

— 論 説 —

陸水学と海洋学*

西條 八束†

要 旨

陸水学は、通常、湖沼を研究水域としている。そして、湖沼が海洋に比べて閉鎖性が強いことを除けば、とくに生態系の構造と機能、物質循環などにおいて共通の性状を示す場合が多い。さらに湖沼が閉鎖的であることは、そこに生息する生物の相互関係、あるいは生物と生活環境の相互作用などを把握しやすくさせている。特に小湖を研究水域とすれば、時間的、空間的に密な観測、あるいは長期にわたる観測も容易で、多額の経費もかけずに精密な研究ができる。

湖沼は通常、深い湖と浅い湖に分けられ、その性状も異なり、貧栄養湖と富栄養湖に分類される。さらに特異な湖であるが、深層に海水など高密度の水が半永久的に停滞している湖(部分循環湖)では、塩分の境界層に厚いバクテリアプレートが形成され、そこに各種のバクテリアなどが密生し、新たな知見が数多く見出されており、海でも同様な現象発生の可能性がある。また近年は、水域の富栄養化が重大な環境問題となり、その分野の研究が盛んになっている。

日本では、湖沼における生物生産と物質循環の研究が、海洋における同様な分野の発展の基礎となった。このような陸水学の研究成果が海洋学の発展に寄与した具体例を挙げて論説した。

キーワード：湖沼、生態系の構造と機能、物質循環、部分循環湖、富栄養化

1. はじめに

英文学術用語の Limnology は、湖沼を総合的に研究する科学分野として湖沼学と訳されているが、河川・地下水なども含めて海に対し陸の水という意味であり、陸水学と呼ばれる場合も多い。現に、わが国では日本海洋学会に相当するものが日本陸水学会である。特に湖沼においては海と共通の問題が多く、戦後米国で、それまでの American Society of Limnology を 1949 年に American Society of Limnology and Oceanography に改められ

て、1956 年に学会誌 Limnology and Oceanography が創刊されている。この誌名の改訂は、現在、水圏学術分野で最も重要な学術誌の一つになっていることから、適確な判断であったことを示している。

1.1. 湖沼学のはじまりと基礎的概念

日本だけでなく世界的に見た湖沼学の発足ならびに発展の歴史は、上野 益三(1977)の「陸水学史」に最もよくまとめられていて、世界的にも類書はない。その中にも記されているように、湖沼学の創始者はスイスの F. A. Forel とされており、彼の最初の著書 Lac Léman (1892, 1895, 1904) 3 巻の内容は地質・気象・水理・化

* 2007 年 3 月 12 日 受領； 2007 年 3 月 27 日 受理
著作権：日本海洋学会，2007

† 〒 465-0063 名古屋市名東区新宿 2-247

著者 e-mail address : y-saijo@sannet.ne.jp

学の体系は Welch (1952) や Hutchinson (1957, 1967, 1975, 1993) や Horn and Goldman (1994, 手塚康彦 1999 の和訳あり) などによって概ね完成に達している。これは、海洋学の体系を示した Sverdrup *et al.* (1961) と広く対比されている。さらに、最近の陸水学専門書としての Wetzel (2001) は内容も豊富であり、わが国の最近の研究もよく引用されている。

しかし、湖沼中に生息する生物と生活環境との相互関係に関する概念は、それ以前の 1887 年に米国のイリノイ大学の動物学の教授 S. T. Forbes が、小都市 Peoria での科学談話会で行なった講演「小宇宙としての湖」“The Lake as a Microcosm” (1887) が基礎となっている。彼は「湖は一つの小さな世界を作っており、その中であらゆる要因が相互に働きあい、活発な生物活動が営まれている。これは我々人間の体がさまざまな器官からできているが、一つのシステムを作っているように、湖も一つの生物総合体として外部からの働きかけに反応する、と考えてよい」と述べた。これが、その後の湖沼学、さらに生態学の発展の基礎となった。この講演は出版されて、10 頁の小論文となって広く読まれている。また、湖沼の微生物学や物質循環に関する研究成果としては、Kuznetsov (1959) が特に優れており、そこに掲載されている物質循環の図は現在なお多くの陸水学や海洋学の専門書に引用されている。

1.2. 研究水域としての湖沼の特色

1.2.1. 閉鎖系であること

海洋に比べて湖沼の大きな特性は、それが閉鎖系の性格が強いため、生物と生物あるいは生物と物理・化学・地学的環境条件などとの因果関係が把握しやすいことにある。特に研究課題によっては、小湖を研究の場とすることで、多額の経費もかけずに、時空間的に緻密な観測研究ができる。

