

海底地震観測システム

藤原 法之・菱木 賢治・片山 武

要 旨

海底ケーブル通信のデジタル通信及び高信頼度技術を適用した「ケーブル式」の海底地震観測システム（インライン方式）は、1978年8月以来、2008年7月までに合計8システムが日本列島太平洋側に設置され、リアルタイムで地震及び津波のデータを観測しています。一方、2000年以降は、アメリカ、日本、ヨーロッパ諸国が、二次元に地震計、津波計などのセンサを展開して面的に観測を実施する「ノード方式」のシステムの開発に着手しています。本稿では、インライン方式に適用された技術、最先端のノード方式の概要について紹介します。

キーワード

●海底地震観測 ●アナログ ●デジタル ●光波長多重 ●光双方向 ●インライン ●ノード ●二次元

1. はじめに

海底におけるケーブル式の海底地震観測システム（インライン方式）は、1979年8月に建設された気象庁殿の御前崎沖「海底地震常時観測システム」（同軸アナログ伝送方式）を始めとして、2008年7月に建設された同じく気象庁殿の光ファイバデジタル伝送方式による御前崎沖システムまで、日本の周辺海域で合計8システムが稼働しています（**図1**、**表1**）。

1993年3月に東京大学殿による「伊豆半島東方沖地震計システム」以降は、光ファイバを用いた光デジタル伝送方式が適用されており、より高精度、より広ダイナミックレンジの海底地震の観測、及びデータの分解能・精度を劣化させることなく長距離伝送が可能となるシステムを提供できるようになりました。

一方、海底に設置された「ノード」と呼ばれる装置に、各種観測センサを水中ロボット（ROV）などを用いて任意に接続し、二次元的にセンサを展開し、高密度の観測を実現しようとするシステム（ノード方式）の開発が、アメリカ、日本、ヨーロッパ諸国で開始されています。

殿御前崎沖システム）を示します。

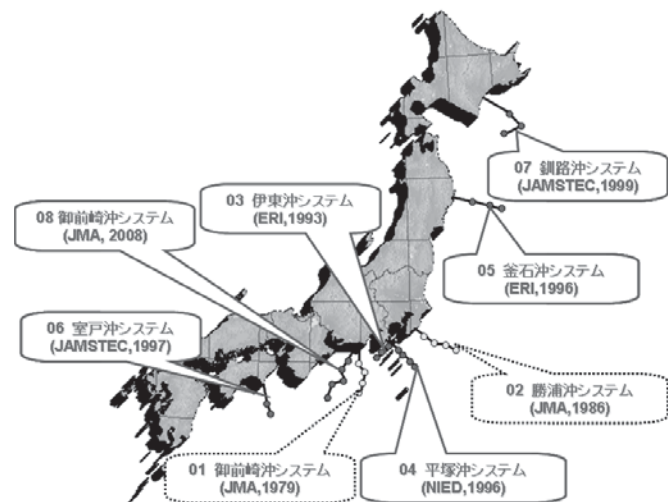


図1 地震観測システムの設置海域

表1 設置場所及び主管

No.	場所	主管	建築年	距離
1	御前崎・静岡県	気象庁(JMA)	1979年	120km
2	勝浦・千葉県	気象庁	1986年	96km
3	伊東・静岡県	東京大学地震研究所(ERI)	1993年	28km
4	平塚・神奈川県	防災科学技術研究所(NIED)	1993年	127km
5	釜石・岩手県	東京大学地震研究所	1996年	123km
6	室戸・高知県	海洋研究開発機構(JAMSTEC)	1997年	125km
7	釧路・北海道	海洋研究開発機構	1999年	242km
8	御前崎・静岡県	気象庁	2008年	210km

2. ケーブル式海底地震観測システム（インライン方式）

「ケーブル式」の海底地震観測システムは、海底地震計（**写真1**）、津波計（**写真2**）陸上端局装置（**写真3**）、及び海底ケーブルで構成されています。海底地震計及び津波計の設置位置及び台数は、それぞれの設置機関の研究（観測）目的に応じて決定されます。**図2**に、代表的な「ケーブル式」の海底地震観測システムのシステムブロック図（気象庁



