

地震調査研究における今後の海域観測の方針について（報告書案）

平成 28 年●月●日
地震調査研究推進本部政策委員会
調査観測計画部会

1. はじめに

2. 海域観測網についての当面の課題

(1) 海溝型地震を対象とした地震発生予測の高精度化に資する観測網

(2) 津波即時予測技術の開発及び地震動即時予測の高度化に資する観測網

3. 今後の海域観測網のあり方

(1) 海溝型地震を対象とした地震発生予測の高精度化に資する観測網

(2) 津波即時予測技術の開発及び地震動即時予測の高度化に資する観測網

4. 観測網整備に当たって必要な技術開発

(1) 海底地殻変動観測

(2) ケーブル式海底地震・津波計

5. 海域ごとに整備すべき観測網

(1) M9 クラスの地震が発生する海域

(2) M8 クラスの地震が発生する海域

(3) 観測データが乏しく、地震発生の特徴が十分に解明されていない海域

(4) 海溝以外の海域

6. その他検討すべき事項

(1) 陸域観測網との関係

(2) 観測データの効果的な活用方策を踏まえた整備

7. おわりに

1. はじめに

地震調査研究推進本部（以下「地震本部」という。）では、平成9年8月に「地震に関する基盤的調査観測計画」（以下「基盤計画」という。）を策定し、地震現象を把握・評価する上で基礎となる調査観測を基盤的調査観測として位置付けた。「基盤計画」やそれ以降に策定された計画に沿って、我が国の地震観測網は整備が進められた。

その後、平成21年4月に策定し24年9月に改訂された「新たな地震調査研究の推進について ―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―」（以下「新総合基本施策」という。）を踏まえ、「基盤計画」をはじめ、これまで策定されてきた調査観測計画を体系的にまとめ、「地震に関する総合的な調査観測計画 ～東日本大震災を踏まえて～」（以下「総合調査観測計画」という。）を策定した。

「新総合基本施策」では、それまでの長期評価手法では東北地方太平洋沖地震のような低頻度で発生する超巨大地震を評価の対象とすることができなかつたことや、地震発生時に地震の規模等を適切に推定できなかつたこと、津波即時予測技術の高度化の取組が十分ではなかつたこと等の東日本大震災で浮き彫りとなったことを踏まえて、今後の課題を整理した。

そこでは、海域における地殻変動観測や地震・津波観測網の整備が遅れていることを指摘しており、海域のリアルタイム地震・津波観測網の整備と、海域における地殻変動観測網の整備を、横断的に取り組むべき重要事項として位置付けた。これを受けて、「総合調査観測計画」では、海域の調査観測を強化するため、ケーブル式海底地震・津波計による地震・津波観測を、陸域における地震観測等に加えて、新たに「全国的に偏りなく実施すべき観測や一定の基準で全国的に実施すべき調査」（以下「基盤的調査観測」という。）として整理した。また、海底地殻変動観測は、「調査観測を行うことの有効性については示されているが、技術的課題等から全国的に偏りなく実施することが困難である調査観測」（以下「準基盤的調査観測」という。）に引き続き位置付けられている。

海域における定常的な観測網は、その整備と運用に多額の経費を要することから、後年度の観測網の維持管理の負担も踏まえた上で、戦略的に整備を進める必要がある。また、防災科学技術研究所が整備した日本海溝海底地震津波観測網（S-net）の運用開始や海上保安庁から南海トラフ想定震源域の固着状態の推定に海底地殻変動観測が有用であることを示す研究成果が公表されるなど、海域における調査観測をとりまく状況にも変化がある。そこで調査観測計画部会では、今後優先して整備すべき観測網について、実現可能性や「総合調査観測計画」策定以降の状況変化も考慮した上で取りまとめた。

2. 海域観測網についての当面の課題

「新総合基本施策」では、当面10年間に取り組むべき地震調査研究として、海溝型地震を対象とした地震発生予測の高精度化、地震動即時予測及び地震動予測の高精度化、津波即時予測技術の開発及び津波予測等に関する調査観測の強化を行うこととしている。

「総合調査観測計画」では、これらの課題を実現するために基盤的調査観測等に加えて実施する調査観測を重点的調査観測と位置付け、その調査観測項目を具体的に示した。

ここでは、それら調査観測項目の中から、整備と運用に多額の経費を要し、後年度の観測網の維持管理の負担も踏まえた上で、戦略的に整備を進める必要があるものとして、「海溝型地震を対象とした地震発生予測の高精度化に資する観測網」ではGNSS/音響測距^{そつきよ}結合方式等の手法による海底地殻変動観測を中心に、「津波即時予測技術の開発及び地震動即時予測の高度化に資する観測網」ではケーブル式海底地震・津波計による地震・津波観測を中心にして、当面の課題についてまとめる。

(1) 海溝型地震を対象とした地震発生予測の高精度化に資する観測網

新総合基本施策において基本目標として掲げられている「M9クラスの超巨大地震の発生や海溝型地震の連動発生の可能性評価を含めた地震発生予測の精度向上」の達成のために、過去の地震発生状況を調べる古地震・古津波調査や、地殻変動観測、地震観測等によりプレート境界における固着域の空間分布等を監視し、プレート境界の状況を把握することが重要である。

地震本部は、活断層で発生する地震や海溝型地震について、地震の発生可能性の長期評価（以下「長期評価」という。）を実施している。長期評価においては、将来発生すると推定される地震の場所と規模を規定する震源断層の同定を行うとともに、過去の地震の発生間隔、最新の地震の発生時期から、一定期間内に地震が発生する確率を推定している。過去複数回発生した地震の震源域と発生時期が明らかであれば、長期評価はある程度可能であることから、海溝型地震については、歴史文献資料等の調査や津波堆積物調査といった古地震・古津波調査に重きが置かれている。

しかし、「新総合基本施策」では、古地震・古津波調査を行う上で必要な史料や津波堆積物の品質及び残存数については、地域により偏りがある。特に、島嶼部では、これらの資料が極端に不足している場合が多い等、古地震・古津波調査のみでは過去に発生した地震を十分に把握できるとは限らない。また、東北地方太平洋沖地震のような極めてまれな低頻度で発生する超巨大地震の評価には限界があったことや、海溝型地震の連動性、（例えば、東南海地震が発生した後に南海地震がどうのように発生するか） というようなことについても評価するに至っていないことを問題として指摘している。そこで、今後は古地震・古津波調査の結果と海底地殻変動観測、地震観測等のデータを活用した地震発生予測手法により得られる結果とを統合して、長期評価の精度向上を図る併せて長期評価に資する方法について検討する必要がある。

