

モデル河口湖実験

永岡 乙哉*
宮沢 忠雄**

1. はじめに

水の需要は産業の発展とともに伸びて行く。工業用水にその例をとると、日本全国で昭和 33 年に 2400 万 m^3 /日を使用していたものが、昭和 37 年には 3700 万 m^3 /日となり、昭和 43 年には 6400 万 m^3 /日の需要が想定されている。このように急速に伸びている水の需要を補うため水資源の開発が大きな問題となっており、現に利水関係各省や地方公共団体が毎年ばく大な予算を投入して水資源の確保をはかっているが、通産省においても将来の水資源確保の一つの方法として河川の末端に貯水池をつくり、無効放流水を利用しようとする考えかたから河口湖開発調査計画というものをつくって、昭和 39 年度よりその基礎調査に着手してきた。河口湖を水源にして利水計画を立てようとする考えかたにはいろいろな方法があるが、技術的な問題点も多く、さらに経済的採算性を考えると果たしてこのような開発方式が可能かどうかという疑問もあり、相当の基礎研究や現場実験を重ねなければ簡単にその結論を出すことはむずかしい。

現在、日本工業用水協会に千葉県知事を会長とする「河口湖開発調査委員会」があり、河口湖開発のための技術的問題点の解明に当たっているが、ここで紹介するモデル河口湖実験も委員会の調査計画にしたがって実施されているもので、国と地方公共団体が約 1 億円の予算と 3 年の時日を費やして河口湖開発の具体的問題点を解明しようとするものである。

以下モデル河口湖実験のため千葉県小櫃川河口に設置した実験設備、現在まで実施した現場実験および室内基礎実験、また今後実施しようとする実験等についてその概要を紹介したいと思う。なにしろ本実験はようやくその緒についたばかりであり、完全な成果としてまとまった報告は得られていないので、今回はごく断片的な紹介になると思うが、読者のご了解をいただきたい。

* 正会員 通産省企業局工業用水課

** 正会員 通産省企業局工業用水課

2. モデル河口湖実験の意義

上水道、工業用水道、農業用水等の水需要増に対してそれを補うため水源開発が盛んに行なわれているが、これらは河川の上中流部に利水目的あるいは多目的のダムを設け、河川の流出量を安定化することによって水を生み出そうとするものであり、最近是有利なダムサイトが少なくなり建設費が高くなるとともに複雑な調整問題が起こることが多い。しかも今後の水資源開発の方向として、大河川の開発はもちろん必要であるが、用水の需要地に近い所では中小河川においても、河川の利用率を最大限に高める必要がある。ここで考えられたのが河口湖によって水資源を開発し、工業用水として利用しようとする考えかたであるが、こうして開発された水が工業用水として要求される性格を満たすかどうか議論のあるところであり、河口湖調査を実施している理由でもある。

工業用水として要求される水は、豊富であること、低廉であること、しかも水質が良質のものであること等の条件をいずれも満足するものでなければならない。

河口湖を水源とする工業用水が豊富、低廉なものとなり得るかどうかを検討するに当たっては、標準となるべき供給水質を定めておく必要がある。河口湖開発委員会は、この標準水質を塩素イオン濃度で 500 ppm と考え 10 年 2 位程度の湯水年において、貯水池の塩素イオンを 500 ppm に押えるため塩水の侵入防止策や貯水池操作について研究しようとするものである。そのためには、まず貯水池の塩水の侵入機構を解明しておく必要がある。そうして、侵入した塩水が貯水池の中でどのように分布し、どのような混合状態を示すかを知っておく必要がある。

農業用水を目的としたわが国の児島湾、八郎瀨、オランダの Zuyderzee 干拓、Detaplan、また水道を目的として、最近建設の始った香港の Plover Cove 貯水池などはかなりの共通点を持った計画であるが、それぞれ設

計条件等に差異もあり、学問的に未解決な問題も残されているので本実験に期待されるところが非常に大きいと思われる。

現在、河口湖開発計画をもっているところには千葉県小櫃川、小糸川、静岡県大井川、兵庫県千種川、山口県田布施川、広島県芦田川、香川県高瀬川、福岡県竹馬川、多々良川等があるが、今後の実験によってこれらの各河川で問題になるであろう一般的な技術問題に対しての解決等が示されるものと期待している。

