

地震・津波観測監視システム構築のための 海中作業技術

地震津波観測監視システム DONET

川口 勝義

日本周辺で発生する地震活動を正確にモニタリングするためには海域への観測網の展開が必要である。地震津波観測監視システム DONET（以下「本システム」という）（Dense Ocean-floor Network system for Earthquakes and Tsunamis）は、陸域と同等の能力を持つ観測網を海底に展開するために開発されたシステムである。多数の観測点から構築される大規模な観測網を長期間安定に運用するために、システムは海中での修理や交換を実現できる機能を持つ。本システムの開発においては、基幹となる通信用海底ケーブル技術を用いた観測システムの開発と合わせて、システムの海底での構築や将来的な保守整備を実現するための、海中ロボットを用いた海中作業技術の開発を行った。本稿では、システムの概要と、ロボットを用いた海中作業の実施における課題と解決手法について紹介する。

キーワード：地震、津波、DONET、海底ケーブル、ROV、海中作業

1. はじめに

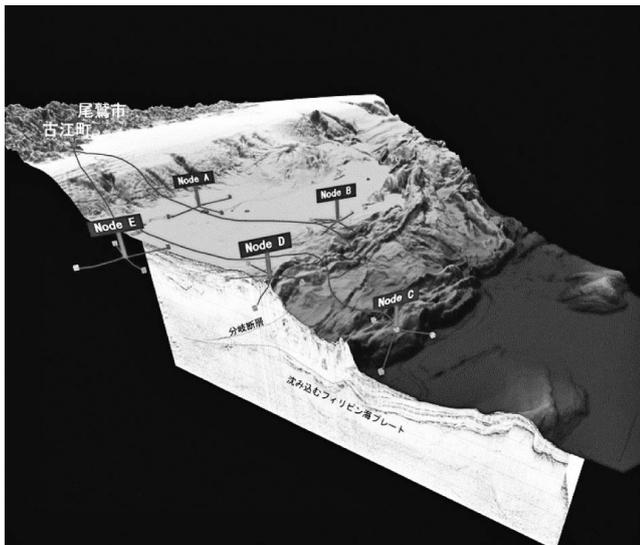
日本列島はユーラシア、北米、太平洋、フィリピン海という4つのテクトニックプレートの交差点に位置し、列島の太平洋岸の海底には、テクトニックプレートの境界が広がっている。プレート境界では、ひずみのエネルギーが蓄積され、これが、日本周辺において周期的に巨大地震や津波を発生させる源となっている。これらの活動を詳細にモニタリングし、その情報を社会発信するために、日本の陸域では、数千点の規模からなる地震観測網が構築され、リアルタイムのデータ収集が行われている。しかしながら、発生する地震震源の多くは海底下に位置することから、地震活動モニタリングの精度を向上させるために、震源域がある海域への観測網の整備が期待されている。水深1,000 mを超える海底に観測装置を展開し、それらの稼働に必要な電力を長期的に供給し、さらに、計測されたデータをリアルタイムで陸上に送信するためには、通信用海底ケーブル技術を用いた観測システムを展開することが、現時点で実現可能な唯一の方法である。通信用海底ケーブルシステムは、大陸間や島嶼間の通信路を長期にわたり安定的に確保するために、高信頼のシステム設計を取り入れており、太平洋を横断しての拠点間通信を可能にする10,000 km長程度のシステムにおいても、海底で4半世紀程度は連続運用が可能なFIT（Failure In Time, 故障率）を持つ。し

かしながら観測用のシステムにおいては、使用する観測機器群の長期信頼性を十分に確保することは困難なことから、大規模システムの海底展開と長期運用においては、故障や修理を想定したシステムのアベイラビリティ（可用性）を十分に検討する必要がある。このような課題を克服し、海底において陸上観測網と同等の観測能力を確保する多数の観測点を、維持・管理・運用可能な観測手法を確立するために、本システムの開発が2006年から進められている。

