

風と開水路の流れの相互作用に関する室内実験

A laboratory experiment on the interaction between wind and open channel flow

水野信二郎* ・ 埜口英昭** ・ 木村康隆***

By Shinjiro MIZUNO, Hideaki NOGUCHI and Yasutaka KIMURA

The effect of wind on an open-channel flow is investigated by changing the flow direction in the channel. It is found that the efficiency of momentum transfer from the wind to the primary flow in the channel depends strongly on whether the channel flow is favorable to or against the wind direction. This is because the wind-driven secondary flow that consists of a pair of Langmuir-like circulations not only controls the redistribution of horizontal momentum in the channel, but also markedly affects turbulent diffusion from the near-surface toward the channel core.

Key words: air-water interaction, wind-driven secondary flow.

1. はじめに

回流装置を取付けた風洞水槽において風が開水路の流れに与える影響を調べ、水面下の流れが風と同じ向きに流れる場合と逆向きに流れる場合（以後、それぞれ順流および逆流と呼ぶ）には、風と開水路の流れの間の相互作用の特徴が著しく異なると云う、興味ある実験結果を見いだした（文献1）。即ち、開水路の水面上を風が吹く時、順流のケースでは水路の中央部で下降流、流れの連続性から側壁付近で上昇流が発生し、対照的に逆流のケースでは水路の中央部で上昇流、側壁付近で下降流が発生した。

本報告では、2次循環流の向きの違いに注目し、それが水面付近の風による吹送流から開水路内部の主循環流への運動量輸送の効率に影響を及ぼすだけでなく、水面下の乱流強度の鉛直分布にも大きな影響を与えることを示す。本研究の結果は、河川水の上を風が吹く時、風が上流側から吹くか、下流側から吹くかによって河川における2次循環流の向きが逆転する可能性を示唆しており、現地計測が重要であると考えている。

2. 実験装置と実験方法

実験は、長さ50 m、幅60 cm、高さ1.2 m、水深80 cmの風洞水槽²⁾を用い、水面上に一定風速の風を吹かせ、同時に水槽に付属する回流装置で水槽内に一様な流れ（風向に相対的に順流と逆流）を発生して行っ

* 正会員 広島工業大学教授 工学部土木工学科（〒731-51 広島市佐伯区三宅2-1-1）

** 正会員 中国工業技術研究所 海洋動態研究室室長（〒737-01 呉市広末広2-2-2）

*** 学生員 広島工業大学 工学部土木工学科（〒731-51 広島市佐伯区三宅2-1-1）

た。報告の実験データは、文献¹⁾で用いた3つの実験ケース：①M4NF（風のみ）、②M4UW10（風＋順流）、③M4UW-10（風＋逆流）のうち、②と③のケース、即ち、水面下に様な流れを発生させたケースを用いる。なお、M4は設定風速が8.4 m/sであることを意味し、NFは流れを与えずに風だけを吹かせた場合を、UW10は断面平均流速10 cm/sの流れを風と同じ向きに与えた場合を、UW-10は断面平均流速10 cm/sの流れを風と逆向きに与えた場合を、それぞれ意味する。流速の測定は、4ビーム後方散乱型2成分光ファイバーレーザー流速計をFetch 16.7 mに設置し、水槽の片側半断面内を組織的に計測した。

3. 実験結果および考察

3. 1 風が開水路の流れに与える影響

図-1は順流のケースにおける鉛直断面内の片側半断面の平均流速のコンター図であり、左から順に無風の場合の流れの水平流速U成分、風と流れが共存するときのU成分および鉛直V成分のコンター図を示す。比較のため、図-2に逆流のケースの同様な流速のコンター図を示す。平均流速Uは、流れが風向きに流れる場合 $U > 0$ 、鉛直上向きの場合 $V > 0$ と取り、 $V < 0$ の下降流の領域を陰影で示す。両図の左図が示すように、風を与えない順流と逆流のケースでは、側壁付近において水平シアが目立つが中央付近で弱く、両図の間の流速分布には特に大きな変化はない。他方、風を加えると図-1と2の中図が示すようにU成分のコンター図に著しい変化が現れる。

