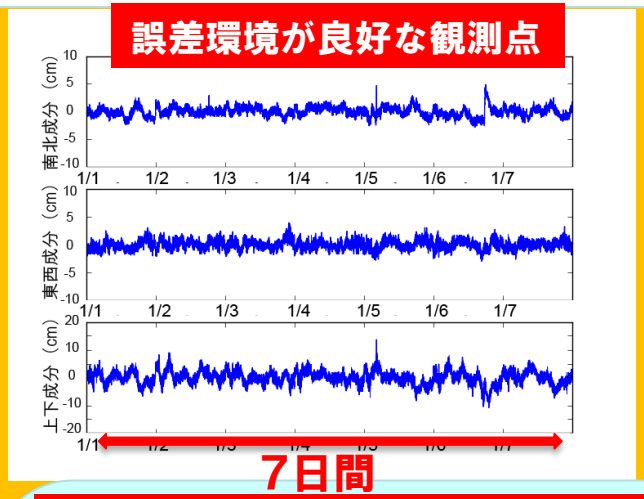
①電子基準点誤差の判別に有効な入力情報の例：

キネマティックGPS時系列(高時間分解能(～30秒)での位置推定)

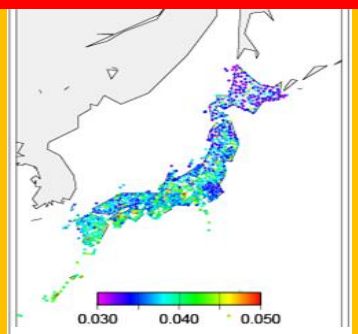
誤差環境が劣悪な観測点



誤差環境が良好な観測点



キネマティックGPSのばらつきの空間分布



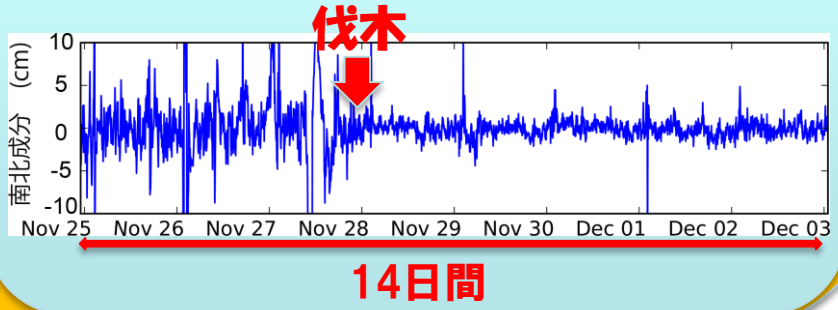
上下座標再現性(cm)

