

ダム貯水池・汽水湖の三次元解析とその適用について

エンジニアリング本部 防災・環境解析部 水圏環境課

加藤 伸悟

林田 健志

1. はじめに

ダム貯水池は、洪水からダム下流の水害を守るほか、かんがい用水や水道用水等の人の生活に関わる水資源としても重要である。ダム貯水池における水環境問題としては、濁水長期化問題、富栄養化問題（アオコ等）などがあり、それらの問題が未だ解決されていない水域も多い。

わが国の湖沼の水質は環境基準の達成率が50%程度と低い状況である。特に淡水と海水が混合する汽水湖は、特有な水質形成過程（潮汐の影響を受けた流動、塩分成層による貧酸素化）を有しているなかで、アオコ・青潮・悪臭等、水質に関する課題が見られており、水質改善が急務になっている¹⁾。また汽水湖はシジミ等の水産資源の創出場としても重要視されている。

ダム貯水池や汽水湖においては、従来、それら諸課題に対する改善策が講じられてきた。その改善策の種類や規模を事前検討する際に用いられてきたのが数値シミュレーションである。

ダム貯水池の水理・水質シミュレーションに対しては、従来、鉛直二次元モデル（一次元多層モデル）が多く用いられてきた。鉛直二次元モデルは貯水池横断方向を一様として縦断方向および水深方向の水理・水質量分布を求めるものであるが、わが国のダム貯水池の多くが河川状で細長いために、そのような空間分割でも十分な精度を確保

できるものと考えられる。また計算負荷が比較的小さい特徴もある。しかし、平面形状が複雑であるなど三次元的な水理・水質量の分布特性を有している場合への適用は精度の低下を招くと考えられる。

汽水湖の水理・水質解析に対しては、従来、準三次元モデルが用いられてきた。準三次元モデルは計算コスト（時間）の関係から、鉛直方向の流速を正確に解くことを犠牲にした静水圧近似を仮定した計算が一般的であるが、特に汽水湖では淡水と塩水の密度差に起因する特有の水質形成過程があり、準三次元モデルでは密度大小による潜り込み現象の忠実な再現が困難であると指摘されている²⁾。

そこで本稿では、ダム貯水池および汽水湖に対して三次元モデルを適用し、解析結果の特徴から実務への適用性と可能性について考察した。

2. 三次元モデルの概要と解析概要

2.1 三次元モデルの概要

本稿で用いた三次元モデルは、静水圧近似を仮定した計算（準三次元）と、非静水圧近似を用いて鉛直・水平方向の緻密な計算（完全三次元）を行うことができる。

完全三次元モデルの基礎方程式は、非圧縮性流体を仮定した連続式と水平・鉛直方向運動方程式から成る。圧力はSMAC法をもとに計算を行う。

それに対して準三次元モデルでは、圧力を静水圧近似と仮定し、完全三次元モデルの鉛直方向運動方程式を解かない代わりに運動方程式により求められた水平方向水理量をもとに、連続式から鉛直方向の水理量を解く。

水の密度は水温・塩分・SS 濃度から求め、水面での熱収支は短波・長波、潜熱・顕熱によって求められる。水平方向は直交可変格子(図 1)、鉛直方向はレベル座標にて空間を分割する。また、自由水面を考慮しているほか、メッシュをまたいで水位が変動する場合にも対応する(図 2)。

