ムーンショット型研究開発事業
新たな目標検討のためのビジョン策定

地域海洋資源を起点とした
自律的な社会経済圏が、繋がり、寄り添う、
新しい海洋国家創成に関する調査研究

調査研究報告書

令和3年7月

目標検討チーム「WeON（ウィーオン：Wealth of Ocean Nation）」
（元：地域海洋資源が支える新海洋国家=日本）

チームリーダー：石村学志（岩手大学農学部　准教授）
サブリーダー：市野川桃子（国立研究開発法人 水産研究・教育機構
水産資源研究所水産資源研究センター漁業情報解析部　資源解析グループ長）

チームメンバー：
秋田鉄也（国立研究開発法人 水産研究・教育機構
水産資源研究所水産資源研究センター漁業情報解析部　資源解析グループ研究員）
阿部景太（ノルウェー経済高等学院（NHH）ポストドクトラルフェロー）
安藤北斗（デザインスタジオwe+、クリエイティブディレクター・デザイナー）
岩崎健太（株式会社HYPERIA 執行役員　技術統括）
大島肇（株式会社アール・ピー・アイ　執行役員）
五味希（株式会社アール・ピー・アイ　プランナー）
酒折幸弘（株式会社HYPERIA 代表取締役　会長）
関口愛理（デザインスタジオwe+、デザイナー・エンジニア）
武村理雪（岩手大学　客員教授）
徳永佳奈恵（Gulf of Maine Research Institute,
Associate Research Scientist in Coastal & Marine Economics）
長谷川琢也（ヤフー株式会社）
馬場真哉（Logics of Blue　代表、岩手大学客員准教授）
林登志也（デザインスタジオwe+ 、
クリエイティブディレクター・デザイナー・コピーライター）
森本詢（株式会社HYPERIA 取締役　社長）
安井翔太（株式会社　サイバーエージェント、
AI Lab Economic Research Scientist）
横川太一（国立研究開発法人海洋研究開発機構　研究員）
Raphael　Roman（岩手大学農学部資源経済・政策と数理資源研究室　研究員）
小川柚葉（岩手大学大学院総合科学研究科修士課程）
金澤海斗（岩手大学農学部食料生産環境学科）
川村慧　（岩手大学大学院総合科学研究科修士課程）
木皿祐雅（岩手大学食料生産環境環境学科）
下山奈津美（岩手大学農学部食料生産環境学科）
中村洸介（岩手大学大学院総合科学研究科修士課程）
三橋瑳絵（岩手大学農学部食料生産環境学科）

目次

I. MS目標案のコンセプト
1.MS目標案
1.1MS目標案の名称
1.2実現したい2050年の社会像
2.Targets（当該MS目標の達成シーン。2050 年（及び2030年）に何が実現しているか）
3.当該MS目標を設定した理由及び、目標達成の社会的意義等
3.1当該MS目標の設定や目標達成に向けた取組みが、今必要である理由
3.2目標達成の社会的意義
3.3当該MS目標の達成に向けた社会全体の取組み概要
4.当該目標達成によりもたらされる社会・産業構造の変化

II. 統計・俯瞰的分析
1. 当該MS目標を達成するための課題（科学技術的・社会的課題）や必要な取組
2. 当該MS目標を達成するために取り組むべき研究開発の俯瞰
3. 当該目標に関連する研究開発の動向（全体）、海外動向及び日本の強み

III. 社会像実現に向けたシナリオ
1.挑戦的研究開発の分野・領域及び研究課題
2. 2030 年・2040 年・2050 年のそれぞれにおける、達成すべき目標
（マイルストーン）、マイルストーン達成に向けた研究開発、これによる波及効果）
3.目標達成に向けた国際連携の在り方
4.目標達成に向けた分野・セクターを越えた連携の在り方
5. ELSI（Ethical, Legal, Social Issues）
（目標達成に向けて取り組む上での倫理・法的・社会的課題及びその解決策）

IV. 結論
V. 参考文献

Ⅰ. 提案するMS目標案のコンセプト

1. MS 目標案

1.1 MS目標案の名称

2050年までに、海洋の財化・可視化・利用最適化のサイクルを経済動機で駆動させ、
新海洋国家＝日本を実現する。

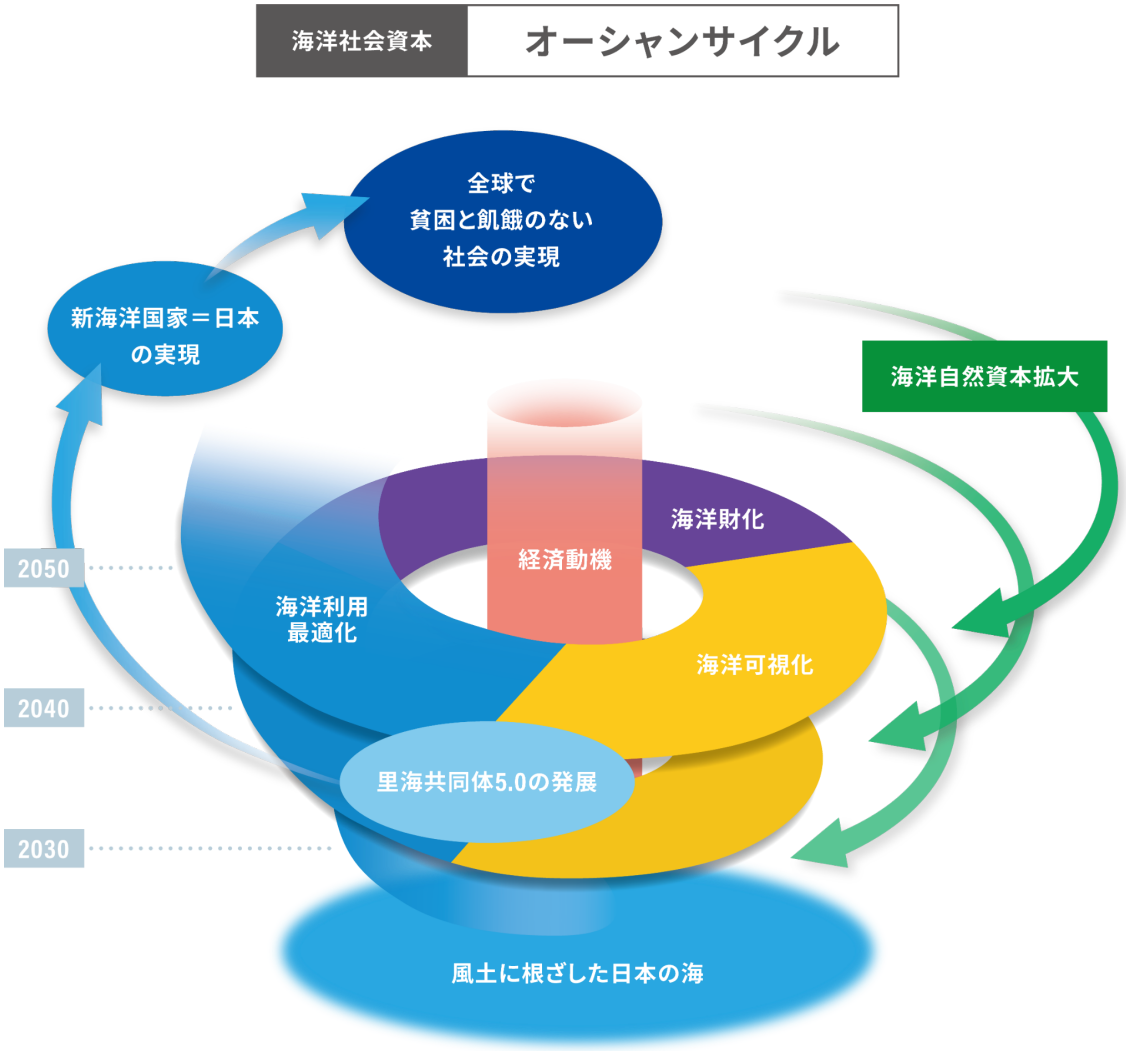
1.2 実現したい2050年の社会像

海は、すべての生命の起源だ。しかし人類は、未だに海のことをほとんど理解できておらず、海は可能性の宝庫とも言える。そこで我々は、古くから海と生きてきた島嶼国日本から、海を起点とした新たな経済圏と人々の暮らしを提案することで、持続可能で多様性に溢れる2050年の新海洋国家=日本への道筋を示し、喫緊に対応すべき世界の諸問題の解決に向けた道標を描きたいと考えている。

新海洋国家＝日本は、経済的な動機づけにより海にまつわるデータなどを財化し、可視化し、最適に利用する海洋社会資本「オーシャンサイクル」によって導かれる。まず、宇宙衛星や海洋ロボット等のセンシング技術で得られる海洋データや、海洋利用者の生活データをリアルタイムに収集。ブロックチェーン技術による分散台帳システムを駆使することで、市場取引が可能な商財としてそれらのデータに価値を持たせ、さらなるデータ集積と海洋の可視化を促進する。その結果、より確かに海の恵みを社会にもたらす海洋自然資本が拡大し、財化され利用される里海共同体5.0が発展する。

里海共同体5.0とは、風土に根ざした地域の海を守りながら、他の経済圏としなやかにつながる共同体だ。地域共有財としての海の最適利用は加速し、次第に膨らむ海洋自然資本は、あらゆる暮らしの場面（食や経済活動）で民主的に活用される。日本固有の共同管理のメリットを生かしながら海と人は深く結ばれていく。各自の意思は、住む地域を問わず共同体に反映され、人々はより多くの選択肢から自分に合った暮らしを主体的に選べるようになる。こうして新たな暮らしと海洋経済が創発され、社会の多様性・豊かさの担保と海洋の持続的な利用の両立が実現する。

人類は海に還り、海から社会をアップデートすることで、新海洋国家を実現する。さらにそのモデルが全球に波及し、貧困と飢餓のない世界を導く。それが2050年の新海洋国家=日本が世界に提示する理想の社会像である。



図I-1 当該MS目標が提案する海洋社会資本、「オーシャンサイクル」

2. Targets（当該 MS 目標の達成シーン。2050 年（及び2030年）に何が実現しているか）

さまざまな海洋データを収集することで、海洋の可視化を促すモニタリング・センシング技術、データの財化・価値づけに寄与する分散台帳システムやデータ取引市場、さらに、データの最適利用を叶えるスマートコントラクト技術、自律分散組織といった技術を社会実装することで、以下の状態を実現する。

＜海の生態系を維持しながらその恵みを最大限に活かす新たな社会基盤の構築＞

2050年までに…

海にまつわるあらゆるデータなどの価値を財化し、可視化し、最適に利用する海洋社会資本「オーシャンサイクル」が日本全域に浸透する。

- あらゆる海洋関連データと海洋利用権を所有、保管、取引できる社会基盤プラットフォームを開発し、日本全域で運用する。
- 海浜・海面・海中における海洋資源の状況ならびに需給をリアルタイムに把握、予測、発信する仕組みを日本の沿岸全域で整備する。
- 持続的な資源利用に向けた需給バランス調整（デマンド＆レスポンス）を非中央集権的に行う仕組みを整備する。

2030年までに…

海にまつわる特定のデータなどの価値を財化し、可視化し、最適な利用を試みる海洋社会資本「オーシャンサイクル」を構築し試行する。

- 特定の海洋関連データと海洋利用権を所有、保管、取引できる社会基盤プラットフォームを開発する。
- 海浜・海面・海中における特定の海洋資源の状況ならびに需給をリアルタイムに把握、予測、発信する仕組みを整備する。
- 特定の海洋関連データをやりとりするためのデータ取引市場を構築する。

＜里海共同体5.0を基盤とした、海と親しみ、多様性にあふれ、創造性に富む暮らし＞

2050年までに…

主体的な暮らしを支える新たな経済活動が多数生まれる。

- 海洋関連データや海洋利用権の取引が増え、各自が属する里海共同体5.0以外への投資をはじめ新たな経済活動が生まれる。★1

市民目線コラム

★1. どこにいても、地元や海とつながって生きていける！

【技術】分散台帳システム、スマートコントラクト技術、自律分散組織

里海共同体 5.0 が、オーシャン・サイクルのもとで繁栄していくには、共同体の内部はもちろん、外部とのつながりも重要です。外の人々にも、共同体の各種権利に対する投資の門戸を開くことで、リターンとして共同体の施策決定への参加や、金銭、物品の配当など新しい経済活動が生まれます。例えば、洋上風力発電に投資することでどこでも安価なグリーン電力が賄えたり、海上観光開発に投資することで共同体を訪れた際に優待されたり。さまざまな理由で地元を離れた人も、場所に縛られずに主体的に地元経済を盛り上げ、海を守る一員になれます。

- 個人の生活関連データ（食関連データ・ヘルスデータ等）も財として流通することで収入源が多様化する。海洋関連データと個人のデータが連携することで各自の健康状態に応じた最適な食、医療、その他サービスの提供が受けられるようになる。★2

市民目線コラム

★2. 自分が持っているデータを売ったら健康になれる!?

【技術】分散台帳システム

海洋のあらゆるデータが集まるデータ取引市場。そこで扱われるのは、漁獲量や推定資源量、気候予測データといった大きなデータばかりではありません。私たち個人が日ごろ買っている魚の種類や量、趣向、調理方法、日々変化するヘルスデータも貴重な商財となります。そうしたデータが研究機関や漁業者、水産関連企業で活用されることで、漁獲量や売値の設定、各自の健康状態の把握や将来予測など、様々な分野に大きく貢献します。自ら海に入って地元の海洋状態をセンシングし、データを集める活動が若者の中で流行ったり、各自の健康状態に応じた最適な食生活や医療情報が毎日届くようになったりするかもしれません。

意志のリアルタイムかつスムーズな反映が可能となる。

- デバイスアプリを通して、各自の意志が無理なく最適なかたちで里海共同体5.0や国家運営に反映される。★3

市民目線コラム

★3. 社会のルールは選挙じゃなくてアプリで決める！

【技術】スマートコントラクト技術、自律分散組織

海洋を最適に利用するためにもっとも大切なのは、利用のためのルール作りです。沿岸地域の開発や、洋上発電機設置の賛否といった地域の意志決定は、各自のデバイスアプリを通して地域住民やステークホルダーの思いが掬い上げられ、完全に透明化されたプロセスの元で進められます。日々の暮らしと密接につながる共同体の細かなルールも、各自の意志をアプリに登録しておくことで最適解が導かれます。全ての人々が無理なく主体的に関わり生きる社会が実現します。

海と親しむ方法が深化、多様化する。

- 海のあらゆる領域がモニタリング・センシングされることで、海の中まで地図が広がる。★4

市民目線コラム

★4. 海中地図を頼りに、どこにでも行ける！

【技術】分散台帳システム、モニタリング・センサリング技術

海洋を最適に利用するには、まず、海のことを知らなければなりません。分からないことが多い海洋を可視化するために、宇宙衛星を使った船の運航状況の観測や、無人運航船や海洋ロボットによる海上や海中のモニタリング・センシングが行われ、Google Sea Map のような海の中の正確な地図が完成します。人々が魚群ロボットと一緒に海中を泳ぎ回り、海の隅々までデータ採集に行く未来もそう遠くはないでしょう。

- ポピュラーな種から希少品種まで多種多様な魚を、旬の時期に適正な価格で楽しむことができる。★5

市民目線コラム

★5. 豊かな海の幸をいつまでも。

【技術】分散台帳システム、モニタリング・センサリング技術

海洋の可視化が進むと、海の中の資源量が分かるようになります。自然環境を守りながら資源を活用する、適切なペースがデータから導かれるので、持続的、安定的に魚を獲ることができるようになり、何百年先の子孫もまた、今と変わらずおいしい魚を食べることができます。日本の海域には多種多様な魚が生息しているので、生息数や生態が的確に分かれば、今まで価値が見出されていなかった希少な魚も適正な価格で市場に出回るようになり、私たちの食卓は彩り豊かな海の幸に溢れることでしょう。

3.当該 MS 目標を設定した理由及び、目標達成の社会的意義等

3.1 当該 MS 目標の設定や目標達成に向けた取組みが今必要である理由

日本の宿命：針路は海にある。

我が国は四方を海に囲まれ、南北3,500kmに伸びる細長い島嶼国ゆえに、交錯する暖流・寒流は変化の大きい気候と多様な風土を形作る。複雑で多彩な沿岸地理も相まって、日本の海は世界屈指の多様な生態系と圧倒的な潜在的価値を誇る。

亜熱帯から亜寒帯までの変遷を網羅した世界の海の様相が、日本の沿岸や海域に現れているのだ。大陸と日本列島に囲まれ、寒流と暖流の出会う日本海は、世界の大海に先んじて気候変動の影響が顕著化すると言われる。また、古くから私たちの生活は、その多様な風土に適応するよう、沿岸帯に広く文化として形作られてきた。

稀有な地理的海洋条件と多様な風土を持つ日本が、海とともにあることを積極的に選び取り、海洋を持続的かつ最大限に利用することで、2050年に確かな海洋国家として存在すること。それは、日本やそこに暮らす人々のみならず、世界に対して、海を起点とした社会を創る路を示すことでもある。

Society　5.0がどれほどサイバー空間を切り拓いたとしても、2050年の日本は確かに海というフィジカル空間とともにある。大きく社会環境が様変わりし、幾度の災禍があったとしても、日本から提示される新海洋国家モデルは、世界の羅針盤となり海への針路を指し示す。

