

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1420 December 2024

流動生態系シミュレーションシステム EcoPARI の
プリ・ポストプロセスに関する Web アプリケーションの開発

松崎 義孝, 井上 徹教, 久保田 雅也, 松本 大輝, 佐藤 智之,
坂本 光, 内藤 大輔

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,
Port and Aviation Technology, Japan

目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
2. EcoPARI-Web GUIの開発方針	5
2.1 EcoPARI-Web GUI Pre	5
2.2 EcoPARI-Web GUI Post	5
3. EcoPARI-Web GUIの実装・紹介	7
3.1 EcoPARI-Web GUI Pre	7
3.2 EcoPARI-Web GUI Post	7
4. EcoPARIの意義と将来性	13
4.1 EcoPARIの重要性・意義	13
4.2 今後の課題	14
5. おわりに	14
謝辞	15
参考文献	15
付録A EcoPARIの紹介	18
付録B EcoPARI-Web GUIの現状の運用環境紹介	28

Development of a web application for preprocessing and postprocessing of EcoPARI which is an ecological hydrodynamics simulation system

Yoshitaka MATSUZAKI^a, Tetsunori INOUE^b, Masaya KUBOTA^c, Hiroki MATSUMOTO^d, Tomoyuki SATO^e, Hikari SAKAMOTO^f, Daisuke NAITO^g

Synopsis

This paper is a Japanese translation of the article “Web application of an integrated simulation for aquatic environment assessment in coastal and estuarine areas” published in Environmental Modelling & Software, with some modifications to its structure. This paper introduces the web application-type Graphical User Interface that has been developed for making simulation conditions (pre-processing) and visualizing (post-processing). These processes represent the most workload-intensive part of conducting numerical simulations of water environments, and it is expected that converting them into web applications will greatly improve efficiency. The introduced simulator conducts hydrodynamics and ecosystems in coastal and estuarine areas. It consists of (1) a hydrodynamic model that can simulate the current velocity, water temperature, salinity, and water level; (2) a pelagic ecosystem model that can simulate dissolved oxygen, phytoplankton, zooplankton, nutrients, fish, and bivalves; and (3) a benthic ecosystem model that can simulate dissolved oxygen, nutrients, metals, and benthic organisms. Note that the solver portion is scheduled to be implemented as a web application in the near future. Web GUI is the first web system of aquatic environment simulation system that can both prepare calculation conditions and visualize them. Another significant feature is that it requires no installation and can be easily used by anyone to perform calculations. Thus, the proposed system helps fill the expertise gap experienced by potential users of the model. The use of standard systems, such as those discussed in this study, will facilitate evidence-based policymaking (EBPM).

Key Words: Aquatic environment numerical simulation, Environment impact assessment, Graphical user interface, Evidence-based policymaking

^a Head of Marine Pollution Management Research Group

^b Director of Marine Environment Control System Department

^c Associate Postdoctoral Researcher, Marine Pollution Management Research Group

^d Researcher, Marine Pollution Management Research Group

^e Tohoku Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (Former Position: Researcher, Marine Pollution Management Research Group)

^f Praia consultant Co., Ltd., Information Systems Department

^g Chuden CTI Co., Ltd., Digital & Data Science Region Data Science Department

3-1-1, Nagase, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan Port and Airport Research Institute
Phone : +81-46-844-5064 Fax : +81-46-844-0575 E-mail : matsuzaki-y@p.mpat.go.jp

流動生態系シミュレーションシステム EcoPARI の プリ・ポストプロセスに関する Web アプリケーションの開発

松崎義孝^a, 井上徹教^b, 久保田雅也^c, 松本大輝^d, 佐藤朋之^e, 坂本光^f, 内藤大輔^g

要 旨

本論文は Environmental Modelling & Software で出版された論文 “Web application of an integrated simulation for aquatic environment assessment in coastal and estuarine areas”の構成を一部変更して日本語訳したものである。本稿では、流動生態系シミュレーションシステム EcoPARI を用いて流動と生態系に関する数値シミュレーションを実施するために必要となる計算条件の作成（プリプロセス）と可視化（ポストプロセス）の両方が可能な Web アプリケーション型 Graphical User Interface を開発した。これらのプロセスは水環境の数値シミュレーション実施においてもっとも作業負荷が大きい部分であり、Web アプリケーション化によって大幅な効率化が期待できる。この GUI により沿岸・河口域の流体力学や生態系シミュレーションが容易になり、専門的な知識が無くても基本的な設定と操作が可能となる。開発したシステムは、(1)流速、水温、塩分、水位をシミュレーションできる流体力学モデル、(2)水中での溶存酸素、植物プランクトン、動物プランクトン、栄養塩をシミュレーションできる生態系モデル、(3)堆積物中での溶存酸素、栄養塩、金属、底生生物等をシミュレーションできる底生生態系モデルから構成され、プリプロセスとポストプロセスを Web アプリケーションで一貫して行う初めての試みである。なお、ソルバー部分の Web アプリケーション化については近い将来の実装を予定している。Web アプリケーションはインストールが不要で、誰でも簡単に計算できることが大きな特徴である。そのため、提案システムは、モデルの潜在的なユーザーが経験する専門知識のギャップを埋めるのに役立つ。本研究で議論されているような標準システムを使用することで、証拠に基づく政策立案（EBPM）が容易になる。

キーワード：水環境数値シミュレーション，環境影響評価，Graphical user interface，Evidence-based policymaking

-
- a 海洋環境制御システム研究領域 海洋汚染防除研究グループ グループ長
b 海洋環境制御システム研究領域 領域長
c 海洋環境制御システム研究領域 海洋汚染防除研究グループ 準専任研究員
d 海洋環境制御システム研究領域 海洋汚染防除研究グループ 研究官
e 東北地方整備局（元 海洋環境制御システム研究領域 海洋汚染防除研究グループ 研究官）
f 株式会社ブライア・コンサルタント 情報システム部
g 株式会社中電シーティーアイ 技術本部 デジタル・データサイエンスリージョン データサイエンス部
〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所港湾空港技術研究所
電話：046-844-5064 Fax：046-844-0575 E-mail：matsuzaki-y@p.mpat.go.jp

1. はじめに

数値シミュレーションは、環境評価、計画、管理に不可欠なものとなっており (Crout et al., 2008), 沿岸・河口域における港湾工事を行う際の環境影響評価に広く利用されている。港湾空港技術研究所では、流動及び生態系に関する数値シミュレーションを行うための数値モデルの開発に精力的に取り組んできた (田中ら, 2011; 田中・鈴木, 2010)。対象とする海域は主に伊勢湾であり、関係省庁や地方自治体が策定した伊勢湾再生行動計画に則って開発されてきた経緯がある。そのため、この数値モデルは通称「伊勢湾シミュレータ」と呼ばれてきた。2007年から2016年における伊勢湾再生アクションプランでは、伊勢湾シミュレータを活用し、伊勢湾の貧酸素水塊に対する効果的な対策方法、実施場所、規模の検討を行った。伊勢湾シミュレータを用いた検討により、環境改善には生物の生息場所となる干潟・浅場・藻場の再生・保全が必要であり、水管理においては適切な流入負荷設定が重要であることが明らかになった。2017年から2026年までの第2期伊勢湾再生アクションプランでは、伊勢湾シミュレータを活用し、干潟・浅場・藻場の計画的な造成や深層掘削跡地の埋め戻しを行い、水質や生態系の回復を図ることを計画している。また、国土交通省の第5期国土交通省技術基本計画 (www.mlit.go.jp/report/press/content/001479986.pdf, 最終アクセス日2024年10月15日) において「沿岸域の再生に向けた高度なシミュレーションの研究開発」の推進が望まれている。

このような背景から、数値シミュレーションの経験がない実務者でも操作できるシミュレータの開発の要請が高まってきた。コンピュータの扱いが不得手な技術者でも数値シミュレーションを実行可能とするために、コマンドを打ち込むタイプのCommand Line User Interfaceではなく、マウスを使用しクリック操作を基本としたGraphical User Interface (GUI) システムによる数値シミュレーション実行環境が必要であると考えられる。すなわち、GUIによりコンピュータに関する十分な技術的専門知識を持たないユーザーでも、複雑な最新モデルを操作できるようになる。

数値シミュレーションモデルのGUIに関する先行研究の概要を以下に示す。Nielsen et al. (2021) は湖沼や貯水池の水質管理を支援するGUIシステムを開発した。Nielsen et al. (2021) が指摘するように、同様の取り組みは幅広い分野で行われている。例えば、Dile et al.

(2016) は地表水と地下水の水質と量をシミュレートし、土地利用や土地管理等に活用するためのモデルである

Soil Water Assessment Tool: SWAT (Arnold et al., 1998) のGUIシステムを開発した。Park et al. (2019) は3次元差分地下水モデルであるSWAT-MODFLOW結合モデル (Harbaugh et al., 2017) 用のGUIシステムを開発した。Meyer and Riechert (2019) は気象モデル Research and Forecast model: WRF (Skamarock et al., 2008) 用のGUIシステムを開発した。

環境分野向けのWebアプリケーションとして、Chesapeake Assessment Scenario Tool (CAST) が挙げられる (Chesapeake Bay Program Office, 2020; Devereux and Rigelman, 2014; Kaufman et al., 2021)。CAST はチェサピーク湾における負荷削減のシナリオを作成し、窒素、リン、堆積物の推定値を提供する。さらに、Abascal et al. (2017) は北部アイルランドのベルファスト湾における油流出対応のための高解像度運用予測システム用のWebアプリケーションを開発した。また、著者らの研究グループでは、日本近海の内湾及び外洋における海上流出油のリアルタイム漂流予測が可能なWebアプリケーション「net-OILPARI」を開発した (Matsuzaki and Fujita, 2024)。

沿岸河口域の流動・生態系モデルに焦点を当てると、Delft3D (Lesser et al., 2004) は生態系モデルのためのGUIシステムに関する先行研究としてよく知られており、多くの適用事例がある (Alosairi and Alsulaiman, 2020; Nauta et al., 2003)。MIKE (Warren and Bach, 1992) もまた、沿岸河口域や、海洋における水理学や水理関連現象をシミュレートするための総合的な GUI モデリング システムとしてよく知られている。さらに操作を容易とするためには、Web アプリケーションを開発する必要があると判断される。

Webアプリケーションの利用により専用ソフトウェアのインストールが不要となり、コンピュータ技術に不慣れたユーザーでも容易に操作が可能となるため、沿岸・河口域の数値シミュレーションモデルの幅広い普及が期待される。すなわち、インストール不要で前処理から後処理まで一貫して利用できるWebベースの流動・生態系シミュレーションシステムが望ましいと考えられる。

そこでMatsuzaki et al. (2024) では、流動と生態系モデルの数値シミュレーションを実行するためシステムであるEcological hydrodynamics simulation system of the Port and Airport Research Institute: EcoPARI (読み方はエコパリ) におけるWebアプリケーションの開発を行った。本報告はMatsuzaki et al. (2024) の構成を実務者向けに一部変更して和訳を行うとともに、今後の研究の展望を加筆して報告する。

2. EcoPARI-Web GUIの開発方針

図 1 に EcoPARI-Web GUI を使用した数値シミュレーション実施フローを示す。1. の EcoPARI-Web GUI Pre によって数値シミュレーション実施に必要なファイル一式を作成する。現状ではこのファイル一式を Windows のローカル PC に保存して、ファイルの中に含まれる EcoPARI-Simulator の実行ファイルを使って数値シミュレーションを実施するか、Linux の計算サーバーにアップロードして数値シミュレーションを実施する。計算結果のファイルは EcoPARI-Web GUI Post のインストールされているサーバーにアップロードして、可視化を行う。以下では Pre と Post の開発方針を示す。

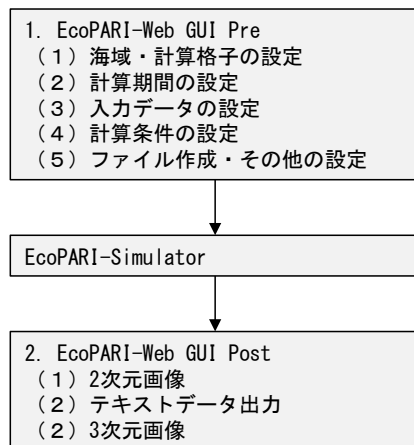


図 1 EcoPARI-Web GUI 数値シミュレーション実施フロー

2.1 EcoPARI-Web GUI Pre

前処理ツール EcoPARI-Web GUI Pre は、ユーザーの必要に応じて、並列計算数、計算水域、計算期間、計算内容（流動、水質、底質、生態系の各モデルの選択）、粒子追跡計算の有無、出力項目、出力インターバル、垂直格子設定の変更や特定のパラメータの選択などの操作を容易にする。