2. 本システムの概要

2006年に開始された本システムの開発計画においては、そのターゲットを海溝型巨大地震発生帯の一つである東南海地震の想定震源域を含む熊野灘に設定した。熊野灘周辺では国際的な海洋研究計画である統合国際深海掘削計画の実施が予定されており、事前調査として行われた地形調査や構造探査のデータが豊富に揃っていたこと、さらに、熊野灘周辺の海溝型巨大地震の発生周期から見て、今後30年程度の間に次の巨大地震が発生する可能性が高い海域であることなどが、この海域を選定した理由として挙げられる。熊野灘周辺域において陸上の観測網と同等の震源決定精度を確保し、さらに、海域で発生する微小な地震活動から海溝型の巨大地震までの広帯域な地震情報と、海底の地殻変動から津波の発生源となる海底の大規模変動まで

の広帯域な圧力変動情報をまんべんなく網羅することを検討し、図一1に示すような、複数のセンサから構成される観測点を10～30kmの観測点間隔で20点配する案を策定した。地震・津波の監視システムは、運用が開始されれば次の巨大地震イベント、もしくは、さらにそれを超えて余震活動の正確な情報を記録することが期待されることから、最低でも20～30年の連続的な運用を想定する。多数の観測機器を装備した大規模システムにおいては、運用期間中の故障発生は事実上不可避であること、また、長期にわたる観測においては、現時点で選定した測器の陳腐化が避けられないことなどから、システム開発のポイントは、海中で構成機器の交換や修理、機能拡張をいかに容易に実現できるかということになる。本システムでは海中部を構成する装置群を、異なる信頼性基準のもとに開発する3種類のコンポーネントに分類し、これらを、水中で着脱が可能な光電気複合コネクタ（水中着脱コネクタ：写真一1）を用いて接続分離することが出来るように設計することで、この問題の解決を試みた¹⁾。システムの動