社会の要請：ポストコロナ時代に必要な食料・エネルギー・経済の自立。

2011年の東日本大震災や新型コロナによるパンデミックなどの災禍を乗り越える中で私たちが身を持って理解したのは、海は日本を世界と繋ぎながらも隔絶をもたらす存在であることだ。島国日本の食料、エネルギー、経済、国土の安全保障の自立について、私たちは真剣に取り組まねばならない。　2050年に向けた社会の欲求の最大公約数が、健康を支える十分な食料と健全な経済であるとき、これらを日本固有の海洋資源によって賄うという、自立への覚悟と道筋が今、求められている。

科学技術的な要請：今まさに、海の課題を克服する環境が整備されつつある。

増え続ける世界人口を養う上で、水産資源の持続的・安定的な生産と消費が、全球での食料供給を大幅に改善できる、との見通しが科学的に明らかになった(Costello et al. 2019)。この発表などを礎に2020年、日本を含む世界の主要な海洋国家14カ国で構成される『持続可能な

海洋経済の構築に向けたハイレベル・パネル』(High Level Panel for a Sustainable Ocean Economy)　は、地球規模の課題に革新的な解決策を提供する持続可能な海洋経済を構築する、と宣言した。科学は海洋から世界をつくる道を示し、国々はその道をともに進むことに合意したのである。

長期取り組みの必要：法整備、制度改革など国家ガバナンスに影響を与える。

新海洋国家＝日本は、経済的な動機づけにより海にまつわるデータなどを財化し、可視化し、最適に利用する海洋社会資本「オーシャンサイクル」によって導かれる。しかし、このインフラを社会実装するには国内の法整備と制度改革のみならず、世界動向を見据え、データなどの規格標準化を必要とする。海洋関連データや権利を財化する技術や制度一つとっても、日本社会に受容されるには、既存の社会規範や商習慣と調整を図る必要があり、政治や国のガバナンスに変革を促す推進力を持つ。

国家レベルの価値：海のサイバー空間を制する者は世界を制す。

宇宙とならんで開拓が進んでいない領域が海であり、サイバー空間に至っては、まったくの未開領域である。海をフィジカル空間とサイバー空間の両域で掌握すれば、世界の旗振り役となり全球の発展に大きく貢献する。

なお、近年海そのものや海の経済・社会・環境的な価値に関わる情報と知識が急速に増えている。その背景には、海の価値を経済的価値として評価し、投資する環境を整えようとする欧米の動きがあり、注視する必要がある(Sumaila et al. 2021)。

3.2 目標達成の社会的意義

海を起点とすることには、世界を変えるほどの価値がある。

日本に限らず、洋上都市や海洋牧場といった未来の海に関するアイデアや技術は社会実装へのハードルが非常に高く、海の潜在能力を引き出し、見事に使いこなした国は未だ存在しない。

しかし、海を起点とした新海洋国家モデルを創成し、世界に対して海洋のポテンシャルを示すことは、世界屈指の多様な生態系と圧倒的な潜在的価値を誇る海に囲まれた日本だからこそ成し得る宿命である。当該MS目標は、陸上を起点に発展してきた産業と科学技術を海へと伸展させ刷新する、計り知れない価値を持つ。

日本が、管轄権内の海洋を持続的かつ最大限に利用できるようになることは、内陸国を含め

たすべての海と関わる他国に対して持続可能な発展の可能性を提示し、全球レベルで貢献する国となることを意味する。

科学技術を基盤としたインフラの影響力は広範囲に及び、社会変革につながる。

当該MS目標では、「オーシャンサイクル」の実現を重要視している。それは、海洋社会資本としての経済インフラであり、水産業従事者も、海への関心が薄い市民も、経済的なインセンティブに従い最善の意志決定を重ねることで、海を起点とした新しい価値を有する国家へと日本が成長していく原動力となる。海洋利用を促す科学技術群の発展はもちろん、新たな海洋ビジネスの勃興や、それらが導く多様性と創造性に富む暮らしまで、広範囲に社会変革を促す波及効果を持つため、実装の社会的意義は非常に大きい。

社会の多様性・豊かさの担保と海洋の持続的な利用の両立が可能となる。

「オーシャンサイクル」によって導かれる社会では、人々は多様な選択肢から自分にあった暮らし方を主体的に選べると同時に、利己的な行動によって資源が枯渇したり、利益が失われたりする「共有地の悲劇」から海洋自然資本は守られ、個人にとっても社会にとっても最適な海洋利用が叶えられる。スマートコントラクトや自律分散の技術によって、持続的な海洋資源利用を志向する選択肢が民主的に選ばれ、その選択が次第に強化されて日常となる。人々の豊かさを犠牲にしない、真に持続可能な社会が実現する。

3.3 当該 MS 目標の達成に向けた社会全体の取組み概要

我々の提案するMS目標の基盤となる「オーシャンサイクル」では、海洋およびその利用データが全領域にかかわる基本要素となるため、ここではデータを切り口に社会全体の取り組みを概説する。

データの収集

多様なデータを有する行政のほか、海運業、造船業、漁業や水産関連産業、海洋性レクリエーション産業など主要な海洋産業関係者による、生物データ、物理的データ、経済社会的活動データの収集と公開、提供への積極的な協力が必要である。また、市民に対しても身近な海洋およびその利用データの収集への協力が求められる。これらを可能とする制度設計と社会受容性（リテラシー）の向上が求められる。

効率的なデータ収集には、電子デバイス、その他の電子部品、産業用電気機器、民生用電気

機器、電子応用装置・電気計測器、その他の電気機械、通信・映像・音響機器、電子計算機関係の産業が関わる。

これら適正な海洋およびその利用データの収集・公開・提供を可能とする制度設計と社会受容性（リテラシー）の向上が求められる。

データの活用

データを処理して情報化するデータベースサービス業（不動産情報、交通運輸情報、気象情報、科学技術情報などの提供）といった情報提供サービス業、ソフトウェア業、アプリケーション・サービス・コンテンツ・プロバイダ業、AI関連産業あるいは出版業や広告制作業にいたる広範な情報関連産業等が、広く収集された海洋およびその利用データをもとに新たな価値を生み出すことが期待される。また、我々の提案するMS目標の画期的な点の一つとして、データや情報を含む財の取引市場に関わる金融、保険、不動産など広範な産業が、新たに既存の海洋産業に加わる点が挙げられる。このため、各分野におけるデータと財の取引と利用に関わる技術開発と制度設計が必要となる。

4. 当該目標達成によりもたらされる社会・産業構造の変化

産業構造にもたらされる変化

現在，海洋に関連する産業は、主に海運業と漁業，それに係る産業群で構成されている。日本が、海の不確実性を克服することによって、海洋由来の自然資本機能（海洋自然資本）を膨らませ，持続的かつ最大限に海を利用する仕組み（オーシャンサイクル，海洋社会資本）が構築されていることによって、海洋を起点とする産業はより多様に膨らみ、社会全体を支える大きな基盤となるであろう。

次章で詳述するこのオーシャンサイクルを回す原動力は「経済的動機」となるような仕掛けになっている。これはすなわち、サイクルがうまく回る結果として、関連する海洋産業に資本が投入され、新たな海洋産業が確立されることを意味する。結果として、社会の海との関わり方は大きく変わり、海と離れた領域へも変化を及ぼしていくだろう。

このオーシャンサイクルの底流には、海洋資源とともに海に由来する財（データ・情報・利用権・価値）が流れる。特に海洋のデータを財として扱うことによって、「海の財をいかに安全かつ速やかに集め、取引し、加工し、利用し、再生産するか？」を解決するためのAI関連産業が海洋自然資本をもとに大きく発展することが期待される。さらに、それによってもたらされた海洋の可視化によって、従来から海洋資源を利用していた水産業・海洋エネルギー産業・海運業等はより効率的に産業を発展させることができる。特に、勘や経験に大きく依存している漁業は、海洋の可視化・利用最適化が達成されれば、勘や経験に頼らずとも効率的に漁業が営めることになり、産業への参入障壁が限りなく小さくなり、結果として多様な人びとで構成されるようになるだろう。

社会構造にもたらされる変化

前述したように、一次産業である漁業（また、このサイクルを他の一次産業へ適用することにより他の様々な一次産業）が誰にとっても魅力ある職種となる。それによって担い手不足が解消され、海洋から食料生産は世界を飢餓から救うことになる。さらに、海洋や自然の不確実性をリスクとして可視化としながら意思決定をおこなっていくことが普通になり、このような意思決定の方法が国民や社会全体の政策決定にも適用されるようになるだろう。また、社会全体が海洋を由来とした産業に支えられることによって、全国各地の海辺へ関心、経済、生活が分散する。分散を前提とした雇用制度を設計することによって、海洋関連の仕事を兼業にする人が増える。

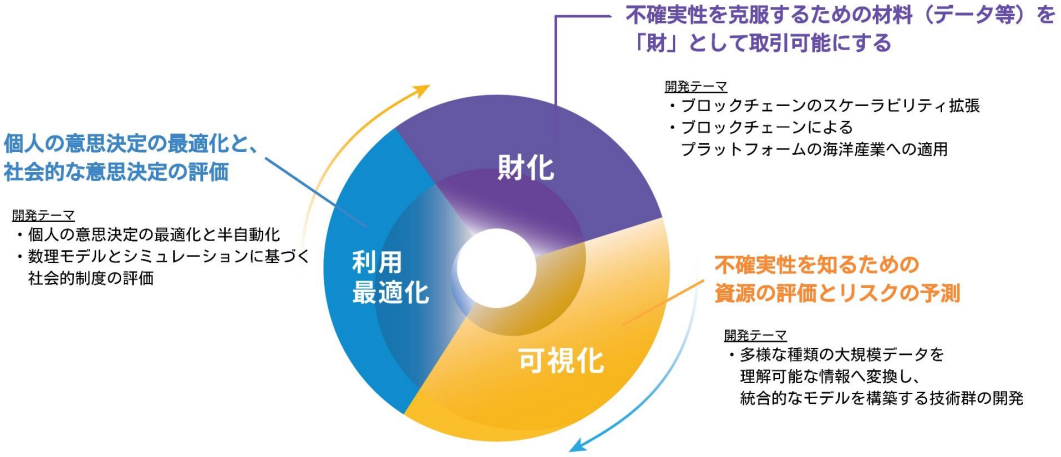
刷新された海洋産業が日本の中核産業になる、自然を起点とした一次産業が新たな形で生まれ変わる、それによって社会構造も大きく変化し多くの国民が海と関わるようになる、それが新海洋国家＝日本の像である。

II. 統計・俯瞰的分析

1. 当該の課題（科学技術的・社会的課題）や必要な取組み

WeONの挑戦	海洋の不確実性を克服

1．海洋社会資本「オーシャンサイクル」を構成する３要素と挑戦的開発テーマ



2. 海洋社会資本「オーシャンサイクル」を回り続けさせる工夫

経済動機	制度設計	人材育成
データ･利用権を 商取引する市場の創設	経済動機の暴走 （共有地の悲劇）を 回避する為のルール作り 所有権の明確化	新たな海洋利用を デザインし、 コミュニケーションを 促進する人材の育成

図II-1 海洋社会資本「オーシャンサイクル」を構成する3要素と挑戦的開発テーマ
図II-2 海洋社会資本「オーシャンサイクル」を回り続けさせる工夫

海の不確実性という課題

MS目標である新海洋国家=日本を実現する上で、もっとも大きな課題となるのは海の不確実性を克服することである。海洋経済の重要性が認識され、海洋に関係するプロジェクトに対する投資の必要性が叫ばれているものの、実際の投資されている額は大きくない。例えば、持続可能な開発目標（SDGs）の14番「海の豊かさを守ろう」に対するインパクト投資はSDGsの17の目標の中で最も低い（Libes and Eldridge 2019）。海洋がインパクト投資や様々な資金の投入によって発展する潜在性を秘めていることが認識されているにもかかわらず、実際の投資額が少ないのは投資を集めるだけの魅力に欠落しているからである。その大きな理由の一つは、海そのものと、その経済・社会・環境の価値に関する情報やデータが大きく不足しているためと言われている（Sumaila et al. 2021）。一般的には、プロジェクトに対する投資はリスクとリ

ターンのトレードオフを考慮し、リターンが低いがリスクの低い投資や、高いリターンのために高いリスクを取る投資がある。社会的なプロジェクトや国家の行う事業であれば金銭的なリターンのみならず社会的インパクトが考慮されるが、この判断においてもリスクの定量的推定は不可欠となる。海に対する投資、ひいては海の最適な利用を促進するには、海の情報の不足によって海洋システムへの理解が十分でないこと（知見の不足による不確実性）、そして、海洋システムそのものの多くの部分が確率的プロセスに左右されていること（確率的な不確実性）の2つの不確実性を克服する必要がある。

不確実性を完全に取り去ることは不可能だが、科学的知見の積み上げにより、知見の不足による不確実性は低減させることは可能である。また、確率的な不確実性を完全になくすことはできないが、対象を確率的なプロセスだと捉えて、不確実性の大きさをリスクとして定量化することができる。つまり、さいころの目を予測するための努力をするのではなく、さいころをよく観察し、さいころの目がいくつあるのか、それぞれの目が出る確率がいくつなのかを正確に捉えるための技術が必要となる。我々はこの2つのアプローチをもって、海洋の不確実性を克服する。

そのためにまず不可欠なのが情報であり、情報を得るために必要なのが膨大なデータである。海に関する科学的知見が陸上のそれと比較して不足しているのは、観測の難しさ、すなわち不可視性によるデータの不足に起因する。海というのは広大な海面に加えて深度をもつ3次元の巨大な空間として広がり、光が届かない範囲が大きい上に水中であるがゆえに人間のアクセスできる範囲が限定されるため、観測が難しい。また、一度観測したとしても、潮汐や季節・潮流の影響により、海は絶えず変化し、魚は常に移動する。暴風雨、高潮、津波といった突発的な脅威に加え、気候変動はゆっくりとだが確実に海を変えつつある。共時的にも通時的にも海洋は不可視な存在なのである。

不確実性克服のためのデータ収集という課題

海の不確実性の克服は、データ量に大きく依存するため、海洋についてのデータを広範に収集する技術と仕組みが必要となる。従来の海洋データ収集は、研究目的の調査データの収集などが主であった。当然このような収集方法は重要な一方で、海洋利用の拡大とともに、利用に伴うデータの収集が鍵となってくる。昨今のビッグデータブームの背景にはセンサー技術、カメラ、マイク、モバイル端末などの普及と情報技術（IT）の拡大によって、データを収集すること自体を目的とした行動ではなく、サービスなどの利用によってデータが生まれ、記録されていくようになったことが挙げられる。これと同様に、海洋のデータについても海洋利用に基づくデータを継続的に大量に収集・集積可能な情報基盤が整ってはじめて、海の最適な利用の準備が整う。このような情報基盤とは、海洋についてのデータ（記録）を得る（データ収集）、得られたデータを保存（データ蓄積）そしてそのデータを加工・分析（データ分析）することで経済動機を誘発する価値をもつ情報（データの情報化）となる仕組みを提供するものである。

データ収集のもっとも大きな壁は収集のためのコストであろう。先述のような研究目的の調査データのために、人工衛星や海に浮かぶ無人センサーなどから成る広域の海洋調査観測網は存在し、その多くは科学的動機のもとに多額の公的資金によって賄われている。しかし、海洋における人間活動や、海洋由来の資源を利用するプロセスで生成されるデータはどうか。サンマ一匹が漁獲されて消費されるまでには、漁獲場所、漁獲者、漁獲時の海況、取引価格、流通経路、消費形態など様々なデータが生じるが、これらを包括的に取得し集める仕組みは今のところ存在しない。その理由は、多種多様なデータを適切なタイミングで記録するにはコストがかかるからである。このようなデータを収集して活用するためには、データ収集にかかる労力・費用・時間を小さくすること、継続的にデータ収集が行われるメカニズムをつくることが鍵となる。

さらに、海洋利用データを包括的に収集することが難しい理由に、海洋利用データが個人のプライバシー情報を含んでいることも挙げられる。たとえば、漁業者が持つデータ（どの海域でいつ何の魚をどれだけ獲ってどのような価格がついたか）の一部は海の可視化に不可欠な情報を含んでいるが、同時に個人の収入などのプライバシーも含んでいる。また、競争相手にデータが渡ってしまうこともあるだろう。海洋利用データについては、収集に対するコストの削減だけでなく守秘性も同時に担保されなければならない。

データ収集という課題を克服する社会的仕組み：オーシャンサイクル

新海洋国家=日本を構築するためには、海の利用に関わるデータを収集し、海洋の不確実性を克服することが必要である。そのためには、経済動機に基づく海洋利用を進める新たな社会基盤の創成と社会経済システムの変革が必要となる。海洋を知るためにデータを収集し、データを解析して海洋を理解・可視化し、そしてその情報を活用してあらたな海洋利用を拡大することで、新たなデータが蓄積される。このような可視化と利用の環（サイクル）を循環させることにより、日本の海洋利用は持続性を担保しながら膨らみ、そして最適化される。そのサイクルが連なって発展するスパイラルが構築されれば日本は、海洋を持続的に最大限利用していく国家へと成長していく。

