

宍道湖における流動数値シミュレーションモデルの改良

井上 徹教（海上・港湾・航空技術研究所港湾空港技術研究所）

目的と内容

宍道湖ではその地理的環境上、大橋川からの塩水進入が不定期に起こり、密度成層の発達に伴い底層貧酸素水塊が形成される。特に宍道湖では密度成層形成時の底層厚さが比較的薄く、貧酸素化の速度が速いという特徴がある。宍道湖内の貧酸素水塊の形成に関して、数値シミュレーションによる既往の解析には Nakata et al. (2004), Ichikawa et al. (2007), 溝山ら (2011)などが挙げられ、一定の成果が得られている。しかし、それらでは流動モデルとして静水圧モデルが採用されており、大橋川からの塩水進入の再現性に問題があるとされている。本稿では宍道湖内における貧酸素水塊形成にとって重要な過程である塩水進入に伴う密度成層場の形成、塩水塊の輸送および密度成層の破壊過程の再現を目的として、非静水圧 (Full3D) モデルを用いた数値シミュレーションを行った。

モデルの設定

本研究では、田中ら(2010)が開発した流動モデルを用いる。このモデルでは流動場の計算に対して非静水圧モデルが採用されており、宍道湖内の密度成層形成過程の主たる駆動力である密度流、および陸風の吹送に伴う湧昇現象などの計算に有利であるとされている。計算条件として、計算格子は水平方向 200m または 400m、鉛直方向 10cm のレベル座標系 (図 1 参照) とした。開境界条件として、西岸の斐伊川河口からは国土交通省水管理・国土保全局の水文水質データベースより上島における流量を、東岸の大橋川においては国土交通省出雲河川事務所による水温塩分の鉛直観測データを与えた。乱流モデルには、水平方向は Smagorinsky モデル、鉛直方向は複数のモデルを採用し、比較検討した。気象条件として、風速・風向については国土交通省出雲河川事務所による湖心観測所のデータを使用し、日射量・大気圧・気温・水蒸気圧・降水量については松江気象台の観測データを使用し、計算領域で水平方向に一様で与えた。

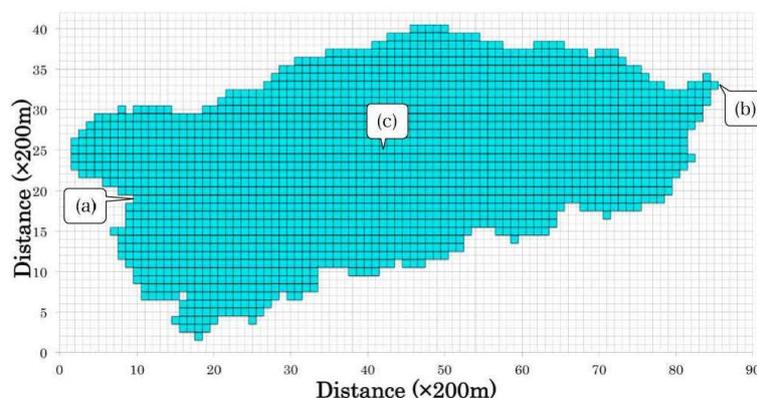


図 1 200m 計算格子。(a)は斐伊川流量設定地点、(b)は大橋川流速・塩分設定地点、(c)は宍道湖湖心であり、国土交通省により水質・気象の観測が行われている。

考察

1. 宍道湖内への塩水進入

大橋川からの高濃度塩水の流入形態として、図2のように、大きく3形態あることがわかった。以下、それぞれの流入形態に対して、風との関連性を元に考察する。

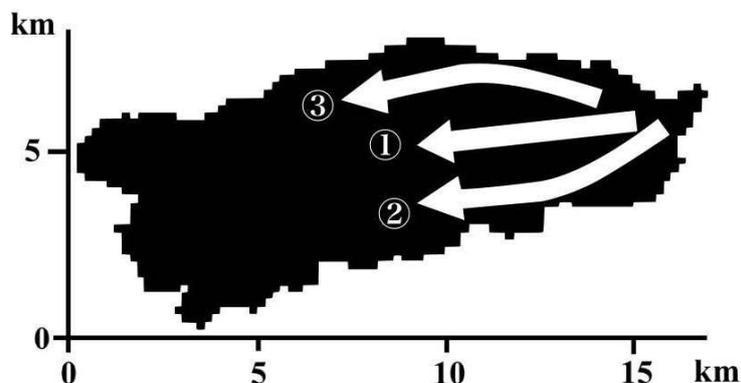


図2 代表的な塩水の流入形態の概念図

① 大橋川から湖心に向けて直進して流入する形態

2009年の計算結果において、宍道湖に侵入した塩分水塊が、図2の①のように大橋川から直進して宍道湖湖心に到達するまでの期間を抽出し、その期間の方位別の風の発生頻度および方位別の平均風速を調べた(図3)。その結果、西南西の風が卓越している時に、①のような形態をとることが分かった。ただし、後述する②や③の形態と比較して方位別の平均風速については目立った特徴は無く、一般的な風場であることがわかる。また、宍道湖への塩水流入形態としても①のような流入形態を取ることが最も多く、最も一般的な流入形態であるといえる。

