

「大阪湾水質予測システム」の構築に向けた検討について

齋藤 杏子

近畿地方整備局 神戸港湾空港技術調査事務所 調査課（〒651-0082 神戸市中央区小野浜町7番30号）

大阪湾では、湾奥部の底層溶存酸素量が不足するなど、慢性的な水質汚濁に対して、「大阪湾再生行動計画」を策定し、環境改善施策を推進しているところであり、大阪湾の海洋環境に係る施策の検討及び評価においては、モニタリング等による水質の把握が不可欠となっている。

本研究では、大阪湾沿岸12地点において多層・多項目での1時間毎の自動観測を行い、その観測値をリアルタイムに配信している「大阪湾水質定点自動観測システム」、及びそのデータ等を用いて大阪湾全体の水質の挙動を把握することを目的とした「大阪湾水質予測システム」構築における検討について報告する。

キーワード 大阪湾、海域環境、貧酸素水塊、水質調査、モニタリングポスト

1. はじめに

大阪湾は、瀬戸内海の東端に位置する閉鎖性の高い海域であり、背後には大きな人口、産業集積を有する集水域を抱えている。これらの特性により、大阪湾は陸域から大量の汚濁負荷が流入するとともに、外海との海水交換が起こりにくいため、水質の悪化が生じやすい。このような状況の中、「大阪湾再生行動計画（第二期）」（大阪湾再生推進会議）では、水辺を快適に散策できる海（湾奥部）、水に快適に触れあうことができる海（湾口部、湾央部）を目指して、“美しい「魚庭（なにわ）の海」”を目標として掲げており、汚濁負荷やごみの削減等の取り組みを行うとともに、効果を把握するため、水質環境のモニタリングの充実に取り組んでいるところである。

そこで、大阪湾沿岸12地点においてモニタリングポストを設置し、1時間毎の観測値をリアルタイムでweb配信する「大阪湾水質定点自動観測システム」を2010年に構築した。一方、観測地点は沿岸域の12地点のみであり、湾奥沿岸部に偏在していることから、未観測エリアも含めた大阪湾全体の水質を把握するため、大阪湾水質定点自動観測システムの取得データの他河川データ、気象データ等を使用して水質シミュレーションを行う「大阪湾水質予測システム」を構築する運びとなった。

本論文では、リアルタイムの水質データの取得を行う「大阪湾水質常時観測システム」及びそのデータ等を用いてリアルタイムに大阪湾の水質シミュレーションを行

うことにより、大阪湾全体の水質の挙動を把握する「大阪湾水質予測システム」構築に向けた検討について報告する。

2. 「大阪湾水質定点自動観測システム」について

(1) 大阪湾水質定点自動観測システムの概要

これまでのわが国の海洋モニタリングは、公共用水域水質調査のような定期モニタリングや、場所・期間の限られた監視調査等がほとんどであり、測定頻度は年4回や月1回程度で、測定層も上層や下層の2層程度であった。このように従来のモニタリングデータは時間的・空間的に限られた情報であり、大阪湾全体の水質の挙動を把握するには、データが不足している状況であった。そこで、水質・流況等のデータを常時取得する水質定点自動観測機器を大阪湾内12地点に設置し、2010年から常時観測を行っている。（図-1）



図-1 水質定点自動観測機器の配置図

水質定点自動観測システムでは、大阪湾内の波浪観測塔や灯浮標、岸壁等の既設構造物等12地点に自動観測機器を設置し、水温、塩分、DO、光量子、流向・流速、風速等多項目の測定を実施している。流況、水質ともに鉛直方向間隔1m、時間間隔60分で計測され、その結果をインターネットでリアルタイムに配信している¹⁾。(表-1、図-2)

