

# 南関東沿岸の地殻上下変動から推定した 1703 年元禄関東地震と 1923 年大正関東地震の断層モデル

## Fault models of the 1703 Genroku and 1923 Taisho Kanto earthquakes inferred from coastal movements in the southern Kanto area

行谷佑一<sup>1</sup>・佐竹健治<sup>2</sup>・宍倉正展<sup>1</sup>

Yuichi Namegaya<sup>1</sup>, Kenji Satake<sup>2</sup> and Masanobu Shishikura<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 活断層・地震研究センター (AIST, Geological Survey of Japan, Active Fault and Earthquake Research Center, [yuichi.namegaya@aist.go.jp](mailto:yuichi.namegaya@aist.go.jp))

<sup>2</sup> 東京大学地震研究所 (Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

**Abstract:** We constructed fault models for the 1703 Genroku and 1923 Taisho Kanto earthquakes by inversion of coastal movement data. The 1703 coastal uplifts were similar to the 1923 uplift in Miura peninsula, but were about three times larger in Boso peninsula. The fault model consists of 34 subfaults, reflecting geometry of upper plane of the Philippine Sea plate compiled from recent three studies. On the subfaults beneath Miura peninsula, the average slip was 5.4 m for both 1703 and 1923 earthquakes. Beneath Boso peninsula, however, the 1703 slip was about 10 m, while the 1923 slip was less than 2 m. On the Kujukuri coast, the 1703 tsunami was larger than the 1923 tsunami and inundated at least 1.5 km from the past coast line. This observation cannot be reproduced by the inverted 1703 fault model, and requires an additional offshore fault rupture southeast of Boso peninsula.

**キーワード:** 1703 年元禄関東地震, 1923 年大正関東地震, 地殻上下変動, 津波, 断層モデル

**Keywords:** the 1703 Genroku Kanto earthquake, the 1923 Taisho Kanto earthquake, coseismic vertical movements, tsunami, fault models

### 1. はじめに

元禄関東地震は元禄十六年十一月二十三日 (西暦 1703 年 12 月 31 日) に南関東で発生した地震 (以下, 元禄地震) である. この地震は, 1923 年大正関東地震 (以下, 大正地震) と同様に地震や津波によって南関東一帯に大きな被害をもたらした. 元禄地震が大正地震とくらべて大きく異なる特徴は, 房総半島 (特に南房から外房地域) における地殻変動や津波の規模が, 大正地震に比べて大きいという点である (松田ほか, 1974; 羽鳥, 1976 など). 一方, 三浦半島だけに着目すると, 地殻変動量や津波の高さは両地震とも似ている (宍倉, 2003; 羽鳥, 1976 など). これらの違いから, 元禄地震の際には大正地震で活動した相模湾周辺の震源断層に加え, 房総半島南端で大きな断層すべりがあったと考えられてきた.

元禄地震についてこれまでに提案された断層モデルは, 大きく次の 2 つのタイプに分けることができる. すなわち, 1) 笠原ほか (1973) に代表されるような, 震源域が相模湾から房総半島南部に及ぶモデル, 2) Matsuda *et al.* (1978) に代表されるような, さらに房総半島の南東沖合にまで震源域が延びるモデル, である (第 1 図). 3 章で言及するように外房

では大きな津波が来襲しており, 2) は主にそれを説明するために提案された.

近年になり, フィリピン海プレートの上面形状の詳細が明らかになってきた (Sato *et al.*, 2005; 武田ほか, 2007; Tsumura *et al.*, 2009). 元禄地震による海岸の変動 (宍倉, 2000; 宍倉・越後, 2001) や千葉県九十九里浜における津波の浸水域などの新たなデータも多く得られてきた (佐竹ほか, 2008).

本稿ではまず, 最近の研究成果に基づいてフィリピン海プレートの上面形状を整理し, それに沿って小断層を設置した. そして, 沿岸の地殻上下変動量からインバージョン解析により元禄地震および大正地震の断層すべり量分布を推定した. さらに, 千葉県九十九里浜での津波の浸水計算を行い, 後述の津波の浸水域データと比べて, 元禄地震における房総半島南東沖合に延びる震源断層の必要性について論じた.

### 2. 地殻上下変動のデータ

元禄地震や大正地震は, 震源断層が陸域の直下に拡がっていることが特徴である. このため沿岸では地殻の上下変動が顕著に表れており, 大正地震では,

それらが測地測量データから明確になっている。たとえば房総半島南端では最大約2 m隆起し、三浦半島や大磯海岸周辺も1~2 m程度隆起したが、丹沢山地周辺は沈降した (Miyabe, 1931)。

元禄地震については、古くは松田ほか (1974) が古文書や海岸沿いの地形から地殻上下変動を推定している。近年になって宍倉 (2000) や宍倉・越後 (2001) により新たにデータが取得され、松田ほかのデータについても見直しを行っている (第2図)。これらの研究では元禄時代の海岸線の位置を地形や化石の高度分布から判別し、大正地震時の海岸線や現在の海岸線との比高を測ることで元禄地震による地殻上下変動量を推定した。とくに、過去の海岸線 (旧汀線) は、波食棚やノッチといった海面付近で作られる特有の地形や、岩礁の海面付近を好んで生息する固着生物 (ヤッコカンザシなど) の化石の高度を調査して推定した。その結果は次のようにまとめられる。

元禄地震の際、三浦半島では大正地震とほぼ同規模の隆起が生じた (宍倉・越後, 2001)。大磯海岸では詳しくわかっていないが、少なくとも大正地震時を超えるような大きな隆起は生じていなかったと推定されている (松田, 1985)。元禄地震で大磯が隆起したことは、歴史史料の解釈から石橋 (1977) が指摘している。一方、房総半島では大正地震時に比べ隆起量が大きく異なった。すなわち、房総半島南端でおおよそ6 mも隆起し (宍倉, 2000)、大正地震の約3倍であった。半島中南部の保田や小湊では、絵図や遺跡の調査から、1 m程度の沈降が推定された (宍倉, 2000)。これらの地域は大正地震時には隆起しているの、正反対の変動だった。

### 3. 津波のデータ

元禄地震や大正地震は大きな津波も引き起こした。元禄地震津波の高さについては、羽鳥ほか (1973) や羽鳥 (1975a, 1975b, 1976) などが歴史記録から推定している。大正地震津波については地震直後に調査が行われ、羽鳥ほか (1973) に高さがまとめられている。これらを第3図に示した。

元禄と大正の津波の高さを比較すると、とくに房総半島において元禄地震の方が高い津波をもたらしたことがわかる。たとえば、房総半島南端から御宿にかけて、大正地震の津波高さは1.2~3 m程度であるのに対し、元禄地震の津波高さは6~11 m程度と推定されている。内房沿岸でも元禄地震の方が高い津波をもたらした。東京湾奥では、元禄地震の津波高さは2 mと推定されている (羽鳥ほか, 1973 など) が、歴史記録に若干具体性が欠ける部分があり、その精度に検討の余地がある。一方、三浦半島から相模湾沿岸では、元禄地震と大正地震の津波高さに大きな違いはない。熱海から伊豆半島東岸にかけては、場所によっては大正地震の津波の方が高かった所も