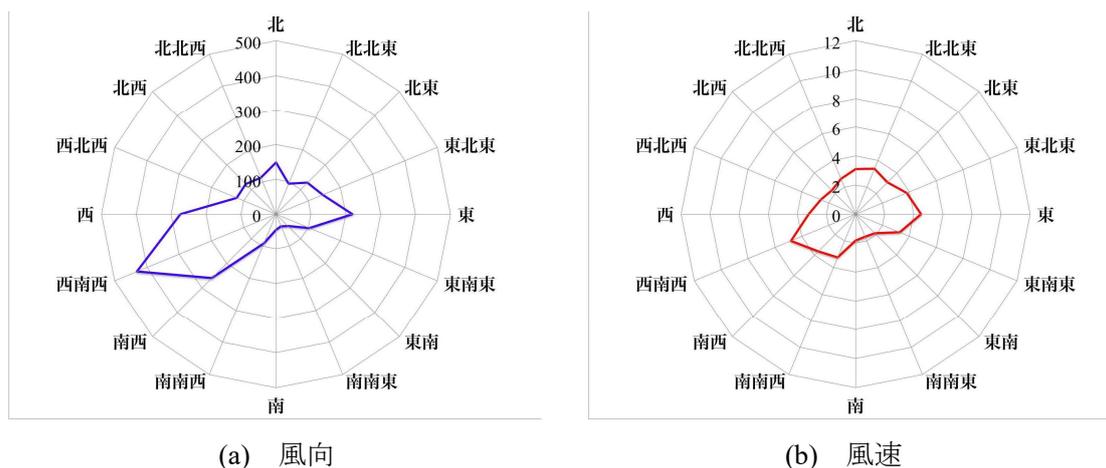


図3 ①の形態の際にみられる風向風速

② 大橋川から南岸に偏って流入する形態

②は宍道湖の南岸に偏って塩水が流入する形態であるが、このような流入形態をとる期間は風の発生頻度は南南西・南西が多く、次いで南の風が多かった(図4)。それぞれの方位における平

均風速は全ての方位で平均風速が 10m/s 程度であることが分かった。ここで宍道湖での一般的な風場では南寄りの風は比較的発生頻度が少ないことを考慮すると、塩水が②のような流入形態をとることは稀であり、発生頻度はそれほど多くはないことが予想される。

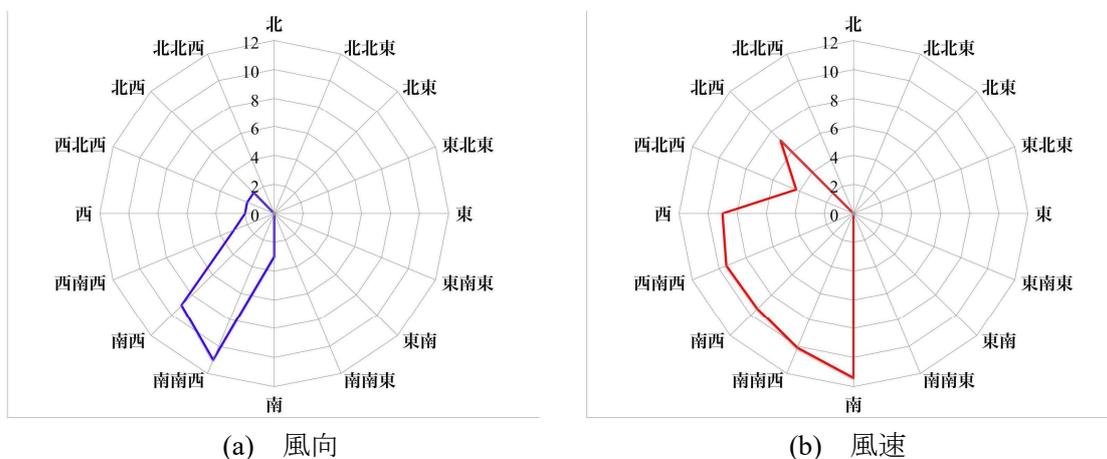


図4 ②の形態の際にみられる風向風速

② 大橋川から北岸に偏って流入する形態

③は宍道湖北岸に偏って塩水が流入する形態であり、計算結果からこのような進入形態の発生頻度は比較的多いことが分かった。また、②と同様に、特定の方向における風との関連が高いことが分かった。まず方位別の発生頻度を見てみると（図5(a)）、西風が卓越しているほか西南西・西北西の風の発生頻度が両方とも西風の約半分程度の頻度で発生しており、③の期間中はほぼこの3方向の風で占められていた。次にこの3方向の平均風速を見てみると（図5(b)）、全て 10m/s 程度となっており、これ以下の風速では塩水進入経路の偏りは見られなかった。宍道湖への塩分の流入形態の差異は平均風速が 10 m/s というのが1つの指標となることが示唆される。

