網走湖における密度界面に対する風応力と 河川流入の影響評価

INFLUENCE EVALUATION OF WIND STRESS AND INFLOW FROM RIVER ON SATRATIFICATION IN LAKE ABASHIRI

丸谷靖幸1・中山恵介2・堀松大志3・鰀目淑範4・米元光明5 Yasuyuki MARUYA, Keisuke NAKAYAMA, Daishi HORIMATSU, Yoshinori YONOME and Mitsuaki YONEMOTO

1学生会員 北見工業大学大学院 土木開発工学専攻(〒090-8507 北見市公園町165番地)
2正会員 博(工) 北見工業大学工学部 社会環境工学科(〒090-8507 北見市公園町165番地)
3正会員 修(工) いであ株式会社東北支店 水圏グループ(〒980-6016 宮城県仙台市青葉区中央4-6-1)
4正会員 工修 北見工業大学工学部 社会環境工学科(〒090-8507 北見市公園町165番地)
⁵正会員 国土交通省 北海道開発局 網走開発建設部(〒093-8544 網走市新町2丁目6番1号)

Lake Abashiri is a typical brackish lake which has a clear interface due to salt water intrusion from Okhotsk Sea. Because of upwelling induced by wind, Lake Abashiri sometimes has blue tide which may kill fish and aquatic plants. Therefore, the depth from water surface to the interface is a great concern, and it is needed to understand the mechanism of the formation of the interface. Previous studies revealed that wind influences the formation of the interface compared to tide effect. This study, thus, made an attempt to clarify the influence of river inflow on the formation of the interface, and wind was found to have the greatest influence on the formation of the interface among the external forces, such as wind, tide and river inflow. Also, the decrease in the level of the interface was revealed to be enhanced by wind effect which tilts interface significantly.

Key Words: brackish lake, Wind stress, River inflow, Interface, Three-dimensional numerical computation

1. はじめに

網走湖はオホーツク海沿岸に位置し、網走川からの流 入により上層が淡水、オホーツク海からの塩水の流入に より下層が塩水という強固な密度二成層を有し、明確な 塩淡境界層が形成される汽水湖である.また、網走湖で はシジミを主として、鮭、ワカサギなどの多くの水産資 源を有している. このように,豊かな水産資源を有して いるが,近年,水質問題が深刻化してきている.上流側 からの栄養塩の流入に起因していると思われる、夏期に おけるアオコの発生がその1例である. その結果,明確な 塩淡境界層の形成による水の交換時間の長期化により, 底層にはヘドロ状の底泥が堆積傾向にある4,5,6,7,8,10).底 泥は酸素を消費し、密度成層の存在により下層における DO濃度がほぼゼロとなる無酸素状態が発生する. そのた め,ある程度の風応力が与えられた場合,下層の貧酸素 水塊が湧昇し、青潮現象が生じる.青潮現象は水性生物・ 植物への影響が大きく、緊急な抑制対策が必要とされて いる.

青潮発生の抑制対策としては、湧昇により下層水塊が



表層に達しない状態にするため、水表面から密度界面ま での水深を増すことが考えられる.そのためには、密度 界面位置がどのように決定されているかを理解し、方策 を提案する必要がある.密度界面位置に関する研究とし ては、小川原湖の研究があげられる^{13,14}.密度界面位置



図-2 2006年洪水時における気象条件とハイドログラフ.(a) 網走における風ベクトル. (b) 網走における潮汐.(c) ハイドログラフ.

の決定に風の影響が重要であることが示されている¹²⁾. 一般的に、密度界面位置を大きく変化させる現象とし

一般のに、密度外面位置を入さく愛化させる現象として、風応力、河川流入、潮汐が考えられる。網走湖における過去の研究により、密度界面の変動は、潮汐よりも風応力による影響が大きいことが示されている¹⁾. つまり、河川流入の影響を評価することで、密度界面に最も影響を与えている主要因を把握することが可能である。しかし、過去の論文^{4,10}で、河川流入の影響について検討されたものが存在するが、強風を伴った洪水時における検討結果であるため、厳密な河川流入による影響を考慮することが出来ていない.

そこで本論文では、風応力と河川流入による影響評価 を行うため、強風と降雨を伴う2006年10月洪水と、風が 弱く降雨を伴う1998年8月洪水における網走湖内の流動解 析を行い、成層状態の変化について比較検討を行った. 解析には、3次元数値モデルの有効性が示されており⁹、 本研究でも3次元数値モデルを利用した^{2,3}.

