

海域を含む流域圏における人為操作と栄養塩動態(その1)

-生態系栄養塩動態に着目したダム貯水池の影響及び干潟域の環境修復事例-

井芹 寧(西日本技術開発 環境部)

井上徹教(港湾空港技術研究所 海洋・水工部)

1. はじめに

流域圏は「21世紀の国土のランドデザイン」において、～「河川の流域および関連する水利用地域や氾濫原」で示される一定の範囲の地域(圏域)であって、水質保全、治山・治水対策、土砂管理や、森林、農用地等の管理などの地域が共有する問題について、地域が共同して取り組む際の枠組みとして形成される圏域～と定義されており、河川の水質保全において基本的に認識して管理を実施すべき領域である。また、近年、河川流域が関連した閉鎖性海域の環境悪化が生じていることから、海域への影響についても認識を広げ、統合して管理を実施する必要性が生じている。

流域圏の水質変動は汚濁負荷などの直接的な人為的要因に加え、自然的要因及び地球温暖化など直接的には水質と関連の少ない人為的影響が起因となって生じる間接的要因等、多様な要因に左右されている。従来、河川・海域の水質管理は結果としての指標である BOD・COD の有機物指標を主体として実施されてきた。しかしながら、未だ水質の改善に至っていない水域が多く、結果を導く「機構」に踏み込んだ指標による管理の必要性が求められている。

流域圏及び海域の栄養塩類動態は、水域生態系の一次生産者である藻類に直接作用し、有機物増加に加え生態系の構造に影響を及ぼす。さらに生態系の構造の変化は栄養塩等の水質にフィードバックし循環系の中で流域圏に影響を及ぼすことになる。これらのことから、水質変動機構を踏まえた管理においては、流域圏の生態系と連動した栄養塩動態を理解することが重要であり、管理においても、自然生態系と共生した水質保全・修復システムの構築が望まれる。

今回は、人為的影響としてダム貯水池を取り上げ、その生態系と連動した栄養塩動態への影響について整理を行う。また、干潟域における生態的栄養塩動態の健全化を目的とした環境修復事例を報告する。

2. ダム貯水池の生態系栄養塩動態に対する影響

ダム貯水池の環境影響は、大きく物理的影響、化学的影響、及び生物的影響に区分されるが、生物的影響に関しては、生物自体のカオスの反応に加え、生態構造が多段であること、物理・化学的条件も生物に影響を及ぼすことなどから、システムが複雑で、未だ全容が明らかになっていない。

河川は一つの連続体として捉えられ、新たなダム貯水池の存在は、その分断化現象を生じさせる。例えば、流下に伴う栄養塩スパイラルに対するトラップ(生物同化、沈降等)、供給(溶出等)による攪乱、栄養塩供給源を上流に移動させる役目を担う魚の遡上や水生昆虫等の移動障害等が挙げられる。また、下流域への水温の変化、懸濁物増加により、

水生生物の成育の遅延、現存量の減少を生じ、水域系外への栄養塩の移動に影響を及ぼす。海域の研究では、動物プランクトンの捕食・排泄作用による、沈降・分解促進作用、鉛直移動性のあるプランクトンによる生物ポンプ作用等が栄養塩動態の重要な要素であることが証明されている。筆者らの淡水域貯水池のメソコズムを用いた調査結果において、分解層から渦鞭毛藻類の *Peridinium* が栄養塩を吸収し生産層に移動させ、表層のワムシの捕食を通じ、利用可能な栄養塩に再変換する、表層の藻類群集への生態的栄養塩運搬システムの存在が示唆された^{1) 2)}。また、同時に窒素固定能を有する *Anabaena* の増殖が観察され大気中窒素から水中窒素栄養塩フラックスの可能性も認められた(図-1参照)。

