

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  
(報告 別冊)

南海トラフ沿いの大規模地震の  
予測可能性について

平成25年5月

平成〇年〇月改訂

| 平成 25 年 5 月以降の研究成果を反映した加筆案

1. はじめに .....	1
2. 東海地震対策と観測体制の現状等 .....	3
(1) 東海地震対策の背景と現状 .....	3
(2) 東海地震予知に係る観測及び南海トラフ周辺の観測の現状と計画 .....	6
(3) 東海地震対策大綱及び東南海・南海地震対策大綱の見直し .....	7
3. 地震発生予測に対する国際的な認識と取り組み .....	8
(1) 2009 年イタリア・ラクイラの地震と実用的地震発生予測に関する国際委員会報告 [Jordan et al., 2011] .....	8
(2) その他の試み .....	11
4. 地震の前駆すべりと考えられた事例等 .....	13
5. 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震から得られた科学的知見 .....	16
(1) 地震活動の変化 .....	16
(2) 地殻変動 .....	19
(3) 電離層及び大気圏関係の現象 .....	21
(4) 地下水の変化 .....	22
6. 地震モデルとシミュレーションから得られた科学的知見 .....	23
(1) 地震モデルによる前駆すべりの検知可能性の違い .....	23
(2) シミュレーションから見た予測可能性 .....	25
(3) 地震の規模の予測 .....	28
7. 南海トラフ沿いの大規模地震の規模と発生時期の予測可能性に関する科学的知見 .....	29
(1) 規模の予測可能性 .....	29
(2) 発生時期の予測可能性 .....	30
8. おわりに .....	32
(参考) 我が国の地震防災対策に関する法律と検討組織等 .....	33
(1) 地震防災対策に関する法律 .....	33
(2) 検討組織等 .....	33

## 1. はじめに

東南海・南海地震は今世紀前半にも発生するおそれがあり、想定東海地震が発生していない現状を考慮すると、東海地震と東南海・南海地震が連動して発生する可能性が生じてきており、「南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ（主査：河田恵昭関西大学教授）」において、地震・津波に対する具体的な防災対策を検討する上で、南海トラフで想定される巨大地震を含め、これら地震の発生時期や規模が予測できるか否かは重要な論点となっている。

一方、想定東海地震については、監視体制が整備され、地震発生直前<sup>※1</sup>の予知の可能性のある我が国で唯一の地震とされている。仮に、地震発生前の前兆現象として、現行の監視体制と知見に基づき、想定東海地震の発生前に震源断層域の一部で発生する少しずつすべり始める現象（「前兆すべり」、「プレスリップ」、「前駆すべり」等と呼ばれ、本報告では「前駆すべり」と言う。）が検知された場合に、引き続いて発生する地震は想定東海地震にとどまると考えるのか、南海トラフ巨大地震につながると考えるのかによって、直前予知がなされた際の地震防災応急対策をとるべき対象地域が変わることになる。

そのため、想定東海地震の前駆すべりが検知された場合に想定東海地震と連動して地震が発生する範囲の考え方についても一定の結論を出す必要がある（東海地震対策大綱、平成 15 年 5 月中央防災会議決定；東南海・南海地震対策大綱、平成 15 年 12 月中央防災会議決定<sup>2</sup>）。

この報告は、南海トラフの大規模地震の規模及び発生時期の予測可能性に関する科学的知見を収集・整理したものである。

※1 ここでの直前とは 2～3 時間から 2～3 日より前のこと。

南海トラフ沿いで発生する大規模な地震への対策については、地震発生切迫性に鑑み、東海地震への対策の検討が進められ、大規模地震対策特別措置法（昭和 53 年法律第 73 号）の制定を経て、想定東海地震の発生前に震源断層域の一部で発生する少しずつすべり始める現象（「前兆すべり」、「プレスリップ」、「前駆すべり」等と呼ばれ、本報告では「前駆すべり」と言う。）を検知し、直前に警戒宣言を発することを前提とした各種対応を主とした対策が講じられてきた。平成 15 年には、阪神・淡路大震災等の経験も十分に生かしたより実効性のある対策を講じるため、「東海地震対策大綱」（平成 15 年 5 月中央防災会議決定）が策定され、東海地震が直前予知できずに突発的に地震が発生した場合の想定も含めた対策が取りまとめられた。

この検討過程で、東南海・南海地震は今世紀前半にも発生するおそれがあり、必要な防災対策を実施することが重要であるとの強い指摘があり、平成 13 年から中央防災会議において対策の検討が進められ、「東南海・南海地震対策大綱」（平成 15 年 12 月中央防災会議決定）が策定された。そして、「今後、東海地震が相当期間発生しなかった場合には、東海地震と東南海・南海地震が連動して発生する可能性も生じてくると考え

られるため、今後 10 年程度経過した段階で東海地震が発生していない場合には、東海地震対策と合わせて本大綱を見直すものとする」とされた。

このような背景のなか、現時点においても東海地震が発生していない現状に鑑み、南海トラフ沿いで東海、東南海、南海地震が同時に発生することを想定した対策の必要性が高まっていた。

折しもこうした状況の下、平成 23 年 3 月に発生した東北地方太平洋沖地震は、これまでの想定をはるかに超える巨大な地震・津波により、一度の災害で戦後最大の人命が失われるなど、甚大な被害をもたらした。その教訓を踏まえて、南海トラフ沿いで発生する大規模地震を対象とした具体的な対策の検討が、中央防災会議防災対策推進検討会議の下に設置された「南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ」において進められることとなった。この検討を進めるにあたっては、想定する巨大地震の発生時期が予測できるか否かが重要な論点となるなった。

地震の予測は一般的に困難との認識があり、南海トラフにおける巨大地震についても同様ではないかなどの様々な議論があることから、南海トラフの巨大地震の発生時期の予測可能性について、現時点における科学的知見を収集、整理することが重要である。

このため、南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループの下に「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」を設置し、設置趣旨を踏まえて、想定東海地震の前駆すべりが検知された場合に想定東海地震と連動して地震が発生する範囲の考え方や、南海トラフの大規模地震の発生時期の予測可能性について、現時点における科学的知見を収集・整理してきた。この報告書は、これらの科学的知見をとりまとめたものである。

## 2. 東海地震対策と観測体制の現状等

大規模地震対策特別措置法（昭和 53 年法律第 73 号）制定の背景には、その当時、地震予知に関して科学的な検討を行うためのデータや地震発生に関する知見が十分ではなかったものの、過去の地震の発生履歴等から駿河湾周辺で大規模な地震の発生が切迫していると考えられていたことに加えて、観測体制の強化により何らかの前兆現象を捉えることが可能であると考えられるという意見が多かったことから、地震予知に対する大きな期待感があったと考えられる。

その後の理論的な研究の進展により、観測されうる前兆現象として、地震の前に想定される震源断層域内の一部で前駆すべりが発生し、加速して地震発生に至る可能性が示された。現在気象庁では、このようなすべりが検知できた場合にあらかじめ想定していた東海地震が発生するおそれがあることを地震予知情報として内閣総理大臣に報告することとしている。これを受け、内閣総理大臣は、閣議にかけて地震災害に関する警戒宣言を発することとなっている。

しかし、前駆すべりが観測可能な規模で発生するかどうかは分からず、大規模な地震の発生前に観測された例もほとんどない。また、理論的な研究においても、地震発生前に現れる現象は、使用するモデルやパラメータ等の仮定に大きく依存することが示されている。さらに、3. に後述するように国際的には前兆現象に基づく確実性の高い地震発生予測は困難との認識がある。

このような状況の中、東海地震に関する情報の発表の根拠や内容及び大規模地震対策特別措置法で定められる警戒宣言が発表された際の地震防災応急対策の内容が、現在の科学の実力に見合っていないという認識が強まっている。一方で、南海トラフで想定される地震については、このまま相当期間東海地震が発生しなかった場合には、東海地震と東南海地震・南海地震との同時発生の可能性も生じてくると考えられる。

なお、現状の観測網により検知できるプレート境界面におけるすべりの規模の下限は、南海トラフ沿いでは陸域で Mw5～6 程度、沖合では Mw6～7 程度である。

### (1) 東海地震対策の背景と現状

[大震法制定当時の主な出来事]

- 地震予知研究計画（昭和 39 年測地学審議会建議）以降、確度の高い地震予知を目指して地殻変動観測や地震観測、地下構造の解明、地磁気地電流の調査、地下水の調査等の多岐にわたる調査研究が大学、試験研究機関等において実施されてきた [測地学審議会地震火山部会, 1997a]。
- 地震予知連絡会（第 2 次地震予知計画に基づき昭和 44 年 4 月に発足）において、東海地域の地殻水平変動データに基づき、この地域に地殻ひずみが蓄積しており、また 1854 年以降大地震が発生していなかったことから「東海地震」の発生の可能性が考えられるとの指摘がなされ、東海地域における調査観測の重要性とともに地震予知の必要性が認識されるようになった（昭和 44 年 11 月）[藤田・藤井, 1979]。
- その後、北海道東部の地殻変動の進行などから大地震の発生が予想されていた根室半

島沖で M7.4 の地震が発生し（昭和 48 年 6 月 17 日）、地震の長期予測の成功例と考えられた [力武, 1979]。東海地域について、地震予知連絡会は根室半島沖と同様の条件にあると考えられた東海地域を観測強化地域に指定した（昭和 49 年 2 月） [藤田・藤井, 1979]。

- 昭和 51 年に「東海地震」の震源域が駿河湾奥に及び発生時期がある程度切迫しているという考えが出され、東海地域における地震防災対策整備が必要との認識が高まった。また、地震予知連絡会が同年 11 月にそれまでの東海地震に関する研究成果に基づく知見を整理した上で、発生時期を推測できる前兆現象と思われるものは見出されていないものの、観測体制は十分とはいえず、駿河湾周辺を含む東海地方の観測をさらに強化し、監視を続けていく必要があるという認識を示した。 [末広・吉田, 1979]
- 「第 3 次地震予知計画の再度一部見直しについて」（昭和 51 年測地学審議会建議）において、「東海地域における連続観測データの集中と常時監視に対応し、判定を行う組織」の早急な確立が必要とされた [測地学審議会地震火山部会, 1997a]。
- 昭和 51 年 10 月に「地震予知に関する重要な施策について、関係行政機関相互間事務の緊密な連絡を図るとともに、総合的かつ計画的な施策を推進するため、内閣に地震予知推進本部を置く」ことが閣議決定された（事務局：科学技術庁） [科学技術庁, 1977]。同本部は昭和 52 年 4 月に「東海地域の地震予知体制の整備について」を決定し、これに基づき東海地域の連続観測データを気象庁へ集中する常時監視体制が構築されるとともに、当面の措置として地震予知連絡会に「東海地域判定会」（事務局：気象庁）を設置することとした [茂木, 2000]。
- 「第 4 次地震予知計画」（昭和 53 年 7 月測地学審議会建議）が出された当時は、駿河湾を予想震源とする M8 級の海溝型巨大地震（東海地震）を想定した予知体制の整備が推進され、かなりの確度で前兆現象を捉えられるという観測実績と技術的確信に基づく考えが基調であった [測地学審議会地震火山部会, 1997b]。
- 予知体制の整備が進むにつれて、直前予知情報が出された場合に、これを防災に活かすための対策を講じておくことの必要性が認識されるようになり、このための法律制定の要請が高まってきた。このような社会的背景のもとに、大規模地震対策特別措置法（大震法）が昭和 53 年 6 月 15 日に公布され、12 月 14 日に施行された [末広・吉田, 1979]。
- 昭和 54 年 8 月 7 日、気象庁において「地震防災対策強化地域判定会」が発足し、東海地域に係る大規模地震の発生のおそれに関する判定が行われることになった。これに伴い、地震予知連絡会「東海地域判定会」は廃止された [科学技術庁, 1980]。

#### [大震法制定後の研究の進展]

- 地震発生過程を再現する岩石すべり実験により、急速なすべり（地震）の発生に先行して前駆すべりが発生することが確認された [Ohnaka et al., 1986]。
- 地震発生過程を説明するためのモデルとして、岩石の固着面の摩擦力に着目した摩擦構成則が提唱されている [大中・松浦, 2002; Dieterich, 1979; Ruina, 1981; Nakatani,

2001]。この摩擦構成則を取り入れたコンピュータシミュレーションにより、プレート境界の普段強く固着している領域で、地震に先行して前駆すべりが発生することを示す結果が得られている。この中には地震発生にむけて加速するすべりが認められる例もある [Tse and Rice, 1986]。

- ただし、このようなシミュレーションでは、前駆すべりの発生場所や規模、前駆すべりの発生から地震発生までの猶予時間については、断層形状等のモデルの立て方や摩擦等のパラメータの設定により様々な値を取りうることから、実際の監視体制における基準となるような値を予め一意的に決めることはできていない。
- 観測・測量体制の強化によって、南海トラフ沿いのプレート境界の強く固着している領域より深部で発生するゆっくりすべりに起因する地殻変動が観測されるようになった。このゆっくりすべりもシミュレーションにより再現可能となった [Kato 2003; Kato, 2004; Matsuzawa et al., 2010; Shibazaki et al., 2010; 弘瀬・前田, 2010]。
- 4. に後述するとおり、前駆すべりに伴う地殻変動の確実な観測事例はない。これは前駆すべりに伴う微小な地殻変動を捉えるために必要な観測網が整備されていなかったことや、前駆すべりがあつたとしても観測網の検知能力を下回る程度の規模であったことなどが原因として考えられる。
- 3. に後述するとおり、現時点では信頼性の高い前兆現象は見つかっておらず、それに基づく確実性の高い地震発生予測は困難であり、地震の予測は確率論的であるべきとの国際的な認識がある。
- 4. 及び6. に後述するとおり、現在の地震学の知見では東海地震に関する情報の発表の根拠となる前駆すべりの検知に基づく地震発生予測には不確実性がある。このような地震学の現状に照らして、大規模地震対策特別措置法（昭和53年法律第73号）の規定による警戒宣言の発表の際の地震防災応急対策の内容が、現在の科学の実力に見合っていないという認識が強まっている。
- また、歴史記録から、南海トラフ沿いで白鳳（天武）地震（684年）以後に発生したM8級の大規模地震の多くは、潮岬の西側の領域で発生する地震、潮岬の東側の領域で発生する地震、両域にまたがる地震（両者が同時に発生する）に大別され、それらの震源断層域を見ると、地震が同時に発生しない場合であっても、数年以内の差でもう一方の領域で地震が発生していることが分かっており [地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2013]、「東海地震」が単独で発生した例は知られていない。
- なお、東海地震の想定震源断層域を含む駿河トラフ付近のプレート境界は、これらの歴史地震のうち1498年の地震（明応東海地震）及び1854年の地震（安政東海地震）の震源断層域に含まれていたことが概ね確実とされているが、1707年の地震（宝永地震）を始めその他の歴史地震の震源断層域に含まれていたかどうかは定かではない [地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2013]。

[気象庁の東海地震に係る地震予知情報に関する業務]

- 気象庁では、地震に先行して想定震源断層域で前駆すべりが発生するというモデルに

に基づき、東海地域において前駆すべりに起因すると考えられる地殻変動が検知できれば、地震発生に向けて事態が進行し始めたと解釈し、当該地域であらかじめ想定していた地震が発生するおそれがあることを地震予知情報として内閣総理大臣に報告するとともに、国民に発表することとしている。

○ただし、現状の観測網で検知可能な大きさの前駆すべりにならない場合、これに伴う地殻変動が観測されず、地震予知情報を発表できないことがあること、また前駆すべりに伴う地殻変動が検知された場合でもその進行が急速な場合には、地震予知情報の発表が地震発生に間に合わないことがあることも併せて周知している〔内閣府・気象庁、2011〕。

## (2) 東海地震予知に係る観測及び南海トラフ周辺の観測の現状と計画

〔地殻変動観測の現状と計画〕

○気象庁は静岡県との協力の下、東海地域における地殻ひずみ観測を 27 か所において実施している。また、産業技術総合研究所は、地下水、地殻ひずみ等の総合的な観測を東海地方から四国にかけて 1416 か所 ~~（平成 24 年度末には 16 か所）~~ において実施している。【図 2-1】

○国土地理院は、GNSS 連続観測システム(GEONET : GNSS Earth Observation Network System)により地殻変動を観測している。【図 2-2】

○防災科学技術研究所は、高感度地震観測網(Hi-net : High Sensitivity Seismograph Network Japan)により約 800 箇所において傾斜観測を実施している。【図 2-3】 ~~○また、平成 28 年度より海洋研究開発機構はから移管された~~地震・津波監視システム(DONET : Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis)により、海底における地殻変動観測を 2051 か所において実施しており、平成 27 年度までにさらに 31 か所を増設する予定であるいる。【図 2-4】