写真1 海底地震計 (気象庁)



写真2 津波計 (防災科学技術研究所)



写真3 端局装置 (気象庁)

表1のNo.3静岡県・伊東沖の東京大学地震研究所のシステムからNo.8静岡県・御前崎の気象庁システムは、デジタル式の海底地震観測システムです。以降は、データ伝送方式が、アナログからデジタル (光) に世代交代しました。デジタル式の海底地震観測システムは、海底ケーブル通信システムに用いられている、光デジタル伝送方式を適用しています。海底

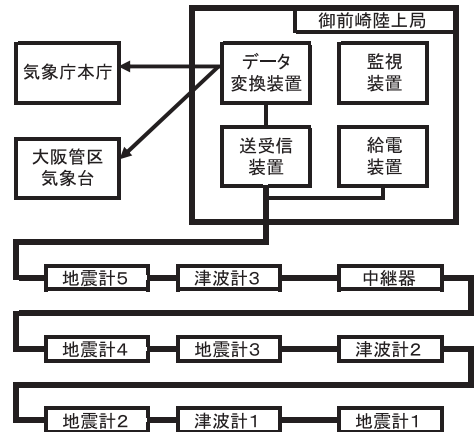


図2 海底地震観測システムブロック図 (気象庁)

表2 デジタル式海底地震観測システムの特徴

No.	波長帯	システムクロック	主要観測データ	光アンプ	光波長多重	光双方向伝送
1	1.3 μm	自走非同期式 1.544MHz	16bits A/D 8kHzサンプリング	—	—	—
2	1.5 μm	高精度同期式 1.544MHz	16bits A/D 8kHzサンプリング	陸上局:1	—	—
3	1.5 μm	高精度同期式 1.544MHz	16bits A/D 8kHzサンプリング	陸上局:1	—	—
4	1.5 μm	高精度同期式 1.544MHz	16bits A/D 8kHzサンプリング	陸上局:1 海底 :1	2波長多重	—
5	1.5 μm	高精度同期式 8.192MHz	24bits A/D 1kHzサンプリング	陸上局:1 海底 :6	2波長多重 3波長多重	○
6	1.5 μm	高精度同期式 8.192MHz	24bits A/D 1kHzサンプリング	陸上局:1 海底 :4	—	—

ケーブルに接続されている「海底地震計」及び「津波 (水圧) 計」からのアナログデータをデジタルデータに (A/D) 変換し、更には電気/光 (E/O) 変換を行った後、光ファイバを介して、陸上に設置された端局装置にリアルタイムで伝送します。デジタル式の海底地震観測システムは、表1に示すように、1994年から2008年にかけて、日本の周辺海域に合計6システム設置されています。それぞれのシステムにおいて、以下に示すデータ及び制御信号の伝送方式を確立してきました。表2にそれぞれのシステムの特徴を示します。

海底地震観測システムで観測された地震及び津波のデータは、16bitもしくは24bitのA/D (アナログ/デジタル) 変換、1kHzもしくは8kHzサンプリングでアナログデータをデジタル信号に変換し光信号で陸上の端局装置にリアルタイムで伝送

しています。表2に示します、No.1~3及びNo.6の海底地震観測システムの海底地震計もしくは津波計で測定されたデータは、1台の海底地震計もしくは津波計に対して、光ファイバ1芯が割り当てられ、割り当てられた光ファイバを介して陸上に伝送されています（センサ：ファイバ=1:1対応）。しかし、No.4及びNo.5のシステムでは、海底地震計と津波計の台数が、光ファイバの芯数を超えたため、1:1対応が不可能となりました。そのため、光波長多重伝送方式及び光双方向伝送方式などの技術を適用しています。

