

数値計算による風応力作用時における河川流速分布の評価

岐阜大学工学部 正会員 ○吉村 英人

中電技術コンサルタント株式会社 正会員 大森 嘉郎

建設工学研究所 正会員 藤田 一郎

1. はじめに

河川の流量観測では、浮子や画像、電波流速計などから得られた表面流速と何らかの方法で推定される水面下の流速分布を組み合わせることで流量を算出することが多い。風速が大きい環境下では表面流速や流速分布は風の影響を受けるが、これに関する検討事例は少なく、未だまとまった知見が得られていない。様々な条件下での風の影響を検討することは実河川では困難であるため、数値計算の活用が効果的である。そこで本研究では、鉛直 1 次元の流れを対象に風応力を作用させた計算を行い、風が表面流速などに与える影響について検討を行った。

2. 計算手法

計算には著者らが開発した数値計算コードを用いた。支配方程式は非圧縮性流体の連続の式と Navier-Stokes 方程式であり、乱流モデルには標準 $k-\varepsilon$ モデルを用いた。水面は固定とし、水面変動や水位変化は無視できるものとする。水深 h の等流状態の流れを対象とし、主流方向および横断方向には周期境界条件を課した。河床底面では式(1)の粗面対数則に基づく底面せん断応力 τ_b を与え、水面では式(2)より風応力 τ_s を与えた。

$$\tau_b = \rho_w u_{\tau,b} |u_{\tau,b}|, \quad \frac{u(y)}{u_{\tau,b}} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{y}{y_0} \right), \quad (1)$$

$$\tau_s = \rho_a C_d U_{10} |U_{10}| \quad (2)$$

ここで、 ρ_w : 水の密度、 $u_{\tau,b}$: 底面摩擦速度、 $u(y)$: 高さ y における流速、 κ : カルマン定数、 y_0 : 粗度高さであり、 ρ_a : 空気密度、 C_d : 水面抵抗係数、 U_{10} : 水面から高さ 10 m における風速である。

3. 計算条件

計算は $h = 2$ m、 $y_0 = 4.63 \times 10^{-3}$ (粗度係数 $n = 0.03$ 相当) において $u_{\tau,b} = 0.2$ m/s の条件で行った。実河川での水面抵抗係数 C_d は観測値も少なく不明な部分が多い。図-1 は既往の文献から得られた水面抵抗係数を湖沼・閉鎖性水域でのモデル式²⁾と合わせて示したものである。滑面開水路での実験値^{3,4)}はモデル式と一致する一方で、実河川での観測値¹⁾はいずれもモデル式よりも過大となっている。しかしながら、風応力の大小は底面せん断応力 τ_b との比で見るのが望ましい。図-2 は $u_{\tau,b} = 0.2$ m/s とした場合の τ_s と τ_b の比を $\sqrt{\tau_s/\tau_b} = \sqrt{\rho_a/\rho_w} u_{\tau,s}/u_{\tau,b} = u_{\tau,s}^*$ と示したものである。ただし、 $u_{\tau,s}$ は τ_s から得られる水面での摩擦速度であり、 $u_{\tau,s}^*$ はそれを ρ_w と $u_{\tau,b}$ で正規化したものであると言える。

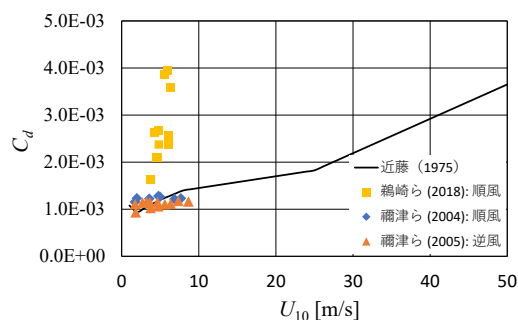


図-1 水面抵抗係数

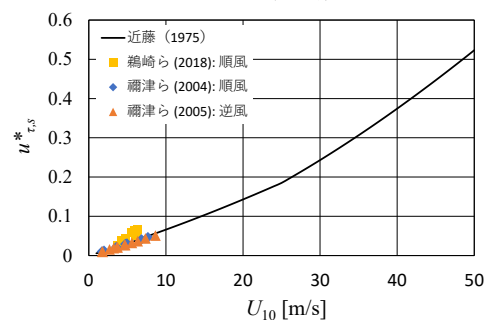


図-2 底面せん断応力と風応力の比 ($u_{\tau,b} = 0.2$ m/s)