具体的には、海底地殻変動観測により、プレート間の固着~~状態~~の分布を高精度かつ高分解能で把握することが出来れば、物理モデルを構築することで、長期評価に必要な情報を補完できる可能性や、古地震・古津波調査から得られる情報が少ない海地域でも長期評価を行える可能性がある。さらに、古地震・古津波調査の結果と統合して解釈する

ことで、その海域で発生が予想される地震の位置と規模（震源断層モデル）を事前により精度良く推定できる可能性がある。さらに、プレート間の固着状態の時間変化を検出しすると同時に、その時間変化を長期評価の精度向上につなげられるから地震発生予測を行う手法が開発されれば、およそその発生時期を推測できる可能性もある。

また、極めてまれな頻度で発生する超巨大地震については、発生する地震像の想定を行うために、海底地殻変動観測により、海溝軸近傍において「超大すべり」の要因となる強い固着があるかどうかを把握することが望まれる。

他方、海溝型地震の連動発生が想定されている海域において、その一部の地震のみが発生した場合、発生した地震の地震像を即座に把握し、残る地震の発生可能性を評価する必要がある。その際、津波波源推定、余震分布の把握に加えて、発生した地震による余効すべり（地震時すべりを起こした震源断層やその延長部および周辺部のプレート境界で地震後発生するゆっくりしたすべり地震後に起きる地殻変動）の発生域を短時間で推定することが望ましいため、震源域直上の海底の地殻変動を直接観測できる海底地殻変動観測網の整備が急がれる。

海底地殻変動観測は、その技術的困難さから、陸域の地殻変動観測網に比べ整備が遅れていたが、これまでの技術開発の努力により、一定の成果が得られるまでになっている。しかしながら、観測精度や時間分解能、観測点の空間密度など陸域の観測に比べ不十分な点が多く、一層の技術開発が必要である。

（2）津波即時予測技術の開発及び地震動即時予測の高度化に資する観測網

新総合基本施策において基本目標として掲げられている「海域における津波観測網の整備及び調査観測の充実」、「高精度な津波即時予測技術の開発」、「津波波源モデルの高精度化等による津波予測技術の高度化」、「震源破壊過程の即時推定技術及び各地域の特性に応じた強震動予測の高精度化・高解像度化、並びにそれらの適用による緊急地震速報の高度化」の達成のために、海域での地震観測データの取得、海域における津波発生 of 直接的観測やそのデータ等を活用した津波即時予測の高度化等が重要である。

地震発生直後に出される津波即時予測のためには、海域の地震の震源域近傍で津波を直接観測可能な観測網の整備が望ましい。また、震源域の近傍で地震波を検知することで、海域で発生する地震の地震動即時予測（緊急地震速報等）の迅速化も期待される。その際は、プレート間地震の発生する場所や深さを考慮すると、20km 程度の間隔で海域の主要な想定震源域をカバーすることを目指して地震計を配置することが望ましい。十分な観測点密度があれば、震源決定精度が向上し、地震動や津波の分布を即時的かつ面的に捉えることができ、地震像の迅速かつ正確な把握に寄与する。しかし、沖合に観測点がある一定の間隔で設置されていれば、その間隔はより疎らであっても、津波即時予測及び地震動即時予測の一応の目的は達せられることから、観測点間隔については、海域ごとに柔軟な対応を検討する必要がある。

3. 今後の海域観測網のあり方

(1) 海溝型地震を対象とした地震発生予測の高精度化に資する観測網

海溝型地震の長期評価を高度化するためには、プレート間の固着^{そつきよ}状態の分布を精度よく把握する必要があり、想定される震源域周辺の海底において地殻変動の観測網を構築する（海底地殻変動観測）ことが必要である。また、陸域の地殻変動観測に比べ劣る測位精度と時間分解能を向上させることが必要である。

海底地殻変動観測については、GNSS/音響測距結合手法による観測（以下「GNSS/音響観測」という。）、海底基線長^{そつきよ}測距、水圧計等の観測手法がある。海底基線長^{そつきよ}測距は、1km～10km 程度の範囲内の局在化した変化を捉えることに特化しており、水圧計による観測は、鉛直変動を検出するものである。GNSS/音響観測は観測点の位置を3次元で観測可能で、特に海底の水平変動の検出に最も有効な手法であり、陸上のGNSS観測とも対応が良い。ここでは、準基盤的調査観測に位置づけられ我が国で特に精力的に取り組まれているGNSS/音響観測を中心に述べる。

1) GNSS/音響観測点の展開方針

現状では陸域の地殻変動観測網のような多点・高密度の観測網を構築するには技術的な困難があることから、GNSS/音響観測網の構築に当たっては、少ない観測点で効果的に観測を行う必要があるため、以下の方針を踏まえる。

①広域化

これまで観測を行ってこなかった海域においては、概ねマグニチュード8相当の広がりを持つ震源域に最低1つの観測点を設置し、同海域のプレート固着状態を把握するために、各海溝において100km 間隔で観測点を展開することが求められている。また、海域におけるプレート固着状態を推定するには、陸側プレートの内部変動を考慮し、固着による変動と分離して解析する必要がある。その解析には、海域まで含めた陸側プレートをブロックに分割するブロック断層モデルが用いられている。このブロック断層モデルでは、観測点間隔が100km 程度であれば、ブロックモデルにより、陸側のプレートをいくつかのブロックに分割した場合であっても、ほぼ全てのブロックに観測点が存在することになる。GNSS/音響観測は比較的低コストで観測点を設置できるため、広域展開に適した観測手法であると言える。

現在、日本海溝と南海トラフについては、ある程度の観測網が整備されつつあるが、それ以外の観測が行われていない海域についても、順次整備していく必要がある。その結果、さらに固着分布の詳細を得る必要性が生じた時には、観測点の高密度化についても検討を行う。

