

光電堆積計の試作と天ヶ瀬貯水池に おける水文観測（序報）

金 成 誠 一

EXPLORATORY STUDY OF A PHOTO-ELECTRIC SEDIMENT METER AND ITS APPLICATIONS TO DEPOSITS SURVEY IN AMAGASE RESERVOIR

Preliminary Report

By Seiichi KANARI

Synopsis

This report describes a photo-electric sediment meter capable of determining the thickness of deposited sediment in lakes or reservoirs, and of transmitting the data electrically through the cable to the shore. From the results of test, it was found that the accuracy of the sediment meter was about 10 per cent of the working range, 4.8 cm. The results of preliminary survey were shown together with the additional hydrological conditions in Amagase reservoir.

1. 緒 言

近年、我国においては洪水調節をかねた多目的貯水池が各地で建設されつつあるが、その建設には莫大な費用を要するために経済的な見地から貯水池の寿命を予測することはきわめて重大な問題となっている。一般にこうした貯水池は急峻な山間部を流れる河川の一部を利用して建設されるために、河川により運搬されてきた土砂が貯水池内に堆積して次第にその貯水容量を減じ、場合によっては約10年位で初期の貯水容量の90%が土砂で埋没し、本来の機能をうしなつて幾多の災害を誘発するという例がすくなくない。

したがって、貯水池にどの程度の堆砂が生ずるか、あるいは大量の流入水があるとき、それによってどれくらいの土砂が貯水池に搬入されるかを推定することは経済性ならびに防災科学の見地からもきわめて重要である。

貯水池内の堆砂機構に関する理論ならびに実験的研究はすでに多くの人達により進められているが、現象がきわめて複雑であつて不明な点が多く、堆積量を的確に予測するまでには到っていないようである。こうした問題がまだ解明されない状態にあるのは、これまでに堆積厚を正確に測定する適当な方法がなく、そのために堆積現象の *fine structure* を把握することができなかったことにも原因の一端があるように思われる。

貯水池内の堆積厚の測定には音響測深法を利用するのが現状で、こうした測深器の精度を考慮するとき、数センチメートル以上の堆積厚、したがって精々堆積の年変化をとらえうるにすぎず、短期間の堆積率（堆積の速さ）の測定などはとても期待できない。

以上のような考察にもとづいて、著者はこうした問題に対する *approach* の一環として、光電堆積計を試作

し、天ヶ瀬貯水池でその性能試験を行ない、それと平行して貯水池の水理観測を行なったのでその結果について述べる。

2. 堆積計の概要

この堆積計の測定原理はきわめて簡単である。測定素子は棒状のシリコン光電池（幅 6%, 長さ 21.8% の光電変換並列素子 3 個〔早川電気製 SRC-100〕を縦に配列し、電気的には並列結合としたもの）からなり、この棒状光電池を鉛直に立て、その全面に一樣強度の光を照射する。光電池の出力電流は入射光の強度ならびに受光面積に比例するから、鉛直に立てた棒状光電池が堆積物で埋没するにつれて受光面積は減少するので、それにつれて出力電流は減少していく。ゆえにこの電流の減少する様子をあらかじめ測定しておけば、任意の場所での堆積厚を測定することができる。光の伝播がまったく妨げられないような媒質中であれば、これだけで充分であるが、実際には水中の浮遊物濃度が同一場所でも大いに变化するために光の透過状態がかわり、その影響が直接光電池の出力に現われて測定の重大な誤差をまねく。水深の浅いところでは太陽光線の強度変化が同様な誤差の原因となるので無視できない。したがって、こうした不要な要素を除去する必要がある。太陽光線の影響を除くのは大して困難ではない。光源に交流を使用すれば光電池の出力電流は太陽光線によるものと交流成分との和として出てくるわけであるが、交流成分にくらべて太陽光線による出力電流は近似的に直流成分とみなせるので、適当なフィルターによって太陽光線の影響を簡単に除去することができる。本装置では光源にフィラメント型のランプを使用しているので、あまり高い周波数の電源は使用出来ず、結局、約 1 サイクルの定振幅交流（9 ボルト〔平五、3 個直列〕の電池を定周期で自動的に切り換わるスイッチで断続させる）を光源に加え、光電池の出力側には 1 サイクルを通過帯域に含むフィルターを附加することによりこの問題を解決した。

