

宍道湖における リアルタイム水質予測管理システムの開発

DEVELOPMENT OF REAL-TIME FORECASTING SYSTEM FOR WATER QUALITY MANAGEMENT OF LAKE SHINJI

矢島啓¹・中田一騎²・本村真一³・新谷哲也⁴・管原庄吾⁵・清家泰⁶

Hiroshi YAJIMA, Kazuki NAKADA, Shin-ichi MOTOMURA,
Tetsuya SHINTANI, Shogo SUGAHARA and Yasushi SEIKE

¹正会員 博(工) 鳥取大学大学院准教授 社会基盤工学専攻 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

²学生会員 学(工) 鳥取大学大学院 社会基盤工学専攻 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

³非会員 博(工) 鳥取大学准教授 総合メディア基盤センター (〒680-8550 鳥取市湖山町南4-101)

⁴正会員 博(工) 首都大学東京助教 都市基盤環境コース (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

⁵非会員 博(理) 島根大学大学院助教 総合理工学研究科 (〒690-8504 島根県松江市西川津町1060)

⁶非会員 農博 島根大学大学院教授 総合理工学研究科 (〒690-8504 島根県松江市西川津町1060)
島根大学 汽水域研究センター センター長

To get useful information about the optimal operation of a water purification device, we developed a real-time water quality forecasting system for Lake Shinji. The system is mainly composed of two parts: 1) three-dimensional hydrodynamic model with aquatic ecology model (Fantom3D-AED) and 2) database system where open-source data through web servers are automatically stored. We used a small purification system called DoDAS that uses ozonation technique. After validating the model for Lake Shinji, we performed water quality simulations with DoDAS operation. The results supplied useful information about the effects of the device operation. Moreover, we added a function to forecast waves in the lake to avoid boat accident by strong winds and wave, which are not predicted by the government.

Key Words : Lake Shinji, algal blooms, water quality management, real-time forecast, SWAN, Fantom3D-AED

1. はじめに

近年, 世界の湖沼等の閉鎖性水域における水質環境の深刻な問題は, 1)富栄養化, 2)毒性物質による汚染, 3)湖沼の酸性化, 4)水位低下と湖の縮小, 5)シルテーションと湛水量減少, 6)移入種による湖の生態系の破壊, の6つにわかれる。これらの中で一番の問題として多く挙げられるのが, 富栄養化である¹⁾。富栄養化が進行すると, 藻類の生息密度が高くなるため, 水の透明度が低下し, 藍藻類(主にミクロキスティス)が優占種の場合に水が緑色に変色して見えるアオコ現象が発生する。

ダム湖におけるアオコ対策は, 大規模な曝気循環装置によることが多い。これは, 湖水を鉛直循環させることで藍藻類を光の届かない中下層に押し込み, 緑藻類や珪藻類に対する優位性を失わせるものである^{2,3)}。しかし,

この方法は, 導入コストだけでなく運用にも多額の費用がかかるという問題がある。一方, 富栄養化した湖沼等において小規模な設備や簡易な手法でアオコを除去する方法についても, 多くの研究者や企業により検討が行われている。藻類を回収する方法として, ZhangらによるナノFe₃O₄粒子とポリ塩化ナトリウム(PAC)を利用した凝集沈殿除去法⁴⁾, 門木らによる電気分離法による方法などがある⁵⁾。また, 殺藻による除去法として, Rajasekharらによる音波処理⁶⁾やHuangらによるオゾン処理法⁷⁾などがある。さらに, 藻類を捕食する動物プランクトンを増大させ除去する生態系を利用したバイオマニピュレーション法などもある⁸⁾。しかしながら, 効率的な除去法は未だ確立されておらず, 依然として富栄養化した湖沼でアオコが発生している。

