

ダム貯水池の水質変化過程とその特性

京都大学 工学部 海老瀬 啓一

1. 緒言

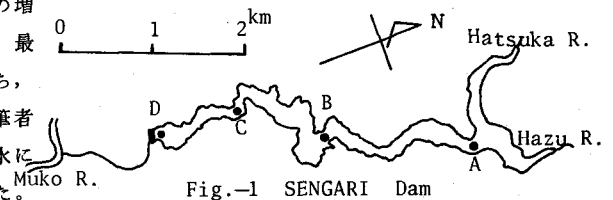
一般に、ダム貯水池では、流動・停滞の流動パターンの季節変化に従って、水質も冬季の一様分布状態から夏季の成層分布状態へと季節変化を示す。このダム貯水池水質変化の定性的かつ定量的な把握は、最近の水質汚濁や富栄養化の現象を含めて、水利用や水環境における水質管理上の重要な課題である。その上、これは貯水池貯留水だけの問題ではなく、貯水池への流入水をも併せて考えるべき問題である。したがって、ダム貯水池貯留水の水質変化に大きな影響をもたらす流入河川水質の変化は、流入河川の流量変動に伴う濃度と負荷量の変化パターンに対する貯水池貯留水、ひいては貯水池流出水の応答との関係から把握の必要がある。すなわち、流量変動を伴う流入水質変化の入力変動に対して、流動や水質に分布を有し、実質滞留時間の変化を伴うダム貯水池という系における水質の応答あるいは挙動を出力とする貯水池水質変化の動特性を把握して、貯留水の、したがって、貯水池流出水の水質変化予測を目ざし、貯水池の水利用や水環境に対する水質管理への提言を目的とすることになる。

2 ダム貯水池の温度成層特性

水深がおよそ15 m以上の貯水池の多くは、春季後半から秋季にかけて温度成層する。とくに、ダム貯水池の場合、天然湖沼と比べて、温度成層状態は流入水の流量と流入深度および流出水の流量と流出深度の影響が顕著であり、さらに流入・流出量が大きく、水位変動が大きいことなどが一般的なダム貯水池の水理特性である。¹⁾²⁾これらの水理特性と貯留水密度の鉛直分布との関係によって、混合状態の程度が支配され、流入水の貯水池内実質滞留時間分布および主流部分の流過径路が左右されて、貯水池の水質変化過程も大きな影響を受けることになる。³⁾貯水池内の混合状態の程度は、温度躍層の有無や強度と、流入水量の相対的な関係などに従うと考えられ、とくに、貯水池流入端付近での初期混合の程度は、貯水池の全体的な水質分布への影響度が大きい。また、ダム貯水池では、比較的安定で上層に出現する表層躍層と、中層に安定した形で出現する主躍層の2つが存在し、これらに分割されて水質的にもかなり異なる水塊の3層状態が形成されることが多い。したがって、貯水池の水温分布、流速分布、および水質分布の関係は密接なものである。

3. 千苅貯水池の概要

ダム貯水池における一般的な水質変化過程の究明には、貯水池の幅や水深が極端に変化する複雑なものではなく、簡単な貯水池形状で、流入・流出の形態も単純、かつ、流出量や水位変化が小さく安定している貯水池を対象にすると都合がよい。兵庫県の武庫川水系の千苅貯水池は、上記の要件の多くを満たすダム貯水池である。千苅貯水池の規模など諸元は、有効貯水量 11620000 m³、最大水深 33m、背水延長約 7 kmと、全体に細長い水道専用の水源池である。Fig-1に示すように、中央に多段取水塔を有する堰堤部から上流に向けて水深が漸減し、上流約 5 kmで2流入河川の合流点となる比較的単純な貯水池形状を有している。その集水面積は94.5 km²で、流域内は90%弱が山林に占められ、残りが田畑他の農山村で、両流入河川沿いに約6700人の流域人口を容れている。この流入河川の羽束川・波豆川・および貯水池周辺流入水の流入量比は、およそ 8.6:2.7:1である。また、千苅貯水池では、流域内の牧場の出現、灌漑用水池の養魚池化、肥料使用量の増加、スポーツ・レジャー施設の進出などに伴って、最近10年間の富栄養化の顕在化や有機汚濁化が目立ち、“水の華”の発生や異臭味の問題も生じている。⁴⁾筆者らは、この千苅貯水池の貯留水および両流入河川水について、1973~1975年に水質・流動調査を行なった。