可視化と利用最適化のサイクルを駆動させるのに必要なものが、データ収集におけるコストや守秘性の課題を解決し、海洋の利用者に経済動機を与える仕組みである。その仕組みこそが、データや海洋の利用権を排他的に所有・保存・取引できる価値対象とする海洋の「財化」である。我々の提案するMS目標では、この海洋の「財化」をサイクルに組み込むことによる「オーシャンサイクル」の構築を提案する。データの財化によって収集するコストを上回る利益を利用者に提供し、海洋の財化→可視化→利用最適化のサイクルを経済動機で駆動させるオーシャンサイクルは、日本にとって海洋利用のゲームチェンジャーとなり、日本の背骨（バックボーン）として、新海洋国家=日本を確立してゆく。

（1）海洋財化

海洋財化によって海のデータと海の利用権を取引可能にすることは、海洋の可視化に資するデータ量を増加させるとともに、海洋のより活発な利用を促す。財化は、オーシャンサイクルの起点となり、また、市場原理を通じてサイクルを持続的に駆動させる経済動機となる。

財化を進めるには、データや権利を排他的に所有、保管、取引できる社会基盤の開発が欠かせない。ここには、データ所有者が意図しない形での利用や複製を防ぐ技術や、データ所有者の権利を守る仕組みが含まれる。分散台帳技術の一形態であるブロックチェーン技術は、このような要請に一挙に応える可能性を秘めた複合要素技術である。

ブロックチェーン技術を用いて財化を進める上での技術的な課題は、ブロックチェーンのスケーラビリティ・セキュリティ・分散管理の３要素間のトレードオフの解消である。この課題を克服できれば、多くの個人が、速く、安全に、一定の条件下で自動的に財を全国規模で取引できるようになる。このような技術を2050年までに普及させるには、2030年までには全国の漁獲魚一匹一匹のデータが取引可能となる程度の社会基盤が確立されていることが必要である。

財化を進める上での社会課題は、財の商取引市場の創設を阻む現行の法規制と制度である。デジタルデータの所有権と利用権ならびに権利移管に係る個人情報保護法や金融商品取引法などの法整備に加え、これらの自動取引に係る制度設計に代表される。海洋利用の権利化と移管には漁業法の改正が必要となる。

データが財として価値をもつ社会経済システムが整備されれば、観測技術の開発および高度化や社会経済活動のデータ収集が、様々なセクターで、また市民・科学者・企業・行政のあらゆるレベルで、自ずと活発になると期待される。

（2）海洋可視化

海洋の財化によって経済動機に基づいたデータ収集が促進されても、海洋の全容が解明されるわけではない。ビッグデータ時代に求められていることは、単なるデータの集積ではなく、データから意味のある情報を引き出すことにある。そこで、オーシャンサイクルの中で財化の次に位置づけるのが海洋の可視化である。海洋の可視化とは、自然システムとしての海洋そのものと、さらに人間活動との相互作用を明らかにし、最適な利用のために必要な情報を取り出す仕組みを構築することである。

科学技術的課題となるのは、既存の研究アプローチにおける調査・分析・モデリングといった手法をデータの利用可能性の増大に合わせて発展させていくこととなる。データの利用可能性が広がることが意味することの一点目は、これまで不可能であった複雑なモデリングや手法の応用が可能になることである。これは、因果推論や人工知能など現在発展が著しい手法を、自然を理解するというモデリングの手法を発展させるために応用することを指す。二点目は、異なるタイプのデータを組み合わせることによる新たな研究の可能性が広がることである。たとえば、衛星やセンサリングによるデータと現場での利用データを組み合わせて、それぞれか

ら得られる情報を補完するような試みである。また、海洋の可視化における課題は、技術開発そのものだけでなく、人材というキャパシティの不足も含まれる。

（３）海洋の利用最適化

海洋の財化と可視化が実現されても、最適なタイミングで、最適な方法で海洋と海洋の資源を資本（海洋自然資本）として価値化し、利用するための枠組みが必要となる。海洋資源は歴史的に排除不可能かつ競合的な公共財（共有資源財）として位置づけられており、その結果として競争や収奪の対象となり、海洋資源から得られる利益が失われてきた（共有地の悲劇）。海洋自然資本を共有地の悲劇から守り、社会にとっても、個人にとっても最適な形で利用するための新しい海洋利用制度の提案が必要である。社会選択理論を参照しつつ、数々の社会実装実験が積み重ねられてきた水産資源管理を例にとった自然システム・社会システムのシミュレーションを通して、制度や政策の有効性を検証する枠組みを提供する。

利用最適化を達成するために開発すべき科学技術は、共有地の悲劇を回避しながら海洋を利用するための新しい海洋利用制度を提案するためのシミュレーション技術である。政策や制度の選択には必ず利点・欠点があり、またそれらは社会における立場によって異なる。政策や制度の選択についてまわる結果を定量的・科学的に把握するためのシミュレーションを行い、その情報を共有することでより建設的な議論に基づいて合意形成を促すことができる。このシミュレーションは、自然科学・社会科学のモデルを統合することにより水産資源管理を中心に応用され始めているが、オーシャンサイクルの財化・可視化プロセスによって収集されるデータ・情報によって更に実社会に適用しうる技術となることが期待される。

利用最適化における海洋自然資本の利用主体を決めることは社会的な課題である。所有権や利用権などの権利を市場における取引できる財として扱い、もっとも効率的な配分・利用を達成する試みはRights-based managementとして世界で広がっており、一定の成果を挙げている。一方で、個人や法人に個別で権利を与える方式は、公平性や本来の目的から外れた投機を誘発するなど問題が出てきていることも事実である。そのような背景から、地域コミュニティなど地域に根づいたグループを権利主体とするアプローチが注目を浴び始めている。たとえば日本の水産業であれば、漁協などのコミュニティによる自主管理・利用が主だったが、このようなグループが新たな海洋の利用権の権利主体となり、管理・利用を促進していく枠組みを作るための社会科学的研究も科学技術的開発と並んで不可欠である。

オーシャンサイクルを駆動させるための課題

経済動機

すでに何度も言及されているが、経済動機（インセンティブ）は海洋社会資本であるオーシャンサイクルを機能させるための根本的な動力に位置づけられる。データを収集し、提供する海洋利用者には、データを流通させることによる見返りが必要となる。これまでの大きな課題は、データ収集が海洋利用者にとってコスト負担の大きい行動であるにも関わらずそれを超

える便益がないことにある。データの排他的所有・流通・取引を可能にする技術によって、この便益を提供することがオーシャンサイクルを機能させる最も大きな目標である。

制度設計

上述のように、経済動機は海の不確実性を克服するためのデータを集め、利用を促す最も根本的な動力に当たるが、共有地の悲劇に代表されるように、動力だけでは暴走をしかねない。その動力を上手くコントロールするハンドルに当たるのが個人のインセンティブを全体最適な目的と一致させる制度である。ここではとくに、データの財化におけるデータの管理や市場の設計と、海洋自然資本の最適な利用のための制度の設計の２つが大きな課題となる。データが価値を持つがゆえに投機目的の利用が増えたり、個人のデータを不正に利用するようなことがあってはならず、そのためにブロックチェーンの技術そのものに加えて、本来の目的との乖離が起こりうるような利用方法を防ぐ制度設計が課題となる。また、利用権の制度については、単純な制度設計ではなく、地域存在する文化や規範とも合致する一方で、権利を従来より明確化するようなバランスのとれた制度設計が求められる。

人材育成

オーシャンサイクルを駆動する上で欠かせないのが、新たな海洋利用をデザインし、様々なステイクホルダーとコミュニケーションを行いながら、利害を調整する人材の育成である。海洋資源の利用における課題として、このような人材の不足は長年指摘され続けているが、解決が見られていない理由は抜本的な人材育成のシステムが存在しないからである。このような立場の人材は、地方自治体の職員などに見られるが、個人の能力に依存しているため異動などで担当が変わるとシステムが根本的に回らなくなるという問題も見られる。また、海洋利用のデザインという面では、海洋を資源として捉え、その利用を自然科学・社会人文科学の面で研究・発信するような人材も日本では不足している。これらの課題を解決するためには、人材育成・教育のシステムを構築していく必要がある。

2. 当該 MS 目標を達成するために取り組むべき研究開発の俯瞰

科学技術によって海の不確実性を克服するためには、大きく分けて3つの研究開発が必須である。

1つ目が海洋の財化である。海洋の財化はオーシャンサイクルの起点となる欠かすべからざる要素である。海洋の財化を実現するための社会基盤を開発するにあたって、本プロジェクトではブロックチェーン技術に焦点を当てる。ブロックチェーン技術が持つボトルネックを解決し、全国規模で財を分散管理し取引する経済を興すための技術の基盤を構築する。

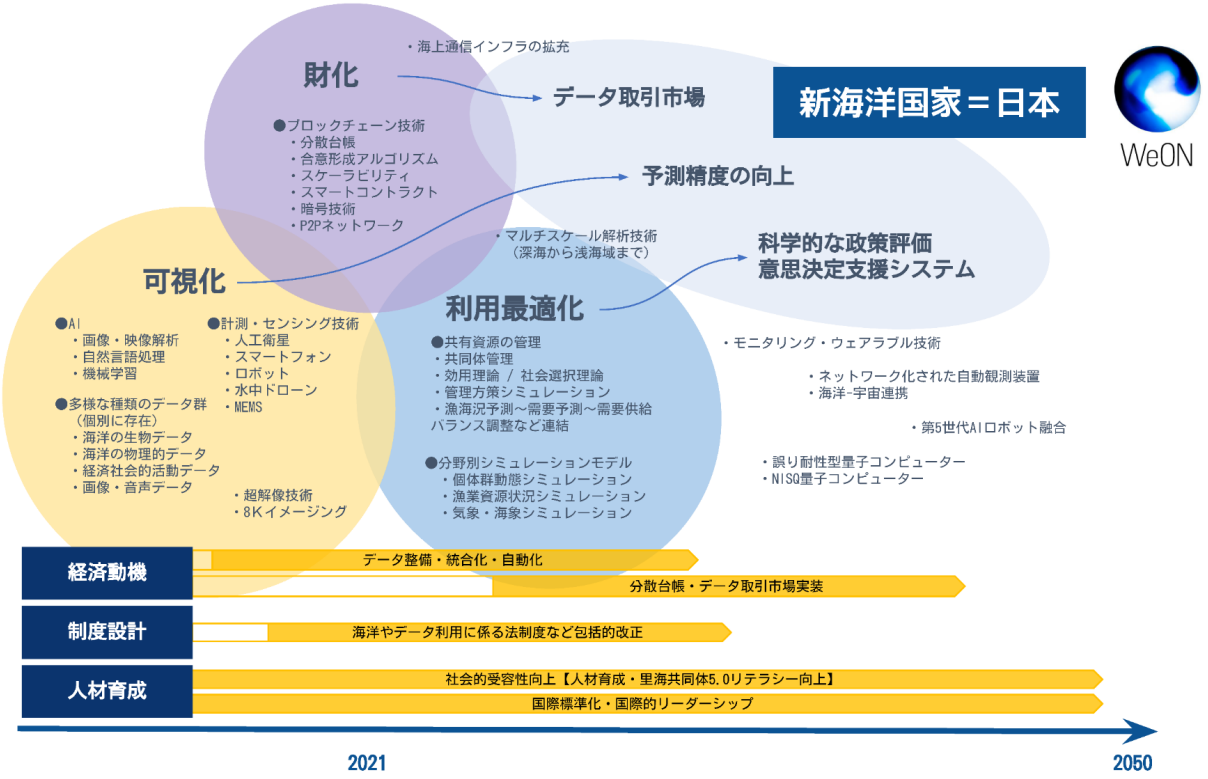
2つ目が海洋の可視化である。海洋の可視化は不確実性の把握や不確実性の軽減を達成するにとどまらず、海洋データを収集する動機付けの1つとなる。膨大な海洋データ・海洋利用データを収集・統合・分析し、「現在」の海洋状況の可視化はもちろんのこと、予測を通して「未来」の海洋可視化をも進めるための技術開発が必要である。

3つ目が海洋の利用最適化である。利用最適化の技術によって、財化・可視化の結果をもと

にして、海洋利用を効率化するサイクルが完成する。ただし、価値観の異なる複数のステークホルダーが存在する中での意思決定は簡単な問題ではない。個人の意思決定の最適化のみならず、社会的な意思決定や社会制度の評価という問題にも取り組む必要がある。

これら海の不確実性を克服する研究開発は、海洋というフィジカル空間とブロックチェーンで管理するサイバー空間を高度に融合させることにより、風土に根ざした地域の海を持続的に最大限活用する「里海共同体5.0」を各地に発展させて、経済発展と社会的課題の両立を目指す。当該MS目標は、第5期科学技術基本計画の柱とされた「Society5.0」の概念、そして「Society　5.0」の社会実装を求める第6期科学技術・イノベーション基本計画の意思と明らかに通ずる(第6期科学技術・イノベーション基本計画)。

本MS目標の達成に向け、関連する研究開発分野と本MS目標で特にフォーカスするテーマを一覧で示し、これらの組み合わせによってもらされる成果を記*される課題を明示*したのが図II-2-1である。



図II-2-1. 科学技術により克服すべき課題と課題克服に必要な研究開発分野

（1）海洋の財化を進めるために

海洋の財化を進めるには、データや権利を所有、保管、取引できる社会基盤プラットフォーム(社会資本)の開発がまず必要である。分散台帳技術の一形態であるブロックチェーン技術は、このような要請に一挙に応える可能性を秘めた複合要素技術である。

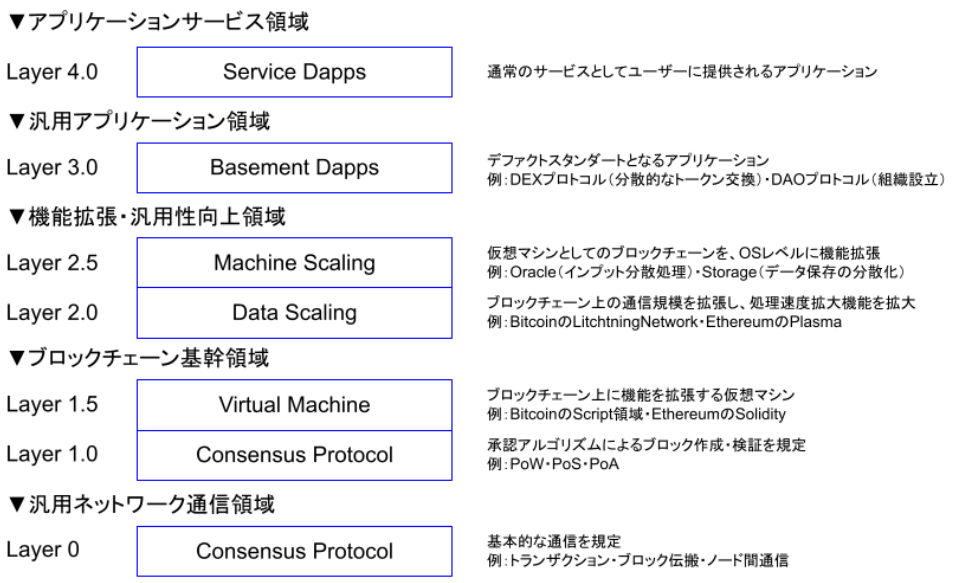
本項ではまず、ブロックチェーン技術を階層別に整理して俯瞰するとともに、当該MS目標の

要請と合致するブロックチェーンの種類について、大まかな方向性を与える。次に、海洋の財化を進めるにあたって、科学技術によって克服すべき課題をまとめる。続いて、ブロックチェーン技術をベースとした社会基盤プラットフォームについて、社会実装という観点から見たボトルネックについてまとめ、ブレークスルーとなる技術について現時点での見通しを述べる。最後に、ブロックチェーン技術開発の変遷や、関連する分野・技術群の構造を俯瞰する。

ブロックチェーン技術の俯瞰

ブロックチェーンとは、狭義ではネットワーク上に「ブロック」と呼ばれるデータのかたまりを連結していく分散台帳の一形態を指す。一方、広義には「分散型アプリケーションの基盤となるP2Pネットワーク技術体系」という意味で用いられることから、本報告書では広義の意味で「ブロックチェーン」や「ブロックチェーン技術」と呼ぶことにする。ブロックチェーン技術は、分散台帳、改ざん不可能性、追跡可能性、分散合意形成、取引機能など魅力的な機能と特長を有する。特に、契約の自動化を意味するスマートコントラクトと呼ばれる機能は、取引情報中にある種のプログラムを組み込むことにより、価値交換以外の情報管理や処理を可能にする。この仕組みに基づく実証実験やプラットフォーム化が、世界中で行われている(JST 2019)。

ブロックチェーンを規定するプロトコルの技術体系を階層別に整理したのが**図II-2-1**（Ethereumプラットフォームを例にしたLayer1.0-4.0の階層図）である。この図に示されているように、暗号技術やP2Pネットワーク技術といった汎用技術（Layer0）の土台の上に、分散台帳や分散合意形成といったブロックチェーンの固有技術（Layer1）が位置している。さらに上位の階層には、スマートコントラクト実現のための階層（Layer1.5）や、スケーリングに関する階層（Layer2.0およびLayer2.5）、汎用アプリケーション技術に関する階層（Layer3.0）などが位置する。



図II-2-1. ブロックチェーンのプロトコル領域を理解するためのレイヤー構造(GincoMagazine 編集部 2018 を改変).