また近年, 湖沼をはじめ, 河川, 沿岸域等において, ソフト的な水質保全対策の試みが検討されている。例え

ば、アイルランドのBray海岸での大腸菌等をリアルタイムに予測するため、流出モデル(NAM)と沿岸域の水質予測モデル(MIKE11, MIKE3 FM)を結合したリアルタイム水質予測システムが構築されている⁹⁾。日本では鳥取市に位置する殿ダム貯水池での選択取水設備の操作支援を目的として、西オーストラリア大学Centre for Water Research(CWR)で開発されたARMS(Aquatic Real-time Management System)を用いた水質予測システムが運用されている¹⁰⁾。しかしながら、これらのシステムは諸外国の研究機関で開発されたものであり、国産で手軽に利用可能なシステムは存在していない。

そこで本研究は、たびたびアオコの発生が問題となっている宍道湖(島根県北東部に位置)を対象に、アオコの発生予測及び、小型の水質浄化装置を用いて効率的にアオコの除去を行うための支援情報を提供するリアルタイム水質予測管理システムの開発を行う。また、宍道湖では平成25年4月をはじめ、強風時における船舶の転覆事故が発生していることから、気象庁が行っている沿岸波浪予想の対象外の内水面である宍道湖における波浪に関する予報も行うこととした。

2. 水質予測管理システムの開発

(1) 研究対象地域

宍道湖(北緯35度27分01秒 東経132度56分58秒)は、湖水面積79.1km²と国内7番目の大きさであり、東西16km、南北6km、周囲長48km、最大水深6.4m、平均水深4.5mの浅い海跡湖である。また、宍道湖は大橋川を通じて中海とつながると同時に、さらに境水道を通じて日本海に至る珍しい連結汽水湖である。ただし、中海の平均塩分は18psu程度に対し、宍道湖は3.5psu程度であるため、異なった生態系を有している。特に宍道湖においては、シジミが重要な水産資源であり、近年その資源量の減少が危惧されていたが、平成26年の漁獲量は4年ぶりに全国第1位となる回復傾向が見られた。さらに宍道湖は中海とともに、平成17年11月にラムサール条約に登録されており、貴重な湿地でもある。

(2) 水質予測管理システムの概要

作成した水質予測管理システムの主要構成要素は、3次元湖沼生態系モデルとデータベースから成る(図-1)。3次元湖沼生態系モデルは、水理学的モデルと生態系モデルが結合されたモデルである。データベースは、主にWeb上で公開されている観測データの格納を行う。水質予測期間は、1週間先までとした。なお、リアルタイムデータの入手先として取り扱うwwwサーバは、国土交通省(川の防災情報)、気象庁、島根県水産試験場、東京大学生産技術研究所喜連川研究室の4つである。

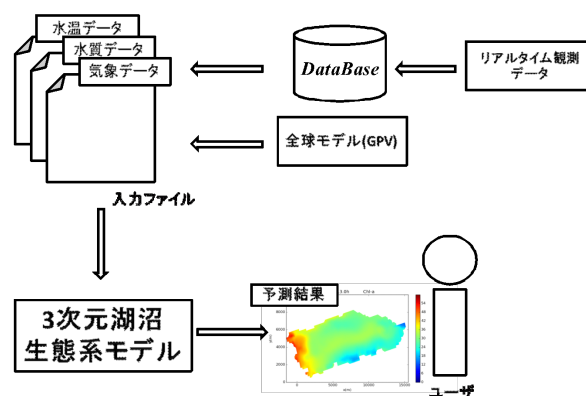


図-1 水質予測管理システムの全体構成

(3) 3次元湖沼生態系モデル

a) モデルの概要

使用する3次元湖沼生態系モデルは、流動場を計算する3次元の流体解析モデルFantom3D¹¹⁾に、アオコ現象を再現するための生態系モデルAED(Aquatic Ecodynamics Model)を開発・結合したFantom3D-AEDを使用する。Fantom3Dモデルの基礎方程式は、非圧縮とブシネスク近似を施した3次元ナビエ・ストークス式である。基礎方程式はデカルト座標系に基づいて離散化されている。また、熱収支計算により水温の変化も計算できる。AEDモデルで計算対象とした水質項目として、粒子態有機態炭素(POC)、粒子態有機窒素(PON)、粒子態有機リン(POP)、溶存態有機炭素(DOC)、溶存態有機窒素(DON)、溶存態有機リン(DOP)、溶存態無機窒素(NH₄-N、NO₃-N)、溶存態無機リン(PO₄-P)、溶存酸素(DO)、塩分、生物項として植物プラクトン1種が考慮されている。

