

甲府市千代田湖（丸山貯水池）の水生植物とその生育環境

Aquatic plants and their growth environment in Lake Chiyoda (Maruyama Reservoir),
Kofu City, Yamanashi Prefecture, central Japan

芹澤 如比古 原野 晃一 東 祐之介

Yukihiko SERISAWA Koichi HARANO Yunosuke HIGASHI

近山 卓也 松井 悠一郎 芹澤（松山）和世

Takuya CHIKAYAMA Yuichiro MATSUI Kazuyo MATSUYAMA-SERISAWA

甲府市千代田湖（丸山貯水池）の水生植物とその生育環境

Aquatic plants and their growth environment in Lake Chiyoda (Maruyama Reservoir),
Kofu City, Yamanashi Prefecture, central Japan

芹澤 如比古¹ 原野 晃一¹ 東 祐之介¹
Yukihiko SERISAWA Koichi HARANO Yunosuke HIGASHI

近山 卓也¹ 松井 悠一郎² 芹澤（松山）和世³
Takuya CHIKAYAMA Yuichiro MATSUI Kazuyo MATSUYAMA-SERISAWA

Abstract : The aquatic flora and water environment were investigated in Lake Chiyoda, Kofu City, Yamanashi Prefecture in 2014 and from 2017 to 2019. The total number of species identified is 28, of which 13 belong to aquatic plants and 15 belong to macroalgae. In the present confirmed species, two species were listed on the 2017 Red List of Ministry of the Environment, Japan; *Najas minor* and *Chara braunii*. At Lake Chiyoda, the air temperature was 5.1 to 33 °C, and the surface water temperature was 4.2 to 32.5 °C. The mean values were 2.8 m for Secchi's transparency, 0.795 for extinction coefficient, and in surface water, 8.29 for pH, 113.79 $\mu\text{S}/\text{cm}$ for electrical conductivity and 2.12 NTU for turbidity. The distribution limit depth of aquatic plants with a relative light intensity of 7% was estimated to be 3-4 m, and the average light intensity was 109.7 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ at 3 m depth and 64.80 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ at 4 m depth. From the DO and water temperature according to water depth, it was inferred that the circulation period of the lake water started from late autumn when the surface water temperature decreased to around 18 °C, and the stratification period started from the early spring when the surface water temperature increased to around 10 °C.

要約 : 山梨県甲府市千代田湖に生育する水生植物とその生育環境を2014年と2017~2019年に調査し、水草13種、大型藻15種の計28種を確認した。このうち、環境省レッドリスト2017に記載されている種はトリゲモとシャジクモの2種であった。千代田湖の気温は5.1~33 °C、表層の水温は4.2~32.5 °Cであった。また、平均値はセッキ透明度が2.8m、消散係数が0.795、表層水のpHが8.29、電気伝導率が113.79 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、濁度が2.12 NTUであった。相対光量が7%となる水生植物の分布限界水深は3~4 mであると推定され、平均光量は水深3 mで109.7 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、水深4 mで64.80 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ であった。水深別のDOと水温から、湖水の循環期は表層水が18 °C前後まで下降する晩秋から、成層期は表層水が10 °C前後にまで上昇する初春から始まると推察された。

I 緒言

日本にはこれまで水草が約270種、車軸藻類が約80種生育していることが報告されているが、水草種の約40%、車軸藻類の約80%が環境省のレッドリストに記載されており、多くの種が絶滅の危機に瀕している（角野 2014, Kato et al. 2014）。これらの絶滅危惧種の保全と、水生植物の多様性を保持していくことが、重要な課題となっているが、そのためには水生植物の現時点における詳細な分布状況と生育状況を把握し、それらの生育環境を明らかにすることが重要である。

¹ 教育人間科学部 卒業生

² 教育学部 科学教育コース4年

³ 教育学域 協力研究員

山梨県内では富士五湖や水田域、四尾連湖においては、水草・大型藻類とその生育環境についての研究調査や既往資料解析が当研究室等により行われているが (e.g. 芹澤 (松山) ら 2009a, b, 2010, 2015, 芹澤ら 2013, 2014, 2016a, b, 2017, 2019a, b, 中村ら 2016, 2017, 2018a, b, 長谷川・吉澤 2017, 上嶋ら 2018, 渡邊ら 2018, 2019a, b, 原野ら 2019), その他の湖沼ではほとんど調査が行われていないのが現状である。

千代田湖 (丸山貯水池) は甲府市の北西部に位置する農業灌漑用人工湖であり、湖面標高は550 m, 貯水面積は0.25 km², 有効貯水量は1,450,000 m³であり、下流域の甲府盆地に広がる水田約1,600 haへと農業用水を供給している (Wikipedia 2019)。したがって、本湖に生育する水草・大型藻類やその湖水環境は下流域の植生や水質に少なからず影響を与えていると考えられる。

そこで、本研究では千代田湖に生育する水草・大型藻類の種組成を明らかにするとともに、それらを取り巻く湖水環境、特に光環境を詳らかにすることを目的とした。

II 方法

調査は山梨県甲府市北西部に位置する千代田湖で2014年に5回 (5月23日, 7月25日, 9月26日, 10月29日, 11月27日), 2017~2019年に23回 (2017年7月4日, 11日, 18日, 25日, 11月29日, 12月21日, 2018年1月20日, 2月19日, 4月1日, 5月19日, 6月21日, 7月24日, 8月19日, 9月28日, 10月23日, 11月29日, 12月26日, 2019年1月21日, 2月21日, 3月28日, 9月12日, 13日, 14日) の計28回行った。なお, 2017年7月は4日間で, 2019年9月は3日間で湖内全体の水生植物調査のみを, 2019年1~3月は環境調査のみを行った。

水生植物の調査は湖岸の形状を考慮して概ね等間隔となるように10定点を設定し (Fig. 1), 各定点で水生植物の目視確認と生態写真の撮影を行うとともに, 20 mロープを付けた自作の採集器を湖岸に対して垂直になるように湖内に投げ入れ, 採集器が着底後に湖底を引きずる方法で水草・大型藻類の採集を行った (Fig. 2)。また, 浅い定点では胴長を着用した徒手採集も併せて行った。採集した水生植物はクーラーボックスに入れて保冷して研究室に持ち帰り, 種を同定した後, 押し葉標本またはプレパラート標本を作製し, 標本写真を撮影した。標本は山梨大学教育学部水圏植物学研究室の標本庫に収蔵, 保管した。

環境要因の調査は千代田湖の湖心に1定点を設定し (Fig. 1), 小型船舶を使用して行った。測定項目はセッキー透明度板を用いた透明度, 水銀棒温度計を用いた湖上の気温と, 表層水 (水深10 cm程度) の水温 (ベッテンコーヘル水温計で測定), pH (水素イオン指数) (Horiba社製 pHメーター B-212型で測定), 電気伝導率 (EC) (YSI社製 ECメーター model-63で測定), 濁度 (Eutech社製濁度計 TN-100で

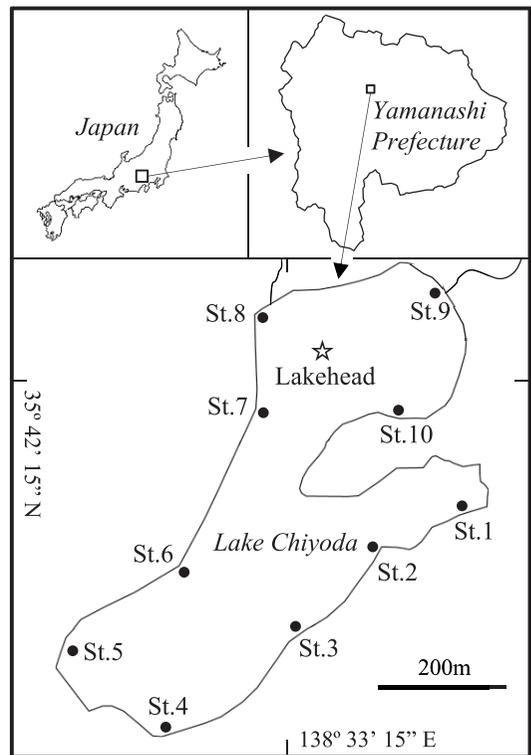


Fig. 1. Map showing the study site in Lake Chiyoda, Kofu City, Yamanashi Prefecture, central Japan. Solid circle, vegetation survey stations; asterisk, environmental survey station.