インターフェイスに関しては HTML5 と Javascript で実装し、クライアントは Web ブラウザ上で操作するように設計した（図 2）。サーバー側の実装はクライアントとやりとりする Apache のインストールされた Web サーバー部分と計算データ作成等の主要な処理を行うバックグラウンド部（主に Python 言語を用いて実装）に分かれる。Apache には Web サービスを提供するソフトウェアでクライアント（Web ブラウザ）からのリクエストに応じたレスポンス

を返す役割がある。通常このレスポンスは HTML ファイルになるけれども、付属機能として Web ブラウザのリクエストによりサーバー側に用意したプログラムを実行させて、その処理結果をレスポンスとして返す Common Gateway Interface（CGI）という機能を持っている。この CGI にはいろいろな言語が使え、EcoPARI-Web GUI Pre は Python を用いて以下の機能を CGI で実装している。

- ・ サーバー内の参照可能な格子データセットの一覧リストの取得
- ・ 選択したデータセットの格子、鉛直格子設定データファイル群の取得
- ・ 選択した地形格子データの取得
- ・ 選択したデータセットの入力データ定義情報の取得
- ・ 選択したデータセットの設定・パラメータ定義情報（EcoPARI — Simulator の sysin ファイル、ecosystem.dat ファイル）の取得
- ・ 設定計算期間・海域のデータセットの有無の確認
- ・ 入力テンプレート作成のジョブ投入
- ・ 計算入力データ一式作成のジョブ投入
- ・ ジョブ進捗の確認
- ・ 作成データのダウンロード

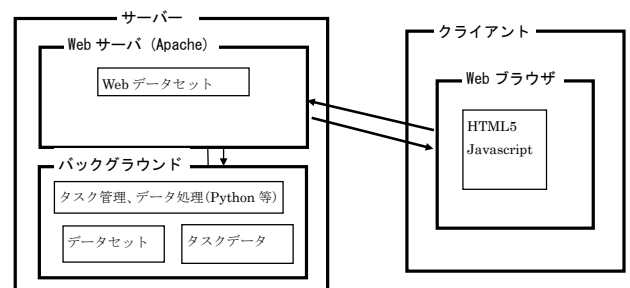


図 2 EcoPARI-Web GUI Pre の構成概念図

2.2 EcoPARI-Web GUI Post

後処理ツールである EcoPARI-Web GUI Post は、数値シミュレーション結果を Web ブラウザ経由で視覚化できる。ユーザーの選択に応じて、シミュレーションされたコンパートメントの 2 次元画像（水平、 x - z 断面、および y - z 断面）と流速ベクトルを描画できる。さらに、数値を任意の場所からテキストとして抽出してダウンロードしたり、溶存酸素の 3 次元分布を視覚化してわかりやすく表示したりすることが可能である。

必要とするソフトウェアは以下の通りとする。また、サーバーとクライアントの概念図を図 3 に示す。

- OS:Ubuntu 20.04 LTS 以上
- Web サーバー:Apache 2.4.41 以上 (apt によりインストール)
- Python3:python3.8 以上 (apt によりインストール)

また、必要とするライブラリは以下の通りとする。

- Python (Python Software Foundation License)
<https://www.python.org/>
- Django (3-clause BSD License)
<https://www.djangoproject.com/>
- matplotlib (Python Software Foundation License) <https://www.djangoproject.com/>
- netCDF4 (MIT License)
<https://unidata.github.io/netcdf4-python/>
- numpy (修正 BSD License)
<https://numpy.org/ja/>
- pillow (Historical Permission Notice and Disclaimer License) <https://python-pillow.org/>
- scipy (BSD License) <https://scipy.org/>
- Three.js (MIT License) <https://threejs.org/>
- js-colormaps (MIT License)
[https://github.com/timothygebhart/js-](https://github.com/timothygebhart/js-colormaps)
colormaps

- IPAex フォント (IPA フォントライセンス v1.0)
<https://moji.or.jp/ipafont/>

なお, EcoPARI-Web GUI Post は付録 A.7 に記載する EcoPARI-Post Stand-alone という先行に開発された Windows 上で動作するスタンドアロン版のソフトウェアの機能をベースに開発された. EcoPARI-Post Stand-alone は長期にわたって設計・機能拡充されてきたものであり, そのノウハウを生かして EcoPARI-Web GUI Post は単年度という短期間で完成させることが可能であった。

なお, EcoPARI-Web GUI のインストール先については付録 B で説明する。

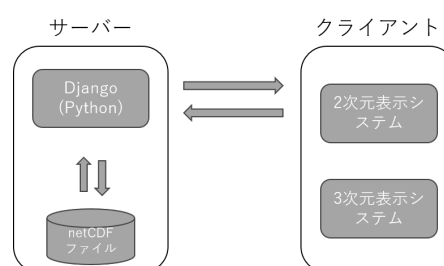


図 3 EcoPARI-Web GUI Post の構成の概念図

3. EcoPARI-Web GUI の実装・紹介

3.1 EcoPARI-Web GUI Pre

Web ブラウザから http でアクセスし、GUI で操作できる前処理システム EcoPARI-Web GUI Pre が開発された (図 4)。

EcoPARI-Web GUI Pre の操作手順は、図 1 のフローの通り、

(1) 海域・計算格子の設定、(2) 計算期間の設定、(3) 入力データの設定、(4) 計算条件の設定、(5) ファイル作成・その他の設定、とした。また、数値計算の初学者でも扱えるように基本機能に絞った編集モード「基本編集」と、数値計算の習熟者向けに細部のパラメータまで編集可能にした編集モード「詳細編集」の 2 つのモードを作成した。なお、「基本編集」と「詳細編集」で (1)～(5) の操作手順は変わらない。

(1) では、ユーザーはサーバーに事前に保存されている計算格子データセット (現時点では伊勢湾、東京湾、大阪湾) を選択することができる (図 5)。流動・浮遊生態系計算用と底生生態系計算用に鉛直方向の格子間隔をユーザーが数値を手入力あるいはクリック操作で設定することができる (図 6)。例えば、図 6 において流動・浮遊生態系計算用の鉛直方向の格子は 32 層設定されており、これを 31 層に減らす、あるいは 33 層に増やす設定を、水深値を手入力するか、設定したい位置でクリック操作をすることで可能となっている。

(2) では、数値シミュレーション期間を設定する (図 7)。期間の設定においては、(3) で選択可能な事前にセットされた境界条件ファイルの期間が表示される。例えば、図 7 では、「伊勢湾海域において 1970/01/01 00:00～2020/12/31 23:59 の期間データが用意されています。」と表示されており、ユーザーはこの期間内で自分が計算したい期間を手入力するか、カレンダー画面から選択することが可能である。

(3) では、境界条件のデータを設定入力することができる (図 8)。ユーザーは事前にセットされた大気境界条件、河川境界条件、側方境界条件、初期条件のファイルを選択することが可能である。事前にセットされた境界条件ファイルは一定の精度が担保されている。また、ユーザーが事前に設定された期間外をシミュレーションしたい場合は、ユーザーは、入力境界条件としてフォーマットに適合する空のファイルをダウンロードできる。ユーザーは空のファイルにデータを入力することで、EcoPARI-Simulator に適合した境界条件ファイルを作成できる。

(4) では、ユーザーはモデル構成を選択する (図 9)

EcoPARI-Simulator は、(a) 流動計算のみ、(b) 流動+水温・塩分、(c) 流動+水温・塩分+浮遊生態系、(d) 流動+水温・塩分+浮遊生態系+底生生態系の 4 つの組み合わせを実行できる。また、魚類、二枚貝、粒子追跡モデルのオン/オフ設定が可能である。さらに、開境界条件のモデル選択と鉛直乱流モデルの設定が可能である。

(5) では、ユーザーは CPU の数に応じて Message Passing Interface (MPI) を使用して並列プロセスの数を選択することができる (図 10)。ユーザーは、OS (Windows または Linux) に沿った記載方式 (例えば ¥ と / の違い) でダウンロード可能である。最後に、ユーザーは設定に沿って作成された入力ファイル一式を、ZIP ファイルとしてダウンロード可能である。ZIP ファイル内には EcoPARI-Simulator の実行ファイルが含まれており、それを使用して数値シミュレーションを実行可能である。ただし、並列計算用の MPI がインストールされているコンピュータが必要となる。

なお、上記の説明内容をホームページ上において動画で紹介しているので参考にいただきたい。

<https://www.ecopari.pari.go.jp/introductionvideo/>

(ホームページ最終訪問日: 2024/11/22, 研究グループのホームページからも閲覧可能です)
<https://www.pari.go.jp/unit/mpmg/is/>

3.2 EcoPARI-Web GUI Post

次に、2 次元可視化のための後処理システム EcoPARI-Web GUI Post を開発した (図 11)。EcoPARI-Web GUI Post において、EcoPARI-Simulator で出力された計算結果ファイル (NetCDF 形式のファイル) をマウスで選択し、表示したい項目 (例えば水温や塩分)、時刻、層方向 (水平、x-z 断面、y-z 断面)、層位置 (表層、底層、メッシュ位置) をマウスでクリックするだけで、数値シミュレーション結果の平面分布図を視覚化できる。描画はコンター、塗りつぶし、粒子 (粒子追跡計算の結果)、ベクトルが可能である。また、画像、動画、数値 (テキスト) のデータをダウンロードできる。画像は伊勢湾で、湾口 (側方境界) が下にある。色は水温を表す。色の最大値・最小値、分割数、配色、矢印のサイズは簡単に調整できる。溶存酸素は 3 次元雲画像としても可視化可能であり、2 次元と同様の細かい設定変更が可能である。貧酸素の生成、移流、消失がイメージしやすくなることが期待される (図 12)。



図 4 EcoPARI-Web GUI Pre トップページのスクリーンショット. ユーザーは 5 つの緑色のボックスをクリックすると設定画面を開くことができる.

