電子基準点データによる水準点の標高変動補正の検証（第 2 年次）

実施期間　　平成 28 年度～
測地部測地基準課　兒玉　篤郎　　加古　考範
測地部宇宙測地課　山下　達也

1. はじめに

本研究は，過去に観測された水準点の標高を電子基準点データ（F3 解）による変動量を補正して，最新の標高を算出するものである．本年度は，平成 28 年度に引き続き，時期の異なる 2 度の水準測量から求めた標高変動量と F3 解を用いて推定した同期間の標高変動補正量との比較検証を行った．また，昨年度の調査研究では，電子基準点間の距離よりも波長の長い変動については，概ね 1～2cm 程度の精度で補正可能であること，点間距離よりも波長の短い変動の補正が困難であることから，電子基準点データによる標高補正は海溝型地震に伴う変動に対して有効であることが示された．今年度は短波長の複雑な変動が生じる内陸型地震に対して，電子基準点データに SAR 解析データを組み合わせた補正手法の検証を行った．

2. 手法

本検証では，GPS 連続観測システムの運用が始まった平成 8 年度以降に 2 度水準測量を行った地域において，水準測量の新しい観測で得られた標高変動量と，電子基準点データを利用して水準測量の古い観測を補正するために計算した標高変動補正量を比較した．本検証の対象地域は仙台から八戸にかけての東北地域（平成 23 年，28 年に水準測量実施），伊豆（平成 14～15 年，27～28 年に水準測量実施）の 2 地域である．手法については，昨年度（山下，2017）と同様の手法で行った．

また，SAR 解析データを組み合わせた補正手法については，平成 28 年（2016 年）熊本地震での観測結果を用いて九州地域の 1 地域で行った（Yamashita et al., 2017）．

干渉 SAR 解析データを組み合わせた補正手法の基本的な考え方は図-1 のとおりである．平成 28 年（2016 年）熊本地震前の水準測量を基準にし，地震の直前の SAR 観測が実施された日までの経年変動を従来の方法と同様に電子基準点データによって補正する．次に地震による短波長の不連続な変動は，地震発生日を挟む SAR 観測による 3 次元解析の結果を利用して補正する．さらに地震後の余効変動については，電子基準点データにより補正する．なお，検証地域には SAR 観測の都合上 3 次元解析を実施できていない領域も存在するが，そのような領域には電子基準点データのみを用いた従来の手法を適用した．

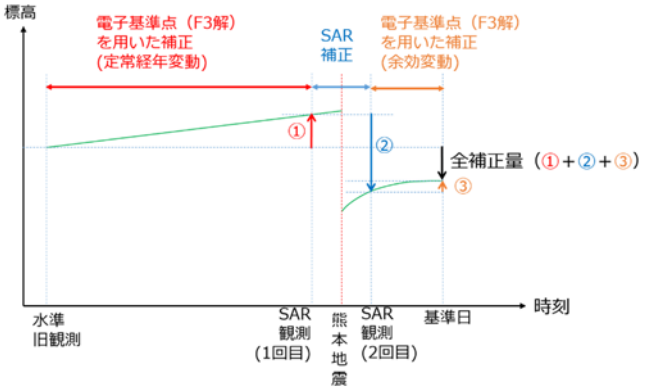


図-1　電子基準点データと SAR 解析データを組み合わせた補正方法のイメージ

3. 得られた成果

3.1 東北地域

平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震の直後に行われた水準測量と平成 28 年に実施した水準測量の結果による標高変動量を見ると，二戸付近の水準点を固定した場合に南部にかけて顕著な変動があり，とりわけ仙台地方から気仙沼にかけての太平洋沿岸部では，おおよそ 20cm～30cm の変動が見られた（図-2）．同期間の電子基準点データを用いて標高変動量を算出し，図-2 で示した標高変動量との差をとった結果（図-3），平均値が 0.32cm，標準偏差が 1.26 cm となり，一部の点で 5cm 程度の差はあるものの，ほとんどの点で 2cm 程度の誤差で水準測量と整合した標高を算出できた．較差の大きかった点は，三陸海岸の沿岸部に集中していた．この地域の水準点は電子基準点よりも海側に存在しているものが多く，これらの点では外挿計算を実施せざるを得ない．すなわち，外挿計算が必要となる沿岸域においては，標高変動量を適切に計算できない可能性があるので，注意が必要である．

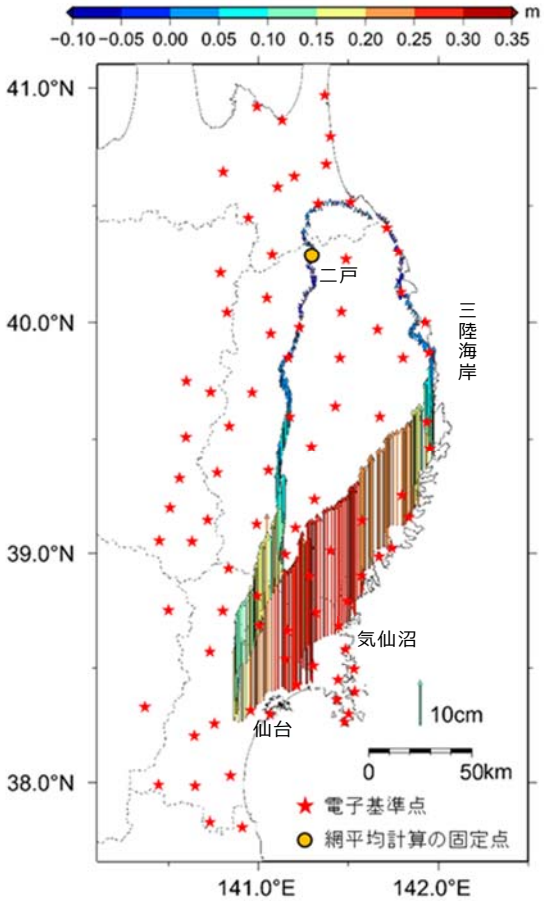


図-2　水準測量による標高変動量
（平成 23 年～平成 28 年）

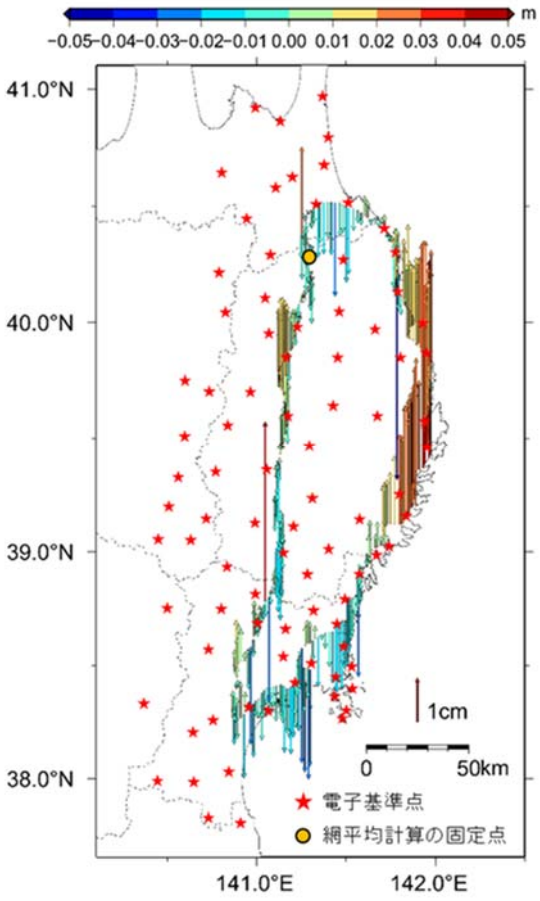


図-3　水準測量による標高変動量と電子基準点データによる標高変動補正量の差

3.2 伊豆地域

伊豆地域において，水準測量によって得られた標高変動量と電子基準点データによる標高変動補正量の差は，2cm 以内で収まっている（図-4）．差の平均は 0.79cm で，標準偏差は 0.95cm であった．概ね良好な結果を示しているが，短波長成分が卓越した局所的な変動は補正できていない．また，沼津付近は,他の地域と比べて電子基準点の配点密度が低い上に,水準路線付近に電子基準点があるため，この電子基準点の影響が大きく寄与していることが伺える．

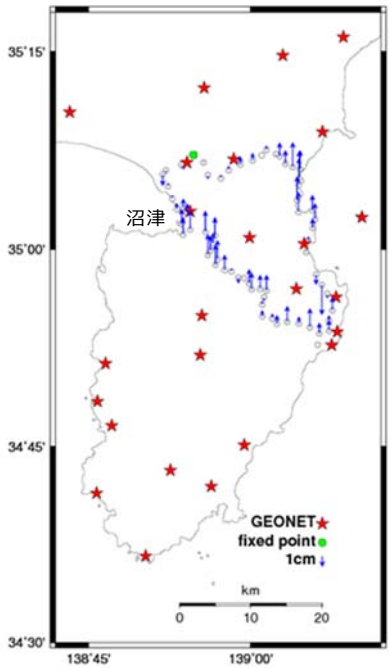


図-4　水準測量による標高変動量と電子基準点データによる標高変動補正量の差

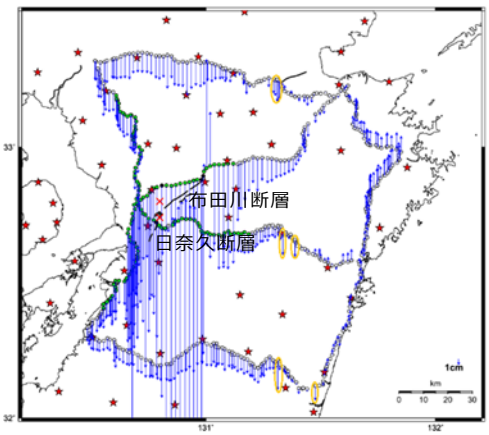
3.3 九州地域

平成 28 年（2016 年）熊本地震は，内陸型の巨大地震で熊本地方を中心に大きな被害をもたらした．そのため，地震後に頻繁に SAR 観測が行われ，水準測量も行われた．この地震では干渉 SAR 解析や GNSS 解析によって，布田川・日奈久断層を中心に複雑な地殻変動が生じたことが確認された．

よって，本検証では，水準測量の旧観測が平成 15 年と平成 18 年に行われ，かつ地震後に水準測量が行われた地域を対象に，電子基準点データと SAR の 3 次元解析データを組み合わせた標高変動補正量の評価を行った．