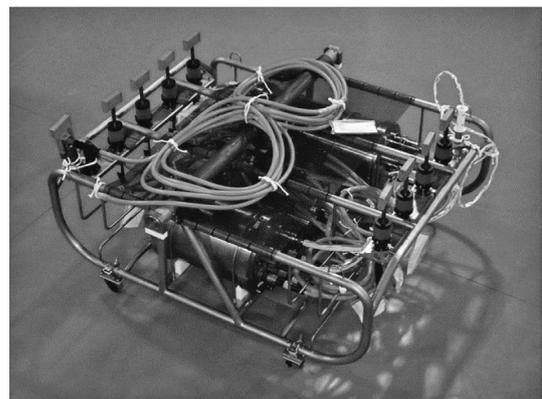
図一1 本システム鳥瞰図



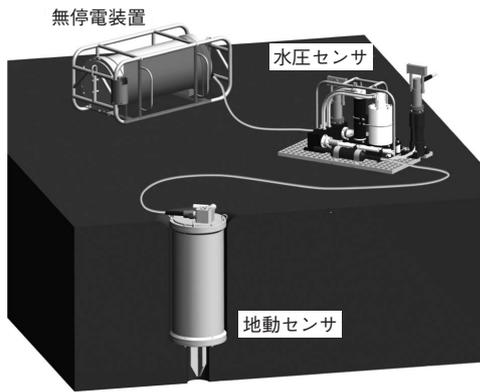
©Teledyne Oil & Gas

写真一1 水中着脱コネクタ

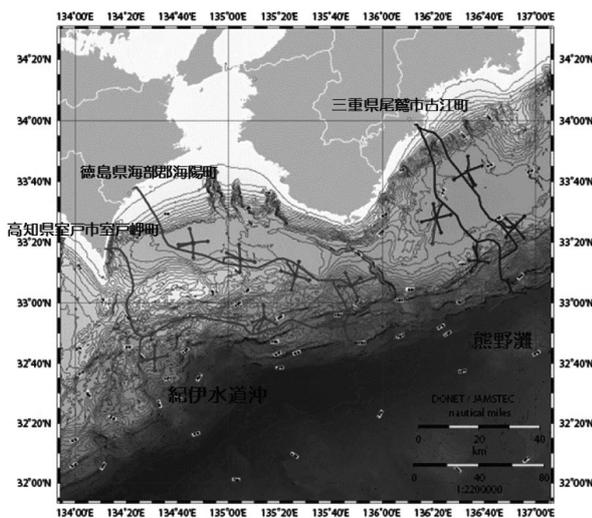
脈となる海底ケーブルを用いた伝送・電送路部分を基幹ケーブルシステムと呼ぶ。このコンポーネントは通信用海底ケーブルの製造技術を用いて開発し、高信頼性設計機器としての製造を行う。高信頼性設計の指針はITU-T (International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector) のリコメンデーションに基づき行い、海底ケーブルシステムを観測用に用いる場合に新たに開発が必要となる要素についても、その評価はこの指針に基づいて行う。結果としてこのコンポーネントはシステムの運用期間中に外的な要因を除いては故障の発生を想定しない部分となる。基幹ケーブルシステムに接続して使用する海底のコンセントレーションとなる装置を拡張用分岐装置（写真一2：海外では Science Node）と呼ぶ。このコンポーネントは陸上から送られてくる電力を海底に展開される観測装置群に分配するとともに、制御信号と時刻情報を配信し、また、観測装置から発信されるデータを取りまとめ、陸上に送信する役割を持ち、通信用海底ケーブルシステムを観測用のシステムとして用いるために必要な機能が集約されている。この装置は本システム用に独自設計されていることから、製造に使用される部品は可能な限りスクリーニングと評価を行い、信頼性を維持できるように検討を行う。しかしながら多様な機能を実現するための大規模回路を搭載することから、信頼性に関しては基幹ケーブルシステムと同等に扱うことはできず、長期的な運用においては交換等が必要となる可能性がある。本システムの観測計画においては一様に構成された地震と津波を複数のセンサで観測できる装置（図一2）を20式製造し海底に展開するが、拡張分岐装置の観測機器用水中着脱コネクタには、電力や伝送容量の制約はあるものの任意のセンサを接続使用することが出来る。また、交換や拡張をすることが前提のため、観測装置の開発にあたっては特に信頼性設計に制約を設けず、通常のマー



写真一2 拡張用分岐装置



図一 2 観測装置構成



図一 3 本システム 1,2 展開案

ケットに存在する多様なセンサを自由に使用することを許容するものとした。熊野灘に展開された初の本システムの初号機では、基幹ケーブルシステムに5つの拡張用分岐装置を接続可能な水中着脱コネクタを持ち、また、各拡張用分岐装置は観測装置用に8口の水中着脱コネクタを持つことから、システム全体で40式の観測点(=観測装置)を運用することが可能な能力を持たせた。初号機の開発は2009年に終了し、2011年より20観測点の運用が始まっている。2010年からは熊野灘の西側に位置する紀伊水道沖の海底に広がる南海地震の想定震源域の監視体制強化に目標を定め、初号機よりも大規模な2号機の開発を進めている(図一3)。

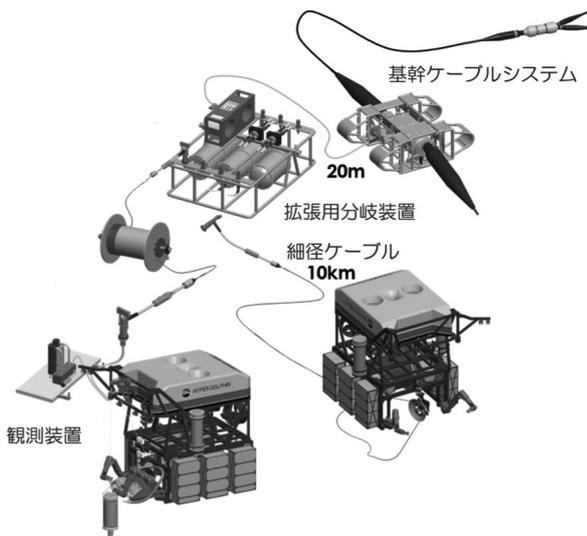
3. 海中作業技術

前項で紹介した本システムの概要からも明らかのように、海底に大規模な観測システムを自在に展開し、これを長期間運用しようとする場合、システムの構築は洋上の船舶による工事のみでは不可能であり、海中

