

7. 浮子測法の不確実性について

国立研究開発法人土木研究所

萬矢敦啓

【講演】

土木研究所の萬矢です。すみません、今日は座って発表させてください。浮子観測の不確実性ということで発表します。少し前まで流量観測全般の不確実性の話はいろいろ議論して、そこそこの計測器では定義できたのではないかと考えていたのですが、浮子だけはどうやってやろうということをずっと考えています。私の中では長年の課題があって、それが、これだったらもしかしたらできるかもということで、まだ議論自体はそんなに煮つまつではないのですが、この場において話題提供したいと思っています。

まず、大まかにアウトラインですが、今回出てきた河川水の水理現象はすごく面白いと思って、これが不確実性とどう結び付くかというのは皆さんのが想像にお任せしますが、そこを少し共有したいと思っています。それから、浮子そのものの分析を結構やっています。それを PTV、パーティクルを追っていく計測と、それから周囲の流速の PIV で比較した時に、どのようなものが見えてくるかということです。それから、2 の知見を用いて 3 の浮子のモデル化を行い、そのモデル化の結果から不確実性を検討するという段取りになります。

観測結果は、神通川という富山の川で、こちらの会社の方々が一生懸命やっていただいいた結果となります。実際に使うのは、いろいろな観測をしていただいているのですが、浮子と ADCP と UAV、この UAV の結果が、今回は非常に参考になりました。

神通川の神通大橋という橋は、上流から下流に向けて高水敷があるような川で、割と右岸側に砂州が付いているような感じの川です。今回の観測も、左岸側の高水敷に水が乗ることなく、その中を流れていくということです。実際には、これは ALB の結果ですが、左岸側はかなり深くて、右岸側は砂州の上になっていますが、この中を、では浮子がどうやって流れたかというのを、まず答えを言ってしまうと、この青い線のように流れていくわけです。一番深いところからそれなりに真っすぐ流れるのですが、砂州の上は、砂州の上をはうような流れが出てきたということになろうかと思います。

これは実際の映像です。実際の映像では、これもすぐ流してしまうのですが、いろいろ、今、浮子などが流れてきましたが、ADCP の測線と浮子それぞれの航跡、それから 4 つの浮子を同時に投げた結果というのが、20 分間ホバリングで、ほぼ微動だにしないような動画が得られています。こういったことを使っていろいろやって、そのうちの約 10 分間を多重露光すると、どうなるかというと、浮子が通過したような値や、これは面白いのですが、鳥がここに飛んでいく様子も下に映っています。それから ADCP の航跡が映って、こうした動画を使っていろいろやるわけです。

その時に、今、この中の結果、これを全体で PIV を用いるところという形になります。赤いところが流速が速い、青いところが流速が遅いという形になって、この辺りが非常に、濁筋があるので、流れが集中していることがよく分かると思います。それで、今、少し遊びで、この部分を切り出して、これを時間展開するとどうなるかというと、左側のようになります。そうすると、かなり速い、遅いというのが連続して続くようになって、それを、

このライン上の横断の流速分布を描いてみると、灰色のようにものすごく分布するわけです。

赤い中心が平均で、青いものが、その中の $\pm 2\sigma$ を取っているわけですが、実際にADCPの観測をこの中心でやると、たくさん集合している中のどこかをさっと通るわけです。従って、ここは合っているけれども、実はここは合わないということが普通に起きてしまつて、少し驚きました。こういったものすごい振動現象を、例えば流量として平均すると、今は中心が $1,400\text{m}^3/\text{s}$ ぐらいなのですが、そこから $\pm 50\sim 100\text{m}^3/\text{s}$ ぐらいは平気で起こるような振動になっていると感じました。

この時の更正係数と河床高の時間変化は無視です。平均流速、表面流速だけが振動しています。その時に対応して、更正係数がどのように変動しているかはよく分かりません。でも、その部分が同位相で変動しているのか、逆位相で変動しているのかによって、流量のばらつきもいろいろ変わってくるのでしょうか、表面流速だけ見ると、そこそこばらついている、振動していると感じました。

まず、そういった現象をさらに深めるために、今、これは1秒平均です。実際は60分の1でデータを取っているので、もっと細かいのですが、1秒平均でPIVで計測した流速分布を見ると、このような感じです。もともとこうしたようなものがたくさん流れしていく感じです。分かりますか。こういったものを全平均すると、ランダムに出るのではなくて、割と筋状になっていることに私は驚きました。

