湯ノ湖水環境保全調査

水環境部
塩月　智子[1]　熊久保　優子[2]　髙橋　直人　奥田　千尋
赤羽　則臣　山口　宏　荷見　昭夫[3]
([1]がんセンター　[2]環境森林政策課　[3]前保健環境センター)
国立環境開発法人水産総合研究センター増養殖研究所
山本　祥一郎

要旨

現在の湯ノ湖の水環境を評価するため、平成25年度調査に引き続き動・植物プランクトンの水深毎の現存量並びに湖水中、湖内沈降物中、表層底泥中のクロロフィルａ等光合成色素量を確認し、水質との関連性を確認した。また魚類の現存量を調査した。その結果、クロロフィルａと透明度に強い相関が確認され、透明度低下には植物プランクトンの影響が大きいと考えられた。また湖内沈降物や表層底泥のクロロフィルａ等の測定結果から、植物プランクトンの一部は水柱で分解されることなく、そのまま沈降し、底層で徐々に分解されたため、成層期の水質へ大きな影響を与えていると考えられた。魚類現存量は過去の調査結果[1)]と大きな差はなかった。近年の湯ノ湖の水質は、改善傾向にあることが確認された。

キーワード：奥日光、湯ノ湖、植物プランクトン、動物プランクトン、クロロフィル、フェオフィチン、透明度

1 5カ年計画の背景と目的

湯ノ湖、湯川、中禅寺湖を中心とする奥日光水域は、我が国を代表する優れた景観を有しており、また平成17年には戦場ヶ原、小田代原、湯ノ湖及び湯川で構成されている奥日光の湿原がラムサール条約湿原に登録されたところである。我々はこの奥日光水域の水環境を良好な状態で保全するため、これらの上流部に位置し、富栄養化が懸念されている湯ノ湖について様々な水質保全対策の基礎調査を行ってきた。

本調査は、湯ノ湖における物質収支を明らかにするため、底生動物、プランクトン、水生植物等、水環境を構成する各種要素について5カ年計画で調査するものである。これまで、平成22年度に底生生物調査[2)]、平成23年度に流出入調査[3)]、平成24年度に水生植物調査[4)]、平成25年度にはプランクトン調査[5)]を実施してきている。

平成26年度は、魚類の現存量、沈水植物、動・植物プランクトンの水深毎現存量、湖内沈降物、表層底泥中のクロロフィルａ等光合成色素量を調査した。また、平成25年の調査結果[5)]も含め、プランクトンと他の水質データとの関連性も併せて確認した。

調査にて得られた知見は、県の水環境保全施策の基礎資料とするとともに、環境教育のプログラム策定や資料作成に活用していく。

2 調査の対象と方法

2.1 調査対象の概要

調査対象は、日光国立公園内の湯ノ湖で、標高1,478mに位置する湖面積0.35km^2、最大水深14.5mの堰止湖であり、冬季は結氷する[6)]。

湯ノ湖においては、平成8年までに2度の浚渫が行われ、平成13年度からは外来種であるコカナダモの刈取り事業を行うなど、各種水質保全事業が実施されてきている。

2.2 調査年月日

平成26年4月7日・5月15日・6月16日・7月14日
8月20日・9月3、4、8、9日・10月23日・11月13日

2.3 調査方法

現地では、透明度板並びにマルチ水質チェッカー(HORIBA､U-52)を用いて透明度､水温､pH､溶存酸素(DO)、濁度を測定した。

水質試料は、湖心（図1、地点Y7、水深12.5m）において､平成25年度の方法[5)]により3m水深毎に採取した。

湖内沈降物は､セジメントトラップを9月3日10時から24時間､水深3mと9mに設置し、湖水とともに採取した。また、同時にバンドーン採水器で湖水を採水した。表層底泥は、佐竹式コアサンプラーを用いて、成層期に地点Y7（9月3日）及び地点Y5（9月8日、水深10m）

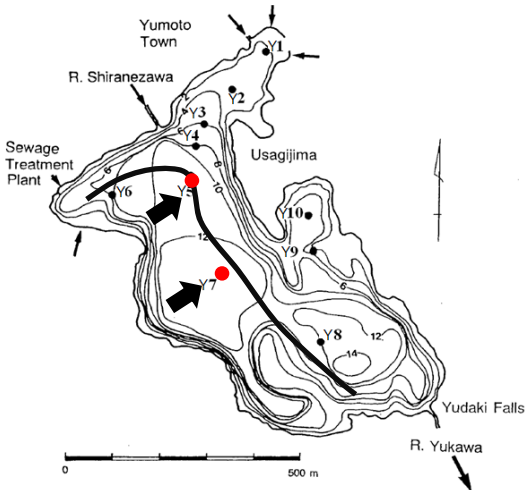


図1 湯ノ湖調査ポイント(矢印)と走査線

で、非成層期に地点Y5（10月23日）でそれぞれ採取した。

魚類は、船にソナー(EAGLE Fish Elite 640C、GPS付魚群探知機)を装備し、図1に示す走査線全長約0.9kmを約3.0km/hで航行、探査することにより調査(10月23日）した。

2.4 試料の前処理

2.4.1 懸濁粒子中のクロロフィル等

湖水懸濁粒子中のクロロフィル(以後 Chl)とフェオフィチン(Phe)の測定用試料と、動・植物プランクトンの前処理は、平成25年度と同様の方法[5]で4月から7月まで行った。

2.4.2 底泥中のクロロフィル等

採取した底泥を採泥管に収めたまま実験室に持ち帰り、4℃にて12時間静置し、表層1cmを分取し、これを遠心分離（600×g、10分)して間隙水を脱水し、N,N-ジメチルホルムアミド(DMF）でChlとPheを抽出し、測定用試料とした。測定用試料は測定までの間、容器内を窒素充填し、-25℃以下で保管した。

