学校法人 松翠学園
滋賀文教短期大学
SHIGA BUNKYO JUNIOR COLLEGE

２台のサボニウス型回転装置まわりの流れのシミュレーション

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2022-05-27 キーワード (Ja): キーワード (En): Savonius rotor, ocean current power generation, numerical simulation, Flow field, Interaction between wind turbines 作成者: 河村, 哲也 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.32125/00000103

２台のサボニウス型回転装置まわりの流れのシミュレーション
Numerical simulation of the flow around two Savonius rotors

河村　哲也

抄録：垂直軸抗力型の風車のひとつにサボニウス風車がある。サボニウス風車には、低速回転、高トルクという特徴があるため、風力発電に用いられることはほとんどないが、最近注目されている海流発電用の回転装置として利用される可能性がある。前報ではこの点に注目して、サボニウス風車まわり流れの数値シミュレーションを行う第１段階として、サボニウス風車が複数台あっても適用可能な格子生成法を示した。本報告では、実際にこの格子を用いた流れの数値シミュレーションを、主として２台の風車が等速で逆回転している場合に着目して実行し、流れ場の様子を調べた。基礎方程式として２次元の非圧縮性ナビエ・ストークス方程式を採用し、差分法を用いて数値的に解いた。なお、高レイノルズ数流れでも計算を可能にするため、方程式の非線形項は３次精度上流差分法を用いて近似した。流れは２台の風車の中心を結ぶ線に対して 90 度、45 度、０度の３種類の角度であたるとして、その条件のもとでシミュレーションを行った。それぞれの角度により流れ場は大きく異なり、２台の風車の相互作用が明らかになった。

Abstract: One of the vertical axis wind turbines that utilize drag force is the Savonius wind turbine.
Savonius wind turbines are characterized by low speed rotation and high torque, so they are rarely used for wind power generation but have possibility to apply to ocean current power generation, which has been attracting attention recently. Focusing on this point, the previous report showed a grid generation method that can be applied even if there are multiple Savonius wind turbines as the first step in performing a numerical simulation of the flow around these turbines. In this report, we actually performed a numerical simulation of the flow using this grid, focusing mainly on the case where two wind turbines are rotating in reverse at a constant speed, and investigated the state of the flow field. Two-dimensional incompressible Navier-Stokes equations are adopted as the basic equation and solved numerically using the finite difference method. In addition, in order to enable calculation even in a high Reynolds number flow, the nonlinear term of the equations are approximated by using the third-order accuracy upstream difference method. The simulation is performed under the condition that the flow corresponds to three types of angles of 90 degrees, 45 degrees, and 0 degrees with respect to the line connecting the centers of the two wind turbines. The flow field differs greatly depending on each angle, and the interaction between the two wind turbines has been clarified.

キーワード：サボニウス風車、海流発電、数値シミュレーション、流れ場、風車の相互作用

Key words : Savonius rotor, Ocean current power generation, Numerical simulation, Flow field, Interaction between wind turbines

１．はじめに

異常気象や気候変動の原因となる化石燃料由来の二酸化炭素削減は喫緊の課題である。政府は 2021 年４月に、2030 年

の二酸化炭素排出量を 2013 年比の 46％に設定した。東日本大震災による原子力発電所の事故により、原子力の安全神話が崩壊したため、自然由来の再生可能エネルギーを効率よく得る努力がなされている。その中で風力エネルギーは自然エネルギーの代表であり、多くの風力発電所やウィンドファームが日本各地に建設されている。一方、風力発電は太陽光発電とともに天候に左右されやすいという欠点がある。安定的なエネルギーの供給のためには、自然エネルギーの獲得方法を増やし、選択肢を増やしていくことが重要である。そのひとつで風力や太陽光の欠点をカバーできるものとして海流エネルギーの利用がある。運動する流体が持つエネルギーはその流体の密度に比例するため、空気の約 1000 倍の密度である海水の流れが持つエネルギーは風力に比べて文字通り桁違いに大きい。さらに日本には近海に世界最大級の海流である黒潮が流れているほか、潮流の速い海域も多く存在する。このため、狭い国土で風車を建設できる場所が少ないという風力発電のデメリットを克服できる。

