

静岡県内湖沼における 富栄養化状態指標 (TSI) の適用について*

渡 辺 稔**・海 野 忠 市**
橋 本 圭 司**・深 沢 均**

1. はじめに

近年、湖沼の富栄養化が問題となるにおよび、富栄養化の実態調査の必要性から富栄養化の程度と変化を明らかにできるより詳細な定量的な物さしがないとされている。従来の湖沼の栄養度上の分類方法は、一般的には貧栄養、中栄養、富栄養、過栄養に分類するなど大まかな分類方法である。概ら¹⁾は1977年～1980年にわが国の主な24の調和型湖沼について調査を行い、透明度を基準としたカールソン富栄養化状態指標のわが国の調和型湖沼への適応性の検討を行った。そして、相崎ら²⁾クロロフィル a 濃度を基準とした富栄養化状態指標を採用し、わが国の湖沼に適用し検討したことを報告している。

湖沼の富栄養化に関する多数の調査研究³⁻⁵⁾や著述⁶⁻⁹⁾があるが、富栄養化を水中の栄養塩濃度が増加して植物プランクトンの現存量が増加する現象と解釈すると、クロロフィル a 濃度を基準とした富栄養化状態指標 (Trophic State Index : TSI) は湖沼の富栄養化状態を表現するために便利な指標であると思われる。

静岡県内の湖沼において、富栄養化状態指標 (TSI) の若干の検討ならびに適用を行ったので結果を報告する。

2. 調査方法

1982年～1984年に静岡県内の湖沼である鯨ヶ池、一碧湖、野守の池および田貫湖において湖心を含む2～4地点の1～3層で採水した。透明度は透明度板 (直径30 cm のセッキ板) を用いて測定した。pH はガラ

ス電極法、DO はウィンクラー・アジ化ナトリウム変法、COD_{Mn} は JIS K 0102 の方法、クロロフィル a はアセトン抽出吸光度法、全りんは環境庁告示第140号に掲げる方法、全窒素は環境庁告示第140号に掲げる銅・カドミウムカラム還元法で分析した。

3. 結果および考察

3・1 水質調査結果

湖沼の湖心における水質を湖沼の代表水質であるとした。調査湖沼の湖心におけるクロロフィル a 濃度、全りん濃度、全窒素濃度および透明度を表 1 に示す。クロロフィル a 濃度、全りん濃度、全窒素濃度については表層における測定値 (上段) と全層における測定値の平均値 (下段) を示した。相崎ら²⁾はクロロフィル a 濃度、全りん濃度、全窒素濃度として生産層の平均値を求めて使用しているが、著者らは調査湖沼の水深が約 1 m～7 m と浅いので、表層の濃度を用いる場合、全層の濃度の平均値を用いる場合の二つの場合について検討を行った。

3・2 クロロフィル a 濃度と透明度、全りん濃度および全窒素濃度との関係

調査湖沼におけるクロロフィル a 濃度と透明度、全りん濃度および全窒素濃度の関係を表 2 と図 1 に示す。クロロフィル a 濃度と透明度の関係は測定値の自然対数を用いた場合の相関係数が、表層で $r = -0.735$ ($n = 12$)、全層については $r = -0.733$ ($n = 12$) であった。

表 2 に掲げたクロロフィル a 濃度と全りん濃度との関係性は、相崎ら²⁾が全国の24の調和型湖沼における

* Application of Trophic State Index to Lakes in Shizuoka Prefecture

** Minoru WATANABE, Chuichi UNNO, Keiji HASHIMOTO, Hitoshi FUKAZAWA (静岡県衛生環境センター) Shizuoka Prefectural Institute of Public Health and Environmental Science

調査結果に基づいて提出したつぎの式と近似な式である。

$$\ln(\text{Chl}) = 6.71 + 1.15 \ln(\text{TP}) \quad (r=0.90) \quad (1)$$

Chl:クロロフィル a 濃度 (mg/m³), TP(mg/l)

