

特別講演Ⅱ

巨大化する想定地震

—地震予知, 強震動予測への技術者の挑戦—

岐阜大学 理事・副学長 杉戸真太

東北工業大学 名誉教授 神山 眞

岐阜大学流域圏科学研究センター 助教 久世益充

1. はじめに

2011年3月11日の東日本大震災において、2万人近くの尊い命が奪われた。明治以降、我が国においては、1891年濃尾大震災から1995年阪神淡路大震災まで1000人以上の人命が奪われる震災を11回も経験し、21世紀に入って間もないところで、またもや多くの人命を失う震災を受けてしまった。近年、科学技術が加速度的に高度化しているにもかかわらず、依然として多くの人命を失う震災が発生する現状にあっては、防災に携わる研究者・技術者によるより高度な技術開発が強く期待されている。そして、開発された技術が実際の防災施策にいち早く生かされることが重要である。

本報告は、二つのトピックで構成されている。一つは、きわめて重要な地震防災技術になり得る巨大地震の予知に関して、その可能性を示唆する重要な観測データが東日本大震災において得られていたことを紹介する¹⁾。次に、東海～四国沖における東海、東南海、南海地震が連動して発生した場合の各地の地震動の特徴について試算例を示す。先の東北の震災を受けて、これらの地域の各自治体ではこの3連動地震を最大級の地震として想定し、被害想定調査を実施してきている。いわゆる1707年宝永大地震に相当するものである。一方、この地域ではさらに巨大な震源断層が想定される²⁾として、昨年12月に内閣府が倍以上の面積をもつ震源断層を発表している。ただし、各地域にとっては、この“超”巨大地震よりも、発生しうる海溝型地震に加えてそれぞれの地域で誘発される内陸直下地震がはるかに脅威となることから、想定する“地震像”について十分検討することが望まれている。本報告では、このような内陸直下地震の見直しも行っている岐阜県での事例を紹介する。

2. GEONET データにみられる東北地方太平洋沖地震の予兆現象

プレート間のひずみ蓄積による地殻変動の観測事例

図-1に、静岡県御前崎と掛川の間での1998年からの10年間における高低差の変化³⁾が示されている。国土地理院のGEONET (GPS Earth Observation Network) による観測値と水準測量による観測値はほぼ同程度で、この10年間において約10cm 御前崎が相対的に沈降していることが確認できる。これは、太平洋側からのプレートの潜り込みに伴い、陸側のプレートの御前崎地域では年々沈降がすすんでいることを示している。沈降のスピードがほぼ一定であり、プレート間でのひずみが毎年同程度に溜まっていると推察できる。GEONETの観測データは、現在毎秒単位のRINEX形式観測データと、GPS衛星の精密な軌道情報を考慮して、気象条件および各種誤差を補正した位置解析結果のデータである日々の座標値(F3 データ)、などが公開されている。

1944年東南海地震においてみられた予兆現象

図-2に、1944年東南海地震においてみられた予兆現象に関する報告事例を示した。図-2(1)は、1934年

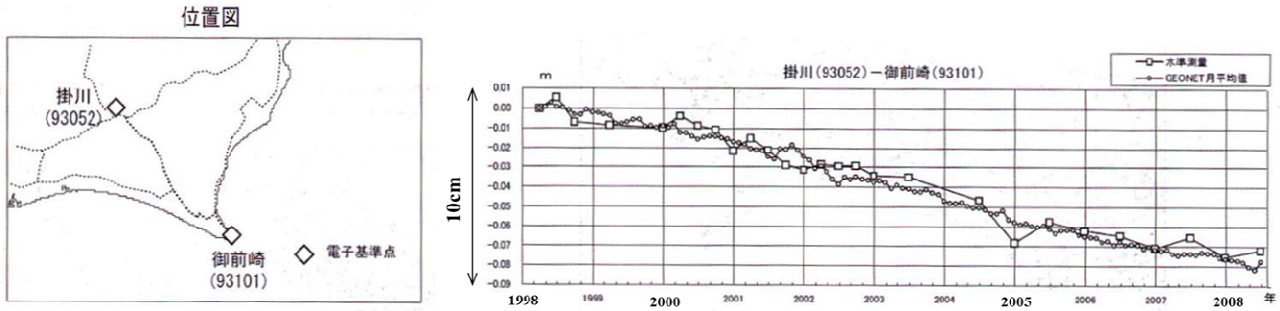
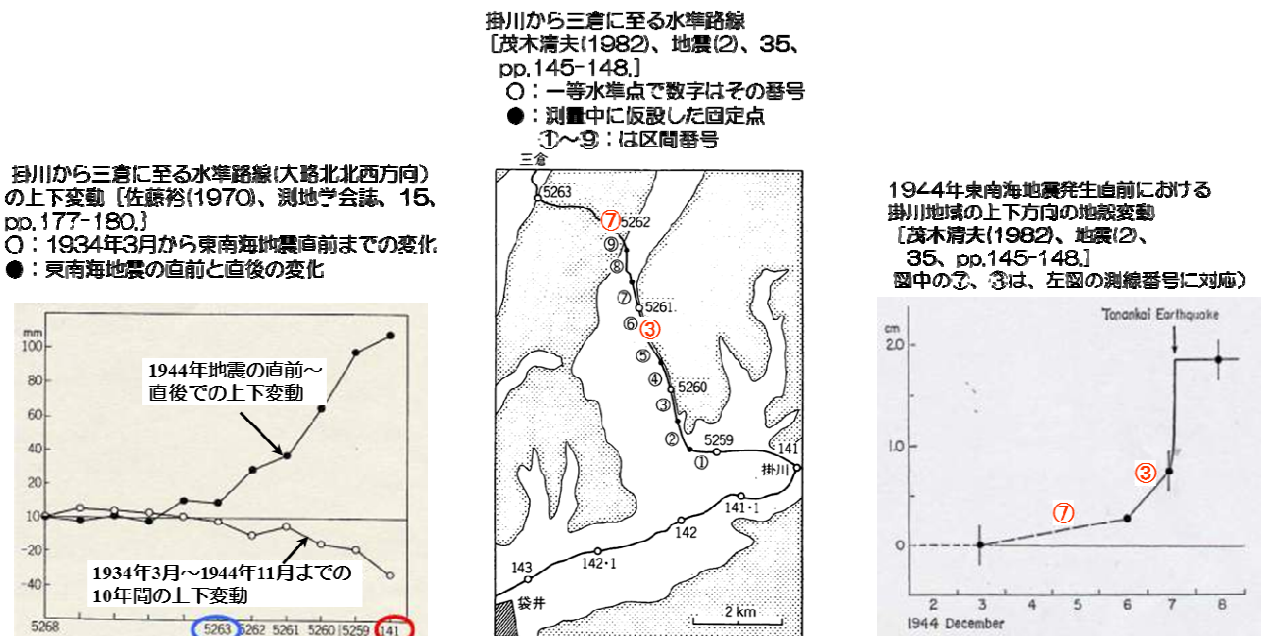


図-1 御前崎～掛川間の相対高低差(国土地理院資料, 文献3)に加筆

から1944年東南海地震が起きたときまでの10年あまりの間、旧国土地理院により掛川から三倉間での水準測量が行われており、その結果を示したものである⁴⁾。掛川から北に向かって三倉の間での1934年～1944年までの10年間の沈下量として、相対的に4～5cm程度と読み取れる。1944年の地震直後に測った値では、8cmほど逆に上昇していることがわかる。この地域は、震源断層から180kmほど離れているため、この程度の上昇量であったと解釈される。