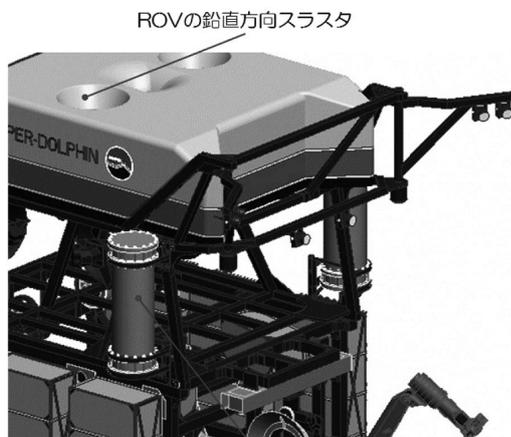
での作業が不可欠である。海中でマニピュレータ(ロボットアーム)を操作し多様な作業を実施するプラットフォームとしては、有人潜水船、有索海中ロボット、無索海中ロボット等が挙げられる。この中で、有人潜水船は、乗船者が必要であることから作業の安全性確保と長時間作業の実施に困難があること、無索海中ロボットは自在な海中作業を実施するにはいまだ未熟であること、さらに両者とも海底で作業活動に必要なエネルギーを搭載する必要があり、長時間の重作業を行うことは困難であることから、海中作業の実施には必然的に船上から必要なエネルギーを供給し、リモートコントロールで操作を行う有索海中ロボットROV(Remotely Operated vehicle)の使用が前提となる。本システムでも使用している水中着脱コネクタが1990年代に商品として実用化されて以来、海中に展開する装置群をコンポーネント化し海中作業により海底での構築を行うという手法が徐々に採用され始め、これに伴いマニピュレータの操作性や作業能力の向上が図られ、現在では一定の作業を海中で実施することが可能になってきている。ROVによる海中作業が注目を浴びたのは、2010年4月20日に発生した米ルイジアナ州沖のメキシコ湾の深海油田掘削施設ディープウォーター・ホライズンでの爆発事故であった。海底の設備からの原油流出を止めるため、ROVによるオペレーションが計画実施され連日ロボットからの映像が流されていた。しかしながら、これらの作業は困難を極め幾度となく作業計画の見直しが行われたことから、多くのメディアからROVは不器用で役に立たないという批判を浴びることとなってしまった(<http://www.newsweekjapan.jp/stories/2010/07/post-1448.php>)。これらの批評は部分的には正しく、ROVで効率的な海中作業を計画する場合、実施する作業の詳細を検討し、さらに、作業の効率化を図るための補助機器の開発と装備が不可欠になる。ここでは本システムを海底で構築していくために必要な作業を紹介し、さらに各作業を確実に実施するために開発を行ったROVの追加装備について紹介する。

(1) 機器設置と浮力調整装置

本システムを構成する3つのコンポーネントのうち基幹ケーブルシステムは専用のケーブル敷設船を用いて対象海域に展開されるが、これに接続して使用する拡張用分岐装置、観測装置、及びこれら装置間を接続する細径ケーブルの海底設置(及び回収)はROVを用いて行う(図一4)。一部の特殊な作業を除き(海底ケーブル浅海部の埋設作業等)ROVは海底でほぼ中性の