②高密度化

総合調査観測計画では、日本海溝・南海トラフについて密度の高い観測を行うことが求められている。特に津波地震の発生可能性がある海溝軸近傍（海溝軸よりも陸寄り）は未だ観測網が手薄であるため、優先的に観測点を設置する必要がある。とりわけ特に、今後 30 年以内にマグニチュード 8 以上の巨大地震が発生する確率が他の海域と比べても特に高く、地震発生までの時間的な猶予がないことから、南海トラフの海溝軸近傍に優先的に観測点を設置することが望ましい。

また、海溝軸のさらに沖合に観測点を設置し、海洋プレートの沈み込み速度を実測することで、固着状態の正確な推定を行う。

2) GNSS/音響観測の高度化の方針

GNSS/音響観測の精度・時間分解能は陸域の GNSS 観測に比べ低いため、GNSS 観測で捉えられているスロースリップのような微小な変動現象を捉えるには至っていない。今後、海底地殻変動観測の精度や時間分解能を高めるために、以下の点を考慮する。

①GNSS/音響観測の高精度化

年間数 cm という地殻変動速度を正確に捉え、固着分布を正確に把握するためには、測位精度を向上する必要がある。また、ゆっくりすべりのような 短期間の微小な変位を検出するためにも高精度化は必須である。なお、観測精度が向上すれば、所定の測位精度を得るための必要データ数が減少することで観測時間が短縮され、1ヵ所あたりの観測頻度の向上にも貢献できる。

②GNSS/音響観測の時間分解能向上

海溝型地震の連動発生が想定されている海域において、その一部の地震のみが発生した場合、発生した地震の地震像を即座に把握し、残る地震の発生可能性を評価する必要がある。その際、津波波源推定、余震分布の把握に加えて、発生した地震による余効すべりの発生域を短時間で推定することが必要となる。また、ゆっくりすべりのような現象にともなう固着分布の時間変化を検出するためにも、短期間の地殻変動の変化を捉える必要がある。

短期の変動を捉えるためには、測位精度の向上に加え、観測の時間分解能を高める必要がある。現状では有人観測船による観測が主体であり、さらに 1 観測点あたりの観測に長い時間を要する。船の運航可能な時間に限りがあるために、観測の高頻度化のためには、効率的な観測による観測の高速化が必須となる。特に、南海トラフにおいては現在の数か月に1度の観測頻度を1か月に1度程度まで向上させることが望ましい。なお、観測の高速化は観測網の増強による観測点数の増加への対応の他、備船費用の削減の観点からも必要となる。

さらに理想的な姿は準リアルタイム観測（衛星通信等により定期的に高頻度で観測データを受信可能な観測）であるが、そのためには、ブイや自律型海上プラットフォーム（~~ウェーブライダー~~や無人走航ボート等）を用いるなど、有人観測船によらない手法の開発が必要である。特に、自律型海上プラットフォームについては、広域化や高密度化等を推進する上でも観測の効率化や低コスト化の面から活用が期待されるため、早急に技術開発に取り組むことが望ましい。なお、自律型海上プラットフォームの運用にあたっては、法的な制約に留意して検討を進める必要がある。

3) GNSS/音響観測の実施方針

GNSS/音響観測は、観測の高度化のための技術開発と長期継続的な定常観測を並行して実施する必要がある。そのため、各機関が連携して、今後も長期間にわたって安定的な観測を継続するため、以下の方針を踏まえる。

①長期安定的な観測

時間スケールの長い海底地殻変動の全体像を把握するためには、同一地点での観測を長期間継続的に行う必要がある。現在、観測点を構成するトランスポンダー（海底に設置する音響信号のミラー応答装置）はバッテリー駆動のため、定期的に交換する必要がある。長期的にわたって定常的に観測を行うには、トランスポンダーの長寿命化が望まれる。

②短期集中的な観測

ブイや自律型海上プラットフォーム等の無人観測が実用化していない現状では、観測のリソースに限りがあり、多数の観測点全てを定期的に観測するには限界がある。そのため、陸上観測で行われている機動的観測のように、ある海地域に一時的に観測網を構築し短期集中的に観測を行う方式を検討する必要がある。例えば、観測の空白域において先導的に集中観測を行うことで、その海地域における最適な観測網の構築に向けた基礎情報を得ることができる。あるいは、既設の観測網の周辺で高密度な集中観測を行うことで、固着分布についてのより詳細な情報を得ることができる。

ただし、現状の観測精度・頻度では一定の成果が出るまでに、数年間の観測を要することから、さらに短期で成果を出せるように観測精度・頻度を向上させる取組が必要となる。

③各機関が連携した観測体制

GNSS/音響観測は、これまでに挙げたような技術開発要素が多数あり大学等が行う観測の高度化を目指した技術開発が重要である。一方、海溝型地震の長期評価のためには、現状の技術によって定常的な観測を実施し、評価に必要なデータを早期に収集する必要

がある。また、定常的観測で得られる広域の長期間のデータは技術の高度化に繋がるものとなりうる。

今後も、大学等の行う試験・研究的観測と海上保安庁が行う定常的観測を両輪とした観測の推進が必要であり、各機関が連携して行う観測体制を構築する必要がある。

④観測データの様式及び解析手法の統一

GNSS/音響観測については、未だ技術の発展途上で解析手法が確立していないことから、これまで、複数の大学及び海上保安庁が、技術を競いながら別々に観測・解析手法を発展させてきた。その結果、同じ観測点について複数の機関が観測した場合にも、観測方法やデータの解析手法が異なるため、単純に比較することができない。

そこで、将来的には、観測データの様式や解析手法の統一に取り組み、別の機関が測定したデータを容易に比較・結合できるようにしたりて、お互いの観測点の観測が可能な互換性の高いシステムとすることが望まれる。

加えて、可能な範囲で観測データの公開を目指す。

4) 目的に応じた観測手法の選択

観測対象の現象や海地域によっては、GNSS/音響観測以外の観測手法を採用することで、より効率良く観測できる場合があるため、観測手法については、目的に照らして最適な方法を選択することが必要である。特に、プレート間の固着分布の時間変化やゆっくりすべり現象といった非定常的な変動の検出には、GNSS/音響観測の時間分解能向上のみでは不十分であり、別の観測手法によるリアルタイム観測（海底敷設の通信ケーブル等により、常に観測データを受信可能な観測）が有効である。また、断層やプレート境界を挟んだ狭い範囲（1km～10km程度）の変動については、海底基線長測距そつきよが有効である。

