

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22380132

研究課題名（和文） 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

研究課題名（英文） Evaluation of the effects of climate change on lake water environment as regional freshwater resources

研究代表者

梶井 和朗(MOMII KAZURO)

鹿児島大学・農学部・教授

研究者番号：40136536

研究成果の概要（和文）：

池田湖の底層は1990～2010年の21年間無酸素状態にあったが、2011年1月～2月の平均気温が8℃（1987年以来最低）となり、表層水の冷却に起因して鉛直混合が生じ、2月中旬に一様な溶存酸素（4.5 mg/L）鉛直分布となった。この全循環は12月～2月の約50日間で達成された。鉛直1次元数値モデルにより、温暖化傾向下における湖水温と溶存酸素の動態を検討した。数値解析の結果、1984、1986、2011年の湖の安定度指標は負値になり、全循環の年と一致した。

研究成果の概要（英文）：

In the observed results, the bottom layer of Lake Ikeda was under anoxic condition for 21 years from 1990 to 2010. In the middle of February 2011, when the mean air temperature from January to February decreased by 8° C, the lowest since 1987, vertical mixing due to surface water cooling occurred and consequently a uniform vertical dissolved oxygen (4.5 mg/L) profile was attained. The overturn was achieved for about 50 days during December to February. The lake water temperature and dissolved oxygen dynamics under the warming trends were investigated by the vertical one-dimensional numerical model. The numerical analysis reveals that 1984, 1986 and 2011, in which the values of lake stability index were negative, correspond to the years of the overturn.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	7,900,000	2,370,000	10,270,000
2011年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2012年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学 ・ 農業土木学・農村計画学

キーワード：水資源, 現地観測, 数値モデル, 溶存酸素, 湖水温, 安定度, 全循環

## 1. 研究開始当初の背景

現代社会における安全できれいな水の確保は、あらゆる人間活動の根幹をなすものである。特に、農業において水は、食料を生産

するための不可欠な資源である。近年、人間活動に由来する環境負荷物質による水環境の劣化が報告され、さらに気候変動という地球規模での問題が地域的な水問題と深く関

わり合っている。このような背景から、近年では、気候変動が水資源に与える影響の科学的検討が行われ、種々の水環境に関わるデータが蓄積されている。

鹿児島県薩摩半島に位置する池田湖は、南薩地域 6000 ha の大規模畑地帯の貴重な農業用淡水資源である。その最大水深は 200 m を越え、池田湖自体が長期の気候変化を写し取る鏡（天然の実験装置）である。研究代表者は、最近 30 年間の池田湖の水位変化を解析し、池田湖の水収支を明らかにした。しかし、湖水質に関しては、気温上昇に伴って最近 30 年間で約 0.8℃、深層の水温が上昇しており、この上昇傾向が湖の水質に及ぼす影響については未だ明確ではなく、水温上昇に伴う湖水環境の劣化が懸念されている。鹿児島県では過去 30 年間にわたり池田湖の水質観測を行っており、この長期観測データを基礎資料とし、さらに本研究で新たに収集するフィールドデータに基づいて水質解析を行うことにより、気候変化が池田湖の水質に及ぼす影響について、学術的成果が得られるとの着想に至った。温暖な南九州の気候条件下での気候変化と湖水環境に関する解析例は少なく、国際的視点からも有意義な成果となる。また、清澄な水の確保・保全の観点からも社会的意義のある研究となる。

## 2. 研究の目的

以上のような研究背景から、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、現地の気象、水質データに基づいて、気候変化が地域の農業用水資源としての湖「池田湖」の水質変化に及ぼす影響、特に気温上昇傾向にある 1980 年以降の池田湖の水温と溶存酸素 (DO) の変化の特徴を明らかにすることを目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 水質資料収集及び現地観測

池田湖では、1977 年から現在まで、水温、DO 濃度、透明度などの水質観測を約 2 ヶ月間隔で鹿児島県が実施しており、湖中央で水深 0.5, 15, 30, 100, 200 m のデータを得ている。本研究では、2010 年 8 月～2012 年 11 月に、多項目水質計 (6600V2, YSI) により水温、DO 濃度、クロロフィル等を観測した。測定は、湖の中央または東部湖岸から約 150 m の養殖漁場の筏地点で行った。溶存酸素の連続観測は、筏において水深 1, 30, 60 m に溶存酸素計 (AROW-USB, JFE アドバンテック) を設置し、1 時間間隔で 2010/11 年, 2011/12 年, 2012/13 年の冬季に、自動測定した。また、気温、湿度、風速、日射の気象観測も筏を利用して湖面上で行い、池田湖周辺の気象観測所 (枕崎市, 指宿市) と比較した。

