

12 - 9 南海トラフ長期孔内観測システムによる観測

Long-term seafloor borehole observation in the Nankai Trough

荒木英一郎

Eiichiro Araki

海洋研究開発機構

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

概要

南海トラフで将来起こる巨大地震に至る海底活動の過程を明らかにし、監視することを目的に DONET(海底地震・津波観測監視システム¹⁾)は、2010年の紀伊半島沖への設置をはじめに2016年4月には東南海・南海地震の震源域とその周辺を覆う DONET1, DONET2 観測網として稼働している。DONET1, DONET2 では、観測装置は海底面に埋設されており、海底における広帯域地震観測に適した観測環境を実現している。一方、より長周期の海底地殻変動等を観測するためには、海底面に広がる軟弱な堆積層や、海底に流れる底層流の影響が顕著となるため現状困難と考えられる。海底下 500-1000 m の掘削孔内へ観測センサーを設置することによって、このような問題を解決できるのではないかと考え、地球深部探査船「ちきゅう」で掘削した孔内へ地震・地殻変動等のセンサーを設置する「長期孔内観測システム」の開発を行い、国際深海掘削計画 (IODP) における南海掘削計画の一環で、東南海地震震源域沖合の海域に複数点を設置し、DONET に接続することによって長期観測を実現した。

システムのデザイン

開発を実施した「長期孔内観測システム」のデザインでは、いくつかの要点の実現を目指した。

- 1) 広帯域・高ダイナミックレンジの観測を冗長系で行うこと。すなわち、孔内に設置した複数種のセンサー (体積歪計・傾斜計・広帯域地震計・強震計・ジオフォン・間隙水圧・温度計アレイ) からの信号を3本のケーブルや3本の水管を並列に使うことで海底まで伝送する方式を採用した (第1図)。ケーブル1系統に体積歪計と強震計を接続するなどにより、一部のケーブルケーブル損傷などのトラブルがあっても長周期から短周期までの広帯域観測がシステム全体で実現できるような、観測機能の冗長化を図った。
- 2) センサーと地殻との良好なカップリングの確保、センサー周囲の流体移動の影響をなくすことを目的として、センサー群はセメント充填によって孔内へ固定した。
- 3) 安定な長期観測の確実な実現のために、DONET への接続を行えるものとした。DONET 接続のために、データ通信・電力供給および時刻基準の供給が行える DONET 孔内インターフェースの開発を行った。

システムの設置計画とその実施

システムの設置は IODP の南海掘削計画の一部に位置づけた。DONET のノードから 10 km 以内に位置し DONET1 への接続が可能となる、東南海地震の固着域浅部 (C0002), 分岐断層浅部 (C0010), 付加体先端部 (C0006) の3か所に設置地点を計画した (第2図, 第3図)。C0002G 孔は、2010年11月に IODP Exp 332²⁾でシステムの設置を「ちきゅう」で実施、2013年1月に DONET への接続を行った。C0010A は、2009年の Exp 319 で孔の掘削と簡易型孔内観測装置による観測を開始、

途中 Exp 332 での装置交換を経て継続されていたが、2016 年 4 月には IODP Exp 365³⁾ で簡易型孔内観測装置の回収と長期孔内観測システムの設置が実施され、2016 年 6 月には DONET へ接続し、以来長期運用が行われている。DONET を通じて収集したデータはインターネットを通じた公開⁴⁾を行っている。

これまでの成果

現在、設置した長期孔内観測システムによる観測データから、顕著な成果が得られつつある。

2016 年 4 月 1 日に、三重県南東沖において Mw6.1 の地震が発生した。震源は DONET1 観測網内に位置していたため、海底地震計で近傍での強震観測を行うことができたが、孔内 (C0002G) においても孔内強震観測記録が得られた。海底との記録の比較 (第 4 図) から、海底では堆積層の影響により水平動の顕著な増幅が見られるが、孔内では地震計が固結した堆積層の下部に設置されていることから、顕著な増幅が見られないことがわかった。海底孔内観測は地震破壊過程の分析に非常に有用であるものと考えられる。

