

論文

琵琶湖周辺内湖の植物プランクトン増殖に
対する栄養評価三田村 緒佐武¹、尾崎 正樹²、後藤 直成³Evaluation of Nutrient Deficiency for Phytoplankton Growth
in Lagoons connected to Lake BiwaOsamu MITAMURA¹, Masaki OZAKI² and Naoshige GOTO³

1. Faculty of Education, Shiga University

2. Dear departed

3. School of Environmental Sciences, University of Shiga Prefecture

To elucidate deficiencies in the nutrients needed for phytoplankton growth, nutrient limits were examined in 24 lagoons, SATOMIZU "Naiko", connected to Lake Biwa. The evaluation parameters consisted of particulate bioelements (particulate carbon, nitrogen and phosphorus), chlorophyll-a, and nutrient (nitrogenous and phosphorus compound) concentrations and their ratios. The phytoplankton in almost all lagoons was not limited by either nitrogen or phosphorous compounds. However, phytoplankton growth in some shallow lagoons with low phytoplankton concentrations was affected by phosphorus nutrients. All lakes throughout the watershed were identified as eutrophic based on total phosphorus concentration as the trophic state index. Furthermore, six lagoons were identified as oligotrophic or mesotrophic lakes, and the other 18 lagoons were identified as eutrophic lakes, judging from chlorophyll-a concentration indicators.

Keywords: nitrogen and phosphorus deficiency, trophic state index, phytoplankton, SATOMIZU, lagoon "Naiko", Lake Biwa

1 はじめに

琵琶湖周辺には内湖と称される潟湖が1940年には37内湖(2,900 ha)あったが、食料不足解消の田畑に転用するために干拓され、現存は23内湖(530 ha)にすぎない。それまで内湖は、比較的自然潟湖の生態学的景観であったが、高度成長期を経て人間生活の影響を多大に受けるようになり、三田村ら(2014)が指摘する2次自然景観の「里水」内湖に変貌した。内湖は、湖内で生息・生育する水生生物のみならず内湖生態系を利用する生物が多様である(中西・関野, 1997; 山田・野崎, 1997; Nagoshi, 1965; Hoyer

and Canfield, 1994; Mehner et al., 2005; 西野, 2005; 浜端, 2010)。倉田(1984, 1988)は、琵琶湖周辺内湖が、水質浄化機能、生態機能、治水機能、利水機能、観光機能、景観機能、水産機能、生活機能を有しているとした。湖水中の生元素化合物(Miyake et al., 2002; 三田村・後藤, 2005)、懸濁有機物(大久保, 1998)、および植物プランクトンによる基礎生産(三田村・後藤, 2005; Mitamura et al., 2009)に関する研究成果から、琵琶湖内湖は生物地球化学的循環特性を有することが報告されている。

Forsberg and Ryding(1980)は、スウェーデン湖沼に

¹ 滋賀大学教育学部 ² 故人 ³ 滋賀県立大学環境科学部

において溶存無機全窒素とリン酸態リン現存量の比 (DIN : DIP 比) を Redfield (1958) が報告した通称 Redfield 比と比較することにより、植物プランクトン増殖を制限する要因を判断する指標を提唱し、DIN : DIP 比 (質量比) が 5 以下は窒素律速、12 以上はリン律速であるとした。Tezuka (1984) は、湖水の窒素およびリン栄養塩化合物の現存量比から、琵琶湖では植物プランクトン増殖にリンが制限因子として働いていると判断した。一方、Healey and Hendzel (1980) は、懸濁態炭素 (PC)、懸濁態窒素 (PN) および懸濁態リン (PP) の比から植物プランクトン増殖に対する栄養制限要因の指標を提唱した。そこで、Tezuka (1985) と Nakanishi et al. (1990) は、湖水の PC : PN : PP 比から琵琶湖の植物プランクトンに対する栄養制限因子を評価した。Aizaki and Otsuki (1987) は、水深が浅い富栄養化した霞ヶ浦において、PC、PN、および PP 現存量にクロロフィル a (Chl.a) 現存量を加えたこれらの比を指標として植物プランクトンに対する栄養制限因子を評価した。

Vollenweider and Kerekes (1980) は、植物プランクトン現存量は湖水中の全窒素と全リン現存量との間に正の相関があり、この関係は湖沼の富栄養化対策管理の基礎に使用できると報告した。さらに OECD (1982) は、年平均の全リン、全窒素および Chl.a 現存量から湖沼の栄養段階の解析基準を提唱した。Sakamoto (1966)、Carlson (1977)、Forsberg and Riding (1980) は、DIP 現存量レベルから湖沼の栄養段階を評定したが、彼らが用いた栄養段階の判定基準の現存量のレベルは異なる。

しかし、これまで琵琶湖周辺「里水」内湖のすべてを対象として、これら懸濁態生元素および溶存栄養塩化合物の現存量を詳細に解析し、内湖の植物プランクトン増殖に対する栄養制限要因を研究した報告はない。本研究は、溶存窒素栄養塩化合物とリン栄養塩化合物、懸濁態炭素、懸濁態窒素、懸濁態リン、クロロフィル a の現存量、およびこれらパラメーター間との関係の分布変動から、植物プランクトンの基礎生産に対する制限栄養塩因子を探ることを目的とした。さらに本研究は、湖水の全リンとクロロフィル a 現存量から内湖の栄養段階を評定し、琵琶湖周辺内湖の富栄養化の現況を調べ、植物プランクトン増殖に対する栄養制限との関わりを明らかにすることを試みた。

