

深層曝気にもとまう貯水池溶存酸素環境の変化に関するシミュレーション

神戸大学工学部	正会員	道奥康治
神戸大学大学院	学生員	○香川健一
神戸大学大学院	学生員	佐々木茂太
神戸大学大学院	学生員	西口祐輝

1. はじめに

貯水池などの閉鎖性水域においては富栄養化の進行によって深水層が貧酸素化し、様々な水質障害が報告されている。本研究で対象とするS貯水池においても受熱期になると貧酸素層が拡大し、これにもとまない底泥から鉄やマンガンなどの溶解性物質の溶出が確認されてきた。そこで99年3月以降水質浄化を目的としてマイクロバブルを用いた深層曝気を実施している。本研究では、曝気による水質の変化を再現するために曝気循環混合モデルと底泥からの金属溶出を考慮した水質モデルを提案し溶存酸素と金属溶出との関係について考察する。

2. 金属に関する水質モデル

本モデルは湖底から水面までを体積可変のN層に分割した鉛直一次元モデルであり、各層内で質量・熱・水質収支が定式化される。対象とする金属成分(Mn, Fe)に関しては図-1のように、溶存態、懸濁態の2つの形態に対し酸化・還元、底泥との溶脱着、浮上・拡散、沈降の4つの現象を考慮している。

(1) 溶存態マンガン (= イオン態): Umn (mg/l・day)

底泥からの溶出は溶存酸素、pHに依存されるものとする。

$$S(Umn) = \underbrace{\frac{k_{PMn} \cdot f_{PMn}(T) \cdot \frac{K_{PMn}}{K_{PMn} + DO} \cdot PMn}{\text{還元}} - \frac{k_{UMn} \cdot f_{UMn}(T) \cdot \frac{DO}{K_{UMn} + DO} \cdot Umn}{\text{酸化}}}_{\text{酸化・還元反応}} + \underbrace{\frac{S_{Mn} \left(\frac{K_{DOS}}{K_{DOS} + DO} + \frac{|pH - 7|}{K_{pH} + |pH - 7|} \right)}{\Delta V_j} \cdot (A_j - A_{j-1})}{\text{底泥からの溶出}}$$

ここで、 S_{Mn} は最大溶出濃度フラックス、 K_{DOS} 、 K_{pH} は、 DO 、 pH のミハエリス・メンテン型制御関数における半飽和定数、 k_{PMn} 、 k_{UMn} は還元・酸化率、 $f_{PMn}(T)$ 、 $f_{UMn}(T)$ は20を基準とした指数型の温度制御関数、 K_{PMn} 、 K_{UMn} は酸化還元反応の半飽和定数、 PMn 、 Umn は懸濁態・溶存態のマンガン濃度である。

(2) 懸濁態マンガン (= 粒子態): PMn (mg/l・day)

浮上・拡散に関しては底面せん断力により駆動される底泥中の懸濁態マンガンの巻き上げを考慮する。

$$S(PMn) = \underbrace{\left(\frac{k_{PMn} \cdot f_{PMn}(T) \cdot \frac{K_{PMn}}{K_{PMn} + DO} \cdot PMn}{\text{還元}} - \frac{k_{UMn} \cdot f_{UMn}(T) \cdot \frac{DO}{K_{UMn} + DO} \cdot Umn}{\text{酸化}} \right)}_{\text{酸化・還元反応}} + \underbrace{\frac{\alpha_{PMn} \left[\frac{\tau_j - \tau_{fc}}{\tau_{ref}} \right] \left[\frac{PMn_m \cdot \Delta z_j}{K_{PMnm} + PMn_m \cdot \Delta z_j} \right]}{\Delta V_j} \cdot (A_j - A_{j-1})}{\text{浮上}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta V_j} [PMn \cdot w_{PMn} \cdot ND \cdot A]_{j-1}^j}_{\text{沈降}}$$

