



沈み込み帯の科学と海洋観測技術

## 海底ケーブル式海洋観測 技術の進化と世界の動向

三ヶ田 均 <sup>1)</sup>	浅川 賢一 <sup>2)</sup>
満澤 巨彦 <sup>2)</sup>	川口 勝義 <sup>2)</sup>
松本 浩幸 <sup>3)</sup>	荒木英一郎 <sup>3)</sup>
後藤 忠徳 <sup>3)</sup>	笠谷 貴史 <sup>3)</sup>
渡邊 智毅 <sup>2)</sup>	大塚 梨代 <sup>2)</sup>
森田 重彦 <sup>2)</sup>	

Evolution of observation technologies and the current movement in worldwide projects for cabled observatory

Hitoshi Mikada • Kenichi Asakawa • Kyohiko Mitsuzawa • Katsuyoshi Kawaguchi • Hiroyuki Matsumoto • Eiichiro Araki • Tadanori Goto • Takafumi Kasaya • Tomoki Watanabe • Riyo Otsuka • Shigehiko Morita

1) 京都大学大学院工学研究科

2) (独) 海洋研究開発機構海洋工学センター

3) (独) 海洋研究開発機構地球内部変動研究センター

1964年に Point Arena から延伸されたケーブルにより地震観測が行われて以来、1978年の日本による御前崎地震観測システムの整備、そして1990年代の積極的なケーブル式海底観測システムの技術開発と、技術及び科学双方で大きな成果が上げられてきた。欧米では、今世紀になり、既存の観測技術を更に高度化し、更に大きな科学的目標を達成するための巨大プロジェクトが進行している。本報では、この世界的な海底ケーブル式観測システムの流れを、過去及び近未来という観点でまとめ、技術開発の継続、研究推進体制の整備の必要性を訴える。

### 1. はじめに

人間のアクセスが極度に限られる海底という場所において、人類が目の当たりにすることのできない自然現象を観測しようとする試みは、既に100年以上の歴史に渡り継続されてきた。特にほぼ四方をプレート境界に取り囲まれ、過去より巨大地震等の現象や津波という自然災害発生の著しかった我が国では、特に地震・津波を海洋底で観測する試みを重視していた。駿河湾近傍の東海地震発生の危惧があらわとなった直後の1978年より、巨大地震を監視するための海底ケーブル式地震計や水圧計（津波計）の設置が進み、現在では、こうした海域の常時観測システムは計7システムを数え<sup>[1]</sup>、数年内には気象庁により東南海地震震源域の観測システムも整備される予定である。こうした観測システムの整備されている海域では、地震や津波の発生をいち早く捕らえ、災害の軽減に役立てることが可能であることも示されている<sup>[2]</sup>。今後も、こうした災害の軽減を目的とする観測システムの整備が必要である。

1964～1974年のケーブル式海底観測から40年以上経過している<sup>[3]</sup>米国では、海軍関係の軍用目的の観測点を除外して考えると、災害の軽減という究極の目的への一歩として、海底地震計のノイズ、T相、音響を用いた数千kmスケールの海水トモグラフィーなど、基礎研究的な観測を主体として遂行されている。21世紀を迎え4年以上経過

し、諸外国では、海底ケーブルを用いた多目的観測を手段とする巨大プロジェクト(米国の ORION 計画及び欧州の ESONET 計画など)が進行しつつある。沈み込み帯の地震発生機構研究に加え、海洋底で可能な限りの観測を実現するための意欲的な試みであり、研究者同士のネットワークを構築するための手段ともなっている。こうした巨大プロジェクトが立ち上がり、海洋観測技術を進化発展させ、今後の科学的成果や観測技術の先陣を切っていくこととなる。我が国は、世界に先駆けて25年以上前に、常時地震観測を開始した世界でも最も海洋観測の充実していた国であり、海洋観測研究を推進しつつある諸外国に対し、過去の経験やノウハウを提供できる立場にある。過去の経験に基づく知見を諸外国に伝達し、未来の科学の発展に寄与することは、先行国として当然の債務であると考えられる。

