

機関番号：84201

研究種目：基盤研究 A

研究期間：2008～2010

課題番号：20244079

研究課題名（和文） 湖沼における低酸素水塊微細構造の形成過程と維持機構に関する研究

研究課題名（英文） Study on the formation and maintenance mechanisms governing micro-structure of low dissolved oxygen water areas in a lake

研究代表者

熊谷道夫 (KUMAGAI MICHIO)

滋賀県琵琶湖環境科学研究センター・環境情報統括員

研究者番号：40234512

研究成果の概要（和文）：

本研究で得られた研究成果は、以下の通りである。

(1) 湖底プラットフォームを用いて、水深 90m の深度での堆積物中の溶存酸素濃度測定を複数回実施した。これによると、酸化状態から還元状態に移行する境界層の厚さは 3mm 程度であり、粘性底層に対応することがわかった。また、冬期における底泥中の溶存酸素濃度の回復は、水温と泥温の差に依存しており、いったん嫌気化した底泥中の酸素濃度はなかなか回復しないことがわかった。

(2) 詳細モード超音波流向流速計 (ADC-TP-1200F) を湖底に設置し湖底境界層中の平均流と乱流を計測した。これによって、レイノルズ応力を計算した結果、湖底に働く応力が非常に小さいことがわかった。このことから、湖底境界層に存在する濁度は、流れの巻き上げによるものではないことが示唆された。同時に、湖底泥中の温度を測定した結果、直上の水温より高い場所が存在することが明らかになった。すなわち、温度的な不安定が発生しており、これが Hydrothermal vent を形成し、湖底泥を吹き上げていることがわかった。このことを、自律型潜水ロボット「淡探」を用いて確認した。

(3) 深水湖を対象とした流動場-生態系結合数値モデルを高度化し、湖底近傍の低酸素水塊の形成、維持過程を再現した。特に、内部波に伴う湖底上の振動流により、低酸素水塊が広範囲に移動することが明らかとなった。本研究成果は、今後の気候変動に伴う低酸素水塊の発生予測や、低酸素化の深水性希少生物への影響の予測に有益なものである。

研究成果の概要（英文）：

We had the following results from this study;

- (1) We deployed a lake bottom platform several times at about 90m depth in Lake Biwa to measure the dissolved oxygen concentration (DO) in the bottom sediments. We found thin layers of 2-3mm thickness between oxic water and anoxic sediment and conclude that these layers correspond to viscous sub-layers. The recovery of DO in sediments depends on the temperature difference between the water and sediment. It is not easy to oxidize bottom sediments completely once they become anoxic,
- (2) We also deployed an ADCP-TP-1200F to measure mean and turbulent flows in benthic boundary layers (BBL). After calculation of Reynolds stress in the layers, we found the stress on the surface of bottom sediments was not great enough to re-suspend sediments. This suggests that turbidity in the BBL is not caused by shear instability, but originated from bottom sediment ebullition such as hydrothermal vents detected by the AUV "Tantan",
- (3) We developed a three dimensional numerical simulation model based on a hydrodynamics and ecosystem coupling scheme to understand the formation and maintenance mechanisms of low dissolved oxygen water areas near the lake bottom. Using this model, we found the oscillation flow due to internal waves periodically moved the anoxic water over a rather wide area. This result can be important, because it is deeply related with the generation of low DO water areas and their influence on benthic animals endemic to Lake Biwa.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	17,900,000	5,370,000	23,270,000
2009年度	13,200,000	3,960,000	17,160,000
2010年度	6,300,000	1,890,000	8,190,000
総計	37,400,000	11,220,000	48,620,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学、気象・海洋物理・陸水学

