

南海トラフ沿いの大規模地震の 予測可能性について

(別添資料)

各検討ケースにおける評価手法と評価例

平成29年8月

南海トラフ沿いの大規模地震の予測可能性に関する調査部会

1. 基本的な考え方	1
2. 南海トラフの震源断層域で見られる可能性がある現象	1
3. 防災対応を検討するケース	2
4. 各検討ケースを評価するための前提条件	4
5. 各検討ケースに対する評価手法と評価例	5
(1) ケース 1 に対する評価手法と評価例	5
(2) ケース 2 に対する評価手法と評価例	10
(3) ケース 3 に対する評価手法と評価例	14
(4) ケース 4 に対する評価手法と評価例	16

1. 基本的な考え方

南海トラフの震源断層域で何らかの現象の変化が見られた場合、時々刻々と変化していく状況に対して、リアルタイムの観測データの収集と即時的な解析に基づく現象の評価が求められる。

しかしながら、現時点では、その現象の評価手法や手順、具体的な評価内容が整理されておらず、最新の科学的知見に基づく評価手法等を予め整理しておく必要がある。

本調査部会では、南海トラフの震源断層域で見られる可能性がある現象を整理した上で、大規模地震の発生に多様性がある南海トラフ沿いで観測される可能性が高く、かつ大規模地震につながる可能性がある現象として社会が混乱するおそれがあると思われる事例として事務局が提示した典型的な4つのケースについて、その評価手法と評価例を整理した。

2. 南海トラフの震源断層域で見られる可能性がある現象

南海トラフ沿いで見られる可能性がある現象については、以下のとおり整理される。

- 南海トラフ沿いで発生する大規模地震には多様性があり、駿河湾から日向灘にかけての複数の領域での同時発生や、時間差をおいて発生するなどの様々な場合がある。最近の2事例（1854年の安政東海地震、1944年の昭和東南海地震）では、震源断層域の西側に隣接したプレート境界面で引き続いて大規模地震が発生しており、今後、南海トラフ沿いで大規模地震が発生した場合にも、その震源断層域の周辺で引き続いて大規模地震が発生する可能性が考えられる。
- 歴史資料から見ると、1944年の昭和東南海地震、1946年の昭和南海地震の発生前に前震と考えられる比較的規模の大きな地震が発生した記録はないが、南海トラフ沿いで過去に発生した大規模地震の多様性を考えると、東北地方太平洋沖地震の2日前に発生したようなM7クラスの比較的規模の大きな地震が、南海トラフ沿いの大規模地震前に発生する場合が考えられる。
- 南海トラフ沿いのプレート境界面で発生する地震は、東北地方太平洋沖地震が発生した日本海溝沿いの領域と比べると、相対的に固有地震モデル

に近い可能性があり、その場合には、前駆すべりが生じる可能性が相対的に高いと考えられる。

- 一方、最近の海上保安庁による海底地殻変動観測の結果により、南海トラフ沿いのプレート境界面においても日本海溝沿いの領域と同様に固着の弱いところが部分的に存在していることが判明した。このような領域では、東北地方太平洋沖地震の震源断層域内で見られたゆっくりすべりや前震活動などの現象が観測される場合が考えられる。
- プレート境界面のすべりを捉えるための観測網が整備されている地域は限られていることなどから、現在のところ、大規模地震の前駆すべりと評価できる確実な観測事例は確認されていない。しかし、大規模地震の発生に関するシミュレーションによると、すべりが次第に進行した後に大規模地震の発生につながる事例も得られており、同様の変動が南海トラフ沿いにおいて観測される場合が考えられる。

3. 防災対応を検討するケース

南海トラフの震源断層域で見られる可能性がある現象の整理を踏まえ、大規模地震の発生に多様性がある南海トラフ沿いで観測される可能性が高く、かつ大規模地震につながる可能性がある現象として社会が混乱するおそれがあると思われる事例の中で、事務局より提起された次の4つの典型的なケースについて検討した。ただし、将来、ここで検討したケース以外の現象が発生する可能性があることに留意する必要がある。

[ケース1]

南海トラフの東側の領域で発生した大規模地震の直近2事例（1854年の安政東海地震、1944年の昭和東南海地震）では、それぞれ32時間後^{※1}、2年後に残る西側の領域で大規模地震が発生しており、それ以前の記録が残る7事例の大規模地震についても、同時あるいは続けて発生した可能性がある^{※2}とされている。このような歴史的事実が知られている中、南海トラフの東側の領域で大規模地震が発生した場合^{※2}を想定する。

※1 最近の調査では、30時間後との結果も報告されている

※2 南海トラフにおいては、過去に西側の領域が先に破壊した明確な事

例は確認されていないが、その可能性を否定するものではないことに留意

[ケース 2]

南海トラフ沿いで M7 クラスの地震が発生した後に、より大規模な M8 クラスの地震が発生した事例は確認されていないものの、東北地方太平洋沖地震が発生した際は、その 2 日前に M7 クラスの地震が発生していた。このようなことが知られている中、南海トラフ沿いで M7 クラスの地震が発生した場合を想定する。

[ケース 3]

東北地方太平洋沖地震が発生した際には、先行してゆっくりすべりや前震活動などの様々な現象が観測された。このようなことが知られている中、南海トラフ沿いでこれと同様の現象が多種目で観測されている場合を想定する。

[ケース 4]

現在、気象庁では東海地域において、ひずみ計を用いてプレート境界面でのすべりを監視しており、基準を超えたひずみ計の変化を捉えた場合は、地震予知情報等を発表することとしている。この監視の対象となっているようなプレート境界面で大きなすべりが観測され、前例のない事例として学術的に注目され、社会的にも関心を集めた場合を想定する。具体的には、東海地震予知情報の判定基準とされるようなプレート境界面での前駆すべりや、これまで観測されることがないような大きなゆっくりすべりが見られた場合を想定する。

本調査部会では、これら 4 つの典型的なケースに基づき、現状の科学的知見から可能な各ケースにおける評価手法と評価例を整理した。ただし、現時点では科学的に確立した手法はなく、飽くまで暫定的な手法に留まることに留意する必要がある。

4. 各検討ケースを評価するための前提条件

大規模地震の発生の可能性を評価するに当たっては、地震活動や地殻変動等をリアルタイムでモニタリングし、科学的な知見を総合して検討することが肝要である。仮に顕著な変化を検出した際には、直ちにその変化に対する評価を行う必要がある。この際、何らかの社会的な対応を講じることを視野に大規模地震が発生する可能性が高まったと評価した際には、現象の推移を見守るとともに、その可能性が低くなったか否かについても評価することが必須となる。

このためには、リアルタイムのモニタリングによる変化の検出方法とその基準、地震発生の可能性が高まったとの判定手法とその基準、低くなったとの判定手法とその基準を、予め検討し定めておく必要がある。

現実に様々な現象が検知され、その評価を行うには、常にリアルタイムでの現象のモニタリングを行い、顕著な変化を検出した際には、直ちにその変化に対する評価が行える体制を構築することが必須となる。また、定期的に観測データを総合的に評価するとともに、その基準や評価手法等についても適時、点検・見直しが行える体制としておくことが肝要である。

なお、今回整理した各検討ケースに対する評価手法と評価例は、リアルタイムのモニタリングの手法とその基準等を検討する体制が整備されていると同時に、リアルタイムのモニタリングの実施体制と速やかな評価体制が構築されていることを前提としていることに留意する必要がある。

5. 各検討ケースに対する評価手法と評価例

(1) ケース 1 に対する評価手法と評価例

南海トラフの東側の領域で発生した大規模地震の直近 2 事例（1854 年の安政東海地震、1944 年の昭和東南海地震）では、それぞれ 32 時間後^{※1}、2 年後に残る西側の領域で大規模地震が発生しており、それ以前の記録が残る 7 事例の大規模地震についても、同時あるいは続けて発生した可能性があると考えられている。このような歴史的事実が知られている中、南海トラフの東側の領域で大規模地震が発生した場合^{※2}を想定する。

※1 最近の調査では、30 時間後との結果も報告されている

※2 南海トラフにおいては、過去に西側の領域が先に破壊した明確な事例は確認されていないが、その可能性を否定するものではないことに留意

○発生した地震の破壊域（震源断層域）とすべり領域の拡大等の即時的な評価

- ・地震観測及び地殻変動観測の結果から断層の破壊域を推定【図 1 参照】
- ・南海トラフ沿いの震源断層域における割れ残り領域の評価（割れ残り領域が破壊する大規模地震が発生した場合の地震の規模、震度分布、津波高の推計を含む）
- ・地震観測及び地殻変動観測により余震活動、余効変動を把握し、その状況の標準的な収束傾向との比較・評価【図 2 参照】
- ・併せて、参考としてクーロン応力変化による地震活動の促進域・抑制域の把握と、観測された地震活動や地殻変動との対比による評価【図 3 参照】

○最新の地震活動に基づく地震発生確率の算出

- ・最新の地震活動に基づき、時空間 ETAS などの統計モデルを用い、震源断層域、周辺域及び割れ残り領域における大規模地震の発生確率を参考として算出（前震活動かどうかの確率算出を含む）【図 4 参照】
- ・地震活動の推移に併せて逐次計算を実施し、最新の地震発生確率を算出

○リアルタイムデータ解析とシミュレーション等による現象の理解

- ・複数のモデルを用い、パラメータ等を変化させて、余効すべりの推移等を計算・可視化するシミュレーションを参考として実施
- ・シミュレーション結果と観測データを比較し、プレート境界面におけるすべりの状況の理解を深めるとともに、今後の推移の可能性についてシミュレーション結果を基に評価

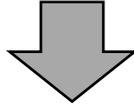
○過去の大規模地震発生統計データに基づく評価

- ・南海トラフで部分的に割れた大規模地震の最新 2 事例（1854 年の安政東海

地震、1944年の昭和東南海地震)では、残る領域で大規模地震が発生している。684年以降に発生した大規模地震7例についても、正確な地震の発生前隔は不明であるが、同時あるいは続けて発生した可能性がある【図5参照】

- ・これら過去の事例から見ると、南海トラフの東側の領域が破壊する大規模地震が発生すると、引き続いて西側の領域でも大規模地震が発生する可能性が高い。
- ・南海トラフの西側の領域で大規模地震が発生するまでの期間にはバラつきがあるが、海溝型地震以外を含む全世界で1900年以降に発生した過去の大規模地震の統計データから、M8.0以上の大規模地震(96事例)の後、隣接領域で発生した地震のマグニチュード±1.0の地震が発生した事例は、最初の3日間が10事例、4日目～7日目が2事例となっており、全体の傾向からは大森・宇津公式に従うと見なすことができる【図6参照】
- ・西側の領域で大規模地震が発生する場合、その規模や発生時期等について確度の高い予測は困難であるが、大森・宇津公式に従うとすると、最初の地震発生から2年経過した期間(731～1095日)を基準とした場合の1日当たりの発生確率の相対的な確率利得は、地震直後から3日程度は約100倍以上と極めて高く、以降1週間程度は約50倍以上、2週間程度は約30倍以上と依然として特段に高い状態にあると考えられる【図7参照】
- ・以降、西側の領域での大規模地震発生の可能性は、時間の経過とともに次第に低減し、約2週間を超えると相対的な確率利得は、地震発生直後の約230倍と比べ約1/8である約30倍以下となり、約2か月を超えると約10倍以下となる。
- ・時間が経過すると、短期的な確率は小さくなるが、地震の発生のおそれが高くなったためではないことを十分強調することが必要。
- ・なお、これらの数値は数少ないデータから導いた結果であり、誤差を含むことに留意する必要がある。
- ・西側の領域での大規模地震の発生の可能性が特段に高い2週間程度が経過した後においても、南海トラフ沿いでは、過去に東側の領域で大規模地震が発生した場合、西側の領域で数年後に大規模地震が発生している事例もあることに留意する必要がある。

