

# 地震の脅威

## 東日本大震災と南海トラフの巨大地震

名古屋大学減災連携研究センター

鷺谷 威

### 1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震(M9.0)は、強く長い揺れと大きな地盤の変動、海底の地殻変動が引き起こした巨大津波によって、東北地方の太平洋沿岸部を中心に19,000名を越える死者・行方不明者、全・半壊建物を合わせて37万棟余(いずれも2012年2月現在)という多大な被害を生じた。さらに、地震の揺れと津波によって生じた福島第一原子力発電所の事故の影響も深刻で、震災から1年が経とうとしている現在でも、被災地の完全な復旧・復興への道筋は見えていない。

この東日本大震災は、日本海溝から沈み込む太平洋プレートの上面で巨大な断層運動が生じることによって発生したが、同じような巨大地震発生の可能性を有する地域が日本列島では他にも多数ある。その典型が、静岡県から紀伊半島、四国の沖合に位置する南海トラフである。ここでは120年ほどの間隔で巨大地震が繰り返し発生しており、次の巨大地震が今世紀中に発生するのではないかと懸念されている。

本稿では、まず、東日本大震災を引き起こした巨大地震と津波について、観測データから明らかになった概要について整理する。これは、マグニチュード(M)9クラスの地震について、その発生前の状況まで含めた全容が、高精度・高密度の観測によって詳細に記録された世界でも初めてのケースであり、ここでの知見は、今後の巨大地震について考える上で前提となる。次に、南海トラフの巨大地震について現時点における知見をまとめ、最後に、東日本大震災の知見や最近の研究成果も参考にしながら、近い将来発生すると言われている南海トラフの巨大地震に関する規模や被害想定について紹介していく。

### 2. 東北地方太平洋沖地震と巨大津波

#### 2.1 東北地方太平洋沖地震の概要

以下では、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震の概要について説明する。この地震は同日の14時46分に宮城県沖の北緯38度6.2分、東経142度51.6分、深さ24kmを震源として発生した。地震波形の解析によれば、震源における断層破壊は約150秒間継続し、その破壊領域は、日本海溝から沈み込む太平洋プレート上面でほぼ北緯36度～40度、東経141度～143度に及んだ。南北方向に約440km、東西方向に約180kmという広範囲であ

り、断層のずれの大きさは最大で約50m、平均でも約18mに及んだと考えられる(Yagi and Fukahata, 2011)。地震のマグニチュードは9.0ないし9.1とされており、これは日本で過去に記録された最大の地震ということになる。

M9を越える地震は、世界全体で見ても、1900年以降に1952年カムチャッカ地震(M9.0)、1960年チリ地震(M9.5)、1964アラスカ地震(M9.2)、2004年スマトラ地震(M9.1)程度しかなく、東北地方太平洋沖地震は世界的に見ても非常に大規模な地震であったことが分かる。また、上記の巨大地震はいずれも現在のような観測設備が発達する以前や、観測網の手薄な場所に発生していた。従って、今回の地震は、その発生過程や準備過程が地震、GPS等の高密度観測網で詳細に捉えられた世界でも初めてのケースだと言える。そのような意味で、今回得られたデータは、今後巨大地震について考える上で欠かすことのできない貴重なものだと言える。

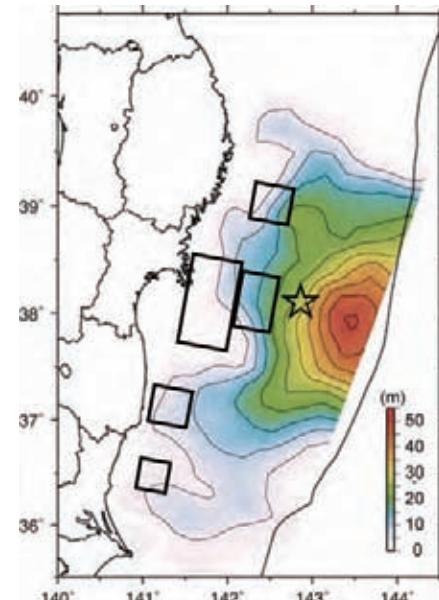


図-1 地震波形から推定された、東北地方太平洋沖地震の断層すべり量分布(Yagi and Fukahata, (2011) を改変)。沖合の実線は日本海溝の位置を、星印は震央を表す。太線で囲まれた四角はKurahashi and Irikura (2011) が推定した強震動発生域。

Yagi and Fukahata (2011)による断層すべり分布(図-1)を改めて見てみよう。震央の東側に断層すべりの非常に大きい範囲が広がっており、大きなすべりがほぼ海溝付近まで及んでいるように見える。推定されたすべり量の最大

値は、解析手法や用いたデータによって様々であるが、およそ50～80m程度の値が推定されている。この値は、地震時の断層すべり量として推定された値としては過去最大である。また、このように局所的に大きな断層すべりが生じたこともあり、震源域の広がりはM9クラスの地震としては比較的狭かった。ちなみに、1960年のチリ地震では震源域の長さは約800km、2004年のスマトラ地震では約1,300kmに及んでいたと言われている。

上の結果は、地震波の中でも比較的周期の長い成分を解析した結果である。建物被害につながる揺れは、より短い周期の地震動である。Kurahashi and Irikura (2011) は、強震動記録を解析して短周期地震波の生成領域を特定した。その結果を図-1に太線の四角で示している。興味深いことに、これらの強震動生成領域は、断層すべりが大きい場所ではなく、ちょうどすべり分布の深い方の端付近に位置している。すなわち、短周期の強い揺れは、震源域の中でも最も陸寄りの部分から発生していたことになる。このように、断層のすべりが大きい部分と強震動生成領域が分かれていることは今回の地震における重要な特徴である。これらの強震動生成領域は、震源からの断層破壊の伝播に伴って、次々と破壊しており、強震動の波形記録は複数の地震が少しづつ間をおきながら連鎖的に発生したように見える。その結果、震源に近い宮城県では3分以上も強い揺れが続いている。こうした連鎖的な断層破壊がM9クラスの巨大地震の特徴と言えるかも知れない。このような性質は、南海トラフの巨大地震の被害を想定する際にも重要な意味を持つ。