4. 水質変化特性の解析手法

ダム貯水池の水質変化過程を把握するために、貯水池の入力としての流量変動を伴う流入水の水質変動を、水質の濃度変化および負荷量変化の両面から、出水時などの一時的な変化と、1年をサイクルとする定常的な周期変化とに注目して、それぞれを近似的に貯水池という系に対するインパルス応答と周波数応答に見たてて考察することにする。すなわち、ダム貯水池という反応などの変化を伴う大容器内での水質変化のプロセスを、流入水の水質変動に対する貯水池内での水質の伝播あるいは混合過程と見て、流入水と流出水の水質変化の対応関係や、流入水の貯水池流入端から流出端までの水質変化過程の追跡から、千叡貯水池の水質観測結果を例として、貯水池水質変化の動特性を明らかにしようとするものである。

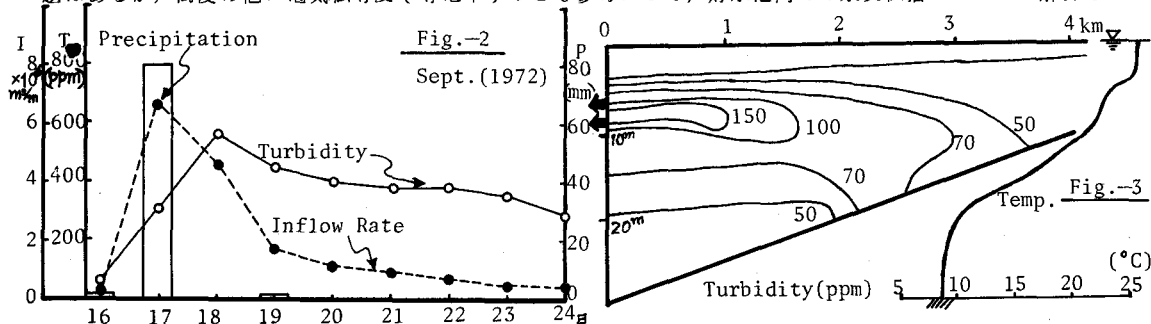
ダム貯水池の流動パターンに重大な影響を与えぬ程度の出水時には、流入水量の変化とその後の取水水質の変化などから、出水に伴う水質への影響度や実質滞留時間の推定を行なうことができる。また、流入水と貯留水について、1年を通しての平均的な水質変化のパターンから定常的な周期変化が求まり、その流下方向の各地点間の水質変化から、流入水水質変化に対する貯水池の水質変化伝播過程を明らかにできる。この出水による一時的な水質変化は、貯水池における各流動パターンの個々について考える方が便宜的であり、水質の定常的な周期変化は貯水池の流動パターン変化との対応関係から把える必要がある。さらに、もっと長期的な富栄養化などの水質変化は、貯水池全体の経年的な傾向として考えるべき問題であると思われる。

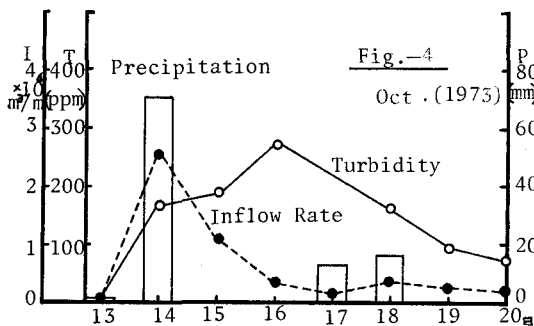
5 出水による水質変化

かなりの降雨による出水時には、流入水量変化だけでなく、その降雨強度、降雨継続時間、降雨間隔などの要素に従った流入水質の濃度および負荷量変化を伴う。公称滞留時間の大きい貯水池における濁質の長期滞留問題を取り扱う場合、日単位で水質変化を追うことが多いため、出水による流入水量変化と同時に濁度やSSなどの流入水質変化を近似的にインパルス状の入力変化と考えることができる。また、大出水時には流入水量の急増に加えて、流出水量の急変や流出形態の変化など操作上の要因によって流動パターンが一時的に大きく変化することが多いので、この場合は考慮の対象外とし、流動パターンに重大な変化を与えぬ程度の出水に焦点を絞り、典型的な流動パターンの個々のものについて検討することにする。