まず、順流のケースを考える。U成分は水路中央で最大、側壁で最小の流速分布を示すが、Uのコンター線が斜めに傾斜し、流速シアがかなり増加している。Uが中央で速くなる理由はV成分のコンター図を見ると理解できる。即ち図1の右図が示すように、鉛直断面内に側壁付近で上昇し、中央部で下降する鉛直2次循環流が形成されている。この2次循環流は湖や海で発生するLangmuir循環流に類似し、風で発生し風に平行な方向に軸

を持つ1対の逆向きの渦からなる³⁾。開水路の2次循環流が自然界のものと異なる点は、側壁が存在するため上昇流と下降流の位置が固定される点である。開水路で通常起こる2次循環流と区別して、風成2次循環流と定義する（風のない順流と逆流の実験でも2次循環流は計測されているが、約一桁V成分が弱いので図示していない）。順流の場合、中央付近で風成2次循環流は下降流のため水面付近の風で加速された高い運動量が下向きに移流される結果、かなり深い深度まで高流速が維持される（この事実は断面平均流速に相当する $U = 10$ cm/sのコンターをたどれば明白である）。更に深度が深くなると、Uは断面平均流速以下となり、風の摩擦で加速された上層付近の流れの帰還流が断面平均流速に相対的に見て底面付近で起こっている事が分かる。この様に順流の流れに風を加えると、水槽の中央付近で下降流が発生するため風で加速された水面付近の運動量が開水路内部の主循環流に効率的に入り、側壁付近の上昇流域並びに下層の帰還流との間に、強い水平シアおよび鉛直シアを形成する事がわかる。

次に逆流のケースを考える。逆流下では風波が流れに逆って進行するため砕波がしばしば起こり、水面付

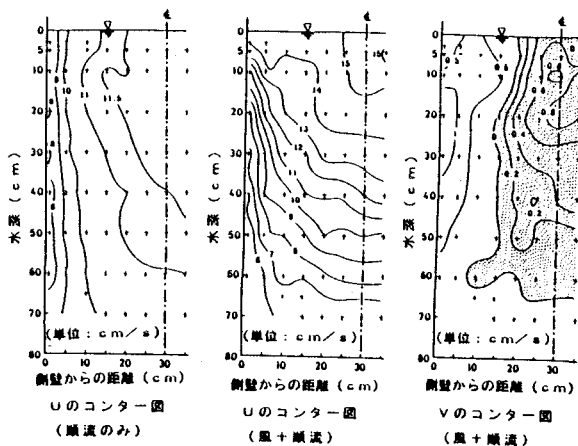


図-1 順流(M4UW10)のケースの流速コンター図

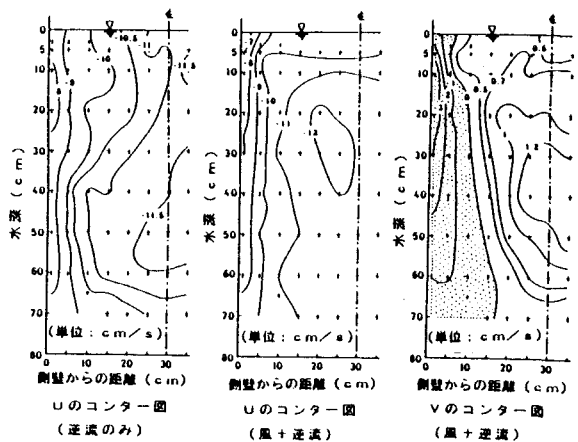


図-2 逆流(M4UW-10)のケースの流速コンター図

近では風波と流れの間に激しい相互作用が観察される。このため風と流れの相互作用は逆流の方が順流のケースよりも大きいと想像しがちだが、風の影響を受けている図2の中図を見ると、左図の逆流のみのケースのコンター図と比較し流速シアに大きな差が現れていない。風の影響は我々が計測できた水面下5 cmの水面付近では強く現れているが、水面付近と側壁付近に限定される。開水路中央の内部では水深の半分程度の深さに、断面平均流速に相対的に見て弱い帰還流が観察されるに過ぎず、開水路の流れの中心部には風の運動量が殆ど入らないと云う極めて興味深い結果が見出された。その理由は順流のケースと同様に、風成2次循環流の振舞いで説明できる。図2の右図を見ると、順流のケースと逆向きのかなり強い2次循環流が鉛直断面内に発生している。つまり、水路の中央で上昇流が存在するため、水面付近の風で加速された水平運動量の下向きの拡散が上昇流によって妨げられ、水面付近で風で加速された高い水平運動量をもつ流れは側壁に向かい、側壁に沿って下向きに運ばれる。この様に、逆流のケースで開水路中央部のU成分の流速が風の影響を受け難いのは水路中央付近に強い上昇流が存在するためである。

