

京都大学防災研究所 矢野 勝 正

同 芦田 和 男

同 田中 祐 一朗

1. 洪水流(波)に関する従来の研究とその問題点、洪水流に関する従来の研究は非常に多岐にわたるが、便宜上つぎのように分類して、その問題点を考察する。

(1) 流体抵抗。 (a) 抵抗係数に対する非定常性の影響、(b) 移動床水路の洪水時における河床形状と抵抗係数の変化。

流体抵抗は洪水流の運動を解析していく場合の基礎となる重要な問題であって、詳細に検討していくことが必要である。特に移動床水路において、河床形状が流量の変化に追随するかどうかの問題、洪水の上昇期と下降期における流体抵抗の変化と水位-流量曲線の画くループとの関係などの問題は未解決でありしかも興味あるところである。これらの点を検討していく上には、まずその基礎として、洪水期における実態を把握することが必要であるが、高精度の現地観測はなかなか困難であるので、詳細な実態的検討が要請される。

(2) 洪水波の伝播に関する理論的解析

河床に沿って下流向きに x 軸を取れば、開水路における不定流の運動方程式および連続方程式は、それぞれ次のように表わされる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} - g \left(1 - \frac{\partial h}{\partial x} \right) - \frac{gu^2}{c^2 R} \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial (Au)}{\partial x} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

問問題は式(1) および(2)を与えられた初期条件および境界条件のもとに解くことに帰着するが、それは困難であるので、従来より洪水流の特性を考慮しながら運動方程式に適當な近似を加えた式と連続方程式とによって解析されている。その方法を大別すると、(a) 一様進行流としての取り扱い (Kleitz Sedon)、(b) 微小変動法 (Deymie, Massé, Cagniard など)、(c) 運動方程式の加速度項を省略する方法、すなわち $\partial u / \partial t + u \cdot \partial u / \partial x = 0$ とみなす方法 (Forchheimer, Boussinesque, Kozeny, Elmer Moots, Biot、速水、矢野など)、(d) 近似的に加速度項の影響を導入する方法 (林、田中) また以上の解析的方法に対して、特性曲線法や逐次計算法によって数値計算的にまたは図式的に解く方法もある。

以上いずれの方法も一長、一短があるが、洪水波の一般的特性をかなりよく表わすという立場から見ると、(c)および(d)の方法がもっともよい。(c)の方法についてみると、式(1)および(2)より、幅の広い長方形水の場合には、

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{3c}{2} h^{1/2} \cdot \left(1 - \frac{\partial h}{\partial x} \right)^{1/2} \cdot \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{c}{2} h^{3/2} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{\partial h}{\partial x} \right)^{1/2}} \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = 0 \dots\dots\dots (3)$$

をうる。上式の一階の項の係数は伝播速度に関係し、二階の項の係数は減衰に関係すると考えられる

が、この式は非線型であるので、このままでは解けず、さらにそれぞれ適当な仮定を設けて線型化して解を求めている。このような取り扱いではいかに適切に線型化を行なうかが最も大切であり、解の適用範囲との関連においてこの問題を再検討してみる必要がある。

(d)の方法は加速度項は考慮するが、 $\partial^2 h / \partial x^2$ の項も含めてその影響は小さいものとみなし、第一近似解においてはこれを省略し、第二近似解において考慮するもので、偏微分方程式の一階の項を主要なものとみなす取り扱いである。これは一様水路における洪水波の特性をかなりよく表わすものと考えられる。しかし洪水波の減衰が特に問題になるのは河口、貯水池や合流点などのように式(1)の $\partial^2 h / \partial x^2$ の項すなわち減衰に係る式(3)の $\partial^2 h / \partial x^2$ の項の影響がかなり大きい場合が多い。こうした場合には、加速度項は省略しても、 $\partial^2 h / \partial x^2$ の項を大きく考慮する(c)の方法の方が現象をよく表わすものと思われる。

