

個別調査分析 3

海洋

Project Manager

阪口 秀 笹川平和財団 海洋政策研究所 所長

Project Member

赤松 友成 笹川平和財団 海洋政策研究所 海洋政策研究部長

吉武 宣之 笹川平和財団 海洋政策研究所 特別研究員／

元防衛装備庁艦艇装備研究所 所長

石原 靖久 国立研究開発法人 海洋研究開発機構

研究プラットフォーム運用開発部門 グループリーダー

中島 敏 元海上保安庁 長官／前海上災害防止センター 理事長

谷 伸 元海上保安庁 海洋情報部長

古庄 幸一 元海上自衛隊 海上幕僚長／

元総合海洋政策本部 参与会議 参与

池田 徳宏 元海上自衛隊 呉地方総監／富士通システム統合研究所

安全保障研究所 所長／

ハーバード大学アジアセンターシニアフェロー

川井 大介 政策研究大学院大学 政策研究院 リサーチ・フェロー

上砂 考廣 政策研究大学院大学 政策研究院 リサーチ・フェロー

中山 衣美子 政策研究大学院大学 政策研究院 リサーチ・フェロー

大村 崇 政策研究大学院大学 政策研究院 リサーチ・フェロー

目次

第1章 総論	3
第2章 各論	6
第1節 国民	6
第2節 物流	19
第3節 財産	39
第4節 食料	69
第5節 環境	87
第6節 健康	111
第3章 政策的観点での一考察	117
参考文献	119

第1章 総論

本報告書は、「安全・安心」及び「経済安全保障」の観点から、とくに海洋に関する項目について深掘調査を行うものである。本調査研究課題に対して、昨年度の令和3年度では、主として、海洋に関する経済安全保障に対する脅威の抽出に注力した。その理由は、21世紀の現在において我が国周辺海域における軍事的対立から武力衝突に至ったケースは無いが（尖閣諸島周辺及び台湾海峡における威嚇とフィリピン周辺の漁船に対する暴力的行為等があったが、それらは武力衝突ではない）、水産資源の奪取、漁業活動に対する威嚇、IUU漁業、海底資源を巡る問題、領海への不法侵入、航行ルートの制限、石油流出や海洋ゴミなどの海洋環境破壊、気候変動などによる海洋環境や生態系の変化、災害など、軍事に加えて外交上の問題など、様々な側面から我が国の経済安全保障が脅かされうる状況が発生しているからである。また、我が国は、「山水（さんすい）」という芸術用語に代表されるように、造山活動によって形成された山々からなる陸地とそれを取り囲む海から成り立っており、海洋は、沿岸地域の風光明媚な景観を楽しむ観光、海水浴、ヨットなどのマリンスポーツ等、国民の健康維持にも深く関連している。

そこで、このような様々な観点に深くかかわる海洋の諸問題を扱うに当たり、昨年度の範疇分けを踏襲し、以下の6つの大項目を設定し、調査結果をまとめることとした。

- 1) 国民
- 2) 物流
- 3) 財産
- 4) 食料
- 5) 環境
- 6) 健康

まず、「1) 国民」では、国民の生命、生活そのものに関わる基盤としての国家主権、領土、領海、排他的経済水域等を守るべき対象とした。国連海洋法では各国の主権の及ぶ範囲や排他的経済水域などが決められているが、離島の歴史的解釈や島として認めるか否かの議論などがあり、陸域のように明確な境界線が決められていないため、近隣国との係争海域の問題は尽きない。守るべきこれらの対象についての脅威として、周辺国からの海洋進出、領海侵犯などを中心とした事項を抽出し、その対策について調査した。

「2) 物流」では、海洋上で物資、人を輸送するための船舶そのものと、船舶の航行に関する、航路、海底地形図、ナビゲーションシステム、港湾施設、燃料等の他に、情報の流通路となる海底ケーブル等などを守るべき対象とした。これらに対する脅威として、事故、航行の妨害、テロ行為、気象災害などを中心とした事項を抽出し、その対策について調査した。

「3) 財産」では、主として大陸棚及び大陸棚縁辺で採掘される石油、天然ガス、そして現在検討されているメタンハイドレート等の化石燃料と、洋上風力や潮流等を利用した発電などに関するエネルギー

ギーと、レアアース・レアメタル・コバルトリッチクラスト・黒鉱などを含む海底熱水鉱床に代表される鉱物資源、さらに赤サンゴなどの貴重生物資源や海洋生物の代謝システムや機能を利用した製薬や新しい材料の開発が期待される遺伝子資源、海底地形や物理化学的な観点からの海洋情報等の広義の財産を守るべき対象とした。これらの対象はいずれも経済安全保障に直結しており、その脅威は（１）ともオーバーラップするところもあるが、略奪や事故、そして開発の遅れなどの事項を抽出し、その対策について調査した。

「４）食料」では、漁業とその周辺産業に関連する事項を守るべき対象とした。動物性タンパク質の生産に関する指標FCR（Food Conversion Ratio：体重1Kg増当たりの飼料要求量）の観点からは、魚類がその値が最も小さく、今後、地球規模の人口増に対するタンパク質供給源として、養殖を含む漁業に大きな期待がかかっている。一方、我が国は2018年に漁業法が改正されたばかりであるが、海は全世界でほぼ繋がっており、水産資源管理については国際的な協調が必要であることは述べるまでもない。そこで、具体的には、水産資源、漁場・漁港・漁具、加工流通等、水産食品のバリューチェーンを守るべき対象とした。これに対する脅威は（１）で論じられる項目と関連する相互の領海侵犯や自国漁船の拿捕、IUU漁業、乱獲、海洋環境変動による生態系変動などの事項を抽出し、その対策について調査した。

「５）環境」では、海洋環境の中でも、自然起源の変動に加えて人為起源によって変動する生態系、水質（ゴミ、海洋汚染、二酸化炭素等を含む）、貯蔵能力、気候変動等による様々な海洋環境及び環境資源を守るべき対象とした。これらは、いずれも（１）、（２）、（３）、（４）と密接に関連している。例えば、気候変動がもたらす海面上昇や海岸浸食は、海と陸の境界基線を縮退させる一方、離島の水没などにつながり、これにより領海、排他的経済水域を失うことになり、海底資源、水産資源などにも大きな影響を及ぼす。また、海洋汚染は食料となる水産物に悪影響を及ぼすだけでなく、

（６）で言及する人間の健康にも問題を引き起こす可能性がある。したがって、本調査では、敢えて海洋の「環境」を経済安全保障の対象に加えた。環境に対する脅威としては、主として人為起源によるものを抽出し、汚染物質の流出、生態系の変動・破壊、そして風評被害について言及した。

「６）健康」では、海洋が国民生活の中で果たす役割の一部であるスポーツ、レジャー、景観、旅行といった海洋・海上資源に関わる人々の健康に関する項目を守るべき対象とした。我が国全体のGDPに対する旅行産業の割合は4%程度で、そこにマリンスポーツやマリンレジャーなどを加えても海洋関係だけでは1%にも満たないほど経済的効果はまだまだ小さい。しかし、四方を海に囲まれている島国である我が国では、海の景観や環境が健康に果たす重要性は古くから知られていて、住宅やホテル、オフィスビルでは明らかにオーシャンビューの部屋に価値があり、今後、気候変動によって亜熱帯化することが予測されている我が国における青少年の健全な育成にはマリンスポーツやマリンレジャーは欠かせない存在となる。よって、これらの対象は直接的にも間接的にも生活水準に関わる事項であると判断されるため、本調査研究では守るべき対象として組み入れた。その脅威としては、事故、荒天、汚染、自然破壊、伝染病などを抽出項目とした。近年、高齢化社会における海洋観光産業の目玉として豪華クルーズ船による世界一周旅行などの航海が盛んであるが、ここに掲げる脅威によって海洋観光産業が大打撃を受けたことはまだ記憶に新しい。

昨年度の調査の結果、包括的に脅威の抽出をすることができた。この結果を踏まえ、本年度は抽出されたそれらの脅威に対して①あるべき姿を描いた〈理想論〉、②それに対する〈個別具体的な対処法〉、③現状を把握するための〈現在の技術レベル〉、④その技術レベルでは対処できない課題ならびに、対処に必要な我が国が保有しない〈技術的解決策〉の四項目を基に整理・検討を行う。本年度は、外部の有識者からのヒアリングや海外の研究機関との連携も積極的に行うことで、より独自性のある調査研究を試みる。加えて、可能な限り内閣府総合海洋政策本部参与会議とも連携をすることで、これから纏め上げられる報告書が、令和5年春頃に取りまとめられる第4期海洋基本計画に寄与するだけでなく、それらの政策を実行するうえで求められる技術的要求は何なのかという問いにも答えるものとなることを目指す。

今次報告書は、以下の3つの項目に沿って記述される。

1. あるべき論、理想論の提示
2. 現状とのギャップの認識
3. ギャップを埋めるための技術、情報及び体制を提案

第2章 各論

第1節 国民

〈あるべき姿〉

海洋進出及び領海侵入の早期探知に関して実施すべきこと

広大で深さのある海洋空間の全てを監視することは極めて困難である。このため、例えば、我が国EEZ内を中心とする海域の常態を把握し、その中の全ての物体や生物等を識別するとともに、それらの数や量、活動の態様（どこから来てどこに向かったのか）等を実時間で把握し、時系列的にデータ化できるようなシステムの構築が、外部が我が国に及ぼす各種の脅威への対応に資するものである。

〈具体的対処〉

周辺国の海洋進出及び領海への不法侵入という脅威に対処するためには、その脅威の烈度を明らかにし、我が国に及ぼす影響度を把握する必要がある。そのためには、広大な周辺海域を常時監視し、異常を迅速に検知して対処することが必要である。現在整備中のMDAIに関連した各種の監視技術をさらに発展させ、海中の状況把握も可能とするシステムを構築し、衛星による海上のデータと海中のデータを融合し、海洋全体の状況把握を可能とするシステムを構築する必要がある。

〈現在の技術レベル〉

衛星を用いた海洋の監視においては、従来の大型の高分解能衛星と小型衛星のコンステレーション及び、次世代AISとされているVDES (VHF Data Exchange System) を用いることで、広域にわたる海洋の効果的な常時把握体制を強化することができる。さらに、AISを搭載しない、又はAISの送信を停止している船舶を捕捉するため、電波監視衛星による監視体制を整備することにより、船舶の動静把握能力が大きく向上すると考えられる。

一方、海中の状況把握については、沿岸域や湾内においては塩分、pH、クロロホルム計測などの常時観測が行われているが、外洋では海洋観測船による海洋観測が定期的に行われているのみで、継続的な状況把握は不十分である。アルゴフロートによる海中状況の把握が世界的に行われているが、我が国周辺に特定した海域の観測を定期的に行うことはできず、リアルタイム性にも乏しい。

海中の状況把握において安全保障上重要なことは、日本周辺での潜水艦や水中無人機の動静を把握することである。海中を移動する潜水艦や水中無人機は、衛星搭載のセンサーでは検出できない。このため、海中を可視化できるセンサーやそのプラットフォームを充実させる必要がある。電波は海中をほとんど伝搬しないことから、広範囲の観測が可能な手段は音響に限られる。我が国には、いわゆる国際海峡やチョークポイント（戦略的扼止点）が数ヶ所有り、ここを通過する艦船等を把握することは極めて重要である。具体的には音響的監視が有効であり、故障や意図的破壊に備えたシステムの重畳化、AIによる探知能力の向上を図ることが望ましい。

米国のDARPAは2017年12月から、数千の低コストの小型フロートを設置して分散型センサー・ネット

ワークを形成し、広大な海洋での持続的な海洋状況認識を可能にするOcean of Things (OoT) プログラムを進めている¹⁾。各フロートには、その場所における海水温、海の状態等の環境データ、商業船舶、航空機、更に海域を移動する海洋哺乳類の活動データを収集するための市販のセンサーが搭載されている。フロートは衛星を介してクラウドに定期的にデータを送信して、記録およびリアルタイム分析を行う。このフロートによるセンサー・ネットワークを用いれば、海中からの潜水艦や水中無人機の侵入といった、異常の検出が可能になる。

海中監視の有望なアセットとして、自律型的水中無人機が挙げられる。これはケーブルによる運動の制約がなく、人の搭乗に必要な設備やスペースが不要であることから、エネルギーの大部分を観測活動に使うことができるメリットがある。自律的に長時間の観測活動ができるため、広大な海洋の観測には適したセンサー・プラットフォームといえる。また、各種の内蔵センサーにより、海中の移動体または停止物体、海水の温度、塩分、溶存酸素量、二酸化炭素濃度などの連続観測が可能である。取得データのリアルタイム性を確保する手段としては、海上にフロートやデータ中継用の水上無人機を配し、衛星を通じてデータを送信する技術はすでに存在する。さらに、観測や監視効率を高めるため、複数の水中無人機を群として運用することも考えられている。水中無人機は、海中という三次元空間での状況監視が継続的にできるアセットである。

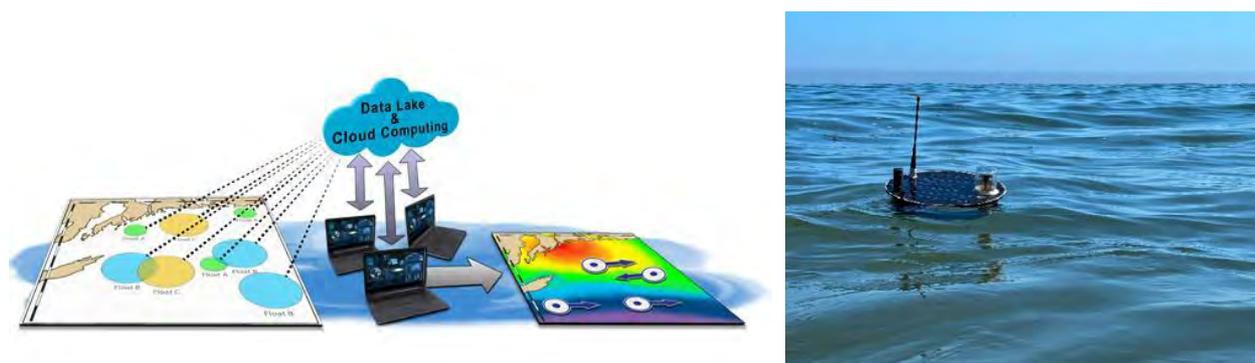


図1-1 Ocean of Thingsの概念図(左)、フロート(右)(出展:参考文献1)

<対処に必要な将来技術>

音響センサーアレイ、OoTフロート、自律型水中無人機・水上無人機、アルゴフロートなど、海中監視のためのセンサーとプラットフォームが多く開発導入されているが、これらを統合するビジョンが形成されていない。さらに、海中で取得したデータの伝送方法や分析手法など、海中監視を効果的に行う仕組みと体制の構築が必要である。

脅威① 周辺国の海洋進出及び不法領海侵入

○東シナ海及び南シナ海における海洋安全保障に関する事項

<現状>

2021年2月に施行された「中華人民共和国海警法」（所謂海警法）により、中国が定める管轄海域とその上空において、「外国軍用船舶等による違反行為に対して強制退去等の措置が可能」（第21条）となったほか、必要であれば武力による対処も可能となった（第22条）¹。海警法の施行により、海警船の活動の態様等に顕著な変化はないが、尖閣諸島周辺接続水域の航行は常態化しており、八重山漁協所属の「鶴丸」に対する「政治的な行動をする漁船への対応行動」や、「第一桜丸」、「恵美丸」、さらには沖縄本島方面から尖閣諸島周辺海域に出漁する日本漁船への接近事案が報告されている。また下のグラフの通り、平成31年以降においても、中国海警局所属船の数が増加していることがわかる²。

¹ 防衛省「中華人民共和国海警法について」https://www.mod.go.jp/j/approach/surround/ch_ocn.html

² 中澤信一「中国海警局に所属する船舶の尖閣派遣パターンと海警法の本気度：中国海警法施行後の『武器使用』の本気度を探る」令和4年度「中国海警局に所属する船舶の尖閣派遣パターンと海警法の本気度」秋季研究大会【部会2】報告資料。

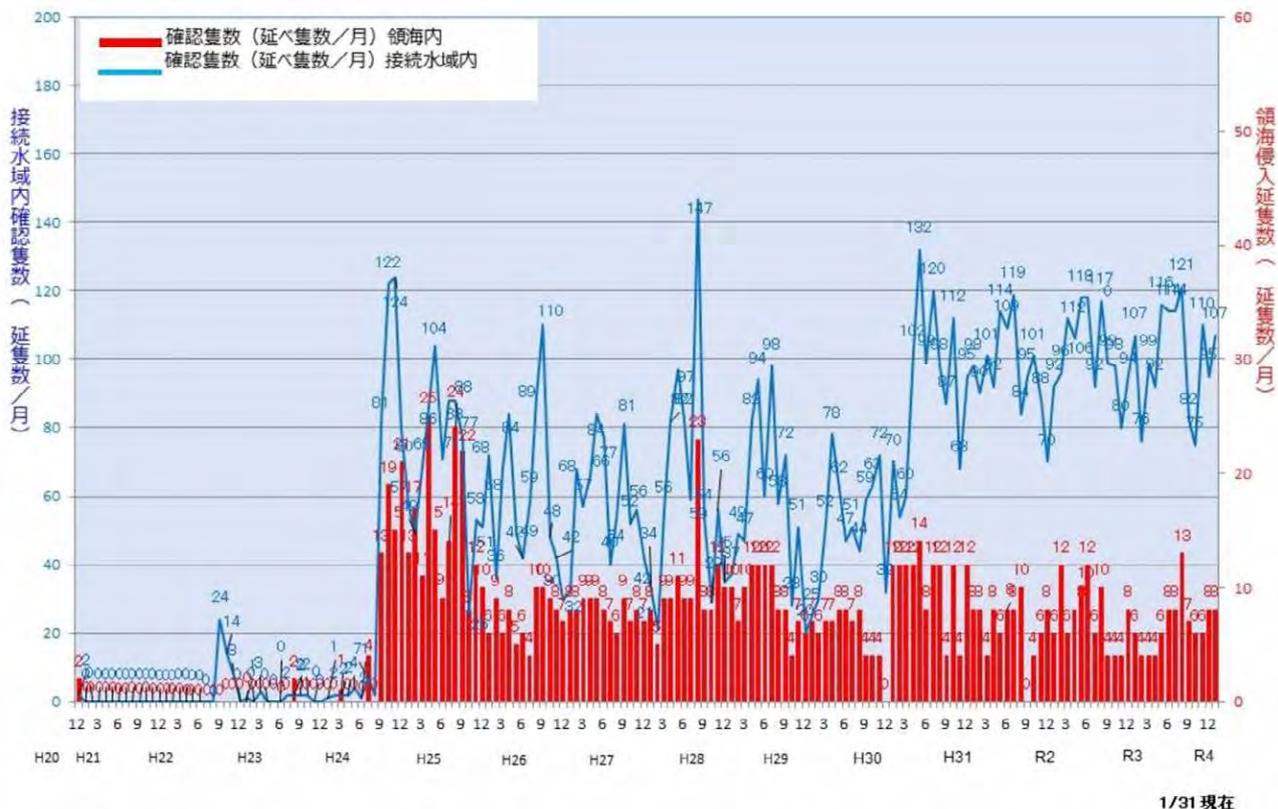


図1-2 尖閣諸島周辺海域における中国海警局所属船舶の動向³

<対策>

国際法に反する中国のこのような行為に対し、我が国は日米同盟を基軸に、毅然とした外交姿勢を示すとともに、法の支配による自由で開かれた海洋という価値観を共有する国際社会と連携した対応を取っている。具体的には、海上保安庁の体制強化に加え、海上保安庁と海上自衛隊等の関係機関との連携を一層強化し、脅威に対して、よりシームレスな対処ができる体制の確立に努めるとともに、同志国とのMDAの連携や能力向上支援を通じた情報共有体制の強化に努めている。

武装した海上民兵への対処も想定されるため、こうした事態にも対応できる海上保安庁の体制強化の継続が必要である。領海不法侵入等に対しては、一義的に警察機関である海上保安庁が対応し、その能力を超える場合は海上警備行動の発令によって海上自衛隊が対応する仕組みになっており、この体制が有効に機能するよう、平成11年から海上保安庁と海上自衛隊が定期的実施している不審船対処訓練等を参考に、更なる連携強化を図っていく必要がある。

武力衝突が生じる可能性は高くはないものの、領海に接近する日本漁船に対しては、安全確保が最優先課題である。

³ 海上保安庁「尖閣諸島周辺海域における中国海警局に所属する船舶等の動向と我が国の対処」. Retrieved from: <https://www.kaiho.mlit.go.jp/misison/senkaku/senkaku.html>

脅威② 船舶に対する安全航行の阻害

<現状>

ソマリア沖のアデン湾及びその周辺海域における海賊対処のため、海賊襲撃事案の多発海域とされる同海域に、海上自衛隊が護衛艦（海上保安官8名が同乗）および哨戒機を派遣している。同海域では、米国や欧州主導等の複数の国際的枠組みが存在し、各国が海賊対処活動に参加して成果を上げている。

<対策>

アデン湾周辺海域における海賊事案の発生件数は減少傾向にある。我が国は、2021年において、護衛艦による護衛活動を17回、P-3C哨戒機による監視活動を196回（飛行時間延べ約1,130時間）、また、情報提供を388回行ったが⁴、こうした活動継続の必要性を検証する段階にきており、我が国の関与を、物理アセット及び人員の派遣から情報の収集及び提供活動に移行させる検討が必要と考えられる。

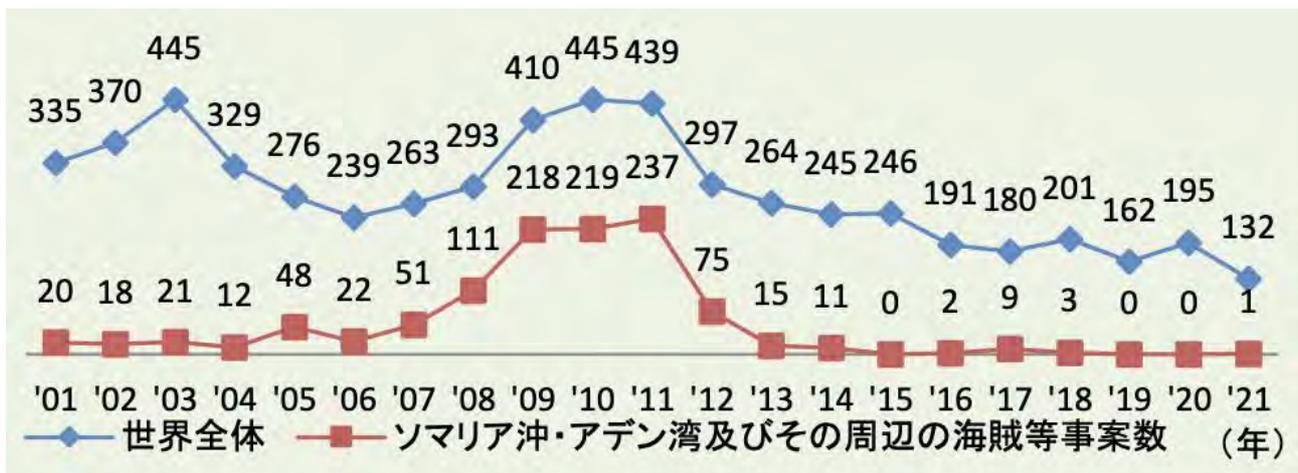


図1-3 世界全体及び、ソマリア沖・アデン湾及びその周辺の海賊事案数の推移⁵

⁴ 内閣官房『2021年海賊対処レポート』（2022年3月）<https://www.cas.go.jp/gaiyou/jimu/pdf/siryu2/report-points2021.pdf>

⁵ i b i d.

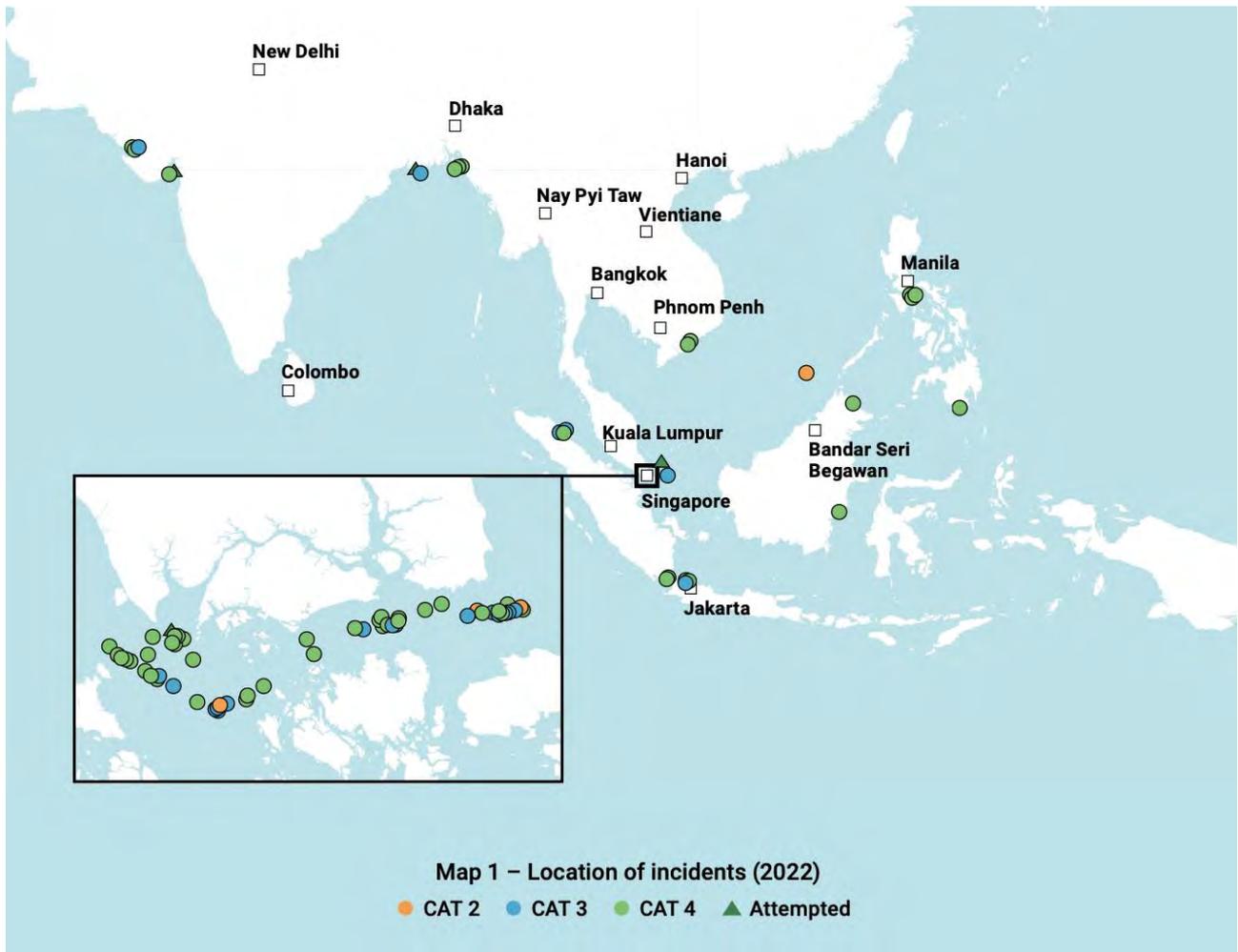
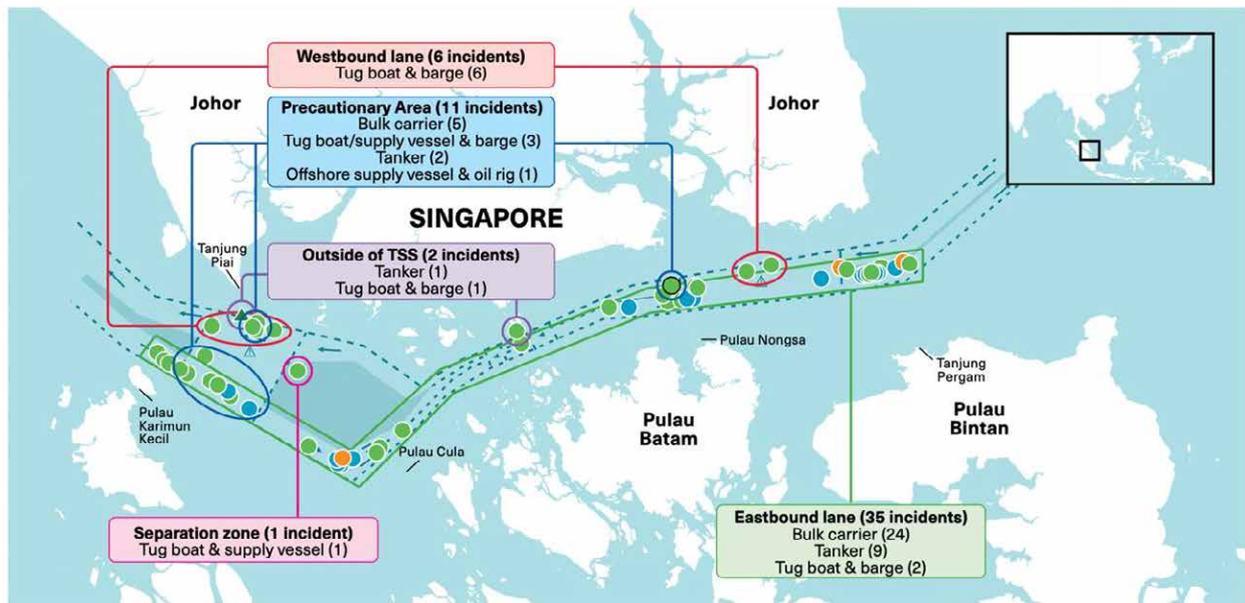


図1-4 2022年に発生した、東南アジア地域における海賊事案の発生状況⁶

*CAT2-4は数字が小さい程重要度が高い。

マラッカ・シンガポール海峡における海賊対処に関しては、沿岸国に対する機器の提供や運用技術指導等の取り組みが必要であろう。特に、シンガポール海峡での海賊行為が近年増加傾向にあり、アジア海賊対策地域協力協定(ReCAAP)との枠組みにより、各国と情報共有を図りつつ、有効な対策を継続する必要がある。

⁶ ReCAAP ISC, *Annual Report 2022*, p. 10.



Map 2 – Location of incidents in the Singapore Strait (2022)

● CAT 2 ● CAT 3 ● CAT 4 ▲ Attempted

図1-5 シンガポール海峡における2022年の海賊事案の発生状況⁷

南シナ海の現状変更を伴う中国の主張に対しては、第一義的に外交的対応を継続することが望ましい。同時に、西側諸国による継続的な警戒監視及び、定期的な共同軍事演習等の実施が重要であるとする。これには、海上自衛隊の継続的な参加が望ましい。

加えて、海洋状況把握（MDA：後述）の連携強化を進める必要がある。海底地形や海中の温度分布等の詳細な調査は、この海域における戦略や戦術を構築するうえでも重要である。

技術的手段として、各種のセンサーによる監視体制を整備するほか、特に海賊事案が多い地域における安全航行情報のリアルタイム配信や共有が襲撃事案の防止につながる。またMDAの項で詳述するが、海上観測や監視のための「衛星によるリモートセンシング」の活用も推進すべきである。衛星によるリモートセンシングで、将来的には小型の船舶まで検出が可能になると期待されており、今後、こうした技術を駆使した海上監視体制の構築が重要となるであろう。また、無人航空機を用いて、海洋状況や船舶動静を把握する取り組みも各国で行われている。さらには、海賊等の攻撃から船舶や生命を物理的に保護するための防弾装備の充実も効果的であろう。2019年の時点において、日本には防弾性能の評価に関する規格が存在せず、国外における規格の調査結果から、階級別に防弾性能を定めているのが現状である。南シナ海や尖閣諸島周辺海域等、緊張度の高い海域において船舶を脅威から保護するには、船舶用の防弾ガラス等の性能の規格を定め、普及を図ることも検討に値すると考えられる。

⁷ Ibid., p. 17.

脅威③ 周辺諸国による武力の行使

<現状>

潜水艦からの弾道ミサイル攻撃の脅威の現状

我が国周辺における潜水艦発射弾道ミサイル（SLBM）の保有国（開発中も含む）は、ロシア、中国、北朝鮮および韓国である。

洋上からの巡航ミサイル攻撃の脅威の現状

陸上に対する海上からの攻撃は、従来の艦砲によるものから、遠距離からの巡航ミサイルによる攻撃が主流となっている。特に、GNSSによる誘導技術の進歩により、安価で高精度の対地攻撃ミサイルの製造が可能になっている。我が国周辺においても、ロシア、中国、北朝鮮が巡航ミサイルを保有しており、北朝鮮は長距離巡航ミサイルの発射を頻繁に行っている。

空母艦載機からの攻撃の脅威の現状

現在、中国は3隻目の国産空母を建造中で、固定翼早期警戒機などを運用可能な電磁式カタパルトを装備する可能性や、将来原子力空母を建造する計画が存在するとの指摘がある。近い将来、外洋作戦能力を有する空母打撃群を編成し、西太平洋上に展開することが予想される⁸。

超音速ミサイル及びその他の脅威の現状

中国は、極超音速滑空兵器や超音速巡航ミサイルの開発を強力に推進しており、軍用の無人艦艇（USV : Unmanned Surface Vehicle）や無人潜水艇（UUV : Unmanned Underwater Vehicle）の開発・配備も進めているとみられる。北朝鮮も大陸間弾道ミサイル（ICBM）の発射を繰り返し、核兵器開発と共に、その運搬手段である弾道ミサイルの開発を進めている。

⁸ 日本国際問題研究所. (2022). 「戦略年次報告2021」 Retrieved from: https://www.jiia.or.jp/strategic_comment/2022/02/17/StrategicAnnualReport2021jp03.pdf

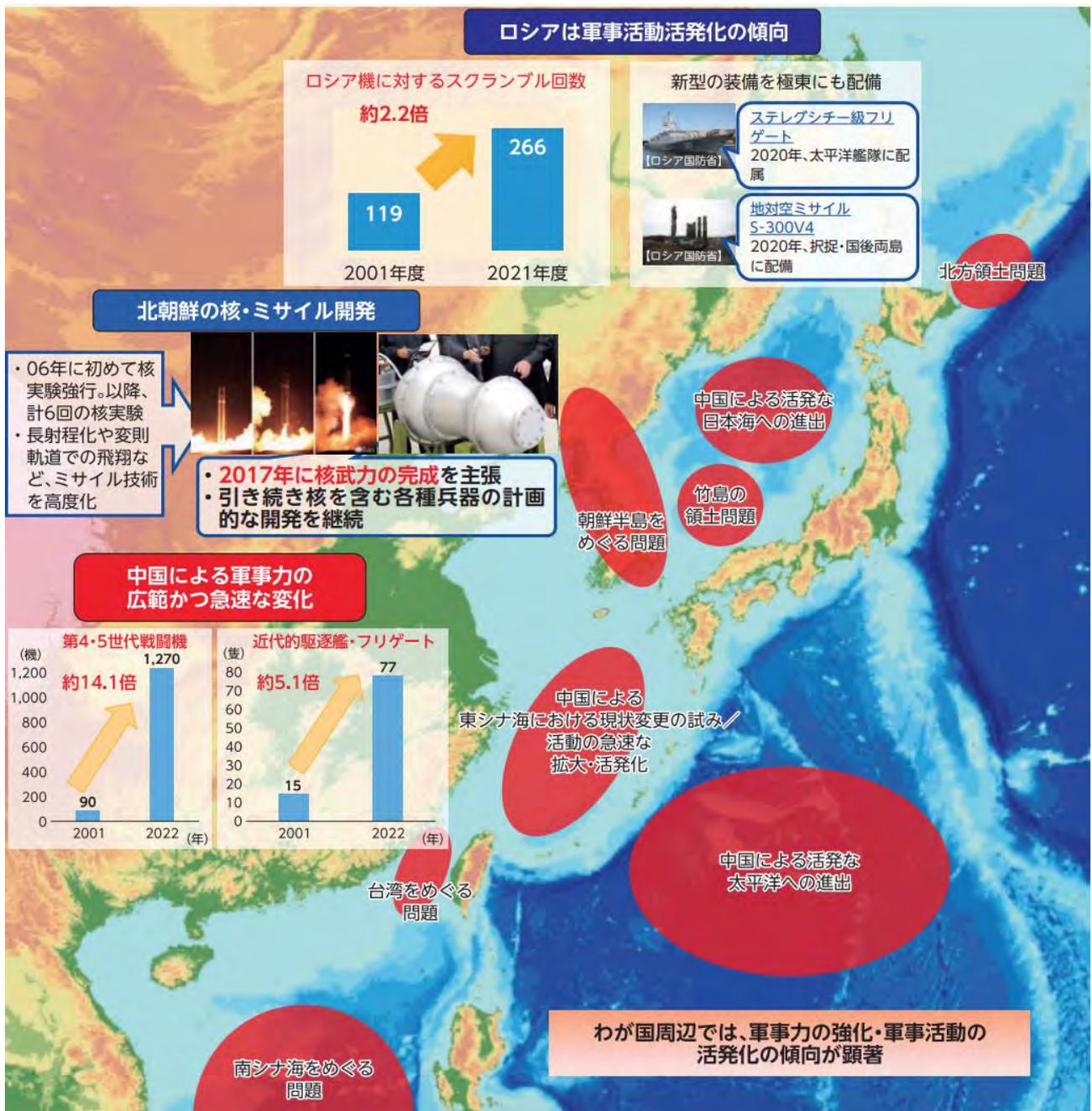


図1-6 我が国周辺の安全保障環境⁹

<対策>

洋上からの巡航ミサイル攻撃への対抗手段として、ミサイルを発射する艦艇に対する常続監視体制が確立されており、護衛艦、哨戒機、複数の衛星等により、24時間の監視が実施できるものの、これらは気象条件の影響を受け、細部の特定による艦船の識別までには至らない。

⁹ 防衛省(2022).「令和4年版防衛白書」. Retrieved from: https://www.mod.go.jp/j/publication/wp/wp2022/w2022_00.html

空母艦載機による攻撃への対応は、発進した航空機の活動を制限することである。国土の陸域に対する攻撃に対しては、航空自衛隊が戦闘機及びPAC-3等により対処し、海上自衛隊がイージスシステム搭載護衛艦等により対処する。上陸侵攻を企図する艦艇に対しては、護衛艦及び哨戒機が装備する対艦ミサイル（SSM）で対処する¹⁰。

米国を含め、西側諸国には極超音速ミサイルに対処する有効な方法はない。無人機に対しては、物理的撃破、サイバー攻撃による無力化などの方法が考えられるが、現時点においては有効な対応策がない状況である。中国、ロシア及び北朝鮮が極超音速兵器の実用化を進める中、日米は、2023年1月に極超音速ミサイルの迎撃技術を共同で研究することに合意した¹²。米国はすでにGPI（Glide Phase Interceptor）計画と呼ぶ迎撃システムの構築に着手しており、迎撃ミサイルの共同開発に向けた検討も開始するとしている。

脅威④ わが国に対する主権の侵害

<現状>

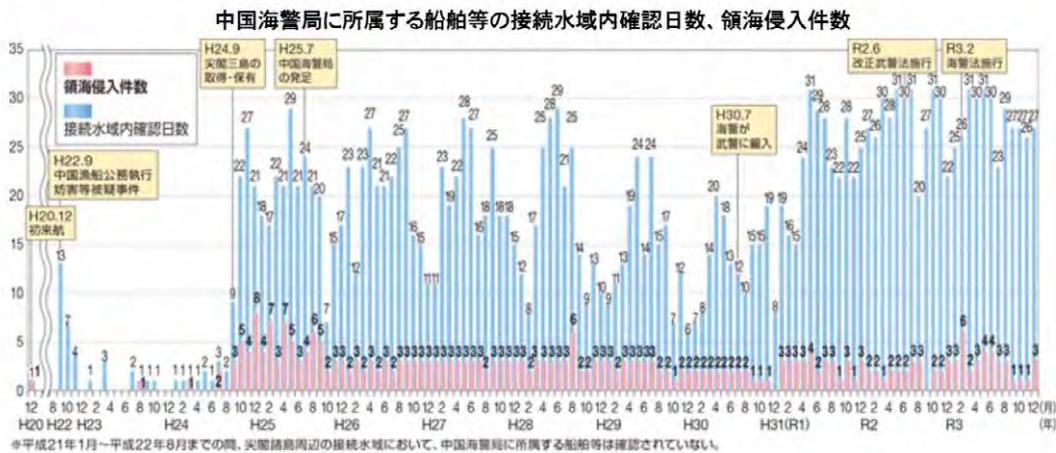
我が国において主権の侵害の発生が想定される差し迫った事案は、台湾海峡の平和と安定に関する問題であり、この場合、尖閣諸島に対する問題が同時に発生する恐れがある。尖閣諸島においては、警察機関である海上保安庁が一義的に領海警備を行っているが、海上保安庁の能力を超える事態が発生した場合、海上警備行動の発令により、海上自衛隊が警察活動を行うよう法整備がなされている。

例えば海上民兵による不法行為が行われた場合、一義的には法執行活動として海上保安庁が対応し、事態がエスカレートしてその能力を超える場合には海上自衛隊による海上警備行動、さらに武力攻撃事態の認定が行われた場合は、自衛隊に防衛出動が下令される。また、重要影響事態が認定された場合は様々な米軍の支援も行われることになる。

¹⁰ 防衛省. (2022). 「令和4年防衛白書」

¹¹ 防衛省・自衛隊. 「各種事態への対応」

¹² Department of Defence. (2023). DOD, Japan MOD Sign Technology and Security of Supply Arrangements. Retrieved from: <https://www.defense.gov/News/Releases/Release/Article/3267110/dod-japan-mod-sign-technology-and-security-of-supply-arrangements/>



中国海警局に所属する船舶等の年間の接続水域内確認日数

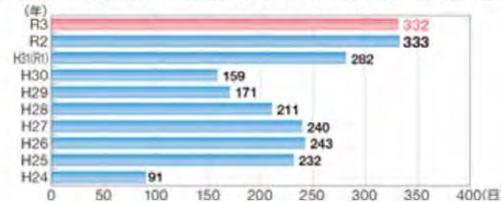


図1-7 中国海警所属船舶の接続水域内確認日数及び領海侵入件数の推移¹³

<対策>

我が国では、海上保安庁と海上自衛隊の役割分担が法令上明確に区分されている。これを前提に、所謂グレーゾーン事態において有効な対処が可能になるよう、共同訓練等を通じて更なる連携強化を図っていくことが必要である。我が国は、南西諸島方面への陸上自衛隊の部隊配置を進めており、これによって侵攻の意図を抑止するとともに、侵攻が行われた場合にそれを撃破する体制を強化する必要がある。

脅威⑤ 占領

<現状>

我が国周辺で、水陸両用戦部隊等による強襲上陸能力を有しているのは中国である。中国では、2022年4月に2隻目の強襲揚陸艦「075型」が就役した。近年、大型ミサイル駆逐艦も複数就役し、台湾海峡での活動を念頭に置いた海軍力の増強が進んでいる。

また、北朝鮮による拉致事件を想起するまでもなく、特殊部隊やゲリラの侵入の監視も十分ではない。過去の事例から、こうした侵入は監視が困難な夜間等に行われることが予想される。

¹³ i bid.

