

水位予測精度向上へ向けた状態把握技術の開発

洪水時の河床計測等を目指したドローン開発

黒 沼 尚 史・黒 田 幸 智

洪水時の河道内で生じている水理現象は、実測できない領域が多く「不確実性」の内在が多くの研究で指摘され、解析精度の課題となっている。

河川の流量を示す水理公式は、流速・水位・河道断面・粗度などの因子が相互に関係し算出される。同時に洪水時に同時計測できない因子が不確実性を増加させる。これらを同時計測できれば、これまで粗度係数などで調整していた「不確実性」を小さくすることが期待できる。

そこで不確実性を小さくする計測項目（因子）を整理しつつ、マルチビームソナーを搭載した飛行・着水・計測可能なドローン開発を協同5社で初号機を試作した。その初号機を開発するに至った考え方などを報告する。

キーワード：河川、ドローン、洪水、不確実性、水位予測、粗度係数、河床変動

1. はじめに

(1) 河川管理の特質について

平成25年4月「安全を持続的に確保するための今後の河川管理のあり方について（答申）」¹⁾にて河川管理における現状の課題が整理されている。

「河道は、河川区間ごとに異なる地形や河床材料等の条件に流水や植生等の作用が働くことによって絶えず変化していく。特に洪水という頻度や規模が不規則に発生する事象により、河道には大きな変化が生じ、その変化は一様ではない。

堤防は、基本的に土質材料で構成されているため、材料そのものに劣化を生じることはないが、歴史的に築造されてきた経緯からその構成材料は多様であり、基礎となる地盤の地質は場所ごとに異なる。このため洪水という外力を受けた時に生じる漏水や洗掘といった現象も、場所ごとに異なる。」

とされており、

「河川の管理の主要な対象である河道や堤防は、長大な延長と区間・箇所ごとに異なる特性を有し、洪水という特異な事象によって箇所ごとに顕在化する変化等を捉えて管理する必要がある。」

と指摘している。

(2) 洪水予測精度を向上させるための2つの技術的アプローチ

頻発する水害を背景に平成27年12月「大規模氾濫に対する減災のための治水対策のあり方について（答申）」²⁾では、速やかに検討に着手し早期に実現を図るべく下記の提言が行われている。

①洪水予測精度を向上させるための技術開発

②氾濫の切迫度が伝わる水位情報提供システム等の開発の推進

今回のドローン開発はこれらの動きも意識し、洪水予測精度を向上させるための技術開発に重要な2つのアプローチ（解析技術、観測技術）から、不確実性を小さくする効果が大きい観測技術の向上を模索する研究開発として進めている。

(3) 新技術開発の課題への認識

河川管理の効率化・高度化のための新技術開発での課題は、洪水に対する(a)侵食・洗掘（河川管理の特質）と(b)越水（水位予測）に対する予防保全対策として実務に繋がること。また、従来手法に比して現場展開への容易性を確保しつつ革新的に機能を向上させる技術的アプローチで進める必要がある。

「国土交通省 河川砂防技術基準（以下、河砂基準）」³⁾の「第5章河川における洪水流の水理解析の考え方」においては、「洪水流の作用により粗度状況（河床波、植生の倒伏・破壊状況等）や河道形状が変化し、また

その影響が洪水流に及ぶことについて、今後とも知見を拡充し、解析の信頼性をより高めていくことが必要である。」とされており、今回の研究開発の方向性と整合させる。

本稿での「河道断面の変化」とは、「河道形状」の変化と「河床形状」の変化を総称することとする。河道断面とは、流下能力の計算に用いる河積（河川の流積）を指し、河床形状とは河床波に代表される河床の形態を指す。

(a) 侵食・洗堀対策の課題

河川の侵食・洗堀による被災対応は、侵食・洗堀が引き起こされた現場へのスポット対策が主でありその多くが事後保全となっている。洪水では計測できるデータが水位と表面流速しか得られず、進行中の侵食・洗堀事象を評価するための手段がないことが評価を難しくしている。

そこで侵食・洗堀事象に繋がる①流下断面の変化（河床波、河道断面）、②流速（水面、層別断面）、③勾配（水面、河床）、④水位（観測点、連続縦断）が洪水発生時に計測できる技術の開発が重要だと考える（図—1）。

