

## 8. 流量観測の誤差について

神戸大学

椿涼太

## 【講演】

### <スライド1>

では、こちらのお題目で話題提供します。どうぞよろしくお願いします。

### <スライド2>

流量観測についてはいろいろな技術検討もあるのですが、国として少しずつ切り替えていこうという流れがあり、その中でどうやって切り替えていくかという議論があります。流量観測手法の切り替えに際して、みんなが気にしている点としては、浮子測法との整合性・連続性があると、安心して切り替えられるということがあります。一方で、整合性を気にしている中で、どうもずれがあるのではないかということで、先ほどの萬矢さんの説明のようなことが少しずつ見えてきている事実もあります。

差がある場合に、どちらかが相対的に正確な値に近いという場合があります、どちらかが相対的には近いわけですが、正確な値は、一般的には分からないことが多いです。そういう場合にできるのは、間接的な情報を積み上げて、消去法や多数決で推論していく場合が多いと思います。そのような時に多少役立つのではないかという話を、今回紹介していきます。その時に重要になってくるのがランダムな誤差とバイアスの誤差で、特にバイアスの誤差が問題になってくることが多いです。

### <スライド3>

例えば流量は  $H \cdot Q$  式に換算しますが、その中でどうしても残ってしまうのがバイアス誤差です。

この辺りの話は計測の根幹に関わることです。気にする時もありますし、あえて気にしないという、不確実性解析などはランダムとバイアスを区別しないというスタンスもあり、その辺が少しややこしくなっているのですが、バイアスの誤差は真値からいつもずれるというものです。それに対してランダム誤差というのは、真値の周りに分散するという誤差です。

### <スライド4>

一応、誤差の計算方法というのがあって、バイアスの誤差の場合は、例えば毎回プラス1ずれるのだとすると、4回測って平均を取るとプラス1ずれますという計算になります。それに対してランダムのほうは、このような感じの計算になって、4回測ると毎回は1ずれるのに、4回測ると0.5になるということがあります。4回だったらこれぐらいで、10回だったらこれぐらいと、どんどん真値に近づいていくことです。このような感じです。

流量を測る時には、断面平均流速を得られることは少ないので、断面全体を覆った電磁流量計などでない限りは、どこかの流速分布を測って計算していきます。その時に、それぞれの流速値のずれがランダムだった場合には、右側のようにだんだん平均に近づいていきますし、ランダムではない、バイアスの場合は、左側のように、細かく取っても真値にはあまり近づかないということがあります。

そういう中で、流量観測の切り替え方法として、整合性の確認の実施方針というのがあって、最初に述べたスムーズに切り替えをしたいという考えの下に作られているものです。

#### <スライド 5>

PDF でこういったものができます。最初にこのような文章があって、その文章とともにこういうグラフが描かれています。このグラフは横軸が浮子測法と次世代型の観測流量の相対差というもので、縦軸が、要は洪水が大きい小さいかです。

この図を見ると、あまりクリアには描いていないのですが、プロットされている点が、0 から -20 のところに偏っています。この辺りにどうしてもバイアスがあるのではないかとすることが想像されます。あとは上に行くほどコンパクトにまとまっていて、下に行くほどばらついているということもあります。こちらは小さいといっても、一応洪水なので、基本的には平水というわけではないです。

#### <スライド 6>

このような傾向がみとめられる中で、流量観測法の切り替えを進めるロジックとしては、ISO の基準が参照されていて、そこで $\pm 20\%$ という話になっているのですが、どういう根拠で $\pm 20\%$ になったかというのを見ていくと、この中では、断面分割数を増やすとどんどん不確実性が減っていくという、やや楽観的な考え方になっています。ということで、浮子の軌跡が流れの湾曲でずれてしまう場合や、橋脚の後流でつかまって遅くなってしまうというのは、同じところに投げたら同じようになる傾向があります。

あとは、先ほどもキーワードであった並列らせん渦などの効果は、表立っては考えられていません。湾曲で外側に少し寄ってしまうというのは、真っすぐなところで流量観測をやればいいという話はあるのですが、真っすぐなところだからこそ並列らせん渦ができるなど、そういうトレードオフもありそうな雰囲気です。

