

5. 海洋に関する基盤技術開発

5-1. まえがき

海と地球に関する理解を深める上で、海洋の観測についても、今後ますます時空間的な広がりと高精度化が求められることは明らかである。空間的には、例えば海洋底堆積物境界での数 mm オーダーから、数千 km に及ぶ計測まで、時間的にも秒、分単位から月、年に至るまで、極めて広い範囲をカバーすることを想定する必要がある。また、計測値そのものの精度や信頼性を高めなければならないことは自明である。このような観測を実現し、ミクロからマクロスケールに至る海洋ならびに地球の変動をとらえるためには、先進的な要素技術の研究開発並びに実用技術の開発が絶え間なく行われることが必要である。

新たな海洋立国の実現を目指すため、総合的な海洋施策を推進するための海洋基本法と同法に基づく海洋基本計画では、世界第6位という広大な面積の領海・排他的経済水域（EEZ）に存在する可能性がある海底鉱物・エネルギー資源の計画的な開発等の推進が重要とされている。これらの資源・エネルギー開発等に貢献できる探査・観測技術や分析技術の高度化と実用化の加速が強く求められている。海洋基盤技術の開発を促進させることは、社会・経済の発展にも寄与できることとなる。

海洋を直接観測するためには、具体的な観測ポイントにアクセスするための観測プラットフォームが必要である。プラットフォームとしては、AUV（自律型無人潜水機）、ROV（遠隔操縦型無人潜水機）等の移動式のものや、ケーブルネットワーク、ブイシステム等の固定式のものや、その他多様なものが考えられる。一方、観測ポイントにおいて、実際にデータを得ようとする場合には、計測を行うための

センサー等に代表されるような探査観測機器を搭載しなければならない。これらは、プラットフォームにとって搭載機材であるペイロードとなる。さらに、観測によって得られる大量のデータから、特定の現象について一定の理解を得るためには、正しくデータを解析・統合する技術が必要である。これら「プラットフォーム技術」、「探査観測技術」、「データ解析・統合技術」の3者は、従来、主としてそれぞれ独立に研究開発が進められてきたが、今後はこれらの技術が相互に影響を及ぼし合いながら発展することが望まれる。

本指針は、以上のような観点から、「プラットフォーム技術」、「探査観測技術」、「データ解析・統合技術」の3つのカテゴリにおける今後の基盤技術開発の方向性について述べるとともに、技術開発分野の特殊性に鑑み、公募航海の実施に関わる留意点を取りまとめたものである。なお、「海と地球の研究」の視点では、例えば人工衛星や航空機からの観測や、観測気球等を用いる大気・海洋境界に関する観測技術もその範疇に入るが、ここでは本指針が研究船等を用いる公募航海を利用する際のガイドラインとなることを考慮し、上記のような3つのカテゴリ分類に基づいて技術開発分野全体を俯瞰することとした。

5-2. プラットフォーム技術

海洋の直接観測に用いられるプラットフォームには、大きく分けて移動式、固定式が考えられる。

移動プラットフォームは、有人潜水船やAUV・ROV・グライダー・曳航体等の無人機、さらには自動計測船等、空間内を自由に移動することによって観測や観測に関わる作業を行うものである。設計や

プラットフォーム技術

- 1) 移動プラットフォーム：AUV、ROV、グライダー、曳航体、有人潜水船、自動計測船等
- 2) 固定プラットフォーム：ケーブルネットワーク、ブイ、掘削孔利用計測システム等
- 3) その他：フロート等

探査観測技術

- 1) 音響計測技術：通信、測位、精密海底マッピング、広域同時環境計測等
- 2) 物理探査・計測技術：磁気探査、音波探査等
- 3) 化学・生物計測技術：センサー・分析システム等
- 4) サンプリング技術：採水、採泥、コア採取、生物取得装置等