したがって、本県の調査湖沼に対して(1)式の使用が可能である。つぎに、調査湖沼別にクロロフィル a 濃

度と全りん濃度の関係を見ると、野守の池においては測定値の自然対数を用いた場合の相関係数が表層の測定値の場合で $r=0.648$ ($n=6$), 全層の測定値の平均値の場合は $r=0.616$ ($n=6$) であった。また、田貫湖においてクロロフィル a 濃度と全りん濃度の関係を見ると、全層の測定値の平均値の自然対数を用いた場合の相関係数は $r=0.628$ ($n=5$) であった。調査湖

表1 調査湖沼のクロロフィル a 濃度, 全りん濃度, 全窒素濃度および透明度

湖 沼	調査年月日	透 明 度 (m)	クロロフィル a (mg/m ³)	表層における測定値	
				全 り ん (mg/ℓ)	全 窒 素 (mg/ℓ)
鯨ケ池 (No.1)	1982. 8. 26	0.7	47.5	0.04	5.64
			53.8	0.05	5.52
一 碧 湖 (湖心)	1982. 10. 14	0.7	32.6	0.05	5.32
野守の池 (湖心)	1982. 10. 4	2.5	43.0	0.05	5.25
一 碧 湖 (湖心)			6.7	0.01	0.67
野守の池 (湖心)	1983. 4. 19	0.8	13.1	0.01	0.62
			27.3	0.06	3.93
田 貫 湖 (湖心)	1983. 6. 29	0.8	23.9	0.04	3.55
			84.5	0.04	4.38
田 貫 湖 (湖心)	1983. 8. 30	1.5	83.7	0.04	3.88
			14.2	0.03	4.65
田 貫 湖 (湖心)	1983. 10. 18	1.2	16.0	0.04	4.38
			21.3	0.03	4.30
田 貫 湖 (湖心)	1983. 12. 13	0.5	19.8	0.02	4.24
			11.9	0.02	2.07
田 貫 湖 (湖心)	1984. 2. 14	1.5	19.4	0.02	2.25
			11.2	0.01	1.36
田 貫 湖 (湖心)	1983. 6. 8	2.5	10.9	0.01	1.30
			4.4	0.03	0.19
田 貫 湖 (湖心)	1983. 8. 9	4.0	5.4	0.01	0.13
			4.8	0.01	0.19
田 貫 湖 (湖心)	1983. 10. 25	1.0	6.1	0.01	0.23
			9.4	0.02	0.46
田 貫 湖 (湖心)	1983. 12. 7	(B)	8.9	0.02	0.43
			2.5	0.01	0.32
田 貫 湖 (湖心)	1984. 3. 15	(B)	2.7	0.01	0.40
			6.6	0.01	0.27
			6.1	0.01	0.29

表2 クロロフィル a 濃度と透明度, 全りん濃度, 全窒素濃度との関係 (調査湖沼)

	表 層	全層 (平均値)
クロロフィル a 濃度 (mg/m ³) と透明度 (m)	$\ln(\text{Chl}) = -1.07 \ln(\text{SD}) + 2.95$ $r = -0.735, n = 12$	$\ln(\text{Chl}) = -0.99 \ln(\text{SD}) + 3.08$ $r = -0.733, n = 12$
クロロフィル a 濃度 (mg/m ³) と全りん濃度 (mg/ℓ)	$\ln(\text{Chl}) = 1.12 \ln(\text{TP}) + 6.85$ $r = 0.759, n = 14$	$\ln(\text{Chl}) = 1.19 \ln(\text{TP}) + 7.35$ $r = 0.840, n = 14$
クロロフィル a 濃度 (mg/m ³) と全窒素濃度 (mg/ℓ)	$\ln(\text{Chl}) = 0.64 \ln(\text{TN}) + 2.39$ $r = 0.873, n = 14$	$\ln(\text{Chl}) = 0.61 \ln(\text{TN}) + 2.54$ $r = 0.848, n = 14$