b) モデルの特徴

流体解析モデルFantom3Dの特徴として、C++を用いたオブジェクト指向に基づいて開発されている点あげられる。現在、ほとんどの生態系モデルを含む環境流体に関する数値モデルは、CWRで開発されたELCOM¹²⁾のように手続き型言語であるFORTRAN言語などで記述されている。手続き型言語は高度な抽象化をサポートしないため、情報の隔離・隠遁が不十分となりコード全体が相互に強く関連したモノリシック構造となる。これは、一部分の修正が広範囲にわたる等、修正・発展が必要なモデルに対しては致命的な欠陥になりうる。一方、オブジェクト型言語では、各機能(Module)の疎結合が維持され、Moduleの入れ替えが容易であり修正・再利用可能なコードの作成が可能になる¹¹⁾。また、生態系モデルの構造は非常に複雑であり、構築・改良過程での試行錯誤が欠かせない。そのため、生態系モデルAEDをコンパイルせずに修正と実行が可能となるように、Fantom3D内に内部言語として組み込まれている高速スクリプト言語Luaを用いて構築した。

(4) アオコ除去モジュールの開発

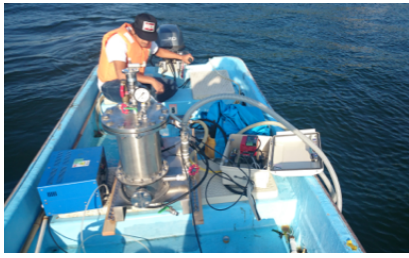


図-2 宍道湖でのDoDAS運用実験の様子

富栄養化した湖沼における水質予測管理システムには、水質浄化装置の運用効果に関する情報提供も重要である。アオコの発生は、流入負荷の状況や風況により空間的な偏りを持つことが多く、広い水域において大型の水質浄化装置を効果的な一定の場所に設置するのは困難である。そこで、小型船舶で可搬でき、自由に設置位置を変更できるアオコ除去装置として、オゾン式水質浄化装置DoDAS（環境システム株式会社製）を用いることとした。DoDASは図-2にあるように小型であり、①試料水にオゾン導入、②加圧、③（細胞等）破碎、④溶解、⑤減圧のプロセスを連続処理するもので、オゾンを加圧溶解させる独特な技術を用いている。基本システムの水処理能力は25L/分であり、オゾン添加量は1L/分である。本装置を用いた現地での水質浄化実験結果をもとに、アオコ除去装置モジュールを作成する。

a) 実験実施場所

ここ数年は、宍道湖におけるアオコの発生がほぼみられなかった。そのため、近隣でアオコの発生がみられた生見川ダム（山口県岩国市）および殿ダム（鳥取県鳥取市）において、それぞれ平成26年10月8日および平成27年10月9日にDoDASを用いた水質浄化実験を行った。

b) 水質浄化実験

実験にはDoDASを用い、装置に1回通水した処理水と処理前の原水の水質を比較することにより、水質浄化効果を確認した。現場においては、多項目水質計(Hydrolab社製DS5X)による水質計測を行うとともに、実験後に持ち帰った試水で水質分析（栄養塩とChl.a）を行った。DoDAS通過後は、アオコが粉碎されている様子を顕微鏡で確認できた。

(5) 波浪推算モデルSWANを用いた波浪予測システム

本システムのサブ機能として、波浪推算モデルSWAN(Simulating Waves Nearshore)を用いた波浪予測システムをもたせた。SWANはデルフト工科大学が開発したモデルである。対象となる領域の水深データと風向、風速データを入力することで、浅水域における波高、周期などのシミュレーションを行うことができる¹³⁾。

