

科学観測用海底ケーブルネットワーク技術報告書 序論（案） ver. 1.1

目次

1. 1	はじめに	1
1. 2	国内の科学観測用海底ケーブルの現状	4
1. 3	これまでに得られた地震学分野の成果	6
1. 4	ネットワーク化の利点	7
1. 5	期待される応用分野	8
	参考文献	9

1. 1 はじめに

海底は大量の海水で覆われており、その実態を詳細に観測し、理解することは簡単なことではない。しかし、最近の科学技術の発展により、海底と海洋は人類の社会生活との間に大きな関係を持つことが知られるようになった。その代表的な例が地震である。海底にあるプレート境界の周辺では巨大な地震が周期的に発生することが知られている。その地震の発生機構を解明し、被害を最小限に食い止めるためには、地震発生帯の近くの海底に多数の観測機器を配置し、観測を強化する必要がある。また、海洋は地球の気候変動に大きな影響を持つことが知られているが、深海の海水が地球全体の気象変動にどのように関わっているのか、まだ完全には解明されていない。このような研究を進めるためには、深海底の環境の長期的な変動や海水と地核との間の熱や物質の相互作用測定することが重要である。さらに、深海底では硫化水素の化学合成で生命を維持するものなど、特異な生物も観測されており、古代の生命との関係も含めその研究が注目されている。そのほか、海底掘削孔や地震トモグラフィー、電磁場トモグラフィーなどを利用した地球の内部構造探査なども地球の本質を理解するために重要な研究テーマである。

このような深海での観測を行う手段として、海底ケーブルを利用したシステムはこれまでも重要な役割を果たしてきた。次節で述べるように日本では 1970 年代後半から海底ケーブルを用いた地震観測が行われるようになってきた。国内では **図 1-1** に示すように、すでに 8 本の海底ケーブル式観測システムが建設されている⁽¹⁾。また、水中着脱式コネクタを用いて海底のジャンクションボックスの周辺に多数の観測機器を設置する技術や、展長ケーブルを用いて主ケーブルから最大 10km 離れた海底に移動型観測機器を設置する技術など、新しい建設技術が実用化されてきた。

一方で光海底ケーブル技術や情報通信処理技術、半導体技術、GPS に代表されるポジショニング技術など、周辺技術も急速に発展してきた。これらの技術革新

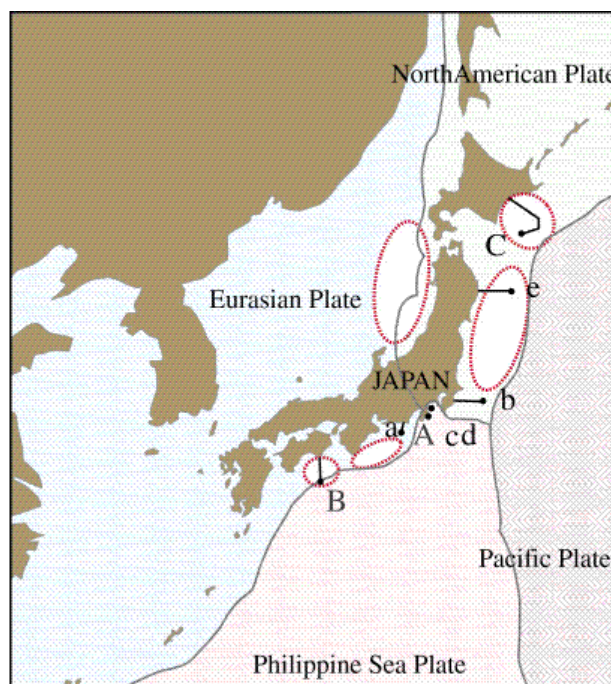


図 1-1 国内における 8 本の地震観測および実験用海底ケーブル式観測システム

a) 気象庁：駿河沖、 b) 気象庁：房総沖、 c) 東大地震研：伊豆半島沖、 d) 防災科研：相模トラフ、 e) 東大地震研：三陸沖、 A) JAMSTEC：初島沖（実験用）、 B) JAMSTEC 室戸沖、 C) JAMSTEC 十勝・釧路沖。赤線で囲った部分は、地震観測強化地域に指定された海域である。