※現象は時々刻々と変化していくため、リアルタイムの観測データの収集と即時的な解析を継続的に実施し、現象の変化の把握に努め、適時的確な情報の発表に努めることが重要である。



[ケース 1 で想定される評価例]

南海トラフの東側の領域で Mw8.6 (仮) の地震が発生 (地震発生直後)

- ・ 震度、津波、今後の地震活動 (内陸地震を含む) 等への警戒の呼びかけ
- ・ 南海トラフの西側の領域は破壊されず割れ残っており、この領域で地震が発生すると、Mw8.6 (仮) の大規模地震となる可能性がある。
- ・ 西側の領域で想定される大規模地震が発生した場合の震度分布、津波高の推計結果に基づく警戒の呼びかけ
- ・ 地震活動や地殻変動の進行状況の評価と地震発生確率の算出
 - ― 地震が発生した東側の領域の地震活動や地殻変動に加え、西側の領域で想定される震源域との境界付近の領域における地震活動と地殻変動の状況を把握し、活動の集中や拡大が見られているか否かを評価
 - ― プレート境界面のすべりの進行状況に関するシミュレーションモデルと観測記録との比較による現象の理解と把握
 - ― 西側で想定される震源域との境界付近における地震発生確率の算出 (前震活動かどうかの事前評価も含む)
- ・ 現在進行している現象から、東側と西側の震源断層域の境界付近での応力が高まった状態にあると考えられる。
- ・ 南海トラフで東側の領域で発生した大規模地震の最新 2 事例 (1854 年の安政東海地震、1944 年の昭和東南海地震) では、それぞれ 32 時間後、2 年後に残る西側の領域で大規模地震が発生しており、それ以前の記録が残る 7 事例の大規模地震についても、同時あるいは続けて発生した可能性があると考えられている。このため、東側の領域で発生した大規模地震に引き続き、西側の領域で大規模地震が発生する可能性は高い。
- ・ 西側の領域で大規模地震が発生する時期及びその規模を確度高く予測することは困難であるが、大森・宇津公式に従うとしてその可能性を評価すると、最初の地震から 2 年経過 (731~1095 日) した期間を基準とした場合、東側の地震直後から 3 日程度は相対的な確率利得が約 100 倍以上と極めて高く、以降 1 週間程度は約 50 倍以上、2 週間程度は約 30 倍以上と依然として特段に高い状態にある。
- ・ ただし、南海トラフ沿いでは、過去に東側の領域で大規模地震が発生した場合、西側の領域で数年後に大規模地震が発生している事例もあることに留意することが肝要である。

[ケース 1 で想定される評価例]：東側の地震直後に比べて地震発生の可能性が
特段に高い状態ではなくなった時点（※）

南海トラフの東側の領域で Mw8.6（仮）の地震が発生（大規模地震が発生しな
いまま 2 週間程度が経過）

- ・南海トラフの東側の領域を震源断層域とする大規模地震による余震、津波等
への警戒の呼びかけ（内陸地震を含む）
- ・地震活動や地殻変動の進行状況の評価と地震発生確率の算出

－地震が発生した東側の領域の地震活動や地殻変動に加え、西側で想定さ
れる震源域との境界付近の領域における地震活動と地殻変動の状況を把
握し、活動の集中や拡大が見られているか否かを評価

⇒（例）地震活動や地殻変動は次第に低減し、それらは東側を震源断
層域とする余震活動と余効変動によるものと評価され、かつ
西側の震源断層域に地震活動や地殻変動が拡大していない。

－プレート境界面のすべりの進行状況に関するシミュレーションモデルと
観測記録との比較による現象の理解と把握

⇒（例）シミュレーションによる解析でも西側へのすべりの拡大が想
定されていない。

－西側で想定される震源域との境界付近における地震発生確率の算出

⇒（例）地震確率の計算から見ると、西側の領域で大規模地震が発生
する 1 日当たりの確率は、東側の地震発生直後に比べて低く
なっているが、2～3 年以内の確率は依然として高い。

- ・南海トラフの西側の領域で発生する大規模地震の規模、発生時期等について
確度の高い予測は困難であるが、大森・宇津公式に従うとすると、大規模地
震が発生する可能性が特段高い期間は過ぎ、相対的な確率利得は、地震発生
直後の約 230 倍と比べ約 1/8 である約 30 倍以下となっている。
- ・西側の領域での大規模地震の発生については、その可能性が特段に高い期間
は経過したものの、南海トラフで東側の領域で発生した大規模地震の最新 2
事例（1854 年の安政東海地震、1944 年の昭和東南海地震）では、それぞれ
32 時間後、2 年後に残る西側の領域で大規模地震が発生しており、それ以
前の記録が残る 7 事例の大規模地震についても、同時あるいは続けて発生
した可能性があるとされている。このため、今後、いつ地震が発生するか分
からないことに留意し対応する必要がある。

(注) 西側の領域が破壊したケースの対応は、基本的に上記の東側の領域が破壊
したケースに倣うが、過去の歴史において西側の領域の破壊が先行した

例は確認されていない。現実にこのような事例が発生した場合、この旨を示し情報提供する等の対応が必要である。

※少なくとも地震活動の変化や地殻変動が活発な状態が続いている時点や、標準的な収束傾向とは異なる傾向で進行している時点では、評価の見直しは行わず、引き続き活動の推移を厳重にモニタリングする。

(2) ケース 2 に対する評価手法と評価例

南海トラフ沿いで M7 クラスの地震が発生した後に、より大規模な M8 クラスの地震が発生した事例は確認されてはいないものの、東北地方太平洋沖地震が発生した際は、その 2 日前に M7 クラスの地震が発生していた。このようなことが知られている中、南海トラフ沿いで M7 クラスの地震が発生した場合を想定する。

○発生した地震の破壊域（震源断層域）とすべり領域の拡大等の即時的な評価

・地震活動及び地殻変動のモニタリング結果から断層の破壊域を推定【図 1 参照】

- ・発生した地震がプレート境界面のすべりによるものか否かを評価
- ・地震観測及び地殻変動観測により余震活動、余効変動を把握し、その状況の標準的な収束傾向との比較し、その拡大の有無を評価【図 2 参照】
(例) 東北地方太平洋沖地震の直前の地殻変動等
- ・同時に、観測されている地殻変動がプレート境界面のすべりによるものか否かを評価
- ・参考としてクーロン応力変化による地震活動や地殻変動の促進域・抑制域の把握と、観測された地震活動や地殻変動との対比による評価【図 8 参照】
- ・引き続き発生している地震活動を含め、これら地震が前震である可能性があるか否かを評価
- ・仮に前震であるとした場合、その後発生する可能性のある大規模地震の規模、震度分布、津波高等を推定

○最新の地震活動に基づく地震発生確率の算出

- ・最新の地震活動に基づき、時空間 ETAS などの統計モデルを用い、震源断層域、周辺域及び割れ残った領域における大規模地震の発生確率を参考として算出【図 9 参照】
- ・地震活動の推移に併せて逐次計算を実施し、最新の地震発生確率を算出
- ・前震である可能性を評価し、大規模地震が連続する確率を算出

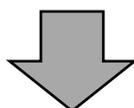
○リアルタイムデータ解析とシミュレーション等による現象の理解

- ・複数のモデルを用い、パラメータ等を変化させて、余効すべりの推移等を計算・可視化するシミュレーションを参考として実施
- ・シミュレーション結果と観測データを比較し、プレート境界面におけるすべりの状況の理解を深めるとともに、今後の推移の可能性についてシミュレーション結果を基に評価

○過去の大規模地震発生統計データに基づく評価

- ・南海トラフ沿いで過去に発生した大規模地震について、M7 クラスの比較的規模の大きな地震後に大規模地震が発生した事例は確認されていない。ただし、近代的な観測体制が整備されて以降に発生した南海トラフ沿いの大規模地震は、1944年の昭和東南海地震、1946年の昭和南海地震のみであり、この事例のみでM7クラスの比較的規模の大きな地震が大規模地震前に起きないと判断することはできない。
- ・海溝型地震以外を含む全世界で1900年以降に発生した比較的規模の大きな地震の統計データから、最初のM7.0以上の地震(1,368事例)が発生後に、更に同規模以上の地震が同じ領域で発生する事例は7日以内に24事例、8日目以降3年以内に32事例である。
- ・M7クラスの地震が前震となる場合、更に同規模以上の地震が発生するまでの期間は大森・宇津公式に従うと見なすことができる【図10参照】。
- ・比較的規模の大きな地震に引き続き、更に同規模以上の地震が発生するか否かについて確度の高い予測は困難であるが、発生した地震を仮に前震とした場合(4%程度の事例に該当するとした場合)、大森・宇津公式に従うとすると、更に同規模以上の地震が発生する可能性は、最初の地震から2年経過した期間(731~1095日)を基準とした場合の1日当たりの発生確率の相対的な確率利得は、地震直後から5日間程度は約100倍以上と極めて高く、2週間程度は約40倍以上と依然として特段に高い状態にあると思われる。【図11参照】
- ・以降、時間の経過とともに大規模地震の発生の可能性は低減し、約2週間を超えると相対的な確率利得は、地震発生直後の約400倍と比べ1/10である約40倍以下となり、約2か月を超えると約10倍以下となる。
- ・時間が経過すると、短期的な確率は小さくなるが、地震の発生のおそれが高くなったためではないことを十分強調することが必要。
- ・なお、これらの数値は数少ないデータから導いた結果であり、誤差を含むことに留意する必要がある。
- ・過去の事例から見ると、比較的規模の大きな地震に引き続き、同規模以上の地震が発生する可能性は、元来4%程度と低いことから、仮に前震とした場合に特段発生の可能性が高いと考えられる2週間程度の期間を経た以降は、比較的規模の大きな地震に引き続き同規模以上の地震が発生する可能性は低くなったと整理することが適切である。
- ・ただし、3年以内に更に同規模以上の地震が起こった事例のうち、半数は2週間以降に発生していることに注意を促すことも必要である【図10参照】。

※現象は時々刻々と変化していくため、リアルタイムの観測データの収集と即時的な解析を継続的に実施し、現象の変化の把握に努め、適時的確な情報の発表に努めることが重要である。



[ケース2で想定される評価例]

南海トラフの震源断層域内で Mw7.5 (仮) の地震が発生 (地震発生直後)

- ・震度、津波、今後の地震活動 (内陸地震を含む) 等への警戒の呼びかけ
- ・南海トラフで M8 クラスの地震が発生した場合に想定されている震度分布、津波高を示し、警戒を呼びかけ
- ・地震活動や地殻変動の進行状況の評価と地震発生確率の算出

- －地震発生領域周辺の地震活動と地殻変動の状況と標準的な収束傾向との比較
- －シミュレーションを用いたプレート境界面の余効的なすべりの進行の把握
- －地震発生領域の周辺における地震発生確率の算出 (前震活動かどうかの事前評価も含む)

- ・M7 クラスの地震後に、更に同規模以上の地震が発生する割合は3年以内に4%程度であるが、今回の地震が前震となって、今後、更に同規模以上の地震が発生する可能性があることから、地震活動と地殻変動の推移を厳重にモニタリングする必要がある。
- ・今回の地震が仮に前震となって更に同規模以上の地震が発生する場合、その規模や発生時期を確度高く予測することは困難であるが、大森・宇津公式に従うとしてその可能性を評価すると、最初の地震直後から2年経過した期間 (731~1095日) を基準とした場合、今後2週間程度で大規模地震が発生する相対的な確率利得は約40倍以上、特に最初の5日間程度は約100倍以上となり、今回発生した地震に引き続き大規模な地震が発生する可能性が高い。