もう少し詳しく見ると、この中には橋脚の後流の影響より遅い部分がかなり入っていて、その後流の間の中を、かなり速い部分があるということです。さらに見ると、実際にこれは、後から説明する浮子の航跡を示しますが、この速い、遅いみたいなものが出てきて、これはまだ分析し切れていないのですが、私は、これは並列らせん流が出ているのではないかという印象を持っています。そうすると、結構速く値が出るのではないかと想像しながらやっているわけですが、ここの結論はまだ、なかなか出しづらいところがあります。

さらに、では浮子一本一本、PTVで赤いのが浮子のところなのですが、周囲の流速分布を見てみると、どういうところが流れているのだろうというのが私の最初の疑問点だったのですが、結構速いところにつられて流れていくという印象を持っています。

それで、では今の流況の中に、浮子を全部PTVで流すとこのような感じになります。その中で、区分断面はこのように開けているわけで、全部で9本流れているわけです。特徴的なのは、この辺りは大体区分の中を流れているわけですが、この辺の浮子は、本当はこちらに流れてしまったのですが、こちらに入るなど、いろいろなものが見えてきます。

では、今、ここを中心の浮子に着目して、これから議論の図を説明すると、まずこの部分だけ切り出したものの平均値と、それから標準偏差が出てきます。そうすると、全体の場合としては、 3m/s に近い値があって、それに $\pm 15\text{cm/s}$ ぐらいの流速差があるということです。それから、その間を、この赤いものが表面流速の値です。オレンジがフロートの流速です。

一番重要なのはこの部分です。この断面平均流速が真の流速値、全部の平均、真の平均になると定義しています。それから、浮子が通過する周囲、浮子が移動した、その周りの流速を引っ張ってきて、その値は幾らなのかというのがここに出す値で、それがこの値なのですが、それを平均すると、 3.27m/s です。それから、その時に実際、浮子は何メートルだったのかというのを見ると、 3.19m/s です。このようなことになります。

これらを考えた時に、この 2 つが何を意味するかというと、全体の平均に対して、浮子はきちんとしたところを、代表性を保ちながら計測しているのかということのチェックになるということと、それから、近傍流速と浮子の速度を直接的に比較することによって、更正係数を出すという話の流れです。

それを今、ケース 4、浮子ナンバー4 で見ているわけですが、それぞれの他のケースでいろいろ見てきて、特徴的なところを見ると、例えばこれは、橋脚の後流みたいなものがあって、浮子は端の速いところの脇を流れていきます。橋脚の後流があって、流速が一気に落ちるので、全般的な流速は、この 2.48m/s で遅くなるのですが、浮子が通過するような近傍流速は、 2.93m/s と、 50cm/s 以上速い値が出てきます。それに対して浮子流速は 2.69m/s ということになります。

これをそれぞれやっていくと、例えばここは、橋脚の後流の中に完全に浮子が入っていって出てこない、そのような流況になります。その時に、ここが特徴的なのですが、赤で代表される周囲の流速は、速くなったり遅くなったりするような中を、中心はあたかも、そんなに流れの影響を受けないような、でも割と影響を受けるような感じでゆっくり浮子が流れしていく様子が、このオレンジのラインで示されています。

それから、先ほど違う例をいろいろ出しているわけですが、割と結構ぴったり合うような例もあります。例えばこれは、全流域の平均流速に対して、浮子の近傍の流速は -0.01m/s しか差がないという結果も出てくるので、浮子は結構すごいなという印象を持ちました。

そういうことをずっとやっていく中で、では、これまでをまとめると、まず、これは全然言っていませんでしたが、PTV による流量観測と従来の浮子観測は、それほど悪くないという結果が一つあります。青いものがそもそも流量観測です。それに対してオレンジが PTV のもので、差がないというのと、流量値としても、ここに出ているものなのですが、それほど差がないということが非常に重要です。

それから、表面流速の時空間変化と浮子の速度変化は、こちらのほうが大きい場合もあります。それから、浮子の近傍流速と PIV の $\pm 2\sigma$ が、割と範囲内に入っていくことが面白いです。それから、例外は橋脚の後流で、PIV の平均値が大きく落ちてしまう場合は、浮子の流速が速くなることが分かります。

