

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 16 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25450364

研究課題名(和文) 地域温暖化傾向が農業用水資源としての湖水質変化に及ぼす影響解析

研究課題名(英文) Influence of Regional Warming Trend on Water Quality Change in Lake as Agricultural Water Resources

研究代表者

初井 和朗 (MOMII, KAZURO)

鹿児島大学・農水産獣医学域農学系・教授

研究者番号：40136536

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、対象地域の温暖化傾向が、地域の農業用水資源である湖水の質及び鉛直循環に及ぼす影響を、現地観測と数値解析により検討した。湖水の循環に関しては、2000年以降の対象地域固有の気温上昇の一時的停滞により、湖水のポテンシャルエネルギーが低下し、風による乱れエネルギーが相対的に大きくなったため、1986年以来の全循環が2011、2012年2月に発生したことを数値解析により明らかにした。水質に関しては、対象地域の気候変化に基づく熱環境変化特性により、下層で富栄養化とクロロフィル極大が進行する可能性があるが、リン濃度が極端に低い現状では、赤潮のような環境異変が生じるリスクは低いことを指摘した。

研究成果の概要(英文)：Based on the field observation and numerical simulation, this study focuses on the influence of the regional warming trend on the water quality and circulation of the lake as valuable water resources in the study site. Concerning the lake water circulation, the numerical results show that the potential energy of the lake water becomes smaller than the wind-induced turbulent energy for the vertical mixing in February of 1986, 2011 and 2012 during 1986-2013. The simulation study reveals that the decrease in the potential energy is caused by the temporal hiatus in the air temperature increase since 2000 in comparison with 1977-1999. The results on the water quality suggest that the long-term fluctuations of the lake thermal environment due to the regional climate change favor eutrophication and chlorophyll maxima in the deep layer, but that the drastic changes in water quality like red tide cannot occur due to very low concentration of phosphorous in Lake Ikeda.

研究分野：水資源学

キーワード：湖水循環 ポテンシャルエネルギー 乱れエネルギー 数値解析 植物プランクトン 栄養塩濃度 溶存酸素 熱環境

1. 研究開始当初の背景

近年、地球規模での気候変動が湖水に与える影響について科学的検討が行われ、湖の水収支、水質、および生態系に関わるデータが蓄積されている。国内では、琵琶湖等で長期にわたる湖水質の観測が行われ、地球温暖化の影響が湖底まで及び生態系への影響が懸念されている。国外では、気候変化と湖水環境に関連する事例が、地球規模の視点で Science や Climatic Change などの学術誌で報告されている。このような地球規模での温暖化と水環境への影響の捉え方だけではなく、対象地域での気温上昇、日射量、風速の変化などの地域の気象変化傾向が地域の水環境に及ぼす影響を明らかにすることは、農業用水資源管理からは重要と考える。

平成 22~24 年度の基盤研究 (B) 『気候変化が地域農業用淡水資源としての湖水環境に及ぼす影響評価』(研究代表者 初井和朗)において、湖周辺の水文・気象資料から、気温と湖水温の上昇傾向を把握し、深層における溶存酸素の減少過程及び湖底付近での無酸素化が継続していることを明らかにした。新たに構築した鉛直 1 次元数値モデルで、溶存酸素の動態を再現し、概略の変化傾向は把握できた。しかし、研究期間中に観測された 2011 年冬期の湖水の全循環のメカニズム解明にまでは至らなかった。また、2011 年の全循環時の深度 2 点での連続観測によれば、溶存酸素の鉛直輸送が比較的短時間で生じることが判明した。このような短時間での溶存酸素変化のデータの蓄積はこれまでになく、今後も継続した観測を行うことにより湖水循環に伴う水質変化機構を明らかにできると考える。このような経緯から、これまでの研究成果と観測機器を活用して、溶存酸素や水温などの連続観測を行い、地域温暖化傾向下での湖水質変化や全循環と部分循環発生要因解析が行えるとの考えに至った。

