短 報 [Note]

国内 9 ケ所のダム湖における水温傾向の評価に関する予備的研究

長尾正之¹⁾・鈴木 淳¹⁾

Preliminary study of recent water temperature trends of nine dam reservoirs in Japan

Masayuki NAGAO¹⁾ and Atsushi SUZUKI¹⁾

Abstract

In order to investigate the impact of global warming on the inland waters of Japan, we examined the rates of rises in water temperature in nine dam reservoirs that had kept long-term records of vertical temperature observations. Water temperatures at the shallowest and deepest layers were selected as being representative for our investigation, and their trend lines were obtained using time-series analysis. Our first expectation was that the deepest water temperatures would be little-affected by meteorological disturbances and might even show clearer temperature rises than those in the shallowest water. However, all the nine reservoir trend lines from 1993 to 2006 in the shallowest layers showed an upward tendency probably attributable to recent rises in air temperature. In some reservoirs, the ratio of water temperature rises exceeded the ratio of rises in air temperature. In contrast, trend lines of the deepest layers during the same period revealed both upward and downward tendencies. Those results suggested that water temperatures in the deepest layers were affected by a reduction in volume due to accretions of sand, enhanced stratification, or diminished vertical mixing, rather than to a rise in temperature due to a concomitant rise in air temperature. To determine the impacts of these effects will be an important issue in future investigation.

Key words: water temperature, dam reservoir, global warming, trend analysis, seasonal adjustment method.

摘 要

日本のダム湖で温暖化による水温上昇が認められるかどうかを調べるため、水温多層観測が長期間なされているダム湖 9 箇所を選び、最表層と最下層の水温傾向を時系列解析で抽出し、水温上昇率を調べた。当初、気象擾乱の影響を受けにくい最下層で、温暖化による水温上昇が明瞭に認められると予想した。しかし、逆に最下層よりも最表層の水温に、水温上昇が明瞭に認められた。すなわち、最表層水温は、1993 年から 2006 年において 9 つのダム湖すべてで上昇傾向にあった。この結果は、最表層水温が気温上昇の影響を強く受けているためと考えられたが、気温上昇率を上回る水温上昇率を持つダム湖もあった。一方、同期間の最下層水温については、上昇傾向と下降傾向にあるダム湖が存在した。最下層水温は気温上昇に伴うダム湖全体の水温上昇よりも、湖底上昇によるダム容量の減少、成層強化、冬季鉛直混合の低下に影響を受けている可能性が示唆され、その分離が今後の課題となった。

¹⁾ 産業技術総合研究所 地質情報研究部門, 〒305-8567 茨城県つくば市東 1-1-1 中央第 7 Institute of Geology and Geoinformation, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba Central 7, Higashi 1-1-1, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan
(連絡先 長尾正之 ✉nagao-masayuki@aist.go.jp)

キーワード：水温，ダム湖，温暖化，トレンド解析，季節調整法

(2009年3月5日受付；2009年11月10日受理)

はじめに

気温や水温の長期変動は，環境変化の指標として常に研究の対象となってきた。IPCC第2作業部会第4次調査報告書(IPCC,2007)によれば，ダム湖，湖沼で温暖化の影響が進行し，表面水温が上昇すると，藻類の増殖を引き起こし(Hall et al., 2002; Kumagai et al., 2003)，塩素処理された飲み水の悪臭や味の悪さの発生につながる恐れがあること，(Moulton and Cuthbert, 2000; Robarts et al., 2005)，この問題は既存の水道技術では解決できない恐れがあること(Charlton et al., 2001)が指摘されている。

近年の国内湖沼の水温変化と環境変化の対応例としては，茨城県霞ヶ浦の化学的酸素要求量(COD)の数値が，2005年度(7.6 mg L⁻¹)，2006年度(8.2 mg L⁻¹)，2007年度(8.8 mg L⁻¹)，2008年度(8.7 mg L⁻¹)にかけて漸増傾向にあることが挙げられる(茨城県生活環境部環境対策課，2007, 2008, 2009)。このうち，2005年度から2006年度のCOD増加については，秋口から春の気温が平年より高く，これが水温上昇を引き起こし植物プランクトンの湖内生産を活発にしたためと考えられている(茨城県生活環境部環境対策課，2007)。このほか，琵琶湖では，2007年1月～3月に暖冬のため全循環が遅れたために，貧酸素状態が継続した(岡本ら，2007)。