また、水のにごりによる影響に関しては、堆積測定用の光電池のほかに、その場所の濁度を測定するための光電池を余分に設置して水のにごりによる堆積計出力の誤差を補正するという方法をとった。Fig. 1 に上述の要領で設計した堆積計の概略図を示す。光源ならびに棒状光電池は 14cm の間隔をおいて基板上に鉛直に立ててある。光源への電源供給ならびに光電池からの出力電流の伝達は約 15m のコード（必要に応じて

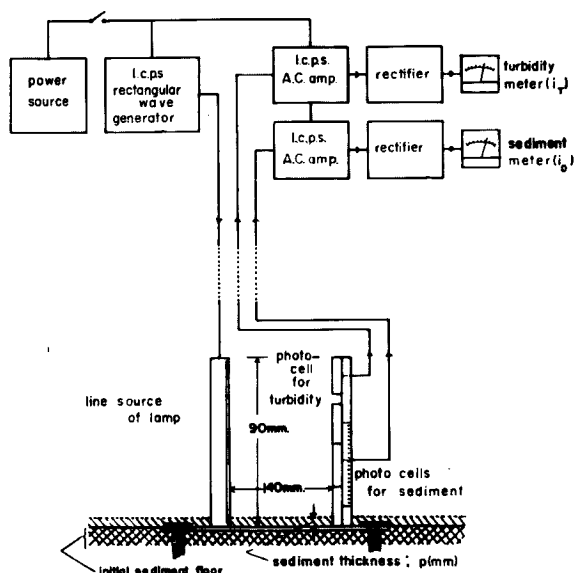


Fig. 1. Block diagram of the photo-electric sediment meter.

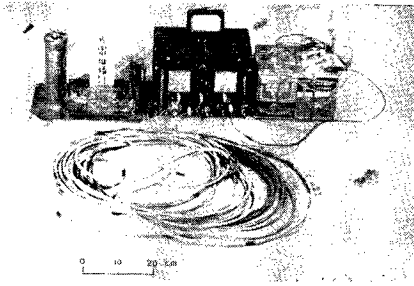


Photo. 1. General view of the photoelectric sediment meter.

もっと長いコードと換えることができる)を通じて行なわれるので、光源と光電池が固定されている基板を水中に沈めておけば、いつでも堆積の測定が可能である。(Photo. 1 参照)

Fig. 1 において光源と光電池との間の距離を x_0 、濁度補正用光電池(以下濁度光電池と呼ぶ)の出力電流を i_T 、堆積厚測定用光電池(以下堆積光電池と呼ぶ)の出力電流を i_D とするとき、基板上に堆積がなければ次の関係が成り立つ。

$$i_T = K_T e^{-(\alpha_{T0} + \alpha_T)x_0} = K'_T e^{-\alpha_T x_0} \dots\dots\dots(1)$$

$$i_{D0} = K_D e^{-(\alpha_{D0} + \alpha_D)x_0} = K'_D e^{-\alpha_D x_0} \dots\dots\dots(2)$$

ただし、 i_{D0} は堆積がないときの i_D の値であり、 α_{T0} 、 α_{D0} は

それぞれの光電池の出力電流に関する水道水中のみかけの吸光係数、 α_T 、 α_D はにごりによる減光率を表わすパラメーターである。これ等の係数には光電池の内部抵抗の影響も含まれているから、いわゆる純光学的な吸光係数とは少し意味が異なる。一方基板上に堆積があればそれに応じて i_D が減少する。この様子を水道水中で実験的に求めたのが Fig. 2 の黒丸で示した値である。ただし、Fig. 2 では横軸に堆積厚 p (mm) を、縦軸には $di_D = 100 - i_D$ をとって堆積厚 p と di_D の増減の方向を合わせてある。この結果から、堆積があるときの di_D と p の関係が次の式で表わされる。

$$di_D = 100 - 0.043e^{-\alpha_D x_0}(48.0 - p) \dots\dots\dots(3)$$

したがって、 α_D が i_T の関数として求めれば(3)式から di_D と p の関係を i_T をパラメーターにして表現することができるはずである。一般に水中の吸光係数は多くの factor の関数であってきわめて複雑な変化をするが、そうしたすべての factor を考慮することはとてもできない。そこで、貯水池における水のにごりは主として浮遊砂によるものと考え、したがって、みかけの減光率も浮遊砂の濃度によって変ると仮定する。

一方、堆積光電池に関する出力電流 i_D は(2)および(3)式から

$$\left. \begin{aligned} i_D &= i_{D0}(1 - 0.2083p) \\ i_{D0} &= 100e^{-\alpha_D x_0} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(4)$$

