

野尻湖の植物プランクトン及び水質の状況

山下 晃子¹・本間 健^{1,2}

野尻湖の植物プランクトンは、春には珪藻綱や緑藻綱が増殖・集積し、さらに夏には珪藻綱に代わり黄色鞭毛藻綱や渦鞭毛藻綱が増え、やがて水温が低下すると珪藻綱などが増殖する季節遷移が認められた。野尻湖では、夏季に水温躍層が発達しその後湖水が循環することから、表層の栄養塩類濃度が変化し、栄養塩類の取り込み特性に応じた種が優占するためと推測された。さらに植物プランクトンから腐水指数を試算すると、水質は、少腐水性(きれいな水)から β -中腐水性(少し汚れた水)であった。

キーワード：植物プランクトン、水質、腐水指数、野尻湖

1 はじめに

長野県北部に位置する野尻湖では、流域の経済活動による湖の富栄養化を背景として、水草の喪失など生態系のバランスが崩れたことにより 1988 年の夏にウログレナの異常増殖に伴う淡水赤潮が発生し、1994 年に湖沼水質保全特別措置法(以後湖沼法)の指定を受けた。それ以降長野県では、6 期 30 年にわたり水質保全計画¹⁾を策定し、水質浄化に取り組んでいる。

野尻湖のプランクトンについては、古くは田中(1926)²⁾の「野尻湖の研究」から始まり、安田(1975)³⁾、酒井(1980)⁴⁾らにより調査が行われた。その後、淡水赤潮の発生直後に、落合(1992)⁵⁾は動物プランクトン 27 種、植物プランクトン 25 種(珪藻類 10 種)を同定した。同時期の諏訪湖で認められた植物プランクトンの 296 種⁶⁾に比較して種数が少なく、田中(1992)の「日本湖沼誌」⁷⁾では、野尻湖の植物プランクトンは第 VI 型中栄養型珪藻類群集、動物プランクトンは第 X 型中栄養型甲殻類・輪虫類混合型群集に分類される。

野尻湖のウログレナによる淡水赤潮は、その後発生はなく、COD の環境基準 1mg/L は未達成ではあるが、りん的环境基準の 0.005mg/L は達成し、現在は透明度も 6.0m を超えており、観光資源としての活用などが進められている。

野尻湖の水質については、公共用水域水質常時監視(以後常時監視)として、継続して水質調査が行われているが、プランクトンの調査例は少ない。一方、

湖沼法に指定がされて以降、野尻湖の植物プランクトンの調査は、長野市が水道水として利用していたことから、取水場所の水穴地点において、2005 年 6 月に取水が停止されるまで継続して実施され、水質年報⁸⁾に報告されている。そこで環境省環境調査研修所のプランクトン研修を受講する機会を得ながら、2012 年 5 月から 2015 年 10 月に野尻湖湖心のプランクトンの計数調査を行い、また同時期に実施した湖心の水質との関連を整理し、蓄積したデータを基に考察したので報告する。

2. 方法

2.1 調査地点

野尻湖は、長野県の北部に位置し、諸元を表 1 に示す。野尻湖の流出河川は 1 河川で、流入河川は 11 河川あるが流量がわずかな河川が多く、揚水発電などのため直接流域及び間接流域から人為的に導水さ

表 1 野尻湖の諸元¹⁾

湖面積	4.55km ²
貯水量	95,676 千 m ³
水深	最大 38.3m 平均 20.8m
滞留時間	738 日
湖面標高	656.8m
流入出河川	流入 11 河川 流出 1 河川
直接流域面積	12.9km ²
間接流域を含む流域面積	185.3km ²
水位調整	揚水による発電、農業用水

1 長野県環境保全研究所 水・土壌環境部 〒380-0944 長野市安茂里米村 1978

2 現：長野県環境部資源循環推進課 〒380-8570 長野市南長野中下 692-2

れ水位変動が大きい。そのため、調査地点は、水環境が安定している湖心(常時監視の基準点)とし、その水深は平均 33.3m であった。(常時監視結果⁹⁾より 2012 年 4 月から 1 年間の平均)