[ケース2で想定される評価例]：発生可能性が低くなった場合（※）

Mw7.5（仮）に引き続き大規模地震が発生しないまま1～2週間程度が経過

- ・余震への警戒の呼びかけ（内陸地震を含む）
 - ・地震活動や地殻変動の進行状況の評価と地震発生確率の算出
- －地震発生領域の地震活動や地震活動と地殻変動の状況を把握し、活動の集中や拡大が見られているか否かを評価
 - ⇒（例）地震活動や地殻変動は次第に低減し、それらは余震活動と余効変動によるものと評価され、活動領域の拡大は見られていない。
 - －シミュレーションを用いたプレート境界面の余効的なすべりの進行の把握
 - ⇒（例）シミュレーションによるモデルでも引き続きの大規模地震につながるすべりの拡大は見られてない。
 - －西側の震源断層域との境界付近における地震発生確率の算出
 - ⇒（例）地震活動は次第に低減しており、1日当たりの地震の発生確率も地震発生直後に比べ低くなっている。ただし、今後2～3年以内に起こる確率はM7クラス発生前に比べて依然として高い。
- ・現在の地震活動と地殻変動の状況から見ると、今回発生した地震の後にすべりが拡大しているような状況は見られていない。
 - ・比較的規模の大きな地震に引き続き、更に同規模以上の地震が発生するか否かについて確度の高い予測は困難であるが、今回の地震が仮に前震であるとして、大森・宇津公式に従うとすると、更に同規模以上の地震が発生する可能性が特段に高い期間は過ぎ、相対的な確率利得は、地震発生直後の約400倍と比べ1/10である約40倍以下となっている。
 - ・過去の事例から見ると、比較的規模の大きな地震に引き続き同規模以上の地震が発生する可能性は、元来4%程度と低いことから、仮に前震とした場合に更に同規模以上の地震の発生する可能性が特段高い2週間程度の期間を経た以降は、その可能性は低くなったものと考えられる。
 - ・ただし、この場合においても、3年以内に同規模以上の地震が起こった事例のうち半数は2週間以降に発生しており、今後、地震はいつ発生するかわからないことに留意しておく必要がある。
- ※少なくとも地震活動の変化や地殻変動が活発な状態が続いている時点や、標準的な収束傾向とは異なる傾向で進行している時点では、評価の見直しは行わず、引き続き活動の推移を厳重にモニタリングする。

(3) ケース3に対する評価手法と評価例

東北地方太平洋沖地震が発生した際には、先行してゆっくりすべりや前震活動などの様々な現象が観測された。このようなことが知られている中、南海トラフ沿いでこれと同様の現象が多種目で観測されている場合を想定する。

○観測されている現象の即時的な評価（地震活動と地殻変動に関連する場合）

- ・地震活動及び地殻変動のモニタリングにより、低周波地震（微動）とゆっくりすべりとの対応など、既に確認されているプレート境界面における地震活動と地殻変動の対応を評価
 - ・プレート間の固着状態の変化を示唆する現象かを評価
 - ・シミュレーションを用いた現象の再現による評価
- ⇒ ひずみの大きな変化が見られた場合は、ケース4へ

○最新の地震活動に基づく地震発生確率の算出

- ・最新の地震活動に基づき、時空間 ETAS などの統計モデルを用い、南海トラフ及びその周辺における大規模地震の発生確率を参考として算出（前震活動かどうかの確率算出を含む）
 - ・地震活動の推移に併せて逐次計算を実施し、最新の地震発生確率を参考として算出
- ⇒ 南海トラフの片側で大規模地震が発生した場合は、ケース1へ
⇒ 比較的規模の大きな地震が発生した場合は、ケース2へ

○過去の大規模地震で先行して観測された現象との比較

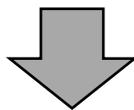
- ・東北地方太平洋沖地震等で先行して観測された多数の現象との比較【図12、13参照】

○リアルタイムデータ解析とシミュレーション等による現象の理解

- ・地殻変動が見られている場合は、複数のモデルを用い、パラメータ等を変化させて、余効すべりの推移等を計算・可視化するシミュレーションを参考として実施
- ・シミュレーション結果と観測データを比較し、プレート境界面におけるすべりの状況の理解を深めるとともに、今後の推移の可能性についてシミュレーション結果を基に評価

※現象は時々刻々と変化していくため、リアルタイムの観測データの収集と即

時的な解析を継続的に実施し、現象の変化の把握に努め、適時的確な情報の発表に努めることが重要である。



[ケース3で想定される評価例]

東北地方太平洋沖地震の先行現象と同様の現象が多種目で観測される

- ・観測されている現象について、東北地方太平洋沖地震で先行して見られた現象との比較・評価を実施。
 - ⇒ 比較的規模の大きな地震が発生した場合は、ケース2へ
- ・地殻変動が観測されている場合には、その変化が想定震源域内のプレート境界面のすべりによるものか否かを評価し、そのすべりの変化をモニタリング。
 - ⇒ ひずみの大きな変化が見られた場合は、ケース4へ
- ・東北地方太平洋沖地震では、先行して観測された現象が5種目以上となつてから地震の発生までに数年以上の期間を要した。
- ・現在観測されている現象から、直ちに南海トラフ沿いで大規模地震が発生するか否かを判断することはできない。
- ・ただし、これらの現象は、南海トラフ沿いにおけるプレート間の固着状態の変化を示唆する現象である可能性が高く、大規模地震が発生する可能性がふだんよりも高まっている状態にあると考えられる。
- ・今後、大規模地震の前震となるような比較的規模の大きな地震の発生やプレート境界面のすべりの拡大に引き続き、大規模地震の前駆すべりに発展する可能性もあるため、南海トラフ沿いの地震活動及び地殻変動の状況等を注意深くモニタリングする必要がある。

※平時からのモニタリングにより、顕著な変化が見られる場合にはリアルタイムで評価を行うことが重要である。また、この評価は、短期的な観点のみならず、長期的観点から行うことも重要である。

(4) ケース4に対する評価手法と評価例

現在、気象庁では東海地域において、ひずみ計を用いてプレート境界面でのすべりを監視しており、基準を超えたひずみ計の変化を捉えた場合は、地震予知情報等を発表することとしている。この監視の対象となっているようなプレート境界面で大きなすべりが観測され、前例のない事例として学術的に注目され、社会的にも関心を集めた場合を想定する。具体的には、東海地震予知情報の判定基準とされるようなプレート境界面での前駆すべりや、これまで観測されたことがないような大きなゆっくりすべりが見られた場合を想定する。

○プレート境界面上のすべりの即時的な推定

- ・観測されているひずみ変化から、南海トラフのプレート境界面上のゆっくりすべりの位置及び規模を推定

○プレート境界面上のすべり領域の拡大等の即時的な評価

- ・地震観測及び地殻変動観測により地震活動、プレート境界面上のすべり等を把握し、その領域の拡大や移動及び現象の加速の有無を評価【図14参照】
 - ⇒ 南海トラフの片側で大規模地震が発生した場合は、ケース1へ
 - ⇒ 比較的規模の大きな地震が発生した場合は、ケース2へ

※仮にプレート境界面上のすべりがM7程度の規模で発生したとしても、過去に繰り返しゆっくりすべりが観測されている場所であれば、同規模の地震が発生した場合（ケース2）と比較して応力降下量が小さいため、応力が解放される領域が広く、その後の地震発生に及ぼす影響が異なることから、ケース2と同様の現象として扱うことはできない。なお、これまでゆっくりすべりが見られていない場所で、ゆっくりすべりの拡大あるいは加速が見られた場合は、その他の場所でのゆっくりすべりに比べ、定性的には、地震発生の可能性が高まっていると言えるが、現時点ではその後の地震発生に及ぼす影響は定量的に評価できず不明であることに留意が必要である。【図15参照】

○リアルタイムデータ解析とシミュレーション等による現象の理解

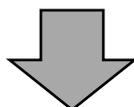
- ・複数のモデルを用い、パラメータ等を変化させて、すべりの推移等を計算・可視化するシミュレーションを参考として実施
- ・シミュレーション結果と観測データを比較し、プレート境界面におけるすべりの状況の理解を深めるとともに、今後の推移の可能性についてシミュレーション結果を基に評価【図16、17参照】

○地震発生の可能性に対する評価

- ここで想定したプレート境界面での大きなすべりは、現在実施されている幾つかのシミュレーションモデルにおいて、大規模な地震が発生する前に想定される現象であるが、現在のところ実際に観測された事例はない。
- プレート境界面で大きなすべりが観測された場合には、大規模地震発生の可能性が相対的に高まっており、すべりが更に進行すると、南海トラフ沿いの大規模地震の発生に至る可能性が考えられる。
- シミュレーションによると、大規模地震が発生する前に大きなすべりが現れる事例もある一方、大きなすべりが見られても地震が発生していない事例や、小さなすべりで地震が発生している事例もある。それぞれの事例は、採用するモデルやパラメータの取り方に大きく依存しており、現時点ではこれらに関する知見が十分でないことから各事例の発生確率を定量的に言うことはできない。
- 仮にモデルで想定されるものと同様の大きなすべりや速度変化が実際に観測された場合、多くの専門家が「大規模地震が発生する可能性が非常に高まっているのではないか」と懸念すると思われるが、現時点において、変化の大きさやその速度から地震発生の可能性の高まりの程度について定量的に評価する科学的な基準も手法もなく、プレート間の固着状態の変化の大きさやその速度をもとに、地震発生の可能性の高まりの程度を評価することはできないのが実情である。
- すなわち、現時点では、プレート間の固着状態の変化の大きさがどの程度になれば地震が発生するのか、変化が加速し始めてどの程度の時間で地震が発生するのか等も評価することはできない。
- 一方、変化が収まった場合には、すべりが生じている時期と比較すると、一定の時間が経過した後は、地震を発生させる可能性は低減したとみなすことができる。
- この場合においても、地震発生の可能性を定量的に評価することはできず、いつ地震が発生するか、わからないことに留意する必要がある。
- なお、これらプレート間の固着状態の変化の大きさ等に基づく評価は、過去の観測事例も少なく統計的な評価もできないのが実情である。
- 今後、地震発生予測に関する技術を確立するためには、プレート間の固着状態の変化を検出し評価することが極めて基本的かつ重要であり、過去に観測されたことがない大きなすべりが観測された場合を含め、大規模地震が発生する可能性を如何に評価するかについての調査研究を、今後も継続的に実施する必要がある。
- 実際にここで想定されたような現象が観測された場合には、上述のように、

リアルタイムでのモニタリングによりその現象を周辺の観測データを含めて解析し、プレート境界面で何が起きているかを評価し、その結果をリアルタイム的に情報として示すことが不可欠となる。

※現象は時々刻々と変化していくため、リアルタイムの観測データの収集と即時的な解析を継続的に実施し、現象の変化の把握に努め、適時的確な情報の発表に努めることが重要である。



[ケース4で想定される評価例]

複数のひずみ計及び地殻変動の観測で大きな変化を観測

- ・複数のひずみ計及び地殻変動の観測で、過去に観測されたことがない、大きな変化を観測
- ・観測されている地殻変動のデータの変化が、想定震源域内でのプレート境界面のすべりによるものか否か、その領域と規模を直ちに推定
- ・すべりの位置とその大きさとすべり速度を推定
- ・変化の様子を厳重にモニタリングすると同時に、モニタリング結果とその評価を、最新の調査・研究成果も踏まえてリアルタイム的に情報として発表し、警戒を呼び掛ける。
- ・この際、大規模地震の発生に至るすべりかどうかを定量的に評価する手法も基準もなく、地震が発生しない可能性があることについても言及。

※ひずみ計及び地殻変動の観測データ、地震観測データ等、リアルタイムの観測データの収集と即時的な解析を継続的に実施し、発生している現象の現状及びその変化を適時適切に情報発表することが重要である。

※定量的な評価手法や基準がない状況においても、観測データの変化の原因を評価すると同時に、大規模な地震の発生の可能性が高まったとの評価、大規模地震の発生の可能性が低くなったとの評価を検討できる体制を構築することが必須である。

