

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

Digital Twin Platform for Estuarine and Coastal Ecosystem Management

プロジェクトリーダー・テーマ1リーダー候補	国立環境研究所	東 博紀
テーマ2リーダー候補	国立環境研究所	金谷 弦
テーマ3リーダー候補	大阪大学	入江政安
テーマ4リーダー候補	大阪公立大学	相馬明郎

研究背景：日本の沿岸域の環境問題と保全・再生への施策・取組み

沿岸域の再生は長年未解決の環境問題

総量削減等によって日本の沿岸域の水質は改善傾向、世界に先駆けて富栄養化を克服しつつあるが、

◆ 生物多様性・生産性は依然として低迷

ノリの色落ちの頻発、有用魚類・二枚貝の急減など、かつての豊かな海は戻らず

◆ 気候変動の影響も顕在化⇒相次ぐ生態系の変調

水温上昇、豪雨出水の頻発化、赤潮、貧酸素化、藻場の磯焼け、食害など、海域によって様々な影響

豊かな海に向け、地域・海域の実情を踏まえた複数の施策・取組みを総合的に推進 ⇒ 里海

➤ 海域ごとのきめ細かな水質管理

総量削減から栄養塩類管理へ (2021年瀬戸法改正)

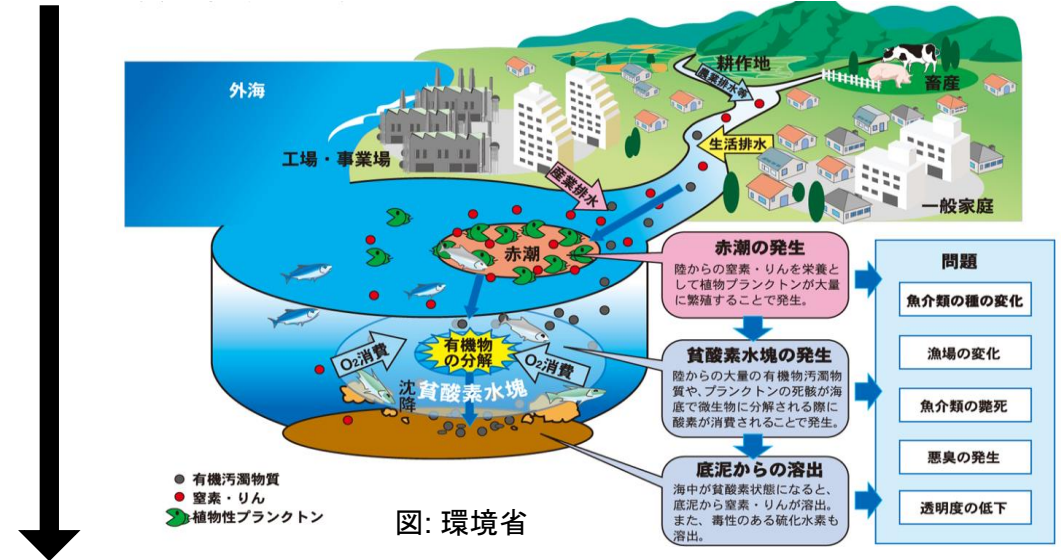
➤ 藻場・干潟の再生など地域の取組みを促進

自然海浜保全地区の拡充 (2021年瀬戸法改正)

➤ 気候変動の影響を踏まえた対応

水質改善の時代から生物多様性・生産性の保全・再生・持続的確保の時代へ

1970年代～ 水質汚濁防止法 水質総量規制制度



2021年 瀬戸内海環境保全特別措置法の一部改正

栄養塩類管理制度の創設

藻場・干潟等の保全・再生に向けた地域の取組み促進 など



写真：環境省

研究背景：生物多様性の国際的枠組 30by30とOECM

◆ 生物多様性の損失は気候変動に次ぐ危機

世界GDPの半分以上(44兆米ドル)は自然に依存(WEF)
ネイチャーポジティブに向けた行動変容は急務

◆ 30by30 ポスト2020 (昆明・モントリオール) 生物多様性枠組

陸と海のエリアベースで30%以上を保護する、2030年までの新たな世界目標

◆ OECM (Other Effective Area-based Conservation Measures)

