

第 25 回公開講演会 要旨集

— 緑の地球と共に生きる —

2019年 6月 28日 (金) 14:00~17:10

京都工芸繊維大学60周年記念館
1F 記念ホール

主催：京都工芸繊維大学環境科学センター

[Http://www.environ.kit.ac.jp](http://www.environ.kit.ac.jp)

プログラム

14:00 – 14:05

開会の挨拶

京都工芸繊維大学 学長

森迫 清貴

14:05 – 15:25

1. 「琵琶湖疎水-京都近代化と水源確保」

京都工芸繊維大学 理事・副学長

小野 芳朗

15:45 – 17:05

2. 「水に溶けている有機物、溶存有機物の研究 —とても地味だが面白い—」

国立環境研究所琵琶湖分室 分室長 フェロー

今井 章雄

17:05 – 17:10

閉会の挨拶

京都工芸繊維大学 環境科学センター長

堤 直人

目 次

1. 「琵琶湖疎水-京都近代化と水源確保」 2~4

小野 芳朗 京都工芸繊維大学 理事・副学長

略歴 1982年 京都大学大学院工学研究科 修士課程修了
1982年 京都大学 助手、講師（衛生工学）
1995年 京都大学博士（工学）
1996年 岡山大学 助教授、教授（環境学研究科）
2008年 京都工芸繊維大学 教授（建築学）
2017年 公益社団法人日本水環境学会会長
2018年 京都工芸繊維大学 理事・副学長

2. 「水に溶けている有機物、溶存有機物の研究 —とても地味だが面白い—」 5~8

今井 章雄 国立環境研究所琵琶湖分室 分室長 フェロー

略歴 1981年 金沢大学大学院工学研究科 修士課程（建設工学専攻）修了
1988年 米国テキサス大学オースチン校 博士課程（Civil Engineering）修了
1988年 国立公害研究所 水質土壌環境部 水質環境計画研究室研究員
1998年 国立環境研究所 地域環境研究グループ 湖沼保全研究チーム総合研究官
2012年 独立行政法人国立環境研究所 地域環境研究センター 副センター長
2014年 独立行政法人国立環境研究所 地域環境研究センター センター長
2017年 国立研究開発法人国立環境研究所 琵琶湖分室 分室長

琵琶湖疏水・京都近代化と水源確保

京都工芸繊維大学 理事・副学長 小野芳朗
(前 (公社) 日本水環境学会会長)

1. 山紫水明の地・京都

明治維新の京都は天皇の東京遷座とともに藩屏である公家も東京に移住した。また神社仏閣は明治 4 年の上知令により土地を国に収用され、京都の産業や文化のパトロンがなくなり、都市として成立の危機に瀕していた。京都は、この危機的状況にまず教育改革にのりだす。番組小学校の設立である。つぎに産業革新に向かう。西陣織機の革新をふくむ殖産興業である。そして都市インフラ開発として琵琶湖疏水が起工された。明治 16 年の起工趣意書によると、疏水は水力発電により路面電車の展開や、水力による工業の育成、さらに舟運による大津 - 京都 - 大阪間の流通などがあげられていた。

山紫水明の地とは、頼山陽の邸宅から望んだ東山と鴨川を賞揚したものではあるが、明治 28 年 11 月、平安奠都 1100 年祭ののち、京都日出新聞が、京都自らを賞揚し、そう呼んだ。京都盆地の地下水は琵琶湖相当の容積を持つ。それゆえ水は豊富である。しかしながら、灌漑や防火、生活用の水としては時間当たりの流量としては少量にすぎず。山紫水明のイメージからくる水の豊富な土地とは裏腹に使える水は不足していた。

近世まで、正確には上知令の明治 4 年まで、京都盆地を北から南に流れる鴨川に源流を持ついくつかの用水は賀茂別雷神社（上賀茂神社）の支配であった。

御所御用水流通水掛り之儀者賀茂別雷神社旧一社ニテ支配被致候ニ付御用水乏敷相成候節者御花壇奉行ヨリ此旨一社江被達候ニ付テハ一社ヨリ賀茂川筋水掛り之村々江御下ケ水分之儀ヲ相達一社川掛り役人并上賀茂村水役式人ニテ村々水役該村井先ニテ分水之儀立会¹⁾ 宮内庁宮内公文書館蔵「御用水録」明治 12 年中

