GPS 連続観測システム（GEONET）の解析戦略（第４版）から見た地殻変動について
Crustal Movement Reevaluated from Solutions of GEONET New Analysis Strategy (Ver.4)

測地観測センター
宮原伐折羅[1]・野神　憩・梅沢　武[2]・岩下知真子・川元智司
Geodetic Observation Center
Basara MIYAHARA, Kei NOGAMI, Takeshi UMESAWA,
Chimako IWASHITA and Satoshi KAWAMOTO

要　旨

国土地理院は，GPS 連続観測システム（GEONET）のさらなる高度化・高精度化を目的として，2009 年４月から，新しい解析戦略（第４版）の運用を開始した．新しい解析戦略（第４版）では，座標値に見られた様々な誤差が軽減されることにより，より詳細な地殻変動の把握が期待される．そこで，新しい解析戦略の運用開始に先立って，解析戦略の変更に伴い座標値に生じる差が，地殻変動監視においてどのような影響を及ぼすのか，第３版と新しい第４版の解析結果を比較することで検証した．比較には，過去の地震・火山活動に伴う地殻変動を用いた．また，解析戦略（第３版）で地殻変動監視の大きな障害として報告されていた大気の不均質による誤差（雨貝・石本，2007）が，大気遅延勾配推定の導入により大きく改善された事例が確認されたため，これを報告する．

１．はじめに

GEONET では，1996 年に運用が開始されて以来，３度の大きな改良が行われている．３度目の改良となった 2004 年には，その前年に全電子基準点で行われたアンテナ・受信機更新を受けて，第３版の解析戦略が構築された．第３版の解析戦略では，それ以前に判明していた諸課題を解決し，アンテナ・受信機更新により機器を統一した効果もあって，地殻変動の検出能力が大きく改善された．しかし，第３版の解析戦略導入から４年以上が経過するに伴って，諸々の課題が顕在化し，また，GPS 解析技術やソフトウェア性能に向上が見られたため，さらなる高度化・高精度化を目指して，第４版となる解析戦略の構築が進められ，2009 年４月に運用が開始された．

第３版の定常解析では，大気の不均質に起因した系統的な誤差や解析固定点の上下動等に起因する年収変動など，実際の地殻変動ではないバイアスが座標値に見られることが報告されている．（雨貝・石本，2007；Munekane et al.，2004）このようなバイアスが地震等の活動と一緒に生じると，実際の地殻変動を正確に把握することができないため，地殻変動を監視する上で障害となる．解析戦略（第４版）では，これらの誤差要因を軽減するために，大気遅延勾配の推定，解析固定点の取り扱いの変更，アンテナ位相特性モデルの変更等を行っている（中川ほか，2009）．これらの変更によって，第３版の解析で見られた年周変動等のばらつきが改善されることにより，第４版の解析では，より詳細な地殻変動の把握が可能となることが期待される．そこで，第３版の解析結果との比較により，第４版の解析戦略が地殻変動をどのように捉えているか，地震・火山活動に伴う地殻変動の事例を用いて検証を行った．また，大気遅延勾配の推定を導入したことにより，大気の不均質に起因した誤差が大きく改善された事例が得られたため，これも報告する．

本報告で地殻変動の把握に用いた座標値は，GEONET の定常解析のうち，最も信頼度が高い，最終解析の結果である．本報告では，第３版の最終解析の結果を F2 解，第４版の最終解析の結果を F3 解と呼ぶこととする．

２．地震および火山活動に伴う地殻変動の比較

地震・火山活動に伴う地殻変動の事例を用いて，第３版と第４版の解析結果の比較を行い，どのような差がみられるか，その特徴の把握を行った．その結果見られた特徴について報告する．