(b) 越水対策（水位予測）の課題

越水対策とは洪水時の河川水位対策のことであり、水位は河川を流下する水量（流量）と河道断面形状と動水勾配などにより定まる。

越水対策については河川縦断水位を把握・予測（河川水位予測モデル）するための技術的アプローチとして①水位観測技術の向上、②水理解析技術の向上の2つがある⁵⁾。

①水位観測技術向上の例

CCTV 画像や電波式流速計による表面流速計測手法や、危機管理型水位計による水位観測地点の増加が取り組まれている。

②水理解析技術向上の例

LP 航空レーザー測量やグリーンレーザ（ALB）を用いた河川定期縦横断測量により3次元点群データの収集・活用により、現況把握性が向上している。

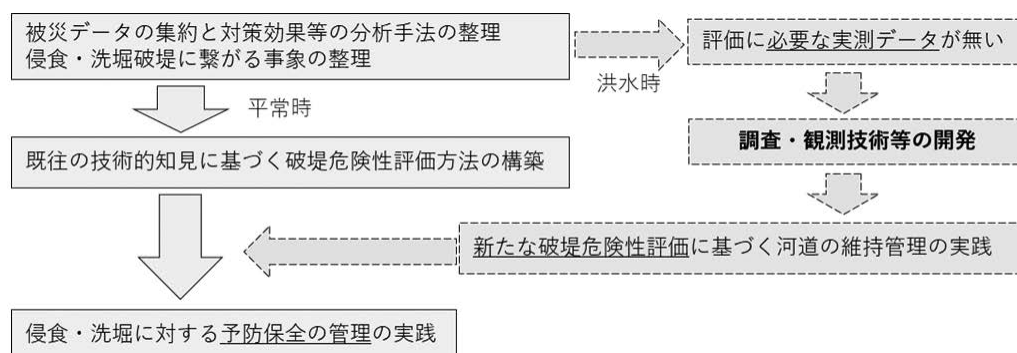
河川水位予測モデルの水理解析技術では、流出解析モデルに降雨予測と観測水位データを入力し計算することが一般的であるが、雨量予測モデルの誤差（不確実性）を受けやすいため、精度の高い予測が難しい。河砂基準調査編でも「不確実性」についての記述は、「河道解析」に関わる部分で粗度係数関連が1か所、「流出解析」に関わる部分で気候変動に関連して6か所散見される。

精度向上に向けた取り組みとして、①②の両技術にデータ同化技術を取り扱った論文⁴⁾では、河川水位予測モデルに河道水理モデルを組み込み各断面の水位を計算することで、連続的な河川水位を把握することを可能とし、さらには河川水位予測モデルにデータ同化技術を導入し観測水位に適合するようにパラメータ推定した予測計算を行うことで、精度の高い河川水位が予測できるとされている。

しかし河道解析モデルには、粗度係数を含む3つの「不確実性」が内包されており、少なからず影響をもたらすとされている。その3つの不確実性とは、

- ①計算水位に支配的な影響を与える「粗度係数」。洪水時の水理現象によって変化することがわかっており、その要因として河床波などが考えられるが成因はいまだ明確ではない。
- ②流量算出に用いられる定数的因子である「河道断面」。H-Q 曲線見直しの要因となる。
- ③河床材の粒径に応じて様々な形態に変化する河床波現象。洪水時の粒径調査が難しい。

以上から「越水対策＝洪水の水位予測精度の向上」には、水理式に用いられている「河道断面」と「粗度係数」を不確実性と捉え影響を低減するアプローチで検討する。



図—1 侵食・洗堀対策の課題関係図

2. 不確実性の要素を分解する

(1) 計算水位に支配的な影響をもたらすもの

平均流速公式においては、河積に対し直角方向に一様である等流状態と想定し、河道断面の形で径深と河床勾配が与えられることで平均流速が算出される。水理学で用いられる代表的な Manning の公式は簡易で精度高く流速 U を算定でき、粗度係数 n と径深 R 、河床勾配 I の関数で表現される。

$$U = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2}$$

粗度係数を扱う多くの研究では、径深 R （水路断面の平均的な水深を表す）を変数として水理現象を整理している。これは河積（河道形状と水位高さ）、潤辺（河道の幅と水深）のいずれもが同時に変化している洪水中的実河川の場合においても、一般的な手法として広く利用されている。

洪水中的の水位予測はこうした公式を用いて、評価したい位置で想定された流量 Q に対して、「河道断面」と「粗度係数」から水位を逆算し評価する。ここでは「河道断面」は変化しないものとして取り扱われるが、実河川の現状値と整合させるために「粗度係数」を調整に用いている。（多くの基準・既往の研究で、「河道断面の変化」と「粗度係数の変化」が「不確実性」として指摘はされている。）

(2) 「河道断面の変化」

実験河川での研究例⁵⁾によれば、河床波が洪水流量のピークに併せて発達し、洪水終了とともに消失することが計測され、河床波は波高で水深の 10～50%、波長が波高の 5 倍程度になる研究にも触れている。また「河床変動の特性把握と予測に関する研究」⁷⁾では、富士川の例で洪水時の増水初期から最大流量にいたるまでに河床が 2.0 m 洗掘され、減水期には洪水前の河床形に復元することが砂面計の計測結果から計測されている。

