

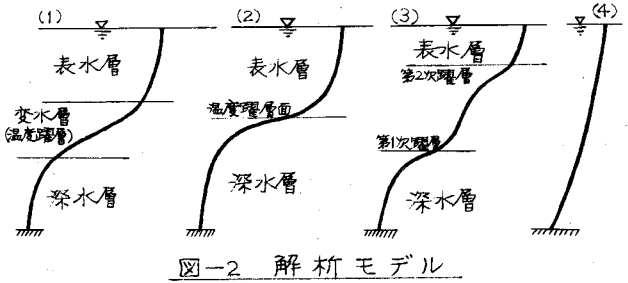
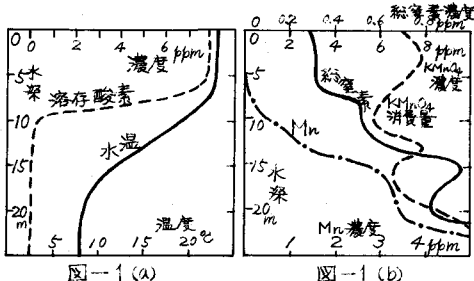
1. はじめに

ダム貯水池は、洪水調節だけでなく水資源利用のため重要な位置を占め、最近では景観などの要素も加わり、水利用の面では水量に加えて水質管理の問題が重大な課題となっている。すなわち、貯留に伴う水温変化だけでなく、豪雨後の濁水の長期滞留や、水の華、異臭味の発生など富栄養化を含む水質汚濁現象が顕在化してきた。一般に、ダムなどの人工貯水池は河川の上・中流の山間部に立地するものが多く、従来は下流への冷水放流や濁水放流の長期化の問題が多かった。普通、その貯水池の集水域には大都市などの人口密集地を含む大きな流域人口を有することは少ないが、最近、その流域内での開発をはじめとする各種の生産活動や生活様式の急激な変化が起こり、これが環境条件の悪化を招き、人工貯水池も他の水域と同様に人為的な原因により富栄養化の傾向を強めつつある。このような時点において、貯水池の流動と水質の関係を明らかにして、富栄養化を含めた水質汚濁現象に対処するため、水質変化の予知と汚濁制御の対策を立てることが水利用においては急務である。

2. 成層化現象

人工貯水池は貯水池自体の形態の多様性もあるが、その流動と水質分布の状態は、外的には、光および熱の波長による侵入特性、大気温と風による外乱、流入水量と流入水温などの環境条件、それに取水や放流などの人為的な操作条件が加わる。人工貯水池の水質変化やフローパターンは、天然湖沼のそれでもなく、その形態と環境により定まる熱的平衡状態に貯水池独自の人為的操作に伴う流動が加わる。水体中での水質変化の機構は、停滞水中と流動水中とでは大きな差異が見られ、温度成層することが最大の特色である浅くない温帯の貯水池では、その各種水質因子への影響が最も大きい。

したがって流動については、貯水池の全体的なスケールから1年間の水温の鉛直分布のサイクルをもとにそのフローパターンを決定する。そして、このフローパターンに基づいて水質汚濁機構の解析を行なうために、層に分割する解析モデルを考える。その分類や判定には水温の鉛直分布と流速分布をもとに、成層の有無およびその強度を示すパラメーターとして Ri 数や鉛直安定度を用いることが多く、貯水池内の鉛直方向の物質移動現象との関係が強い。すなわち、温度躍層の有無とその位置は各種水質の鉛直分布に強大な影響を及ぼす。その例として、実際のS貯水池の夏季の成層期について図示したのが、下の図-1である。また、温度躍層の存在の有無およびその位置と強度によって、右下の図-2に示すような解析モデルを考える。すなわち、成層期か、循環期か、また成層すれば躍層の