〔現在の観測網によるプレート境界のすべりの検知能力〕

○気象庁は、東海地域の陸域では、ひずみ計の感度を考慮したプレート境界におけるすべり現象の検知能力はモーメントマグニチュード (Mw) に換算して Mw5.0~5.5 程度と見積もっている。このことは東海地震の想定震源断層域よりも深部のプレート境界で発生している同程度のゆっくりすべり現象を検知できていることから傍証されている。観測点からの距離によってすべりの検知能力は低下するため、海域のすべりの検知能力は陸域に比べて低く、東海地震の想定震源断層域内の沖合側では Mw6.5 程度と見積もられる。【図 2-5】

○産業技術総合研究所は、~~産業技術総合研究所のひずみ計の感度を考慮し、東海地域以西の南海トラフ沿いの陸域では、プレート境界におけるすべり現象の検知能力は Mw5.5~6.0 程度と見積もっている。ただし、南海トラフ沿いのプレート境界は沖合側に広く、プレート境界におけるすべり現象の検知能力は沖合では Mw6~7 程度となる~~〔小泉・他、2012〕産業技術総合研究所のひずみ計・傾斜計・地下水位データ、防

災科学技術研究所の傾斜データおよび気象庁のひずみ計データの統合解析によって、東海地域以西の南海トラフ沿いの陸域では、プレート境界におけるすべり現象の検知能力は Mw5.3～5.7 程度と見積もっている。ただし、南海トラフ沿いのプレート境界は沖合側に広く、プレート境界におけるすべり現象の検知能力は沖合では Mw5.3～7 程度となる [Itaba and Kimura, 2013]。【図 2-6】

- 国土地理院は、GEONET によるプレート境界におけるすべり現象の検知能力は、検知能力が高い海岸線沿いの深さ 20km 前後の場所で Mw 6.0 前後、検知能力が低いトラフ軸付近や内陸の深さ 50km より深い場所で Mw 7.0 程度と見積もっている。【図 2-7】
- 長期的な変化を観測する場合には GEONET が有利であり、短期的な異常を捉えるにはひずみ計や傾斜計が有利である。
- 防災科学技術研究所の高感度地震観測網による傾斜観測では、南海トラフ沿いのプレート境界におけるすべり現象の検知能力は Mw 6.0 程度と見積もられる。【図 2-8】

### (3) 東海地震対策大綱及び東南海・南海地震対策大綱の見直し

- 「東海地震対策大綱」(平成 15 年 5 月中央防災会議決定)では、「本大綱は、いつ発生してもおかしくない東海地震を対象にしているものであるが、今後、相当期間同地震が発生しなかった場合には、東南海地震等との連動の可能性も生じてくると考えられる。また、東海地震が単独で発生した場合も、今世紀前半にも東南海地震等が発生する可能性が指摘されている。そのため、特に予防的対策については、東海地震だけでなく東南海地震等の発生も考慮して行う必要がある。」とされ、「また、今後、相当期間が経過し、東南海地震等との連動が危惧されるに至った場合には、本大綱を抜本的に見直すものとする。」とされている。
- 「東南海・南海地震対策大綱」(平成 15 年 12 月中央防災会議決定)では、「今後、東海地震が相当期間発生しなかった場合には、東海地震と東南海・南海地震が連動して発生する可能性も生じてくると考えられるため、今後 10 年程度経過した段階で東海地震が発生していない場合には、東海地震対策と合わせて本大綱を見直すものとする。」とされている。

### 3. 地震発生予測に対する国際的な認識と取り組み

2009年にイタリアのラクイラで発生した地震を契機として、イタリア政府が国際地震予測委員会を組織し、地震の短期予測<sup>※2</sup>に関する知見を整理するとともに、確率を用いた地震動の予測や大地震の有力な前兆現象を活用するためのガイドラインについて検討した。また同委員会の報告概要は国際地震学及び地球内部物理学協会（IASPEI）の総会での承認を受けて、現在の地震学界における国際的な共通認識を示した。上記委員会の報告では、確実性の高い地震発生予測に用いることができる前兆現象は見つかっていないため、前駆すべりに基づき地震の発生時期や場所・規模を狭く特定する決定論的な地震発生予測は一般には困難であるとし、予測には確率が用いられるべきであるという見解が表明されている。

なお、上記委員会の報告では、現在、多くの国で短期予測の方法は開発中であるとしている。アメリカ西海岸やトルコの一部地域では、これまでに短期予測を目指した集中的な観測が行われた例があるが、まだ確実な予測の成功事例はない。それに加え、日本の東海地域も短期予測を検証する場所として見なされている。

電磁気学的な予測研究については、国際測地学・地球物理学連合（IUGG）のワーキンググループを中心に国際的な研究が進められており、統計的に有意な結果が得られているものの、発生場所及び規模の予測に不確実性がある。

※2 ここでの地震の短期予測とは、2～3か月以内に発生する地震について予測すること。

#### (1) 2009年イタリア・ラクイラの地震と実用的地震発生予測に関する国際委員会報告 [Jordan et al., 2011]

[背景]

○2009年4月6日にラクイラ地震（Mw6.3）が発生し、死者約300名、全半壊20,000棟、避難65,000人の被害となった。

○地震発生前に、地元の研究者がラドン観測に基づいて発表した「地震予知」による混乱が起き、それに対し政府市民安全局(DPC)が「大地震発生の可能性は低い」との情報を出した。しかしその6日後に上記の地震及びそれに伴う大災害が発生したため、市民らがイタリア地震学者ら7名を提訴した<sup>※</sup>。

~~※2012年10月22日に一審で7名に禁固6年の判決が出された。~~

○2012年10月22日、1審で7名に禁固6年の判決が出された。

○2014年11月10日、ラクイラ高等裁判所（2審）で7名のうち6名の科学者には無罪が言い渡された。当時のイタリア市民安全局の副局長のみが有罪となり、禁固2年の判決となった。

○2015年10月20日、イタリア最高裁判所で2審の判決を支持する判決が出され、6人の科学者の無罪と行政担当者の刑が確定した。

#### [委員会の組織とそのミッション]

- イタリア政府の要請により、地震発生予測に関して広範な経験を有する中国、フランス、ドイツ、ギリシャ、イタリア、日本、ロシア、イギリス、アメリカの地球物理学者から構成される「市民保護のための国際地震予測委員会」が組織された。
- 地震の短期予測に関する知見の整理、大規模地震の地震ハザード確率評価の利用、大地震の有力な前兆現象を活用するためのガイドラインを提示した。

#### [報告書の位置づけ]

- 地震発生予測の国際的な現状認識を整理してイタリア政府市民安全局に報告されたものである。なお、国際地震学及び地球内部物理学協会（IASPEI）の総会は報告書を支持した [IASPEI, 2011]。現時点での国際的な共通認識となっている。

#### [報告書における予測可能性に関する見解]

- 地震の発生を警告できるほどに確実性の高い前兆現象は見つかっていないため、前兆現象に基づいて発生時期や場所・規模を狭く特定する決定論的な手法による予測は一般には困難であるとし、確率論的予測が用いられるべきであるという見解を表明している。

#### [実用的地震発生予測についての各国の取り組みに関する報告]

##### 中国

- 中国では、地質や歴史地震の研究と、地殻変動や宏観異常等の観測に基づく予測を行っている。1975年海城地震（M7.3）では、活発な前震活動があったことから地震前に住民が避難して被害を大きく軽減した。ただし、公式な情報が発表されたかどうかについては疑問があり [Wang et al., 2006]、またその後の地震の予測においてもこのような経験的な予測手法による同様な成功例はない。
- 1976年唐山地震（M7.8）では、海城地震と同じように観測を行っていたものの、直前の地震活動がなかったため経験的手法による予測は失敗した。
- 地震発生予測の難しさに直面し、観測データによる地震の理解を進めている。

##### ギリシャ

- 国の機関である地震防災計画機構（EPPO）が、地震対策の基本方針の調整、地震の予測の評価を行っている。
  - 1980年代からVANグループの研究者により電磁気学的な手法を用いた予測が頻繁に行われ、公式な評価がなされないまま国内外のメディアにより伝えられるなど注目されたことを受け、これにより生じる社会的問題に対応するため、1992年にEPPOのもとに科学的地震災害・リスク評価委員会が設置された。なお、電磁気学的な手法を用いた予測はこの委員会に報告されず評価を受けていないままである\*。
- \*当初、VANグループの研究者はM5以上の先行現象を観測した場合に、政府等にファックスを送るという方法を採用していたが、「受け取った／受け取らない」というような科学とは関係の無

い問題を引き起こした事から、近年はタイムスタンプがはっきりしているコーネル大学の arXiv (<http://arxiv.org/>) に論文という形で情報を公開している。予測情報公表の問題の困難さをギリシヤの例は示している。

○地震発生予測を行う公式な仕組みは無い。

#### イタリア

○地震活動や地震発生可能性、地震波エネルギー伝播を考慮した長期的な地震ハザードマップを国立地球物理火山学研究所 (INGV) が作成している。

○数か月以内の短期的な予測のための手順は確立されていない。

#### ロシア

○地震発生予測手法の開発研究がロシア科学アカデミーを中心に盛んに行われている。特に数か月から数年程度の中期的な予測が重点的に取り組まれている。

○中期的な予測に基づく地震発生の見込みに関する情報が法律に則ったルートで政府に伝えられる。

○地震活動の観測に基づく予測手法を用いて、クロノスコイ地震 (1997 年) の 16 か月前、シムシル島地震 (2006 年) の 49 か月前に予測が出され、予測した地域に地震が発生した。これらの予測に基づき緊急事態省は予防的措置を講じた。

#### アメリカ

○連邦レベルでは、地震発生予測の実用的利用のための手順は確立に至っていない。

○カリフォルニアでは 3 日間の地震発生確率を評価する短期予測が試行されていたが、予測手法や伝達の手順は決まっていなかった。

#### [諸国の地震発生予測の実験的取り組み]

○アメリカ太平洋岸にあるサンアンドレアス断層沿いのパークフィールドでは、1984 年から地震を予測する実験が始められ、米国地質調査所は、1857 年から 1966 年にかけて M6 程度の地震が 6 回発生しているという過去の地震履歴に基づき、95%の信頼水準で 1993 年 1 月までに次の M6 程度の地震が発生すると予測した。しかし、次の M6 の地震は予測された期間よりも 10 年以上後の 2004 年に発生した。短期予測のための集中的な観測が行われたが、先行現象は観測されなかった。

○トルコ北部にある北アナトリア断層帯西端のムドゥルヌ谷では、M6 程度の地震が 15 ~ 21 年間隔で発生していると推定され、1967 年以降同程度の規模の地震は発生していなかったことから地震の発生が差し迫っているとして、1984 年に地震発生予測研究のプロジェクトが始められた。規模の予測の幅は非常に大きかった ( $5.1 \leq M \leq 7.2$ )。ところが、結果としてこの地域は、1999 年のイズミット地震 (M7.4) の震源断層域となり、期間についても規模についても予測は外れた。また、短期予測も実現しなかった。

○日本の東海地域も、上述のパークフィールドや北アナトリア断層と同様、短期予測を検証する場所と見なされているが、まだ地震は発生していない。

## (2) その他の試み

[電磁気的な先行現象を用いた短期予測の試み]

- 電磁気学的な先行現象を用いて地震発生の短期・直前予測を行おうという試みがここ30年ほど、ロシア、中国、ギリシャ、日本、台湾、イタリア、インド等でなされており、2001年以降は、IUGGのワーキンググループ(EMSEV: Electromagnetic Studies of Earthquakes and Volcanoes)を中心に国際的な研究が進められている。これまでに地震と先行現象との間係について、査読誌で統計的有意性が明確に示されている観測結果のほとんどは、事例収集が容易な電離層観測や衛星観測関係 [Liu et al., 2000; Fujiwara et al., 2004; Liu et al., 2006; Moriya et al., 2010; Le et al., 2011] であったが、地磁気変化についても地上観測で初めて10年以上の観測結果を解析し、有意性が示された [Hattori et al., 2012]。
- ギリシャのVANグループは地震と地電流異常との間の相関を主張しているが、十分な統計的記述がなされているとは言えない。ただ、最近日本のグループがM3クラスの地震ではあるが、神津島の観測点から20km以内で発生した地震と地震に先行する地電流の異常変化について、極めて有意性の高い事例を発表した [Orihara et al., 2012]。
- 大地震発生数日前にGPS観測による電離層全電子数(TEC)の異常が観測されたという報告が多数なされており、統計的にも有意性が報告されている。また、フランスの地震電磁気観測衛星(DEMETER)のデータを世界中の9,000個以上の地震について解析することにより、地震の数時間前に電離層上部で観測されたVLF帯(解析に用いられている周波数は約1.7kHz)の電波強度が有意に低下していたことが示されている [Němec et al., 2009]。
- 地震現象がなぜ前駆的に電離層にまで影響を与えるのかについて、いくつかの仮説(電氣的結合、化学的結合、力学的結合)が提唱されているが、決定的なものは存在しない [Kamogawa, 2006]。
- 近年、地震に先行すると主張されている電磁気学的変化が、実は後述する臨界状態における地震発生のトリガーとなっていた可能性が指摘されている。例えば、旧ソビエトが実施していた大地への大電流注入実験で明確に地震が誘発された事例が存在する [Tarasov, 1997; Tarasov and Tarasova, 2004]。
- 電磁気学的な先行現象を用いた短期予測の試みの課題は、異常と地震との間の時間的・空間的相関は認められるものの、マグニチュードと先行現象の強度等の関係は必ずしも明らかになっていない点である。

[地震を臨界現象として扱うことによる予測の試み]

- ここ10年ほど地震活動を、震源断層域周辺の応力の状態が臨界に達した時に生じる臨界現象として扱おうという機運が広がっており、地震活動等から何らかの相関距離が伸びる(長距離相関)という現象を抽出することで、臨界に近づいたかを判断できる可能性が指摘されている [Shebalin et al., 2004; Varotsos et al., 2011]。



#### 4. 地震の前駆すべりと考えられた事例等

地震の短期予測の可能性に関する知見として、地震発生直前の前駆すべりと考えられた事例を中心に関連する観測事例を収集・整理した。

前駆すべりと推測される観測事例はあるものの、前駆すべりを捉えるための十分な観測網がある地域は限られており、確実な観測事例はない。

1944年東南海地震直前に前兆的な地殻変動が観測されていたという考え方もあったが、その後のデータ解析や現在の震源物理の知見からは、この変化を前駆すべりによるものとするには疑わしい点があり、現存のデータで確定的な結論を得ることは困難である。

一方、このような直前の前駆すべりとは異なり、プレート境界のゆっくりすべりや周辺で発生した地震の余効すべりに伴って発生する地震があることが知られている。

地震発生直前の前駆すべりを捉えるための観測網を有する地域はあまり多くないが、前駆すべりを捉えたと考えられた事例をいくつか挙げる。[なお、平成23年\(2011年\)東北地方太平洋沖地震に関連する観測事例は、以下とは別に5.にまとめる。](#)

##### [1944年東南海地震直前の地殻変動]

- 当時測量を実施していた陸地測量部の測量班の手記によると、地震発生直前に行われた測量で、700mの区間に対して4mmの異常な往復差が2区間連続して観測されており、地震発生3日前頃から掛川付近で南上りの傾斜変化が加速していたという解釈があった〔茂木, 1982; Mogi, 1984〕。【図4-1】
- しかし、その後この手記の再検討が行われ、データ解析による知見から、4mm超の異常な往復差が地震直前以外にも見られるため測量誤差の可能性があることや、傾斜変化が生じたことを認めたとしてもデータは連続的な加速を必ずしも示していないこと、傾斜変化が本物だとしてもプレート境界のすべりとしては解釈が困難で、地殻内の断層運動によるものだった可能性があることが指摘されている〔鷺谷, 2004〕。
- 傾斜変化が本物で、前駆すべりによるものだったとすると、紀伊半島沖の震源(破壊開始点)から約200km離れた掛川で前駆すべりが発生したことになり、震源物理の知見から説明が困難との指摘がある〔鷺谷, 2004〕。
- 地震発生サイクルのシミュレーションでは、すべりの加速が複数の場所から始まって、そのうちのいずれか最初に最も加速したところが最終的な破壊開始位置になるという場合があり、このように破壊開始位置と離れた場所でのすべりの加速が起こる場合もあり得る。

##### [1946年南海地震前の地殻変動]

- 1946年南海地震前に温泉の水位や湧水量の低下があったこと、また、太平洋沿岸部の浅い地下水の水位低下が、井戸枯れとして見られたことが報告されている〔水路局, 1948; 重富・他, 2005〕。これらの地下水変化を説明するための仮説として、広範囲

に地震前に地殻変動が生じたことが考えられる [京都大学防災研究所地震予知研究センター, 2005ab]。変動は小規模であったが、局所的には大きいところもあったかもしれない。