実洪水で侵食・洗掘によって河道断面が変化しても、各断面位置に設定されている「H-Q 曲線式（水位から流量を推計する式）」は、変化前の実測断面を基にしているためその時起こっている断面の変化による影響を加味できない。そのため大きな河道断面の変化（河床波の発達や侵食・洗掘による）が生じた以降は、前提となる計算条件が変わり洪水予測精度の低下が生じる。

(3) 「粗度係数の変化」

洪水中に起こる事象である河床波は、幾種類の河床形態として分類されており、粗度係数に大きく影響するとされている（表—1）。

ADCP 技術（超音波ドップラー流速計：Acoustic Doppler Current Profiler）の観測結果と、Manning の断面平均流速公式を基にした Slope-area method

表—1 河床波の特徴と定義（土木学会水理委員会，1973 を微修正）

河 床 形 態		形状・流れのパターン		移動方向	河 床 波 の 特 性
		縦 断 図	平 面 図		
小規模河床形態	低水流域	砂 礫		下 流	河床波の移動速度は、流水の速度よりも小さい。砂礫の波長は、河床材料の粒径の約 500～1500 倍である。
		砂 堆		下 流	河床波の上流側斜面は、通常、勾配の急な下流側斜面に比べると、緩やかに傾斜している。砂堆の波長は、水深の約 4～10 倍である。
		遷移河床			発達の初期段階にある小さな砂礫と砂堆が平坦河床の間に広がっている。
	高水流域	平坦河床			多量の流砂が平坦な河床上を流れている。
		反砂堆		上 流 停 止 下 流	河床波と同位相の水面波と強い相互干渉を持つ河床波。
中規模河床形態		交互砂州		下 流	水流は、水路内を曲がりくねって流れる。交互砂州の波長は、水路幅の約 5～16 倍である。
		複列砂州		下 流	—
		うろこ状砂州		下 流	うろこ状砂州は、 B/H が非常に大きい領域で発生する。それは、魚のうろこのように見える。

引用) 山本晃一：沖積河川 - 構造と動態 -, 技報堂出版, 2010

(Manning の断面平均流速公式と縦断水位勾配を用いて流量を算定する方法) による流量値を比較する研究⁸⁾で、河床高と粗度係数のそれぞれの変化が打ち消しあうような作用が起きていることも示されている。

この研究では ADCP 観測値から逆算された粗度係数は、洪水初期 0.04 が洪水ピーク時には 0.03 前後まで変化し、洪水の逓減時には 0.04 まで変化するという、水位変動とは逆の挙動を示すことが観測されている。

(4) 実測値とそれ以外について

洪水中に実測できるデータは限られているが、水位観測所による「河川水位」と、高水流量観測による「表面流速」がある。

『河川水位』は、直轄河川管理区間で約 1 km 近いピッチで整備が進む危機管理型水位計のデータが加わりつつありデータ数が向上している。しかし水位計算は 200 ～ 500 m の間隔であるため、水理現象を検証するためには十分なものとは言い難い。

一方『表面流速』は、浮子（ふし）による観測や、表面流速の計測に特化した電波流速計や画像処理型流速測定などが導入されている。この手法では表面流速を河積の平均流速に換算するために不確実性が指摘される「更正係数」が必要となる。

またその他の要素については、通常既知の想定や経験による定数を適用するが、当然その適用範囲外では大きく外れる場合があり、顕現化した不確実性は「粗度係数の変化」に意図的に統合調整されることで、計算式を成立させているともいえる（図—2）。

ここでは、特に「表面流速」を測る高水流量観測に着目する。

3. 流速を計る高水流量観測

(1) 高水流量観測の目的

河砂基準では「流量観測は、河川の計画・管理を適切に行うために、流域から河道への流出過程及び河道内の流下過程を把握することを目的としており、河川・砂防に関する計画の立案、工事の実施、施設の維持管理、環境の整備及び保全、洪水や渇水等による水災害への対応等を実施するための最も基本的な調査項目の一つ」とされている。