#### <スライド 7>

この辺の話をポンチ絵で描くと、このような感じになります。ここまで地形に特徴がある場所で流量観測をやるかというのは、少し大げさですが、川の流れというのは 3 次元性が確実にあります。少し曲がっているところ、それから中州などの中では 3 次元的な流れが形成されていて、3 次元的な流れそのものは弱いのですが、こういう流れが集まるところ、それから流れが発散する場所が出てきます。

この図でいうと、青で書いてあるところが追い越し車線というか高速域で、赤いところは少し渋滞しているような場所です。基本的には青いところ、速く流れるところに表面の流れが寄っていくので、表面付近に物を流したとすると、そちらに寄っていくという傾向はあり、結果として流量が大きめに出る傾向にはなると考えられます。

#### <スライド 8>

それで、もう一回この図に戻ってきてもみると、その他にいろいろな要因が考えられていて、表面や、浮子は表面浮子だけではないですが、それぞれの更正係数があって、表面浮子でいうところの 0.85 というのがおかしいというのが、効いてきます。ただ、今までいろ

いろな検討があつて、1を超える場合やすごく小さい場合があるというのもしわれていますが、平均値としてこれがおかしいということは、あまりいわれていないと思います。従つて、大きい時、小さい時があるけれども、全体として-10に寄るという説明としては、更正係数というのは少し弱いのではないかと考えられます。

その他、風の影響、今日も先ほど発表がありましたし、また次の発表があるかと思いますが、これも非常に重要なファクターになります。しかし、順風と逆風の両方のケースがあつて、多少地形の効果によって、どちらが強いというのはあるかもしれませんが、台風などを考えた時には両方の向きがあるはずなので、平均すると打ち消しあうと想像されます。そのように考えていくと、流れの3次元性というのが、浮子が大きめに出ている理由としては残るのではないかと考えられます。

#### <スライド 9>

そうは言つても、切り替えていくためには、このような図を作つて、0から-20の間に入っているということのチェックが必要になっています。それをやるのは結構大変で、同じイベント、同じ時刻に対して浮子を投げて出した流量と、画像や電波、ADCPなどで流量観測を行っていきます。ここで合わなかった場合、特に大きい洪水があつた時には合いやすいけれども、下のほうだと、よく分からないけれども、結構差が大きいということがあつて、その時の逃げ道が用意はされています。

いずれにしろ、いったん整合性が確認できたら、次の年からは浮子測法は無理にやらなくてもいいとなっているのですが、いかんせん、このばらつきがなぜできるかというのは分からないので、いろいろ大変なところはあるかもしれませんが、浮子測法を続けたほうがいいと考えています。

#### <スライド 10>

それで、この図を使ってチェックするのが大変なのですが、あとは、何となく分かるような気もしますが、あまりよく分かっていないのが、大きい洪水だと浮子測法とその他の新手法が合いやすくて、下のほうは合いにくいというのは、なぜかというのはいまひとつ分かりません。何となく怪しい候補があるというのは、実際に携わっている方々はいろいろと感じているところがあると思いますが、そんなに証拠はないと思います。いろいろな、フルード数や水深などで見ても、あまりはっきりした統計的な傾向は見られていないというのが現状かと思います。

#### <スライド 11>

先ほどのダイアグラムで、浮子測法と新手法の流観を同時にできなかった場合にはこのような感じで、違う年の浮子のばらつきと、新しい方法で出した流量と水位の関係を比較していきます。丸で描いてあるものが、過去の同じ場所を取つた浮子の流量と水位の関係で、もちろんこの線に沿うけれども、少しばらつくので、そのばらつきぶりと、新手法で取つた黄色い三角の分布を比較していきます。

#### <スライド 12>

白丸のばらつきぶりの中に、黄色い三角が入ってしまえばいいということです。バイアスがもしなかったとすると、それでもいいのですが、バイアスがあるとすると、全体的に丸がこちら向き、黄色がこちらというのが起きます。このチェック方法の一つの特徴として、浮子測法でばらつきが多い場所だと、新手法が範囲の中に入りやすいので、切り替えがしやすいです。逆に浮子測法が近似線にきれいに乗ってしまうと、そこは切り替えしにくいということになってしまいます。