- 当時の検潮記録について、潮汐と気圧の影響を補正したうえで2つの検潮所間の潮位差をとる相対的な補正法を用いて、南海地震発生前における検潮所間の上下方向の相対的な地殻変動を検討することにより、南海地震の2~3日前から紀伊半島東側にある浦神の潮位が上昇していたことが指摘されている。この潮位変化が南海地震の前兆的地殻変動を示していると断定するには証拠が十分とは言えないものの、浦神沖においてプレート境界上ですべりが生じたとしても説明可能であることが指摘されている [小林・他, 2002]。ただし、紀伊半島の東岸と西岸では潮位の変動が違い、潮位の差をとる場合は、地殻変動がなくとも同程度の変化が生じる場合があるので注意が必要である。

[1960年チリ地震 (Mw9.5) 直前のゆっくりしたひずみ変化]

- 1960年チリ地震 (Mw9.5) の約15分前に、アメリカカリフォルニア州パサデナの長周期ひずみ地震計で周期300秒から600秒の長周期の波が観測された。この波源として本震断層の深部延長で発生したゆっくりすべりが考えられ、このすべりが前震を励起し、さらに本震に至った可能性が指摘されている [Kanamori and Cipar, 1974]。
- 長周期地震計のデータを用いた自由振動の解析 [Cifuentes and Silver, 1989] や、海水面変動に基づく近地上下変動の解析 [Linde and Silver, 1989] から、本震前にゆっくりすべりが発生していたことが示唆されている。

[南アフリカ大深度鉱山内で地震直前に震源極近傍で観測されたひずみ記録]

- 南アフリカの金鉱山内にひずみ計を設置し、掘削に伴って発生する地震の前に、震源極近傍で明瞭なひずみ変化を捉えた。ただし、より大きな地震に対して先行するひずみ変化が観測されなかった例も多数確認されている。【図4-2】

その他、プレート境界のゆっくりすべりに伴う地震活動として以下の例を挙げる。[これに関しても、平成23年\(2011年\)東北地方太平洋沖地震に関連する観測事例は、以下とは別に5.にまとめる。](#)

[2001年7月7日ペルーの地震(6月24日のMw8.4の地震の最大余震)前にGPSで観測された地殻変動]

- 2001年7月7日ペルーの地震 (Mw7.6) の約18時間前から、GPSで前駆的な地殻変動を観測した。この地殻変動はプレート境界のすべりに調和的で、前駆すべりである可能性が指摘されている。しかし、このすべりの規模はMw7.8程度と推定され、地震の規模より大きいことから、前駆すべりと整理するのは適切でないと考えられる。なお、この地震は、6月24日の地震 (Mw8.4) を本震とする最大余震である。本震

前には前駆的な地殻変動は観測されなかった [Melbourne and Webb, 2002]。【図 4-3】

[2004年11月29日の釧路沖地震前に見られた平成15年(2003年)十勝沖地震の余効変動の拡大]

○小繰り返し地震やGPSデータの解析により、平成15年(2003年)十勝沖地震の余効すべり域が東に拡大し、釧路沖の地震(M7.1)の発生を促したことが指摘されている。十勝沖地震とその後の余効すべりが釧路沖地震(M7.1)の発生に与えた影響を、応力変化の推定により評価すると、余効すべりの影響の方が4倍以上大きかったという指摘もある [Murakami et al., 2006; Uchida et al., 2009]。

[2011年10月～11月の房総半島沖のゆっくりすべり]

○2011年10月から11月にかけて、房総半島南東部付近で群発地震の活動があり、プレート境界のゆっくりすべりによると見られる地殻変動が国土地理院のGEONETや防災科学技術研究所のHi-netの高感度加速度計で観測された。傾斜変化の時間推移から推定されるゆっくりすべりの発生域の移動と、群発地震の発生域の移動は良く対応する。相似地震より求めた平均積算すべり量の推移と傾斜変化の推移は、相似地震がゆっくりすべりの主要部分で発生したことを示唆している [防災科学技術研究所, 2011b; 国土地理院, 2011b]。

○房総半島南東部付近の陸のプレートとフィリピン海プレートの境界では、2011年10月から11月にかけて観測されたように群発地震を伴うゆっくりすべりが5～7年間隔で繰り返し発生している。過去の群発地震の発生域がほぼ重なることは、ゆっくりすべりが毎回房総沖のほぼ同じ場所で発生しており、それによって、毎回地震が誘発されるとすることで説明可能である [防災科学技術研究所, 2011b]。

[2014年イキケ地震前に見られた地震活動]

○2014年4月2日にチリ北部沿岸で発生したM8.2の地震(イキケ地震)に先立って、同年1月上旬以降、本震の震源断層域周辺で小繰り返し地震を含むいくつかのまとまった地震活動が発生しており、3月中旬以降に発生した活動域がゆっくりと移動し、最終的には3月22日から25日にかけて本震の震源に向かって移動していたことが確認された。これらの地震活動域のゆっくりとした移動や小繰り返し地震の発生は、本震の震源断層域周辺でゆっくりすべりが進行していたことを示唆している [Kato and Nakagawa, 2014]。

## 5. 平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震から得られた科学的知見

東北地方太平洋沖地震で見られたとされる前兆的な異常に関する知見を収集・整理した。

東北地方太平洋沖地震発生前にはこの地域において Mw9.0 の地震が発生するとは考えられていなかった。また、東北地方太平洋沖地震発生直前には、加速するような明瞭な前駆すべりは観測されなかった。

しかし、地震発生前<sup>※3</sup>の観測データを整理すると、地震発生の可能性が相対的に高まっていることを示す複数の解析結果が得られている。ただし、これらの結果から地震の規模や発生時期との定量的な関係は必ずしも見いだせていない。

※3 ここでは数十年前から見られている現象を含む。

平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震発生前の観測データを整理することにより得られた地震発生の可能性が高まっていることを示すと考えられる解析結果を以下に挙げる。

### （1）地震活動の変化

〔静穏化〕

○本震発生の 4～23 年前から震源断層域の深部や北部の他、西南日本を含む日本全国で静穏化がみられた。ただし、静穏化が本震まで継続していなかったという報告もある [気象庁, 2008ab, 2009; Katsumata, 2011; 統計数理研究所, 2011b; 吉川, 2011; 吉川・林元, 2012]。

○データの処理方法や解析手法の違いによって静穏化域や静穏化の期間は異なってくる。

○また、東北日本の深さ 60km 以浅で発生した M3.0 以上の地震について、静穏化と活発化の双方を含む時空間的に異常な地震活動の空間分布とその移動パターンを解析したところ、2000 年から 2011 年の本震発生まで、異常な地震活動を示す領域が本震の震央付近に向かって移動していたとする報告もある [Kawamura et al., 2013]。

〔地球潮汐と地震活動の相関〕

○本震発生の約 10 年前から、最大前震 (M7.3) 及び本震の震源付近の深さ 70km 以浅での中規模 Mw5.0 以上の地震の発生に地球潮汐との強い相関がみられていた [田中, 2011; Tanaka, 2012]。

○より規模の小さな地震まで含めて M3.0 以上の全ての深さの地震について、発震機構を考慮せずに地震発生頻度と潮汐との相関を分析すると、それらの間の相関は偶然高くなり得ることも報告されている [Wang and Shearer, 2015]。

〔b 値〕

○遅くとも 2005 年頃から b 値が低下し始め、さらに本震の約 1 ヶ月前からの前震活動期で急降下した。空間的には低 b 値域と本震で大きくすべった領域には相関がある

ようにみえる [弘瀬・前田, 2011; Nanjo et al., 2012; [Tormann et al., 2015](#)]

○なお、推定された b 値を用いて地震の規模別頻度分布を外挿することにより推定される大規模地震の発生の可能性が、本震の震央付近で本震発生前の約 3 ヶ月間、それ以前に比べて高まっていたことも報告されている[[Tormann et al., 2016](#)]

補足：東北地方太平洋沖地震後の b 値の変化について、地震発生前の状態に戻っていることからいつまた巨大地震が起きても不思議ではなく地震発生はランダムに近いとの主張がある[[Torman et al., 2015](#)] が、これに対して、本震による応力降下量は十分大きく本震前の応力状態に戻るには数百年程度が必要であることや、b 値の変化は地震発生場所や発震機構解の時間変化を反映しているのではないかとの指摘がなされている[[Bürgmann et al., 2016](#)]

#### [前震]

○本震発生の約 1 ヶ月前から本震破壊開始点の北東側で群発的な前震活動が 2 回あった。これらの地震の活動域が本震の震源に向けてゆっくり拡大している様子が観測された [Kato et al., 2012]。

○今回の本震が発生した領域は同規模の地震が続けて起こりやすい領域であった [地震調査研究推進本部地震調査委員会, 1998] ため顕著な前震活動がみられたと考えられる。前震の統計解析に基づいた予測モデルによれば、最大前震 (M7.3) が発生した時点 (本震の約 2 日前) 付近では、M7.3 以上の地震が 4 日以内に発生する確率が約 20-30%であったという報告がある。しかし、ここでは M7.3 以上の地震が発生すると予測しているだけであって、M9.0 そのものの発生を予測していたわけではない [Maeda, 1996; Ogata et al., 1996; 前田・弘瀬, 2011; 統計数理研究所, 2011a; Maeda and Hirose, 2012]。

○なお、例えば日本の内陸域で、M5.0 以上の地震が発生した場合、それを上まわるマグニチュードの地震が最大半径 50 km 以内で 30 日以内に発生する確率は 3%程度であり、そのほとんどは 5 日以内に発生している。一方、平常時では日本の内陸域において M5.0 以上の地震が半径 50 km 以内で 5 日以内に発生する確率は 0.16%程度である (M5.0 以上の地震は 1970~2010 年に内陸 (37 万km<sup>2</sup>) の深さ 30 km 以浅で 222 個。ただし、群発活動が活発な伊豆半島東方沖から伊豆諸島にかけての領域は除く)。このことから、大きな地震が起きた直後はより大きな地震が普段より起こりやすくなっているといえる [明田川・福満, 2011]。

○また、東北地方太平洋沖地震の他にも、1999 年から 2011 年 1 月 1 日までに太平洋北部のプレート境界で発生した M6.5 以上の地震の多くについて、本震前に震央付近で数日から数ヶ月間の加速的な地震活動の高まりがみられたことが報告されている [[Bouchon et al., 2013](#)]。その他、南カリフォルニアで過去 19 年間に発生した M2.0 以上の地震について、前震活動の時空間的特長を、本震からの距離に対する地震数及び本震からの平均距離の逆数を用いて抽出したところ、空間的に本震に近いほど前震

活動は活発であり、時間的に本震に近いほど前震は本震の近くで発生する傾向があることが報告されている。この特徴を考慮した予測モデルでは、過去 19 年間に発生した M6.0 以上の本震 6 回のうち 5 回を予測しうる結果が得られているが、これらの本震前の期間以外にも予測確率が高くなる時期はあるため、包括的な予測の有効性については更なる検証が必要とされている [Lippiello et al., 2012]。

#### [小繰り返し地震]

- 小繰り返し地震の震源と大きな地震の主破壊域は相補関係にある。実際に 1994 年の三陸はるか沖地震のすべり量が大きかった場所と、2003 年の十勝沖のすべり量が大きかった場所は、小繰り返し地震が発生しておらず、発生領域を棲み分けしているように見える。東北地方太平洋沖地震ですべり量が大きかった領域でも小繰り返し地震が発生しておらず、固着していた可能性が高い [東北大学大学院理学研究科, 2011a; Uchida and Matsuzawa, 2013]。
- 小繰り返し地震の解析により本震前後にプレート間のゆっくりすべりに変化があったことが示されている。例えば、本震のすべり量が比較的大きかった領域の一部では、本震の約 3 年前から本震直前にかけて顕著な小繰り返し地震の発生頻度の増加が見られており、ゆっくりすべりによるすべり量が増加していたことが示唆される [Uchida and Matsuzawa, 2013]。
- また、小繰り返し地震を用いたゆっくりすべりの時空間発展の解析により、本震の震源周辺では、2010 年後半より震源のやや北を基点としてゆっくりすべりが加速しはじめ、活動が徐々に南下して最終的に 3 月 9 日の最大前震 (M7.3) 及び本震に繋がったとする報告もある [野村・他, 2013]。
- なお、本震のすべり量が比較的大きかった領域の周辺では、本震後の余効変動に対応する小繰り返し地震の増加が見られた。この傾向は、本震のすべり量が比較的大きかった領域から離れるにつれて緩やかになったり、数ヶ月遅れて見られるようになり、余効変動の周囲への伝播を反映していることを示唆している [Uchida and Matsuzawa, 2013]。
- 1984 年から 2011 年までに北海道から北関東にかけて太平洋沖のプレート境界で発生した小繰り返し地震の解析や同地域の地殻変動観測結果からプレート境界のゆっくりすべりの速度がプレート境界の広い範囲で周期を持って変化していることが見出され、この速度が増加している期間に規模の大きな地震が発生する傾向があり、東北地方太平洋沖地震の発生もこの期間に含まれていたことが報告されている [Uchida et al., 2016]。

#### [低周波微動]

- 東北地方太平洋沖地震の震央付近に複数設置されていた海底地震計のうち海溝軸寄りの観測点で 3 日以上継続時間を持つノイズレベルの増加が、海底圧力計のデータから示唆される本震前のゆっくりすべりの発生 [Ito et al., 2012] と同時期に 3 回観

測された。同様の現象は、同じく海底圧力計のデータから示唆される 2008 年 11 月のゆっくりすべりの直前にも一度観測されていた。観測されたノイズは 5-8Hz の低周波に富み、その増加はゆっくりすべりに伴う小規模な低周波微動によることを示唆する。ノイズレベルの増加がプレート境界で発生する低周波微動によるものとする、その発生位置は東北地方太平洋沖地震で大きなすべりが生じた領域内のプレート境界浅部に推定される [Ito et al., 2015]。

#### [その他の地震活動]

○地震活動が他の地震の余震とそれ以外の非地震性の载荷に伴う地震に分類されるといふ考えに基づいて、プレート間のゆっくりすべり等による非地震性の载荷に伴う地震発生頻度の高まりを抽出すると、2011 年 1 月中旬から 2 月中旬にかけて本震の震央付近でゆっくりすべりに起因すると考えられる小規模・短期間 (20km・240 日程度) の地震発生頻度の高まりが抽出された。同様 (20km・40 日程度) の地震発生頻度の高まりは東北地方太平洋沖では他の期間にもしばしば見られ、プレート境界浅部で発生しやすい。なお、大規模・長期間 (80km・100 日程度) の発生頻度の高まりの多くは、福島県沖から茨城県のプレート境界深部で見られ、プレート間の固着が弱い領域で発生していることや、小繰り返し地震の解析や同地域の地殻変動観測結果から推定されるゆっくりすべりの速度変化の周期 [Uchida and Matsuzawa, 2013] と同程度の周期で発生していることが指摘されている。これらの結果からは地震活動の解析がゆっくりすべりの検出に役立つ可能性が示唆される [Marsan et al., 2013]。

## (2) 地殻変動

### [長期的変動]

○本震発生の数年前から福島県沖では、M7 クラスの地震の余効変動としては通常と異なった地殻変動が観測されていた。これは広範囲でプレート間の固着の程度が弱まっていた (ゆっくりすべりが大きくなっていた) ことを示唆している [気象研究所, 2011; 国土地理院, 2011a; 西村, 2011; Suito et al., 2011; Ozawa et al., 2012; Mavrommatis et al., 2014;]。

○海溝軸近傍の変位をゼロに拘束せずに固着の程度を推定すると、地震時のすべり量が大きかった宮城県沖の海溝軸近傍では、1997 年以降すべての期間でプレート間が強く固着が大きかっていたと仮定しても陸上の GPS データを説明できることがわかった [海上保安庁, 2011; 気象研究所, 2011; 国土地理院, 2011a; 西村, 2011, 2012; Suito et al., 2011; Ozawa et al., 2012]。

○1996 年 3 月から 2011 年 3 月 8 日までの GEONET による地殻変動データから Mw6 ~8 の地震やその余効変動の影響、年周変化を取り除き、2002 年以前のデータから推定したトレンドとの差をプレート間のすべりによるものとして解析すると、宮城沖から福島沖のプレート間の深部側で Mw7.7 に相当するすべり量の増加が推定される [Yokota and Koketsu., 20145]。

○GPS／音響測距結合方式による本震前 9 年間の宮城沖と福島沖の海底地殻変動の観測結果は、2007 年頃からの宮城県沖のプレート間の固着が 2005 年宮城沖地震(M7.2) 以前より弱かったこと、また福島県沖のプレート間の固着が宮城県沖よりかなり弱かったことを示している [海上保安庁, 2011; Sato et al., 2013]。

補足：東北地方太平洋沖地震の発生直後の数年間にその震源断層域上で観測された海底地殻変動の大部分は、マンタルの粘弾性変形に起因するものとして説明可能であることが報告されている [Sun et al., 2014]。また、このようなマンタルの粘弾性変形を考慮したモデルにより地震発生直後の余効変動における粘弾性変形の効果を検討したところ、Mw8.0 を超える大規模な地震の発生直後には粘弾性変形の影響により陸域と海溝軸付近で逆向きの地殻変動が生じるとともに震源断層域の陸側端周辺で沈降が生じること、また粘弾性変形の影響の大きさは沈み込む海洋プレートの厚さや粘性係数等の条件に依存するものの Mw7.5 以上の地震の余効変動においては粘弾性変形の効果が無視できない可能性があることが報告されている [Sun and Wang, 2015]。

