

風洞水槽内の流れの2次循環流の構造について

Experimental Study on Secondary Circulation of Flow in a Wind Tunnel Basin

埜口英昭*・水野信二郎**・佐藤寛***・木村康隆***

By Hideaki NOGUCHI, Sinjiro MIZUNO, Hiroshi SATO and Yasutaka KIMURA

Two velocity components of subsurface flow, observed in a rectangular wind tunnel basin equipped with a water circulation pump system, are measured over a vertical cross-section of the basin. Measurements are carried out for three cases : 1) reference wind speed $U_a=8.4\text{m/s}$ without water current ; 2) $U_a=8.4\text{m/s}$ with current velocity $U=10\text{cm/s}$; and 3) $U_a=8.4\text{m/s}$ with current velocity $U=-10\text{cm/s}$. A pair of secondary circulations is observed in a cross-section of the flow in the basin for each case : in the case-1 and case-3, a downwelling zone is found along the sidewall and an upwelling zone in the centre of the basin ; and in the case-2, an upwelling zone is found along the sidewall and a downwelling zone in the centre of the basin. It is estimated that the velocity of the secondary circulations would be about 7~50% of the mainflow velocity.

Keywords: Flows of Wind Tunnel Basin, Secondary Circulation, Turbulence Measurements

1. はじめに

一様な直線開水路や河川直線部の流れには2次流(Prandtlの第2種)が存在し、それが主流速分布をゆがめて最大流測点を水面下に出現させたり、壁面せん断応力や浮遊砂濃度を横断方向に変化させたりすることから注目され、その構造は、流れの3次元計測などの手法により明らかにされてきた^{1), 2)}。また、複合断面開水路においても、低水路と高水敷の接合部付近から強い斜昇流が発生し、それは2次流の一部であり流れの3次元性を示すものとして注目され、その解明が進められつつある^{3), 4)}。

一方、風が吹くと海面に筋状の縞模様、いわゆるLangmuir循環⁵⁾が発生することは古くからよく知られている。その成因としては、吹送流によって出来る鉛直シアアが風波のストークス・ドリフトの空間分布によってゆがめられ、吹送流の方向に軸を持つ渦列が生成されるとする説が有力とされ⁶⁾、室内実験例⁷⁾もあるが、その詳細な発生機構はまだ明らかにされてはいない。また、吹送流に起因する2次流の研究では、いくつかの風洞水槽実験例がある。日野ら⁸⁾は、吹送流の層流から乱流への遷移領域では水面近傍に存在する縦渦によって明瞭なstreak構造が存在することを、可視化実験で示した。Faller & Caponi⁹⁾も、同様の可視化実験によって風洞水槽中に縦渦が存在することを示しているが、その発生機構は明らかにしていない。Mizuno & Cheng¹⁰⁾は、比較的高風速の条件で、風洞水槽内の流れには、1次循環流(表層部の風下側へ向かう吹送流(正)と、底層部の上流側へ向かう反流(負)とから成る)のほかに、風の吹送方向に鉛直な断面内に大規模な循環流(Prandtlの第2種2次流と区別して2次循環流と呼ぶ)が存在することを見出した。しかし、その発生機構は解明されていない。

埜口¹¹⁾は、風と流れが共存する場での吹送流実験で、比較的高風速の条件の下に、水路断面中央での流れ方向の平均流速 U の鉛直分布を測定した。その結果、一様な流れの上に風を吹かせると表面流

* 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)

** 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)

*** 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)

速は当然ながら増加するが、流速の増加が水面付近だけでなくかなり深くまで及ぶことを見出し、水槽の断面中央部で水面から水槽底面へ向かう下降流が存在するのではないかと推論したが、2次循環流の構造についてまでは明らかに出来なかった。その後、著者等は、1) 静水面上に風を吹かせた場合、2) 一様な流れの上に流れと同じ方向に風を吹かせた場合、3) 一様な流れの上に流れと逆向きに風を吹かせた場合の3つのケースについて、高精度2次元レーザ流速計を用いて水平流速、鉛直流速の断面分布の詳細な計測を行った。本報告では、その結果に基づいて、一様開水路の2次流の特性と比較しながら、風洞水槽内に発生する2次循環流の特性について検討する。