表-1 水質定点自動観測機器の観測内容

No.	モニタリングポスト	水温	塩分	DO	chl.a	濁度	光量子	流況	風況	観測方式
①	明石海峡航路東方灯浮標	○	○							固定式(1層)
②	洲本灯浮標	○	○							固定式(1層)
③	関空MT局	○	○	○	○	○	○	○	○	自動昇降式
④	神戸港波浪観測塔	○	○	○	○	○	○	○	○	自動昇降式
⑤	淀川河口	○	○	○	○	○	○	○	○	固定式(3層)
⑥	阪南伸陸地	○	○	○	○	○	○	○	○	自動昇降式
⑦	堺浜	○	○	○	○	○	○	○	○	自動昇降式
⑧	神戸六甲アイランド東水路中央第三号灯標	○								固定式(18層)
⑨	近寺航路第十号灯標	○								固定式(18層)
⑩	淡路交流の裏港	○	○							固定式(2層)
⑪	須磨海づり公園	○								固定式(2層)
⑫	大阪港波浪観測塔	○	○	○	○	○	○	○	○	自動昇降式

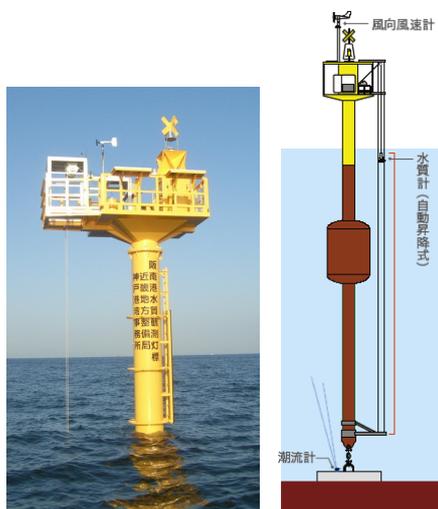


図-2 設置状況及び設置イメージ

(2) データの活用及び分析

水質定点自動観測システムでは、従来の定期モニタリング等では取得できなかった様々な条件下での水質データを取得することができる。そのため、大阪湾の環境特性を解明する上で重要な、台風通過時や大出水時等における水質変化状況も把握することが可能になった。図-3には台風通過時における大阪港波浪観測塔のDO飽和度の変化を示しており、貧酸素水塊の一時的な解消やその後の再形成など、台風通過に伴う貧酸素水塊の挙動が確認できる。貧酸素とは、水中の生物に必要な酸素が十分でない状況であり、風や潮汐により海水が攪拌されると、貧酸素水塊は生じない。

また、水質定点自動観測システムでは、複数の地点で同時刻に連続して測定を行っているため、測定時間のずれ等による誤差を含んでいた従来の定期モニタリングデータと異なり、海域による水質特性の違いをより正確に把握することが可能になった。各観測地点における貧酸素(DO飽和度40%以下を貧酸素と定義)の最大継続日数

をみると(図-4)、堺浜では130日以上貧酸素が継続しており、他海域に比べて、強風等による一時的な貧酸素水塊の解消が生じにくい状況がうかがえる。また、出水の影響を受けやすい淀川河口では、神戸港波浪観測塔や大阪港波浪観測塔に比べて貧酸素の最大継続日数が短い傾向も確認できる。

図-5には、貧酸素水塊形成期(4~7月)における神戸港波浪観測塔での水温差(海面下0.5mの水温と測定最下層の水温の差)と底層DOの相関を示しており、底層が貧酸素化している時期の水温差は概ね2℃以上であり、水温差がそれ以下の場合にはほとんど貧酸素化しないことが確認できる。水質定点自動観測システムでは、多項目の水質データを長期にわたり連続的に取得しているため、このような水質項目間の関係性や気象変化との対応について詳細に分析することが可能になった。

