

GEONET にみられる大気擾乱の広域的な影響について
Wide Influence of Atmospheric Disturbance on Analysis of GEONET

測地部 雨貝知美

Geodetic Department Tomomi AMAGAI

測地観測センター 石本正芳

Geodetic Observation Center Masayoshi ISHIMOTO

要 旨

国土地理院では、GEONET(Gps Earth Observation NETwork)の解析結果を用い、地震調査研究、火山噴火予知研究のための地殻変動監視を行っている。GEONETのルーチン解析(以下、「解析」という。)の結果には、大気遅延や電離層など様々な誤差要因により、地殻変動とは異なる変位を示すことがあり、地殻変動を監視する上で問題となる。

そこで、本論では、2005年8月12日に東北地方で観測された異常変位、及び2005年10月16日、17日に東北地方南部の太平洋沿岸から四国地方におよぶ広い範囲で観測された異常変位について、その原因について調査を行った。両ケースとも、当時の気象条件を考慮すると、大気遅延勾配の影響が特に疑われたため、大気遅延勾配を推定した場合と推定しない場合について解析し、GEONETの解析結果と比較した。その結果、GEONETにみられた異常な変位は、大気遅延勾配を推定しないために生じた誤差であることがわかった。

このように、前線などの大気擾乱がGEONETの解析結果に広域的な誤差をもたらす可能性があることが明らかとなった。このことから、このような広域的な誤差に注意して、地殻変動の監視を行う必要がある。また、大気遅延勾配の推定は、誤差軽減に有効であることから、GEONETの解析に大気遅延勾配の推定を早期に導入することが望まれる。

1. はじめに

GEONETの解析結果により、これまでに地震活動や火山活動に伴う地殻変動や地震を伴わないようなゆっくりとした地殻変動などが捉えられている。このことから、GEONETの解析結果は、地震や火山研究に非常に有効なデータであることが広く認識されている。しかし、これらの結果には、地殻変動とは考えにくい変位がみられることがある。このような異常変位は、地殻変動の把握や監視の上で問題となる。

異常な変位のうち、観測点固有の変位である場合、周囲の観測点とは異なる変動をするため、異常値であることが認識しやすい(小清水ほか、2005)。また、その原因についても、変位パターンや現地調査などにより特定しやすい。一方、異常な変位が広域的小さい場合については、経験的に地殻変動と区

別されるだけで、その原因はわからないことが多い。

このような広域的な異常変位がみられた例が、図-1である。2005年10月16日及び17日に、東北地方南部の太平洋沿岸から四国地方にかけて、帯状に最大1.4cmにおよぶ北西方向の変位が観測された。この変位は、18日には16日以前の状態に戻っていることから、経験的に地殻変動ではないと考えられた。そこで、この変位をもたらした要因について調査を行った。本論では、その結果について報告する。

また、宮城県沖の地震(2005年8月16日)の4日前にも、東北地方太平洋側の広い地域で東北東方向の変位がみられた。当時、地震との関連も議論となったが、その原因は特定されていないため、このケースについても同様の方法で調査を行ったので、合わせて報告する。



図-1 GEONET(最終解)における全国ベクトル図
 基準期間: 2005/10/01-2005/10/15
 比較期間: 2005/10/16-2005/10/17

2. 2005年10月16日及び17日における異常変位

図-1は、青森県の岩崎(950154)を固定局とした、2005年10月16日及び17日のベクトル図である。東北地方南部の太平洋沿岸から四国地方におよぶ広い範囲で、帯状に北西方向の変位がみられることがわかる。図-2は、この2日間を含む付知(950284)の基線変化グラフである。このグラフからわかるとおり、16日、17日の変位はこの2日間のみで、18日には16日以前に戻っている。一般的に、地殻変動の場合には変位が元に戻ることは少ないため、地殻変動の可能性は低いと考えられる。

また、固定局が局所的な変動をする場合にも、異常な変位があるようにみえるが、このケースでは、固定局を代えても同様のパターンがみられることから、固定局の問題ではないことがわかる。