その意味で、後に、いくつかの例を述べるが、研究テーマによっては、湖沼は海洋研究の基礎的知見を発展させ、海洋の実験室とも見なせる重要な役割を果たし、その発展に寄与してきた。

1.2.2. 環境条件が多様であること

まず湖の一般的条件の違いは、深い湖と浅い湖の違いから生じている。これは湖沼研究の初期から認識されていたが、研究の発展と共に、深い湖と浅い湖の水温成層の違い、特に溶存酸素の成層・循環の違い、それに伴う一次生産とそれを支えている栄養塩の循環の違いが明らかになり、生物の多い富栄養湖、少ない貧栄養湖などの湖沼分類から、近年の湖沼汚染の中心的課題である汚濁負荷の増大による人為的富栄養化の問題にまで到達した。この問題は内湾や沿岸域などでも全く同様である。

また、後に述べる部分循環湖 (meromictic lake) と称される、水の上下の層が半永久的に混合せず、深層の酸欠状態が永続している湖がある。この種の湖の多くは上下の境界層に微生物が濃縮した、いわゆるバクテリアプレートが形成され、興味深い生態系をなしており、微生物生態系について、新たな知見が得られる可能性が高い水域である。

2. わが国における湖沼学の歩み

わが国の湖沼研究は、長く父君とヨーロッパに行っておられた田中 阿歌麿が帰国して、約 100 年前に山中湖で始められた。まだ鉄道網さえ整備されていない時代に、日本中の主な湖沼の深度図を作成し、透明度や水温の測定を行なわれたのは、その後の研究の発展に偉大な貢献であった。その後、一方でわが国の淡水生物学は、1911 年に手賀沼の水生植物の中野治房による研究に始まり、1914 年に京都大学の天津臨湖実験所が発足し、川村 多実二 (1918) の「日本淡水生物学」上下が刊行されて軌道に乗った。その後、吉村 信吉の名著「湖沼学」が 1936 年に刊行され、日本の湖沼学の発展の基礎となった。吉村が強く主張して日本陸水学会が発足したのは 1930 年 11 月で、「陸水学雑誌」1 巻 1 号が刊行されたのは 1931 年 12 月であった。

しかし、吉村は 1947 年 1 月、諏訪湖で観測中に氷が破れたため殉職してしまった。満 40 歳になっていなかった。吉村は数百の論文を残したが、海洋についても多くの論文があったことは、あまり知られていない。

わが国で最初の湖沼の生産と物質循環の研究は、宝

月 欣二が戦争直後の1947年12月から諏訪湖で2年間、数名の共同研究者と実施した「内水面の生産および物質循環の研究」である。観測機材は勿論、食事さえ不自由な時代であったが、メンバーのほとんどが諏訪湖付近の出身者だったため毎月の観測が可能だった。観測項目は、透明度、水温、溶存酸素、栄養塩、溶存有機物、セストン、バクテリア数(平板培養)、新生沈殿物、クロロフィル、水生植物の現存量、植食性ペントス等に及んだ。現在でも、これだけの項目の観測は容易でない。この成果は、部分的には論文になっているが、全ての内容は「内水面の生産及び物質循環に関する研究」(1952)と題して学術誌「水産資源研究」に127頁にわたり掲載された。この論文が国際的には勿論、国内でも広く知られていないのは残念である。しかし、この研究は、後のわが国におけるIBP(国際生物学事業計画)における陸水、海洋の生物生産研究等の基礎としてきわめて重要な役割を果たした。IBPの際も宝月は沿岸域を分担した。

わが国の湖沼研究において、もう一方の輝かしい業績は、化学者の菅原 健による。菅原は木崎湖に赴き、外国文献に基づいて自ら製作したpH測定器具を用いて、わが国ではじめて湖沼のpHを測定した。これ以来、湖沼研究に熱中し、毎週休日には埼玉県の利根川河畔の小湖、高須賀沼(水深6m)において、水温、DOなどの基本的観測は勿論、深さ5cmおきに採水して微細な化学成層を見出すとか、底泥を7層に分けて採取し、細菌数、底生動物、無機、有機成分(エーテル可溶分、アルコール可溶分、セルローズ、リグニン等)を1か年にわたり調査研究した。さらに、高須賀沼の新生沈殿物の化学組成などの研究、その他の湖沼での観測も含め、水素、窒素、炭酸などのガスの代謝を研究し、世界で初めて水中の全炭酸の直接測定法を考案した。これらの業績は“Chemical Studies in Lake Metabolism”と題する論文として刊行し、国際的にもきわめて高い評価を受けた。