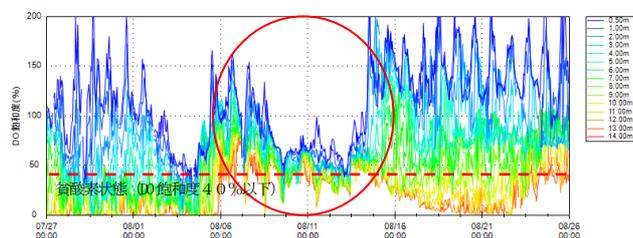
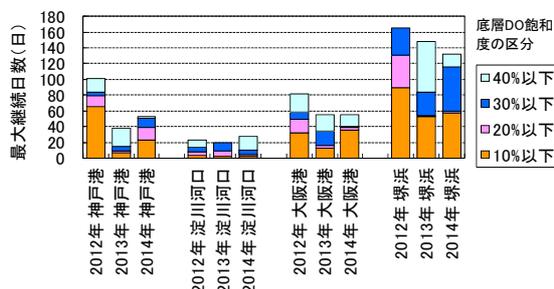
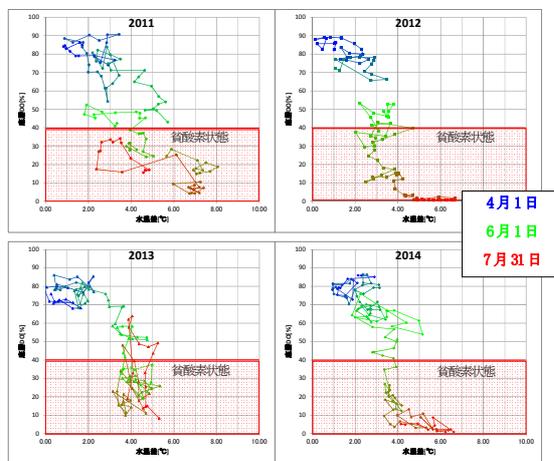


図-3 DO飽和度の時系列図(大阪港, 台風時)



注) DO飽和濃度の日平均値に基づき算定

図-4 貧酸素の最大継続日数



注)水温差:[海面下0.5mの水温]-[測定最下層の水温]

図-5 水温差と底層DO相関図(神戸港, 日平均値)

(3) 大阪湾水質定点自動観測システムの課題

大阪湾水質定点自動観測システムは、年間を通して常時水質データを取得することができることから、汚濁メカニズムの解明にあたって非常に有意義な観測システムとなっている。しかしながら、点データの時系列解析（自動連続観測データによる解析）では、特定の海域での解明しかできず、また地点間の関係性が不明瞭な場合がある。そこで大阪湾全体の水質の挙動把握を可能とする予測システムの構築を行うこととなった。

3. 「大阪湾水質予測システム」の構築について

(1) 大阪湾水質予測システムの概要

大阪湾水質予測システムは、日々の水質を点データではなく、3次元的な把握・蓄積を可能とするシステムである。

水質予測計算は、現時刻（基準時刻）の約1～2日前から約1日後までの計算を1セットとして、一定時間毎（半日～1日毎）に基準時刻をずらしながら繰り返し計算を行うリアルタイム計算を想定している。

また、大阪湾では水質定点自動観測システムにより鉛直方向に高密度かつ多点での水質連続観測が実施されていることから、水質予測の精度向上に向けた水質定点自動観測データの活用方法についても検討を行った。

(2) システムの構成

システムの処理フローを図-6に示す。

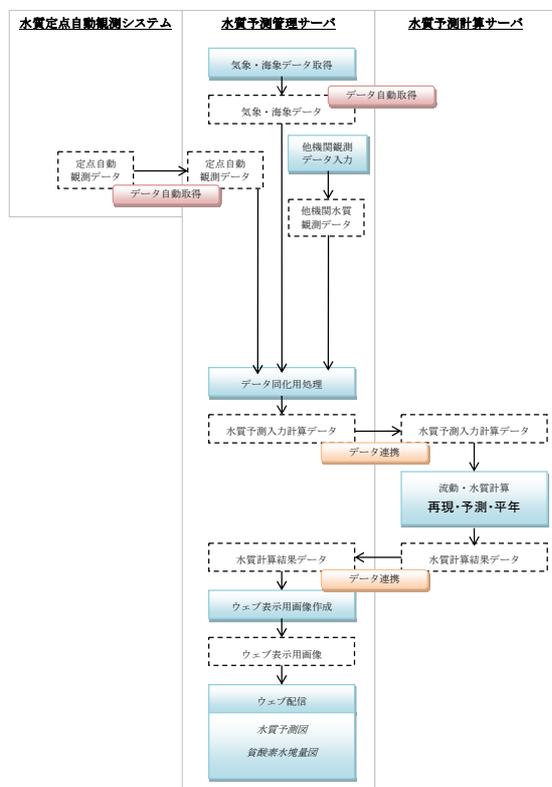


図-6 システムの処理フローの概要

水質予測システムは、水質予測計算に相応の処理負荷が見込まれることから、計算条件の設定や計算結果の処理を行う管理サーバと、水質予測計算を行う計算サーバの2つに分割するものとした。