3. 浸透池実験

浸透池実験の目的は、実際の河口湖でその規模と形式および操作方法に応じた塩水の浸透量の見積り、および浸透を防止あるいは軽減するための土質条件に応じた有効な処置方法等を見出すことにある。また滞留する水の水質の変化（とくに塩淡水の混合）や水中生物の観察などもあわせて実施しようとするものである。

本実験の順序はつぎのように予定されている。

- ① 実験施設の築造
- ② 現地盤の透水性の把握

図-1 浸透実験池

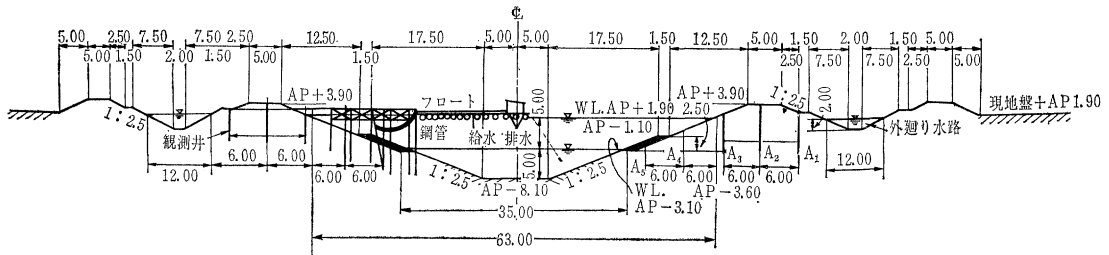


表-1 現場の土質試験表

採取深度		2.15 m ~ 2.45 m	3.15 m ~ 3.45 m	5.15 m ~ 5.45 m	8.45 m ~ 8.75 m	14.50 m ~ 15.70 m	18.42 m ~ 19.32 m
N	値	17	11	31	32	5	2
試料の種類		乱した	乱した	乱した	乱した	乱さない	乱さない
土粒子の比重		2.70	2.69	2.67	2.72	2.70	2.66
粒度	礫分 (%)	4	1	2	8	2	0
	砂分 (%)	90	91	94	88	60	20
	シルト分 (%)	6	8	4	4	25	52
	粘土分 (%)					13	28
	最大径 (mm)	2.0	2.0	2.0	0.40	5.0	2.0
度	60% 径 (mm)	0.44	0.39	0.29	0.24	0.09	0.026
	10% 径 (mm)	0.10	0.10	0.10	0.095	0.004	
透係数	定水位法 (cm/sec)		6.50×10^{-3}		4.32×10^{-3}		
	圧密試験より算定 (cm/sec)					$1.23 \times 10^{-7} \sim 8.38 \times 10^{-8}$	$1.04 \times 10^{-7} \sim 6.86 \times 10^{-8}$
KODANによる分類		砂	砂	砂	砂	砂質ローム	シルト質粘土ローム
コテンシスI	液性限界 (%)					---	79.2
	塑性限界 (%)					---	33.9
	塑性指数					---	45.3
自然状態	含水比 (%)	30.4	29.6	28.2	24.6	40.7	81.5
	間隙比					1.190	2.130
	湿潤単位体積重量 (g/cm³)					1.733	1.541
飽和度	飽和度 (%)					93	100
	乱さない試料 (kg/cm²)					0.572	0.419
一軸圧縮強さ	練り返した試料 (kg/cm²)						0.697
	鋭敏比						0.843
三軸圧縮強さ	内部摩擦角 (度)					$14^{\circ}20'$	$12^{\circ}00'$
	粘着力 (kg/cm²)					0.33	0.15
	試験条件					側圧1.0, 2.0, 3.0 kg/cm²	側圧1.0, 20, 3.0 kg/cm²
圧密試験	先行荷重 (kg/cm²)					不明	2.05
	圧縮指数					0.32	0.80
	圧密係数 (Po 対する)						