その後、菅原グループの研究は、菅原が湖に興味を持つきっかけとなった木崎湖を中心に、まず深層水中のアルゴンの飽和度が特に高いことを見出し、次に金属に関心をもち、秋季に湖底付近の貧酸素化が進む時期に、水中の鉄、マンガンの鉛直分布が異なること、湖

水の停滞期に湖底直上にアルミニウムが濃縮すること、また、湖水と堆積物中の銅と亜鉛濃度に着目し、堆積物中の銅を生物起源と鉱物起源のものに分け、亜鉛、バナジン、モリブデン、ストロンチウム等の金属、さらにヨウ素、ヒ素なども研究し、その研究の多くは南極海を含む世界の海洋にまで発展した。また粒子状のマンガンを計測し、その数の季節変化を明らかにしたほか、湖の貧酸素層にヒドロキシラミンが増えること等、次々と新知見を得た。これらの湖における成果は、Saijo and Hayashi (2001)のLake Kizakiに紹介されている。なお、菅原は敗戦直後、研究費の不足などの条件のもとで、湖沼、海洋の地球化学的研究のほかに、風送塩などの研究を行ない、特に興味深いのは、海の波浪などから空中に飛ぶ泡沫が破裂する際に、化学的成分の選択的濃縮が起きることを発見するなど、海洋の陸水への化学的影響の解明などにつとめ、それらもふくめた一連の研究で学士院賞を受けた。

西條 八束は吉村に師事し、湖沼の物質循環研究の重要性を強く教えられたが、上述のように、わずか1年後に吉村が殉職してしまったため、西條は宝月と菅原の業績を基礎に、木崎湖等で湖沼の一次生産や炭素・窒素代謝を研究していた。その間に、Steeman Nielsen (1952)が世界の海洋の一次生産測定に用いた ^{14}C 法を湖沼に応用することに成功し、市村 俊英とともに ^{14}C 法の測定値の意義を検討し、北西太平洋などの海洋において一次生産を測定した。さらに、湖沼・海洋の一次生産、物質循環の研究を生物地球化学的ならびに生態学的に発展させた。また、水圏有機化学分野において、小山忠四郎や半田 暢彦などは、同じく湖沼学研究から出発し、海洋の有機物の地球化学的研究において大きな成果をあげている。一方、海洋学から湖沼学へと主要な研究対象を移した研究成果に基づく著書(Seki, 1982)もある。この書は出版されて25年経過しているが、今なお欧米の多くの水圏科学大学院において教科書や参考書として用いられており、海洋学と湖沼学の両面から水圏科学の本質を展望することの重要性を示している。

3. 海洋学への湖沼研究の寄与

海洋学への湖沼研究の寄与について、西條グループの研究成果を例に挙げて説明すると、概略は以下の如くである。

3.1. 海洋について

まず、南極海の一次生産を観測し、栄養塩が豊富なのにパックアイス水域以外では、一次生産が意外に低いことを見出し、臨界深度が深いためであろうと推定した。また国際インド洋観測において、わが国のセンター的役割を果たしたが、 ^{14}C アンプルの商品化やバンドン採水器の製作など、さまざまな問題を克服する必要があった。わが国から3隻の研究船が2年にわたり参加し、全測点で現場法により光合成量を測定したのみか(他国では現場法はあまり使われていなかった)、特に諸外国より深層までクロロフィルの測定を行ない、 24°S に至るまでの観測水域全般にわたって、深度100~125 m層に、いわゆる亜表層クロロフィル極大の存在することを明らかにした。

3.2. 一般の湖沼について

一方、国内では1963年~1965年にかけて、琵琶湖を南北分離して貯水機能を高めたいという建設省の計画の関係で、「琵琶湖生物資源調査」が大規模に実施された。西條は ^{14}C 法による光合成量とクロロフィル量を測るとともに、堀江正治と協力して深度70 mの湖底からブイを浮かべ、各層の新生沈殿物を採取し、湖水中での窒素循環を研究した。その結果、湖水中の約20 mの補償深度より上の生産層で生産された有機物の85%が、同じ生産層の中で分解され、栄養塩として再利用されることが明らかになった。