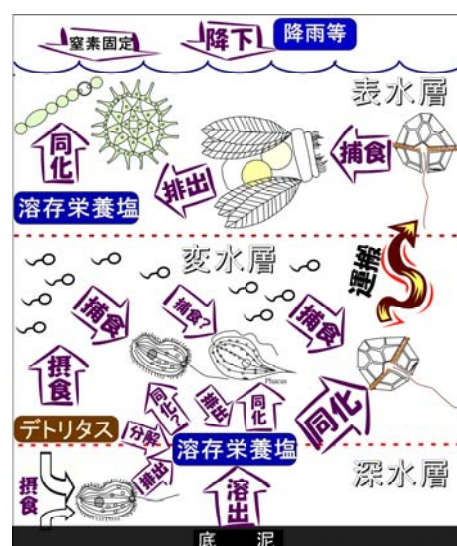


図-1 貯水池メソコズム内の生態的栄養塩動態

ダム貯水池においては、特有の貯水池水流動形態により、鉛直移動・水面集積性のある藻類が優占する傾向が認められる。特に、ダム貯水池における *Peridinium* の異常増殖(集積)による淡水赤潮は、世界的にみてもわが国の発生頻度が高い。*Peridinium* 等の鉛直移動性の藻類が優占することは、前述の生態的栄養塩移動が促進されることになる。また、*Peridinium* は従属栄養的性質を有し、微細藻類、バクテリア等栄養塩含有懸濁物を取り込む。これらのことから、*Peridinium* 赤潮が発生するダム貯水池においては、自然河川・湖沼と異なった栄養塩動態の影響が増大することが予想される。また、*Anabaena* 等の窒素固定能のある藍藻類も富栄養化に伴い全国のダム貯水池で発生が見られ、窒素栄養塩の動態に変化をもたらす。

海域への影響を考慮すると、リン、窒素に加え、シリカや

鉄が重要な栄養塩として挙げられる。ダム貯水池底層の嫌気的環境の進行により、リン、鉄の溶出による濃度増加、窒素成分における、有機物分解促進、アンモニア態窒素の濃度増加を生じる。ここで、ダムから底層放流が実施されると、栄養塩の量及び組成の変化が下流域に影響を及ぼす。逆に、表層放流では栄養塩が同化作用でプランクトン細胞に含有された有機物として放流される。

一般に、河川付着藻類は珪藻類が主体でありゆるやかなシリカトラップとして作用していると推定される。ダム貯水池内では珪藻類増殖及び沈降体積によるトラップ促進効果が生じ、流域のシリカの動態に影響を及ぼす。

栄養塩については、それらの比率も重要で、窒素/リン比が藻類の組成を左右することが知られている。また、Mg, Ca等の陽イオンの比が藻類組成に影響するという指摘もあり、一次生産に関与する各栄養塩の濃度や、それらの比率の影響について明かにし、管理優先順位を設定する必要がある。さらには、栄養塩が藻類に吸収される機構を左右する溶存態有機物（キレート効果）やその起源の一部となり窒素含有量の多いリター等の懸濁態有機物の動態も同時に把握することが望ましい。

ダムでは富栄養化防止対策として、貯水池内の曝気循環の適用例が多い。また、流域圏の土砂動態の正常化のため、堆砂の下流域還元が試みられている。曝気循環は藍藻から珪藻類への藻類組成の変化によるシリカトラップ効果を促進し、堆砂の下流域還元はダム堆砂が河川堆積砂と比較して、有機物含量が多く、還元化環境にさらされる機会が多いことから、下流への栄養塩負荷量の増大につながるケースが多くなるものと予想される。今後、対策後のモニタリング結果を総合的に取りまとめ栄養塩動態の観点から影響を評価することが必要と考えられる。

筆者らの調査では、ダム下流域において、ダム内のプランクトン放流の影響で、流下沈積有機物量の増加、河床付着生物膜内の藻食者、分解者の増加による栄養塩無機化作用の促進傾向が認められた³⁾。これらの変化は栄養塩動態の活性化につながり、河川水中の栄養塩濃度にも影響を及ぼすものと予想される（図-2 参照）。

各地のダム下流域において水量変動の定常化が原因となった大型糸状藻類の繁茂が観察されている。本来は栄養塩を固定する役目の石礫付着藍藻、珪藻類が、対数増殖期において頻繁に剥がれ流下する環境であるものが、糸状藻類の繁茂により比較的長期にわたって栄養塩を河床に固定した後、水温変化など季節的変動要因による枯死や、生長に伴う流水との摩擦力等の増加が原因となって、定常、衰退期にまとめて大量に流下する状況に変化する。また、大型糸状藻類はアユなどの藻食魚にとって消化率が悪く、通常の水生昆虫にとっても採食が困難で、河川付着藻類の大型糸状藻類への組成変化は、栄養塩の生態系フラックスの縮小を引き起こす。