さて、同年12月7日の地震の直前の数日間の変化について、茂木⁵⁾は、図-2(2)、(3)に示される結果を報告している。図-2(2)の測線⑦のところでの水準測量の結果によれば、12月3日と6日の間でこれまでの傾向に反して掛川方向でわずかに上昇しており、その増分が図-2(3)に示されている。さらに、図-2(2)の測線③のところでも地震前日から7日にかけて上昇しており、その増分が先の測線⑦の増分に加えて図-2(3)に示されている。測線⑦と測線③の結果を単純に加えることには多少無理があるが、地震発生時にはこの地域の地殻が大きく上昇する動きが少なくとも2～3日前から漸増的傾向としてみられ、それが本震直後の大きな



(1)1934～1944年までの変化 (2)掛川から三倉に至る水準路線 (3)1944年東南海地震直前における掛川地域の上下方向の地殻変動

図-2 1944年東南海地震直前までの掛川から三倉に至る水準測量

変化量の 1/100 程度のオーダーであったことを表している。これらの分析結果が、後の地震予知研究発展のきっかけとなったことは言うまでもない。

GEONET データにみられる東北地方太平洋沖地震の予兆現象

全国 1240 箇所に展開されている国土地理院の GEONET[®]による GPS のデータには、今回の東北地方太平洋沖地震の予兆的な現象がみられた。GEONET は現在、1 秒ごとの観測点位置情報のリアルタイム取得を実現し、そのデータはインターネットを通じて公開されている。それらは、用途に応じた 3 種類の精度をもったデジタルデータとして公開されている。神山ら¹⁾は、電子基準点の観測データ・最終解析 (F3) の結果(日々の座標値)を使って地殻変動を検討した。F3 の日々の座標値は 1 日 1 回の各日 21 時 (日本標準時) として公開されているものである。

図-3 は、典型的な予兆現象を示す地殻変動記録が得られた女川地点の事例である。2011 年 1 月 1 日における同地点の位置を座標原点とし、それからの水平方向 (実線)、鉛直方向 (破線) の変動量を 2 月 1 日から示したものが上段に示されている。地震発生後に 5 m 程度東に移動し、1 m 程度の沈下があったことが読み取れる。2 月 1 日から地震前日までの部分を 100 倍に拡大すると、中央の図のように、3 月 8 日、9 日、10 日において水平方向に移動量が漸増していることがわかる。この水平変位を東西と南北に分けてプロットしたものを下段に示した。主として東方向に大きく移動していることが分かる。水平平面上での変位軌跡図 (図の右下) にも示されているように、本震 3 日前の 3 月の 8 日、9 日、10 日において東方向への移動が漸増していることが分かる。東北地方の全ての GPS 観測点データを調べたところ、16 地点でこのような傾向が顕著に見られた。それらの観測点の変動軌跡を一括して図-4 に示した。同図に示されるように、2 月 1 日

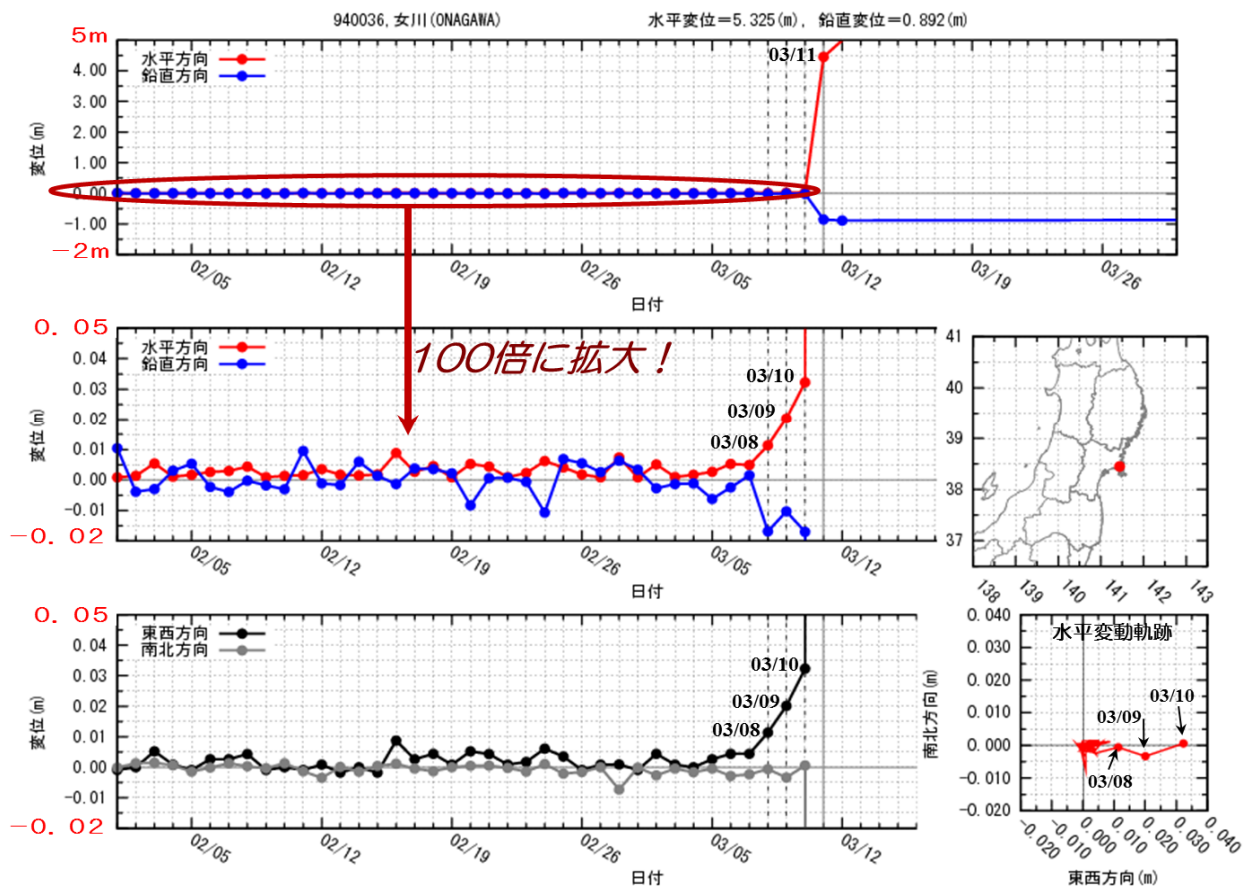


図-3 基準点の変動 (2012 年 1 月 1 日からの変動履歴, 女川地点)

から3月7日までの16地点での変動の傾向は全地点において酷似しており、日々の座標値として平滑化した後にも観測システムに共通して残る系統的な誤差の可能性が高い。一方、8、9、10日の漸増的な東方への移動の傾向は、それまでとは全く異なるものであり、有意な変動と考えられる。