- ③ 塩淡水混合調査
- ④ 熱収支および水中生物調査
- ⑤ シャ水工法の検討と経済的比較
- ⑥ 貯水池の設計に関する一般的問題点の検討

上記各項目について ①, ② は昭和 39 年度において実施し, 以下は 40 年度と 41 年度で実施する予定であるが, その概要について述べると, まず実験施設は図-1 に示すような満水面の直径 63 m, 底面の直径 10 m, 深さ 10 m のすりばち型の池で, 貯水量は約 12000 m³ である。まわりに幅 12 m, 深さ 2 m の水路をめぐらしてあり, この水路に海水あるいは淡水を注入して浸透実験やウォーターカーテン実験が実施できるようになっている。また付属設備としては, 1.1 m³/min の海水供給設備と, 2.8 m³/min の淡水給水設備, および排水設備

表-2 定常揚水試験より求めた透水係数

	r (m)	h (m)	k (cm/sec)
$A_5 \sim A_1$	$r_1=22$ $r_2=46$	$h_1=9.442$ $h_2=12.115$	4.43×10^{-3}
$A_5 \sim A_4$	$r_1=22$ $r_2=28$	$h_1=9.442$ $h_2=10.377$	4.52×10^{-3}
$A_4 \sim A_1$	$r_1=28$ $r_2=46$	$h_1=10.377$ $h_2=12.115$	4.43×10^{-3}
$A_3 \sim A_1$	$r_1=34$ $r_2=46$	$h_1=10.984$ $h_2=12.115$	4.01×10^{-3}

図-2 池内塩分濃度の変化

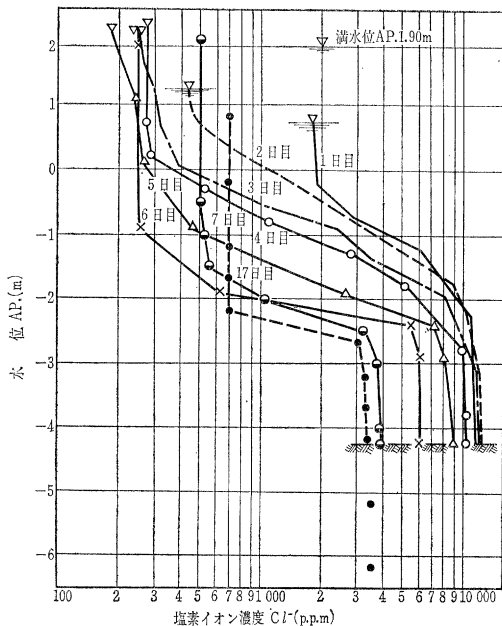
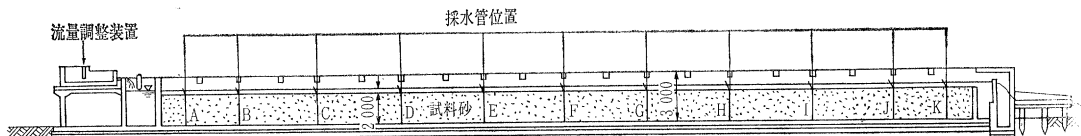


図-4 拡散実験池



が備えられている。

浸透池の掘削にかかる前にこの地点の土質調査を行なっておいたが, その一つを表-1 に示す。また, 現地盤の透水性を明らかにするために, 定常揚水試験と非定常揚水回復試験を行なった。定常揚水試験の結果 Thiem の平衡式から k を求めた結果は表-2 のとおりであった。 $A_1 \sim A_5$ は図-1 に示される観測井 r_1, r_2 は池中心から観測井までの距離, h_1, h_2 は飽和滞水層の厚さを示す。その結果は表-2 の室内試験の結果と大体一致しており, 現場の深さ 10 m 以浅の地盤透水係は 4×10^{-3} と考えられる。