測定), 溶存酸素濃度 (DO) (HACH社製 DOメーター LDO101 プローブで測定) と, 水深別の光量, 水温, DOである。光量については光量子計 (Li-Cor社製, Li-250) 2組を用いて一方のセンサーを水中用アンカーに固定して水中に沈め, 他方を小型船舶上で空中用とし, それぞれのセンサーを上方に向けて, 水中と空中で同時に光量子束密度の測定を行い, 相対光量 (水中の光量/水面上の光量×100) を求めた。測定水深は水深10 cmおよび水深1~10 mまで1 m毎としたが, 水位の関係で10 mまで測定できないことや, 湖底近くで泥が巻き上げられて測定できないことがあったため, データの解析は水深9 mまでで行った。また, 測定した水深別の相対光量の値から水深—相対光量曲線を求め, 次式により指数回帰して消散係数を算出した。

$$I_d = I_0 \exp^{-kd} \quad (I_d: \text{水深 } d \text{ m の相対光量, } I_0: \text{水深 } 0 \text{ m の相対光量, } k: \text{消散係数})$$

消散係数は光がどの程度深くまで届くかを示す値であり, k で示される消散係数の値が高いほど水中に光を吸収する物質が多く, 深くまで光が届きにくいことになる。なお, 光が空気中から水中に入射する時, 水面で約7%が反射することが報告されている (Campbell & Aarup 1989) ので, 本研究では I_0 を93として計算した。水深別の水温とDOは, 上述のDOメーターを用いて水深10 cmおよび水深1~10 mまで1 m毎に測定した。水深別の光量など環境の測定は日が高い正午頃に行った。なお, 2017年11月は測器の不調により水深別の光量測定が欠測となった。

III 結果と考察

本研究により千代田湖からヨシ, キショウブ, セリ, マツバイ, スイレン属 sp., アオウキクサ, ウキクサ, ホテイアオイ, コカナダモ, トリゲモ, エビモ, ホソバミズヒキモ, ササバモの水草13種と, シャジクモ, イトマキミドロ属 sp., ヒザオリ属 sp., アオミドロ属 spp., ホシミドロ属 sp., アファノケーテ属 sp., アミミドロ属 sp., ブルボケーテ属 sp., サヤミドロ属 spp., ネダシグサ属 sp., アオミソウ属 sp., フタマタシオグサ, ミクロスボラ属 sp., ヒビミドロ属 sp., シゾメリス属 sp. の大型藻類15種の計28種を確認することができた (Tables 1, 2, Figs. 3-5)。このうち, 環境省レッドリスト (環境省2017) に記載されている種はトリゲモとシャジクモの2種であった。

植生調査の期間中, 水草ではヨシとキショウブが, 大型藻類ではアオミドロ属 spp. が周年確認された (Table 1)。確認された種数は水草では春季から秋季にかけて多い傾向が見られたが, 大型藻類では調査日により変動が大きかった。本研究で確認された大型藻類は藻体が微細な種が多く, 顕微鏡を用



Fig. 2. Photographs showing the collection apparatus and collection scenery in Lake Chiyoda, Kofu City.

Table 1. Aquatic plants and macroalgae confirmed in Lake Chiyoda, Kofu City during the vegetation survey period.

Japanese name	Scientific name	2014				2017			2018				2019								
		May	July	Sep.	Oct.	Nov.	July	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Sep.
ヨシ	<i>Phragmites australis</i>	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
キシヨウブ	<i>Iris pseudacorus</i>	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
セリ	<i>Oenanthe javanica</i>						○														○
マツバイ	<i>Eleocharis acicularis</i> var. <i>longiseta</i>						○	○	○												
スイレン属sp.	<i>Nymphaea</i> sp.	○	○	○	○		○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
アオウキクサ	<i>Lemna aoukikusa</i> subsp. <i>aoukikusa</i>																				○
ウキクサ	<i>Spirodela polyrhiza</i>																				○
ホテイアオイ	<i>Eichhornia crassipes</i>																				○
コカナダモ	<i>Elodea nuttallii</i>	○	○	○	○	○	○	○	○												○
トリゲモ	<i>Najas minor</i>						○	○													○
エビモ	<i>Potamogeton crispus</i>	○	○	○	○	○	○														○
ホソバミズヒキモ	<i>Potamogeton octandrus</i> var. <i>octandrus</i>						○														○
ササハモ	<i>Potamogeton wrightii</i>	○	○	○	○	○	○	○	○												○
シャジクモ	<i>Chara braunii</i>	○	○	○	○	○	○	○	○												○
イトマキミドロ属sp.	<i>Spondylosium</i> sp.																				○
ヒザオリ属sp.	<i>Mougeotia</i> sp.						○														○
アオミドロ属spp.	<i>Spirogyra</i> spp.	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
ホシミドロ属sp.	<i>Zygnema</i> sp.	○	○	○	○	○	○	○													○
アフアナケーテ属sp.	<i>Aphanochaete</i> sp.						○		○	○											○
アミミドロ属sp.	<i>Hydrodictyon</i> sp.																				○
ブルボケーテ属sp.	<i>Bulbochaete</i> sp.						○														○
サヤミドロ属spp.	<i>Oedogonium</i> spp.						○		○	○											○
ネダシグサ属sp.	<i>Rhizoclonium</i> sp.						○														○
アオミソウ属sp.	<i>Pithophora</i> sp.						○	○													○
フタマタシオグサ	<i>Cladophora fracta</i>	○					○														○
ミクロスポラ属sp.	<i>Microspora</i> sp.						○	○	○												○
ヒビミドロ属sp.	<i>Ulothrix</i> sp.						○		○												○
シノメリス属sp.	<i>Schizomeris</i> sp.						○		○												○
Number of species in aquatic plants		5	7	8	8	5	10	6	6	3	3	7	8	7	9	8	8	7	6	7	11
Number of species in macroalgae		4	3	3	3	2	12	3	9	4	2	1	1	2	4	4	3	1	2	4	9
Total number of species		9	10	11	11	7	22	9	15	7	5	8	9	9	13	12	11	8	8	11	20

Table 2. Aquatic plants and macroalgae confirmed at the each survey station in Lake Chiyoda, Kofu City during the vegetation survey period.