2. 実験装置と実験方法

実験は、長さ50m、幅60cm、高さ1.2m、水深80cmの風洞水槽^{1,2)}を用いて、水槽に付属する回流装置で水槽内に一様な流れを起こしながら、その上に風を吹かせて行った。実験ケースは、① M4NF、② M4UW10、③ M4UW-10の3ケースである。ここに、M4は設定風速が8.4m/s（送風口にセットされたモニター風速計の指示値）であることを意味し、また、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10cm/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10cm/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。流速値及び風速値の鉛直断面分布の計測は、送風口から16.7m離れた断面で行った。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流速計（アルゴンレーザ出力2W；TSI社製）を用いて行い、水槽のガラス側壁を通して水平方向の流速成分U及び鉛直方向の流速成分Vを計測した。この流速計は、計測に必要なすべての制御がコンピュータ支援で行われ、またドップラー信号の処理は自己相関法によって行われるため、従来のカウンター方式に比べて格段に優れた周波数応答特性を有する。事実、著者らの測定でも常に200Hz以上の周波数応答特性を示したが、今回の計測では、データのサンプリング周波数を50Hz、サンプリング時間は5分に設定した。なお、流速の計測は、側壁から水槽中央までの鉛直片側断面について行い、測点数は68点である。風速の鉛直断面分布の測定は、外径9mmのJIS型標準ピトー管を用いて行い、ピトー管に接続した精密微差圧計からの出力電圧をサンプリング周波数2HzでAD変換して5分間記録し、平均風速値を求めた。

3. 実験結果及びその考察

(1) 平均流速分布

図1(a)～(d)は、M4NFの実験ケースについての平均流速分布の特性を示す。まず、図(a)の水平方向平均流速Uの鉛直断面コンター図を見ると、表層部に風下側へ向かう吹送流が、底層部で上流側へ向かう反流（負の値を示す陰影を付けた領域）が存在し、1次循環流が形成されている。なお、図中の＋マークは、流速の測定点を示している。一方、図(b)の鉛直方向平均流速Vの鉛直断面コンターは、水槽側壁側で下降流（負の値を示す陰影を付けた領域）が、水槽中央部で上昇流が存在し、側壁と水槽中央の間に反時計回りの2次循環流が形成されていることを示している。この2次循環流はUの鉛直断面分布形状に大きな影響を及ぼし、側壁付近では表層の大きな運動量を下向きに、水槽中央部では負の運動量を上向きに輸送するため、等流速線は中央部で凸型の断面形状を示している。次に、図(c)でUの水平断面分布について見ると、水深5cmでの水平分布に見られるように水面付近では水槽中央から側壁に近づくほどUの値が大きい逆放物線形の分布を示す。この時の水面上の風速の水平面分布にはこのような現象は見られず、風下側に凸形の放物線形状を示しているにもかかわらずである。これは明らかに2次循環流の影響であり、水槽中央部での上向きの循環流が底面付近の負の運動量を上方に運ぶため水槽中央の表層付近では水平流速が大きく減少し、逆放物線形の流速分布になったと考えられる。なお、図中のYは静水面を基準とした水深を、Zは側壁からの距離を表す。図(d)でVの水平分布は、水深20cm付近で下降流、上昇流ともに最大となっており、特に側壁付近の水深5～20cm付近には-3cm/s程度の強い下降流があり、表層のUの最大値の50%程度にもなる。

図2(a)～(d)は、M4UW10の実験ケースについての平均流速分布の特性を示す。図(a)でUの鉛直断面コンターを見ると、最大流測点は水槽中央の表層付近にあり、風の影響で等流速線が側壁に向かって左肩上がりに大きく傾斜している。一方、図(b)のVの鉛直断面コンターは、水槽側壁側で上昇流が、水槽中央部で下降流が存在し、側壁と水槽中央の間で時計回りの2次循環流が形成されていることを示

