

流れにより回転する柱状体の後流構造 に関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE WAKE STRUCTURE BEHIND A
CYLINDRICAL ROTATOR WITH ASYMMETRY IN A UNIDIRECTIONAL FLOW

押川英夫¹・寺尾直樹²・小松利光³

Hideo OSHIKAWA, Naoki TERAOKA and Toshimitsu KOMATSU

¹正会員 博（工） 九州大学大学院助教 工学研究院環境都市部門（〒819-0395 福岡市西区元岡744）

²正会員 修（工） 国土交通省港湾局技術企画課（〒100-8918 東京都千代田区霞ヶ関2-1-3）

³フェロー 工博 九州大学大学院教授 工学研究院環境都市部門（〒819-0395 福岡市西区元岡744）

Wake structures behind a cylindrical rotator with asymmetrical protrusions were investigated by physical experiments. Such a cylindrical rotator could prevent a flood disaster due to congeries of driftwood for a bridge. In this study, a cylinder with five quarter-cylinders was placed in a unidirectional flow. The cylinder itself can rotate by hydrodynamic force with a flow. As a result of this study, it is made clear that vortices shed from the rotator influence flow structures behind the rotator. A transverse distribution of a time-average longitudinal velocity of the flow with the rotator was asymmetric on the longitudinal centerline. In the accelerating area with a rotation of the rotator, five vortices were obviously shed from each protrusion of a quarter cylinder in each period. On the other hand, in the interrupting one, the lesser vortices were found. A longitudinal series of vortices merged downstream, and became one vortex finally. Therefore, a wake flow behind the rotator becomes asymmetric in an area.

Key Words : Cylindrical rotator, wake, eddy, unidirectional flow

1. はじめに

近年、山腹崩壊や溪岸侵食等を引き起こすような豪雨の頻度が高くなっている。特に中小河川に架かる橋梁には径間長が不十分なものが多く、河川に流入した流木が橋梁に集積して河道を堰き止め、その結果、計画高水流量以下でも越水して周辺の家屋や護岸等に甚大な被害を与えている。従って、流木に関する研究と対策が喫緊の重要課題となっている¹⁾。

このような背景の下、著者らは非対称構造物を取り付けた回転式の柱状体（以下、回転体と呼ぶ）を橋脚の上流側に設置し、橋梁への流木の集積を回避する手法を提案している²⁾。流木の橋梁・家屋への集積について検討した研究は見られるものの^{3)~6)}、流木被害の軽減対策を検討した例は少なく、また本技術の基礎となる非対称形状を有する柱状回転体周りの水流を扱った研究も非常に少ない。そこで本論文では、回転体の設置による流木の橋脚への集積防止効果の把握と向上を目指して、まずは回転体の基本的な後流構造について実験的検討を行った。

流れにより回転する柱状体を扱った本研究に関連した研究としては、ダリウス型⁷⁾、サボニウス型^{8)~10)}等の垂直軸型風車の研究が挙げられる。特にサボニウス型風車の形状は、本研究が対象とする回転体の形状と比較的類似しており、ある程度参考となるような知見も期待されるが、これらの風車では柱状体内部に風（流体）を取り込み、柱状体の背後から風を放出することから、本研究が対象とする回転体の後流構造とは大きく異なるものと考えられる。

また最近、マグナス効果を利用したスパイラルマグナス風車が実用化されつつある^{11), 12)}。この風車は電力を加えてらせん状のフィンの付いた回転円柱を回転させて揚力を得ることで、風車全体を回転させて高効率に発電するものであるが、通常の風車のフィンに相当する不透過製のスパイラル円柱翼に対して、本研究の回転体を用いれば、自然エネルギーのみを利用して更に効率的な発電が行える可能性がある。なお、前述のサボニウス型風車と融合させることで、モータを使用せずにスパイラルマグナス風車を回転させる技術については、既に伊藤ら¹³⁾が実験的検討を行っている。