図一4 ROVによる本システム構築のための海中作業



浮力調整装置 (VBCS)
図一5 浮力調整装置

浮力を維持することで、その機動力を確保している。このことから、海底への機器設置や回収の実施にあたっては、絶えず浮力バランスの変化を考慮する必要がある。ROVが許容できる浮力変動は機体のサイズや搭載するスラスタの能力に大きく依存するが、一般的に重作業用と称されるROVにおいては $\pm 500\text{N}$ ～ $\pm 1\text{kN}$ がスラスタが担保できる最大許容浮力変化である。しかしながら、柔らかな海底堆積物近傍でのスラスタの使用は、海水をかく乱し泥水を巻き上げるため、視界の確保に大きな問題を及ぼし、作業効率を大幅に低減することになる。このことから、能力の高いスラスタを搭載していても可能な限りその使用を控えることが求められる。この問題を解決するために、魚でたとえれば浮き袋にあたる浮力調整装置VBCS (Variable Buoyancy Control System)を開発しこれをROVに装備することで問題の解決を行う(図一5)。本システムの計画で開発を行ったVBCSは50Lの耐圧容器を2台用意し任意の水深でこの容器に海水

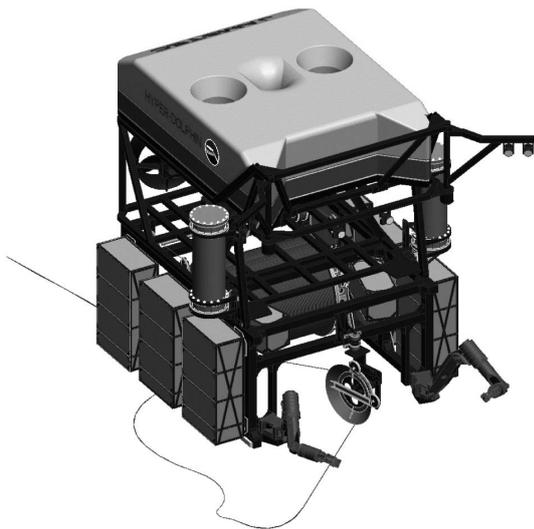
を注排水することで最大1kNの浮力調整を行う機構である。本システムの海中作業で想定されるオペレーション中の最大浮力変動は10kmの細径ケーブルの海底展張に伴う2.2kNの変動であり、スラスタとVBCSを併用することで、オペレーション中のスラスタの使用を最小にしつつ機動性を十分に確保できるシステム構成を実現している。

(2) 細径ケーブルの長距離展張

海底の観測ネットワークの構築に特有で、かつ最も難易度の高い作業はROVによる細径ケーブルの展張作業である。細径ケーブルは拡張用分岐装置と観測装置との間に給電路と電送路を構築するためのもので、最大10km離れた海中の任意の2点間を確実につなぐことが要求される。このケーブルは1kmあたり0.18kNの海水中重量と、海中の高圧下で可能な限り体積変化の少ない構造を持ち、海中でROVのブラックアウトなど不測の事態が発生した場合も、安全に作業を中断しROVを回収できるよう、1kNという意図的に低い張力で破断するデザインを採用している。10kmのケーブルはその両端に水中着脱コネクタを装備した状態で専用のポビンに収容される(写真一3)。ポビンに収容された細径ケーブルを船上でROVに搭載した状態で海底に持ち込み、時に複雑な地形を有する海底に、最低でも10時間程度連続して(海底の状況を確認しながらのROVの移動速度は概ね0.5knot程度であることから、10kmの展張作業には最低でも10時間の作業時間が必要)展張していくためには、作業性の良さや信頼性をもつ専用のケーブルハンドリング機構を持つ装置の支援が必要となる。展張装置(図一6)は細径ケーブル船上及び海中で確実にハンドリングするために開発された。展張装置はポビンに搭載された細径ケーブルを船上でROVに装備するための昇降機能、ポビンから確実に細径ケーブルを繰り出し



