

琵琶湖統合水質モデルを用いた気候変動影響評価に関する研究

山敷庸亮・寶馨・中北英一・加藤真人*

* 京都大学大学院工学研究科

要 旨

20km の空間解像度を持つ気象研究所 GCM(MRI-GCM) 結果を用いて Biwa-3D 統合解析モデルを用いての周辺気候変化に対する湖水温度の感度解析を行なった。2099 年の MRI-GCM 結果から作成された高温年(VHY)を境界条件とすると琵琶湖東岸での水温が 34 度以上と計算され、これは湖の水質環境に決定的な打撃を与えうる事が示唆された。現在気候下では 4 月以降でないと見られない水温成層が、高温年では 3 月に確認され、また現在気候では 15-20m 前後とされる成層厚が高温年では 25-30m になる可能性があることが示唆された。

キーワード: ダウンスケーリング, GCM, 琵琶湖, VLES, 地球温暖化

1. はじめに

本研究においては、予測される気候変動に対する中・小規模流域の代表例として琵琶湖を例にあげ、湖の物理的・生物科学的な様々な側面に対して地球規模の環境変化に対する応答をできるだけ高い精度で推定可能なモデルの構築を試み、水温場や溶存酸素濃度場の応答評価を示した。

Matzinger ら(Matzinger et al. 2007)はOrbid湖の調査を通じて地球温暖化により湖への栄養塩流入が増加する可能性に言及している。Stich and Brinker(2009)は成層形成湖におけるリン濃度は減少するが水温は上昇する可能性があるとしている。琵琶湖は1400万人の人口を支えているが、現在湖は深刻な環境負荷の影響を受けているが、例えば田中ら(Tanaka et al. 2009)は琵琶湖に河川から流入する除草剤について詳細な報告を行なっている。

琵琶湖の物理特性については、例えば山敷ら(Yamashiki (1999, 2000) and Yamashiki et al. (2003a, 2003b))により VLES を用いた、差分加熱による琵琶湖の環流の数値計算の例がある。Shimizu ら (2007)は気象データとして風のみ

を考慮して環流を発生させることに成功している。Akitomo ら(2009a, 2009b)は RANS を用いて琵琶湖における夏期の半時計回りの環流と冬期の時計回りの環流の生成を試みた。しかしながら地球温暖化影響に特化して進められた研究は数少ない。

湖沼や内湾などの閉鎖性水域に対する温暖化による予想を行なう際、様々な困難が存在する。まず(1)海洋に比較して流域スケールが小さいため、GCM アウトプットにおける対象水域がグリッドサイズ以下となり、空間代表性に乏しい事(2)流域が人間活動の影響を大きく受けるため、その将来予測が困難な事(3)流域スケールの水循環がGCMに比較して小さすぎるためモデル化が困難な事、などがあげられる。本研究においては気象研究所の全球20kmグリッドスケールの GCM アウトプット(MRI-GCM)を用いる事により、(1)の問題を回避できると考えられ、かつ(3)に関しても従来モデルと比較してある程度の空間的信頼性がありうると考えられる。(2)に対しては明確なるモデル化が困難であるため、本研究においては、MRI-GCM を用いて琵琶湖流域の特に気温の上昇と降水量変化に注目し、琵琶湖における現状に比較し

ての温度上昇の予測を試みた。

2. 手法

計算に用いた Biwa-3D は大きく分けて三次元非静水圧の流動解析モジュール、富栄養化解析モジュールから構成される。琵琶湖の初期水温、流入河川データ、気象条件、初期水質項目などを入力すると、年間の水質を予測可能である。水平方向格子サイズは $500\text{m} \times 500\text{m}$ および $250\text{m} \times 250\text{m}$ 鉛直 2m にて計算を実施した。