これらの問題について今後さらに研究すべき事項はつぎの諸点であると考えられる。

(a) 境界値問題としての取り扱い。従来の解析的研究においては、いずれも $x \rightarrow \infty$ において、等流状態にあるという条件のもとに、初期に与えられた変動がいかに伝播し、減衰していくかを取り扱っており、いわゆる初期値問題とみなされる。これに対して実際問題としては貯水池や合流点および河口部などのように下流端の境界条件が洪水波の伝播に直接影響する場合が多い。このような境界値問題については、その一般的特性を論ずることは非常に困難であるが、しかし検討していくべき重要な問題であろう。

(b) 河道条件の洪水波の伝播におよぼす影響の検討。貯水池における場合のように $\partial^2 h / \partial x^2$ の項がかなりの影響を持つ場合や断面が急変する場合のように加速度項がかなりの影響を持つような場合については、運動方程式の各項のorderについて再検討を行ない、これらの河道条件が洪水波の伝播におよぼす影響について一般的な考察を行なう必要がある。

(c) 洪水のピーク付近のみに着目した取り扱いが多いが、洪水調節や洪水追跡の問題の関連においては波形全体についての取り扱いが必要である。

(3) 洪水追跡

これは結局上に述べた洪水理論の適用の問題であるのでここでは特にふれないが、実際的な要請のために、さらに実用的な各種の方法が考察されていることを付記しておく。

(4) 非定常流の場合における河床変動

これは(1)の問題とも関係するが、従来ほとんど研究されていない。

2. 本装置による研究の目的

以上の諸点を実験的に検討するためには、確実に自動制御された洪水流発生装置を持つ長大水路と水位および河床を高精度で自記しうる計測装置が必要であって、従来このような装置をもたなかったことが研究の進展をはばんだ一因であろう。本研究はこうした装置を完備しその特徴を十分に生かした研究を行なうことを目的とするが、その主な研究課題を列挙するとつぎのとおりである。

(1) 従来の洪水理論の実験的検討。

(2) 境界条件が洪水源の伝播に及ぼす影響の解明。……貯水池・合流点・河口などの洪水の特徴、洪水と高潮とが組み合わされた場合の問題など。……

(3) 河道条件が洪水波の伝播に及ぼす影響の解明。……河床こう配の急変、断面の急変などによ

る洪水波の変形、貯水池や階段状の砂防ダムなどの場合における洪水波の伝播。……………

- (4) 移動床水路における洪水時の河状形状と流体抵抗の問題の解明。
- (5) 構造物による河床変動が上下流の長区間の河道に及ぼす影響の解明。
- (6) 貯水池の急激な放流などによつて生じる段波の問題の解明。

3. 洪水流実験装置

本装置は写真-1および-2に見られるように、水路本体、昇降装置、上下流低水槽および帰還水路、高水槽および量水槽、洪水発生用装置、下流部境界条件発生用装置および付属装置のサンドフィーダーおよびスクレーパーからなる。

水路本体：断面： $60\text{cm} \times 60\text{cm}$
全長：150 m の鋼製水路、下流端は境界条件の発生用のプールとして $3\text{m} \times 3\text{m} \times 1\text{m}$ に広くしてある。6 m 間隔の昇降装置で支持されており、0 ~ $1/150$ の範囲で連続的にこう配を変えることができる。満水に載荷した状態での水路のタワミ量は 1mm 以内である。