2. 強風を伴った洪水について

(1) 2006年に発生した洪水について

2006年10月に発生した洪水は、洪水期間の10月7日から 10月16日までの10日間における総河川流入量は1.8× 10⁸m³であり、網走湖全体(2.3×10⁸m³)の水を約1回交 換するほどの流量であった.また、7日から8日にかけて の降雨により、10月8日18:00にピーク流量約800m³/sが流 入していた(図-2).網走湖では明確な密度界面が形成 されているため、上層における水の交換が主であると言 える.そのため、より多くの交換が上層を中心として生 じていたと考えられ、与えられた流量は網走湖にとって 大きなインパクトを与える洪水であったことが分かる.

(2) 数値計算による再現結果の検討

洪水時における流動を理解するため、3次元数値モデル による再現計算を行った.再現計算を行うにあたり、西 オーストラリア大学にて作成された3次元数値モデル ELCOM^{2),3)}を用いた.詳細なモデルに関する情報は参考 文献をご覧頂きたい.本計算において、これまでの計算 と大きく異なる点は、洪水による密度界面低下をより正 確に考慮するために、鉛直メッシュの与え方に工夫を凝 らした点である.最大水深16mにおいて、水表面付近で 0.5m、密度界面付近で0.1m、底層で1mの合計102層を与 えた.水平方向のメッシュサイズは200mの等間隔メッシュ、 メッシュ数56×30とした.

境界条件として、気象条件は網走のAMeDAS観測所の 値を使用した.ここで、湖上と陸上では粗度の違いによ り風の大きさが異なる可能性があるため、AMeDAS観測 所の値と湖上での実測値との比較を行った.その結果、 両者ともほぼ1対1に対応しており、AMeDASの値をその まま利用しても構わないという結果が得られたことを記 しておく.また、上流に位置する網走川からの流入量は、 図-1の地点Bにて得られた、計算期間における実測値+ 残流域からの推定流量を与えた.この観測地点は河口か ら21.7kmに位置しており、流域面積は1,120.40km²である. また、計算を行う際鉛直方向をzとし、旧測地系で標高が 0となる時を基準面とした.

ELCOMの精度を確認するため、再現計算結果の検証 を行った.検証には、図-1のNo.1, No.2, No.3で水温・ 塩分計を1m間隔で湖内に設置し、得られたデータを用い ることとした.実測値と数値計算結果を比較したところ、 湖内で発生する内部波の振幅、周期が同様な結果となっ ていることが確認でき、数値計算結果が非常に良好な再 現性を示していることが確認された(図-3).過去の研 究¹⁾で示されているように、約8時間周期で内部ケルビン 波が実測および計算において発生していることが確認さ



図-3 2006年10月1日から30日にかけての塩分時系列データを使用した,実測値と再現計算結果の比較 a:No.1における実測値.b:No.2における実測値.c:No.3における実測値. d:No.1における再現計算結果.e:No.2における再現計算結果.f:No.3における再現計算結果.



図-4 3次元数値計算結果. 澪筋における密度の鉛直コンタ図. a:2006年10月7日12:00. b:2006年10月8日0:00. c:2006年10月8日18:00. d:2006年10月9日0:00.

れており、あらためてよい再現性が確認された.また、 密度界面位置の低下量が実測値,数値計算結果共に約2m であることが確認された.

密度成層構造の検討を行うため、数値計算による鉛直 断面の計算結果をもとに検討を行った.10月7日12:00頃 から密度界面に変化が現れ始め、10月8日0:00には界面 が図ー1のA'付近の水面にまで到達し、密度界面が湖の長 軸方向に沿って大きく傾斜している様子が分かる(図ー4). ここで、密度界面とは、上層が塩分約3PSUであり、下層 は約21PSUであるため、上層の塩分が急激に変化する、 塩分約10PSUの位置のことを示している.その後、10月8 日18:00まで密度界面の傾斜は維持されていたが、その直 後から密度界面の傾斜は急激に変化し、10月9日0:00には 水平な状態へと落ち着いていた.気象データと比較する と、10月7日12:00からの風速14m/s程度の北北東の風が、 密度界面の傾斜を生じさせ、その後、風速16m/s程度の北 風へと変化した後、密度界面が水平な状態に戻っていた ことが分かった.短時間での反応であるため、エクマン 輸送による影響¹¹⁾を無視すると、北北東の風は網走湖の 長軸方向に密度界面の傾斜を発生させやすい風向きで あったと推測される.10月7日における上下層の密度差に 対する下層密度比は0.012程度であり、上層厚さを6m、 下層厚さを9mとすると、長波近似における内部波の波速 は0.66m/s¹⁰であった.このことから、傾斜した密度界面



図-5 1998年洪水時における気象条件とハイドログラフ.(a) 網走における風ベクトル. (b) 網走における潮汐.(c) ハイドログラフ.

