

地震 ジャーナル

51

2011年 6月

- エッセイ M9超巨大地震の発生を前にして ● 平原和朗
- 東日本大震災で被災された皆様にお見舞い ● 高木章雄——1
- 東北地方太平洋沖地震（速報） ● 岡田義光——2
- 平成23年3月11日東北地方太平洋沖地震の
津波について（速報） ● 都司嘉宣／佐竹健治
石辺岳男／杉本めぐみ
大木聖子／西山昭仁
室谷智子／泊 次郎
上野俊洋——11
- 濃尾地震が大地に遺したもの ● 松田時彦——22
- 濃尾地震震源域周辺における地震活動 ● 浅野陽一——29
- 書評——37
- 新刊紹介——38
- ADEP情報——40

地震予知総合研究振興会

ASSOCIATION FOR THE DEVELOPMENT OF EARTHQUAKE PREDICTION

M 9 超巨大地震の発生を前にして 平原和朗

平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震で犠牲になられた方々のご冥福をお祈りするとともに、被災された方々に心よりお見舞いを申し上げ、一日も早い復興を祈念致します。

地震学に携わる者として、今回の M 9 超巨大地震による強震動、特に巨大津波が生み出した、東北から関東地方にわたる未曾有の大災害を前に、言葉を失いました。現在関わっている、文部科学省受託研究「東海・東南海・南海地震の連動性評価研究」では、南海トラフに加えて北海道東岸沖での超巨大地震の発生は考えてはいましたが、東北地方では想定宮城沖地震のみがターゲットになっていました。言葉を失ったと言う意味は、この超巨大地震の発生を想定外と言うすべしか持たない、自分の力不足を痛感したことも含んでいます。

まず、なぜ、どのようにしてこの超巨大地震が発生したのか、今尚活発な余震活動の推移並びに日本列島全域の地震活動に及ぼす影響について、また後追いの研究ですが、予測につながるデータは得られていたのか、などの解明が急務で、その成果を広く発信していく必要があります。しかし、1995 年兵庫県南部地震発生時のように、これまでの研究に対する真摯な反省・検証は必須と思います。例えば、M 9 クラスの超巨大地震については、M 7 アスペリティが連動して M 8 地震を作るという連動モデルの延長上に M 9 クラスの地震発生を考え得るのか、M 9 アスペリティとその地震サイクルの存在を考える必要があるのではないかと、また、限られた期間のすべり欠損しか手にしていない我々が、M 9 クラスの長い地震サイクル中に変動するすべり欠損総量を如何にして見積もり得るか、難問ですが解決すべき問題だと思います。

地震学会の話を書くということだったのですが、今回の地震に終始してしまいました。日本地震学会は、2000 年に社団法人としての認定を受けましたが、2008 年に施行された新しい公益法人改革関連法を受けて準備を行い、2010 年 12 月に公益社団法人として再出発いたしました。益々公益性を求められることとなります。この超巨大地震の発生とそれに起因する諸問題に対し、会員ひとりひとりの取り組みはもちろんですが、日本地震学会は、日本地球惑星連合大会及び秋の地震学会での特別セッションの企画や、土木学会等の設置した「東北地方太平洋沖地震被害調査連絡会」及び日本学術会議の呼びかけによる「東日本大震災の総合対応に関する学協会連絡会」へ参加し、学会間の連携を図りながら、調査研究を進め、社会等への成果情報の発信に努めてまいりたいと思います。



平原和朗

[ひらはら かずろう]

現職 京都大学大学院理学研究科教授

略歴 昭和 56 年 3 月京都大学理学博士、昭和 58 年 6 月京都大学防災研究所助手、平成 2 年 6 月助教授、平成 8 年 4 月名古屋大学大学院理学研究科教授、平成 13 年 4 月同大学院環境学研究科教授、平成 17 年 9 月京都大学大学院理学研究科教授、現在に至る

研究分野 地震学：地震発生サイクルシミュレーション、レシーバ関数、地震波干渉法

著書 Seismic Tomography, edited by H. M. Iyer and K. Hirahara, Chapman and Hall, pp. 842, 1993. 新版地学教育講座 2 地震と火山 1 部 2・3 章、東海大学出版会、1996. 東海地震がわかる本、第 4 章、東京新聞出版会、2003

東日本大震災で被災された皆様に 心からお見舞い申し上げます

今回の大震災から早くも3ヶ月が経過いたしました。頻発していた大きな余震も収まりつつあります。他方、連日報道されております被災地の惨状には目を覆いたくなるばかりです。死者は1万5千人を超え、いまだに行方不明の方は8千人に及んでいます。衷心よりお悔やみを申し上げます。さらに、被災者の方々は数知れず、心からお見舞い申し上げます。

また、このようななか、連日不眠不休で復旧に当たられている方々のご努力に心から敬意を表したいと思えます。

わたしどもは、地震予知および防災についての総合的な調査・研究を推進することにより、科学技術の振興を図り、もって国民の生命・財産に寄与することを目的として、昭和56(1981)年1月に設立され、爾来、地震予知および防災の研究業務を推進してまいりました。これらの成果は、行政及び民間等の負託に応えるとともに、高い評価を受けてまいりました。しかしながら、このたびの大震災に直面し、無力さをいやというほど思い知らされております。

海と陸のプレートが押し合う変動帯上にある我が国は、常に大小の地震に見舞われて来ました。また、地震とともに津波の被害にも襲われて来ました。このような知識経験から、津波に関しては古来からの言い伝えも多く、三陸地方を始めとして巨大な防波堤、防潮堤も数多く設置されてきたところです。これらの対策にもかかわらず、未曾有の巨大地震と津波により大災害が発生してしまいました。

われわれの知識経験は限られたものであり、自然に対して謙虚であらねばならないとの思いを強くいたします。

他方、先の阪神・淡路大震災の反省から、我が国には世界にも類を見ない地震観測網が整備されております。これらにより、多くのデータを得ることが出来ています。今回の地震は言い表せないほどの不幸をもたらしましたが、このような災害を再び繰り返さないよう、得られた数多くのデータを用いて、調査研究を全力で実施することが、わたしどもに課せられた使命であるとの思いを一層強めております。

また、今回の津波被害を教訓に、今後の整備が必要とされる海域の観測網に関しても、わたしどもの知識経験を最大限に活用する所存です。

復旧、復興には、まだ多くの困難がありますが、わたしどもも再びこのような災害が生じないように、最大限の努力を傾注する所存でありますので、この困難を乗り越えられますようにお祈り申し上げます。

(財)地震予知総合研究振興会
会長 高木 章雄

東北地方太平洋沖地震（速報）

岡田義光

1. はじめに

2011年3月11日、我が国の観測史上最大となるM 9.0の「東北地方太平洋沖地震」が発生して巨大な津波が押し寄せ、2万5千人近くの死者・行方不明者を生じる未曾有の大災害となった。この地震の犠牲者に深く哀悼の意を表するとともに、被災された方々に心よりお見舞いを申し上げたい。

なお、この地震によって、福島第一原子力発電所では1号機から4号機までの冷却機能と閉じ込め機能に重大な障害を生じ、深刻な事態に陥った。これにより、一般の人々に大きな不安が広がると同時に、電力不足による前代未聞の計画停電が実施され、数多くの市民に多大なる混乱がもたらされた。このように地震災害と原子力災害が同時に発生したことによって、人々の間には半ばパニックのような状況が生じ、ガソリンや食料品などの物資調達が困難になるなど、かつて経験したことのない様相の災害が市民生活に及んだ。

ここでは、この東北地方太平洋沖地震（M 9.0）の概略について、速報的な解説を行う。

2. 本震

本震の発生は2011年3月11日14時46分で、宮城県栗原市で震度7が観測されたほか、岩手県から茨城県にかけての太平洋岸の広い範囲で震度6強や6弱の揺れが記録された（図1）。防災科学技術研究所の強震観測網で捉えられたこの地震による最大の加速度は、栗原市築館における2,933ガル（三成分合成値）であった。震度7が我が国で観測されたのは、1995年兵庫県南部地震（M 7.3）、2004年新潟県中越地震（M 6.8）に次いで、

3度目である。気象庁は、この地震を「平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震」と命名した。

震源は牡鹿半島の東南東約130kmの三陸沖で、震源の深さは約24kmであった。気象庁より最初に発表された地震のマグニチュードはM 7.9（速報値）であったが、その後、同日16時の記者発表ではM 8.4（暫定値）、同17時30分にはM 8.8（暫定値）と改められ、3月13日には最終的にM 9.0と修正された。

この地震の発震機構解は、図1左上のように西北西—東南東方向に圧力軸をもつ低角逆断層型というものである。これは、今回の地震が、日本海溝から沈み込む海側プレート（太平洋プレート）に引きずり込まれた陸側プレート（北米プレート）が跳ね返ることによって発生する、典型的な

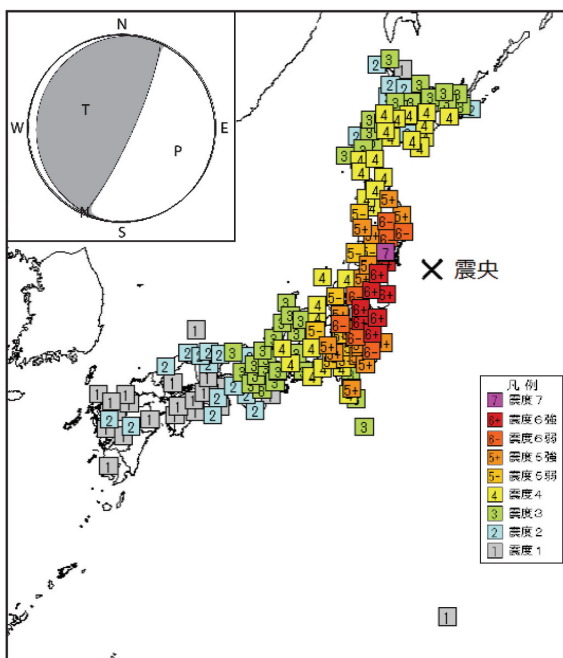


図1 2011年東北地方太平洋沖地震の発震機構解（左上）と震度分布（気象庁資料より合成）

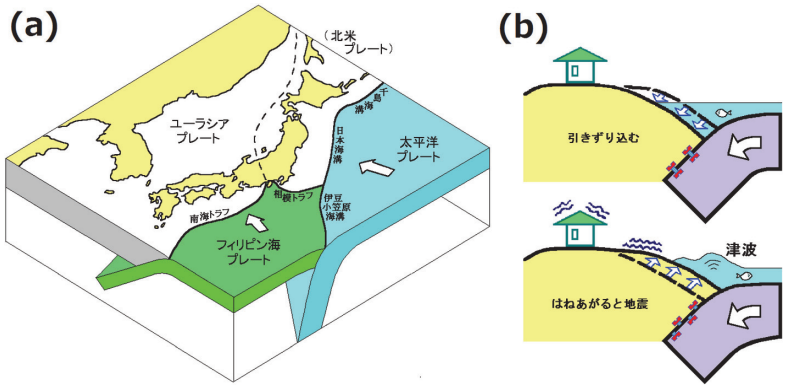


図 2 (a) 日本列島周辺のプレート構造, (b) プレート沈み込みによる海溝型大地震発生の模式図

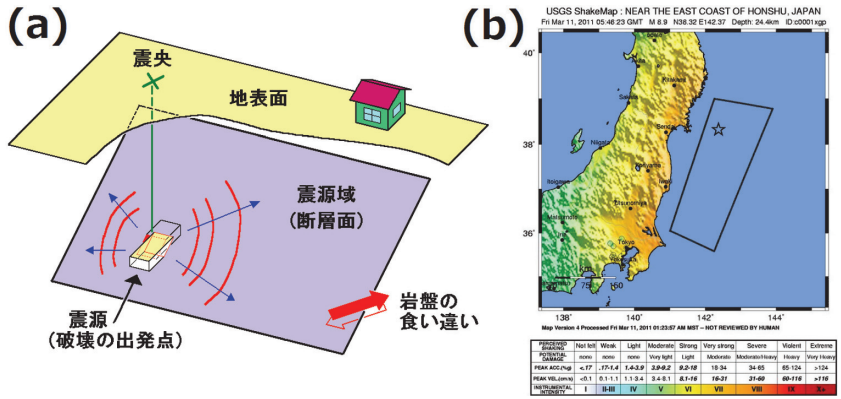


図 3 (a) 一般的な地震の発生様式(断層運動), (b) 米国 USGS による東北地方太平洋沖地震の概要図。陸上のカラーは震度の分布 (MM 震度階) を示す。

海溝型大地震のメカニズムであったことを示している(図2)。

図1では震源が×印の点として示されているが、M 9.0 という巨大な地震のエネルギーがこの1点から放出されたわけではない。図3(a)は、一般的な地震の発生を示す模式図だが、地下の震源で始まった破壊(岩盤のずれ)は秒速3~4kmで周囲に伝播し、ほぼ平面状の切れ目を作る。これを断層面と呼び、この断層面の広がり、ずれの量の大きさが地震のマグニチュードを決定する。震源(破壊の出発点)の真上の点を震央と呼び、断層面を地表に投影した部分を震源域と呼ぶ。

図3(b)は、今回の地震の概要を速報した米国地質調査所(USGS)の資料である。三陸沖の星印

が震央、四角の範囲が震源域を示しており、この南北約500km、東西約200kmの範囲が今回の地震に関与した領域である。本震の破壊は星印の震源から出発し、北は岩手県沖まで、南は茨城県沖にまで達し、岩盤のずれの量は大きいところで20m近くに達したものと見られている。

なお、この地震については、宮城県石巻市大瓜で最初の地震波が検知されてから8.6秒後に緊急地震速報が発信され、警報発表から主要動の到達までは、仙台市中心部において約15秒、東京都心で約65秒の余裕があったとのことである。

3. 津波

海溝型の大地震は大きな津波を伴うことが常で

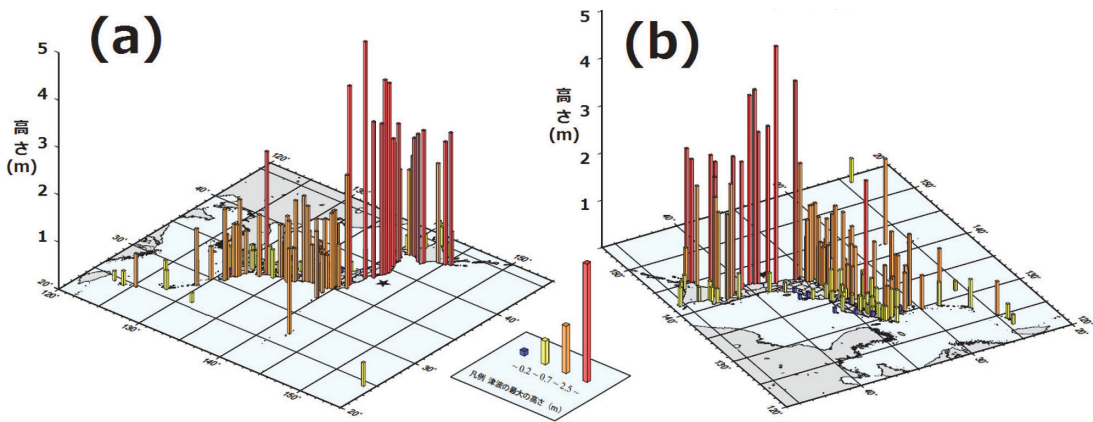


図 4 (a) 太平洋側、および (b) 日本海側から見た津波最大波高の分布 (気象庁資料に加筆合成) のちに痕跡調査等によって判明した最大波高値は含まれていない。

あるが、今回の地震は M 9.0 という超巨大なものであったため、津波の規模も大変に大きかった。我が国では、北海道から沖縄にかけての太平洋沿岸で高い津波が観測されたほか、日本海、オホーツク海、東シナ海の沿岸でも津波が観測され、さらに、ハワイや北米・南米、および太平洋諸国にまで津波が到達した。

岩手県の釜石、石巻、大船渡などでは、津波の第 1 波が 14 時 46 分、すなわち地震の発生と同時に到着し、最大波は 15 時 20 分前後、すなわち地震発生の約 30 分後にこれらの地を襲っている。図 4 は観測された全国の津波最大波高の分布を示しており、青森県八戸で 6.2 m、岩手県大船渡で 11.8 m、釜石で 9.3 m、久慈港で 8.6 m、宮城県石巻で 7.7 m、仙台港で 7.2 m、福島県相馬で 8.9 m、茨城県大洗で 4.2 m などの最大波高が記録されている。

気象庁では、地震発生から 3 分後の 14 時 49 分、岩手県、宮城県、福島県に津波警報 (大津波) を発令した。そして、15 時 14 分には青森県太平洋沿岸、茨城県、千葉県九十九里・外房、15 時 30 分には北海道太平洋沿岸と伊豆諸島、16 時 08 分には青森県日本海沿岸、千葉県内房、小笠原諸島、相模湾・三浦半島、静岡県、和歌山県が、次々と津波警報 (大津波) の対象に加えられた。その後は、海域ごとに推移を見ながら、津波警報 (津波) や津波注意報への切り替えがなされ、すべての警

報・注意報が解除されたのは 3 月 13 日 17 時 58 分であった。

4. 地殻変動

M 9.0 という巨大地震は、地殻変動においても日本列島に大きな影響を与えた。図 5 は、国土地理院の GPS 観測網によって捉えられた、この地震に伴う東日本の地殻変動の様子を示す。島根県の浜田市三隅を固定点として、東北日本の太平洋側は東南東方向に数 m 移動し、宮城県の南三陸町志津川で 4.4 m、石巻市牡鹿では最大となる 5.3 m の水平変動が観測された。これに対し、日本海側の移動量は 1 m 程度であり、東日本は全体が東西方向に大きく引き伸ばされたことになる。

一方、上下変動としては、東北地方太平洋側の広い範囲で数 10 cm におよぶ沈下を生じ、志津川では 75 cm、牡鹿では最大となる 120 cm の沈下が観測された。このように地盤が沈降したことによって、津波で入った海水は引きにくくなる状況となり、また、堤防や土地そのものが低くなったことで、次の津波や高潮への備えが弱体化する結果をもたらしている。

