

東北地方太平洋沖地震による西日本の地殻変動について

澤 夏起・佐藤 丈晴*・西村 敬一**

岡山理科大学大学院総合情報研究科修士課程生物地球システム専攻

*岡山理科大学生物地球学部生物地球学科

**岡山理科大学総合情報学部生物地球システム学科

(2014年9月26日受付、2014年11月6日受理)

東北地方太平洋沖地震の影響は、西日本全域における地震時の地殻変動を解析し定常時と比較した結果、西日本全域まで及んでいることが示唆された。4観測点における座標変化および6基線における基線長変化を解析し、東日本だけでなく西日本にも東北地方太平洋沖地震の影響が及んでいることを明らかにした。さらに東北地方太平洋沖地震に伴った西日本全域の地殻変動の特徴を捉えるために、平面主ひずみおよび平面剪断ひずみを解析した。平面主ひずみでは、震源の方向に伸び、それと直交した方向に縮みを示す主軸が引かれ、それら主軸が震源域から遠ざかるにつれて小さくなる。平面剪断ひずみでも、震源域から遠ざかるにつれて小さくなる。以上の解析結果から、東北地方太平洋沖地震の影響が西日本全域にまで及んでいることが実証された。注目すべき特徴として、近畿地方東部に平面ひずみの有意な段差が生じていることであり、この段差は敦賀湾-伊勢湾線(TITL)と関係があると示唆される。

1. はじめに

2011年3月11日、三陸沖を震源とした東北地方太平洋沖地震(Mw9.0, 以下3.11地震と略記)によって東日本の各地で非常に大きな地殻変動が生じ、多くの報告がなされている。国土地理院では、図1のように、3.11地震時の水平変位が確認できる(http://mekira.gsi.go.jp/JAPANESE/h23_img/311coseismic_hor.pdf)。また、同HP内には、3.11地震時の地殻変動の様子がアニメーションで示されている(http://mekira.gsi.go.jp/JAPANESE/crstanime_tohoku110311.html)。しかし、西日本については、どの程度の地殻変動が生じたのか、どのような特徴があるのか明らかになっていない。本研究では、3.11地震に伴う西日本(近畿地方以西)の地殻変動に着目し、その特徴を捉えることを目的とした。

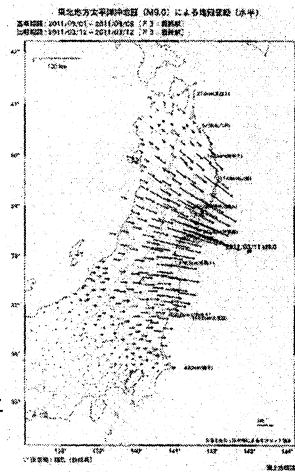


図1 東北地方太平洋沖地震に伴った東日本の水平変動

2. 使用したデータと解析方法

使用したデータは、国土地理院の「電子基準点の日々の座標値(F3解)」であり、用いた電子基準点の分布を図2に示す。このF3解とは、国土地理院の構築したGEONETの解析戦略第4版の最終解である。以前の第3版と比較すると、基本的な処理の流れや観測網の構成を踏襲しつつ、大気遅延勾配の推定や、アンテナの絶対位相特性モデルの採用、座標系のITRF2005への変更、解析固定点(電子

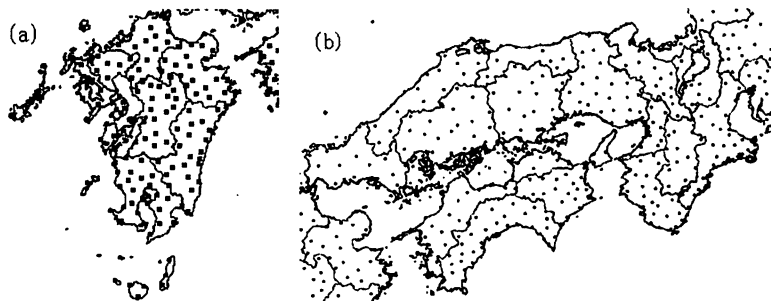


図2 九州(a)及び近畿・中国・四国地方(b)における電子基準点の分布

基準点「つくば1」)の座標値の取り扱いの変更、電離層遅延高次項の補正等の導入を行っている。したがって、以前の解析戦略よりも安定であり、かつ信頼できる結果が得られるので、平成21年(2009年)より解析戦

略第4版によるGEONET定常解析の正式運用が開始されている。

解析には、気象庁地震津波監視課の中村浩二氏により提供していただいたソフトPAT-MEを用いた。解析期間は、3.11地震を中心とした2年間(2010年1月1日から2012年3月31日)である。