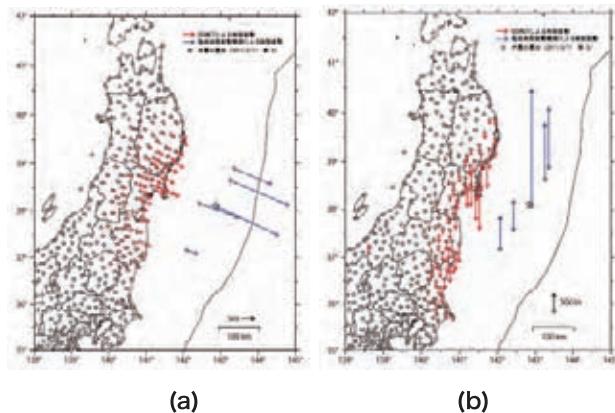


図-2 東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動の分布(国土地理院・海上保安庁, 2011)。(a) 水平変動, (b) 上下変動。

海底下で発生した断層運動は顕著な地殻変動を引き起こし、その様子は日本列島に整備されたGPS観測網や海底地殻変動観測点で記録された。その様子を示したのが図-2である。日本列島には、ほぼ20km程度の間隔でGPS観測点(電子基準点)が設置され、データを連続的に取得している。そのデータを解析することにより、地震時に生じた地殻変動の様子が明らかとなった。図-2(a)に示す通り、岩手県南部から福島県にかけての太平洋沿岸部は大きく東に移動し、宮城県牡鹿半島での移動量は約5.5mに達し

た。日本海沿岸部でも最大1m近い東向き変位が生じているが、地震に伴って東北地方は最大4mも東西方向に引き延ばされたことになる。また、これと同時に、図-2 (b)に示す通り、岩手県から茨城県にいたる広い範囲で数十cm単位の沈降が生じた。沈降量が最大となったのも牡鹿半島で、その大きさは1.1mにも及んだ。

最近では、キネマティックGPS測位と海中音響測距を組み合わせた海底地殻変動観測が実用化されている。日本海溝沿いでは海上保安庁や東北大大学による観測が数年前から実施されていたが、今回の地震では、これらの観測点において、陸上よりもはるかに大きい変位が検出された。図-2に青色の矢印で示したように、最大で東南東向きに最大約30mの水平変位および3mの隆起が検出された。これらの変位データの解析から図-1と同様な断層すべり分布が推定されているが、その際、海底における変位データは大変重要な役割を果たした。

一方、海洋研究開発機構は、地震発生前に海底地形の音波探査を行っていたが、地震発生後に同じ場所で同様の探査を再び行い、地震前後の地形変化について検討した。その結果、日本海溝の陸側に認められた地形変化から、海溝の陸側斜面が東向きに約50m移動し、7-10m程度隆起したと推定されている(Fujiwara et al., 2011)。この結果は、プレート境界で生じた巨大な断層運動が海溝軸まで突き抜けたことの直接的な証拠として捉えられている。また、海溝軸付近で生じた地殻変動は、巨大な津波を生じた原因である。

今回のM9地震の特徴は以下の3点にまとめることができる。

- 1) 440km×180kmという広範囲の断層が連鎖的に破壊した。
- 2) 200km×100km程度の範囲で20m以上、最大では50m以上の巨大な断層すべりが生じた。
- 3) 断層運動がプレート境界の浅い部分でも生じ、一部は海溝軸まで突き抜けた。

このうち、最初の特徴は、M8.5以上の巨大地震には共通の特徴と言える。むしろ、M9規模の地震としては、震源域の広がりは狭い部類に入る。第二、第三の特徴は、この地震が巨大な津波を伴った原因である。これらのうち、前者は巨大地震に共通の性質であるが、後者はいわゆる津波地震の特徴に近い。津波地震とは、地震の揺れから推定される地震規模に対して非常に大きな津波を伴う地震で、過去に1896年明治三陸地震、1992年ニカラグア地震、1994年ジャワ島地震、2006年ジャワ島地震などの例が知られている。1896年明治三陸地震は、陸上での震度が2～3程度であったにも関わらず、三陸沿岸に30mを越す津波が押し寄せ、2万人以上の犠牲者が出ていた。今回の地震でも、沖合の大きく断層がずれた場所では短周期の強震動は出でていないようなので、明治三陸地震と似た性質を内包している可能性が高い。その一方、陸に近いところでは強震動も発生しており、プレート境界全体が破壊しているように見え

る。これらのことから、今回の地震は、プレート境界で起きる普通の巨大地震と、海溝付近で生じる津波地震が同時に発生したものと言われている。

## 2.2 東北沿岸を襲った巨大津波

次に、東北地方太平洋沖地震で生じた津波の様子について見てみよう。今回、沖合に設置された海底ケーブル方式の水圧計やGPS波浪計によって、沿岸に到着する前の津波の様子が捉えられた。また、米国大気海洋局(NOAA)が運用しているブイ方式の水圧計でも海面変動が捉えられており、津波情報の即時および事後の解析に大いに役立てられた。

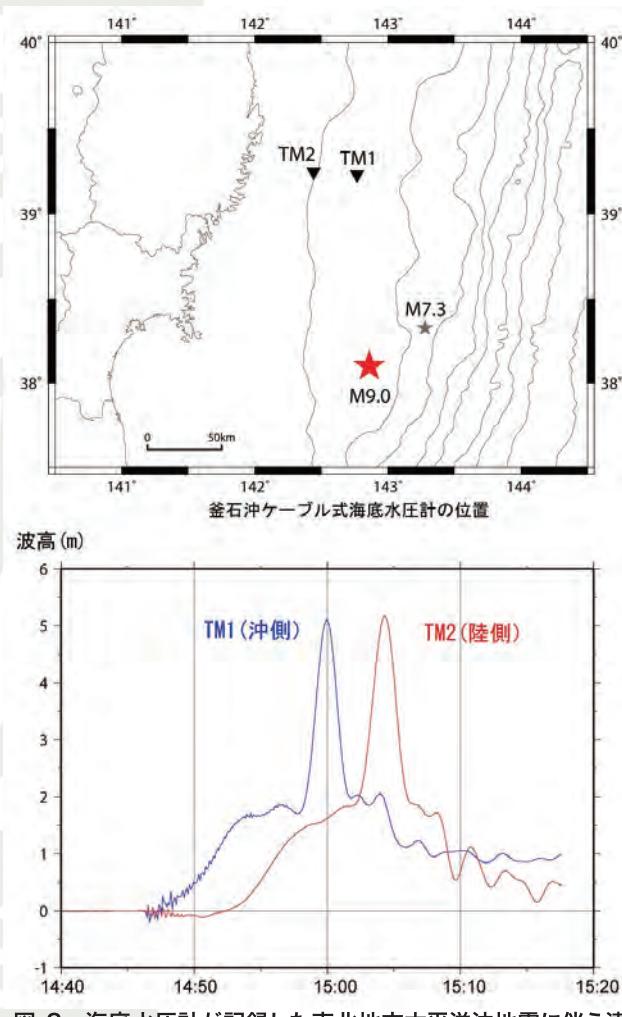


図-3 海底水圧計が記録した東北地方太平洋沖地震に伴う津波による海面変動(東京大学地震研究所, 2011)。

図-3は、釜石沖に設置されていた海底ケーブル方式の水圧計で捉えられた海面変動の様子である(東京大学地震研究所, 2011)。沖側のTM1では地震発生直後の14時47分頃から、陸側のTM2でも14時53分頃から海面が上昇し始め、海面が2m程度高い状態が15分ほど継続した。また、TM1で15時ちょうど頃、TM2で15時4分頃に5m程度の高さのパルス状の津波が到来していることが分かる。このように今回の津波は長時間にわたって海面が上昇し、さらにパルス的な非常に高い津波が含まれていたという2つの特徴があった。前者は広い範囲の海底が隆起したことの結