また、計算条件の設定やデータ同化に活用するため、大阪湾水質定点自動観測システムにより得られる水質データを取得する。

(3) 水質モデル

流速、水質・塩分を計算する流動水質モデルには、ROMSを使用した。ROMSは静水圧3次元流動モデルをベースに水質モデルなどの様々なモデルを一体的に扱うことができるシステムである。

ROMSに加える水質モデルはROMSに組み込まれているFennel型水質モデルをベースに改良して用いた。水質モデルの概要を図-7に示す。

また、水質予測の精度向上を図るため、水質定点自動観測システムで得られる水質データを同化する方法を採用した。データ同化は気象学や海洋学の分野で用いられる手法であり、数値シミュレーションに観測データを埋め込み馴染ませることで、計算値を観測値に近づける手法（ナッジング法）である。

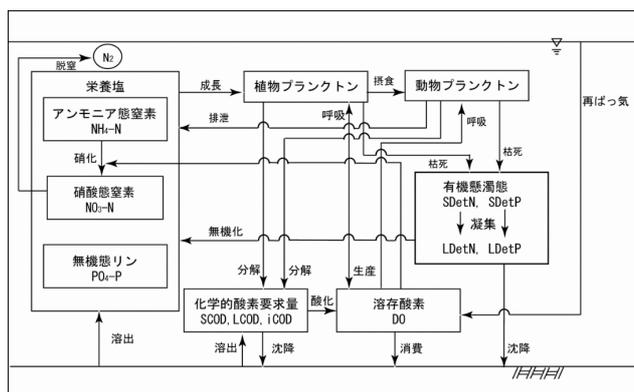


図-7 水質モデルの概要

(4) 計算条件の設定方法

a) 地形条件

計算領域は明石海峡西側の播磨灘と西側開境界、紀淡海峡南側の紀伊水道を南側開境界とする東西方向 60km × 南北方向 63.5km の領域である。水平格子間隔は湾奥では地形を細かく表現するために 500m、その他は 1km と設定し、海面から海底まで鉛直方向には 20 層で区切り、表面付近では層厚が薄くなるよう設定した。（図-8）

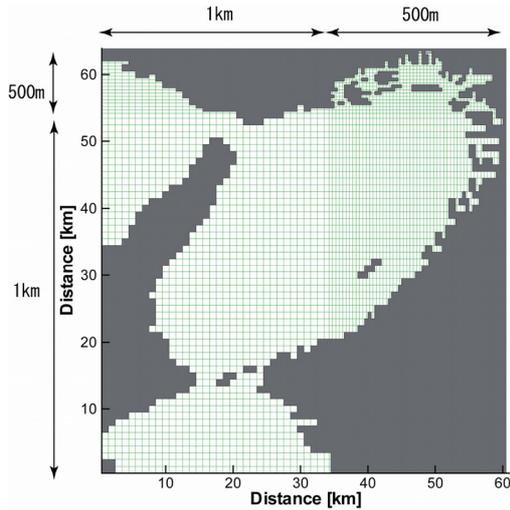


図-8 水平方向の計算格子

b) 境界条件等

現時刻（基準時刻）以前の計算を「再現計算」、現時刻（基準時刻）後の計算を「予測計算」とし、それぞれの計算条件の設定方法を検討した。気象条件（気圧、気温、湿度、風、降水量、雲量、日射量）、河川流量、河川水温、開境界条件（水温・塩分、潮位、水質）等の計算条件の設定方法は表-2に示すとおりである。

「再現計算」では、リアルタイムに得られるデータに基づき計算条件の設定を行うことを前提とした。水質（DO、クロロフィル、植物プランクトン、NO₃-N、NH₄-N、PO₄-P）の開境界条件については、リアルタイムでデータを得ることが出来ないため、アメダスデータ等を活用した重回帰式による推定値を与えるものとした。重回帰式は、瀬戸内総合水質調査による開境界付近の水質調査結果を目的変数とし、説明変数に境界付近の気温、日照時間、河川水質を用いて重回帰分析を行うことにより作成した。