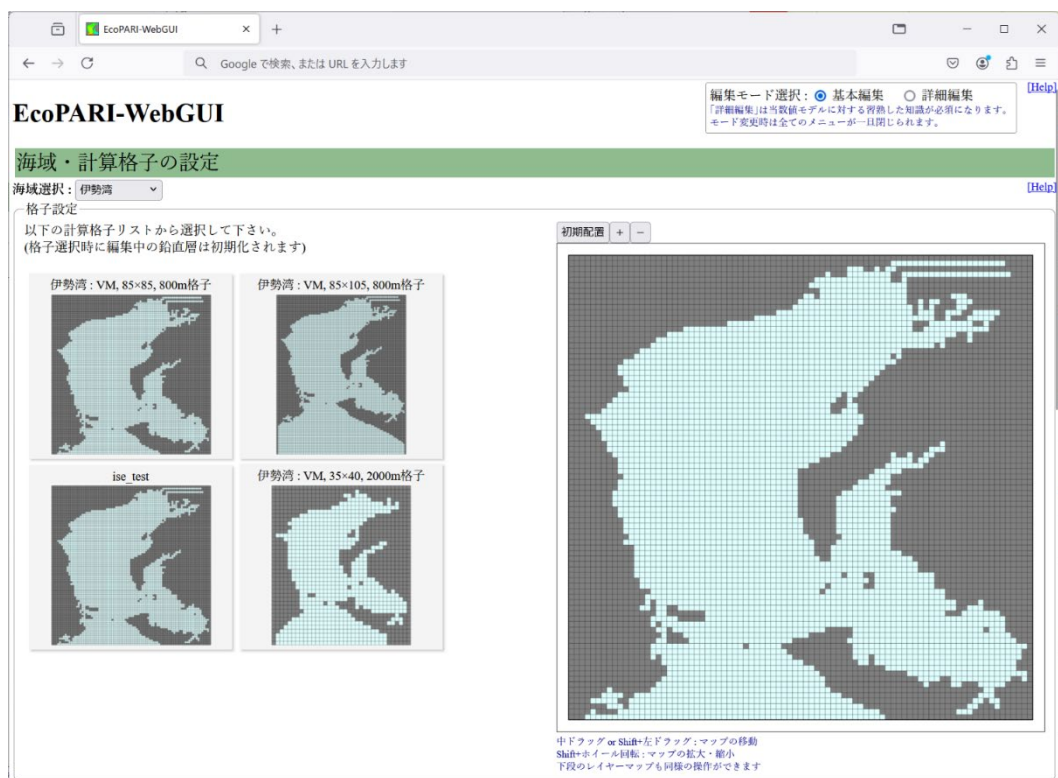


図 5 EcoPARI-Web GUI Pre の海域設定画面

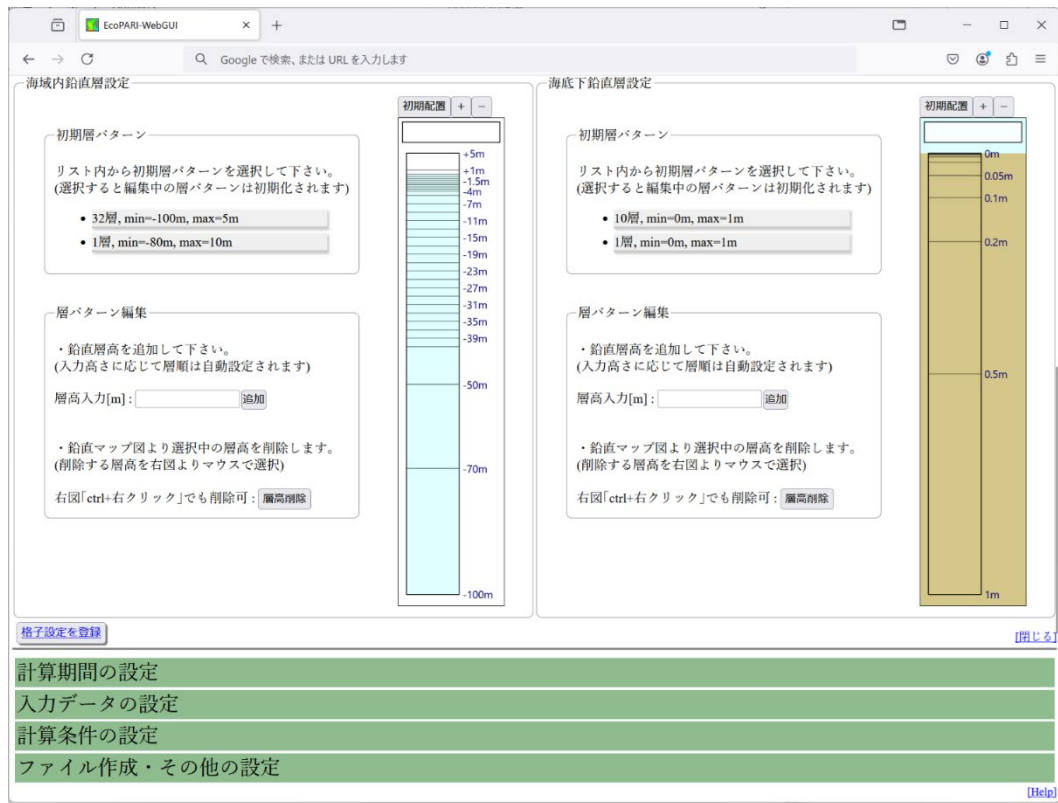


図 6 EcoPARI-Web GUI Pre の計算格子設定画面



図 7 EcoPARI-Web GUI Pre での計算期間の設定画面. 境界条件ファイルとしてサーバー上にあらかじめ設定されているデータを使用する場合, ユーザーが選択できる期間が表示される. この図では, 「1970/01/01 00:00 ~ 2020/12/31 23:39」と表示されている.



図 8 EcoPARI-Web GUI Pre での入力データ設定画面. ユーザーは、大気、開境界、開境界潮位、河川の各境界条件と、初期値データ（初期条件）を選択できる. ユーザーが自分で用意したデータを基に境界条件ファイルを作成したい場合、フォーマットに従い入力ファイルを作成するための CSV ファイルがダウンロードできる.

EcoPARI-WebGUI

編集モード選択: ☒ 基本編集 ☐ 詳細編集
「詳細編集」は当数値モデルに対する習熟した知識が必要です。
モード変更時は全てのメニューが一旦閉じられます。

海域・計算格子の設定

計算期間の設定

入力データの設定

計算条件の設定

設定内容: 基本設定 << < > >> 追加 削除

計算の実行制御パラメータ設定

計算実行内容の選択:

☐ 流動計算のみ
☐ 流動+水温・塩分の計算
☒ 流動+水温・塩分+浮遊生態系の計算
☐ 流動+水温・塩分+浮遊生態系+底生生態系の計算

魚類モデル(魚種)の選択:

モデル未使用

二枚貝類モデルの選択:

モデル未使用

計算結果出力の時間間隔:

1 時間

開境界モデルの選択:

☐ 均配0条件
☐ Reid and Bodineモデル
☒ Sommerfeld境界条件
☐ 日野モデル

鉛直乱流モデルの選択:

☐ Richardsonモデル
☒ 中村モデルNo.1
☐ 中村モデルNo.2
☐ Yoonモデル
☐ 佐々木モデル
☐ Henderson-Sellersモデル

ファイル作成・その他の設定

図 9 EcoPARI-Web GUI Pre での計算条件の設定画面

EcoPARI-WebGUI

編集モード選択: ☒ 基本編集 ☐ 詳細編集
「詳細編集」は当数値モデルに対する習熟した知識が必要です。
モード変更時は全てのメニューが一旦閉じられます。

海域・計算格子の設定

計算期間の設定

入力データの設定

計算条件の設定

ファイル作成・その他の設定

ファイル作成

計算データ作成

ケース名: calc_casetest01

計算データ一式を作成する

設定条件によっては入力データファイルの用意が必要です。

セーブファイルの作成: ダウンロード

その他の設定

並列計算に使用するCPUコア数: 1

利用デバイスの論理スレッド数は12です。
数値計算にはCPUの物理コア数以下に設定することが推奨されます。

数値計算に用いるパソコンのOS

☒ Windows ☐ Linux

セーブファイルの値をセット

ここにsave.jsonをドラッグ&ドロップ

作成データの状態

最新状態に更新

データ種類	ファイル名	作成時刻	有効期限	状態	結果	
calc_casetest01	lt_calc_20240813151056.zip	2024/08/13 15:10	2024/08/20 23:59	DL可	成功	削除

ダウンロード可能なファイルにリンクが入ります。リンクをクリックでダウンロードを開始します。

設定のクリア

図 10 EcoPARI-Web GUI Pre でのファイル作成とその他の設定画面

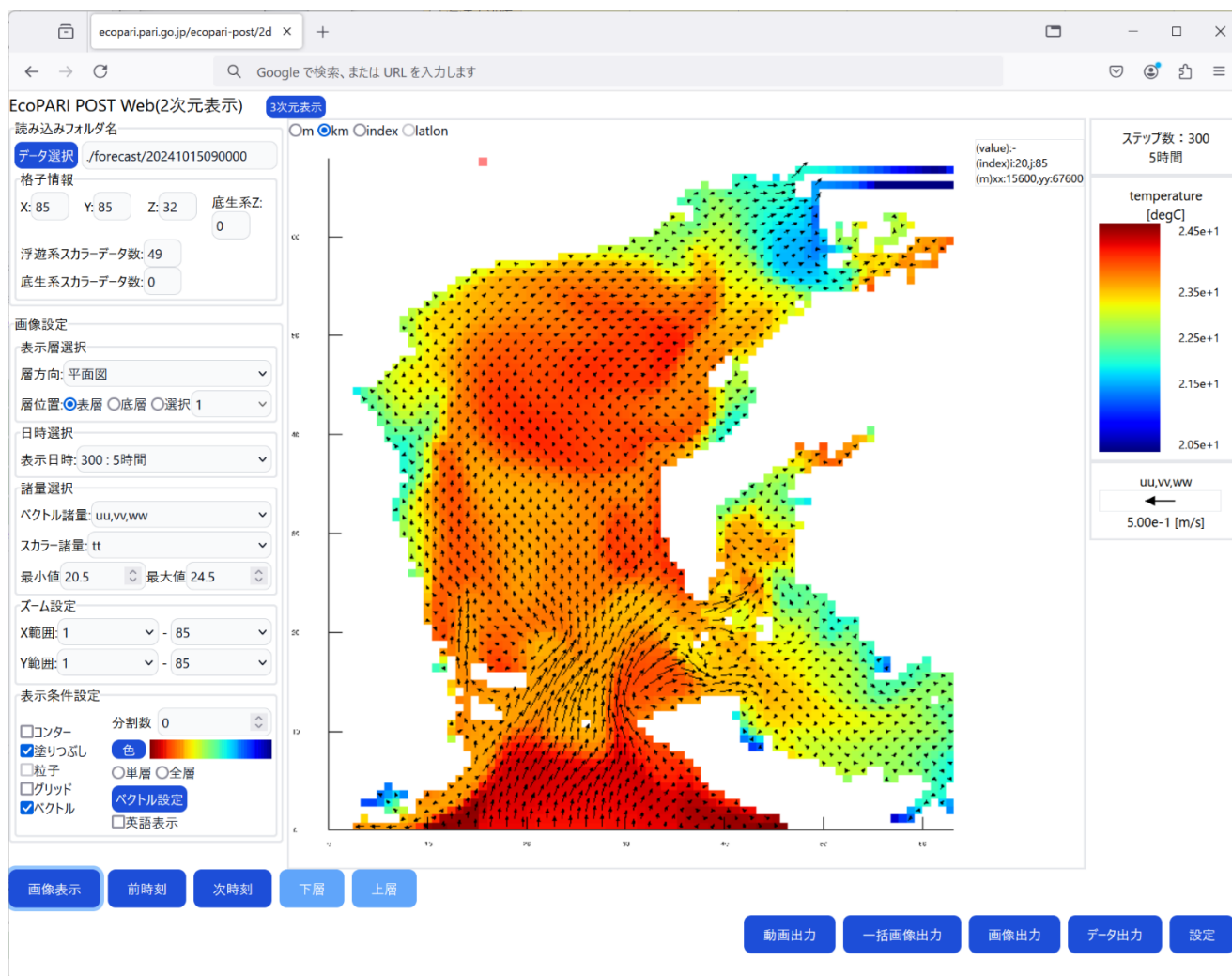


図 11 EcoPARI-Web GUI Post のスクリーンショット。マウスをクリックするだけで、数値シミュレーション結果の平面分布図を視覚化できる。また、画像、動画、数値（テキスト）のデータをダウンロードできる。画像は伊勢湾で、湾口（側方境界）が下にある。色は水温を表す。色の分割数、配色、矢印のサイズは簡単に調整できる。