果で、長時間海面を上昇させ、仙台平野などで海岸から最大5km程度も津波が遡上する原因となった。一方、パルス状の変化は、海溝軸付近で生じたと推定されており、津波地震としての特徴が表れたものと考えられる。沖合から約30kmでの津波波高は5m程度であったが、津波は海が浅くなると伝播速度が遅くなるため、沿岸部ではエネルギーが狭い範囲に集中し波高が増幅される。さらに、三陸海岸を特徴付けるリアス式の地形によって、入り組んだ湾の奥に津波のエネルギーが集中してさらに波高が増す。こうした効果が積み重なった結果、三陸海岸における津波の高さは非常に大きくなかった。確認された範囲では、宮古市の重茂姉吉地区における40.5mが今回記録された遡上高(津波が陸にかけ上がった高さ)の最大値とされている。

## 2.3 余震・誘発地震活動

大地震が発生すると、震源域の周辺では余震が発生する。通常、最大余震のマグニチュードは本震と比べて1小さいと言われており、M9地震が起きると、通常は巨大地震と呼ばれるM8地震が余震として起きる可能性に注意する必要がある。また、余震は本震ほど規模が大きくないと言っても、非常に強い揺れを伴い、本震で損傷を受けた建物が倒壊する危険もある。

東北地方太平洋沖地震では、本震発生直後に大規模な余震が続けて発生した。本震発生は14時46分であるが、15時8分には震源域の北側の岩手県沖でM7.4の余震が、15時15分には震源域南側の茨城県沖でM7.7の余震が、さらに15時25分には震源域の東側の日本海溝よりも海寄りでM7.5の余震が発生した。最初の2つは、本震と同じくプレート境界の地震であるが、15時25分の地震は、日本海溝から沈み込む太平洋プレートの内部が割れるタイプの地震であった。この後も4月7日に宮城県沖でM7.2の余震が発生したが、この地震は沈み込んだ太平洋プレート内部で起きた地震で、震源が陸に近かったため、最大震度6強を記録し被害を生じた。

以上は本震の震源域であるプレート境界およびその周辺で生じた主な余震であるが、今回の地震の影響は震源域周辺にとどまらず、東北日本一帯で見られる。こうした震源域から離れた場所で起きる地震を誘発地震と呼ぶこともある。本震発生翌日の未明には新潟・長野県境付近でM6.7の地震が発生し、長野県栄村を中心に大きな被害をもたらした。3月15日には静岡県富士宮市でM6.4の地震が発生したが、震源域が富士山の直下であったため、火山活動が活発化するのではないかと懸念された。幸い、現時点において富士山の活動に変化は見られていない。また、本震発生直後から茨城・福島の県境付近で内陸の地震活動が活発化し、4月11日にはM7.1の地震が発生した。この茨城・福島県境の地震活動は、正断層のメカニズムを持つ点が特徴的であった。日本列島は通常東西方向の圧縮場にあり、東西方向に圧縮軸を持つ逆断層または横ずれ断層の地震が圧倒的に多く、正断層型の地震は火山地域などで僅かに

起きるだけである。今回は最大でM7.1を含む多数の正断層地震が発生しており、地殻の力学的な状態が大きく変化したと考えられている。その原因是M9の本震で東北地方が大きく東西方向に引き延ばされたことであろう。正断層型の地震は、本震で大きな断層運動が生じたプレート境界の付近でも発生しているが、こちらは本震発生前には東西圧縮の逆断層型の地震が起きていた場所であり、本震発生の前後で力の向きが反転してしまった可能性も指摘されている。

一方、首都圏はもともと地震活動が非常に活発な地域であるが、東北地方太平洋沖地震の発生後に、地震発生数が以前の7倍程度に増加した。この地震活動データから、M7程度の地震が首都直下で発生する確率を4年で70%とする試算も公表されている(東京大学地震研究所, 2012)。

東北地方太平洋沖地震の発生後に日本列島各地で活発化した地震活動は、巨大地震の発生によって日本列島の力のバランスが大きく変化したことを如実に物語っている。過去の大地震発生後のケースを見ても、地震活動が活発な状態は10年単位で続くものと考えられるので、当分は地震活動に対してもいつも以上の注意が必要である。

## 2.4 巨大地震が想定できなかった理由

東北地方太平洋沖地震の発生後、この地震やそれに伴う巨大津波の発生が事前に想定できなかっただことが問題とされた。政府の地震調査研究推進本部は日本列島周辺の海域で発生する大地震について、その震源域や長期発生確率を推定した結果を公表している(地震調査研究推進本部, 2012)。

地震調査研究推進本部の長期評価では、それぞれの地域で同じような地震が繰り返し起きるという「固有地震説」を採用し、17世紀以降に発生した地震の記録に基づいて各地域で過去約400年間に発生した最大規模の地震を特定し、その発生間隔を推定し、地震発生確率を評価している。従って、400年間の地震活動が当該地域の地震活動を評価するのに十分な長さである必要があるが、以下で述べるように、こうした認識は間違っていた。

仙台平野では1980年代後半では過去の津波が運んだ砂層が発見され、古文書に記載のある869年の貞觀地震に伴う津波堆積物の証拠である可能性が指摘されていた(例えばMinoura and Nakaya, 1991)。2000年以降、産業技術総合研究所によって宮城県から福島県にかけて津波堆積物調査が実施され、869年貞觀地震による津波の浸水範囲が明らかとなってきた(宍倉・他, 2010)。この研究で推定されていた津波の浸水範囲と、今回の津波で浸水した範囲(国土地理院, 2011)とは驚くほど一致している。この研究成果がまとまつたのは震災の前年であり、こうした知見を防災対策に反映させる時間が無かったことは残念と言ふしかない。