なお、図 5 によれば、東京も東へ 20 cm ほど移動すると同時に、約 5 cm 沈下したように見られる。また、国土地理院によれば、地震発生後も、東北地方から関東地方の広い範囲で東向きの地殻

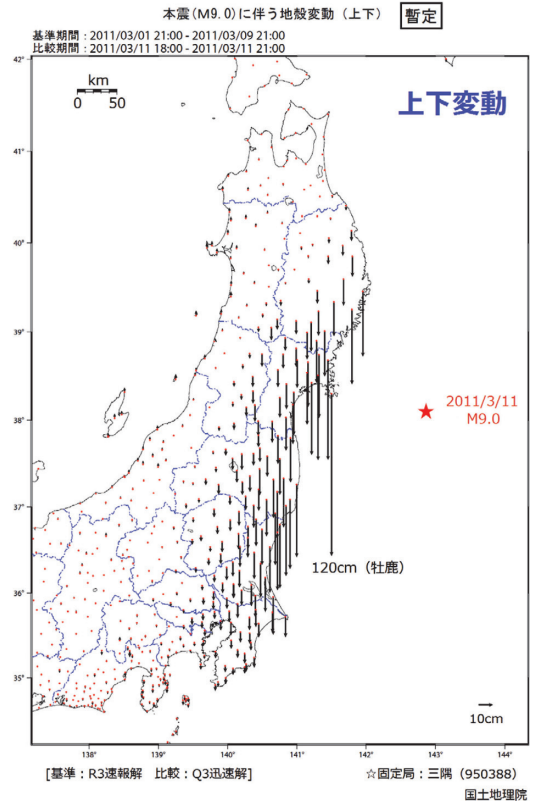
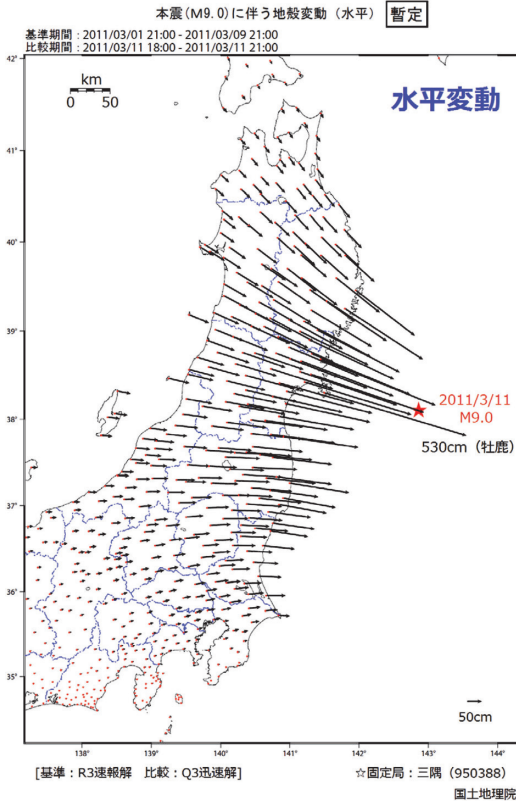


図5 東北地方太平洋沖地震に伴う東日本の地殻変動(国土地理院資料に加筆合成)

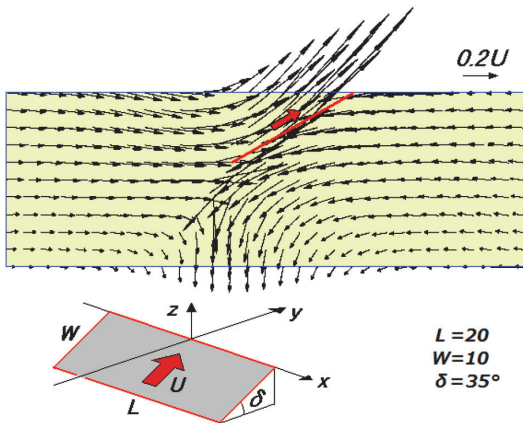


図6 逆断層による地表面(海底面)および地球内部の変形の様子(断層面に直交する面上での変位分布)

変動が継続して見られ、その大きさは岩手県山田町で25 cm、千葉県銚子市で17 cmなど、大きいところでは20 cmを超える余効変動が観測され

ているとのことである(3月19日現在)。

上記のような地殻変動は、震源域で生じた低角逆断層運動がその原因となっている。図6は、低角逆断層によって地表面(海底面)および地球内部がどのように変形するかを理論的に求めたものである。断層の方向に地表面が引き寄せられ、断層面の直上は大きく隆起して津波を引き起こす一方、陸側では地面が沈降する様子がよくわかる。

5. 余震活動

図7(a)は、東北地方太平洋沖地震の発生した3月11日から31日までの20日間に発生した、本震とM5以上の余震の震源分布を示す。宮城県沖の赤い丸印が本震の震源、橙色がその後発生したM7級の地震、黄色がM6級の地震の位置を示している。

余震は、岩手県沖から茨城県沖にかけての南北

約 500 km, 東西約 200 km の範囲に密集しており, これは図 3 (b) に示した震源域の範囲に相当する。M 9.0 の本震では, 地下における破壊 (岩盤のずれ) が赤丸印の震源位置からスタートし, 北は岩手県沖まで, 南は茨城県沖まで達して, 巨大な切れ目状の断層面を形成した。数限りない余震は, いわば, この切り傷がズキズキするような形で発生している。

このように本震の断層面付近で発生する余震は「狭義の余震」と呼ばれるが, 一方, この震源域から遠く離れた場所でも, 「広義の余震」と呼ばれる地震が発生している。これらは, 本震の影響で誘発されたものと考えられ, 本震翌日 (3/12) の 03:59 に長野県北部 (M 6.7), 同 04:47 に秋田県沖 (M 6.4), 3/15 の 22:31 に静岡県東部 (M 6.4) と, 強い地震が続発した。

長野県北部の地震では最大震度 6 強が長野県栄村で記録され, また, 静岡県東部の地震でも静岡県富士宮市で震度 6 強が観測された。どちらも浅い内陸地震であるが, 後者の震源は富士山はほぼ直下の深さ 14 km に位置し, 想定東海地震の震源域に近いことが問題となった。なお, 図 7 (a) に見られる震源の全体分布を図 2 (a) のプレート構造図と見比べてみると, 狭義の余震と広義の余震を

含めた全体は, ちょうど北米プレートの縁をなぞって発生しているようにも見える。

図 7 (b) は, 同図 (a) 内の長方形範囲で発生した地震の AB 方向に沿った時空間分布, 図 7 (c) は, 最大震度 4 以上を記録した有感地震の時間ごとの回数の推移を示している。M 7 級の余震は, 本震発生後 20 分から 40 分の間に M 7.4, M 7.7, M 7.5 と 3 つが続発したのち発生していないが, 本震発生から 3 月 31 日までの 20 日間に, M 6 以上の地震は 64 個, M 5 以上の地震は 381 個発生している。また, 最大震度 4 以上の有感地震の発生回数は 82 回を数えている。ちなみに, 今回の地震と同様, 巨大な津波を生じた 2004 年 12 月のスマトラ島沖地震 (M 9.1) では, 本震の 3.5 時間後に M 7.1 の最大余震が発生し, また M 6 以上の余震の発生回数は 65 回であった。

図 8 は, 本震発生から 10 日間の M 5 以上の余震の積算回数を, 過去の海溝型地震における余震積算回数と比較したもの (気象庁資料) である。今回は巨大な地震であり, 震源域も広いため, これまでに例のないほど沢山の余震が発生していることがわかる。全体的な傾向としては, 時々大きなものを混じえながらも, 余震の発生間隔は徐々に延び, 発生数も少なくなっていくものと思

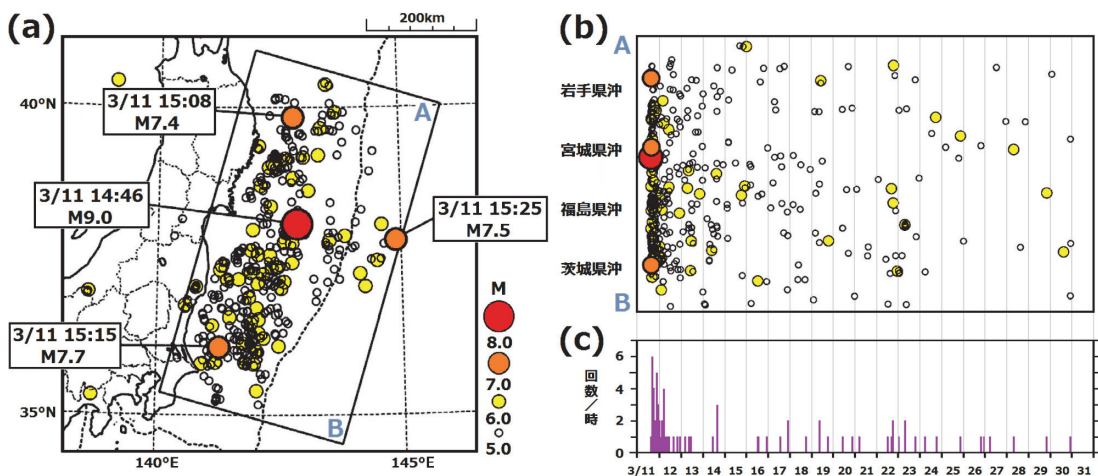


図 7 (a) 本震および 3/11 12 時~3/31 12 時に発生した M 5 以上の余震の分布, (b) 矩形領域内で発生した地震の AB 方向に沿った時空間分布図, (c) 震度 4 以上の有感地震の時間ごと回数の推移 (気象庁資料に加筆合成)

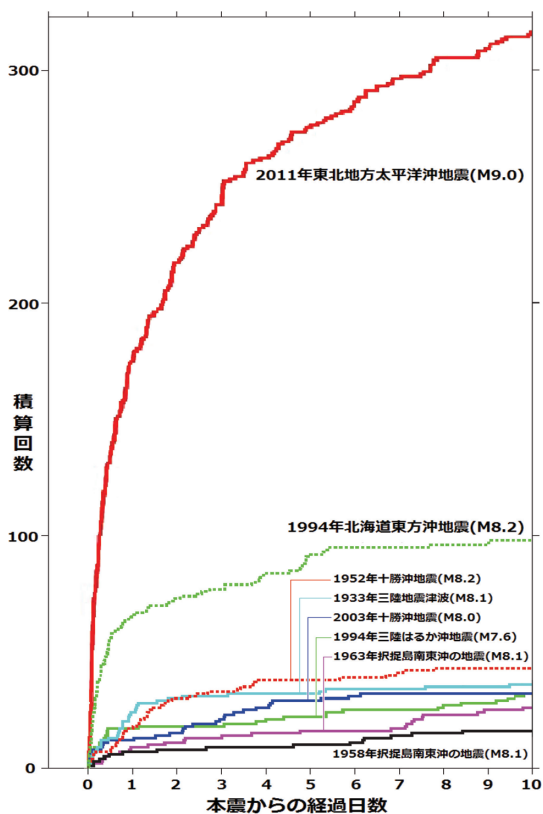


図 8 本震発生後 10 日間の M 5 以上の余震の積算回数と、過去の海溝型地震との比較（気象庁資料に加筆合成）

われる。

6. 前震活動

東北地方太平洋沖地震（M 9.0）が発生する 2 日前の 3 月 9 日 11 時 45 分、宮城県のはるか沖合で M 7.3 の地震が発生し、翌日の M 6.8 の地震を含んで活発な余震活動があった（図 9）。この地震により最大震度 5 強が記録され、また津波注意報が発令されて大船渡、釜石などで高さ 0.5 m ほどの津波が観測された。これらの地震活動があった場所は、今回の巨大地震の震源のすぐ北隣りであり、結果的には M 9.0 の地震の前震活動であったものと考えられる。

しかし、通常、M 7.3 といえば単独で発生する立派な大地震であり、これが、次に続くより巨大な地震につながると想像することは、なかなか困難であったと思われる。

7. 長期予測

今回の巨大地震の震源域を含む東日本太平洋沖における海溝型地震については、地震調査研究推進本部の地震調査委員会によって、その長期発生予測がなされていた。その際に対象となった海域の領域分けは図 10 に示すとおりであり、各々の海域において発生が予想される地震のマグニ

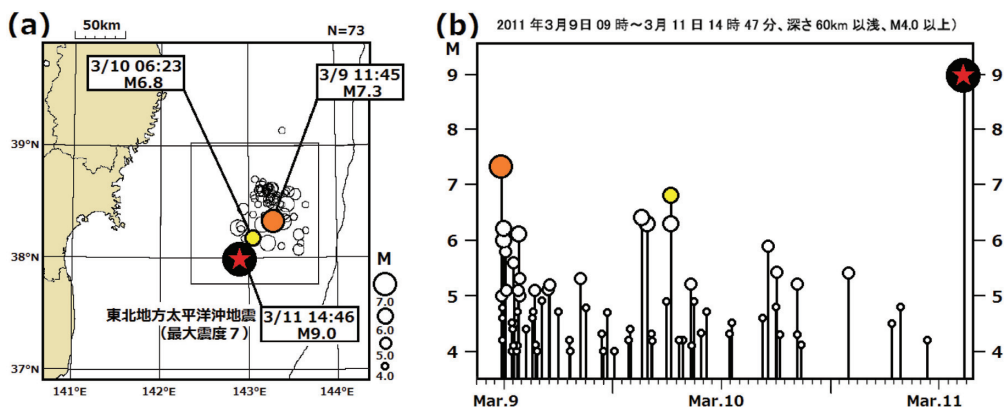


図 9 3 月 9 日三陸沖の地震（M 7.3）とその余震活動、および、東北地方太平洋沖地震（星印）の位置。（a）は震源分布、（b）は M-T 図を示す。（気象庁資料に加筆合成）

表 1 東日本太平洋沖における海溝型地震の長期発生予測（地震調査研究推進本部による）

海 域	予想されるマグニチュード	今後 30 年以内の発生確率	平均発生間隔
三陸沖北部	M 8.0 前後	0.5%~10%	約 97 年
三陸沖中部	(過去に大地震がなく評価不能)		
三陸沖南部海溝寄り	M 7.7 前後	連動時は M 8.0 前後 99%	105 年程度
宮城県沖	M 7.5 前後		37 年
福島県沖	M 7.4 前後 (複数地震が統発)	7% 程度以下	400 年以上
茨城県沖	M 6.7~M 7.2	90% 程度以上	約 21 年
房総沖	(過去に大地震がなく評価不能)		
三陸沖北部から	M 8.2 前後 (津波地震)	20% 程度	133 年程度
房総沖の海溝寄り	M 8.2 前後 (正断層型地震)	4%~7%	400~750 年

チュード、今後 30 年間における地震発生確率、および平均発生間隔は表 1 のように評価されていた。

「宮城県沖」は、過去 200 年間に 1793 年 (M 8.2)、1835 年 (M 7.3)、1861 年 (M 7.4)、1897 年 (M 7.4)、1936 年 (M 7.4)、1978 年 (M 7.4) と 6 回の地震が平均 37.1 年間隔で繰り返されており、今後 30 年間の発生確率は 99% という我が国で最も高い値であった。なお、1793 年の地震 (M 8.2) は、さらに沖合の「三陸沖南部海溝寄り」が連動した地震と考えられている。

この「宮城県沖」では、2005 年 8 月に M 7.2 の地震が発生したが、予想された M 7.5 には達しなかったため、まだ警戒を緩めることはできないとの評価がなされていた。次いで本年 3 月 9 日には、沖合の「三陸沖南部海溝寄り」の海域で M 7.3 の地震が発生した。この時は、これによって「宮城県沖」と「三陸沖南部海溝寄り」が連動する M 8 級の大地震の危険性はやや薄らいだとも考えられていた。

ところが、結果的にはこの地震が前震となって今回の M 9.0 の地震が発生し、その巻き込んだ領域は、「三陸沖中部」から「茨城県沖」までの 5 海域、そして「三陸沖北部から房総沖の海溝寄り」までを含む超巨大なものとなった。歴史的には、平安時代の 869 年 (貞観) に、大きな津波を伴った三陸沖巨大地震 (M 8.3) があり、多賀城下で溺

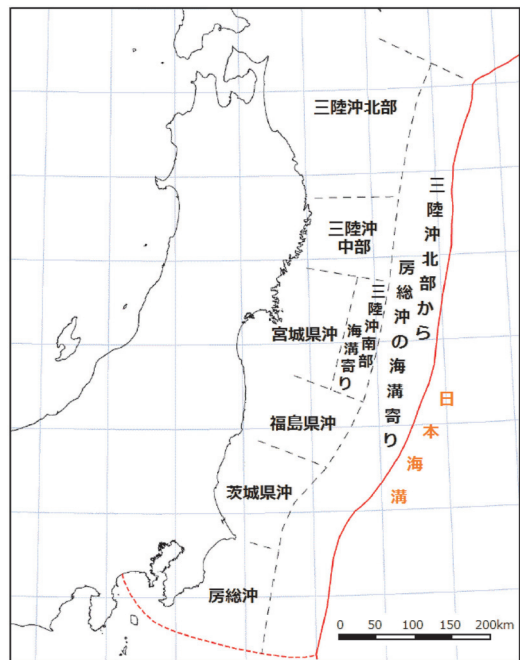


図 10 東日本太平洋沖における海溝型地震の発生領域分け（地震調査研究推進本部による）

死 1,000 などの被害があったことは知られていたものの、それが現世に再現する、またはそれを上回る地震が起こるとは、殆どの人が想像できなかった。

8. 誘発現象の問題

東北地方太平洋沖地震は M 9.0 という超巨大な地震であり、大きな地殻変動によるひずみ変化が周辺に及んだと考えられる。この影響によって、広域にわたり様々な地学現象が誘発されることが懸念される。

(1) 海溝型巨大地震の誘発

大きな地震が発生すると、本震の断層面の延長部において同様の地震が連鎖的に起こる場合が多いことが知られている。たとえば、1854年(安政)東海地震(M 8.4)とその32時間後の(安政)南海地震(M 8.4)、1944年東南海地震(M 7.9)と1946年南海地震(M 8.0)、2004年12月スマトラ島沖地震(M 9.1)と翌年3月にその東隣りで起こったニアス島沖地震(M 8.4)など、数多くの例がある。

