

ダム貯留水の戦略的品質確保に関する今後の研究課題 ―河川連続性を考慮した貯水池内の微小藻類ハビタットと制限栄養塩動態の人為的制御における欧州と日本の相違点―

埼玉大学大学院理工学研究科

Federal Environment Agency, Germany

Federal Environment Agency, Germany

国立研究開発法人国立環境研究所・地域環境研究センター

独立行政法人水資源機構総合技術センター

正会員 ○古里 栄一

Ingrid Chorus

Jutta Fastner

正会員 篠原 隆一郎

正会員 今本 博臣

1. はじめに

ダム貯留水の品質である水質の保全是水資源開発施設のストックマネジメントにおいて重要な要素である。本発表では、現在でも世界的に解決の望まれる富栄養化現象の抑制技術に関する今後の研究課題について、学術および社会実装の両面を考慮して述べる。こうした技術の作用機構においては、有害藍藻類の発生機構の無効化という観点から、制限すべき環境要素は光および栄養塩の2要素に大別される。これら双方について国内外で古くから莫大な学術的研究および技術開発等が実施されており、現在は環境水理学的な研究テーマとしては重要性が高くない可能性がある。しかしながら上記2点の基本効果に関しても、技術だけでなく学術的にも現在でも課題が存在すると考えられる。特に後者については歴史的背景により現在わが国において十分に周知されていない、ヨーロッパ北部バルト海周辺諸国でのリン制限に関する学術的知見および社会資本に係る管理政策についてベルリンの水源湖沼での事例を述べる。

2. 光制限と貯水池循環対策 ―現地での低 P_N ―

日本では多くの貯水池において気泡循環対策が実施されている。わが国の実施例においては、その作用機構において気泡からの直接的「曝気」効果は期待しないことから、ここでは一般的に用いられる「曝気循環」という用語は用いずに、「気泡循環」と呼称することとする。図-1に本対策で貯水池に生じる局所および広域的流動の模式図を示す。局所的な気泡噴流によって副次的に生じた広域的水平密度流が継続して発生することにより水温成層が変形する。結果として植物プランクトンのハビタットが制御され、有害藍藻類の増殖抑制を主に光制限効果から達成するものである。この対策の作用機構は、水理学における気泡噴流と密度流およびその結果生じた水温成層形態に応じた、風や水面冷却による鉛直混合に加え、植物プランクトンにかかる生理生態学的な藍藻類の競合戦略などの広範な学術的領域にわたる。このため工学的指針構築のためには、まず気泡噴流によって生じる、広域的な水平密度流の流量が最も基礎的な知見となる。成層流の学術分野においては、この流量は気泡噴流スケールで無次元化すると、ブルーム数 (P_N) に対して一定値となることが報告されており¹⁾、現在でもその結果に基づいた多くの気泡噴流に関する多くの研究が実施されている²⁾。ところが先行研究における P_N は、実貯水池の循環装置の条件に比べて著しく大きいこと