データ解析・統合技術

製造、システム化など機体（ビークル）そのものに関わる技術から、運動制御や作業技術等の運用に関わる技術まで広い範囲の技術開発が含まれる。

固定プラットフォームは、ケーブルネットワークやブイシステムなど、空間内の固定点に配置され、電力や通信系等の観測に関わるインフラを供給するプラットフォームであり、特に長期変動の連続的な観測を可能にするものとして期待されている。海底面上に設置されたプラットフォームは、AUV等の移動プラットフォームや孔内計測システム、さらには衛星との連携を考慮することで、より広範な観測網が構築できる可能性がある。

アルゴフロートに代表されるフロート式の観測機器や表面漂流式ブイも移動する形式であるが、移動するためのアクチュエータ等を装備していないため、その他として分類する。

なお、本指針では掘削船は対象外とするが、プラットフォームを運用、展開するための船舶において、作業効率化や計測精度向上等の高度化に資するための技術開発については含むものとする。

1) 移動プラットフォーム

移動プラットフォーム技術としては、有人潜水調査船の技術をベースに様々な技術開発が展開され、それらが実用化されるとともに、確立された技術として定着つつある。特に 1990 年代以降、無人探査機（AUV や ROV）のビークルそのものに関する技術基盤は飛躍的に発展しており、今後は、多様なミッションに対応しうるようさらなる進化が求められる。例えば、長時間、長距離を航行可能な AUV、精密・重作業が可能な ROV あるいは AUV 等、海中・海底における新しい観測技術の研究・開発の進展に伴って、そこで必要とされる観測機器の設置・回収作業、さらには初期設定・キャリブレーション等、様々なまた複雑な作業が要求されるようになった。

現在、海底資源を効率的・効果的に探査するための探査システムが求められている。未利用・未発見の海底鉱物・エネルギー資源を探査するためには、一度の航海で総探査範囲が広く取れることと、専用母船でなくても運用できる機動性のある AUV が必要である。比較的小型で大きなペイロードが確保できる AUV も実用になってきているが、トータルでより長距離・広範囲の探査を行うためには、複数の探査機を同時に展開する必要がある。複数機を同時展開しても効率的かつ安全に運用できるようにするためには、探査機同士が接近した場合のセンシング・通信・運動制御や母船から遠距離に離れていても監視できる海中通信ネットワークや監視用表面ビークル等の技術開発が不可欠である。

「かいこう」ビークルの亡失事故以来、深海底での作業ができるビークルの能力不足が指摘されており、重作業が可能な遠隔操作型無人探査機 ROV が強く求められている。作業の複雑性に対応するためには、重作業能力に加えて精密性を同時に実現する必要がある。海底資源探査で重要なサンプル採取がより効率的にできる大容量の推進力を有する機体と重作業用マニピュレータや、複数のコアサンプルを採れる装置への要望も強く、これらを装備した ROV ビークルが求められている。また、「かいこう」ビークル亡失によってできなくなった最大深度 11,000m への潜航を再び実現することも要望されている。整備が今後行われる新しいプラットフォームにおいても、さらなる機能追加・性能向上は継続的に進められるべきである。また、移動プラットフォーム技術の新しい展開として、中層での生物の追跡撮影など、特定の単純作業のみを行う新形式のビークル、従来の形式にとらわれない新しい探査機のコネプトが登場しており、実用化が早期に実現することを期待したい。

一方、人間の目で直接観測することが可能である有人潜水船への需要は今後も変わることはない。「しんかい 6500」に代わる次世代有人潜水船や、日本海溝の最深部調査も可能な大水深化についても議論を重ね、今後の在り方について展望すべきである。海外では透明球を利用した 1,000m 水深に潜航できる有人潜水船も登場し、さらなる大水深化が計画されているなど、従来の概念にとらわれない技術開発も海外では進んでおり、我が国においても検討すべきである。

自動制御技術、航法技術、画像技術、アクチュエータ技術、マンマシンインタフェース等の要素技術は移動プラットフォーム開発を支える基盤として必要不可欠なものであるが、海洋機構の従前の中期計画により大きな進展があり、それらの成果は実用展開されている。これまでに本格的な実用までに到達していない要素技術であっても、無人探査機のさらなる高度化に不可欠なものは今後も積極的に研究開発を進めて行く必要がある。すなわち、長距離測位・通信技術、複数機制御システム、次世代小型動力システム、計測・認識・判断システム、次世代ネットワーク技術、水中動力源、水中充電技術の研究開発等である。