波浪予測システムの全体構成を図-3に示す。なお、波浪予測期間は、33時間先までとした。

(6) データベースの構築

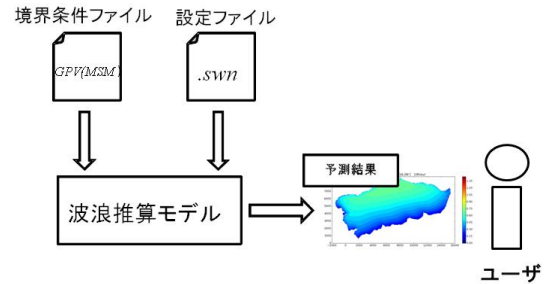


図-3 波浪予測システムの全体構成

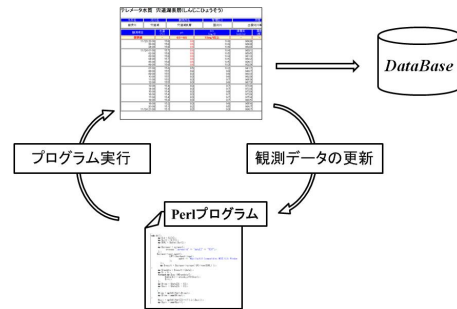


図-4 観測データの取り込み

a) データ自動取り込みシステム

観測データの取り込みは、プログラミング言語PerlのWeb Scraperモジュールを用いた。このモジュールは、Web上で公開されているURLを引数として渡すことで、HTMLデータを取得できる。Web上で公開されている観測データは全てCSS(Cascading Style Sheets)のセルTD要素として定義されており、一度TD要素から全てのデータを抜き出した後、データの文字・記号の処理や整理を行いデータベースに格納する(図-4)。プログラムの実行時間間隔は、wwwサーバの更新に合わせて行うものとした。なお、プログラムの自動実行は、cron設定を用いた。

b) データベース

本システムのデータベースは、オープンソフトウェアのリレーショナルデータベースマネジメント(以下、RDBMSと略)であるMySQLを用いていた。構築したデータベースは、河川情報を保存するテーブル(以下、水系マスターテーブルと略)と、Web上で公開されている観測データを保存するテーブルの2つからなる。表-1に示す水系マスターテーブルは、Web上で公開されている水系名、河川名、観測所名などの情報を保存するテーブルである。表-1の最初の項目「識別用ID」はWeb上に存在していないが、RDBMSにおいてテーブル内の行(データ)を一意に識別するためのプライマリーキーが必要となるため、データ識別用のIDとして定義している。表-2に示すデータ保存用テーブルでは、Web上でリアルタイムに公開されている観測データを逐次格納する。これらのデータは日時とともに保存する。この保存用テーブルは、上述と同じ理由で「識別用ID」を作成し、また、水系を特定するために「水系特定用ID」も作成した。こ

表-1 水系マスターテーブル

説明	変数	型	桁数	備考
識別用ID	Uryo_id	Int	3	プライマリーキー
水系	Suikai	Varchar	50	
河川名	Kasen	Varchar	50	
観測所名	Kansoku	Varchar	50	
管理区分	Kanri	Varchar	50	
所管	Syokan	Varchar	50	
所在地	Addr	Varchar	50	
標高	hyoka	Varchar	4	

表-2 データ保存用テーブル

説明	変数	型	桁数	備考
識別用ID	Id	Int	11	プライマリーキー
水系特定用ID	Uryo_id	Int	3	フォーリンキー
日時	Time	Datetime		
雨量	Uryo	Double	3(整数), 1(小数点)	
累積雨量	Ruiuryo	Double	3(整数), 1(小数点)	

の「水系特定用ID」は上述の水系マスターテーブルの「識別用ID」とフォーリンキー(外部キー)という形で関連つけられる。これらのテーブルには、上述で述べたPerlのWeb Scraperモジュールを用いてデータを取得し保存した。