また、同じ 2016 年 4 月 1 日の地震の孔内間隙水圧記録の解析から、孔内で高感度かつ精度の高い地殻歪変化の計測が行えることが示された⁵⁾。孔内では、地震時の歪変化だけでなく、地震後の余効的なゆっくりとした変動もとらえられている。この地震では、地震時に 0.37 μ 歪に相当する変化が生じたが、その後 2 日間でさらに 30% 程度の歪変化を明瞭に観測した。さらに、この地震によって誘発されたと考えられる、震源域沖合の海溝軸付近での浅部ゆっくり滑りが発生したことも観測された (第 5 図)⁶⁾。この浅部ゆっくり滑りは、陸上の GNSS 観測網や孔内歪計、DONET 海底水圧計いずれの観測限界より小さな変動であり、孔内観測の高感度を実証するものである。

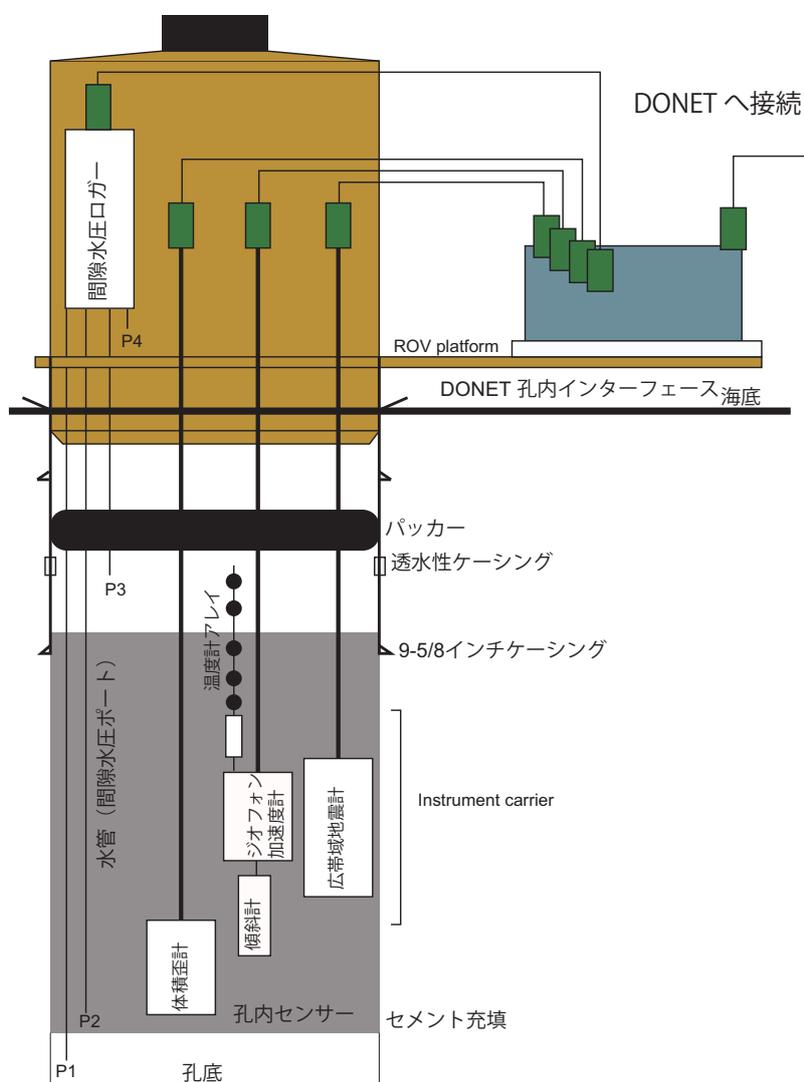
今後の展開

南海トラフでの海底孔内観測によって、浅部ゆっくり滑りが繰り返され、また地震によって誘発される事例が示されたことは、震源域近傍での海底地殻変動を高精度で注意深く監視することの重要性を示すものと考えられる。また、孔内での実測例が示されたことによって、海域プレート境界での地震・ゆっくり滑り等の滑りの実態を把握分析することは現在技術的には可能となっているとも考えられる。現状の海底孔内による観測域は、東南海地震震源域の一部にとどまっているが、2017 年度中に予定する付加体先端部 (C0006) への展開、さらに東南海・南海地震震源域周辺への広域展開を海底面での地殻変動観測技術の開発と合わせて行うことが必要だと考える。

参考文献

- 1) Kaneda, Y., K. Kawaguchi, E. Araki, H. Matsumoto, T. Nakamura, S. Kamiya, K. Ariyoshi, T. Hori, T. Baba, N. Takahashi, Development and application of an advanced ocean floor network system for megathrust earthquakes and tsunamis. in *Seafloor Observatories*, 643–666, Springer, Heidelberg, Germany (2015).
