

移動床水理現象の自動計測制御並びにデータ処理に関する研究

移動床現象自動計測研究グループ

(今本 博健・澤井 健二・藤田裕一郎・宇民 正・
芦田 和男・高橋 保・江頭 進治・里深 好文・
村本 嘉雄・河田 恵昭・藤木 繁男・藤原 清司・
土屋 義人・上野 鉄男・中川 一・山下 隆男・
石垣 泰輔)

STUDIES ON THE LABORATORY AUTOMATION AND DATA PROCESSING FOR SEDIMENT HYDRAULIC RESEARCH

By Study Group for Laboratory Automation in Sediment Hydraulics

(*Hirotake IMAMOTO, Kenji SAWAI, Yuichiro FUJITA, Tadashi UTAMI,*
Kazuo ASHIDA, Tamotsu TAKAHASHI, Shinji EGASHIRA, Yoshihumi SATOFUKA,
Yoshio MURAMOTO, Yoshiaki KAWATA, Shigeo FUJIKI, Seiji FUJIHARA,
Yoshito TSUCHIYA, Tetsuo UENO, Hajime NAKAGAWA, Takao YAMASHITA
and Taisuke ISHIGAKI)

Synopsis

This study was carried out as a joint work among the research sections of DPRI concerning with experimental hydraulics. Various methods and problems about the measurement, control and analysis in sediment hydraulics were discussed and some of them were improved in this study as follows:

- (1) Automatic measurements of sediment discharge including direct and indirect methods were improved. Indirect methods consist of sonar and ultra sonic image analyses.
- (2) A new measurement method of suspended load concentration using continuous pumping and weighing was devised.
- (3) A new type sand feeder for wet sand was devised.
- (4) A carriage system driven along arbitrary curves was devised and applied for the experiment on bed variation in a meandering channel.
- (5) A high-speed intelligent type carriage for the calibration of velocity meters was introduced and applied for the calibration of an electro-magnetic velocity meter.
- (6) An optical 3-dimensional bed profile measurement system using two theodolites and a personal computer was devised and applied for an experiment in an inclined wide flume.
- (7) An attachment made of paste for the ultra-sonic bed profiler was devised which extended its applicable lower limit depth to infinitesimally small one.
- (8) Picture processing by the cross-correlation was refined using CCD camera

unit and a work station and applied for flood flow analyses. This technique was also applied to an automatic tracer tracking of video image and topography analysis.

(9) A new algorithm for plane partitioning by triangles constituted by adjacent points was devised and applied to the linear interpolation of the data.

1. ま え が き

移動床水理現象を解明する上で、観測や実験の果たす役割はきわめて大きく、その効率化を図ることは重要な課題である。このために従来多くの努力が払われ、かなりの成果が蓄積されているが、なお解決すべき問題点も数多く残されている。防災研究所水理(実験)関係部門では、それらの問題点を整理するとともに、その内のいくつかについて解決(改良)もしくはその展望を得るために、移動床現象自動計測研究グループを組織し、平成2・3年度の特定研究として、本共同研究を実施した。

研究組織と役割分担を示すと次のようである。

研究代表者：今本博健

研究分担者並びに役割分担：

3次元乱流場の画像解析並びに流砂量の自動計測(今本博健・澤井健二)

高濃度流れの自動計測並びに流砂制御(芦田和男・高橋 保・江頭進治)

河床変動過程の自動計測並びに画像解析(村本嘉雄・藤田裕一郎)

漂砂海滨変形過程の自動計測(土屋義人・河田恵昭)

上記は主として対象とする現象の面から分類した役割分担であるが、研究を進めていく過程でこれらの間に共通の問題点の多いことがわかり、さらに次のような手法に基づいたグルーピングを行って、作業を進めた。(○は幹事を示す。)

(A) 流砂(流砂量・濃度・粒径)計測法と給砂システムの改良

(○澤井健二・江頭進治・里深好文)

(B) フィードバック機構を伴う点計測による砂面計測

(○藤田裕一郎・河田恵昭・澤井健二・藤木繁男・藤原清司)

(C) 画像処理による移動床現象(乱流場・砂面)の計測

(○宇民 正・上野鉄男・藤田裕一郎・中川 一・山下隆男・石垣泰輔)

本報告は、各グループで得られた研究成果を取りまとめたものであるが、その詳細が別に報告されているものについては、概要を示すにとどめる。

2. 移動床水理現象の計測制御並びにデータ処理における従来の手法の問題点

移動床水理現象を究明する際の主な計測項目と計測手法、ならびに問題点を列挙すると、次のようである。

2.1 主な計測項目と計測手法

(1) 水 位 標尺、容量式波高計、触針式水位計、立体撮影、水圧

(2) 河 床 位 標尺、電気抵抗式、超音波式、光反射式、接触反力式、立体撮影

(3) 流 速 浮子、プロベラ、電磁流速計、レーザー、ホットフィルム、カメロン撮影、ピトー管

(4) 流 量 堰、フリューム、電磁流量計

- (5) 流砂量 ピット, スクリーン, 音響, 映像, 回転(転倒)マス, ロードセル
- (6) 濃度 重量, 光散乱, 構造物の共振
- (7) 粒径 ふるい分け, 映像, 光の回折
- (8) 移動層厚 側方からの観察
- (9) 粒子軌跡 写真, ビデオ画像
- (10) 台車位置 スケール, ポテンショメータ, ロータリーエンコーダ

2.2 主な制御項目と制御方法

- (1) 流量 バルブ, ポンプ回転数
- (2) 水位 堰
- (3) 勾配 ジャッキ
- (4) 給砂量 重力, ベルト, ローラー, スクリュー, 回転羽根, 回転マス, 容器引上, ポンプ
- (5) 台車走行 誘導モータ, パルスモータ
- (6) その他 リレー, パルスモータ