ブロックチェーン技術に基づくプラットフォームは、パブリック型とプライベート型に２つに大別される。パブリック型は、管理者が存在せず誰でも参加可能であることから、ブロックの生成やソースコードの改変に厳密な承認が必要とされる。また、ブロックチェーンの仕様変更の際は、不特定多数の賛同が必要となり頻繁な変更は容易ではない。その一方で、多数のノードが分散して運用されていることから、結果として高いセキュリティ性能を発揮する。管理者がいて参加に許可が必要なプライベート型の場合は、パブリック型とは反対の性質を持つ。プライベート型のブロックチェーンを企業や限られた個人間で共有する場合は、コンソーシアム型と呼ばれる。コンソーシアム型では、ネットワークが信頼できるノードから構成されるという前提を利用した、特有の承認アルゴリズムが提案されている。

当該MS目標においては、まず第一に、高いセキュリティ性能のもとで、運用に支障のない速度の取引実現が求められている。第二に、プラットフォームの成長や取引ルールの変更に伴う頻繁なアップデートに対応できる、フレキシブルなブロックチェーンが求められている。これら２つの前提条件のもと、どのようなブロックチェーンが本目標の候補に挙がるかを俯瞰し、またそれらが克服すべき課題について述べる。

パブリック型のブロックチェーンは当該MS目標に適さない

パブリック型は厳密な承認アルゴリズムに支えられて、不特定多数のノードを維持しているが、当該MS目標への適用については下記の２つ理由により適していない。１つ目の理由は、すでに述べた通り、頻繁なアップデートへの対応が困難であるためである。例えば、パブリック型であるEthereumプラットフォームの場合、承認アルゴリズムを大規模に変更するにあたり、技術以外の要因によって複数年を要していることが知られている(Young 2021)。本目標では、実証実験を重ねながら参画者の規模拡大を狙うアプローチを取らざる得ないことから、頻繁なアップデートへの対応は必須である。２つ目の理由は、ステークホルダー外の参画者の振る舞いによって、プラットフォームが支えられるためである。このことが引き起こす問題点について、やや複雑だが説明する。パブリック型の場合、ブロック生成には匿名の参加者の貢献が欠かせない。その際、貢献への報酬としてだけでなく、不正取引リスクを軽減するためにも手数料が必須となっている。パブリック型の仕様上、あらゆる処理にかかる手数料を投機対象となりうる暗号通貨で支払わなければならないため、トランザクションが多く発生するシステムでは運用費が乱高下し安定しない課題が考えられる。また、こうした理由からパブリックチェーンでは実質的な手数料価値の高いトランザクションから順に処理されるため、トランザクション完了の延滞もたびたび発生する。チェーン全体で一定時間に実行できる処理の量は限られているため、他に多くのトランザクションを送信するアカウントが出てくるとこのような遅延はより深刻になる。こうした理由からパブリックチェーンは多くのデータ処理を前提とする当該MS目標が構想するプラットフォームには適さないといえる。

科学技術により克服すべき課題

スケーラビリティ・セキュリティ・非中央集権のトリレンマ

Ethereumの考案者であるVitalik Buterinが提示した「ブロックチェーンのトリレンマ」という概念がある(https://eth.wiki/sharding/Sharding-FAQs)。これは、スケーラビリティ・セキュリティ・非中央集権の3要素のうち、同時に満たせるのは2要素までである、という制約である。スケーラビリティとは処理能力を向上できる度合いである。セキュリティとはブロックチェーンへの攻撃を成功させる難易度である。非中央集権とはブロックを検証する「ノード」を誰でも自由に立てることができるか（パーミッションレス）、他のノードへの信頼を前提とせず機能するか（トラストレス）、特定のノードに依存していないか（単一障害点の排除）、そして実態として多数のノードが分散して運用されているかである(星 2018)。

BitcoinやEthereumなど代表的なパブリック型のプラットフォームでは、高いセキュリティと非中央集権を達成する一方で、スケーラビリィティを犠牲にしている。約１万～数万のノード数から構成されているこれらのプラットフォームでは、１秒あたりのトランザクション数(TPS, Transaction Per Second)は１０前後と非常に少なく、頻繁な取引実施においては律速段階となっている。このような背景から、パブリック型のブロックチェーンにおけるスケーラビリティの解決が、研究開発における中心的課題となっている(JST 2019)。

その一方で、すでに述べた通り、当該MS目標が構想するのは参加そのものが動機となるプラットフォームであることから、ステークホルダー外の匿名の参画者は想定しない。しかしながら、プラットフォームの規模拡大に耐えうるTPSが必須となることから、スケーラビリティとセキュリティのトレードオフを解決する研究開発が求められている。現状で候補となりえる、コンソーシアム型の運用が可能なブロックチェーンについて、代表的な性能を比較したものを**表II-2-1**に示す。

表II-2-1. 当該MS目標の候補となりうるブロックチェーンの性能比較

	Rheia	Hyperledger Fabric	Go Quorum	Substrate	Cosmos	Corda	Solana	Avalanche Network	Hedera Hashgraph	miyabi
コンセンサスアルゴリズム	Proof of Convergence	PBFT (election type) Raft / Kafka / Solo (Orderer)	IBFT Raft Clique	Aura (round robin) BABE (slot-based) PoW Customize	Tendermint BFT	Raft BFT-SMaRt	PoH Tower BFT	Avalanche Consensus	Hashgraph PoS	BFK2
ノードの役割	全て同等権限	リーダーノード/フォロワーノード 動的な投票	提案 / 検証 リーダー / フォロワー / 習熟者メーカー	検証ノード	検証ノード	ノタリーノード	リーダーノード / 検証ノード 非同期ローテーション	検証ノード	検証ノード ブロック生産者	リーダー / フォロワー (動的な投票)
ファイナリティ	1~4 秒	数秒～17秒	1~4 秒	最長鎖ルール or ゴーストルール	1 秒	1~4 秒	0.4 秒	0.206 秒	3~5 秒	1~4 秒
セキュリティに関する優位性	単一障害点の排除	決定論的コンセンサス チャンネルシステム	プライベート状態	セキュリティ共有	フォーク時に明確な責任所在	データ秘匿	セキュリティ会社による監査	>51%の保証	単一障害点の排除 コンセンサス順序が証明可能	決定論的コンセンサス
Max TPS	31,240	2,700	900	数千 (推定)	数千	22000 (平均 6,300)	50,000	7,002	10,000+	4,000
ノードスペック	512 MB RAM	PC Spec	PC Spec	PC Spec	PC Spec	PC Spec	GPU	PC Spec	PC Spec	16GB RAM
他のチェーンとの相互互換性	✔	–	✔	✔	✔	✔	✔	–	–	–
国産	✔	–	–	–	–	–	–	–	–	✔

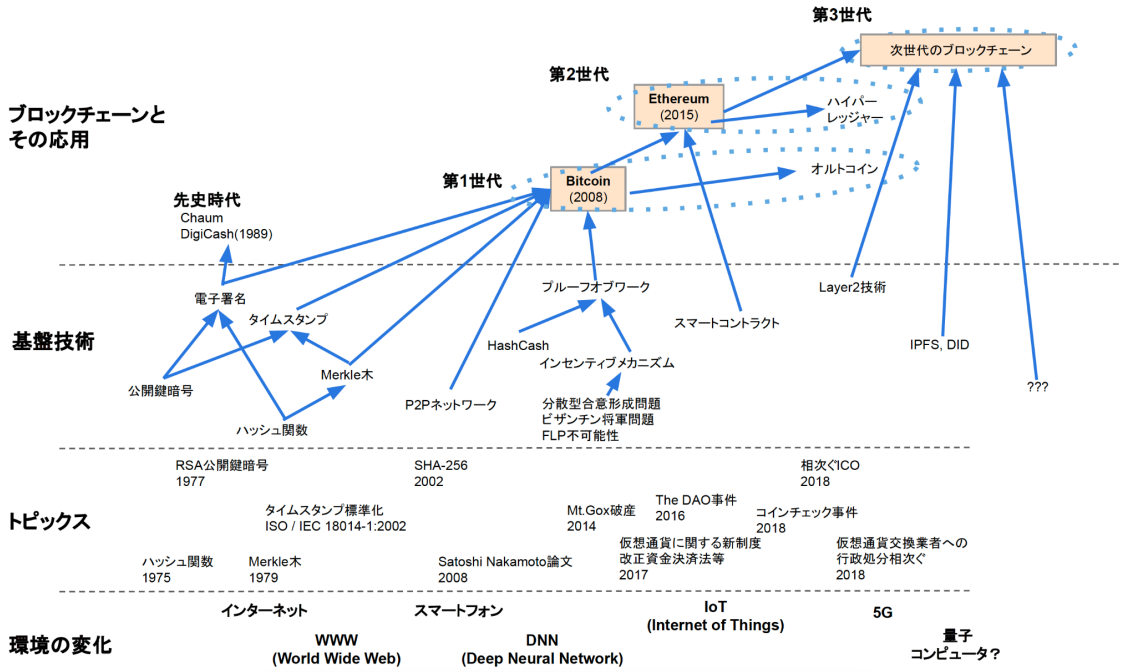
ブレイクスルーは、国産プロトコル『Rheia』

表II-2-1に示したように、<u>Rheia（レイア）は現時点で非常に高いレベルのスケーラビリティとセキュリティを両立することで、速くて安全なブロックチェーンを実現している。</u>トランザクション速度について、240ノードで31,240　TPS（ベンチマーク）、10,000ノードでも28,936 TPSに到達する。また、セキュリティについても、全てのノードが同等の権限をもってトランザクションの検証やブロックのコンセンサスを行う仕組みによって、単一障害点の排除に成功している。つまり、コンソーシアム型でありながら真に民主化・分散化されたパブリックライクなプラットフォームが形成できることになる。またRheiaのカスタマイズ性が他のチェーンと比べて高いことも、その優位性を示している。これは、Rheiaが完全オリジナルのブロックチェーンプロトコルであるためである（Layer　1ブロックチェーン）。このことにより、既存のチェーンに上乗せする技術（Layer　2ブロックチェーン）とは異なり、外部要因に縛られない開発や、フレキシブルな機能実装が可能になる。例えば、プラットフォームの拡張に伴って、ノードの追加を承認制にして独自の承認ルールを定めたり、データ閲覧などの権限を詳細に規定したり、保持するデータの形式を自由に設定できたりなど、非常に柔軟な実装が可能である。また、ノード運用をするサーバーに必要なスペックが小さいことは必要リソースが少ないということであり、Rheiaが環境負荷の少ないプロトコルであることを示している。

Rheiaは、岩崎健太氏によって考案されたブロックチェーンであり、氏が所属する企業によるサポートが確保されているが、2022年にオープンソース化される見通しであり、開発者コミュニティの規模拡大が期待される。

関連する研究開発の変遷

図II-2-2に、ブロックチェーン技術の系譜と将来展望を示した。すでに述べたように、ブロックチェーン技術は複合要素技術である。暗号プロトコルやP2Pネットワークといった基盤技術は、計算機科学の分野において３０年以上の歴史をもつ。その一方で、量子コンピューティングによる暗号解読の可能性についても近年議論されているのが、同時に量子暗号と呼ばれるさらに堅牢な暗号技術の開発についても進んでいる（例えば、国内でも量子暗号通信を介してゲノム情報を転送する実証実験に成功している。
https://ps.nikkei.com/toshiba2103/ryoshi/index.html）



図II-2-2.　ブロックチェーン技術の系譜と将来展望　（JST研究開発戦略センター（JST/CRDS）2019年の戦略プロポーザル「次世代ブロックチェーン技術～個人や社会のデータ共有・価値交換を安全で高信頼に実現する～」（JST 2019）のP.18を加工）

（２）海洋の可視化を実現するために

海洋の可視化という挑戦

海洋は広大であるだけでなく、視界が悪く、さらに時空間的な変動が大きい。海洋が持つ不確実性を減少させる、あるいは不確実性の大きさを正確に把握することは、海洋利用において喫緊の課題である。

本項では海洋可視化というテーマにおいて、科学技術で克服すべき課題を、(1)　海洋・海洋利用データの収集・統合プロセスである「海洋観測・海洋利用把握」、(2)　データ分析による

「海洋の現状評価と将来予測」、(3)　海洋情報を一般の人々が利用できるようにする「コミュニケーションのための海洋可視化」の三つに分けて考える。

海洋観測・海洋利用把握

海洋可視化のためには、海洋を観測しデータを収集する技術が重要である。MS目標の中心的課題は、データを収集するための動機づけを与えることであるが、データを収集する技術そのものも継続して発展していくことが望ましい。

海洋を可視化するための海洋データの取得、すなわち海洋観測は、広大で変化し続ける海洋を地球表面上で直接観測できる領域と期間が限定的であり、なおかつ船舶等による直接観測には莫大な費用が必要なことに困難を抱えている。MS目標においては、莫大な費用をかけてデータを取得するのではなく、財化を通してデータ収集の動機づけを与え、海洋産業従事者が自らデータを収集しその共有を図ることでこの問題を解決する。

一方、宇宙衛星ネットワークによる地球表面観測、すなわちリモートセンシングは、広域かつ連続的な海洋データ取得を可能とする。地球規模での巨視的データは気候変動や海洋酸性化など巨視的な海洋可視化には有効であるものの、こうした巨視的データを直接に経済活動としての海洋利用に結びつけることは容易ではない。しかし、海洋産業従事者が自立的に収集した微視的なデータと、リモートセンシング技術等によって得られた巨視的なデータを統合することで、海洋産業従事者にとって有益な情報が提供されたり、長期的な政策決定の根拠となるような知見が得られたりすれば、巨視的データの価値が海洋の利用最適化へ還元され、これらのデータの収集のインセンティブや投資も促進されることが期待される。この点は「コミュニケーションのための海洋可視化」でも触れる。

海洋の現状評価と将来予測

データの収集がどれほど進んでも「1ミリメートル間隔で、地球上の全海域のすべての物理・生物・社会的プロセスが把握できる」という状況には現実的になりえないだろうし、その必要性もない。また、未来のデータを収集することは不可能である。データを収集するだけでは、1ミリ隣の場所や1秒先の未来であっても不可視な存在となる。真の可視化には、データがとられていない場所や未来に起こる事柄をも見通すための技術が必要となる。

地理的な補間や時間的な予測を行うため、海洋の生物や物理プロセスを記述したモデルを構築し、得られたデータを用いることで、記述したプロセスの確からしさやパラメータを推定する必要がある。それにより自然現象を理解し予測することができる。海洋利用によって生みだされたビッグデータを機械学習などを通じて予測に利用する手法は、近年徐々に発展しつつあるものの、まだ伸びしろが大きい。さらに魚資源などの変動プロセスを完全に理解できなかったとしても、確率モデルを用いることでリスク評価を行うことはできる。ランダム効果を含んだモデルを利用し、生物がどのような確率的プロセスに支配されているのかを知ることも重要な可視化技術である。現状では、プロセスの記述のためのモデリング技術、予測精度向上のためのAI技術、確率プロセスを記述する確率モデルはそれぞれ別々に発展している状況であるが、**海洋可視化のためには、これらの3つのモデリング技術を統合する、統合型のモデリング技術の開発が当該分野でのブレイクスルーとなろう。**

コミュニケーションのための海洋可視化

海洋可視化で海洋・海洋利用のデータを意味のある情報に変換するだけでは、海洋利用に結び付かない。可視化によって得られた情報を専門知識を持たない一般市民に対して「生きた」情報として届けることで、はじめて海洋利用の拡大そして海洋利用の最適化が達成される。

情報学分野でのユニバーサルコミュニケーション技術は、様々な情報とその利用者の壁を取り除く技術である（木俵 2015)。海洋可視化はこのユニバーサルコミュニケーション技術を包括する。本技術については情報を利用する側の価値観や目的にも大きく依存するため、(3) 海洋の利用最適化で再度触れる。

（３）海洋の利用最適化を実現するために

個人の意思決定の課題

海洋の財化、そして財化によって促進される可視化が達成されたとしても、海洋資源利用にかかる課題がすべて解決されるわけではない。たとえば可視化によって得られた膨大なデータを数値表として受け取っても、漁業者は困惑するだけだろう。データサイエンスやデシジョンサイエンスの知見に基づき、膨大なデータを行動に変換するための関数、すなわち決定方式の策定が必要である。

社会的な意思決定の課題

海洋の可視化によって不確実性が仮に無くなったとしても、社会的な意思決定にかかる課題は依然として残る。海洋の財化と可視化が実現されれば、個人にとって最適なタイミングで、最適な方法で海洋の資源を資本として価値化し、利用するための枠組みが提供できるだろう。しかし、そこで生み出された新しい資源から得られる利益は誰のものになるのだろうか？ 海洋は歴史的に排除不可能かつ競合的な公共財すなわち共有資源財として位置づけられており、その結果として競争や収奪の対象となり、海洋資源から得られうる利益が失われてきた。これは共有地の悲劇と呼ばれる。海洋資本を共有地の悲劇から守るためには、公共財として放置するのではなく、持続的利用が可能かつステークホルダー間の合意によって利用される新たな利用の形態を創出する「仕組み」が必要である。