我が国の対応の現状としては、外国の特殊部隊が離島に上陸する事態を想定した対応訓練などを、自衛隊、海上保安庁及び沖縄県警察本部が連携して行っている。我が国領土への武力攻撃である上陸作戦が行われた場合、日米安全保障条約第5条により日米共同で対処することが想定される。



図1-8 中国強襲揚陸艦「075型」(CCTV)

<対応>

夜間等を狙った特殊部隊やゲリラの侵入に対しては、洋上から海岸線まで切れ目なく監視するシステムを構築し、特に光学カメラと赤外線カメラの併用により、夜間の監視能力も備える必要がある。特に海上保安庁や警察等が実施する密輸・密入国の監視においても有効な情報共有体制を構築すべきであり、ここでもMDAの体制強化が望まれる。

自衛隊と海上保安庁の連携にとどまらず、在日米軍及び米国政府と平時から十分な情報共有を行い、机上演習（ウォーゲーム）などを通じ、あらゆる事態を想定した準備を行う必要がある。

脅威⑥ 避難民への対応及び国民の保護

<現状>

朝鮮半島や台湾海峡での有事において想定しておかなくてはならないのは、大量に発生する避難民への対応である。特に北朝鮮からは、漁船等の小型船が数多く来航する可能性がある。加えて、中国には11万人、台湾には約2万人の在留邦人がおり、我が国領土への武力攻撃が同時に発生した場合、自衛隊は前線への部隊輸送に勢力を割かれるため、邦人保護のための輸送の確保が問題となる。台湾海峡での有事が尖閣諸島に及んだ場合、最前線となる沖縄の与那国島・宮古島・石垣島等の、10万人を超える国民の保護も重要な課題である。

対策として、どのような形態の攻撃を受けた場合でも対処できるように、国民の被害をできる限り抑えるためのシミュレーションが政府において現在進められている。

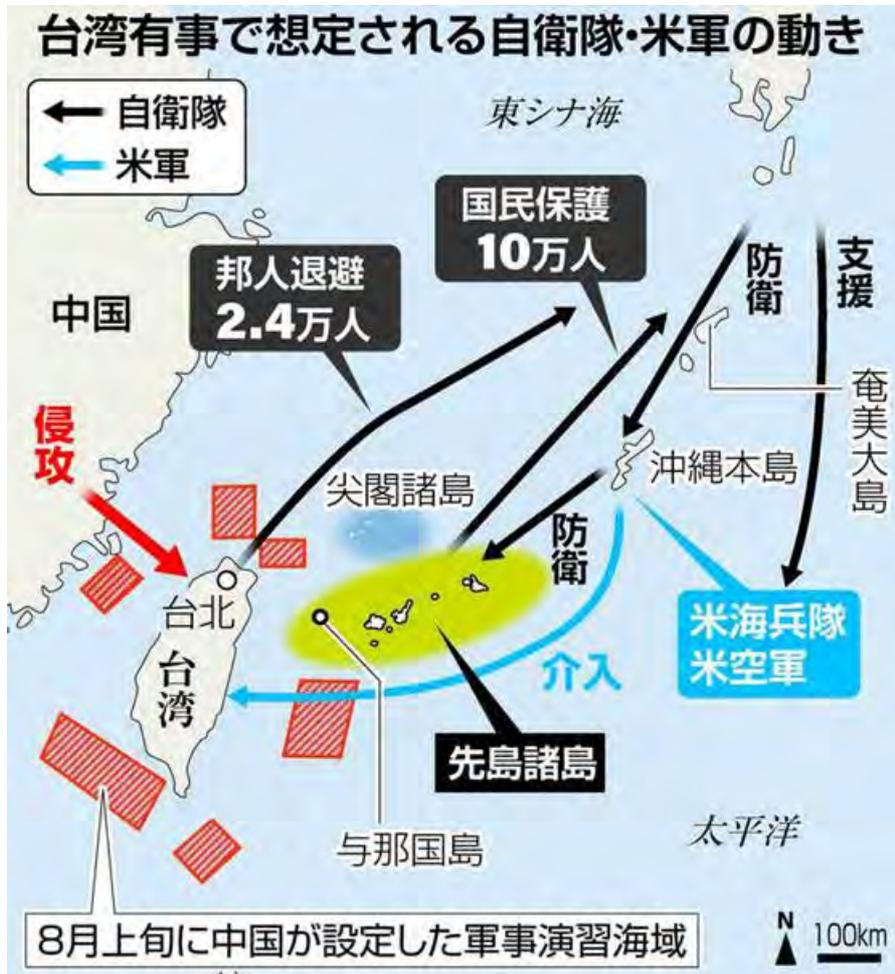


図1-9 台湾海峡における有事の際の自衛隊・米軍の動き(産経)

<対策>

日本に来航した避難民を送還することは人道的観点から難しく、難民認定までの保護施設、認定後の生活保護などの問題が生じるため、大量の避難民への対応は大きな課題である。加えて、国民保護に係る対応として、各自治体単位の訓練に加え、先島地区及び沖縄本島地区においては、島外避難も含めた、自治体をまたがる訓練を実施する必要がある。自主的退避では間に合わない可能性が高く、早期に退避できる仕組み作りが急務である。事前に兆候を掴み、早期に航空機や船舶を手配することが最善の対策であることから、やはり平時のMDA強化が望まれる。同時に、大量の避難民に対する対応についても、あらかじめ各自治体と連携したシミュレーションを実施しておくことが望ましい。

第2節 物流

脅威① 事故

海運は国内外の貨物輸送の大半を担っており、各国の経済のみならず、国際的な経済の枠組を確保するためにもその安定維持が不可欠である。一方で累次の海難で環境中に放出された積載物、特に積載油や燃料油による海洋汚染は甚大なものであり、船舶の事故を極少化することは、経済及び環境の両面から極めて重要である。

衝突、座礁、沈没、故障等の海難やハイジャック等の原因として、操船ミス（人的要因）、海図の誤り（調査不足）、気象海象（自然）、船体構造（技術）、海賊（外部からの攻撃）等が挙げられる。

船舶事故は、物流を阻害することで、社会の経済活動に大きな影響を与え、事故により生じる環境破壊は社会への重大な脅威となる。以下に、事故を回避するための対策を、有効性の順に示す。

<船舶運航の自動化>

船舶運航の自動化（機械による操船支援）により、

- 1) 海事事故原因の多くの割合を占める人的要因を極小化できる。
- 2) 船員不足問題への対策となりうる。

さらに、究極的な自動化である無人化が実現すれば、

- 1) 船員の質的・量的課題（過誤による事故を含む）を解決できる。
- 2) 人間の乗船に必要な構造上の要件や、運航に伴って生じる負荷（居住区画・医療・食事・水の確保、排水・廃棄物対策等）を無くすことができ、船体構造の合理化と運航費の削減が可能になる。
- 3) 入り口や窓を必要とせず、海賊の襲撃に対して有効である。
- 4) 人間の心理に対する配慮が不要なため、全水没型の船型によりエネルギー効率を大きく高めることができる。

このため、船舶運航の自動化は、最終的な無人化を目標に全力を挙げて進めるべきである。このための技術的課題としては、以下が挙げられる。

- 1) 位置情報が極めて重要になるため、GNSSが機能しない場合に備えた独立の測位システムが必要である。
- 2) 周辺状況を把握するための高度なセンサーが必要である。
- 3) 状況把握及び異常事態発生時に陸上から操船するため、陸上との間に広帯域かつ信頼性の高い通信手段が必須である。
- 4) 無人での完全自動操船には、大量の情報を迅速に処理し、自律的に判断して操船する能力が必要である。陸上から操船する場合であっても、陸船間の通信が途絶した場合に自律的に安全を確保するAI機能が船側に必要である。

完全無人運航の場合、制度的課題も検討が必要である。現在の海事法制は船員の乗り組みを前提としているため、無人船の運航においては、船長の責務・責任を誰が負うことになるのか等、国内外の海事関係法制度の見直しが必要である。

<船体構造の高度化>

過酷な気象・海象下で発生する転覆や船体損傷による沈没は、気象・海象を正確に予測することで、ある程度の対応が可能である。また、想定される最も過酷な条件においても転覆や損傷を生じない船体構造（及び操船技術）も不可欠である。

こうした要件を満足しないサブスタンダード船の排除は重要であるが、一方で我が国の造船所が建造した船齢5年のMOL COMFORTの船体に異常を生じたことから、船体構造については、一層の知見の向上と制度化が必要である。

この際、脱CO₂の流れを受けた帆走船、水没型船等、従来にない船型も考慮する必要がある。また、LNG、水素、アンモニア、電力等、重油以外のエネルギー源を使用する船舶では、エネルギー貯蔵庫の位置、容量、形状が従来船と異なるため、これらを含めた考慮が必要である。

<巨大海洋波(Freak Ocean Wave)の解明>

船舶運航にとって極めて危険なフリークウエーブについては、どのような原因により、いつ、どこで発生するか、という地球物理学的研究を進展させる必要がある。一方で、フリークウエーブの発生状況をリアルタイムに把握するためには、高分解能の海面高度の把握が有効である。これは、合成開口レーダー（SAR）による海面高度の常時観測と、これによって得られる膨大な量のデータを即時に解析することで可能になると考えられる。

<サブスタンダード船対策>

サブスタンダード船を排除する方向に働く、効果的な逆インセンティブを制度として確立することが必要である。

一方で、我が国のEEZ内に存在する全ての船舶の形状と挙動を把握することで、サブスタンダード船をある程度抽出することが可能である。このため、EEZの全域にわたり、船舶の高解像度の画像・形状情報を取得し、リアルタイムで解析することが考えられる。

脅威② 船舶の安全航行の阻害及び海賊・テロ行為

<航行の自由の確保>

海運の安定維持は、国際的な経済の枠組を維持するために不可欠である。船舶の安全運航を阻害する要因の一つに海賊・テロ行為が挙げられる。これらを抑止するため、国連海洋法条約の規定の実効性のある担保が必要である。一方で、我が国のEEZ内に所在する全ての船舶の形状と挙動を把握することで、サブスタンダード船を抽出可能と考えられ。このため、EEZの全域において、船舶の画像・形状情報を高分解能で常時取得し、リアルタイムで解析することが考えられる。

<海賊対策>

海賊行為は、沿岸国の経済活動の一部となっている面があることから、沿岸地域に対する経済支援や経済発展の実現により、地域の人々がリスクのある海賊行為に関与する必要のない社会の形成を支援することが有効である。

<テロ対策>

テロについては、海上における各種の活動を把握するための高分解能モニタリングが有効である。また、海底の状態の把握（AUVのサイドスキャンソナーによる定期的自動測量等）により、海底の経時変化から、機雷敷設等の敵対的行為の可能性のある異常を検出でき、これは既に米国で実施されている。

<特記事項 AUV>

AUV（自律型無人潜水機）については、以下の項目において有用性を指摘した。

3-2	テロ対策	海底の定期観測
5-1	地震・津波	海底地形・地質の高分解能測量
5-4	メタンハイドレート	海底表面の高分解能繰り返し観測

AUVの活用を阻む原因として、以下が考えられる。

1)	高価格	入手の困難性
2)	母船からの常時監視が必要	亡失対策
3)	電源供給	定期的な船上回収の必要性
4)	揚収	荒天を常に意識する必要

安価なAUVが利用可能になれば、母船から多数（N機）を同時運用することで、母船のオーバーヘッドコストをN分の1にできる。また、価格が十分に安くなれば、亡失を恐れて母船から常時監視する必要性がなくなること（母船の張り付きを必要としないため飛躍的に運用費を低減できること）も指摘したい。

電源を海底の基地、または海中の給電プラットフォーム（母船やASV（自律型無人洋上機）から海中に吊り下げたもの）から供給できれば、定期的な揚収が不要になる。また、海中または海底で電源を供給できるようになれば、安全サイドに（突然の荒天で揚収できないうちに電力不足で回収できなくなる事態を避ける）作業計画を作成・変更、すなわち天候悪化を予測して作業を中断し、AUVを回収する必要がなくなり、作業効率と経費効率が大きく向上する。

ASVが多数のAUVの監視、給電及びデータの吸い上げを行えるようになれば、母船はAUVの投入とミッション完了後の揚収のみを行えばよく、母船関連の経費を大きく下げることができる。

脅威③ 情報・通信障害

<現状>

情報伝達の障害は、船舶の安全航行の致命的な問題となる。情報や通信の途絶は、政治情勢や自然現象によっても発生しうる。

GPSによる位置情報は、船舶運航はもとより海上工事や法執行等、海事のあらゆる場面で不可欠なものとなっている。一方、GPSはシステムを運用する米国が、精度や可用性まで制御可能であり、有事の際の精度劣化や、全く使用不能になる可能性もあることもありうることに留意が必要である。また、電磁パルス攻撃に対して脆弱で、さらに大規模な太陽フレアが発生した場合、GPSや我が国の準天頂衛星を含め、衛星航法システム（GNSS）は悉く機能を失うと言われている。

GNSSに依存しない測位方法としてはロランCやオメガがあるが、オメガは1997年に運用を停止し、現在ロランCを運用しているのはサウジアラビア、インド、中国及び韓国のみである。英国及び米国は、GPSの脆弱性に鑑み、安全保障の観点からロランCを改良したeロランの運用を計画し、韓国は北

朝鮮からのGPS妨害を受けているため、米国のeロラン計画に賛同した。しかし英国はノルウェー及びフランスがロランCの運用を停止したこと、また米国はオバマ政権がGPSで十分であると決定をしたことで、いずれも運用段階に入ることはなかった。

<問題点>

衛星測位システム (GNSS) の安定性

GNSSの信号は、スペクトル拡散という手法により暗号化されているため、運用者のコード制御によってGNSSを使用不能にすることが可能である。しかしながら、米国が民生用のGPSを突如使用不能にすることは考えにくい。以前は、有事において米国がSelective Availabilityによる意図的精度劣化を行う可能性があったが、2007年の米国大統領令でSAの機能を持つ衛星を調達しないこととなったため、GPSの現在の精度は今後も維持されると考えて良いと思われる。しかし、中国の「北斗」やロシアの「GLONASS」については、この点が明確ではない。

一方、太陽フレアや意図的な宇宙での核爆発による電磁パルスによりGNSSが機能を失うことは想定しておく必要がある。太陽フレアは今後強くなることが予想されている。また、核爆発によって、強力な電磁パルスが生じ、電子装置が影響を受けることが知られている。このように本質的に脆弱なGNSSを補完する必要が指摘され、eLORANと呼ばれる強化型のロランCが開発され、2014年から英国で運用が開始されたが、隣接国がロランCの運用を2015年末で停止したため、eLORANもこれに合わせて運用を停止してしまった。ただし、英国は依然として研究開発用にeLORANの電波を現在も送信している。eLORANは位置精度が8m程度と報告されており、GPSの補完が可能と考えられている。

一部の海域ではセーフティネットとしてロランCが維持されているが、世界中をカバーするものではない。現在、ロランCを運用している国は、サウジアラビア(3局)、インド(4局)、中国(6局)及び韓国(1局)だけである。

リアルタイムの正確な位置情報を前提にした、電子海図を始めとする運航システムが船舶で用いられており、GNSSが利用不能になると、船舶の安全運航に深刻な問題が発生する。これを代替する測位システムが事実上存在しない現状では、ほとんどの船舶の安全運航が極めて困難になる。特に船舶の自動運航化においては重大な課題である。ロランに先立ちオメガも廃止され、現在外洋航行する船舶が位置決定に使える手段は天測だけであるが、国際条約で天測暦等天測に必要な書籍を船舶に備置する義務がなくなり、海上保安庁は天測暦等の書誌の刊行を令和4年末で廃止した。このため、天測による位置決定は困難になっている。なお、GNSSへの過度の依存は航海だけの問題ではなく、航空においては一層深刻な問題である。

スペクトル拡散方式を用いるGNSSは、原理的に妨害に強いとされているが、偽信号や妨害信号によりGPSが使用不能となった現象は既に報告されており、近年では北朝鮮国境付近で航空機が位置情

報を失ったとの報告がなされている。また、太陽フレアや意図的な宇宙での核爆発によりGNSSが機能を失うことを想定した代替システムの構築を急ぐ必要がある。我が国の準天頂衛星はGPSを補強・補完するものとされているが、太陽フレアや核爆発に伴う電磁パルスに対してはGPS同等脆弱であり、この点ではGPSを補完できるものではない。

<今後検討を要する事項>

- 1) GNSSを補完・代替する測位システムの検討
- 2) GNSSが使用できなくなった場合の危機対応策の検討
- 3) 海底ケーブルの脆弱性対策の検討

1) GNSSを補完する測位システム

我が国では、準天頂衛星「みちびき」がGNSSを補強・補完する機能を有している。また、高度約20km以上の高度に滞空する成層圏プラットフォーム（成層圏気球やソーラープレーンなど）により、GPSが機能しない場合でも高い精度を得られる、わが国独自の測位システムを構築することも可能である。こうしたシステムは、GNSSとの互換性を持たせ、通常時はGNSSの補強システムとして活用することが適当である。このようなシステムにより、GPSの機能低下時においても測位精度を維持でき、平時においてはGPSの精度を補強できる。ただし、電磁パルス攻撃や大規模な太陽フレアの際には、GPS同様に機能しなくなる。成層圏プラットフォームについては後述する。

あるべき姿及び具体的対処

GNSSが利用不能になった場合でも、船舶の安全運航を継続することができる測位システムを整備する。候補としては、衛星コンステレーション（多数の小型衛星群）による独立した宇宙通信システムや、携帯電話の基地局等として開発が進められている成層圏プラットフォーム（HAPS）への測位機能の付加、地上波を利用するeLORAN等がある。これらを活用し、非常時用の測位手段を確保する。なお電磁パルス攻撃や大規模な太陽フレアが起きた場合、電子装置はいずれも使用不能になる可能性があり、地上系の測位システムであるeロランも機能しなくなる可能性がある。このような場合に何が起きるか、どのようにすべきかの検討も必要であり重要である。

現在の技術レベル

GNSSの補完・代替には、衛星コンステレーション、成層圏プラットフォーム、廃止されたロランの再構築等が考えられる。

今後の見通しについて、前2者は日本のみでは構築困難で、アライアンスによる管理が必要となり、後者はコストが比較的安い精度とカバレッジに限界がある。

衛星コンステレーションについては、Starlinkなどの高速通信網が整備されつつあるが、GNSSの補完という観点からは、簡易なシステムであることが望ましい。船舶の位置情報を送信するAIS（Automa

tic Identification System) が、双方向データ通信が可能な、AIS2.0ともいべきVDES (VHF data exchange system) に今後置き換わる見込みである。VDESは、約60機の衛星で全球をカバーするが、このシステムの「R-Mode」は簡易な測位が可能である。VHFを使用するため、ホイップアンテナで受信可能であるが、測位精度は劣る。現在は試験段階であるが、すでにノルウェーは試験衛星を運用した経験を有し、今後数年で、我が国も含めかなりの数のVDES衛星が打ち上げられる計画であり、システム構築のための先行投資の一部として利用できる。民間企業を中心とした国際アライアンス (VDES alliance¹⁴) および日本国内の企業を中心としたVDESコンソーシアム¹⁵が2022年に創設され、活動を行っている。

成層圏プラットフォーム (HAPS) とは、飛行船やソーラープレーンを利用して、高度約20km以上の成層圏に滞空するプラットフォームである。成層圏とは、地球大気の鉛直構造において対流圏と中間圏の間に位置する、高度11~50kmの空間である。

日本では、1999年からミレニアム・プロジェクトのひとつとなり、総務省 (NICT)、文部科学省 (JAXA、JAMSTEC) などの組織を横断した研究開発が行われた。JAXAおよびNICTで2種類の試験機が開発され、2003年には高度16キロメートルまでの上昇、2004年には全長68メートルの試験機による高度4キロメートルでの定点滞空を実証したが、同時期に地上通信網が整備されたため、通信基地および中継基地としての可能性が低いと判断され、プロジェクトは終了した²⁾。

2019年4月、ソフトバンク株式会社は、子会社であるHAPSモバイル株式会社による事業に着手し、米エアロバイロンメント社の協力のもと、高度約20キロメートルを飛行可能な無人航空機「HAWK30」を開発したことを発表した²⁾。鉄塔型の地上基地局の削減及び、通信圏外となるエリアを大幅に減らすことができ、山岳部や離島などの地上基地局の設置が困難な場所での通信を可能とすることを目指している。また、ISR (偵察監視) 用のペイロードを搭載し、MDAのプラットフォームとする可能性も視野に入れている。

現在の技術では、一般的な基地局が通信可能な範囲は、直線距離にして約100km程度と言われているが、高度約20kmの成層圏に基地局を1つ配置すると、半径約100kmの範囲が通信圏となる。そのため、数多くが必要な地上基地局に比べ、約40機の「HAWK30」で日本列島全体をカバーできるとしている。

この成層圏プラットフォームは、ソーラーパネルを搭載した全長約78メートルの翼に10個のプロペラを備え、平均時速約110キロメートルで飛行する (図2-1参照)。このプラットフォームが実現した背景には、太陽光発電や蓄電技術の進展ある。携帯電話の基地局を搭載したHAPSを飛ばし続けるには、太陽光による発電エネルギーを蓄積して夜間も飛行を継続し、信号を送受信できる仕組みも必要である。サービス維持に必要な電力の確保、消費電力の低減、軽量化といった先進技術の組み合わせにより、無人空中基地局の実現に向けた取組が進められている。

¹⁴ <https://www.vdes-alliance.org/>

¹⁵ <https://www.jmd.co.jp/article.php?no=281558>



図2-1 成層圏通信プラットフォーム向け無人航空機「HAWK30（ホーク30）」
(出典：参考文献3)

ロランの再構築には地上局が必要である。最大の課題は船舶等に専用受信機を用意しなければならない点で、これはGNSSのバックアップ以外に用途がなく、eLORANの普及を阻んでいる。一方で、我が国周辺海域をカバーでき、完全に我が国がコントロール可能なシステムを構築できることは利点である。

対処に必要な技術要素

衛星VDESのシステム構築が検討されているが、国際的な運用やデータを管理する機構やシステムのあり方は未定である。異なる国の衛星間でのローミングを可能とし、データの秘匿性を確保しつつ、事業者の利便性を実現するための制度や規則が必要である。

現時点において、成層圏プラットフォームの技術は完成に近づいていると考えられるが、空気の薄い成層圏で機体を定点維持する技術の確立が必要である。さらに、商用のプラットフォームに国家の安全保障機能を共存させる仕組みづくりも必要である。

上述のとおりeLORANは、GNSSのバックアップのみを目的としており、単なるバックアップシステムでは維持管理に限界がある。構築費用の抑制やデュアルユース、トリプルユースといった、多様なユースケースを実現する技術が求められる。

2) 海底ケーブルの脆弱性対策の検討

海外との情報通信は衛星経由と海底ケーブル経由があるが、遅延の少なさ、通信容量の大きさから、大半が海底ケーブルを通じて行われている。海底地滑りによる海底ケーブルの切断は1929年にカ

ナダ沿岸で発生したものが有名である¹⁶が、台湾地震、東北地方太平洋沖地震、トンガでの噴火でも海底通信が途絶している。自然災害だけでなく、投錨や底引き漁業で海底ケーブルが損傷することもある。我が国においても揚錨時に海底ケーブルを引き上げてしまって断線させ、国際通信が途絶した例がある。投錨や底引き網漁業によるケーブルへの損傷を防ぐため、海底ケーブルの敷設位置は海図に記載することとされている。これは、海図情報をもとにケーブル位置を把握し、意図的に海底ケーブルを損傷させることが可能ということでもある。一例を挙げれば、台湾本島と馬祖列島を結ぶ海底ケーブルが2023年2月に7日間で2回切断され、いずれも中国船が通過した時間帯であったとの報告がある¹⁷。全ての船舶の位置を常時監視することで、ケーブル直上での停船を把握することは可能と思われるが、ケーブルが損傷する前に対応することはほぼ不可能である。

海底地滑りや海底噴火による海底ケーブルの断線を防ぐことも困難である。こうした原因による海底ケーブルの切断は今までに世界各地で経験されているため、海底ケーブルの敷設に当たって経路選定の際にある程度の配慮はなされている。しかし地滑りや乱泥流は発生場所が予測できないこと、発生する可能性がある範囲が極めて広域に及ぶこと、埋設しても埋設深度が浅い場合切断を避けられないこと等から、ケーブル切断の回避は現実的には不可能で、地震・火山噴火による海底ケーブルの断線は引き続き発生している。このため、海底ケーブルの敷設経路の冗長化等を検討する必要がある。



図2-2 東北地方太平洋沖地震の際の海底ケーブルの障害¹⁸

¹⁶ <https://www.earthmagazine.org/article/benchmarks-november-18-1929-turbidity-currents-snap-trans-atlantic-cables/>

¹⁷ <https://www.yomiuri.co.jp/world/20230218-0YT1T50017/>

¹⁸ <https://www3.nhk.or.jp/news/html/20210309/k10012904451000.html>

脅威④ 燃料供給の遮断

船舶の多くは燃料に重油や軽油を使用しているため、石油の安定供給が滞ると運航できなくなる。船舶運航以外にも、我が国の経済活動のあらゆる部分で石油が使用されており、石油の安定供給に支障が生じた場合、船舶運航の停止に留まらず、社会活動全般に甚大な影響が生じるため、燃料供給の遮断という事態への対策は本稿の域を越える。

石油の安定供給が阻害されることへの対策は、脱CO2対策により一部実現しつつある。すなわち風力利用、液化天然ガス燃料、電気推進などである。石炭を燃料とする蒸気タービン推進も脱石油対策ではあるが、脱CO2と相容れるものではない。原子力推進は燃料供給遮断の懸念が殆どなく、また脱CO2にも寄与するものでもある。三菱重工業が開発中の超小型原子炉（直径1m、長さ2m）は電力出力が500kW（666馬力）とされており、このようなマイクロ炉を船用に開発することは可能であろう。ちなみに原子力船「むつ」の出力は1万馬力であった。

燃料供給の遮断としては、エネルギー源の変遷の過程における供給のミスマッチにも考慮する必要がある。海上交通において脱CO2を実現するのが、電力船か風力船か水素船かアンモニア船かネットゼロ船であるかを現時点で見通すことはできないが、いずれにせよ、将来のある時点で石油の供給が先細りし、代替燃料がその時点の需要を満たすことができない可能性もある。このため、海上物流において燃料の奪い合いが生じる可能性を考慮しておく必要がある。

紛争や戦争により石油の輸入が完全に止まった場合に備え、海上の物流維持に必要な燃料の確保策を、配送方法も含めて検討しておくことは重要である。

<特記事項 海洋温度差発電>

脱CO2対策や燃料供給遮断への対応として、船舶の動力源に電気を使用することは有効である。一方、現在の電力は6割が輸入に依存する石炭、LNG及び石油であり、セキュリティ上の課題を抱えている。再生可能エネルギーは増加しつつあるが、天候等に左右されるため、ベースロードを支えるためには揚水発電等の二次電池が不可欠である。

この状況に対処するため、我が国独自のエネルギーとして海洋温度差発電を強力に推進すべきである。風力や太陽光と異なり、海洋温度差発電は安定して大規模な電力を供給できるため、ベースロード電源とすることができる。

海洋温度差発電は、表層の温かい海水と深層の冷たい海洋水の温度差を利用して発電する技術である。表層の温水で作動流体（アンモニア等）を蒸発させてタービンを回し、深層から汲み上げた冷水で作動流体を液体に戻す。このサイクルは火力や原子力発電所と同じであるが、低温熱源として約5～10℃の深層水（冷海水）、高温熱源として約20～30℃の表層水（温海水）を使うことが異なる。

温水と冷水の温度差が15度程度あれば、深層から汲み上げるのに必要なエネルギーを上回るエネルギーが得られる。発電機を陸上に設置する場合、深層水の揚水用のパイプの距離を（設置コスト低減、揚水中の温度上昇の回避のため）短くする必要があり海岸から急峻な海底地形の場所を選ばねばならない。発電機を浮体に設置すれば深層水のパイプ長を最短にでき、汲み上げるエネルギーを極少化できる。台風が来ない赤道周辺に浮体式の海洋温度差発電所を設置し、得られたエネルギーを液体化し

てタンカーで我が国に運ぶ方法により、大容量の備蓄可能なエネルギーを得ることができる。なお発電方式は①オープンサイクル、②クローズドサイクル、③ハイブリッドサイクルの 3 種類がある¹⁹。クローズドサイクルの例を図示する（図2-3）。

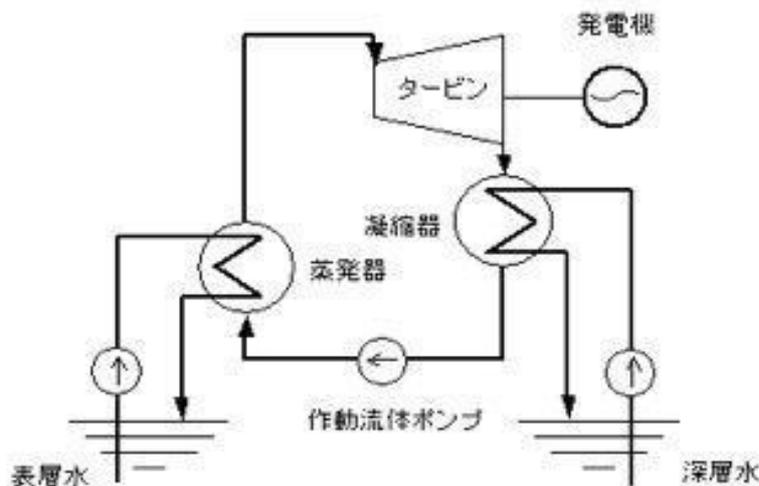


図2-3 クローズドサイクルの例²⁰

環境省の2008年の報告書では、2050年時点で海洋温度差は40TWhと見積もられ、これは80TWhと見積もられている洋上風力に匹敵する。現在久米島で小規模な運転がされており、その規模での技術的問題は報告されていない。海洋温度差発電は大規模にするほど効率が急激に良くなるが、大規模な設備の初期投資が大きい実用化へのハードルが高い。このため、大規模設備の実証のための投資が必要である。

海域が平穏でかつエネルギー効率のよい赤道周辺海域（表面温度が年中高い海域）での浮体による海洋温度差発電は、赤道周辺の島嶼国の支援にもなる。このため、大規模な浮体式海洋温度差発電の実現に向けた技術開発（浮体・係留システムの開発、エネルギーの液化・再気化の飛躍的効率向上）を強力に推進するべきである。あわせてこれら島嶼国海域での海洋温度差発電に向けて、国際環境を醸成して行く必要がある。

発電で得た電力で水素を製造し、アンモニアやシクロヘキサンのような常温の可燃液体に変換すれば、石油同様備蓄や運搬が可能なエネルギーとなる上、化石燃料からの脱却が困難な航空機のみならず、船舶、自動車等多くの移動体のエネルギー源として化石燃料を代替できる可能性があり、このための技術開発を強力に推進するべきである。

¹⁹ 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構。「海洋温度差発電の技術の現状とロードマップ」. NEDO再生可能エネルギー技術白書. Retrieved from: <https://www.nedo.go.jp/content/100107275.pdf>.