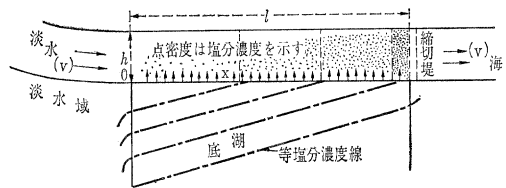
浸透池は 3 月 27 日に揚水回復試験を打切って淡水を注水したが, その後の池内の塩分濃度分布は図-2 のようである。図-2 によると, 当所水深 2~5 m にあった塩分濃度の躍層がしだいに低下して 4~5 m の間で安定した躍層を形成しており, その後の測定でもこの層はほとんど変化していないことがわかっている。この観測はさらに 9 月まで続けられるが, 風や温度変化による上下層の混合状態等の結果とあわせて, 実際の取水方法や, 有効貯水量の決定に大いに参考となる資料が得られると思われる。

3. 拡散池実験

塩分の拡散については, 京都大学の奥田教授が児島湖の河川延長部について定量的な解析を試みておられる。

この理論によると, 池を二次元的とし一方から v の流速で単位幅当り $h \cdot v$ の流量があつて x 方向に流れ, 池底より拡散塩分をとりさつて行く過程を考えている。

図-3 奥田理論の説明



拡散池実験は奥田理論にもとづいて塩分の拡散機構を解明しようとするものであり, 同時に流水のない状態の分子拡散, 奥田理論で取り扱っていない under ground water による塩分の運搬等について, 実験資料にもとづいて解析をしようとするものである。

本実験の設備は 図-4 に示すような長さ 50 m, 断面 $2\text{ m} \times 3\text{ m}$ のコンクリート水路で, 2 m の深さまで砂を填充し, $2.8\text{ m}^3/\text{min}$ の淡水を流すことができる。図中 A, B~K 等は砂中の塩分濃度を調べるための採水断面で, 1 断面につき 18 個の採水管がとりつけられている。

実験は本年 3 月より始め, ごく短期間ではあるが流水中に対する塩分の拡散を調べ, 現在は静水に対する拡散実験を行なっている。静水実験は水路を 5 つに分割してそれぞれ異なった条件で 8 月まで観測し, それ以降はまた流水実験を行なう予定である。3 月に行なった流水実験の結果を 図-5, 6 に示す。図-5 は A, F, K の各断面 (図-4) における 145 時間後の砂中塩分濃度の変化を示し, 図-6 は F 断面における塩分濃度の時間的変化を示している。これらの図から見ると拡散はかなり早い速度で進行し, しかも水路の中央部においてとくにいちじるしい。これは砂中を流れた伏流水による塩分の搬出によるものと考えられるが, 実験条件等に多小の疑問もあるので今後の実験と解析の結果を待ちたい。

図-5 砂中塩分濃度の流路方向における変化

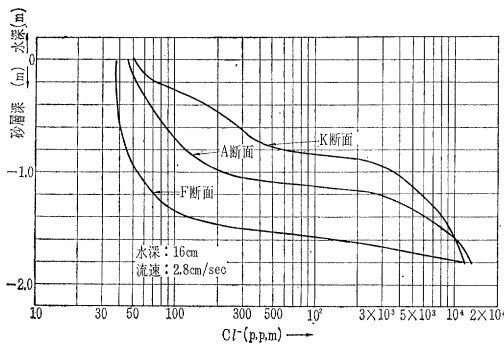
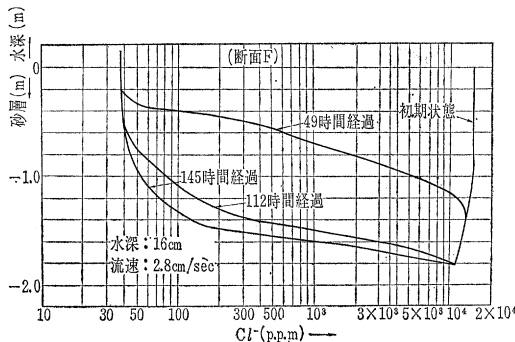


図-6 砂中塩分濃度の時間的变化



4. 室内基礎実験

モデル河口湖調査計画の一環として実施してきた室内基礎実験と解析について, その一部の概要を報告する。

これらの基礎研究は東京大学土木工学科河川研究室, 中央大学土木工学科土質研究室等で担当されなお実験研究を継続中であるが, 中間報告書が発表されているのでその要約を転載する。詳細については参考文献を参照いただきたい。

