

アオコの発生予測の高精度化に向けた貯水池モデルの改良と検証

Development of Reservoir model to predict algae bloom

中山 恵 介
Keisuke Nakayama

1. はじめに

人々の生活を支えるライフラインの一つとして、水道は重要な役割を果たしている。その水道水の供給源として貯水池がある。貯水池のような閉鎖性水域では、一般的に滞留時間が長いことにより、日射や河川水の流入により成層場が形成され、湖底に堆積した有機物等により溶存酸素が消費され、下層に貧酸素水塊が形成される^{1),2),3),4)}。それに加え、夏季の上層ではアナベナなどのカビ臭原因物質（ジェオスミン等）^{5),6)}が検出されることがある。この上層と下層の水質の差異を発生させているのは、水温成層の効果によるものである。そのため、水質維持にあたり、水温成層がどのような状態であるかを把握し、適切な水深から効率よく選択取水を行う必要がある。

本研究では、神戸市の重要な水道水源である千苺貯水池を研究対象とする。山元ら³⁾により、千苺貯水池では春から秋にかけて成層が発達し、底層付近を中心として貧酸素水塊が発生し、河川流入によりその影響範囲が変化することが示されている⁷⁾。しかし、どのように溶存酸素が減少し、貧酸素水塊が発生するかについての詳細は未解明である。過去の観測結果から“郡界”と呼ばれる場所を中心として貧酸素水塊が発生し始める程度の知見しか得られていない。そのため、時空間的に詳細な溶存酸素（Dissolved Oxygen：DO）分布を再現することのできる数値モデルでの解析が必要となる。

過去の研究において、環境流体モデル Fantom^{8),9),10),11)}を用いた鉛直 2 次元断面モデルでの計算が行われ、良好な再現結果が得られているが、底層における酸素消費速度を過大に与えなければいけないという問題が残されている³⁾。これは底層における貯水池体積の再現性に起因した問題であり、ある降雨パターンに対応する出水に関して高精度な再現性を確保できても、異なる降雨パターンに対して同様な再現性を得ることができるかどうか保証されないという課題が残されている。

そこで本研究では、汎用的なモデルを構築することを目的とし、縦断方向および横断方向の地形を考慮した 3 次元モデルを作成し、2016 年 4 月から 6 月までの 3 ヶ月の水温および DO の千苺貯水池における縦断鉛直分布を示し、成層の発達までに起きる現象、および流入河川水が成層および DO に及ぼす影響の検討を行なった。その際、千苺貯水池には底層および中層の DO 回復を目的として底層水循環装置、および中層曝気装置が設置されていることも考慮した。

2. 千苺貯水池における水温・DO 分布

2. 1 貯水池の概要

千苺貯水池は、神戸市北区に位置し、羽束川および波豆川が流れ込んでいる。総流域面積は 94.5 km²、有効貯水容量は 11,244,266 m³の南北に長い貯水池である（図-1）。ダム取水塔前から滞筋沿いに 2700 m ほど離れた場所に“郡界”と呼ばれている場所が存在する。この場所は、水温躍層と湖底斜面が接する場所に近い。

中層曝気装置（図-1）は、中層域の水を水面に設置した曝気水槽まで揚水・曝気後、再度中層域（吸込み高さより 1.5

m ほど上) に戻す装置である。また、底層水循環装置は、底層域の水を装置内に吸込み、陸上のコンプレッサーからエアホースを通じ直接酸素を供給して、吸込み高さより 1.7 ~7.7 m 上から底層域に戻す装置である。中層曝気装置は 2016 年において 5 月 31 日から 6 月 21 日まで、9 月 29 日から 12 月 26 日まで稼働していた。一方で、底層水循環装置は 3 機あるうち 6 月、8 月に 1 機ずつ故障しているものの年中稼働していた。また送水流量は、中層曝気装置は約 $0.6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 、底層水循環装置は約 $0.12 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ であった。なお、底層水循環装置の流量は、貯水池内に設置された 4 基合わせて 20 日間で最大 $1,320,000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ の送水を行うという設計値に基づき算出されている。