図－1と2の中図が示すように、風速が同一で風が水面に作用する摩擦力が殆ど変わらなくても、開水路内部の流速の再分布後の流速分布は、流れの向きを変えると大きな変化を示す。風が開水路の流れに与える影響は主循環流を加速し流速シアを強める作用をすると考えて、次式を計算した：

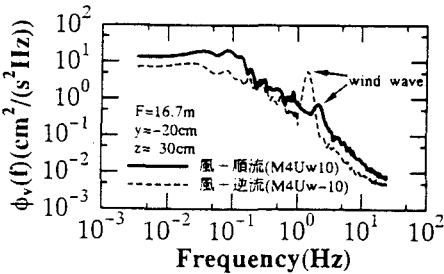
$$M = \frac{\rho}{A} \int_A (U - \bar{U})^2 dA \tag{1}$$

ここに、Uは鉛直断面内の1点の水平流速、 $\bar{U}$ は断面平均流速、 ρ は水の密度、積分範囲Aは流速に垂直な鉛直断面の面積とする。Mは断面平均流速からの偏差の大きさを示すパラメータで、応力の次元を持つ。パラメータMは水面、側壁、および底面に作用する摩擦により形成される開水路内部の平均的なシアの強さの尺度を与える。4つの実験ケース、即ち、無風時における開水路の流れの2ケースと風を与えた時の順流と逆流のケースに対してMの値を計算した。ただし、水路の片側半断面で測定された流速データを用いた。風のない開水路の流れでは、流れの向きを変えた2つのケースでM=1.1と1.4 dynes/cm²となり流れの向きの差によるMの変化は小さい。他方、風を加えると順流と逆流のケースでMの値は、それぞれ8.6と2.1 dynes/cm²に増加し、順流のケースでは風の水面摩擦が開水路内部の1次循環流を強く加速するため流速シアが強化され、風から開水路の流れへ運動量輸送が効果的に起こる事が定量的に裏付けられた。

3.2 鉛直循環流が水面下の乱流構造に及ぼす影響

図－3は順流と逆流のケースで水路中央で水面下20 cmで得られた流速の乱流変動のパワー・スペクトル（v成分）を示す。1 Hz 付近の風波の矢印は風波の軌道粒子速度に対応するスペクトル・ピークで、順流と逆流のケースでピーク値およびピーク周波数に若干の差がある。風波による軌道粒子速度のスペクトル・ピークは順流よりも逆流のケースの方が高く現れているが、風波のピーク周波数を除くと全周波数域で逆流よりも順流のケースのパワースペクトルが大きいので、乱流運動は順流のケースの方が大きい。

3.1において水面付近の風で加速された水平運動量が開水路内部に移流される効率は、逆流よりも順流の場合に効率的な事を示した。同様に、図－3が示すように同一の風速条件で、風波の振幅が小さく砕波が起こらないにもかかわらず、順流のケースの方が開水路内部の乱流強度は大きい。その理由として（1）水路中央の下降流により水面付近で風による摩擦や砕波で発生する乱流が移流拡散するためと、（2）開水路内部におけるシア乱流の発生が考えられる。図－3に示すように、1 Hz 以上で風波の軌道粒子速度のパワーが観測されるので、全パワースペクトルを1 Hz を境として高周波側と低周波側に分割し、それぞれPv(high)とPv(low)と定義する。ここに、Pv(high)は主に風波の軌道粒子速度によるパワーであり、Pv(low)