次節以降で、異常変位の原因について調査した結果を述べる。

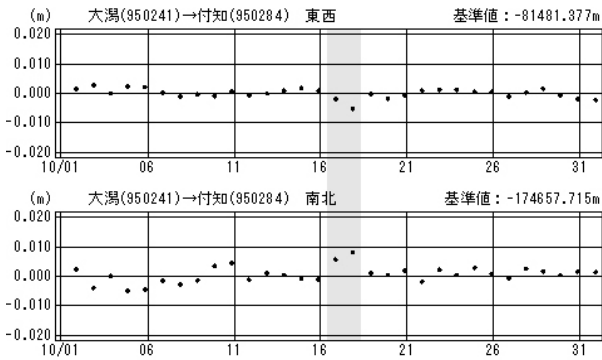


図-2 大湯(950241)を固定した付知(950284)の基線変化グラフ

2. 1 異常変位の原因に関する調査及び考察

2. 1. 1 ambiguity 決定率

異常変位が、ambiguity のミスフィックスといった解析上の問題である場合、その日の解析における ambiguity 推定の決定率が低下する可能性がある。

図-3は、異常変位がみられた時期を含む2005年10月14日から20日までのGEONETの解析結果(最終解)における ambiguity 決定率である。GEONETでは、観測点を地域毎に分割して解析しており、それを地域クラスターと呼ぶが、図-3は地域クラスターごとにプロットしたものである。全体的に10月17日の決定率が低下しているが、同様のことは15日にもあり、特に際立ったものではない。また、地域クラスター毎にみても、16日、17日のデータがその前後と特に異なっていないことがわかる。

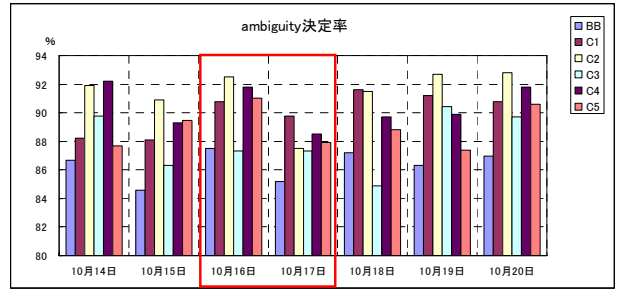


図-3 2005/10/14 から 2005/10/20 における GEONET(最終解) の ambiguity 決定率

2. 1. 2 大気遅延推定量の推移

図-4は、17日9時(JST)の天気図である。この天気図から、停滞前線が太平洋岸に停滞しており、さらに台風が日本列島に近づいている様子がわかる。このような状況から、南側から湿った空気が流れ込んでいたと考えられ、異常変位は大気中の水蒸気量に関係する可能性があるため、大気遅延量について調査した。

一日の大気遅延量の変化をみるため、高い時間分解能で大気遅延量を推定できるGIPSY-OASIS IIを用いて解析を行った。5分毎に大気遅延量(湿潤天頂遅延量)を推定し、その推移について、次の二通りの比較を行った。まず、10月16日、17日において、異常変位がみられた観測点とみられない観測点について比較を行い(1)、次に、10月16日及び17日と、天候が良好であった2005年1月1日及び8月5日について比較を行った(2)。

大気遅延を推定した観測点は、GEONETの解析において、異常変位がみられた付知(950284)・京都加茂(950334)・東洋(950441)、10月16日のみ変位がみられた尾鷲(940066)、両日とも変位がみられなかった銚子(93022)・大田(950386)・網野(960640)の7点である。

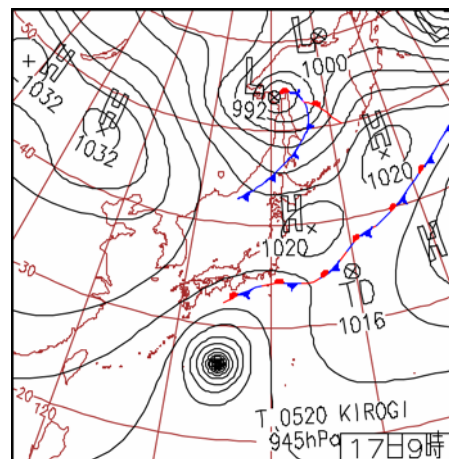


図-4 2005/10/17 9:00(JST)における天気図 【 気象庁のホームページより引用 】

(1) 10月16日, 17日における観測点毎の比較

10月16日, 17日の結果を図-5, 6に示す. 左図は, GEONETの解析結果(最終解)による全国ベクトル図, 右図は, 各観測点の大気遅延量(湿潤天頂遅延量)をプロットしたグラフで, 縦軸は大気遅延量(単位:m), 横軸は時間(UTC)である. 10月16日の大気遅延量をみると, この日に異常変位がみられた尾鷲・付知・京都加茂・東洋はいずれも急激な変化が確認できる. それに対し, 変位がみられなかった銚子・大田・網野には急激な変化はみられず, 1日を通してほぼ一定の遅延量で推移している. 17日についても同様で, 変位がみられる観測点では大気遅延量が急激に変化している. 銚子のように, 大気遅延量が大きくても, 異常変位はみられないことから, 異常変位は, 大気遅延量の大きさには関係がなく, その急激な変化が関係していると推測できる.