御所は上賀茂神社の支配する小山郷の下流にある。その御所の庭用水は御所側から上賀茂神社に通水の要請がなされ、御所への樋門を開ける。図 1 に示すように、賀茂川の右岸は小山郷を通して御所に流れ、内裏・仙洞を通過して寺町筋に落ちる用水であった。この構造では、夏の渇水期には上流小山郷の田畑の灌漑が優先され、御所まで水は来なかった。そしてこの水は防火用水として御所内に水路網が張り巡らされ、それが慢性的に不足し、実際江戸期 8 回の火災にあい、幕府の命によりたびたび大名普請により再建している。

2. 琵琶湖疏水後の水インフラ

明治 16 年から 23 年の間、工部大学校を卒業し、その卒業設計に琵琶湖疏水を設計、そして技師として工事監督をなした田辺朔郎によれば²⁾ 田辺朔郎「琵琶湖疏水誌」大正 9 年、疏水の目的とは、

尚水路は更に北上し白川村田中村下鴨村を経て京北小川頭に至り灌漑並に御所御用水に供するの目的であった、
而して引用しようとする総水量は三百箇である³⁾ (注：1 箇=毎秒1立方尺 三百箇=日70万トン)

とあり、灌漑と防火が目的であったとしている。つまり水が慢性的に不足し、その原因が上賀茂神社の支配する京都盆地の水系の構造的なものであり、その構造転換のために琵琶湖疏水が開削された、といってもよい。疏水の開削の目的は、起工趣意書に書かれ、世間に一般にいわれる、水力利用、発電、舟運などではなく、水不足の京都盆地に琵琶湖からの水量の確保そのものが目的である、とするのが妥当である。当初の 8.35m³毎秒の水量が琵琶湖

から引かれたが、その一部が御所用水として旧用水を改修して新たに作られた。まさに京都御所の上賀茂神社からのくびきを逃れることが目的であった。図1には疏水分線として蹴上、南禅寺より北上し、高野川、賀茂川を伏越して御所用水、堀川に至るルートを表している。

水の水利利用は基本的に有料であった。建設費が明治天皇の京都市民への実質手切れ金となった産業基立金60万円と、市民や産業に掛けた税金、特別徴収料60万円であり、水量の利用は当然有料であるべきであった。水力発電を担う京都電灯会社が最大の顧客であり、疏水の周辺の水車群はその目的が精米や伸銅など軽工業であった。明治後期の無鄰菴に始まる七代目小川治兵衛の設計する庭園群は疏水の水を引きこんで作られた

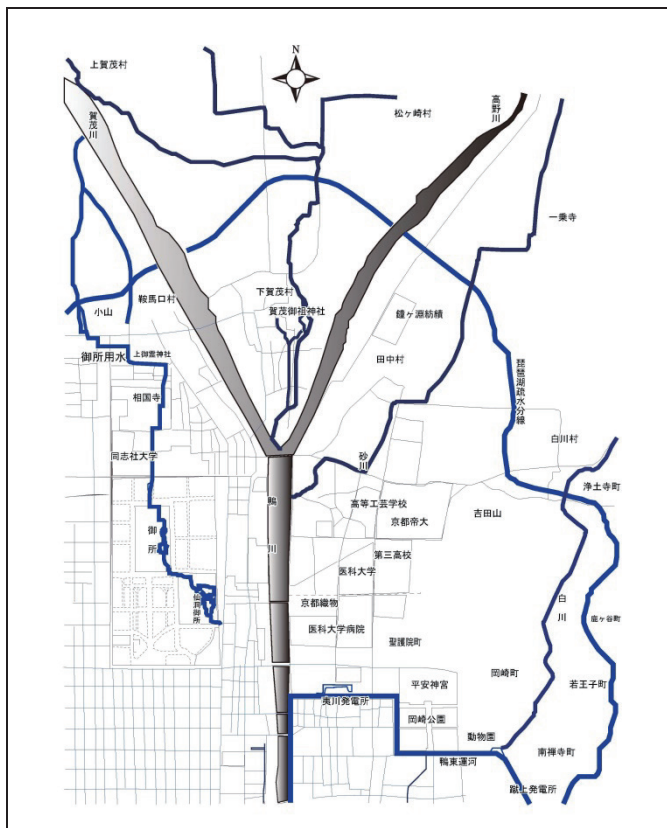


図-1 琵琶湖疏水経路図 (拙著「水系都市」思文閣出版)