ある。なお、都司 (1981) の歴史史料に関する調査によると、浜名湖や紀伊半島東岸においても元禄地震により3~5 m程度の津波が来襲した場所があった。

元禄地震の津波では、千葉県九十九里浜沿岸における津波浸水域の拡がりも大きな特徴である。九十九里浜沿岸では、おもに元禄地震の津波による死者を弔う目的で供養碑が数多く建立されており、羽鳥 (1976) や古山 (1996) などにより碑文が詳しく紹介されている。第4図はその位置の分布を表す。羽鳥 (1976) によると、これらの供養碑は水死者の多く出た場所に建てられたと伝えられている。これが確かであれば、供養碑の位置から元禄地震の津波のおおよその浸水域を知ることができる。しかし供養碑の建立者には「もう二度と恐ろしい津波に遭いたくない (遭わせたくない)」という気持ちがあったはずであり、実際には津波が浸水限界よりも内陸側に供養碑を建てられた可能性も否定できない。そこで著者の一人 (行谷) は現在、これらの供養碑が津波の波先を表すか否かについて、一つ一つ検討を行っている。第4図の赤丸印は、これまでの調査でほぼ元禄地震の津波の波先あるいは少なくともそこまで浸水したことが判明した供養碑 (あるいは地点) を表す。たとえば、白子町幸治に残る「無縁塚津波精霊様」 (第5図) は、「供養碑が面している道路付近まで津波が来襲した」という言い伝えが残っていることを現地を確認した。

元禄地震当時は、海岸線の位置が現在とは異なっている。古川 (1984) は、歴史記録の精読や現地に残る言い伝えから、現在の海岸線から約400 m内陸を走る千葉県道30号線 (飯岡一宮線) が元禄時代の海岸線であったと推定した。県道30号線から供養碑の位置まで元禄地震の津波が浸水したとすると、その距離は所によって1.5 km以上となる。

### 4. 地殻上下変動から推定した大正・元禄関東地震の断層モデル

#### 4.1 手法

元禄地震の断層モデルを構築するために、まず沈み込むフィリピン海プレートの上面形状を整理した。上面形状に関する研究については、地震活動のデータに基づくIshida (1992) の例が有名であるが、近年になって、反射法地震探査のデータ解析に基づいたプレートの上面形状の推定が行われている。具体的には、Sato *et al.* (2005) はおもに陸域で大規模な探査を行い、武田ほか (2007) は過去に海域で行われた探査データの再解析を行った。Tsumura *et al.* (2009) は特に房総半島南部周辺をターゲットに沿岸域で探査を行っている。そこで本研究では上記3例 (Sato *et al.*, 2005; 武田ほか, 2007; Tsumura *et al.*, 2009) が示すプレート上面形状の結果を、できる

だけ互いに矛盾がないように統合した。第 6 図は統合したフィリピン海プレートの上形状を表す。相模湾沖合では、プレートがほぼ一様に沈み込んでいて等深線が北西-南東方向に平行にならぶのに対し、房総半島南方沖合ではその形状が東西方向に屈曲している。さらに房総半島南東方沖合では沈み込み角度が緩くなっている。

つぎに、このプレート上面に沿って 34 枚の小断層を設置した (第 6 図)。基本的には  $15 \text{ km} \times 15 \text{ km}$  の小断層を設置したが、房総半島南方沖合ではプレート形状が屈曲しているので、 $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$  の準小断層を配置して (たとえば小断層 7D は 6 枚の準小断層から構成される) できるだけ隙間が生じないようにした。小断層の傾斜角や上端深さは第 6 図のフィリピン海プレートの上形状から読み取り、すべり角については Sagiya (2004) による房総半島のすべり欠損の方向を参考に設定した。ただし、房総半島南端の小断層 10 の位置では、Tsumura *et al.* (2009) によると、フィリピン海プレートの上形状が突起状 (bump) になっており、その傾斜角は比較的高角 ( $40^\circ$  程度、図からの読み取り値) となっている。本研究ではこれを参考にして、小断層 10 の傾斜角を  $45^\circ$  とした。これらの断層パラメータは表 1 にまとめた。

つぎに、測定された地殻上下変動量のインバージョン解析により各小断層のすべり量 (食い違い量) を推定した。具体的には、地殻上下変動量が判明している地点において、各小断層が単位量 (1 m) すべった際の地殻上下変動量を Okada (1985) のプログラムにより計算した。その計算地殻上下変動量をグリーン関数として、測定した地殻上下変動量を再現する断層のすべり量を最小二乗法により推定した。ただし、断層のすべり量は負にならない条件を付けて解いた (Lawson and Hanson, 1995)。

インバージョン解析は次の 2 種類を行った。すなわち、三浦半島側の小断層 (1A~6C) と房総半島側の小断層 (7D~10) 上のすべり量はそれぞれ一定であると仮定するモデル (一様すべりモデル) と、34 枚の小断層のすべり量を直接推定するモデル (不均質すべりモデル) である。不均質すべりモデルについては、安定した解を推定するためにスムージングの効果を取り入れている。なお地殻上下変動量データは、元禄地震については宍倉 (2000) や宍倉・越後 (2001) などの 46 地点のデータを、大正地震については陸地測量部 (1930) による 533 地点のデータをそれぞれ用いた。

## 4.2 結果

まず一様すべりモデルによる元禄地震と大正地震の断層すべり量を第 7 図 (a) および (b) に示す。元禄地震のすべり量は三浦半島側で 5.4 m、房総半島側で 9.4 m と推定された。大正地震では三浦半島側で 5.4 m、房総半島側では 0.3 m と推定された。三浦

半島側でのすべり量が元禄地震と大正地震とで等しく推定されたことは、これらの地震による海岸の隆起量がほぼ等しかったという観測結果を反映する結果である。フィリピン海プレートの収束速度が年間 3 cm 程度であることから、これらのすべり量は元禄地震と大正地震の間隔 (220 年) の沈み込み量 (約 7 m) (地震調査委員会, 2004) を超えておらず、両地震のすべりがプレート間地震によって解放されたことに矛盾しない。第 8 図は宍倉 (2000) や宍倉・越後 (2001) などによる元禄地震の地殻上下変動量、および陸地測量部 (1930) による大正地震の地殻上下変動量 (第 9 図) とを比較したものである。これによれば、元禄地震および大正地震とも全体的におおむね良い一致を示しているが、三浦半島では計算値が系統的に小さくなっている。

次に、不均質すべりモデルによる断層すべり量解析結果を第 7 図 (c) および (d) に示す。具体的なすべり量の値については第 1 表を参照されたい。まず相模湾周辺に着目すると、元禄地震では大磯付近から三浦半島にかけて 8 m を超えるすべり量が推定された。大正地震では、小田原周辺のすべり量が 8 m を超えるが、その周辺では 5 m 程度となっている。これらの局地的に大きなすべり量によって計算隆起量が大きくなり、一様すべりモデルに比べてより観測値に近づいた (第 8 図)。一方で、房総半島に着目すると、南端部において元禄地震では 10 m 程度のすべり量が推定されたが、大正地震では最大でも 2 m 程度であった。すなわち、元禄地震では大きな破壊が房総半島南端まで及んだが、大正地震では房総半島内房側付近でとどまったと言える。なお、剛性率を  $5 \times 10^{10} \text{ Nm}$  とすると不均質すべりモデルにおける元禄地震および大正地震のモーメントマグニチュード ( $M_w$ ) はそれぞれ 8.1 および 8.0 と計算される。

元禄地震および大正地震とも、一様すべりモデルよりも不均質すべりモデルの方が観測値と計算値の一致がよくなった (第 8 図) が、局所的にはまだ再現できていないところも存在する。たとえば保田や小湊では元禄地震モデルから計算した地殻変動は小さいながらも隆起となっており、観測された沈降は再現できていない。また、館山周辺では計算値が 1 m 程度過大評価になっており、逆に白浜周辺では 1 m 程度過小評価になっている。これらの改善については今後の検討課題としたい。

## 5. 九十九里浜における元禄地震の津波浸水域の再現

3 章で述べたように元禄地震の津波によって千葉県九十九里浜では、当時の海岸線から約 1.5 km 以上内陸まで浸水した。本研究で検討した元禄地震の断

層モデルでそれが再現できるのか確認するために、九十九里浜において津波の浸水計算を行った。津波計算や用いた地形の詳細は佐竹ほか(2008)に準じており、基本的に非線形長波の式を用いて九十九里浜での津波遡上を計算した。陸上地形データは、国土地理院と千葉県県土整備部によって取得された航空レーザープロファイラの地形データ(2mメッシュ)を利用した。さらに、元禄当時の地形を再現するために防波堤などの人工構造物を除去した。また、元禄地震当時の汀線は現在の千葉県道飯岡一宮線付近にあったと推定されているので(古川, 1984), この位置(現在の海岸線から約400m内陸)を海岸線(標高0m)とし、現在の海底地形と線形につないだ地形モデルを作成した。佐竹ほか(2008)と異なる点は浸水計算を行う領域の空間格子間隔を33.3mとしたことである。