写真一3 ポビンに収容された細径ケーブル



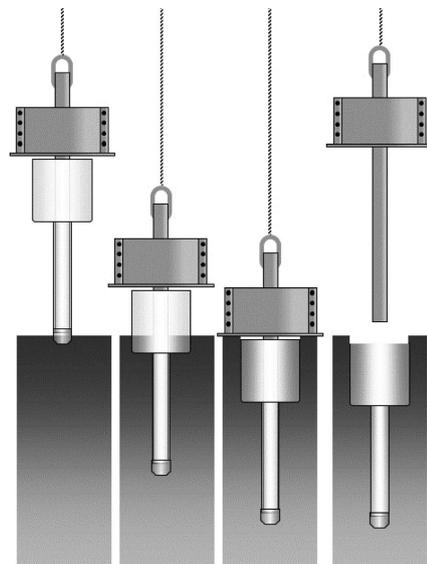
図一六 展張装置

海底面上への展張を行う展張機能、及びボビンを切り離し任意の海底に設置するボビン固定機能を有する。初号機の実施計画においては20カ所で観測点の構築のため展張装置を用いた作業が実施され、その有用性と信頼性が検証された。現在は、2号機で予定される大規模な観測点構築計画に向けて、音響を用いた対地速度計や慣性航行装置からの運動情報を利用した、展張機能の自動化を進めており、今後の作業計画では大幅な作業の効率化が進む予定である²⁾。

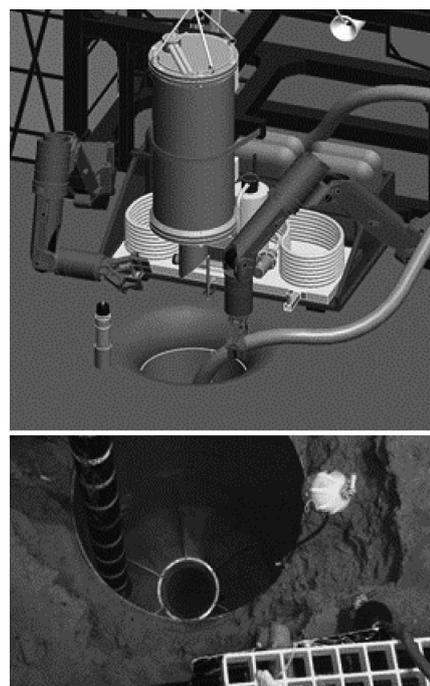
(3) 観測環境の制御

本システムの主要な目的の一つは地震観測であることから、海底でいかに品質の良い地震観測を実現するかは非常に重要な問題となる。一般的に陸上の地震観測では環境ノイズの少ない比較的人的活動の少ない地域で、なるべく安定した岩盤を探し、そこを観測点とすることが多い。一方で一般的な海底は一面を堆積物に覆われた軟弱な構造を持ち、また、定常的に底層流等の流れが存在することからノイズ環境も良好とはいえない。本システムの開発計画では、このような地震観測にとって困難な場所において、どのように高品質な地震観測を行うかについての検討も行い、一義的には海底堆積層中に観測装置を埋設することで良好な観測を行うことが出来ることを確認した。本システムの観測装置を埋設するためには海底にφ50cm、深さ100cmの、鉛直がほぼとれた穴を準備する必要がある。この観測孔を観測点毎に効率的に整備し、各観測点を観測孔内に固定する作業を容易に実施するために、計画では複数の機器を用いた観測点構築手法を確立した。堆積層中にしっかりした形状の孔を整備する場合、削孔に伴い側壁が崩れてくることを防止するた

めに事前に孔の形状を持ったケーソンを海底に設置する必要がある。ROVによるケーソンの設置は底質の硬さにもよるがかなり困難であることから、海底堆積物のサンプリングツールである。ピストンコアラの機構を改造したケーソン貫入装置を開発し、さらに底質強度の分布と貫入長との関連性を明らかにすることで、事前のサンプリング調査の結果を参考に選定された観測点に確実にケーソンを設置することを可能にした(図一七)。貫入を容易にするためケーソンの底面は構造材を除いて空隙を設けてあることから、ケーソン設置後にはケーソン内の堆積物を除去する必要がある。この作業も単純ではあるがマニピュレータのみで



