本州中部湖沼の夏季におけるけん濁態蛋白質 および核酸の鉛直分布

前田 修・富岡 英通

Vertical Distributions of Particulate Protein and Nucleic Acids in Lakes in Central Japan in Late Summer

Osamu MAEDA and Hidemichi TOMIOKA

Abstract

Vertical distributions of particulate protein, RNA and DNA were surveyed in 15 lakes in central Japan in late summer. Average concentrations of chlorophyll *a*, protein, RNA and DNA in the photic zone of these lakes were 1.6-185.5 mg/m³, 143-4565 mg/m³, 24-2086 mg/m³ and 1.0-46.8 mg/m³, respectively. Concentrations of particulate protein and nucleic acids, especially of DNA, showed marked vertical changes in stratified lakes. The changes were rather small in homothermal lakes. In well-stratified eutrophic lakes, concentrations of protein and nucleic acids were much higher in the hypolimnion than in the epilimnion.

The ratios of RNA/protein and DNA/protein fluctuated vertically. Higher values for the former were found in upper layers of extremely eutrophic lakes and those for the latter were detected in lower layers of stratified eutrophic lakes. A high DNA/protein value was found at the same depth with concentration-maximum of bacteriochlorophyll.

1. はじめに

蛋白質, リボ核酸 (RNA) およびデオキシリボ核酸 (DNA) は, いずれも水中に生活する諸微小生物の主要な生体構成物質である。したがって, 湖沼にけん濁する蛋白質・核酸の動態と浮遊微小生物群集の動態との間には, 密接な関連が予想される。

けん濁態有機物質の定量は BIRGE and JUDAY (1934) 以来多種試みられており, 蛋白質に関しては STRICKLAND and PARSONS (1965) の方法, DNA については HOLM-HANSEN *et al.* (1968) の方法が一般化している。またけん濁物中の RNA 測定もすでに検討されている (IWAMURA *et al.*, 1967; 前田・岩村, 1968; IWAMURA *et al.*, 1970)。

これらの方法を用いて, けん濁態の蛋白質と核酸はすでにいくつかの湖沼で測定されている (SEKI *et al.*, 1972; 山口ほか, 1973; MAEDA and ICHIMURA, 1973; 前田ほか, 1974)。しかしそれらはいずれも断片的であり, 湖沼における蛋白質と核酸の分布・動態に関

する一般的知見を得るほどには, 十分な資料が集積されていない。

筆者らは, 蛋白質・核酸の湖沼生態系における意義を明らかにする目的で, これらの物質の挙動をさまざまな水域について調べている。本稿では, 関東・中部地方の15湖沼について晩夏に実施した調査に基づき, 主として夏季停滞期にある湖沼における蛋白質と核酸 (RNA および DNA) の鉛直分布について述べる。

2. 方 法

調査は関東・中部地方の貧・中・富栄養湖合計15水域を対象に, 1973年8月から10月の間に実施した (Table 1)。水中照度計による測光, サーミスタ水温計による測温およびバンドン採水器 (容量3 l) による採水は, 主に各水域の中心部で行なった。

さまざまな深さから得た試水の一部は, ウィンクラ一法による溶存酸素の定量に供した。残部は0.5-3 l ずつに分割し, けん濁物をグラスファイバー濾紙 (Whatman GF/C, 55 mm) 上に濾し集めた。けん濁

物の少ない試水は汙過に先だって網目巾約 0.3mm のナイロン布を通過させ、けん濁物の多い試水では汙過の前後にピペットまたはピンセットを用いて裸眼で捕えうる動物をできるだけ除去した。中型・大型の動物プランクトンは測定値を著しく変動させ、標本誤差を大きくするからである。汙紙上のけん濁物はアイス・ボックスに収めて実験室に運び、分析まで -20°C に保存した。

けん濁物中のクロロフィル *a* は STRICKLAND and PARSONS (1965) に従って、またバクテリオクロロフィル (バクテリオビリジンとバクテリオクロロフィル *a*) は TAKAHASHI and ICHIMURA (1968) によって定量した。蛋白質、RNA および DNA は IWAMURA *et al.* (1970) に準じ、色素抽出後の残渣について定量した。すべての定量は同一試水について 2 回くり返し、その平均をもって測定値とした。