注) 実際に、南海トラフの片側で大規模地震が発生した場合はケース1へ、比較的規模の大きな地震が発生した場合はケース2へ移行する。その場合には、すべり領域の拡大等を継続的に評価するため、ひずみ計による観測が重要となる。

(別添資料 図表集)

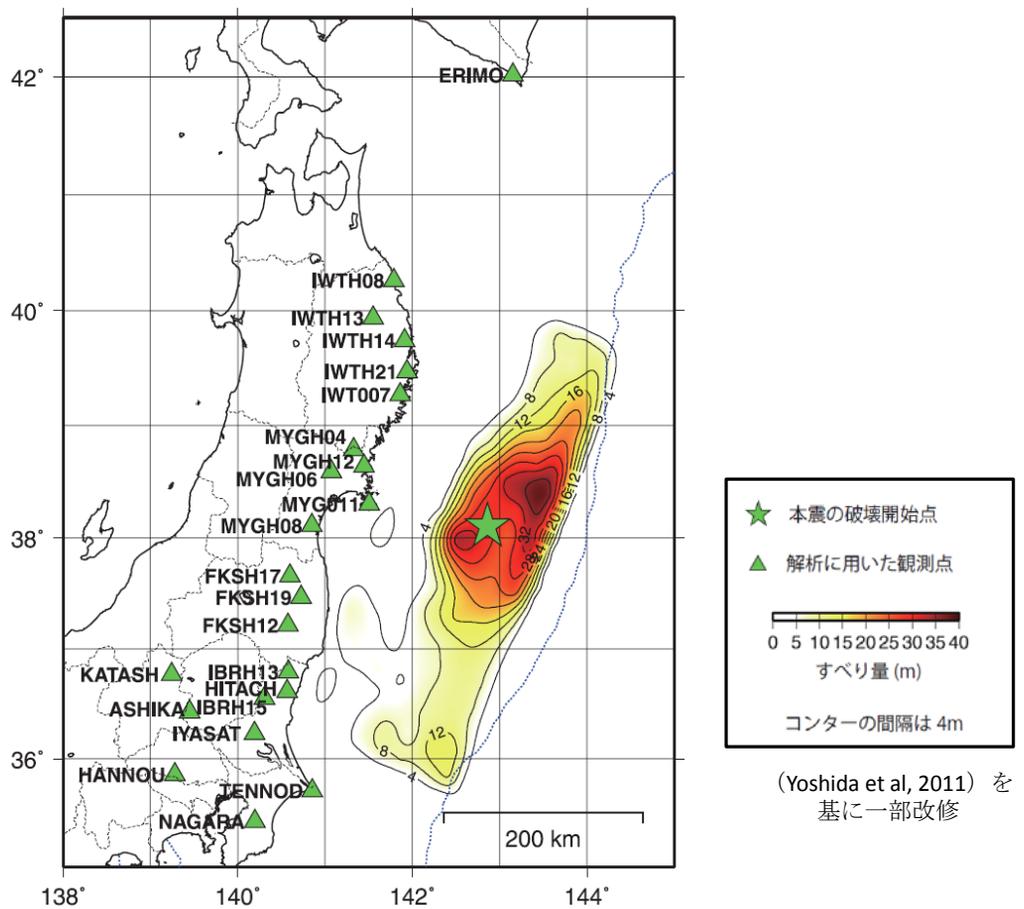


図1. 2011年東北地方太平洋沖地震時のすべり量分布

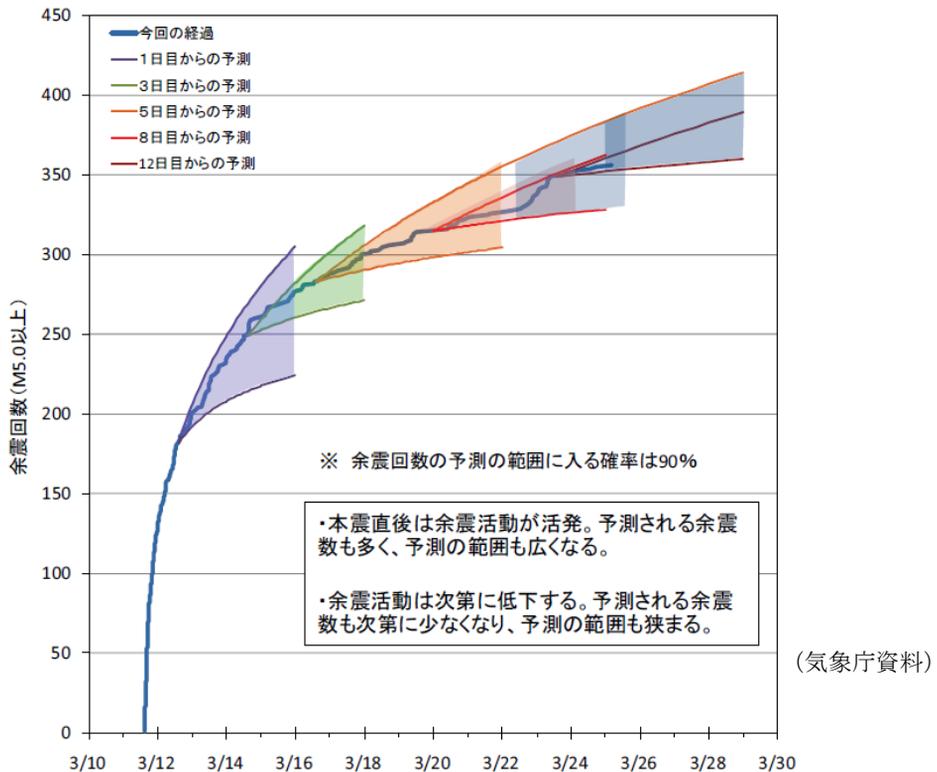


図2. 2011年東北地方太平洋沖地震の余震活動の経過と検証

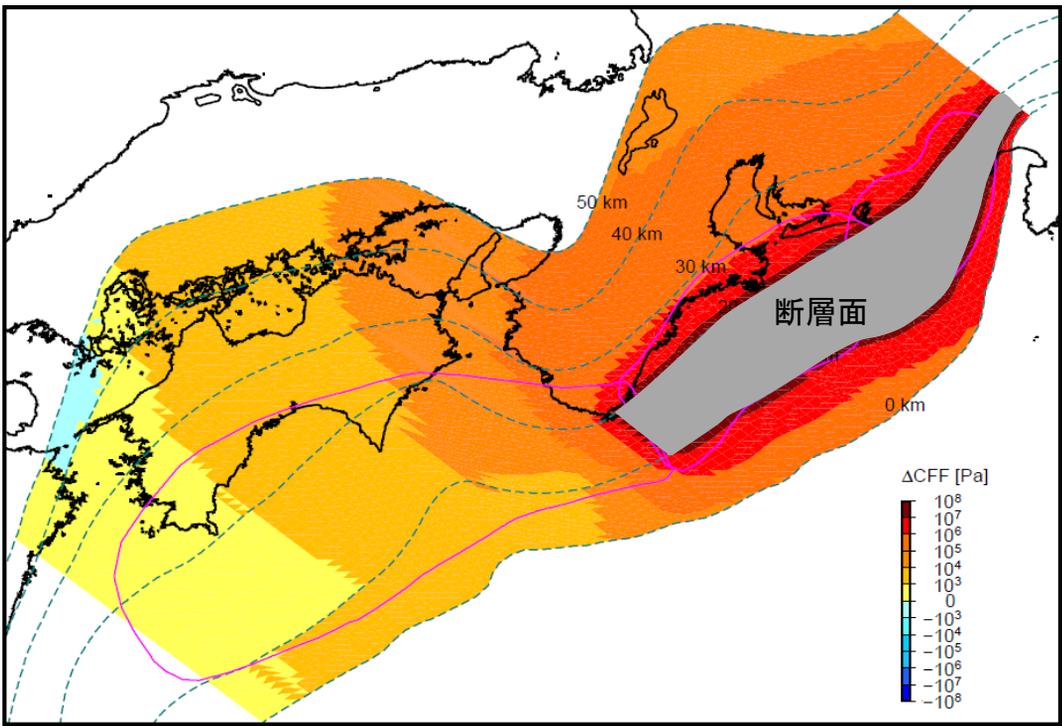


図3. 東海地震(M8.4)を想定したクーロン応力変化

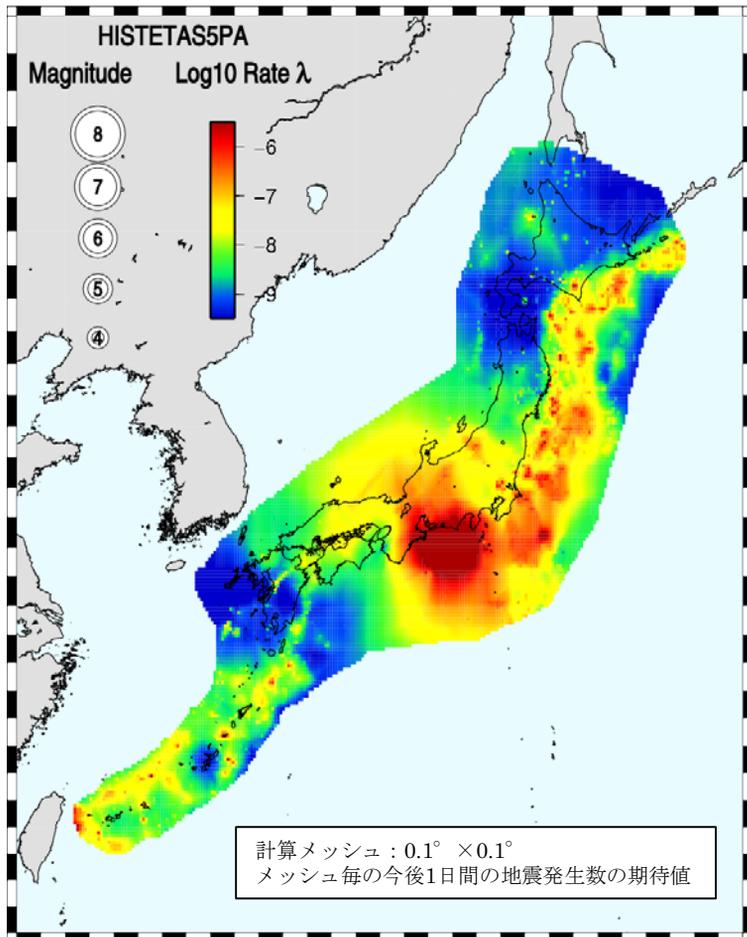


図4. 東海地震(M8.4)を想定した時空間ETAS結果

3. 南海トラフで発生する地震の多様性について

歴史記録によると、南海トラフで発生した大地震は、白鳳(天武)地震(684年)まで遡って確認されている。図2に、白鳳(天武)地震が発生した684年から現在までの約1,400年間に、南海トラフで発生した大地震の震源域の時空間分布図を示す。南海地域(評価対象領域のうち、潮岬の西側の領域)と東海地域(評価対象領域のうち、潮岬の東側の領域)で、若干の時間差(数年以内)をおいて地震が発生することがある。この場合は同じ地震サイクルの中で発生したと見なし、今回の評価では、南海トラフにおいて少なくとも9回の大地震サイクルがあった可能性が高いと判断した。発生した年が古い大地震については、史料の不足により見落としている可能性があるが、正平(康安)地震(1361年)以降は、見落としはないと考えられる。また、震源域の広がりについては、史料の記述の不確実性などから、かなり不確かさがあるため、図2の時空間分布図には、それぞれの地震の震源域について、確実度に応じて表記を変えている。