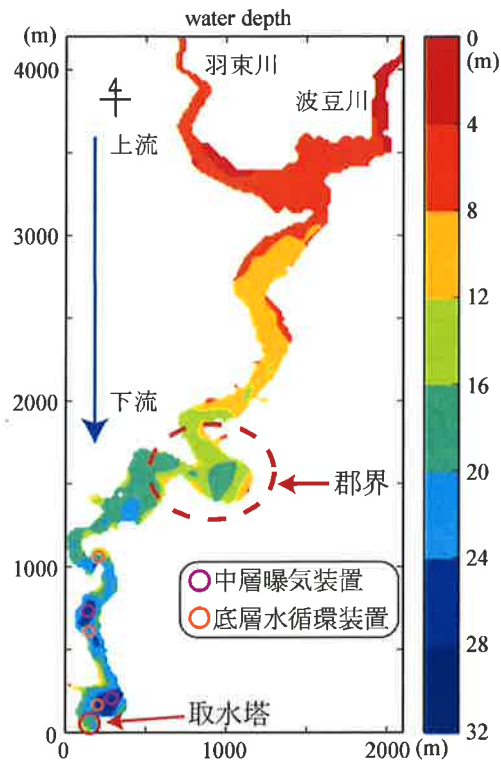


図-1 千苅貯水池の水深図

2. 2 観測結果

2016 年 4 月から 2017 年 3 月にかけて、縦断方向に約 500 m 間隔で、水温、DO などを水深 0.1 m 間隔で測定した (図-2)。鉛直プロファイルの計測には、総合水質計 AAQ-177 (JFE アドバンテック) を利用した。6 月において貧酸素水塊が発生していることが示された。また、曝気装置の効果により DO が回復していることも表されている。

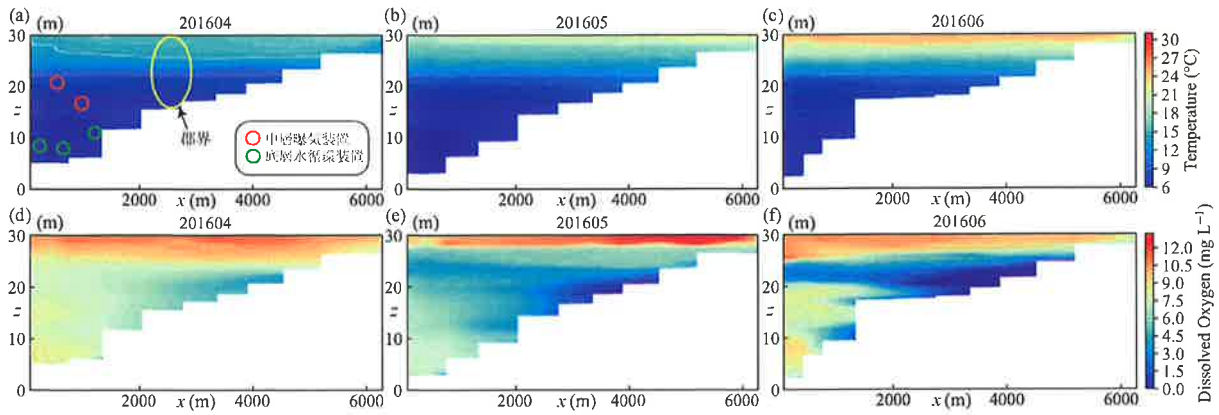


図-2 千苅貯水池における水温・DOの鉛直断面コンタ (2016年4月～6月).

水温: (a) 4月18日. (b) 5月16日. (c) 6月16日. DO: (d) 4月18日. (e) 5月16日. (f) 6月16日.

3. 数値シミュレーション

3. 1 環境流体モデルの概要

本研究では、環境流体モデル *Fantom* を適用した。基礎方程式は、非圧縮とブジネスク近似を施した Navier-Stokes 式であり、静水圧近似を用いた。計算格子は、セル中心に圧力、スカラー量、運動量を置き、セル面に運動量の補助係数を配置するコロケート格子としている。また、運動量、水温の移流計算には *Ultimate Quickest* を使い、粘性(拡散)項は2次精度の中心差分で離散化した。解法にはフラクショナルステップ法を利用し、移流項、順圧勾配項、鉛直拡散項以外での時間積分は、2次精度の Adams-Bashforth 解法としている。密度に関しては、水温と塩分(ゼロ)の関数であり、UNESCOの状態方程式を基に計算を行っている。また、鉛直拡散項は GLS の乱流モデル ($k-\epsilon$, CA フィルタ) ^{12) 13)} を使用している。