風車や水車は揚力型と抗力型に分類される。前者は物体が流体から受ける揚力を利用するもので、流速より速く回転できるという特徴がある。その一方でトルクは小さい。代表例として全国各地に設置されているプロペラ型風車がある。後者は物体が流体から受ける抗力を利用するもので、流速より速く回転できないが、トルクが大きいという特徴がある。サボニウス風車やクロスフロー風車が代表例である。回転速度は変速機を用いて変化させることが可能であるが、エネルギーロスが大きい。したがって、発電には高速回転する風車を用いのが効率的であるため、風力発電ではプロペラ型が現在主流になっている。それに反して、海流は流速が小さいため、揚力型は不向きである。それとともに、海中でプロペラを高速回転させると、キャビテーションが発生し、著しいエネルギーロスがあるとともに回転体にもダメージを与えるという問題もある。したがって、海流発電には抗力型が適切であると考えられる。

以上のような背景を踏まえて、本報告では、海流発電の実用化に向け、サボニウス型回転装置に着目した。

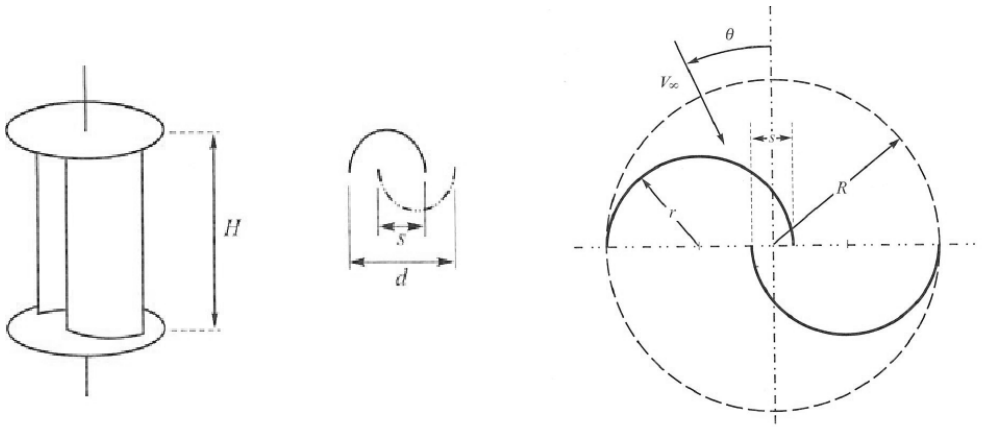


図１　サボニウス風車

サボニウス風車（回転装置）は図１に示すように、縦方向に置いたドラム缶のような中空の円筒を、軸を含む面で２つに割ってそれを重なりをもつように横方向にずらせた形状をしている。この風車はフィンランド人技師サボニウスによって考案され 1924 年に特許がとられているため、サボニウス風車とよばれる。

発電用の回転装置の性能を見積もる上では、その装置が回転しているときのまわりの流れを調べることは必要不可欠である。最終的には模型を作って直接トルクを測定するにしても、流れを十分に理解した上で、系統的に回転装置の形を変化させていくのが効率がよい。そのような場合には数値シミュレーションが有用になる。

サボニウス風車は、見かけは簡単な形状であるが、数値シミュレーションを行う上でいくつか困難な点がある。流体シミュレーションでは基礎方程式であるナビエ・ストークス方程式を、数値的に近似的にコンピュータを使って解く。ナビエ・ストークス方程式は非線形の連立偏微分方程式であり、代表的な数値解法として差分法と有限要素法がある。後者は通常、計算領域を（２次元計算では）三角形の要素に分割する。三角形であることから、複雑な領域でも要素分割が容易

であることが最大の利点である。しかし差分法に比べて計算時間がかかるとともに、ナビエ・ストークス方程式の非線形性に由来する計算不安定性を回避するための方法が使いにくいため、特に実際の風車で想定されるレイノルズ数に対して適用が困難になる。差分法では、通常は計算領域を差分格子とよばれる四辺形の格子に分割する。形状表現能力は有限要素法に劣るが、計算時間が少なくてすむとともに高レイノルズ数流れに対応しやすいという利点がある。

前報[1]では、サボニウス型回転装置の形状が、差分法では非常に困難になるほど複雑ではないため、差分法を用いた解析が可能なような差分格子の生成の方法を提案した。この格子を用いれば複数個の風車が近接しておかれた場合の解析も可能になる。

以上のことを踏まえて本報告では、前報で提案した差分格子を用いて、今回着目する流れの支配方程式である非圧縮性ナビエ・ストークス方程式を、差分法を用いて近似的に解くことにより流れ場の数値シミュレーションを行う。