断層面の両端延長部分で、本震と同じ発震機構を有する地震の発生を促す応力が大きくなることは、弾性論による理論的な計算でも裏付けられている。このような連鎖的誘発現象は、海溝型地震同士のみならず活断層で起こる内陸型地震同士でも知られており、トルコの北アナトリア断層で1939年(M 7.8)、1942年(M 6.9)、1943年(M 6.3)、1944年(M 7.6)と順番に西へ破壊域が移っていった例は有名である。また、最近の例では、2010年9月ニュージーランドのカンタベリー地震(M 7.3)の約6か月後、本震の断層面の東方延長部でクライストチャーチ地震(M 6.3)が2011年2月に発生している。

今回の地震にあてはめると、南北500kmの断層面の北方延長と南方延長が要注意ということになるが、北方の「三陸沖北部」では1968年十勝沖地震(M 7.9)や1994年三陸はるか沖地震(M 7.5)がすでに発生している。ところが、南方の「房総沖」では、長い間大きな地震の発生がない。過去には、今から334年前に1677年(延宝)房総沖地震(M 8.0)が発生し、千葉から茨城の沿岸に大津波が押し寄せて死者200名を数えたとの記録がある。少なくとも半年から1年くらいは、この

海域での地震に対して警戒をすべきであろう。

(2) 内陸地震の誘発

5節の余震活動の項で述べたとおり、東北地方太平洋沖地震(M 9.0)の発生後、内陸側においても「広義の余震」と呼ばれる地震が連発し、本震翌日の3月12日には、03:59に長野県北部でM 6.7、同04:47に秋田県沖でM 6.4、3月15日の22:31には静岡県東部でM 6.4と、M 6級の地震が相次いだ。

図11は、本震発生の翌日から1週間の期間に東日本で発生した地震の震源分布を示しているが、この中のA, B, Cが上記3つのM 6級地震とその余震に対応している。このほかに内陸で目立つ活動として、同図のDに示す福島・茨城県境の浅発地震活動がある。ここは、普段ほとんど地震活動の見られない場所であるが、今回はM 6級地震を含む活発な地震活動が生起しており、何度か震度5強の揺れも記録されている。そして、本震から1ヶ月後の4月11日には福島県東部でM 7.0のごく浅い地震が発生し、地表断層も確認された。これらの地震の発震機構解は東西方向に張力軸を有する正断層型が多いことから、4節で述べた東西伸張の地殻変動が関係している可能性が高い。

なお、過去に海溝型巨大地震と内陸の大地震が連動した例としては、1896年6月(明治)三陸の津波地震(M 8.2)と、同年8月に岩手・秋田県境付近で発生した陸羽地震(M 7.2)のペアがよく知られている。

(3) 火山活動の誘発

図11では、領域A~Dのほかに、Vと記した地域でも地震活動の活発化が見られた。これらはいずれも関東・中部地方の火山に関係した活動であり、日光白根山、焼岳・乗鞍岳、箱根山、伊豆大島、新島・神津島が該当している。また、Cについても、富士山のほぼ直下で発生した地震活動である。

元来、火山地帯は力学的に弱い構造を有しており、刺激を受けやすい場所と言われている。なお、関東・中部地方のみならず、北海道、東北、九州の火山でも東北地方太平洋沖地震のあとに火山性

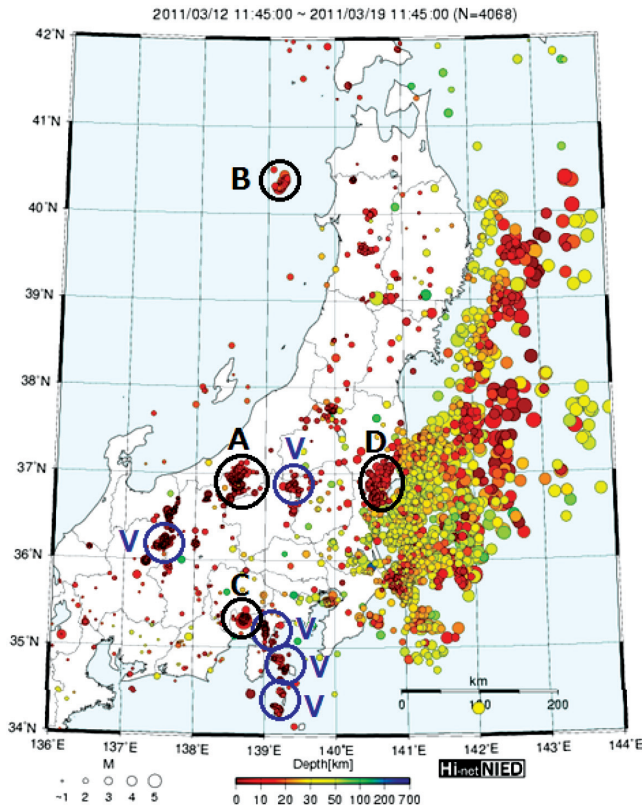


図 11 今回の地震発生の翌日から1週間の期間における東日本の地震活動（防災科研 Hi-net の自動処理震源による）。A, B, C, D は M 6 級を含む浅発地震活動，V は火山関連の地震活動を示す。

地震の活動が高まったとの報告がある。ただし、いずれの火山についても、噴火の兆候となる火山性微動や低周波地震、そして異常な表面現象などは観測されておらず、誘発された地震活動は徐々に終息へと向かっている。

過去に海溝型巨大地震と火山活動が連動した事例としては、1707年（宝永）東海・南海地震（M 8.4）の49日後に富士山が大噴火し、宝永火口を作った例が有名である。また、2004年12月スマトラ島沖地震（M 9.1）の後には、数ヶ月間にわたって周辺の10以上の火山で地震活動が活発化し、1年4カ月後にはジャワ島のメラピ火山が噴火した。

今回のように超巨大な地震が起こったあと、周辺でどのような現象が発生するのかは予断を許さない状況であり、今後とも注意深く活動を見守っていく必要がある。

岡田義光

〔おかだ よしみつ〕

現職 独立行政法人防災科学技術研究所
所理専務
理学博士

略歴 東京大学大学院理学系研究科地球物理学専門課程博士課程中退、東京大学地震研究所助手（富士川地殻変動観測所勤務）、科学技術庁国立防災科学技術センター（現防災科学技術研究所）地殻力学研究室長、地震前兆解析研究室長、地震活動研究室長、地震・噴火予知研究調整官、地震予知研究センター長、地震調査研究センター長、企画部長を経て現職

研究分野 地震学、地殻変動論

著書 『日本の地震断層パラメータ・ハンドブック』（共著、鹿島出版会）、『現代測地学』（共著、日本測地学会）、『最新 日本の地震地図』（朝倉書店）、『自然災害の事典』（共著、朝倉書店）他



平成 23 年 3 月 11 日

東北地方太平洋沖地震の津波について（速報）

都司 嘉宣，佐竹 健治，石辺 岳男，杉本めぐみ，大木 聖子，
西山 昭仁，室谷 智子，泊 次郎，上野 俊洋

1. はじめに

2011年3月11日の14時46分ごろ、関東地方から東北地方にかけての東方沖の広い海域を震源として、マグニチュード9.0のプレート境界型超巨大地震が起きた。この地震に伴う巨大津波によって、三陸海岸地方に壊滅的な被害をもたらされた。南三陸町、女川町、気仙沼市、大船渡市、釜石市などの市街地が、ほぼあますところなく津波によって壊滅したとのニュースが伝えられ、目を覆う悲惨な津波被害の映像がテレビの画面は次々と写し始めた。この津波による死者数は、地震発生から41日を経過した4月22日時点で、被害が大きかった3県で、宮城8,603人、岩手4,110人、福島1,432人であって、日本全体では死者は12都道府県にわたって14,208人である。行方不明者は宮城6,955人、岩手3,590人、福島1,835人をはじめ6県にわたって合計12,384人となっている。死者・行方不明者の合計数は、26,592人にのぼっているが、いまだ最終数字ではなく、今後増加する傾向にある。しかし、ここまでの数字ですでに昭和三陸地震津波（1933）の死者行方不明者合計3,064人はもとより、明治三陸地震津波（1896）の約2万2千人をも越えている。さらに、明和8年八重山津波（1771）の死者数9,209人、寛政4年（1792）年島原半島眉山の崩壊に伴う有明海津波の死者合計数15,135人をも上回って、日本史上最大の死者・行方不明者を出した津波となることが確実となった。

2. 仙台市以南の直線状海岸の集落を襲った津波

未曾有の規模の地震とそれに引き続く津波による被災映像は、災害発生の直後からテレビ画面にあふれかえった。宮城県仙台市若林区の海岸の上空からのヘリコプター映像には、ゆるやかにカーブする海岸線に設けられた高さ約6mの堤防など全く問題にせず、津波は易々と乗り越え、海岸砂丘を完全に海水で飲み込んだあと、その最後に広がる田園地帯の集落の家々を次々と飲み込んでいく。海水の帯は、家屋の建材屋家具類などを含み込んだまま、海岸線から数キロ内陸にまで、途中ほとんど妨げるものが無く侵入していく。このあたりの集落には、津波警報が出て、ほんのわずかな高地もなく、津波から避難するための高層ビルもない。だいたい、仙台市から南、福島県に至る海岸線は、明治・昭和の2度の三陸津波にも被害地域の範囲外であって、全く被害は起きていなかった。このため、この海岸線のすぐ内側、砂丘の背後にある集落は、三陸海岸より津波災害に遭う可能性はきわめて少ないと、漠然と考えられていた。これらの集落に住んでいる人、これらの集落を行政範囲の一部とする市町村、あるいは県、さらに私も含め、津波の専門家でさえも、このような直線状の海岸線の背後にある集落の津波危険性をほとんど指摘することがなかった。今回の津波では、このような津波対策の盲点であった場所の弱点を、もののみごとに突かれてしまったのである。

3. 千葉県・茨城県の津波被害

3月11日の発生直後には東北地方の被災地では、非常の多くの津波被災者の安否が不明であったこと、幸いにも一命を取り留めて緊急的に避難所に身を寄せた多くの人にも、水・食料・衣類・寝具などの必要物資の輸送が緊急となる一方、避難所に接近するための道路が瓦礫や海水による水没のため確保が困難な上、ガソリンなどの輸送手段にも事欠くという、避難場所に孤立した人々の生命を脅かすような状態が続いた。被災地海岸が

このような状態であったため、全国の理学・工学の立場の津波研究者が、遡上高さの測定などの研究目的で被災地に入ることは3週間ほど自粛した。4月にはいと、東北自動車道の再開による物資の輸送体制が改善され、被災地海岸への移動にも支障が少なくなり、津波研究者たちは手分けをして、被災地海岸に入り、被害や浸水高さの調査を開始した。われわれ地震研究所でも、3月中は、千葉県、茨城県の調査を3度行った。

千葉茨城両県の海岸での津波の高さの分布を、棒グラフの形で示しておく(図1)。千葉県の海岸に対しては、1960年、および2010年の2回のチ

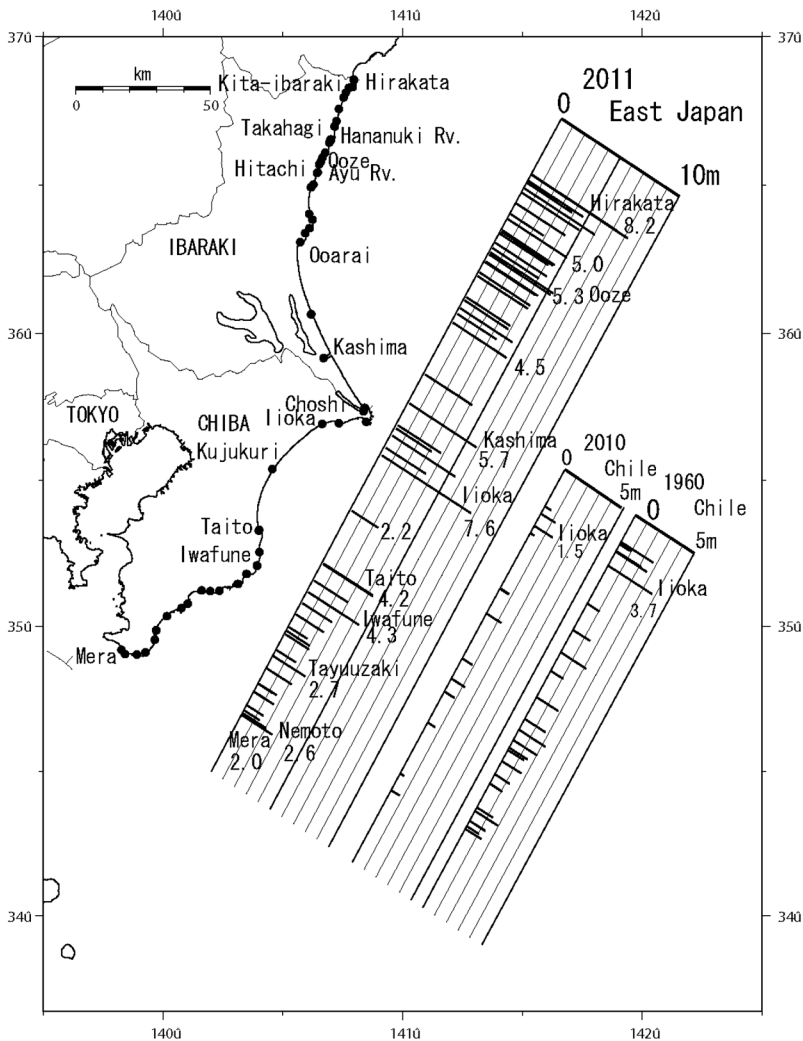


図1 東北日本太平洋側地震津波による千葉県・茨城県海岸の津波の浸水高(m)の分布。千葉県海岸に対しては1960年、および2010年のチリ津波による津波の高さ分布も併せて示してある。

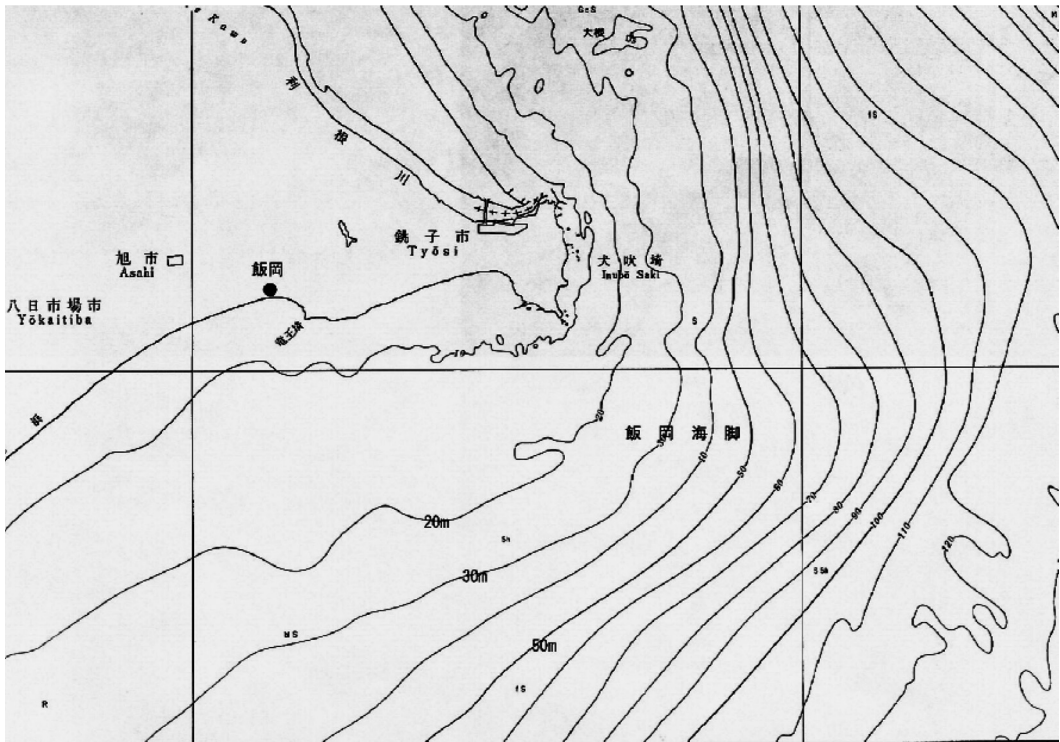


図 2 千葉県飯岡の沖合には東南東に延びる舌状の浅海部分「飯岡海脚」が沖に向かって突き出している。

り津波による津波の浸水高さ (m) の分布も併せて示して置いた。

千葉県の外房海岸で、今回の津波で最大被災地となったのは、九十九里海岸の東端に位置する旭市飯岡である。ここは、ゆるやかにカーブを描く海岸線が続くが、海岸線に並行して走る砂丘のすぐ内側に居住地域が広がっているが、飯岡ではおよそこの市街地の1階の天井付近まで浸水し、全潰320軒を含む被害住宅が3,144軒に及び、津波による死者13人、行方不明者2人を出して、関東地方最大の被災地となった。実は、1960年のチリ津波、そして昨年2月のチリ津波のときにも、飯岡は房総半島の海岸で一番津波が高くなった場所であった。2010年のチリ津波のときには、飯岡漁港では、海面が1.5m上昇し、岸壁の背後の魚市場のコンクリート床面が浸水した。1960年のチリ津波のさいにも、ここで3.7mの津波の高さがあった。飯岡の沖合の海底地形図をみると、20m、30mおよび50m等深線が南東に向かって沖に突き出ていることがわかる。こういう沖に向

かって浅い部分が舌状に突き出た地形では、その背後の海岸に津波の伝播線が焦点を結ぶ傾向があり、津波エネルギーが集中しやすい場所なのである。飯岡は将来の津波のさいにも、波源が東、あるいは東南方向である場合には、他の場所より津波が高くなることは必然である。

