

関東地方において計器観測初期に発生した地震の調査のための 近年の地震データの収集・整理と1922年浦賀水道付近の地震への予察的適用

東京大学地震研究所* 石辺岳男・佐竹健治・村岸 純・鶴岡 弘・中川茂樹・酒井慎一・平田 直

Compilation of Seismometrical Data of Recent Earthquakes for the Purpose of Investigating Semi-Historical Earthquakes in the Kanto District, Japan, and Preliminary Application to the 1922 Uraga-Channel Earthquake

Takeo ISHIBE, Kenji SATAKE, Jun MURAGISHI, Hiroshi TSURUOKA,

Shigeki NAKAGAWA, Shin'ichi SAKAI and Naoshi HIRATA

Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, Site 1-1-1, Bunkyo, Tokyo 113-0032, Japan

Modern seismological analyses are difficult for earthquakes which occurred in the early period of instrumental observation (between 1870's to 1920's) because of sparse station distributions and low quality of data particularly in clock errors. Source parameters of such old earthquakes can be estimated through comparisons with recent seismological data of known hypocenters and focal mechanism solutions. We compiled S-P times and first-motion polarities of earthquakes in the Kanto district observed between 1923 and 2011 by the Japan Meteorological Agency (JMA), and those between 2008 and 2014 by the Metropolitan Seismic Observation Network (MeSO-net) and other networks. The number of target stations, where these data can be compared with 26 stations in early stage of instrumental observations, is 69 for JMA, and 19 for MeSO-net and other networks, respectively.

We then constructed a new method to determine hypocenters and focal mechanism solutions for semi-historical earthquakes using template matching technique. To quantify the similarity in hypocentral locations between recent and semi-historical earthquakes, we use the root mean squares of S-P time differences. For focal mechanism solutions, we calculated weighted (by the normalized P-wave amplitudes) misfit rate between observed first-motion polarities of semi-historical earthquakes and expected polarities from recent focal mechanism solutions. We confirmed the effectiveness of this method by applying it to recent earthquakes and comparing the distribution of root mean squares of S-P time differences and weighted misfit rates with hypocenters and focal mechanism solutions determined by an ordinary method. Root mean squares of S-P time differences show small values around the true hypocenter and weighted misfit rates become small for focal mechanism solutions which are similar to the true one.

As an example of application to semi-historical earthquake, we preliminary applied this method to the 1922 Uraga-Channel earthquake ($M6.8$). The six S-P times are similar to those reported from recent intermediate-depth earthquakes in the southern part of Chiba Prefecture. The thirteen first-motion polarities are consistent with those expected from recent strike-slip or normal-faulting types earthquakes at depth 60 -70 km within subducting Philippine Sea slab in this region. Such earthquakes are active along the western edge of slab-slab contact zone between Philippine Sea and Pacific Plates. These results suggest that the 1922 Uraga-Channel earthquake was an intra-slab earthquake within the Philippine Sea Plate.

Keywords: S-P Time, First-Motion Polarity, Kanto District, the 1922 Uraga-Channel Earthquake, Template Matching Technique

* 〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1
電子メール: ishibe@eri.u-tokyo.ac.jp

§1. はじめに

日本において、地震の近代計器観測は 1870 年代半ばに始まり、当時の煤書きの波形記録や検測値、被害記録等が収集・保管されている[例えば、気象庁(1957)]. その後の震災や落雷・戦災による焼失などのため不完全ではあるが、これらは計器観測時代初期に発生した地震に関する貴重な資料として地震像の解明に活用されてきた. 例えば、宇津(1979, 1982)は 1885~1925 年に日本で有感であった大地震の震源やマグニチュード(M)を推定し、また宇津(1981)は、東経 136–144°, 北緯 32–38°の関東・中部地域において 1904 年~1925 年に発生した $M5.5$ 以上の有感地震カタログを作成した. なおこれらのカタログにおいて、震源深さは約 100 km 以深の地震のみが数値として示され、100 km 以浅の地震は vs(震源がごく浅く大陸側プレート内部の地震、ほとんどが深さ 0~15 km であると考えられるもの)、s(プレート境界面あるいはその付近の地震、日本の内陸部・沿岸部では深さ 40~80 km 程度、沖合ではより浅い)、d(深発地震であるが深さがわからないもの)に分類されている. その後いくつかの地震に対して震源位置やマグニチュードの改訂が行われてきたものの[例えば、松浦(2013, 2014)], これらは「宇津カタログ」として計器観測時代初期に発生した大地震のカタログとして長年にわたり活用されてきた.

関東地方では、フィリピン海プレート(以下、PHS と略記)の北端部がオホーツクプレート(OKH)の下に沈み込み、太平洋プレート(PAC)が更にその下に沈み込む複雑なテクトニクス下にあり[図 1a; 例えば、瀬野(1995)], (1)陸のプレート内部で起こる浅い地震、(2)陸のプレートと PHS とのプレート境界の地震、(3)陸のプレートと PAC 境界で発生するプレート境界型地震、(4)PHS 内部で発生する地震、(5)PHS と PAC とのスラブ境界の地震、ならびに(6)PAC 内部で発生する地震と、様々な型の地震が発生する. しかしながら、計器観測時代初期に発生した顕著地震がこれらのどれに分類されるのか、明らかにされているものは少ない.

大地震の繰り返し間隔は一般に数百年から数千年に及び、その長期的な繰り返し挙動や複雑性・多様性を理解するためには、なるべく過去に遡って地震活動を調査する必要がある. また、大地震による余震や誘発地震は長期間にわたり継続しうることが報告されている[例えば、松浦(1995); Utsu *et al.* (1995), Ishibe *et al.* (2011b)]. これらの観点から、計器観測時

代初期に発生した地震の震源・発震機構解の推定あるいは類型化は、気象庁による震源カタログ(1923 年 1 月 14 日~)以前に遡及して地震活動を議論するうえで重要な課題である. 特に関東地方ではこの時期は、1923 年大正関東地震($M7.9$)発生前の数十年間にあたり、1894 年 6 月 20 日の明治東京地震($M7.0$; 宇津, 1979 による)などの被害地震が発生したがその詳細は明らかにされていなかった[石辺・他(2009a, b)]. そこで、室谷・他(2012)ならびに石辺・他(2012)は、地震調査委員会(2004)による『相模トラフ沿いの地震活動の長期評価』の中でその他の南関東で発生する $M7$ 級地震に対する長期評価の対象となった 5 つの $M7$ 級被害地震(1894 年明治東京地震, 1895 年ならびに 1921 年茨城県南部の地震, 1922 年浦賀水道付近の地震, 1987 年千葉県東方沖の地震)に対する既往研究ならびに地震波形記録や検測値などのデータを収集し、その類型化を試みた.

しかしながら、計器観測時代初期の地震に対して残された記録は限られており、通常的手法を用いて震源・発震機構解を推定するには困難が伴う. 例えば、当時の地震計は刻時精度が低く、P 波や S 波の到達時刻が周辺の観測点から顕著に乖離したものが散見される. このため、この時期に発生した地震の震源決定には時計のずれに依らない初期微動継続時間(S-P 時間)が用いられることが多い[例えば石橋, (1975a, c)]. また地震波形が残されているものの、紙送り速度や倍率など地震計の計器特性が不明なため、その活用が困難な場合も少なくない. さらに、観測点が疎であったため一意的な発震機構解の推定も容易ではない.

近年(特に 1995 年兵庫県南部地震以降)には、高感度地震観測網あるいは広帯域地震観測網が全国に展開され[例えば、Okada *et al.* (2004), Obara *et al.* (2005)], 震源や発震機構解が高精度で決定されるようになってきた[例えば、福山・他(1998)]. また、2007 年度から 5 か年で実施された「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト」において、高精度の震源決定や強震動予測に必要な地震波速度構造と非弾性常数(Q 値)の三次元分布を解明するとともに、プレート境界面の形状やプレート内における弱面の存在等を把握することを目的として、296 観測点からなる首都圏地震観測網(Metropolitan Seismic Observation network; MeSO-net)が展開され、観測が行われている[笠原・他(2009), 酒井・平田(2009)].

近年の地震に対する S-P 時間や初動、あるいは震

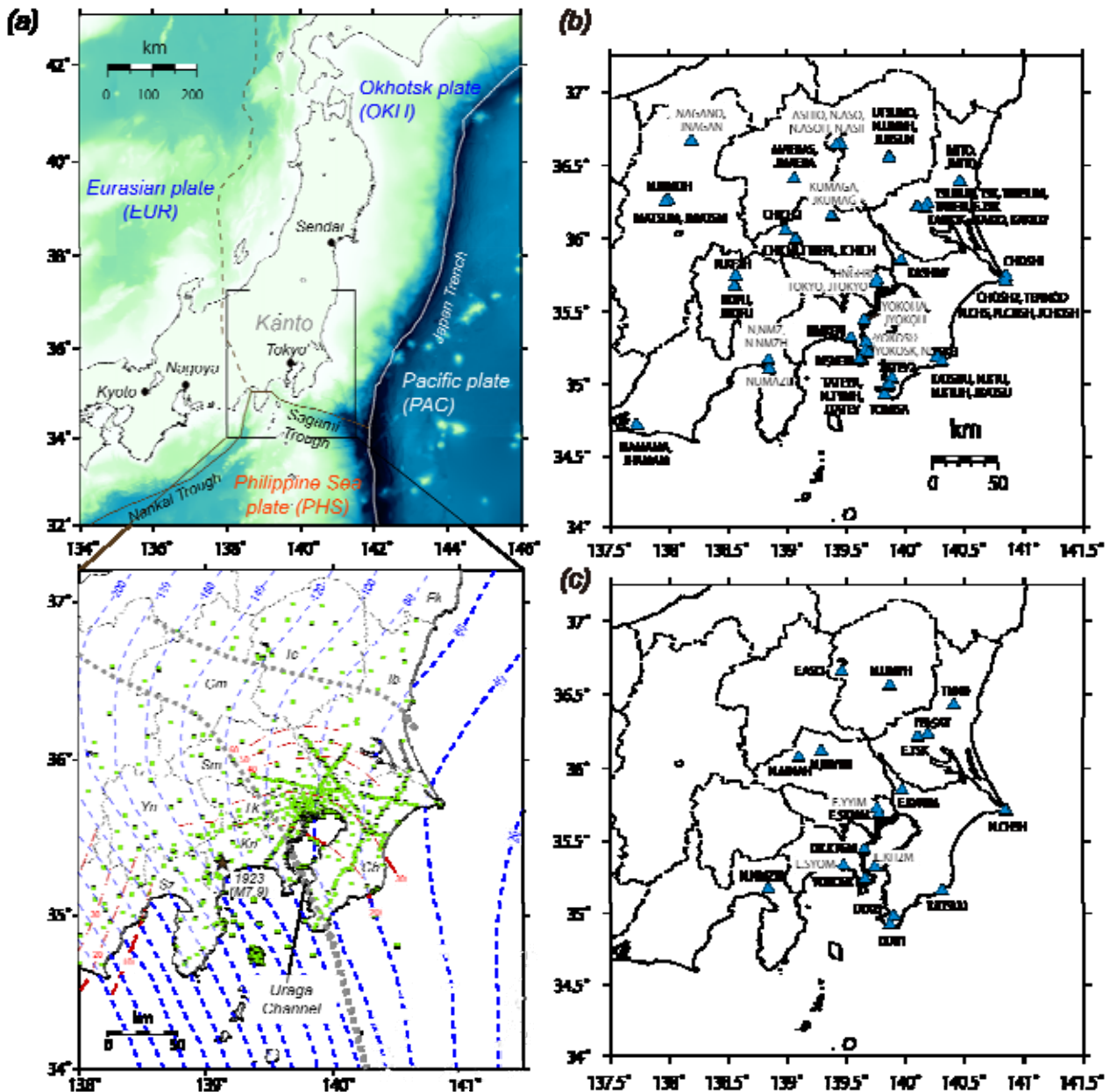


図 1. (a) 関東地方のテクトニックセッティング。プレート境界データは Bird (2003) による。下の拡大図において細破線・鎖線はそれぞれ太平洋プレート・フィリピン海プレート上面の深さを示す (笠原, 1985)。太破線は Nakajima *et al.* (2009) によるフィリピン海プレートと太平洋プレートの接触域を表す。黒鎖線は県境を表し、Fk, Tc, Gm, Ib, Sm, Cb, Kn, Sz, Yn, Tk はそれぞれ福島県、栃木県、群馬県、茨城県、埼玉県、千葉県、神奈川県、静岡県、山梨県、東京都を表す。四角は首都圏地震観測網 (MeSO-net) あるいは既存の観測点を表す。星印は気象庁による 1923 年大正関東地震の震央。(b) 気象庁総合検測値ファイルから S-P 時間ならびに初動を出力した観測点の分布。(c) MeSO-net あるいは既存観測網において S-P 時間ならびに初動を出力した観測点の分布。