基本的には地域性を反映しているが周囲よりも特に悪い観測点が散在している

↓

誤差環境が劣悪な観測点の同定が可能

誤差状況が変化したタイミングの特定も可能
→誤差原因の特定に有効



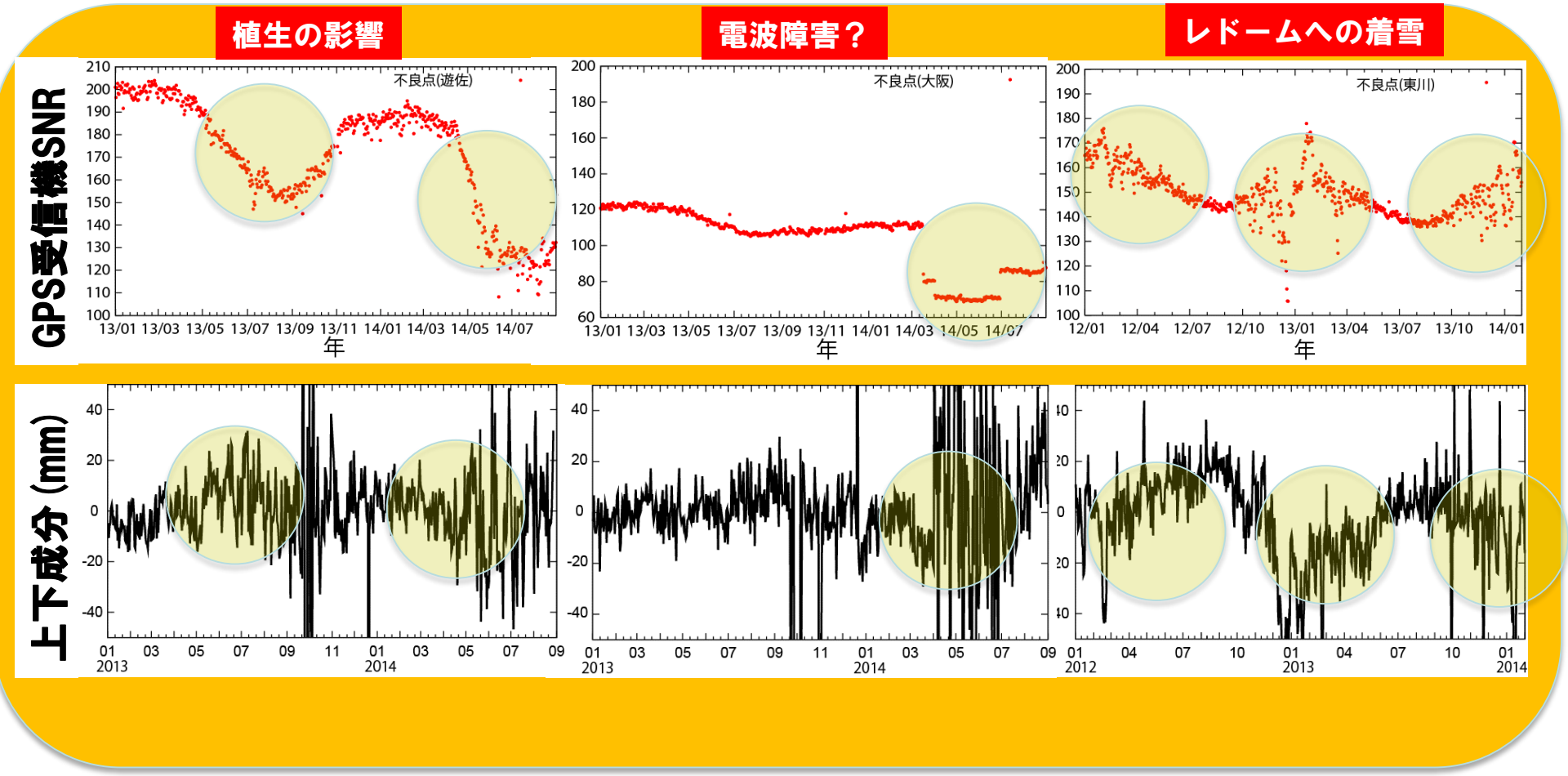
キネマティックGPS時系列を整備し、誤差状況の把握に使えるようにした

成果(２)電子基準点誤差分析システムの構築

国土地理院

①電子基準点誤差の判別に有効な入力情報の例

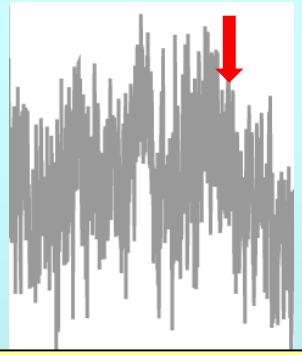
GPS受信機SNR時系列



GPS受信機SNR時系列を整備し、電波受信環境の把握に使えるようにした

成果(2)

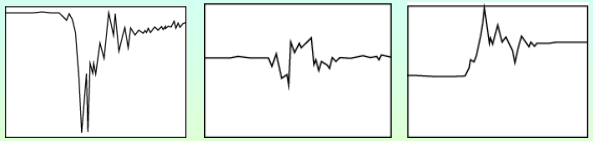
②電子基準点誤差分析システムの構築(外注作業中)



誤差かシグナルか紛らわしい時系列

電子基準点誤差分析システム

誤差データベースサーバ



分析・図化 ↓ ↑ 時系列取得

分析・表示サーバ

誤差かどうかの判断

➢データベース
- ■比較用座標時系列
  - ■PPP解
  - ■PPPキネマティック解
- ■誤差時系列
  - ■積雪荷重変形
  - ■大気荷重変形
  - ■土壌水分荷重変形
  - ■海洋荷重変形
- ■誤差判別補助時系列
  - ■地面反射マルチパス
  - ■大気擾乱
  - ■受信機SNR
  - ■傾斜計
  - ■サイクルスリップ

など

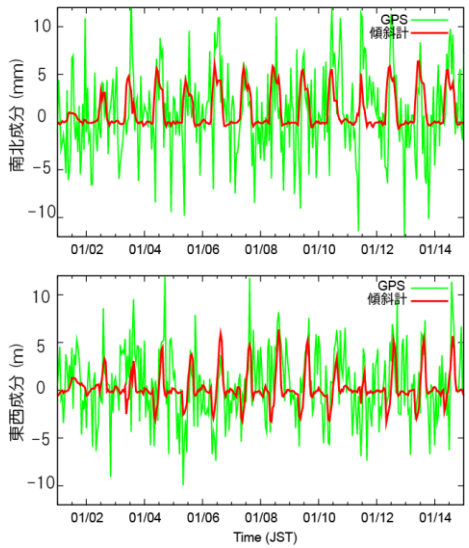
➢分析機能
- ・単純補正
- ・相関計算
- ・補正パラメータ計算(季節変動・オフセット等)
- ・座標再現性計算
- ・スペクトル計算
- ・主成分/独立成分分析
- ・位相残差スタック計算

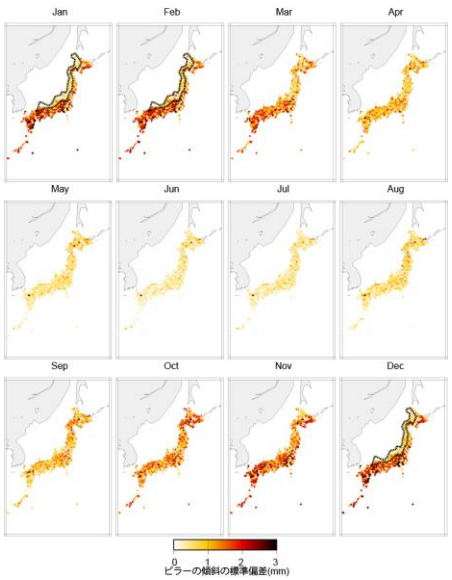
など

年度末までに外注により完成させる予定

本研究から派生して得られた成果

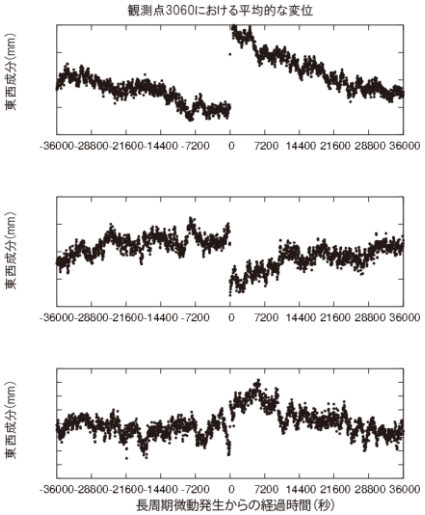
①電子基準点モニュメントの熱変形の定量的な評価

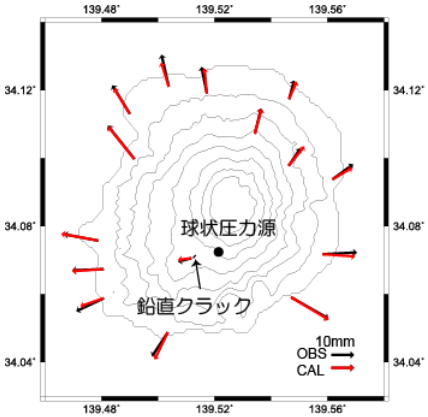


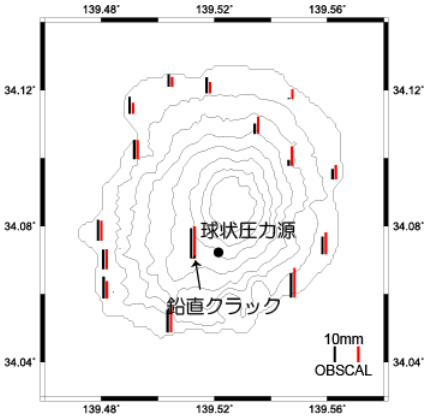


傾斜計記録をキネマティックGPSの変動と整合させることで、熱変形を定量化した。振幅の空間分布から、日射量との相関が高いこと、太陽高度の低い冬場に振幅が大きくなることなどを明らかにした

