

緩流段落ち部後流領域における流速測定法について

METHODS OF THE LOW VELOCITY MEASUREMENTS
IN THE WAKE OF THE ABRUPT DROP中村 俊六*・足立 昭平**
By Syunroku Nakamura and Syohei Adachi

1. ま え が き

貯水池内の堆砂段丘によって生ずる緩流段落ち流れの濁度物質連行現象を解明するうえに、段落ち後流領域の速度分布を実験的に計測することは、重要な実験課題の1つと考えられる。このような緩流場の速度分布の実験計測の難点は、流向がある水深で反転することと、その絶対値が小さいことである。

一般に、微流速2次元場の流速測定の有効な手法としては、流水中にトレーサーを混入してその運動軌跡を追跡する方法があげられる。トレーサーとしては、たとえば適当な薬品を調合して得られるコロイド状浮粒子や、流水を電気分解して発生させた水素気泡が用いられていて、それぞれ「浮粒子法」、「水素気泡法」と呼称されている¹⁾。

浮粒子法の例としては、四塩化炭素とトルオールおよび着色剤ズダン²⁾を調合したコロイド状粒子を用いた金子³⁾の塩水くさびに関する実験が、水素気泡法の例としては、一様水深における密度流に関する日野⁴⁾の実験がある。

しかしながら、浮粒子法を効率的に行なうには、速度場に浮粒子を適当に分散配置する必要があり、いまの場合それは必ずしも容易ではなく、特に浮粒子の識別を容易にするために着色剤を用いる場合には、流水はもちろん、水路を汚染するおそれもある。

一方、水素気泡法は流水中に濁度物質がなければ緩流段落ち流の速度分布測定にも最適と考えられるが、濁度物質を含む流水を対象とする際には、濁度物質の電極線への付着が水素気泡発生を妨げ、また気泡列の撮影が難しくなるという問題を生ずる。

筆者らは、この実験課題に対して2つの方法で微流速

の測定を試みた。すなわち、1つは、最も簡単に測定点を指定でき、データ処理の手順も簡単な方法として、小型プロペラ式流速計を流水中で定速移動させることによって、その測定限界以下の微流速を検出しようとするものである。また第2の方法は、流水よりわずかに比重の小さい固形浮子の浮上軌跡を基として流速を求める方法である。

最初の、流速計を移動する方法については、測定のために流水をかくはんするおそれがあり、一方、浮上浮子法では、浮子が完全に流水の運動に追従するという厳密な保証がない。しかし、両測定法とも実用上比較的に簡便であり、特に、流水に濁度物質が含まれる場合に、それが極端に多量でない限り、いずれも使用可能であるという利点を有する。

本報告は、こうした2つの速度分布測定法の利点を重視して、それらの実用上の精度を、濁度物質を含まない場合の最適法と考えられる水素気泡法との比較から検討したものである。

なお、実験水路は図-1に示す全面アクリル製のものであり、流水の水利的条件は、 $u_0=3\sim6(\text{cm/sec})$ 、 F_r

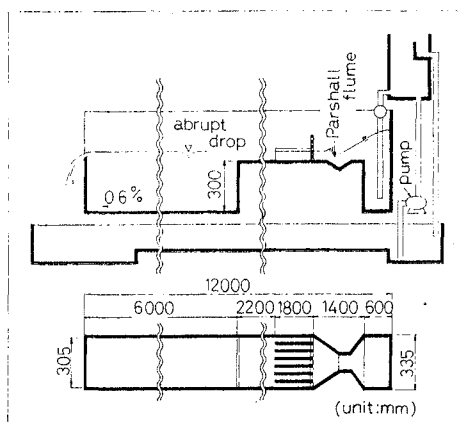


図-1 実験水路側面図および平面図

* 正会員 名古屋大学助手 工学部土木工学科

** 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科

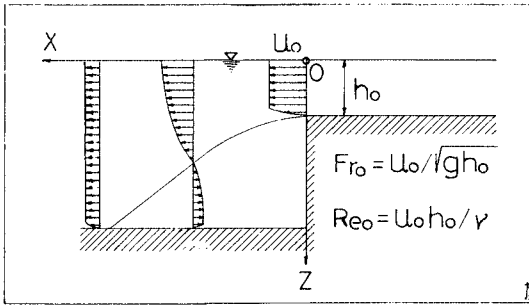


図-2 段落ち流れ概念図

$= 0.04 \sim 0.07$, $Re_0 = 2000 \sim 3000$ であって、段落ち部における水面形の変化は十分小さい(記号の説明は図-2参照)。

