

高度な国土管理のための複数の衛星測位システム（マルチ GNSS） による高精度測位技術の開発（第 1 年次）

実施期間	平成 23 年度～
測地観測センター衛星測地課	古屋 智秋 酒井 和紀 辻 宏道 森下 一
測地観測センター地殻監視課	川元 智司
測地観測センター	豊田 友夫

1. はじめに

国土地理院では、国土交通省総合技術開発プロジェクト「高度な国土管理のための複数の衛星測位システム（マルチ GNSS）による高精度測位技術の開発」（平成 23～26 年度）を実施し、米国の GPS をはじめ、日本の準天頂衛星（QZSS）、ロシアの GLONASS、EU の Galileo といった各国の衛星測位システムのデータを統合的に利用したマルチ GNSS 高精度測位技術の開発及び標準化を進めている。

マルチ GNSS による高精度測位が可能となった場合、観測点上空の GPS 以外の衛星も同時に利用できるようになるため、都市部のビル街や山間部等の GPS のみでは測位が困難な地域でも測位が可能になると期待され、さらには、新たな周波数帯のデータが追加されることから、より短時間で高精度測位が可能になると期待されている。

2. 研究内容

平成 23 年度に行った業務は以下の通りである。

1) マルチ GNSS の解析技術等の開発

①衛星系の組合せに関する調査検討

－複数の衛星系を統合的に解析する手法の検討

②複数周波数信号の組合せに関する調査検討

－新たな周波数帯 L5 を利用した解析手法の検討

③衛星系、受信機及び GNSS 解析ソフトウェアの技術仕様調査

④マルチ GNSS 解析システムの基本設計

－①、②及び③の結果を踏まえた解析システムの検討

⑤データ生成システム（シミュレータ）の開発

－任意の位置/時間における受信データを擬似生成するソフトウェアの開発

2) 解析技術の検証と確立

⑥アンテナ・受信機の調達

⑦マルチ GNSS 現地試験観測

－調達受信機を用いて、GPS、QZSS、GLONASS を試験的に観測し、受信状況等を評価

⑧試験観測点の設置

－長期的に実験データを取得するための試験観測点の設置

3. 得られた成果

ここでは、上記の研究内容のうち、①・②・⑦を中心に報告する。

(1) 衛星系の組合せに関する調査検討業務

実測データから得られたマルチパスによる観測誤差モデルと、異機種受信機間の基線解析において発生する GLONASS 受信機チャンネル間バイアスの計算を行った。これらの補正を行い、GPS と GLONASS を用いた基線解析を行った結果を表-1 に示す。補正を行わなかった場合と比較し、初期化時間の短縮、Fix 率の向上が確認された。また、GPS、QZSS、GLONASS、Galileo のそれぞれの時刻系・座標系の整理と軌道暦の精度についての調査を行った。

(2) 複数周波数信号の組合せに関する調査検討業務

L1, L2, L5 帯信号の 3 周波を用いたアンビグイティ決定手法について、3 周波の様々な線形結合を利用した解法である「TCAR (Three Carrier Ambiguity Resolution)」と、長基線においても安定して高精度に測位できると考えられる「電離層推定+ILS (Integer Least Squares : 整数最小二乗法)」の検討を行った。シミュレーションデータを用いて測位解析を行った結果、「TCAR」「電離層推定+ILS」のいずれにおいても、アンビグイティが Fix した状態ではミリオーダーの精度が得られた。また、「電離層推定+ILS」においては、3 周波を利用することで、解の収束時間が改善されることが確認された。

(3) マルチ GNSS 現地試験観測

QZSS を含む GNSS 衛星の観測を行い、測量業務において QZSS により GPS 補完を行う場合の技術的な課題の確認を行った。試験観測の結果、QZSS を解析に加えたことによる解析結果の精度の低下は確認されず、QZSS が GPS の補完機能を果たしていることが確認された。

受信機 組合せ	補正	初期化 時間 (エポック)	Fix率 (%)	RMS E-W (mm)	RMS N-S (mm)	RMS U-D (mm)
① JAVAD- NovAtel	×	1078	0.9	0.9	6.0	6.5
	○	<u>1</u>	<u>86.1</u>	2.1	<u>5.2</u>	<u>5.9</u>
② JAVAD- Trimble	×	1	54.6	2.0	5.3	5.9
	○	1	<u>93.8</u>	2.1	<u>5.1</u>	<u>5.4</u>
③ JAVAD- TOPCON	×	1	82.6	2.1	4.6	6.1
	○	1	<u>91.8</u>	2.4	4.7	6.3

表-1 GPS・GLONASS を用いた基線解析の解析結果。補正を与えて改善した値を 下線 で示す。

測位方式：キネマティック 観測データ期間：24 時間 エポック間隔：30 秒 基線長：1 m

4. 結論

平成 24 年度には、平成 23 年度に行った 1) マルチ GNSS 解析技術等の開発の内容を引き続き行い、さらに深めていく。今回の結果では、①の調査において、GPS-GLONASS 間の二重位相差を用いた基線解析による検証はされていないため、その点についてはさらなる調査を行う必要がある。また、解析システムの開発においては、詳細設計に加えてプロトタイプの実験も行い、GPS、QZSS、GLONASS の統合解析が可能なソフトウェアの提供を行う予定である。2) 解析技術の検証と確立においては、新たにデータを取得するなどして、引き続き現地試験観測によるデータの品質評価を行っていく。

リアルタイム解析の信頼性向上に関する研究

実施期間 平成 16 年度～平成 23 年度
測地観測センター地殻監視課 影山 勇雄 古屋 有希子
鎌苅 裕紀 大島 健一

1. はじめに

GEONET の 1 秒データによる後処理解析（以下、「後処理 1 秒データ解析」という。）は、大規模な地震が発生した場合に地殻変動量の把握のための解析に用いられている。後処理 1 秒データ解析は、定常解析よりも精度が劣るものの、解析結果が得られるまでの時間が短いという特徴がある。しかしながら、解析の過程で手動による操作が必要となるため発災から最大で 3 時間程度の時間を要している。そのため、処理を自動化し発災から概ね 1 時間で解析結果を得ることができる「準リアルタイム解析システム（以下、「本システム」という。）」を平成 22 年度に構築した。