キーワード 表面流計測, 河川流量観測, 風応力, RANS, $k-\varepsilon$ モデル

連絡先 〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1

岐阜大学工学部 TEL058-293-2477

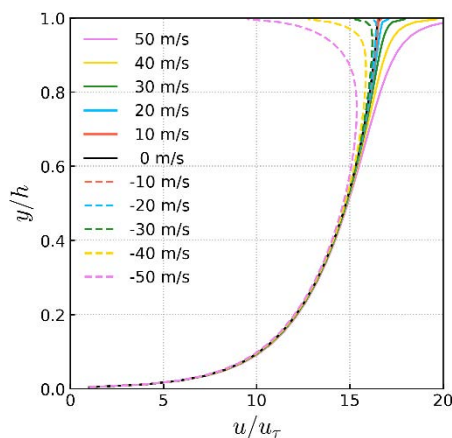
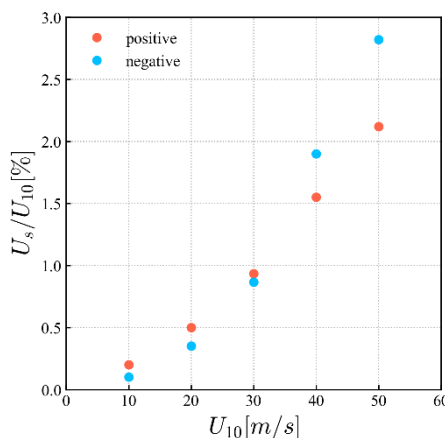
図-3 流速分布 ($u_{\tau,b} = 0.2$ m/s)

図-4 風速と吹送流の関係 (風速基準)

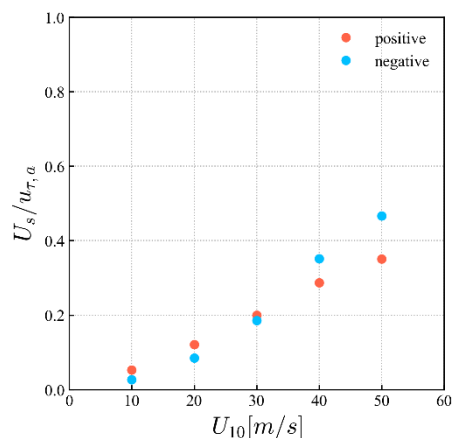


図-5 風速と吹送流の関係 (水面摩擦速度)

以上より、底面せん断応力に対する風応力の比としては観測値もモデル式と同程度であることがわかる。よって本研究では、モデル式を用いて水面抵抗係数を与えることとする。風速を $-50 \sim 50$ m/s の 10 m/s 間隔で変化した時の風応力を与えた。なお、 $U_{10} < 0$ は逆風時、 $U_{10} > 0$ は順風時とする。

4. 計算結果

図-3 に $u_{\tau,b} = 0.2$ m/s の場合の流速分布を示す。風速の増加とともに水面付近の流速が増減しているのが確認できる。風速が小さい場合は水面の極近傍にのみ影響が現れるが、風速が大きくなるにつれて水面から $h/3$ 程の範囲まで影響が及んでいる。

図-4 は風速と吹送流の関係を風速 U_{10} の基準で示したものである。本研究では、風がある場合の表面流速と無風時の表面流速の差を吹送流速 U_s として扱った。これより風速に対しておよそ線形で吹送流速が増加しているのがわかる。また、風速 30 m/s 以下では逆風時よりも順風時で流速が大きくなるが、風速 40 m/s 以上では逆転する結果となった。風速に対する吹送流速は流れのない海域や湖沼で $3 \sim 3.5\%$ 、実河川での観測では 7.4% や 11.4% ¹⁾ といった報告もあるが、本計算結果は 3% 以下であり、海域や湖沼に近い結果となった。ただし、実河川で報告されている吹送流速は表面流速と ADCP で計測可能な水面付近の流速との差として求められており、本計算での定義とは異なることに留意する必要がある。

図-5 は図-4 の吹送流速を水面摩擦速度 $u_{\tau,s}$ を基準として示したものである。水面摩擦速度に対する吹送流速は海域や湖沼で $U_s \approx 0.55u_{\tau,s}$ ということが知られているが、本計算結果はそれよりも過小となった。このことが開水路流れに特有なのかは今後詳細な分析が必要である。

5. おわりに

本研究では風が河川表面流速や水面下の流速分布に与える影響を検討するため、鉛直 1 次元数値計算による感度解析を行った。風速の増加に伴い、吹送流速が増加することや流速分布への影響が大きくなることを確認できた。吹送流速の大きさは既往の報告よりもやや過少ではあるものの、傾向を捉えることはできていると思われる。

6. 参考文献

- 1) 鵜崎賢一，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，pp. I_625-I_630，2018.
- 2) Kondo, J.: Air-sea bulk transfer coefficients in diabatic conditions, Boundary-Layer Meteorol., Vol. 9, pp. 91-112, 1975.
- 3) 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乱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.
- 4) 禰津家久，他：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.