

関東地震は‘characteristic earthquake’か？

吉田明夫*・原田昌武*・小田原 啓*・宮岡一樹*・小林昭夫*²・野口伸一*³

Is the 1923 Kanto earthquake a ‘characteristic earthquake’?

by

Akio YOSHIDA*, Masatake HARADA*, Kei ODAWARA*, Kazuki MIYAOKA*, Akio KOBAYASHI*² and Shin'ichi NOGUCHI*³

Abstract

Fault model of the 1923 Kanto earthquake was first presented by Kanamori (1971) and Ando (1971) based on seismic wave data and geodetic data, respectively. Then, it was refined by Matsu'ura et al. (1980), Matsu'ura and Iwasaki (1983), Wald and Somerville (1995), Kobayashi and Koketsu (2005) and Nyst et al. (2006) using both geodetic and seismic data. The model, we call it hereafter “the standard model”, explains seismic waves as well as horizontal and vertical displacements observed at the Kanto earthquake very well. However, as we show here, it is not concordant with topography of seabed and configuration of the Philippine Sea slab. Crustal deformation in recent years in southern Kanto revealed by the GNSS, which is supposed to be caused by the subduction of the Philippine Sea plate, differs apparently from the displacements at the Kanto earthquake. Fault slip direction in the standard model does not accord with the direction of the convergence of the Philippine Sea plate against the North-American plate. Based on these observations we propose an idea that the 1923 Kanto earthquake was not a characteristic or typical interplate earthquake between the Philippine Sea and the North-American plates. The fact that the aftershock activity of the Kanto earthquake was exceptionally high among great earthquakes around the Japanese Islands also suggests that the fault motion was an irregular one. We think there is a possibility that other types of fault motion different from that of the 1923 Kanto earthquake may occur in the future or might have occurred in the past.

1. はじめに

駿河・南海トラフ沿いでは、震源域が隣り合う東海、東南海、南海のプレート境界地震が、個別にあるいは連動して発生する可能性があるとして、その確率予測や被害想定が行われている（地震調査委員会, 2001）。同様に、相模トラフ沿いでは相模湾直下を震源とする 1923 年関東地震型と、その震源域に加え、更に南側の房総半島沖まで破壊が及ぶとする 1703 年元禄地震型の二つのタイプのプレート境界地震が発生すると想定されている（例えば、地震調査委員会, 2004）。この大正地震型と元禄地震型は、関東下へのフィリピン海プレートの沈み込みに関連して発生する、二つの特徴的なタイプの地震（characteristic earthquake）とみなされ、三浦半島や房総半島の海岸に見られる段丘は、これらの地震の繰り返した跡を示すという考え方に立って、相模トラフ沿いのプレート境界地震の繰り返し周期が議論されている（例え

ば、穴倉ほか, 2001）。

しかし、南海トラフ沿いの過去のプレート境界地震を見ても、決して、東海、東南海、南海の各特徴的な地震が繰り返して起きてきたわけではない（例えば、瀬野, 2012）。昨年 3 月 11 日のマグニチュード 9 の東北地方太平洋沖地震の発生は、プレート境界における、いわゆる ‘characteristic earthquake’ についての思い込みに反省を迫るものでもあった（松澤, 2011）。こうしたことを鑑みるなら、南海トラフ周辺と比べて格段に複雑な海底地形を有する相模トラフ沿いにおいて、大正型と元禄型が起こりうる唯二つのタイプのプレート境界地震とは考えにくい。むしろそれらとは別な破壊様式を持つ地震が今後発生する、あるいは過去発生してきた可能性が多分に有るのではなかろうか。

初めに、第 2 節で、1923 年関東地震の震源モデルと、相模トラフから沈み込むと考えられているフィリピン海

* 神奈川県温泉地学研究所 〒250-0031 神奈川県小田原市入生田 586

*² 気象研究所 〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1

*³ 独立行政法人防災科学技術研究所 茨城県つくば市天王台 3-1

論文, 神奈川県温泉地学研究所報告, 第 44 巻, 1-7, 2012

プレートの形状並びにトラフ周辺の海底地形との非整合性を指摘する。次いで第3、4節では、関東地震で解放された地殻歪みと GNSS で観測されている最近の地殻変動との差異、関東地震の余震活動が日本列島周辺における他のプレート境界巨大地震と比べ突出して活発だったことを示す。そして、こうした事実を基に、第5節で、大正関東地震は、フィリピン海プレートと北米プレートとの間のプレート間カップリングを素直に反映した地震ではなかったのではないか、言うならば、あらかじめ準備されていた歪みをそのまま解消したというより、むしろその時その場の成り行きでたまたまそのように破壊が進行してしまったものではないかという考えを提出する。