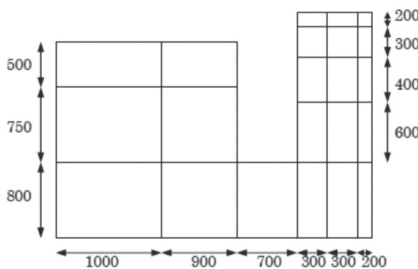


図 1 平面可変格子の考え方

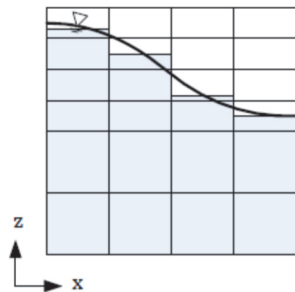


図 2 鉛直座標と水面の考え方

2. 2 解析概要

本稿では、三次元モデルを用いてダム貯水池と汽水湖の水理・水質計算を行い、その結果から三次元解析の特性について考察した。

ダム貯水池の解析では、準三次元モデルを用いた。洪水時を含む期間を対象として流況・水温・

濁質(SS)計算を行い、貯水池内流況計算結果から三次元解析を行うことの特性を示した。また、分画フェンス設置による濁水長期化対策効果を示した。

汽水湖の解析では、完全三次元モデルを用いて年間を対象とした水理・水温・水質(クロロフィル a、窒素、リン、有機物、溶存酸素)計算を行い、海域から湖内への塩分遡上状況とそれにとまう水質変化(本稿では溶存酸素)の表現精度の確認を行った。また完全三次元モデルとの比較の為に準三次元モデルでの解析を行い、完全三次元と準三次元モデルによる塩水遡上と湖内塩分分布の再現精度の比較を行った。

また、貯水池においては準三次元モデル、汽水湖においては完全三次元モデルを用いることで表現が可能になる事柄と計算に要する負荷(計算時間)から、三次元解析の実務への適用性を考察した。

3. ダム貯水池の準三次元解析

3. 1 貯水池内の流況

洪水期間中の貯水池内上層および中層流速を図 3 に示す。貯水池内上層では、上流端からの洪水流入により上流端～貯水池中流まで強い流れが生じている。貯水池上流の狭窄部(破線円①)では、流水断面が小さいことでより大きな流速が生じている。一方で流心から離れた水域(破線円②)の流速は小さく、滞留性が高いことがわかる。ダム貯水池等で問題となっているアオコは、植物プランクトンが異常増殖して生じる水質障害であり、栄養塩、水温や日射量、滞留時間等、植物プランクトンの増殖条件が揃った時に発生しやすくなる。計

算結果に見られる滞留性の高い水域は、アオコ発生源としてのポテンシャルが高いものと考えられる。また、アオコは風等により吹き寄せられて集積腐敗し、悪臭を発生させる事態も報告されている³⁾ことから、滞留性の高い水域はダム貯水池での水質障害を考える際に特に重要な水域と捉えることができる。

洪水吐き高さに相当する中層では、ダムサイト付近で放流にともなう強い流れが生じている。ダムサイト付近～貯水池中央までは流速 1～2cm/s 程度の流れが縦断的に連続しており、中央付近は上層と中層の流速がほぼ同程度である。一方で貯水池上層のダムサイト付近の流れは微小である。このことから、解析対象とした規模の洪水流は、貯水池中央付近までは上層～中層を強混合状態で流下し、貯水池中央付近で洪水吐きによる引き込みにより中層へと潜り込む特性があると考えられる。このような洪水時の貯水池内流況は洪水規模によっても異なると考えられるが、その水理特性を把握することは、例えば分画フェンス設置による濁水長期化対策を考える際に重要になってくると考えられる。

3. 2 分画フェンス設置時の水理・濁質挙動

ダムサイト～貯水池中央付近に流動制御フェンスを設置した場合の貯水池内流速を図 4、中層の鉛直流速を図 5 に示す。貯水池遮閉層では上流から流下してきた洪水流がフェンスにより遮られることで下層へと潜り込み、フェンス下流側の水平流速は微弱になっている(破線円③)。特に右岸側で強い潜り込みが見られる。潜り込んだ洪水流は、大きな流速でフェンス下端直下を通過し、洪水吐