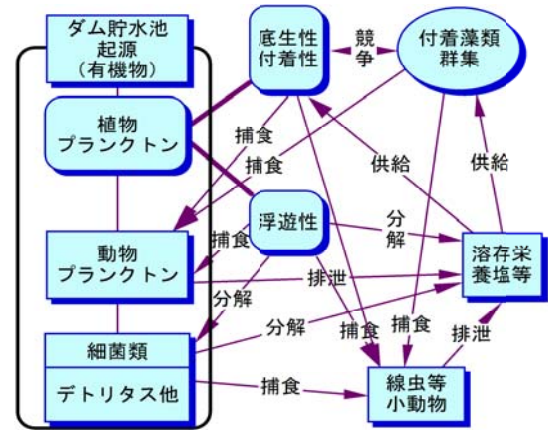


図-2 河川付着生物膜に与えるダム起源有機物の影響

筆者らの調査では、流下過程のダムや堰などの滞留域において、流下藻類の種類によって沈降特性が異なっていることが観察されており⁴⁾、ダム放流水の影響による付着藻類、流下藻類組成変化が河川の栄養塩動態に影響を及ぼすことが予想される。

河川水量や土砂動態の回復を目的としたダムの放流の弾力的運用、フラッシュ放流、堆積土砂の下流還元、清流バイパスの設置、穴あきダムへの計画変更等が実施されているが、これらの処置については、河川生態系の変化による栄養塩動態の変化に加え、土砂に吸着した栄養塩、間隙水中の栄養塩の挙動も明かにしなければならない。

上記のダム貯水池影響における栄養塩動態の変化に関しては、濁質動態調査（ウォッシュロード、ダム濁水長期化調査）と比較すると簡易的な測定器がなく、定量化がなされている事例は少ない。今後は、濁質モニタリング調査時においても、栄養塩濃度の調査を実施するなど、多くのケースの調査結果を総合的に取りまとめ、これらの栄養塩動態に対する影響を定量化し、流域圏管理に役立てていくことが必要と考えられる。

ダム貯水池はここに挙げた現象以外にも多様な栄養塩動態の変化を流域圏に持ち込む、これらの効果は自然河川にダムが設置された場合は、一般にマイナス方向への環境変化要因としてとらえられている。しかしながら、筆者らの調査では、ダム上流に集落や農地からの人為的影響が存在する場合、ダム直上流域よりもダム下流域の方が、より上流の人為的影響のない自然河川に近い環境が保たれている結果も得ている³⁾。河川生態系の構造を踏まえ、量及び質的両面を考慮したダム放流操作により、上流域の人為的影響を軽減し、ダム下流河川、海域の生態系を修復できるケースも存在すると考えられる。そのためにも、生態系の基本となる一次生産者への接的影響の大きい栄養塩動態を明かにしていくことが重要課題としてあげられる。

3. 干潟の修復事例

河川と海域の接点である干潟域は、塩分濃度の変化による化学的凝集沈降促進、潮汐・波浪等物理的流動による底泥

巻き上げなど多様な要因に影響を受け、栄養塩動態がダイナミックに変動する場である。また、生物生産性が高く、栄養塩動態に生物活動が大きく関与している。底質中のバイオターベーションは底質への酸素供給、有機物分解、栄養塩回帰作用等を促進する。藻場は繁茂時の栄養塩吸収、衰退期の栄養塩回帰のサイクルで、海域における一時的栄養塩のストックの役割を担い、多様性のある海域生態系形成に重要な役割を成している。干潟域では過採食者の二枚貝類の水中有機物、懸濁態栄養塩の固定及び漁獲にともなう系外排出の作用が、周辺海域も含めた富栄養化抑制に役立っている。一方、藻場や貝類の消失が、栄養塩を浮遊性藻類に移行させ、赤潮の発生につながるなど、本来の栄養塩動態が崩壊した海域が増加傾向にある。筆者らは、アサリ現存量の急減が観察された九州地区の干潟において現地調査を実施し、その原因の究明及び対応策の検討を行った。

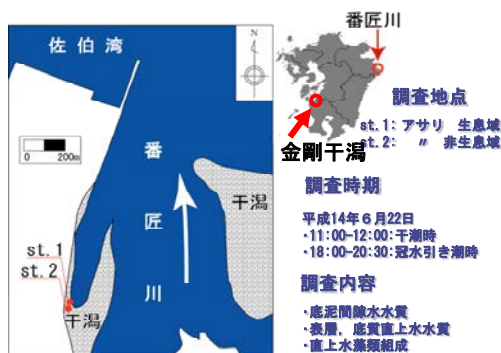


図-3 アサリ生息環境調査(番匠川), 修復試験地点(金剛干潟)

第一段階として図-3 に示す st. 1:アサリ生息域, st. 2:アサリ非生息域の干潟間隙水及び直上水の調査を実施した。その結果, st. 2 は st. 1 と比較して, 潮汐に伴う海水(直上水)と底質間隙水の交換が悪く, 還元化の進行でアサリが生息できないD0条件となり, 底泥からの栄養塩溶出が増大傾向となっていることが明らかとなった(図-4 参照)⁵⁾。