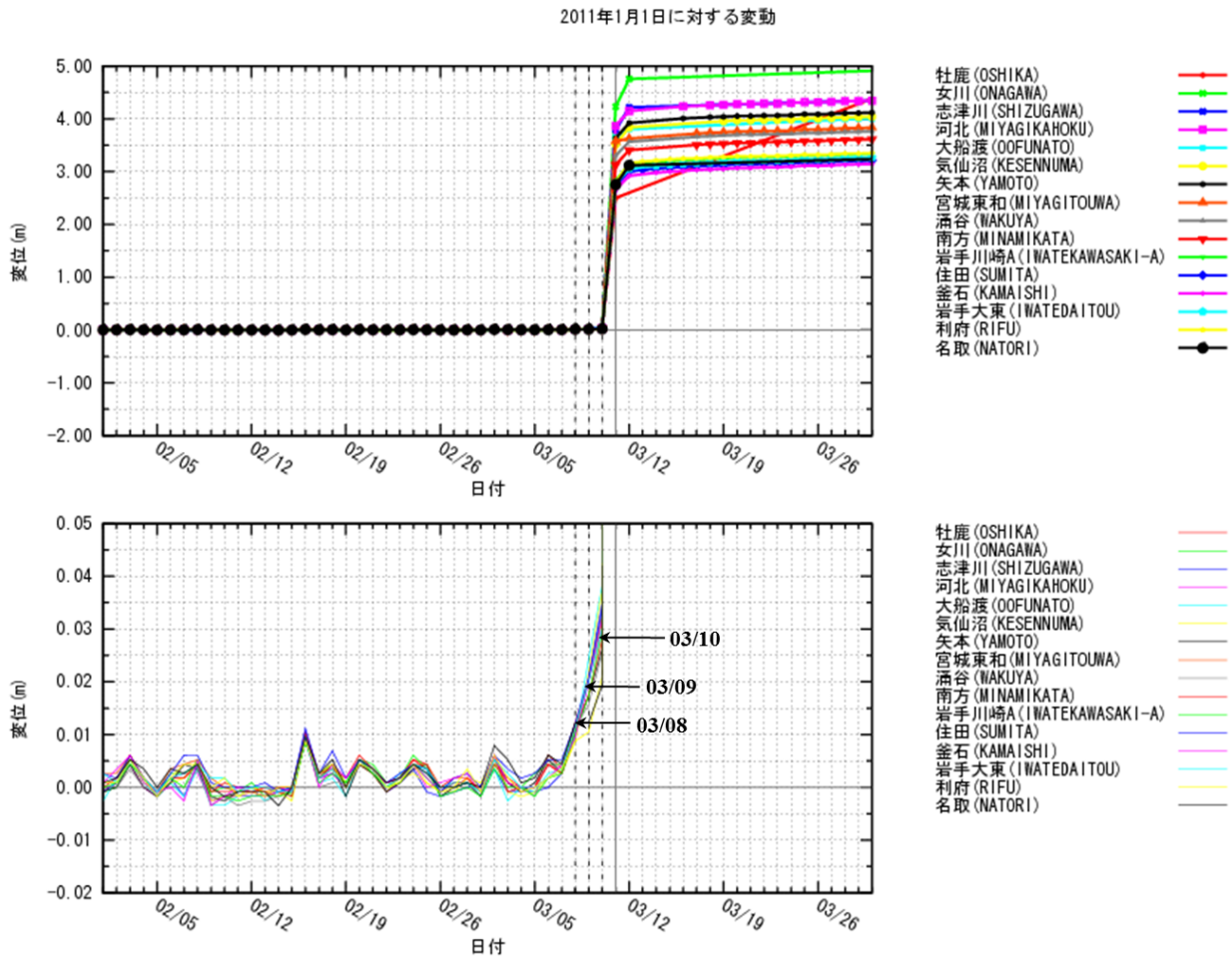


図-4 予兆現象が顕著であった16基準点の変動(各基準点の2011年1月1日からの変動履歴)

以上の結果から、図-2で紹介した1944年の東南海地震の時と同じように、断層の破壊に伴う大きな地殻変動の方向に、数日前からの漸増的な地盤変動現象があったと判断されると考えている。図-5には、気象庁から発表された本震における断層面上の推定変動分布とこれらの16地点とを示した。これらの16地点が、大きな変位が発生した断層の部分に近いところに集中していることが分かる。3月9日に、前震と考えられるマグニチュード7.3の地震が発生し、東北地方の多くの観測点で数cmのオーダーで前日から動いていることは報告されているが、ここに示した数日前からの予兆的な動きをこの一つの前震のみで説明することはできないと考えている。

東海地域において想定されている東南海・東海地震のケースでは、今回の東北の地震に比べて断層が陸域に近いということから、こういった巨大地震の直前における予兆現象はより顕著に表れることが期待される。問題は、リアルタイムでこのような情報が得られるかどうかである。先に述べたように、GEONETデータは毎秒の観測値が公表されており、我々も手にすることはできるが、複雑なデータ処理が必要であり、気象条件等に依存する補正も必要となる。より簡便に使える信頼性の高いデータがリアルタイムに近いレベルで多くの研究者に公表されるようになると、その価値は学術的にも地震防災上もきわめて高いものとなることは間違いない。