地球温暖化に対する陸水温度の応答について，新井(2000)は既往研究を総評し，河川・湖沼ともに水温上昇は気温上昇よりは小さいこと，湖沼の循環型が変わる可能性があること，水温成層が強くなること等が予測されるとしている。しかし同時に，基礎となる観測値が非常に少なく予測を困難にしていることも指摘している。また，取り上げられている研究の多くは湖沼，河川であった。日本を代表する湖である琵琶湖については，1964年から1997年までの琵琶湖北湖深層水温の上昇率が0.40℃(10y)⁻¹であり，直近の彦根の月平均気温の上昇率0.30℃(10y)⁻¹を上回っていたことが，速水・藤原(1999)により報告されている。

一方，国内の主要ダム湖では定期水温観測が行われ，その結果は多目的ダム管理年報(建設省河川局，1959-1992)やダム諸量データベース(国土交通省)に公表されている。たとえば池浦ら(2008)は，1962年1月～2008年2月の日向神ダム湖水水温の経年変動を調べ，

底層水温は0.88℃(10y)⁻¹の割合で上昇していることを明らかにした。この値は，ダムの年平均気温の上昇率0.32℃(10y)⁻¹を上回っていた。湖のスケールの違いやデータ解析期間の違いはあるが，池浦ら(2008)の結果は，速水・藤原(1999)の結果と同様に，気温上昇率を上回る水温上昇率をダム湖が示す場合があることを示唆している。

池浦ら(2008)の研究のように，国内ダム湖の水温観測記録を使えば，水温経年変動について調べることができるが，筆者が調べた範囲では，池浦ら(2008)の研究以外にダム湖水水温の経年変動の研究は認められなかった。ダム湖水水温上昇率の研究例が少ない理由は，自然湖沼に比べて，堆砂によるダム湖容積の縮小や，人為的な水位操作による変動が激しいため，取り扱いが困難だからだと想像された。

そこで，本研究では，季節要因や短期変動の影響を避け，傾向成分だけを抽出できる時系列解析法を使い，全国9つのダム湖の最表層と最下層の水温の傾向について解析を試みた。

材料と方法

データの出典と解析対象ダム

原則として毎月観測されている1959年から2006年までの多層水温データを，多目的ダム管理年報(建設省河川局，1959-1992)とダム諸量データベース(国土交通省)の水温年表から選び，解析に用いた。

水温上昇率の評価は，長期的傾向と短期的傾向の二つの見方で行った。長期的傾向については，1970年代以前から水温が記録されているダム湖について，竣工時から現在までの水温傾向について調べた。一方，水温上昇率を比べるためには，記録期間がダム湖間でそろっている必要がある。そこで，短期的傾向については，記録期間を1993年から2006年の14年間に固定し，水温傾向を調べた。

Fig.1に解析対象のダム湖の位置を示した。短期的な傾向を解析するためにダム湖は，北海道，東北，関東，中部，関西，中・四国，九州，沖縄から代表的なものを選んだ。長期的な水温傾向を調べるために，選んだダム湖のダム名(都道府県名)は，桂沢(北海道)，釜房(宮

Table 1 Specifications of analyzed dam reservoirs.

表 1 解析対象としたダム湖の諸元.

Dam Name	(1)Net Volume (10 ⁶ m ³)	(2)Surface Area (ha)	(3)Depth (m)*	(4)Latitude	(5)Longitude	(6)Elevation of dam crest (m)	(7)Basin Area (km ²)	(8)Net volume of annual flow (10 ⁶ m ³)**	(9)Exchange rate (y ⁻¹)	(10)Residence time (mon)
Katsurazawa	92,700	499	19	43° 14' 23" N	142° 00' 09" E	192	446	286	3.1	3.9
Kamafusa	45,300	390	12	38° 12' 08" N	140° 41' 51" E	153	195	297	6.6	1.8
Ikari	55,000	310	18	36° 54' 11" N	139° 42' 20" E	594	271	359	6.5	1.8
Iwaya	173,500	426	41	35° 45' 39" N	137° 09' 25" E	428	1,735	556	3.2	3.7
Hitokura	33,300	140	24	34° 54' 19" N	135° 24' 42" E	154	115	89	2.7	4.5
Haji	47,300	280	17	34° 38' 37" N	132° 37' 16" E	259	308	378	8.0	1.5
Sameura	316,000	750	42	33° 45' 24" N	133° 33' 02" E	345	472	952	3.0	4.0
Matsubara	54,600	190	29	33° 11' 39" N	130° 59' 38" E	275	491	977	17.9	0.7
Aha	18,600	83	22	26° 42' 38" N	128° 16' 09" E	114	40	63	3.4	3.6
Hyugami	27,900	112	25	33° 10' 34" N	130° 46' 49" E	146	84	124***	4.4	2.7

(1) and (2) were quoted from "Dams Yearbook 2008 (*Damu Nenkan 2008*)" (Japan Dam Foundation, 2008). (4)-(7) were quoted from "Dam Handbook (*Damu Binran*)" (Japan Dam Association).