キーワード：

- (1) 湖底泥 (2) 水温 (3) 溶存酸素濃度 (4) 消散係数 (5) 湖底境界層  
(6) 数値モデル (7) 内部波 (8) 琵琶湖

### 1. 研究開始当初の背景

湖底や海底の境界層は、高エネルギーでかつ高栄養塩濃度であることが特徴である。熊谷ら(1996)は、琵琶湖における湖底境界層が長周期の内部波(内部ケルビン波)によって形成されることを示した。湖底には多くの底生生物が生息していることから、溶存酸素が多く健全な境界層の存在が、深層生態系にとって非常に重要である。しかしながら、1960年代から1980年代にかけての富栄養化による過剰な有機物の沈降・堆積と、1980年代後半からの急激な地球温暖化は、深水層に極度に低い酸素状態をもたらし、結果として底泥を含む湖底環境の著しい劣化を引き起こした。琵琶湖環境科学研究センターの実験調査船「はっけん号」は、2007年10月29日に湖底境界層の詳細な調査を実施し、湖底付近の低酸素水塊微細構造を正確に捉えた。この結果、湖底上2mの厚さで密度が一定で酸素濃度が2mg/L以下の低酸素境界層(乱流境界層)が存在する。その上にわずかに、0.04℃の水温差で、混じりにくい安定な境界層があり、さらにその上で水温逆転が起こっている。しかも、0.01℃という微細な構造である。このような湖底付近の低酸素水塊微細構造は、物理・化学・生物的に大変興味深い現象であるが、過去に報告された事例はない。おそらく、内部波の発達に伴って形成された境界層だと推察される。本観測結果は、物理的な乱流構造だけでなく、低酸素状況下での化学的な発熱反応の存在も示唆している。IPCCの予測のように、今世紀中にさらに2℃～5℃の気温上昇があれば、このような低酸素水塊が世界各地の湖沼で発生し、淡水の還元化が進み、水資源は急速に劣化するので、詳細な調査研究を早急に必要としている。

### 2. 研究の目的

IPCCのシナリオにあるように、今後、温暖

化が進行すれば、琵琶湖周辺の気温上昇がさらに加速される可能性がある。このような温暖化シナリオは、琵琶湖のような大湖沼の深水層における溶存酸素濃度に大きな影響を与えるので、成層強化と湖底付近の低酸素水塊微細構造との関係を明らかにすることを目的とする。

### 3. 研究の方法

移動可能な湖底プラットフォームを開発し酸素低下が著しい水域の湖底に設置することによって、底泥-湖水境界層の詳細な連続計測を行う。具体的には、応答特性の早いガラス電極プローブを用いて底泥中の酸素濃度を計測し、底泥での酸素消費速度や酸化還元層の季節的な成長を解明する。現地計測から得られる高精度なパラメータを用いて、低酸素水塊微細構造の形成と維持に関わる数値シミュレーションモデルも構築する。

### 4. 研究成果

本研究で得られた研究成果は、以下の通りである。

(1) 湖底プラットフォームを用いて、水深90mの深度での堆積物中の溶存酸素濃度測定を複数回実施した。これによると、酸化状態から還元状態に移行する境界層の厚さは3mm程度であり、粘性底層に対応することがわかった。また、冬期における底泥中の溶存酸素濃度の回復は、水温と泥温の差に依存しており、いったん嫌気化した底泥中の酸素濃度はなかなか回復しないことがわかった。

(2) 詳細モード超音波流向流速計(ADC-TP-1200F)を湖底に設置し湖底境界層中の平均流と乱流を計測した。これによって、レイノルズ応力を計算した結果、湖底に働く応力が非常に小さいことがわかった。このことから、湖底境界層に存在する濁度は、流れの巻き上げによるものではないことが示唆された。同

時に、湖底泥中の温度を測定した結果、直上の水温より高い場所が存在することが明らかになった。すなわち、温度的な不安定が発生しており、これが Hydrothermal vent を形成し、湖底泥を吹き上げていることがわかった。このことを、自律型潜水ロボット「淡探」を用いて確認した。

(3) 深水湖を対象とした流動場－生態系結合数値モデルを高度化し、湖底近傍の低酸素水塊の形成、維持過程を再現した。特に、内部波に伴う湖底上の振動流により、低酸素水塊が広範囲に移動することが明らかとなった。本研究成果は、今後の気候変動に伴う低酸素水塊の発生予測や、低酸素化の深水性希少生物への影響の予測に有益なものである。

#### 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 20 件)

(1) Hsieh,C.H, Y.Sakai, S.Ban, K.Ishikawa, T. Ishikawa, S.Ichise, Y.Yamamoto and M. Kumagai (2011) Eutrophication and warming effects on long-term variation of zooplankton in Lake Biwa. Biogeosciences. 8: 1383-1399.

(2) Rahman,M.A. and H.Hasegawa (2011) Aquatic arsenic: phytoremediation using floating macrophytes. Chemosphere. 83: 633-646.