また、これらの観測は単独で行うよりも、それぞれの長所・短所をカバーするように複合的に連携させることでより有効なデータが得られることが期待されるため、各観測の連携も視野にいれ、早急に技術を確立する必要がある。

例えば、以下の観測が想定される。

- ・海溝軸をまたいで海底基線長測距そつきよを行うことで、海溝軸付近のプレート間の相対速度を精度良く推定し、海溝軸近傍における強い固着の検出を行う。ただし、この場合、あらかじめGNSS/音響観測等により、大局的なプレート運動場から、海溝軸両側のプレートの相対運動ベクトルを把握し、そのベクトルに平行な向きに対して海底基線長測距そつきよを行うなどの工夫が必要である。また、地震・津波観測監視システム（DONET）等の既設ケーブル観測網を活用して、海底地殻変動のリアルタイム観測を可能にするための技術開発にも取り組むことが望まれる。
- ・プレート間の固着分布の時間変化や短期的／長期的ゆっくりすべりの発生を検出するため、DONET等のケーブル観測網に既に設置されている水圧計や、新規に接続する

水圧計、傾斜計等によるリアルタイム観測を行う。ただし、この場合、水圧計のドリフトや、海流の影響、海水の温度変化等と、観測対象（ゆっくりすべり等）を分離する技術や解析手法が必要である。海流の影響については、海底下に計器を埋設することができれば、より安定的な環境で海底地殻変動観測を行うことで観測精度を高めることができるため、技術の確立が望まれる。

これらの観測の実現後には、可能な範囲で観測データの公開を目指す。

（２）津波即時予測技術の開発及び地震動即時予測の高度化に資する観測網

津波即時予測技術の開発及び地震動即時予測の高度化のためには、ケーブル式海底地震・津波計が極めて有効であるため、その整備を着実に進めていく必要がある。

1) ケーブル式海底地震・津波計の展開方針

今後、空白域となっている海域における観測網の整備海域の選定と観測点密度や整備すべきシステムの検討に当たっては、以下の方針を踏まえることとする。

①整備海域の選定

概ねマグニチュード8程度以上の海溝型地震が発生する可能性があり、かつその発生可能性が高い（地震の長期発生確率が高いなど。）場合に、その地震の想定震源域及びその周辺に観測網を整備する。該当する海域が複数存在する場合には、地震の規模、長期発生確率、沿岸地域の社会的、経済的な影響の大きさ人口等を総合的に勘案して、優先順位を決定する。

②観測点密度の検討

「総合調査観測計画」に記されているように 20km程度の間隔で観測点を配置することが望ましいが、技術的・費用的にそれが困難な場合には、観測点間隔を大きくする。その際は、大きな津波を発生させる可能性のあるマグニチュード7.5程度の地震の震源域に最低一つの観測点を配置することを目指すとともに、海域が広大な場合は、より疎らな観測点配置も検討する。

③整備するシステムの検討

ケーブル式海底地震・津波計は、現在、S-netのようなインライン型やDONETのようなノード型がある。前者は広域での迅速な展開に適しており、後者は機器の交換や新たなセンサーを接続した技術開発が可能である。

今後の大規模なケーブル式システムの整備にあたっては、長期間の運用も含め相当のコストを要することから、研究者や技術者による検討体制を構築し、これまでのケーブル式システムの実績も踏まえつつ、長期間の安定性・信頼性を確保するとともに

拡張性や発展性にも配慮したシステムの検討が必要である。コストの面からは、整備・運用にわたるコストの低減化を図りながら、必要に応じて機器の交換や拡張にも対応できる持続可能なシステム設計が求められる。また、整備にあたっては、整備海域の特徴や観測の対象とする現象に適確に対応したシステムとすることが重要である。

2) 安定的な観測の実現

ケーブル式海底地震・津波計は海底特有の環境で観測を行うため、安定的に観測を行うための技術開発が求められる。また、海底に設置されているため整備や機器の交換にコストがかかり、機器の故障や陳腐化に柔軟に対応できる設計が必要である。

①観測技術の向上

海底は陸上と異なり、軟弱な堆積層上に観測点を設置せざるを得ない。そこで、こうした地質に観測機器を長期間設置しても傾斜等をしない技術、または傾斜を長期にわたり自動で補正する技術が必要である。また、強震動や底流によって観測機器が跳躍・移動・転倒しないような工夫が求められる。

②機器の拡張性と更新可能性の向上

ケーブル式海底地震・津波計観測網は、一般にケーブルの耐久性は高いものの、地震計・津波計等の機器は、長期にわたる運用の中で故障が発生したり、機器自体が陳腐化したりするおそれがある。観測する海域や観測の対象によっては、観測機器を交換したり、新たな観測機器を取り付けたりする拡張性を持つことが望ましい。

③冗長性の向上

多様な現象を観測するとともに、基盤的調査観測としての観測網の信頼性を確保するために、地震計については、各観測点に、地震計、水圧計それぞれを加速度計や速度計等、複数種を設置して冗長性を高めることが望ましい。

3) 場所に応じた観測手法の選択

港湾に近い浅海部では、ケーブル式海底地震・津波計を設置することが困難な場合がある。このような海域では、GPS 波浪計・津波観測ブイ等による津波観測による代替も検討する。また、近年の衛星測位技術の進展を踏まえ、ケーブルの設置が困難なほか沖合や海底地すべり地帯でも、GPS 波浪計の活用を検討することとする。