(1) 浸透防止工法に関する基礎的研究

本研究は東京大学土木工学科河川研究室に担当していただいたもので, その内容は,

- ① ウォーターカーテンに関する理論的研究
- ② 砂模型による塩水の非定常運動と, それにとりま塩分の拡散の実験およびその理論
- ③ ヘルショー模型による塩水の非定常運動, およびウォーターカーテン効果の推定

である。

a) ウォーターカーテンに関する理論的研究

ウォーターカーテンは 図-7 (A) によって示されるように, 貯水池 A より B に浸透流がある場合, 堤防上の

図-7 ウォーターカーテン説明図

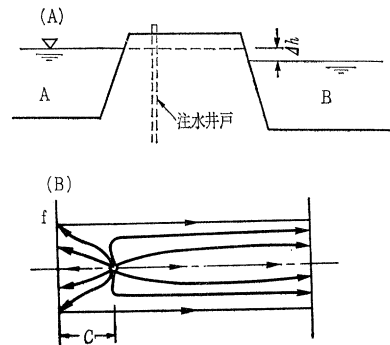
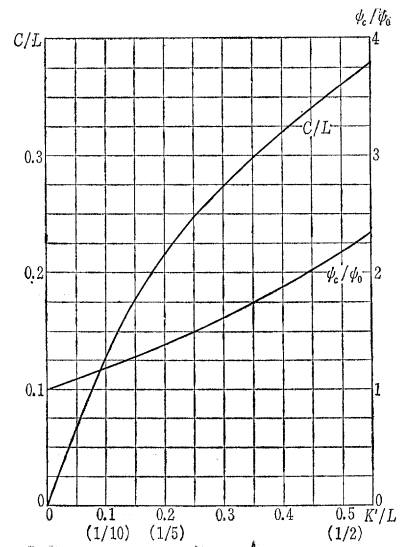


図-8 注水量と井戸の位置の関係



注水井戸または溝より水を注入することによって浸透する水流を防止しようとするものであるが、この場合の貯水池Aより貯水池Bに浸透流の生じない限界状態を示す流線の平面図は 図-7 (B) で示される。このような限界状態の生ずる条件は、井戸のピッチ B 、堤体の幅 L 、A、B 両貯水池の水位差 $4h$ 、井戸の径 r 等によって支配されるが、このときの $\frac{\psi_c}{\psi_0}$ (ψ_0 は井戸の注水量、 ψ_c は井戸のない場合の浸透量) の最小値に対して K'/L ($K'=B/2$) および C/L の関係で図示すると 図-8 のようになる。一例をあげると、堤防幅の $1/5$ の間隔に海側より堤防の $1/5$ の距離の所に井戸を設置し、浸透量の 1.5 倍の淡水を注入すれば、海水の浸透を防ぐことができる。

b) 砂模型に関する研究

実験装置は幅 20 cm、長さ 1.8 cm のプラスチック ピーズを入れた水槽と、両側にベッド コントローラを置いて、淡水塩水の水位を自由に調整できるようにしている。塩水くさびの進入状況は電極を水槽内にそう入してペン書きオシログラフにて記録させた。

実験結果を示すと、地中において定常状態に達した塩水くさびの形状の一例を 図-9 に示す。またくさび先端の進入速度の一例を 図-10 に示す。図中の曲線 A は自由水面を放物線と仮定したときの理論解であり、曲線 B