2. 測定法

(1) 水素気泡法

水素気泡発生 の原理および水素気泡法の技術的説明については、F.A. Schraub, S.J. Kline ほか⁹⁾、浅沼・武田⁹⁾などの研究にくわしいが、今回用いた実験計測中の様子は図-3 のようであり、写真データの一例を示せば、写真-1 のようである。

水素気泡列にスリット状の光をあてる光源としては、500 W ハロゲンランプ 1 灯を用い、撮影用カメラには望遠レンズをつけて水路からできるだけ離し、境界面での屈折の影響による写真のひずみを少なくしている。また写真-1 に見られるように、白金線 (0.05 φ) には適当な間隔でラッカーペイントによるコーティングを施して、水素気泡の浮力と x 方向流速成分 (w) による水素気泡列のひずみを修正できるようにした。また、この方

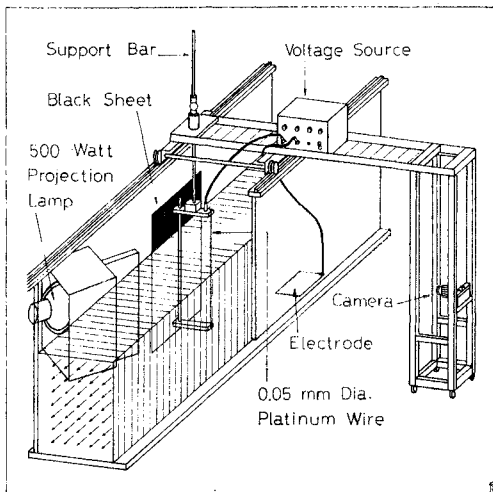


図-3 水素気泡法説明図

法によれば、 x 方向流速成分 (u) の測定と同時に、 z 方向流速成分 w の値についてもある程度の目安を得ることができる。

(2) プロペラ式流速計を定速度で移動する方法

今回使用したプロペラ (図-12 (2)) の検定曲線は図-4

に示すようであって、測定限界は 4~5 (cm/sec) である。実験水路の段落ち後流領域の流速はこの限界値以下の微流速になるから、プロペラ自身を定速移動し、微流速と定速移動速度との合成速度を検出することによって、次式から流速 u を求めた。

$$u = u' - u_0$$

ここに u : 流速

u' : 検出された合成速度

u_0 : プロペラの移動速度

(今回は $u_0 = 5.17$ cm/sec)