3. 解析手順

PAT-MEによるデータ解析の手順を以下に示す。

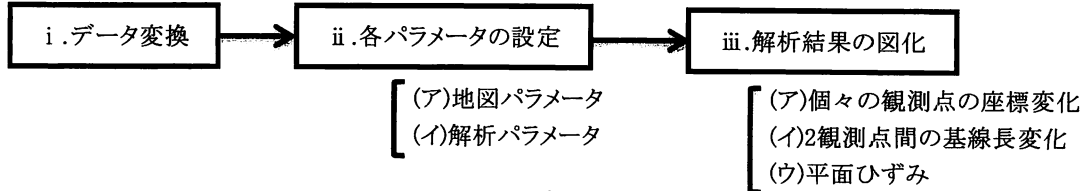


図3 解析手順

i. 国土地理院で作成された「電子基準点の日々の座標値(F3解)」をPAT-ME用のデータに変換した。

ii. 変換したデータから作図するために次の各パラメータを定めた。

(ア)「地図パラメータ」(図4)

表示する地図の範囲を定める。本研究では西日本を対象としたため、北緯30~36.5度、東経129~136.9度とした。

(イ)「解析パラメータ」(図5)

解析する期間を定める。電子基準点の位置を示す座標値は、日単位で変化しているため、通常は基準となる位置(始)および比較対象となる位置(終)には、一定期間の平均位置を用いる。本研究では、比較のため2種類の解析を行う。まず、[始]に2010年3月12~2011年4月10日、[終]に2011年2月9日~2011年3月10日を取った定常時の期間。次に、[始]に2011年3月1日~2011年3月10日、[終]に2011年3月12日~2011年3月21日を取った3.11地震を中心とした地震時の期間。このように設定することで、[始]および[終]のそれぞれの期間の平均値より、その差を求めている。

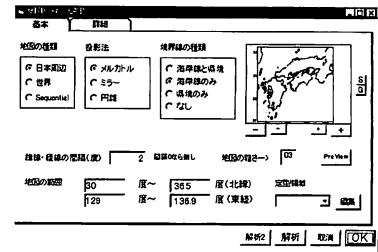


図4 地図パラメータ

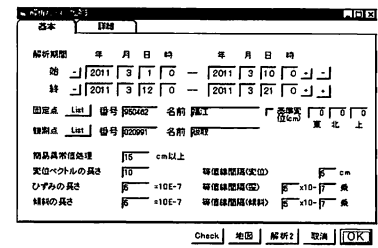


図5 解析パラメータ

iii. 解析結果を図に示した。

(ア)個々の観測点における3.11地震前後の変位

定常時および地震時の水平変位を図化することで、それぞれを比較した。また、観測点の位置の違いによる座標の変化を比較した。本研究では4事例挙げ、各観測点を比較できるように変位のスケールを4cmとした。

(イ)2観測点間の基線長変化

指定した2観測点間の距離の変化を数事例挙げて、観測点の位置の違いによる距離の変化を比較した。本研究では6事例挙げ、これらを比較できるように変位のスケールは1cmで調整した。

(ウ)平面ひずみ

西日本の各地点でどの程度歪んだのか確認する。なお、この平面ひずみを作成するには、不均等に分布している観測点を格子化する必要があるので、次章でグリiddingについて説明する。また、グリiddingしたのちに作成した平面ひずみには2種類あるが、このひずみについても次々章で説明する。

4. グリidding

PAT-MEでは、各観測点の変位をもとに、一定間隔の格子点の変位を内挿計算している。この内挿計算の方法は、単純な一次式で内挿している。以下の添字の*i*は観測点、*j*は格子点、*k*=1, 2は東西方向および南北方向における変位を表す。

各観測点*P_i*の座標を(*X_i*, *Y_i*)とし、それぞれの観測点における変位成分を*V_{ik}*とする。

ある格子点*G_j*での変位成分*V_{jk}*を周囲の変位成分*V_{ik}*から一次式で内挿計算するには、変位成分の場*V_{ik}*がどちらの成分に対しても以下の一次式で表されることを仮定する。

$$V_{ik}(P) = aX_i + bY_i + c \quad - \text{①}$$

この式は、平面の方程式となっている。つまり、格子点での変位成分を決めるにはこの式の係数*a*、*b*、*c*を決定し、格子点の座標を①式に代入して計算すればよい。

観測点から、このような方程式の係数が決定する最も一般的な方法は最小自乗法である。次に示す偏差自乗和*S_{jk}*が最小になるように*a*、*b*、*c*を決定する。

$$S_{jk} = \sum_i \alpha_{ij} \{V_{ik} - (aX_i + bY_i + c)\}^2 \quad - \text{②}$$

α_{ij} は各格子点毎に与える重み係数であり、 α_{ij} には格子点*G_j*と各観測点との距離の逆数が与えられる。したがって、格子点により近い観測点の方により大きな重みがかかることになる。

このソフト上での最小自乗計算は一定範囲内の観測点に対して行い、係数*a*、*b*、*c*を決定しているが、格子点に対して観測点が偏在しないことが前提になる。そのため、格子点から見た方位を0~90度、90~180度、180~270度、270~360度に分けて、それぞれに1点以上の観測点がある場合にのみ計算を行っている