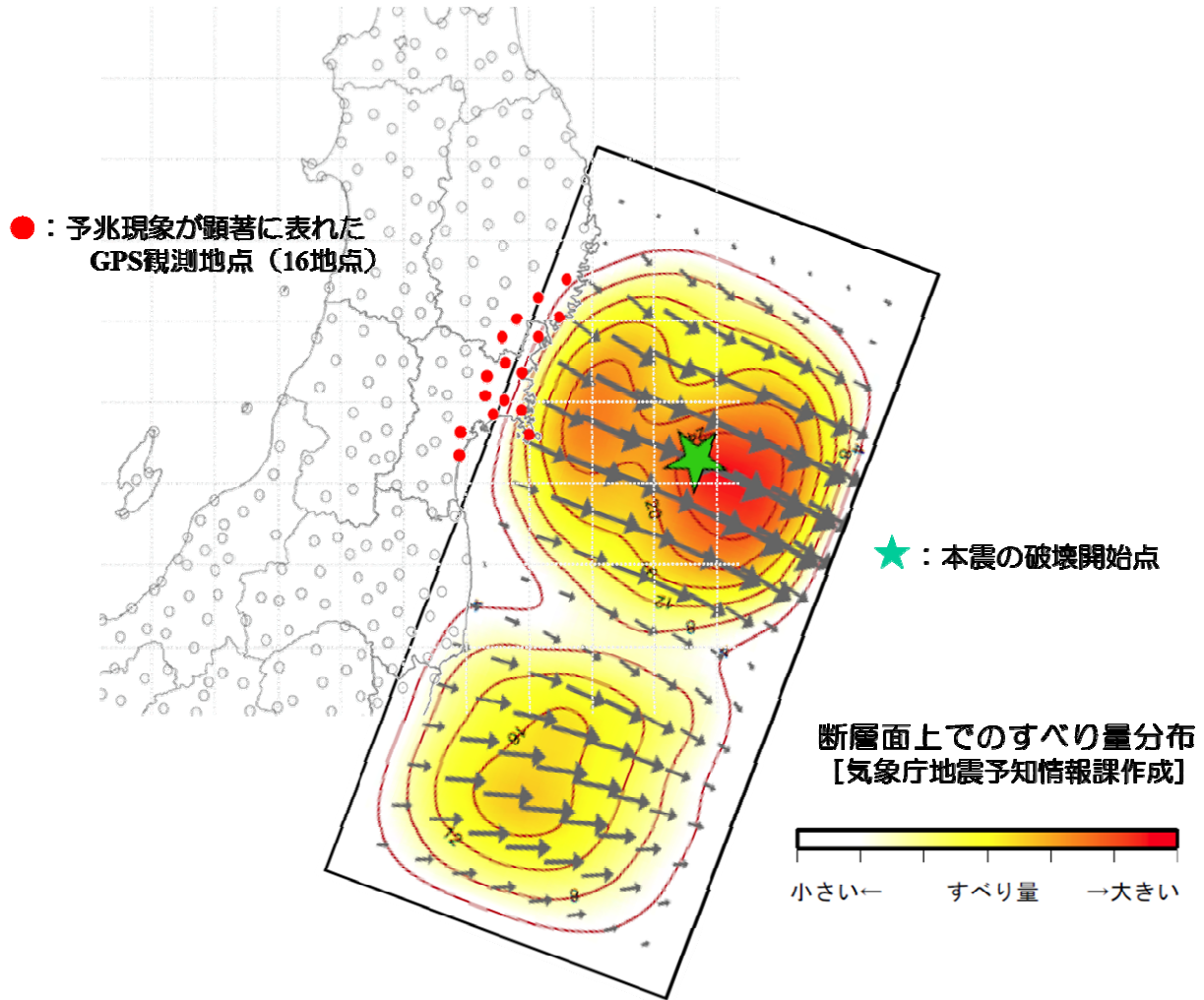


図-5 予兆現象が顕著であった16基準点と震源断層面のすべり量分布との関係

3. 東海～西日本において想定される超巨大地震

東北地方太平洋沖地震の震源域はおおよそ $450\text{km} \times 150\text{km}$ ⁸⁾で、東北地方の太平洋沖では有史以来最大級であったと言える。また、断層面のずれは、最大で $25\text{m} \sim 30\text{m}$ もあったと報告されている⁸⁾。これに対して、東海から四国までの太平洋沿岸域で想定される海溝型地震としては、東海、東南海、南海地震が考えられ、さらに、それらの連動型地震も実際に発生している。室町時代以降でも5回発生しており、1707年の宝永の大地震は、いわゆる3連動であったと記録されている⁹⁾。また、1864年安政東海地震(東海・東南海連動)の34時間後に南海地震が発生、さらに1944年東南海地震の2年後に南海地震が発生するなど、これらの発生時間差でも連動の範疇に入れるなら、すべてが連動型地震として発生していることになる。

昨年3月の東北の震災を受けて、国はもちろんのこと、岐阜県や愛知県などの自治体でも、“今後は想定外だったという言い訳は許されない”ということで、この地域での想定地震は3連動地震を対象とする自治体が多くなってきている。その場合の断層規模は、 $600\text{km} \times 150\text{km}$ 程度となり、岩盤のずれも数十メートルに達すると言われている。1707年の宝永地震がこれに相当し、そのときのマグニチュードは8.6程度と推定されているが、断層面のすべり量が数十メートル規模になればモーメントマグニチュード M_w は9.0程度に至ることも考えられる。図-6に、東京大学地震研究所¹⁰⁾より発表されている東日本太平洋沖地震の推定震源断層と、上記の3連動地震の断層モデルを示した。なお、3連動モデルは、内閣府、地震調査研究推進本部(文科省)により発表されている断層モデルを基に、当研究室の強震動シミュレーションに対応するモデル

に設定したものである。

この3連動地震の震源域をほぼ2倍とするさらに巨大な海溝型地震もあり得るとの判断により、昨年12月には内閣府からその震源断層モデルが発表され、地域の自治体等においてもこれを新たな想定地震として採用する方向で検討している。いわば“超巨大地震”である。この断層モデルによる強震動のシミュレーション結果については、講演当日に示す予定である。

3連動地震による地震災害と強震動の特徴

今回の東北の震源断層と、東海から西日本にかけての3連動地震断層の大きさを比べてみると、むしろ後の方が震源域の面積としては広い。そして、東北の震源域は、陸域からやや離れた海域にあるのに対して、東海・東南海・南海地震の断層は一部が陸域直下に達していることから、陸域での地震動はこちらのほうが大きいことが予想される。断層が陸域に近いことから津波も早く来襲することになる。さらに、図-6に示されるように、濃い網目で示されているアスペリティ（より大きな震動を発生する断層域）が、陸域に近い領域に存在し、各地で強大な地震動となることを推察される。特に南海地震、東海地震では陸域の一部が断層直上となることから、その周辺域ではすさまじい地震動となることが容易に想像できる。