2.4.3 ユスリカ等の栄養塩類

ユスリカ、ヨシ、ショウブ及びコカナダモを80℃で乾燥し、粉砕機（大阪ケミカル製 ABS-W）で粉砕し、測定用試料とした。

2.5 測定方法

各項目の測定は、表1に示す方法により実施した。HPLC蛍光法の測定条件、動・植物プランクトンの計数は、平成25年度[5]と同様とした。

湖内沈降物中の光合成色素量は、同水深の湖水をブランクとし、その測定結果を差し引くことによって補正した。

ユスリカ等の中の全窒素はCHNコーダー（ヤナコMT-5型、柳本製作所）を用いて測定し、全りんは乾燥試料に硝酸を加え、以降の操作はJIS K0102 46.3.2硝酸-過塩素酸分解法に従って測定した。

2.6 湖内現存量の算出

2.6.1 魚類

魚類現存量は、禁漁期間を除く平成22年5月から平成25年9月の18か月間を対象期間として、国立研究開発法人水産総合研究センター増養殖研究所（以下、増養殖研という）と全国内水面漁業協同組合連合会から「湯ノ湖釣魚アンケート調査」等に基づく釣獲尾数、持ち帰り尾数及び放流数を提供いただき、自然死亡率[7]、年齢と成長[8]等の文献値を用いて算出した。また、ソナーによる調査結果から田中の方法[1]により算出した。

2.6.2 湖水

湖水中の栄養塩類現存量は、湯ノ湖の全容積2,720,000m^3[6]及び白石ら[9]が1962年に求めた水深別容積比率と全容積との積により得た水深別容積を用いて算出した。

2.6.3 ユスリカ等

底生生物のユスリカ、抽水植物のヨシとショウブ、沈水植物のコカナダモ及び底泥中の栄養塩類現存量は以下のとおり算出した。ユスリカについては、平成24年に測定した全窒素及び全りん含有量と、平成22年の調査[2]で得た湖内の現存量及び水深別面積[9]を用いて算出した。ヨシ及びショウブについては、平成24年に測定した全窒素含有量、全りん含有量及び現存量を用いて算出した。コカナダモについては平成14年の調査[10]で得た全窒素及び全りん含有量と、平成24年の調査[4]で得た現存量を用いて算出した。底泥については、平成20年の調査[2]で得た全窒素及び全りん含有量と、底泥の現存量から算出した。

表 1 測定方法等

項目	測定方法
透明度	透明度板(直径30cm)
水温	マルチ水質チェッカー®(白金則温体)
pH	マルチ水質チェッカー®(ガラス電極法)
DO	マルチ水質チェッカー®(ポーラログラフ法)
濁度	マルチ水質チェッカー®(透過散乱法)
TOC、DOC、TN、DON	燃焼法
SS	JIS K0102 14
強熱減量	底質調査方法(環境省水・大気環境局、H24.8)
溶解性無機態窒素、PO4-P、K	イオンクロマトグラフ法
全りん	JIS K0102 46.3.1、3.2
Si、Mn、Ca	ICP質量分析法
Mg	フレーム原子吸光法
Chl、Phe	HPLC蛍光法

3 調査結果と考察

3.1 プランクトン数等の季節変化

各水深におけるプランクトン数、光合成色素等及び水質の測定結果は図2に示すとおりであった。6、7月は、底層が無酸素状態となっておらず、成層が弱いことが確認された。

プランクトンの同定・計数結果を図3～6に示した。平成26年度調査における植物プランクトンは、昨年5月～6月にかけて優占種となっていた*Asterionella* sp.や*Fragilaria* sp.といった大型珪藻類に替わって、緑藻類が優占していた。

平成26年5月～7月における動物プランクトンの現存量は、昨年の同時期と比較すると5月で約1/3、6月で約1/6、7月で約1/3と少なかった。

また、7月の水深9mではDO値が0mg/Lとならず、平成25年7月の同水深の調査では少なかった甲殻綱が多く存在していた。

3.2 湖内沈降物及び表層底泥中のChl-a、Phe-a

平成25年度の調査結果[5]から、植物プランクトンの一部は分解されないまま底層まで沈降し、無酸素層において徐々に分解されていると考えた。これを確認するため、湖内沈降物中及び表層底泥のChl-a及びPhe-aを測定した。

		プランクトン数		光合成色素等			水質		
調査月_水深	透明度	植物 (Cell/mL)	動物 (個体数×10^3/m³)	Chl-b (μg)	Chl-a (μg)	Phe-a (μg)	DO (mg/L)	濁度 (ppm)	水温 (℃)
4月_0m	2.3	10,234	50	5.1	22.3	0.691	11.63	5.4	3.5
4月_3m		12,289	30	3.3	22.7	0.565	11.62	5.6	3.4
4月_6m		16,487	120	3.7	22.7	0.753	11.85	5.8	3.4
4月_9m		15,051	100	3.4	22.9	0.438	12.1	5.9	3.4
5月_0m	2.5	9,646	50	1.3	10.9	0.092	10.07	4.3	11.2
5月_3m		8,866	140	1.9	11.8	0.118	10.16	4.2	11.1
5月_6m		6,507	120	0.7	8.9	0.172	9.56	3.7	10.1
5月_9m		5,415	190	0.2	4.7	0.139	9.31	3.7	9.6
6月_0m	2.9	4,234	40	2.0	6.9	0.030	8.93	3.1	14.7
6月_3m		4,888	50	2.8	6.8	0.053	9.4	3.1	13.3
6月_6m		2,907	220	1.6	7.1	0.083	6.53	2.6	11.4
6月_9m		2,481	260	0.3	3.9	0.087	4.04	3.5	10.7
7月_0m	4.5	8,733	10	7.8	16.1	0.091	10.14	2.8	16.9
7月_3m		10,928	160	12.1	14.5	0.128	9.9	2.2	13.6
7月_6m		6,960	310	10.9	13.7	0.139	7.75	7.6	11.9
7月_9m		4,273	400	4.6	6.6	0.078	2.59	2.7	11.0

