

貯水池水理の空間的スケールからみた解析法の考察
A Study of the Simulation Method of Reservoir Hydraulics
in View of Spatial Scales

京都大学工学部 正 員 ○松尾 直規
京都大学工学部 正 員 岩佐 義朗
京都大学大学院 学生員 小林 正典
京都大学大学院 川那部嘉彦

1. はじめに

貯水池における水理現象のモデリングには、ふつうコントロール・ボリューム法が用いられることが多い。この方法では、対象とする現象の空間的一様性及びスケールに基いて、貯水池を適当な大きさの空間で分割し、それをコントロール・ボリュームとして、流体力学原理の適用が図られなければならない¹⁾。

貯水池水理で対象とする貯留水の性質は水温、濁度及び富栄養化関係物質の濃度であり、これらは貯水池の幅方向にはほぼ一様であることが知られている。また、水温は夏期水温成層にみられるように流れ方向にはほぼ一様で水深方向にのみ変化することが多い。ところが、濁度及び濃度は、濁水現象ならびに富栄養化現象にみられるように、水深方向ばかりでなく流れ方向にも変化する。このため、従来より水温に対しては貯水池をいくつかの水平層に分割した解析法^{2),3)}が用いられ、濁度等の解析には、水平層をさらに流れ方向に分割したものが開発されてきた^{4),5)}。

これらのモデルは実際の貯水池における水理現象の解析に有効であることが実証されているが、これらを用いた実際の解析にあたっては、貯水池をどの程度の大きさのものに分割すれば現象をより忠実に再現できるかということが問題となる。すなわち、実際現象の空間的一様性やスケールからみて、コントロール・ボリュームの大きさをどの程度にすれば水理学的に妥当であり、また一方、所要の解析精度を得るためにはそれがどの程度であれば良いかということである。

本研究は、この点を中心に考察したものである。まず貯水池における水理現象の各種スケールとそれらに応じた解析法について概括し、そのうちから、成層型貯水池における濁水現象を対象として、その時間的・空間的スケールを既存の実測資料から明らかにする。つぎに、この実際のスケールに基く貯水池分割法について、水理解析上の妥当性と数値解析による現象の再現性の両面から検討し、さらに、それらの結果から水理解析に必要な実測資料の計測スケールについても考察を加える。

2. 貯水池における水理現象の各種スケールと解析法

貯水池における水理現象と一口に言っても、それは様々の時間・空間スケールのものから構成されており一概に述べられるものでない。たとえば時間スケールについてみれば、貯水池の水理・水文的性格のような年単位あるいはそれ以上のスケールのものから、洪水時における濁水の流下、伝播過程のように時間単位あるいはそれ以下のものまで各種のものがあ、一方、空間スケールについても、貯水池の地理的位置や流域の地形、地質、気候条件などのように貯水池規模より大きなスケールのものに関係する水理・水文的特徴から、水温成層破壊のように貯水池における局所的な現象に関係するものまで多様である。

もちろん、これら各種の時間スケールと空間スケールとは、上述したような大きなスケールでの環境条件、流入流出量・水温・濁度（濃度）・気象条件等の境界条件、貯水池規模・幾何形状・取（放）水口位置等の貯水池形態要素、貯留水の運動学的挙動・濁質の沈降速度・生物学的生産・消費速度等の力学的・運動学的要素など、多くのものに関係すると同時に、それらを通じて密接に関連している。