2 方法

2-1 研究対象内湖

調査を行なった琵琶湖周辺内湖を図 1 に示す。調査研究対象とした内湖は、現存すべての 24 内湖である。

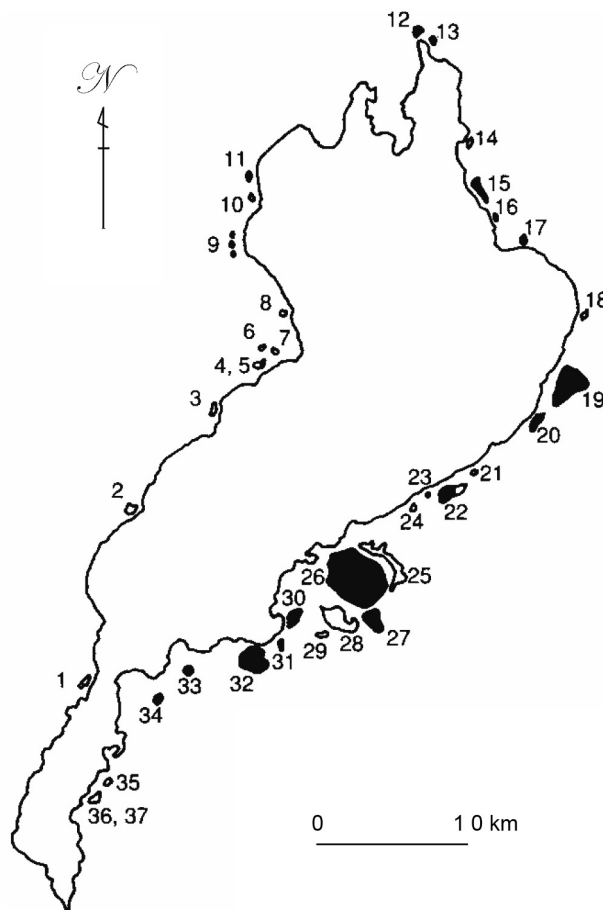


図 1 1940 年に確認された琵琶湖周辺内湖 (倉田, 1984). 現存の堅田内湖 (1)、近江舞子内湖 (2)、乙女ヶ池 (3)、松ノ木内湖 (4)、五反田沼 (6)、十ヶ坪沼 (7)、菅沼 (8)、浜分沼 (10)、貫川内湖 : 南 (11)、貫川内湖 : 北 (11)、野田沼 : 湖北 (14)、南浦内湖 (16)、細江内湖 (17)、蓮池 (18)、野田沼 : 彦根 (21)、曾根沼 (22)、神上沼 (24)、伊庭内湖 (25)、西の湖 : 西 (28)、西の湖 : 東 (28)、北の庄沢 (29)、北沢沼 (31)、志那中湖 (35)、柳平湖 (36)、および平湖 (37) を調査対象とした。黒く塗りつぶして記したものは干拓により消失した内湖。

図 1 に白抜きで記した堅田内湖 (1)、近江舞子内湖 (2)、乙女ヶ池 (3)、松ノ木内湖 (4)、五反田沼 (6)、十ヶ坪沼 (7)、菅沼 (8)、浜分沼 (10)、貫川内湖 : 南 (11)、貫川内湖 : 北 (11)、野田沼 : 湖北 (14)、南浦内湖 (16)、細江内湖 (17)、蓮池 (18)、野田沼 : 彦根 (21)、曾根沼 (22)、神上沼 (24)、伊庭内湖 (25)、西の湖 : 西 (28)、西の湖 : 東 (28)、北の庄沢 (29)、北沢沼 (31)、志那中湖 (35)、

柳平湖 (36)、および平湖 (37) が現存内湖である (カッコ内の数字は図中に記載した番号と対応する)。なお、図中に黒く塗りつぶして記したものは、現在は消失した内湖である。かつて大中の湖 (図 1 の 26) は広大な面積を誇っていたが、現在は干拓されて消失した。現存する琵琶湖内湖は、狭い面積の五反田沼 (1.2 km²) から比較的広い面積を有する西の湖 (221.9 km²) までさまざまである (Miyake et al., 2002)。なお、本研究対象とした 24 内湖の中には貫川内湖のように小水路で分割された内湖もある。この両内湖を同じ内湖として名称を用いることがあるが、本研究では両内湖を貫川内湖 (北) と貫川内湖 (南) とした。したがって、一般に現存内湖数は 23 と称されるが (倉田, 1984)、本研究の琵琶湖周辺の現存内湖数は 24 になる。さらに、最大内湖の西の湖は、内湖の東部定点と西部定点 (この定点は、琵琶湖への流出河川の長命寺川に近い、西の湖水質の全平均値を示すと考えられる) を設定した。内湖景観は、周辺の土地利用や内湖利用の影響を受け、さまざまな特徴がある。例えば、野田沼 (彦根)、曾根沼、伊庭内湖のように一部分が干拓された内湖、五反田沼、十ヶ坪沼、菅沼のように緑地公園整備が進行した内湖、そして堅田内湖のように水産物の養殖に利用されている内湖などである。

2-2 湖水の採取と測定方法

調査観測は、2004 年 6 月、8 月、10 月、そして 12 月の 4 回行なった。内湖の開水面水域を見渡せる湖岸から、ロープ付きプラスチックペールを用いて数 m 沖の表面水を採取した。採取した試水の水温 (WT) は電気温度計 (Tohodentan type ET-5)、透視度 (Tr) は 1 m の透視度計、濁度 (Turb) は濁度計 (HACH 2100N)、電気伝導度 (EC) はポータブル電気伝導度計 (Yokogawa model SC-51)、そして pH はガラス電極法 (Yokogawa PH-82) を用いてそれぞれ測定した。

現場から持ち帰った試水は、420℃で燃焼処理したガラス繊維ろ紙 (Whatman GF/F) でただちにろ過した。ろ紙は懸濁態生元素 (懸濁態炭素; PC、懸濁態窒素; PN、懸濁態リン; PP)、およびクロロフィル a (Chl.a) の分析に、ろ液は栄養塩化合物 (アンモニア態窒素; NH₄⁺-N、亜硝酸態窒素; NO₂⁻-N、硝酸態窒素; NO₃⁻-N、リン酸態リン; PO₄³⁻-P)、および溶存有機物 (溶存有機炭素; DOC、溶存有機リン; DOP) の分析に供した。なお、ろ紙およびろ液は、実験室における化学分析まで -20℃で凍

