

## 富士五湖における水質の周年変化と長期的変動

中村誠司<sup>1</sup>・上嶋崇嗣<sup>1</sup>・渡邊広樹<sup>2</sup>・芹澤(松山)和世<sup>1</sup>・芹澤如比古<sup>1</sup>

(2015年10月31日受付 2016年2月26日受理)

Seasonal Changes and Long-term Fluctuations of Water Quality  
in the Fuji Five Lakes, Central JapanSeiji Nakamura<sup>1</sup>, Takatsugu Uejima<sup>1</sup>, Hiroki Watanabe<sup>2</sup>,  
Kazuyo MATSUYAMA-SERISAWA<sup>1</sup>, Yukihiko SERISAWA<sup>1</sup>

## 要旨

富士五湖におけるセッキ透明度、懸濁物質、化学的酸素要求量(1974～2013年)、全窒素量(1979～2013年)、全リン量(1983～2013年)、クロロフィル $a$ 量(1991～2013年)を山梨県による公共用水域水質測定結果を使用して解析した。解析期間中の各月の平均値は本栖湖を除いていずれの湖でも多くの測定項目で月による有意差が認められ、透明度と懸濁物質の周年変化の傾向は水深の浅い山中湖・河口湖・精進湖の3湖、水深の深い西湖・本栖湖の2湖の中では類似していた。富士五湖の水質は一時やや悪化していたが、2002年以降は回復傾向にあることが明らかとなった。

## Abstract

In the Fuji Five Lakes, transparency (Secchi depth), suspended solids and COD from 1974 to 2013, total nitrogen from 1979 to 2013, total phosphate from 1983 to 2013, and chlorophyll  $a$  from 1991 to 2013 were analyzed based on the monthly data of water quality observation results in public waters by Yamanashi Prefecture. Monthly averages for the analyzed period were significantly different among months in most measurement items in each lake except Lake Motosu and the tendency of the seasonal change of transparency and suspended solids was similar among the 3 shallow lakes (Lake Yamanaka, Lake Kawaguchi and Lake Shoji) and between the two deep lakes (Lake Sai and Lake Motosu). Although water quality of the Fuji Five Lakes had been temporarily slightly worse, a recovery trend has been found since 2002.

キーワード：山岳湖沼、貧栄養湖、セッキ透明度、懸濁物質、化学的酸素要求量

Key Words : mountain lakes, oligotrophic lake, secchi disk depth, suspended solids, chemical oxygen demans

## I 緒言

富士五湖は湖岸線延長、最大水深、湖沼型が多様な5つの湖であり、標高832～982mと日本の湖沼においては高標高域に位置している(環境庁自然保護局1993)(Fig. 1)。富士山および富士五湖が位置するエリアは1936年2月に富士箱根国立公園に指定され、伊豆半島が編入されたことにより1955年3月

に富士箱根伊豆国立公園と名称変更された(環境省HP)。また、富士五湖は2011年9月に国の名勝に指定され(文化庁HP)、2013年6月に世界文化遺産「富士山—信仰の対象と芸術の源泉」の構成資産となった(文化庁2013)。しかし、国内外からの急激な観光客の流入や、それに伴った観光開発等による富士五湖の環境の悪化が懸念されており、湖の環境や生態系の保

1. 山梨大学教育人間科学部 2. 山梨大学大学院教育学研究科修士課程(現所属：韭崎西中学校)

Corresponding author: Yukihiko SERISAWA E-mail: yserisawa@yamanashi.ac.jp

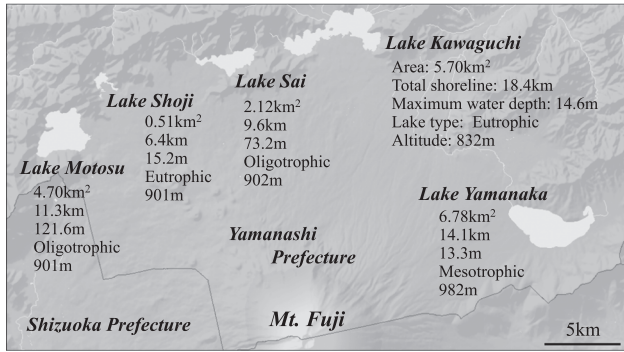


Fig. 1 Map showing the Fuji Five Lakes in Yamanashi Prefecture, at the northern foot of Mt. Fuji, central Japan. The information on the lakes from the Nature Conservation Bureau of the Environment Agency of Japan (1994) is also presented. The background map was accessed from the marine cadastre of the Japan Coast Guard.

全が緊急の重要課題となっている。

1970年12月に制定された水質汚濁防止法により公共用水域における水質の常時監視が義務付けられたことにより、富士五湖では山梨県による水質調査が1971年より開始され、月1回程度の定期的な測定が1972年度より現在まで継続して行われており、1973年度以降のデータについてはHP上で公開されている（山梨県 2015）。富士五湖の水質の長期的変化については有泉・吉澤（2002）が1972～2001年度まで、短期的変化については長谷川・吉沢（2011）が2002～2010年度までの富栄養化に関連する項目について上記データの解析を行っており、長期的な水質変化として河口湖と精進湖ではやや改善傾向、本栖湖、西湖、山中湖では悪化傾向、短期的な水質変化として本栖湖、西湖、河口湖では改善傾向、山中湖、精進湖ではほとんど変化していないことが明らかにされている。しかし、富士五湖の水質の短期的変化を連続して捉えた長期的傾向や長期データを用いた周年変化についてはほとんど解析されていない。著者らは2007年度より富士五湖の水草・大型藻類とその湖水環境について継続的に調査しており（芹澤（松山）ほか 2009a, b, 2010, 2015；芹澤ほか 2013, 2014, 2016）、水生植物相の周年変化や短期的・長期的変化を解析する上で、水質環境の周年変化や短期的・長期的変動を解明する必要が生じた。そこで富士五湖の湖心で測定された公共用水域水質測定結果の中で、水草・大型藻類の生育に特に関連が深いと考えられるセッキ透明度、懸濁物質量、化学的酸素要求量、全窒素量、全燐量、クロロフィルa量の周年変化と短期的変化の