5. 平面主ひずみ・平面剪断ひずみ

PAT-MEでは、地殻変動の様子を観察する方法として平面ひずみを採用している。平面ひずみとは、厚さ方向の変形が生じない状態のことであり、本研究では、平面主ひずみおよび平面剪断ひずみの2種類を作成する。以下にそれぞれのひずみについて説明する。なお、*u*、*v*はそれぞれ*x*軸、*y*軸方向の微小変位成分を表す。

i. 平面主ひずみ

図6のように、*x*と(*x*+ Δx)が近くに位置しているとき、位置*x*が*x*軸方向に*u*だけ変位すると、(*x*+ Δx)は(*u*+ Δu)だけ変位することになる。それぞれの位置の間隔も、変位前が Δx であったが、変位後は(Δx + Δu)に変化する。 Δu とは($\partial u / \partial x$) Δx のことである。式で記すと以下のようなになる。

$$\epsilon_x = \frac{\text{change in separation}}{\text{original separation}} = \frac{(\Delta x + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x) - \Delta x}{\Delta x} = \frac{\partial u}{\partial x}$$

同様に、 $\epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}$ となる。

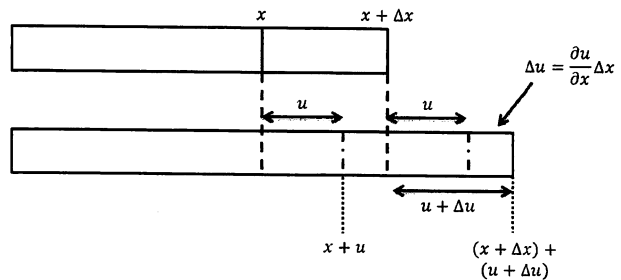


図6 ϵ_x の平面主ひずみの説明図

ii. 平面剪断ひずみ

一辺の長さが*a*である正方形を考える。底辺が固定されているとして、横向きに応力が加わると、平行四辺形に変形する(図7)。変形前と変形後での角度の差 ϕ を剪断ひずみの値としている。式で表すと以下のようなになる。なお、PAT-MEで作成される平面剪断ひずみの分布図では○印で表示されるが、その大きさが平面剪断ひずみの大きさと対応している。

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$$

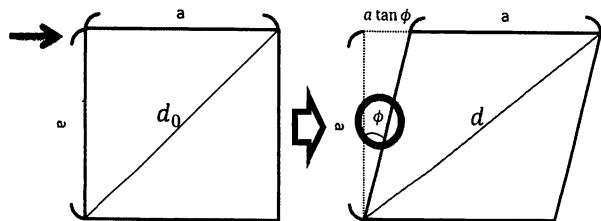


図7 平面剪断ひずみの説明図

6. 結果・考察

(ア) 個々の観測点における3.11地震前後の変位

3.11地震前と3.11地震時の地殻変動の比較を行い、それぞれ図8、図9に示した。地震前の期間としては、2010年3月12日から2011年3月10日を選び、以下では「定常時」とよぶことにする。一方、3.11地震時の期間としては、2011年3月1日から2011年3月21日を選び、以下では「地震時」とよぶことにする。図8、図9に長崎県の五島列島の「福江」を固定点とする定常時と地震時の地殻変動の変位分布を示す。「福江」を固定点にした理由は、震源である三陸沖から遠くに位置し、3.11地震の影響がより小さな観測点であるためである。

