アジア太平洋地域における GPS 解析戦略の構築
Development of the GPS Analysis Strategy in Asia-Pacific Region

測地部　鈴木　啓・宮原伐折羅 [1]
Geodetic Department　Akira SUZUKI and Basara MIYAHARA

要　旨

アジア太平洋地域地殻変動監視事業は，国連アジア太平洋地域地図会議の傘下に置かれたアジア太平洋GIS基盤常置委員会（PCGIAP）の調整・仲介のもと，アジア太平洋地域における防災・減災計画を目的とした国際測地共同観測として2006年度（平成18年度）から実施している．この事業では，アジア太平洋地域の地殻変動を監視するとともに，同地域の基準座標系（Asia-Pacific Reference Frame；以下，「APREF」という.）の構築に貢献することを目指している．本事業では，国土地理院が設置し，運用する観測点を含むアジア太平洋地域のGPS観測点を定常的に解析するため，2010年度（平成22年度）にGPS解析支援システム（GPS解析ソフトウェアにBernese（Astronomical Institute, University of Bern, 2007）を搭載）を導入した．安定した測位解を定常的に得ることを目的として，GPS解析支援システムによる解析戦略の構築を行った．

アジア太平洋地域における観測網は，数百kmから数千kmにおよぶ長距離基線から構成されるため，長距離基線において安定した測位解が得られるよう，解析戦略を検討した．また，検討した解析戦略を基に過去データの解析を実施し，解析結果を評価するとともに，地震に伴う地殻変動に対する検出精度についての検証を行った．

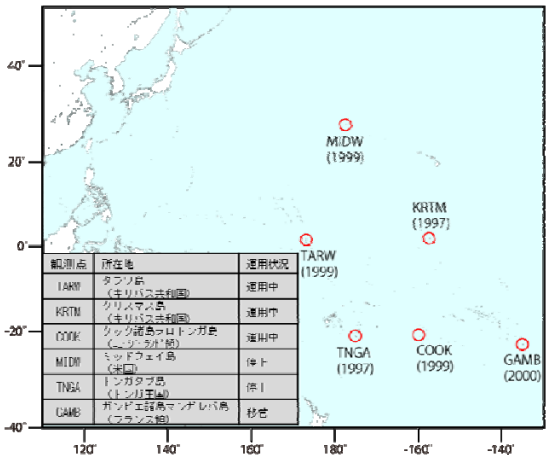
1. はじめに

国土地理院は，科学技術振興調整費国際共同研究「全地球ダイナミクス」の一環として，1997～2000年に南太平洋地域の島嶼部6地域にGPS観測点を設置した（図-1）．その後，設置されたGPS観測点は，2001～2006年に「東アジア・太平洋プレート内部変形の様式に関する国際共同研究」において継続して利用され，2006年度（平成18年度）からは，アジア太平洋地域の地殻変動監視と同地域の測地基準座標系（APREF）構築への貢献を目的とした国際測地共同観測事業へ引き継がれている．

事業開始から数年間は，アジア太平洋地域地殻変動監視システムの開発として，主にハード・ソフト面の整備（観測データの管理等）や現地観測データをオンライン転送するための改造を実施した．GPS解析システムは，2010年度（平成22年度）に導入されたが，アジア太平洋地域のGPS観測データを定常的に解析するためには，解析戦略の構築が課題となっていた．そこで，2011年度（平成23年度）は，GPS解析支援システムを定常的に運用するため，解析戦略を検討した．主な検討事項は，数千kmにおよぶ長距離基線で安定した測位解を得るためのアンビギュイティー推定時の戦略および網平均計算における座標値の拘束条件である．検討した解析戦略により，過去データの解析を進める中で，IGS（International GNSS Service）が算出した観測点座標との比較を行い，地震に伴う地殻変動の検出精度を検証したため，その結果について報告する．

2. 南太平洋地域に設置した GPS 観測点の現状

1997～2000年に南太平洋の6地域に国土地理院が設置したGPS観測点は，諸般の事情により一部の観測点が停止している．ミッドウェイ島（米国），トンガタプ島（トンガ王国）の観測点は，渡航禁止規制等により観測を停止し（ミッドウェイ（2001年停止），トンガタプ（2003年停止）），現在まで観測再開が困難な状況にある．ガンビエ諸島マンガレバ島（フランス領）の観測点は，2011年7月にIGN（Institut Geographique National）へ管理を移管し，今後はIGSからデータが取得可能となる予定である．2012年1月現在，国土地理院が運用する観測点は，タラワ島・クリスマス島（キリバス共和国），クック諸島ラロトンガ島（ニュージーランド領）に設置した3点である．これらの観測点のデータは，国土地理院にオンラインで自動転送されている．今後は，準天頂衛星等，マルチGNSSに対応した観測機器へ更新を行う予定である．



観測点	所在地	運用状況
TARW	タラワ島（キリバス共和国）	運用中
KRTM	クリスマス島（キリバス共和国）	運用中
COOK	クック諸島ラロトンガ島（ニュージーランド領）	運用中
MIDW	ミッドウェイ島（米国）	停止
TNGA	トンガタプ島（トンガ王国）	停止
GAMB	ガンビエ諸島マンガレバ島（フランス領）	移管