きへと流下していることがわかる。

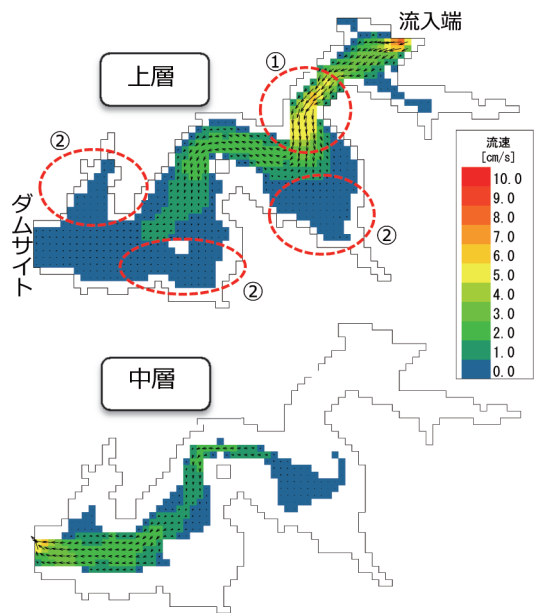


図 3 貯水池内水平流速分布

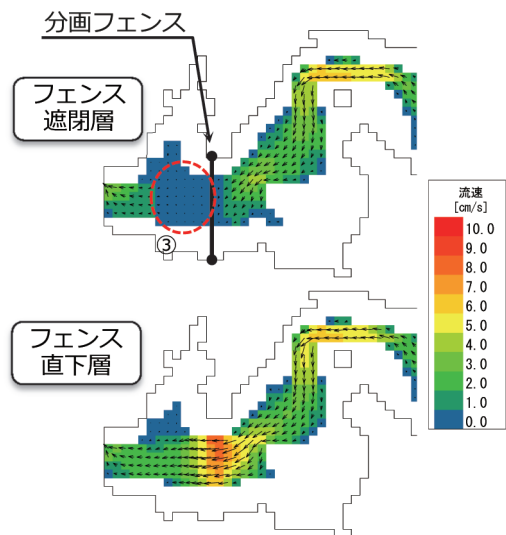


図 4 フェンス設置時の水平流速
(ダムサイト～貯水池中央付近拡大)

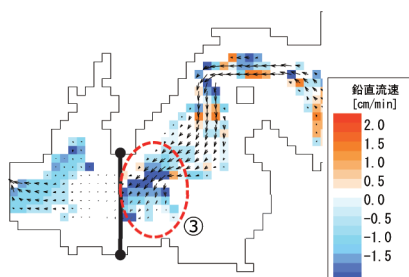


図 5 フェンス設置時の鉛直流速
(赤色:鉛直上向き流速、青色:鉛直下向き流速、
ベクトル:水平流速)

ダム貯水池の濁水長期化対策の主な効果は貯水池内の濁水を早期にダム下流へ排出すること、および、洪水時にフェンス～ダムサイト間に清澄水を貯留して洪水後の放流水とすることであり、分画フェンスによる流動制御と高濁度水の選択的な放流がそれをより効果的なものにすると考えられる。本稿の分画フェンス設置時の濁水解析では、そのことを踏まえて、フェンス下端をダム洪水吐き高さにあわせている。フェンス設置時の SS 濃度分布(図 6)からは、フェンス分画による上層部への清澄水貯留および濁水早期排出効果が確認できる。

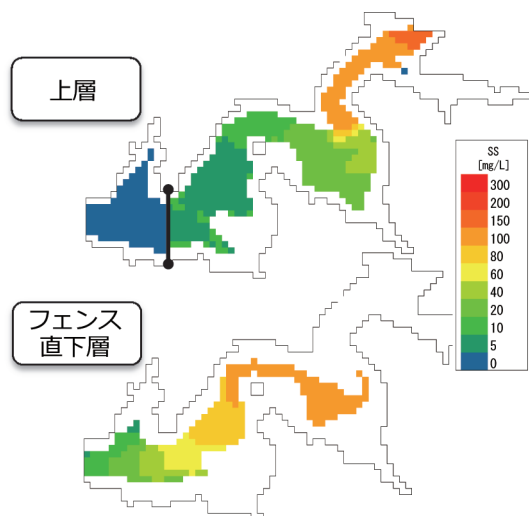


図 6 フェンス設置時の SS 濃度

本稿では、流れが横断方向に均一な断面にフェンスを設置しているが、不均一な断面にフェンスを設置した場合は流動制御効果に違いが生じる可能性がある。分画フェンスによる効果は鉛直二次元解析でも可能であり、従来それにより行われてきた。しかし、断面流速に偏りがある箇所への設置の場合、三次元解析の優位性が現れるものと考えられる。