結保存した。ケイ酸態ケイ素 (DSi) 測定のための試水は、ろ紙ろ紙 (Advantec No.5C) でろ過してろ液を分析まで冷蔵庫で冷却保存した。NH₄⁺-N はインドフェノール法 (Sagi, 1966)、NO₂⁻-N は BR 法 (Bendschneider and Robinson, 1952)、NO₃⁻-N は硫酸ヒドラジニウム法 (Mitamura, 1997) で測定した。PO₄³⁻-P (DIP) はアスコルビン酸還元によるモリブデン青法 (Murphy and Riley, 1962)、DSi はモリブデン黄法 (Mullin and Riley, 1955) で測定した。DOC は全有機炭素計 (Shimadzu TOC-5000A) を用い、DOP は Menzel and Corwin (1965) によるペルオキシ二硫酸カリウム分解法で測定した。PC と PN は CHN コーダー (Yanaco MT-5 type) を用いて測定した。PP は Menzel and Corwin (1965) に従った。Chl.a 現存量はろ紙上の色素を 90% アセトンで抽出し、蛍光光度計 (Turner 10-AU) で測定した。

3 結果と考察

3-1 内湖における生元素化合物の分布と懸濁物の特徴

琵琶湖周辺 24 内湖 25 定点において測定した水質パラメーター (WT、Tr、Turb、EC、pH、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、DIP、DSi、DOC、PC、PN、PP、および Chl.a 現存量) の分布変動を表 1 に示す。なお表は、それぞれのパラメーターの 6 月、8 月、10 月、12 月に得られた値から算出された平均値、標準偏差、および変動計数を示している。水温は、12 月に低いほかの季節は比較的高かった。Tr ならびに Turb から判断すると、内湖水は比較的濁水に近いといえる。そしてそれぞれの内湖ごとに、また季節ごとに水中浮遊懸濁量は変動していた。EC は、琵琶湖北湖の西岸に近い内湖で低く、東岸に位置する内湖は高い値であった。この分布特徴は、Miyake et al. (2002) が指摘したように、内湖集水域の地質が反映した結果であると考えた。琵琶湖南湖東岸に位置する柳平湖と平湖は植物生産活性が高いために pH が高く、北湖西岸域の内湖は低い傾向があるため活性が低いと考えられた。なお、北沢沼の pH は変動が激しかった。内湖における現存量の多さから判断すると富栄養化関連栄養塩化合物として機能しないと考えられる DSi は、EC の分布変動と異なり、内湖ごとにまた季節ごとに比較の変動は小さく安定したパラメーターであると考えられた。なお、現存量が低い浜分沼や五反田沼などにおいては、DSi は珪藻の栄養源として考慮する必要がある。DOC と DOP 現存量は、東岸に位置する内湖で高く集水域などからの汚濁負荷の影響を受けていると考

えられた。それぞれの内湖ごと季節ごとの変動は比較的小さかった。

溶存無機全窒素（DIN： $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ の合計）、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ およびDIP現存量は、琵琶湖北湖東岸と南湖岸に位置する内湖で高く、北湖西岸内湖で低い傾向があった。人間生活による内湖集水域からの流入負荷による影響を受けた結果であると考えた。今後、集水域の土地利用や内湖流入水の汚濁処理などの実態を把握する必要がある。これら窒素栄養塩化合物の現存量は夏季に低く冬季に高くなる傾向を示したが、内湖ごとに大きく異なり、また季節変動も激しかった。一方、DIP現存量は、各内湖において明らかな季節変化の傾向を示さなかった。高い現存量のPC、PNが、十ヶ坪沼と平湖で観測され、細江内湖の約10倍現存していた。そして、夏季に高く冬季に低くなる季節変化を示した。一方、PP現存量はPCとPNの分布と異なった変動パターンを示した。これら懸濁態生元素は、窒素栄養塩化合物やリン栄養塩化合物のように激しく変動しないが、それぞれの内湖で、そして季節によってもかなり異なっていた。Chl.a現存量は、懸濁態生元素の現存量と同様に夏季に高く、冬季に低い季節変化傾向を示したが、内湖ごとに大きく変動していた。とくに十ヶ坪沼のChl.a現存量が他の内湖でPCとPNから想定されるより高いことから理解されるように（表1）、植物プランクトン現存量は、それぞれの内湖ごとに、そして季節ごとに大きく異なっていたことを示す。

本研究水域とした水深が浅い琵琶湖周辺の「里水」内湖が、いかなる水環境にあるのかを水中懸濁物の特徴から明らかにしようと試みた。水域に生息する植物プランクトン細胞のPC、PN、PP量とChl.a量の比は、植物プランクトンの生理状態や種によって異なることがよく知られており、一般にPC：Chl.aが30～100、PN：Chl.aが5～15、PP：Chl.aが2～4の値を得ることが報告されている（例：西條・三田村，1995）。琵琶湖周辺内湖においてPC：Chl.a、PN：Chl.a、PP：Chl.a比を計算した結果、一般に得られる植物プランクトンの比より高い値が半数近くの内湖で得られた。これは、琵琶湖内湖水は、植物プランクトン以外のデトリタス状の有機物を多量に含んでいたことを示唆している。一方、比較的高いChl.a現存量が測定された内湖では、これらは低い比の値が計算され、この内湖水の懸濁物のほとんどは、植物プランクトンで構成されていたと考えた。このことは、夏季と秋季に十ヶ坪沼と秋季の近江舞子沼できわめて高いChl.a現存量が得られ、それに対応し

たきわめて低いPC：Chl.a比が後述で示す表2からも理解される。

これらのことは、一般に水深が浅い琵琶湖周辺内湖の水中懸濁有機物は、植物プランクトン以外の物質を多量に含むことを示唆している。この原因として、内湖で生産された沈積堆積物が波風により湖底から再懸濁したことなどが考えられる。また、自然あるいは人間活動による内湖集水域からの有機懸濁物の流入負荷も考慮しなければならない。なお、本研究では、水中Chl.a現存量を植物プランクトン現存量の指標としたが、大型水生植物の破片あるいは付着藻類の剥離色素量の一部が測定されていたことは言うまでもない。