②キネマティックGPS時系列を用いた火山現象の解明（三宅島）







2000年三宅島噴火のカルデラ形成に伴い観測された長周期地震動に伴う地殻変動を分析し、力源位置やメカニズムを詳細に明らかにした

5. 当初目標の達成度

国土地理院

（目的・目標）

１）地面反射マルチパス誤差を定量的に評価する手法を開発するとともに、

２）先行研究で開発したGPS時系列誤差推定手法と統合し、全国の電子基準点の観測データの誤差特性を簡便に分析できるシステムを構築する

（達成度）

１）任意のGPS解析ソフトウェアで地面反射マルチパスによる誤差を定量的に評価する手法を開発し、電子基準点毎に評価を行った。その結果を地面反射マルチパスについての電子基準点の品質情報としてとりまとめた

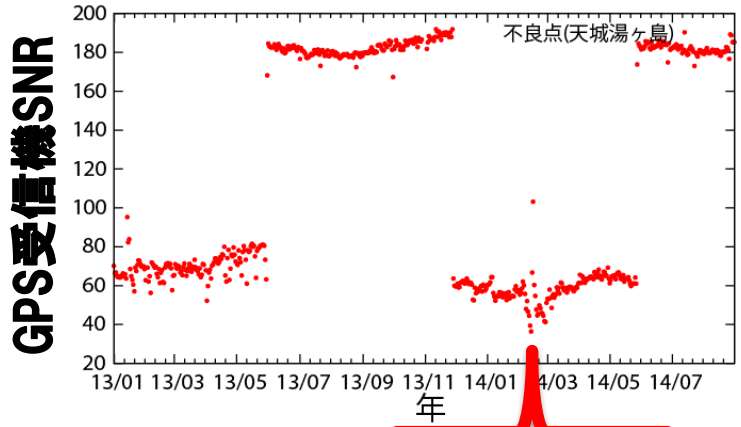
２）GEONET定常解析の座標解について、比較用座標時系列、補正用誤差時系列、誤差判別補助時系列を準備し、ユーザーがGUIを用いて両者を補正・比較・分析することで、座標解の誤差の有無を判断を支援する電子基準点誤差分析システムを構築した

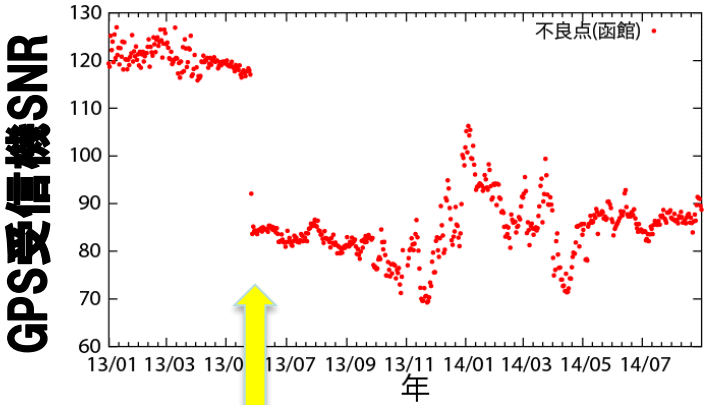
→目標達成の見込み

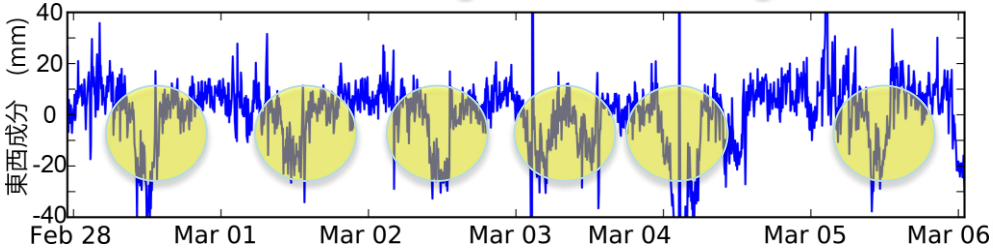
7. 成果活用の見込み

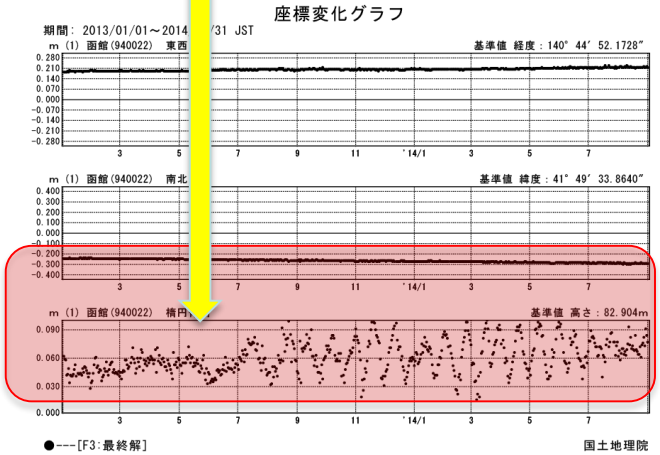
1. 完成された電子基準点誤差分析システムは、国土地理院の地殻変動監視業務において、電子基準点座標解の誤差の有無の評価に用いられ、監視業務の効率化のため活用される

現時点での活用例→受信機SNRの急落現象がみられた電子基準点の同定









7. 成果活用の見込み

2. 本研究で得られた電子基準点誤差情報は、外部の地殻変動情報ユーザ（防災関係者、研究者コミュニティーなど）に、地殻変動情報に含まれる誤差情報について注意を喚起する際に活用される