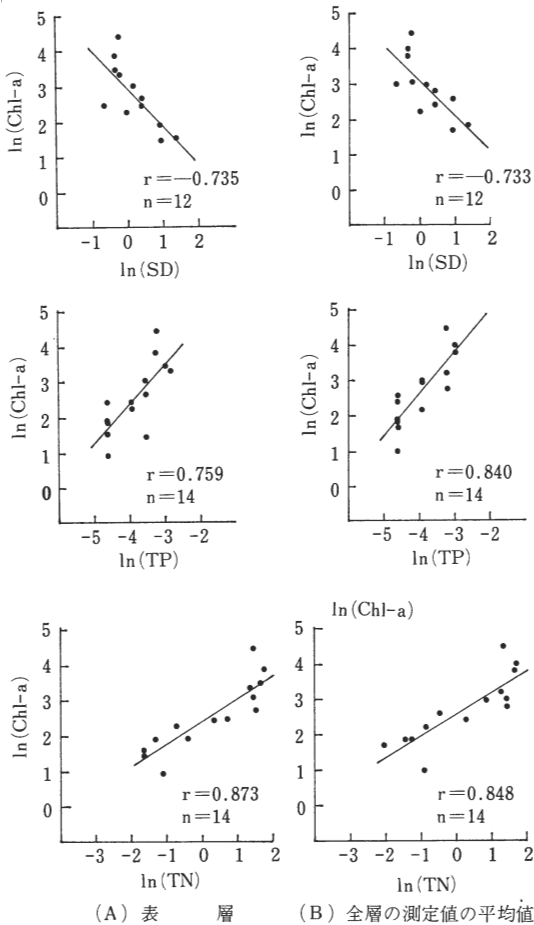


図1 クロロフィル a 濃度 (Chl-a : mg/m³) と透明度 (SD : m), 全りん濃度 (TP : mg/l), 全窒素濃度 (TN : mg/l) との関係 (調査湖沼)

沼 (4 湖沼) におけるクロロフィル a 濃度と全窒素濃度の間には、表層における測定値の自然対数を用いた場合の相関係数が $r=0.873$ ($n=14$), 全層における測定値の平均値の自然対数を用いた場合の相関係数が $r=0.848$ ($n=14$) と共に良い相関がみられた。

3.3 TSIの式および調査湖沼のTSIの算出に用いた式

$$TSI(Chl) = 10 \times \left(2.46 + \frac{\ln(Chl)}{\ln 2.5} \right) \quad (2)$$

Chl : クロロフィル a 濃度 (mg/m³)

$$TSI(TP) = 10 \times \left(2.46 + \frac{6.71 + 1.15 \ln(TP)}{\ln 2.5} \right) \quad (3)$$

TP : 全りん濃度 (mg/l)

$$TSI(SD) = 10 \times \left(2.46 + \frac{3.69 - 1.53 \ln(SD)}{\ln 2.5} \right) \quad (4)$$

SD : 透明度 (m)

(2)式は、相崎ら²⁾が提唱している TSI の基本式である。この式においては、クロロフィル a 濃度 1,000 mg/m³ を TSI 値の 100 とし、0 としては植物プランクトンによる光の吸収が水による吸収より十分に小さくなる値として、クロロフィル a 濃度 0.1 mg/m³ を仮定している²⁾。(3)式と(4)式は、相崎らにより全国の 24 の調和型湖沼の調査結果から求められたクロロフィル a 濃度と全りん濃度の関係式(1)およびクロロフィル a 濃度と透明度の関係式を、それぞれ(2)式に代入して導かれた式である。