一般に、循環期における出水時の流入水質変化は、貯留水の水温と各水質が一様に近い分布状態でもあって、流入水の混合領域が大きく、主流部も幅広く不明確なものとなり、流出端への水質変化の伝播は遅れて、その影響も顕著なものではなくなることが多い。これに対して、成層期における出水時の流入水質変化は、流入端付近での流入に伴う初期混合の程度も幾分抑えられ、混合領域も主流部付近に限られ、密度流現象として流出端までかなり短時間で顕著な変化として伝播されることになる。また、この両者の中間にあたる遷移期（移行期）における出水時の水質変化過程は、両者の中間的な様相を呈する。これらのそれぞれの例として、千叡貯水池の流入水量と流出濁度の変化および貯水池内濁度分布について考察を進めることにする。

Fig-2に示す流出濁度変化曲線は、出水による流入水質のインパルス入力変化に対する流出水質の応答変化を示し、濁度をトレーサーと見たてた流出トレーサー濃度一時間曲線と見て、貯水池内の混合特性や実質滞留時間分布の解析に用いることができる。濁質粒子をトレーサーとするには水分子に対する追従性に若干問題はあ





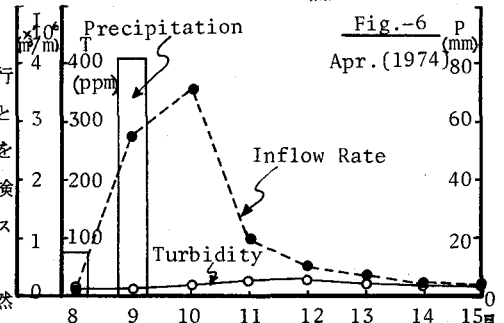
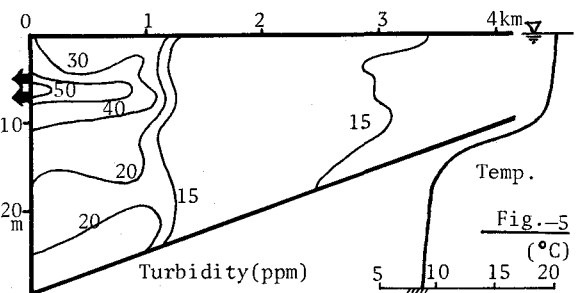
温度躍層強度，流入水量／総貯水量比，濃度ピーク到達時間，一定濃度（ピーク値の1/2など）減衰時間などをもとに行なうことになる。これと，貯水池内濁度分布図から，主流部と死水域の大きさ，流出端から流入端への循環流の大きさなどをチェックすることができる。また，一般には，バイパス流の検知が行えるほか，水質的には濁質の沈降は主流に対するクロスフローとして考えることができる。

Fig-2, 3は9月中旬18日の出水例である。9月中旬は依然として表層躍層が健在で，9月12日に17日の1/6程度の出水が先行したが，温度躍層を若干弱体化させたにとどまり，表層部分，表層躍層と主躍層にはさまれた中間層，主躍層下の深水層の3層に大別される安定かつ強力な成層状態下である。17日の流入水量は，総貯水容量の6割強にもかかわらず，定常量の中層取水量以外は越流放流されたことも，温度成層状態が維持された原因と考えられる。9月12日の水温鉛直分布から水深15~18mの主躍層の温度傾度1.1~1.4℃/mの大きさが目立ち，中層取水にも支えられ，流入水は密度流となって流出端に達することがわかる。濁度ピーク到達時間は流入水量ピークからおよそ1日遅れであり，濁度ピーク値の1/2への減衰時間は，濁度ピーク出現後6日で長期化している。