は、科学観測用海底ケーブルネットワークにも大きな影響を及ぼすことが予想される。例えば、Ethernet に代表される情報通信技術を用いることにより、センサと研究室を直接結ぶ柔軟な情報通信ネットワークを構築することが可能となってきた。また、光増幅技術と波長多重技術をベースとした最新の光海底ケーブル技術⁽²⁾は、柔軟な海底ケーブルネットワークを構築することを可能にした。ここで、これらの多くの周辺技術のうち、特に大きな影響を持つ光海底ケーブル通信技術について振り返ってみる。

1988 年に世界で初めて商用化された大西洋横断光海底ケーブルの光ファイバー一本当たりの伝送容量は、280Mbps であったが、13 年後の 2001 年にはファイバ 1 本当たり 960Gbps と約 3,400 倍に拡大した。通信方式も、初代の光海底ケーブルでは再生中継方式（弱まった光信号を一旦電気信号に変換し、増幅して波形整形を行ったのち、再び光信号に変換して送り出す中継方式）であったが、1994 年には、光信号を光のまま増幅する光増幅方式が登場し、その後一本の光ファイバの中を複数の波長の光信号が伝搬する光波長多重通信方式が実用化された。光波長多重方式は光増幅方式と併用される。

光増幅方式では伝送する信号はビットフリーである。このことは、伝送端末に様々な機器を使えることを意味し、用途に見合った低コストの伝送システムが実現できるようになった。また、波長多重システムを利用することにより、信号の分岐や伝送チャンネルの増設が容易にできるようになった。このような光海底ケーブル通信技術の発達により、低コストで柔軟な伝送システムを容易に構築することが可能になってきた。

このような周辺技術の発達により、新しい機能と構造を持つ科学観測用海底ケーブルネットワークを実現することが可能となってきた。半導体技術と光通信技術や無線通信技術の発達が現代社会に情報革命をもたらしたように、これらの周辺技術の発達は深海研究に従来にない知見をもたらし、新しい科学を発展させる可能性を秘めている。

このような背景のもとに、IEEE Oceanic Engineering Society Japan Chapter では、次世代の科学観測用海底ケーブルネットワークに関する技術的な検討を行い、提案をまとめるために、「地球観測海底ケーブルネットワーク検討委員会」を設けた。提案する科学観測用海底ケーブルネットワークは、ARENA(Advanced Real-time Earth monitoring Network in the Area)と名付けられた。

委員会は 2002 年 2 月 14 日に発足して以来、「給電システム」、「伝送システム」、「海中システム」の 3 分科会に分かれて延べ 10 回の会合を開き、実質的な検討を進めた。委員会への参加者は 47 名であった。これらの分科会の報告はそれぞれ第 3 章：給電システム、第 4 章：伝送システム、第 5 章：海中システムにまとめられている。第 2 章：ネットワークの概要では、ネットワークのイメージの他、技術的要求条件、ネットワークモデル、消費電力、データ容量、同期精度など次章以後の基礎となる事項をまとめた。以下、本章では 1. 2 で国内の科学観測用海底ケーブルネットワークの現状を紹介したのち、1. 3 でネットワーク化することの利点を考察し、1. 4 で科学観測用海底ケーブルネットワークの応用範囲をまとめる。

1. 2 国内の科学観測用海底ケーブルの現状

(1) 地震観測用海底ケーブルシステム

日本では、70年代後半から地震対策の一環として海底ケーブルを利用した観測が行われるようになった。1996年には文部省の地震対策推進本部が地震観測強化のため、5海域での海底ケーブルを用いた地震観測システムの設置を答申している。これまでに図1-1 (p.1)に示したように、国内では合計8本の科学観測用海底ケーブルが建設されている。これらのシステムは、気象庁（2本）、東京大学地震研究所（2本）、防災科学技術研究所（1本）、海洋科学技術センター（3本）により建設されたものである。