SAR の 3 次元解析データには，SAR 干渉解析によるものと，ピクセルオフセット法（以下「PO」という．）と呼ばれる画像解析手法によるものがある．SAR 干渉解析は PO に比べて精度が良い一方で，水面や土砂崩落地域などでは非干渉となり変動を検出できない．一方，PO は SAR 干渉解析に比べ精度は劣るものの，非干渉域でも変動を検出できる．そこで両者の利点を活かすため，SAR 干渉解析データがある点は SAR 干渉解析データを使用し，PO データのみの点は PO データを利用し，両者とも存在しない点は電子基準点データのみで標高変動補正量を計算した．

図-5 に新旧の水準測量によって得られた標高変動量の空間分布を示す．布田川・日奈久断層帯の近傍では，最大で約 90cm の沈降が発生し，全体的に沈降の傾向がある中に局所的な隆起域が見られ，電子基準点よりも短い波長の変動が生じていることが伺える．一方，布田川・日奈久断層帯から離れた地域においては，約 10 年間の経年変化に伴い最大で約 5cm の沈降・隆起がなだらかに変化しているのが確認できる．また，これらの変動は長波長の変動成分が支配的であるものの，これまでの検証と同様，点固有の局所的な標高変動を示す水準点も数点見られる（図-5 の橙色の丸で囲んだ点）．



×:平成 28 年熊本地震の前震と本震の震央
★:電子基準点
●:干渉 SAR データが存在する水準点
●:干渉 SAR データがなく PO データが存在する水準点
○:干渉 SAR 及び PO データが存在しない水準点

図-5　水準測量によって得られた標高変動量

図-6 は，図-5 の水準測量の標高変動量と電子基準点データのみで作成した標高変動補正量との差である．図-7 は，図-5 の水準測量の標高変動量と電子基準点データと SAR の 3 次元解析データで組み合わせて計算した標高変動補正量との差である．図-6，図-7 より，断層付近での複雑な変動補正量の計算について，SAR の 3 次元解析データを組み合わせたことにより大幅に改善していることがわかる．

図-6 の場合は，平均−2.00cm，標準偏差 11.56cm であったのに対し，図-7 では，平均−0.65cm，標準偏差 2.14cm であった．

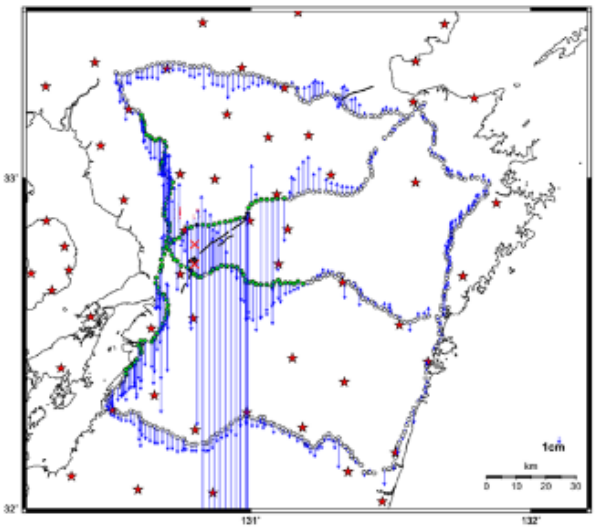


図-6　水準測量による標高変動量と電子基準点データによる標高変動補正量の差

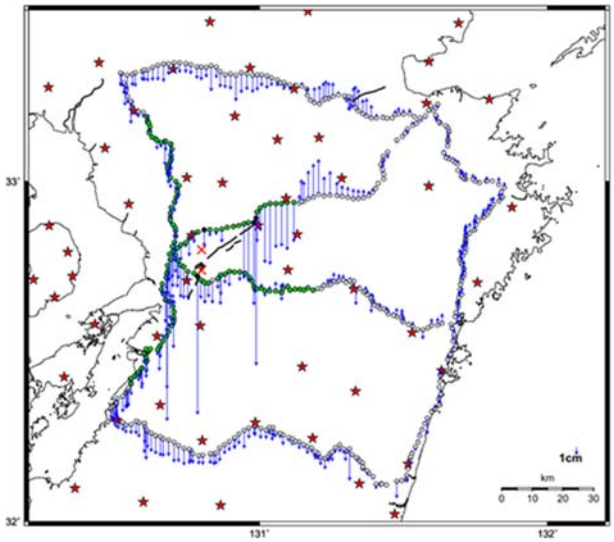


図-7　水準測量による標高変動量と電子基準点データと干渉 SAR の 3 次元解析データの組み合わせによる標高変動補正量の差

4. 結論

得られた成果から，変動勾配のなだらかな地域では水準測量と概ね整合した変動補正量を得られるが，電子基準点の配置やデータの質に依存するため，海岸線沿いの沿岸部等では注意が必要である．

内陸型地震が発生した地域についても，SAR 観測が十分に実施され 3 次元解析が実施されれば，実際の変動量により適合した補正が可能である．ただし，いずれの補正手法においても，それぞれの手法が有する空間分解能よりも波長の短い局所的な変動を再現することはできない．

今後は，較差の大きかった地域の原因について追求するとともにその解消方法を探る．また，干渉 SAR 観測データが十分になく，3 次元解析が困難な場合について，震源断層モデルを用いた検証を進めていく必要がある．

参考文献

山下達也（2017）：電子基準点データによる水準点の標高変動補正の検証，平成 28 年度調査研究年報，24-27.

Yamashita, T., T. Toyofuku, K. Kokado, S. Nemoto, H. Tanaka, and Y. Morishita (2017), The leveling net adjustment with a correction for altitude variations obtained from GNSS-based control stations data, IAG-IASPEI, Kobe, Japan.

水準測量の精度向上の研究（第 2 年次）

実施期間　平成 28 年度～平成 29 年度
測地部測地基準課　瀧　修一　黒田 次郎
測地観測センター地殻監視課　澤田 正典

1. はじめに

測地基準課では，水準測量の総合的な精度向上を目的とした研究の一環として，御前崎地区の年周変動の原因を測量誤差の観点から探る調査研究を続けている．平成 28 年度から直射日光による水準測量用三脚（以下「三脚」という.）の変形を抑制する遮蔽材（澤田，2016）を取り付けた三脚を用いて，御前崎地区の水準測量を実施している．本調査研究では，平成 28・29 年度の 2 年間の夏冬観測を通じて得た観測データの検証結果について報告する．

2. 研究内容

直射日光による三脚の変形に伴う三脚天板傾斜による系統的な測量誤差を確認するため，防災対策地域水準測量御前崎地区において，三脚に直射日光の影響を最小限にするための遮蔽材を装着して観測を行った（写真-1）.

観測期間は，平成 28 年度（夏季観測：以下「Ⅰ期」という.）2016 年 6 月 27 日～7 月 13 日，（冬季観測：以下「Ⅱ期」という.）2017 年 1 月 5 日～1 月 21 日，及び平成 29 年度（Ⅰ期）2017 年 6 月 27 日～7 月 14 日，（Ⅱ期）2018 年 1 月 9 日～1 月 27 日である．

遮蔽材の構造は，2mm 厚と 3mm 厚の断熱材（東レ製「トーレペフ」）を重ねて巻き，その外側をアルミテープで覆い最後に透明性の高い保護テープを巻いて補強した（写真-2）.

写真-1　遮蔽材を装着した三脚による観測の様子

写真-2　遮蔽材の構造

3. 得られた成果

過去 5 年間の御前崎地区の変動と三脚に遮蔽材を覆った結果について，表-1 に各観測年度における一等水準点 140-1 を固定し算出した一等水準点 10151 の観測標高の夏冬較差を示す．また，図-1 に一等水準点 140-1 から御前崎検潮所標石までの各水準点の変動について，平成 25 年度Ⅰ期を基準に算出した平成 29 年度までのⅠ期・Ⅱ期観測の結果を示す．

表-1 の夏冬較差は、平成 28 年度では平成 25～27 年度と同様の傾向となっているが，平成 29 年度では減少している． また図-1 において，平成 29 年度観測は，年度間における沈降幅及び年度内の較差いずれにおいても傾向が減少している．

表-1　一等水準点 140-1 を固定し算出した一等水準点 10151 の標高値と夏冬較差

	Ⅰ□10151の観測標高(m)		較差（mm）
	Ⅰ期	Ⅱ期	Ⅰ期－Ⅱ期
平成25年度	2.8380	2.8309	+ 7.1
平成26年度	2.8356	2.8252	+ 10.4
平成27年度	2.8243	2.8107	+ 13.6
平成28年度	2.8164	2.8061	+ 10.3
平成29年度	2.8134	2.8073	+ 6.1

※平成 28・29 年度は，三脚に遮蔽材を装着

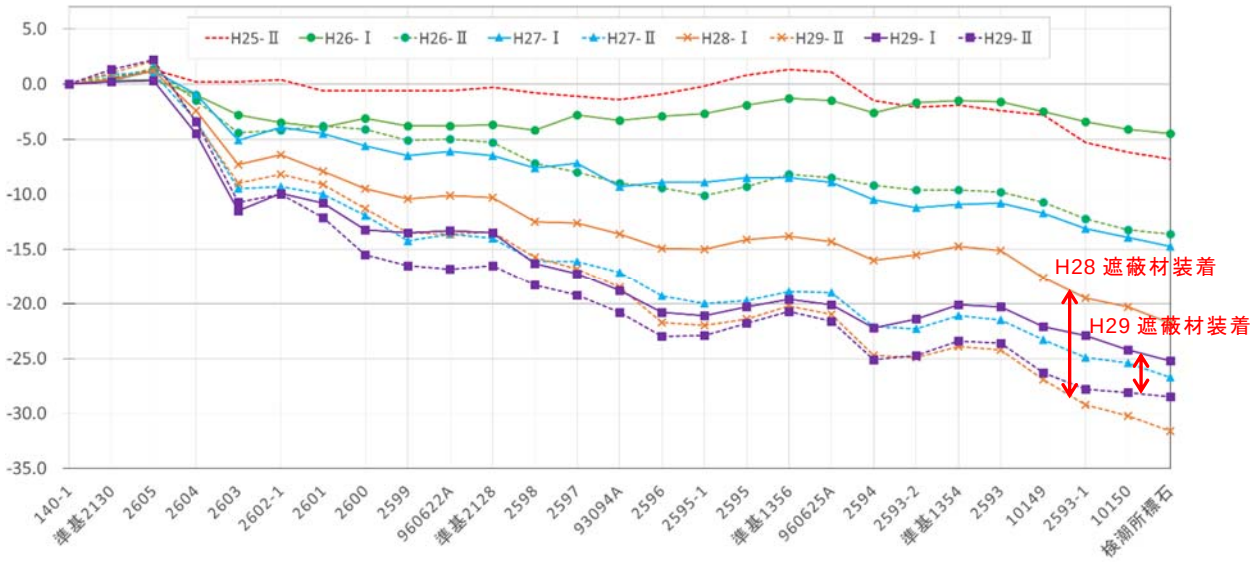


図-1　御前崎地区　水準測量の変動量

4. 結論

三脚に遮蔽材の覆いをした平成 28・29 年度の観測結果は，条件が同一にもかかわらず平成 28 年度は例年どおり，平成 29 年度は年周変動の減少という対照的な結果となった．これは，三脚に直射日光が当たることによる系統的な測量誤差よりも，その他の誤差要因の方が大きいことを示唆しており，現時点では遮蔽材による明確な精度改善の効果は認められない．