Fig. 1. (a) Tectonic setting in the Kanto region. Plate boundary data is from Bird (2003). In a lower magnified figure, iso-depth contours of the PAC and PHS slab upper surfaces from Kasahara (1985) are indicated by broken and chain lines, respectively. Bold broken lines indicate the western and eastern edges of the area where the upper surface of the PAC is in contact with the lower surface of the PHS (slab-slab contact zone; Nakajima *et al.*, 2009). Fk, Tc, Gm, Ib, Sm, Cb, Kn, Sz, Yn, and Tk indicate Fukushima, Tochigi, Gunma, Ibaraki, Chiba, Kanagawa, Shizuoka, and Yamanashi prefectures, and Tokyo Metropolis, respectively. Solid squares indicate the observation stations of the Metropolitan Seismic Observation network (MeSO-net) and other networks. A filled star indicates the hypocenter of the 1923 Kanto earthquake by Japan Meteorological Agency (JMA). (b) Distribution of observation stations where the S-P times and first-motion polarities are compiled from JMA pick data. (c) Distribution of observation stations where the S-P times and first-motion polarities are compiled from pick data by the MeSO-net or other networks.

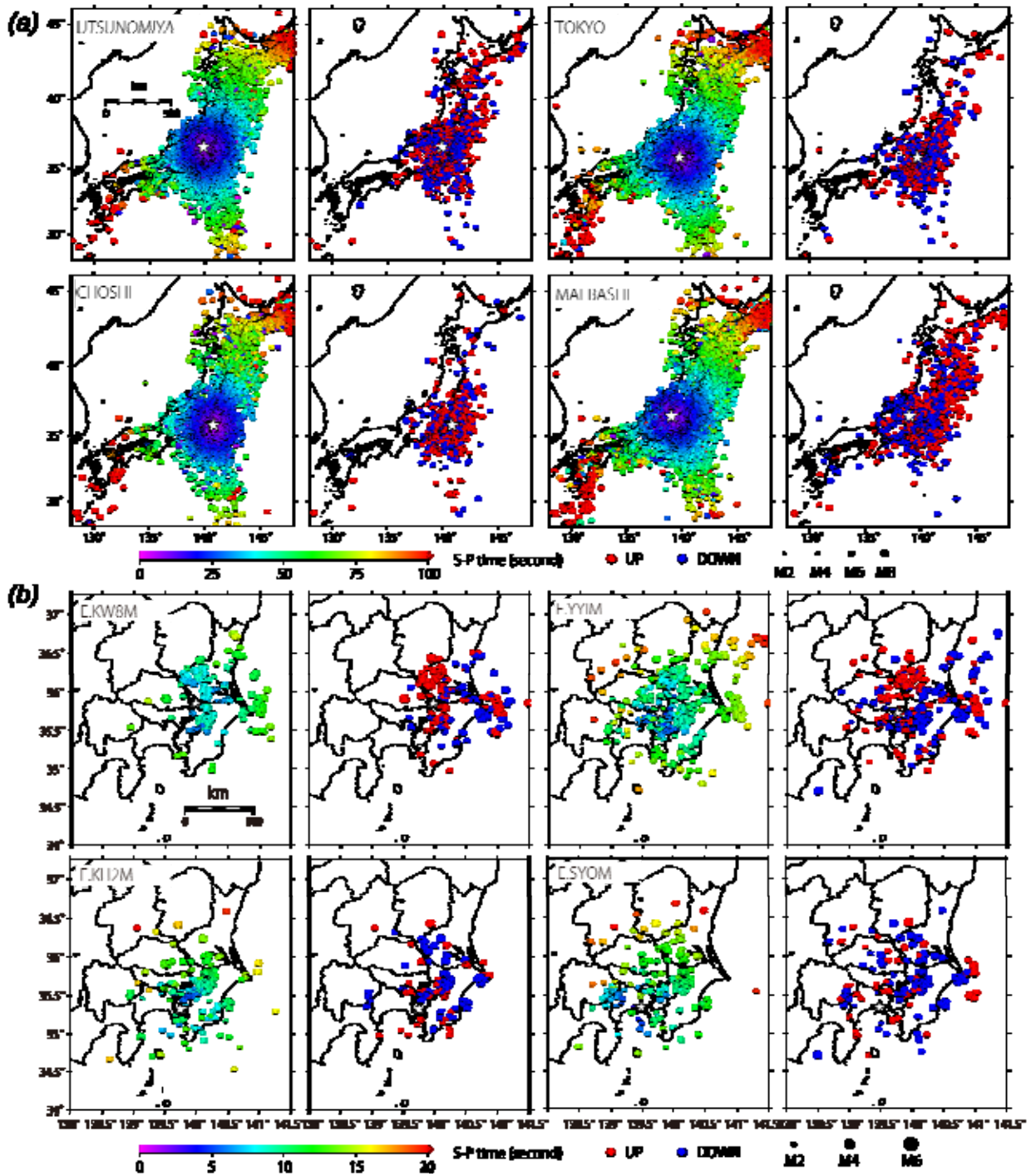


図 2. (a) 宇都宮，東京，銚子，前橋の気象庁観測点における（左）S-P 時間，（右）初動（赤；上方動，青；下方動）を気象庁カタログ（1923 年 1 月 14 日～2011 年 12 月 31 日）の震央にプロットしたもの．星印はそれぞれの観測点の位置を表す．(b) 柏（E.KW8H），本郷（E.YYIM；弥生（東京大学地震研究所構内）），横須賀（E.KH2M；第二海堡）ならびに鎌倉震研（E.SYOM）における（左）S-P 時間，（右）初動（赤；上方動，青；下方動）の分布を MeSO-net 検測値から決定した震央（2008 年 4 月 1 日～2014 年 7 月 10 日）にプロットしたもの．本図のカラー版は口絵 1 参照．

Fig. 2. (a) For each of four stations, Utsunomiya, Tokyo, Choshi, and Maebashi, observed S-P times (left) and first-motion polarities (right) are plotted at epicenters of the JMA catalog from January 14th, 1923 to December 31st, 2011. White star indicates the location of each observation station. (b) For each of four stations, Kashiwa (E.KW8H), Hongo (E.YYIM; Yayoi), Yokosuka (E.KH2M), and Kamakura (E.SYOM), observed S-P times (left) and first-motion polarities (right) are plotted at epicenters determined by using pick data from MeSO-net and other networks from April 1st, 2008 to July 10th, 2014. White star indicates the location of each observation station. See Frontispiece 1 for the color version.

源・発震機構解等を活用し、これらとの比較から計器観測時代初期に発生した大地震をより詳細に解明できる可能性がある。そこで本研究では、関東地方において明治・大正期に設置されていた観測点あるいはその近傍の観測点を対象として、気象庁検測値ならびに MeSO-net による S-P 時間と初動の分布を整理した。また、5 つのカタログを用いて近年の地震に対する発震機構解を整理した。さらに、これらのデータとの比較から、1922 年浦賀水道付近の地震について予察的に検討を行い、この地震が PHS 内部で発生した地震であった可能性を示す。

§2. 近年の地震観測網に基づくデータの収集ならびに整理

2.1 S-P 時間・初動

明治・大正期に関東及びその周辺域において気象官署(気象大学を含む)によって設置、観測が行われていた 21 観測点(水戸・柿岡・筑波山・宇都宮・足尾・前橋・熊谷・秩父・柏・銚子・勝浦・富崎・館山・東京・八丈島・横浜・横須賀・沼津・松本・甲府・浜松)、ならびに東京帝国大学による 5 観測点(本郷・一ツ橋・筑波・鎌倉・三崎(油壺))と対比可能な近年の観測点(気象庁;69 観測点, MeSO-net(既存観測網を含む);19 観測点)を対象に S-P 時間ならびに初動を整理し、これらの情報を観測点ごとに 1 ファイルに纏めた。なお、気象官署における地震観測履歴として、浜松(1966)を参考にした。また、東京帝国大学等による観測点は歴史地震気象検索システム[野口・他(2001)]によった。

より長期間かつ大量にあることが望まれることから、S-P 時間ならびに初動の整理にあたり、1923 年 1 月 14 日以降、2011 年 12 月 31 日までの気象庁検測値ファイル、ならびに 2008 年 4 月 1 日以降、2014 年 7 月 10 日までに MeSO-net で検測された地震に対する検測値を網羅的に用いた。明治・大正期の観測点と対比可能な気象庁検測値ファイル中の観測点コードを図 1b に、MeSO-net(既存の観測点を含む)検測値中の観測点を図 1c にそれぞれ示す。なお、移設等によって観測点コードが変更された場合は別の観測点として取り扱った。

図 2a に宇都宮、東京、銚子、および前橋の気象庁観測点で記録された S-P 時間ならびに初動の分布を気象庁カタログの震央位置にプロットしたものを示す。また、図 2b に MeSO-net あるいは既存の観測網のうちの柏(E.KW8H)、本郷(E.YYIM; 弥生)、横須賀

(E.KH2M; 第二海堡)、ならびに鎌倉震研(E.SYOM)における S-P 時間ならびに初動の分布を示す。弥生観測点は、現在の東京大学地震研究所 1 号館脇に設置されており、明治・大正期に観測されていた本郷観測点(当時、東京帝国大学構内)と 1 km 未満の距離にある。図 3 は 4 ヶ所の観測点における震源距離と S-P 時間との関係を示したものである。S-P 時間は震源-観測点間の距離に比例する大森公式に概ね従うが、検測のばらつきあるいは速度構造(特に V_p/V_s 比)の不均質に起因すると考えられるばらつきが見られる。なお、それぞれの観測点における S-P 時間ならびに初動の検測数は稼働期間ならびに周辺の地震活動度に強く依存する。

2.2 発震機構解

本研究ではまた、5 つのカタログを用いて近年に関東及びその周辺域において発生した地震の発震機構解を整理した。なお、5 つのカタログの間で同一の地震に対する発震機構解が重複した場合、本研究では重複を許して別々の地震として取り扱い、いずれの発震機構解に対しても後述の乖離度を計算した。