図２　水深毎のプランクトン数と Chl、Phe 濃度及び水質の季節変化

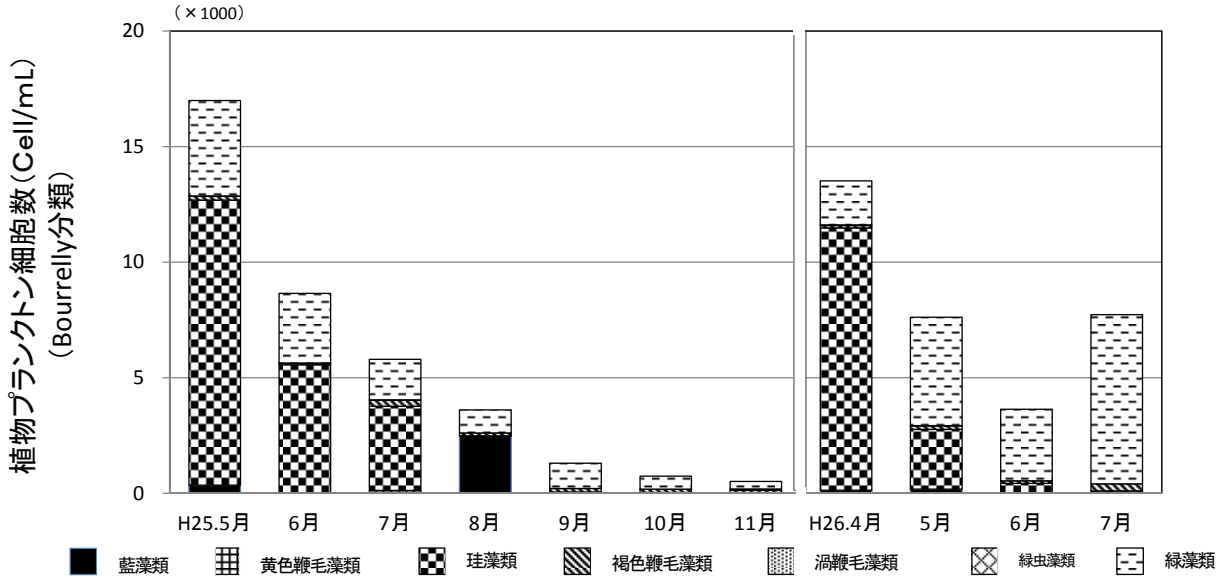


図３　植物プランクトン現存量（月別４水深平均）

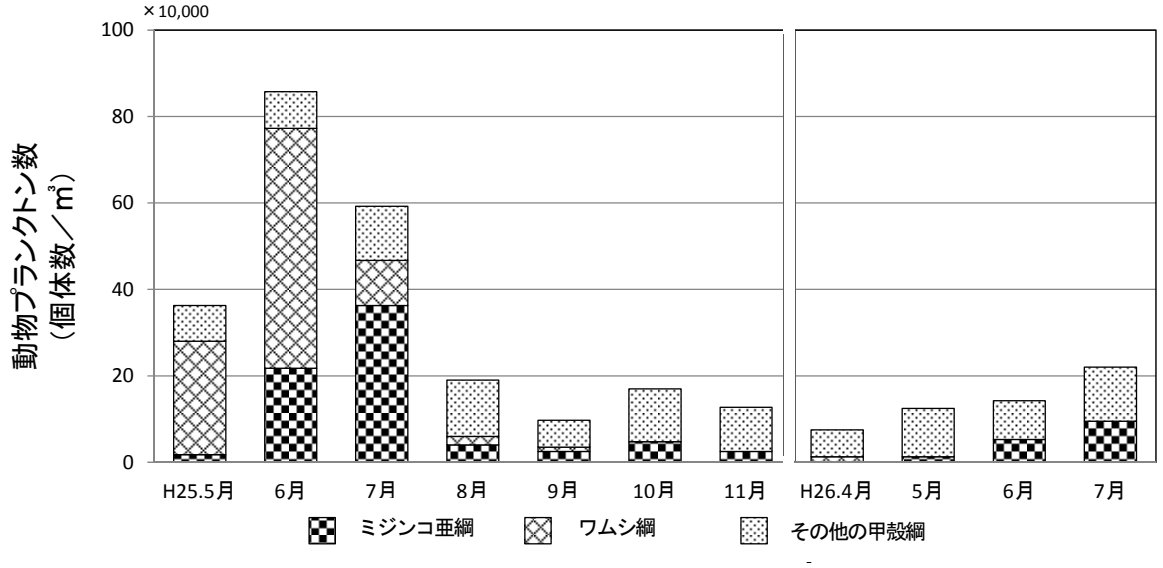
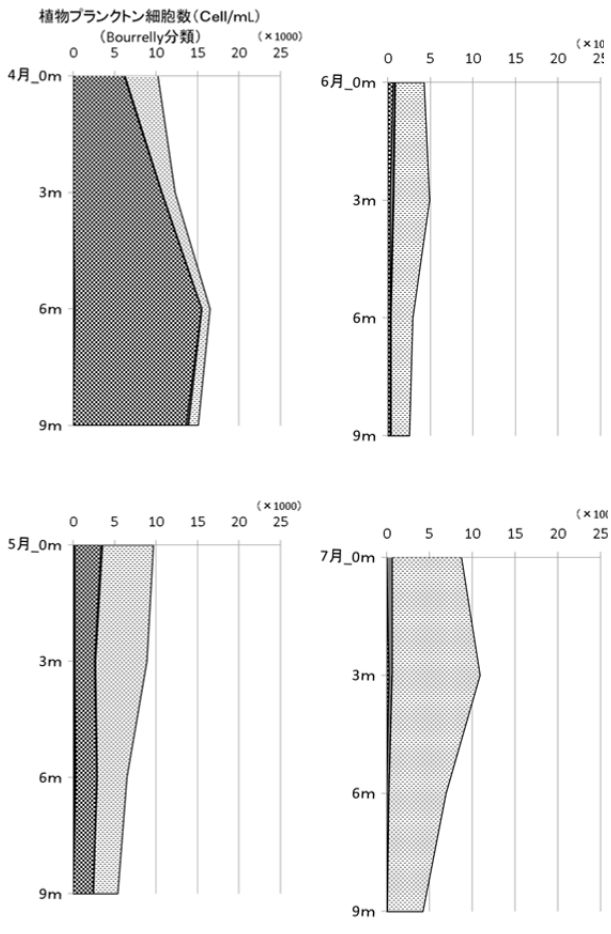