2. 関東地震の断層モデルとプレート形状

1923 年関東地震の断層運動に関して、地震波形データと測地学的データをそれぞれ用いて定量的な解析がなされたのは、地震発生後 50 年近く経過してからであった (Kanamori, 1971; Ando, 1971)。これらの研究によって、断層面の走向や傾斜、その拵がりと平均的なすべりに関する、初めて明確な描像が提示された。その後、地震波形データと測地学的データを合わせて用い、更に断層面上のそれぞれの区域におけるすべり量やすべり方向の違いまで考慮に入れたより精緻な解析が幾度か試みられている (Matsu'ura et al., 1980; Matsu'ura and Iwasaki, 1983; Wald and Somerville, 1995; Kobayashi and Koketsu, 2005; Nyst et al., 2006)。それらのモデルによれば、破壊は神奈川県西部の深さ約 15km のところで始まり、東南東方向に拵がっていった。断層下部ではすべり方向は横すべり的であったが、断層上端に近いところでは傾斜方向に沿う逆断層的なすべりが生じた。そして強震動をもたらしたアスぺリティは断層西部の震源周辺と三浦半島直下付近にあった (例えば、Wald and Somerville, 1995; Kobayashi and Koketsu, 2005)。大きなすべりを生じた領域が西と東にあって、それらですべり方向が異なっていたということは他のモデルでも共通している。そのことを考慮して、断層面を二つに分割したモデルも提出されているが (Matsu'ura et al., 1980; Nyst et al., 2006) 全体として震源断層が西北西 — 東南東走向の北北東方向に傾斜した面で、破壊は神奈川県西部から房総半島東岸まで、ほぼ長さ 130km、幅 70km の領域に及んだとするのは、Kanamori (1971) 以来、引き継がれている。こうしたモデルによって、三角測量や水準測量データから求められた関東地震時の地殻水平変動や上下変動は良く説明される。ここでは、断層面上のすべり分布を含めて Wald and Somerville (1995) や Kobayashi and Koketsu (2005) によ

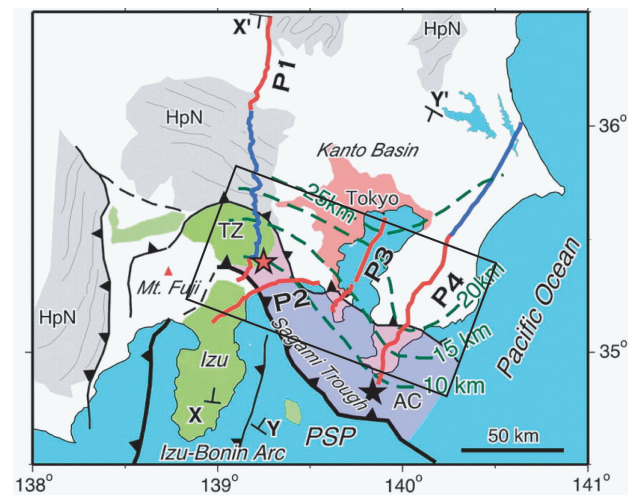


図1 関東地震の標準震源断層モデル (Wald and Somerville, 1995; Kobayashi and Koketsu, 2005) と首都圏直下のフィリピン海プレートの上面形状モデル (Sato et al., 2005)。

Fig.1 Standard fault model of the 1923 Kanto earthquake (Wald and Somerville, 1995; Kobayashi and Koketsu, 2005) and configuration of the upper surface of the Philippine Sea plate (Sato et al., 2005) .

