

河川基金助成事業

「観測データおよび数値計算に基づく
風が観測流量の推定精度に与える影響の評価」

助成番号：2023-5211-012

岐阜大学 工学社会基盤工学科
助教 吉村 英人

2023 年度

1. はじめに

我が国の洪水時における河川流量観測では従来から浮子が用いられてきたが、この方法は現地で人手が必要となるため、強風や大雨などの悪条件下では安全性に課題がある。そのため、現在、流量観測の無人化・省力化を目的に、電波流速計¹⁾や画像解析^{2),3)}などの非接触型流速計測法の活用が進められており、これに関する手引き(案)⁴⁾も作成されている。

非接触型流速計測法は河川の表面流速を計測し、それから推定した水面下の流速分布から水深平均流速を得て、流量を求めている。流速分布は対数則やべき乗則を仮定したり、あるいは MEM (Maximum Entropy Method) 法⁵⁾や DIEX (Dynamic Interpolation and EXtrapolation) 法⁶⁾などにより推定したりするが、実用的には表面流速と水深平均流速の比である更正係数を用いることが多い。したがって、正確な流量を得るには表面流速を精度良く計測し、流況に応じた流速分布を用いる必要がある。しかしながら、砂州、橋脚、樹木、風などの影響がある流れでは水表面は乱れ、流速分布も変化するため、流量の推定精度が低下する⁷⁾。特に、風は河川表面に直接作用し、吹送流を引き起こすため、流量の推定精度に及ぼす影響が大きい(図-1.1)。そのため、吹送流速の大きさに応じて表面流速の補正が必要となるが、現在のところ吹送流速を直接計測することはできない。暫定的には実河川での観測結果と海洋や閉鎖性水域での知見をもとに吹送流速を地上 10 m 高さにおける風速 U_{10} の 3%~5%として補正することとされているが、実河川では 4%~11%とそれよりも大きくなる観測結果⁶⁻¹²⁾もあり、今後も検討が必要な事項とされている⁴⁾。

実河川における吹送流の計測は上記の観点からいくつか行われているが、その数は限られている。また、風速に対する吹送流速は海洋や閉鎖性水域と比べてばらつきが大きい。このばらつきの要因としては①観測条件の違い、②基準風速の違い、③吹送流速の計測方法などが考えられる。①は風況や河川の水利条件の違いである。吹送流速の大きさは風速だけをパラメータとして整理されることが多いが、これは吹送流に関する研究が流速の影響が小さい海洋や閉鎖性水域を中心に行われてきたことが背景にあると思われる。しかし、河川では流れが支配的であるため、流速やそれとバランスする底面せん断応力、水深なども吹送流速の大きさに影響を及ぼすものと考えられる。したがって、河川の吹送流速は風速の大小だけでは評価することはできないのではないだろうか。

②に関しては通常風速 U_{10} を河川表面の直上で直接計測することは困難である。そのため、橋上や河岸、あるいは河川から離れた場所のある高さで計測された風速を補正あるいは直接用いており、当然ここにも任意性が生じる。既往研究でも河川表面近くと橋上に風向・風速計を設置して風の鉛直分布を計測しているもの¹¹⁾もあれば、河岸のみもの¹⁰⁾や橋上のみもの^{6),8),9),12)}、観測地点から数 km 離れた最寄りの気象庁観測所のデータを用いているものも⁷⁾あり、さまざまである。

最後に③に関して、既往研究⁶⁻¹²⁾では電波流速計や画像解析で計測した表面流速と ADCP で計測した表面近傍流速の差を吹送流速として考えている。しかし、電波流速計や画像解析は河川表面の波紋を追跡して表面流速を算出しているため、風波の発生により移流成分よりも波動成分が卓越した場合、吹送流速の増減を含んだ表面流速を十分な精度で計測できていない可能性がある。また、風作用時の波紋がどのような応答を示すのかも明らかにされていないため、風の影響と言われているものが吹送流によるものだけなのかということも疑問が残る。

以上のように流量観測において吹送流速を適切に評価し、それを考慮した補正を行うにはまだ多くの課題が残されている。①に関しては様々な風況と水利条件での観測データの継続的な収集と分析が必要

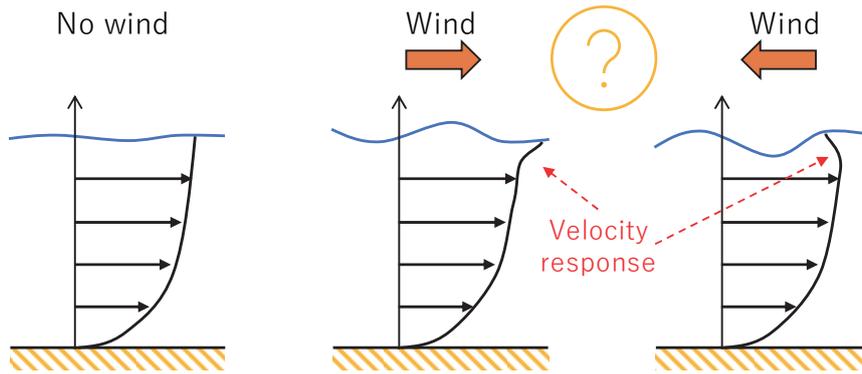


図-1.1 風の有無での流速分布の変化

となるが、風が吹いているときの流量観測は多く実施できないため、数値計算による検討も必要である。②に関しては実用面も考えると、統一した方法で風観測を実現することは困難であることから、観測可能な地点の風況と河川表面近くの風況との関連性を調べていく必要があると思われる。③に関しては風作用時の波紋を分析することで、風が表面流速とその計測精度に及ぼす影響を知ることができ、さらに波紋の挙動から直接吹送流速を推定することも発展として期待できる。

そこで本研究では上記課題の①と③に対して、それぞれ数値計算と現地観測から河川流量観測における風の影響を検討した。①では鉛直一次元の開水路流れを対象に風速、水深および底面せん断応力を変化させた数値計算を実施し、各パラメータが吹送流速や水面下の流速分布、水深平均流速の推定に及ぼす影響を調べた。③では長良川忠節橋において約半年間の画像解析による表面流計測と風向・風速観測を実施し、風作用時の波紋の挙動とそれらが表面流計測に及ぼす影響を調べた。第2章では数値計算による結果を、第3章では現地観測による結果を報告する。

キーワード：河川流量観測，非接触型流速計測法，画像解析，風の影響，吹送流

2. 数値計算による風が表面流速および水面下の流速分布に及ぼす影響の評価

鉛直一次元の開水路流れを対象に、水面に風応力を作用させた数値計算を実施し、風速や水理条件の違いが吹送流速や水面下の流速分布、水深平均流速の推定に及ぼす影響を調べた。また、数値計算という理想的な流れにおいて、吹送流速が風速 U_{10} の何%になるのかを確認した。

2.1 風応力作用時の河川の流れ

本計算で取り扱う風応力作用時の河川の流れについて説明する。河川の流れの平均流速分布は風や地形変化、二次流等の影響がない平衡状態を考えると、以下の粗面対数則に従う。

$$\frac{U_w(y_w)}{u_{\tau,b}} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{y_w}{y_b}\right) \quad (2.1)$$

ここで、 $U_w(y_w)$ は河床を基準とする高さ y_w での平均流速、 $u_{\tau,b}$ は底面摩擦速度、 κ はカルマン定数(=0.41)である。 y_b は粗度高さであり相当粗度 k_s と $y_b \approx k_s/30$ の関係がある。このとき、河床には次式の底面せん断応力 τ_b が作用する。

$$\tau_b = \rho_w u_{\tau,b} |u_{\tau,b}| \quad (2.2)$$

ただし、 ρ_w は水の密度(=1000 kg/m³とする)である。

風が吹くと水表面には風応力が作用し、風波が発達する。このとき、河川の表面流速 U_s は無風時の表面流速 U_{s_0} に吹送流速 U_c を加えて、

$$U_s = U_{s_0} + U_c \quad (2.3)$$

となる。風波界面上における平均風速分布は流れと同様に、一般に以下の粗面対数則に従う。

$$\frac{U_a(y_a) - U_s}{u_{\tau,s}} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{y_a}{y_s}\right) \quad (2.4)$$