1 つ目は 1979 年 7 月以降、2003 年 7 月まで稼働した関東・東海地殻活動観測網による初動発震機構解[松村・関東東海地殻活動観測研究グループ(2002)]であり、防災科学技術研究所によって公開されている。その数は関東およびその周辺域(東経 138-141.5°, 北緯 34-37.25°)において 42,431 個である。本研究では、T 軸ならびに P 軸の推定誤差がともに 20 度以上の発震機構解を除いた 23,549 イベントに対する発震機構解を用いた。2 つ目は広帯域地震観測網(F-net)による波形から防災科学技術研究所によって決定・公開されている F-net 解のうち、Variance Reduction が 80 %以上の 3,643 地震(1997 年~2014 年)に対する発震機構解である。3 つ目は、気象庁による 1997 年 10 月以降、2014 年 7 月までの地震に対する初動発震機構解である。関東およびその周辺域においてスコアが 90 以上の 3,843 地震に対する発震機構解を用いた。4 つ目は JUNEC 初動メカニズム解カタログ(JUNEC FM²)[Ishibe *et al.* (2014)]である。このカタログは国立大学観測網地震カタログ(JUNEC)の初動ならびに HASH v1.2 [Hardebeck and Shearer (2002)]を改良したプログラム(以下、改良 HASH)を用いて、1985 年 7 月から 1998 年 12 月までに日本で発生した 14,544 個の地震の発震機構解を推定したものである。本研究では、品質が A または B

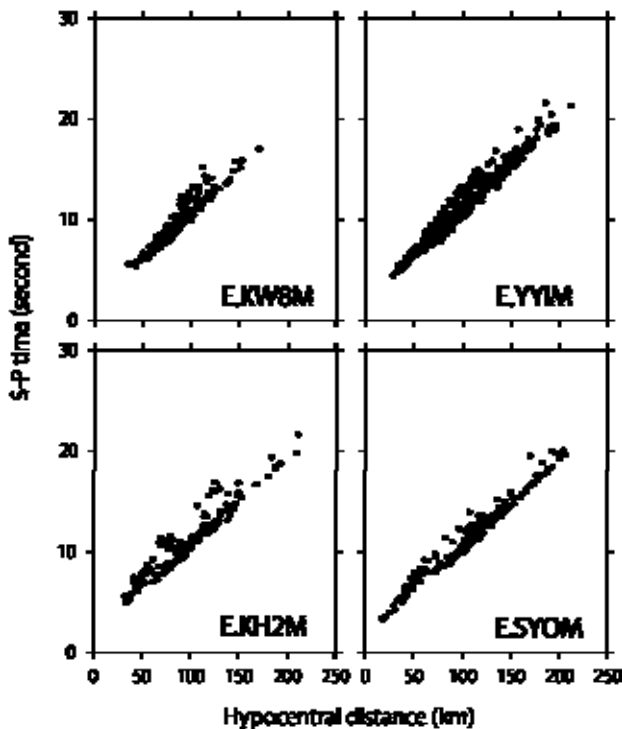


図 3. 柏 (E.KW8H), 本郷 (E.YYIM; 弥生), 横須賀 (E.KH2M; 第二海堡), ならびに鎌倉震研 (E.SYOM) における震源距離と S-P 時間の関係。

Fig. 3. Relationship between hypocentral distances and S-P times at Kashiwa (E.KW8H), Hongo (E.YYIM; Yayoi), Yokosuka (E.KH2M), and Kamakura (E.SYOM) stations.

[品質の詳細については, Hardebeck and Shearer (2002)を参照]の 1,277 地震に対する発震機構解を用いた. 5 つ目は, MeSO-net によって観測された初動に基づき同様に改良 HASH を用いて推定した発震機構解[Ishibe *et al.* (2015)]である. 本研究では 2008 年 4 月 1 日以降, 2014 年 7 月 10 日までに発生した地震のうち, 品質が A または B の 2,104 地震に対する発震機構解を用いた.

図 4 に整理された発震機構解をもつ地震の震源分布, 発震機構解の累積個数と 1 年あたりの個数, ならびに規模別頻度分布を示す. その発震機構解数は, 関東地方において 30,000 個以上に及ぶ. 関東・東海地殻活動観測網としての観測は 2003 年 7 月に終了したため, この時期を境に 1 年あたりの発震機構解数が減少する傾向が認められる. なお, 1 年あたりの発震機構解数における 2000 年の顕著な突出は伊豆諸島での活発な群発地震に起因するものである. また, 2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震後に関東地方では地震活動の活発化が観測されており, 発震機構解数にもその様子がみとれる.

§3. 近年の地震観測網によるデータとの乖離度

本研究ではテンプレートマッチング法に基づき, 震源・発震機構解の推定を行った. テンプレートマッチング法は元々, 画像情報処理技術として発展してきた手法であり, 画像内にある対象物体の位置検出, 物体数のカウント, あるいは物体移動の検出などに用いられてきた. 具体的には, テンプレート画像を入力画像で走査させて入力画像上の各位置における類似度(あるいは乖離度)を算出し, 最大あるいは閾値以上の位置を検出するものである. 明治・大正期の地震に対する記録をテンプレート画像と見做し, 豊富な最近の地震データを入力画像として走査することで, どの地震と最も類似していたのか, あるいは閾値を設定した場合にどの地震が可能性として考えられるのか議論できると期待される.

近年の地震に対するデータと, 計器観測時代初期に発生した地震に対する報告値との乖離度として, S-P 時間に対しては残差の二乗平均平方根を用いた. なお, S-P 時間に対する乖離度は, 震源の深さがフリーで決定され, かつ深さの誤差が 5 km 未満の地震を対象に, 比較可能な観測点が 3 点以上の場合に算出した.

また初動に対しては, 発震機構解から期待される P 波の理論振幅値で規格化した重み付きミスフィット率を計算した. 重み付きミスフィット率の計算にあたり, 初動の射出角ならびに方位角の計算には改良 HASH ならびに気象庁による速度構造[JMA2001; 上野・他(2002)]を用いた.

§4. 近年の地震観測網によるデータとの比較に基づく類型化の可能性検証

本研究で指標とした乖離度によって, 震源・発震機構解をどの程度制約できるのか, 手法の妥当性・有効性を検証するため, 2011 年 3 月 16 日の銚子沖の地震 ($M6.1$), 2012 年 5 月 18 日の茨城県南西部の地震 ($M4.8$), 2012 年 2 月 16 日の千葉県南西部の地震 ($M3.3$), ならびに 2005 年 7 月 23 日の千葉県北西部の地震 ($M6.0$) の 4 地震に対して本手法を適用した (図 5~8).

2011 年 3 月 16 日の地震は, 2011 年東北地方太平洋沖地震後に銚子沖において活発化した正断層型の地殻内地震である. S-P 時間の乖離度は, 気象庁による震源位置と調和的な銚子沖において極めて小さくなる (図 5a). また重み付きミスフィット率は, 銚

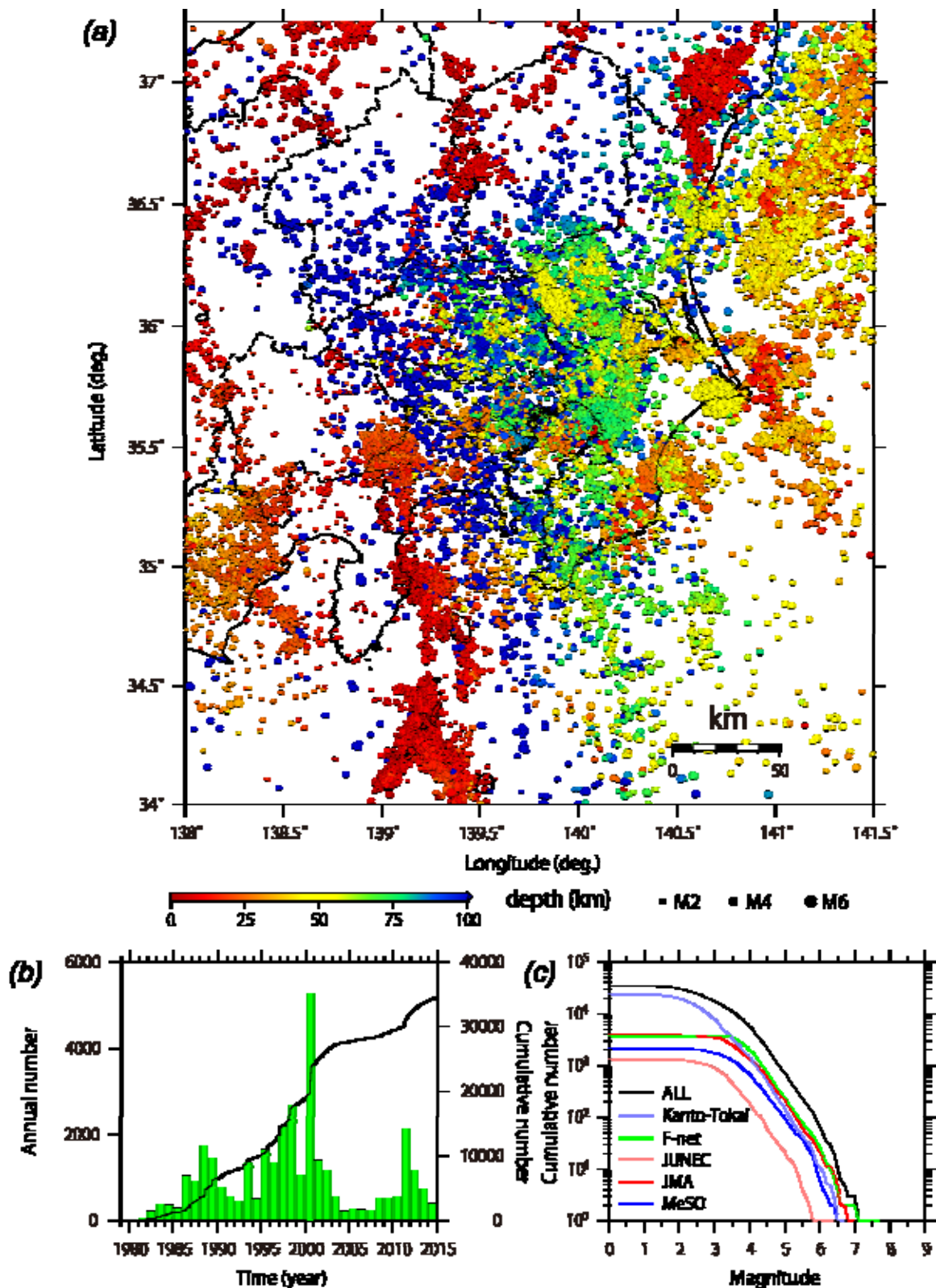


図 4. (a) 関東ならびにその周辺域において 5 つのカタログから整理された発震機構解をもつ地震の震央分布。色は震源の深さを表す。(b) 1 年あたりの発震機構解数(棒グラフ; 左軸)ならびに累積頻度曲線(実線; 右軸)。(c) 本研究で整理した発震機構解が推定された地震の規模別頻度分布。本図のカラー版は口絵 2 参照。

Fig. 4. (a) Distribution of earthquakes for which focal mechanism solutions were compiled from five catalogs. The colors indicate hypocentral depths. (b) Annual frequency of earthquakes with compiled focal mechanisms (green bars; left axis) and cumulative frequency curve (black line; right axis). (c) Magnitude-frequency distribution of earthquakes that the focal mechanism solutions were compiled. See Frontispiece 2 for the color version.