第10図(a)は4章において地殻上下変動量から推定された元禄地震の断層モデル(不均質すべりモデル)により計算された津波の浸水深(陸上における地面からの水の厚さ)分布を表す。この結果から、このモデルによる津波は3章で言及した津波供養碑の位置(赤丸印)まで浸水しないことがわかる。すなわち、九十九里浜における津波供養碑の位置を考慮すると、元禄地震の断層モデルとしては地殻変動量から推定されたモデルでは不十分であることを示唆している。

本研究では相模湾沖や房総半島南方沖にトラフ軸付近まで小断層を設定している。ここでのすべり量を大きくした場合、沿岸で測定された隆起量よりも大きな隆起量が計算される。そこで、Matsuda *et al.* (1978)と同様に、第6図の小断層11にも破壊が及んだと考え、すべり量10mを与えて津波の浸水計算を行った。なお、この小断層11のすべりは沿岸部の地殻上下変動量にはほとんど影響を与えない。

第10図(b)は小断層11を加えたモデルによる浸水計算結果を表す。地殻変動から得られたモデルに比べより奥まで浸水し、津波供養碑などから推定された浸水域をおおむね再現していることがわかる。すなわち、九十九里浜の津波浸水域を考慮すると、地殻上下変動量から推定された断層に加えて房総半島南方沖合にも断層すべりが必要であると言える。これは元禄地震の破壊域が房総半島南方沖にも及んだことを意味し、Matsuda *et al.* (1978)を支持する結果となった。ただし、沖合の小断層11の形状などには任意性が残っている。本研究では小断層10と同じく傾斜角を45°に設定したが、傾斜角が変わるとすべり量も大きく変わる。また、断層の長さや幅あるいはすべり量についても今のところ決定的な根拠はない。したがって、本研究の解析結果は、「元禄地震による地殻上下変動量は、房総半島南東沖合にまで達した」ことを示すにとどまる。小断層11の形状については、今後他の地点における津波高さのデー

タなどから検討したいと考えている。

## 6. まとめ

本研究では、まずフィリピン海プレートの上表面形状に関する最近の研究結果を整理し、その上面に34枚の小断層を設置した。そして、元禄地震や大正地震に伴う地殻上下変動量に基づいてインバージョン解析により両地震の断層すべり量分布を推定した。その結果、大磯付近から三浦半島にかけての断層面上では、元禄地震と大正地震とで同等のすべり(一様すべりモデルのすべり量はともに5.4m)が見積もられた。一方房総半島南部を見ると、大正地震では最大でも2m程度のすべり量なのに対し、元禄地震では10mものすべり量が推定された。これらは海岸地形などから推定された地殻上下変動をおおよそ再現できている。また、九十九里浜における津波浸水域を再現するには、房総沖の断層が必要であることも確認された。しかしこの沖合の断層に関しては、現時点で拘束できるパラメータが少なく、今後も引き続き検討を重ねる必要がある。

相模トラフ沿いで起こる海溝型地震は、ひとたび起これば日本の中核である首都圏に大きな影響を及ぼす。地震調査研究推進本部による今後30年の発生確率は、大正型地震でほぼ0~2%、元禄型地震でほぼ0%と評価されており、しばらくは発生の心配はないと考えられている。しかし最近、海岸段丘の対比の見直しなどから、房総沖のみの断層を震源とした別のタイプの地震の可能性も指摘されている(宍倉, 2011)。過去数千年まで遡った履歴(宍倉, 2003)からみると、相模トラフ沿いでは、元禄型地震がほぼ最大規模と考えられる。東日本大震災の発生以降、国や各自治体において被害想定の見直しが進められているが、南関東地域における被害想定においては、元禄地震の断層モデルの構築が最重要であることは間違いない。したがって、筆者らは今後もモデルの改良を進めていく予定であるが、本稿では現時点で考え得る最適解を提示した。

**謝辞** 国土地理院、千葉県(県土整備部)には、レーザープロファイラーによる地形データをご提供頂いた。九十九里浜における津波供養碑については、千葉県大網白里町在住の古山豊氏にご教示いただいた。査読者である活断層・地震研究センター海溝型地震履歴研究チームの澤井祐紀主任研究員には有益なコメントを戴いた。ここに記して感謝の意を表します。