西風が強い時に水塊が北寄りになるのは、コリオリ力によるものと予想される。即ち、西風が湖面を吹き抜ける時、コリオリ力によって表面水が南寄り偏向するために、それを補完するために底層水は北岸寄りへと向かい、結果として流入した塩水も北岸寄りへと偏って流入すると推測される。宍道湖では東西方向の風、特に西方向の風が卓越しているため、強風時には比較的③のような流入形態をとりやすいと考えられる。

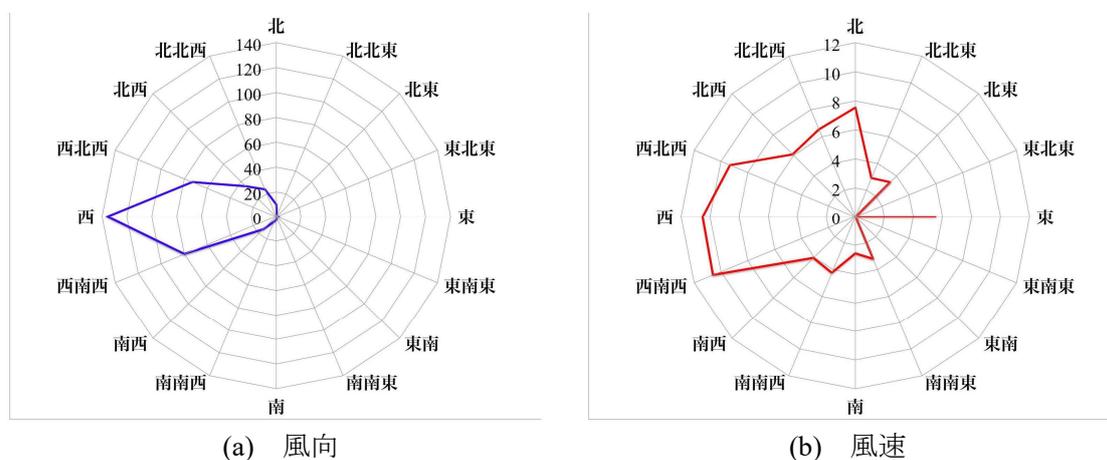
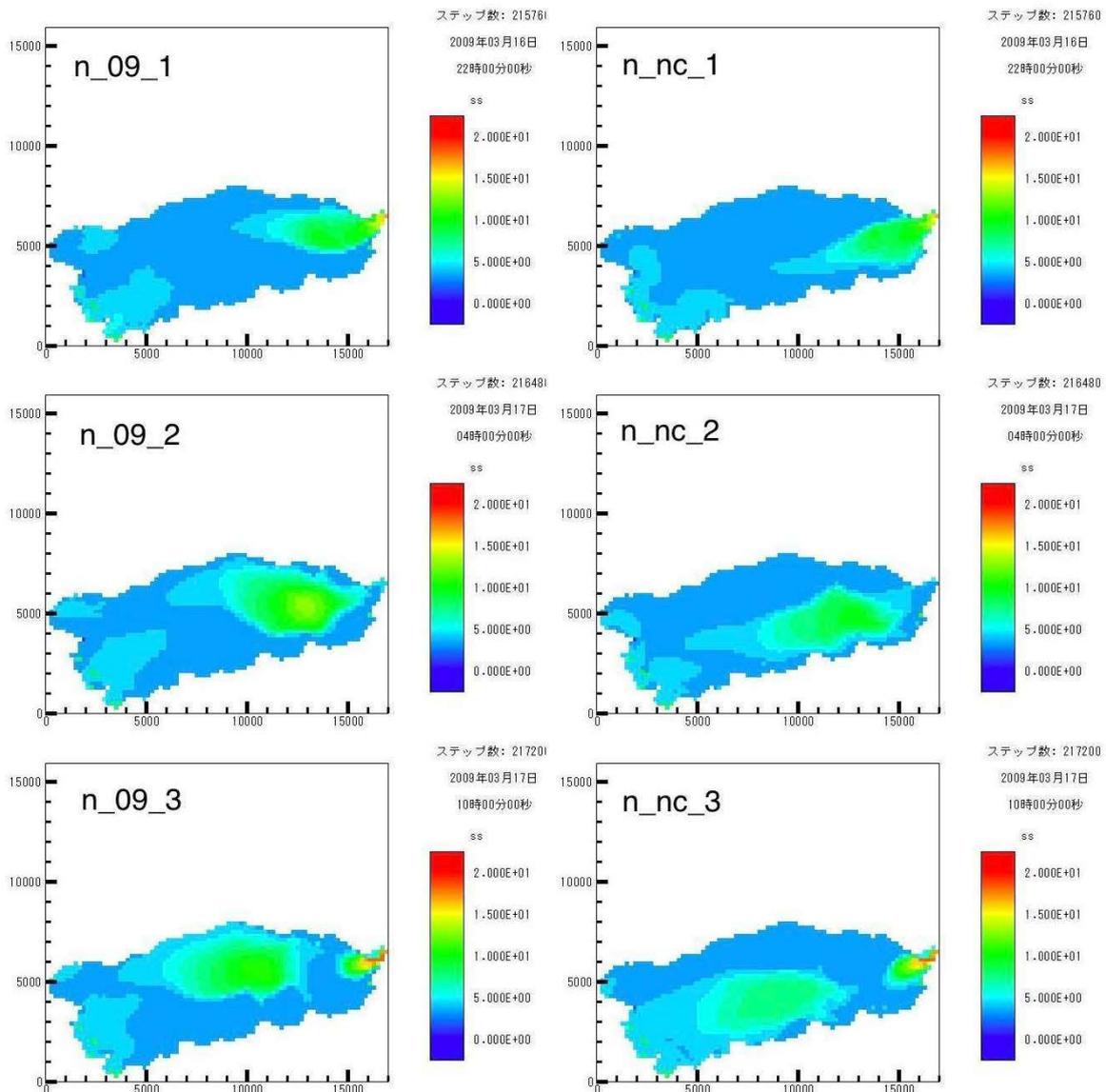