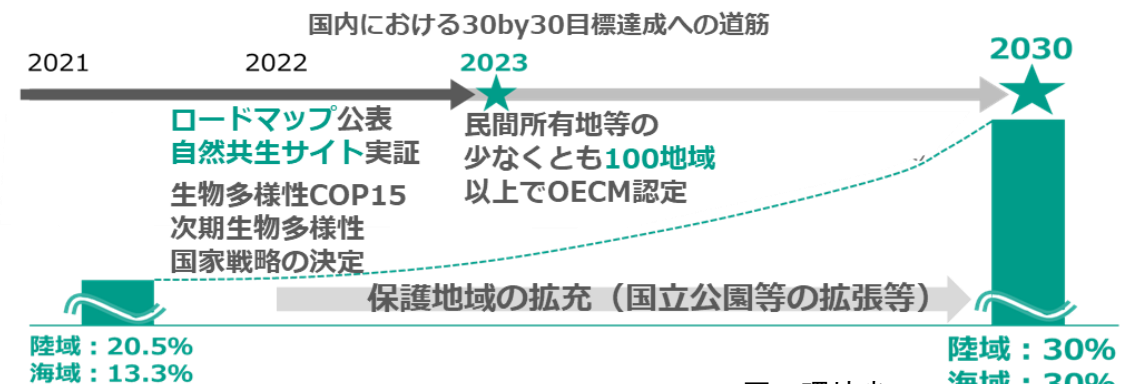
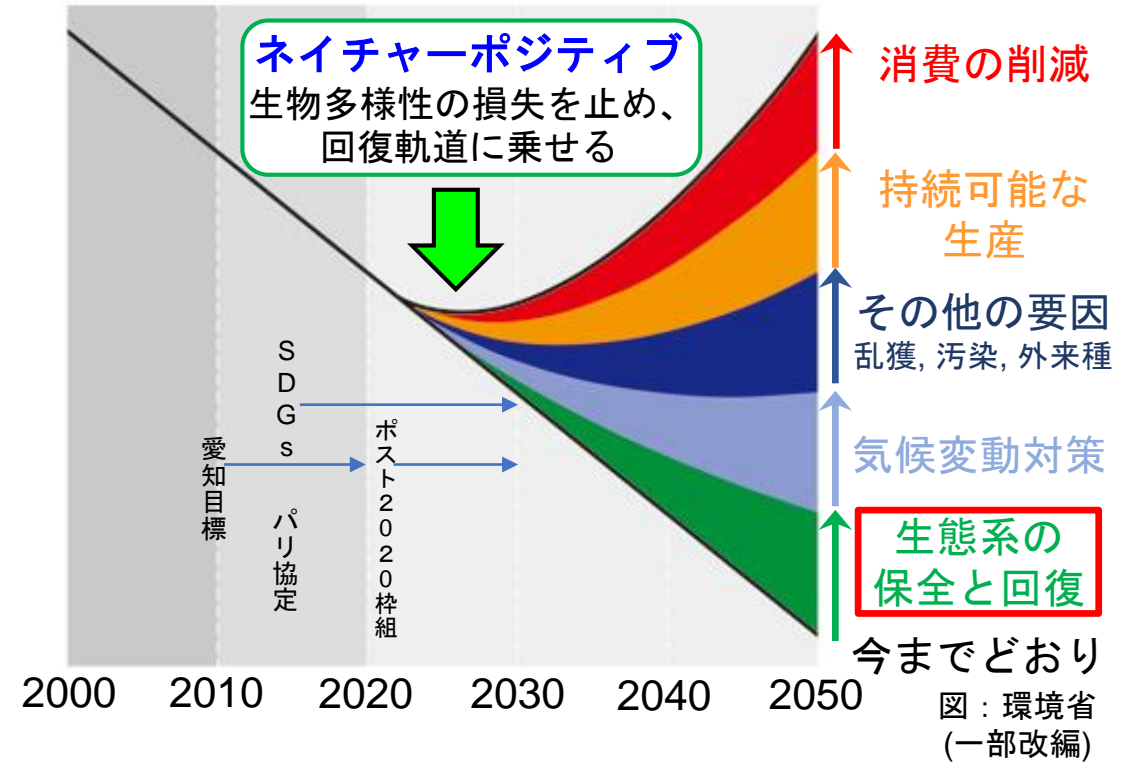
保護区以外で、本来の目的に関わらず、様々な取組みの結果、生物多様性保全に資する区域
 日本は**主にOECMにより30by30の達成を目指す**方針

◆ 日本版OECM: 自然共生サイト

「**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認定(2023~)

⇒ 沿岸域の認定事例 (藻場・干潟の保全・再生) は1件のみ
豊かな海・ネイチャーポジティブに向けても更なる促進が必要

生物多様性の損失を減らし、回復させる行動



研究の必要性(行政ニーズ): 沿岸環境・生態系の統合評価モデルと見える化

沿岸環境・生態系の統合評価モデルの必要性

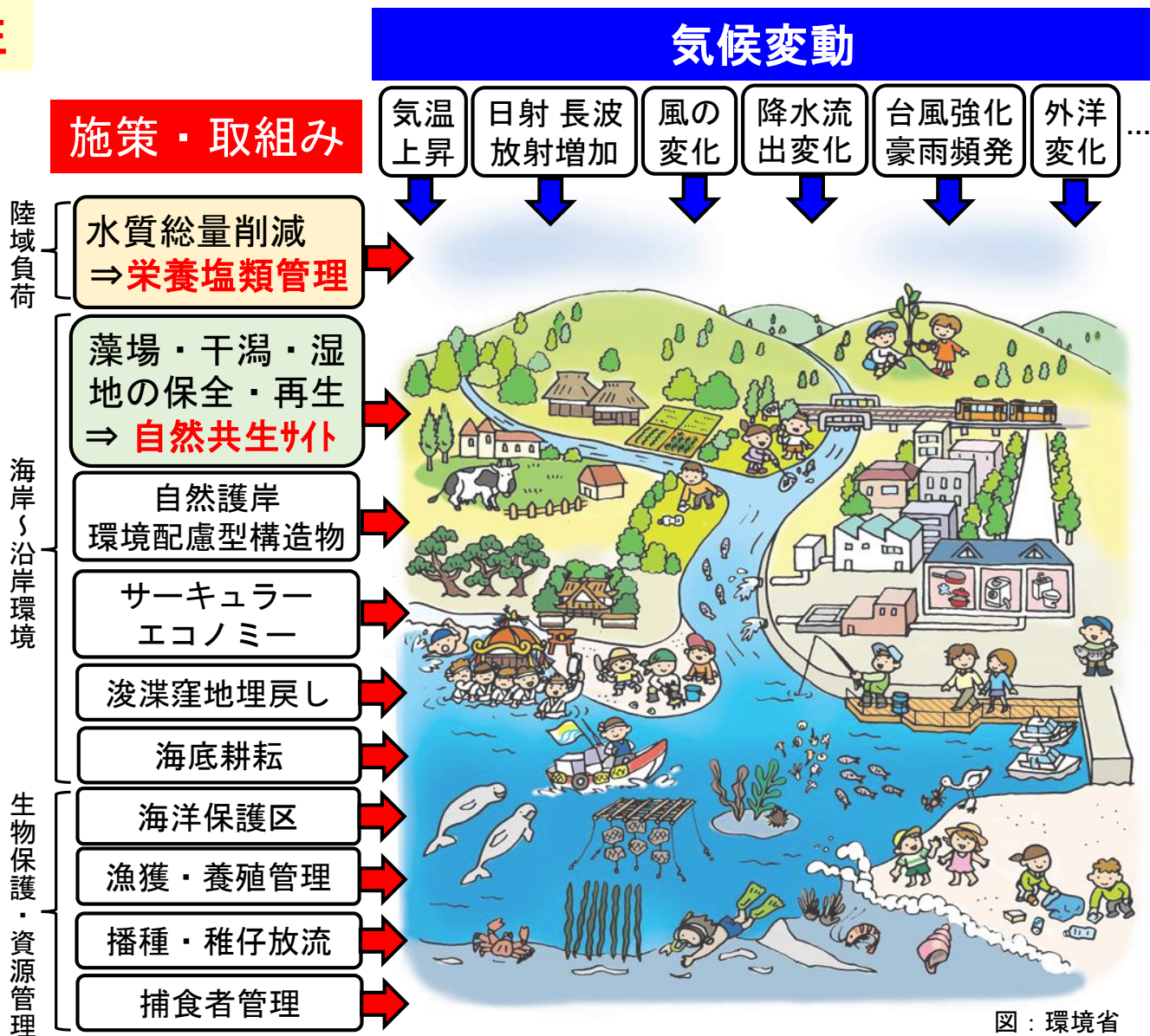
- ◆ 様々な施策や取組み、気候変動の影響等を統合的に評価可能な汎用的なモデル
- ◆ 藻場、干潟、湿地、養殖場、人工構造物等、多様な場の保全・再生・管理が沿岸域の生物多様性・生産性に及ぼす影響を評価可能なモデル