社会的な意思決定における不確実性がもたらす課題

もちろん海洋の可視化を進めるとしても、それでもなお自然環境が持つ不確実性を完全にゼロにすることはできない。将来の不確実性（リスク）が高くなると割引率が上がって、目先の利益のみを考慮することになる(Ostrom et al. 1999; Gutiérrez et al. 2011)。海洋利用に関する意思決定は不確実性やリスクを前提としなければならない。不確実性があり、かつ競争が不可避である海洋資源における社会的な制度設計と、その制度下における意思決定プロセスの改善という課題を克服することが急務である。

効用の集計にかかる課題

たとえば個人が考える好ましさや幸福の度合いを効用として数値で表現し、この数値の総量

を最大化することを考えてみよう。ある地域を漁業のために使うか、養殖場として利用するかを検討する際などでは、土地利用についての対立が発生する。このとき海洋産業従事者の人数を増やすために「多数派の利益を優先する」という意思決定の手続きを採用すると、少数派は常に虐げられることになる。倫理学におけるトロッコ問題では5人の命を救うために1人を殺めることの是非を問うているが、本質的にはこれと同じ問題が、社会的意思決定においてつねに発生しうるのである。

「万能薬」幻想の打破

上記の問題設定は、社会選択理論において活発に議論されている。選択対象となる社会状態（たとえば土地利用の方法や、ある年度での漁獲枠）に対してどの社会状態が最も好ましいか、どの社会状態が次いで好ましいか、という社会状態に対する個人的順序を人々が有しているとしよう。一方で個人ではなく社会的に好ましいと思われる社会状態の順序を社会的順序と呼ぶ。ステークホルダー全員における個人的順序の組に対して1つの社会的順序を定める過程や規則を社会的厚生関数と呼ぶ。このとき、完備性・推移性・満場一致性・二項独立性・非独裁制を満たすような社会的厚生関数は存在しないことがアローの不可能性定理として知られている。要求された社会的厚生関数の性質をすべて有する社会的意思決定のルールは存在しえないのである(アロー 2013; 坂井 2013)。

しかし、アローの不可能性定理で要求された公理を一部緩めることで、さまざまな社会的意思決定のルールが生み出されてきた(志田 2016)。社会的な意思決定という曖昧模糊とした対象を、科学の枠組みで議論し、問題を明確化し、意思決定の規則を改善する下地ができてきたといえる。

海洋資源の利用最適化を実現するためには、社会選択理論の枠組みを応用し、個人の行動の最適化、あるべき社会システムの設計、そして社会的な意思決定の規則を定める必要がある。個人の行動の最適化では、蓄積されたデータに基づく将来予測にとどまらず、予測結果を利用した決定方式の策定の半自動化や、推定された需給バランスやリスクの大きさに基づく最適戦略の策定技術を開発する必要がある。

一方の社会的選択において「非の打ち所がない」社会厚生関数を提案することは現実的ではない。漁業管理においても特定の政策を無条件に信奉する「万能薬」への幻想があった(Young et al. 2018)。実現不可能であることが証明された口当たりの良い言葉を並び立てるのではなく、「万能薬」への幻想を打ち砕くことこそが科学技術の果たす真の役割である。

科学的な政策評価というブレイクスルー

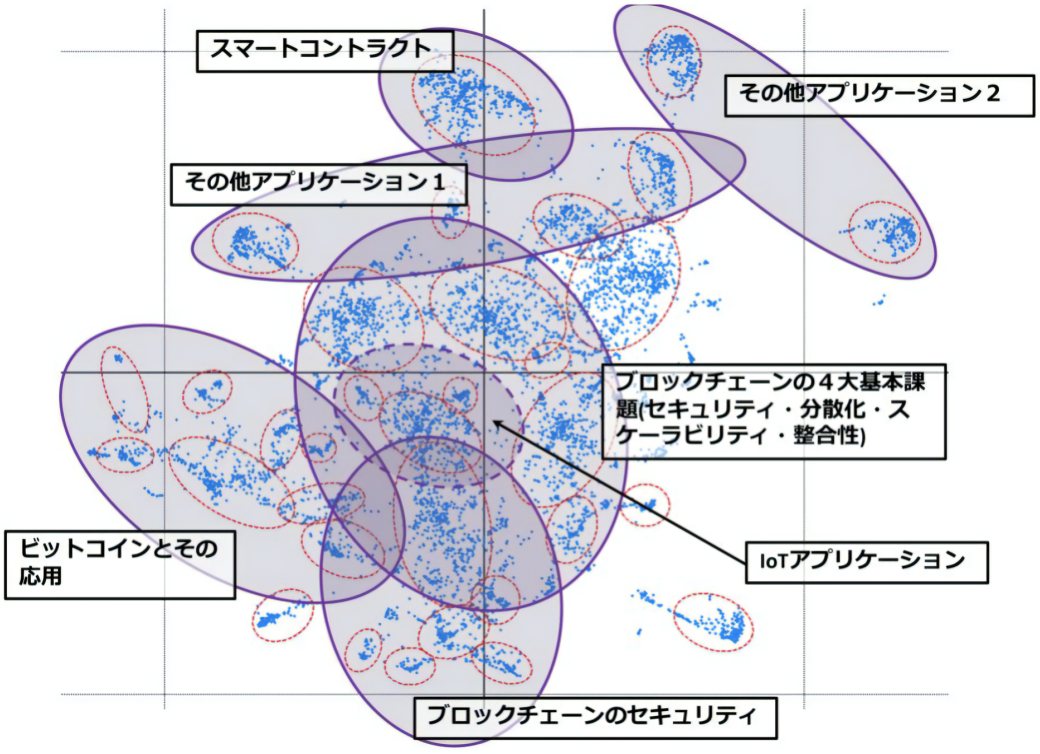
科学に裏打ちされた**社会選択の手続きの改善として、新しい制度や新しい社会システムがどのような結果をもたらすのかを評価するプロトコルの開発がブレイクスルー技術**となる。「非の打ち所がない」社会システムを提案するのではなく、社会システムの「良さと悪さを、定量的に・科学的に人間が把握でき、それに基づいて選択できる」ことを目指すというアプローチへの転換により、不毛な議論からのゲームチェンジを達成する。漁業管理においては広範なシ

ミュレーションを用いた管理戦略評価（Management Strategy Evaluation, MSE; Punt and Donovan 2007, 市野川・岡村 2016）が実際に適用され、大きな成果を上げている(Hillary et al. 2016)。シミュレーションに基づく政策評価を、漁業管理から始めてさらに広範に海洋資源一般に対する利用や社会システム設計全般に対して適用することは、海洋利用の最適化を達成するためのChallengingでありながらもCredibleな唯一の解である。

3. 当該目標に関連する研究開発の動向(全体)、海外動向及び日本の強み

（1）海洋の財化を実現するために

図II-3-1はブロックチェーンに関連する論文の俯瞰解析図である。すでに述べた通り、スケーラビリティ・セキュリティ・中央集権のトリレンマを解決しようとする試みが論文では多くの割合を占めている（図中の「４大基本課題」の部分に相当）。すなわち、当該MS目標が突破しようとしている課題が、ブロックチェーンの本質に関連することを示唆している。
ブロックチェーンを海洋産業への適用する上で必要なIoT　アプリケーションについての論文が「４大基本課題」に包含されてることから、IoT　アプリケーションはトリレンマの解決と関連付けて研究される傾向にある。



図II-3-1. ブロックチェーンに関連する論文の俯瞰解析図。文章の類似度に応じて各論文が配置される。JST研究開発戦略センター（JST/CRDS）2019年の戦略プロポーザル「次世代ブロックチェーン技術～個人や社会のデータ共有・価値交換を安全で高信頼に実現する～」(JST 2019)のP.34から転載

表II-3-1はブロックチェーン技術の国際比較の表である。日本は、いずれのフェースでも顕著な活動・成果が見えており、活力は維持されている。本MS目標は、トリレンマの解消というブロックチェーン技術が抱える根源的課題を解決すると同時に、その成果を海洋関連産業に適用する応用研究を行うことで、ブロックチェーン技術分野における比較優位性を得る計画を内包している。

表II-3-1. ブロックチェーン技術の国際比較。JST研究開発戦略センター（JST/CRDS）2021年の「研究開発の俯瞰報告書」のP.485～487から抜粋。

ブロックチェーン技術の国際比較

国・地域	日本		米国		欧州		中国	
フェーズ	基礎研究	応用研究・開発	基礎研究	応用研究・開発	基礎研究	応用研究・開発	基礎研究	応用研究・開発
現状	○	○	◎	◎	○	◎	○	◎
トレンド	→	→	→	→	→	↗	→	↗

（出典）JST CRDS 研究開発の俯瞰報告書　システム・情報科学技術分野（ 2021）
（註 1）フェーズ　基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究の範囲
応用研究・開発フェーズ：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲
（註 2）現状　※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：特に顕著な活動・成果が見えている、○：顕著な活動・成果が見えている、
△：顕著な活動・成果が見えていない、、×：活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド　↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（２）海洋可視化を実現するために
気候変動モデルにおける日本の優位性

表II-3-2は、JST研究開発戦略センター（JST/CRDS）2021年の「研究開発の俯瞰報告書　（JST 2021）」から、海洋可視化の技術と重なる研究開発領域の国際比較を抜粋したものである。気候変動予測分野の基礎研究において、日本は全球的な地球環境システム変遷を予測する気候モデル（GCM）、地球システムモデル（ESM）において、複数の機関で独自の開発が行われ研究コミュニティの潜在能力は高いとされている。一方で、海洋観測における応用技術分野では、自動観測プラットフォームに必要なハードウエアの開発・製品化がほとんどないため顕著な活動・成果はなく、国内連携・協力体制構築が必要であると帰結されている。

表II-3-2 研究開発状況の国際比較（JST 2021，表2.1-1より気候変動予測分野を抜粋）

	国・地域	日本		米国		欧州		中国	
	技術フェーズ	**基礎**	**応用**	**基礎**	**応用**	**基礎**	**応用**	**基礎**	**応用**
気候変動観測	衛星	○↘	○↘	◎→	○→	◎→	◎→	△↗	○↗
	大気・陸域	○↗	○→	◎↗	◎→	◎↗	◎↗	○↗	△→
	海洋	○→	△→	◎→	◎→	◎→	△→	○↗	△→
気候変動予測		**◎→**	○↗	◎→	◎↘	◎→	◎↗	△→	△↗
生態系・生物多様性の観測・評価・予測		○→	○→	◎↗	◎↗	◎↗	◎↗	◎↗	◎↗
社会・生態システムの評価・予測		○↗	○↗	◎↗	◎→	◎↗	◎↗	○↗	◎↗

日本の強みである全球的な地球環境システム変遷を予測する気候モデル、地球システムモデルを海洋利用に向かう海洋可視化に展開するためには、日本が苦手とする海洋観測の応用技術で

ある連続で網羅的な海洋の自動観測プラットフォームにより、海洋データの解像度を上げることが必要だ。

気候変動モデルから生態系モデルへ

日本は気候変動が水産資源の変動に与える影響を研究する水産海洋学の分野を牽引してきた(稲掛ら 2013)。日本の水産物の多くの部分を占めるサバ・イワシをはじめとした浮魚資源は，海洋環境の10数年規模での変動に伴って歴史的に大きく変動しており（川崎 2007)，海洋環境変動と生物学的プロセス，そして個体群動態を結び付けるための研究（c.f. Takasuka et al. 2008）が特に重要であったためである。それらの研究のため、日本周辺海域では40年以上にわたって海洋生物の卵密度を推定する調査船調査が行われており、これによって得られたデータセット（c.f. Takasuka et al. 2008）は世界でも類を見ないほどの質・量を誇る。

一方、日本の水産資源は海洋環境変動だけでなく漁業による大きな外圧を受け続けており、その結果として日本の多くの水産資源は適正レベルよりも低い状態にあることも指摘されている（Ichinokawa et al. 2017)。現状が低い水準にあるということは、将来的に大きく資源が回復する可能性を示唆しており（Tokunaga et al. 2019)、実際にサバやイワシの資源は回復傾向にある（Ichinokawa et al. 2015)。

日本周辺海域において水産生物の個体数が環境や漁業によって大きく変動してきたという経験と日本周辺海域に張り巡らされた海洋生物調査網は、海洋生物の個体数が外圧によってどのように影響を受けるか、その影響をパラメータとして評価する際には限りない利点である。

モデル化の技術向上

さらに、コンピュータの性能向上とモデル化のための最適化技術の向上も近年の大きな変化である。モデルにおいてパラメータを推定するためには、たとえば残差平方和を最小にしたり尤度を最大にするなど何らかの最適化計算が行われることが多い。このとき、最適化のためのソフトウェアの性能は、モデル化の実行効率、ひいては現実的な時間内での実現可能性にも影響を与える。尤度関数を自動微分することによりパラメータの最尤推定値を高速に探索するTemplate Model Builder（TMB, https://kaskr.github.io/adcomp/Introduction.html）と呼ばれるソフトウェアの近年の登場により、推定できるモデルの複雑性・柔軟性が各段に増した。それにより、時空間的な自己相関を考慮したモデリング手法を用いて海洋生物の分布密度推定をおこなうことが容易となった（Thorson and Barnett 2017)。この分布密度推定手法は、前述した日本周辺の海洋生物の卵密度データに適用され、マサバ産卵場の長期変化の解明(Kanamori et al. 2019）など、大きな成果を上げつつある。

（３）海洋の利用最適化を実現するために

社会選択理論の背景と現在

意思決定のあり方の理解や意思決定支援の基礎付けとなる効用に関する理論を効用理論と呼ぶ。その起源はサンクトペテルブルクのパラドクスに対するベルヌーイの議論(田村ら　1997)

にさかのぼるが、その発展にはノイマンとモルゲンシュテルンによる定式化の功績が大きい（フォン・ノイマン、モルゲンシュテルン　2009)。期待効用理論に基づき人間の価値観を定式化する試みには反例も多いが、プロスペクト理論やマキシミン期待効用理論といった代替的な理論の発展により、人間の行動の記述と、あるべき行動の規範についての理解が進んできた（ギルボア　2014)。近年は大規模データとニューラルネットワークを用いて人間の価値観を記述する試みも進んでいる(Peterson et al. 2021)。

社会選択理論の誕生には、1700年代後半におけるボルダやコンドルセの多数決に対する問題提起が重要な役割を果たす(坂井　2013)。その後若干のときを経て1951年に出版されたアローの記念碑的著作（第3版の日本語訳は2013年刊行(アロー　2013))を経て定式化が進んだ。このため、学問分野としては比較的新しいものと言える。社会選択理論が果たした第一の貢献としては、根拠づけにおいて全面的に数学を用いた点が挙げられる(志田　2016)。社会的な意思決定という曖昧な対象を定式化し学問としての形を作った。

実社会での知見の蓄積と日本の優位性

一方で、海洋の最適利用に関する理論や方法論も、個々の事例の問題解決の現場で様々に提案されている。しかし、自然資本の利用は大規模な自然システムと社会システムの複雑な相互作用の結果として実現されるため、理論や方法論の正当性や妥当性を繰り返し可能な実験によって証明することは不可能である。そのため、最適利用に関する理論や方法論に係る研究は大きく分けて、1)　実際に制度として社会に導入されたときの効果を事後的に評価し、その知見を集積するメタ解析（例: Worm et al. 2009; Gutierrez 2017）(表II-3-3）と、2）自然システムと社会システムのふるまいをシミュレーションで記述し、仮想現実の中で管理方策を繰り返し適用するMSE（Punt and Donovan 2007)、の2つの手法の併用によって進められてきた。

表II-3-3はWorm et al.（2009)とGutierrez（2017)を参考に、持続的資源利用にとって有効とされた管理手法をまとめ、日本内外で比較したものである。また、これらの方策が、有効に働く仕組みを「メカニズム」の行で、Worm et al.（2009）から引用した「有効度」を示した。欧米では経済的動機を喚起する漁獲割当制度の有効性に関する実証例（Chu 2009）が多い一方で、**日本は共同体管理としての漁業協同組合制度を基礎とした実証例が豊富であり、これが日本の持つ大きな強みの一つである。したがって、日本の水産資源管理をとりあげ、これを自然資源利用における意思決定の問題に切り込む端緒とすることは、まさに我が国だけになしうる研究課題である**。また、これらの資源管理方策は制度の高い資源評価（海洋の可視化）との相乗効果が期待できるものが多い。海洋の可視化の枠組みの中での日本の資源評価技術は最先端とまではいかないまでも、長期にわたって続けられてきたデータと知見の蓄積があり、飛躍の可能性を十分に有している。