2. 2 調査期間及び試料採取

プランクトン試料の採取は、2012 年から 2015 年の 5 月、7 月、8 月(2015 年は 9 月)、10 月の年 4 回、野尻湖水草復元研究会¹⁰⁾の観察日に合わせて実施した。透明度の 2~2.5 倍の深さが植物プランクトンの光合成量と呼吸量が等しくなる深さ(補償深度)である¹¹⁾ことから、湖心において透明度の 2 倍に相当する水深 12~16m から表層まで北原式プランクトンネット(口径 22.5cm NXX13 目合 0.1mm)を用いて鉛直方向に引き上げ集められたものを試料とした。

2012 年 8 月、10 月、2013 年 7 月、8 月、10 月、2014 年 5 月は鉛直方向の水温も同時に測定した。

水質測定は、2012 年 4 月から 2015 年 3 月まで毎月の常時監視の測定に合わせて当所で行った。なお、採水は長野県長野保健福祉事務所に依頼した。

2. 3 プランクトン試料の調製

採取した試料は直ちに固定液 0.5mL を添加し、後に 100mL に定容した。固定液は、グルタルアルデヒド(25%)50mL にホルマリン(37%)0.5mL を加え塩化カルシウム 1.25g を溶解し調製した。

2. 4 プランクトンの計数方法

試料を 10 倍または 20 倍に希釈したものを振り混ぜ、マイクロピペットでその 1mL をプランクトン計数板(松波硝子 枠付 50×20 マス)の枠内に均一になるように注入した。プランクトンについては、生物顕微鏡を用いて 50 または 100 マスの細胞数を 3 回または 4 回計数しその平均値を換算して湖水 1mL 中の細胞数とした。分類は「日本の淡水プランクトン図解ハンドブック」¹²⁾に沿って種名まで行い、網ごとに細胞数を合計することを基本とし、「日本淡水産動植物プランクトン図解」¹³⁾も参照した。緑藻綱の種名の同定まで行えないものは、その他緑藻として計数した。また *Aphanocapsa* sp. (アフアノカプサ属)は群体として計数した。

2. 5 水質測定方法

湖心の水温鉛直測定は、YSI 社製 650MDS 多項目水質計を用いて、水深 14m までは 1m ごとに、それ以降は 2m ごとに湖底まで測定した。

水試料の溶存態については 450°C で 2 時間処理したガラス繊維ろ紙(Whatman 社製 GF/F)でろ過したろ液を用いた。測定項目及び方法は、化学的酸素要求量(COD)、溶存態 COD(D-COD)、全有機炭素量(TOC)、溶存態有機炭素量(DOC)、全窒素(T-N)、溶存態窒素(DTN)、硝酸態窒素(NO₃-N)、亜硝酸態窒素(NO₂-N)、全りん(T-P)、溶存態りん(DTP)及びりん酸態りん(PO₄-P)は JIS K0120 に準拠した。またアンモニア態窒素(NH₄-N)は上水試験法により分析した。懸濁態炭素量(POC)、懸濁態窒素量(PON)については各々、全量と溶存態量の差とした。また溶存有機窒素量(DON)は、溶存態量(DTN)から無機態窒素量(NO₃-N、NO₂-N 及び NH₄-N の合計)を差し引いた値とした。

3. 結果及び考察

3. 1 湖心の水質

2013 年 7 月~2014 年 5 月(連続する 4 期)の湖心の鉛直方向の水温測定結果を図 1 に、2012 年 4 月~2015 年 3 月の 3 年間の湖心表層の月別有機物濃度を図 2 に、窒素及びりん濃度を図 3 に示す。

野尻湖の湖心では、夏季に成層することにより、水温躍層が発達し(図 1)、その後消滅し 12 月から 1 月に湖水が完全循環する¹⁴⁾。湖心表層の水質は、COD が 1.5~2.5mg/L (平均 2.0mg/L)、TOC は 1.0~2.0mg/L (平均 1.3mg/L)であった。T-N は 0.11