られた (いわゆる植治の庭)。平安神宮、碧雲荘、清流亭、怡園、織宝苑など明治大正の実業家たちが南禅寺界隈に別邸を築き、その庭の水を琵琶湖疏水というインフラによって、都市の新しい風景、現代の大名庭園とでもいふべき風景を現出したことになる。

御所への給水は、それが疏水の目的の大事でもあり、10 箇 (10 立方尺毎秒=278 リットル毎秒) が疏水を管轄する京都府 (現在の京都市と同義) から御所を管理する宮内省主殿寮へ献上されている。一方、京都市域周縁の村々 (愛宕郡南禅寺村、浄土寺村、白川村、松ヶ崎村、下鴨村、小山村) への灌漑用水は、これを無償で配給している。なぜ灌漑は無償なのか。村々は鴨川、白川水系の水を慣行的に (優先的、あるいは略奪的に) 使用していた。疏水はこうした村々が持つ灌漑の中世以来の慣行水利権を補償するものであり、琵琶湖疏水

の公共的目的が何なのか理解できる。産業振興的には明治 20 年代の京都は農業生産に頼り、水力利用も精米の水車動力である。灌漑用水の安定供給により農業生産力を高め、これによって京都盆地の食料供給を安定させる。御所へは安定した水量が流されているはずであった。ところが、

御所非常用水俄然欠乏ヲ告ケ候ニ付水路為取調候処旧御用水ハ沿道耕作用トシテ多少引用致居候故減水相成候ハ
不得止儀ニ候共疏水支線ノ分ハ全ク絶水ノ実況ニ有之³⁾ 宮内庁宮内公文書館蔵「御用水録」明治 29 年中

御所の上流の愛宕郡小山村では夏場になると自身の水田へ御所用水から無断で水を引いたり、水車を設けて汲み上げていた。御所用水の支配は上賀茂神社でなくなり、国、すなわち京都府が管理していた。しかしながら、現場の管理は水番という役目で村長が務めた。いざ渇水の時に村長は慣行水利権に従って村の利益のために動いた。

3. 琵琶湖第二疏水の明治 45 年後

明治 45 年、琵琶湖第二疏水が新たに開削され、水量は 15.3m³ 毎秒増水した。この水源をもって京都市水道が建設された。このときに御所へ直接ルートで御所水道が建設され、その完成によって京都御所は独自の防火系統と庭園用水をもつことになる。

現在は御所も京都市水道から配水されている。また琵琶湖疏水は国土交通省によって契約水利権を認可されている。その内訳は、水道 9.83、灌漑 1.10、工業 0.004、雑用水 6.76、その他（通過水）23.65m³ 毎秒である。この水量は、京都市内に流入する雨水由来の水量（河川と雨水管に流入）と、ほぼ匹敵しており、雨水量が必ずしも利用可能な水量ではないことを考えると、いかに多量の水を導入しえたかを示している。疏水の利用目的は時代とともに変遷したが、水量を確保する、つまり疏水そのものが近代化を支えたインフラであったといえる。

本論は拙著「水系都市京都 - 水インフラと都市拡張」思文閣出版、2015 年第 1 章による。ならびに KYOTO Design lab ライブラリー第 2 巻「食と都市」所収拙著「京都の食と水」昭和堂出版による。なお、趣旨については、平成 30 年度農業農村工学会でのシンポジウム予稿集「琵琶湖疏水の開削と京都の近代化」に掲載した。