3. 本研究で整備した電子基準点誤差データベースは、外部（当初は専門家向けを想定）に試験的に提供され、地殻変動研究等に活用される

4. 本研究の成果によりとりまとめられた電子基準点の品質に関する情報は、地殻変動研究において、より現実的な地殻変動のモデル化や地殻変動検知能力の評価を実現するために活用される

5. 本研究で開発した誤差分析ツール（主成分分析／独立成分分析；位相残差マップ作成など）は、現在宇宙測地研究室で実施中の特別研究（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）において活用される

8. 達成度の分析

国土地理院

（１）有効性の観点からの分析

●電子基準点の座標時系列に生じた変化について、誤差かどうかの判断材料を提供

→国土地理院として監視業務の効率化に利用

→外部利用者への情報提供

●電子基準点の品質に関する情報を提供

→たとえば地殻変動の検知能力の評価がより現実的になることで、効果的な観測点の設置が可能となる

（２）効率性の観点からの分析

●電子基準点誤差分析システムの開発にあたっては、分析のためのツールについて、**汎用のオープンソースのツールを積極的に導入**

●電子基準点誤差分析システムのGUI化については、**外注を活用**

9. 残された課題と新たな研究開発の方向

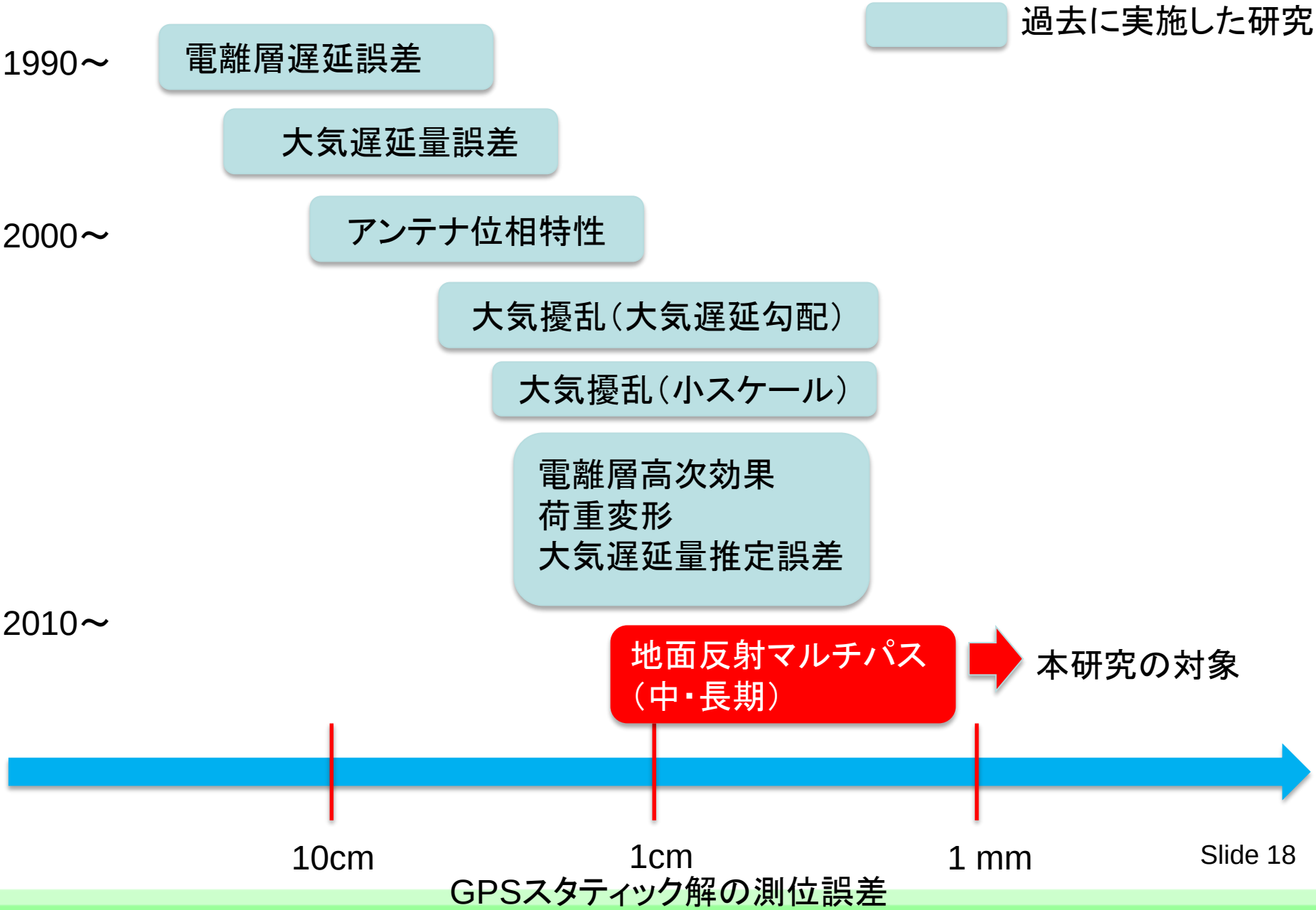
国土地理院

●電波環境の変化（GPS受信機SNRの変化）と、電子基準点の座標時系列の誤差との関連が見られる事例について、網羅的な調査および原因の把握が必要

●外部の地殻変動情報ユーザ向けにより使いやすい誤差情報（例えば地殻変動情報の品質に関する指標）などへの加工手法の検討が必要

参考資料

研究背景


過去に実施した研究
1990～
電離層遅延誤差
大気遅延量誤差
2000～
アンテナ位相特性
大気擾乱（大気遅延勾配）
大気擾乱（小スケール）
電離層高次効果
荷重変形
大気遅延量推定誤差
2010～
地面反射マルチパス
（中・長期）
本研究の対象
10cm
1cm
1 mm
GPSスタティック解の測位誤差