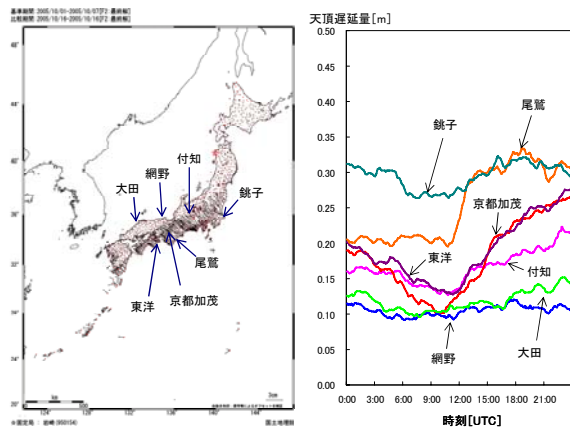


図-5 左図: GEONET(最終解)における全国ベクトル図
基準期間: 2005/10/01-2005/10/07
比較期間: 2005/10/16-2005/10/16
右図: 2005/10/16における大気遅延量の推移

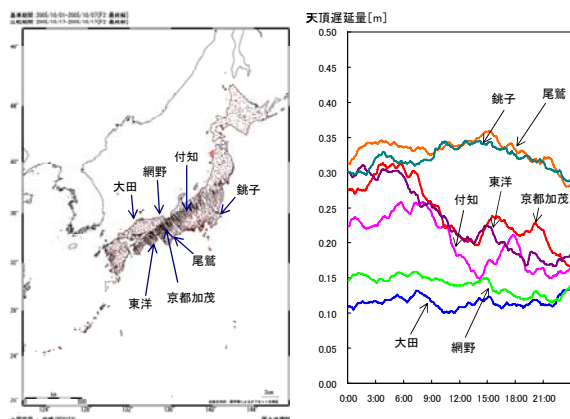


図-6 左図: GEONET(最終解)における全国ベクトル図
基準期間: 2005/10/01-2005/10/07
比較期間: 2005/10/17-2005/10/17
右図: 2005/10/17における大気遅延量の推移

(2) 1月1日及び8月5日との比較

1月1日及び8月5日の結果を図-7, 8に示す. (1)と同様に, 左図はGEONETの解析結果による全国ベクトル図, 右図は各観測点の大気遅延量(湿潤天頂遅延量)のグラフである. 両日とも10月16日, 17日でみられたような大気遅延量の急激な変化はみられず, 異常変位もみられない. しかし, その大気遅延量の大きさは, 8月5日と1月1日では大きく異なっていることから, 異常な変位は, 大気遅延量の大きさには,それほど影響がされないことがわかる.

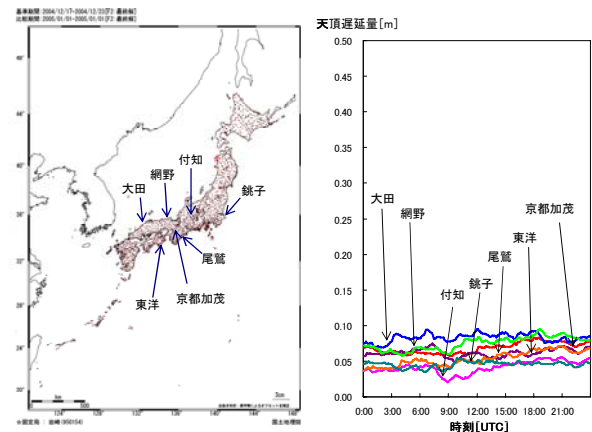


図-7 左図: GEONET(最終解)における全国ベクトル図
基準期間: 2004/12/17-2004/12/23
比較期間: 2005/01/01-2005/01/01
右図: 2005/01/01における大気遅延量の推移

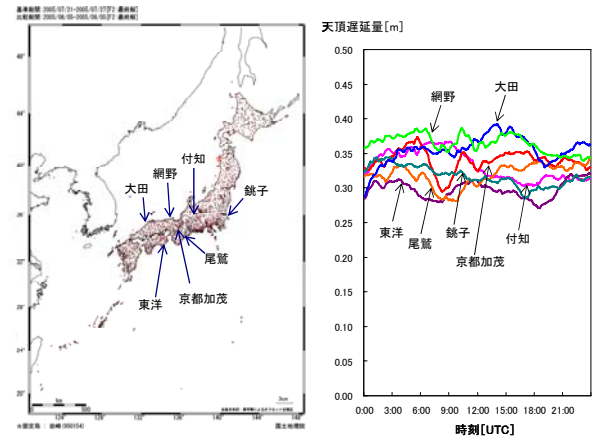


図-8 左図: GEONET(最終解)における全国ベクトル図
基準期間: 2005/07/21-2005/07/27
比較期間: 2005/08/05-2005/08/05
右図: 2005/08/05における大気遅延量の推移

2. 1. 3 異常変位の原因に関する考察

前節までに述べてきたように, 10月16日, 17日には, 大気遅延量の急激な変化があったこと以外では, 特に目立った現象はみられない. このことから, 異常な変位は, 大気遅延量の急激な変化に関係する