連続としての長期的傾向を明らかにすることを本研究の目的とした。

## II 方法

山梨県が測定しHP上で公開している富士五湖の公共用水域水質測定結果（山梨県 2015）の中で、湖の富栄養化の指標としてよく用いられる6項目、即ちセッキ透明度（Tr）、懸濁物質量（SS）、化学的酸素要求量（COD）、全窒素量（TN）、全燐量（TP）、クロロフィルa量（Chl. a）の各湖の湖心におけるデータを使用し解析に供した。なお、有泉・吉澤（2002）では1972年度からのデータを使用しているが、本研究では山梨県のHP上で公開されている1973年度からのデータ（山梨県 2015）を使用し、生物の周年変化が一般に4月から翌年3月までの年度ではなく1月から12月までの年単位で示されていることが多いので、便宜上、年単位の解析を試みた。したがって、解析を行ったデータの測定期間はTr、SS、CODについては1974年1月～2013年12月までである。また、追加された測定項目であるTN、TP、Chl. aについてはデータが連続している期間、即ちTNは1979年1月以降、TPは1983年1月以降、Chl. aは1991年1月以降を解析する対象とした。なお、同じ月にデータが2つあった場合にはその平均値を使用した。また、欠測月があった場合には欠測のまま年平均値を算出するとその年の値が過大または過小評価されることが考えられるため、データの補完を試みた。欠測月データの補完方法は基本的に過去5年の同じ月のデータの平均値とし、過去5年で5個のデータがない場合には欠測月以降のデータも加えた同じ月の5個のデータの平均値とし、同じ月に欠測データが続く場合には便宜上補完したデータも使用して欠測月前後の同じ月の5個のデータの平均値とした。さらに、公共用水域水質測定結果のデータシート上で検出限界以下の値があった場合、年平均値を算出するためには上記の理由で何らかのデータを代入する必要があり、0を代入すると過小評価され、検出限界値を代入すると過大評価される可能性があるため、吉澤・中村（1995）や有泉・吉澤（2002）と同様に検出下限値の1/2の値（SSについては0.5 mg/L、TNについては25 μg/L、TPについては1.5 μg/L、Chl. aについては0.5 μg/L）を代入した。

解析はTr、SS、CODについては40年間、TNについては35年間、TPについては31年間、Chl. aに

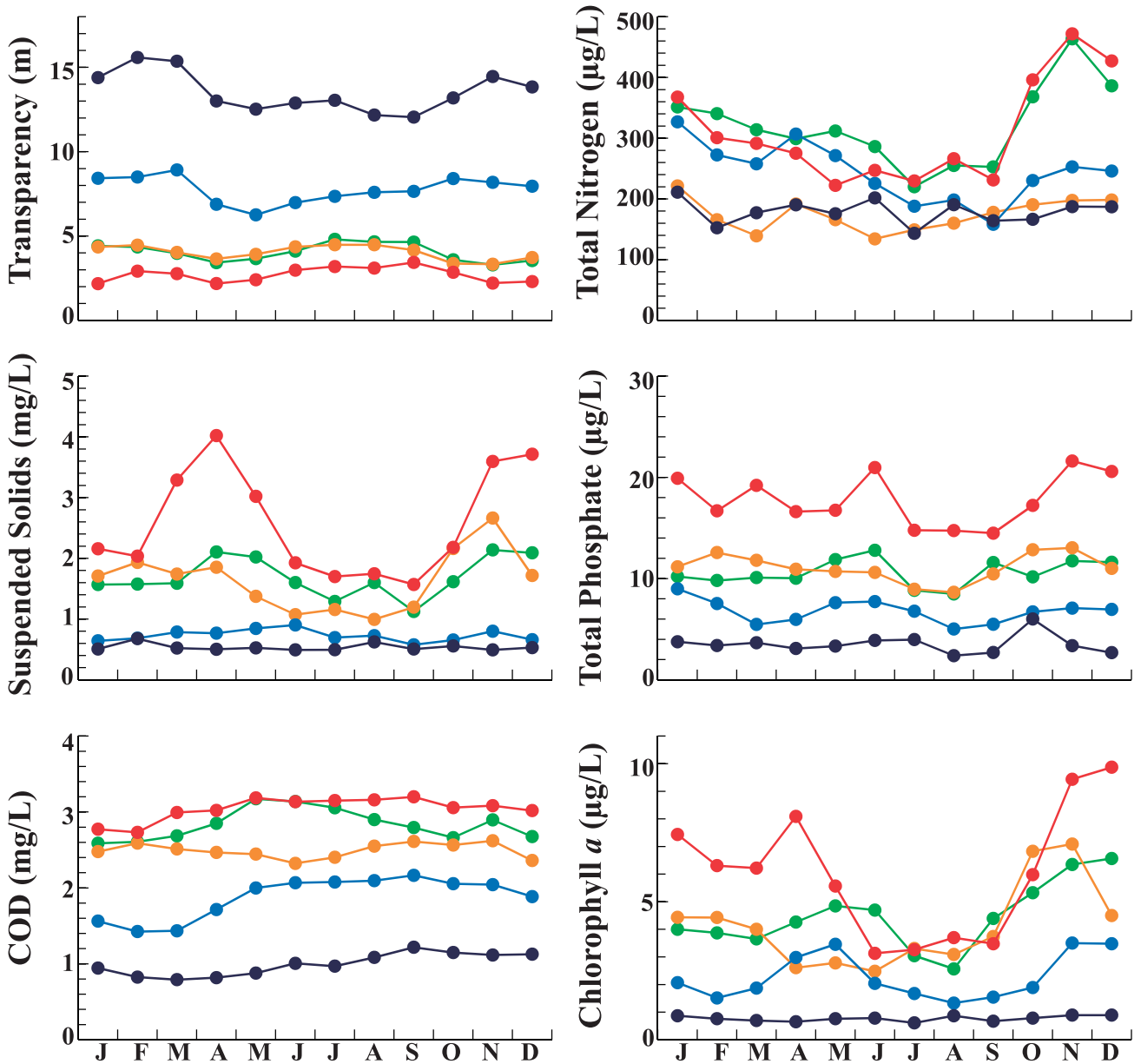


Fig. 2 Fluctuations of the monthly average water quality in the Fuji Five Lakes. Red, Lake Shoji; green, Lake Kawaguchi; orange, Lake Yamanaka; light blue, Lake Sai; deep blue, Lake Motosu. For Transparency (Secchi depth), concentration of Suspended Solids and COD, monthly averages were calculated based on data over a period of 40 years; for concentration of Total Nitrogen over 35 years; for concentration of Total Phosphate over 31 years; for concentration of Chlorophyll *a* over 23 years.