4. 観測網整備に当たって必要な技術開発

前項目の海域観測網のあり方で示した観測網の整備に当たっては、迅速に技術開発を実施し、観測網の整備・運用コストが持続可能なものとなるよう整備及び運用にかかる

コストを低減する技術開発に取り組むとともに、目的に応じ適切な観測技術・観測システムを適用する必要がある。

(1) 海底地殻変動観測

GNSS/音響観測の実施に当たっては、長期的な観測の実現、観測の高精度化、観測の効率化、(準)リアルタイムでの観測の実現が求められる。

①長期的かつ安定的な観測の実現

GNSS/音響観測のトランスポンダーを更新すると、それまでのトランスポンダーを用いた観測と、新しいトランスポンダーを用いた観測で、測位データを接続することは困難となる。そのため、長期間にわたる変動を解析することができない。一定の期間、近接する場所に設置した新旧のトランスポンダーを並行して観測することで、この課題に対応する方法等もあるが、観測効率の低下は避けられない。そこで、長期的に観測するには、トランスポンダーの長寿命化が望まれる。そのためには、バッテリーの増強に加えて、音響信号を効率良く送受信することで省電力化できる機構の開発が求められる。~~また、海面反射波等の後続波を除去する技術など、海中を伝播する際に信号に生じる誤差を除去する技術等の早期の確立が望まれる。~~

②観測の更なる高精度化

GNSS/音響観測の測位精度向上のためには、観測における様々な誤差要因を取り除く必要がある。

観測精度の最大の誤差要因である海中の音速度構造推定の高度化や、陸上のGNSS観測点から遠く離れた海域における船舶のGNSS測位精度、船舶の揺れの測定精度等を向上させることが望ましい。~~また、音響測距精度は海流の影響を大きく受けるため、観測海域によらず同程度の音響測距精度が担保できる観測デザインや解析方法の確立が望まれる。~~また、水圧計による観測を併用することで、水平成分に比べやや測定誤差が大きいGNSS/音響観測の鉛直成分を水圧計データから補正し、GNSS/音響観測の解析精度を向上させることが考えられる。ただし、水圧計データに長期的な誤差(ドリフト)が生じないようにする必要があり、そのために技術開発が必要である。加えて、海面反射波等の後続波を除去する技術など、海中を伝播する際に信号に生じる誤差を除去する技術等の早期の確立が望まれる。

③観測の更なる効率化

時間分解能の向上や多点観測への対応、備船費の削減のために観測を効率化し観測時間を短縮する必要がある。

例えば、これまで観測点を構成する複数のトランスポンダーに対して1つずつ音響信号を送受信していたが、これを複数同時に送受信可能にする技術が開発されており、こうした効率化を今後も進めていくことが考えられる。また、GNSS 受信機とトランスデューサー（船舶やブイ等に装着し、音響信号を送受信する装置）を搭載したブイを併用し、同時に複数のトランスデューサーから信号を送受信することも考えられる。さらに、船舶の測位精度の高精度化により、観測の際の測線数や音響信号の送受信回数が少なくても、十分な精度を得られるようにすることが望まれる。

④準リアルタイム観測

準リアルタイムでGNSS/音響観測を行うには、船舶による有人観測とは異なる手法が必要である。そのためには、GNSS 受信機とトランスデューサーを搭載したブイや自律型海上プラットフォームを用いる必要がある。ブイについてはトランスポンダーに水圧計を設置することで、GNSS/音響観測と併せてより高精度な鉛直変動を検出する試験的な取り組みも行われている。自律型海上プラットフォームを用いる場合は、長期間無人で運用する技術を確立する必要がある。また、水深ごとの水温等を自動で測定するための技術開発が必要である。さらに、ブイや自律型海上プラットフォーム上でデータの基本的な処理を行ったうえで、GNSS 衛星の位置情報や解析結果等を、衛星通信等を用いて常時送受信する仕組みも考える必要がある。

各観測点の準リアルタイム化への過渡期には、必要な観測点に対してのみ、速やかに観測可能な仕組みを構築することが考えられる。例えば、特定の観測点周辺で規模が大きな地震が発生した際に、その観測点で直ちに観測を行えば、地震活動の評価に生かすことができる。そのために、自律型海上プラットフォームを特定の観測点に移動させ、観測を行う技術の開発が望まれる。

さらに、自律型海上プラットフォームは、海底火山周辺等、人が近づきにくい海域での観測にも応用できる可能性がある。

⑤リアルタイム観測

リアルタイムで海底地殻変動を観測するには、DONET 等の既存のケーブル観測網をデータ伝送インフラとして活用することが考えられる。

現在オフラインで展開されている海底基線長測距^{そつきよ}の観測点を DONET 等のケーブル観測網に接続するための技術開発を行い、リアルタイム観測を行うことが考えられる。この際、音波経路波形は下方に曲がる特徴があるため、海溝を挟んで設置するなど、音響が十分透過するような適切な観測点配置の選定が重要となる。また、ケーブル観測網に接続していない観測点については、電源の供給ができないためバッテリーによる運用になり、温度データも測距信号^{そつきよ}に乗せて通信する必要がある。

また、ケーブル観測網には津波を直接観測するために水圧計が備えられており、この水圧計で鉛直方向の海底地殻変動を観測することが期待できる。水圧計には年間に 10cm 程度のドリフトが生じることがわかっているが、陸上の基準で校正した移動式基準水圧計と既設の水圧計とを比較して現場校正を行い、ドリフトによる誤差を取り除くことで、鉛直変動を観測することが考えられる。加えて、ケーブル観測網に新たに水圧計、傾斜計等を接続することによって、鉛直方向と水平方向の変動を観測することが期待できるため、設置や安定的な運用に係る技術開発が望まれる。

さらに、ゆっくりすべり等の検出には、リアルタイム観測により時間分解能を向上させることが必要だが、観測を高精度化することも重要である。ケーブル観測網に観測機器を接続する際は、海底下のより深い深度（数 m～1km 程度）に観測機器を埋設することで間隙水圧や傾斜をより精度よく観測できる。設置についてはコストの低減を図りつつ、より精度の高い観測の実現に向けた技術の確立が必要である。

（2）ケーブル式海底地震・津波計

ケーブル式海底地震・津波計の設置と運用に当たっては、長期にわたり安定的に観測できる技術を確保することが求められる。

①海底特有の環境を考慮した観測技術

海底への設置に伴う観測機器の傾斜防止や、強震動や底流による観測機器の跳躍・移動・転倒防止等の課題を解決するための一つの方法は観測点を埋設することだが、埋設方法については今後も技術の向上が望まれる。

さらに、海底の観測機器やケーブルは、仮に障害が発生したとしても容易に対処できないため、十分な堅牢性と冗長性を備えるべきである。そのために、ケーブルや観測機器からなるシステム全体を、より単純な機構で構成し、障害要因を少なくする工夫が望まれる。