ここで、 $U_a(y_a)$ は平均水面を基準とする高さ y_a での平均風速、 $u_{\tau,s}$ は表面摩擦速度である。 y_s は水面の凹凸を示す粗度高さであるが、これは風波の発達により変化する。風応力 τ_s は水面から高さ10 mにおける風速 U_{10} を用いて次式で表される。

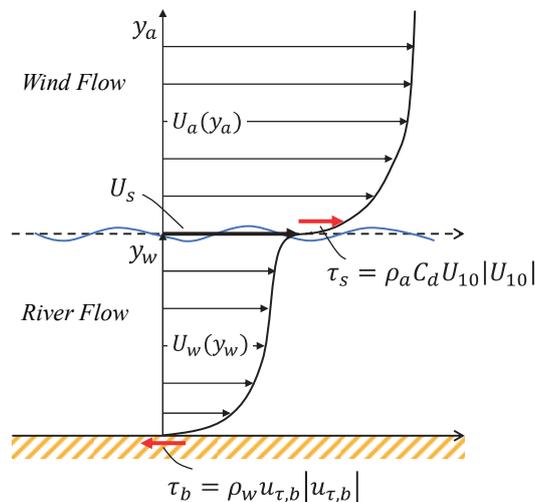


図-2.1 風応力作用時の河川の流れ

$$\tau_s = \rho_a C_d U_{10} |U_{10}| \quad (2.5)$$

ただし、 ρ_a は空気の密度 (= 1.25 kg/m³ とする)、 C_d は水面抵抗係数であり、次式で求められる。

$$C_d = \left(\frac{u_{\tau,s}}{U_{10}} \right)^2 \quad (2.6)$$

風応力の作用により、河川流の水面付近の流速分布は変化し、式(2.1)の対数則から外れることになる。

2.2 数値計算モデル

数値計算には著者らが開発した数値計算コード¹³⁾を用いた。基礎方程式は以下に示すレイノルズ平均を施した非圧縮性流体の連続の式と Navier–Stokes 方程式である。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \{2(\nu + \nu_t) S_{ij}\} + g_i, i = 1, 2 \quad (2.8)$$

ここで、 t は時間、 x_i は*i*方向の座標 ($x_1 = x$, $x_2 = y$)、 u_i は各方向の流速 ($u_1 = u$, $u_2 = v$)、 ρ は流体の密度、 p は圧力、 ν は動粘性係数、 ν_t は渦動粘性係数、 S_{ij} は歪み速度テンソル、 g_i は重力加速度の各方向成分である。乱流モデルには標準 k - ε モデルを用いた。計算領域は有限差分法で離散化し、空間離散化には 2 次精度中心差分を用いた。時間離散化には移流項に 2 次精度 Adams–Bashforth 法を、粘性項に Crank–Nicholson 法を用いた。また、速度と圧力のカップリングは Fractional Step 法により行った。なお、本計算では水面変動を考慮せず、水面を rigid-lid 近似で取り扱った。したがって、風応力は全て流れに作用する。

2.3 計算条件と水理条件

計算領域 $0.1h \times h \times 0.1h$ (ただし、 h は水深) の鉛直一次元開水路流れを対象とした。主流方向と横断方向には周期境界条件を与え、底面には式(2.1)と式(2.2)から決まる底面せん断応力 τ_b を、水面には式(2.5)から求めた風応力 τ_s をそれぞれ与えた。なお、水面抵抗係数 C_d は事前の検討結果¹⁴⁾を踏まえて閉鎖性水域で用いられている以下のモデル式¹⁵⁾から求めた。

$$C_d = (1.2 + 0.025U_{10}) \times 10^{-3} \quad (8 \leq U_{10} < 25) \quad (2.9)$$

$$C_d = 7.3U_{10} \times 10^{-5} \quad (25 \leq U_{10} < 50)$$

乱流エネルギー k は底面と水面でいずれも勾配ゼロの条件を課し、エネルギー散逸率 ε はそれぞれ次式で与えた。

$$\varepsilon_b = C_\mu^{3/4} k^{3/2} / \kappa (y_b + 0.5\Delta y) \quad (2.10a)$$

$$\varepsilon_s = C_\mu^{3/4} k^{3/2} / \kappa (y_s + 0.5\Delta y) \quad (2.10b)$$

ただし、 ε の下付き添え字の b と s はそれぞれ底面と水面を示し、 C_μ (=0.09) はモデルパラメータ、 Δy は境界最近傍の鉛直方向格子サイズである。水面の粗度高さ y_s は式(2.4)~ 式(2.6)から得られる。計算格子

表-2.1 水理条件

Case	h (m)	y_b (m)	u_{τ,b_0} (m/s)	y_b/h	Re_{τ}
Case-01	1	1.96×10^{-3}	0.10	1.96×10^{-3}	9.90×10^4
Case-02			0.14		1.40×10^5
Case-03			0.17		1.71×10^5
Case-11	2	1.96×10^{-3}	0.14	9.82×10^{-4}	2.80×10^5
Case-12			0.20		3.96×10^5
Case-13			0.24		4.85×10^5
Case-21	2	4.63×10^{-3}	0.14	2.32×10^{-3}	2.80×10^5
Case-22			0.20		3.96×10^5
Case-23			0.24		4.85×10^5

は風応力作用による水面近傍の速度勾配を捉えるため、粗度パラメータ y_s よりも十分小さくなるように設定した。

対象とした流れの水理条件を表-2.1に示す。水深 h を1 mと2 m、粗度高さ y_b を 1.96×10^{-3} と 4.63×10^{-3} m (それぞれマニングの粗度係数 n で0.026と0.03相当)、無風時の底面摩擦速度 u_{τ,b_0} を0.1 m/s~0.24 m/sで変化させ、合計9パターンの水理条件で計算を行った。水深 h と底面摩擦速度 u_{τ,b_0} を基準とする摩擦レイノルズ数 Re_{τ} は $9.9 \times 10^4 \sim 4.85 \times 10^5$ である。風速 U_{10} は $-30 \sim 30$ m/sの範囲で5 m/s間隔で変化させた。ただし、 $U_{10} < 0$ は逆風時、 $U_{10} = 0$ は無風時、 $U_{10} > 0$ は順風時とする。いずれのケースも無風時の底面せん断応力 $\tau_{b_0} = \rho_w u_{\tau,b_0}^2$ と釣り合う主流方向重力加速度を与えて計算を行った。水面に風応力を与えた場合には、底面せん断応力は計算された流れに応じて変化する。なお、数値計算モデルは鶴谷ら¹⁶⁾による風洞水槽による実験と比較し、検証した¹⁴⁾。

2.4 結果と考察

図-2.2に底面摩擦速度が最小であるCase-01と最大であるCase-23の流速分布をそれぞれ示す。Case-01では風速の増加とともに水面付近で流速が増減する。また、風速が小さい場合は水面の極近傍でのみ流速が変化するが、風速が大きくなるにつれて底面付近にもその影響が及んでいる。特に、逆風時では風速が大きくなるにつれて管路流れに似た流速分布に近づいている。一方、Case-23では風速20 m/s以上でも水面付近の流速変化はわずかである。Case-01とCase-23の風速30 m/s時の風応力の底面せん断応力比 τ_s/τ_b はそれぞれ0.32および0.042であり約10倍異なる。よって、同じ風速の場合は底面せん断応力が小さいほど表面流速が風の影響を受けやすいことを示している。

図-2.3(a)に風速 U_{10} と吹送流速 $U_c = U_s - U_{s_0}$ の関係を示す。Case-11~Case-13とCase-21~Case-23のプロットはほとんど重なっており、粗度高さの違いによる吹送流速の差異はみられない。今回の水理条件では粗度高さは水深に対して十分小さく、また、風が流速分布に及ぼす影響は水面側で生じるため、底面せん断応力が同じであれば表面流速は底面粗度の影響を受けにくいものと考えられる。一方、吹送流速の底面せん断応力と水深に対する依存性が確認できる。Case-21~Case-23の結果から同じ風速でも底面せん断応力が小さいほど吹送流速は大きくなる傾向にある。また、水深が同じで底面せん断応力が約2倍異なるCase-01とCase-02の吹送流速の差と、底面せん断応力が同じで水深が約2倍異なるCase-01とCase-21の吹送流速の差を比べると、特に後者が大きく、吹送流速は水深よりも底面せん断応力の