水に溶けている有機物、溶存有機物の研究—とても地味だが面白い—

国立環境研究所・琵琶湖分室 今井章雄

1. はじめに

水に溶けている有機物、溶存有機物 (dissolved organic matter、DOM) は、水環境における有機物の主要な存在形態であり、物質循環 (炭素循環等)、生態系食物網 (微生物ループ等)、栄養塩や金属の生物利用性、水塊の光学的特性 (透明度等)、浄水処理 (膜処理や殺菌処理) および気候変動応答等にとっても重要な役割を果たしている。しかしながら、DOM の質的および量的な変化が、物質循環、生態系、生態系機能、および人の健康リスクにどのような影響を及ぼすのか、その具体的な (定量的な) 理解は十分ではない。

DOM のとても興味深い特徴は、その操作的な定義と複雑な組成であろう。DOM は孔径 0.2–1 μm のろ紙を通過したものと操作的に定義され、一方、ろ紙上に残るものは粒状有機物 (particulate organic matter、POM) と定義される [図 1]。一般的なろ紙 (GF/F、名目孔径 0.7 μm) を使うと、ほとんどのウイルスやかなりの数の細菌はろ紙を通過することになり、ウイルスや細菌は DOM の要素に成り得る。

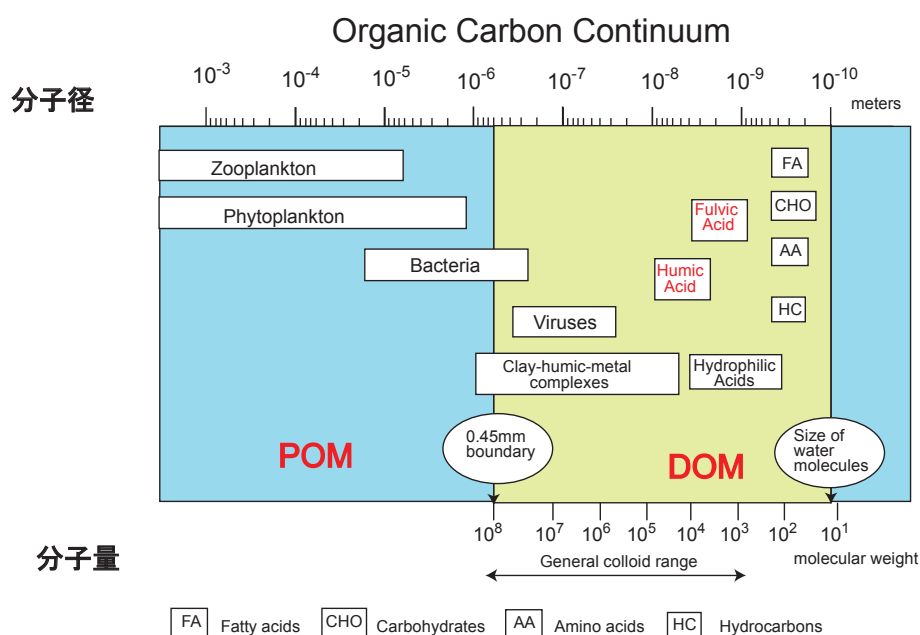


図 1 水環境における有機物のサイズ.

フミン物質 (腐植物質、生物起源で極めて難分解性) は DOM の主要な構成要素である。フミン物質はとても複雑な有機物でその組成・構造は未だ特定されていない。同定可能な生化学化合物は主に結合型の糖類やアミノ酸だが、その割合は DOM 全体の 10%程度に止まっている。近年、超高分解能を誇るフーリエ変換イオンサイクロトロン共鳴質量分析計 (FT-ICR MS) が DOM 研究に適用され非常に多くの研究成果が

報告されている。しかし、前処理での低い回収率と分子式・組成式による定性的な解析のため、DOMの明確な同定には至っていない。すなわち、DOMは特定化合物としてほとんど分かっていない“ごった煮的な”混合物であると言える。この曖昧さのために、DOMが関与する物理・化学的、生物的反応の定量的な評価はとても難しい。しかしひっくり返して見ると、多くの重要な事象・反応に関係しているのにその存在が曖昧なDOMは、研究対象としてとても魅力的に映る。DOM研究はとても面白いのである。

国立環境研究所（国環研）において、湖沼のDOMに関する研究は1995年頃に本格的に着手された（国際的に見て10年遅れ）。その後20年以上に渡り、DOMの研究は絶えることなく継続的に実施され現在に至っている。全研究期間において本講演者が研究代表者として研究を進めてきたため、研究のトピックは変遷し続けたものの、ほぼ同一の視点・アプローチから研究は実施され成果が積み上げられてきた。