## 文献

古川 力(1984) 古記録に見える元禄地震と九十九里浦、千葉県郷土史研究連絡協議会(編)『房総災害史—元禄の大地震と津波を中心に—』、39-67。

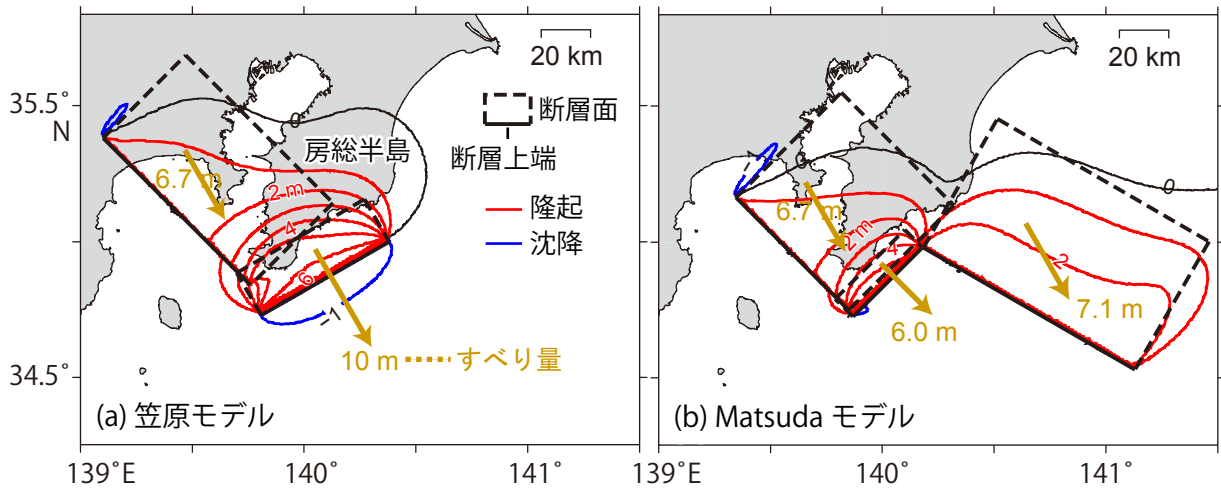
- 羽鳥徳太郎 (1975a) 房総沖における津波の波源—延宝 (1677 年)・元禄 (1703 年)・1953 年房総沖津波の規模波源域の推定—, 東京大学地震研究所彙報, 50, 83-91.
- 羽鳥徳太郎 (1975b) 元禄・大正関東地震津波の各地の石碑・言い伝え, 東京大学地震研究所彙報, 50, 385-395.
- 羽鳥徳太郎 (1976) 南房総における元禄 16 年 (1703 年) 津波の供養碑—元禄津波の推定波高と大正地震津波との比較—, 東京大学地震研究所彙報, 51, 63-81.
- 羽鳥徳太郎・相田 勇・梶浦欣二郎 (1973) 南関東周辺における地震津波, 関東大地震 50 周年論文集, 57-66.
- 石橋克彦 (1977) 1703 年元禄関東地震の震源域と相模湾における大地震の再来周期 (第 1 報), 地震 2, 30, 369-374.
- Ishida, M. (1992) Geometry and relative motion of the Philippine Sea plate and Pacific plate beneath the Kanto-Tokai district, Japan, *J. Geophys. Res.*, 97, 489-513.
- 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, [http://www.jishin.go.jp/main/chousa/04aug\\_sagami/index.htm](http://www.jishin.go.jp/main/chousa/04aug_sagami/index.htm)
- 笠原慶一・山田重平・安藤雅孝 (1973) 南関東の地殻変動—展望と作業仮説—, 関東大地震 50 周年論文集, 103-116.
- 古山 豊 (1996) 千葉県における元禄地震の供養諸相と伝承—供養碑を中心に—, 千葉県編さん史料「千葉県地域民俗調査報告書」, 3, 82 pp.
- Lawson, L.C. and Hanson, R.J. (1995) Solving least squares problems, *Soc. Indust. Appl. Math.*, 339 pp.
- 松田時彦 (1985) 大礫型地震について, 月刊地球, 7, 472-477.
- 松田時彦・太田陽子・安藤雅孝・米倉伸之 (1974) 元禄関東地震 (1703 年) の地学的研究, 垣見俊弘・鈴木尉元編「関東地方の地震と地殻変動」, ラティス, 175-192.
- Matsuda, T., Ota, Y., Ando, M., and Yonekura, N. (1978) Fault mechanism and recurrence time of major earthquakes in southern Kanto district, Japan, as deduced from coastal terrace data, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 89, 1610-1618.
- Miyabe, N. (1931) On the vertical earth movements in Kwanto districts, *Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ.*, 9, 1-21.
- Okada, Y. (1985) Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 75, 1135-1154.
- 陸地測量部 (The Imperial Japanese Military Land Survey) (1930) Re-survey of the Kwanto district after the great earthquake of 1923, *Bull. Imperial Earthquake Investigation Committee*, 11, 1-6.
- Sagiya, T. (2004) Interplate Coupling in the Kanto district, Central Japan, and the Boso peninsula silent earthquake in May 1996, *Pure Appl. Geophys.*, 161, 2327-2342.
- 佐竹健治・宍倉正展・行谷佑一・藤 良太郎・竹内仁 (2008) 元禄関東地震の断層モデルと外房の津波, 歴史地震, 23, 81-90.
- Sato, H., Hirata, N., Koketsu, K., Okaya, D., Abe, S., Kobayashi, R., Matsubara, M., Iwasaki, T., Ito, T., Ikawa, T., Kawanaka, T., Kasahara, K., and Harder, S. (2005) Earthquake source fault beneath Tokyo, *Science*, 309, 462-464.
- 宍倉正展 (2000) 離水海岸地形からみた 1703 年元禄関東地震における房総半島の地殻上下変動, 歴史地震, 16, 113-122.
- 宍倉正展 (2003) 変動地形からみた相模トラフにおけるプレート間地震サイクル, 東京大学地震研究所彙報, 78, 245-254.
- 宍倉正展 (2011) 関東地震の多様性—古地震データによる検討—, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会予稿集, SSS033-02.
- 宍倉正展・越後智雄 (2001) 1703 年元禄関東地震に伴う三浦半島南部の地殻上下変動—離水波食棚・生物遺骸の高度分布からみた検討—, 歴史地震, 17, 32-38.
- 武田哲也・笠原敬司・木村尚紀 (2007) 相模トラフ周辺域におけるフィリピン海プレート等深度曲線マップの作成—紙記録のマルチチャンネル反復法探査データのデジタル化復元—, 月刊地球号外, 57, 115-123.
- 都司嘉宣 (1981) 元禄地震・津波 (1703-XII-31) の下田以西の史料状況, 地震 2, 34, 401-411.
- Tsumura, N., Komada, N., Sano, J., Kikuchi, S., Yamamoto, S., Ito, T., Sato, T., Miyauchi, T., Kawamura, T., Shishikura, M., Abe, S., Sato, H., Kawanaka, T., Suda, S., Higashinaka, M., and Ikawa, T. (2009) A bump on the upper surface of the Philippine Sea plate beneath the Boso peninsula, Japan inferred from seismic reflection surveys: A possible asperity of the 1703 Genroku earthquake, *Tectonophysics*, 472, 39-50.

(受付: 2011 年 11 月 28 日, 受理: 2011 年 12 月 6 日)

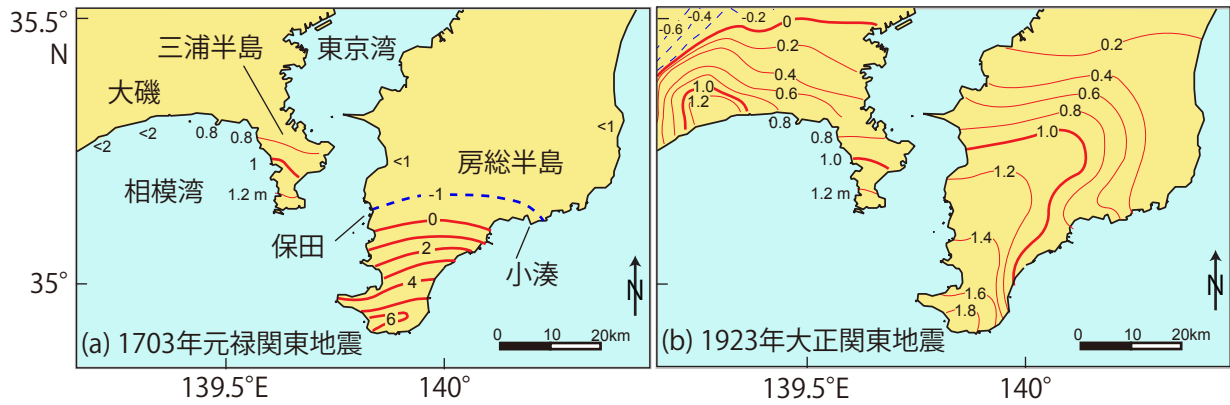
第1表. 設定した断層パラメータと推定したすべり量分布.  
Table 1. Fault parameters and estimated slip amounts.

ID	東経, 度**	北緯, 度**	上端深さ, km	走向, 度	傾斜角, 度	すべり角, 度	長さ, km	幅, km	(元禄) すべり量, m	(大正) すべり量, m
1E	139.523	35.623	18.0	320	30	155	15	15	1.9	5.8
1D	139.401	35.539	14.1	320	15	155	15	15	3.7	3.3
1C	139.279	35.455	10.0	320	16	155	15	15	5.0	2.0
1B	139.164	35.377	3.7	320	25	155	15	15	4.8	5.0
1A	139.041	35.293	0.0	320	14	155	15	15	2.7	4.5
2E	139.629	35.519	18.0	320	30	155	15	15	2.9	5.0
2D	139.507	35.435	14.1	320	15	155	15	15	6.0	4.1
2C	139.385	35.352	10.0	320	16	155	15	15	8.4	5.1
2B	139.270	35.273	3.7	320	25	155	15	15	8.4	8.7
2A	139.147	35.189	0.0	320	14	155	15	15	4.5	8.1
3E	139.735	35.416	18.0	320	30	155	15	15	2.8	4.1
3D	139.613	35.332	14.1	320	15	155	15	15	6.2	4.8
3C	139.491	35.249	10.0	320	16	155	15	15	8.8	5.0
3B	139.377	35.170	3.7	320	25	155	15	15	7.9	4.8
3A	139.254	35.086	0.0	320	14	155	15	15	4.3	2.3
4E	139.843	35.313	17.3	320	15	155	15	15	1.5	5.0
4D	139.719	35.229	14.1	320	12	155	15	15	4.5	6.6
4C	139.597	35.145	10.0	320	16	155	15	15	8.2	4.9
4B	139.479	35.064	4.9	320	20	155	15	15	7.1	2.1
4A	139.354	34.978	2.3	320	10	155	15	15	3.7	0.5
5E	139.946	35.208	18.5	320	6	155	15	15	0.0	3.0
5D	139.824	35.125	14.4	320	16	155	15	15	1.2	5.3
5C	139.703	35.042	10.0	320	17	155	15	15	4.1	3.4
5B	139.581	34.958	6.4	320	14	155	15	15	2.6	0.4
5A	139.457	34.872	3.8	320	10	155	15	15	1.5	0.0
6E	140.009	35.135	20.7	320	6	155	10	15	1.0	1.3
6D	139.894	35.055	14.6	320	24	155	10	15	5.0	2.9
6C	139.774	34.973	10.0	320	18	155	10	15	8.2	2.5
7D*	140.019	34.993	13.2	270	29	105	15	15	10.0	2.7
8E*	140.183	35.117	21.3	270	6	105	15	15	2.1	0.7
8D	140.183	34.995	15.0	270	25	105	15	15	8.2	1.5
9E	140.348	35.130	19.3	270	6	105	15	15	0.5	0.1
9D	140.348	35.007	13.0	270	25	105	15	15	2.6	0.0
10	140.183	34.874	1.3	270	45	105	45	18	10.1	2.1
11	140.716	34.711	1.3	290	45	125	50	30	-	-