図４　動物プランクトン現存量（月別４水深平均）



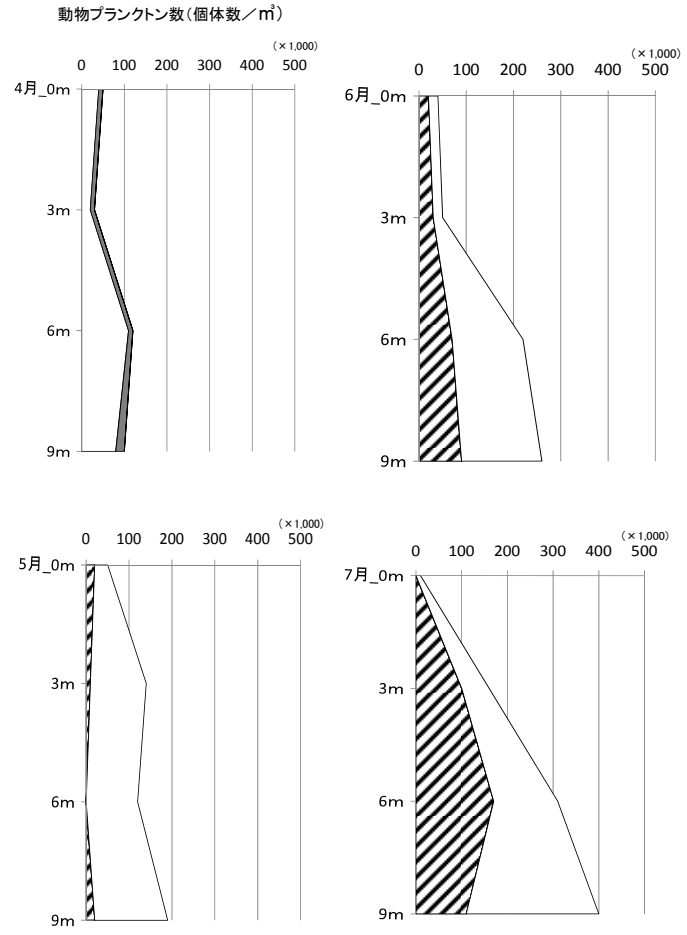


図５ 植物プランクトンの
月別現存量と構成種

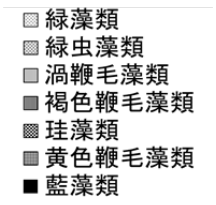
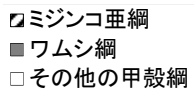


図６ 動物プランクトンの
月別現存量と構成種



調査を行った９月の透明度は2.6m、水中Chl-aは上層が底層のおよそ２倍の値で、上層は下層に比べ植物プランクトンの一次生産が盛んであった。しかし、湖内沈降物中のChl-aは上層より底層の方が1.5倍と多く存在していた。また湖内沈降物中のPhe-aは、上層に比べ底層で約2.2倍多く存在していた(図7)。

一方、表層底泥中には、全ての地点でChl-aが確認されたが、無酸素層にあるY7に比べ同時期で無酸素となっていなかったY5の方がChl/Phe比が高かった。また、成層期である９月に比べ循環期の10月の方がChl/Phe比が高かった（図8)。

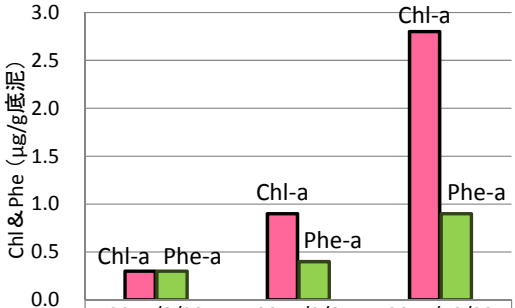
これらのことから、植物プランクトンは活発な一次生産を行うものと水柱において枯死、摂餌等により死滅するものに加え、水柱で分解されず生きたままで沈降、有光層や水温躍層を超えて底層へと沈降した後、無酸素層にて徐々に分解されていると推察された。また、湯ノ湖における湖内沈降物量は循環期に比べ成層期の方が多い[11]ことから、植物プランクトンが成層期における底層の水質に与える影響は大きいと考えられた。