(2) 通信用海底ケーブルを利用した実験システム：VENUS プロジェクト

図1-1に示した観測用海底ケーブルはいずれも新規に建設されたものであるが、運用を停止した通信用海底ケーブルも科学観測に利用されている。このような通信用海底ケーブルを利用することにより、低コストで科学観測用海底ケーブルシステムが建設できるだけでなく、人類全体の資産とも言える海底ケーブル資源を有効に再利用することにもなる。

国内の通信用海底ケーブルを利用した代表的な例は、図1-2に示すGEO-TOC ケーブル⁽³⁾と沖縄ーグアム間海底ケーブルである。1999年には科学技術庁の科学技術振興調整費により、複数の観測機器を接続するジャンクションボックスを沖縄ーグアム間海底ケーブルに実験的に接続した⁽⁴⁾。接続した観測機器には、広帯域地震計、津波計、ハイドロフォンアレイ、地殻変動観測用精密測距計、臨時観測装置、電位差計、磁力計、テレビジョンカメラ、などを含んでいる。これらの観測機器は、水中着脱式コネクタによりジャンクションボックス（図1-3）に接続される。このことは、観測機器がROVによ

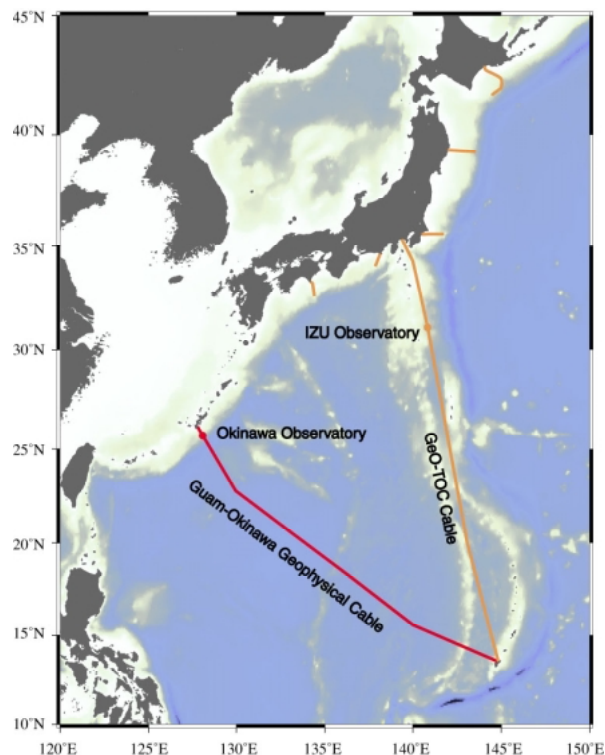


図1-2 国内における通信用海底ケーブルの再利用

国内においては、2本の通信用同軸海底ケーブルが科学観測用に後利用されている。沖縄ーグアム間を結ぶ旧 TPC-2 (Trans Pacific Cable - 2)には VENUS プロジェクトにより多目的観測ステーションが実験的に設置された。二宮ーグアム間を結ぶ GEO-TOC ケーブル（旧 TPC-1）にはさらに2箇所観測センサを挿入することが計画されている。

り保守を行ったり、新しい機能を持つセンサに更新できることを意味する。VENUS システムはジャンクションボックス内のコネクタ障害により通信が中断するまで、海底に設置したセンサから連続的な観測データを取得することができた。なお、VENUS に僅かに先立ち、ハワイとカリフォルニアを結ぶ通信用海底ケーブルを利用して同様な観測ステーションが設置されている。これらの実験により、多目的の海底観測システムを設置できることが実証され、海底ケーブルシステムが海底観測の重要なインフラストラクチャとなることが確認された。

（３） 移動型観測システム

2001 年に設置された釧路十勝沖観測システム⁽⁵⁾では、8km の展長ケーブルを用いて、海底ケーブルに挿入された Branch-MUX から離れた地点に移動型観測システム^{(6),(7)}を設置することに成功した。図 1-4 は釧路十勝沖観測システムのイメージを描いたものである。展長ケーブルの敷設と接続は、ディープトウと ROV によって行われた。この技術を用いることにより、観測機器の設置位置の自由度が高まるとともに、正確な位置に観測機器を設置することが可能となった。また、複数の観測機器を平面的に配置することも可能となった。なお、本システムで用いた展長ケーブルは光ファイバのみを用いたケーブルである。電力線を持つ展長ケーブルの開発は次の課題である。