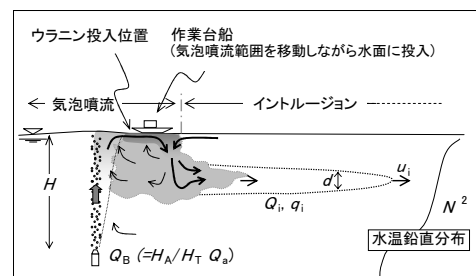


図-1 Type 1 の気泡噴流形態および広域密度流の模式図。濃淡はウラン濃度⁵⁾

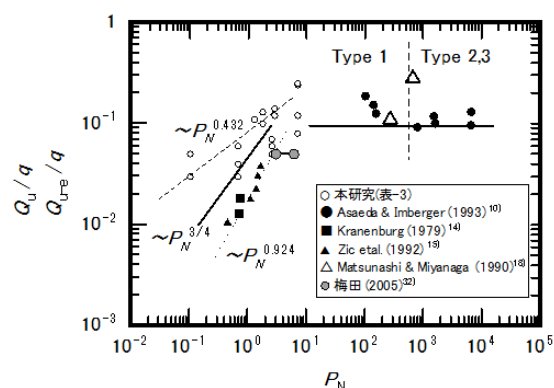


図-2 無次元 Q_u と P_N との関係⁴⁾

が、古くから指摘されている³⁾。近年、古里ら⁴⁾は、実用条件に相当する小さい P_N (<10) においては、従前指摘されてきた傾向¹⁾とは異なり、 P_N の低下、すなわち密度成層が弱くなるに従い、広域的な表層水平流量が少なくなることを報告している(図-2)。また、intrusion としての中層流においても P_N の低下に応じて水平密度流量が減少することも確認されている⁵⁾。こうした傾向は従前の成層流に関する基礎水理学的な事例では対象とされていないために、その水理学的な機構に関して更なる学術的研究が必要であるとともに、これに基づく工学的指針構築と社会実装が求められる。

3. テーゲル湖における流入河川水の全量処理によるリン削減と酸化剤としての硝酸態窒素⁶⁾

テーゲル湖は、ドイツの首都ベルリンの北西部に位置し、ベルリン域の上水水源の約2割を供給するとともに、市街地に近接することから親水利用の盛んな水域である。水面積3.1 km²、最大水深16m、平均水深6m、湖水容量2,460万m³の自然湖沼である。流入河川はNordgraben川とTegeler川であり滞留時間は約60日である。流入水に対してNordgraben川の下処理場の

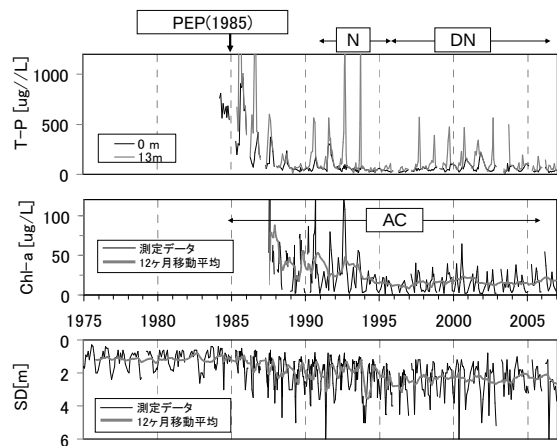


図-3 テーゲル湖における水質の経年変化(細黒線, 測定結果; 太グレー線, 12ヶ月移動平均; AC, 気泡循環; N, 硝化; DN, 脱窒処理期間を示す)

放流水が多くを占めるために、対策前(1985年以前)の無機態栄養塩濃度は過栄養レベルであった。その結果*Microcystis*属等によるアオコが例年発生し、親水利用および上水水源として極めて不適な状態であった。1985年以降、湖内対策としての気泡循環対策と、流入河川におけるリンの浄化施設(PEP: Phosphorus Elimination Plant)が導入された結果、貧栄養化に成功し(図-3)、現在はベルリン近郊の親水および上水原水としての役割を果たしている。

3.1 気泡循環対策

計 15 基の空気吐出施設から総空気量 91,000m³/d が放出されている(吐出水深水深12~16m)。この対策規模は、わが国で使用されている k 値に換算すると 240 であり、混合状態の維持に十分な規模である。本対策は 1980 年から 2004 年まで実施され、通年稼働だけでなく間欠稼働など様々な運用方法が行われた。特筆すべきは、日本では間欠式揚水筒を導入していた時期から、適切な規模での循環装置が導入されたことに加え、既に約 30 年前から近年日本において河川環境分野で議論されている中規模攪乱仮説が実施の運用で議論されていることである。