このため、貯水池における水理現象の解析法にも、その目的と対象とする現象及びそれに関係する諸要素の時間・空間スケールに応じて各種のものがある。

表－１ 貯水池における水理現象の各種スケールとその解析法

水理現象・水理特性	関係要素（環境境界条件）	時間スケール	空間スケール	用いられる解析法
水理・水文の性格 水温・水質値のレベル 富栄養化の程度 など	年間流入量，地理的位置， 地質，地形，気候条件 流域の植生及び産業構造 など	1年以上	貯水池規模以上	水温成層による定性的分類 平均年回転率 平均的内部フルード数 Vollenweiderの富栄養化指標 など
水深方向の水温分布特性 濁度を除く水質分布特性 など	気温の季節的変化 流出入水温の季節的変化	季節あるいは月	貯水池規模	システム解析法
平常時の水温・ 水質値の変化など	流出入流量，流出入水温・ 濁度・濃度，気象条件の 日平均変化	数日～1週間程度	水深方向に1～数m 流れ方向には貯水池長 あるいはそれ以上	二層流・三層流モデル 鉛直一次元多層モデル
成層破壊時を除く洪水期 の水温変化 洪水後の貯留過程におけ る濁度変化 植物プランクトン異常増 殖時の各種水質変化 など	同 上	1日程度	流れ方向に1～数km 水深方向に1～数m	鉛直一次元多層モデル 二次元モデル
洪水期における濁度・濃 度の流下伝播過程 成層破壊時の水温変化 表面水温の日変化 など	洪水期の流量・濁度・濃度， 気象条件の時間変化	1時間 あるいはそれ以下	流れ方向に100～ 数百m あるいは それ以下 水深方向に1～数m あるいはそれ以下	

そこで，貯水池における各種の水理現象をその時間・空間スケール及びそれらの対応関係から整理し，さらに各スケールに応じた解析法についてまとめてみると，表－１のようになると考えられる。

このうち，冷水・濁水長期化・富栄養化の課題を定量的に論ずるためには，表－１の下から3つ目までのものを取り扱う必要がある。すなわち，これらを取り扱う貯水池水理では，通常，コントロール・ボリューム法を用いてそれぞれの空間的スケールに応じた解析が進められることになる。したがって，まず，これらの現象の空間的变化特性とそれに関連する時間的变化特性とを正しく把握し，それに基いた貯水池分割を考えることが，重要になる。以下ではこの点について検討を進める。

3. 貯水池濁水現象の空間的变化特性とそれに基く貯水池分割法

ここでは，成層型貯水池に分類される那賀川水系長安口貯水池における昭和52年～53年にかけての期間に生じた濁水現象のいくつかの例を用いて，既存の実測資料から得られる範囲内で上述の検討を行なうことにする。

表－２ 実測資料の各種スケール

資料項目 \ スケール	時間スケール	空間スケール
流 入 出 流 量	時間平均値 日平均値	取水口及び洪水吐 での各流量
貯 水 位	時間平均値 日平均値	ダム地点 1ヶ所
流 入 水 温	1日単位 (定時観測)	本川上流部で数km 毎に数ヶ所
流 入 濁 度	1週間～10日毎	本川上流部で数km 毎に数ヶ所
水 温 分 布	約 10 日 毎	流れ方向に約 1km 水深方向に 2m
濁 度 分 布	約 10 日 毎	流れ方向に約 1km 水深方向に 2m
水 表 面 水 温	1日単位 (定時観測)	ダム取水口地点 1ヶ所
水 表 面 濁 度	1日単位 (定時観測)	ダム取水口地点 1ヶ所
気 象 関 係 〔気温・日照時間〕 〔湿度・風速・雲量〕	日 平 均 値	ダム周辺観測所 数十kmの範囲 一部ダム地点

まず，得られている実測資料の計測スケールについて整理しておくと，表－２のようである。表－２と表－１とを比較してわかるように，実測資料はいま問題とする現象の時間的・空間的変動の各スケールに応じて十分なものが得られているとはいえないところがある。したがって，ここでは表－２に示した資料の計測スケールより小さなスケールのものを考察の対象にはし得ないことを断っておかねばならない。この実測資料の計測スケールの問題についてはまた後にふれることにする。

さて，長安口貯水池における昭和52年4月～昭和53年5月の期間における濁水現象の状況を，表－１にあげた水表面濁度の変化でみると図－1のようである。図－1には，同地点における約10日