(7) データベースからの境界条件設定

a) 湖沼生態系モデルFantom3D-AEDの境界条件の設定

計算実行時の前1日から計算を開始して1週間先まで計算を行うFantom3D-AEDに与える境界条件は、本研究で構築したデータベースから、気象庁の気象データと国土交通省の斐伊川水系の水位データ、及び東京大学生産技術研究所喜連川研究室でアーカイブされている気象庁の全球モデルより計算された予測期間11日間の数値予報データ(以下「GPVデータ」と記述)から作成する。なお、GPVデータの格子間隔は、20km×20kmである。また、時間間隔は、1時間である。

流量データは、斐伊川本川については新伊萱地点の水位からHQ式により流量に変換し、宍道湖周辺の13河川の支川は比流量より設定した。また、水温や水質(栄養塩)データは、出雲河川事務所の資料(気温からの推定式とLQ式)から設定した。ただし、将来データはないため、過去1日データが1週間先まで同様に連続するとして設定した。

気象データは、前1日については松江地方気象台の気象データを用い、1週間先までの気象データは、GPVデータを使用した。GPVデータはバイナリ形式であるが、Fantom3D-AEDモデルは、境界条件をテキストファイルで入力する必要がある。そこで、wgrib2¹⁴⁾によりバイナリ形式からテキストデータに変換し、宍道湖に一番近い地点のデータを切り出した(図-5)。

b) SWANモデルの境界条件の設定

計算実行時の前1時間から33時間先まで計算を行う波浪推算モデルに与える境界条件は、先ほどと同様に東京大学生産技術研究所喜連川研究室でアーカイブされてい

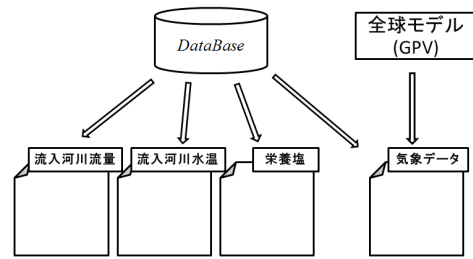


図-5 境界条件作成の概要

る気象庁のメソ数値予測モデルより計算された予測期間39時間の数値予報データ(以下「MSMデータ」と記述)を用いる。なお、MSMデータの格子間隔は、5km×5kmである。また、時間間隔は、1時間である。

MSMデータは、水質予測管理システムの境界条件と同様に、wgrib2によりバイナリ形式からテキストデータに変換し、宍道湖が含まれる範囲を2次的に切り出し時系列だけでなく空間的にも変化する風況を境界条件として与えた。なお、波浪推算モデルの格子間隔は、60m×60mである。

(8) 操作支援のためのインターフェイス設計

管理システムの操作に際して、各データ項目や機能が無機的に羅列した画面では、ユーザにとってわかりにくく、適切な判断を阻害する可能性がある。そこで、画面を大まかに分割し、エリアごとに必要なデータや機能を目的ごとに整理することで、直感的でわかりやすいユーザーインターフェイスの設計を行った。本研究では、主要な情報を明確に分離表示するためにメイン画面とサブ画面、波浪予測画面の設計を行った。

a) メイン画面

メイン画面では、画面上部にメニューエリアを設け、その選択項目(植物プランクトン、水温など)に応じて、Fantom3D-AEDの予測結果を表示させるピクチャーエリアを設けた。また、本研究のモデルは、3次元であるため、水平方向、鉛直方向の2種類が存在し、これらを選択できる項目をメニューエリアに追加した。

b) サブ画面

サブ画面では、メイン画面と同様に画面上部にメニューエリアを設けた。メニューエリアでは、本研究で構築したデータベース内のテーブル名、日時をそれぞれ選択・入力すると観測データをリストアップするリストエリアを設けた。また、リストアップされた観測データに応じて、図化を行うために、チャートエリアを設けた。