*(3)=(1)/(2). ** (8) is based on average annual flows from 1993 to 2007 taken from "Database of Dams (*Damu Shoryou de-tabe-su*)" (Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism).

*** Calculated by net volume of annual flow at Hunagoya, and ratio of catchment area between Yabe River and Hyugami Dam. Net volume at Hunagoya and catchment area were obtained from "Rivers in Japan (*Nihon Kasenzu*)" (Japan River Association).

城), 五十里(群馬)である。各ダムの諸元は Table 1 にまとめた。

水温傾向の調査方法

データの前処理

水温年表を精査し異常値を発見した場合は、欠測扱いとした。たとえば、小数点記入もれが原因で、ある深度の水温がその上と下の水温に比べて 10 倍程度高い場合は、その深度の水温は欠測扱いとした。

また、観測日の水位も精査した。水面ではなく基準面を基準にして等水温図を作る際に、観測日の水位が必要となるためである。観測日の水位が欠測、あるいは異常値と考えられる場合は、多目的ダム管理年報、またはダム諸量データベースの貯水位・流入量・放流量年報の日平均水位を代入した。また、ある月の水温観測が行われていない場合は、その月の平均水位を代入した。

解析対象水温

本研究では、水温年表に記載されている最表層水温と最下層水温を、解析対象とした。ここで、最表層水温は、水温年報に記載されている水温測定層のうち、もっとも上の層の水温である。そして、最表層水温は、気温の年変動の影響を強く受ける層である。最下層水温は、水温年報に記載されている水温測定層のうち、もっとも下の層の水温であり、気温変動の影響が極小な層と考えられ

Fig.1. Locations of analyzed dam reservoirs. Closed squares (■) denote reservoirs utilized for long/short-term trend analyses. Closed circles (●) denote reservoirs utilized only for short-term trend analyses. Locations are quoted from "Dam Handbook (*Damu Binran*)" (Japan Dam Association).

図 1 解析対象のダム湖の位置。水温の長期的傾向と短期的傾向の両方を調べたダム湖は■で、また、短期的傾向だけを調べたそれ以外のダム湖は●で示している。ダム湖位置は、「ダム便覧」(日本ダム協会)から引用。

る。

水温上昇率の決定方法

池浦ら（2008）は日向神ダム水温時系列に対して線形一次回帰直線をあてはめて、水温上昇率を計算している。この方法では水温時系列の傾向成分（トレンド）を求めることができない。傾向成分を知るには、自然由来の熱収支と人為的水位操作に伴う季節変動成分を除く必要がある。

経済統計分析では月次データから季節要因を取り除くために、季節調整法が用いられる。TIMSAC for R package（統計数理研究所）の decomp（Akaike et al., 1985）は季節調整法の一つで、月次データから季節要因を取り除くほか、短期的な変動成分も取り除き、長期的変動成分を傾向成分として抽出できる。

decomp では、月水温データ $y(t)$ を、

$$y(t) = T(t; k) + S(t; l) + AR(t; m) + W(t) \quad (1)$$

の季節調整モデルの形式に分解する。ここで t : 時刻（月単位）。 $T(t; k)$: 次数 k の階差モデルによる傾向成分で、本論文ではこれを傾向線（トレンド）とする。 $S(t; l)$: 次数 l の季節変動モデルによる季節変動成分。 $AR(t; m)$:

次数 m の自己回帰モデルによる定常 AR 成分。定常 AR 成分はトレンド成分のような長期的変動ではなく、短期的な変動成分を表す。 $W(t)$: 測定ノイズ成分。各成分に対して仮定されるモデルの詳細については、文献（Akaike et al., 1985）にゆずる。