図-9 堤体内の塩水くさびの非定常運動と理論

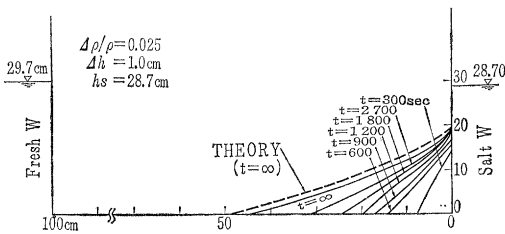


図-10 塩水くさび先端の侵入速度

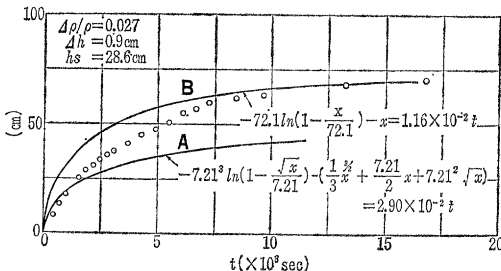
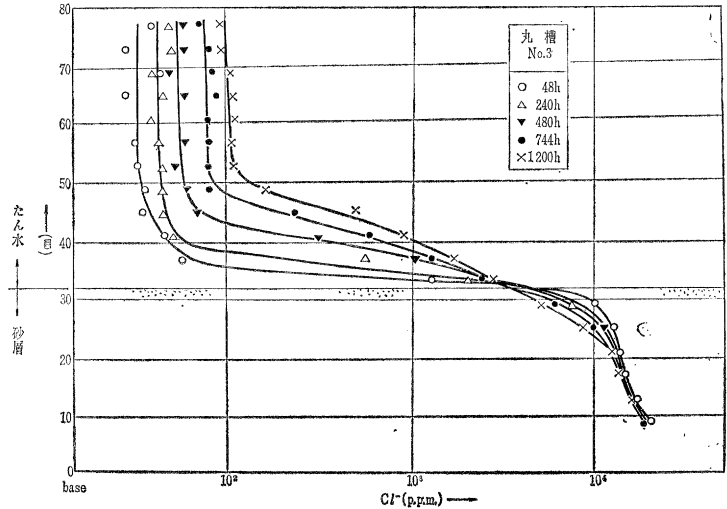


図-11 塩分濃度分布の時間的变化



はこれを直線と仮定したときの理論解である。これらの図より、定常状態のくさびの形状は理論計算とよく一致することがわかる。またくさびの進入位置は、時間の経過が小さいときは自由表面が放物線の場合の、時間が経過した後は直線の場合の計算によって近似できることがわかった。なお、ヘルショー模型による実験は目下継続中である。

(2) 砂中塩分の拡散に関する基礎実験

本実験は中央大学土木工学科土質研究室に依頼しているもので、昨

写真-1 拡散実験水槽



年は流れをともしなわないうゆる分子拡散現象のみを対象として実験していた。

さらに対流的拡散(分散)、渦拡散(混合)現象についての考察も合せて行なった。今後は、池内の水の流動にともなう生ずる砂中の流れと、塩分の拡

散についての実験と解析を行なう予定である。

実験装置は 48.5 cm × 28.4 cm 角、深さ φ 78.2 cm の水槽 (角型) 3 個と、φ 35 cm、深さ 90 cm の水槽 (3 個) で、たん水深、砂の厚さ、砂中塩分濃度にそれぞれ異なった試験条件を与えて、砂上の淡水 (蒸留水) に拡散する塩分を滴定試験によって求めた。写真-1 は丸型実験水槽で、採水口が 3 方向に 12 cm 間隔で取りつけてある。

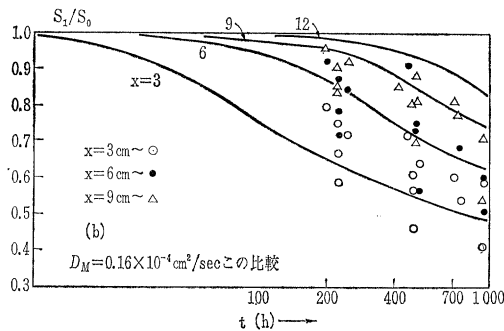
図-11 は丸型水槽の一つの砂中および水中の塩分濃度分布を示す。6 つの実験水槽について 図-11 と同様な塩分濃度分布表をつくって検討して見た結果、つぎのことがわかった。

① 砂層表面上の濃度 (S_b) はほぼ時間によらず一定である。 S_b は t が小さいときは大きい、 t が大きくなってもそれほど減少せずほぼ一定と見られる。初期塩分濃度 S_0 との比 S_0/S_b を計算すると大体 3.0~3.5 の間にあって、その平均値は 3.27 であった。これは理論解とほぼ一致する。