しかし実際に計測しているのは河川の「流量」ではなく「流速」であり、これらから河道断面が変化していないことを前提とした「流量」を算出している。

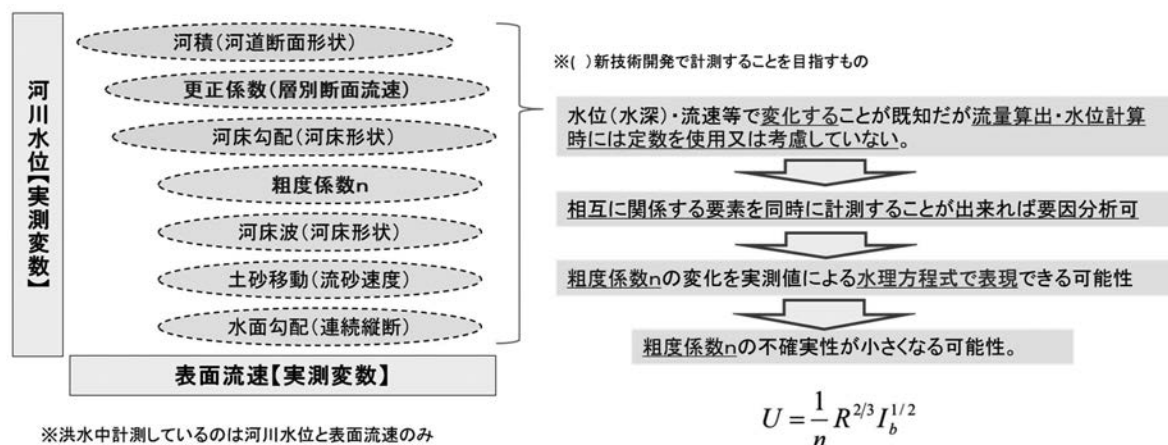
算出された流量だが実績値として河道の流下能力を定める河川の計画に用いられ、治水対策の検討が行われる。越水対策などの危機管理においても、洪水水位予測にこうした流量の値が用いられている。

(2) 近年の高水流量観測

浮子測法の課題については、「非接触型流速計測法の手引き（案）」¹⁰⁾にまとめられている。浮子測法の課題を改善・補足するために非接触型流速計測手法である画像解析手法や電磁計測手法が現場導入され、国交省事務連絡¹¹⁾では、浮子観測データと非接触型流速計測法データの相対差について「十分高い水位では -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」とされている（表—2）。

(3) 水位流量（H-Q 曲線式）について

H-Q 曲線式の目的は、河川地点での水位 H から流量 Q を関数的に推計することであるが、ここでの流量 Q は、以下の課題がある。



図—2 観測データと不確実性の関係

表一 2 浮子測法の課題とその要因

浮子測法の課題	要因
大規模出水時に観測所へ到達できない	観測所へのアプローチ道路が既往洪水で浸水、土砂災害等で通行止めになったことがある、またはなることが予想される
観測員の安全が確保できない	橋梁下流に歩道がない 長時間観測時に交代要員を確保できない 超過洪水時など観測員が危険となり浮子観測ができなくなる
浮子測法ではピーク観測が困難	水位の立ち上がりが速くピーク水位観測ができない 複数観測所を担当しておりピーク水位観測が間に合わない 超過洪水時など橋梁が危険となり浮子観測が困難
観測態勢	観測態勢の構築が困難なため流量観測業務の契約が困難
浮子測法では所定の精度が確保できない	浮子が砂州や湾曲などの影響で区分断面をまっすぐ流下しない 高水敷が樹木やビニールハウスなどで浮子が直線的に流下しない 河川幅が広く浮子の視認が困難

(a) 増水期と減水期において同じ水位でも流速が異なる現象がある

増水期と減水期で水面勾配（動水勾配）の差により同じ水位でも異なる流速が発生することが河砂基準にも示されているが、H-Q 曲線式は増水期と減水期の区別はつけていない。この点でも水位と流量の関係に幅（不確実性）が生じると考えられる。ここに水面勾配を計測することで不確実性の低減を図ることは可能であるが、効果的に水面勾配を算出することは困難とされている。

(b) 水位流量曲線は一水文年をひとつの有効期間として曲線式を作成する

「洪水による河床変動等を契機として水位流量関係が変化した場合は、その変化時を区切りとして H-Q 曲線式を更新する」とされ、大きな河床変動等（河道形状変化）が生じて水位（河床高さ含む）と流量の変化が明確であるならば速やかに更新する必要があると生じる。

(c) 「更正係数」の課題認識

浮子による流速観測は層別流速計測が可能だが、現場負担が大きいため水面流速のみ計測することが多く、非接触型流速計も計測方法の特徴から表面流速計測のみとなっている。計測された「表面流速」は、断面の平均流速にするため「更正係数」を乗じる。更正係数は砂防基準調査編でも定数化されているが、水深が 10 m 程度を超える場合は、更正係数の設定条件からのずれが大きくなることから、流速分布や実測値に基礎を置いた更正係数の再設定を行うことが望ましいとされている。

既往の研究^{6),9)}で更正係数は、洪水時に縦横断方向・時間によって変化することが報告されている。縦断方向での変化は、実験河川（移動河床）で河道幅・流速が変化しない環境で河床波の計測と層別断面流速を計