我々は、水温時系列に対して季節調整モデル（式（1））の次数 k, l, m の組み合わせを変えながら、赤池情報量規準（AIC）を計算した。その中で AIC が最小の季節調整モデルが、水温時系列に対して最も適合度が高いと判断して採用した。そして、傾向成分に一次回帰直線をあてはめ、その傾きを水温上昇率とした。

なお、 $S(t; l)$ には、前述のとおり、熱収支による季節変動のほか、人為的水位操作に伴う季節変動も含まれる。また、 $T(t; k)$ には、長期的な温暖化による「趨勢」に加えて、定常 AR 成分でも表現できない周期 1 年以上の「循環」的要素が含まれる可能性がある。陸水応答の分野では、観測値から趨勢と循環的要素の影響を分離し、循環的要素とエルニーニョ現象との対応関係を評価する試みがなされている。たとえば、Arpe et al.（2000）は 1837 年から 1997 年のカスピ海年平均水位と南方振動指数がよく合うことを数値実験も用いて調べ、水位変動とエルニーニョ現象との関係性を指摘している。また、陸水ではないが、1997-1998 年のエルニーニョ現象で発生

Fig.2. Isothermal plot of Kamafusa Dam Reservoir. Data were obtained from “Management Annual Report of Multipurpose Dams (*Tamokuteki Damu Kanri Nenpou*)” (River Bureau of Ministry of Construction, 1961-1997) and “Database of Dams (*Damu Shoryou de-tabe-su*)” (Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism).

図2 釜房ダム湖の等水温図。水温データは多目的ダム管理年報（建設省河川局，1961-1997）とダム諸量データベース（国土交通省）から引用した。

した高海水温の特異性を, 1903-1999 年の海面水温データセットとの対比により調べた研究 (Lough, 2000) も行われている。いずれの研究でも, 十分に長い観測データを使ってエルニーニョ現象と観測値との対応について検討を行っている。最長でも 50 年程度のダム湖水温記録から, 趨勢と循環的要素を分離し, 循環的要素の原因について評価する研究は今後の課題である。

結果と考察

釜房ダムの事例

Fig.2 は前処理後の水温年表データから作成した, 釜房ダム湖の等水温図である。水温は月一回観測されている。1970 年に定義された観測層深度の定義は, 0.1 m, 0.5 m, 1-10 m までは 1 m ごと, 12-20 m までは 2 m ごと, 25 m からは 5 m ごとである。ただし, 観測年によって観測されていない層もある。Fig.2 の黒線は水面水位であり, 最上の観測層 (深度 0.1 m) にほぼ対応する。また, 釜房ダムでは砂の堆積が進んでいるため最深部標高は一定ではない。Fig.2 から釜房ダムの夏の水温は, 1985 年以降, 全層にわたって上昇傾向にあることが明瞭に読み取れる。

Fig.3 は釜房ダム湖の最下層の水温変化を, 傾向線 (トレンド), 季節変動成分, 短期的変動成分 (定常成分), ノイズに分離した結果を示している。トレンド成分, 季節成分, 定常 AR 成分の次数 k, l, m はそれぞれ 1, 2, 2 である。また, 傾向成分 (灰色線) にあてはめた直線 (黒実線) と, その傾きから求めた水温上昇率も記入している (Fig.3 (b))。この例では水温上昇率は $+1.19^{\circ}\text{C} (10\text{y})^{-1}$ となり, 高い上昇率を示した。

しかし, 傾向線と, あてはめた直線とを比べると, 年代により水温上昇率が異なることがわかる (Fig.3 (b))。1970-1984 年までの水温上昇率は 1970-2006 年の全期間の水温上昇率 (黒実線) とほぼ一致する。1985-1990 年の傾向線にあてはめた直線 (破線) が示す水温上昇率は $2.78^{\circ}\text{C} (10\text{y})^{-1}$ であり, 全期間の水温上昇率の 2.3 倍である。1991-2006 年の傾向線にあてはめた直線 (一点鎖線) が示す水温上昇率は $0.31^{\circ}\text{C} (10\text{y})^{-1}$ である。この上昇率は全期間の水温上昇率の約 1/3 である。このように, 季節調整法を使って傾向線を得ることで, 年代間の上昇率の違いを比較することが容易になる。

なお, 釜房ダム最下層水温が堆砂による湖底上昇の影響を受けていた可能性があるが, その影響の解析は今後の課題である。

Fig.3. De-composition of water temperature time-series at deepest layer of Kamafusa Dam Reservoir. (a) Monthly water temperature, (b) trend line (gray line), (c) seasonal component, (d) steady autoregressive (AR) component and (e) noise. Solid, broken and dashed-dotted lines denote regression lines for 1970-2006, 1985-1990 and 1991-2006, respectively.