中山ら ⁷⁾ は、貯水池の平均幅を 80 m とした鉛直2次元断面計算モデル(以下、鉛直2次元モデル)を用いて、良好な再現結果が得られることを示している。しかし、貯水池内の計算期間が長期に及ぶと、貯水池底層における水温が観測値よりも高くなることを指摘している。GLS は主として海洋や沿岸域を対象として適用されており、background turbulence が貯水池の静穏時に過大となっている可能性がある。そこで、GLS における最小の乱流エネルギーである E_{min} を貯水池用に調整することで background turbulence を抑え、貯水池底層における水温上昇の抑制を試みた。

従来の数値計算で提唱されている E_{min} は $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ である。Lilly ら ¹⁴⁾ や Schmidt ら ¹⁵⁾ により提案されている乱流モデルを利用すると、式(1)に示されるように、乱流エネルギーから渦拡散係数を見積もることができる。

$$K_m = C_m l E_{min}^{1/2} \quad (1)$$

ここで、 K_m : 渦拡散係数、 C_m : LES 定数 (= 0.0856)、 l : 代表スケール (= 0.25 m) である。

$E_{min} = 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ に対応する渦拡散係数は $2.14 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ であり、湖沼の静穏時において卓越する約 $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ の拡散係数の 20 倍の値であることが分かる。この過大な拡散係数が、山元ら ³⁾ の再現計算における底層水温の過大な上昇を生み出した原因であると推測された。 E_{min} をゼロとするのが理想であるが、散逸率の計算において計算不安定を誘発する可能性があり、ゼロにはできない。そこで本研究では、式(2)で示されるように、乱流による拡散係数が、物性値である拡散係数を超えないような条件 ($E_{min} < 2.18 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) を与えることとした。

$$E_{min} < \left(\frac{K_{m0}}{C_m l} \right)^2 \quad (2)$$

ここで、 K_{m0} : 静穏時における拡散係数 (= $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) である。種々の値を与えて再現計算を行った結果、最もよい

再現性を得ることができた $E_{min} = 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ を利用することとした。

3. 2 鉛直 2 次元モデルによる再現計算の概要

計算領域は、縦断方向にはダム堤体から波豆川上流端までの 6,800 m の範囲とした (図-3)。また、初期水面の位置は、最低河床基準から 30.5 m とした (図-3 の青線)。縦断方向のメッシュ間隔は 100 m とし、時間間隔は 30.0 s を与えた。鉛直メッシュ間隔は、高精度化を目指し、全層において $0.25 \text{ m} \times 134$ 層とした。貯水池底面の標高値について、過去の研究と同じもの (滯筋の標高値) を利用した。気象条件については、ダム堤体直上の風向、風速、アメダスによる三田市の気温、神戸地方気象台の気圧、相対湿度、雲量、大阪管区気象台の日射量を用いた。一ヶ月に 1 度の頻度で上流側に向かう強風が発生しているが、解析期間を通して風の影響はそれほど大きくなかったことが分かる (図-4)。流入河川は羽束川と波豆川を合流河川とみなし、一つの流入河川とし与えた。5 月に小規模な出水が発生していた (図-5)。

千苺貯水池では選択取水が行われているため、放流量に関して越水量だけではなく、選択取水による取水量も考慮した。計算対象期間では、 $z = 20 \text{ m}$ 、 $z = 26 \text{ m}$ から選択取水が行われている。3 月 14 日の初期条件は、堤体前の水温分布を利用し、縦断方向一様に与えた。