については23年間の月平均値、各年の年平均値、10年毎の期間平均値を算出し、マイクロソフト社製表計算ソフトであるエクセルの分析ツールを使用して月平均値については一元配置の分散分析 (ANOVA) を、各年の年平均値については短期的・長期的な一次回帰分析を行った。また、10年毎の期間平均値についてはR環境下で統計解析ソフトR コマンドを起動して一元配置の分散分析 (ANOVA) と Tukey の多重比較検定を行った。

### III 結果

#### 1 周年変化

富士五湖における Tr、SS、COD、TN、TP、Chl. *a* の解析期間中の月平均値を Fig. 2 に示した。Tr の月平均値は本栖湖で 12.0m (9月) ~ 15.6m (2月)、西湖で 6.3m (5月) ~ 8.9m (3月)、河口湖で 3.3m (11月) ~ 4.8m (7月)、山中湖で 3.3m (11月) ~ 4.5m (2, 7 ~ 8月)、精進湖で 2.2m (1, 4, 11月) ~ 3.4m (9月) であり、いずれの湖でも月による有意差が認められた ( $p < 0.05$ )。Tr は本栖湖では 1 ~ 3月と

11月に14.4m以上、西湖では1～3月と10～12月に8m以上と二山形に高い傾向が認められた。河口湖、山中湖、精進湖では変動は大きくないが、河口湖と山中湖では1～3月と6～9月に4.0m以上、精進湖では2～3月と6～10月に2.8m以上と晩冬と夏季にやや高い傾向が認められた。

SSの月平均値は精進湖で1.6mg/L(9月)～4.0mg/L(4月)、河口湖で1.1mg/L(9月)～2.1mg/L(4, 11～12月)、山中湖で1.0mg/L(8月)～2.7mg/L(11月)、西湖で0.6 mg/L(1, 9月)～0.9mg/L(6月)、本栖湖で0.5mg/L(1, 3～7, 9, 11～12月)～0.7mg/L(2月)であり、精進湖、河口湖、山中湖では月による有意差が認められたが( $p < 0.05$ )、本栖湖と西湖では月による有意差が認められなかった( $p = 0.19$ と $p = 0.33$ )。SSは精進湖では3～5月と11～12月に3.0mg/L以上と二山形に高い傾向が認められた。河口湖では4～5月と11～12月に、山中湖では2, 4月と10～11月に1.9mg/L以上とやや高い傾向が認められた。一方、検出限界またはそれに近い値であった本栖湖と西湖では周年を通して大きな変化は認められなかった。

CODの月平均値は精進湖で2.7mg/L(2月)～3.2mg/L(5, 7～9月)、河口湖で2.6mg/L(1～2月)～3.2mg/L(5月)、山中湖で2.3mg/L(6月)～2.6mg/L(2, 8～11月)、西湖で1.4mg/L(2～3月)～2.2mg/L(9月)、本栖湖で0.8mg/L(2～4月)～1.2mg/L(9月)であり、河口湖、西湖、本栖湖では月による有意差が認められたが( $p < 0.05$ )、精進湖と山中湖では月による有意差が認められなかった( $p = 0.07$ と $p = 0.09$ )。CODは精進湖では5～11月に、河口湖では5～7月に3.1 mg/L以上、山中湖では2月と8～11月に2.6 mg/L以上、西湖では5～11月に2.0 mg/L以上、本栖湖では6～12月に1.0 mg/L以上と値がやや高い傾向が認められた。

TNの月平均値は精進湖で222.2  $\mu\text{g/L}$ (5月)～471.7  $\mu\text{g/L}$ (11月)、河口湖で220.1  $\mu\text{g/L}$ (7月)～463.5  $\mu\text{g/L}$ (11月)、西湖で158.3  $\mu\text{g/L}$ (9月)～327.0  $\mu\text{g/L}$ (1月)、本栖湖で143.5  $\mu\text{g/L}$ (7月)～211.1  $\mu\text{g/L}$ (1月)、山中湖で134.2  $\mu\text{g/L}$ (6月)～221.3  $\mu\text{g/L}$ (1月)であり、河口湖、精進湖、西湖では月による有意差が認められたが( $p < 0.05$ )、山中湖と本栖湖では月による有意差が認められなかった( $p = 0.28$ と $p = 0.51$ )。TNは精進湖

と河口湖では1月と10～12月に350  $\mu\text{g/L}$ を、西湖では1月と4月に300  $\mu\text{g/L}$ を超え高い傾向が、本栖湖では1, 4, 6, 8月に、山中湖では1, 4, 10～12月に190  $\mu\text{g/L}$ を超えやや高い傾向が認められた。

TPの月平均値は精進湖で14.5  $\mu\text{g/L}$ (9月)～21.6  $\mu\text{g/L}$ (11月)、山中湖で8.6  $\mu\text{g/L}$ (8月)～13.0  $\mu\text{g/L}$ (11月)、河口湖で8.5  $\mu\text{g/L}$ (8月)～12.8  $\mu\text{g/L}$ (6月)、西湖で5.0  $\mu\text{g/L}$ (8月)～9.0  $\mu\text{g/L}$ (1月)、本栖湖で2.4  $\mu\text{g/L}$ (8月)～6.0  $\mu\text{g/L}$ (10月)であり、山中湖では月による有意差が認められたが( $p < 0.05$ )、精進湖、河口湖、西湖、本栖湖では月による有意差が認められなかった( $p = 0.32$ ,  $p = 0.45$ ,  $p = 0.54$ ,  $p = 0.70$ )。TPは精進湖では6月と11～12月に20  $\mu\text{g/L}$ を超え高い傾向が、山中湖では1～3月と10～12月に、河口湖では5～6月、9月、11～12月に11  $\mu\text{g/L}$ を超えやや高い傾向が、西湖では1～2, 5～6, 11～12月に7  $\mu\text{g/L}$ を超えわずかに高い傾向が認められた。一方、本栖湖では最大値を示した10月、3  $\mu\text{g/L}$ 未満の8～9, 12月を除くと、ほとんど変動が見られなかった。

Chl. *a*の月平均値は精進湖で3.1  $\mu\text{g/L}$ (6月)～9.9  $\mu\text{g/L}$ (12月)、河口湖で2.6  $\mu\text{g/L}$ (8月)～6.6  $\mu\text{g/L}$ (12月)、山中湖で2.5  $\mu\text{g/L}$ (6月)～7.1  $\mu\text{g/L}$ (11月)、西湖で1.3  $\mu\text{g/L}$ (8月)～3.5  $\mu\text{g/L}$ (5, 11～12月)、本栖湖で0.6  $\mu\text{g/L}$ (7月)～0.9  $\mu\text{g/L}$ (1, 8, 11～12月)であり、精進湖、河口湖、山中湖、西湖では月による有意差が認められたが( $p < 0.05$ )、本栖湖では月による有意差が認められなかった( $p = 0.71$ )。Chl. *a*は精進湖では11～12月に9  $\mu\text{g/L}$ を、河口湖では11～12月に、山中湖では10～11月に6  $\mu\text{g/L}$ を超え高い傾向が、西湖では4～5月と11～12月に3  $\mu\text{g/L}$ を超えやや高い傾向が認められた。一方、検出限界またはそれに近い値が多かった本栖湖では最大値を示した8月を除き、ほとんど変動が見られなかった。