場の保全・再生が湾全体に及ぼす影響、低次から高次までの生物多様性を評価できるモデルは存在しない。

「見える化」の必要性

- ◆ 民間・市民等の取組み・OECMの促進に資する、保全・再生の効果や価値 (TNFDも見据えて) の見える化
- ◆ 多様なステークホルダーの価値観共有と合意形成の支援に資する、施策・取組みのシナジー/トレードオフの見える化

モデルの複雑さが増し、理解が追い付かない。見たいものを直観的に正しく理解できる見える化が必要。



図：環境省

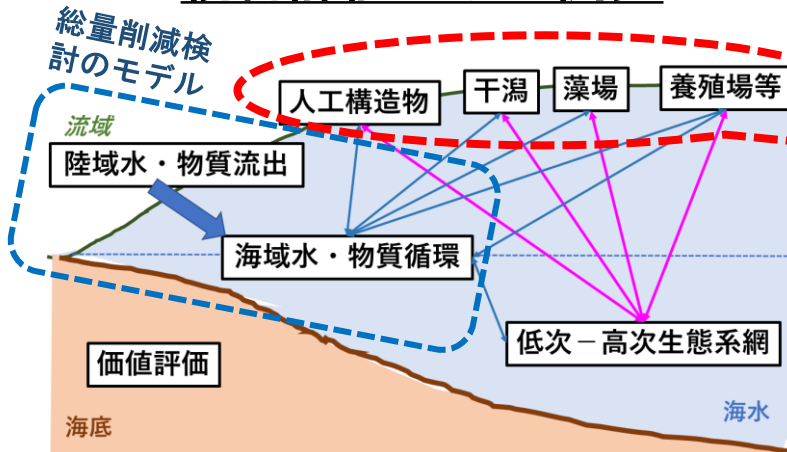
本プロジェクト研究の目的

研究目的：沿岸環境・生態系のデジタルツインプラットフォームの開発

- 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の開発
- 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の開発
- 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の開発

3つの目標

統合評価モデル開発

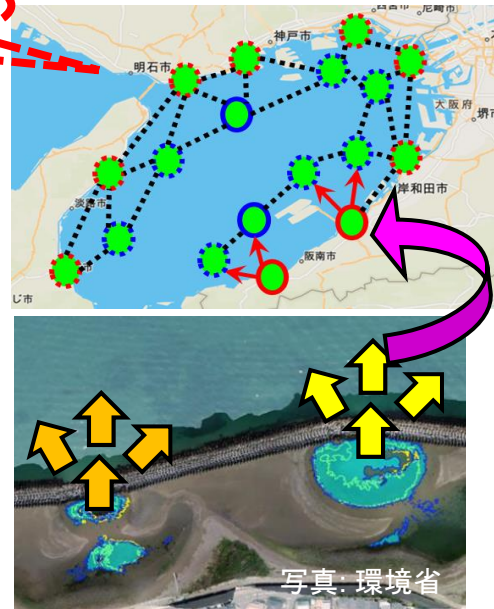


- ◆ 水質・底質-低次-高次生態系
自然科学ベースのE2Eモデル
- ◆ 個々のモデル・データを統合

⇒ 新規・既存の個別研究の統合化

場～湾の評価手法開発

⇒ 統合モデルに反映



見える化技術開発



デジタルツインプラットフォーム

政府・自治体・民間等の管理者



市民参画プラットフォーム



海洋教育

メインフィールド：播磨灘・大阪湾・阪南セブンの海の森



生態系タイプ【海浜・藻場】、生物多様性の価値【場・機能】
 4. 阪南セブンの海の森 (大阪府阪南市) ©環境省



統治責任者	管理責任者	NPO 保全 団体	企業 業	漁 業 者	行政	詳細	保護地域との重複	概要
港湾区域：大阪府 漁港区域：大阪府 共同漁業権区域：大阪府 （活動に当たっては）	港湾区域：大阪府 漁港区域：大阪府 共同漁業権区域：西 鳥取漁業協同組合、 尾崎漁業協同組合	○	○	○	○	セブンイレブン記念財団、セブンイレブン加盟店、NPO法人海辺づくり研究、会NPO法人大阪湾沿岸域環境創造研究センター、チーム☆ガサ、阪南市、尾崎漁協、西鳥取漁協、下狂漁協	共同漁業権区域	大阪府阪南市の鳥取地区に位置する、府内有数のアマモ場。 セブンイレブン記念財団は、大阪府阪南市のと2018年～2028年の10年間の協定を結び、西鳥取漁港西海岸を活動場所に、アマモの保護保全活動を行う「阪南セブンの海の森」プロジェクトに取り組んでいる。 これは、阪南市、地域の方々（産官学民）と共に「山と森」と「海の森」の二つの視点から「CO2削減」と「豊かな自然環境の再生」を進めている最初の「海の森」づくりである。