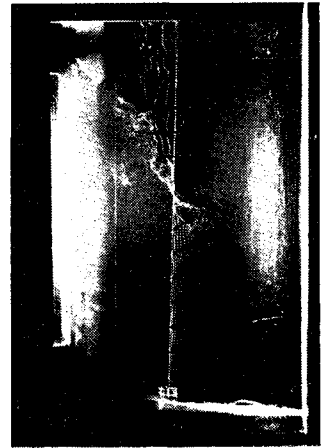


写真-1 水素気泡法によるデータの一例

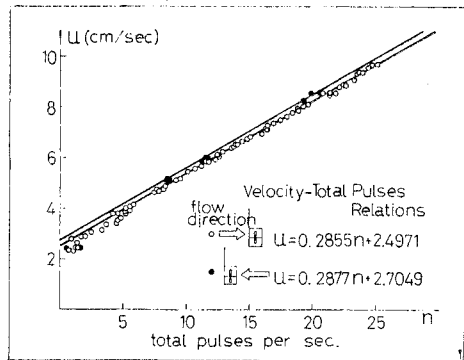


図-4 プロペラの検定曲線

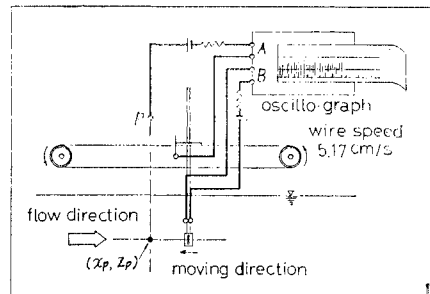


図-5 プロペラ式流速計移動法

プロペラの移動速度 u_0 は、そのプロペラの測定限界以上でなければならないが、移動による流水への影響を少なくするためにはできるだけ小さい値が望ましいと考えられる。今回は $u_0 = 5.17 \text{ cm/sec}$ で実験した。測定中の様子を図-5 に模式的に示したが、oscillo graph は入力回路 B によってプロペラの回転によるパルスを記録するとともに、回路 A によって測定点 ($x = x_p$) の通過時点を記録するようにくふうされている。測定値は測定点を中央として 1 秒間のパルス数から求めた。測定点の水深 (z) はプロペラの支持棒の昇降によって、また x は接点 P の移動によって、それぞれ任意に指定できる。またプロペラの移動には、回転方向の変えられるモーターを使用して、合成速度 u' が常に測定限界以上になるように留意しながら測定した。

ただ、この方法で測定できるのは、 x 方向流速成分 u のみであって、 w は測定できず段落部における流速測定法としては大きな弱点と考えられるが、他方同一水深における x 方向の u の分布を連続的に得られるという利点を有している。

(3) 浮上浮子法

この測定法は、比重が流水のそれよりわずかに小さい浮子が、流水に流されつつ水路底面から水表面まで浮上するとき描く軌跡を、分解写真としてとらえることによって、流速成分を検出する方法である。今回使用した浮子は、図-6 に示すようにポリエチレン製の 4 枚羽根と針金によりできており、比重は約 0.802 のものである。針金は、4 枚羽根を直立させ、全体の比重を調節するための「おもり」の役目を果たすと同時に、磁石によって浮子を水路底に定着するために利用されている。分解写真

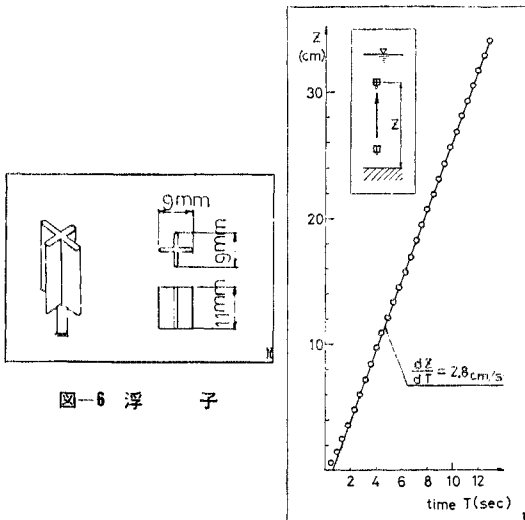


図-6 浮子
図-7 静水中での浮子の浮上速度測定結果

はストロボの連続発光によるバルブ撮影によって作成した。

写真-2 はその一例である。また使用した浮子の静水中での上昇速度は、図-7 に示すように水路底近傍を除けば一定と見なすことができるので、流水中での浮上軌跡によって x 方向流速成分 u とともに、 z 方向流速成分 w も測定可能と考えられる。

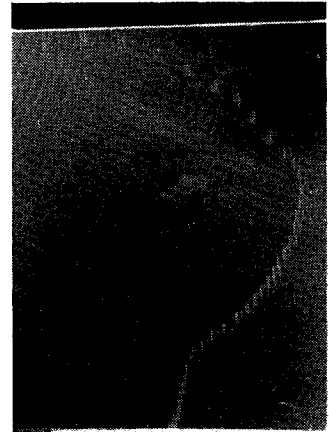


写真-2 浮上浮子法によるデータの一例

3. 測定結果の比較と考察

以上 3 種の測定法を、同一条件下で、同一測定点に使用して得た x 方向流速成分 u についての各測定値の比較を図-8~10 に示す。ただし、厳密に同一条件下とすることはできないので、適当な時間間隔で 5 回ずつ測定した平均値を用いている。また、浮上浮子法においては、その浮上軌跡は水路底面の始発点だけしか指定できないので、図-11 に示すように測定点近傍 (今回は $|x_p - x_b| < 10 \text{ cm}$) の軌跡から得た値を近似的に用いた。図-8~10 において u_H , u_F および u_P は、それぞれ「水素気泡法」、「浮上浮子法」および「プロペラ式流速計移動法」による測定値を示す。