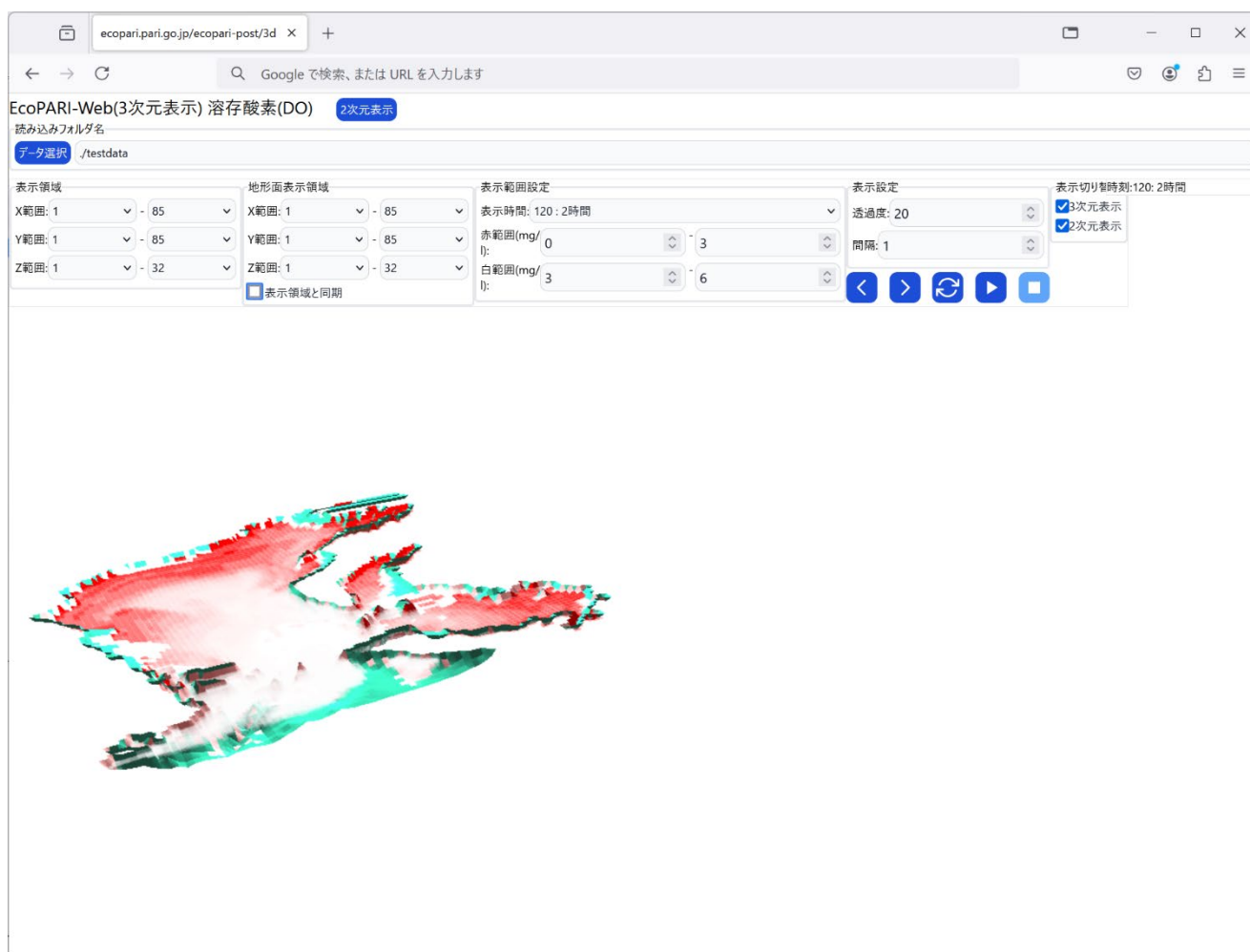


図 12 EcoPARI-Web GUI Post のスクリーンショット. シミュレーションされた溶存酸素濃度の 3 次元を視覚化できる. 画像は伊勢湾で, 左下が湾口側 (側方境界) である. 赤い領域は低酸素状態 (ここでは 2 mg/L 以下と設定), 白は溶存酸素濃度が 0 ~ 4 mg/L の水塊, 緑は計算領域の海底を示す. 溶存酸素濃度の表示範囲は調整可能である.

4. EcoPARIの意義と将来性

4.1 EcoPARI の重要性・意義

EcoPARI-Web GUI は, 水環境シミュレーションに関するプリ・ポストシステムの Web アプリケーションとして初めて開発された. EcoPARI-Web GUI は, インストールやコンピュータの技術が必要とせず, 数値シミュレーションに習熟しない者でも簡単に使用できるため, 既存のシステムによくある欠点を解消している. すなわち, 注目すべき特徴は, システムのインストールの必要がなく, すべてのユーザーが計算の実行に必要な条件設定を行うことができることである. つまり, 例えば Delft3D (Lesser et al., 2004) のように, 数値シミュレーション用の GUI の設定をユーザ

一のコンピュータに構築することは不要である. あるいは, MIKE (Warren and Bach, 1992) のようなシステムを外部委託して有償で設定を行えばスムーズにシミュレーションを行えるが, 少しだけ試してみたいユーザーが費用を捻出することは敷居が高い. そのため, EcoPARI のような標準化されたシステムの開発は画期的で他に例を見ないものである. よって, EcoPARI は, モデルの潜在的ユーザーが経験する専門知識のギャップを埋めるのに役立つ. その一例として, 数値シミュレーションシステムに馴染みのなかった共著者 (国土交通省職員) が EcoPARI-Web GUI を使いこなした. この事実は, システムの使いやすさを定量的に証明するものではないが, その使い勝手の良さを物語っている.

現在は EcoPARI-Web GUI Pre にインストールされている海域は

東京湾、伊勢湾、大阪湾に限定されているが、境界条件、地形、パラメータ設定などの数値シミュレーションデータセットを用意している。今後は、さまざまな湾の数値シミュレーションデータセットを追加し、一定の精度で数値シミュレーション結果を得られる海域の範囲を拡大していく予定である。

EcoPARI シミュレーションシステムを開発し、数値シミュレーションに習熟しない者でも数値シミュレーションを行える環境を整えることで、次のような効果が期待できる。まず、国土交通省職員などの港湾計画の策定者や港湾管理者が数値シミュレーションを実施できるため、机上検討が容易になり、干潟造成場所の選定や窪地埋め戻しの検討など、自らのアイデアを計画・管理に容易に反映させることができる可能性がある。また、内閣官房行政改革推進本部（<https://www.gyokaku.go.jp/ebpm/index.html>, 最終アクセス日 2024 年 10 月 15 日）は、ad hoc なシナリオに頼るのではなく、政策目的を明確にした上で、合理的な証拠に基づいて政策立案を行う Evidence-Based Policy Making (EBPM) を推進しようとしている。本研究で議論されているような標準的なシステムを活用することで、EBPM が促進されると考えられる。

EcoPARI は、数値シミュレーションの経験は少ないが、現場調査の経験がある研究者でも、現場データを活用して数値シミュレーションの精度を高め、実際の現場計測との差異を減らすことができる。また、実務者である建設コンサルタントが活用することで、建設コンサルタントの持つ豊富な経験と知識をモデルに取り入れることができる。さらに、建設コンサルタントがよく知られている標準システムを使用することで、顧客へのデモンストレーションが容易になり、顧客は EcoPARI を環境影響評価に活用するメリットを理解できるようになる。

将来的には、EcoPARI を Web アプリケーションとして公開し、海外など遠隔地のエンジニアでも活用できるようにすることも可能である。その場合、Web アプリケーションであれば、数値シミュレーション環境を構築することなく技術指導が受けられるというメリットがある。

4.2 今後の課題

本研究で開発した EcoPARI は、包括的な基盤を提供できたと考えている。EcoPARI の今後の発展の余地は以下の通りと考えている。

現在、EcoPARI-Web GUI で作成できる海域は伊勢湾、東京湾、大阪湾に限られている。そのため、EcoPARI-Web GUI で計算できる海域や事例を増やす必要がある。直営で海域を増やすことは重要であるけれども、EcoPARI の使い勝手がよくなりユーザーが増えることで、増えたユーザーから海域のデータセットを提供され、EcoPARI-Web GUI Pre で利用可能な海域が拡大することが期待される。

また、EcoPARI-Web GUI ですべての機能が使えるようになれば、使い勝手は向上する。そこで、今後は、EcoPARI-Boundary Conditions で境界条件ファイルの作成を容易にし、Web ブラウザから計算を実行できるようにすることも検討したい。なお、クラウド環境を使ったシステム構築に関する将来展望は付録 B に記載した。

5. おわりに

本研究では、伊勢湾再生行動計画に基づいて開発された伊勢湾シミュレータをベースに、数値シミュレーションの前処理から後処理まで実行できる EcoPARI システムを開発した。EcoPARI は、Web ブラウザを用いた Web サーバー環境で境界条件ファイルの作成、数値シミュレーションの実行、結果の可視化を行うことができる。

EcoPARI は、国土交通省職員などの港湾計画の策定者や港湾管理者が数値シミュレーションを実施できるようにすることで、机上検討を容易にし、EBPM に沿った計画・管理に建設関連の考え方を取り入れることを可能にする。本研究で議論したような標準システムの使用は、EBPM の実現に向けた進歩につながることを期待される。

今後の展望として、著者らの研究グループは、沿岸域や河口域を対象とした新たな数値シミュレーションモデルを構築し、数値シミュレーションに習熟しない者でも使いやすいシステムとするためには、表 1 に掲げる4つの標準的な開発や整理が必要であると判断した。(1) は流動や低次生態系から、二枚貝や魚類といった比較的高次の生態系に至るまでをシミュレーション可能とし、数値シミュレーションモデルの選択の際に、研究機関、民間、行政のいずれからも標準的に選ばれる・選択肢に入るモデルの必要性を掲げる。(2) は、コンピュータの扱いが不得手な技術者でも数値シミュレーションを実行可能とするために、コマンドを打ち込むタイプの Command Line User Interface ではなく、マウスを使用しクリック操作を基本とした GUI システムによる数値シミュレーション実行環境の開発の必要性を掲げる。(3) は、これまでユーザーの感覚に頼り、ヒューリスティックに行われていたパラメータ調整を、一定のルールに則って、観測値と比較しながらパラメータ調整を行う仕組みの必要性を掲げる。(4) は、日本の沿岸河口域において流動・生態系モデルを構築するうえで、その指針となるような標準的な手順書の必要性を掲げる。これを著者らのグループは「水環境数値シミュレーションの標準化」と定義した。本報告では、水環境の数値シミュレーションの標準化に向けた取り組みのうち、(2) を解決するための研究開発に重点を置いたけれども、今後は(1)のモデルに磨きをかけるとともに、(3)の開発や(4)の策定にも力を注ぐ。今後、EcoPARI が日本の標準モデルとなるように港湾分野のみならず、広く水環境にか

かわる関係者の意見を聞き、研究開発の方針を見定めていきたいと考えている。

表 1 著者らが掲げる「水環境の数値シミュレーションの標準化」の定義

(1)	沿岸域および河口域の流体力学と栄養塩や低次生物から魚類や二枚貝などの比較的高次の生物まで、生態系のすべての構成要素を正確にシミュレートできるモデル
(2)	コンピュータの扱いに習熟しない者でも数値シミュレーションが実行できる Graphical User Interface (GUI) システム
(3)	一定のルールに則ったパラメータ調整法の確立
(4)	モデルの構築から精度の検証に至る一連の数値シミュレーションを実行するための標準的な手順・ガイドライン

(令和6年11月5日受付)

謝辞

本研究成果の一部は、国土交通省港湾局の委託研究の成果である。本研究は、学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 (JHPCN) (課題番号: jh230015), JSPS 科研費 (21K14255), 環境研究総合推進費 (JPMEERF20221R01), 鉄鋼環境基金の支援を受けた。株式会社エコーの森谷氏, Smart Solutions 株式会社の花島氏にはソフトウェア開発の際に助力いただいた。

参考文献

井上徹教, 小室隆. (2020). 新たな魚類生態系モデルによる低次生態系と漁獲量の解析. 港湾空港技術研究所資料, (1368), 38.

太田琢磨, 牧原康隆. (2015). 大雨警報における浸水雨量指数の適用可能性-タンクモデルを用いた内水浸水危険度指標-. 気象庁研究時報, 65.

松崎義孝, 井上徹教. (2022). 伊勢湾シミュレータに実装した領域沿岸データ同化法による通年のデータ同化実験: 沿岸・河口域における適切なアンサンブルを作成するための境界条件の摂動. 港湾空港技術研究所報告, 61 (1), 1-37.

比嘉紘土, 中村聖美, 林宏樹, 岡田輝久, 中村由行, 井上徹教, 鈴木崇之. (2023). 東京湾における水底間の硫化物・鉄・マンガン循環に関する現地観測及び生態系モデル解析. 土木学会論文集, 79 (17).
<https://doi.org/10.2208/jscej.23-17143>

永尾謙太郎, 中村由行. (2018). 伊勢湾における窒素・リン濃

度に対する微生物ループの応答. 土木学会論文集B2 (海岸工学), 74 (2), I_1243-I_1248.
https://doi.org/10.2208/kaigan.74.I_1243

永尾謙太郎, 中村由行, 鶴島大樹, 小山悠人. (2019). 伊勢湾における下水処理場での栄養塩の管理運転の有効性に関する試算. 土木学会論文集B2 (海岸工学), 75 (2), I_1021-I_1026. https://doi.org/10.2208/kaigan.75.I_1021

田中陽二, 鈴木高二朗. (2010). 密度流湧昇流の計算を目的とした三次元沿岸域流動モデルの開発について. 港湾空港技術研究所報告, 49 (1), 3-25.

田中陽二, 中村由行, 鈴木高二朗, 井上徹教, 西村洋子. (2011). 微生物ループを考慮した浮遊生態系モデルの構築. 港湾空港技術研究所報告, 50 (2), 3-68.

