

湖沼行脚を振り返る

中西正己*

はじめに

学生時代（1960）、先輩に誘われ気象庁の海洋観測船，“凌風丸”で太平洋を航海し、海水201を濾過、フィルター上に植物プランクトンを濃縮しクロロフィルa量の測定作業を手伝ったのが湖沼行脚のきっかけになりました。大学院に進学し、「光合成と呼吸過程から植物プランクトンの生活を理解する」という方法論を取り入れ、“塩分や栄養塩濃度の異なる水域に生育する植物プランクトンの塩分・栄養塩濃度の変化に伴う光合成の応答”に関する研究を行いました。フィールドとして東京湾・瀬沼（汽水湖）・山中湖にかけたの

が湖沼行脚の始まりでした（1966年、再度、凌風丸に乗船し、黒潮・親潮海域の植物プランクトンの基礎生産測定に参加）。“植物プランクトンの生活を光合成と呼吸過程から理解する”方法論による研究が私を古代湖・大湖沼—琵琶湖—に導いてくれました。

琵琶湖を拠点に、メルゴッツオ湖（イタリア）、リオテルチェーロ湖（アルゼンチン）、ポカラ湖沼群（ネパール）、バイカル湖（ロシア）を行脚、退職後、ビクトリア湖など東アフリカの湖沼を巡ってきました（図1）。

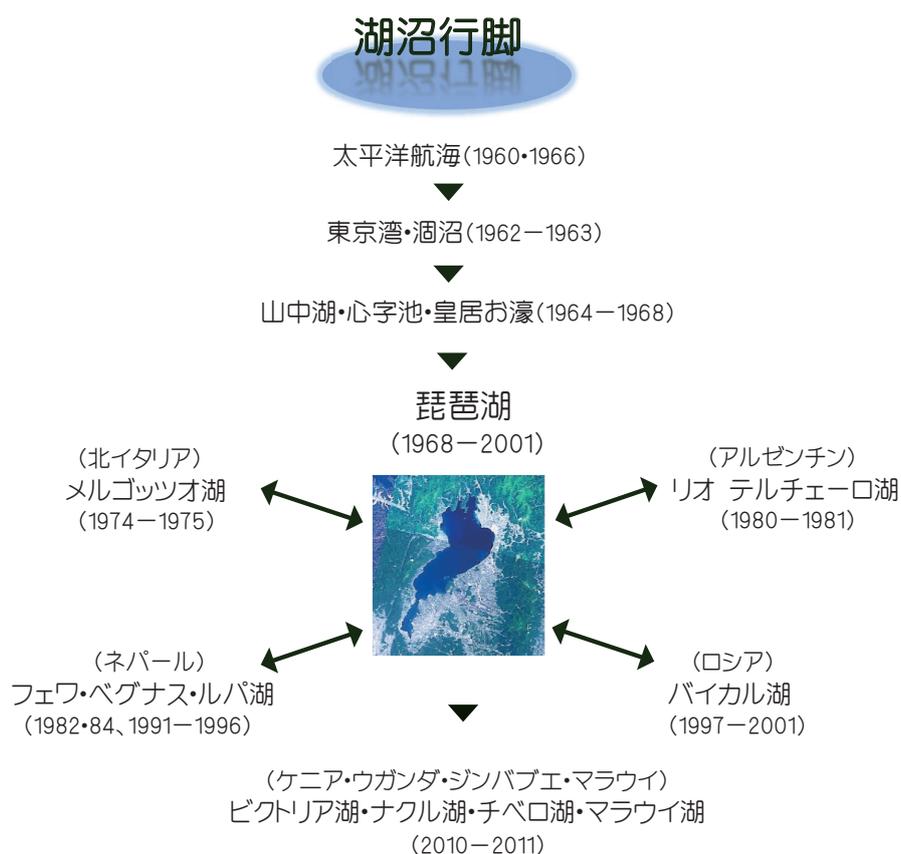


図1. 湖沼行脚の道筋

*京都大学名誉教授，総合地球環境学研究所名誉教授

I. 琵琶湖 (1968–2001)

1) 塩津湾に始まる琵琶湖の植物プランクトンの基礎生産評価 (1968–1990)