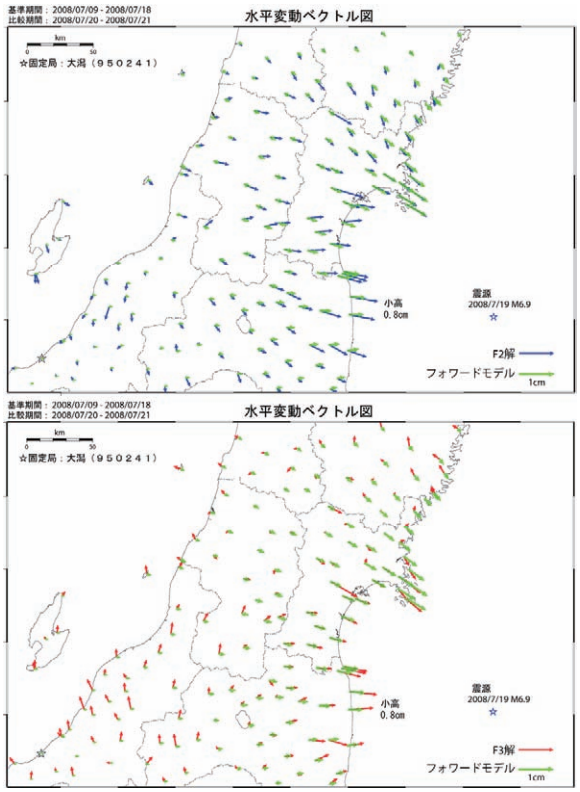
２．１　平成 20 年７月福島県沖の地震

平成20年７月19日に発生した福島県沖の地震（最大震度４，M6.9）では，宮城県沿岸から福島県沿岸を中心とする地域において電子基準点「小高」を最大に１cm 弱のわずかな地殻変動が観測された．F2 解と F3 解から求めた地震に伴う地殻変動を，図－１に水平変動ベクトル図で重ねて表示した．沿岸の変動の大きな地域では，F2 解から求めた変動ベクトルは，宮城県では震央方向よりやや北側へ，福島県ではやや南側へ向く傾向を示しているが，F3 解から求めた変動ベクトルは，いずれの地域でも震央方向へ向かう傾向を示している．防災科学技術研究所の Hi-net の結果から得られた震源メカニズムに基づいてフォワードモデルにより計算した地震に伴って予測される変動量と，F2 解，F3 解から求めた変動ベクトルを

現所属：[1] 国土交通省総合政策局　[2] 測地部

比較したのが，図－２である．沿岸部では，F2 解は上述した変動を見せるため，モデルによるベクトルと方向のずれを生じている．また，F3 解とモデルによる値は，内陸部で震源方向に向かう非常に小さな変動を示すのに対し，F2 解では，内陸まで５mm 程度の変動が見られ，モデルによる値との乖離が見られる．震源メカニズムから予測される変動との一致で見ると，F3 解は F2 解と比べてメカニズムにより整合した地殻変動が捉えられている．この事例では，解析戦略の変更により，結果のばらつきが改善された効果が，震源メカニズムにより整合する地殻変動の把握という形で認められる．

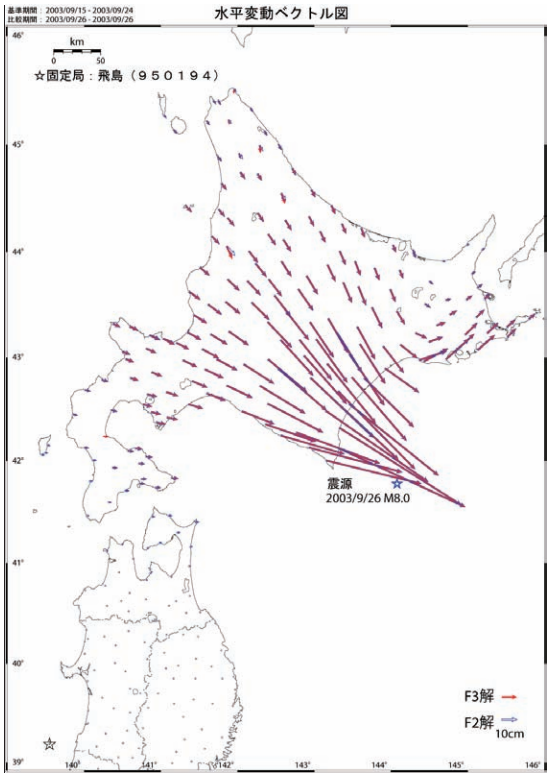
図－１　F2・F3 解による平成 20 年７月の福島県沖の地震に伴う地殻変動（水平変動ベクトル図）