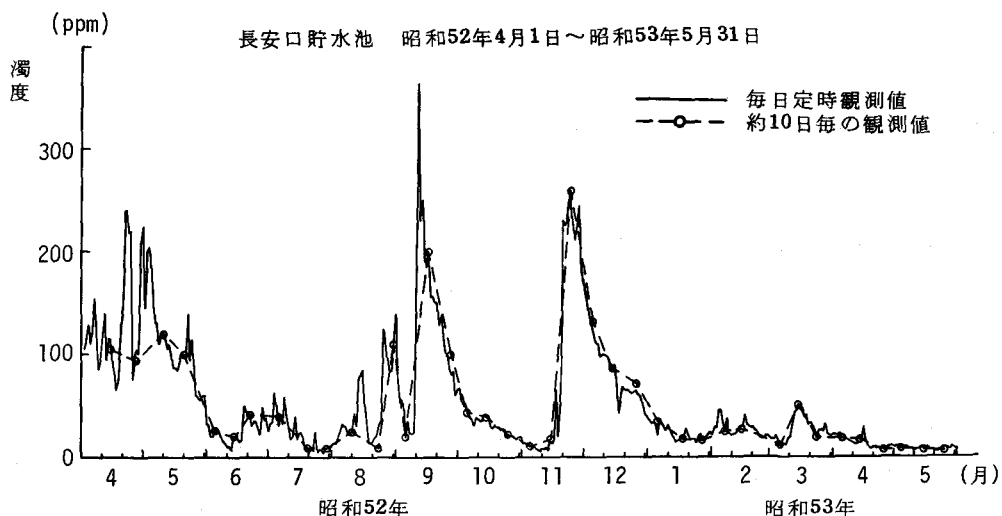
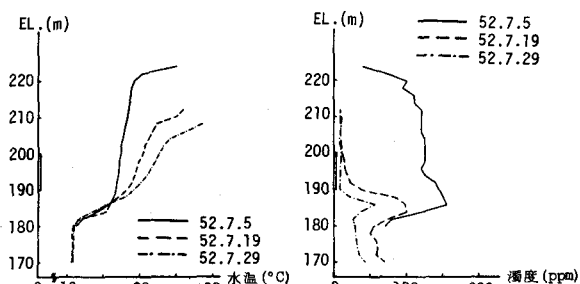


図-1 長安口貯水池における水表面濁度の時間的変化

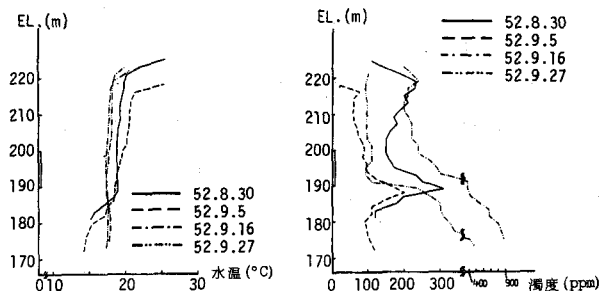
毎の濁度分布資料の値からみた変化も同時に示している。この2つのものを見比べたとき、濁度変化の時間的スケールに関しては次のことが言えよう。

- 1) 洪水時及びその直後の期間においては、1日あるいはそれ以下のスケールの変動が大きく、支配的である。
- 2) 洪水後しばらく経過した後の濁度の低減期間では、1日以下の短いスケールの変動は小さく、数日から10日程度のスケールでみれば十分その変化を把握できる。とくに、水温成層が破壊され貯水池全体が濁水化した52年9月半ば以降及びその後の冷却期におけるものではその傾向が顕著である。

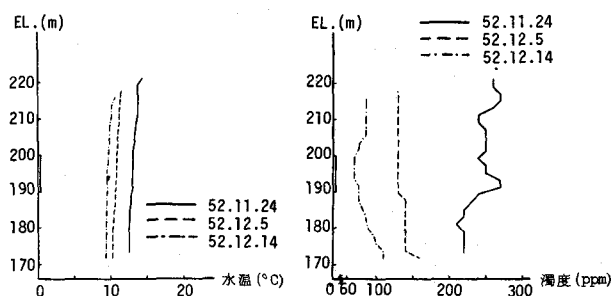
つぎに、図-1に示した濁水現象の空間的分布特性について調べるため、対象期間を水温成層期、その変形・破壊期、水温一様期（冷却期）の4つに分け、各期間における洪水後の水温・濁度分布例を水深方向について示したものが図-2(a)～(c)であり、そのときの流れ方向の濁度変化を各標高について示したものが図-3(a)～(c)である。図-2(a)は成層期における小規模洪水の流入後の例で、これより水温成層は表層ならびに取水口よりやや深いところにあつて、そ