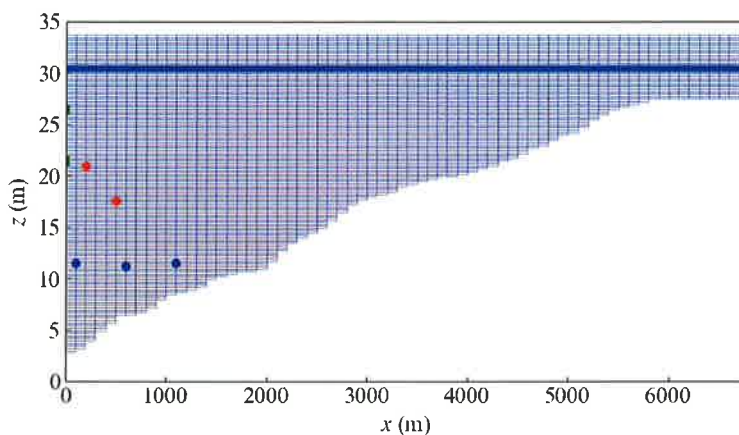


図-3 鉛直 2 次元モデルの計算メッシュ図。

横軸 x はダム堤体 (取水塔) からの距離、縦軸 z は最低河床基準からの標高。緑：取水口、赤丸：中層曝気装置、青丸：底層水循環装置。

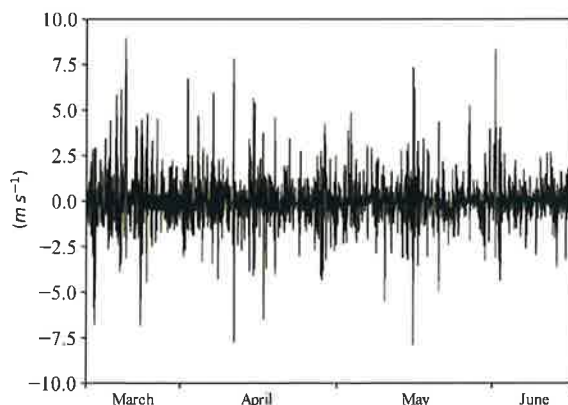


図-4 千苺貯水池の長軸方向の 2016 年における風速の時系列。上流側への風が正、下流側への風が負。

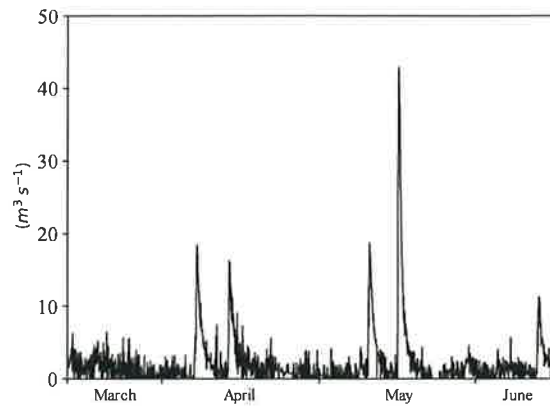


図-5 千苜貯水池への流入流量の時系列（2016年）。

DO モデルに関しては、底層において一定の消費速度 $1,500 \text{ mg L}^{-1} \text{ m}^2 \text{ d}^{-1}$ を与えた。現地観測結果から、底泥による DO 消費が卓越していると推測されたため、水中における DO 消費は無視した。曝気装置は、中層曝気装置 2 つ（赤丸部分）と底層水循環装置 3 つ（青丸部分）を考慮した（図-3）。曝気における飽和溶存酸素量の算出には、Weiss の飽和溶存酸素計算式¹⁶⁾を用いた。

3. 3 鉛直 2 次元モデルによる解析結果と考察

水温において、水表面付近の水温の上昇に伴い、6 月には成層が強くなり安定している様相が示されており、底層における水温も良好に再現されていた（図-2, 図-6）。詳細はページの都合上省略するが、最小の乱流エネルギーである E_{min} を修正する前のモデルでは、水温が観測値よりも約 2°C 高くなっていたが、 E_{min} を変更することで観測結果をほぼ完全に再現することができた。底層での DO については、郡界付近において DO の減少が生じていることが確認された。図-6 の青点線内において、数値計算による DO 値が観測値に比べ、より大きくなっていた。中層曝気装置の効果が強めに反映されたためと考えられ、送水流量の精査が必要であると考えられた。さらに、斜面上での DO が観測結果に比較して小さくなっていた。2 次元計算のため最下層の体積が過大となっている DO を観測結果と一致させるためには、より大きな酸素消費速度を与えなくてはならない。そのため、斜面上での DO の値が観測値に比べやや過小評価されたと考えられた。