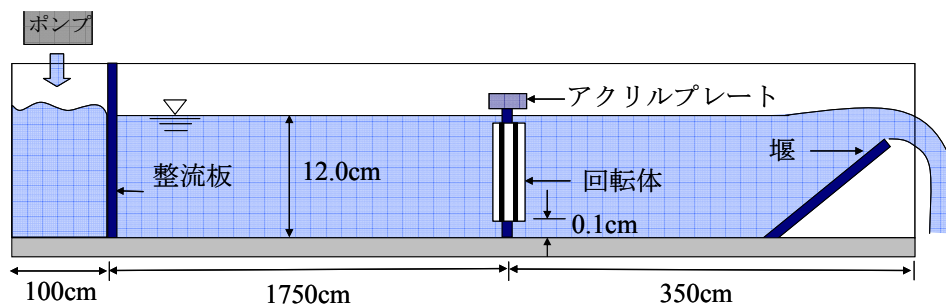


図-1 実験装置の概略（側面図）

表-1 実験条件

Q (m ³ /h)	h (cm)	U (cm/s)	Re	Fr
75	12.0	29	1.4×10^4	0.27

2. 実験方法および実験条件

実験には図-1に示す長さ2200cm、幅60cmの直線開水路を用いた。実験条件を表-1に示す。Qは流量、hは柱状体の中心から50.0cm上流のA地点(後述の図-3参照)における水深、UはA地点を含む断面における断面平均流速、 $Re \equiv UD/\nu$ 、 ν は水の動粘性係数は柱状体の直径D（回転体では円柱部分の直径）に基づくレイノルズ数、 $Fr \equiv U/(gh)^{0.5}$ 、gは重力加速度はhに基づいたフルード数である。

回転体は直径D=5cm、高さ12cmの円柱に半径k=1cmの円柱を4等分した1/4円柱（以下、突起とよぶ）を等間隔に5個設置したものであり（図-2参照）、水路上部に横断的に設置したアクリルプレートで回転体の支柱（心棒）を固定している。回転体等の柱状構造物は整流板（図-1参照）から1750cm下流の中央部に設置された。用いられた柱状構造物は、制御されることなく流れに応じて回転する回転体と比較用の（1/4円柱の突起が付いていない）同じ大きさの回転しない円柱である。また回転体直下に設置したデジタルレーザーセンサ（キーエンス社製、LV-21A）を用いて回転体の位相と流速の時系列を同期させている。その際レーザーから得られた信号より回転体の回転の平均的な周波数を求めたところ $f_r = 0.84\text{Hz}$ であった。従って、周速比は $\lambda \equiv 2\pi f_r(D/2+k)/U = 0.64$ である。流速の測定には超音波式流速計（Nortek社製、Vectrino）を用い、水路床から3.5cmの高さにおける流速3成分の水平分布を測定した。サンプリング周波数は100Hzであり、測定時間は各点ごとに6分間とした。

座標系O-xyzの定義、および瞬時流速3成分(u_s, v_s, w_s)の各方向の定義は図-3に示されている。測定位置はx方向に7測線($x=7.5, 10, 12.5, 15, 20, 30, 40\text{cm}$)、y方向に11測線($y=0, \pm 2.5, \pm 5, \pm 7.5, \pm 10, \pm 15\text{cm}$)の交点上とした。なお、柱状体を扱った本研究では、後述の図-6中の流速のスペ

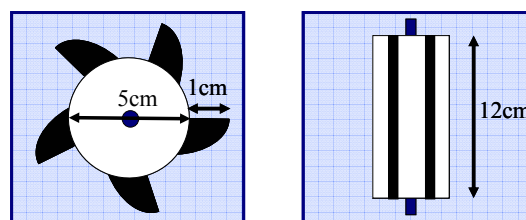


図-2 回転体（左：平面図、右：側面図）

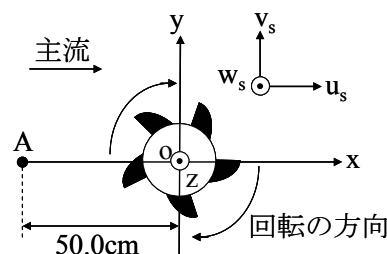


図-3 座標系と測定位置（平面図）

クトル $F_w(t)$ からも分かるように、鉛直方向流速は顕著でなかったことから検討の対象とはしていない。

3. 実験結果および考察

(1) 平均流および乱れの構造について

柱状体付近の $x/D=1.5$ における回転体および円柱後流の平均流速の水平2成分(u, v)の横断方向分布を図-4に示す。なお本研究で用いる結果の図は、今後も含めて空間座標はD、流速はUにより無次元化して表記する。これより、円柱の平均流速分布は水路の中心線 ($y=0$) に関して左右対称になるのに対し、回転体の流速分布は非対称になることが分かる。これは回転体が一方方向に回転していることに起因したものであり、特に回転体近傍(例えば $y/D=\pm 0.5$)ではyが正の領域より負の領域で流速uが小さい。y<0の領域においては、突起の向きに起因して回転体が流れ(主流)を妨げる方向に回転することから、y>0の領域と比較してuが小さくなっていると理解される。逆にy>0の領域においては、回転体が流れをフォローする方向に回転することから、y<0の領域と比較してuが大きくなっている。