って与えられた断層モデルを、関東地震の標準震源断層モデル、略して標準モデルと呼ぶことにする。

図1は標準モデルの断層の位置を、深部地震探査から推定された首都圏直下のフィリピン海プレートの上面の形状モデル (Sato et al., 2005) に重ねて示したものである。他の、地震波の反射や震源分布、速度構造等から推定された上面形状も、研究者によって等深線の位置にいくらか違いがあるものの、パターンは変わらない (例えば、Nakajima et al., 2009)。それらのモデルは総じて、等深線が相模湾下ではほぼトラフに平行、東京都直下で東西に近くなる。しかし、この形状モデルは、関東地震の標準モデルとは整合的でない。標準モデルの走向は、トラフ軸や等深線の方角と一致せず、それと明らかに斜交している。標準モデルの上端の深さは 2km で房総半島南端をかすめているが、形状モデルでは房総南端で 10km の深さになる。また、形状モデルではトラフ軸が沈み込み口にあたるとされているのに対して、標準モデルでは、相模湾北西端部において、トラフよりも南側から沈み込んでいるようになっている。Ando (1971) のモデルでは、断層走向がトラフ軸に平行にとられているが、Matsu'ura et al. (1980) は、そのような走向の断層モデルでは、地殻変動の観測データを説明することが難

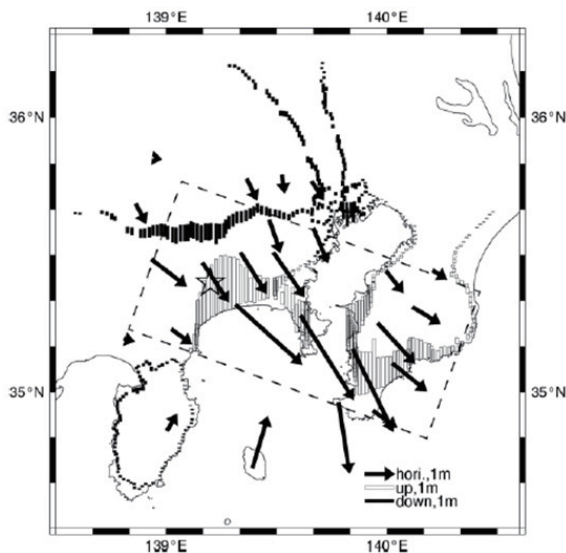


図2 関東地震の際に観測された水平変位と上下変動 (Kobayashi and Koketsu, 2005)

Fig.2 Horizontal and vertical displacements observed at the 1923 Kanto earthquake. After Kobayashi and Koketsu (2005) .

しいことを示した。いずれにしても、トラフ軸のほぼ陸上延長にあたる国府津—松田断層で変位は認められず、その西側の小田原や真鶴、湯河原で地盤の隆起が観測されたので、トラフ軸を断層上端とするモデルは関東地震の地殻変動と矛盾する（例えば、石橋, 1980）。

しかし、標準モデルで問題なのは、断層の西端が伊豆衝突帯を超えて富士山の火山体直下付近まで延びていることである。これに関して、Noguchi et al. (2012) は、関東地震の断層の西端は真鶴付近から東丹沢に続く地震活動の高いゾーンの西縁にあたるほぼ南北方向の線で限られるとするモデルで、関東地震時の地殻変動に加えて最近の地殻変動も説明できることを示している。

なお、関東地震の際に変位が観測された三浦半島の下浦断層、房総半島の延命寺断層の走向も、標準モデルの走向及び後述する相模湾の隆起域と沈降域を分ける境界線とほぼ平行になっていることを付記しておく。

3. 関東地震の断層モデルと地殻変動

図2は1923年関東地震によって引き起こされた水平変位、また図3はGNSS観測による2009年—2010年の期間の水平変位速度である。両者を比べると、関東地震の際の変位の方向は、最近の地殻変動の動きを、そのまま逆転させたものとはなっていないことが見てとれる。例えば、断層西部と東部の変位ベクトルを比べると、関東地震のときに観測された、断層東部の変位に対する西

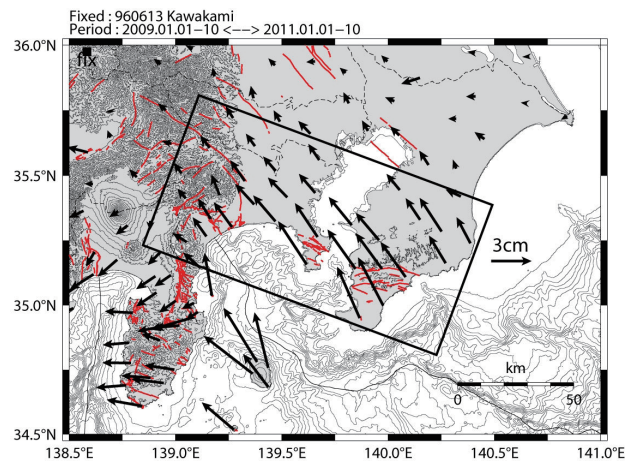


図3 GNSS観測による2009年–2010年の期間の水平変位速度。基準は図の左上隅の長野県川上。

Fig.3 Horizontal velocity in the period 2009–2010 observed by the GNSS. Kawakami on the upper left end in the map is taken as the fixed point.