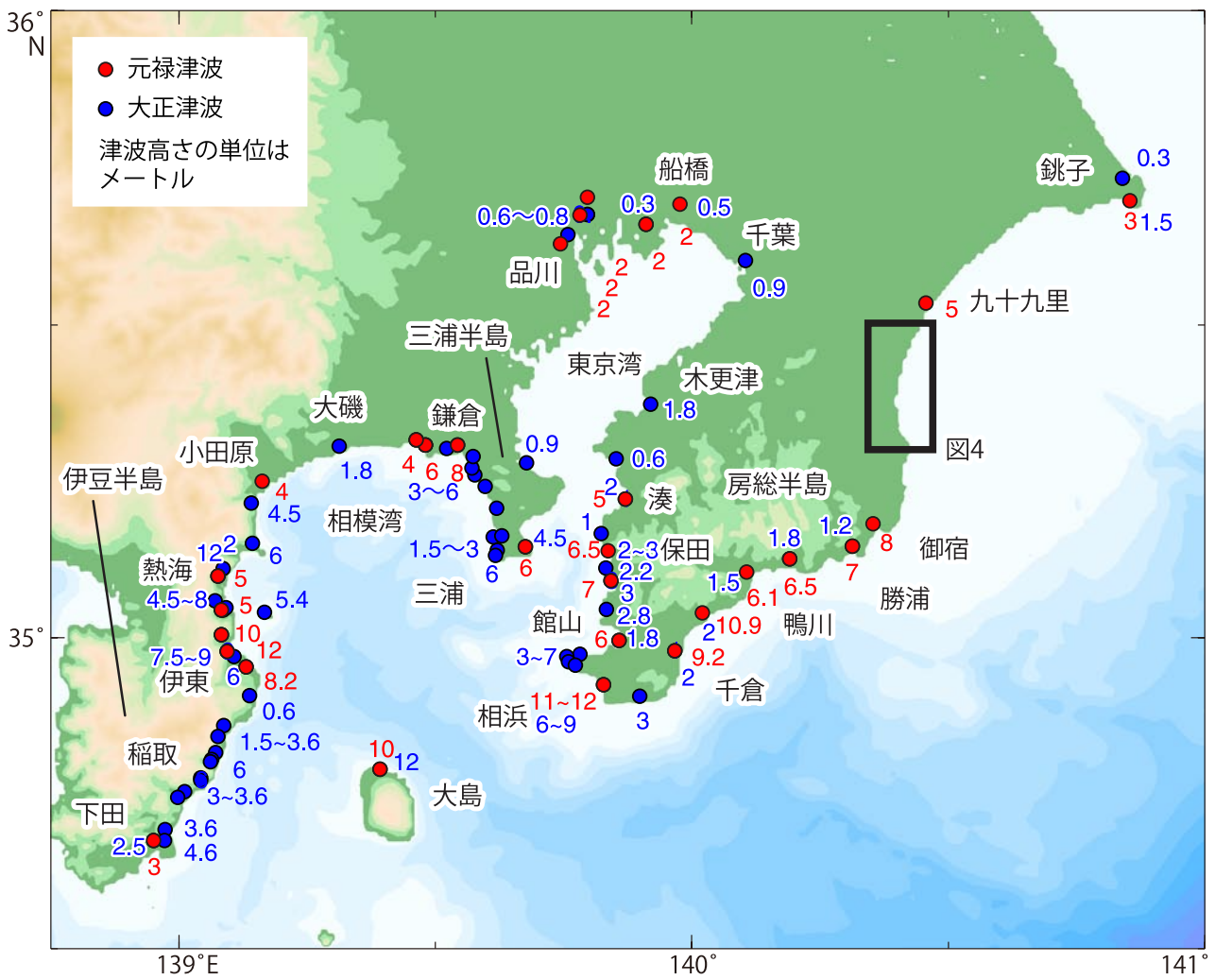
\*5 km × 5 km の小断層を6枚配置していることに注意を要する. \*\*緯度・経度とは各小断層の四隅のうち、もっとも南側（小断層 7D~10 については南東側）の緯度・経度を表す.



第 1 図. 元禄地震の断層モデルと計算地殻上下変動量. (a) 笠原ほか (1973) によるモデル.  
 (b) Matsuda *et al.* (1978) によるモデル.  
 Fig. 1. Fault models and the vertical movements of the 1703 earthquake calculated from (a) Kasahara  
*et al.* (1973) and (b) Matsuda *et al.* (1978).



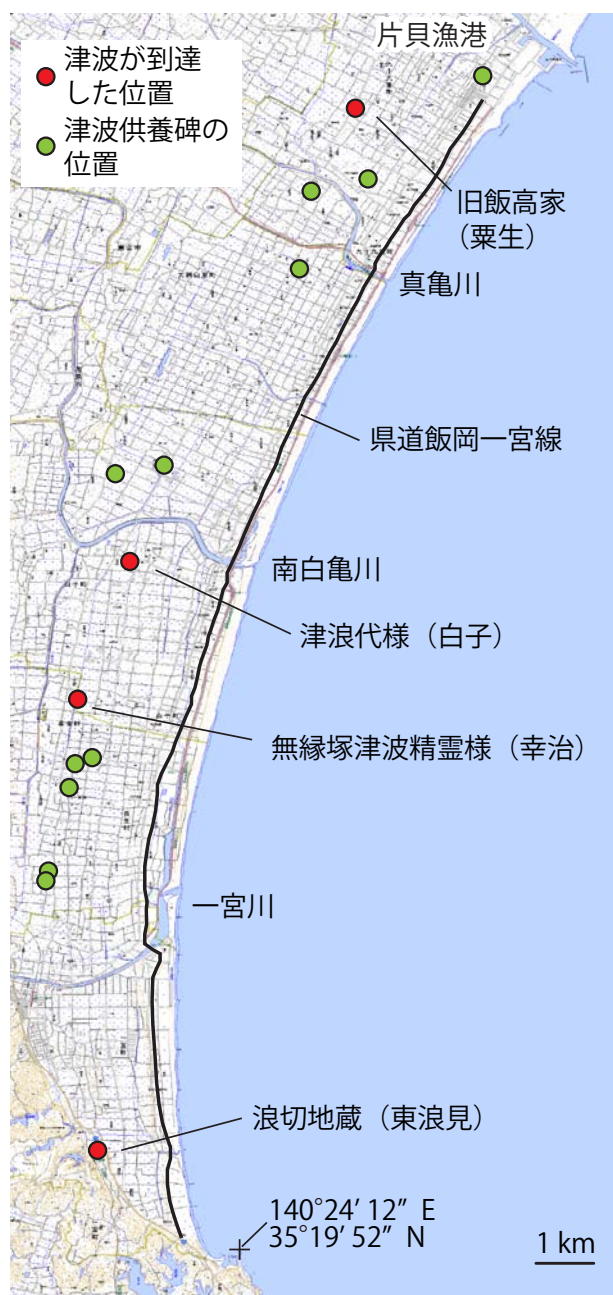
第 2 図. (a) 1703 年元禄地震による地殻上下変動量分布. (b) 1923 年大正地震による地殻上下変動量分布.  
 いずれも宍倉 (2003) から転載し, 地名を日本語で加筆. 赤線および青線はそれぞれ隆起・沈降を  
 表し, 単位は m (メートル).  
 Fig. 2. Coseismic movements: (a) the 1703 earthquake and (b) the 1923 earthquake reprinted from Shishikura (2003).  
 The red and blue contours indicate uplift and subsidence. The unit of the amounts is meter.