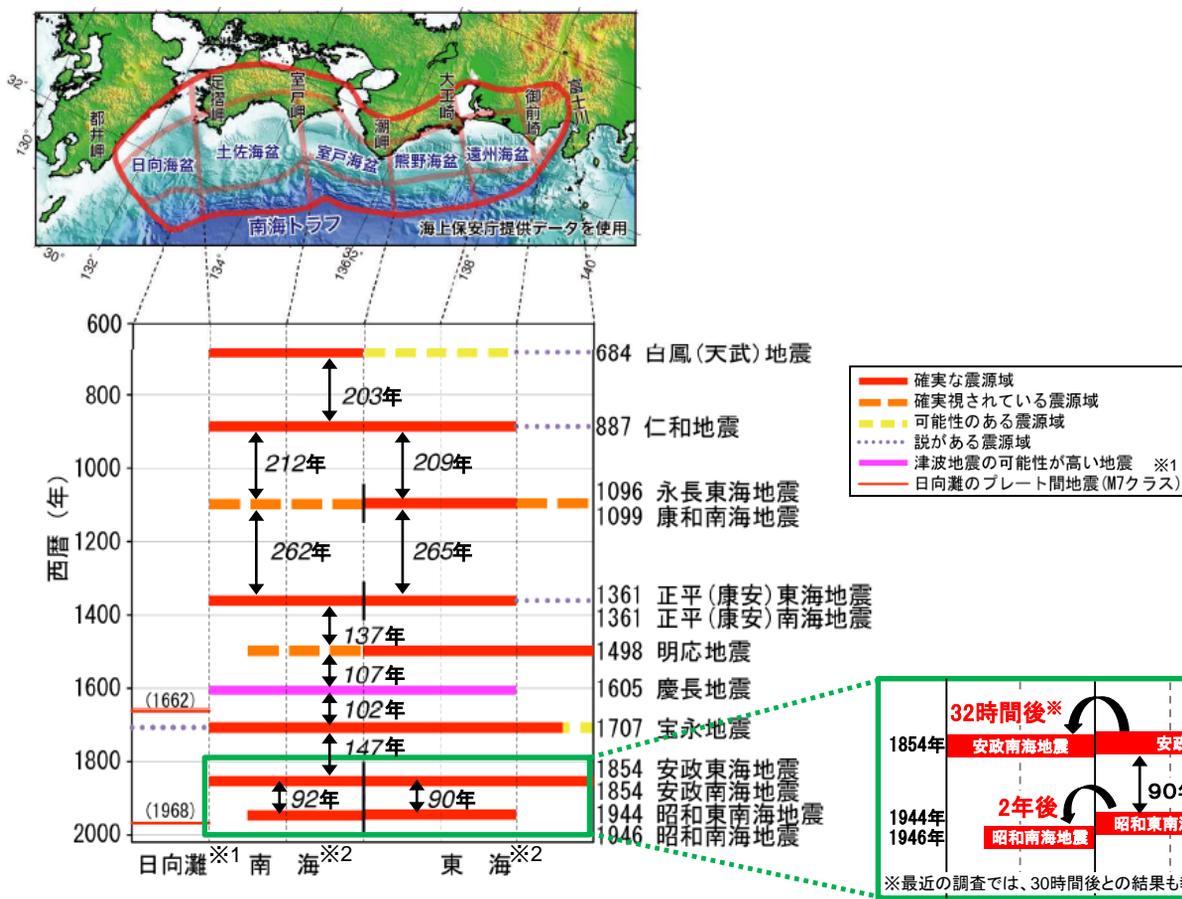
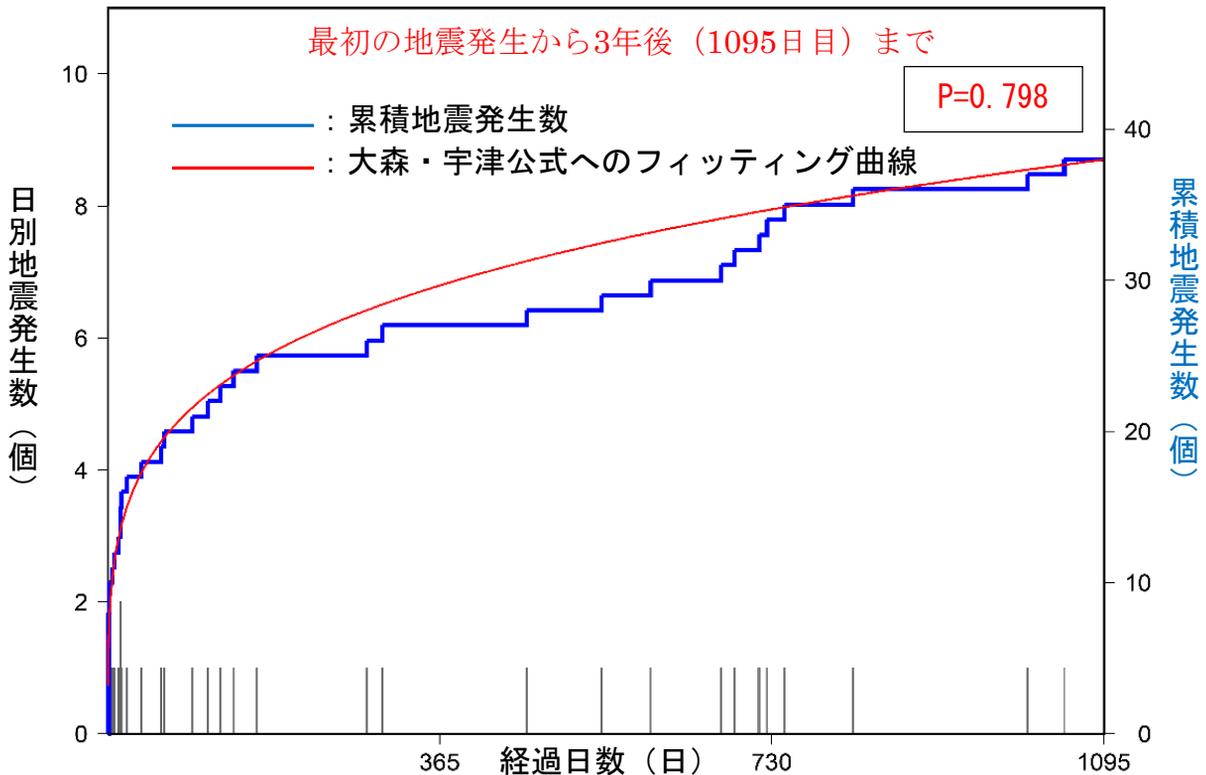
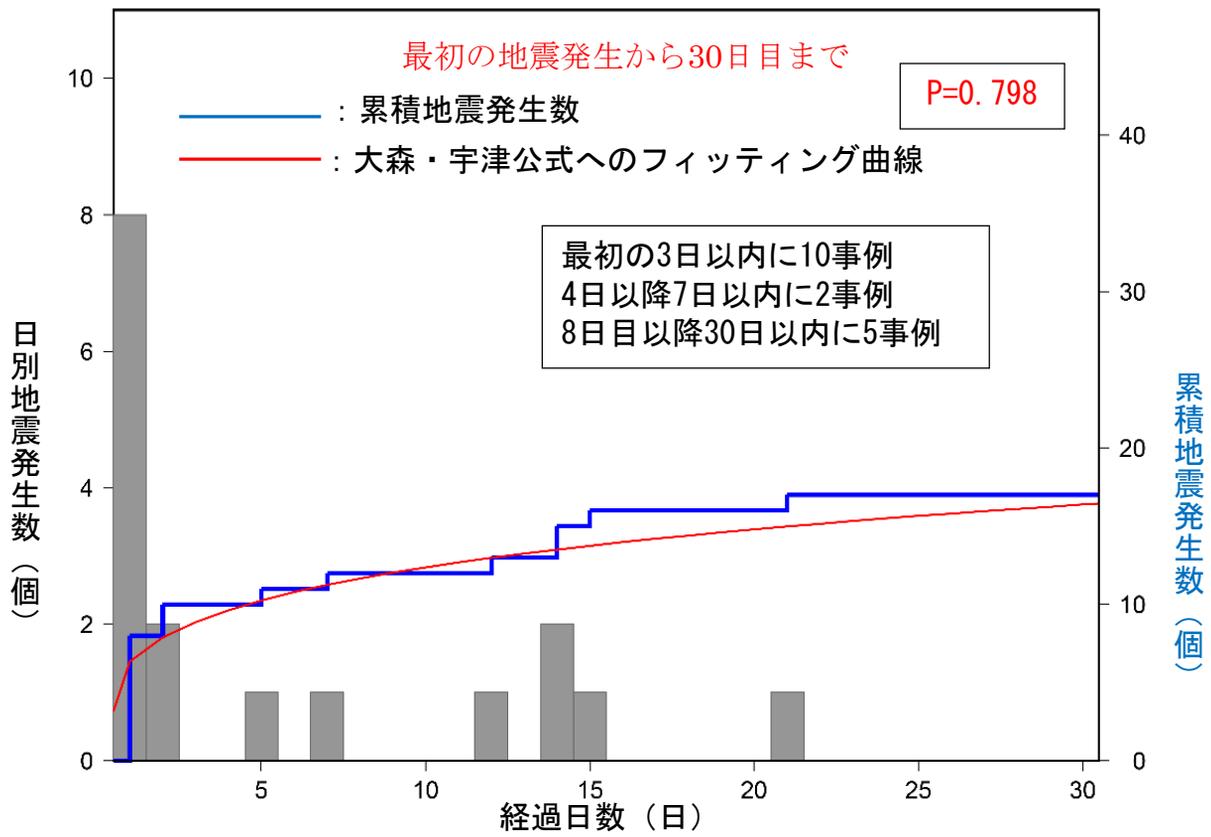


図2 南海トラフで過去に起きた大地震の震源域の時空間分布

図5. 南海トラフの地震活動の長期評価(第二版)(地震調査委員会、平成25年5月公表)に加筆

※1 「日向灘のプレート間地震(M7クラス)」として、現在知られているこの海域としての最大規模の地震(『地震活動総説』では、1662年の地震がM7.6、1968年の地震がM7.5)を記載。

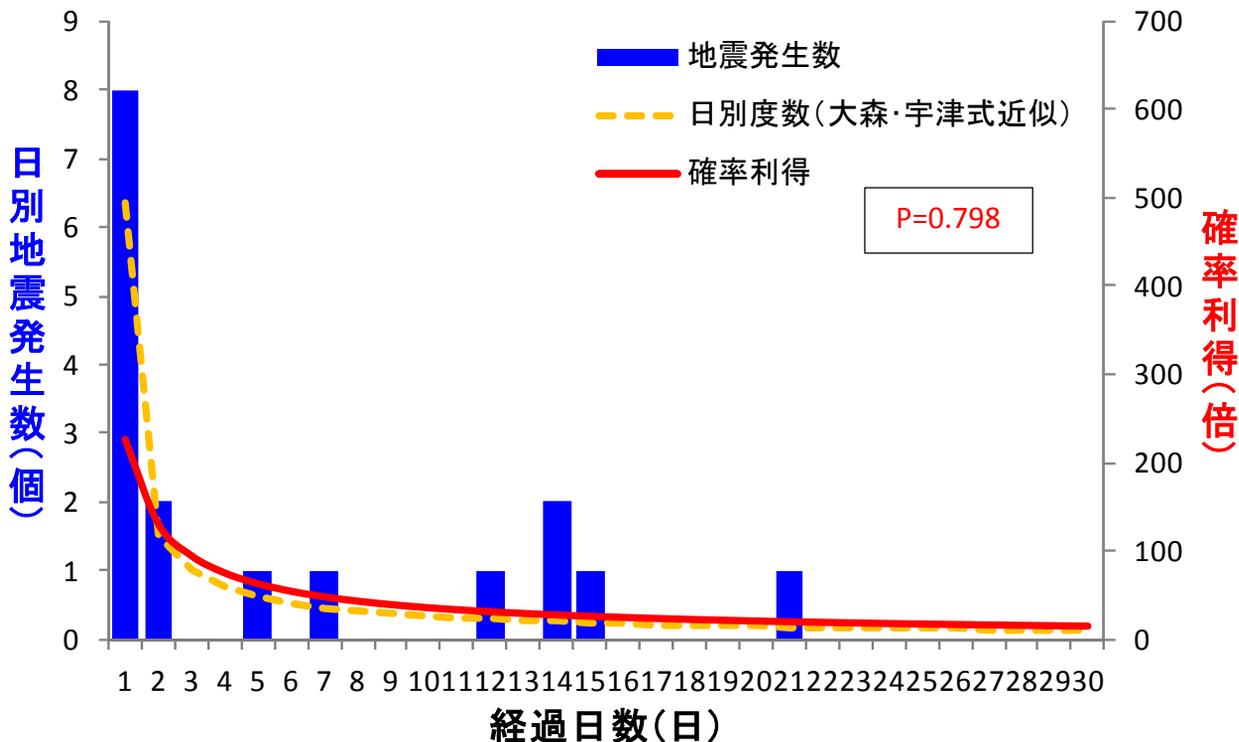
※2 東海～南海には、現在知られている大規模地震(宇津徳治者『地震活動総説』(1999)では、正平(康安)東海地震以降の地震はいずれもM7.9以上)を記載。