2. 研究の目的

近年、水環境に及ぼす気候変化の影響が地球規模の視点で論じられているが、農業用水資源管理上からは、対象地域固有の気温や放射量、風速などの気象変化傾向が地域の水環境に及ぼす影響を明らかにすることが重要である。本研究では、農業が地域社会の維持、発展に重要な役割を担う地域、鹿児島県南薩地域を対象に、地域温暖化傾向が対象地域の貴重な農業用水資源である湖水(池田湖)に及ぼす影響を、主に水温、溶存酸素、植物プランクトン、栄養塩類、透明度の視点から解明することを目的とする。本研究のように温暖な気候条件下での解析事例は少なく、ここでの成果は、他の地域での種々の気候条件下での事例研究との比較検討に有益となる。1977 から 2015 年までの自治体(鹿児島県)の湖水質観測結果、本研究での短期集中観測結果、および数値モデルによる数値解析結果に基づいて、池田湖の水質変化と鉛直湖水循

環について検討する。

3. 研究の方法

(1) 水温・溶存酸素の集中連続観測

科研費により整備した溶存酸素・水温観測機器を水深 10, 20, 30, 50, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200 m に設置し、1 時間間隔で、2013~2014 年に連続観測した。これにより冬期の湖水冷却期間における水温と溶存酸素に関する独自の観測資料を得る。

(2) 地域温暖化傾向が湖水循環に及ぼす影響解析

本研究の対象地域(指宿)の 1977~2013 年の年平均気温の変化によれば、1977~1999 年の気温上昇率は、日本の気温上昇率(0.039 /yr)に比べてやや高く、0.044 /yr である。一方、2000 年以降では-0.010 /yr とやや低下傾向にある。すなわち、1999 年以前に比べて、2000~2013 年では気温上昇が一時的に停滞している状況にある。多くの文献に示されるように地球温暖化は進行しているが、少なくとも、対象地域では、1977~1999 年の気温上昇率に比べて、2000~2013 年の上昇率は小さい。この気温上昇の変化が、湖の水温や湖水の鉛直循環に及ぼす影響については検討されていない。本研究では、1986 年以来 25 年ぶりに発生した 2011 年の池田湖の全循環を、地域特有の気温変化傾向に基づいて検討する。

具体的には、この地域の気温変化傾向が湖水温および湖水の鉛直混合に及ぼす影響について、数値シミュレーションに基づく検討を加える。検討方法として、Case 1(現状)では、現状の日平均気温(1977~1999 年の日単位の気温上昇率= 1.57×10^{-4} /day; 2000~2013 年の日単位の気温上昇率= 8.7×10^{-5} /day)に対する池田湖の水温変化を、著者らが開発した鉛直 1 次元湖水温数値解析モデル(Momii, K. and Ito, Y.: Heat budget estimates for Lake Ikeda, Japan. Journal of Hydrology, 361, 362-370 (2008))により再現する。再現水温の妥当性については、観測鉛直水温分布と比較する。一方、Case 2(シナリオ)では、2000 年以降も 1977~1999 年の気温上昇傾向が継続した場合を想定した数値シミュレーションを行う。すなわち、Case 2 では、2000~2013 年の気温変化が 1977~1999 年の気温上昇率になるように、日平均気温を修正し、解析モデルへの入力値とした。現状(Case 1)とシナリオ(Case 2)の 2 つの気温変化に対して、湖の全水深を対象としたポテンシャルエネルギー E_p と、湖面上の風に起因する乱れエネルギー E_k の日変化を算定し、両者の比較から全循環の可能性について検討する。

(3) 地域温暖化傾向が池田湖の熱環境に及ぼす影響因子の解析【研究分担者】

湖における熱環境は、湖水循環、生物活動、水収支などの湖の様々な水環境に影響を及

ばす。ここでは、温暖化傾向が熱環境に及ぼす影響因子を明らかにするために、鉛直1次元モデルを用いた感度解析を行う。解析熱環境要素は容積加重平均水温 T^* 、湖水安定度指数 S 、サーモクライン深度 D_t 、純放射量 R_n 、潜熱量 IE 、顕熱量 H である。これらへの影響因子として、気温 T_a 、風速 u 、相対湿度 RH 、日射量 R_s 、大気放射量 R_a および透明度 D_s を選出する。解析1として、各因子の潜在的な影響を調べるために、1978~2013年を対象に影響因子を最大25%までの一定率で変化させた場合の熱環境要素の感度を調べる。一方、熱環境の長期的な変化傾向は、各因子の潜在的な影響に加え、各因子の長期変化傾向の大きさにも依存する。解析2としては、影響因子を各々の1978~2013年の変化傾向の大きさに応じた割合で変化させ、この場合の熱環境要素の感度を調べる。なお、感度は、各熱環境要素の1978~2013年の算術平均値に対する相対誤差(%)として評価した。