次に、図-4と同一条件における乱流エネルギー($\equiv k$)、および乱れのプロダクション($\equiv P_r$)の横断方向分布を図-5

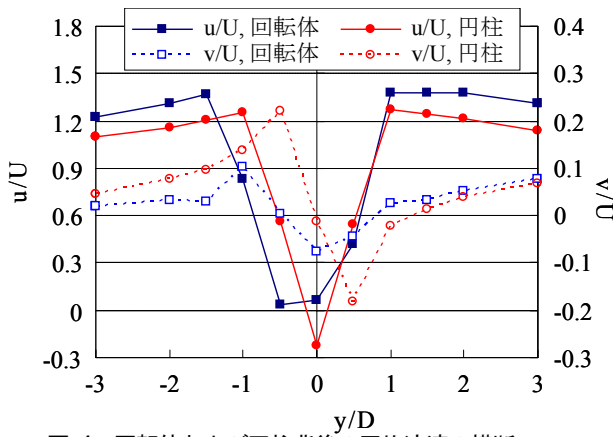


図-4 回転体および円柱背後の平均流速の横断方向分布 ($x/D=1.5$)

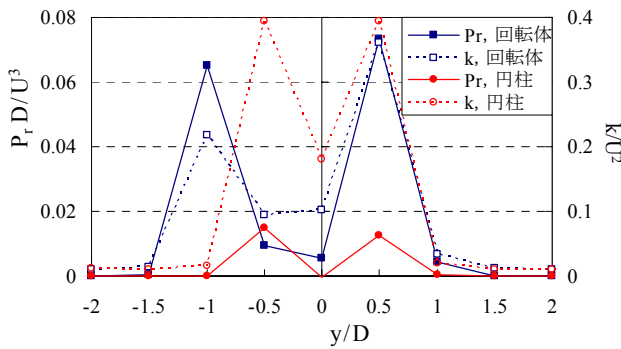


図-5 回転体と円柱の k , P_r の横断方向分布 ($x/D=1.5$)

に示す。本研究では、 k および P_r はそれぞれ以下の式(1)、(2)で表されるものとする。

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (1)$$

$$P_r = -\overline{u'v'} \frac{\partial u}{\partial y} - \overline{u'v'} \frac{\partial v}{\partial x} \quad (2)$$

但し、 u' , v' , w' はそれぞれ、 u_s , v_s , w_s の変動成分であり、 $\overline{}$ は時間平均を意味する。 P_r の式中の空間微分は差分により近似した。一般に円柱などの2次元構造物の後流の P_r については、式(2)中の右辺第一項で近似する¹⁴⁾ことが多いものの、回転に因る流れの歪みを議論する本研究では v も影響する可能性が考えられたため、 v の空間微分まで考慮して検討を行った。しかしながら実際に計算してみると、第一項は第二項よりも1オーダー程度大きかったため、 P_r への第二項の寄与は小さかった。

図-4の平均流速分布と同様に、図-5において円柱の場合の k および P_r は $y=0$ に関して対称であるのに対し、回転体の k および P_r は非対称になっている。当然ながら、これも回転体が一方方向に回転しているためである。

ここで、非対称な回転体周りの平均流速分布 (図-4) と乱れ (図-5) の関係について検討する。回転体の P_r および k はともに、 $y/D=0.5$ において最大値、 $y/D=-1$ において極大値を持つ非対称な双子山の分布となっている。

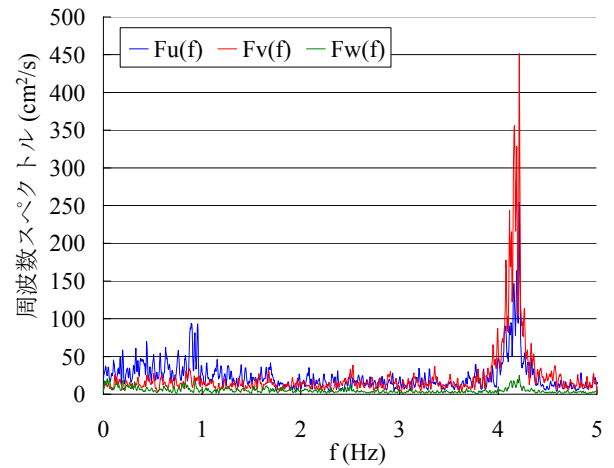


図-6 回転体付近の流速のスペクトル ($x/D=1.5$, $y/D=0.5$)