浮子測法がばらつくというところで切り替えがしやすいというのは、何となく浮子のばらつき、浮子がおかしいということなので、割と誰も不幸にはならないと思うのですが、浮子測法のデータがそろっているけれども、その線の位置が実際の状況とずれているのではないかということが起こり得ます。そういう場所では、そうであるゆえに、新手法に切り替えがしにくいということが起きてしまいます。その時には、過去にさかのぼっていくと白丸のデータが増やせるので、どんどんばらつきを増やしていけるので、その辺で工夫していくことになるのかなと思っています。

#### <スライド 13>

その他、H・Q のプロットで整合性、ばらつきを考える時に考えておいたほうがいいのは、水位流量曲線はそもそも一直線には乗らないということで、ループを描きます。ループを描くのだけでも、過去の浮子測法は、例えばピークから減水期にしか取っていない場合に、新手法は上昇期・ピーク・下降期のループが取れた場合には、ループが取れたゆえにばらついてしまうので、それ故に誤差の範囲内に入れないというふうにはならないような議論は必要ではないかと思っています。

#### <スライド 14>

それで、最初の漏斗のような形の図ですが、合わなかった場合に、新手法がおかしい場合と浮子測法が合わなかった場合と、2通りが考えられます。浮子測法がおかしいというところで、表立ってそれを追っていくこともないのだけれども、流量観測を切り替えていくという意味では重要なので、先ほどの萬矢さんのような検討は非常に重要だと思っています。

そのためには、画像での浮子の観測や、GPS での浮子の観測は非常に大切になってくるので、ぜひいろいろなところでやってもらって、報告してもらいたいのではないかと思います。うまくいく場合もたくさんあるはずなので、どういう時にうまくいって、どういう時にうまくいかないかというのをみんなで持ち寄って共通認識ができると良いと思います。

#### <スライド 15>

あとは、流量を計算する時に、区分求積法と DIEX 法と、結構差が大きい場合があって、その時に、現時点ではどちらが正しいとも言いづらいところがあるので、両方見てみる、風の効果についても、効き過ぎる場合と効かな過ぎる場合と両方あるので、両方を見て、

先ほどのプロットを見るのが必要ではないかと思います。

あとは、新手法というのは、方法にもよりますが、時間変化や横断方向の流速分布が浮子では得られない密度で得られるので、そういうところから整合性やもってもらしさを確認できると思います。いろいろな工夫をしながら、どちらがいいかという話をしていくのがいいのではないかと思います。

これで終わります。

# 流量観測の誤差について

---

椿 涼太(神戸大学大学院)

2025/06/18

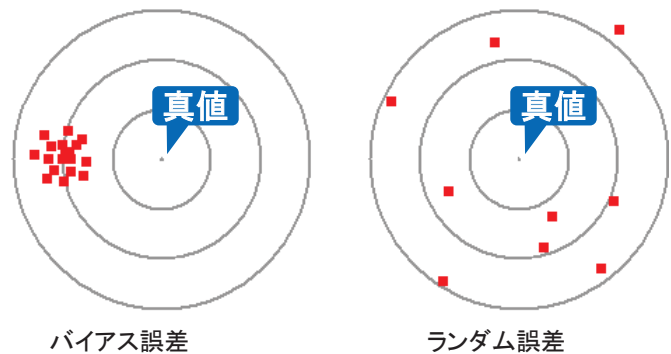
謝辞：本資料については様々な方にご意見やコメントをいただき、内容を調整させていただきました。ここに記して謝意を表します。

## 次世代流量観測への切り替えに関する留意点

- 浮子測法との整合性・連続性があるとスムーズに切り替えができる。
- 整合性を確認するなかで、流量観測法毎の違いの傾向が確認されるようになってきた。
- 差があるばあい、どちらかが相対的に正確な値に近いということになるが、正確な値が未知であることが多い。そのような場合にできるのは、間接的な情報を積み上げて、より正確そうな値を推論していくことである。
- 間接的な情報を積み上げて、より正確そうな値を推論していく際のいくつかの考え方をいかで紹介していく。
- ランダム誤差とバイアス誤差、バイアス誤差の発生要因が主な論点となる。

## 誤差計算（誤差伝播）の考え方とバイアス誤差の対処の難しさ

- 誤差は、ばらつきのランダム誤差と、いつも過大評価・過小評価するバイアス誤差の二種類がある。
- いろいろなデータを組合わせて量を計算していく（例えば浮子測法）ときに、使ったいろいろなデータがそれぞれもつ誤差が、計算した最終的な値にどう影響するかを計算するのが誤差計算とよぶ。