(4) 地域温暖化傾向が池田湖の植物プランクトンと栄養塩濃度に及ぼす影響評価【研究分担者】

2013年7月~2015年10月において、約1ヶ月間隔で採水と水質観測による水環境調査を行った。この結果に基づき、温暖化傾向が池田湖の植物プランクトンと栄養塩濃度に及ぼす影響について検討する。調査では、まず湖の中央で多項目水質計(6600V2, YSI)を湖面から水深200mまで降下させ、水深毎の水質データを取得した。また、透明度板を用いて透明度を測定した。さらに、湖面(水深0m)、水深2, 5, 10, 15, 20, 30, 50mの8深度を対象に、湖面では直接、その他の深度ではバンドーン採水器(5026B, 離合社)を用いて採水した。採取した水を冷蔵保存して持ち帰り、深度別にそれぞれ50mlずつ分取した水にルゴール液を加えて固定サンプルとし、後日、各固定サンプル中の植物プランクトンを科研費により整備した生物顕微鏡(CiL-PH-15, Nikon)により計数した。残った水は深度別に10mlを分取して冷凍保存し、後日、解凍したサンプル水中の溶存無機態窒素(DIN)と溶存無機態リン(DIP)の濃度をオートアナライザー(TRAACS2000, BLTEC)を用いて測定した。

4. 研究成果

(1) 溶存酸素の日変化に関する観測結果

2011年と2014年における現地観測値に基づく日平均溶存酸素の時空間変化により次のようなことが考察できる。まず、2011年2月の全循環により、1990年以降貧酸素状態が継続していた深さ100m以深の溶存酸素DOが急激に上昇している(図1上図参照)。12月下旬から2月中旬までの気温の低下(日平均気温10以下)に伴い、風を駆動力とする湖水中での鉛直上下混合により、DOの高い表層の水塊が中層まで輸送され、中層のDO

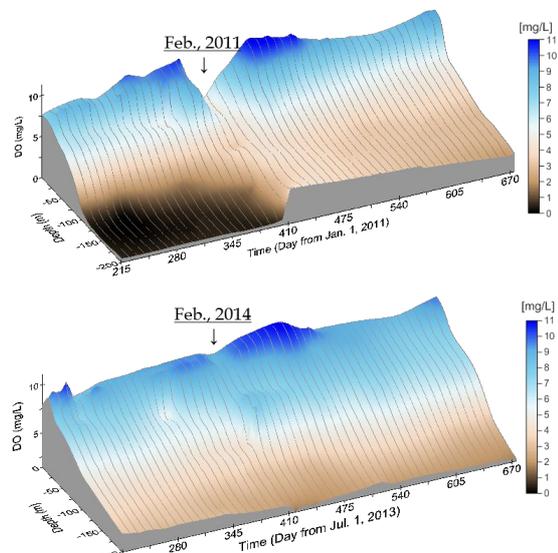


図1 2011年と2014年の日平均溶存酸素の時空間変化

が上昇、その後、徐々に上下混合が進み、深層から表層に鉛直上向きに輸送される貧酸素水塊により表層のDOは低下した。一方、下層のDOは上昇し、全層のDOが一様化(約4 mg/L)された。水深200mまで溶存酸素が一様化される2011年2月の池田湖の全循環は、冬期の気温の低下とともに表層から徐々に進行し、約1ヶ月半の時間を要して達成された。