## 2 長期的・短期的変化

富士五湖におけるTr, SS, COD, TN, TP, Chl. *a*の解析期間中の各年の年平均値を短期的または長期的な回帰直線とともにFig. 3に示した。Trの年平均値は本栖湖で10.8 m(1991年)～17.7 m(2008年)、西湖で5.2 m(2012年)～9.6 m(1981年)、河口湖で2.7 m(1980, 1982, 1997年)～5.7 m(2012年)、山中湖で3.4 m(1974, 1983年)～

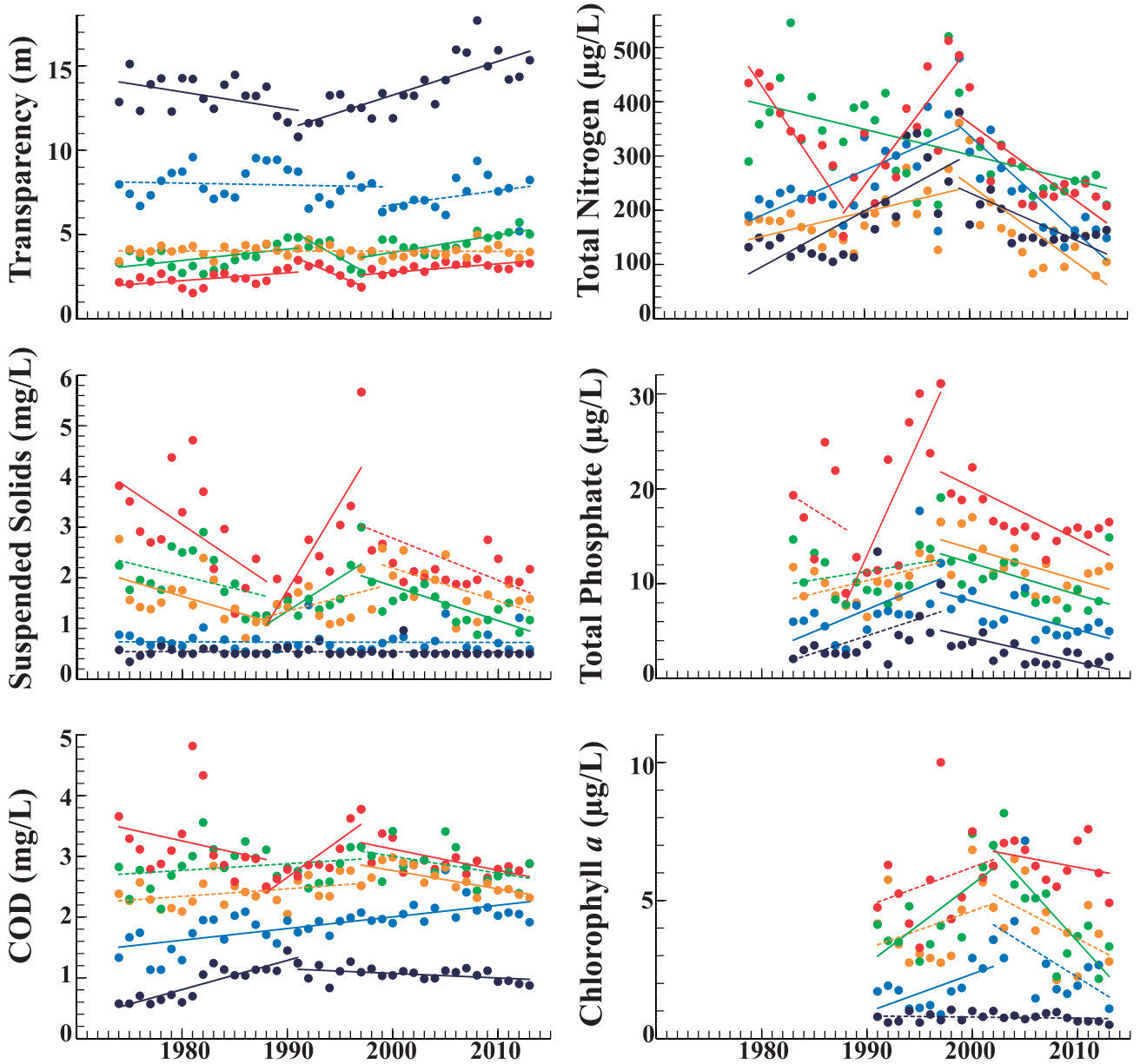


Fig. 3 Long-term fluctuations in annual average of Transparency (Secchi depth), concentration of Suspended Solids, COD, Total Nitrogen, Total Phosphate and Chlorophyll *a* in the Fuji Five Lakes. Linear regression lines are also presented. Solid lines are significant ( $p < 0.05$ ), and broken lines are not significant ( $p > 0.05$ ). Red, Lake Shoji; green, Lake Kawaguchi; orange, Lake Yamanaka; light blue, Lake Sai; deep blue, Lake Motosu.

5.0 m (2008年)、精進湖で1.5 m (1981年) ~ 3.6 m (2008年)であり、本栖湖、河口湖、精進湖では長期的に有意な上昇傾向を示したが ( $p < 0.05$ )、山中湖と西湖では長期的に有意な変動傾向を示さなかった (山中湖  $p = 0.88$ 、西湖  $p = 0.13$ )。短期的には本栖湖では1991年を境にそれ以前には有意な下降傾向、それ以降は有意な上昇傾向が認められ ( $p < 0.05$ )、河口湖と精進湖では1991年と1997年を境に有意な上昇、下降、上昇傾向が認められた ( $p < 0.05$ )。また、西湖では1973 ~ 1999年まではほ

ぼ横這い、1999 ~ 2013年にかけては有意ではないが上昇傾向が認められたが ( $p = 0.20$ )、山中湖では短期的な変化もほとんど認められず、ほぼ横這い状態であった。

SSの年平均値は精進湖で1.3mg/L (1985、1988年) ~ 5.7mg/L (1997年)、河口湖で0.9mg/L (2008、2012年) ~ 3.0mg/L (1997年)、山中湖で0.8mg/L (1986年) ~ 2.8mg/L (1974年)、西湖で0.5mg/L (1986、1988、1995 ~ 1996、2002、2006年) ~ 1.5mg/L (1992年)、本栖湖で0.3mg/L (1975年)