2.3 データの種類と処理法

- (1) 入力
 - (a) 画像データ イメージスキャナ, ビデオ画像入力装置, マイクロデンストメータ
 - (b) 文字データ キャラクタリーダ
 - (c) デジタルデータ 種々のインターフェース
 - (d) アナログ電圧 AD変換
- (2) 演算
 - (a) データロガー等の専用機
 - (b) パソコン, ミニコン, ワークステーション, 汎用コンピュータ
 - (c) 画像処理機
- (3) 出力
 - (a) 文字 プリンタ
 - (b) イメージ プロッタ, CRT
 - (c) 磁気 ディスク, テープ

2.4 問題点

- (1) 計測上の問題点(センサー)
 - (a) 水中と陸上部の地形を連続的に計測できる河床センサーがない。
 - (b) 多量の土砂を含有する流れの計測(流速・河床・流砂)が難しい。
 - (c) 粒度分布にかかわらず信頼のおける濃度計がない。
 - (d) センサーの時間並びに空間分解が十分でないことがある。
- (2) 制御上の問題点
 - (a) 台車制御 センサーを曲線に沿って効率的に駆動させることが難しい。また, 小さなスペースで高速の流速計検定を行える台車がない。
 - (b) 給砂制御 湿潤砂を効率的に供給できる装置がない。
 - (c) 流量・水位制御 流砂を妨げずに流量・水位等を制御できるか?
- (3) データ処理上の問題点
 - (a) データサンプリング

効率的なデータ収録器が十分に配備されていない。(数と場所)

機器を設置保管する場所の環境が十分でない。

研究目的に合致したサンプリングソフトを入手するのが難しい。

(b) データの保管・転送

種々の媒体間のデータ交換が必ずしも容易でない。

(c) データ解析

画像データは非常に多くの情報を包含しているが、その解析には極めて多量の計算を必要とし、高性能のハードとソフトを必要とする。

(4) その他の問題点¹⁾

(a) 開発に要する費用、労力。

(b) 多様なニーズに対応できる柔軟性。

(c) 新しい技術・装置に関する情報の入手とそれを使う知識・技術の習得。

3. 成果の概要

3.1 流砂量計測法の改良(澤井)

(1) 直接法による流砂量計測の自動化²⁾

水路出口に設置したトロンメルで流砂からできるだけ水を除去し、ロードセルで釣り下げられた回転マスに誘導して流砂量を連続的に計測できるようにしたもので、トロンメルの直径は50 cm、長さは120 cm、勾配は1/5で、金網のメッシュは0.3 mmである。回転マスは、幅20 cm、直径20 cmで、90°ごとの4室に分かれ、約1 kgcmのモーメントで90°回転するようになっている。粒径1-3 mmの砂礫に対して、流量40 l/s、流砂量約50 g/s程度までの条件で測れることが確認された。

(2) 音響による流砂計測³⁾

流砂の衝突音をパイプ内に封入したマイクロホンによって検出し、その振幅と頻度から粒径別の流砂量を推定しようとするものである。衝突条件を揃えると振幅は砂礫の重量に比例するが、水理条件によって衝突速度や角度が変わるとばらつきが大きくなり、流砂量と音響出力の間に一定の関係が成り立たなくなる。

実験室では水路下流端に衝突板を設け、板の裏側にパイプを取り付けることによってかなり精度良く流砂量を計測できるが、現地においては河床にパイプを設置せざるを得ず、精度を高めることは難しい。現在、穂高砂防観測所の深谷観測点では河床のコンクリート内に、また、常願寺川上流の人津谷では床止め工の天端付近の河床面にマイクロホンを封入したパイプが設置してあり、ある程度以上の出水があるとデータが収録されるようになっている⁴⁾。穂高では音響データがそのまま磁気テープに録音されるが、常願寺川では5段階に分けた音響レベルごとの衝突数が記録される。

音響法では、小粒径の砂礫の計測は難しく、現在のところ約5 mm程度以上の礫でなければ計測できない。また、流砂量が増えて衝突頻度が100回/s程度を超えると、個々の衝突音の分離は困難となる。

(3) 超音波断層映像による流砂計測 (Fig. 1 参照)

超音波送受信器を水路横断方向に配列し、高頻度で走査することにより、流砂を映像化し、画像処理によって流砂量を算定しようとするもの⁵⁾で、現在のところ、実験室内で医療用超音波診断装置を用いてテストを行っている。超

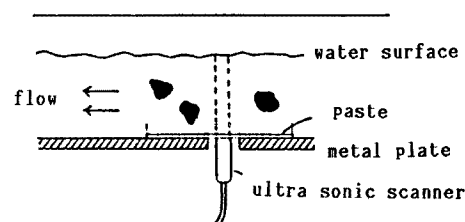


Fig. 1. Ultra sonic imaging of sediment transport from the bottom of flume.

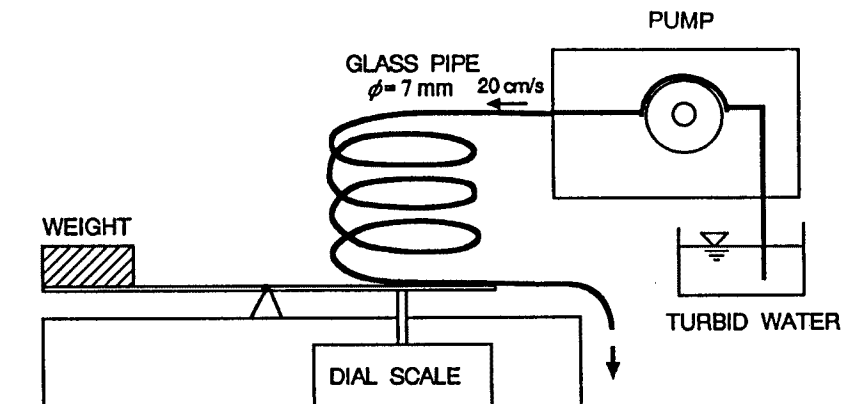


Fig. 2. A new device detecting the sediment concentration by continuous weighing.