である。Fig. 3 により濁度光電池に関する出力電流 i_T に対する i_{D0} をみかけの減光率を explicit に含まない型で図式的に求めることができ、結局 i_D 、したがって di_D と p の関係をパラメーター i_T を用いて表現することができる。この様子は、Fig. 2 の直線群で示してある。明らかに、水のにごりが増すにつれて堆積厚 p に対する堆積指示量 di_D の感度は低下するが、この図を用いることによって Calibration の範囲内の濁水中で堆積厚の測定が可能となる。Fig. 2 の黒丸で示した実験値のばらつきは約 ± 2 mm であるが、水のにごりが増すにつれて感度が低下するので測定精度もそれに応じて悪化することが予想される。

なお、以上の実験に用いた土は天ヶ瀬貯水池上流の外畑地区で採取した底土である。実験に際しては、この底土を Mesh. 65 の篩にかけてごみを除いたあと蒸留水中に分散させて、沈降法によって約20ミクロン以上の粒径の粒子を除去し、その残りの液を使用した。この残溜液中の粒子の粒度分布は G. Simmons¹⁾ の比濁沈降法と類似の方法で求めたものであり、その結果は積算重量百分率の形で Fig. 4 に示してある。

実際に堆積計を現場に設置した場合、派生すると思われる問題のひとつに流水による洗掘作用がある。水中に沈めるべき堆積計感部は平らな基板上に垂直に2本の柱(円筒状の光源ケースおよび矩形断面の光電池支柱)を立てたものであるから、基板上に堆積した堆積物の上方に流れが起ればそれによって柱のまわりに渦が発生し周囲の堆積物は洗掘を受ける²⁾。

この影響を調べるために、堆積計を実際に宇治川に沈めて簡単なテストを行なった。実験は、それぞれ 30 cm/sec 以上および 20 cm/sec 以下の表面流速を持つ2地点を選び、それぞれの場所で堆積計を設置して

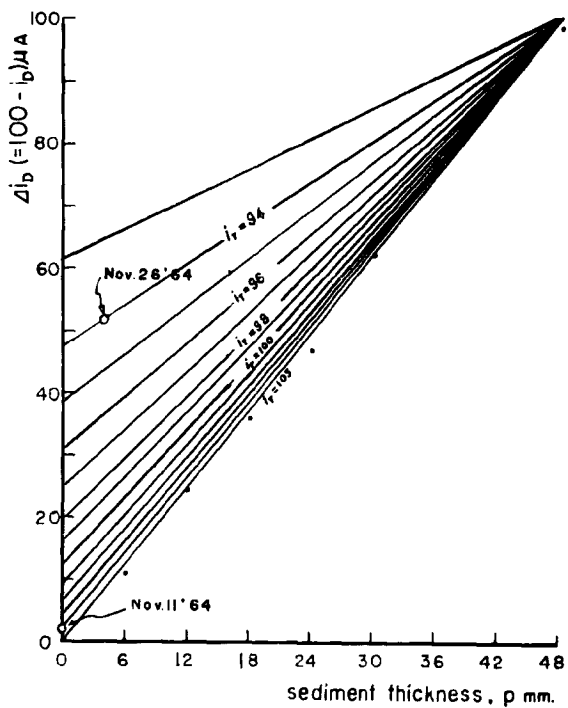


Fig. 2. Static characteristics of the photo-electric sediment meter.

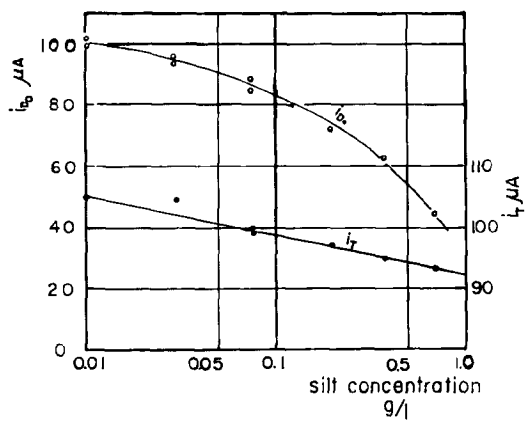


Fig. 3. Characteristics of (i_r) and (i_{D0}) to silt concentration.

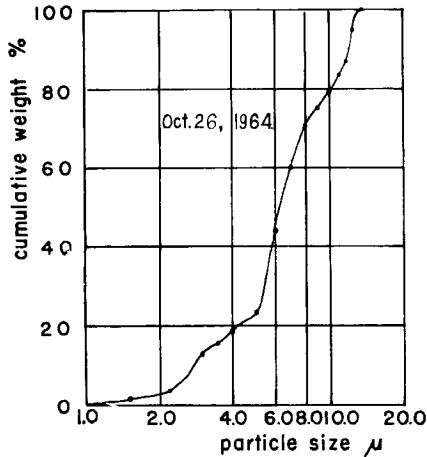


Fig. 4. Size analyses of suspended sediment in samples from Amagase reservoir near Sotohata, Oct. 26, 1954.

