

12 - 4 海域地震・地殻変動観測の将来像

Marine seismic and geodetic observation in the future

篠原 雅尚（東京大学地震研究所）

Masanao Shinohara (Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

日本列島周辺ではプレート境界型地震の多くが海底下で発生しており、海底における地震・地殻変動観測が重要である。海底における観測は技術的困難があるため、海域は観測の空白域となっていた。しかしながら、近年エレクトロニクス・材料工学・制御工学・海洋工学などの技術的進歩により海底においても地震・津波・地殻変動の観測が可能となってきた。

海底における地球物理学的な観測測器の一つとして、地震帯域を観測する海底地震計がある。海底地震計は大きくわけてケーブル式海底地震計と自己浮上式海底地震計がある。ケーブル式海底地震計はデータをリアルタイムで収集することが可能であるという大きな利点を持ち、モニタリング観測に大きく寄与することから現在日本周辺では整備が進められている。海底における津波及び上下地殻変動の観測には精密圧力計が用いられる。海底の圧力は海水層の厚さに対応しており、現在の海底圧力観測では海水の高さに換算して 1cm 以下の変化を捉えることができる。近年、小型で消費電力が少ない精密圧力計が開発され、自己浮上式システムと海底ケーブルを用いたシステムの両方に用いられている（第 1 図）。

日本におけるケーブル式海底地震・津波観測システムを用いた海底観測は、1970 年代後半からは始まった。当初のシステムは、通信に用いられる電信電話技術を全面的に採用し、同軸ケーブルを用いたアナログデータ伝送システムであった¹⁾。1990 年代には海底光ケーブルを用いたデジタル伝送方式となり、順次設置が進められた。2010 年以前に設置されたシステムは海底観測装置を海底ケーブルで数珠繋ぎ（インライン式）にしておりケーブル長は長い場合で 250km 程度である。1 本の海底ケーブルに接続される海底観測装置の数も限られていた²⁾。2000 年代後半から実績があり信頼性が高い光ケーブルを用いた大規模システムの研究開発が開始され、観測ネットワークとして日本近海に展開されるようになってきた。地震・津波観測監視システム（DONET）は紀伊半島沖及び紀伊水道に展開された大規模海底ケーブル観測システムである³⁾。DONET の特徴は通信海底ケーブル技術を用いた信頼性の高い基幹ケーブルとそれに接続された分岐装置とノードからなる展開型ケーブルシステムであることである。基幹ケーブル設置後に水中ロボットを用いて多項目観測装置を接続する。2011 年東北地方太平洋沖地震の発生を受けて千島海溝および日本海溝では地震と津波の発生を早期に検知することを主な目的として日本海溝海底地震津波観測網（S-net）の整備が行われた⁴⁾。この観測網は 6 つのサブシステムからなり、それぞれのサブシステムは長さ 730km から 1470km の光海底ケーブルに 22 点から 28 点の観測ノードが挟み込まれているインライン式である。それぞれの観測ノードには、短周期地震計、加速度計、津波を検出する水圧計が複数個装備されている。海底ケーブルは基本的には両端が陸上局に接続されており、電力供給およびデータ伝送の冗長化がなされている。一方、多数の観測点を配置できるようにコストを抑えて柔軟性の高い観測を行えるシステムを目指して、インターネット技術利用する観測システムの開発が 2000 年代後半から行われており⁵⁾、最新のシステムは岩手県釜石市沖（三陸沖）に 2015 年に設置された。DONET および S-net の整備より、日本周辺の海底観測点数は東北地方太平洋地震以前に比べて飛躍的に増加し海底データを用いたモニタリング手法の開発も進んでいる（第 2 図）。南海トラフ沿いでは今

後大きな地震の発生が想定されており、震源域西部に地震や津波の早期検知のためにケーブル式海底地震・津波観測システムの整備が進んでいる。このシステムは DONET および S-net の方式をハイブリッドしており、さらにデータ収集にインターネット技術を活用することが計画されている。ケーブル観測システムとして新しいシステムになるとともに、南海トラフ西部におけるモニタリングが進むことが期待されている。