図-1　国土地理院が南太平洋地域に設置した GPS 観測点

現所属：[1] 測地観測センター

3. GPS解析支援システムの導入と課題

本事業では，2006年度（平成18年度）から観測点情報やデータ管理のためのハードウェア整備，データベース等ソフトウェアの構築を開始し，2007年度（平成19年度）には，観測データ等を公表するためのWebページを作成した．2008～2010年度（平成20～22年度）には，主に観測点の調査・改修等を実施し，2010年度（平成22年度）にGPS解析支援システムを導入した．このシステムは，基幹のGPS解析ソフトウェアをBernese（ver.5.0）とする解析システムで，解析結果の座標時系列グラフや変動ベクトル図等を表示する機能も有する．また，解析する観測点をクラスターに分割し，分散処理する設定が可能である．

アジア太平洋地域に設置されたGPS観測点（IGS観測点を含む）は，日本国内のGPS連続観測システム（GEONET）とは異なり，観測点の間隔が数百kmから数千km間隔と長く，観測点によっては，数日～数週間におよぶ欠測が発生することもある．そのため，同地域の観測データを解析するためには，数千kmにおよぶ長距離基線で安定した推定パラメータを得るために適した解析戦略を検討し，データが欠測した場合にも観測網の形状が極力変わらないよう解析クラスターを構成することが必須となる．

4. 長距離基線におけるGPS解析戦略

アジア太平洋地域のGPS観測点から観測網を構成すると，数千kmにおよぶ長い基線でアンビギュイティーを推定することが必要となる．このような長い基線で安定した測位解を得るための最適な条件を検討するため，基線長と最低衛星高度角の関係に注目して試験解析を行った．以下の解析では，解析ソフトウェアは，全てBernese (ver.5.0)を利用している．

解析時の主な入力・設定を表-1に示す．なお，L5のアンビギュイティーは，P1C1コード間バイアスを用いてMelbourne-Wuebbenaのコード・位相線形結合により推定し，推定したL5のアンビギュイティーを既知としてL3（L1・L2の位相線形結合）のアンビギュイティーを推定した．

表-1　共通の解析設定

設定項目	
地球回転パラメータ	IGS 地球回転パラメータ
衛星軌道情報	IGS 暦（IGS05 : ～2011/4/17） （IGS08 : 2011/4/17～）
位相特性モデル	IGS 絶対位相特性モデル
初期座標値	ITRF2008
大気遅延推定	天頂遅延：3 時間毎 遅延勾配：24 時間毎
海洋潮汐加重	FES2004
マッピング関数	NIELL

4.1 最適な最低衛星高度角の検討方法

衛星測位における主要な誤差要因の一つに信号の伝播遅延が挙げられる．大気による信号の伝播遅延は，低仰角のデータにおいて大きなノイズの原因となっている．特に，長距離基線におけるアンビギュイティーの推定では，低仰角のデータに含まれるノイズが大きくなるため，アンビギュイティーが決まらない，もしくは誤って見積もられる可能性がある．しかし，数千kmにおよぶ長距離基線では，観測点間で同時に受信できる衛星数が少なくなるため，低仰角のデータを使用しないことで観測データが極端に不足し，アンビギュイティーが決まりにくくなる可能性もある．そこで，アンビギュイティー決定の際に使用する最低衛星高度角を変更して様々な基線長について解析を行い，推定したアンビギュイティーのFix率（決定率）やRMSを比較することによって，低仰角のデータに含まれるノイズの影響と観測データ量の増減のトレードオフについて検討した．

検討では，同地域の観測点から想定される解析基線を基線長約300km～8,600kmの間で作成し（図-2），各基線において，L5とL3を観測量に用いて最低衛星高度角を15°～30°の間で5°毎に変更させ，3日間についてL1とL2のアンビギュイティーを推定した．

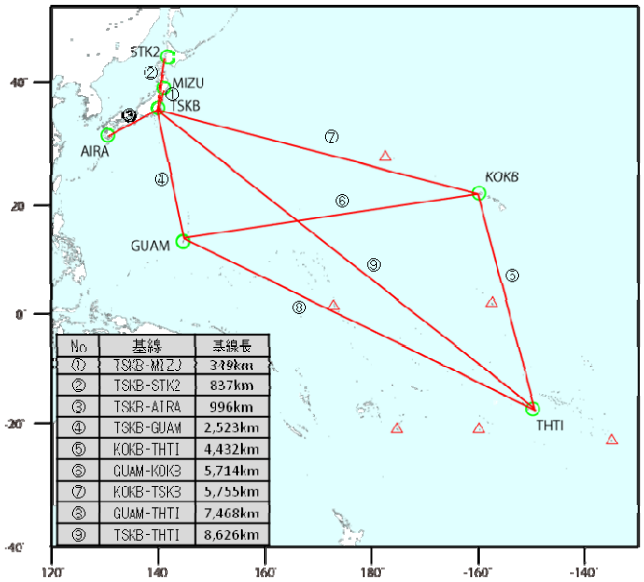


図-2　アジア太平洋地域で想定される観測網
（試験解析用の観測網）

4.2 最低衛星高度角の変化に伴う基線解析結果

L5解析における基線長と最低衛星高度角の変化に伴う各基線のFix率と観測量の変化を図-3に示す．基線長が7,000km以上の基線では，仰角によらずFix率は低く，さらに高仰角では，観測量が減少するため，推定されたアンビギュイティーが安定せず，誤った値が推定されている可能性が高い．基線長が2,000km～6,000kmの基線では，仰角20°と25°におけ