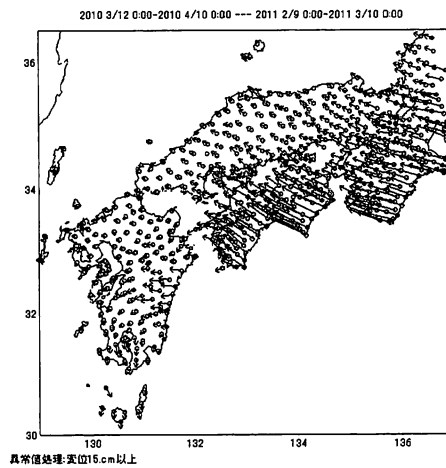


図8 3.11地震前1年間の地殻変動

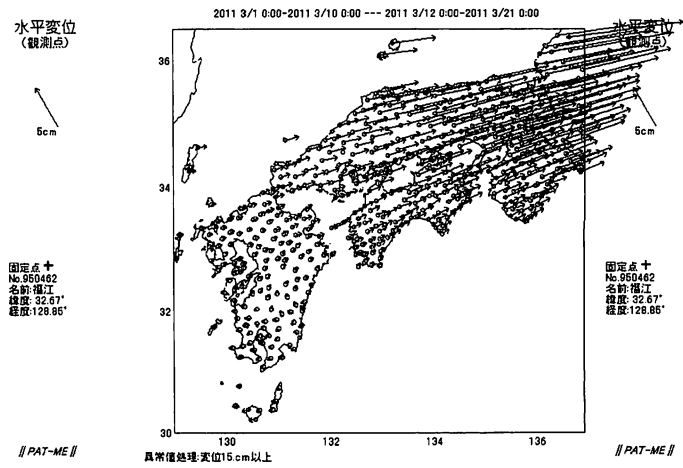


図9 3.11地震時の地殻変動

図8と図9を比較すると、定常時と地震時では、各観測点の水平変位が大きく異なっていることがわかる。図8は北西方向の変位を示す観測点が目立つのに対して、図9では震源の方向である東北東方向への変位を示す観測点が目立つ。つまり、3.11地震の影響が西日本にも及ぼされていることが示唆される。

そこで、個々の観測点の経度および緯度の日々の座標値を用いて、3.11地震時の解析期間である2011年3月1日から2011年3月21日の座標変化を整理した。本研究では、図10に示す、震源の方向にほぼ一直線上に並んでいる4観測点を選定した。ここでは震源域からの距離の違いによる座標変化の比較を目的としたため、観測点間の距離は同程度とまではいかないが、震源の方向にほぼ一直線上に並んでいることを優先し選定した。

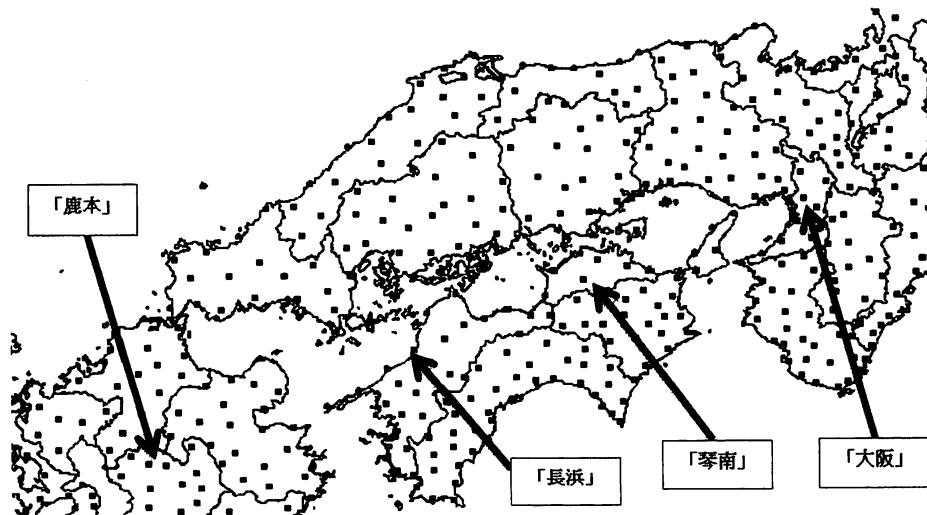


図10 個々の観測点の座標変化を確認するために選定した4観測点

図11は上から(a)「大阪」、(b)「琴南」、(c)「長浜」、(d)「鹿本」の経度変化を示す。また、図12は上から(a')「大阪」、(b')「琴南」、(c')「長浜」、(d')「鹿本」の緯度変化を示す。期間は2011年3月1日から

2011年3月21日である。変位のスケールは各観測点とも4cmで揃えている。

ここで注意すべきは、図にプロットした値は、24時間分の観測点データを基線解析した結果を示していることである。つまり、地震が起こった日の観測点データは、地震前のデータと地震後のデータを比例配分して、その日の正午のデータとして与えられている。そのため、地震の影響は部分的に反映されたものになる。3月11日の値はどの観測点についても不連続を示してはいるが、その日の地殻変動を正確に反映していない。したがって、3月11日のデータは以後の解析では扱わないことにした。それ以外の座標値は、大きな地殻変動の原因となる地震が起きていないので、信頼できるデータとして、解析に用いた。