茨城県では、福島県境に近い茨木市平潟の東地区で津波が8.2mの高さに達し、住宅の2階の窓面まで海水が上がり、ここもほとんどの家屋が全壊の被害を被った。

なお、水戸市に近い大洗では、4.5mの高さまで浸水したが、住宅地域は浸水にとどまり、全半壊家屋はほとんど生じなかった。住宅地域と海岸の間に、フェリーターミナルのオフィスビルや町役場の庁舎、水産会社の倉庫など、大きくて頑丈なビルが建ち並んでいて、津波の流速のエネルギーが一般住宅を直撃することを妨げたからである。津波防災を含めた都市計画に大きなヒントとあるであろう。

4. 北三陸海岸の津波の高さ

今回の津波は、死者行方不明者数において昭和8年(1933)の三陸地震津波、あるいは明治29年(1896)の明治三陸津波を越えるものであったが、津波の高さについては、4月になって研究者たちが被災地に入って測量を始めるまで、はっきりしたことは知られていなかった。4月にはいると、津波研究者たちはいっせいに最大被災地となった三陸地方の調査に出かけ始めた。われわれも、三陸海岸の北の部分である、宮古市以北、久慈市までの海岸の調査を4度行い、この間の海岸の津波

による浸水高さの測定を行った。

図3にその結果を示す。注目すべきことに、本州最東端のトドが崎近くの千鷲から以北、小堀内までの約25キロの海岸線区間にある、千鷲、重茂里漁港、松月、和野、真崎、青野滝、小堀内などの9カ所で、30mを越える津波高さを記録している。このうち小堀内では、津波の遡上高さ37.9mに達していた。明治三陸津波の遡上高の最大は、大船渡市三陸町綾里での38.2mであったから、この数値に迫るものである。図4は小堀内漁港と丘の上の小堀内の集落である。幸いにも津波高さが37.9mを記録した小堀内漁港は、付近に人の常住する民家のない無人の漁港であって、こ

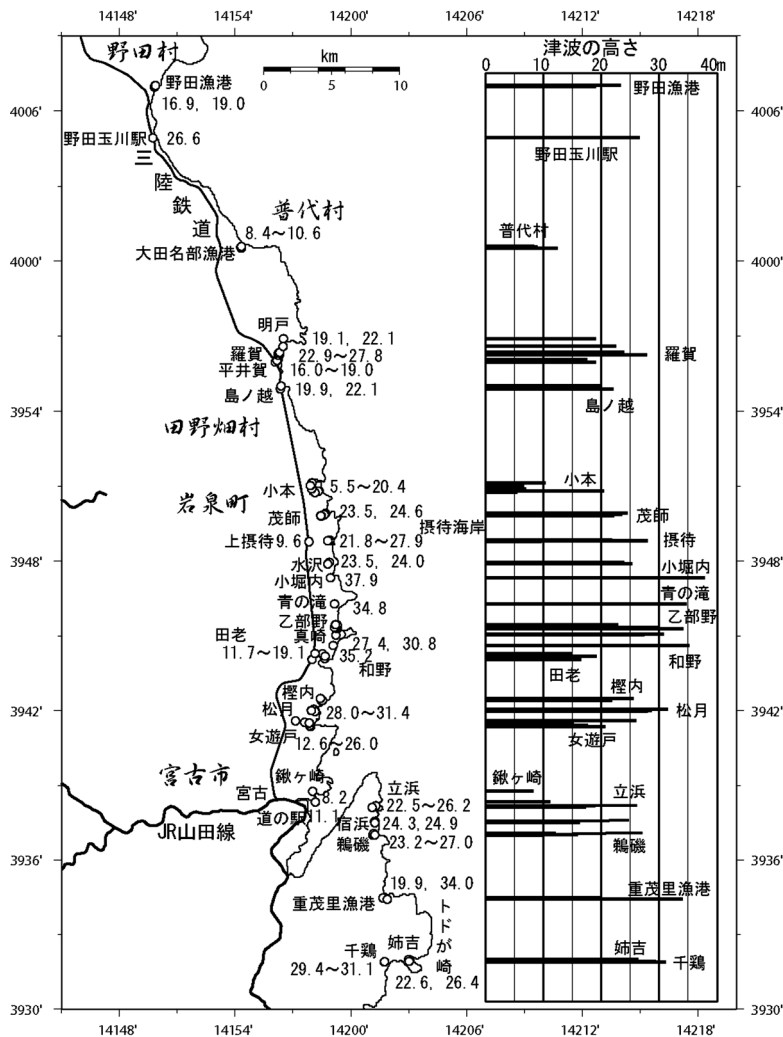


図3 岩手県宮古市・野田村間の津波の浸水高さ

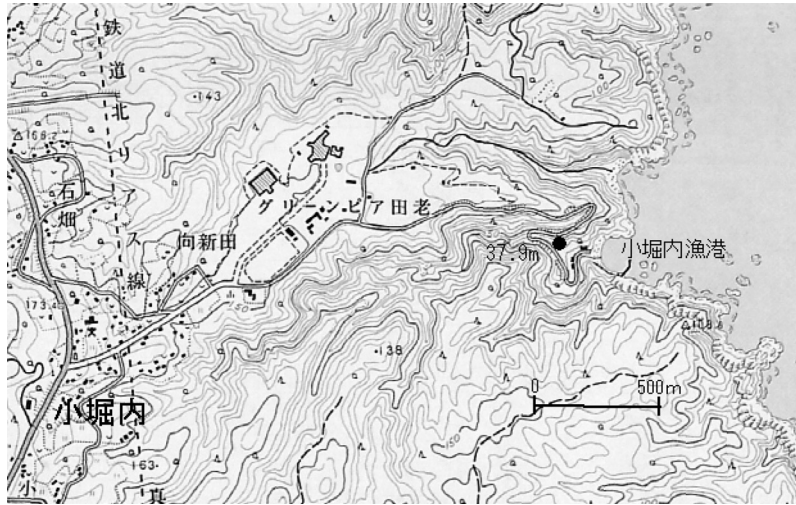


図 4 小堀内地区の地図 ●は津波到達点 (37.9m)



図 5 津波遡上高さ 37.9m を記録した小堀内漁港

の漁港を本拠とする漁業者はみな、丘の上の小堀内集落に住んでいたため、居住者の被害はおきていない。ただ、津波警報が出されて、田老地区の消防士 3 名が監視のために標高 30 m の道路の屈曲部で駐車した消防自動車内にいたところ、標高 30 m 以上にまで駆け上がってきた津波のために消防自動車ごと背後の谷に突き落とされ、乗っていた消防士 3 名が死亡したのは痛ましいことであ

る。図 5 は、この道路の屈曲部から小堀内漁港を見下ろしたところであって、漁港が津波によって大きな損傷を受けている様子がわかる。それと同時に、カメラを置いた場所のすぐ近くの地面に、津波によって露出した樹木の根や、溪谷対岸の急斜面の標高の高いところにある木が、津波のためになぎ倒されている様子を見ることが出来るであろう。津波到達点は、このカメラ像を撮影した場

所からさらに6, 7メートル上方に位置する。

図4の地図に、丘の上にグリーンピア田老の保養施設があるが、ここが田老での生存者約700名の避難所となっていた。

なお、津波浸水高さ30mを越えたこれ以外の場所である、松月、和野、青野滝、水沢は海岸付近は、人の常住する住居がほとんど無い場所であった。真崎のみは、数軒の家がこの非常に大きな高さの津波の直撃を受けた。

5. 田老の被害

2005年以後宮古市と合併してその一部となった田老町は明治三陸津波(1896)の津波で住民の

約90%にあたる2,859人の死者を出し、また昭和三陸津波では911人も死者を出した津波被災の町であった。町を津波の被害から守ろうと、昭和三陸津波の被災の直後から、道路配線を改良した町を取り囲むように高さ10メートルあまりの防潮堤が始められ、25年の年月を経て昭和33年に完成した。その後、この防潮堤の東側外部の長内川にそった平野部の青砂里地区に新たに居住する人が増え始めた。この新しい街区を津波の被害から守るため、昭和53年(1978)からもとの防潮堤と同じ10mの高さの「外側の防潮堤」が建設され始め、こちらの方は翌昭和54年(1979)に完成した。こうして、田老町は、総延長2,433メートルの

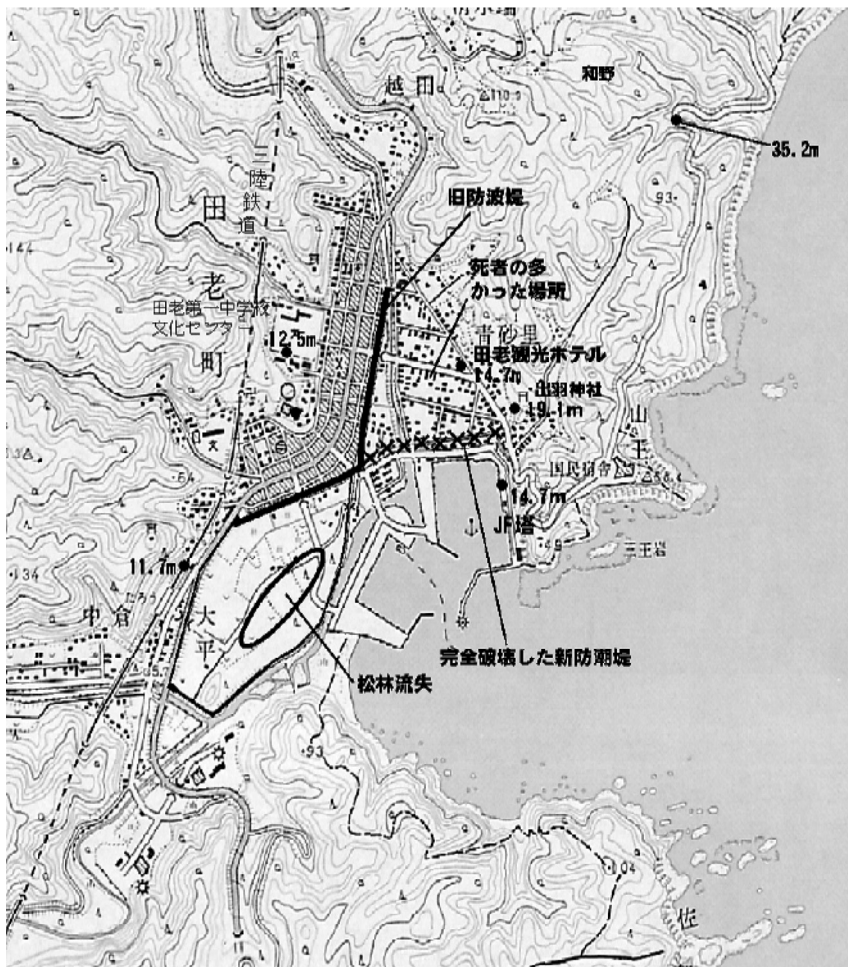


図6 津波に被災した田老町の新旧防潮堤の配置

高さ 10 m の防潮堤に守られた町となった。ことに昭和 33 年に完成した古い方の防潮堤に囲まれた旧市街地は、昭和 54 年に完成した新防波堤と併せて 2 重の防潮堤に守られることとなって、津波に対して鉄壁に守られた田老町が完成したかに見えたのである。

しかしながら、この 2 重の防潮堤も、昭和三陸津波の高さ 10 m を防ぎきることを目指して建設されたのではあるが、明治三陸津波の時には 14.9 m の津波であることは歴代の町長もよく承知しておられた。したがって、「たとえ、この防潮堤があっても、明治三陸津波のような、14.9 メートルの津波が来たなら完璧には防ぎきれないから、津波警報が発令されたならやはり町民は 1 次避難施設の高台に避難すること」と町民に呼びかけておられた。東町長、竹花町長ら歴代の町長自らが、折に触れて町民に語っておられたのである。

ところが、今回の津波は、明治三陸津波をも遙かに上回る大津波であった。おそらく、慶長 16 年 (1611) の三陸津波をさえも上回り、遙か古代の貞観十一年 (869) の三陸津波しか匹敵するものがないと考えられるほどの「千年震災」であった。その浸水高さは、新防潮堤の内側の出羽神社の参道を横切る地点でさえ 19.1 m もあった。両堤防外の JF 塔のところを「進行波」として進んだ津波の水表面の高さは 14.7 m に達していた。おそらく、防潮堤がいっさい何もなければ、田老の町の背後の丘に駆け上がって、高さ 25 m 以上の地点に達していたのではないかと推定される。図 3 をよく見てほしい。田老のわずか 4 km 南の松月で 31.4 m、わずか 1 km 北の和野で 35.2 m に達しているのだ。まったく防潮堤のような人工物がなければ、田老の場所でも 30 m を越えていたと考えるのがむしろ必然であろう。

この巨大な津波に、昭和 54 年に完成した方の新防潮堤は、おもちゃの積み木を壊すように、もろくも崩れ去ってしまった。このため、この新防潮堤だけによって守られていた、青砂里の集落のあった街区は、ほとんど木造家屋の基礎の痕跡を後に残すのみ、瓦礫すらもとの家の敷地の場所に残らないような、完璧な市街地の流失をまねいて

しまった。今回命を失った人の多くも、この街区に住んでいた人々であった。これに比べて、昭和 33 年に完成した旧防潮堤はほぼ完璧に残った。津波はこの防波堤も遙かに越える高さで迫ってきたのにもかかわらず、海水の流速エネルギーを減殺するのに大きな有効性を発揮した。このため、この旧防潮堤に守られた街区の木造家屋は、たとえ全壊にいたり、あるいは瓦礫の山に化しても、資材の多くは元の家との位置にとどまり、人々の多くは何とか命を取り留めることが出来たのである (図 7)。

これに比べて、今回の津波で無惨にも完璧に崩れ去った昭和 54 年完成の新防潮堤を見ておこう。図 8 は完全に崩壊した田老町の新防潮堤である。左端に立っているコンクリートの壁は、新防潮堤の端の壁材であった部分である。その手前に防潮堤の上部の壁面を構成していたコンクリートスラブの壁材は、底部をこちらに向けて転倒している。画面右側には底部は元の位置にとどまっているが、その上にあったはずの壁材をなすコンクリートスラブは、完全に運び去られている。よくみると、上部分のコンクリートスラブの底面には、その下部のコンクリート塊と連結する工夫が全くないのに気づく。近頃は墓石の積み上げにさえ「でっぱり」と「ほぞ」のかみ合わせの構造が施されている。しかるにこの堤防を構成していたコンクリートスラブの上部と下部の間にはこれすらない。さらに、連結の役目を果たすべき鉄筋も全く用いられてはいない。

図 9 は、新防潮堤が道路を通すゲートの部分である。新防潮堤はこのゲート部分の両側に同じ海面上 10 メートルの高さで万里の長城のように連なっていたはずである。ところが、写真で見ると、ゲート部分の橋梁をなすコンクリートだけは完璧に残っているが、それに連なる部分は、なかに詰めてあった土の土手と、写真向こう側に下部のコンクリートスラブが見られるだけで、跡は何も残っていない。つまり、このゲート部分のコンクリートは、それに連なるべき両脇のコンクリートスラブの壁面とも、まったく一体化されてはいなかったことになる。全体として、この新防



図 7 壊れなかった田老町の旧防潮堤



図 8 完全崩壊した田老町の新防潮堤

防潮堤は、「積み木」のように「上に載せただけ」、あるいはゲート部分では横に並べただけの構造であった。これでは、強力な津波の流速の力にはとうてい抵抗することは出来なかったであろう。はっきりいって、この新防潮堤は「手抜き工事」

の産物であろう。いっけん頑丈そうに見えるので、この防潮堤の内側にいた住民たちは、津波のときの抵抗力を信じて命を託したのであろう。しかし、その構造の内実は上述の通りであった。無惨にも崩壊するのは道理であった。痛恨の極みで



図 9 完全崩壊した田老町の新防潮堤（道路ゲート部分）

ある。

6. 田野畑村の被害

津波高さが 20 m を越えた場所は、宮古市の中心街の約 5 キロ北方の女遊戸（おなっぺ）以北、野田村の三陸鉄道野田玉川駅までの、約 50 km に及ぶ海岸線区間であった。この区間の田野畑村の領域に、島ノ越、平井賀、羅賀の 3 つの集落がある。いずれも家屋の過半数が失われるという重大被害を生じている。なかでも島ノ越は、山の中腹に土地を切り開いた 3 軒の家屋だけが残って、残りのすべての家屋が、全壊流失した。ことに三陸鉄道は島の越の部分で高架部分に駅があったが、駅もろとも高架部分が津波に倒壊してしまった（図 10）。

羅賀（らが）には、明治三陸津波のときに海岸から運ばれてきた大小 2 個の「津波石」が畑の中に残されているので有名である。今回の津波の浸水限界が、ちょうどこの大きい方の津波石の所を通過していた（図 11）。この場所で今回の津波の遡上高さが 24.5 m であったことが判明している。

7. 明治・昭和の両三陸津波と比較して

最後に、今回の調査で得た三陸海岸北部の津波の浸水高さを、明治 29 年（1896）、昭和 8 年（1933）の 2 回の三陸津波のそれらと比較したグラフをかかげて本稿の結びとしよう（図 12）。今回、われわれが現地測量で得た津波高のデータは、三陸海岸では、宮古市以北、野田村までのおよそ 60 km の部分だけであるが、この間に 30 メートルを超える地点がすでに 5 点を数える。20 m を越えた地点は、この間にほとんどどこにでも見いだすことが出来るほどである。図 12 には、今回のデータは白丸で示した。昭和三陸津波のデータは星印で示したが、これは比較にならないだろう。昭和三陸津波が 15 m を越えた地点は三陸海岸全体で数えるほどしかないのであるから。明治三陸津波を見てみると、30 m を越えたのは、北三陸のわれわれの測定区間には 1 点もなく、ただ、大船渡市三陸町綾里の 1 点と、陸前高田市広田地区集（あつまり）の 1 点のみである。このような細かい比較を論ずるまでもなく、図 12 を見れば、今回の津波