2. 研究内容

本システムは一度に解析を行える電子基準点数に制限があるため、地震の規模に応じて解析範囲を自動で判定している。内陸型地震のように地殻変動が検出されるエリアが限定されることが予測される地震では、震源域近傍の全ての電子基準点の解析を行う「通常クラスター」を用いるのに対して、海溝型地震のように広範囲で地殻変動が検出されることが予測される地震では、解析を行う電子基準点を間引いた「広域クラスター」を用いている。通常クラスターについては平成 23 年 4 月 11 日に発生した福島県浜通りを震源とする地震、広域クラスターについては東北地方太平洋沖地震に伴い検出された地殻変動について本システムの有効性について検証を行った。

3. 得られた成果

図-1 に通常クラスターを用いて作成された解析クラスター、図-2 に後処理 1 秒データ解析結果

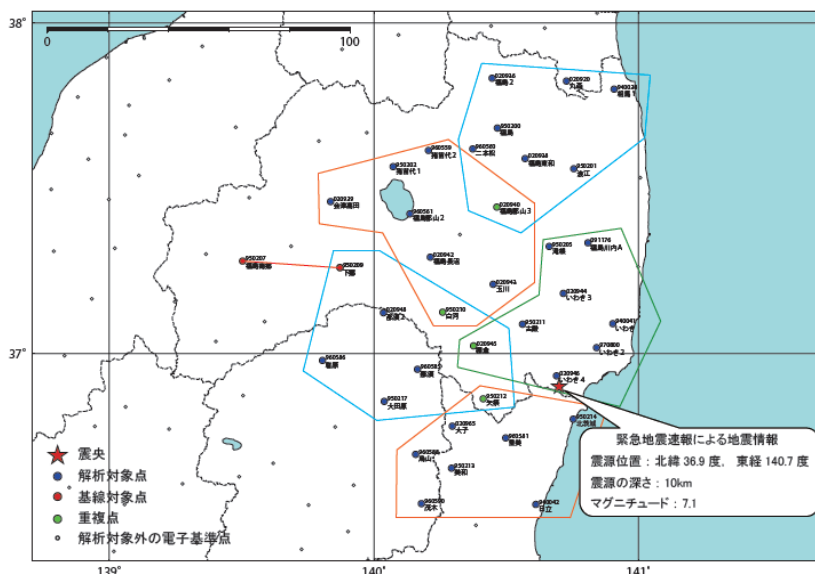


図-1 通常クラスターを用いて作成された解析クラスター

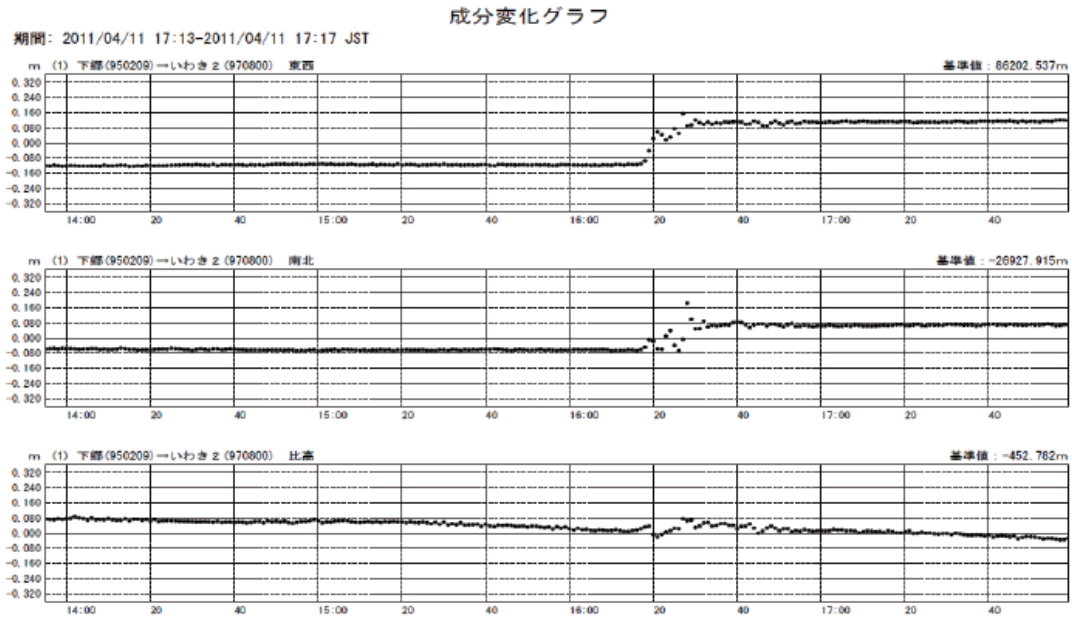


図-2 後処理1秒データ解析結果(下郷(950209)→いわき2(970800))

をそれぞれ示す。その結果によると、電子基準点「下郷(950209)」と「いわき2(970800)」の基線で水平方向に約28cmの地殻変動が検出された。この結果は、図-3に示す定常解析結果(迅速解(Q3))とほぼ整合している。