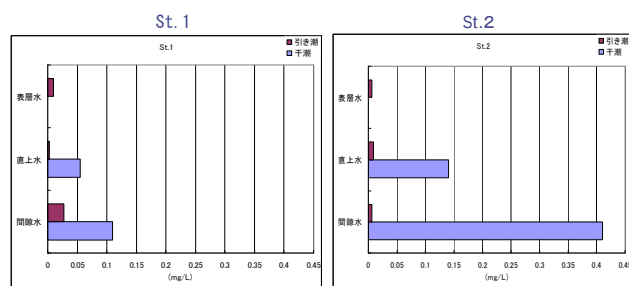


図-4 番匠川河口干潟の鉄イオン濃度

第二段階として、土壌間隙水の交換率を向上させ、アサリの生息環境を改善する目的で、土壌改良材として利用されている多孔質クリンカ土壌改良材を用いて、アサリの生育室内試験を行い天然砂との改善効果を比較した。その結果、クリンカ土壌改良材は天然砂と同等のアサリ生育効果と、天然砂を上回る栄養塩溶出抑制効果を有することが明らか

となった(図-5, 6 参照)⁶⁾。

第三段階として、泥質化の進行でアサリの現存量が減少している球磨川河口域の金剛干潟において、クリンカ資材を用いた干潟修復試験施工(クリンカ 100%施工及びクリンカ+砂 50%混合施工 各 5×5×0.3m 覆砂)を実施した。施工後、アサリ稚貝現存量、間隙水水質のモニタリング調査を行った。また、6ヶ月間にわたり各施工区のケージ内にアサリ成貝を投入し、その生息状況を観察した。その結果、クリンカ資材を用いた干潟域への覆砂により、従来の干潟域と比較して底質間隙水の還元化の抑制、D0の向上効果があり、明確な稚貝の着底促進効果、成貝のへい死防止効果が確認された(図-7~12,表-1 参照)。

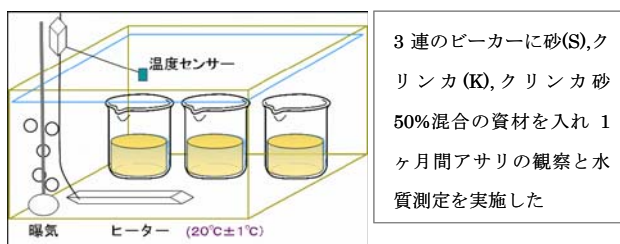


図-5 アサリ室内生育試験の概要

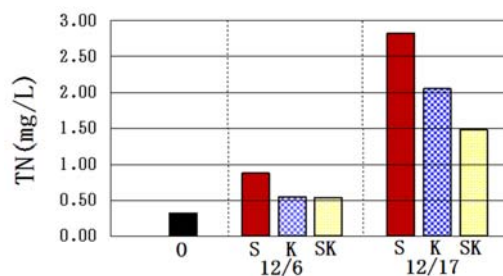


図-6 アサリ室内生育試験結果(直上水全窒素濃度)



図-7 干潟域クリンカ覆砂状況及び水質調査概要



図-8 生物調査の概要

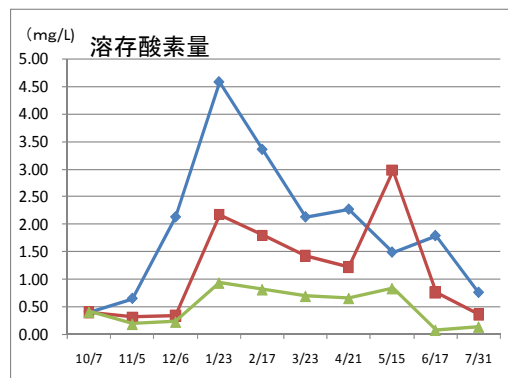
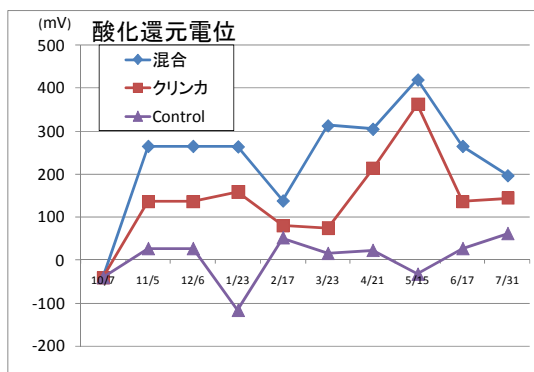