c) 波浪予測画面

波浪予測画面では、メイン画面と同様に画面上部にメニューエリアを設け、波浪推算モデルの予測結果を表示させるピクチャーエリアを設けた。

3. 結果と考察

(1) システムの画面表示及びデータ接続

a) メイン画面の動作確認

メイン画面では、メニューエリアの選択項目に応じて、3次元湖沼生態系モデルFantom3D-AEDの予測結果の表示を行うことができる。ある予測時刻における水面のChl.a濃度を左図に、宍道湖横断方向での水温鉛直分布を右図に示す表示例を図-6に示す。それぞれの表示はアニメーションとなっており、図の下部のバーにより、表示したい時刻を調整することができる。このように、メニューエリアの選択項目に応じて、適切に動作していることを確認した。

b) サブ画面の動作確認

サブ画面では、メニューエリアの選択・入力後、データベースにアクセスしデータ一覧表示を行う。また、データ一覧から、グラフの自動生成を行うことができる。動作結果の一例を図-7に示す。表示されている画面左側は、データベースから観測データ(松江地方気象台の平成27年10月1日の気象データ)を一覧として表示させている。画面右側では、観測データ一覧より観測項目(気温)を選択した後、グラフとして自動生成することができている。

c) 波浪予測画面

波浪予測画面では、波浪推算モデルの波高計算結果の表示を行う。動作結果を図-8に示す。メイン画面の表示

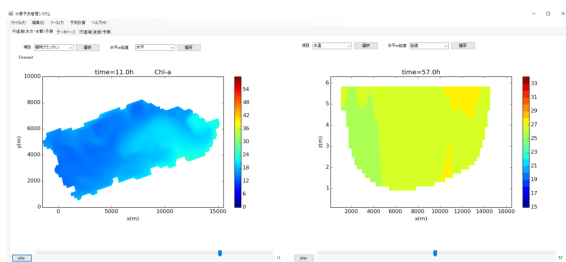


図-6 メイン画面

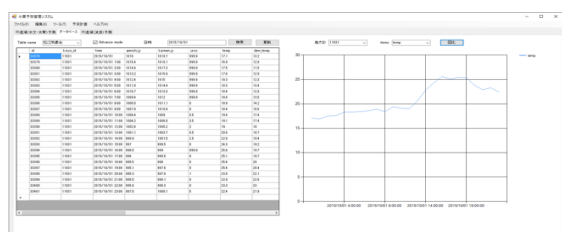


図-7 サブ画面

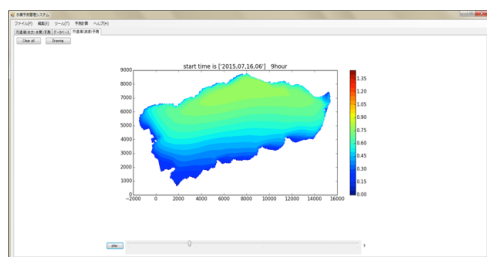


図-8 波浪予測画面

と同様に、アニメーション表示となっており、予測時間内の任意の時刻の波高を表示することができる。

(2) 3次元湖沼生態系モデルのシミュレーション結果

a) 再現計算の検討

再現計算では、国土交通省出雲河川事務所が行っている定期採水(月1回)の観測データをもとに比較・検討を行った。モデルの検証地点は、宍道湖湖心の上層、下層とした。計算期間は、宍道湖でアオコが生じて発達した平成24年6月1日から7月31日の2ヶ月までとした。また、3次元湖沼生態系モデルの格子間隔は、全領域一様の水平方向に240m、鉛直方向に0.2mとした。入力した気象条件は、風速、風向、湿度、大気圧、全日射量、降水量、雲量である。加えて、河川の境界条件は、水温、栄養塩、流量であり、13支川が考慮されている。初期条件は、平成24年5月24日の定期採水の観測値とした。また、再現計算期間中の定期採水日は、平成24年の6月14日と7月18日である。