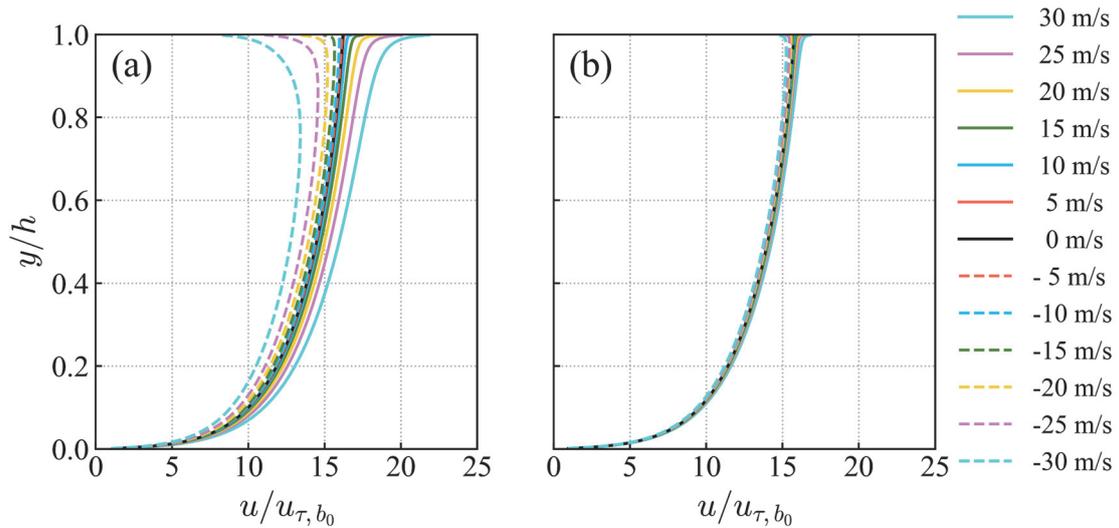


図-2.2 鉛直流速分布: (a) Case-01, (b) Case-23

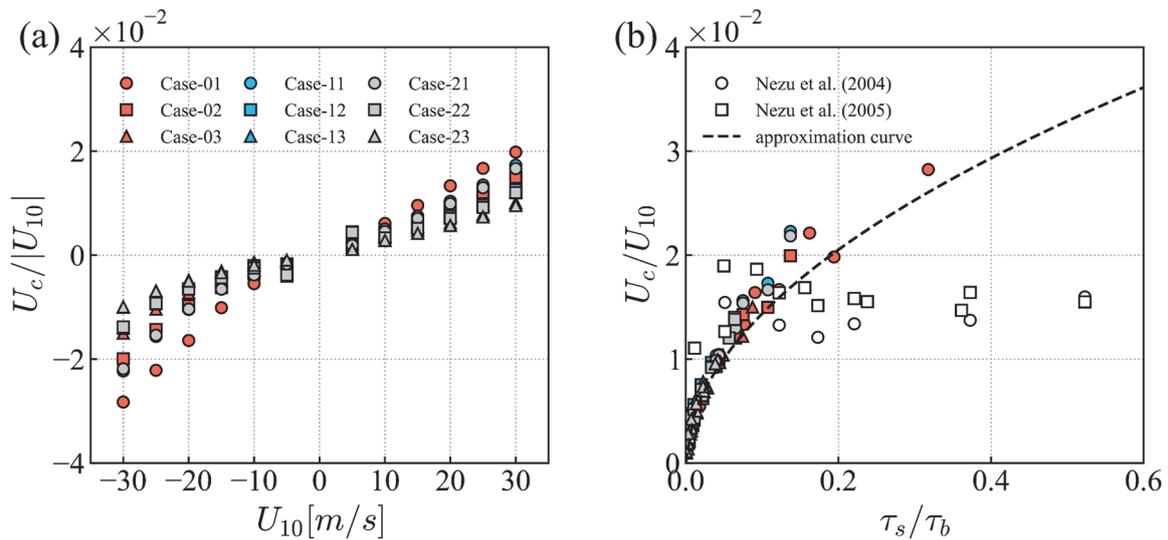


図-2.3 吹送流速の (a) 風速と (b) 風応力-底面せん断応力比の依存性

影響を受けやすいといえる。

図-2.3(b)に風応力の底面せん断応力比 τ_s/τ_b と吹送流速 U_c の関係を禰津ら^{17), 18)}による実験結果とともに示す。本計算で得られた吹送流速は τ_s/τ_b に応じて増加し、風速の3~4%に達する。この結果からも風応力に対して底面せん断応力が小さいほど吹送流速が大きくなる事がわかる。一方、実験では $\tau_s/\tau_b > 0.2$ で吹送流速が風速の約1.7%に落ち着く。実験では風速の増加にともない風波が発達し、風の運動量の一部が波の運動量へと変換されるが、本計算では水面変動を考慮していないため、風の全運動量が流れの運動量へと変換され吹送流速が過大になったと推察する。

図-2.4(a)に風速 U_{10} と水深平均流速の増減 $\Delta U_m = U_m - U_{m_0}$ の関係を示す。ただし、 U_{m_0} は無風時の水深平均流速である。風速10 m/s以下では増減は小さく風の影響ほとんどない。しかし、風速が10 m/sを超えると水深平均流速が急激に変化し、その増減は底面せん断応力が小さいほど大きくなる。図-2.4(b)に流量観測で用いられる水深平均流速と表面流速の比である更正係数 α の風速 U_{10} に対する変化を示す。

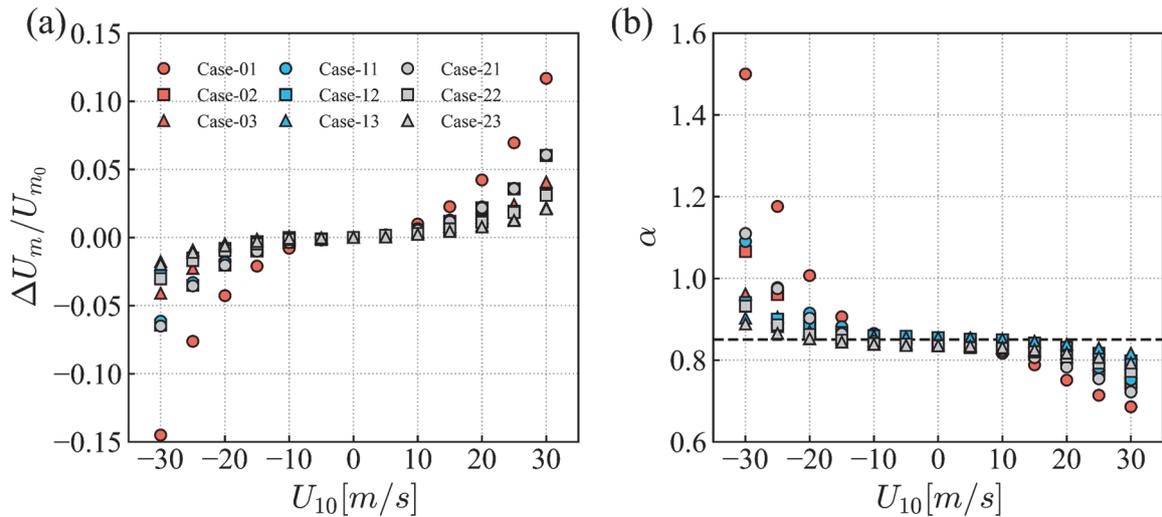


図-2.4 (a)水深平均流速の増減と(b)修正係数の風速依存性

風速 10 m/s 以下では標準値の 0.85 に概ね一致するが、風速がさらに増加すると標準値から大きく外れる。また、修正係数は水深平均流速と表面流速の比として定義されるため、表面流速や水深平均流速そのものよりも風速に対する感度が高く、特に逆風時の風速 20 m/s 以上では 1 を超えるようになる。なお、実際に風速が 20 m/s 以上となることはほとんどないが、重要なのは風応力の底面せん断応力比 τ_s / τ_b である。したがって、10 m/s 以下の風速でも τ_s / τ_b が大きくなる流れの場合には吹送流速が大きくなり、修正係数も標準値に対して 1 割以上の違いが生じる可能性が考えられる。