次に、2014年2月では全循環は発生せず、部分循環であった(図1下図参照)。溶存酸素については、水深30mでは、水温と同様に、12月17日の5.4 mg/Lから上昇し始め、12月20日には、8.1 mg/Lに達する。水深80mは、2月8日から、また水深100mでは、2月18日から上昇し始めている。水深120mでは、3月に僅かな上昇が見られたが、水深180mでは溶存酸素の上昇は認められない。したがって、水深約120mまでの部分循環が生じ、深層までの全循環は生じていないといえる。以降、深層の溶存酸素は減少している。ここでの現地観測データは、今後、数値解析等を通じて、池田湖の湖水鉛直混合メカニズムを解明する際に有用となる。

(2) 地域温暖化傾向が湖水循環に及ぼす影響解析

池田湖では、1986年以降の25年間、深層までの全循環は確認されていなかったが、2011年(例えば、図1上図参照)と2012年の2月に深さ200mの溶存酸素が上昇し、全循環が発生したと判断できる。本研究で構築した1次元数理モデルによる1978~2012年の湖水温度の数値計算より求めたシュミット安定度指標(鉛直密度分布に基づく湖水の安定性評価指標)によれば、2011年2月が最低値、2012年2月が2番目に小さい値となった

(Ito, Y. and K. Momii: Impacts of regional warming on long-term hypolimnetic anoxia and dissolved oxygen concentration in a deep lake, Hydrological Processes, (2015))。12 月後半～2 月前半における気温の低下 (日平均気温 9 以下) および湖面上の風速の増大 (平均風速 2m/s 以上) が要因と推察される。これに関し、本研究では新たに、ポテンシャルエネルギー E_p と、湖面上の風に起因する乱れエネルギー E_k による考察を加えた。

現状の気温変化 Case 1 に対して、数値計算により求めた 1977～2013 年の表面水温は、1 年の中では、概ね、2 月に最低となり、8 月に最高となり、1980 年代では、1981 年 (9.6 , Feb. 5) , 1984 年 (8.1 , Feb. 9) , 1986 年 (9.7 , Feb. 9) の 2 月に 10 より低下した。2000 年以降では、2011, 2012 年が小さい値 (10.1 , Jan. 31, 2011 ; 10.5 , Feb. 3, 2012) となった。この表面水温の変化に対応し、ポテンシャルエネルギー E_p は 2 月から 3 月に小さく、8 月から 9 月に大きな値となる。特に、表面水温が低下する前述の 5 年間 (1981, 1984, 1986, 2011, 2012 年) では、 E_p の値は負値 (零に近い小さい値) を示す。一例として、図 2 に、2011 年における風による乱れエネルギー E_k とポテンシャルエネルギー E_p を示す。冬季以外では、 E_k は、 E_p より概ね 1 桁小さいエネルギーの大きさである。一方 E_p が負 (零に近い小さい値) になるときは、相対的に風による乱れエネルギーの方が大きくなる ($E_k > E_p$) ため、湖面上の風に起因する乱れによる湖水の鉛直混合 (全循環) が生じやすくなる。

一方、2000 年以降も、1977～1999 年の気温上昇傾向が継続した場合 Case 2 (シナリオ) におけるポテンシャルエネルギーの変化を、図 2 に比較して示す。計算上、表面水温は僅かではあるが、高く算定される。一例として、図 3 に、現状の気温上昇傾向の場合と、シナリオの場合の鉛直水温分布の比較を示す。現状に比べてシナリオの場合、表層の水温が上昇することがわかる。この上昇により、湖水のポテンシャルエネルギーが増加し、湖水の安定性が増大する。

要約すると次のようである。1977 年から 2013 年の 35 年間において、ポテンシャルエネルギーが負の値になるのは、1981, 1984, 1986, 2011 および 2012 年の 5 年である。1986 年以降、2011, 2012 年に全循環が発生したのは、2000 年以降の対象地域に特有な気温上昇の一時的な停滞のため、冬期の湖水のポテンシャルエネルギーが低下し、2 月における風に起因する乱れエネルギー E_k がポテンシャルエネルギー E_p より大きくなる状況が、3 週間程度継続したためと推察される。数値シミュレーションによれば、地域気温上昇の一時的な停滞が無かった場合 Case 2 (シナリオ) には、湖水のポテンシャルエネルギーが乱れエネルギーより常に大きくなる ($E_k > E_p$) ことがわかった。