②拡張性と機器の更新可能性

故障等に伴う機器の交換や、新たな観測機器の拡張を可能にするためには、DONET の設計思想を踏まえつつ、より安価かつ簡便に機器の脱着が可能なシステムを開発していくことが望まれる。また、機器の脱着を可能にするシステム自体が故障するリスクを抑えるために、できるだけ単純なシステム構成で実現することが望ましい。

③整備・運用経費の低減

ケーブル式海底地震・津波計観測網は、長期間にわたる耐久性を維持するために、海中部にコンピュータを使わないシステムが主流であったが、結果的に海陸の機器が大型化し、消費電力も大きく、運用コストの低減が困難である。そのため、地震・津波計を

収納する筐体や、ケーブルへの給電装置等、システム全体が肥大化し、整備や運用にかかる経費を膨張させていた。

将来は、コンピュータやインターネット技術を活用して、システム全体を小型化する必要がある。また、システムは出来るだけ市販品を用いるなど、整備と保守にかかる経費を圧縮することが望ましい。ただし、システム全体の耐久性を損なうことのないよう、新しい技術を導入する際は、その堅牢性を十分吟味することが重要である。

5. 海域ごとに整備すべき観測網

防災に確実に貢献するためには、地震の発生を事前に予測したうえで、地震が発生した際には即時的に地震・津波を捉え、予測することが望まれる。そのためには、海域ごとの観測網の現状、想定される地震の規模、長期発生確率、社会的影響等を総合的に勘案した上で整備・運用上のコストもふまえて最適な観測網を整備する必要がある。また、これまで整備されてきた観測網を最大限活用しつつ、海域ごとに観測すべき現象に適した観測手段を選定する必要がある。

(1) M9クラスの地震が発生する海域

南海トラフと日本海溝は過去に M9クラスの地震が発生し、今後もその発生が懸念される海域である。これらの海域では、これまでにケーブル式海底地震・津波計が整備され、GNSS/音響観測も優先的に取り組まれてきた。今後も既設の観測網を活用し各機関が連携して観測を継続するとともに、さらなる高密度化・高精度化を目指した観測網の構築や技術開発を進める必要がある。

①南海トラフ

南海トラフは、我が国周辺でもっとも早く観測網の整備が進んだ海域であり、既存の観測網を最大限活用することが重要である。海底地殻変動観測については、海上保安庁及び大学が連携して、今後も観測を実施する。また、ケーブル式海底地震・津波計については、防災科学技術研究所の地震・津波観測監視システム（DONET）や気象庁の東海沖及び東南海沖常時海底観測システムを、今後も安定的に継続して運用することが重要である。

ただし、東北地方太平洋沖地震の際に、海溝軸近傍で「超大すべり」が生じたことを踏まえ、南海トラフにおいても観測点が存在しない海溝軸近傍に、十分にその効果を検討した上で、海底地殻変動観測点を設置し、海底地殻変動を観測することで、「超大すべり」の要因となる強い固着が存在するかを確かめる必要がある。また、そのためには、海溝軸を挟んだ沖合にも海底地殻変動観測点を設置して地殻変動を観測することで、プレート間の相対速度を正確に求める必要がある。なお、東海沖から紀伊半島沖にかけての海域では、陸側プレートとフィリピン海プレートとの間にマイクロプレートがあるこ

とが指摘されている。海底地殻変動観測点の設置にあたっては、マイクロプレートの運動ベクトルの把握にも留意することが望ましい。また、精度よく固着状態を推定するには、観測頻度を向上させることも重要である。南海トラフの海溝軸近傍における強い固着の分布については、同海域で発生する巨大地震による津波想定やその被害想定を考える上で非常に重要であるから、これらの観測は喫緊の課題と言える。

また、南海トラフでは、マグニチュード8程度以上の地震が短時間のうちに続けて発生する場合があるため、規模の大きな地震が発生した場合には、その震源域を即座に推定し、次に起こりうる地震の震源域を推定する必要がある。そのため、海底地殻変動観測については、可能なものから(準)リアルタイム及びリアルタイム化することが求められる。特に、安政東海地震と安政南海地震や、昭和東南海地震と昭和南海地震の、各震源域の境界付近に位置する紀伊半島沖では、こうした理由から(準)リアルタイム及びリアルタイム化を進めることが喫緊の課題である必要性が高い。当面は、現在の有人観測船による観測の頻度を向上させることが必要であり、地震調査委員会の評価に合わせ、現在の数か月に1度の観測頻度を1か月に1回程度まで向上させることが望ましい。

さらに、南海トラフの西側（高知県沖）においては、過去に起こった南海トラフの地震の震源域に含まれ、同海域を震源として地震が発生するケースが想定されていることから、地震や津波の早期検知のためにケーブル式海底地震・津波計を整備することが必要である。この場合、大規模なケーブル式システムとなることが想定されることから、前述の通り、様々な視点から具体的な検討を進める必要がある。

南海トラフについては、今後30年以内にマグニチュード8以上の巨大地震が発生する確率が、他の海域と比べても特に高く、時間的な猶予がないことから、必要な観測については、年限を区切って集中的に実施することを目指す。また、必要なデータを短期間で効率的に得るために必要な技術開発を優先して進めるべきである。

②日本海溝

日本海溝においては、既に観測網が充実していることから、既存の観測網を最大限活用することが重要である。

現在は、東北地方太平洋沖地震後の余効変動すべりが継続しており、余震活動も活発である。今後の海底地殻変動や地震活動の推移を把握することは防災上極めて重要な課題となるため、今後も観測を継続することが重要である。

余効変動の要因には余効すべりと粘弾性緩和が挙げられる。巨大地震後の余効すべりには地震時にすべったプレート境界面が再び固着を回復し、ひずみエネルギーの蓄積が再開される過程が反映されている。プレート境界の状況を正しく把握するために、海上保安庁及び大学が連携して、今後も海底地殻変動観測を継続して実施することが必要である。さらに、粘弾性緩和過程などの断層運動以外の効果も含めたプレート境界のすべ

り状態のより正しい理解のために、より高精度、高頻度な海底地殻変動観測を目指した技術開発を進める。

また、東北地方太平洋沖地震が発生した現在の状況では、今後その北側と南側に隣接した領域での大地震の発生が懸念されることから、破壊域の拡大過程を把握するために、観測の空白域となっている青森沖や房総沖で海底地殻変動観測を行う必要がある。