さて、3連動地震による被災地域は非常に広域に及ぶことは自明であるが、とくに人口の集中する東海地域での地震災害の特徴として、以下の事項が予測される。

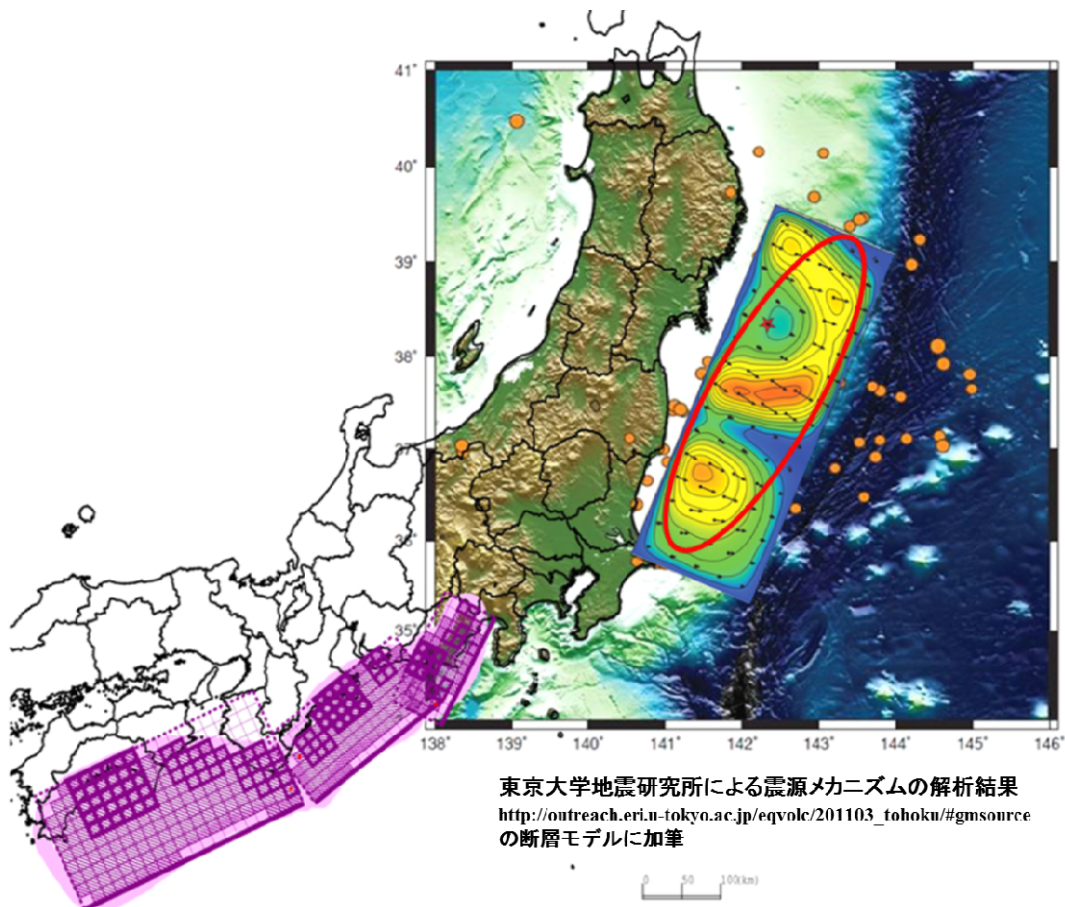


図-6 2011年東北地方太平洋沖地震の推定断層モデルと東海、東南海、南海地震の想定断層モデル

- (1) まず、中山間部での斜面崩壊が多発することが考えられる。とくに岐阜県では緩い斜面が多く分布しており、危険箇所が2万箇所にもおよぶため、毎年降雨による斜面崩壊が多発している。したがって、地震による多地点での斜面崩壊が発生し、交通網等の麻痺による孤立地域が多数発生することが大きな問題となる。
- (2) 名古屋市や岐阜市等には古くからの市街地が多く、そこには住宅密集地が多く存在している。小型の消防車でも入れない地域も少なくないため、地震発生時に延焼火災が多地点で同時に発生することが予想される。地域住民が一体となった初期消火訓練など、事前の準備が必要である。
- (3) 地震動の継続時間が数分におよぶため、河川・海岸堤防の液状化による沈下被害が広範囲に広がり、その後の津波による被害の拡大が予想される。関係所轄機関では、以前より耐震化検討調査を実施しており、その具体的な事業化計画も検討されているが、喫緊の課題として早急に対処する必要がある。

上記の(3)の原因となる長い継続時間を有する強震動について、3連動地震の震源過程を想定した各地でのシミュレーション地震動を算定し紹介する。断層規模がきわめて大きいため、震源の位置により各地点での地震動の様子は大きく変わる。ここでは、2つの典型的な事例を示す。まず、Case-Iとして、1944年の東南海地震の震源位置を想定地震の震源位置とした場合を考える。岐阜大学地点で推定される地震動を図-7に示した。この場合、東南海地震の震源での破壊開始から約7秒後に南海地震の断層破壊がスタートすることになる。東海地震は、東南海地震の断層破壊が東海地震の断層まで伝わった後に破壊が開始することになり、57秒の時間差が生じることになる。図-7の最上段に示された波形が3連動による地震動、その下には、東海地震、東南海地震、南海地震による個々の地震動を示した。これら個々の地震による波形を、着目地点への到着時間差を考慮して合成することにより3連動地震として推定している。図の右端には、各地震動の最大加速度や計測震度値が示されており、これらは、堅固な工学的基盤レベルでの推定値である。一般的な堆積地盤では、震度で0.5程度増幅した値となる。堆積地盤レベルでのおおよその震度階についても示されている。

もう一つの断層破壊のケースとして、東海地域に破壊が進展してくる場合をCase-IIとして想定した。すなわち、南海地震の西端に震源を設定した場合である。南海地震は長さが300km程度あり、破壊が伝播して東南海地震の断層まで到達するのに111秒かかる。その後東南海地震が発生し、さらにそれから時間差をもって東海地震の断層破壊が始まるパターンである。

東海地域にとっては最悪のケースといえる場合のシミュレーション地震動を図-8示した。図-7と同様に、東海、東南海、南海地震による個別の地震動も示されている。南海、東南海地震は、断層破壊が着目地点に近づく方向に進展するため、とりわけ南海地震による時刻歴波形の状況がCase-Iと大きく異なっていることがわかる。すなわち、短い時間帯に加速度パワーが集中することになる。それでも、断層が大きいいため、震動は1分以上続くことになる。南海地震単独による震度は5強程度と推定される。その直後に、東南海地震による震度6弱程度の地震動が来襲し、さらに東海地震による地震動が来襲することになる。全体として最上段のような各震源を特定できる3連動の地震動となり、強い揺れの継続時間が非常に長くなる。

図-9に、東海3県域での各都市におけるCase-IIの地震動を示した。各地点と各断層との相対的な位置関係の違いにより、加速度波形はそれぞれ特徴的な様相を示している。たとえば、名古屋は岐阜に比べて断層までの最短距離が近いことから、相対的に大きな震動となるが、加速度パワーの時間軸上での変化の様子はほぼ同等である。一方、東海地震の震源断層に最も近い浜松では、震度が相当高くなるとともに、東海地震の影響が非常に大きい地震動となる。強い揺れの継続時間は、どの地点でも少なくとも2分以上はあり、実際には断層破壊がスムーズに進行しないことや、地域の深い基盤構造によるやや長周期地震動が励起されてその震動が続くことにより、さらに長くなるものと予想される。着目する地域と断層との位置関係、さらに、破壊の開始点(震源位置)によって、各地の地震動の特徴が大きく異なることになる。

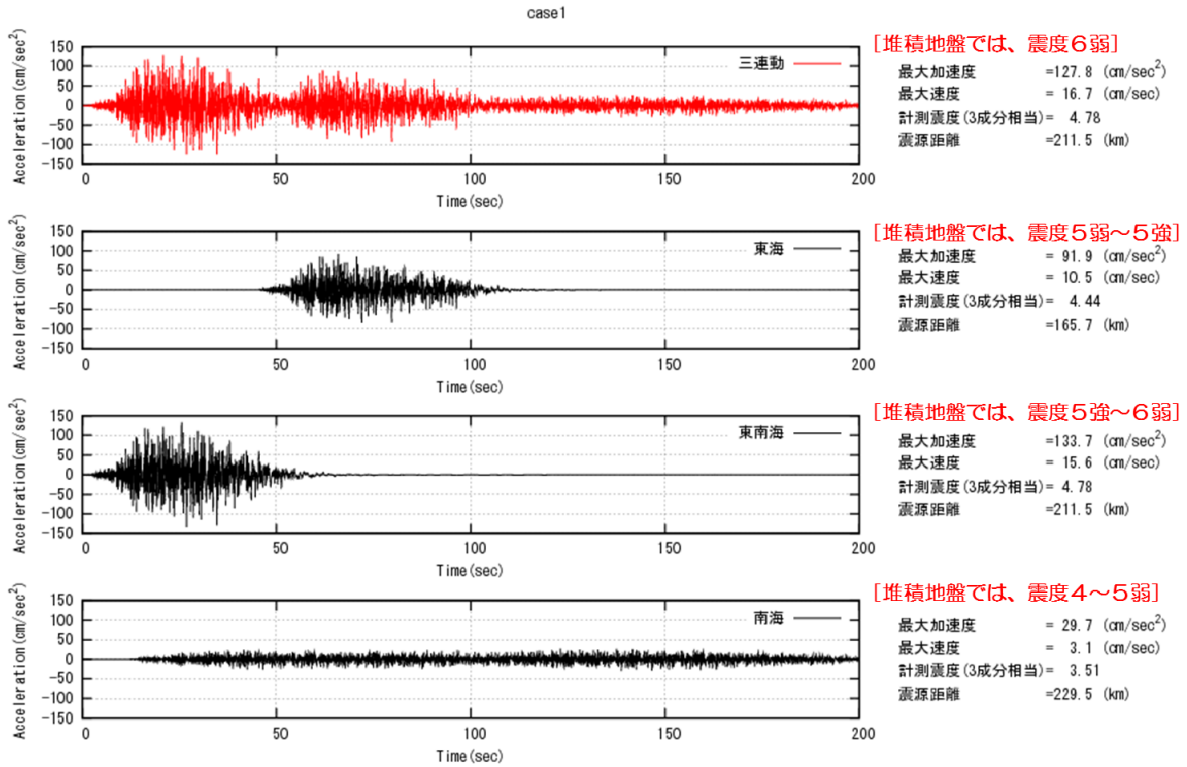


図-7 3連動地震(Case-I)による工学的基盤上のシミュレーション地震動(岐阜大学地点)