と考えられる。図-9は、気象庁メソ数値予報モデルの客観解析値（数値予報モデルの初期値）を用いて計算した湿潤大気遅延量の分布である。図-1及び図-9を比較すると、異常のみられた地域と湿潤大気遅延量が大きく変化している地域が一致しており、このことから、大気遅延量の急激な変化は、水蒸気量の空間分布が不均一であることに原因があったと考えられる。GPSの解析では、このような不均一な水蒸気分布による影響を軽減するため、大気遅延勾配を推定するのが一般的である。しかしながら、現行のGEONETの解析では大気遅延勾配の推定を行っていない(測地観測センター, 2004)。

以上のことから、今回のケースでは、前線の停滞による不均一な水蒸気分布が主な要因である可能性が高いと考えられる。

次節で、大気遅延量推定の効果を調査した結果について述べる。

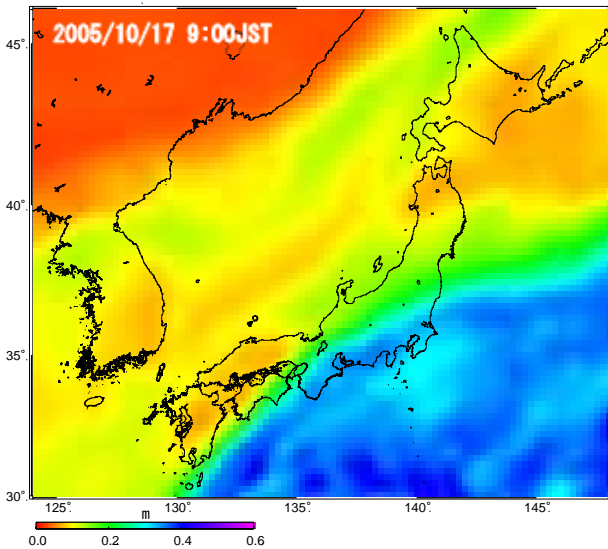


図-9 気象庁メソ数値予報モデルから計算した2005/10/17 9:00(JST)における湿潤大気遅延量

2.2 大気遅延勾配の推定の効果

大気遅延勾配の推定の効果を検証するため、実際に大気遅延勾配の推定を行った場合と推定を行っていない場合について解析し、これらの結果とGEONETの解析結果を比較する。

解析には、GAMIT(Ver. 10.21)を使用し、天頂遅延量のみ推定した場合(推定なし)と、天頂遅延量、大気遅延勾配ともに推定した場合(推定あり)について解析を行った。推定の時間間隔は、天頂遅延量、大気遅延勾配ともに3時間毎とした(表-1)。解析を行った観測点は、GEONETの解析において、異常な変位がみられた高知・付知・京都加茂・東洋・宇治、変位がみられなかった銚子・大田・網野の計8点である。これらの観測点について、大湯(950241)を固

定局として解析を行った。

図-10は、大湯を固定とした、付知・京都加茂・網野における座標時系列グラフである。グラフには、GEONET、推定あり、推定なしの各解析結果が示してある。

付知、京都加茂では、GEONETと推定なしの結果は、16日、17日ともに、北西の変位が大きいことがわかる。推定なしとGEONETの結果を比較すると、推定なしの変位量が大きいのが、これは、GEONETでは、大気遅延補正以外にも大気荷重補正など様々な補正をしていることや観測網の違いなどによるものと考えられる。

一方、大気遅延勾配を推定したものでは、明らかに北西の変位がみられなくなっており、大気遅延勾配の推定により、誤差が軽減されている。また、16日、17日に異常な変位がみられなかった網野では、解析方法による違いがほとんどみられない。このことから、大気遅延勾配を推定した場合としない場合の違いは、観測点における大気遅延勾配の影響を反映したものであるといえる。

以上の結果から、2005年10月16日、17日に広域的にみられた異常変位は、前線の停滞により水蒸気分布が不均一となり、そのため大気遅延勾配推定を行っていないGEONETの解析結果に大きく表れたと考えられる。

表-1 各解析における大気遅延推定の設定条件

	解析ソフトウェア	天頂遅延量の推定	大気勾配の推定
GEONET	Bernese (Ver. 4.0)	3時間毎	なし
推定あり	GAMIT (Ver. 10.21)	3時間毎	3時間毎
推定なし	GAMIT (Ver. 10.21)	3時間毎	なし