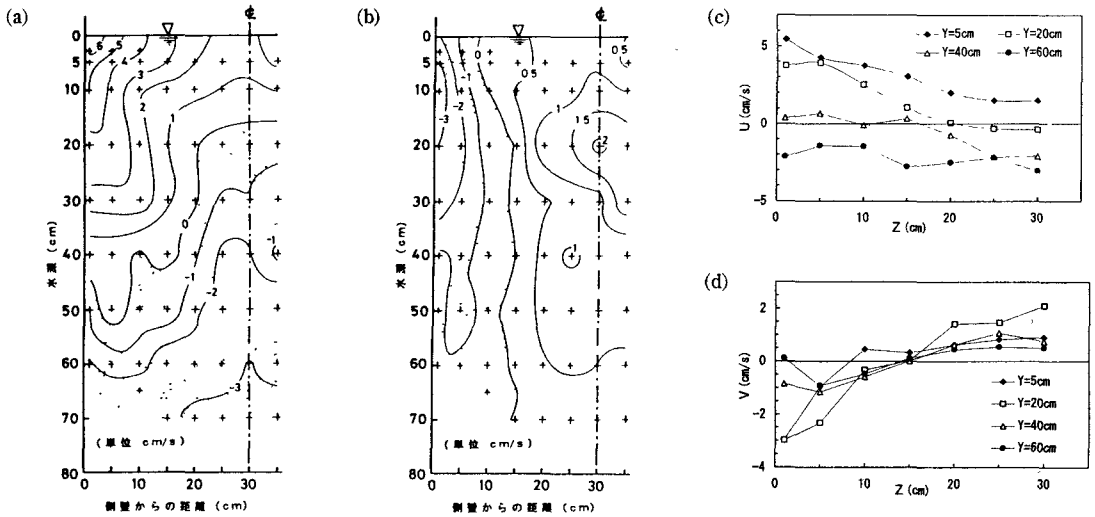


図1 風洞水槽内における平均流速分布の特性 (M4NF; 風のみの場合. (a) 流速 U のコンター図, (b) 流速 V のコンター図, (c) U の横断方向分布, (d) V の横断方向分布)

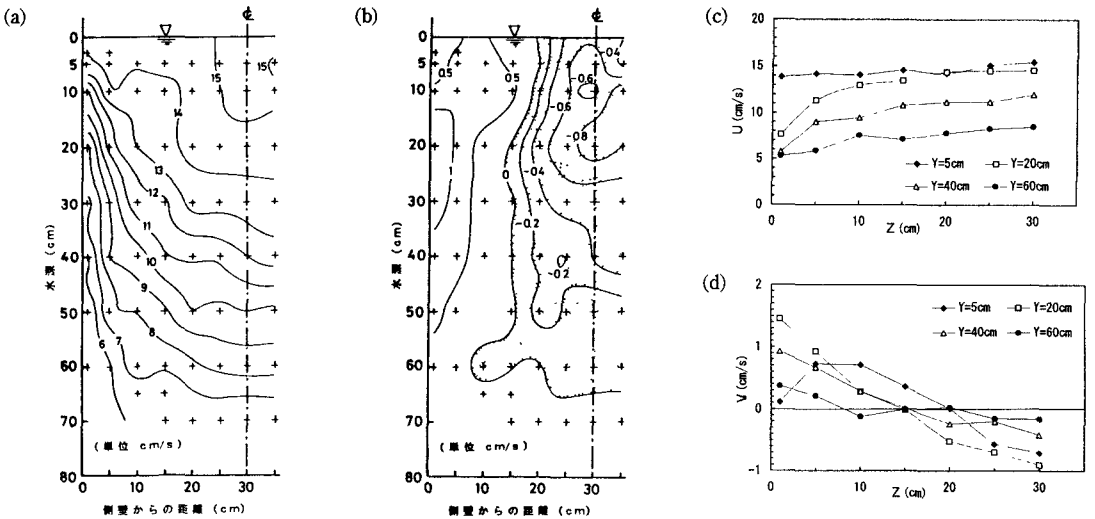


図2 風洞水槽内における平均流速分布の特性 (M4UW10; 風と順流の場合. (a) 流速 U のコンター図, (b) 流速 V のコンター図, (c) U の横断方向分布, (d) V の横断方向分布)