1964年、国際学術連合会議 (ICSU) は、世界人口の増加を懸念し、「地球 (森林・草原・海洋・湖沼・河川)」は、人間の食糧資源としてどれくらい光合成により有機物生産する能力を有しているか」を評価するため国際生物学事業計画 (IBP, International Biological Program) を提案しました。日本も、日本学術会議は特別委員会を設置し、貧栄養湖 (湖沼) の調査対象水域として琵琶湖最北端に位置する塩津湾が登録されました。京都大学に赴任して1週間後、1968年11月25日、下阪本から塩津湾へ調査船「はす」で向かいました。私にとって初めての琵琶湖航行でした。

1969–73年の調査から、塩津湾の植物プランクトンの年間基礎生産量は、 $140\text{--}340\text{ Cg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ と年により大きく変動することに驚きました (塩津湾に隣接する琵琶湖北湖盆沖帯の基礎生産量は、 $120\text{--}250\text{ Cg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$)。

塩津湾・北湖盆沖帯・南湖盆沖帯で測定された植物プランクトンの純基礎生産量を基に琵琶湖の年間基礎生産量を評価しますと、乾燥重量にして23–60万トン/年になります。滋賀県の農耕地 (570 km^2) で収穫されるお米の量に相当することが判りました。

2) 光合成により生産された有機物の細胞外排出物質とその行方について (1973–1976)

貧栄養水域である外洋の植物プランクトンは、光合成により生産された有機物質の90–95%は、グリコール酸・多糖類として細胞外へ排出されることが知られています (Fogg, G.E., 1966)。塩津湾が典型的な貧栄養水域であれば、外洋と同様な現象がみられるのではないかと自問し、大学院生の研究テーマにしました。結果は、排泄される物質はグリコール酸でしたが、排泄量はわずか光合成量の2–7%でした。この結果と水中の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度 ($\sim 100\text{ }\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$) などから、塩津湾は典型的

な貧栄養水域ではなく、中栄養湖に近い水域であることが判明しました (細胞外排出物質に関する研究をされた大学院生は博士学位を取得)。

3) 琵琶湖北湖盆沖帯における植物プランクトンの基礎生産とその行方 (1982–2001)

植物プランクトンが光合成により生産した有機物質がどのような行方を辿るか調べました。その概要は、日総基礎生産の23–38%は自己呼吸による消費され、35–40%は動物プランクトンに摂食されることが判りました。この調査結果を基盤に、植物プランクトンの行方を、植物プランクトンをサイズ分画 (ピコ・ナノ・マイクロ藻) し夫々の行方の違いを調べました (バイカル湖記載欄参考)。

他に、植物プランクトンの光合成に不可欠な琵琶湖水中の光環境の分析—水中の光合成有効波長の鉛直変化、光減衰とそれに関係する懸濁態物質・溶存物質などの鉛直分布構造など—も行いました。

4) その他

イタリアから帰国直後、メルゴッツオ湖で5–6月に優占種として出現したウログレナ (*Uroglena americana*) が、1977年 (1976年に既に発生) に琵琶湖で異常発生し赤潮現象を呈しました。滋賀県からの委託研究 (門田元教授代表) に参加し、発生原因を探りましたが、ウログレナの異常発生機構の科学的検証に至りませんでした。委託研究報告書には、異常発生の背景に琵琶湖の富栄養化があることから、「富栄養化により異常発生が生じたと考えられる」と結論づけています。ウログレナに限らず、植物プランクトンの異常発生機構について科学的に殆ど説明・検証されていないのが現状です。

他に、外来種、オオカナダモ群落内の環境調査を行い、オオカナダモに付着するバクテリアが放出するビタミンBグループの植物プランクトンの種組成に及ぼす影響、1994年夏に発生した水位低下 (-123 cm) が植物プランクトンの鉛直分

布に大きな変化をもたらすことなど琵琶湖の環境に関する現象を論文として発表してきました。

5) 琵琶湖総合開発に伴う諸工事差し止め訴訟 (1976-1989) 原告：8名，弁護士：29名

「人間だけでなく、学術・文化・歴史的に貴重な生物の生息する琵琶湖に人格権を認め、人間が代わって訴訟できる法制度を日本にもつくる」ことを目的とした訴訟でしたが、日本には、人格権を認める法制度がなく、「総合開発に伴う諸工事により琵琶湖の水を利用している原告に健康被害を与える（浄水権享受）」として民事訴訟に切り替え、原告の一人として活動しました。裁判では、民事訴訟であります。一貫して貴重な生物の生息する琵琶湖に代わって訴訟できる「人格権」を認める法制度を日本にも設定する必要があることを訴え続けました。残念ながら、結果は「人格権に基づく差し止め訴訟は理解できるが、本工事が原告に健康被害を齎す証拠が不十分」として敗訴しました。この訴訟を通して人格権を認める法制度確立を目指す弁護士さんたちの熱意に感動を覚えました（現在、インドの聖なる川、ガンジス川とニュージーランドのマオリ族の敬うワレガンヤヌイ川に人格権が認められています）。