3.2 流入リン負荷除去対策

PEPは、2つの流入河川が合流した後に、Tegel湖の流入直前に設置された無機態リンの除去施設であり、1985年から稼働している。本施設は、流入河川の平水流量に相当する最大約6m³/sの全量を処理している。なお、出水時の余剰流入量である約2.4m³/sはその全量を放流河川にバイパスしているために、無処理水はテーゲル湖に流入しないシステムとなっている。処理方式は、前処理として沈殿槽を経由した後、吸着剤(鉄)を添加しリン酸鉄のブロックを軽石を混合した濾剤を用いた緩速濾過で除去するものであり、リン除去に特化したシステムである。なお、ドイツ地方は日本と気象特性が異なり出水時の流量が多くないために栄養塩負荷量供給バランスが異なる。このため、少ない出水流入量の全量バイパスが可能であること、結果として溶出栄養塩負荷の寄与度が大きいために平水時の流入リン負荷除去が顕著な効果を有する特性がある。流入河川のリン濃度は処理前の0.8mg/Lから約1/40に相当する0.02mg/Lに、湖内リン濃度も約0.8mg/Lから

約0.03mg/Lまで低下し、以前の極度の有害藍藻類の増殖は抑制された。

ここで注目されるのが、窒素除去を積極的にとりやめたことである。バルト海諸国の研究者達により硝酸態窒素はリン制限水域においては、一次生産に対する栄養塩供給ではなく、酸化剤として溶出抑制に作用することが30年以上前から指摘されていた⁷⁾。実際に上述した流域の下水処理施設において、1991年から1997年までの硝化处理の期間は湖底からのリン溶出が減少したのに対して、1998年から開始された脱窒処理後は、湖底からのリン溶出が徐々に増加した。その結果、窒素除去を取りやめ、現在は硝酸態窒素は積極的に供給されている。わが国においては、リン制限水域においても富栄養化対策として流入窒素除去対策が実施されている。窒素リン対策の基礎原理としてのリーベットの最小律から考えてもそうした水域での窒素除去は必要性が低いはずである。しかも上述した硝酸態窒素の作用は、窒素除去が場合によっては、富栄養化対策として悪影響を与えている可能性を示唆しており、今後の研究が必要である。

4. 課題

光制限に関しては気泡噴流以外のテーマである、生態学的な基礎である臨界水深および水理学的な問題である混合水深の評価方法について、現在でも海洋学の分野において活発な研究が実施されている。また、リン溶出と硝酸態窒素の関係についても、酸化還元電位や鉄、イオウとの相互関係を含めて海外では学術的研究が現在でも盛んである。今後は日本でも、貯留水の品質確保のために、光制限および栄養塩制限に関する更なる学術・技術開発および研究が必要である。とりわけ、日本とともに先の大戦の敗戦国であるドイツとの貯水池環境分野における学術・技術知見の交流が十分でなかったために、硝酸態窒素に関する認識がわが国では知られていなかったのではないだろうか。今後は、そうしたいわゆる戦後スキームの問題を克服して真の水環境保全とインフラのストックマネジメントのための学術・技術的な取り組みが必要であると考えられる。

謝辞

本研究の一部は、埼玉大学Lab-to-Lab事業および河川財団河川基金助成事業(平成28年度 ダム下流の川づくりに資する貯水池水質保全対策の高度化—河床微細付着物と貯水池内一次生産の関係に対する曝気循環対策の影響—、代表者古里栄一)、公益財団法人 高橋産業経済研究財団(「水資源開発貯水池における戦略的な貯留水品質確保方策の開発—微細藻類のハビタット制御—」、代表者古里栄一)により行われた。ここに記して謝意を示す。

【参考文献】

- 1) Asaeda, T. & Imberger, J., 1993, *J. Fluid Mech.*, **249**, 35-57.
- 2) Socolofsky, S. A., 2013, *Handbook of Environmental Fluid Dynamics*, **2**, 55-67.
- 3) Kranenburg, C., 1979, *J. Hydraulics Div.*, **4**, 333-1132.
- 4) 古里ら, 2015, *土木学会論文集G*, **71**, III_455-III_466.
- 5) 古里・犬山, 2016, *土木学会論文集B1*, **72**, I_691-I_696.
- 6) Chorus, I. & Schlag, G., 1993, *Hydrobiologia*, **249**, 67-92.
- 7) Schausser, I et al., 2006, *Acta hydrochim. hydrobiol.*, **34**, 325-332.