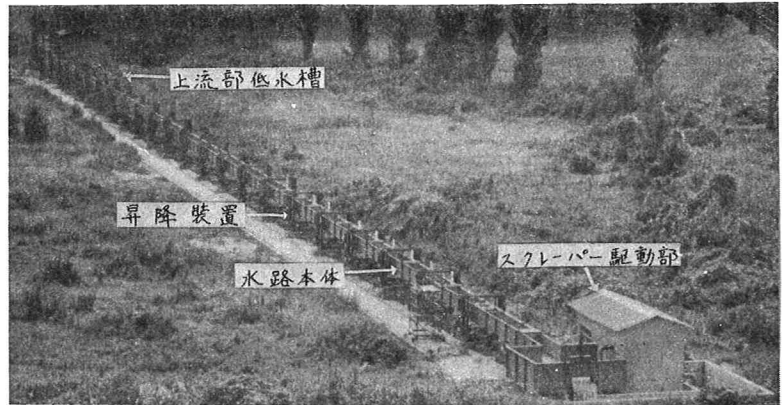


写真-1 洪水流実験装置

昇降装置：1 ストローク 5 mm のネジ棒を回転させて水路の支点を上下させる。実際に昇降させるにはウオームギヤによって回転数を18倍にした軸を1個所づつVベルトによりモーターで回転させているが、将来は連動化したいと考えている。

上下流低水槽および帰還水路：上流部低水槽は $9\text{m} \times 4.5\text{m} \times 1.35\text{m}$ 、下流部低水槽は $57\text{m} \times 2\text{m} \times 1.9\text{m}$ コンクリート製。帰還水路は内径 50cm のヒューム管。総貯水量約 80m^3 。

高水槽および量水槽：

高水槽： $2\text{m} \times 2\text{m} \times 1.5\text{m}$
量水槽： $2\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$ で $50\text{cm} \times 50\text{cm}$ の刃形ぜきを取り付けてある。高水槽、量水槽ともに鋼製。

洪水流発生用ポンプおよびモーター：内径 25cm 、20P のポンプにて高水槽に揚水し、高水槽と量水槽を連結する内径 30cm の

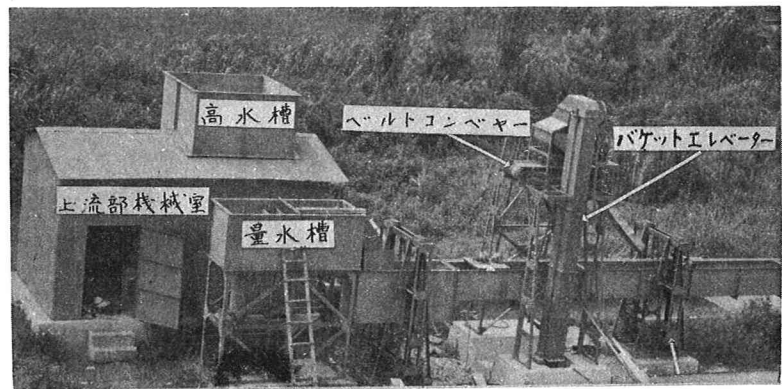


写真-2 水路上流部およびサンドフィーダー

パイプに設置された空気調節弁を自動制御して流量をコントロールする。最大流量は 100L/s である。

下流部ポンプおよびモーター：内径 10cm 、10P のポンプにて水路下流端のプールに給水する。

サンドフィーダー：一定量の給砂を連続的に行なう装置であって、移動床の実験には不可欠のものである。この装置の概要はつぎのようである。投入口に投入された砂はバケットエレベーターによって上部のホッパーまで持ち上げられる。ホッパーに貯えられた砂はベルトコンベヤーとホッパーの間隙から、シュートを伝わって水路内に投下される。給砂量の調節はベルトコンベヤーとホッパーの間のゲートの開度およびベルトコンベヤーの回転速度により行なわれ、乾燥砂重量で20 gr/s ~ 2,680 gr/sまで連続的に変化させうる。給砂量は砂の乾燥状態により、かなり変動するので、十分に乾燥した砂を使用しなければならない。それでも数%の変動は避けられないようである。