図-8 および図-9 から、上記 3 種の測定法のうち、

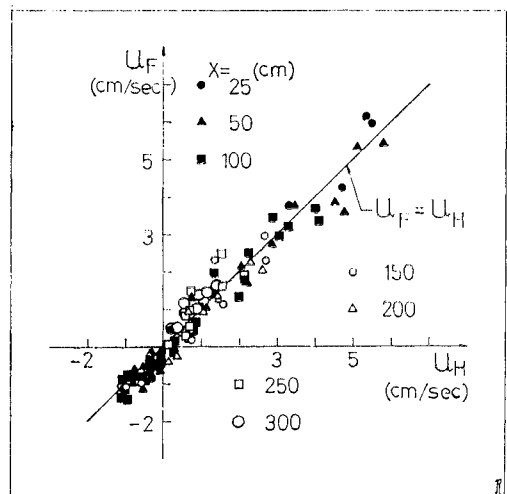


図-8 測定値 (浮子法と水素気泡法) の比較

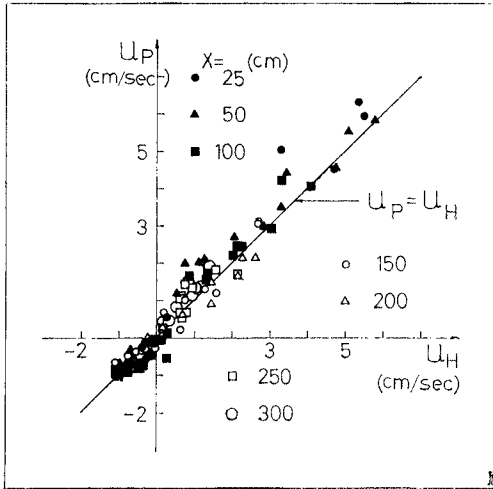


図-9 測定値（プロペラ法と水素気泡法）の比較

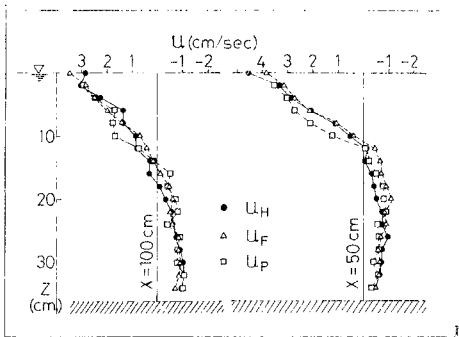


図-10 各測定法による u の鉛直分布

いずれを用いてもほぼ同一の測定値が得られることがわかるが、さらに詳細にこれらの測定値を鉛直分布形で表示すると、図-10 に一例を示すように、3者の間には若干の相違がある。

すなわち、水素気泡法による測定値を基準にすると、

(1) 浮上浮子法による測定値 (u_F) は、流速0となる位置が上にあり、この付近で誤差が大きい。

(2) プロペラ式流速計移動法による測定値 (u_P) は、流速0となる位置の付近において、絶対値が大きい。

前者については、浮上浮子法における測定位置の x 方向におけるずれに原因があると思われる。すなわち、底部に逆流領域が存在する場合には、浮子は写真-2のような軌跡を残し、これから測定値は図-11 に示した方法で近似値として求められるが、今回の測定では図中軌跡 (A) で示したような case が多い。この場合測定値として $u=0$ を得る位置 (z) は図中 $4z$ で示した誤差を生じ、同時にこの付近で誤差が大きくなると考えられる。