4. 汽水湖の三次元解析

4.1 完全三次元モデルによる塩水遡上

汽水湖における塩分流入と湖内の塩分成層状態は湖内水質および生態系と密接に関係していることが知られている。網走湖や小川原湖においては塩分成層下での高濃度の栄養塩の上層への回帰が植物プランクトンの異常増殖の一因となっている⁴⁾。また海域から河川を經由して汽水湖に流入する塩水は、河川の河床形状に大きく影響を受け、汽水湖の塩分濃度変化の原因となり、生態系の変化をもたらす⁴⁾。このような汽水湖の水理・水質特性を踏まえると、水質保全施策や環境影響を検討するシミュレーションモデルに対しては、塩水の挙動とそれに伴う水質変化を詳細に解析できることが求められる。そこで、海域から汽水湖内への塩水遡上とそれに伴う水質変化に対する完全三次元モデルの適用性を考察した。海域側水門閉鎖時と水門開放時の塩分および溶存酸素(DO)縦断面図を図 7 に示す。

水門閉鎖時は、湖内は淡水で満たされ、河川の窪み部分(破線円④)には塩水が滞留している。また湖内深部および河川の窪み部分には貧酸素水が滞留している。一方、水門開放遡上時には塩水

が海域から河川部へ流入し、上層が淡水で下層が塩水となる明瞭な二層流が形成されている。湖内深部へは厚さ 50 cm 程度で塩水が湖底に沿って貫入しており、水門閉鎖時に滞留していた貧酸素水が塩水に含まれる豊富なDOによって消滅していく状況を確認できる。本稿ではごく一部の結果のみを示しているが、完全三次元解析による結果からは、海域から河川を経由して湖内に遡上する塩水とそれによる水質変化を詳細に捉えられていると考えられる。

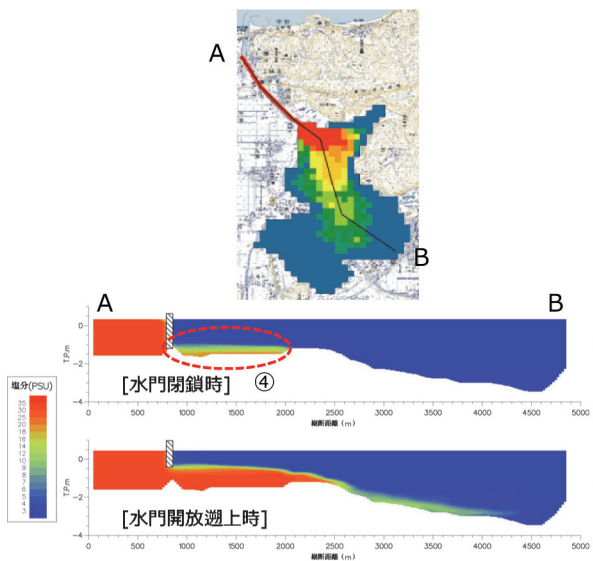


図 7 完全三次元解析による塩水遡上(左:塩分、右:DO濃度)