測したところ、河床波の発生と移動現象が生じ、更正係数が約 0.8 ～ 1.1 の間で変化し、局所的に 1 を超えている。

複数回の実験時間全体平均では 0.86 ～ 0.88 となり、従前から用いられている更正係数の範囲 (0.85 ～ 0.96) に収まるため課題認識を持ちがたいが、危機管理の視点では、局所的に変化する更正係数が大きな不確実性となる。

横断方向での変化についても、ADCP を橋梁に係留し層別断面流速を計測した研究¹²⁾があり、浮子による計測流速と ADCP 計測値と比較している。そこでは浮子の更正係数が 0.8 ～ 0.85 程度に収束しているが、ADCP で計測した計測結果では高水敷を除き 0.6 ～ 1.1 の幅が見られる。

4. 課題解決に向けた技術開発

(1) 水文観測に重点を置く

前述の不確実要素が影響する水理公式において支配因子である流速・水位・河道形状・粗度などは相互に影響関係にあり、複雑な多元関係にあるといえる。逆に言えばこれらを同時に計測できれば、関数化が容易になるのではないかと考え、水理解析から水文観測に重点を置く方針とした。

本研究では、①流速（表面流速、層別断面流速）、②水位（水深、水面勾配と水面形）、③河道形状（横断面、河床波）、④河床勾配を計測する機能の実装を目標とした（図一 3）。

(2) 計測機器の選定

前述手引き（案）等から計測機器の選定は、計測項目毎に適した下記とした。

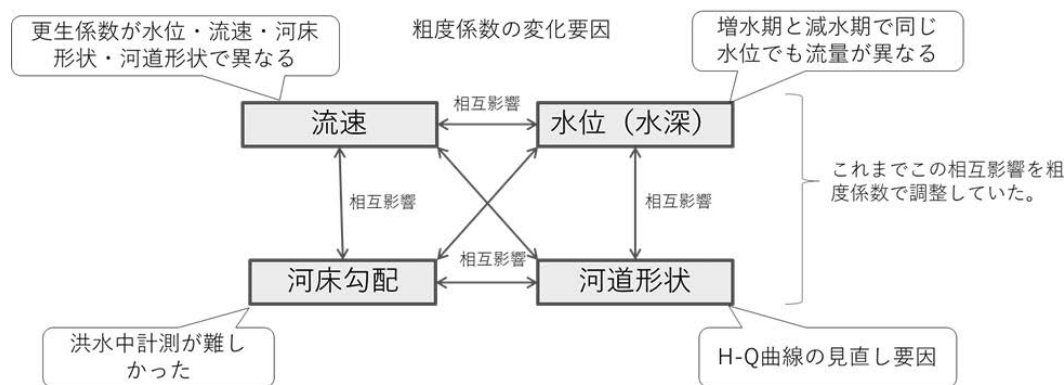


図-3 粗度係数の変化要因

①河道形状・河床波：音響測深法（マルチビームソナー）

②流速：超音波ドップラー流速計（ADCP：Acoustic Doppler Current Profiler）

③水位：RTK（Real Time Kinematic）

今回実装したマルチビームソナーは、洪水時の濁度の影響を受けないため河道形状・河床波を把握するのに最も適している。搭載ソナーは、水深20m、計測河床幅約340m、水面流速5m/sec級の洪水にてスワフ幅120度計測で約15点/m²の点密度を確保できる。公共測量河川地形測量で使われる航空レーザー測深ALBの水中部点密度1点/m²、港湾の浚渫マニュアルによる3点/m²に比べて十分な点密度を確保できる。また層別断面流速計測にはADCPを利用する。

・河川水位はドローンに搭載したRTKによって、着水している位置の座標を水位高さ（標高）として計測できる仕組みとしている。連続計測が可能なので水面勾配や河床勾配も求めることができる。

(3) 不確定要素を高水流量観測で計測するドローン

現場展開と従来技術との親和性を考え、浮子をドローンに置き換える発想を得た。浮子が流速以外を計測できるものとするれば、これまで不確定だった因子を定量化するのに合理的と考えたからである。浮子測法で指摘されている表-2の課題の多くは、ドローンを搭載した車両の移動性で、堤防天端などから離陸させ計測することで改善・解決できる（図-4）。

本研究での現地計測結果では、従来のボート型計測と比べ、1/17程度の工数で実施できた。従来ボートは準備時間が（搬入やボート準備、器具立て込み搭載など）3時間以上を要していたのに対し、今回のドローンは車両から荷下ろし後離陸まで4分程度だった。これは浮子測法の課題である準備工に時間がかかり洪水ピークのタイミングを逃すといった課題の解決に繋がる（写真-1, 2, 図-5）。