- 2) Kopf, A., E. Araki, S. Toczko, the Expedition 332 Scientists, *Proc. IODP*, 332: Tokyo (Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc.) (2011).
- 3) Kopf, A., D. Saffer, S. Toczko, the Expedition 365 Scientists, *Expedition 365 Preliminary Report: NanTroSEIZE Stage 3: Shallow Megaspay Long-Term Borehole Monitoring System (LTBMS)*. International Ocean Discovery Program (2016).

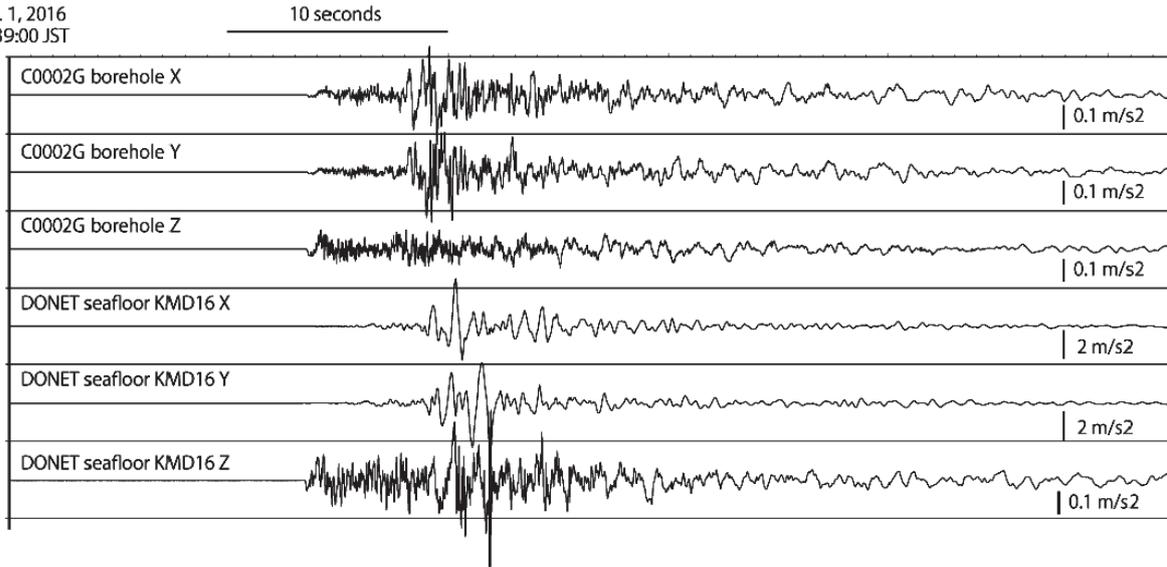
- 4) JAMSTEC データ公開サイト <https://join-web.jamstec.go.jp/join-portal/>
- 5) Wallace, L. M., E. Araki, D. Saffer, X. Wang, A. Roesner, A. Kopf, A. Nakanishi, W. Power, R. Kobayashi, C. Kinoshita, S. Toczko, T. Kimura, Y. Machida, S. Carr, Near-field observations of an offshore M_w 6.0 earthquake from an integrated seafloor and subseafloor monitoring network at the Nankai Trough, southwest Japan. *J. Geophys. Res.* **121**, 8338–8351 (2016).
- 6) Araki, E., D. M. Saffer, A. J. Kopf, L. M. Wallace, T. Kimura, Y. Machida, S. Ide, E. Davis, IODP Expedition 365 shipboard scientists, Recurring and triggered slow-slip events near the trench at the Nankai Trough subduction megathrust, *Science* **356**, 1157–1160 (2017).