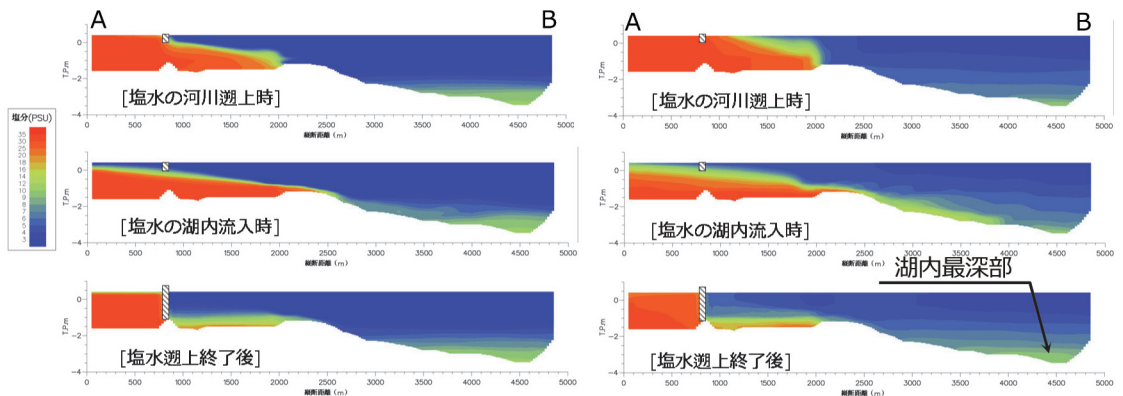


図 8 完全三次元解析(左)と準三次元解析(右)の塩分縦断分布

4. 2 完全三次元解析と準三次元解析の比較

従来、汽水湖の水理・水質解析には準三次元解析(静水圧近似モデル)が用いられてきた。例えば網走湖や中海・宍道湖の事例⁵⁾が当てはまる。ここでは、本稿で用いた完全三次元解析と従来用いられてきた準三次元解析の塩水挙動の違いについて考察した。

同条件設定および同時間における完全三次元解析と準三次元解析の塩水遡上状況を図 8 に示す。完全三次元と準三次元の違いは、塩淡水境界面の混同程度(境界面のシャープさ)において明確に現れている。準三次元解析(図 8 右)では、遡上時の河川は強混合状態となって塩水が流下し、湖内へも上層方向へ拡散しながら厚みをもった形態で流入している。湖内に流入した塩分は中層付近まで拡散しており、やや緩い塩分躍層が形成されている。

一方で完全三次元解析(図 8 左)では、遡上時の河川では塩水が明瞭なくさび状を形成したまま流下し、湖内へも厚さ 50 cm 程度で塩水が湖底に沿って貫入している。湖内では、上層～中層の淡水と下層の塩水が躍層を形成しており、下層に高密度の塩水がたまった状態を維持している。解析対象とした汽水湖の湖内最深部鉛直塩分プロファイル(図 9)からは、T.P.-2m 付近に塩分躍層が形成され、それ以浅は塩分 2PSU 程度となっている。このことから、対象汽水湖の塩分分布特性の再現に対しては、鉛直方向の流速を正確に解くことのできる完全三次元解析が優位であると言える。

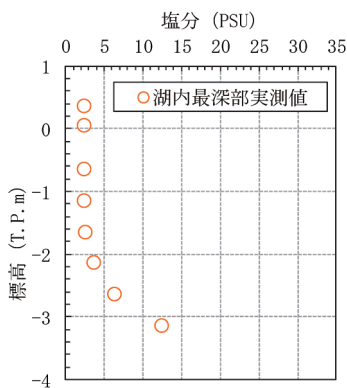


図 9 汽水湖の鉛直塩分プロファイル

5. 三次元解析の実務への適用について

5.1 ダム貯水池の準三次元解析

本稿の洪水時を対象としたダム貯水池準三次元解析からは、河川状の貯水池においても、局所的な滞留が生じることが確認された。鉛直二次元モデルでは表現が困難なこのような場合に対しては準三次元モデルが有効と考えられる。

本稿のダム貯水池三次元濁水解析は静水圧近似を仮定した計算としており、湛水面 1125 メッシュ×最大 40 層の空間分割で 1 ヶ月間を対象とした計算に「約 5 時間」を要している(計算スペック;表 1)。代表洪水を対象とした濁水解析であれば実務へ十分に適用可能である。また、クロロフィル a 等を含む水質解析の場合に対しても、空間分割の工夫や計算対象期間を限定すること等で実務に適用できるレベルになると考えている。