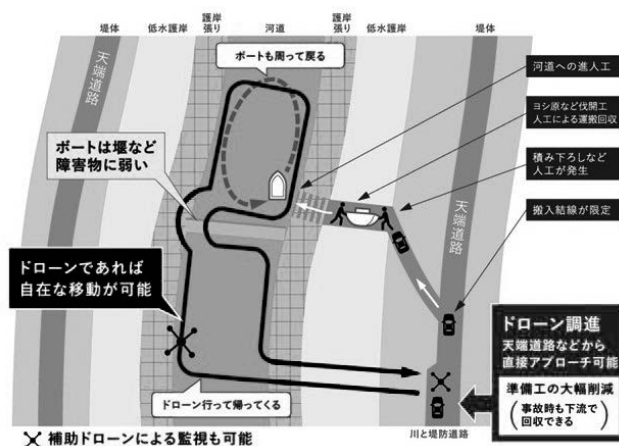


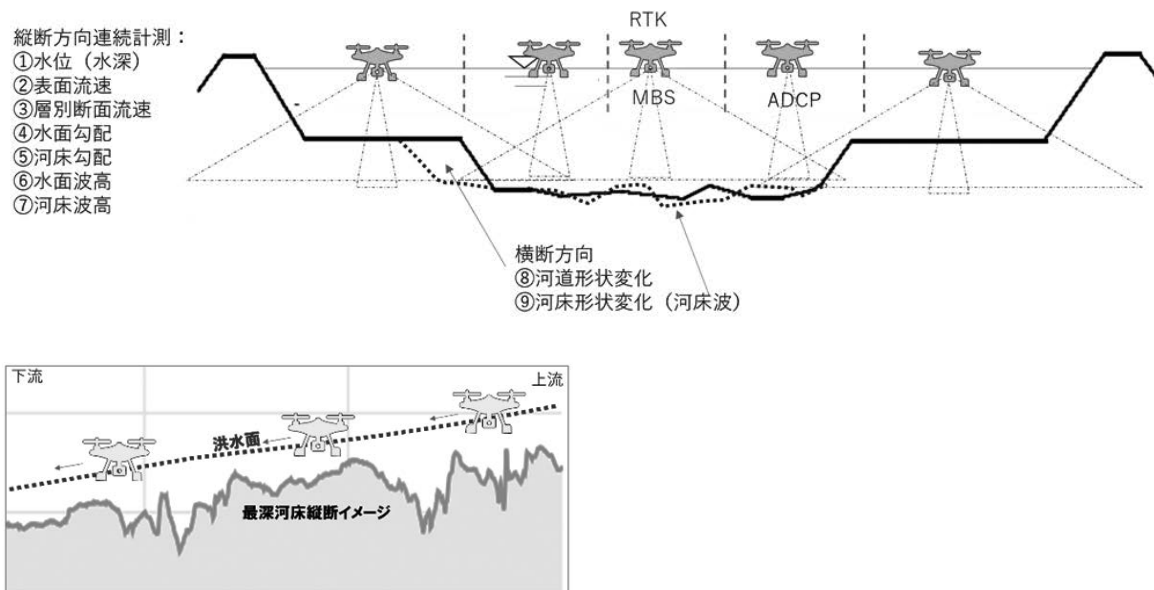
図-4 現地計测试験概要



写真-1 初号機計測の様子



写真-2 マルチビーム搭載型ドローン初号機概要（初テスト時）



図—5 流量観測高度化イメージ（浮子観測をドローン観測に置き換え）

(4) 洪水中計測を意識した開発コンセプト

(a) 発想の転換

今回の研究開発の思想では、

- ①洪水流に抵抗しない。（飛行・着水して計測する）
 - ②河道・河床形状・水位・流速（表面，層別断面）を計測する。（複数機でも可）
 - ③危険発生時には離水回避する。（走行力に頼らない）
 - ④距離追跡はドローンのL4認証制度等¹⁴⁾を利用する。（後の検討とする）
- をコンセプトにしている。

これまでの研究の多くは、橋梁などに計測機器を係留させその場に留まる方法を基本としており、「洪水流に抵抗する思想」となっている。

今回の技術開発では、「洪水の流れに逆らわない」思想とし、飛行～着水～安定した自然流下～離脱飛行をサイクルとした運用を目指している。さらに安定した水面流下能力を備え、連続計測するための姿勢制御できる機体構造を第一とした。これは「川下り」から発想したもので、激流を下る際水中を見れば同じ速度で水中の浮遊物が視認され、表面流速との相対的な変化だけになる。この視点で計測ができるかがポイントになる。

今回の初号機は、平時で性能①と性能③を実装しており、性能②についても洪水中の計測実現を準備している段階である。流速分布の計測についてはADCP搭載を目指している。また性能④は制度的に未整備な課題もあるため、今後整備されるL3.5規格の具体化やインフラ整備の結果を待って導入したい。特に機体