今後は，遮蔽材の改善を試みながら前年度までの調査研究の残された課題である「電子レベル設置後に発生する視準線の変動」について，また平成 29 年度の観測において，メーカー校正後に電子レベルの視準線補正角が小さくなり，往復差のプラス傾向が減少していることから「電子レベルの視準補正角と往復差の相関」について，それぞれ調査を進める必要がある．

参考文献

澤田正典（2016）：水準測量用三脚に取り付ける直射日光遮蔽材の選定，測地部技術報告書，平成 27 年度．

ジオイド・モデルの維持管理に関する研究開発（第 3 年次）

実施期間　　平成 27 年度～平成 29 年度
測地部物理測地課　　平岡　喜文　　佐々木　利行
小板橋　勝　　矢萩　智裕

1. はじめに

地震等に伴って地殻変動が生じると，地殻変動量に応じて電子基準点の楕円体高成果及び標高成果が改定される．この場合，楕円体高成果と標高成果の改定量が等しければ，楕円体高成果から標高成果を減じて得たジオイド高も変わらないため，ジオイド・モデルを変更する必要はない．しかし，楕円体高成果と標高成果の改定量に乖離が生じると，ジオイド・モデルとの間に不整合が生じることとなり，ジオイド・モデルの更新を検討する必要がある．

平成 28～29 年度にかけて東北地方で標高の測量成果が改定されたことから，ジオイド・モデルの不整合を把握して現行のジオイド・モデルを用いた基準点測量及び GNSS 水準測量の標高の結果が目標精度を達成できるか調査し，ジオイド・モデルの更新の是非を検討したので，その結果を報告する．

2. 研究内容

平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震後に続く余効変動により東北地方太平洋沿岸では地盤の隆起が継続していたことから，平成 28 年度に岩手県，宮城県，福島県及び茨城県，平成 29 年度に秋田県，山形県及び新潟県に設置されている水準点及び電子基準点の標高成果が水準測量に基づき改定された．そこで，水準測量に基づき標高成果が改定された電子基準点 72 点のほか，近隣まで含めた東北地方の電子基準点 147 点について，楕円体高成果から改定後の標高成果を減じてジオイド高を求め，ジオイド・モデルとの不整合を把握した．また，同じく標高成果が改定された水準点のうち，岩手県，宮城県，秋田県及び山形県に位置する 27 点においては，平成 28 年度から平成 29 年度にかけて水準点上における GNSS 観測（ジオイド測量）を実施し，電子基準点を既知点とした GNSS 基線解析により水準点上の楕円体高を求め，改定後の標高成果を減じてジオイド高を求めてジオイド・モデルとの不整合を把握し，先に述べた電子基準点における結果と合わせて評価した．

3. 得られた成果

ジオイド・モデルに求められる要求基準は測量方式により異なる．電子基準点を既知点として用いた基準点測量では，ジオイド・モデルは楕円体高成果の元期の値から標高成果を減じて得たジオイド高との整合が求められる．一方，電子基準点を既知点として用いた GNSS 水準測量では，ジオイド・モデルは楕円体高成果の今期の値から標高成果を減じて得たジオイド高との整合，また，隣接する電子基準点間のジオイド高の不整合の較差が小さいことが求められる（平岡ほか，2017）．そこで，楕円体高を元期と今期とした場合で計算し，ジオイド・モデルとの不整合を把握し評価した．なお，楕円体高成果の今期の値は ”SemiDyna2017.par” を用いたセミ・ダイナミック補正により求めた．

ジオイド高の計算に楕円体高成果の元期の値を用いた場合には，ジオイド・モデルとの不整合が牡鹿半島周辺で 30cm に達した（図-1）．原因は，平成 28～29 年度にかけて標高成果が改定された際に楕円体高成果が改定されなかったためであり，不整合の量は標高成果の改定量とよく一致する．電子基

準点を既知点とした基準点測量では，観測時の標高に関する制限は超過しないものの，得られた新点の標高は改定後の水準点の標高とは乖離する．

ジオイド高の計算に楕円体高成果の今期の値を用いた場合には，ジオイド・モデルとの不整合は電子基準点「いわき 2」の 9cm が最大となる．GNSS 水準測量ではこの不整合が楕円体高閉合差となって潜在的に含まれ，既知点とする電子基準点の組み合わせによっては，GNSS 水準測量の結果が周囲の標高成果と乖離する場合がある（平岡ほか，2017）．ジオイド・モデルとの不整合の大きな電子基準点を使用すると，隣接する電子基準点間で楕円体高閉合差が許容範囲を超過する懸念のある組み合わせがいくつか見られた．

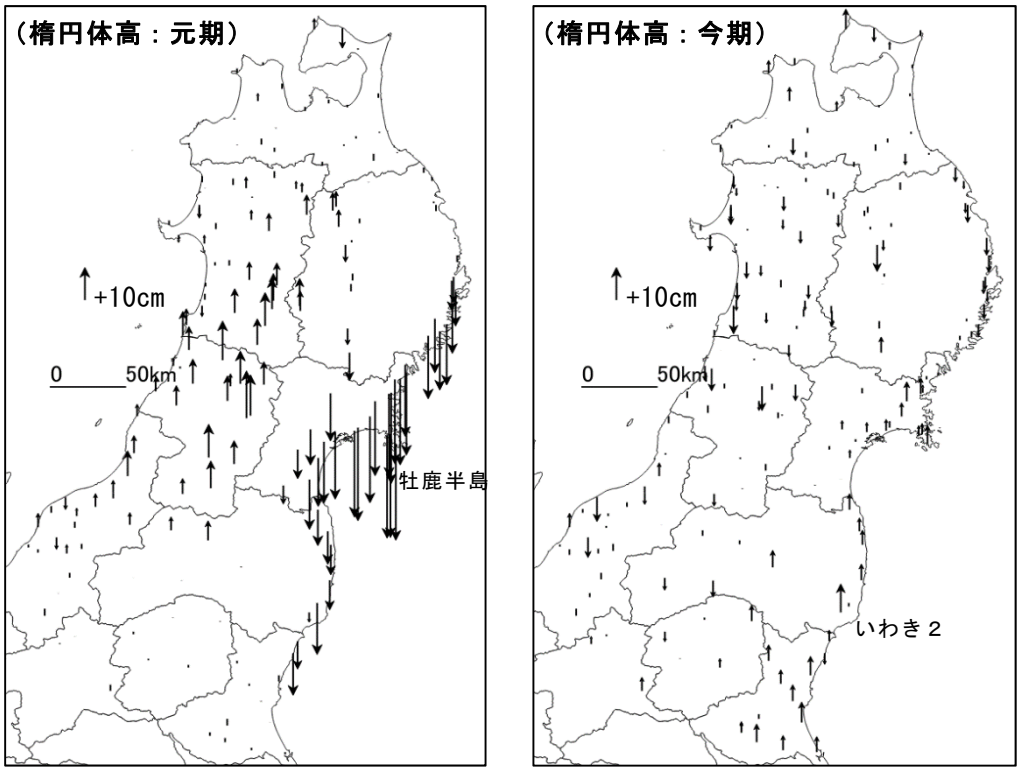


図-1　東北地方におけるジオイド・モデルとジオイド高との比較

4. 結論

平成 28～29 年度にかけて東北地方で標高の測量成果が改定されたことから，楕円体高成果から標高成果を減じて得たジオイド高とジオイド・モデルとの不整合を把握し，現行のジオイド・モデルを用いた基準点測量及び GNSS 水準測量の標高の結果が目標精度を達成できるか評価した．その結果，電子基準点を既知点として用いる基準点測量では，得られる新点標高が改正後の水準点の標高と乖離することが明らかとなった．また，GNSS 水準測量にて，ジオイド・モデルとの不整合の大きな電子基準点を使用すると，隣接する電子基準点間で楕円体高閉合差が許容範囲を超過する懸念のある組み合わせがいくつか見られており，これらの電子基準点は GNSS 水準測量では使用しないなどの対策が必要である．これらの問題は高精度な重力ジオイド・モデルを新たに構築し，電子基準点の楕円体高成果からそのジオイド高を減じることで標高を決定する新たな標高体系の中で解決を図る．

参考文献

平岡喜文，佐々木利行，重松宏美，矢萩智裕（2017）：ジオイド・モデルの維持管理に関する研究開発（第 2 年次），平成 28 年度調査研究年報，40-43.

重力基準網の更なる高度化と基盤データの有効活用に関する調査（第 2 年次）

実施期間　　平成 28 年度～平成 30 年度
測地部物理測地課　大森　秀一　　加藤　知瑛
平岡　喜文　　矢萩　智裕

1. はじめに

国土地理院は,全国に等しく正確な重力の基準を与えるため陸上の重力測定を 1950 年代から継続して行ってきた.最新の重力基準は,平成 29 年 3 月 15 日に公開した「日本重力基準網 2016(JGSN2016)」で，質量，圧力などの計量分野の国家標準の検定，地下構造探査のための重力測定の基準など，社会及び科学分野で広く活用される重力値を提供している.

JGSN2016 は,基準重力点 32 点,一等重力点等(併用点である水準点及び電子基準点付属標を含む.) 231 点から構成されている．しかし，約 14,000 点の二等重力点及び他機関を含む国内 240,000 点を越える地上重力データは，依然として過去の日本重力基準網 1975（JGSN75）（国土地理院，1976）に準拠したまま残っている．異なる基準系の重力データが混在することはユーザの混乱を招くことから，これを解消するため JGSN75 の重力値を JGSN2016 に整合させる変換パラメータの開発を地理地殻活動研究センター宇宙測地研究室（以下「宇宙研」という.）と共同で行っている．物理測地課では，変換に必要な全国の重力データを整備するとともに，宇宙研において開発中の変換パラメータ（宮﨑・松尾，2018）を用いて，二等重力点の重力値を更新し，平成 30 年度を目途に重力値推定計算サービス（http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/gravity/calc/gravity.pl）の基盤データを JGSN2016 に整合させる予定である．また，新たな標高体系の基盤となる精密重力ジオイド・モデルの構築において，有効活用するために重力データを管理していく.