3. 結果と考察

調査水域におけるクロロフィル *a*・蛋白質・RNA・DNA の有光層内平均濃度と、無光層を含む全水柱内での蛋白質・核酸濃度を Table 1 に示した。有光層内平均濃度は、蛋白質に関して 7, RNA に関して 8, DNA に関して 11 の湖沼で無光層内平均濃度より低い値を示した。こうした湖沼での水柱内平均濃度は有

光層内平均濃度より高い値となった。

単位水面面積あたりの水柱内における蛋白質・RNA・DNA の全量に関する最小値はそれぞれ、3864 mg/m² (木崎湖), 520 mg/m² (河口湖), 19.2 mg/m² (木崎湖), またその最大値はそれぞれ, 17220 mg/m² (湧池), 7736mg/m² (霞ヶ浦), 358.0mg/m² (震生湖) であった。

Fig. 1 はけん濁有機物質濃度の低い貧・中栄養湖での測定結果である。蛋白質・RNA・DNA の鉛直分布は湖沼によって異なっており、また同一湖沼内でも 3 物質の濃度極大または極小が、それぞれ異なった深さに見出されることが多かった。しかし青木湖ではクロロフィル *a*・蛋白質・DNA の、また野尻湖ではクロロフィル *a* と DNA の濃度極大を水深 15m 層に見出した (Fig. 1. a, b)。両湖におけるこの深さはともに有光層下限に相当し、この層ではまた微弱ながら溶存酸素の極大を記録した。青木・野尻・木崎 3 湖の深層では、クロロフィル *a* が深さを増すにつれ減少したが、蛋白質と核酸の濃度は最深層でやや増大した (Fig. 1. a-c)。赤城大沼では蛋白質・核酸とも上記 3 湖に較べ高濃度に分布しており、とくに表層と深層で著しかった (Fig. 1. d)。

Fig. 2 には水温鉛直傾度の微弱な湖沼での鉛直分布をまとめた。河口湖と山中湖では全層ほぼ等温であっ

Table 1. Average concentrations of chlorophyll *a*, particulate protein, RNA and DNA in 15 lakes in middle Japan, measured in late summer.

Lake	Lake type ¹⁾	Depth ²⁾ (m)	Date of sampling	α ³⁾	Average concentration (mg/m ³)						
					Photic zone				Total water column		
					Chl. <i>a</i>	Protein	RNA	DNA	Protein	RNA	DNA
Nojiri	O	27	18 Sep.	0.33	1.6	143	24	1.6	151	25	1.9
Aoki	O	50	16 Sep.	0.66	1.7	214	33	1.0	164	18	1.1
Nakatsuna	M-E	14	15 Sep.	0.64	3.7	365	49	2.0	470	83	2.9
Akagi-ono	M	16	19 Sep.	0.90	3.9	536	109	8.8	445	107	10.6
Kizaki	M	24	16 Sep.	0.51	4.0	204	27	0.9	161	25	0.8
Kawaguchi	M-E	10	4 Oct.	0.52	5.4	424	54	6.2	398	52	6.2
Haruna	M-E	14	19 Sep.	0.58	6.4	470	63	4.7	542	86	11.0
Nakanuma	M-E	13	13 Aug.	0.58	6.9	434	54	2.9	612	83	10.7
Yamanaka	E	13	3 Oct.	1.15	13.6	544	67	6.2	568	64	5.3
Shinsei	E	10	5 Oct.	0.78	18.2	702	102	18.6	1397	206	35.8
Fukami-ike	E	9	14 Sep.	1.24	28.2	1119	114	6.9	1084	176	30.2
Shirakaba	E	4	13 Sep.	1.44	29.7	1965	273	14.0	1952	266	12.0
Kasumigaura	E	4	7 Aug.	1.64	71.8	3088	1830	46.8	3393	1934	53.0
Wakuike	E	6	17 Sep.	4.19	83.5	3560	478	13.7	2870	354	17.5
Suwa	E	3	13 Sep.	7.68	185.5	4565	2086	21.3	3719	1478	23.3

1) O, oligotrophic; M, Mesotrophic; E, eutrophic.

2) Depth of water at the sampling site.

3) Attenuation coefficient of light.

Fig. 1. Vertical distribution of relative light intensity (L), water temperature (T), dissolved oxygen (DO), chlorophyll *a* (C, mg/m³), protein (P, mg/m³), RNA (R, mg/m³) and DNA (D, mg/m³) in oligo- and mesotrophic lakes. a, Lake Aoki; b, Lake Nojiri; c, Lake Kizaki; d, Lake Akagi-ono. Dates of measurements are shown in Table 1.