実際にサボニウス型回転装置を海中に設置する場合、単独で設置すると装置全体に回転力が加わり、静止させるのが難しい。しかし、２台の装置を近接して設置し支持棒などでつないで、互いに逆方向に回転するようにすれば回転を打ち消すことができるため、安定な設置が望める。もちろん、２台の装置は相互作用をするため、その影響を見積もることが大切になる。そこで、本報告では主として２台の逆回転しているサボニウス型回転装置に着目して風車軸に垂直な断面内における２次元流れの数値シミュレーションを行った。このとき２つの回転装置を中心を結ぶ線に対して流れが当たる角度によって流れ場が大きく変化すると予想される。そのため、典型的な場合として、流れが上記の線に対し平行な場合、垂直な場合、45 度の角度をなして当たる場合について計算を行った。

２．計算方法

２．１　基礎方程式

流れは音速に比べて十分に遅いため、流れ場は非圧縮性ナビエ・ストークス方程式に支配される。図２に基礎方程式を示す。なお、本報告で用いた方法は、外部領域（図４左）では静止座標系、内部領域（図４右）は風車と同じ角速度で回転する回転座標系を円形境界でつなげる方法であるため、基礎方程式は静止座標系と回転座標系の２種類で表現した。図２で小文字は静止座標系、大文字は回転座標系を表すが、両者の間には以下に示す関係が成り立つ。

$$x = X\cos\theta + Y\sin\theta \qquad u = U\cos\theta + V\sin\theta + \omega y$$

$$y = -X\sin\theta + Y\cos\theta \qquad v = -U\sin\theta + V\cos\theta - \omega x$$

$$X = x\cos\theta - y\sin\theta \qquad U = u\cos\theta - v\sin\theta - \omega Y$$

$$Y = x\sin\theta + y\cos\theta \qquad V = u\sin\theta + v\cos\theta + \omega X$$

基礎方程式（静止座標系）

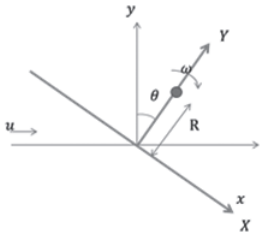
◇連続の式 (静止座標系)

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0$$

◇非圧縮性 Navier-Stokes 方程式 (静止座標系)

$$\begin{cases}\dfrac{\partial u}{\partial t}+u\dfrac{\partial u}{\partial x}+v\dfrac{\partial u}{\partial y}=-\dfrac{\partial P}{\partial x}+\dfrac{1}{Re}\left(\dfrac{\partial^2 u}{\partial x}+\dfrac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)\\ \dfrac{\partial v}{\partial t}+u\dfrac{\partial v}{\partial x}+v\dfrac{\partial v}{\partial y}=-\dfrac{\partial P}{\partial y}+\dfrac{1}{Re}\left(\dfrac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\dfrac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)\end{cases}$$

x, y : 座標値(静止座標系)
u, v : 速度(静止座標系)
P : 圧力
Re : レイノルズ数



基礎方程式（回転座標系）

◇連続の式 (回転座標系)

$$\frac{\partial U}{\partial X}+\frac{\partial V}{\partial Y}=0$$

◇非圧縮性 Navier-Stokes 方程式 (回転座標系)

$$\begin{cases}\dfrac{\partial U}{\partial t}+U\dfrac{\partial U}{\partial X}+V\dfrac{\partial U}{\partial Y}-\omega^2 X+2\omega V=-\dfrac{\partial P}{\partial X}+\dfrac{1}{Re}\left(\dfrac{\partial^2 U}{\partial X^2}+\dfrac{\partial^2 U}{\partial Y^2}\right)\\ \dfrac{\partial V}{\partial t}+U\dfrac{\partial V}{\partial X}+V\dfrac{\partial V}{\partial Y}-\omega^2 Y-2\omega U=-\dfrac{\partial P}{\partial Y}+\dfrac{1}{Re}\left(\dfrac{\partial^2 V}{\partial X^2}+\dfrac{\partial^2 V}{\partial Y^2}\right)\end{cases}$$