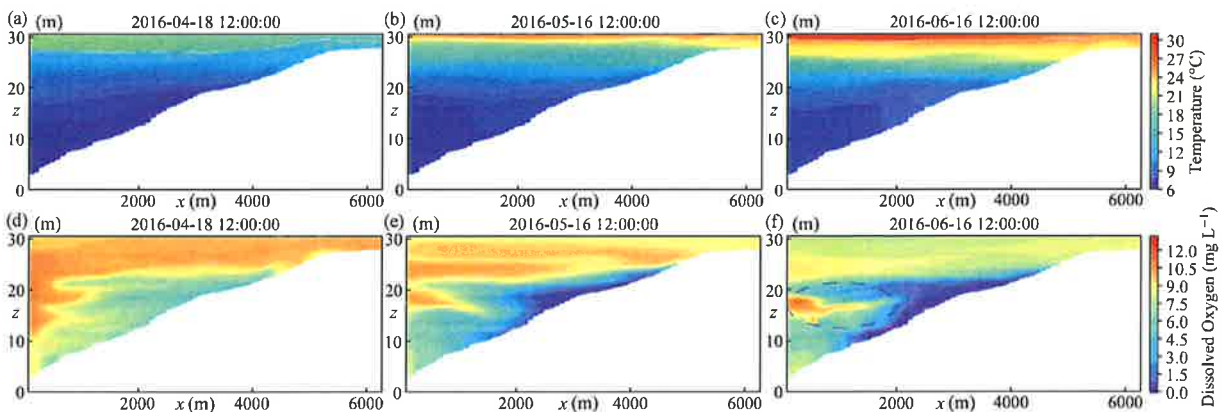


図-6 鉛直 2 次元モデルでの解析による水温・DO の鉛直断面コンタ（2016 年 4 月～6 月）。

水温：(a) 4 月 18 日。(b) 5 月 16 日。(c) 6 月 16 日。DO：(d) 4 月 18 日。(e) 5 月 16 日。(f) 6 月 16 日。

3. 4 3 次元モデルによる再現計算の概要

3次元モデルでは、縦断方向をダム湖の流軸に沿う方向とした。縦断方向のメッシュ間隔を鉛直2次元モデルと同じく100 mを用い、横断方向のメッシュ間隔を20 mとし、横断方向に5列作成し最大で100 m幅となるように地形を再現した。地形データに関して、鉛直2次元モデルの値を滞筋の標高値とし、右岸側へ順に右岸1、右岸2、左岸側へ順に左岸1、左岸2として与えることとした。実際の地形を100 m間隔で抽出すると、生データには高周波な変動成分が含まれてしまう。そのため、Lanczos フィルターおよびローパスフィルターにより高周波成分を取り除いた（図-7）。ローパスフィルターの基準値としては、標高値にスペクトル解析を適用し、地形の特徴を再現するために卓越波長（約430 m）以下を対象とした（図-8）。鉛直方向のメッシュは、鉛直2次元モデルと同様に、全層において0.25 m×134層とした。底層におけるDOの消費速度は $1,100 \text{ mg L}^{-1} \text{ m}^2 \text{ d}^{-1}$ を与えた。底層におけるDOの消費速度については、様々な値を与えて試行計算を行った後、DOを最も再現できた $1,100 \text{ mg L}^{-1} \text{ m}^2 \text{ d}^{-1}$ を与えた。鉛直2次元モデルの最適値である $1,500 \text{ mg L}^{-1} \text{ m}^2 \text{ d}^{-1}$ よりも小さく与えることができた。