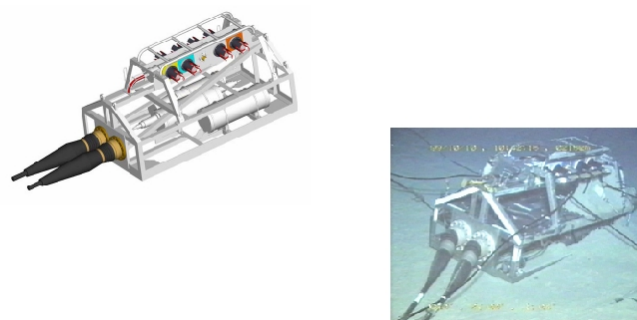


図 1-3 VENUS プロジェクトのジャンクションボックス

左：ジャンクションボックスのイラストレーション

右：ROV 「かいこう」によって撮影した海底上のジャンクションボックス

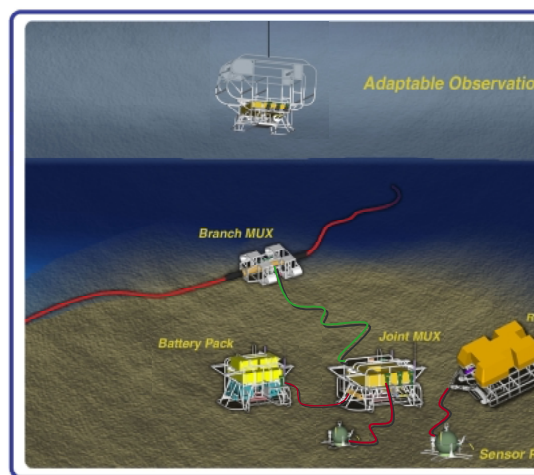


図 1-4 釧路十勝沖観測システム

釧路十勝沖観測システムでは展長ケーブルを用いて主ケーブルから 8km 離れた地点に移動型観測システムを設置した。

1. 3 これまでに得られた地震学分野の成果

先に呼べたように、プレートの境界付近で生じる地震の震源は海底下に位置する。そのため、震源域に近い海底下に観測機器を設置することにより、観測の感度が高まるとともに、精度が向上する。図1-5は室戸沖のケーブル式地震計を用いた観測により、地震の震源の推定精度が高まったことを示している⁽⁸⁾。図1-6は釧路十勝沖観測システムで捕らえた設置後1年間の微小地震の分布を描いたものである。これらの微小地震の多くは、陸上の観測機器では検知できなかったものである。また、地震計とともに設置された津波計により、津波の検知と圧力変動を記録することが可能となった。このような観測精度の向上により、地震の発生機構について、さらに詳しい解析を行うことが可能となってきた。

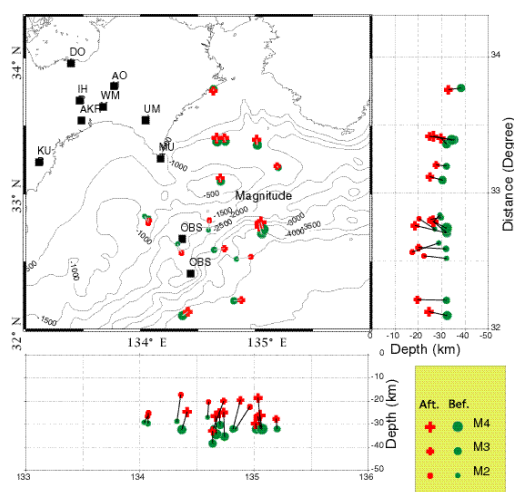


図1-5 震源の推定精度の向上

震源の推定深度を投影して示したものである。南北と東西方向の投影図をそれぞれ図の下側と右側に示す。"+"と"●"のマークはそれぞれケーブル式地震計の設置後と設置前の震源推定位置を示している。海底地震計により深度の推定精度が高まったことが確認できる。