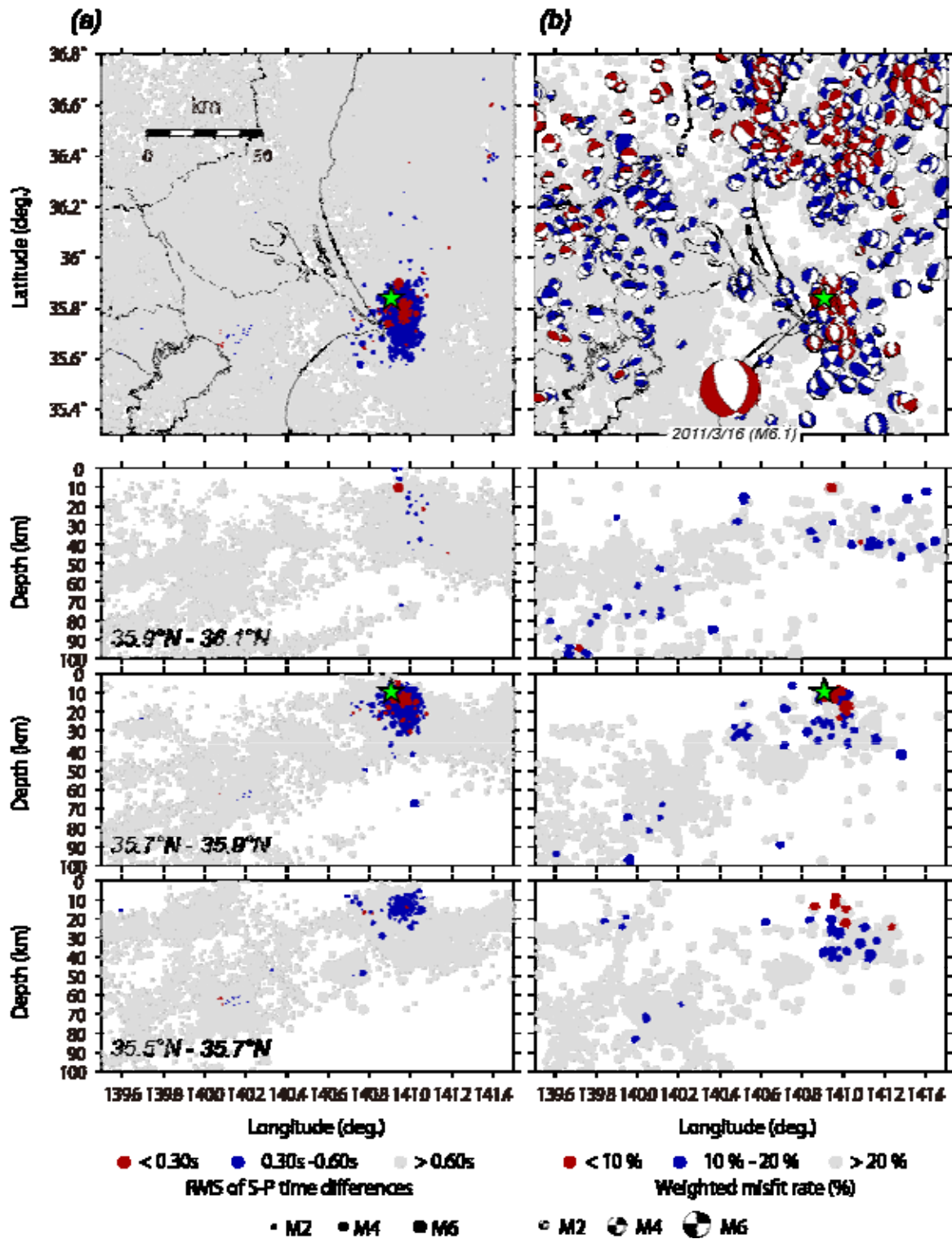


図 5. (a) 2011 年 3 月 16 日の地震 ($M6.1$) と近年の地震との間の S-P 時間の残差の二乗平均平方根の分布ならびにその東西断面図。緑星印は気象庁による震源を表す。(b) 近年の地震の発震機構解に対する重み付きミスフィット率の分布ならびにその東西断面図。重み付きミスフィット率が 20% 以下の発震機構解のみを震源球表示している。本図のカラー版は口絵 3 参照。

Fig. 5. (a) Distribution of root mean squares of S-P time differences between recent earthquakes and the earthquake of March 16th, 2011. East-west cross sections for $35.9^{\circ}\text{N}-36.1^{\circ}\text{N}$, $35.7^{\circ}\text{N}-35.9^{\circ}\text{N}$, and $35.5^{\circ}\text{N}-35.7^{\circ}\text{N}$ are also shown. Green star indicates the hypocenter of earthquake on March 16th, 2011 by JMA. (b) Distribution of weighted misfit rates of the first-motion polarities reported for the earthquake of March 16th, 2011 for focal mechanism solutions for recent earthquakes. Only focal mechanism solutions with weighted misfit rates $\leq 20\%$ are shown in the lower hemispheres. East-west cross sections for $35.9^{\circ}\text{N}-36.1^{\circ}\text{N}$, $35.7^{\circ}\text{N}-35.9^{\circ}\text{N}$, and $35.5^{\circ}\text{N}-35.7^{\circ}\text{N}$ are also shown. See Frontispiece 3 for the color version.

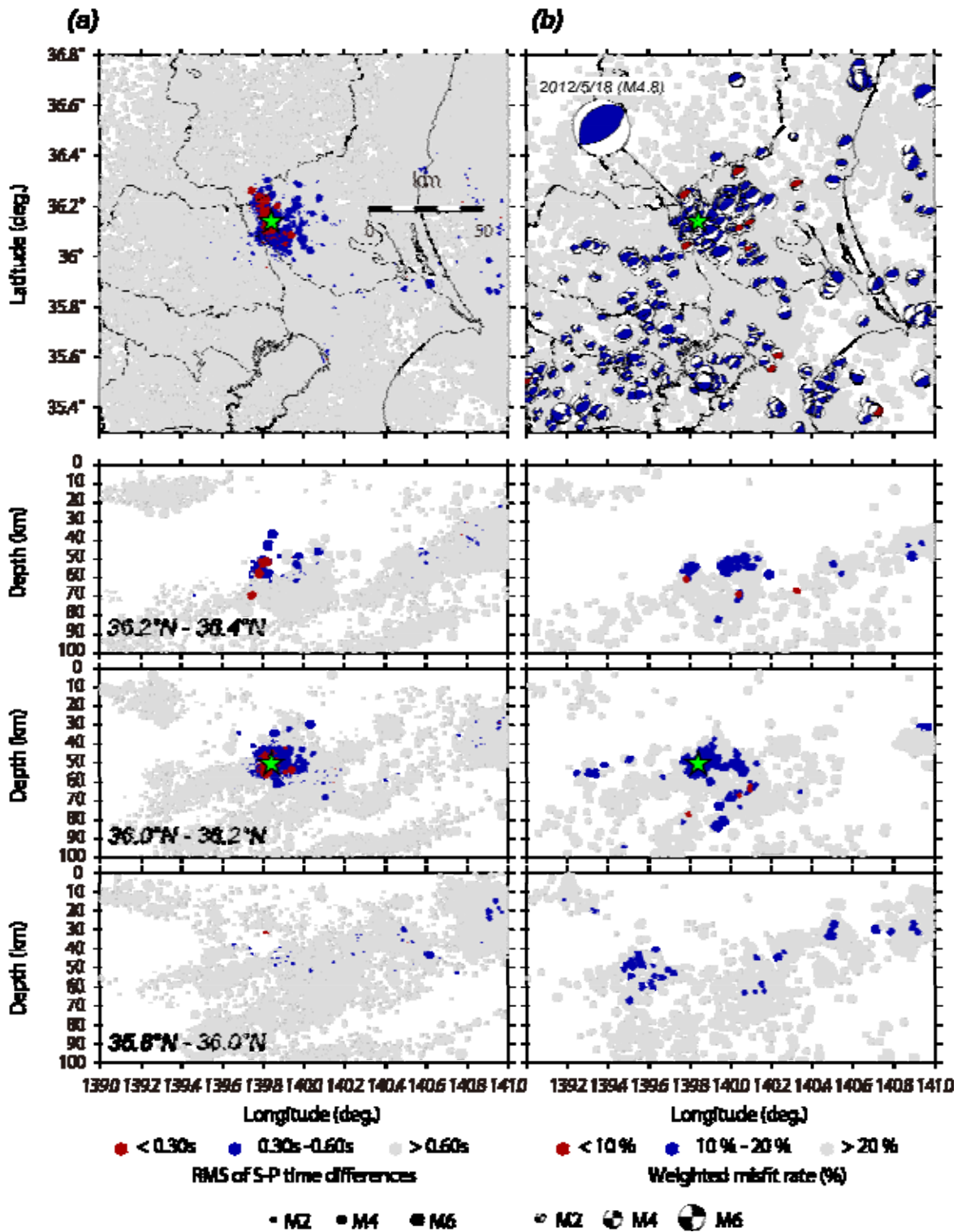


図 6. (a) 2012 年 5 月 18 日の地震 ($M4.8$) と近年の地震との間の S-P 時間の残差の二乗平均平方根の分布ならびにその東西断面図。緑星印は気象庁による震源を表す。(b) 近年の地震の発震機構解に対する重み付きミスフィット率の分布ならびにその東西断面図。重み付きミスフィット率が 20% 以下の発震機構解のみを震源球表示している。本図のカラー版は口絵 4 参照。

Fig. 6. (a) Distribution of root mean squares of S-P time differences between recent earthquakes and the earthquake of May 18th, 2012. Green star indicates the hypocenter of earthquake on May 18th, 2012 by JMA. East-west cross sections for 36.2° - 36.4° N, 36.0° - 36.2° N, and 35.8° - 36.0° N are also shown. (b) Distribution of weighted misfit rates of the first-motion polarities reported for the earthquake of May 18th, 2012 for focal mechanism solutions for recent earthquakes. Only focal mechanism solutions with weighted misfit rates $\leq 20\%$ are shown in the lower hemispheres. East-west cross sections for 36.2° - 36.4° N, 36.0° - 36.2° N, and 35.8° - 36.0° N are also shown. See Frontispiece 4 for the color version.