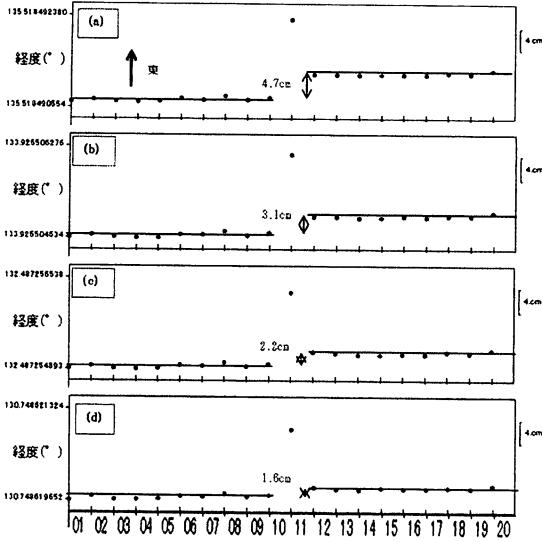


図11 大阪(a)、琴南(b)、長浜(c)、鹿本(d)の経度変化

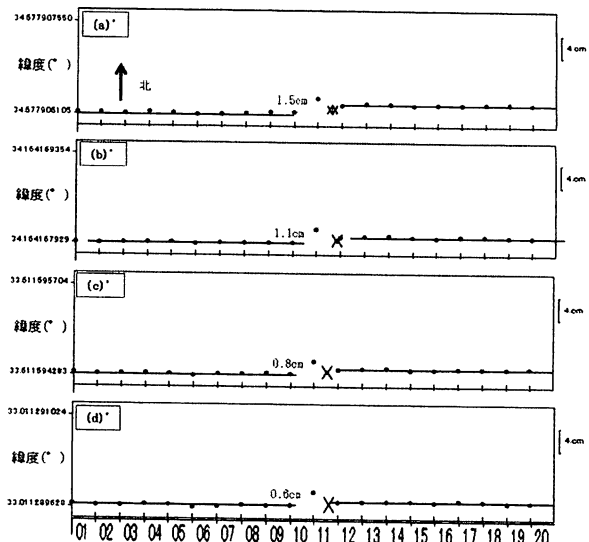


図12 大阪(a')、琴南(b')、長浜(c')、鹿本(d')の緯度変化

図11の各観測点の経度変化を見ると、はっきりと観測点の位置が東へ移動したことがわかるが、緯度変化(図12)では、各観測点とも変化は微小であった。図11の(a)から(d)、図12の(a')から(d')をそれぞれ比較すると、ともに「大阪」→「琴南」→「長浜」→「鹿本」の順に変化が小さくなっているのがわかる。それをより明確に示したのが下の図13である。

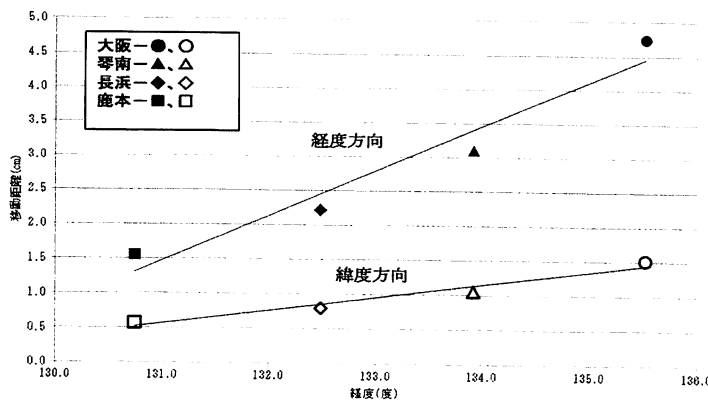


図13 経度方向および緯度方向の移動距離

図13は、横軸を経度にして、経度方向および緯度方向の移動距離を示す。各観測点とも、経度が小さくなると、経度方向および緯度方向の移動距離が小さいことがわかる。また、各観測点とも、経度方向の移動の方が大きい。

(イ)2観測点間の基線長変化

3.11地震の地殻変動をより詳しく見るために、2観測点間の基線長の変化を調べた。図15に解析した6基線の位置を示した。なお、基線長の向きは震源の方向である北東方向に、それぞれの基線長はおよそ100kmと、すべての基線長でほぼ等しくとっている。

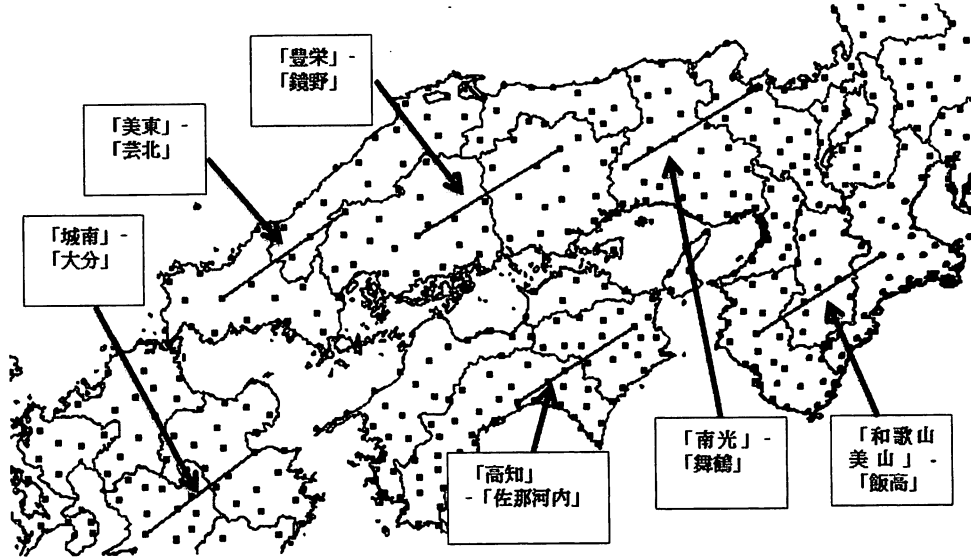


図14 2観測点間の基線長変化を確認するために選定した6基線

次の図15は図14に示した北側3基線の基線長変化で、上から「南光」-「舞鶴」、「豊栄」-「鏡野」、「美東」-「芸北」を表し、図16は図14の南側3基線の基線長変化で、上から「和歌山美山」-「飯高」、「高知」-「佐那河内」、「城南」-「大分」を表している。期間は、2011年3月1日から2011年3月21日である。スケールは1.0cmで揃えている。ここでも3.11地震当日の座標値は、検討の対象とはしていない。