(a) 成層形成期

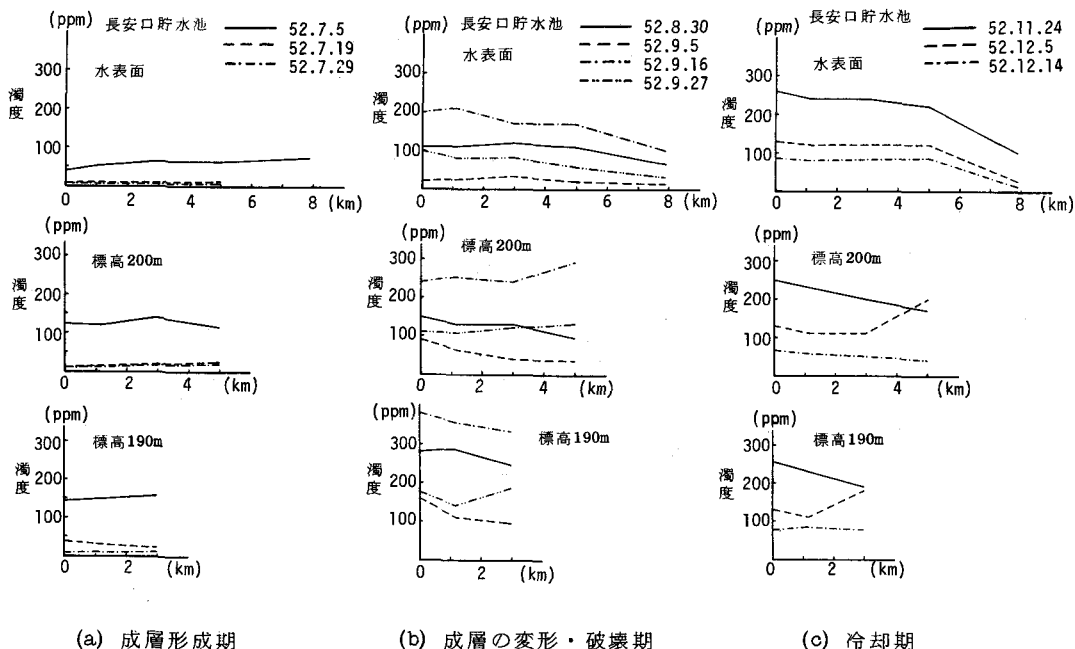


(b) 成層の変形・破壊期



(c) 冷却期

図-2 洪水後における水温・濁度の水深方向変化



図－3 洪水後における濁度の流れ方向の変化

の厚さ及び温度差はそれぞれ2～4mで4℃～6℃、4～10mで4℃～8℃であり、このとき、濁度分布は後者の変水層のところでピークをもつ形で変化し、その高濁度層の厚さは変水層のそれと同程度であることがわかる。また、変水層以外での水温・濁度変化は、洪水吐（敷高標高210m）からの放流による影響が残る昭和52年7月5日の例を除くと比較的ゆるやかで、ほぼ一様とみなしうところも少なくない。つぎに、昭和52年8月24日～25日と9月8日～9日に流入したより大規模な洪水後の例である図－2（b）では、取水口付近の水温成層がそれぞれ変形・破壊されたが、表層部には洪水後再びそれ以前と同程度の変水層の形成がみられ、これに対応して、前者の場合の濁度分布は上述した図－2（a）の例とほぼ同様の傾向を示すのに対し、後者のそれは、元の変水層の位置から水深方向に濁度が急増する形で変化している。また、図－2（c）の成層破壊後の冷却期における例では、水温・濁度分布はともに水深方向にほぼ一様であることが示されている。

一方、図－3の流れ方向の濁度変化をみると、この方向にほぼ一様な水温成層が形成されている期間の例を示した図－3（a）では、濁度も一部を除いて各標高ともにその変化はゆるやかであり、ほぼ一様とみなしても差しつかえない場合が多いことがわかる。ところが図－3（b）、（c）に示した水温成層の変形・破壊期及びその後の冷却期における例では、かなり顕著な流れ方向の変化がみられる。とくに取水口より水深の浅いところでは、貯水池上流部での変化が急で、下流部は比較的ゆるやかであるのに対し、取水口がある標高200m、190mでのそれは、下流部であってもかなり大きな変動を示すことが多いのが特徴的である。これは、相対的に流速が大きい領域、すなわち主流域で流れ方向の変化が顕著にみられると言いかえてもよいのであろう。