母船等の支援を受ける探査機の運用効率、稼働率を向上させるには、探査機だけではなく船からの着水及び揚収が荒天時においても安全に実施できる方法が求められている。このような二次的と思われる性能・機能について、母船と探査機の相互作用を含めて本格的に検討された例はあまりない。従来行わ

れている海面に浮上した機体を水平に吊る方法ではなく、垂直吊りやAUVの水中捕獲方法なども検討され、実用に向けた開発が行われている。複数機のAUVやROVを高度に展開することを求められる母船や調査船には、船舶の構造から見直すことも必要と考えられ、この方面の研究開発が積極的に実施されることを期待する。

2) 固定プラットフォーム

海底ケーブルシステムを用いたリアルタイム4次元観測網は、日本をはじめ海外においても大型プロジェクトが進められており、国内においては熊野灘において世界でも例を見ない稠密な観測網の開発・構築が行われ、平成23年から本格的な運用を開始している。このシステムは、繰り返し発生している海溝型巨大地震の解明が主な研究対象であるが、海中部にはノードと呼ばれる接続口があり、無人探査機により海底ケーブルの敷設と観測装置の設置を行う。そのため、将来的に新たな観測装置も接続・展開可能であり、海洋環境、生態系分野、さらには石油業界からも注目を集めている。

海底ケーブルシステムの構築には、これまでに国内で行われてきた多種多様な海底観測技術の開発成果が活用されている。現在はさらに大規模な観測網の構築計画が進められていることから、無人探査機等海中機器による観測点の構築・維持を定期的に行えるようにする必要があり、今後はこれまでに確立してきた海中作業技術のさらなる高度化に加え、保守運用を効率化するための新たな技術開発が不可欠である。また、作業プラットフォームとなる研究調査船や無人探査機等の海中機器については、確実な作業性を確保するため機器の高機能化や更新などを常に検討することが重要である。

海底ケーブルシステムに接続する観測装置等は、長期間の設置・観測に対する評価検討が必要であることから、新たな観測手法の確立や機能向上のため既存のテストベッドも含めて活用し、各種基礎検討・検証試験等を進めることが不可欠である

洋上での海洋気象観測のための固定プラットフォームとして、海洋観測ブイシステムがある。現在、赤道熱帯域を中心にブイ網が展開されており、西太平洋域には、大型かつ堅牢で水中センサーの目標深度が安定している緊張係留型のブイが展開されている。流れが速いインド洋には、小型で強潮流に強いが、水中センサー深度の変位は大きくなる、スラック係留型のブイが展開されている。一方で、依然として人為的な破壊行為による被害は後を絶たないが、様々な対策が講じられ、データ回収率等で一定の成果は出てきている。海洋観測ブイシステムの利点は、

気象海洋変動について、時間的に密にかつ長期間にわたる定点観測が可能であり、またセンサーの事前事後検定を含めた適切なメンテナンスを実施することで高いデータの信頼性が担保されるところにある。さらに様々なセンサーとの接続を考慮したロギングシステムや双方向大容量衛星通信システムを搭載しており、洋上でのリアルタイム・マルチセンサープラットフォームとしても進化してきている。

地球温暖化に伴い、気候変動観測の重要性がますます高まる状況において、今後は鍵と目される海域で、大気-海洋間の相互作用計測や水中部の水温・塩分構造をはじめとする各種計測を、高精度で定期的に提供できる観測システムが重要になる。こうした要求に応えるひとつの方法として、今後は設置環境の厳しい、中・高緯度域でも展開可能な表面係留型の海洋観測ブイシステムを実現していく必要がある。このパイロット実験として、すでに南大洋域に1基の実験ブイの係留を行っており、ここで得られて知見をベースに、中・高緯度域あるいは極域付近に展開可能な表面係留ブイシステムの実用化が求められている。さらに温暖化シグナルの応答として重要な計測項目となる、CO₂濃度や海水のpH値の計測についても実現すべく、開発が進められているプロトタイプセンサーの早期実用化にも取り組んでいく必要がある。