ここで、 α_{PMn} は再浮上率係数、 τ_j は底面せん断力、 τ_{fc} は限界掃流力、 τ_{ref} は底面せん断力の基準値、 PMn_m は底泥堆積層の懸濁態マンガン濃度、 K_{PMnm} は底泥堆積層からの拡散浮上に関する半飽和定数、 ΔV_j は第j層の体積、 w_{PMn} は沈降速度、 A_j は第j層の表面積、 Δz_j は第j層の層厚、 ND は1日を秒換算した値である。鉄(Fe)に関しても同様に定式化されている。

3. 曝気循環混合モデル

図-2のように、気・液混相の気泡噴流を気相（空気）と液相（連行水）に分けて考え、高さ z_j における気相の流量を Q_{aj} 、液相の流量を Q_{pj} とする。また、第j層において、気泡噴流（直径 D_j ）への取り込まれる周

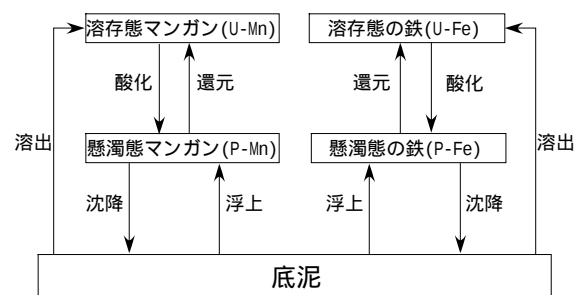


図-1. 金属収支のモデル化

キーワード：金属溶出，深層曝気，溶存酸素，マンガン，鉄

連絡先：〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1 Phone: (078)803-6056, FAX: (078)803-6069

囲水の流量を ΔQ_{pj} 、気泡噴流から周囲水へとけ込む空気量（曝気量＝溶解流量）を Q_{dj} 、密度や水質濃度 (ρ_j, C_{ij}) とする。気泡噴流による第 j 層での浮力フラックス B_j は $B_j = gQ_{aj-1} - g\left(\frac{\rho_{pj-1} - \rho_{j-1}}{\rho_{j-1}}\right) \cdot Q_{pj-1}$ で表せる。ここ

で、 ρ_j は貯水池第 j 層の密度、 ρ_{pj} は気泡噴流の液層の密度である。また第 j 層における水圧を P_j 、 P_{air} を大気圧とすれば、第 j 層での気相流量 Q_{aj} は $Q_{aj} = \left(\frac{P_{j-1}}{P_j}\right)^{0.71} Q_{aj-1} - Q_{dj}$ で表される。気泡噴流の液相は第 j 層毎に

周囲水から ΔQ_{pj} だけの連行をとまなう。よって、 Q_{pj} (ρ_{pj} , $C_{pi,j}$)だけの質量、物質量が第 j 層へ加わる。そしてある層で B_j が負に転じた時にブルームがその層に水平貫入するものとする。また、第 j 層の酸素溶解流量 Q_{dj} は、溶存酸素DO収支式へ加え、[気-液境界面の表面積] × [気泡个数] × [気泡の溶解速度]とし、 $Q_{dj} = 4\pi d_j N_j v_{wj}$ で表わす。ここで v_{wj} は気泡の溶解速度、 d_j は気泡の平均直径、 N_j は気泡个数である。

4. 解析結果

図-4.において、曝気混合モデルを考慮することにより水温構造がより良好に再現されているといえる。また、溶存酸素においても底層付近の貧酸素領域の縮小が再現されている。これにともない図-3.では底層でのマンガンの濃度が抑えられているものの再現精度はまだ不十分でありモデルパラメータの調整が今後の課題である。

参考文献

1) Jason Antenucci and Alan Imerito: *The Computational Aquatic Ecosystem Dynamics Model Science Manual* September 25,2000