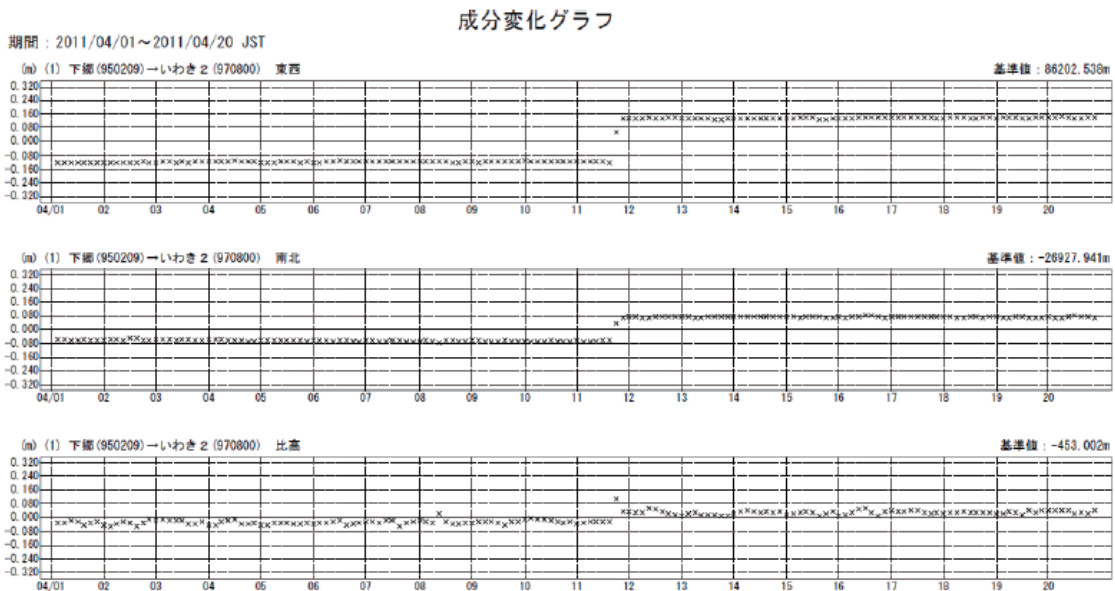


図-3 定常解析(Q3解)結果(基線;下郷(950209)→いわき2(970800))