スクレーパー：水路床に均一に砂を敷き均らす装置である。スクレーパーは水路上流部に設置した駆動部のモーターによって上下流方向に6 m/minの速度で移動する。

洪水発生用自動制御装置

ここに用いているものは、図-1に示すように空気式のものであるが、別に新しいものでもないのて簡単に説明するにとどめる。

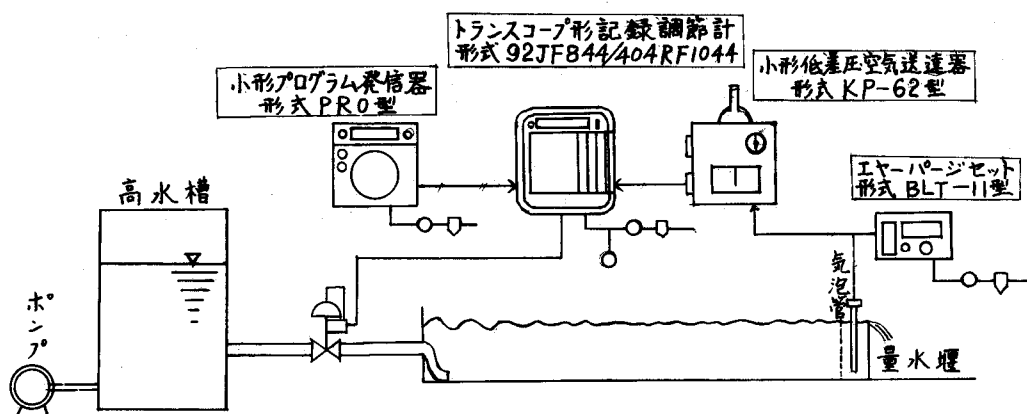


図-1 洪水発生用自動制御装置

エアーバージセットより一定圧の空気を送ると、それと並列につないだ気泡管により液面の高さに応じて空気背圧が変化するから、これを小形低差圧空気送達器で0.2~1 kg/cm²の標準空気圧に変換し、トランスコープ調節計に入れる。一方小型プログラム発信器で、与えた関数に応じて、0.2~1 kg/cm²の範囲の空気圧に変換して、調節計に入れ、両者の空気圧信号の差によってコントロール信号を発し、さらに増幅回路へ入れ、コントロールバルブを作動させる。ここでは流量目盛で関数を発生させるように、さらに特性変換器を使用している。

発生する洪水波のベースの時間は、プログラム発信器のカムの回転速度を変化させることにより、どのようにでもすることができるが、ここでは10分程度から2時間程度まで変えうるように設計した。この装置での水理的な問題点は、いままでしばしば検討されているように、検出部と制御バルブとの間の水流の抵抗および貯留による波形の変形および伝達時間であろう。これについては実際のものについて種々検討し、その結果を用いて適当な調節を行なうことが必要である。

4. 非定常流計測装置

(1) 超音波による水位および河床の計測

水位および河床の時間的な変化を正確にしかも容易に自記する装置を完備することが、非定常流の

研究を行なう上に大切である。従来より水位計についてはいろいろなものが試作されているが、河床の変化を測定する計器は比較的少ない。われわれは超音波式の測定器を用いてどの程度水位および河床変化を測定しうるかを検討し、一応満足すべき結果をえたのでここに報告する。