● 沿岸OECMと栄養塩類管理を包含する海域

大阪湾: 富栄養 播磨灘: 生態系劣化 阪南セブン: OECCM

● 市民・NPO・民間等の取組みや海洋教育が活発

大阪湾生き物一斉調査 兵庫県栄養塩類管理 阪南市海洋教育
 ⇒ これらの枠組みと連携した研究活動を展開

ここを共通フィールドとして調査研究を展開

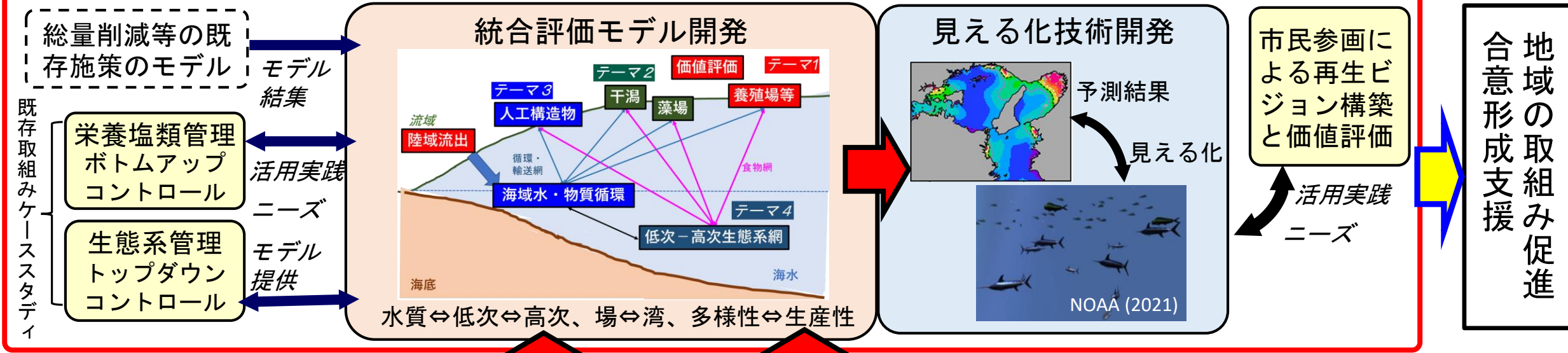
既存成果の結集、不足データの補完、モデルの汎用性の検証などのため、データ・情報が充実し、地域の取組みが盛んなサブフィールド研究も併せて実施（東京湾、有明海・八代海など）



沿岸域の自然共生サイトとして唯一の認定相当

本プロジェクト研究の構成

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3 自然共生サイト～湾の循環・輸送モデル

- 流動・物質循環・生態系NW
- 場および湾での繋がり
- 人工構造物・生態系の影響

基盤データをモデル開発に提供

評価手法技術
基盤データ提供

場(自然共生サイト等)～湾の研究

テーマ2 自然共生サイトの生物観測研究・基盤データ集積

- 干潟底生動物の多様性と食物網
- 藻場の生息場創出・提供機能
- 生態系間の遺伝的連結

テーマ4 自然共生サイト～湾の生態系モデル

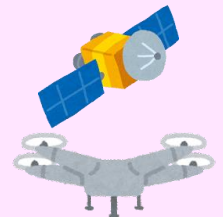
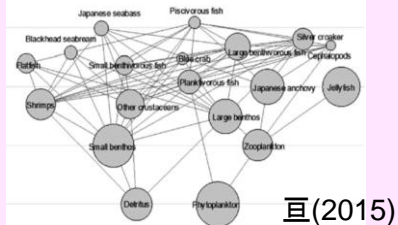
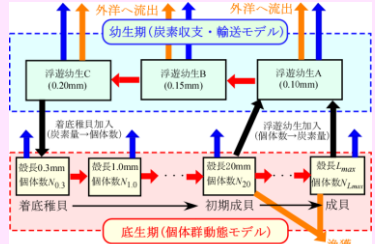
- 低次-高次生態系網(食物網)
- 場および湾での繋がり
- 主要生物の食性・生産性応答

基盤データをモデル開発に提供

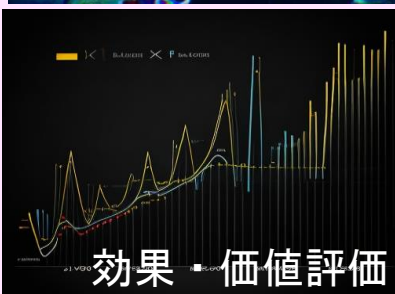
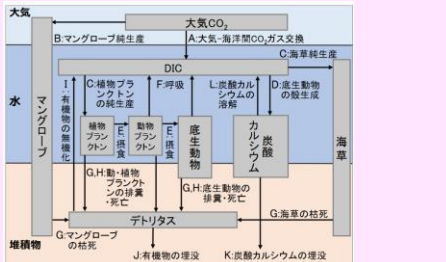
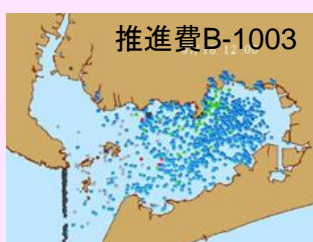
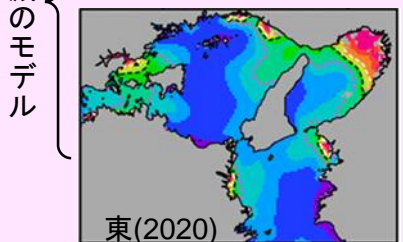
テーマ1 沿岸環境・生態系デジタルツインの開発と実践