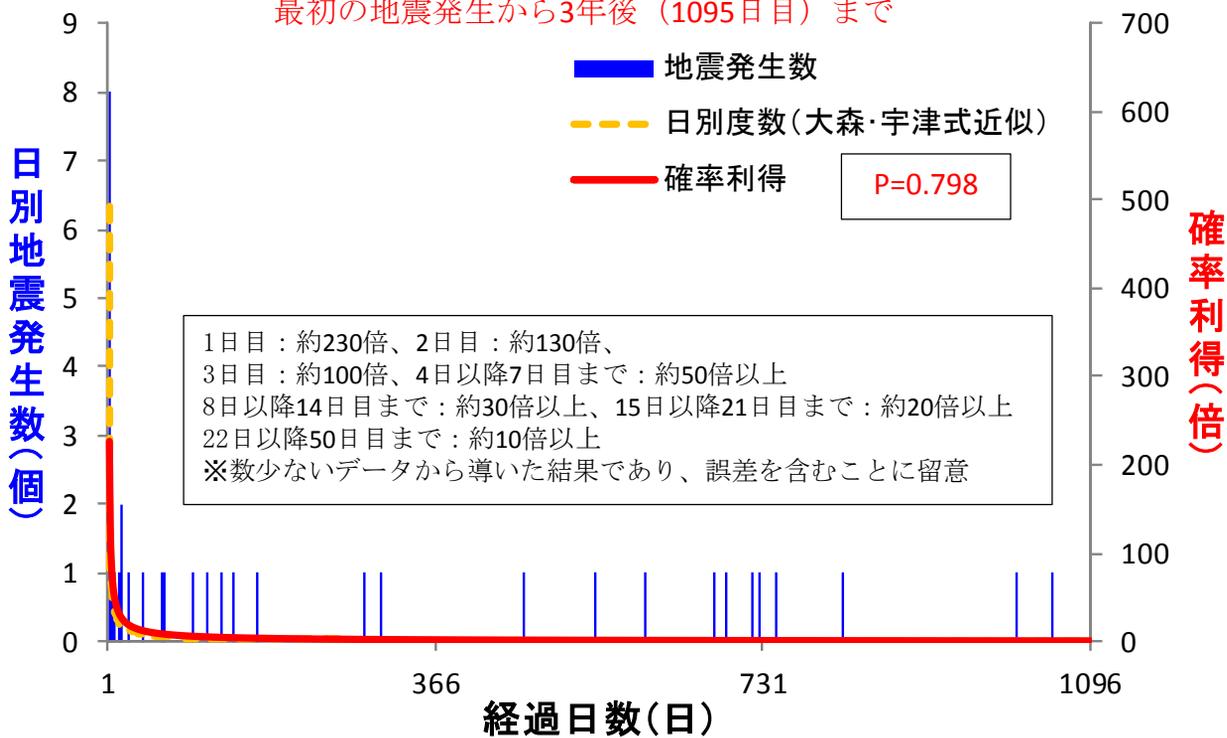
1900年以降から2016年6月までに全世界で発生したM8.0以上の大規模地震(96事例)の後、隣接領域*で、最初に発生した地震のマグニチュード±1.0の地震が続発した事例38事例(3年以内)
 出典:ISCgemカタログ(1900~2013年)、USGSによる震源(2014年~2016年6月)
 ※隣接領域:最初の地震の震源から50~500km以内の領域

図6. 隣接領域で大規模地震が続発する事例に関する統計データ

最初の地震発生から30日目まで



最初の地震発生から3年後(1095日目)まで



※日別度数:大森・宇津式を用いて近似した関数を1日ごとに積算して求めた近似式から求まる日別地震発生数

※隣接領域:最初の地震の震源から50~500km以内の領域

図7. 隣接領域で大規模地震が発生する事例と確率利得

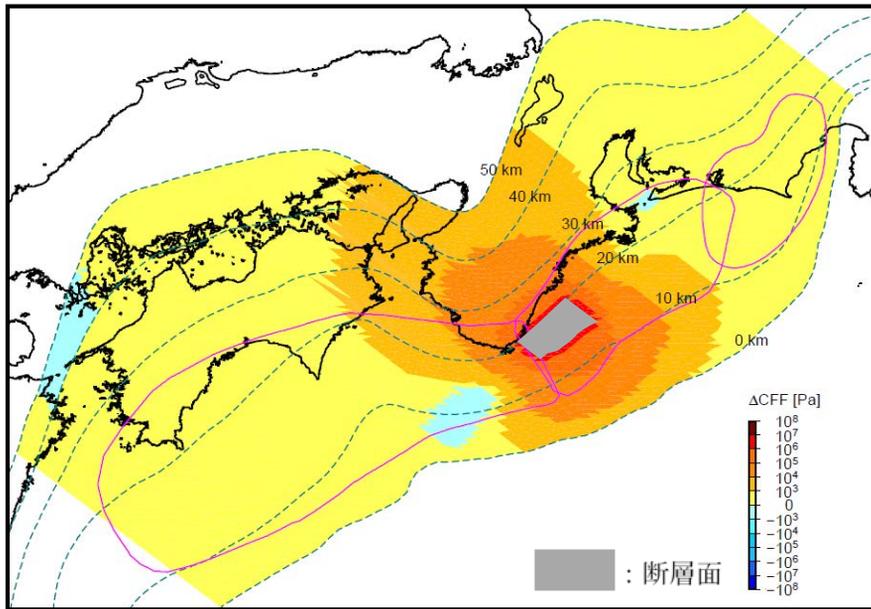


図8. 三重県南東沖でM7.0を想定したクーロン応力変化

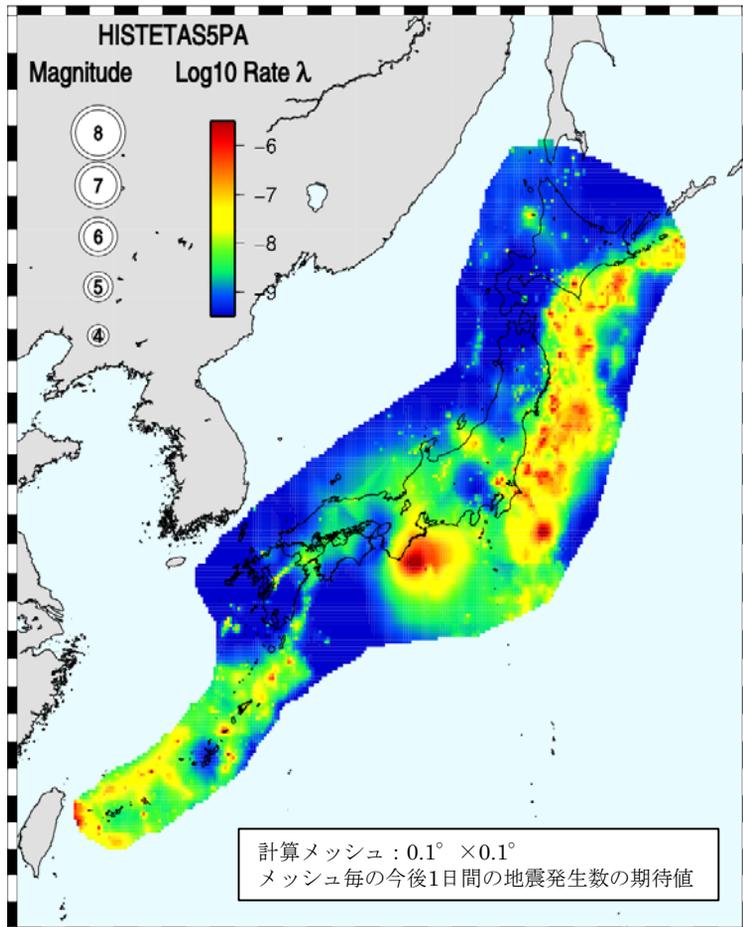
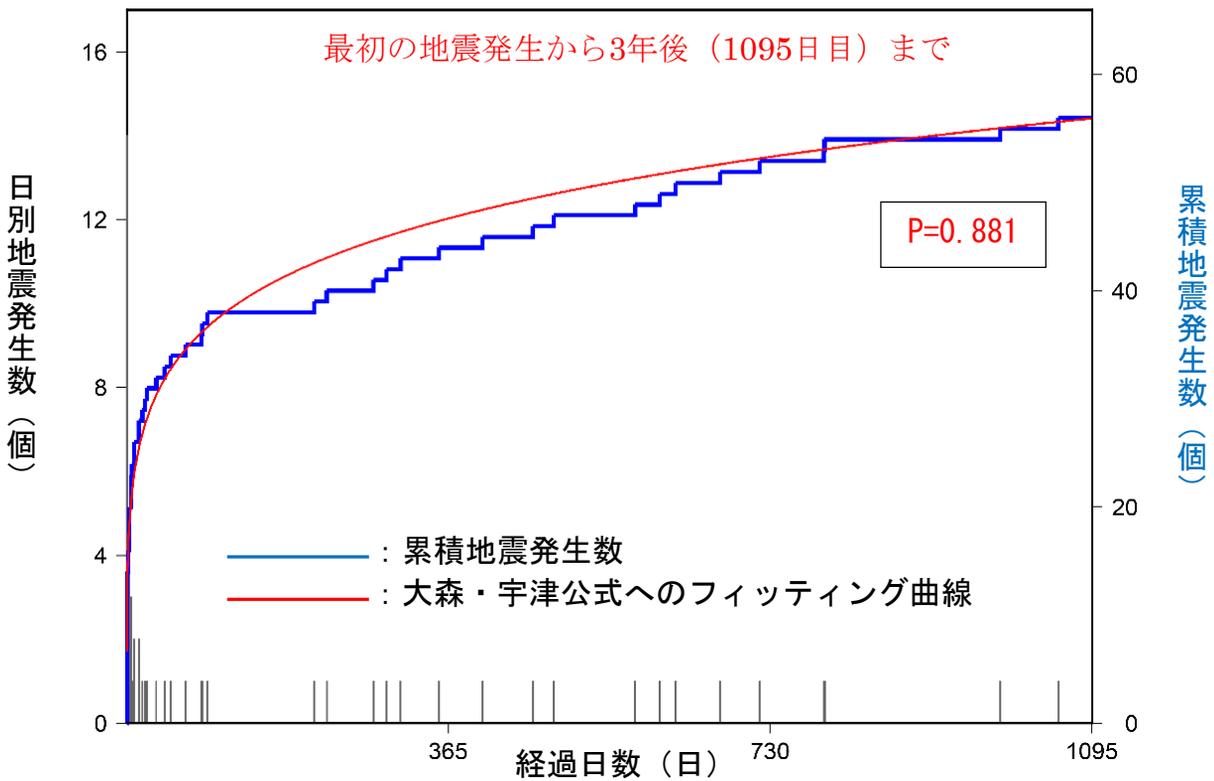
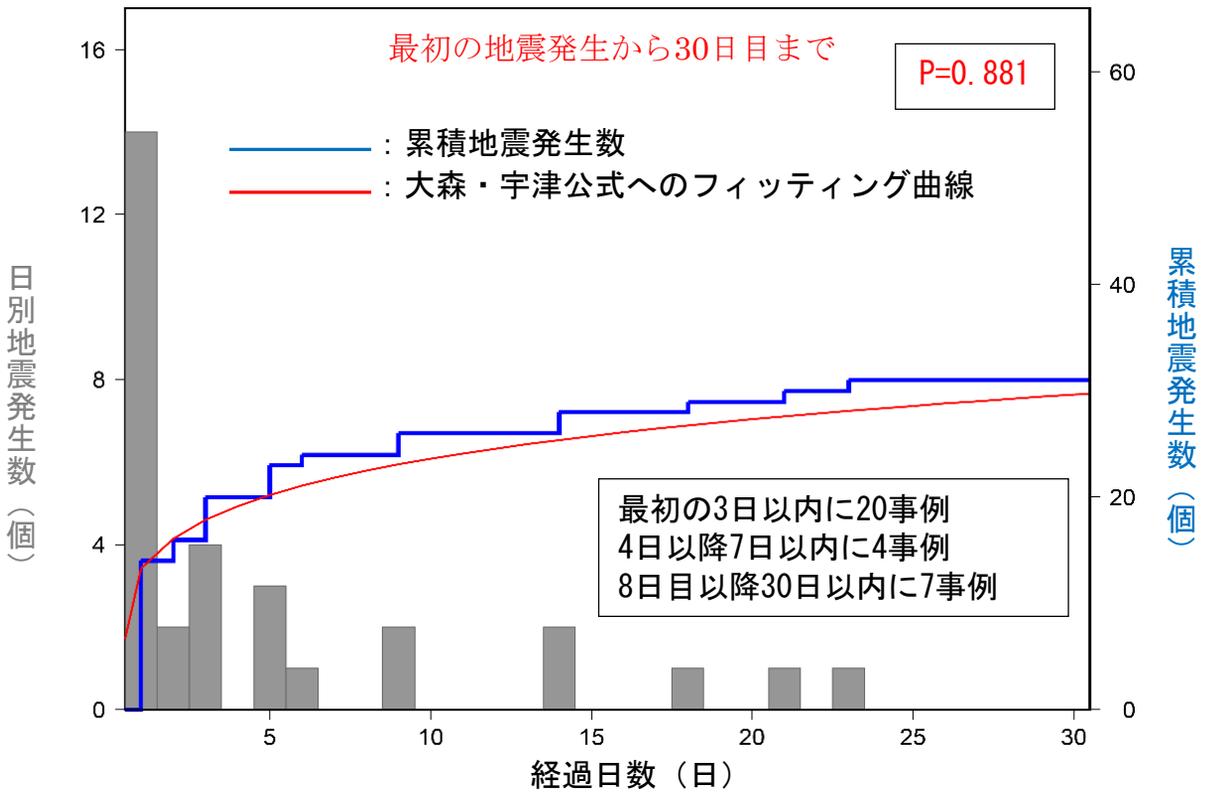