図5 ③の形態の際にみられる風向風速

ここで、コリオリ力の作用について検証するため、コリオリ力を考慮しない状態での計算も行い、塩水の侵入形態に差があるかどうか確かめる。図 6(a)はコリオリが考慮されている場合に北岸に偏って塩水が流入する時期の塩分水平分布の 3 時間毎の計算結果、図 6(b)は同時期のコリオリ力を 0 とした場合の計算結果である。コリオリ力の影響を考慮していない計算結果 (図 6(b)) では、塩水は西南西方向へ流入していた。この原因として、コリオリ力の影響が無い場合は表層水が西南西からの風により東岸へ吹送され、湖底では西南西方向への流れが生じ、流入する塩水は北方向へ偏向せず直進的に西南西方向へ流入するためと考えられる。



(a) コリオリ力有り

(b) コリオリ力無し

図 6 塩水流入経路に対するコリオリ力の影響

2. 風による塩水塊の混合と移動

宍道湖へ流入した高塩分水塊を駆動する要因は主に風起因の吹送流であることが現地観測等の結果から断片的に知られている。貧酸素水塊の元となる高塩分水塊の生成・消滅についても風と

相関があることもよく知られた事実であるが、ここでは計算によって得られた湖心塩分の時系列変化と底層塩分の水平分布から、どのように塩分成層が移動し、また消滅するのかを詳細に調べた。

高塩分水塊の消滅について湖心における塩分の計算結果をみると、風に煽られた直後に塩分が下がる場合は、塩分の水平分布を見ると湖心から他のエリアに移動した場合であり、湖心で鉛直拡散により高塩分水塊が消滅することはなかった。高塩分水塊は風に煽られながら徐々に拡散していくが、特に強風時に湖岸においては湧昇しながら混合し、湖心ではなく湖岸部で底層から消滅する様子が確認できた（図7）。また、斐伊川から大規模な出水がある場合はそれによっても高塩分水塊が消滅することが分かった。ただし、完全に高塩分水塊が消滅することはほとんどなく、消滅する前に新たな塩水塊と結合し、底層には2ヶ月以上に渡って高塩分水塊が存在することも確認された。この場合、底層に高塩分水塊が長期間存在していることから溶存酸素濃度がかなり低下していることが予想されるが、これは、貧酸素化した高塩分水塊が消滅すること無く宍道湖の湖底を移動していることを意味し、幅広く湖内の生物に影響を与えている可能性がある。