掘削孔の利用については、今後、高精度孔内地震観測、地球内部熱構造解明のための熱学的観測、地球規模物質循環解明のための孔内流体サンプリング、生命起源解明のための地下生物圏実験等、様々な目的を想定しなければならない。プラットフォーム技術としては、移動プラットフォームによるリエントリやケーブルネットワークあるいはブイシステムとの接続等、他の形式のプラットフォームによるサポートや相互の連携に関わる技術開発が求められる。

3) その他

アルゴフロートは、10日ごとに海面下2,000mまでの水温・塩分の鉛直プロファイルを観測して、リアルタイムにデータ送信する観測システムとして、既に3,000個を越し、全球海洋をカバーできる観測網となっている。今後は、多様なセンサー（CO₂計測など）を搭載する必要性が高まり、ペイロードも大型化することが予想される。このため浮力や電力容量の増大などが避けられないため、フロート本体の改良が求められる。さらに深海底までの観測域をカバーできる深海用フロートとして4,000mまで観測可能なフロートが実用化されており、これらがさらに改良され広く展開されることが期待される。アルゴフロートのように漂流するタイプでなく、グライダー

一と同様の移動機能を有して、ほぼ定位置で海底と海面の間を定期的に上下移動と定点復帰を繰り返し長期観測するシャトル型観測機の開発が進み、実用展開されることが期待される。

5-3. 探査観測技術

3次元、長期、連続、精密な観測を可能とするためのプラットフォーム技術の発展に伴い、その技術を固体地球物理学、海洋学、海洋生物学など多くの分野へ実用展開していく必要がある。そのためには、深海底を含む海洋の様々な環境下において高精度で高効率な計測・分析を可能とする探査観測技術の研究開発を進めていくことが重要である。海水中では、光や電波の減衰が大きいため、水中で計測を行う手段として、伝統的に音響が広く用いられてきた。また、地震波や電磁気等を用いる物理探査・計測も、地下構造をとらえる手段として、これまでに大きく発展してきた。一方、化学や生物に関連する計測については、従来は採水や採泥等、サンプリングによる方法が主流であったが、近年では、同様の分析や計測を現場で行う「現場計測分析技術」や「環境保持サンプリング技術」の発展が著しい。

海底鉱物資源等の探査技術開発では、効率的に探査するために、海水の化学成分や海底地形、海底下構造等の探査に用いるセンサー等や実用観測技術が求められている。音響センサーによるコバルトリッチクラストの厚さの高精度計測技術や、化学センサーによる海水の異常を検知する方法などが実用レベルになるなど、様々な手法の開発が精力的に行われてきた。これら技術開発での機器や手法は海域試験で検証・評価されて、実用化に向けた展開が着実に進むことが期待される。また、従来にはない新しい技術開発への挑戦も継続されることを期待する。

1) 音響計測技術

時間的・空間的により広がりを持つ計測は、他の計測技術と同様、音響計測にも求められる要素である。より広範囲を計測可能な技術としては、合成開口ソナーやインターフェロメトリを用いたサイドスキャンソナー等が実用になっている。長距離通信技術としては、位相共役波を用いた手法等の確立が期待される。高精度化にはプラットフォームの測位精度向上や運動制御性向上も重要であるため、プラットフォームと観測機器の総合的な性能向上がさらに進められなければならない。

また、4次元観測の推進という観点からみると、数百kmの広範囲の水温分布を同時に計測するような広域音響計測システムの構築も重要である。一方、精度の高い測位技術は、地殻変動計測に必須である