II. メルゴツオ湖 (1974-1975, 北イタリア) 文科省：「海外学術研究」

共同研究機関：イタリア陸水生物学研究所

メルゴツオ湖は、北イタリアの氷河湖、マジョーレ湖に繋がる小さい湖（表面積：1.2 km²）です。この海外学術研究は、私にとって初めての長期海外滞在（1年6か月）でした。

植物プランクトンの種や基礎生産に関する季節変動の研究は、慣例として月1回の調査頻度で行われてきました。イタリアの共同研究者との話し合いの結果、月1回の調査で測定された植物プランクトンの基礎生産が種の消長をどれくらい反映されているか検証することも兼ねて週1回の頻度で調査を行いました。種は、出現・増殖し1か月

後にピークに達し、急激に減少、1か月後に消滅することが判りました。植物プランクトンの基礎生産や種の季節変動に関する調査研究は、月1回に固定せず、研究の目的により調査頻度を高める必要のあることなども検証し、論文3編にまとめました。

この調査研究を通して、日本とイタリアでは研究体制の違いのあることを体験しました。調査研究は、研究者と専門技術職員で構成されていることはほぼ同じですが、夫々の分担が曖昧でなく明確です。研究者は、研究計画と各専門技術職員が分担・分析したデータを基に論文に仕上げることです。技術者は、「船上での作業—採水・水温・水中の光測定など—」、「水質分析」、「プランクトンの同定・計数」・「クロロフィル分析」そして「使用した実験ガラス器具などの洗浄・乾燥」など多岐に分かれています。

共同研究を通して使用したスイスのナイター社の30 μmメッシュサイズのプランクトンネットとの出会いが、琵琶湖・バイカル湖の植物プランクトンをサイズ分画し、夫々の機能の違いを解明するきっかけになりました。後日、出会いの凄さを実感しました。

III. リオ テルチェーロ湖 (1980-1981, アルゼンチン)

共同研究機関：ラプラタ陸水学研究所

湖畔に原子力発電所建設中の堰止湖、リオテルチェーロ湖（表面積：54 km²、コルドバ州）において発電所が作動する前の湖沼環境を記録するための調査依頼がラプラタ陸水学研究所からあり出かけました。発電所からの排水の影響は広範囲に及ぶことを念頭に、湖沼全域を調査水域（30定点）とし、水温・透明度・pH・栄養塩濃度・溶存酸素・植物プランクトン（種・クロロフィルa量・基礎生産）の鉛直分布の季節変動を調べ、4篇の論文に纏めました。この湖は、4河川から流入し、湖沼の水量は不規則に変動し、物理・化学的環境の変動も定点により異なり多様な環境で

あることがわかりました。原子力発電所が作動後もこの湖の環境モニタリングを継続していく必要のあることを論文に指摘しました。

この調査を通して、使用するピペットは、全てメスピペットであることに気づき、日本からたまたま持参した安全ピペッターと駒込ピペットを披露し実践して見せたところ、大好評を受け、フィールドでの溶存酸素固定液の注入などに使用され、野外調査がスムーズに進行し、研究者・技術職員の笑顔が今も浮かびます。一年間の共同調査研究を通し、研究者と専門技術職員との間で絶えず意見交換し、作業の確認をしながら和やかな雰囲気の中で作業をしている姿も印象に残りました。

調査の合間に、アルゼンチンと国境に近い位置にあるブラジルの世界三大瀑布の一つ、イグアスの滝に出会い、その規模の大きさとナイアガラ瀑布と違い多様な構造に感動しました。また、共同研究者の一人、Aldo 博士からのお誘いで最南端に位置するフエゴ島を散策しました。秋のフエゴ島は、赤一色に紅葉した木々で覆われ、島は真っ赤に染まり、當に“Tierra del Fuego”の姿を呈していました。フエゴ島のウスアイアの郊外を散策すると山麓に野生化したウサギの大群と出会いビックリしました。植民地時代、西洋人が狩猟を楽しむため放したウサギが天敵のいない島で大繁殖して現在に至っているとのことでした。更に、現地人から「西洋人が持ち込んだインフルエンザに感染した原住民一族が絶滅した」という悲しいお話も耳にし驚きました。冬には、パタゴニアに出かけ、お誘いいただいたご家族と一緒にスキーを楽しみました。ブエノスアイレスでは、サッカーやタンゴの夕べを大好物の赤ワインを味わいながら楽しみアルゼンチンの歴史・文化・習慣を肌感じてきました。