3.3 魚類現存量

魚類現存量は、成魚放流の有無等を考慮し、ヒメマスについてのみ実施した。湯ノ湖への入漁者数、稚魚放流数及び成魚放流数をそれぞれ図9～11に示す。

アンケート（回収率 26.4%）から推計した結果、ヒメマスの期間中の持帰り数は 12,589 尾、総重量 2,164kg であった。一方、期間中の稚魚放流数は201,541尾であり、放流稚魚の体重を 2.38g/尾（H26、増養殖研）と仮定した場合の放流総重量は480kgであった。稚魚放流数から自然死亡数と全持帰り数を差し引いたヒメマス成魚残存数は、35,720尾と推計された(表2）。

一方、ソナーによる現地調査では、魚体が大きなもの（魚影を個々に計上できるもの）が39,236尾、魚体が小さく群集性の魚類が54,570～3,147,337尾と推計された（表3)。今回の結果において、群集性魚類現存量に約60倍の幅があったが、これは群集性魚類の密度の推計法による違いで、魚体が小さなものについて厳密な数値を必要とする場合には、手法を再考する必要があると考える。



	2014/8/20 Y7 表層底泥	2014/9/8 Y5 表層底泥	2014/10/23 Y5 表層底泥
Chl-a	0.3	0.9	2.8
Phe-a	0.3	0.4	0.9
DO	0	4.38	6.14

図8 底泥中Chl-a、Phe-a及び底層DO

また、1978年の調査結果では、魚類現存量は8cm以上で40,150尾(17,600～74,000尾)、8cm未満で342,017尾（186,600～541,500尾）であったが、これを今回の調査結果と比較すると魚体が大きな魚類については大きくかけ離れてはいなかった。

3.4 プランクトンと水質項目との関連

Chl-a 濃度と濁度との相関について、別の要因の影響を受けた[5]平成25年8、9月の夏季底層を除外して、昨年度に引き続いて確認したところ、両者には高い正の相関が確認された(r=0.8262, p<0.01, 図12)。また、Chl-a濃度の4水深平均値と透明度についても同様に高い負の相関が確認された(r=-0.6708, p<0.01, 図13)ことから、湯ノ湖の透明度低下には、植物プランクトン現存量が大きく寄与していることが確認された。

なお、他の湖沼において、夏季底層では植物プランクトンの沈降及び再浮上に加え、無酸素状態によって底泥から溶出したMnが酸化され、凝集し、懸濁態Mnとなった結果、高濁度層が維持されているとの報告[12]がある。湯ノ湖においても、無酸素層のPhe-a[5]とMnが(図14)高局在化していることから、これと同様の現象が発生していると考えられる。

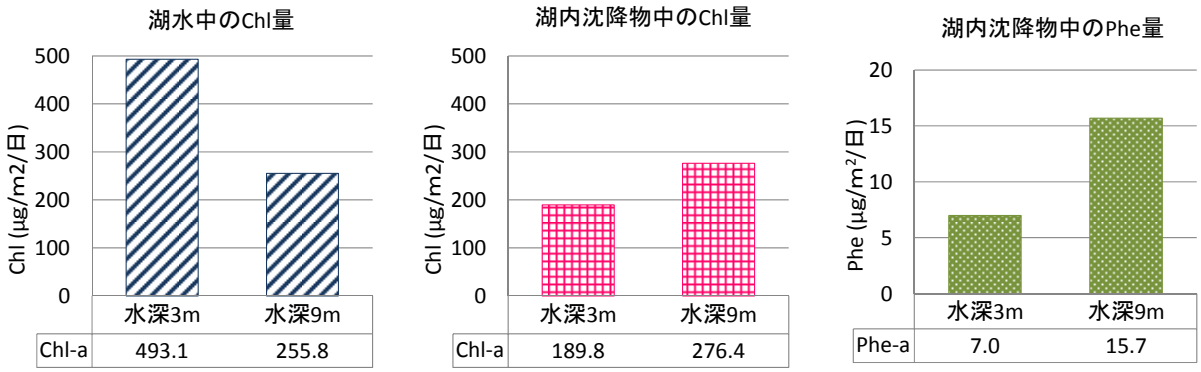


図7 湖水及び湖内沈降物中Chl-a、Phe-a量（地点Y7：H26.9.3）

図 9 湯ノ湖入漁者数の経年変化（S38～H26）

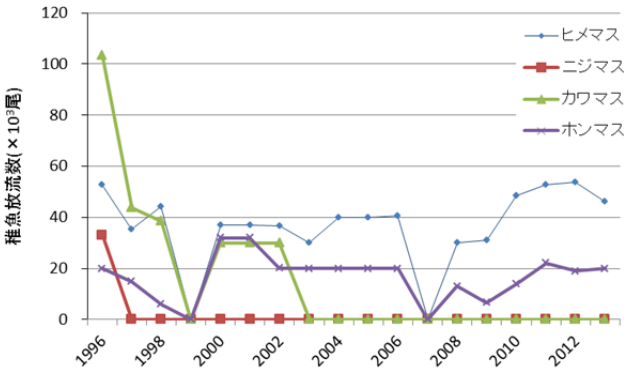


図 10 湯ノ湖稚魚放流数の経年変化（H8～H25）

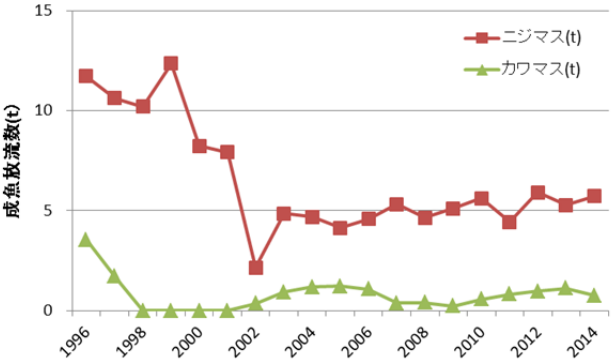


図 11 湯ノ湖成魚放流数の経年変化（H8～H26）

表 2 ヒメマス現存量の推計(H22-H25)