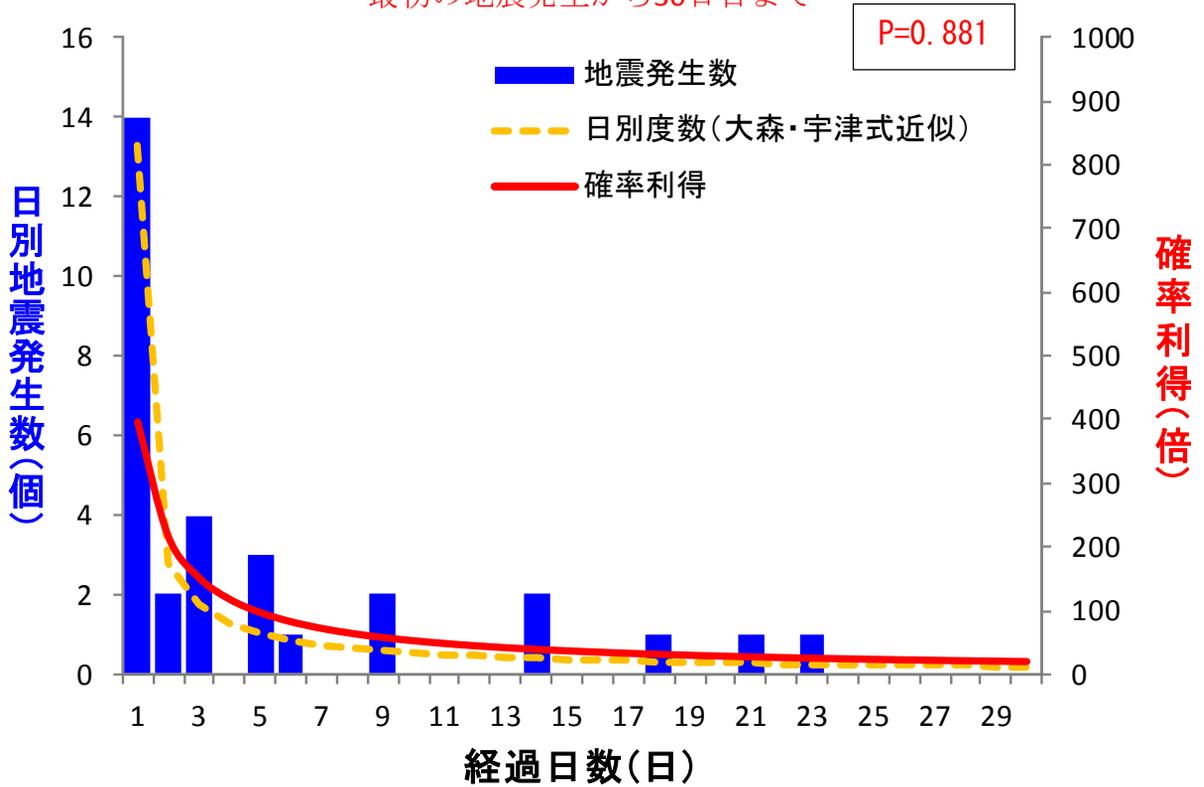
図9. 三重県南東沖の地震(M6.5)を想定した時空間ETAS結果



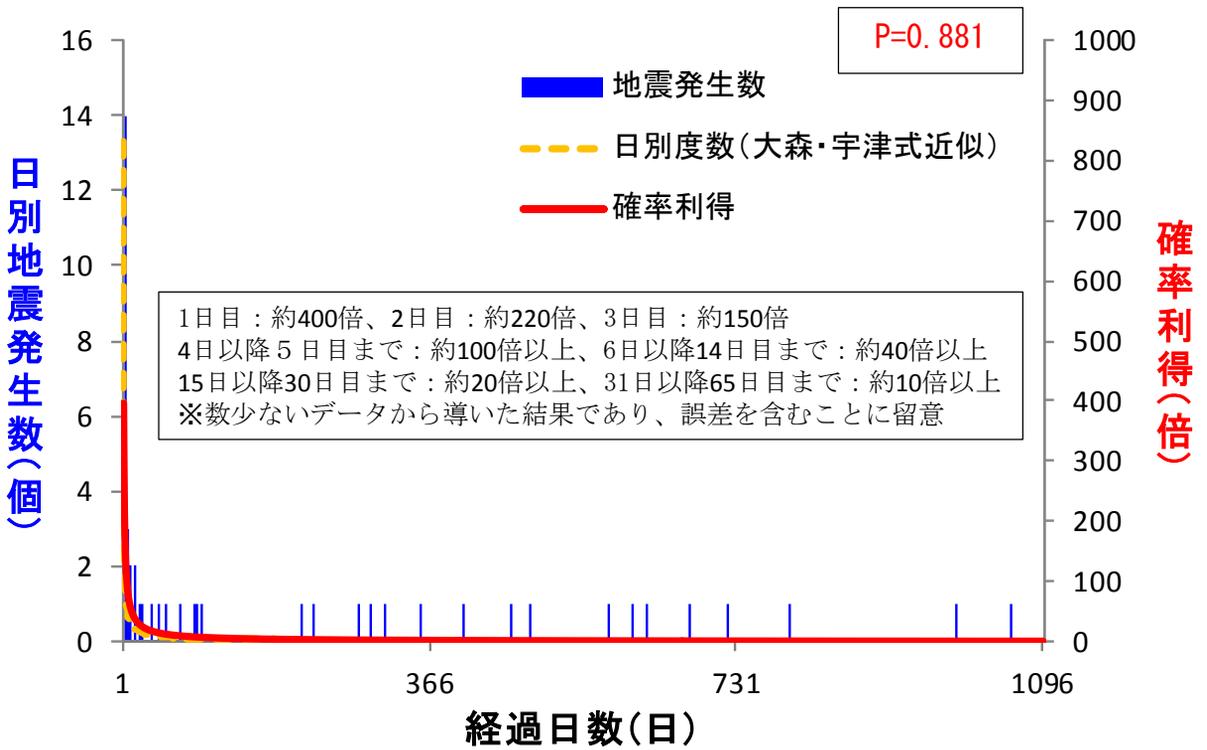
1900年以降から2016年6月までに全世界で発生したM7.0以上の地震（1,368事例）の発生後、同じ領域*でさらに同規模以上の地震が発生した事例56事例（3年以内）
 出典：ISCGEMカタログ（1900～2013年）、USGSによる震源（2014年～2016年6月）
 ※同じ領域：最初の地震の震源から50km以内の領域