Fig-4, 5は10月中旬14日の出水例である。10月中旬は，主躍層が弱体化の進行にもかかわらず健在の温度成層状態下であり，水深15m付近の主躍層上下の表水層と深水層とに分けられる。流入水は，主躍層上の表水層下部を，流下して流出端に達するが，上記9月の例に比べて，躍層強度の弱小化により主流部分の拡大を伴い，濁度ピーク到達時間は流入水量ピーク後2日で，濁度のピーク値半減時間は濁度ピーク値出現後2日と短い。10月11日の主躍層強度は1.0~1.2℃/m，14日の流入水量は総貯水容量の約1/5であり，流出量は中層取水の定常取水量のみで越流放流はなく，主躍層上の表水層厚が増加した。

Fig-6は，4月前半10日の出水例である。4月上旬は，弱い表層躍層が出現するのみで，ほぼ様な水温分布状態下で，中層から定常取水が行なわれている。10日の流入水量は，総貯水容量の約1/3で，その大半は越流放流された。また，濁度ピーク到達時間は流入水量ピーク出現後3日で，濁度のピーク値半減時間は，濁度ピークが低いため，不明瞭となっている。

以上の3例を初め，過去いくつかの出水例の流入水量変化と取水濁度変化⁵⁾から，出水後の貯水池水質変化を左右する重要因子は，流入水量，流出水深，流出水量，水温鉛直分布であると考えられる。したがって，流入水量の総貯水容量に対する大きさ，流出水量の流入水量に対する割合，流出水深と，貯留水の成層状態の有無，すなわち，水温一様分布状態，主躍層のみ存在する場合の躍層水深と躍層強度，主躍層と表層躍層が存在する場合の両躍層の水深と躍層強度との相対的な関係を中心に，貯留水および流出水の水質変化が規定されると考えられる。また，成層状態下でも大出水時には，躍層強度の弱体化にとどまらず，大流入水量による流動変化のために躍層破壊に至る場合も考えられ，大出水による水質変化が短時間に貯水池全体に及び，貯留水の流入水による入れ替わり状態が出現することもある。このような大出水の場合，大出水による水質への影響は長期化し，定常的な周期変化をも覆いかくしてしまうことが多い。

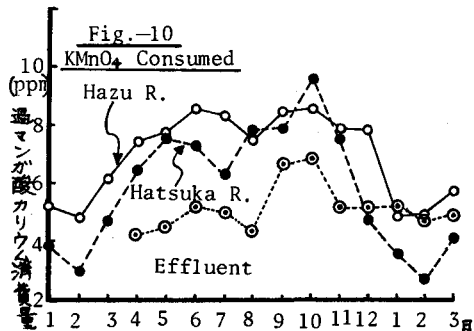
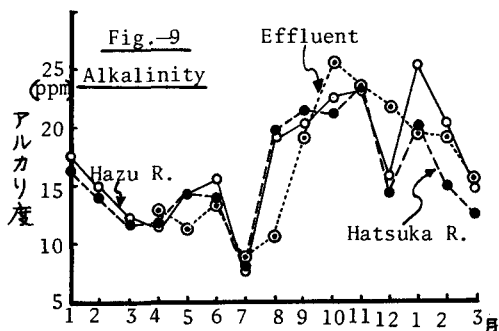
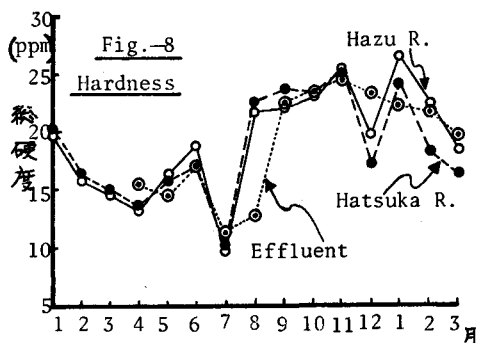
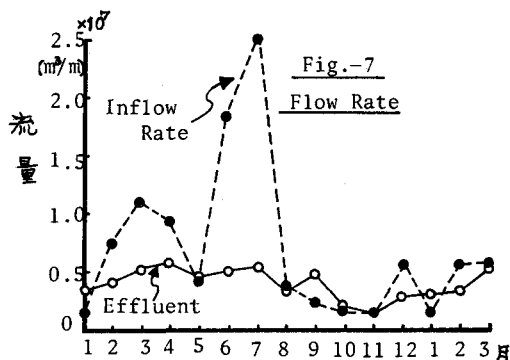