田中陽二, 中村由行, 井上徹教, 鈴木高二朗, 内田吉文, 澤田玲, 内藤了二. (2012). 伊勢湾での陸域負荷削減が一次生産量と貧酸素水塊の規模に与える影響. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 68 (2), I_1131-I_1135.
https://doi.org/10.2208/kaigan.68.I_1131

鶴島大樹, 永尾謙太郎, 中田喜三郎. (2019). 数値シミュレーションを用いた伊勢湾におけるアサリの餌料不足に関する一考察. 土木学会論文集B2 (海岸工学), 75 (2), I_1111-I_1116. https://doi.org/10.2208/kaigan.75.I_1111

鶴島大樹, 永尾謙太郎, 白崎正浩, 日恵井京子, 藤田智志, 中田喜三郎, 中村由行. (2023). 伊勢湾における2000年代以降の夏季底層貧酸素水塊の変動要因について. 海洋理工学会. https://doi.org/10.14928/amstec.27.2_1

Abascal, A. J., Castanedo, S., Núñez, P., Mellor, A., Clements, A., Pérez, B., et al. (2017). A High-Resolution Operational Forecast System for Oil Spill Response in Belfast Lough. Marine Pollution Bulletin, 114 (1), 302-314.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.09.042>

Alosairi, Y., Alsulaiman, N. (2020). Hydro-environmental Processes Governing the Formation of Hypoxic Parcels in an Inverse Estuarine Water Body: Assessment of Physical Controls. Marine Pollution Bulletin, 157, 111311.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111311>

Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., Williams, J. R. (1998). Large Area Hydrologic Modeling and Assessment part I: Model Development. Journal of the American Water Resources Association, 34 (1), 73-89.
<https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>

Booij, N., Ris, R. C., Holthuijsen, L. H. (1999). A Third-generation Wave Model for Coastal Regions: 1.

- Model Description and Validation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4), 7649-7666. <https://doi.org/10.1029/98JC02622>
- Chesapeake Bay Program Office. (2020). Chesapeake Bay Program. Retrieved from <https://cast.chesapeakebay.net>
- Crout, N. M. J., Kokkonen, T. S., Jakeman, A. J., Norton, John. P., Newham, L. T. H., Anderson, R., et al. (2008). Chapter Two Good Modelling Practice. In *Developments in Integrated Environmental Assessment* (Vol. 3, pp. 15-31). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S1574-101X\(08\)00602-9](https://doi.org/10.1016/S1574-101X(08)00602-9)
- Devereux, O., Rigelman, J. R. (2014). CAST: An Online Tool for Facilitating Local Involvement in Watershed Implementation Plans for the Chesapeake Bay Total Maximum Daily Load. *Journal of Water Management Modeling*. <https://doi.org/10.14796/JWMM.C364>
- Dile, Y. T., Daggupati, P., George, C., Srinivasan, R., Arnold, J. (2016). Introducing a New Open Source GIS User Interface for the SWAT Model. *Environmental Modelling & Software*, 85, 129-138. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.08.004>
- Evensen, G. (2003). The Ensemble Kalman Filter: Theoretical Formulation and Practical Implementation. *Ocean Dynamics*, 53(4), 343-367. <https://doi.org/10.1007/s10236-003-0036-9>
- Hafeez, M. A., Inoue, T. (2024). Three-Dimensional Hydrodynamic Modelling of Saltwater Ingression and Circulation in a Brackish Lake Shinji, Japan. *Advances in Water Resources*, 184, 104627. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2024.104627>
- Hafeez, M. A., Nakamura, Y., Suzuki, T., Inoue, T., Matsuzaki, Y., Wang, K., Moiz, A. (2021). Integration of Weather Research and Forecasting (WRF) model with regional coastal ecosystem model to simulate the hypoxic conditions. *Science of The Total Environment*, 771, 145290. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145290>
- Hafeez, M. A., Inoue, T., Matsumoto, H., Sato, T., Matsuzaki, Y. (2024). Application of Building Cube Method to reproduce high-resolution hydrodynamics of a dredged borrow pit in Osaka Bay, Japan. *Proceedings of the 11th International Conference on Asian and Pacific Coasts: Apac 2023*, 14-17 Nov, Kyoto, Japan. Edited by Yoshimitsu Tajima, Shin-Ichi Aoki, and Shinji Sato. Kyoto, Japan: Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-99-7409-2_26
- Harbaugh, A. W., Langevin, C. D., Hughes, J. D., Niswonger, R. G., Konikow, L. F. (2017). MODFLOW-2005: USGS three-dimensional finite-difference groundwater model. U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.5066/F7RF5S7G>
- Kaufman, D. E., Shenk, G. W., Bhatt, G., Asplen, K. W., Devereux, O. H., Rigelman, J. R., et al. (2021). Supporting Cost-Effective Watershed Management Strategies for Chesapeake Bay Using a Modeling and Optimization Framework. *Environmental Modelling & Software*, 144, 105141. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105141>
- Lesser, G. R., Roelvink, J. A., van Kester, J. A. T. M., Stelling, G. S. (2004). Development and Validation of a Three-Dimensional Morphological Model. *Coastal Engineering*, 51(8-9), 883-915. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.07.014>
- Matsuzaki, Y., Fujita, I. (2024). OILPARI-A Real-Time Oil Transport Simulator for Marine Disaster Response: Its Functionary, Update, and Progress Toward the Next Generation. In Y. Tajima, S. Aoki, S. Sato (Eds.), *Proceedings of the 11th International Conference on Asian and Pacific Coasts* (pp. 277-288). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-7409-2_25
- Matsuzaki, Y., Inoue, T. (2022). Perturbation of Boundary Conditions to Create Appropriate Ensembles for Regional Data Assimilation in Coastal Estuary Modeling. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 127(4). <https://doi.org/10.1029/2021JC017911>
- Matsuzaki, Y., Kubota, M. (2024). Uncertainty in River Discharge Forcings and Error Range on Nowcasting Numerical Simulation of Salinity and Seawater Temperature in Ise Bay, Japan. *Marine Pollution Bulletin*, 207, 116734. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116734>
- Matsuzaki, Y., Fujiki, T., Kawaguchi, K., Inoue, T., Iwamoto, T. (2021). Application of the WRF Model to the Coastal Area at Ise Bay, Japan: Evaluation of Model Output Sensitivity to Input Data. *Coastal Engineering Journal*, 63(1), 17-31. <https://doi.org/10.1080/21664250.2020.1830485>
- Matsuzaki, Y., Inoue, T., Kubota, M., Matsumoto, H.,

- Sato, T., Sakamoto, H., Naito, D. (2024). Web Application of an Integrated Simulation for Aquatic Environment Assessment in Coastal and Estuarine Areas. *Environmental Modelling & Software*, 106184. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.106184>
- Meyer, D., Riechert, M. (2019). Open source QGIS Toolkit for the Advanced Research WRF Modelling System. *Environmental Modelling & Software*, 112, 166-178. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.10.018>
- Nauta, T. A., Bongco, A. E., Santos-Borja, A. C. (2003). Set-up of a Decision Support System to Support Sustainable Development of the Laguna de Bay, Philippines. *Marine Pollution Bulletin*, 47(1-6), 211-218. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00407-1](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00407-1)
- Nielsen, A., Schmidt Hu, F. R., Schnedler-Meyer, N. A., Bolding, K., Andersen, T. K., Trolle, D. (2021). Introducing QWET - A QGIS-plugin for Application, Evaluation and Experimentation with the WET Model. *Environmental Modelling & Software*, 135, 104886. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104886>
- Park, S., Nielsen, A., Bailey, R. T., Trolle, D., Bieger, K. (2019). A QGIS-based Graphical User Interface for Application and Evaluation of SWAT-MODFLOW Models. *Environmental Modelling & Software*, 111, 493-497. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.10.017>
- Prasad, R. (1967). A Nonlinear Hydrologic System Response Model. *Journal of the Hydraulics Division*, 93(4), 201-222. <https://doi.org/doi:10.1061/JYCEAJ.0001646>
- Skamarock, W., Klemp, J., Dudhia, J., Gill, D., Barker, D., Wang, W., et al. (2008). A Description of the Advanced Research WRF version 3. University Corporation for Atmospheric Research. <https://doi.org/10.5065/D68S4MVH>
- Suzumura, T., Sugiki, A., Takizawa, H., Imakura, A., Nakamura, H., Taura, K., et al. (2022). mdx: A Cloud Platform for Supporting Data Science and Cross-Disciplinary Research Collaborations. In 2022 IEEE Intl Conf on Dependable, Autonomic and Secure Computing, Intl Conf on Pervasive Intelligence and Computing, Intl Conf on Cloud and Big Data Computing, Intl Conf on Cyber Science and Technology Congress (DASC/PiCom/CBDCCom/CyberSciTech) (pp. 1-7). Falerna, Italy: IEEE. <https://doi.org/10.1109/DASC/PiCom/CBDCCom/Cy55231.2022.9927975>
- Wang, K., Nakamura, Y., Sasaki, J., Inoue, T., Higa, H., Suzuki, T., Hafeez, M. A. (2022). An Effective Process-based Modeling Approach for Predicting Hypoxia and Blue Tide in Tokyo Bay. *Coastal Engineering Journal*, 64(3), 458-476. <https://doi.org/10.1080/21664250.2022.2119011>
- Warren, I. R., Bach, H. K. (1992). MIKE 21: a Modelling System for Estuaries, Coastal Waters and Seas. *Environmental Software*, 7(4), 229-240. [https://doi.org/10.1016/0266-9838\(92\)90006-P](https://doi.org/10.1016/0266-9838(92)90006-P)

付録A EcoPARIの紹介

EcoPARI は、表 A1 の通りに開発が進められている。表 A1（1）のモデルはすでに開発されており（井上・小室，2020；田中ら，2011；田中・鈴木，2010），その概要と適用事例を付録 A.1 で示す。表 A1（2）では，本文で紹介した，前処理（EcoPARI-Web GUI Pre）と後処理（EcoPARI-Web GUI Post）を行うシステム EcoPARI-WebGUI であり，計算条件の準備と，計算結果の Web ブラウザ経由の GUI による可視化が可能である。表 A1（3）では，遺伝的アルゴリズムを用いて数値シミュレーションに設定されるパラメータのキャリブレーションを行う EcoPARI-Generic Algorithm を開発する。なお，EcoPARI-Genetic Algorithm はまだ開発段階であるため，テストランの状況を付録 A.2 で示し，その詳細については別の論文でより詳しい説明が発表される予定である。表 A1 の（参考）については，開発された EcoPARI のツールやシステムを付録 A.3 以下で紹介する。

表 A 1 EcoPARI の研究コンセプト、開発されたシステム・ツールとそれらの説明

コンセプト	開発されたシステム・ツール	システム・ツールの説明 (本論文の関連セクション)
(1) EcoPARI のソルバー	EcoPARI-Simulator (付録 A. 1)	流動と生態系の数値シミュレーションモデル.
(2) GUI システム	EcoPARI-Web GUI (本文)	計算に必要な入力データを作成し、生態系モデルの数値シミュレーション結果を可視化するシステム. Web ブラウザ上で操作できる GUI.
(3) パラメータ調整システム	EcoPARI- Genetic Algorithm (付録 A. 2)	遺伝的アルゴリズムを用いて観測値と数値シミュレーション結果を比較し、パラメータのキャリブレーションを行うシステム.
(参考) 便利で先進的なツール・システム	EcoPARI-Grid (付録 A. 3)	格子 ファイルと水深ファイルを作成するためのツール.
	EcoPARI-Remesher (付録 A. 4)	計算コストを削減するために、シミュレーションメッシュのサイズを合理的に設定 (リメッシュ) するシステム.
	EcoPARI-Parser (付録 A. 5)	リスタートファイルの格子 サイズ, 格子数, コンパートメントの値等を編集するシステム.
	EcoPARI-Boundary Condition (付録 A. 6)	大気境界条件, 河川境界条件, および開境界条件 (側方境界条件) のファイルを作成するシステム.
	EcoPARI-Post Stand-alone (付録 A. 7)	数値シミュレーション結果を 2 次元 で視覚化する Windows ソフトウェア.
	EcoPARI-Reaction (付録 A. 8)	ストックとフローを視覚化する Windows ソフトウェア.
	EcoPARI-WRF (付録 A. 9)	EcoPARI-Boundary Condition において大気境界条件の入力として使用するための WRF シミュレーションシステム.
	EcoPARI-Wave (付録 A. 10)	波浪および沿岸流シミュレーションを実行するシステム.
	EcoPARI-Data Assimilation (付録 A. 11)	EcoPARI-Simulator 用のデータ同化システム.