²⁰ 佐賀大学海洋エネルギー研究所. Retrieved from: https://www.ioes.saga-u.ac.jp/jp/ocean_energy/about_otec_0/about_otec_02

脅威⑤ 地震・津波・その他の災害

<海洋観測の飛躍的な充実・強化>

地震の発生予知は、観測点が稠密な陸上においても実現していない。一方、海上では弾性波探査（音波探査）が陸上に比べて容易なため、伏在断層を含めた断層を発見・特定することが、陸上よりも技術的に容易である。高密度・高分解能の音波探査及び地形調査によって海底断層の全体像を明らかにすることは、防災・減災対策に資するものである。

大規模な津波を発生させる海域の大規模な活断層は、海底に明瞭な地形のシグナルが現れているため、高分解能の海底地形調査とこれに引き続く反射法弾性波探査で得られる情報が有効である。また、大規模な津波は海底地滑りによっても発生する。海底地滑りの発生歴や発生の可能性を明らかにするためには、高分解能の海底地形情報・表層地質情報が有効である。

深海では、高分解能の地形情報・表層地質情報を得るためAUVを使用することが最も現実的であり、AUVを用いた観測システムの確立は有効である。

海底火山の噴火予知は、地震計による火山性微動の観測により、ある程度可能である。噴火の可能性のある海域では地磁気の異常が見られるため、地磁気探査の結果をもとにオンラインの地震計やハイドロホンを敷設し、常時監視することが有効である。ただし、噴火が起こる地点と時期を予知するための科学的知見は未だ十分とは言えず、今後10年間での詳細な予知は困難と考えられる。

フリークウエーブの研究においては、気圧、風、海・潮流及び海底地形に関する空間的・時間的な高分解能のデータが必要である。また、そのようなデータによって明らかにできることを専門家が提示する必要がある。一方、どのようなフリークウエーブ予報が必要であるかを専門家に伝える必要もある。フリークウエーブによる災害を防止するには、前述のように高分解能・リアルタイムのモニタリングによる海面高度情報が有効で、これについては後述する。

<東日本大震災の復旧に従事した現場担当者の知見のレビュー>

東日本大震災の現場復旧に関する多くの報告書がまとめられているが、これが集団知として体系的に共有、あるいは東南海で被災の蓋然性が高い自治体や組織において適切に活用されているとは言い難い。現場での復旧に従事した担当者の知見は価値が高く、記憶が失われる前に、これをビッグデータとして整理し、今後に生かすべきである。

<海底ケーブルの複数経路化>

情報化社会において、通信の断絶は大きな経済的損失をもたらす。海底に敷設された通信ケーブルは、複数経路による冗長化がある程度行われているが、ノードが被災した場合は影響が避けられない。このため、海底ケーブルの破断に対して取りうる対応、あるいは対応の可否について検討し、更なる冗長化を進めるべきである。

<メタンハイドレートによる船舶交通への危険>

メタンハイドレートは一定の圧力と温度の条件（高圧・低温）が満足されないと水とメタンガスに分離し、メタンガスを放出する。このため、地震による海底地滑りで上層の土砂が削剥されると下部にあったメタンハイドレート層の圧力が下がりメタンガスが放出される可能性があり、また、温暖化等の影響で地底温度が上昇するとメタンハイドレートが分解しメタンガスとなることが懸念されている。我が国周辺においてもは、地中及び海底表面のメタンハイドレートが海底を離れた（ガスとなって浮上した）痕跡が残っている海域がある。仮にメタンガスが海底から大規模に放出され、メタンガスのプルームが海面まで上昇すれば、航行船舶に危険が生じる恐れがある。すなわち、プルーム内にはメタンガス気泡が多いため海水の密度は低くなり、船舶の浮力が減少するため、プルームに船が遭遇すると突如海面下に落ち込むことになる。確認されてはいないが、バミューダトライアングルにおける船舶の消失は当該海域に賦存するメタンハイドレートの暴発のせいではないか、との説がある。この説の指摘に応じて米国は海底の調査を行なったが、消失した船舶は発見されなかった、とされている。ただ、この調査が海底に埋もれた船舶を見つけるだけの精度と分解能とカバレッジを持ったものであったかは疑問であり、メタンハイドレート暴発説が否定されたとは言い切れない。南海トラフ沿いのメタンハイドレート稠密賦存域の上方海面は我が国の経済活動を支える船舶の主要な航路である。大規模な地震がこの海域で発生すると海底地滑りによりメタンハイドレートの圧力バランスが崩れてメタンガスが大量に発生し、上方の航行船舶に危険が生じる可能性、また、一旦被災した場合には環境や経済活動に甚大な影響がでる可能性が懸念される。

こうした災害の発生を予測するには、高分解能の海底地形調査と海底音波探査、メタンハイドレート暴発検知システムの開発、リアルタイムの地形変動モニタリング及び水中音観測が有効である。メタンハイドレート放出のモニタリングに関する研究は不十分で、今後研究を進めることが必要であるが、蓋然性の高い海域の海底表面地形の繰り返し観測から有益な情報を得ることができる。メタンハイドレートの状況を把握するための海底表面地形の詳細な把握（分解能が数センチメートル程度）は、メタンハイドレートの挙動把握だけでなく、海底活断層の挙動把握、生態系の把握、海底資源探査等、多様に利用できる。このような情報は海底底上でAUVに装備した高分解能サイドスキャンソナーの観測により取得可能で、複数AUVの長時間完全自律運航技術が確立されれば実現可能である。このようなデータにより、敵性国やテロリストによる機雷やセンサーの設置を検出（米国が既に実施）でき、行方不明の沈没船等の発見も可能になる。

<GNSSを補完する測位システムの整備>

我が国では、準天頂衛星「みちびき」がGNSSを補強・補完する機能を有している。また、高度約20km以上の高度に滞空する成層圏プラットフォーム（成層圏気球やソーラープレーンなど）により、GPSが機能しない場合でも高い精度を得られる、わが国独自の測位システムを構築することも可能である。こうしたシステムは、GNSSとの互換性を持たせ、通常時はGNSSの補強システムとして活用することが適当である。このようなシステムにより、GPSの機能低下時においても測位精度を維持でき、平時においてはGPSの精度を補強できる。ただし、電磁パルス攻撃や大規模な太陽フレアの際には、GPS同様に機能しなくなる。成層圏プラットフォームについては後述する。

脅威⑥ 海洋分野の人材減少

＜産業構造の根本的見直しによる、若者から見た魅力の増大＞

SNSやオンラインゲームが生活の一部となっている世代の若者が積極的に海上勤務を希望するようにするためには、洋上でも高速でインターネットに接続できる環境が必要である。成層圏プラットフォームによる通信圏の海上への拡大は、そのための解決策となる。成層圏プラットフォームについては後述する。

＜旧来の慣行の見直しによる業務の改善＞

海事社会は経験が重視される世界であり、それ自体は全く悪いことではないが、このことが若者にネガティブな印象を与えていることは否定できない。技術の進歩を踏まえ、業務の手順や手法を改めることで近代的な勤務環境を創出し、若者にとっても魅力ある職場とする必要がある。

脅威⑦ 港湾

スケールメリットによる輸送コスト低減のため、コンテナ船は大型化の一途にある。現在、世界で就航しているコンテナ船の最大船型は、24,000個積み (TEU) であるが、我が国に寄港しているコンテナ船の最大船型は、15,000TEUに過ぎない。欧米基幹航路の便数がアジア主要港では横ばいまたはやや減少傾向にあるのに対し、我が国では明らかに減少している (1998年比で1/3に減少)。24時間、最大船型のコンテナ船が受け入れられる大水深 (-18m) バースが整備できていないため、巨大船は近隣国の大水深港湾に向かわざるを得ず、ハブ化した近隣国から中型船に寄せ替えられた荷物が日本に来るようになっており、これは経済性、即時性の点で大きなデメリットになる。今後も基幹航路に従事するコンテナ船は一層大型化することが予想され、我が国の基幹港がこれを受け入れることができなければ、日本と欧米の間に直航の基幹航路がなくなってしまう可能性がある。この場合、年間約3兆円の経済損失が出るという試算がある。



図2-4 三大港に寄港する基幹航路の推移

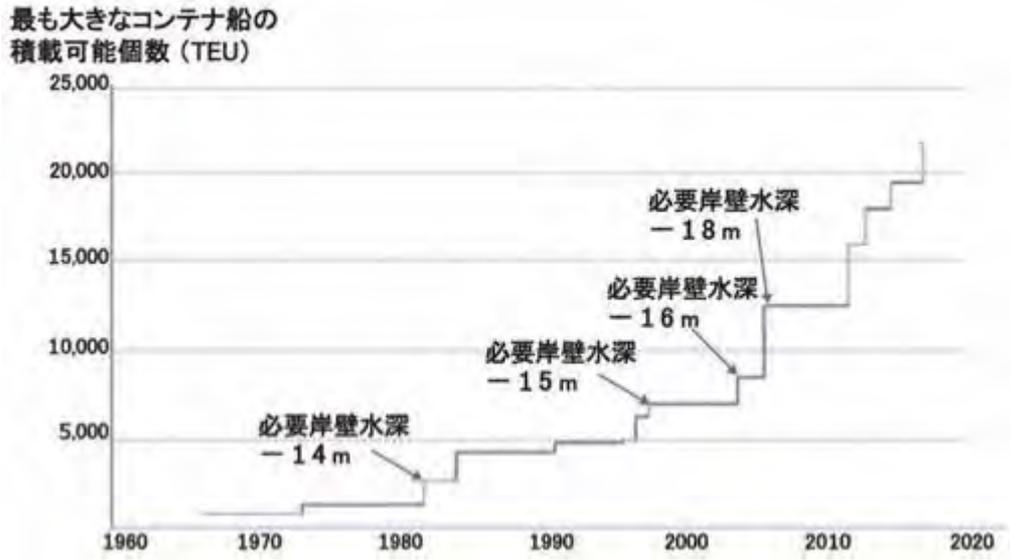


図2-5 コンテナ積載個数と必要岸壁水深

投資縮小効果	約0.8兆円 ⁽¹⁾
対欧米「輸入コスト」の上昇に伴う日本人の支出増分	約0.61兆円 ⁽²⁾
対欧米以外「輸入コスト」の上昇に伴う日本人の支出増分	約0.059兆円 ⁽³⁾
対欧米「輸出コスト」の上昇に伴う日本製品の売り上げ減	約1.33兆円 ⁽⁴⁾
雇用がなくなることによる消費の縮減	約0.082兆円 ⁽⁵⁾
合計	約2.888兆円

- (1) 投資が年4,000億円縮小、その乗数を2と想定
- (2) 欧米からの輸入に伴う船料金約1.19兆円、それが33%増加(直行便の場合、3,000ドル/TEU→基幹航路が消滅し、アジア主要港経由のみとなった場合、4,000ドル/TEUへの増加との船社意見: 国交省資料より)すると仮定。
- (3) 欧米以外の諸外国からの輸入に伴う船料金約0.64兆円、それが5%増加すると仮定(基幹航路がなくなると、日本-アジア間等の費用も上昇圧力を受けると想定)。
- (4) 日本からの輸出に伴う船料金が北米航路で33%、それ以外で5%高騰すると仮定。そうすると、上記(2)(3)の数字に基づくと0.66兆円上昇。日本からの輸出額が、ちょうどこの金額と同水準で低迷すると仮定すると、0.66兆円輸出額が縮小する。そのうえで、この輸出額の減少が日本経済にもたらす影響を乗数2で算定。
- (5) 雇用が1.6万人縮小するインパクトを、全雇用5,840万人に対する、国民総消費300兆円に対する割合から算定。

図2-6 基幹航路を失った場合の日本経済への影響

船舶の大型化以外に、今後、自動化船の増加、船舶推進エネルギーの石油からの転換が進むものと見込まれ、港湾機能はこのような変化に対する技術的対応を行なう必要がある。対応を誤れば海運における大きな地位の低下を招き、適切に対応すれば東アジア域のハブ港としての地位を維持強化できるであろう。

自動化船を前提にした管制システム、港湾内の航路や錨地の設定、通信の信頼性向上、測位支援等、自動化船に対応するための課題を抽出し、解決して行く必要がある。

二酸化炭素の排出削減に関して、船舶の動力源のLNG化、アンモニア混焼、帆走併用、電動化等が行われて行くであろう。このため、新エネルギーの供給のための設備の整備や、電力に関しては裏付けとなる自然エネルギーの確保を行なわねばならない。一方で、フェードアウトして行く(であろう)石油系燃料の供給を引き続き適切に確保することも重要である。

港湾の機能として、洋上風力発電、海潮流発電、海洋温度差発電等の海洋再生可能エネルギーの基地港としての役割は、新しく、またエネルギー安全保障の観点から極めて重要な機能である。これら

の機能を果たすためには、岸壁長、水深、港湾の陸上施設や面積等で従来になかった規格が必要となるため、前広に対応して行く必要がある。海底鉱物資源やメタンハイドレート等の海底炭化水素資源に関しても、港湾の果たすべき役割と、それに必要な港湾機能があるため、前広の準備が必要である。一方で、石炭、将来的には石油に用いられている用地や施設の今後の整理についても前広に検討しておくことが必要である。

脅威⑧ 造船

わが国の造船事業は、かつて世界一の建造量を誇ったが、現在は世界第3位に低落している。4位以下に比べれば、建造量ははるかに多いが、造船事業の衰退により、設備や要員の整理が行われてきた結果、多くの問題が発生している。

拡大を続ける国際物流において、海運が今後も重要な役割を果たす中で、自国に十分な造船能力がないことは（経済）安全保障面での問題が懸念される。

一つには、開発能力の低下と経験不足の悪循環により、新たなニーズに適合した造船能力が失われることが挙げられる。洋上風力発電が今後の我が国の再生可能エネルギー源の主要部分を占めていくと考えられるが、大型化が進む洋上風力発電装置を設置するための大型クレーン船やSEP船を建造できる造船所が国内には少なく、それらの船は海外の造船所で建造されたものが使用されている。

こうした作業船の状況から、エネルギーの安定確保のための洋上風力発電能力の増強に制約が生じているのが現状である。

国内外の物流における船舶輸送の重要性は改めて述べるまでもないが、国際航海に従事する船舶からのCO2排出量は約9.19億トン、世界全体のグリーンハウスガス排出量の2.51%に相当する量となっている(2018年)。これはドイツ1国分(世界第6位)のCO2排出量に相当しており、環境への負荷は少ない(温室効果ガス(GHG)排出量などに関する第4次調査報告書(4th GHG study, GHG4) 国際海事機関, 2020)。二酸化炭素負荷の少ない船舶の開発、運航速度の環境面から見た適正化、自然エネルギー(海流等)の利用、海上交通の環境面から見た適正化等により、海上交通により発生する二酸化炭素の量を縮減する必要がある。国内物流においてはトラック(営業用貨物車)が発生する二酸化炭素は225g /t・kmなのに対して、船舶では41g /t・km、鉄道では18g /t・kmであり、二酸化炭素発生量から見て船舶は営業用貨物車に対しては圧倒的に環境に優しいが鉄道の2倍以上であることから、鉄道に比べて輸送量の総量が大きい内航船の環境負荷を一層縮減する必要がある。このような環境対策のためには、我が国の造船事業者による技術開発が必須であり、我が国の造船事業の健全な発展が環境面からも不可欠である。

適切な造船能力を維持できないと、自衛隊の艦船や海上保安庁の巡視船等の建造や修理にも支障が生じる。これらの船舶は、性能や構造を詳らかにすべきものではないため、海外の造船所に依存することはできない。

造船業は海運業の景気に大きく左右されるため、需要減少時の対応を事業者任せると、各事業者の経営判断によって設備投資や廃止が行われるため、長期的に必要な造船能力の維持が困難になる。また、整理されたわが国の人材を他の国が獲得して能力を高め、結果として我が国の首を絞めた面があることは否定しがたい。

海運や海洋開発といった、我が国の経済を支える造船能力の維持については、安全保障の観点からの長期戦略を国が示し、技術や人材というソフト要素についても戦略と方法論を提示すべきである。安全保障上重要な造船能力の確保を、企業の判断のみに依存すべきかについて議論すべきと考えられる。

我が国の造船技術力の低下を示したとも考えられるのが、2013年にインド洋で起きた商船三井が運航するコンテナ船「MOL COMFORT」の破断・沈没事故である。同船は2007年から三菱重工業が建造した国産の新造船であった。国土交通省のコンテナ運搬船安全対策検討委員会は、波の衝撃で生じる船体振動による力と、横方向から船体に加わる力による船体の縦方向の強度低下が原因と認定したが、設計・製造等のどの部分に大きな問題があったのかは明らかではない。

国立研究開発法人 海上・港湾・空港技術研究所及び海上技術安全研究所では、このような課題を認識し、デジタルシップヤードの構築、船体荷重・構造一貫解析強度評価システム デルサ（DLSA）、船体構造モニタリング及びデジタルツインシステムを開発してきており、これらが技術面や価格面でのブレークスルーになることが期待される。

<あるべき姿と技術的解決策>

1) デジタルシップヤードの構築

- 造船行程を数値的に計画・管理することにより、納期、品質及びMPAコストを計画通りに達成する。
- 設計と建造をつなぐ一体したデータ管理、建造工程の正確な再現及び品質目標のデジタル化
- 設計と建造のデータ連携、設計及び行程データをPMLシステム内のBOM・BOPで管理。

2) 船体荷重・構造一貫解析強度評価システム デルサ（DLSA）

- 波浪中の船体応答と荷重を動画で確認。
- 構造解析と荷重の長期予測による発生応力の最大予測値。
- 構造解析の所要時間を1/10に短縮する設計効率の大幅な向上。造船5社が実設計に利用

3) 船体構造モニタリングとデジタルツインシステム

- 大型コンテナシリーズ船の疲労を評価する。同型船でも航路により疲労蓄積が異なる。

4) デルサとハルモニタリングを結合した船体構造デジタルツインシステム アイザス i-SASJ

- 同化技術を用いて少ない計測点から全体の応力分布を解析し、船体の応力・負荷・疲労・損傷を評価し、設計に反映する。

<特記事項 無人化>

船舶自動運航の最終形である無人化には、技術的に幾つかの論点がある。

海図

現在の海図は、紙海図のフォーマットにより視覚的に認識されるように作られており、電子計算機が認識するには困難がある。例えば、水深と水深の間の白地の部分は一般に「両水深よりも浅くはな

い」と理解されるが、「データが無いため何も描いていないだけ」の場合もあり得る。経験豊富な航海士は、自らの経験からこのことを理解するが、電算機にこれを理解させることは容易ではない。電子海図のフォーマットは電子計算機に理解させやすいように変更されつつあるが、データ空白域の存在は如何ともしがたく、これを測量成果によって埋めるには長期間を要する。予定航路だけでなく、避航海域等を含めて船底余裕水深（アンダー・キール・クリアランス）情報が整備された海域を航行する必要がある。

測位

GNSS測位では、接岸等の精密な位置情報を必要とする場合を除き、自動運航に十分な精度が得られる。補完的な測位情報を加えれば、接岸までの自動運航に必要な測位情報（船体の向きや傾斜も含む）が利用可能になっている。しかしながら、別項で述べるように大規模な太陽フレアや電磁パルス攻撃があった場合、測位が不可能になり、復旧には長期間を要することが懸念される。有人船であれば、外洋では天文航法、沿岸では地文航法が可能であるが、このような位置決定方法の自動化はGPS普及後に開発が中断されている。また、電子機器がすべて使用不能になった場合は、天文・地文航法システムが自動化されていたとしても機能しない可能性が高い。測位機能が完全に失われた場合の対応策を検討しておく必要がある。

当直（見張り）

ブリッジにおける見張りの過誤（居眠り等）は海難事故の主な原因である。自動運航船の場合、人間と同等以上の見張り機能を実現できるかが課題である。AISによる他船の動静情報は、操船判断に重要な役割を果たす。コンピュータによるレーダー画像の解釈は難度が高く、例えば漂流者をレーダーエコーとカメラ画像から自動検出することは、現在の技術ではハードルが高い。検出できたとしても、避航は可能でも、停船して救助することは困難である。自動運航船が果たすべき機能と活動についての整理が必要と考えられる。

機関等

エムゼロ船では、機関室の常時当直が免除されているが、機関長・機関士が乗船し、警報対応や点検を行っている。自動車の自動運転が数時間程度であるのに対し、自動運航船ははるかに長時間の無人航行を行う場合があり、機関等のメンテナンスフリー化のハードルは高い。

これらの課題の解決には、集中的な研究開発と投資が必要であるが、自動運航の実現によって得られるメリットはきわめて大きい。

成層圏プラットフォーム(HAPS)

成層圏プラットフォーム (HAPS : High Altitude Pseudo Satellite) は、高分解能の光学センサー及びSARによる海上監視、GNSSに依存しない測位システム、海上通信用の基地局等のため、高度約20キロメートル (風速16~25m/s) の高度に飛行船やソーラープレーンなどを配置するものである。

HAPSは、人工衛星よりも低高度 (1/10~1/40) を飛行するため、光学画像の解像度が10~40倍高くなることが期待できる。また電離層の下に位置するため、測位システムに用いた場合の精度も高いものが期待できる。高度20km程度であれば携帯電話の基地局として使用可能とされており、低高度による低遅延も大きなメリットである。

本稿で取り上げた高分解能モニタリングの必要性等、HAPSHAPSの活用が考えられる分野を以下に列記する。

1-1	自動運航	測位システム、海上監視
1-3	フリークウェイブ	海上監視、海面高度計測
1-4	サブスタンダード船	海上監視
2-1	航行の自由	海上監視
2-3	テロ対策	海上監視
3-1	GNSSの代替・補完	測位システム
3-2	テロ対策	海上監視
5-1	地震・火山等 フリークウェイブ	AUV・海底地震計のデータ送信 海上監視、海面高度計測
5-5	GPS補完	測位システム
6-1	若者の確保	通信

HAPSは、海上監視システムや測位システムの構築において、人工衛星よりも優位な点が多い。

商用画像衛星IKONOSは軌道高度681kmで1mの解像度を得ている。比例計算によれば、高度20kmでは3cmの分解能が得られ、これは船上の人の表情を認識できるレベルである。

GPS信号は高度約20,000kmから到来するため、電離層の影響を受けるが、高度20kmのHAPSではこうした影響が無い。このためHAPSによる測位システムでは、測位精度がGNSSに比べて高くなる。

HAPSにより、我が国独自の自律測位システムを構築することが可能である。平時においては、GPSと互換性を持たせ、GNSSの補強システムとすることが適当であろう。

海上監視、海洋観測、データ通信及び測位以外に、商用通信や放送の機能をHAPSに持たせることも可能である。通信機能のみであれば水平方向に100kmがカバーでき、我が国のEEZをカバーするのに100機程度必要であろう。一方3cm程度の解像度の画像を得るためにはHAPS 1機のカバレッジを水平方向に20kmとした場合は数千機程度で日本のEEZを監視できる。

第3節 財産

脅威① 資源の奪取行為

<日中間における相互事前通報制度>

日中間ではEEZの境界が合意されておらず、東シナ海で海洋調査を行う場合、相互に事前通報を行うことを取り決めた枠組みが平成13年2月より運用されているが、中国は通報の内容と異なる海域及び期間においてしばしば調査を行っており、科学的調査を超えた資源探査や開発を行っていることも指摘されている。科学的調査であれば、資源探査とは異なり調査成果を共有すべきであるが、そのような情報には接しておらず、資源探査や軍事的調査の可能性が高い。このため、現在の通報制度のあり方等を再検討すべきと考えられる。

<海底鉱区申請>

「深海底」は国連海洋法条約で「人類の共同財産」とされており、科学的調査も本来自由に行うことができるはずであるが、ISA（国際海底機構）に鉱区申請が行われている海底では、申請国の許可を得なければならないことになっている。こうした運用が、国際法を遵守する日本のみとなっていないか確認が必要である。例えば、深海のホットスポットである海底熱水孔は重要な研究対象であるが、公海上で新しく発見された海底熱水域で新たな知見が発表されるたびに鉱区として申請され、再調査が困難になっている。これは熱水噴出域だけでなく、他の酸化鉱物資源についても同様である。海底資源の開発は環境影響評価の観点やコストの面で開発が遅れており、実際どれだけの経済的価値があるのかは容易に判断できないが、鉱区申請という形で重要な海域を押さえることは、人類の共同財産の奪取に等しい行為である。このため、資源調査でない限り、鉱区での科学的調査を鉱区の申請国は原則認め、通報をルール化することが重要である。

<EEZにある資源を公然もしくは秘密裏に奪取されるリスク>

公然に行われる奪取のリスクとして、日中間の地理的中間線付近における天然ガス開発が挙げられる。ガス田が地下で中間線を越えた日本側のEEZにも広がっている場合、中国が掘削している地点から水平掘削により日本の側のガスを吸い出される可能性がある。現在中国側のリグは中間線から4km程度の位置にあるが、そこから10km以上の水平掘削が可能である。

一方で、非公然に行われるケースとしては、深海底の鉱物資源を、深海用無人機等を用いて回収する等の行為が挙げられる。こうした違法行為への対策としては、深海を含むEEZ全体を監視するシステムの構築が考えられる。我が国のEEZは広大で、そのすべてを海底まで含めて立体的に監視することは難しいが、EEZの境界にカーテンのように監視網を配置する方法が考えられる。また、海中を自律航行し、エネルギーを補充できるAUVも有効である。その際に課題となるのは、海中での測位である。例えば、米国国防高等研究計画局(DARPA)は、「Ocean of Things」という画期的なプログラムを進めている。これは、何千ものセンサーを用い、環境・気候データや海洋データ、商業船舶や民間旅客機の運航に関わるデータ等を総合的に観測することで、恒常的な海洋状況の認識 (maritime situational aw

areness) を可能にするものであり、安全保障及び民間用途への様々な応用が期待されている。

<あるべき姿と技術的解決策>

理想的には、防空識別圏のように、EEZ内のすべての海中物体の活動を把握できることが望ましいが、我が国のEEZは広大で、これを守るには境界の監視が重要である。EEZに出入りするすべての物体（生物も含む）を検知できるシステムの構築が望ましく、海上から海底までをカーテン状に監視できる機能を実現する必要がある。

海水中では電波の減衰が大きいことから、海中での物体の探知には音波を用いる必要がある。EEZの境界で、物体から発せられる音を検知し、物体の通過時刻や方位を検出する。また、音波を発射し物体からの反射を検知するアクティブなシステムも有効で、従来の超音波による魚群探知やソナーを密に線状に配置する方法が考えられる。一方で浮き魚などの水産資源に対しては、低周波により半径15km以内の魚群を検知する技術がマサチューセッツ工科大学（MIT）で開発されている。また、AUV（Autonomous Underwater Vehicle）を用いる場合には、海中を可視化するためにAUVが取得した情報を、衛星を通じて地上局に伝送する情報伝送能力を開発し、海中の状況をリアルタイムに近い形で世界に公開できる能力を保有すべきである。

<現在の技術レベル>

船舶の多くが音響測深器や魚群探知機を装備しているが、得られたデータは現場で使用された後は蓄積されることなく捨てられている。これらの超音波機器が収集する情報は、海中の魚群の存在や数、プランクトン群集の層、海中の物体、海底地形などが含まれている。これらの情報を集約して再利用できるようにすることが必要である。

MITで開発された、海洋音響導波層リモートセンシングは画期的な技術である。魚のウキブクロ共振周波数が数百Hzと低いため、超音波機器では実現できない超長距離の魚群の可視化に成功している⁴⁾。これは、かつてあった富士山レーダーによる雲の映像イメージ（図3-1）に近く、長距離リアルタイムの水産資源計測を可能にする、現在唯一の技術である。

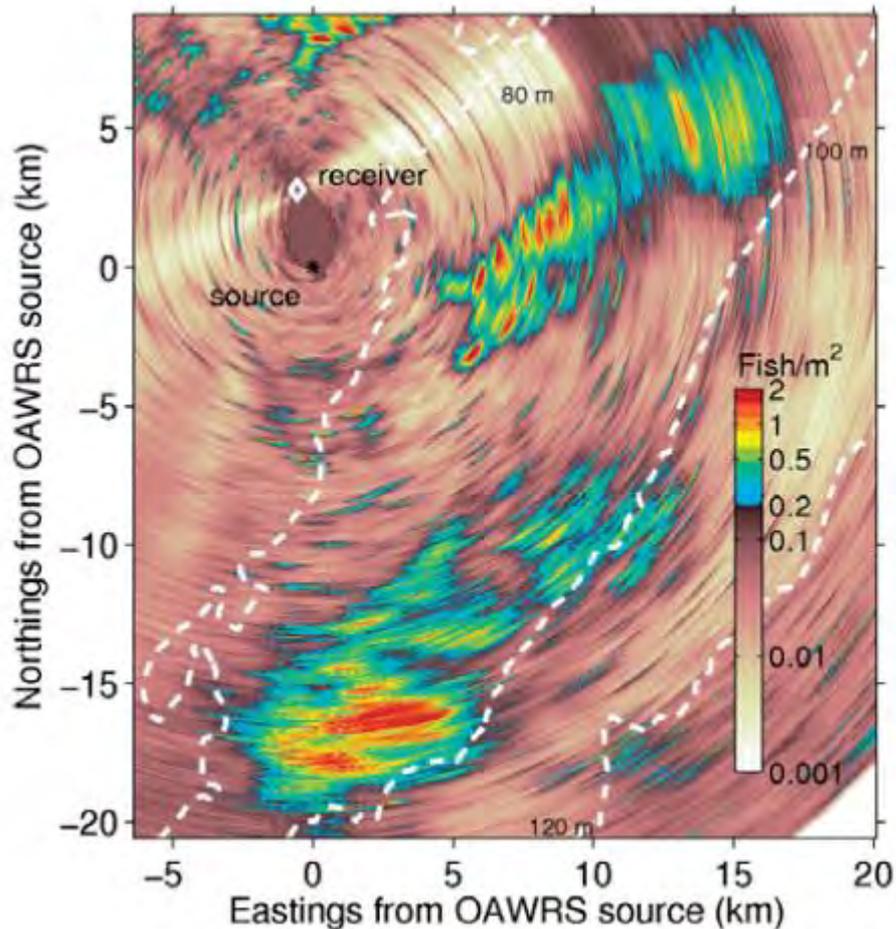


図3-1 海洋音響導波層リモートセンシング(Ocean Acoustic Waveguide Remote Sensing)による広範囲の魚群イメージ⁴

AUVに搭載したマルチビーム音響ソナーにより、海底付近から地形等の詳細な状況を航空写真の様に映像化することができ、数ノットで連続24時間程度の範囲であれば、1台のAUVで調査が可能である。近年、多数のAUVを同時に展開し、観測範囲を飛躍的に拡大できるようになりつつある。また、AUVによる深海観測には長時間の潜水航行と、海中での位置の正確な把握が必要である。現在、海中での測位は慣性航法+音響補正に依存しており、より正確な位置を把握するためには、船舶等による海上からの補助、またはAUVが浮上してGPS信号を取得し、慣性航法用の位置補正を定期的に行うことが必要である。

AUV潜航時の測位システムとして、BAE Systemsと DARPA による、「Positioning System for Deep Ocean Navigation (POSYDON)」がある。これは、海中でも正確な位置情報の取得が可能な音響測位システム(図4参照)で、潜航中の潜水艦でも取得可能な音響信号を発信するブイを配置し、複数のブイから到来する音響信号の差分を求める一種の「三角測量」である。具体的には、各ブイは水面のアンテナでGPS信号を取得して低周波音響信号に変換し、吊下された送波器から送波する。ブイは補正によって正確な位置を得られるため、これにより海中でGPS信号の利用が可能になる⁵⁾。

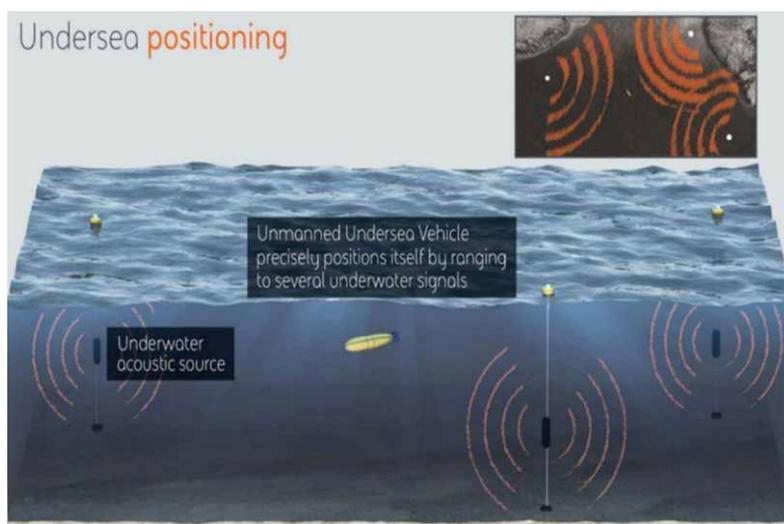


図3-2 POSYDONの動作概要（出典：参考文献5）

<対処に必要な将来技術>

EEZ境界でカーテン状の監視を行うには、メンテナンスが容易な低雑音の音響センサーが必要である。光ファイバコイルを用いた水中マイクロホンが開発されており、有力な候補であるが、数千kmにわたり展開するには低コスト化と堅牢化が必要である。光ファイバを用いるため、電力供給が不要で安定性も高く、敷設後の維持管理は容易と考えられる。対象の識別には機械学習を用いるため、クジラや魚の鳴音や、AUVなどの海中航行物体が発する音のシグネチャ（ライブラリ）の整備が必要である。

音響測深器や魚群探知機のデータ集約については、ハードウェアの制約はほとんどない。すなわち、既存のシステムからデータを抽出して伝送・蓄積すればよい。このときに必要となる技術要素は、沿岸と沖合で異なる通信環境に対応できる通信路の確保と端末側での情報処理である。また、情報提供に対する報酬や、データ解析結果の提供者へのフィードバック等、情報提供者に対するインセンティブも重要である。たとえば漁業者であれば水産資源分布状況を提供する代わりに魚群探知機の情報を提供してもらう。これらがビックデータ化するにつれ、応用範囲は海底地形や水産資源の把握だけでなく、地震防災、気候変動、ブルーカーボン、海中防衛などに広がるのが期待できる。その際に解析結果の利用を有料とし、データ提供者にインセンティブとしてフィードバックする方法も考えられる。

海洋音響導波層リモートセンシングでは、コンパクトで大音圧を発生可能な水中スピーカーの開発が重要である。受信側の水中マイクロホンアレイは、従来技術の圧電素子を用いたマイクロホンと並べれば対応できる。このシステムを設置するプラットフォームの開発も重要で、電力と通信環境を備え、台風でも損傷しない架台が必要である。この技術は沖合の浮体式洋上風力発電にも応用可能である。また風力発電のパイルに海洋音響導波層リモートセンシング装置をとりつければ、電力供給と水産資源把握の効果が同時に期待できる。

AUVIによる効率的な海底観測を実施するには、長時間実用化が将来技術として重要である。

量子慣性センサーは量子が周囲環境からの影響を受けやすいという、量子コンピュータや量子通信では不利に働く性質を、周囲データを計測するという用途に利用する技術である。したがって、技術の応用の障壁は比較的 low、量子コンピュータの活用よりも先行して活用が広がることが期待されており、量子科学技術のうちでは最も実用化に近い技術と考えられている。現在進められている研究のターゲットは、既存のジャイロに比べ精度を3桁向上させた原子ビームジャイロ慣性航法装置（数十時間のAUVの航行で誤差が数十メートル程度）及び、同じく精度を2桁向上させたイオントラップジャイロ型慣性航法装置（自動運転車で5分程度の誤差が数十センチメートル）の二つである⁶⁾

一方、海中での高速大容量通信に用いられる光通信技術は、レーザー光を用いる光通信であり、海中で数十メートルの範囲での通信に限定される。現在JAMSTECが実験を重ねており、実用化が近いとされている⁷⁾。

上記の他には、画像認識等に基づく自律的な撮影調査（サンプリングを含む）技術、帰還不能または拘束された場合の漏洩防止技術（自沈、データ自動消去、自爆等）、大容量電池等があるが、これらは海洋関連技術とは別の分野で精力的に研究開発が進められている。

また、取得データの取り扱いについては、公開/非公開データの整理や公開の基準を明らかにする必要があり、公開するデータについては、世界的に利用されている共通フォーマットに準拠させる必要がある。

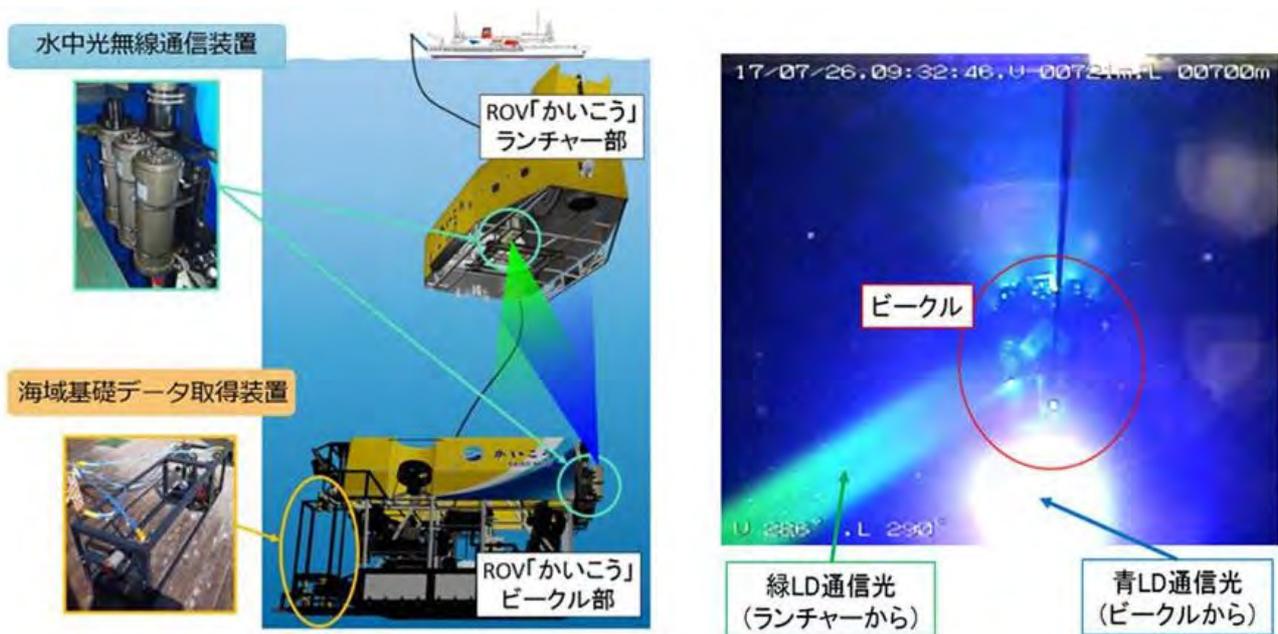


図3-3 試験模式図（左）及び海中光無線通信中の映像（右）（出典：参考文献7）

<特記事項 MDAの「構想と可能性」から「実践と成果」へ>
 これまでの経緯

2001年の米国同時多発テロを発想の契機とするMDAは、米国による「国家の保安、安全、経済、環境等に影響を与える可能性のある、すべての海洋事象の実行的理解」という定義²¹を基礎に概念化が進められ、我が国においては、2018年5月に閣議決定された「第三期海洋基本計画」において、MDAに重点的に取り組むことが明記された。こうした検討を通じ、軍事以外の非伝統的分野も広く文脈に含める、海洋安全保障の要素としてのMDAの位置づけがおおむね定まり、いまやMDAは構想や可能性の段階から具体的な成果の段階に移行したと云う。そして、第三期海洋基本計画におけるMDAの定義²²を見れば、これまでに抽出した課題のほぼすべてが、何らかの形でMDAの文脈とかかわりを持っている。

変化する多様なニーズへの対応

米国の国家MDA計画書では「テロや犯罪の抑止、重要インフラの防護、自然・人為的災害からの海上輸送システム及び関連インフラの被害局限及び迅速な復旧、世界の資源及び市場への自由なアクセス、海洋の資源保護のための海上状況把握の強化」をMDAの目的に据えているが、急速に変化する海洋安全保障環境においては、常に新たな課題が生まれている。MDAによる海洋の可視化や透明性の確保を、そうした海洋安全保障環境においてどのように課題解決に活用するかは、変化するニーズを踏まえ、各ステークホルダーがそれぞれの責任分野において考察すべきものであり、わが国においてもMDAによって実現すべき価値が時代の要請に即したものとなるよう、不断の見直しが必要である。海底ケーブルやエネルギーのパイプライン、洋上風力発電施設等を保護するための破壊活動監視といった分野も、MDAに関わる新たなセキュリティニーズと云ってよい。海洋の持続的発展という、SDGsとのかかわりにおいてMDAに新たな意義が見出されたことも重要な視点である。ウクライナ危機においては、軍事・経済・物流・航行安全等の分野において海洋状況を把握することの重要性が再確認された。海洋安全保障におけるMDAの役割は益々重要になっている。

今後の方向性

我が国はこれまで、第三期海洋基本計画に従い、海洋状況表示システム「海しる」の構築、海洋監視大型無操縦者航空機の導入、JAXAの衛星データの利用等によるMDA体制の強化を図っており、これらは監視能力（目）及び神経（情報共有）を強化する先進的な取り組みである。MDA体制の強化においては、海洋と航空・宇宙の融合が一層重要であり、今後は、さらに成層圏プラットフォーム、VDES、電波監視衛星といったゲームチェンジャー技術の開発導入に取り組むことで一層の体制強化を図るとともに、MDAの成果が具体的な課題の解決に貢献するよう、取得した情報の分析能力の高度化を進め、海

²¹ National MDA Plan for the National Strategy for Maritime Security (2017) なお、国際海事機関（IMO）は MDA を「安全保障、安全性、経済又は環境に影響を与える海洋環境に関連した活動に対する実効的な理解（MSC.1/Circ. 1415, Amendments to the IAMSAR Manual 11 (May 25, 2012)）」と定義しており、米国の定義をほぼ踏襲している。

²² 「海洋の安全保障、海洋環境保全、海洋産業振興、科学技術の発展等に資する、海洋に関する多様な情報を、取扱い等に留意しつつ効果的な収集・集約・共有を図り、海洋に関連する状況を効果的に把握すること」とされ、米国の定義とは若干趣を異にしている。

洋の可視化における先進的地位を確立し、MDAの取組を通じた海洋安全保障の推進をリードすべきである。

課題

実施体制

半面、課題としては、政府を挙げて横断的に取り組む体制には改善の余地がある。米国のMI FC、フランスのMI CA、フィリピンのNCWC、シンガポールのIFC、豪主導による太平洋島嶼国のPFCなど、各国には関係部門が協力するMDAの情報融合体制が存在するが、わが国には明確に位置付けられたMDAの中核となる責任組織がなく、第三期海洋基本計画に定められた司令塔（NSS、海事務局および宇宙事務局）のもとで、関係機関が個別の取り組みを進めている状況である。これは、国内における所掌と責任の明確化というだけでなく、MDAのカウンターパートを国際的に明らかにするという意味においても不十分である。米国がMDAの位置づけと責任組織を大統領令²³（PPD-18）で明らかにしているように、何らかの形でMDAに取り組む実務体制の制度的明確化が必要である。

情報管理のルール作り

また、MDA情報の管理のためのルール作りも十分ではない。例えば、海底地形のメッシュ精度や海底資源の分布など、国家の安全や経済安全保障の面から外国と共有すべき情報の基準も明確にされておらず、情報の共有を国益とバランスさせる情報管理ルールが求められる。他方、2022年12月に閣議決定された安全保障関連3文書において、海上自衛隊は滞空型無人機を含む無人機部隊2個隊を新たに編成することとされた。今後は得られた情報を効果的に共有するための情報管理のルールの策定が不可欠であり、MDAの実効性を担保するための喫緊課題でもある。

国際協力の推進

MDAの国際協力においては、これまで二国間およびQUADやHACGAM等の多国間の枠組みにおいて様々な議論や施策が行われてきたが、先に述べたように、MDAによって解決を図ろうとする課題の重点は、地域の実情によって異なる。例えば、米国においてはテロの抑止、南・東シナ海沿岸諸国においては海洋資源の確保や侵害行為への対処、越境犯罪の根絶、太平洋島嶼国においては環境の保護やIUU漁業の抑止等が重点事項と考えられ、それらの実情を的確に理解した上で課題解決に資するよう、わが国は他の先進各国と連携しつつ地域の能力向上支援に努めることが求められ、構想と可能性から具体的成果へという文脈がここでも成立し得る。その際、MDAにより特定国との間に無用の懸念や軋轢を生じては意味がない。国際協力の推進においては、特定の政治的意図を廃し、海洋の透明性を向上させるこ

²³ 政策大統領令（Presidential Policy Directive）第18号（PPD-18、2012年8月）により、米国においてMDAの政策と実務の基本的枠組みが定められ、NMI O（国家海事インテリジェンス統合局）が設置された。なお、PPD-18はそれまでMDAの基本政策であった2件の大統領令（NSPD-51及びHSPD-20、いずれも2001年）を統合して新たに発出されたものである。