それから、浮子の流速と浮子近傍流速を比べた時に、浮子の速度が速くなるわけです。これはなかなか面白くて、更正係数 1 を超えることになるのですが、このメカニズムは何かという話なのですが、今日の感じだと、velocity dip など、そういうことがすごく影響してくるのではないかと考えています。

それで、更正係数全体をまとめた表がこれですが、先ほど出した 3 番は 1.10、5 番は 1.01 という数字が並び、おおむね 0.9 ぐらいです。この辺りの 0.58 などの数字は、流れが複雑過ぎて、平面 2 次元ではなかなか議論できないもので、変な数字が出てきます。

では、こういった知見を受けて、どうモデル化するかということなのですが、今、赤いものが PTV の結果として出てくるわけですが、その中で、推定浮子速度というのを欲しいわけです。この中で、ではどうやってやるかというと、これは 3 次元流速分布が欲しいわけですが、今現在あるのは表面の PIV の計測結果なので、これをどうやって使うかというところで少し苦労します。

まずは浮子そのものの基礎方程式があって、それは浮力や重力、それから、流れから受ける流体力から浮子の加速度が決まるという式から入るわけですが、その時に鉛直方向を、この 2 つのほうを無視して差分化すると、こういう式が出てくるわけです。そうすると、この平面流速、PIV から受けて、浮子の流速が変わって、その差分によってそれが流体力になり、浮子の流速が変わるという式になろうかと思います。

この部分で、浮子速度に影響を与える流速を計測結果から得るために、鉛直平均流速を介するわけなのですが、例えば PIV からの鉛直平均流速を出そうとすれば、通常の 0.85 みたいなものを使ってデプスアベレージを換算します。一方フロートは、デプスアベレージを換算するために、フロートの更正係数があって、計測された浮子との関連の中でデプスアベレージを出します。

その中で、デプスアベレージ同士を使って議論しようとすると、この式から分母に持つていって、こちら側に持っていくと、合成アルファみたいなものが出てきて、この合成アルファというのが、先ほどから出てくるアルファになるわけですが、これをいろいろ考えようということです。

取り急ぎアルファサーフェスを 0.85 で、アルファフロートを基準どおりでやってみたらどうなるでしょうか。そうすると、例えばモデル化した浮子の、これはすぐ結果ですが、この流れの中に今のものを、ここに、それぞれの場所に浮子を投下し、それが時間的にどう動くかということを示した結果です。

この浮子は残念ながら領域外に出てしまって、計測できなかったところです。この浮子はそれなりにいい流れで、この辺の浮子は少し複雑な流れがあり過ぎるなど、いろいろな結果が出てきますが、それらの流下したものを使って、流速結果を出すとこのような感じです。先ほど少し示したように、ここの浮子はカウントされなくなってしまったので、流量値は出ないということになります。実際の PIV の結果はこういう形になるので、悪くはないかなという感じはあるのですが、まだ流量値が出ていないところから、評価しづらいと思いました。

では、それを受けて、このモデルの中に適用するために、今度は不確実性の算定を行うわけですが、今ここで浮子を投下したところに、直接的な値の周辺から ±5m のボックスの中に、100 本の浮子を投下するという試みをやります。それぞれがどうやって流れていくか

というのが、今のもこのうちの一つなのですが、この黒い点が全部、シミュレーションとして出てきた結果です。

それを、それぞれの番号ごとに浮子を流すと、例えば一番端のほうは、先ほどは変な形で領域外に出たケースですが、ちなみに、この赤いものが PTV の結果です。それに対して、割と赤も含めた流れになっているかなという感じになります。それから、この辺の浮子はいいように流れていますが、例えばこの浮子になると、だいぶいろいろな広がり方をして、やはり 3 次元性の流れが強いところは、浮子の流下を予測するのが非常に難しいということになろうかと思います。また、ここも、すごく端の部分なのですが、浮子を流すと全部外に出てしまう、そういう流れになっているわけです。

こういったことについて、今、100 本の計測結果が出てきました。それをまとめるとこうなるわけですが、それに対して流速の、例えば平均なり標準偏差を取ると、本来の浮子に対して、少しだけバイアスエラーがあるところもありますが、ランダムエラーは驚くべきことに 12%しかありません。こんなに収まるのだと思って驚きました。PIV の空間的な誤差が 11%なので、同程度の数字が出ているのではないかと思います。