テーマ目的 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・エンドで評価し、結果を分かりやすく「見える化」する沿岸環境・生態系デジタルツインを開発・実践する。

サブテーマ(1) 統合評価モデルと見える化技術の開発



現地画像+環境・生物観測

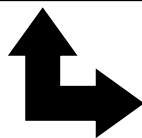


目標1: 統合評価モデルをアジャイル型で開発

すぐに既存モデルの統合に着手 ⇒ プロトタイプ (2~3年目)
⇒ プロジェクト成果の取り込み (3~4年目) ⇒ 最終版 (5年目)

目標2: 「予測データ⇒画像」の機械学習技術を開発

現実画像に近づけるために必要な環境・生物データを取得
⇒ 統合モデルに反映 (画像から情報取得するfeedbackも検討)



開発と並行して活用実践を行い
市民等からのニーズを収集

サブテーマ(2)
栄養塩類管理

サブテーマ(3)
生態系管理

サブテーマ(4)
再生ビジョン構築・価値評価

テーマ1の公募サブテーマ

テーマ1
サブテーマ(1)

統合評価モデルと見える化技術の開発

テーマ2～4
自然共生サイト～
湾の評価手法技術

統合

モデル
ニーズ

モデル
ニーズ

見える化
ニーズ

公募サブテーマ(2)

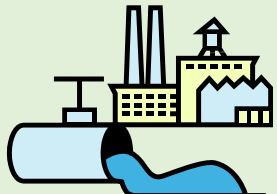
栄養塩類管理・ボトムアップ効果
の評価手法開発

目的:

デジタルツインのケーススタディ研究として、
栄養塩類管理により生物生産性の確保を図る
新たな施策・取組みの評価手法を開発する。

研究概要:

瀬戸内海等を対象として、市民参画のもと、
水質保全と生物生産性の確保が両立・調和する
栄養塩類管理の方策を検討するとともに、
ボトムアップ効果の評価する手法・モデルを
開発し、サブテーマ(1)に提供する。



栄養塩類管理
⇒ノリ養殖の例



ノリ養殖

写真: 環境省

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

目的:

デジタルツインのケーススタディ研究として、
生態系管理により沿岸生態系の健全化を図る
新たな施策・取組みの評価手法を開発する。

研究概要:

瀬戸内海等を対象として、市民参画のもと、
藻場・干潟生態系の保全・再生に向けた生態
系管理の方策を検討するとともに、トップダ
ウン効果の評価する手法・モデルを開発し、
サブテーマ(1)に提供する。



藻場の磯焼け等



キーストーン種

写真: 愛知県

上位捕食者

公募サブテーマ(4)

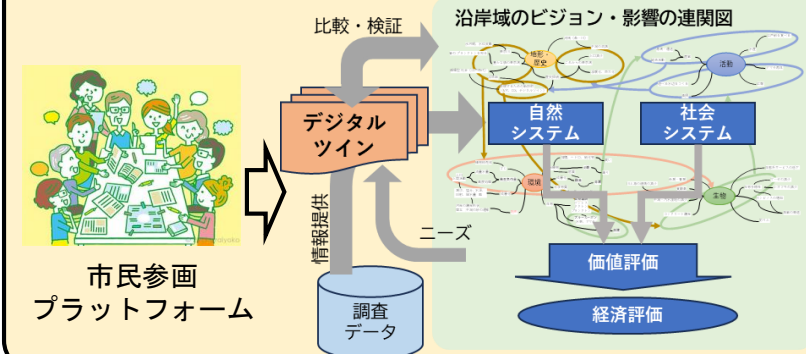
市民参画による再生ビジョン
の構築と価値評価

目的:

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
践を行い、ニーズをサブテーマ(1)に提供する。

研究概要:

サブテーマ(1)の統合評価モデルと見える化を
活用して、市民参画のもと沿岸域の再生ビ
ジョンの構築、施策・取組みの影響関連図の
作成等を実施し、それらの価値評価を行う。

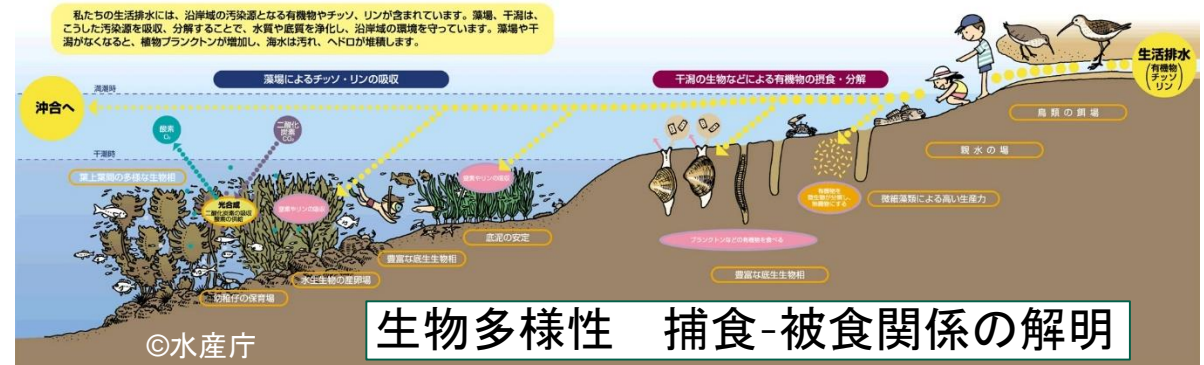


テーマ2: 自然共生サイトの生物多様性と構成種の生態に関する観測研究・基盤データ集積

目的: 自然共生サイトの生物多様性(種・生態系・遺伝子)形成・維持機構および構成種の生態情報に関する観測研究を実施し、デジタルツイン開発に資する基盤データを集積する。