たが、各物質濃度には微弱ながら鉛直変動が認められた (Fig. 2. a, b). 白樺湖では全層からほぼ等濃度のクロロフィル *a* を検出したが、蛋白質と核酸の濃度は深さによって異なっていた (Fig. 2. c). 霞ヶ浦と諏訪湖からは極めて高濃度の蛋白質と核酸を検出した (Fig. 2. d, e). 諏訪湖では、表面水中のクロロフィル *a* 濃度が最大で、水面に観察された *Microcystis* を主とする水の華との対応を示した。蛋白質・RNA の濃度もまた表面水で最大に達したが、DNA 濃度の最大値は無光に近い中層に見出された。

無酸素化した深水層をもつ湖沼における諸物質の鉛直分布を Fig. 3 に示した。中瀬湖・深見池・震生湖・榛名湖の表水層では蛋白質・核酸とも比較的低濃度で、鉛直変動も小さかった。一方深水層では蛋白質・核酸とも著しく高濃度となり、深水層におけるそれぞれの平均濃度は表水層におけるその 2.5-7.5 倍に達した。こうした深水層からはバクテリオクロロフィルが検出され、またその上部では蛋白質・核酸の濃度極大が見出された (Fig. 3. a-d)。

湧池表水層のクロロフィル *a* 濃度は、上記 4 湖に較べて高かった。蛋白質と RNA も深水層より表水層で高濃度を示したが、DNA 濃度は深水層でやや高く、その最大値は深水層上限に見出された (Fig. 3. e)。

成層の発達にともなう蛋白質・核酸の鉛直分布の変化を中沼について調査した (Fig. 4)。成層の未発達な 4 月には、蛋白質と核酸にはほぼ様な分布が見られた。5 月に水温躍層が発達し、底部に無酸素層が出現すると、蛋白質と DNA の濃度は表水層で、RNA 濃度は深水層で高まる傾向を示した。6 月、8 月には無酸素層が発達し、この時期には蛋白質・RNA・DNA がすべて表水層より深水層で高濃度となった。5、6 月における 7m 層、8 月における 8m 層はほぼ深水層上限に相当したが、各期のこの層には蛋白質と DNA の濃度極大を見出した。

こうした鉛直分布の季節変化から、蛋白質・核酸の濃度が表層より深層で高まる現象は、成層の発達に伴って生じると推察された。

蛋白質・核酸が示す鉛直濃度変動の大きさを、濃度測定値の変動係数 (CV, %) によって比較した。調査した 15 水域のうち、11 湖では DNA に関する、3 湖では RNA に関する CV 値が最大で、蛋白質に関する CV 値が最大な水域は 1 湖にすぎなかった。また蛋白質の CV 値は 10 湖で最小となった。こうした CV 値の差は、鉛直濃度変動の大きさが DNA で最も大きく、RNA はこれに次ぎ、蛋白質では比較的小さい傾向にあることを示唆するものと思われた。

Fig. 2. Vertical distribution of relative light intensity (L), water temperature (T), dissolved oxygen (DO), chlorophyll *a* (C), protein (P), RNA (R), DNA (D), RNA/protein (R/P) and DNA/protein (D/P) in homothermal lakes. a, Lake Kawaguchi; b, Lake Yamanaka; c, Lake Shirakaba; d, Lake Kasumigaura; e, Lake Suwa. Dates of measurements are shown in Table 1.

各物質に関する CV 値を大きい順に並べたとき、上位 1-3 位を占める値を得た湖沼は、蛋白質について震生湖・中瀬湖・湧池、RNA について中瀬湖・青木湖・諏訪湖、DNA に関しては深見池・青木湖・榛名湖であった。同様に 15・14・13 位となる値を得た湖沼は蛋白質について白樺湖・山中湖・霞ヶ浦、RNA について赤城大沼・河口湖・白樺湖、DNA では霞ヶ浦・赤城大沼・山中湖であった。CV 値の大きい 9 例は、1 例を除くといずれも水温鉛直傾度の大きい湖沼であり、そのうち 6 例には無酸素化した深水層が発達していた。一方 CV 値の小さい 9 例のうち 7 例までは、水温躍層が生じていない湖沼であった。この結果から、各物質濃度の鉛直変動の大きさは成層の発達に大きく影響されるものと推察された。