が水平な状態に戻るまでには約3時間程度要することが 分かる. 北風へと変化した10月8日18:00頃から約4時間 程度で密度界面が水平な状態へ戻ったことは,北北東の 風が密度界面の傾斜に重要な役割を果たしていたことを 示すものであると考えられる.

3. 強風を伴わない洪水について

(1) 1998年に発生した洪水について

1998年8月に発生した洪水は、8月28日から9月10日までの14日間における総河川流入量は1.2×10⁸m³であり、網走湖全体(2.3×10⁸m³)の約半分の水を交換するほどの流量であった.特に、8月28日から29日にかけての降雨により、8月29日14:00にピーク流量約500m³/sが流入していた(図-5).1998年8月洪水の最大の特徴としては、強風を伴わない洪水であったことである.最大風速はおよそ7m/sであり、2006年洪水の最大風速21m/sと比較すると、およそ30%であった.

(2) 数値計算による再現結果の検討

2006年洪水と同様に3次元数値モデルELCOMを使用し、 再現計算を行った.境界条件やメッシュサイズ等は2006 年洪水の再現計算と同様とした.1998年の洪水時には、 数日毎に計測されている密度界面位置と計算結果との比 較から、良好な再現計算結果が得られていることが確認 された(図-6).図-6で示したデータは、図-1のNo.2 にて観測された密度界面位置であり、密度界面が傾斜し ている場合、敏感に反応する場所であることから、本観 測時には密度界面変動が小さかったことが分かった.ピ ーク流量が与えられた8月29日14:00とピーク流量前の8 月26日0:00を比較したところ、密度界面の変動、密度界 面位置の低下を確認することが出来なかった(図-7).





前節で述べたとおり、風応力が2006年に比較すると最大 で30%であり、密度界面の変動には風応力が大きく影響 しているのではないかと推測される.

4. 風応力と河川流入による密度界面に対する影響評価

強風を伴った洪水(2006年)と強風を伴わない洪水(1998年)における風応力と河川流入の影響評価を行った.しかし、風や河川流入等の外的な条件が異なるため、厳密には両者の比較により、風応力による影響で密度界面が変動しているとは言えない.そこで、3次元数値モデルを用い、強風を伴った2006年洪水において風応力をゼロとし、風応力に関する影響評価を行った.その結果、密度界面の変動は小さく、2006年洪水と1998年洪水の比較と同様に、風応力によって密度界面の変動が引き起こされていることが確認された(図-8).1998年と2006年の観測結果の比較では、十分ではなかった風の効果の分離・評価が、数値計算を行うことにより可能となった.



図-7 3次元数値計算結果. 澪筋における密度の鉛直コンタ図. a:1998年8月26日0:00. b:1998年8月29日14:00. c:1998年8月30日0:00. d:1998年8月31日0:00.





網走湖における密度界面位置を決定する大きな要因と して、既存の研究において、洪水時における上層流速の 増加による吸出し効果4が重要であると指摘されている. そこで、本研究において得られた数値計算結果を用いて、 吸出しの効果がどのような機構により発生していたか検 討を行った.数値計算結果から,網走湖流出部の上層の 流速は最大で0.3m/s程度であり、密度界面は明確に存在 しておらず,界面上で不安定が発生していたことが分かっ た(図-4, 図-9).また,2006年10月8日18:00におい て水表面付近に大きな流速が発生しているのは風の影響 であり,その流れの方向は下流側から上流側に向かうも のであった.そのため、2006年の下層の水塊の流出は、 風による密度界面の傾斜を伴って生じていたことが確認 された. つまり, 風による密度界面の傾斜に伴い, 下層 の水塊が網走湖の流出部付近にまで湧昇により輸送され、 下層の水塊が流出したものと考えられる. よって, 吸出 し効果は、風による効果と相まって顕著に発生するもの であると考えられる.