している。この2次循環流は U の鉛直断面分布形状に大きな影響を及ぼしており、側壁付近では底層の小さな運動量が上向きに輸送されて等流速線が大きく傾斜し、水槽中央部では表層の大きな運動量を下向きに輸送して水深が深い部分の U を加速させている。図(c)で U の水平断面分布について見ると、水深5cmでは水平方向にほぼ一様な分布となっている。これは、側壁に沿って上昇してきた流れが2次流の水平方向成分 W で水面に沿って水槽中央部に運ばれ、 U 成分を一様化させる方向に作用するためと考えられる。また、風を吹かせない流れだけの場合と比べて鉛直方向に速度差が顕著に現れており、水深60cmの水槽中央部では U の値が7cm/s程度まで低下している。図(d)で V の水平分布は、水深20cm付近で最大となり、下降流が1cm/s、上昇流が1.5cm/s程度の値を示すが、これは表層付近の U の最大値の7~10%程度であり、他の2ケースと比較して2次循環流は弱いようである。

図3(a)~(d)は、M4UW-10の実験ケースについてである。図(a)で U の鉛直断面コンターを見ると、水深10cmあたりまでは等流速線は水平に走っているが、それより深いところでは等流速線は鉛直にな

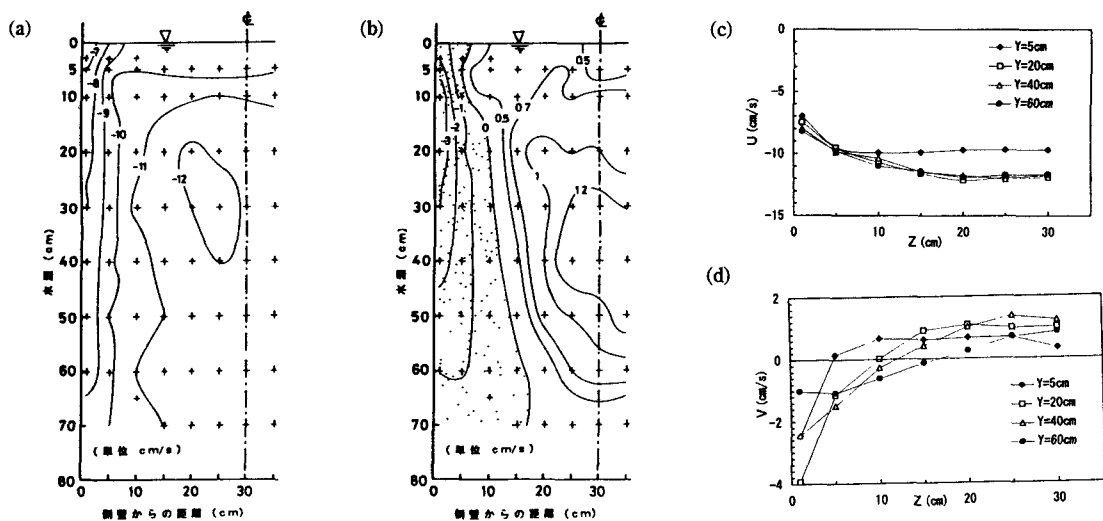


図3 風洞水槽内における平均流速分布の特性 (M4UW-10; 風と逆流の場合. (a) 流速 U のコンター図, (b) 流速 V のコンター図, (c) U の横断方向分布, (d) V の横断方向分布)