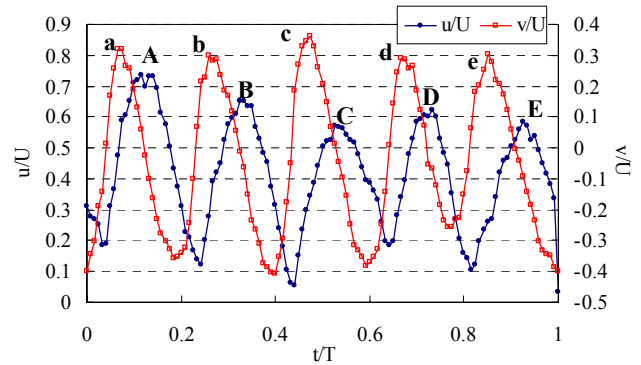


図-7 流速の位相平均波形 ($x/D=1.5$, $y/D=0.5$)

これより乱れのプロダクションによって両地点 ($y/D=0.5$, -1) の k が周囲に比較して大きくなっていることが理解される。またこの位置は図-4において平均流速の勾配の絶対値が大きくなる位置とも一致する。分布が左右非対称になる点については、 $y=0$ において円柱の v はほぼ0であるのに対し、回転体では $v < 0$ となっていることから分かるように、回転に伴う y 方向の平均流の発生およびそれによる輸送に起因したものと理解される。

(2) 流れの周期的な変動特性について

$x/D=1.5$, $y/D=0.5$ における流速 u_s , v_s , w_s のそれぞれの周波数スペクトル $F_u(f)$, $F_v(f)$, $F_w(f)$ を図-6に、横軸を回転の周期 $T(=1/f_r)$ で無次元化した無次元時間 t/T 、縦軸を u/U および v/U とした同一地点における位相平均流速の時系列を図-7に示す。図-7より5つの波を確認できるとともに、スペクトルから回転体の回転($f_r=0.84\text{Hz}$)の5倍の周波数においてパワーが卓越していることがわかる。回転体は5つの突起を有していることから、図-7における5つの波は回転体の突起により誘起されたものと考えられる。なお、本研究において回転体は制御されることなく流れに応じて回転しているため、図-6から理解されるように、回転の周波数も $f_r=0.84\text{Hz}$ の周りで若干変動する。そこで、レーザーからの回転の信号を用いて全ての回転 (および同期した流速データ) を抽出して各回転の時間を揃えた上で (時間の無次元化)、時間内挿を

行って位相平均を算定した。一方、図-6と同一地点において円柱周りの流速スペクトルのピーク周波数を求めたところ0.97Hzであり、回転体の回転周波数 $f_r=0.84\text{Hz}$ と比較的近いことから、回転体の回転周波数は固定柱状体からの渦放出の影響を受けている可能性もある。しかしながら、ここで検討されている周期性は、レーザーによる回転と流速の時系列データの位相関係の考慮（同期）のもとに検討されているので、そのような渦放出の影響の有無に係わらず回転体の回転に起因したものである。

x/D の各測線について、位相平均流速からそれぞれの平均値(u , v)を引くことで位相平均波形の変動($\langle \rangle$ で表記する)を抽出した。代表的な測線における結果を図-8～図-10に示す。図中の黒い実線の閉曲線は個々の渦の大まかな位置と大きさを、矢印は渦の回転方向（および流れの向き）を意味している。また、破線の閉曲線は融合している可能性のある渦の例を同様に示している。なお、各々の図で i) が $\langle u \rangle$ 、ii) が $\langle v \rangle$ となっている。これらは各測線上で検出された流れの周期的な時間変化を図示したものであるが、測線上で検出された変動が（移流によって）そのまま継続すると仮定した場合の流れの組織構造（いわば渦）を平面的に描いたことに相当する。

図-7～図-9には突起から発生した5個の波のそれぞれに便宜的に記号がふられている。 $\langle u \rangle$ に関する波を大文字、 $\langle v \rangle$ に関する波を小文字で表記し、大文字と小文字は対応させているので、例えば波Aと波aは本来、同一の突起に起因する同一の波（渦）を意味する。回転体近傍の $x/D=1.5$ の図-8で、波Bおよび波bについてみると、変動の振幅が卓越している $y/D=0.5$ において、波Bの変動が0の位相($t/T \approx 0.25$)で波bが正のピークを取ることや構造物から発生する一般的な渦の回転方向等を考慮すると、図-8に実線で示したような渦が存在していることが理解される。

