

## 琵琶湖内の物質収支の再考察

○横田喜一郎(琵琶研)、大塚良仁(環境科学技術研究所)

### 1. 情報収集

第9回世界湖沼会議を目前にした2001年11月、「びわ湖を語る50章」という書籍が出版された。これに掲載の3つの章を参照しつつ論を進めたい。

まず第1章は琵琶湖の生い立ちを概観しており、水のたまる場所となる広範囲の凹地(すなわち琵琶湖)は、かつて400万年前には三重県伊賀上野にあったものが、現在の場所まで徐々に移動してきたことが明かされる。そして遠方から飛来した火山灰(たとえば22000年前の始良Tn火山灰や、別時期の別火山からの火山灰)が、幾重にも層状となって地層や琵琶湖の底泥中に今も保存さるので、もし掘ればそれらはそこから出てくる、ということが紹介される【論点①】。

次に第6章では、北湖における窒素の循環とその収支が紹介され、植物プランクトンの光合成により窒素が生物固定されるが(たとえば溶存無機態 $\text{NH}_4\text{-N}$ →粒子状有機態 $\text{-NH}_2$ (アミノ基)などへの変化)、年間1m<sup>2</sup>当たり10.6gの窒素が固定され、約15m前後の水深より深い場所にある分解層へと沈降するのはそのうちの15%(1.6g)、底泥として湖底面に堆積するのは表層で固定されたうちの4.5%(0.5g)、底泥と運命を共にして永久堆積物となるのは1%(0.1g)であると例示される。ここでテキストでは「収支決算」が行われる。要約すると、次に述べる差額つまり窒素の僅かな過剰分が、永久堆積物として毎年湖底に溜まる、との説が紹介される。つまり年間1m<sup>2</sup>当たり3.1gの窒素が雨水や河川水を通じて北湖に流入するが、瀬田川へ流出するのは3.0gと僅かに少ないので、その差額が琵琶湖底に溜まる(ただし1970年の結果なので現在もそうであるか、また脱窒の分が未定などの保留付き)という【論点②】。

更に第26章では統計データにみる農業の姿が紹介され、滋賀県で化学合成農薬が初めて使用されたのは1947年であったことが明かされる。そして各年度毎の農薬出荷量データを示し、急性毒性が強いタイプの農薬は1970年以降に姿を消していったこと、出荷量は漸減傾向にあるが依然として農薬使用が続いていることなどが例示される。テキストは「出荷農薬の質・量の転換」を巧く紹介しているが、「その転換に対する水質の応答」は、「ほとんど不明のまま」と述べている【論点③】。

### 2. 論点の整理

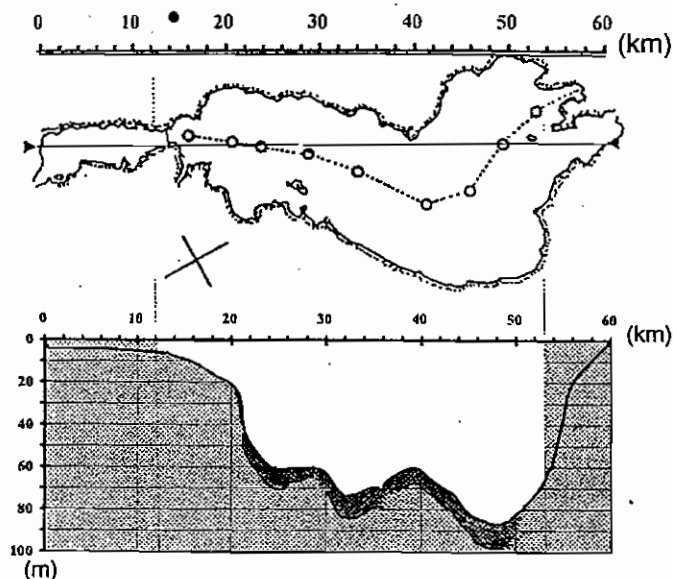
まず【論点①】で、たとえば東京ドームの何杯分の量の泥が湖底に溜まっているのかが気になる。物質収支を扱う際、たとえば「22000年かけて溜まった底泥の量は全部でこれだけ」という情報と、「面積・時間当たりに溜まる底泥の量は何g/m<sup>2</sup>・yr」という情報には互換性があるので、まず前者について「東京ドーム何杯分?」と問いかけたくなるが、後者についても「何g/m<sup>2</sup>・yr?」と問いたい。【論点②】では「北湖に年間1m<sup>2</sup>当たりに溜まる窒素の量は0.5g/m<sup>2</sup>・yr」と紹介された。では年間1m<sup>2</sup>当たりに溜まる底泥の量は?。もしそれが167g/m<sup>2</sup>・yrなら、次の情報と整合が取れて都合が良い。琵琶湖の底泥表面の窒素含量はおよそ0.3%である。この含量0.3%を掛けると窒素の堆積量が0.5g/m<sup>2</sup>・yrとなるようにつつまを合わせて年間1m<sup>2</sup>当たりに溜まる底泥の量を試算すると167g/m<sup>2</sup>・yr(上述の値)になる。