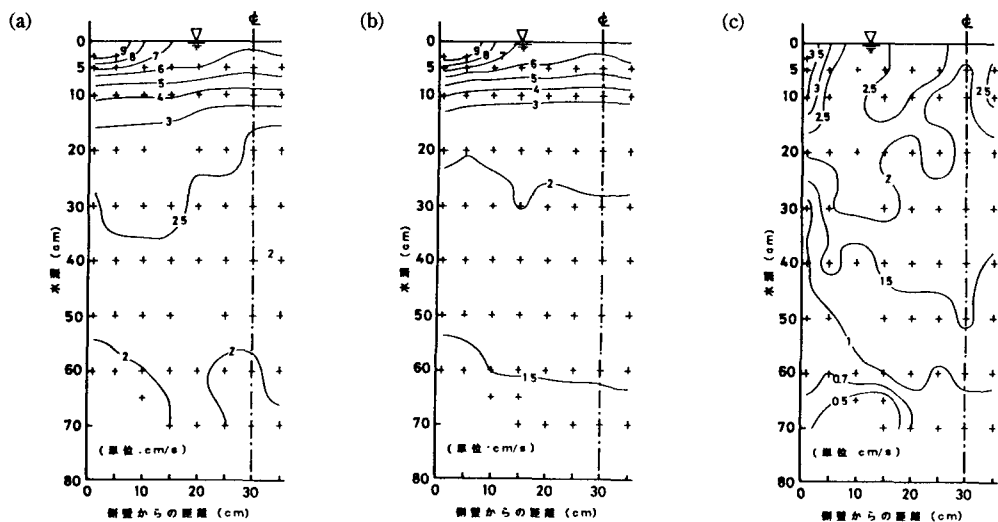


図4 風洞水槽内における乱れ強度分布の特性 (M4UW10; 風と順流の場合. (a) 乱れ強度 u' のコンター図, (b) 乱れ強度 v' のコンター図, (c) レイノルズ応力 $-\overline{uv}$ のコンター図)

り、水面付近は流れに逆向きの風に引っ張られて流速が低下するものの、水深10cmより深い領域では鉛直的にはほぼ均一な流速分布となる。これは、図(c)の U の水平分布にも顕著に現れており、風の影響は表層部分に限られているようで、図2(a)の結果とは際違った違いを見せる。最大流速点は水槽中央の水深30cm付近にある。一方、図(b)で V の鉛直断面コンターは、水槽側壁近くに下降流が、水槽中央部に上昇流が存在し、側壁と水槽中央の間で反時計回りの2次循環流が形成されていることを示している。図(d)の V の水平分布で見ると、側壁部の水深20cm付近に -4cm/s 程度の強い下降流が存在しており、これは U の最大値の33%程度に達するが、水槽中央部の上昇流速は最大でも 1.5cm/s 程度である。

(2) 乱れ強度分布

図4は、M4UW10の実験ケースについて、流れの方向の乱れ強度 u' 、鉛直方向の乱れ強度 v' 、及びレイノルズ応力 $-\overline{uv}$ の鉛直断面のコンター図である。図から明らかなように、乱れ強度 u' 、 v' は、風波

が大きな影響を及ぼして水面に近づくほど強くなっており、側壁部の水面付近には特に乱れ強度及びレイノルズ応力が強い領域が存在する。また、 u' と v' はよく似た分布形状を示し、その値もほぼ同じオーダーである。このような特徴は、他の二つの実験ケース、M4NFとM4UW-10でも全く同様に観察され、その値もほぼ同じオーダーであった。水面付近の乱れ強度は、M4NFではUの最大値の2倍程度、他の2ケースではUの最大値と同程度の大きさにも達するが、これは風波が乱れ強度に強い影響を与えているためである。ところで、瀬津ら¹⁾は、一様開水路では自由水面付近で乱れの非一様性が増加して渦度の発生項が大きくなり、その結果大規模な2次流（水面渦）が形成されることを指摘した。今回の実験では、鉛直断面の水平方向の流速Wとその乱れ成分wについては計測されなかったが、いずれの値も側壁近くでは小さくなると想定される。したがって、今回の3つの実験ケースにおいては、水槽側壁の存在が大きな要因となって側壁部の水面近くで乱れの非一様性が増加して大きな渦度が生成され、その結果、一対の2次循環流が形成されたという仮定が成り立つ。なお、図5は、Mizuno & Cheng¹⁰⁾によって得られた風洞水槽内の渦度の鉛直断面分布を示す。このデータは、水槽のスケールと風速は異なるがM4NFと同じ実験ケースである。