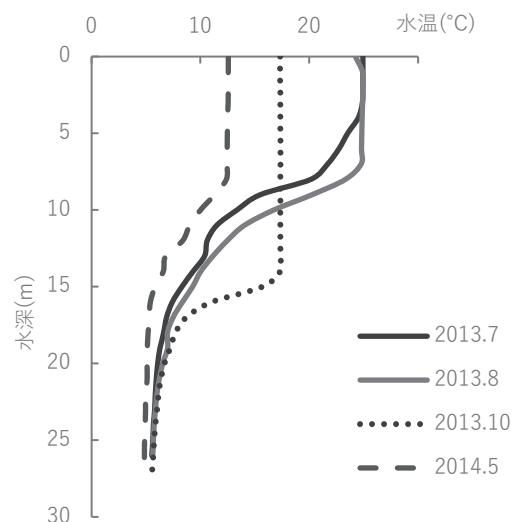


図1 野尻湖の水深別水温

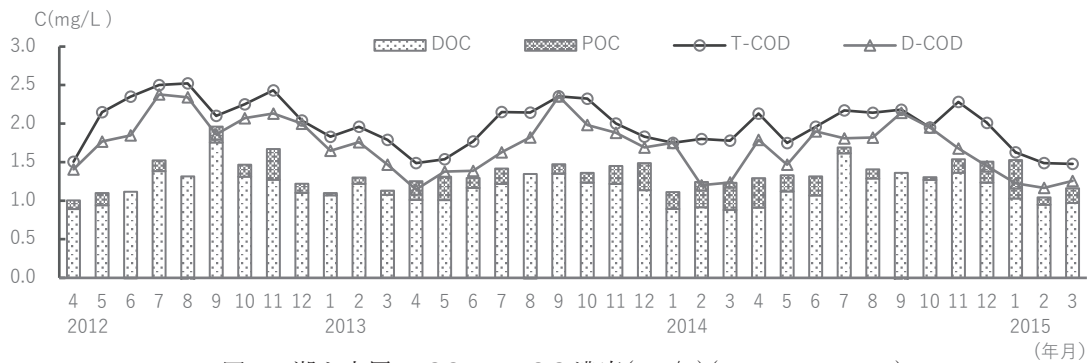


図2 湖心表層のCOD・TOC濃度(mg/L)(2012.4~2015.3)

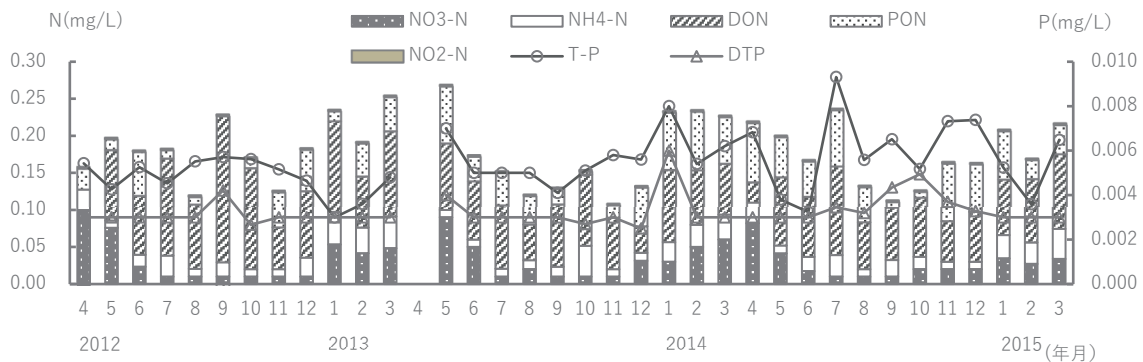


図3 湖心表層のN・P濃度(mg/L)(2012.4~2015.3)

~0.27 mg/L(平均 0.18mg/L), T-P は<0.003~0.009mg/L(平均 0.005mg/L)であった。常時監視結果⁹⁾から同時期の透明度は3.5~9.2m(平均 6.5m), クロロフィル a(Chl-a)は 1.0~5.2 μg/L(平均 2.5 μg/L)であった。OECDの富栄養化の判定¹⁵⁾では、貧栄養湖のレベルを T-P が 0.01mg/L 未満, Chl-a が年平均 2.5 μg/L 未満, 最大 8 μg/L 未満及び透明度が年平均 6m 以上, 最小 3m 以上としている。これによれば, 野尻湖は貧栄養湖に属する。

3. 2 植物プランクトンの結果

湖水 1mL あたりの細胞数は, 有効数字を 2 桁とし小数点以下 1 桁まで求め整数値とし, 出現した種名を表 2 に示す。一例として 2014 年の調査の顕微鏡写真を図 4 に示す。また網別に分類した総数の変化を図 5 に示し, 信濃町のアメダス気象データ¹⁶⁾ から試料を採取した日の直前 10 日間の平均気温及び日最低・日最高気温の平均を合わせて示す。