~~また、~~ケーブル式海底地震・津波計については、日本海溝海底地震津波観測網（S-net）や大学の三陸沖海底地震・津波観測システムを、今後も安定的に継続して運用することが重要である。

（2）M8 クラスの地震が発生する海域

相模トラフと千島海溝は過去に M8 クラスの地震が発生し、今後もその発生が懸念される海域である。これらの海域では、ケーブル式海底地震・津波計は充実しているものの、GNSS/音響観測は限定的であり大部分の領域が観測の空白域となっているため、今後は、空白域において海底地殻変動の観測網を構築していく必要がある。

①相模トラフ

相模トラフにおいては、既にケーブル式海底地震・津波計が充実していることから、日本海溝海底地震津波観測網（S-net）や防災科学技術研究所の相模湾ケーブル式海底地震観測システム、気象庁の房総沖常時海底観測システムを、今後も安定的に継続して運用することが重要である。他方、海底地殻変動観測はあまり行われていない。しかし相模トラフのうち西側については、陸域から近いこと、陸域の GNSS 観測網（GEONET）からプレート間の固着状態をある程度推定することが可能である。今後は陸域から遠い東側の海地域で海底地殻変動を観測することが望まれる。

②千島海溝

千島海溝においては、既にケーブル式海底地震・津波計が充実していることから、日本海溝海底地震津波観測網（S-net）や海洋研究開発機構の釧路・十勝沖海底地震総合観測システムを、今後も安定的に継続して運用することが重要である。

他方、海底地殻変動観測は全く行われていない。同海域では、過去の地震履歴の解明が十分ではないが、津波を伴う海域での地震が発生していたことはある程度明らかになっている。そこで、海底地殻変動観測を行い、同海域のプレート間の固着状態を推定することで、規模の大きな地震のおおよその震源域と規模を把握する必要がある。最低限、海溝軸に平行に約 100km の間隔で観測点を設置することが喫緊の課題である。なお、十勝沖及び根室沖を震源域とする地震は、連動して発生した場合にマグニチュード 8.3

程度となることが予想されていることから、海溝軸近傍には高い密度で観測点を設置できることが望ましい。

(3) 観測データが乏しく、地震発生の特性が十分に解明されていない海域

南西諸島海溝と伊豆・小笠原海溝は、これまでにほとんど観測が行われておらず、地震発生の特性の詳細が不明な海域である。そのため、将来の観測網の構築に向けて、まずは大学等による先導的なGNSS/音響観測や、機動的な地震観測を進めることで、プレート間固着の大まかな状況や当該海域の地震活動を把握する必要がある。

①南西諸島海溝

南西諸島海溝においては、海底地殻変動観測点が乏しく、ケーブル式海底地震・津波計も存在しない。

同海域では、過去の地震の履歴がほとんど未解明であり、与那国島近海を除いて、規模の大きな地震の震源域や発生間隔すら不明である。また、古地震・古津波調査に必要な史料や津波堆積物等も不足している。そのため、過去の地震発生履歴に頼った現状の長期評価には限界がある。しかし、最近の研究では、過去に津波を伴う海域での地震が発生していたことも指摘され始めている。また、最北部は南海トラフ地震の想定震源域に接続する海域であり、早期のデータ取得の開始が望まれる。そこで、海底地殻変動観測を行い、プレート間の固着状態を推定することで、規模の大きな地震のおおよその震源域と規模を把握する必要がある。最低限、海溝軸に平行に約 100km の間隔で観測点を設置することが喫緊の課題である。

その上で、仮に強い固着が推定された場合には、その海域に絞って重点的調査観測を実施するなどして、十分な精度で長期評価を行う。その成果を踏まえ、必要に応じてケーブル式海底地震・津波計を整備することを検討する。

②伊豆・小笠原海溝

伊豆・小笠原海溝においては、海底地殻変動観測点、ケーブル式海底地震・津波計ともに存在しない。

同海域は広大な面積を有する一方で、我が国の本土から遠く、周辺人口も少ないため、海域の断層調査を除いて、精度の高い系統だった調査観測がほとんど実施されていない。そこで、まずは、周辺海域で発生する地震活動について評価を行うために、どのような調査を優先して行うべきかを検討する必要がある。そのうえで、特に考慮すべき地震の対象を明らかにしつつ、更に必要な観測網の構築を進める。その際、また、最近、1605年慶長南海津波地震は、南海トラフではなく、伊豆・小笠原海溝で発生した可能性を指摘する研究も現れている。従って、プレート間の固着状態の把握のため、まずは少数であっても海底地殻変動観測点を設置し、海底地殻変動観測を開始することが望まれる。

(4) 海溝以外の海域

①日本海東縁部

日本海東縁部においては、海底地殻変動観測点は存在しない。ケーブル式海底地震計は小規模ながら、大学の栗島沖海底地震観測システムが設置されていることから、今後とも確実に運用することが重要である。また、ひずみ集中帯が存在しているが、現在の観測技術では海底地殻変動は捉えられないことが想定される。海底地殻変動観測に頼ることなく、海域断層調査を充実させるなど、当海域に適した調査観測を優先すべきである。今後、より安価に整備可能な技術が開発された際には、地震の発生確率が日本海東縁部の中で相対的に高く、陸域からやや遠いために、地震や津波の早期検知によって十分な猶予時間を得られるであろう佐渡島北方沖に、ケーブル式海底地震・津波計の整備を目指すべきである。

②その他

上記のほか、沖縄トラフについては、近年もマグニチュード7程度の地震が発生していること、日本海（日本海東縁部を除く。）についても海域断層が多数存在することから、強震動や津波による被害の発生可能性を考慮して、将来的には、これらの海域への観測網の設置についても、必要に応じて検討する。