とで、海洋安全保障における普遍的価値や利益の実現を図るという姿勢が重要であろう。この意味で、UNODC（国連麻薬犯罪事務所）が海洋監視と情報分析技術のノウハウに関して東南アジア諸国で実施している「MDAスクール」を通じて日本が行っている支援は優れた手法であるといえる²⁴。世界の海運物流の大きな割合を占め、多種多様な海洋の課題を抱えるアジア・太平洋地域においては、海洋の可視化を進めることの意義は大きく、各国の期待も高いことから、監視技術や情報分析というわが国の優位性を生かした能力向上支援の取り組みを一層進める必要がある。

MDAをこのように整理したうえで、それが時代の変化に対応しつつ、具体的課題の解決に資するものとなるよう、個別の議論を行うべきである。

- 1) 海底ケーブルや重要港湾の点検保守に関しては、データの保全の観点から国産AUVを使用すべきで、そのためには国産のAUV産業の育成を加速化する必要がある。
- 2) MDA推進のための民間プラットフォームの活用。商船、漁船、洋上風力発電など、民間プラットフォームを活用したセンシングにより、EEZあるいはその外側での監視能力が格段に向上する。この場合には情報伝送の暗号化が必須である。
- 3) 観測範囲、即時性、精度などの効果と費用を考慮すべきである（図3-4参照）。

	観測範囲	即時性	観測精度
パッシブカーテン監視	大	○	低
魚群探知機・測深器ビックデータ	中	×	中
海洋音響導波層リモートセンシング	大	○	低
自律型無人潜水機(AUV)	小	△	高

図3-4 監視技術の一覧

脅威② 情報漏洩

1) 誤操作による漏洩

日本ネットワークセキュリティ協会の 2017 年の個人情報漏えいインシデントの分析結果によると、情報漏洩原因で最も多かったのは誤操作で、次いで紛失・置忘れ、不正アクセス、管理ミスが続く。対策としては社内教育による社員のセキュリティ意識の向上及び、情報が漏洩しない組織の仕組みづくり等が挙げられる。

<あるべき姿と技術的解決策>

²⁴ 日本とUNODCとの間の戦略的協力：2013年に署名され、2022年に改訂された。UNODCによるMDAの地域能力向上プログラムと日本の支援はこの枠組みを背景に行われている。

誤操作による情報漏洩は、発生することを前提に対策を講じなくてはならないが、技術面から見ると、現在普及している暗号には、コンピュータの能力の向上によって解読される危険性があるため、そのような危険性が原理的に存在しない情報の伝送システムを構築する必要がある。

具体的には、量子暗号と量子鍵の配送によって堅牢な情報伝送システム（衛星回線を含む量子暗号ネットワーク）を構築する。このネットワークが従来の暗号と大きく異なる点は、送り手と受け手が鍵を絶対安全かつ自動的に共有できる仕組みを有することである。量子鍵配送では、将来どんなにコンピュータの性能が向上しても、傍受による鍵の窃取が原理的に不可能とされている。

<現在の技術レベル>

量子鍵配送とは、光の量子単位であるひとつひとつの「光子」に情報を乗せて送信を繰り返し、秘密鍵を完成させる。その秘密鍵の中から「チェックビット」と呼ばれる確認用の部分をランダムに取り出して送信者と受信者の間で確認し、食い違いの有無を確認する。十分な回数のチェックビットを確認すれば傍受の有無が検出できるため、傍受の疑いがある場合には秘密鍵を破棄して、新しい秘密鍵の送信を行う（ワンタイムパッド方式）ことで通信の安全を確保することができる⁷⁾。

量子暗号通信は光子という非常に微弱な光を使用するため、地上に設置した光ファイバ網を通じて送受信すると、伝送損失により光子が消失してしまう。現在、光ファイバによる量子鍵配送の伝送可能距離は、200km程度で、300kmが限界といわれている。また、伝送距離を10km程度から100km程度に延ばすと、伝送損失の増加により通信速度が落ちるという課題もある。一方、衛星でレーザー光により光子の送受信を行う場合には、伝送距離は1000km程度まで可能である。ただし、衛星は地球の低軌道を高速で周回するため、通信可能時間が限られる制約がある。

中国は2016年に「墨子」という実験衛星を打ち上げ、2018年に中国とオーストラリアの間で7,600kmの距離の大陸間量子鍵配送を実現させている。日本では、総務省が「衛星通信における量子暗号技術の研究開発」を重点課題と位置づけ、2018年から2023年までのプロジェクトを実施してきた。このプロジェクトの目標の一つとして、衛星と地上局間で10kbpsを超える速度で理論上の安全性を備えた暗号鍵配送技術の実証が挙げられている。2017年に情報通信研究機構（NICT）は、50kg級の超小型衛星「SOCRATES」と固定地上局間による量子通信の実証に成功した。今後は2023年に打ち上げ予定の技術試験衛星9号機に搭載される光通信機器「HICALI」による、10Gbpsの高速通信と大気の影響による通信品質の劣化低減に関する技術実証を行う。

日本の宇宙基本計画では、2025年ころまでに「グローバルな量子暗号通信網の実現に向けた研究開発等」を進める予定となっている。さらに、NICTは2025年には都市間を結ぶ量子暗号通信網の構築に着手し、2030年ころまでには日本全土の量子暗号通信網を整備する計画である。2035年以降は、主要な同盟国との間に、宇宙を介して量子暗号通信のグローバルネットワーク化を構築する計画を有して

いる⁸⁾。地上と衛星を統合したグローバルな量子セキュアネットワークの概念を図3-5に示す。

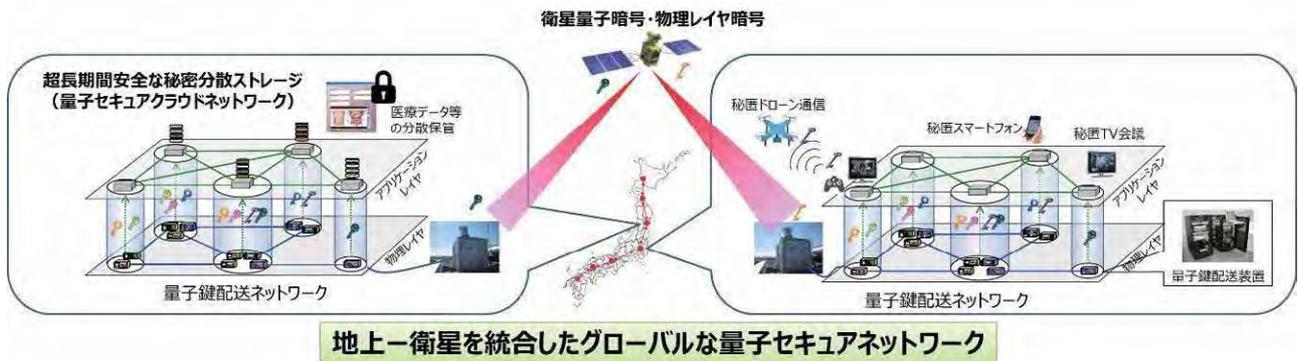


図3-5 地上—衛星を統合したグローバルな量子セキュアネットワーク（出典：参考文献8）

＜対処に必要な将来技術＞

量子暗号ネットワークをより安全なものとする、秘密分散技術と量子セキュアクラウド技術の研究促進が必要である。秘密分散技術とは、原本データを無意味化された複数のデータに分散して保存する技術である。量子セキュアクラウド技術とは、将来にわたり秘密漏洩と不正改ざんを防ぐ安全なデータ保管を実現し、一部のサーバが棄損した場合で原本データの復元を可能とする技術である。これらの技術により、理論上安全なグローバルネットワークを形成できる⁹⁾。図3-6に量子セキュアクラウドの概念図を示す。

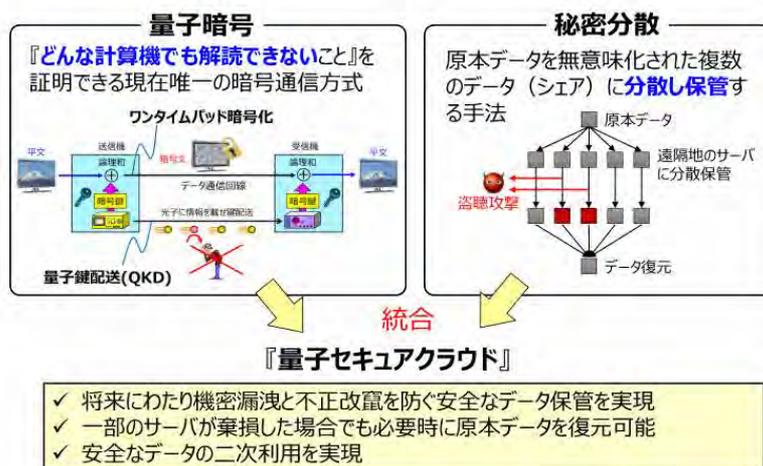


図3-6 量子セキュアクラウドの概念（出典：参考文献9）

2) 外部からの不正アクセスによる漏洩

<あるべき姿と技術的解決策>

情報漏洩の発生を前提とする部分については、脅威②(情報漏洩の1)に同じ。一方で、海洋活動では観測機器の亡失や奪取により生じる情報漏洩が考えられ、これらについても、先述同様の高度な暗号化に加え、自律的データ消去や機械的な破壊の仕組みを実装する必要がある。

<現在の技術レベル>

現状のAUVや観測機器等は、亡失や奪取による情報漏洩について、一部の漂流観測装置に自沈機能がある以外、考慮した機器はほとんどないのが実態である。

<対処に必要な将来技術>

AUVや観測機器等の、陸上で使用される機器に比して性能が劣るH/W（CPU＋メモリ）環境下にも実装可能な、

- 量子暗号化
- 自律判断による不正アクセスの防止

が考えられ、その他以下のような技術が今後必要と考えられる。

- 自律的データ消去
- 自沈等の物理的破壊

3) 外国の観測装置による、通信機能を通じた情報の漏洩

今後、AUVの普及に伴い、水中における機器間の通信技術も発展が見込まれる。水中での機器間の通信は、音響または近距離の光通信に限られる。これらは、人間がアクセス出来ない場所で行われるため、高度な秘匿性や傍受等への対策が必要である。

<あるべき姿と技術的解決策>

情報漏洩の発生を前提とする部分に関しては、脅威② 情報漏洩の1)および2)に同じ。一方で、市場規模の小さい海洋産業においては、陸上技術の応用が前提となる。また、海洋観測では、国際標準への準拠も重要であり、AUVのような秘匿性の高いデータを取り扱う観測と同列には議論できない。今後は、安全保障の観点から明確な情報公開の基準が重要となり、公開するレベルに応じた情報管理体制の確立が必要である。

また、国内の業界等では、AUVのシステム構成の共通化やモジュール化が進んでおり、これが確立されれば、専用H/Wチップ（ROSベースではあるが）等の実現が期待できる。

<現在の技術レベル>

現在、水中通信では音響でも光通信でも、陸上技術と同じ変調方式を用いている。通信機器自体は、陸上用の装置を耐圧容器に収めたものであり、通信プロトコルも水中用の特別なものを使用しているわけではない。

<対処に必要な将来技術>

量子暗号化技術は実用レベルに近づきつつあるが、現状では大規模な装置が必要となる。AUV等の水中機器間での通信では、

- 機器の小型化
- 機器の省電力化

が必須の技術要素となる。

陸上機器と異なり、水中機器の市場は極めて小さいため、まずは陸上での技術の確立と普及を踏まえ、小型化と省電力化を図る必要がある。

4) 人による漏洩

<あるべき姿と技術的解決策>

情報漏洩の発生を前提とする部分に関しては、脅威② 情報漏洩の 1)および2)に同じ。

一方で、「うっかり」といった無意識の過誤に起因する漏洩に関しては、1)により対応可能であるが、意図的な漏洩を防止するためには、帰属意識やプロ意識の醸成が有効かつ重要である。しかし市場規模の小さい海洋の分野では、技術者の母数が少なく、現状では海に対する個人の熱意に依存している部分が多い。こうした状況では、国として重要な技術にかかわる人材の処遇を改善する必要がある。

<現在の技術レベル>

海洋技術に関与する研究所や船舶内にCCTVカメラを設置し、AIも活用して監視することは、現在でも技術的に可能である。

一方、大学等ではデュアルユース技術への関与が批判的な評価を受ける風潮が存在することも事実である。産業としての発展性に乏しい海洋技術分野においては、国として重要な技術であっても、担い手の確保が困難という状況に陥りがちである。

<対処に必要な将来技術>

人間の意識を技術的課題として扱うことは出来ないが、技術を生み出すのは人間であるから、何らかの対策が望まれる。先駆的な成果を得るためには、官民を問わず、自由な発想を促して支援し、適切な処遇を保証する、海洋技術にかかわる研究設備や組織の創設が望まれる。

5) 海洋鉱物資源の分布及び賦存量のマップ、微生物を含む生物のハビタットマップ、海洋生物の遺伝情報等の漏洩

<理想論>

現代の社会生活は、エネルギーや資源の利用なしには成り立たない。日常生活に不可欠の電気、ガス、水道をはじめ、物流や通信においてもエネルギーや鉱物などの資源を必要としている。エネルギー・鉱物資源にはさまざまな種類がある。2018年度のエネルギー需給実績によると、日本では一次エネルギー総供給のうち、化石燃料の割合が約80%であり、そのうち石油が約35%で、そのほとんどを輸入に依存している。また、金属資源もほぼすべてを輸入に頼っている。日本の陸域に存在するエネルギー・鉱物資源はすでにほぼ枯渇しており、需要のほとんどを海外からの輸入に頼っている。そうした資源の供給元には政情不安な国もあることから、安定供給先の確保に課題を抱えている。日本に陸上資源が乏しい理由のひとつとして、陸域面積が世界第61位の約38万km²で、鉱山の候補地となる陸地が少ないことが挙げられる。一方、日本は四方を海に囲まれ、領海及び排他的経済水域（EEZ）の合計面積は約447万km²と、陸域の12倍にも及ぶ。陸域と海域の面積を総合すると、日本は世界第6位の広さの領域を有しており、大水深の海域を多く含むため、海水の体積では世界第4位となる。

化石燃料や鉱物資源が存在しているのは陸域だけではない。地球表面の7割の面積を占める海域の海底も有望な候補地である。日本の領海およびEEZの面積の約8割を占める水深1,000m以上の深海底には、メタンハイドレート、銅・亜鉛・鉛・金・銀などを高濃度で含む海底熱水鉱床、ニッケル・コバルト・白金などを含むコバルトリッチクラスト、銅・ニッケル・コバルトを含むマンガン団塊、レアアースを含むレアアース泥など、潜在的な海底鉱物資源が存在していることが明らかになってきた。深海の鉱物資源は、人類の手が容易に届かない、極限の環境に存在しており、それらを活用するには、科学的知見に基づいて資源の分布を把握し、高度な技術的課題を克服することが必要になる。

また、生物資源及び遺伝資源（生物遺伝資源）は、バイオテクノロジーやバイオ産業の発展に不可欠なものである。バイオテクノロジーやバイオ産業は、人間の生活や社会を大きく変える可能性を有する重要な産業であり、その基盤である生物遺伝資源は、生物多様性条約に配慮して有効に活用することが期待される。海洋では生物調査が十分に行われておらず、今後も多くの未知の生物の発見が

期待される。特に、深海底及び海底下の地下生命圏には莫大な量の微生物の存在が推定されており、ここから有益な遺伝資源が得られることも期待もされている。

このため、こうした資源の賦存量や分布に関する情報は、我が国の経済発展を支える上で、極めて重要な情報であり、その管理を怠れば、他者による不法採取を招くことになる。こうした情報は、国だけではなく、大学、研究機関、自治体、企業なども保有しているが、その管理方法や重要度の認識に差異がある。

<あるべき姿と技術的解決策>

情報の漏洩リスクに対しては、国の一元管理（海洋情報に関する国のデータプラットフォームの構築）に加え、サイバーセキュリティ対策の強化が必要である。

一方、資源や生物分布のマップ、遺伝子情報等の意図的な漏洩は、基礎科学と応用科学の構築手法が異なることも原因のひとつである。基礎科学はオープンイノベーションを基本としており、論文の査読等では、数値の正確性が求められ、結果として詳細な分布やマップ、遺伝情報等を公開して活用する傾向がある。また、メタデータ化が新たなイノベーションにつながるため、研究技術者はそれらの公開を基本的姿勢とする。半面、応用科学では、知的財産保護の意識からデータの公開には慎重になりがちである。真の脅威は意図しない漏洩であり、これを防ぐためのわかりやすいルール作りが求められる（鉱物資源については、海洋白書より引用）。

<現在の技術レベル>

海底鉱物資源の開発は、現在JOGMECと戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）²⁵による事業しか行われておらず、情報管理には個別の運用ルールしかない。SIPでは、レアアース泥を含む海洋鉱物資源を対象とした技術開発を行うとされており、具体的には、南鳥島海域の資源量を評価するために必要な調査を実施するとともに、この調査で明らかになった帯域に対してレアアース濃集部分を揚泥する技術開発を行うとされている。加えて、レアアース泥の広域調査を展開するにあたって必要となるAUV複数機同時運用システムの構築、また将来の深海鉱物資源開発に必要となる技術を確立することが目的とされている。

海洋生物のハビタットマップについては、基礎科学的な研究と、海洋開発に係る環境影響評価が行われている。いずれも外部からの可視化が求められており、学術論文をベースに情報公開を行うべき分野であるが、公表前に情報が外部に漏洩することがある。

生物の遺伝情報の漏洩については、日本は生物多様性条約を批准しているため、国際ルールに従い情報提供を行えば問題はない。ただし、この条約に加盟していない国との間での情報のやり取りは、2

²⁵ 首相官邸. 「第2期SIP海洋課題「革新的深海資源調査技術」概要」. Retrieved from: <https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kaiyou/sanyo/dai41/shiryuu5.pdf>. このほか、内閣府戦略的イノベーション創造プログラム（SIP：エスアイピー）ホームページ（https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku2/12_shinkai.pdf）、国立研究開発法人海洋研究開発機構ホームページ（<https://www.jamstec.go.jp/sip2/j/>）にも深海資源調査技術・回収技術に関する研究開発の資料あり。

国間協議のみとなるため注意が必要である。

資源の分布情報や遺伝子情報は、記録メディアを扱う技術者を通じてデータが漏洩することがあることから、収集し提供するデータの性質を理解するための教育を行っている。

＜対処に必要な将来技術＞

機微な技術を適切に管理する観点から、研究開発区分に応じた成果の公開の在り方について検討を行い、新たな知的財産管理のあり方について検討を進める。その際、公開すべきものとそうでないものの対象範囲や、特に政府資金による研究開発成果の取扱いについて検討する他、民間資金による研究開発成果についても取扱いを検討する必要がある。

生物多様性条約のように、従事する人材が多い生物研究の場合は国際的な管理ルールが成立しており、従事者の教育も容易であるが、海底資源やハビタットマップのような、従事者の少ない分野においては、取扱いのルールが不明確なものが多い。知的財産は、公表により得られる人流共通の財産と、関係者のイノベーションにつながる個別の財産があり、線引きが難しい。議論が成熟していない分野であり、そのあり方を明確にするよう、管理部門が意識を高める必要がある。

米国において「経済スパイ法」の疑義をかけられた例

2001年に、理化学研究所の研究者が米国の研究所に留学した際、帰国時に遺伝子サンプルを無断で持ち帰ったことについて、米国の財団から「企業秘密を不正に入手し、外国政府の利益をはかった」と告訴される事案が発生した。この事案では研究者の受け入れ態勢について、文書による同意書が無かったことが指摘されているが、研究において重要な遺伝子情報が無かったことで事なきを得た。海洋生物の遺伝子情報についても、その有用性がはっきりとしない段階では、オープンな他機関との協力体制も必要であり、試料の持ち出しについての同意書（MTA：Material Transfer Agreement）をとり交わす必要がある。生物多様性条約では、MTAを交わしてからの研究実施を定義しており、それらをサポートする研究開発体制が必要である。

海海底質の分布や環境生物のハビタットマップは、環境評価の場合は公表が前提であるが、有用資源の分布や、有用生物のハビタットマップは厳重に管理すべき情報である。一方、学術分野では、知的財産としてデータを公表することでイノベーションを推進し、産業利用分野では知的財産を独占することでイノベーションを推進する。情報管理においては、このバランスを取りつつ、適切に情報を取り扱う体制を確立する必要がある。

脅威③ 事故

1) 海中構造物の劣化

海中での構造物の建設や観測機器の設置には、安価で高い強度を長期間維持できる鉄筋コンクリートが多く使用されるが、地上や浅海域と異なり、深海域に設置されたコンクリート構造物は、高圧低温の環境に晒され、海水の化学組成に起因するカルシウム溶脱により、経年劣化が急速に進行する恐れがある。深海域（3,000m以深）におけるコンクリートの曝露試験は十分に行われていない。

こうした構造物には、石油井などの資源採掘施設、空港、産業プラント、洋上備蓄基地、橋梁・沈埋トンネル、観光基地、風力発電などがある。

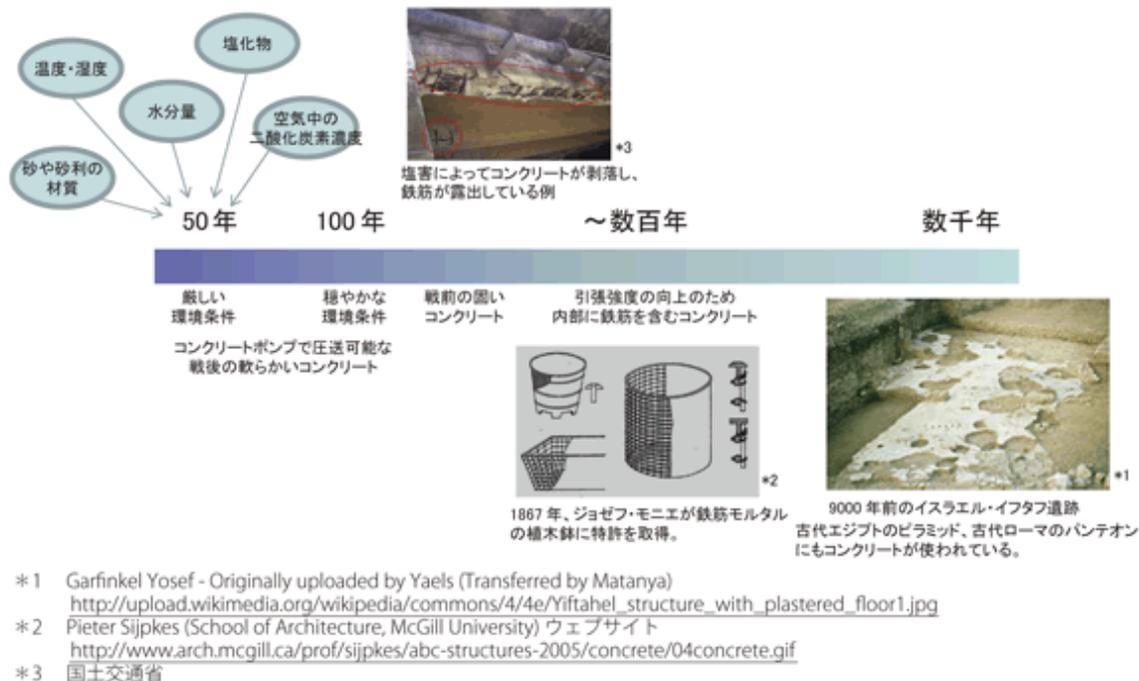


図3-7 海中構造物の変遷

コンクリートの寿命は、比較的好条件のもとで100年程度、海岸部等の悪条件下では50年程度といわれているが、さらなる長寿命化をはかる必要がある。

<あるべき姿と技術的解決策>

- 監視の強化については、第3節財産 脅威① 奪取行為に同じ。
- シミュレーション等による予測と、AUV等を活用した遠隔監視といったデジタルツインの導入により、効率的なメンテナンス技術が確立している。

<現在の技術レベル>

海水練りコンクリート²⁶²⁷が、強度が高く耐水性にも優れるとされている。

<対処に必要な将来技術>

深海という特殊な環境下では経験則が役に立たないため、データを取得するしかなく、以下のよう

²⁶ https://www.jci-net.or.jp/j/concrete/technology/201607_article_1.html

²⁷ GIGAZINE. 「2000年もの耐久性を誇るローマ時代のコンクリートは海水の腐食によって強度を上げていた」 <https://gigazine.net/news/20170705-ancient-concrete/>

な劣化対策が考えられる。

- コンクリートに代わる新素材の開発
- 既存施設の表面強化技術の開発
- AI等による状態無人モニタリング
- 自動メンテナンス技術の確立

2) 有毒ガス

海水

海水には様々なガスが溶け込んでおり、酸素と二酸化炭素の溶解量が特に多い。二酸化炭素は低温で溶解しやすく、温度が高くなるとガス化しやすいため、温度変化のある利用形態では、低温から常温になった際に、貯留タンク内に充満する可能性があり、注意が必要である。

船内

船内の生活空間に有毒ガスが及ぶ場合があり、LNGなどの輸送貨物の区画に入る場合に、中毒事故の危険がある。

また、生活排水の微生物発酵により、硫化水素ガスやメタンガス、二酸化炭素ガスが発生することがある。船舶によっては、汚水の処理タンクのガスが揺動で逆流し、トイレやシンクを通じて個室空間に及ぶ可能性がある。

さらに、潜水作業中に供給すべき気体の配管を間違え、有毒ガスの吸入が起きる可能性がある。特に窒素ガスの吸入事故が数件発生している。

海底構造物

熱水域などの硫化鉱物が堆積する場所では硫化水素ガスが発生する。鉄などに腐食を生じやすく、構造物の強度が劣化し事故につながる危険性がある。また、熱水域から離れるにつれて硫化水素ガスが海水中の酸素と反応し、硫酸などの酸化物に変化していくため、影響は減少する。しかし、硫化水素はそれを利用する生物が海底に生息するため、これによる金属腐食が原因で構造物の強度の劣化が進行する。対策としては、海底の有毒ガス成分を把握する技術の開発、安価で硫化水素に強い素材の開発、さらには有毒ガスが発生した場合の対応計画の策定等が考えられる。

海底堆積物の回収

海底堆積物の中には、メタンや二酸化炭素がハイドレートとして存在する場所がある。これらを回収して貯留する場合、貯留槽内に有毒ガスが滞留する危険がある。

<あるべき姿と技術的解決策>

- 監視の強化については、第3節財産 脅威① 奪取行為に同じ。
- デジタルツインの導入促進については、脅威③ 事故(1)海中構造物の劣化に同じ。
- 有毒ガスについては、発生を探知する技術が確立しており、何らかの方法による現場の状況把握が可能である。

<現在の技術レベル>

- 硫化水素は、石油・ガスの生産現場において最も危険な有害化学物質である。
- 2018年に発生した米ハワイ島キラウエア火山の噴火では、海に流れ込んだ溶岩流が海水と化学反応を起こし、有毒ガスを含む水蒸気が発生した。地元当局は肺の障害や皮膚炎を引き起こす恐れがあるとして住民らに注意が呼びかけた。
- 船内の貯留空間には、滞留するガスを逃がすための排気設備が設置されている。また、トイレやシンクにも、有毒ガスが滞留しないよう換気対策を施している。
- 有毒ガスは目視では確認できないため、ガスセンサーが設置されている。市販の二酸化炭素センサーや硫化水素ガスのセンサーが船内に設置され、定期的なメンテナンスが行われている。
- 潜水作業で供給するガスについては、ガスボンベの色やレギュレーターの手配り方を変えることで、人為的ミスによる有毒ガスの混入を防いでいる。

<対処に必要な将来技術>

- 掘削リグや海底火山の噴火から有毒ガスが発生した場合の大気の監視（二酸化硫黄や粒子状物質の濃度）や予報技術。
- 逃げる場所のない海上掘削施設等においては、硫化水素災害の予防対策は非常に重要であり、的確な知見、訓練及び優れたガス検知手法により可能である。

船内の生活空間におけるガスセンサーの定期検査の簡便化と長寿命化を進める必要がある。ガスセンサーのウェアラブル化をすすめ、バッジの装備や、ヘルメットへの設置により、個人レベルの安全性を高める技術が必要である。ガス取扱いの資格制度を的確に運用することでリスク管理を行い、制度が複雑化しないよう配慮したうえで、安全なガス取扱い技術の普及と啓蒙をはかる。

3) メタンハイドレート²⁸

陸上からの堆積物が厚く堆積している大陸棚には、メタンハイドレートが存在している。海底地すべり等で堆積していた地層がなくなると、地層内の圧力が下がり、メタンハイドレートが急激に溶け出す。メタンは海水には溶けにくいいため、気泡となって浮上し大気中に放出されるが、大量の気泡が発生すると、航行船舶や付近の洋上リグ等の事故につながる危険性がある。対策としては、洋上に構造物を設置する際には、メタンハイドレートの量を事前に把握し、危機管理計画を策定しておくことが重要である。また、メタンハイドレートを海底から抽出する際に、圧力をコントロールしながら安定抽出できる技術の開発を進めることが必要である（レアメタル採掘に関して有毒物質の発生が伴うSIPの推進）。

また、海底からのメタンガスの放出による海底生物と地球温暖化への影響や、生産水の放出による周囲の生物への影響も把握する必要がある。

²⁸ MH21-S研究開発コンソーシアム、「砂層型メタンハイドレート研究開発」。Retrieved from <https://www.mh21japan.gr.jp/envi ron.html>

<あるべき姿と技術的解決策>

メタンハイドレートが存在する場所と量を把握し、

- 海底からのメタンガスの漏出による、海底生物と地球温暖化への影響
- 生産水の海洋放出による周囲の生物への影響

等を把握したうえで、海底からのメタンガスが発生せず、生産水による生物への影響もない、安全な開発と生産を行う。

<現在の技術レベル>

メタンハイドレートは、海洋基本計画（平成30年5月閣議決定）において、「平成30年代後半に民間企業が主導する商業化に向けたプロジェクトが開始されることを目指して、民間企業が事業化する際に必要となる技術、知見、制度等を確立するための技術開発を行う」こととされている。同計画では、砂層型、表層型というメタンハイドレートのタイプ別に開発目標が定められている。

砂層型については、以下についての研究成果の評価が待たれる。

- 長期間の安定生産を実現する生産技術の確立
- 経済性を担保する資源量の把握
- 商業化を見据えた複数坑井での生産システムの開発等

表層型については、以下のとおり。

- 回収・生産技術の調査研究
- 商業化に向けた技術の確立
- 海底下の地層における表層型メタンハイドレート分布や形態の特徴等の解明

<対処に必要な将来技術>

「メタンハイドレート開発の今後の在り方について」（平成29年6月資源エネルギー庁資源・燃料部）によると、今後開発を必要とする技術は以下の通り。

- 安定生産技術の確立
 - 生産技術に関しては現在、生産手法の有効性を検証している段階である。安定生産の可能性の検証が今後行われることとなるが、検証に当たり、過去に実施した海洋産出試験を十分検証し、明らかとなった課題について、必要な対策を検討していく必要がある。
 - ガスの商業生産を行うには、1つの坑井で5～10年程度の連続生産を行う必要があるため、一定の生産性を維持しつつ、少なくとも数ヶ月ないしは1年程度の長期の安定生産を確立していく必要がある。これらを通じ、長期安定生産の見通しが立った段階で、複数坑井での中長期的な安定生産試験に移行する。
- 生産システム開発
 - 砂層型メタンハイドレートの商業化においては、複数の坑井から生産されるガスを効率的に収集し、パイプラインで陸上に移送するシステムの構築も併せて必要である。

このため、商業化に向けたパイロット実証試験に先立つ形で、上述した海域における複数坑井での中長期的な安定生産の試験と並行し、生産システムに関する要素技術の開発に着手する必要がある。

脅威④ 調査・開発の遅れ

1) 外国の調査・開発技術への過度な依存

調査により判明した課題を解決するために開発を進めるといように、「調査」と「開発」は一体的に行うべきものであるが、これを外国のノウハウに依存した場合、必要な技術力、技術者及びノウハウの蓄積が困難になるが、そうならざるを得ない背景も存在する。

例えば、海洋の調査・研究を行う船舶を建造する場合、船体や推進システムは日本のメーカーにより十分な性能を有するものが建造可能であるが、搭載する研究・調査機器は、大部分が海外からの調達品である。

こうした状況の背景として、船体や推進システムについては、日本のメーカーが内外の大きな海運市場に早くから参入し、高い技術を蓄積してきたため、市場における日本の優位が保たれてきた。しかしながら、海洋調査や開発の分野では、成長が期待できる大きな世界市場が常にあるとは言えず、国内においても、豊富で利用可能な海洋資源が確認されない限り、市場が期待できない。こうしたことから、国内企業に技術力があっても、そうした企業が積極的に海洋分野に参入して市場を形成することは期待できない。これは、水中調査用の自律型無人潜水機などの技術についても同様である。

<あるべき姿>

- 国内産業により高性能の機器が製造され、海外にも輸出されている。
- 国内産業に技術の高度化をはかる環境や機運が醸成されており、高い水準の製品が速いペースで市場投入され続ける。
- 産業界の雇用が安定しており、技術の革新と継承が行われている。

<現在の技術レベル>

日本周辺で海洋調査をおこなう研究船や無人潜水船に搭載する観測機器は、多くが海外製である。特に、海底地形や地質を調査する機器には、国産製品を選択する余地はない。また、自律型無人探査機の市場についても、国産メーカーは、外国メーカーの後塵を拝しているのが実情である。

観測機器名称	製造メーカー
マルチビーム音響測深機	Kongsberg Maritime (ノルウェー) Wärtsilä ELAC Nautik (独) Reson (デンマーク)
サブボトムプロファイラー (地層探査装置)	SYQWEST(米) KONGSBERG GEOACOUSTICS LTD(英) EdgeTech (米)

音響測位装置	オキシテック（日）
多層式流向流速計	Teledyne RD Instruments 社(米)
CTD(水温 電気伝導度 深度)	Seabird Electronics(米)
XBT/XCTD 装置	鶴見精機（日）
船上重力計	Micro-g LaCoste（米） ZLS corporation（米） SCINTREX（カナダ）
船上磁力計	テラテクニカ（日） Geometrics（米）

図3-8 JAMSTECの研究船が搭載する共通の主要な観測機器と製造メーカー

製造メーカー	量産機
Atlas elektronik（独）	SeaFox, Cobra, SeaCat
BAE Systems（米）	Archerfish
L3 HARRIS（米）	Iver3, Iver4
Teledyne Marine(米)	Gavia, SeaRaptor
Lockeed Martin（米）	Marlin, A-size AUV
General Dynamics（米）	Bluefin 21, Bluefin 9, Bluefin HAUV
Hydroid(Kongsberg Group)（米）	REMUS 100, REMUS 600, REMUS 6000
ECA（仏）	A-9, A-18, A-27, Alistar 3000
Kongsberg Defence & Aerospace(ノルウェー)	MINESNI PER Mk III
Kongsberg Maritime（ノルウェー）	HUGIN, MUNIN, Seaglider, Eelume, REMUS M3V
ISE（カナダ）	Explorer, Theseus
Saab Seaeye（スウェーデン）	Sabertooth
（株）IHI	—
川崎重工	—
三井E&S	AQUA EXPLORER 2、AQUA EXPLORER 2000、 たんたん
三菱重工	—

図3-9 自律型無人潜水機 (AUV: Autonomous Underwater Vehicle)製造メーカー

<対処に必要な将来技術>

広大なEEZを有する日本にとって、自国の技術による水中調査能力の確保は重要な課題である。航空機等と異なり、水上・水中での移動は大きく制限を受けることから、効率の高い調査技術を開発・実装していく必要がある。このため、今後必要な技術要素として、以下が考えられる。

- コンパクトで大容量のエネルギー源
- 調査観測船の省人化と無人化
- 無人運用を支える、各種技術の信頼性向上
- 自律型無人潜水機の現場海域への無人での迅速な展開
- 特に、海底地形や海底資源の調査に関わる調査機器の国産化
- 同上の機器により、従来よりも広域を1度で調査できる合成開口技術等の活用
- 水中調査機器を支援する高精度測位技術
- 水中調査機器を支援する、長距離大容量の通信技術

2) 外国製品への過度の依存

1) に同じ。

3) 技術者不足

日本の海洋には、陸上と同等規模の市場が無く、海運や食料関連、一部のレジャー等を除き、成熟した国内市場が存在しない。また日本のEEZ内から適正な価格で潤沢に市場供給できる資源も存在しない。このため、海洋では民間の競争原理が働かず、積極的な市場形成や技術向上のための開発資本が投入されることもない。このため、海洋では市場の成長が見込めず、通信インフラ等の整備も進まないことから、海洋への投資が遠のく傾向に拍車がかかることになる。

他方で、周辺を海に囲まれる我が国は、海洋状況把握 (MDA) の能力強化が重要課題であり、今後産業界を含め、広く優秀な人材を確保して重点を置くべき分野であるが、有効な市場がない現状では、大学等の教育機関も海洋を看板に人材を集めることが容易でないのが実情である。

<あるべき姿>

1) との共通点が多いが

- 雇用が安定し、技術の継承・革新が継続している。
- 海洋に関する大学・研究機関が充実し、学生や研究者に広く門戸が開かれている
- 海洋技術開発や研究開発への競争的資金等の支援策が豊富で充実している

<現在の技術レベル>

海洋関係の技術者を維持するためにも、安定した業務量が確保されていることが望ましい。特に、気象庁、水産庁、海上保安庁、海洋研究開発機構等に所属する調査・研究船の維持や定期的な代船建

造は、技術の伝承の意味でも大きな役目を果たしてきた。しかし、船舶の保有は民間も含めて縮小傾向にあり、技術の伝承されず、技術者の離散が続いているのが実情である²⁹。

<必要となる技術要素>

初等教育から社会人教育まで、切れ目ない人材育成を展開することが必要である。「日本工学アカデミー（EAJ）「海洋テロワール」提言（令和3年3月EAJ「海洋研究の戦略的推進」プロジェクト（リーダー：藤井輝夫））によれば、以下の通り。

①初等中等教育へのアプローチ

- 教育・研究機関、水族館・博物館、各種団体などの連携の下、海洋教育の定義や意義を统一的に定め、教育段階ごとにブレイクダウンし、各学習内容に入れ込む。
- 海洋教育に熱心な教員、各種団体の指導者等のネットワークを構築し、人材・情報、教材の可視化と共有化を進める。
- 体系化した教育パッケージや副教材の提供
- SDGsと連携した海洋教育プログラムの開発の推進
- 海洋の総合的理解に向けてはSTEAM教育の手法を考慮にいれた教育コンテンツ作成、提供等

②高等教育・社会人教育へのアプローチ

- 海洋に関わる教育・研究を行っている高等教育機関、各種研究所などの連携を図り、海洋に関する分野別の教育パッケージを複数作成する。それらを用いて夏季休暇中などに短期集中型教育プログラムを提供する。
- 大学院レベルの統合型海洋教育プログラムを、内外の教育研究機関が共同で構築する等

技術力の向上には海洋関連産業の活性化が必要であるが、短期間に実現することは困難である。しかし、資源に乏しい日本では、世界レベルの技術力の保有と維持が不可欠で、それには近道はない。例えばBoston Dynamicsの今日の突出した技術の背景にDARPAの支援があったことは事実であるが、40年ひたすらに取り組むことで達成した技術レベルであることに留意すべきである。