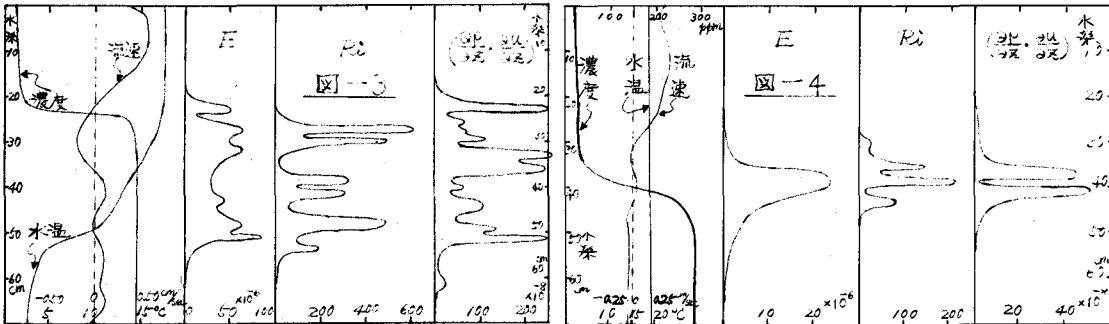


数や強さによって2層状態か、3層状態かのように分類し、その中間の遷移期あるいは移行期はこの大別されたモデルから推定するか、1年をサイクルとする全体モデルの中で捉えることになる。

3. 水温・流速・濃度の分布

先述のように、人工貯水池は天然湖沼や河川と異なり、人為的な操作による流動があり、これが水質管理にも有力な手段となり得るし、水質管理上必要なフローパターンを人為的に作ることも考えられる。この特性を、層の鉛直方向の安定性のパラメータであるRi数と鉛直安定度Eによって捉えてみる。人工貯水池が河川のように流動が顕著で一過性が強い場合は、流速の鉛直方向変化が2乗で入るRi数がある特色をよく示し、湖沼のように風による流動が主で、流動性に乏しく停滞性が強い場合は、流速の項の入らない鉛直安定度Eがその状態での水質分布との関係をよく表わす。一般に、水質管理において複雑な問題をもたらす貯水池は、水温と流速の両者の分布が重要となるが、貯水池全体の水質変化を取り扱うという観点では、Ri数のように流速の鉛直方向変化が2乗で効いてくると、水温分布、より正確には密度分布の鉛直変化の項が減殺されてしまうことが多い。しかし鉛直安定度Eでは流速分布の影響を加味しえない。ただし貯水池内の局所的現象に注目する場合はまた異なり、これらの指標に加えて、さらにいくつかの指標が流動や物質の挙動についての有力な解析手段となりうる。

一般に、かなりの水深を有する貯水池の流速分布は、測定の実験の困難さもあって資料が少なく、存在しても、流入端および放流・取水口付近の流速の大きい場所だけのことが多い。したがって、貯水池模型実験槽での実験結果を中心にして述べてみる。下の図-3から図-4までは、成層の有無、放流方式の違い（越流放流、中層放流）、流量の大小を変えて行なった実験例である。水温分布のほかに濃度分布も加えて、流速分布やRi数およびEとの関係が示してある。そして、水質との関係を注目するために、Ri数とEの他に、密度勾配変化と速度勾配変化の積（ $\frac{\partial \rho}{\partial z} \times \frac{\partial u}{\partial z}$ ）をとってみた。この指標は、貯水池内での鉛直方向の物質移動量の大小が流速と密度の変化の両方の影響が直接的な関係で示される。