図 3 釜房ダム湖最下層の水温時系列の分解例。(a) 月ごとの水温変化, (b) 傾向成分 (トレンド成分) (灰色線), (c) 季節成分, (d) 定常 AR 成分, (e) ノイズ。(b) の黒実線, 破線, 一点鎖線は, 1970-2006 年, 1985-1990 年, 1991-2006 年の傾向成分に対する回帰直線。

Fig.4. Long-term trend lines of water temperatures at shallowest layers in Katsurazawa, Kamafusa, and Ikari Dam Reservoirs.

図 4 桂沢, 釜房, 五十里ダム湖の最表層水温の長期的傾向.

Fig.5. Long-term trend lines of water temperatures at deepest layers in Katsurazawa, Kamafusa, and Ikari Dam Reservoirs.

図 5 桂沢, 釜房, 五十里ダムの最下層水温の長期的傾向.

長期的傾向

1960年代あるいは1970年代以降からダム水温記録を持つ桂沢, 釜房, 五十里ダムの水温の傾向線(トレンド)をFig.4とFig.5に示した。傾向線は, 最表層はFig.4, 最下層はFig.5に表し, さらにダムごとに表示を分けた。傾向線の最大最小の範囲に合わせてFig.4とFig.5の縦軸は調整した。

傾向線の変動幅がダムごとに大きく違うので, 定性的な水温傾向線の特徴だけをここでは列挙する。

桂沢ダムの最表層水温の傾向線を見ると, 1985年以前は比較的变化は少ない。1985年から1990年にかけて水温は急上昇している。1991年から1995年には水温は低下傾向にある。1996年以降は水温が急上昇している。桂沢ダムの最下層水温の傾向線を見ると, 1990年ごろ

までは水温は低下傾向にある。1991 年から 2000 年までは急激な水温上昇を示している。2001 年以降の水温変化はほとんどない。また、最表層では傾向線の変動幅は 1℃だが下層では 0.04℃しかない。

釜房ダムの最表層水温の傾向線を見ると、1970 年以降、水温は低下傾向にある。1995 年以降はそれより前の年代よりも低下率は小さくなっている。釜房ダムの最下層水温の傾向線の特徴は前述したのでここでは省略する。また、桂沢ダムと異なり、釜房ダムでは最表層では傾向線の変動幅は 0.2℃だが、最下層では 5℃と変動幅が大きい。

五十里ダムの最表層水温の傾向線を見ると、1994 年までは低下傾向であり、1995 年以降は上昇傾向に転じている。また、五十里ダムの最下層水温の傾向線では、1981 年までは弱い水温低下傾向にあり、続く 1982-1995 年まではそれ以前に比べて急激な水温低下傾向を示している。1996-1999 年までは横ばい傾向で、2000 年以降はわずかに上昇傾向にある。

長期的傾向について、桂沢、釜房、五十里ダム湖の水

温上昇率を、Fig.4, 5 の傾向線を使用し、1970-2006 年に対して計算した (Table 2)。最表層水温については、桂沢が地方の気温上昇率を上回る水温上昇率を示した。釜房と五十里は逆に低下傾向を示した。最下層水温については、桂沢と釜房で正の水温上昇率を示した。特に釜房では気温上昇率を大きく上回っていた。五十里の最下層水温は最表層水温と同様に低下傾向を示していた。

短期的傾向

長期傾向を三つのダムから調べた結果、概して、1980 年代以降または 1990 年代以降と、それ以前の年代では、水温傾向が変わっているように見える。そこで、1993-2006 年の 14 年間に調査期間をそろえ、この期間に水温記録を持つ主なダムについて、1990 年代以降の最表層と最下層の水温の短期的傾向を調べた (Table 2)。桂沢については、1993-2006 年のデータでは最良の季節調整モデルが定まらなかったため、1959-2006 年の長期傾向の解析で得た傾向線を用い、その線の 1993-2006 年の範囲に直線をあてはめ、その勾配を短期的傾向の上昇

Table 2 Trends of water temperature for each dam reservoir.