#### [短期的変動]

- 震源に近い位置にある海底圧力計で、本震の 1 ヶ月前ぐらいからゆっくりすべりによるものと考えられる海底の昇降変化が観測された。同様の变化は 2008 年 11 月にも観測されていた。陸上でも東北大の金華山の体積ひずみ計で海底圧力変化に同期した変化が観測されたとの報告がある [Ito et al., 2012]。陸上の GPS データ及び傾斜データでは事前の変化は観測されなかった (国土地理院, 2011a; 防災科学技術研究所, 2011a)。
- 本震の 2 日前に発生した前震後に余効すべりが発生し、本震の破壊開始点に向けて拡大していった。ただし加速的な変化は見られなかった [東北大学大学院理学研究科, 2011b]。海底圧力計のデータから潮汐や気圧変化による地殻変動以外の要因による変動を除去することにより、震央付近の海底上下変動の時系列がノイズレベル 2~4cm で得られた。このデータには 3 月 9 日の最大前震の後に変化が見られるが、この変化を余効変動として対数関数でフィッティングして差し引いたデータからは、本震前にノイズレベル以上の変化を見出すことは出来なかった。ノイズレベルに相当するプレート間のすべりの検知限界は、すべりが本震の震源付近で発生した場合には Mw6.2、すべりが震源直近の海溝軸付近で発生した場合には Mw6.0 程度であった [Hino et al., 2013]。

補足：海底圧力計や陸域の地殻変動観測により検出されたゆっくりすべりについては、以下のように、地震活動の変化からも同じゆっくりすべりに起因すると考えられる変化が検出されていることが報告されているものがあり、地震活動の観測からもゆっくりすべりに関連する情報が得られる可能性が示唆されている。

- 本震前約 1 ヶ月間及び 2008 年 11 月に海底圧力計で検出されたゆっくりすべり [Ito et

[al., 2012](#)] と同時期に、海底地震計で低周波微動によると考えられる低周波に富むノイズの増加が観測された [[Ito et al., 2015](#)]。本震前約 1 ヶ月間には、群発的な前震活動の活動域が本震の震源に向けてゆっくり拡大している様子が観測された [[Kato et al., 2012](#)]

○小繰り返し地震の解析により検出されたゆっくりすべりの速度の周期的な変化は、陸域の地殻変動観測データとも整合的である [[Uchida et al., 2016](#)]。また、地震活動の解析からも同程度の周期の変化が検出されている [[Marsan et al., 2013](#)]。

○海底圧力計や陸域の地殻変動観測により検出された 3 月 9 日の最大前震後のゆっくりすべり [[Hino et al., 2013](#)] は、小繰り返し地震の増加としても捉えられている。また、同時期に群発的な前震活動の活動域が本震の震源に向けてゆっくり拡大している様子も観測された [[Kato et al., 2012](#)]。

### (3) 電離層及び大気圏関係の現象

○電離層全電子数 (TEC) を含む複数の要素で本震の数日から数十分前に変化が報告されている [[日置, 2011](#); [Heki, 2011](#); [Ouzounov et al., 2011](#); [He et al., 2012](#)]。

○電離層全電子数 (TEC) に関して、~~ただし、これは GNSS によって得られる視線方向に積分した全電子量 (Slant Total Electron Content: STEC) を解析した結果~~ [[日置, 2011](#); [Heki, 2011](#)] については、衛星の視線方向では仰角の変化で STEC の値が U 字型に大きく変化し、その補正に任意性が出てしまうためという指摘や、~~あるいは、宇宙天気~~に起因する、たとえば津波による海面変動がもたらした電離層擾乱による見かけの変動にすぎないという考え方もある [[Kakinami et al., 2012](#)]。

○衛星高度の影響を受けにくい鉛直方向の全電子量 (VTEC) の解析により、東北地方太平洋沖地震を含む近年の Mw8.2~9.2 の 8 事例で、地震発生の 25~80 分前に同じような変化が検出されることが報告されており、Mw8.5 以上の地震については電離層擾乱により検出が妨げられた 2005 年スマトラ島沖地震 (Mw8.6) を除く全 5 事例で変化が検出されている。同様の変化は、宇宙天気に起因して地震とは無関係にしばしば発生しており、ある観測点の 3 週間のデータから推定される 1 時間あたりの同程度の変化の発生率は 0.1 程度である。~~が、しかし、Mw8.5 以上の 5 全ての事例で地震前 1.5 時間に同様の変化が偶然検出される確率は  $(1.5 \times 0.1)^5$  と十分小さいため、これらの地震の前に、このような効用の変化が検出されたことは偶然とは考えにくいことが指摘されている~~ [[Heki and Enomoto, 2015](#)]。

○地球大気上層部から宇宙へ放射される赤外線領域のエネルギー (Outgoing Long-range Radiation, OLR) が震源断層域付近で数日前から顕著な異常を示していたという報告が NASA を中心としたグループから報告されている [[Ouzounov et al., 2011](#)]。ただし、統計的有意性は示されていない。

#### (4) 地下水の変化

○本震の約3か月前から、震央の北西155kmの地点にある深さ2000mの井戸で、水位が10m以上、水温が1℃～2℃低下していたことが報告されている。本震発生前3.5年間のデータの中で、水位と水温の以上な変化が同時に見られたのは、本震発生直前の約3ヶ月間のみであり、潮汐や気圧変化、降水の影響は普段から見られなかった。この他、この付近の沿岸で本震の1か月前から井戸水が汲み上がらなくなったことが報告されている。観測された水位や水温の異常は、プレート境界での東北地方太平洋沖地震の前駆的なゆっくりすべりに伴う岩盤中の圧力低下により、新たに地下水の通り道が出来たことに起因する可能性が指摘されている [Orihara et al., 2014]。また、その後行われた追加調査により、本震前に日常的な使用が確認された三陸地方の16地点の井戸について聞き取り調査を行った結果、気仙沼市の1地点で時期は不明だが本震前に井戸水の濁りがあったという証言が得られたこと、また他の15地点については本震前の異常に関する証言は得られなかったことが報告されている [織原・鴨川, 2016]。

## 6. 地震モデルとシミュレーションから得られた科学的知見

地震の予測可能性に関わる地震モデルやそれに基づくシミュレーション研究の知見を収集・整理した。

地震モデルは、震源断層域に破壊単位<sup>※4</sup>がどのように配置しているかという点で2つの極端な場合に分けて考えることができる。一方は破壊単位がただひとつ存在するという単純なモデル（固有地震モデル）、もう一方は大小さまざまな破壊単位が存在するという複雑なモデル（階層的不均質モデル）である。単純なモデルでは前駆すべりが現れ、複雑なモデルでは前駆すべりは必ずしも現れない。また、単純なモデルでは発生する地震の規模は予測できるが、複雑なモデルでは確率論的要素の影響もあり確度の高い予測は困難である。現実の震源断層域の複雑さについて定量的な見積もりができていないため、前駆すべりの検知可能性や規模の予測可能性は評価できていない。

地震モデルやそれに基づくシミュレーション研究によると、過去の地震活動や各種観測データと矛盾しないように地震発生サイクルを再現し、どのような前駆すべりが発生するかを検討することは可能である。ただし、過去の地震履歴に関する情報は十分には得られていないため、前駆すべりや引き続き発生する地震の規模について確度の高い予測は困難である。

また、複雑さを考慮したシミュレーションでは、地震前の前駆すべりと考えられる現象が発生しても必ずしも地震が発生しないこともあり、地震発生に至る過程が多様であることが示されている。

シミュレーションでは、前駆すべりのほか、震源近傍でのゆっくりすべり、前震とその余効すべり、近傍で発生した地震の余効すべり等の地震発生時期と関係する現象が観測されることが示されている。これらのすべりの発生中など、プレート間の固着状態に普段と異なる変化が観測されている時期には、不確実ではあるが、地震が発生する危険性が普段よりも高まっている状態にあると考えられる。

※4 面的な広がりを持つ震源断層域内の領域で、その内部で破壊条件が一定とみなせる場所を、ここでは破壊単位と呼ぶ。破壊単位には様々な大きさがあり得、また、大きな破壊単位は、それよりも小さな破壊単位を内包することもある。

### (1) 地震モデルによる前駆すべりの検知可能性の違い

[前駆すべりについて]

○前駆すべりは、理論的には、すべり領域を広げるのに必要なエネルギーが他からもたらされない場合（小規模地震からの連鎖や近傍の大中地震の影響がない場合）、前駆すべりが破壊エネルギー（仮定するモデルによっては破壊に伴うすべり量を規定する長さパラメータ（ $D_c$ ）で表されるに比例することもある）に応じた規模で、破壊核形成過程として発生する [大中・松浦, 2002; Scholz, 2002]。この理論では、破壊エネルギーは破壊単位の大きさに依存し、破壊単位が大きいほど破壊エネルギーも大きいと考えられているため、検知できるほどの前駆すべりが大地震の前に発生する可能性があるとされている。なお、破壊単位の大きさが大きい（地震規模が大きい）ほど

再来間隔が長く、その間の震源域深部延長でのすべりによる応力集中に耐えられるためには、破壊開始位置付近の破壊エネルギーが大きい必要のあることが数値シミュレーションで示されている [Kato, 2012] (ただし、地震時の大すべりが Thermal pressurization によるものである場合 [例えば Mitsui et al., 2012]、この限りではない)。

[地震モデルと前駆すべりの検知可能性]

- 固有地震モデル：地震の震源断層域全体が一定の破壊エネルギーを持つとする極端に単純なモデル。このようなモデルでは、大規模な地震の前に検知可能な規模の前駆すべりが発生する可能性がある。
- 階層的不均質モデル：震源断層域全体が空間的な階層構造を持ち、さまざまな大きさの破壊単位がべき分布\*に従って存在するような極端に複雑なモデル[Ide and Aochi, 2005]。このモデルでは、破壊エネルギーが小さい場所から始まった地震が動的に連鎖して拡大した結果として大規模な地震が発生することが予想される。前駆すべりの規模は、最初の破壊の規模に依存し、最初の破壊が非常に小さい場合には、前駆すべりは必ずしも発生するとは言えず、発生したとしてもその規模は非常に小さい。  
※どの大きさを見ても、それよりも一回り小さなものが一定の比率で多く存在していて、特徴的な大きさが無い分布。
- 地表に露出した断層帯の位置、形状の観察では、異なる長さの断層が多数入れ子になっているという観察例もある [Swanson, 2006]。【図 6-1】このことは、震源断層域が複雑な構造を持つことを示唆すると考えられる。
- 規模の異なるいくつかの地震について地震波形の最初の部分を比較すると、ほとんど同じように見える。この観察は、これらの地震が同程度の小さな破壊単位から動的に連鎖して拡大したことを示唆しており、階層的不均質モデルに調和的である [Ide and Aochi, 2005]。
- 小さな破壊から大きな破壊へ動的に連鎖する場合に、小さな破壊によって生じる地震波形が、単独で発生する小さな地震の波形と同じようなものとして独立して認識される[例えば Ide and Aochi, 2005]ためには、大きな破壊の破壊核と小さな破壊単位とが同程度のサイズである必要があり、その場合には大きな破壊の準備状況に応じて小さな破壊が単独で起きたり、大きな破壊に動的に連鎖したりすることが、階層的不均質モデルの最も単純な場合（1つの大きな破壊単位の内部に、1つの小さな破壊単位が存在する）のシミュレーションの結果示されている[Noda et al., 2014]。このような条件のもとでは、小さな破壊から大きな破壊に動的に連鎖する場合だけでなく、小さな破壊後の余効すべりを経て大きな破壊が発生する場合・大きな破壊単位内の前駆すべりをともなう場合などが、同じ摩擦パラメタでの繰り返し破壊の中で生じることが確認されている[Noda et al., 2013a]。つまり、階層的不均質モデルにおいても、前駆すべりをともなう場合と、ともなわない場合がある。
- 実際の地震は、2つの極端なモデル（固有地震モデルと階層的不均質モデル）の間に

あると考えられる。ただし、どちらにどの程度近いかという定量的な議論はできていないため、前駆すべりの検知可能性は評価できていない。【図 6-2】

## (2) シミュレーションから見た予測可能性

[地震発生時期と関係する現象]

- 加速する前駆すべり：南海トラフのようにプレート間の固着が強い状況を再現した上で、これまでの南海トラフ沿いの観測事実に即して本震よりも一回り小さな部分的破壊が生じないということを仮定すると、加速する前駆すべりが発生する結果が得られる [Hori, 2006; 弘瀬・前田, 2010]。ただし、常に連鎖破壊を起こすために部分的破壊が起きない場合には、前駆すべりが小さくなるといったことや、構成則によっては前駆すべりが加速しながらすべり領域が縮小していく [Noda et al., 2013b] といったことなどもあり、規模については、現状では評価できていない。このため、シミュレーションから見ても、前駆すべりを確実に観察観測できるとは言えない。
- 震源近傍でのゆっくりすべり、前震活動、前震とその余効すべり：階層的な破壊単位の分布とプレート間の固着が弱い条件を仮定すると、本震前に期待される現象として定性的には再現可能である [例えば Nakata et al., 2016]。プレート境界の強く固着している領域より深部で繰り返し発生するゆっくりすべりを再現するシミュレーションでは、大規模な地震の発生が近づくにつれてゆっくりすべりの規模や繰り返し間隔が変化する可能性が示されている [Matsuzawa et al., 2010; Ariyoshi et al., 2012]。従来、南海トラフは固着の強い領域と認識されていたが、海底地殻変動観測データの解析により、固着の弱い領域も存在することが明らかになった [Yokota et al., 2016]。したがって、南海トラフにおいても震源域近傍でのゆっくりすべりや前震等が生じる可能性を今後検討する必要がある。
- 単純な階層的不均質モデルにおいて前駆すべりをともなわない場合のうち、小さな破壊後に余効すべりを経て大きな破壊が発生する場合には、小さな破壊だけで終わる場合の余効すべりとは領域全体のモーメント速度に有意な違いがみられる（両方の場合を複数回計算した結果の比較） [Noda et al., 2013a]。階層的不均質モデルで M7 と M9 が共存する地震の繰り返しを表現したシミュレーションにおいて、M9 地震の発生から遠い時期の M7 地震の余効すべりは、発生が近い時期の余効すべりよりも大きなモーメントになる [Hori and Miyazaki, 2011]。
- 近傍で発生した地震の余効すべり：南海トラフ全域で地震が起こらず途中で破壊が停止した場合（例：1944 東南海地震）、その周辺で発生する余効すべりの起こり方によって、南海トラフ沿いで次に発生する地震（例：1946 南海地震）までの発生間隔が異なることがある。

[大地震発生に至る多様さ]

- 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さが示されている[Noda et al., 2013; Noda and Hori, 2014]。このため、地震前に観測された現象から一対一の対応関係で大地震を予測することは極めて困難であると言える。なお、ここでのゆっくりすべりは、東北地震前に見られたような大地震の震源域内部で発生するものであり、豊後水道や東海で観測されている震源域深部でのゆっくりすべりとは性質が異なる可能性がある。震源域内とは異なる摩擦特性を与えて深部延長でのゆっくりすべりを表した例としては[Kato, 2003; Shibazaki and Iio, 2003]がある。最近では前駆すべりよりも、ゆっくり地震のモデルとして用いられており[例えば Matsuzawa et al., 2010]、前駆すべりとしての性質の検討は十分には進んでいない。

- 例えば、東海及び豊後水道のゆっくりすべりの繰り返しを再現するシミュレーションの例では、紀伊半島沖で前駆すべりが発生する結果も得られているが、仮定するパラメータの値によっては豊後水道のゆっくりすべりが加速してゆっくりすべりの縁付近から破壊が開始する場合がある。また、ゆっくりすべりが大地震に至らない場合もある。なお、この例では、シミュレーションを行ったパラメータ範囲では、東海地震は単独では起きなかった [弘瀬・前田, 2010]。ただし、海底地殻変動データ解析結果を考慮したシミュレーションでは東海（遠州灘沖を含む）からの発生も見られる。
- 足摺沖から破壊開始して紀伊半島の西側の地震（南海地震）が東側（東海地震・東南海地震）よりも先に起こる場合が、シミュレーションでは見られる。またその中で、1968年日向灘地震の震源域でM7クラスの地震が発生すると、数十年以上早く西側の地震が早く起こる（誘発される）場合がある[Hyodo et al., 2016]。
- 実際にゆっくりすべりを観測した場合に、それが地震につながる前駆すべりであるのか、地震につながらないゆっくりすべりであるかを識別することは困難である。そもそも、前駆すべりだけで大地震につながるかどうかを判断するべきではなく、「地震発生時期と関係する現象」で示した現象を活用したり、東北地方太平洋沖地震の先行現象に示されたような様々な時空間スケールの現象に基づいて大地震の発生準備が整っているかどうかを評価することも重要である。