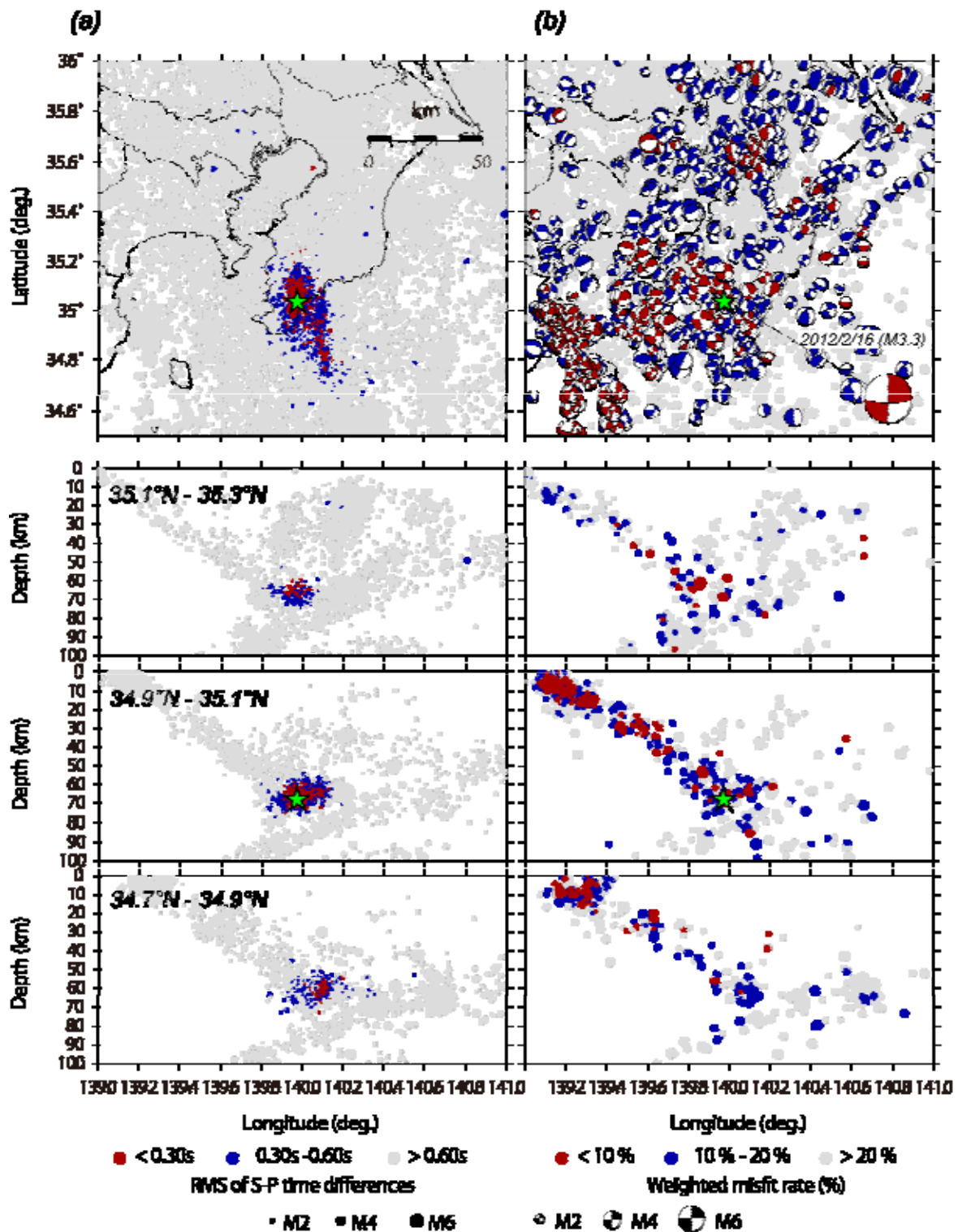


図 7. (a) 2012 年 2 月 16 日の地震 ($M3.3$) と近年の地震との間の S-P 時間の残差の二乗平均平方根の分布ならびにその東西断面図。緑星印は気象庁による震源を表す。(b) 近年の地震の発震機構解に対する重み付きミスフィット率の分布ならびにその東西断面図。重み付きミスフィット率が 20% 以下の発震機構解のみを震源球表示している。本図のカラー版は口絵 5 参照。

Fig. 7. (a) Distribution of root mean squares of S-P time differences between recent earthquakes and the earthquake of February 16th, 2012. East-west cross sections for 35.1°-35.3°N, 34.9°-35.1°N, and 34.7°-34.9°N are also shown. Green star indicates the hypocenter of earthquake on February 16th, 2012 by JMA. (b) Distribution of weighted misfit rates of the first-motion polarities reported for the earthquake of February 16th, 2012 for focal mechanism solutions of recent earthquakes. Only focal mechanism solutions with weighted misfit rates $\leq 20\%$ are shown in the lower hemispheres. East-west cross sections for 35.1°-35.3°N, 34.9°-35.1°N, and 34.7°-34.9°N are also shown. See Frontispiece 5 for the color version.

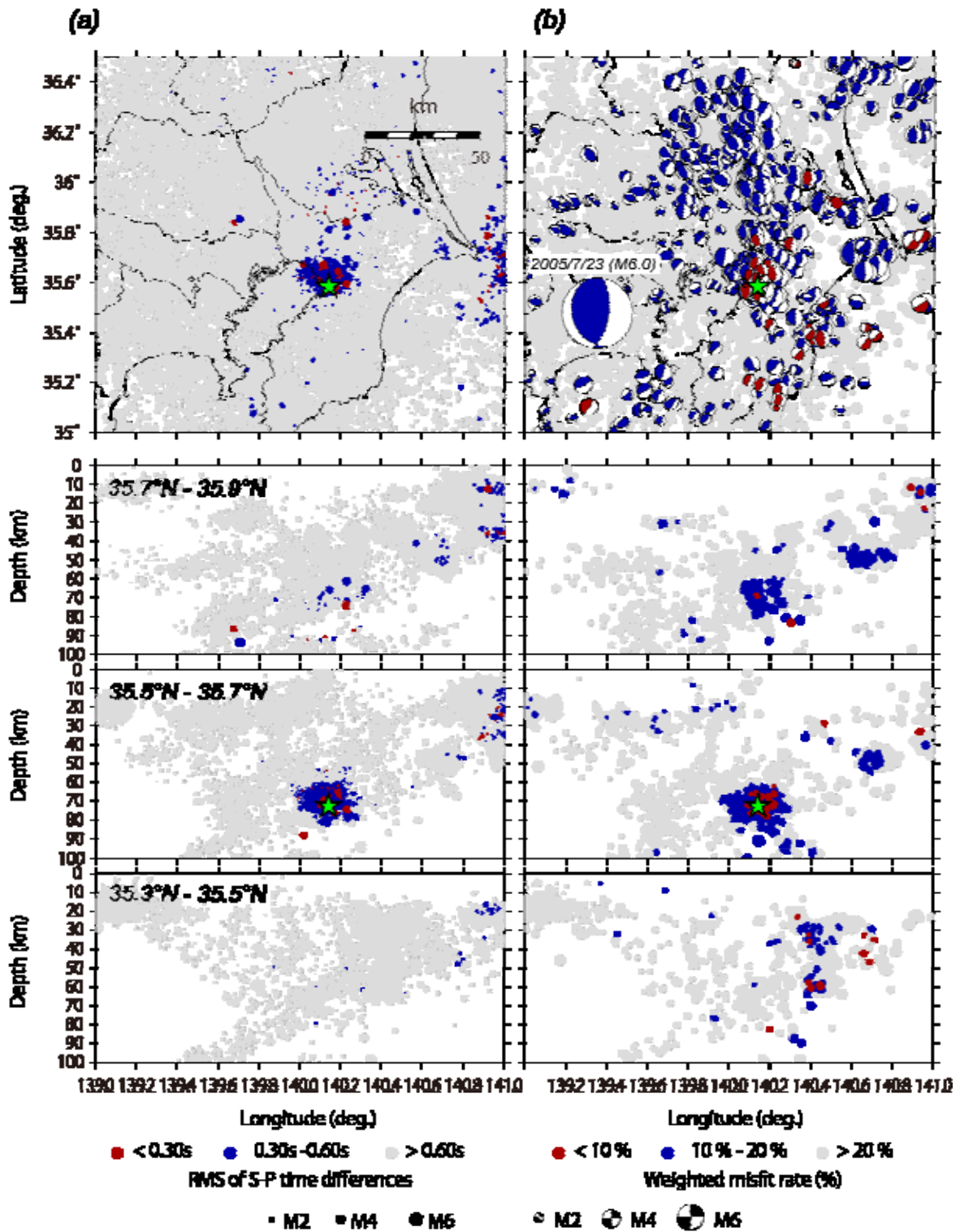


図 8. (a) 2005 年 7 月 23 日の地震 ($M6.0$) と近年の地震との間の S-P 時間の残差の二乗平均平方根の分布ならびにその東西断面図。緑星印は気象庁による震源を表す。(b) 近年の地震の発震機構解に対する重み付きミスフィット率の分布ならびにその東西断面図。重み付きミスフィット率が 20% 以下の発震機構解のみを震源球表示している。本図のカラー版は口絵 6 参照。

Fig. 8. (a) Distribution of root mean squares of S-P time differences between recent earthquakes and the earthquake of July 23th, 2005. East-west cross sections for 35.7° - 35.9° N, 35.5° - 35.7° N, and 35.3° - 35.5° N are also shown. Green star indicates the hypocenter of earthquake on July 23th, 2005 by JMA. (b) Distribution of weighted misfit rates of the first-motion polarities reported for the earthquake of July 23th, 2005 for focal mechanism solutions for recent earthquakes. Only focal mechanism solutions with weighted misfit rates $\leq 20\%$ are shown in the lower hemispheres. East-west cross sections for 35.7° - 35.9° N, 35.5° - 35.7° N, and 35.3° - 35.5° N are also shown. See Frontispiece 6 for the color version.

子沖のごく浅い領域に多く分布する, T 軸が東西を向く正断層型地震(一部横ずれ型地震)と調和的である(図 5b). なお, 2011 年 3 月 16 日の地震に対する発震機構解では重み付きミスフィット率は 6%となり, これは 34,416 地震の発震機構解に対する重み付きミスフィット率のうち 92 番目に小さい値である. またこれより重み付きミスフィット率が小さい地震には, 銚子沖の正断層型地震が多く含まれている.

2012 年 5 月 18 日の地震は, 定常的に地震活動が活発な茨城県南西部における地震クラスターで発生した PHS 上面の地震である. S-P 時間の乖離度は, 気象庁による震源と調和的な茨城県南西部において小さくなる(図 6a). また, 重み付きミスフィット率は茨城県南西部において活発な PHS 上面の地震に典型的な南西-北東走向の逆断層型の発震機構解に対して小さくなる(図 6b). この地震に対する重み付きミスフィット率は 16%となり, 34,416 地震のうち 933 番目に小さい値である. これより重み付きミスフィット率が小さい発震機構解の多くは, 同様に茨城県南西部において活発な PHS 上面の地震に対するものである.

2012 年 2 月 16 日の地震は, 千葉県南西部の深さ 65 km 程度で発生した PHS スラブ内地震である. S-P 時間の乖離度は気象庁震源と調和的な千葉県南西部において顕著に小さい値を示し(図 7a), この領域において T 軸が南西-北東を向く横ずれ型地震に対して小さな重み付きミスフィット率を示す(図 7b). この地震の発震機構解に対する重み付きミスフィット率は 1%であり, 34,416 地震に対する発震機構解のうち一番小さい値となる.

2005 年 7 月 23 日の地震は千葉県北西部の深さ 70 km 程度で発生した PAC プレート上面付近(または PHS スラブ内地震との報告もある)の地震である. S-P 時間の乖離度は千葉県北西部の深さ 70 km 程度において顕著に小さくなり(図 8a), 重み付きミスフィット率は PAC 上面の地震に典型的な南北走向の逆断層型地震に対して小さくなる(図 8b). この地震の発震機構解に対する重み付きミスフィット率は 11%であり, 34,416 地震のうち 762 番目に小さい値となる.