TSI の基本式である(2)式と前項 2 の理由から、(3)式を用いて静岡県内の調査湖沼の TSI 値を求め表 3 に示した。

3.4 TSI値の比較および採水層の検討

相崎ら²⁾は、湖沼の生産層におけるクロロフィル a 濃度、全りん濃度の測定値の平均値により求めた TSI (Chl), TSI (TP) を用いて湖沼の富栄養化状態を示した。全層のクロロフィル a 濃度、全りん濃度の測定値の平均値を用いて算出した TSI 値と、表層の測定値を用いて算出した TSI 値を比較し、検討を行った。表 3 において全層の TSI (Chl) と表層の TSI (Chl) を比較すると、一碧湖を除いて野守の池、田貫湖および鯨ヶ池では両数値に大きな差はみられない。これは調査湖沼におけるクロロフィル a の垂直分布の特性によると考えられる。野守の池と田貫湖におけるクロロフィル a の垂直分布を図 2 に示す。野守の池 (湖心) に

表 3 調査湖沼のクロロフィル a 濃度、全りん濃度から求めた富栄養化状態指数

湖沼名	調査年月日	全層		表層		
		TSI (Chl)	TSI (TP)	TSI (Chl)	TSI (TP)	
鯨ヶ池	1982. 8. 26	68	60	67	57	
	10. 14	66	60	63	60	
	一碧湖	1982. 10. 4	53	40	45	40
		野守の池	1983. 4. 19	59	57	61
	6. 29		73	57	73	57
	8. 30		55	57	54	54
10. 18	57		49	58	54	
12. 13	57	49	52	49		
田貫湖	1984. 2. 14	51	40	51	40	
	1983. 6. 8	43	40	41	54	
		8. 9	44	40	41	40
	10. 25	48	49	49	49	
	12. 7	35	40	35	40	
	1984. 3. 15	44	40	45	40	

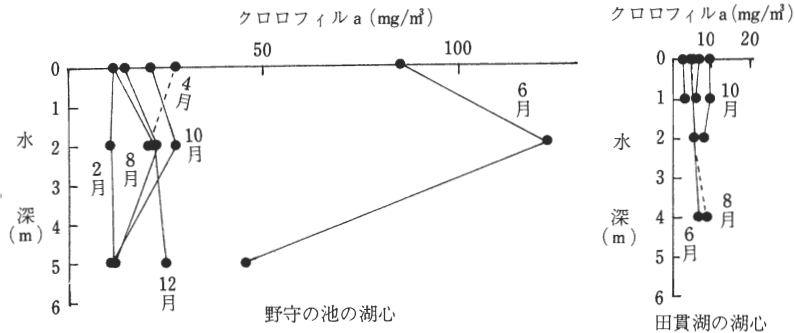


図2 クロロフィル a の垂直分布

おけるクロロフィル a の垂直分布をみると、2月を除き他の調査時においては各深度においてクロロフィル a 濃度は異なるが、表層の濃度は全層の濃度の平均値とほぼ同じ値を示している。2月にはクロロフィル a 濃度は全層で等しくなっている。また、田貫湖（湖心）におけるクロロフィル a の垂直分布をみると、クロロフィル a 濃度に深度による大きな差はみられない。一方、一碧湖（湖心）において同様にクロロフィル a の垂直分布をみると、クロロフィル a 濃度は深度により大きく異なっている。

以上から湖沼によっては、あるいは調査時期によっては表層部のクロロフィル a 濃度を用いて求める TSI (Chl) も結果的には湖沼の富栄養化状態を示し有効であると思われるが、湖沼におけるクロロフィル a の垂直分布の特性の違いを考慮すると、富栄養化状態を調査するため生産層におけるクロロフィル a 濃度の平均値を用いて TSI (Chl) を算出すべきであると考えられる。つぎに、野守の池の6月29日における TSI (Chl) と TSI (TP) を比較すると、両指標の間には大きな差がみられた。