[シミュレーションによる予測可能性]

- Jordan, et al.[2011]にもある通り、決定論的予測（予知）は非常に困難で、確率論的予測が用いられるべきであり、そのためには地震活動データと統計モデル（例えば ETAS モデル,Ogata [2011]など）をベースにした予測は現時点の地震学として可能である (Tsuruoka, et al., [2012])。さらに、普段と異なる複数の現象を組み合わせ、地震発生の予測の確率利得を評価することが今後必要になる。
- こうした予測とは別に、地震波や地殻変動のリアルタイム連続観測データの逐次解析によって、現在の地下の状態（プレート境界の固着・すべり状態や周辺の地震活動）をモニタし、それらに整合する複数のシミュレーション結果を加えることで、現状をその都度理解・説明するとともに、その後起こりうる複数の現象を検討するという

- 意味での予測を行うことは、技術的には可能であり、近い将来実現可能と言える。
- ただし、問題の持つ自由度の高さや不確実性から、将来起こりうることを本当の意味で網羅的には調べられず、バイアスがかかることは避けられない。あくまでも、人間が解析結果を見て頭で考えるだけでは見落とすようなシナリオを補うためのものであって、この予測結果だけにもとづいて行政的な判断をするためのものではない。
  - 現状を逐次理解し、近い将来に起こりうることを検討するという目的で、現在の地下の状態をモニタするためのデータ解析をする際には、分野内である程度コンセンサスのとれたモデルを用いて解析を行うとともに、モデルや観測データの持つ誤差を適切かつ定量的に評価することが必要不可欠となる。
  - プレート境界のすべりをシミュレーションするためには、シミュレーションモデルにプレート間の摩擦構成則等のモデルを仮定した上で、そのパラメータをも与える必要があるが、これらモデルやそのパラメータを正確に与えることは不可能であり、シミュレーションの結果にはモデルの不完全性による誤差が含まれていることに留意する必要がある。
  - シミュレーションにより精度の高い予測を行うには、過去の断層すべり履歴を正確に記述できる必要があるが、現状では過去の履歴に関しての情報は十分に得られていない。このため意味でも精度の高い予測は難しいが、様々な条件の下でのシミュレーションから、過去の履歴に関する情報と矛盾しないものを絞り込み、起こり得るシナリオをモデルが表せる範囲で網羅的に示すことはできる。
  - ただし、複雑さを考慮したシミュレーションでは、地震前の前駆すべりと考えられる現象が発生しても必ずしも地震が発生しないというように、地震発生に至る過程が多様であることが示されている。従ってこのことからも、前駆すべりから規模や発生時期を特定して次の地震を予測することは難しい。
  - シミュレーションでは、前駆すべりのほか、震源近傍でのゆっくりすべり、前震とその余効すべり、近傍で発生した地震の余効すべり等の地震発生時期と関係する現象が観測されることが示されている。ゆっくりすべりの発生中など、プレート間の固着状態に普段と異なる変化が観測されている時期には、不確実性は伴うものの、それ以外の期間に比べて地震が発生する危険性が普段よりも高まっている状態にあると考えられる。
  - 以上のことを踏まえて、大地震発生に至る過程として様々な場合が起こりうることを前提として、また、初期条件やモデル、観測データの誤差などに起因する曖昧さを前提として、それら様々な場合を可能な限り網羅的にシナリオとして事前に多数用意し、リアルタイムに観測される海底ならびに陸上の地殻変動連続データと逐次比較し、データとの整合性に応じた尤度で重み付けをすることで、その後の固着・すべりの推移を予測する手法が提案されている[Hori et al., 2014]。さらに、逐次観測されるデータに応じてパラメータや初期値を改善する手法や、モデル変数のうちで固着・すべりを反映するすべり速度を直接的にデータ解析から推定した上で、応力や強度に対して様々なシナリオを用意するといった手法の研究も進められている。いずれにしても、上で

述べたバイアスの存在等を踏まえて、適切に活用する必要がある。

### (3) 地震の規模の予測

- 固有地震モデルでは地震の規模をあらかじめ推定することが可能だが、断層が階層的不均質を持つモデルでは、地震の規模が大きくなるかどうかは、断層の破壊が動的に連鎖する確率で決まるため、地震の最終的な規模をあらかじめ推定することは困難である。
- 固有地震的な振る舞い（ほぼ同じ規模の地震がほぼ同じ間隔で繰り返す）をしてきた釜石沖の地震の規模が、東北地震後に大きく変化していることが知られている。このことは、固有地震的な場合ですら、規模の予測が困難であることを示している。一方で、規則的な地震を繰り返している震源域を余効すべりが通過することによる応力や強度の変化によって、このような現象を半定量的にシミュレーションで再現することができている[Ariyoshi et al., 2014; Yoshida et al., 2016]。
- 長期的な過去の履歴に関しての情報が十分に得られていないためことによる初期条件の曖昧さやモデルの誤差等によりシミュレーションによる精度の高い予測は困難だが、地震間のすべり欠損率の分布と過去に起きた M7 以上の地震の震源域の分布の整合性[Hashimoto et al., 2009; 2012]があることから、地震の規模についても、得られたシナリオの中から起こり得る範囲を示すことはできる。その際、得られた結果の妥当性を評価するには、それらのシナリオによって発生する地殻変動と津波をシミュレーションし、それらを津波高さ分布や遡上域を、歴史資料や地質情報と照らし合わせることが有効である[例えば Hyodo et al., 2015]。ただし、すべり欠損率が低い場所でも大すべりを起こす場合もある[Noda and Lapusta, 2013]ので、現在のすべり欠損率分布だけに依存したモデルで十分と考えるのは危険である。

## 7. 南海トラフ沿いの大規模地震の規模と発生時期の予測可能性に関する科学的知見

以上の知見を踏まえ、南海トラフ沿いの大規模地震の規模と発生時期の予測可能性に関する科学的知見を整理した。

南海トラフ沿いのプレート境界において発生した過去の大規模地震には多様性が認められ、震源断層域が広がる範囲、すなわち地震の規模は確率的にしか評価できないと考えられる。このため、その範囲を事前に高い確度で示すことは極めて難しい。しかし過去の地震の発生履歴を考慮すると、豊後水道付近から紀伊半島沖付近までの領域及び紀伊半島沖付近から遠州灘もしくは駿河湾までの領域を震源断層域として同時に、もしくは時間差を持って発生するなど様々な場合が考えられる。

日本海溝と南海トラフの沈み込み帯を比較すれば、南海トラフのほうが、単純な固有地震モデルではないが、相対的には固有地震モデルに近いと考えられる。すなわち、南海トラフ沿いの地震では、日本海溝沿いの地震に比べて、現状の観測技術で検知し得る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。しかし、南海トラフについても破壊単位が複数あると考えられ、規模や発生時期に関する確度の高い予測は難しく、検知限界を下回るすべりからいきなり地震に発展することや、あるいは検知されたとしても地震が発生しないことがあり得る。

現在の科学的知見からは地震の規模や発生時期を高い確度で予測することは困難である。一方、観測データの変化に基づいてプレート境界のすべり等の固着状態の変化が検知できれば、不確実性は伴うものの地震発生の危険性が相対的に高まっているということは言及できそうである。このようなプレート間の固着状態変化の典型例であるゆっくりすべりは、過去には、継続時間のごく短いものから 5~6 年にわたり観測されたものまでである。

### (1) 規模の予測可能性

○過去の地震の発生履歴からは、南海トラフ沿いの大規模地震の震源断層域の東端は駿河湾、西端は豊後水道付近と考えられる【図 7-1】。また、過去の地震は、豊後水道付近から紀伊半島沖付近までの領域及び紀伊半島沖付近から遠州灘もしくは駿河湾までの領域をそれぞれ震源断層域として地震が発生し、それらが同時あるいは 2 年程度までの時間差をもって発生するというように多様性を持つ [南海トラフの巨大地震モデル検討会, 2011]。

○なお、駿河湾周辺を震源断層域とする東海地震が単独で発生した事例は知られていない。また、現時点での気象研究所のシミュレーションモデルでは、東海及び豊後水道のゆっくりすべりの繰り返しは再現されるが、東海地震が単独で発生するシナリオは得られていない [弘瀬・前田, 2010]。

○南海トラフ沿いのプレート境界は、地震の発生数が少なく、大きな破壊単位の存在が想起される一方で、日本海溝沿いのプレート境界では M7 級までの様々な大きさの地震がかなりの頻度で発生していることから、南海トラフ沿いのほうが日本海溝沿いよりは、単純な固有地震モデルではないが相対的により固有地震モデルに近いと考えら

れる。しかし、近年の調査により、南海トラフの過去の大規模地震においても、多様な断層運動が起きたことが推定されつつあり、破壊単位が複数あると考えられ、極めて単純な「固有地震モデル」の適用は難しい。このような場合には確率論的要素等の影響があり、確度の高い予測は難しい。

- 6. で示したように、実際の地震が2つの極端なモデルのどちらにどの程度近いかという定量的な議論はできていない。このため南海トラフにおいても、前駆すべりの検知可能性は評価できていない。
- 6. で示したように、シミュレーションにより精度の高い予測を行うには、過去の断層すべり履歴を正確に記述できる必要があるが、現状では過去の履歴に関する情報は十分に得られていない。このため、南海トラフ沿いのある震源断層域で地震が発生した場合、別の震源断層域でも地震が発生する可能性はあるが、どの程度の時間差で発生するかを予測することは困難である。
- 南海トラフの巨大地震モデル検討会〔2012b〕では、日向灘の南部に海嶺が存在することから、この部位を震源断層域を分ける領域として整理したが、2007年のソロモン諸島の地震のように、構造不均質を越えて震源断層域が広がった例もある〔Miyagi et al., 2009〕。日向灘周辺のプレート境界がどういう性質をもっているか不明なため、モデル化が困難で、シミュレーションからは本当に構造不均質を越えて破壊が広がるかどうかは分からない。
- 地震時に複数の領域が連動するかどうかは確率的に表現することが適切であるが、現在の科学では観測データからその確率を見積もることは困難である。
- これらのことから、仮に想定東海地震の震源断層域で前駆すべりが検知できた場合、どの程度の規模の地震まで成長するのか（日向灘まで連動するのか否か）を予測することは困難であると考えられる。

## （2）発生時期の予測可能性

- 4. で示したように、1944年東南海地震直前に観測された前兆的な地殻変動が前駆すべりに該当するものという考え方もあったが、その後のデータ解析や震源物理の知見から、前駆すべりによるものと解釈するのは困難であり、現存のデータで確定的な結論を得ることは困難である。
- これまでに前駆すべりが発生したと広く認められている事例はほとんどないが、プレート境界のうち固着していると考えられる領域でゆっくりすべりが発生していることが地殻変動等の観測で確認された場合、過去の観測事実と矛盾しないシミュレーションのシナリオを考慮すると、それが前駆すべりである可能性がある。前駆すべりがシミュレーションの結果に見られるように加速する場合にはその加速の状況が継続する場合の地震発生の時期を予想することはできるが、必ずしもそのような加速があらわれるとは限らない。また、ゆっくりすべりやその加速が地震に至らないことから、一般には地殻変動観測により捉えたゆっくりすべりに基づいて地震の規模や発生時期を高い確度で予測することは困難と考えるべきである。また、発生時期

を予測するその他の手法は現時点で見出されていない。

- 南海トラフ沿いのプレート境界における地震の発生状況は、東北地方太平洋沖に比べると、単純な固有地震モデルではないが、相対的には固有地震により近い地震モデルを南海トラフに適用できることを示唆している。この仮定が正しいならば、南海トラフ沿いで観測可能な規模の前駆すべりが発生する可能性は東北地方太平洋沖よりも相対的に高い。
- 現在の観測体制では、例えば東海地域の陸域で  $M_w5.0\sim5.5$  程度のプレート間すべりがあれば検知でき、南海トラフ沿いのその他の陸域で  $M_w5.5\sim6.0$  程度のすべりを検知する能力がある。
- 紀伊半島沖や豊後水道のゆっくりすべりが加速して大規模な地震に至る場合もあることが、シミュレーションから一つのシナリオとして示されている。しかし、現状の観測点配置によるこの地域におけるゆっくりすべりの検知能力は上述のとおり東海地域に比べて低い。ひずみ計等の地殻変動の観測点を増やすことにより検知能力の向上が期待できる。
- 東北地方太平洋沖地震の知見から考えると、本震の発生前に長期的変化が現れる可能性がある。例えば、ゆっくりすべりの発生や活動変化、地震活動の静穏化、地球潮汐と地震活動の相関の高まり、 $b$  値の減少等の長期的変化が現れる可能性がある。【図 7-2】 これらの項目を総合的に監視することで、地震前の中・長期的な異常を捉えられるかもしれない。ただし、南海トラフ沿いで観測される地震は数が少ないため、仮に地震活動の静穏化等の変化があったとしても、現状の観測体制ではその検知は困難である。
- DONET の整備が進められておりにより、従来捉えられていなかった海底下の微小地震活動も捉えられるようになりつつある。
- 5. で示したように、地震計や海底圧力計により、ゆっくりすべりに関連する情報が得られることが分かってきた。海域におけるこれらの観測の強化により、緊急地震速報や津波警報への寄与のみならず、地震発生予測に関する調査研究の進展が期待される。
- GPS/音響測距結合方式による海底地殻変動観測により、南海トラフ沿いのプレート間の固着状態が明らかになってきている [Yokota et al., 2016]。
- 6. で示したように、前駆すべりのほか、震源近傍でのゆっくりすべり、前震とその余効すべり、近傍で発生した地震の余効すべりの地震発生時期と関係する現象が観測されることが示されており、また、4. や5. で示したようにこれらの現象が地震前に観測された事例もある。南海トラフ沿いにおいても、このような前震やゆっくりすべり等が観測される時期は、それに引き続いて隣り合う震源断層域で大きな地震が発生する可能性が高まっていると考えられる。ただし、発生時期や発生する地震の規模についての精度の高い予測は難しい。

## 8. おわりに

本調査部会では、南海トラフ沿いの大規模地震の発生の予測可能性について、現時点における科学的知見を収集・整理した。本報告の主なポイントは、次のとおりである。

### [南海トラフで発生する地震の多様性]

- 過去の事例から見て、南海トラフの地震の発生には多様性がある。駿河湾から四国沖にかけての複数の領域で同時に発生、もしくは時間差をおいて発生するなどの様々な場合が考えられる。

### [地震の規模や発生時期の予測の可能性]

- 地震の規模や発生時期の予測は不確実性を伴い、直前の前駆すべりを捉え地震の発生を予測するという手法により、地震の発生時期等を確度高く予測することは、一般的に困難である。
- 南海トラフ域は、日本海溝域と比べると、現状の観測技術で検知し得る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。その場合でも、前駆すべりに基づく地震の規模や発生時期に関する確度の高い予測は難しく、検知限界を下回るすべりからいきなり地震に発展することや、あるいは検知されたとしても地震が発生しないことはあり得る。
- ゆっくりすべりが拡大しているなど、プレート間の固着状態に普段と異なる変化が観測されている時期には、不確実ではあるが、地震が発生する危険性が普段より高まっている状態にあるとみなすことが出来る。
- この場合においても、南海トラフ沿いのいずれの領域で地震が発生するか、あるいは複数の領域で同時に発生するかなど、発生する地震の領域や規模の予測は困難である。

以上からわかるとおり、現在の科学的知見からは、確度の高い地震の予測は難しい。ただし、ゆっくりすべり等プレート間の固着の変化を示唆する現象が発生している場合、ある程度規模が大きければ検知する技術はある。検知された場合には、不確実ではあるものの地震発生の可能性が相対的に高まっていることは言えるであろう。

## (参考) 我が国の地震防災対策に関する法律と検討組織等

南海トラフ沿いの大規模な地震については、東海地震と東南海・南海地震のそれぞれについて個別に対策を進めてきており、東海、東南海、南海が同時に震源断層域となることを想定した対策はこれまで取られていない。

### (1) 地震防災対策に関する法律

#### 【図参-1】

- 災害対策基本法（昭和 36 年法律第 223 号）：防災組織、防災計画、災害予防、災害応急対策・災害復旧等、災害全般への対策の基本を定める。
- 地震防災対策特別措置法（平成 7 年法律第 111 号）：避難地等の整備に係る財政上の特別措置、地震に関する調査研究の推進のための体制の整備等について定める。
- 大規模地震対策特別措置法（昭和 53 年法律第 73 号）：直前の予知の可能性がある大規模地震対策として、地震予知に資するための観測・測量体制の強化、直前予知を前提とした警戒避難体制等を定める。現在対象とする地震は東海地震のみ。
- 東南海・南海地震に係る地震防災対策の推進に関する特別措置法（平成 14 年法律第 92 号）：東南海・南海地震に係る地震防災対策の推進を図ることを目的とし、観測・測量施設等の整備努力、防災施設の整備に係る財政上及び金融上の配慮等を定める。
- 日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に係る地震防災対策の推進に関する特別措置法（平成 16 年法律第 27 号）：日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に係る地震防災対策の推進を図ることを目的とし、観測・測量施設等の整備努力、防災施設の整備に係る財政上及び金融上の配慮等を定める。