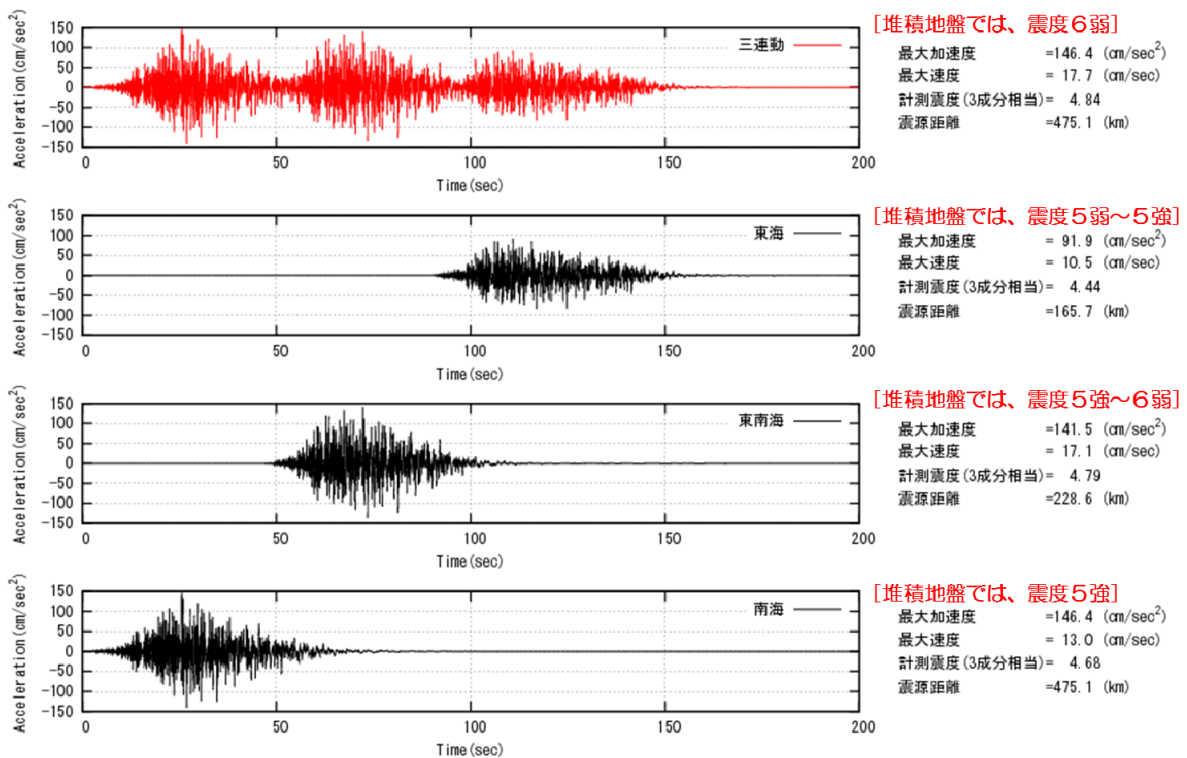


図-8 3連動地震(Case-II)による工学的基盤上のシミュレーション地震動(岐阜大学地点)

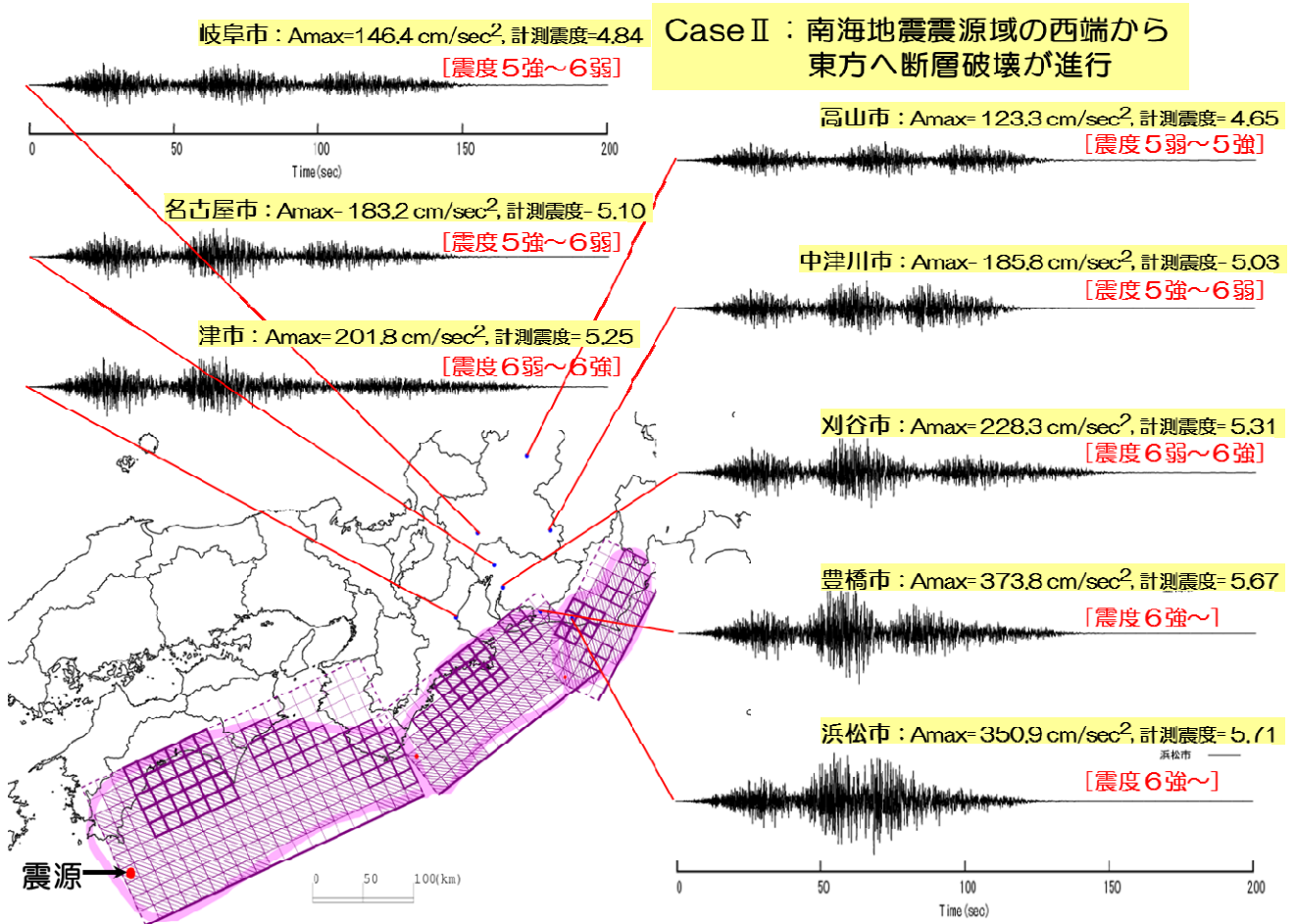


図-9 3 連動地震 (Case-II) による各都市のシミュレーション地震動の比較

誘発地震としての内陸直下地震の脅威

2011年東北地方太平洋沖地震の発生翌日、長野県と新潟県の県境付近にてM6.7の内陸直下地震が発生し、長野県栄村(震度6強)、新潟県津南町(震度6弱)、新潟県十日町市(震度6弱)を中心に大きな被害が出た。とくに、地すべり、大規模崩壊、表層崩壊に伴って、住宅倒壊や線路の破線、道路の亀裂などの災害が多く発生した^{11),12)}。この地震の震源は、東北地方太平洋沖地震の震源断層から200km以上も程離れており、その余震でないことは明らかであるが、プレート境界での広域にわたる大きな応力の解放により、陸域プレート内での応力場が変化し、そのために誘発して発生した地震とも考えられる。このような海溝型巨大地震発生後に発生した内陸直下地震の事例としては、1944年東南海地震の約1ヶ月後に三河地震が発生している。

