

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560477

研究課題名(和文) 琵琶湖北湖における冷却期熱対流現象及び関連する底層水貧酸素化の
応急対策技術の研究研究課題名(英文) THERMAL CONVECTION PHENOMENA DURING COOLING PERIOD IN THE NORTHERN
PART OF LAKE BIWA AND EMERGENCY COUNTERMEASURES OF DO DEPLETION NEAR
THE BOTTOM OF LAKE

研究代表者

細田 尚 (HOSODA TAKASHI)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：10165558

研究成果の概要(和文): 近年, 琵琶湖北湖において富栄養化と温暖化による冬期気温の上昇に起因した湖底底層水溶存酸素濃度(DO)の減少が懸念されている。本研究では, 水面・湖底間の主要な DO 輸送メカニズムである冷却期の熱対流現象について数値実験に基づいた実態の解明を行うと共に, 応急的貧酸素化対策として, 滋賀県琵琶湖環境研究センターにおいて検討が進められてきた湖底水電気分解や, 密度流拡散装置と類似の対流混合促進装置についてシミュレーションモデルの開発を行った。

研究成果の概要(英文): It is an increasing concern that the depletion of dissolved oxygen (DO) concentration at the bottom layer of the northern part of Lake Biwa with 100m in maximum depth has been worsen in recent years not only due to eutrophication in water but also the effects of global warming such as the raise of air temperature during winter. Since it is known that the thermal convection during the cooling period is the main mechanism of the vertical DO transfer from the surface to the lake bottom, the fundamental features of mixing processes caused by thermal convection were clarified using the results of 3D CFD simulation. Then, the electrolysis of water at the lake bottom for the restoration and DO recovery is considered as one of the countermeasures proposed by Lake Biwa Environmental Research Institute, Shiga Prefecture. The simulation model was developed to predict the effectiveness of the electrolysis in the lake. A mechanical setup to enhance the vertical mixing was also proposed as the other countermeasure technique.

交付決定額

(金額単位: 円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,800,000	1,140,000	4,940,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工学

キーワード：琵琶湖, 地球温暖化, 水質, 熱対流, 貧酸素化, 土木環境工学

1. 研究開始当初の背景
近年、最深部の水深が約 100mの琵琶湖北湖

において、富栄養化と温暖化による冬期気温の上昇に起因した湖底底層水溶存酸素濃度

(D0)の減少と、それに伴う底層生物への影響や、リン等の栄養塩溶出の増大による富栄養化の急激な進行が懸念されている。このような深刻な状況の中、実態が十分解明されていない冷却期の熱対流による底層へのD0供給メカニズムの把握、及び冬期の気温上昇による循環の早期停止時の応急対策の検討が必要と考えられていた。

2. 研究の目的

上述した状況のもとで、本研究ではまず、実態が十分には解明されていない琵琶湖北湖冷却期の物質鉛直混合メカニズムを明らかにすることを第一の目的とした。次に、冬期(2月頃)の気温上昇によって鉛直混合が十分進まず底層へのD0供給が不十分な事態が発生した場合の応急対策について、熊谷(滋賀県琵琶湖環境科学研究所)が検討を進めてきた湖底水電解、及び密度流拡散装置と類似の対流混合促進装置について、それらの効果を検討するためのシミュレーションモデル開発を目的とした。(論文(2)参照)

3. 研究の方法

3.1 琵琶湖北湖冷却期の鉛直混合メカニズムの解明

水面から湖底へのD0の主な輸送機構として、9月から始まり3月上旬に終了する冷却期の熱対流に伴う底層への輸送機構が考えられる。このような琵琶湖北湖における鉛直方向の物質輸送の基本特性を解明するために、従来の鉛直1次元の簡易水理・生態モデルを用いて得られたD0濃度等水質指標鉛直分布の季節変化に関する解析結果を用いて、D0鉛直分布の形成メカニズム、特に冷却期における水温躍層中に極小値を有する分布形の発生メカニズムを解明する。

次に、熱対流混合について3次元熱対流数値シミュレーションを用いて検討する。すなわち、琵琶湖北湖の空間スケールと表面冷却条件を設定することで冷却期の熱対流現象を再現し、水温鉛直分布形の時間変化過程や熱対流の空間構造等を明らかにする。