### (2) 検討組織等

- 中央防災会議：災害対策基本法に基づき設置（事務局：内閣府（防災担当））。防災基本計画の作成や、防災に関する重要事項の審議等を行っている。
- 地震調査研究推進本部：地震防災対策特別措置法に基づき設置（事務局：文部科学省）。地震に関する観測、測量、調査及び研究の推進についての総合的かつ基本的な施策の立案、地震に関する観測、測量、調査又は研究を行う関係行政機関、大学等の調査結果等の収集、整理及び分析、並びにこれに基づく総合的な評価を行っている。
- 科学技術・学術審議会 測地学分科会：科学技術・学術審議会は、文部科学大臣の諮問に応じて、科学技術の総合的な振興に関する重要事項や学術の振興に関する重要事項の調査審議等を行うため、文部科学省に設置。この審議会の下にある測地学分科会では、地震予知研究の推進方策等について調査審議を行っている。
- 地震予知連絡会（予知連）：政府として地震予知の実用化を促進する旨の閣議了解（昭和 43 年 5 月）及び測地学審議会建議（昭和 43 年 7 月）を踏まえて、地震予知に関する調査・観測・研究結果等の情報の交換とそれらに基づく学術的な検討等を行うことを目的に、昭和 44 年 4 月に発足（事務局：国土地理院）。地震に関する観測研究を実施している関係機関や大学の委員で構成される。

○地震防災対策強化地域判定会：気象業務法第 11 条の 2 に定める気象庁長官の任務の遂行のため、強化地域に係る大規模な地震の発生のおそれに関する判定に必要な助言を行うとともに、これに必要な調査検討を行っている。

## (参考)用語集

南海トラフ沿いの大規模地震の予測可能性に関する報告は、国や地方公共団体の防災担当者に加えて、地震防災に関係する様々な分野の専門家等にも活用されることが想定される。一方、本報告書では、本調査部会で収集・整理した科学的知見を記述する上で必要な地震に関するやや専門的な用語が用いられている。このため、本報告書の内容を一般の方々に分かり易いものとするのと併せて、様々な分野の専門家にも誤解なく理解されるものとするため、用語の説明とともに、本調査部会における定義及び取扱についてここに示す。(報告別冊中での掲出順)

## 予知と予測

本報告書では、法律で定められた東海地震に係る地震予知情報に関する記述や過去固有名詞として用いた場合を除き、現状における研究の実態を適切に表すため、地震の「予測」という言葉を用いている。

なお、日本地震学会理事会〔2012〕は、2009年イタリア・ラクイラの地震後に組織された市民保護のための国際地震予測委員会の報告書において地震の予測について(1)警報につながる確度の高いもの(deterministic prediction)と(2)確率で表現され日常的に公表可能なもの(probabilistic forecast)を明確に区別していることを踏まえ、「地震予知」という言葉については(2)の意味で用いないよう努めるべきであるとの見解を示している。

## ※ 予知や予測の時間範囲を表す用語

地震の「予知」や「予測」は、対象となる地震が発生するまでの時間やその精度によって、「長期」、「中期」、「短期」、「直前」という時間範囲を表す用語とともに用いられる場合がある。これらの用語が表す時間範囲は、用いられる状況により若干異なることがあり、以下に各用語についていくつかの用例を挙げる。

- ・長期：「第3次地震予知計画の再度一部見直しについて」(昭和51年測地学審議会建議)においては、「やがて発生する地震の前兆現象を数年前から補足する長期的予知」としている。また、地震調査研究推進本部地震調査委員会による「活断層及び海溝型地震の長期評価」〔地震調査研究推進本部〕では、主要活断層帯の長期評価の中で30年以内、50年以内、100年以内の地震の発生確率を、海溝型地震の長期評価の中で10年以内、30年以内、50年以内の地震の発生確率を公表している。また、実用的地震予測に関する国際委員会報告〔Jordan et al., 2011〕では、数年から数十年を長期と呼ぶこととしている。
- ・中期：実用的地震予測に関する国際委員会報告では、数か月から数年を中期と呼ぶこととしている。

- ・短期：「第3次地震予知計画の再度一部見直しについて」（昭和51年測地学審議会建議）においては、「数か月前からの前兆現象の補足に努めるいわゆる常時監視を主体とした短期的予知」としている。また、気象庁は、「地震が発生する直前（長くても数日程度）に行われる予知は、地震の直前予知（あるいは短期予知）と呼ばれます。」としている〔気象庁〕。また、実用的地震予測に関する国際委員会報告では、2～3か月以内を短期と呼ぶこととしている。
- ・直前：気象庁は、「地震が発生する直前（長くても数日程度）に行われる予知は、地震の直前予知（あるいは短期予知）と呼ばれます。」としている〔気象庁〕。また、実用的地震予測に関する国際委員会報告では、短期のうち1週間程度以内のものを直前と呼ぶ場合があるとしている。

### 震源断層域

地震時に動いた（もしくは動く）断層の領域。南海トラフの巨大地震モデル検討会〔2012a〕の整理と同様に、本報告書においても、強震断層モデル、長周期地震断層モデル、津波断層モデルを包絡するような領域を震源断層域と表記する。

### 前駆すべり

地震の前に生じると考えられている震源核形成過程（※1）により、震源断層域内の一部が少しずつすべり始める現象。「プレスリップ」または「前兆すべり」とも呼ばれ、例えば気象庁では東海地震予知情報業務の説明に「前兆すべり」を用いている〔内閣府・気象庁, 2011〕。この報告書では「前駆すべり」に統一して表記している。

#### ※1 震源核形成

地震（本報告書では、地震性すべり（本用語集中「ゆっくりすべり」の項も参照）を伴う断層運動のことをいう）は、地下の断層で破壊を伴ってすべり領域が急速かつ自発的に進展していく現象である。理論的には、弾性体（※2）中で破壊が自発的に進展するには、破壊が進展することによって解放される弾性エネルギーが、破壊が進展する（新たに破壊面を作る）のに必要なエネルギー（破壊エネルギー）よりも大きくなる必要がある。また、破壊が進展することによって解放される弾性エネルギーは、破壊領域の拡大やすべりの進行に伴って大きくなる。このため地震の発生前には、震源断層域内の一部で局所的にゆっくりとしたすべりが発生して徐々に進行し、上記条件を満たした段階で自発的な加速を始めて地震の発生に至ると考えられる。この局所的なゆっくりとしたすべりの発生領域を震源核と呼び、地震に至るまでの過程を震源核形成過程と呼ぶ。この過程は室内実験でも確認されている〔Ohnaka et al., 1986; 大中・松浦, 2002〕。

#### ※2 弾性体

応力を加えるとひずみが生じ、応力を除去すると元に戻る性質（弾性）を有する物質。

地下の岩盤も弾性体である。応力を加えることにより弾性体に蓄えられるエネルギーを弾性エネルギーと呼ぶ。

## 地震予知情報

気象業務法は、気象庁長官は、地震防災対策強化地域に係る大規模な地震が発生するおそれがあると認めるときは、直ちに、当該地震に関する情報を内閣総理大臣に報告しなければならないと規定している。また同法は、この報告をした後において、当該地震に関し新たな事情が生じたと認めるときは、その都度、地震災害警戒本部長（内閣総理大臣）に報告しなければならないと規定している。大規模地震対策特別措置法では、これらの情報を地震予知情報と定義している。

## 警戒宣言

大規模地震対策特別措置法は、内閣総理大臣は、気象庁長官から地震予知情報の報告を受けた場合に、閣議を経て、警戒宣言を発すると規定している。

警戒宣言が発せられると、地震災害警戒本部が設置され、また、津波や崖崩れの危険地域からの住民避難や交通規制の実施、百貨店等の営業中止等の地震防災基本計画等に基づく各種対策が実施される。

## ひずみ

物体に力を加えた時に生じる形状変化（変形）のこと。地殻のひずみは、大きさを表す量（長さ又は面積、体積）について、単位量当たりの変化量の単位量に対する割合として測定される。例えば、体積ひずみ計は単位体積当たりの体積変化を、単位体積に対する割合として測定するものである。

## 摩擦構成則

物質間の境界（摩擦面）の力学的応答を表現する法則で、主に摩擦面に働く応力と境界面のすべりによるすべりの量もしくはすべり速度の関係を表すものとして記述される。

## プレート間の固着

陸のプレートの下に海洋プレートが沈み込んでいるプレート境界を例とすると、プレート間が完全に固着している場合は、両プレートの相対的な位置関係が変わらず、海洋プレートの沈み込みに伴って陸のプレートも深部へと引きずられ、弾性エネルギーが蓄えられる。逆にプレート間が全く固着していない場合は、陸のプレートは動かない（プレートを境に両者が相対的にずれていく）。実際のプレート境界では、地震やゆっくりすべり等のすべり現象によりプレート間の相対的なずれが生じており、これらの現象よりも長い期間で見れば、プレート間の相対的なずれの大きさによって固着の程度を特徴づけることができる。本報告書では、ある時間範囲で見たときにプレート間の相対的なずれが少ないほど、プレート間の固着が強いと表現する。

## ゆっくりすべり

プレート境界等の断層面で発生するすべり現象を、ガタガタという地面の揺れをもたらすような短周期の地震波を発生させる地震性すべりと、短周期の地震波をあまり発生させないゆっくりとした非地震性すべりに分けて考える場合がある。本報告書では、後者のことをゆっくりすべりと表記する。また、地震に先駆けて発生する前駆すべり（本用語集中「前駆すべり」の項参照）や余効すべり（本用語集中「余効変動」の項参照）も非地震性すべりであるが、本報告書では「ゆっくりすべり」には含めない。

## GNSS

GPS（アメリカ）、GLONASS（ロシア）、Galileo（EU）、準天頂衛星（QZSS、日本）等の測位衛星システムを総称してGNSS(Global Navigation Satellite System / 全世界的衛星測位システム)と呼ぶ [国土地理院]。

## モーメントマグニチュード (Mw)

断層のずれの規模を表す指標で、ずれ動いた部分の面積とずれの量の平均、剛性率（弾性の程度を表す指標の一つで、ずれによって周囲の岩盤に生じるひずみに対する応力変化の割合を表す係数）の積で表される地震モーメントをもとに計算される。モーメントマグニチュードを用いることで、地震の規模だけでなく、ゆっくりすべり等による断層のずれの規模も同じ指標で表すことができる。

## 国際地震学及び地球内部物理学協会 (IASPEI)

“International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior” の和訳及び略称。IUGG を構成する 8 学協会の一つ。（IASPEI ホームページ：<http://www.iaspei.org/home.html>）

## 国際測地学・地球物理学連合 (IUGG)

“The International Union of Geodesy and Geophysics” の和訳及び略称。測地学と地球物理学に関する非営利の国際的な学術団体であり、日本学術会議が正式に認知した国際組織である。（IUGG ホームページ：<http://www.iugg.org/>）

## 前駆すべりによる地震発生時期等の決定論的な予測

地震発生前の前駆すべりの観測に基づき、地震の発生時期、場所、規模を特定して予測することを言う。即ち、この手法は、観測した現象を前駆現象か否かを評価し、地震の発生時期、場所、規模を特定して、その特定した地震が発生するか否かを二者択一的に宣言することに相当する。

この手法は、地震の発生前には必然的に前駆すべりがあるとの考えによるもので、この意味から決定論的な予測と呼ばれている。しかし、2009 年イタリア・ラクイラの地震と実用

的地震予測に関する国際委員会報告 [Jordan et al., 2011] によると、地震の発生時期、場所、規模を特定できるような確度の高い前駆すべりは見つかっていないため、このような前駆現象に基づく決定論的な地震の予測は、一般的には困難であり、確率論的な予測が用いられるべきとの見解が示されている。

### 前震・本震・余震

ある時空間範囲内の一群の地震のうち、一つだけ特に大きいものがあれば、それを本震と呼び、本震の前に起こったものを前震、後に起こったものを余震と呼ぶ。ただし、厳密でかつ一般性のある定義を示すことは難しいとされている [宇津, 2001]。

### VAN 法

ギリシャの研究者 (P. Varotsos, K. Alexopoulos, K. Nomikos) により電磁気学的な前兆現象の観測に基づく短期的予測手法が提案されており、提案者の名前の頭文字を取って VAN 法と呼ばれている。この手法を支持する観測事例もあるが [Orihara et al., 2012]、否定的な主張もなされている [Jordan et al., 2011]。

### 電離層全電子数 (TEC: Total Electron Content)

電離層と呼ばれる超高層大気では、太陽放射によって大気分子・原子の一部が電離している。電離層全電子数 (TEC) は、視線方向の電子数を積分した全電子数で、単位には TECU (TEC unit、1 TECU は視線に沿った底面積  $1 \text{ m}^2$  の円柱に  $10^{16}$  個の電子が含まれることを意味する) が用いられる。

電離層の電子が電波の伝搬を遅延 (電離層遅延) させるという性質を利用して、GPS 衛星から発信される 2 種類の電波を測定し、その遅延量を解析することにより TEC を算出することができる [日置・他, 2010]。

### 応力

物体の内部に生じる力の大きさや作用方向を表現するために用いられる物理量。断層面等の岩盤中の面を考えた時、その面に働く単位面積あたりの力を指す。

### 震源物理

震源断層域で生じる岩盤の破壊やすべり等の現象を、地下の岩盤や流体がどのような性質を持っているか、またそれらに働く力がどのように作用するかを考察の対象として理解すること。

### 陸地測量部

明治 21 年 5 月に陸地測量部条例の公布とともに、日本陸軍参謀本部長直属の独立官庁として設置され、国内外の陸地測量や地図の製造修正等に当たった機関。参謀本部の解体に伴い業務は内務省地理調査所に移管され、その後国土地理院となって現在に至る [国土地理

院,1970]。

### 余効変動

地震の後に観測される地殻変動。主に発生した地震の震源断層域やその周囲のゆっくりとしたすべり（余効すべり）に起因すると考えられる。

### 小繰り返し地震

プレート境界では、波形が良く似た小地震が繰り返し発生することが知られており、小繰り返し地震（または相似地震）と呼ばれる。これらの地震は、プレート境界面上のほぼ同じ場所で繰り返し発生するすべりにより生ずるものと考えられ、これを解析することで、その場所でのプレート境界のすべりの進行について情報が得られると考えられている [Igarashi et al., 2003]。

### 地球潮汐

地球の固体部分は、月や太陽等の天体から受ける引力が地球の表面や内部で場所によって異なることにより変形する。このため、地球の自転や月の公転等による天体との位置関係の変化を受けて、潮の満ち引きと同じように、地球の固体部分も周期的に変形（伸び、縮み）している。この周期的な変動を地球潮汐と呼ぶ。

### b 値

規模の小さい地震は大きいものよりも発生数が多いという地震の規模別頻度の性質を表すグーテンベルク・リヒター則※のパラメータ。b 値は 1 程度の値を取ることが多く、b = 1 の時、グーテンベルク・リヒター則は、マグニチュードが 1 大きくなると地震の発生数が 10 分の 1 となることを表す。また、b 値が小さいほど地震の総数に占める大きな地震の割合が大きい [宇津, 2001]。

### ※ グーテンベルク・リヒター則

マグニチュードM以上の地震の発生数  $N(M)$  は、a、b をパラメータとして、以下の式で表される。

$$\log N(M) = a - bM$$

この関係は、様々な地震活動についてほぼ成り立つことが経験的に知られている。

### 海溝軸

海溝は、大陸縁や島弧に沿った、比較的急な斜面に囲まれる細長い深海底の凹地であり、海洋プレートの沈み込み口である。海溝のいちばん深いところを海溝軸と呼ぶ [瀬野, 1995]。