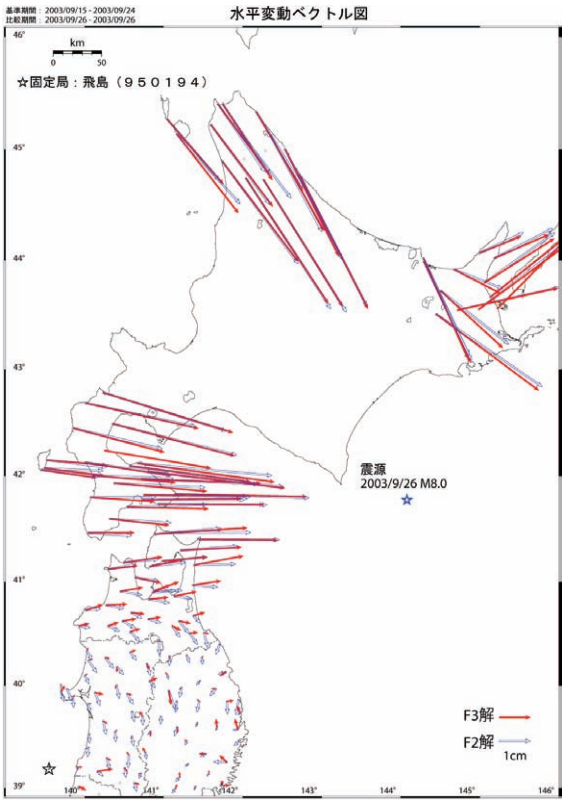
図－２　福島県沖の地震に伴う地殻変動（フォワードモデルと F2・F3 解による水平変動ベクトル図）

２．２　平成 15 年（2003 年）十勝沖地震

平成 15 年９月 26 日に，北海道十勝沖を震源として発生した平成 15 年（2003 年）十勝沖地震（最大震度６弱，M8.0）では，北海道全域で大きな地殻変動が観測され，水平変動は最大で 80cm を超えた．地震に伴って生じた地殻変動を F2 解，F3 解により示した水平変動ベクトル図を図－３，図－４に示す．図－３では，北海道地域で見られる地殻変動は，一見したところ両者でほぼ一致している．これは，F2 解，F3 解の間にある違いが通常は非常に小さいため，数 10cm という変動の大きさに対して，変動を把握する際にその差がほとんど認識できないことを示していると思われる．一方，ベクトルのスケールを 10 倍変えて５cm 未満の地殻変動を表示した図－４では，より詳細な変動が把握できる．地震に伴って青森県で見られる地殻変動は，F2 解では震源の方向へ向かわず，全体に南に向かう傾向が見られるのに対し，F3 解では，１cm 以下の変動も震源に向かう東向きの変動を示している．福島県沖の事例でも見られるように，地殻変動があまり大きくなく，１cm 程度の場合には，F2 解と F3 解の間で変動の違いが明確に認識される．これは，解析戦略の変更によって解析結果から軽減されたノイズが，生じている地殻変動の量とほぼ同じ程度のオーダーであるため，解析戦略変更による改善の効果がよく見えるためであると考えられる．



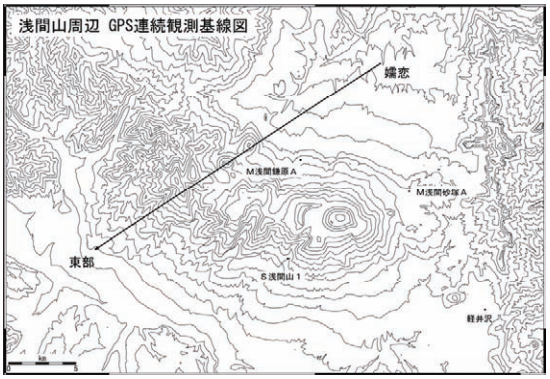
図－３　F2・F3 解による平成 15 年（2003 年）十勝沖地震に伴う地殻変動（水平変動ベクトル図）



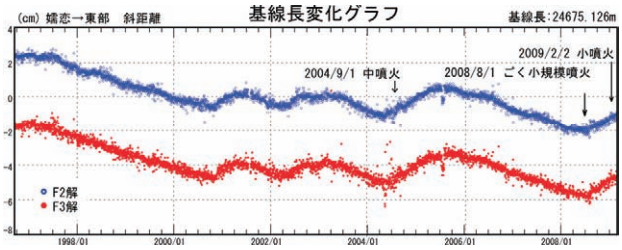
図－４　F2・F3 解による平成 15 年（2003 年）十勝沖地震に伴う地殻変動（水平変動ベクトル図・大きさが５cm 未満のベクトルのみ表示）