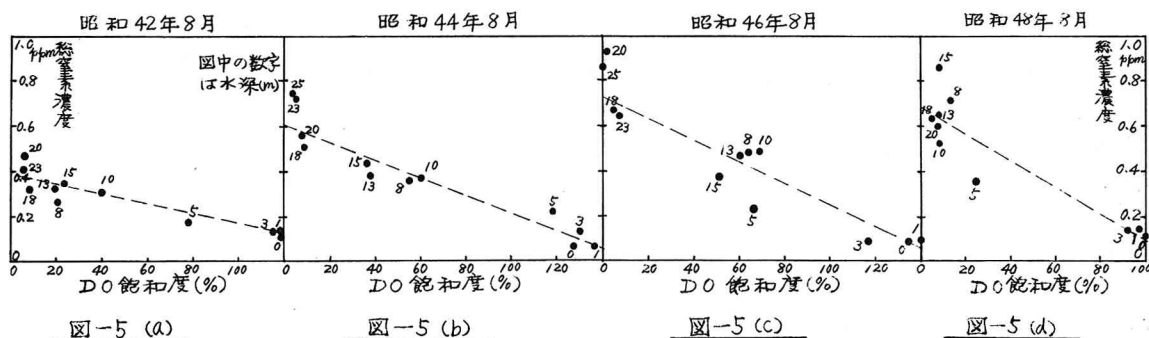


一般に、水質因子相互の関係が顕著なものもあり、その量的な関係もある程度推測することができる。例えば、河川においての流量と濁度の比例的関係、流量と電気伝導度の逆比例的な関係、濁度とSS量の比例的な関係は、貯水池流入水についても成立し、今回の観測例からも認められた。また、溶存酸素の飽和度と溶解性物質の形態別濃度、すなわち、酸化・還元物質濃度、栄養塩量および光量あるいは透明度とプランクトン濃度、すなわち、光合成量などの関係も明らかである。とくに、鉛直方向に温度勾配が存在すると、酸化・還元反応におけるDO量とともに、反応速度も影響を受ける。底面における底質と水体との水質交換も顕著であり、解析的取り扱いにおいては、反応項の中で捉えたり、境界条件として考慮することが必要で、温度躍層面での上下の物質移動とともに重要である。

4. 貯水池の観測と模型実験

人工貯水池は洪水調節を目的とする量的な管理は進んでいるが、水質に関する管理は遅れているところが多く、水質に関する資料も少ない。水質変化のパターンは、貯水池ごとに異なるであろうが、またこれらをよく検討すれば共通性も認められるであろう。しかし、実際には定期的な観測体制がとられ、かつ必要時にも観測可能という状態は少ない。その上、現地で観測の他に実験を行なうことは諸般の事情から困難な場合がほとんどである。したがって、ある現象に注目してそれを明らかにしようとする場合、模型実験は有効な手段である。各種水質因子の挙動の流動への追従性など、流動と水質が複雑にからみ合う上、ひずみ模型の相似則など解決すべき問題が多いが、現時点では、模型実験は必要であり、実際の貯水池の観測とは補完的な関係にあり、これに理論的な研究が加わる。

実際の貯水池の観測は、兵庫県の上貯水池において現在観測を継続中である。ここでは、かなり古くから水質観測が行なわれており、経年変化と季節変化の例を示してみる。この上流は、開発があまり進んでいないにもかかわらず、上水の水質試験項目で唯一の有機性汚濁の指標となり得る過マンガン酸カリウム消費量は、流入端において、昭和36年8月の7.6 ppm から昭和48年8月の15.5 ppm とおよそ2倍の増加である。また、富栄養化の指標となる全窒素量と溶存酸素の飽和度との関係を示す図-5において、その関係を示す直線の傾きが大きくなり、絶対量が年々かなり増加し、とくに深層の増加が認められる。そして、成層期と循環期の差異も顕著であることがわかる。そして、底層付近の水質悪化は溶存酸素の涸渇を招き、Mnや鉄の溶出など水利用上障害となる頻度が高い。



つぎに、模型貯水池は、右下の図-6に示すように、本水路と補助水路、採水装置と測定機器から成っている。本水路は幅60cm、長さ500cm、深さが上流端で30cm、下流端で130cmと5分の1の底面勾配を有している。一側面が観察用のためにガラス面であり、他は保温材の入ったステンレス面であり、人工的に温度成層状態をつくり出すために底面に冷却装置を備えている。この本水路の前部に、同じ幅、同じ底面勾配で、長さ100cmの補助水路と流入調整槽が付属している。採水装置は内径3mmの銅管を水深方向にいくつか並べたものを流下方向に6カ所設け、放流装置はoverflow方式の他に、水深方向に4カ所から近似的にline状に放流できるようにしてある。前述の実験結果も、これ以降の実験結果も全てこの実験装置において行なわれたものである。