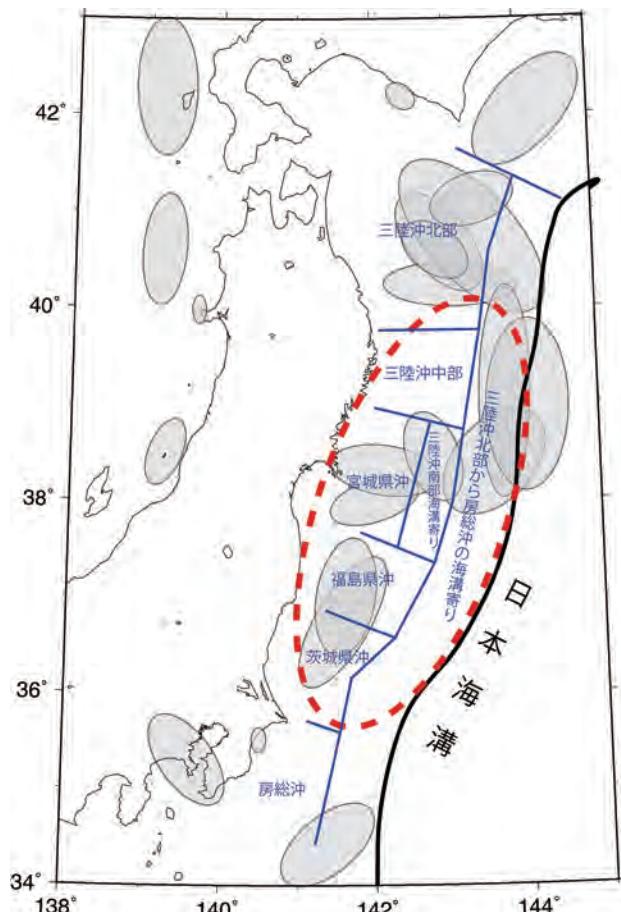


図-4 海溝型地震の長期評価における震源域の地域区分と明治時代以降に発生した主要な地震の震源域(灰色の楕円)。破線の楕円は東北地方太平洋沖地震の震源域を示す。

一方、岩手県の三陸沿岸では、今回記録された津波の高さは1896年の明治三陸地震の際とほぼ同じであった。このように、今回の津波は非常に大規模ではあったが、少なくとも福島県北部より北側では、決して「未曾有」のものではなく、もう少し対策が進んでいれば「想定内」となる事象であった。こうした過去の知見を十分に生かすことの重要性は、今後南海トラフの巨大地震や首都圏直下に備える上で重要な教訓である。

GPS観測網が地震時に顕著な地殻変動を検出したことは既に述べたが、地震発生前に観測された地殻変動から、プレート境界の固着域を検出する試みが行われていた(例えばNishimura et al., 2004)。プレート境界の大地震は海洋プレートの沈み込みによって生じるが、プレートの沈み込みの際に、陸側プレートは、プレート境界で強く固着している部分で引きずられていると考えられている。この強く固着している部分は地震発生時に大きな断層すべりが起きると考えられ、そのような断層すべりの大きい場所は「アスペリティ」と呼ばれている。Yamanaka and Kikuchi (2004)は、過去の大地震で記録された地震波形記録を解析して日本海溝沿いのアスペリティの分布を求めたが、その分布とNishimura et al. (2004)がGPSデータから推定した固着域を比較すると、後者が宮城県沖でプレート境

界が広範囲にわたってほぼ100%固着していたことを示すのに対し、前者は、宮城県沖において、プレート運動で蓄えられるエネルギーの20-30%程度しか解放されていないことを示していた。こうしたエネルギー収支の食い違いは、そこにM9地震の発生するポテンシャルがあることを示す結果に他ならなかった。しかし、日本の地震学者は、M9地震の発生の可能性に全く気付かず、観測データの無かった時に、地震を伴わないゆっくりとした断層すべりなどの形でエネルギーが放出されたのではないか、と勝手に解釈していた。これは今では根拠の無い先入観に支配されていたと理解できるが、そうした思い込みに自ら気付くことが困難であることもまた事実である。

2004年にスマトラ島沖でM9.1の大地震が起きた時、世界の地震研究者はそこで巨大地震が起きる可能性を全く考えていなかった。その後巨大地震が起きえる場所について様々な検討がなされ、日本海溝を含むあらゆる沈み込み帯でM9クラスの巨大地震が発生し得る、という衝撃的な結論を述べた研究も存在した(McCaffrey, 2008)。しかし、そうした研究が日本国内でしっかり認知されたのは、残念ながら今回の地震が発生した後であった。

以上述べてきたように、日本海溝のM9地震を事前に想定できなかったことには様々な要因がある。地震現象に対する我々の理解がまだ不十分であることがそれらの根本にあることは明らかであり、このことは、他の地域での将来予測をする上でも十分肝に銘じる必要がある。

### 3. 南海トラフの巨大地震とその将来予測

#### 3.1 南海トラフの巨大地震の概要

以下では、西南日本で今世紀中に発生する可能性が高いと言われている南海トラフの巨大地震について述べていく。

南海トラフは、フィリピン海プレートが西南日本の下へと沈み込むプレート境界である。南海トラフは富士川河口付近から駿河湾、東海沖、紀伊半島沖、四国沖を経て九州の沖合で南西諸島海溝へとつながっており、その全長は800km程度に及ぶ。

南海トラフから沈み込むフィリピン海プレートの運動は、最近のGPS観測によって精度良く明らかにされており、駿河湾付近の沈み込み速度が年間2cm程度などに対し、四国沖では年間約6cmと、西に行くに従って速くなる。フィリピン海プレートは形成年代が新しく、太平洋プレートと比べると温度が高く薄いプレートである。そのため沈み込みにくい性質があり、10度程度と非常に低角で沈み込んでいる。その結果、西南日本太平洋側の海岸線付近でもフィリピン海プレートの深さは20-30km程度と、東北地方に比べて半分程度であり、結果的に我々の生活域に近いところに震源域が存在している。この結果、東北地方と同規模の地震が起きた場合でも、揺れはより強く、また津波の到着时刻はより早くなる可能性が高い。