その後、国際黒潮共同調査(CSK)や海洋の有機懸濁物量の観測などを行っていたが、海洋では緻密な観測を繰り返し実施できないことを痛感し、かつて物質循環の観測を試みた長野県の木崎湖において観測を再開した。木崎湖は最大深度29 mの小湖であるが、夏季に水温躍層が4 mから8 mくらいまで顕著に形成されている時、深度5 m層にクロロフィル極大がある一方で、7 m層にアンモニウムイオン極大が見出された。

透明度が2 m程度であったから、5 m層の照度は補償深度に近いと考えられ、海洋の亜表層クロロフィル極大に類似していた。その下のアンモニウムイオン極大層は、これまで湖で報告された例はなく、沈降してきた有機物が活発に分解されている層と考えられた。特に興味深い現象は、春になって湖水が成層した後、深層水中のアンモニウムイオンは次第に増加するが、硝酸イオンは増えない。しかし、6月中旬になると、それまで蓄積されていたアンモニウムイオンが短時間にすべて硝酸イオンに変化する。この原因として、春の循環期に硝化細菌が日光にあたり、硝化機能を受光量に応じて、ある期間、失っていたためであることが培養実験で明らかになった。また、8月下旬、深層の溶存酸素が消失する直前に亜酸化窒素が生じることを見出した。これらの業績は、前述の Saijo and Hayasi (2001) “Lake Kizaki”にも記されているが、このような湖での緻密な観測の成果は、海洋の研究にも多くの示唆を与えるであろう。

3.3. 部分循環湖について

特殊な湖の観測として、海水の侵入などで深層水の密度が高いため、冬季に表面が冷却されても底層まで鉛直混合が行なわれない湖、いわゆる部分循環湖と称される湖がある。その型の湖の一つの三方五湖中の水月湖において、松山 通郎(1971)が深度8 m付近の塩分の境界層に、夏季は光合成硫黄細菌、冬季は化学合成硫黄細菌が多いことを見いだした。松山は、その後、長崎県の上甕島の部分循環湖である貝池で詳しい研究を行ない、塩分躍層のある深度5 m付近に形成されるバクテリアプレートに密集している光合成、化学合成細菌などの微生物の詳しい組成と、それを捕食するために集まり、硫化水素層にまで活動している繊毛虫などの動物プランクトンも含めた特異な生態系を明らかにした。同様な研究はロシアの J. I. Sorokin がモスクー近郊の小湖及び貯水池で行ない、さらに、最近、黒海に関して刊行した著書の中でも、その問題に言及しており、他の沿岸海域などに適用できる場合も少なくないと考えられる。

4. 富栄養化問題等

第二次大戦後の世界各国における経済活動の急速な発展に伴って生じた、都市、工業、農業等の各種排水により生じた湖沼の水質汚染は、欧米においては既に1961年頃から重大な環境問題として注目されており、1960年代末には国際シンポジウムも2、3開催されていた。それらのなかでも最も卓越した成果として、National Academy of Sciences (1969) が挙げられる。

一方、環境問題としての湖沼や内湾の富栄養化汚染がわが国で認識されるようになったのは1960年代末期である。当時、わが国の湖沼の全窒素・全リン量とクロロフィル量の関係を明らかにして、後のVollenweiderモデルの基礎となった研究成果を坂本充(1966)が発表していたが、そのような問題に関する基本的知見を持っている研究者は数えるほどしかいなかった。その意味でも、このような問題が起きる以前に水に関する総合的な基礎研究の機関を作った菅原の卓見は高く評価されてよいであろう。

全国の浅い湖沼、内湾などで富栄養化が進んでいること等が次第に明らかになり、河川や大気汚染が重大化したため、1971年に環境庁がはじめて設置された。さらに各地方自治体なども水、大気などの環境汚染に関する部局を設けるに伴い、陸水、内湾などの環境汚染に関わる調査、研究が急速に進み、これに関係する多数の学会、学術誌が刊行されるようになり、現在に至っている。しかし、その中には、環境の調査・改善等に関する技術的側面が強く、本質的な問題意識が不足しているものも少なくないのは残念である。