部における変位は、最近の変動場での同相対比に比べて大きいことが見てとれるほか、断層上端付近の変位、特に三浦半島や房総半島南端での変位は、GNSS観測の結果に比べて明らかに南に振れた方位になっている。

図4はWald and Somerville (1995) によって求められた断層面上でのスリップの分布で、大きくすべったところが断層の西部と三浦半島直下付近にあることがわかる。Kobayashi and Koketsu (2005) など、他のモデルでも大局的にはこの特徴は同じである。ここで注目されるのは、三浦半島直下の、断層面の浅いところでのスリップの向きが、ほぼ断層の走向に垂直で純粋な逆断層のような動きになっていることである。これと、同図に示した、プレートの相対運動の方向とを比べると、両者の間には明らかに違いが見られる。標準モデルの走向がトラフ形状やプレートの形状と合わないことと合わせると、関東地震は本当に相模湾下においてプレート間カップリングが生じているその境界面に沿って発生したのかという疑問が生じる。これに関しては考察のところでもう一度触れる。

関東地震前後での相模湾海底における地殻変動が水路部によって調査されている（水路部, 1924）。その結果を見ると（図5）、隆起域と沈降域を分ける境界線は、館山と真鶴を結ぶ線にあたっていて、標準モデルの断層の走向と平行かつその上端にほぼ一致しており、海底の地殻変動は標準モデルと整合的であると言える。図6に、Matsu'ura et al. (1980) によるモデルを参考に、断層

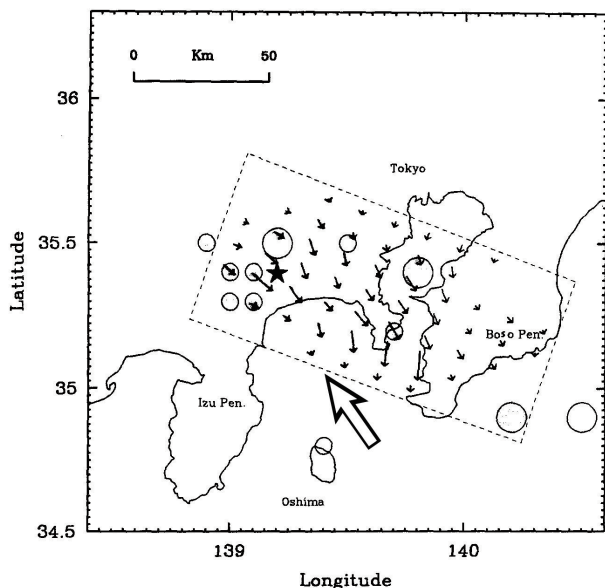


図4 標準モデルにおける断層面上でのスリップベクトル。白抜きの太い矢印は北米プレートに対するフィリピン海プレートの相対運動の方向 (Seno *et al.*, 1993) を示す。

Fig.4 Slip vectors on the fault plane in the standard model (Wald and Somerville, 1995). A white big arrow indicates direction of the relative motion between the North-American and the Philippine Sea plates (Seno *et al.*, 1993).

上端の深さを 0km として、Okada (1992) の式を用いて計算した上下変動図を示す。上昇域と下降域の空間分布は、ほぼ水路部の調査結果と一致していることが見てとれる。

水路部 (1924) の調査結果が、プレート境界地震の地殻変動についての常識と違えるのは、その上下変動量の大きさである。隆起の大きいところでは数 10m 以上になっているところがあるほか、館山と真鶴を結ぶ線の南側では、同じく数 10m 以上に及ぶ沈降が記録されている。このような大きな変動が本当に生じたのかについては、調査結果が発表された当初から、様々な議論があったようである。寺田 (1924) は、いくつかの誤差要因について検討したうえで、誤差でなく実際に生じたとしたら、どのような説明が可能かについて、種々、考察している。その考察は、当時、まだ、提案されたばかりのウェーゲナーの大陸移動説も取り入れてたいへん示唆に富むものであるが、それについては本研究報告の中で別に詳しく紹介されているので (吉田ほか, 2012)、ここでは触れない。