年齢*	湯ノ湖における自然死亡率[7]	H22-H25 自然死亡数(尾)	H22-H25 自然死亡による回帰量(kg)	湯ノ湖における年令別生息尾数比率[7]	H22-H25 成魚残存数(尾)	平均成長量(kg/尾/年)	H22-H25 成長による全固定量(kg/年)
1+	76%	142,848	4,187	91%		0.010	344
2+	5.3%	2,453	395	8.2%		（加重平均値）	
3+	9.5%	4,164	1,091	1.1%	35,720	0.091	3,233
4+	9.5%	3,767	1,364	0.06%		（単純平均値）	
合　計		153,232	7,037	100%			

＊年齢は放流から2歳未満までのものを1+、2歳以上から3歳未満のものを2+として表記している。（以下同じ。）

表 3 ソナーによる魚類現存量の推計（H26.10.23 調査）

水深（m）	水深別容積[9]（m^3）	水深別現存量 最小尾数			水深別現存量 最大尾数		
		単体	群集	合計	単体	群集	合計
0～4	1,320,732	22,545	54,570	93,806	22,545	0	22,545
4～8	931,699	9,535			9,535	404,925	414,460
8～12	453,213	7,119			7,119	2,712,161	2,719,280
12～	14,355	37			37	30,251	30,288
合計	2,720,000	39,236	54,570	93,806	39,236	3,147,337	3,186,572