表 2 ダム湖の水温の傾向。

Dam Name	Prefecture	Analyzed period	Shallowest layer						Deepest layer						Rate of air-temperature rise ^{****} ℃ (10y) ⁻¹
			Average ℃	Rate of rise ℃ (10y) ⁻¹	Order			Average ℃	Rate of rise ℃ (10y) ⁻¹	Order					
					<i>k</i>	<i>l</i>	<i>m</i>			<i>k</i>	<i>l</i>	<i>m</i>			
Katsurazawa	Hokkaido	1970-2006*	10.2	+0.30	1	1	2	5.9	+0.01	1	1	1	+0.106		
		1993-2006**	10.6	+0.73	-	-	-	5.9	+0.02	-	-	-			
Kamafusa	Miyagi	1970-2006	13.5	-0.06	1	1	2	9.1	+1.19	1	2	2			
		1993-2006	13.3	+0.03	1	1	1	10.4	+0.03	1	1	1			
Ikari	Gunma	1970-2006*	12.5	-0.03	1	1	2	5.2	-0.04	1	1	2	+0.110		
		1993-2006	12.4	+0.35	1	1	0	5.0	+0.01	1	1	3			
Iwaya	Gifu	1993-2006	15.1	+0.02	1	1	1	8.7	-1.09	1	1	2			
Hitokura	Hyougo	1993-2006	17.9	+0.01	1	1	1	9.0	-0.00	1	1	4			
Haji	Hiroshima	1993-2006	16.5	+0.04	1	1	1	10.5	+2.36	1	1	2	+0.115		
Sameura	Kouchi	1993-2006	17.2	+0.77	1	1	0	7.1	+0.62	1	1	2			
Matsubara	Ooita	1993-2006	17.5	+0.01	1	1	1	14.1	-0.02	1	1	1			
Aha	Okinawa	1993-2006	23.4	+0.67	1	1	0	16.0	+0.48	1	1	0	+0.103		
Hyugami ^{***}	Fukuoka	1962-2008	-	+0.21	-	-	-	-	+0.88	-	-	-	0.115 (0.32) [#]		
Whole of Japan													+0.106		

* For Katsurazawa and Ikari Dam Reservoirs, rates and averages of temperature rise and average were determined using trend lines only from only 1970 to 2006 in Figs. 4 and 5.

** Rate and average of temperature of Katsurazawa Dam Reservoir from 1993 to 2006 were obtained using trend line from 1959 to 2006.

*** By Ikeura et al. (2008) with linear regression analysis.

**** Cited from Table 2.1.3 in "Extreme Weather Report 2005 (*Ijou Kishou Report 2005*)" (Japan Meteorological Agency, 2005).

At dam site of Hyugami Dam Reservoir (Ikeura et al., 2008).

Fig.6. Short-term trend lines (thin lines) and their regression lines (thick lines) of water temperatures at shallowest and deepest layers in each dam reservoir. Analyzed period ranges from 1993 to 2006. Values in brackets are rates of temperature rises ($^{\circ}\text{C} (10\text{y})^{-1}$) (Table 2).

図6 各ダム湖における最表層と最下層の水温傾向成分（細線）とその回帰直線（太線）。解析期間は1993-2006年。カッコ内の数値は水温上昇率（ $^{\circ}\text{C} (10\text{y})^{-1}$ ）（表2）。

率とした。また、Fig.6は、1993-2006年の最表層と最下層のダムの傾向線と、あてはめた一次回帰直線を示している。平均水温は、短期的傾向解析で得られた傾向線の1993-2006年の平均をとり計算した（ただし桂沢ダムだけは長期的傾向の解析で得られた傾向線の1993-2006年の結果を利用した）。

最表層の水温については、安波ダムで23.4 $^{\circ}\text{C}$ で、九州から東北に向かうにつれて温度が下がり、桂沢ダムで10.6 $^{\circ}\text{C}$ となっていて、緯度が高くなるにつれて平均水温が低下している。短期的傾向の水温上昇率をみると、すべてのダムで水温上昇率は正だった。また、最も上昇率が高かったダム湖は早明浦ダム（+0.77 $^{\circ}\text{C} (10\text{y})^{-1}$ ）で、次いで、桂沢ダム（+0.73 $^{\circ}\text{C} (10\text{y})^{-1}$ ）、安波（+0.67 $^{\circ}\text{C} (10\text{y})^{-1}$ ）、五十里（+0.35 $^{\circ}\text{C} (10\text{y})^{-1}$ ）の順となっていた。

