

令和6年度戦略的研究開発課題（S-23）の公募方針

1. プロジェクト名：

沿岸環境・生態系の統合的管理のためのデジタルツインプラットフォームの構築

2. 研究プロジェクトリーダー：

国立環境研究所地域環境保全領域海域環境研究室 主幹研究員 東 博紀

3. 研究予算：

年間総額1億円以内（令和6年度）、年間総額2億円以内（令和7～10年度）

※サブテーマ毎の予算は「6. プロジェクトの研究テーマ構成及びサブテーマ構成」に記載。

4. 研究期間：

5年間（令和6～10年度）

※研究3年目に中間評価を行う。

5. プロジェクトの概要

（1）背景と目的

沿岸環境・生態系の保全・再生は長年未解決の水環境問題である。高度経済成長期に著しく環境が悪化した日本の沿岸域は、総量削減等の様々な取組みによって水質改善が進み、世界に先駆けて富栄養化問題を克服しつつある。しかし、かつての豊かな海の再生を実感するには至らず、依然として生物多様性・生産性の低迷は続いている。さらに近年は気候変動による水温上昇等の影響も重なり、ノリの色落ちや藻場の磯焼け、有用魚介類の急減など、全国各地で生態系の変調や漁業被害が相次いで発生している。2019年に公開された「変化する気候下での海洋・雪氷圏に関する IPCC 特別報告書」によると、温暖化によって海草・海藻やサンゴなど生物生息場の喪失リスクが高まり、沿岸生態系の構造や機能、生物多様性の劣化がさらに深刻化すると予測されている。このような背景のもと、2015年、2021年の瀬戸内海環境保全特別措置法の改正（以降、新瀬戸法）を機に日本の水環境行政の大きな転換が図られ、これまでの水質改善に加え、生物多様性・生産性が確保された「きれいで豊かな海」の保全・再生・創出を目標とする新たな時代に移った。

国際社会においても、生物多様性の損失は気候変動に次ぐ深刻な経済危機と認識されており（World Economic Forum Global Risks Report 2023）、生物多様性の損失を止め、反転させ回復軌道に乗せる「ネイチャーポジティブ」の実現に向けた横断的な社会変革が急務とされている（IPBES 生物多様性と生態系サービスに関する地球規模評価報

告書 2019)。2022 年 12 月の生物多様性条約 COP15 では「昆明・モンリオール生物多様性枠組」が採択され、陸と海のそれぞれ 30%以上を保全する「30by30」をはじめとする 2030 年までの新たな世界目標が定められた。日本は 2023 年 3 月に世界目標を踏まえた生物多様性国家戦略を策定し、30by30 に関しては、国立公園等の保護地域の拡張に加えて、OECM (Other Effective area based Conservation Measures:保護区以外で、本来の目的に関わらず、様々な取組みの結果、生物多様性の保全に資する区域) を設定することによって目標達成を目指す方針を掲げている。その促進に向けて、「民間の取組等によって生物多様性の保全が図られている区域」を自然共生サイトとして環境大臣が認定する新たな制度を創設し、2022 年度の試行を経て、2023 年度より正式認定を開始した。しかし、2022 年度の試行において沿岸域の自然共生サイトの事例はわずか 1 件のみであり、30by30 の目標達成のみならず、きれいで豊かな海・ネイチャーポジティブに向けても更なる促進策が必要な状況である。

こうした状況を受け、現在の日本の沿岸域では、水質改善に向けた総量削減等の広域かつ湾一律の従来施策、豊かな海に向けた栄養塩類管理等の海域ごとの新たな施策、OECM・自然共生サイトなど市民や民間等による藻場・干潟等の保全・再生等の地域の取組みをはじめ、多種多様な施策・取組みが重層的に実施されている。これに漁業活動や港湾整備、気候変動等が重なり、様々な人間活動や自然変動の影響が輻輳する中で沿岸環境・生態系が形成されている。この複雑な構造を理解し、今後の保全・再生方策を検討するためには、様々な人間活動や自然変動の影響を網羅的に解析可能な沿岸環境・生態系の統合評価モデルが必要である。しかし、これまで水質総量削減の検討で多用されてきた海域の水質・生態系モデルは、主に環境基準の達成状況への影響予測を目的として開発されてきたため、モデル中の生物は水質予測の精度確保に最低限必要な植物・動物プランクトンに留まっており、豊かな海の再生方策検討に必要な魚介類等の高次生態系や底生生態系を評価することができない。栄養塩や溶存酸素等の水質から低次-高次生態系を繋げたモデルも存在するが、多くは特定の生物種（主に水産有用種）に特化したものとなっており、生物多様性の評価を目的とした用途は限定される。特に、藻場や干潟等の評価については海外でも重要性が指摘されているものの、これら「場の保全・再生」が生態系の構造や機能、ならびにその位置や規模が沿岸域全体の水質や生物多様性・生産性に及ぼす影響を評価する手法はいまだ確立されておらず、新瀬戸法と OECM・自然共生サイトの両政策に共通する重要課題として研究開発が求められている。