科学的な成果を目的とした観測システムについての研究は、いち早くその必要性を認識し研究開発に着手した日本だけではなく、米国や欧州もその開発に携わり、国際的に進められてきた。1990年代には日本の深海底総合観測ステーションの設置から通信ケーブルを利用した VENUS 計画、米国の HUGO 計画や H2O 計画、欧州の GEOSTAR 計画の推進など、既存の観測技術を高度化する諸計画は、今世紀の海洋観測技術を産み出すための試験研究的な成果を挙げたことは言うまでもない。本報では、この世界的な海底ケーブル式観測システムの流れをまとめ、現在の世界的な動向についてまとめることとする。

## 2. 固体地球物理学に関連したこれまでの海洋観測プロジェクト

笠原(2004)がまとめている通り、地震学に関しては、既に1964年に米国西海岸 Point Arena 沖に全長180kmのケーブル式海底地震計が設置され<sup>[4]</sup>、1974年迄の観測を実施している。1997年には、ハワイ島南東沖海底のロイヒ火山に統合型のケーブル式海底観測ステーション HUGO (Hawaii Undersea Geo-Observatory) 設置のため<sup>[5]</sup>、翌年春

までの間に、主として多分野のセンサー設置のための陸揚局からの電源供給、ケーブルを流れるデータのための信号ブロードバンド化など種々の技術的な検討が行われた。1998年の H2O (Hawaii-2 Observatory) 計画では、退役した海底ケーブルを用いた多目的海底観測点の設置が目論まれた<sup>[6]</sup>。ハワイ島と米国本土とのほぼ中間に設置されたジャンクションボックスの近傍には、2001~2002年の国際深海掘削計画第200次航海では地震計設置のための掘削孔も削孔され、計画は現在も継続中である。この他にも、海底観測システム開発として1996年の LEO-15<sup>[7]</sup>、2000年の MVCO<sup>[8]</sup>、米仏共同プロジェクトである1996年の MOISE<sup>[9, 10]</sup>を引き継ぐ2000年の MOBB<sup>[11]</sup>(モンレー水族館研究所のケーブル設置を待つ状態)など、精力的な海底観測所のための技術開発が進められてきた。

欧州では、主としてフランス及びイタリヤが試験観測としての海洋観測プロジェクトを進行させて来た。いち早く開発された掘削孔利用システム NADIA を用い行われた OFM (Observatoire Fond de Mer)<sup>[12]</sup>により、深海底の地震観測におけるノイズの研究では、世界をリードした。GEOSTAR (Geophysical and Oceanographic Station for Abyssal Research)、GETSTAR-2、そして ORION (Ocean Research by Integrated Observation Network; 米国の ORION とは異なることに注意)-GEOSTAR-3 と続いた計画では、当初から多目的観測を実現するための機動的プラットフォームの開発が行われた<sup>[13]</sup>。ORION-GEOSTAR-3 では、後発の ASSEM (Array of Sensors for long-term Seabed Monitoring of Geo-Hazards; 地震学、測地学、地球化学センサーからなる)<sup>[14]</sup>システムとの通信も可能となり(2004年ギリシャのコリント湾の地震発生帯観測で実現した)、国際的な共同体制及び機動的観測システムの拡張を容易とする段階まで至った。その他、ABEL (Abyssal Benthic Laboratory)<sup>[15]</sup>や DESIBEL (Deep Sea Intervention on future Benthic Laboratory)<sup>[16]</sup>などのプロジェクトでセンサー関連の技術開発が行われ、今後の展開を待つ状況にある。

我が国の場合、1978年には、気象庁により、東

海地震震源域に近い御前崎沖に地震観測専用のケーブルが設置され、以後、房総沖、相模湾、伊豆半島東方沖、三陸沖、室戸沖、十勝・釧路沖と、計7つの地震・津波観測のためのシステム整備が行われた<sup>[17]</sup>。地震発生帯に関する研究面でも、2003年十勝沖地震の観測<sup>[18]</sup>や2004年の紀伊半島沖地震<sup>[2]</sup>などの観測を通じ、海底に設置されるシステムがいかに地震学研究や防災に重要であるかを訴えている。通信ケーブルの再利用では、GeO-TOC (Geophysical Observation using Trans-Ocean Cable)<sup>[19]</sup>で地震計設置に成功した後、沖縄南東沖でVENUS (Versatile Eco-minitoring Network by Undersea Cable) 計画<sup>[20]</sup>として、海底観測を多目的に用いる研究につながることとなった。新規のケーブルを用いた多目的観測は、初島沖深海底総合観測ステーション<sup>[21]</sup>を用いて行われている。現在気象庁で整備の準備を進めている東南海地震震源域直上の海底ケーブル式観測システムは、地震・津波のモニタリングを主目的としており、国内では科学的に多目的を目指す海域観測システムの整備の目処はたっていない。しかしながら、世界の趨勢である「海域の広域多目的観測」の実施に向けた技術開発は着実に継続されている<sup>[22, 23]</sup>。