図-9 底質間隙水の ORP, DO の推移

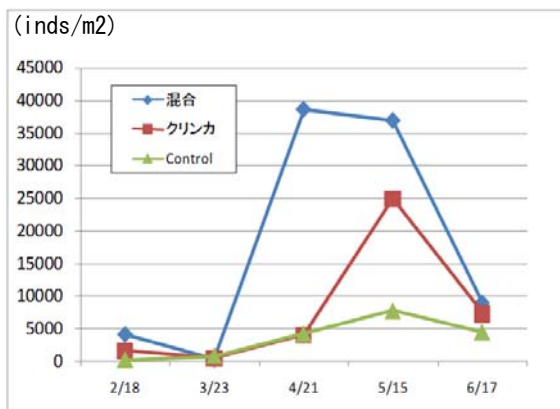


図-11 金剛干潟におけるアサリ稚貝の個体数の推移

表-2 アサリ成貝生育試験結果(6ヶ月間)

地 点		殻頂 (mm)	殻高 (mm)	殻幅 (mm)	湿重量 (g)	生存率 (%)
クリンカ	最大	44.4	30.5	21.3	19.2	91.3
	平均	39.1	27.5	18.1	12.8	
	最少	33.1	23.9	15.3	7.7	
control		全て死亡				0
沖合アサリ 生息域	最大	43.9	29.4	20.1	16.5	-
	平均	38.9	26.6	17.9	12.0	
	最少	34.9	23.6	15.2	8.0	



図-12 生育試験後のアサリ(左:クリンカ, 右:control)

今回の試験結果をアサリのろ水量 0.369L/g 殻付湿重/hr⁷⁾に基づき計算すると、1 m²あたり約 1 m³/hr の海水をろ過する能力がある干潟の修復に寄与することになる。

5. おわりに

持続的で実効性を有する流域圏管理の構築のためには、流域圏全体の、行政、住民、NPO、ボランティア、事業者等の各主体が良好なパートナーシップを持ち、正確な情報を共有したうえ協働して施策を行わなければならない。

流域圏管理の持続性の確保の面では、流域圏において良好な栄養塩フラックス形成を目指すことに加え、良好な人と資金のフラックスを形成させ、流域圏管理が産業として成り立つ仕組み作りが理想と考えられる。また、これらの仕組みに有効性を持たせる上で、基本的事項である栄養塩動態を明確化し共有可能な情報のひとつとして発信することが重要であり、その役割を担う学識者が、各主体とのパートナーシップ形成を念頭に置いて活動することが、実行性のある流域圏管理につながるものと考えられる。パートナーシップ形成の仕組み作りの例を図-13に示す。

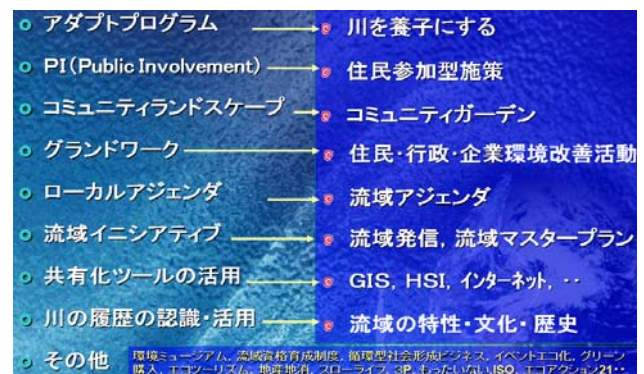


図-13 持続性・実効性のある流域管理の試み

参考文献

- 1) 井上徹教・井芹寧他: 渦鞭毛藻 *Peridinium bipes* の鉛直移動が栄養塩循環に及ぼす影響, 環境工学論文集, Vol. 37, 2000
- 2) 井芹寧他: ダム貯水池生態系における動植物プランクトンの分布及び移動の重要性について, 陸学会講演要旨集, Vol. 71, 2006
- 3) 井芹寧他: ダム維持放流量変化が河床付着生物膜形成に与える影響に関する現地調査, 河川技術論文集, Vol. 12, 2006
- 4) 矢野真一郎・井芹寧他: 堰上流湛水域における滞留特性が浮遊性藻類の増殖に与える影響の評価, 河川技術論文集, Vol. 11, 2005
- 5) 井芹寧他: 河口干潟におけるアサリ生息底泥域の水質環境について, 海岸工学論文集, Vol. 50, 2003
- 6) 井芹寧他: 底質改良資材を用いた干潟環境の修復技術に関する基礎実験, 海岸工学論文集, Vol. 52, 2005
- 7) 赤澤貴光他: 大村湾の浄化・生態系回復に関する研究, 長崎県衛生公害研究所報 No. 50, 2004