2.1 光波長多重伝送方式及び光双方向伝送方式の適用

本方式を適用した表1のNo.7「北海道・釧路沖海底地震総合観測システム」（図3）は、「海底地震計」3台（写真1）、「津波（水圧）計」2台（写真2）、各種の海底観測用センサを搭載した「先端観測装置」1台、及び海底観測機器を将来つなぐための「分岐MUX」2台が約240km長の光ファイバ6芯の光海底ケーブルに接続され、陸上局に設置されている端局装置（写真3）へリアルタイムで観測データを伝送しています。

6芯の光ファイバは、1芯を陸上局装置からの「海底観測機器」へのクロック及び「先端観測装置」の制御信号用に、4芯を「海底地震計」、「津波（水圧）計」、及び「先端観測装置」の個別観測用に、残りの1芯を分岐MUX用の信号線にそれぞれ割り振られています。

個別観測用の4芯は、それぞれ、1芯が「先端観測装置」に搭載されている深海カメラの画像データ専用として、3芯で、3台の「海底地震計」、2台の「津波（水圧）計」及び「先端

観測装置」（合計6台）のデータを陸上へ伝送しています。それを実現するために、本システムでは、光波長多重伝送方式及び光双方向伝送方式を適用しています。

2.2 光波長多重伝送方式の適用

合計6台のデータを3芯の光ファイバを介して陸上に伝送するために、波長多重伝送方式を適用しています。光ファイバ②を用い「海底地震計3」において「海底地震計3」データと「津波計2」データの2波長多重を行い、2台の海底観測機器データを伝送しています。また、光ファイバ③を用い「海底地震計1」において「先端観測装置」データと「海底地震計1」データの多重を行い、更に「津波計1」でそのデータを多重（3波長多重）するとともに、伝送損失を補償するため途中2ヵ所（分岐MUX装置内）に中継器として光直接増幅器（光アンプ）を配置することにより、3台の海底観測機器データを陸上局装置まで伝送しています。

2.3 光双方向伝送方式の適用

「分岐MUX」は、当初は、観測センサなどが接続されない状態で海底面に設置されます。将来において、海底地震計及びそのほかの海洋観測センサなどの機器を接続し、リアルタイムで観測データを取得するために、アナログ信号及びシリアル信号多重機能を有しています。ここで特筆する機能として、光双方向伝送技術を適用していることが挙げられます。接続された海底地震計などの各種センサで観測されたデータを陸上に伝送するとともに、各種センサに対して陸上からセンサ制御信号を送る必要もあります。しかし「分岐MUX」に対しては、光ファイバ1芯しか割り当てられていません。1芯の光ファイバで、端局装置からセンサへ制御信号、センサから端局装置へ観測データの送信が可能となるよう、光ファイバ伝送路を光コプラで分岐し、光双方向伝送を行っています。

3. ノード方式

「ケーブル式」の海底地震観測システムは、通信用海底ケーブルに海底地震計及び津波計などを接続した「インラインシステム」であり、海底ケーブル通信の高信頼度技術を適用し、30年以上の無故障での稼働実績を誇り、安定して、リ

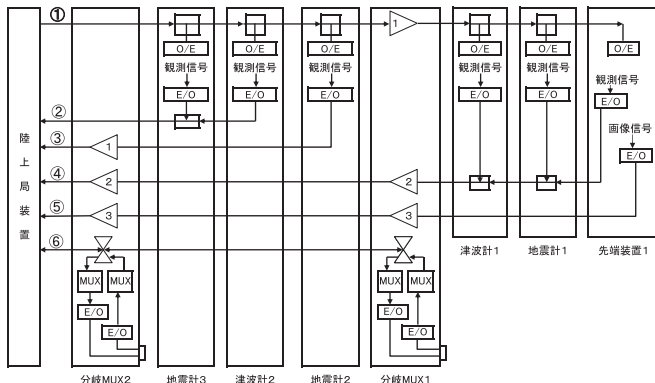


図3 釧路・十勝沖システムブロック図

リアルタイムで観測データを提供しています。

一方、2000年以降は、複雑な地球物理学的な活動（地震、津波）及び海洋環境変動（潮流、海水温、海水成分）を広範囲に把握することを目的として、通信用海底ケーブルに「ノード」（地震、津波、環境センサを複数接続可能なポート（インタフェース）を有した観測中継装置）を接続し、広範囲の観測を実現するシステム（ここでは、ノード方式とする）の開発が、アメリカ、日本、ヨーロッパ諸国を中心に進んでいます。アメリカではワシントン大学が中心となり、NPTUNE（North-East Pacific Time-series Undersea Network Experiments）計画が、ヨーロッパでは、ESONET（European Seafloor Observatory Network）計画がそれぞれ進行中で、一部、観測を開始しています。