### 3. 沈み込み帯の科学的に関する観測

笠原 (2004) によれば、沈み込み帯における研究項目として、巨大地震の巣となる地震発生帯に関する地震学・測地学・電磁気学・地球化学的な研究が提唱されている<sup>[3]</sup>。使用するべき観測システムに関しても、リアルタイムでデータを取得すべきこと、地震発生帯或はプレート境界面近傍に存在する媒質や流体の物性、地震発生帯を取り巻く応力場等の物理的条件変化、地震発生や津波発生の状況把握に適したシステムである必要性を指摘している。力学的に、どのような広域応力場の中で、どのような応力集中が生じ、どのようなきっかけで地震発生に至るのかを理解することは、地震という現象の科学的解明に必要不可欠である。また地震発生帯と呼ばれる領域に数10～100年間隔で繰り返し生じる地震という現象のサ

イクルを理解する上で、地震発生帯を取り巻く領域の地殻変動観測や地震断層面になるべく近い場所での応力や地震発生に関わる物理量を推定する試みは重要である<sup>[24]</sup>。周辺の地殻変動観測という地域スケールの観測や掘削孔データを用いた応力推定手法や地下の流体の挙動把握と併せ広域応力場と断層面近傍の応力の関係を明らかにすることは、地震発生のメカニズムに繋がるステップとなる。このためには、災害の軽減に必要な地震・津波の観測に加え、掘削や掘削孔内観測点設置による海底面下の水理学的な環境変化、応力変化等の長期的かつリアルタイムによるモニタリングが必要であり、今後の地震研究が固体地球物理学の種々分野を横断的に網羅する範囲に拡大することを示唆する。観測のリアルタイム性に注目すれば、観測データのケーブルによる陸上へのデータ転送や人工衛星を用いた通信という手段が必要不可欠であること、長期観測の必要性は、使われるセンサーへの電源供給及びデータ量に十分留意する必要性を暗示している。取得されるデータの解析も分野横断型で行われる必要があるだけでなく、観測の技術についても、各種センサーを動作させ、取得されたデータを高精度で扱えるに足る十分な容量を持つインフラが必要である。

### 4. 今後の海洋観測プロジェクト

米国ORION計画(米国とカナダの国際共同プロジェクト)では、沈み込み帯の科学に関し、前述したような分野横断型の観測を用い、地震発生帯全体のシステムを理解する方向で検討が続けられている。こうした科学的目的の明確化と並行し、将来のケーブル式観測システムの構築に向け、LOOKING (Laboratory for the Ocean Observatory Knowledge Integration Grid) と呼ばれるプロジェクトが2004年秋に立ち上がった。このLOOKING予算は、全米科学基金のIT技術枠から捻出され、4年間で総額3.9百万ドルの研究費が割り当てられた。海洋科学観測のためにIT技術を積極的に導入し、観測ネットワークの運営、データ・プロトコル、データ管理、WEBサービスを充実させ、