一方、モデルの評価・予測結果を分かりやすく「見える化」することの重要性も高まっている。周知のとおり、沿岸域環境・生態系には多様なステークホルダーが存在し、施策・取組みの効果や価値にトレードオフが発生するため、共通の理解を得るのは容易ではない。ステークホルダーの理解醸成と合意形成にモデルの予測情報を利用しようにも、沿岸環境・生態系モデルの精緻化が進み、複雑さが一層増したことにより、予測情報を利用する側の理解が追い付かない状況に陥っている。取組みの主体となる民間・市

民等が必要とするものを直観的に正しく理解でき、かつ合意形成にも活用できるヒューリスティックな「見える化」の開発が求められ、特に OECM・自然共生サイトの促進に向けては、民間企業を取り巻く自然関連財務情報開示タスクフォース（TNFD：Taskforce on Nature-related Financial Disclosure）等の国際的情報開示に資する「見える化」も必要とされている。

以上を背景・行政ニーズとして本戦略課題では、様々な施策や地域主体の取組み、気候変動等が沿岸域の水環境や生物多様性・生産性に及ぼす効果・影響をエンド・ツー・エンドで予測・評価可能な沿岸環境・生態系の統合評価モデルと、予測・評価結果をバーチャル空間で分かりやすく可視化する「見える化」機能を搭載した、デジタルツインプラットフォームを構築することを目的とする。海洋分野におけるデジタルツインの開発は G7 科学技術担当大臣会合でも最重要課題として取り上げられているが、沿岸域の環境・生態系に特化した開発事例はまだ無く、先駆的に水質改善が進んでいる日本の知見や技術の統合化を戦略的に進めることにより、先導的な成果を上げることが期待される。本研究の成果・アウトカムは、国や地方による沿岸環境・生態系の保全・再生の方策の検討はもとより、市民勉強会や海洋教育等への活用を強く意識し、ステークホルダーの理解醸成と合意形成を支援し、市民・民間等による保全・再生活動の促進に繋げるためのツール開発を目指す。なお、一般的にデジタルツインは現実空間と同期した高いリアルタイム性を有するものであるが、本研究の開発目的である環境・生態系の長期保全・再生の方策検討は必ずしもそれを必要としない。そのため、本研究ではリアルタイム性を追求しないが、それを組込むことによって海域の状況に即したきめ細かな順応的水質管理等への応用・展開も期待される。

（２）研究概要

本研究では、上記の目的達成に向けて、次の３つの目標を柱とした研究開発を進める。

【目標 1】 OECM をはじめ様々な施策・取組みを評価する統合評価モデルの開発

新規・既存の個別研究の成果・モデルを結集・統合し、水質・底質から低次-高次生態系に至るまでのエンド・ツー・エンドモデルを自然科学ベースで開発する。

【目標 2】 自然共生サイト・生物多様性保全の効果と広域波及の予測・評価手法の開発

今後重要性が高まる藻場・干潟等の「場の保全・再生」の効果・影響について、特に科学的知見が不足している「場と湾の繋がり」を対象に重点的な調査研究を行い、自然共生サイトやネイチャーポジティブの方策検討、気候変動の影響予測等への活用を意識した予測・評価モデルの開発を行う。

【目標 3】 ステークホルダーの理解醸成と合意形成を支援する「見える化」技術開発

沿岸域の管理者、市民勉強会、海洋教育など、デジタルツインの具体的な活用を意識し、また実際に実践してニーズを収集しつつ「見える化」技術の開発を行う。

現場に即したデジタルツインを開発するため、本研究では、播磨灘・大阪湾・阪南セ

ブンの海の森を共通のメインフィールドとした調査研究を実施する。この海域は栄養塩類管理のトレードオフ問題（毎年のように湾奥で赤潮・貧酸素水塊が発生し、栄養塩類の削減が求められる大阪湾と、ノリの色落ちが頻発化し、下水処理場の季別調整運転などの栄養塩類管理を進めている播磨灘）と沿岸 OECM を内包する海域である。阪南セブンの海の森は、昨年度の自然共生サイトの認定試行において、沿岸域で唯一の事例であり、セブニーレブン記念財団の支援のもと、NPO や漁業者、阪南市の住民等がアマモ場の保全・再生活動に取り組んでいる。その他にも、大阪湾生き物一斉調査、兵庫県の栄養塩類管理、阪南市の海洋教育など、市民参画型の活動・取組みが活発に行われており、これらの枠組みと連携した研究活動を実施する。一方、このメインフィールドにおける本研究の実施期間中の調査だけでは観測データや知見の不足が予想されるため、データ・情報が充実しているサブフィールドの研究も併せて実施・公募することで、既存成果の結集や不足データの補完を図る。