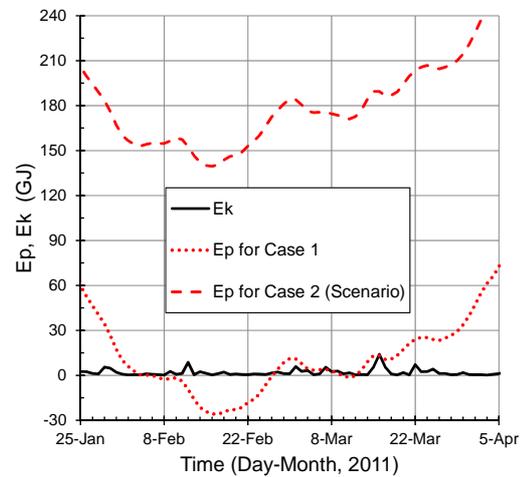


図 2 全循環が発生した 2011 年の現状 (Case 1) とシナリオ (Case 2) におけるポテンシャルエネルギー E_p と乱れエネルギー E_k の比較

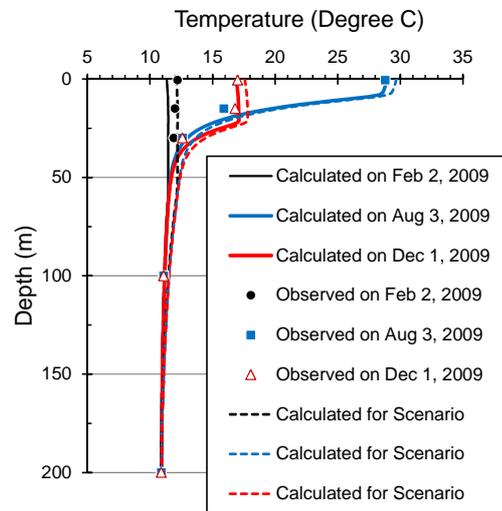


図 3 2009 年の鉛直水温分布の観測値と計算値の比較 (実線 : Case 1 (現状) , 点線 : Case 2 (シナリオ))

(3) 熱環境の長期変化に影響を及ぼす環境因子【研究分担者】

解析 1 より、容積加重平均水温 T^* 、湖水安定度指数 S 、サーモクライン深度 D_t に対しては、気温 T_a の影響が最も大きかった。純放射量 R_n 、潜熱量 IE 、顕熱量 H に対しては、大気放射量 R_a の影響が最も大きかった。一方、解析 2 より、影響因子の長期変化傾向を考慮した場合には、容積加重平均水温 T^* と湖水安定度指数 S に対しては気温 T_a 、サーモクライン深度 D_t に対しては透明度 D_s 、純放射量 R_n と潜熱量 IE に対しては日射量 R_s 、顕熱量 H に対しては相対湿度 RH の影響が最大となった (図 4)。この結果から、湖自体の温暖化 (T^*) および湖安定化 (S) に最も影響を及ぼす因子は気温 T_a である。その他の熱環境要素の長

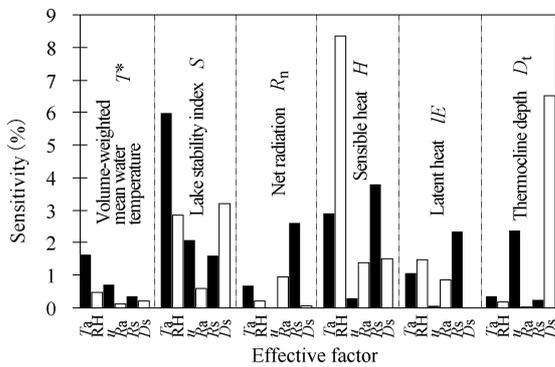


図4 感度解析2の結果：池田湖における気温 T_a 、相対湿度 RH、風速 u 、大気放射量 R_a 、日射量 R_s 、透明度 D_s の1978~2013年の長期変化が熱環境6要素に及ぼす影響