また、開発支援側の技術に対する見方の狭さに起因する、技術者不足に陥る負のスパイラルも存在する。新たな技術への投資は、近視眼的な研究開発に対してのみ行われるのが常であるが、技術が実装された将来像を見据えた投資が行われていない。これは、市場が乏しい海洋分野の機器開発では深刻な問題である。新技術の実験が既存のプラットフォームを利用して行われるのは当然であるが、そのプラットフォームの維持・運用がすでに市場として成立していないため、外注等の支援を得られず、開発者自身が、実験プラットフォームの維持で消耗し、肝心の技術開発に注力できず、開発の停滞に陥ってしまう。高いレベルの技術開発を目指すのであれば、先端技術の技術者も必要であるが、開発プラットフォーム等を維持管理する現場の技術者や、開発を支援する実験技術者なども必要であ

²⁹ <https://www.mlit.go.jp/maritime/content/001359742.pdf> 資料1-1(別紙)など

る。こうした開発の土台が整っていない環境では、レベルの高い開発を継続的に行うことは困難と言わざるを得ない。

4) 資源調査開発能力の内製化^{30 31}

わが国が資源の調査・開発能力を有することは、他国の開発にも貢献できることであり、外交上の有効な武器になる。一方、外交上の脅威となる他国がその役割を担うこととなった場合、友好国が当該国への依存度を高める恐れもあり、外交上の損失につながることから、SIP事業の推進が重要となる。

<あるべき姿>

我が国のEEZ内では、メタンハイドレートから回収されるメタンガス、海底熱水鉱床、コバルトリッチクラスト、マンガン団塊、レアアース泥から回収される鉱物の存在が確認されている。従来型の石油天然ガス開発や陸上の鉱山開発は、海外では大手企業が行っており、国内生産の少ない日本では採算が難しいが、日本の海洋と地質に適した調査・生産手法、その手法に適した機器の開発及び、それらを熟知した人材の育成を行い、オールジャパンの体制を確立する。これにより、海洋石油・天然ガス開発の工程である、探鉱、試掘、開発、生産、輸送の全ての工程において、

- 資源開発会社がオペレーターとして、
- 海洋探査会社とフィールドサービス会社とエンジニアリング会社、海運会社がコントラクターとして、
- 造船会社と機器メーカーが機器製造事業者として、

事業に参加することができる。鉱山開発においても、同様の工程で行われている。

<現在の状況>

日本の周辺の深海底には、メタンハイドレート、銅・亜鉛・鉛・金・銀などを高濃度で含む海底熱水鉱床、ニッケル・コバルト・白金などを含むコバルトリッチクラスト、銅・ニッケル・コバルトを含むマンガン団塊、レアアースを含むレアアース泥など、潜在的な海底鉱物資源が存在している。

³⁰ 資源エネルギー庁「海洋資源の活用をめざして、「海洋エネルギー・鉱物資源開発計画」を改定」。Retrieved from <https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyokai/hatukeikaku.html>

³¹ 日本財団 オーシャンイノベーションコンソーシアム。「海洋石油・天然ガス開発の産業構造」。Retrieved from https://project-kaiyoukai.hatsu.jp/dev/test_web_ol_dsite/industry/flow_01.shtml

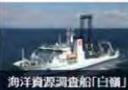
資源	メタンハイドレート		石油・天然ガス		
特徴	低温高圧の条件下で、メタン分子が水分子に取り込まれた氷状の物質		生物起源の有機物が厚く積もった海底の堆積岩中に賦存		
存在水域等	 砂層型（主に太平洋側） 水深 500m 以深の海底下 数 10m の砂質層内 表層型（主に日本海側） 水深 500m 以深の海底面及び 比較的浅い深度の泥層内		水深数百m～2,000m 程度の 海底下数 km 	三次元物理探査船「資源」	
資源	海底熱水鉱床	コバルトリッチクラスト	マンガン団塊	レアアース泥	
特徴	海底から噴出する熱水に含まれる金属成分が沈殿してできたもの	海山斜面から山頂部の岩盤を皮殻状に覆う、厚さ数cm～10 数cmの鉄・マンガン酸化物	直径2～15cmの楕円体の鉄・マンガン酸化物で、海底面上に分布	海底下に粘土状の堆積物として広く分布	
含有金属	銅、鉛、亜鉛 等 (金、銀も含む)	コバルト、ニッケル、銅、白金、マンガン 等	銅、ニッケル、コバルト、マンガン 等	レアアース (重希土も含む)	
存在水域等	沖縄、伊豆・小笠原 (EEZ) 700m～2,000m	南鳥島等 (EEZ、公海) 800m～2,400m	太平洋 (公海) 4,000m～6,000m	南鳥島海域 (EEZ) 5,000m～6,000m	
					

図3-10 海底資源の種類

<対処必要な将来技術>

日本の海洋、地質に適した調査・生産手法、その手法に適した機器の開発及び、それらを熟知した人材の育成（従来型の石油天然ガス開発や陸上鉱山開発は、海外では大手企業が行っており、国内生産の少ない日本では採算が難しい）が急務である。

また、開発にともなうモニタリング技術として以下が求められる。

- メタンハイドレートからのメタンガスの漏出のモニタリング
- 環境影響モニタリングの確立

脅威⑤ 外国による排他的経済水域（EEZ）への進出

日本の国際貢献度低下に伴う中国の台頭

<あるべき姿と技術的解決策>

赤道帯の海洋で発生する気候変動現象は、全球規模で影響を及ぼすことから、WCRP（世界気候研究計画）では、これを捉えるための観測システムとして、GT MBA（Global Tropical Moored Buoy Array；全球熱帯ブイ網）とよばれる国際観測ネットワークを次のように構築し、国際共同で運用している。

- 太平洋：TAO/TRI TON
- 大西洋：PIRATA
- インド洋：RAMA

このうち、日本はJAMSTECが、TRI TON(Tri angle Trans-Ocean Buoy Network：熱帯域海洋気象観測係留ブイシステム トライトンプイ)として、東経156度から西側137度までを担当し、1998年から運用していた。しかし、近年は予算上の問題（シップタイム不足など）から展開規模が縮小し、JAMSTECは、GT MBAでのTRI TONの運用を2021年に休止した。一方、中国がTRI TON観測網にブイを設置したことが、JAMSTECの航海で確認されている（図3-11）。ブイの洋上浮力体には“TPOS” Tropical Pacific Observing System（熱帯太平洋海洋観測システム）の文字が見られ、国際観測活動の一環であることを示している。



図3-11 JAMSTECが運用休止した、赤道-156Eサイト付近に設置された中国ブイ

GT MBAは国際観測網であり、中国が運用の一端を担うことに問題は無いが、データを公開している様子は、いまのところ見られない。また中国は、GT MBAで計画されたTRI TON観測網から、さらに北方への延伸も独自に提唱している。

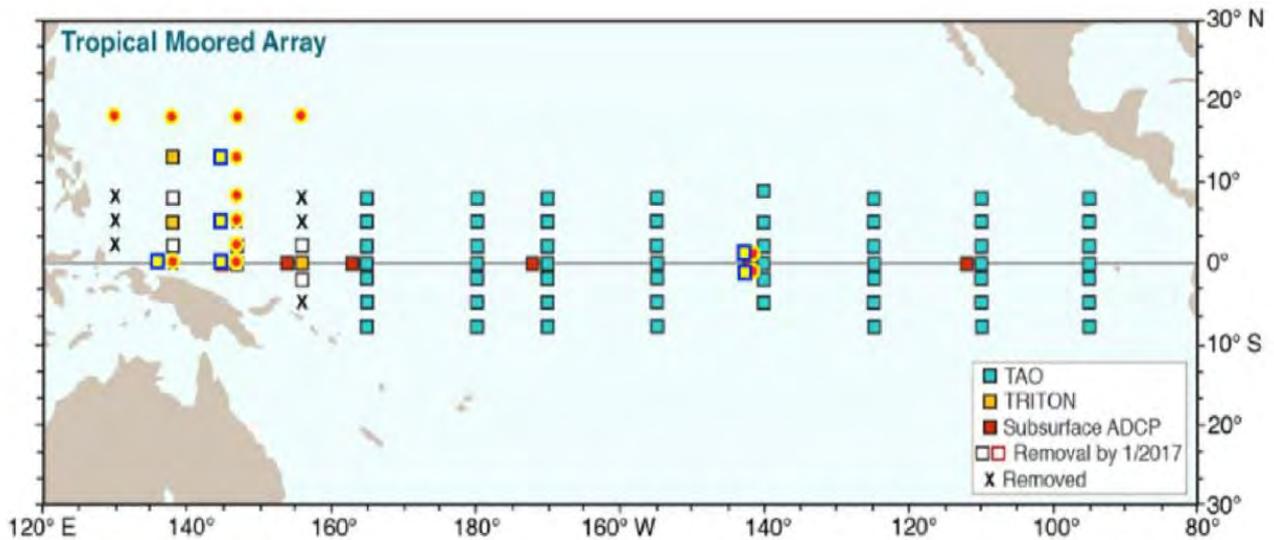


図3-12 中国がC-GOOSとして提唱するGTMBAIによる南太平洋での観測活動

※黄色丸は国家海洋局が計画する大気海洋観測ブイを、青枠で囲まれた黄色四角は、超音波流速計の設置計画を表す。

<あるべき姿と技術的解決策>

気候変動を捉える観測網の運用を日本が休止していく過程で、運用能力を持つ他の国が運用を継続することは、国際観測網としてはあるべき姿である。

一方で、データの連続性や品質管理・精度等の観点から、可能であれば日本が観測を継続し、世界にデータを発信していくべきであるが、多額のランニングコストが必要で、大規模な設備が無いと国際ブイ網を維持出来ないのも現実である。従って、今後国際観測網の運用維持においては、現場でのハンドリングが容易でランニングコストの低いプラットフォームによる、持続可能なシステムの構築が必要である。

<現在の技術レベル>

これまで日本がGTMBAIのTRITON観測網やRAMA観測網で運用してきたシステムは、係留ブイ方式のトライトンブイと m-TRITONブイである（図第3節 ⑤-3）。トライトンは堅牢な観測システムであるが、洋上での展開や揚収には大型のハンドリング設備が必要となり、JAMSTEC船舶でも限られた船舶でしか運用できない。一方、m-TRITONブイシステムは、外国の比較的小型な研究調査船でも展開や揚収が可能である。しかし、いずれの方式も高度な操船技術や甲板上でのハンドリング技術を必要とし、m-TRITONの運用においても、外国船の手配はできるものの、船員の練度の維持が難しく、観測網の維持という面で課題が残る。

搭載機器やセンサーについて、長期間の洋上観測を行う技術は確立しているが、生物付着や漁船によるバンドリズム被害などの環境下でGTMBAIの高い要求精度を維持するには、最長でも1.5年程度ごとの交換が必要である。

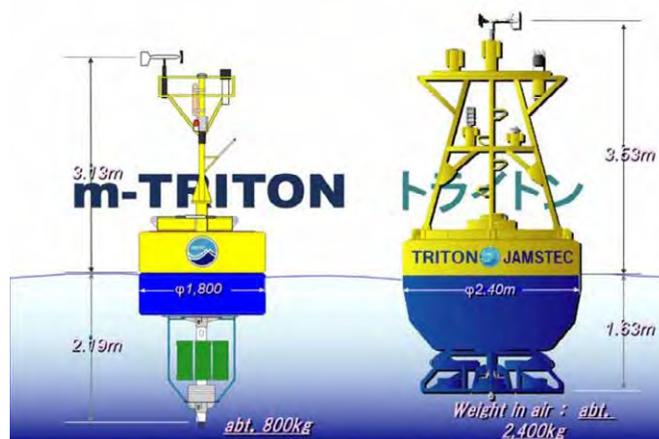


図3-13 JAMSTECがGTMBAで運用する洋上浮力体部分

※左のm-TRITONは主にインド洋RAMAブイ網で現在も運用され、右のトライトンは、西太平洋のTRITONブイ網で使用されてきた。

こうしたブイの代替技術として、

- 洋上観測部分：Wave Glider（商品名）をベースに改良を加えた、海面フラックス観測グライダー
- 水中観測部分：小型の観測フロート（図20右）

などが開発され、実用段階に到達している。

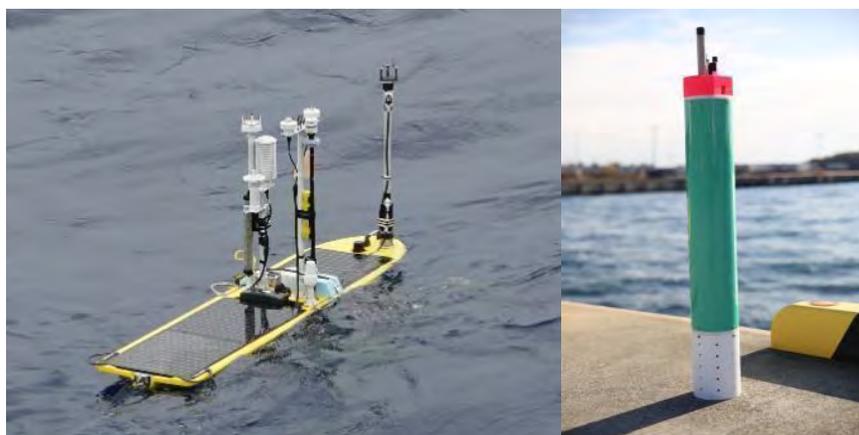


図3-14 海面フラックス観測グライダー（左）と小型の観測フロート(右)

また、これらと、陸上をつなぐ衛星データ通信システムは、装置・アンテナともに小型で低消費電力のイリジウムやアルゴス、スラーヤ等が存在するが、いずれも回線容量が小さく、気候変動観測データ程度の通信には活用できるが、リアルタイムでの状態監視等は不可能である。

<必要な技術要素>

持続可能な観測システムのためには、

- 洋上での展開や回収が容易なプラットフォームの実現
- 国際観測の仕様を満足しつつ、低ランニングコストで長期の展開が可能な観測システムの実現

が必要である。

具体的には、自然エネルギーを利用した自航、長期定点観測及び帰還が可能な観測プラットフォームの開発や、あるいは展開、揚収に際して高度なデッキハンドリングや操船技術を必要とせず、船舶の選択肢の広い係留システム技術の開発が挙げられる。

自然エネルギーを活用したプラットフォームは、すでにウェーブライダーやセイルドローン（いずれも商品名）が導入されはじめているが、現状では生物付着やAIS非搭載船舶等との接触などの問題があり、長期間の観測には課題が残されている。

また、定点における洋上と水中でのリファレンス観測や、さまざまな監視を長期間継続的に行うためには、現場へのアクセスは引き続き必要となるが、今後も係留系の需要はあると考えられる。ランニングコストや運用リソースの柔軟性を高めるためには、コンパクトでかつ堅牢な係留系の実現が必要である。

洋上監視を強化する観点からは

- 常時接続可能で、一定の回線容量を持つ、小型・省電力型の衛星通信システムの実現
- コンパクト化が進むシステムによる、長期間の監視や通信を支える電源の開発

などが挙げられる。

また技術要素ではないが、国際観測網等の継続運用を実施する機関の設立も、持続的運用の観点から重要である。

脅威⑥ 地殻変動

<地殻移動に伴う変動ひずみの観測技術>

日本周辺のプレート境界付近では、地殻移動に伴う変動ひずみが常時蓄積されている。これを逐次把握することは重要であるが、陸上と違い、海底に蓄積されるひずみを把握することは容易ではない。これを計測する手法としては、海底に複数のセンサーを設置し、これらを通信ケーブルで結んで陸上の基地局でモニタして計測するか、あるいは水中音響技術を利用し、海底の固定点に設置されたトランスポンダを介して、洋上のさまざまなプラットフォームから、海底の固定点を精密計測する技術（以下、GPS/A技術）を利用することになる。

<あるべき姿と技術的解決策>

地殻移動に伴う変動ひずみ計測センサーを、日本周辺の太平洋の側の海底にくまなく設置し、リアルタイムあるいは準リアルタイムでモニタリングをする必要がある。これを実現するには、海底のセンサーあるいは洋上のプラットフォームからの大容量データ通信回線の確保と、洋上プラットフォームについては、高精度GNSSセンサーとGPS/A専用のハイドロホンが搭載でき、気象・海況に左右されず長期運用可能な専用プラットフォームが必要となる。

<現在の技術レベル>

海底設置型としては、DONET等の観測ケーブルとセンサーを組み合わせた海底ケーブルネットワークシステムがあり、地殻変動のようなゆっくりとした動きから大きな地振動まであらゆるタイプの海底の動きを捉えることができる。しかし敷設するためには、専用のROVやそのための母船が必要となり、敷設には時間とコストがかかる。GPS/Aについては、海底に多数のトランスポンダが設置されており、船舶やWave Gliderによるキャンペーン観測)が実現されているが、地殻変動計測については、洋上データ回線の容量が足りないことから、リアルタイム観測は実現していない。また、測位のための水中音響を発することから、電力消費が高く、冬場の観測では太陽電池の電力不足が頻発する。

<必要な技術要素>

海底ケーブルネットワークを普及させるには、敷設やメンテナンスのためのROVや母船といった専用ツールの配備が必要である。あるいは、高い自律航行や作業を行うことができ、海底作業もこなせるAUVも有力な候補である。GPS/A技術については、気象・海象に強く、長期にわたる持続的な運用が可能で、ハンドリングも容易なコンパクトなプラットフォームの実現が望まれる。同時に、コンパクトであると同時に、大容量の給電能力を有する必要がある。洋上からの通信については、動揺するプラットフォームから、小型のアンテナで100Mbpsクラスの大容量通信を、省電力で行える必要がある。

第4節 食料

脅威① 領海・排他的経済水域（EEZ）における対応

<現状>

第1節 国民の「脅威① 周辺国の海洋進出及び不法領海侵入」で述べたとおり、2021年2月に施行された「中華人民共和国海警法」（所謂海警法）により、中国が定める管轄海域とその上空において、「外国軍用船舶等による違反行為に対して強制退去等の措置が可能」（第21条）となったほか、必要であれば武力による対処も可能となった（第22条）。尖閣諸島をめぐる問題が深刻化する中でこうした中国の新たな動向により、我が国との関係は一層悪化しており、海洋安全保障をめぐる問題が緊張度を増していることは明らかである。海警法の施行により、海警船の活動の態様等に顕著な変化はないが、尖閣諸島周辺接続水域の航行は常態化しており、八重山漁協所属の「鶴丸」に対する「政治的な行動をする漁船への対応行動」や、「第一桜丸」、「恵美丸」、さらには沖縄本島方面から尖閣諸島周辺海域に出漁する日本漁船への接近事案が報告されている。そのほかにも、外国の船舶が、我が国のEEZ内で違法に活動することで、我が国の漁船の漁を妨害するリスクがある。近年では日本のEEZ内にある日本海の大和堆周辺以北の水域で、北朝鮮籍の漁船による違法操業が相次いで報告されている。こうした中で、令和4年の水産庁漁業取締船による外国漁船への取締実績として、立入検査4件、拿捕（逮捕）1件、違法設置漁具（かにかご、ばいかご等）の押収23件が報告されており、日本の領海及び排他的経済水域の安全と資源を守るための活動が、海上保安庁や水産庁を中心に日夜続けられている³²。

<対策>

こうした継続的な監視検挙活動に加え、海上保安庁をはじめとする政府が一体となって一元的管理できる効果的な対応が今後さらに重要となる。現状、内閣府総合海洋政策推進事務局の総合調整の下、海洋情報の所在を一元的に管理・提供する「海洋情報クリアリングハウス」が運用されているほか、平成28年7月に総合海洋政策本部において決定された「我が国の海洋状況把握の能力強化に向けた取組」を踏まえ、政府関係機関等が保有する様々な海洋情報を地図上に重ね合わせて表示できる「海洋状況表示システム（海しる）」が、平成31年4月から運用を開始している。今後はさらに、センサー技術や衛星技術を駆使したより高度な「海上状況把握」（MDA）システムを構築することでEEZ全体を監視し、迅速かつ効果的に対応できる体制の構築が求められている。

³² 水産庁「令和4年の外国漁船取締実績について」令和5年2月28日 <https://www.jfa.maff.go.jp/j/press/kanri/230228.html>



図4-1 日本海大和堆周辺水域において北朝鮮漁船に対し放水する水産庁漁業取締船（水産庁）

水産庁漁業取締船による外国漁船への立入検査件数

年	合計	韓国	中国	台湾	ロシア
平成30年	14	9	3	0	2
令和元年	8	6	0	0	2
令和2年	1	1	0	0	0
令和3年	2	0	0	0	2
令和4年	4	1	0	0	3

水産庁漁業取締船による外国漁船の拿捕件数

年	合計	韓国	中国	台湾	ロシア
平成30年	6	5	0	0	1
令和元年	1	1	0	0	0
令和2年	1	1	0	0	0
令和3年	0	0	0	0	0
令和4年	1	0	1	0	0

※ 拿捕件数には逮捕件数を含む。

水産庁漁業取締船による違法設置漁具の押収

	件数	押収物			(参考) 漁獲物(トン、概数)
		刺し網 (km)	はえ縄 (km)	かご漁具 (個)	
平成30年	26	0	29	2,276	14.7
令和元年	37	7.5	0.9	3,125	19.0
令和2年	22	0	—	1,457	12.0
令和3年	18	4.3	0	1,009	10.4
令和4年	23	1.4	0	1,877	12.2

※ はえ縄の長さについては、潮流等による絡みがひどく、計測不能なものを除く。
令和2年に押収したはえ縄は計測不能なもののみ。

図4-2外国漁船に対する取締りの状況（水産庁）

また、我が国のEEZを維持する取り組みも継続する必要がある。中でも、我が国のEEZ維持において極めて重要な、本邦最南端の沖ノ鳥島の保全管理や、低潮線の保全及び活動拠点の整備は、引き続き国

の直轄により実施する必要がある³³。また、地球温暖化による海面上昇は、我が国のEEZを脅かす潜在的脅威となり得る。こうしたことから、リアルタイムの海洋モニタリングの継続が欠かせない。特に、海面水位のモニタリングは、リアルタイムの現状計測、面的な計測および、継続的な計測が欠かせない³⁴。日本は、2000年から地球全体の海洋変動をリアルタイムで捉えることを目指す、前例のない大規模な国際プロジェクト「国際Argo計画」に参画し、積極的に世界規模での海上モニタリングに貢献してきた。今後は、①船舶観測、②係留系観測、③中層フロート観測の全体を俯瞰することが重要になると指摘されている³⁵。



³³ 国土交通省『国土交通白書 2018』<https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h30/hakusho/r01/html/n2261000.html>

³⁴ 磯野哲郎「国際Argo計画に貢献する日本の海洋政策に関する評価・分析」日本海洋政策学会第14回年次大会報告資料(2022) <http://oceanpolicy.jp/wp-content/uploads/研究発表5-磯野様.pdf>

³⁵ *ibid.*



図4-3 沖ノ鳥島の位置と保全活動の様子 (国土交通省)

脅威② 拿捕

<現状>

上記同様、我が国のEEZ内において国民の身体や財産を拘束する不法な活動が行われている。1950年代には、韓国が国際法に反する海上境界線「李承晩ライン」を一方的に設定して竹島を取り込み、この水域に出漁した日本の漁船を拿捕するという事案が相次いで発生していた³⁶。また、2007年には、ロシア国境警備局所属の警備艇が、我が国漁船4隻を国後島北方の領海内で「拿捕」する事案が発生している³⁷。

<対策>

EEZ 全体を監視し、事案に対して迅速かつ効率的に対処する体制の整備が必要となる。各種のセンサーや衛星による監視技術を駆使して、我が国の領海及びEEZ内での活動の安全を確保することが重要である。近年では、合成開口レーダー（SAR）のデータと機械学習により、広域地表面の継続監視が可能になりつつある。SAR衛星等により、船舶動静をリアルタイムで詳細に把握することで、領海・EEZ内における船舶の探知等、海域の状況を効果的に把握できるようになるであろう。特に、SARによる情報をAISと照合することで、海上の物体の検出だけでなく、それらを識別し、不審な活動を行う船舶等の特定が可能になる³⁸。

³⁶ 内閣官房 領土・主権対策企画調整室「韓国による日本漁船の拿捕」<https://www.cas.go.jp/jp/ryodo/ryodo/takeshi-ma-jcg.html>

³⁷ 外務省「国後島北方水域におけるロシア当局による日本漁船の拿」(2007年12月13日)https://www.mofa.go.jp/mofaj/press/release/h19/12/1176622_818.html

³⁸ 三菱スペースソフトウェア(株)「衛星による海上漂流物・船舶の観測について」(2015年3月5日)https://www.rssj.or.jp/rssj/jitsuriyou_kouen_ppt/symp_report20150409/7.pdf

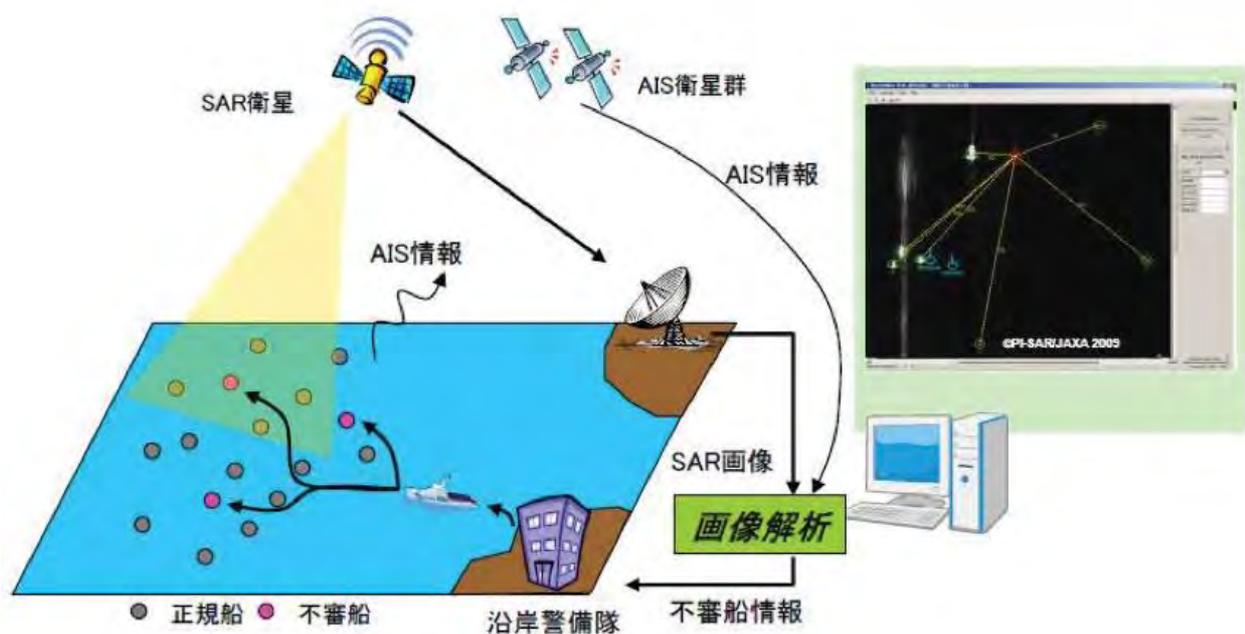


図 4-4衛星による海上船舶観測のシステム構成（三菱スペースソフトウェア（株））

脅威③ 水産資源の乱獲

<現状>

島国の日本にとって、水産資源は人々の生活に欠かせないと同時に、重要な産業の一つである。一方で、世界的な水産資源の消費は、ここ半世紀で右肩上がりに上昇している³⁹(図4-5)。また、1996年に日本が国連海洋法条約を批准しEEZを設定して以降、日本の漁業活動はEEZ及びその周辺の公海上を中心に行うものとなったが、その漁獲量は、ここ20年間で、あらゆる魚種について減少している(図4-6)⁴⁰。こうした状況下、外国船等による我が国周辺海域における乱獲は、食糧安全保障の観点からも我が国にとっての脅威である。IUU漁業インデックス (Illegal, Unreported and Unregulated Fishing Index) (図4-7) によれば、2021年のIUU漁業国の上位3ヶ国は、中国、ロシア及び韓国であり、いずれも日本と海で接している⁴¹。このように、我が国は外国漁船による乱獲の脅威を継続的に受けていることがわかる。

³⁹ 水産庁『平成28年度水産白書』

⁴⁰ 和田 時夫「わが国周辺の水産資源の現状と見通し ～増える魚、減る魚～」2019年度東京水産振興会講演会。 <http://lib.suisan-shinkou.or.jp/ssw621/ssw621-02.html>

⁴¹ IUU Fishing Index, <https://iuufishingindex.net/ranking>

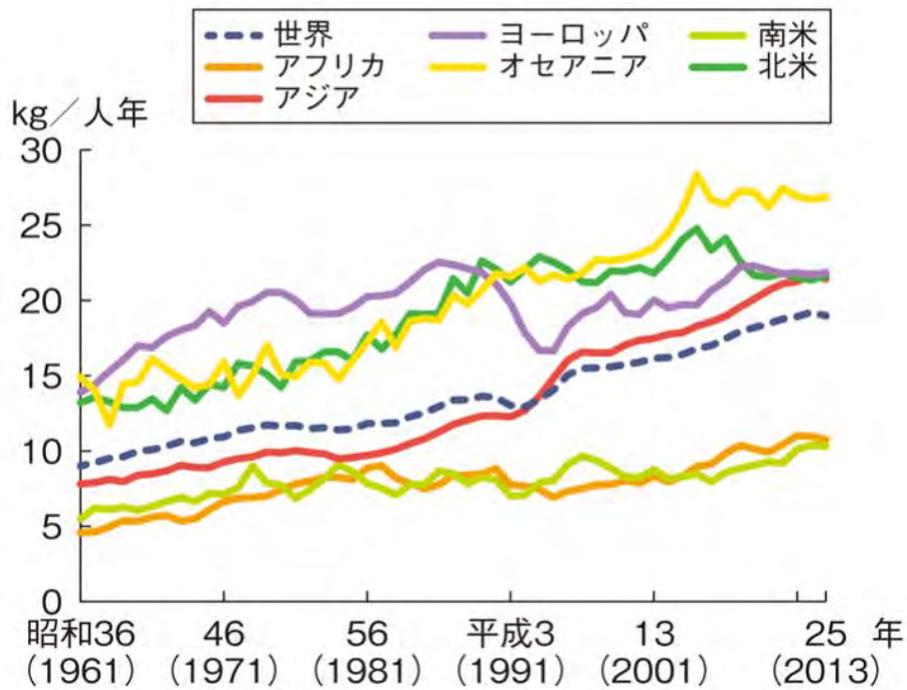


図4-5 地域別の世界の1人1年あたりの食用魚介類消費量の推移（粗食料ベース）（水産庁）

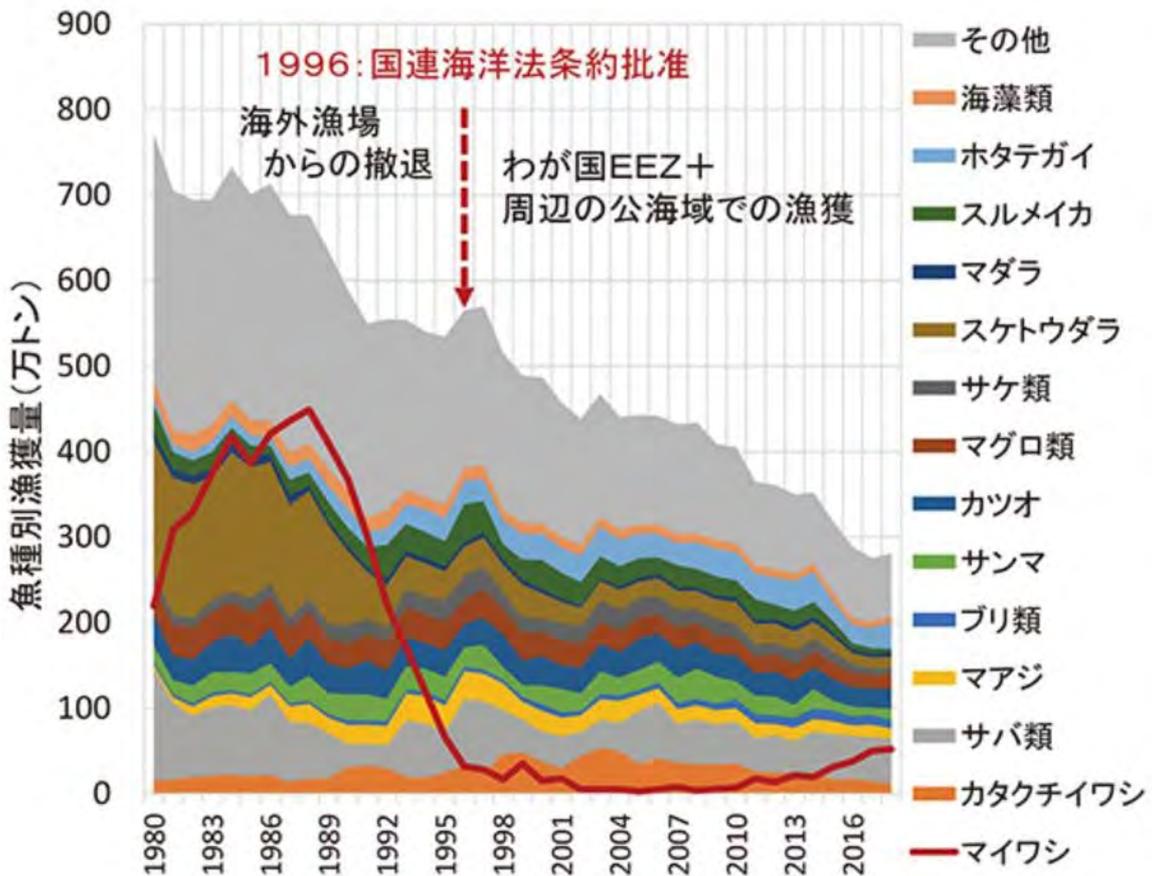


図4-6 主要魚種別漁獲量の経年変化（東京水産振興会）

2021 rank	rank change from 2019	country	2021	2019	2019-2021 score change
↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓
#1	—0	China	3.86	3.93	↘-0.07
#2	↑2	Russia	3.04	3.16	↘-0.13
#3	↑34	Korea (Rep. South)	2.91	2.49	↗0.42
#4	↑6	Somalia	2.90	2.75	↗0.16
#5	↑2	Yemen	2.89	2.96	↘-0.07
#6	↘-4	Taiwan	2.88	3.34	↘-0.47
#7	↑24	Ukraine	2.75	2.53	↗0.22
#8	↑53	Eritrea	2.75	2.31	↗0.44
#9	↑16	Egypt	2.70	2.58	↗0.12
#10	↑2	Libya	2.69	2.73	↘-0.04

図4-7 IUU Fishing Index 2021

しかし、乱獲の脅威は外国漁船によるものだけではなく、日本漁船による乱獲も水産資源の減少をもたらしてきたことは否定できない。例えば、スケトウダラの漁獲量の激減の原因を韓国漁船による乱獲であるとする主張が多く見られた。しかしながら、韓国漁船の排除が決まった1999年以降も、漁獲量が大きく減少し続けており（図4-8）⁴²、国内の水産資源管理の問題も原因として指摘されている。

⁴² 片野歩「『魚が獲れない日本』を外国のせいにする人の盲点：漁業の歴史を知らないから他国を非難してしまう」『東洋経済』2022年12月8日。https://toyokeizai.net/articles/-/636627?page=2

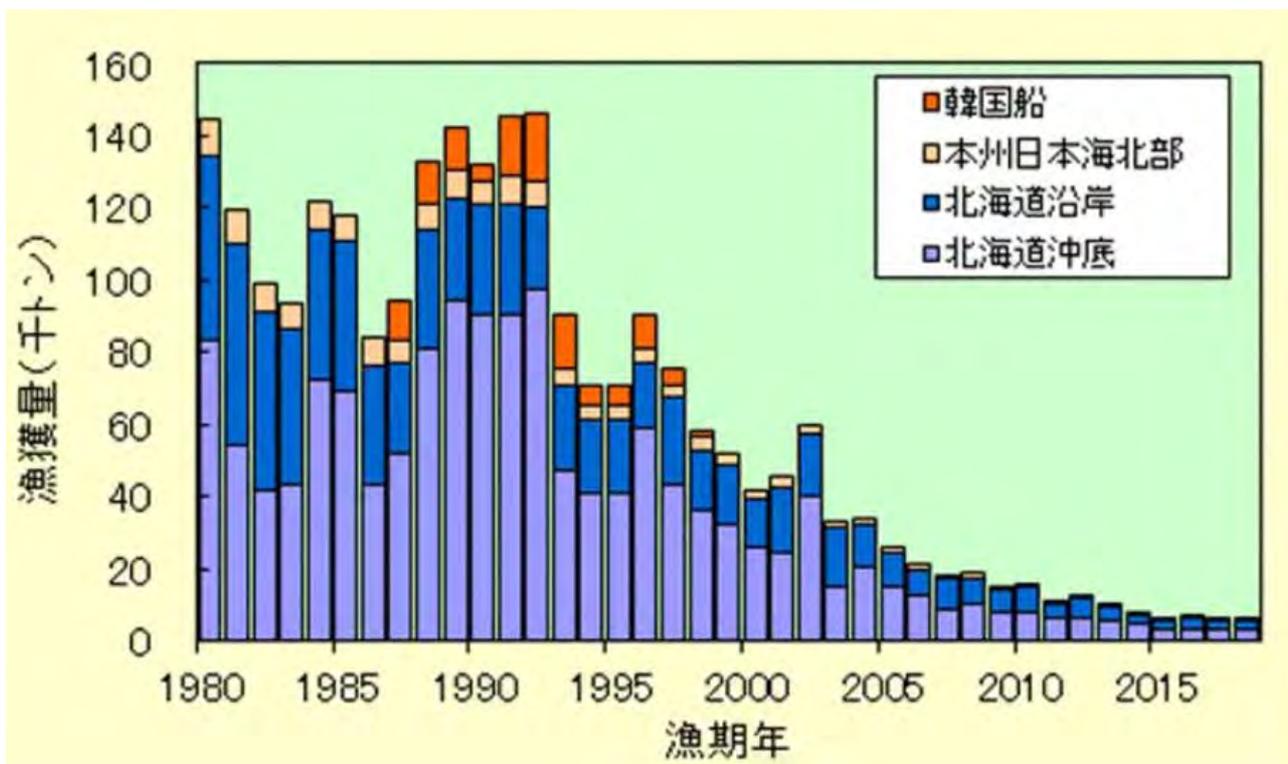


図4-8スケトウダラ 日本海北部系群水揚げ推移 (東洋経済)

<対策(理想論)>

外国漁船による我が国の領海及びEEZ内での違法な漁業活動は、厳正に取り締まる必要があり、そのためにも、これまでに述べたセンシング技術や衛星技術による船舶監視は有効である。特に、リアルタイムで海上の状況や船舶動静を把握することが重要で、外国籍の漁船による密漁や乱獲を常に厳しく監視し、適切に対処するシステムの構築が求められる。

一方で、国内の水産資源管理にも改善の余地があると考えられる。水産庁は「水産資源ごとに、最新の科学的知見を踏まえて実施された資源評価に基づき資源管理の目標を設定し、当該資源管理の目標の達成を目指し漁獲可能量による管理を行い、最大持続生産量を実現できる資源量の水準を維持し、又は回復させることを基本⁴³⁾」としており、2020年に漁業法を改正した。ここでは、乱獲を防止するための「限界管理基準」が設定されたほか、主要資源毎の資源管理目標も設けられた⁴⁴⁾。広大な海洋空間を利用こうした近年の政策の動向を踏まえ、わが国が水産資源管理に関して実施すべきこととして、以下が挙げられる。

- 科学的調査結果に基づき、魚種毎に資源管理目標を明確に定めること

⁴³⁾ 水産庁「資源管理に関する基本的な考え方」<https://www.jfa.maff.go.jp/j/suisin/>

⁴⁴⁾ 水産庁「水産政策の改革について」令和5年1月。<https://www.jfa.maff.go.jp/j/kikaku/kaikaku/attach/pdf/suisa nkai kaku-17.pdf>