一方、鉛直方向に関しては後処理1秒データ解析では沈降する傾向が見られているが、定常解析結果では同様の変動は検出されなかった。

図-4に広域クラスターを用いて作成された解析クラスター、図-5に後処理1秒データ解析結果

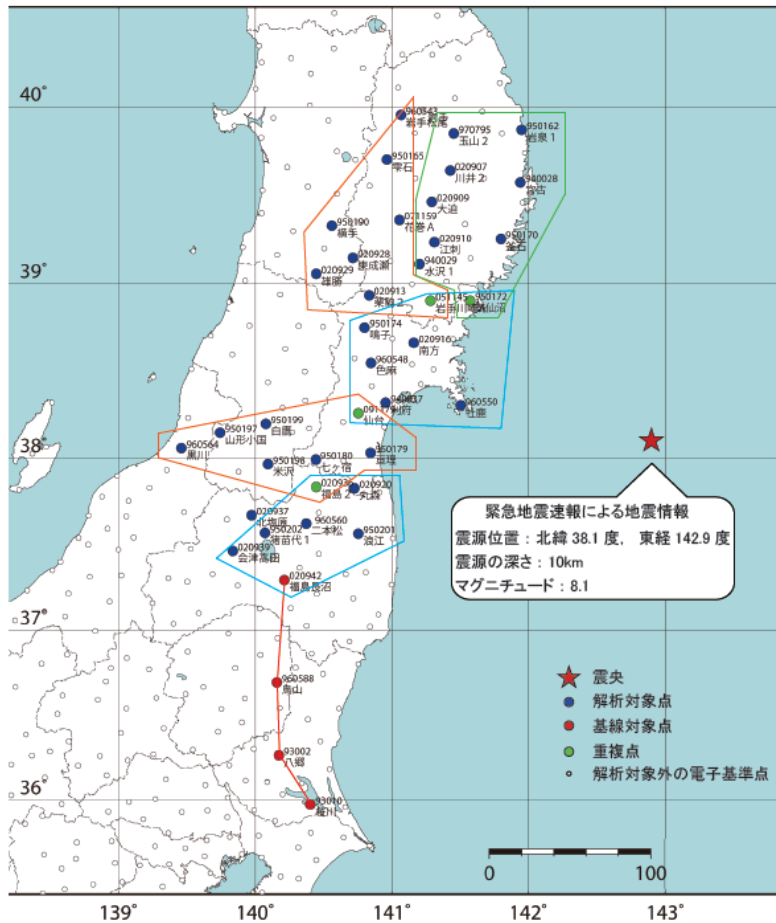


図-4 広域クラスターを用いた解析クラスター

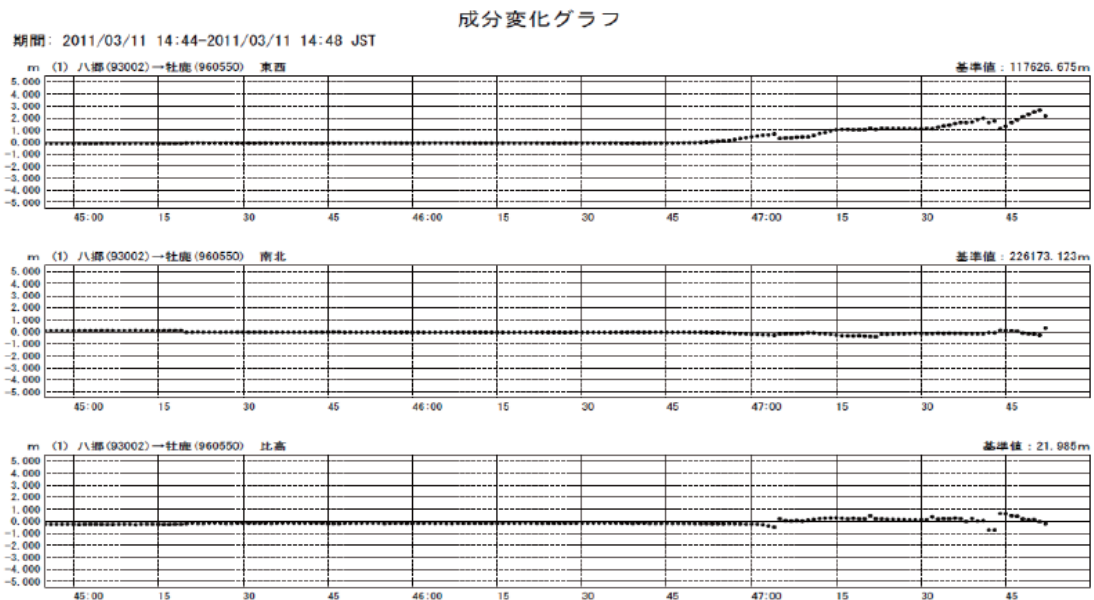
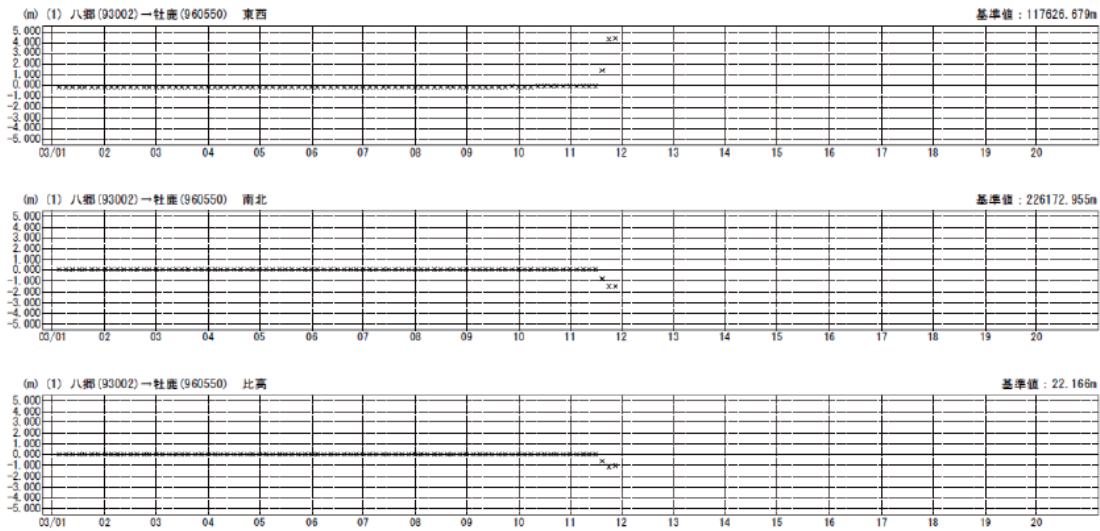


図-5 後処理 1 秒データ解析結果 (八郷(93002)→牡鹿(960550))

を示す。その結果によると、電子基準点「八郷(93002)」と牡鹿「(960550)」の基線で水平方向に約 2.4m の漸移的な変動が見られたが、図-6 に示す定常解析結果 (迅速解 (Q3)) では水平方向に約 5.3m の変動が見られ、それぞれの解析結果から得られた変動量に大きな隔たりが生じた。また、後

成分変化グラフ

期間：2011/03/01～2011/03/20 JST



図－6 定常解析（Q3解）結果（基線；八郷(93002)→牡鹿(960550)）

処理1秒データ解析では鉛直方向で有意な変動は検出されなかったが、定常解析結果（迅速解（Q3））からは約-1.2mの変動量が検出された。定常解析結果と比較し異なる結果が得られた要因として、地震に伴う変動量が大きく、後処理1秒データ解析で用いている解析初期値からの差が大きくなったために、後半の解析結果が得られなかったことに加え、後処理1秒データ解析ではカルマンフィルターを用いているために漸移的な変動を示す結果となり、定常解析結果で検出された変動量に至らなかったと考えられる。

4. 結論

通常クラスターで解析された水平方向の地殻変動について、定常解析結果と整合しており、本システムの有効性が確認されたが、鉛直方向の地殻変動については、定常解析結果と整合していなかった。また、広域クラスターで解析された地殻変動については定常解析結果と水平及び鉛直方向ともに整合していなかった。