以上に述べた水温・濁度の空間的变化特性は、2.で述べたように多くの要素に関係しているが、これを水理学的な立場からみたとき、そのなかで重要なものは、貯水池の形態要素ならびに環境境界条件の各種特性を反映し、かつそれらに対応して熱及び濁度物質を輸送・伝播する貯留水の流れの運動学的挙動であらう。なかでもとくに、移流による熱及び物質移動に関係する流速の大きさとその分布は最も重要な要素と考えら

れる。なお、図-3に示した流れ方向の濁度変化に関しては、ダムより上流約5kmの地点に流入する高濁度の支川と、貯水位の低下に伴う貯水池上流端の移動による影響も少なくはないであろう。

既存の実測資料より得られた水温・濁度の変化特性に関する以上の考察に基いて、これらを水理解析するための貯水池分割法について考えてみると、次のようになる。

- 1) 水温成層期の変水層における水温勾配が $1^{\circ}\text{C}/\text{m} \sim 2^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 程度であり、濁度勾配は濁度の大きさにより異なるが $20\text{ppm}/\text{m} \sim 60\text{ppm}/\text{m}$ 程度であることに加え、前述した変水層及び高濃度層の厚さを考えると、これらを表現するための水深方向の分割は1mあるいはそれ以下になるであろう。水深方向の移流速度がただか数十m/日(ふつうは $10^{-1} \sim 10^0$ 程度のオーダー)であり(著者らのモデルによる計算値)、濁度の沈降速度が 4μ 粒径のもので約1.25m/日(Stokesの式)であることからしても、一日当りの水温・濁度変化を追跡する場合には、この程度の分割が必要と考えられる。
- 2) その他の期間及び領域で、水温・濁度の水深方向変化がゆるやかなときには、1)の場合より大きな分割が可能と考えられる。しかしながら、移流速度及び濁質の沈降速度を考えると、冷却期のように水深方向の混合速度が非常に大きくほぼ一様分布のときを除けば、濁度の日変化などは1m程度の分割によるのが妥当であろう。
- 3) 洪水の流入による成層破壊など非常に短い時間スケールのもの⁶⁾を取り扱うときには、空間的にも1)の場合よりさらに小さく分割する必要がある。
- 4) 水温に関しては、流れ方向の一様性及びそのスケールを考えると、3)のような場合を除けば、水平層で取り扱っても差しつかえないであろう。
- 5) 水温成層期のように、洪水後しばらくして流れ方向に濁度がほぼ一様となったときなどには、濁度も水温と同様に取り扱うことができよう。
- 6) それ以外の期間における流れ方向の濁度変化は主として移流によるものと考えられるが、洪水後流量が低減したときには、その伝播速度は主流域で数km/日程度と推測され、この領域での濁度の日変化を追跡するには、1km程度に分割する必要があるであろう。しかし、冷却期における洪水後のようにもっと長い時間スケールでの変化でも十分な場合には、さらに大きな区分をとることも可能であろう。
- 7) 洪水時及びその直後における濁度分布の詳細は不明であるが、流入流量及び濁度の時間スケールと貯水池内における移流伝播速度(数百m/時程度)とを考え合わせると、濁度の伝播・貯留過程の解析は、少なくとも100m程度の分割区分を用いて、1時間単位で追跡する必要があるであろう。

4. 濁水現象の数値解析結果からみた分割法の評価

上述した1)～7)の考察結果に基いて、コントロール・ボリューム法による現象のモデル化とそれを用いた数値解析が実施され、対象とする現象が明らかにされるわけであるが、ここでまず重要なことは、前章で述べたことからわかるように、貯留水の流れの運動学的挙動を正しく把握しようようなモデルでなければ、貯水池分割法がいくら正しくても、現象の再現は期待できないことである。ところで、実際の数値解析にあたっては、対象とする現象及び期間によって貯水池分割の大きさ、すなわち Δx 、 Δy を時間的・空間的に変えてゆくことは技術的に面倒なことが多く、上述の1)～7)に挙げたすべてのものを含む解析では、そのうちの最も小さなスケールのものに合わせて解析を進めざるを得ない。しかし、こうした解析は長時間の計算を必要とし、また実用上は不要なことも少なくない。さらに、解析に用いる入力資料の計測スケールを考えると(表-2参照)、それと解析スケールとの整合がとれないことが多い。したがって、実際の解析にあたっては、先の1)～7)で述べたような水理学的な妥当性の面からのものとは別に、現象の実用再現精度からみた分割の大きさの評価も重要となろう。もちろん、数値解析では数値解法の安定性、近似度などの面からのこれに対する議論もあるが、ここではそれは取り扱わないことにする。