相模湾底における隆起域と沈降域を分ける境界線が、標準モデルの上端と一致しているということに何らかの意味を認めたとき、一つ注目したいのは、南側海域での海底の沈降は本当に生じたのかということである。プレート境界でのカップリングに起因する巨大地震では、地震時に動くのは、海洋プレートの沈み込みによって引きずり込まれていた上盤側の陸塊であり、下盤の海洋プレートが地震発生に伴って動くことはないとは一般には考えられている。しかし、もし、沈降を示す測深結果が事実とすれば、地震と同時であったかどうかは別として、少なくとも地震を挟む、大正年間の二回の測定の間、海洋プレートの沈み込みが進行したことを示している。いまとなつては、確認しようはないが、たいへん興味をそそられる。伊豆大島の三角点が、関東地震前後の二回の測定の間、1.8m 北向きに動いていたことも (Matsu'ura *et al.*, 1980)、もしかしてこの海洋プレートの沈み込みの動きと関連していたかもしれない。ただし、Kobayashi and Koketsu (2005) は伊豆大島におけるこの変位は同島の噴火の影響によるものと推定している。

4. 例外的に高かった余震活動

1923 年関東地震の余震活動は、20 世紀以後に日本列島周辺で発生したプレート境界巨大地震のそれと比べて顕著に高かった (武村, 1994; 宮岡・吉田, 投稿中)。マグニチュード 7.7 以上の巨大地震について、直後 1 年間に発生したマグニチュード 6 以上の余震数を比べると、96 個を数える 2011 年東北地方太平洋沖地震は別格として、31 個の関東地震は突出している (図 7)。著者らはこの事実も、関東地震の断層運動が、プレート間カップリングを素直に解消するような形で進行したのではなく、いわば、無理な壊れ方をしたことを示しているのではないかと考える。

なお、関東地震の余震活動については、濱田ほか (2001) によって詳しく調査された。その結果を参照して、Kobayashi and Koketsu (2005) は、余震活動が震源域の東側に比べて西側に多かったことを指摘し、それは、西側のアスペリティが、より破壊応力の高い、より脆性的な壊れ方をしたことと関係しているのではないかと推論している。

5. 考察とまとめ

Kanamori (1971) は地震波初動によるメカニズム解の一つの節面を採用して 1923 年関東地震の断層モデルを求めた。そのとき、地質学的、地形学的、あるいはテクニクス上の知見は、まったく考慮に入れられていない。