今後は地震に伴う地殻変動情報をよりの確に提供するために、解析精度の向上を目指しつつ、様々なケースでの有効性を検証する必要がある。

参考文献

小島秀基 (2010)：リアルタイム解析ソフトウェア rtNet のための自動クラスタリングツールのアルゴリズム検討，高等測量研修課題研究報告書。

電子基準点の GPS 近代化計画への対応に関する研究

実施期間	平成 16 年度～平成 23 年度
測地観測センター地殻監視課	影山 勇雄 古屋 有希子 鎌苅 裕紀 大島 健一

1. はじめに

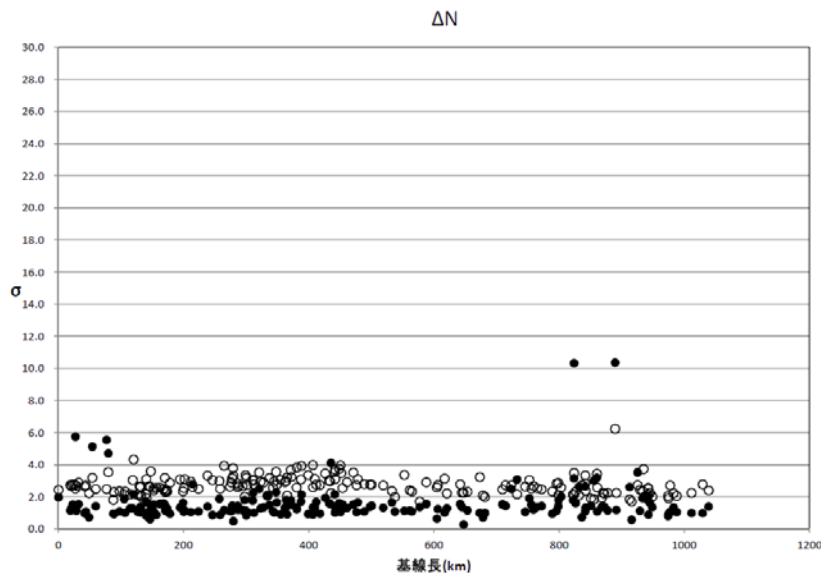
測地観測センターでは GPS 近代化計画へ対応するために、平成 18 年度より電子基準点の受信機更新を計画的に進めており、P(Y)コードの保証がなくなる 2020 年末までには全点で GPS 近代化に対応させる予定である。また、GPS 近代化計画の一部である第 3 の周波数帯 L5 を採用することにより、周波数の線形結合が増え、長い基線ではアンビギュイティの決定率向上が期待され、Galileo との相互運用性など測位分野での活用が見込まれる。一方、アンテナを L5 対応型に交換する必要があるため、地殻変動の連続監視への影響があることが懸念される。このため新しい L5 対応型チョークリングアンテナや受信機を用いて試験観測を実施し、GPS 近代化に対する GEONET の更新・改良の進め方を検討してきた結果、現行のアンテナと同程度の安定性及び性能がこれまでに確認されてきた。

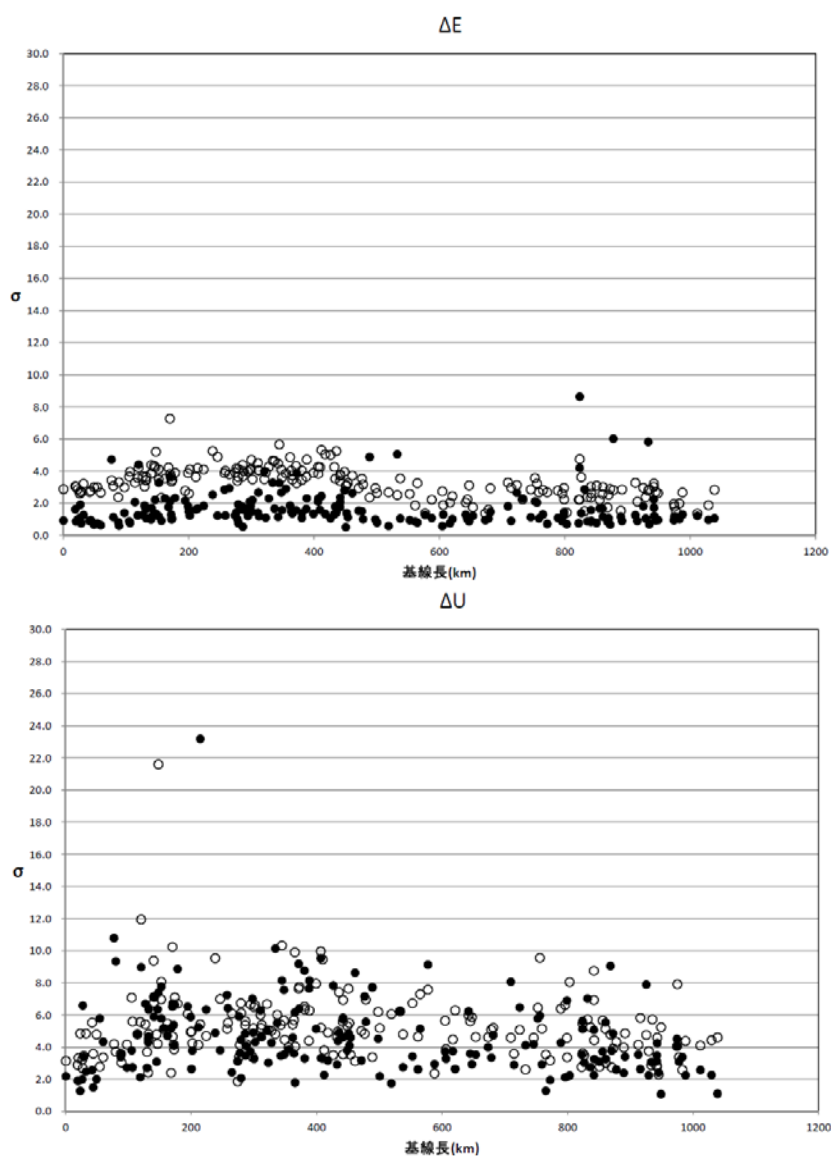
2. 研究内容

平成 23 年度に実施された電子基準点等の受信装置等の更新作業において、L5 対応型のチョークリングアンテナ（トプコン社製 TPSCR.G5、トリンプル社製 TRM59800.80）が新規に導入されることとなったため、電子基準点のアンテナ架台毎にそれぞれアンテナ位相特性の算出を行い、定常解析に適用した。アンテナ交換前後の定常解析結果について、ある基準日との座標差の標準偏差をそれぞれ算出し、解析結果の安定性の評価を行った。なお、評価にあたっては解析固定点であるつくば 1 (92110) のアンテナ交換の影響を受けないように、つくば 1 (92110) のアンテナ交換前の解析結果を用いている。

3. 得られた成果

図-1 に基準日との座標差から算出された標準偏差の結果を示す。アンテナ交換前の標準偏差は南





図－1 横軸に電子基準点「つくば1(92110)」とアンテナ交換を行った電子基準点との基線長をとり、縦軸にアンテナ交換を行った前後のある基準日との座標差の標準偏差をプロットした図。白抜きのプロットはアンテナ交換前、塗りつぶしのプロットはアンテナ交換後を示している。