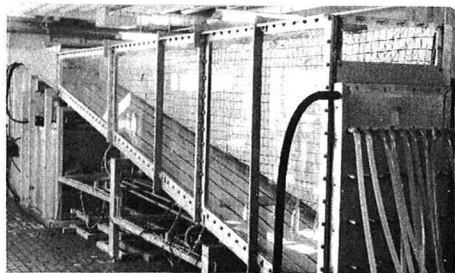
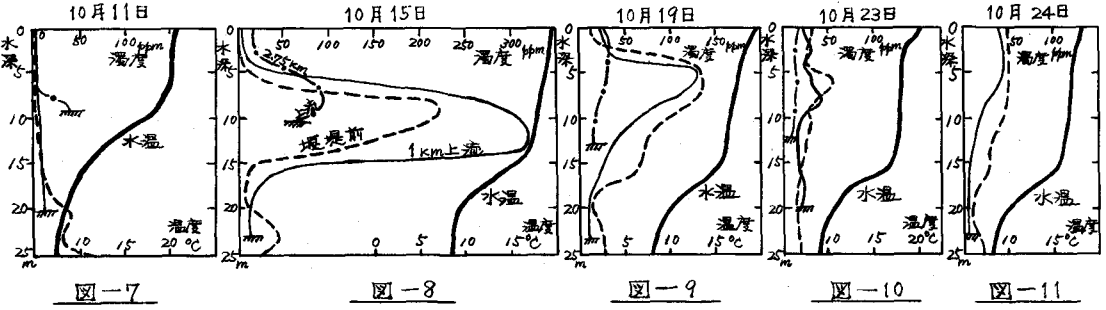


図-6 模型貯水池

成層期の温度躍層付近における濁質の長期滞留現象は、強雨後の濁水流入水によるもので、ダム、貯水池だけでなく天然湖沼でも観測され、実験的には、人工的に温度勾配をつけた静水中でも確認されている。この実際現象の経過をS貯水池の観測例に従って説明し、模型実験例でも示してみる。昭和48年の夏は異常な渇水状態が続いたが、まだ温度躍層が残っていることが確認される10月11日の観測後、10月14日に55.0～69.5mmの強雨があり、さらに10月17日に9.5～11.5mm、10月18日に3.5～16.0mmの降雨によって一気に平水位近くに回復した。しかし、濁質は全貯水池に広がってある分布を形成し、温度躍層も水位の増加などから10月11日の9～14mから15日には14～18m、さらに19日には14～18mになり、22日の19.5～23.0mmの降雨によって23日には18m付近、24日には15～20mとなった。その経過を下の図-7から図-11までに示す。温度躍層より上部に濁度最大値がある。



また、理論解析においては、濁水の流入後は、擬定常あるいは準定常状態が続くと仮定して、次の水平および鉛直方向の2次元の拡散方程式に、沈殿項と減衰項を加え、温度躍層面を内部境界面と考えて境界条件を考える。すなわち、底面のみならずこの内部境界面にも浮遊物質再浮上に関するパラメータkを、内部の層境界面における物質移動に関するパラメータとして用いる。このkは層の安定度や物質固有の性質などに支配されるものと考え、 $k \leq 1$ で、負の値もとりのものとする。

$$u \frac{\partial C}{\partial x} + w_p \frac{\partial C}{\partial z} = E_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + E_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - kC$$

$$C = 2C_0 \left(\frac{E_x}{u} \right)^{1/2} \left(\frac{E_z}{w_p} \right)^{1/2} \left(\frac{\lambda^2 + k_1^2}{\lambda^2 + k_2^2} \right)^{1/2} \left(\frac{\lambda \cos \lambda x - K_1 \sin \lambda x}{\lambda \cos \lambda x + K_2 \sin \lambda x} \right)^{1/2} \left(\frac{\lambda \cos \lambda z - K_3 \sin \lambda z}{\lambda \cos \lambda z + K_4 \sin \lambda z} \right)^{1/2}$$

ここで、 $K_1 = -\frac{w_p}{2E_z}$, $K_2 = -\frac{w_p}{2E_z} (2k_1 - 1)$
 $\tan \lambda h_1 = \frac{\lambda (k_2^2 - k_1^2)}{\lambda^2 + k_1 k_2}$ である。

この解析解と炭酸カルシウムを浮遊物質として用いた模型実験の結果を右の図-12に示す。

水表面 ($z=0$) において、 $E_z \frac{\partial C}{\partial z} - w_p C = 0$
 内部境界面 ($z=h_1$) において、 $E_z \frac{\partial C}{\partial z} - k_1 w_p C = 0$
 底面 ($z=h_2$) において、 $E_z \frac{\partial C}{\partial z} - k_2 w_p C = 0$
 起点 ($x=0$) において、 $C = C_0(z)$