そこで、この数値解析の再現精度からみた分割の大きさの評価とその違いによる数値解析結果への影響を考察するため、ここでは先に示した長安口貯水池における昭和52年8月24日～9月16日までの期間における

濁水現象を対象に、著者らの二次元水理モデル⁵⁾を用いて、 Δx 、 Δy の値をそれぞれ $\Delta x = 100\text{ m}$ 、 1000 m 、 2000 m 、 $\Delta y = 1\text{ m}$ 、 2 m 、 4 m と変えて数値解析を実施し、その結果を考察した。このうち、 Δx を変えたときの計算例を、8月24日～8月30日までの濁水の伝播・貯留過程について示したのが図-4～6である。

これらの図より Δx の大きさ、すなわち流れ方向の分割の大きさによる解析結果の違いを列挙すると

- 1) Δx が大きいほど濁水先端部の伝播が早く、濁水塊は流れ方向に分散しながら流下する傾向がみられ、表水層でその傾向がより顕著である。
 - 2) Δx が 100 m のときには 500 ppm 程度の高濁水が取水口までほぼその濃度を保ったまま到達するが、 1000 m 、 2000 m の場合には流れ方向への分散の結果、濃度の最大値は低くなる。
 - 3) 8月26日24時には、流れ方向の変化はいずれもゆるやかとなり、貯留、希釈過程へ移ってゆくが、 Δx が 100 m のときには取水口より上層部での濁度変化は依然として流れ方向に顕著である。
 - 4) 水深方向の変化が顕著となる希釈、貯留過程ではいずれもほぼ同様の濁度分布となるが、 100 m 分割では取水口からの取水の影響がより強く現れる。
- 1)～4)に述べたことは、9月8日以降の濁水現象に対してもほぼ同様にみられる傾向である。

図-4～6の各結果を実測資料と比較することは、それができないが、図-7に示す8月30日のものとの比較では、いずれも取水口よりやや水深の深いところでの高濁度層をよく再現している。しかし、それより上層ではやや濁度が高く、実測値にみられる取水による影響及び 5 km 付近へ流入する支川による影響を十分に再現していない面がある。この実際現象との定性的な面での不一致は、 Δx を大きくするほど顕著なようである。また、濁度の値自体の不一致は、流入濁度資料の不備によるところが大きいと考えられる。

つぎに、 Δy を変えた結果について要約しておくと、次のようである。

- 1) Δy を大きくするほど、水深方向への分散傾向が顕著となり、主流域の流速が相対的に小さくなるため、そこでの濁水の伝播が遅くなる。
- 2) Δy を 4 m としたときには、洪水後の高濁水層がはっきりと再現されず、それが上下に分散されたような分布形となる。
- 3) Δy が 1 m と 2 m のときでは、それほど顕著な差は認められなかった。

以上の Δx 、 Δy を変えた場合の数値解析結果より得られることは、これらの値を大きくとるほど、流れ方向、水深方向への分散効果が大きくなり、そのことが、濁水の伝播過程のように実際現象の時間的・空間的スケールが小さい場合には、計算結果に顕著な影響を及ぼすということである。しかし、この分散効果は、洪水後しばらく経って現象の変化がゆるやかとなった場合には、比較的影響が小さい。したがって、洪水時における濁水現象の詳細な追跡を必要とせず、実測資料が得られている程度の時間スケールでそれを解析すれば十分であるという場合には、先の各ケースの再現性を考慮すると、 Δx は 1000 m 程度、 Δy は $1\sim 2\text{ m}$ 程度で所要の実用精度は得られるものと考えられる。この実用精度からみた分割の大きさについては、著者らが早明浦貯水池を対象に行なった検討⁷⁾によってもほぼ同様の結果が得られている。