Life-form or Family	Japanese name	Scientific name	Survey Station	St.1	St.2	St.3	St.4	St.5	St.6	St.7	St.8	St.9	St.10	All St.
Emergent plant	ヨシ	<i>Phragmites australis</i>		○									○	○
	キシヨウブ	<i>Iris pseudacorus</i>		○									○	○
	セリ	<i>Oenanthe javanica</i>										○		○
	マツバイ	<i>Eleocharis acicularis</i> var. <i>longiseta</i>		○	○	○	○							○
Floating leaved plant	スイレン属sp.	<i>Nymphaea</i> sp.		○				○						○
Floating plant	アオウキクサ	<i>Lemna aoukikusa</i> subsp. <i>aoukikusa</i>		○				○	○				○	○
	ウキクサ	<i>Spirodela polyrhiza</i>		○	○			○	○				○	○
	ホテイアオイ	<i>Eichhornia crassipes</i>		○										○
Submerged plant	コカナダモ	<i>Elodea nuttallii</i>		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	トリゲモ	<i>Najas minor</i>		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	エビモ	<i>Potamogeton crispus</i>		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	ホソバミズヒキモ	<i>Potamogeton octandrus</i> var. <i>octandrus</i>		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	ササハモ	<i>Potamogeton wrightii</i>		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Characeae	シャジクモ	<i>Chara braunii</i>		○	○		○		○				○
Desmidiaceae	イトマキミドロ属sp.	<i>Spondylosium</i> sp.		○		○		○					○	
Zygnemataceae	ヒザオリ属sp.	<i>Mougeotia</i> sp.		○	○		○					○	○	
Zygnemataceae	アオミドロ属spp.	<i>Spirogyra</i> spp.		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
Zygnemataceae	ホシミドロ属sp.	<i>Zygnema</i> sp.		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
Chroococcaceae	アフアナケーテ属sp.	<i>Aphanochaete</i> sp.			○		○						○	
Hydrodictyceae	アミミドロ属sp.	<i>Hydrodictyon</i> sp.											○	
Oedogoniaceae	ブルボケーテ属sp.	<i>Bulbochaete</i> sp.				○							○	
Oedogoniaceae	サヤミドロ属spp.	<i>Oedogonium</i> spp.		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
Cladophoraceae	ネダシグサ属sp.	<i>Rhizoclonium</i> sp.		○		○						○	○	
Cladophoraceae	アオミソウ属sp.	<i>Pithophora</i> sp.		○									○	
Cladophoraceae	フタマタシオグサ	<i>Cladophora fracta</i>		○		○	○					○	○	
Microsporaceae	ミクロスポラ属sp.	<i>Microspora</i> sp.		○	○	○		○					○	
Ulotrichaceae	ヒビミドロ属sp.	<i>Ulothrix</i> sp.		○	○	○	○				○		○	
Schizomeridaceae	シノメリス属sp.	<i>Schizomeris</i> sp.		○									○	
Number of species in aquatic plants				12	6	8	6	8	6	4	4	7	9	13
Number of species in macroalgae				12	7	10	9	4	5	4	4	7	5	15
Total number of species				24	13	18	15	12	11	8	8	14	14	28

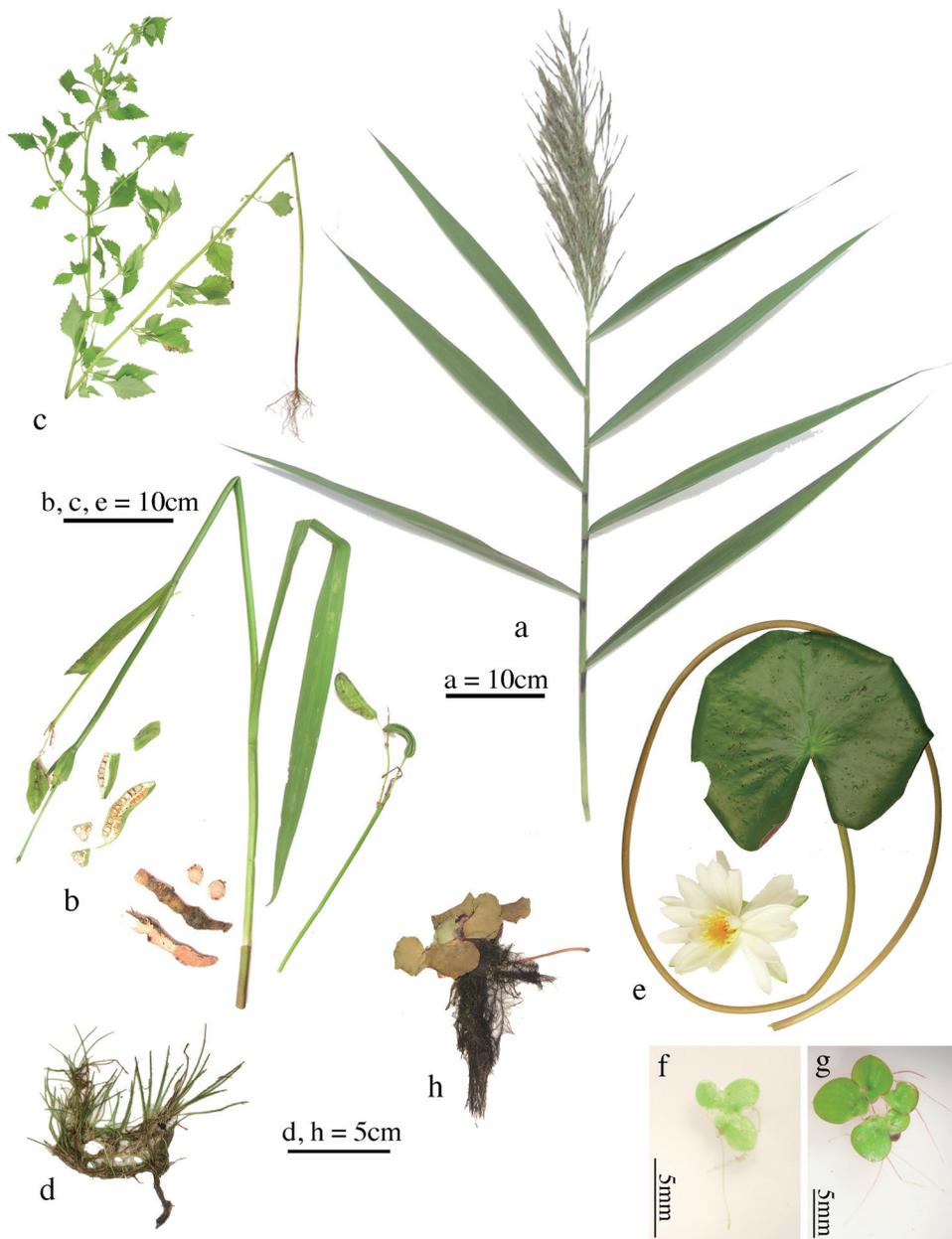


Fig. 3. Photographs showing the specimens of emergent plant, floating leaved plant, and floating plant. a, *Phragmites australis*; b, *Iris pseudacorus*; c, *Oenanthe javanica*; d, *Eleocharis acicularis* var. *longiseta*; e, *Nymphaea* sp.; f, *Lemna aoukikusa* subsp. *aoukikusa*; g, *Spirodela polyrhiza*; h, *Eichhornia crassipes*.

いないと生育の有無の確認も難しいことから、湖内に生育する種全てを毎回把握することができていなかった可能性がある。2014年、2017～2018年、2019年の確認種数は水草ではそれぞれ8、10、11種、大型藻類では4、14、9種であり、千代田湖に生育している水生植物の種数は2017年以降増加していることが判明した。

湖内における水生植物の分布状況については、水草ではコカナダモ、トリゲモ、ホソバミズヒキモが全定点で確認され (Table 2)、これら3種は千代田湖の広い範囲に分布していることが判明した。こ



Fig. 4. Photographs showing the specimens of submerged plant. a, *Elodea nuttallii*; b, *Najas minor*; c, *Potamogeton crispus*; d, *Potamogeton octandrus* var. *octandrus*; e, *Potamogeton wrightii*.