本研究では、研究課題を以下の4つのテーマに分割し、緊密に連携した現地調査の実施やデータ・モデル等の研究成果の結集により、上記3つの目標達成を目指す。目標1のデジタルツインの統合評価モデル開発と、目標3の「見える化」技術開発はテーマ1が担当する。テーマ2～4は、目標2の自然共生サイト、すなわち「場の保全・再生」の効果・影響評価モデルの開発に向けた基盤研究、特に知見が不足している「場と湾の繋がり」に着目した研究を連携して進める。テーマ2は、主に藻場・干潟等の自然共生サイトの生物・生態系の調査研究を中心とし、モデル開発に必要なデータベースを構築する。テーマ3と4はいずれも「場と湾の繋がり」に関するモデル開発研究であり、テーマ3は物理要因が支配的な循環・輸送網を、テーマ4は捕食-被食関係の生態系網を担当し、各研究成果をテーマ1のデジタルツインの統合評価モデルに提供する。また、自然共生サイト以外の沿岸域における施策や取組み、及びこれらの価値評価に関する研究はテーマ1で実施・公募し、ケーススタディによる実践を通じて、デジタルツインの支援ツールとしての実用性・汎用性を高める。

本研究で進める沿岸環境・生態系デジタルツインの開発は、先行する他の環境研究総合推進費（例えば、S-13「持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発」）等で得られた知見・技術についても可能な限り取り込み、個別研究成果の結集・統合を図る。また、社会科学的アプローチで生物多様性・生態系サービスの統合評価モデル開発を進めている先行戦略的研究開発課題 S-21「生物多様性と社会経済的要因の統合評価モデルの構築と社会適用に関する研究」と情報共有・相互補完を図り、沿岸環境・生態系に特化した自然科学的アプローチによる統合評価モデルの開発を目指す。

(3) 成果目標

1) 全体目標

次の3つの開発を行い、沿岸環境・生態系デジタルツインプラットフォームを構築する。

- OECMをはじめ様々な施策や取組みを評価しうる統合評価モデルを開発する。
- 自然共生サイト・生物多様性保全の効果と広域波及の評価手法を開発する。
- ステークホルダーの理解醸成と合意形成を支援する見える化技術を開発する。

2) 個別目標

- 水質総量削減の検討や藻場・干潟等の機能・サービス評価、気候変動の影響予測など既存の個別要素モデルや施策評価ツールを結集し、沿岸域の水環境及び生物多様性・生産性の統合評価モデルを開発する。
- 沿岸域における新たな施策・取組み（OECM・自然共生サイト、栄養塩類管理、生態系管理）について、現場調査に基づく評価手法・モデルの開発を行い、統合評価モデルに組み込む。
- 自然共生サイトをはじめ、沿岸域の藻場・干潟・塩性湿地等を対象として、生物多様性（種・生態系・遺伝子）の形成・維持機構、構成種の生態情報、遺伝的交流、食物網、物質循環、及びこれらの物理環境の変化に対する応答等に関する観測研究を実施するとともに、デジタルツイン・モデル開発に資する基盤データを集積する。
- 人工護岸周辺や強閉鎖性海域に特徴的に形成される生態系の構造と機能を調査し、湾スケールの物質の循環・輸送に及ぼす影響を定量化する。
- 地先から湾全体まで、様々なスケールで構成される流れ・物質循環・生態系の重層構造を表現する循環・輸送モデルを構築する。
- 自然共生サイト及び閉鎖性内湾における低次-高次生態系網（食物網）を、観測・実験・既往文献調査に基づき評価する。
- 数理モデル化と観測・実験・既往文献調査の知見を統合し、低次-高次生態系網（食物網）の環境変化に対する応答性を予測・評価する低次-高次生態系網モデルを開発する。
- 水質・底質や光量などの環境データ、及び植生や生息動物の種や個体数・バイオマスなどの生物データから実際の上空・水中画像に近いバーチャル海洋空間を作成する機械学習技術を開発する。
- デジタルツインの開発プロセスにおいて、実海域の施策・取組みのケーススタディや市民参画プラットフォームにおける再生ビジョンの構築等の活用実践を並行して行い、行政や市民・民間等からのニーズを幅広く収集して開発に反映する。

各テーマ及びサブテーマの成果目標の詳細については、「6. プロジェクトの研究テーマ構成及びサブテーマ構成」を参照のこと。

6. プロジェクトの研究テーマ構成及びサブテーマ構成

本プロジェクトは、以下の4つのテーマ構成により、適宜、テーマの下にサブテーマを設けて、各テーマ及びサブテーマ研究者が一体的に研究を実施する。課題代表者とテーマリーダーは、研究フレームワークの検討、アウトリーチ活動の推進、データの共有と相互検証など本プロジェクト全体に係る調整を行う。全体構成及びテーマ・サブテーマ間の関係については、概要資料も参照のこと。

URL : <https://www.erca.go.jp/suishinhi/koubo/>

研究提案の公募は、各テーマのサブテーマ(2)、(3)、(4)について行う。

(留意事項)

- ・サブテーマのうち、各テーマの「サブテーマ(1)」は、テーマリーダーが担当し、テーマの総括を行うため公募は行わない。
- ・テーマリーダーが担当する【総括】サブテーマ(1)は各テーマ全体の総括班として機能し、サブテーマ間の研究調整・進捗管理を担当する。
- ・研究提案は、【総括】サブテーマ及びその他の【公募】サブテーマと研究内容が連携するものであることが必要である。
- ・各サブテーマのリーダーは、研究プロジェクトリーダー及びテーマリーダーの指示のもとで、他テーマ、サブテーマの研究者と緊密に連携し、一つの研究プロジェクトを構成する研究活動として研究を実施する。
- ・サブテーマリーダーは、応募したサブテーマの内容及びヒアリングの審査過程での連絡・対応について、総括的な責任を持つ。