日本では飛鳥時代以降の長期間、奈良や京都に政治の中心が置かれていた。そのため、南海トラフで発生した地震

の記録が数多くの古文書に記されている。こうした記録に基づいて、過去1300年以上にわたる地震の繰り返し発生の様子が明らかにされてきた。その一覧を図-5に示す。

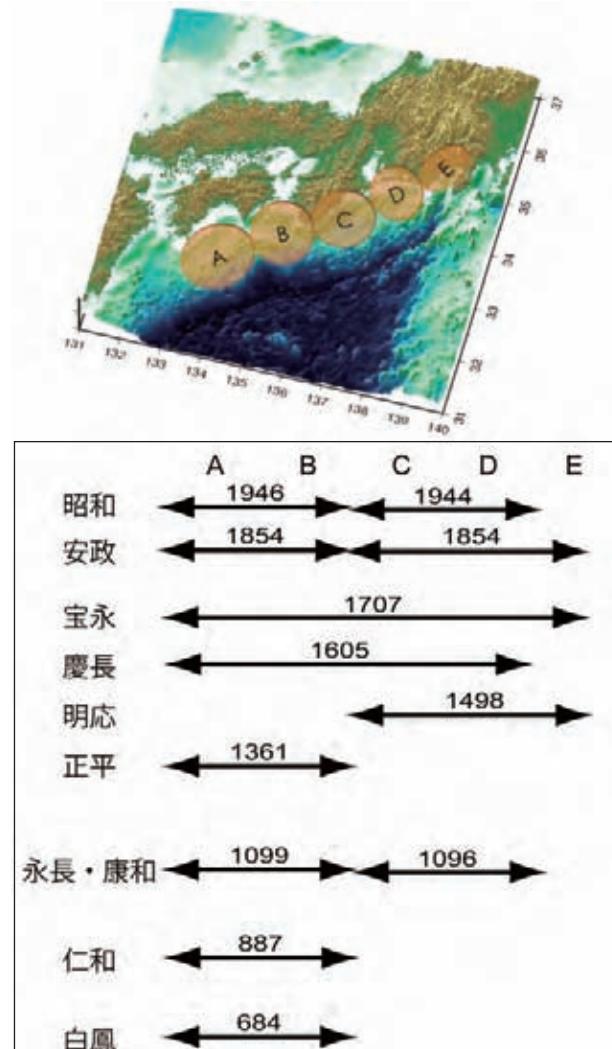


図-5 石橋・佐竹(1998)による南海トラフの巨大地震の時空間分布。A～Eは地震発生領域の区分を示す。

図-5に示されている地震はすべてM8級の巨大地震と考えられている。A-B領域で発生する地震は南海地震、C-D-E領域で発生する地震は東海地震と呼ばれるが、1944年の地震がC-D領域を破壊し、E領域が未破壊で残ったため、1944年の地震は東南海地震と呼ばれている。また、未破壊で残ったE領域ではいわゆる東海地震の発生が懸念されている。

図-5の地震活動を見ると、1944年と1946年、1854年(2つの地震)、1707年の例から明らかのように、南海トラフ沿いで大地震が起きる時には、長くても3年以内という非常に短い期間に、東海沖から四国沖までの南海トラフ全体で地震が起きていることが分かる。これは南海トラフにおける地震活動の特徴である。1498年、1361年のように東半分あるいは西半分が破壊したように見える地震もあるが、文献上記録に抜けがある可能性が高いと考えられる。

こうした可能性を踏まえると、南海トラフにおける大地震の再来間隔は最短で90年、最長で147年程度となり、平均間隔としては120年程度になる。以下では、まず、個別の地震について述べていくこととする。

### 3.2 南海トラフで発生した過去の巨大地震

#### 3.2.1 1944年東南海地震

1944年12月7日に発生した東南海地震(M7.9)は、南海トラフの東側で最後に発生した巨大地震である。断層破壊は紀伊半島の南端付近から開始して東向きに伝播し、浜名湖付近まで及んだと考えられている。地震波の解析によれば、大きな断層運動は志摩半島南東沖付近で生じた(Ichinose et al., 2003)。静岡県東部・愛知県・三重県・奈良県がほぼ震度5の範囲であり、伊勢湾周辺の地盤が悪い地域で震度6が記録された。また、津波は紀伊半島東岸で大きく、尾鷲で9mを記録した。強い揺れによる建物の倒壊や津波によって1,200名余の死者・行方不明者が出ていている。

1944年東南海地震は、太平洋戦争末期に発生したこともあり、情報が十分に開示されず謎の多い地震であったが、近年は改めて情報が整理され、被害状況の全容がほぼ明らかにされている。

この地震発生から1ヶ月後には、愛知県三河地方を震源として1945年三河地震(M6.8)が発生し、局所的な強い揺れによって2000名を越える死者が出ている。これは東北地方太平洋沖地震の後に東日本各地で生じているのと同様、大規模な誘発地震の一つだったと考えられる。東南海地震で損傷を受けた建物がさらに強く揺らされて被害が拡大した事例も報告されている(木股・他, 2005)。

1944年東南海地震は、前兆的な地殻変動が観測された事例としても有名である。これは地震発生時に静岡県掛川市付近で行われていた水準測量データの再解析によって、南上がりの傾斜変化が地震発生の3日前から加速的に進行していたというものである(Mogi, 1984)。この事例は、現在も東海地震の予知が可能であることの根拠とされているが、データの信頼性や解釈に関する疑問も示されている(鷺谷, 2004)。そもそも1944年東南海地震は紀伊半島南端付近を震源としており、震源域のちょうど反対側にあたる掛川付近で起きた事象を前兆現象とすることの合理性はいま一度真摯に検討する必要がある。

#### 3.2.2 1946年南海地震

1946年南海地震(M8.0)は1946年12月21日の未明に発生した。震源は紀伊半島南部の串本沖で、破壊は西へ伝播し、土佐湾付近にまで及んだ。被害は高知県で特に大きく、地震動や津波による死者・行方不明者は1,400名以上に及んだ。

南海地震が発生すると、プレート境界の断層運動によって、紀伊半島南端の潮岬や四国南東端の室戸岬が1m前後の顕著な隆起を生じる一方、高知平野は50cm程度沈降す

る。高知平野は津波に襲われて水浸しとなるが、そうした状況の描写は古文書の中にも再三現れ、南海地震の発生を判断する上での重要なポイントとなっている。また、紀伊半島の湯の峰温泉や四国の道後温泉で一時的に温泉の湧出が止まるといった事例も南海地震に共通する特徴である。

#### 3.2.3 1854年安政東海・南海地震

1854年の安政東海地震(M8.4)は12月23日に、安政南海地震(M8.4)は翌24日に発生した。2つの地震の時間差は僅か32時間である。これら2つの地震は、それぞれ1944年東南海地震や1946年南海地震と比べてひと回り規模の大きい地震だったと考えられている。安政東海地震では、中部・近畿地方全体が震度5、静岡県から愛知県にかけての広い範囲が震度6程度の揺れだったと推測されている。安政東海地震では断層破壊が駿河湾の内部まで及び、富士川河口断層帯の一部も活動したと考えられている。