3-2 溶存無機窒素と溶存無機リンの比および懸濁物質の生元素比から判定した植物プランクトン増殖の栄養制限因子

本観測期間に得られたDIN：DIP比は、冬季に高くなる傾向が認められた。これは、DIP現存量が明らかな季節変化を示さなかったが、DIN現存量が冬季に高くなったことによる。これらのことから、上述したように内湖の栄養塩化合物現存量は内湖ごとに、また季節によっても大きく異なり、水中の構成栄養塩は変動していると考えられた。したがって、内湖水の栄養塩化合物は、湖内で生産された自生性有機物の分解・無機化に伴った生成と、内湖外からの他生性の栄養塩種の供給が複雑に絡み合い、内湖の内部生産、すなわち植物プランクトン、付着藻類、ならびに大型水生植物などの光合成基礎生産を支えていると想定された。そこで、Forsberg and Ryding (1980) が提唱した

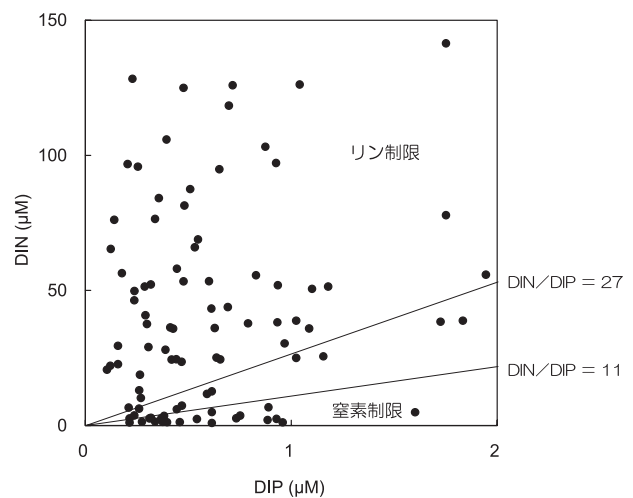


図2 DIN：DIP 比值（●）から判定した植物プランクトンの栄養制限関係図。図中の直線は Forsberg and Ryding (1980) による判定基準線を示す。

DIN : DIP モル比と Redfield モル比との比較から、内湖の植物プランクトン増殖因子を判定することを試みた。本研究結果の DIN : DIP 比から内湖の栄養状態を判定するために、DIN : DIP 比のおよそ 11 以下を窒素律速、そしておよそ 27 以上をリン律速とした (図 2)。図に見られるように、一部の琵琶湖周辺内湖では、植物プランクトン増殖に対して窒素栄養塩化合物が栄養制限因子として働いていたが、ほとんどの内湖は、植物プランクトンの増殖に対してリンが制限因子として機能していたと考えられた。

本調査で得られた PC、PN および PP 現存量の値から、それぞれの内湖における PC : PN : PP モル比を計算し、その季節変動を表 2 に示した。PC : PN 比の測定期間中の平均値が最大となった内湖は南浦内湖で、最小値は伊庭内湖で得られた。一方、PC : PP 比の最大平均値は曾根沼で、最小平均値は細江内湖で得られた。これらの懸濁態生元素モル比と Redfield (1958) が報告した Redfield モル比の

106 : 16 : 1 とを比較すると、琵琶湖周辺内湖の平均 PC : PN 比は 6.5 と計算され、Redfield 比の 6.6 と同程度の値であった。しかし、内湖水の平均 PC : PP 比、および平均 PN : PP 比はそれぞれ 62 および 9.5 と計算され、Redfield 比の 106 および 16 よりかなり低かった。

Healey and Hendzel (1979, 1980) は、PC : PN、PC : PP、PN : PP 比から、植物プランクトン増殖に対する栄養制限因子を評価することを提唱した。彼らとその判定基準とした関係をモル比で表現すると、植物プランクトン増殖に対して、PC : PN 比が約 10 以下であれば窒素制限は無く、10 ~ 15 であれば中程度の窒素制限があり、15 以上であれば厳しい窒素制限がある。一方、PC : PP 比が約 130 以下であればリン制限は無く、130 ~ 260 であれば中程度のリン制限があり、260 以上であれば厳しいリン制限を植物プランクトンは増殖の際に受けることになる。

それぞれの琵琶湖内湖水の PC と PN あるいは PC と PP

表 2 各内湖における懸濁態炭素 (PC)、窒素 (PN)、リン (PP) のモル比、および懸濁態炭素 (PC) とクロロフィル a (Chl.a) の重量比の季節変動。