研究提案を行う申請者は、テーマリーダーに連絡をして提案内容(申請書、ヒアリング審査資料)についてテーマに沿った内容かどうか確認することができる。確認のあった提案内容(申請書、ヒアリング審査資料)について、テーマリーダーはプロジェクトリーダーと相談の上、申請者にコメントを回答する。テーマリーダーの連絡先は、以下までメールにて問い合わせること。

環境省水・大気環境局海洋環境課海域環境管理室 (mizu-hesasei@env. go. jp)

環境省自然環境局自然環境計画課 (shizen-keikaku@env. go. jp)

各テーマ及び公募するサブテーマの構成

<p>テーマ名 及び テーマリーダーの担当するサブテーマ</p>	<p>公募を行うサブテーマ</p>
<p>テーマ1：沿岸環境・生態系デジタルツインの開発と実践</p> <p>サブテーマ(1)：統合評価モデルと見える化技術の開発（年間3070万円以内（令和6年度）、年間5560万円以内（令和7～10年度））</p>	<p>サブテーマ(2)：栄養塩類管理・ボトムアップ効果の評価手法開発（年間550万円以内（令和6年度）、年間1100万円以内（令和7～10年度））</p> <p>サブテーマ(3)：生態系管理・トップダウン効果の評価手法開発（年間500万円以内（令和6年度）、年間1000万円以内（令和7～10年度））</p> <p>サブテーマ(4)：市民参画による再生ビジョンの構築と価値評価（年間600万円以内（令和6年度）、年間1200万円以内（令和7～10年度））</p>
<p>テーマ2：自然共生サイトの生物多様性と構成種の生態に関する観測研究・基盤データ集積</p> <p>サブテーマ(1)：干潟底生動物の多様性と食物網（年間830万円以内（令和6年度）、年間1460万円以内（令和7～10年度））</p>	<p>サブテーマ(2)：藻場の生息場創出・提供機能（年間550万円以内（令和6年度）、年間1250万円以内（令和7～10年度））</p> <p>サブテーマ(3)：干潟・藻場等生態系間の遺伝的連結性（年間500万円以内（令和6年度）、年間1150万円以内（令和7～10年度））</p>
<p>テーマ3：自然・人工サイトとの相互作用を考慮した沿岸域の物質循環・輸送モデルの開発</p> <p>サブテーマ(1)：サイト～湾の相互作用や外力の影響を評価しうる流れ～水質・生態系モデルの構築（年間850万円以内（令和6年度）、年間1820万円以内（令和7～10年度））</p>	<p>サブテーマ(2)：自然共生サイトにおける生態系構造・物質循環およびそれらへの物理環境の影響（年間425万円以内（令和6年度）、年間910万円以内（令和7～10年度））</p> <p>サブテーマ(3)：強閉鎖性海域・護岸における生態系の構造と機能の把握および湾スケールの物質循環への寄与（年間425万円以内（令和6年度）、年間</p>

	910万円以内（令和7～10年度）
テーマ4：自然共生サイト・内湾における低次-高次生態系網モデルの開発	サブテーマ(2)：自然共生サイトにおける生態系網の観測・実験による評価（年間500万円以内（令和6年度）、年間1150万円以内（令和7～10年度））
サブテーマ(1)：低次-高次生態系網の数理モデル化（年間700万円以内（令和6年度）、年間1340万円以内（令和7～10年度））	サブテーマ(3)：閉鎖性内湾における生態系網の観測・実験による評価（年間500万円以内（令和6年度）、年間1150万円以内（令和7～10年度））

(1) テーマ1：沿岸環境・生態系デジタルツインの開発と実践

テーマリーダー：東博紀（国立環境研究所地域環境保全領域海域環境研究室 主幹 研究員）

① 成果目標

様々な施策・取組みの効果や気候変動の影響等をエンド・ツー・エンドで予測・評価する統合評価モデルと、予測・評価結果をバーチャル空間上で分かりやすく可視化する「見える化」機能を搭載した沿岸環境・生態系デジタルツインを開発する。開発プロセスにおいて、実海域の施策・取組みのケーススタディや市民参画プラットフォームでの活用実践を並行して行い、行政や市民・民間等からのニーズを幅広く収集して開発に反映することで、多様なステークホルダーの理解醸成と合意形成を支援するデジタルツインプラットフォームを構築する。

② 研究概要

水質総量削減の検討や藻場・干潟等の機能・サービス評価、気候変動の影響予測など既存の個別要素モデルや施策評価ツールを結集し、沿岸域の水環境及び生物多様性・生産性の統合評価モデルを開発する。加えて、近年の新たな施策・取組みである栄養塩類管理と生態系管理について現場調査に基づく評価手法・モデル開発を行い、テーマ2～4のOECM・自然共生サイトの評価モデルとともに、統合評価モデルに組み込む。海域の特性や施策・取組み等の用途に応じてユーザーがモデル選択可能なプラットフォームを構築する。