流動解析モジュールにおいては LES を用いた非静水圧三次元解析により湖流を計算する。本研究においては、(1) 琵琶湖研究所による 2002 年の現地観測結果を (2) 2002 年の気象データ (AMeDAS) を元に再現を試み (河川流入条件は琵琶湖工事事務所による計算値を用いた)、ついで (3) Biwa-3D を用いて MRI GCM 20km grid (A1B) にて計算された 2090–99 年の当該地域での温暖化シグナルを該当地域に適用し、琵琶湖全域の温暖化予測を行なった。MRI GCM アウトプットの琵琶湖面に対する該当グリッド数は丁度 6 となった。この数はむしろ空間平均値を十分に議論するには不十分であるといえるが、AMeDAS の該当観測点が 6 地点であることなどを考慮すると、許容される数であると考えられる。

3. 数値計算結果

水温場の計算結果は鉛直方向長さを水平方向に比して 100 倍した疑似三次元投影を用いて表示を行い、Fig. 1 に、 250m グリッドにおける投影図を示した。また Fig. 2 に (a) 250m グリッドで計算された 2002 年の琵琶湖における Biwa-3D による計算結果と (b) 同年の琵琶湖環境科学センターによる観測結果の比較を示す。年間の変動はよく再現されているが、夏期の成層が若干弱く再現されている。

Fig. 3 に 500m グリッドを用いた場合の計算結果投影法を示した。 500m グリッドでは鉛直方向は水平方向に比して 200 倍としている。Fig. 4 に現在気候と将来気候における高温年 (VHY) における計算結果の比較を、Fig. 5 に同結果の月毎の平均値の比較を示した。将来気候との差異は特に月別平均値の比較で特に顕著であるが、7 月／8 月の夏期の昇温が特に顕著となっている。

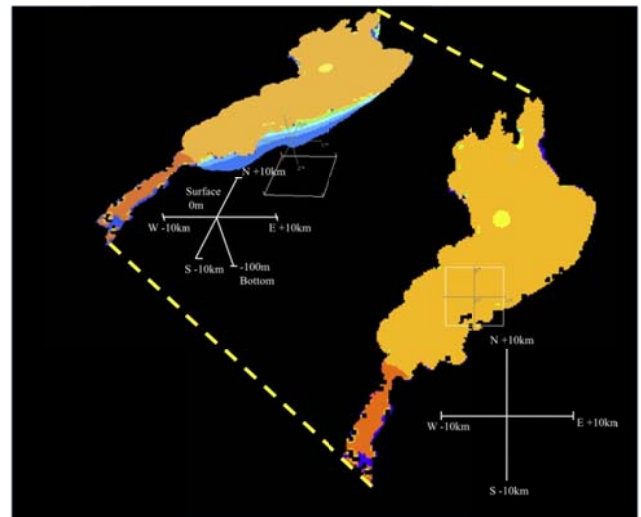


Fig. 1 3D projection for 250m horizontal grid spacing.

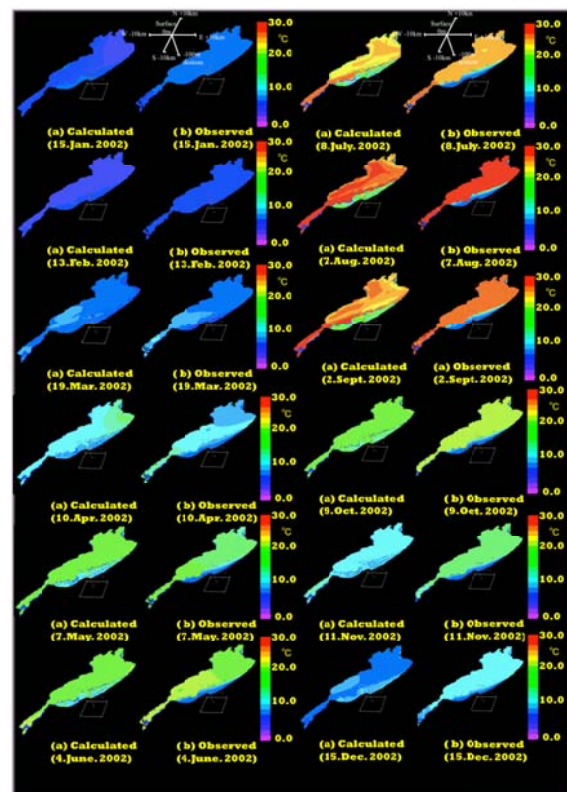


Fig. 2. Comparison with (a) Calculated 3D lake temperature profile on the present-day year (2002) and (b) Observed data by Fine Scale Profiler (LBERI), using 250m horizontal grid spacing.