図－3 水路中央、水面下20 cmにおける流速変動（v成分）のパワースペクトル

は風波の影響を受けない低周波数領域の乱流成分のパワーである。図-4は開水路の中央 ($z = 30$ cm) における $Pv(\text{high})$ と $Pv(\text{low})$ の鉛直分布を示す。図-3のパワースペクトル分布から予想できるが、2次循環流の渦中心の深度に相当する20 cmより浅い水面付近では風波の軌道粒子速度が優勢なため逆流のケースの方が $Pv(\text{high})$ は高いが、20 cmより深い水深では波の影響はなく乱流運動が支配するため、順流のケースの $Pv(\text{high})$ の方が逆流のケースのそれよりも高くなる事を示している。他方、 $Pv(\text{low})$ は水面下10 cmまでには殆ど差は見られないが、より深い水路の中央では圧倒的に順流のケースのパワーが逆流のケースのパワーを越える。この理由は、順流では水面付近で風で直接発生した乱流変動が下向きに移流拡散され易いが、逆流では風成2次循環流が水路の中央で上昇流のため、水面付近の強い乱流エネルギーの拡散が抑えられる為である。この様に、風成2次循環流の存在は、開水路の平均的な水平流速の再分布のみならず、乱流変動のパワーの鉛直分布にも強く影響する。更に、3.1で示したように、逆流のケースでは流速シアが弱く、順流のケースで強くなった。そこで、シアによる乱流生成項の大きさが順流と逆流のケースの間でどの程度有意な差が生じているかを調べた。開水路の中央におけるシア乱流の生成項の鉛直分布を順流と逆流の両ケースについて比較した結果を図-5に示す。ここに、 $-\overline{u'v'}$ は1 Hz以下の低周波成分による Reynolds 応力から計算した。図-5の鉛直分布は極めて興味深い。即ち、逆流のケースでは水面付近でシア乱流の生成が著しいが、水面下20 cmよりも深くなると全く無視できる。順流のケースでは、シア乱流の生成は水面付近では弱いですが、水面下20 cm以深で有意な乱流生成が認められ、両者の間の鉛直分布は全く対照的である。

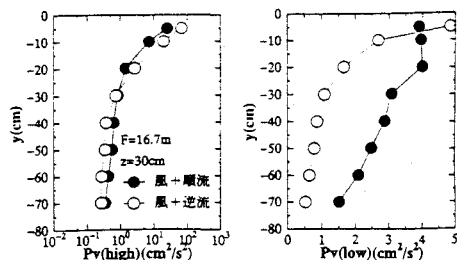


図-4 流速 v 成分の1 Hz以上の高周波成分のパワー $Pv(\text{high})$ と1 Hz以下の低周波成分のパワー $Pv(\text{low})$ の、水路中央における鉛直分布 (データの符号は両図共通)

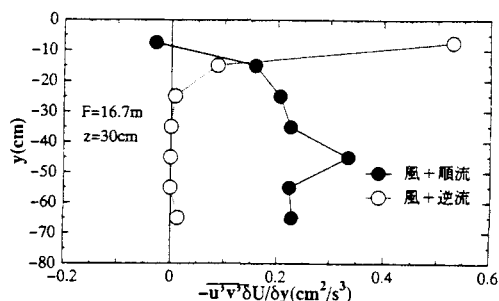


図-5 流速シアによる乱流生成項の水路中央における鉛直分布

4. 結論と今後の課題

風が吹くと開水路の流れに垂直な鉛直断面内で風成2次循環流が発生し、この2次循環流が水路中央で下降する順流のケースでは、水面付近で加速された高い水平運動量が主循環流に効率良く輸送され、開水路の流れは風向きに加速されて帰還流も強まり、流速シアを強化した。又、水面付近の乱流運動が開水路内部に移流拡散し、更に水路内部でシア乱流も増加するため乱流運動も活発化した。逆流のケースでは、水路中央で上昇流が支配し、風の影響は水面付近と側壁に限定され、水路中心部には及ばない事が見いだされた。

最後に、風成2次循環流は順流と逆流で何故逆転するか、という重要課題に対する解答が残っている。開水路の流れにおける2次循環流(渦度)の発生機構として、Prandtlの第2種の生成機構がよく知られているが、これにより風成2次循環流の向きの逆転を説明できない事は文献¹⁾で既に述べた。風で駆動される水面付近の吹送流と開水路内部の流れの間の相互作用に基づく新しい発生機構が必要で、現在検討中である。

謝辞 本研究を実施するにあたり、文部省の科学研究費補助金(基盤C・課題番号:07640580)および平成8年度ウエスコ土木技術振興基金から研究助成を受けました。

参考文献

- 1) 埜口英昭・水野信二郎・佐藤寛・木村康隆(1996):水工学論文集、第40巻、pp.743-748.
- 2) 埜口英昭(1993):中国工業技術試験所報告、第41号、pp.1-31.
- 3) Langmuir, I. (1938): Science, 87, pp. 119-123.