平成 29 年度は変換パラメータの JGSN2016 への整合性を高めるため,データ空白域である北海道道央とその周辺,東北地方の日本海側及び沖縄島等において新たに測定を行い,重力データを整備した.本稿では，重力データ整備に係る概要，現状及び今後の方針を報告する.

2. 重力データの整備

2.1 概要と現状

JGSN75 構築時に骨格となった一等重力点の JGSN2016 の重力値を基準として,最寄りの二等重力点(主に水準点)に対して相対重力測定を行い，JGSN2016 に整合した重力値を付与した．これにより，二等重力点において両基準系に基づく重力値が直接比較可能となる．新旧重力値比較のための測定対象となる二等重力点は，JGSN75 構築以降に移設，改埋等の重力値に影響を与える人為的な外的要因が存在しない点のみであり，現存するものは少数である．地殻変動等による経時変化の影響を極力排除するためには，可能な限り短期間に有効な重力データを整備する必要がある．そのため，JGSN2016 構築のための測定に合わせて，

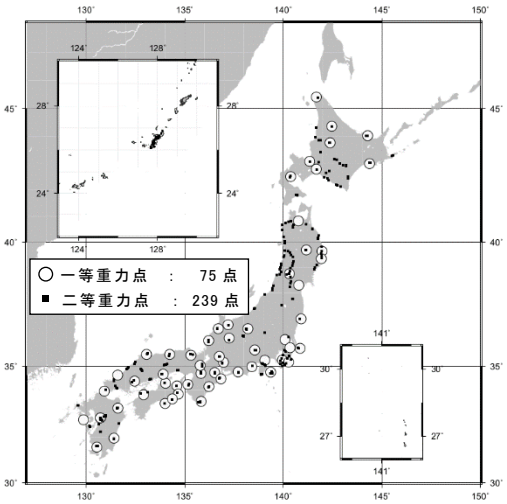


図-1　データ整備の状況（配点図）

変換パラメータ作成のために別途試行的に測定していた平成 26 年度以前の重力データを活用するとともに，平成 27～29 年度は全国で本格的に新たに測定を行い，ほぼ全国の重力データを整備した（図-1）.

2.2 測定及び計算方法

JGSN2016 の重力値を有する一等重力点等を起点として，二等重力点に対して相対重力測定を実施した．平成 29 年度の測定では，ラコスト G 型重力計（G-83，G-118）及びシントレックス重力計（No.300200022）の 3 台を用いた．測定は 1 測点あたり 1 台に付き 3 回読定し，最大値と最小値の差が 10μGal 以内であればその 3 組の平均値を採用し, 10μGal を超える場合はそれを超えないデータが 3 組得られるまで再測定を繰り返し，その平均値を採用した．重力値の計算は，測定した重力差を観測値として, 未知数である測点の重力値を最小二乗法により推定した. 計算に用いたスケールファクタ, ドリフト及び周期誤差に JGSN2016 で決定した値を使用するとともに，器械高，固体・海洋潮汐及び気圧の補正方法, 並びに測定値に対する重量にも JGSN2016 で採用した方法を用いることで, JGSN2016 に整合した最終的な重力値を算出した.

2.3 結果

これまでの測定により，両基準系に基づく重力値を有する二等重力点は全国で 239 点となった．その重力値の差を図-2 に示す．日本全体で重力差が負に偏る（矢印下向き：重力値が小さくなる）傾向が見られ，平均値は−0.028mGal であった. 正の最大値は青森県つがる市の一等水準点「6110」で+0.164mGal，負の最大値は静岡県菊川市の二等水準点「2600」で−0.238mGal である．この差は，約 40 年間の地殻変動等に伴う物理的な重力値の時空間変化，基準とする重力値の違い，測定時の計算手法の違いなどに起因する.

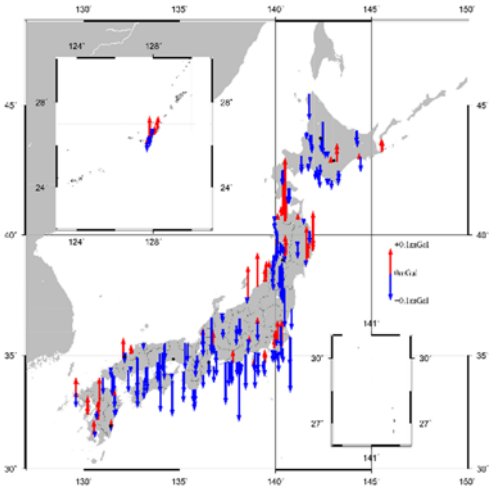


図-2　JGSN2016－JGSN75

3. まとめ

物理測地課では, 平成 27 年度から新旧異なる重力基準網に基づく重力値を相互に変換するためのパラメータ作成に必要な重力データの整備を行ってきた. 平成 29 年度にデータ空白域において測定を行ったことで重力データの整備は完了した.

平成 30 年度は宇宙研が開発する変換パラメータで二等重力点の重力値を更新する．これにより，約 14,000 点の二等重力点が JGSN2016 に準拠することになる．また，準拠した二等重力点の重力データを用いて，JGSN2016 に準拠した重力値推定計算サービスを公開する．これらの重力データは，新たな標高体系の基盤となる精密重力ジオイド・モデルを構築する際にも活用していく.

参考文献

国土地理院（1976）：日本重力基準網 1975 の設定，測地学会誌，22，2，65-76.

国土地理院：重力値推定計算サービス，http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/gravity/calc/gravity.pl　(accessed 7 Mar. 2018).

宮﨑隆幸, 松尾功二（2018）：ジオイドと重力場の時間変化抽出と機構解明に関する研究（第 2 年次），平成 29 年度調査研究年報，印刷中.

地磁気時空間モデルの有効な利用方法の検討

実施期間　平成 29 年度
測地部物理測地課　髙橋　伸也　菅原　安宏
芝　公成　矢萩　智裕

1. はじめに

物理測地課では日本全国の地磁気の地理的分布を表した「磁気図」を作成しており，1970 年以降，定期的に図を更新し，公表してきた．2016 年 12 月には，最新版となる磁気図 2015.0 年値を公表した．また，磁気図と同時に地磁気値計算サービスも更新し，国土地理院のホームページ上で提供している．これまで，磁気図や地磁気値計算サービスでは 2010.0 年値（2010 年 1 月 1 日 0 時（UTC））や 2015.0 年値（2015 年 1 月 1 日 0 時（UTC））など，ある特定の時間における地磁気値のみを提供してきた．この度，地磁気データの利用拡大を図るため，本研究では特に利用用途の多い偏角について，地磁気時空間モデルを活用した予測値計算手法の検討を行ったので報告する．

2. 研究内容

2.1 研究の背景

現在公表している最新の磁気図は，2016 年 12 月 1 日に公表した磁気図 2015.0 年値である．地磁気は時間的に変化し続けているため，図に表すには時点を設ける必要がある．ここで，yyyy.0 年とは yyyy 年 1 月 1 日 0 時（UTC）を意味する．したがって，磁気図 2015.0 年値とは，日本国内における 2015 年 1 月 1 日 0 時（UTC）時点の磁場 5 成分の分布を示した図である．磁気図のほかに国土地理院ホームページにおいて無償で公開している地理院地図で閲覧できる偏角一覧図やその一覧表のテキストデータは，いずれも 2015 年 1 月 1 日 0 時（UTC）時点における値である．

地磁気データの利用拡大を図るため，磁気図 2015.0 年値公表後に国土交通省航空局に対してニーズ調査を行った．同局では，航空機の安全飛行のため空港ごとに整備される航空情報の作成及び更新のために偏角を用いている．しかし，その値は国土地理院が提供する値ではなく，主に国際標準磁場モデルである IGRF（International Magnetic Reference Field）や WMM（World Magnetic Model）を用いて計算される偏角の予測値であること，さらに予測値の提供がないために国土地理院の偏角が使用されていないことが明らかとなった．

現在，磁気図作成には地磁気時空間モデルを使用しているが，モデルの性質上，連続観測データが存在する期間の偏角（確定値）しか計算することができない．一方，磁気図は国内の詳細な地磁気測量の結果に基づき作成されているため，空間分解能の低い国際標準磁場モデルでは表現できない日本国内の複雑な磁場分布を表現できる利点がある．地磁気時空間モデルの詳細は，阿部（2015）や髙橋（2017）を参照されたい．

地磁気時空間モデルをベースとした偏角（予測値）の提供は航空情報の確度向上につながり，利用者の安全・安心に直結するものであることから，本研究では 2 種類の偏角（予測値）の計算手法を考案し，精度評価により最適な手法について検討を行った．

2.2 偏角（予測値）計算手法

2.2.1 直接予測

本手法は，地磁気時空間モデルで計算した直近 1 年間の偏角のモデル値を使用して，単純な線形予測を行う方法である．計算過程を以下に示す．

① 地磁気時空間モデルを使用して予測期間の直前 1 年間（2010 年 1 月 1 日～2010 年 12 月 31 日）の偏角のモデル値を求め，線形近似を行う．ただし，モデル値は日平均値であり，日々の値のばらつきを軽減するため，近似計算には月平均値に換算した値を使用する．

② ①で計算した近似式の傾きを 2010 年 1 月 1 日以降の偏角の変化係数（a）とみなし，$D=D_{2010.0}+a\cdot t$ として 2010 年 1 月 1 日から 2015 年 12 月 31 日までの予測値を計算する．

2.2.2 間接予測

本手法は，地磁気時空間モデルの時間関数を推定した後で空間関数と合成することにより，間接的に偏角の予測を行う方法であり，「時間関数の推定」と「時間関数と空間関数の合成」の 2 段階の工程で計算を行う．なお，地磁気時空間モデルの空間関数は時間に依存しないため，予測期間において不変であると仮定する．計算過程を以下に示す．

《時間関数の推定》

① 地磁気時空間モデルにおいて，偏角計算に寄与する時間関数の X 成分と Y 成分のうち寄与率の大きい主成分（X：第三主成分まで，Y：第二主成分まで）について，予測期間の直前 5 年間（2006 年 1 月 1 日～2010 年 12 月 31 日）の時間関数のモデル値を使用し，関数近似（1 次～3 次）を行う．ただし，直接予測と同様にモデル値の日々のばらつきを軽減するため，近似計算には月平均値に換算した値を使用する．

② 近似計算の結果から，主成分と近似式の採用次数をそれぞれ決定する．

《時間関数と空間関数の合成》

③ 時間関数に②で決定した主成分と近似式を使用し，空間関数と合成して 2010 年 1 月 1 日から 2015 年 12 月 31 日までの予測値を計算する．

2.3 精度評価

精度評価のため，連続観測を行っている観測点のうち観測条件が良好な一部の観測点において，2010 年 1 月 1 日から 2015 年 12 月 31 日の期間の観測値と予測値を比較した．直接予測と間接予測の 2 種類の手法で計算した予測値について，（1）式より観測値と予測値の二乗平均平方根誤差 RMSE を手法及び年ごとに計算して評価を行った．なお，（1）式において N は時系列データの総数である．

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(D_i^{obs} - D_i^{pv}\right)^2}{N}} \tag{1}$$

精度評価は連続観測を行っている観測点のうち，観測環境が良好な国土地理院の測地観測所 3 か所（鹿野山，水沢，江刺）と，気象庁の地磁気観測所 3 か所（柿岡，鹿屋，女満別）の計 6 点で実施した．また，航空情報に記載される偏角値の桁数（有効数字）が 0.1 度単位であることから，その半量の 0.05 度（3 分）を予測の目標精度（RMSE の許容範囲）として設定した．

3. 得られた成果

3.1 直接予測

直接予測による予測値と精度評価の結果を図-1 と表-1 に示す. なお, 表-1 の括弧書きの数値は IGRF の予測値に対して同様の精度評価を行った場合の結果である.