第3図. 元禄地震および大正地震による各地の津波高さ分布 (羽鳥ほか, 1973; 羽鳥, 1975a, 1975b, 1976). ただし, 羽鳥 (1976) は元禄津波の房総半島の高さを松田ほか (1974) による地殻上下変動量を基に推定しているため, 本図では宍倉 (2000) による地殻上下変動量を加味して修正.

Fig. 3. Tsunami heights from the 1703 earthquake (the red numerals) and the 1923 earthquake (the blue numerals) based on Hatori *et al.* (1973) and Hatori (1975a, 1975b, 1976). The 1703 tsunami heights in Boso peninsula were modified with vertical movements estimated by Shishikura (2000), because Hatori (1976) used the vertical movements by Matsuda *et al.* (1974) to estimate the tsunami heights.



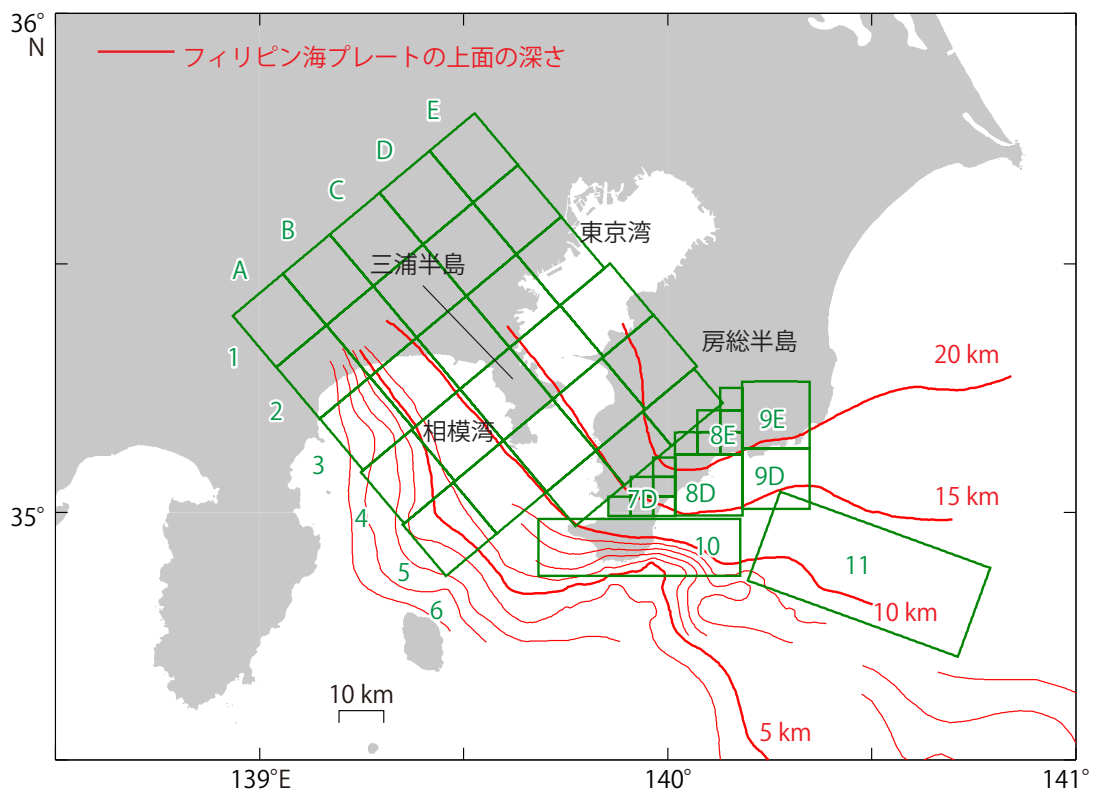


第 4 図. 九十九里浜南部における元禄津波の到達地点 (赤丸印) と津波供養碑 (緑丸印) (古山, 1996) の分布. 国土地理院発行の 2 万 5 千分の 1 地形図「上総片貝」, 「東金」, 「四天木」, 「茂原」, 「東浪見」, 「上総一宮」, 「上総長者」, 「国吉」を使用.

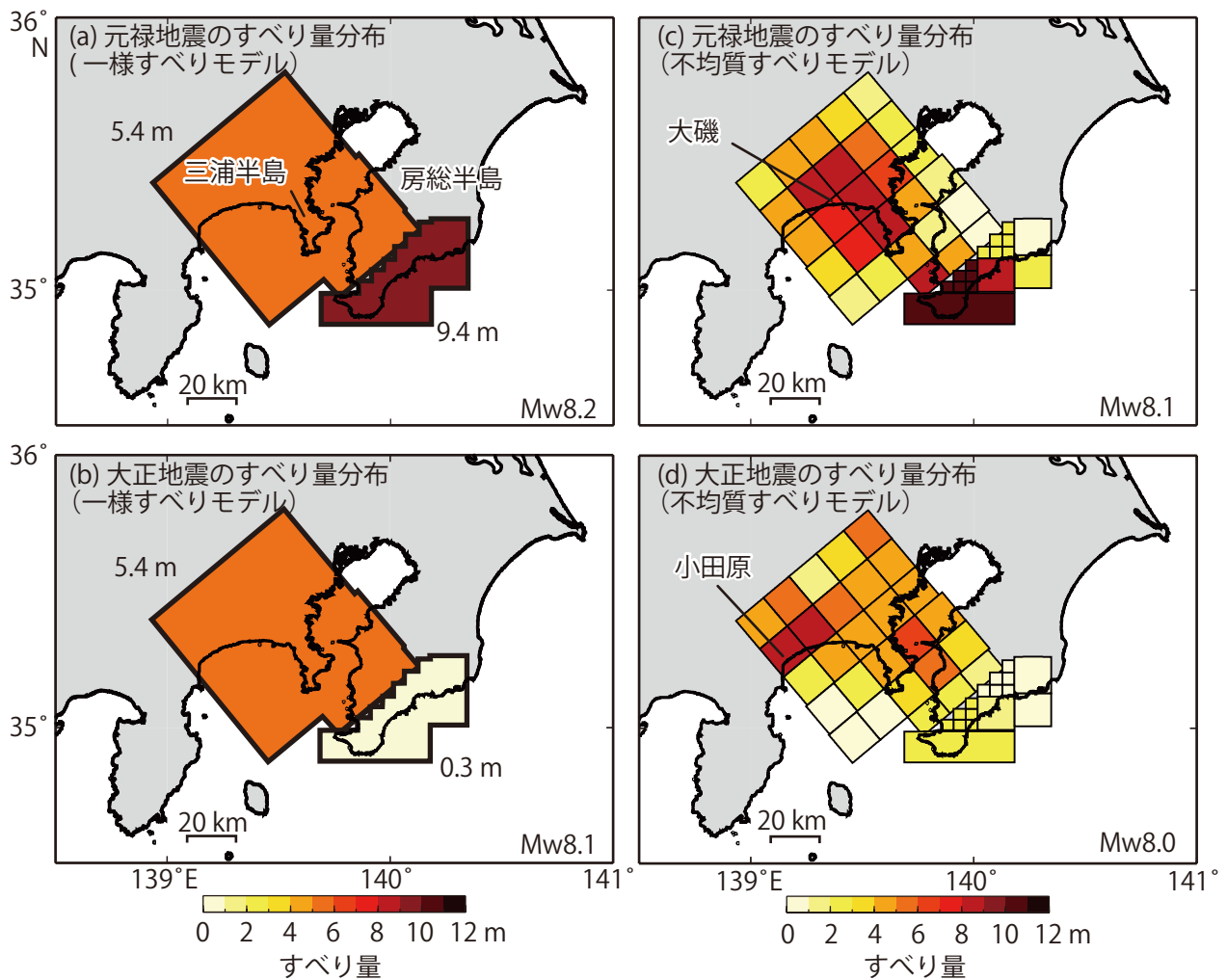
Fig. 4. Locations of tsunami memorial monuments (the green circles) of the 1703 earthquake tsunami along the Kujukuri coast, the eastern side of Chiba prefecture. They are based on Koyama (1996). The red circles indicate locations where the 1703 tsunami arrived. The map is modified from 1/25000-scale map of Geospatial Information Authority of Japan, [Kazusa-katagai], [Togane], [Shitengi], [Torami], [Kazusa-ichinomiya], [Kazusa-choja], and [Kuniyoshi].