(1) 干潟底生動物の多様性と食物網

沿岸域における生物多様性の変動要因を評価・予測するため、OECMサイトを含む内湾干潟群を対象として統一手法による観測研究を実施する。構成種の生態情報および種間の捕食-被食関係(底生食物網構造)に着目して基盤データを集積し、テーマ4の生態系網モデル開発に貢献する。



(2) 藻場の生息場創出・提供機能

主にアマモ場を対象として、生態系の多様性と種の多様性の関係、底生動物等への生息場創出・提供機能に関する観測研究を行い、テーマ4のモデル開発に資する基盤データを集積する。

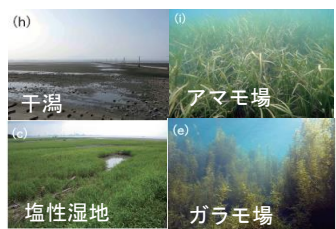
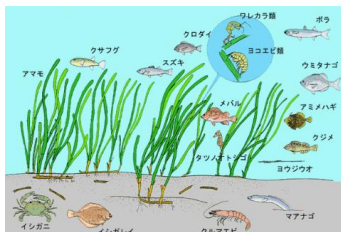


写真: 日本ベントス学会2020

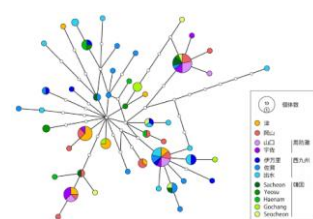


せとうちネット

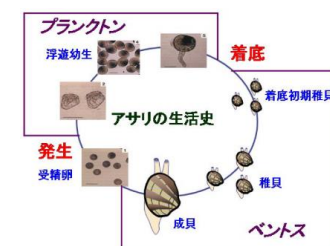


(3) 干潟・藻場等生態系間の遺伝的連結性

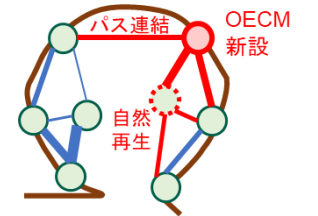
遺伝的多様性を指標とし、内湾域の干潟間での幼生分散を介した生態系NWの「つながり」と「障壁」に関する観測研究を実施し、テーマ3のモデル開発に資する基盤データを集積する。



巻き貝で見られる地域間での遺伝的変異 (Inoue et al. 2022)



浮遊幼生期を有する底生動物(瀬戸内水研2004)



内湾域の生態系NW保全と再生

テーマ2の公募サブテーマ

サブテーマ(1) 干潟底生動物の多様性と食物網

目的: 生物多様性の変動要因に関する知見を得るために、内湾干潟群で統一手法による観測研究を行う。また、構成種の生態情報および底生食物網に関する観測研究を実施し、モデル開発に資する基盤データを集積する(テーマ3・4連携)。

公募サブテーマ(2) 藻場の生息場創出・提供機能

相互連携

目的: 主にアマモ場を対象として生態系の多様性と種の多様性の関係、底生動物等への生息場創出・提供機能に関する観測研究を行い、テーマ4のモデル開発に貢献する。

研究概要

- (1) 内湾域のアマモ場についてパッチ～湾灘スケールの分布調査を行い、生育環境選好性に関する知見と併せて自然共生サイト近傍での分布拡大予測を行う。
- (2) アマモ場の生物群集(魚、底生動物など)について、野外調査や環境DNA等でその特徴を把握し、「生息場の創出・提供機能」に関する基盤データを集積する。
- (3) アマモによる生息場の改変効果(底質や水質)に関する知見を集積(テーマ3と連携)し、アマモ場の生態系機能に関する基盤データを集積する。

公募サブテーマ(3) 干潟・藻場等生態系間の遺伝的連結性

目的: 遺伝的多様性を指標とし、内湾域の干潟間での幼生分散を介した生態系NWの「つながり」と「障壁」に関する観測研究を行い、テーマ3のモデル開発に貢献する。

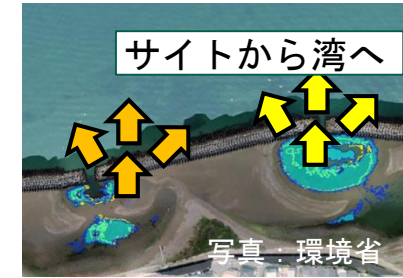
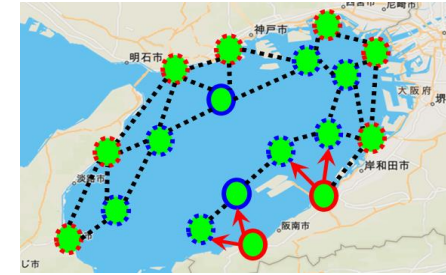
研究概要

- (1) 個体群の健全性に関する観測研究として、底生動植物の遺伝的多様性をマイクロサテライトマーカー等の集団遺伝学的手法を用いて干潟間で比較する。
- (2) 遺伝的交流頻度(生息場のつながりと分断)に関する観測研究として、複数の生物種を対象とした遺伝的集団構造解析を行う。
- (3) (1)(2)より、内湾域に生息する動植物の保全上重要な遺伝的な「つながり」と「障壁」に関する基盤データを集積し、テーマ3のモデル開発に貢献する。