表-2 再現計算及び予測計算における計算条件の設定方法

項目	計算条件の設定方法	
	再現計算	予測計算
日照量以外の気象条件	アメダスの観測値又は地上気象観測値	GPV（気象庁）予測データ
日射量	地上気象観測値	GPVの雲量・気温・湿度より推定
河川流量	淀川、大和川：水位観測値より換算 その他：年平均流量	左記データの最新値
河川水温	大阪湾水質定点自動観測値（淀川河口）	左記データの最新値
開境界水温・塩分	大阪湾水質定点自動観測値	左記データの最新値
開境界潮位	天文潮位を観測値を用いて補正	天文潮位を前12時間の観測値を用いて補正
開境界水質	気温、日照時間、河川水質より推定	左記データの最新値
同化計算	大阪湾水質定点自動観測値	なし

(5) 異常時における対策

本システムは、一定時間毎（半日～1日毎）に前回の計算結果を引き継ぎながら計算を繰り返すため、一度計算が停止すると次の計算に計算結果が引き継がれずシステムが停止する。そのため、システム停止を防止する対策を講じる必要がある。

計算が停止する理由の一つとして、インプットデータ（気象・海象データ等）の欠測または異常値の混入があげられる。この対策として²⁾、欠測や異常値の混入があった場合には予め決められた方法により自動的に補完することとした。各データの補完方法を表-3に示す。補完を行う場合、現実に近い値で補完することが重要となる。例えば、気温のように日周期で変化する項目については、日平均値等で補完するのではなく、前日の同時間のデータを与える等、各データの特徴を考慮して、できる限り現実に近い値で補完することが求められる。

欠測や異常値の混入が連続する場合には、表-3の方法による補完が繰り返されるため、長期間にわたり欠測や異常値が発生した場合には、表-3の方法では補完が困難となる。そこで、補完方法の繰り返し限度を設定し、繰り返し限度を超えた場合には既存データにより作成したデータベースの値で補完することとした。補完方法の繰り返し限度と最終的な対策を表-4に示す。

表-3 各データの補完方法

項目	基本的特徴	補完方法
水温	日単位での変化が小さい	前日の同時間のデータ
塩分	日単位での変化が小さい	前日の同時間のデータ
風	短期的な傾向が強い	直前のデータを一定値とする
河川流量	傾向がある程度続く	直前のデータを一定値とする
気温	一日周期で変化、日単位での変化量が小さい	前日の同時間のデータ
気圧	一日周期で変化、日単位での変化量が小さい	前日の同時間のデータ
湿度	一日周期で変化、日単位での変化量が小さい	前日の同時間のデータ
雲量	周期性がない	月平均値で置き換え
短波放射量	一日周期で変化、月単位で変化する	月平均された1時間単位のデータ
雨量	一日周期で変化、月単位で変化する	月平均された1時間単位のデータ
水質データ	日単位での変化が小さい	前日の同時間のデータ

表-4 補完方法の繰り返し限度と最終的な対策

項目	補完方法の繰り返し限度	最終的対策
水温	5日分	月平均された1時間単位のデータベース
塩分	5日分	月平均された1時間単位のデータベース
風	5日分	月平均された1時間単位のデータベース
気温	5日分	月平均された1時間単位のデータベース
気圧	5日分	月平均された1時間単位のデータベース
湿度	5日分	月平均された1時間単位のデータベース
水質（境界条件として）	10日分	月平均されたデータベース

また、インプットデータが原因でない場合でも、計算が発散（停止）する可能性がある。その場合の対策として、以下の2段階の対策を講じることとした。1段階目は発散した場合に計算の初期条件を減衰させて計算をやり直す（発散がなくなるまで初期条件の流速を80%、50%と減衰させていく）方法である。2段階目は、常に通常計算と並行して平年計算（外力条件・開境界条件に平年値のデータを用いた流況計算）を行い、1段階目の対策を講じても発散した場合には平年計算結果に差し替え、次の計算に引き継ぐ方法である。この2つの対策を組み合わせることで計算の発散によるシステムの停止を防止する。