の内、トリゲモは2014年の調査では確認されておらず、2017年7月以降に確認されるようになり、2018年12月まではSt. 1~4でのみ確認されていたが、2019年9月の調査では全定点での生育が確認され、St. 1~5では生育量も多かった。したがって、トリゲモは最近になって分布域と生育量を拡大させているものと推察された。また、2019年9月の調査ではそれまでに確認されていないアオウキクサとウキクサを6定点で確認した。この内、ウキクサについては2008年に行った当研究室の予備的な調査でも確認されており、両種とも非常に小型であるため、それまでの調査では見落とされていた可能性がある。

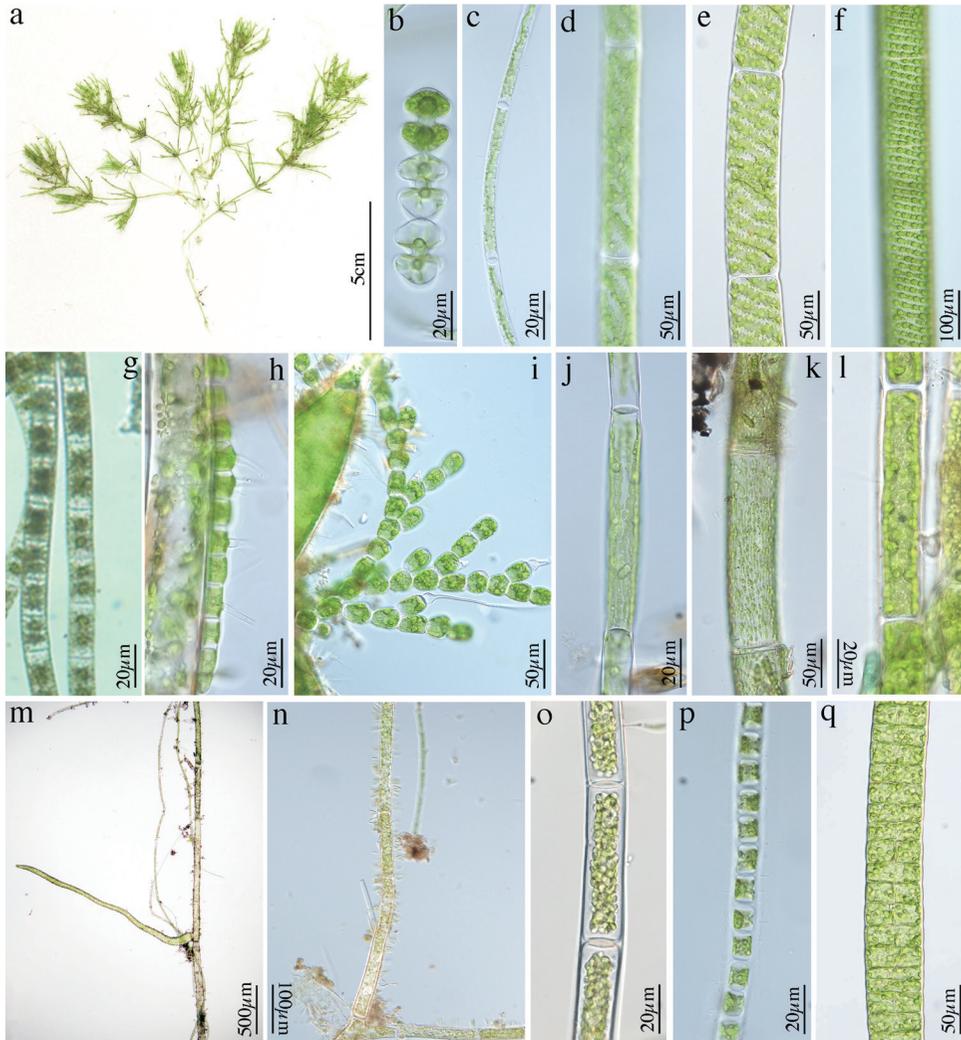


Fig. 5. Photographs showing the specimens of macroalgae. a, *Chara braunii*; b, *Spondylosium* sp.; c, *Mougeotia* sp.; d-f, *Spirogyra* sp.; g, *Zygnema* sp.; h, *Aphanochaete* sp.; i, *Bulbochaete* sp.; j-k, *Oedogonium* sp.; l, *Rhizoclonium* sp.; m, *Pithophora* sp.; n, *Cladophora fracta*; o, *Microspora* sp.; p, *Ulothrix* sp.; q, *Schizomeris* sp.

水草の確認種数はSt. 1が12種と最も多く、次いでSt. 10が9種、St. 3, 5が8種、St. 9が7種、St. 2, 4, 6が6種、St. 7, 8が4種であった。

各定点の環境は、湖東岸北部に張り出した半島の北側のSt. 10と南側のSt. 1では岸辺に浅い泥帯が認められ、湖底は砂泥から泥であった。湖東岸のSt. 2では急深であり湖底に砂礫や巨礫が認められた。湖東岸南部のSt. 3, 4ではなだらかに深くなり湖底は砂泥であった。湖西岸のSt. 5~8では湖岸がコンクリートで整備されており湖底は砂泥であった。また、St. 5, 8では湖岸に積み石が認められた。湖北岸のSt. 9では帯那川から流入する水の流れが常時生じており湖底は砂泥であった。本研究において千代田湖で確認された水草の内、抽水植物のヨシとキショウブはSt. 1, 10、マツバイはSt. 1~4、セリはSt. 9、浮葉植物のスイレン属sp.はSt. 1, 5、浮遊植物のホテイアオイはSt. 1でのみ確認された。定点毎の底質、地形、水流などの環境の違いがこれらの種の分布にも影響していると考えられた。