成果(２)電子基準点誤差分析システムの構築

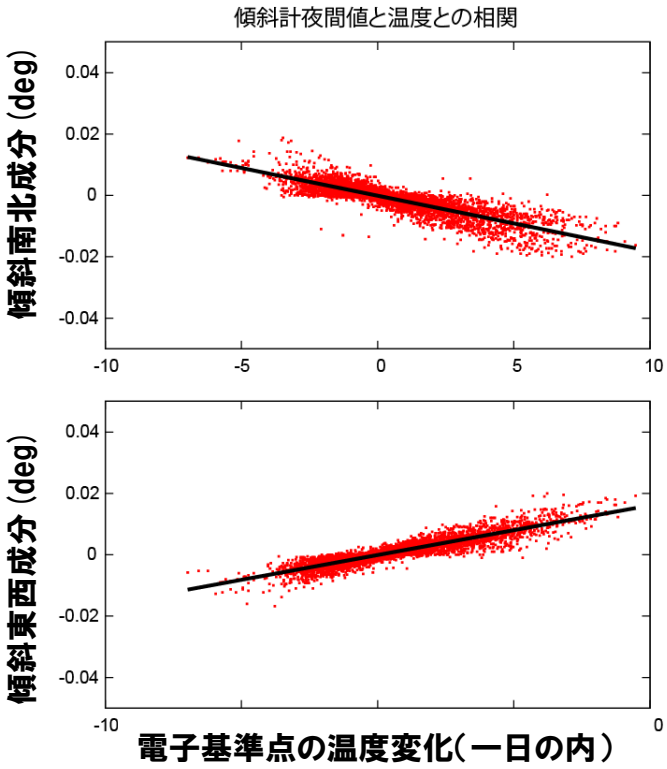
国土地理院

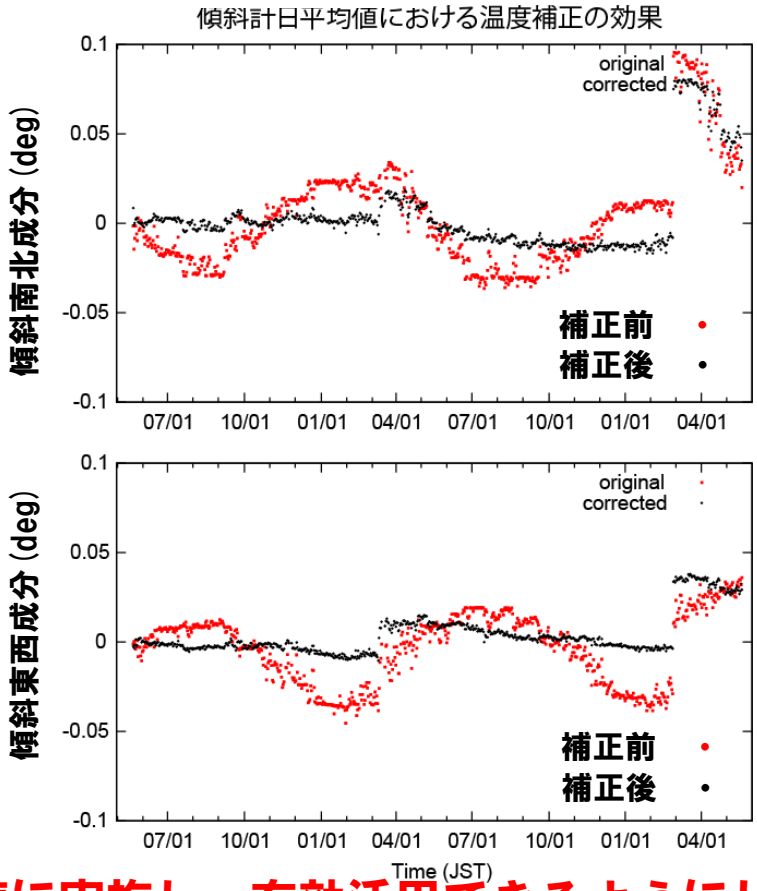
①電子基準点誤差の判別に有効な入力情報の検討

１)電子基準点傾斜量

地震時のモニュメント傾動などを監視する目的で電子基準点に傾斜計が設置されているが、センサーの温度変化に伴うみかけ変動が大きく監視上の障害となっていた

温度補正の例(960583; 石下)