(6) 水質予測計算結果の検証

水質予測システムでは、水質予測の精度向上を図るため、水質定点自動観測システムで得られる水質データの同化処理を行う。ここでは、水質データの同化がどの程度効果を発揮するかについて検証した。同化あり、同化なしの2つの計算結果と、鉛直方向に高密度で観測されている大阪湾環境保全調査（海上保安庁）による観測値を比較した。比較は夏期（2013年8月2日）のデータにより実施した。（図-9）

各観測地点において比較した結果、一部観測値と差があることが認められる箇所も見受けられたが、水質データをナッジング法を用いて同化することにより、同化なしの水質計算と比較して概ね良い再現性が得られた。今後は実際のケースでの検討を重ね、境界条件の設定方法やナッジング係数分布等について、課題の洗い出しや精査を行う必要がある。

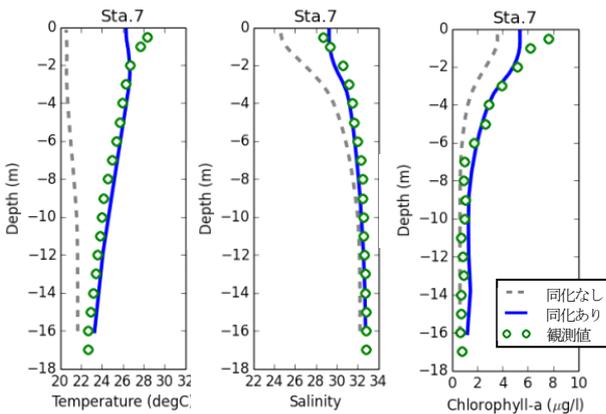


図-9 水温、塩分、クロロフィルaの鉛直分布比較

(7) 水質予測システムのアウトプット

水質予測システムにより、夏期底層DO等の変化を3次的に把握することができるため、水質改善施策の効果等を評価する際、従来は測定値を元に平面コンター図（面積）で評価していたものを、3次元シミュレーションにより貧酸素水塊の体積量等さまざまな指標での評価が可能となる。想定されるアウトプットの具体的イメージについて以下に示す。

ジについて以下に示す。

a) 貧酸素水塊の体積量

大阪湾における貧酸素水塊の月平均体積量のアウトプット例を図-10に示す。このように体積量を指標として、貧酸素水塊の形成規模の季節変化や年変化等を評価することができる。また、水質改善施策導入前後のデータを比較することで、貧酸素水塊の形成規模の観点により改善効果を定量的に評価することが可能となる。ここでは月平均値を算出したが、目的に応じて季節単位や日単位の平均値を整理することも可能である。

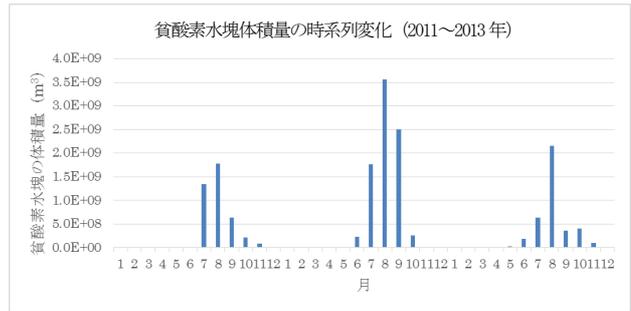


図-10 大阪湾における貧酸素水塊の体積量のアウトプット例

b) 水質項目の水平分布

水質予測システムでは、日々の水質を3次的に蓄積することが可能であるため、使用目的に応じて必要とする項目、時間、深度を自由に設定して水平分布をアウトプットすることができる。例として、2011年8月の底層DOの月平均水平分布を示す。（図-11）

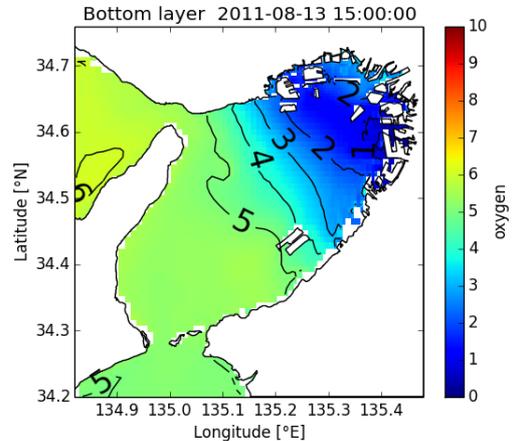


図-11 底層DOの水平分布のアウトプット例（2011年8月、月平均）

c) 貧酸素水塊の層厚分布

底層DO値や貧酸素水塊の体積量だけではなく、貧酸素水塊の層厚等も把握が可能となることから、図-12及び図-13に示すように貧酸素水塊の3次的な形成状況が可視化でき、貧酸素水塊の形成状況の変化をわかりやすく把握することができる。