3・5 TSI (Chl) による調査湖沼の富栄養化状態の表示

すでに述べたように、TSI の基本式(2)に実際に測定して求めたクロロフィル a 濃度（平均値）を代入して得られる TSI (Chl) が、TSI の中で最も適切であると考えられる。この考え方に基いて、野守の池の富栄養化状態を TSI (Chl)（クロロフィル a 濃度は全層の平均値）で表わし図3に示した。野守の池の表層水の pH と DO と COD_{Mn} を同様に図3に示す。野守の池において TSI (Chl) は、51～73 と富栄養域で変動がみられた。野守の池における調査期間（1年間）における TSI (Chl) の平均値は59であり、TSI (Chl) による栄養度の区分²⁾に基づくと富栄養湖に分類され、全窒素濃度、全りん濃度による坂本の分類⁷⁾による分

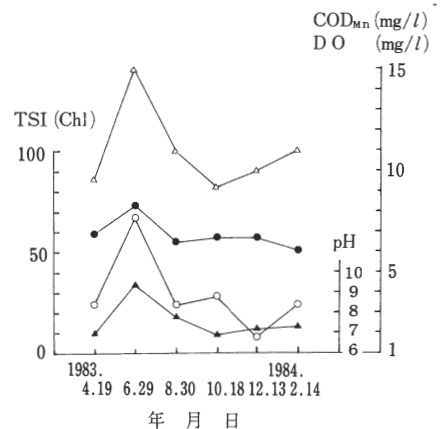


図3 野守の池の富栄養化状態(湖心)

●: TSI (Chl) △: 表層水の DO
▲: 表層水の pH ○: 表層水の COD_{Mn}

類結果と一致した。野守の池における TSI (Chl) の変動のパターンは、同地点の表層水の pH、DO および COD_{Mn} の変動のパターンと類似した。TSI (Chl) が73を示した富栄養化度の高い状態では、表層水の pH は9.4、DO は15 mg/l、COD_{Mn} は7.7 mg/l と富栄養化の様相を示す水質項目との間に関連がみられた。田貫湖において TSI (Chl) は、35～48 とほぼ中栄養域で変動がみられた。田貫湖における TSI (Chl) の平均値は43であり、中栄養湖に分類できると思われる。静岡県内の湖沼と全国の湖沼を対比するため、相崎ら²⁾が求めたわが国の湖沼の TSI 値を表4に示した。

4. まとめ

湖沼の富栄養化において、湖沼水中の栄養塩濃度の増加に基づく植物プランクトンの増殖によってもたらされる2次汚濁が大きな問題となっている。そこで、静岡県内の湖沼において富栄養化状態指標 (TSI) の検討ならびに適用を行った。

表4 わが国の湖沼の TSI²⁾ 値(相崎ら, 1981年)
TSI values calculated from surveyed data of
concentration of chlorophyll-a, total phosphorus,
and Secchi disk transparency in Japanese lakes.

Lake	TSI(Chl)	TSI(SD)	TSI(TP)
L. Shikotsu	7 (15)	12 (14)	31 (27)
L. Towada	15 (22)	17 (18)	31 (27)
L. Motosu	27 (32)	25 (25)	25 (20)
L. Nishinoumi	32 (37)	28 (28)	20 (14)
L. Chuzenji	30 (36)	26 (27)	25 (20)
L. Kuttara	25 (31)	21 (22)	37 (34)
L. Aoki	29 (35)	37 (36)	25 (20)
L. Nojiri	32 (37)	34 (33)	35 (32)
L. Toya	32 (38)	47 (44)	29 (24)
L. Nakatsuna	34 (39)	40 (38)	34 (30)
L. Biwa (N)	41 (45)	37 (36)	37 (34)
L. Biwa (S)	47 (51)	52 (49)	46 (44)
L. Kizaki	46 (50)	38 (37)	39 (36)
L. Yamanaka	46 (50)	48 (45)	39 (36)
L. Haruna	40 (44)	43 (41)	39 (36)
L. Tsutanuma	41 (45)	41 (39)	41 (39)
L. Kawaguchi	48 (52)	47 (45)	40 (37)
L. Onuma	44 (48)	43 (41)	45 (43)
L. Hangetsu	53 (56)	42 (40)	55 (55)
L. Shoji	58 (60)	56 (52)	64 (65)
L. Yunoko	59 (62)	55 (52)	63 (65)
L. Mikata	61 (63)	66 (61)	59 (59)
L. Hinuma	72 (73)	72 (66)	65 (66)
L. Suwa	80 (80)	77 (71)	76 (78)
L. Kasumigaura (C)	66 (68)	66 (61)	63 (64)
L. Kasumigaura (T)	82 (82)	81 (74)	83 (87)