再現計算の結果を図-9に示す。上段から、水温、塩分、Chl.a濃度、栄養塩(DIN, PO₄-P)濃度となっている。なお、Chl.a濃度は、上層だけとした。検証期間中の採水データ2回しかないものの、それぞれの項目で良く再現されていることが分かる。特に、上層と底層の水温、Chl.a濃度は、高い精度で再現されている。塩分は若干の差はあるが、6月14日に存在していた塩分成層が、7月18日には破壊され混合している様子も再現できている。栄養塩に関しては、底層の計算値の方がより観測値に近く、上層では過小評価となっているが、本モデルは宍道湖の生態系で重要なシジミを考慮していないので、概ね再現性のあるモデルになっていると考えられる。

b) アオコ除去モジュールの検討

DoDASを用いたアオコ除去に関する水質浄化実験を行った結果、生見川ダムでは、湖水のChl.a濃度が平均34.9 µg/Lに対し、水質浄化後に平均13.0 µg/Lと平均除去率で58%であった。また、殿ダムでの実験では、浄化前後のChl.a濃度が、それぞれ平均14.3µg/L、2.2µg/Lと平均除去率85%であった。ただし、栄養塩に関しては前後で大きな変化はなかった。これはDoDASにはアオコの分

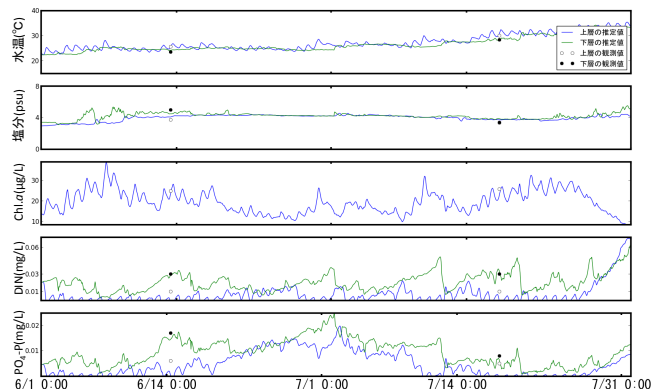


図-9 再現計算結果

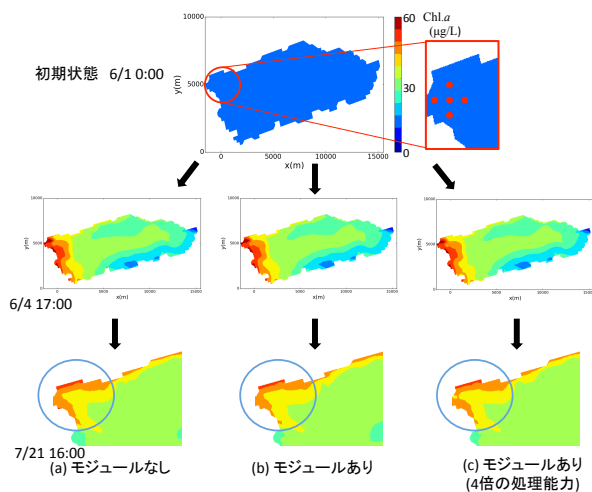


図-10 アオコ除去モジュールを適用した場合と再現計算の比較

解能力はあるが、分解した物質を除去する機能があまりないことによるためと思われる。今後、装置自身の改良が必要と考えられるが、本研究においては、Chl.aの除去率を80%とし、分解したChl.aは栄養塩として湖水に回帰する計算を行った。また、装置の設置場所は、宍道湖北西に5台設置すると仮定し、処理能力を通常のものとして4倍にした計算も合わせて行った（設置場所は図-10参照）。なお、水質浄化装置はアオコが発生し始める6月1日0時から常時運転を行った。

アオコ除去モジュールを適用した場合と再現計算の比較した結果を図-10に示す。この図より、アオコ除去モジュールを適用した場合、再現計算に比べて設置場所のChl.a濃度が4日後の6月4日17時では大きな変化はないが、約2ヶ月の7月21日16時では、4倍の処理能力（5台で500L/分）とした場合には、その効果がわずかであるが確認できた。宍道湖の貯水量約3.6億 m^3 に対し、処理量がかなり小さいため、今後は処理能力を大きくするとともに、極所的なアオコ除去に用いるなどその用法について検討を行う必要がある。