	PC : PN : PP				PC : Chl.a			
	June	August	October	December	Jun.	Aug.	Oct.	Dec.
堅田内湖	86 : 14.4 : 1	77 : 14.2 : 1	51 : 6.3 : 1	89 : 15.0 : 1	50	65	144	78
近江舞子沼	80 : 14.1 : 1	86 : 11.5 : 1	130 : 20.6 : 1	76 : 15.5 : 1	81	82	20	97
乙女ヶ池	83 : 11.8 : 1	71 : 13.4 : 1	86 : 10.3 : 1	53 : 8.5 : 1	146	65	46	123
松ノ木内湖	46 : 7.6 : 1	18 : 2.5 : 1	21 : 2.8 : 1	26 : 8.2 : 1	49	215	51	417
五反田沼	47 : 7.7 : 1	73 : 10.5 : 1	49 : 7.5 : 1	84 : 11.9 : 1	127	136	49	114
十ヶ坪沼	38 : 7.8 : 1	153 : 22.9 : 1	47 : 6.9 : 1	55 : 7.6 : 1	224	21	46	33
菅沼	33 : 5.0 : 1	43 : 8.1 : 1	17 : 2.6 : 1	29 : 4.4 : 1	94	89	139	516
浜分沼	120 : 17.6 : 1	68 : 11.9 : 1	100 : 13.5 : 1	86 : 13.9 : 1	32	173	49	135
貫川内湖 (南)	89 : 15.2 : 1	76 : 12.2 : 1	37 : 5.1 : 1	39 : 4.8 : 1	133	97	505	1080
貫川内湖 (北)	54 : 7.8 : 1	75 : 13.5 : 1	54 : 9.7 : 1	58 : 12.1 : 1	109	65	41	121
野田沼 (湖北)	115 : 12.5 : 1	85 : 11.3 : 1	74 : 11.4 : 1	73 : 11.2 : 1	122	109	31	63
南浦内湖	128 : 13.1 : 1	45 : 7.1 : 1	69 : 11.2 : 1	105 : 12.6 : 1	133	78	30	72
細江内湖	20 : 4.3 : 1	16 : 2.3 : 1	12 : 2.3 : 1	14 : 1.7 : 1	168	1050	80	147
蓮池	30 : 4.4 : 1	31 : 5.1 : 1	40 : 6.0 : 1	25 : 3.3 : 1	268	464	65	130
野田沼 (彦根)	63 : 10.2 : 1	69 : 12.0 : 1	35 : 5.4 : 1	42 : 6.7 : 1	196	125	79	195
曾根沼	117 : 16.3 : 1	131 : 16.4 : 1	67 : 14.4 : 1	165 : 22.5 : 1	156	99	139	94
神上沼	48 : 8.2 : 1	48 : 9.3 : 1	22 : 3.3 : 1	31 : 5.6 : 1	83	58	280	125
伊庭内湖	129 : 28.4 : 1	70 : 12.8 : 1	56 : 8.6 : 1	48 : 8.1 : 1	43	108	112	126
西の湖 (西)	81 : 15.3 : 1	53 : 11.0 : 1	50 : 6.9 : 1	88 : 17.2 : 1	66	64	90	152
西の湖 (東)	63 : 12.0 : 1	53 : 10.0 : 1	46 : 7.5 : 1	146 : 16.8 : 1	106	75	128	61
北の庄沢	56 : 9.3 : 1	92 : 13.2 : 1	25 : 3.0 : 1	39 : 7.2 : 1	60	127	406	234
北沢沼	83 : 11.8 : 1	40 : 6.4 : 1	70 : 9.3 : 1	94 : 14.1 : 1	140	67	84	98
志那中湖	20 : 3.4 : 1	25 : 4.3 : 1	16 : 1.9 : 1	11 : 2.1 : 1	320	128	390	591
柳平湖	102 : 14.0 : 1	114 : 13.5 : 1	98 : 15.7 : 1	59 : 8.2 : 1	88	152	92	93
平湖	96 : 14.9 : 1	112 : 16.5 : 1	130 : 18.7 : 1	109 : 13.3 : 1	54	231	71	124

の関係を図3に示した。PC:PN 関係図に見られるように、6月に湖北野田沼と南浦内湖でわずかに中程度の窒素制限を受けていたが、琵琶湖周辺内湖のほとんどは窒素制限を受けていないと考えられた。一方、PC:PP 関係図に見られるように、調査季節にもよるが伊庭内湖、曾根沼、十ヶ坪沼、平湖、近江舞子沼、曾根沼、西の湖は中程度のリン制限を受ける図に示した判定範囲にプロットされたが、その他の内湖は植物プランクトン増殖に対してリン制限を受けていないと判断された。なお、PN:PP 比からも、一部の内湖(伊庭内湖、十ヶ坪沼、曾根沼)では、中程度のリン制限を受けていたと判定されたが、琵琶湖内湖の多くはリン制限を受けていなかったと判断された。このように、Healey and Hendzel (1979, 1980) が提唱した懸濁態生元素比からの判定によると、琵琶湖周辺内湖水のほとんどは、植物プランクトン増殖に対して栄養制限を受けていなかったと考えられた。

これは、内湖の窒素・リン・ケイ素栄養塩現存量に見られるように(表1)、これら内湖が富栄養湖であることが大きな要因であると考えられる。

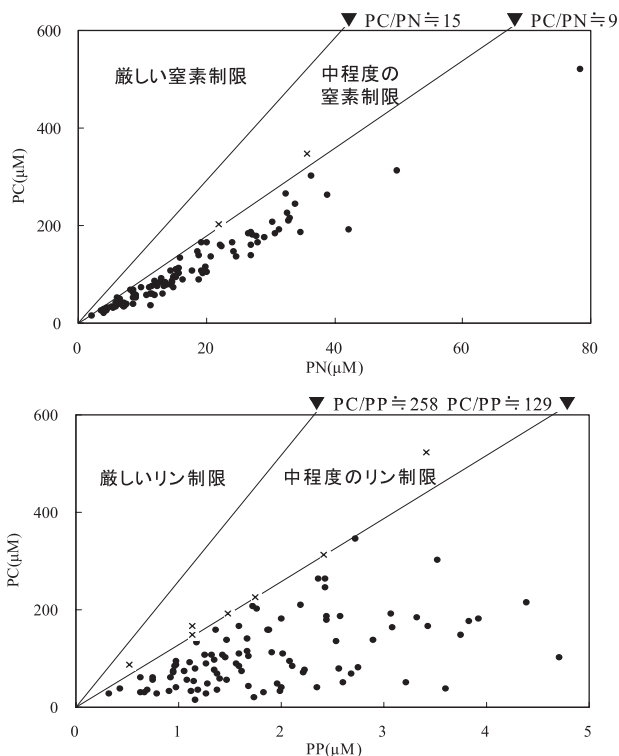


図3 PC:PN:PP 比值(●または×)から判定した植物プランクトンの栄養制限関係図。上図はPC:PN判定、下図はPC:PP判定。×:窒素またはリンが若干制限された内湖。図中の直線:Healey and Hendzel (1980)の判定基準線。