() : TSI values calculated from Carlson's equations
(Carlson, 1977).

- 1) 田貫湖においては植物プランクトンの生産活動は野守の池と比較すると小さい。これに対して野守の池においては、植物プランクトンの生産活動が盛んであり、表層部の pH の上昇および COD_{Mn} の増加、溶存酸素量では表層と下層の差が大きい垂直分布がみられた。
- 2) 調査湖沼においては、クロロフィル a 濃度と透明度の間に負の相関関係がみられた。また、クロロフィル a 濃度と全りん濃度、全窒素濃度の間には正の相関関係がみられた。

3) 野守の池において TSI (Chl) は51~73と変動し、調査期間(1年間)におけるその平均値は59であり、富栄養湖に分類された。TSI (Chl) の変動のパターンは表層水の pH, DO および COD_{Mn} の変動のパターンと類似した。

4) 田貫湖において TSI (Chl) は35~48と変動し、その平均値は43であり、中栄養湖に分類できると思われる。

湖沼の富栄養化状態は、湖沼水中の栄養塩濃度の増加とそれにとまう生産層における植物プランクトンの生産活動の結果である。したがって、富栄養化状態の表現の一方法として、生産層における植物プランクトンの現存量の指標であるクロロフィル a 濃度を用いる方法は適当であると思われる。

一引用文献一

- 1) 大槻 見, 相崎守弘, 河合崇欣, 福島武彦: カールソン富栄養化状態指標の我国調和型湖沼群への適応性の検討とその問題点, 国立公害研究所研究報告, No. 23, pp. 3~12, 1981.
- 2) 相崎守弘, 大槻 見, 福島武彦, 河合崇欣, 細見正明, 村岡浩爾: 修正カールソン富栄養化状態指標の日本湖沼への適用と他の水質項目との関係, 国立公害研究所研究報告, No. 23, pp. 13~31, 1981.
- 3) 今 武純, 鹿原正志, 関野正義, 奈良忠明, 小山田久美子, 野田正志, 田中 稔: 富栄養に関する調査(その3)—主成分分析法と富栄養化状態指標の比較検討—, 青森県公害センター所報, No. 5, pp. 35~39, 1981.
- 4) 奈良忠明, 小山田久美子, 今 武純: 富栄養に関する調査(その4)—市柳沼の水質と懸濁物質の挙度—, 青森県公害センター所報, No. 5, pp. 40~45, 1981.
- 5) 川村 実, 樋口澄男: 富栄養化状態指標を用いた長野県内湖沼の水質判定, 長野県衛生公害研究所報告, Vol. 3, pp. 57~61, 1981.
- 6) 相崎守弘: 湖沼の富栄養化, 保健の科学, Vol. 24, pp. 574~580, 1982.
- 7) 坂本 充: 富栄養化の機構, 水圏の富栄養化と水産増養殖, p. 12, 日本水産学会編, 1973.
- 8) 大槻 見: 湖沼の富栄養化とその指標, ぶんせき, No. 8, pp. 59~65, 1983.
- 9) 日本水質汚濁研究協会編: 湖沼環境調査指針, pp. 221~237, 公害対策技術同友会.