は殆どが水面流下で活用されるものであり、360度カメラによる水面流速計測・安全監視用カメラの兼用などの運用についても実用化を進めたい。

(b) 機体開発メーカー等との共同開発

今回の機体開発は、水中ドローン搭載の着水可能飛行ドローン事例がヒントになり、水中ドローンの代わりにマルチビームソナー機器搭載の可能性を考えたことによる。しかし上記事例の実験機体は海面にかりうじて浮く程度の安定性だったため、河川での計測を実現するために、浮体構造から全面的な見直し、ペイロードの倍増を行い令和3年度に研究着手し令和5年度に初号機試作が実現した。

初号機製造は河川財団が発案し共同研究中の建設コンサルタント、機体を製造できるドローンメーカー、マルチビーム計測機を提供する測量会社、着水可能機体の商標をもつ通信企業の5社による共同開発で実現した。

2号機の製作では、洪水流下と計測分析を意識しチームを再編して開発に取り組みたい（図—6）。



図—6 2号機イメージ

(5) 高水流量観測の高度化が洪水水位予測精度向上に直結

高水流量観測で算出される流量は、計画及び危機管理に用いられる最も上流に位置する重要な要素であることからこの段階で不確実性を小さくすることが最も効果的と考えられる。そこで前述の課題を踏まえ、洪水水位予測の3つの不確実性のうち、「河道形状の変化」と「粗度係数の変化」について高水流量観測の高度化で対処可能にすることを方針とした。

洪水水位予測モデルは、水位観測技術と水理解析技術で形成されるが水理解析技術の不確実性を観測技術を高度化することで、河道解析モデルの課題となっている不確実性を減少させ河川水位予測モデルの精度向上を図ることとした。

度向上すると考えている。これは河床変動を考慮した越水危険箇所を予測できることになり、治水機能の向上に寄与する。

これまでの研究では、補正係数を伴う計算式が多く考案され運用されているが、計測できていない因子は不確実性を含んだ定数として表現されている。しかし実測できるデータ（層別断面流速、流向、水位、河道断面変化等）が増えることで、不確実性を低減させられる。それは洪水水位の予測精度向上に大きく寄与すると考えられる。

それには、高水流量観測の実測データの蓄積が必須であり、本開発が一つの解決策として多様な関係者と多くの実測データを共有することで水理研究の発展に寄与できれば幸いである。

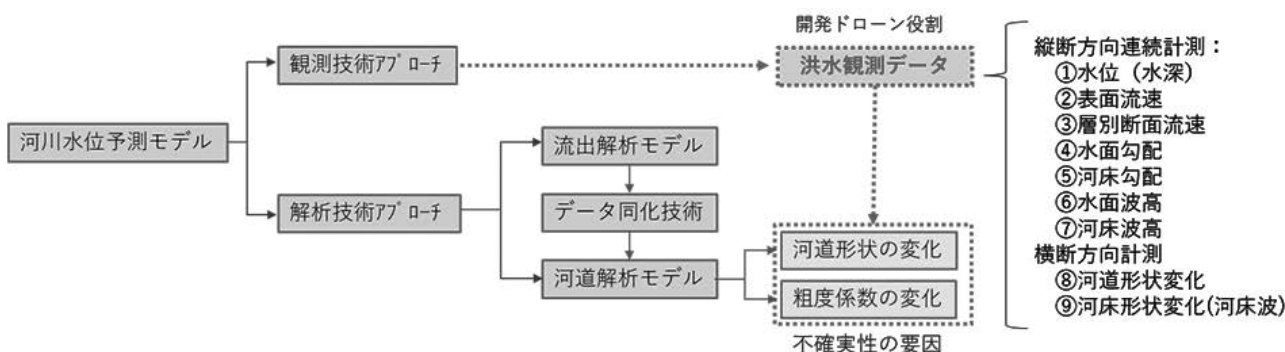
5. おわりに

(1) 洪水水位予測精度向上への期待（図－7）

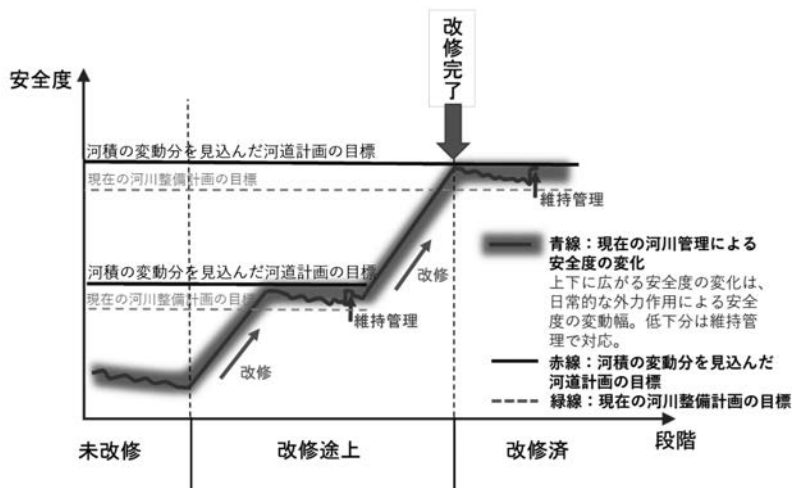
河川断面毎の計算水位は、流下能力の算出結果と実測水位に対する縦断的連続比較が可能になることで精