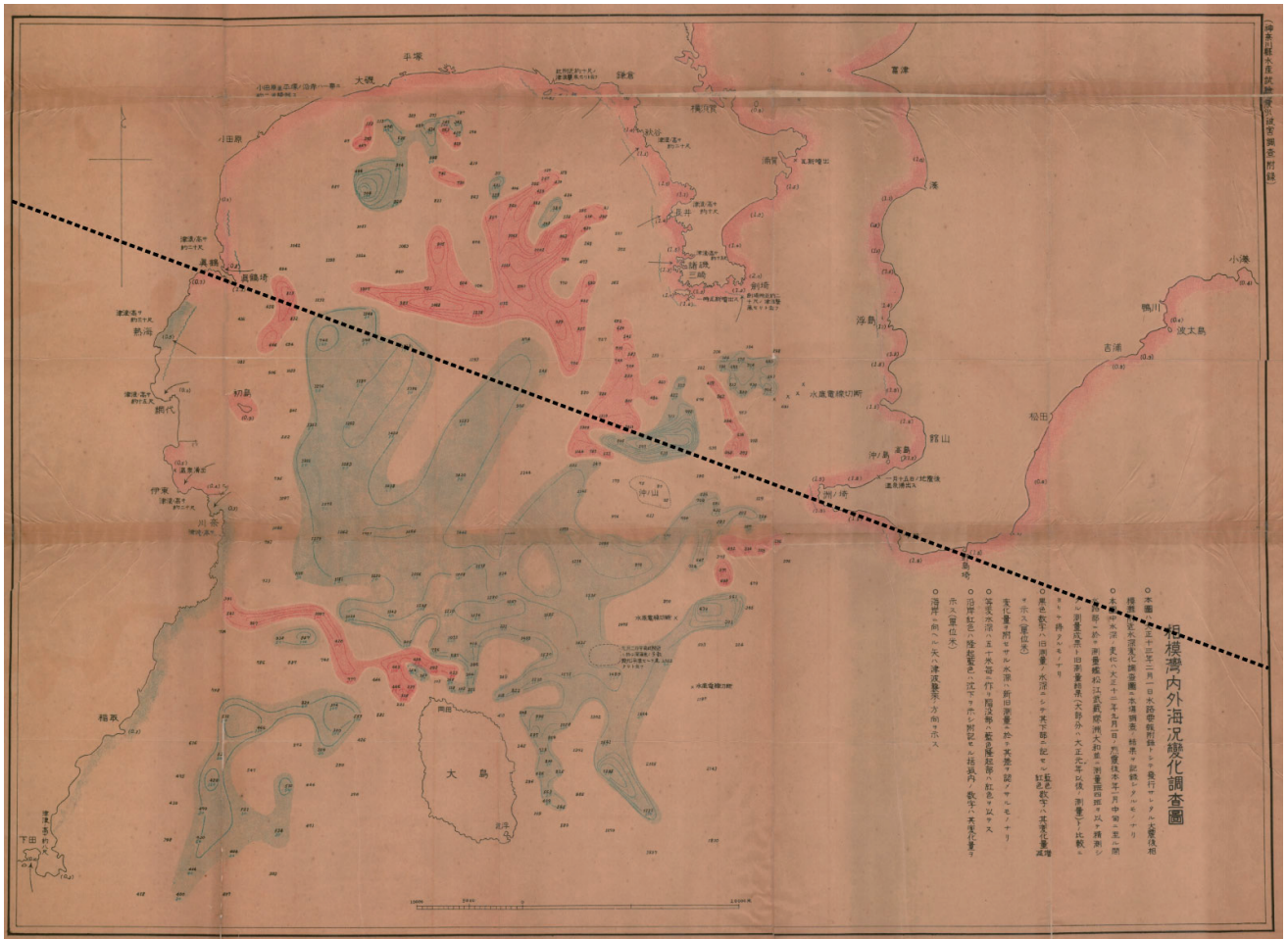


図5 関東地震前後での相模湾の水深変化（水路部，1924）。追記した太い破線は標準モデルの断層上端を示す。

Fig.5 Difference in the depth of sea water in Sagami Bay between the measurements carried out before and after the 1923 Kanto earthquake (The Hydrographic Department, 1924) . A thick broken line indicates the upper end of the fault plane in the standard model.

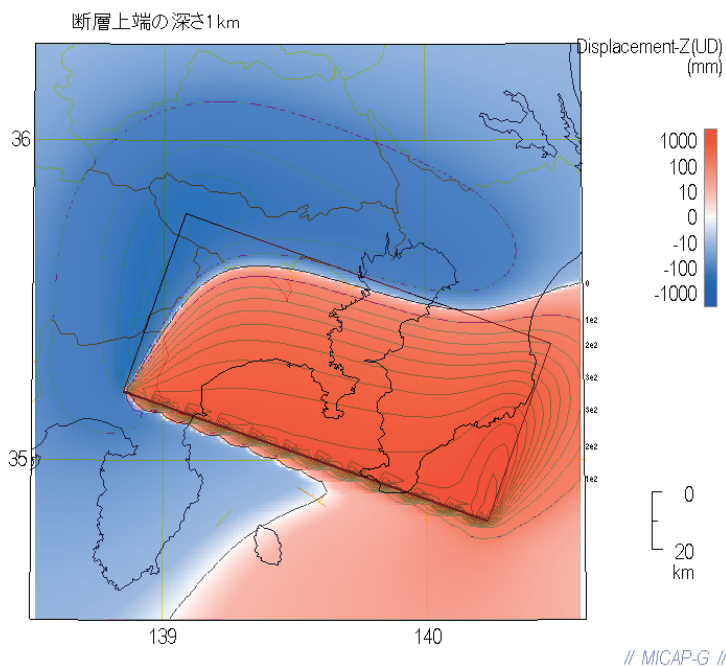


図6 Matsu'ura et al. (1980) による関東地震の断層モデルを基に、Okada (1992) の式を用いて計算した上下変動図。上昇域と下降域の空間分布は、ほぼ水路部の調査結果と一致している。