生物多様性と構成種の生態に関する情報を集積しデジタルツイン開発に貢献

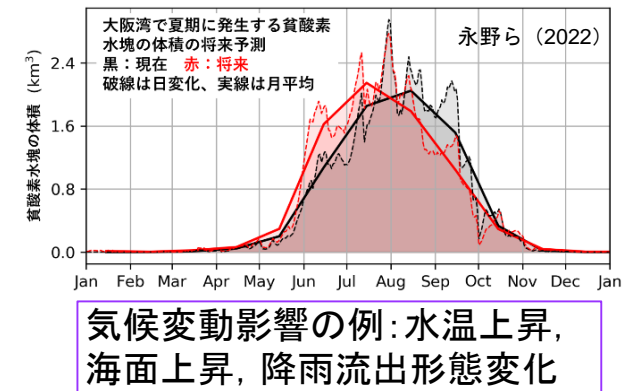
テーマ3 自然・人工サイトとの相互作用を考慮した沿岸域の物質循環・輸送モデルの開発

テーマ目的：地先から湾全体まで、様々なスケールで重層的に構成される水・物質循環と生態系ネットワークを評価するため、多様な自然・人工サイトの機能モデルと、それらを連結した沿岸域の循環・輸送モデルを力学ベースで開発する。



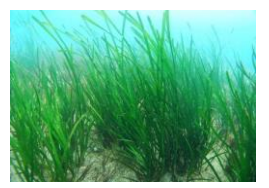
サブテーマ(1) サイト～湾の相互作用や外力の影響を評価しうる流れ～水質・生態系モデルの構築
目的：流動場・物質輸送の視点から、様々な空間スケールをもつ物質循環・生態系ネットワークモデルを構築し、OECMが沿岸域の循環・輸送網に及ぼす効果や気候変動の影響を評価する手法を提案する。

- サブテーマ(1) 研究概要**：
- (1) 湾スケール、サイトスケールを同時に解析するマルチスケールモデルの構築
 - (2) 藻場・干潟・護岸の生態系が湾スケールの物質循環に及ぼす影響の解析
 - (3) 遺伝子解析結果 (テーマ2) を用いた生態系空間ネットワーク (NW) の解明
 - (4) 外力・湾スケール流動・物質循環が生態系NWに及ぼす影響を、流動場の視点から解析 ⇒ 気候変動の影響は？ 回復軌道に乗るためには？



必要データの取得・提供

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



写真：岩井氏

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

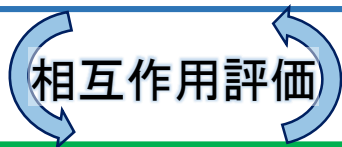


写真：関西エアポート・日下部氏

テーマ3の公募サブテーマ

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

目的：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。



相互作用評価

自然共生サイトデータ

湾スケール既存データ

人工サイトデータ



相互作用評価

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

目的：藻場や干潟等のサイト内における物理・化学・生物プロセスの統一調査を複数地点で実施し、湾スケールの循環・輸送網との作用に関する知見を結集・集積する。

(1) 物理環境とその変化の影響把握(ソース・シンク)
藻場、干潟の、主に物理環境(水温、光、波、流れ、底質など)の変化と生態系の応答に着目し、複数地点で統一的な環境調査を実施する。

(2) サイト⇄湾の相互作用の把握(フロー)
サイト内⇄外の物質フラックス・相互作用を解析し、湾スケールの循環・輸送網への影響を定量評価する。

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

目的：強閉鎖性海域・護岸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・輸送に及ぼす影響に関する知見を結集・集積する。

前提：湾奥港湾域など著しく閉鎖性が強い海域は、栄養塩が偏在し、一次生産が高いため、周辺への影響が無視できない。

これまで解明されていない人工護岸周辺の生態系の把握と物質の循環・輸送の定量化を行う。



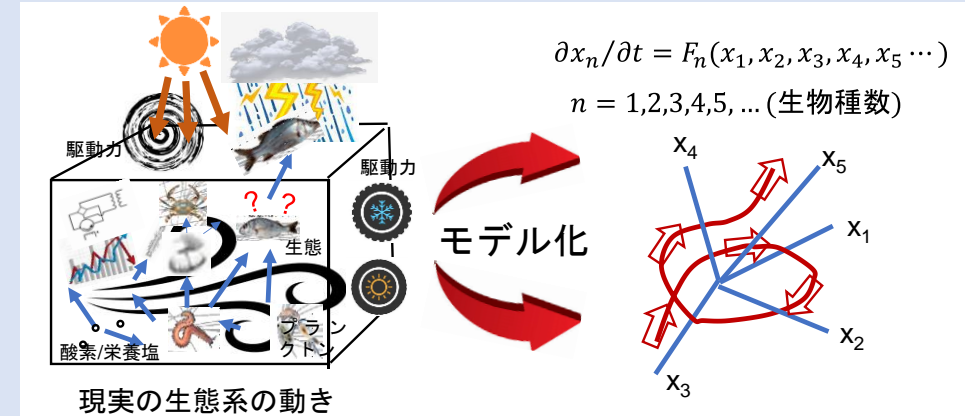
人工護岸の適切な活用・管理はOECMに繋がる可能性あり
(例：関西空港緩傾斜護岸＝大阪湾最大の藻場)

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

目的：一次生産者から高次捕食者にわたる**食物網**（低次-高次生態系網）の動態を解析する数理モデルを開発し、環境変化に対する低次-高次生態系網の**応答**を評価する。

サブテーマ(1) 低次-高次生態系網の数理モデル化

- 一次生産者から高次捕食者にわたる生物にて構成される**食物網**（低次-高次生態系網）と**主要生物の生態**を数理モデル化する。
- サブテーマ(2) (3) およびテーマ2から得られる**知見**と、数理モデル化技術を統合し、**実海域**に適用した**低次-高次生態系網モデル**を開発する。