音波センサーは衝撃に弱く、砂礫が直接に当たると破壊される恐れがあるので、何らかの物質で保護する必要がある。その物性と厚みを適切に選べば、超音波はほとんど反射せずに保護板を透過するが、その条件を逸脱すると透過成分が弱くなるだけでなく、保護板の両面での多重反射が妨げとなって、保護板近傍の砂礫が識別できなくなる。そこで、計測砂礫を保護板から2-3 cm以上離すために、水とほとんど音響特性が等しくてしかも砂礫を支持できるような物質としてコンニャクを河床に敷き、その裏側に超音波センサーを当てることにより、河床付近の砂礫を検出できるようにした。現有のセンサーは、毎秒15回走査されるが、これでは高速で移動する小粒径の粒子を確実に検出することができず、直径5 mmの粒子の場合、20 cm/s程度以上で粒子が移動すると、検出率が低下する。

超音波診断装置から出力されたビデオ信号は、ビデオテープに録画した後、パーソナルコンピュータでデジタルデータに変換し、ワークステーションに転送して解析するシステムを構築中である⁶⁾。

3.2 秤量法による浮遊砂濃度の連続計測（江頭・里深）

濁水をポンプで汲み上げながら、採取せずに重量を測定することにより、粒径に依存しない浮遊砂濃度の連続計測を可能にしようとする試みである（Fig. 2参照）。計測部分で砂を堆積させないためには、ある程度以上の流れが必要であり、細管を用いるのが適当であると考えられるが、微妙な濃度変化を検出するにはある程度以上の体積が必要であり、長さ2 mおよび4 mの螺旋状のガラス管を用いた。ポンプは砂粒子が停滞しないよう、ローラー型のものを用いている。これにより、数%程度の濃度の浮遊砂であれば、長さ10 mのシリコンチューブを通じてガラス管内に連続汲み上げが可能となったが、ローラーポンプの振動（圧力変動）が伝わり、現在のところ正確な秤量が困難である。今後、変動を軽減していくことが必要である。

3.3 湿潤砂の連続供給（澤井）

ローラー式の給砂機構を水中に設置し、出てきた砂を水とともにポンプアップし、金網で水と分離して水路に供給するシステムを考案し、試作した（Fig. 3, Photo. 1参照）。十分な流速がないとパイプ中に土砂が堆積すること、また、水量が多いと水路へ供給する際の水と土砂の分離が大がかりになることから、ポンプの容量やパイプの諸元を適切に選ぶ必要がある。試作品では、直流モータ駆動の小型水中ポンプに家庭の水道用ホースを接続して土砂をポンプアップしている。その際、給砂器のローラー部から出てきた砂がポンプの吸い込み口にうまく集まるよう、小型のホッパーで受け、その底部付近にホースの先端を差し込んでいるが、砂の粒径が小さい場合にはわずかの乱れによって砂が舞い上がり、かなりの砂がホッパーから外へ出てしまう。現在のところ、直径1 mmの砂はうまく供給できるが、0.1 mmの砂の供給は困難

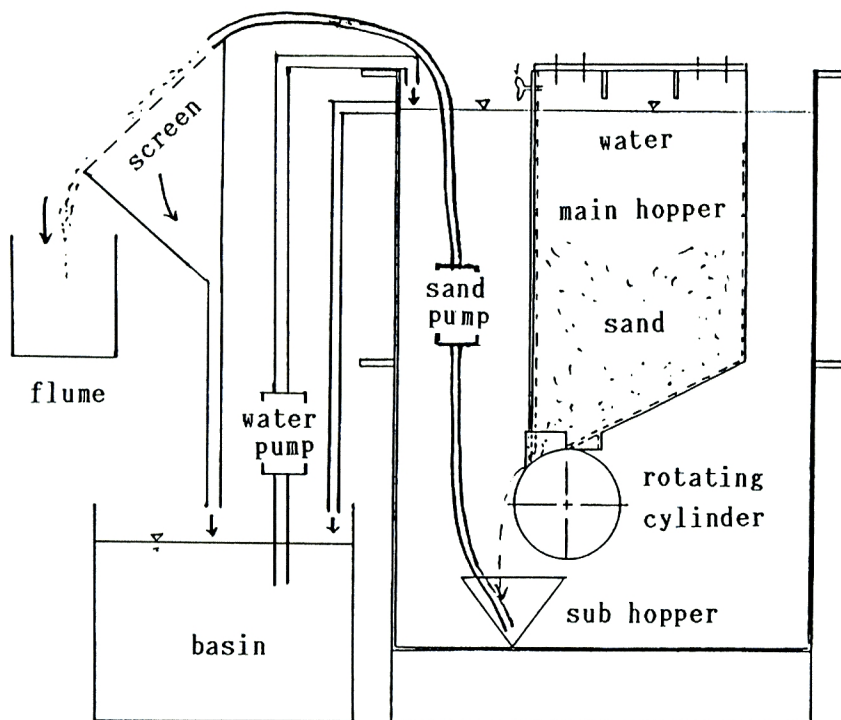


Fig. 3. Structure of wet sediment feeder.

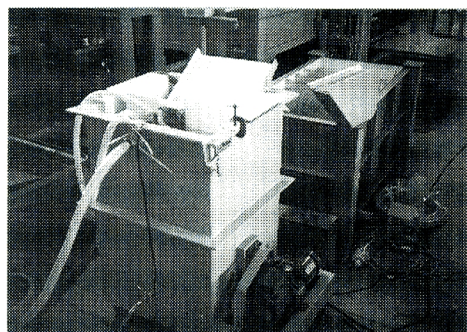


Photo. 1. Testing of the wet sediment feeder.