～1.0mg/L (2001年)であり、精進湖と河口湖では長期的に有意な下降傾向を示したが ( $p < 0.05$ )、山中湖、西湖、本栖湖では長期的に有意な変動傾向を示さなかった (山中湖  $p = 0.84$ 、西湖  $p = 0.92$ 、本栖湖  $p = 0.87$ )。西湖と本栖湖では検出限界値やそれに近い値が多く、短期的な変化も認められずほぼ横這い状態であったが、精進湖、河口湖、山中湖では短期的に1988年と1997年を境に下降 (精進湖と山中湖では有意  $p < 0.05$ 、河口湖では有意でない  $p = 0.11$ )、上昇 (精進湖と河口湖では有意  $p < 0.05$ 、山中湖では有意でない  $p = 0.61$ )、下降傾向 (河口湖では有意  $p < 0.05$ 、山中湖と精進湖では有意でない  $p = 0.05$  と  $p = 0.06$ ) が認められた。

CODの年平均値は精進湖で2.5mg/L (1988年)～4.8mg/L (1981年)、河口湖で2.1mg/L (1978年)～3.6mg/L (1982年)、山中湖で2.1mg/L (1978～1980、1990年)～3.0mg/L (2000年)、西湖で1.1mg/L (1977～1978年)～2.8mg/L (2005年)、本栖湖で0.6mg/L (1974～1975、1977～1978、1980年)～1.5mg/L (1990年)であり、精進湖では長期的に有意な下降傾向を、山中湖、西湖、本栖湖では長期的に有意な上昇傾向を示したが ( $p < 0.05$ )、河口湖では長期的に有意な変動傾向を示さなかった ( $p = 0.77$ )。短期的には精進湖では1988年と1997年を境に、有意な下降、上昇、下降傾向が認められた ( $p < 0.05$ )。河口湖と山中湖では1997年を境に有意でない上昇 (河口湖  $p = 0.26$ 、山中湖  $p = 0.05$ )、下降傾向 (河口湖  $p = 0.06$ 、山中湖では有意  $p < 0.05$ ) が認められた。本栖湖では1991年を境に有意な上昇、下降傾向が認められた ( $p < 0.05$ )。

TNの年平均値は河口湖で210.0  $\mu\text{g/L}$  (1997、2013年)～545.6  $\mu\text{g/L}$  (1983年)、精進湖で151.9  $\mu\text{g/L}$  (1988年)～512.5  $\mu\text{g/L}$  (1998年)、西湖で131.7  $\mu\text{g/L}$  (2009年)～480.8  $\mu\text{g/L}$  (1999年)、本栖湖で105.0  $\mu\text{g/L}$  (1987年)～380.8  $\mu\text{g/L}$  (1999年)、山中湖で79.2  $\mu\text{g/L}$  (2012年)～360.4  $\mu\text{g/L}$  (1999年)であり、河口湖と精進湖では長期的に有意な下降傾向を示したが ( $p < 0.05$ )、山中湖、西湖、本栖湖では長期的に有意な変動傾向を示さなかった (山中湖  $p = 0.16$ 、西湖  $p = 0.40$ 、本栖湖  $p = 0.35$ )。短期的には精進湖では1988年と1997年を境に、有意な下降、上昇、下降傾向が認められた ( $p < 0.05$ )。山中湖、西湖、本栖湖では1999年を境に有意な上昇、下降傾向が認

められた ( $p < 0.05$ )。

TPの年平均値は精進湖で9.0  $\mu\text{g/L}$  (1988年)～31.1  $\mu\text{g/L}$  (1997年)、山中湖で6.5  $\mu\text{g/L}$  (1990年)～17.0  $\mu\text{g/L}$  (2000年)、河口湖で6.1  $\mu\text{g/L}$  (2008年)～19.1  $\mu\text{g/L}$  (1997年)、西湖で3.1  $\mu\text{g/L}$  (1988年)～17.7  $\mu\text{g/L}$  (1995年)、本栖湖で1.5  $\mu\text{g/L}$  (1992、2005、2007～2008、2011年)～13.4  $\mu\text{g/L}$  (1991年)であり、五湖とも長期的に有意な変動傾向は示さなかった (精進湖  $p = 0.93$ 、山中湖  $p = 0.24$ 、河口湖  $p = 0.22$ 、西湖  $p = 0.65$ 、本栖湖  $p = 0.17$ )。短期的には精進湖を除いた四湖では1997年を境に上昇 (西湖では有意  $p < 0.05$ 、山中湖  $p = 0.07$ 、河口湖  $p = 0.36$ 、本栖湖  $p = 0.06$  では有意でない)、有意な下降傾向が認められた ( $p < 0.05$ )。一方、精進湖では1988年と1997年を境に、有意でない下降 ( $p = 0.67$ )、有意な上昇、下降傾向 ( $p < 0.05$ ) が認められた。

Chl. *a*の年平均値は精進湖で3.3  $\mu\text{g/L}$  (1995年)～10.0  $\mu\text{g/L}$  (1997年)、河口湖で2.2  $\mu\text{g/L}$  (2012年)～8.2  $\mu\text{g/L}$  (2003年)、山中湖で2.1  $\mu\text{g/L}$  (2008年)～6.8  $\mu\text{g/L}$  (2000年)、西湖で0.9  $\mu\text{g/L}$  (1997年)～7.2  $\mu\text{g/L}$  (2005年)、本栖湖で0.5  $\mu\text{g/L}$  (2013年)～1.0  $\mu\text{g/L}$  (1994、1998、2000、2002、2008年)であり、五湖とも長期的に有意な変動傾向は示さなかった (山中湖  $p = 0.81$ 、河口湖  $p = 0.65$ 、本栖湖  $p = 0.41$ 、西湖  $p = 0.27$ 、精進湖  $p = 0.23$ )。値が検出限界またはそれに近い値であった本栖湖を除いた四湖では、短期的には2002年を境に上昇 (河口湖と西湖では有意  $p < 0.05$ 、山中湖  $p = 0.26$  と精進湖  $p = 0.36$  では有意でない)、下降傾向 (河口湖では有意  $p < 0.05$ 、山中湖  $p = 0.08$ 、西湖  $p = 0.08$ 、精進湖  $p = 0.30$  では有意でない) が認められた。

### 3 10年毎の変化

富士五湖におけるTr、SS、COD、TN、TP、Chl. *a*の10年毎の期間平均値をFig. 4, 5に示した。6項目の10年毎の平均値は本栖湖ではSSとChl. *a*を除いた4項目で、西湖ではSSを除いた5項目で、山中湖と精進湖ではChl. *a*を除いた5項目で、河口湖ではCODを除いた5項目で期間による有意差が認められた (ANOVA、 $p < 0.05$ )。