## (2) 数値モデルの構築及び数値解析

湖水中での DO 動態の再現のため、生物・化学・物理的過程を考慮した数値モデルの構築を行った。特に、再曝気による酸素供給、光合成による酸素生成、生物化学的分解による酸素消費、底質での酸素消費、及び鉛直渦動拡散係数のモデル化を検討した。次に、この数値モデルに基づいて、2004 年 4 月 20 日～2004 年 12 月 6 日及び 2010 年 8 月 19 日～2011 年 4 月 1 日を対象に、日単位の池田湖の水温と DO 濃度を、湖面から湖底まで水深 1 m 間隔で数値解析した。水温及び DO 濃度の初期鉛直分布には、実測値を与えた。気象資料には、枕崎市と指宿市で得られた日平均のデータを用い、日射量は気象資料に基づいて推定した。クロロフィル a 濃度と透明度のデータには、鹿児島県によって得られた 2, 4, 6, 8, 10, 12 月の観測値を用い、各データをその前の月から 2 ヶ月間一定値としてモデルに与えた。クロロフィル a 濃度の鉛直分布は、水深 0.5, 15, 30, 100, 200 m の観測値を非線形近似して求めた。水温と DO 濃度のモデルパラメータは、既往の研究で報告されている数値を参考にし、2004 年の水温と DO 濃度の実測値にフィッティングさせて決定した。各パラメータの妥当性を、2010～2011 年の水温及び DO 濃度の観測値と推定値の比較により検討した。

## 4. 研究成果

### (1) 対象地域の気温、水温、溶存酸素変化

この地域の気温の上昇率は、1950～1980 年 (0.0033℃/年) に比べて、1981～2011 年では 0.032℃/年となり、最近 30 年間で増大する特徴がある。また水温に関しては、水深 200m において、1980 年代は 10.2℃であったが、2011 年には 11℃になり、水温上昇率は 0.030℃/年である。この気温及び水温の上昇傾向のもとで、1986 年以降、水深 200m の溶存酸素は徐々に減少し、1990～2010 年の 21 年間は無酸素状態となっている。本研究での観測開始直後の冬 (2011 年 2 月) に 1987 年以降最低の月平均気温 (8℃) となり、2011 年 4 月 12 日の鹿児島県の観測によれば、水深 200m の DO 濃度が 3.8 mg/L となっており、25 年ぶりに全循環が発生したと推察される。

### (2) 数値モデルによる溶存酸素動態解析

2004 年の数値計算では、推定した水温、DO 濃度の変化傾向は観測値とよく一致した (図 1)。この結果から、構築した鉛直 1 次元数値モデルにより、全循環の生じない時期の DO 濃度の時間変化は、決定したモデルパラメータを用いて概ね再現できるものと判断される。