大型藻類の分布状況については、アオミドロ属sp.とホシミドロ属sp.が全定点で確認され、これら2

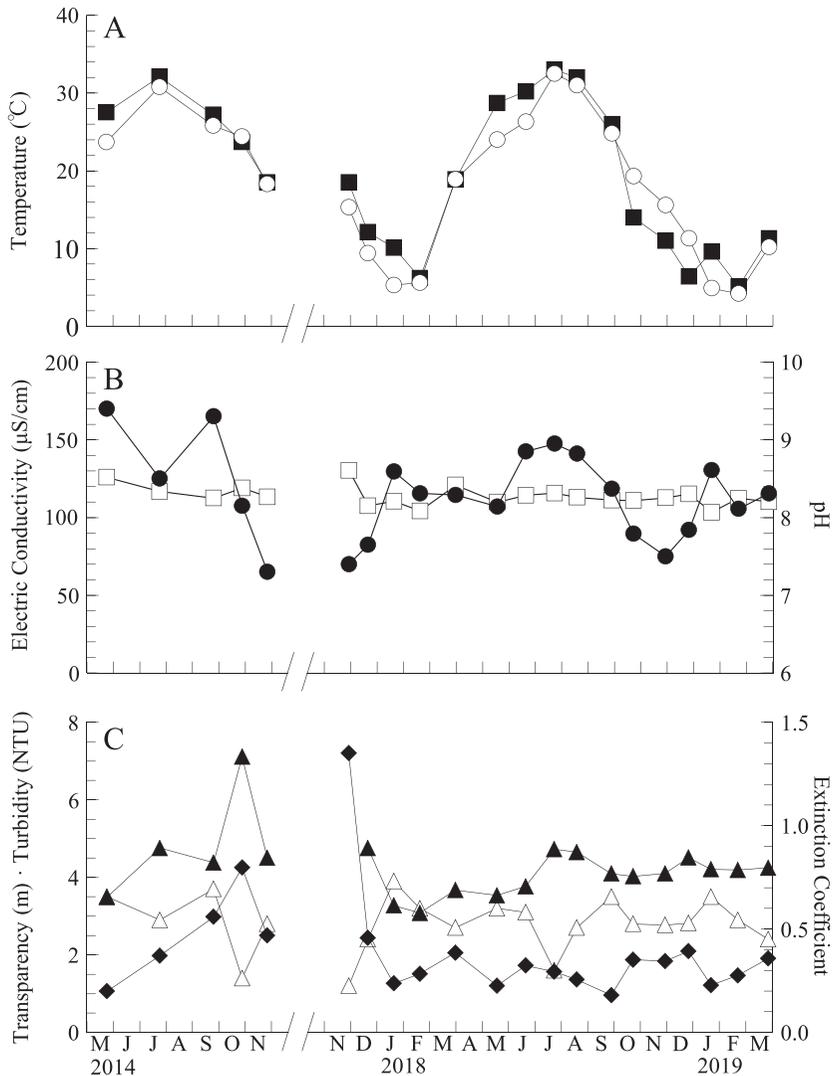


Fig. 6. Fluctuations of the air (A, solid square) and water temperature (A, open circle), pH (B, solid circle), electric conductivity (B, open square), Secchi's transparency (C, open triangle), turbidity (C, solid lozenge), and extinction coefficient (C, solid triangle) during the environmental survey period in Lake Chiyoda, Kofu City.

種は千代田湖の広い範囲に分布していることが判明した (Table 2)。また、藻体が肉眼で認識しやすいアミミドロ属 sp. は St. 9 でのみ確認されたが、これは帯那川流域の水田から流入した藻体である可能性もある。大型藻類の確認種数は St. 1 が 12 種と最も多く、次いで St. 3 が 10 種、St. 4 が 9 種、St. 2, 9 が 7 種であり、水草の確認種数が多かった定点では大型藻類の確認種数も多い傾向が見られた。

環境調査の期間中における千代田湖の気温、表層の水温・pH・電気伝導率、光環境 (透明度、表層の濁度、消散係数) の変動を Fig. 6 に示した。気温は 5.1 °C (2019 年 2 月) ~ 33 °C (2018 年 7 月)、表層の水温は 4.2 °C (2019 年 2 月) ~ 32.5 °C (2018 年 7 月) であり (Fig. 6A)、冬季には湖面の一部が結氷していることもあった。標高 901 m に位置する面積 0.51 km² の精進湖 (環境庁自然保護局 1993) では 2017 年度の気温が -0.5 ~ 29 °C、表層の水温が 3.4 ~ 27.0 °C (山梨県 2019)、標高 880 m に位置する面積 0.06 km² の四尾連湖 (環境庁自然保護局 1993) では 2005 年度の表層の水温が 4.8 ~ 27.0 °C (吉田・風間

2007) であったことが示されている。両湖は上述のように千代田湖と同様に面積が1 km²に満たない湖沼であり、冬季には結水することが知られている(有泉・吉澤 2001, 吉田・風間 2007)。千代田湖は両湖より北部に位置しているが、湖面標高が300 m以上低いため、夏季の水温が5 °C以上高かったと推察される。

表層のpHは7.3 (2014年11月) ~9.4 (2014年5月) で平均は8.29であった (Fig. 6B)。表層のpHは精進湖では7.6~8.4 (山梨県 2019), 四尾連湖では6.5~7.9 (吉田・風間 2007) であったことが報告されており、千代田湖の最高値は両湖より高く、変動幅が両湖より大きいことがわかった。

表層の電気伝導率は103.4 μS/cm (2019年1月) ~130.3 μS/cm (2017年11月) で平均は113.79 μS/cmであった (Fig. 6B)。表層の電気伝導率は精進湖では77.2~86.6 μS/cm (山梨県 2019), 四尾連湖では44~50 μS/cm (吉田・風間 2007) であったことが報告されており、千代田湖の最低値が両湖の最高値より高く、変動幅が両湖より大きいことがわかった。

セッキー透明度は1.2 m (2017年11月) ~3.9 m (2018年1月) で平均は2.8 mであった (Fig. 6C)。精進湖のセッキー透明度は2017年度では1.8 m (3月) ~4.4 m (8月) で平均2.9 mであり、11~3月に低い (山梨県 2019) ことが、1992~2001年度では年平均値が1.7~3.7 m (有泉・吉澤 2002) であったことが、四尾連湖では2005年度のセッキー透明度は3.3 m (3月) ~7.0 m (6月) で10~3月に低い (吉田・風間 2007) ことがそれぞれ報告されている。したがって、透明度は3湖の中では四尾連湖が最も高く、千代田湖では精進湖と同等か、やや低いことがわかった。

表層の濁度は0.96 NTU (2018年9月) ~7.2 NTU (2017年11月) で平均は2.12 NTUであった (Fig. 6C)。精進湖の表層の濁度は2012年度に1.16 NTU (8月) ~3.78 NTU (11月) で、平均2.23 NTU (芹澤ら 2016b) と報告されており、千代田湖で突出して濁度が高かった2017年11月の値を除くと最大値は2.44 NTUとなることから、両湖の濁度はほぼ同等であると考えられる。千代田湖で濁度が最大となった2017年11月は透明度も最低であったが、翌月には両値ともそれぞれ下降、上昇したことから、2017年11月の水質汚濁は短期的なものであったと推察された。

相対光量から算出した消散係数は0.578 (2018年2月) ~1.333 (2014年10月) の間で変化し (Fig. 6C), 調査期間中の近似値は0.795であった (Fig. 7)。また、2014年5~11月では0.91, 2017年11月~2019年3月では0.756と、後の期間で値が減少していることが判明した。精進湖の消散係数は2012年度に0.58 (2月) ~1.04 (11月) で近似値は0.716 (芹澤ら 2016b) であったことが報告されており、両湖の消散係数はほぼ同等であると言える。また、調査期間中の水中光量は水深0.1mで212.6~1755.2 μmol/m²/s, 水深1mで30.52~944.0 μmol/m²/s, 水深2mで25.35~490.5 μmol/m²/s, 水深3mで13.2~252.0 μmol/m²/s, 水深4mで7.18~155.0 μmol/m²/s, 水深5mで2.23~95.86 μmol/m²/s, 水深6mで0.68~65.18 μmol/m²/s, 水深7mで0.17~41.81 μmol/m²/s, 水深8mで0.02~26.72 μmol/m²/s, 水深9mで0.01~16.96 μmol/m²/sであった (Table 3)。調査期間中、空中光量は2017年4月1日が最大であったが、水中光量の最大値となった調査日は水深により異なり、

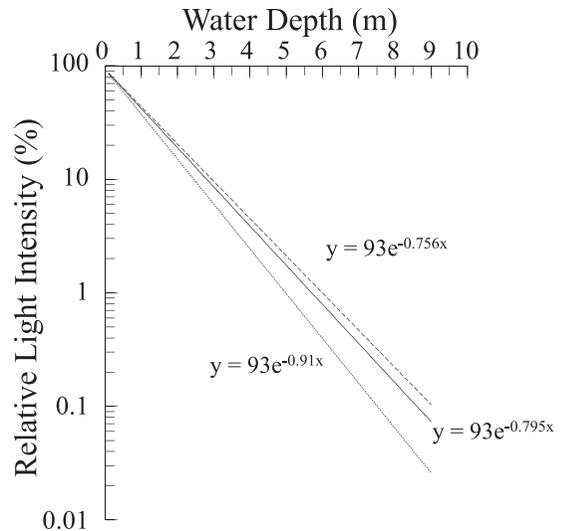


Fig. 7. The extinction coefficients calculated from relative light intensities according to water depths in Lake Chiyoda, Kofu City. Solid line, all measurement period; dotted line, measurement from May to November 2014; broken line, measurement from November 2017 to March 2019.