X, Y : 回転座標系での座標値
U, V : 回転座標系での速度
P : 圧力
Re : レイノルズ数
ω : 回転装置の回転角速度

図２　基礎方程式

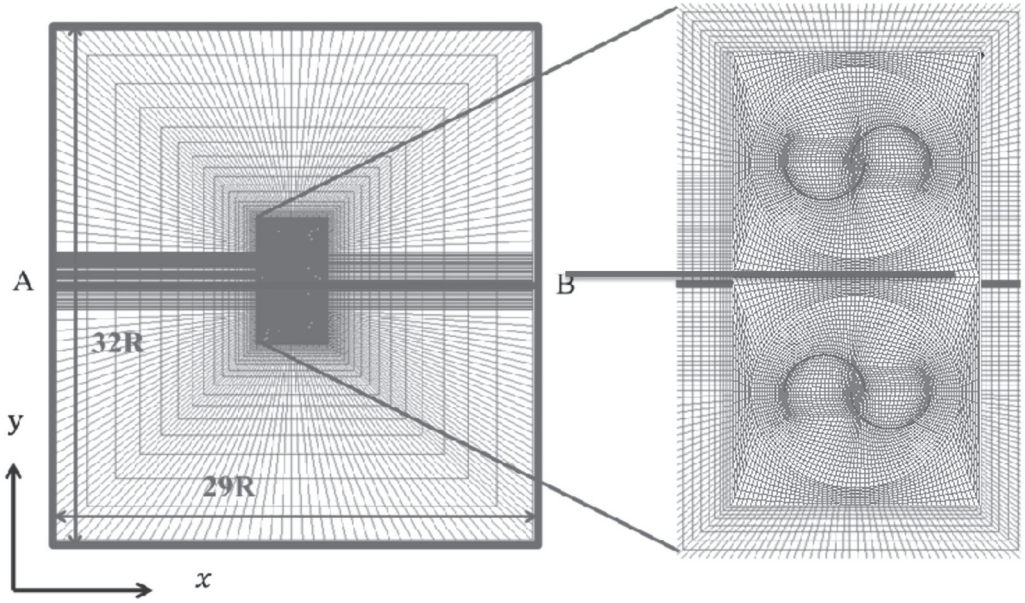


図３　２つの回転装置に対する計算格子（左：全体、右：風車近傍）

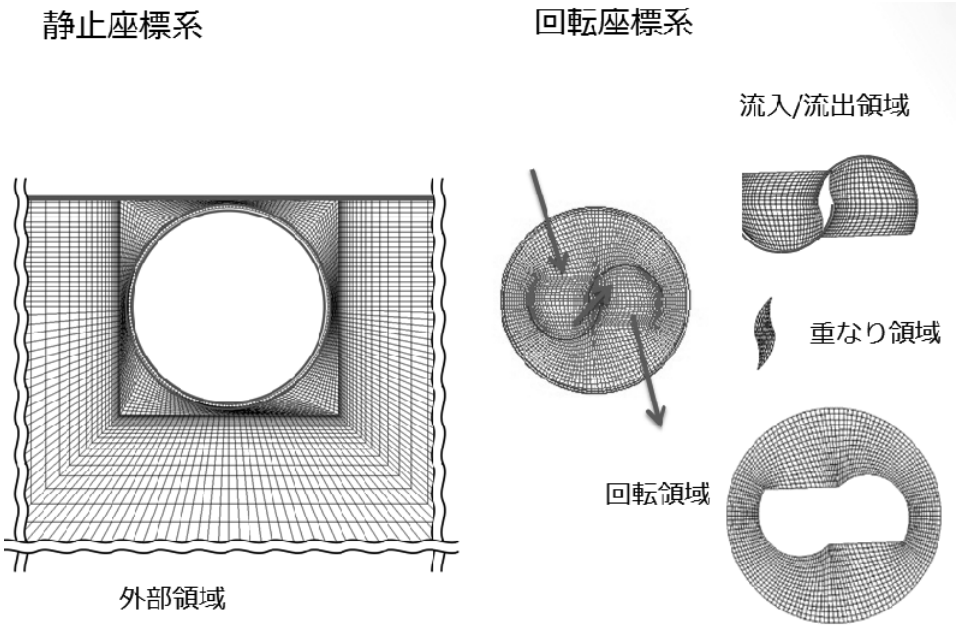


図４　静止座標系の格子（左半分）と回転座標系の格子（右半分）

これらの基礎方程式を一般座標に変換した上で、フラクショナルステップ法で解く。

２．２　計算条件

境界条件は流入側では速度について一様流、圧力については法線方向微分が０、流出側では圧力については大気圧、速度については法線方向微分が０と設定した。

内部領域の外側と外部領域の内側は円周になっていて１格子分重なっているため、その格子点の速度や圧力は周方向に１次元の補間によって、時間ステップごとに計算した。

風車の周速比は0.5に固定し、流れは風車の中心を結ぶ線に対し90度（迎角０度）、45度（迎角45度）、０度（迎角90度）であたっているとした。レイノルズ数は格子の解像度を考慮して10000とした。