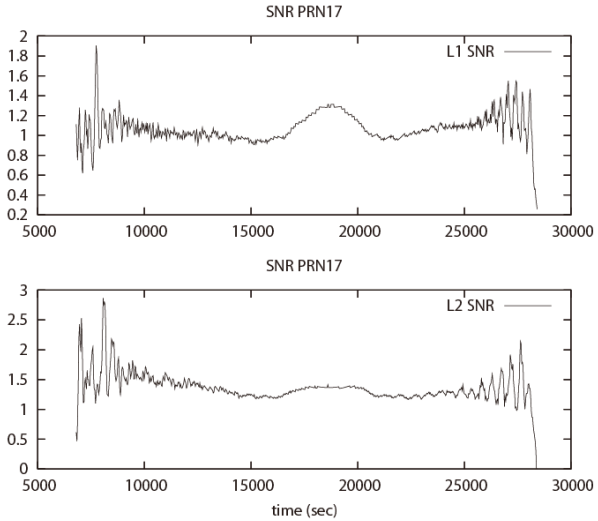
傾斜計の温度補正を高精度に実施し、有効活用できるようにした

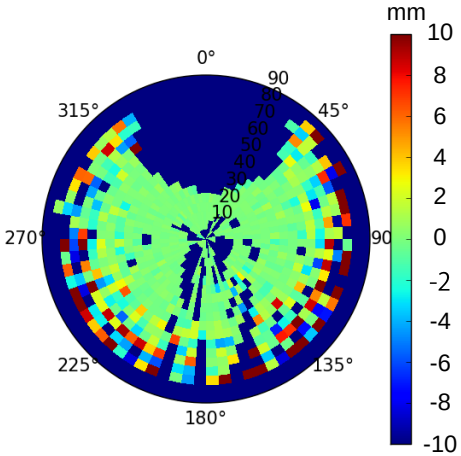
成果(１)地面反射マルチパスの定量的評価手法の確立

国土地理院

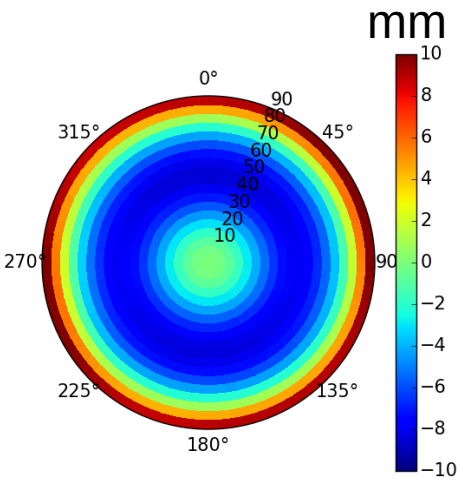
地面反射マルチパス定量的評価手法

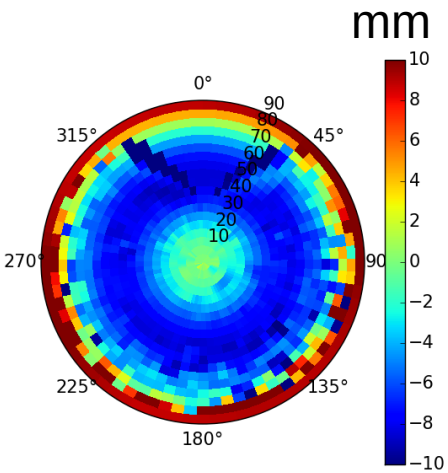
受信機SNRを用いた遅延マップ作成





GPS解析時に適用するアンテナ位相モデルに加算→任意の解析ソフトウェアに適用可能

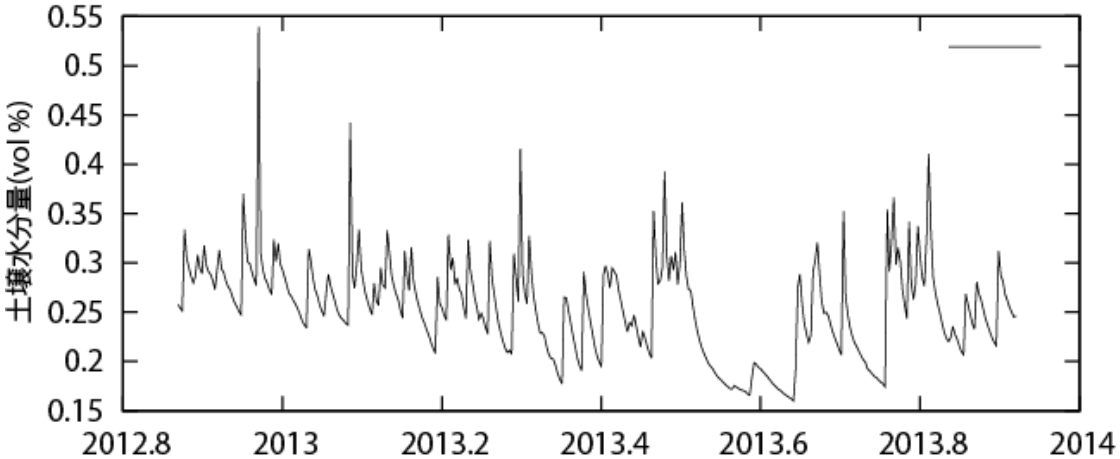


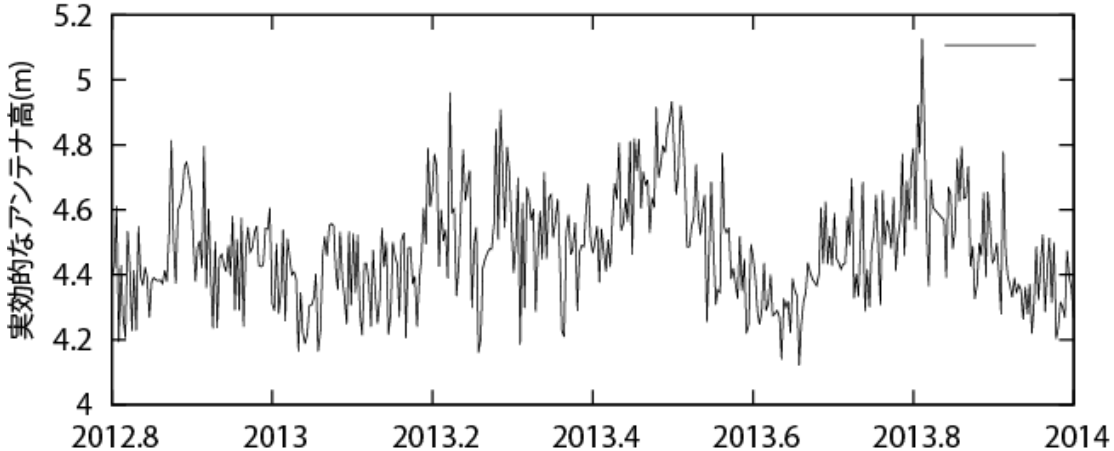