予測・評価結果を分かりやすく可視化する「見える化」技術の開発では、市民・民間等が沿岸環境・生態系の変化を直感的・視覚的に理解することを支援する3次元バーチャル海洋空間を作成する。そのため、水質・底質や光量などの環境データ、及び

植生や生息動物の種や個体数・バイオマスなどの生物データを収集し、これらのデータから実際の上空・水中画像に変換する機械学習技術を開発する。

以上の開発はアジャイル型で進め、開発プロセスにおいて実海域の施策・取組みのケーススタディや市民勉強会での活用実践を適宜行い、デジタルツインの適用性や有効性等をその都度確認する。それと同時に、市民・民間等からのニーズを幅広く収集して開発に反映する。これらを繰り返し実施することで、多様なステークホルダーの参画による公開性と透明性を有したデジタルツインの開発を目指す。

③ 【総括】サブテーマ(1)：統合評価モデルと見える化技術の開発

沿岸域の流動・水質・底質、低次-高次生態系、藻場・干潟、養殖場、人工構造物、陸域からの流出など既存の個別要素モデルを結合し、沿岸域の水・物質循環及び低次-高次生態系網の統合評価モデルを自然科学ベースで開発する。アジャイル型で開発を進め、初年度より既存モデルの収集・結合に着手し、3年度目までにプロトタイプの構築、その後はサブテーマ(2)(3)の栄養塩類管理と生態系管理、及びテーマ2～4の「場の保全・再生」「場と湾の繋がり」の研究成果・モデルを随時取り込み、最終年度に完成を目指す。さらに、予測・評価結果の「見える化」として、沿岸環境・生態系の変化を視覚的・直感的に理解できるバーチャル海洋空間を構築する。リモートセンシングとは逆の発想で、各種環境・生物データから現実空間に近い上空・水中画像を創り出す機械学習技術を開発し、それに必要な現地観測や画像データの収集を行う。また、サブテーマ(4)と共同して市民・民間等が「見たいもの」のニーズを収集し、開発に反映する。

④ 【公募】サブテーマ

以下のサブテーマ(2)、(3)、(4)について研究を公募する。

【公募】サブテーマ(2)：栄養塩類管理・ボトムアップ効果の評価手法開発

新たな施策・取組みとして瀬戸内海等で実施されている栄養塩類管理を対象としたデジタルツインのケーススタディ研究を行う。具体的には、生物多様性・生産性への効果や周辺環境への影響など、栄養塩類管理の評価に必要なノリやカキの養殖場等の場の機能や生態系について調査研究を実施するとともに、それに基づくモデル開発研究を行い、サブテーマ(1)の統合評価モデルに提供する。また、デジタルツインやその要素モデル、独自開発モデル等を用いて、関係自治体の実施・検討事例に基づく栄養塩類管理の効果・影響評価を行い、栄養塩類管理の実効性やその限界、沿岸環境・生態系全体へのボトムアップ効果等に関する科学的知見を集積する。さらに、市民参画のもと、水質・底質保全と生物生産性の確保が両立・調和する栄養塩類管理の具体的方策やその価値等を議論するとともに、デジタルツインの課題やニーズを収集してサブテーマ(1)に提供する。

【公募】サブテーマ(3)：生態系管理・トップダウン効果の評価手法開発

高次捕食者から藻場・干潟生態系を把握してその保全・再生を目指し、沿岸生態系の健全化を図る新たな施策・取組みを対象としたデジタルツインのケーススタディ研究を行う。具体的には、瀬戸内海等を対象として、藻場・干潟生態系の高次捕食者・キーストーン種を特定するとともに、その行動・回遊・移動範囲等の生態特性や捕食-被食関係に関する調査研究を行う。また、デジタルツインやその要素モデル、独自開発モデル等を用いて生態系網の解析を行い、他の海域の知見も活用して、高次捕食者が沿岸環境・生態系に及ぼすトップダウン効果に関する科学的知見を集積する。さらに、漁業関係者を含めた市民参画のもと、食物網を介した生態系管理の具体的方策やその価値等を議論するとともに、デジタルツインの課題やニーズを収集してサブテーマ(1)に提供する。

【公募】サブテーマ(4)：市民参画による再生ビジョンの構築と価値評価

沿岸環境・生態系の保全・再生について多様なステークホルダーが意見交換を行う市民参画プラットフォームにおいて、合意形成支援ツールとしてのデジタルツインの活用実践研究を行う。具体的には、漁業者や民間企業等を含む市民参画プラットフォームを構築もしくは既存の枠組みを活用して、市民参画のもと、沿岸環境・生態系の再生ビジョンを検討・構築するとともに、その再生ビジョン実現に向けた施策・取組みについて影響連関図の作成と価値評価を行う。再生ビジョンの構築及び影響連関図の作成にあたっては、サブテーマ(1)のデジタルツインを活用し、統合評価モデルの予測結果より得られる多角的な情報を「見える化」技術によって分かりやすく市民に提供するとともに、市民が見たいものについてのニーズを収集してサブテーマ(1)に提供する。価値評価については、単に事業実施の有無を確認するのみでなく、沿岸域の特性を踏まえ、環境・生態系の現状と予測された施策・取組み実施後の変化に基づいて包括的に評価する手法を開発する。