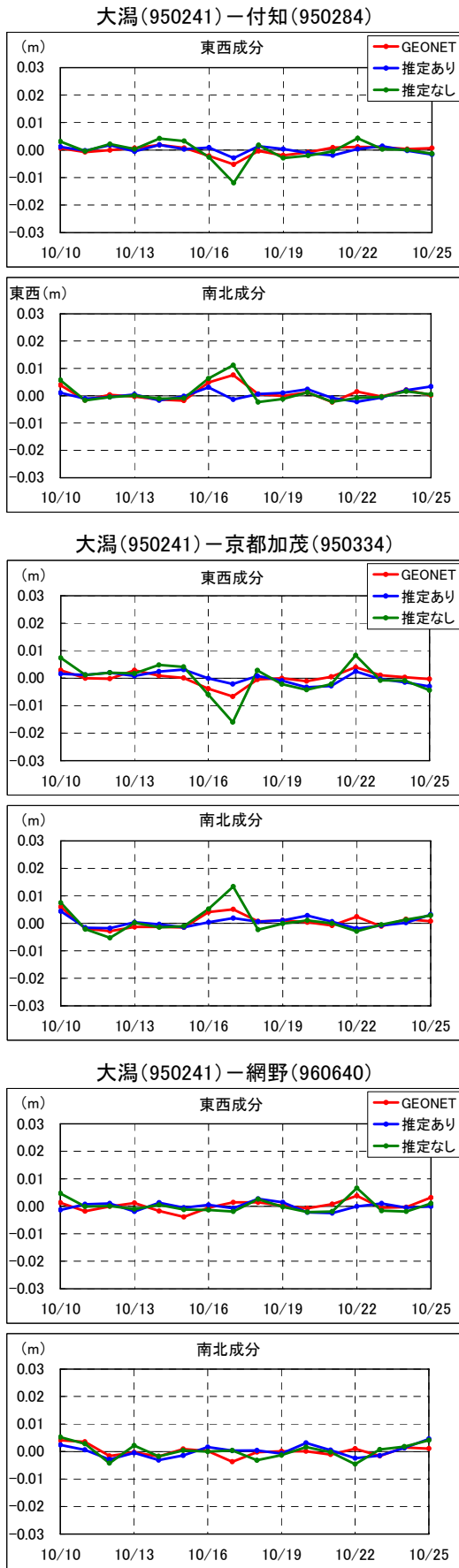
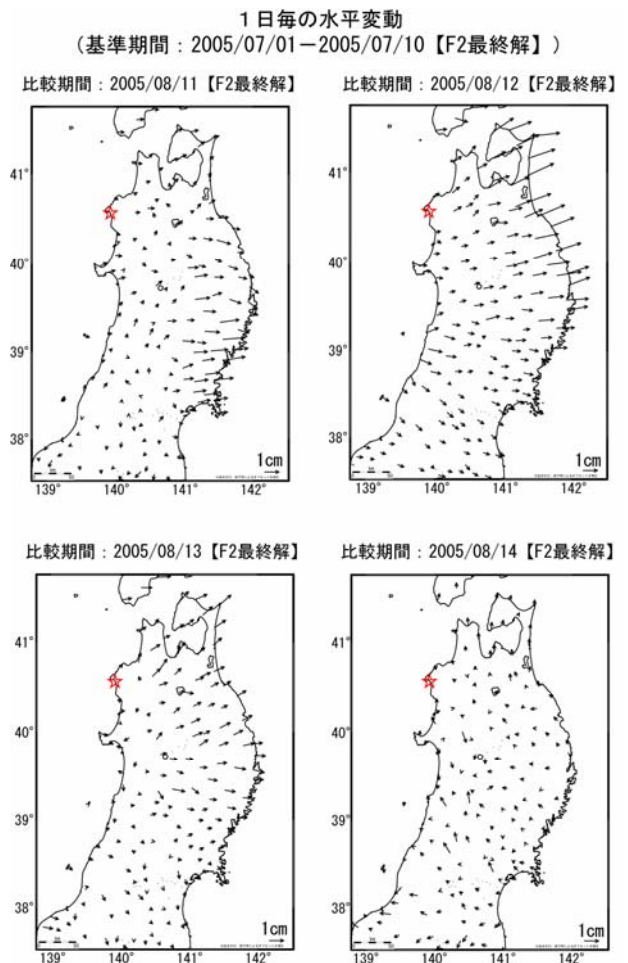


図-10 付知(950284)・京都加茂(950334)・網野(960640)における大気遅延勾配の推定有無による比較

3. 2005年8月12日における異常変位

図-11は、青森県の岩崎を固定局とした、2005年8月11日から14日までの4日間のベクトル図である。8月12日に東北地方の太平洋沿岸で、最大で2cmの東北東方向の変位がみられている。その4日後の8月16日に宮城県沖の地震(M7.2)が発生したため、当初、地震との関連も議論された。しかし、地震前である14日には東北東の変位がみられる以前の状態に戻っているため、地殻変動の可能性は低く、なんらかのノイズであると考えられた。

このケースにおいても、固定局に依存した動きではないこと、ambiguity 決定率に低下などはみられないことから、大気遅延について、前章の10月16日及び17日と同様の方法で調査を行った。