２．３　浅間山の火山活動

浅間山では，GEONET の観測が始まって以来，山体の北側を北北東―南南西に横切る電子基準点「東部」－「嬬恋」の基線（図－５）において，繰り返し生じる膨張・収縮が捉えられている．基線長変化グラフ（図－６）による比較では，1997 年から 2001 年，2006 年から 2008 年の基線の収縮期間に F2 解で見られた年周変動が F3 解では解消している．また，2008 年に噴火に先んじて基線が収縮から伸長に転じた際には，F3 解の時系列では，F2 解と比べて，変化が明瞭に捉えられており，基線が伸び初めた時期を特定することが容易になっている．



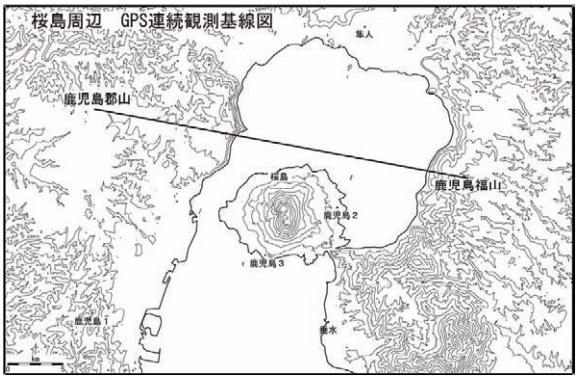
図－５　浅間山周辺 GPS 連続観測基線図



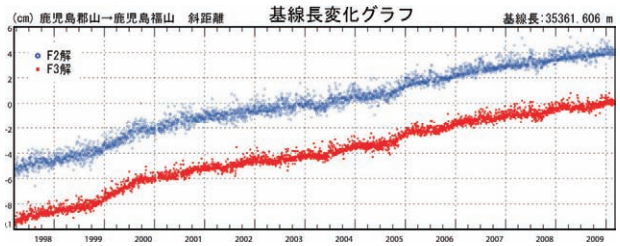
図－６　浅間山周辺基線変化グラフ（F3 解は－４cm）

２．４　桜島の火山活動

桜島周辺では，GEONET の観測が始まって以来，錦江湾（鹿児島湾）をまたぐ基線（図－７）で長期的な伸びが観測されている．図－８は，1997 年１月から 2008 年９月まで約 10 年間の錦江湾を横断する基線の基線長変化グラフである．F2 解では，基線は長期的に伸び続けていることはわかるが，伸びの速度の変化は明瞭ではない．一方，F3 解では，1999 年から 2000 年にかけて，また，2005 年の初めから中ごろにかけて，基線の伸びが加速している時期があることが捉えられている．また，値のばらつきも F3 解において小さくなっていることがわかる．



図－７　桜島周辺 GPS 連続観測基線図



図－８　桜島周辺基線変化グラフ（F3 解は－４cm）

３．大気遅延勾配の推定導入による効果

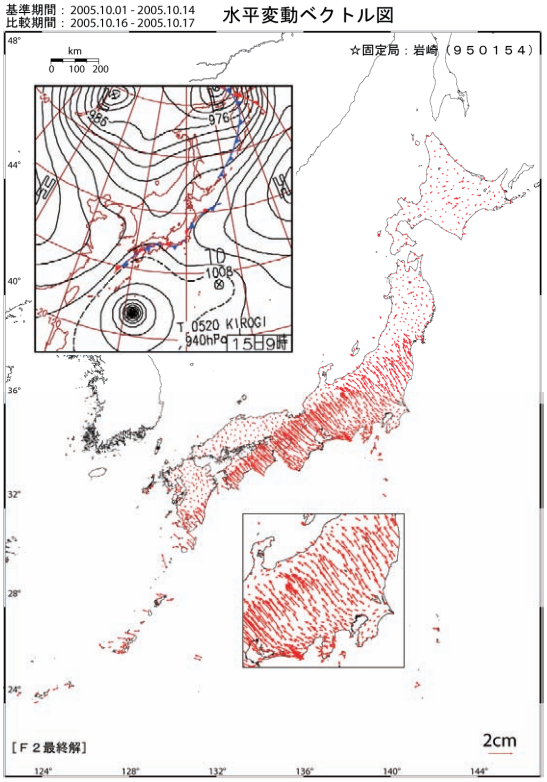
大気中の水蒸気に大きく不均質が生じる台風や停滞前線といった気象のもとでは，GPS の解析結果に系統的な誤差が生じる．このような気象条件に起因する誤差は，座標値推定の際に大気遅延勾配を同時に推定することで大きく軽減できることが指摘されている（Miyazaki et al., 2003）．GEONET において