内陸活断層の地震発生周期は千年から数千年以上のオーダーであるが、その数は特に中部地域で多いことが知られている。発生時期が迫ってきている断層の地震が、近隣の海溝型地震を契機として発生することもあると考えられる。一般に、地震が発生する可能性のある活断層の最後の地震発生時期を特定することは困難であることから、各地域において可能性の高い誘発地震の震源を見極めることはきわめて難しい。したがって、万が一発生した場合の被災レベルの高い内陸地震を特定し、それについての被害予測等を行い、事前の対策を講ずることが重要であろう。

以上のような防災上ポイントとなる内陸活断層の例として、東海地域のなかでも人口の集中する地域で想

定される養老・桑名・四日市断層の断層モデル¹³⁾を図-10に示した。2つの断層面から構成されており、傾斜角度は西方に45度、断層長さは約52km、マグニチュードは7.5である。断層面上の格子は強震動シミュレーションで対象となる単位断層要素、太い線で描かれた格子部分はアスペリティを表している。図-10には、断層パラメータを示した。

岐阜県および県内市町では、地震被害想定調査におけるこの地域の想定内陸直下地震として、これまで関ヶ原・養老断層を対象としていた。東北の震災を受け、想定する海溝型巨大地震を起ころうる最大級のものへ見直す自治体が増えているが、岐阜県では内陸直下地震についてもそのような考えに基づいて西濃地域での内陸地震として養老・桑名・四日市断層を対象としている。

さて、図-10の震源断層を想定した場合と、従前の関ヶ原・養老断層を想定した場合での岐阜県内の震度分布を図-11に示した。従前の断層モデルは、傾き角度90度でいわゆる鉛直に立っているものである。両者を比較すると、断層近傍での震度が大きく異なることが分かる。同図下に、各震度階の面積(km²)を比較して示した。想定断層のサイズが大きくなることにより、震度6強の地域は7倍、震度7の地域は20倍近く広がっている。