図-1 には, 比較を行った 6 観測点のうち, 最北にある女満別（北海道）と最南にある鹿屋（鹿児島）の結果を示す. いずれの点も予測開始直後 2 年程度は比較的観測値と一致しているが, それ以降は観測値との差が徐々に増加していく様子がわかる. ただし, IGRF の予測値と比較すると乖離の程度は小さい.

次に, 表-1 は RMSE の全点平均値の 2010 年から 2015 年までの変化を示したものである. 2014 年には RMSE が 2.3 節で設定した許容範囲（3 分）を超過するため, その前年の 2013 年中にはモデルの更新が必要である. なお, IGRF の予測値は 2012 年の時点で既に許容範囲を超過している.

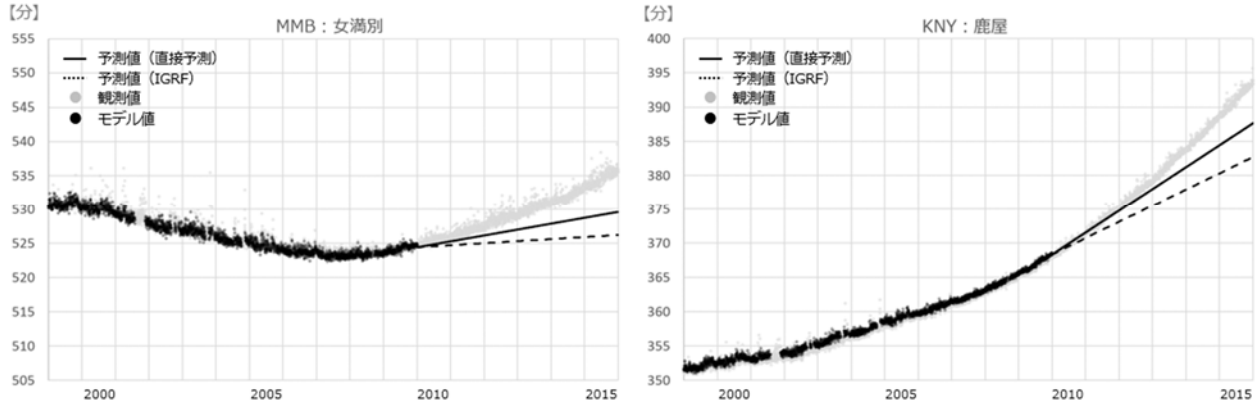


図-1 観測所における直接予測の結果比較（偏角）

表-1 実測値と予測値の RMSE（直接予測）

（単位：分）

	2010	2011	2012	2013	2014	2015
6 観測点 全点平均	0.510 (0.646)	0.775 (1.853)	1.632 (3.208)	2.559 (4.853)	3.490 (6.473)	5.136 (8.792)

3.2 間接予測

直接予測による予測値と精度評価の結果を図-2 と表-2 に示す. なお, 表-2 の括弧書きの数値は, IGRF の予測値に対して同様の精度評価を行った結果である.

図-2 には, 比較を行った 6 観測点のうち, 最北の女満別（北海道）と最南の鹿屋（鹿児島）の結果を示す. いずれの点も予測期間を通じて予測値と観測値の差が小さく, IGRF の予測値と比べても, 予測結果が良好であることは明らかである.

次に, 表-2 は RMSE の全点平均値の 2010 年から 2015 年までの変化を示したものである. 予測期間の最終年である 2015 年時点においても RMSE の全点平均は許容範囲（3 分）内であることがわかる.

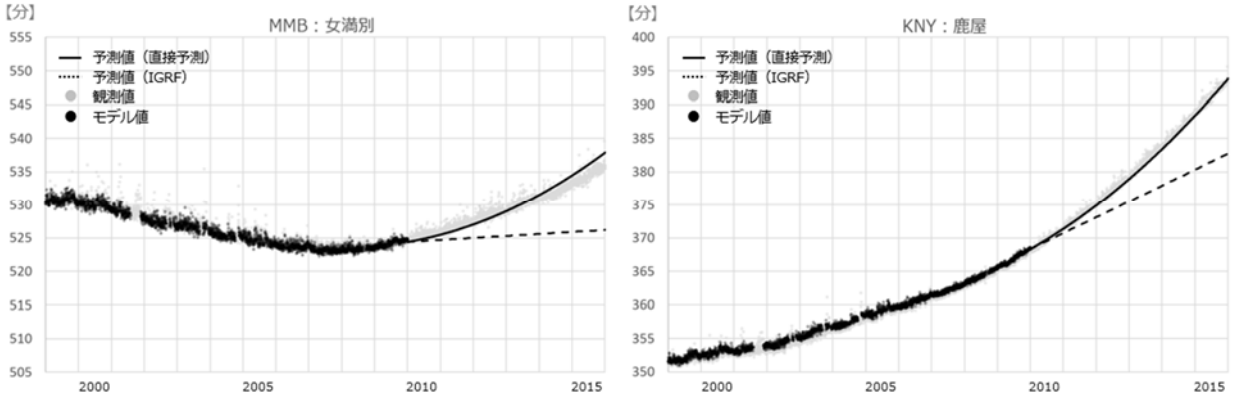


図-2 観測所等における間接予測の結果比較（偏角）

表-3 実測値と予測値の RMSE（間接予測）

（単位：分）

	2010	2011	2012	2013	2014	2015
6 観測点	0.474	0.503	0.652	0.726	1.436	2.147
全点平均	(0.646)	(1.853)	(3.208)	(4.853)	(6.473)	(8.792)

4. 結論

本研究では，偏角の予測値計算手法として直接手法と間接手法の 2 種類の手法について検討を行った．3 章の精度評価の結果から，直接予測，間接予測ともに予測期間において IGRF の予測値よりも良好な予測結果が得られた．また，今回の条件では，直接予測よりも間接予測の方が観測値との乖離が小さく，良好な予測結果が得られた．しかし，間接予測は時間関数の近似関数の選択が困難であり，選択する関数を誤ると予測結果に大きな影響が生じる可能性がある．一方，直接予測では時間の経過により観測値と予測値の差が大きくなるため，RMSE が許容範囲を超える前にモデル更新が必要となるものの，線形予測の性質上，RMSE の変化量は事前に見積もることができるため，計画的なモデル更新が可能である．また，直接予測は計算方法が単純で，間接予測のような判断要素も少ないことから，誰が予測モデルを更新しても同じ結果が得られるという利点がある．

以上の結果を踏まえ，予測の安定性や作業の継続性，求められる予測値の精度等の観点から，直接予測の方が今回の目的については適していると判断される．

参考文献

阿部聡，宮原伐折羅（2015）：主成分分析を用いた日本周辺の地磁気変化モデルの開発，国土地理院時報，127，129-152.

Fujiwara S., T. Nishiki, H. Shirai, H. Hamazaki, and V. P. Glovkov, Modeling the daily mean values of regional geomagnetic total field changes in Japan (2001), *Earth Planets Space*, 53, 69-73.

Ji, X., M. Utsugi, H. Shirai, A. Suzuki, J. He, S. Fujiwara, and Y. Fukuzaki, Modeling of spatial-temporal changes of the geomagnetic field in Japan (2006), *Earth Planets Space*, 58, 757-763.

髙橋伸也，菅原安宏，矢萩智裕，阿部聡（2017）：磁気図 2015.0 年値の公表，Conductivity Anomaly 研究論文集，2017，49-56.

干渉 SAR 成果の利用拡大に関する研究開発（第 4 年次）

実施期間　平成 26 年度～平成 30 年度
測地部宇宙測地課　山下　達也　　撹上　泰亮
上芝　晴香　　林　京之介
本田　昌樹　　仲井　博之
宮原伐折羅

1. はじめに

測地部宇宙測地課では，陸域観測技術衛星「だいち 2 号（ALOS-2）」に搭載されている合成開口レーダー（以下「SAR」という.）のデータを用いて SAR 干渉解析を実施し，日本全国の地震・火山活動・地盤沈下・斜面変動などに伴う地表変動を監視している．特に，火山活動に伴う地表変動が検出された場合には，SAR 干渉解析で得られた画像（以下「SAR 干渉画像」という.）を変動の監視・把握の基礎資料として関係機関に提供してきた．提供した SAR 干渉画像は，火山噴火予知連絡会では火山活動の評価に，気象庁では噴火警戒レベルの引き上げ･引き下げの判断に活用されている．また 2015 年に箱根山の火山活動が活発化した際には，自治体の火山防災協議会による立ち入り規制区域の決定に活用された．

これまでに宇宙測地課の解析で得られた SAR 干渉画像は，地理院地図に重ね合わせ可能なタイルデータに変換され，国土地理院のイントラネット内の地図表示用サーバに蓄積されている．データの蓄積により，地表変動や SAR の解析技術に関する知見は着実に得られているものの，近年タイルデータの増加に伴い，目的の SAR 干渉画像に即時にアクセスできない状況が度々発生している．火山活動に伴う地表変動の監視・把握を目的とした基礎資料としてより使いやすくするため，これらのタイルデータから火山地域を含む画像を抽出し，当該域を切り出しておき，アーカイブとして整備しておくことが有用な方策であると考えられる．これにより，火山域の変動の履歴のより迅速な把握が期待できる．また，アーカイブを地理院地図（https://maps.gsi.go.jp/）上で一般公開することで，火山監視を行う機関が他の地理空間情報と重ね合わせることも可能となり，火山防災業務に役立つと考えられる．以上の利点が見込めることから，平成 29 年度は火山域における SAR 干渉画像のアーカイブの構築と，地理院地図上での公開に向けた準備を進めた．本稿では，この取組について報告する．