A.1 EcoPARI-Simulator

EcoPARI-Simulator は、沿岸域および河口域の流体力学と生態系の数値シミュレーションが可能な数値モデルである。EcoPARI-Simulator は、(1)流速、水温、塩分、水位をシミュレーション可能な流体力学モデル、(2)水中の溶存酸素、植物プランクトン、動物プランクトン、栄養塩をシミュレーション可能な生態系モデル、(3)堆積物中の初期続成過程（底質からの溶出を含む）をシミュレーション可能な底生生態系モデルで構成されている。流体力学モデルは、非静水圧モデル、汚染物質や浮遊物の発生源と漂着域を分析するための粒子追跡モデル、濃度変化を解析可能である移流拡散を計算するためのトレーサーモデル、可変格子 (variable mesh)、および高解像度で分析領域をフォーカス/ネストする Building Cube Method (BCM) で構成されている。生態系モデルは、溶存酸素、植物プランクトン、動物プランクトン、原生動物、好気性細菌、金属類、栄養塩等をシミュレーション可能なモデルであり、腐食連鎖モデル（田中ら, 2011）、二枚貝（鶴島ら, 2019）及び魚類の高次生態系モデル（井上・小室, 2020）等の特徴的なモデルが組み込まれている。EcoPARI-Simulator の出力ファイルは、使いやすいモデル出力の標準形式と考えられる NetCDF および VTK 形式で提供される。汎用的な可視化ツールの一つである ncview (cirrus.ucsd.edu/ncview) で NetCDF ファイルの結果が可視化できる。また、こちらも汎用的な可視化ツールの一つである ParaView (www.paraview.org) で VTK ファイルの結果を可視化可能である。

以下で、EcoPARI-Simulator の適用事例を紹介する。EcoPARI-Simulator（伊勢湾シミュレータ）は伊勢湾再生行動計画に沿って開発されたため、伊勢湾を対象とした適用事例が多数ある。田中ら（2012）は伊勢湾における河川負荷の削減が一次生産性と酸素枯渇に与える影響を数値実験によって調査した。その結果、河川負荷の削減により河口付近の局所的な一次生産性が減少するが、湾全体ではほとんど改善しないことが示された。永尾ら（2019）は下水処理場での栄養塩の排出量と伊勢湾内の一次生産、二次生産、二枚貝資源の関係に関する数値シミュレーションを実施した。その結果、栄養塩を増やすことで、これらを増加できることが示された。また、その地理的条件により、窒素やリンの濃度が低い海域には、栄養塩を効率的に供給することができないことも示された。鶴島ら（2023）は 2000 年代以降、夏の底層に貧酸素水塊が発生する要因を分析し、底層からの外洋水の流入と貧酸素水塊の大きさの関係性を示唆した。永尾・中村（2018）は微生物ループを調査し、窒素とリンの濃度がさらに低下すると、食物連鎖における微生物食物網の割合が増加し、一次生産から二次生産への移行効率が低下することを明らかにした。鶴島ら（2019）は 1990 年代後半から 2010 年代にかけての長期予測計算を行い、2010 年頃からアサリの肥満度が低下し、産卵数も減少すると予測した。Matsuzaki and Kubota (2024) は伊勢湾への河川流量の不確実性に基づいて、現況予測 (nowcast) あるいは短期予測 (forecast) に関する数値予測モデルでシミュレートされた塩分と海水温の誤差範囲を推定した。この方法による現況予測に用いられた年間河川流量の不確実性は $\pm 30\%$ 以内と推定された。また、河川流量の不確実性に基づく塩分と海水温の年間シミュレーション誤差範囲は、それぞれ約 $\pm 1.2^{\circ}\text{C}$ と $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$ と推定された。

また、EcoPARI-Simulator は伊勢湾以外の沿岸域や河口域にも適用されている。貧酸素水塊や青潮の発生が問題となっている東京湾を対象とした数値シミュレーションでは、Wang et al. (2022) が底層水の溶存酸素濃度と青潮の発生について詳細な数値シミュレーションを実施した。比嘉ら（2023）は硫化物・鉄・マンガン循環に着目して流域河川及び湾内における現地観測及び 3 次元浮遊系-底生系結合モデルによる数値解析を行った。その結果、水中の溶存酸素濃度、溶存態鉄濃度、硫化水素濃度と、堆積物中の溶存態鉄、溶存態マンガンの鉛直分布を概ね再現することができた。Hafeez et al. (2024) は窪地での酸素減少が問題となっている大阪湾で数値シミュレーションを実施した。高解像度のメッシュ構成で窪地内の流体力学を正確にシミュレーションするために BCM (Building Cube Method, 付録参照) を使用し、高解像度に窪地内の数値シミュレーションを行うことに成功した。汽水への応用も報告されている。Hafeez and Inoue (2024) は日本の宍道湖で観測された塩水侵入と密度成層を正確にシミュレートしようと試みた。その結果、夏季の塩水侵入や、9 月の強い西風による湧昇を再現することができた。なお、追加の適用事例は港湾空港技術研究所のホームページ (<https://www.pari.go.jp/unit/mpmg/is/>, 最終アクセス日 2024 年 10 月 15 日) で紹介する予定である。

本研究で紹介した EcoPARI-Simulator の定量的な精度は先行研究で検証されており、様々な海域での実用化が進んでいる。低次から比較的高次まで幅広い生態系をシミュレーションできるため、数値シミュレーションに習熟しない者（例えば、国土交通省職員などの港湾計画の策定者や港湾管理者）から専門家（建設コンサルタント技術者やモデリング研究者）まで、あらゆるスキルレベルの人が利用できる。そのため、EcoPARI-Simulator は幅広いユーザーによって、さまざまな用途で広く活用されることが期待される。

今後の開発予定は以下のとおりである。EcoPARI シミュレータの二枚貝および魚類モデルの精度はまだ十分に検証されて

いない。さらに、海洋領域が変化する場合には、生態系モデルのパラメータ調整が必要である。経験上、伊勢湾などで検討されたパラメータを使用しても日本沿岸域では概ね計算できるものと考えているが、現地のデータと比較した精度の確認は必須であると判断される。

A.2 EcoPARI-Genetic Algorithm

EcoPARI-Genetic Algorithmは、観測値と数値シミュレーション結果の比較に基づき、遺伝的アルゴリズムを用いてパラメータのキャリブレーションを行う。遺伝的アルゴリズムは、生物の「遺伝子」の組み合わせとしてパラメータの組み合わせが表現される多数の「個体」から始め、適応度の高い個体を優先的に選択して世代交代を繰り返しながら解を探索し、最適なパラメータを算出する。適応度は相関係数と誤差で決まる。この手法の特徴は、適応度分布が多峰性を示す場合、適応度の低い個体も意図的に残存させることで、局所最適解の選択を回避することができることである。

図A 1はEcoPARI 遺伝的アルゴリズムを使用した実験パラメータの較正による堆積物の硫化物と鉄の垂直分布を示している。結果は、一般的なパラメータを使用した場合、硫化物はほとんど生成されないことを示しているが、パラメータを調整することで、数値シミュレーションは観測された傾向とほぼ一致した。その際に、鉄などのすでに十分な精度でシミュレーションされているコンパートメントの値を大幅に変更することなく、妥当な結果が得られた。

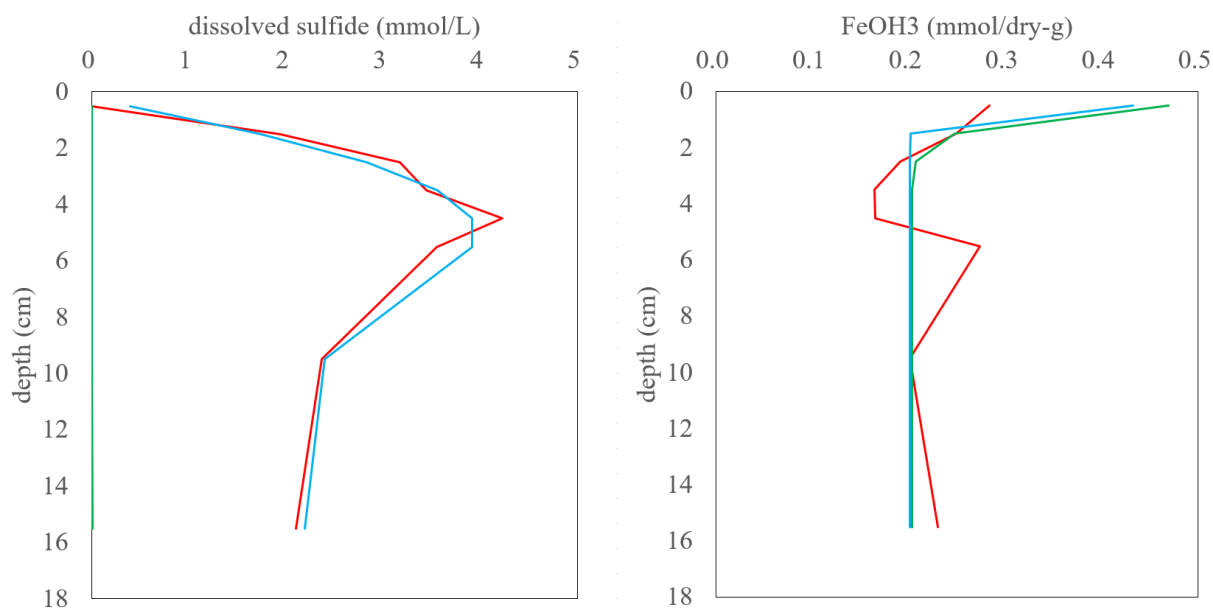


図 A 1 底層における硫化物（左）と鉄（右）の鉛直分布。赤線：観測値，緑線：一般的なパラメータを使用した際の数値シミュレーション結果，青線：EcoPARI-Genetic Algorithm で取得したパラメータを使用した数値シミュレーション結果。

A.3 EcoPARI-Grid

EcoPARI-Grid (図A 2) を使用すると, EcoPARI シミュレータに入力する地形 (水深) ファイルを作成できる. また, 地形変化のシミュレーションも比較的簡単に実行できる. 例えば, 浅瀬や干潟の形成による影響や, 窪地の埋め戻しによる影響などをシミュレーション可能である.