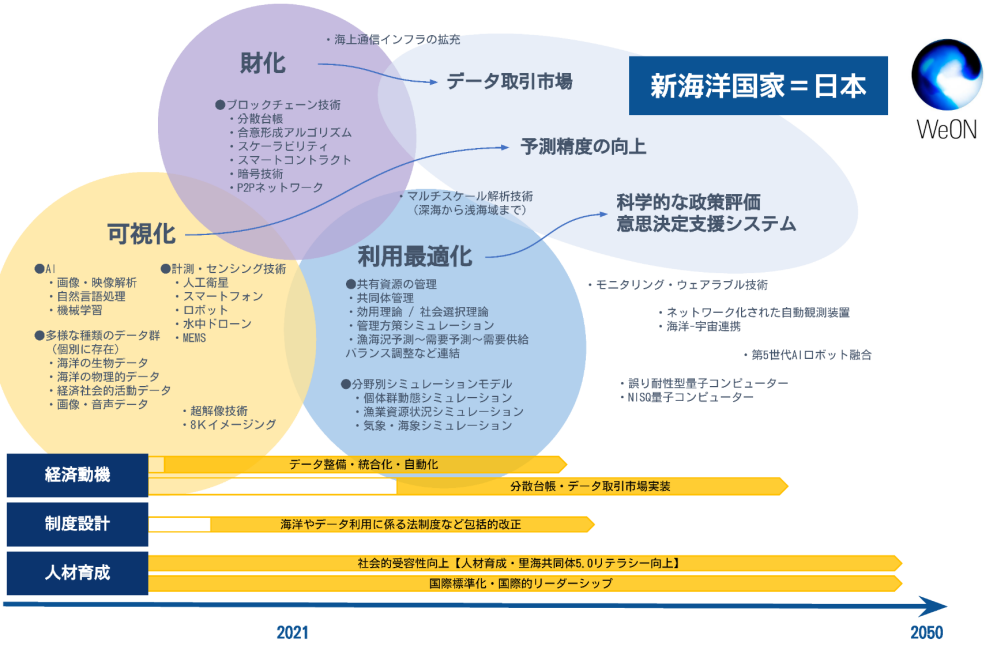
表II-3-3. コモンズとしての海洋資源の持続的利用手法に関する実証・社会実装例の国内外の動向. コモンズの持続利用のための制度設計や合意形成手法については、特に水産資源の利用の分野で多くの先行的な研究例があり、本表も水産資源の利用におけるメタ解析の結果（Worm et al. 2009; Gutierrez 2017）をまとめたものである。有効度の列はデータの豊富さ（data avairability）以外はWorm et al.（2009)からの引用で相対的な数値を示し、数値が大きいほ

ど有効性が高い。data availabilityが資源の持続的利用に資することについての出典はGutierrez (2017)による。個々の手法は相互排他的ではなく、通常は複数の組み合わせによって管理が実施される。また、本プロジェクトで提案している概念（財化・海洋可視化）と相互に補完しあうものについて「特徴」に記述した。各手法の一般的な特徴はCochrane and Garcia (2009) 、海外の動向については Hilborn and Hilborn (2012)、日本の動向についてはMakino (2011) や水産庁ウェブサイト等を参照した。海外の保護区の面積については地球規模生物多様性概況(第5版)(Secretariat of the Convention on Biological Diversity. 2020と環境省ウェブサイト（環境省 2011）を参照した。

制度・合意形成手法	メカニズム	有効度	特徴	海外の動向	日本の動向
漁法や漁具の制限 Gear restrictions	規制	14	導入は比較的容易だが，効率的に漁獲できる方法に制限をかけるため，経済的効率性が犠牲となる	TACの適用が難しい地域で利用.	共同体管理の中で利用
漁獲努力量拡大への投資の制限 Capacity reduced	規制	10	導入は比較的容易だが，効率的に漁獲できる方法に制限をかけるため，経済的効率性が犠牲となる	TACの適用が難しい地域で利用.	共同体管理の中で利用
漁獲量の上限 TAC reduced	規制	18	資源評価が適切であれば効果が高い．海洋可視化との相乗効果が見込める.	国連海洋法条約によりEEZ内の水産資源をTACにより管理することが義務付けられている．欧米では多くの魚種でTAC設定されている	改正漁業法により，TAC管理魚種を200種まで拡大する方針.
漁獲努力量の上限設定 TAE reduced	規制	5	規制されていない部分での漁獲努力量が増えるなど，人間の行動の変化の問題が指摘	―	共同体管理の中で利用
保護区の設定 Closed areas	抑制	15	適切な場所・期間での保護区の設定が重要. 海洋可視化との相乗効果が見込める.	2020年時点で海域の約7.5%	2010年時点で8.3%．このうち多くの海域が漁業法によって指定されている漁業権区域
漁獲割り当て Catch shares	経済的動機	14	権利を私的所有させることにより，経済的動機の喚起し，個人の利益の最大化が社会の利益も最大化させる．欠点は，各自が割り当てを遵守しているかの監視を行う必要があるため，管理コストが高い．ただし，割り当てをブロックチェーン化することにより，管理コストを削減できる可能性を本プロジェクトの研究プランにて提示(財化との相乗効果).	米国，ニュージーランド，ノルウェー	一部の漁業で試験的に導入，改正漁業法にも明記
水産物認証制度 Fisheries certification	透明性 経済的動機	3	消費者の選択的購買によって持続可能な方法による漁業への動機が喚起される	MSC等，MSC認証水産物のみを取り扱うサプライチェーンの協力	MEL，Sh"u"n 消費者への認知度は大きくない
共同体管理 Community co-management	排他的利用 公平性	8	排他的利用，共同体内での合意形成	チリ(territorial use rights in fisheries, TURFs)	漁協制度（日本の強み）

III. 社会像実現に向けたシナリオ

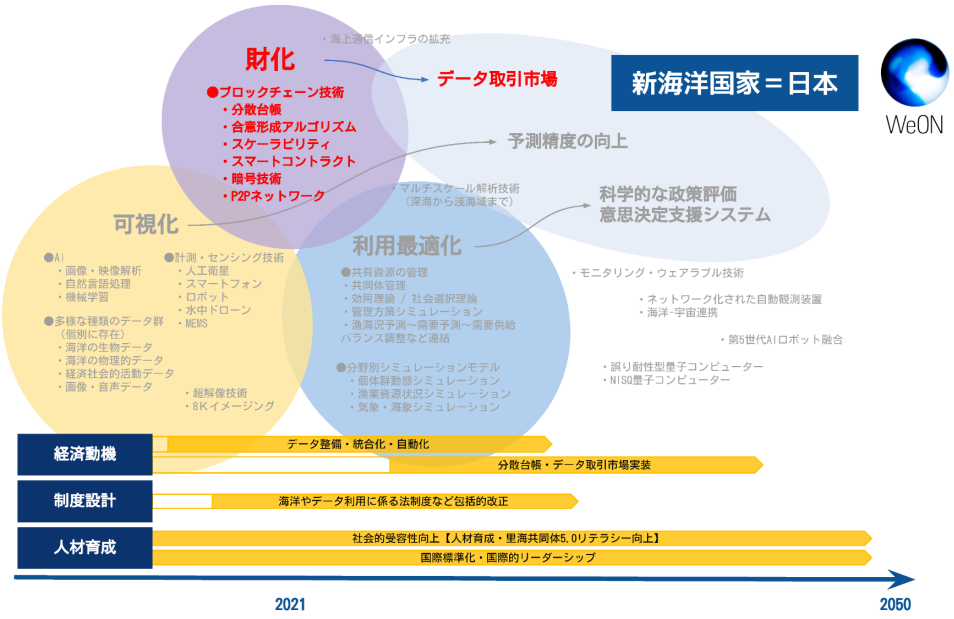
1. 挑戦的研究開発の分野・領域及び研究課題



図III-1. 当該MS目標へ至るための技術俯瞰図

（1）海洋財化：ブロックチェーンの拡張性をもたらす技術開発および海洋産業への適用

Layer 2.5以下の課題とLayer 3.0以上の課題とに分けて研究課題を設定して克服を図る（Layerについては図II-2-1を参照）。Layer 2.5以下の研究課題は、（A）ブロックチェーンの拡張性の確保である。Layer 3.0以上の課題は２つあり、（B-1）漁獲漁業を起点とした財の安全なオンライン自動取引を可能にする市場の設計、（B-2）漁獲漁業に係るサプライチェーンの調整と制御である。それぞれに具体的な研究テーマを箇条書きで下に記す。



図III-2. 当該MS目標へ至るための技術俯瞰図（海洋財化）

研究課題１-A ブロックチェーンの拡張性の確保

ブロックチェーンを全国の海洋産業で活用するための拡張性の確保

拡張性を阻むトレードオフ関係の解消を狙う。トレードオフとは、スピード（秒間処理性能）・セキュリティ・必要スペックの中の一つを解消しようとすると他が犠牲になる関係性を指し、その解消によって、拡張性を表すスペック目標（秒間処理性能とノード数）を達成していく。Layerごとの研究テーマは次のとおり。

Layer 0

- 全ノードがトランザクションを短時間で認知するための高効率プロトコル開発。
- 全ノードに情報を短時間で拡散するための調整アルゴリズム開発。
- ブロック認証処理を並列化するための制御アルゴリズム開発。

Layer 1.0

- ブロック認証を短時間で実施するためのサンプリングアルゴリズム開発。

Layer 2.0

- 各ノードにおけるアクセス処理速度向上のためのデータ構造効率化。
- 複数のブロックチェーンをまたがるデータを扱う場合の、効率的なパテーション設計開発

Layer 2.5

- 複数のトランザクションを短時間で検証するための暗号署名スキーム開発

研究課題１-B ブロックチェーンの海洋産業への適用

拡張性課題を克服し、安全・快速・省エネなトランザクション（処理・取引）機能を備えたブロックチェーンを海洋産業へ適用する上で必要な研究開発を行う。なお、2つ目の課題は『研究課題３．利用最適化』と連動し、海の持続的な利用に資する効果を生む。

１．漁獲漁業を起点とした財の安全なオンライン自動取引を可能にする市場の設計

- 海洋に係るデータ、情報、利用権、価値の分散管理
- 権利内容に応じたNFT化
- 財所有者の生体認証デバイスのノード化によるID付与
- アクセス権を詳細設定する仕組みの導入
- スマートコントラクトによる、財の一定条件下での移行と取引の完結

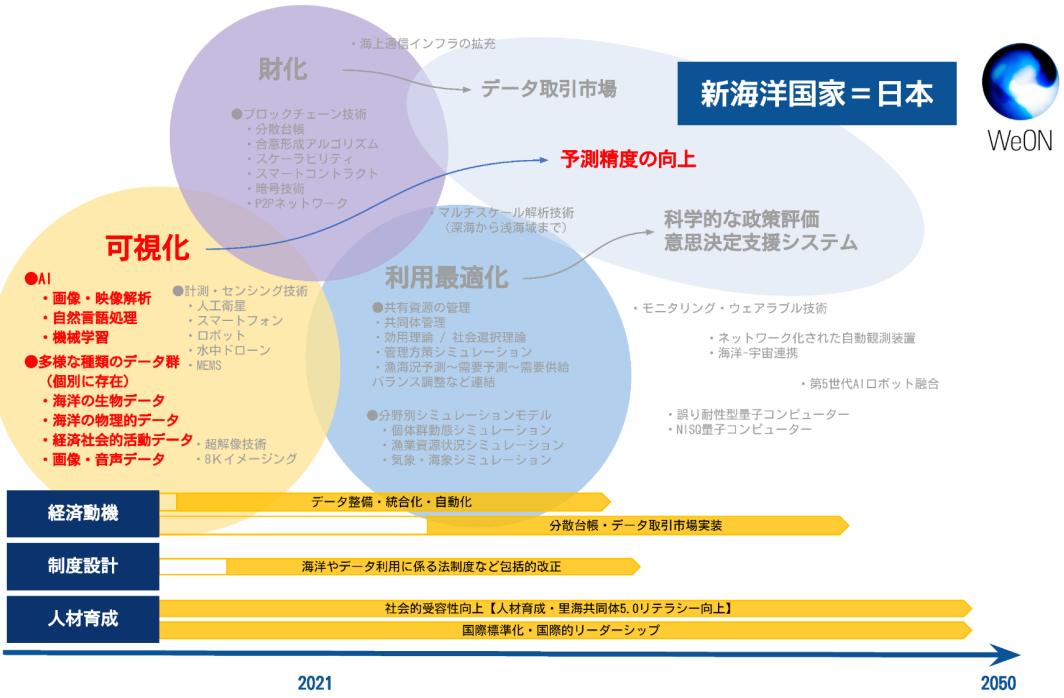
２．漁獲漁業に係るサプライチェーンの調整と制御

- サプライチェーンで生成されるデータと情報の分散管理
- 漁獲物の生体認証（画像・化合物・ゲノム）によるトレーサビリティの実現
- IoTのノード化によるIDの付与
- 『研究課題３．利用最適化』と連動させたスマートコントラクト設計
- スマートコントラクトによる各IoTにおける自動での調整・制御

＊ NFT: Non-Fungible Token: 非代替トークンと呼ばれ、ブロックチェーン上で追跡され、購入者にそれを保有する権利の証明を提供する

＊ IoT: Internet of Things: 様々な「モノ」がインターネットに接続され、情報交換することにより相互に制御する仕組み

（2）海洋可視化：　海洋の可視化の飛躍的拡張性をもたらす技術開発



図III-3. 当該MS目標へ至るための技術俯瞰図（海洋可視化）

研究課題 2-A 海洋と海洋生態系のモデル化技術の開発

海洋・生物データの広範な補間と予測を達成するため、多魚種の相互作用なども加味した広域なモデル化技術を開発する。モデル化においては、実用化が進んでいる方法論としての状態空間モデルや最大エントロピー法と、最新のAI技術としての深層学習・説明可能AIなどを組み合わせた、柔軟なモデル化手法の開発を行う。本技術開発テーマにおけるモデリングのポイントは3点ある。1つは現象のプロセスの理解を進めるためのモデル化を中心に行うこと，2つ目はそれに確率モデルを組み合わせてリスクを評価すること，3つ目はデータの質の不均一性をAI技術によって補うことである。

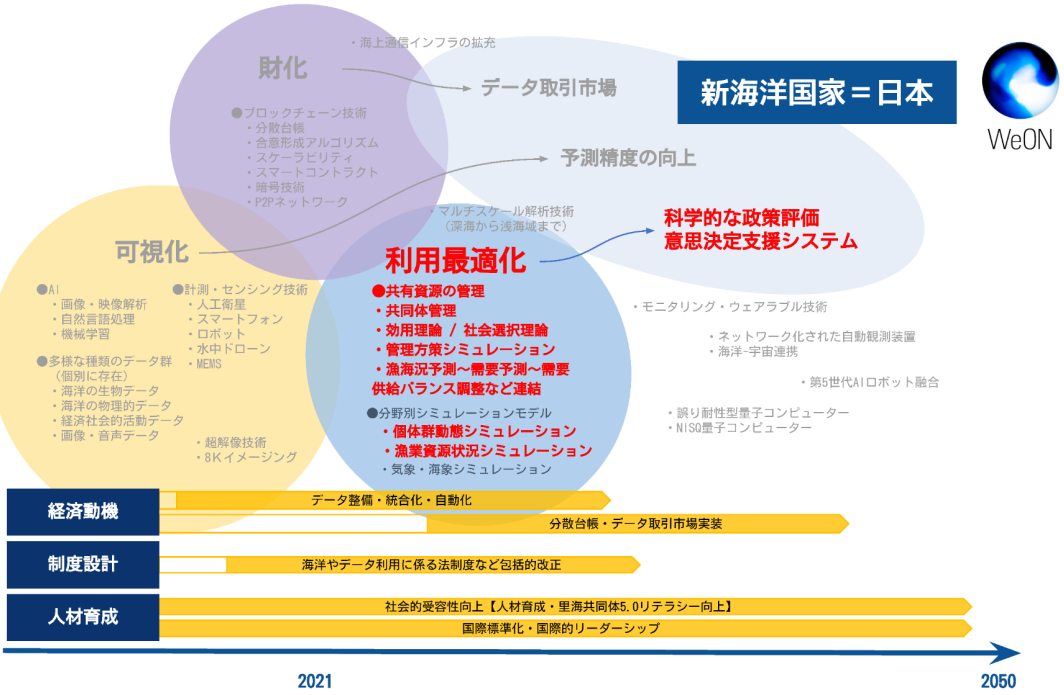
2つ目の確率モデルについては，近年の計算性能・高速計算のためのソフトウェア開発が複雑な誤差構造を持つモデルを推定することを可能にした背景によって実現可能性が担保されている（本報告書II-3を参照のこと）。かつてはランダム効果を含むモデルを推定するのには多くの時間と労力がかかった．しかし、現状はこの課題の多くが解決されている。モデル化の手法も、最尤法だけにとどまらずベイズ推論とMCMCの組み合わせなど様々な方法が提案されている。これらの技術を用いて、本研究では確率モデルによってリスクや不確実性の大きさを正確に可視化する。可視化の結果は、利用最適化へと通じる。意思決定に活用しやすい情報を提供するというゴールを見据えるうえで、リスクや不確実性の可視化は欠かすべからざる重要な技術と言える。

また、3点目のAI技術については、研究課題1で果たされるデータの財化によって、今後利用可能なデータがビックデータ化していくことを考慮してのことである。データの財化によって今後は今以上に、様々な質・量のデータが利用可能になるだろう。たとえば海洋生物資源の解明のために利用可能なデータとしては、調査・漁獲・衛星・市場取引データなどが考えられる。このような、多種多様なデータが利用できるようになった場合、同じ現象を異なる解像度と精度で表すデータを大量に扱うことになる。まず、大量なデータの中から有用な情報を持つデータをAI技術等により抽出し、その上で、プロセスを理解するためのモデル化に仕様するような、階層的なモデル開発が重要である。そのためには、最新のAI技術と伝統的モデリング技術の柔軟な組み合わせが鍵となる。また、1つ目のプロセス理解のためのモデリングには因果推論技術や説明可能AIを積極的に利用する。この3つのポイントを意識して組み合わせることで、自然現象が変動するその理由を可視化することも含めた、新しい技術群を開発していく。