本講演では、国環研のDOM研究はどのようなきっかけでスタートして、どのようなトピックの変遷を経たのか、そしてこれまで得られた研究成果について抜粋的に話す。

2. 研究のキッカケと経緯

【キッカケ】 溶存有機物（DOM）について研究する「きっかけ」は、琵琶湖北湖におけるCOD濃度の漸増現象であった（1984年～2000年頃まで漸増、それ以降は安定）。易分解性指標であるBODが低減傾向にあるにもかかわらず、全有機物指標であるCOD（≒溶存COD）が増えていることから、何らかの難分解性溶存有機物（DOM）が琵琶湖湖水中に蓄積していると推察されていた。滋賀県からの要請を受け、環境庁の地域密着研究プロジェクトとして、既に開発していたフミン物質の分離に基づくDOM分画手法を琵琶湖湖水等に適用してDOMの特性・起源を検討した。琵琶湖北湖のフミン物質濃度やDOMの分画分布が初めて明らかになった。

【研究の経緯】 国環研のDOM研究は、その後、主に5つの研究プロジェクト（PJ）として継続実施された：PJ1「湖沼において増大する難分解性有機物の発生原因と影響評価（1997-1999）」；PJ2「湖沼における有機炭素の物質収支および機能・影響の評価（2001-2003）」；PJ3「有機物リンケージに基づいた環境の評価および改善シナリオ（2004-2006）」；PJ4「湖沼における有機物の循環と微生物生態系との相互作用（2008-2011）」；PJ5「流域圏生態系プログラム（2011-2015）以降の研究」。当該PJと並列して、環境省地域密着研究、環境研究総合推進費、科研費、厚生労働科研費等が実施された。PJsの報告書は国立環境研究所のHPで参照・ダウンロードできる（<http://www.nies.go.jp/kanko/tokubetu/index.html>）。

3. 研究の成果

【研究・実験方法の進展】 研究の進捗に伴い、多くの新規的な研究・実験方法が開発・適用された。(1) 分析的DOM分画手法：陸水や排水中DOMの特性・起源の評価に適用。(2) 吸着ボルタンメトリー法：陸水中の溶存鉄の存在形態分析の定量分析。(3) 全有機炭素（TOC）検出サイズ排除クロマトグラフィー：DOM等の分子サイズ分布。(4) 湖沼モデル解析：湖沼3次元流動モデルPrinceton Ocean Model (POM)の適用。(4) 安定・放射性炭素同位体比分析（ $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\Delta^{14}\text{C}$ ）：DOMの起源推定。(5) HPLC-電気化学的検出[PAD]法：糖類組濃度・組成分析（藻類由来DOMに適用）。(6) 鏡像異性体D/L-アミノ酸分析：バクテリア起源DOMの算定。(7) FRRF (Fast Repetition Rate Fluorometry) 法：藻類一次生産の μs の迅速測定。(8) ^{15}N -dA ($^{15}\text{N}_5$ -2'-デオシキアデノシン) 法：放射性同位体を全く使用しない細菌二次生産の測定。(9) 特異的プライマーでの定量PCR法：アオコ形成藍藻 *Microcystis aeruginosa* の存在密度測定、動態解析。(10) ^{31}P -

NMR 法：懸濁物・底泥中のリンの形態定量分析。(11) MRI と CT 画像解析法：底泥底生生物の巣穴とガス泡の物理構造の可視化(定量化)。(12) 非接触型蛍光式 DO 計の適用：現場での底泥酸素要求量(SOD)の測定、多くのサンプル処理可能に。(13) 湖沼物質収支モデル解析(POM+生態系・水質モデル[CE-QUAL-ICM])：有機物、窒素、リンの動態解析、窒素飽和の影響評価。