図 10 岩手県田野畑村島ノ越の三陸鉄道高架橋部分の津波による倒壊。向こう側に高所に残った2軒の家が見える。



図 11 田野畑村羅賀の津波石。明治三陸津波のときに運ばれてきた。今回の津波の浸水限界線はちょうどこの石の根元を通過している。

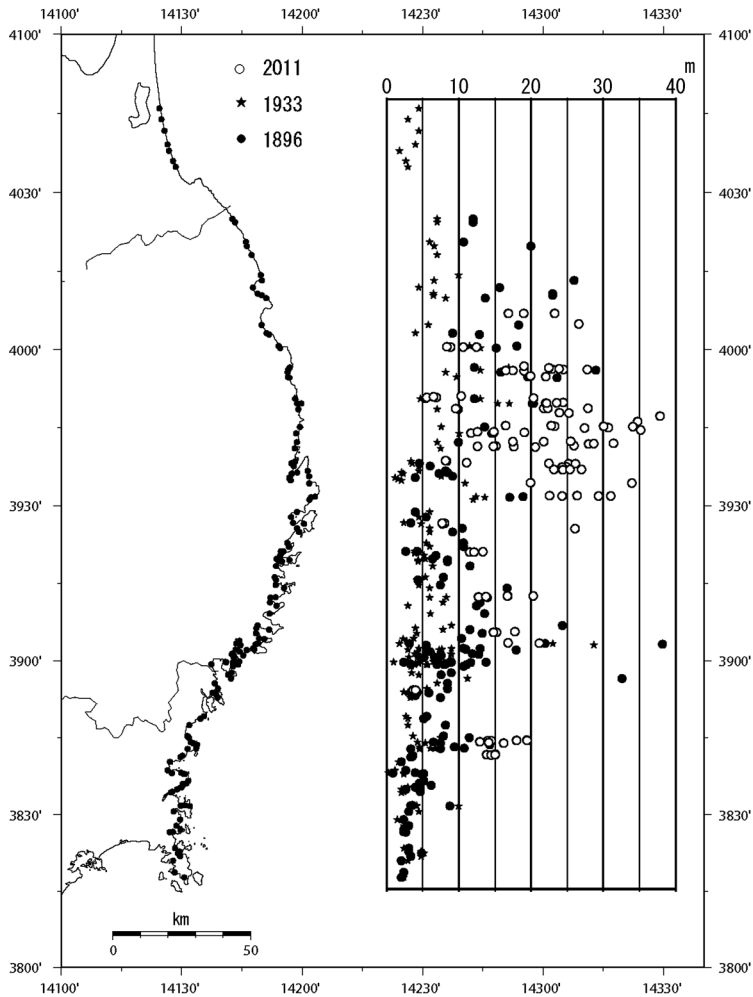


図 12 今回の津波の高さ(白丸)を昭和(1933)および明治(1896)三陸津波と比較したグラフ

が、明治三陸津波を大きく上回っていることが一目瞭然と言うべきであろう。われわれや、津波調査を推進している工学系のグループ、あるいは各研究所の各位の調査によって、明治三陸津波の最高値 38.2 m を越えるデータが見いだされるのは時間の問題であろう。

率直に言って、今回の地震、津波は、昭和三陸津波はもとより、明治三陸津波の規模をはるかに越え、はるか 1142 年前に起きた貞観 11 年 (869) の三陸大津波にしか匹敵する相手を見いだすことが出来ない、とほぼ確信を込めて言うことが出来るのである。

都司嘉宜

[つじ よしのぶ]

現職 東京大学地震研究所准教授
理学博士

略歴 東京大学工学部土木工学科卒業、
同大学大学院理学系研究科地球物理学
専攻修士課程修了、科学技術庁国立防災科学技術セン
ター研究員を経て現職

研究分野 津波、高潮、古地震

著書 『沿岸災害の予知と防災』(共著、白亜書房)、『ソ連の地震予知研究事業』(地震予知総合研究振興会)、『富士山の噴火』(築地書館)、『地震と断層』(共著、東京大学出版会)、『古地震を探る』(共著、古今書院)、『火山とマグマ』(共著、東京大学出版会)、『千年震災』(ダイヤモンド社)



濃尾地震が大地に遺したもの

—地震断層と小藤文次郎の断層原因論，その後—

松田時彦

1. はじめに

明治24年(1891年)10月28日の早朝、内陸最大の地震、濃尾地震が起こった。それは明治期の近代化を急ぐ日本に大被害を与えた。地震による死者は7,000以上、全潰家屋は14万を超える。山地では大規模な山崩れが起き、平野には多くの地割れができた。震源地とされた岐阜の根尾谷には谷や田畑を横切って延々と断層が現れた。それを現場でみた地質学者小藤文次郎は、その断層の動きが濃尾地震の原因であったと確信した。しかし、そのような地震の「断層原因説」が確立するまでには日本ではその後半世紀以上の年月を要した。その間の「断層」を巡る議論を振り返ってみよう。

2. 当時の地質学と地震学

明治初期の日本政府は外国人を招いて近代化を進めていた。地質学の中心地ドイツからE. ナウマンが招かれて来日、明治10年(1877年)には東京大学ができ、明治11年に地質課(地質調査所の前身)が設置された。イギリスからは地質学者J. ミルンが来日し工学部で教えていた。ミルンは、明治13年の横浜地震を契機に「日本地震学会」を作り、日本の地震研究を押し進めた。明治18年頃からは各地の測候所で地震観測が始まった。

小藤文次郎は、東京大学の地質および採鉱冶金学科の第1期生として卒業し、翌年ドイツへ留学、3年後の明治17年(1884年)に帰国して翌18年に東京大学理学部地質学科の教授になった。その頃から地質調査事業が進み日本列島の地質が大

略把握されるようになった。

明治20年代に入ると、明治21年に磐梯山が爆裂、翌22年には熊本で被害地震が起こった。そして24年(1891年)に濃尾地震が発生した。

小藤文次郎は、明治22年熊本地震での調査の経験から地震と地層の関係を知りたいと考えて現地へ向かった。同じく東京大学の地震学担当の関谷清景は、磐梯山にも熊本にも出向いて調査したものの濃尾地震では病のため現地行きを断念せざるを得なかった。物理学科からは、前年に卒業したばかりの大森房吉が菊地大麓教授の命を受けて被害地に出かけた。地質調査所からは巨智部忠承が直ちに被害地に向かった。

3. 濃尾地震と小藤文次郎

小藤文次郎は濃尾地震に直面して次のように書いている。そこには地質学者としての喜びと自負が率直に表われている(図1)。濃尾地震は、「人間一生涯のうちに再三遭遇することの無いような世界の大地震であるからその震源を研究することは実に学者の愉快とする所である」。「今回の濃尾地震では通常は地下に隠れている断層を地上で誰もが肉眼で見ることができた。その長さも測ることもできた。これはおそらく世界ではじめてのことであり震災の賜であると言うことができる」(小藤、1892)。そして小藤は濃尾地震の現場でその断層を目の当たりにして、その断層が濃尾地震の原因であることを世界に向かって主張した(Koto, 1893)。

さらに、「ドイツやオーストリアの学者は地震の原因には断層、火山、陥落があるというが、彼らの国は大地震の少ない所であるから、それらの

定説はみな推理上の憶説に過ぎない。自分らはそれを今日まで半信半疑に聞いていたが、過般の濃

尾地震においてそれが断層地震（あるいは地質構造地震）であることを実際に証明することができた」と述べている。



図 1 小藤文次郎（津和野町郷土館提供）

4. 根尾谷断層とその調査

「断層」とは、岩盤を切断しその両側の岩盤をずり動かしている岩盤中の不連続面のことである。岩盤中に鉱脈や石炭層があるとそれらも切断されて移動している。したがって、断層には鉱山関係者や地質学者が早くから注目してきた。19世紀のドイツやオーストリアの地質学者達はアルプス山脈の地質構造の中に多くの大規模な断層を見つけていた。

地震の時に地表に現れた断層を「地震断層」あるいは「地表地震断層」という。日本で最初に科学者の目に触れた地震断層がこの濃尾地震の地震断層である（図2）。それは根尾谷断層などであり、福井県足羽川沿岸から東南へ美濃の木曾川南

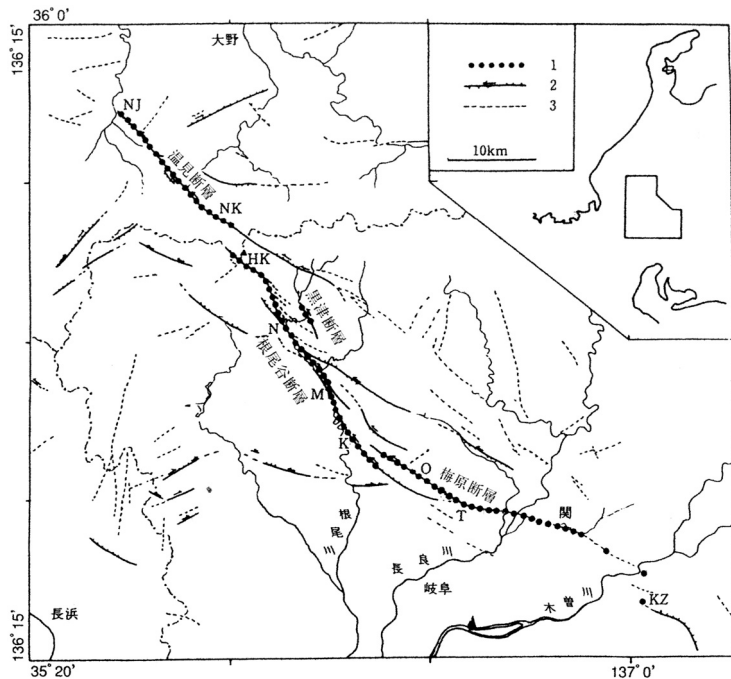


図 2 濃尾地震の地震断層（松田，1974；村松ほか，2002）

1：濃尾地震の地震断層 2：既存の活断層 3：リニアメント

HK：能郷白山 K：金原 KZ：古瀬 M：水鳥 N：能郷 NJ：野尻 NK：温見 O：大森 T：高富

側まで全長約 80 km で、それを境にその北東側の土地が北西へ向かって最大 8 m ほど移動した。

濃尾平野北側の山地の根尾川沿い一帯（金原以北）を根尾谷という。そこでは山崩れなどの被害や地変がとくに顕著であった。現地の岐阜測候所長はそこで大規模な山地の陥没を観察してそれが今回の地震の原因であると報告した。小藤文次郎はその報告を聞いてから根尾谷に入り地震断層を見いだした（小藤，1892；Koto, 1893）。大森房吉は越前側をも含めて広く山地を踏査して、地震断層は越前側の断層線と根尾谷以南の断層線とに分かれていることを明らかにした（大森，1893，1900，1910）。このほか、地質学科学生 比企 忠（1891）は直後に単独で根尾谷に入り能郷一水鳥付近で最初に土地の系統的なずれを見出していた。

5. モグラの通り道（モルトラック）と水鳥の断層崖

現地で小藤文次郎の注意を引いた地変線は、丘や稲田を横切って続く地割れの列であった。それは表土が砕かれて土塊が重なり合ってやや盛り上がったもので、巨大な^{モグラ}モルトラックの通り道に非常によく

似ていた（図3）。この“モグラの通り道”は土地の横ずれに伴って平坦な土壌の表層部にしばしば現れるものである。これは「モルトラック」（mole-track）と呼ばれてその後しばしば世界の地震学の教科書に登場して、今や国際語になっている（Richter, 1958；Yeats, et al, 1997 など）、余談だが、かつて私がアメリカの地震断層の地割れを見学した折、案内者から“この国のモグラとあなたの国のモグラは似ているか？”という奇妙な質問を受けた。半ば冗談にせよ、小藤の論文がよく読まれていることを思い知らされた。

小藤はこの地割れを見た時、その形から日本の伝説の中の奇怪な“地震虫”を思い出し（図4）、それを丁寧に英語でも説明している。その地震虫は「日本の11世紀の曆に画かれていたとされるもので、無数の突起を持ち、頭はドラゴンで背中には日本地図を載せている恐ろしく平べったい生き物である。それは帝国日本の下に棲むといわれる巨大な“なます”の迷信の元になったものかもしれない。そしてこの地震虫信仰はおそらく今回のようなテクトニック地震の時にあらわれた地割れの外観から生まれたものと思われる」と書いている。

小藤の英文報告には、このほか根尾谷の水鳥付

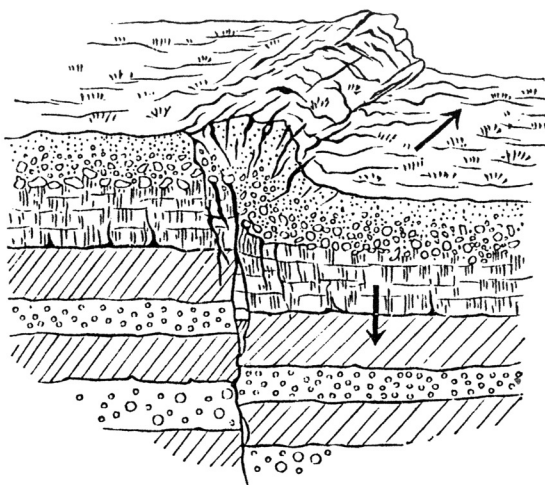


図3 モルトラック（モグラの通り道）
（左図）モルトラックの断面（Koto, 1893）
（右図）モルトラックの例（1979地震時のImperial断層沿い，R.V. Sharp氏 撮影）

近に突如現れた“鉄道線路の土手のような”断層崖の写真が付されている(図5)。ヨーロッパに地

震断層が現れたことは無かったから、その写真は濃尾地震とともに一躍世界の注目を引いた。地震学者C. リヒターの地震学教科書には、「小藤による水鳥の断層崖は地学の世界で最もしばしば引用される資料の一つである。地震学の教科書でこれに言及していない教科書は完全ではない」と書かれている(Richter, 1958)。戦後、外国に出かけたある日本人の地質学者は「ミドリの断層崖はどうなっているか?」とその安否を尋ねられたが、「ミドリ」がどこの何であるか知らなかったという。少々恥ずかしい話である。小藤自身は「この片田舎の図画が富士山とともに日本の名物となった」と述べている(小藤, 1900)。

濃尾地震は、その地震断層とともに地震国日本を一躍西欧の地学の世界に知らせたのであった。

6. 小藤の断層原因論

小藤文次郎は上述のように震源地付近で地震断層を見出して、その断層の北東側の土地が少し下

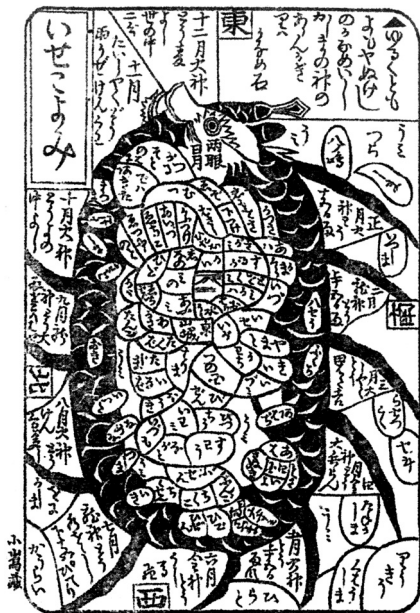


図4 地震虫の図(東洋学芸雑誌, 122, 151より)
建久9年の暦に付されていたものといわれる



図5 水鳥の断層崖(Koto, 1893)
濃尾地震の時に根尾川の谷底平地に出現した段差

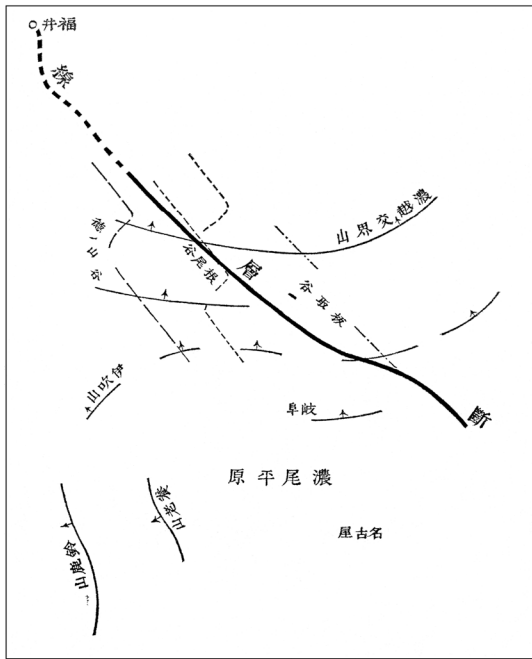


図 6 根尾谷断層（太実線）と美濃山地の山脈・水系の関係（小藤，1892）

り北西へ横すべりしたことが濃尾地震の原因であると確信した（小藤，1892）。濃尾地震は当時よく知られていた地震の3種類，断層地震，火山地震，陥落地震のうちの断層地震であることを強く主張したのである。

さらに小藤は，根尾谷付近の美濃山地には古い時代の岩層からなる東西方向の山脈とそれを斜めに横切っている北西-南東走向の断層があり，その断層の一つ（根尾谷断層）が濃尾地震の時に再活動したと記している（図6）。初めて目にした地震断層に対して，早くもその横ずれ性とその再活動性を指摘している。

では断層はどのようにしてできるのか。当時，構造地質学のE. ジュースらの強い影響下にあったオーストリアやドイツの地質学では，地球は次第に冷えて表面近くに古びたミカンの皮のように皺が寄り，地層は圧縮されて褶曲し山脈や盆地ができる。褶曲が進んで限界を超えればついに地層は切断されて断層ができる。このように，地質学では早くから地震は山脈構造の形成に伴って生じると考えられていたのである。小藤の考えもこれ

と同様であった。

J. ミルンや関谷清景も以前から，地震の種類や原因についてほぼ同様の定説を紹介していたが（関谷，1889），両者とも濃尾地震については独自の考えは述べていない。大森房吉（1910）は，根尾谷断層，黒津・温見断層および濃尾平野下の推定断層が同時に動いて地震が生じたとして，断層原因説に追従している。

しかし，断層から地震がどのようにして発生するかについては，小藤を含めて当時の学者は全く触れていない。小藤は「地盤が断層すべりを起こせば地震が生じることは地質学者の定論である」（小藤，1892）と当時の常識的知識を記しているだけである。少なくとも当時の西欧の地質学者には断層の動きが地震を起こすことは自明であり，それ以上の説明は必要でなかったであろう。