るFix率（90～95%）について差はないが，1,000km以下の基線では，仰角15°の場合，Fix率が80%程度まで低下する観測日が見られる．一方，推定されるアンビギュイティーのパラメータ数（観測点間で共通に観測できる衛星の組み合わせ数）は，7,000km以上の基線では，仰角が25°以上になると10以下まで減少している．6,000km以下の基線では，仰角を5°高仰角へ変化させるごとに，アンビギュイティーのパラメータ数が約10～20%（5～10）程度減少している．

以上の結果から，安定したFix解と十分なアンビギュイティーのパラメータ数が得られる最大基線長は，6,000km以下で，安定したFix解が得られる最低衛星高度角は，20°もしくは25°であった．

推定されたL5のアンビギュイティーを既知としてL3のアンビギュイティーを推定すると，多くの場合L3のアンビギュイティーは決まるため，L3のアンビギュイティーを推定した際の座標値のRMSを比較することでL3解析の最低衛星高度角を検討した．アンビギュイティー推定時に，L5では最低衛星高度角を20°と25°，L3では10°と15°として，推定した座標値のRMSを比較した（図-4）．基線長3,000km以下では，仰角の変化に伴ったRMSの差は，いずれの条件でも水平成分で2mm以下，上下成分で1～3mm程度である．4,000～6,000kmと長い基線では，10°までデータを用いた場合にRMSが小さく，特に上下成分のRMSに差が見られる．仰角の変更に伴うRMSの差は，数mm程度であるが，最も小さいRMSが得られた条件（L5で最低衛星高度角を20°，L3で10°）を用いることとした．

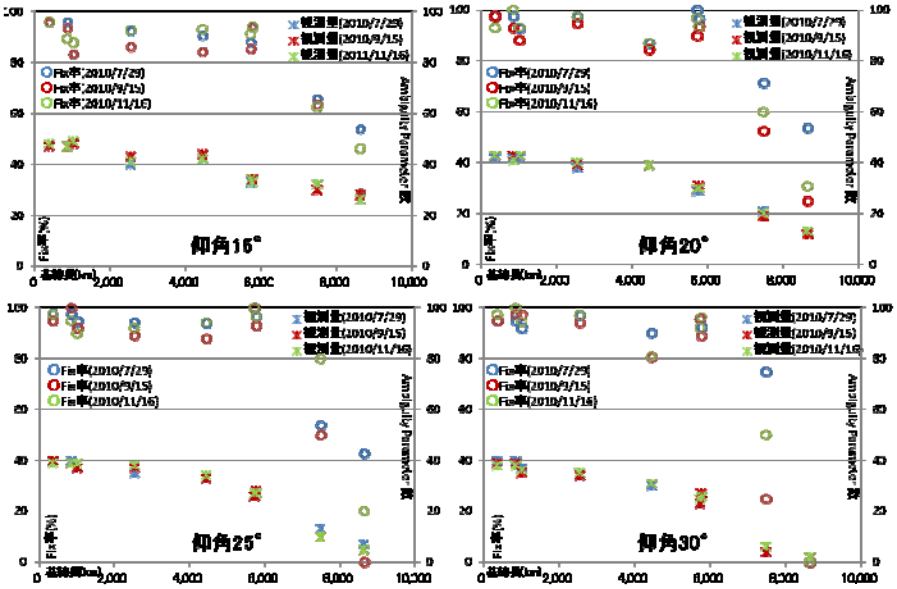


図-3　L5（Melbourne-Wuebbena）解析の仰角変化に伴う各基線の Fix 率と観測量

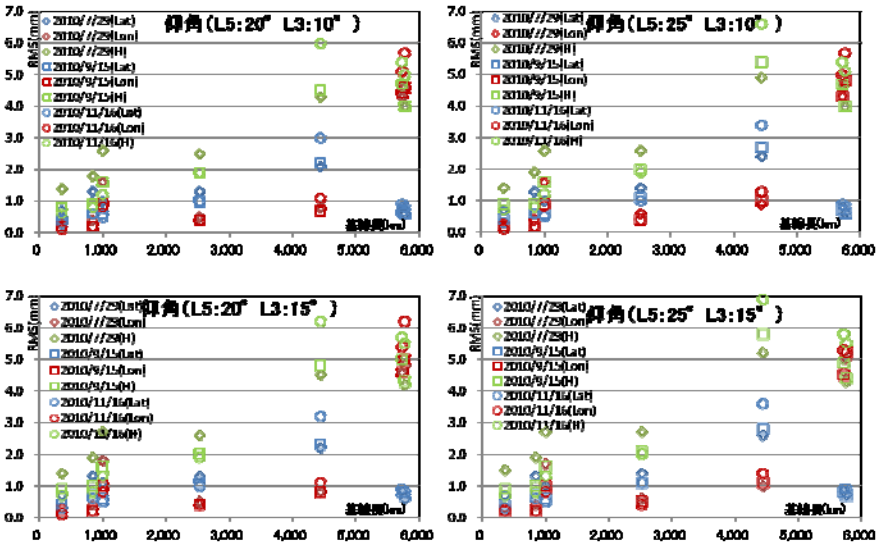


図-4　仰角変化に伴う座標値の RMS

5. アジア太平洋地域における観測網の構築

地域全体を網羅する観測網を構築する上で，①安定した Fix 解を得るため最大基線長は，6,000km 以下，②観測網を維持するため，欠測の少ない観測点を根幹とし，根幹点の近くに代替点があること，③骨格にした観測点から放射状に基線を組むこと，を基本とした．