(2) テーマ2：自然共生サイトの生物多様性と構成種の生態に関する観測研究・基盤データ集積

テーマリーダー：金谷弦(国立環境研究所地域環境保全領域海域環境研究室 主幹研究員)

① 成果目標

自然共生サイトを含む沿岸域の干潟、藻場、塩性湿地等多様な生息場における生物多様性の形成・維持機構、主要な構成種の生態情報、生息場としての機能、遺伝的集団構造解析によって示される生息場間のつながり(連結性)に関する知見を、現地での観測研究や文献調査に基づいて収集し、デジタルツイン開発に資する基盤データを集積する。

② 研究概要

3つのサブテーマにおいて、生物多様性の3つの柱である種の多様性、生態系の多様性、遺伝的多様性にフォーカスした研究を行い、デジタルツイン開発に資する基盤データを集積する。サブテーマ(1)では内湾域に残存する干潟・塩性湿地群を主な対象とし、そこに生息する底生動物の種多様性形成・維持機構、代表的な生物種の生態情報、特に底生動物の捕食-被食関係(食物網)に着目した観測研究を実施し、得られた知見をテーマ4の生態系網モデルに提供する。また、テーマ総括として、サブテーマ(1)~(3)で得られた知見を統合し、テーマ1の沿岸環境・生態系デジタルツイン開発に資する基盤データを整備する。サブテーマ(2)では内湾浅海域の生息場として重要な藻場(アマモ場)を主な対象とし、その生息場創出機能と生物多様性の関係に着目した観測研究を行い、テーマ4の生態系網モデルに提供する。サブテーマ(3)では生物の遺伝的多様性を指標とし、幼生や種子を介した海域での遺伝的交流の頻度について観測研究を行い、湾内の海流等の物理環境が駆動する生態系ネットワーク(遺伝的連結性)の「つながり」と「断絶(障壁)」に関する基盤データを集積し、テーマ3の循環・輸送網モデルに提供する。

③ 【総括】サブテーマ(1)：干潟底生動物の多様性と食物網

本サブテーマでは、内湾域に残存する干潟及び塩性湿地群における生物多様性と群集構造の空間分布を定量的に把握するため、統一的手法による底生動物の現地調査を実施し、生物多様性の形成・維持過程に関する知見を得る。次に、干潟及び隣接海域での捕食-被食関係(底生食物網構造)に着目して、安定同位体比や胃内容分析等の手法による推定を行うとともに、懸濁物食者、堆積物食者といったそれぞれの機能群(functional group)を代表する構成種について個体群動態や現存量に関する観測研究を行い、テーマ4の生態系網モデルに提供する。本サブテーマで得られる種の多様性及び食物網に関する知見と、サブテーマ(2)で得られる生息場創出・提供機能及びサブテーマ(3)で得られる遺伝的連結性に関する知見を統合し、テーマ1の沿岸環境・生態系デジタルツイン開発に資する基盤データを整備する。

④ 【公募】サブテーマ

以下のサブテーマ(2)と(3)について研究を公募する。

【公募】サブテーマ(2)：藻場の生息場創出・提供機能

本サブテーマでは、内湾域における藻場について、特にアマモ場を主な対象として近年の分布状況の地図化をパッチスケールから湾・灘のスケールで行なう。分布データを用いた解析及び収集した文献情報によって、対象海域でのアマモの生育適地に関する知見を得て、対応する広域の環境情報を他のテーマとの連携による推定等も含めて収集す

る。得られた知見と環境情報とを用いて、藻場の分布適地推定について自然共生サイト近傍を主な対象地域として進め、テーマ3と連携して生息適地評価手法の検討を進める。次に、藻場自体とそこに付随して成立する魚類及び底生無脊椎動物を含む生物群集の構造や機能について、野外でのサンプリング調査や環境DNA調査などを用いてその特徴を把握する。その結果のうち、特に藻場が有する「生息場の創出・提供機能」についての知見を定量的に集積し、テーマ4の生態系網モデルに提供する。

【公募】サブテーマ(3)：干潟・藻場等生態系間の遺伝的連結性

本サブテーマでは、閉鎖的な内湾域を対象とし、底生動物や海草・海藻類の遺伝的多様性における空間的変化を一塩基多型 (SNP ; Single Nucleotide Polymorphism) やマイクロサテライト (MS) といったDNAマーカーの技術を用いて定量的に計測し、内湾域に点在する干潟や藻場等に生息する生物個体群の健全性を生息場間で比較する。次に、メタ個体群ネットワークの観点から、内湾域に残存した生息場間の遺伝的交流頻度について、複数の動植物種を対象とした遺伝的集団構造解析に基づいた推定を行い、湾内の海流等の物理環境が駆動する生息場間の「つながり (遺伝的連結性)」と「断絶・障壁 (遺伝的分断)」に関する知見を集積し、テーマ3の循環・輸送網モデルに提供する。