- 漁業者に対し、資源管理の達成度を明示する等の情報公開を行うこと
- 環境に配慮した養殖漁業の研究及び普及促進
- 令和2年度から実施している新たな資源管理システムの有効性を科学的データにより検証し、関係者に説明すること
- 同システムの継続的見直し及び実施

また、国際的な水産資源管理に関して実施すべきこととして、以下が重要である。

- 衛星によるIUU漁業監視体制を強化し取締り機関への通報体制を充実させ、厳正な取り締まりにより抑止を図る
- 効果的な栽培漁業の手法を開発し、モデルケースとして国内外への普及を図る

脅威④ 生態系の変動・破壊

1) 海洋生物の生息域変動

<あるべき姿と技術的解決策>

船舶が航行中に発する海中騒音が問題になっており、多くの海洋生物が感じる音の領域に船舶騒音の領域が重なるため、海洋生物のコミュニケーションに影響を与えているとの調査報告もある。国際海事機関（IMO）では、2022年以降に規制を検討する動きがあり、カナダでは低騒音船へのインセンティブを導入している。こうした中、我が国としても、船舶による海中騒音の最大原因であるキャピテーションを抑制する素材の開発や、プロペラの設計等の技術開発を進めるとともに、ディーゼル発電機の振動を防振ゴムなどで船体に直接伝えないようにする電気推進船の導入等が考えられる。合わせて、バイオリギングなどの技術を活用した、生活史の理解と適応的な保護区の設定等も検討の余地がある。

気候変動に伴う生態系の変化については、生態系構造の変化、生息域の移動及び時期の変化が、高い確信度で世界的に観測されていることを示している（IPCC第2作業部会第6次報告書）。アジア地域では、生息域の移動の証拠が限定的とされているが、構造及び時期の変化については観測的事実が集積されている。

(a) 生態系において観測された気候変動影響

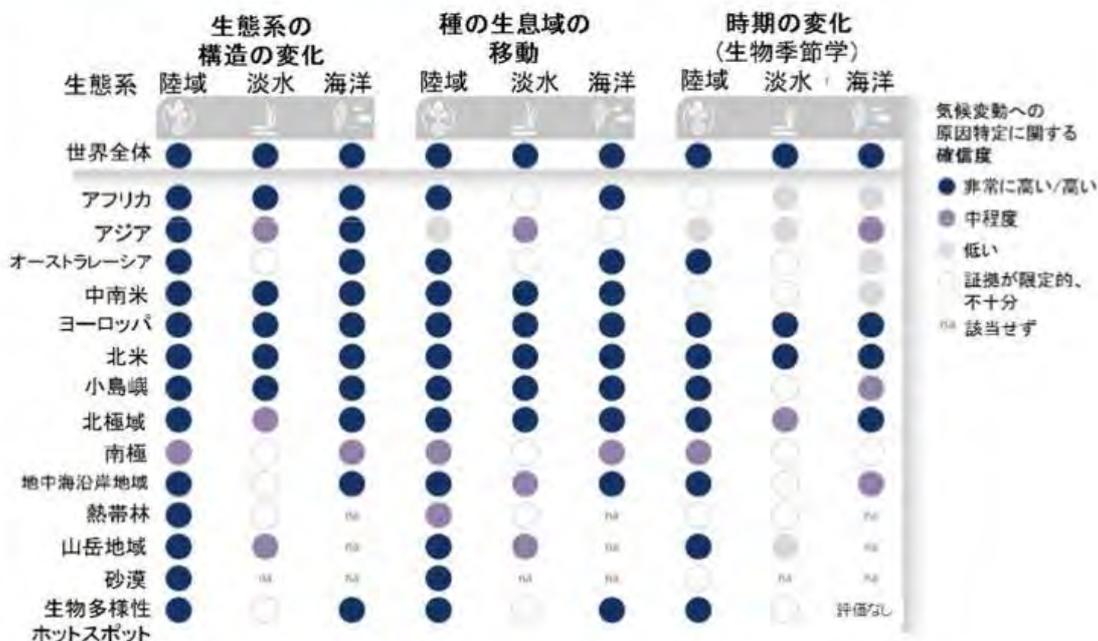


図4-9 生態系において観測された気候変動影響⁴⁵

日本周辺海域での、気候変動による海洋生態系の影響については「気候変動影響評価報告書⁴⁶」にまとめられており、沿岸生態系、海洋生態系ともに特に重大な影響が認められる、とされている。確信度については、亜熱帯域の沿岸生態系については高いとされているものの、温帯・亜寒帯の沿岸生態系では中程度、海洋生態系では低いとされており、今後継続的なモニタリングが必要とされている。

食糧としての海洋生物の生息域変動も顕著に生じていると考えられている。日本周辺の変化については、農林水産省の「気候変動に対応した循環型食糧生産等の確立のためのプロジェクト」において、「地球温暖化による『海』と『さかな』の変化」にまとめられている⁴⁷。

その可能性として、表層の海水温上昇と塩分濃度の低下が海面の物質循環を弱め、栄養塩の供給が減少することが示唆されてきた。これにより、生育するプランクトンの生産量が減少し、海洋生物全体の生産量が低下するという推定が指摘されている。

⁴⁵ <https://www.env.go.jp/earth/ipcc/6th/index.html>

⁴⁶ 環境省. 「気候変動影響評価報告書」(2020年12月17日). Retrieved from :<https://www.env.go.jp/press/108790.html>

⁴⁷ 農林水産省. 「気候変動に対応した循環型食糧生産等の確立のためのプロジェクト」. Retrieved from: https://www.naro.affrc.go.jp/org/niaes/ccaff/conference2014/images/seika20141204_fishery.pdf

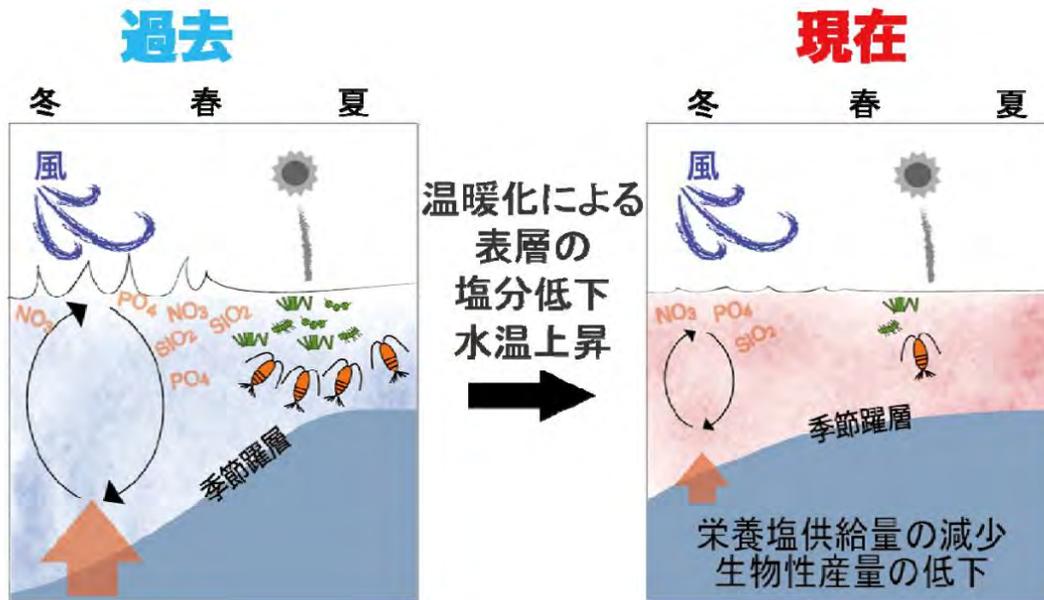
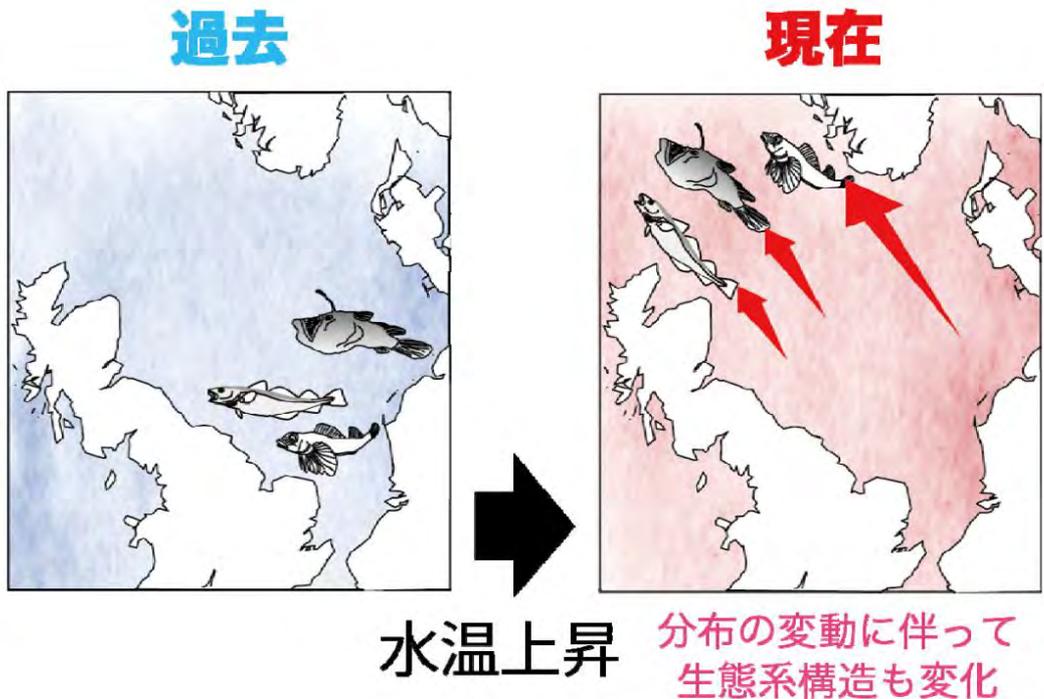


図4-10 水産総合研究センターによる模式図

また、沿岸域や内湾において、局所的な海水温の上昇が、過去に生息していた魚種を追い出し、本来定着しない魚種である「死滅回遊魚」が死滅せず定着する現象がみられ、局所的な生物の生息域の入替が進行している。こうした変化に周辺漁業者の漁法がマッチしていない場合、生計に必要な漁業活動が困難になることが危惧される。



温度に対する感受性は魚種によって異なるため、魚種の分布に対する温暖化の影響は異なり、海水温上昇の結果として生態系に変化が生じる可能性がある⁴⁸。

回遊魚についても、生態系の変動が生息域の変化をもたらしている。サケやサンマ、スルメイカは食糧としての重要な位置を占めていたが、回遊パターンの変化により、漁法や採捕水深が適合しなくなりつつある。また、操業海域が公海や外国水域であった場合、資源管理が難しくなり、水産活動が活発になりつつある近隣国との間に過剰な競争（オーバーフィッシング）が生じる可能性もある。

<現在の技術レベル>

生物保護団体等による、水中騒音が海洋生物の行動や身体に及ぼす影響に関する調査結果から、水中騒音規制の導入に向けた機運が国際的に高まってきている。

- 2000年3月、パハマ諸島の北東および北西において、17頭のクジラの集団座礁が発見された。本事故の原因は米国海軍の潜水艦が発するソナー音であり、米国海軍もこれを認めている。
- 2008年5月、マダガスカル沖で75頭のイルカが座礁死した。国際捕鯨委員会(IWC)の報告書によると、同海域において米エクソンモービル社が実施した海底資源調査が主たる原因であったとしている。
- 同様の座礁事故が頻発していることから、船舶の水中騒音が海洋生物に与える影響に関する研究が実施されている。



水中騒音が原因と想定される海洋生物の座礁例

図4-11 水中騒音が原因と想定される海洋生物の座礁例⁴⁹

水中騒音に関する研究結果を踏まえ、生物多様性条約（CBD）の関連会議や、国際海事機関（IMO）等において、水中騒音が海中生物に与える影響の検討が、2010年頃より開始された。EUは、2012年2

⁴⁸ 水産総合研究センター

⁴⁹ 国土交通省より

月、船舶に起因する水中騒音の増加が海洋生物に影響を与えていると公表し、2020年を目標に、船舶からの水中騒音の規制を導入する検討を進めている。

養殖海藻における食害は古くから認識されているが、それが北上していることが確認されている。海苔は各地で養殖栽培されているが、岡山県などの比較的温暖な海域でクロダイによる食害が指摘されている（2007年岡山県水産試験場報告、No. 22, 15-17）。

近年、東京湾の海苔養殖においても、クロダイによる食害が拡大している。クロダイは水温が高いと海苔を摂餌する率が高くなることが知られており、海苔の養殖時期と、クロダイの生息域の変動が食害を加速させている例である。

サケ、サンマ、スルメイカなどの回遊性魚種は、漁獲量の調査から資源量の変動が報告され、減少を続ける数値から危機が指摘されている。漁獲量の減少は、温暖化による回遊ルートの変化に加え、外国の漁業が盛んになり公海での漁獲量が増えたことや、生息域の変動による漁具や漁法のミスマッチなどが考えられている。

<必要な技術要素や対応>

船舶からの水中騒音の最大原因であるプロペラのキャビテーションについては、水槽実験と実船を用いた騒音計測結果とに差があるため、シミュレーションの手法を検証・改良することにより、キャビテーションによる騒音の発生と水中伝搬を再現可能な数値シミュレーション手法を確立する必要がある。

また、科学的根拠のない水中騒音規制の導入を回避するため、我が国としては科学的データをもとに議論に参加していく必要がある。

沿岸及び内湾での生息域の変動は、変動の根拠となる環境データを蓄積・活用できる基盤を整備する必要がある。また、漁具や漁法を改良し、生息域変動に対応できる漁業体制を整備する必要がある。

回遊魚については、実態を把握する計測方法を確立して科学的データを取得し、議論に貢献する必要がある。

2) 生態系の変動・破壊及び環境の変化による水産資源の枯渇

<あるべき姿と技術的解決策>

天然資源のみに依存しない水産資源の需給体制の構築が対策として考えられる。例えば、大規模なエコ養殖、垂直農業のような広大な海洋空間を利用した栽培漁業、代替肉等のフードテック等がある。

<現在の状況と懸念事項>

気候変動が水産業に与える影響は、IPCC第2作業部会第6次報告書によると、確信度は中程度ながら負の影響があることが示されており、酸性化とあいまって養殖業や漁業生産に悪影響を与えている。このことは、陸域の食糧生産とともに栄養不良を招くなど、健康への悪影響もあり、気候変動の緩和に加えた対応策の必要性が高まっている。

(b) 人間システムにおいて観測された気候変動影響



図4-12 人間システムにおいて観測された気候変動影響

国内産業への影響としては、「気候変動影響評価報告書⁵⁰」に重大かつ緊急性が高いと示されており、前回（2015年）の評価では、増養殖業について確信度が低かったものが、今回の評価では中程度に引き上げられるなど、多くの研究で影響が示されるようになっている。

- 地球温暖化の大きな影響を受けるのは、生態系や自然環境において気温上昇の影響を受けやすい生物であり、IPCCの第4次評価報告書によると「地球の気温が1～3℃上昇することにより生物種の20～30%が絶滅の危機に瀕する」と予測。
- 河川は水温が3℃上昇することで、冷水魚の生息域が減少し、積雪量や融雪出水の時期の変化が起こるとされている。
- また、大規模な洪水の頻発による河底環境の変化や濁水による水温上昇、溶残酸素減少が河川生物の生息に影響を与えられている。湖沼では富栄養化が進行しているところもあり、水温上昇による鉛直循環の停止や貧酸素化にともなう、貝類などの底生生物への影響が懸念されている。

<対処に必要な将来技術>

- 生態系を高度に管理し、人工的構造物や多様な養殖システムを組み合わせた統合的なシステムを構築することで、漁業生産と生態系や環境の維持を両立させる、イノベアクアファームの実現（脅威③ 乱獲世界的水産資源需要の高まりの記載に同じ）
- これに加え、地道なモニタリングの継続も重要である。生態系の変動・破壊は事実が生じた後に認識されるもので、再生不可能な環境の変動や破壊を事前に見極めることは難しい。このた

⁵⁰ Ibid.

め、可能な限りモニタリングを継続することが必要である。

脅威⑤ 事故

1) 船舶の座礁事故による燃料や貨物の流出⁵¹

<あるべき姿>

座礁事故のない安全な船舶の航行。

<背景及び現在の技術レベル>

令和3年度におけるわが国の食糧自給率は、カロリーベースで38%であり、食料・農業・農村基本計画における食料自給率等の目標である45%（令和12年度目標）に達しておらず（農林水産省）、食糧自給率の向上が食糧安全保障の重要課題となっている。国内で自給できない食糧は下図のとおり、多くの外国から輸入されているが、その輸送は重量コスト効率の高い海上輸送が中心である。

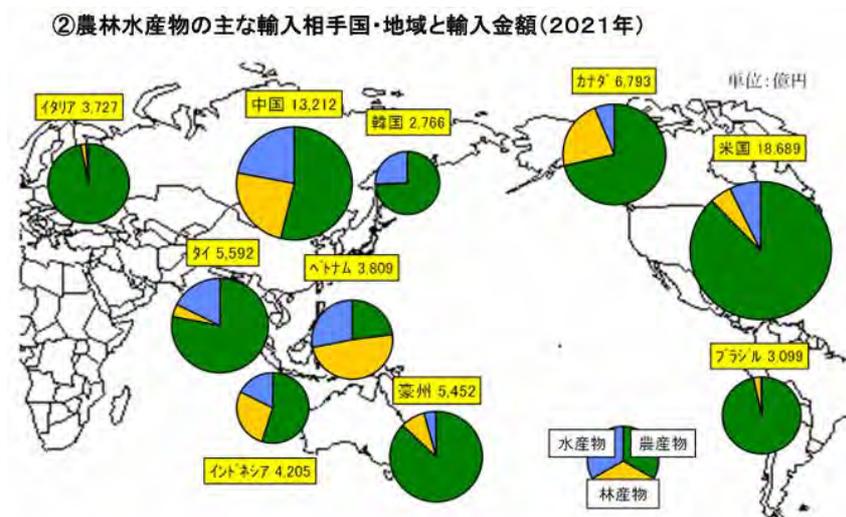


図4-13 農林水産物の輸出入概況 2021年（令和3年）

2021年3月23日にコンテナ船「エバー・ギブン」（22万4千トン）がスエズ運河で座礁した事故は記憶に新しい。我が国においても、2008年から2015年の7年間で22件の大型座礁事故が報告されており、操船ミスという人的要因が事故原因の55%を占めている。中でも、錨泊中に走錨して付近の浅瀬に乗り上げる、見張り不十分による座礁事故が目立つ（座礁事故では「見張り不十分」も操船ミスに含まれる）。

⁵¹ 日本の食料自給率 https://www.maff.go.jp/j/zyukyu/zi_kyuu_ritu/012.html . このほか、農林水産物輸出入概況 2021年（令和3年） https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/kokusai/pdf/gai_kyo_2021_k.pdf、P&I ロス・プリベンション・ガイド 第33号2015年1月 p.26大型事故原因分析及再発防止対策 <https://www.piclub.or.jp/wp-content/uploads/2018/04/%E3%83%AD%E3%82%B9%E3%83%97%E3%83%AA%E3%83%99%E3%83%B3%E3%82%B7%E3%83%A7%E3%83%B3%E3%82%AC%E3%82%A4%E3%83%89-Vol.33-Full.pdf>

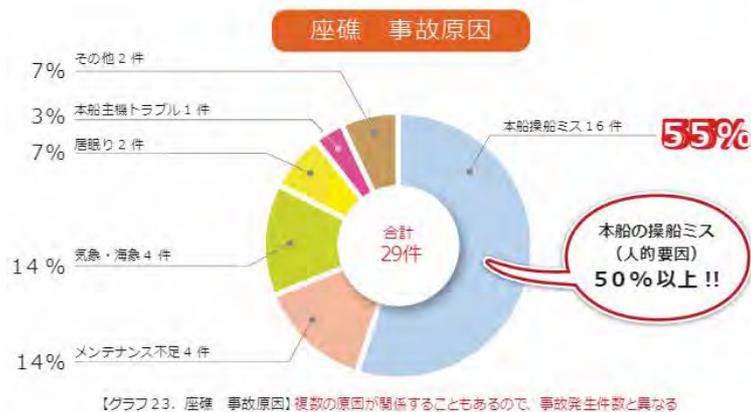


図4-14 座礁事故原因

錨泊海難は、走錨→漂流→座礁・衝突という形で発生し、事故に至るまでの原因と対策を纏めると以下の通りである。

- ① 走錨を検知するまで時間を要する。
 - ▶ 守錨当直を厳重に行い、可能な限り早い段階で走錨を検知することが重要。
- ② 走錨している錨を巻き上げ、自船の姿勢制御が可能になるまでに時間を要することを認識しておく。
 - ▶ 迅速に対応するため、走錨時の非常計画を策定しておく。
- ③ 走錨を始めてから姿勢制御を掌握出来るまでの間、漂流しても座礁しないよう危険水域までの距離や水域が確保出来ていない。
 - ▶ 多数の船舶が港外避泊して錨泊しているような場合、風下側に安全水域を確保することは難しい状況にあります。このような場合は錨泊を継続することを諦めて漂泊体制とすることも必要です。

また、走錨事故を避けるための基本的な考え方は以下の通りです。

- ① 錨泊に際し、事前に考慮する事項
 - ▶ 走錨しにくい錨地（地形、底質、水深等）を選定。
 - ▶ 走錨しても事故に至らないための浅瀬や他船との距離を確保。
- ② 守錨時における技術的方策
 - ▶ 風向 / 風速、波高 / 周期、流向や流速等の外力を把握。
- ③ 走錨の余地・早期検知
 - ▶ 外力と把注力の関係を知る。
 - ▶ 振り回り走錨を検知する（電子海図や GPS などの情報を旨く活用する）。
- ④ 走錨後の対策措置
 - ▶ 揚錨し、自船の姿勢制御を出来る限り早く可能にする。
 - ▶ 振り回り走錨の状態の内に揚錨する。

図4-15 走錨事故の原因と対策

<現状の民間提供技術の例>

株式会社ウェザーニューズは、座礁事故対策を支援するため、海運業界向けに「NAR (Navigation Assessment & Routeing) サービス」を開発した。これは、陸上の運航管理者や関係各社に対して、船舶の座礁の危険性を自動検知して通知する世界初のサービスで、船舶の航路データをもとに、浅瀬や漁船の操業海域など、危険性の高い海域への接近を計画または実際に航行した場合、あるいは計画航

路から逸脱した場合に、自動でアラート通知するものである。2021年5月から提供を開始しており、国内外の外航海運大手船社を中心に採用が見込まれている。

今後は、台風接近時の強風による走錨リスクや、荒天時の船体動揺リスクなどの通知機能も追加し、NARを座礁対策だけでなく、走錨や動揺といった様々な航海リスクへの対策支援まで拡張される予定である。

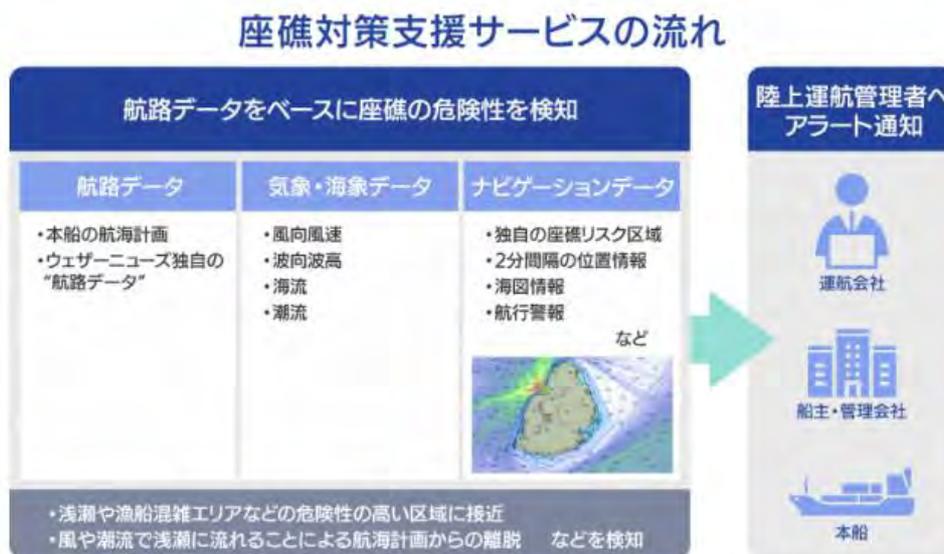


図4-16 世界初の座礁対策支援サービス⁵²

<対処に必要な将来技術>

<対処に必要な将来技術>

座礁海難はヒューマンエラーが原因の大半を占め、完全自律運航船の導入により大幅に減少させることが期待できる。自律運航と有人操船を問わず、座礁を防ぐためにはアンダー・キール・クリアランス（船底と海底と間の安全余裕）を確保することが必要である。

海底地形は土砂の流入等により変化する。特に、サンドウエーブが生じる場合、翌日に数メートルから十数メートルも水深が変化することが知られている。このため、海域によっては空間的に密な水深情報を高頻度で更新する必要がある。海図水深は最低水面（潮位が最も下がった時の水面の位置）から測定したものであるが、最低水面は、観測値に基づき天体の運行をもとに推算したものであって、気圧変化や風の吹き寄せによる変化は考慮されていない。このため、航路上のブイ等で得られるリアルタイムの水位情報から得た各地点でのリアルタイム潮位が必要で、これを水深情報に加味したダイナミック水深が、アンダー・キール・クリアランスを得るためにまず必要である。

船底の位置は、船舶の動揺や搭載量の変化（搭載した清水は運航とともに減少する）、航行速度、海水温・塩分等により動的に変化する。その時点における船体の三次元的な最低位置（デジタルツイン）

⁵² 株式会社ウェザーニュース<https://jp.weathernews.com/news/35429/>

及び、ダイナミック水深の引き算でアンダー・キール・クリアランスが把握できる。これに、予定航路、予測される船体の動き、風、波浪、海流・潮流を加味し、以後の船体の動きと、その場合の各地点におけるアンダー・キール・クリアランスを予測し、安全な航路を決定することが必要である。このために必要な情報及び技術は以下のとおり。

- 高頻度に更新される、数メートルグリッドの海底水深モデル（DTM）

<必要な技術>

- 高頻度の水深測定を面的に行うことのできる航空レーザー測深 <既存技術>
- AUVによる巡回水深測量（航空レーザーが使用できない海域で） <開発要素あり>
- DTM構築システム <開発要素あり>

- 海面高のリアルタイム把握

<必要な技術>

- 既存の航海用ブイまたは、OMNIのような漂流ブイによる海面高のリアルタイム把握 <開発要素あり>
- 海面高リアルタイムデータの潮汐モデルへのアシミレーション <開発要素あり>

- 船体位置の三次元的リアルタイム把握

<必要な技術>

- GPSによる、デジタルツインとしての三次元的な船体位置把握 <開発要素あり>

- 現在のアンダー・キール・クリアランス及び将来予測

<必要な技術>

- 上記データからのアンダー・キール・クリアランスの把握 <開発要素あり>
- リアルタイムの風、海流・潮流、波浪及び、これらの将来予測値による船体動揺の予測 <開発要素あり>
- 風、海流・潮流、波浪及び航海計画に基づく船体位置の予測 <開発要素あり>

アンダー・キール・クリアランスの将来予測には、高速計算機やAIが必要と考えられる。このため、このような支援の計算を陸上側で行うことも考えられ、そのためには信頼性の高い高速通信が必要である。 <開発要素あり>

第5節 環境

脅威① 汚染物質の流出

1) 原子力発電所由来のトリチウム

<現状>

トリチウムとは、三重水素と呼ばれる水素の放射性同位体である。トリチウムは、水分子の一部として大気中の水蒸気、雨水、海水、水道水にも存在している。また、トリチウムは、自然界の宇宙線で生成されるほか、原子力発電所を運転することで人工的に生成される。

原子力災害		原発事故由来の放射性物質				
	H-3 トリチウム	Sr-90 ストロンチウム 90	I-131 ヨウ素131	Cs-134 セシウム134	Cs-137 セシウム137	Pu-239 プルトニウム 239
出す放射線の種類	β	β	β, γ	β, γ	β, γ	α, γ
生物学的半減期	10日 *1 *2	50年*3	80日*2	70日～ 100日*4	70日～ 100日*3	肝臓:20年 *5
物理学的半減期	12.3年	29年	8日	2.1年	30年	24,000年
実効半減期 (生物学的半減期と 物理学的半減期から計算)	10日	18年	7日	64日 ～88日	70日 ～99日	20年
蓄積する 器官・組織	全身	骨	甲状腺	全身	全身	肝臓、骨

実効半減期：（関連ページ上巻P27「内部被ばくと放射性物質」）

実効半減期は、生物学的半減期の表中に記載した蓄積する器官・組織の数値から計算。

*1：トリチウム水、*2：ICRP Publication 78、*3：JAEA技術解説,2011年11月、*4：セシウム137と同じと仮定、

*5：ICRP Publication 48

図5-1 原発由来の放射性物質⁵³

東京電力福島第一原子力発電所の事故で発生した、放射性物質を含む汚染水は、多核種除去設備（Advanced Liquid Processing System、ALPS）によってトリチウム以外の放射性物質を、環境放出の際の規制基準を満たすまで繰り返し浄化する（ALPS処理水）。トリチウムは酸素と結合して水になる（三重水素の放射性同位体）ため、水から分離して取り除くことが極めて難しい。

⁵³ 環境省. 原発由来の放射性物質. Retrieved from: <https://www.env.go.jp/chemi/rhm/r3kisoshiryo/r3kiso-02-02-04.html>

日本政府は、2021年4月、風評被害対策を徹底することを前提に、ALPS処理水を海洋放出する方針を決定した。トリチウム濃度を世界保健機関（WHO）が定める飲料水基準の7分の1（国の定めた安全基準の40分の1）程度まで処理したうえで、原子力発電所の敷地内から海底トンネルを通して放出する計画である。海水で希釈しながら長期間をかけて放出するため、沖合や外洋での継続的な影響評価が欠かせない。

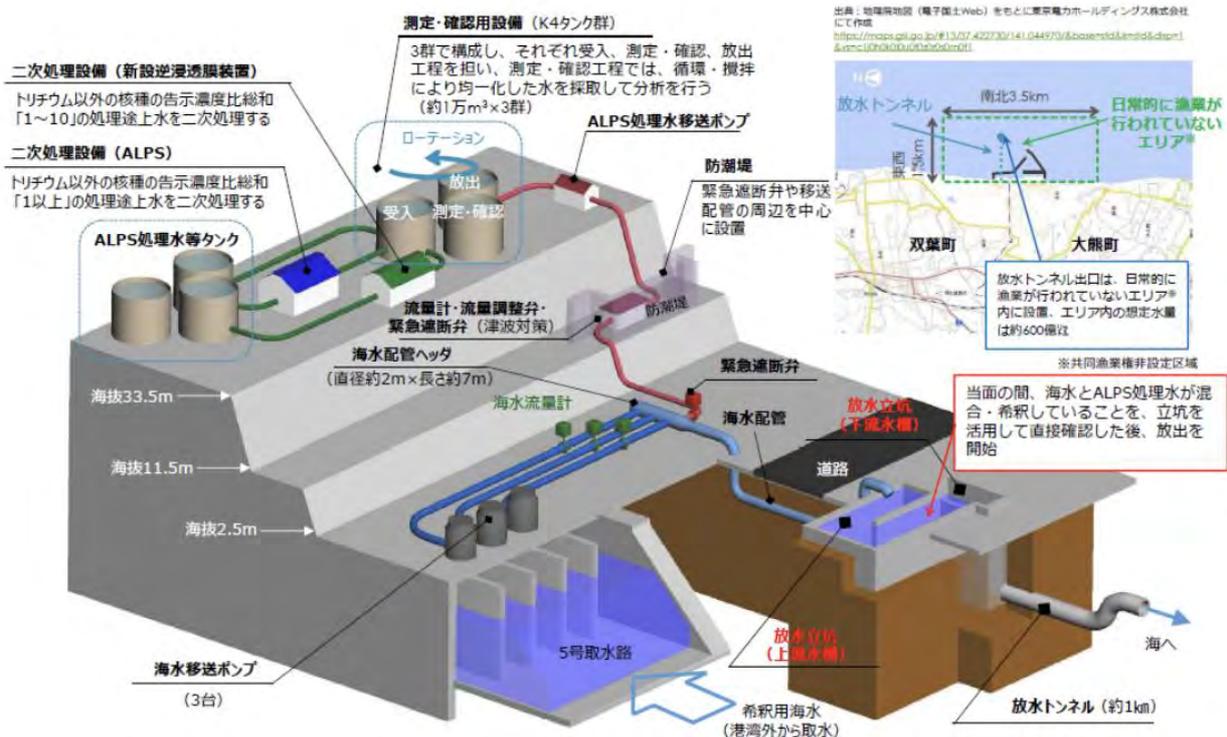


図5-2 海洋放出の全体像⁵⁴

<対策>

放出されたトリチウム濃度を常時継続的にモニタリングできる観測装置の開発及び、その測定結果に基づいたトリチウム濃度変化のシミュレーションと、結果の可視化が有効と考えられる。現在、環境省等が実施する海域モニタリングの結果が専用ホームページ⁵⁵上に公表されている。

東京電力では、ALPS処理水の放出が海洋生物に影響を与えるかどうかについて飼育試験を行っている。「海水」と「海水で希釈したALPS処理水」の環境を作り、ヒラメやアワビ、海藻などを飼育して生体内のトリチウム濃度を計測し、影響を測定・評価している。

⁵⁴ 東京電力. 「処理水ポータルサイト」. Retrieved from: <https://www.tepco.co.jp/decommissi on/progress/watertreatment/oceanrel ease/>

⁵⁵ 環境省. 「ALPS処理水に係る海域モニタリング情報」. Retrieved from: <https://shori sui -moni toring. env. go. jp/>

東京電力福島第一原子力発電所周辺 5km以遠（海水トリチウム）

最終更新日：2023年2月28日

(単位：Bq/L)

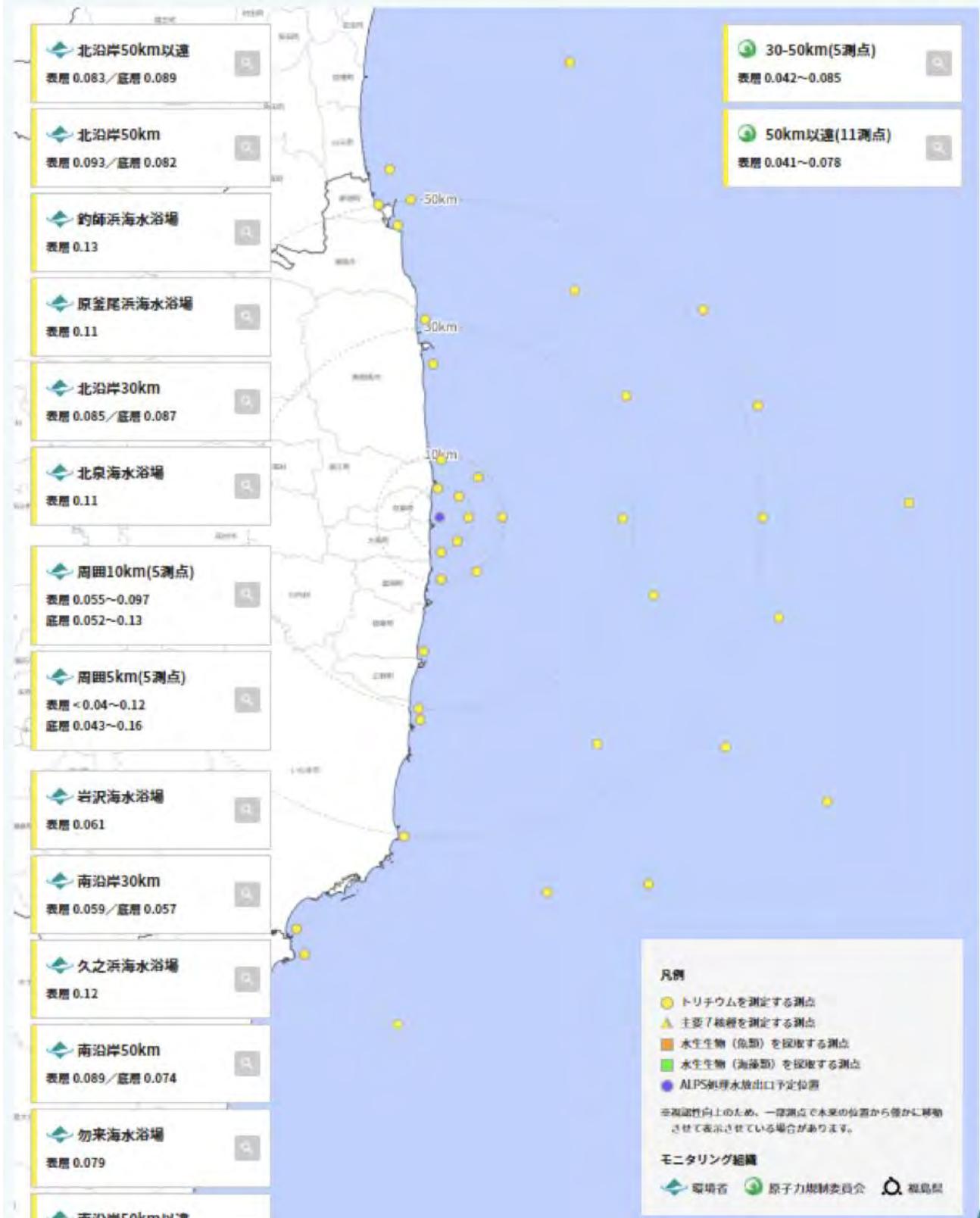


図5-3 公表されるモニタリング結果

<技術>

前述のように、トリチウムは環境中に様々な形で存在するため、原子力発電所から放出する今回のケースでは、大気や水などの形態に応じた検出方法が必要となる。

一般的にトリチウム濃度の測定には、低自然係数率仕様の液体シンチレーションカウンター（LSC）が適するとされており、自然環境におけるトリチウム濃度を知るためにはSPE電解によるトリチウム濃縮を行う必要がある⁵⁶

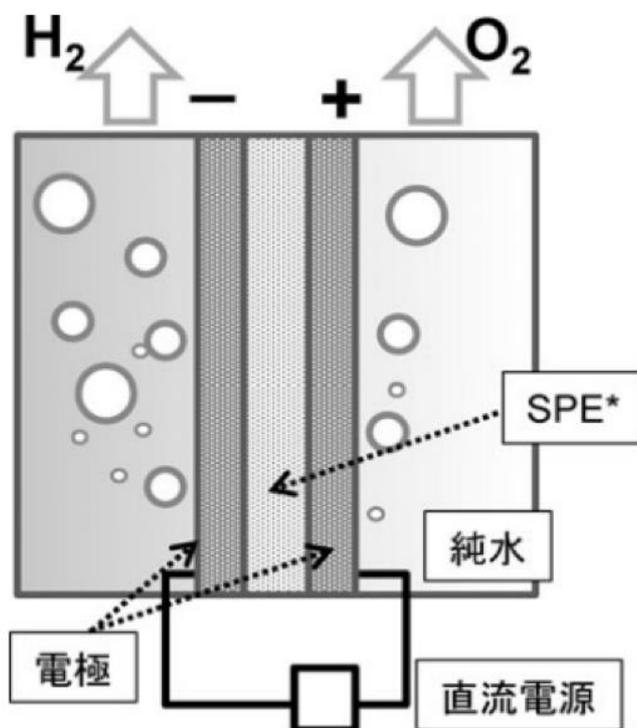


図5-4 SPE電解濃縮システムの模式図

2) 海洋プラスチック

<あるべき論>

浮遊性があり、長期間分解されないプラスチックが海洋に流出すると、状態の把握や制御ができないことが問題とされており、流出を抑える対策と、流出の状況を把握し、回収する技術が必要である。

海洋に浮遊するプラスチックは排出元の特定が困難で、国境を超えて移動拡散するものを、どこが

⁵⁶ 柿内秀樹, 4. 環境分析のためのトリチウム電解濃縮 (< 小特集 > トリチウム分離・濃縮技術). 「プラズマ・核融合学会誌」, 92(2016) 26-30.