超音波式河床および水位測定装置の機構は図-2に示すとおりである。

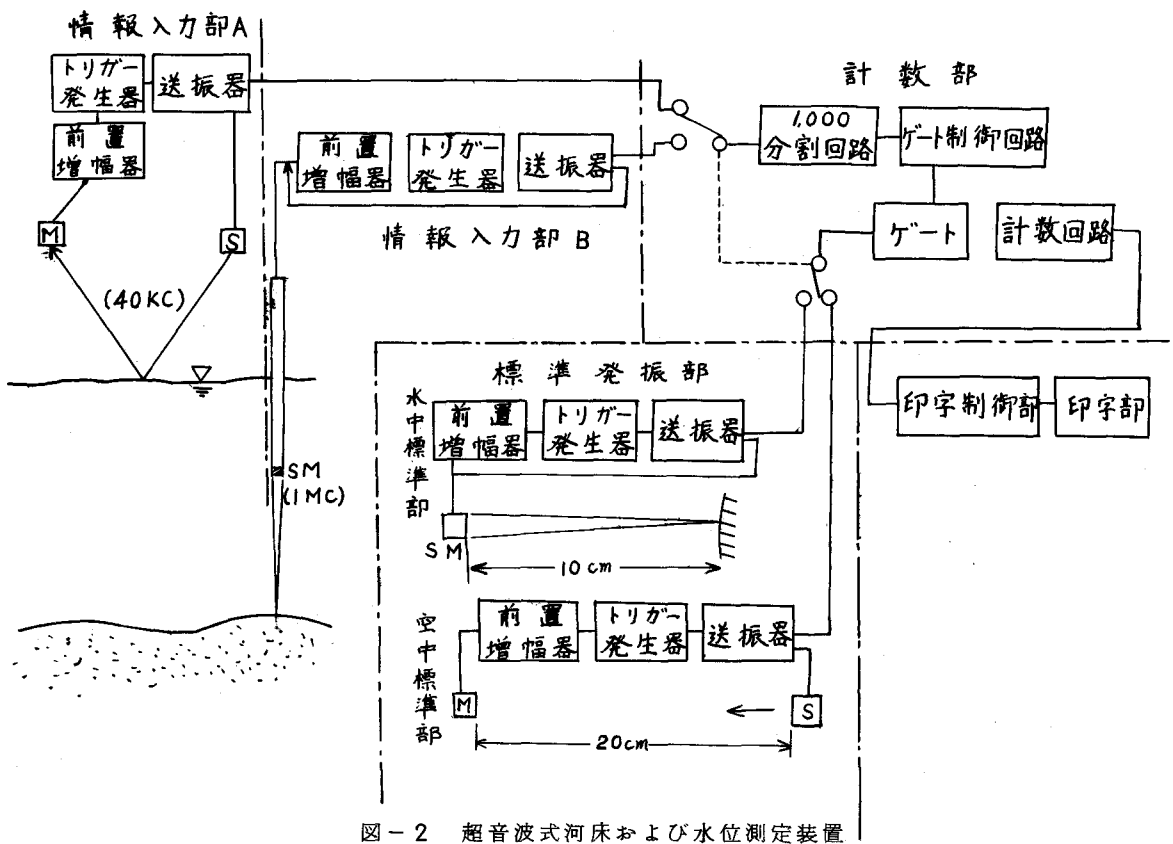


図-2 超音波式河床および水位測定装置

自走ブロッキング発振器からの衝撃波が送波器へ加えられ、水面または河床で反射して受波器にて受波され、増幅器、波形整形器を通りブロッキング発振器のトリガパルスとなる。このようにして、送受波器から水面または河床までの距離に比例した周期をもつ閉回路を形成するが、この周期によって距離を測定するものである。本装置は特に実験水路において使用することを目的としたもので、比較的短い距離(3~50cm)をかなりの高精度(誤差1mm)にて測定しうるように配慮してある。繰り返しの周波数を測定するようにしているのもこのためであり、また送波器の共振周波数を繰り返し周波数より1 order以上大きくするため水中のものは1MC、空気中のものは40KC に取られている。音速はまた温度によってかなり変化するため、標準発振部を設け、これとの比較を行なうことによって、その補正を自動的に行なわせる。測定された値は直接mm単位で印字部に記録される。印字に要する時間は、1測点(河床および水位)について、せいぜい1秒程度である。また1台の記録計で30測点程度は自動的に切り換えて記録することができるので、この程度のベッドを用いても、それぞれの場所で30秒ごとの記録をとることができる。

この装置でもっとも問題になるのは、カラ振りがどの程度生じるかということである。送波器から

の波は約 15° の拡がり
で伝わるが、このビー
ムの当たった瞬間におけ
る反射面がある程度以
上傾斜していると、反
射波は受波器に帰らず、
いわゆるカラ振りの現
象を生じる。このカラ
振りは反射面の状態に
よって定まるものであ
るがこれがあまり多い
ところの装置は使用不可
能になる。