(3) テーマ3：自然・人工サイトとの相互作用を考慮した沿岸域の物質循環・輸送モデルの開発

テーマリーダー：入江政安(大阪大学大学院工学研究科 教授)

① 成果目標

デジタルツインによる再現・予測性能の向上に寄与するため、湾スケールから地先サイトスケールまで、様々なスケールで重層的に存在する物質循環・輸送の空間構造を現地調査に基づいてモデル化する。サイト内の水質・生物調査から得られるサイトスケールの物質循環を定量することにより、それらの湾スケールの循環・輸送への寄与と湾スケールの環境条件の変化がサイト生態系に及ぼす影響について定量可能なモデルを構築する。

② 研究概要

テーマ3では、特に空間構造や物理環境の視点から、大阪湾や播磨灘において現地調査を実施し必要な情報を得た上で、流れ-水質・生態系の統合モデルを構築する。サブテーマ(2)では自然共生サイトにおいて、テーマ2で深掘りされる生態系調査と連携し、複数のサイトで主要な生物相・資源量調査を実施し、同時に水質・底質・物理環境を調査することでその相互関係に関する知見を得る。また、日本の内湾では、多くの海岸構

造物が存在しているが、人工構造物周辺の生物相や資源量については十分な知見がないことから、サブテーマ(3)では、このような人工サイトの生態系調査を実施し、湾スケール物質循環への作用・影響について知見の蓄積を進める。物理環境の異なる複数のサイトにおいて、生物相と資源量を中心に調査し、生態系構造と機能を可視化する。サブテーマ(1)では、独自の現地調査に加え、サブテーマ(2)、(3)で得られた知見を活用して、生物多様性確保に向けたサイトでの取組みが湾スケールに及ぼす影響や気候変動に代表される物理環境の変化がサイトに及ぼす影響の評価に向けて、サイトスケールのストックとフローを表現しつつ、サイト内外の水質項目をはじめとする物質輸送を表現する流動-水質・生態系ネットワークのマルチスケールモデルを構築する。

③ 【総括】サブテーマ(1)：サイト～湾の相互作用や外力の影響を評価する流れ～水質・生態系モデルの構築

ネイチャーポジティブに向けた環境施策の方向性を確実なものにするためには、自然共生サイトの湾スケールへの影響評価及び自然共生サイトが環境変化から受けるインパクトの評価を行えるモデルを構築することが肝要である。自然共生サイトを取り巻く物質循環にはサイト内スケール～近傍～湾スケールまで多様なスケールと非定常性を持ち、その重層構造を解くモデルの構築が必要である。サブテーマ(1)では、流動場・物質輸送の視点から、様々な空間スケールをもつ物質循環・生態系ネットワークモデルを構築し、OECMが沿岸域の循環・輸送網に及ぼす効果や気候変動の影響を評価する手法を提案する。具体的には、湾スケール、サイトスケールを統合して解析するマルチスケールモデルを構築し、サブテーマ(2)、(3)で得られるデータを用いて、藻場・干潟・護岸の生態系が湾灘スケールの物質循環に及ぼす影響の解析を進める。この際、必要に応じて物理環境・外力の影響を評価するための現地調査を追加実施する。また、テーマ2の遺伝子解析結果を用いて生態系空間ネットワークの解析を行う。最後に、物理場の視点から、外力の変化や湾スケール流動・物質循環の変化が生態系ネットワークや各サイトの生態環境に及ぼす影響を定量可能なモデルを構築し、テーマ1に提供する。

④ 【公募】サブテーマ

以下のサブテーマ(2)と(3)について研究を公募する。

【公募】サブテーマ(2)：自然共生サイトにおける生態系構造・物質循環およびそれらへの物理環境の影響

湾全体での様々なスケールでの物質循環と生態系ネットワークを評価するためには、藻場、干潟や塩性湿地といった沿岸域の多様な自然共生サイトにおいて水温や流れ等の物理環境を中心に、水質、底質、動植物といった物質循環と生態系の構造に着目した調査が必要である。湾内の複数サイトで統一的な環境調査をテーマ2と連携して実施する

ことで、物理環境と生態系構造の比較を行う。また、これらの生態系について場が成立する条件を整理する。さらに、過去に調査が実施されたサイトにおいて物質循環機能に関わるパラメータの変化やその機能の継続性について評価する。現地で得られた物理環境と物質循環について整理したデータをサブテーマ(1)で扱う流動場・物質輸送に資する沿岸域の循環・輸送モデルに提供する。

【公募】サブテーマ(3)：強閉鎖性海域・護岸における生態系の構造と機能の把握および湾スケールの物質循環への寄与

海岸構造物近傍に形成される生態系の構造と機能を可視化することを目的とする。過去の埋め立て事業等で浅場の多くが失われた海域では、人工島や運河、港湾などでの生物との共生が重要である。一方で、そのような場所での生態系の時空間変動特性については学術的な知見が十分ではなく、OECMの視点での生態系創出施策の「効率性」やネイチャーポジティブの視点での「効果」を議論するための基礎情報として、生態系の「構造」や「機能」を調査する。具体的には生態系の構造については、環境特性により選択した複数の評価地点における生物相とバイオマス量の変動特性を、機能については湾スケールの物質循環に対する人工サイトの作用を明らかにする。また、ネイチャーポジティブ実現の視点から、今後の環境変化に対応した生態系応答の評価に寄与する情報も必要であることから、水温上昇の影響を受けやすい停滞性水域における生態系変化について特に調査・解析を進める。