【主な研究成果】 PJ1 から PJ5 にかけて得られた主な成果を以下に列記する。

PJ1：(1)DOM 分画分布(フミン物質、疎水性中性物質、親水性酸、塩基物質、親水性中性物質の 5 分画分布)は DOM の起源的情報を与えた。霞ヶ浦 DOM の特性は下水処理水のそれに酷似していた。(2) 霞ヶ浦の主要な難分解性 DOM はフミン物質ではなく低分子の親水性酸(分子量約 600)であった。(3) フミン物質は、鉄錯化を介して、藍藻類(アオコ等)の種組成に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。(4) 湖水が水道原水の場合、消毒副生成物トリハロメタン(発がん物質)の前駆物質としては、フミン物質よりも親水性 DOM のほうが重要であった。

PJ2：(1) 3次元流動モデル解析により、霞ヶ浦における難分解フミン物質や難分解性 DOM の場所的・季節的な変動を定量評価した。(2) 難分解性 DOM の負荷発生源として生活系より面源系の寄与が大きいと推察された。(3) DOM の底泥溶出は経年的・季節的に大きく変動し、春季の方が夏季より大きかった。(4) 霞ヶ浦湖水の溶存鉄の 99.9%以上は有機態として存在していた。(5) アオコを形成する藍藻 *Microcystis aeruginosa* の増殖・優占として鉄の存在形態が重要であることが明らかとなった。

PJ3：(1)霞ヶ浦湖水の糖類組成はほぼ均一で変化しなかった。糖類組成の均一であることと湖水 DOM の分解性に連動関係が推察された。(2) 藍藻類が細胞外に排出する溶存糖類としてグルコースが卓越していた。微生物分解によりグルコースは選択的に分解された。溶存糖類組成と藻類由来 DOM の分解性にも連動関係が示唆された。(3) 炭素安定および放射性同位体比により湖水 DOM と河川水 DOM を区別することができた。DOM はとても年代が古く湖水で最古で約 1900 年以上前、河川で 5200 年前であった。(4) フミン物質と親水性画分(=親水性酸+塩基物質+親水性中性物質)の三次元励起蛍光マトリックス(EEM)で、フミン様物質とされるピークが両画分に顕著に出現した。EEM でのフミン様物質の定義は曖昧であることが明示された。(5) 降雨時でも平水時でも河川水中の懸濁有機物は難分解性 DOM に寄与しないと示唆された。(6) 雨水 DOM のフミン物質は極めて少なかった。(7) DOM 底泥溶出と底生動物の連動関係、リン底泥溶出と硫酸還元菌の連動関係が示唆された。(8) 湖内モデルを用いた費用対効果解析により、下水処理水の系外放流と処理場への高度処理プロセス導入によって霞ヶ浦湖沼水質保全計画の COD 削減目標が達成可能であると示唆された。

PJ4：(1)霞ヶ浦ではアオコが観察する内湾部よりも沖帯(湖心等)で一次生産が高かった。(2) 細菌起源バイオマーカーである D 体-アミノ酸濃度から細菌起源 DOM の存在割合を求めることに成功した。その割合は霞ヶ浦で 35~55%であった。(3)長期トレンド解析から、アオコを形成する藍藻 *M. aeruginosa* の増殖を大きく左右する因子として日射量と水温が重要であると推察された。(4) 霞ヶ浦湖水 DOM の分子サイズ分布を全有機炭素(TOC)、紫外吸光度(UV)および蛍光検出器で測定した。湖水 DOM は 15~18 万 Da と 1500~3000 Da 付近に頂点を持つ 2 つないし 3 つのピークを示した。高分子画分には UV 吸収や蛍光がほとんどなく、湖水中の溶存炭水化物(糖類)と高い相関を示した。(5) 霞ヶ浦底泥間隙水中の DOM、NH₄-N、PO₄-P の深さ方向濃度プロファイルは経年的に各々異なる特徴的な変動を示した。特に NH₄-N のトレンドが劇的で、2006 年に濃度が急激に上昇した。(6) 底泥間隙水 DOM の分子サイズ分布は湖水 DOM のそれとほぼ一致していた。高分子画分の存在割合と溶存炭水化物(糖類)の存在割合の間に高い相関が認

められた。(7) 湖沼モデルを使って、霞ヶ浦(湖心)における難分解性 DOM (RDOM) の起源別 (供給源別) の寄与を算定した (2001-2007 年)。降雨由来 RDOM は平均で 0.6%、河川由来は 67.5%、下水処理水由来は 2.9%、溶出由来 12.0%、内部 (湖水柱) 生産由来は 17.6%であった。湖水柱生産と底泥溶出の変動が大きかった。