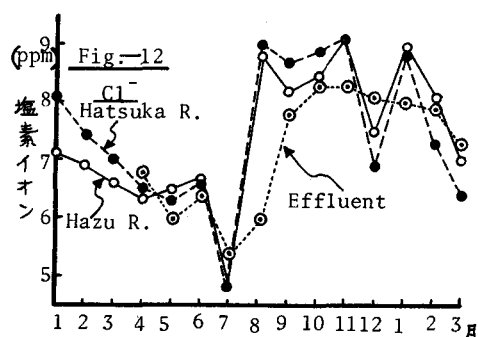
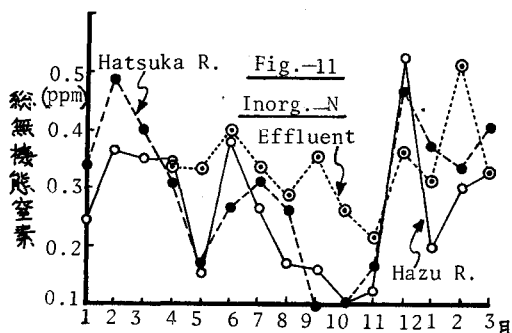
6. 定常的な周期水質変化

流入水質の定常的な周期変化パターンは、降水量や温度などの自然的要素と、土地利用形態や人間活動などの人為的要素によって左右される。したがって個々の水質因子によって異なった変化パターンを有すると考えられ、流入水量変化を考慮すると、流入水質は濃度変化だけでなく、負荷量変化も加味する必要がある。この流入水質変化に対する取水水質変化および貯留水水質変化の対応関係を、入力変化に対する出力応答、および流入水質変化の貯水池流下方向への水質伝播過程、といった観点から捉えてみることにする。千苅貯水池は、水道専用のため中層からほぼ一定量の取水が定常的に行なわれており、出水時には越流放流されることもあって、水位変化は小さく、水質も全般的に安定した変化を示す。この千苅貯水池の1年間の水質変化を、入力変化としての流入水質変化に対する出力応答としての取水水質変化の例を1969年について示し、約8年間の流入水質および貯水池流下方向4地点の水質変化の平均的な対応関係を、各種水質の鉛直分布も加味して、毎月観測値の調和分析によって定量的に捉えることにする。

(1) 流入・流出の水質変化の対応

1969年の流入水量は平年並みであるが、流入水量の平均的な季節変化では、平年量と比べて2、3月が多かったため3月中旬から7月中旬にかけてのほとんどの間、越流放流があった。また、9月の台風期の流入水量が平年に比べて少く、10、11月は水位の漸減状態が続き、11月には満水面下37mまで水位低下した。また、取水量はほぼ一定で、11月が若干少ない程度であり、取水口位置の変化はなく、取水水深は水位変化の影響のみを受けることになる。とくに、流入水量の季節変化が著しく、流入水の実質滞留時間の季節変化に直接影響するため、流入水質の入力変化に対する出力応答としての流出水質変化の時間遅れにも季節変化が現れることに注目する必要がある。Fig-7~12に、流入・流出の水量および水質の月別変化を示すが、流出水質については滞留時間を考慮して4月から翌年3月までの変化を示した。流入水は波豆川と羽東川があるが、流量的に大きい羽東川の貯留水・流出水の水質へ影響が大きい。また、流入水質の観測は月1回であるが、取水水質は月2回観測の平均値であり、さらに、流入・流出の水量や水位変化は毎日観測によっている。