3-3 植物プランクトン増殖に対する栄養制限判定の検討

PC:PN:PP 比から植物プランクトン増殖に対する栄養制限要因を判定すると、上述したように琵琶湖内湖の植物プランクトンは窒素あるいはリンによる栄養制限をほとんど受けていなかった(図3)。一方、DIN:DIP 比から内湖の植物プランクトン増殖に対する律速を判定すると、多くの内湖の植物プランクトンはリン律速を受けていた判定結果が得られた(図2)。そこで、内湖の栄養制限を評価する指標は、いずれの判定方法がより適しているかを検討した。水中のDINとDIP現存量が植物プランクトンが要求する栄養源に比して充分現存する場合は、DIN:DIP 比は基本的に変動しないと考えられる。したがって、水中のDIN:DIP 比を植物プランクトン細胞構成元素のRedfield比と比較して、DINとDIPのいずれが植物プランクトンの増殖制限因子になりうるかの議論は、山本(1999)が指摘するように、適切でないと考えられる。このことは、とくに富栄養湖の琵琶湖内湖の植物プランクトン増殖に対する栄養制限因子を探る方法は、水中栄養塩のDIN:DIP 比から判断するよりも、水深が浅い内湖の特性(濁水環境などの水環境)による誤判定を除いて、植物プランクトン細胞の構成生元素比(PC:PN:PP 比)から判定することが上述の判定方法の中ではより妥当性があると判断せざるを得ない。

したがって、本研究では、PC:PN:PP 比を内湖の植物プランクトンの栄養制限の主たる判定指標に用いた。しかし、上述したように、琵琶湖内湖においては植物プランクトン以外の懸濁物質がPC:PN:PP 比に影響を与えることが充分考えられるため、懸濁態生元素比を指標として植物プランクトンの栄養制限を判定するとき、内湖水のChl.a 現存量のレベルを考慮に入れて判定することとした。すなわちChl.aが $15 \mu\text{g chl.a L}^{-1}$ 以上の試料に対しては、懸濁態生元素比(PC:PN:PP)から判定した。この理由は、これ以上のChl.a 現存量の試水においては、PC:Chl.a、PN:Chl.a および PP:Chl.a 比の値が一般に測定される植物プランクトン細胞のこれらの構成比に近いと考えられるからである。なお、Chl.aがこの現存量以下である内湖は、基礎生産が比較的低い内湖であり、湖水の栄養塩レベルが低いために内湖の植物プランクトンの光合成生産を含めた富栄養化が促進されなかったと判断し、DIN:DIP 比も植物プランクトン増殖に対する律速因子の指標になりうると思った。

本研究で調査した琵琶湖内湖の植物プランクトン増殖に

対する律速要因を、これらの基準から判定した結果は次のごとくにまとめることができる。Chl.a 現存量が 15 $\mu\text{g chl.a L}^{-1}$ 以上の内湖の一部では、図 3 に示したように、夏季に中程度の窒素制限、秋季から冬季に中程度のリン制限を受けたが、他のほとんどの内湖の植物プランクトンはその増殖に対して栄養制限を受けていなかった。一方、Chl.a が 15 $\mu\text{g chl.a L}^{-1}$ 以下の植物プランクトン現存量が比較的低いレベルの内湖では、Forsberg and Ryding (1980) の指標に従うと、植物プランクトン増殖に対して窒素あるいはリンの制限を受けていた (図 2)。ただし、琵琶湖内湖の栄養塩現存量のレベルから判断すると (表 1)、この判定結果はごく一部の内湖にのみ適用できると考えられた。

3-4 内湖の栄養段階

OECD (1982) は、湖沼水の全リン現存量の年平均レベルから、湖沼を貧栄養湖 (全リン現存量が 0.3 μM 以下)、中栄養湖 (0.3 ~ 1.1 μM)、そして富栄養湖 (1.1 μM 以上) に分類した。本研究で得た全リン (DIP と DOP と PP の合計) 現存量 (ただし、表 1 には DOP 値を掲載していない) の年平均現存量 (4 回測定した平均値を年平均現存量とした) を OECD (1982) が提唱した分類基準と比較検討することにより、琵琶湖内湖の栄養段階を評価した。その判定結果、琵琶湖周辺内湖のすべてが、全リンの平均現存量が 1.1 μM 以上存在する富栄養湖であると考えられた。さらに、OECD (1982) は、クロロフィル a 現存量の基準からも湖沼の栄養段階を分類した。本研究で得た Chl.a 現存量 (表 1) と OECD (1982) が提唱した Chl.a 現存量の基準値を比較することにより、琵琶湖内湖の栄養段階を評価すると、OECD 基準の 2.5 $\mu\text{g chl.a L}^{-1}$ 以下の志那中湖と細江内湖が貧栄養湖、西の湖 (東)、菅沼、貫川内湖 (南)、蓮池が中栄養湖 (2.5 ~ 8 $\mu\text{g chl.a L}^{-1}$)、そして他の 18 内湖が富栄養湖 (8 $\mu\text{g chl.a L}^{-1}$ 以上) に分類された (表 3)。

このように、内湖の栄養段階の評定は、全リン現存量からの判定結果と、クロロフィル a 現存量からの判定結果が異なった。すなわち、OECD (1982) の基準は、栄養段階に対する目安の評価であるといえる。とくに、内湖は小潟湖のため、面積が小さく、水深が浅く、水と物質の流入・流出の速度・量が内湖容積の全量に比較して大きく、内湖の湖内での滞留時間が短い水系であるため、高い栄養塩現存量湖水であっても植物プランクトンが十分に増殖・成長するまでの時間に湖水は内湖から流出することが考えられる。これらのことが、クロロフィル a 現存量による栄養段

表 3 TP 現存量および Chl.a 現存量から判定した内湖の栄養段階. 富栄養湖: TP > 1.1 μM または Chl.a > 8 $\mu\text{g L}^{-1}$ 、中栄養湖: Chl.a 2.5 ~ 8 $\mu\text{g L}^{-1}$ 、貧栄養湖: Chl.a < 2.5 $\mu\text{g L}^{-1}$.