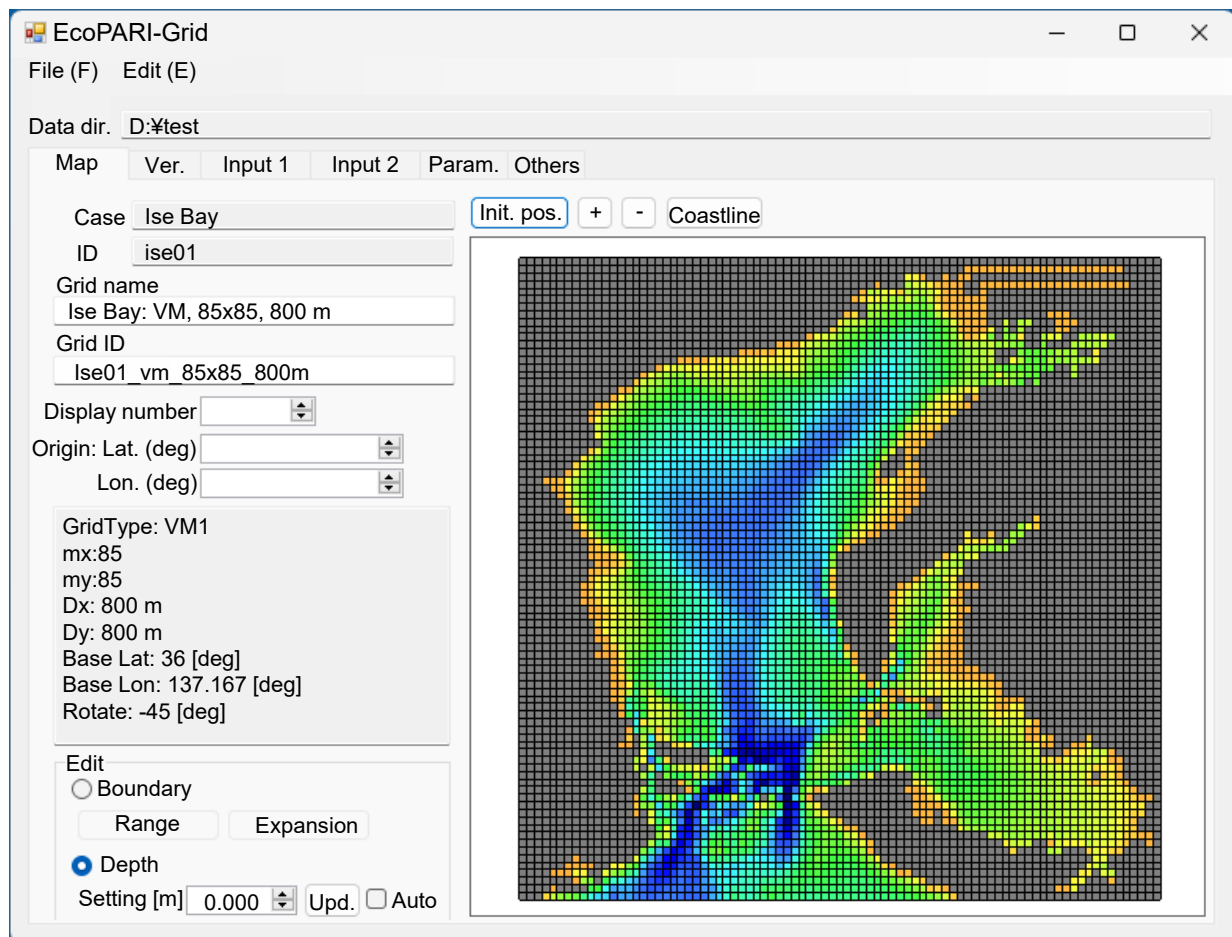


図 A 2 EcoPARI-Grid のスクリーンショット

A. 4 EcoPARI-Remesher

EcoPARI-Remesher は、BCM で使用できる合理的なメッシュ分割を目的としたツールである。関心のある数量が同一の場合に、隣接するメッシュを結合する。図A 3はEcoPARI-Remesher を使用して最適な格子を作成する例を示す。水流速度の変化が大きい領域では再メッシュを実行できないため、詳細なメッシュが保持される。対照的に、水平方向の均一性が高い領域では再メッシュを実行し、メッシュは粗くなる。

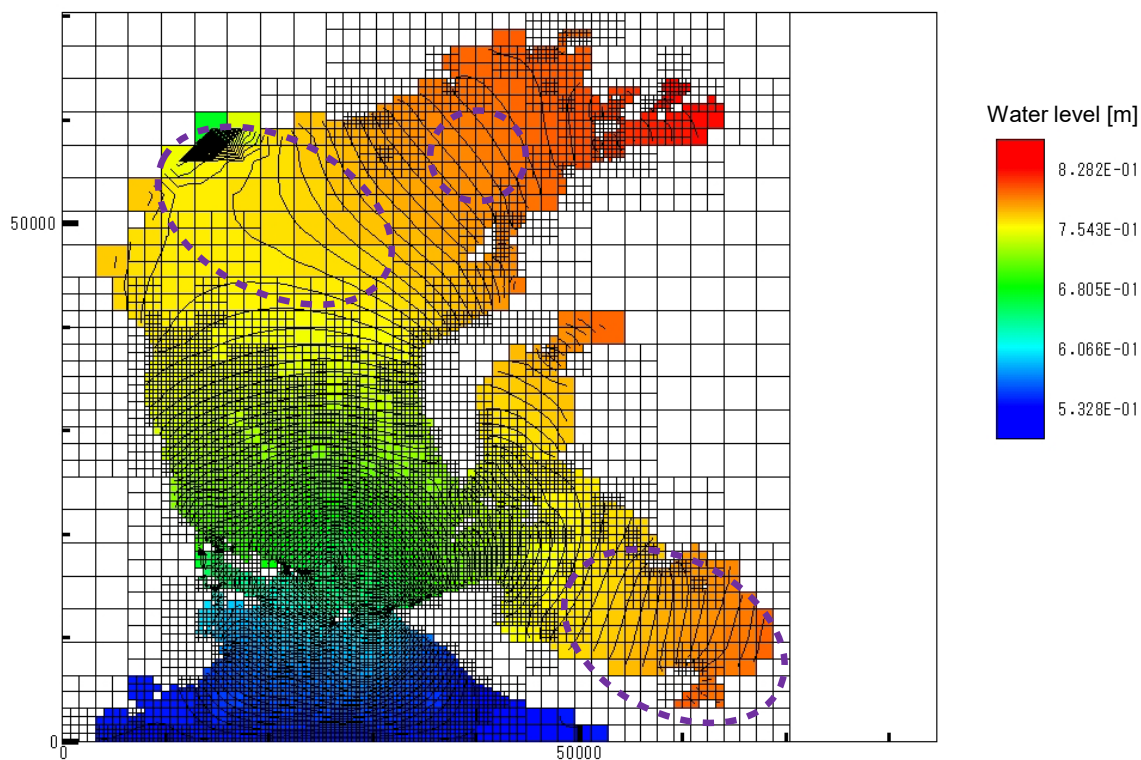


図 A 3 EcoPARI-Remesher を使用して伊勢湾の最適格子を作成した例. 直交する黒の実線は計算格子, 曲線は水位等高線, カラーバーは水位を表している. BCM でより細かい格子を計算するのに適した領域と, 格子が粗くても精度を維持できる領域 (紫の点線) を示している.

A. 5 EcoPARI-Parser

EcoPARI-Parser（図A 4）は、既存の初期条件ファイルを編集して、ユーザーが任意の初期条件を簡単に作成できるようにするツールである。例えば、感度解析のために、底層の溶存酸素のみが異なる 2 つの数値シミュレーションを実行する際に、EcoPARI-Parserを使用して底層の溶存酸素濃度が異なる初期条件ファイルを作成するような用途に用いる。

EcoPARI-Parser

Org. restart dir. F:\test\test_vm\restart Ref.

Export Import Convert

CSV out. dir. F:\test\test_vm\restart Ref.

CSV filename data

Output range

x direction 1 ~ 3

y direction 1 ~ 6

z direction 1 ~ 5

Benthic z direction 1 ~ 10

BCM Level

Start time 1. istep=1, time=300.0

End time 8. istep=20, time=6000.0

Option

Execution

tt ss ql ccpl ceg ccbt bmei1 bmdf1 bmdf2

All selection All deselection

図 A 4 EcoPARI-Parser のスクリーンショット

A. 6 EcoPARI-Boundary Condition

EcoPARI-Boundary Condition は、大気、開境界（側方）、開境界潮位、河川の各境界条件の境界条件データセットを作成する。現在、大気境界条件の作成可能範囲は日本の沿岸および河口域全体であり、河川境界条件、開境界条件、開境界潮位条件は伊勢湾と東京湾である。

EcoPARI-Simulatorでは、短波放射、長波放射、大気圧、気温、風向風速、水蒸気圧、降水量が大気境界条件の変数として使用される。EcoPARI-Boundary Condition において気象庁がシミュレーションしたGlobal Spectrum Model (GSM), MesoScale Model (MSM), Local Forecast Model (LFM), JRA-55領域ダウンスケーリング (DSJRA-55, Kayaba et al. 2016), ユーザーがWRFで実施した気象シミュレーション結果、AMeDAS（アメダス）の気象観測結果が入力条件として利用できる。EcoPARI-Boundary Conditionへの入力条件として利用可能な各データセットの特徴は表A 2にまとめられる。GSM, MSM, LFMの天気予報の格子 サイズと予報時間には、一定のトレードオフがある。たとえば、EcoPARI シミュレータを使用して長期予報を行う場合は GSM を選択し、過去解析を行う場合は LFM などの高時空間解像度のデータセットを使用する。一方、WRF はより細かい空間解像度を可能にし、高解像度の分析に適している。AMeDAS 観測は陸上で行われ、風速と気温の傾向は海と陸で異なるため、気象モデルの出力が利用できない場合を除いて AMeDAS の利用は推奨されない。

河川流量、水温、栄養塩は、河川境界条件としてEcoPARI-Simulatorに入力される。河川流量は、貯留関数法(Prasad, 1967)により、降水量に基づいて計算するか、流域雨量指数(太田・牧原, 2015)によって作成することが可能である。河川水温は、気温との相関関係から算出する。栄養塩は過去の観測値に基づいて河川流量と濃度の関係（L-Q曲線）を決定することによって計算される。

EcoPARI-Simulator では、潮位、水温、塩分、溶存酸素、栄養塩などの側方境界条件が入力として設定される。潮位は、伊勢湾と東京湾の湾口付近にある赤羽根観測所と布良観測所の天文潮位予測値を用いて計算される。水位は、気圧補正したものや、気象庁が 2 km 格子でシミュレートした海流データセット（日本沿岸海況監視予測システムGPV）から得られる値を入力することができる。水温と塩分は、日本沿岸海況監視予測システムGPVを設定する。あるいは、愛知県水産研究所と千葉県水産研究センターが伊勢湾と東京湾を対象に毎月観測した10年間の統計値を選択することも可能である。溶存酸素濃度は飽和値を設定する。なお、本研究の対象である伊勢湾では、過去の飽和を仮定した数値シミュレーション結果に基づき、飽和を仮定しても問題ないと判断されている(田中ら, 2011)。栄養塩類は、愛知県水産研究所と千葉県水産研究センターが伊勢湾と東京湾を対象に毎月観測した10年間の統計値を用いている。EcoPARI-Boundary Conditionシステムで作成した境界条件データセットは、いくつかのアプリケーションで使用されており、境界条件ファイルが適切に処理されていることが確認されている(Matsuzaki and Inoue, 2022; Matsuzaki and Kubota, 2024)。

表 A 2 EcoPARI-Boundary Condition で大気境界条件を作成する際の入力データセット

データセット名	格子サイズ	更新時間間隔	予報時間	データセットの期間
GSM	20 km	6 時間毎	11 日間	2007 年 11 月-2023 年 3 月
	10 km			2023 年 3 月-現在
MSM	5 km	3 時間毎	78 時間	2006 年 3 月-現在
LFM	2 km	1 時間毎	10 時間	2014 年 3 月-現在
DSJRA55	5 km	1 時間毎	(再解析データセットのため予報は無い)	1958 年 1 月-2012 年 12 月
WRF	条件設定による	条件設定による	条件設定による	条件設定による
AMeDAS	-	10 分毎	(観測値)	現在まで

A.7 EcoPARI-Post Stand-alone

EcoPARI-Post Stand-aloneは、Windowsコンピュータにインストールされる計算結果を解析するためのソフトウェアである（図A 5）。ユーザーの選択に応じて、2次元の平面図、x-zおよびy-zの断面図、コンターと流速ベクトルを描画したり、任意の場所のコンパートメントをテキストとして抽出することができる。機能は3次元描画機能を除いてEcoPARI-Web GUI Postと同じであるが、モデル出力ファイルがローカル環境にある場合は描画速度が速くなるという利点がある。