湖水 1mL あたりの細胞数(表 2)は 8~355 個/mL(平均 112 個/mL)と差が大きく, 最小値は, 2015 年 10 月で, 最大値は 2015 年 7 月であった。水質年報⁹⁾より長野市が水穴地点で測定した 2001 年から取水を停止する 2004 年までの 4 年間の 5, 7, 8, 10 月

の細胞数は, 平均 267 個/mL であり, 計数の方法に違いはあるものの, 今回の細胞数の平均は, 同程度か小さい値であった。

優占種は, 黄色鞭毛藻の *Dinobryon sp.* (ディノブリオ属)が 5, 7, 10 月に優占し, 特に 2012 年の 10 月には全細胞数の 90%以上を占めた。湖水の鉛直混合が阻害され湖底からの栄養塩の供給がなくなり栄養塩類が著しく枯渇していると考えられる。そのため, 運動性があり光合成による独立栄養性と菌従属栄養性(非光合成)の中間的性質のある混合栄養性¹⁷⁾の *Dinobryon sp.* が優占したと考えられる。野尻湖にはピコ植物プランクトンが存在し, その出現パターンは変化し単純ではないが, 有光層下部で高密度になることが知られている¹⁸⁾。また鞭毛藻はピコ・ナノ植物プランクトンを捕食¹⁹⁾することから鞭毛藻綱の *Dinobryon sp.* が優占したことはピコ・ナノプランクトンの出現の可能性が推測される。珪藻綱の *Fragilaria crotonensis*(オビケイソウ)は 7, 8 及び 10 月に優占しその優占率は 54~92%であった。珪藻綱の *Asterionella sp.* (ホシガタケイソウ属)は 5 月に優占した。調査した期間を通じて緑藻綱が出現し, 7 月及び 8 月の夏季には渦鞭毛藻綱の *Ceratium hirundinella*(ケラチウム)が優占種となった。2015

表2 植物プランクトンの細胞数(個/mL)

名称	2012				2013				2014				2015			
	5.12	7.19	8.4	10.20	5.11	7.13	8.3	10.19	5.10	7.12	8.2	10.19	5.9	7.11	9.4	10.12
Cyanophyceae (藍藻綱)																
<i>Anabaena sp.</i>																2
小計																2
Chrysophyceae (黄色鞭毛藻綱)																
<i>Dinobryon sp.</i>		3	2	280	1	4	3	5	77	4		1	1	7	1	2
小計		3	2	280	1	4	3	5	77	4		1	1	7	1	2
Bacillariophyceae (珪藻綱)																
<i>Aulacoseira sp.</i>	1			1	9											
<i>Melosira varians</i>	9	2	1	4	46			1	3			1	7		1	1
<i>Cyclotella sp.</i>		1	2	3	4			1	1	3			1		1	
<i>Asterionella sp.</i>	27	1			95			1	66	22	1	1	43	18		
<i>Fragilaria crotonensis</i>	14		3	1	6	3	2		37	160	13	120	13	320	1	1
<i>Nitzschia sp.</i>	3					1	2		6	8	2	2				
小計	54	4	6	9	160	4	4	3	113	193	16	124	64	338	3	2
Dinophyceae (渦鞭毛藻綱)																
<i>Ceratium hirundinella</i>		4	5	4		3	4	5		3	2	3		3	2	1
<i>Peridinium sp.</i>			1	1				1		1				3		1
小計		4	6	5		3	4	6		4	2	3		6	2	2
Cryptophyceae (褐色鞭毛藻綱)																
<i>Cryptomonas sp.</i>	1								1							
小計	1								1							
Chlorophyceae (緑藻綱)																
<i>Chlamydomonas sp.</i>			1						2							
<i>Eudorina elegans</i>			1					5	1	1		1				
<i>Sphaerocystis sp.</i>													2		1	1
<i>Gloeocystis sp.</i>		1	1							1	1					1
<i>Dictyosphaerium sp.</i>			3	2		3	7			2				3		
<i>Scenedesmus sp.</i>				1												
<i>Spondylosium moniliforme</i>			1				1			4	5	1				
その他の緑藻	110			2	1		68		2				12	1		
小計	110	1	7	5	1	3	76	5	5	8	6	2	14	4	1	2
総計(個/mL)	165	12	21	299	162	14	87	19	196	209	24	130	79	355	9	8