最後に、これまでに述べたことに基いて、数値解析を実施するために必要な実測資料の計測スケールについて考えると、それは、対象とする現象の時間的・空間的スケール及びその解析スケールに応じたものでなければならないという当然の結論になる。とくに、現象をできるだけ忠実に追跡するには、それに関係する環境境界条件の時間スケールを正しく把握し、それに応じた資料を収集することがぜひとも必要になる。またモデリングの基礎資料及び解析結果の検証資料となる貯水池内の水温・濁度分布資料についても、洪水の流入時は無理としてもその後の濁水現象では時間的にも空間的にもより詳細なスケールでの観測が望まれる。

5. 結 語

本研究では、貯水池における各種水理現象の時間的・空間的スケールとそれに応じた従来の解析手法とに

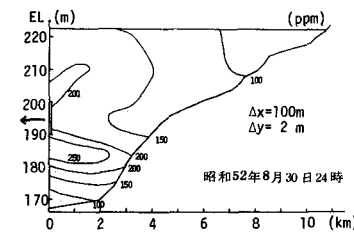
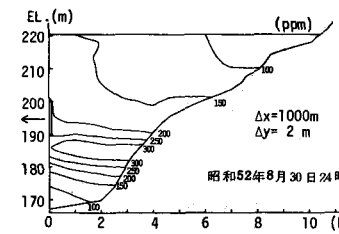
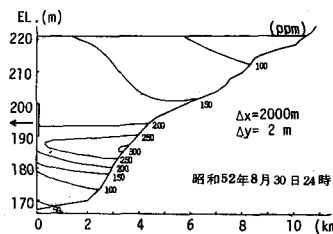
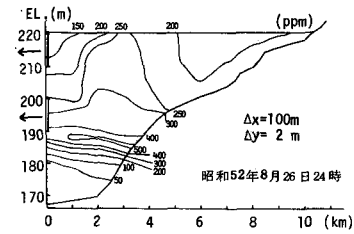
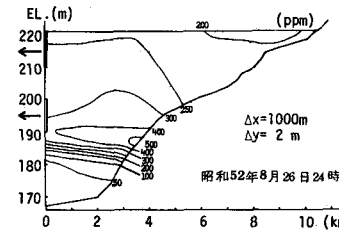
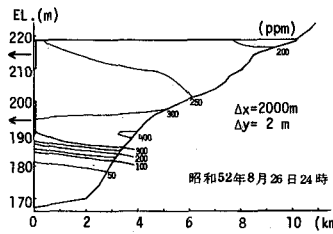
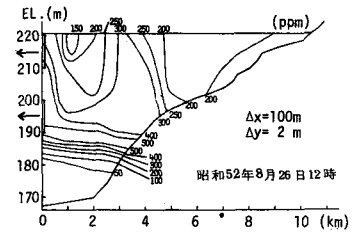
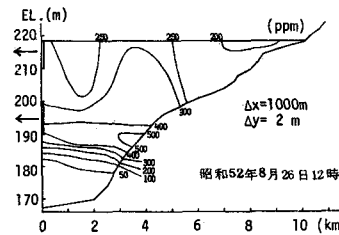
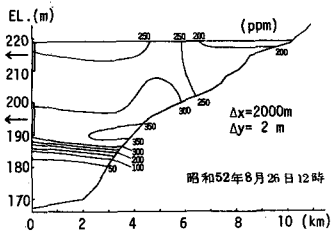
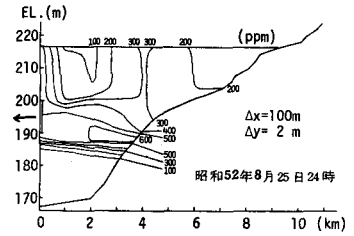
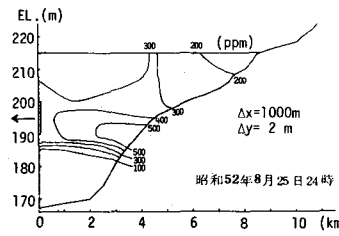
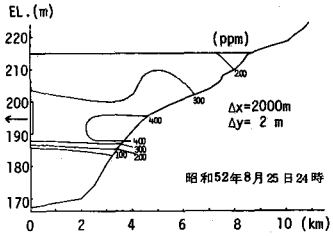
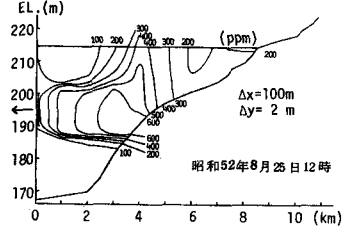
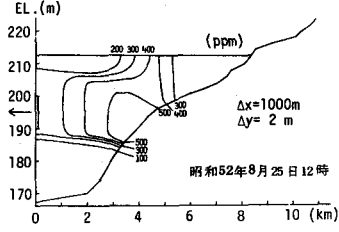
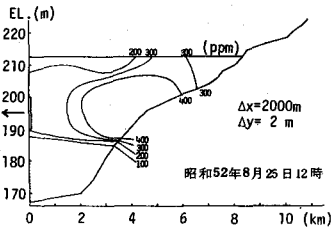
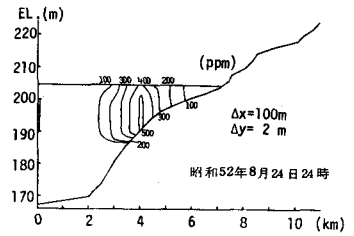
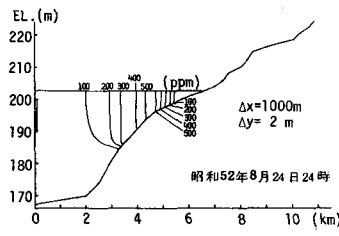
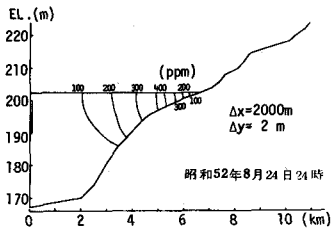