な段階である。

3.4 曲線に沿った台車駆動制御⁷⁾ (澤井・藤原)

(1) 原理

任意の曲線を折れ線によって近似し、さらに折れ線を構成する各線分を X , Y 2 方向の有限の刻み幅のステップで近似し、2 台のパルスモーターを用いた直交 2 軸のステップ運転によって追跡する。この 3 つの過程のうち、1 番目と 3 番目については原理的な困難はないが、パルスモーターのトルクが十分でないと、大きな負荷の台車を速く運転しようとする時に、脱調をおこしやすい。2 番目の過程

すなわち線分のステップ近似には種々のアルゴリズムが考えられるが、ここでは、 X , Y のうち、ステップ数の多い方の方向に 1 ステップ進むごとに、他の方向に 1 ステップ進むか進まないかを判断することにした。そのようにして求められたステップの送出時系列を記憶しておけば、運転中にそれを計算とする必要はなく、より高速の制御ができる。また、 X 方向のステップと Y 方向のステップが並ぶ場合には、それをまとめて、斜めのステップとすることにより、ステップ数を減らすこともできる。

(2) 非定常蛇行河床変動実験への適用 (Photo. 2 参照)

幅 20 cm, 深さ 10 cm, 波長 2 m の蛇行低水路を有する幅 1 m, 長さ 10 m, 勾配 1/100 の複断面水路に、平均粒径 1.3 mm の均一砂を厚さ 5 cm に敷き、周期 30 min で 0.6–7.3 l/s の間を正弦波状に変化する流量を供給し、半波長内で低水路法線に直交する 7 横断線および両側低水路法線から 1 cm 内側の 2 縦断線に沿って、 XY 台車を駆動させ、光反射式の砂面計によって河床形状を 1 cm 間隔で検出した。

使用したモーターは、1 パルス 1.8° のパルスモーターで、ダイナミックトルク 4.2 kgcm の小型のもので

ある。X方向の台車は重量も大きく、逆勾配の方向にも駆動する必要があるため、1:5の減速器付きとした。

プーリー径はX方向が約4 cm (1ステップ0.126 mm)、Y方向が約5 cm (1ステップ0.844 mm)で、パソコン(NEC PC 9801 F)にAD変換ボードを付加し、N 88 BASIC言語を用いて制御したところ、片道を約2分間で計測することが可能になった。

3.5 高速高機能流速計検定装置⁸⁾ (藤田・澤井・藤木・藤原)

(1) 諸 元

限られたスペースで現地観測用のものも含めて、広範囲の条件下で使える流速計検定装置について検討し、以下のような諸元のシステムを設計・導入した。(Photo. 3 参照)

水槽部：鋼製(幅1.2 m, 深さ0.6 m, 長さ12 m)。

駆動部：2.2 kw デジタル制御 AC サーボモーター。(プログラム制御および外部電圧によるオーバーライド制御可能。アナログモニター出力有)

引張力調整ワイヤプーリー駆動。

駆動速度0-3 m/s。

台 車：アルミ合金製(幅1.55 m, 長さ1.2 m)。

レール：片側リニアウェイ、片側上下両抱きカムフォロワー対応。

両端非常用ダンパー付きストッパー。

両サイドに障害物検知用光電スイッチ付加。

さらに速度変動機能を付加するため、2軸制御アクチュエータを増設の予定である。

(2) 電磁流速計の検定への応用

電磁流速計は、少々濁った水の中でも作動し、さらに、物体の衝撃や空中への露出が生じても損傷にくい特徴があり、移動床実験に適用すると大きなメリットのあることが期待される。ところが、測定原理上、周囲の物体の電磁特性の影響を受け易く、水面や底面さらには水路側壁の近傍では出力が変化する。そこで、どのような範囲からその影響を考慮しなければならないかが明確にできると、都合がよい。ここでは、東京計測(株)製の2成分電磁流速計を用いて、水面近傍での応答を明らかにした。このプローブは、L字型に曲げた直径5 mmの円柱支持棒の先端に直径9 mm, 長さ15 mmの円柱形のセンサーを取り付けた構造になっており、センサー軸に直交する2方向の流速成分をアナログ電圧に変換して出力する。カタログ仕様による計測範囲は、0-2 m/sで、時定数を0.1, 0.5, 1, 10 secに切り替えることができるが、ここでは、0.1 secに設定した。また、センサーは水槽中心線上で軸が水平になるようにセットし、支持棒を鉛直上方で台車に固定し、センサー軸に直角水平方向に牽引した。牽引速度が大きくなると、水槽全体に流れが発生するとともに、センサー周辺に波立ちが生じ、気泡が発生したりセンサーが空中に露出したりして、出力に異常が現れる。Fig. 4は、水面からセンサー上面までの距離をパラメータとして、牽引速度と出力電圧の関係をプロットしたものであるが、センサーのかぶり水深が2 cm以上の場合には、2 m/sで牽引してもほぼ線形性が保持されている。かぶり水深がそれ以下の場合には、ある速度までは同一の出力特性が保持されるが、それを超えると、出力電圧が正常値にくらべてやや減少した後、急激に増

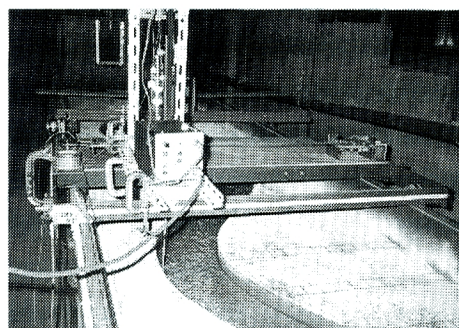


Photo. 2. Bed form measurement using two dimensional carriage driven along arbitrary curves.

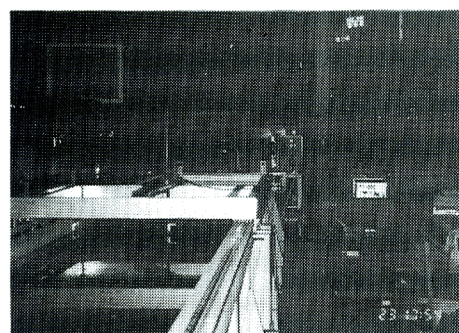


Photo. 3. Calibration of the electromagnetic velocity meter using the new calibration system.