☆固定局：岩崎(950154) 国土地理院
図-11 GEONET(最終解)における東北地方のベクトル図

3. 1 大気遅延量の調査及び考察

前章と同様に、GPSY-OASIS II を用いて5分毎に大気遅延量(湿潤天頂遅延量)を推定し、その推移を確認した。

大気遅延を推定した観測点は、GEONETの解析において、異常な変位がみられた久慈(940027)・宮古

(940028)・六ヶ所 (950152)・八戸 (950156), 変位がみられなかった鳴子(950174)・能代(950184)・河辺(950188)の計7点である. 結果を図-12 に示す. 10月16日及び17日の結果と同様に, 異常変位がみられた観測点はいずれも急激な変化が確認できるのに対し, 変位がみられなかった観測点では急激な変化はみられない. このことから, 8月12日における異常変位についても, 大気遅延量の急激な変化に関係があることがわかる.

図-13, 14は, それぞれ12日9時(JST)の天気図及び気象庁メソ数値予報モデルの客観解析値を用いて計算した湿潤大気遅延量の分布である. 図-13からは, 関東から北陸にかけて前線が停滞しているが, 異常変位がみられた東北地方では特に急激な変化をもたらすような大気の状態ではないように見える. しかし, 図-14をみると, 異常変位がみられた東北地方の太平洋側を境に, 大気遅延量が東西に大きく変化していることがわかる. このことから, 大気遅延量の急激な変化は, 不均一な水蒸気分布に起因していると考えられる.

したがって, 8月12日にみられた異常変位は, 10月16日及び17日と同様に, 大気遅延勾配の推定が誤差軽減に有効であると考えられる.

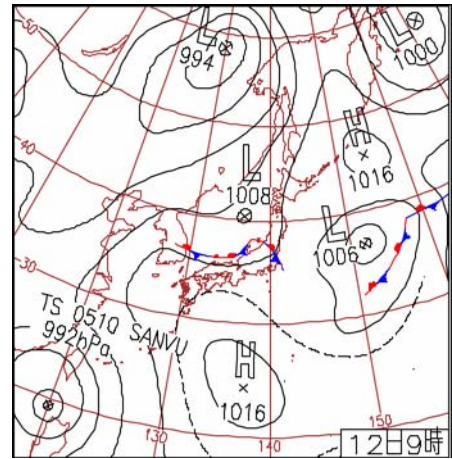


図-13 2005/08/12 9:00(JST)における天気図
【気象庁のホームページより引用】

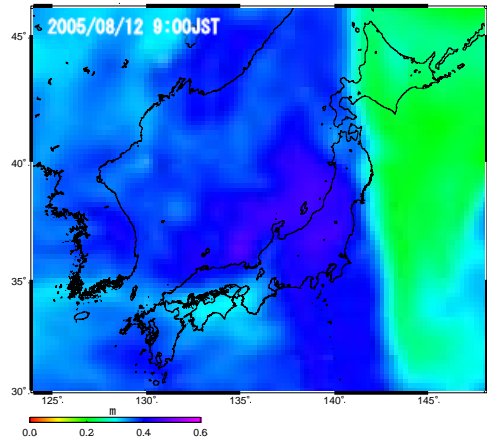


図-14 気象庁メソ数値予報モデルから計算した2005/08/12 9:00(JST)における湿潤大気遅延量

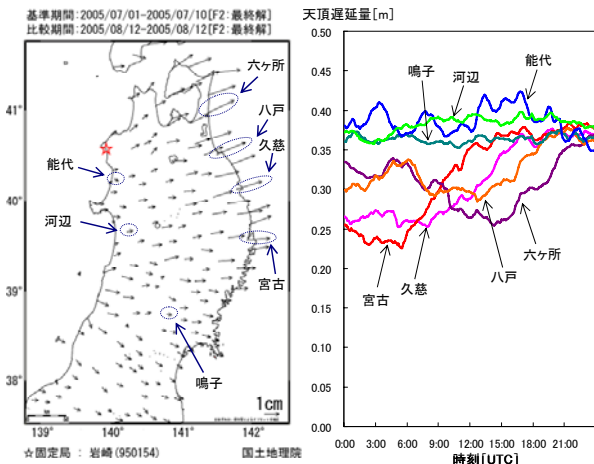


図-12 左図: GEONET (最終解) における東北ベクトル図
基準期間: 2005/07/01-2005/07/10
比較期間: 2005/08/12-2005/08/12
右図: 2005/08/12における大気遅延量の推移

3. 2 大気遅延勾配の推定の効果

大気遅延勾配の推定による効果を検証するため, 大気遅延勾配の推定を行った場合と推定を行っていない場合について解析し, これらの結果と GEONET の解析結果を比較する.