本栖湖ではTrは2004-2013年の10年平均値が他の期間に比べ有意に高く (Tukey、 $p < 0.001$ )、CODは1974-1983年の10年平均値<2004-2013年<1984-1993年であり (Tukey、 $p < 0.05$ )、TN

富士五湖の水質の変化

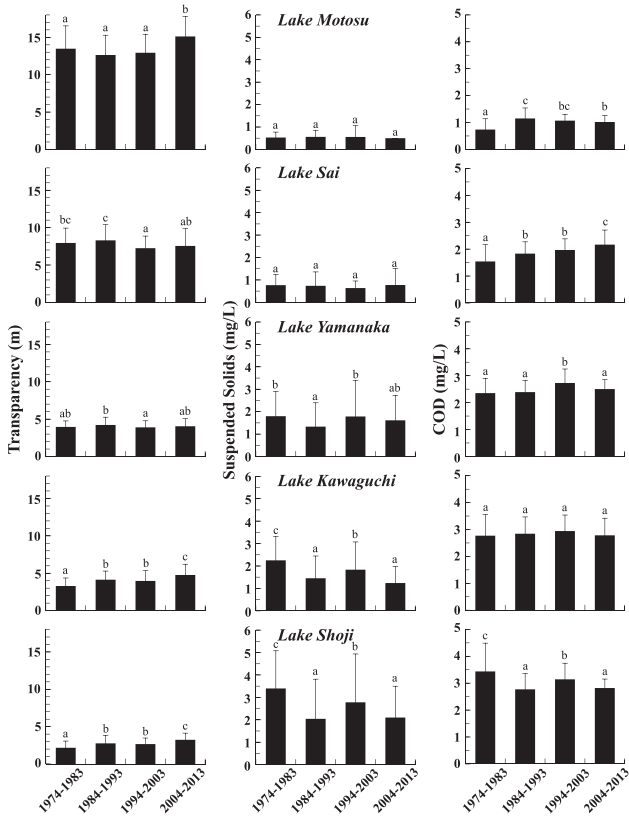


Fig. 4 The 10-year averages of water quality (Tr, SS, COD) in the Fuji Five Lakes. The left column, Transparency (Secchi depth); the center column, concentration of Suspended Solids; the right column, concentration of COD. The first row, Lake Motosu; the second row, Lake Sai; the third row, Lake Yamanaka; the fourth row, Lake Kawaguchi; the fifth row, Lake Shoji. Different letters indicate significant differences among the 10-year periods by Tukey's post hoc test. Error bars represent SD.

は1994-2003年の10年平均値が他の期間に比べ有意に高く (Tukey,  $p < 0.001$ )、TPは2004-2013年の10年平均値が他の期間に比べ有意に低かった (Tukey,  $p < 0.05$ )。

西湖ではTrは1984-1993年の10年平均値が1994-2003年に比べ有意に高く (Tukey,  $p < 0.001$ )、CODは1974-1983年の10年平均値 < 1984-1993年 = 1994-2003年 < 2004-2013年であり (Tukey,  $p < 0.05$ )、TNは2004-2013年の10年平均値 < 1984-1993年 < 1994-2003年であり (Tukey,  $p < 0.001$ )、TPは1994-2003年の10年平均値が他の期間に比べ有意に高く (Tukey,  $p < 0.01$ )、Chl. *a*は1994-2003年の10年平均値が2004-2013年に比べ有意に低かった (Tukey,  $p < 0.05$ )。

山中湖ではTrは1984-1993年の10年平均値

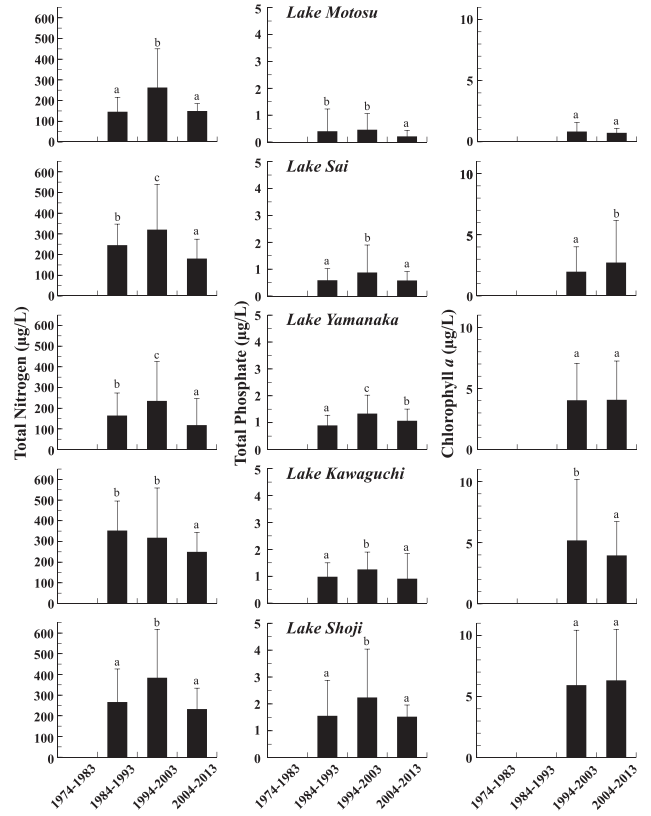


Fig. 5 The 10-year averages of water quality (TN, TP, Chl. *a*) in the Fuji Five Lakes. The left column, concentration of Total Nitrogen; the center column, concentration of Total Phosphate; the right column, concentration of Chlorophyll *a*. The first row, Lake Motosu; the second row, Lake Sai; the third row, Lake Yamanaka; the fourth row, Lake Kawaguchi; the fifth row, Lake Shoji. Different letters indicate significant differences among the 10-year periods by Tukey's post hoc test. Error bars represent SD.