本計算結果をより詳細に議論するため鉛直断面での昇温状況を Fig. 6 に示した。琵琶湖最深部を含む安曇川-米原測線において、将来高温年においては夏期の成層厚が現在気候の $10\text{--}15\text{m}$ から $20\text{--}25\text{m}$ へと 10m 程厚くなる事が予想された。

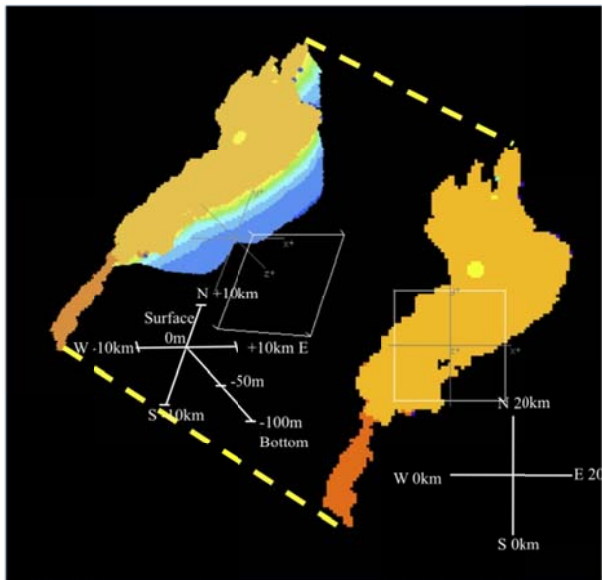


Fig. 3 3D projection for 250m horizontal grid spacing.

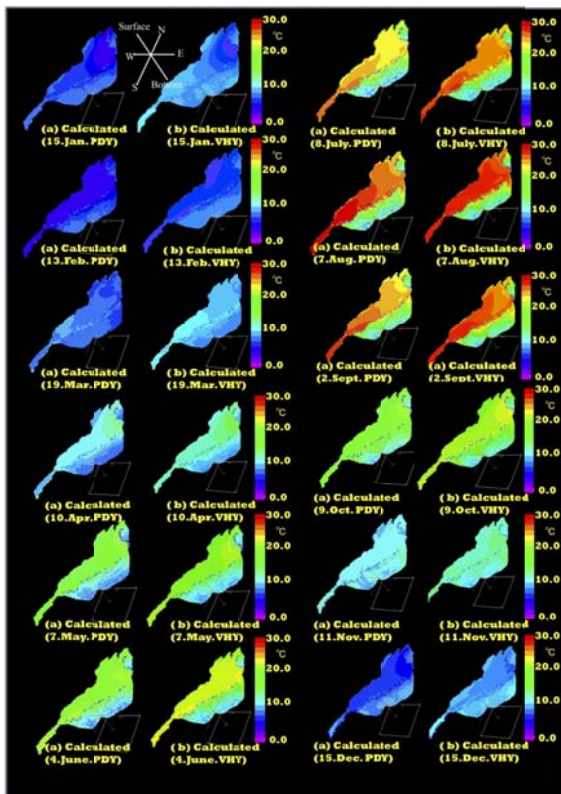


Fig. 4. Temperature in three dimensional projection comparing the present-day year (PDY) and the very hot year (VHY), calculated using MRI-GCM output.