最後に【論点③】で農薬の統計データを見ると、「底泥でも窒素でもなく、農薬中の特定の薬効成分、例えば水銀は何 $\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{yr}$ つつ溜まるのか？」が気になる。表層泥の水銀含量はおよそ200ppb(0.000002%)前後であるから、この含量を上述の167 $\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{yr}$ に掛ければ33 $\mu\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{yr}$ 、これに琵琶湖面積の670 $\text{km}^2$ を掛ければ湖底には年間約0.02 $\%$ の水銀が、更に1960年頃に登場した水銀系農薬の使用が自粛されるまでの約20年に渡りその堆積が継続したと仮定すれば、累計で約4 $\%$ の水銀が湖底に蓄積したと試算される。

これらの試算値は正しいのであろうか？ それを点検するための糸口は、しかし前掲テキストのどこを読んでも出てこない。このテキストを、「収支の再考察」についての論点整理のキッカケにとらえ、以下、上述の試算値の点検を試みる。

### 3. 点検用の情報

まず【論点①】を点検するための情報として、図1を示す。これは6300年前に鹿兒島沖から飛来した「鬼界アカホヤ」と呼ばれる火山灰を、音波探査によって底泥中から検出した記録紙(着色で一部改変)である。



この火山灰以浅に堆積した底泥の厚さは最高約12m(この場合の底泥の平均堆積速度は約2 $\text{mm}/\text{yr}$ )であるが「場所によりけり」で一概には言えない。なお、この火山灰のみで成る層の厚さは、墳源地に近い西日本の地層中なら数十 $\text{cm}$ 、しかし琵琶湖の底泥中では遙かに薄く、数 $\text{cm}$ 以内とのことである。これに先立ち同様の音波探査を実施した井内(1987)は年間面積当たりの底泥堆積量を全琵琶湖平均で約38.2 $\text{mg}/\text{cm}^2\cdot\text{yr}$ (382 $\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{yr}$ )と見積もった。これは前述の試算値の約2倍の値である。どちらが真に正しいか、底泥を陸揚げして計量すればよさそうだが、それは不可能である。

代案として、セディメント・トラップ法からの情報に裏付けを求める。これは可能である。そこで由水ら(1998)、その結実である Yoshimizu(2001)に着想を得て、

歴代トラップ法による実測値のレビューを行ったところ、トラップ法もまた「時と場所によりけり」であることが判明した。トラップ情報の詳細（横田ら(2001a), Yokota(2001b)で展開した説）をここに要約する紙面のゆとりは無いが、今のところ井内(1987)の見積りの方が真の姿を捉えていると思っている。

なお筆者は、井内(1987)の見積りも含めて総合的に解析した結果、琵琶湖全体で1年間に堆積する底泥の総量を、最低でも約25万ト（100℃乾燥状態の重量で評価）と試算した。全湖底面に1年間で堆積する底泥の厚さは一説には約2ミとも言われるが、この約25万トの底泥とは、琵琶湖中からその厚さの底泥を全てかき集めて乾燥させた際の重量である。この重量を乾燥前のボリュームに換算すると東京ドーム2杯弱となる。この詳細は、場を改めて投稿予定である。

#### 4. Inventory とは？

「収支」とは、金銭等の出入りを扱う際に不可欠の経済概念であり、その釣り合いの説明を会計監査役に求める場合、あるいは監査役がそれを説明する際にキーワードとなる。Inventory は「財産目録」や「在庫一覧」、Budget は「皮袋の中身」というのが本来の意だが、前者は「資産」、後者は「予算」とでも訳せばよいだろう。

これらの経済用語を陸水学に転用することに違和感がある方には、地球化学者達の業績を紐解いてみることをお勧めする。地球上のバイオマス(総生体量)はどれくらいか、大気圏-水圏-陸圏間の物質収支を点検した歴史がそこにある。その際に Stock・Flow という概念が導入され、前者が「現存量(単位:例えばg/m<sup>3</sup>)」、後者が「移動量(g/m<sup>2</sup>・day)」、両者の割算が「移動速度(m/day)」であり、実測値を駆使して矛盾無くこれを説明することが地球化学のフロンティアでもあった。なお Inventory は「蓄積量(g/m<sup>3</sup>)」とも訳され、扱い慣れれば便利である。

ところで陸水学的には、「(窒素・リンなどの)蓄積」が進行することが「富栄養化」への道のりであって、琵琶湖にはその道を歩ませたくないという風潮(あるいは決意や法的根拠?)がある。一方、経済学一般では「蓄財」に励むということが「富豪」への道のりであって、努力してでもその道を歩んでみたいという風潮がある。このように見ると、「蓄える」という意味には二面性があるように思える。