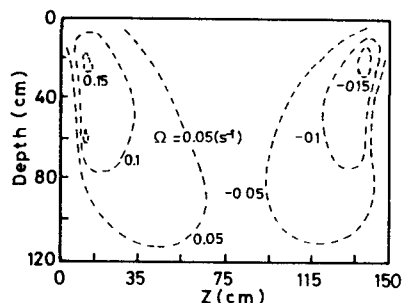


図5 風洞水槽内の渦度分布の例¹⁰⁾

図によれば、両側壁部の水面付近で強い渦度が生成されているが、今回の3ケースの実験でも両側壁部の水面付近で強い渦度が生成されていると考えられる。このように、鉛直断面内の渦度の生成のみについて考えると、水面付近での乱れの非一様性がその大きな要因となっている可能性が考えられる。また、瀬津ら²⁾は、2次流を支配する渦度方程式において、渦度の発生項が負の場合には2次流は時計回りに回転し、正の場合には反時計回りに回転することを指摘している。渦度の発生項の正負を決めるのは、Z軸方向とY軸方向の乱れ強さの差($\overline{w'^2} - \overline{v'^2}$)である。今回の実験ではwは測定されていないので、風洞水槽内の2次流の回転方向が渦度の発生項の特性から説明できるのかどうかは明らかではない。しかし、 u' と v' の分布に見られるように、今回の3つの実験ケースにおける鉛直断面内の乱れの分布は非常に似通った特性を示している。したがって渦度の発生項の特性から、今回の3つの実験ケースで風洞水槽内に現れた2次循環流の回転方向の違いを説明するのは困難なようである。それでは、何が風洞水槽内の2次流の回転方向を決めるのか？これは、今後の課題である。

4. おわりに

本研究では、風洞水槽内の流れの鉛直断面構造を把握するため2次元の高精度レーザ流速計を用いた

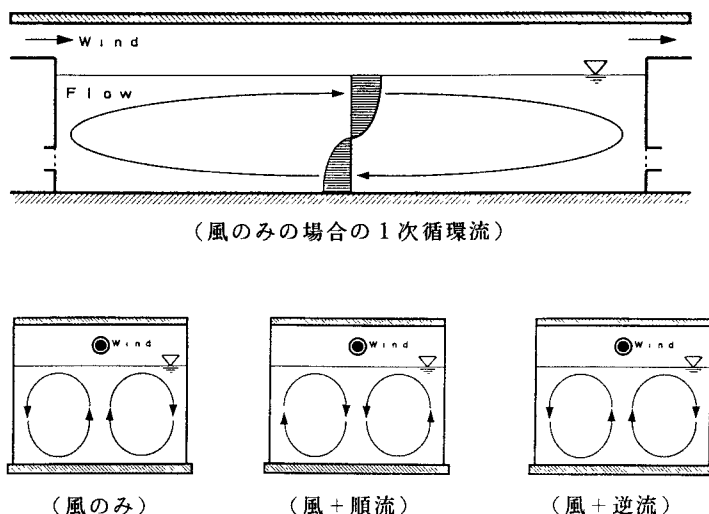


図6 風洞水槽内に発生する1次循環流と2次循環流の模式図（上；1次循環流，下；2次循環流）

計測を行い、風と流れが共存する風洞水槽内の流れには大規模な2次循環流が存在することを明らかにした。風洞水槽内の2次循環流の特徴をまとめると、次のようである。

①循環流の構造を模式的に表すと、図6のようで、水槽内に流れを起こさずに風のみを吹かせた場合、風向きに発達する吹送流とその反流からなる1次循環流、及び水槽側壁で下降し中央で上昇する一対の2次循環流が発生する。風と同じ向きに流れを与えると、1次循環流はないが側壁で上昇し中央で下降する一対の2次循環流が、風と逆向きに流れを与えると、側壁で下降し中央で上昇する一対の2次循環流が、それぞれ発生する。