責任をもって回収するかという国際協力体制が求められる。自国に優れた検出・回収技術があれば、国際貢献として周辺国に提供することで地域への流出を抑えることができる。

海洋プラスチックの更なる問題は、長期間浮遊する間の微細化現象（マイクロプラスチック）と、その残留性への理解が不十分であると指摘されている。プラスチックは固化した油に類似しており、親油性の化学物質との親和性が高い。このため、生態系に影響を与えるホルモン物質や発がん性物質を貯留する傾向があるといわれるが、実態はよくわかっておらず、劣化したマイクロプラスチックの安全性評価手法の確立が必要である。

海洋性プラスチック問題の原因として、プラスチックを使い捨てる習慣が問題である。また、ロングライフプラスチックの永続的な浮遊性が問題であることから、プログラムされた物質を分解するプラスチックへの置き換えが求められており、生分解性プラスチックの海洋での浄化実態に関する情報の蓄積が重要である。

<あるべき姿と技術的解決策>

海洋に流出した浮遊性のロングライフプラスチックは、フィルム状のものや小型のものを海洋生物が誤食することで、生態系バランスが崩れる可能性がある。また、大型のものは、表面に海洋生物が付着し、「流れ藻」的効果で広範囲に生物が分散して生態系を変化させる可能性がある（バラスト水による港湾の生態系破壊に類似した課題）。これには、流出元と、全球的な海流の把握が必要で、正確なシミュレーション技術の確立が望まれる。沿岸域における実態の把握は、河川からの流出量や海岸線の漂着物から推定できるが、外国由来のものが混在する外洋の実態を把握する技術はなく、新たなモニタリング手法の確立が必要である。

2009年の予測において、魚の生物量と海洋プラスチックの総量が2050年に等しくなると報告されたが、海岸や海域での実サンプリングで回収された海洋プラスチックは、予測値をはるかに下回っていた。これは、どこかの海域や沿岸に集積、または生物付着などにより沈降していると考えられているが、実態は不明である。海洋プラスチックの安定化のプロセスは解明されておらず、これを明らかにする手法の確立が必要である。

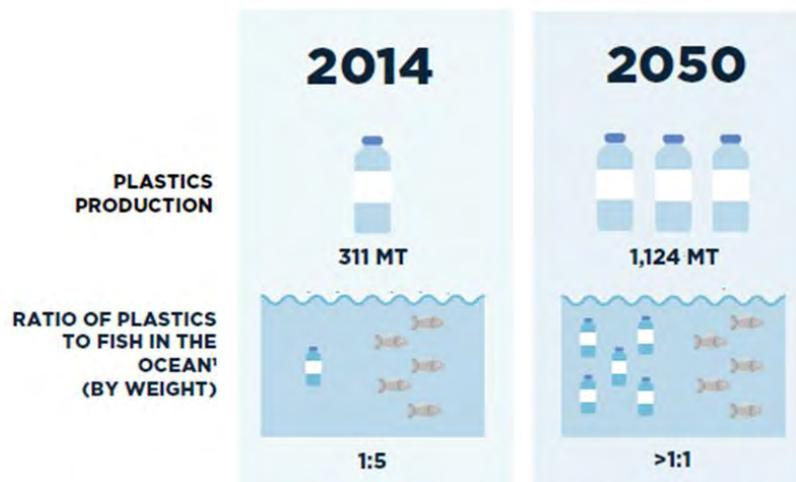


図5-5 海洋プラスチックの増加予測⁵⁷

浮遊性でロングライフの流出したプラスチックの拡散シミュレーションにより、高濃度に集積する海域が予測され、調査船による調査や、ヨットレースによる定期的なネットサンプリングによる実測が行われた。その結果、緯度30度付近の海域で海洋プラスチックが多く検出されることがわかってきた。これは、海流に大きく依存している。沿岸に漂着するプラスチックは、海岸清掃技術の開発が必要で、沖合に集積する海洋プラスチックは、それらを集めて効率的に回収する技術が必要である。

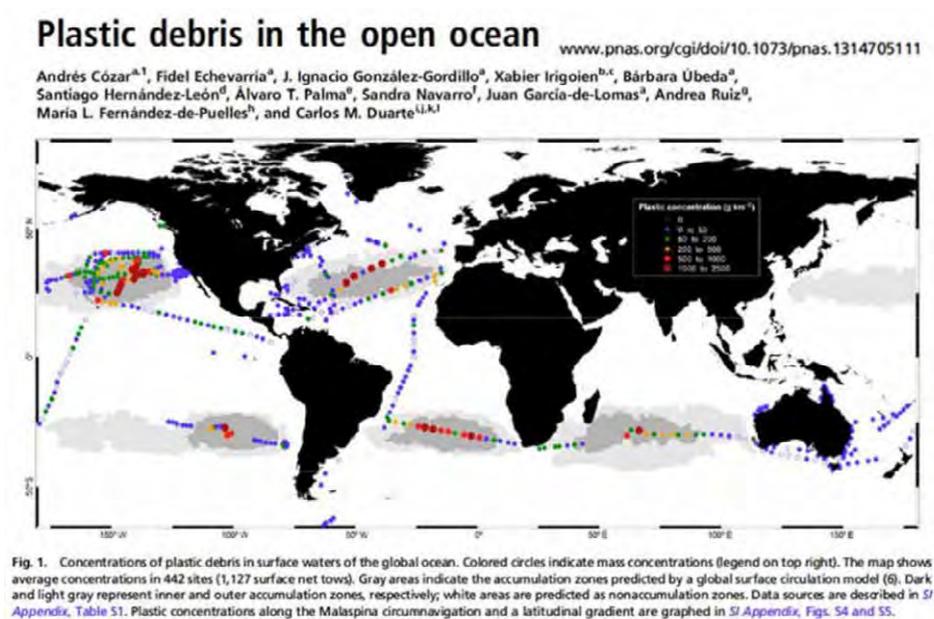


図5-6 プラスチックごみの漂流状況⁵⁸

※南半球のサンプリングは、世界周回ヨットレース中に実施された。

劣化、微細化したマイクロプラスチックは、海洋生物の食物連鎖により生物濃縮される可能性があるが、実態は不明である。これらの実態を把握するため、海洋生物の腸内の状態を調べる必要があり、基礎データの蓄積が求められている。プラスチックなどの材料には、JIS規格やISO規格により、化学物質の「安全データシート」が添付され、商品の製造者は、材料が環境に与える影響を把握しているが、海洋関係者は把握していない。水生環境有害性を把握するとともに、実際の生物への取り込み量を明らかにする必要がある。また海水中での劣化状況を把握するデータの蓄積が求められる。

⁵⁷ 世界経済フォーラムレポート『The New Plastics Economy Rethinking the future of plastics』

⁵⁸ Ocean adventurer Yasujiro Shiraiishi から引用。

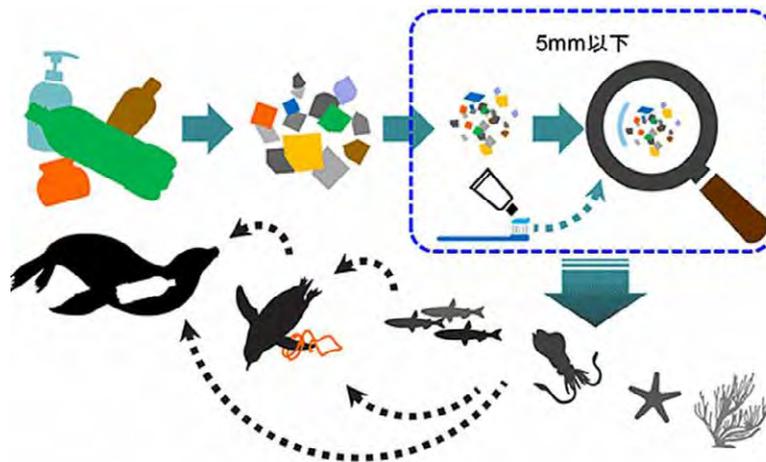


図5-7 海洋生態系におけるプラスチックの動態⁵⁹

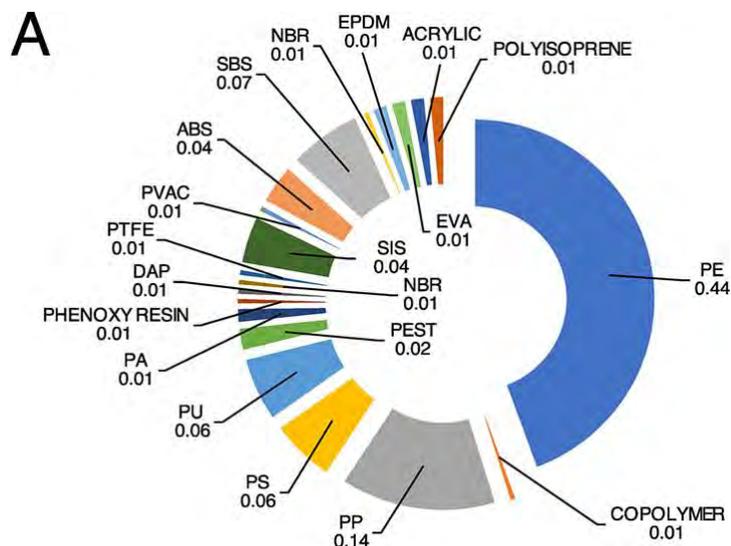


図5-8 地中海、ヨーロッパアカザガニ（深海底生性エビ）の内蔵に残留するプラスチックの比率⁶⁰
 ※ポリエチレン、ポリプロピレンの取り込み量が多い

海洋プラスチックや、それが劣化したマイクロプラスチックは、プラスチックの長期安定性が弊害として現れたものである。このため、分解過程を制御できるプラスチックが求められ、分解性プラスチックや生分解性プラスチックのような製品の開発と普及が必要である。また、現在、土壌やコンポストなどの環境での分解評価をしているが、海中や海底での分解プロセスを把握し、評価できるデータの蓄積が必要である。また、分解プロセスまでトレースできるプラスチックを普及させるとともに、プラスチックを使い捨てない文化を定着させることが必要である。

⁵⁹ WWFホームページ

⁶⁰ Aresandro Cauら, *Environ. Sci. Technol.*, 2020, 54, 8, p4886

生分解性	PLA PHA系 (PHBH等)	バイオPBS PBAT・PLAコンバウンド 澱粉ポリエステル樹脂 酢酸セルロース (ジアセテート)	PVA、PGA PBS、PBSA PBAT PETS その他
	バイオPE バイオPA11 バイオPA1010	バイオPET バイオPTT バイオPA610、410、510、56 バイオPA1012、10T バイオPA11T、MXD10 バイオPC バイオPU 芳香族ポリエステル バイオ不飽和ポリエステル バイオフェノール樹脂 バイオエポキシ樹脂 酢酸セルロース (トリアセテート)	PE PP PET PTT PVC PS ABS、PC、PBT POM、PMMA PPS、PA6、PA66 PU、フェノール樹脂 エポキシ樹脂 その他
非生分解性	バイオ由来	バイオ由来+化石由来	化石由来

PVA：ポリビニルアルコール、PGA：ポリグリコール酸、PBS：ポリブチレンサクシネート、PBSA：ポリブチレンサクシネート-co-アジペート、PBAT：ポリブチレンアジペートテレフタレート、PETS：ポリエチレンテレフタレートサクシネート、PE：ポリエチレン、PP：ポリプロピレン、PET：ポリエチレンテレフタレート、PTT：ポリトリメチレンテレフタレート、PVC：ポリ塩化ビニル、PS：ポリスチレン、ABS：アクリロニトリル-ブタジエン-スチレン樹脂、PC：ポリカーボネート、PBT：ポリブチレンテレフタレート、POM：ポリアセタール、PMMA：ポリメタクリル酸メチル、PPS：ポリフェニレンサルファイド、PA：ポリアミド、PU：ポリウレタン、PLA：ポリ乳酸、PHA：ポリヒドロキシアルカノエート、PHBH：3-ヒドロキシ酪酸・3-ヒドロキシヘキサン酸共重合ポリエステル

図5-9 マイクロプラスチックの種類と分解性⁶¹

＜現在の技術レベル＞

海洋プラスチックについて、生産消費場所の把握や、河川や沿岸からの流出のシミュレーションのほか、表層海流による移動シミュレーションは、十分なモニタリングのデータがあれば可能なレベルにきている。一方、海中でのプラスチックの拡散を把握する手法は構想のレベルである。衛星による監視を補完する観測フロートや、各種のGlider、セイルドローンなどが開発されているが、交通量が多く、黒潮が流れ、台風や低気圧が頻繁に通過する日本周辺でのモニタリングには課題が多い。現在直ちに利用可能な技術として、航行船舶やヨットなど回収装置を取り付けることが考えられるが、プランクトンネットによる採集は効率が低い。

海洋プラスチックのセンシング技術として、FT-IR分光法によるプラスチックの分子鎖の判定が普及しており、とくにATR法（面反射計測）が広く使われている。大型の海洋プラスチックは検出容易であるが、マイクロプラスチックについては、マイクロATP法が開発され、多くの研究室で利用されている。この方法の問題点は、ネットサンプリングと同様、研究者が作業する際に衣類等に由来するプラスチックが混入することで、研究スキルの向上が求められている。

大量の分析データが出力されるIR分光計測は、解析速度の向上と、特に沖合での無人化を実現しなければ普及しない。このため、可視光だけでなくIRまで含めた分光型のカメラ映像解析が可能なハイパースペクトルカメラによる映像や、衛星画像により得られる特徴的なスペクトルをAI処理等により効率よく抽出する技術が確立しつつある。

⁶¹ 日本バイオプラスチック協会

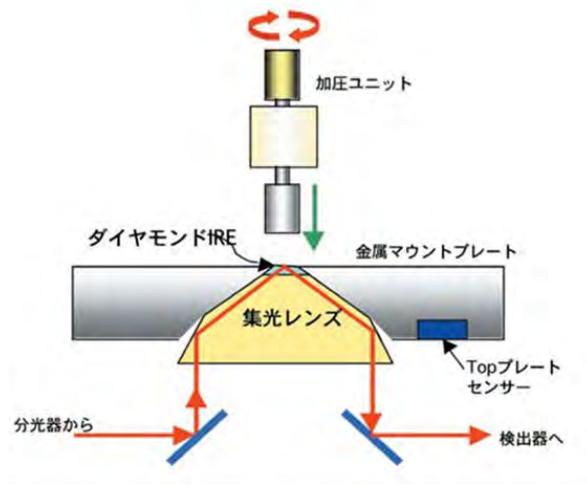


図5-10 マイクロATR法によるIR分光計測

リスクの高い海洋プラスチック（生物の口に入る大きさから微粒子に至る期間）の存在期間を、より短くするため、分解性・生分解性プラスチックを開発し、海中における分解の評価と基準化が進められている。海洋で分解する様々なプラスチックを提供し、可視化することで、プラスチックの使用スタイルを変えていく必要がある。現在、数種類の生分解性プラスチックが存在するが、既存のプラスチックに代わる、更に多種の分解性プラスチック材料の開発が望まれる。また、海洋での実評価が必要で、海洋プラスチックが多く集まる沖合の海中で分解プラスチックの安全評価を行う試験海域を確保する必要がある。

<対処に必要な将来技術>

日本周辺の厳しい自然環境の中で、自然エネルギーによる長期間の定点観測あるいは測線観測、さらには、水深500m程度まで観測可能な量産タイプの簡易な観測プラットフォームが必要である。これらは、海洋プラスチックの広がり調査する拠点になるとともに、今後開発すべきプラスチックの評価ステージともなり、海洋プラスチックの蓄積を遅くする、または減少させるサポートを行う。

海洋に流出したプラスチックの回収は、低コストを実現しなければ普及しないと思われる。国際協力体制も必要で、表層だけではなく、海中に漂う海洋プラスチックを、生態系を破壊しないで選択的に回収する技術が必要になる。具体的には、セイルドローンや観測ブイに、プラスチックを集積するツールを取り付けて回収する方法等が考えられる。

マイクロプラスチックは、回収方法（現在はネット採集）と解析手法の開発に高度な人材をあて、自動化と情報のメタデータ化を推進する必要がある。そのための技術として、画像解析技術と分光技術を融合させた、海洋プラスチックの分析用に最適化したハイパースペクトルカメラの開発とが考えられる。

材料物質の環境安全データシートによる水生環境有害性の評価基準に海洋での分解特性を追加し、リスクの低減に努める必要がある。そのため、長期間運用可能な海洋プラットフォーム技術を活用

し、安全評価を行う。また、分解特性の制御に取り組み、生分解性プラスチックの開発など、海洋残留を減らす材料の開発を進める必要がある。

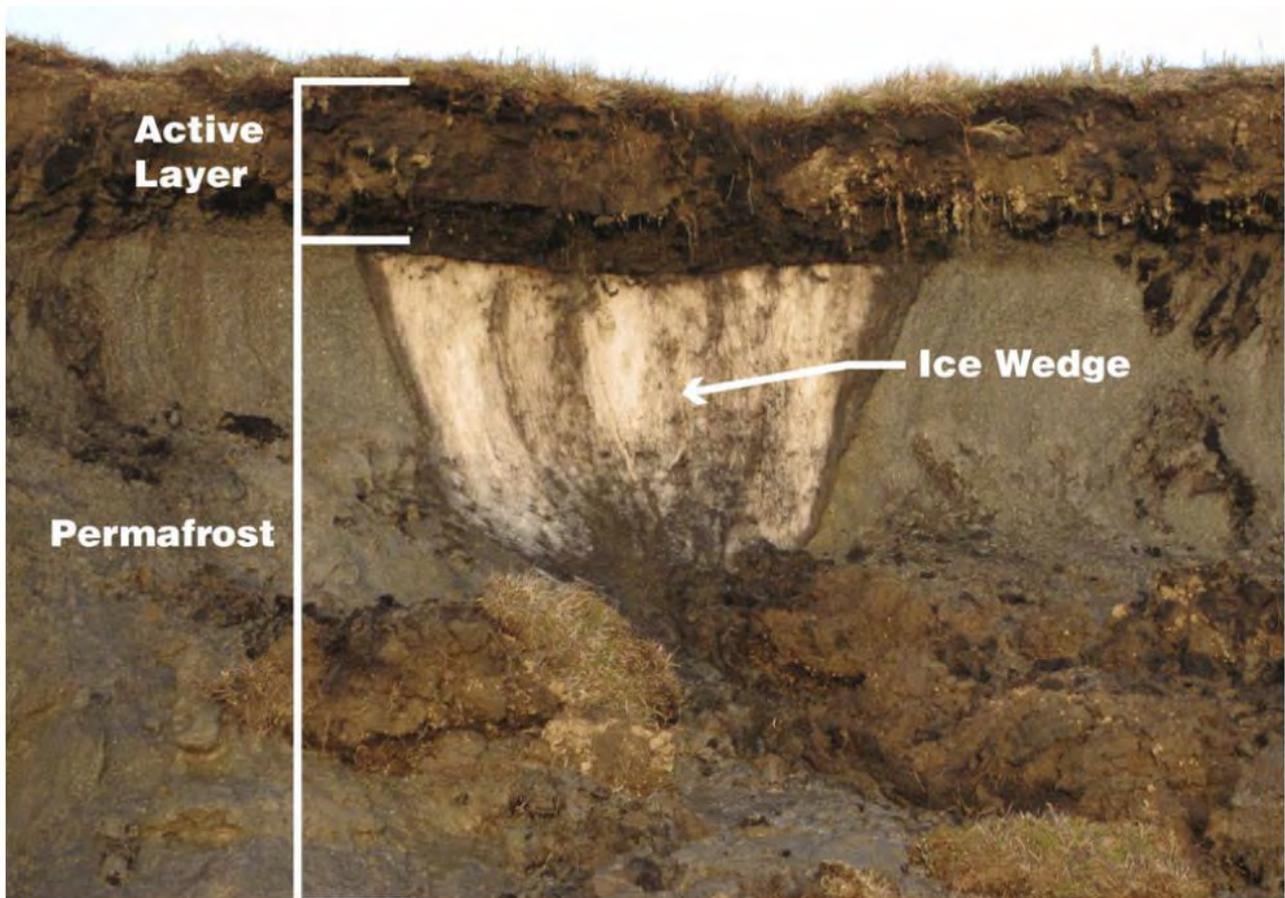
脅威② 温暖化等による生態系の変動・破壊

<理想論>

温暖化等によって最も影響を受ける生物に焦点を絞り、それらに対する影響度を短期間で調査し、結果を研究者だけでなく、政策立案者や一般市民にも周知する。

1) 凍土の崩壊

シベリアやアラスカ、カナダの北極圏に分布する永久凍土は、夏には緑が覆い空气中的二酸化炭素を吸収し、地中の凍土が融解しないように機能している。冬は、積雪が断熱材となって融解を妨げている⁶²。



© US Geological Survey/NASA | Layers of permafrost.

図5-11 永久凍土

⁶² NASA. What is Permafrost? Retrieved from: <https://climatekids.nasa.gov/permafrost/>

こうした自然のバランスを崩す原因が地球温暖化とされている。永久凍土は年間平均気温がマイナス5度以下に保たれることで、融解せず安定を維持するとされているが、永久凍土が存在する一部の地域では平均気温の上昇が続き、融解が懸念されている。

実際に永久凍土の融解が原因とされるインフラへの影響が報告され始めている。2020年にはロシアのノリリスクにある火力発電所の燃料タンクが崩壊し、付近を流れるダルディカン川、アンバルナヤ川に重油が流出する事故が起きた⁶³。検察当局は、地盤が緩んだことが火力発電所の燃料タンクの崩壊の原因と結論し、政府は永久凍土の脆弱な地盤上にある建造物の一斉点検を命じた。ヨーロッパにエネルギーを送るシベリア・パイプラインも、パイプラインを流れる天然ガスの温度で永久凍土が融解して土壌浸食が起こり、設備の破損やガスの漏洩が発生したとしている⁶⁴。

このほか、永久凍土には多くの種類のウイルスが存在するとされている⁶⁵。2015年には、採取された永久凍土からモリウイルスという、高い増殖能力を持つ新種のウイルスを蘇らせることに成功したと報告された⁶⁶。永久凍土の融解により、このような未知のウイルスや有害物質が自然界に放出される可能性があることから、感染症などの人体への影響も懸念される。

さらに、永久凍土の融解がメタンガスの大量放出につながると懸念されている。永久凍土は、古い有機炭素堆積物を含んでおり、その量は大気中に存在する二酸化炭素の炭素の少なくとも2倍の量に達すると考えられている。永久凍土の融解によって、地中の炭素がメタンや二酸化炭素として放出された場合、大気中の二酸化炭素濃度が急上昇して気温の上昇を招く。これがさらなるメタンと二酸化炭素の放出を招き、地球温暖化を加速することが危惧されている⁶⁷。

⁶³ Sueddeutsche Zeitung. *Auf unberechenbarem Boden*. (22 June 2020) Retrieved from: <https://www.sueddeutsche.de/wissen/klimawandel-permafrost-russland-norilsk-1.4944524>

⁶⁴ Stefan Varlamov et al. (2022). Monitoring the Permafrost Conditions along Pipeline Routes in Central Yakutia, Russia. *Land* 2022, 11(12), 2331; <https://doi.org/10.3390/land11122331>

⁶⁵ Zhong, ZP., Tian, F., Roux, S. et al. Glacier ice archives nearly 15,000-year-old microbes and phages. *Microbiome* 9, 160 (2021). Retrieved from: <https://doi.org/10.1186/s40168-021-01106->

⁶⁶ Matthieu Legendrea et al. (2015). In-depth study of Mollivirus sibericum, a new 30,000-year-old giant virus infecting Acanthamoeba. *National Academy of Science*, e September 8, 2015, E5327-E5335. Retrieved from: <https://www.pnas.org/doi/pdf/10.1073/pnas.1510795112>.

⁶⁷ United Nations. *If you're not thinking about the climate impacts of thawing permafrost, (here's why) you should be*. (22 January 2022). Retrieved from: <https://news.un.org/en/story/2022/01/1110722>

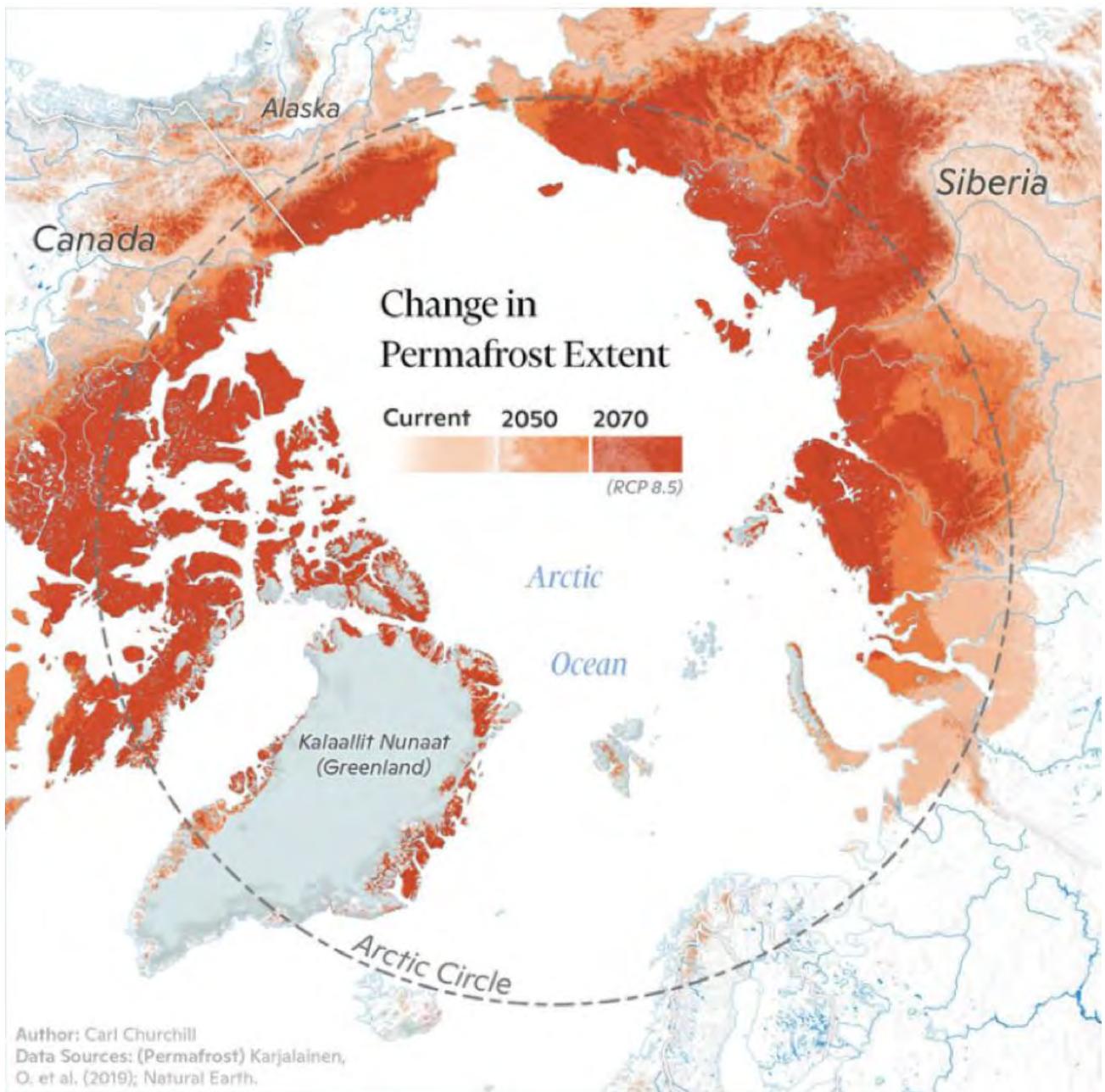


図 5-12 永久凍土の侵食予想⁶⁸

2) 氷河湖の決壊

氷河のある地域の一部では、氷河が融解する過程で氷河のくぼみ等に水が溜まり、氷河湖と呼ばれる地形を形成している。地球温暖化によって融解が加速すると氷河湖の水位が上昇し、あるいは土壌

⁶⁸ Ibid.

の浸食により氷河湖が決壊する懸念が高まっているとの研究が発表された⁶⁹。

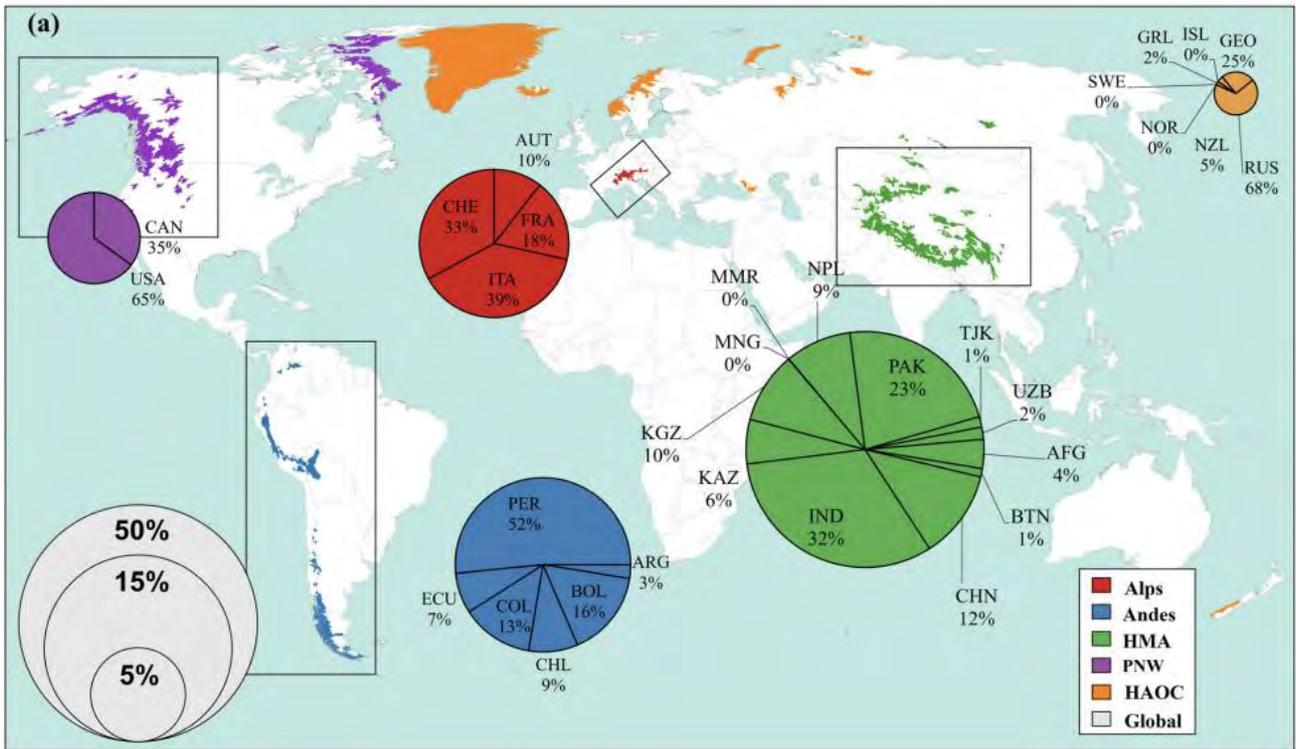
この研究によると、氷河湖決壊の危険が最も高いのはネパール、パキスタン、カザフスタン、インド、中国などアジアの高山地域と、ペルーやボリビアといったアンデス地域である。特にアジアの高山地域では、氷河湖から10キロ以内の居住人口が多く、氷河湖が決壊した場合の甚大な被害の発生の危険が指摘されている。



図5-13 決壊したネパールの氷河湖⁷⁰

⁶⁹ Taylor, C., Robinson, T.R., Dunning, S. et al. Glacial lake outburst floods threaten millions globally. *Nature Community*. 14, 487 (2023). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36033-x>

⁷⁰ Ibid.



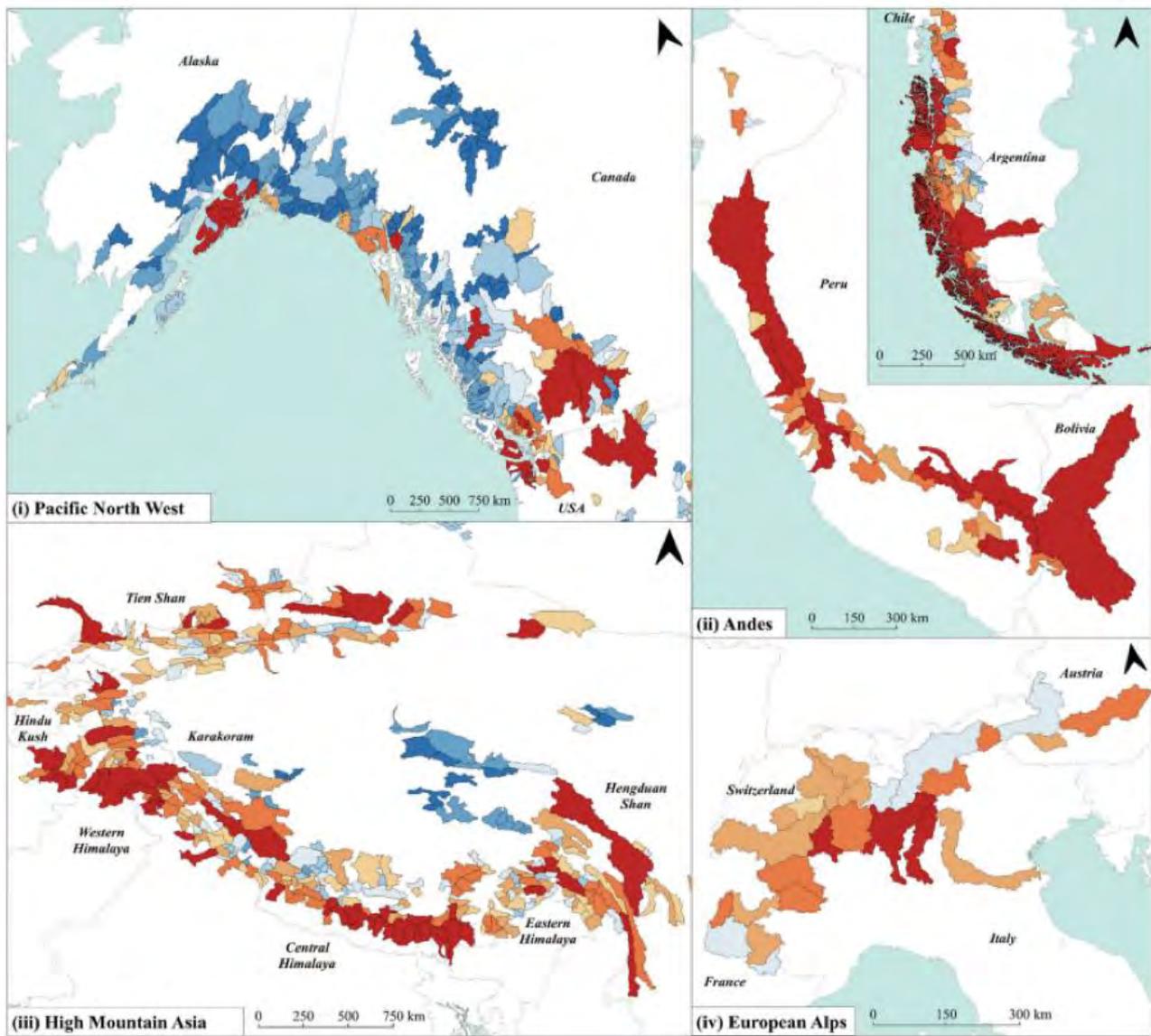


図5-14 氷河湖の決壊が懸念される地域⁷¹

⁷¹ ibid.