観測網の根幹となる観測点は，IGS08 の Reference Frame 局でもある IGS 観測点の 11 点を選択した．この 11 点からなる網を根幹のクラスターとし，根幹のクラスター11 点から放射状にそれぞれ 5～10 点程度の観測点（IGS 観測点と国土地理院の GPS 観測点）に基線を組み，観測網を構築した（図-5）．なお，構成した観測網の最大基線長は，約 5,700km（GUAM-KOKB）であり，根幹とした観測点が欠測した場合は，その観測点から 500km 以内にある最寄りの観測点を代替点とする．根幹の点も代替点も欠測の場合は，解析処理が停止する．

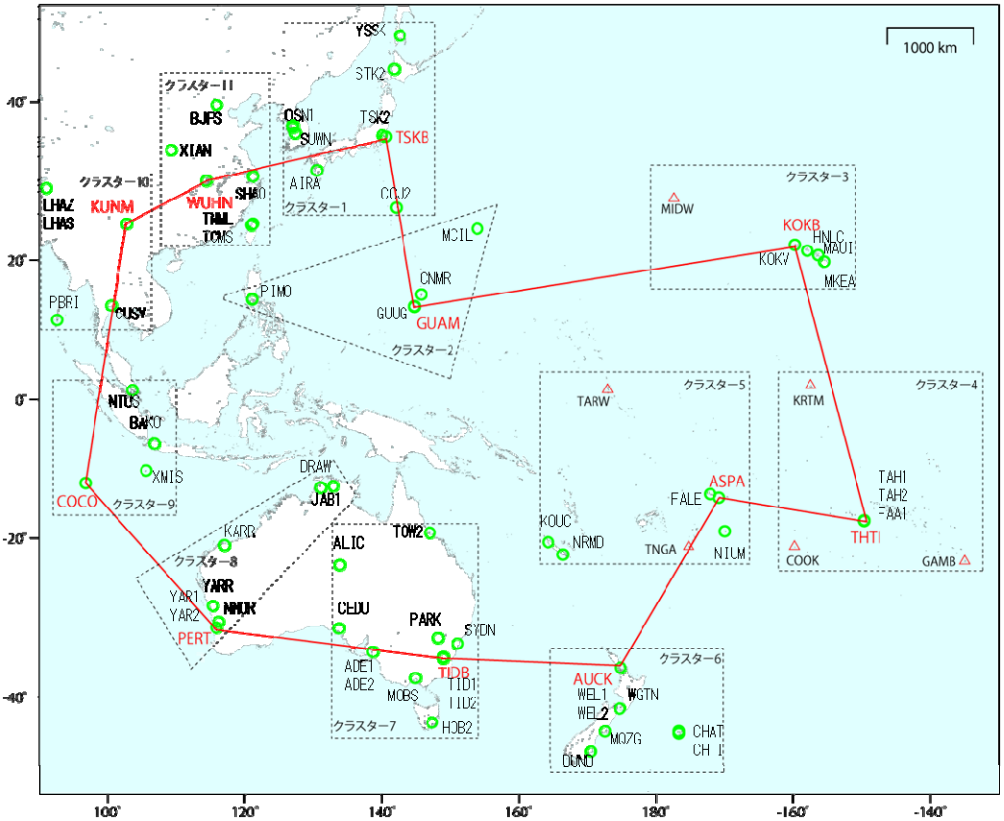


図-5　アジア太平洋地域の GPS 観測網

6. 網平均計算における拘束条件

本事業は，当該地域の基準座標系構築への貢献を目的としているため，ITRF 座標系に整合した測位解を推定する必要がある．そこで，解析の際に初期座標として与えた ITRF2008 の座標に整合する値が得られるよう網平均計算における拘束条件について検討した．網平均計算における結合処理（ADDNEQ2）の際に，拘束条件（各成分 1 mm，3cm）を変えて 1 点拘束と複数点拘束で解析を行い，座標推定値と初期座標値（ITRF2008）との差をクラスターごとに比較した．1 点拘束では，TSKB を拘束し，複数点拘束では，各クラスターの根幹点となる IGS 観測点 11 点を拘束した．図-6 に初期座標値と座標推定値との水平成分の差のばらつきをクラスター毎に示す．

いずれの場合でも，初期座標値との差は，拘束を強くした場合に小さくなっている．また，拘束を緩くすると，観測日ごとのばらつきが大きくなり，最大で 2cm 程度の差が見られる．