Table 3. Light intensities in air and water ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) and relative light intensities (%) according to water depths during the environmental survey period in Lake Chiyoda, Kofu City. Bolds and underlines indicate maximum or minimum values.

Depth (m)	Survey Date																	Survey Term					
	2014					2017					2018					2019		2014	2017-2019	2014-2019			
	5/23	7/25	9/26	10/29	11/27	12/21	1/20	2/19	4/1	5/19	6/21	7/24	8/19	9/28	10/23	11/29	12/26	1/21	3/28	Av.	Av.	Av.	
0.1	1132.8	1197.4	699.6	876.9	697.7	812.3	740.6	1029.4	1682.0	719.2	585.5	<u>1755.2</u>	1453.0	328.7	480.0	289.5	212.6	415.1	276.5	587.6	920.9	757.8	798.6
1	719.0	673.6	232.3	260.2	285.4	343.9	437.9	683.3	944.0	494.4	277.0	490.5	193.1	214.0	30.52	99.76	99.76	134.6	76.80	210.0	434.1	387.9	399.4
2	452.5	371.4	183.0	71.91	120.3	151.4	235.7	382.4	411.7	216.6	127.4	490.5	326.3	98.57	94.33	25.35	61.52	46.70	27.80	57.60	239.8	183.6	197.6
3	242.7	200.8	152.2	21.50	59.05	70.73	162.1	252.0	203.6	129.5	76.84	250.6	157.7	55.44	49.18	16.40	29.95	22.50	13.20	28.60	135.3	101.2	109.7
4	143.8	116.1	102.0	7.18	29.30	33.42	98.88	155.0	123.8	76.06	49.79	126.4	112.1	31.77	24.71	15.75	13.40	7.54	19.90	79.67	59.85	64.80	
5	67.70	49.71	53.48	2.23	14.47	17.09	54.62	95.86	70.12	41.38	28.13	48.37	66.87	18.14	11.66	6.45	7.80	8.90	3.82	9.88	37.52	32.65	33.87
6	30.29	20.14	27.09	0.68	7.62	8.75	30.00	65.18	48.18	24.18	19.26	21.16	38.27	10.71	6.09	3.82	4.21	3.21	2.99	7.31	17.16	19.15	18.66
7	15.77	4.10	11.19	0.17	3.95	4.74	19.53	41.81	22.89	13.33	6.40	9.14	7.99	5.22	2.75	2.11	2.11	2.00	3.62	7.036	9.784	9.06	9.10
8	8.37	0.35	3.10	0.02	1.97	2.52	13.17	26.72	12.31	6.81	2.58	1.48	2.20	2.27	1.60	1.52	1.05	1.28	0.89	1.51	2.762	5.194	4.59
9	3.84	0.32	0.05	0.01	1.04	1.34	9.20	16.96	6.67	3.84	0.68	0.07	0.06	0.09	0.88	0.84	0.51	0.84	0.45	0.74	1.052	2.878	2.42
Light Intensity in Air																							
1705.5	1942.4	1300.6	1463.5	1376.4	1501.6	1680.0	2240.0	2810.0	1561.1	812.2	1996.0	1994.4	511.2	764.2	385.5	653.1	381.1	756.1	1557.7	1239.1	1318.8	1318.8	
1692.4	1901.7	1209.7	1461.6	1399.9	1557.8	1453.0	2325.0	2740.0	1455.3	772.6	1999.0	1940.6	529.1	752.4	389.4	677.4	511.3	376.2	754.2	1533.1	1215.6	1294.9	
1678.0	1919.9	1233.5	1465.6	1389.5	1524.2	1543.8	2294.0	2731.0	1424.9	775.4	2039.0	2054.0	541.9	742.3	399.0	723.1	576.2	322.5	764.1	1537.3	1230.4	1307.1	
1687.8	1855.7	1309.6	1479.1	1355.4	1563.0	1605.4	2374.0	2635.0	1387.9	711.6	2063.0	1979.0	560.0	722.1	446.7	660.1	521.1	354.1	753.4	1537.5	1222.4	1301.2	
1685.5	2029.0	1451.6	1550.9	1321.5	1549.2	1645.5	2470.0	2748.0	1394.5	710.6	2041.0	2001.0	584.2	674.6	376.6	818.9	531.4	391.2	760.1	1607.7	1246.5	1336.8	
1724.0	1920.2	1400.5	1538.0	1430.0	1521.7	1357.8	2207.0	2726.0	1386.9	715.2	2051.0	1992.0	582.0	665.2	356.7	707.1	539.2	406.1	758.9	1602.5	1198.2	1299.3	
1692.4	1855.3	1469.1	1552.7	1394.8	1523.7	1465.0	2268.0	2772.0	1355.0	799.1	2070.0	2034.0	580.9	642.2	416.6	727.6	611.1	375.2	752.1	1592.9	1226.0	1317.7	
1710.0	1939.9	1500.1	1568.1	1349.5	1532.7	1589.9	2295.0	2720.0	1320.6	810.6	2048.0	1894.0	608.4	620.6	489.9	700.1	589.1	321.4	758.6	1613.5	1219.9	1318.3	
1730.0	2011.0	1320.9	1592.8	1419.3	1505.7	1544.8	2372.0	2775.0	1320.1	816.1	2034.0	2120.0	610.2	633.1	585.5	691.0	541.1	356.8	764.1	1614.8	1244.6	1337.2	
1684.9	2030.0	1341.9	1636.4	1400.5	1607.1	1678.5	2348.0	2780.0	1313.1	827.3	2063.0	2074.0	634.2	603.1	494.8	793.1	521.0	321.4	763.3	1618.7	1254.8	1345.8	
0.1	66.42	61.65	53.79	59.92	50.69	54.10	44.08	45.96	59.86	46.07	72.09	87.94	72.85	64.30	62.81	75.10	32.55	76.86	72.55	77.71	58.5	63.0	61.9
1	42.48	35.42	19.20	17.80	20.39	22.08	30.14	29.39	34.45	33.97	35.86	44.88	40.27	36.49	28.44	7.838	14.73	26.33	20.41	27.84	27.1	28.9	28.4
2	26.97	19.34	14.84	4.907	8.658	9.931	15.27	16.67	15.08	15.20	16.43	24.06	15.89	18.19	12.71	6.353	8.508	8.105	8.620	7.538	14.9	13.2	13.7
3	14.38	10.82	11.62	1.454	4.357	4.525	10.10	10.61	7.727	9.333	10.80	12.15	7.969	9.900	6.811	3.671	4.537	4.318	3.728	3.796	8.53	7.33	7.63
4	8.530	5.723	7.024	0.463	2.217	2.157	6.009	6.275	4.504	5.454	7.007	6.191	5.602	5.438	3.663	2.461	1.923	2.522	1.927	2.618	4.79	4.25	4.39
5	3.927	2.589	3.819	0.145	1.012	1.123	4.023	4.343	2.984	3.933	2.558	3.357	3.117	1.753	1.808	1.103	1.651	0.941	1.302	2.30	2.43	2.39	
6	1.790	1.086	1.844	0.044	0.546	0.574	2.048	2.874	1.522	1.787	2.410	1.022	1.882	1.844	0.948	0.917	0.579	0.525	0.797	0.972	1.06	1.38	1.30
7	0.922	0.211	0.746	0.011	0.293	0.309	1.228	1.822	0.842	1.009	0.790	0.446	0.422	0.858	0.503	0.561	0.301	0.358	0.622	0.477	0.44	0.70	0.64
8	0.484	0.017	0.235	0.001	0.139	0.167	0.853	1.126	0.444	0.516	0.316	0.073	0.104	0.372	0.260	0.152	0.237	0.249	0.198	0.18	0.35	0.31	
9	0.228	0.016	0.004	0.001	0.074	0.083	0.548	0.722	0.240	0.292	0.082	0.003	0.014	0.146	0.170	0.064	0.161	0.140	0.097	0.16	0.18	0.15	
Relative Light Intensity																							