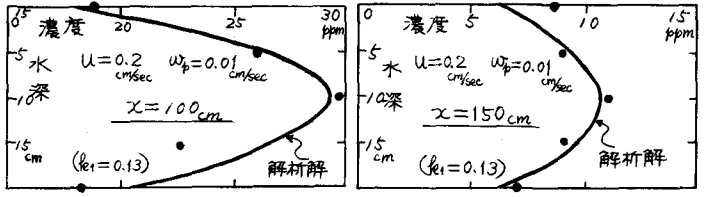
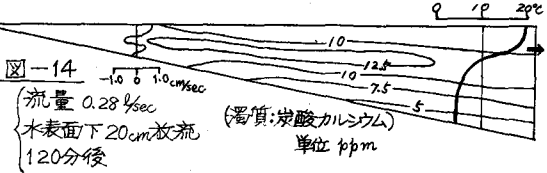
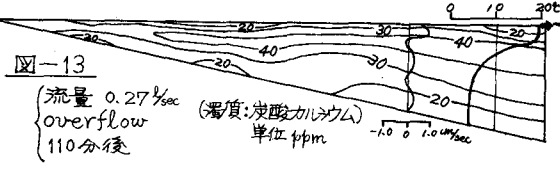


図-12(a)

図-12(b)

また、下の図-13と図-14は放流方式を変えて行なった模型実験の結果であり、浮遊物質が沈降性炭酸カルシウムであるが深水層へは容易に侵入しない。微細なカオリン粒子はほとんど侵入しない。



5. 水温変化

一般に、貯水池へ流入する河川の水温変化、さらには貯水池表面水温変化は1年を周期とするsine関数的変化をし、太陽の放射量、大気温、蒸発熱量の年間変化もsine関数で近似できうる場合が多い。したがって、これらの環境条件からほぼ定常水位が保持されるような理想的な場合は、水温分布の予測も可能と見られるが、実際は流入水量が不規則なため、流量・水位などの変動の少ない限られた状態の継続する場合にのみ、ある流速分布を仮定して水温分布を予測しうる程度である。

その解析法の例としては、先述の解析モデルに従って、水表面、底面、温度躍層（内部境界）面で境界条件を考慮する熱拡散方程式によるものである。成層期の場合は、温度躍層の位置が他の方法で既知の場合の水温分布を知ることができる。すなわち、解析解あるいは計算機による数値解である。温度躍層面を $\frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = 0$ で定義して各層において熱拡散方程式を立て、水温分布を求めることになる。したがって、一応基本式は、 $\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = E_x \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + E_z \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}$ の非定常2次元の熱拡散方程式を立て、次のような境界条件で計算機による数値解を求めるか、さらに簡単化して、前述の解析モデルに従って、1層、2層、3層という前提に立って、定常2次元の解析解を求めるのである。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{水表面}(z=0) \text{において, } \theta = a + b \sin(\alpha t + \beta) \text{ あるいは } \frac{\partial \theta}{\partial z} = c + d \sin(\gamma t + \delta) \\ \text{温度躍層面}(z=h) \text{において, } \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = 0 \\ \text{底面}(z=H) \text{において, } \theta = \theta_0 (\theta - \theta_e) \\ \text{流入端}(x=0) \text{において, } \theta = e + f \sin(pt + q) \end{array} \right.$$

定常2次元の方程式は、 $u \frac{\partial \theta}{\partial x} = E_z \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{水表面}(z=0) \text{で, } \frac{\partial \theta}{\partial z} = G_1 \text{ or } \theta = h_1(\theta_a - \theta) \\ \text{温度躍層面}(z=h) \text{で, } \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = 0 \\ \text{底面}(z=H) \text{で, } \frac{\partial \theta}{\partial z} = G_2 \text{ or } \theta = h_2(\theta - \theta_e) \\ \text{流入端}(x=0) \text{で, } \theta = a + bz + cz^2 \text{ or } \theta = \theta_0 e^{-\frac{z}{H}} \end{array} \right.$
その境界条件は右のように考える。この解析解はラプラス変換によって得られる。成層期の表水層についての解は次のようになる。