解析には, GAMIT (Ver. 10. 21) を使用し, 大気遅延推定の設定条件は, 前章と同様で, 表-1 のとおりである. 解析を行った観測点は, GEONET の解析において, 異常変位がみられた久慈(940027)・宮古(940028)・六ヶ所(950152)・八戸(950156), 変位がみられなかった鳴子(950174)・能代(950184)・河辺(950188)の計7点である. これらの観測点について, 岩崎(950124)を固定として解析を行った.

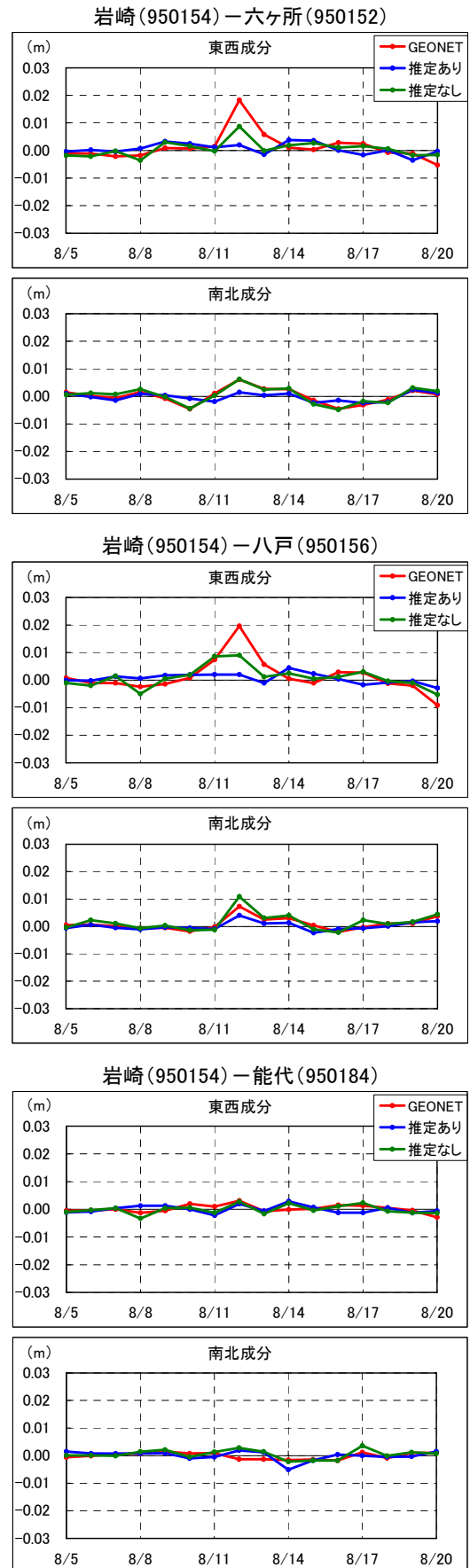
図-15~17は, 岩崎を固定とした, 上記7点の座標時系列グラフで, GEONET, 推定あり, 推定なしの各解析結果を示している.

六ヶ所, 八戸では, 8月12日に GEONET 及び推定なしでみられた東北東方向の変位が, 推定ありではほぼ解消されている. 10月16日及び17日と同様に,

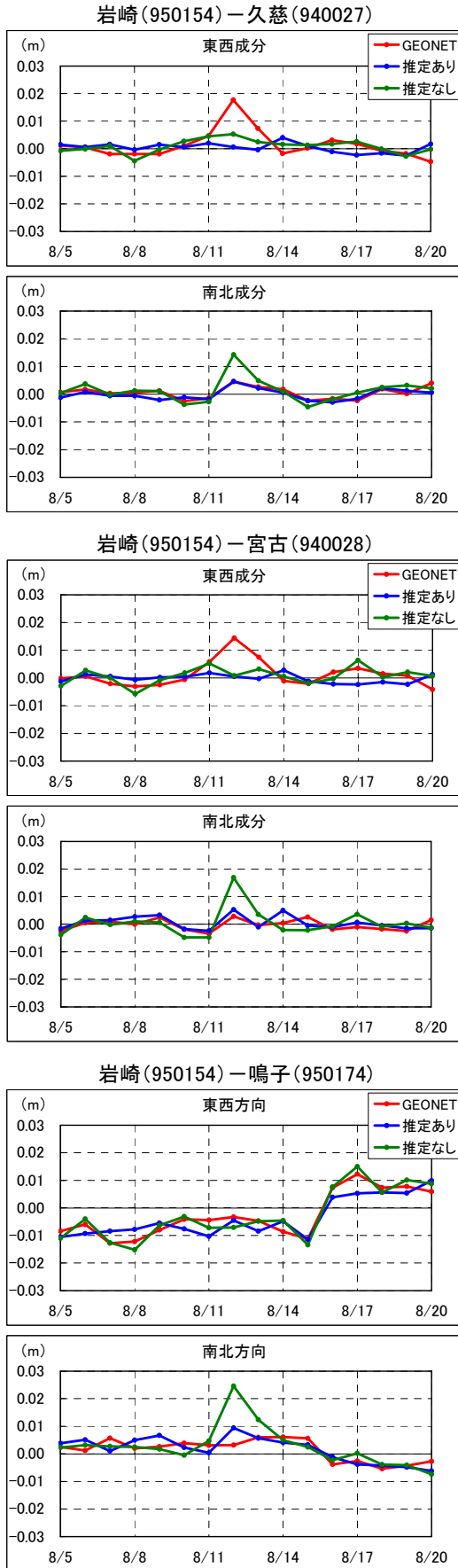
GEONET と推定なしでは変位量に多少の違いはあるが、どちらの解析も東北東方向の変位を示しており、大気遅延勾配の推定により、誤差が軽減されている。また、変位がみられなかった能代では、解析方法による違いはほとんどみられない。