## Functional Components of an Ocean Observatory

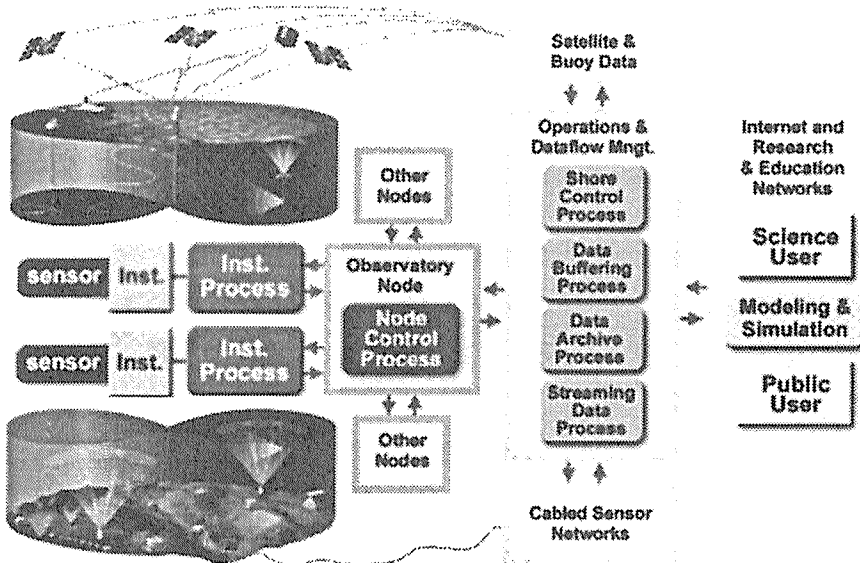


図1 LOOKINGで検討されている将来の海洋観測システムのブロック図。データの流れを整理すると共に、観測インフラの整備が必要となる技術的な検討要件を整理することを目的としている。

無線、有線によるネットワークを確立し、グリッド技術も取り入れ、海洋学者、海中のセンサー、インターネットユーザーの間のサイバーネットワークを設計する予定である(図1)。海洋観測における科学的な目標設定<sup>[3]</sup>だけでなく、こうしたインフラに関わるソフトウェア・ハードウェアの技術革新を綿密な設計から実現するため、着々と準備が進められていることとなる。

これまでのHUGOやH2O等のプロジェクト遂行から、例えば固体地球物理学分野の観測のみであったとしても、海洋という厳しい環境で使用される観測機器を効率的にデータ取得に活かすためには、技術面及び科学面双方でプロジェクト管理が重要であることが浮き彫りとなっている。このため、ORION計画では、プロジェクト管理の成功例である深海掘削計画(ODP: Ocean Drilling Program)の研究運営構造を導入し、研究者による諮問組織(Advisory Structure)、研究運営組織(ORION Office)を立ち上げた(図2)。研究運営に関しては、入札の結果、ODPの運営経験があり統合国際深海掘削計画(IODP: Integrated Ocean Drilling Program)の運用に当たっているNPO法人JOI (Joint Oceanographic Institutions)が落札し、ODP

の経験がそのまま活かせる構造となった。図に見られるように、ODPと同様、ORIONという巨大なプロジェクトの研究運用構造に、米国及びカナダからいつでも地球規模の国際研究計画として発展させて運営することの可能なインターフェースを設けていることは、この計画の特徴である。

欧州では、過去において科学技術の革新を担ってきた自負が、近年のプロジェクト巨大化の流れの中で、中核的研究施設(Center of Excellence 或はCoE)の分散という問題を乗り越えようとする力に昇華しつつある。そのため、あらゆる科学的分野において欧州の担う役割を明確にするという目的でCORDIS (Community Research and Development Information Service) という組織を立ち上げ、中核的ネットワーク(Network of Excellence 或はNoE)の形成のための努力が、Framework Programと呼ばれる数カ年計画で続けられている。現在は第6次Framework Program (FP6と呼ばれ、2003年から2006年までのプログラム)の中にあり、このFP6で組み上げられたNoEが第7次Framework Program (FP7)でのプロジェクトの担い手となることが予想されている。2004年12月のスマトラ島沖地震、相次いで明らかとなる過去の海底地滑