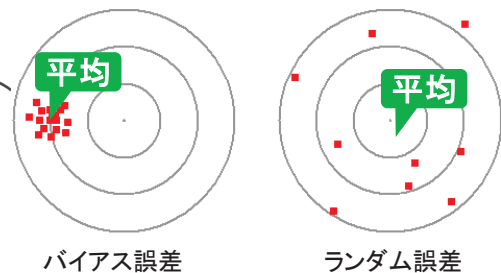


[https://www.e-education.psu.edu/natureofgeoinfo/c5\\_p5.html](https://www.e-education.psu.edu/natureofgeoinfo/c5_p5.html)

6

## 誤差計算（誤差伝播）の考え方とバイアス誤差の対処の難しさ

- 複数計測で平均値をとる場合、
  - バイアス誤差は、変わらない。 $\left(\frac{1+1+1+1}{4} = 1\right)$
  - ランダム誤差は、プラスになる場合とマイナスになる場合が打ち消しあうので二乗したものを足してルートをとる。 $\left(\sqrt{\frac{1^2}{4} + \frac{1^2}{4} + \frac{1^2}{4} + \frac{1^2}{4}} = \sqrt{\frac{1}{4}} = 0.5 \ll 1\right)$ という計算
  - 足し算（例えば区分求積）の場合でそれぞれの区分の流量誤差が1 (m<sup>3</sup>/s)の場合、誤差がランダムな場合は  $\sqrt{1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2} = \sqrt{4} = 2$  (ランダム誤差)  $\ll 4$  (バイアス誤差) となる。



[https://www.e-education.psu.edu/natureofgeoinfo/c5\\_p5.html](https://www.e-education.psu.edu/natureofgeoinfo/c5_p5.html)

7



# 浮子観測データとの整合性の確認の実施方針（案）

[https://www.mlit.go.jp/river/shishin\\_guideline/kasen/pdf/fushi\\_houshin.pdf](https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/kasen/pdf/fushi_houshin.pdf)

非接触型流速計測法による観測データ（以降、非接触型流速計測法データと呼ぶ。）については、浮子測法による観測データ（以降、浮子観測データと呼ぶ。）との整合性が以前より課題になっていた。～略～、**図-1** に示す通り、低い水位では乖離やバラつきがあるものの、十分高い水位（重要度の高い領域）では**-20% から 0%**の範囲に収束し、**浮子測法の持つ不確実性程度（±20%程度）に収まることがわかってきた。※1**

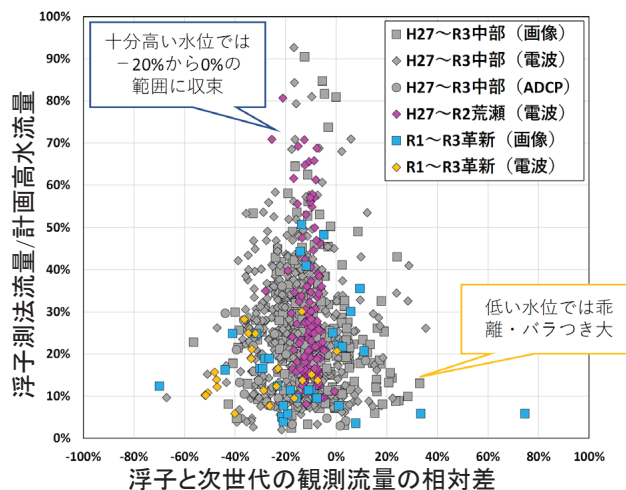


図-1 （観測流量の相対差）-（出水規模）

浮子測法と非接触型流速計測法の観測流量の相対差=（非接触型流速計測法-浮子観測流量）／浮子観測流量

8

## ※1 ISO748: 2021 (Hydrometry – Measurement of liquid flow in open channels – Velocity area methods using point velocity measurements)

ISO748での（主に表面浮子を想定した）不確実性評価では、~~バイアス~~でなくランダムな要因を仮定していて、断面分割数を増やすと不確実性が減るという、やや楽観的な評価になっている。