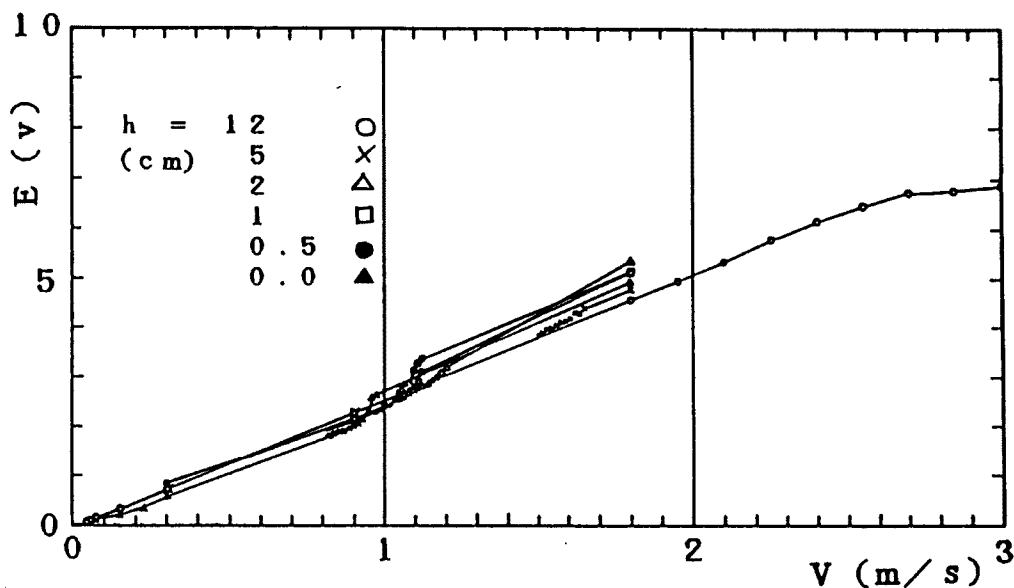


Fig. 4. Relation between the drag velocity and the output of the electro-magnetic velocity meter. (h denotes the water depth above the sensor)

加するなどの異常が現れている。水深の浅い流れを計測する場合や、水面近傍の流速を計測する場合には、この特性に留意する必要がある。今後さらに、側壁や底面の影響やセンサーの設置方向の影響についても検討を加える必要があろう。

3.6 光学式3次元砂面測定装置⁹⁾ (藤田)

(1) 測定原理 (Fig. 5 参照)

既知の位置に置いたモータードライブレザーセオドライトからパーソナルコンピュータ制御によって砂面にある水平・鉛直角度で打たれたマークを同じく既知点にある電子セオドライトでマニュアル視準し、自動測角したデータを通信回線経由でパーソナルコンピュータに集録した後、三角測量と同様の計算で3

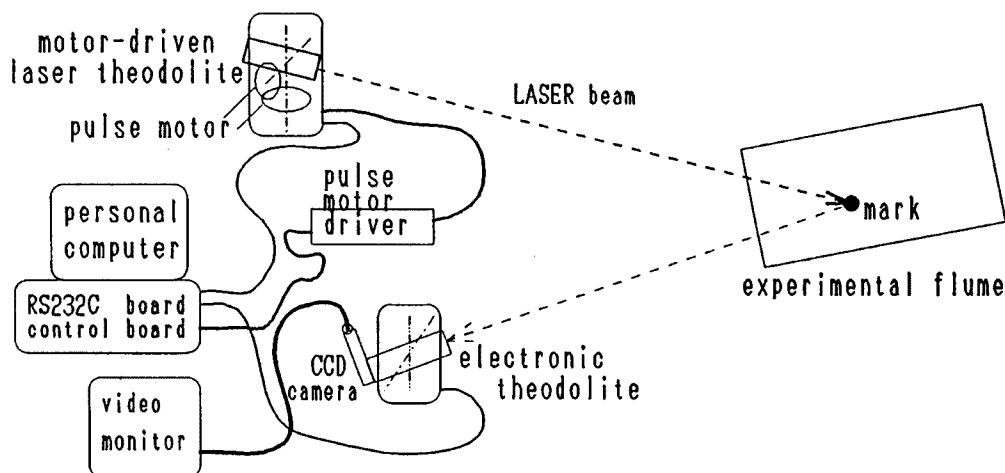


Fig. 5. Three dimensional bed profile measurement system.

次元座標値を求めるものである。

電子セオドライトの視準は、CCDカメラによる映像をビデオモニターに出力し、遠隔操作できるようにした。今後さらにそのプロセスを自動化していく計画である。

(2) 広幅傾斜水路実験への適用

広幅傾斜水路では、センサーを河床に近接させることが難しく、遠隔測定の必要性がとくに高い。ここでは、上記のシステムを流木実験に適用し、計測精度と効率の向上を図った。

3.7 超音波式砂面測定器へのアタッチメント (澤井)

超音波センサーと河床との間に空気が介在すると、正しい計測が行えない。

そこで、センサーと河床との間に水を挿入できればよいのであるが、センサーと河床との間にはある程度以上の距離が必要であるから、水深が小さい場合には、センサー面が水面よりも上に出てしまう。

そこで、センサーの先に管をつけ、水を満たしておけば、センサーが水面より上に出ても、管の先が水中にある限り、その中に水が保持されるため、計測が可能となる。しかし、何らかの原因で一旦管の先端が空中に出ると、管の中に保持されていた水が出てしまうため、計測が不能になる。(Fig. 6 (a))

そこで水の流出を防ぐため、管の先端に底蓋をつけると、その位置で超音波が反射してしまい、河床面が計測されなくなる。(底蓋をある程度センサーに近づけると、その反射はノイズとして処理され、それを透過した超音波によって河床面が正しく計測できるようになり、測定可能領域がかなり拡大されるが、底蓋と河床との距離がある程度以下になるとやはり計測不能となる。)(Fig. 6 (b))