3.2 応急対策についての検討

貧酸素化対策の一つとして、熊谷(滋賀県琵琶湖環境科学センター)が基礎的な検討を進めてきた湖底での水電解を用いたD0供給を取り上げる。これは、湖底水の水電解によりH₂とO₂バブルを発生させ、H₂を回収すると共にO₂バブルを湖水に溶解させることでD0濃度を回復させようとするもので、湖底での効率的な水電解法や生態系への影響等、基礎的な研究が進められている。本研究では、その有効性を検討するために、O₂バブル・プルームによる流動とバブルから水中

への溶解を予測するシミュレーションモデルを開発する。

さらに、機械的方法として密度流拡散装置と類似の対流混合促進装置を考え、同様に効果を検討するための数値シミュレーションモデルを開発する。

4. 研究成果

4.1 琵琶湖北湖冷却期の鉛直混合メカニズムの解明

(1) 極小値を伴うD0鉛直分布の形成メカニズム(論文(4)、学会発表(3,4)参照)

水温躍層中に極小値を有する分布形が発生することが知られているが、この発生メカニズムを明らかにした。すなわち、水温・水質鉛直分布季節変化シミュレーション結果を用いてD0の生成項、消費項、拡散項の鉛直分布を評価し、躍層内での消費項と拡散項の差(拡散係数は躍層上部で成層効果のため急減するが消費項は躍層内で水温の減少に応じて減少すること)が極小値を生成する要因であることを見出した。また、極小値の層を解消することで水面から湖底に向かうD0フラックスが形成されるため、底層水貧酸素化対策として極小値の層の解消が考えられることを指摘した。

(2) 3次元熱対流シミュレーションに基づいた時空間構造の解明(論文(1,3,6)、学会発表(2)参照)

冷却期の琵琶湖北湖の諸条件に基づいて熱対流現象の基本特性を把握するために、単純な場での数値実験を行うとともに、シミュレーション結果の基本特性を再現できる確率モデルとそれに対する平均場近似の適用性について考察した。

現実的な範囲で表面冷却速度を変化させて熱対流シミュレーションを行い、12月から2月にかけての水温鉛直分布の時間変化を再現することができること、熱対流は数十メートルの大きさを有する冷却水塊が間欠的に落下するような形態で生じ、水塊の大きさや落下位置は時間的に変動することを示した。このような特性は衛星画像解析により得られた1月の琵琶湖水面水温の空間変動として捉えられていることを指摘した。

さらに、このような冷却水塊の水平面内の存在確率と冷却速度の関係等の基本的な関係を、森林ギャップモデルと類似の確率モデルの平均場近似を用いて再現可能であることを示した。

統計力学の分野では磁性体など種々の物質の性質を解明するための手法として確率モデルとそれに対する近似理論が提案され、状態の相転移等の基本物性が解明されている。また、磁性体のイジングモデルと森林ギ

ヤップモデルの関係等、全く別の現象を同一の確率モデルにより解釈できることも示されている。琵琶湖北湖において、気象等の諸条件が気候変動により変化したとき、熱対流現象に相転移のような急激な変化が生じるかどうか本研究の範囲では不明であるが、本研究で提案する確率モデルが熱対流現象に適用可能ならば、確率モデルの特性を検討することで、将来生じ得る変化についての何らかの知見を得ることができると考えられる。

4.2 応急対策についての検討

(1) 湖底水電解の数値シミュレーションモデルの開発(論文(5), 学会発表(1)参照)

琵琶湖北湖底層水の貧酸素化対策の一つとして検討されている湖底での水電解に関して、その有効性を検討するためのシミュレーションモデルの開発を行った。さらに、数値計算結果と室内実験結果および現地実証実験結果を比較することにより、モデルの検証を行なった。図-1に電気分解実験の様子を、図-2にシミュレーション結果を示した。



図-1 水電解実験の様子

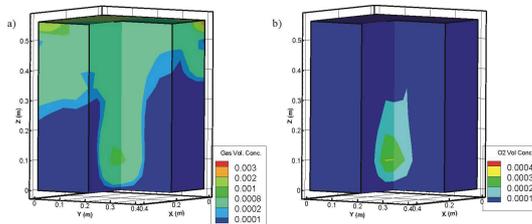


図-2 シミュレーション結果(左: H₂+O₂ バブル体積濃度, 右: O₂ バブル体積濃度)