4. おわりに

本研究では、新たな湖沼生態系モデルとして、環境流体モデルFantom3Dに機能を追加したFantom3D-AEDを開発した。また、このモデルを宍道湖に適用し、その性能を確認するとともに、今回開発した水質予測管理システムに組み込み、1週間先までのリアルタイム水質シミュレーションを行うことに成功した。この水質シミュレーションでは、アオコの除去を目的とした水質浄化装置の運用を想定した水質予測情報も提供できるため、湖沼の水質管理者が具体的な水質浄化方法を決定するのに活用できると考えられる。また、近年の強風時の船舶事故が起きている状況を鑑み、波浪推算モデルSWANを利用し

た33時間先までのリアルタイム波浪予測情報も提供できるシステムとして拡張することができた。今後は、本システムが湖沼管理者や漁協者に利用され、そのフィードバックのもとにシステムが改良されるように働きかけていく予定である。

謝辞：本研究は、公益財団法人 河川財団の河川整備基金助成事業により実施しました。ここに厚く御礼を申し上げます。また、国土交通省川の防災情報、島根県水産試験場、気象庁、東京大学生産技術研究所喜連川研究室の各種データ及び、国土交通省出雲河川事務所の資料を利用して頂きました。論文執筆にあたり、元鳥取大学大学院生山本茂友氏から有益なるコメントを頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 倉田亮：世界の湖沼環境の現状と問題点，人間環境学研究報告，pp.1-17，2002.
- 2) 国土交通省河川局河川環境課：曝気循環施設及び選択取水設備の運用マニュアル（案），146pp.，2005.
- 3) 高玉はるか，今本博臣，花木幸仁：現場報告 浦山ダムにおける曝気循環によるアオコ・カビ臭抑制対策ダム技術，331，pp.63-70，2014.
- 4) Zhang, B., Jiang, D., Guo, X., He, Y., et al. : Removal of *Microcystis aeruginosa* using nano- Fe_3O_4 particles as a coagulant aid, *Environmental Science and Pollution Research*, 22(23), pp.18731-18740, 2015.
- 5) 門木秀幸，除田雅之，岸田悟：磁気分離法によるアオコ，赤潮の除去に関する研究，鳥取県衛生環境研究所報，47，pp.11-15, 2007.
- 6) Rajasekhar, P., Fan, L., Nguyen, T., & Roddick, F. A. : Impact of sonication at 20kHz on *Microcystis aeruginosa*, *Anabaena circinalis* and *Chlorella* sp. *Water Research*, 46(5), 1473-1481, 2012.
- 7) Huang, W.J., Cheng, B.L., Hu, S.K. et al. : Ozonation of algae and odor causing substances in eutrophic waters, *J. Environ. Sci. Health A: Toxic/Hazard. Subst. Environ. Eng.*, 41, pp.1587-1605, 2006.
- 8) Triest, L., Stiers, I. and Onsem, S.V. : Biomanipulation as a nature-based solution to reduce cyanobacterial blooms, *Aquatic Ecology*, pp.1-23, 2015.
- 9) Bedri Z., Corkery, A., et al. : An integrated catchment-coastal modeling system for real-time water quality forecasts, *Environmental Modeling & Software*, 61, pp.458-476, 2014.
- 10) 矢島啓，Chris Dallimore，後藤誠志：殿ダム貯水池における選択取水設備の操作支援システムの設計，河川技術論文集，第15巻，pp.207-211，2009.
- 11) 新谷哲也，中山恵介：環境流体解析を目的としたオブジェクト指向型流体モデルの開発と検討，水工学論文集，第53巻，pp.1-6，2009.
- 12) Hodges, B. and Dallimore, C. : Estuary, Lake and Coastal Ocean Model: ELCOM v2.2 Science Manual, 2014.
- 13) USER MANUAL SWAN Cycle III version 41.01AB : http://swanmodel.sourceforge.net/online_doc/swanuse/swanuse.htmlswanuse.pdf (2016.3.31).
- 14) National Weather Service Climate Prediction Center : <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/wesley/wgrib2> (2016.3.31).

(2016. 4. 4受付)