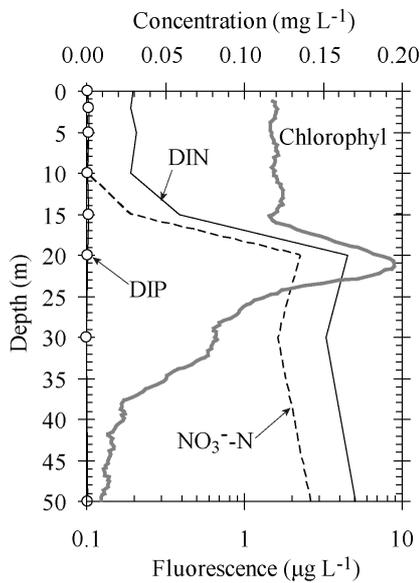


図5 2015年9月17日の池田湖中央における栄養塩濃度とクロロフィル蛍光値

期変化に対する最大の影響因子は、上記(解析2)で列挙した透明度 D_s 、日射量 R_s 、相対湿度 RH であるが、解析1で明らかにした影響因子 (T_a や R_a) に代わって、それらの影響が大きくなったのは、透明度 D_s 、日射量 R_s 、相対湿度 RH の長期変化傾向が比較的大きいという池田湖の地域的特性が強く影響したためであった。既往の研究では、大気放射量 R_a が熱環境に強い影響を及ぼすことが報告されている。本研究でも熱収支 (R_n , LE , H) に対して大気放射量 R_a の潜在的な影響は大きい。しかし、大気放射量 R_a の長期変化傾向が極めて小さかったため、熱収支の長期変化に及ぼす大気放射量 R_a の影響は結果として小さくなることが分かった。

(4) 地域温暖化傾向が植物プランクトンと栄養塩濃度に及ぼす影響【研究分担者】

水質観測結果より、成層期と非成層期に水

深 10~35 m でクロロフィル蛍光値の極大 (DCM) が認められた (図5)。両期の DCM の発生深度はそれぞれサーモクライン深度と有光層下端深度と概ね等しく、これは国内外の多くの湖で報告されている結果と一致した。池田湖ではサーモクライン深度は増大傾向にあるが、上述の感度解析によればその主因は透明度の増大傾向による。したがって、温暖化傾向とは直接関係しないものの、過去40年ほどの間に DCM 深度は増大傾向、すなわち植物プランクトンの生存領域は拡大傾向にあると考えられる。

DIN と DIP の分析値を OECD の水質基準に照らし合わせた結果、池田湖の表層は、貧栄養または極貧栄養に分類された。また分析結果より、池田湖では、DIN に比べて DIP の濃度が極めて低く (図5)、観測期間の平均 DIN/DIP 比は63であり植物プランクトンにとって極めて厳しいリン制限条件である。一方、DIN は、植物プランクトンが増殖するのに十分な濃度を示し、表層よりも下層のほうが高濃度であった (図5)。DIN の多くは硝酸態窒素 (NO_3^- -N) であり (図5)、その主な供給源は流域からの地下水であると考えられた。冬季の鉛直循環は、下層の硝酸態窒素を表層に輸送し、表層への重要な栄養塩供給を担っていた。したがって、温暖化により鉛直循環が弱化するすると、表層への栄養塩供給が抑制されるだけでなく、深層に栄養塩を蓄積し、DCM の規模をより拡大させる可能性がある。

池田湖では、たとえ植物プランクトンの生存領域が拡大および DIN 濃度が増大したとしても現状では湖水のリン制限が植物プランクトンの成長を強く律速していると考えられる。そのため、赤潮のような環境異変が生じる可能性は低いと考える。

(5) まとめ

本研究では、まず、2011年の全循環と2014年の部分循環時における水温と溶存酸素の1時間サンプリングデータを、表層から深層に渡って収集・整理した。湖水の鉛直上下混合メカニズム解明のための貴重な学術的資料となる。次に、本研究で得た現地観測データと独自に開発した数理モデルによる解析結果に基づいて、温暖な南九州特有の気象条件下において、地域温暖化傾向が農業用水資源である池田湖の水質および鉛直混合に及ぼす影響について検討し、以下のような成果を得た：