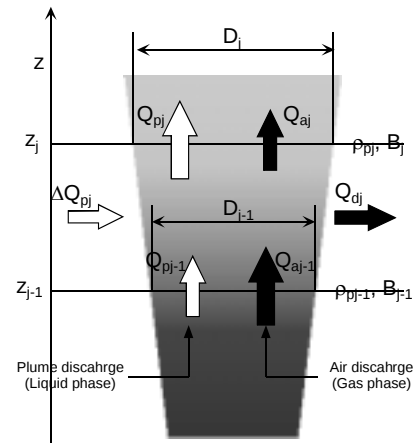


図-2. 曝気循環混合モデル

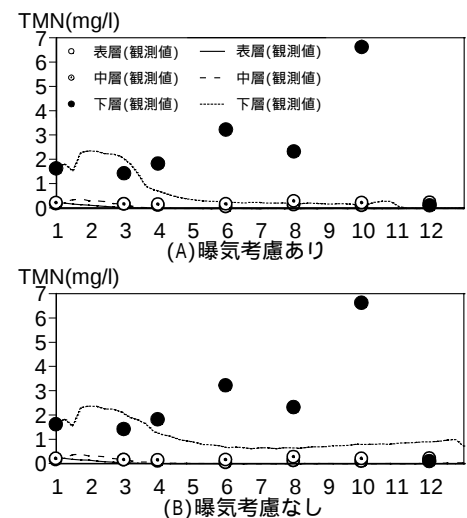


図-3. マンガンの時系列(Sダム1999年)

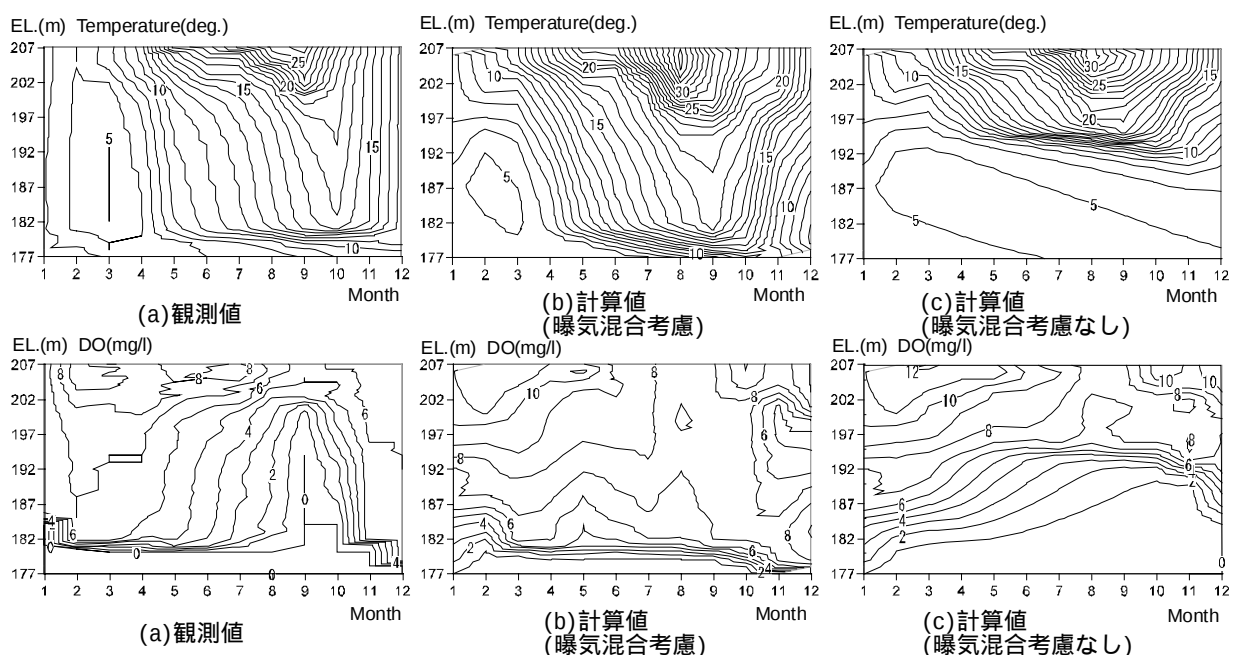


図-4. 水温、溶存酸素の季節変化 (Sダム1999年)