（釜慶大学校（大韓民国））　研修報告書
（研修テーマ）機械学習を用いた溶存酸素（DO）予測モデルの開発

先進理工系科学研究科　社会基盤環境工学プログラム　佐藤駿介

1. はじめに

本研修では，韓国・釜山の釜慶大学海洋流体力学研究室（指導：Prof. Kyunghoi Kim, Dr. Seongsik Park）において，衛星リモートセンシングデータを使った機械学習により，瀬戸内海の底層 DO を高精度に予測するモデルの構築を行った．Dr. Park の先行研究では，夏季に貧酸素水塊が多発する韓国の沿岸域を対象に，水質観測当日の衛星データのみが使われていた．本研究では，表層での現象が底層まで影響が及ぶ時間遅延（タイムラグ）を考慮し，1- 2 日前，8 日平均，前 8 日平均など多様な時系列要約の有効性を評価した．また，内湾と外湾の区別が精度に与える影響も検証した．

2. 研修/共同研究課題の決定

2.1 背景

海域において，環境基準である COD（化学的酸素要求量），N，P は有機汚泥物質及び富栄養化をもたらす栄養塩類の指標とされていたが，平成 28 年には，底層に棲む生物の生息，再生産の指標として DO が環境基準として設定された．瀬戸内海は DO 測定の対象として国が類型指定を行っており，測定が必須となっている．

瀬戸内海は複雑な地形と閉鎖性を併せ持ち，時空間的に DO が大きく変動する．広域・高頻度の水質把握にはコスト制約があるため，衛星データを説明変数とする機械学習モデルによる補完が有望である．また将来的な展望として，モデルの構築によって類型指定されていない海域に適用することができれば，広域的な DO 状況の把握に寄与することができる．

2.2 目的

(1) タイムラグを考慮した衛星データ利用の有効性検証　(2) 内湾・外湾のモデル分離による精度向上の検証 (3) 実運用を見据えた欠損耐性（8 日平均等）の確認

3. 研修/共同研究スケジュール

2025 年 8 月 1 日　出国
　　データの確認，研究方針の再確認
2025 年 8 月 12 日　中間発表
2025 年 8 月 14 日　最終発表
2025 年 8 月 16 日　帰国

4. 研修先/共同研究派遣先の概要

- 派遣大学：釜慶大学（Pukyong National University）
- 所在地：韓国・釜山広域市
- 設立：1996 年．韓国最大級の海洋・水産系国立大学で，海洋科学・水産学・工学・環境学で国内トップクラス．
- 研究室：海洋流体力学研究室／指導教員：Prof. Kyunghoi Kim ，Dr. Seongsik Park

5. 研修/共同研究の内容

5.1 研究対象とデータ

- 対象海域：瀬戸内海（13 海域に区分，うち 3 つが湾）（**図-1**）
- 目的変数：現場観測 DO（約 2.1 万件；年 4 回程度の測定）
- 説明変数（衛星）：SST，Chl，PIC，POC，Rrs（10 波長：412- 678nm）など（原データは日次）

- 時系列派生：The day / 1-day-ago / 2-days-ago / 8-day-ave. / previous 8-day-ave. を比較
- 参考：海域区分・採水位置や DO 時系列の特徴を事前可視化し，内湾の遅延・安定性に着目

5.2 データ前処理
- 位置補完：観測点と衛星ピクセルの空間差を上限距離内で補間（平均約 1.97 km）
- 外れ値処理：負の Rrs は原理上不可能のためゼロ化/除外をケースに応じて選択
- 欠損補完：コア変数と補助変数を導入し，コアに合わせ統計的補完．補助が多すぎると補完頻度増で悪影響が出うる点にも配慮

5.3 モデル・学習設定
- モデル：ニューラルネットワーク（NN），比較としてガウス過程（GP）
- HP 最適化：ベイズ最適化で探索
- 変数重要度：ランダムフォレストで寄与度評価- SST が最大，次に Chl
- 検証：学習/検証/テストの分割を明示し，各タイムラグ・海域分割条件で R^2/MSE/RMSE/MAE を算出

5.4 実験設計（比較軸）
- タイムラグ：当日 vs 1 日前 vs 2 日前 vs 8 日平均 vs 前 8 日平均
- 海域分割：内湾／外湾を別モデルで学習する条件と，統合モデル条件を比較
- 特徴量群：コアに 8 日平均を据え，補助に前 8 日平均 SST/Chl 等を組み合わせた条件も検討

5.5 主な結果
- タイムラグの効果：当日より 1 日前や 2 日前，8 日平均の方が高精度になるケースが多い．R^2：The day：0.648，1-day-ago：0.602，2-days-ago：0.663，8-day-ave.：0.693，previous 8-day-ave.：0.681
- 海域分割の効果：内湾・外湾の別モデルにより精度が向上．最良条件では R^2=0.726 を達成（8 日平均＋前 8 日平均 SST/Chl を軸とする設計）（**図-2**）
- 変数重要度：SST＞Chl の寄与．SST は混合・代謝活性，Chl は生産・沈降を通じ底層酸素消費に関与

5.6 考察（物理・化学プロセスとの整合）
- 表層→底層への情報伝達に遅延：生産（光合成）→沈降→分解の過程で底層 DO は遅れて応答．夏季は成層強化で鉛直混合が起こりにくく，表層情報が底層へ届くまで時間を要するため，数日前～週次平均が説明力を持つ
- 内湾の安定性：海水交換が弱く，タイムラグ影響が大きく顕在化．内外湾の別モデルが合理的
- 実務的含意：8 日平均は欠測耐性が高く，運用上の頑健性を確保できる

5.7 限界と課題
- 観測頻度と衛星可視性の制約により，季節・天候偏りが残る可能性
- 衛星日次と底層実態の時空間スケール差
- 風・潮汐・流況等の物理場を組み込むことで，さらなる改善余地
- 補完の多用はバイアスを生む可能性があるため，コア/補助設計の厳密化が必要

.