2.5 まとめ

鉛直一次元の開水路流れを対象に風応力作用時の数値計算を実施し、吹送流速や水面下の流速分布の風速や水理条件の依存性について調べた。計算から吹送流速の大きさは風応力だけでなく底面せん断応力や水深にも依存する結果が得られた。特に底面せん断応力に依存し、風応力に対して底面せん断応力が十分に大きい流れでは吹送流速は風速の 1% 以下と小さいが、底面せん断応力が小さくなるにつれて吹送流速は風速の 3 ~ 4% に漸近する結果となった。手引き (案) ⁴⁾ で定められている吹送流速の大きさは河川の水理条件によらず風速の 4% (3% ~ 5% の中央値) であるが、洪水時のように流速が速く、底面せん断応力も大きくなるような流れでは顕著な吹送流が生じていない可能性も考えられ、その場合 4% の風速補正は過剰となる。したがって、このような点も踏まえて今後の検討を進めていく必要があると考える。

また、今回用いた数値計算モデルは水面変動を考慮していないため、流れに対して実際よりも過大な風応力が与えられ、吹送流速も過大に評価している可能性がある。それでも吹送流速は既往の観測結果 ⁶⁻¹²⁾ よりも小さくなっている。観測では様々な不確実性もあるためその理由は不明であるが、画像解析や電波流速計による表面流計測では吹送流速を含んだ表面流速そのものではなく風波の伝播を捉えている可能性もあり、この点についても検討が必要である。

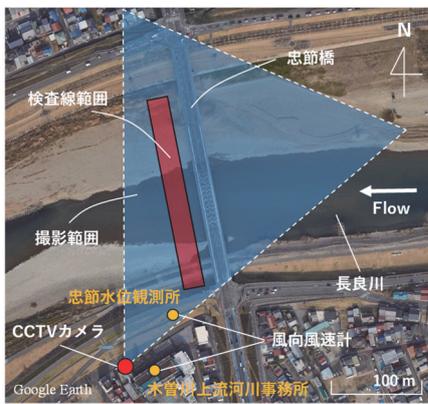
3. 現地観測による河川表面流計測における風が波紋に及ぼす影響の評価

風作用時の波紋の挙動とそれらが表面流計測に及ぼす影響を調べるため、STIV (Space-Time Image Velocimetry)^{2),3)}による表面流計測と風向・風速観測を実施した。

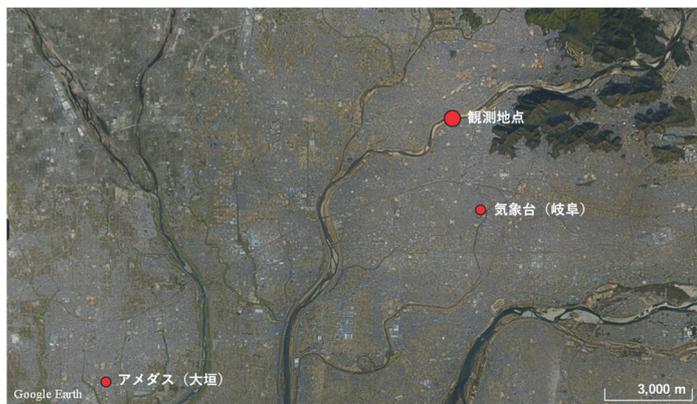
3.1 観測内容

3.1.1 観測地点概要

観測は木曾川水系長良川における岐阜市忠節橋下流を対象に2023年7月頃から約半年間実施した。図-3.1に観測地点の概要を示す。この地点では河川はおおむね東から西に向かって流れており、東風のときに順風、西風のときに逆風となる。河川表面の動画は国土交通省中部地方整備局木曾川上流河川事務所を設置されているCCTVカメラ（解像度：1920×1080 pixel，フレームレート：30 Hz）により取得し



(a) 観測地点



(b) 観測地点周辺の気象庁観測所

図-3.1 観測地点概要



(a) 水位観測所



(b) 事務所屋上

図-3.2 風向・風速計設置状況

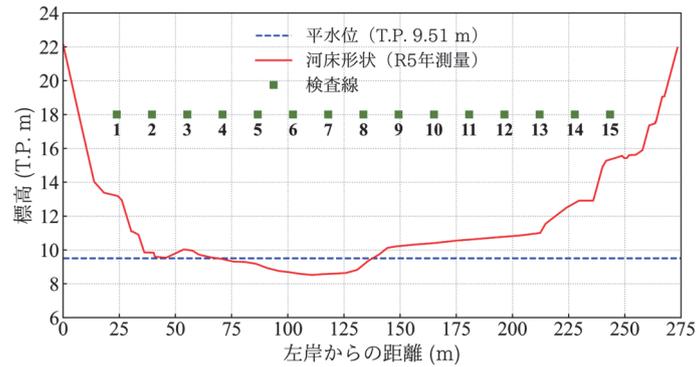


図-3.3 河道断面図とSTIVの検査線位置

た。また、風向・風速計（Onset 社製 S-WCF-M003）を図-3.2 に示すように忠節水位観測所（設置高さ：T.P. 21.75 m）と事務所屋上（設置高さ：T.P. 29.56 m）の二か所に設置し、1 秒間隔で計測した。設置高さは本研究で対象とした平水位（国土交通省水文水質データベース¹⁹⁾，2021 年値：T.P. 9.51 m）を基準とした場合、それぞれ約 10 m および 20 m に相当する。河川水位は水文水質データベースから 10 分間隔で取得した。図-3.3 には観測地点における河道断面図（R5 年測量）を示す。

3.1.3 観測データ

観測期間において風向や風速，河川水位に着目して抽出した 8 ケースの動画を解析対象とした。各動画の撮影期間とそのときの観測条件を表-3.1 に示す。また，各ケースの日時を含む週の観測データの履歴を図-3.4 に示す。なお，水位は撮影期間終了時刻における瞬時値を示し，風向と風速は 10 分間の平均値を図-3.1(b)に位置する岐阜（観測地点から約 3.5 km）と大垣（観測地点から約 15 km）の気象庁観測データ²⁰⁾と合わせて示している。動画は風向と風速を考慮して，無風，横風，順風，逆風の四つの風況に分類し，それぞれ 2 ケースずつ抽出した。ただし，無風は風速が 2 m/s 未満で河川表面に風の影響がみられない動画を対象とし，横風，順風，逆風は風速が 2 m/s 以上で風の影響が確認できた動画を対象とした。順風および逆風ではいずれも風が定常的に吹き，発達した風波が上下流に伝播する様子が動画からも確認できている。また，水位の違いが波紋や流速に与える影響を排除するため，水位はなるべく同程度となるように選んだ。そのため，本研究で解析する動画は平水時のものに限られる。出水時に関しては今後の課題であるが，観測地点では平水時においても波紋の移流が明瞭に確認でき，STIV で表面流速を計測することは十分可能であった。

3.2 STIVによる表面流計測

画像解析には STIV を用いた。STIV による表面流速の算出フローについて図-3.5 を用いて説明する。まず，斜めから撮影された画像を河川真上からの画像に幾何補正し，河川表面に主流方向に一定の長さの検査線を設定する（図-3.5①）。次に，検査線上の輝度値を時間方向に積み重ねて生成した STI (Space-Time Image)（図-3.5②）の縞パターンの勾配から表面流速を算出する（図-3.5③および④）。この縞パターンは波紋の挙動を画像で捉えたものであるが，波紋に表面流速に対応する移流成分以外の波動成分やノイズが含まれている場合には，移流成分のみを抽出して勾配を決定することが表面流速の正しい評価につながる^{13), 21)-23)}。風作用時には風波に起因する波動成分が顕著になると考えられ，本研究ではこの観点から風波の有無が表面流速の計測精度に及ぼす影響についても検討した。

表-3.1 解析対象とする観測データ

ケース	風況	動画撮影期間	風速 (m/s)		風向		水位 (T.P. m)
			水位観測所	事務所屋上	水位観測所	事務所屋上	
1	無風	2023/08/09 10:00-10:10	1.34	1.67	南東	東	9.50
2	無風	2023/08/30 15:50-16:00	0.67	0.67	北北東	東南東	10.10
3	横風	2023/07/25 18:50-19:00	2.67	3.01	南西	南南西	9.69
4	横風	2023/08/15 16:50-17:00	欠測	4.01	南南東	南南東	10.03
5	順風	2023/07/26 18:30-18:40	4.01	5.34	東	東	9.68
6	順風	2023/08/15 11:10-11:20	欠測	5.68	東南東	東南東	9.84
7	逆風	2023/10/15 13:30-13:40	5.14	7.18	西北西	西北西	9.78
8	逆風	2023/10/10 12:20-12:30	5.01	8.35	西北西	西北西	9.98