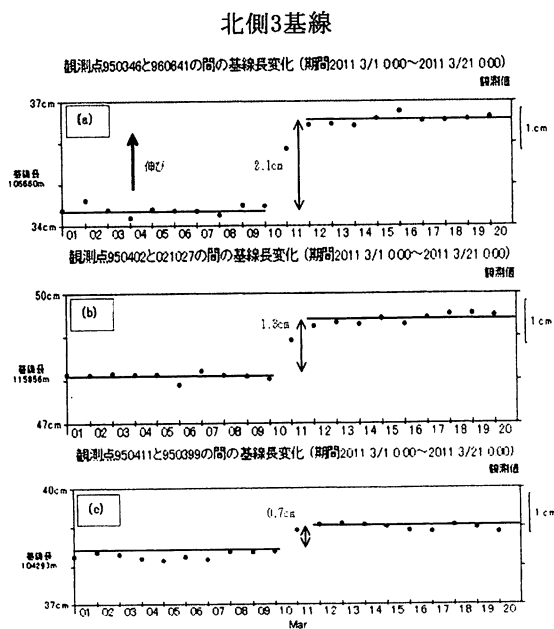


図15 「南光」-「舞鶴」(a)、「豊栄」-「鏡野」(b)、「美東」-「芸北」(c)の基線長変化

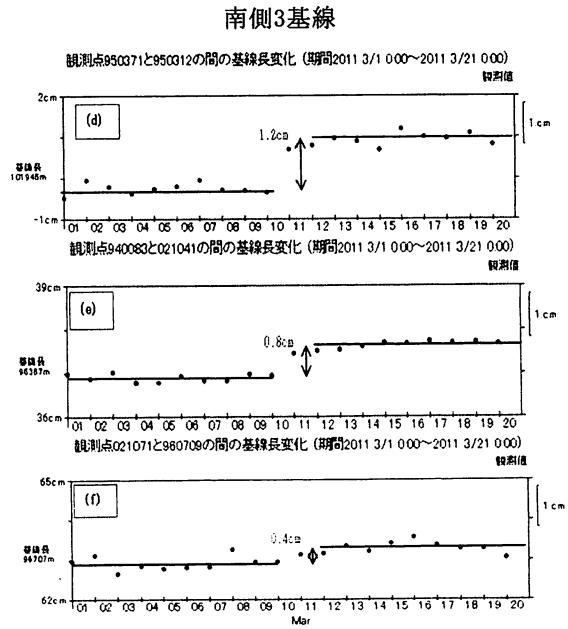


図16 「和歌山美山」-「飯高」(d)、「高知」-「那佐河内」(e)、「城南」-「大分」(f)の基線長変化

図15と図16から、図14の北側3基線および南側3基線はともに、西側の基線長ほど変化が小さくなっている。図17は、図15および図16の基線長変化をまとめて示す。北側3基線および南側3基線はともに、西側にある基線ほど基線長変化量が小さい。さらに北側3基線の方が南側3基線に比べて基線長変化量が大きい。これは北側の基線長の方が、3.11地震の影響を強く受けたことを意味する。北側の基線長の方が強く影響を受けたことは、図9の地震時の水平変位でも確認できる。北側(近畿地方上および中部・中国地方)の方が南側(近畿地方下部・四国地方・九州地方)よりも水平変位が小さいことがわかる。