IV. フェワ湖・ベグナス湖・ルパ湖 (1982・1984, 1991-1996, ネパール)

1) 1982・1984 (文科省, 「海外学術研究」, 共同研究機関: トリブヴァン大学)

ネパールのポカラ地方 (標高 600-750 m) に存在する堰止湖、フェワ湖 (表面積: 5.2 km²)・ベグナス湖 (3.3 km²)・ルパ湖 (1.4 km²) を調査対象湖として、情報の欠如している植物プランクトンに関する調査を行いました。

全窒素・全リン・クロロフィル a 濃度の分析結果から、三湖沼すべて富栄養湖であることを確認しました。懸濁態 C:N:P 比 (フェワ湖=270:27:1, ベグナス湖=151:21:1, ルパ湖=200:27:1) は、三湖沼とも植物プランクトンの理想的栄養組成比 (Redfield Ratio, C:N:P=106:16:1) より炭素、窒素に比べリン濃度が低くリン制限型湖沼であることもわかりました。植物プランクトンの類似度指数数は、フェワ湖とベグナス湖では極めて高い値 (0.85-0.90) 示しましたが、ルパ湖とは著しく低い値 (0.010-0.012) を示し、フェワ湖・ベグナス湖とルパ湖の植物プランクトン群集を構成している種が異なり群集構造の違う水域であることが判りました。この違いの原因について更なる調査が求められます。

2) 1991-1995 (JICA, 共同研究機関: NARC (Nepal Agricultural Research Council))

JICA からの要請があり、「水産業開発プロジェクト」の短期専門家として赴任、NARC に所属する研究員 (2 名)、技術職員 (3 名) を対象に湖沼調査法をポカラの三湖沼を対象水域とし実践指導を行いました。毎月 1 回の現場観測を基本とし、定期観測の意義・測定項目などについて講義し、湖上での作業、採水した試水の分析を指導しました。湖沼の定期観測は始まってから 20 数年になりますが現在も継続されています。

湖沼調査の実習に参加された技術職員 (3 名) は、その後、来日し京都大学生態学研究センターが琵琶湖で行っている定期観測に参加し貴重な体験を

しました。また、研究者の一人は、湖沼調査法で習得した技術を応用し、「ポカラ湖沼群の陸水学的特徴」という博士論文を完成させ、京都大学理学博士学位を取得しました（もう一人の研究者も京都大学大学院に進学、「琵琶湖の微生物群集の動態」に関する研究をまとめ京都大学理学博士学位取得）。

ネパールに滞在中、お釈迦誕生の地、ルンビニ（標高 80 m、インド国境に近い）、チトワン国立公園（初めて象に乗り散策）からカトマンズ（標高 1,337 m）を経て標高 5 千 m を超えるヒマラヤ山地を散策し、多民族に接し、ネパールは多様な自然環境と多様な人間文化・習慣の混在する国であることを体感してきました（南北 200 km に標高 80 m から標高 8 千 m を超えるヒマラヤ山脈がある珍しい地形）。また、ヒマラヤ山地をトレッキング中、標高 5 千 m 当たりの斜面に黒い丸っこい石を見つけ、手にしていると同行のネパール人から「これはアンモナイトです」と言われ、ヒマラヤ山地は過って、海の底であったことを実感しました。

V. バイカル湖 (1997-2001, ロシア) 文科省, [学術創生研究]

共同研究機関：イルクーツク陸水学研究所

国際学術連合会議 (ICSU) が提案した**生物多様性科学国際計画**の一環として「古代湖—バイカル湖・琵琶湖—のプランクトン群集の構造と機能に関する研究」を企画・実施しました。バイカル湖は、面積：31,500 km²、容積：23,760 km³（世界最大容積）、水深：1,637 m を有する世界最古の湖（～3,000 万年）です（琵琶湖は、面積：674 km²、容積：281 km³、最大水深：104 m、～300-500 万年）。