2017年4月1日が最大となったのは水深1 mだけであり、相対光量の最大値も水深により水中光量の最大日と一致してはなかった。同様に、空中光量は2018年11月29日と2019年2月21日で400 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ を下回る低い値であったが、水中光量が最小値となったのは2018年11月29日では水深1~2 m, 2019年2月21日では水深3 mのみで、水深0.1 mは2018年12月26日、他の水深は2014年10月29日であり、2014年10月29日の空中光量は1400 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ を上回る値となっていた。よって、空中光量が多い日でも水塊により水中光量は多くならない場合があることが明らかとなった。水深別水中光量の平均値は2014年が水深0.1 mで920.9 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、水深1 mで434.1 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、水深2 mで239.8 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、水深3 mで135.3 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、水深4 mで79.67 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、水深5 mで37.52 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、水深6 mで17.16 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、水深7 mで7.036 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、水深8 mで2.762 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、水深9 mで1.052 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、2017年以降が水深0.1 mで757.8 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、水深1 mで387.9 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、水深2 mで183.6 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、水深3 mで101.2 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、水深4 mで59.85 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、水深5 mで32.65 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、水深6 mで19.15 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、水深7 mで9.784 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、水深8 mで5.194 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、水深9 mで2.878 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ であった。また、全調査期間中では水深0.1 mで798.6 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、水深1 mで399.4 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、水深2 mで197.6 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、水深3 mで109.7 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、水深4 mで64.80 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、水深5 mで33.87 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、水深6 mで18.66 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、水深7 mで9.10 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、水深8 mで4.59 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、水深9 mで2.42 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ であった。水中光量の平均値は水深5 mまでは2014年で高かったが、水深6 m以深では2017年以降で高かった。水深別の平均相対光量は2014年が水深0.1 mで58.5 %、水深1 mで27.1 %、水深2 mで14.9 %、水深3 mで8.53 %、水深4 mで4.79 %、水深5 mで2.30 %、水深6 mで1.06 %、水深7 mで0.44 %、水深8 mで0.18 %、水深9 mで0.06 %、2017年以降が水深0.1 mで63.0 %、水深1 mで28.9 %、水深2 mで13.2 %、水深3 mで7.33 %、水深4 mで4.25 %、水深5 mで2.43 %、水深6 mで1.38 %、水深7 mで0.70 %、水深8 mで0.35 %、水深9 mで0.18 %であった。また、全調査期間中では水深0.1 mで61.9 %、水深1 mで28.4 %、水深2 mで13.7 %、水深3 mで7.63 %、水深4 mで4.39 %、水深5 mで2.39 %、水深6 mで1.30 %、水深7 mで0.64 %、水深8 mで0.31 %、水深9 mで0.15 %であった。水深2~4 mを除いて、2014年より2017年以降で平均相対光量が高かった。水中光量も水深6 m以深は2017年以降で高かったことから、近年、千代田湖では深部に届く光量は増加傾向にあると考えられた。また、このことが上述のような近年の水生植物種の増加に影響した可能性がある。山中湖では沈水植物と大型藻類の分布下限水深が5mであり(芹澤(松山)ら2009a, 芹澤ら2014)、水深5mにおける相対光量は湖心を基準とすると7%程度(芹澤ら2016a)であったことが報告されている。千代田湖では相対光量が7%となる水深は3~4 mであったので、この水深が本湖の水生植物の分布限界水深と考えられ、山中湖の5 mより分布下限水深は浅いものと推定された。なお、上述したように千代田湖における平均光量は3 mで109.7 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、4 mで64.80 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ であり、沈水植物と大型藻類の分布下限水深の光量は100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 前後であるのかも知れない。

水深別の DO と水温は2014年11月、2017年11月~2018年2月、2018年11月~2019年2月では表層から底層までほとんど変化していなかった (Fig. 8)。これは湖水が循環して湖底まで酸素が均一に供給されていたことを示している。しかし、2014年5~10月、2018年4~10月、2019年3月では水温成層が認められ、湖底から月によっては水深6 mまで溶存酸素濃度が0 mg/Lとなる貧酸素水塊となっていたことが判明した。これは水草などの生物の遺骸をバクテリアが分解する際に酸素を消費するが、成層ができているため表水層からの酸素の供給がないためと考えられる。調査期間中の表層水の温度は2014年10、11月に24.4、18.3 °C、2017年11月に15.3 °C、2018年2、10、11月に5.6、19.3、15.6 °C、2019年2、3月に4.2、10.2 °Cであった (Fig. 6A)。よって千代田湖では湖底まで十分に酸素が供給される循環期は表層水が18 °C前後まで下降する晩秋から始まり、湖底が貧酸素状態になりやすい成層期は表層水が10 °C前後にまで上昇する初春から始まると推察された。上述した春季から秋季の水生植物の繁茂は酸素