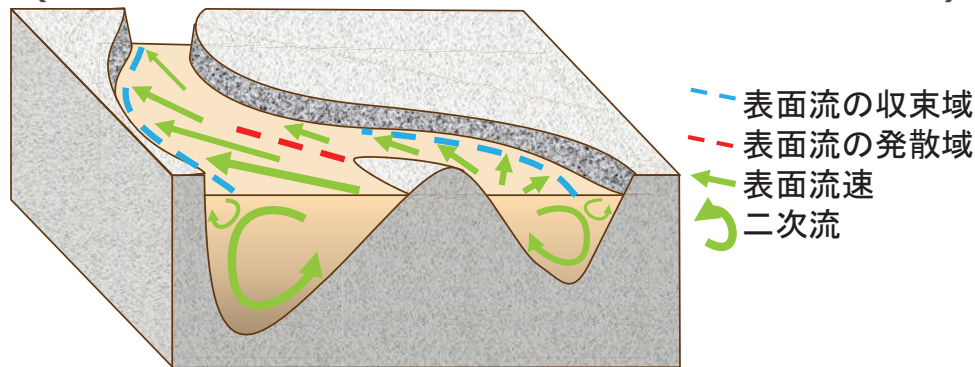
浮子の軌跡が流れの湾曲でずれたり、橋脚の後流の影響を受けたり、並列らせん渦にトラップされて流速の代表性が損なわれる効果が考慮されていない点もISO748の問題点として上げられる。

流れの湾曲については、そもそも浮子法は直線河道区間で実施すべきであるという立場に立つと正当化できる（他方で、流量観測の現場では様々な状況がある）。

並列らせん渦へのトラップについては、学術的にもはっきり結論が出ていないため考慮できないと擁護することもできる（でも不確実性評価に際しては考えられるあらゆる要素について粗くても、たとえば定数でエイトと評価してでも、考慮すべきというのが基本方針のはず）。

14

## 湾曲部や中洲の周りの流れの概要図 (浮子測法のバイアス誤差発生要因を意識して)



湾曲部や中洲などの周辺では、**三次元的な流れ**が形成される。浮子は表面近くの流れの影響を強く受けるので、三次元的な流れの影響を受ける。

具体的には、**表面流の収束域**に沿って浮子が流れやすくなる。**表面流の収束域**は、底面摩擦の影響が比較及びにくいいため、比較的**流下方向流速が大きめになる**。

15

## 浮子観測データとの整合性の確認の実施方針（案） 図-1

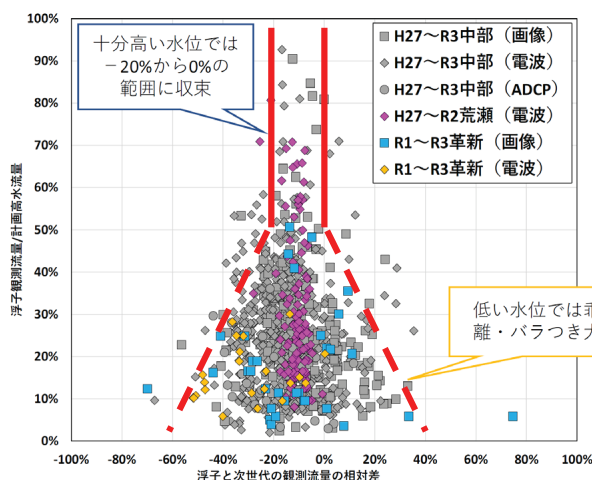


図-1 (観測流量の相対差) - (出水規模)

浮子測法と非接触型流速計測法の観測流量の相対差 = (非接触型流速計測法 - 浮子観測流量) / 浮子観測流量

左図のように、なぜ-20%から0%の範囲に収束するかについて、すなわち、浮子観測が平均して10%程度大きめに流量をみつもっている要因については、はっきりとはしていない（ISO748もバイアス誤差評価は適切な考慮にはなっていない）。

表面浮子の更正係数については、個別事例に対して正確ではないにしても**平均値として0.85は、今までのいろいろな検証にも耐えており、バイアス誤差発生の主要因とは言いつらい**。