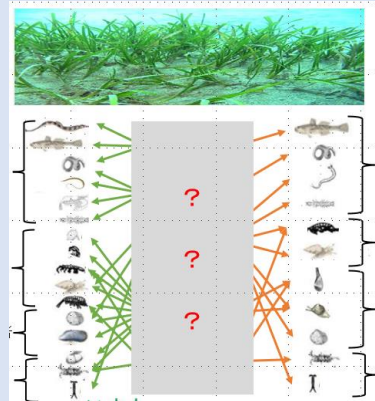


食物網・生物生態データの提供

食物網・生物生態データの提供

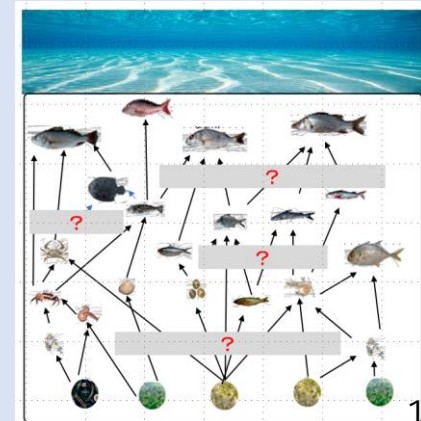
サブテーマ(2) 自然共生サイトにおける生態系網の観測・実験による評価

- 自然共生サイト**における低次-高次生態系網（**食物網**）を把握・推定する。
- 主要生物の生態**（**食性・生産性・生息環境など**）を把握・推定する。



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

- 閉鎖性内湾**における低次-高次生態系網（**食物網**）を把握・推定する。
- 主要生物の生態**（**食性・生産性・生息環境など**）を把握・推定する。



テーマ4の公募サブテーマ

サブテーマ(1) 低次-高次生態系網の数理モデル化

目的：一次生産者から高次捕食者にて構成される食物網の動態を解析する低次-高次生態系網モデルを開発する。

食物網ダイアグラムの共創

生物生態情報の共有

生態系応答の共有

食物網ダイアグラムの共創

生物生態情報の共有

生態系応答の共有

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

目的：干潟・藻場等の自然共生サイトでの低次-高次生態系網と主要生物の生態を推定・評価する(テーマ2連携)。

研究概要：

1. 干潟・藻場等生態系における食物網の仮説を作成する。
2. 主要生物の生物量と生態を、観測・実験・文献等より把握する。
3. 主要生物の生産性と生息環境の関係を観測・実験・文献等より把握する。
4. 観測結果とサブテーマ(1)のモデル計算結果の比較から、食物網の仮説の妥当性を検討し、必要に応じて新たな食物網に関わる生物生態を把握する。

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

目的：閉鎖性内湾域での低次-高次生態系網と主要生物の生態を推定・評価する(テーマ2連携)。

研究概要：

1. 閉鎖性内湾生態系における食物網の仮説を作成する。
2. 主要生物の生物量と生態を、観測・実験・文献等より把握する。
3. 主要生物の生産性と生息環境の関係を観測・実験・文献等より把握する。
4. 観測結果とサブテーマ(1)のモデル計算結果の比較から、食物網の仮説の妥当性を検討し、必要に応じて新たな食物網に関わる生物生態を把握する。

各テーマ及びサブテーマの構成

サブテーマ	サブテーマ名	令和6年度	令和7-10年度
テーマ1：沿岸環境・生態系デジタルツインの開発と実践【リーダー：東博紀（国立環境研究所）】			
(1)	統合評価モデルと見える化技術の開発	3070万円/年	5560万円/年
公募(2)	栄養塩類管理・ボトムアップ効果の評価手法開発	550万円/年	1100万円/年
公募(3)	生態系管理・トップダウン効果の評価手法開発	500万円/年	1000万円/年
公募(4)	市民参画による再生ビジョンの構築と価値評価	600万円/年	1200万円/年
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【リーダー：金谷弦（国立環境研究所）】			
(1)	干潟底生動物の多様性と食物網	830万円/年	1460万円/年
公募(2)	藻場の生息場創出・提供機能	550万円/年	1250万円/年
公募(3)	干潟・藻場等生態系間の遺伝的連結性	500万円/年	1150万円/年
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【リーダー：入江政安（大阪大学）】			
(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	850万円/年	1820万円/年
公募(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	425万円/年	910万円/年
公募(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	425万円/年	910万円/年
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【リーダー：相馬明郎（大阪公立大学）】			
(1)	低次-高次生態系網の数理モデル化	700万円/年	1340万円/年
公募(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	500万円/年	1150万円/年
公募(3)	閉鎖性内湾における生態系網の観測・実験による評価	500万円/年	1150万円/年

※ 各テーマのサブテーマ(1)はテーマリーダーが担当

研究の新規性・先行推進費研究との関係

沿岸域の環境・生態系に特化したデジタルツインの開発事例はまだ無く、先駆的に富栄養化海域の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**

研究の新規性

- **場の保全・再生が沿岸域の水・物質循環及び低次-高次生態系網に及ぼす影響をエンド・ツー・エンドで評価する、新たな統合評価モデルを開発**
- モデルの予測・評価結果を市民・民間等に分かりやすく伝える「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**を新たに開発
- **市民参画の調査研究や活用実践研究を展開し、デジタルツイン開発へのニーズを幅広く収集**

先行推進費研究との関係

- S21: 陸域・海域の生物多様性・生態系サービスと社会経済や土地利用等の関係を**社会科学**的アプローチで統合評価するモデルを開発
- ⇔ 本研究は**自然科学的アプローチ**で沿岸域に特化した統合評価モデルを開発するものであり、**互いの不足部分を相補する関係**にある。
- 沿岸環境・生態系に関する他の推進費研究等の先行成果・データについても可能な限り取り込み、統合評価モデルの開発を進める。