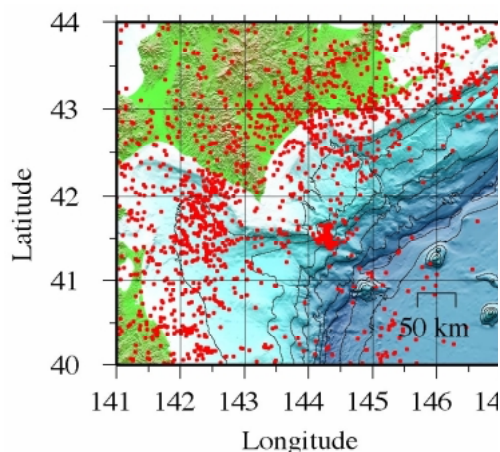


図1-6 釧路十勝沖観測システムで捕らえた設置後1年間の微小地震の分布

これらの多くの微小地震は陸からの観測では捕らえることができないものである。

1. 4 ネットワーク化の利点

ネットワーク化を行う利点は、

（１）システムの冗長性と信頼性の向上、（２）システムの拡張性の向上、（３）建設コストの削減、にあると考える。

日本列島の周辺は豊かな漁場である。通信用海底ケーブルに発生する障害の大部分（図 1－7 参照）はこのような漁業活動に起因するものである。これらの事故を未然に防ぐため設置する海底ケーブルは水深 1000m～2000m 付近までは海底下に埋設し漁業活動を妨げないように考慮をするが、それでも漁業活動による障害を完全に避けることができない。

既存の科学利用ケーブルシステムは、陸揚げ局と海底の観測機器の間を一本の海底ケーブルで接続しているため、海底ケーブルに何等かの障害が発生した場合、障害点から海側の観測は中断してしまう。

このような障害に対応するため、ケーブルシステムの給電路、伝送路をネットワーク化し、複数の陸揚げ局を持つ構成を取りネットワーク化することにより、一ヶ所に障害が起こっても給電及びデータの伝送が可能な冗長性のあるシステムを構築する必要がある。

次の利点は拡張性を持ったシステムの構築である。実際に日本列島周辺に発生している地震は日本列島に並行するプレート境界に並行して広範囲に発生している。15km～20km のメッシュ間隔で整備を進める陸上の観測点と同様に、海域においても 20-50km 間隔で日本列島を囲むような観測網ができあがるのが望ましい。このような大規模な科学利用ケーブルを建設する場合、一度に整備されるものではなく適宜ケーブルを拡張していくようなシステムになると考えられる。従ってブロック単位でケーブルシステム自体が拡張可能な構成をとれることが望ましい。この場合使用するケーブルと伝送システムにはあらかじめ、最終的な情報容量を推定し十分な余裕を持ったシステム構築が望まれる。

第三の利点は同一規格による機器の製造によるコスト削減である。海中機器は建設や修理を行うために高度な設備を持つ母船を必要とするために、建設と修理にかなりの費用を要する。また、母船を利用するためには数ヶ月以上の準備期間を必要とするために、万一観測機器に障害が発生しても、直ちに修理を行うことは困難で、観測に長期の欠測が発生する。このような問題を避けるために、海中機器には高度な信頼性が要求される。そのため開発時には多くの信頼性確認試験が必要となるため、開発コストも上昇する。ネットワーク化により冗長性を高めることにより、