(3) 回転方向と主流の向きが同じ領域 ($y>0$) について

はじめに図-8に見られるように、 $\langle u \rangle$ では渦が著しく扁平となり、 $\langle v \rangle$ ではそれ程歪んでいないというように、同じ渦に相当するものが見ると異なっているように見える点などについて概説しておく。例えば5回の周期変動が卓越している $y/D=0.5$ と1.0で検討すると、柱状体から遠い $y/D=1.0$ の平均流速 u が $y/D=0.5$ の u よりも速いために（図-4参照）、渦が x 方向に引き延ばされた結果として $\langle u \rangle$ では扁平な渦が発生している。なお、図-8i)では扁平化した渦は反時計回りに傾いて見えるが、実際の扁平化した渦は時計回りに傾いている。 $\langle v \rangle$ については、図-4からも分かるように絶対値が小さいことからシア어도小さいために、渦の変形が小さい。実際の渦の形状は、図-8i)、図-8ii)を併せて考えると想像されるように著しく扁平化しているとともに、 y 方向にも変形するので、ある程度流下すると扁平な楕円というよりは更に変形して勾玉のような形状となる。

$x/D=1.5$ の図-8と $x/D=2.5$ の図-9を比較することで、渦の流下に伴う変化について考察する。図-9ii)より波a, dの正のピークが小さくなっていることが分かる。よって図中に破線で示されたように、波eと波a、波cと波dが一体化しつつあると考えられる。また図-9i)からも、波Aの負のピークが無くなり、波Eと波Aの正の領域が一体化しつつあることが伺える。よって渦の合体・融合が起こっているものと判断される。

さらに流下した位置の $x/D=8.0$ における図-10i)より、例えば $y/D=1.0$ を見ると回転の一周期間に $\langle u \rangle$ には正と負の領域が1組存在していることが分かる。また図-10ii)の $\langle v \rangle$ でも同様に1組の変動となっている。従って、ある程度流下した $x/D=8.0$ の位置では、渦の融合を繰り返した結果として、回転の一周期間に対応した1つの波になっているものと判断される。

(4) 回転方向と主流の向きが異なる領域 ($y<0$) について

回転が主流の流れを妨げることになる $y<0$ の領域では、図中の渦の様子から分かるように、回転体に近い図-8においても明確な5つの波（渦）を確認することはできず、また変動の振幅も $y>0$ の領域と比較して小さいことが分かる。つまり $y<0$ の領域で発生する渦は $y>0$ の領域の渦に比べて強度が弱く、 $x/D=1.5$ より上流で既に融合が始まっている、もしくは必ずしも5個の突起全てから明瞭な渦が発生する訳ではなく、突起の通過に伴う変動（動揺）のみ生じる場合があるものと推測される。

若干下流の図-9の $y<0$ の領域においては、 $\langle u \rangle$ 、 $\langle v \rangle$ ともに回転の一周期間にほぼ1つの変動を有していることが分かる。すなわち $y<0$ の領域では、突起の影響が $y>0$ の領域よりも速やかに消滅している。

(5) 流れの全体構造について

図-8～図-10より、 $y>0$ の領域では $y/D=0.5$ の縦断面、 $y<0$ の領域では $y/D=-1.0$ の縦断面で周期的な速度変動が顕著になっていることが分かる。従って回転体の回転により、 $y>0$ の領域で各突起から発生した渦は $y/D=0.5$ 付近、 $y<0$ の領域で突起から発生した渦は $y/D=-1.0$ 付近を流下するものと考えられる。

最後に位相平均流速のもつ乱れエネルギー $\langle k \rangle$ [$\equiv \{\langle u^2 \rangle + \langle v^2 \rangle + \langle w^2 \rangle\} / 2$] の横断方向分布の流下方向遷移を図-11、主流方向の平均流速 u の横断方向分布の流下方向遷移を図-12に示す。図-11は、図-5に示した k （全周波数成分）の分布と同様に、渦の通過する位置（ $y/D=0.5, -1.0$ ）に極大値をもつ非対称な双子山の分布を示している。また図-8～図-10の結果からも想像されるように、流下に伴って左右の極大値は大きく減衰している。図-12の平均流速分布の流下方向の遷移と図-11を併せてみると、渦の影響が残る範囲は $y=0$ の両側で異なっているものの、 $\langle k \rangle$ のピークがほぼ無くなっていることから $x/D=6.0$ の位置では渦の影響は弱くなり、平均流