図-4 濁水現象の数値解析例
($\Delta x = 2000\text{ m}$, $\Delta y = 2\text{ m}$)

図-5 濁水現象の数値解析例
($\Delta x = 1000\text{ m}$, $\Delta y = 2\text{ m}$)

図-6 濁水現象の数値解析例
($\Delta x = 100\text{ m}$, $\Delta y = 2\text{ m}$)

ついてまとめるとともに、洪水時及びその後の濁水現象を対象に、水理解析のための貯水池分割法を検討した。その結果、移流による伝播速度と水温・濁度の空間的変化のスケールを考えると、流れ方向には濁水伝播過程で100 m程度、貯留・希釈過程では1000 m程度に分割し、水深方向にはいずれの場合も1 m程度にすることが水理学的にみて妥当であり、また、数値解析による現象の再現性の面からもほぼ同様の評価ができることがわかった。

参 考 文 献

- 1) 岩佐義朗；開水路流れのモデリング法，1980年水工学に関する夏期研修会講義集，1980年7月
- 2) Huber, W. C., Harleman, D.R.F. and Ryan, P.J.; Temperature prediction in stratified reservoirs, Proc. of A.S.C.E., Vol. 98, HY-4, 1972年
- 3) 安芸周一・白砂孝夫；貯水池流動形態のシミュレーション解析，その1，発電水力，No 134，1975年
- 4) 白砂孝夫・宮永洋一；貯水池内の濁度の二次元解析，第32回土木学会年次学術講演会講演概要集，1977年
- 5) 松尾直規・岩佐義朗；貯水池における水理特性の変化とその予測，第24回水理講演会論文集，1980年2月
- 6) 岩佐義朗・松尾直規・遠藤正昭；洪水時における貯水池の成層破壊について，京都大学防災研究所年報第20号-B，1977年
- 7) 岩佐義朗・松尾直規・井上素行；貯水池における濁度解析について，京都大学防災研究所年報第21号-B，1978年

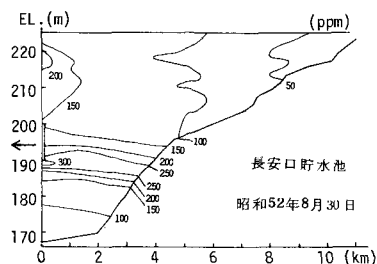


図-7 実測資料による洪水後の濁度分布