以上、まとめですが、このまとめを確認して、今後の検討です。やはり 3 次元乱流計算は検討が非常に重要で、これによって浮子がどう動くかというのをきちんと真面目にやりたいと考えています。それから、今度は更正係数の PTV、PIV を真値としてこの辺を動かすと、この数字がどれだけここに近づくかということが、今後の検討で、それが正確に合いまざると、3 次元的に複雑でない流れに対しては、浮子のモデル化がきちんと進むのではないかと想像しています。以上で発表を終わります。

【質疑・応答】

【岐阜大学 吉村】PIV の時間変化を示されていましたが、あの時間変化は、ある程度物理的に妥当な変動なのですか、あるいはノイズ的なものですか。

【土木研究所 萬矢】ADCP や電波式流速計の計測を、例えばこの辺の断面の一点で実施していて、それに対して変動がどのぐらいか、変動の幅などを比較しながら、それほど悪くはないかなという感想を持っています。これが 60 フレームパーセカンドの映像なのですが、それをそこまで細かくやってしまうと状態が悪くなるのです。ですから、そこの落としどころがどこかというのは結構悩んでいて、1 秒ぐらいではないかと思っています。

【神戸大学 椿】後半のシミュレーションで、100 個の軌跡を比べていて、分散しているところがあったのですが、その分散している理由は、それぞれの流速分布が違うからということなのですか。

【土木研究所 萬矢】使っている画像は同じです。場所だけが違うということになります。

【神戸大学 椿】投下場所が違うのですか。

【土木研究所 萬矢】投下場所だけです。

【神戸大学 椿】流速分布自体は平均値に従って動いているのですか。

【土木研究所 萬矢】1 秒平均したものがそれぞれあって、ある場所からそこに移動して、移動先でまた流速の影響を受けて次の場所に移動するというのを、ずっと追い掛けています。場所が違えば流速も大きく変わるので、その影響を受けてばらつくという感じになろうかと思います。

【神戸大学 椿】1 秒ごとに時刻は少しずつ時間進行していくのですか。

【土木研究所 萬矢】そうです。

【中央大学 手計】これはやはり、もっと、乱れないですか。

【土木研究所 萬矢】これはそれぞれの川の特性です。いろいろな渦が発生しているところではもっと違う挙動になると思うのですが、ここではこういう落ち着き方をしたという

ことかと思います。もちろんいろいろパラメータがあるので、例えば今、 $5m \times 5m$ の四角の中でやっているかと思うのですが、もっと広げたら、それはもう少し変わるのは否めません。ただ、現状で流した人に聞いて、このようなばらつきが出るけれども、どう思いますかと言ったら、このようなものではないですかと言うので、このようなものかなと思っています。

【東京理科大学 柏田】 多分感想になると思うのですが、昔、ADCP が出来て河川に適用し始めた頃に、偉い先生方からいろいろなご批判が確かあったと思います。その当時、よく浮子は時間的、空間的な平均図を取れるからいいのだという話がある一方で、ADCP は瞬間値を取っているからよくないと言われて、そのようなことはないと、私たちは確かに反論していました。

それをまさしく証明するような結果であって、浮子も時間的、空間的にいろいろな渦の影響を受けながら、平均図をうまいこと取っている部分もあるのだなというのが、今回こういう PIV の結果などを見て、なるほどと、少し私も言い方をいろいろ考え直さなければという発見があるご発表でした。非常に面白かったです。

真面目にこういうものをきちんとやろうとすると、最後に萬矢さんがおっしゃっていたように、3 次元乱流、しかも、多分固液混相流の、きちんとシミュレーションをやって、浮子にかかる力とその浮子の応答を真面目にやらなければ駄目で、そのようなことを誰ができるのだろうかと思うのですが、それをやって初めて本質的な議論ができるのではないかと思うので、次の発表を期待しています。

【中央大学 手計】 振動という話をおっしゃっていたのですが、周期性がありそうだという話なのですか。

【土木研究所 萬矢】 それは分かりません。ですから、そこは大事で、どのような渦が発生しているのかというのを見極めながら、特に大規模平面渦が発生しているようだと、長い周期の振動が発生することが考えられるので、そこはきちんと考えなければいけません。ここでいうと、右側の赤いラインがもっと変な動きをするということです。

ここはそんなに振動しないのではないかと感じています。というのは、ずっと平均しても、短い画像を見ても、それほど流速分布が変わらないので、そこが河道特性というか、断面特性、観測所特性で、それを一つ一つ詰めていくと初めて、ここの不確実性はこのようなものだということが分かるのだと思います。