1) バイカル湖と琵琶湖の物理・化学環境

バイカル湖と琵琶湖の水温の季節変動は、夫々、0-16℃、6-29℃です（バイカル湖の冬は、1 m を超える厚さの結氷が見られます）。水中の光環境

を日補償深度（表面光のほぼ 1% の水深：光合成量と呼吸量が等しくなる水深）で比較しますと、バイカル湖で 19-80 m、琵琶湖で 8-18 m、季節的に大きく変動します。琵琶湖に比べ、バイカル湖はかなり透明度の高い湖と言えます。NO₃-N を主成分とする無機態窒素化合物—N（モル数）と溶存無機態リン酸態—P（モル数）濃度は、バイカル湖：N=～2 μmol、P=～0.2 μmol、琵琶湖：N=～10 μmol、P=～0.02 μmol です。これら両湖の栄養塩濃度を N:P 比で比較しますと、バイカル湖、N:P=10:1 に対し、琵琶湖、N:P=500:1 と大きく違います。この栄養塩濃度比の違いは、植物プランクトンを主成分とする両湖の懸濁態窒素 (PN) と懸濁態リン (PP) 比（バイカル湖：PN:PP=13:1、琵琶湖：PN:PP=36:1）にも反映されています。これら N:P 比の値を Redfield 比と比べますと、バイカル湖の栄養環境は、琵琶湖に比べ植物プランクトンの生育により適していると考えられます。琵琶湖は、リン濃度が窒素に比べ、極めて低く、リン律速の水域であると言えます。

2) プランクトンの種数の比較

バイカル湖と琵琶湖の植物プランクトンの種数は、夫々、～280 種（固有種：98 種）、～200 種（固有種：3 種）、動物プランクトンは、～440 種（固有種：140 種）、～100 種（固有種：1 種）です。バイカル湖は琵琶湖に比べ固有種が非常に多く、動物プランクトンの種数の多い多様な群集構造を有する湖です。

3) サイズ分画による植物プランクトン群集の比較

両湖の植物プランクトン群集をピコ (0.2-2 μm)・ナノ (2-20 μm)・マイクロ (20-200 μm) に分画し比較しました。バイカル湖の植物プランクトン群集は、～80% を動物プランクトンに摂食され易いピコ・ナノプランクトンで構成されていますが、琵琶湖の群集は、～50% を動物プランクトンに摂食されにくいマイクロプランクトンで構成

されおり、両湖で大きな構造の違いが見られました（バイカル湖と琵琶湖の植物プランクトンの生物量は、夫々、 $3.2\text{--}19.2\ \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ 、 $40\text{--}316\ \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ ）。

この植物プランクトン群集のサイズ分画による違いは、基礎生産の行方に影響します。年基礎生産量には、バイカル湖（ $80\text{--}250\ \text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ ）と琵琶湖（ $120\text{--}250\ \text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ ）間で大きな違いはありませんが、バイカル湖の基礎生産の72–85%はピコ・ナノプランクトンであるのに対し、琵琶湖は、~50%がマイクロプランクトンであり、その行方に大きな違いが考えられます。

バイカル湖と琵琶湖の動物プランクトン量（H）と植物プランクトン量（A）の比の値（H/A値）は、夫々、4.26、0.63（年平均値）と大きく違います。バイカル湖は、動物プランクトンが植物プランクトンより量的に多く、琵琶湖は、逆に植物プランクトンが量的に動物プランクトンより多いプランクトン群集と言えます。バイカル湖の植物プランクトン群集は、主にピコ・ナノプランクトンで構成されているため、光合成により生産された有機物は動物プランクトンに摂食され、回転率が非常に高いためではないかと考えられます。一方、動物プランクトンに摂食されにくいマイクロプランクトンの優占する琵琶湖では、生産された有機物の殆どは水中に暫く現存し、雑食性魚介類に摂食されるか、自己分解により溶存有機物として水中に流出しバクテリアに摂食されるのではないのでしょうか。多様な生活様式を有する生物の絡む湖沼生態系の実態解明の難しさを教えてくれた共同研究でした。

冬季のフィールド調査研究で、氷点下 -41°C の下で、1mを超える結氷に穴を開けウインチに滑車を設置し、直ぐ凍てつく滑車に湯をかけながら採水した体験は生涯忘れられない作業でした。また、定年退職時にイルクーツクの共同研究者・技術者から心の籠ったメッセージが届きました（ネパールの研究者からも温かいメッセージが届きました）。

VI. ビクトリア湖・ナクル湖・チベロ湖・マラウイ湖（2010–2011, ケニア・ウガンダ・タンザニア・ジンバブエ・マラウイ・南アフリカ）

中村正久先生（IIEC：国際湖沼委員会 副理事長）からお誘いいただき、「東アフリカの湖沼環境の現状とその改善策」（環境省からの委託）を課題とし、ビクトリア湖・ナクル湖・チベロ湖・マラウイ湖を訪れました。