TSKB1 点を拘束した場合，水平成分の初期座標値との差は，THTI を根幹とするクラスター4 で最も大きく 4cm を超える．根幹とする 11 点を拘束した場合，9 つのクラスターで 1 点拘束とくらべて 5mm～2cm 程度初期座標との差が小さくなる．TSKB を含むクラスター1 では，2mm 程度，観測点数が 5 点でもっとも少ない，GUAM を根幹とするクラスター2 では 5mm 程度，大きくなっている．

上下成分の座標推定値については，初期座標値との差は，水平成分に比べ小さく，いずれの条件でも 1～2cm 程度であり，大きな違いは見られなかった．そこで，各クラスターの根幹となる点を水平成分に

ついては，強く拘束（1mm 程度）し，上下成分については，緩く拘束（3cm 程度）することとした．

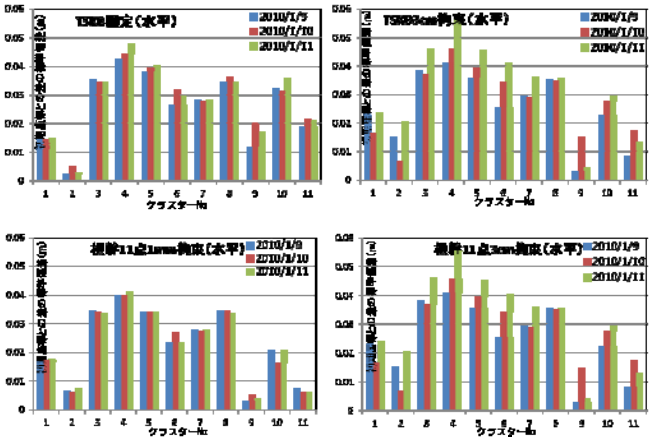


図-6　各クラスターにおける推定座標値と初期座標（ITRF2008）との差の標準偏差

7. 座標時系列の精度と地震に伴う地殻変動の検出

検討した解析戦略を基に当該地域において，2010～2011 年までの過去データについて解析を実施した．解析結果を評価するため，IGS 解析センターの中から Bernese で解析を行う CODE（Center for Orbit Determination in Europe）の解析結果（CODE Analysis Strategy Summary，accessed Jan.2012）と座標時系列の比較を行った．また，地殻変動の検出性能を評価するため，2011 年 3 月 11 日に発生した平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震（以下，「東北地方太平洋沖地震」という．）に伴う地殻変動の検出を試みた．

7.1 CODE 解との比較

比較には，本稿の GPS 解析で用いた Bernese で解析を行う IGS の CODE 解析センターが公開する週値の解析結果（Weekly SINEX）を利用した．比較した基線は，2010 年の 1 年間について，根幹クラスター同士で構成される東西・南北方向において距離の長い基線（KOKB-COCO：約 10,000km・TSKB-PERT：約 7,400km）と同じクラスター内にある中距離基線（GUAM-PIMO：約 2,500km）の基線成分の変化量について比較を行った．CODE と本解析の結果を合わせて表示した基線変化グラフを図-7 に示す．なお，各基線における基準値は, CODE の 2010 年 1 年間の平均値を用いた．

CODE との解析結果に見られる差は，最大で南北成分 1～2cm，東西成分 2～3cm，上下成分 3cm 程度であり，同一のクラスター内の中距離基線では，各成分において非常によく一致している．一方，クラスター間にまたがる長い基線では, 2～3cm 程度の差が見られ，特に東西方向に短周期のバイアスが見られる．