このように小藤の地震に対する断層原因説は，地震発生のメカニズム論を欠いた直感的な断層原因論であった。カリフォルニアの地質学者H. F. レイドがサンフランシスコ地震を経験して弾性反発説を提出したのは，この20年後（1911年）のことである。

7. 地震の地質学的研究

— “ミルン派地震学” への批判

小藤はドイツから帰国したとき，ミルンらが活躍する日本の地震学に対して違和感を感じたらしい。小藤はその著書（小藤，1884）の中で「どんなに精密な驗震器を作ってもその（地震発生の）根核になる山脈全体の構造を考察して火山あるいは地震を調べなければ到底真理の門には達しない」と述べ，さらに小藤（1891）では「ミルンらの先輩は地震を詳しく研究しているが，それらはみな器械上の研究であり，その点は世界に向かって誇れるが，震源を求め地震と地質の関係についてのことは非常に不^{マコ}信切であり，ついには地震研究は驗震器上の観測に属すべきものであるとさえいわれる様になった。自分はこの学風にミルン派の地震学という名称を与える」と言っている。

しかし，小藤自身もその弟子達も濃尾地震後に

は専ら火山の調査を精力的に行って、地質学からの地震研究は進まなかった。一方で、大森房吉らによる余震や地震波の研究があるが、地震学者の関心の大勢は地震災害軽減へ向いていた。

このような時(明治27年)に地震学の前途を心配した関谷清景は、地質調査所の所長宛に「地震学を専門としているものは小生と大森房吉理学士だけでほかにはいない。その2人とも数理地震学を得意としているが地質学の知識に乏しい。ついては地質学者にして地震学を専攻するものがあつたら御推薦いただきたい。このことで先般来、小藤教授とも話合ったがまだ達せられていない。自分は病弱で余命永からずと覚悟している。自分らが大学にいる間に後継者を2、3人つくり置きたいと願っている」という手紙を書いている(今村, 1936)。この2年後に関谷清景は病没した。

その後、地震学はますます地質学から離れていく。小藤(1910)はほぼ20年後の江濃地震(1909)の調査報告書の中で嘆いている:「地震学は物理学の一派である弾力学家の占有的研究事項となつてしまった。そうしてその後地震観測術は大いに振るい倍々その傾向に進まず。されば地震学は地質学の手を離れて物理学に嫁せり」。

濃尾地震後の地震学は主に大森房吉と今村明恒によって進められた。本来地質学的な課題である日本の地震帯の研究もこれらの地震学者によって行われた。

8. 地震の原因論 その後

日本内陸では濃尾地震の後に庄内地震(1894)、陸羽地震(1896)、江濃地震(1909)などが相次いで発生した。しかし、「断層原因説」はほとんど議論されることはなかった。関東地震(1923)や北丹後地震(1929)の頃には、地殻は幅数km程度かそれ以上の「地塊」からなっていると考える「地塊説」(山崎直方, 1925など)が強調された。そこでは断層は地震の原因ではなく、地震動や地塊運動の結果であるとされた。あるいは、北丹後地震では断層を地震を起こした断層(「起震線」と地震動によって動かされた断層(「地弱線」)の

2種類にわける考えも現れた(中村新太郎, 1927など)。小藤文次郎は断層原因説を固持して二つの方向の(共役の)地震断層が出現したことによって北丹後地震を双子地震と考えた(Koto, 1928)。一方ではほぼ同じ頃から、地下深部の岩漿(マグマ)による熱的な効果やマグマの流動を重視する地震の熱・マグマ原因説(小川琢治, 1929; 石本巳四雄, 1935)などが唱えられた。

その後、昭和の北伊豆地震(1930年)、鳥取地震(1943年)、三河地震(1945年)などでも明瞭な地震断層が現れて詳細な記載が行われた。しかし、断層が地震の原因であるという議論は日本では地震波初動の四象限分布や双力源の主張以外には、濃尾地震以後1960年代に入るまで半世紀以上の間ほとんど行なわれないうままであった。

9. 地震断層に学ぶ

濃尾地震から今年で120年。現在の地震研究は2種類の記録によって支えられている。一つは地震計が捉えた地震動の記録であり、他の一つは断層として遺された大地の記録である。前者の地震動の記録に基づく研究は地震計の改良と地震観測の充実によって地震学の中核として濃尾地震以後ますます発展した。後者の、大地に遺された記録に基づく研究は、1960年代の地震学者による地震予知研究計画をきっかけにして漸く地形や地層を用いた活断層の調査として発展し地震の断層原因説を支援した。

最近の地震計記録による地震学は震源での断層の動きを物理学的にとらえて説明することができるようになった。地形・地質の記録からの研究は、将来また地震を起こすかもしれない断層が共役的な関係で日本陸域に多数存在していること、その断層から起こる大地震は一般に歴史時代の長さよりも遙かに長い間隔を持ってほぼ定期的に発生するものであること、大地震の規模は地表でわかる断層の規模に大略対応していることなどの、今では当たり前のような地震現象の基本的な性質を明らかにした。

こうして、私達は地震とは「最近地質時代を通

じて安定して存在している広域的な地殻応力場のもとで間欠的に生起する断層運動である」という地学的地震観を確立した。そして物理現象と地質現象の両面から、地震を「地学現象」として捉えるようになった。

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震と津波は現在の地震学の予想を超えた巨大な規模のものであった。災害に遭われた方々に心からお見舞い申し上げるとともに、地震学がより予測力のあつる科学へ発展することを願うものである。

参考文献

- 藤井陽一郎 (1967) 「日本の地震学」, 紀伊国屋書店, 239 p.
- 比企 忠 (1891) 美濃国根尾谷陥落の略況, 地学雑誌, 第3集, 第35巻, 585-589.
- 今井 功 (1966) 「黎明期の日本地質学」, ラテイス, 193 p.
- 今村明恒 (1936) 関谷先生と後進養成, 地震漫談 (其の9), 地震, 8, 29-38.
- 石本巳四雄 (1935) 「地震とその研究」, 古今書院, 336 p.
- 石本巳四雄 (1936) 地震断層に就て一大塚学士に答ふ一, 地震, 8, 284-291.
- 小藤文次郎 (1884) 「金石学, 一名鉱物学」, 澤屋印刷部, 162 p.
- 小藤文次郎 (1891) 震源ニ就テ, 東洋学芸雑誌, 123, 618-629.
- 小藤文次郎 (1892) 濃尾大地震ノ震源, 東洋学芸雑誌, 9, 147-158.
- Koto, B. (1893) On the cause of the great earthquake in central Japan, 1891. Jour. Coll. Science, Imp. Univ. Japan, 5, 296-353.
- 小藤文次郎 (1900) 根尾谷断層両端ノ地震, 東洋学芸雑誌, 226, 310-311.
- 小藤文次郎 (1910) 地質学上ノ見地ニ依ル江濃地震, 震災予防調査会報告, 69, 1-15.
- Koto, B. (1928) The intersecting twin earthquake of Tango Hinterland in 1927, J. Fac. Sci., Imp. Univ. Tokyo, Sec. II, Vol. II, pt. 6, 265-329.
- 松田時彦 (1974) 1891年濃尾地震の地震断層, 地震研究所研究速報, 13, 85-126.
- 松田時彦 (2008) 活断層研究の歴史と課題, 活断層研究, 28, 15-22.
- 三雲 健・安藤雅孝 (1975) 濃尾地震の解析的再現, 科学, 45, 50-58.
- 村松郁栄・松田時彦・岡田篤正 (2002) 「濃尾地震と根尾谷断層帯」, 古今書院, 340 p.
- 中村新太郎 (1927) 丹後峰山地震に顕れたる起震線と地弱線, 地球, 7, 260-272, 431-440.
- 小川琢治 (1929) 「地質現象之新解釈」, 古今書院, 745 p.
- 大森房吉 (1893) 濃尾地震概報, 地質学雑誌, 1, 42-55, 99-102, 153-161, 215-219, 253-263, 311-322, 425-437.
- 大森房吉 (1900) 明治二十四年十月二十八日濃尾大地震ノ調査 (第2回報告), 震災予防調査会報告, 32, 67-87.
- 大森房吉 (1910) 地震ノ種類ニ就キテ, 震災予防調査会報告, 68, 甲, 3-19.
- Richter, C.F. (1958) 「Elementary Seismology」, Freeman, 768p.
- 関谷清景 (1889) 地震の原因等に就いて, 東洋学芸雑誌, 6, 157-159.
- 山崎直方 (1925) 関東地震ノ地形学的考察, 震災予防調査会報告, 100 (乙), 11-54.
- Yeats, R. S., Kerry Sieh, and C. R. Allen (1997) 「The Geology of Earthquakes」, Oxford Univ. Press, 568 p.
- (無署名, 1891) 地震虫之図, 東洋学芸雑誌, 122, 580-581.

松田時彦

[まつだ としひこ]

現職 (財)地震予知総合研究振興会副
首席主任研究員, 東京大学名誉教授
理学博士

略歴 東京大学理学部地学科卒業, 同大
大学院博士課程修了, 東京大学地震研究所教授, 九州大
学理学部教授, 熊本大学理学部教授, 西南学院大学文学部
教授を経て現職

研究分野 地震地質学, ネオテクトニクス

著書 「日本列島の地形学」(共著, 東京大学出版会),
「濃尾地震と根尾谷断層帯」(共著, 古今書院), 『活断層』
(岩波書店), 『地震』(共訳, 古今書院), 『動く大地を読
む』(岩波書店), 『火山と地震の国』(共著, 岩波書店),
『新編 日本の活断層』(共著, 東京大学出版会)



濃尾地震震源域周辺における地震活動

—今なお続く余震活動と新たな震源断層モデルの可能性—

浅野陽一

1. はじめに

1891年に発生した濃尾地震 (M 8.0 [村松 (1962)], M_w 7.5 [Fukuyama et al. (2007)]) は国内の内陸地震としては最大規模のものと言われている。この地震の震源域では近年においても微小地震活動が周囲と比べて活発であり、それらの地震は濃尾地震の余震であると考えられている [たとえば、大井田・他 (1971)]。

大きな地震 (本震) の後に続いて発生する余震の活動は、一般的に本震発生からの経過時間とともに減衰することが知られており、濃尾地震の場合には、地震発生の1年後には1日あたり約1個であった有感地震数が、10年後には約0.1個といった具合に減少してきたことが報告されている [大森 (1894), Utsu (1961)]。このデータに対して当てはめられた改良大森公式 [Utsu (1961)] という経験式によれば、地震発生から約120年後の近年では、年間約4個の有感地震発生が期待される。有感地震が M 3程度の規模であると仮定すれば、より小さな地震ほど多数発生するという規模別頻度分布に基づいて M 1程度の微小地震の発生数を予測することができる。その数は約400個と見積もられ、実際に検出されている M 1以上の地震数はこれよりやや少ないものの概ね一致する。すなわち、今なお比較的活発な地震活動は濃尾地震の余震であるという解釈と矛盾しない。

このような余震の詳細な分布の解明は、濃尾地震の震源断層モデルに一定の拘束を与えるとともに、内陸巨大地震の発生メカニズムの理解にも貢献するものと期待される。近年の防災科学技術研究所による高感度地震観測網 (Hi-net) [Okada

et al. (2004)] の整備によって、濃尾地震の震源域周辺ではマグニチュード1以下の地震の検出とそれらの高精度震源決定が可能となった。本稿では、Hi-netの整備以降の記録解析によって明らかとなった詳細な震源分布を紹介するとともに、その分布を参考にした新たな震源断層モデルの提案を試みる。

2. 濃尾地震の震源断層モデル

濃尾地震では、地表地震断層が現れた温見断層、根尾谷断層、および梅原断層に沿った領域のみならず、これらの断層からやや離れた濃尾平野においても甚大な被害があったことが報告されている [たとえば、村松 (1963)]。また、地震発生当時、地震観測や測量が既に始められており、濃尾地震にともなう地震動 (地面のゆれ) や地殻変動の記録も数少ないながら残されている。三雲・安藤 (1975), Mikumo and Ando (1976) は、丹念に再調査された地表地震断層 [松田 (1974)] に加えて、これらの被害分布、地震動、および地殻変動から震源断層モデルを推定し、地表地震断層に沿った数枚の起震断層に加えて、後に岐阜—一宮線 [活断層研究会 (1991)] と呼ばれる想定伏在断層を含むモデル (以下、三雲・安藤モデル) が記録を良く説明することを示した。このような震源過程の解析が試みられた大地震としては、濃尾地震は恐らく国内最古のものであろう。

今日の震源過程解析では、断層すべりの複雑な時空間的發展を解く一方で、高精度の余震分布や発震機構解を参考にして予め断層面を仮定するのが一般的である。しかしながら、地震発生当時の観測態勢や技術からするとそのような余震分布な

どは望むべくもない状況であり、1970年代になって始めて、根尾谷断層に沿って地震活動が活発であること、それらの大部分が深さ15 km以浅で発生していることが明らかにされた [大井田・他(1971)]. この結果は三雲・安藤モデルの断層面の深さ範囲に一定の根拠を与えはしたが、それ以上の手がかりにはなりえず、仮定する断層面の位置や傾斜角は震源分布以外の情報によらざるをえなかった。

被害分布の観点からは、木沢・山羽(1891)および片山(1893)が岐阜市付近から一宮市付近を経て名古屋市付近に達する線状の被害集中域を第2震裂波動線として報告している。一方、杉崎・柴田(1961)は、ボーリング資料解析から第四紀層中の軽石層を約5 m東上がりに変位させる一宮一稲沢断層を推定した。村松(1963)は、第2震裂波動線と一宮一稲沢断層が濃尾地震時の隆起域と沈降域との境界線に概ね一致することを指摘し、この地下に伏在する断層(後の岐阜—一宮線)も濃尾地震時に動いたと考えた。しかしながら、愛知県(1998, 2000)による反射法地震探査の結果、新第三紀後期層および第四紀層中に少なくとも大きな累積変位をとまなう地質構造は認められなかった。地震調査研究推進本部(2001)は、これらの結果を含めた既往研究を検討し、岐阜—一宮線は活断層ではないとの判断を示した。また、同報告の中では、村松(1963)および飯田(1979)の調査結果に線状の被害集中域は認められないこと、三雲・安藤モデルでは上下変動の緩やかな空間分布が説明できないことといった、岐阜—一宮線が濃尾地震時に動いたと考える上での疑問点についても言及された。

一方、地震活動に基づいた震源断層モデルの再検討はNakano et al. (2007)によって試みられた。彼らは、名古屋大学による1983年から2003年の震源カタログを調べて、地震活動度の高い領域が岐阜—一宮線よりも東側に分布すること、ほぼ東西圧縮の逆断層型の発震機構解を持つ地震がそこで発生していることを明らかにした。これらを彼らは、岐阜—一宮線に対応した西落ち、東傾斜の伏在断層に沿って発生する地震と解釈すると

もに、東傾斜の伏在断層を考慮したモデルが被害分布や地殻変動を良く説明することを示した。しかしながら、傾斜する面状の震源分布が見出されたわけではなく、東傾斜の伏在断層と地震活動との対応は必ずしも明らかとは言えない。そこで今回我々は、濃尾地震の震源域周辺においてHi-net整備以降のデータを解析し、この地域における地震活動を詳細に調べた。

3. 近年の地震観測から見えてきた 西傾斜の逆断層

本研究では、2003年1月から2009年3月までのHi-net、気象庁、および名古屋大学の定常観測点の記録を使用した。この観測網の観測点間隔は約20 km程度であり、地殻浅部の深さ数キロメートル程度で発生するような地震の震源を精度良く決めるには必ずしも十分ではない。そこで我々は、このHi-netの観測点を補完するような5点のオンライン臨時観測点を2008年4月に設置し、そのデータも使用した(これらの観測点は2011年3月現在、大学との合同観測点として運用されている)。Hi-netおよび臨時観測点に設置された1 Hz速度型地震計からのアナログ電気信号は、現地でデジタル信号に変換された後にインターネット回線を通じて防災科学技術研究所に集められ、Hi-netのルーチン処理システムによって処理される。処理されたイベントのうち、地震活動度が比較的高い震源域の中央部以南の深さ20 kmよりも浅い地震約2000個について、P波およびS波の到達時とP波初動極性を手動で検出し、その読み取り値をデータとした。

浅い地震についてその震源位置、とりわけ深さを高い精度で推定するには、その地域に適した一次元地震波速度構造や、観測点直下の局所的な不均質構造による走時(地震波が伝わるのに要する時間)のずれを補正するための観測点補正值を使用することが効果的である。そこで我々は、以下の手順でそれらを評価した後に震源決定を行った。まず初めに、砕石発破の記録によって深さ数キロメートル程度までのP波速度構造を推定し、

次に、自然地震の記録によってそれよりも深部の P 波および S 波の速度構造を推定した。そして最後に、その速度構造による震源決定の走時残差から観測点補正値を評価した。このように得られた一次元地震波速度構造と観測点補正値を用いて震源決定 [Hirata and Matsu'ura (1987)] を行い、その結果を初期震源として精密震源再決定 (ダブルディファレンス (DD) 法 [Waldhauser and Ellsworth (2000)]) を行った。

最終的に DD 法によって再決定された震源の分布を図 1 に示す。図からは、濃尾地震の震源域周辺において、その周囲よりも相対的に地震活動が活発であることがわかる。根尾谷断層から梅原断層の北部にほぼ沿って延びる線状の地震活動域は、その位置と分布形状から、濃尾地震の震源断層近傍で発生した余震によって構成されているものと考えられる。一方、この線状の地震活動域の南側に位置する梅原断層と想定伏在断層とされてきた岐阜—宮線に挟まれた領域では、地震活動度が特に高い。このような震源分布の特徴と断層との関係を明らかにするために、これらの地震の発震機構解を P 波初動極性によって調べた。ある地震について、各観測点における P 波初動の立ち上がり方向 (極性) がどのように分布するかを調べることによって、断層運動を表す発震機構解を知ることができる。この発震機構解によって我々は、地震が横ずれ断層型なのか、あるいは逆断層型なのかといった情報を得ることができる。