#### 3.2.4 1707年宝永地震

1707年宝永地震(M8.6)は、東北地方太平洋沖地震が発生するまで、日本史上最大の地震として知られていた。この地震では、駿河湾周辺から足摺岬付近に至る南海トラフ全体が破壊したと考えられている。最近では、九州東部で発見された津波堆積物を説明するために、この地震の震源域が日向灘付近まで広がっていたという説も提唱されている(Furumura et al., 2010)。静岡県から四国に至る広範囲で震度6程度の揺れが生じ、また沿岸では10m程度の津波が押し寄せたと考えられている。こうした揺れや津波の状況からは、東北地方太平洋沖地震に近い非常に大規模な地震であったと推測される。

宝永地震発生の4年前には相模湾周辺を震源として元禄関東地震(M8.2)が発生しており、これら2つの地震によってフィリピン海プレート北縁部のプレート境界全体で断層運動が起きたことになる。さらには宝永地震から1ヶ月半後に富士山で宝永の大噴火が起き、大量の軽石や火山灰を噴出した。降灰は江戸でも5cm程度あったと言われている。この宝永噴火は宝永地震によって誘発されたという解釈が一般的である。

#### 3.2.5 その他の地震

宝永地震以前になると、歴史記録は必ずしも十分ではなくなる。

1605年の慶長東海地震は、あちこちで津波による被害が残されているのに対し、揺れの記録が殆ど無く、謎の多い地震である。最近では、南海トラフの海溝軸付近で生じた津波地震ではないかという解釈もある。

1498年明応地震は南海トラフの東側で起きた地震としては最大級の規模を持つものと考えられている。飯田(1985)によれば、明応地震による津波は志摩半島で最大15mもの高さがあったとされる。この津波の高さは、南海トラフの巨大地震について知られている中でも最大級であ

る。また、この時の津波によってそれまで淡水湖であった浜名湖が海となつたことも有名である。さらには、伊勢湾内部でも顕著な被害が記録されており、場所によっては5m程度の津波が生じた可能性がある。なお、明応地震については、対応する南海地震が記録されていないが、四国地方の当時の遺跡から液状化による噴砂跡が見つかるなど、西側でも大地震が発生していた可能性が高い。

### 3.3 南海トラフに関する最近の知見

南海トラフは世界中でも最も良く研究されているプレート沈み込み帯であり、近年もここを舞台に様々な発見が相次ぎ、プレート沈み込みの理解に大きく貢献している。以下では、南海トラフの巨大地震を考える上で重要なスロースリップと深部低周波微動について簡単に紹介しておく。

スロースリップは、GPS連続観測網が実用化されたことで存在が明らかになった。スロースリップとは地震を伴わない間欠的な断層運動で、日本列島の周辺では、房総半島沖、豊後水道、浜名湖周辺などで見つかっている。これらはいずれも沈み込んだフィリピン海プレートの上面で発生しており、南海トラフの西端にあたる豊後水道では、1997年、2003年、2009-2010年に半年から1年程度の時間をかけてM6.8程度に相当する断層運動が生じた(例えば Hirose et al., 1999)。通常、この規模の地震であれば、断層の広がりは20km四方程度であるが、スロースリップでは断層の広がりが100km四方程度と広く、滑り量は最大でも20cm程度と小さい。このように、広い範囲で比較的小さい断層すべりがゆっくり起きるのがスロースリップの特徴である。似たようなスロースリップは2001年から2005年にかけて浜名湖周辺でも発生したが、こちらは継続期間が4-5年と長く、M7以上に相当するエネルギーが解放されている(Ozawa et al., 2002)。スロースリップはプレート運動に伴うひずみエネルギーの収支やプレート境界の固着域の広がりを考える上で重要である。すなわち、スロースリップが起きる場所では、通常固着しているように見えて、間欠的な断層すべりによってエネルギーを解放していれば大地震の震源域にはなりにくいと考えられる。

一方、地震観測からは、沈み込んだフィリピン海プレートの深さ30km周辺を発生源とする、深部低周波微動の存在が明らかになった(Obara, 2002)。この現象は、通常の地震と比べると、低周波側の成分に富んだ微弱な揺れが長時間続く現象で、稠密な観測網の複数の観測点で似たようなデータが得られたことから、地下に原因のある自然現象であると判明したものである。低周波微動の原因是あまり良く分かっていないが、観測された地震波形を解析すると、プレート境界の巨大地震と同じ低角逆断層の運動によって生じたと解釈できる部分があることから、深部低周波微動の発生位置はプレート境界の固着が存在する下限を示しているのではないかと考えられている。

スロースリップや深部低周波微動の発見によって、プレート沈み込みに対する我々の見方は一変した。それまでのプ

レート境界の見方は、固着域(アスペリティ)かどうか、固着しているか高速でずれているか、といった単純な二分法であったが、実際のプレート境界の挙動ははるかに複雑であることが明らかになった。近年では、こうした様々な挙動の時空間分布を明らかにするとともに、これらの物理メカニズムを解明することが重要な研究課題となってきている。

### 3.4 南海トラフ巨大地震の規模・被害想定

石橋(1977)は、駿河湾を震源とする巨大地震が近い将来に発生する可能性を指摘した。これがきっかけとなり、1978年には大規模地震対策特別措置法が制定され、想定「東海地震」を対象とする地震予知を前提とした地震防災対策が開始された。既に述べた1944年東南海地震の発生直前に掛川付近で検出された異常傾斜変化は、東海地震予知が可能である根拠とされた。

東海地震は「いつ起きたても不思議ではない」とも言われたが、現在に至るまで発生していない。しかし、御前崎ではフィリピン海プレートの沈み込みに伴う北西ないし西向きの変位や地盤の沈降が続いている。これらの地殻変動は、将来の大地震時に逆向きの変位で解消されると考えられ、地震発生に向けたエネルギー蓄積は着々と進んでいるようを見える。それでは、東海地震がまだ発生しないのはなぜか?この問い合わせて、Sagiya(1999)およびHeki and Miyazaki (2001)がGPSデータに基づいて回答を与えた。これらの研究によると、東海地震の震源域である駿河湾周辺では、沈み込むフィリピン海プレートも沈み込まれる陸側のプレートもそれぞれ内部で変形が生じており、プレート運動に伴う歪みの一部がプレート境界以外で解消されている。プレート境界で解消すべき歪みの蓄積速度は、同じ南海トラフ沿いの四国付近に比べると半分以下であり、隣接地域のように100年程度で大地震が繰り返す必要は必ずしも無い。そのため、想定されている東海地震が単独で発生する可能性はあまり高くないという認識が広がりつつあり、逆に、次の東南海地震の発生時に駿河湾周辺まで断層破壊が及ぶ可能性が懸念されている。ただ、安政東海地震以降に、駿河湾周辺単独でもM8級の地震に相当するエネルギーが蓄積されていると考えられており、近い将来に単独発生する可能性も否定はできない。