最表層の水温上昇率がすべて正だったことは、近年、気温が上昇傾向にあること（気象庁、2005）を、反映しているためと考えられた。なお、桂沢、五十里、早明浦、安波ダムでは水温上昇率が、それぞれの地方の気温上昇率を上回った。この原因は本研究では明らかにはならず、今後の課題として残された。

一方、気温の上昇傾向や気象影響を比較的受けにくい最下層の水温の上昇率をみると、それが正のダム湖と負のダム湖とが存在した。

最下層で水温上昇率が正だったダム湖のうち、上昇率が最大だったダム湖は土師（+2.36 $^{\circ}\text{C} (10\text{y})^{-1}$ ）で、次いで早明浦（+0.62 $^{\circ}\text{C} (10\text{y})^{-1}$ ）、安波（+0.48 $^{\circ}\text{C} (10\text{y})^{-1}$ ）、

釜房 (+0.03 °C (10y)⁻¹), の順であった。また、地方ごとの気温上昇率を上回る水温上昇率を最下層で示したダム湖は、土師、早明浦、安波だった。

気温上昇率を上回る高い底層水温の上昇率の原因として、堆砂による湖底上昇や冬季鉛直混合の弱まりが指摘されている。池浦ら (2008) は、日向神ダムの底層水温が 1980 年代後半から 0.88 °C (10y)⁻¹ でありダム地点の気温上昇率 0.32 °C (10y)⁻¹ を超えていること、同ダム湖では堆砂が進んでおり、これが底層の冷水層を近年頻繁に消滅させ最下層水温の高い上昇率の原因になった可能性があることを指摘している。一方、速水・藤原 (1999) は、1964 年から 1997 年までの琵琶湖北湖深層水温の上昇率が 0.40 °C (10y)⁻¹ であり彦根の月平均気温の上昇率 0.30 °C (10y)⁻¹ を上回っていること、この原因が暖冬化による冬季鉛直混合の弱まりによることを数値実験に基づき示している。堆砂による湖底上昇や冬季鉛直混合の弱まりは、本研究で最下層水温の上昇率が高かったダム湖でも起こっている可能性があり、その定量的な評価は今後の検討課題である。

一方、Hondzo and Stefan (1991) は規模の異なる 3 湖沼で平常年と温暖年の水温の解析を行い、面積が広い 2 湖では表層・深層ともに秋まで高温が続いたが、面積がもっとも狭い湖では深層水温が低下したことを報告している。この原因は水温躍層が強固になることが主因と考えられたが、狭い湖が潜渚を持つことも関係していると思われた (新井, 2000)。

本研究で最下層水温が低下傾向を示した岩屋、一庫、松原のダム湖についても、水温躍層の経年変動と底層水温の低下との関係を、今後検討する必要がある。

まとめ

日本の地方ごとにダム湖 9 箇所を選び、最表層と最下層の水温時系列について、季節要因や短期変動の影響を避け、傾向成分だけを抽出できる時系列解析法 (季節調整法) を使い、ダム湖の最表層と最下層の水温の傾向成分を求めた。

1970 年代以前に作られ、長い水温記録を持つ三つのダム湖の傾向成分によると、1980 年代以降または 1990 年代以降と、それ以前の年代では、水温傾向が変わっていることがわかった。

1993 年から 2006 年の水温について、全国 9 つのダム湖を調べたところ、最表層水温には気温上昇が理由と思われる水温上昇が全てのダム湖で認められ、一部に、気

温上昇率を上回る水温上昇率を持つダム湖も存在した。最下層水温に関しては、上昇傾向と下降傾向のダム湖が存在した。最下層水温の結果が一樣でなかった理由は、堆砂による湖底上昇、冬季鉛直循環の弱まり、水温躍層の強まりなどに影響されているためと考えられた。それらを個々のダム湖ごとに検討し、影響を分離することが今後の検討課題である。

謝 辞

国交省図書館、国総研図書館、土木図書館、東京大学工学・情報理工学図書館からは、多目的ダム管理年報の閲覧等についてご支援をいただいた。産総研地質情報研究部門 安永恵三子氏には、水温年表の入力、異常値確認など、データ整備全般を行っていただいた。統計数理研究所 佐藤整尚准教授からは、TIMSAC for R package の時系列分解プログラム `decomp` について詳しくご説明をしていただいた。名古屋工業大学 長尾正志名誉教授からは 時系列解析全般についてご意見をいただいた。査読者ならびに担当編集委員からの多数のご意見により、論文が改善された。以上、記して感謝の意を表する。また、長年にわたりダムの水温年表の作成を続けて来られた各ダム管理者と観測担当者に敬意を表する。なお、本研究は、環境省公害防止等試験研究費の一環として実施されたほか、一部は科研費 (課題番号: 19560526) の助成を得て行われた。