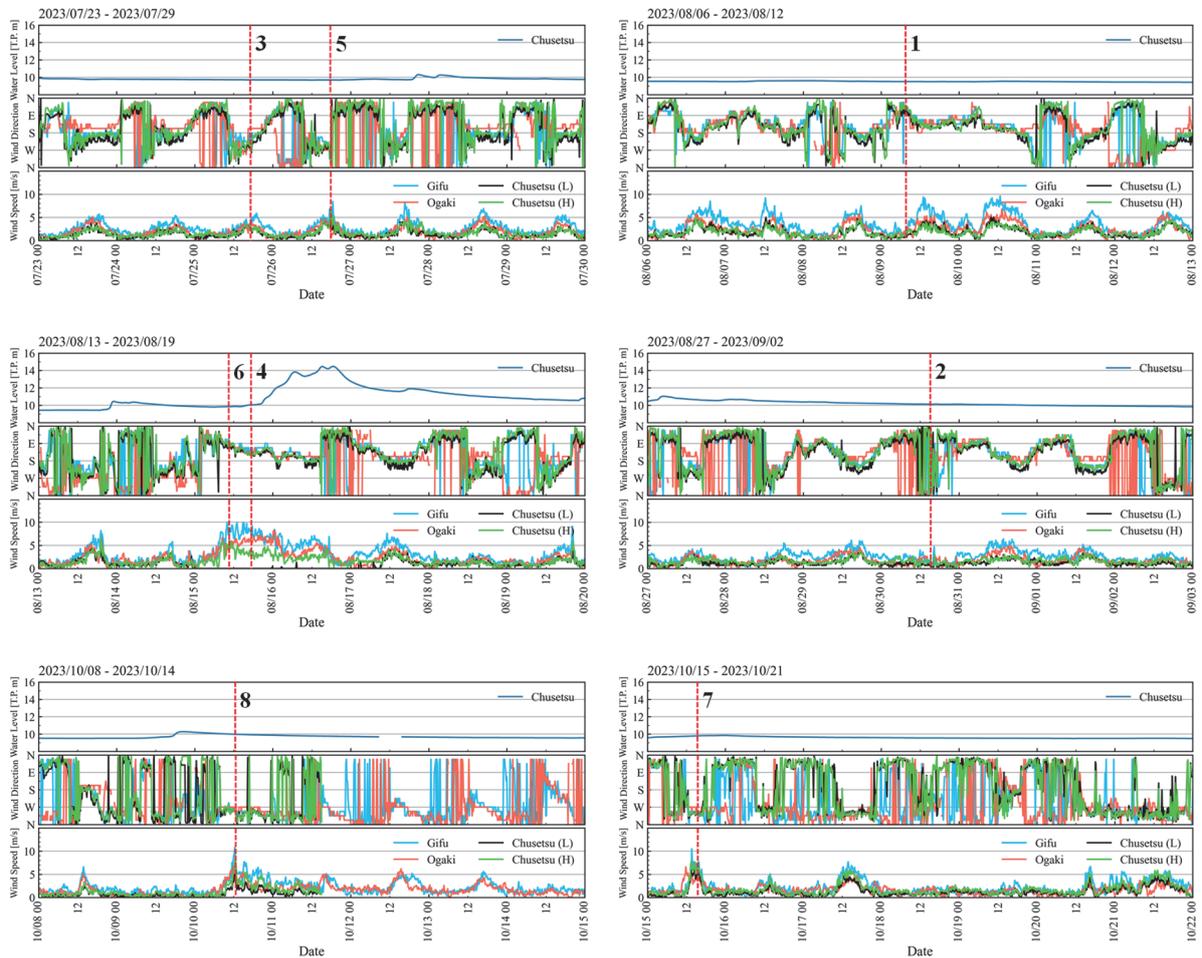


図-3.4 観測データの履歴 (Chusetu (L) : 水位観測所, Chusetu (H) : 事務所屋上)

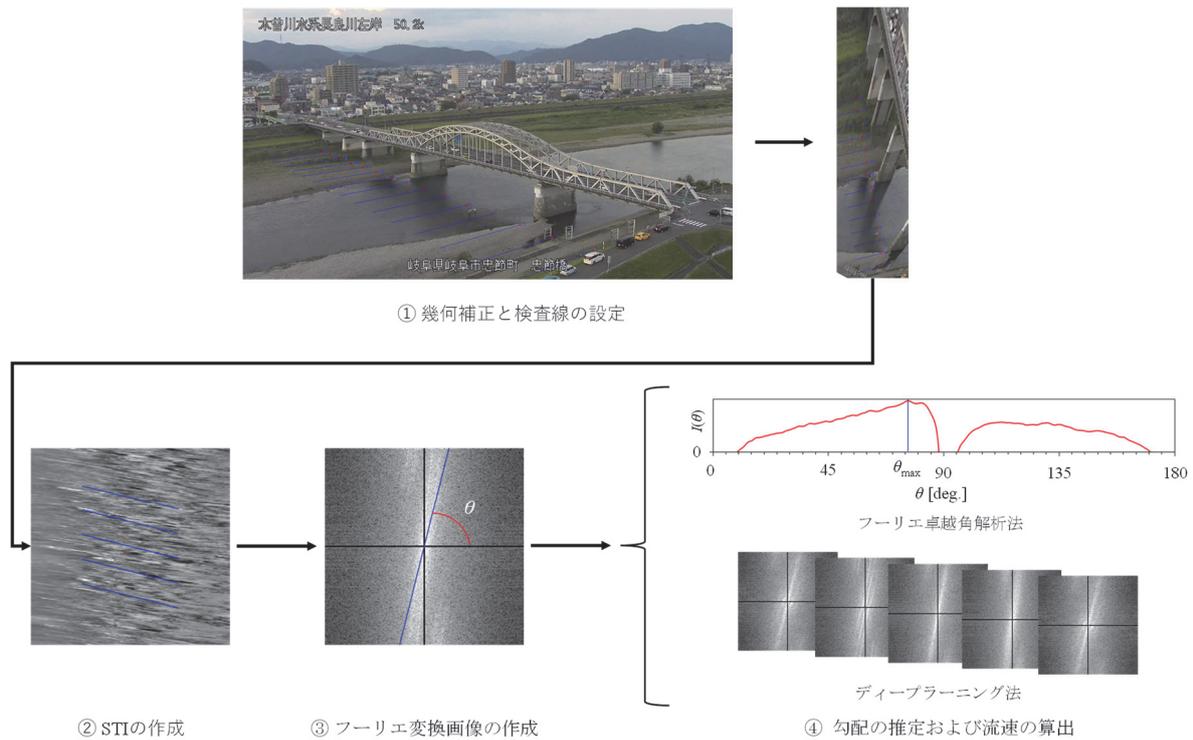


図-3.5 STIVによる表面流速算出のフロー

縞パターンの勾配を決める手法はいくつか提案されているが、本研究ではフーリエ卓越角解析法²²⁾とディープラーニング法²³⁾の二つの手法（図-3.5④）で結果を比較した。どちらもSTIの二次元フーリエ変換画像（図-3.5③）を用いて勾配を決める手法であるが、フーリエ卓越角解析法はフーリエ変換画像に対して角度ごとの動径方向輝度積分値 $I(\theta)$ を次式で算出し、この積分値が最大となる角度 θ_{\max} をSTIの縞パターンの勾配とする手法である。

$$I(\theta) = \int G(\theta, r) dr \quad (3.1)$$

ただし、 $G(\theta, r)$ は極座標 (θ, r) におけるフーリエ変換画像の強度である。

一方、ディープラーニング法は事前に多様なSTIと縞パターンの勾配の対応関係をディープラーニングにより学習させたモデルで勾配推定を行う手法である。学習はフーリエ変換画像を用いて移流成分とその他の成分を区別するように行われているため、フーリエ卓越角解析法よりも推定精度が高く、誤検出も少ない。