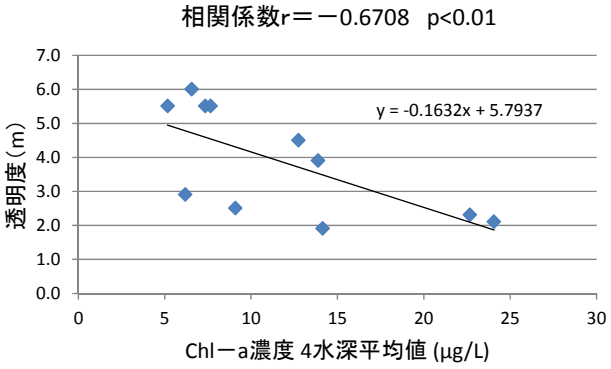


図 12 Chl-a 濃度と濁度の散布図
夏季（H25.8，9 月）底層は除外

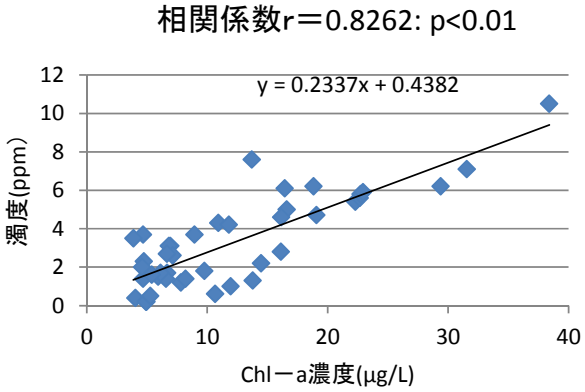


図 13 Chl-a 濃度 4 水深平均値と透明度の散布図

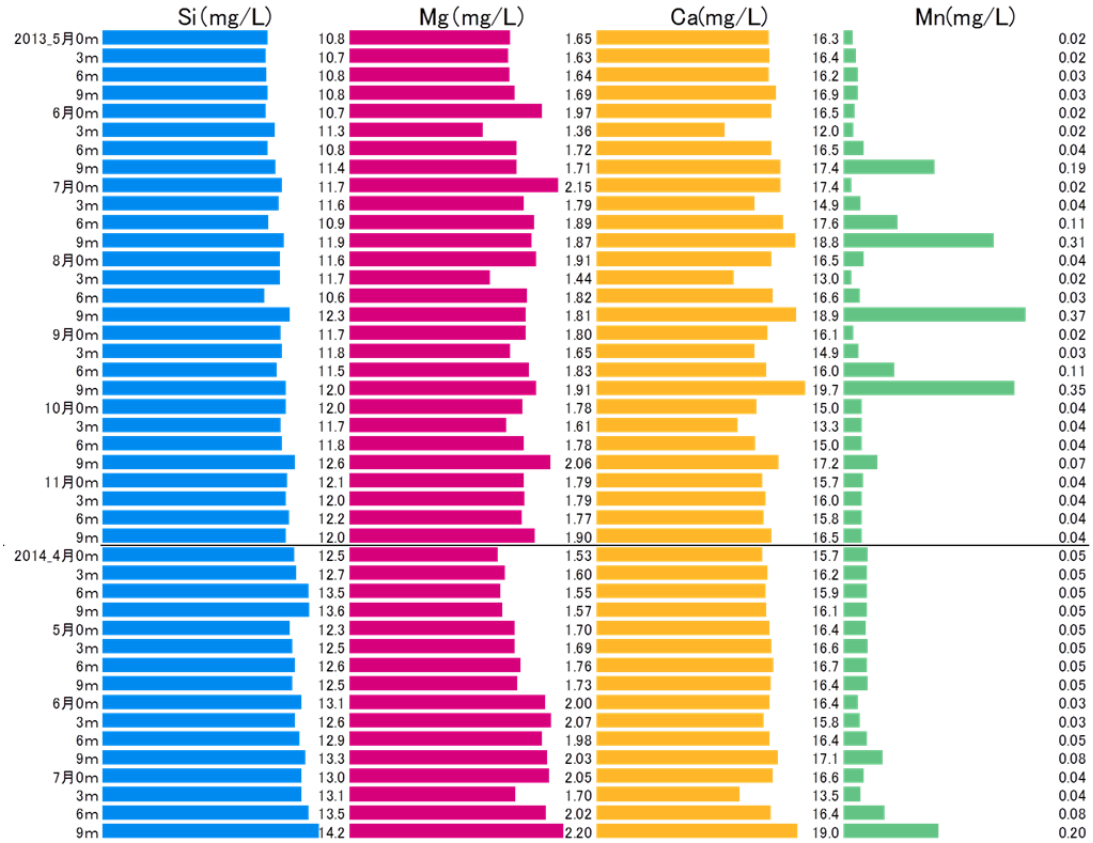


図 14 水深毎のケイ素、マグネシウム、カルシウム、マンガン濃度とその季節変化(H25.5-H26.7)

3.5 コカナダモ等現存量

湯ノ湖北半分における沈水植物の植生面積の経年変化を図15に示す。コカナダモの植生面積は近年減少傾向である一方、ヒメフラスコモやカタシャジクモ等在来種の植生面積は拡大傾向であることが分かる。

また、近年における底泥中のりん含有量[13]は、過去の調査結果[14]と比較して有意に低下しており、湖水中に含まれるりん濃度も年々低下し、成層期における上層と底層のりん濃度の差は縮小傾向にある(図16)。コカナダモ等沈水植物の生長は底泥りん濃度に強く依存していると言われている[16)17)]ことから、近年における湖水中のりん濃度の変化及びコカナダモの植生面積の減少は、流入水中のりんの減少に加えて、コカナダモの刈取りによる水質浄化等の事業が実施されてきた結果と推察される。

3.6 栄養塩類現存量

湯ノ湖の各構成要素中の栄養塩類含有量を推計した結果を表4に示す。

平成23年度常時監視結果から、湖水の全層平均濃度はN 0.42mg/L、P 0.019mg/L と計算され、湯ノ湖の全容積2,720,000m^3[6)]を用いて湖水中の栄養塩類現存量は、N 1,100kg、P 52kg と推計された。

本調査結果から、湖水中のプランクトンを含むSSは湖全体で 8,200kg、また、湖水の栄養塩類濃度のうち、SSによる寄与分はN 0.062mg/L、P 0.015mg/L と計算され、栄養塩類現存量としてN 168kg、P 42kg と推計された。

魚類は、魚体体重を文献値[8)]の0.17kg/尾とした場合、湖全体で湿重量約6,100kg 存在すると計算され、魚体中の栄養塩類含有量として文献値[18)]N 88g/kg-dry、P