洗掘の発生状況を観察した。設置方法は、まずはじめに堆積計の基板が全部収まる程度の範囲で約 2 cm の深さで河床を作り、そこに堆積計を固定したあと基板上に周囲の河床面と同一の高さになるまで水平に泥を盛り上げる（この実験では 2~3cm）。この状態で約10分間放置しておくとし掘のある場合には明確な「くぼみ」が柱のまわりに発達するのがみられる。水深はいずれも約 30 cm 前後であったが、この実験の結果、流速が 30 cm/sec 以上では明らかに洗掘が起り、柱のまわり、とくに下流側で基板の露出が起るが表面流速が 16 cm/sec 以下では洗掘がまったくみられなかった。すなわち洗掘作用が起る限界流速はこの場合 20 cm/sec から 30 cm/sec の間にあるらしく、結局、この堆積計に関する限り流速が約 20 cm/sec 以下であれば堆積物に対する洗掘の影響は無視できるように思われる。もちろん、こうした洗掘の問題は、堆積物の粒度組成、柱の断面形状および流速の鉛直分布など関連づけて論じなければならないのであるが、洗掘の機構が主題ではないので、ここではこれ以上立ち入った議論はしない。

上記の洗掘作用のほかに、光源窓および光電池の受光面を構成している透明な合成樹脂板のよごれにより受光量が低下するという可能性が考えられる。しかし、これについては以下に述べる天ヶ瀬貯水池内での1ヶ月間の設置試験の結果ほとんど問題にならないことがわかった。しかしながら、この問題はさらに長期間の設置を行なって検討する必要があるものと思われる。

3. 天ヶ瀬貯水池における設置試験ならびに付加的な水理観測結果

前述の洗掘の問題と関連して、堆積計の設置を予定している天ヶ瀬貯水池内での流速分布を実際に調べてみた。Fig. 5 に同貯水池の概略図を示してある。天ヶ瀬ダムから上流の外畑までは実長約 10 km であり、水深は上流側が 3~5 m、ダムの近くで約 60 m であるが昭和34年12月末までには本格的に貯水が完了し、上流側でも約 10 m の水深になる予定である。この貯水池内に (×) 印で示すように、上流から S, A, D, B, C の各地点に観測点を設けて今年の 9 月 24 日から 11 月 26 日まで数回にわたり水理観測を実施した。この観測は流速分布以外に、今後、何台かの堆積計を同貯水池内に設置する場合に主としてどの辺に重点を置くべきかを決定するための参考資料を得る目的で、水温および濁度についても観測を実施した。観測による流速分布を Fig. 6 に示す。いずれの場合も測点 A および S では最大流速は 20 cm/sec 以下であり、その位置は表層よりむしろ中層に近い。測点 B は旧志津川ダムの下流に位置しており、この地点から天ヶ瀬ダムにかけ

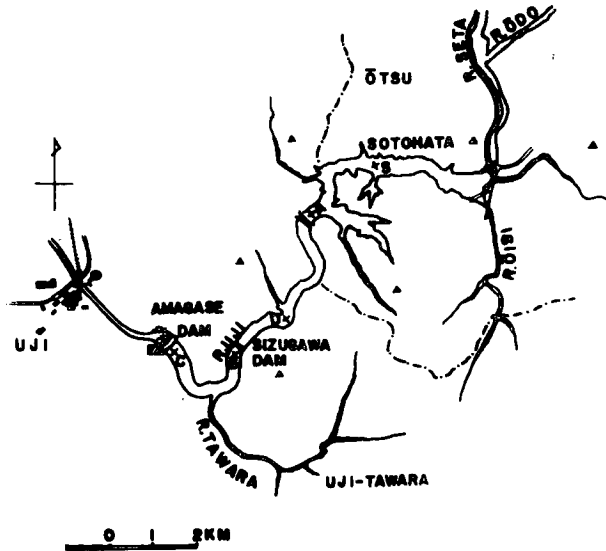


Fig. 5. Map showing Uji river arms and Amagase reservoir. (x); Stations of hydrological observation.