も，気象条件に起因する系統的な座標値の変動が広い範囲で認められる例が報告されてきた（雨貝・石本，2007）．しかし，第３版の解析戦略では，おもにソフトウェアの仕様の制限から，大気遅延勾配の推定は行っていなかった．第４版の解析では，大気遅延勾配の推定を導入したため，気象条件に起因する系統的な誤差が大きく軽減された事例が得られた．

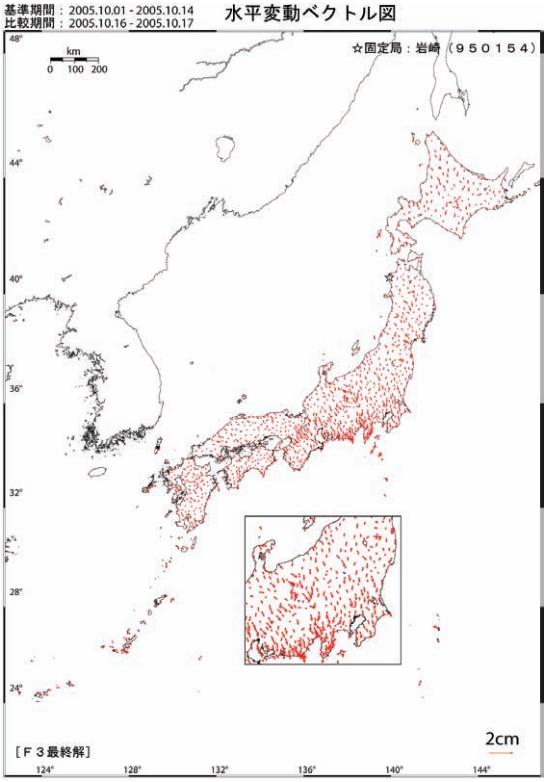
３．１　2005 年 10 月の前線停滞による事例

2005 年 10 月中旬，F2 解からみた全国の地殻変動ベクトルに，四国から東北にかけて２cm に達する座標値の系統的な変動が認められた（図－９）．この変動は２日間に継続し，その後は以前と同じ定常的な変動に戻ったため，実際の地殻変動ではなく何らかの測位誤差により生じた変動の可能性が高いと考え，気象条件を確認したところ，同日の天気図（図－９左上）に，変動のパターンと一致する停滞前線と台風の配置が見られた．そのため，この変動は前線と台風による大気の不均質によって生じた可能性が高いと考え，F3 解を用いて同時期の水平変動ベクトル図を作成し（図－10），大気遅延勾配の推定によってこの変動が解消されるか確認した．

F3 解による水平変動ベクトル図では，F2 解に見られる四国から東北にわたる変動ベクトルは解消しており，停滞前線と台風により生じた大気の不均質が，大気遅延勾配の推定によって適切にモデル化されたことが示されている．