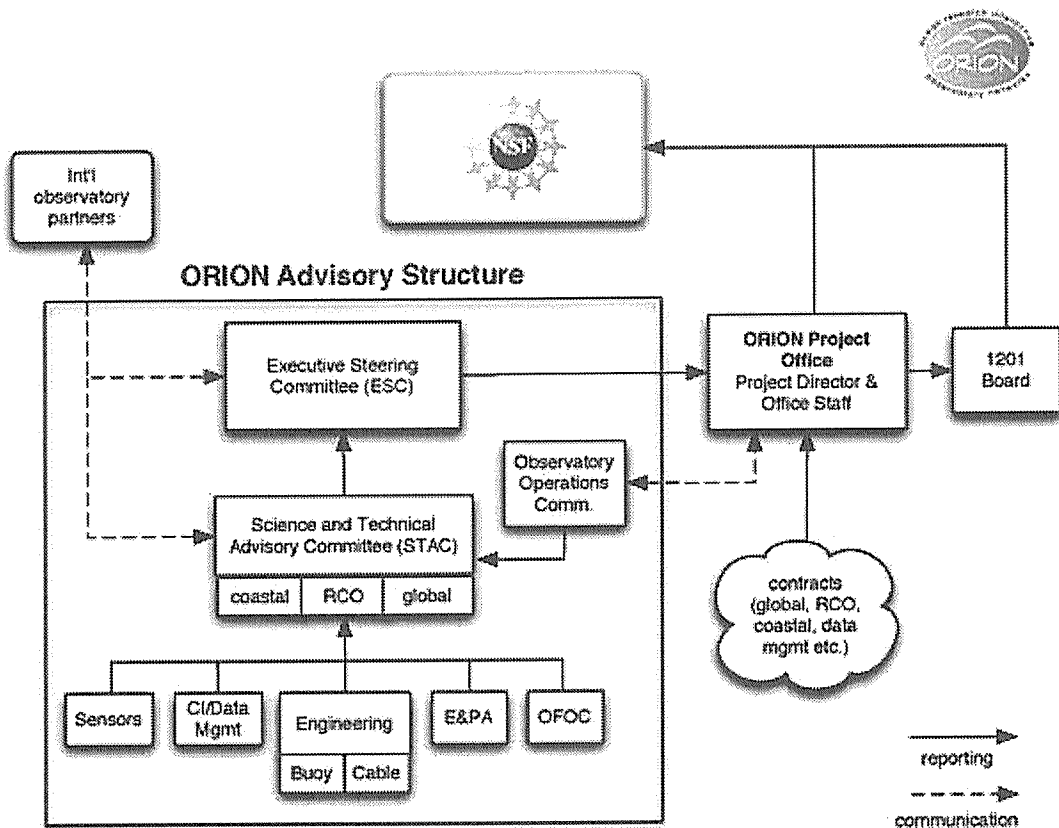


図2 ORION計画の推進体制 (ODPから移植された)。研究推進構造と研究運用構造を独立させ、研究者による研究者のためのインフラ整備を目論んでいる。RCOはRegional Cabled Observatoryの略。図1のLOOKINGはCI/Data mgmt (Cyber-Infrastructure and data management) に相当する。ORION Project Officeは、JOIがその運営に関わることとなった。

り痕、1755年リスボン地震など、沈み込み帯に関する科学の重要性も再認識されており、2002年にはGMES (Global Monitoring for Environment and Security) 計画の中にESONET (European Seafloor Observatory Network) 計画検討チームが形成された。FP6期間内にはESONET計画自体の海洋観測インフラ整備についての予算化に至っていないが、2005年から2年間NoE国際委員会設置は認可された。計画検討チームは、2006年FP6終了年、アイルランド沖Porcupine深海平原観測所 (Porcupine Abyssal Plain Observatory 或はPAP) 整備に着手するための準備を進めている (Porcupineとは、1869年にこの海域の東側大陸斜面で初めて深海ドレッジを成功させた英国軍艦の名前である)。

FP6期間内のESONET計画についての報告書はESONIM (ESONET Implementation Model) としてまとめられ、欧州連合に提出された。米国ORION計画でのケーブル観測所整備 (NEPTUNE) の完成が2010年頃と見込まれており、FP7 (2007~2013年) の時期とも重なる。そのため、欧州の研究者は、NoE委員会で、米国の研究者とともに、科学的検討やLOOKING等の先行計画との結びつきを強める予定である。防災を目的とするシステムの整備とは異なり、欧米では科学者からのBottom-upで巨大プロジェクトが開始されており、研究者側は、システム整備の科学的目的の一部が防災への寄与という立場を取っている。そのため先行型試験研究的要素を取り入れることが可