	栄養段階	
	TP 判定	Chl.a 判定
堅田内湖	富栄養湖	富栄養湖
近江舞子沼	富栄養湖	富栄養湖
乙女ヶ池	富栄養湖	富栄養湖
松ノ木内湖	富栄養湖	富栄養湖
五反田沼	富栄養湖	富栄養湖
十ヶ坪沼	富栄養湖	富栄養湖
菅沼	富栄養湖	中栄養湖
浜分沼	富栄養湖	富栄養湖
貫川内湖 (南)	富栄養湖	中栄養湖
貫川内湖 (北)	富栄養湖	富栄養湖
野田沼 (湖北)	富栄養湖	富栄養湖
南浦内湖	富栄養湖	富栄養湖
細江内湖	富栄養湖	貧栄養湖
蓮池	富栄養湖	中栄養湖
野田沼 (彦根)	富栄養湖	富栄養湖
曾根沼	富栄養湖	富栄養湖
神上沼	富栄養湖	富栄養湖
伊庭内湖	富栄養湖	富栄養湖
西の湖 (西)	富栄養湖	中栄養湖
西の湖 (東)	富栄養湖	富栄養湖
北の庄沢	富栄養湖	富栄養湖
北沢沼	富栄養湖	富栄養湖
志那中湖	富栄養湖	貧栄養湖
柳平湖	富栄養湖	富栄養湖
平湖	富栄養湖	富栄養湖

階の評価が、リン現存量によるそれよりも貧栄養的に評価されやすい可能性があると考えた。

4 おわりに

本研究対象とした琵琶湖周辺内湖の植物プランクトンは、懸濁態生元素比による判定基準 (Healey and Hendzel, 1980) を適用すると、その増殖に対して栄養制限を受けることは少ないと判断された。ただし、植物プランクトン現存量が低い内湖に対しては、懸濁態生元素比のみを適用して栄養制限を判定することは困難であり、貧栄養湖あるいは中栄養湖と判定された 6 内湖では、栄養塩比による判定基準 (Forsberg and Ryding, 1980) を使用すると、植物プランクトン増殖にとってリン制限を受けていた可能性が示唆された。栄養段階判定 (OECD, 1982) の結果、一部の内湖は貧栄養あるいは中栄養湖と考えられたが、他のほ

とんどの内湖は富栄養湖と判定した。この富栄養内湖の植物プランクトンは窒素あるいはリン栄養塩化合物による栄養制限を受けることは少ないと判断された。このように、琵琶湖周辺内湖の多くは、植物プランクトンあるいは付着藻類増殖の制限因子になる栄養塩化合物現存量は豊富に存在する富栄養湖であり、懸濁態生元素の比から判定して栄養制限を示さなかった内湖が大半を占めていたことと一致する。指摘されているように、富栄養湖沼においては栄養塩比から栄養制限を評価することは困難であると考えられる。とくに浅く小潟湖で富栄養化した琵琶湖内湖では、この栄養塩現存量比からの栄養制限の判定結果は信頼性を失う。しばしばあらゆる水域で用いられているこの基準比は、誤った判定を下すことになり、あくまで目安としてこの比による栄養制限を判断するべきである。富栄養小湖において植物プランクトン増殖に対する栄養制限を評価する際にこれらの問題点の解決には、本研究測定パラメーターとした懸濁態生元素と栄養塩化合物現存量の多少とそれらの関係に加え、さらに植物プランクトンの光合成活性、植物プランクトン増殖に働く微量成分、さらに物理・地学・生物的要因などから総合的に判断して、植物プランクトンの増殖の因子を探り解析していく必要がある。

上述したように、現存の琵琶湖周辺「里水」内湖の多くは富栄養湖であり、内湖水中の植物プランクトンは窒素あるいはリン栄養塩化合物による光合成増殖の制限を大きく受ける可能性は低いと考えられた。しかし、一部の内湖のある季節では、貧栄養あるいは中栄養的であり、植物プランクトンの光合成増殖は、リンによる制限により抑制されていた可能性がある。このことは、琵琶湖内湖の富栄養化防止対策のために、「里水」内湖の水環境復元のための湖沼管理を今後とも充分に行っていくことが重要である。内湖は琵琶湖と繋がっており琵琶湖の水環境に多大なる影響を与える。琵琶湖内湖を琵琶湖流域の一部として思考視野を拡大し里水保全のための水環境管理を真摯に考えていかなければならない。

本論文をまとめるにあたって追記したい。共著者の尾崎正樹は本研究活動と成果を基に身近な水環境学習を学校教育に生かすべく、中学校教育者として活躍していた。彼の教育に対する高い志は万人が認めるところであり、高い評価を得ていた。しかし、彼は志半ばで2013年4月5日永眠し短い人生を終えた。彼の心中を察するに余りある。水環境教育に対する彼の志を思い、ここに謹んで哀悼の意を

表するとともに故人の墓前に本論文を捧げたい。

謝辞

本研究を進めるにあたり、野外調査と実験室における化学分析測定に多大なる援助をいただいた滋賀県立大学環境科学部湖沼環境実験施設の海外文一郎氏、ならびに同大学環境科学研究科環境動態学専攻および環境科学部環境生態学科の学生諸子に深謝を申し上げる。