(4) テーマ4：自然共生サイト・内湾における低次-高次生態系網モデルの開発 テーマリーダー：相馬明郎(大阪公立大学大学院工学研究科 教授)

① 成果目標

テーマ1のデジタルツインの開発に向け、藻場・干潟など自然共生サイトの空間スケールならびに閉鎖性内湾の空間スケールにおける低次-高次生態系網(食物網)を表現する生態系モデルを開発し、環境変化に対する生態系網の応答を評価する。

② 研究概要

テーマ4は、一次生産者(低次生物)から高次捕食者(高次生物)にわたる捕食-被食関係から成る低次-高次生態系網(食物網)を、数理モデルならびに観測・実験の両見地から探求するよう、3つのサブテーマから構成される。サブテーマ(1)では、食物網を構成する生物機能群の生態と捕食-被食関係を数理モデル化する。サブテーマ(2)では、自然共生サイトに生息する生物、食物網、生息環境を観測・実験により評価する。サブテーマ(3)では、閉鎖性内湾に生息する生物・食物網・生息環境を観測・実験によ

り評価する。また、サブテーマ(1)はテーマ統括として、全サブテーマの知見を集約・統合することで、実海域から得られた生物・環境データを根拠とする生態学的に妥当性ある低次-高次生態系網モデルを開発し、自然共生サイトならびに閉鎖性内湾における、環境変化に対する生態系網の応答を解析する。

③ 【総括】サブテーマ(1)：低次-高次生態系網の数理モデル化

本サブテーマでは、数理生態学に基づき、低次-高次生態系網（食物網）を数理モデル化する。本数理モデル化では、生態系網を構成する機能群（主要生物）の生理生態・食性・外部環境に対する応答性を数理モデル化する。また、各機能群間の食物網（パス）についても数理モデル化する。さらに、サブテーマ(2)、(3)及びテーマ2で得られた生態学的知見、生物・環境データの知見を統合し、実海域（自然共生サイトならびに閉鎖性内湾）に適用した低次-高次生態系網モデルを開発することを試みる。また、開発するモデルは、生態系動態を解析でき、水温、栄養塩、海洋生物の死滅に対する応答を予測・評価可能な構造とする。

開発したモデルを活用し、現状の生態系網のフローと、環境変化に対する生態系網の応答性能を定量的に予測・評価する。

④ 【公募】サブテーマ

以下のサブテーマ(2)と(3)について研究を公募する。

【公募】サブテーマ(2)：自然共生サイトにおける生態系網の観測・実験による評価

本サブテーマでは、観測・実験・既往文献調査から、自然共生サイト（干潟・藻場の空間スケール）の低次-高次生態系網（食物網）を推定し、食物網を構成する主要生物、これら主要生物の生理生態・食性・外部環境特性を評価する。干潟・藻場等の生物共生サイトにおける生物・環境調査により、低次-高次栄養段階の生物群集の豊度と種組成の実態及び環境条件（海草の繁茂等の生物環境を含む）との関係を明らかにする。また、主要生物群のバイオマス、食性、生活史特性を野外調査及び文献調査から推定し、干潟浅海域生態系の食物網を推定する。以上を通じて干潟・藻場域の生態系機能を明らかにするとともに、その機能の沖合域への寄与についても漁獲対象種の生活史や栄養フローをもとに推定する。以上を通じて、干潟浅海域の低次-高次生態系網の構造（生態系網を構成する主要生物とパス）、外部環境に対する生態系網の応答性の知見・仮説をとりまとめ、サブテーマ(1)と共有する。

【公募】サブテーマ(3)：閉鎖性内湾における生態系網の観測・実験による評価

本サブテーマでは、観測・実験・既往文献調査から、閉鎖性内湾における低次-高次生態系網（食物網）を推定し、食物網を構成する主要生物、これら主要生物の生理生態・食性・外部環境特性を評価する。閉鎖性内湾における生物・環境調査及び文献調査により、低次-高次栄養段階の生物群集の豊度と種組成の長期変化を明らかにする。また、生態系を構成する生物の食性解析を通して被食-捕食関係を調査し、湾内生態系の食物網を推定する。さらに、主要種の生活史特性及び個体群動態を野外調査で明らかにし、湾内の環境因子の経年変化を解析して個体群動態に寄与する生活史段階と影響因子の推定を行う。加えて、これにより得られた影響機序の仮説を室内実験により検証する。以上を通じて、内湾の低次-高次生態系網の構造（生態系網を構成する主要生物とパス）、外部環境に対する生態系網の応答性の知見・仮説をとりまとめ、サブテーマ(1)と共有する。