なお、水理を非静水圧で計算した場合(完全三次元計算)、静水圧近似を仮定した水理計算の 3～4 倍の計算時間を要するが、実務へ適用できないレベルではないと考えている。

5.2 汽水湖の完全三次元解析

湖沼の水理・水質解析に対しては、従来、準三次元モデルが多く用いられている。湖沼のうち淡水湖については、過去の経験からも準三次元モデルを用いて十分な解析精度が得られてきたが、汽水湖を対象とした本稿の解析結果からは完全三次元モデルが再現性の面で優位であることが示された。しかし、より緻密な計算を行う完全三次元モデルは高い計算負荷を要するとしているのが一般的な見解である。本稿で解析した汽水湖は湖面積約 4km²、平均水深約 2m である。本解析では 100m

正方格子(河川部分は 100m×21m)、鉛直層厚 0.1m により空間分割し、1 年間の水理・水質計算に「約 36 時間」を要している(計算スペック;表 1)。よって、計算負荷の観点からは実務へ適用できないレベルではないと考えている。

表 1 計算スペック

CPU	Intel Xeon 3.4GHz(8 コア)
メモリ	32 GB
並列処理	4 スレッド(MPI 使用)

6. まとめと今後の展開

6.1 まとめ

本稿では、ダム貯水池および汽水湖の三次元解析を行い、その結果の特徴と、実務への適用性を考察した。以下にそのまとめを示す。

① ダム貯水池準三次元解析

- 河川状の貯水池においても局所的に滞留性の高い水域が見られた。貯水池内での水質障害を考える際に重要な水域を特定できることが示された。
- 分画フェンス設置時の解析を行い、フェンス分画による貯水池上層部への清澄水貯留効果、および、洪水吐からの濁水早期排出効果を示した。

② 汽水湖の完全三次元解析

- 完全三次元解析からは、海域から河川を経由して湖内に遡上する塩水の挙動およびそれによる湖内水質変化を詳細に表現できていることが示された。
- 完全三次元解析と準三次元解析結果の比較から、汽水湖の塩分分布特性の再現精

度は鉛直方向の流速を正確に解くことのできる完全三次元解析が優位であることが示された。

③ 三次元解析の実務への適用性

- ダム貯水池に対する準三次元解析は、代表洪水を対象とした濁水解析であれば実務へ十分に適用可能である。また水質解析に対しても、空間分割の工夫や計算期間を限定すること等で実務に適用できるレベルになると考えられる。
- 汽水湖に対する完全三次元解析は、準三次元解析と比較して計算負荷が大きいが、実務に対して適用可能なレベルであると判断される。

6.2 今後の展開

本稿ではダム貯水池における水理・濁質計算結果からその特徴を考察した。今後はクロロフィル a を含めた水質計算を行い、三次元解析による特性を考察する予定である。また、曝気循環装置などの水質保全設備の組み込みを行い、ダム貯水池の三次元検討に用いるツールとして拡充していく予定である。また、完全三次元モデルによる解析を行い、準三次元との違いを考察する予定である。

<参考文献>

- 1) 「日本の汽水湖～汽水湖の水環境の現状と保全～概要版」（平成 26 年 12 月，環境省 水・大気環境課 水環境課）
- 2) 「伊勢湾再生への取り組み～伊勢湾シミュレーターの開発について～」（内田了二・澤田玲，平成 23 年，名古屋港湾空港技術調査事務所）
- 3) 「野村ダムにおける貯水池の水質保全の取り組みについて」（野村ダム記者発表資料，平成 19 年 6 月，国土交通省四国地方整備局 野村ダム管理所）
- 4) 「湖沼における水理・水質管理の技術 第1章 湖沼の水理・水質現象」（平成 19 年 3 月，国土交通省 湖沼技術研究会）
- 5) 「湖沼における水理・水質管理の技術 第6章 代表的な湖沼の水理・水質特性の実態」（平成 19 年 3 月，国土交通省 湖沼技術研究会）