と同時に、移動プラットフォームの位置保持精度向上にも貢献しうる。これにより、計測データの空間的分布の正確性や空間解像度の向上が期待できる。

船載型の音響測深装置や音響測位、通信装置に関しても、高精度化が求められており、この分野における我が国の技術開発が進むことを期待する。

2) 物理探査・計測技術

物理探査技術についても、空間軸・時間軸・観測成分のそれぞれに拡張が求められる傾向にある。空間的拡張としては、空間カバレッジの拡大と空間分解能の向上の双方が必要である。いずれについても、調査船による観測のみでは限界があり、AUV、ROV、曳航体等、より機動性の高い移動プラットフォームを活用し、海底面近傍にアクセスすることが必要である。そのため、観測機器のさらなる小型化を実現し、そうしたプラットフォームに搭載可能なものとするのが重要である。

一方、海底面下の諸現象の理解については、長期モニタリングの重要性がますます高まるものと考えられる。例えば従来よりも多点で計測するために、海底装置の小型化や、レコーダー部分やトランスポンダなど一部機能の共通化による運用コストダウンを図り、プラットフォームに加えて、ケーブルネットワークや掘削孔といった独立型の海底長期観測装置を高度化させることも考えられる。

海底ケーブルステーションで始まっている海底多項目（多成分）観測は、今後の物理探査技術面でも必要となるであろう。例えば調査船やAUVによる空間的な物理探査、ROVや有人潜水船によるピンポイントかつ高精度の物理探査、自己浮上式装置による長期観測等の組み合わせによる、海底あるいは海底下諸現象の理解促進が期待される。

3) 化学・生物計測技術

化学・生物に関わる従来の観測手法では海水または海底泥をサンプリングし、これらを船上または陸上に回収して計測、分析を行うスポット的な観測が一般的である。ただし、これらの手法では、

- (1) 回収時に不純物混入の可能性が排除できない。
- (2) サンプリング後の環境変化にもなう状態変化の可能性が排除できない。
- (3) 物理、化学及び生物的な計測、分析が別個に行われるためにデータの整合性がとれない。
- (4) 時空間的に連続したデータが得られない。

などの問題があり、これらを解決する現場計測・分析システムや現場型センサーの一刻も早い実用化が

待たれる。これらの科学ニーズから生まれた調査技術は、独自性が高く、技術分野におけるイニシアティブが取りやすいため、今後とも積極的に進展させるとともに、新規技術の取り込みに力を注ぐべきである。結果として、海洋地球観測に関わる研究者人口を広げることにつながり、我が国の先進性を維持する上でも有効な方策である。

海水中のCO₂の濃度を計測する技術として、色素法を用いた現場型の小型高精度センサーが開発、実用されている。漂流ブイ用に開発された本センサーは、深海用センサーとしての展開も進み、本計測原理によるpHセンサーは国際標準計測法としても期待されている。

海底鉱物資源開発等に伴う環境影響評価や生物多様性評価、海洋環境変動モニタリング、掘削孔内地下微生物生態系の探索など、海洋の生物・生化学パラメータに関する調査研究の重要性が増している。サンプリングに依存した従来手法に代わる、新たな現場計測技術の開発と装置の高性能化に向けた新技術導入が期待されている。AUVやROVのペイロードとして搭載する場合、装置の小型化が不可欠であり、センサー部だけでなくアンプ、駆動部なども含めた装置全体の小型化、省電力化は常に考慮されるべきである。

4) サンプリング技術

現場での計測技術とともに重要な技術として、海水・底質・生物等様々な試料を採取する技術が挙げられる。特に今後は、例えば深海の極限的な環境を保持したままサンプル回収を行う技術がますます重要なものとなる。高温あるいは低温かつ高圧の環境を保存したまま試料をサンプリングし、船上に持ち帰ることはもちろん、そこでそれらの環境を保持、あるいは制御しながら、観察や分析等を行うことが求められる。さらに海洋微生物に関わる多様性解析・環境影響評価に資する高品質試料を取得するために、現場で濃縮・固定を行う技術も求められている。

岩石等のサンプリングに関しては、より長尺の岩盤コアサンプルへの要求が高くなってきている。従来になかったようなサンプリング方式やサンプリング装置を開発することも重要である。