* 太字：各調査の優占種

年9月には藍藻綱の *Anabaena sp.* (アナベナ属)が優占種となったが、総細胞数が9個/mLと少なく、調査した期間の中ではこの時だけの出現であった。

細胞数から植物プランクトンの綱別の出現割合を求めたところ、優占種と同様に、珪藻綱が最大99%(平均49%)、次いで緑藻綱が最大87%(平均21%)、黄色鞭毛藻綱最大94%(平均17%)であった。

調査した期間では、夏季に細胞数が減少する傾向がみられるが、細胞数が最も多かった2015年7月は、採取前の10日間の気温(日最低気温、日最高気温)の平均が19.0°C(15.5°C, 23.6°C)で2012年及び2013年7月の23.2°C(19.3°C, 28.3°C), 22.7°C(19.2°C, 27.5°C)に対して低かった。この時、水温の鉛直方向の測定は行わなかったが、気温が低いいため水温躍層の発達が遅く、珪藻綱に適した低い水温と栄養塩類の供給があったため珪藻綱が増殖し細胞数が多くなったと推測される。

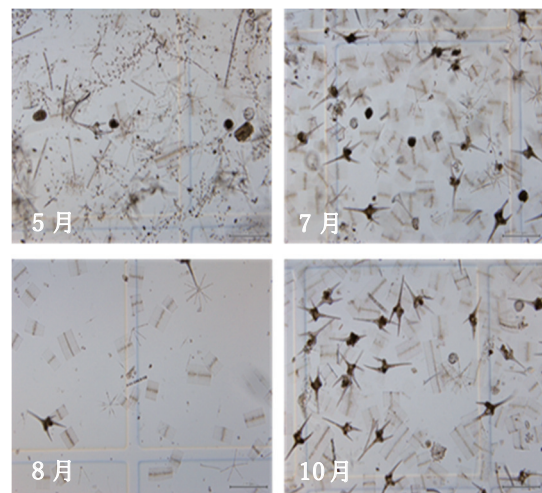


図4 計数した顕微鏡写真(×100)
上段左から2014年5月,7月,8月,10月

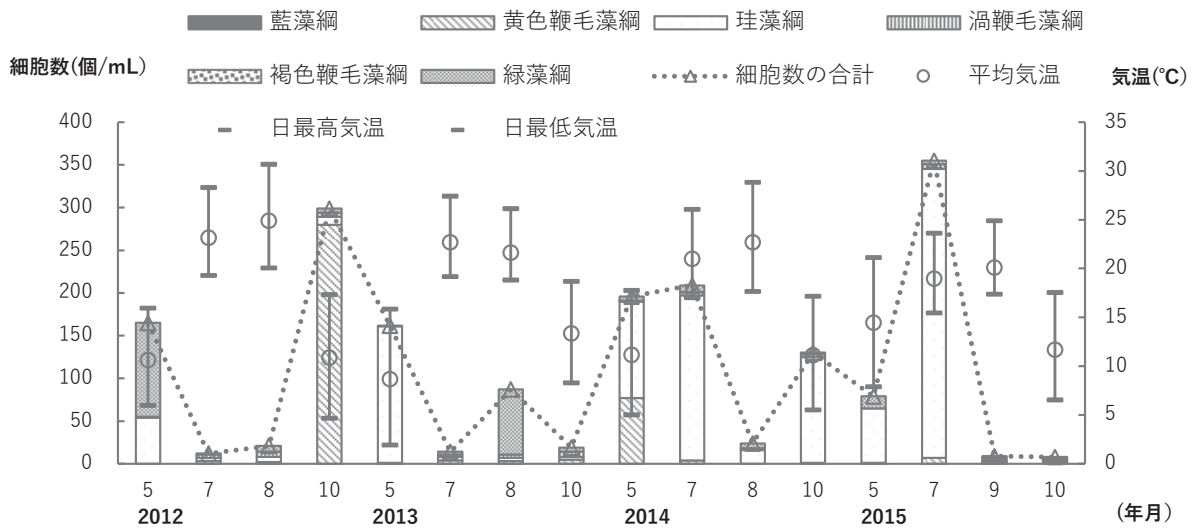


図5 植物プランクトンの綱別細胞数(個/mL)と直近10日間の信濃町の平均気温

野尻湖では、水温躍層が発達すると NO₃-N は、下層からの栄養塩類の供給停止と植物プランクトンの活発な消費により夏場に枯渇している。それにより無機態の窒素濃度が低下する。それに対しりんは、T-P が平均 0.005mg/L と定量下限値(0.003mg/L)付近の低い値であり、2012年4月～2015年3月の月別平均値の TN/TP 比は、22～59(平均 39)で8月及び9月が最低となる。1982年に川村ら(1986)が実施した野尻湖の調査²⁰⁾では、N/P比が23.3(湖心表層 5～12月)であり、また AGP の栄養塩類添加実験から藻類の増殖を制限している因子はりんであるとしている。しかし、野尻湖はりん制限ではあるが、夏季は、上層の NO₃-N が枯渇することで窒素も制限因子となり細胞数が減少すると考えられる。