北方向で 2-4mm，東西方向で 2-5mm の範囲内にほぼ分布していたが，アンテナ交換後は南北および東西方向ともに 0-2mm の範囲内に分布しており，アンテナの交換に伴い解析結果が安定したことが分かる。鉛直方向についてはアンテナの交換前後とも 2-10mm に分布しており，アンテナの交換後も交換前と同様の安定性が得られた。また，水平及び鉛直方向とも解析固定点であるつくば1(92110)との距離の依存性は見られなかった。

4. 結論

平成 23 年度に新規に導入されたチョークリングアンテナは既存のアンテナと比較し水平方向では解析結果がより安定し，鉛直方向についてはほぼ同程度の安定性が得られることが分かった。

今後も引き続きアンテナ更新が行われる予定であるため，順次導入さえるアンテナについて解析結果の評価を行うとともに，L5 についても試験観測を行い，各アンテナの性能評価を行う必要がある。

GPS 連続観測データを用いた潮位監視手法の高度化に関する研究

実施期間 平成 20 年度～平成 23 年度
測地観測センター地殻監視課 三浦 優司 川元 智司

1. はじめに

IPCC (気候変動に関する政府間パネル) がとりまとめた第 4 次報告書では、現在から 100 年後には最大で 50cm 程度、全球的に海面が上昇すると予測している (Solomon et al., 2007). 第 4 次報告書には、1993 年から 2003 年にかけての海面変動トレンドの全球図が示されており、海面変動は、地域によって偏りがあり、海面が上昇する地域もあれば、下降する地域があることが示されている。したがって、日本沿岸の長期的な海面変動を地域的に把握することが必要である。

海面変動を計測する技術としては、主に「沿岸部に験潮儀を設置して海面を直接計測する方法」と「衛星に搭載したアルチメトリー (海面高度計) を使用して海面を計測する方法」がある。アルチメトリーは、衛星を利用していることから、全球的な海面変動をとらえることができる。しかし、衛星の軌道のずれ、対流圏遅延、電離層遅延等の誤差要因があり、データの補正が必要である。また、その結果は海面を平均化したものとなる。

一方、験潮儀から取得した観測結果は、その場所での海面変動を直接取得している。また、験潮儀で取得した潮位データは、陸域と海域の境界である沿岸部であるため、アルチメトリーのデータと組み合わせることにより、より正確な海面変動の把握につなげることができる。このことは、近年の国際的な測地分野の取り組みである IAG GGOS (Global Geodetic Observation System of International Association of Geodesy) でも取り組むべき課題の一つとして挙げている (Plag and Pearlman, 2009)。

アルチメトリーで得られる海面データが、準拋楕円体からの高さである楕円体高 (以下、「絶対的潮位」という。) であるのに対して、験潮儀で得られる潮位データは、験潮場の地盤を基準とした海面変化 (以下、「相対的潮位」という。) の値である。相対的潮位には、潮位の変動と験潮場の地盤上下変動の 2 つの影響が混在している。したがって、相対的潮位のデータから、地盤上下変動成分の影響を取り除き、絶対的潮位として長期的な海面変動を評価する必要がある。

国土地理院の験潮場には、GPS 連続観測点 (GPS-P 点) が 2003 年から取り付けられており、この GPS のデータを活用すれば、準拋楕円体を基準とした絶対的潮位データを作成することができる。本研究では、験潮場で取得したデータ (潮位データ、GPS データ) を利用して、絶対的潮位データを作成し、海面変動トレンドの定量的な評価を実施した。

2. 研究内容

(1) 平成 22 年度までに実施した研究内容と結果

平成 22 年度までに国土地理院の験潮場で取得した潮位データと GPS データ等を利用して、気圧変化と潮汐変化を取り除いた絶対的潮位データの作成を実施し、2003 年から 2010 年にかけての海面変動トレンドの傾向を評価した (三浦・川元, 2012)。算出した結果は、日本海側では、1mm から 3mm 程度の海面上昇であったが、太平洋側では、静岡西部から四国にかけての地域では海面下降、それ以外の地域では海面上昇と異なる傾向が見られた。

太平洋側において、海面上昇と海面下降という相反する傾向の分布は、アルチメトリーから得られた全球的な海面変動図でも見られている。この原因として、解析したデータから、黒潮の流路変化の