1) 2000~2013年における対象地域に特有な気温上昇の一時的な停滞のため、湖水のポテンシャルエネルギーが低下し、風に起因する乱れエネルギーが相対的に大きくなる。これにより、1986年以降25年間発生しなかった全循環が、2011年に発生したと考える。1977~1999年の気温上昇が、2000年以降も継続した場合は、2011、2012年のポテンシャルエネルギーが乱れエネルギーより大きくなることを数値シミュレーションにより示した。

2) 池田湖の温暖化および湖水安定化に最も寄与する環境因子は気温である。熱収支に最も影響を及ぼす因子は日射量と相対湿度であり、サーモクライン深度は透明度の影響を最も強く受ける。熱収支やサーモクライン深度の長期変化に対しては、透明度、日射量、相対湿度の長期変化傾向が比較的大きいという池田湖の地域的特性が強く影響する。

3) 池田湖の深層クロロフィル極大の発生深度は、温暖化とは直接関係しないものの、透明度の増大により近年深くなる傾向にある。また、温暖化により鉛直循環が弱化すると、表層への栄養塩供給と消費が抑制され、深層に栄養塩を蓄積し、その結果クロロフィル極大の規模をより拡大させる可能性がある。しかし、現状では湖水のリン制限が植物プランクトンの成長を強く律速していると考えられ、赤潮のような環境異変が生じる可能性は低い。

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1件)

- 1) Ito, Y. and K. Momii: Impacts of regional warming on long-term hypolimnetic anoxia and dissolved oxygen concentration in a deep lake, *Hydrological Processes*, 29, 2232-2242 (2015) DOI: 10.1002/hyp.10362 (査読有)

[学会発表](計6件)

- 1) 村田龍星, 伊藤祐二, 初井和朗: 湖の熱環境に影響を及ぼす地域的環境要因. 農業農村工学会九州・沖縄支部大会, 2015年10月29日, ANA クラウンプラザホテル那覇ハーバービュー(那覇市)(2015)
- 2) Ito, Y., Ando, J. and Momii, K.: Thermal responses to regional changes in climate and water clarity in Lake Ikeda, Japan. *HydroEco2015* (5th international multidisciplinary conference on hydrology and ecology), 2015年4月15日, The University of Natural Resources and Life Science (Vienna, Austria) (2015)
- 3) 伊藤祐二, 織田翔平, 初井和朗: 池田湖の温暖化と熱特性の変化. 水文・水資源学会2014年度研究発表会(宮崎大会), 2014年9月25日, 宮崎グリーンスフィア壱番館(宮崎市)(2014)
- 4) 初井和朗: 農業用水資源としての地下水および湖水における物質動態に関する研究. 農業農村工学会応用水理研究部会(特別講演), 2013年12月7日, 京都大学農学部総合館(京都市)(2013)
- 5) 伊藤祐二, 初井和朗, 大久保道徳: 池田湖の全循環発生と溶存酸素の季節変化. 農業農村工学会九州沖縄支部大会, 2013年11月6日, 宮崎観光ホテル(宮崎市)(2013)

- 6) 伊藤祐二, 初井和朗: 池田湖における長期モニタリングと湖水環境の変化. 日本陸水学会第78回大会(公開シンポジウム), 2013年9月12日, 龍谷大学瀬田キャンパス(青志館)(大津市)(2013)

[その他]

- 1) 初井和朗: 農業用水資源としての地下水および湖水における物質動態. 公益社団法人土地改良測量設計技術協会, 2015年5月21日, 鹿児島県土地改良会館(鹿児島市)(2015)
- 2) 初井和朗: いのち育む水資源と水循環. 日本学術会議九州・沖縄地区会議学術講演会『かごしまの水を考える-鹿児島大学「水」研究最前線-』, 2013年11月18日, 鹿児島大学稲盛会館(鹿児島市)(2013)
- 3) 初井和朗: 農業用水資源としての地下水および湖水における物質動態に関する一連の研究. 農業農村工学会誌, 81(11), 931-932 (2013)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

初井 和朗 (MOMII, Kazuro)
鹿児島大学・農水産獣医学域農学系・教授
研究者番号: 40136536

(2) 研究分担者

伊藤 祐二 (ITO, Yuji)
鹿児島大学・農水産獣医学域農学系・准教授
研究者番号: 60526911