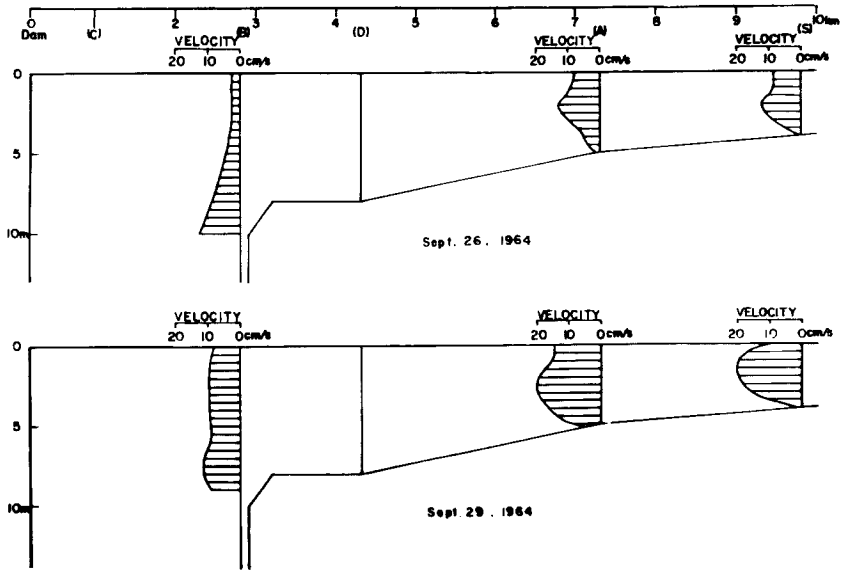


Fig. 6. Velocity distributions in a vertical section from Sotomata to Amagase dam, Sept. 26 and 29, 1964.

て水深が急に大きくなっている。ここでは底層付近に最大流速があるが、上流側にくらべて流路の断面積が大きくなるために最大流速の値自身は上流のそれよりも小さい。したがって、今回の流速観測の結果からは堆積計に支障をもたらすような底層流の存在は見出せない。しかし、こうした貯水池内では広義の密度流の発生が充分考えられ、その場合には底層でも相当強い流れが生ずるものと思われる。このような流れの現象はそれ自身きわめて興味ある多くの問題を含んでいるので、この点に関しては今後も同様な調査を続行したいと考えている。

堆積計は測点S付近の水深約 3 m のところに設置した。期間は10月26日から11月26日までの1ヶ月間であり、堆積計による測定は10月26日、11月16日および11月26日の3回にわたって行なったが10月26日の測定では水底のごりが激しく、濁度の Calibration の範囲を越えていて堆積厚を読みとることはできなかった。11月16日および11月26日の測定結果は Fig. 2 に白丸で示してある。この測定結果は11月16日まではほとんど堆積がなかったのが11月26日までの10日間で約 4 mm の厚さの堆積が起ったことを示しているが、11月26日の最終測定後ただちに堆積計を引き上げて実際に堆積計の状態を調べたところ、基板上に約 10 mm の厚さの堆積物があり、また、堆積計の光源窓の一部に水滴が附着していることが認められた。したがって、このような状態での測定値はあまり信用できず、実際、堆積計の読みから推定した堆積厚と実際の堆積厚との間には約 6 mm の差がある。部分的な水滴の付着が堆積厚の推定にどのような影響を与えたのか不明であるが、もしも、それが i_T を減少させる方向にだけ作用すれば結果的には堆積厚を実際より小さく見積ることになるし、逆に i_D を減少させる方向に作用するのであれば堆積厚を大きく見積ることになる。いずれにしてもこうした水滴付着の影響は適当な乾燥剤の封入によって容易に解決できることである。

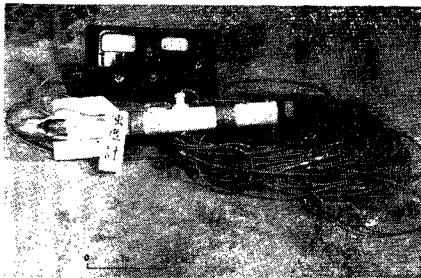


Photo. 2. General view of the turbidity meter.