東南海地震、南海地震について、地震調査研究推進本部は2001年に長期評価を行った。想定された震源域は図-6に示すようなもので、地震規模は東南海地震でM8.1前後、南海地震でM8.4前後、両者が同時発生した場合にM8.5前後とされた。地震発生確率の推定値は毎年更新されている。2012年1月現在で今後30年以内にこれらの地震が発生する確率は、東南海地震で70%、南海地震で60%と推定されている。50年以内の発生確率はともに90%以上になることから、今世紀の中頃までには起きる可能性が高いと言える。なお、地震調査研究推進本部では、東北地方太平洋沖地震の発生を受けて長期評価の見直し作業を行っており、今後想定が変更される予定である。



図-6 長期評価で想定された東南海・南海地震の震源域(地震調査研究推進部, 2001)。

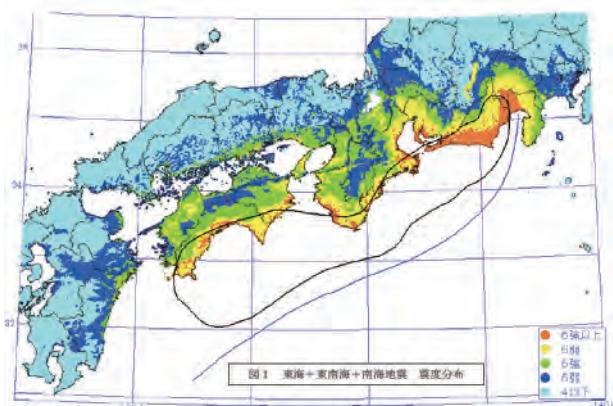


図-7 東海・東南海・南海地震が同時発生した場合の予想される震度分布(中央防災会議による)

一方、中央防災会議では東海・東南海・南海地震の様々なケースを想定して地震動や津波の分布を計算し、被害予測を行っている。以下では、そうした想定の中で規模が最大となる東海・東南海・南海地震が同時発生した場合の結果について照会する。図-7は、震度分布で、静岡県から高知県に至る広範囲で震度6強以上の強い揺れが予想されている。こうした広い範囲が強い揺れに見舞われることを我々は東日本大震災でも経験したが、南海トラフの巨大地震の場合、震源域が陸域に近いため、既に述べた通り、地震動はより激しくなり、また津波の到着時刻が早くなると予想される。南海トラフ沿いでは沿岸地域の人口が多いため、建物の地震動対策や津波避難対策を一刻も早く進める必要がある。また、日本の大動脈とも言うべき東海道新幹線や東名自動車道が一時的に利用できなくなる可能性も高く、交通や物流に大きい影響が出ると予想される。さらに、名古屋や大阪といった日本を代表する大都市が強い揺れや津波に見舞われる可能性があり、社会・経済に対する影響は東日本大震災よりも一層深刻なものになるのではと懸念される。

東日本大震災では、様々な想定外の事象が起き、被害の拡大につながった。こうした経験から生じた重要な教訓の一つが、自然災害の想定においては、最も起こりそうなこと

を考えるだけでは不十分で、起り得る最大規模の事象についても検討しておく必要がある、ということであった。そうした教訓を生かし、中央防災会議では、南海トラフで将来発生する巨大地震の断層モデルや被害想定に関する検討を進めている。2011年12月末には、中間取りまとめとして想定震源域や津波波源域に関する検討結果が公開された。その概要を図-8に示す。

新たな想定では、震源域は図-8の太い灰色の線で囲まれた範囲とされた。図-6や図-7に示されていた従来の想定震源域と比べると、北側や西側に大きく広がっていることが分かる。新しい想定震源域の北端は、深部低周波微動の発生域とされた。プレート境界の固着が僅かながらも存在する限界が深部低周波微動域であると仮定し、多少なりとも固着があれば地震時に断層破壊を起こす可能性がある、という考え方である。また、西方に震源域を伸ばした点については、九州東岸で発見された宝永地震の津波堆積物を説明するために震源域の拡張が必要という点が根拠とされた。一方、東日本大震災の経験から、海溝軸付近においてもプレート境界がずれて大きな津波を発生させる可能性があると考え、津波波源域はトラフ軸まで南に延長された。

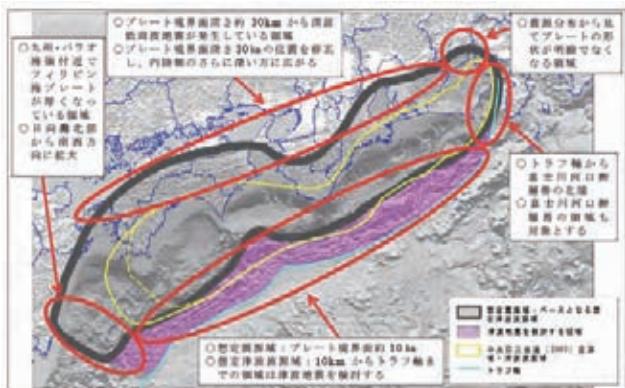


図-8 検討中の新しい想定震源域および津波波源域(中央防災会議による)。

今後、このモデルを用いた被害予測が検討され、地震・津波対策に生かされることになる。図-7に震度分布を示した中央防災会議による2003年の試算では、東海・東南海・南海地震が同時発生する場合、最悪のケースでは死者24,700人、経済被害は81兆円に上るとされていた。図-8の新しいモデルでは、想定震源域が陸側に広がるため揺れはより強くなり、津波はより大きくなることが予想され、被害想定もさらに大きくなるのがほぼ確実と思われる。次の南海トラフ巨大地震の発生が今世紀中に確実視される中、事前・事後の対策によってどれだけ被害を軽減できるかに日本の真価が問われている。国、自治体等で万全の地震・津波対策を講じることは当然だが、それにも増して、各個人が防災に対する意識を高めておくことが大切である。

将来、南海トラフの巨大地震が起きる際に特に心配される被害として、長周期地震動による被害を挙げておく。これは、ゆっくりとした揺れが長時間継続することにより、大規

模な構造物が損傷を受けるもので、特に堆積層が厚い関東平野、濃尾平野等で揺れが增幅される。東日本大震災においては、震源地から遠く離れた大阪で、大阪府咲州庁舎が被害を受けている。長周期地震動は、震源から放出される地震波に加え、地盤構造と建物の構造などの複合的な要因で被害が左右される。我々は南海トラフの巨大地震を過去70年近く経験していないが、その間に多くの高層ビル等の大規模構造物が建設されており、これらの構造物は次の巨大地震で初めて長周期地震動を経験することになる。