土壌水分量観測

国土地理院

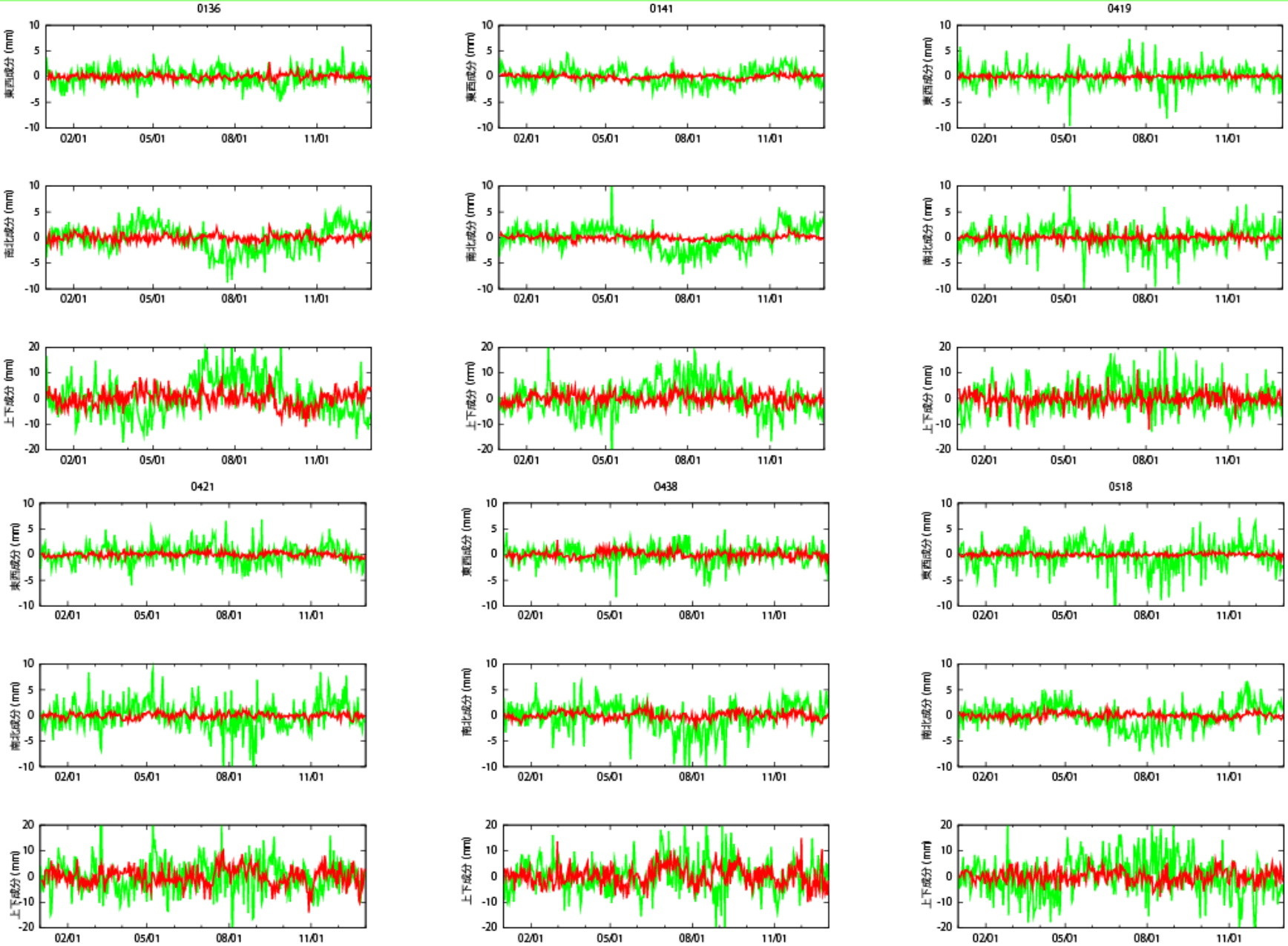
全国11ヶ所で土壌水分量の連続観測を実施



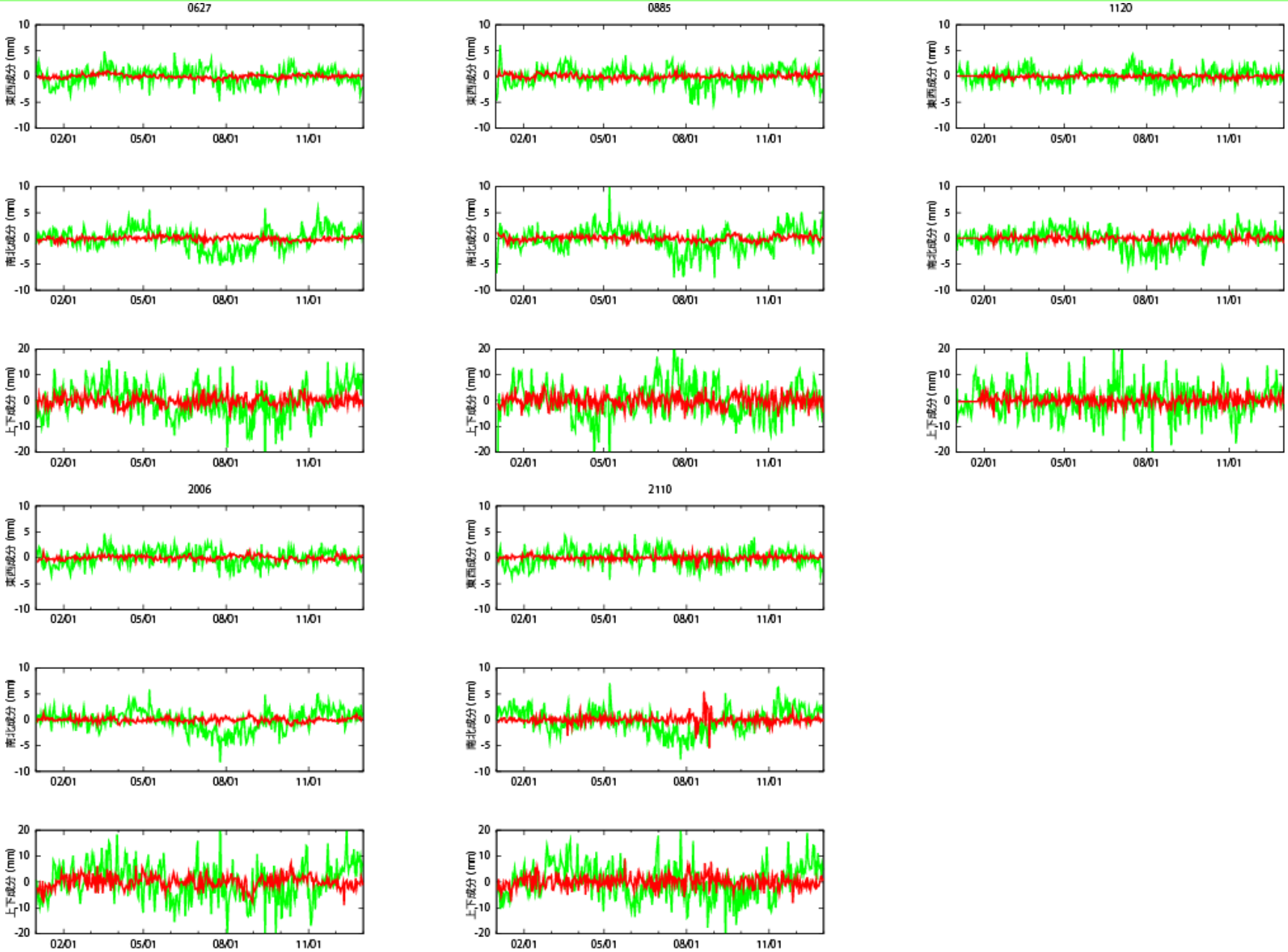


受信機SNRから求めた実行的なアンテナ高と土壌水分量との間には、弱い相関が見られる
→チューニング次第では、土壌水分量を受信機SNRから抽出できる可能性がある

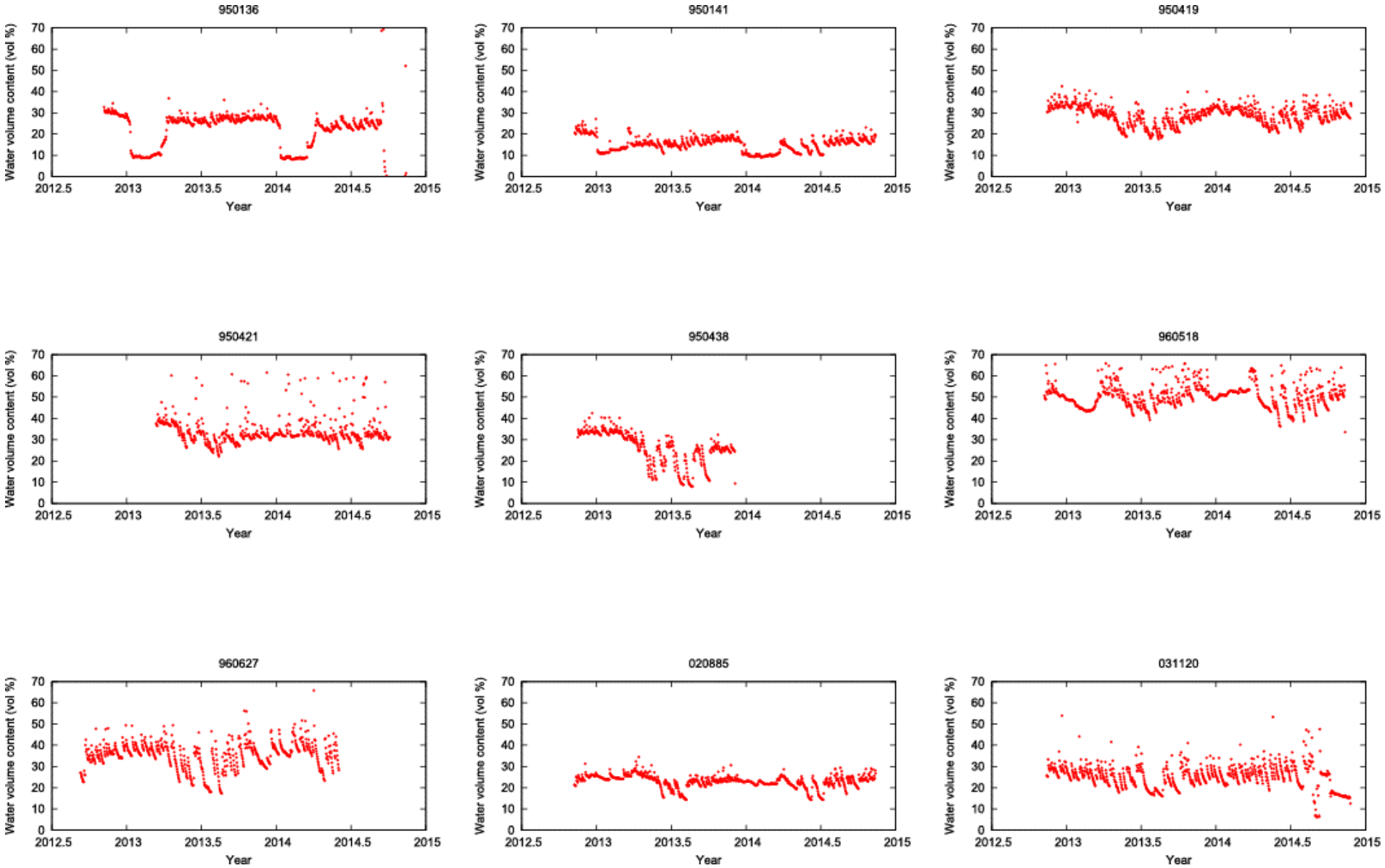
地面反射マルチパス時系列（その１）



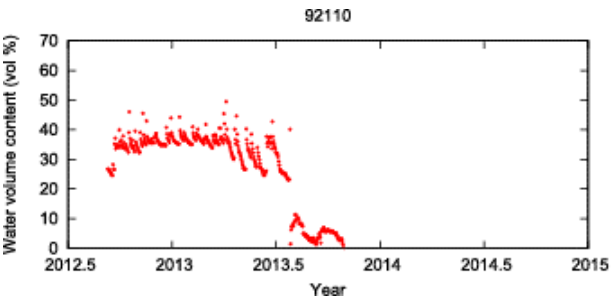
地面反射マルチパス時系列（その２）

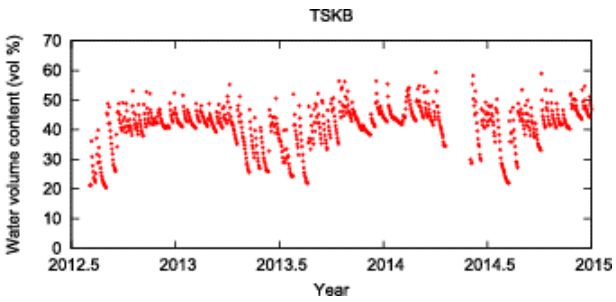


土壌水分計記録（その１）


950136
950141
950419
950421
950438
960518
960627
020885
031120
Water volume content (vol %)
Year
0
10
20
30
40
50
60
70
2012.5
2013
2013.5
2014
2014.5
2015

土壌水分計記録（その２）


92110
Water volume content (vol %)
70
60
50
40
30
20
10
0
2012.5
2013
2013.5
2014
2014.5
2015
Year


TSKB
Water volume content (vol %)
70
60
50
40
30
20
10
0
2012.5
2013
2013.5
2014
2014.5
2015
Year