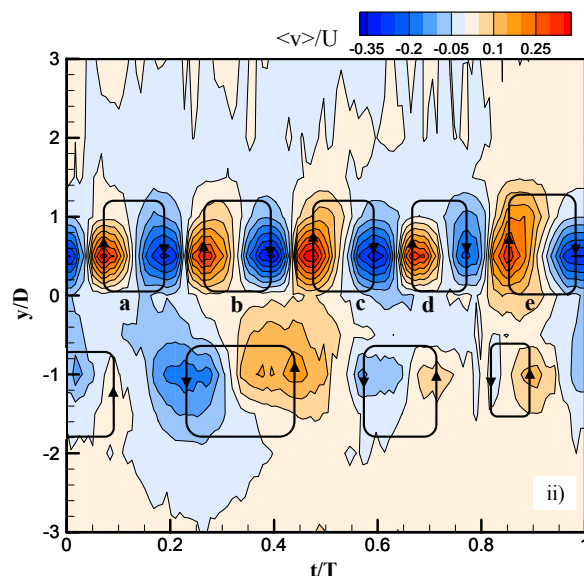
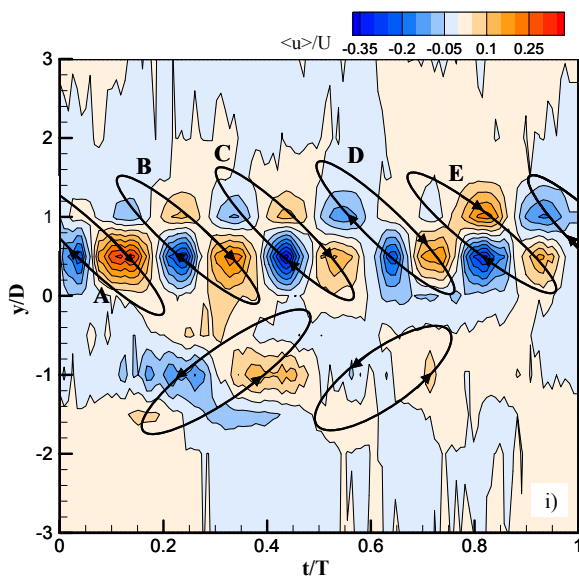


図-8 $x/D=1.5$ における水平流速の位相平均波形の横断方向分布 [i) : $\langle u \rangle/U$, ii) : $\langle v \rangle/U$]

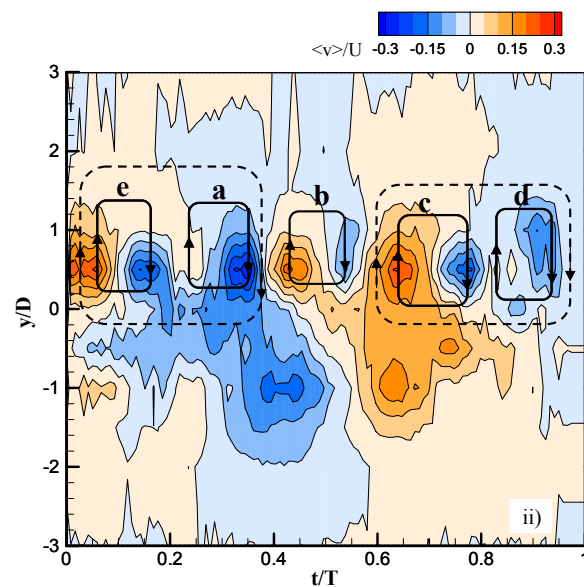
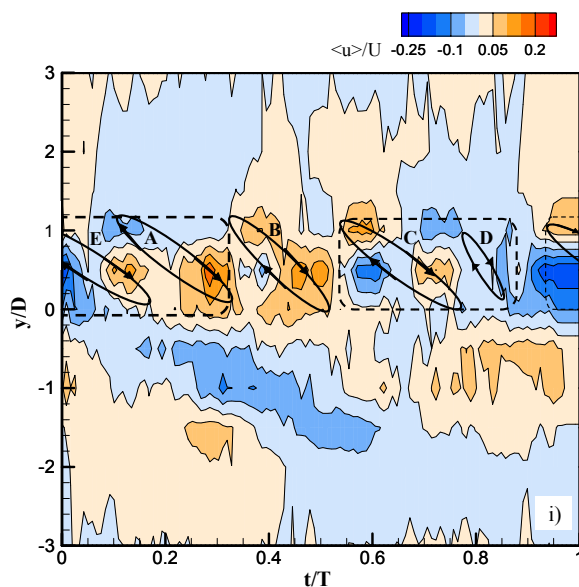