上述のように、浮上浮子法においては軌跡があらかじめ指定された特定の測定点を通過することを期待できな

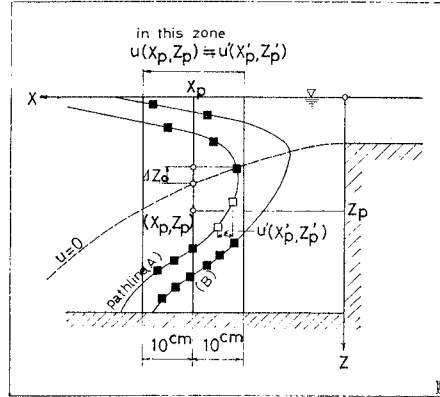


図-11 浮上浮子法による測定値の求め方

いという欠点はあるが、この点については同時に複数の浮子を浮上させることによって補うことができる。

なお、写真-3 は、2つの浮子が横断方向位置 (y) の異なる水路底から同時に出発して描く軌跡の一例であり、段落ち部からの距離がほぼ同じ位置にあっても、流れの3次元性状

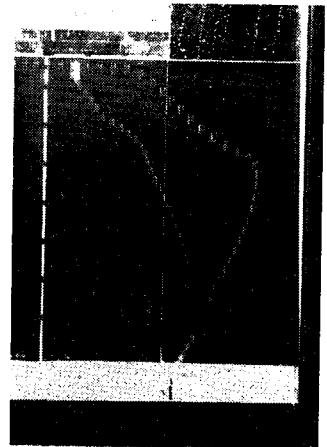


写真-3 浮子法によるデータの一例 (浮子を2個使用)

から横断方向位置 (y) によって、瞬間的な速度分布が大きく異なることがあり、 y 方向流速成分 (v) が相当に大きいものであることがわかる。

次に、プロペラ法による測定値の水素気泡法による測定値との相違は、上述した y 方向流速成分 (v) の影響が、使用したプロペラの斜流特性に関連して表われたものと考えられる。

プロペラの斜流特性については、武田⁹⁾が風洞中で図-12(1) のようなプロペラを用いて詳細な実験を行っており、羽根が flat plate の場合、回転数の比は cosine カーブに乗らず、図-13 に破線で示したようになることがわかっている。今回使用したプロペラの場合は、図中●で示したとおりであり、一部を除けばほぼ類似の傾向を示しているが、 $\theta=20^\circ$ 付近においては、回転数はいったん増加して武田の示した傾向と異なっている。

これは、今回使用したプロペラの場合、 θ によってプロペラを支持する枠の影響があるためと思われる。すなわち、支持枠とプロペラの羽根との位置関係は、図-12

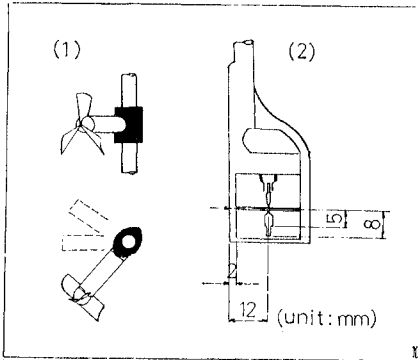


図-12 武田⁹⁾の使用したプロペラ(1)と今回使用したプロペラ(2)

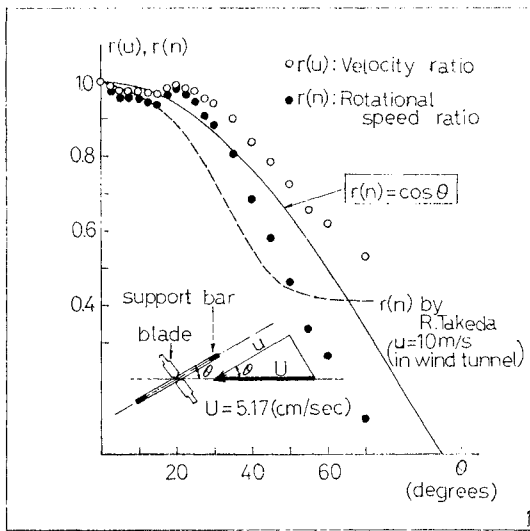


図-13 プロペラの斜流特性

(2) のようになっており、これから杵による影響は、 $\theta = 16^\circ 25'$ 付近より変わりはじめ、 $38^\circ 40'$ を過ぎてのち著しく減少するものと考えられるが、これらの数値は図-13 の傾向とよく一致している。図-13 において○で示したのは、得られた回転数を図-4 の検定曲線に適用して求めた流速値 u の、 $\theta = 0^\circ$ における値との比であり、 $\theta = 15^\circ$ 付近以後、測定値 u は流速ベクトル U の軸方向成分を、常に大きめに検出することが理解される。