References

- 上野 益三 (1977): 陸水学史, 培風館, 367 pp.
- 川村 多実二 (1918): 日本淡水生物学, 上下, 裳華房, 579 pp.
- 宝月 欣二, 北沢 右三, 倉沢 秀夫, 白石 芳一, 市村 俊英 (1952): 内水面の生産及び物質循環に関する基礎的研究 (1), 水産資源研究, 41-127.
- 吉村 信吉 (1937): 湖沼学, 三省堂, 520 pp.
- Forbes, S. A. (1887): The lake as a microcosm. Bull. Peoria Sci. Assoc. Bull. 10 pp.
- Forel, F. A. (1892): Le Léman, Monographie limnologique 1, Lausanne, F., Rouge. 543 pp.
- Forel, F. A. (1895): Le Léman, Monographie limnologique 2, Lausanne, F., Rouge. 651 pp.
- Forel, F. A. (1904): Le Léman, Monographie limnologique 3, Lausanne, F., Rouge. 715 pp.
- Hutchinson, G. E. (1957): A Treatise on Limnology, Vol. I. Geography, Physics, and Chemistry. John Wiley & Sons, New York. 1,015 pp.
- Hutchinson, G. E. (1967): A Treatise on Limnology, Vol. II. Introduction to Lake Biology and the Limnoplankton. John Wiley & Sons, New York. 1,115 pp.
- Hutchinson, G. E. (1975): A Treatise on Limnology, Vol. III. Limnological Botany. John Wiley & Sons, New York. 660 pp.
- Hutchinson, G. E. (1993): A Treatise on Limnology, Vol. IV. The Zoobenthos. John Wiley & Sons, New York. 994 pp.
- Kuznetsov S. I. (1959): Die Rolle der Mikroorganismen im Stoffkreislauf der Seen. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin. 301 pp.
- Matsuyama M. and Y. Saijo (1971): Studies on biological metabolism in a meromictic lake Suigetsu. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **27**, 197-206.
- National Academy of Sciences (1969): Eutrophication: Causes, Consequences, Correctives. Proceedings of a Symposium. National Academy of Sciences, Washington, D. C. 661 pp.
- Saijo Y. and H. Hayashi (2001): Lake Kizaki, Limnology and Ecology of a Japanese Lake. Buckhuys Publishers. 427 pp.
- Sakamoto, M. (1966): Primary production by phytoplankton community in some Japanese lakes and its dependence on lake depth. *Arch. Hydrobiol.*, **62**, 1-28.
- Seki, H. (1982): Organic Materials in Aquatic Ecosystems. CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida. 201 pp.
- Steehan Nielsen, E. (1952): The use of radioactive carbon (C^{14}) for measuring organic production in the sea. *J. Cons. Int. Explor. Mer.* **18**, 117-140.
- Sugawara K. (1938): Chemical studies in lake metabolism. *Bull. Chem. Soc. Japan*, **14**, 375-451.
- Sverdrup, H.U., M. W. Johnson, and R. H. Fleming (1961): The Oceans: their Physics, Chemistry, and General Biology. Prentice-Hall, Englewood, 1,087 pp.
- Wetzel, R.G. (2001): Limnology, Lake and River Ecosystems. Academic Press, 1,006 pp.

Limnology and Oceanography

Yatsuka Saijo[†]

Abstract

Studies of limnology are carried out mainly in lakes. Although lakes have a more enclosed character than seas, both aquatic systems share common ecological structures and functions. The enclosed character of lakes, however, often makes it possible to clarify interrelationships among biological communities or between the biological community and environmental features. Particularly in small lakes, frequent and intensive observation, as well as prolonged study, is possible with less expense than in seas and oceans.

Lakes are usually classified into deep and shallow lakes, which have different general characters, and are further divided into oligotrophic lakes and eutrophic lakes. There also are specific lakes where high density water stagnates semi-permanently at a lower layer. In such meromictic lakes, a dense microbial plate is often maintained at the boundary between upper low-density and lower high-density water masses. In these lakes, especially in the microbial plate, many unknown microbial phenomena remain to be discovered. Such findings may contribute to the future progress in microbial studies in some regions of the sea.

In Japan, studies of biological production and of the mineral cycle in lakes have provided a basis for the development of similar research in coastal seas and the open ocean. In particular, limnological findings regarding anthropogenic eutrophication, a well known worldwide environmental problem, gave important knowledge to solve this urgent problem, not only in lakes but also in coastal sea areas.

This paper describes several limnological studies that have contributed to the progress of oceanographic research.

Key words: ecological structure and function, mineral cycle, meromictic lakes, eutrophication

(Corresponding author's e-mail address: y-saijo@sannet.ne.jp)

(Received 12 March 2007; accepted 27 March 2007)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2007)

[†] Shinjuku 2-247, Meito-ku, Nagoya 465-0063 Japan