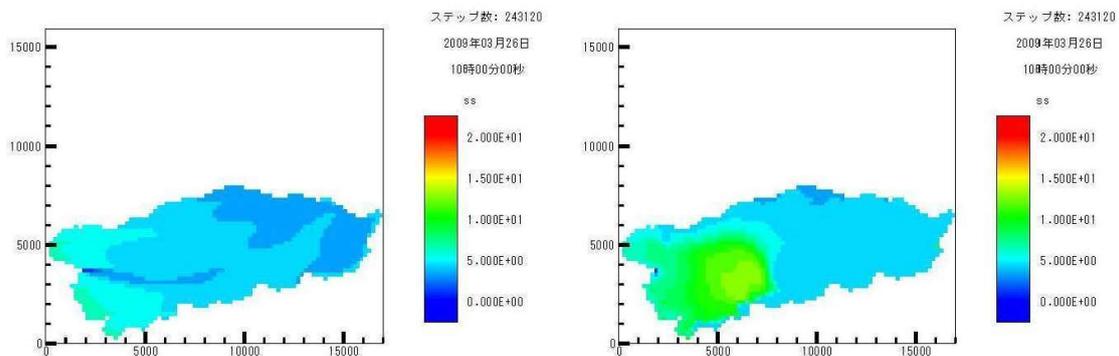


図7 風による高塩分水塊の輸送と混合の様子（左は表層，右は底層の塩分を示す）

以下では、仮想的な風環境を入力した計算結果から、宍道湖での風条件下と塩水混合との関係を調べた。計算方法は平均塩分が5psuの宍道湖内底層に厚さ約30cm程度、塩分15psuの高塩分水塊を配置し、単純なモデル風を与えて高塩分水塊の応答を追った。

宍道湖では東方向と西南西方向の風が卓越しており、高塩分水塊の解消に大きく影響すると推測される風速10m/s以上の強風は東方向ではほとんど発生していないため、ここでは西南西の風を採用した。西南西の風においては、風速4m/sの風が最も発生頻度が多いため、これをモデル風の1つとした。また高塩分水塊の解消には一定方向に風が連続的に吹き続けることも重要であると推測され、西南西の風の風速別連続吹送時間を確認した。これより、現実的に発生しうる連続吹送時間は約29時間であり、この時の風速は13m/sであった。また、発生頻度・風速・連続吹送時間全てにおいて中程度の8m/sの風も計算対象とし、結果として与えるモデル風は、宍道湖において実際に発生しうる風を、2009年の宍道湖湖心における風向・風速の観測データから選定した以下のものを用いた。

検証期間は風の入力終了後91時間まで（風の入力開始から120時間）とし、風の入力開始6時間後、16時間後、28時間後、また風の入力終了後91時間後の湖底塩分の水平分布を確認した。

(1) 4m/s の西南西の風を 29 時間連続で入力

風速 4m/s の西南西の風は、宍道湖において最も頻繁に発生する風であり、この水域における恒常風と考える事ができる。しかし、高塩分水塊の解消能力という視点で図 8 を見ると、顕著な解消能力に期待はできないことがわかる。29 時間連続して発生しても、高塩分水塊はその形状を保ったまま湖心から殆ど移動することはなく、その後 91 時間経過した後も殆ど塩分に変化はなかった。そのため、一時的に湖底へ酸素を供給するといった働きも小さいものと考えられる。また 2009 年においては、風速 4m/s の西南西の風は連続的に発生したとしても 6 時間程度であり、このような風が高塩分水塊の解消に大きく影響している可能性は低いと考えられる。