Fig. 2, 3 の右端に例示したように、RNA/蛋白質、DNA/蛋白質など物質間の濃度比には鉛直変動が認められた。RNA/蛋白質比は湧池・諏訪湖など極めて富栄養な湖沼の表層、青木湖・木崎湖など貧・中栄養湖の中層と最深層で高まり、成層した富栄養湖では表・

変・深水層で極大を示した。また DNA/蛋白質比は多くの貧・中・富栄養湖の中層ないしは深水層上部で高まった。

蛋白質・核酸の鉛直分布は測定時期のほか、各湖に固有な条件に左右されると思われるが、本調査結果から夏期の鉛直分布を典型的にまとめると、次のようになる。

1) 蛋白質・核酸ともに貧栄養湖では低濃度で、深い湖の深層ではとくに少ない (例、青木湖)。一方浅い富栄養湖では、各物質とも極めて高濃度となる (例、諏訪湖・霞ヶ浦)。

2) 濃度の鉛直変動は、DNA で大きく、蛋白質で小さい。富栄養湖における DNA の最大濃度層は、蛋白質および RNA の最大濃度層より下方に見出されることが多い (例、諏訪湖・湧池)。

3) 全層ほぼ等温な湖沼でも蛋白質・核酸に鉛直濃度変動が認められるが、その大きさは成層した湖沼での変動に及ばない (例、山中湖・白樺湖・霞ヶ浦)。

Fig. 3. Vertical distribution of relative light intensity (L), water temperature (T), dissolved oxygen (DO), chlorophyll *a* (C), bacteriochlorophylls (BCv, bacterioviridin and BCa, bacteriochlorophyll *a*), protein (P), RNA (R), DNA (D), RNA/protein (R/P) and DNA/protein (D/P) in well-stratified lakes. a, Lake Nakatsuna; b, Lake Fukami-ike; c, Lake Shinsei; d, Lake Haruna; e, Lake Waku-ike. Dates of measurements are shown in Table 1.

4) 富栄養湖の無酸素化した深水層には、表水層より高濃度な蛋白質・核酸が見出される。この場合蛋白質とDNAの濃度極大は、深水層上限に位置する（例、中瀬湖・深見池）。

けん濁態の蛋白質・核酸は微小生物と非生物有機物に由来すると考えられるが、蛋白質・核酸濃度の湖沼による差は、微小生物現存量の差をある程度反映しているようにみえる。とはいえ、DNA量から推定した海水中の微生物現存量がATP量からの推定値をはるかに上まわる場合があるという指摘（HOLM-HANSEN, 1970）を考慮すると、蛋白質・核酸濃度からの直接推

定は、生物現存量を過大評価することになる。

各物質間の濃度比にみられる鉛直変動は、けん濁有機物の組成変動を示している。本調査では節足動物など裸眼で捕捉しうる動物を除外したので、けん濁有機物は微小藻類・原生動物・輪虫類・細菌類などの生物体に非生物有機物が加わって構成されていると思われる。DNA/蛋白質比に顕著な極大が認められた深見池5m層のけん濁物を直接検鏡したところ極めて多くの細菌を認めたが、動物プランクトン・微小藻類・デトリタスなどはほとんど見出せなかった。この比の極大層がバクテリオビリジンの極大層と一致すること、細

Fig. 4. Seasonal changes in the vertical distribution of chlorophyll *a* (Chl. *a*), protein (Prt.), RNA and DNA in Lake Nakanuma. Tr, transparency; T, water temperature; NH₃, ammonia-N; DO, dissolved oxygen; CO₂, total carbon dioxide.

菌の DNA 含量は極めて高いことなどを考え合せると、この DNA/蛋白質比の極大は、高密度な緑色硫黄細菌の存在によってもたらされたと推定される。各物質間の濃度比が微小生物群集の組成を反映する場合があるとすると、今後検討が進めば濃度比の変動から微小生物群集の組成変動を推定できる可能性がある。

物質間の濃度比には、しばしば著しい水域差を生じていた。例えば諏訪湖の有光層について求めた RNA/蛋白質比 0.46 は、青木湖での値 0.13 の 3 倍であった。一方前者での蛋白質/クロロフィル *a* 比 24.6 は、後者における値 125.9 の約 1/5 にすぎなかった。こうした

濃度比の差異は、富栄養湖と貧栄養湖とにおけるけん濁有機物ないしは微小生物群集の組成に関する相違を示唆するものと考えられる。

4. 摘 要

本州中部の 15 湖沼について、晩夏におけるけん濁態蛋白質・RNA・DNA の鉛直分布を調べた。

1. 15 湖沼の有光層におけるクロロフィル *a*・蛋白質・RNA・DNA の平均濃度はそれぞれ、1.6-185.5 mg/m³, 143-4565 mg/m³, 24-2086 mg/m³, 1.0-46.8 mg/m³ であった。