4. む す び

以上、3種の測定法を比較検討し、浮上浮子法およびプロペラ式流速計移動法の実用性を確かめたが、まとめとしてそれぞれの長所および短所を列挙すれば、以下のようである。

(1) 水素気泡法の長所

(i) 流速分布形を、実験中に視覚的にとらえることができる。

(ii) 流水を乱すことが少ない。

(iii) z 方向流速成分 w についても、ある程度測定可能である。

(2) 水素気泡法の短所

(i) 流水中に濁度物質が混入すると、測定が著しく困難かまたは不可能となる。

(ii) 取扱いに比較的注意を要する(白金線および光源の照射角)。

(iii) データの処理が比較的煩雑である。

(iv) 水路側壁が透明であることを要し、測定部分が十分に暗くなくてはならない。

(3) プロペラ式流速計移動法の長所

(i) データ処理の手順(流速値への変換)が、もっとも簡単である。

(ii) とり扱いが比較的簡単である。

(iii) 移動方向の流速分布を検出するうえには、他の二者に優る。

(iv) 水路の側壁が透明である必要はなく、測定部分を暗くする必要もない。

(4) プロペラ式流速計移動法の短所

(i) 流水を乱す。

(ii) 今回のように支持棒を有するプロペラを使用し、微流速を測定する際には、斜流成分によって測定値に誤差が生ずる。

(iii) 移動方向の流速成分のほかは測定できない。

(5) 浮上浮子法の長所

(i) 流水中にある程度の濁度物質が混入しても測定可能である。

(ii) データ(分解写真)を得るためのストロボおよびカメラを除けば、浮子そのものはきわめて安価でとり扱いが簡単である。

(iii) 測定中に流水を乱すことは、プロペラ法に比較して少ない。

なお本報文では、 x 方向流速成分 u の測定値についてのみ比較検討したが、段落ち部直下流では z 方向の流速成分 (w) が卓越するから、段落ち部直下流における流速を測定するにはその測定も必要である。いまのところ浮上浮子法による w の測定精度についての厳密な保証はないが、図-7 に見られるように静水中での浮上速度は実用上一定と見なし得るから、少なくとも w に関する相対的な分布は比較的容易に得ることができる。このことは本方法が段落ち部における流速測定法として有する長所の1つと考えられる。

(6) 浮上浮子法の短所

(i) 測定点をあらかじめ指定できない。

- (ii) 流速の微小な変動については計測できない。
- (iii) データの処理が比較的煩雑である。
- (iv) 水路側壁が透明であることを要する（分解写真の作成は、たとえばフィルムを巻かずにおいてシャッターのみを一定間隔で切る、という方法によっても可能であるから、測定部分は必ずしも暗くする必要はない）。

なお、各種測定法の比較実験においては、山田広巳氏および佐崎雅史君の協力を得た。末尾ながら謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 本間仁編：応用水理学下 I, 「水理実験」, pp. 117~118, 丸善株式会社, 1971.
- 2) 金子安雄：流路の水深が変化する場合の塩水楔の機構, 港湾技術研究所報告, 第 4 卷 5 号, 1965.
- 3) 日野幹雄・四方 浩・中井真行：密度流の流速分布に関する実験, 第 11 回水理講演会講演集, 1967.
- 4) Schraub, F.A., Kline, S.J., Henry, J. et al. : Use of Hydrogen Bubbles for Quantitative Determination of Time-Dependent Velocity Fields in Low-Speed Water Flows., Tran. ASME, Journal of Basic Eng., June, 1965.
- 5) 浅沼 強・武田定彦：水の電気分解による流れの可視化について, 日本機械学会論文集(第 2 部), 31 卷, 222 号, 1965.
- 6) 武田力也：流速計の斜流特性について, 広島大学工学部研究報告, Vol. 5, No. 3, 1956.

(1973.7.23・受付)