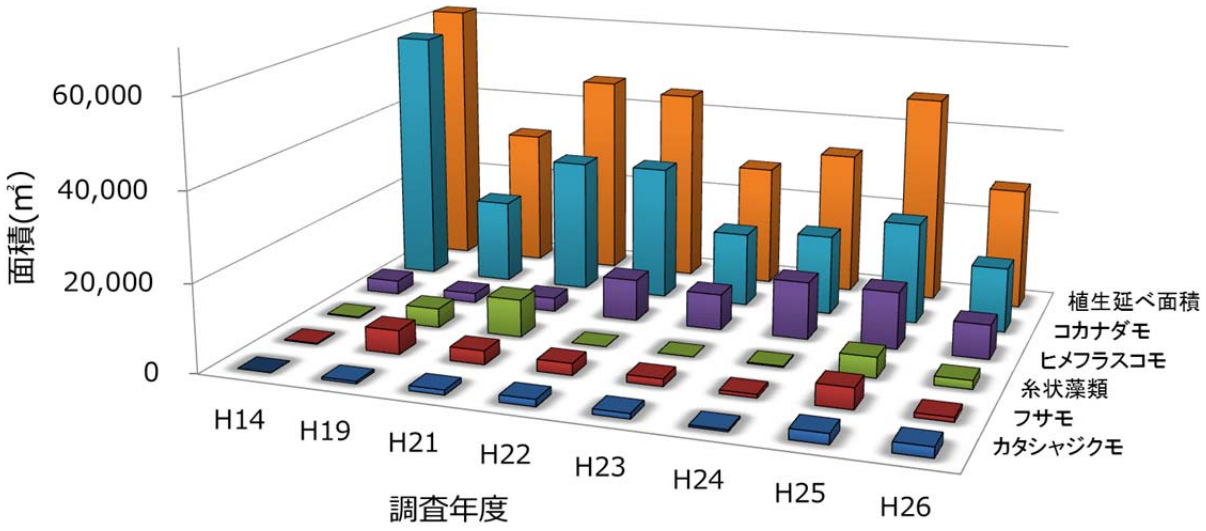


図15 沈水植物の分布面積（湯ノ湖北半分）　混在箇所は個々の面積に含む

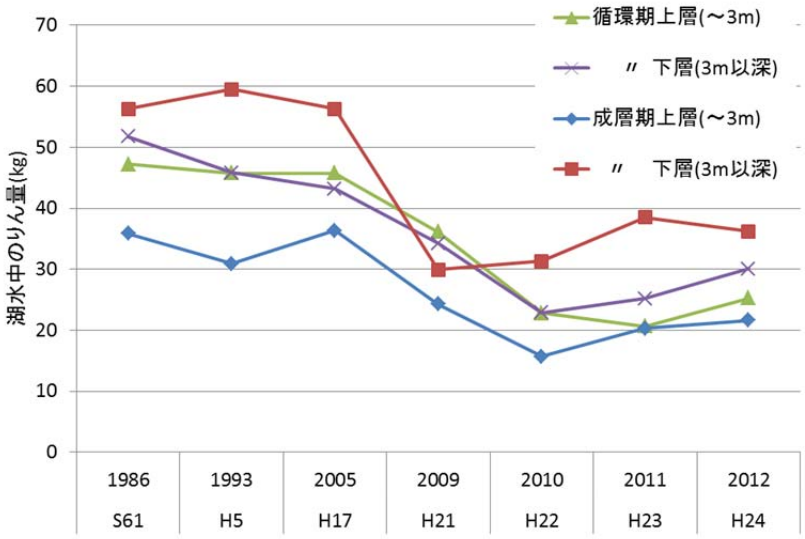


図16 全りん(水質)の経年変化（S61～H24）

表4 各構成要素の窒素・りん含有量

単位(湖水・SSを除く):mg/g-dry

	湖水 (mg/L)	SS (mg/L)	魚類[18]	ユスリカ[2]	ヨシ	
					地上部	地下部
全窒素	0.42	0.062	88	80.2	12.2	7.6
全りん	0.019	0.015	7.5	3.2	0.8	0.7

	ショウブ		コカナダモ[10]	底泥[15]
	地上部	地下部		
全窒素	15.5	9.2	46.6	4.5
全りん	1.4	1.1	8.17	0.47

7.5g/kg-dry を用いると、栄養塩類現存量は、N 140kg、P 12kg と推計された。また成長の際、年合計 340kg が固定され、期間中自然死亡による回帰量は 7,000kg と推計された。全持ち帰り重量 2,164kg から放流総重量 480kg を差し引くと、調査期間中に湯ノ湖から持ち出された魚体湿重量は 1,684kg となり、栄養塩類の量としては、N37kg、P3kg と試算された。

ユスリカの栄養塩類現存量は平成22年の調査[2]により得たユスリカ現存量(乾燥重量) 2.9ｔを用いて計算した結果、N230kg、P9.2kg であった。

同様に、ヨシ及びショウブの栄養塩類現存量を計算した結果、ヨシがN24kg、P1.7kg(地上部としてはN19kg、P1.2kg)、ショウブが N17kg、P1.9kg(地上部としてはN4.3kg、P0.4kg)であった。

また、コカナダモは、平成24年の調査[4]で得た現存量(4.5t)と平成14年の調査で得られた栄養塩類含有量の値[10]を用いて計算した結果、N210kg、P37kg であった。

底泥は、平成 20 年に実施した調査[15]により得た栄養塩類含有量 N:4.5mg/g-dry、P:0.47mg/g-dry、底泥量約 86,000t を用いて計算した結果、N390t、P41t であった。

4 まとめ

今回を含む近年の調査結果からは、以前の調査結果と比較して、水質、底質、コカナダモのいずれについてもりん含有量が低下していることが確認され、保全事業等、人為的な負荷低減の結果と考えられた。湖では、湖水など様々な構成要素の間で栄養塩類の固定と回帰による物質循環が繰返し行われている。今後も一定期間毎に各構成要素の状況を把握していく必要があると考える。

5 謝辞

本調査に際して、ご指導をいただきました国立環境研究所生態系機能評価研究室の野原精一室長に深謝いたします。また、ご協力いただいた全国内水面漁業協同組合日光支所、日光湯元レストハウスの皆様に深謝いたします。

6 参考文献

1) 田中実,魚探による資源量推定法に関する基礎研究,淡水研報,28巻2号p77-139,1978
2) 石川俊行他, 湯ノ湖水環境保全調査 (底生生物編),栃木県保健環境センター年報, 第16号, 2011
3) 福田悦子他, 湯ノ湖水環境保全調査 (湯ノ湖流出入水調査編),栃木県保健環境センター年報,第18号,2013
4) 塩月智子他,湯ノ湖水環境保全調査(水生植物の植生),栃木県保健環境センター年報, 第18号, 2013
5) 塩月智子他, 湯ノ湖水環境保全調査(プランクトンの季節変化-水質との関係), 栃木県保健環境センター年報,第19号,57-63,2014
6) 栃木県,栃木県湖沼水質保全基本指針, 1993
7) 田中実,マス類の放流効果に関する研究-Ⅰ,湯ノ湖に放流したヒメマスの生残について,淡水研報,20巻2号, p81-91, 1970
8) 徳井利信,日光国立公園内湖沼ヒメマスの年齢と成長,水産増殖,38巻2号,p165-169,1990
9) 白石芳一他,日光湯ノ湖における水産開発のための基礎研究,淡水研報,14巻1号,p37-53,1964
10) 田村博他, 湯の湖におけるコカナダモに関する調査研究, 栃木県保健環境センター年報, 第8号, 2003
11) 国立公害研究所,陸水域の富栄養化防止に関する総合研究(Ⅷ)総括報告,国立公害研究所研究報告第57号,1984
12) 鷺邦彦他,びわ湖における湖底高濁度層の季節変化,Jpn. J. Limnol.,58:27-44,1997
13) 福田悦子他,湯ノ湖の底泥に関する調査(第2報),栃木県保健環境センター年報, 第15号,70-74,2010
14) 小池正純他,湯ノ湖底泥の性状について (第3報),栃木県公害研究所年報,第13号,13-25,1989
15) 福田悦子他,湯ノ湖の底泥に関する調査, 栃木県保健環境センター年報, 第14号,p69-72,2009
16) 永坂正夫,木崎湖における移入沈水植物コカナダモの個体群衰退と生長制限要因としての底泥栄養塩,金沢大学大学院自然科学研究科博士学位論文,2006
17) 沖陽子,雑草の多面的機能を活用した環境修復に関する実証研究,雑草研究,Vol.58(4),p190-197,2013
18) 生物地球科学 南川雅男ら, 培風館, 2006, 東京