能となっているところが、我が国の計画と異なっている。地震が国家の安全に係る問題である日本との研究環境の差異を示していると考えられることができる。

我が国では、ARENA と呼ばれる沈み込み帯観測システムの構想がある。前述した通り、その構想を実現するための技術開発が継続されている [22]。

## 5. まとめ

沈み込み帯の科学については、地震発生メカニズムという分野を含む大きな枠での国際的な議論の場が存在し、ケーブル式観測システムやリアルタイムでデータを転送できるシステムの必要性も十分に認識されている。沈み込み帯の研究では、今後も海域への地震観測システム整備継続が必要であることは、言を待たない。しかしながら、沈み込み帯における地震発生メカニズムの解明に近付くためには、諸外国と同様に、新たな分野横断型の観測を導入することも検討されて然るべきであると考えられる。技術革新が実現する場合は、今後海外に移るかもしれないが、日本の技術開発における過去の経験は欧米のプロジェクトの中で活かされることとなろう。今後、研究者間の分野横断的コミュニケーションを熟成させ、欧州が行っているように、沈み込み帯やその観測技術熟成のための中核的研究拠点を整備することも必要かもしれない。少なくとも、観測における科学的な目的を明確にし、観測システムの技術的高度化を十分に検討した成果を蓄積することが望ましい。ESONET で考慮された NoE という構想は、日本の社会システムに定着させ易いし、ORION で構築された研究推進体制や LOOKING に見られるような将来の組織的な観測インフラやデータ管理構造の検討も重要である。

謝辞：米国の最近の動向情報は Alan Chave 氏私信、欧州については I. G. Priede 氏及び P. Favali 氏私信による。記して感謝申し上げる。

## 参考文献

[ 1 ] Mikada, H., K. Hirata, H. Matsumoto, K. Kawaguchi, T. Watanabe, R. Otsuka and S. Morita (2003) : Scientific

results from underwater earthquake monitoring using cabled observatories, Proc. IEEE, 3rd Inter. Workshop Sci. Use Submarine Cables Related Tech., 3-7.

[ 2 ] Matsumoto, H. and H. Mikada (2005) : Fault geometry of the 2004 off Kii-peninsula earthquake inferred from offshore pressure waveforms, Earth Planets Space, 57 (3), 161-166.

[ 3 ] 笠原順三 (2004) : 海底ケーブル式観測におけるリアルタイム地震観測の目的と意義, 月刊地球, 26 (4), 234-239.

[ 4 ] Sutton, G. H., W. G. McDonald, D. D. Prentiss and S. N. Thomson (1965) : Ocean bottom seismic observatories, Proc. IEEE, 53, 1909-1921.

[ 5 ] Duennebie, F. K., D. W. Harris, J. Jolly, J. Caplan-Auerbach, R. Jordan, D. Copson, K. Stiffel, J. Babinec and J. Bosel (2002) : HUGO : the Hawaii Undersea Geo-Observatory, IEEE J. Oceanic Eng., 27, 218-227.

[ 6 ] Chave, A. D., F. K. Duennebie, R. Butler, R. A. Pettit Jr., F. B. Wooding, D. Harris, J. W. Bailey, E. Hobart, J. Jolly, A. D. Bowen and D. R. Yoerger (2002) : H2O : The Hawaii-2 observatory, in Science-Technology Synergy for Research in the Marine Environment : Challenges for the XXI Century, Developments in Marine Technology, 12, (eds. Beranzoli, L., P. Favali and G. Smriglio), Elsevier, Amsterdam, 83-91.

[ 7 ] Schofield, O., T. Bergmann, P. Bisset, J. F. Grassle, D. B. Haidvogel, J. Kohut, M. Moline and S. M. Glenn (2002) : The Long-term Ecosystem Observatory : an integrated coastal observatory, IEEE J. Oceanic Eng., 27, 146-154.

[ 8 ] Austin, T. C., J. B. Edson, W. R. McGillis, M. Purcell, R. A. Pettit Jr., M. K. McElroy, C. W. Grant, J. Ware and S. K. Hurst (2002) : A network-based telemetry architecture developed for the Marthas's Videyard Coastal Observatory, IEEE J. Oceanic Eng., 27, 228-234.

[ 9 ] Romanowicz, B., D. S. Stakes, J. -P. Montagner, P. Tarits, R. Uhrhammer, M. Begnaud, E. Stutzmann, M. Pasyanos, J. -F. Karczewski, S. Etchemendy and D. Neuhauser (1998) : MOISE : A pilot experiment towards long-term seafloor geophysical observatories, Earth Planets Space, 50, 927-937.

[10] Stutzmann, E., J. -P. Montagner, A. Sebai, W. C. Crawford, J. -L. Thiriot, P. Tarits, D. S. Stakes, B. Romanowicz, J. -F. Karczewski, D. Neuhauser and S. Etchemendy (2001) : MOISE : a prototype multiparameter ocean-bottom station, Bull. Seism. Soc. Am., 91, 885-892.