#### 4. おわりに

東日本大震災において、我々は多大な犠牲を払った。今後発生する南海トラフの巨大地震に備える上では、この苦い教訓を十二分に生かす必要がある。東日本大震災では、釜石市において事前の防災教育が功を奏し、市内の小中学校の生徒が全員無事に避難したことが報道されているが、防災教育での重要なポイントの一つは「想定を信じるな」ということであった。将来起きる地震の規模や被害に関する想定は人間の知恵であるが、我々の自然に対する理解は常に不十分なので、自然は人間の思惑など関係無く、想定外の事象もたやすく引き起こす。本稿でも南海トラフ巨大地震に関する様々な想定を紹介したが、これらも外れる可能性の方がはるかに高いと思われる。大切なことは、震度や津波高といった詳細ではなく、まずは、そうした不安定な地盤の上に自分達が住んでいるという自覚であり、人間の力が及ばない巨大な自然に対して謙虚に向き合うことだろう。東北において様々なデータがM9地震発生の可能性を示唆していたように、虚心坦懐に自然と向き合い自然が発するメッセージを受け取れる感受性を養うことが、自然災害を軽減する上で重要ではないだろうか。

#### 参考文献

- Fujiwara, T., S. Kodaira, T. No, Y. Kaiho, N. Takahashi, and Y. Kaneda (2011) The 2011 Tohoku-oki earthquake: displacement reaching the trench axis, *Science*, 334, 1240.
- Furumura, T., K. Imai, and T. Maeda(2011) A revised tsunami source model for the 1707 Hoei earthquake and simulation of tsunami inundation of Ryujin Lake, Kyushu, Japan, *J. Geophys. Res.*, 116, doi:10.1029/2010JB007918.
- Heki, K. and S. Miyazaki (2001) Plate convergence and long-term crustal deformation in central Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 2313-2316.
- Hirose, H., K. Hirahara, F. Kimata, N. Fujii, and S. Miyazaki (1999) A slow thrust slip event following the two 1996 Hyuganada earthquakes beneath the Bungo Channel, southwest Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 3237-3240.
- Ichinose, G., H. K. Thio, P. G. Somerville, T. Sato, and T. Ishii (2003) Rupture process of the 1944 Tonankai earthquake (Ms8.1) from the inversion of teleseismic and regional seismograms, *J.Geophys.Res.*,108,doi:10.1029/2003JB002393.
- 飯田汲事 (1985) 東海地方地震津波災害誌 , 800pp. 飯田汲事教授論文選集発行会 .
- 石橋克彦 (1977) 東海地方に予想される大地震の再検討－駿河湾地震の可能性一、地震予知連絡会報 , 17, 126-132.
- 石橋克彦・佐竹健治 (1998) 古地震研究によるプレート境界巨大地震の長期予測の問題点－日本付近の鵜レート沈み込み帯を中心として、地震 , 50, 1-21.
- 地震調査研究推進本部 (2012) 海溝型地震の長期評価 [http://www.jishin.go.jp/main/p\\_hyoka02\\_kaiko.htm](http://www.jishin.go.jp/main/p_hyoka02_kaiko.htm)
- 木股文昭・木村玲欧・林能成,(2005) 三河地震 60 年目の真実 , 218pp, 中日新聞社
- 国土地理院 (2011) 10 万分 1 浸水範囲概況図 , <http://www.gsi.go.jp/kikaku/kikaku60003.html>
- 国土地理院・海上保安庁 (2011) 東北地方太平洋沖地震の陸域及び海域の地殻変動と滑り分布モデル, <http://www.gsi.go.jp/cais/topic110520-index.html>
- Kurahashi, S. and K. Irikura (2011) Source model for generating strong ground motions during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, 63, 571-576.
- McCaffrey, R. (2008) Global frequency of magnitude 9 earthquake, *Geology*, 36, 263-266.
- Mogi, K.(1984) Temporal variation of crustal deformation during the days preceding a thrust-type great earthquake – The 1944 Tonankai earthquake of magnitude 8.1, Japan, *PAGEOPH*, 122, 765-780.
- Minoura, K. and S. Nakaya (1991) Traces of tsunami preserved in inter-tidal lacustrine and marsh deposit: Some examples from northeast Japan, *J. Geol.*, 99, 265-287.
- Nishimura, T., T. Hirasawa, S. Miyazaki, T. Sagiya, T. Tada, S. Miura, and K. Tanaka (2004) Temporal change of interplate coupling in northeastern Japan during 1995-2002 estimated from continuous GPS observations, *Geophys. J. Int.*, 157, 901-916.
- Obara, K. (2002) Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan, *Science*, 296, 1679-1681.

- ・ Ozawa, S., M. Murakami, M. Kaidzu, T. Tada, T. Sagiya, Y. Hatanaka, H. Yarai, and T. Nishimura (2002) Detection and monitoring of ongoing aseismic slip in the Tokai region, central Japan, *Science*, 298, 1009-1012.
- ・ Sagiya, T. (1999) Interplate coupling in the Tokai district, central Japan, deduced from continuous GPS data, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 2315-2318.
- ・ 鷺谷威 (2004) 1944年東南海地震前後の地殻変動再考, 月刊地球, 26, 746-753.
- ・ 宮倉正展・澤井祐紀・行谷祐一・岡村行信 (2010) 平安の人々が見た巨大津波を再現する—西暦869年貞觀津波ー, AFERCニュース, 2010年8月号, 1-10.
- ・ 東京大学地震研究所 (2011) 海底ケーブル式地震計システムで観測された海面変動,  
[http://outreach.eri.u-tokyo.ac.jp/eqvolc/201103\\_tohoku/#kamaishimeter](http://outreach.eri.u-tokyo.ac.jp/eqvolc/201103_tohoku/#kamaishimeter)
- ・ 東京大学地震研究所 (2012) 3月11日以降の首都圏の地震活動の変化について,  
[http://outreach.eri.u-tokyo.ac.jp/eqvolc/201103\\_tohoku/shutoseis/](http://outreach.eri.u-tokyo.ac.jp/eqvolc/201103_tohoku/shutoseis/)
- ・ Yagi, Y. and Y. Fukahata (2011) Rupture process of the 2011 Tohoku-oki earthquake and absolute elastic strain release, *Geophys. Res. Lett.*, 38, doi:10.1029/2011GL048701.
- ・ Yamanaka, Y. and Kikuchi, M.(2004) Asperity map along the subduction zone in northeast Japan inferred from regional seismic data, *J.Geophys.Res.*, 109, doi:10.1029/2003JB002683.