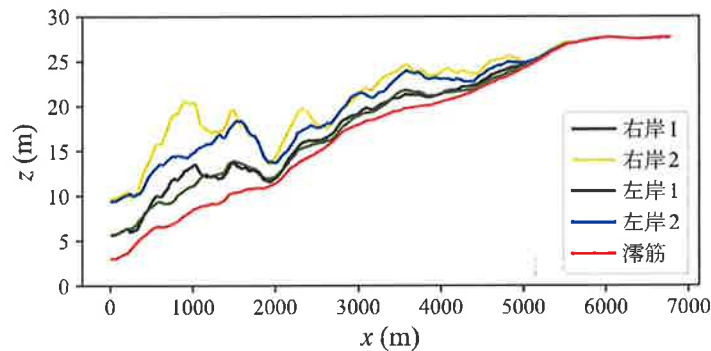


図-7 高周波変動成分除去後の標高値

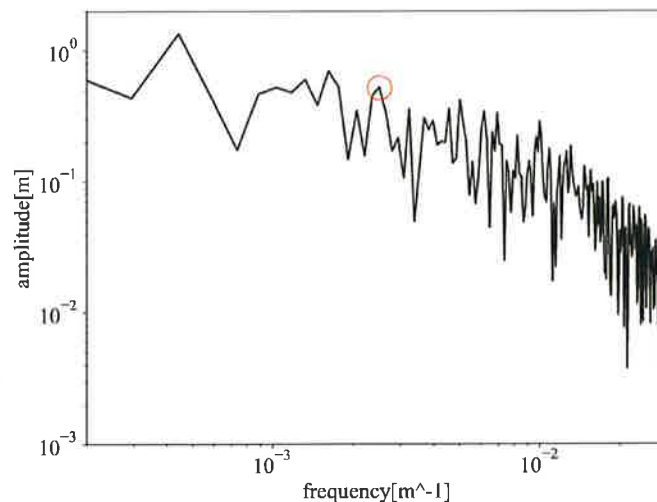


図-8 高周波成分除去後のスペクトル（右岸2）。

赤丸：卓越波長のピーク。

3. 5 3次元モデルによる解析結果と考察

水温について、鉛直2次元モデルと同様、ほぼ全域において成層の状態が良好に再現されていた（図-9）。表層付近については、鉛直2次元モデルと同様に、観測結果に比べやや過大評価となっていた。これは、大阪での日射量データを用いていること、および兩岸の急斜面の山森によるカバーで水面への日射が遮られていることから生じた差異と考えられた。

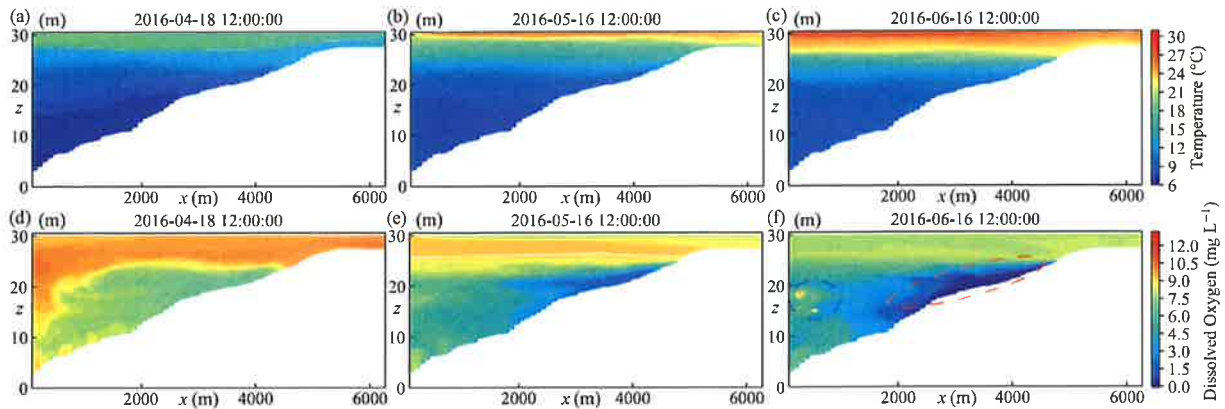


図-9 3次元モデルでの解析による水温・DOの鉛直断面コンタ（滞筋）（2016年4月～6月）。

水温：(a) 4月18日。(b) 5月16日。(c) 6月16日。DO：(d) 4月18日。(e) 5月16日。(f) 6月16日。

DOについて、6月の観測結果と解析結果を比較すると、貧酸素水塊がおおよそ2,000 m付近まで伸びていること（赤点線で囲んだ部分）や中層曝気装置によるDO値上昇効果が発生した水深位置がおおよそ一致していること（青点線で囲んだ部分）が確認できた（図-9）。これにより、水温に続きDOについても良好な再現結果が得られたと考えられた。特に注目すべき点として、鉛直2次元モデルでは5月の貧酸素水塊の発生領域が観測値に比較して過大となっているが、3次元モデルでは良好に再現できている。観測値により近いDO消費速度値に設定したにも関わらず、より精度良くDO濃度を再現することができており、実現象により近づいたと考えられた。