5.8 今後の展開
- 季節別感度の掘り下げと物理場（風応力・潮汐・混合指標等）との統合

- 他海域への汎化

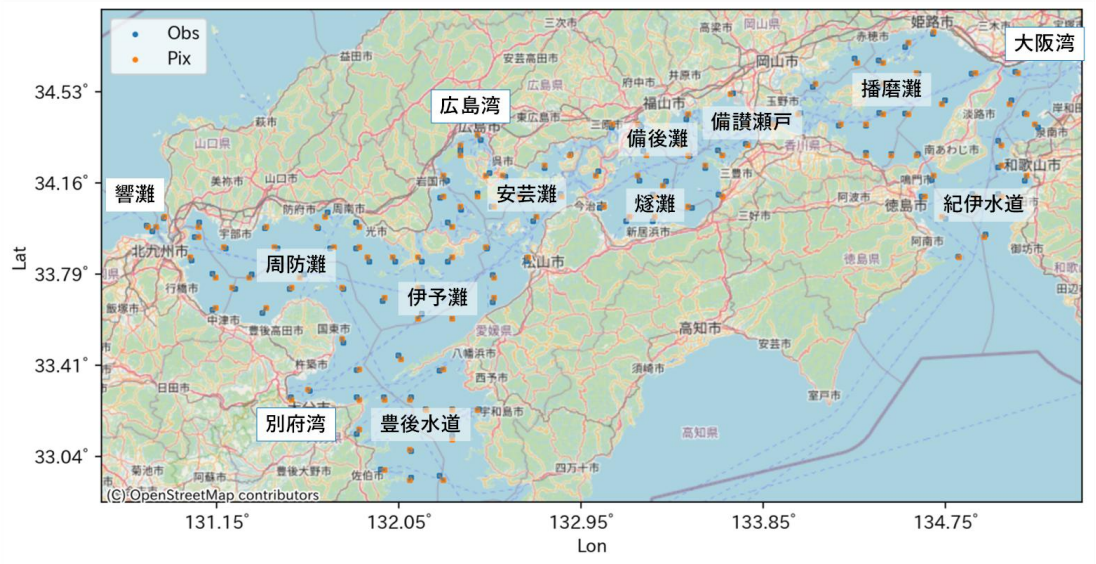


図-1 瀬戸内海の13海域，DO測定点(Obs)と衛星データの補完位置(Pix)

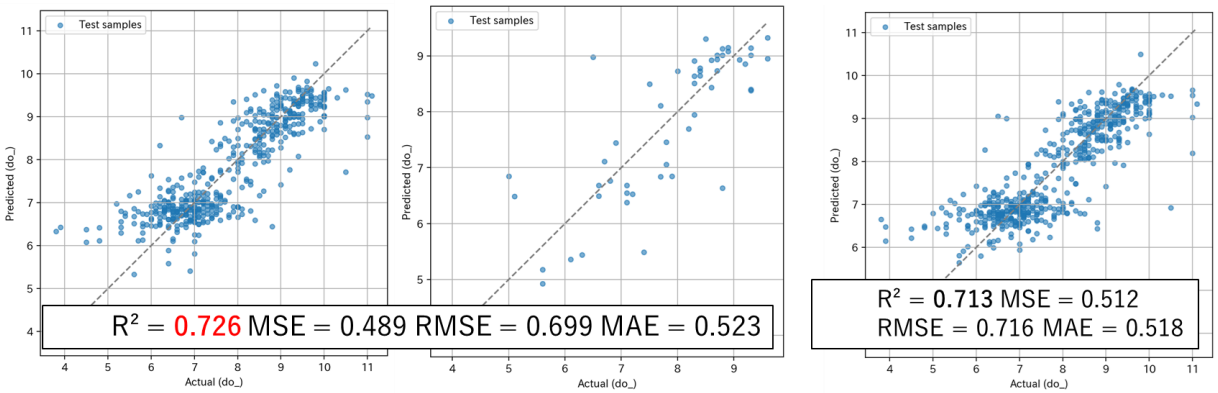


図-2 湾と湾外で分けて構築したモデルの性能（左中）と併せて構築したモデルの性能（右）

6. まとめ

6.1 研究成果

(i) 数日前・8 日平均を含むタイムラグ考慮が底層 DO 予測に有効　(ii) 内湾/外湾の別モデルが精度向上に寄与　(iii) 8 日平均は欠測耐性の観点から運用上の利点が大きい
最良条件で R^2=0.726 を達成し，物理・化学プロセスとも整合した知見を得た．今後は物理場統合と運用系設計により，他海域への展開を図る．

6.2 現地交流

研究室の学生とは，記念撮影でキャンパス内を周ったり，誕生日会，送別会，また海岸散策等，たくさんの交流を行ったりすることがきました．常駐の学生はマレーシア２，セネガル 1，韓国１と国際色豊かで，研究室での公用語は英語でした．研究や日々の生活を通じて毎日英語を話したことで，英語の力も身に着けることができたと思います．休日は登山で体を動かし，現地の方と積極的に交流を図りました．

7. 謝辞

本研究で身に着けた，外部からデータを必要な時間，場所に合わせてプログラムでダウンロードし，また補完するといった力は，今後の研究および研究室の他の学生に還元できると思います．本研究においてお世話になりました，Prof. Kim ，Dr. Park，日比野先生，現地の学生の皆様，広島大学の諸先生方，支援室の方々に，深く御礼申し上げます．