6. その他検討すべき事項

(1) 陸域観測網との関係

海域の観測網については、海域のみで考えるのではなく、陸域の観測網との整備状況や新技術の動向関係を踏まえ、最適な観測網のあり方を考える必要がある。

地殻変動観測については、陸域のGNSS観測網から、海域のプレート境界の固着状態についてどこまで推定できるかを、例えばチェッカーボードテスト等で明らかにした上で、推定が困難な海域から観測網を展開すべきである。また、ゆっくりすべり現象の検出を目的とするのであれば、陸域のひずみ計や傾斜計等では検出が困難な海域に優先して展開する必要がある。さらに、プレート間の固着状態やゆっくりすべり現象を解析する場合は、陸域の観測データと海域の観測データを統合することを念頭に、観測頻度やデータ形式（座標系を含む）等を検討すべきである。

陸域観測の知見を海域観測に生かす事例として、陸域のGNSS観測網のデータをリアルタイムで解析して海溝型巨大地震の規模を推定するシステムが開発されており、今後もこのような陸域及び海域観測の連携を進め、施策の効果を高めていくべきである。

また、海域の観測点密度についても、将来的には陸域と同程度のものを目指す。ただし、海底地殻変動観測、ケーブル式地震・津波観測を問わず、過度に高密度な観測点を

設置することは望ましくないため、整備の際に観測対象とする現象や海地域に対して必要な観測点密度をよく検討した上で実施することが望まれる。

(2) 観測データの効果的な活用方策を踏まえた整備

海域で観測されたデータは、長期評価をはじめとする地震調査委員会における検討に最大限活用される必要がある。そのために、データを有効に活用するための方策をあらかじめ考えたうえで、海域における観測網の整備を戦略的に進める必要がある。

海底地殻変動観測については、海溝軸に平行に 100km 間隔で観測点を設置して観測を実施したとしても、その観測結果のみを用いて長期評価を行うことには限界がある。そこで、例えば同じ海域で地殻構造調査を実施し、海底地殻変動観測データと併せてシミュレーションを行うことで、長期評価の精度を向上することなどが考えられる。反対に、既存の地殻構造調査結果を踏まえてシミュレーションを行うことで、海底基準局観測点の最適な配置を求める方法も考えられる。

また、観測データが地震調査研究以外の分野にも有効活用されることで、観測網の必要性はより説得力が増す。例えば、ケーブル式海底地震・津波観測網については、地震・津波の観測や、水圧計による海底地殻変動の観測のみならず、海底火山の爆発等によって生じる音波の観測、気象・海洋現象の観測等にも活用できることに留意して、観測機器やケーブルシステムを選定することが望ましい。

7. おわりに

海溝型地震に備え、被害を軽減するために、海域において観測網を充実することの重要性は論をまたない。既存の基盤的調査観測網は長期安定的に維持し運用することも重要である。しかし、限られた予算で最大限の成果を挙げるためには、海域ごとに観測網の必要性を吟味したうえで、緊急性の高いものから整備を進める必要がある。そのために、最新の技術を積極的に取り入れ、より安価に、より効果的に観測を進めることが求められる。また、長期的かつ安定的な観測の実現のためには、安定した運用体制や予算を含む最適な観測網のあり方を考える必要がある。前述のように効率化が必要であるが、それでも定期的な船舶の確保は欠かせない。また、今後さらに技術革新の要素を海底観測技術に取り入れるためには、理学と工学の融合あるいは連携した取り組みが必要になる。

併せて、海域における観測では、海洋環境との調和を図るとともに、漁業関係者をはじめとする住民の理解を得ることが不可欠である。そのために、今後も、海域で地震・津波観測を行うことの必要性を丁寧に説明するとともに、環境等に配慮した整備・運用を常に心がけることが肝要である。

観測により得られたデータは、地震調査研究に効果的に活用され、我が国の地震防災に貢献しなければならない。そのために、観測データの多様な利活用方法を絶えず検討

するとともに、そのデータは出来るだけ広く公開されるよう、併せて検討を行っていく必要がある。

地震調査研究における今後の海域観測の方針について（報告書案）

背景

- ・「地震に関する総合的な調査観測計画～東日本大震災を踏まえて～」（平成26年8月27日策定）では、ケーブル式海底地震・津波計による地震・津波観測を「基盤的調査観測」、海底地殻変動観測を「準基盤的調査観測」に位置付け。
- ・これまでの海底地震・津波観測網の導入事例や海底地殻変動観測データを用いた新たな研究成果等、海域観測に関する状況変化を踏まえて、今後優先して整備すべき海域観測網について取りまとめ。

今後の海域観測網のあり方

1. 海底地殻変動観測（GNSS/音響観測等）

【効果的な観測点の展開】

- ・広域化 ・高密度化

【観測の高度化】

- ・観測精度の向上 ・時間分解能の向上

【長期間かつ安定的な観測】

- ・観測装置の長寿命化
- ・短期集中的な観測
- ・関係機関との連携体制の構築

2. ケーブル式海底地震・津波計

【観測網展開に係る検討】

- ・整備海域の選定
- ・観測点密度の検討
- ・整備するシステムの検討

【安定的な観測】

- ・観測技術の向上
- ・機器の拡張性と更新可能性の向上
- ・冗長性の向上

3. 観測網整備にあたって必要な技術開発

【海底地殻変動観測】

- ・長期的な観測の実現
- ・観測の高精度化
- ・観測の効率化
- ・（準）リアルタイムでの観測の実現

【ケーブル式海底地震・津波計】

- ・長期にわたり安定的に観測できる技術の確保

海域ごとに整備すべき観測網

（1）M9クラスの地震が発生する海域 （南海トラフ、日本海溝）

- ・既設の観測網の安定的な運用
- ・各機関が連携した観測の継続
- ・更なる高頻度化・高密度化・高精度化を
目指した観測網構築や技術開発の推進

（2）M8クラスの地震が発生する海域 （相模トラフ、千島海溝）

- ・既設のケーブル式海底地震・津波観測網
の安定的な運用
- ・海底地殻変動観測網の更なる構築

（3）観測データが乏しく、地震発生の特 性が十分に解明されていない海域 （南西諸島海溝、伊豆・小笠原海溝）

- ・将来の観測網構築に向けた、先導的な地
殻変動観測や機動的な地震観測の推進

期待される成果

- ・観測データから得られるプレート間の固着状態の分布・時間変化を考慮した物理モデルや地震発生予測手法の開発の推進
- ・上記モデルや予測手法の導入による中～長期的な地震発生予測の高度化
- ・海域で発生した地震の地震像の即時把握から残る地震の発生可能性の評価への貢献