以上が堆積計の試験結果であるが、これと平行して天ヶ瀬貯水池内の水温ならびに濁度の測定を行なったので以下にその結果をつけ加えておく。

測定に用いた濁度計³⁾は写真2に示すような直径約 50 mm、長さ 500 mm の円筒内部にその軸に沿って光源と光電池を約 200 mm の間隔をおいて固定したものであり、この円筒の内部を通過する濁水の減光効果からにごりを測定する。もちろん、この円筒は、水の通過は自由であるが外部からの光は入射できないように設計されている。濁度計のメーター指針は蒸留水に対してフルスケールを示す。

この状態でメーターの指針の振れが 0 の場合を濁度100%、ま

た蒸留水の場合を 0 %と定めて濁度を百分率で表わすと天ヶ瀬貯水池内のシルトの濃度と濁度との関係が Fig. 7 に示したような曲線で表わされる。この実験結果を用いて天ヶ瀬貯水池内の濁度分布をシルトの濃度分布に換算した結果を Fig. 8 (a)~Fig. 12 (a)に、また、そのときの水温分布を Fig. 8 (b)~Fig. 12 (b)に示してある。なお、9月26日の濁度および10月26日の水温は欠測となっている。9月24日の観測では測点Dにおける観測がないのでD点付近の分布は不明であるが、その他の場合はいずれも旧志津川ダムの上流部と下流部とで分布特性が若干異なっている。すなわち、上流部では支流河川からの流入水の影響が随所に現われており、部分的にシルト濃度の大きい水ならびに低温水の存在が目立っている。一方、旧志津川ダム下流から天ヶ瀬ダムの間では流入水が停滞し、常にほぼ一定した分布特性を示しており、旧志津川ダム付近で分布が不連続となる傾向がみられる。すなわち、現在のところ天ヶ瀬貯水池内の水理特性は旧志津川ダム附近を境界に上流部と下流部とに二分されており、上流部の特性はむしろ河川に近いようであるが、この点に関しては貯水完了後の調査結果をも考慮する必要があるので今回の水理観測の結果だけから今後の調査方針を決定することは避けるべきであろうと考えている。なお、こうした水理学的な量の分布特性に関する詳細については別紙で論ずる予定である。

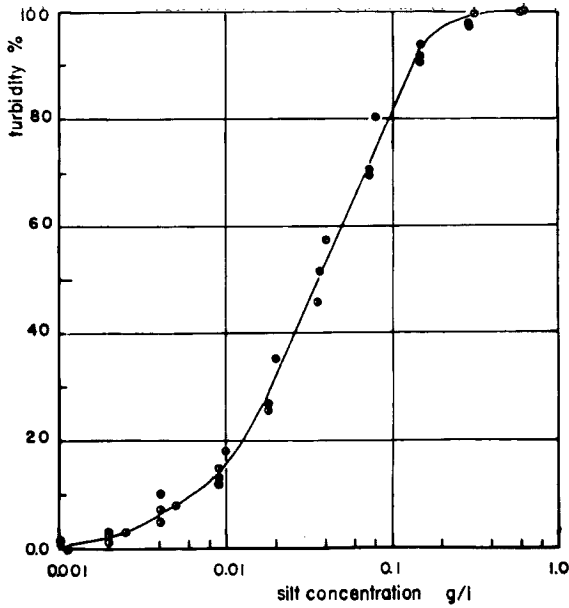


Fig. 7. Characteristics of the turbidity meter to silt concentration.

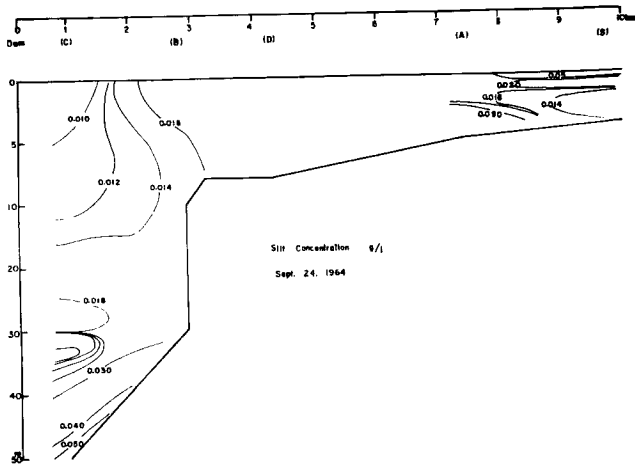


Fig. 8 (a). Distribution of silt concentration in a vertical section from Sotohata to Amagase dam, Sept. 24, 1964.