2. 蛋白質・RNA・DNA の湖内における鉛直分布は、多くの場合、互いに異なっていた。鉛直濃度変動は DNA で大きく、蛋白質で小さかった。

3. 全層ほぼ等温な湖沼でも蛋白質・核酸濃度に鉛直変動を認めたが、その大きさは成層した湖沼に及ばなかった。

4. 貧・中栄養湖、浅い富栄養湖での蛋白質と RNA は、一般に深層より表層で高濃度を示し、DNA は中・深層で高濃度となる傾向にあった。成層の発達した富栄養湖では、蛋白質・核酸ともに深水層で高濃度を示した。

5. RNA/蛋白質比は浅い富栄養湖の表層で高まった。DNA/蛋白質比は多くの湖沼の中・深層で高まり、富栄養湖の無酸素化した深水層ではその上限で極大を示した。この極大層はバクテリオクロフィルの極大層に一致した。

謝 辞

本稿を草するにあたり、原稿の校閲と有益な御批判を賜った東京教育大学・市村俊英教授に謹んで感謝の意を表す。また尾形一法氏による調査への助力に対し深謝する。

文 献

- BIRGE, E. A. and C. JUDAY (1934): Particulate and dissolved organic matter in inland lakes. *Ecol. Monogr.*, 4: 440-474.
- HOLM-HANSEN, O., W. H. SUTCLIFFE, Jr. and J. SHARP (1968): Measurement of deoxyribonucleic acid in the ocean and its ecological significance. *Limnol. Oceanogr.*, 11: 510-519.
- HOLM-HANSEN, O. (1970): Determination of microbial biomass in deep ocean water, p. 287-300. In D. W. Wood (ed.), *Symposium on organic matter in natural waters*, Univ. Alaska Press.
- IWAMURA, T., T. KANAZAWA, K. SHIBATA, Y. MORIMURA, S. ICHIMURA, O. MAEDA and H. TAMIYA (1967): Preliminary studies on the feasibility of microanalytic measurement of planktonic populations. *Journ. Oceanogr. Soc. Japan*, 23: 247-251.
- IWAMURA, T., H. NAGAI and S. ICHIMURA (1970): Improved methods for determining contents of chlorophyll, protein, ribonucleic acid, and deoxyribonucleic acid in planktonic populations. *Int. Rev. ges. Hydrobiol.*, 55: 131-147.
- 前田 修・岩村達一 (1968): 水界における物質の動態に関する生化学的アプローチ (自然水中の蛋白質と RNA の測定). 日本プランクトン学会報 15: 17.
- MAEDA, O. and S. ICHIMURA (1973): On the high density of phytoplankton population found in a lake under ice. *Int. Rev. ges. Hydrobiol.*, 58: 673-685.
- 前田 修・岩本伸一・山口征矢 (1974): 霞ヶ浦の富栄養化に関する二三の考察. 陸水雑, 35: 53-59.
- SEKI, H., M. TAKAHASHI, Y. YAMAGUCHI and S. ICHIMURA (1972): Ecological characteristics of Go-no ike Lake. *Arch. Hydrobiol.*, 70: 425-441.
- STRICKLAND, J. D. H. and T. R. PARSONS (1965): A manual of sea water analysis. *Fish. Res. Bd. Canada Bull.*, 125: 1-203.
- TAKAHASHI, M. and S. ICHIMURA (1968): Vertical distribution and organic matter production of photosynthetic sulfur bacteria in Japanese lakes. *Limnol. Oceanogr.*, 13: 644-655.
- 山口征矢・高橋正征・市村俊英・森谷虎彦 (1973): 夏季停滞期の余呉湖の性状. 陸水雑, 34: 121-128.

(著者: 前田 修*・富岡英通, 東京教育大学理学部植物学教室, 東京都文京区大塚3丁目。*現所属: 筑波大学生物科学系, 茨城県新治郡桜村; Osamu MAEDA* and Hidemichi TOMIOKA, Department of Botany, Faculty of Science, Tokyo Kyoiku University, Bunkyo-ku, Tokyo。*Present address; Institute of Biological Sciences, The University of Tsukuba, Sakura-mura, Ibaraki, 300-31)