$$\theta = 2E_z C \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left\{ \left[x + \frac{(2n+1)h-x}{2E_z} \right] \operatorname{erfc} \frac{(2n+1)h-x}{2\sqrt{E_z x}} - (2n+1)h-x \left(\frac{x}{4E_z x} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{(2n+1)h-x}{2\sqrt{E_z x}}} + \left[x + \frac{(2n+1)h+x}{2E_z} \right] \operatorname{erfc} \frac{(2n+1)h+x}{2\sqrt{E_z x}} - (2n+1)h+x \left(\frac{x}{4E_z x} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{(2n+1)h+x}{2\sqrt{E_z x}}} \right\} \\ + 2(b-a)\sqrt{E_z x} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left\{ i \operatorname{erfc} \frac{2nh+x}{2\sqrt{E_z x}} - i \operatorname{erfc} \frac{2nh-x}{2\sqrt{E_z x}} \right\} + a + bx + cx^2 + 2E_z Cx$$

いずれの場合とも、流速分布や境界条件の資料が十分でない場合が多く、流入量や流出量の極端な変動に対応できない。一般的には、熱収支式からその貯水池形態を考慮して予想されることが多い。

6. 浮遊性物質

浮遊性物質と言えは、濁質など無機性のものが中心に考えられがちであるが、富栄養化などの現象を考慮すると、排水によるものや、プランクトンなど有機性のものも重要となってくる。両方とも浮遊するだけでなく沈降もし、その鉛直方向濃度が時間的に変化し、SS濃度で示される水質項目で表示され、濁度にも比例的な影響を及ぼす。とくに、有機性のものは沈殿してもセストンなどの形で存在し、循環期の再浮上や、溶出で生物の生産サイクルの一環として重要な役割を果たす。有機性か無機性かは、SSとVSSの2つの水質項目で測定すればほぼ区別できるが、問題の発生後はどちらか一方に片寄ることが多い。この浮遊性物質は、0の場合を含めて沈降速度を有するから、水の流れの挙動に加えて、独自の鉛直方向の移動現象を有し、成層期に各種の問題を生ずる。すなわち、細かい径の濁質粒子は、成層期には密度分布と流速分布などの影響により温度躍層部より下方への沈降が阻止される形となることが多いし、プランクトンなどは風下方向に流されて側面に付着することもある。

7. 溶解性物質

この溶解性物質は、流動に対する追従性が強く、生成や分解の反応を伴ない、量的な変化も生ずる。酸素や二酸化炭素の溶存ガスもこれに含まれ、他の水質因子への影響も大きい。一般に、温度と圧力によりその溶解度には限度があるが、過飽和の濃度で存在することも珍しくない。とくに、富栄養化現象と非常に重要な関係にある窒素やリンなどの栄養塩類がこの中に入り、光合成プランクトンを誘発し、その結果、溶存酸素が過飽和になることもあり、表層近くと底層近くの不均一分布が多い。すなわち、各種水質因子はそれぞれその環境条件での安定な状態へと向かい、化学成層と呼ばれる状態をつくり出したりするが、水温分布とDOの分布に左右されて1つの平衡状態にあるものが多い。

溶解性物質の水質変化の解析も浮遊物質と同様に、温度躍層面を内部の層境界面と考えて、水表面と底面とともに境界条件を考えて、次の拡散方程式を解くことになる。内部境界面の上下での物質移動は、そこでの濃度fluxが層の安定度などから定まる一定値で与えられると考える。

$$u \frac{\partial C}{\partial x} + w \frac{\partial C}{\partial z} = E_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + E_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \kappa C$$

さらに簡略化して、 $u \frac{\partial C}{\partial x} = E_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \kappa C$

境界条件および起点条件は、右のとおりであり、表水層では、

	水表面 ($z=0$) において、 $E_z \frac{\partial C}{\partial z} = 0$
	内部境界面 ($z=h_1$) において、 $E_z \frac{\partial C}{\partial z} = r_1$
	底面 ($z=h_2$) において、 $E_z \frac{\partial C}{\partial z} = r_2$
起点 ($x=0$) において、 $C=C_0(z)$	