5-4. データ解析・統合技術

プラットフォームおよび探査観測技術の進展に伴い、そこで取得されるデータの量や精度の向上、サンプルの質、量の向上が見込まれる。この結果、今後は、大量の高精度データの解析技術や、得られたデータを統合し、現象をモデル化する技術、さらに

はモデルに基づいて挙動予測を行う手法の開発が望まれる。観測データの質、量が向上したとしても、一般に、限られたシブタイムの中で、十分な精度のデータを必要量得ることは困難である。したがって、限られたデータから現象の全体像を把握するためには、モデルを用いてデータを補間する必要がある。

一方、データ解析の必要性から、逆に観測オペレーションのための新しい戦略が要請されることもありうる。また、モデル化を行なうために、あるいは不足しているデータを補うために、どのような計測が必要になるのかを、次の探査観測技術開発にフィードバックすることも考えられる。すなわち、冒頭に述べたように、プラットフォーム技術、探査観測技術とデータ解析・統合技術は、それぞれ独立のものではなく、相互に影響を及ぼし合いながら発展するものである。データ解析・統合技術についても、海洋の研究者のみではなく、例えば情報処理技術や数理科学分野の研究者を取り込み、大きく発展させていくべき分野である。

5-5. 公募航海実施の留意点

技術開発分野は、現象の理解や解明を目的とする他の科学的な分野と異なるため、公募航海の実施にあたっては特別の配慮を必要とする。

機器開発においては、例えば深海熱水地帯を対象とする場合、陸上にて高圧水槽などを用いて基本性能を確認することは必須であるが、一般に陸上の設備で、高圧、高温（もしくは低温）等の厳しい深海環境を厳密に再現することは困難であり、実海域での動作試験を通じて開発を進めるべきである。すなわち、実用レベルへ向けて機器開発を加速する上でも、今後はますます技術開発を目的とした航海も増やしていくことが望ましい。また、機器開発や手法開発を目的とする場合は、さまざまな環境因子（物理、化学、生物、地形など）が大きく異なる条件下で繰り返して試験を行うことが重要である。したがって、同じ海域での複数年度にわたる航海の提案については、科学的な研究課題と異なり、むしろ妥当なものとして取り扱う必要がある。その際、多岐にわたる科学分野についての試行を通して、計測・分析システムの有用性を考察する上では、単に機器を工学的なパラメータのみで評価するのではなく、現場の環境因子も十分に把握した上で評価する必要があるため、乗船研究者は工学分野のみで構成されるよりも、ユーザーとなる科学分野の研究者も含めた形で構成され、総合的に研究開発が推進されることが望ましい。

公募航海を実施するにあたって、技術開発分野に

において留意すべきもう一つの観点として、広く最先端技術を海洋分野へ取り入れ、より高度で独自性の高い技術を醸成できるよう、新しい取り組みを積極的に支援することが望まれる。例えばマイクロアレイ技術、メタゲノム解析に代表されるように、生物分野においては近年続々と新しい技術が登場している。また、我が国は、ナノテクノロジーやロボット技術、マイクロデバイス技術をはじめ世界をリードする最先端技術を有している。そうした技術を海洋分野へ積極的に導入するためにも、公募対象を特定の技術分野に限定することなく、より多くの分野の研究者が公募航海に応募・参加し、ユーザー側の研究者と工学分野の研究者とがオープンな環境で情報を共有しつつ、基盤技術開発が進められるべきである。

5-6. まとめ

以上のように海洋に関する技術開発は、海洋地球研究の全ての分野における研究基盤を形成するものとして、極めて重要な位置を占める。我が国の海洋地球研究の先進性を維持する上でも、その持続的な強化は必要不可欠である。公募航海においても、将来、大きな発展が見込めるような先端的な技術が数多く創出されることを期待したい。また、従来技術の延長上ある技術においても、機能向上や高精度化、現場作業の効率化に向けての取り組みは継続的に行われなければならないものである。これらは実海域での動作試験、検証試験が必須であり、着実に実施して改善の歩みを継続することが肝要である。