風の影響は、順風・逆風の両ケースがあるはずなので左図のような統計上は±双方にずれるランダム要因と予想される。

消去法より、**流れの湾曲や並列らせん渦などの流れの三次元性の効果が最有力**といえよう。

16

# 浮子観測データとの整合性の確認の実施方針（案） 図-1

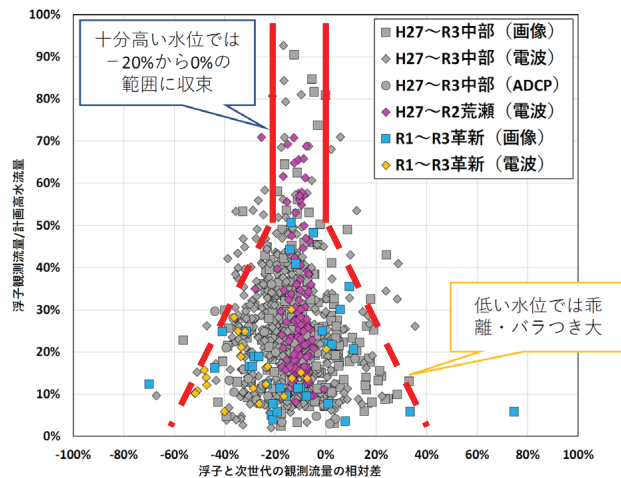


図-1 （観測流量の相対差）-（出水規模）

浮子測法と非接触型流速計測法の観測流量の相対差=（非接触型流速計測法-浮子観測流量）／浮子観測流量

さしあたり、**実施方針**では、次世代流量観測に切り替えたい、重要な**観測所**ごとに、左の図の上にデータをプロットしていき、**浮子観測データとの整合性**，すなわち大規模出水時の-20%～0%の範囲に入ることを、**次世代流量観測検討会**で審議する。

データをプロットするため、浮子測法と新手法の流量観測を同時に行なう必要がある（逃げ道は用意されている。次ページで解説）。

いったん審議を通過した観測所は、次年度以降は、浮子観測を実施しなくてもよい（でも、できるだけ浮子測法も続けた方がよい）。

17

# 浮子観測データとの整合性の確認の実施方針（案）

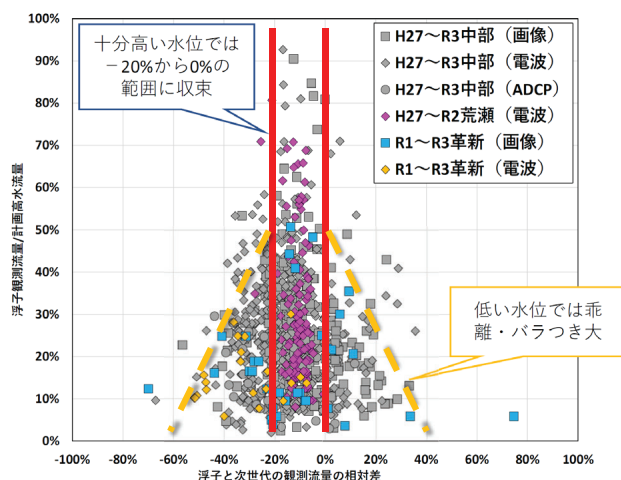


図-1 （観測流量の相対差）-（出水規模）

浮子測法と非接触型流速計測法の観測流量の相対差=（非接触型流速計測法-浮子観測流量）／浮子観測流量

浮子測法と新手法の流量観測を同時に行えない場合の**逃げ道**，あるいは，左の図での整合性が確認できない場合（大規模出水が起きたけど-20%～0%の範囲に（複数データが）外れた場合や，大規模出水が起きなかった場合など），過去の浮子測法で作成された水位流量曲線との整合性をチェックする（次ページ）。

次世代流量観測検討会では、**小規模洪水**について**破線**のような解釈（どちらかというと中部地整方式）でなく、**-20%～0%の範囲内にあるかどうかを確認していくため**，**小規模洪水での整合性確認のハードルは高い**。（整合性が確認できないと、次年度以降もデータを蓄積して再検討する）