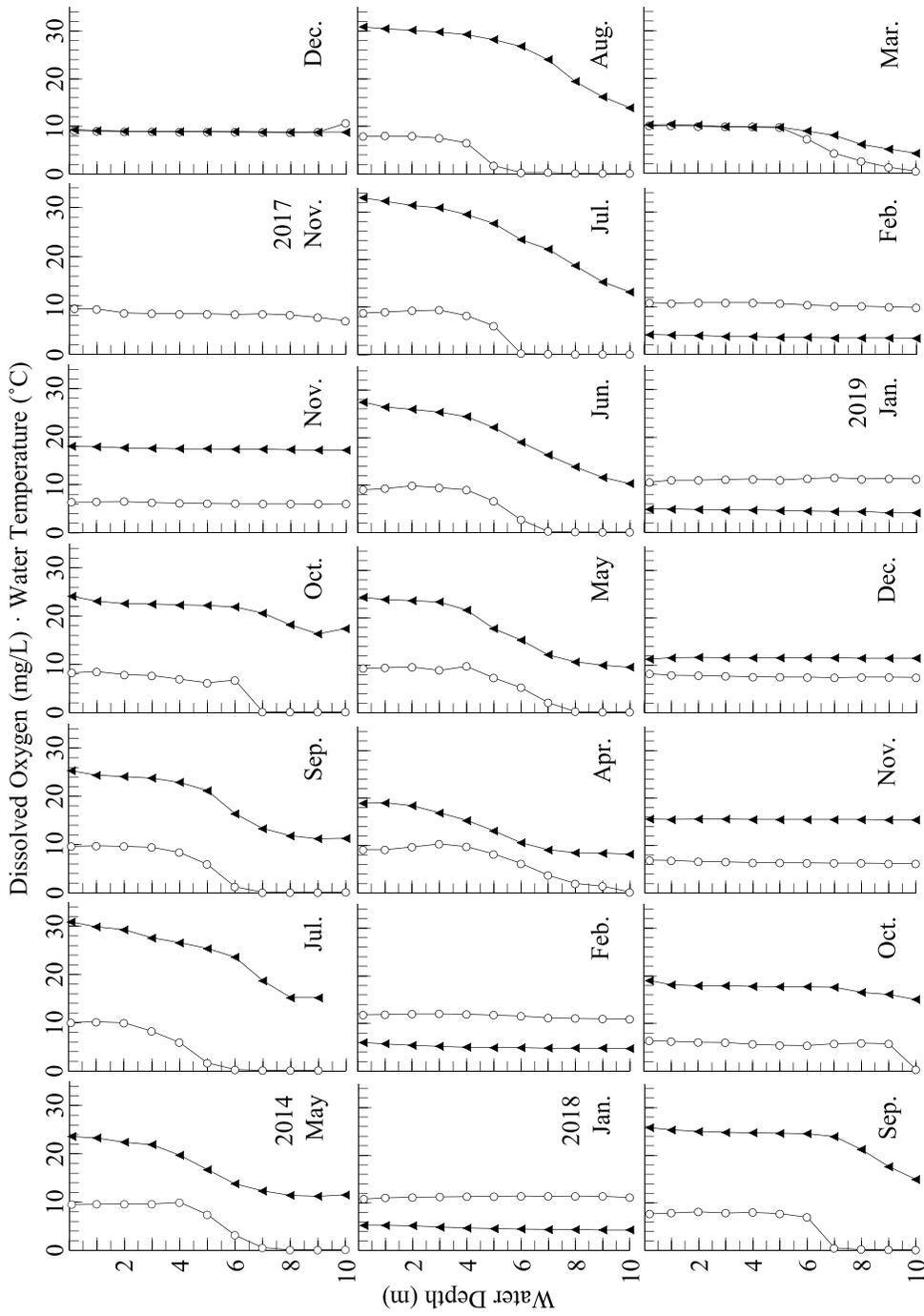


Fig. 8. Dissolved oxygen (open circle) and water temperature (solid triangle) according to water depth during the environmental survey period in Lake Chiyoda, Kofu City.

が不足しがちな成層期には日中においては光合成により貴重な酸素の供給源となり、夜間には逆に呼吸によりDOのさらなる減少を引き起こしているかも知れない。

IV 謝辞

トリゲモおよびホソバミズヒキモの同定にご協力いただいた新潟大学教育学部の志賀 隆博士と新潟大学大学院自然科学研究科修士課程の緑川昭太郎氏に深謝する。本研究は山梨大学教育人間科学部水圏植物学研究室2014年度生および教育学部水圏植物学研究室2019年度生の卒業研究を中心にまとめたものである。調査にご協力いただいた同研究室の佐野英樹、井鍋優子、中村誠司、上嶋崇嗣、渡邊 亮、奥田なほ、森下祐太郎の各氏に謝意を表す。本研究の一部はJSPS科研費JP16K00633及び山梨大学教育人間科学部戦略プロジェクトの助成を受けて遂行した。

V 引用文献

- 有泉和紀, 吉澤一家 (2001) 河口湖および精進湖の結氷状況. 山梨衛公研年報 45 : 45-48
- 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
- Campbell J W, Aarup T (1989) Photosynthetically available radiation at high latitudes. *Limnology and Oceanography* 34: 1490-1499
- 原野晃一, 中村誠司, 渡邊亮, 芹澤(松山)和世, 芹澤如比古 (2019) 山梨県内の主要4河川上流部における水質の周年変化と長期的変動. 山梨大学教育学部紀要 28:127-135
- 長谷川裕弥, 吉澤一家 (2017) 四尾連湖における水生植物について (2015年夏季). 山梨衛環研年報 61 : 63-64
- 角野康郎 (2014) 日本の水草. 文一総合出版. 東京
- 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
- 環境省 (2017) 環境省レッドリスト2017 <http://www.env.go.jp/nature/kisho/hozen/redlist/MOERedlist2017.pdf>
- Kato S, Kawai H, Takimoto M, Suga H, Yohda K, Horiya K, Higuchi S, Sakayama H (2014) Occurrence of the endangered species *Nitellopsis obtusa* (Charales, Charophyceae) in western Japan and the genetic differences within and among Japanese populations. *Phycological research* 62: 222-227
- 中村誠司, 上嶋崇嗣, 渡邊広樹, 芹澤(松山)和世, 芹澤如比古 (2016) 富士五湖における水質の周年変化と長期的変動. 富士山研究 10 : 31-40
- 中村誠司, 上嶋崇嗣, 佐野英樹, 田口由美, 渡邊広樹, 芹澤(松山)和世, 芹澤如比古 (2017) 富士北麓, 本栖湖の水草・大型藻類と光環境. 富士山研究 11 : 11-22
- 中村誠司, 上嶋崇嗣, 芹澤(松山)和世, 芹澤如比古 (2018a) 富士北麓, 精進湖における水草・車軸藻類と環境の2015年までの変遷. 山梨大学教育学部紀要 26 : 157-164
- 中村誠司, 上嶋崇嗣, 芹澤(松山)和世, 芹澤如比古 (2018b) 富士北麓, 西湖における水草・車軸藻類と環境の2015年までの変遷. 山梨大学教育学部紀要 27 : 105-113
- 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 (2009a) 山中湖における水草・大型藻類-2007年-. 水草研究会誌 9:1-9
- 芹澤(松山)和世, 安田泰輔, 中野隆志, 芹澤如比古 (2009b) 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, 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, 芹澤(松山)和世(2016a) 富士北麓, 山中湖における水中光量と消散係数. 富士山研究10:23-29

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(2016b) 富士北麓, 西湖と精進湖の水草・大型藻類と光環境. 山梨大教育人間学部紀要17:201-210

芹澤如比古, 金原昂平, 芹澤(松山)和世(2017) 富士北麓, 精進湖に生育するフジマリモの分布状況. 山梨大教育人間学部紀要25:193-199

芹澤如比古, 中村誠司, 加藤将, 志賀隆, 山ノ内崇志, 首藤光太郎, 坪田和真, 緑川昭太郎, 上嶋崇嗣, 渡邊亮, 井藤大樹, 中村高志, 山本真也, 芹澤(松山)和世(2019a) 富士北麓, 河口湖における水草・車軸藻類と湿生植物の分布状況－2017年－. 富士山研究13:17-27

芹澤如比古, 渡邊亮, 中村誠司, 原野晃一, 芹澤(松山)和世(2019b) 水草研究会第39回全国集会のフィールドワークで精進湖, 本栖湖, 河口湖から確認された水生植物. 水草研究会誌108:13-25

上嶋崇嗣, 中村誠司, 渡邊広樹, 芹澤(松山)和世, 芹澤如比古(2018) 富士北麓, 河口湖における水草・車軸藻類と光環境. 山梨大学教育学部紀要26:147-156

渡邊亮, 中村誠司, 芹澤(松山)和世, 芹澤如比古(2018) 山梨県の水田域における水草・大型藻類. 山梨大学教育学部紀要27:89-103

渡邊亮, 中村誠司, 原野晃一, 芹澤(松山)和世, 芹澤如比古(2019a) 山梨県の水田域における水草・大型藻類群集の市町村間の類似性. 山梨大学教育学部紀要28:119-125

渡邊亮, 中村誠司, 芹澤(松山)和世, 芹澤如比古(2019b) 山梨県の水田域に生育する水草・大型藻類の優占度の評価. 富士山研究13:43-59

Wikipedia(2019) 千代田湖. フリー百科事典ウィキペディア. <https://ja.wikipedia.org/wiki/千代田湖>

山梨県(2019) 平成29年度富士五湖 公共用水域水質測定結果. https://www.pref.yamanashi.jp/taiki-sui/documents/h29_4fujigoko.pdf

吉田雅彦, 風間ふたば(2007) 四尾連湖における陸水学的研究－2005年度の理化学調査結果から－. 山梨県立大学人間福祉学部紀要2:89-92