1) ビクトリア湖（褶曲湖、200–40万年前誕生、表面積：68,800 km²、淡水湖で世界最大の表面積、ケニア・ウガンダ・タンザニア）

環境問題：（1）都市排水や農耕地から流入する窒素・リンなどにより「富栄養化」が進行しています。（2）外来魚、ナイルパーチの定着は、漁業者や加工業者の収益に貢献していますが、固有種の多いカワスズメ科の魚類を柱とするビクトリア湖本来の生態系が崩壊しつつあります（近年、乱獲によりナイルパーチの個体群は激減しつつある）。また、外来種であるホテイアオイの大繁殖により沿岸生態系の悪化も指摘されています。

2) ナクル湖（陥没湖、表面積：40 km²、ケニア）

ナクル湖はナトリウムや重炭酸を大量にふくむ塩湖（pH=9–11）。流出河川はなく、水位は河川からの流入水量と蒸発散に左右され、干上がったことも多々あり、水位変動の大きい湖です。**環境問題**として、河川から流入する未処理の汚水による富栄養化が深刻な問題になっています。

3) チベロ湖（堰止湖、表面積：26.3 km²、ジンバブエ）

チベロ湖は、1952年にハラレ市の水源・灌漑用水として造られた湖です。湖の**環境問題**は、河川から大量の汚濁物質の流入による富栄養化です。外来種、ホテイアオイが大繁殖し湖面を覆っていました。

4) マラウイ湖（断層湖，100-150 万年前，表面積：29,500 km²，マラウイ・タンザニア・モザンビーク）

マラウイ湖の環境問題についての情報は入手できませんでした。日本国際民間協会（NICCO）が村落開発プログラムの一つとして設置した「エコサントイレ（Ecological Sanitation Toilet）」の使用・管理状態について集落の住民に聞き取り調査を行いました。このトイレは、尿と糞を分離し、夫々を肥料として利用することを目的としたトイレです。聞き取り調査で、「人尿や糞を肥料として育った野菜などは、“汚らわしい”という現地

5) アフリカの湖沼が抱えている環境問題

人間活動による“富栄養化”が挙げられます。富栄養化対策として、日本などからの支援により設置されている“下水処理施設”は、殆どが機能していない状態です。その理由は、1) 地域住民の環境問題に対する危機意識が希薄であること、2) 施設を作動させる技術・維持管理費用の不足、3) 汚濁負荷物の排出規制の欠如していることなどが考えられます。

ビクトリア湖では、外来魚、ナイルパーチが定着し、漁師や加工業者の生活を豊かにしている一方、ビクトリア湖本来のカワスズメ科魚を軸とした豊かな生態系が壊れつつあります。この現状をどのように考えるか今後の課題です（琵琶湖でも、

外来魚であるワカサギは、「琵琶湖産ワカサギ」としてスーパーなどで堂々と販売されています）。

VII. 湖沼行脚から学んだこと

「琵琶湖とバイカル湖のプランクトン群集の構造と機能の調査研究」、「琵琶湖で発生したウログレナの異常発生機構の調査研究」などを通して、生物の絡んだ生態系機構の概念は判っていてもその実態は未知の世界であること実感しました。海外の研究機関との共同研究から、国による研究体制の違いに出会い、日本の研究体制に拘わらず、現地の文化・習慣などを前向きに理解し、共同研究や支援活動を行い、相互の信頼関係を築くことの大切さを学びました。また、海外の湖沼行脚で、日本にない自然景観（アルプスの山々、フエゴ島、アンデス山脈、イグアスの瀑布、ヒマラヤ山地、サバンナ、大地溝帯、ビクトリア瀑布など）に直面し、画像や文章では見えない立体感のあるダイナミックな姿に感動しました。海外に滞在中、研究者・技術者だけでなく、住民との親交を深め、家庭に招待されたり談笑したり、散策しながら歴史が生んだ多様な文化・習慣に触れ、視野が広くなりました。

メルゴッツオ湖、リオ テルチェーロ湖での出会いに始まり、琵琶湖で再会し親交を深めてきた Dr. Carlo Saraceni（イタリア陸水生物学研究所）・Dr. Aldo A. Mariuzzi（ラプラタ陸水学研究所）の在りし日を偲び、ご冥福をお祈りします（合掌）。