第5図. 千葉県長生郡白子町幸治に鎮座する「無縁塚津波精霊様」. 2011年6月撮影.  
 Fig. 5. A memorial monument “Muentsuka tsunami seirei sama” established at Koji, Shirako town, Chiba prefecture. The photo was taken in June, 2011.

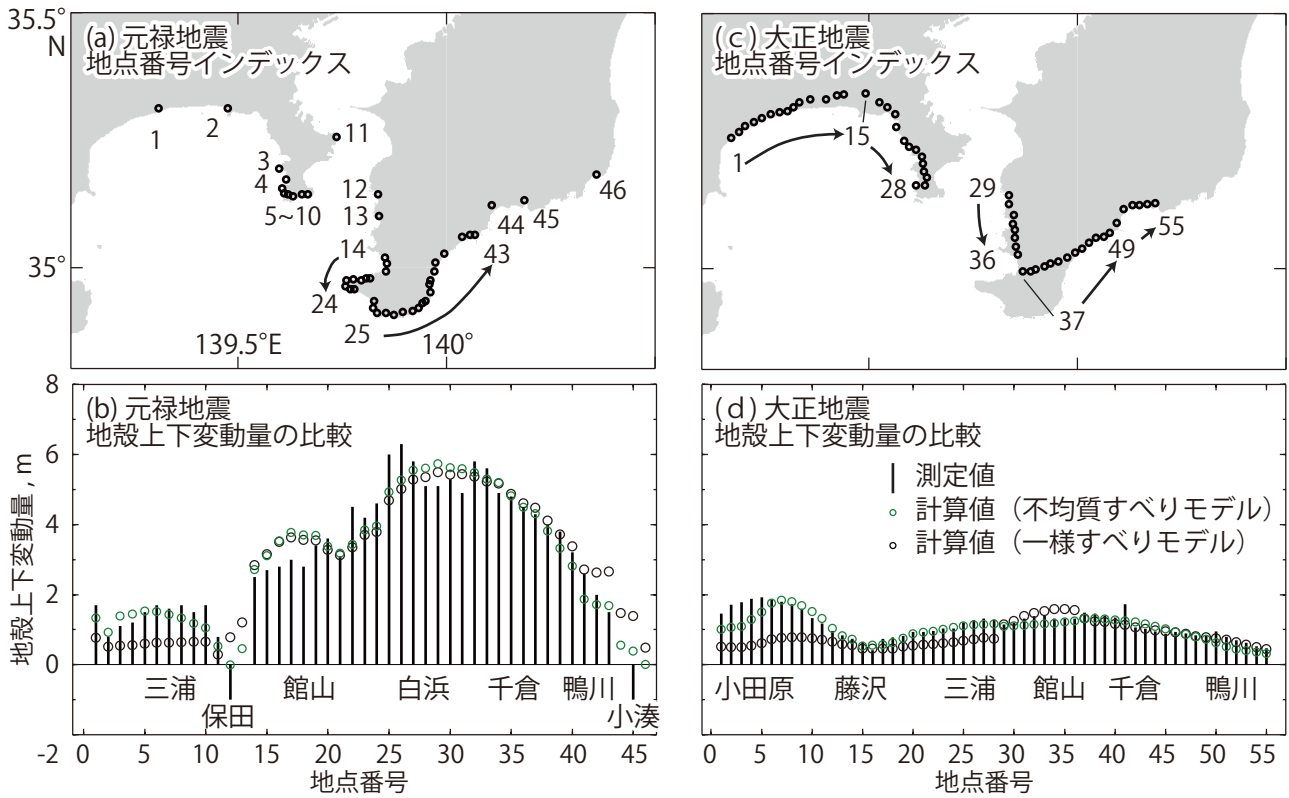


第6図. フィリピン海プレートの上面の深さ分布 (赤線) と設置した断層面 (緑線).  
 Fig. 6. Compiled geometry of the upper plane of the Philippine Sea plate (the red contours).  
 The sub faults used in this study are also shown by the green rectangular.



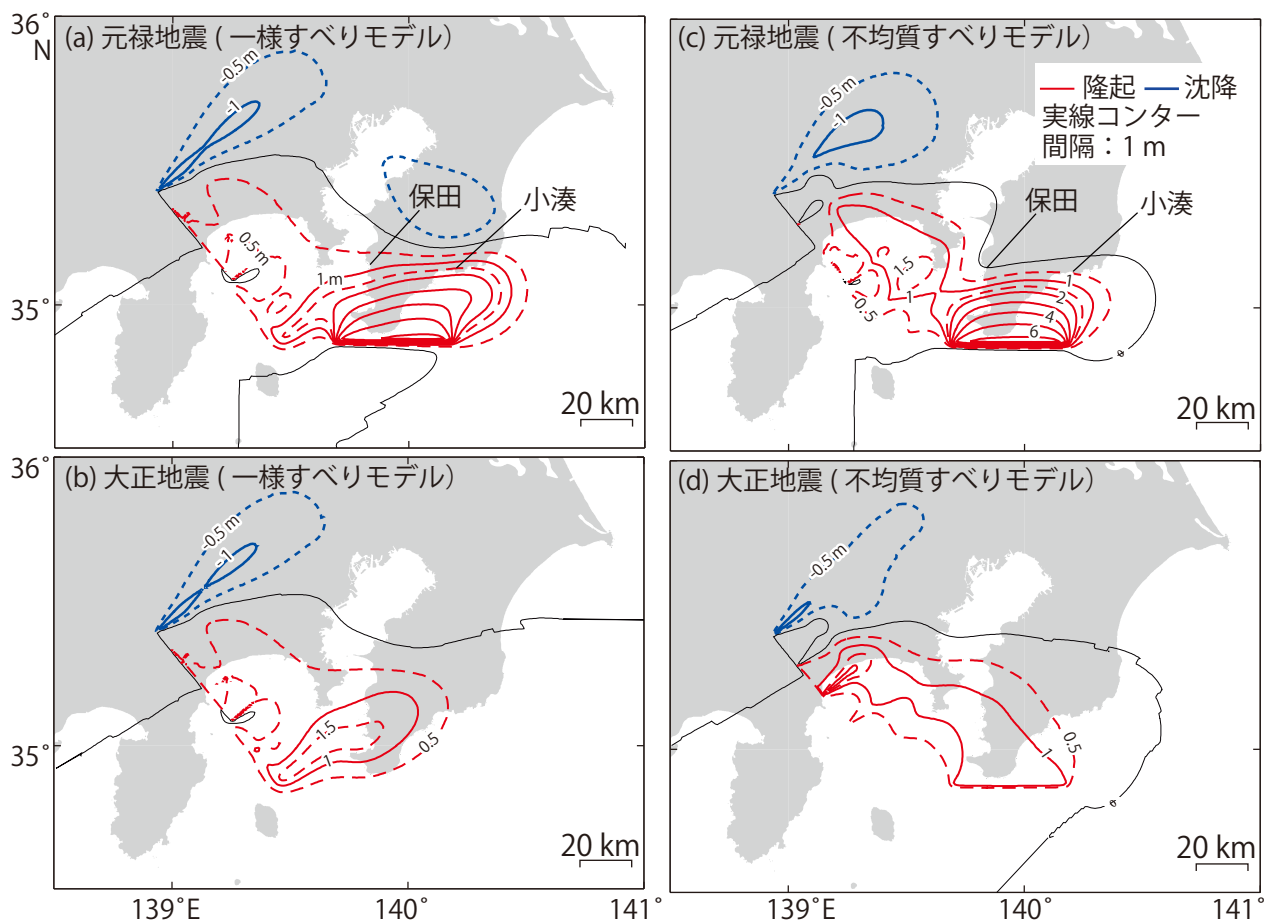
第 7 図. 地殻上下変動量分布からインバージョン解析により推定したすべり量分布. (a) 一様すべりモデルによる元禄地震の例. (b) 一様すべりモデルによる大正地震の例. (c) 不均質すべりモデルによる元禄地震の例. (d) 不均質すべりモデルによる大正地震の例.