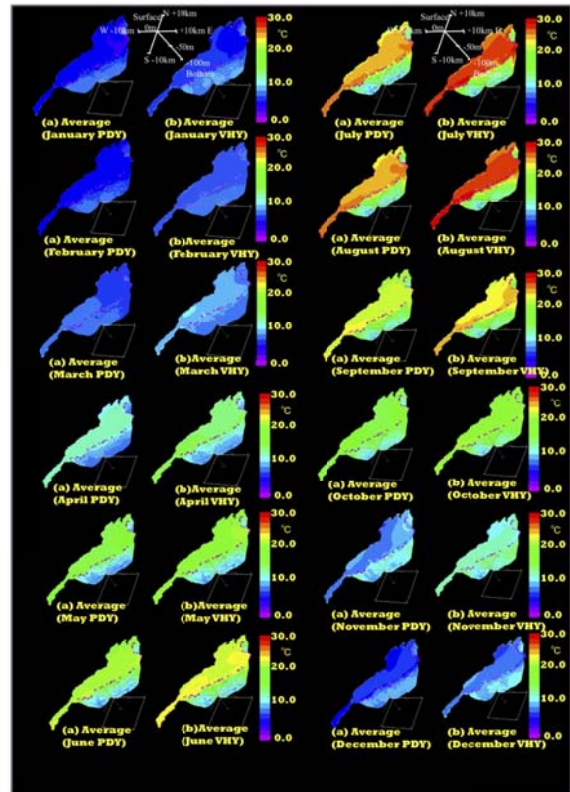


Fig. 5. Averaged monthly temperature in three dimensional projection comparing the present-day year (PDY) and the very hot year (VHY), calculated using MRI-GCM output.

4. 考察

本モデルにおける計算結果において、若干成層強度が弱めに出る傾向が見られたため、実際の形成される成層は温度勾配がより急でシャープなものになる事が予想される。夏期の温度上昇は溶存酸素濃度の著しい低下をもたらすことが予想され、また状況によっては全湖循環が抑制される可能性もある。全湖循環の発生については、深水層の水温による影響を大きく受け、深水層の温度上昇が大きければ表面水温が高くなっても循環は起こりうる。しかし溶存酸素濃度が冬期に回復するかどうかについては、水温上昇に伴う濃度低下も考えられるため新たな解析が必要となる。

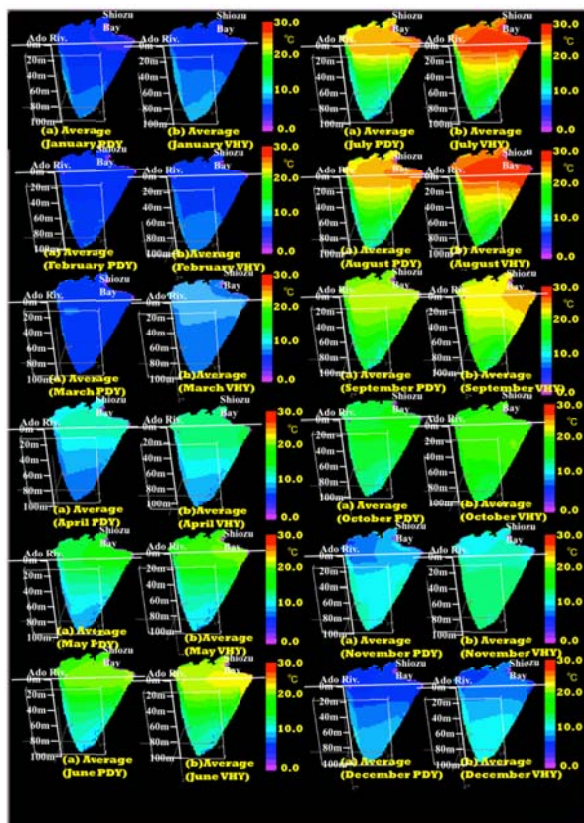


Fig. 6. Vertical distribution along a cross-section (Ado River mouth-Maibara section) of averaged monthly temperature comparing present-day year (PDY) and very hot year (VHY), calculated using MRI-GCM output.

謝 辞

本研究において琵琶湖研究所の熊谷氏・焦氏には貴重なデータを賜り感謝申し上げます。気象研究所の鬼頭氏、仲江川氏らには革新プロジェクトを通じて様々なアドバイスを頂き感謝申し上げます。また防災研究所の辰巳氏にはGCMアウトプットの加工をいただき、大変感謝申し上げます。なお本編はYamashiki et al. 2010 を日本語にて解説した内容となっています。

参考文献

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

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

Kitoh A, Ose T, Kurihara K, Kusunoki S, Sugi M, KAKUSHIN

Team-3 Modeling Group. 2009. Projection of changes in future weather extremes using super-high-resolution global and regional atmospheric models in the KAKUSHIN Program: Results of preliminary experiments. *Hydrological Research Letters* 3:49-53. doi:10.3178/hrl.3.49.