図-9 $x/D=2.5$ における水平流速の位相平均波形の横断方向分布 [i) : $\langle u \rangle/U$, ii) : $\langle v \rangle/U$]

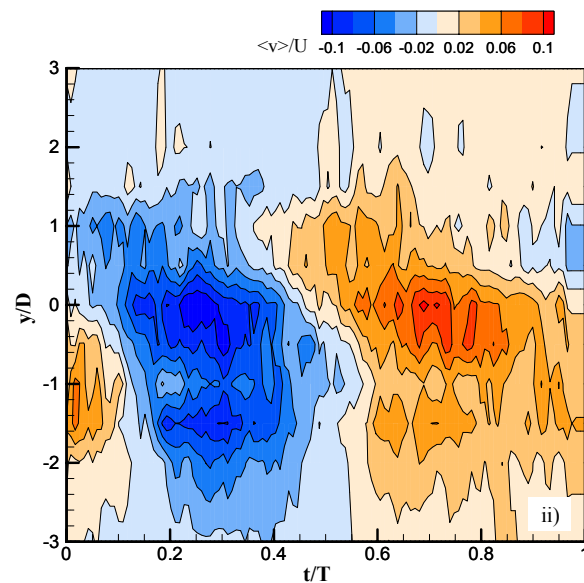
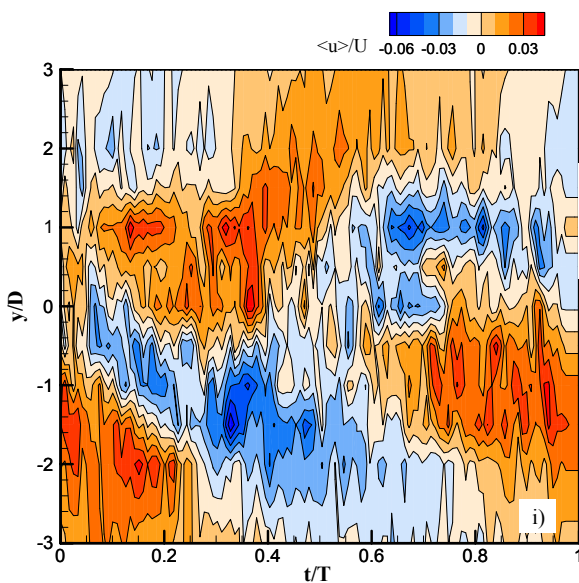


図-10 $x/D=8.0$ における水平流速の位相平均波形の横断方向分布 [i) : $\langle u \rangle/U$, ii) : $\langle v \rangle/U$]

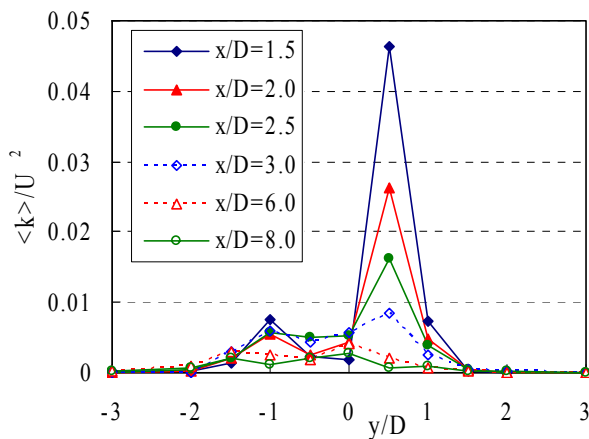


図-11 位相平均流速のもつ乱れエネルギー<math>\langle k \rangle</math>の流下方向遷移

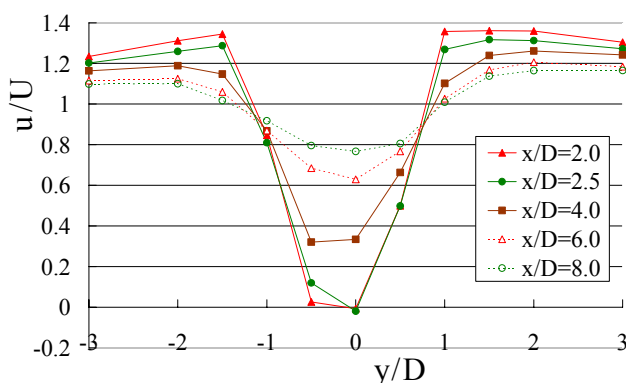


図-12 回転体背後の平均流速分布 u の流下方向遷移

速分布もほぼ対称になることが分かった。なお、本実験における流下方向の測定範囲 ($x/D \leq 8.0$) においては、平均流速分布に速度欠損域が残っており、いわゆる柱状体の後流としての特性は維持されている。