Fig. 7. Slip amounts on the subfaults estimated from inversion analyses of the vertical movements for (a) the uniform slip model for the 1703 earthquake, (b) the uniform slip model for the 1923 earthquake, (c) the various slip model of the 1703 earthquake and (d) the various slip model of the 1923 earthquake.



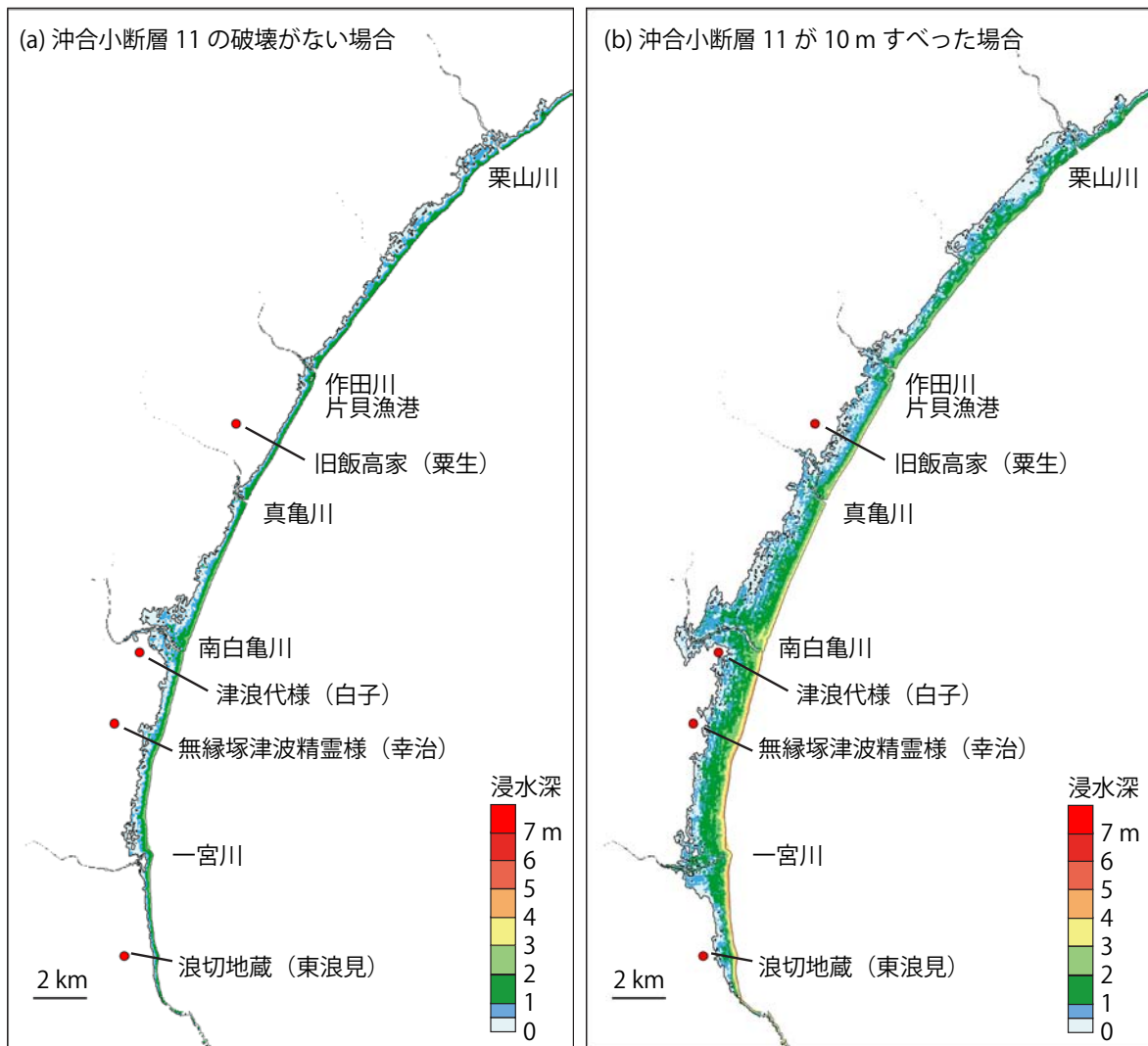
第 8 図. 測定された地殻上下変動量分布と一様すべりモデルおよび不均質すべりモデルによる計算値との比較.  
 (a) 元禄地震の地点番号インデックス. (b) 元禄地震の比較. (c) 大正地震の地点番号インデックス. (d)  
 大正地震の比較. ただし, 大正地震に関しては本図以外の地点における地殻上下変動量分布もインバー  
 ジョン解析に使用.

Fig. 8. (a) Index map of locations where the movements of the 1703 earthquake are compared. (b) Comparisons of the  
 measured coseismic movements of the 1703 earthquake with the calculated ones from the estimated slip amounts  
 using the uniform slip model (the black circles) and the various slip model (the green circles). (c) Index map of the  
 1923 earthquake. (d) Comparisons of the movements of the 1923 earthquake. In case of the 1923 earthquake, more  
 vertical movements were used in the inversion analyses.



第9図. 推定されたすべり量分布から計算された地殻上下変動量分布. (a) 一様すべりモデルにおける元禄地震の例. (b) 一様すべりモデルにおける大正地震の例. (c) 不均質すべりモデルにおける元禄地震の例. (d) 不均質すべりモデルにおける大正地震の例.

Fig. 9. Vertical movements calculated from the estimated slip amounts from (a) the uniform slip model of the 1703 earthquake, (b) the uniform slip model for the 1923 earthquake, (c) the various slip mode for the 1703 earthquake, and (d) the various slip model for the 1923 earthquake.



第 10 図. (a) 推定した不均質すべりモデルによる千葉県九十九里浜における計算津波浸水域. (b) (a) の断層モデルに加えて、沖合の小断層 11 にすべり量を 10 m 与えた場合の浸水計算結果. 赤い点は図 3 で示した元禄津波が来襲した地点.

Fig. 10. (a) Calculated tsunami inundation along the Kujukuri coast from the estimated slip amounts of the various slip model of the 1703 earthquake. (b) Calculated tsunami inundation from the various slip model with an additional subfault located southeastern offshore of the Boso peninsula. The red circles indicate locations where the 1703 tsunami reached.