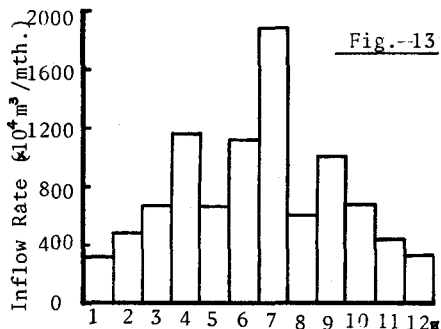
まず注目されるのは、総硬度、アルカリ度、塩素イオン濃度の6月流入・流出水の高濃度ピークの出現期の一致および7月流入・流出水低濃度の谷の出現期の一致であり、8~11月の流入水高濃度傾向と9~2月流出水高濃度化傾向の出現時間の遅れおよび12月流入水質の低濃度の谷と3月流出水低濃度の谷の出現時間遅れである。これらは、6・7月の流入水量の多さと成層状態、8~11月の流入水量の少さと成層状態、および、12~3月流入水量と水温・水質の一樣分布状態を考慮すると、流入水的主流部にのった実質滞留時間あるいは流下時間との関係から説明できうと思われる。この他に、水温補正を施した導電率の流入水と流出水の対応関係も同様の傾向にある。さらに、総無機態窒素($\text{NO}_3^- - \text{N} + \text{NO}_2^- + \text{NH}_4^+ - \text{N}$)濃度と KMnO_4 消費量は、それぞれ植物プランクトンの光合成作用や微生物の有機物質分解作用と密接に関係し、流入水と流出水の変化の対応関係は、上記の水質ほど明かではなく、全体的に総無機態窒素濃度は流出水濃度が高く、 KMnO_4 消費量は流出水濃度が低い傾向にある。 KMnO_4 消費量の流出濃度減少は、ダム貯水池の浄化作用とも関係するが、正確には出水期の越流放流水の水量・水質変化を併せて考える必要がある。また、取水水深が中層以外の場合には、温度成層状態と主流部の相対的な位置関係などによって、流入水と流出水の水質変化の対応関係は異なることもある。

(II) 流下方向へ水質変化の伝播

流入水の貯水池流入後の水質変化過程を把握するには、流入水の濃度変化だけでなく、流動パターンや実質滞留時間あるいは流下時間に影響を及ぼす流入水量の変化を考慮に入れる必要があり、流入水の水量と濃度の積である水質負荷量の変化を併せて取り扱うこととは、意義あることと考えられる。したがって、流入水の水質変化として、濃度と負荷量の平均的な季節変化の貯水池流下方向への貯水池流下方向の水質伝播過程を、流下方向4地点の水質鉛直分布の平均的な季節変化との関係を中心に明らかにすることになる。

最近8年間の資料によると、月別流入水量の平均的な季節変化はFig-13に示すように、6~7月の梅雨期に大きなピークがあり、4月頃の菜種梅雨期と9月の台風期に少し小さなピークが見られる。この流入水量と、定常的な一定取水量と出水期の越流放流量の流出水量、および温度成層状態や流出水深と主流部の相対的な位置関係は、流入から流出までの流過径路や流下時間あるいは伝播時間を左右する重要な因子である。

流入水質の濃度変化は2流入河川それぞれについて、水質負荷量変化は各河川負荷量の和として、流下方向4地点の水質濃度変化も含めて、8年間の毎月観測値の調和分析による水質変化近似式を用い、その変化の平均値や分散、12カ月周期変動成分の振幅や位相角など諸特性値から、水質変化伝播過程の解析を行うことにする。ただし、ここでは定常的な周期変化を中心に解析を進めるために、各種水質変化のうち富栄養化や水質汚濁化の傾向は除去したものについて、貯水池流下方向の主流部分の濃度変化の大きさと時間遅れを中心として取り扱う。



水温の周年変化は安定しており、この事実が安定した温度成層状態の維持を如実に示している。この調和分析によると、12 カ月周期変動成分が全変動の約90%を占めるが、躍層水深付近ではこの比率が低下する。貯水池内の水温鉛直分布特性の水平方向の差異はほとんどなく、流入水温と等温度の水深付近が主流部を形成すると考えられ、変化の小さい取水水深や他の水質分布特性などから水深8~15 mの範囲内に主流部が位置すると推定できる。したがって、浅い地点を除いて水深8~15 mの水質変化に焦点を絞ることにする。

各種水質因子のうち、DO濃度は生物の呼吸や分解作用、植物プランクトンの光合成作用、酸化還元反応など関係するなど他の水質との関連も強く、飽和度として取り扱われる場合が多い。DO飽和度としては、水深8~15 mでは30~100%と冬季以外は不足状態が多く、流下方向に幾分時間遅れの変化があり、8~15 mの水深方向にも変化が遅れて出現する。