Fig.6 Vertical displacements calculated by Okada' s formula (Okada,1992) based on the fault model by Matsu'ura et al. (1980)

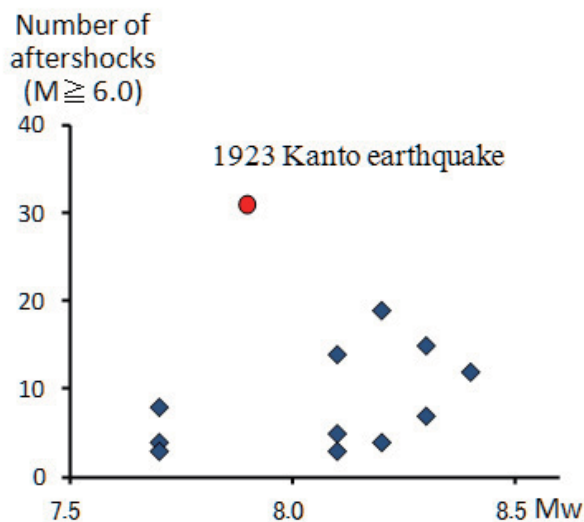


図7 20世紀に日本列島周辺で発生した巨大地震に伴ったマグニチュード6.0以上の、本震直後1年間の余震と本震のモーメント・マグニチュードの関係。関東地震の余震数が際立って多いことに注意。

Fig.7 Scatter plot between moment magnitude and number of aftershocks with magnitude 6.0 or larger within one year after main shocks for great earthquakes that occurred around the Japanese Islands in the 20th century. Note that the number of aftershocks of the 1923 Kanto earthquake was exceptionally large.

Kanamori (1971)を読むと、当時はそもそも、関東地震が相模湾より沈み込むフィリピン海プレート上面におけるプレート境界地震であるという概念も一般的ではなかったことがわかる。しかし、この、地震波データのみに基づいて求められた断層モデルは、陸域の三角測量データや水準測量データをも良く説明することがわかった。上述したように、水路部による関東地震前後での相模湾底の測深調査の結果や関東地震時に観測された湾岸での上下変動(吉田ほか, 2012)も、標準モデルとおおよそ合っている。その一方で、標準モデルは海底地形やプレートの形状とは整合しない。近年のGNSS観測が示すプレート間カップリングによって生じているとみられる地殻変動も、関東地震によって開放された歪とは一致していない。標準モデルにおけるスリップ量の分布や方向もまた、プレート相対運動のカップリングが単純に解消したとは解釈できないことを示すものである。

以上の事実から、われわれは、関東地震は相模湾から沈み込むフィリピン海プレートと北米プレートの間の典

型的なプレート境界地震ではなかったのではないかという考えを提出する。関東地震の余震活動が日本列島周辺で発生したプレート境界巨大地震の中で例外的に突出して高かったことも、無理な壊れ方をしたことを示しているものと考えられる。また、もし、標準モデルの地震が、これまで相模湾で何度も繰り返し起きてきたとすると、海底地形にもその地殻変動の累積した跡が見られていいはずなのに、それを示唆するような地形は認められない。

大正関東地震と元禄関東地震が相模トラフ沿いの唯二つの典型的なタイプのプレート間地震ではなく、それら以外の破壊様式を持つ地震が発生する、あるいは過去に発生してきた可能性があるとする、南関東巨大地震の繰返し周期や想定される震源像について再考する必要が生じる。ここでは、他にどのような破壊様式の地震が想定されるかについては言及しないが(吉田ほか, 2007; Noguchi et al., 2012を参照)、この問題を明らかにするには、海岸に残された累積地殻変動を、大正型、元禄型の二つの地震時の変動の組み合わせとして読み解くのではなく、過去における一つ一つの地震毎にどのような変動が生じたのかを個別に注意深く調べて、そのときの震源断層運動がどのようなものであったかを虚心に検討する必要があると思われる。