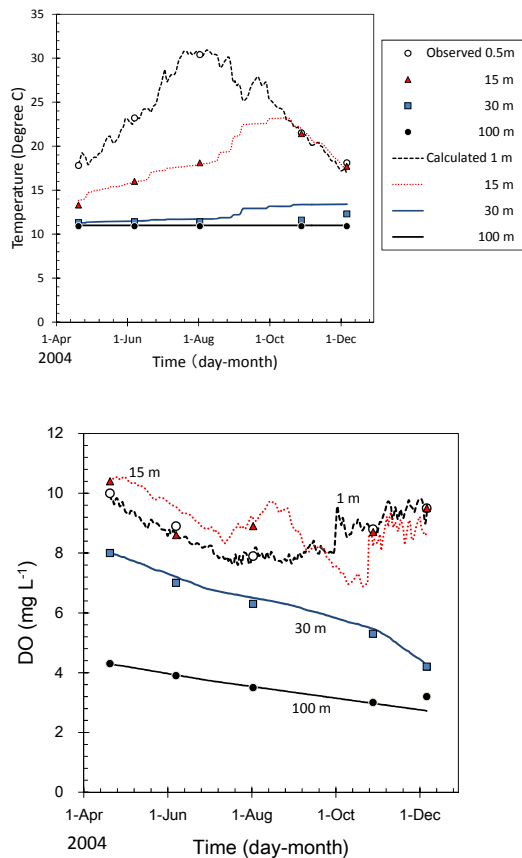


図1 水温及び溶存酸素の時間変化

全循環が生じた2010/11年の場合、各水深でDO濃度が大きく変化し、同一の拡散係数では、DOの時間変化を再現することには至らなかった。再現性の向上のために、表層-深層間の密度逆転の判別を数値モデルに組み込み、逆転が生じた場合には拡散係数を大きくすることで、全循環時の溶存酸素の変化を、概略ではあるが、再現できることを確認した。また、数値モデルによれば、有光層では植物プランクトンによる光合成と鉛直混合、中層では鉛直混合、呼吸と有機物(BOD)による酸素消費、さらに深層ではBODによる酸素消費と底質(SOD)との酸素交換がDOの濃度変化に影響を及ぼす主因子であることがわかった。

本研究で新たに構築した数値モデルは、簡便な鉛直1次元モデルであり、湖内のすべての生物・化学的過程を反映していない。しかし、簡便な1次元モデルであっても、2ヶ月単位のクロロフィルa濃度や透明度の観測値、及び日単位の周辺気象資料を用いて、深い池田湖のDO濃度の変化を、概略ではあるが、再現することができた。今後は、本研究で収集した全循環時の集中観測データを用いて、パラメータの再設定及び数値モデルの精緻化を図り、温暖化傾向下における長期的なDO濃度の変化について検討する。

### (3) 安定度指標に基づく考察

1978～2011年における水温の数値計算値から密度を算出し、安定度指標(SchmidtのStability Index)Sに基づいて池田湖の安定性について考察する。

2月のSの平均値は、1981, 1982, 1984, 1986, 2011年で負となった(図2)。Sが小さい場合、湖の成層強度は低下し、機械的混合に対する抵抗が低下するため、湖水は鉛直混合しやすくなる。1984, 1986, 2011年では水深200mでDO濃度の上昇も認められたことから、この3年では、全循環したものと考える。また、1985, 1996, 1997, 2006年のSは、0.2～1.5 kJ m<sup>-2</sup>の範囲にあり、対象期間の中では比較的小さい。この4年では、水深100mのDO濃度が冬期に急上昇し、その後4 mg/Lを超えたことから、少なくとも水深100mまでは循環が及んだ(部分循環)と考える。その他の年では、Sは大きくなり、湖は安定しており、深層までの循環は生じていない。また、1986～1990年には気温に大きな上昇傾向(0.147°C/年)が認められた。気温の上昇が湖の水温と成層強度を増大させることは、Erie湖やZurich湖などで報告されている。以上のことから、1980年代後半の気温の上昇傾向が、池田湖の水温と安定性を増大させ、2010年までの全循環喪失と深層無酸素化の要因になったと推察する。

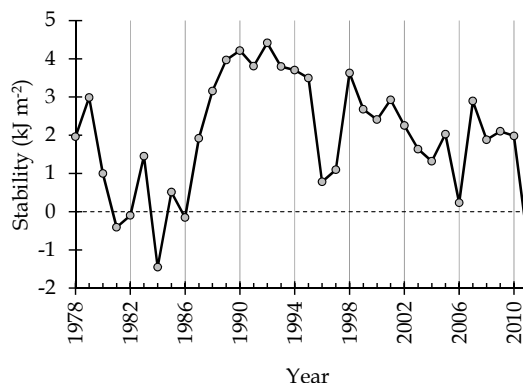


図2 2月の平均安定度指標の年変化

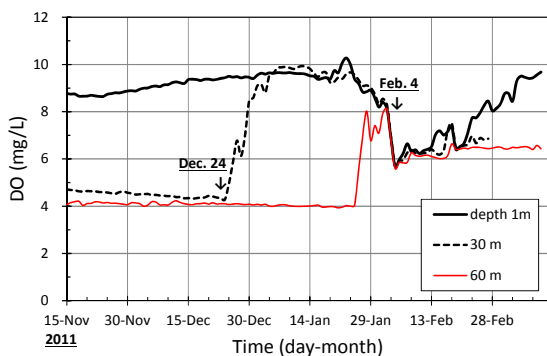
### (4) 全循環における溶存酸素の動態

1983年以降のDOの観測結果によれば、1984, 1986, 2011, 2012年の冬季に、水深200mのDOが増加しており、湖水の鉛直上下完全混合、すなわち全循環が生じたと判断できる。特に、本研究期間中に2年(2011年, 2012年)連続して、全循環の発生が認められた。全循環発生年は、冬季(12月, 1月, 2月の3ヶ月)の平均気温が低く(9°C以下の年:1983, 1984, 1986, 1996, 1997, 2011, 2012年)、かつ冬季の平均風速が2 m/s以上ある年(1984, 1986, 2011, 2012年)に対応している。2011年2月に1986年以降25年ぶりに観測された池田湖の全循環時のDO輸送過程は次のようであ