(3) Hsieh,C.H, K.Ishikawa, Y.Sakai, T. Ishikawa, S.Ichise, Y.Yamamoto, T.C.Kuo, H.D.Park, N.Yamamura and M.Kumagai (2010): Phytoplankton community reorganization driven by eutrophication and warming in Lake Biwa. Aquatic Sciences. 72: 467-483.

(4) Hasegawa,H., M. A. Rahman, K. Kitahara, M. Mae, H. Tada, T. Maki and K. Ueda (2010) Seasonal changes of arsenic speciation in lake waters in relation to the eutrophication. Sci. Total Environ. 408: 1684-1690.

(5) 殷安齊・李洪武・渡辺琴文・中村剛也・朴虎東・伴修平(2010)藍藻 *Microcystis* spp. に対するアカシア属樹木抽出物質の増殖抑制効果. 日本プランクトン学会報. 57: 73-78.

(6) 中村剛也・本間隆満・宮原裕一・花里孝幸・朴虎東(2010)諏訪湖における藍藻の現存量・種組成変化に及ぼす滞留時間の影響. 水環境学会誌. 33: 123-129.

(7) Prairie, J.C., P.J.S. Franks, J.S. Jaffe, M.J.Doubell and H.Yamazaki (2010) Physical and biological controls of vertical gradients in phytoplankton. Limnol. Oceanogr. : Fluids and Enviroments. In press.

(8) Arima,M., .H.Nakamura and H.Yamazaki(2010) Development of the Glider-type Turbulence Ocean microstructures Acquisition Profiler, TurboMAP-G. Procs. of the twentieth, International Offshore and Polar Engineering

Conference (ISOPE-2010). CD-ROM.

(9) Yamazaki,H., H.Honma, T.Nagai, M.Doubell, K.Amakasu and M.Kumagai(2010) Multilayer biological structure and mixing in the upper water column of Lake Biwa during summer 2008. Limnology. 11: 63-70.

(10) 北澤大輔 (2010)深水湖の長期水質予測シミュレーション. 生産研究. 63: 65-68.

(11) Kitazawa,D., M.Kumagai and N. Hasegawa (2010)Effects of Internal Waves on Dynamics of Hypoxic Waters in Lake Biwa. J. of the Korean Soc. for Mar. Environ. Eng. 13:30-42.

(12) 熊谷道夫(2010)地球温暖化による湖沼環境の変化と生態系への影響. 資源環境対策. 46:43-49.

(13) Itoh,N., S.Tamamura, T.Sato and M.Kumagai (2010) Elucidation of polycyclic aromatic hydrocarbon sources in the suspended matter in Lake Biwa, Japan. Limnology. 11:241-250.

(14) Hasegawa,H., M.Azizur Rahman, T.Matsuda, T.Kitahara, T.Maki and K.Ueda (2009) Effect of eutrophication on the distribution of arsenic species in eutrophic and mesotrophic lakes. Sci. Total Environ. 407:1418-1425.

(15) Kitahara,K., H.Hasegawa, M.Mae, H.Tada, M. A. Rahman, T.Maki and K.Ueda (2009) Influence of eutrophication on arsenic speciation in lake waters. J. Ecotechnol. Res. 14:251-254.

(16) Kitazawa,D., M.Kumagai and N. Hasegawa (2009) Effects of Internal Waves on Dynamics of Hypoxic Waters in Lake Biwa. J. Korean Soc. Mar. Envi. Eng. 13: 30-42.

(17) Yamazaki,H., H. Honma, T. Nagai, M. Doubell, K. Amakasu and M.Kumagai(2009) Multilayer biological structure and mixing in the upper water column of Lake Biwa during summer 2008. Limnology. 9: 63-70.

(18) Akitomo,K, K.Tanaka and M.Kumagai (2009) Annual cycle of circulations in Lake Biwa. part 2: mechanisms. Limnology. 10:119-129.

(19) Akitomo,K, K.Tanaka, M.Kumagai and C. Jiao (2009) Annual cycle of circulations in Lake Biwa, part 1: model validation. Limnology. 10:105-118.

(20) Tanaka,L. L., S.Ban and M.Kumagai (2009): Spring ammonium maximum in the mid-depth layer of Lake Biwa. Can. J. Civ. Eng., 37:1-9.