これまでのケーブル式海底観測システムは従来の地震計や津波計を海底ケーブルで結んだものであるが、近年、新技術として光ファイバ自身をセンサとして用いる Distributed Acoustic Sensing (DAS) 計測技術が進展している。DAS 計測は光ファイバセンシング技術の一つでコヒーレントなレーザー光の短いパルスをシングルモードファイバに連続して送信し後方散乱を観測する。ファイバ近傍で発生した振動により発生したファイバの微小な変形が後方散乱波のパターンを変化させることから振動を検出する。パルスを送出してからの時間が観測点までの距離に対応する。また、後方散乱波のパターン変化検出には干渉計測を用いており、散乱源間の距離変化（歪変化）を計測する。干渉させる散乱波の散乱源の距離（ゲージ長）が空間的な分解能に相当し、地震観測の場合はゲージ長は数十 m に設定することが多い。すなわち、地震計を数十 m 間隔で長さが敷設されているファイバに対応するアレイ観測が行うことができる。DAS 技術による観測は、これまで「点」であった観測を「線」での観測に変化させる画期的なものである。1996 年に三陸沖光ケーブル式海底地震・津波観測システムが東京大学地震研究所により設置された。このシステムは将来の拡張用として 6 本（3 組）のスペアファイバを持っており、その一つを用いて DAS 技術によるパイロット観測が行われている。その結果、マグニチュード 1 クラスの微小地震を始め観測システム近傍で発生した小さな地震や深発地震など多数の地震が観測されている。また、DAS 計測で記録された雑微動を用いて浅部構造が求められた⁶⁾。

自由落下自己浮上式海底地震計は地震計センサの他にデータレコーダ、電池などを収納した耐圧容器の外側に沈降用錘を装着して海底への設置は自由落下により行われる。回収は音響信号を用いて錘を切り離すことにより浮力を持つ耐圧容器を自己浮上させる。技術の進歩に伴い海底における連続記録期間は 1 年間以上に延伸された⁷⁾。その結果、同一地点に繰り返し長期観測型海底地震計を設置するモニタリング的な観測が可能となったが、データがリアルタイムで得られないことが最大の欠点である。現在は計測センサーとして水圧計や広帯域地震計、加速度計などを選べるようになってきている。

海底における地殻変動モニタリングの一つに、GNSS/音響測距結合方式海底地殻変動観測がある⁸⁾。この方法は、GNSS 測位と音波による測位を組み合わせた方式であり、1990 年ごろに考案された。現在は GPS に加えて、GLONASS を用いた解析、海中音速場の空間不均質を推定可能な観測・解析などの高度化により測定精度は従来に比べて大幅に向上した。また、船舶による超高頻度観測（ほぼ毎月）が実施され、ウェーブグライダーやブイを用いた観測が開発中である（第 3 図）。

現在の状況を踏まえ、今後の海域観測網は従来を大きく超える空間的密度で測地帯域から地震帯域までの広帯域リアルタイム観測となることが予想される（第 1 図）。この場合、現在発展中の海底ケーブルを用いた観測網は、海底ケーブル観測システムを海域観測のインフラストラクチャーとしても利用する観測網に発展する可能性がある（第 4 図）。特に測地帯域でのリアルタイム観測が今後の課題であり、光ファイバーを用いた測地観測、海底掘削孔内における歪・傾斜観測、2 点間音響測距観測、GNSS/A 方式地殻変動システムの海底ケーブルシステムへの接続などが有望な技術である。一方、地震帯域における空間密度の向上には、さらにコストをさげ多数の観測点をケーブ

ルに接続する技術開発や DAS 計測技術の開発などが期待される。また、自由落下自己浮上式測器は海底ケーブル観測システムが設置されていない領域での観測に重要であるが、さらにケーブル式観測システムと連携し空間密度の増大を行った観測の実施なども今後必要性が増すと考えられる。