琵琶湖では、栄養塩が蓄積する(枯渇しない)ことで「種の多様性」が涵養されてきた反面、毒性物質が蓄積しかねないことで、それが涵養できなくなるのではと懸念する人もいる。栄養塩類も毒性物質も、共に同一の物質循環系にのって琵琶湖内を移動し、波及効果に二面性が出てくのは興味深い。

陸水学に携わる我々に出来ることは、「今ここに、コレが全部でこれだけ在る」、および「それが後にどう変化する(した)」を示すことであろう。その際 Stock(g/m<sup>3</sup>)と Inventory(g/m<sup>3</sup>)のどちらで示すか、という選択が研究者の手に委ねられる。

#### 5. Inventory の実例

琵琶湖底泥中に蓄積する水銀の量を Inventory(g/m<sup>3</sup>)で示した実例は横田ら(2000)を参照されたい。一方、琵琶湖の底泥1m<sup>3</sup>あたりに生息するミミズ類の個体数、あるいはその全湿重量を調べて「生息密度」を求めた結果は(匹/m<sup>3</sup>)あるいは(g/m<sup>3</sup>)の単位で示される。ミミズの分布や分散の状況を見れば、ミミズが場所を選んで生息しているかどうかの傾向性がハッキリする反面、「平均生息密度×琵琶湖面積＝琵琶湖中のミミズ総数」などという推論は自粛するようになる。

農薬中の特定の薬効成分、例えば水銀は、ミミズとは異なり陸上から流入する。かつて陸上で発生し得た水銀量と、底泥中に蓄積している水銀量との大小関係を点検したところ、前者が約18<sup>t</sup> (1962~1967年の累計結果)、後者が約3.6<sup>t</sup> (上記文献中での試算結果)となった。後者の値(3.6<sup>t</sup>)は前掲の試算値(4<sup>t</sup>)と近似の値である。前掲の試算は不確かな値の乱暴な掛け合わせであったにもかかわらず、Inventory (g/m<sup>2</sup>)を踏まえた算定と偶然近似したのは皮肉なことである。

なお水銀の発生源は農薬以外にもあるので、この大小比較だけでは何とも言えないが、しかしこのような発生量と蓄積量の比較というアプローチは、琵琶湖が介在する物質収支についての新しい切り口のひとつと言えるのではないだろうか。

ただし、この切り口から環境汚染に関する物質収支を論じようとする際は、社会科学系の援軍すなわち、その汚染源に関する何等かの商業統計資料等を活用し、累計値(蓄積量との比較対照値)を算出する作業が不可欠である。

## 6. おわりに

以上、3件の情報を参照しつつ、収支について再考察してみた。底泥に随伴して永久堆積物中に封入された窒素は、もし封入されなければ、毎年僅かずつではあっても琵琶湖を富栄養化させかねなかったと見てはどうか。そのメカニズムが顕著な富栄養化を予防してきてくれたように、底泥が毒性物質をも封入し、今後も水質悪化を予防し続けて欲しい。

本稿では触れなかったが、テキスト第44~50章は「琵琶湖の水質保全等への社会的対応」を網羅している。例えば汚濁負荷については、濃度の増減のみを論じるのではなく、負荷量と流出量の差額を論じようとする姿勢の一端が伺え、物質収支は単に自然科学系研究者だけの関心事ではないことが確認できる。

ひるがえって再度、底泥の毒物封入効果に目を向けると、その収支がどうであり、その効果がどの程度期待できるのか、陸水学者はそれを見極める必要がある。

本稿が、琵琶湖の物質収支を再考する一助となれば幸いである。

## 引用文献

- 【びわ湖を語る50章】：サンライズ出版(2001)発行¥2,800
- 井内美郎(1987)：音探堆積速度算定法—音波探査で求めた琵琶湖の堆積速度—、地球科学41巻4号、p231-241。
- 由水千景、占部城太郎、野崎健太郎、吉田丈人、鏡味麻衣子、中西正己(1998)：琵琶湖の沈降粒子束に及ぼすプランクトン群集の影響。基礎研究A1(08308031)食物網が担う「第二の生物ポンプ」報告書p63-78。
- Yoshimizu, C.・T.Yoshida・M.Nakanishi・J.Urabe(2001)：Effects of zooplankton on the sinking flux of organic carbon in Lake Biwa. *Limnology*, Vol.2, No.1, p37-43.
- 横田喜一郎、山本政儀、小島貞男、山崎秀夫(2001a)：琵琶湖底泥の堆積年代の評価方法。第1回環境技術研究協会年次大会(大阪産業大学)要旨集p179-182。
- Yokota *et al.*, (2001b)：Seeking a Holistic Picture on the State of the North Basin Water Quality. in "Learning About Lake Biwa and Its Watershed: selected subjects from LBRI research notes" (in printing)
- 横田喜一郎、村瀬潤、中山英一郎、山崎秀夫(2000)：琵琶湖底泥中の水銀蓄積量の推定。滋賀県琵琶湖研究所所報第18号p84-91。