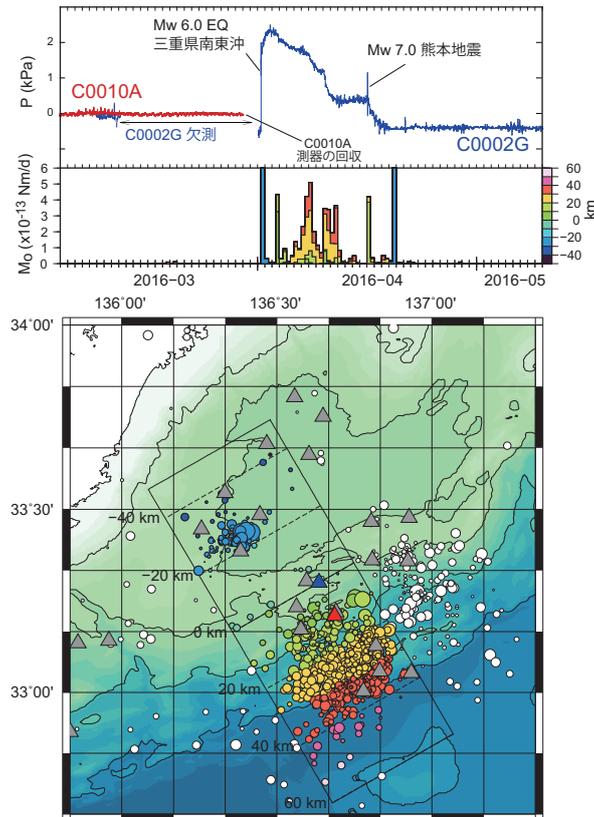
第1図 長期孔内観測システムダイアグラム 孔内には、体積歪計・傾斜計・ジオフォン・加速度計・広帯域地震計・温度計アレイ・間隙水圧ポートが設置され、海底までケーブルおよび水管で接続されている。海底でDONET孔内インターフェースに接続される。

Fig.1 System diagram of the Long-term Borehole Monitoring System. Strainmeter, tiltmeter, geophones, accelerometers, broadband seismometer, thermometer array, and pore-fluid pressure ports are installed in the same borehole. Cables and hydraulic tubes connect sensors to the seafloor, where connected to DONET via the DONET borehole interface unit.

Apr. 1, 2016
11:39:00 JST



第4図 2016年4月1日三重県南東沖地震の海底（KMD16）および海底孔内（C0002G）における3成分強振動記録の比較
Fig.4 Comparison of three-component strong motion records of Mie-ken-Nanto-oki earthquake in Apr. 1, 2016, in nearby seafloor (KMD16) and seafloor borehole (C0002G).



第5図 2016年4月1日三重県南東沖地震後に熊野灘沖合で見られた孔内間隙水圧観測による浅部ゆっくり滑り（上：間隙水圧変化（赤：C0010A，青：C0002G）と低周波微動活動（中：地震モーメント時系列および下：震源位置地図）。
Fig.5 Shallow slow slip event detected by the seafloor borehole pore-fluid pressure (top: red trace for C0010A borehole, and blue trace for C0002G borehole), shown with time series of low frequency tremor (middle: seismic moment release) and hypocenter location (bottom map).