推定された発震機構解の空間分布を図 2 に示す。根尾谷断層および梅原断層の近傍では、主として横ずれ断層型が発生していることが分かる。それらの中にはこれらの断層直下で発生しているようにも見える地震もあるが、全体的には空間的なばらつきが大きく、分布形状とは一致しないような発震機構解を持つ地震も多い。従って、これらの地震は根尾谷断層や梅原断層そのもので発生する地震というよりは、むしろその周囲で発生する地震によって構成されていると解釈される。

一方、震源域南部に位置する梅原断層と岐阜—宮線に挟まれた領域では、逆断層型の地震が多数発生している。そこで、そのような逆断層の走

向と直交する鉛直断面に沿って震源の深さ分布を調べた (図 3)。その結果、この領域には東西約 10 km、南北約 20 km にわたる西傾斜の震源分布が存在し、その傾斜角は発震機構解の節面とも調和的であることが分かった。この結果は、震源分布に対応するような西傾斜で東落ちの逆断層が存在し、多くの地震がその断層に沿って発生していることを強く示唆する。2005 年 1 月 9 日には、この西傾斜の震源分布域の南西部で M 4.7 の地震が発生した。この地震とそれに伴う余震の分布も明瞭な西傾斜を示しており、やはり同断層の一部がすべったものと考えられる。

4. 逆断層を含む震源断層モデルから予想される最大速度

震源域南部に見出された西傾斜の逆断層は M_w 6.5 程度の断層サイズを持ち、濃尾地震時に動いた可能性もある。しかしながら、それは自明な話ではなく、丁寧な検証が必要である。たとえば、1894 年 1 月 10 日には M 6.3 [宇津 (1979)] の地震があり、現在の一宮市や江南市などで被害があったことが報告されている [岐阜縣岐阜測候所 (1894)]。このような比較的規模の大きな余震が震源域南部で発生し、それに関係した余震活動が今なお続いている可能性も否定できない。そこで以下では、逆断層を含む震源断層モデルを仮定し、そのモデルから予想される地震動の最大速度分布が被害状況を説明するかどうかを検討した。

最大速度分布の推定には、簡便法と呼ばれる手法を採用した。この手法では、S 波速度が 600 m/sec という硬質基盤における最大速度を距離減衰式 [司・翠川 (1999)] によって評価し、それに増幅率を乗じて地表での最大速度を評価する [例えば、藤原・他 (2004)]。ここでは、防災科学技術研究所の地震ハザードステーション J-SHIS [防災科学技術研究所 (2009)] が公開する工学的基盤から地表に至る最大速度の増幅率を使用した。震源断層モデルは、温見断層および根尾谷断層については三雲・安藤モデルと同様とした。梅原断層については、その直下というよりも南西側で地震

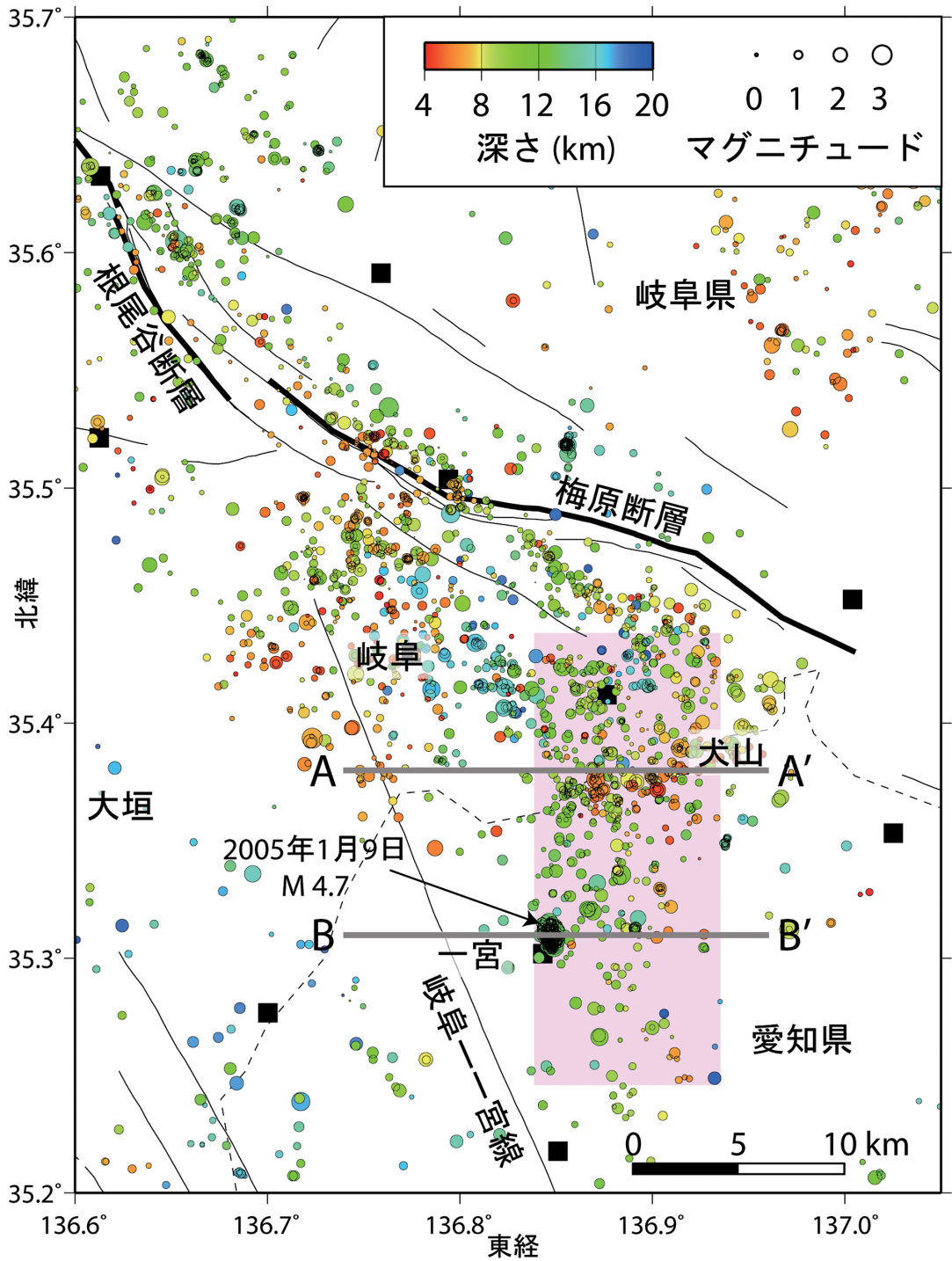


図 1 再決定された震源の分布. 震源を丸印で示し, その大きさはマグニチュードを, 色は深さを表す. 観測点を四角印で併せて示す. 黒色太実線および細実線は, 地表地震断層および活断層 [活断層研究会 (1991)] をそれぞれ表す. 灰色実線は図 3 に示す東西鉛直断面の位置を表す. 桃色矩形は西傾斜の震源分布域を表す.

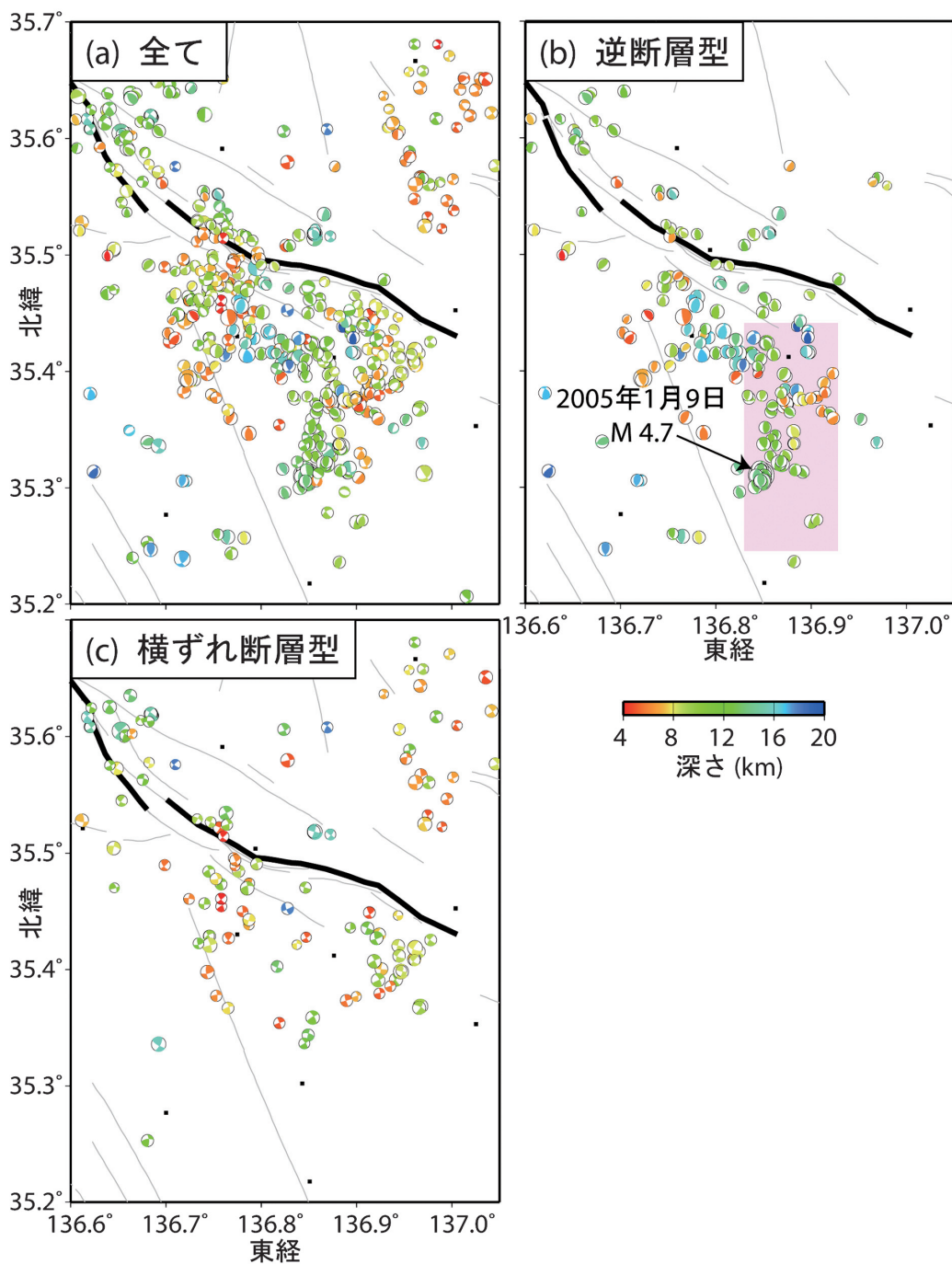


図 2 発震機構解の分布. (a) 全て, (b) 逆断層型, および (c) 横ずれ断層型の地震の発震機構解を下半球等積投影で示す. カラースケールおよび桃色矩形は図 1 に同じ.

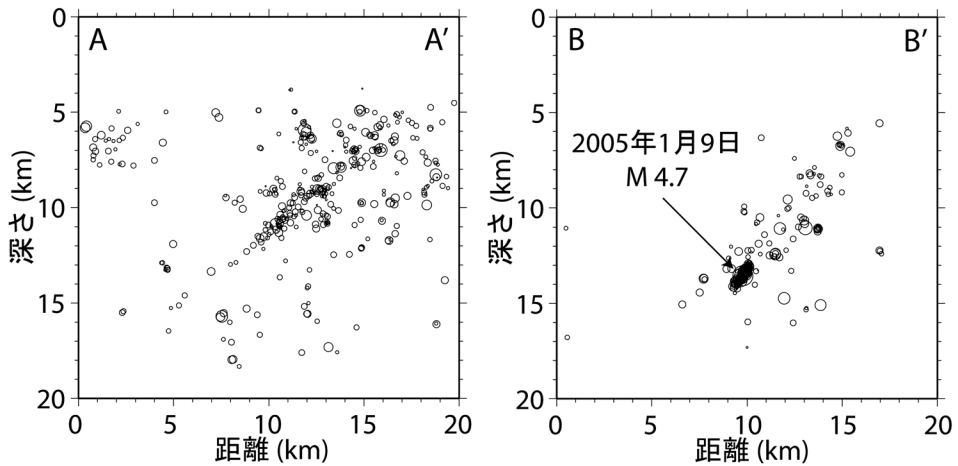


図3 震源域南部における震源の深さ分布。(a) AA'および(b) BB'鉛直断面における再決定震源の深さ分布。

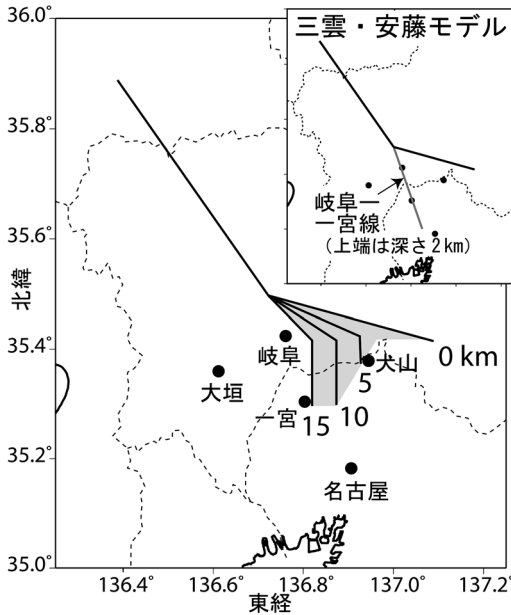


図4 仮定した震源断層モデル。仮定した断層の広がりや深さ分布を表す等深線を黒実線でそれぞれ示す。等深線が収束して重なる北緯35.5度以北では、モデル化された断層は鉛直である。また、挿入図に三雲・安藤モデルを併せて示す。

活動が活発であることから、地表の梅原断層と地下の震源分布をつなぐような傾斜した断層としてモデル化した。それよりも南に位置する震源域南部については、西傾斜の震源分布に沿うような

伏在断層としてモデル化した。伏在断層の深さ範囲は試行錯誤的に5~15 kmとした。既往研究による岐阜—一宮線(三雲・安藤モデルでは、左ずれ・東側隆起の鉛直な伏在断層)は本研究では採用しなかった(図4)。その他に必要なパラメータは、三雲・安藤モデルに準拠したモデルによって最大速度分布を評価した宮腰・他(2003)を参考に設定した。

推定された最大速度の空間分布を図5に示す。最大速度は局所的な増幅率の大小に応じて同一市内であっても値が大きくばらつくが、名古屋市の北西部、一宮市、および岐阜市を含む震源域南部では100 cm/sを超える値となった。この特徴は、被害状況に基づく地変震度分布[村松(1963)]から評価した最大速度分布[宮腰・他(2003)]を概ね良く説明する。すなわち、岐阜—一宮線のかわりに西傾斜の逆断層を導入した震源断層モデルであっても、大域的な被害状況を説明できることが分かった。一方、大垣市付近での最大速度推定値は約80 cm/s程度と、この地域の甚大な被害状況からみるとやや小さいと思われる値となった。大垣市を含む濃尾平野西部では堆積層が著しく厚いことが知られており、簡便法ではモデル化できないような深部地下構造の影響などによって最大速度が過小評価された可能性がある。このような残された問題については、今後の検討が必要と考え

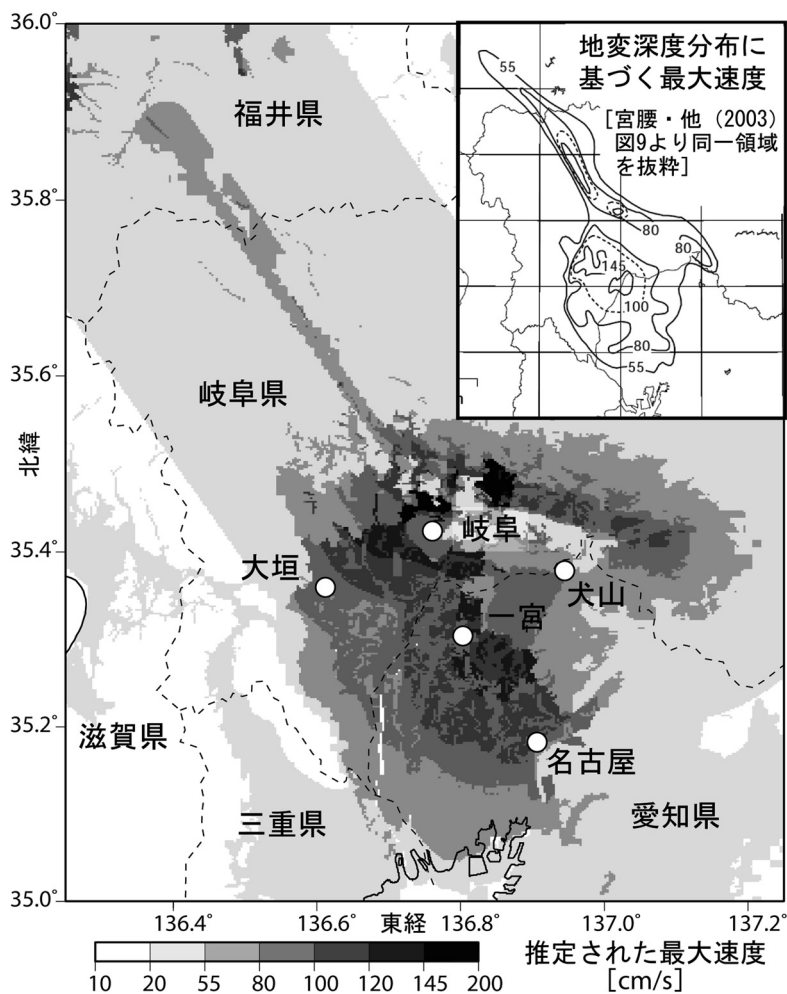


図 5 最大速度の空間分布。推定された最大速度をカラスケールで示す。丸印は主要な都市の位置を表す。宮腰・他（2003）が地変震度分布〔村松（1963）〕から評価した最大速度の分布を挿入図にて併せて示す。

られる。

5. ま と め

本稿では、近年の高感度かつ高密度の地震観測から明らかになった濃尾地震の震源域周辺における地震活動を紹介するとともに、その震源分布から濃尾地震時に震源域南部で西傾斜の逆断層がすべった可能性を指摘した。また、従来のモデルで考慮されてきた岐阜—宮線にかわり、この西傾斜の逆断層を含むモデルを仮定して最大速度の空間分布を評価した。その結果、このモデルによる