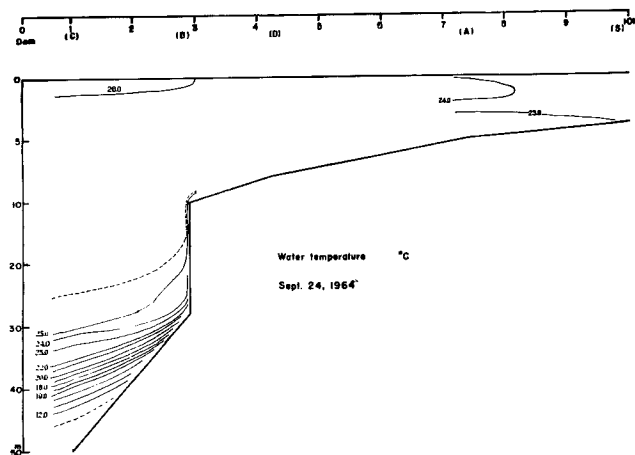


Fig. 8 (b). Distribution of water temperature in a vertical section from Sotohata to Amagase dam, Sept. 24, 1964.

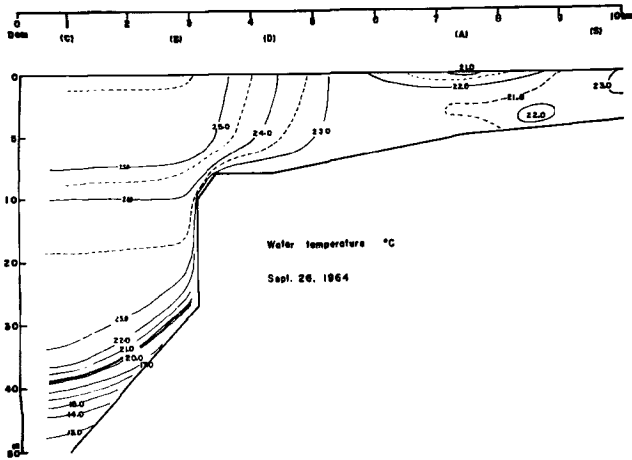


Fig. 9. Distribution of water temperature in a vertical section from Sotohata to Amagase dam, Sept. 26, 1964.

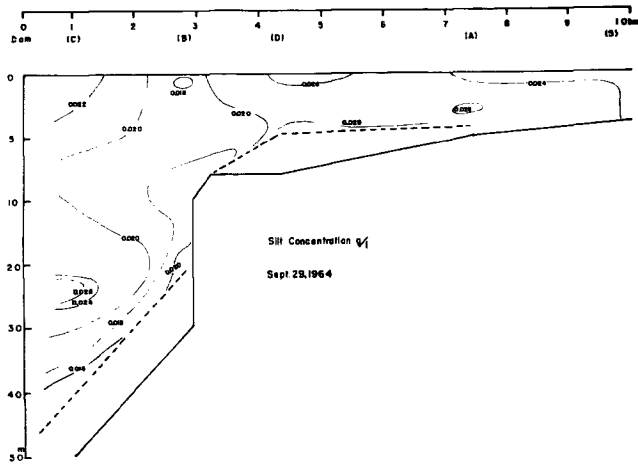


Fig. 10 (a). Distribution of silt concentration in a vertical section from Sotohata to Amagase dam, Sept. 29, 1964.

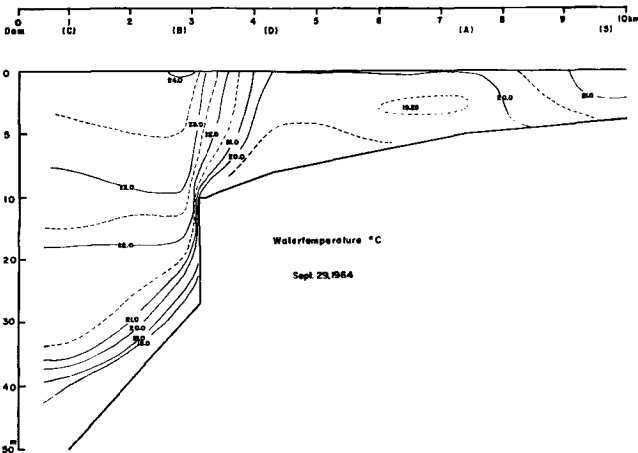


Fig. 10 (b). Distribution of water temperature in a vertical section from Sotohata to Amagase dam, Sept. 29, 1964.