そもそもなぜ小規模洪水でばらつきが大きくなるのかは、よくわかっていない。なんとなく怪しい要因の候補はある。

18

## 浮子観測データとの整合性の確認の実施方針（案） 図-2

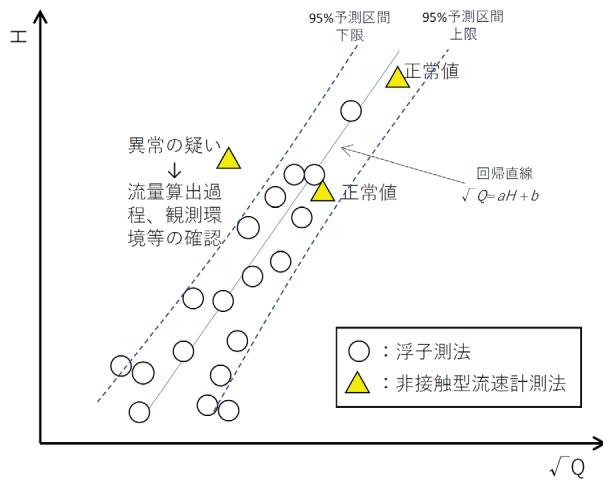


図-2 浮子観測データによる 95%予測区間と非接触型流速計測法データ

図-1で整合性が確認できない場合、過去の浮子測法で作成された水位流量曲線との整合性をチェックする。

そのチェックでは図-2のようなプロットを観測地点で作成する。

回帰直線を前提とした浮子データ○のばらつきの95%予測区間内に、新手法の流量観測△が、収まれば良い。

図-2の左上の△のように、一部外れた場合については、その特別な理由を説明することができれば、予測区間範囲を逸脱したことを合理化できる。（図-1の外れ値についてもおそらく同様の余地はある）

19

## 浮子観測データとの整合性の確認の実施方針（案） 図-2

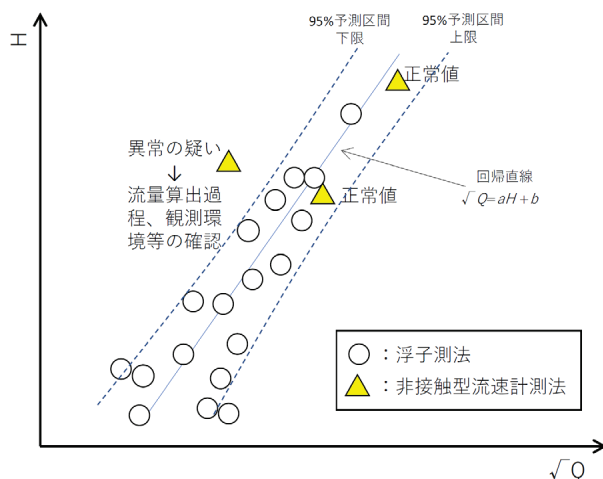


図-2 浮子観測データによる 95%予測区間と非接触型流速計測法データ

図-2のチェックでは、①浮子測法のばらつきが大きいと新手法を採用しやすく、②浮子測法のばらつきが小さいと新手法を採用しにくいという特徴がある。

前者①は合理化できる（少なくとも浮子法のばらつきが大きいという欠点を新手法で解消できる）が、後者②は、浮子法が10%大きめに出るという特徴を考えると、場合によってはより尤もらしい新手法の採用を阻害する可能性もある。

いずれにしろ、図-2の浮子測法データは過去のデータなので、どれくらい遡るか（意思）・また地形の変化などをふまえてどれくらい遡ることができるか（可能性）が重要となる。