(2) 河積の変動分を見込んだ河道計画という考え方

河川財団水害研究会の「河川の安全性と河川管理責任を考える」¹⁵⁾では、「河川技術の進歩によって河床変動として生じる現象を、水工学的な手法により定量的に評価することによって、改修済みの河川に生じる



図－7 精度向上に向けたアプローチ



図－8 河積の変動を見込んだ計画のイメージ

（参照：「河川の安全性と河川管理責任を考える」（R5年11月 河川財団水害研究会））

河床の変動，すなわち現状では維持管理で対応すべき変動を合理的に見積もることができれば，改修と維持管理を総体としたより効果的な河川管理とすることができると考えられる。」としている。

そこには技術的な2つの課題があり，①河床変動計算等の技術を実務に適用できる技術水準の向上と，②上下流の流下能力バランスに生じる変化への対応とされている。

河床変動の影響は，「更正係数が縦断方向に0.8～1.1の変化」しただけで流下能力で約1.3倍の不確実性に相当し，「気候変動で2度気温上昇した場合の河川の流量が約1.2倍」になる影響と比べても無視できないレベルだと考えられる。

この河積変化が，洪水中に下流方向に移動しながら生じることが前述の研究で報告されており，本稿でのドローン技術開発を進め「河積の変動分を見込んだ河道計画の導入」に寄与できるよう研究開発に臨みたいと考えている（図—8）。

J C M A

《参考文献》

- 1) 安全を持続的に確保するための今後の河川管理のあり方について検討委員会 配付資料，社会資本整備審議会，平成25年4月
- 2) 大規模氾濫に対する減災のための治水対策検討小委員会 配付資料，社会資本整備審議会，平成27年12月
- 3) 河川砂防技術基準調査編，国土交通省 水管理・国土保全局，令和5年10月版
- 4) 土屋修一・川崎将生，データ同化技術を導入した実用的な河川水位予測手法の開発，（一財）土木研究センター，土木技術資料61-9（2019）
- 5) 土屋修一・川崎将生，洪水危険度の見える化に向けた河川縦断水位の把握・予測技術の開発，土木技術資料59-12，2017年
- 6) 橋田隆史・坂元賢司・佐々木智弘・萬矢敦啓・小関博司，無人ボート

搭載型マルチビームソナーによる洪水時の河床波計測について，日本測量調査技術協会，先端測量技術108号

- 7) 末次忠司，河床変動の特性把握と予測に関する研究，国土交通省 国土技術研究会報告，国土技術政策総合研究所 河川研究室，2004年
- 8) 小関博司・萬矢敦啓・工藤 俊・岩見洋一，洪水中の河床高と粗度係数の変化が河川流量の算定に及ぼす影響，土木学会論文集G（環境），Vol.71, No.5, I_7-I_15, 2015.
- 9) 萬矢敦啓・大平一典・菅野裕也・深見和彦，非接触型電波式流速計を用いた洪水流量自動観測手法の一考察，河川技術論文集，第16巻 2010年6月
- 10) 非接触型流速計測法の手引き（案），国土交通省 水管理・国土保全局，令和5年3月
- 11) 国土交通省水管理・国土保全局河川計画課課長補佐，浮子観測データとの整合性の確認の実施方針（案）について，事務連絡，令和5年3月29日
- 12) 福岡達信・水野寛太・柳瀬伸一・西澤諒亮，流量高度化に向けた複数の流量観測手法の観測精度の比較検証，河川技術論文集，第22巻，2016年6月
- 13) 水理委員会移動床流れの抵抗と河床形状研究小委員会，移動床流れにおける河床形態と粗度，土木学会論文報告集第210号・1973年2月
- 14) ドローンを活用した荷物等配送に関するガイドライン Ver.4.0，国土交通省，2023年3月
- 15) （公財）河川財団水害研究会，河川の安全性と河川管理責任を考える，河川財団，令和5年11月

【筆者紹介】

黒沼 尚史（くろぬま ひさし）
（公財）河川財団
河川総合研究所 情報施策推進グループ
主管研究員（当時）



黒田 幸智（くろだ ゆきのり）
（株）ニュージェック
経営戦略本部 DX推進部 DX推進グループ
グループ統括