謝辞

最近の地殻変動の解析には国土地理院のGEONETデータを使用させていただきました。また、瀬野徹三氏からは多くの有益なコメントをいただきました。記して感謝します。

参考文献

- Ando, M. (1971) A fault-origin model of the great Kanto earthquake of 1923 as deduced from geodetic data, Bull. Earthquake Res. Inst., 49, 19-32.
- 濱田信生・吉川一光・西脇 誠・阿部正雄・草野富二雄 (2001) 1923年関東地震の余震活動の総合的調査, 地震 2, 54, 251-265.
- 石橋克彦 (1980) 伊豆半島をめぐる現在のテクトニクス, 月刊地球, 2, 110-119.
- 地震調査委員会 (2001) 南海トラフの地震の長期評価について.
- 地震調査委員会 (2004) 相模トラフ沿いの地震活動の長期評価について.
- Kanamori, H. (1971) Faulting of the great Kanto earthquake of 1923 as revealed by seismological data, Bull. Earthquake Res. Inst, 49, 13-18.

- Kobayashi R., and K. Koketsu (2005) Source process of the 1923 Kanto earthquake inferred from historical geodetic, teleseismic, and strong motion data, *Earth Planets Space*, 57, 261-270.
- Matsu'ura, M., T. Iwasaki, Y. Suzuki, R. Sato (1980) Statical and dynamical study on faulting mechanism of the 1923 Kanto earthquake, *J. Phys. Earth*, 28, 119-143.
- Matsu'ura, M. and T. Iwasaki (1983) Study on coseismic and postseismic crustal movements associated with the 1923 Kanto earthquake, *Tectonophysics*, 97, 201-215.
- 松澤 暢 (2011) 東北地方太平洋沖地震は何故想定できなかったのか, 日本地震学会 2011 年度秋季大会 特別シンポジウム「地震学の今を問う」, 2.
- 宮岡一樹・吉田明夫 (投稿中) 日本周辺の巨大地震に伴った大きな余震, 地震.
- Nakajima, J., F. Hirose, and A. Hasegawa (2009) Seismotectonics beneath the Tokyo metropolitan area: Effect of slab-slab contact and overlap on seismicity, *J. Geophys. Res.*, 114, B08309, doi:10.1029/2008JB006101.
- Noguchi, S., A. Yoshida, K. Hosono, A. Kobayashi and M. Harada (2012) Double subduction of the Philippine Sea plate and its implication in large earthquake occurrence in southern Kanto, central Japan, AGU Fall meeting.
- Nyst, M., T. Nishimura, F. F. Pollitz, and W. Thatcher (2006) The 1923 Kanto earthquake reevaluated using a newly augmented geodetic data set, *J. Geophys. Res.*, 111, B11306, doi:10.1029/2005JB003628.
- Okada, Y. (1992) Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 82, 1018-1040.
- Sato, H., N. Hirata, K. Koketsu, D. Okaya, S. Abe, R. Kobayashi, M. Matsubara, T. Iwasaki, T. Ito, T. Ikawa, T. Kawanaka, K. Kasahara, and S. Harder (2005) Earthquake source fault beneath Tokyo, *Science*, 309, 462-464.
- 瀬野徹三 (2012) 南海トラフ巨大地震 — その破壊の様態とシリーズについての新たな考え —, 地震 2, 64, 97-116.
- Seno, T., S. Stein, and A. E. Gripp (1993) A model for the motion of the Philippine Sea plate consistent with NUVEL-1 and geological data, *J. Geophys. Res.*, 89, 17941-17948.
- 穴倉正展・原田 強・宮内崇裕 (2001) 房総半島南西部岩井低地の離水海岸地形からみた大正関東地震の発生年代と再来間隔, 地震 2, 53, 357-372.
- 水路部 (1924) 大震後相模灘付近水深変化調査図, 水路要報, 第 3 年, 第 16 号.
- 武村雅之 (1994) 1923 年関東地震の本震直後の余震活動 — 岐阜測候所の今村式二倍強震計記録の解析, 地震 2, 64, 97-116.
- 寺田寅彦 (1924) 大正十二年九月一日の地震に就いて, 地学雑誌, Vol. 36, No. 7, 395-410.
- Wald, D. J., and P. G. Somerville (1995) Variable-slip rupture model of the great 1923 Kanto, Japan, earthquake: Geodetic and body-waveform analysis, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 85, 159-177.
- 吉田明夫・野口伸一・細野耕司 (2007) フィリピン海プレート北端部におけるスラブの二重沈み込み, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会, S228-02.
- 吉田明夫・原田昌武・小田原啓 (2012) 大正関東地震の際の海底地殻変動, 温泉地学研究所研究報告, 44, 17-28.