文 献

- Akaike, H., T. Ozasaki, M. Ishiguro, Y. Ogata, G. Kitagawa, Y.-H. Tamura, E. Arahata, K. Katsura, and Y. Tamura (1985): TIMSAC-84 Part 1 & Part 2. Computer Science Monographs, No.22 & 23, The Institute of Statistical Mathematics, Tokyo.
- 新井 正 (2000): 地球温暖化と陸水水温. 陸水学雑誌, 61:25-34.
- Arpe, K., L. Bengtsson, G. Golitsyn, I. Mokhov, V. Semenov and P. Sporyshev (2000): Connection between Caspian sea level variability and ENSO. Geophysical Research Letters, 27:2693-2696.
- Charlton, M., M. Giddings, C. Holmes, W. Carmichael and J. Ridal (2001): Algal toxins and taste and odour. In Threats to sources of drinking water and aquatic ecosystems health in

- Canada. NWRI Scientific Assessment Report Series Report No.1., Environment Canada(ed.):5-8, National Water Resources Research Institute, Burlington.
- Hall, G.V., R.M. D'Souza and M.D. Kirk(2002): Foodborne disease in the new millennium: out of the frying pan and into the fire?. The Medical Journal of Australia, 177:614-618.
- 速水祐一・藤原建紀(1999): 琵琶湖深層水の温暖化、海の研究, 8:197-202.
- Hondzo, M. and H.G. Stefan(1991): Three case studies of lake temperature and stratification response to warmer climate. Water Resources Research, 27:1837-1846.
- 茨城県生活環境部環境対策課(2007): 平成18年度霞ヶ浦の水質概況について.
- 茨城県生活環境部環境対策課(2008): 平成19年度霞ヶ浦の水質概況について.
- 茨城県生活環境部環境対策課(2009): 平成20年度霞ヶ浦の水質概況について.
- 池浦太莊・一木謙次・竹田智和(2008): 日向神ダム湖水温の経年変動. 福岡県保健環境研究所年報, 35:83-89.
- IPCC(2007): Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson(Eds.), Cambridge University Press, Cambridge.
- 建設省河川局(1961-1997): 多目的ダム管理年報(第3回昭和34年-第36回平成4年).
- 気象庁(2005): 異常気象レポート2005 近年における世界の異常気象と気候変動. 気象業務支援センター, 東京.
- 国土交通省: ダム諸量データベース. <http://www2.river.go.jp/dam/index.html> (2009年11月2日)
- Kumagai, M., K. Ishikawa and J. Chunmeng(2002): Dynamics and biogeochemical significance of the physical environment in Lake Biwa. Lakes & Reservoirs: Research and Management, 7: 345-348.
- Lough, J.M.(2000): 1997-1998: Unprecedented thermal stress to coral reefs?. Geophysical Research Letters, 27:3901-3904.
- Moulton, R. and D. Cuthbert(2000): Cumulative impacts/risk assessment of water removal or loss from the Great Lakes – St. Lawrence River system. Canadian Water Resources Journal, 25:181-208.
- 日本ダム協会(2008): ダム年鑑2008. 日本ダム協会, 東京.
- 日本ダム協会: ダム便覧. <http://wwwsoc.nii.ac.jp/jdf/Dambinran/binran/TopIndex.html> (2009年11月2日)
- 日本河川協会: 日本河川図. http://www.japanriver.or.jp/river_law/map.htm (2009年11月2日)
- 岡本高弘・奥田一臣・小林博美・矢田稔・原良平・石川俊之・中村豊久(2007): 2006年度冬季(2007年1月~3月)の琵琶湖北湖の水質変動について. 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター試験研究報告書, 3:125-129.
- Robarts, R., M. Kumagai and C.H. Magadza(2005): Climate change impacts on lakes: technical report of the session 'Ecosystem Approach to Water Monitoring and Management' organized at the World Water Forum II in Kyoto. Climatic Change Ecosystem Approach to Water Monitoring and Management, UNEP Publication, Nairobi.
- 統計数理研究所: TIMSAC for R package. <http://cran.r-project.org/web/packages/timsac/index.html> (2009年11月2日)