②一様開水路で流れの3次元性を示すものとして注目されている2次流は、その流速が主流速の高々3%程度の微流速であるが、風洞水槽内に発生する2次循環流の流速はかなり大きく、鉛直平均流速 V は主流速の50%程度に達する場合もある。

③風洞水槽内においては、水槽側壁の存在が大きな要因となって側壁部の水面近くで乱れの非一様性が増加して大きな渦度が生成され、その結果、一対の2次循環流が形成されたと考えられる。

吹送流に関する研究は、これまで、Keulegan¹³⁾、Baines & Knapp¹⁴⁾、We¹⁵⁾、光易ら¹⁶⁾など数多くの研究者によって行われてきた。しかし、それらは平均流速や摩擦速度といった何らかの平均量を対象とした研究であり、その中に吹送流中の運動量の鉛直輸送機構を直接支配する乱れの構造や2次循環流の構造までを考慮した研究はなされていなかった。しかし、今回の実験で明らかになった2次循環流は、風洞水槽内での風から流れへの運動量の鉛直輸送に大きな影響を及ぼしていると考えられる。今後さらに実験を進めて、2次循環流の特性を明らかにしていきたい。

謝辞：最後に、本研究に関する実験の遂行については、広島工業大学大学院修士課程在学中の村本将司君（現在、応用地質（株）に勤務）に多大な協力をいただいたことを付記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) 瀬津家久・中川博次(1986)：土木学会論文集，第369号/II-5，pp. 89-98.
- 2) 瀬津家久・富永晃宏・中川博次(1993)：土木学会論文集，No. 467/II-23，pp. 49-56.
- 3) Nezu, I. (1994)：第9回国際水理学会アジアパシフィック国際会議，基調講演論文，pp. 1-24.
- 4) 瀬津家久・阿部崇・中川博次(1995)：水工学論文集，第39巻，pp. 747-752.
- 5) Langmuir, I. (1938)：Science，87，pp. 119-123.
- 6) 海洋大事典(1987)：和達清夫監修，(株)東京堂出版発行，pp. 482-483.
- 7) 水野信二郎・塚本和寛(1988)：九州大学応用力学研究所所報，pp. 37-45.
- 8) 日野幹雄・瀧岡和夫・須見徹太郎(1985)：土木学会論文集，第357号/II-3，pp. 75-80.
- 9) Faller, A. J. & Capom, E. A. (1987)：J. Geophys. Res.，Vol. 83, No. C7，pp. 3617-3633.
- 10) Mizuno, S. & Cheng, Z. (1992)：J. Oceanogr. Soc. Japan，Vol. 48，pp. 37-57.
- 11) 埜口英昭(1994)：土木学会第49回年次学術講演会講演概要集，2-A，pp. 618-619.
- 12) 埜口英昭(1993)：中国工業技術試験所報告，第41号，pp. 1-31.
- 13) Keulegan, G. H. (1951)：J. Res. nat. Bur. Stand.，Vol. 46，pp. 358-381.
- 14) Baines, W. D. & Knapp, D. J. (1965)：J. Hyd. div.，A. S. C. E.，Vol. 91，pp. 205-221.
- 15) We, J. (1975)：J. Fluid Mech.，Vol. 68，pp. 49-70.
- 16) 光易恒・草場忠夫(1988)：九州大学応用力学研究所所報，第66号，pp. 21-35.