日本では、海洋研究開発機構がDONET（Dense Oceanfloor Network System for Earthquakes and Tsunamis）計画で、1)防災・減災への貢献、2)地震予知モデルの高度化、3)世界最先端の技術開発を3本柱とした「海底ネットワークシステム」の構築を推進しています。

このシステムは、約150年周期で巨大な地震が繰り返し発生している熊野灘（東南海海域：紀伊半島三重県沖）に2010年3月末までに設置を完了し、高密度な観測を開始する予定となっています（図4）。

本システムは、長さ約300kmの基幹ケーブルシステム（海底ケーブル通信技術の適用）、5台のノード、20台の観測装置、陸上局設備で構成されています。20台の観測装置は、広帯域地震計、強震計、水圧計、及び温度計などで構成されており、将来、巨大地震の発生が懸念されている熊野灘海域に高密度に設置することにより、地震発生前の微弱な地殻活動をリアルタイムで検出し、地震発生前のメカニズム及び発生のシミュ

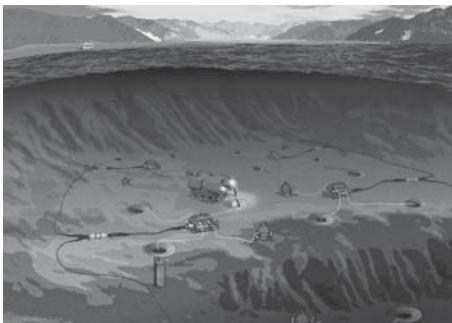


図4 DONETイメージ（JAMSTECホームページより）

レーションを実施し、防災及び減災に寄与することを目的としています。

NECは、このシステムの実現のため、2007年度より、システム設計、世界最先端技術を適用した装置の試作/評価を経て、2010年度末のシステム設置に向け、装置製造の最終段階を迎えています。

本システムは、基幹ケーブルシステムを商用の海底ケーブル敷設船を用いて海底に設置後、海洋開発機構所有の無人潜水艇（ROV）により、5台のノードを設置し、水中着脱コネクタにより基幹ケーブルシステムに接続します。その後、同じくROVを用いて、図3に示すように20台の観測装置を順次海底面に設置し、ノードに水中着脱コネクタで接続することにより、リアルタイムでの観測を開始します。

ノード及び観測装置は、ROVを用いて、任意の場所に設置が可能であるとともに、観測装置の保守が可能であり、インラインシステムでは実現できなかった、1)システムの拡張、2)観測装置の移動、3)交換、が可能なシステムとなっています。

また、将来発生が懸念されている巨大地震の発生シミュレーションの解析精度の向上のため、取得したデータのタイムスタンプは1 μ 秒の時刻精度を有しており、この精度は、海底観測システムにおいて世界最先端となっています。

4. おわりに

NECは、1979年の気象庁御前崎沖の日本初のケーブル式海底地震観測システムの製造/設置から日本周辺で稼働している8つのシステムすべてを提供するとともに、今後の時代趨勢であるノード式システムのDONETの試作/評価/製品化を、各研究機関及び関係省庁のご指導の下、取り組んでいます。

執筆者プロフィール

藤原 法之
NECネットエスアイ
モバイル・海外ネットワークシステム
事業部
海洋エンジニアリング部
部長

菱木 賢治
NECネットエスアイ
モバイル・海外ネットワークシステム
事業部
海洋エンジニアリング部
課長

片山 武
NECネットエスアイ
モバイル・海外ネットワークシステム
事業部
海洋エンジニアリング部
課長