図10. 比較的規模の大きな地震後、同じ領域でさらに同規模以上の地震発生事例に関する統計データ

最初の地震発生から30日目まで



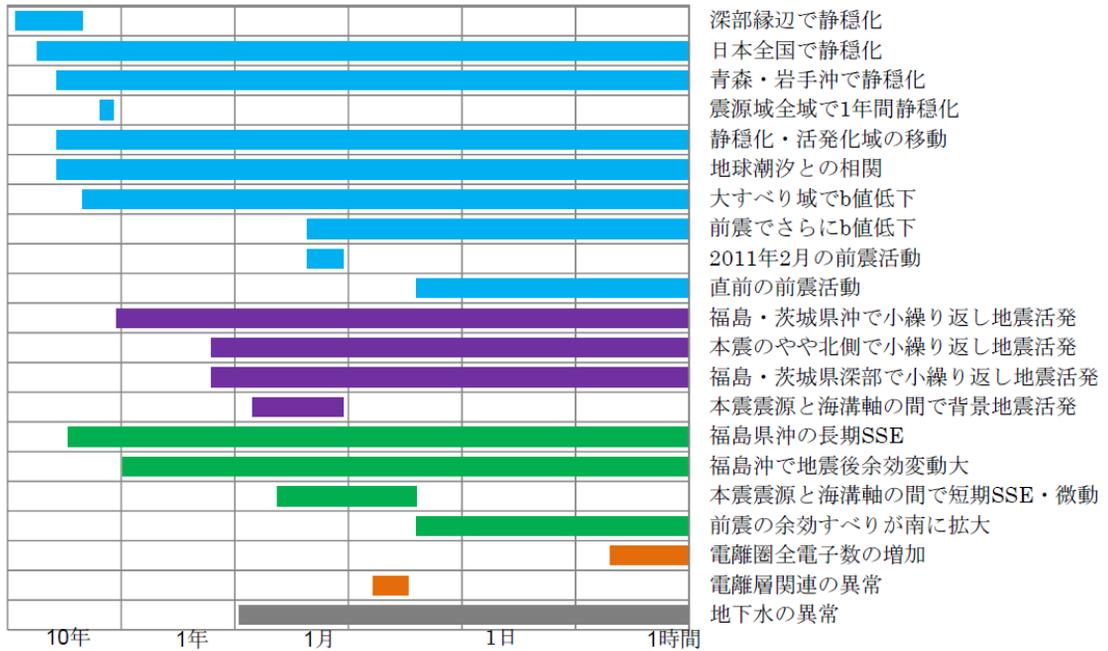
最初の地震発生から3年後(1095日目)まで



※日別度数：大森・宇津式を用いて近似した関数を1日ごとに積算して求めた近似式から求まる日別地震発生数
 ※同じ領域：最初の地震の震源から50km以内の領域

図11. 比較的規模の大きな地震後、同じ領域でさらに同規模以上の地震発生事例と確率利得

10000 1000 100 10 1 0.1 0.01



※これらの現象には、大地震の発生と関連した現象であったのかが不明確である場合や、発現メカニズムが不明のものが多く含まれていることに留意

図12. 2011年東北地方太平洋沖地震等で先行して観測された現象

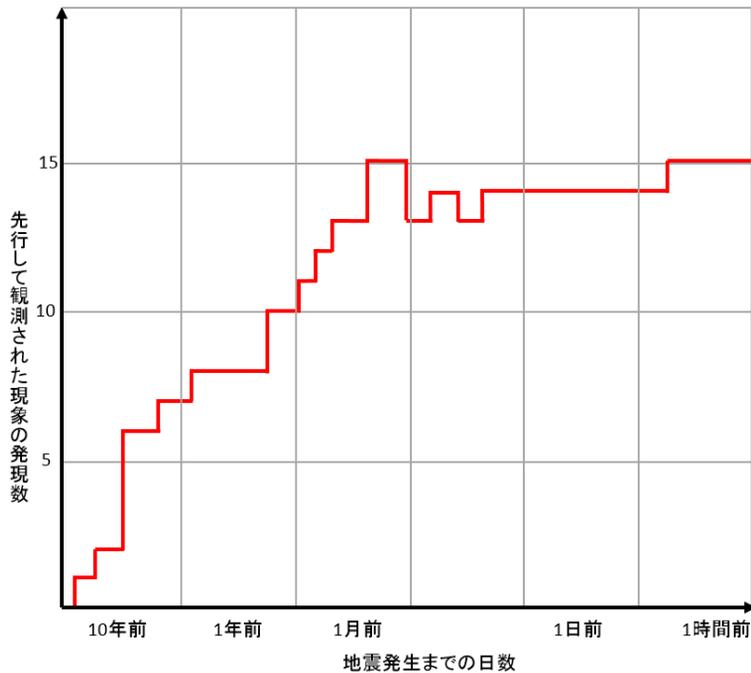


図13. 2011年東北地方太平洋沖地震の先行現象の発現数と地震発生までの日数

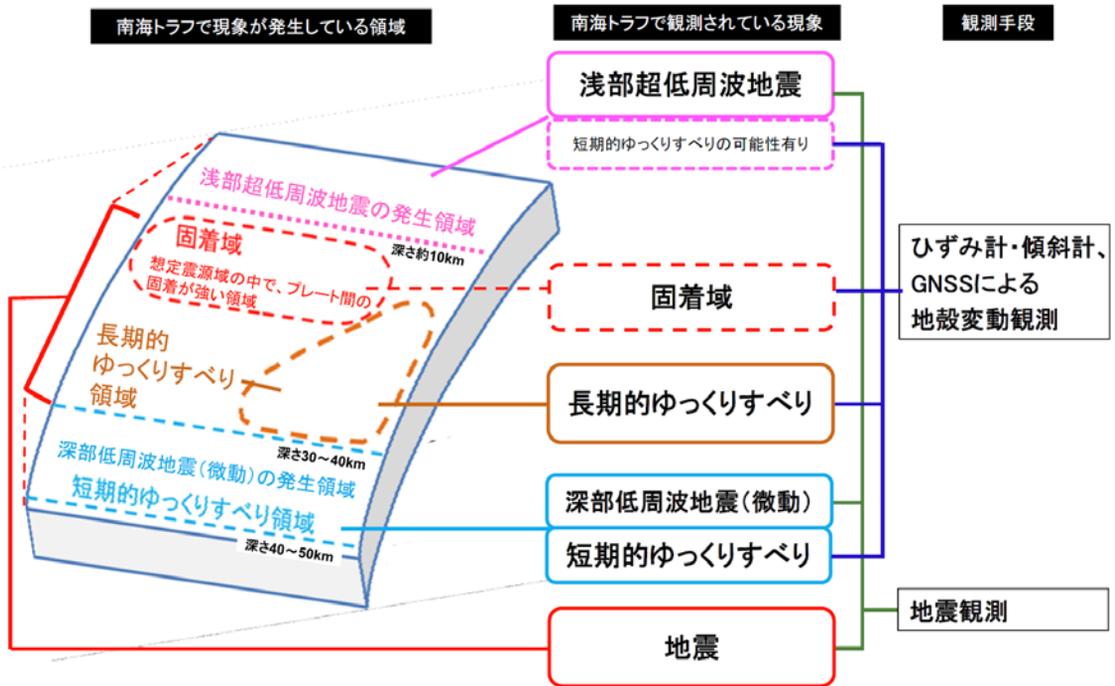
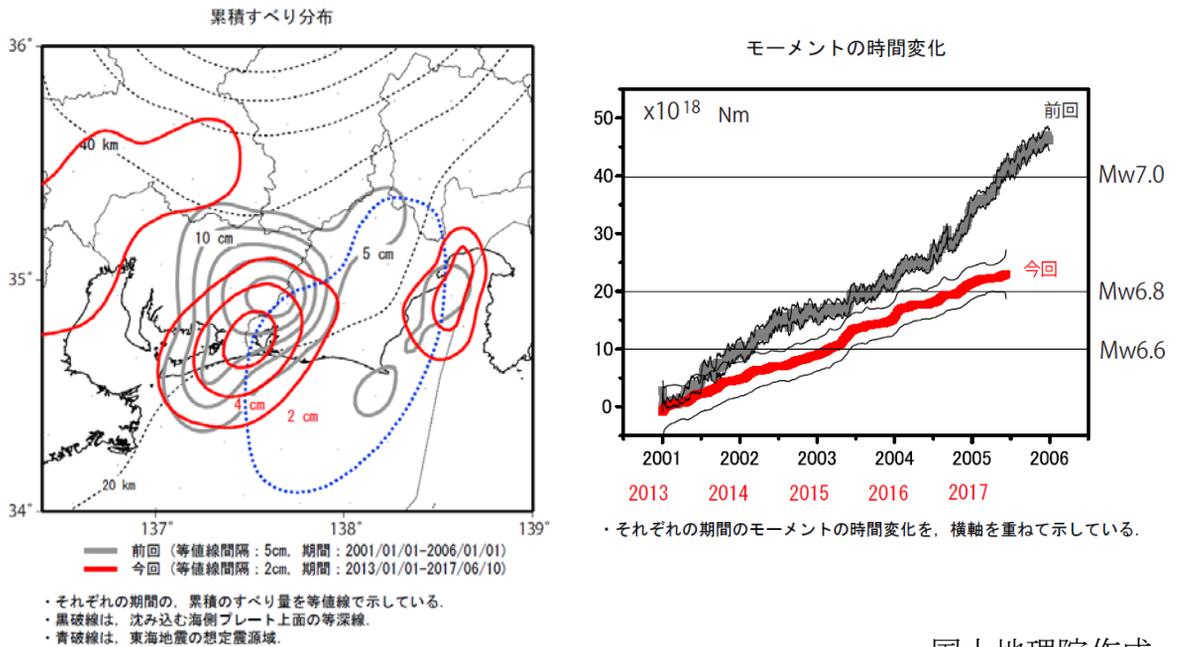


図14. 南海トラフで観測されている現象とそれらを捉える観測項目

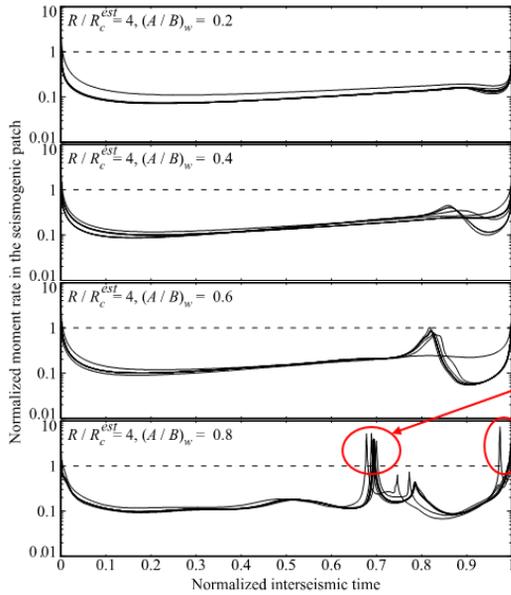
非定常地殻変動から推定される累積すべり分布及びモーメントの時間変化（暫定）



国土地理院作成

図15. 累積すべり分布及びモーメントの時間変化の例

階層的不均質モデルを仮定したシミュレーションでは、地震発生前にゆっくりすべりを伴う場合、伴わない場合があり、またゆっくりすべりが伴う場合でもそれが加速して地震に至る場合や加速することなく大地震に至る場合等のように、大地震発生に至る多様性が示されている。



急激な変化があっても地震が発生していない

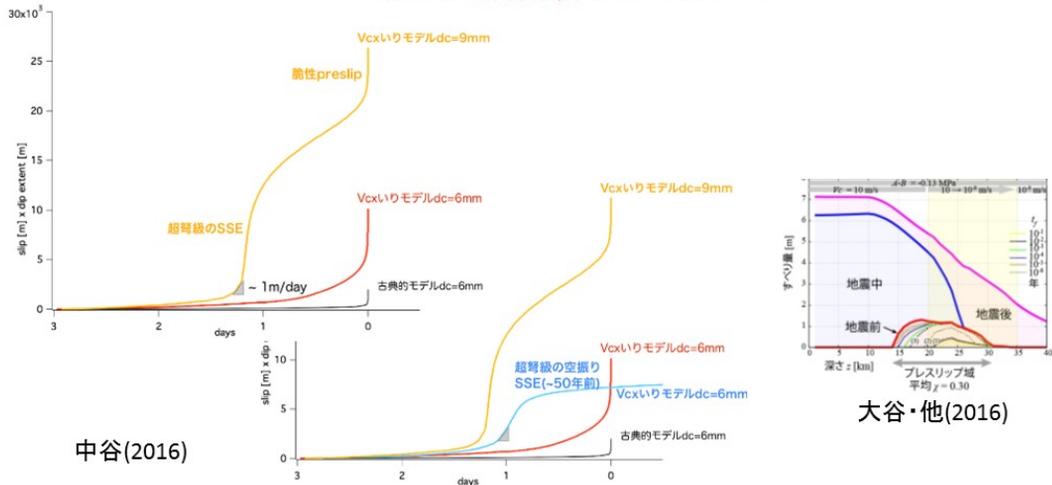
「地震発生の可能性が高い」という判断に使えるか？

大破壊前のゆっくりすべりの多様性, Noda and Hori (2014)

図16. シミュレーションを用いた地震発生過程の評価①

東海地震の判定基準とされるような前兆すべりが見られた場合

震源域の深部延長でのゆっくりすべり



中谷(2016)

大谷・他(2016)

- 速度弱化に上限速度(V_{cx})を設定した場合の地震発生サイクルシミュレーションによる震源域の深部延長でのゆっくりすべり
- 震源域の深部延長で普段のSSEに比べてかなり大きなSSEが発生した場合、大地震をトリガーする可能性が高い。
- すべり速度の閾値の候補例: 1m/dayを超えると大地震に至る可能性が高いが、同じパラメータで空振りもあり得る(青線)。閾値や空振りの確率については今後の課題。

図17. シミュレーションを用いた地震発生過程の評価②