§5. 1922 年浦賀水道付近の地震への予察的適用

1922(大正十一)年 4 月 26 日に発生した地震(M6.8;宇津, 1979 による)は, 京浜, 三浦, 房総の東京湾沿岸一帯に家屋や土蔵の破損, 水道管の破裂やがけ崩れなどの被害を与え, 浦賀水道付近の地震

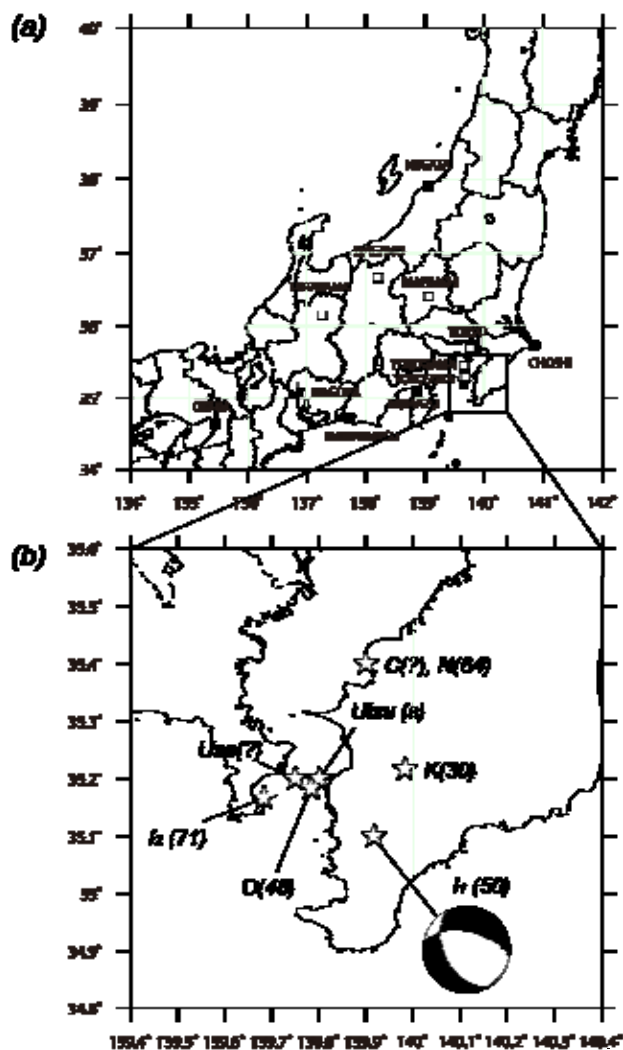


図 9. (a) 1922 年浦賀水道付近の地震に対する初動(黒; 上方動, 白; 下方動). (b) 1922 年浦賀水道付近の地震の震源[C: 中央気象台(1922), N: 中村(1922a), Nakamura(1922b), O: Omori(1922d), K: 勝又(1975a, b), I₁: 石橋(1975a), I₂: 石橋(1975c, d) Utsu: 宇津(1979), Usa: 宇佐美・他(2013)による]と発震機構解[石橋(1975b)による]. 括弧内は震源の深さ(km)を示す. (s はやや深い地震, ?は不明を表す).

Fig. 9. (a) Distribution of first-motion polarities for the 1922 Uruga-Channel earthquake. (b) Hypocenter [C: Central Meteorological Observatory (1922), N: Nakamura (1922a, b), O: Omori (1922d), K: Katsumata (1975a, b), I₁: Ishibashi (1975a), I₂: Ishibashi (1975c, d), Utsu: Utsu (1979), Usa: Usami *et al.* (2013)] and focal mechanism [Ishibashi (1975b)] of the 1922 Uruga-Channel earthquake. Parenthetic number or character (s: intermediate-depth; ?: unknown) indicates hypocentral depth (in km).

と呼ばれてきた。東京と横浜で1名ずつ、計2名の死者が生じた。

中央气象台(1922)、中村(1922a)、Nakamura(1922b)、大森(1922a, b, c)、Omori(1922d)、勝又(1975a, 1975b)、石橋(1975a, c, d)、宇津(1979)、宇佐美・他(2013)などによって震源決定がなされているが、推定された震源は浦賀水道内に留まらず、広範にわたる(図 9b)。例えば、石橋(1975a)は、横須賀、東京(本郷)、銚子、横浜、東京(一ツ橋)、沼津、熊谷、水戸、前橋の S-P 時間を用いて多層構造モデルのもとで震源決定を行い、震源を 139°55'E, 35°06'N、深さ 50 km の嶺岡付近に推定した。石橋(1975c, d)は、データの信頼性を再検討して銚子、横浜、前橋を除外し、東京(本郷)での S-P 時間 10.4 秒、東京(一ツ橋)の 10.8 秒、横須賀の 6.3 秒、沼津の 11.1 秒、熊谷の 14.0 秒及び水戸の 16.0 秒から、震源を 139°41'E, 35°10'N、深さ 71±21 km と推定した。ただし誤差を考慮して、震央は三浦半島先端部から浦賀水道を経て房総半島南部に至る一帯のどこかで、深さは 40~70 km 程度とした。なお石橋(1975b)は、石橋(1975a)の震源に対して、「解は自由度がかなりあるので模式的に示したが、P 軸はあまり動かない」と付記した上で発震機構解を掲載した(図 9b)。

石辺・他(2012)は、残された波形記録から読み取った、または原簿に残された S-P 時間に基づき、三次元グリッドサーチ法を用いて千葉県南西部の深さ 53 km 程度に震源を決定した(図 10)。また、既往研究による震源の相違を考慮しても推定された初動発震機構解が横ずれ型または正断層型に分類されることから、房総半島南西部から浦賀水道に至る一帯で発生した PHS 内地震であると結論付けた。

本研究では、石橋(1975c, d)による 6 観測点における S-P 時間(東京(本郷)の 10.4 秒、東京(一ツ橋)の 10.8 秒、横須賀の 6.3 秒、沼津の 11.1 秒、熊谷の 14.0 秒ならびに水戸の 16.0 秒)ならびに、牛山(1922)による初動ならびに残された波形記録から再検出した 13 観測点における初動(図 9a)を用いて乖離度を計算した。

図 10a に S-P 時間の乖離度ならびにその東西断面図を、図 10b に発震機構解に対する重み付きミスフィット率の分布とその東西断面図をそれぞれ示す。S-P 時間に対する乖離度は三浦半島先端部から浦賀水道を経て房総半島南部に至る深さ 40~70 km [石橋(1975c, d)]の領域において小さくなる一方で、震源が深い PAC 内地震に対して顕著に大きくなる。このこ

とから、1922 年の地震は PAC 内地震ではなかった可能性が示唆される。また、この領域における PHS 上面の深度は 20 km 以浅に推定されており[例えば、笠原(1985)、Ishida(1992)]、地殻内地震あるいは PHS 上面の地震である可能性も S-P 時間に対する乖離度からほぼ棄却される。

1922 年の地震に対して報告された初動は、重み付きミスフィット率から南西-北東に T 軸を持つ横ずれ型あるいは正断層型の発震機構解と調和的である(図 10c 左, 中央)。重み付きミスフィット率が小さい発震機構解をもつ地震は、石辺・他(2012)によって推定された深さ 53 km より若干深い(深さ 60~70 km 程度)領域に多く分布する(図 11)。一方で、1922 年の地震に対して報告された初動は、PAC 上面で発生するプレート間地震に典型的な、南北走向の逆断層型の地震から期待される初動分布とは明らかに異なる(図 10c 右)。これらの観点から、1922 年浦賀水道付近の地震は PHS 内部で発生した地震であった可能性が示唆される。なお本結果は、先行研究[石橋(1975c, d)、海野・他(2010)、Nakajima *et al.* (2010)、石辺・他(2012)]の結論を支持する。

房総半島南西部から浦賀水道に至る領域は、PHS と PAC のスラブ接触域の西縁部に位置し[例えば、Nakajima *et al.* (2009); 図 1a]、1922 年の地震に対する初動の押し引き分布と調和的な横ずれ型あるいは正断層型の地震が多く発生している。2011 年東北地方太平洋沖地震後に、この領域において顕著な群発地震活動が発生し[Nakajima *et al.* (2013)、Ishibe *et al.* (2015)]、2011 年 11 月 14 日には M4.1 の地震が発生した。Nakajima *et al.* (2013)によって決定されたこれらの地震に対する発震機構解の多くは、T 軸が南西-北東を向く横ずれ型あるいは正断層型であり、1922 年の地震に対する初動報告と調和的である。1922 年の地震はこのタイプであった可能性が考えられる。

§6. まとめと今後の展望

本研究では、計器観測時代初期(1870 年代~1920 年代)に関東ならびにその周辺域において気象官署(気象大学を含む)によって設置され、観測が行われていた 21 観測点、ならびに東京帝国大学による 5 観測点と比較可能な近年の観測点を対象として、気象庁検測値ならびに MeSO-net 検測値から S-P 時間と初動を整理した。またこれらとの比較から、プレートマッチング法に基づき震源・発震機構解を推定

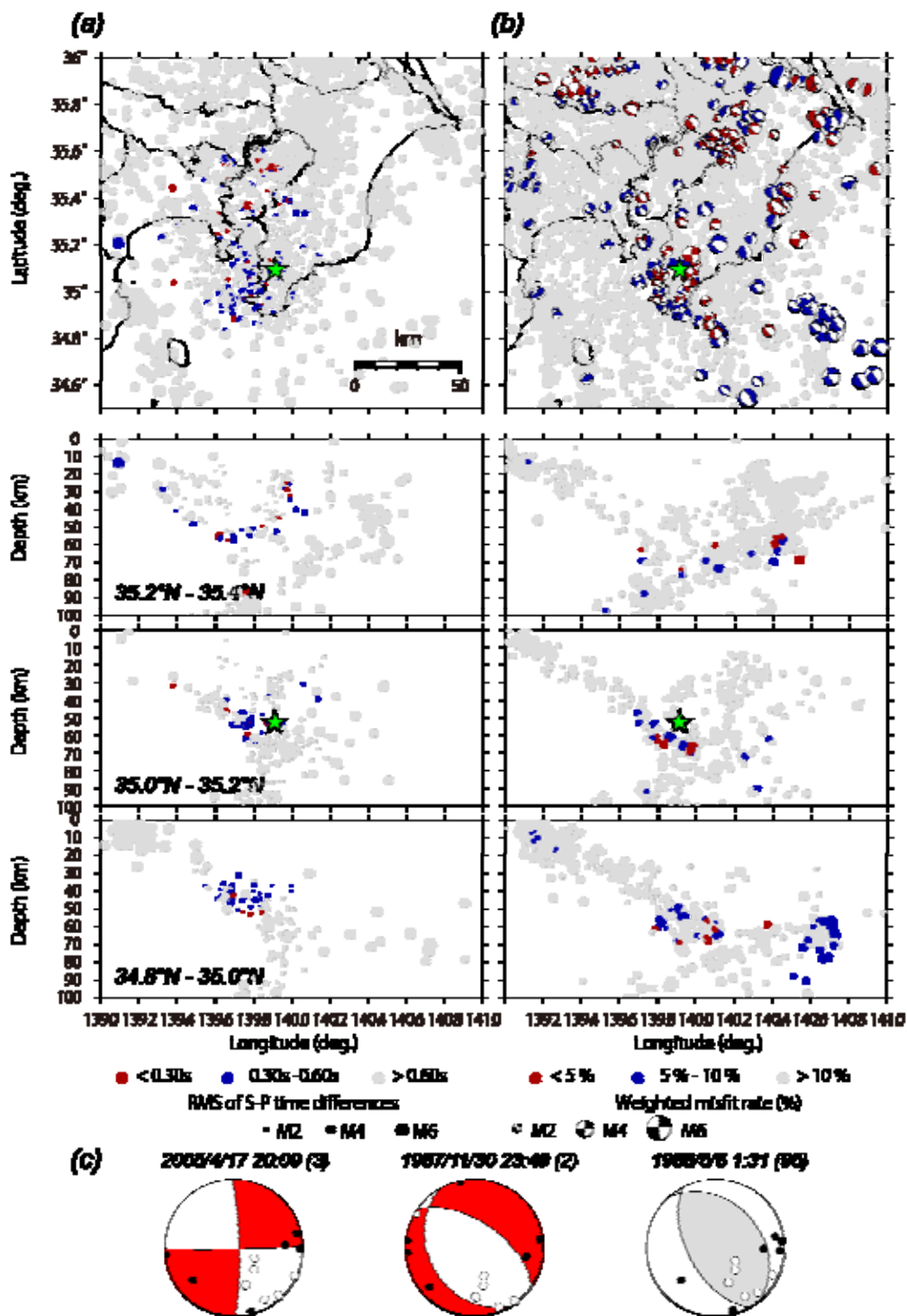


図 10. (a) 1922 年浦賀水道付近の地震と近年の地震との間の S-P 時間の残差の二乗平均平方根の分布ならびにその東西断面図。緑星印は石辺・他 (2012) による 1922 年の地震の震源。 (b) 近年の地震の発震機構解に対する重み付きミスフィット率の分布ならびにその東西断面図。重み付きミスフィット率が 10% 以下の発震機構解のみを震源球表示している。 (c) 浦賀水道付近から千葉県南西部に至る領域において発生した 3 地震に対する発震機構解と 1922 年浦賀水道付近の地震に対する初動の分布。黒丸・白丸はそれぞれ初動が押し・引きを表す。括弧内の数字は重み付きミスフィット率 (%) を示す。本図のカラー版は口絵 7 参照。