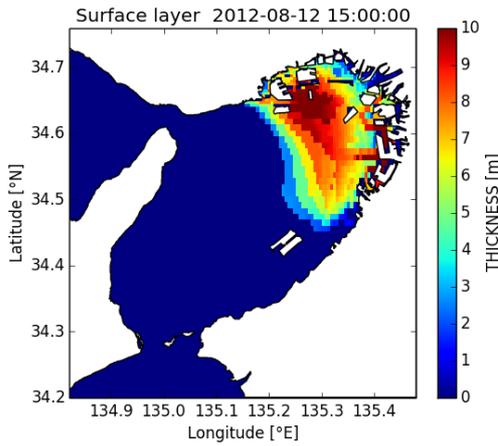


図-12 貧酸素水塊 (D03mg/L以下) 層厚のアウトプット例 (2012年8月)

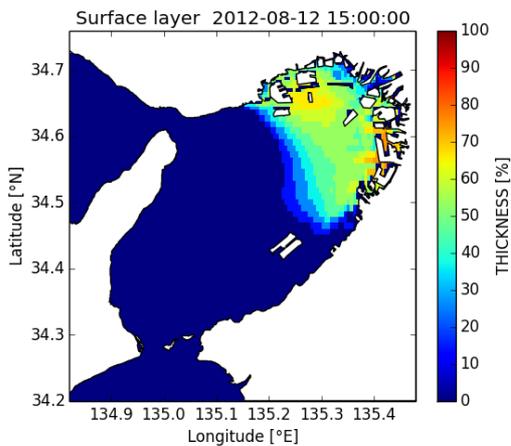


図-13 貧酸素水塊 (D03mg/L以下) 層厚の全水深に対する割合のアウトプット例 (2012年8月)

4. 「大阪湾水質予測システム」の活用方策

大阪湾水質予測システムの構築により、モニタリングポストを設置していない箇所についても、水質環境を把握することができ、大阪湾全体の水質環境を多面的にとらえることが可能になることから、大阪湾内に無数のモニタリングポストを設置せずとも、大阪湾における水質環境の全体的な把握を行うことができる。

様々な条件下による水質分布の変化を面的に把握することで、貧酸素水塊の発生・解消機構、青潮発生機構、富栄養化・貧栄養化機構の解明に活用できる。また、長期的な水質分布の変化を面的に把握することにより、これまでは個々の環境施策について評価を行っていたのが、大阪湾全体において評価が可能となり、大阪湾再生行動計画による各種の施策効果を定量的に評価することも可能となる。今後、計算結果をリアルタイムに発信することも想定し、各機関において水環境施策を行う際（海水循環設備の設置、干潟の造成等）にも、効果的・効率的な水質改善施策の展開が可能となる。

5. まとめ

本論文では「大阪湾水質定点自動観測システム」及び「水質予測システム」の構築に向けた検討について報告した。大阪湾全体の3次元的水質分布の把握は、大阪湾の汚濁機構解明に大きく寄与するものと考えられる。

今後の課題として、本システムを実際のリアルタイムデータを用いて再現・予測計算を実施し、さらに海洋短波レーダ（HFレーダ）によって観測されている表層流速分布等の各種データを用いることにより、予測精度を向上させ、大阪湾全体における環境改善施策の反映に役立てていきたい。

参考文献

- 1)入江政安, 辻陽平, 西田修三, 坂井啓吾, 中島晋, 中平浩之, 中筋みゆき: 大阪湾水質定点自動観測データを用いた貧酸素水塊の挙動の解析と可視化, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 67, No. 2, pp. 931-935, 2011
- 2)宇城誠: 「粒子追跡システム」の構築とその活用について, 2014年度近畿地方整備局研究発表会論文集 (調査・計画・設計部門)