検査線は出水時にも備えて流下方向に約30mの長さで図-3.3に示すように左岸側から15m間隔で15本設定した。ただし、本論で用いる動画は平水時のものであるため、このうち検査線4番～8番を対象に解析を行った。STIVにはHydro-STIV²⁴⁾を用いた。

3.3 結果と考察

3.3.1 風による波紋の応答特性

表-3.1の各動画から抽出した検査線6番におけるSTIとその波数-周波数スペクトルを図-3.6に示す。検査線6番は最大水深付近に位置しており水深は約1.0～1.5mである。波数-周波数スペクトルはSTI

を二次元フーリエ変換することにより得られるものであり、これにより STI にどのような波数と周波数の縞パターンが含まれているのかを知ることができる。スペクトルの $k_x > 0$ は下流に、 $k_x < 0$ は上流に移流あるいは伝播する成分であることを示している。また、図には移流 (式(3.2))、前進波 (式(3.3)) と後退波 (式(3.4))、定在波 (式(3.5)) に対応する分散関係式も合わせて示している。

$$\omega(k_x) = U_s k_x \quad (3.2)$$

$$\omega(k_x) = U_s k_x + \{g k_x \tanh(k_x h)\}^{0.5} \quad (3.3)$$

$$\omega(k_x) = U_s k_x - \{g k_x \tanh(k_x h)\}^{0.5} \quad (3.4)$$

$$\omega(k_x) = v(k_x \pm k_0) \quad (3.5)$$

ただし、 ω は角周波数、 U_s は表面流速、 k_x は主流方向波数、 k_0 は定在波の波数、 g は重力加速度、 h は水深であり、表面流速 v はディープラーニング法で求めたものを用いている。既往研究²¹⁾により洪水時の波紋もこれらの分散関係式に従うことが確認されている。ただし、式(3.2)~式(3.4)の表面流速 U_s は吹送流速 U_c も含まれた $U_s = U_{s_0} + U_c$ (U_{s_0} は無風時の表面流速) であることに注意されたい。

図より無風 (図-3.6(a), 図-3.6(b)) と横風 (図-3.6(c), 図-3.6(d)) の STI にはおおむね共通した一定勾配の縞パターンが確認できる。波数-周波数スペクトルではいずれも式(3.2)の分散関係上にピークが現れていることから、これらの縞パターンは移流成分に対応しているといえる。また、スペクトルのピークは $0 < k_x < 4$ の範囲に現れているが、これは波長に換算すると約 1.5 m 以上であることから水深規模の波紋が支配的であるとわかる。無風と横風の差異は STI やスペクトルからは確認できなかった。

一方、順風や逆風では無風や横風とは異なる縞パターンやスペクトルのピークが確認できる。順風 (図-3.6(e) と 図-3.6(f)) の STI ではいずれも無風や横風の移流よりも勾配が緩く、細かい縞パターンが現れている。また、波数-周波数スペクトルでは移流成分に対応するピークに加えて、式(3.3)の $k_x > 4$ にもピークが分布している。このことは移流成分よりも波長の短い風波が前進波として移流よりも速く下流に伝播していることを示しており、実際に動画からもその様子が確認できている。

図-3.6(g) と 図-3.6(h) に示す逆風の STI からはケース 1 ~ ケース 6 とは逆勾配の縦縞のような縞パターンが確認できる。これは上流に伝播する風波や、それらが表面流速と釣り合い生じる定在波を示しており、波数-周波数スペクトルでも式(3.4)の後退波あるいは式(3.5)の定在波の分散関係上に明瞭なピークが確認できる。なお、後退波では $|k_x| < 6$ の波数の小さい (波長の長い) 成分は上流に伝播するが、 $|k_x| > 6$ の波数の大きい (波長の短い) 成分は下流に伝播する。また、無風や横風と比較すると式(3.2)の移流成分に対応するピークはやや不明瞭となっており、このときの波紋の挙動は風波の波動成分が支配的となっていると考えられる。

以上より、本研究で観測した順風や逆風時においては風により河川表面に顕著な風波が発生し、そのエネルギーは画像の輝度値からではあるが移流成分と同等かそれ以上となることが確認された。また、異なる日時でも同じ傾向を示していることから、流速と水深が同程度の流れであれば一般性のある特性であると考えられる。次節では、このような風波に起因する波動成分が STIV による表面流速の計測精度に及ぼす影響を検討する。

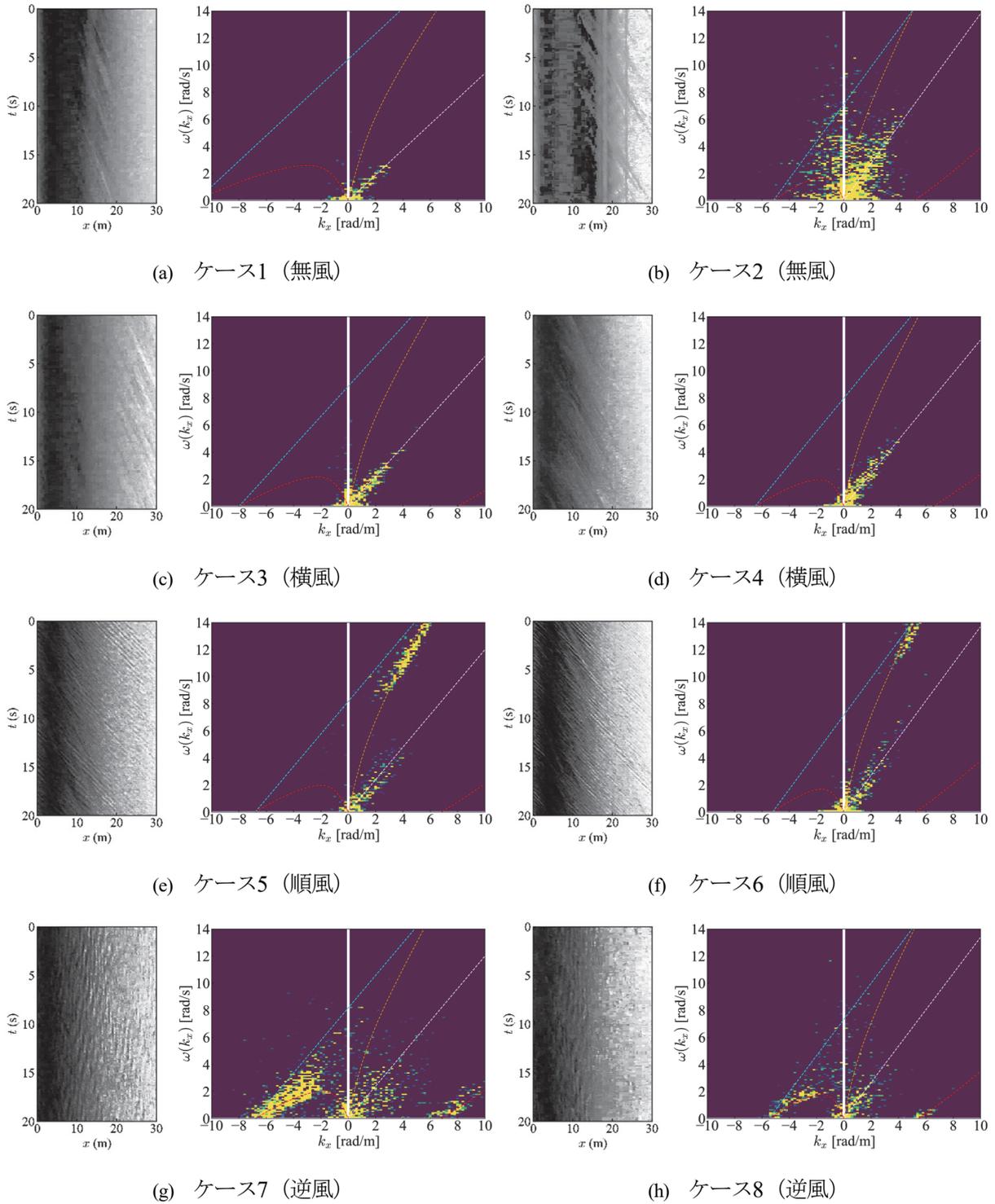


図-3.6 STI (左) と波数-周波数スペクトル (右), 白点線: 移流 (式(3.2)), 橙点線: 前進波 (式(3.3)), 赤点線: 後退波 (式(3.4)), 青点線: 定在波 (式(3.5))