4. おわりに

本研究では、回転体の設置による流木の橋脚への集積防止技術の研究開発の一環として、流れにより回転する柱状体の後流構造について実験的検討を行い、以下の知見を得た。

- (1) 回転体の回転により5つの突起それぞれから渦が発生する。
- (2) 回転体の回転方向と主流の向きが一致する領域 ($y > 0$) の渦は $y/D = 0.5$ 付近、反対側 ($y < 0$) に発生する渦は $y/D = -1.0$ 付近を流下する。また渦は流下に伴い融合し、最終的に柱状体の回転に応じた一周期間に一つの変動となる。
- (3) 渦の影響は $x/D = 6.0$ 程度までと考えられ、この領域内では、回転体の回転に伴い平均流速分布が左右非対称となる。

今後は、回転体背後の後流に関する本研究成果を踏まえて回転体の適切な設置位置を評価するとともに、最終的には流木および橋脚の影響を考慮した上で回転体による流木の集積防止効果の把握と向上に関する研究を行っていく必要があるものと考えられる。

謝辞：本研究の一部は、平成18、19年度河川整備基金自主研究事業「流木災害軽減対策と河川樹木管理に関する総合的研究」の援助のもとに実施された。また実験を行うにあたり、九州大学大学院工学府技術補佐員の藤田和夫氏に多大なる援助を頂いた。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) (財) 河川環境管理財団, 流木災害軽減対策と河川樹木管理に関する総合的研究, 2008.
- 2) 押川英夫, 寺尾直樹, 藤田和夫, 小松利光: 流木による河道閉塞に対する防止技術の基礎的研究, 河川技術論文集, 第13巻, pp.405-408, 2007.
- 3) 中川一, 井上和也, 池口正晃, 坪野考樹: 流木群の流動と堰止めに関する研究, 水工学論文集, 第38巻, pp.543-550, 1994.
- 4) 坂野章: 橋梁への流木集積と水位せきあげに関する水理的考察, 国土技術政策総合研究所資料, No.78, 87p., 2003.
- 5) 清水義彦, 長田健吾, 高梨智子: 個別要素法を用いた流木群の流動と集積に関する平面2次元数値解析, 水工学論文集, 第50巻, pp.787-792, 2006.
- 6) 後藤仁志, 五十里洋行, 酒井哲郎, 奥謙介: 山地橋梁の流木閉塞過程の3次元シミュレーション, 水工学論文集, 第51巻, pp.835-840, 2007.
- 7) 田中太, 川口清司, 杉本真一, 富岡政裕: 直線翼ダリウス風車の翼型と翼取り付け角が起動性能に及ぼす影響, 日本機械学会論文集 (B編), 74巻739号, pp.624-631, 2007.
- 8) Savonius, S.J.: The S-Rotor and Its-Application, *Mechanical Engineering*, Vol.53, No.5, pp.333-338, 1931.
- 9) 山岸真幸: サボニウス型風車後流の速度分布の位相平均解析, 可視化情報, Vol.24 Suppl., No.1, pp.79-82, 2004.
- 10) 山岸真幸: 単一熱線プローブによるサボニウス型風車後流の流れ場の可視化, 可視化情報, Vol.25 Suppl., No.2, pp.147-150, 2005.
- 11) <http://www.mecaro.jp/>
- 12) 須知成光, 村上信博, 伊藤肇: スパイラル構造をもつ回転円筒に作用するマグナス効果を利用した風車の開発, 第27回風力エネルギー利用シンポジウム論文集, pp.177-179, 2005.
- 13) 伊藤晃, 西沢良史, 牛山泉: サボニウス型マグナス風車の特性に関する実験的研究, 日本機械学会 第12回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集, pp.125-126, 2007.
- 14) Tennekes, H. and Lumley, J.L.: *A first course in turbulence*, The MIT Press, 300p., 1972.