PJ5: (1) 霞ヶ浦における DOM、NH₄-N、PO₄-P の底泥溶出フラックスの長期変動、季節的・地点別変動を定量評価した。各物質の長期変動は顕著に異なっており、DOM、NH₄-N、PO₄-P の溶出メカニズムは顕著に異なると示唆された。(2) 海水中の DOM の分子サイズ分布を全有機炭素(TOC)として世界で初めて明らかにした。海水 DOM でも陸水 DOM と同様に、平均分子量 1 万 Da 以上の高分子と 2 千 Da 以下の低分子ピークから成ることがわかった。(3) 難分解性 DOM に係る個別供給源別モデル解析により、霞ヶ浦ではアオコ発生に伴い内部生産由来 DOM の寄与が顕著に増大することが明らかとなった。(4) 琵琶湖北湖における細菌生産速度は 0.30~15.9 μgC L⁻¹ d⁻¹ の範囲で変動していた。夏季の表層で高く、冬季に低下する傾向を示した。細菌生産速度は水温や粒子態リン濃度と高い正の相関を示した。(5) 琵琶北湖における藻類一次生産速度は、霞ヶ浦と同様に、湖岸よりも沖帯中央で高かった。

4. まとめ

国環研の DOM 研究は、当初は DOM の起源・特性の評価、水道水源やアオコ発生に対する影響に重点が置かれた。次で、定性から定量的方向に進展して、湖沼モデル計算によって湖沼における難分解性 DOM の物質収支を定量的に評価するに至った。その後、DOM や難分解性 DOM と微生物との相互関係が注目され、細菌を介して多くの難分解性 DOM が生産されることが判明した。そして現在、藻類一次生産、細菌二次生産、底泥溶出等の微生物ループ間や内部生産由来のフラックスに焦点を当て研究が進められている。

従って、今後は、DOM 自体を対象とした研究から湖沼の微生物食物連鎖の中の一つの要素として DOM を見る研究へと変遷してゆくと推察される。図 2 の右上方にある Microbial Food Web の相対的なサイズが大きくなってゆくだろう。

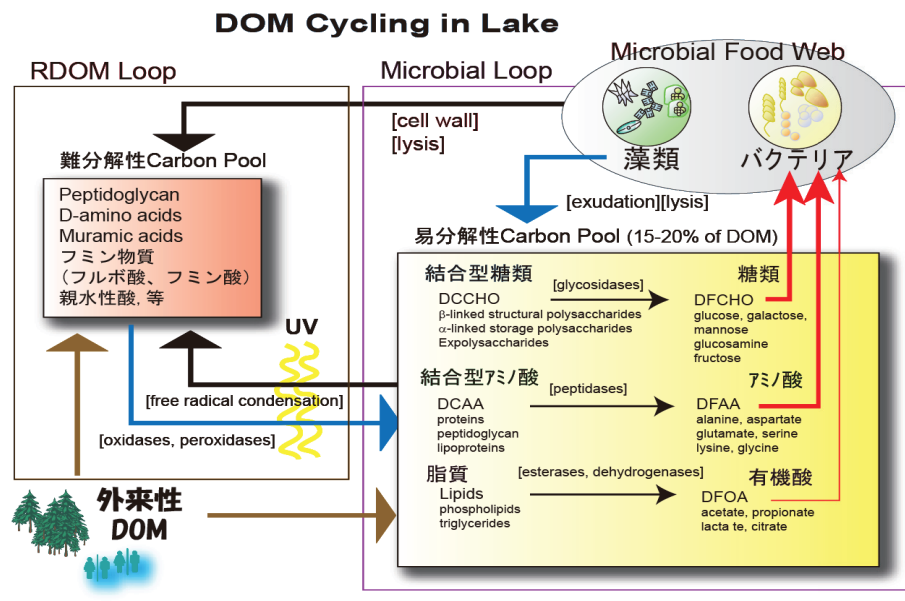


図 2 湖沼における DOM サイクル (循環) の概念図。