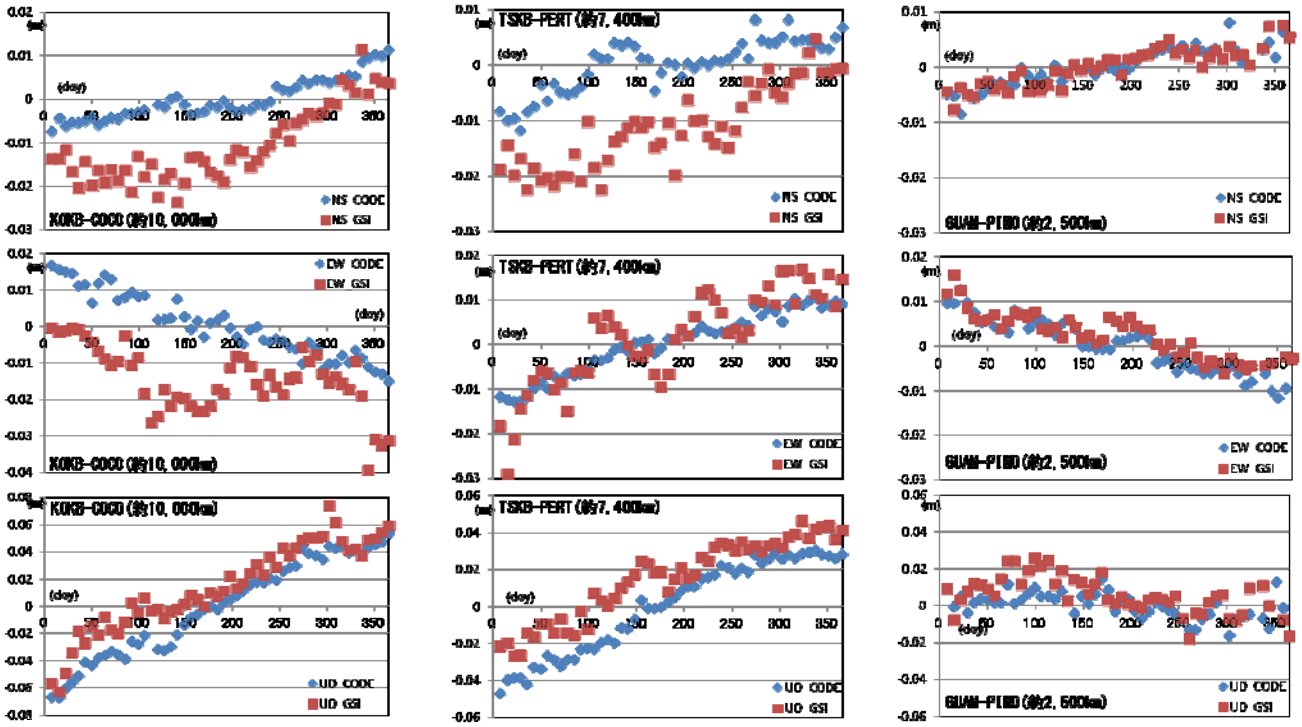


図-7　CODE の週値と比較した各成分の基線変化グラフ

本解析は，IGS の解析で推奨される条件とすべて整合はしておらず，特に，大気遅延推定の際に使用するモデルが，天頂遅延，マッピング関数ともに異なっている．CODE の解析では、天頂遅延は GPT，マッピング関数は GMF を用いているが，現在公開されている Bernese では，仕様上，これらは使用できず，今後 Bernese の更新の際に，使用できるようになることとなっている．解析の条件の統一とともに，バイアスの原因を特定するなど，解析戦略については，今後とも検討が必要である．

7.2 地震に伴う地殻変動の検出

東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動を事例として，変動の検出性能を評価した．地震発生の前後数カ月における TSKB の座標時系列を図-8 に示す．
地震発生前の TSKB の初期座標値を継続して使用した場合，水平成分の拘束条件を一律に 1mm と強く拘束しているため，地震前後において観測網全体にギャップが生じ，地震による変動が及んでいないと思われる地域の観測点においても変動が乗じるなど，座標値が誤って推定された．そこで，TSKB の初期座標値を地震後の IGS の最終解に変更して解析を行った結果，安定した座標推定値が得られた．地震前後において TSKB の座標値には，東西・南北・上下成分でそれぞれ約 60cm・約 3cm・約 7cm の変動量が検出された．この変動量は，つくば VLBI 観測局で地震前後に観測された変動量と調和している（国土地理院，2011）．なお，今回の解析では，TSKB の地震後の初期座標には，余効変動による速度を考慮していない．

最後に，アジア太平洋地域にある GPS 観測点において，本解析で得られた東北地方太平洋沖地震に伴う変動ベクトル図（水平・上下）を図-9 に示す．地震による変動が及んでいないと思われるオーストラリア東部の TIDB を固定すると，日本では，北海道（STK2）と九州（AIRA）で震源方向に 4～6cm の変動が見られる．また，GUAM および KOKB を根幹とするクラスターでは，クラスター内の全点に同じ方向の変動が見られており，水平成分で 1～2cm，上下成分で 2～3cm に達する．CODE との比較では，解析日によって数 cm のばらつきが見られるため，有意な地殻変動と判断はできず，クラスターの根幹点のばらつきがクラスター内に反映されたと考えられる．