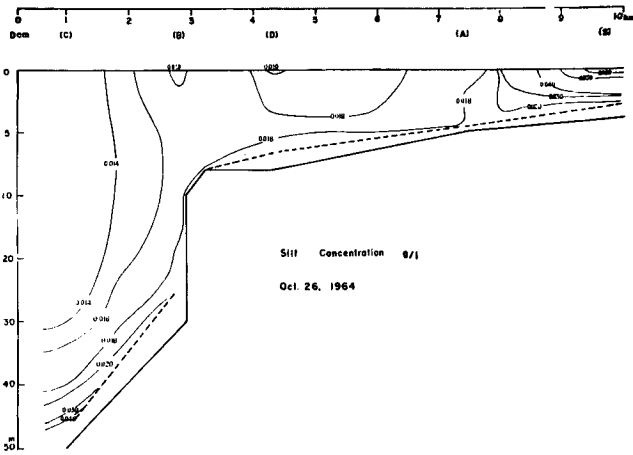


Fig. 11. Distribution of silt concentration in a vertical section from Sotohata to Amagase dam, Oct. 26, 1964.

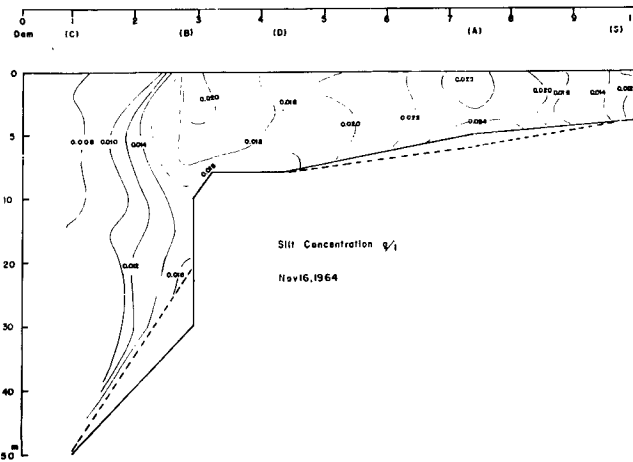


Fig. 12 (a). Distribution of silt concentration in a vertical section from Sotohata to Amagase to Amagase dam, Nov. 16, 1964.

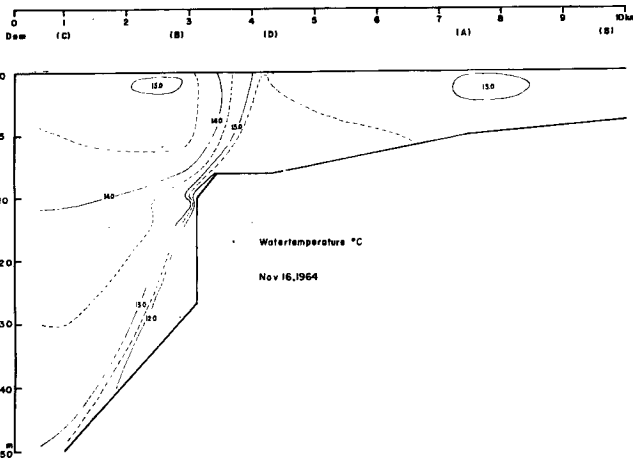


Fig. 12 (b). Distribution of water temperature in a vertical section from Sotohata to Amagase dam, Nov. 16, 1964.

4. 結 言

貯水池内の堆砂現象を究明する一手段として、光電堆積計の試作、試験ならびに天ヶ瀬貯水池の大まかな水理特性について簡単に考察を行なった。設置試験の結果、二三問題点が見出されたが、その解決はそれほど困難ではない。試作堆積計の精度は約10%であり、決して良い精度とは言えないが、従来の堆積測定方法に比較すれば、かなり詳細な測定が期待できる。その上、一度設置しておけばそのあとは陸上から堆積の測定ができるという利点がある。

現在、天ヶ瀬貯水池の周辺は工事中であって、そのために大量の土砂が貯水池内に流入しており、自然の状態での堆積測定はできなかったが、来年度から本格的な堆積測定を実施する予定である。

最後に、本研究を行なうにあたり終始適切な御指導を賜った奥田教授、堆積計および濁度計の製作ならびに観測に協力していただいた横山技術員、ならびに観測に際して幾多の便宜を計っていただいた近畿地方建設局天ヶ瀬工事事務所のかたがたに深甚なる謝意を表す。なお、装置の試作に使用した各種光電素子は早川電気工業株式会社半導体技術部長、馬場幸三郎氏の御好意により提供されたものである。

参 考 文 献

- 1) G. Simmons ; The photo-extinction method for the measurement of silt-sized particles. J. Sedi. Petrol., Vol. 29, No. 2, 1959.
- 2) 石原藤次郎編；「応用水理学」I（中），82頁。
- 3) G.E. Hutchinson ; A treatise on limnology. Vol. 1—Geography, Physics, and Chemistry. John Wiley & Sons, Inc. 1957, pp. 366.