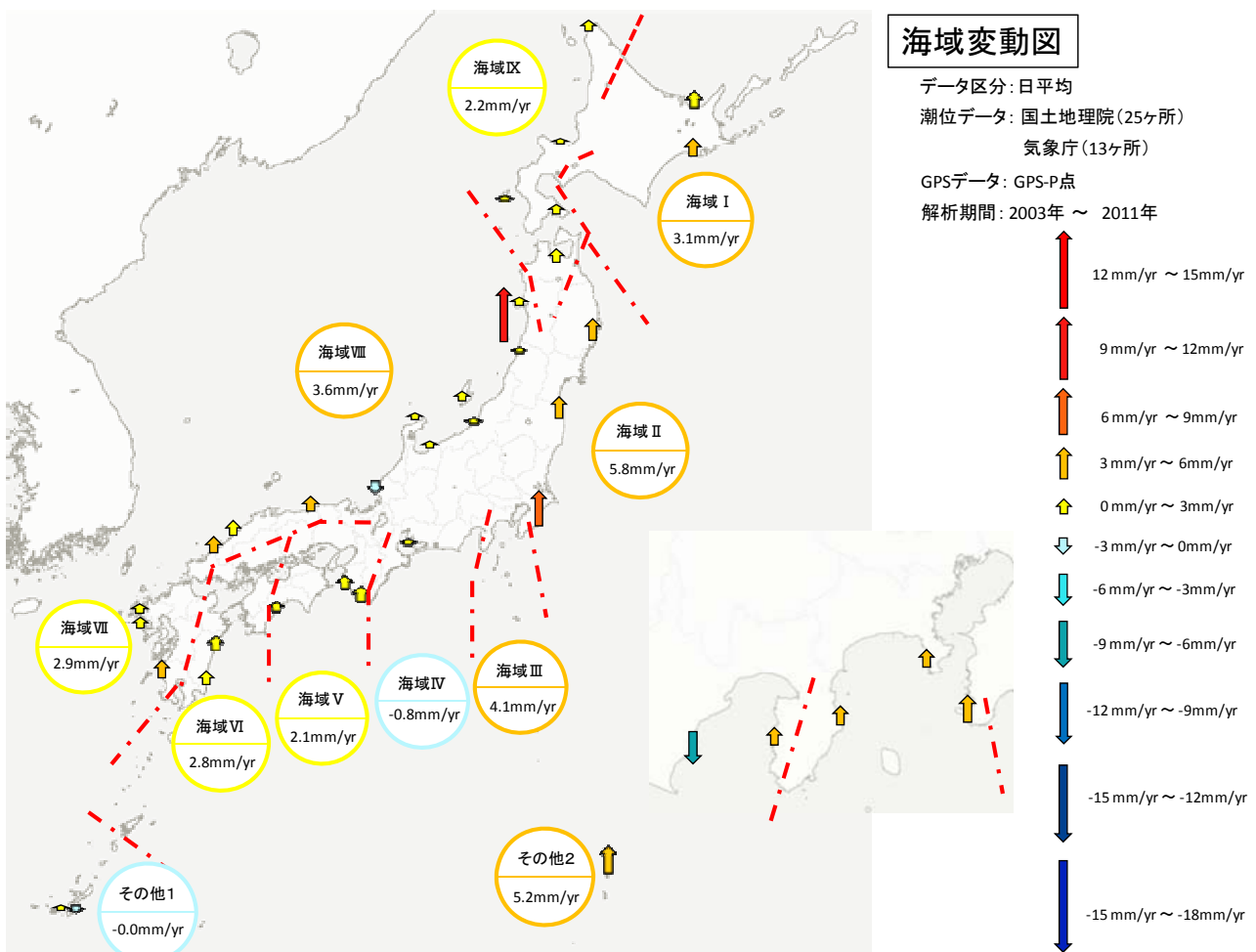
影響が大きく関係していることが分かった。特に黒潮大蛇行の期間には、明瞭な潮位変化が見られ、海面変動トレンドを算出する上で、黒潮の流路変化に注意する必要がある。

(2) 平成 23 年度に実施した研究内容

測地観測センターでは、国土地理院所管の 25 験潮場の他に、気象庁所管の 16 験潮場（気象庁では、験潮場のことを「検潮所」と整理している。）においても、建物の屋上もしくは近傍に GPS 連続観測点を設置し、データを取得している。最終年度である平成 23 年度は、国土地理院の験潮場の他に、気象庁験潮場のデータを加えて再解析を実施することとした。その際、気象庁験潮場の潮位データは、気象庁の潮位データ提供サイト「潮汐観測資料(<http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/db/tide/genbo/index.php>)」から取得した。「潮汐観測資料」ホームページでは、2002 年から毎時潮位のデータを公開しているが、「熊野（三重県熊野市）」、「御坊（和歌山県御坊市）」、「由岐（徳島県美波町）」の 3ヶ所については、2005 年からのデータ公開であったため、2003 年から 2011 年にかけての海面変動トレンドを算出できず、今回の解析対象点から除外した。したがって、国土地理院験潮場 25ヶ所、気象庁験潮場 13ヶ所の全 38ヶ所にて解析処理を実施した。

3. 得られた成果

38ヶ所の験潮場で算出した海面変動トレンドは、±11mm/year の範囲におさまっており、全 38 験



図ー1 各海域での海面変動トレンド

※矢印は、各験潮場での海面変動トレンドを示している。

潮場平均で+2.1mm/yearであった。また、加藤・津村（1979）の海域区分ごとに、作成した各験潮場の潮位データを重ね合わせ処理し、各海域での海面変動量を見積もったところ、日本海側では2mm/yearから4mm/yearの海面上昇の傾向、太平洋側では-1mm/yearから6mm/yearと海面上昇と海面下降が混在する結果となった（図-1、表-1）。日本海側では海面上昇、太平洋側では海面上昇と海面下降が混在する傾向は、昨年度、国土地理院の25験潮場のデータを用いて、2003年から2010年にかけての海面変動トレンドを算出した場合にも見られたパターンである（三浦・川元、2012）。ただし、太平洋側の海域V、海域VIにおいて、昨年度算出した2003年から2010年にかけての海面変動トレンドは海面下降の傾向であったが、今回算出した2003年から2011年にかけての海面変動トレンドは海面上昇の傾向であり、異なる海面変動トレンドの傾向が見受けられた。この要因としては、千葉県から四国にかけての海域（海域III、海域IV、海域V、海域VI）での「黒潮の流路変更に伴う一時的な潮位変化」の影響が関係していると考えられる。図-2は、海域IV、海域V、海域VIの重ね合わせ処理した潮位データだが、黒潮大蛇行時に周期一年程度の一時的な潮位変化が生じていることが分かる。このような一時的な潮位変化は、海面変動トレンド算出に影響をもたらすため、その影響を取り除くことが今後の課題としてあげられる。

表-1 各海域での海面変動トレンド

海域	海面変動トレンド (mm/yr)	標準偏差 (mm/yr)	対象験潮場
I	3.10	0.29	網走*, 釧路*
II	5.83	0.33	大船渡*, 相馬, 勝浦
III	4.10	0.44	布良*, 油壺, 伊東
IV	-0.77	0.61	田子, 焼津, 鬼崎,
V	2.11	0.55	串本*, 海南, 久礼
VI	2.76	0.47	細島, 油津*
VII	2.86	0.38	仮屋, 長崎*, 阿久根
VIII	3.61	0.43	男鹿, 飛鳥, 鼠ヶ間, 小木, 柏崎, 富山*, 輪島, 三国, 田後, 浜田*, 須佐
IX	2.18	0.30	稚内*, 忍路, 奥尻, 函館*, 浅虫
その他1	-0.04	0.42	沖縄, 那覇*
その他2	5.21	0.56	父島*