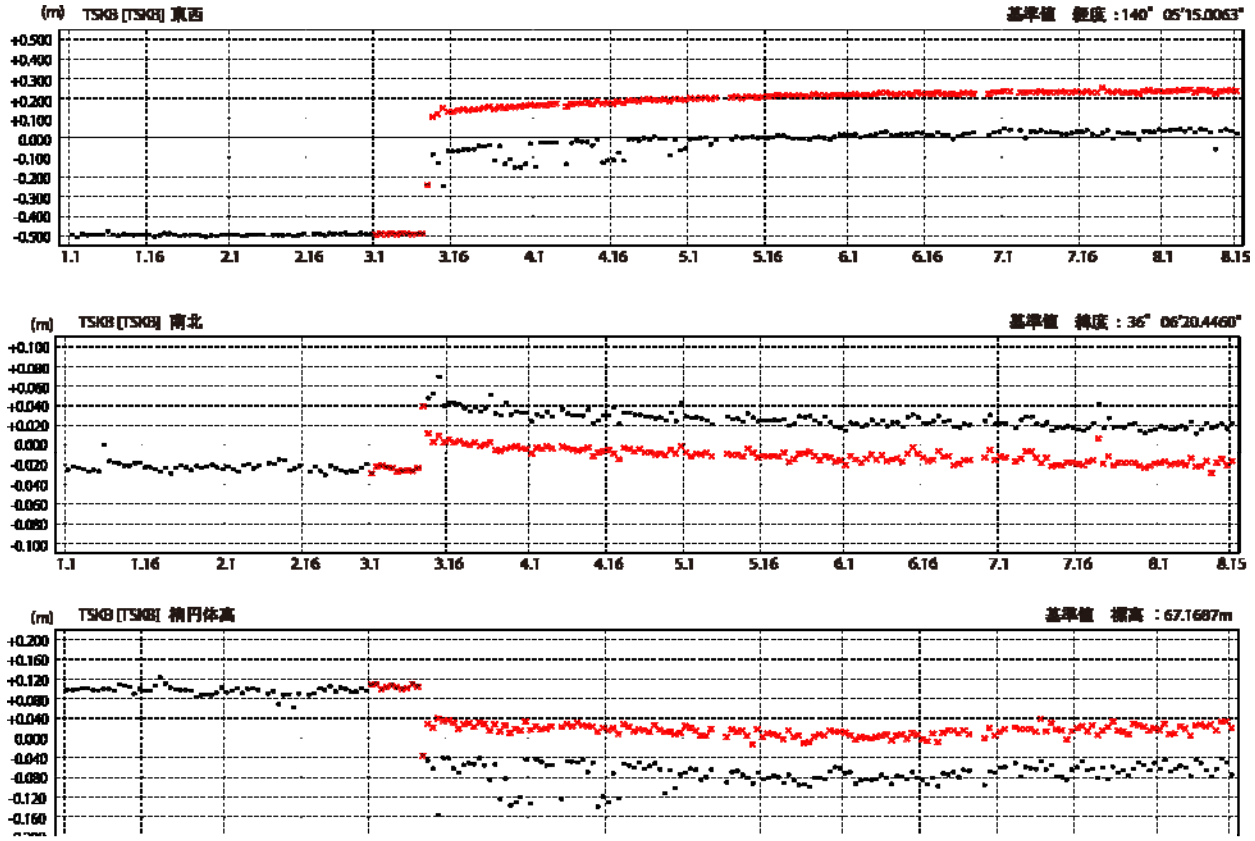
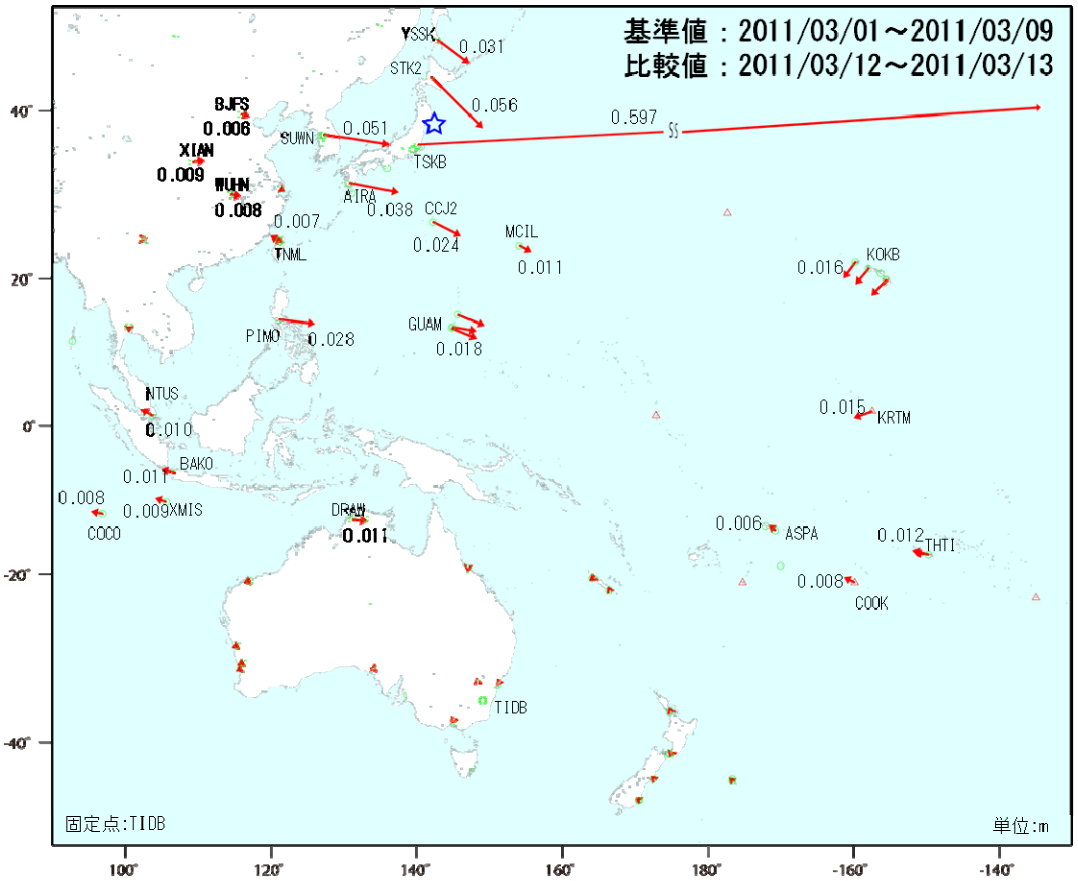


図-8　東北地方太平洋沖地震前後の TSKB の座標変化グラフ
（●：地震前の TSKB の初期座標を継続して使用，×：地震後の変動量を考慮した TSKB の初期座標を使用）