Table-1に総硬度、アルカリ度、KMnO₄消費量、総無機態窒素濃度の周年変化の12カ月周期変動成分を、 $a \cdot \cos(\frac{2\pi}{12}t - \theta)$ の形で表した場合の初期位相角について、各水深ごとの流下方向変化を示している。総無機態窒素濃度以外の12カ月周期変動成分の全変動の30~50%を占めるが、総無機態窒素濃度のこの比率は植物プランクトンの栄養塩として光合成作用の影響などにより若干低くなる。また、アルカリ度はPHや遊離炭酸濃度の影響のため一部にこの比率の低いものもある⁸⁾。

水深の浅いA、B両地点では、Table-1の一部の水深は主流部の挙動とは考えられないものもあるが、総硬度、アルカリ度、KMnO₄消費量は流入水質の濃度変化の時間遅れの伝播が明らかであり、総無機態窒素濃度は流入水質の負荷量変化の時間遅れの伝播と貯水池内での変化を加えた形で表われる。その他、塩素イオンは濃度変化と負荷量変化が一致して、一定の時間遅れで流下方向に伝播する。また、KMnO₄消費量やNH₄-Nは流下方向へ濃度と変化の幅を減少させて伝播する。

Table-1. 12カ月周期変動成分の初期位相角

		Hard-ness	Alkali-nity	KMnO ₄	Inorg-N
Hazu R. Hatsuka R.		3.431	3.487	2.018	5.588
		3.205	2.993	2.050	5.691
Inflow Rate		1.364	1.251	1.541	1.304
Load		1.455	1.557	1.460	0.785
A	0 ^m	3.367	3.091	2.000	5.150
	1 ^m	3.271	3.079	1.949	5.127
	3 ^m	3.201	3.019	2.100	5.417
	5 ^m	3.385	3.231	2.180	0.507
B	5 ^m	3.578	3.331	2.016	0.197
	8 ^m	3.749	3.455	2.285	0.783
	10 ^m	3.883	3.432	2.372	1.027
	13 ^m	5.292	3.282	2.518	1.295
C	8 ^m	4.181	3.956	2.142	1.289
	10 ^m	4.291	4.155	2.264	1.461
	13 ^m	4.451	4.206	2.591	1.686
	15 ^m	4.477	4.000	2.963	2.125
D	8 ^m	4.181	4.023	2.092	1.742
	10 ^m	4.328	4.250	2.271	1.895
	13 ^m	4.576	4.425	2.494	1.735
	15 ^m	4.628	4.457	2.816	2.522

備考：4月をt=0とする。単位はラジアン

7. 結言

ダム貯水池流入水と水質変化に対する貯留水あるいは流出水の水質変化の対応関係を、出水による一時的な水質変化と1年をサイクルとする定常的な周期水質変化に分けて解析した。さらに数多くの貯水池について解析を進め、流入水量変化や温度成層状態に関する諸特性値をパラメーターとして、典型的な流入水質変化に対する貯水池内水質の分布変化を予測し、水利用や水環境に対して水質制御を含む水質管理を行うべきである。終りに、現地観測に御協力を頂き、資料を御提供下さった神戸市水道局に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 新井・西沢：「水温論」，水文学講座10，pp.146~218，共立出版（1974）
- 2) 小島貞男：「貯水池における水の流動について」，水道研究，No.40，pp.13~23，（1960）
- 3) 合田・海老瀬：「貯水池の流動と水質の関係について」，第18回水理講座会講演集，pp.193~198，（1974）
- 4) 神戸市水道局：「水質試験成績」，昭和41年度~昭和49年度，（1967~1975）
- 5) 合田・石原：「応用水理学 中Ⅱ」石原藤次郎編，pp.338~345，丸善，（1958）
- 6) 合田・海老瀬・大島：「貯水池の水質変化と富栄養化について」，第29回土木学会年次講演会，（1974）
- 7) 合田・海老瀬・大島：「ダム貯水池の水質変化と富栄養化」，土木学会論文報告集，（投稿中）
- 8) 合田・海老瀬・大島：「貯水池における各種水質の変化パターン」，第30回土木学会年次講演会，（1975）