る。

2010年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、表層から深層までの水温が一樣化(約11℃)され、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の値は上昇する。その後、徐々に鉛直混合が進み、深層の貧酸素水塊が表層に到達すると、表層のDOは低下する。一方、下層のDOの値は上昇し、全層のDOが一樣化(約4 mg/L)される。

本研究での集中観測によれば、水深30mから深層まで溶存酸素が一樣化される2011年2月の池田湖の全循環は、冬季の気温の低下とともに表層から徐々に進行し、約53日間(12月24日～2月14日)で達成されている。さらに、2012年2月の全循環は、約43日間(12月24日～2月4日)で達成され、DO濃度は約6 mg/Lに一樣化(2012年2月4日、**図3**)されたことが明らかになった。なお、鉛直混合に及ぼす風(風向・風速)の効果を定量的に検討していくためには、今後、この地域の気象特性を考慮した湖水質に関する数値シミュレーションが必要である。



**図3** 溶存酸素の時間変化  
(2011年11月～2012年3月)

最後に、本研究の成果の一部は、Impact of regional warming on continuous hypolimnetic anoxia over 21 years in deep Lake Ikeda, Japanとして国際学術誌に投稿予定であり、また、鹿児島県が2012年2月に開催した水環境先進地づくりシンポジウムでは、池田湖水環境に関するDVDやパンフレットを通じて社会に情報発信したことを付記する。

## 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9件)

- 1) 梶井和朗：巡る水に夢をのせて。水文・

水資源学会誌, 25(2), 69-70 (2012) (査読無)

- 2) 伊藤祐二・梶井和朗：気象変化が深い湖の湖面蒸発量、水温、熱収支に及ぼす影響-鹿児島県池田湖の事例-。農業農村工学会論文集, 269, 93-103 (2010) (査読有)

[学会発表] (計14件)

- 1) Momii, K. and Ito, Y.: Influence of regional warming trends on lake water dissolved oxygen dynamics -A preliminary investigation in Lake Ikeda, Japan-, Nordic Water 2012, XXVII Nordic Hydrological Conference, August 13-15, 2012, University of Oulu, Oulu, Finland (2012)
- 2) 伊藤祐二・梶井和朗：鉛直1次元モデルに基づいた池田湖における水温の変化傾向の解析。水文・水資源学会2011年度研究発表会, 2011年9月1日, 京都大学宇治キャンパスきはだホール(宇治市)(2011)
- 3) 平坂張菜・近藤文義・伊藤祐二・梶井和朗：ランドサットETM+データを利用した鹿児島県池田湖における水温分布の把握。農業農村工学会九州支部講演会, 2010年10月19日, ホテル熊本テルサ(熊本市)(2010)
- 4) 伊藤祐二・梶井和朗・西川薫・東井上宗太：気候変化が地域水資源としての湖水質に及ぼす影響-池田湖の水温及び溶存酸素に関する考察-。農業農村工学会九州支部講演会2010年10月19日, ホテル熊本テルサ(熊本市)(2010)

[その他]

- 1) 伊藤祐二：湖の水・熱収支のモデル化と解析-池田湖の事例-, 農研機構農村工学研究所工研気候変動定例研究会(招待講演), 2013年2月22日, 農村工学研究所(つくば市)(2013)
- 2) 梶井和朗：基調講演「生命を育む水資源と水循環」, 鹿児島県水環境先進地づくりシンポジウムみんなで語ろう池田湖「水ものがたり」, 2012年2月19日, メディポリス指宿(指宿市)(2012)
- 3) 梶井和朗：地域水資源として池田湖の水, 畑の郷水土利館水土学習講座, 2010年12月1日, 畑の郷水土利館(南九州市)(2010)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

梶井 和朗 (MOMII KAZURO)  
鹿児島大学・農学部・教授  
研究者番号：40136536

### (2) 研究分担者

伊藤 祐二 (ITO YUJI)  
佐賀大学・低平地沿岸海域研究センター

研究機関研究員  
研究者番号：60526911