次に、吸い出しの効果における、風と河川流入の影響 の比較検討を試みた.まずは、2006年洪水で最も流速が 大きい2006年10月8日19:00において、安定度に関する検 討を行った.風を考慮した場合,混合層厚h=8m,平均 流速u=0.37m/sより, Richardson数は約5.2となった. また, 風を考慮しなかった場合の同時刻において、混合層厚h =6m, 平均流速u=0.044m/sより, Richardson数は約359 となった. Richardson数は両者とも比較的大きく, 密度 界面は安定していたことが推測される.風を考慮した場 合,最大の連行係数¹⁶⁾ E=約1.7×10⁴と推定された.その 状態が継続すると仮定すると、約9時間で2m程度密度界 面が低下することになる. 実際には, Richardson数は時 間的に変化しており、それに伴い連行係数も変化してい るため、数値計算結果のより詳細な解析が必要である. ページの都合上、その詳細な解析結果については別の機 会で紹介させて頂くことをご容赦願いたい.



図-9 3次元数値計算結果. 澪筋における絶対流速の鉛直コンタ図. a:2006年10月7日12:00. b:2006年10月8日0:00. c:2006年10月8日18:00. d:2006年10月9日0:00.

5. おわりに

本研究では、網走湖における河川流入と風応力の影響 評価を行い、以下のような結論を得た.

- (1) 3次元数値モデルによる再現計算を行い、密度界面の変動を引き起こす要因として、河川流入ではなく、 風応力によるものであるということが示された.
- (2) 3次元数値モデルによる風あり,風なしの再現計算 より,密度界面の傾斜,および斜面不安定領域付近 における混合が,密度界面位置を決定付ける大きな 要因の一つであるということが確認された.

謝辞:本研究を進めるにあたり,網走開発建設部治水課から観測データを提供して頂きました.また,Centre for Water Research,西オーストラリア大学の協力の下実施されました.記して感謝の意を表します.本研究は,科学研究費基盤(C)の助成を受けて実施されました.

参考文献

- 中山恵介,堀松大志,清水健司,丸谷靖幸,角谷和成,早川 博,岡田知也,鰀目淑範,網走湖における内部ケルビン波と 風応力の影響評価,水工学論文集,第53巻,2009.
- Hodges, B. R., Estuary, lake and coastal ocean model (ELCOM): user manual, University of Western Australia, Centre for Water Research Reference WP 1386 BH, 2000.
- Hodges, B.R., J. Imberger, A. Saggio and K. B. Winters, Modeling basin-scale internal waves in a stratified lake, Limnology and Oceanography, 45(7), pp.1603-1620, 2000.
- 4) 池永均,向山公人,大島伸介,山田正,塩淡二成層を形成す る汽水湖沼の長期的な界面変動予測手法の開発,土木学会論 文集,第628巻, pp.77-96, 1999.

- 5) 平野道夫,山田正,井出康郎,網走湖における流動と成層界 面の挙動に関する観測,水工学論文集,第35巻, pp.609-614, 1991.
- 6) 池永均,山田正,内島邦秀,大島伸介,向山公人,平野道夫, 井出康郎,田村圭司,網走湖における塩淡二成層の形成と挙 動に関する研究,水工学論文集,第40巻, pp.589-594, 1996.
- 7) 池永均,山田正,内島邦秀,向山公人,平野道夫,井出康郎, 網走湖における吹送流の発生と成層界面の挙動に関する研究, 水工学論文集,第41巻,pp.481-488, 1997.
- 8) 桒島知哉,高橋克人,宮島滋近,平野道夫,山田正,塩淡二成 層を形成している網走湖の塩水の流出入に関する研究,水工 学論文集,第37巻, pp.305-312, 1993.
- 9) 赤堀良介,清水康行,閉鎖性水域における密度流現象に関す る3次元乱流モデルによる数値計算,土木学会論文集,第684 巻, pp.113-125, 2001.
- 10) 池永均,山田正,向山公人,大島伸介,内島邦秀,網走湖 の塩水化の機構と塩淡二成層の長期変動特性に関する研究, 土木学会論文集,第600巻, pp.85-104, 1998.
- Kundu, P. K.: FLUID MECHANICS, Academic Press, pp.638. 1990.
- Gill, A. E.: Atmosphere-Ocean Dynamics, Academic Press, pp.662. 1982.
- 13) 西田修三, 佐野俊幸, 小川原湖の内部流動と混合現象に関 する現地観測, 水工学論文集, 第45巻, pp.1159-1164, 2001.
- 14) 笹嶋悠達,石川忠晴,中村恭志,鶴田泰士,天野光歩,遠藤真一,小川原湖の密度躍層付近における流動混合の構造について,水工学論文集,第53巻,2009.
- 15) 宇野木早苗,沿岸の海洋物理学,東海大学出版会, pp.672, 1993.
- 16) 土木学会編, 水理公式集, 土木学会, pp.625, 1985.

(2009.9.30受付)