[学会発表] (計 11 件)

(1) 二木功子・朴虎東(2010) 湖沼の溶藻機構に及ぼす cyanobacteria 溶藻バクテリアと microcystin 分解バクテリアの役割. 日本陸水学会. 弘前大学

(2) 熊谷道夫(2010) 湖底境界層の動態. 日本陸水学会. 弘前大学.

北澤大輔(2010) 深水湖の全循環の将来予測.

第3回システム創成学専攻学術講演会. 東京大学

(3) 熊谷道夫(2010) Ecological gradient along the bottom slope of Lake Biwa observed by the Autonomous Underwater Vehicle Tantan. SIL (国際陸水学会). 南アフリカ・ケープタウン.

(4) 熊谷道夫(2010) The dynamics of benthic boundary layer in Lake Biwa. PPNW (Physical Processes in Natural Waters). アイスランド・レイキャビク.

(5) 熊谷道夫(2010) Charles R. Goldman in Japan: Limnology from both sides. ASLO (先進陸水海洋学会). アメリカ・サンタフェ

(6) Kumagai M. (2009) The Dynamics of Dead Zone in Lake Biwa, Japan. First IWA Symposium on Lake and Reservoir Management. National Cheng Kung University Tainan, Taiwan.

(7) Michio Kumagai, T. Ishikawa and A. Jassby (2009) Impacts of Climate Change on the Lake Biwa Ecosystem. ASLO Aquatic Sciences Meeting. フランス・ニース.

(8) Michio Kumagai (2008) Impacts of Climate Change on the Lake Biwa Ecosystem. 台湾-日本生態学ワークショップ. 国立台湾大学.

(9) 熊谷道夫・石川俊之(2008) 琵琶湖における循環と物質輸送 - 低酸素水塊の動態 - 日本陸水学会第73回大会. 北海道大学.

(10) 北澤大輔・熊谷道夫(2008) 琵琶湖における循環と物質輸送 - 流入河川水温が冬季の鉛直循環に及ぼす影響について - 日本陸水学会第73回大会. 北海道大学

(11) 北澤大輔・熊谷道夫(2008) 琵琶湖の低酸素水塊の挙動シミュレーション. 日本流体力学会年会. 神戸大学六甲台キャンパス

[図書] (計2件)

(1) Goldman, C., M. Kumagai and R. Robarts (2011) Effects of Climate Change and Variability on Inland Water Systems of the World: what can be done to reduce negative impacts? Wiley-Blackwell, 450pp.

(2) 永田俊・熊谷道夫・吉山浩平(2011) 温暖化の湖沼学. 京大出版会. 319pp.

[その他]

ホームページ等

<http://www.lberi.jp/root/jp/51sosikigaiyo/syokuin/bkjhkumagai.htm>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

熊谷 道夫 (KUMAGAI MICHIO)  
滋賀県琵琶湖環境科学研究センター・  
環境情報統括員  
研究者番号: 40234512

### (2) 研究分担者

北澤 大輔 (KITAZAWA DAISUKE)  
東京大学・生産技術研究所・准教授  
研究者番号: 30345128

朴 虎東 (PARK HO-DONG)  
信州大学理学部・准教授  
研究者番号: 20262686

山崎 秀勝 (YAMAZAKI HIDEKATSU)  
東京海洋大学・海洋科学部・教授  
研究者番号: 80260537

長谷川 浩 (HASEGAWA HIROSHI)  
金沢大学・物質化学系・准教授  
研究者番号: 9025335

### (3) 連携研究者

永田 俊 (NAGATA TOSHI)  
東京大学・大気海洋研究所・教授  
研究者番号: 40183892

宮島 利宏 (MIYAJIMA TOSHIHIRO)  
東京大学・大気海洋研究所・助教  
研究者番号: 20311631

伴 修平 (BAN SYUHEI)  
滋賀県立大学・環境科学部・教授  
研究者番号: 50238234

中村 由行 (NAKAMURA YOSHIYUKI)  
独立行政法人港湾空港技術研究所・研究主監  
研究者番号: 90172460

里村 雄彦 (SATOMURA TAKEHIKO)  
京都大学・理学研究科・教授  
研究者番号: 20273435