これらのことより、野尻湖では、栄養塩類が豊富な春には珪藻綱や緑藻綱が増殖・集積し、やがて水温の上昇と水温躍層の発達により上層の栄養塩類が不足すると、珪藻綱に代わり運動性のある黄色鞭毛藻綱や渦鞭毛綱が増え、やがて水温の低下とともに湖水の循環が始まり、栄養塩類が下層から供給されると低温性の珪藻綱などが再び増殖する季節遷移をしていると推測される。しかし、その変化は、春から夏の気温変動に加え、水温や日射量の変化にも影響されていることが推測されることから、年変動があると考えられる。また、これら植物プランクトンの出現による一次生産が、COD 及び TOC 濃度の変化に影響している¹⁴⁾。

3.3 腐水指数による水質評価

プランクトンの出現種、出現頻度による水質を客観的に評価するために腐水指数(S)²¹⁾という考え方がある。腐水指数(S)は、PANTLE と BUCK によって 1955 年に導入された概念であり腐水指数が高ければ高いほど汚濁が進行しているとされ以下の式により定義されている。

$$S = \frac{\sum (h \cdot Si)}{\sum h}$$

S：出現した全種類に対する腐水指数

Si：植物プランクトン種により異なる腐水指数

h：評価のための細胞数による数値(出現量)

今回の調査では、プランクトンの種名まで同定されているものが少ないが、Si を参考文献²¹⁾に記載された値とし、属まで同定のは Si 値が判っているものの平均値とし、不明な緑藻については Si を 2 として試算した。また、h は湖水 1mL あたりの細胞数をもとに「1」～「4」とし、0～1 個/mL(偶在)は「1」、>1～10 個/mL(少)は「2」、>10～100 個/mL(多)は「3」、>100～1000 個/mL(とても多い)は「4」とした。

試算された腐水指数(S)は、x 段階(貧腐水性)0.0 ± 0.5、o 段階(少腐水性)1.0 ± 0.5、β 段階(β-中腐水性)2.0 ± 0.5、α 段階(α-中腐水性)3.0 ± 0.5 と判定した²¹⁾。一般的には、貧腐水性や少腐水性は、「きれいな水」、β-中腐水性は「少し汚れた水」、α-中腐水性は「汚れた水」に相当する。

試算した植物プランクトンの腐水指数は、1.5～1.8(平均 1.6)で、少腐水性からβ-中腐水性と判定さ

れた。

4. 結語

野尻湖の水質は、OECDの富栄養化の判定によれば貧栄養湖に属し、また出現した植物プランクトン量から試算した腐水指数は、1.5~1.8(平均 1.6)で、少腐水性「きれいな水」から β -中腐水性「少し汚れた水」と判定され、野尻湖の水質は良好であるといえる。

調査した期間においては、優占種としては、*Dinobryon sp.*、*Fragilaria crotonensis* 及び *Asterionella sp.*が多く出現し、いずれの種も腐水指数²¹⁾が1.9以下の種であった。