4. おわりに

本研究では、貯水池モデルの3次元化がどのように解析精度を向上するかについて検討した。まず、数値計算モデルにおけるbackground turbulenceを調整することで、貯水池の平均幅を80 mとした鉛直2次元断面計算におけるモデル解析の改良を行った。水温については良好な再現ができ改善されていた。貧酸素水塊の発生領域が観測値より過大となっていた。また、横断方向の地形の変化を考慮した3次元モデルによる解析を行った結果、鉛直2次元モデルに比べ、底層でのDOの再現精度を向上することができた。その際に利用したDO消費速度は、現地計測により得られた値に近いものであった。

参考文献

- 1) Fujiwara, T., and Yamada, Y.: Inflow of oceanic water into Tokyo Bay and generation of a subsurface hypoxic water mass, *Journal of Geophysical Research*, Vol.107, Issue C5, 3045, 2002.
- 2) Nakayama, K., Sivapalan, M., Sato, C., and Furukawa, K.: Stochastic characterization of the onset of and recovery from hypoxia in Tokyo Bay, Japan: Derived distribution analysis based on “strong wind” events, *Water Resources Research*, Vol.46, W12532, 2010.
- 3) 山元幸之助, 中山恵介, 藤井智康, 藤原建紀, 清水武俊, 小林健一郎: 貯水池底層における貧酸素水塊発生機構の解明, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.74, No.5, pp.I_535-I_540, 2018.
- 4) 木村昌嗣, 豊田政史, 宮原裕一: 現地観測に基づく諏訪湖における貧酸素水塊の時空間特性の分析, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.71, No.4, pp.I_769-I_774, 2015.
- 5) 梅田信, 古里栄一, 浅枝隆: 富栄養化したダム湖におけるアオコ発生指標としての水温成層安定性, *ダム工学*, Vol.16, No.4, pp.269-281, 2006.
- 6) 矢島啓, 吉川栄, 石黒潤: 選択取水方式がダム貯水池の長期・短期の水質保全に与える影響に関する研究, *水工学*

- 論文集, Vol. 50, pp.1375-1380, 2006.
- 7) 中山恵介, 藤原建紀, 藤井智康, 小林健一郎, 中島祐輔, 佐藤啓央: 貯水池における出水時の成層場鉛直混合に関する検討, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.73, No.4, pp. I_979-I_984, 2017.
 - 8) 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証, 水工学論文集, Vol. 53, pp.1267-1272, 2009.
 - 9) 新谷哲也, 中山恵介: 生物の細胞組織構造を模した流体シミュレーターの設計と検証, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.71, No.4, pp.I_751-I_756, 2015.
 - 10) Nakayama, K., Shintani, T., Shimizu, K., Okada, T., Hinata, H. and Komai, K.: Horizontal and residual circulations driven by wind stress curl in Tokyo Bay, *Journal of Geophysical Research*, Vol.119, pp.1977-1992, 2014.
 - 11) Nakayama, K., Sato, T., Shimizu, K. and Boegman L.: Classification of internal solitary wave breaking over a slope, *Physical Review Fluids*, Vol.4, No. 1, 014801, 2019.
 - 12) Umlauf, L. and Burchard, H.: A generic length-scale equation for geophysical turbulence models, *J. Mar. Res.*, Vol.61, pp.235-265, 2003.
 - 13) Warner, J. C., Sherwood, C. R., Arango, H. G. and Signell, R. P.: Performance of four turbulence closure models implemented using a generic length scale method, *Ocean Modelling*, Vol.8, pp.81-113, 2005.
 - 14) Lilly, D. K., Waco, D. E., and Adelfang, S. I.: The representation of small-scale turbulence in numerical simulation experiments, *Proc. IBM Sci. Comput Symp. on Environmental Science*, pp.195-210, 1967.
 - 15) Schmidt, H. and Schumann, U.: Coherent structure of the convective boundary layer derived from large-eddy simulations, *J. Fluid Mech.*, Vol.200, pp.511-562, 1989.
 - 16) Weiss, R. F.: Oxygen Solubility in seawater, *UNESCO technical papers in marine science*, Vol.36, pp.22, 1981.

著 者

中山 恵介 所員, 博士 (工学), 水工学