参考文献

- 1) 気象研究所地震火山研究部 (1980), 気象研究所技術報告, **4**, 1-232. 海底地震常時観測システムの開発
- 2) 藤原法之・他 (2009), *NEC 技報*, **62**, 4, 56 - 59. 海底地震観測システム
- 3) Kaneda, Y. et al. (2015), *Seafloor Observatories*, P. Favali et al., Springer Praxis Books, 643 - 662. Development and application of an advanced ocean floor network system for megathrust earthquakes and tsunamis
- 4) Kanazawa, T. et al. (2016), *SubOptic 2016*, WE2B3. S-net project, Cabled observation network for earthquakes and tsunamis
- 5) Shinohara, M. et al. (2014), *Marine Geophys. Res.*, **35**, 231-242. New compact ocean bottom cabled seismometer system deployed in the Japan Sea
- 6) Spica, Z. J. et al. (2020), *Geophys. Res. Lett.*, **47**, e2020GL088360. Marine sediment characterized by ocean - bottom fiber - optic seismology
- 7) 金沢敏彦・他, (2009), *地震* **2**, **61**, S55-S68. 海底地震観測の最近の進展 - 海底地震観測システムと海底における自然地震観測の進展について -
- 8) 佐藤まりこ・藤田雅之 (2012), *海洋情報部研究報告*, **48**, 26-40. GPS/ 音響測距結合方式による海底地殻変動観測技術の進展 - この 10 年の歩み -

現在の海域におけるモニタリング観測システム

- 海底地殻変動観測
 - GNSS 音響結合方式地殻変動観測システム（準リアルタイム）
 - 自己浮上式海底水圧計（海底上下変動観測）（オフライン）
- 地震・津波観測
 - 海底ケーブル式地震・津波計（リアルタイム）
 - 自己浮上式海底地震計（オフライン）