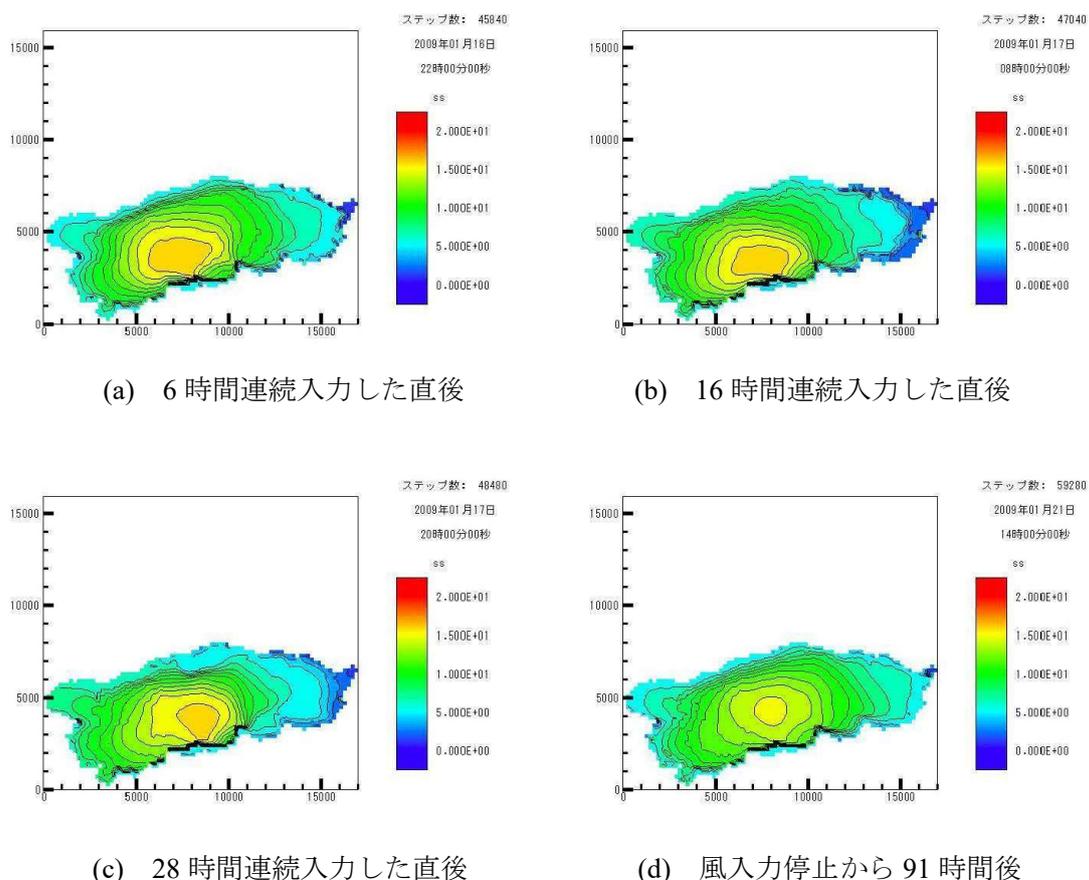


図-8 風速 4 m/s の西南西の風を入力した場合の湖底塩分水平分布

(2) 8m/s の西南西の風を 29 時間連続で入力

まず図 9(a)をみると、風速 8m/s の場合は風入力 6 時間後で風速 4m/s の風が 29 時間連続的に発生した時よりも高塩分水塊を西へ移動させている事が分かる。次に(b)を見ると、高塩分水塊は宍道湖の西側半分まで輸送され、湖心付近では塩分濃度が低くなっていることが分かる。このとき、湖心へは表層から酸素の供給があると考えられ、仮に湖心にあった高塩分水塊が貧酸素化していたとすると、湖底への酸素供給回復といった働きが期待でき、湖内環境へ重要な役割を果たしている可能性がある。

2009 年の例では風速 8m/s の風の連続吹送時間は最大 16 時間程度であったが、更に連続的に吹送した場合について(c)より考察する。(b)と比較して高塩分水塊の分布に顕著な変化は見られない

が、高塩分水塊の濃度や規模は小さくなっており、この地点において風により鉛直混合が生じているものと考えられる。このため、風速 8m/s の風については、高塩分水塊をある一定の浅い水深までは輸送する能力があり、その水深に到達すると鉛直混合により高塩分水塊を解消することができるものと思われる。風の入力終了後の塩分は風速 4m/s の結果と比較すると、湖底塩分の低濃度化が進行しており、ある程度の高塩分水塊の解消能力はあるものと考えられる。