次に、水のかわりにもう少し流動しにくい物質を用いれば、底蓋がなくても流出が壁けられる。超音波をある程度透過させ、しかも自立できる物質として、種々の物質を試してみたところ、ゼリー状の物質ならばたいはいは用い得ることがわかった。たとえば、糊やグリース、整髪料あるいは羊糞などの類である。ところが、それらは、粘着性を有するために砂粒その他の粒子が付着しやすく、その反射を検出してしまふことがある。粘着性を有しないゼリー状の物質としては、コンニャクがあり、試してみたところ、非常にうまく機能することがわかった。ただし、長期間放置すると、腐食するのが難点である。(Fig. 6 (c))

ところで、超音波の反射は音響特性の異なる物質の境界面で生じるのであるから、物性が徐々に変化していけば顕著な反射は防止できるであろう。そこで、水よりも少し固体に近い音響特性を持つ物質を用いれば、その先端に底蓋を設けても反射を防げる可能性がある。ここでは、市販の糊を用いてその先端をポリエチレン膜で覆ったところ、うまく機能することがわかった。しかし、状態が必ずしも安定でなく、接触状態によっては頻繁に誤作動することがある。また、超音波の反射は、物性だけでなく、境界面の傾きにも依存するため、ある程度面を傾けると、反射の影響を除去して河床を検出できる場合のあることがわかった。

3.8 相関法による画像解析

(1) 洪水流航空写真の画像解析 (宇民・上野)

一対の洪水流航空写真をマイクロデンシトメーターで数値化してワークステーションに入力し、相互相関法によって流速ベクトルを求めることによって洪水流の乱流構造を解析する方法を確立した^{10, 11)}。

この方法は、立体図化器を用いてなされていた従来の方法に比べて、以下の点で飛躍的に優位である。

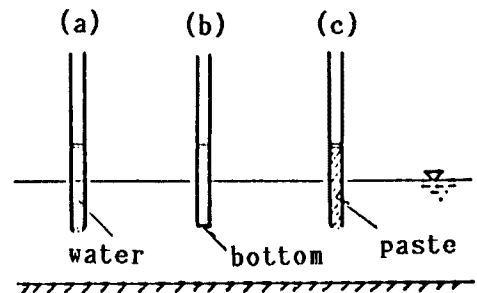


Fig. 6. Attachments for ultra sonic bed profiler.

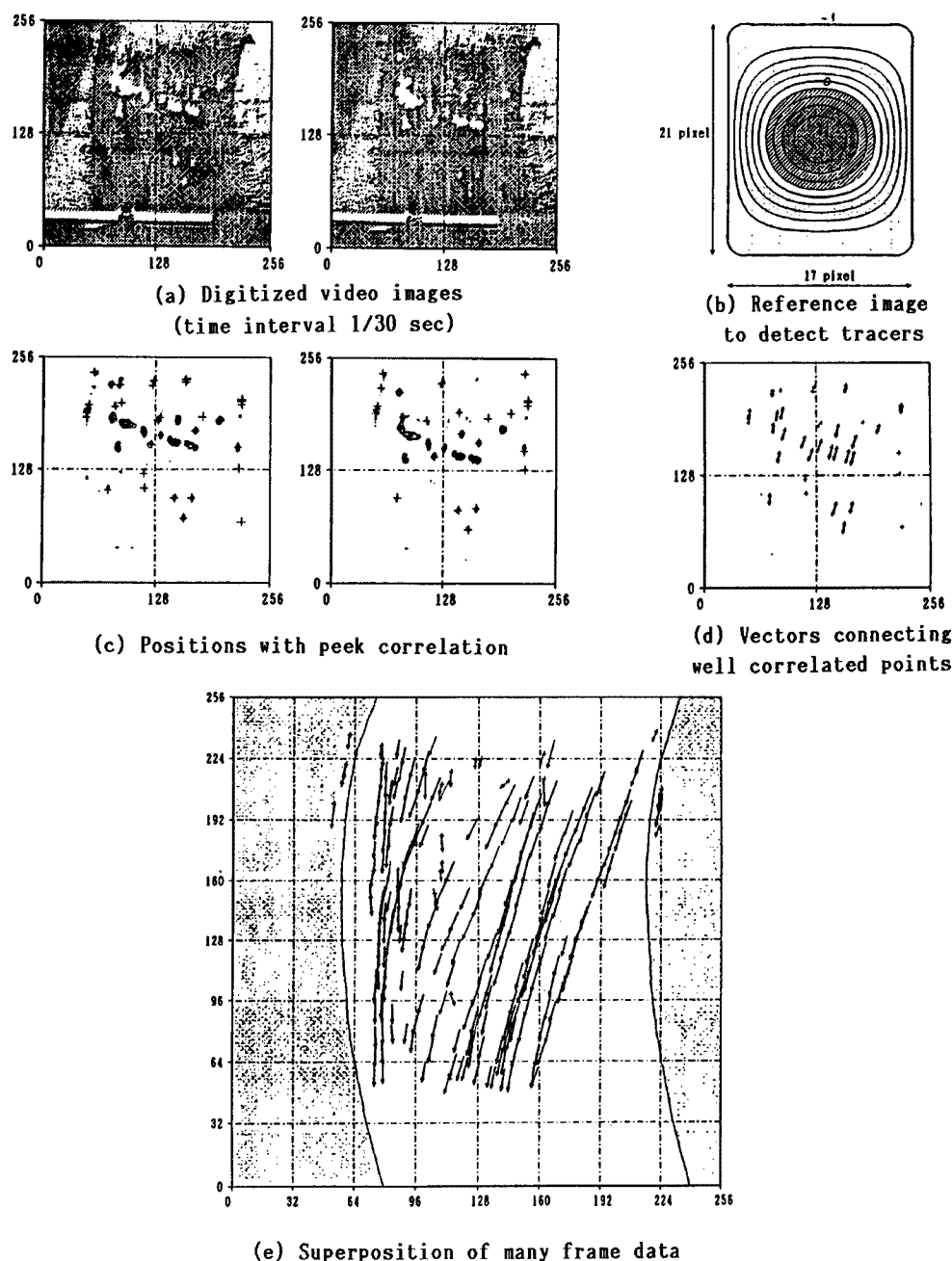


Fig. 7. Picture processing of video image for the analysis of velocity distribution.