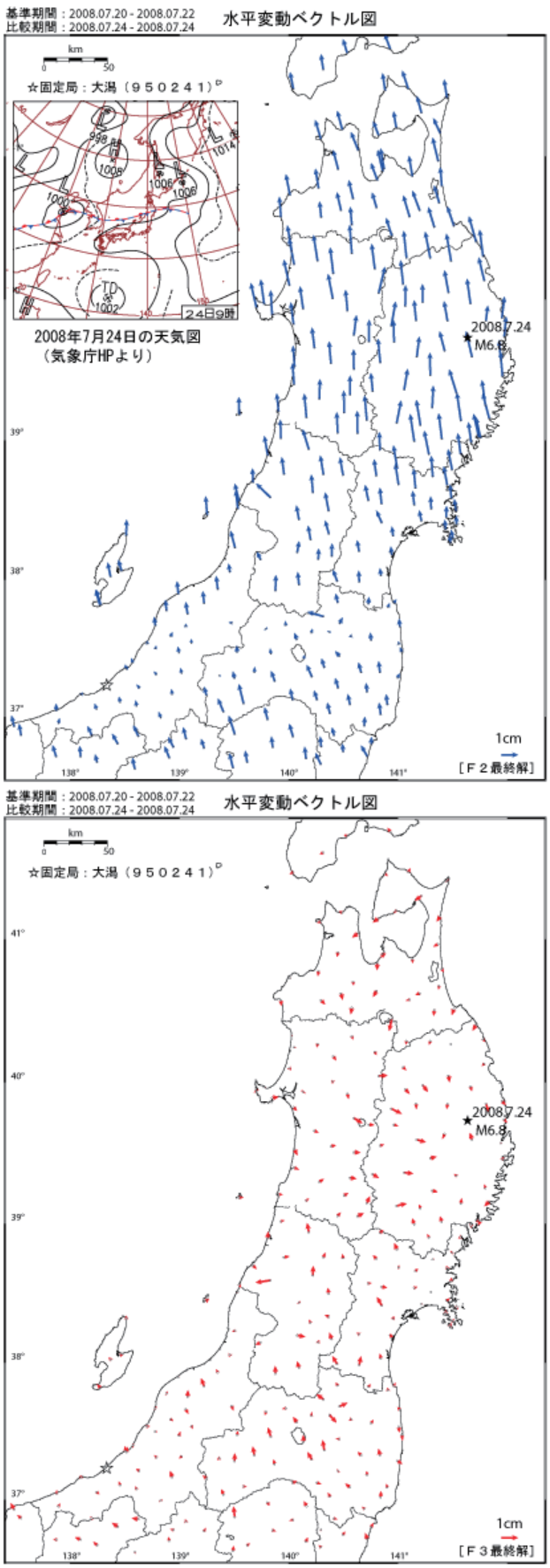
図－９　全国の水平変動ベクトル図（F2 解）



図－10　全国の水平変動ベクトル図（F3 解）

３．２　岩手県中部の地震（平成 20 年７月 24 日）

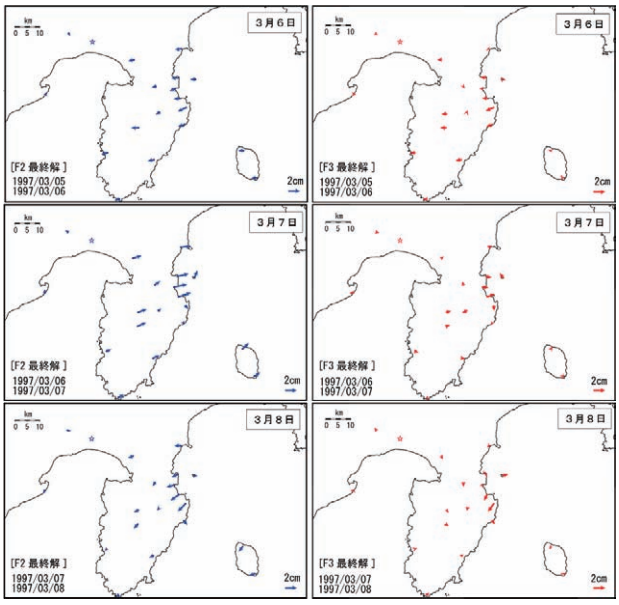
平成 20 年７月 24 日に発生した岩手県中部の地震（最大震度５強，M6.8）では，地震の前後で東北地方に前線が停滞したため，GEONET の解析結果に系統的な誤差が生じ，地殻変動を把握する妨げとなった．F2・F3 解による水平変動ベクトル図および７月 24 日の天気図を図－11 に示す．図－11 の上図に示した F2 解による水平変動ベクトル図では，東北地方北部のほぼ全域にわたって北向きに２cm に達する水平変動が見られる．この変動は，図－11 に示した７月 24 日の天気図に見られる停滞前線を境界として前線の北側に生じており，前線の通過に合わせて F2 解にこの変動が見られなくなったため，この北向きの変動を，気象に起因する誤差と考え，F3 解による水平変動ベクトル図（図－11 下図）を作成して，F2 解と F3 解の比較を行った．F3 解の結果には，F2 解に見られた北向きの変動は見られず，この変動が，大気遅延勾配の推定により取り除くことができる大気の不均質に起因した誤差であることが示された．また，F2 解の結果では，震源メカニズムから想定される地殻変動の範囲と，停滞前線による誤差の範囲が重なっていたため，地震に伴う変動を把握することが非常に困難であったが，F3 解の結果では，前線による誤差が取り除かれたため，この地震に伴う大きな地殻変動は生じていないことが確認された．