Fig. 10. (a) Distribution of root mean squares of S-P time differences between recent earthquakes and the 1922 earthquake. East-west cross sections for 35.2°-35.4°N, 35.0°-35.2°N, and 34.8°-35.0°N are also shown. Green star indicates the hypocenter of the 1922 earthquake estimated by Ishibe *et al.* (2012). (b) Distribution of weighted misfit rates of the 1922 first-motion polarities for focal mechanism solutions for recent earthquakes. Only focal mechanism solutions with weighted misfit rates $\leq 10\%$ are shown in the lower hemispheres. (c) The distribution of first-motion polarities (solid circles, push upward; open circles, pull downward) reported for the 1922 earthquake for three focal mechanism solutions of earthquakes. The colors in the expansion of the lower hemisphere indicate the weighted misfit rates as shown in the parenthetic numbers. See Frontispiece 7 for the color version.

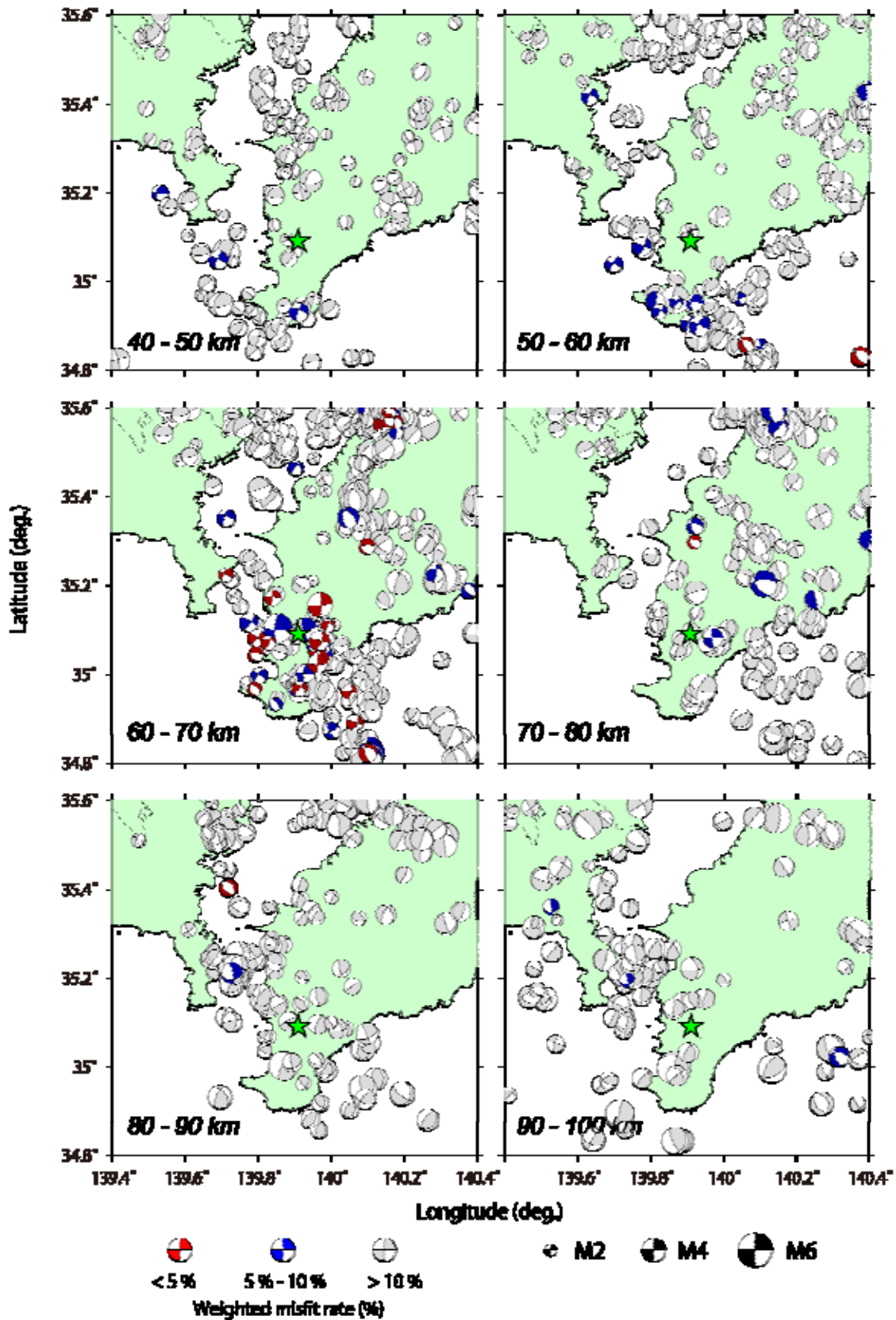


図 11. 1922 年浦賀水道付近の地震に対する初動を用いた近年の地震の発震機構解に対する重み付きミスフィット率の深さ毎の分布。緑星印は石辺・他(2012)による 1922 年の地震の震央。本図のカラー版は口絵 8 参照。

Fig. 11. Distribution of weighted misfit rates of the 1922 first-motion polarities for focal mechanism solutions for recent earthquakes for different depths. Green star indicates the epicenter of the 1922 earthquake estimated by Ishibe *et al.* (2012). See Frontispiece 8 for the color version.

する手法を構築し、1922 年浦賀水道付近の地震が沈み込むフィリピン海プレート内部において発生した可能性を示した。

今後は、計器観測時代初期に発生した地震に対して地震波形や検測値を収集・整理し、本手法を用いてその震源・発震機構解を推定する。なお、本研究では S-P 時間と初動に対する乖離度を別々に定義したが、より高い精度・信頼性を以て震源・発震機構解を推定するためには、これらをジョイントした乖離度を指標として用いることを今後検討する必要がある。また、計器観測時代初期の地震に対する震度分布[宇津(1989), 石垣(2007), 石垣・高木(2000)]と、近年の観測網による震度分布との比較も有効であろう。

本研究で予察的に検討した近年の地震観測データとの比較に基づく手法は、発震機構解(起震応力場)や地震波速度構造が時間的に変化しないことを前提としている。一方で、東北地方太平洋沖地震(M9.0)後に日本列島各地で地震活動が活発化し[例えば, Hirose *et al.* (2011), Ishibe *et al.* (2011a), Toda *et al.* (2011)], 震源域やその近傍などいくつかの領域では、本震前と異なる発震機構解をもつ地震が観測されている[例えば, Asano *et al.* (2011), Kato *et al.* (2011)]. 発震機構解の時間的定常性は、本手法の適用性・妥当性に大きく寄与するため、今後、検討を要する。

明治時代以前の歴史資料の中には、初期微動継続時間に相当すると考えられる記述がしばしば含まれている。例えば、萩原(1990)は歴史資料にある歌舞伎役者・中村仲蔵の記事から、1855(安政二)年江戸地震の S-P 時間を 10 秒程度と推定し、深い地震(深さ 100 km 程度)の可能性を指摘した。また中村・他(2003)は、安政江戸地震に対する初期微動継続時間に相当する記述を整理し、推定した S-P 時間(5~10 秒)から深さ 40-50 km の PHS 内部地震であったとしている。安政江戸地震の深さは、ごく浅い地殻内地震から 100 km 程度までの様々な見解があり[萩原(1972), 宇佐美(1976), 大竹(1980), 松田(1995), 引田・工藤(2001), 古村(2003), Bakun(2005), 引田(2006), 古村・竹内(2007), 中村・他(2007)], 本研究で整理した S-P 時間や初動の分布は、これら歴史地震の震源決定に関する議論にも活用できる可能性がある。

謝辞

編集出版委員会委員の諸井孝文会員ならびに査

読者の石橋克彦会員による指摘は、本稿の改善に非常に有益であった。また乖離度の計算にあたっては尾形良彦統計数理研究所名誉教授にご議論頂いた。本研究では、気象庁総合検測値を使用させて頂いた。また、防災科学技術研究所による関東・東海地殻活動観測網に基づく初動発震機構解ならびに F-net 解、気象庁による初動発震機構解を使用した。発震機構解の推定には HASH v1.2 [Hardebeck and Shearer (2002)]を改良したプログラムを、走時計算には HypoMH [Hirata and Matsu'ura (1987)]を、図の作成には Generic Mapping Tools [GMT; Wessel and Smith (1998)]を、地震の抽出には地震活動解析システム[TSEIS; 鶴岡(1998)]をそれぞれ使用した。ここに記して感謝する。なお、本研究は文部科学省受託研究「都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の軽減化プロジェクト」の経費を用いて実施した。

対象地震: 1922 年浦賀水道付近の地震

文献

- Asano, Y., T. Saito, Y. Ito, K. Shiomi, H. Hirose, T. Matsumoto, S. Aoi, S. Hori and S. Sekiguchi, 2011, Spatial distribution and focal mechanisms of aftershocks of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, **63**, 669–673, doi:10.5047/eps.2011.06.016.
- Bakun, W.H., 2005, Magnitude and location of historical earthquakes in Japan and implications for the 1855 Ansei Edo earthquake, *J. Geophys. Res.*, **110**, B02304, doi:10.1029/2004JB003329.
- Bird, P., 2003, An updated digital model of plate boundaries, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **4**, 1027, doi:10.1029/2001GC000252.
- 中央气象台, 1922, 千葉縣下木更津附近ノ地震, 気象要覧, **269**, 105–114.
- 福山英一・石田瑞穂, D.S. Dreger, 川井啓廉, 1998, オンライン広帯域地震データを用いた完全自動メカニズム決定, 地震第 2 輯, **51**, 149-156.
- 古村孝志, 2003, 1855 年安政江戸地震の広域震度分布と震源パラメータ: 数値シミュレーションによる考察, 日本地震学会 2003 年秋季大会講演予稿集, B052.
- 古村孝志・竹内宏之, 2007, 首都圏直下の地震と強