すなわち、第1に、従来の方法では、基線方向の流速成分のコンター図と流向が別々に得られていたが、本方法では流速ベクトルそのものが算出されるので、解析精度が高い。また、解析のための時間と労力が大幅に節減でき、熟練も要しない。第2に、航空写真の撮影に際して、従来の方法で解析する場合には飛行経路は河道に並行して選択する必要があったが、本方法で解析する場合は、河道が撮影されておりさえすれば良いので、撮影は容易かつ迅速に行える。第3に、本方法によって得られた流速ベクトルを用いると、各種水理量例えば渦度、発散、流線などを計算し図化することができるので、解析により得られる情

報量は圧倒的に豊富である。

また、マイクロデンストメータに代る簡易の画像入力装置として、CCD デジタルカメラシステムを導入し、その精度の検定方法を確立すると共に航空写真解析の効率化を図った¹²⁾。

(2) ビデオ映像によるトレーサー追跡 (澤井・宇民・上野)

昼間のビデオ映像から水面トレーサーを自動追跡して、流速分布を求めようとする場合、従来は、ビデオ画像にパソコンのマウスカースルをスーパーインポーズし、手動でカーソルを動かしながら、目視で像の一致を確認していたが¹³⁾、新たにビデオ画像をデジタイズし、相互相関法によって、トレーサーを自動追跡する方法を開発した。その方法を Fig. 7 に即して説明する。

1) VTR に録画されたビデオ映像 (1/30秒間隔) を 256×256 の画素数、8ビットの濃度で数値化し、計算機に入力した。(a) は、そのうちの相隣る2コマの映像 A, B を図化したものである。

2) パターン認識法によって映像 A 上の各トレーサー画像の中心位置を求めた。すなわち、検出パターンとして (b) に示されるような濃度分布を設定し、ビデオ映像 A 内の各小領域 ($17 \text{ ピクセル} \times 21 \text{ ピクセル}$) との相関係数を求め、それが閾値を超えるものを中心位置とした。露出時間があるためトレーサー画像が若干縦長になっていることを考慮し、検出パターンを縦長に設定した。

3) ビデオ映像 A 内のトレーサー画像の中心位置 (流速ベクトルの始点) の周辺の濃度分布に関して、ビデオ映像 B との間で相互相関法を適用し、流速ベクトルの先端位置を求めた。得られた結果の一例を (d) に示す。このようにして、相隣る2コマのビデオ映像の間で流速ベクトルを次々に計算した。得られた流速ベクトルを重ね合わせて表示すると、(e) のようになる。

(3) 画像解析の地形測量への応用 (中川・宇民・上野)

三次元的な地形を上方から2台のカメラで撮影し (Photo. 4), その画像を各々に数値化して計算機に入力し、相互相関法で各位置の視差を計算することによって地形の標高を算出した。Fig. 8 は、土堰堤の越流決壊地形の測量結果を示している。通水しながら撮影したため、水面で乱反射があるところで誤差が発生している。

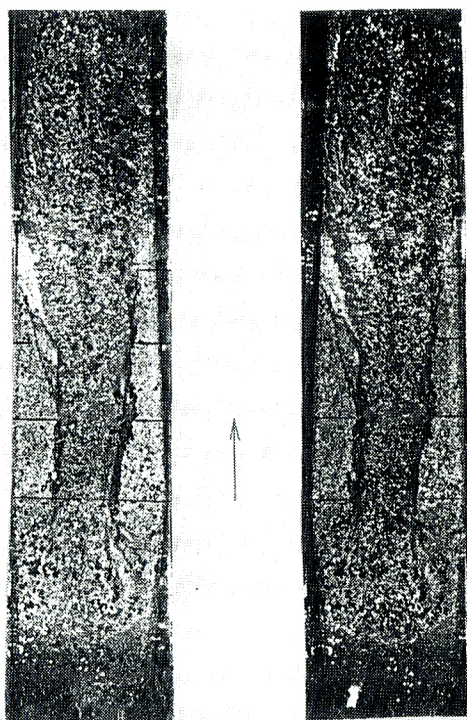


Photo. 4. Stereo photographs of bank breach experiment.

3.9 平面内分布量の多面体近似内挿法 (澤井)

水位や河床など、平面内に分布する諸量が不規則に配置された計測点において与えられた場合、それ

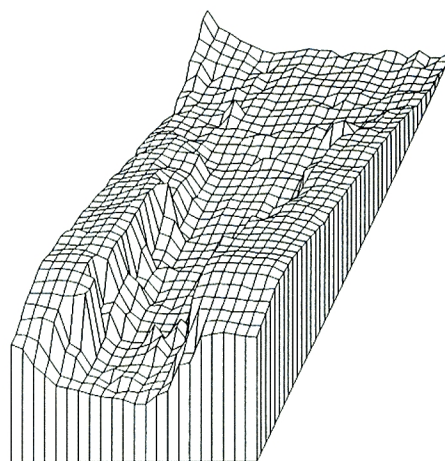
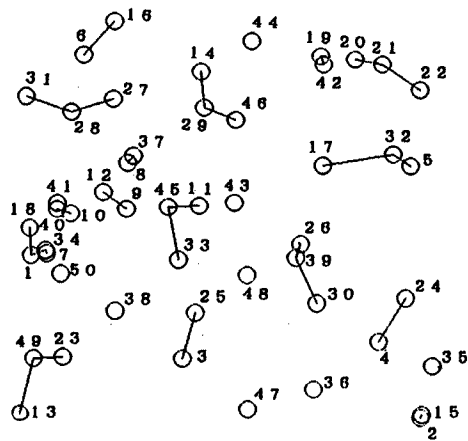
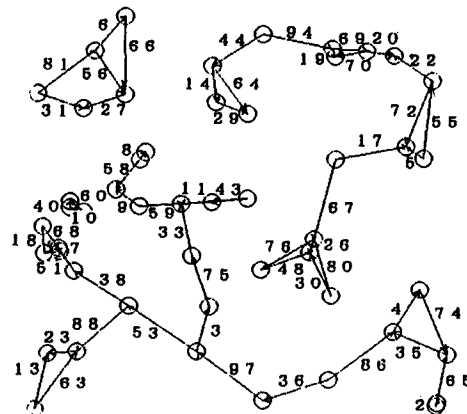