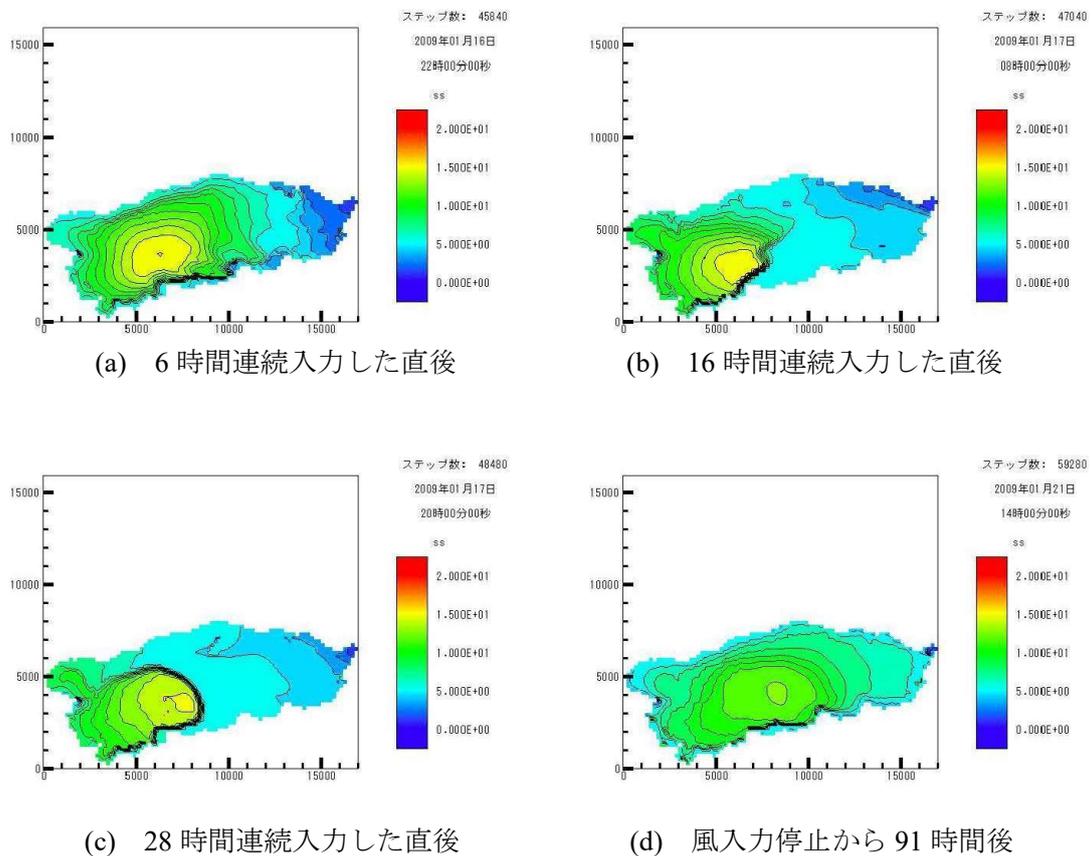


図9 風速 8m/s の西南西の風を入力した場合の湖底塩分水平分布

(3) 13m/s の西南西の風を 29 時間連続で入力

風速 13m/s の風は宍道湖に発生する風速の中で比較的大きく、また発生頻度は少ないが一度発生すると同一方向へ長時間吹送するため、高塩分水塊の解消能力は高いと考えられる。実際、図 10(a)より 6 時間で、風速 8m/s の風が長時間発生した時と比較しても高濃度の塩水がさらに縮小していることがわかる。(b)、(c)と時間が進行するにつれて湖底から塩分水塊が殆ど消滅しており解消能力の高さが伺えるが、この時は西岸から湧昇が生じており、高塩分水塊が貧酸素化しており還元的な環境となっている場合、湖表面において青潮を発生させる可能性もある。この程度の風速の風は長期間発生しなくとも瞬間的に発生するだけで湖底の塩分環境に影響を与えることが考えられ、宍道湖においては特に西南西方向では風速 13m/s 程度の風が比較的多く発生することから、高塩分水塊は基本的に宍道湖の西方において解消されることが多いと考えられる。