2. 火山域における SAR 干渉画像のアーカイブ

アーカイブの構築は，火山噴火予知連絡会が選定した 111 の国内の活火山のうち陸域にある 99 の火山を対象にした．各火山の画像の抽出域は，地形･地盤分類 250m メッシュマップ（若松・松岡，2013）を参考に，各火山とその周辺をカバーするよう，おおむね 20～30km 四方とした．地理院地図上でアーカイブを閲覧したときのイメージを図-1 に示す．アーカイブには火山ごとのレイヤファイルがあり，それぞれのレイヤにはタイルデータがスレーブ観測（SAR 干渉解析で用いる 2 回の観測のうちの新しい観測）の日付の新しい順に並べてある．ただし，抽出域全体が雪等の影響により非干渉となり変動の有無を判読できない SAR 干渉画像は，アーカイブに入れていない．また，火山噴火予知連絡会資料に掲載された SAR 干渉画像は，当該会議で確定した有意な変動の評価の閲覧が可能である．

アーカイブ更新のためには，タイルデータの追加分の抽出・切り出し，各火山のレイヤファイルの編集，有意な変動に関する評価の追加を実施する必要がある．そこで，これらの工程を自動的に実施

するスクリプトファイルを整備した．これにより，アーカイブ更新が容易にできるようになった．

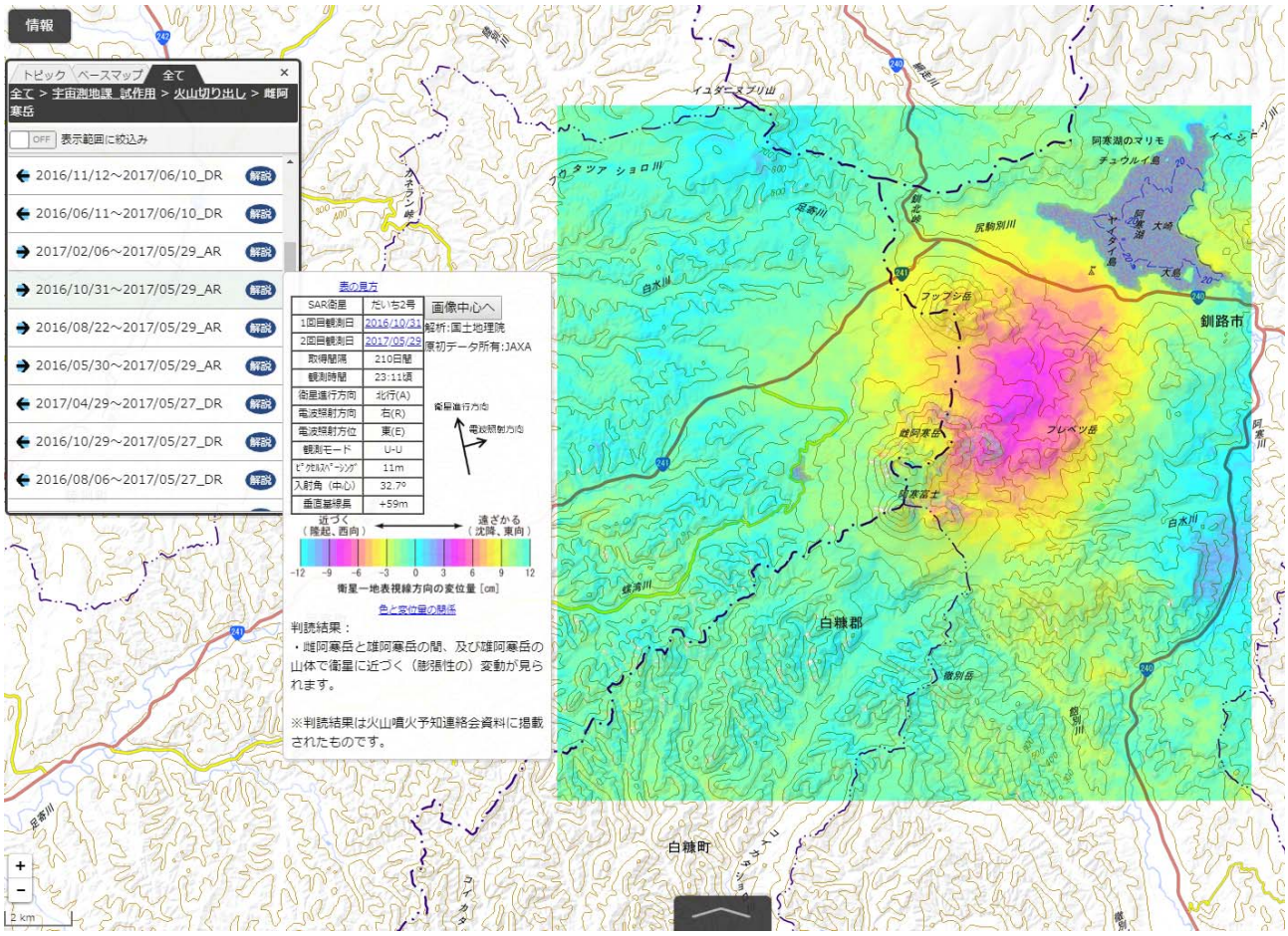


図-1 火山域における SAR 干渉画像のアーカイブを地理院地図上で閲覧したときのイメージ

3. まとめ

宇宙測地課が解析した SAR 干渉画像は，これまで日本全国の地震・火山活動などに伴う変動の監視・把握の基礎資料として活用されてきた．平成 29 年度は，SAR 干渉画像の利便性の向上と迅速な変動履歴の把握及び幅広い活用を目的として，火山ごとに自動で SAR 干渉画像のタイルデータを抽出して切り出し，観測日順に並べたアーカイブを構築した．このアーカイブは，平成 30 年度に地理院地図で公開予定であり，火山の変動状況の把握や火山防災業務においてより一層の活用が期待される．

謝辞

だいち 2 号の原初データは，国土地理院と宇宙航空研究開発機構（JAXA）の間の協定に基づき提供されました．だいち 2 号の原初データの所有権は，JAXA にあります．

参考文献

若松加寿江，松岡昌志（2013）：全国統一基準による地形・地盤分類 250m メッシュマップの構築とその利用，地震工学会誌，18，35-38.

気象庁：火山噴火予知連絡会資料，http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/ CCPVE/CCPVE08.html (accessed 19 Mar. 2018).

VGOS に関する研究開発（第 4 年次）

実施期間　平成 26 年度～平成 29 年度
測地部宇宙測地課　若杉　貴浩　石垣　真史
藤原みどり　梅井　迪子
石本　正芳　栗原　忍
宮原伐折羅

1. はじめに

国際的な VLBI 観測のとりまとめを行う機関である国際 VLBI 事業（以下「IVS」という.）は，地球規模で起こる地震，津波，火山噴火，海水面変動，洪水などの自然災害に対応するための，より高精度な VLBI 観測網を構築することを目的として，新たな国際 VLBI 観測の方針である「VGOS（当初 VLBI2010，2012 年に名称変更)」を 2005 年に決定した．これは直径 12m 級で毎秒 12 度で回転する高速駆動アンテナ及び広帯域周波数対応の受信システムを用いて，①1mm の精度での局位置決定，②24 時間 365 日の連続観測，③24 時間以内の解の算出を目指すものである.

平成 29 年度は，石岡局において S/X 帯を用いた測地 VLBI 観測を定常的に実施するとともに，11 月～12 月にかけて世界の VGOS アンテナとの間で広帯域観測を行い, VGOS 観測技術の確立に向けた研究開発を進めた．加えて，VGOS データの解析処理技術に関する調査を行うとともに，広帯域データの試験的な相関処理を実施した.

2. 研究内容

2.1 石岡局における広帯域観測

石岡局では，VGOS への移行に向けて，S/X 帯を用いた測地 VLBI 観測に加え VGOS に対応した広帯域観測を実施している．平成 29 年度は 11 月～12 月にかけて S/X 帯（2 GHz 及び 8 GHz 帯）から広帯域（3～14 GHz）に受信機を切り替えた上で，CONT と呼ばれる連続観測に参加した.

CONT 観測は，IVS によるキャンペーン観測として 3 年に一度程度実施されているもので，2 週間の連続観測を行うことにより，高い時間分解能での地球姿勢パラメータ（EOP）の測定を主な目的とするものである．今回の CONT 観測では，S/X 帯の観測に加えて VGOS の技術的検証や国際的な実施体制の確立を目的として，VGOS に対応した広帯域の 5 日間連続観測が初めて実施された．石岡局は米国，ドイツ，スペインの観測局とともに，VGOS 局として CONT 観測に参加した.

また，観測システムを確認することを目的として，受信機の切り替え後に 2 種類の観測様式で試験観測を実施した（VT 及び FT セッション)．CONT 観測及び試験観測の観測諸元を表-1 に示す.

2.2 VGOS データの解析処理技術に関する調査

国土地理院は IVS 公認の相関局・解析センターとして，S/X 帯を用いた測地 VLBI 観測の相関・解析処理業務を行っている．一方，国際的な観測が S/X 帯を用いた従来型から VGOS へ移行した場合，取得されるデータ量は飛躍的に増加するため，データ処理に対応した計算資源の増強が必要となる.

IVS は，VGOS 移行後のデータ解析処理に関する検討を 2014 年に行っている．これを基に必要となる計算資源について試算するとともに，主要な海外の相関局の状況についてまとめた.