引用文献

- Aikazi, M. and A. Otsuki (1987): Characteristics of variations of C:N:P:Chl ratios of seston in eutrophic shallow Lake Kasumigaura. *Jpn. J. Limnol.*, 48: S99-S106.
- Bendschneider, K. and R. J. Robinson (1952): A new spectrophotometric method for the determination of nitrite in sea water. *J. Mar. Res.*, 11: 87-96.
- Carlson, R. E. (1977): A trophic state index for lakes. *Limnol. Oceanogr.*, 22: 361-369.
- Forsberg, C. and S. O. Ryding (1980): Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish wast-receiving lakes. *Arch. Hydrobiol.*, 89: 189-207.
- 浜端悦治 (2010) : 湖沼生態系の保全・回復に向けて. 関西自然保護機構会誌, 32 : 47-51.
- Healey, F. P. and L. L. Hendzel (1979): Indicators of phosphorus and nitrogen deficiency in five algae in culture. *J. Fish. Res. Board Can.*, 36: 1364-1369.
- Healey, F. P. and L. L. Hendzel (1980): Physiological indicators of nutrient deficiency in lake phytoplankton. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 37: 442-453.
- Hoyer, M. V. and D. E. Canfield (1994): Bird abundance and species richness on Florida lakes: influence of trophic status, lake morphology, and aquatic macrophytes. *Hydrobiologia*, 279/280: 107-119.
- 倉田亮 (1984) : 内湖 - その生態学的機能 -. 滋賀県琵琶湖研究所所報, 2 : 46-54.
- 倉田亮 (1988) : 水草帯と内湖 - その現状と機能 -. 滋賀県琵琶湖研究所 5 周年記念誌, 琵琶湖研究集水域から湖水まで, 滋賀県琵琶湖研究所所報, 142-163.
- Mehner, T., M. Dielmann, U. Bramick and R. Lemcke (2005): Composition of fish communities in German lakes as related to lake morphology, trophic state,

- shore structure and human-use intensity. *Freshwater Biol.*, 50: 70-85.
- Menzel, D. W. and N. Corwin (1965): The measurement of total phosphorus in seawater based on the liberation of organically bound fractions by persulfate oxidation. *Limnol. Oceanogr.*, 10: 280-283.
- Mitamura, O. (1997): An improved method for the determination of nitrate in freshwaters based on hydrazinium reduction. *Mem. Osaka Kyoiku Univ. Ser. III*, 45: 297-303.
- 三田村緒佐武・石川聡子・石田典子・後藤直成・橋淳治・丸尾雅啓 (2014) : びわ湖内湖・西の湖における水環境教育. *陸水研究*, 1 : 5-15.
- 三田村緒佐武・後藤直成 (2005) : 琵琶湖周辺内湖の水質特性 —内湖の水質特性—. 185-194, 西野麻知子・浜端悦治編「内湖からのメッセージ 琵琶湖周辺の湿地再生と生物多様性保全」. サンライズ出版, pp.253.
- Mitamura, O., J. Tachibana, N. Ishida, Y. Seike and J. K. Choi (2009): Photosynthetic activity of epiphytic algae in embayment reed zone in a lagoon connected with Lake Biwa. *Kor. J. Limnol.*, 42: 48-57.
- Miyake, H., K. Nozaki and O. Mitamura (2002): Chemical characteristics of small lagoons "Naiko" connected with Lake Biwa. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 28: 1727-1732.
- Mullin, J. B. and J. P. Riley (1955): The colorimetric determination of silicate with special reference to sea and natural waters. *Anal. Chim. Acta*, 12: 162-176.
- Murphy, J and J. P. Riley (1962): A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta*, 27: 31-36.
- Nagoshi, M. (1965): Ecological studies on the population of *gengorobuna*, *Carassius cuvieri*, in Lake Biwa. II. Mortality, size of spawning population and number of emigrants estimated with tagging method. *Rep. Fac. Fish. Mie Pref. Univ.*, 5: 307-317.
- 中西正巳・関野樹 (1997) : 琵琶湖水質の生物学的特徴. *環境技術*, 26 : 13-17.
- Nakanishi, M., O. Mitamura and T. Matsubara (1990): Sestonic C:N:P ratios in the south basin of Lake Biwa with special attention to nutritional state of phytoplankton. *Jpn. J. Limnol.*, 51: 185-189.
- 西野麻知子 (2005) : 琵琶湖と内湖の関係. 54-61, 西野麻知子・浜端悦治編「内湖からのメッセージ 琵琶湖周辺の湿地再生と生物多様性保全」. サンライズ出版, pp.253.
- 大久保卓也 (1998) : ため池, 内湖を利用した水質浄化. 用水と排水, 41 : 883-893.
- OECD (1982): *Eutrophication of waters: Monitoring, Assessment and Control*. OECD, Paris.
- Redfield, A. C. (1958): The biological control of chemical factors in the environment. *Am. Sci.*, 46: 205-221.
- Sagi, T. (1966): Determination of ammonia in sea water by the indophenol method and its application to the coastal and off-shore waters. *Oceanogr. Mag.*, 18: 43-51.
- 西條八東・三田村緒佐武 (1995) : 新編湖沼調査法. 講談社, pp.230.
- Sakamoto, M. (1966): Primary production by the phytoplankton community in some Japanese lakes and its dependence on lake depth. *Arch. Hydrobiol.* 62: 1-28.
- Tezuka, Y. (1984): Seasonal variations of dominant phytoplankton, chlorophyll a and nutrient levels in pelagic regions of Lake Biwa. *Jpn. J. Limnol.*, 45: 26-37.
- Tezuka, Y. (1985): C:N:P ratios of seston in Lake Biwa as indicators of nutrient deficiency in phytoplankton and decomposition process of hypolimnetic particulate matter. *Jpn. J. Limnol.*, 46: 239-246.
- 山田佳裕・野崎健太郎 (1997) : 炭素・窒素安定同位体比精密測定法を用いた琵琶湖生態系の解析. *月刊海洋*, 29 : 399-407.
- 山本民次・橋本俊也・松田治・多田邦尚 (1999) : 瀬戸内海における植物プランクトン態 N : P 比とその変動要因. *水産海洋研究*, 63 : 6-19.
- Vollenweider, R. A. and J. J. Kerekes (1980): *Synthesis Report, Cooperative Programme on Monitoring of Inland Waters (Eutrophication Control)*. Report prepared on behalf of Technical Bureau, Water Management Sector Group, Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), Paris, pp.290.