② たん水中と砂層中で曲線の勾配が異なり、砂層表面がその不連続点となっていることが認められる。砂層上と水中の勾配の比は平均 2.07 で、ほぼ 2 に近い値となった。

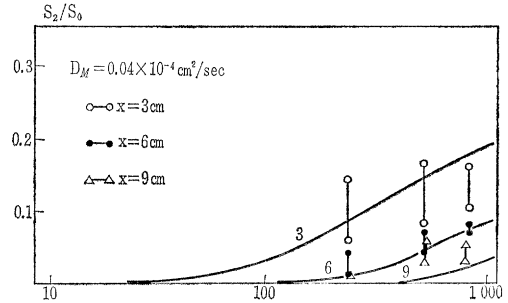
③ たん水深、砂の厚さを変えても本実験 (1 200 ~ 1 600 時間継続) のようなスケールについては拡散の度合が小さく、深さの影響はほとんど効いてこないことがわかった。

図-12 実測分布と理論分布の比較 (砂中)



また、砂中塩分濃度とその初期濃度との比 S_1/S_0 の理論分布と実測値の分布を 図-12 に示す。図-12 から見て拡散係数を $P_M = 0.16 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$ とすると理論値と実績が大体一致していることがわかった。図-13 は水中塩分濃度と S_0 との比 S_2/S_0 の理論値と実測値を比較したものである。図-13 で見られるように砂中の場合にくらべて実測値のばらつきが大きく、 $x = 3.6 \text{ cm}$ のところでは $D_M = 0.04 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$ の程度であり、 $x = 9 \text{ cm}$ になると $D_M = 0.10 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$ となる。すなわち砂中で測った場合にくらべて、水中での D_M は約半分程度となっている。このことは一見矛盾しているよ

図-13 実測分布と理論分布の比較 (水中)



うであるが、実験誤差や測定濃度範囲が 100~1 000 ppm 程度の小さい範囲であるために、初期条件のわずかな差が大きく響いてくることによるものと思われる。本実験においては以上のことから D_M の値を $(0.7 \sim 1.6) \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}$ とするのが妥当であると考えられる。

なお本稿で記述すべき基礎実験として「水門操作にともなう淡水二層流に関する実験」(坂出高校水理実験室担当)、「鋼矢板の浸透計算に関する解析」(千葉県工業用水部担当)、ヘルシヨ-模型によるウォ-ターカーテン工法の検討」(千葉県工業用水部担当)、「逆調扉門自動調整装置に関する実験」(国際技術協力協会担当)等の諸実験があるが紙数の関係で省略させていただく。いずれもモデル河口湖実験の一環として日本工業用水協会と千葉県が実施しているもので、いずれ今後の基礎実験ともあわせて集成し報告する機会があると思う。

5. む す び

モデル河口湖実験は、今後問題となるであろう河口湖の築造に当って、その技術的問題点の究明と、基礎資料集成为目的とし 3 ヶ年計画で始められ、ようやくその 1 ヶ年が経過した所である。今後の実験の進め方等について読者諸氏の助言を得られれば幸いと思う。終りにこの実験に協力していただいている横田周平、佐藤清一、狩野徳太郎、山口柏樹、嶋 祐之、徳平 淳、奥田節夫、岸 力、綾日出教、椎貝博美、茨木龍雄、横田一秋の諸先生方、千葉県工業用水道部の三宅康夫、高橋淳一氏および現場の実験員に対して厚くお礼を申し上げる次第である。

参 考 文 献

- 永岡乙哉：新しい水資源開発方式としての河口湖，工業用水 Vol. 43, 1964. 5.
- 奥田節夫：児島湾塩分濃度調査資料，1960. 10
- 東京大学工学部土木工学科河川研究室：昭和 39 年度河口湖委員会報告，1965. 4
- 中央大学工学部土質研究室：昭和 39 年度河口湖委員会報告，1965. 4

(1965.6.1・受付)