図－11　平成 20 年７月の岩手県中部の地震に伴う地殻変動（水平変動ベクトル図，上図 F2，下図 F3）

３．３　1997 年伊豆半島東方沖の群発地震

1997 年３月に，伊豆半島東方沖で生じた群発地震に伴い，GEONET の解析に地殻変動が検出された．変動は３月の初めから見られ，火山活動に整合的な地殻変動が継続して見られたが，３月７日の F2 解には，前後の地殻変動と反対方向を示す変動がみられる（図－12 左図）．Shimada et al.(2002)は，この変動が地形と気象により生じた山岳波に起因するもので，大気遅延勾配の推定によっても解消しないとしている．そこで，F3 解による水平変動ベクトル図（図－12 右図）を作成し，３月７日の変動が解消するかどうか確認した．図－12 の右図では，F3 解による３月７日の地殻変動は，図－12 の左図の F2 解に見られる地殻変動と比べて，前後の日の変動と反対方向のベクトルが小さくなってはいるものの，解消はされていない．F3 解で導入された大気遅延勾配の推定でも，1997 年３月の伊豆で生じた気象に起因した変動は，軽減はされるが解消はされていないことがわかる．第４版で導入した大機遅延勾配の推定は，水平方向の１次の勾配であるため，この事例で見られるような空間的に細かく複雑な気象の不均質については，的確にモデル化できない可能性があることが考えられる．



図－12　1997 年伊豆半島東方沖の群発地震に伴う地殻変動（1997 年３月６日から８日の水平変動ベクトル図，左が F2 解，右が F3 解）

４．まとめ

第４版の解析戦略による解析結果から見た地殻変動は，地殻変動の量が，１cm 程度で小さい場合には，第３版の解析と比べてより詳細な地殻変動を把握できる可能性が高いことが，地震，火山活動に伴う過去の地殻変動事例によって示された．これは，今回

の解析戦略変更によって改善された座標値に含まれるノイズが，ちょうど１cm程度の地殻変動とオーダーが近いため，ノイズの軽減により実際の地殻変動が見えやすくなるためと考えられる．地震に伴う地殻変動量が数10cmと大きい場合には,地殻変動の量に対して軽減されるノイズが小さいため，第３版と第４版により把握される地殻変動の差は目立たなくなる．また，第４版で導入された大気遅延勾配の推定によって，大気の不均質による系統的な誤差が大きく改善されることが示された．ただし，大気の不均質が空間的に細かく複雑な場合は，誤差が解消されない可能性が高いことを示す事例も得られた．

参 考 文 献

雨貝知美，石本正芳（2007）：GEONET に見られる大気擾乱の広域的な影響について，国土地理院時報，112，41-49.

畑中雄樹，宗包浩志，豊福隆史，小谷京湖（2008）：GEONETの新しい解析戦略（第４版），日本測地学会第110回講演会要旨集，95-96.

岩下知真子，川元智司，宮原伐折羅，中川弘之，畑中雄樹（2008）：GEONET 新解析戦略による解から見た火山周辺の地殻変動，日本測地学会第110回講演会要旨集，213-214.

宮原伐折羅，野神憩，石本正芳，雨貝知美，畑中雄樹（2008）：大気遅延勾配推定がGEONET解に与える影響について，日本測地学会第110回講演会要旨集，97-98.

Miyazaki, S., T. Iwabuchi, K. Heki and I. Naito (2003): An impact of estimating tropospheric gradient on precise positioning in summer using the Japanese nationwide GPS array, J. Geophys. Res., 108, 2335, doi:10.1029, 2000JB000113.

Munekane, H., M. Tobita and K. Takashima (2004): Groundwater-induced vertical movements observed in Tsukuba, Japan, Geophysical Research Letters, 31, L12608, doi:10.1029/2004GL020158.

中川弘之，豊福隆史，小谷京湖，宮原伐折羅，岩下知真子，川元智司，畑中雄樹，宗包浩志，石本正芳，湯通堂亨，石倉信広，菅原安広（2009）：GPS連続観測システム（GEONET）の新しい解析戦略（第４版）によるルーチン解析システムの構築について，国土地理院時報，118，1-8.

野神憩，梅沢武，宮原伐折羅，中川弘之，畑中雄樹（2008）：GEONET 新解析戦略による解から見た地震に伴う地殻変動，日本測地学会第110回講演会要旨集，133-134.

Shimada, S., H. Seko, H. Nakamura, K. Aonashi and T. A. Herring (2002): The impact of atmospheric mountain lee waves on systematic geodetic errors observed using the Global Positioning System, Earth Planets Space, 54, 425-430.