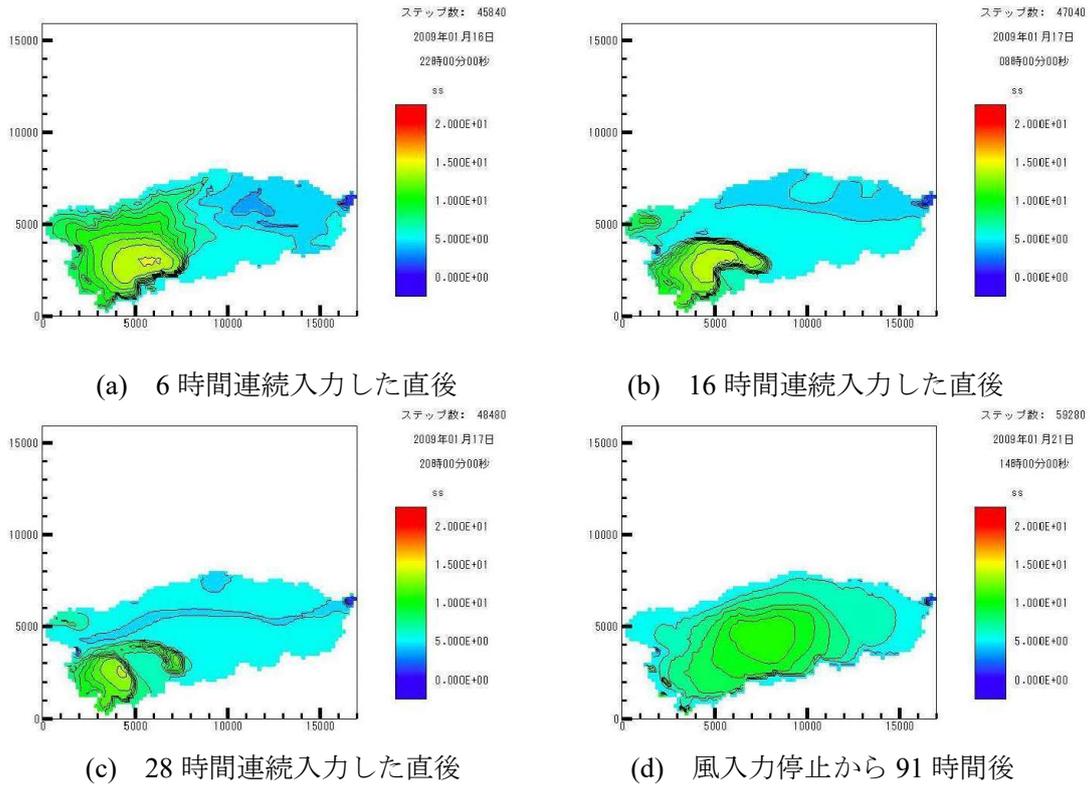


図10 風速13m/sの西南西の風を入力した場合の湖底塩分水平分布

3. 大橋川拡幅の影響

大橋川の拡幅を疑似的に再現する目的で、大橋川接続部（東端）のセルを1個から2個に変化させた計算も行った（図11参照）。

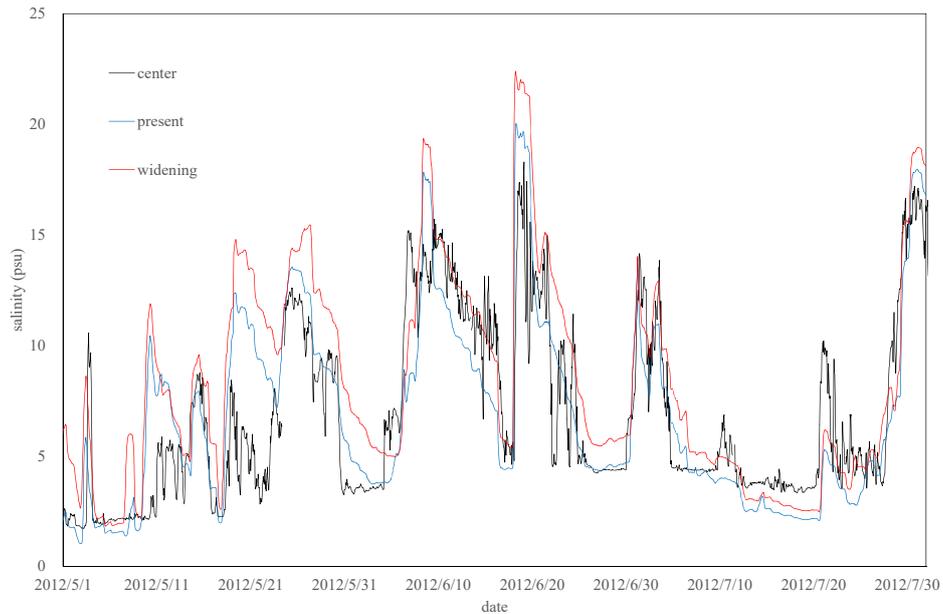


図11 大橋川拡幅を模擬した計算結果

大橋川の川幅を広げた計算結果（図 10 中の赤線）では現況（図 10 中の青線）よりも塩分が上昇している。これは大橋川から進入する塩水量が増えたためと考えられ、大橋川拡幅により宍道湖内の総体的な塩分は上昇することが示唆される。一方、鉛直拡散に伴う底層塩分の低下の様子は、塩水進入量の違いにかかわらず同様の低下傾向を示している。これは塩水進入量が増えた場合でも、塩分は変化がないため、密度成層の強度はほとんど変化しないことが理由と考えられる。気候変動に伴う海面上昇などの影響により、より高塩分の水塊進入がある場合には、密度成層の強化に伴う成層構造の長期化、底層貧酸素の進行などが予想される。

まとめ

本研究では、宍道湖内の塩水塊を含む物理場のシミュレーション精度の向上を目的とした検討を行った。

- ・入力ファイルの再整理を行った
- ・5種の乱流0方程式モデルの比較を行い、Nakamuraらによるモデルを採用することとした
- ・鉛直粘性および拡散については、水面摩擦係数を見直すことで再現性が向上した
- ・水温下降時における堆積物への熱拡散の重要性が示された
- ・融雪期の河川流量の設定の注意点を示した
- ・大橋川拡幅により湖内塩分は総体的に上昇するが、成層強度の変化は少ないことが予想された

一方、以下の課題については未解決である。図 5 において、5月11日頃や5月21日頃の塩分は過大評価となっている。大橋川における塩分上昇は見られ、この期間の風は弱く、湖心に塩水収入が到達しない理由が現時点では見いだされない。逆に7月15日頃の塩分は過小評価となっている。7月7日から9日にかけては斐伊川流量は最大 $957\text{m}^3/\text{s}$ にまで流量が増加しており、現場塩分がそれほど低下していない原因が不明である。