表-1 広帯域観測の諸元

観測名	CONT 観測，試験観測（VT セッション）	試験観測（FT セッション）
観測様式	多チャンネルモード	1 チャンネルモード
参加局 （石岡を除く）	GGAO，Kokee，Westford（アメリカ）， Yebes（スペイン），Wettzell（ドイツ）	鹿島，Hobart（オーストラリア）
バンド数	4	4
中心周波数	3240.4, 5480.4, 6600.4, 10440.4 MHz	3512, 5512, 6512, 10512 MHz
帯域幅	512 MHz	1024 MHz
1 バンドあたりの チャンネル数	16 ch	1 ch

2.3 広帯域データの相関処理試験

国土地理院は，情報通信研究機構（NICT）が開発した K5 相関処理ソフトウェアを用いて，S/X 帯による従来型の測地 VLBI 観測の相関処理を行っている．K5 相関処理ソフトウェアは S/X 帯観測のために開発されたソフトウェアであり，これまで広帯域データの相関処理に用いられた実績はないが，K5 相関処理ソフトウェアによる処理が可能かどうかを検証するため，前述の CONT 観測で得られた広帯域データを用いて試験的な相関処理を実施した．CONT 観測に参加したスペイン Yebes 局からデータを取得し，石岡－Yebes 基線のフリンジ（観測データを相関処理した際に相関強度が最大となることを示すピーク）サーチを行った．

3. 得られた成果

3.1 石岡局における広帯域観測

CONT 観測は石岡局では初めてとなる 5 日間連続の観測であったが，アンテナやシステムが停止することなく，必要なデータを全て取得することができた．データは変換後に Haystack 観測所（米国）に転送され，現在相関処理が行われている．CONT 観測に VGOS 局として参加しデータを取得したことで，24 時間常時観測を目指す VGOS 観測に向けた連続観測の実績を積むことができた．

CONT 観測前に実施した試験観測では，データの一部が相関処理されフリンジが検出された（図-1）．これにより，石岡局の広帯域観測システムが VGOS 観測に必要な性能を有していることが確かめられた．

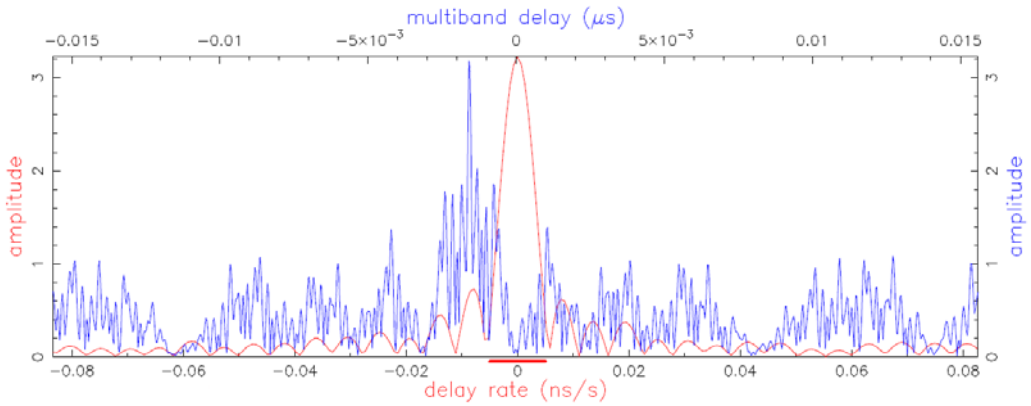


図-1 試験観測で得られた石岡－Westford 基線のフリンジ（Haystack 観測所提供）
青色の線が遅延時間の相関強度を示し，ピークの位置が遅延時間を示している．

3.2 VGOS データの解析処理技術に関する調査

IVS が示した，データ解析処理に要する計算資源量を表-2 にまとめる．

表-2　VGOS データ解析処理に要する計算資源量（Petrachenko et al., 2014）

観測局数	1 日のデータ量	実効データ転送レート	ネットワーク帯域	処理に要する CPU コア数	サーバ間通信速度
24	1037 TB	96 Gbps	134 Gbps	3900	269 Gbps

表-2 の値は全観測局のデータを 1 つの相関局に集約することを仮定しているが，すべての処理を 1 つの相関局で行うことは不可能であり，実際には複数の相関局で処理を分担することが予想される．その際，現実的な分担割合として，国土地理院の現在の分担割合（S/X 帯観測の基線数ベース）である 3%（最小）から，アジア・オセアニア地域の代表相関局として活動する 33%（最大）までが考えられる．この場合に必要となる計算資源量を表-3 にまとめる．

表-3　分担割合を考慮した計算資源量

分担割合	1 日のデータ量	実効データ転送レート	ネットワーク帯域	処理に要する CPU コア数	サーバ間通信速度	ストレージ容量
3 %	33 TB	3 Gbps	5 Gbps	119	9 Gbps	597 TB
33 %	346 TB	32 Gbps	45 Gbps	1280	90 Gbps	1537 TB

また，海外の主要な相関局の状況は表-4 のとおりである．

表-4　現在の主要な相関局の状況

相関局	ネットワーク帯域	CPU コア数	サーバ間通信速度	ストレージ容量
国土地理院	10 Gbps	32	6 Gbps	300 TB
上海天文台	1 Gbps	140	56 Gbps	384 TB
ボン大学	2 Gbps	1360	56 Gbps	900 TB
ウィーン工科大学	20 Gbps	96 以上	80 Gbps	130 TB 以上
Joint Institute for VLBI ERIC (JIVE)	30 Gbps	464	40 Gbps	200 TB 以上

以上のことから，仮に国土地理院が現在の分担割合を維持するとしても，CPU コア数をはじめとした計算資源は不足しており，増強が必要である．また，有数の相関処理能力を有するボン大学を以ってしても地域代表相関局として要する計算資源には足りておらず，計算資源確保は世界的な課題である．

VGOS データの解析処理で国土地理院が分担すべき割合を見極めるために，来年度は世界の相関局の意向や準備状況について調査を行う．また，冗長化や更新計画等を含めた，より現実的な計算資源量の試算を行う予定である．

3.3 広帯域データの相関処理試験

CONT 観測で得られた，2017 年 12 月 8 日 17:32-17:33 UT に行われたスキャン（電波源 0552+398）のフリンジサーチの結果の一部を図-2 に示す. 3224.4 MHz のチャンネルのデータで信号対雑音比 18.3 のフリンジが検出され, K5 相関処理ソフトウェアが S/X 帯以外の周波数帯にも適用可能であること，また，VGOS 観測データの標準フォーマットである VDIF 形式のデータを処理できることが確認された．今後は，今回の処理で得られた結果を，海外の相関局で異なる相関処理ソフトウェアを用いて処理された結果と比較し, 広帯域データに対する K5 相関処理ソフトウェアの妥当性を評価する. また，広帯域データは S/X 帯のデータと異なり，フリンジサーチ後に異なる偏波のデータを合成する必要があるため，その方法についても調査・検討を行う必要がある.

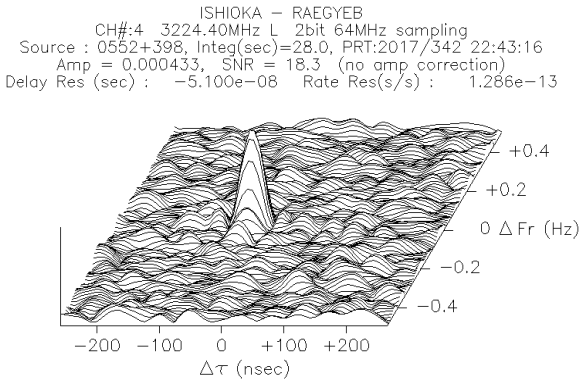


図-2　CONT 観測データで検出された石岡－Yebes 基線のフリンジ

4. 結論

石岡局において S/X 帯を用いた測地 VLBI 観測を定常的に実施するとともに, 11 月～12 月にかけて世界の VGOS アンテナとの間で広帯域観測を行い，VGOS 観測に向けた連続観測の実績を積むことができた．また，VGOS データの解析処理技術に関する調査を行うとともに，広帯域データの試験的な相関処理を実施し, K5 相関処理ソフトウェアが S/X 帯以外の周波数帯にも適用可能であること, VGOS 観測データの標準フォーマットを処理できることを確認した.

来年度以降も，引き続き世界の VGOS アンテナとの間で広帯域観測を行い，VGOS 観測の定常運用に向けた研究開発を進める．また，VGOS データの解析処理技術に関する調査を継続し，解析処理技術導入に関する指針をまとめる. 加えて, K5 相関処理ソフトウェアを用いた相関処理試験を継続する.

参考文献

石垣真史，若杉貴浩，石本正芳，栗原忍，藤原みどり，梅井迪子（2018）: 石岡VLBI観測施設～この3年間を振り返って～，2017年度VLBI懇談会シンポジウム集録原稿，印刷中.

NOTHNAGEL, A., D. BEHREND, A. BERTARINI, P. CHARLOT, L. COMBRINCK, J. GIPSON, E. HIMWICH, R. HAAS, A. IPATOV, R. KAWABATA, J. LOVELL, C. MA, A. NIELL, B. PETRACHENKO, T. SCHULER and G. WANG (2016): Strategic Plan of the IVS for the Period 2016-2025, International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2016 General Meeting Proceedings: "New Horizons with VGOS", Eds. Dirk Behrend, Karen D. Baver, Kyla L. Armstrong, NASA/CP-2016-219016, 3-14.

PETRACHENKO, B., A. BERTARINI, W. ALEF, D. BEHREND, R. CAPPALLO, H. HASE, C. MA, A. NIELL, A. NOTHNAGEL and X. ZHANG (2014): VGOS Data Transmission and Correlation Plan, IVS Document https://ivscc.gsfc.nasa.gov/technology/vgos-docs/VGOS_DataTransmissionCorrelation_Plan_141118.pdf (accessed 15 Mar. 2018).