20

## 浮子観測データとの整合性の確認の実施方針（案） 図-2

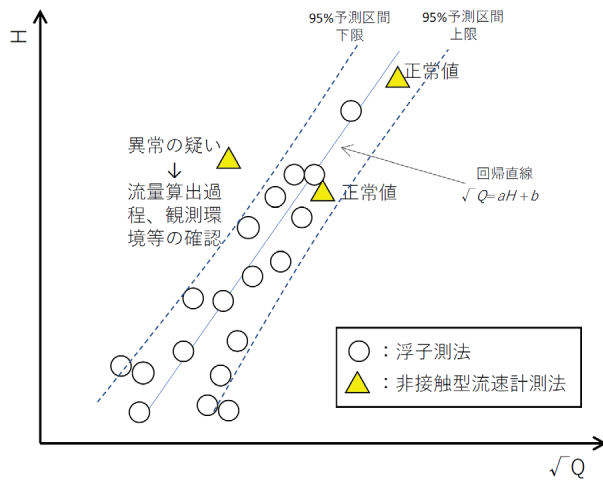


図-2 浮子観測データによる 95%予測区間と非接触型流速計測法データ

洪水波の非定常性による水位流量曲線のループについて、特に整合性では考えていないが、浮子測法と新手法のそれぞれのばらつきの検討事項には入るだろう。

特に新手法については、一洪水で複数のデータを得やすいので、矢印で点を繋ぐなどすると良いだろう（新手法がばらつきが大きいことの説明理由となる）。

21

## 考察（新手法の妥当性の検討について 1）

図-1で整合性（浮子との差が-20%～0%に収まる）が確認できなかった場合に、新手法が適切でないのか、**浮子測法が適切でないのか二通りが考えられる。**

**浮子測法が不適切である状況**を表立って議論する必要もないが、流量観測方法の切り替えの本質として重要であるし、浮子測法での観測に問題を抱えている流量観測地点の切り替えについては、**その地点での浮子測法の課題を明瞭化**しないと、次世代流量観測への切り替えがしづらい。（浮子測法で適切に流量観測が出来ている箇所も多いはず）

**浮子測法が不適切である状況確認のため**、万能とはいえないとしても、浮子の軌跡の分析は役立つので、浮子観測中のビデオ撮影を活かすとよい（GPS浮子などでも良い）。

22



## 考察（新手法の妥当性の検討について 2）

新手法については、流量計算の際に、**区分求積法とDIEX法とで差**が生じる場合もある（困ったら両方の値を見てみると良い）。**風の効果**についても両方併記が良い場合も（補正が効き過ぎているような場合もありそう）。

新手法について、**横断流速分布の形**（河床形状と整合しているかや、ある程度の連続性など）、**水位変化による流速分布の変化**の様子などから、尤もらしいかどうかを推論することもできる。

非接触型流速計測法の手引き（案）もベースにしつつ、現場特有の状況もあるので、**創意工夫**。

## 【質疑・応答】

【パシフィックコンサルタンツ 浜口】先ほどのゼロからマイナス 20%の誤差の範囲に、浮子測法と非接触型流速計測法の誤差が入るところで、流量の高いところに関して、われわれが今思っているのは、ある程度比率の大きいところというのは、水深がものすごく大きいところになって、結構そこで使っている、4メートル浮子の更正係数が一番大きく影響しているのではないかと考えています。

逆にそういうところでは、ADCP で鉛直流速分布を取って、更正係数を検証することで浮子測法の流量を見直す、要は新しい方法で測った流速と比較する時に、バイアスがかかるという部分を評価した上で、整合性を評価するという流れのほうがいいのではないかと考えています。更正係数のところに関して、そういう評価をしていくということに関しては、要は、検討会のほうではいかがなのですか。

【神戸大学 椿】それは遠いというか、あまり触れないような、みんなでそういう話をしていこうという議論、雰囲気ではないということは確かなと思います。ただ、こういう場で少しずつ議論を進めていくのは大事だと思います。要は、更正係数を変えるということは、過去にさかのぼった更正ができるという話になってしまって、いつかそういうことをしていく必要があると思っはいるのですが、そのタイミングがみんな、空気を読んでいるという感じです。でも、いつかは我々の浮子の誤差に関する理解が深まって、みんなすっきりする日が来るとは思っています。

【パシフィックコンサルタンツ 浜口】先ほどの 95%の確度の H・Q の図面のところで、浮子の整合性が、浮子がきちんと計測されていて、幅が少ない時に、要はその傾き方が異なっているという形が出てしまうと、新しく測った方法でそのままグラフに載せた時に合わないということで、浮子測法からの変更ができなくなった時に、要は、元々あったデータを見直して載せるという評価の仕方は、なかなか難しいのですか。

【神戸大学 椿】まずは、そういう補正ができるようなバックデータがある、新しい更正係数というのがまとまってくると、もちろんあり得ると思います。可能性はありますし、そういうことは必要だとは思っています。

【中央大学 手計】やはり浜口さんがおっしゃるとおり、各事務所でこれをやっているコンサルさんがたくさんいっちゃって、多分、だいぶ困っているのではないかと思いますので。

【神戸大学 椿】そこはお互いに知恵を絞って、それぞれの状況に応じて、あの手この手

のみんなが納得できそうなロジックを、こういう場で議論して、共有できるといいのではないかと考えています。

**【中央大学 手計】** ですので、そういう意味では、こういう場で意見が出るということが大事だということですね。これはまた検討会でフィードバックしていただけるということですか。

**【神戸大学 椿】** そうですね、そういうところはあると思います。