図一七 ピストンコアラの機構を改造したケーソン設置システム



図一八 サクシオンシステム

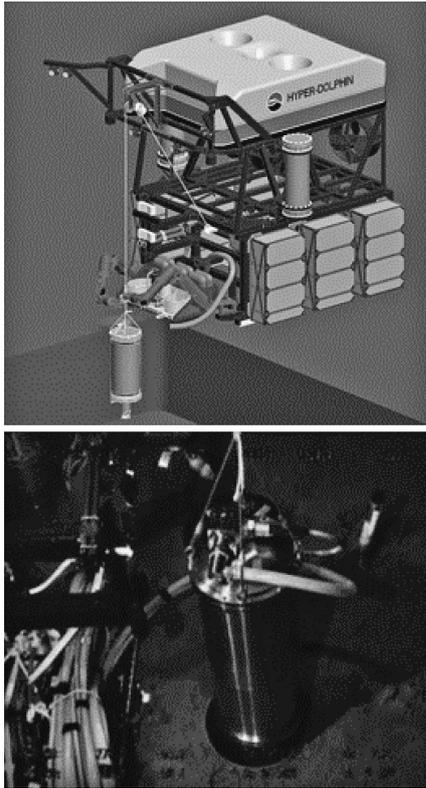


図-9 観測装置設置システム

は実施が不可能なことから、渦巻きポンプを用いたサククションシステムを開発し約 200 L の堆積物を 1 時間程度の作業で吸い出すことを実現した (図-8)。また、観測装置用の耐圧容器も海中で ROV マニピュレータが自在に扱える形状と重量を超えていることから、展張装置のアクチュエーターを流用して高所からケーソン内に観測装置を吊り下げて設置することが可能な機能を実現した (図-9)。また、設置機器を固定するために観測装置とケーソンの間の空隙を後埋設するためのツールも準備し観測性能の向上を図っている。

4. おわりに

「本システム」地震津波観測監視システム DONET の構築には、システム開発とシステム構築手法の開発について革新的な試みがなされた。当初計画された熊野灘海域への 20 観測点の展開は成功裏のうちに終了し、システムから提供される多様なデータは、現在研究者コミュニティが高く注目するクオリティを出すことに成功している。この実績は本計画で提案したシステムデザインと、それを実現するための構築手法のアプローチが海底における地震・津波リアルタイム長期観測の実施において非常に有効であることの証明であり、国内での 2 期計画の推進に加え、海外においても台湾気象局が小規模ながら本システムの導入を行っていることから明らかである。一方で作業の実施には熟練した ROV オペレーション技術が不可欠であり、また、観測点の構築においては観測点毎に最低でも 3 回の ROV 作業潜航が必要であることなどから、今後は観測機器のパッケージングの見直しや、作業技術の自動化の推進が不可欠であると考えられる。また、機器の交換や拡張が可能な海中システムの長期的な運用は過去に例がなく、今後運用という新しいフェーズを効率的に実施していく手法の開発も必要になると考える。

JCMA

【参考文献】

- 1) 川口勝義, 荒木 英一郎, 金田 義行: “DONET—海底におけるリアルタイム長期連続モニタリング手法の確立—”, 海洋理工学会誌, Vol.17 No.2, pp.125-135, 2012.
- 2) J. -K. Choi, T. Yokobiki, S. Nishida and K. Kawaguchi, “Toward Automation of Thin Optical-Fiber Submarine Cable Installation.”, MTS/IEEE Oceans, Taipei, 2014.

【筆者紹介】

川口 勝義 (かわぐち かつよし)
 (独)海洋研究開発機構
 地震津波海域観測研究開発センター
 海底観測技術開発グループ
 グループリーダー