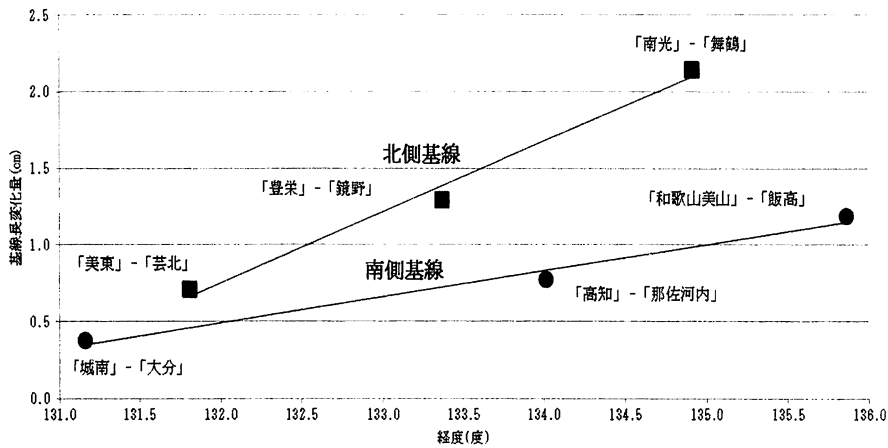


図17 6事例の基線長変化

(ウ) 平面ひずみ

以上の解析は個々の観測点を任意に選んで行ったが、以下では西日本のすべての変位を解析する。その最も有効な方法は、平面ひずみの分布を解析することである。

図18に平面主ひずみの分布を示す。すべての地点で北東-南西方向に伸び、北西-南東方向に縮んでいる。また、平面剪断ひずみ(図19)では、北東方向にひずみが大きくなる。これらの図より、震源域に近づくにつれて平面ひずみが大きくなる。つまり、3.11地震の影響が西日本全域にまで及んでいたことが明らかになった。

注目されるのは、図18および図19で、近畿地方東部を境にして変動が大きく変化したことである。そのおおよその位置を破線で示した。この境界の位置は、岡山(1956)が提唱した「敦賀湾-伊勢湾線」(図20)と一致していることから、この構造線がひずみの変位に何らかの影響を示したと示唆される。

図20は、敦賀湾-伊勢湾線(以下TITLと略記)の位置と、その両側にある高度不連続線を示す。高度不連続線とは、山地における高度の変化の程度が大きな箇所のことであり、断層崖や撓曲崖などの下端に相当する。この高度不連続線は、TITLを境にして走向を異にし、地質構造上、中日本と西日本を分ける境界にあたりと述べている。

岡山(1956)がTITLについて議論したのち、Kanaori et al.(1992)は、TITLの存在は、重力異常のリニアメントによっても確認できると指摘した。また、駒沢 他(1999)は、重力測定により日本列島をSE-NWに切る幾つかの低重力異常が何本を検出し、なかでもTITLは基盤の落差が数kmに達していると指摘した。つまり、TITLは地殻の深部にまで達する構造線であるといえる。

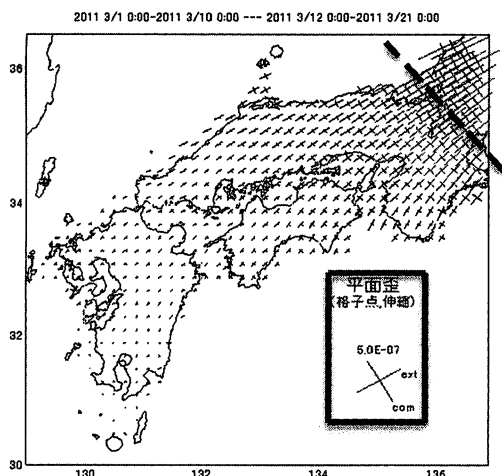


図18 西日本における平面主ひずみ

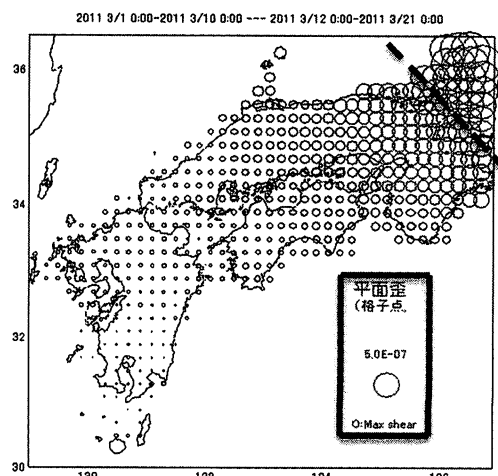


図19 西日本における平面剪断ひずみ

したがって、近畿地方東部を境にして平面ひずみの大きさが変化した原因は、TITLが深部にまで達しており、震源の方向と直交する方向に位置していることに因る。

さらに構造線との関連で、平面主ひずみの伸びを示す主軸の向きが、震源の方向と調和的であるが、地点によって異なる場合もある。琵琶湖付近の伸びの主軸の向きを基準にすると、中国地方ではほぼ同じ傾きを示すが、紀伊地域・四国地方・九州地方の向きはわずかに大きな傾きを示す。この違いを示す原因として、中央構造線(以下TMLと略記)が考えられる。主軸の向きが異なる点とTMLの関係性については、今後の検討すべき課題である。