## 文献一覧

- 明田川保・福満修一郎, 2011, 震度 5 弱を観測するなどの顕著な地震が前震であった事例について, 駿震時報, 74, 17-28.
- 宇津徳治, 2001, 地震学 (第 3 版), 共立出版.
- 大中康譽・松浦充宏, 2002, 地震発生の物理学, 東京大学出版会.
- 織原義明, 鴨川仁, 2016, 三陸地方における東北地方太平洋沖地震前の井戸水異常の調査ー岩手県山田町から宮城県石巻市にかけてー, 地震第 2 輯, 69, 31-34.
- 海上保安庁, 2011, 海底地殻変動観測結果から得られた平成 23 年(2011 年) 東北地方太平洋沖地震発生前後の海底の動き, 地震予知連絡会会報, 86, 284-293.
- 科学技術庁, 1977, 昭和 52 年科学技術白書,  
[http://www.mext.go.jp/b\\_menu/hakusho/html/hpaa197701/index.html](http://www.mext.go.jp/b_menu/hakusho/html/hpaa197701/index.html).
- 科学技術庁, 1980, 昭和 55 年科学技術白書,  
[http://www.mext.go.jp/b\\_menu/hakusho/html/hpaa198001/index.html](http://www.mext.go.jp/b_menu/hakusho/html/hpaa198001/index.html).
- 気象庁, 2008a, 東北地方の地震活動の静穏化, 地震予知連絡会会報, 79, 69-73.
- 気象庁, 2008b, 東北地方とその周辺の地震活動 (2007 年 11 月~2008 年 4 月), 地震予知連絡会会報, 80, 55-65.
- 気象庁, 2009, 東北地方とその周辺の地震活動 (2008 年 5 月~10 月), 地震予知連絡会会報, 81, 84-97.
- 気象庁, 東海地震の予知について,  
[http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/tokai/tokai\\_eq4.html](http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/tokai/tokai_eq4.html).
- 気象研究所 (小林昭夫・木村一洋), 2011, 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震の数年前からの震源域内の非地震性すべり, 地震予知連絡会会報, 86, 182-183.
- 京都大学防災研究所地震予知研究センター (橋本学), 2005a, 地下水変化に対する前駆的すべりの断層モデル, 地震予知連絡会会報, 70, 402-403.
- 京都大学防災研究所地震予知研究センター (梅田康弘), 2005b, 南海地震の前の井戸水の減少についてー増幅のメカニズムー, 地震予知連絡会会報, 70, 423-428.
- 小泉尚嗣・他, 2012, 愛媛県新居浜市と愛知県西尾市における東南海・南海地震予測のための地下水等総合観測点整備, GSJ 地質ニュース, 1(6), 188-190.
- 国土地理院, 1970, 測量・地図百年史.
- 国土地理院, 2011a, 東北地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 86, 184-272.
- 国土地理院, 2011b, 関東甲信地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 87, 191-205.
- 国土地理院, GNSS とは, <http://terras.gsi.go.jp/gps/GNSS.html>.
- 小林昭夫・真砂礼宏・吉田明夫, 2002, 1946 年南海地震直前の浦神の潮位変化, 測地学会誌, 48, 1-12.
- 鷺谷威, 2004, 1944 年東南海地震の前兆的地殻変動再考, 月刊地球, 26, 11, 746-753.
- 重富國宏・梅田康弘・尾上謙介・浅田照行・細善信・近藤和男・辰巳賢一, 2005, 資料・証言にみる南海地震前の井水涸れ及び異常潮位, 京都大学防災研究所, 48-B, 191-195.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 1998, 余震の確率評価手法について,

<http://www.jishin.go.jp/main/yoshin2/index.htm>.

地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2013, 南海トラフの地震活動の長期評価 (第二版) について, [http://jishin.go.jp/main/chousa/13may\\_nankai/index.htm](http://jishin.go.jp/main/chousa/13may_nankai/index.htm)

地震調査研究推進本部, 長期評価結果一覧,

[http://www.jishin.go.jp/main/p\\_hyoka02\\_chouki.htm](http://www.jishin.go.jp/main/p_hyoka02_chouki.htm).

水路局, 1948, 昭和 21 年南海大地震調査報告 (地変及び被害編). 小向良七編, 水路要報増刊号 201, 1-117.

末広重二・吉田弘, 1979, 地震予知連絡会 10 年のあゆみ, 国土地理院, 48-52.

瀬野徹三, 1995, プレートテクトニクスの基礎, 朝倉書店.

測地学審議会地震火山部会, 1997a, 地震予知計画の実施状況等のレビューについて (報告), 別紙 A.

測地学審議会地震火山部会, 1997b, 地震予知計画の実施状況等のレビューについて (報告), 別紙 B.

田中佐千子, 2011, 月や太陽の引力が地震の引き金にー東北地方太平洋沖地震に先行した地球潮汐の地震トリガー現象, 科学, 81, 1060-1062.

統計数理研究所, 2011a, 前震の確率予報の実施と評価: 東北地方太平洋沖地震までの 15 年間, 地震予知連絡会会報, 86, 123-125.

統計数理研究所, 2011b, 東北地方太平洋沖地震の前震活動と広域的静穏化について, 地震予知連絡会会報, 86, 134-141.

東北大学大学院理学研究科 (内田直希・松澤暢), 2011a, 小繰り返し地震から推定された 2011 年東北地方太平洋沖地震震源域周辺の準静的すべり, 地震予知連絡会報, 86, 315-318.

東北大学大学院理学研究科 (太田雄策・他), 2011b, 2011 年 3 月 9 日三陸沖地震(M7.3)ー測地データおよび地震活動から推定される前震およびその余効変動ー, 地震予知連絡会会報, 86, 309-312.

内閣府・気象庁, 2011, リーフレット「平成 23 年 3 月 24 日から東海地震に関連する情報が新しくなりました」, <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/toukai/index.html>.

南海トラフの巨大地震モデル検討会, 2011, 南海トラフの巨大地震モデル検討会 中間とりまとめ, [http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai\\_trough/chukan\\_matome.pdf](http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai_trough/chukan_matome.pdf).

南海トラフの巨大地震モデル検討会, 2012a, 南海トラフの巨大地震による震度分布・津波高について (第一次報告),

[http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai\\_trough/1st\\_report.pdf](http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai_trough/1st_report.pdf).

南海トラフの巨大地震モデル検討会, 2012b, 南海トラフの巨大地震モデル検討会 (第二次報告) 強震断層モデル編ー強震断層モデルと震度分布についてー, [http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai\\_trough/pdf/20120829\\_2nd\\_report05.pdf](http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai_trough/pdf/20120829_2nd_report05.pdf).

西村卓也, 2011, 第 189 回地震予知連絡会についての報告, 日本地震学会ニュースレター, 23, 14-16.

西村卓也, 2012, 測地観測データに基づく東北日本の最近 120 年間の地殻変動, 地質学雑誌,

118, 278-293.

日本地震学会理事会, 2012, 日本地震学会の改革に向けて: 行動計画 2012, <http://www.zisin.jp/pdf/SSJplan2012.pdf>.

野村俊一・内田直希・尾形良彦, 2013, 時空間非定常 BPT モデルによる北日本太平洋沖沈み込み帯の小繰り返し地震 (1993.7.15-2011.3.10) の解析例 (2) - 特に主要地震の前と後の変化について -, 地震予知連絡会報, 90, 54-57.

弘瀬冬樹・前田憲二, 2010, 東海地域および豊後水道の長期的スロースリップイベントの再現, 日本地震学会講演予稿集, B32-06.

弘瀬冬樹・前田憲二, 2011, 東北太平洋沈み込み帯の b 値の時空間変化, 日本地球惑星科学連合 2011 年度連合大会予稿集, MIS036-P96.

藤田尚美・藤井陽一郎, 1979, 地震予知連絡会 10 年のあゆみ, 国土地理院, 41-43.

日置幸介・菅原守・大関優・岡崎郁也, 2010, GPS-TEC 法による地球物理学, 測地学会誌, 56, 125-134.

日置幸介, 2011, 超高層大気は巨大地震の発生を知っていたか?, 科学, 81, 1063-1064.

防災科学技術研究所 (廣瀬仁), 2011a, 2011 年東北地方太平洋沖地震前の傾斜記録, 地震予知連絡会会報, 86, 298-302.

防災科学技術研究所 (木村尚紀・廣瀬), 2011b, 房総半島沖スロースリップイベント (2011 年 10 - 11 月), 地震予知連絡会報, 87, 185-190.

前田憲二・弘瀬冬樹, 2011, 前震の経験則に基づく東北地方太平洋沖地震の予測可能性, 日本地震学会講演予稿集, P3-10.

茂木清夫, 1982, 1944 年東南海地震直前の前兆的地殻変動の時間的变化, 地震第 2 輯, 35, 145-8.

茂木清夫, 2000, 地震予知連絡会 30 年のあゆみ, 国土地理院, 1-33.

吉川澄夫, 2011, 平成 23 年東北地方太平洋沖地震前の地震活動静穏化現象, 日本地震学会講演予稿集, A32-07.

吉川澄夫・林元直樹, 2012, 2011 年東北地方太平洋沖地震前の静穏化現象 - 再考, 日本地球惑星科学連合 2012 年連合大会予稿集, SSS25-03.

力武常次, 1979, 地震予知連絡会 10 年のあゆみ, 国土地理院, 39-40.

Ariyoshi, K., N. Uchida, T. Matsuzawa, R. Hino, A. Hasegawa, T. Hori and Y. Kaneda, 2014, A trial estimation of frictional properties, focusing on aperiodicity off Kamaishi just after the 2011 Tohoku earthquake. Geophys. Res. Lett., 41(23), 8325-8334, doi:10.1002/2014GL061872.

Ariyoshi, K., T. Matsuzawa, J. P. Ampuero, R. Nakata, T. Hori, Y. Kaneda, R. Hino and A. Hasegawa, 2012, Migration process of very low-frequency events based on a chain-reaction model and its application to the detection of preseismic slip for megathrust earthquakes, *Earth Planets Space*, 64, 693-702.

Bouchon, M., V. Durand, D. Marsan, H. Karabulut, and J. Schmittbuhl, 2013, The long

- [precursory phase of most large interplate earthquakes. \*Nature geoscience\*, 6\(4\), 299-302, doi: 10.1038/ngeo1770.](#)
- [Bürgmann, R., N. Uchida, Y. Hu and T. Matsuzawa, 2016, Tohoku rupture reloaded?. \*Nature Geoscience\*, 9\(3\), 183-184, doi: 10.1038/ngeo2649.](#)
- Cifuentes I. L. and P.G. Silver, 1989, Low-Frequency Source Characteristics of the Great 1960 Chilean Earthquake, *J. Geophys. Res.*, 94, 643-63.
- Dieterich, J. H., 1979, Modeling of rock friction:1. Experimental results and constitutive equations, *J. Geophys. Res.*, 84(B5), 2161–2168, doi:10.1029/JB084iB05p02161.
- Fujiwara, H., M. Kamogawa, M. Ikeda, J. Y. Liu, H. Sakata, Y. I. Chen, H. Ofuruton, S. Muramatsu, Y. J. Chuo and Y. H. Ohtsuki, 2004, Atmospheric anomalies observed during earthquake occurrences, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L17110, doi:10.1029/2004GL019865.
- [Hashimoto, C., A. Noda, T. Sagiya and M. Matsu'ura, 2009, Interplate seismogenic zones along the Kuril–Japan trench inferred from GPS data inversion. \*Nature Geoscience\*, 2\(2\), 141-144, doi:10.1038/NGEO421.](#)
- [Hashimoto, C., A. Noda and M. Matsu'ura, 2012, The Mw 9.0 northeast Japan earthquake: total rupture of a basement asperity. \*Geophys J. Int.\*, 189\(1\), 1-5, doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.05368.x.](#)
- Hattori et al., 2012, Investigation of ULF Seismo-Magnetic Phenomena in Kanto, Japan During 2000–2010: Case Studies and Statistical Studies, *Surveys in Geophysics*, DOI 10.1007/s10712-012-9215-x.
- He, L., L. Wu, S. Pulinet, S. Liu and F. Yang, 2012, A nonlinear background removal method for seismo-ionospheric anomaly analysis under a complex solar activity scenario: A case study of the M9.0 Tohoku earthquake, *Advances in Space Research*, 50, 211-220.
- Heki, K., 2011, Ionospheric electron enhancement preceding the 2011 Tohoku - Oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L17312, doi:10.1029/2011GL047908.
- [Heki, K. and Y. Enomoto, 2015, Mw dependence of the preseismic ionospheric electron enhancements. \*J. Geophys. Res. Space Physics\*, 120\(8\), 7006-7020, doi:10.1002/2015JA021353.](#)
- [Hino, R., D. Inazu, Y. Ohta, Y. Ito, S. Suzuki, T. Iinuma, Y. Osada, M. Kido, H. Fujimoto and Y. Kaneda, 2014, Was the 2011 Tohoku-Oki earthquake preceded by aseismic preslip? Examination of seafloor vertical deformation data near the epicenter, \*Mar. Geophys Res.\*, 35\(3\), 181-190, doi:10.1007/s11001-013-9208-2.](#)
- Hori, T., 2006, Mechanisms of separation of rupture area and variation in time interval and size of great earthquakes along the Nankai Trough, southwest Japan, *J. Earth. Siml.*, 5, 8-19.
- [Hori, T. and S. Miyazaki, 2011, A possible mechanism of M 9 earthquake generation](#)

[cycles in the area of repeating M 7~ 8 earthquakes surrounded by aseismic sliding, Earth, planets and space, 63\(7\), 773-777, doi:10.5047/eps.2011.06.022.](#)

[Hori, T., M. Hyodo, R. Nakata, S. Miyazaki and Y. Kaneda. 2014. A forecasting procedure for plate boundary earthquakes based on sequential data assimilation. Oceanography 27\(2\), 94–102, doi:http://dx.doi.org/10.5670/oceanog.2014.44.](#)

[Hyodo, M., T. Hori and Y. Kaneda, 2016, A possible scenario for earlier occurrence of the next Nankai earthquake due to triggering by an earthquake at Hyuga-nada, off southwest Japan. Earth, Planets and Space, 68\(1\), 1-17, doi:10.1186/s40623-016-0384-6.](#)

IASPEI, 2011, IASPEI Resolutions (2011 Scientific Assembly, Melbourne, Australia), [http://www.iaspei.org/resolutions/resolutions\\_2011\\_melbourne.pdf](http://www.iaspei.org/resolutions/resolutions_2011_melbourne.pdf).

Ide, S., and H. Aochi, 2005, Earthquakes as multiscale dynamic ruptures with heterogeneous fracture surface energy, *J. Geophys. Res.*, 110, B11303, doi:10.1029/2004JB003591.

Igarashi, T., T. Matsuzawa and A. Hasegawa, 2003, Repeating earthquakes and interplate aseismic slip in the northeastern Japan subduction zone, *J. Geophys. Res.*, 108(B5), 2249, doi:10.1029/2002JB001920.

[Itaba S, Kimura T, 2013, Average slip rate at the transition zone on the plate interface in the Nankai subduction zone, Japan, estimated from short-term SSE catalog, AGU 2013 Fall Meeting, S41B-2422.](#)

Ito, Y., R. Hino, M. Kido, H. Fujimoto, Y. Osada, D. Inazu, Y. Ohta, T. Iinuma, M. Ohzono, S. —Miura, M. Mishina, K. Suzuki, T. Tsuji and J. Ashi, 2012, Episodic slow slip events in the Japan subduction zone before the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Tectonophysics*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2012.08.022>.

[Ito, Y., R. Hino, S. Suzuki and Y. Kaneda, 2015, Episodic tremor and slip near the Japan Trench prior to the 2011 Tohoku-Oki earthquake, Geophys. Res. Lett., 42, 1725-1731, doi:10.1002/2014GL062986.](#)

Jordan T. H., Y-T. Chen, P. Gasparin, R. Madariaga, I. Mai, W. Marzocchi, G. Papadopoulos, G. Sobolev, K. Yamaoka, J. Zschau, 2011, Operational earthquake forecasting: state of knowledge and guidelines for utilization, report by the International Commission on Earthquake Forecasting for Civil Protection, Rome, Italy, *Ann. Geophys* 54(4),315–391.

Kakinami, Y., M. Kamogawa, Y. Tanioka, S. Watanabe, A. R. Gusman, J.-Y. Liu, Y. Watanabe and T. Mogi, 2012, Tsunamigenic ionospheric hole, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L00G27, doi:10.1029/2011GL050159.

Kamogawa, M., 2006, Preseismic Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling, *EOS*, Vol. 87, No. 40, 3.