[11] Romanowicz, B., D. S. Stakes, R. Uhrhammer, P. McGill, D. Neuhauser, T. Ramirez and D. Dolenc (2001) : The MOBB experiment : a prototype permanent off-shore ocean bottom broad-band station, EOS Trans., 84, 325-332.

[12] Montagner, J. -P., J. -F. Karczewski, B. Romanowicz, S. Bouaricha, P. Lognonne, G. Roul, E. Stutzmann, J. -L. Thiriot, J. Brion, B. Dole, D. Fouassier, J. -C. Koenig, J. Savary, L. Flourey, J. Dupond, A. Echardour and H. Floc'h (1997) : The French Pilot Experiment OFM/SISMOBS : first scientific results on noise level and event detection, Phys. Earth Planet. Int., 84, 321-336.

- [13] Beranzoli, L., D. Calore, P. Favali, J. Marvaldi and M. Nicot (2004) : ORION-GEOSTAR-3 : A Prototype of seafloor network of observatories for geophysical, oceanographic and environmental monitoring, Proc. 14th International Off-shore and Polar Engineering Conference, vol. II, 371-376.
- [14] Blandin, J., R. Person, J. M. Strout, P. Briole, G. Etiope, M. Masson, S. Smolders, V. Lykousis, G. Ferentinos and J. Legrand (2003) : ASSEM : a new concept of regional observatory, Proc. 3rd International Workshop on Scientific use of submarine cables and Related technologies (Tokyo, Japan), IEEE, 240-243.
- [15] Berta, M., F. Gasparoni and M. Capobianco (1995) : Abyssal Benthic Laboratory (ABEL) : a novel approach for long-term investigation at abyssal depths, J. Mar. Systems, 6, 211-225.
- [16] Rigaud, V., D. Semac, M. Nokin (1998) : DESIBEL Team, G. Tietze, H. Amann, V. Goetz and A. Pascoal, New methods for Deep-Sea Intervention on future Benthic Laboratories, DESIBEL Project - Final Results, Comparison of concepts and at sea validation. Proc. OCEANS '98 (Nice, France), CD-ROM.
- [17] Asakawa, K., H. Mikada, K. Kawaguchi, R. Iwase, K. Hirata, T. Goto, K. Mitsuzawa, H. Matsumoto, T. Watanabe and K. Suyehiro (2002) : Envisioned Network System for Future Underwater Observations, Proceedings of Techno-Ocean 02, CD-ROM.
- [18] Watanabe, T., H. Matsumoto, H. Sugioka, H. Mikada, K. Suyehiro and R. Otsuka (2004) : Offshore Monitoring System Records Earthquake in Japan, EOS Trans., 85 (2), 14.
- [19] Kasahara, J., H. Utada, T. Sato and H. Kinoshita (1998): Submarine cable OBS using a retired telecommunication cable : GeO-TOC Program, Phys. Earth Planet. Int., 108, 113-128.
- [20] Kasahara, J., Y. Shirasaki and H. Momma (2000) : Multidisciplinary geophysical measurement on the ocean floor using decommissioned submarine cables : VENUS Project, IEEE J. Oceanic Eng., 25, 111-120.
- [21] Momma, H., R. Iwase, K. Mitsuzawa, Y. Kaiho and Y. Fujiwara (1998) : Preliminary results of a three-year continuous observation by a deep seafloor observatory in Sagami Bay, Central Japan, Phys. Earth Planet. Int., 108, 263-274.
- [22] Asakawa, K., H. Mikada, K. Kawaguchi, Y. Shirasaki, J. Kojima, J. Muramatsu, Y. Horiuchi and ARENA Committee members, Japan (2004) : ARENA : A New Scientific Cable-network for Real-time and Long-term Underwater Observation, Proc. 14<sup>th</sup> International Society of Offshore and Polar Engineering Conference (Toulon, France), CD-ROM.
- [23] Chave, A., G. Massion and H. Mikada (2005) : Science Requirements and the Design of Cabled Ocean Observatories, Ann. Geophys., 48 (4), 印刷中.
- [24] 三ヶ田均 (2003) : 地震発生帯掘削と物理探査, 物理探査, 56 (6), 503-508.