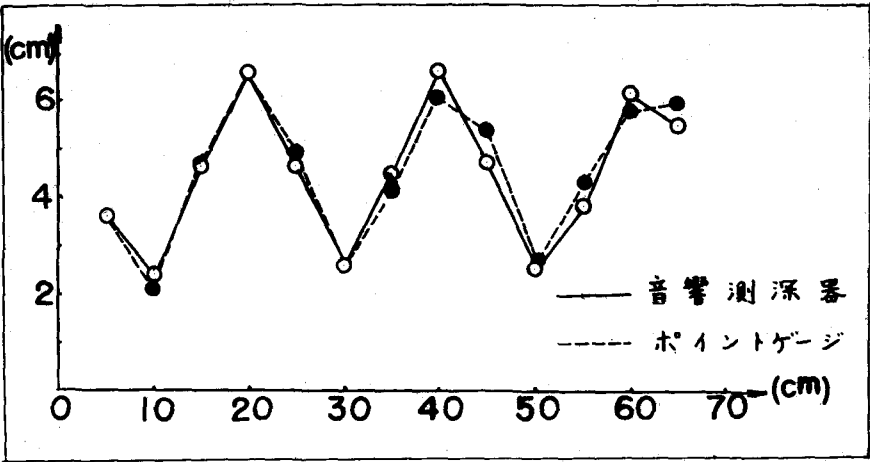


図-3 音響測深器とポイントゲージによる河床高測定値の比較

この点について2, 3の検討を行なってみた。図-3は、砂(平均粒径 0.8^{mm})で人工的な波状河床を作り、静水中において音響測定器とポイントゲージとの両方で測定した結果を比較したものである。両者はよく一致している。砂面は水面と異なり、いろんな方向に反射するからほとんどカラ振りすることもない。ただし砂と水との音響インピーダンスはあまり違わないから、反射率は非常に小さく、せいぜい $1/30$ 程度であるので、かなりゲインを上げておく必要がある。図-4は $1-1/500$ Bo-1 m の水路に $d_m=0.8^{\text{mm}}$ の砂を砂堆形状に敷き均し、 $Q=46^{\text{l/s}}$ の水流を与えた場合の河床および水位の時間的な変化を10秒ごとに記録したもので

ある。河床についてはカラ振りすることもほとんどなく、かなり良好な結果がえられたが水面については、しばしばカラ振りした。しかし値が急激に変化するので前後の関係からカラ振りかどうか知ることができる(図の黒点)浮遊流砂がかなりある場合や水面がさらに波状を呈する場合などについてどの程度の適用性があるかはさらに検討を加えなければならない

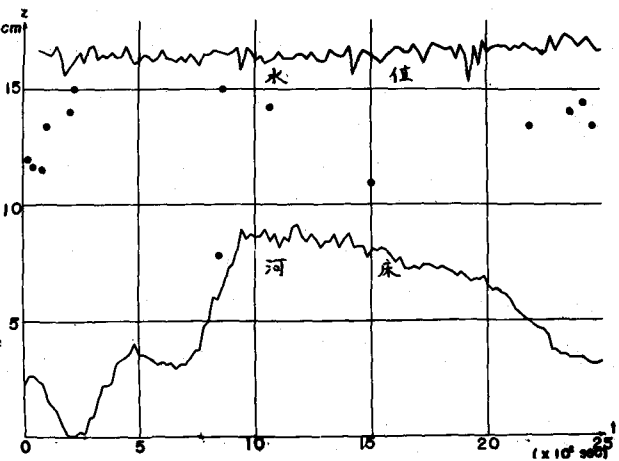


図-4 水位と河床高の測定値の一例

(2) 流量の算定
式(2)より

$$Q(x, t) = Q_0(t) - B \int_0^x \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right) dx. \text{ であるか}$$

ら、水位の測定結果によって各点の流量を算定することができる。いま h の測定誤差を 5^{mm} とみなしても ∂t を1分程度 dx を 10^{m} 程度に取れば上式による流量の算定の誤差は $0.5^{\text{l/s}}$ であるので、十分な精度で算定しうると考えてよい。

なお超音波式の水位および河床測定器は沖電気株式会社において試作中のものであり、実験に多大の労をわずらわした沖電気研究所 宮沢 久氏はじめ研究所の各位に深謝の意を表する。