3.3.2 風が表面流速の計測精度に及ぼす影響

表-3.1に示すケースのうち水位が同程度のケース2（無風）、ケース4（横風）、ケース6（順風）およびケース8（逆風）を対象に流速分布を求めた。流速分布は10分間の動画から1分ごとに求め、10分間における流速のばらつきや異常値の発生頻度を調べた。STIの勾配推定には上述のとおりフーリエ卓越角解析法とディープラーニング法を用いた。さらに、ケース4（横風）、ケース6（順風）およびケース8（逆風）ではディープラーニング法により明らかな異常値が算出された検査線には、フーリエ変換画像の輝度分布と式(3.2)～式(3.5)の分散関係式との対応から勾配を決定する手動補正を行った。

図-3.7(a)にケース2（無風）の流速分布を示す。図よりフーリエ卓越角解析法およびディープラーニング法とも10分間における流速のばらつきは小さく、明らかな異常値もみられない。したがって、本ケースでは手動補正を行っていない。また、ディープラーニング法はフーリエ卓越角解析法よりも流速のばらつきが小さく、勾配推定が安定していることがわかる。

次に、ケース4（横風）の流速分布を図-3.7(b)に示す。フーリエ卓越角解析法では無風時と比べて異常値が多く、ディープラーニング法でもいくつかの異常値がみられる。図-3.6のSTIや波数-周波数スペクトルでは無風と横風の有意な差異は確認できなかったことから、非定常的な風が影響を与えているものと考えられる。

図-3.7(c)と図-3.7(d)にケース6（順風）とケース8（逆風）の流速分布をそれぞれ示す。いずれも無風や横風と比べて流速のばらつきが大きく、異常値も多い。これは図-3.6で示したように順風や逆風時のSTIには風波に起因する波動成分が含まれ、勾配推定でこれを移流成分として誤検出したり、移流成分のピークが不明瞭になったりするためである。また、ディープラーニング法では逆風時よりも順風時で流速のばらつきが大きくなっている。これは図-3.6(e)や図-3.6(f)の波数-周波数スペクトルに示したように、順風時では風波に起因する波動成分のピークが移流成分と同じ第一象限に現われ、誤検出しやすくなるためと考えられる。

ケース4（横風）、ケース6（順風）およびケース8（逆風）の手動補正後の結果ではいずれも流速のばらつきは小さく、異常値もみられない。移流成分の抽出が難しくなる風作用時のSTIでも、フーリエ変換画像の輝度分布と分散関係式との対応から直接勾配を判断することで、妥当な流速分布が得られているといえる。ただし、上述の通りこの方法で得られる表面流速は波動成分の影響は除かれているが、吹送流速は除かれていない。したがって、この表面流速に吹送流速が含まれているかどうかは判断することはできない。

3.3.4 表面流速分布の比較

図-3.8にケース2（無風）にはディープラーニング法で得られた結果を、その他のケースにはディープラーニング法に加えて手動補正を行った結果を用いて得られた10分間平均の流速分布を示す。なお、ばらつき（標準偏差）をエラーバーで示している。ケース8（逆風）の流速は全体的に他のケースよりも小さく、吹送流により表面流速が減少している可能性が考えられる。一方、ケース6（順風）の流速は無風や横風と明確な差異はみられない。順風時の風波は図-3.6(e)や図-3.6(f)で示したように、移流成分よりも高波数かつ高周波数の波であるため、表面流速に影響するほどの吹送流は生じていないと考えられる。逆風時には図-3.6(g)や図-3.6(h)で示したように、移流成分と同程度の波数と周波数帯の波が後退波として生じており、顕著な吹送流が生じているものと考えられる。

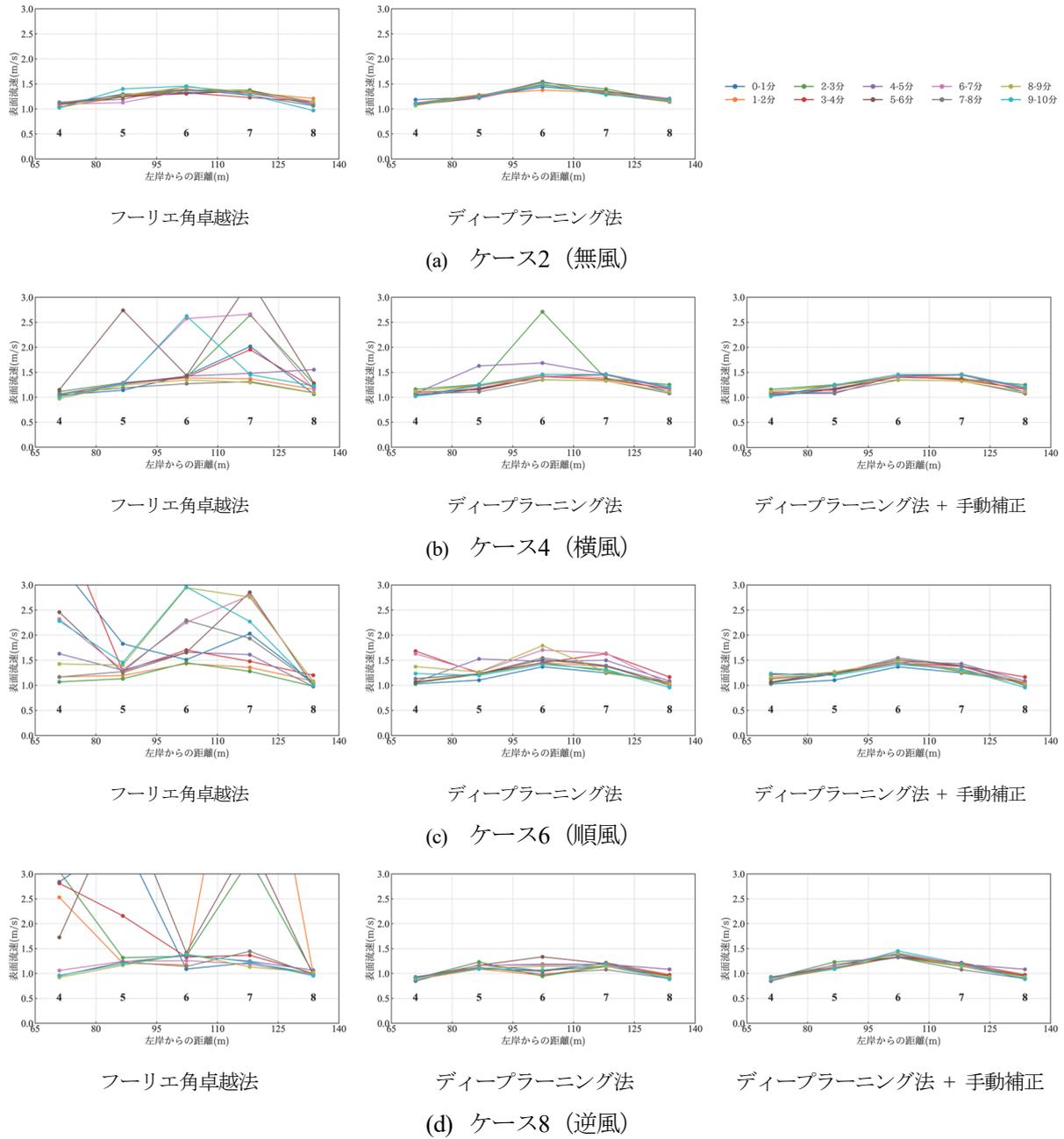


図-3.7 異なる勾配推定手法による表面流速計測精度の比較

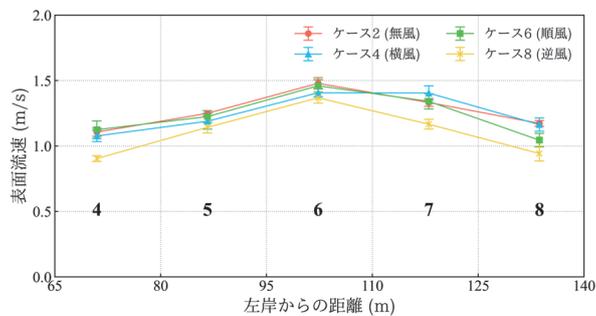


図-3.8 風向・風速ごとの表面流速分布の比較

3.4 まとめ

長良川忠節橋下流で実施した STIV による表面流計測と風向・風速観測の結果から、風作用時における波紋の挙動とそれらが STIV の表面流計測に及ぼす影響を調べた。その結果、波紋の STI やその波数-周波数スペクトルから順風や逆風時には風波に起因する波動成分が顕著に現れることを確認した。また、波動成分の影響を受けて表面流速の計測値にばらつきや異常値が生じやすくなることを示した。