が1994-2003年に比べ有意に高く (Tukey,  $p < 0.05$ )、SSは1984-1993年の10年平均値が1974-1983年や1994-2003年に比べ有意に低く (Tukey,  $p < 0.05$ )、CODは1994-2003年の10年平均値が他の期間に比べ有意に高く (Tukey,  $p < 0.01$ )、TNは2004-2013年の10年平均値 < 1984-1993年 < 1994-2003年であり (Tukey,  $p < 0.05$ )、TPは1984-1993年の10年平均値 < 2004-2013年 < 1994-2003年であった (Tukey,  $p < 0.05$ )。

河口湖ではTrは2004-2013年の10年平均値 > 1984-1993年 = 1994-2003年 > 1974-1983年であり (Tukey,  $p < 0.001$ )、SSは2004-2013年の10年平均値 = 1984-1993年 < 1994-2003年 < 1974-1983年であり (Tukey,  $p < 0.05$ )、TNは2004-2013年の10年平均値が他の期間に比べ有意

に低く (Tukey,  $p < 0.01$ )、TP は 1994-2003 年の 10 年平均値が他の期間に比べ高く (Tukey,  $p < 0.01$ )、Chl. *a* は 2004-2013 年の 10 年平均値が 1994-2003 年に比べ低かった (Tukey,  $p < 0.05$ )。

精進湖では Tr は 2004-2013 年の 10 年平均値  $> 1984-1993$  年 = 1994-2003 年  $> 1974-1983$  年であり (Tukey,  $p < 0.001$ )、SS は 1984-1993 年の 10 年平均値 = 2004-2013 年  $< 1994-2003$  年  $< 1974-1983$  年であり (Tukey,  $p < 0.05$ )、COD は 1984-1993 年の 10 年平均値 = 2004-2013 年  $< 1994-2003$  年  $< 1974-1983$  年であり (Tukey,  $p < 0.01$ )、TN と TP はいずれも 1994-2003 年の 10 年平均値が他の期間に比べ高かった (Tukey,  $p < 0.001$ )。

#### IV 考察

富士五湖の水質の周年変化について、Tr は河口湖、山中湖、精進湖では夏季と冬季にやや高く、西湖と本栖湖では 2 ~ 3 月と 10 ~ 11 月に極大値があり、SS は前者の三湖では 2 ~ 4 月と 11 ~ 12 月に極大値があり、後者の二湖では月による有意差が無く、三湖間及び二湖間で周年変化の傾向が類似していた (Fig. 2)。透明度の値を左右する湖底の泥の巻き上げは水深、風向、風速により決定されることから (天野ほか 2002)、上述の様に Tr と SS の周年変化の傾向が類似した要因の一つとして湖の水深の類似性 (三湖の最大水深は 13.3 ~ 15.2m であり、二湖の最大水深は 73.2 ~ 121.6m である) による影響が考えられた。また、吉澤・中村 (1995) は本研究と同じ測定値を用いた 1986 ~ 1992 年度までの 7 年間の富士五湖の水質の周年変化から本栖湖では COD が 1.2mg/L 前後で年間を通して変化が少なかったこと、精進湖では 12 月に Chl. *a* が最大となることを報告しており、それらの特徴は 1974 ~ 2013 年までの測定データを用いた本研究における結果でも確認できた。また、本研究の解析により富士五湖の各湖における長期的な Tr、SS、COD、TN、TP、Chl. *a* の月平均値と季節変化の傾向を示すことができた。芹澤ほか (2013) は山中湖の沈水植物の芽生えに 1 ~ 6 月の水位低下 (光量増大) がその年の現存量増大や種数増加を導いた可能性を示しており、今後、沈水植物の現存量や種数の調査を行った年のこの時期の水質項目の値を本研究から得られた長期的な平均値と比較することで、沈水植物の現存量や種数の動態とそれぞれの水質項目との関連性について

でも検討して行きたい。

有泉・吉澤 (2002) は本研究と同じ水質 6 項目の測定値を用いて 1972 ~ 2001 年度までの解析を行い、精進湖と河口湖では初期の状態から見るとやや改善傾向、山中湖、本栖湖、西湖は COD、Tr、TN、TP で水質悪化の兆候と報告している。本研究における有泉・吉澤 (2002) 以降の 12 年分のデータを加えた解析結果から、長期的に TP と Chl. *a* はいずれの湖でも有意な傾向を示さなかったが、精進湖では Tr が有意な上昇傾向を、SS、COD、TN が有意な下降傾向を示し、河口湖では COD が有意な傾向を示さなかったものの、Tr が有意な上昇傾向を、SS と TN が有意な下降傾向を示したことから、両湖では水質が長期的に改善傾向にあると推察された (Fig. 3)。一方、本栖湖では長期的に Tr は有意な上昇傾向を示したが、COD も有意な上昇傾向を示し、SS と TN は変動傾向を示さず、山中湖と西湖では COD は長期的に有意な上昇傾向を示したが、Tr、SS、TN は変動傾向を示さなかったことから、これら三湖では長期的には水質の悪化や改善の傾向は認められないことがわかった。

他方、本研究による回帰分析の結果を短期的に見ると、本栖湖の水質は Tr と COD が 1991 年、TP が 1997 年、TN が 1999 年を境に悪化傾向 (TP のみ有意ではない) から改善傾向へ転換していることが明らかとなった (Fig. 3)。同様に、西湖の水質は TP が 1997 年、Tr と TN が 1999 年、Chl. *a* が 2002 年を境に悪化傾向 (Tr は有意ではなく、1999 年まではほぼ横ばい) から改善傾向 (Tr と Chl. *a* は有意ではない) へ転換していることが判明した。一方、精進湖の水質は 1974 年から COD、TN、TP の 3 項目が 1988 年、SS が 1989 年、Tr が 1991 年までは改善傾向 (TP は有意ではない) を示したものの、それ以降 Tr、SS、COD、TP の 4 項目が 1997 年、TN が 1999 年、Chl. *a* が 2002 年まで悪化傾向 (Chl. *a* は有意ではない) を示し、それ以降は改善傾向 (SS は有意ではない) となり、5 項目が 2 回転換していることが明らかとなった。また、河口湖の水質は 1974 年から SS が 1988 年、Tr が 1991 年までは改善傾向 (SS は有意ではない) を示したものの、それ以降 Tr、SS、COD と TP が 1997 年、Chl. *a* が 2002 年まで悪化傾向 (COD と TP は有意ではない) を示し、その後再び改善傾向 (COD は有意ではない) となり、山中湖の水質は 1974 年から SS が 1988 年まで改善傾向を示したものの、そ



れ以降 COD と TP が 1997 年、SS と TN が 1999 年、Chl. *a* が 2002 年まで悪化傾向（TN 以外は有意ではない）を示し、それ以降は改善傾向（SS と Chl. *a* は有意ではない）となったことが判明した。