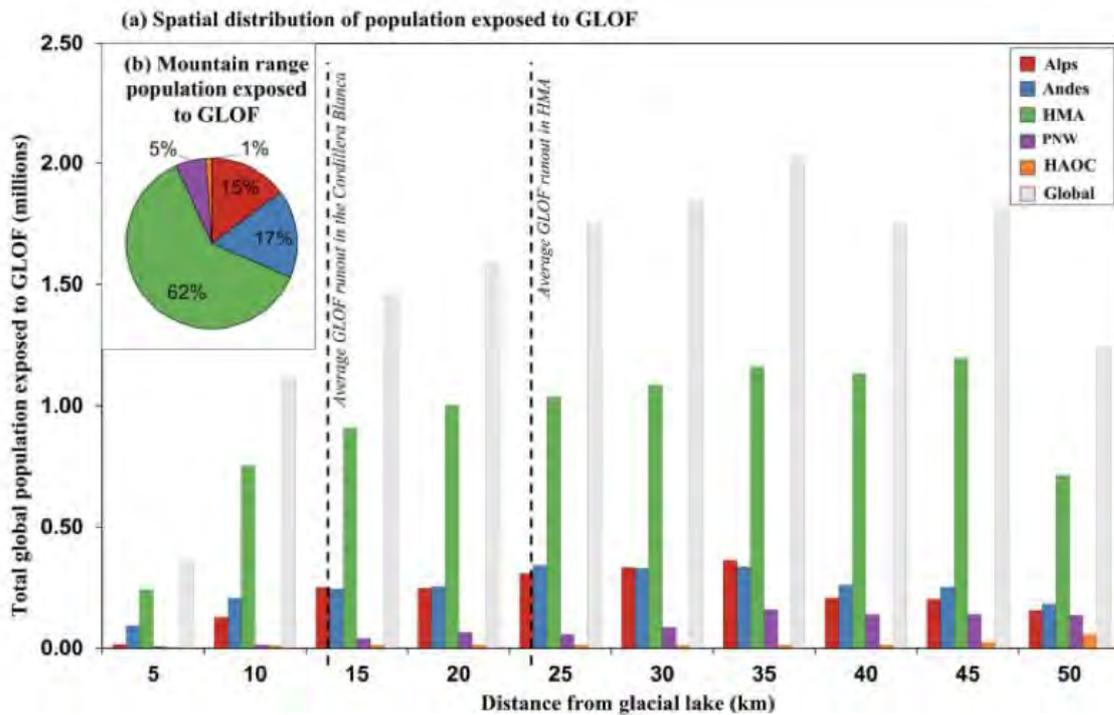


図5-15 氷河湖から住宅地までの距離

3) 海水や淡水の生態系、生物多様性がもたらす様々な利益の喪失

生物多様性は、①生態系の多様性、②種の多様性および、③遺伝子の多様性という、3つの概念で構成されている。現在、その生物多様性に4つの危機が訪れているとされており、ひとつめは、開発や乱獲による種の減少・絶滅、生息・生育地の変化である。二つ目が、自然の質の低下といわれ、里山や里地などの手入れが行き届かないことによる環境の変化によって、このような地域に生息する動植物が絶滅、あるいは個体数が増加して人間の営みに影響を与えることである。三つ目が、乱獲や土地開発など人間の活動による破壊である。自然に対する最大の脅威は、土地利用の変化とされており、自然界の動植物の環境が破壊されている現在の状況は危機的であるとされる⁷²。四つ目が地球の温暖化である。平均気温の上昇によって氷河の融解や高山帯の縮小が生じ、海面温度の上昇などによって、動植物の20~30%は絶滅のリスクが高まると予想されている。

生物多様性が失われると、人間が生物多様性から享受している様々な利益を享受できなくなる。森林伐採による土砂崩れの増加、高潮や津波の被害を軽減するとされるサンゴ礁が生活排水や開発による土砂の流出の影響により減少していることなど、自然が有する防災機能が低下する。また、森林の減少は気候変動や温暖化を加速させ、近年増加している異常気象の原因のひとつとされている。また、

⁷² WWF. 「生きている地球レポート2022」. Retrieved from: <https://www.wwf.or.jp/activities/data/20221013>
lpr_02.pdf

森林破壊やフードサプライチェーンの多様化により、これまで接触のなかった動植物と人間や家畜が接触するようになってきていることから、新たな感染症発生のリスクが高まっていると指摘されている。

<対策>

これらに共通の対策として、現状を把握するための国際プロジェクトの創設とその推進・支援が重要である。これには、自然科学系の研究だけでなく、人文系の視点も必要である。データ共有を推進する外交的取り組みも必要である。また、台風の勢力増大にともなう、高波・高潮による沿岸生態系の破壊も懸念される。海水面と水温の上昇に伴う生態系環境の変化等に対しても、被害想定に合わせた対応策の実施（気候外力の変化を取り除く、生態系の移動の補助等々）を検討すべきである。

生物多様性については、国際的な枠組みでの課題の共有が始まっている。2020年のCOP26では、生物多様性の保全に向けた取り組みが共有され⁷³、2022年の生物多様性条約第15回締約国会議では、「昆明・モンリオール生物多様性枠組」が採択され、「30 by 30目標（2030年までに陸と海の30%以上を保全する）」が主要な目標の一つとして定められたほか、ビジネスにおける生物多様性の主流化等の目標が採択された。

生態系に特に深刻な影響を与える海洋酸性化への対策としては、先端的な技術開発の推進（海水から二酸化炭素を直接回収する⁷⁴等）がある。またこうした対策の策定には環境変動の実態と将来予測が重要であり、そのための研究開発の推進も重要である。

⁷³ COP26. (2020). Protecting and restoring nature for the benefit of people and climate. Retrieved from: <https://ukcop26.org/nature/>

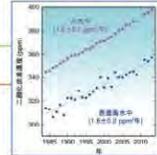
⁷⁴ JAMSTEC. 「海のカーボンニュートラル 新技術開発」. (21 January 2022). . Retrieved from: https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/green_innovation/pdf/006_03_06.pdf

海からのCO₂回収



海からのCO₂回収

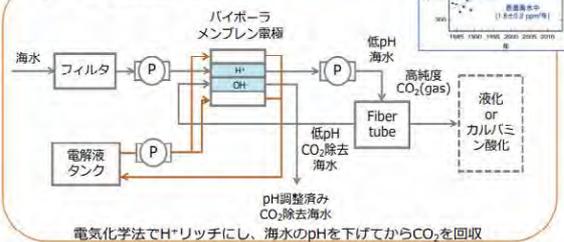
- 海洋は大気中のCO₂濃度と平衡になるまでCO₂を取り込む
 - 大気中のCO₂濃度の上昇とともに、海水中の濃度も上昇していることが観測されている
- 海洋のCO₂濃度の上昇により、表層の海水は酸性側にシフトしている (**海洋酸性化問題**)
- 表層のCO₂を人為的に回収できれば、海洋のCO₂濃度を低下させ、海洋の酸性化を緩和できる
- 大気とのCO₂濃度差が大きくなれば、海洋のCO₂吸収(リザーブ)能力も高まり、さらに大気中のCO₂濃度が低下する



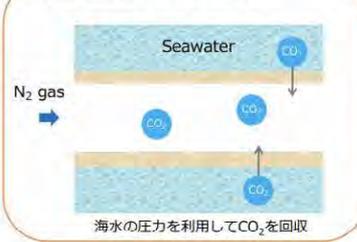
キーテクノロジー (海中CO₂回収技術)

- ①電気透析型手法 (現状:TRL2~3)** : pHを下げて (pHスイング) CO₂ガスを回収する手法
 海洋表層からCO₂を安定的に直接回収するためのキーテクノロジー
 →膜の安定運用技術 ✓電気透過型手法における異常検出技術
- ②低エネルギー型手法 (現状:TRL1)** : 海の圧力と触媒を利用
 自然の力(圧力)や触媒を利用し、従来法よりも低エネルギー、かつ低コストで海中からのCO₂回収を実施するためのキーテクノロジー

①電気透析型手法



②低エネルギー型手法



システムコンセプトデザイン



図5-16 海からのCO₂回収

4) 生態系に特に深刻な影響を与える海洋の酸性化

人間の活動によって排出される二酸化炭素は、地球温暖化を引き起こす主要な温室効果ガスである。さらに近年、大気中に放出された二酸化炭素を海洋が吸収することにより生じる「海洋酸性化」が問題として指摘されている。海水中のpHは一般的に弱アルカリ性を示し、表面海水中での約8.1から深くなるにつれてpHは下がり、北西太平洋亜熱帯域では水深1000m付近で約7.4と最も低くなる。二酸化炭素が多く溶け込むとpHが下がり、海水のアルカリ性が弱まる。pHの0.1の低下は水素イオン濃度で約26%の増加に相当する。

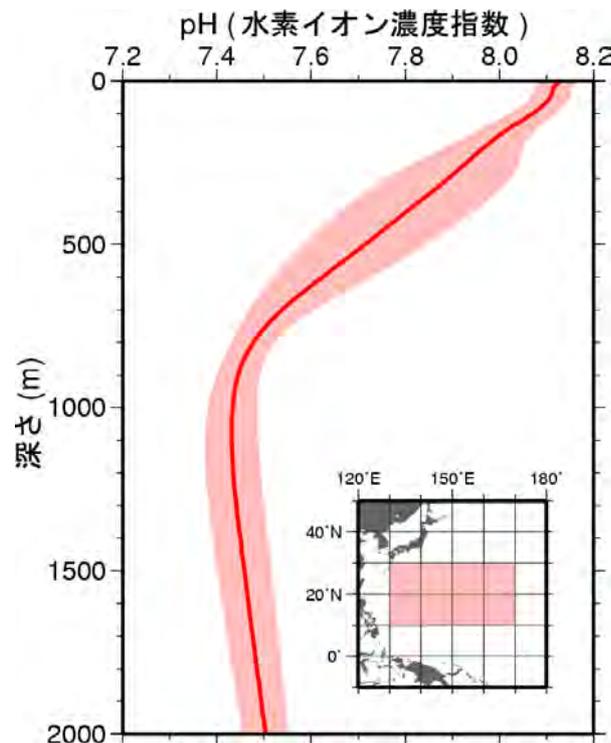


図5-17 海洋酸性化⁷⁵

1990年代末から2000年代の初頭にかけて、海洋の酸性化が海洋生物に影響を及ぼすことが指摘されはじめたことで、研究者の間で海洋酸性化への問題意識が急速に高まった。海洋酸性化は、表面海水だけでなく海洋内部においても世界的に進行していると考えられており、将来大気中に排出される二酸化炭素の量に応じて更に進行すると指摘されている⁷⁶。

<あるべき姿と技術的解決策>

海洋酸性化の進行について、まだ実態はよく分かっておらず、今後監視を継続し、科学的な知見を集積していくことが必要となる。

対策としては、先端技術開発の推進（二酸化炭素の海水からの直接回収等）がある。またこうした対策立案には環境変化の実態と将来予測が重要であり、そのための研究開発の推進も重要である。

<現在の技術レベル>

海洋CO₂の回収技術開発はまだ成功（商用化）していない。

⁷⁵ 気象庁HP. 「海洋酸性化」 https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/db/mar_env/knowledge/oa/acidification.html
地図中の赤塗りつぶし部分で得られた観測データから求められた北西太平洋亜熱帯域でのpHの平均的な鉛直分布を示す。赤線は平均値、塗りつぶしは標準偏差の範囲(±1σ)を示す。(

⁷⁶ Gruber, N. (2011), Warming up, turning sour, losing breath: Ocean biogeochemistry under global change, *Philos. Trans. R. Soc. A*, 369(1943), 1980-1996.

- 大気からのCO₂回収（DAC）は、欧米で実用プラントが稼働している。国内ではムーンショットにより効率的な手法の研究開発が進められている。



写真出典：ICEF資料より

図5-18 DAC装置

- カーボンリサイクルに関する報告は、グリーンイノベーション戦略推進会議（経済産業省）が取りまとめている⁷⁷。

このなかで、論文から見る学術活動は中国と米国が圧倒的に多く、日本は英国とドイツに続く5番目に位置する。DACとは、大気からCO₂を直接回収する技術で、空気を化学溶液に通してCO₂を除去する手法や、化学的に結合するフィルターを用いてCO₂を回収し貯留する手法がある。近年は、電解還元技術のような、電氣的にCO₂を誘導し、再利用可能な物質に変換して貯蔵することが試みられている。

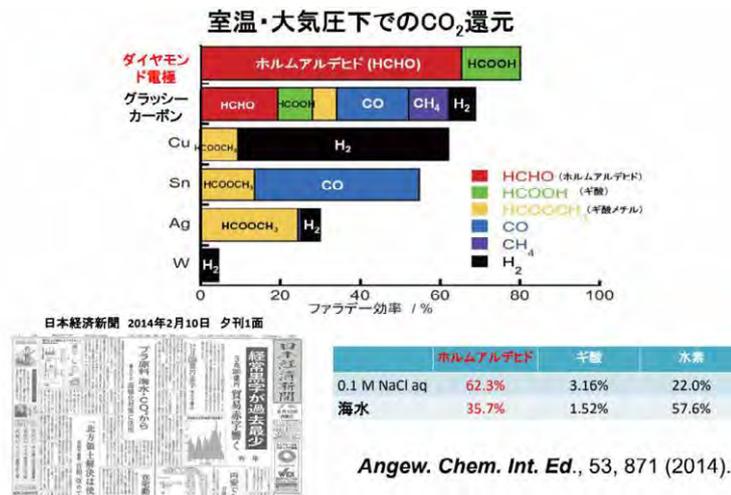


図5-19 室温・大気圧下でのCO₂還元

⁷⁷ https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/green_innovation/pdf/001_07_02.pdf

海水から電解還元技術によりCO₂をホルムアルデヒドに還元させる技術。水の電解とCO₂の還元が同時に起きるため、電極によっては別々の反応を起こすが、特定の電極を使うことで有機物を合成する。(慶応大学、栄長研究室)

- DACでは、技術的課題は解決されているが、コストがかかりすぎるという批判もあるという。DACの場合、大気中のCO₂濃度は400ppmと、非常に薄いため、火力発電排ガスの5~12%に比べて、回収コストは約3倍以上とされている。海水からの回収にも同様の課題がある。

<対処に必要な将来技術>

CO₂回収の要素技術とプラント開発（分離技術・回収技術、プラント技術）

- 大規模展開においては洋上プラットフォームの開発が必要（遠・自動制御、洋上電源等）
- モニタリングのためのCO₂センサーの開発、シミュレーション開発も必要
- 低コストで回収できる技術手法の開発も必要

脅威③ 風評被害 グローバル化や移動の容易性

福島第一原発からの処理水の海洋放出

<あるべき姿と技術的解決策>

環境 脅威① 汚染物質の流出に同じ

脅威④ 水資源管理

1) 気候変動による水資源不足

世界各地で発生している水資源不足の原因は、人口増加、気候変動、水紛争の3つに大きく分類されている。とりわけ、大雨や干ばつなどの異常気象を引き起こしているとされる地球温暖化による気候変動は、利用可能な水資源の量に大きな影響を及ぼしている。

このほかにも、世界では水をめぐる様々な紛争（水質汚濁、水の所有権、水資源開発等）が発生している。

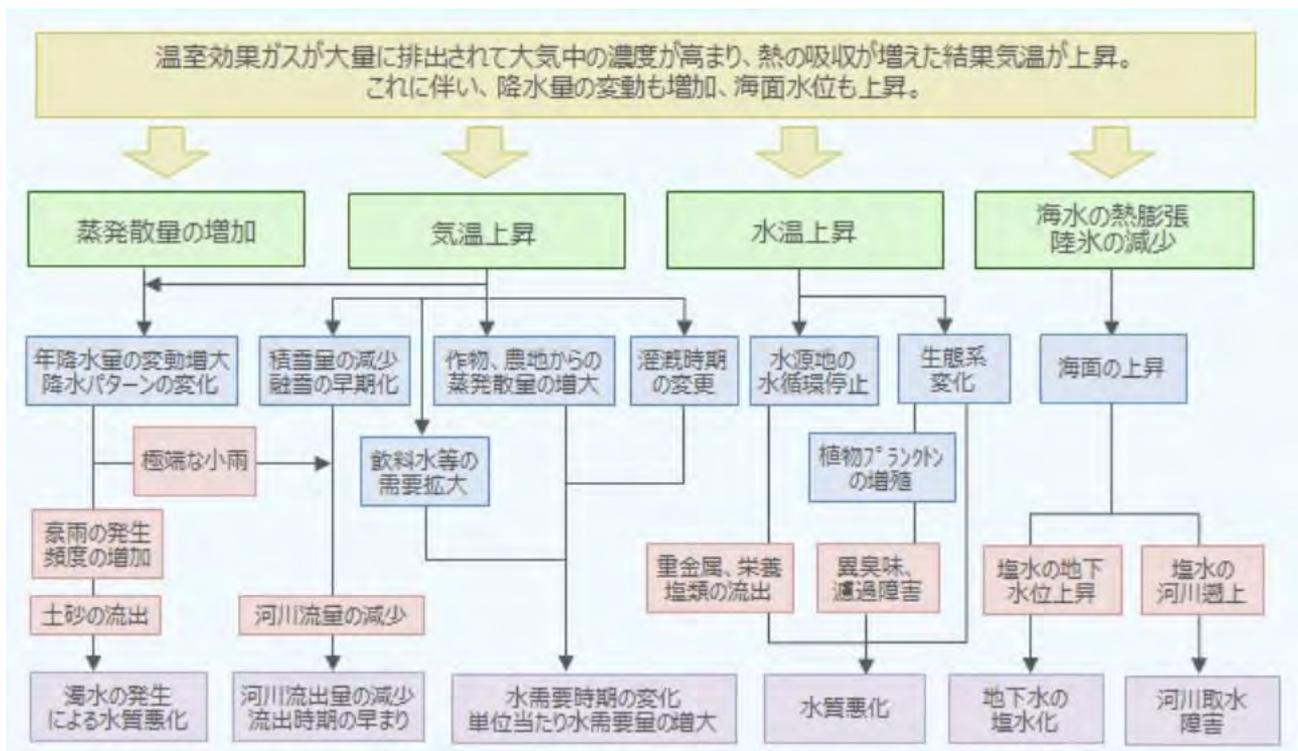


図5-20 地球温暖化が水資源に与える影響⁷⁸

⁷⁸ JAMSTEC. 「海のカーボンニュートラル 新技術開発」. (21 January 2022). Retrieved from: https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/green_innovation/pdf/006_03_06.pdf

世界各地の水紛争の例



図5-21 世界の水紛争⁷⁹

2) その他（再生可能エネルギーの推進による環境破壊）

<現状>

地球温暖化対策として、二酸化炭素を排出しない再生可能エネルギーが注目されている。他方で、再生可能エネルギー発電設備の設置による環境破壊や生態系への影響が懸念されている。

メガソーラー施設の建設には広大な土地を必要とし、パネルの展張によって景観が損なわれるだけでなく、森林伐採による生態系への影響や土砂災害が懸念される。

また、風力発電施設では、発電機の羽が回転する際に発生する音の問題、洋上風力発電であれば海底地形への影響や、海洋生物の生態系への影響など、環境への影響が少なからず生じると考えられている。

対策として、施設の設置に先立つ十分な環境評価システムを構築することが必要で、そのための科学調査の推進と海洋空間計画立案を進める必要があり、こうした取り組みは風評被害の防止にもつながる。

⁷⁹ 国土交通省. 「水資源問題の原因」. Retrieved from: https://www.mlit.go.jp/mi_zukokudo/mi_zsei/mi_zukokudo_mi_zsei_tk2_000021.html

<あるべき姿と技術的解決策>

第5節 環境 脅威② 温暖化等による生態系の変動・破壊 (4) 生態系に特に深刻な影響を与える海洋の酸性化に同じ。

脅威⑤ 気候変動

1) 極端な気象によるインフラの機能停止

<あるべき姿と技術的解決策>

第5節 環境 脅威② 温暖化等による生態系の変動・破壊 (4) 生態系に特に深刻な影響を与える海洋の酸性化に同じ。

大型化する台風を制御する議論が始まっている。

<現在の技術レベル>

ムーンショット型研究開発事業において「タイフーンショット」プログラムが進行中である。

<対処に必要な将来技術>

タイフーンショット計画参照 (<https://typhoonshot.ynu.ac.jp/>)

2) 国際的な日本のプレゼンスの低下

<あるべき姿と技術的解決策>

日本が得意とする、気候変動シミュレーションの技術を防災やインフラ保護のための重要技術として外国に提供していく。

<現在の技術レベル>

NI-CAM, MIROC6、SINTE-Fなどの優れた技術が存在する。

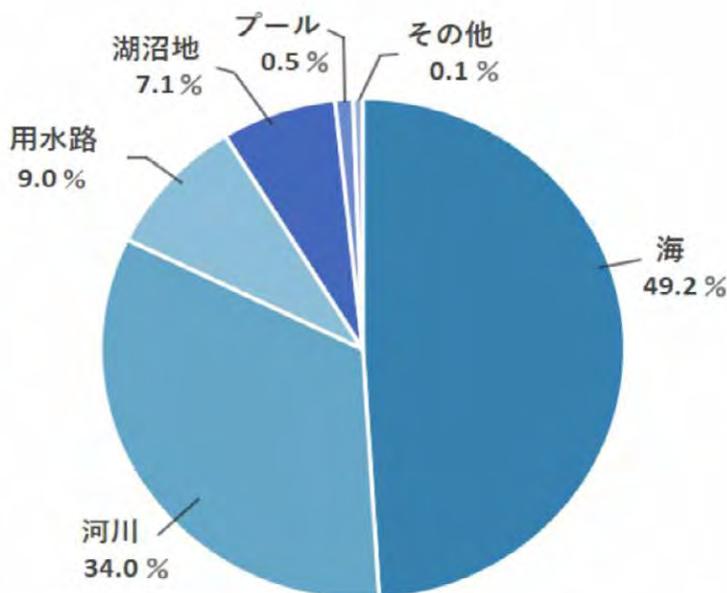
<対処に必要な将来技術>

外国に対する戦略的優位性を確保するため、(新幹線の売り込みのように) このための関連技術も国家レベルで同等に扱う。

第6節 健康

脅威① 事故

水難事故による死亡・行方不明事案の約半数は海で発生している。



資料提供：警察庁「令和3年における水難の概況」

図6-1 2021年度 水難事故の場所別割合⁸⁰

<対応>

海や川などそれぞれの自然環境の特徴を理解し、水難事故につながりやすい危険な場所や行為に関する知識を深め、的確な状況把握と安全確保を行うことが重要である。水難事故の原因となる離岸流などの自然的要因をAIとIoTを融合した先端技術によって探知し、いち早く水難者を発見するシステムの活用も期待されている。

⁸⁰ 政府広報オンライン。水の事故、山の事故を防いで海、川、山を安全に楽しむために。 Retrieved from: <https://www.gov-online.go.jp/useful/article/201407/3.html>

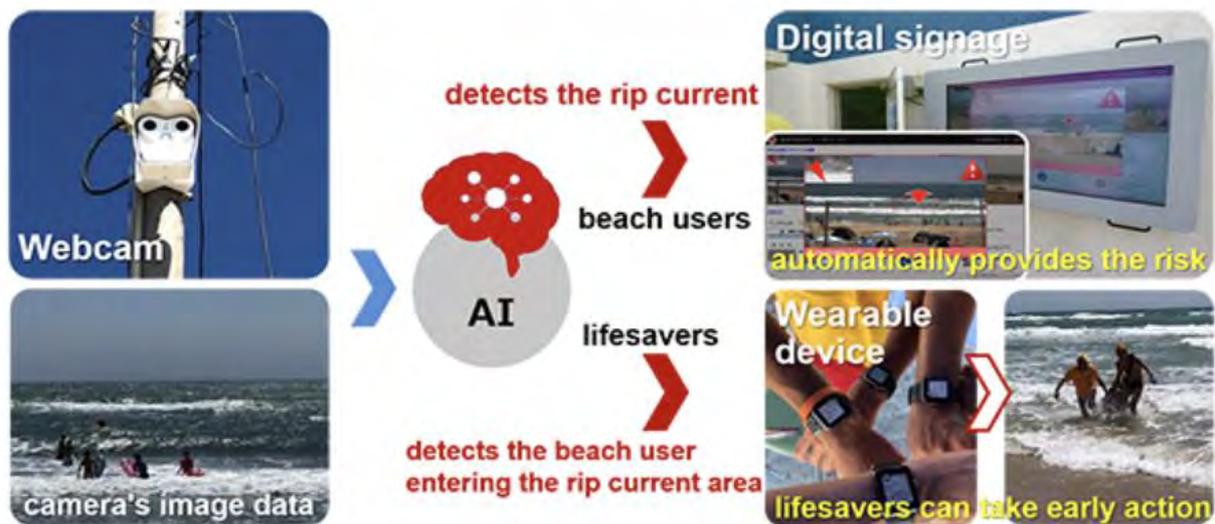


図6-2 早期救助救命システム：海面の撮影画像をAIが分析し、離岸流の発生や人の動きを検知

2022年G7 科学技術担当大臣会合では、デジタルツインオーシャン (Digital Twin of the Ocean, DITTO) の技術開発が最重要課題として取り上げられた⁸¹。デジタルツインとは、実在するものと同じ環境を仮想空間に再現し、あらゆる想定をシミュレーションできる技術である。デジタルツインは水難事故の際の認知能力、判断能力、動作の適切性などを実験・評価することに役立つと期待されている。

シュノーケリング中の死亡事故

<あるべき姿と技術的解決策>

低電力による水中と陸上間的高速通信網が構築されれば、初動対応が大幅に改善される可能性がある。

<現在の技術レベル>

海上通信に関しては、沿岸では携帯電話網がほぼ活用できるが、携帯電話の圏外となる外洋では、船舶衛星電話等の衛星通信システムを利用する必要があるが、衛星通信に対応した安価な携帯電話装置は一般に普及していない。

水中音響通信は、数m程度の距離であれば、数Mbpsの帯域を実現するところまで来ているが、これには大がかりなシステムが必要である。

<対処に必要な将来技術>

- 携帯電話網に外洋からアクセスできる、衛星コンステレーションによる通信網の構築。

⁸¹ G7 FS01. *International Digital Twins of the Ocean Summit*. Retrieved from: <https://www.g7fsoi.org/digital-twin-ocean-summit/>

- Ⅲ財産 脅威② 情報漏洩 (1) 通信機能を観測装置の専用チップ化が進み、音響通信にも適用されるようになれば、水中から洋上への通信も装置の小型化が可能。
- 一方で、水中音響通信と衛星通信の接続方法については課題が残る。

脅威② 荒天

海洋に関わる視点から、海溝型地震と海底火山について述べる。

<あるべき姿と技術的解決策>

第3節 財産 脅威⑥地殻変動の項目と同様、地震計や、地殻移動に伴う変動ひずみ計測センサーを、日本周辺の太平洋の側の海底や海底火山周辺にくまなく設置し、リアルタイムあるいは準リアルタイムで状態を監視する必要がある。このためには、海底のセンサーや洋上のプラットフォームからの大容量データ通信回線の確保と、気象・海況に左右されず長期運用可能な専用の洋上プラットフォームが必要となる。

<現在の技術レベル>

地震については、DONET等の観測ケーブルとセンサーを組み合わせた、海底設置型のケーブルネットワークシステムがあるが、これは沿岸が観測対象であり、太平洋側に点在する海底火山に対しては、現実的な手法ではない。海底火山観測については、現状では航空機による観測を定期的に行っている。また西之島や福徳岡ノ場のような活発な活動についても、航空機観測や、WaveGliderによる観測で対応している。

<対処に必要な将来技術>

海溝型地震を海底でリアルタイムに観測するため、海底ケーブルネットのワークを普及させるには、敷設あるいはメンテナンスのための、ROVや母船と行った専用ツールが必要となる。高い自律航行や作業を行うことができ、海底作業もこなせるAUVも有力な候補である。

海底火山の常時リアルタイム観測や、活動の活発化に伴う迅速なリアルタイム観測システムを構築するには、水中や洋上で長時間の監視活動を行える専用の観測プラットフォームと、それらを本土から離れた場所に点在する海底火山現場に迅速に展開する輸送システムが必要である。こうした長時間の監視活動を支える大容量電源と、現場の詳細映像（4k以上）等の大容量データを伝送可能な衛星通信回線も必要である。洋上プラットフォームからのアップリンクは、揺れる洋上から、小型アンテナにより省電力で送信する必要があるため、衛星の受信能力を飛躍的に高める、あるいは低高度の周回衛星や成層圏プラットフォームの利用を検討する必要がある。

脅威③ 汚染

1) 廃棄物の投棄

不法に投棄されるゴミが多くの場所で景観を損なっている。この対策として、人が多く集まる観光地

等での食品等の販売には生分解性プラスチック包装を使う等が考えられ、安価な生分解性プラスチックの開発が重要となる。また、ゴミのフローを明らかにし、効率的な回収システムを構築することも重要である。越境汚染の問題に対しては、海洋ゴミの扱いに関する国際的な取り決めが必要となる。

2) 大気中の汚染

ブラック（及びブラウン）カーボン・タイヤ粉塵等、着色大気エアロゾル粒子の拡散による北極海氷の汚染が発生しているが、現状ではモニタリングが不十分で、問題顕在化の認識に遅れがある。沿岸の大規模排出源毎及び船舶毎の排出を可視化する、ドローンや衛星による監視・計測技術や、硝酸センサー、微量元素センサー、粒子センサーなどの開発及び標準化、沿岸や発生域での多点モニタリングの展開、赤潮・海色モニタリングシステムの開発が必要である。

3) 海難事故に伴う船舶からの汚染物質（積み荷、燃料）の流出

<現状>

タンカーの海難事故や油井の事故に伴う油の流出は世界各地で発生しており、日本の周辺海域においても、大規模油流出事故の危険が常に存在している。

<対応>

実海域のリアルタイム監視と、予測のためのリアルタイムデータの融合によるシミュレーションの高精度化が必要である。

<あるべき姿と技術的解決策>

第5節 環境 脅威①に同じ。

脅威④ 自然破壊

<現状>

陸上のリゾート開発によって森林等の生態系が崩れ、自然破壊につながる。大規模である程影響が大きく、対策として、リゾートをまず海に求め、エネルギーも自給可能な洋上でのリゾート開発を推進する。

<あるべき姿と技術的解決策>

第5節 環境 脅威①に同じ。

脅威⑤ 伝染病

<グローバル化や移動の容易性>

人の交流や物の移動のグローバル化が進み、航空機や大型コンテナ船による短時間での移動や大量輸送が可能になったことで、伝染病の感染拡大を地域に抑え込むことができなくなった。新型コロナウイルス感染症の世界的なパンデミックは、社会の安全性を根底から揺るがし、社会・経済活動の大きな停滞と不安を引き起こすことが示された。

伝染病は人から人への1次元的な広がりとして捉えられがちであったが、季節性伝染病や、数十年から数百年単位の長周期の流行伝染病の存在が認識されつつある。季節性や長周期性の伝染病は、動物に由来するものが多く、自然環境に長期間潜伏し、時として人に害をもたらす。例えば、ペスト菌（ダニなどに潜伏）やインフルエンザウイルス（渡り鳥などに潜伏）などが代表例である。

海洋に潜伏する伝染病も知られるようになってきている。コレラ菌は海産物の摂食を通じて感染する病気であり、船舶による人の移動が盛んになったことで世界に広がった伝染病である。コレラ菌はビブリオ属細菌の仲間であるが、米国東海岸のチェサピーク湾や深海の微生物生態の研究により、冬に減少し夏に増加することが明らかになった⁸²。

さらに、コレラ菌は、海洋性プランクトンの表面に着生し潜伏する。このような潜伏状態は、生存可能一培養不可能（viable but non-culturable; VBNC）状態として、発見の遅れが指摘されている。近年、細菌相互の類似性を数値化しコンピュータにより細菌を同定する、分類学上のバイオインフォマティクス解析により、早期に発見できる技術が確立しつつある。

また潜伏期間を提供する着生をする生物を同定し、それらの摂取を控えることで感染を防ぐことができる。実際、バングラデシュなどでは、サリーなどの布で簡便にろ過した水を用いることでプランクトンの混入を防ぎ、伝染病の発生率を下げるのができたことが確認されている。

<あるべき姿と技術的解決策>

対策には予防措置と、対症措置がある。予防措置としては、感染に関与する生物を確定し、それらとの接触を控えることである。さらに衛生管理措置によって発生を抑え、人が本来持っている免疫力により対処することである。

対症措置としては、ワクチン及び処方手順を迅速に開発できる体制を整備することである。また、人口密度の高い陸域での感染を防ぐため、船舶の活用や、洋上に医療・衛生環境を整備すること等が考えられる。

<現在の技術レベルおよび状況>

- 世界規模のパンデミックは、自国の対策のみでは収束させることが困難であり、世界規模での対応が求められる
- 感染拡大を抑制するためには対面での活動を制限せざるを得ず、その結果、世界経済は大きなマイナスの影響を受ける
- 季節性伝染病や長周期性伝染病は、潜伏期間が長く、流行が環境の変化に影響されることが

⁸² Colwell, R.R. 1970. Polyphasic taxonomy of the genus *Vibrio*: numerical taxonomy of *Vibrio cholerae*, *Vibrio parahaemolyticus*, and related *Vibrio* species. *J. Bacteriol.* 104: 410-433.

ら、大規模地震災害のように、予測が難しいが頻繁には起きない災害と認識し、基本的情報の収集と対策の周知が必要と認識すべきである。

- とくに地球温暖化による海水の温度上昇は、ビブリオ属細菌の増加を促進するため、これに由来する伝染病の新たな流行に注意する必要がある。

<対処必要な将来技術>

経済産業省「通商白書2020」より

- 世界規模の課題の解決には世界的な協調行動（グローバル・ガバナンス）が重要。
- 新型コロナウイルスの感染拡大を契機として、国際協調の重要性を再認識し、危機にも耐性が高い、柔軟でバランスのとれた経済社会システムの構築を目指し、国際協調の深化を通じたグローバル・ガバナンスを更に強化していくことが求められている。
- デジタル標準を通じた技術等に関する整合性の確保を目指す国際標準化機構（ISO）、電気電子関連の技術的協議を行う国際電気標準会議（IEC）などの国際標準化団体は、個別分野毎の産業団体や学術団体による様々な取組に併せ、世界規模での貿易促進、科学技術・経済面での国際協力推進に寄与している。
- ビブリオ属細菌に代表される伝染病を引き起こす微生物を早期に発見し、宿主も明らかにする。このためには、バイオインフォマティクス解析などの環境ゲノム情報を用いたデータの集積が求められる。また、それらとの接触や摂取を防止する衛生環境の普及が必要である。
- 海洋の温暖化が潜伏生物の活性化を促すことで伝染病のリスクが高まる可能性を認識し、食や物流の衛生対策を広めていく必要がある。
- 伝染病は早期の封じ込めが重要で、地震における72時間以内の救助のように、早期の発見と、発生時における周辺国の協力体制の構築と経験の蓄積が必要である。
- また、パンデミックや地域性の流行が発生した場合、その収束プロセスを解析し、予防措置と対症措置を柔軟にバランスさせ、正常化に至るノウハウを蓄積し、知識の普及を図ることが必要である。

第3章 政策的観点での一考察

海洋状況把握（MDA：Maritime Domain Awareness）の役割

1. 変貌する安全保障

平成30年5月15日に第3期海洋基本計画が閣議決定された。特記すべきは、法の支配の下、自由で開かれ安定した海洋の実現に向け、伝統的な安全保障の柱である外交、防衛のみならず、領海警備、密輸・密航、海上交通、資源開発、環境保護などを含めた総合的な海洋の安全保障に取り組むべきと強調されている点である。

この第3期海洋基本計画には、非日常的な状況を想定している「海洋安全保障」ではなく、日常的な世界に内在する危機に対処しようとすることを含めた総合的な「海洋の安全保障」と明記されている点、すなわち「の」の意味が大きいものと考えている。

グローバル化の進展により、密輸・密航、エネルギー、食糧、難民、海賊、海洋環境、気候変動、大規模災害、更には世界を震撼させた新型コロナウイルス（本来、一地方の局所的感染症であるが・・・）の大規模感染拡大等、日常的な生活に内在する危機が拡大し、非日常である軍事力では対処することができない危機が多くを占めるに至っている。

これらの危機に対処する海上の担い手は、海上保安庁をはじめ、水産庁、警察庁、財務省（税関）、出入国在留管理庁、経済産業省等の法執行機関であり、伝統的な安全保障の柱である「外交」、「防衛」に加え、「法執行」を「海洋の安全保障」の更なる柱と位置づけたといえる。これは、海上における法執行機関の新たな幕開けであり、更に経済安全保障等の観点からも極めて重要である。

2. 海の可視化

これらの危機も視野に、海洋の常態を把握する必要があるとの認識のもと、海洋状況把握(Maritime Domain Awareness：MDA)体制を強化する取組（海の可視化）が進められている。第3期海洋基本計画は、海洋状況把握（MDA）を「海洋の安全保障、海洋環境保全、海洋産業振興・科学技術の発展等に資する海洋に関連する多様な情報を、取り扱い等に留意しつつ効果的に収集・集約・共有し、効率的に把握すること」と定義しており、MDAの取り組みにおいて注目すべきは、政府機関が一体となって、効率的に情報集約・共有のメカニズムを確立しようとする点にある。

2019年（平成31年）、MDA能力強化の一環として、海洋情報の集約・共有するための情報システム「海洋状況表示システム」（愛称：海しる）の運用が開始された。「海しる」は、政府・関係機関等が保有する様々な海洋情報を地図上に重ね合わせて表示できるインターネット上のサービスで、誰でも利用可能である。

常態の把握なくして、異常の認知は困難である。今後は、「海しる」を含め、海の更なる可視化に向け、MDA体制の充実強化を推進すべきである。第3期海洋基本計画は、MDA体制の確立を海洋の安全保障の基盤となる施策として重点的に取り組むものと位置づけている。

3. 科学・技術、イノベーションの貢献

一方、我が国の科学力・技術力は、経済や防衛力等の環境を整備する上での基盤となる。科学技術の促進を図ることは、海洋の産業振興に直結するだけでなく、海洋の安全保障に関連する様々な分野に於ける基盤として大きな意義がある。安全保障及び民生分野の両方で活用可能なデュアルユースを意識した海洋に関連する研究開発、技術力の向上を図ることは、長期的な観点から重要である。

2016年（平成28年）に策定された第5期科学技術基本計画で「Society5.0」が提起された。同基本計画には、「分野の異なる個別システム同士が連携協調することにより、自立化・自動化の範囲が広がり、社会の至るところで新たな価値が生みだされていく。これにより、生産・物流・販売、交通、健康・医療、金融、公共サービス等の幅広い産業構造の变革、人々の働き方やライフスタイルの変化、国民にとって豊かで質の高い生活の実現の原動力になることが想定される。」と記されており、この取組は、MDAの体制確立においても重要な意味を持つ。

そのため、この基本計画における「Society5.0」の概念を海洋分野でも適用すべく、無人機（AUV、ROV等を含む）やドローン等のハード面での技術開発及びそれらのネットワーク化を今後一層推進していくとともに、これらの技術に加え、衛星関連・海洋監視技術、データ・情報の取得・解析技術等を、安全保障に直結する重要な技術として発展させ、総合的な理解と活用を図るべきである。これらの実現により、総合的な国力の向上が図られ、我が国に有利な海洋における安全保障環境を創出し、国家安全保障戦略に大きく貢献することとなる。

4. 新たな推進力

我が国周辺海域を取り巻く情勢は、過去に例を見ないほど厳しさを増している。水産資源の奪取、漁業行為に対する威嚇、IUU漁業、海底資源を巡る問題、領海への不法侵入、航行ルートの制限、海洋環境破壊、海洋環境変化、生態系変化、大規模災害等、いずれも法の支配に基づく自由で開かれた海を護る上での大きな課題である。力に屈せず、法に則り、事を平和裡に解決することが、国家の安寧と秩序を維持し、国民の安全・安心に寄与することとなる。そのため、海を可視化し、関係者が常に最新の状況を共有するMDAは経済安全保障の新たな推進力となる。

海上における各法執行機関は、これまで、我が国を取り巻く情勢の変化を踏まえ、その都度、各省庁が自らの所掌の範囲で、MDAの体制を整備してきたものと認識している。これからは外務、防衛といった伝統的な安全保障の担い手と共に政府機関が一丸となり、官民が協力し、業務需要変化の予兆を捉え、科学・技術、イノベーション分野の力を最大限活用し、海洋立国日本を更に強化していくことが肝要である。MDAはそのための重要な起爆剤ともいえる。

新たな国家安全保障戦略において、海上保安庁と自衛隊の連携強化が盛り込まれた。また、新たな海上保安能力の強化に関する方針においても、海上保安庁と防衛省・自衛隊は、それぞれの役割分担の下、情報共有・連携の深化や、武力攻撃事態における防衛大臣による海上保安庁の統制要領の策定や共同訓練を含めた、各種の対応要領や訓練の充実を図るものとしている。「安全・安心」の実現に向けた科学技術・イノベーションを推進するにあたり、海洋の安全保障はその基盤である。海上保安庁と自衛隊の連携・協力を不断に強化していくことは、MDAを進化させる上でも重要であることを付記しておく。

参考文献

- 1) <https://oceanofthings.darpa.mil/> (2022年11月21日アクセス)
- 2) 「高精度測位技術の現状とその利用分野に関する調査」 国土地理院時報 (2004, 103集) <https://www.gsi.go.jp/common/000024805.pdf>
- 3) 「ソフトバンクが成層圏に挑戦する理由 - 無人飛行機で成層圏に基地局を。「HAPS」」 ソフトバンクニュース 2019-08-26. https://www.softbank.jp/sbnews/entry/20190826_01
- 4) Jagannathan, S., Bertsatos, I., Symonds, D., Chen, T., Nia, H. T., Jain, A. D., ... & Makris, N. (2009). Ocean acoustic waveguide remote sensing (OAWRS) of marine ecosystems. Marine Ecology Progress Series, 395, 137-160.
- 5) " DARPA Explores UnderSea "GPS-Like" Network" , Warrior Maven MAR 22, 2018. <https://warriormaven.com/future-weapons/darpa-explores-undersea-gps-like-network>
- 6) 国立研究開発法人情報通信研究機構 未来ICT研究センタージャーナル, KARC FRONT. Vol.16 2009. 「原子の波の性質を利用した高精度子型慣性センサーの研究」 Retrieved from: https://www.nict.go.jp/advanced_ict/plan/4otfsk000001h78m-att/16.pdf
- 7) 「水中光無線通信による100m超の20Mbps双方向通信に成功～水中光Wi-Fiの構築及び水中観測機器のIoT化へ大きく前進～」 国立研究開発法人海洋研究開発機構プレスリリース2017年 10月 2日. Retrieved from: http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20171002/.
- 8) 「“盗聴不可”の量子暗号通信を人工衛星で実用化目指す 先行する中国に追いつけるか」 ITmedia, Inc. 2020年11月10日. Retrieved from: <https://www.itmedia.co.jp/news/articles/2011/10/news040.html>
- 9) 「26年にも量子暗号衛星打ち上げへ、NICTが狙う中国追撃シナリオ」 日経クロステック、2021年5月26日。Retrieved from: <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/01639/00011/>
- 10) 「量子暗号・物理レイヤ暗号の研究開発 情報理論的安全な通信の実用化に向けて」 NICT NEWS 2021 No. 2 (通巻486) 掲載記事. Retrieved from: <https://www.nict.go.jp/quantum/about/crypt.html>.