植物プランクトンは、栄養塩類が豊富な春には珪藻綱や緑藻綱が増殖・集積し、さらに水温が上昇し水温躍層の発達により上層の栄養塩類が不足すると、珪藻綱に代わり黄色鞭毛藻綱や渦鞭毛藻綱が増え、やがて水温が下がり、栄養塩類が下層より供給されると珪藻綱が再び増殖する季節遷移をしていると推測される。しかし、その季節遷移は、春から夏の気温変動及び日射量の変化にも影響を受けていると推測される。

野尻湖の水質は、植物プランクトンの消長とも深く関係しており、食物連鎖を含めた複雑な湖沼生態系の解明が必要である。本調査ではその一端を明らかにした。野尻湖では、かつて水草駆除のため放流したソウギョにより水草がない状況が続いていたが、2018年頃より水草の復元がみられ、湖内の生態系は大きく変化しようとしている。今後も野尻湖の水質とともに湖沼生態系の変化について注視していきたい。

謝 辞

プランクトンの採取、湖水の採水及び水質測定にご協力いただいた野尻湖水草復元研究会、長野県長野保健福祉事務所検査課並びに当所水・土壤環境部のみなさまに感謝いたします。

文 献

- 1) 長野県(2020), 野尻湖に係る湖沼水質保全計画(第6期)

- 2) 田中阿歌磨(1926), 野尻湖の研究(信濃教育会上水内部会)
- 3) 安田郁子・荒井優実・井山洋子(1975)野尻湖のプランクトン, 日本水処理生物学会誌, 11(2):20-23
- 4) 酒井倫子・赤尾秀雄(1980)野尻湖の植物プランクトン, 日本水処理生物学会誌, 15(2):33-37
- 5) 落合照雄・風間英俊・徳竹利一(1992)野尻湖のプランクトン, 日本水処理生物学会誌, 28(2): 147-151
- 6) 沖野外輝夫(1990), 諏訪湖-ミクロコスモスの生物(八坂書房), 33-48.
- 7) 田中正明(1992), 日本湖沼誌(名古屋大学出版会), 365-368
- 8) 長野市, 水質年報 平成13年-16年版(長野市上下水道局浄水課)
- 9) 長野県, 水質測定結果2012年-2015年版(長野県環境部水大気環境課)
- 10) 野尻湖水草復元研究会, <http://park7.wakwak.com/~fuyosou/mizukusa0.htm>(令和4年1月確認)
- 11) 西條八束・三田村緒佐武(2016), 新編湖沼調査法第2版(講談社), 58-59
- 12) 一瀬諭・若林徹哉(2005), 日本の淡水プランクトン図解ハンドブック(合同出版)
- 13) 田中正明(2002), 日本淡水産動植物プランクトン図鑑(名古屋大学出版会)
- 14) 山下晃子・館内知佳・川野政美・寺澤潤一・赤池史子・小澤秀明(2015)野尻湖の湖水中の有機物実態調査, 長野県環境保全研究所研究報告, 11:15-22
- 15) 岩佐義朗(1990), 湖沼工学(山海堂), 224-228
- 16) 気象庁, 過去の気象データ:<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/>(令和4年1月確認)
- 17) 渡邊信(2012), 藻類ハンドブック(NTS), 50-52
- 18) 国立環境研究所(1998)湖沼環境指標の開発と新たな湖沼環境問題の解明に関する研究, 国立環境研究所特別研究報告, SR-24-'98: 26-34
- 19) 鏡味麻衣子(2021), 植物プランクトン研究法(共立出版), 1-18
- 20) 川村 實・樋口澄男・丸山正人・中沢雄平(1986)野尻湖の水質について, 長野県衛生公害研究所報, 9: 18-24
- 21) ウラディミール・スラディチェック(1991), 淡水指標生物図鑑(北隆館)

Seasonal variations of phytoplankton and water quality in Lake Nojiri, northern area of Nagano prefecture

Akiko YAMASHITA¹ and Ken HOMMA^{1,2}

1 *Water and Soil Environment Division, Nagano Environmental Conservation
Research Institute, 1978 Komemura, Amori, Nagano 380-0944, Japan*

2 *Present address: Recycling and Waste Management Division, Nagano Prefectural
Government, 692-2 Habashita, Minaminagano, Nagano City 380-8570 Japan*

Key words : *phytoplankton, water quality, saprobic index, Lake Nojiri,*