（３）海洋の利用最適化：海洋の最適利用を促進するための技術開発

海洋の可視化の結果に基づき海洋利用の最適化を達成する科学技術の開発を進める。個人の意思決定の最適化にとどまらず、社会的な意思決定を改善するための研究開発も行う。

研究課題3-Aでは個人の意思決定を対象とし、意思決定を支援するための具体的な社会実装を試みる。課題3-Bでは社会的な意思決定や制度について評価をするプロトコルを開発し、課題3-Cでは海洋資源管理において有力な社会システムの制度に関して具体的に制度設計及びその評価を試みる。



図III-4. 当該MS目標へ至るための技術俯瞰図（海洋の利用最適化）

研究課題　3-A　個人の意思決定の最適化技術の開発と社会実装

リスクや不確実性があることを前提とした個人の意思決定支援のために、海洋の可視化の結果を入力し、とるべき行動を出力する決定方式を策定する。そして漁業従事者を対象として、漁況予測～需要予測～需要供給バランス調整などを連結した意思決定支援システムを開発する。これにより、いつ、どのタイミングで漁獲すべきかを判断するための情報提供をおこなう。

この課題に関しては、単なるモデル化にとどまらず、特定の地域で実行可能な最小限の製品（MVP）を作成し、実証実験を行う。

本研究による成果は、漁業者への直接のメリットになる。データを活用して利益が得られるという結果は、漁業者がもつデータを公開・共有することの経済動機になるはずである。データ活用の恩恵を受けた人がデータを提供したいと実際に感じるかどうか、漁業者へのアンケート調査や実証実験を通して明らかにする。

研究課題　3-B　シミュレーションに基づく社会システムの評価プロトコルの開発と社会実装

水産資源管理を題材として、複数の代替的な社会システム（漁獲管理方策）を比較検討するための評価プロトコルを開発し、社会実装する。このとき、ステークホルダーの価値観と、その価値観を満たすためのルールの対応関係を探る。たとえばある制度を適用した際の機会平等あるいは結果平等の達成可能性や、生みだされた金銭的価値の総和、あるいは富の年変動の大きさなど、どのような価値観を優先すると、どのような制度が適しているのか、その対応関係を明らかにする。

方法としては、シミュレーションに基づく社会システムの評価、いわゆるMSEを用い、それを実行するための基盤を整備する。長期的にはシミュレーションと実データをデータ同化の枠組みで統合した仮想現実上において、MSEに収まらないさまざまな制度の評価を行う。具体的には水産分野における漁獲割当などの制度の評価や、TACの期中改訂の影響評価等を進める。

すでに検討されている制度の特徴を評価する技術開発が完了次第、新しい社会システムの評価検証へと移行する。具体的には研究課題3-Cにおける社会制度の提案についての評価を試みる。長期的には、このようなシミュレーションベースの政策評価を一般的なプロトコルとして提供することにより、不確実性の高い様々な将来課題においてエビデンスベースの政策決定（EBPM）や地域共同体内での意思決定を容易にしていく。

本研究課題は、評価対象となる政策ごとに技術的難易度が異なる。最初は比較的単純でいて社会的な価値が高い問題の評価と解決に臨み、徐々に大規模化し、最終的には社会制度の評価という曖昧な対象をも包含することを目指す。この意味で本研究課題はscalableであり、長期的な発展が見込める。

研究課題　3-C　新たな資源利用の仕組みの提案

広範な海洋資源を社会の中で最適に、持続的に利用するための仕組みを創出し、その有効性を検討する。

海洋資源は、利用者の排除が難しく、かつ利用が競合するため、各利用者が合理的振る舞った結果、全体としての効率性が達成されないという共有地の悲劇と呼ばれる現象が発生する危険性と常に隣り合わせである。世界で起こっている海洋資源を含む共有資源の崩壊はこの共有地の悲劇的な状況によって起こっているとされる。一方で、共有資源が必ずしも崩壊するわけではなく、地域社会の自己管理によって適切に管理されるケースが世界でも多くあることを指摘し、その理論・実証研究によりノーベル経済学賞を与えられたのがエレノア・オストロムである。オストロムの実証研究の研究例には日本の漁協による共同管理も含まれており、特に自治性による独自ルールの設定によって中央政府の管理の及ばない範囲を管理していることが指摘されている。日本の漁協による共同管理へのインセンティブは共同体内部での「公平性」が重視されてきた結果であるとの研究もある(Tokunaga et al. 2019)。地域共同体による管理は一定の地理的範囲での収穫を行う権利を個人・グループに与える区画利用漁業権(Territorial

use rights for fisheries, TURF)や、あるグループに資源の管理を任せる代わりに利用券を与える協同管理組合方式なども挙げられる（Costello 2012)。

一方で、共同体による管理が歴史的に行われてこなかった地域においては、個人またはグループに資源の利用権を付与する管理方式であるRights-based management である。代表的な制度として、資源の収穫量を収穫前に権利として定め、個別に配分する個別収穫割当（漁業における個別漁獲割当など）がある。Right-based managementは個人に対して割り当てられた枠の中でできるだけ利益を最大化しようとする経済的インセンティブが働くことにより、個人の利益の最大化が全体の利益の最大化に繋がる仕組みである。しかし、権利を売買可能にすることによって零細漁業者が淘汰され、地域共同体が崩壊するような欠点も報告されている。特に、オーシャンサイクルによって海洋の価値が新たに創出されるのであれば、その新しい価値から得られる利益の恩恵を誰が受けるのかが問題となる。この場合は、共有地の悲劇を避けるRights-based managementのアプローチが必要な一方で、地域のコミュニティにある信頼や規範という無形の共有財産プロトコルを生かした制度を考案する必要がある。主には個人・法人など個別に権利を与える割当などが主だと思われがちなRights-based managementであるが、近年は個別割当などの限界も指摘されており、グループ・コミュニティの権利を与えて管理・利用を行う方式を政策的に主導する試みが議論されてきている (Holland 2018)。日本に存在する共同管理は、長い歴史の中で形成されてきた共有資源の利用方法であり、存在していたコミュニティに政府が後付け的に権利を付与してきた経緯がある。しかし、これからはその無形の共有財産プロトコルを認識し、制度を改めてデザインしていく必要がある。

我々が考える「新たな資源利用の仕組み」は日本が築いてきた世界に誇る地域共同体による管理をベースにしつつも、経済動機を喚起するright-based managementの良さを取り込んでいく、そんな仕組みを考えている。これが風土に根ざした地域の海を基盤に、海洋自然資本を持続的に・合意のもとで利用していく里海共同体5.0の核となる仕組みになる。この提案は、3-Bで構築されたシミュレーションベースの制度評価プロトコルの中で評価され、ブラッシュアップされる。

2. 2030 年・2040 年・2050 年のそれぞれにおける、達成すべき目標（マイルストーン）、マイルストーン達成に向けた研究開発、これによる波及効果

我々の目標では、2050年までに、海洋の財化・可視化・利用最適化のサイクルを経済動機で駆動させ、新海洋国家＝日本を実現する。2050年に実現された社会像に必要な海洋の財化・可視化・利用最適化のスペックを長期目標と想定し、それに基づき、MS研究開発として2021年から2030年に達成する短期目標とする。実現とする理想としての2050年と着実研究開発による具現化の2030年の中間地点での評価・修正を行うための中期目標としての2040年を設定した。

（1）海洋財化 研究課題　1-A

		2021-2030	2031-2040	2041-2050
マイルストーン	TPS	350,000	450,000	500,000
	Node	10,000	100,000	300,000
研究課題		全国の漁獲漁業でブロックチェーンを活用するための拡張性の確保	全国の海洋食品産業でブロックチェーンを活用する拡張性の確保	全国の海洋産業でブロックチェーンを活用するための拡張性の確保
効果		漁獲漁と漁獲漁業に関連する財(データ・情報・利用権・価値)が安全に分散管理されるとともに、速やかな取引が可能となる	海洋食品と本産業に関連する財が安全に分散管理されれるとともに、速やかな取引が可能となる	海洋産業で生産させるすべての資源と本産業に関連する財が安全に分散管理されれるとともに、速やかな取引が可能となる

*TPS: Transaction per second(秒間処理性能)

研究課題　1-B-1

	2021-2030	2031-2040	2041-2050
マイルストーン	漁獲漁業を起点に生産される水産物と財（データと利用権）の取引をオンライン上で可能にする基盤の整備	海洋食品に関連する財の取引をオンライン上で可能にする基盤の整備	海洋に関連するすべての財の取引をオンライン上で可能にする基盤の整備
研究課題	漁獲漁業を起点とした財の安全なオンライン自動取引を可能にする市場の設計	オンライン自動取引の対象を海洋食品産業に関連するすべての財へ拡大	オンライン自動取引の対象を海洋由来のすべての財へ拡大
効果	漁獲漁業を起点とした財を一定条件下で自動取引する市場創設	海洋由来の財の自動取引市場が拡大	海洋由来のすべての財を自動取引市場が完成

研究課題　1-B-2

	2021-2030	2031-2040	2041-2050
マイルストーン	漁獲漁業の生産や流通の調整と制御を、非中央集権的に行う基盤の整備	海洋食品産業における生産や流通の調整と制御を、非中央集権的に行う基盤の整備	海洋産業全体における生産や流通の調整と制御を、非中央集権的に行う基盤の整備
研究課題	漁獲漁業需給予測を基に、自動で生産、流通調整や制御を行うスマートコントラクト技術開発	非中央集権的に調整や制御する基盤を、海洋食品産業へ拡大	非中央集権的に調整や制御する基盤を、すべての海洋産業へ拡大
効果	漁獲漁業のサプライチェーンで必要なエネルギーと漁獲物の持続的な最適利用	海洋食品産業のサプライチェーンで必要なエネルギーと食品の持続的最適利用	海洋産業のサプライチェーンで必要なエネルギーと海洋資源持続的な最適利用

（2）海洋可視化

	2021-2030	2031-2040	2041-2050
マイルストーン	海洋生物資源を対象として、自然生態系の理解と予測が達成される	人間に利用される海洋部分の理解と予測が達成される。具体的には深海等も対象となる。また、エネルギーやゾーニングに関わる海洋資源の可視化が達成される。	日本の全海洋域において海洋と海洋利用に関する完全可視化が可能となる
研究課題	海洋生物資源を題材に、多種多様なデータベースをAI技術により統合しモデル化するための技術開発を行う	海洋生物資源以外も含めたデータの統合モデリングに挑む。統合モデリング技術をパッケージ化し、深い専門知識がない人にとっても解析が容易になるような技術を提供。	日本の全海域を対象として、物理環境・生物資源動向などを統合したモデルを開発する
効果	今後予想される質や解像度が異なる大量データを適切に取り扱い、意味のある情報を抽出するための基礎的技術が整う。 プロセスの理解を通して、海洋生物資源の中短期的動向の予測精度が高まるため、意思決定の最適化へとつながる。	人間に利用される海洋部分をモデル化し、理解と予測精度の向上につながる。また、海洋資源全体の中短期的動向の予測結果は、意思決定の最適化へとつながる	海洋に対するものの見方や海洋利用の在り方を大きく拡張する、豊富な「生きた」情報が利用できるようになる。

（3）海洋の利用最適化

研究課題　3-A

	2021-2030	2031-2040	2041-2050
マイルストーン	特定の地域において、漁業従事者のための意思決定支援システムのMVP（Minimum Viable Product）を開発し、運用を開始する。利用者の意見を取り入れて、改善を行う。 MVPの結果に基づいて実運用のための情報システムの開発が開始される。	特定の地域の結果をもとにして、全国に意思決定支援システムを広げる。 機能面の追加として、漁業以外の資源利用についての行動の最適化ができるようになる。	海洋資源を利用してみたいと思いつけば、いつでも・どこでも・誰でも、海洋資源を効率よく利用できる技術が開発されている。
研究課題	漁況・海況・需要・船の性能などの情報を入力し、とるべき行動を出力する決定方式の策定。 この中には、需要曲線の同定や費用曲線の同定などのモデル化とモデルの結果に基づく最適化が含まれる	海洋利用全般に関しても、モデル化とモデルの結果を用いた最適化を行う手法を開発する。	個人の意思決定の在り方を定式化して、その積み上げとして社会的な意思決定のプロセスの評価を可能とするための技術を開発する。

研究課題　3-B, 3-C

	2021-2030	2031-2040	2041-2050
マイルストーン	定式化が比較的容易である具体的あるいは小規模な課題（例：水産資源の管理）について、価値観や目的に応じて社会的に合意できる施策を科学的エビデンスをもとに評価するための統一的なプロトコルが完成し、運用を開始する。 定式化が困難な曖昧かつ大規模な課題（例：共有財の扱い・中央集権型と分散型社会の優劣・あるべき社会システム像の設計）に対して、数理モデルによる方法と、計算機的シミュレーションによる方法において、政策評価実施のためのプロトタイプ的技術が完成する。	包括的な海洋・自然資源利用全般について定式化が容易な課題について、2030年までに得た政策評価プロトコルを応用し、問題の実課題への適用と解決が図られる。 定式化が困難な課題に対しても、MVPを作成し、検証を行う。	社会制度が持つ課題と利点について、一人一人が理解し納得したうえで、自分が望む社会システムにを選択したり，意見したりできるようになる。社会的施作の効果は科学的に定量化・可視化されて還元されるため、常に社会的施作は継続的に改善され続ける。
研究課題	水産資源・漁業・社会システムの相互作用を模した確率的シミュレーション技術の開発。結果を広く共有し，エビデンスベースの社会的意思決定を支援するためのソフトウェアのMVPの開発。	定式化が困難な課題をエージェントベースのシミュレーションなどで表現し、評価する技術の開発。	シミュレーションで評価された結果をもとに、国としての社会制度を改善していくプロセスの設計。

効果（3-A,B,C共通）

効果	資源利用の個人的な効率化が達成される。 社会的な変化について、価値観と行動の対応関係が明らかとなる。	資源利用の効率化が全国に広がる。 エビデンスベースの社会的意思決定・政策評価が広く行われる。	個人が自立的に行動しつつ、社会的にも効率的な資源利用が達成される。必要に応じて動的に社会システムを再設計～再評価～社会適用が実行できるようになる。

3. 目標達成に向けた国際連携の在り方

本MS目標の2050年までの目標の焦点は日本にあるが、本目標を提案した動機は、海洋の国際連携研究、その結果としての国際政策展開がある。

海洋からのSustainable Development Goals（SDGs 持続可能な開発目標）達成にむけ日本が積極的に参加する『持続可能な海洋経済の構築に向けたハイレベル・パネル』は、人類と海との関係を強化し、多様なステークホルダーと協力し、最先端の知識活用により、持続可能な海

洋経済の実現を目指すことのできる唯一の国際海洋政策機関である。昨年12月にこの国際海洋パネルは、持続可能な海洋経済への移行のために優先される行動アジェンダを策定した。　この行動アジェンダは「新海洋国家＝日本」チームメンバーを含む専門家による海洋からの食料供給と経済発展可能性についての研究に基づく次世代海洋政策提言「The Future of Food from the Sea」を科学的根拠の一つとしている(Costello et al. 2020)。この研究結果はNature誌に学術研究論文としても掲載され、全球規模での海洋からの持続的食料供給とその経済活動が、2050年に世界の飢餓問題と貧困問題を解決する可能性を科学で示し、それを達成するための政策を明確に提示したものである。科学は海洋から世界をつくる道を示し、国々はその道をともに進むことに合意した。しかしながら、いまだに、2050年の海洋からの食料供給と経済発展に具体性をもった行動はない。

国際海洋パネルの目指す、持続可能な海洋経済に向かう、経済的余力・科学・人材を持ち、情報・技術・制度の深化と進化で進める国、そして何より進むべき必然を持つ国が、日本である。その確信がMS目標、「2050年までに海洋の財化・可視化・利用最適化のサイクルを経済動機で駆動させ、新海洋国家＝日本を実現する。」へとつながる。

2050年のこのMS目標達成には継続的技術イノベーションが必要であり、2030年に終了予定のムーンショットR&D制度だけの運営には困難がある。さらに基幹技術イノベーションを公的な研究資金に起こしたとしても、そこから、市場原理による応用展開がなければ、継続的イノベーションには繋がらない。

4. 目標達成に向けた分野・セクターを越えた連携の在り方

当該MS目標は、新機軸の社会資本を備えた新しい国家を目指すことから、必要な協力と連携は多岐にわたる。ここでは、海洋利用の拡大におけるボトルネックとして、海洋をめぐる産学官の連携に焦点を当てる。

海洋研究と海洋産業の歴史を見渡すと、大学における研究成果が産業の発展を支えてきたとは残念ながら言い難い。日本が世界に誇る水産業も例外ではなく、研究が現場の具体策へ結びついていないと指摘する声は少なくない(吾妻 2021)。

海洋の無数のプロジェクトへは、これまで多額の研究資金や補助金が投じられてきた。新しい技術を海に持っていき実証実験を行ったものの社会実装されずに終わることがほとんどであった、と乱暴に決めつけたとしても、反論は多くなかろう。

海洋利用を発展の波に乗せる上で必要なのは、アイデアの概念実証（Proof of Concept: PoC）に産官学が連携して取り組むことである。概念実証とは、アイデアや新しい概念を最小限の規模で社会に実現することによって、実現可能性や実用性を検証することを指す。