Matzinger A, Schmid M, Sarafiloska EV, Patceva S, Dafina G, Wagner B, Muller B, Sturm M, Wuest A. 2007. Eutrophication of ancient Lake Ohrid: Global warming amplifies detrimental effects of increased nutrient inputs, *Limnology and Oceanography* 52(1):338-353.

Shimizu K, Imberger J, Kumagai M. 2007. Horizontal structure and excitation of primary motions in a strongly stratified lake, *Limnology and Oceanography* 52(6): 2641-2655.

Stich HB, Brinker A. 2009. Oligotrophication outweighs effects of global warming in a large, deep, stratified lake ecosystem. *Global Change Biology*. 16(2):877-888. doi:10.1111/j.1365-2486.2009.02005.x

Tanaka LL. Sudo M, Ban S. 2009. The spatial and temporal distribution of rice herbicides in Lake Biwa, Japan. *Hydrological Research Letters* 3:45-48. doi 10.3178/HRL.3.45

Yamashiki Y. 1999. Development of a Numerical Prediction Model for Currents and Suspended Particles in Lake Biwa and its Application on Eutrophication Analysis. Doctoral thesis submitted to Graduate School of Engineering, Kyoto University: 226pp.

Yamashiki Y. 2000. Proposed Three Dimensional Hydrodynamic and Ecological Model for Eutrophication Analysis – PAMOLARE3D, WORKING DOCUMENT, EXPERTS' MEETING ON THE STRATEGIC APPROACH FOR THE DEVELOPMENT AND DISSEMINATION OF A NUMERICAL MODEL ON EUTROPHICATION. Proceedings 22-24 March 2000, Davis California USA, IETC Report 11, UNEP-IETC: 48-61.

Yamashiki Y, Kumagai M, Jiao C, Nezu I, Matsui S. 2003a. Numerical Simulation of Thermally Induced Gyres in Lake Biwa. *Hydrological Processes* 17(14): 2947-2956. doi: 10.1002/hyp.1443.

Yamashiki Y, Matsumoto M, Tezuka T, Matsui S, Kumagai M. 2003b. Three-dimensional eutrophication model for lake biwa and its application to the framework design of transferable discharge permits. *Hydrological Processes* 17(14): 2957-2973. doi: 10.1002/hyp.1444.

Yosuke Yamashiki, Masato Kato, Kaoru Takara, Eiichi Nakakita,

Michio Kumagai, Chunmeng Jiao. 2010. Sensitivity Analysis on Lake Biwa under the A1B SRES climate change scenario using Biwa-3D Integrated Assessment Model: part I – projection of lake temperature. Hydrological Research Letters 4:45-49.

Impact Assessment of Climate Change on Lake using Lake Biwa Integrated Water-Quality Model

Yosuke YAMASHIKI, Kaoru TAKARA, Eiichi NAKAKITA and Masaya KATO*

* Graduate School of Engineering

Synopsis

Sensitivity analysis on lake temperature has been evaluated by coupling MRI-GCM with 20 km outputs and the Biwa-3D integrated assessment model. A significant temperature increase in surface water, recording more than 34 degrees in the East Coast of the North Basin of the Lake Biwa, has been projected for the simulation for the very hot year (VHY), determined from comparison with MRI-GCM output for the year 2099, which may induce a catastrophic impact on lake water quality during the period. Weak stratification is predicted to start from March in VHY, compared with observations of stratification that doesn't commence until after April in PDY. The thickness of the epilimnion which is around 15–20 m in PDY increases to 25–30 m in August in VHY due to a much higher atmospheric temperature.

Keywords: Downscaling; GCM; Lake Biwa; VLES; Global Warming