一方、フーリエ変換画像の輝度分布と分散関係式との対応から STI の勾配を決定した場合には、ばらつきが小さく異常値のない流速分布が得られた。このようにして得られた表面流速は吹送流速を含むものの波動成分が除かれているため、吹送流速をより正確に評価していけるものと考えられる。また、既往の吹送流速の検討では波動成分を明確に取り除いていないことが吹送流速のばらつきを生じさせている一つの要因だったとも考えられる。本研究では画像解析による表面流計測を行ったが、電波流速計に関しても同じ可能性がある。なお、STIV のディープラーニング法による勾配推定では風作用時の STI を学習していくことで、表面流速の計測精度の改善が期待できる。

4. おわりに

本研究では風が非接触型流速計測法の流量の推定精度に及ぼす影響に関して、数値計算と現地観測による検討を行った。数値計算では鉛直一次元の開水路流れを対象に、風速と水理条件を変えた計算を実施し、以下の成果が得られた。

- 吹送流速の大きさは風速だけでなく流れの水深や底面せん断応力にも依存し、特に底面せん断応力に大きく依存する。
- 底面せん断応力に対して風応力が十分に小さい流れでは吹送流速は風速の1%以下と小さい。したがって、底面せん断応力が大きい流れでは4%の風速補正は過剰となる可能性がある。
- 計算結果の吹送流速は大きくても風速の3~4%であり、実河川での観測結果⁶⁻¹²⁾よりも小さい。画像解析や電波流速計による表面流計測では吹送流速を含んだ表面流速そのものではなく風波の伝播を捉えている可能性もあり、この点も考慮して観測データの収集と分析を行っていく必要がある。

また、現地観測では長良川忠節橋下流でSTIVによる表面流計測と風向・風速観測を行い、以下の成果が得られた。

- 順風や逆風時には波紋に風波に起因する波動成分が顕著に現れる。また、波動成分の影響を受けて表面流速の計測値にばらつきや異常値が生じやすくなる。
- STIのフーリエ変換画像の輝度分布と分散関係式との対応から波動成分の影響を除くことで、ばらつきが小さく異常値のない表面流速（無風時の表面流速 + 吹送流速）を得ることができ、吹送流速をより正確に評価できるようになる。

以上の成果より、画像解析や電波流速計では吹送流を含む表面流速そのものを計測しているのか、あるいはそれに風波の伝播も含まれたものを計測しているのかということを今後の検討では考慮しなければならないと考える。本研究で示したように少なくともSTIVでは前者の計測が可能である。今後は電波流速計も含め他の計測手法との同時観測を実施し、風の影響を調べる予定である。また、波数-周波数スペクトルを活用した吹送流速の推定方法についても検討を進めていく。

参考文献

- 1) 山口高志, 新里邦正: 電波流速計による洪水流量観測, 土木学会論文集, No. 497/II-28, pp. 41–50, 1994.
- 2) Fujita, I., Watanabe, H. and Tsubaki, R.: Development of a non-intrusive and efficient flow monitoring technique: The space-time image velocimetry (STIV), *International Journal of River Basin Management*, Vol. 5, No. 2, pp. 105–114, 2007.
- 3) Fujita, I., Omori, Y., Watanabe, K., Iguchi, M., Hasegawa, M. and Yoshimura, H.: Estimating surface velocity coefficient from entropy theory for STIV discharge measurements, *New Waves in Hydrometry*, Vol. 1, pp. 17–35, 2024.
- 4) 国土交通省 水管理・国土保全局 河川計画課 河川情報企画課: 非接触型流速計測法の手引き(案), 2023年3月.
- 5) 藤田一郎, 濱田拓也, 西山貢平, 谷昂二郎: 最大エントロピー法による流量観測の高度化と時空間画像を用いた河川表面乱流場の計測, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 75, No. 2, p. I_631–I_636, 2019.
- 6) 柏田仁, 二瓶泰雄, 山下武宣, 山崎裕介, 市山誠: 電波流速計によるDIEX法に基づく流量推定手法の提案, 河川技術論文集, 第18巻, pp. 393–398, 2012.
- 7) 本永良樹, 萬屋敦啓, 深見和彦: 河床変動及び強風に伴う河川表面流速の特性と風による影響の補正に関する検討, 土木学会論文集B1(水工学), Vol. 69, No. 4, p. I_745–I_750, 2013.
- 8) 恩田実乃留, 平川隆一, 大野智弘, 柏田仁, 山崎裕介, 井上拓也, 阿部昭寛: 河川上流部での非接触型流速計測法を用いた高水流量観測の実用化, 河川技術論文集, 第21巻, pp. 95–98, 2015.
- 9) 恩田実乃留, 平川隆一: 非接触型流速計測法の流速計測精度が受ける風の影響, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 72, No. 4, p. I_901–I_906, 2016.
- 10) 小野史也, 井上拓也, 木下武雄, 森田靖則, 持丸章治, 北野実紀: 高水流量観測の省力化に関する精度検討, 河川技術論文集, 第22巻, pp. 73–78, 2016.
- 11) 裴希恵, 浜口憲一郎, 山崎裕介, 吉田俊康, 横山貴宏, 米田一也: 河川における水表面流速観測値に対する風速依存性の一考察, 土木学会第71回年次学術講演会, II-038, 2016.
- 12) 鶴崎賢一, 大塚隆之: 河川の流量算定における吹送流の影響評価, 土木学会論文集B1(水工学), Vol. 74, No. 5, p. I_625–I_630, 2018.
- 13) Yoshimura, H. and Fujita, I.: Investigation of free-surface dynamics in an open-channel flow, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 58, No. 2, pp. 231–247, 2020.
- 14) Yoshimura, H., Omori, Y. and Fujita, I.: Numerical investigation of wind stress on surface velocity and vertical velocity profile in an open-channel flow, *Journal of JSCE Special Issue (Hydraulic Engineering)*, Vol. 12, No. 2, 23-16165, 2024.
- 15) Kondo, J.: Air-sea bulk transfer coefficients in diabatic conditions, *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol. 9, pp. 91–112, 1975.
- 16) 鶴谷広一, 中野晋, 加藤始, 一戸秀久: 吹送流に関する実験的研究, 海岸工学講演会論文集, Vol. 30, pp. 79–83, 1983.
- 17) 禰津家久, 吉田圭介, 垂井晃一: 水面上に風シアが存在する開水路流場における水層乱れ

- 構造と水面変動に関する研究, 水工学論文集, Vol. 48, pp. 517–522, 2004.
- 18) 禰津家久, 福谷彰, 吉田圭介, 垂井晃一: 逆風風波開水路混成場における乱れ構造と気体輸送に関する実験的研究, 応用力学論文集, Vol. 8, pp. 911–918, 2005.
 - 19) 国土交通省水文水質データベース: <http://www1.river.go.jp>
 - 20) 気象庁データベース: <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
 - 21) 谷昂二郎, 藤田一郎: 実河川における自由水面の支配的挙動, 土木学会論文集B1(水工学), Vol. 75, No. 2, p. I_637–I_642, 2019.
 - 22) 藤田一郎, 渡辺健, 井口真生子, 長谷川誠: 深層学習を用いたSTIV解析の高性能化, 土木学会論文集B1(水工学), Vol. 76, No. 2, p. I_991–I_996, 2020.
 - 23) Watanabe, K., Fujita, I., Iguchi, M. and Hasegawa, M.: Improving accuracy and robustness of space-time image velocimetry (STIV) with deep learning, *Water*, Vol. 13, No. 15, 2079, 2021.
 - 24) Hydro-STIV HP: <https://hydrosoken.co.jp/service/hydrostiv.php>

助成事業者紹介

氏名: 吉村 英人

現職: 岐阜大学工学部社会基盤工学科 助教