最大速度分布は濃尾地震による被害分布を良く説明することが分かった。今後、当時の地震動や地殻変動の記録の解析や詳細法による強震動予測などによって、モデルの改良や妥当性の検証がさらに進むことが期待される。

参 考 文 献

- 愛知県, 1998, 平成 9 年度地震関係基礎調査交付金 岐阜—宮断層帯及び養老—桑名—四日市断層帯に関する調査 成果報告書, 118 pp.
- 愛知県, 2000, 濃尾平野の地下構造調査. 第 1 回堆積平

- 野地下構造調査成果報告会予稿集, 61-70.
- 防災科学技術研究所, 2009, 地震ハザードステーション J-SHIS, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>.
- 藤原広行・河合伸一・青井 真・功刀 卓・石井透・早川 譲・森川信之・本多 亮・小林京子・大井昌弘・先名茂樹, 八十島裕・奥村直子, 2004, 布田川・日奈久断層帯の地震を想定した地震動予測地図作成手法の検討, 防災科学技術研究所研究資料第 256 号, 189 pp.
- Fukuyama, E., I. Muramatsu, and T. Mikumo, 2007, Seismic moment of the 1891 Nobi, Japan, earthquake estimated from historical seismograms, *Earth Planets Space*, 59, 553-559, 2007.
- 岐阜県岐阜測候所, 1894, 明治廿七年一月十日ノ強震.
- Hirata, N. and M. Matsu'ura, 1987, Maximum-likelihood estimation of hypocenter with origin time eliminated using nonlinear inversion technique, *Phys. Earth Planet. Int.*, 47, 50-61.
- 飯田波事, 1979, 明治 24 年 (1891 年) 10 月 28 日濃尾地震の震害と震度分布, 愛知県防災会議地震部会, 304 pp.
- 地震調査研究推進本部, 2001, 岐阜——宮断層帯の評価, 12 pp.
- 活断層研究会, 1991, 新編日本の活断層, 東京大学出版会, 437 pp.
- 片山逸郎, 1893, 濃尾震誌, 241 pp.
- 木沢成肅・山羽義彦, 1891, 明治震災輯録, 金池堂, 174 pp.
- 松田時彦, 1974, 1891 年濃尾地震の地震断層, 地震研究所研究速報, 13, 85-126.
- 三雲 健・安藤雅孝, 1975, 濃尾地震の解析的再現, 科学, 45, 50-58.
- Mikumo, Y. and M. Ando, 1976, A search into the faulting mechanism of the 1891 great Nobi earthquake. *J. Phys. Earth*, 24, 63-87.
- 宮腰淳一・佐藤俊明・福和伸夫, 2003, 住家被害を利用した 1891 年濃尾地震の地震動強さ分布の分析, 地域安全学会論文集, 5, 77-86.
- 村松郁栄, 1962, 濃尾地震のマグニチュード, 地震 2, 15, 341-342.
- 村松郁栄, 1963, 濃尾地震激震域の震度分布および地殻変動, 岐阜大学学芸学部研究報告 (自然科学), 3, 202-224.
- Nakano, M., J. Miyakoshi, and K. Yamaoka, 2007, A new model for the fault beneath the sedimentary basin in the 1891 Nobi earthquake, *Earth Planets Space*, 59, 13-19.
- 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 and Space*, 56, xv-xviii.
- 大井田徹・山田功夫・多田 堯・伊藤 潔・杉山公造・佐々木嘉三, 1971, 中部地方の微小地震活動 (1) 一根尾谷断層周辺の微小地震活動一, 地震 2, 24, 240-247.
- 大森房吉, 1894, 餘震ニ關スル調査, 震災豫防調査會報告, 2, 103-139.
- 司 宏俊・翠川三郎, 1999, 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, 523, 63-70.
- 杉崎隆一・柴田 賢, 1961, 地下水の地球化学的研究 (第一報) —濃尾平野の地下構造と帯水層の分布—, 地質学雑誌, 67, 335-345.
- Utsu, 1961, A statistical study on the occurrence of aftershocks, *Geophys. Mag.*, 30, 521-605.
- 宇津徳治, 1979, 1885 年~1925 年の日本の地震活動—M 6 以上の地震および被害地震の再調査—, 地震研究所彙報, 54, 253-308.
- Waldhauser, F. and W.L. Ellsworth, 2000, A Double-Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 90, 1353-1368.

浅野陽一

[あさの よういち]

現職 独立行政法人防災科学技術研究所 地震研究部 主任研究員

略歴 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻後期 3 年の課程修了, 独立行政法人防災科学技術研究所固体地球研究部門特別研究員, 同任期付研究員を経て現職。

研究分野 地震学



■ 書 評 ■

● 眠りから目覚めた活火山

木股文昭 著

御嶽山 静かなる活火山

評者 山里 平

1979年10月の御嶽山噴火は、一般には「死火山」と思われていた御嶽山が噴火したことで社会的に大きな反響を呼んだが、火山噴火予知計画発足間もない当時の火山研究者や気象庁にも衝撃を与えた。御嶽山は、その後も1991年、そして2007年にもごく小規模な噴火を起こしている。本書は、1979年噴火直後から御嶽山の火山観測研究に従事してきた著者が、御嶽山の火山活動とそのメカニズム、そして、火山観測体制とその課題についてわかりやすくまとめた一般向けの書籍である。

序章では、1979年の御嶽山の噴火、第2章では、1979年噴火後の長野県西部地震そして1991年と2007年の噴火について述べている。活火山のひとつとされながら火山学者さえ噴火するとは思っていなかった御嶽山の有史以来初の噴火に対しての初期対応における問題点から、この噴火を契機に始まった活火山定義の見直し、その後観測研究によってわかってきた成果などが述べられている。1979年噴火の経緯を読むと、火山観測体制が整っていない火山の噴火対応の難しさが理解できる。御嶽山でも時代とともに観測体制が進んで、2007年噴火の際には、事前に火山体の膨張が捉えられるなどの進歩があったが、噴火自体がごく小さかったことなどから、噴火日時さえ特定できていない。火山観測技術は進歩してきているが、実のところ万全ではないということがわかる。

第3章では、御嶽山の活動史、噴火に至ったメカニズムをこの間に得られた火山学的な知見をもとに解説している。その中で、著者は、火山体から離れた群発地震域と火山活動の関連性について詳しく述べている。往々にして火山体から離れた活動を火山活動と無関係と考えることへの警鐘ともいえる。

第4章では、火山災害について、御嶽山に限らず内外の事例をもとに紹介している。現在、全国の主な火山で火山防災マップ（ハザードマップ）が作成されており、著者も御嶽山の防災マップ作成に携わっている。この章では、巨大噴火や火山灰による航空機災害まで広範に記

述が及んでいる。その規模、様式が非常に多様な火山災害を減らすためには、観測体制の充実と基礎研究の進展による火山の理解が進むことが重要である。

第5章では、火山観測をめぐる現状と題して、御嶽山の火山観測体制あるいは日本の火山観測体制の課題について述べている。評者は、著者が最も主張したかったのはこの部分ではないかと憶測している。気象庁は、防災対応に直接利用できるように主な火山で「噴火警戒レベル」を導入し、発表を開始した。御嶽山もそのうちのひとつである。著者は、本賞の中で「噴火警戒レベル」の解説に多くを割き、それに対して評価しつつも、その実効性についての危惧を述べている。我が国では、長らく大学や研究機関、気象庁が連携して火山観測体制の充実を図ってきた。しかし、大学が法人化され、選択と集中の論理のなか、御嶽山のような活動度が低い火山から大学は次第に撤退を余儀なくされているという現状がある。一方で、気象庁は1960年代以来の抜本的な観測体制の見直しといえる、ポアホール型地震計・傾斜計等を基軸とした監視体制の強化を図っているものの、火山によっては1点観測の火山も多く、決して十分なものではない。著者は、火山に根付いた火山観測所の重要性や人材の育成に関しても触れているが、これもまた昨今の行財政改革の流れの中では困難な課題である。

第6章では、御嶽山山麓の町村の現状を紹介している。過疎が進む周辺自治体が持つ課題とともに、そういう困難な中で進められている火山防災の取組が述べられている。火山は、地震と異なり、「恵み」がある。著者は御嶽山周辺の自然の素晴らしさをアピールすることによって火山防災への関心も高めていくことが重要であると述べている。

本書は、一般向けの読み物ではあるが、御嶽山のような活動度の低い活火山の火山活動に関する書物はほとんどないことから貴重なものと言える。また、本書に述べられている様々な課題は、御嶽山だけのものではなく、おそらく大多数の活火山の抱える問題でもある。2011年1月、霧島連山の新燃岳が300年ぶりの本格的なマグマ噴火を開始した。新燃岳では幸い前年度から気象庁や防災科学技術研究所が観測を強化したばかりであり、新たな観測機器でマグマだまりの膨張収縮が捉えられるなど、そのデータは活動評価に生かされている。改めて普段からの観測の大切さを痛感させられる。

火山災害はまれな現象であり、近年我が国では大規模な火山災害は発生していない。しかし、「天災は忘れたころにやってくる」普段からの備えが重要である。効率化が錦の御旗となっている現在、一般向けの書物として書かれている本書を読んだ一般の国民が火山防災の重要性、さらには観測や研究体制の充実の重要性を認識してほしいと念願するものである。
<信濃毎日新聞社、2010年、A5判、8+198頁、1,680円>

●新刊紹介

宇津徳治・嶋悦三ほか 編
地震の事典 (第2版 (普及版))
朝倉書店、2010年3月、A5判、657頁、19,950円 (税込み)

日本建築学会 著
2007年能登半島地震災害調査報告
丸善出版、2010年3月、A4判、356頁、8,400円 (税込み)

矢田俊文 著
地震と中世の流通 高志書院選書
高志書院、2010年5月、B6判、227頁、2,625円 (税込み)

藤原咲平 著
日本現代気象名著選集<第3巻>地渦・地裂及地震
大空社、2010年5月、A5判、161頁、8,610円 (税込み)

月刊消防<2010年5月号>—「現場主義」消防総合マガジン
特集：チリ地震津波 岩手の消防はどう動いたか
東京法令出版、2010年4月、B5判、116頁、880円 (税込み)

竹野栄 著
もうはちじいの島帰り—地震・津波・大火災におそわれた北海道奥尻島!
近代文藝社、2010年6月、B6判、163頁、1,365円 (税込み)

中部大学 著
アリーナ<第9号 (2010)>特集：地震の表象—濃尾震災の再検討
風媒社、2010年7月、B5判、418頁、2,100円 (税込み)

土木学会 編
地震災害マネジメント—巨大地震に備えるための手法と技法
日本理工出版会、2010年8月、A4判、654頁、7,350円 (税込み)

豊島ミホ 著
東京・地震・たんぼぼ 集英社文庫
集英社、2010年8月、A6判、230頁、499円 (税込み)

饒村曜
静岡の地震と気象のうんちく 静新新書
静岡新聞社、2010年6月、新書判、157頁、899円 (税込み)

西井晃・中村晋也 著
21世紀東海地震—あなたの防災力で家族を守れますか
羽衣出版、2010年8月、A5判、131頁、999円 (税込み)

クリストファー・H. ショルツ 著/柳谷俊・中谷正生 訳
地震と断層の力学 (第2版)
古今書院、2010年9月、B5判、448頁、15,750円 (税込み)

加藤碩一 著
地震と活断層の科学 (普及版)
朝倉書店、2010年8月、A5判、280頁、4,725円 (税込み)

木村政昭 著
「地震の目」で予知する次の大地震
マガジンランド、2010年10月、B6判、220頁、1,260円 (税込み)

吉田望 著
地盤の地震応答解析
鹿島出版、2010年10月、B5判、256頁、6,720円 (税込み)

やざきせうざう 著

もしもトイレで地震にあったなら

文芸社, 2010年11月, B6判, 253頁, 1,365円(税込み)

東畑郁生・島田俊介ほか 著

地震と地盤の液化化—恒久・本設注入によるその対策

インデックス出版, 2010年10月, A5判, 296頁, 3,150円(税込み)

地震イツモプロジェクト 編 寄藤文平 絵

地震イツモノート—キモチの防災マニュアル

ポプラ社, 2010年12月, A6判, 171頁, 588円(税込み)

佐藤隆雄 監修

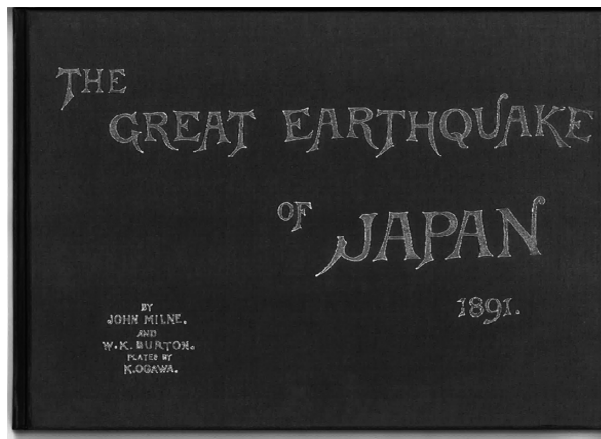
知ろう!防ごう!自然災害<1>地震・津波・火山噴火

岩崎書店, 2011年2月, A4変形, 47頁, 3,150円(税込み)

大塚久哲 著

地震防災学

九州大学出版会, 2011年3月, B5判, 120頁, 2,730円(税込み)



濃尾大震災の写真集の頒布について

東日本太平洋沖地震が発生した今年、濃尾地震発生(1891年)の120周年にもあたります。これを機に、当振興会では、日本地震学の基礎を作ったジョン・ミルンが雇い外国人のウィリアム・K・バートンと共著で出版した「THE GREAT EARTHQUAKE OF JAPAN」(1892年)の復刻版を無償頒布することと致しました。ご希望の方は、お名前、発送先を明記の上、下記宛てにFaxまたはE-mailにてお申し込みください。なお、部数に限りがありますので、頒布は一名につき一部とし、無くなり次第、締め切らせていただきます。また、発送は「着払い宅急便」とさせていただきますので、ご了解のほど、よろしくお願い申し上げます。

申し込み先:(財)地震予知総合研究振興会 野坂

Fax:03-3295-3136 E-mail:nosaka@8f.adeq.or.jp

ADEP情報

財団法人 地震予知総合研究振興会 (ADEP) の人事異動について

採用

伊藤 谷生 本部 地震防災調査研究部
副首席主任研究員 (非常勤) 23. 4. 1
阿部信太郎 本部 地震防災調査研究部 主任研究員 23. 4. 1
山本菜穂子 研究業務支持機構 副主任研究員 23. 4. 1

退職

岩橋 敞広 本部 地震防災調査研究部
副首席主任研究員 (非常勤) 23. 3. 31
吉水 正義 地震調査研究センター 事業推進管理部長 23. 3. 31

配置換等

阿部 正男 地震調査研究センター 事業推進管理部長 23. 4. 1
(旧) 地震調査研究センター 事業推進管理部 参事

編集後記

本誌50号の特集「これだけやればこれだけわかる—明日の地震予知総合研究に向けて」においては、地震予知に到達するにはどうしたらよいかと云う、掲載論文に明確な目標があった。本来ならば12月末の発行であったが、編集に手間取って実際には1ヶ月程発行が遅れた。ところが発行後僅かに40日余り、東北地方太平洋沖地震の発生を見た。予知を目標においた特集号には、残念ながらこの超巨大地震については殆どと云うか全く言及されていない。まさに「想定外」のイベントであった。

特集号では触れなかったが、過去の日本列島における超巨大地震の存在は知られていた。津波堆積物の分布から千年に1度くらいの割合で、超弩級の地震が起こったらしい事実は判っていた。黙示録からの引用で「ハルマゲドン地震」の異名もあった程である。とにかく超巨大地震の発生は決して想定外ではなかった。

単独のアスペリティから発生する地震規模には限度がある。これに対して超巨大地震は複数のアスペリティが同時に連動する。連動現象は東海・東南海・南海地震についてよく知られていた。1707年宝永地震は

これら3海域の同時連動であったため、M8.4の巨大地震に発展した。土佐では25.7mの高度に津波堆積物が発見されている。1854年安政地震では東海・東南海の同時発生32時間後に南海地震が発生した。しかし1944年昭和東南海地震では2年後に南海地震の発生を見た。この時には東海を空白域のまま残したのである。このように連動間隔も同時から2年後まで、地震規模にも違いがあって一様ではない。

東北地方の太平洋沖の連動も知られていた。1933年三陸沖地震の前後には、青森県沖から宮城県沖、さらに福島県沖と4海域にわたって、1~3年の間隔で連動した。しかし今回のような三陸沖中部から茨城県沖に至る広い海域を巻き込んだ同時連動は想定外であった。869年貞観地震はその津波堆積物の分布が今回の地震津波の浸水範囲と一致する事から、超巨大地震の存在の可能性が指摘されてはいた。今から考えると2004年中越地震、2007年中越沖地震、2008年岩手宮城県内陸地震は今回の超巨大地震の前触れであったと云える。予知に結び付かなかった事は残念である。

本年秋は我が国最大の内陸地震で

ある濃尾地震の120年に当たる。本誌はこれに焦点を当てる編集計画を立てていた。東北地方太平洋沖地震に関する速報に加えて、濃尾地震関連の論文が掲載されているのはこのためである。これらの研究が来たるべき東海・東南海・南海連動地震の予知に向けて、実効ある貢献となる事を期待して止まない。東北地方太平洋沖地震の犠牲者のご冥福を祈り、被災者の一日も早い復帰を切に願いながら、本号を刊行する。

(Y.H.)

地震ジャーナル 第51号

平成23年6月20日 発行

発行所 ☎101-0064
東京都千代田区猿樂町1-5-18
☎ 03-3295-1966

財団法人

地震予知総合研究振興会

発行人 高木章雄

編集人 萩原幸男

本誌に掲載の論説・記事の一部を引用される場合には、必ず出典を明記して下さい。また、長文にわたり引用される場合は、事前に当編集部へご連絡下さい。

●製作/ (財)学会誌刊行センター