Kanamori H., and J. J. Cipar, 1974, Focal Process of the Great Chelean Earthquake

- May 22, 1960, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 9, 128-136.
- Kato, A., K. Obara, T. Igarashi, H. Tsuruoka, S. Nakagawa and N. Hirata, 2012, Propagation of slow slip leading up to the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki Earthquake, *Science*, 335, 705-708, doi: 10.1126/science.1215141.
- Kato, A. and Nakagawa, S., 2014, Multiple slow - slip events during a foreshock sequence of the 2014 Iquique, Chile Mw 8.1 earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, 41(15), 5420-5427, doi: 10.1002/2014GL061138.
- Kato, N., 2003, A possible model for large preseismic slip on a deeper extension of a seismic rupture plane, *Earth and Planetary Science Letters*, 216 (2003), 17-25.
- Kato, N., 2003, Repeating Slip Events at a Circular Asperity: Numerical Simulation with a Rate- and State-Dependent Friction Law, *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, 78, 151-166.
- Kato, N., 2004, Interaction of slip on asperities: Numerical simulation of seismic cycles on a two-dimensional planar fault with nonuniform frictional property, *J. Geophys. Res.*, 109, B12306, doi:10.1029/2004JB003001.
- Kato, N., 2012, Fracture energies at the rupture nucleation points of large interpolate earthquakes, *Earth and Planetary Science Letters* 353–354(2012), 190–197.
- Katsumata, K., 2011, A long-term seismic quiescence started 23 years before the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (M = 9.0), *Earth Planets Space*, 63, 709-712.
- Kawamura, M., Y. H. Wu, T. Kudo and C. C. Chen, 2013, Precursory migration of anomalous seismic activity revealed by the pattern informatics method: A case study of the 2011 Tohoku earthquake, *Japan. Bull. Seism. Soc. Am.*, 103(2B), 1171-1180, doi: 10.1785/0120120094.
- Le, H., J. Y. Liu and L. Liu, 2011, A statistical analysis of ionospheric anomalies before 736 M6.0+ earthquakes during 2002–2010, *J. Geophys. Res.*, 116, A02303, doi:10.1029/2010JA015781.
- Linde A. T. and P. G. Silver, 1989, Elevation Changes and the Great 1960 Chilean Earthquake: Support for Aseismic Slip, *Geophys. Res. Lett.*, 16, 1305-8.
- Lippiello, E., W. Marzocchi, L. de Arcangelis, and C. Godano, 2012, Spatial organization of foreshocks as a tool to forecast large earthquakes, *Scientific Rep.*, 2, 846, doi: 10.1038/srep00846.
- Liu J. Y., Y. I. Chen, S. A. Pulinet, Y. B. Tsai and Y. J. Chuo, 2000, Seismo-ionospheric signatures prior to  $M \geq 6.0$  Taiwan earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 3113-3116.
- Liu J. Y., Y. I. Chen, Y. J. Chuo and C. S. Chen, 2006, A statistical investigation of preearthquake ionospheric anomaly, *J. Geophys. Res.*, 111, A05304, doi:10.1029/2005JA011333.
- Maeda, K., 1996, The use of foreshocks in probabilistic prediction along the Japan and Kuril trenches, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, 242-254.
- Maeda, K., and F. Hirose, 2012, Prediction Performance of Empirically Defined

Foreshocks and Its Application to the 2011 Off Tohoku Earthquake, Abstracts of international symposium on statistical modeling and real-time probability forecasting for earthquakes, 14.

[Marsan, D., T. Reverso, A. Helmstetter and B. Enescu, 2013, Slow slip and aseismic deformation episodes associated with the subducting Pacific plate offshore Japan, revealed by changes in seismicity, \*J. Geophys. Res. Solid Earth\*, 118, 4900-4909, doi:10.1002/jgrb.50323.](#)

[Mavrommatis, A. P., P. Segall and K. M. Johnson, 2014, A decadal-scale deformation transient prior to the 2011 Mw 9.0 Tohoku-oki earthquake, \*Geophys. Res. Lett.\*, 41, 4486-4494, doi:10.1002/2014GL060139.](#)

Matsuzawa, T., H. Hirose, B. Shibasaki and K. Obara, 2010, Modeling short- and long-term slow slip events in the seismic cycles of large subduction earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 115, B12301, doi:10.1029/2010JB007566.

Melbourne, T. E, and F. H. Webb, 2002, Precursory transient slip during the 2001 Mw =8.4 Peru earthquake sequence from continuous GPS, *Geophys. Res. Lett.*, 29, doi:10.1029/2002GL015533.

[Mitsui, Y., N. Kato, Y. Fukahata and K. Hirahara, 2012, Megaquake cycle at the Tohoku subduction zone with thermal fluid pressurization near the surface, \*Earth and Planetary Science Letters\*, 325-326, 21-26.](#)

Miyagi, Y., T. Ozawa and M. Shimada, 2009, Crustal deformation associated with an M8.1 earthquake in the Solomon Islands, detected by ALOS/PALSAR, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 287, 385-391.

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, *PAGEOGH*, 122, 765-780.

Moriya, T., T. Mogi and M. Takada, 2010, Anomalous pre-seismic transmission of VHF-band radio waves resulting from large earthquakes, and its statistical relationship to magnitude of impending earthquakes, *Geophys. J. Int.*, 180, 858-870, doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04461.x.

Murakami, M., H. Suito, S. Ozawa and M. Kaidzu, 2006, Earthquake triggering by migrating slow slip initiated by M8 earthquake along Kuril trench, *Japan, Geophys. Res. Lett.*, 33, L09306, doi:10.1029/2006GL025967.

[Nakata, R., T. Hori, M. Hyodo and K. Ariyoshi, 2016, Possible scenarios for occurrence of M~ 7 interplate earthquakes prior to and following the 2011 Tohoku-Oki earthquake based on numerical simulation. \*Scientific Reports\*, 6, doi:10.1038/srep25704.](#)

Nakatani, M., 2001, Conceptual and physical clarification of rate and state friction: Frictional sliding as a thermally activated rheology, *J. Geophys. Res.*, 106(B7), 13,347-13,380, doi:10.1029/2000JB900453.

- Nanjo, K. Z., N. Hirata, K. Obara and K. Kasahara, 2012, Decade-scale decrease in b value prior to the M9-class 2011 Tohoku and 2004 Sumatra quakes, *Geophys. Res. Lett.*, *39*, L20304, doi:10.1029/2012GL052997.
- Němec, F., O. Santolík and M. Parrot, 2009, Decrease of intensity of ELF/VLF waves observed in the upper ionosphere close to earthquakes: A statistical study, *J. Geophys. Res.*, *114*, A04303, doi:10.1029/2008JA013972.
- [Noda, H. and N. Lapusta, 2013, Stable creeping fault segments can become destructive as a result of dynamic weakening. Nature, 493\(7433\), 518-521, doi: 10.1038/nature11703.](#)
- [Noda, H. and T. Hori, 2014, Under what circumstances does a seismogenic patch produce aseismic transients in the later interseismic period?, Geophys. Res. Lett., 41\(21\), 7477-7484, doi:10.1002/2014GL061676.](#)
- [Noda, H., M. Nakatani and T. Hori, 2013a, Large nucleation before large earthquakes is sometimes skipped due to cascade - up - Implications from a rate and state simulation of faults with hierarchical asperities. J. Geophys. Res.: Solid Earth, 118\(6\), 2924-2952, doi:10.1002/jgrb.50211.](#)
- [Noda, H., M. Nakatani and T. Hori. 2014, Coseismic visibility of a small fragile patch involved in the rupture of a large patch-implications from fully dynamic rate-state earthquake sequence simulations producing variable manners of earthquake initiation. Progress in Earth and Planetary Science, 1\(1\), 1, doi:10.1186/2197-4284-1-8.](#)
- Ogata, Y., T. Utsu and K. Katsura, 1996, Statistical discrimination of foreshocks from other earthquake clusters, *Geophys. J. Int.*, *127*, 17-30.
- Ohnaka, M., Y. Kuwahana, K. Yamamoto and T. Hirasawa, 1986, Dynamic breakdown processes and the generating mechanism for high-frequency elastic radiation during stick-slip instabilities, in Earthquakes Source Mechanics (eds Das, S., Boatwright, J. & Scholz, C.) 13–24 (AGUMonogr. 37, Am. Geophys. Un., Washington DC, 1986).
- Orihara, Y., M. Kamogawa, and T. Nagao and S. Uyeda, 2012, Pre-seismic anomalous telluric current signals observed in Kozu-shima Island, Japan., *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, doi:10.1073/pnas.1215669109.
- [Orihara, Y., M. Kamogawa and T. Nagao, 2014, Preseismic Changes of the level and temperature of confined groundwater related to the 2011 Tohoku earthquake, Scientific Reports, 4, 6907, doi:10.1038/srep06907.](#)
- Ozawa, S., T. Nishimura, H. Munekane, H. Suito, T. Kobayashi, M. Tobita and T. Imakiire, 2012, Preceding, coseismic, and postseismic slips of the 2011 Tohoku earthquake, Japan, *J. Geophys. Res.*, *117*, B07404, doi:10.1029/2011JB009120.

- Ouzounov D, Pulinets S, Romanov A, Romanov A, Tsybulya K, Davidenko D, Kafatos M, Taylor P, 2011, Atmosphere-ionosphere response to the M9 Tohoku earthquake revealed by multi-instrument space-borne and ground observations: Preliminary results, *Earthquake Science*, *24*, 557-564.
- Ruina, A., 1983, Slip instability and state variable friction laws, *J. Geophys. Res.*, *88(B12)*, 10,359–10,370, doi:10.1029/JB088iB12p10359.
- Sato, M., M. Fujita, Y. Matsumoto, T. Ishikawa, H. Saito, M. Mochizuki and A. Asada, 2013, Interplate coupling off northeastern Japan before the 2011 Tohoku-oki earthquake, inferred from seafloor geodetic data, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, *118*, 3860-3869, doi:10.1002/jgrb.50275.
- Scholz, C. H., 2002, , The mechanics of earthquakes and faulting, 2nd ed., Cambridge Univ. Press, New York.
- Shebalin, P., V. Keilis-Borok and I. Zaliapin, 2004, Advance short-term prediction of the large Tokachi-oki earthquake, September 25, 2003, M = 8.1 A case history, *Earth Planets Space*, *56*(8), pp. 715-724.
- Shibazaki, B., S. Bu, T. Matsuzawa and H. Hirose, 2010, Modeling the activity of short-term slow slip events along deep subduction interfaces beneath Shikoku, southwest Japan, *J. Geophys. Res.*, *115*, B00A19, doi:10.1029/2008JB006057.
- Shibazaki, B. and Y. Iio, 2003, On the physical mechanism of silent slip events along the deeper part of the seismogenic zone, *Geophys. Res. Lett.*, vol.30, no.9, 1489, doi:10.1029/2003GL017047.
- Suito, H., T. Nishimura, M. Tobita, T. Imakiire and S. Ozawa, 2011, Interplate fault slip along the Japan Trench before the occurrence of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake as inferred from GPS data, *Earth Planets Space*, *63*, 615-619.
- Sun, T., K. Wang, T. Iinuma, R. Hino, J. He, H. Fujimoto and Y. Hu, 2014, Prevalence of viscoelastic relaxation after the 2011 Tohoku-oki earthquake. *Nature*, *514*(7520), 84-87, doi:10.1038/nature13778.
- Sun, T. and K. Wang, 2015., Viscoelastic relaxation following subduction earthquakes and its effects on afterslip determination. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, *120*(2), 1329-1344, doi:10.1002/2014JB011707.
- Swanson M. T., 2006, Late Paleozoic strike-slip faults and related vein arrays of Cape Elizabeth, Maine, *J. Struct. Geol.*, *28*, 456-473.
- Tanaka, S., 2012, Tidal triggering of earthquakes prior to the 2011 Tohoku-Oki earthquake (Mw 9.1), *Geophys. Res. Lett.*, *39*, L00G26, doi:10.1029/2012GL051179.
- Tarasov, N. T. and N. V. Tarasova, 2004, Spatial-temporal structure of seismicity of the North Tien Shan and its change under effect of high energy electromagnetic pulses, *Ann. Geophys.*, *47*, 199-212.
- Tarasov, N. T., 1997, Crustal Seismicity Variation under Electric Action, *Transactions*

*(Doklady) of the Russian Academy of Science/Earth Science Sections, 353A, 445-448.*

Tormann, T., B. Enescu, J. Woessner and S. Wiemer, 2015, Randomness of megathrust earthquakes implied by rapid stress recovery after the Japan earthquake. *Nature Geoscience*, 8(2), 152-158, doi: 10.1038/ngeo2343.

Tormann, T., S. Wiemer, B. Enescu and J. Woessner, 2016, Normalized rupture potential for small and large earthquakes along the Pacific Plate off Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 7468–7477, doi: 10.1002/2016GL069309.

Tse, S., and J. Rice, 1986, Crustal earthquake instability in relation to the depth variation of frictional slip properties, *J. Geophys. Res.*, 91, 9452-9472.

Uchida, N. and T. Matsuzawa, 2013, Pre-and postseismic slow slip surrounding the 2011 Tohoku-oki earthquake rupture. *Earth and Planetary Sci. Lett.*, 374, 81-91, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2013.05.021.

Uchida, N., S. Yui, S. Miura, T. Matsuzawa, A. Hasegawa, Y. Motoya and M. Kasahara, 2009, Quasi-static slip on the plate boundary associated with the 2003 M8.0 Tokachi-oki and 2004 M7.1 off-Kushiro earthquakes, Japan, *Gondwana Research*, 16, 527-533.

Uchida, N., T. Iinuma, R. M. Nadeau, R. Bürgmann and R. Hino, 2016, Periodic slow slip triggers megathrust zone earthquakes in northeastern Japan. *Science*, 351(6272), 488-492, doi:10.1126/science.aad3108.

Varotsos, P. A., N. V. Sarlis and E. S. Skordas, 2011, Natural time analysis of critical phenomena, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 108, 11361-11364, doi: 10.1073/pnas.1108138108.

Wang, K. L., Q. F. Chen, S. H. Sun and A. D. Wang, 2006, Predicting the 1975 Haicheng earthquake, *B. Seismol. Soc. Am.*, 96, 757-795.

Wang, W. and P. M. Shearer, 2015, No clear evidence for localized tidal periodicities in earthquakes in the central Japan region, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 120, 6317–6328, doi: 10.1002/2015JB011937.

Yokota, Y., and K. Koketsu, 2015, A very long-term transient event preceding the 2011 Tohoku earthquake, *Nature Communications*, 6, 5934, doi:10.1038/ncomms6934.

Yokota Y., T. Ishikawa, S. Watanabe, T. Tashiro1 and A. Asada, 2016, Seafloor geodetic constraints on interplate coupling of the Nankai Trough megathrust zone, *Nature*, 17632, doi:10.1038.

Yoshida, S., N. Kato and J. Fukuda, 2016, Forecast experiment on the Kamaishi repeating earthquakes based on numerical simulations using friction law. *Earth, Planets and Space*, 68(1), 1-14, doi:10.1186/s40623-016-0448-7.

## 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について

(平成24年7月～平成25年1月)

### 1. 趣旨

南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループにおいて、地震・津波に関する具体的な防災対策を検討するにあたり、大規模地震対策特別措置法、東南海・南海地震にかかる地震防災対策の推進に関する特別措置法等の法的枠組みについても検討が行われることとなり、想定する巨大地震の発生時期が予測できるか否が重要な論点となる。

想定東海地震については、観測体制が整備され、数時間～数日前の直前予知の可能性がある我が国で唯一の地震とされている。仮に、現行の観測体制と知見に基づき想定東海地震の前兆すべりが検出された場合に、それによって発生する地震は、想定東海地震にとどまるのか、南海トラフ巨大地震につながるものとするのかによって、直前予知がなされた際の地震防災応急対策をとるべき対象地域が変わることになる。そのため、調査部会において、科学的知見を整理した上で、想定東海地震の前兆すべりが検出された場合に想定東海地震と連動して地震が発生する範囲の考え方について一定の結論を出す必要がある。

一方、地震予知は一般的に困難との認識にあり、南海トラフにおける巨大地震についても同様ではないか等、様々な議論があることから、南海トラフの巨大地震の発生時期の予測可能性について、現時点における科学的知見を収集、整理することが重要である。

以上により、南海トラフの巨大地震の発生時期の予測可能性に関する科学的知見の収集・整理を行うことを目的として、調査部会を設置する。

本調査部会の検討結果は、南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループに報告する。

### 2. 主な調査内容

地震発生予測に関する資料の収集・整理

- 東北地方太平洋沖地震による知見
  - 地震発生予測に関する現状確認
  - 東海地震予知に係る前兆すべり検出の考え方
  - 各委員からの報告
- 等を整理する。

# 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

## 委員

座長 やまおか こうしゆん  
山岡 耕春 名古屋大学大学院環境学研究科・教授

副座長 はしもと まなぶ  
橋本 学 京都大学防災研究所・教授

い で さとし  
井出 哲 東京大学大学院理学系研究科・准教授

ながお としやす  
長尾 年恭 東海大学海洋研究所地震予知研究センター長・教授

ほり たかね  
堀 高峰 独立行政法人国立研究開発法人海洋研究開発機構地震津波・防災研究プロジェクトサブリーダー  
地震津波海域観測研究開発センター  
地震津波予測研究グループ・グループリーダー

まつざわ とおる  
松澤 暢 東北大学大学院理学研究科・教授

## 開催経緯

### 平成24年7月～平成25年1月

- 第1回 平成24年7月18日（水）
- 第2回 平成24年8月6日（月）
- 第3回 平成24年9月13日（木）
- 第4回 平成24年9月24日（月）
- 第5回 平成24年10月26日（金）
- 第6回 平成24年11月8日（木）
- 第7回 平成24年11月29日（木）
- 第8回 平成25年1月18日（金）

### 平成28年9月～平成〇年〇月

- 第1回 平成28年9月26日（月）
- 第2回 平成28年10月13日（木）
- 第3回 平成28年11月1日（火）
- 第4回 平成〇年〇月〇日（ ）