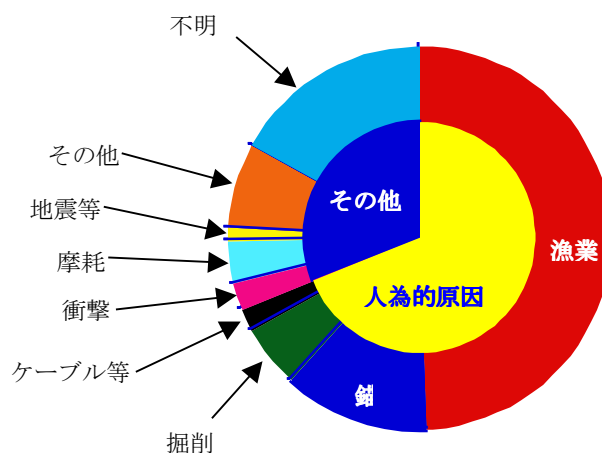


図 1－7 通信用海底ケーブルに発生する障害原因
ICPC (International Cable Protection Committee)
の資料より

信頼性に対する要求基準を緩和することができるだけでなく、同一規格の海中機器を使用することにより、機器の単価を下げることを期待できる。

1. 5 期待される応用分野

ここでは、地震以外の応用分野について述べる。

（1）海洋環境調査

海洋は地球全体の環境に大きな影響を持つことが知られているが、その詳細はまだ解明されていない。この問題に取り組むためには、海洋の熱循環や物質循環、温度変動の研究、個体地球一海一空の間の相互作用の研究などを進める必要がある。科学観測用海底ケーブルネットワークはこれらの研究を進めるのに必要な基礎的なデータを提供する。

（2）地震計による地球の内部構造探査

地震計を用いた地球内部構造探査の分解能は、地震計の平均密度に依存する。海底下の分解能はおおよそ 2,000km に限定されているが、これは海底地震計の数が少ないことに起因している。海底ケーブルを利用した地震観測システムは、地球内部構造の分解能を高めるものと期待されている。地表に近い部分の地球断層映像は、最も興味深い応用分野の一つである。

（3）電磁気学的手法による地球の内部構造探査

海底における電磁場測定は、海底下の構造探査に用いられている。これらの分野は海底ケーブルを用いた観測システムの重要な応用分野の一つであり、地震計による地球の内部構造探査と併せて利用されることが期待される。

（4）深海生物学への応用

深海には陸上には見られない特殊な生物が生息している。高圧下で生息しているだけでなく、海底からしみ出してくる硫化水素を栄養分に変える細菌と共生しているシロウリガイのような特異な生物も存在する。ところが、このような深海の生物を陸上で飼育したり、その生態を解明することは簡単ではない。深海底でこのような生物に関する実験や観察を長期間に渡って行うことができることが望まれる。科学観測用海底ケーブルシステムに遠隔操作が可能なロボットを設け、このような生物学的実験と観測が深海底で行うことが期待される。

（5）その他の応用分野

そのほか、メタンハイドレートなど海底資源の長期観測、一部で提案されている CO₂ の深海貯蔵に伴う海洋環境の監視、海底火山活動の監視など、多くの分野での利用が期待される。

参考文献

- (1) H.Kawaguchi, H. Momma, R. Iwase, K. Hirata, Y. Kaiho and H. Mikada, "Scientific Submarine Cable Systems in JAMSTEC", SubOptics2001, pp.184-pp.187, 2001
- (2) "Submarine Cable Network Systems", edited by S. Akiba and S. Nishi, NTT Quality Printing Services co., 2001
- (3) J. Kasahara, et al. "Submarine Cable OBS Using a Retired Submarine Telecommunication Cable: GeO-TOC program", Phys. Earth Planet. Inter., 108, pp.113-127.
- (4) J. Kasahara, et al. "Multi-disciplinary Geophysical Measurements on the Ocean Floor using Decommissioned Submarine Cables: VENUS Project", IEEE Ocean Eng., 25 (1), pp.111-120, 2000
- (5) K. Hirata, *et al.*, "Real-time Geophysical Measurements on the Deep Seafloor Using Submarine Cable in the Southern Kurile Subduction Zone", IEEE Ocean. Eng., 27 (2), pp.170-181, 2002
- (6) K. Kawaguchi, et al., "A New Approach for Mobile and Expandable Real-time Deep Seafloor Observation –Adaptable Observation System–", IEEE Ocean. Eng., 27 (2), pp.182-192, 2002
- (7) K. Kawaguchi, et al., "An Expandable Deep Seafloor Monitoring System", Sea Technology, 42 (10), pp.49-54., 2002
- (8) S. Kimura, "Seismicity at the Nankai Trough, Off Muroto, Report on the Contract Research from JAMSTEC", Japan Marine Sci. Tech. Ctr.,1999