(2) 対流混合促進装置

さらに、貧酸素化の緊急対策として代表者が提案している対流混合促進装置(図-3)に

関して、数値シミュレーションモデルを用いた考察を試み、対流混合促進装置の有効性について検討を行った。シミュレーション結果の一例を図-4に示した。

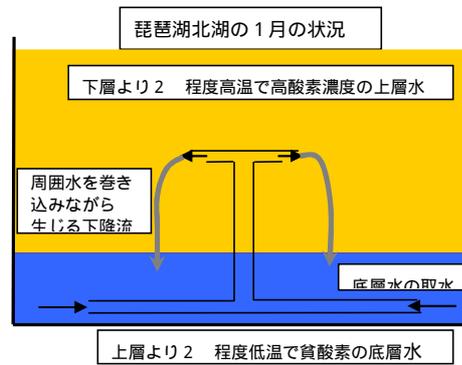


図-3 対流混合促進装置の概念図

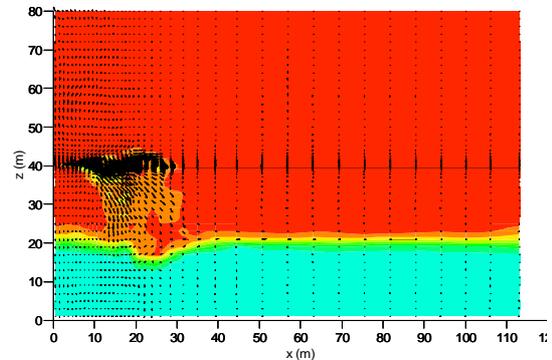


図-4 シミュレーション結果の一例

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計6件)

- (1) 細田 尚・磯野太俊, 琵琶湖北湖の冷却期を想定した熱対流の数値実験と確率モデルによる考察, 土木学会応用力学論文集, 査読有, Vol.11, 2008, pp.825-834.
- (2) 細田 尚, 温暖化による琵琶湖北湖の底層水貧酸素化と対策技術の事例紹介, 近相流, 査読有, Vol.23.4, 2009, pp.412-419.
- (3) Hosoda, T., Isono, T. and Malembeha, F.P.: Some considerations on numerical experiments of thermal convection in the northern part of lake Biwa by means of stochastic model, Turbulence, Heat and Mass Transfer 6, 査読有, 2009.
- (4) Hosoda, T. and Malembeha, F.P., Generation mechanism of typical vertical distributions of dissolved oxygen in the northern part of Lake Biwa, Environmental Hydraulics, 査読有, Vol.1, Christodoulou & Stamou (eds.), Taylor & Francis Group, London,

2010 , pp.697 -702.

- (5) Jacimovic, N., Ivetic, M., Hosoda, T. and Park, H.D., Numerical modeling of dissolved oxygen recovery during aeration in lakes, Environmental Hydraulics, 査読有, Vol.2, Christodoulou & Stamou (eds.), Taylor & Francis Group, London, 2010 , pp.729 -734.
- (6) 細田 尚・Malembeka, F.P.: 琵琶湖北湖を想定した熱対流シミュレーションに対する平均場近似理論の適用性, 水工学論文 集, 査読有, 第 55 巻, 2011, pp.1477 -1482 .

[学会発表](計4件)

- (1) 細田 尚・Jacimovic・朴 虎東・熊谷道夫, 水電解による O₂ バブル・ブルームの発生と溶解のシミュレーション, 日本流体力学会年会 2008, 2008.9.6, 神戸大学六甲台キャンパス .
- (2) 細田 尚・磯野 太俊・Malembeka F.P. , 琵琶湖北湖を想定した冷却期の熱対流数値実験結果の確率モデルを用いた考察, 第 2 回数値流体力学シンポジウム講演論文集, 2008.12.19, 国立オリンピック記念青少年総合センター .
- (3) 細田 尚・Malembeka, F. P. , 琵琶湖北湖における極小値を伴う溶存酸素鉛直分布の生成機構, 日本流体力学会年会 2010, 2010.9.10, 北海道大学 .
- (4) Jacimovic, N., Ivetic, M. and Hosoda, T., Modeling of dissolved oxygen vertical distribution changes in lakes: Case study of the lake Zavoj in Serbia, 4th International Perspective on Water Resources & the Environment 2011, 2011.01.04, National University of Singapore.

[その他]

ホームページ等

http://www.geocities.jp/kyoto_u_rivereng/

6 . 研究組織

(1)研究代表者

細田 尚 (HOSODA TAKASHI)
京都大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号 : 10165558

(2)研究分担者

田村 正行 (TAMURA MASAYUKI)
京都大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号 : 90109900
音田 慎一郎 (ONDA SHINICHIROU)
京都大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号 : 50402970