* 気象庁所管の験潮場

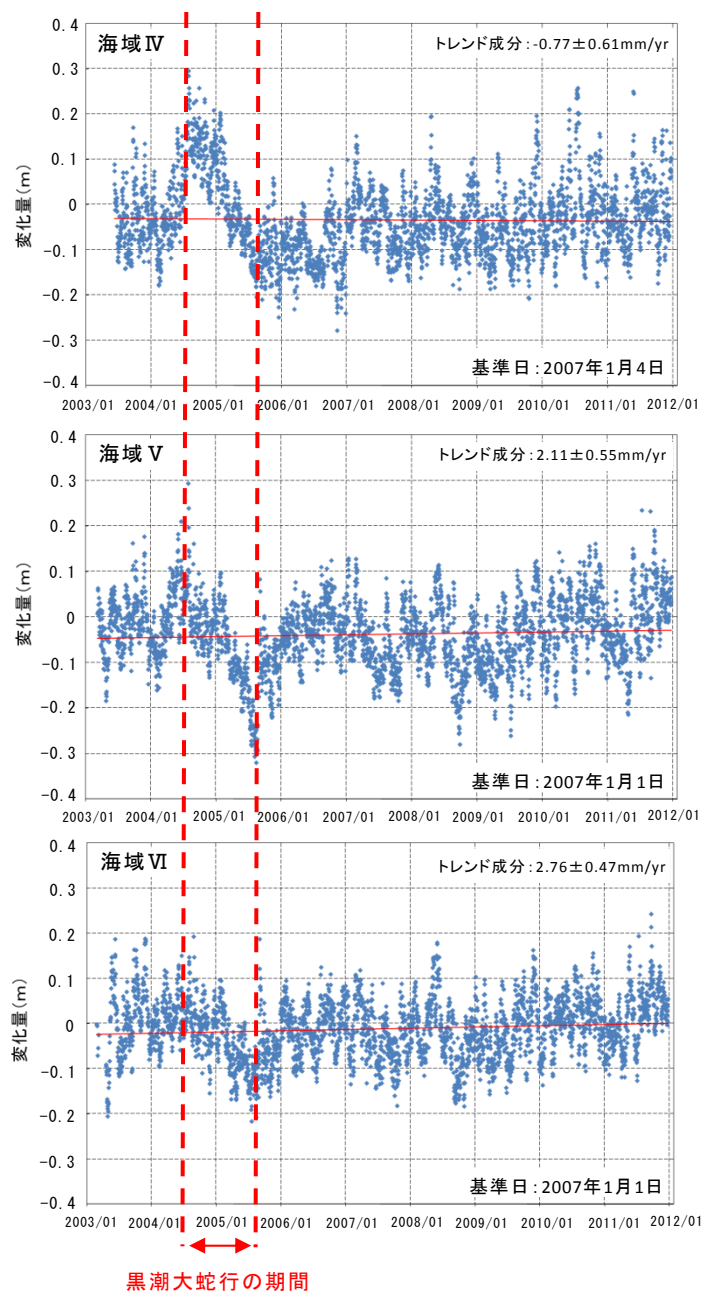


図-2 重ね合わせ処理した潮位した潮位データ
(海域IV, 海域V, 海域VI)

4. まとめ

験潮場に設置された潮位データと GPS データを組み合わせることにより、準拋楕円体からの海面高データ（絶対的潮位データ）の作成を行った。作成したデータから算出した海面変動トレンドは、国土地理院と気象庁の全 38 験潮場平均で +2.1mm/year であり、最近の報告書・論文等に記載してある全球平均した海面変動トレンドとも調和していた (Solomon et al., 2007 ; Woppleman et al., 2009, 2007 ; AVISO)。各験潮場の海面変動トレンドには、地域分布が見られ、日本海側では、2mm/year から 4mm/year の海面上昇、太平洋側では -1mm/year から 6mm/year と海面上昇と海面下降の地域が見受けられた。太平洋側の海面上昇と海面下降の地域分布には、黒潮の流路変化による一時的な潮位の変動が影響しており、黒潮大蛇行といった海流の大きな流路変化に注意すべきである。なお、本解析結果（平成 22 年度実施分）は、平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震基準点成果改定会議 水準点成果ワーキンググループに報告し、水準原点成果改定の検討材料として活用された。

参考文献

- AVISO : Mean Sea Level rise, <http://www.aviso.oceanobs.com/en/news/ocean-indicators/mean-sea-level/> (accessed 9 Feb. 2011).
- 加藤照之, 津村建四朗 (1979) : 潮位記録から推定される日本の垂直地殻変動 (1951~1978), 地震研究所彙報, Vol. 54, 559-628.
- 三浦優司, 川元智司 (2012) : 験潮場の GPS 連続観測点を用いた潮位データ解析手法の検討, 国土地理院時報, 123, 21-33.
- Plag H.-P. and M. Pearlman (eds.) (2009) : Global Geodetic Observing System Meeting the Requirements of a Global Society on a Changing Planet in 2020, Springer.
- Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.) (2007) : Climate Change 2007 -The Physical Science Basis-, Cambridge University Press.
- Wöppelmann, G., C. Letetrel, A. Santamaria, M. N. Bouin, X. Collilieux, Z. Altamimi, S. D. P. Williams and B. Martin Miguez (2009) : Rates of sea-level change over the past century in a geocentric reference frame, Geophys. Res. Lett., 36, L12607, doi:10.1029/2009GL038720.
- Wöppelmann, G., B. Martin Miguez, M. N Bouin and Z. Altamimi (2007) : Geocentric sea-level trend estimates from GPS analyses at relevant tide gauges world-wide, Global Planet. Change, 57, 396-406.