超長基線電波干渉計による高度測地観測に関する共同研究（第 2 年次）
超長基線電波干渉計による高精度観測に関する共同研究（第 11 年次）
VLBI による高度測地観測に関する共同研究（第 4 年次）

実施期間　平成 28 年度～平成 29 年度（情報通信研究機構）
平成 19 年度～平成 29 年度（宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所）
平成 26 年度～平成 29 年度（大阪府立大学）

測地部宇宙測地課　藤原みどり　梅井　迪子
石本　正芳　若杉　貴浩
石垣　真史　栗原　忍
宮原伐折羅

1. はじめに

国土地理院は，情報通信研究機構（以下「NICT」という．），宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所（以下「JAXA/ISAS」という．）及び大阪府立大学とそれぞれ共同研究協定を締結し，超長基線電波干渉計（以下「VLBI」という．）による高度測地観測及び高精度観測に関する研究を実施している．平成 29 年度は，各共同研究協定に基づき，測地 VLBI 観測，VLBI 観測システムの技術開発及び高精度化，コロケーション観測について研究を実施した．

2. 研究内容

2.1 測地 VLBI 観測

国土地理院と NICT は，日本の測地基準座標系の維持・管理及び日本周辺のプレート運動の監視を目的として AOV 観測及び IVS-T2 観測に参加した．AOV 観測は，国際 VLBI 事業（IVS）のサブグループであるアジア・オセアニア VLBI グループ（AOV）によって平成 27 年から実施されている国際 VLBI 協働観測であり，アジア・オセアニア地域の測地基準座標系の維持・管理，プレート運動の監視を目的としている．国土地理院は従前の国内 VLBI 観測（JADE 観測）に代わって日本の測地基準座標系の維持・管理及び日本周辺のプレート運動の監視を行うものとして，観測のみならず観測スケジュールの作成から相関処理・解析まで AOV 観測に関与している．IVS-T2 観測は，国際 VLBI 事業（IVS）が地球基準座標系（ITRF）の維持を目的として行っている観測であり，国内から国土地理院石岡局，NICT 鹿島 34m 局，鹿島 11m 局及び小金井局が参加している．

このほか，JAXA/ISAS 臼田局の ITRF における精密な局位置を求めるため，臼田局との間で測地 VLBI 観測（JX 観測）を実施した．これらの観測について，各観測局の観測状況を表-1 に示す．

2.2 VLBI 観測システムの技術開発及び高精度化

2.2.1 広帯域受信機の性能測定

大阪府立大学とは，広帯域 VLBI 観測技術の開発と観測精度向上を目的として共同研究を行っており，今年度は石岡局広帯域受信機の性能測定を行った．広帯域受信機の性能を示す 3 つのパラメータ（システム等価フラックス密度（SEFD），システム雑音温度，アンテナビームパターン）を計測した．

表-1　平成 29 年度共同研究協定締結機関との測地観測実績

観測名	参加局	観測名	参加局
AOV016	Is, Kb	IVS-T2118	Is, Kg
AOV017	Is, Kb	IVS-T2119	Is, Kg
AOV019	Is, Kb	IVS-T2120	Is, K1, Kb, Kg
AOV020	Is, K1, Kg	IVS-T2121	Is, Kg
JX1701	Is, Ud	IVS-T2123	Is, K1, Kb

（Is: 石岡，Kb: 鹿島 34m，K1: 鹿島 11m，Kg: 小金井，Ud: 臼田）

2.2.2 広帯域試験観測の実施

国土地理院と NICT は，次世代 VLBI 観測システム（VGOS）への移行に向けて，VGOS に対応した VLBI 観測処理システムの開発・利用に関する研究も行っている．今年度は NICT 鹿島 34m 局及びタスマニア大学 Hobart 局（オーストラリア連邦）と広帯域試験観測を 2 回実施した．VGOS への導入が検討されている帯域幅 1GHz の信号を 1ch でサンプリングする方式で実施した．観測にあたり，国土地理院は広帯域観測用サンプラーK6/iDAS を試験的に導入した．

また，今年度国土地理院は CONT と呼ばれる連続観測に VGOS 局として参加した．その際，観測データを海外の相関局で処理可能なファイル形式に変換するため，NICT が開発したソフトウェアを使用した．

2.3 コロケーション観測に関する研究

コロケーション測量とは，異なる測量技術（例えば GNSS と VLBI）で決定された観測局について，相互の位置関係を計測し，各技術で構築された測地網の結合を可能とするローカルタイベクトルを決定する測量をいう．JAXA/ISAS とは，VLBI 観測による高精度な基準座標系の構築維持に関する共同研究を行っており，JAXA/ISAS が建設を進めている深宇宙探査用 54 m アンテナでのコロケーション観測の実施方法について，国土地理院での実施例を基に検討した．

3. 得られた成果

3.1 測地 VLBI 観測

AOV 及び IVS-T2 の観測データは相関局において相関処理された．観測から得られた石岡局及び鹿島 34m 局の座標値の変化を図-1 に示す．石岡局が観測を開始した 2015 年以降，石岡局と鹿島 34m 局がともに南東及び上方向に運動していることがわかる．JAXA/ISAS との観測については，国土地理院が試験的に相関処理したところ，フリンジ（観測データを相関処理した際に，相関強度が最大となることを示すピーク）が検出され，観測に問題がないことを確認した．相関処理は来年度 JAXA/ISAS が実施する．

3.2 VLBI 観測システムの技術開発及び高精度化

3.2.1 広帯域受信機の性能測定

受信システムの感度を表す SEFD は周波数（3～14 GHz）にわたってばらつきが大きいことが確認された．また，システム雑音温度は 8GHz より高い周波数で上昇する傾向が見られた．SEFD，システム雑音温度ともに 3～14 GHz にわたって安定して低い値をとることが理想的である．そのため，石

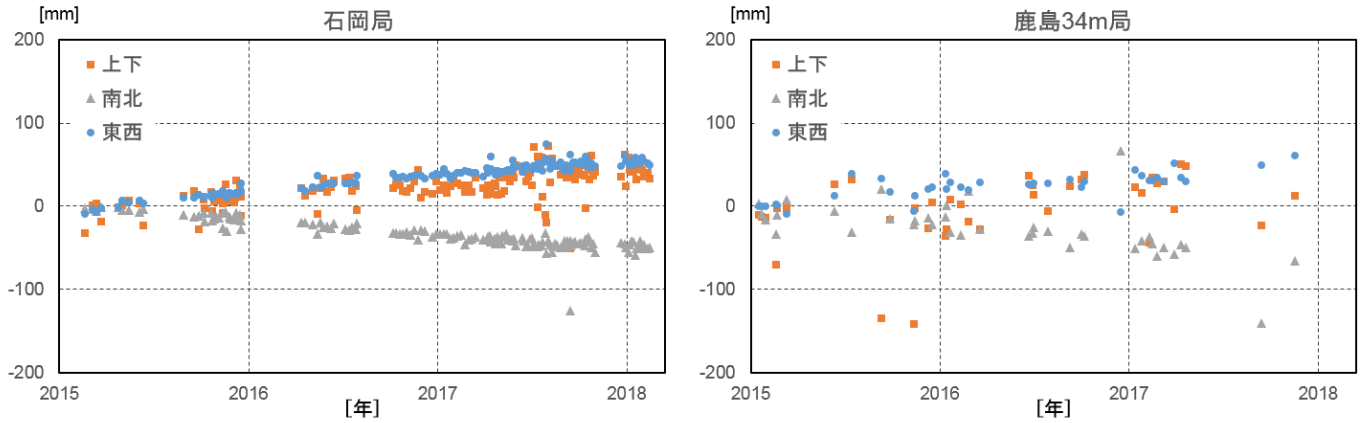


図-1　VLBI 観測から得られた各観測局の座標値の変化（左：石岡局，右：鹿島 34m 局）．縦軸の正方向は上，北，及び東方向の変動を表す．また，2015.0 年時点の ITRF2014 に基づく座標値を 0 としている．ただし，石岡局は ITRF2014 に登録されていないため，国土地理院による解析から得られた位置及び速度を採用している．

岡局の広帯域観測システムに何らかの問題が生じていると考えられるが，実際の広帯域観測では，その影響が確認されていない．また，アンテナビームパターンの測定から，ビームサイズ（受信感度の半値幅）が水平軸方向 577 秒，鉛直軸方向 595 秒であることが確認された．これは理論値 546 秒とほぼ同じであり，アンテナ集光系は想定の仕様を満たしていることが確認できた．

3.2.2 広帯域試験観測の実施

鹿島 34m 局及び Hobart 局との試験観測のデータは，NICT によって相関処理された．その結果，鹿島 34m 局との間でフリンジが検出され（図-2），石岡局の広帯域観測システムに問題がないことが確認できた．鹿島 34m 局と Hobart 局，石岡局と Hobart 局の間ではフリンジを検出できなかったため，Hobart 局のデータに何らかの問題があったと考えられる．なお，K6/iDAS で記録したデータが一部欠損していることが判明したため，原因を調査中である．

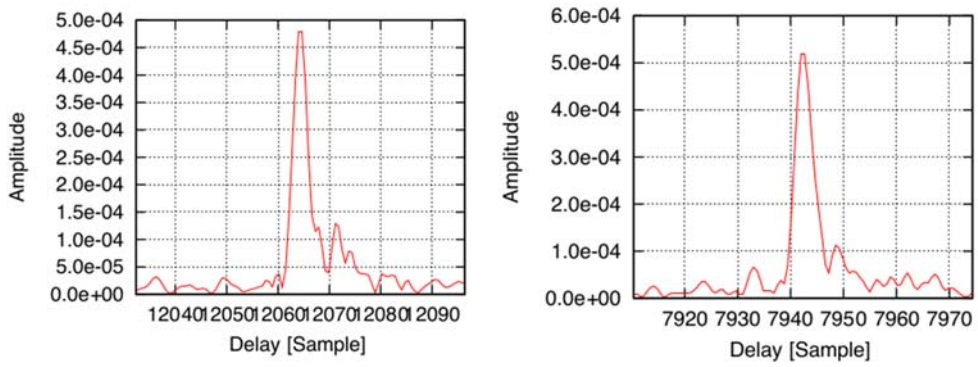


図-2　試験観測で検出された石岡局－鹿島 34m 局間のフリンジ（左：水平偏波，右：垂直偏波，NICT 提供）

3.3 コロケーション測量に関する研究

JAXA/ISAS の深宇宙探査用 54 m アンテナの敷地配置図を参考に，観測に最適なピラーの配置や使用機器について検討した．また，キャッツアイ法によるアンテナ中心の計測方法の課題を整理した．

石岡局では次年度以降，キャッツアイ法に加えレーザートラッカーを用いた直接観測法によるコロケーション観測を検討している．観測後，キャッツアイ法と直接観測法の精度や作業効率を比較し，JAXA/ISAS のアンテナに適したコロケーション観測方法を検討していく．

4. まとめ

NICT，JAXA/ISAS 及び大阪府立大学との共同研究協定に基づき，測地 VLBI 観測，VLBI 観測システムの技術開発及び高精度化等及びコロケーション観測の研究を実施した．

測地 VLBI 観測では，AOV 観測及び IVS-T2 観測に，NICT の鹿島 11m 局，小金井 11m 局及び鹿島 34m 局が参加した．また，精密な局位置の決定のため，JAXA/ISAS の臼田局と測地 VLBI 観測を実施した．

VLBI 観測システムの技術開発及び高精度化の研究として, NICT 鹿島 34m 局と広帯域試験観測を行った．その結果，フリンジが検出され石岡局が広帯域観測に必要な機器の調整がなされていることを確認した．

コロケーション観測については，観測のために設置するピラーの配置や観測方法を検討した．

来年度も引き続き，定常的な VGOS 観測への移行に向けた VLBI 観測システムの技術開発及び高精度化等の研究を実施する．