- 震動 安政江戸地震と明治東京地震, 地学雑誌, **116**, 431-450.
- 萩原尊禮, 1972, 明治27年東京地震, 安政2年江戸地震, 元禄16年関東地震の震度分布, 地震予知連絡会会報, **7**, 27-31.
- 萩原尊禮, 1990, 江戸-東京の直下地震, 古地震から探る, 地震ジャーナル, **10**, 1-6.
- 浜松音蔵, 1966, 気象官署における地震計観測の履歴表, 地震第2輯, **19**, 286-305.
- Hardebeck, J.L. and P.M. Shearer, 2002, A new method for determining first-motion focal mechanisms, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **92**, 2264-2276.
- 引田智樹, 2006, 震度データに基づく安政江戸地震の震源位置・規模の推定, 日本地震学会2006年秋季大会講演予稿集, D006.
- 引田智樹・工藤一嘉, 2001, 経験的グリーン関数法に基づく1855年安政江戸地震の震源パラメータと地震動の推定, 日本建築学会構造系論文集, **546**, 63-70.
- Hirata, N. and M. Matsu'ura, 1987, Maximum-likelihood estimation of hypocenter with origin time eliminated using nonlinear inversion technique, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **47**, 50-61.
- Hirose, F., K. Miyaoka, N. Hayashimoto, T. Yamazaki and M. Nakamura, 2011, Outline of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (Mw 9.0) - Seismicity: Foreshocks, mainshock, aftershocks, and induced activity-, *Earth Planets Space*, **63**, 513-518, doi:10.5047/eps.2011.05.019.
- 石橋克彦, 1975a, 多層構造モデルのもとで多点のS-P時間をを用いた古い地震の震源再計算, 昭和50年度地震学会春季大会講演予稿集, **1**, 68.
- 石橋克彦, 1975b, 関東大地震直前の関東内陸の起震応力-相模トラフ大地震発生の指標-, 昭和50年度地震学会春季大会講演予稿集, **1**, 69.
- 石橋克彦, 1975c, 多層構造モデルのもとで多点のS-P時間をもちいた古い地震の震源再計算, 地震第2輯, **28**, 347-364.
- 石橋克彦, 1975d, 東京に被害を与えた明治・大正期の地震の震源位置の再検討, 東京都防災会議東京直下地震に関する調査研究(その3)-地震活動状況に関する考察-, 132-136.
- 石辺岳男・西山昭仁・佐竹健治・島崎邦彦, 2009a, 南関東で発生したM7級地震の既往研究とデータの整理-1894年明治東京地震と1895年茨城県南部の地震, 地震研究所彙報, **84**, 149-182.
- 石辺岳男・西山昭仁・佐竹健治・島崎邦彦, 2009b, 南関東で発生したM7級地震の既往研究とデータの整理-1921年茨城県南部の地震, 1922年浦賀水道付近の地震ならびに1987年千葉県東方沖地震, 地震研究所彙報, **84**, 183-212.
- Ishibe, T., K. Shimazaki, K. Satake and H. Tsuruoka, 2011a, Change in seismicity beneath the Tokyo metropolitan area due to the 2011 off the Pacific coast of Tohoku, Japan Earthquake, *Earth Planets Space*, **63**, 731-735, doi:10.5047/eps.2011.06.001.
- Ishibe, T., K. Shimazaki, H. Tsuruoka, Y. Yamanaka and K. Satake, 2011b, Correlation between Coulomb stress changes imparted by large historical strike-slip earthquakes and current seismicity in Japan, *Earth Planets Space*, **63**, 301-314, doi:10.5047/eps.2011.01.008.
- 石辺岳男・室谷智子・佐竹健治・島崎邦彦・中川茂樹・酒井慎一・平田直・西山昭仁, 2012, 1885年以降に南関東で発生したM7級地震の類型化, 地震予知連絡会会報, **88**, 526-530.
- Ishibe, T., H. Tsuruoka, K. Satake and M. Nakatani, 2014, A focal mechanism solution catalog of earthquakes ($M \geq 2.0$) in and around the Japanese Islands for 1985-1998, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **104**, 1031-1036, doi:10.1785/0120130278.
- Ishibe, T., K. Satake, S. Sakai, K. Shimazaki, H. Tsuruoka, Y. Yokota, S. Nakagawa and N. Hirata, 2015, Correlation between Coulomb stress imparted by the 2011 Tohoku-Oki earthquake and seismicity rate change in Kanto, Japan, *Geophys. J. Int.*, **201**, 112-134, doi: 10.1093/gji/ggv001.
- 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, doi: 10.1029/91JB02567.
- 石垣祐三, 2007, 明治・大正時代の震度観測について 震度データベースの遡及, 験震時報, **70**, 29-49.
- 石垣祐三・高木朗充, 2000, 気象庁震度データベースの整備及び活用例について, 験震時報, **63**, 75-92.
- 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, 31pp.

- 笠原敬司, 1985, プレートが三重会合する関東・東海地方の地殻活動様式, 国立防災科学技術センター研究報告, **35**, 33-137.
- 笠原敬司・酒井慎一・森田裕一・平田直・鶴岡弘・中川茂樹・楠城一嘉・小原一成, 2009, 首都圏地震観測網 (MeSO-net) の展開, 地震研究所彙報, **84**, 71-88.
- Kato, A., S. Sakai and K. Obara, 2011, A normal-faulting seismic sequence triggered by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake: Wholesale stress regime changes in the upper plate, 2011, *Earth Planets Space*, **63**, 745-748, doi:10.5047/eps.2011.06.014.
- 勝又護, 1975a, 大正時代の地震活動について－1923年の関東地震前の地震活動を中心に－(概報), 東京都防災会議東京直下地震に関する調査研究(その3)－地震活動状況に関する考察－, 117-122.
- 勝又護, 1975b, 大正時代の地震資料について 2, 3のこと, 昭和50年度地震学会春季大会講演予稿集, 66.
- 気象庁, 1957, 日本における大地震の記録, 験震時報, **22** 別冊, 1-139.
- 松田時彦, 1995, 陸上活断層の最新活動期の表, 活断層研究, **13**, 1-13.
- 松村正三・関東東海地殻活動観測研究グループ, 2002, 関東・東海地域における最近20年間の地震観測結果(発震機構解)－特別研究「関東・東海地域における地震活動に関する研究」観測成果のまとめ(その4)－, 防災科学技術研究所研究資料, **224**, 1-80.
- 松浦律子, 1995, 大森公式から1世紀:余震減衰に関する研究, 地震ジャーナル, **19**, 33-44.
- 松浦律子, 2013, 明治期の二地震の震源改訂の提案, 日本地球惑星科学連合2013年大会予稿集, SSS32-01.
- 松浦律子, 2014, 1894年10月7日などいくつかの古い地震の震源変更, 歴史地震, **29**, 155.
- 室谷智子・石辺岳男・佐竹健治・島崎邦彦・中川茂樹・酒井慎一・平田直・西山昭仁, 2012, 1885年以降に南関東で発生したM7級地震の類型化, 日本地球惑星科学連合2012年大会予稿集, SSS33-04.
- Nakajima, J., F. Hirose and A. Hasegawa, 2009, Seismotectonics beneath the Tokyo metropolitan area, Japan: Effect of slab-slab contact and overlap on seismicity, *J. Geophys. Res.*, **114**, B08309, doi:10.1029/2008JB006101.
- Nakajima, J. and A. Hasegawa, 2010, Cause of M ~ 7 intraslab earthquakes beneath the Tokyo metropolitan area, Japan: Possible evidence for a vertical tear at the easternmost portion of the Philippine Sea slab, *J. Geophys. Res.*, **115**, B04301, doi:10.1029/2009JB006863.
- Nakajima, J., K. Yoshida and A. Hasegawa, 2013, An intraslab seismic sequence activated by the 2011 Tohoku-oki earthquake: Evidence for fluid-related embrittlement, *J. Geophys. Res.*, **118**, 3492-3505, doi:10.1002/jgrb.50246
- 中村操・茅野一郎・松浦律子, 2003, 安政江戸地震の首都圏での被害, 歴史地震, **19**, 32-37.
- 中村亮一・植竹富一・佐竹健治・遠田晋次・宇佐美龍夫・島崎邦彦・渡辺健, 2007, 関東地域の三次元減衰構造・異常震域とそれに基づく1855年安政江戸地震の震源深さの推定, 歴史地震, **22**, 101-107.
- 中村左衛門太郎, 1922a, 四月廿六日の東京附近の強震に就て, 気象集誌, **41**, 139-156.
- Nakamura, S., 1922b, On the Destructive Earthquake occurred near Tokyo on the 26th, April 1922, *Seism. Bull. Cent. Met. Obs., Japan*, **1**, No. 1, 39-44.
- 野口和子・山中佳子・田辺由美子・岩田孝行, 2001, 歴史地震記象データを Web で検索する, 東京大学地震研究所技術研究報告, **7**, 64-71.
- Obara, K., K. Kasahara, S. Hori and Y. Okada, 2005, A densely distributed high-sensitivity seismograph network in Japan: Hi-net by National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, *Rev. Sci. Instrum.*, **76**, 021301.
- Okada, Y., K. Kasahara, S. Hori, K. Obara, S. Sekiguchi, H. Fujiwara and A. Yamamoto, 2004, Recent progress of seismic observation networks in Japan, - Hi-net, F-net, K-NET and KiK-net -, *Earth Planets Space*, **56**, xv-xxviii.
- 大森房吉, 1922a, 東京の強震, 地学雑誌, **34**, 285.
- 大森房吉, 1922b, 東京にて感じたる激震強震の強震計記録図, 東洋学芸雑誌(学芸), **39**, 2-5.
- 大森房吉, 1922c, 震源位置測定の方法, 東洋学芸雑誌(学芸), **39**, 42-46.
- Omori, F., 1922d, The semi-destructive earthquake of

- April 26, 1922, *Seismological Notes*, **3**, 1-30.
- 大竹政和, 1980, 関東・東海地域のテクトニクスの一モデルと南関東直下の地震の発生メカニズム, 防災科学技術, **41**, 1-7.
- 酒井慎一・平田直, 2009, 首都圏地震観測網の設置計画, 地震研究所彙報, **84**, 57-69.
- 瀬野徹三, 1995, プレートテクトニクスの基礎, 朝倉書店, 190pp.
- Toda, S., R.S. Stein and J. Lin, 2011, Widespread seismicity excitation throughout central Japan following the 2011 M=9.0 Tohoku earthquake and its interpretation by Coulomb stress transfer, *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L00G03, doi:10.1029/2011GL047834.
- 鶴岡弘, 1998, WWW を用いた地震情報検索・解析システムの開発. 情報処理学会研究報告;データベースシステム 115-9, 情報学基礎 49-9, 65-70.
- 上野寛・畠山信一・明田川保・舟崎淳・浜田信生, 2002, 気象庁の震源決定方法の改善—浅部速度構造と重み関数の改良—, 験震時報, **65**, 123-134.
- 海野徳仁・岡田知己・中島淳一・内田直希・河原俊夫・平原聡・中山貴史, 2010, 東北地方の地震記象を用いた首都圏の過去地震の調査研究, 地球惑星科学連合 2010 年大会予稿集, SSS024-02.
- 宇佐美龍夫, 1976, 新資料による安政江戸地震の調査, 地震研究所彙報, **51**, 209-230.
- 宇佐美龍夫・石井寿・今村隆正・武村雅之・松浦律子, 2013, 日本被害地震総覧 599-2012, 東京大学出版会, 694 pp.
- 宇津徳治, 1979, 1885 年～1925 年の日本の地震活動, 地震研究所彙報, **54**, 253-308.
- 宇津徳治, 1981, 関東・中部地方およびその周辺の地震活動(1904 年～1925 年), 地震研究所彙報, **56**, 111-137.
- 宇津徳治, 1982, 1885 年～1925 年の日本の地震活動(訂正と補遺), 地震研究所彙報, **57**, 111-117.
- 宇津徳治, 1989, 日本付近の M6.0 以上の地震及び被害地震の震度分布図(1901 年～1926 年), 東京大学地震研究所, 242 pp.
- Utsu, T., Y. Ogata and R.S. Matsu'ura, 1995, The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity, *J. Phys. Earth*, **43**, 1-33.
- Wessel, P. and W.H.F. Smith, 1998, New, improved version of Generic Mapping Tools released, *EOS Trans., AGU*, **79** (47), 579.