一方、久慈、宮古では、GEONET で捉えた東方向の変位が、推定なしではほとんど認められず、むしろ北方向の変位が卓越している。この北方向の変位は、GEONET において異常変位がみられなかった鳴子、河辺を含めて、4点全ての推定なしの結果でみられ、GEONET の結果と整合しない。しかし、推定ありではこれらの変位が軽減されていることから、大気遅延勾配が影響している可能性も否定はできない。

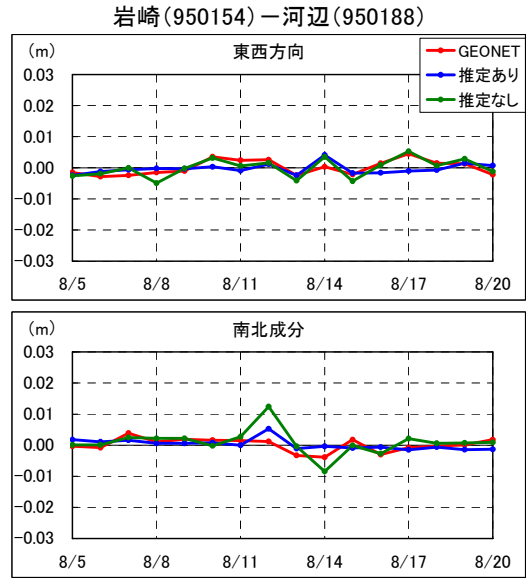
いずれにしても、大気遅延の勾配を推定することにより異常な変位はみられなくなっていることから、2005年8月12日の異常変位は、10月16日、17日と同様に、不均一は水蒸気分布に起因したものであり、その軽減には、大気遅延の勾配推定が有効であることがわかった。



図一15 六ヶ所 (950152) ・八戸 (950156) ・能代 (950184) における大気遅延勾配の推定有無による比較



図一六 久慈(940027)・宮古(940028)・鳴子(950174)における大気遅延勾配の推定有無による比較



図一七 河辺(950188)における大気遅延勾配の推定有無による比較

4. まとめ

GEONET の解析結果に、広域的な異常変位がみられた 2005 年 10 月 16 日・17 日、2005 年 8 月 12 日について、その原因について調査した。

両期間とも、前線などの大気擾乱による水蒸気の空間的な不均一がその原因と考えられたので、実際に、大気遅延勾配を推定した場合と推定しない場合について比較した。その結果、広域的な異常変位は、不均一な水蒸気分布によるものと考えられ、その補正には大気遅延勾配推定が有効であることがわかった。

本論では、2つの事例について調査したが、このような気象条件は特に珍しいものではない。したがって、地殻変動を監視する上で、このような誤差が生じ得ることを十分念頭におく必要があることが今回の調査で示された。一方、大気遅延勾配の推定が誤差の軽減に有効であることも、明らかであるので、GEONET のルーチン解析に大気遅延勾配の推定を早期に導入することが望まれる。

謝 辞

本論のとりまとめにあたっては、測地観測センター畑中雄樹地震調査官より多大なご指摘を頂いた。気象庁メソ数値予報モデルのデータの使用にあたっては、地球流体電脳倶楽部が公開している NetCDF 形式のデータを使用した。ここに記して感謝いたします。

参 考 文 献

- 小清水寛, 雨貝知美, 石倉信広, 根本盛行, 納田俊弘, 山口和典, 植田勲 (2005) : GPS 連続観測データを用いた地殻監視支援装置の開発, 国土地理院時報, 第 108 集, 39-48.
- 測地観測センター (2004) : 小特集「電子基準点 1,200 点の全国整備について」, 国土地理院時報, 第 103 集, 1-51.
- Ichikawa R, M. Kasahara, N. Mannoji, I. Naito (1995) : Estimations of Atmospheric Excess Path Delay based on Three-Dimensional, Numerical Prediction Model Data, J. Geod. Soc. Japan, 41, No. 4, 379-408.