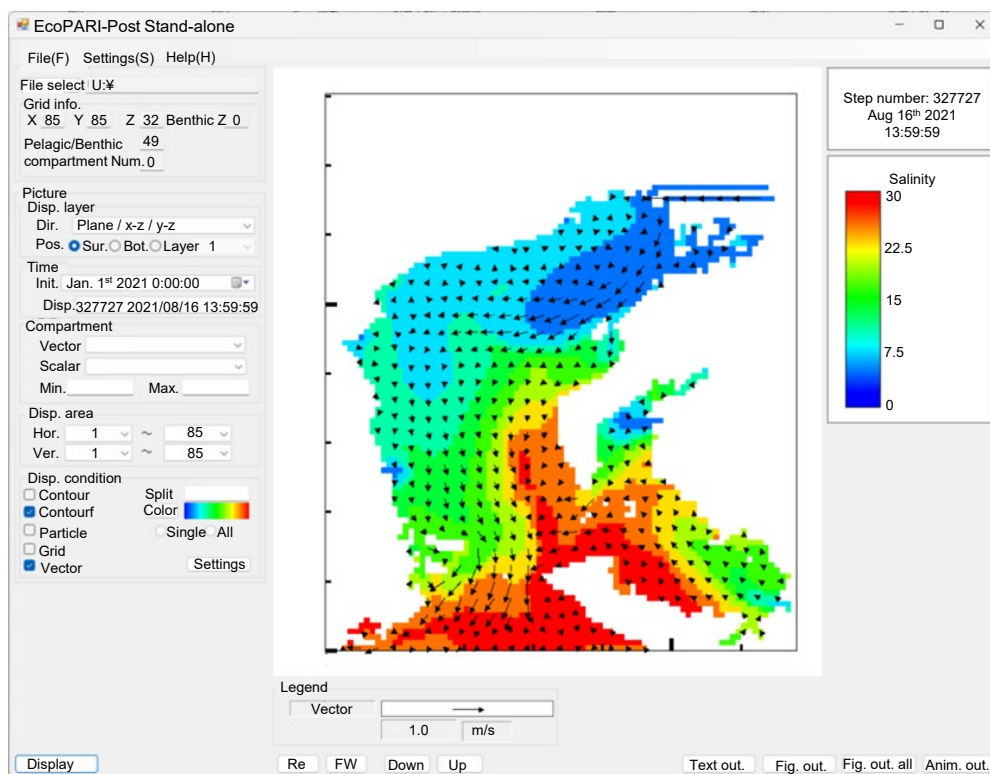


図 A 5 EcoPARI-Post Stand-alone のスクリーンショット

A. 8 EcoPARI-Reaction

EcoPARI-Reactionは、生態系モデルの反応速度を可視化し、計算結果のスカラー量（ストック）と生態系モデル内の反応速度（フロー）を定量化することができる。また、計算結果のスカラー量（ストック）と生態系モデル内の反応速度（フロー）を可視化することができる（図A 6）。各スカラー量（ストック）、反応速度（フロー）の左隣には、それぞれの値の大きなものからの順位が表示され、どのスカラー量、反応速度が重要であるのかを推察することができる。

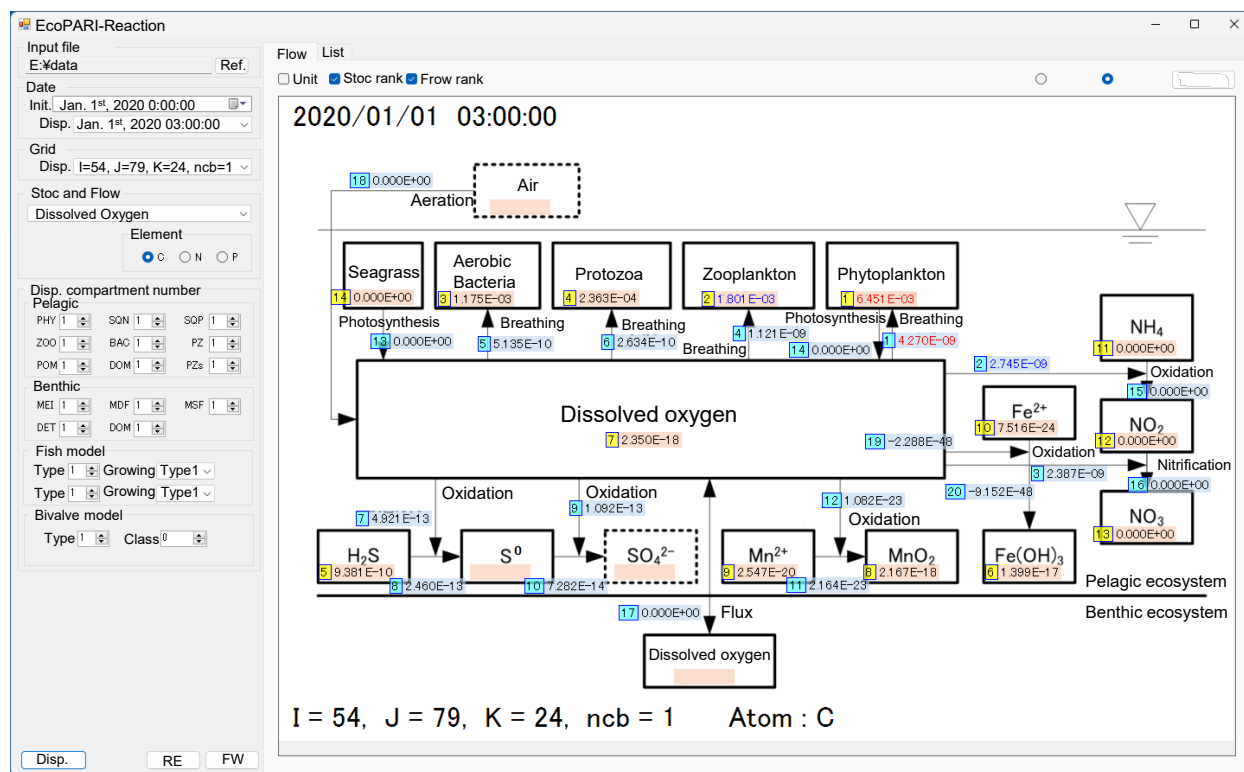


図 A 6 EcoPARI-Reaction を使用して溶存酸素のストックとフローを可視化した例。計算対象外の項目については、空欄で表示される。

A. 9 EcoPARI-WRF

EcoPARI-WRFはWRFモデルを使用して気象データを出力する(Skamarock et al., 2008)。日本の沿岸域の高精度な気象シミュレーションを提供するために、気象シミュレーションにおける大気、海面水温、高度/土地利用の入力データが日本向けに修正されている(Matsuzaki et al., 2021)。EcoPARI-SimulatorとEcoPARI-WRFを用いて算出した溶存酸素濃度の精度検証を行ったところ(Hafeez et al., 2021)、浅瀬では底溶存酸素の変動の 80% 以上、深海では 90% 以上を再現した。

A. 10 EcoPARI-Wave

EcoPARI-Waveでは、SWAN(Booij et al., 1999)と呼ばれるプログラムを使用して波浪をシミュレートできる。また、沿岸流は、EcoPARI-Simulator を使用して EcoPARI-Wave に入力することで計算できる。

A. 11 EcoPARI-Data Assimilation

EcoPARI-Data Assimilationは、アンサンブルカルマンフィルタ(Evensen, 2003)が採用されている。EcoPARI-Data Assimilationによって短期予測の初期条件を作成するためのデータ同化システムを構築する研究が行われている(Matsuzaki and Inoue, 2022; 松崎・井上, 2022)。

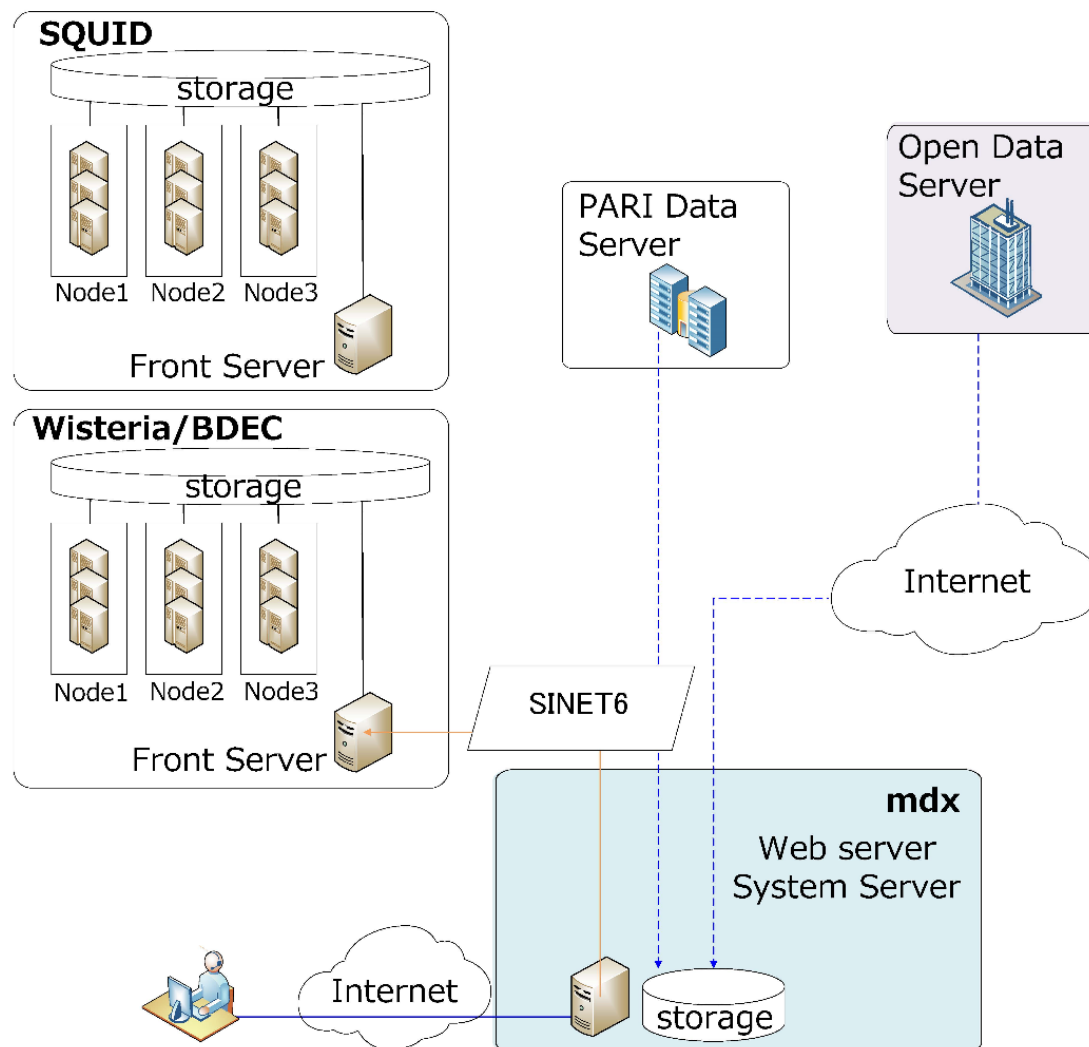
付録 B EcoPARI-Web GUI の現状の運用環境

EcoPARI-Web GUI は Linux 環境にインストールすることができ、現在は港湾空港技術研究所内のオンプレミス環境と、mdx(Suzumura et al. 2022)と呼ばれるクラウドプラットフォーム (図 B 1) にインストールされている。

オンプレミス環境においては、EcoPARI-Web GUI Pre を単独の Linux コンピュータにインストールし、主として動作確認や、テストランデータセットの作成等に利用している。EcoPARI-Web Web GUI Post はクラスタ計算機 (管理ノード 1 台、EcoPARI-Web GUI Post 用ノード 1 台、計算ノード 18 台、大規模ストレージ) にインストールした。計算ノードで計算された数値シミュレーション結果は大規模ストレージに保存される。EcoPARI-Web GUI Post 用ノードで大規模ストレージをマウントすることで、計算結果を Web ブラウザから可視化可能となっている。

mdx は、学術情報ネットワーク 6 (SINET6) と呼ばれる専用回線を介して日本の大学や公的研究機関に接続されており、比較的安全に利用することができる。2024 年 10 月時点では、mdx から提供いただいている固定 IP アドレスにドメイン (www.ecopari.pari.go.jp) を設け、その下に EcoPARI-Web GUI 及び EcoPARI-Genetic Algorithm をインストールして運用している。

現在、mdx から大阪大学 D3 センターの SQUID と東京大学情報基盤センターの Wisteria/BDEC というスーパーコンピュータに Web ブラウザ上から直接計算ジョブを投入できるようにシステム開発中であり、それが実現すると、プリプロセス—計算実行—ポストプロセスという、一連の計算実行が Web ブラウザ上で完結するようになり、容易な計算実行が一段と進むことが期待される。また、将来的には mdx 上でお試しの計算ができるくらいの規模の計算を実行できるようにシステムを構築し、手軽に EcoPARI を試用できる環境を整えたい。そうすることでさらに、EcoPARI 利用のすそ野が広がることが期待される。



図B1 mdx サーバーにインストールされた EcoPARI-Web GUI の構成. ユーザーはmdx に Web ブラウザでアクセスし, EcoPARI-Web GUI の操作が可能. mdx は大阪大学のスーパーコンピュータ SQUID と東京大学のスーパーコンピュータ Wisteria/BDEC と SINET6 で接続されており, 将来的には Web ブラウザで接続した mdx からスーパーコンピュータに計算ジョブの投入をできるように改良を行う.

港湾空港技術研究所資料 No.1420

2024. 12

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <https://www.pari.go.jp/>

Copyright © (2024) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。