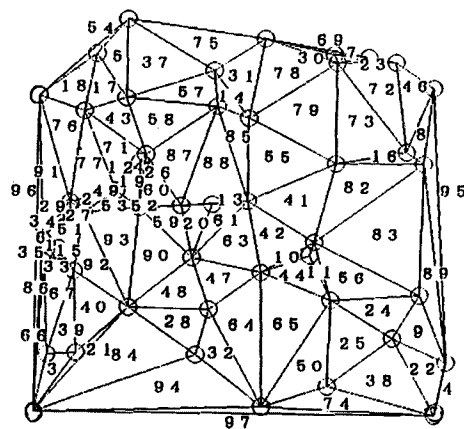
Fig. 8. 3 dimensional display of the topography obtained by the cross-correlation analysis of Photo. 4.



(a) Numbering of randomly allocated points



(b) Numbering of lines connecting adjacent points



(c) Numbering of triangles surrounded by lines

Fig. 9. Plane partitioning by triangles constituted by randomly allocated points.

らの値から平面内の任意の点における値を補間する必要があることが多い。これにはすでに種々の方法が提案され、実用に供されているが、ここでは、計測点によって平面を3角形分割し、3角形の内部での値を各頂点での値から線形補間するための、合理的な平面分割法について考察した。

(1) 原理

2つの計測点の組を距離の短いものから順に並べ、既に引いた線分を横切らないという制約条件のもとで、それらの2点を順次結んでいくと、比較的近くの3点の組によって平面が分割される。線分が交差しないことの判定には種々の方法が考えられるが、ここでは、既に構成された3角形の内角を再分割しないことを判定条件とした。すなわち、予めすべての2点の組についてそれらを結ぶ線分の方角角を求めておき、3角形が構成されると、その内角に含まれる線分を順次除外していくことによって、分割の効率化を図った。

(2) 適用例 (Fig. 9 参照)

パソコンによって乱数を発生させて50個の点をランダムに配置し、上記の方法によって平面分割を行ったところ、ほぼ妥当な分割ができた。しかし、中には極めて偏平な三角形も生じており、最適な分割にまでは至っていない。これは、隣合う2つの3角形で構成される4角形の2本の対角線の中で、より適切な分割のできるものを選び直すことによって改善されるものと考えられる。

4. あ と が き

以上、本研究で得られたいくつかの成果について、その概要を述べたが、本研究で取り組んだテーマはこれ以外にも数多く存在する。たとえば、音響スキャナーを用いた水底形状計測（土屋・山下¹⁴）や赤外線ビデオによる流れ計測（今本・石垣）は既に実用に供されている。また、水陸両用連続砂面測定器の改良（藤田・藤木）も現在進行中で、近日中に実用化されるものと期待される。一方、本研究で着手しながら完成しなかったものや、粒度分布の自動計測のように着手すらできなかった問題も数多い。その解決には、今後かなりの時間と労力を要するものと考えられるが、本研究で得られた研究成果ならびにチームワークを基礎として、さらなる展開を図っていきたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 藤田裕一郎・澤井健二：移動床水理実験におけるラボラトリーオートメーションの試み，水工学論文集，第34巻，1990，pp. 701-706.
- 2) Sawai, K.: Techniques for Sediment Discharge Measurement in Laboratories, Bull. DPRI, Kyoto Univ., Vol. 40, Part 2, 1990, pp. 91-110.
- 3) 芦田和男・澤田豊明：山地流域における出水と土砂流出(21)，京都大学防災研究所年報，第34号B-2，1992.
- 4) 栗原淳一・宮本邦明：音響を利用した流砂量計測装置について，新砂防，Vol. 44, No. 5, 1992, pp. 26-31.
- 5) 小倉久直・中山純一・澤井健二・鈴木 宏・宮本邦明：超音波による流砂の映像化と流砂計測について，自然災害科学，Vol. 7, No. 2, 1988, pp. 73-78.
- 6) 澤井健二・小倉久直・中山純一・高橋信行：超音波映像による間接的流砂量測定法の基礎実験，平成4年度砂防学会研究発表会概要集，1992，pp. 166-169.
- 7) 澤井健二：移動床水理実験におけるラボラトリーオートメーションの試み(2)―曲線に沿う自動河床計測―，土木学会第46回年次学術講演会概要集，第2部，1991，II-PS 6.
- 8) 澤井健二・藤田裕一郎・藤木繁男・藤原清司：移動床水理実験におけるラボラトリーオートメー

- ションの試み(3)―高速高機能流速計検定装置―, 土木学会第47回年次学術講演会概要集, 第2部, 1992.
- 9) 村本嘉雄・藤田裕一郎・馬場健志: 流木を伴った河道災害に関する基礎実験, 平成4年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要, 1992, II-22.
- 10) 木下良作・宇民 正・上野鉄男: 相関法による洪水流航空写真の画像解析, 可視化情報, Vol. 11, No. 1, 1991, pp. 161-164.
- 11) 木下良作・宇民 正・上野鉄男: 洪水時河川に現れる大規模渦について, 第23回乱流シンポジウム論文集, 1991.
- 12) 木下良作・宇民 正・上野鉄男: 画像処理による洪水流解析―阿賀野川における並列らせん流について―, 水工学論文集, 第36巻, 1992, pp. 181-186.
- 13) 澤井健二: スーパーインポーズボードとマウスを利用したパソコンによるビデオ画像読み取り法, 自然災害科学, Vol. 7, No. 1, 1988, pp. 49-57.
- 14) 山下隆男・土屋義人: スキャニング式海底プロファイラーを援用した人工浅瀬の変形の現地実験, 平成3年度京都大学防災研究所研究発表講演会, 1992, 3-39.