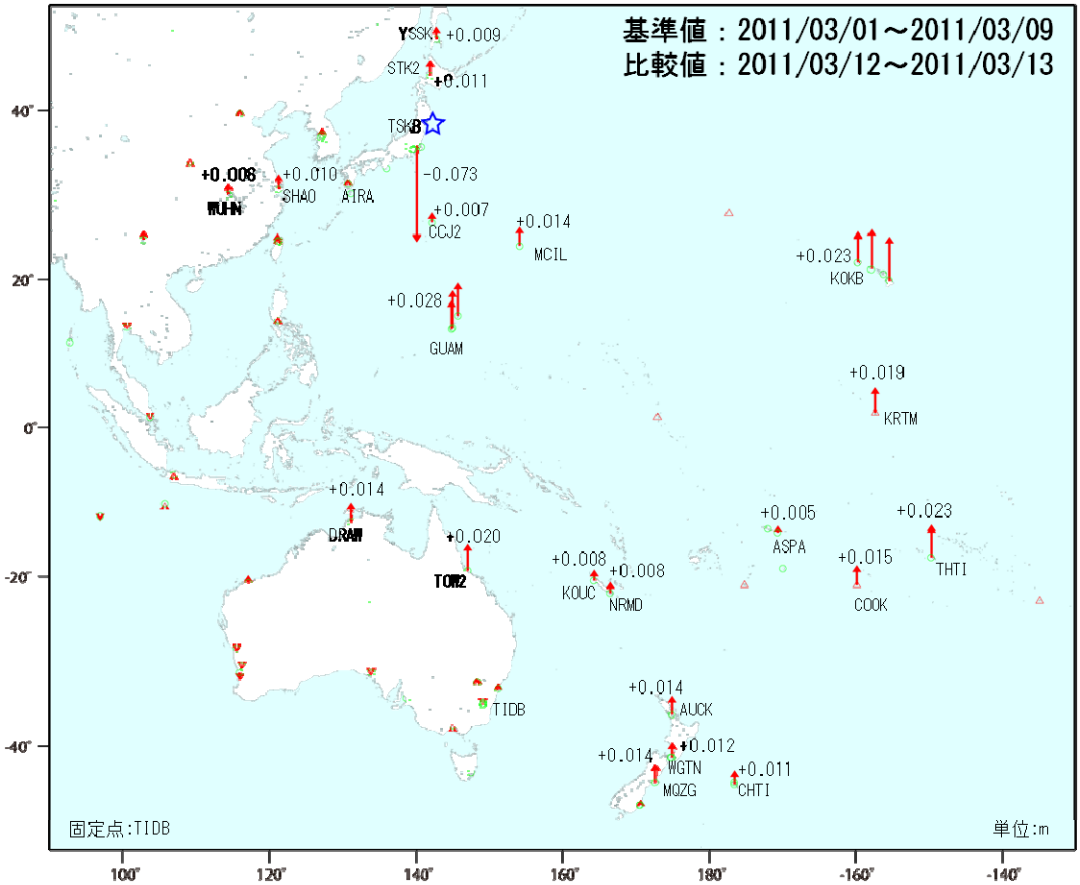


図-9　東北地方太平洋沖地震に伴うアジア太平洋地域の変動ベクトル図
（上：水平成分のベクトル図，下：上下成分のベクトル図）

8. まとめと今後の展望

アジア太平洋地域において GPS 解析支援システムを定常的に運用するため，解析戦略を構築した．数千 km におよぶ長距離基線において安定した測位解を推定するため，最適な最低衛星高度角は，L5 で 20°，L3 で 10°とし，ITRF 座標系に整合した座標値を安定して得るために網平均計算時の拘束条件は，根幹 11 点を水平成分では，強く拘束（1mm 程度）し，上下成分は，緩く拘束（3cm 程度）することにした．

構築した解析戦略を基に 2010～2011 年の観測データを解析し，IGS の解析センターである CODE の週値と解析結果を比較した．長距離基線では各成分において数 cm の差が見られるが，調和的な結果が得られた．特に東西成分において短周期のバイアスが見られるため，原因の把握と解析戦略の更なる改善が今後の課題として挙げられる．

東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動の検出性能を評価した結果，最も変動した TSKB において，つくば VLBI 観測局と調和した変動量が求められた．

今後の課題として，東北地方太平洋沖地震の余効変動速度を TSKB の初期座標へ反映させた再解析を実施し，東北地方太平洋沖地震以外の地震についても検出性能を検討する．さらに，アジア太平洋地域を網羅するため，IGS 観測点や国土地理院が設置した GPS 観測点以外の GPS 観測点を組み入れることや解析結果を円滑に公表する仕組みを構築することも今後の課題である．

謝　辞

CODE 解析センターによる一週間の座標推定値（Weekly SINEX）については，IGS の ftp サイト（ftp cddis.gsfc.nasa.gov）より取得しました．データの公開について感謝いたします．

参 考 文 献

Astronomical Institute, University of Bern (2007): Bernese GPS software version5.0

CODE Analysis Strategy Summary (accessed Jan.2012): http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/center/analysis/code.acn

国土地理院（2011）: 東北地方太平洋沖地震に伴う VLBI 観測局の変動～地震による変動量と余効変動の監視～，http://www.spacegeodesy.go.jp/vlbi/ja/earthquake2011/index.html (accessed 30 Jan.2012) .