$$C = e^{-\frac{\alpha x}{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{\mu x}{2}} \cdot \left\{ e^{-\frac{(2n+1)h_1-z}{2\sqrt{\mu x}}} \operatorname{erfc} \left[\frac{(2n+1)h_1-z}{2\sqrt{\mu x}} \right] - e^{-\frac{(2n+1)h_2-z}{2\sqrt{\mu x}}} \operatorname{erfc} \left[\frac{(2n+1)h_2-z}{2\sqrt{\mu x}} \right] \right. \\ \left. + e^{-\frac{(2n+1)h_1+z}{2\sqrt{\mu x}}} \operatorname{erfc} \left[\frac{(2n+1)h_1+z}{2\sqrt{\mu x}} \right] - e^{-\frac{(2n+1)h_2+z}{2\sqrt{\mu x}}} \operatorname{erfc} \left[\frac{(2n+1)h_2+z}{2\sqrt{\mu x}} \right] - (2\alpha h_1 + b) \left\{ 2 \sqrt{\frac{\mu x}{\pi}} e^{-\frac{(2n+1)h_1-z}{4\mu x}} - \frac{(2n+1)h_1-z}{2\sqrt{\mu x}} \operatorname{erfc} \left[\frac{(2n+1)h_1-z}{2\sqrt{\mu x}} \right] \right. \right. \\ \left. \left. + 2 \sqrt{\frac{\mu x}{\pi}} e^{-\frac{(2n+1)h_2-z}{4\mu x}} - \frac{(2n+1)h_2-z}{2\sqrt{\mu x}} \operatorname{erfc} \left[\frac{(2n+1)h_2-z}{2\sqrt{\mu x}} \right] \right\} + b \left\{ 2 \sqrt{\frac{\mu x}{\pi}} e^{-\frac{(2n+1)h_1+z}{4\mu x}} - \frac{(2n+1)h_1+z}{2\sqrt{\mu x}} \operatorname{erfc} \left[\frac{(2n+1)h_1+z}{2\sqrt{\mu x}} \right] \right. \right. \\ \left. \left. + 2 \sqrt{\frac{\mu x}{\pi}} e^{-\frac{(2n+1)h_2+z}{4\mu x}} - \frac{(2n+1)h_2+z}{2\sqrt{\mu x}} \operatorname{erfc} \left[\frac{(2n+1)h_2+z}{2\sqrt{\mu x}} \right] \right\} \right\} \\ + a + b + c + \kappa z^2 + 2\mu \alpha z \quad \left(\alpha = \frac{\kappa}{u}, \mu = \frac{E_z}{u} \right) \quad \text{ただし、} C_0(z) = a + b + c + \kappa z^2$$

この実験例は先述の図-3～図-4からもわかるように流速分布の影響が、滞留時間、したがって、その環境での接触時間・反応時間の形で関係し、鉄やMnのように酸化・還元反応で変化するものが多い。

8. おわりに

水利用において問題となる貯水池内の水質汚濁現象を、流動と水質の両者の関係からその機構を明らかにし、その汚濁制御のための1つのアプローチを示した。しかし、実際貯水池での流速分布と水質の同時観測は困難なことが多い。したがって、流動と水質分布の関係は、実際貯水池の観測資料、模型実験、さらに解析手法を利用し、その不備な点を補って、より精密な予知が行なえるよう検討を進める必要がある。また移行過程における水質変化や、最近の水質悪化に対処する方策だけでなく、予防的研究も研究も必要と考えている。S貯水池の観測においては、K市の御厚意に感謝し、協同実験者である京都大学大学院生大島高志君、工学部学生勝部利之君の協力を得たことを付記する。

参考文献

- (1) 小島貞男, 「ダム貯水に伴なって起こる水質障害とその対策」(1),(2) 工業用水 41, 43, (1962)
- (2) Toshiji Takemura; J. of Fac. of Lib. Arts. & Sci., Shinshu Univ. No. 5. (1959)
- (3) Hays, Beckett; "The flow of minerals through the thermocline of a lake", Arch. f. Hydrobiol. (1956)
- (4) Mortimer; "The exchange of dissolved substance between mud and water in lake" J. of Ecol. (1941)
- (5) Takeshi Goda; "Density currents in an impounding reservoir" IAHR, No. 8, (1959)
- (6) Churchill, M.A.; "Effects of impoundments on water quality" ASCE, SA6, (1967)
- (7) 合田・海老瀬, 「水質の変化とその予報に関する研究」(3),(4) 衛生工学研究討論会, 46, 6, 9, (1970, 73)