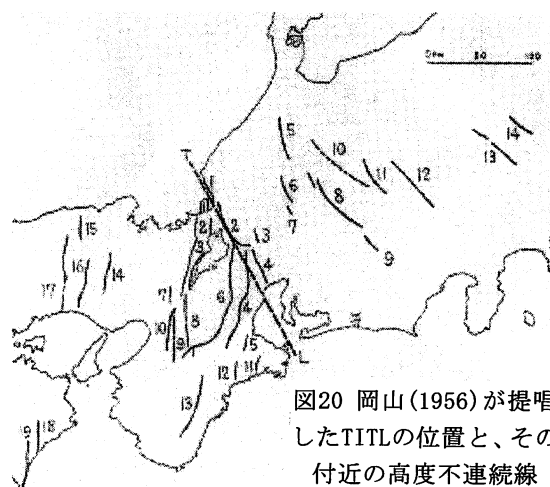


図20 岡山(1956)が提唱したTITLの位置と、その付近の高度不連続線

7. まとめ

本研究で、国土地理院の電子基準点の日々の座標値(F3解)を用いて、個々の観測点の水平変位、2観測点間の基線長変化、平面ひずみの分布を解析し以下の結果を得た。

- ・定常時と地震時の西日本全域の地殻変動の様子は大きく異なる。
- ・地震時の、各観測点の座標変化および各地点の平面ひずみは震源に近づくにつれて大きくなる。

これらから、3.11地震の影響が西日本にも及んでいたことが明らかになった。

さらに注目する点は、平面ひずみの分布図において、近畿地方東部に大きな段差が生じていることである。これは震源の方向に直交に位置し、かつ深部にまで達する構造線であるTITLの影響を受けたと考えられる。

また、平面ひずみの伸びの主軸の向きが、近畿地方上部および中部・中国地方と、近畿地方下部・四国地方・九州地方で異なることにも気づく。これには、それら地域の間位置している構造線であるTMLが絡んでいる可能性がある。

8. 謝辞

本研究で用いたソフトPAT-MEを提供していただいた気象庁地震津波監視課津波予測モデル開発推進官中村浩二氏に深く感謝します。

9. 引用文献

- 阿部 武治・清水 茂俊・山田 勝稔 (1991), 『弾性力学』, 現代機械工学シリーズ4, pp.9-30.
- Kanaori, Y., S. Kawakami and Y. Yairi (1992), Space-time correlations between inland earthquakes in central Japan and great offshore earthquakes along the Nankai trough: Implication for destructive earthquake prediction, *Engineering Geology*, 33, pp.289-303.
- Kanaori, Y., S. Kawakami and Y. Yairi (1992), THE BLOCK STRUCTURE AND QUATERNARY STRIKE-SLIP BLOCK ROTATION OF JAPAN, *tectonics*, vol. 11, no. 1, pp.47-56.
- 駒澤 正夫・広島 俊男・石原 丈実・村田 泰章・山崎 俊嗣・上嶋 正人・牧野 雅彦・森尻 理恵・志知 龍一・岸本 清行・木川 栄一 (1999), 『地球内部を概観する-100万分の1日本重力図』, 地質ニュース, 544号, pp.11-16.
- Loerie, W. (2007), *Fundamentals of Geophysics*, Cambridge University Press, pp.84-91.
- Murai, S., H. Araki (2012), Crustal movement before and after the Great East Japan Earthquake, *Coordinates*, Vol. III, Issue 5, pp.8-12.
- 中村 浩二 (1999), 『GPSデータ簡易表示プログラム(SEIS-PC)の開発』, 情報地質, 第10巻, 第4号, pp.257-266.
- 岡山 俊雄 (1956), 『柳ガ瀬断層と敦賀湾伊勢湾線』, 駿台史学, 7, pp.75-101.

Coseismic crustal movement in west Japan caused by the 2011 off Pacific coast of Tohoku Earthquake

Natsuki SAWA, Takeharu SATO* and Keiichi NISHIMURA**

Graduate School of Informatics, Okayama University of Science

**Department of Biosphere-Geosphere Science, Faculty of Biosphere-Geosphere Science, Okayama University of Science*

***Department of Biosphere-Geosphere System Science, Faculty of Informatics, Okayama University of Science*

Okayama University of Science,

1-1 Ridai-cho, Kita-ku, Okayama 700-0005, Japan

(Received September 26, 2014; accepted November 6, 2014)

Although significant coseismic crustal deformation over a wide area and central Japan, Associated with the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, has been well studied by many researchers, no attention has yet been paid to that in west Japan, from the Kinki district to the Kyushu island. In this study, we examined the characteristic features of the crustal movement in west Japan by analyzing the daily coordinate values of GNSS-based control stations (F3) provided by the Geo-spatial Information Authority of Japan (GSI).

As result, it has been clarified that the 2011 Earthquake induces an effect on the crustal deformation in western Japan from the analyses of four datasets of horizontal change at GPS stations and six datasets of base length among paired GPS stations in western Japan. Longitudinal and shear strains in movement plains in western Japan indicate one discontinuous step at eastern Kinki district. it is considered that the cause is "Tsurugawan-Isewan tectonic line (TITL)", proposed by Okayama (1956), because this step is along TITL.

Keywords: the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake; crustal movement; GPS stations; PAT-ME; Tsurugawan-Isewan tectonic line (TITL).