さらに、2004-2013 年の 10 年平均値は 1994-2003 年のそれに比べ、Tr については本栖湖、河口湖、精進湖で有意に高く、SS については河口湖と精進湖で、COD については山中湖と精進湖で、TN と TP については五湖全てで、Chl. *a* については河口湖で有意に低いことが明らかとなった（Fig. 4, 5）。したがって、富士五湖における最近の 10 年（2004～2013 年）の水質はいずれの湖でも回復傾向にあるものと推察された。富士五湖の各湖で 2003 年以降に確認された水草・大型藻類の種数（Kato et al. 2005；山中湖村 2006；富士北麓生態系調査会 2007；芹澤（松山）ほか 2009a, b, 2010, 2015；渡邊ほか 2012；芹澤ほか 2013, 2014, 2016；中村ほか 2015）は、それまでに各湖で確認されてきた種数を凌いでおり、これには個人の努力量や同定能力の違いに起因する部分も多少あるとは考えられるものの、湖の環境変化による部分も少なからず影響していると考えられる。河口湖では野生絶滅とされた車軸藻類のホシツリモが 2003 年に復活し（Kato et al. 2005）、その後分布域を広げて繁茂しており（渡邊ほか 2012）、山中湖ではかつて優占種であったエゾヤナギモ（延原ほか 1971）が、2000 年の調査で確認されず（吉澤ほか 2005）、2005 年以降再び確認される様になった（富士北麓生態系調査会 2007；芹澤ほか 2013, 2014；中村ほか 2015）こと等を考え合わせると、富士五湖では近年の水質の改善傾向に呼応して水生植物種が変化していると言えそうである。

## V 謝辞

本研究を行うにあたりデータ入力・解析にご協力いただいた山梨大学教育人間科学部水圏植物学（芹澤）研究室の卒研生、深代牧子、佐藤裕一、坂本倫美、白澤直敏の各氏に謝意を表す。

## VI 引用文献

天野邦彦, 安田佳哉, 鈴木宏幸 (2002) 浅い貯水池における表層底泥の巻き上げによる水質変化のモデリング. 水工学論文集 46: 1085-1090  
有泉和紀, 吉澤一家 (2002) 富士五湖の水質. 山梨衛公研年報 46: 32-41

文化庁 HP 「富士五湖 山中湖 河口湖 西湖 精進湖 本栖湖」 史跡名勝天然記念物 国指定文化財等データベース, <http://kunishitei.bunka.go.jp/bsys/maindetails.asp>

文化庁 (2013) 「富士山—信仰の対象と芸術の源泉」 世界遺産 (文化遺産) 一覧 文化財の紹介, [http://www.bunka.go.jp/seisaku/bunkazai/shokai/sekai\\_isan/ichiran/fujisan.html](http://www.bunka.go.jp/seisaku/bunkazai/shokai/sekai_isan/ichiran/fujisan.html)

富士北麓生態系調査会 (2007) 富士北麓水域の生態系の特徴と保全のための課題. 富士北麓水域 (富士五湖) における生態系多様性に関する調査報告書. 富士北麓生態系調査会, pp. 157-177

長谷川裕弥, 吉澤一家 (2011) 富士五湖の水質環境の変化. 山梨衛環研年報 55: 80-85

Kato S, Higuchi S, Kondo Y, Kitano S, Nozaki H, Tanaka J (2005) Rediscovery of the wild-extinct species *Nitellopsis obtuse* (Charales) in Lake Kawaguchi, Japan. *Journal of Japanese Botany* 80: 84-91

環境省 HP 富士箱根伊豆国立公園, <https://www.env.go.jp/park/fujihakone/index.html>

環境庁自然保護局 (1993) 第 4 回自然環境保全基礎調査 湖沼調査報告書 (全国版). 環境庁自然保護局, 東京, p. 141

中村誠司, 上嶋崇嗣, 芹澤 (松山) 和世, 芹澤如比古 (2015) 富士五湖に生育する水草・大型藻類の比較—2015 年—. 日本陸水学会甲信越支部会報 41: 39-40

延原肇, 岩田好宏, 生嶋功 (1971) 富士五湖の水草の分布. 富士山総合学術調査報告. 富士急行株式会社, pp. 559-577

芹澤 (松山) 和世, 安田泰輔, 中野隆志, 芹澤如比古 (2009a) 山中湖におけるフジマリモの再発見. 富士山研究 3: 13-18

芹澤 (松山) 和世, 吉澤一家, 高橋一孝, 中野隆志, 安田泰輔, 芹澤如比古 (2009b) 山中湖における水草・大型藻類—2007 年—. 水草研究会誌 92: 1-9

芹澤 (松山) 和世, 瀬子義幸, 小佐野親, 安田泰輔, 中野隆志, 早川雄一郎, 神谷充伸, 芹澤如比古 (2010) 富士北麓, 西湖のフジマリモとその生育地の光環境の現状. 富士山研究 4: 17-20

芹澤 (松山) 和世, 金原昂平, 米谷雅俊, 渡邊広樹, 白澤直敏, 田口由美, 神谷充伸, 芹澤如比古 (2015) 富士北麓, 精進湖と本栖湖における

- フジマリモの発見（予報）. 富士山研究 9: 1-6
- 芹澤如比古, 佐藤裕一, 深代牧子, 土屋佳奈, 芹澤（松山）和世（2013）富士北麓, 山中湖に生育する水生植物の種組成と現存量の周年変化－2008～2010－. 水草研究会誌 100: 61-71
- 芹澤如比古, 吉澤一家, 高橋一孝, 加藤将, 野崎久義, 芹澤（松山）和世（2014）富士北麓, 山中湖に生育する水生植物の水平・垂直分布－2008年－. 富士山研究 8: 7-14
- 芹澤如比古, 上嶋崇嗣, 中村誠司, 渡邊広樹, 白澤直敏, 芹澤（松山）和世（2016）富士北麓, 西湖と精進湖の水草・大型藻類と光環境. 山梨大教育人間科学部紀要 17: 201-210
- 渡邊広樹, 加藤将, 芹澤（松山）和世, 芹澤如比古（2012）富士北麓, 河口湖の車軸藻類と環境. 日本陸水学会甲信越支部会報 38: 67-68
- 山中湖村（2006）山中湖の水生植物と湖畔沿いの植物. 山中湖村の自然誌. 山中湖村, 山梨, pp. 42-47
- 山梨県（2015）公共用水域水質測定結果 公共用水域及び地下水の水質測定結果（常時監視）水質監視及び保全対策 水質・土壌・地盤 環境保全・資源・公害 まちづくり・環境, [www.pref.yamanashi.jp/taiki-sui/sokutei.html](http://www.pref.yamanashi.jp/taiki-sui/sokutei.html)
- 吉澤一家, 中村文雄（1995）山梨県内水源池及び湖沼の水質特性と富栄養度. 日本水処理生物学会誌 31: 175-184
- 吉澤一家, 有泉和紀, 永坂正夫（2005）山中湖の最近の水草. 日本陸水学会甲信越支部会報 31: 81-89