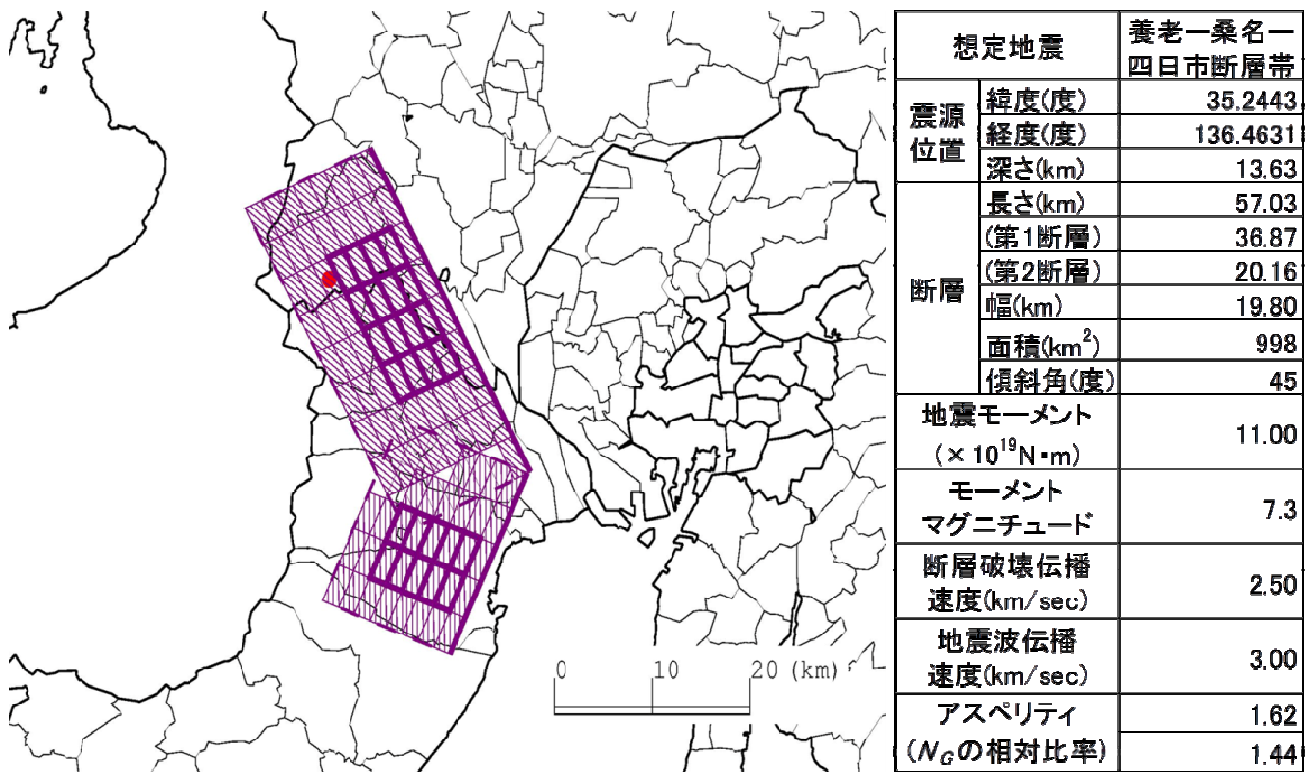


図-10 養老-桑名-四日市断層帯の断層モデルと断層パラメータ

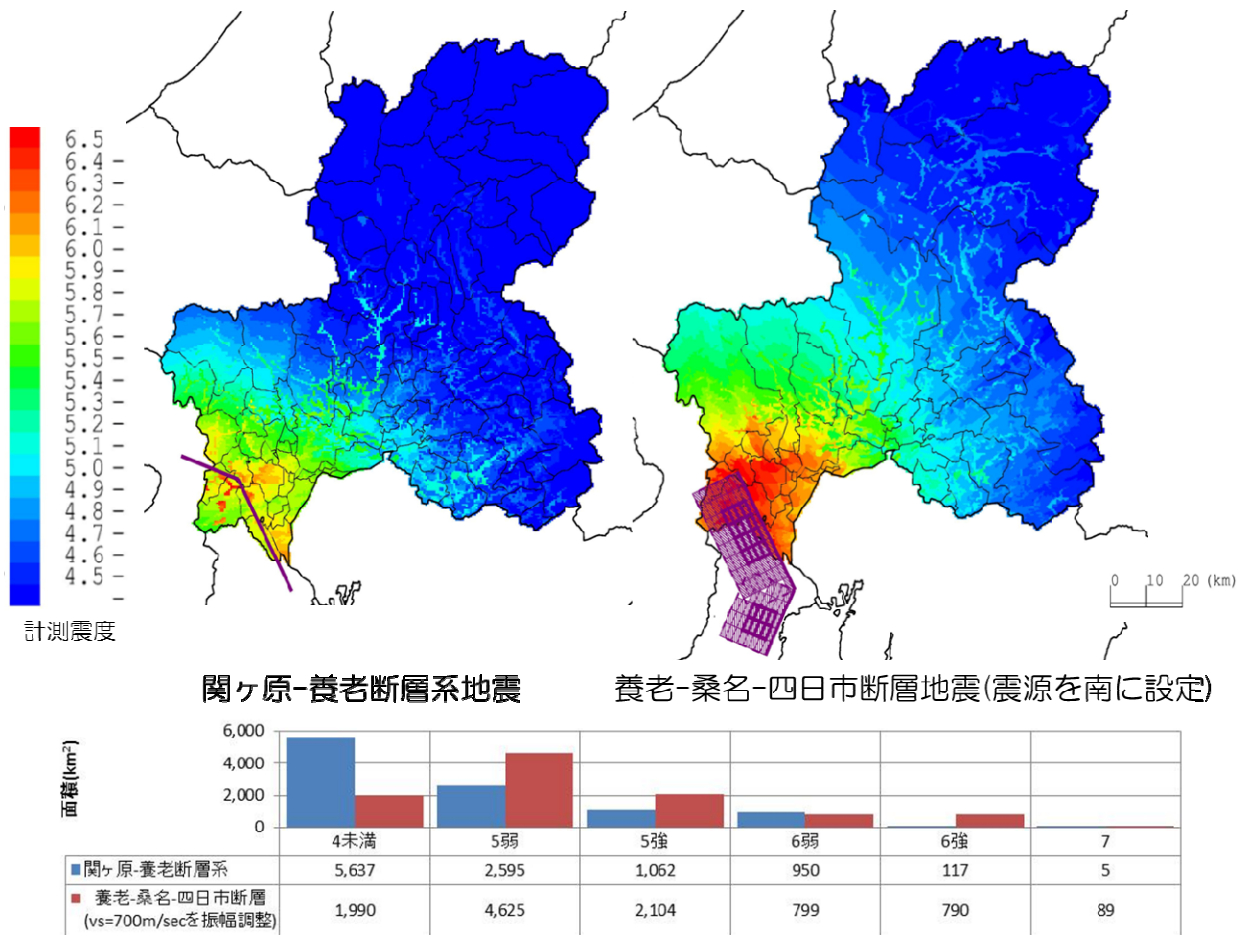


図-11 内陸直下地震による震度レベル毎の陸域面積の比較(岐阜県域)

4. まとめ

- (1) 茂木⁵⁾により報告された1944年東南海地震の直前の数日間における掛川での予兆と考えられる地殻の鉛直変動と同じように、東北地方太平洋沖地震の数日前からの東方への漸増的な地盤変動現象があったと判断される16のGEONET観測点データの解析結果を示した。東海地域において想定されている東南海・東海地震のケースでは、今回の東北の地震に比べて断層が陸域に近いということから、こういった巨大地震の直前における予兆現象はより顕著に表れるものと推察される。リアルタイムに近いレベルでこのような情報を多くの防災研究者、技術者が得ることができる体制を構築することがきわめて重要な課題である。
- (2) 東海沖から和歌山、四国南部の南海トラフで発生する可能性の高いいわゆる3連動地震による各地での強震動を試算して示した。震源断層がきわめて広域に及ぶことから、断層破壊の進展方向と着目地点との相対的な位置関係や断層までの最短距離によって、震動パワーの時刻歴の特徴が大きく変わることを示した。さらに、先の東北地方太平洋沖地震と同様、強い揺れの継続時間が3~4分程度ときわめて長くなることを示した。各種構造形式に及ぼす震動継続時間の影響については既に学会等において検討されてきている¹⁴⁾が、東海~南海沖での巨大地震発生の逼迫性を考えると、長い継続時間の影響を視野に入れた具体的な耐震化の事業が早急に実施されることが望まれる。
- (3) 自治体の地震被害想定調査では、海溝型巨大地震に加えて内陸直下地震についてもその地域で考えられる最大級の震源断層を想定するようになってきている。30年発生確率が海溝型地震に比べて極めて低い、一方で、海溝型地震に引き続いて発生する内陸直下の誘発地震についても指摘される

ようになってきている。そのような内陸地震の一例として、岐阜県等で検討されている関ヶ原・養老断層地震から養老・桑名・四日市連動地震に修正されたケースの震度分布の違い等について紹介した。東海地域では、海溝型巨大地震の逼迫性が極めて高いことに加えて、内陸活断層が我が国でも最も集中している。誘発地震の可能性まで考えた地震被害の想定とその対策事業をどのように合理的に実施してゆくかが、防災技術者に課せられた課題である。

参考文献

- 1) 神山眞・杉戸真太・久世益充：震災を踏まえた技術者への提言，土木学会誌 Vol. 97, pp. 119~123, 2012.
- 2) 内閣府中央防災会議，南海トラフの巨大地震モデル検討会，http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai_trough/nankai_trough_top.html
- 3) 例えば，平成20年10月，地震・火山月報(防災編)，<http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/gaikyo/monthly200810.pdf>, p. 24.
- 4) 佐藤 裕：1944年の東南海地震に伴う地殻変動，測地学会誌，Vol. 15, pp. 177-180, 1970.
- 5) 茂木清夫：タイトル，地震(2)，35, pp. 145-148, 1982.
- 6) 国土地理院，GEONET，<http://terras.gsi.go.jp/ja/index.html>
- 7) 国土地理院測地観測センター：平成23年(2011年)3月9日11時45分頃の三陸沖の地震に伴う地殻変動について，http://www.gsi.go.jp/chibankansi/chikakukansi_sanriku.html
- 8) 気象庁・気象研究所，「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」の断層すべり分布の推定 - 近地強震波形を用いた解析 -，<http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/sourceprocess/event/20110311near.pdf>
- 9) 安藤雅孝：次の南海地震に向けて日本は何をすべきか，月刊地球，南海地震一次の巨大地震に備えて -，海洋出版，pp. 5-13, 1999.
- 10) 東京大学地震研究所，広報アウトリーチ室，2011年3月 東北地方太平洋沖地震，http://outreach.eri.u-tokyo.ac.jp/eqvolc/201103_tohoku
- 11) 長野県，長野県北部の地震による県内への影響について，<http://www.pref.nagano.lg.jp/kikikan/bosai/happyou/201207010000.pdf>
- 12) 新潟県，3月12日発生 長野県北部を震源とする地震に関する情報，<http://www.pref.niigata.lg.jp/bosai/H23naganokenhokubujishin.html>
- 13) 中央防災会議，東南海，南海地震に関する専門調査会(第26回)参考資料，<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/26/index.html>
- 14) 土木学会 地震工学委員会 強震継続時間が長い地震動に対する土木構造物の耐震性検討小委員会，強震継続時間が長い地震動に対する土木構造物の耐震性評価シンポジウム概要集，2011.