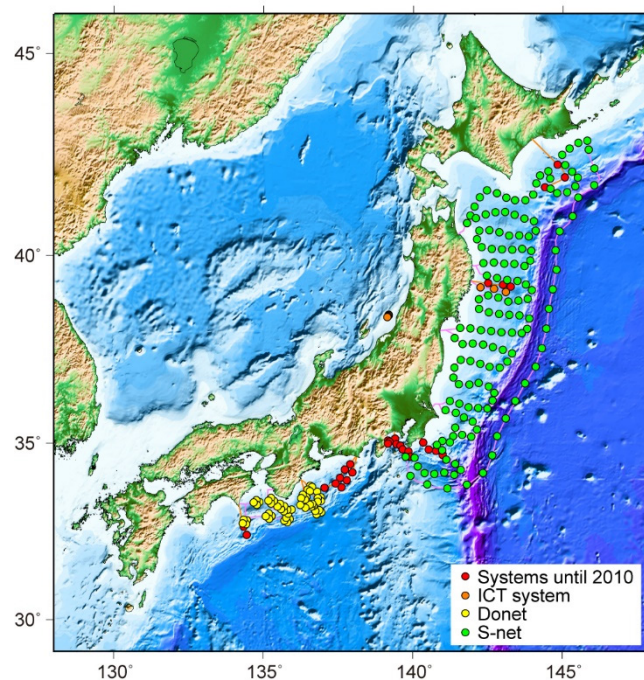
次期海域観測網のコンセプト

- 測地帯域から地震帯域までの広帯域の観測を実施
- 従来を大きく超える空間的密度を確保する
- リアルタイム観測が基本である

ケーブルシステムを基幹
とした観測網の展開

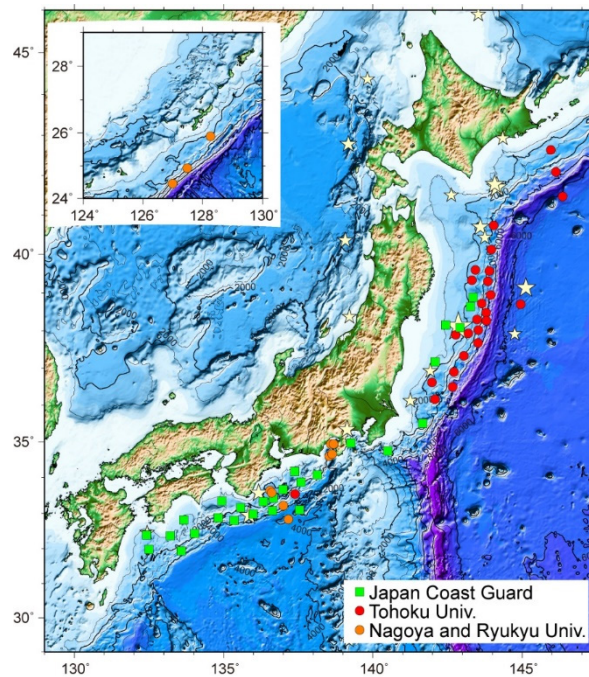
第 1 図 現在の海域におけるモニタリング観測システムと次期海域観測網のコンセプト

Fig. 1 Present monitoring observation system in marine environment and concept of next marine observational networks in the future.



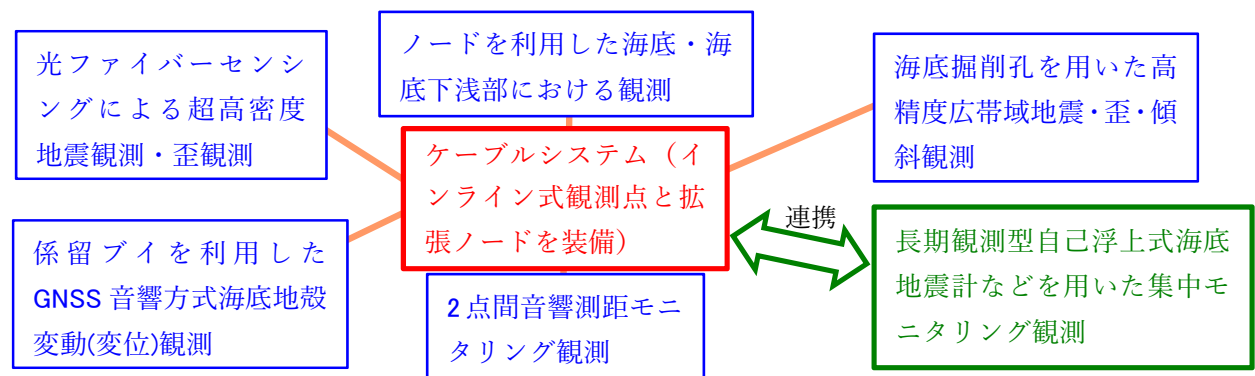
第 2 図 2020 年 8 月時点における海底ケーブル式地震観測点の位置。赤丸は 2010 年以前に設置された観測点を示している。黄色と緑の丸は、それぞれ Donet と S-net の観測点位置、橙丸はインターネット技術を用いたシステムの観測点位置を示す。南海トラフ西域にも、設置計画が進行している。

Fig. 2 Positions of seafloor cabled seismic stations around Japan as of August 2020. Red circles indicate stations installed before 2010. Yellow and green circles denote stations of Donet and S-net, respectively. Orange circles mean stations which introduces Internet Communication Technology. Deployment of a new cable observation system to western area of the Nankai trough is planned.



第 3 図 2020 年 8 月時点における GNSS 音響海底地殻変動観測海底局の位置。色は設置機関を表す。星は 1923 年以降に発生したマグニチュード 7.5 以上の地震の震央を示す。

Fig. 3 Positions of seafloor stations for Global Navigation Satellite System/Acoustic ranging (GNSS/A) system for crustal deformation measurement around Japan as of August 2020. Colors of symbols mean institutions which installed stations. Stars indicate epicenters of earthquakes with a magnitude greater than 7.5.



第 4 図 ケーブルシステムを基幹とする海底地震・地殻変動・津波観測システム

Fig. 4 A real-time seafloor seismic, geodesy and tsunami observation system based on seafloor cable systems as infrastructure of observational networks