一つの巨大技術を海に浮かべて単独で実験する実証実験プロジェクトとは異なり、PoCはア

イデアを体現した最小サイズの技術や仕組みを実社会に持ち込むことに特徴がある。PoCでは、前後につながるサプライチェーンとの相性を確かめたり、個人と社会の反応を計測したり、商慣習や現行法との摩擦の在りかを明確にしたりする。通常、開始から3年目や5年目に、総合的な見地からアイデアの実現可能性について判断が下され、あるものは社会実装に向けて動きが加速され、あるものは終了宣告を受ける。PoCはまさしく産官学連携の場である。そして、海という公共財を扱うならば産官学連携なくしてPoCはそもそも成り立たない。

これまで海洋研究や海洋利用技術の世界では、PoCが意識されて取り組まれて来なかった。数多くの実証実験が社会や経済に馴染まず立ち消えしたが、もしかしたらアイデアが悪かったわけではなく、幾つかのケースは単にPoC的アプローチ不足が原因で社会実装に至らなかったという可能性がある。

そこで、本MS目標では、PoCを強く意識して進めていく。一例を挙げれば、海の財化において、まずは漁獲漁業に焦点をあてて、一つの漁港に集まる漁船を起点にする。ある朝に出港した一隻が獲った一匹の魚が消費者の手に渡るまでのすべての過程で生成されるデータを可能な限り集めて、ブロックチェーンをつけて管理、取引する。そこには、漁船所有者・漁業権所有者・漁業者・漁協・水産加工会社・運送会社・小売会社・認証団体・マーケティング会社・消費者・弁護士・自治体・関連省庁・水産研究者・ブロックチェーン技術者などが関わる。彼らの判断が、本MS目標を構築している概念とアイデアの実現可能性の判断へと集約されるような産官学連携を行っていく。

5. ELSI (Ethical, Legal, Social Issues)(目標達成に向けて取り組むうえでの倫理・法的・社会的課題及びその解決策)

当該MS目標は技術開発とその社会実装において、2050年までに、新しいブロックチェーン技術による海洋社会資本であるオーシャンサイクルによる経済動機喚起で海洋自然資本としての海洋の利用最適化を目指す。新しい技術に誘われて社会と人が、地域共有財としての海洋と新たな関係を結び、新た価値を創出する。

第6期科学技術・イノベーション基本計画においては、社会課題解決や技術イノベーションによる新たな価値創造には、研究開発の初期段階からの倫理・法的・社会的課題 (ELSI)にステークホルダーなどを巻き込み「総合知」を用いた対応が必須であるとする。(第6期科学技術・イノベーション基本計画)。あらたな技術が社会に導入されるには、すでにある社会制度との整合性やそれまでの制度では対応できないことが多い。その結果、ELSIが発生し、問題が発生することで新しい技術が社会から受容されず社会実装につながらない可能性がある。そのため、あたらしい科学導入による潜在的なリスクを事前に把握し、規範の確立と社会的合意形成が必要となる(肥後ら 2021)。

当該MS目標においての大きなELSI課題は、2021年の現在の社会において、2050年という長期的な視界で倫理的・法制度的・社会的課題を発見・予測しながら、研究開発と社会実装を進め

ることにある。地域共有財の権利・管理主体としての里海共同体5.0は、日本固有の共同管理を起点とする一方で既存の法制度では対応できない多様な海洋利用の権利体系を構想している。とりわけ、漁業法により定められている漁業権、すなわち「一定の水面において特定の漁業を一定の期間排他的に営む権利」のなかでも、現在、人口減少や高齢化の進展で2050年までの権利主体のあり方が問われる、共同漁業権（存続期間：10年、　採貝採藻など、漁場を地元漁民が共同で利用して漁業を営む権利）のあり方を、海洋の財化に合わせて適切な制度改正を検討していく必要がある。

また、データの財化においては複製可能性（写像）をもつデジタルデータの独占的なアクセス権・所有権・権利の移譲に係る法整備が必要となる。さらにデータ市場の創設にあたり、データの取扱いについては個人情報保護法の、市場運営については金融商品取引法等関連法の遵守が求められる。なお、市場運営者については、国が一定の要件を満たした者を認定し、公表することで信頼性を確保する制度が想定されるが、分散的で民主的な制度を目指し、当事者の自主的な取組による運営を推進し、当事者が実態に即したルールを形成していく方法(眞野2021)も検討されるべきである。

当該MS目標では、研究開発初期のProof of　Concept（概念実証)において、自明なこうした法的課題から出発し、社会実装試行を通じて倫理課題を積極的に発見・予測してゆく。こうして潜在的な社会課題の掘り起こしと対応を可能にする。そのために研究チームに応用倫理学研究者及び、法学者・実務家を加えてELSIを明確な研究課題として進めてゆくことが唯一の解決策となる。本提案メンバーには含まれてはいないが、目標検討チームが、研究開発チームへと移行時に、実践的ELSIを行うための国際経験も豊富な応用倫理学研究者、また、法学者・実務家の参加の同意をすでに得ている。当該MS目標の研究開発、そして技術は、2050年の先に世界での海洋からの変革を目指してはいるが、明確に日本の地理的風土特性、固有の価値、そしてこの国に暮らす人びとを対象としデザインされている。そのため、ELSIを研究開発に確実に盛り込むことで、科学技術と社会実装の橋渡しを確かにする公的資金研究でのELSIの実践的手法研究・開発へと大きく貢献する可能性を持つ。

IV. 結論

我々の提案するMS目標、「2050年までに、海洋の財化・可視化・利用最適化のサイクルを経済動機で駆動させ、新海洋国家＝日本を実現する」は、島嶼国日本に、海を起点とする新しい海洋国家への道程を示す。

しかし、本調査研究にて「新海洋国家＝日本」を実現する路を描くにあたり、二つの大きな転換点があった。

一つ目は、「海洋の不確実性」との再会だ。2011年の東日本大震災から海とともに歩んできた我々にとって、海洋がこの国の未来を作るという確信は揺るぐことはない。しかし、「新海洋国家＝日本」へ向かう技術群にその確信が持てなかった。革新的な世界の海洋関連技術は無数にあるが、それが社会実装されるケースは限定的である。とくに日本では、公的資金による

海洋関連の研究開発は多数存在するが、社会実装・発展する「技術」は見つからない。そうした中で出会った重要なピースが、まさに我々がこれまで十年に渡りこの国の漁業で対峙し、乗り越えようとしてきた「海洋の不確実性」である。「海洋の可視化」によってその不確実性を克服し、海洋関連技術が社会に広がるための経済動機をつくることができるのである。

二つ目は、「海洋の可視化」への道をフィジカル空間・サイバー空間の融合に見いだしたことだ。我々は、漁獲漁業を通じて海洋の不確実性を乗り越えようとしてきたが、「海洋可視化」に必要なデータが圧倒的に不足していた。しかし、我々のチームメンバーが技術開発し、オープンソース化を目指している新しい自立分散型ブロックチェーンプロトコルによって、データ取引市場のスケーラビリティ（拡張性）は飛躍的に伸び、「海洋可視化」「海洋財化」を経済動機でつなげ、駆動させる海洋社会資本「オーシャンサイクル」の実現可能性は高まる。このフィジカル空間・サイバー空間の融合は、日本固有の地域海洋の共同管理を、サイバー空間へと拡張する可能性を秘めており、それが「里海共同体5.0」の発展へとつながっていく。

我々の「新海洋国家＝日本」は、開国とともに海洋国家を目指した明治期以来の新しい海洋国家作りへの意思である。「新海洋国家＝日本」が目指すのは、富国強兵による国力顕示や世界での覇権ではない。島嶼国ゆえ直面せざるをえない災禍も、経済発展の困難も、しなやかに受け止め、発展していく。それを乗り越えていくことが、この国の宿命であるという覚悟のもとに見上げる月（ムーン）、2050年の「新海洋国家＝日本」、は確かに輝いている。そこへの路はおぼろげではあるが、いま、我々は最初の一歩を踏み出す。

V. 参考文献

Chu, Cindy. 2009. “Thirty Years Later: The Global Growth of ITQs and Their Influence on Stock Status in Marine Fisheries.” *Fish and Fisheries* 10 (2): 217–30.

Cochrane, Kevern L., and Serge Garcia, eds. 2009. *A Fishery Manager’s Guidebook, 2nd Edition*. Wiley.

Costello, Christopher. 2012. “Introduction to the Symposium on Rights-Based Fisheries Management.” *Review of Environmental Economics and Policy* 6 (2): 212–16.

Costello, Christopher, Ling Cao, Stefan Gelcich, Miguel Á. Cisneros-Mata, Christopher M. Free, Halley E. Froehlich, Christopher D. Golden, et al. 2019. “The Future of Food from the Sea.” *The High Level Panel for Sustainable Ocean Economy*.

———. 2020. “The Future of Food from the Sea.” *Nature* 588 (7836): 95–100.

GincoMagazine編集部. 2018. “ブロックチェーンの全体像を掴むための２つのレイヤー観｜BlockchainInsight.” Ginco Magazine. March 15, 2018. https://magazine.ginco.io/post/kisochishiki_blockchain_ecosystem/.

Gutierrez, Nicolas L. 2017. “Harnessing Citizenry Awareness and Technology to Improve Fisheries Information: The Power of Data.” *Fisheries* 42 (12): 615–20.

Gutiérrez, Nicolás L., Ray Hilborn, and Omar Defeo. 2011. “Leadership, Social Capital and Incentives Promote Successful Fisheries.” *Nature* 470 (7334): 386–89.

“High Level Panel for a Sustainable Ocean Economy.” n.d. Accessed October 4, 2020. https://oceanpanel.org/.

Hilborn, Ray, and Ulrike Hilborn. 2012. *Overfishing: What Everyone Needs to Know*. Oxford University Press.

Hillary, Richard M., Ann L. Preece, Campbell R. Davies, Hiroyuki Kurota, Osamu Sakai,

Tomoyuki Itoh, Ana M. Parma, Doug S. Butterworth, James Ianelli, and Trevor A. Branch. 2016. "A Scientific Alternative to Moratoria for Rebuilding Depleted International Tuna Stocks." *Fish and Fisheries* 17 (2): 469–82.

Holland, Daniel S. 2018. "Collective Rights–Based Fishery Management: A Path to Ecosystem-Based Fishery Management." *Annual Review of Resource Economics* 10 (1): 469–85.

Ichinokawa, Momoko, Hiroshi Okamura, and Hiroyuki Kurota. 2017. "The Status of Japanese Fisheries Relative to Fisheries around the World." *ICES Journal of Marine Science: Journal Du Conseil* 74 (5): 1277–87.

Ichinokawa, Momoko, Hiroshi Okamura, Chikako Watanabe, Atsushi Kawabata, and Yoshioki Oozeki. 2015. "Effective Time Closures: Quantifying the Conservation Benefits of Input Control for the Pacific Chub Mackerel Fishery." https://doi.org/10.1890/14-1216.1.

JST. 2019. "次世代ブロックチェーン技術 個人や社会のデータ共有・価値交換を安全で高信頼に実現する." CRDS-FY2019-SP-09. 戦略プロポーザル. 国立研究開発法人科学技術振興機構 研究技術開発センター . https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2019/SP/CRDS-FY2019-SP-09.pdf.

———. 2021. "研究開発の俯瞰報告書 統合版（2021年）～俯瞰と潮流～." 研究開発の俯瞰報告書. 国立研究開発法人科学技術振興機構 研究技術開発センター . https://www.jst.go.jp/crds/report/report02/CRDS-FY2021-FR-01.html.

Kanamori, Y., A. Takasuka, S. Nishijima, and H. Okamura. 2019. "Climate Change Shifts the Spawning Ground Northward and Extends the Spawning Period of Chub Mackerel in the Western North Pacific." *Marine Ecology Progress Series* 624 (August): 155–66.

Makino, Mitsutaku. 2011. *Fisheries Management in Japan: Its Institutional Features and Case Studies*. Fish & Fisheries Series. Springer.

Ostrom, E., J. Burger, C. B. Field, R. B. Norgaard, and D. Policansky. 1999. "Revisiting the Commons: Local Lessons, Global Challenges." *Science* 284 (5412): 278–82.

Peterson, Joshua C., David D. Bourgin, Mayank Agrawal, Daniel Reichman, and Thomas L. Griffiths. 2021. "Using Large-Scale Experiments and Machine Learning to Discover Theories of Human Decision-Making." *Science* 372 (6547): 1209–14.

Punt, André E., and Greg P. Donovan. 2007. "Developing Management Procedures That Are Robust to Uncertainty: Lessons from the International Whaling Commission." *ICES Journal of Marine Science: Journal Du Conseil* 64 (4): 603–12.

Secretariat of the Convention on Biological Diversity. 2020. "地球規模生物多様性概況第5版." Montreal. https://www.cbd.int/gbo5.

Sumaila, U. Rashid, Melissa Walsh, Kelly Hoareau, Anthony Cox, Louise Teh, Patrízia Abdallah, Wisdom Akpalu, et al. 2021. "Financing a Sustainable Ocean Economy." *Nature Communications* 12 (1): 3259.

Takasuka, Akinori, Yoshioki Oozeki, Hiroshi Kubota, and Salvador E. Lluch-Cota. 2008. "Contrasting Spawning Temperature Optima: Why Are Anchovy and Sardine Regime Shifts Synchronous across the North Pacific?" *Progress in Oceanography* 77 (2): 225–32.

Thorson, James T., and Lewis A. K. Barnett. 2017. "Comparing Estimates of Abundance Trends and Distribution Shifts Using Single- and Multispecies Models of Fishes and Biogenic Habitat." *ICES Journal of Marine Science*. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsw193.

Tokunaga, Kanae, Gakushi Ishimura, Shigehide Iwata, Keita Abe, Kazuhiko Otsuka, Kristin Kleisner, and Rod Fujita. 2019. "Alternative Outcomes under Different

Fisheries Management Policies: A Bioeconomic Analysis of Japanese Fisheries." *Marine Policy* 108 (December 2018): 103646.
Worm, Boris, Ray Hilborn, Julia K. Baum, Trevor A. Branch, Jeremy S. Collie, Christopher Costello, Michael J. Fogarty, et al. 2009. "Rebuilding Global Fisheries." *Science* 325 (5940): 578–85.
Young, Martin. 2021. "イーサリアム2.0への移行、予想よりも時間がかかってしまっている＝共同創設者ブテリン氏." Cointelegraph Japan. June 2, 2021. https://jp.cointelegraph.com/news/even-vitalik-buterin-is-surprised-at-just-how-long-eth2-is-taking.
Young, Oran R., D. G. Webster, Michael E. Cox, Jesper Raakjær, Lau Øfjord Blaxekjær, Níels Einarsson, Ross A. Virginia, et al. 2018. "Moving beyond Panaceas in Fisheries Governance." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 115 (37): 9065–73.
アローケネス・j. 2013. 社会的選択と個人的評価. 勁草書房.
ギルボアイツァーク. 2014. 不確実性下の意思決定理論. 勁草書房.
フォン・ノイマン J., and モルゲンシュテルン O. 2009. ゲームの理論と経済行動. 筑摩書房.
坂井豊貴. 2013. 社会的選択理論への招待: 投票と多数決の科学. 日本評論社.
川崎健. 2007. "総論 レジーム シフト 地球システム管理の新しい視点." レジームシフト: 気候変動と生物資源管理, 1–9.
志田基与師. 2016. "社会的選択理論を学ぶことの意義は何か？." 理論と方法 31 (1): 167–78.
星暁雄. 2018. "【星暁雄のブロックチェーン界隈ざっくり見て歩き】スケーリング狂詩曲～パブリックブロックチェーンの技術革新は創造のムーブメントだ." 仮想通貨 Watch. November 9, 2018. https://crypto.watch.impress.co.jp/docs/column/akiohoshi/1151957.html.
木俵豊. 2015. "ユニバーサルコミュニケーション技術の課題と展望." *Panasonic Technical Journal*. https://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_11012901_po_p0102.pdf?contentNo=1&alternativeNo=.
環境省. 2011. "我が国における海洋保護区の設定のあり方について." http://www.kantei.go.jp/jp/singi/kaiyou/dai8/siryou3.pdf.
田村坦之, 中村豊., and 藤田真一. 1997. 効用分析の数理と応用. コロナ社.
眞野浩. 2021. "デジタルアーキテクチャデザイン: 3. データ取引市場のアーキテクチャ-データ取引市場の実装と国際標準化." 情報処理 62 (6): e13–19.
稲掛伝三, 大塚一志, and 黒田一紀. 2013. "水産海洋アーカイブズ 水産海洋学の黎明 宇田道隆 (1905-1982)." *Bulletin of the Japanese Society of Fisheries Oceanography* 77: 2–5.
"第6期科学技術・イノベーション基本計画." n.d. Accessed July 8, 2021. https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/index6.html.
肥後楽., 鹿野祐介, and 武田浩平. 2021. "第６期科学技術・イノベーション 基本計画をゼロから考えるために ～その概要と論点～." ELSI NOTE, No. 10. 大阪大学 社会技術共創研究センター. https://elsi.osaka-u.ac.jp/system/wp-content/uploads/2021/05/ELSI_NOTE_10_2021_210514.pdf.
吾妻行雄. 2021. "研究の出口は何か？." 日本水産学会誌 87 (2): 77–77.