３．計算結果と考察

３．１　流れ場

図５に迎角が０度の場合で、下側の回転装置のブレード近くの流れ場を速度ベクトルで表示した図を示す。サボニウス型回転装置は２枚のブレードの間に隙間があり、そこに風上側のブレードで受けた流れの一部が流れ込んで風下側のブレードを押すため、隙間がない場合に比べてトルクが大きくなる構造になっている。図５を見ると確かに隙間に流れが流れ込んでいる様子がわかるが、流れに対して45度傾いた（b）の場合が最も流れが強い一方で、（a）や（f）で示す０度の場合には、隙間部分で渦が生じ、それが流れの流入を阻害してほとんど流れがなくなっている様子がわかる。

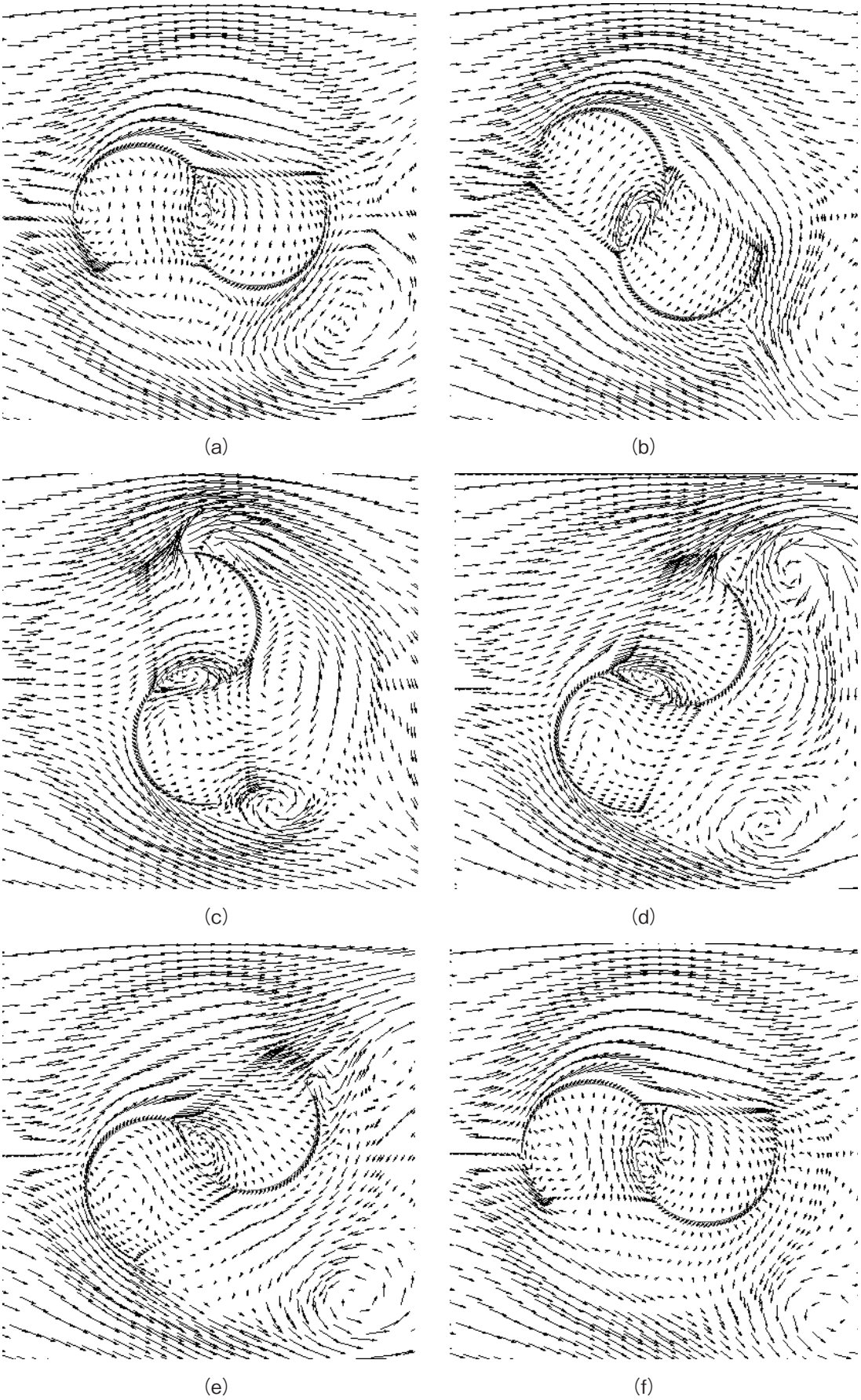


図５　下側の回転装置のブレード近くの速度場（迎角０度：流れは左から右）

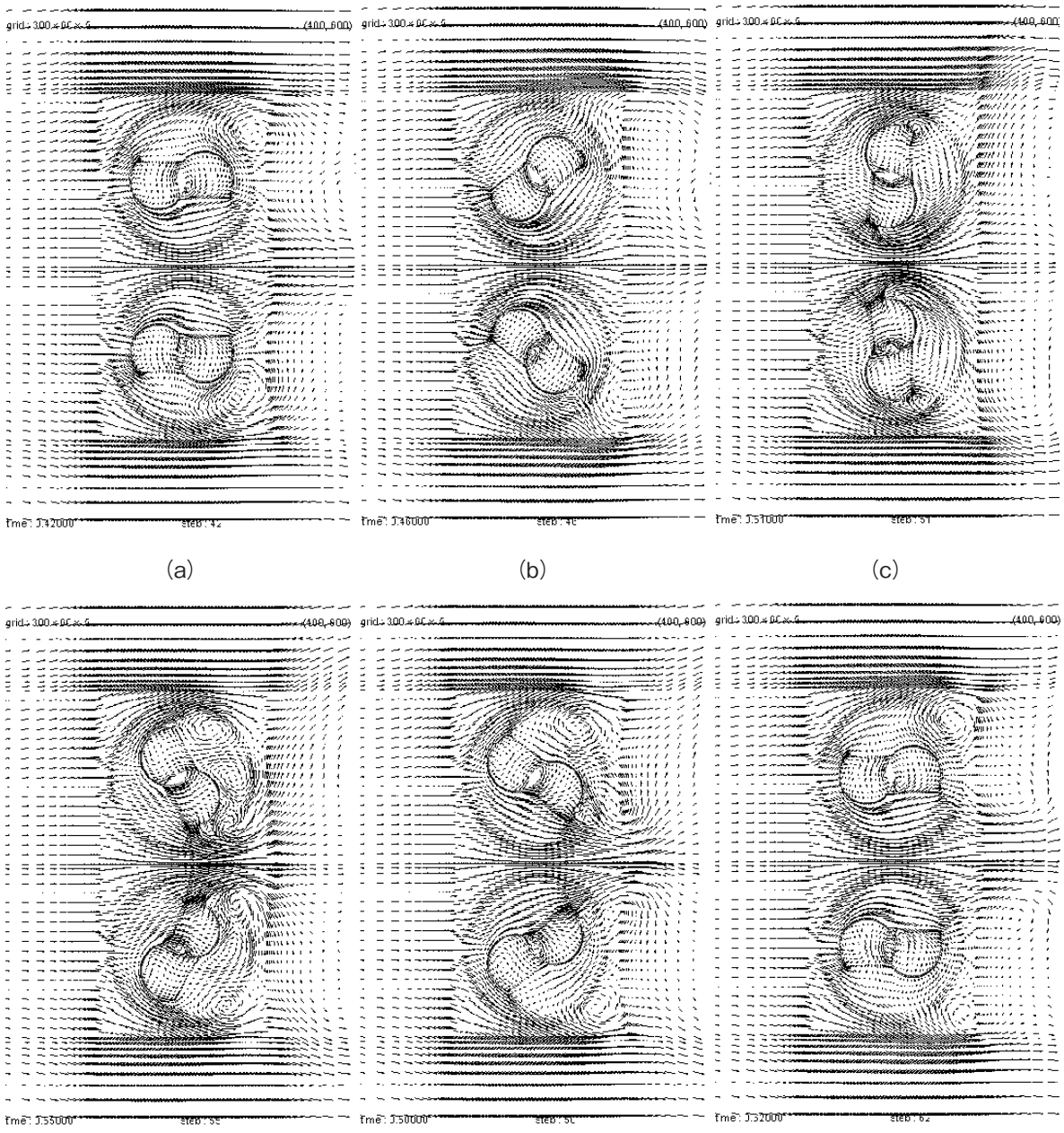


図６　迎角０度（流れは左から右）の場合の２つの回転装置近傍の流れ場（速度ベクトル）

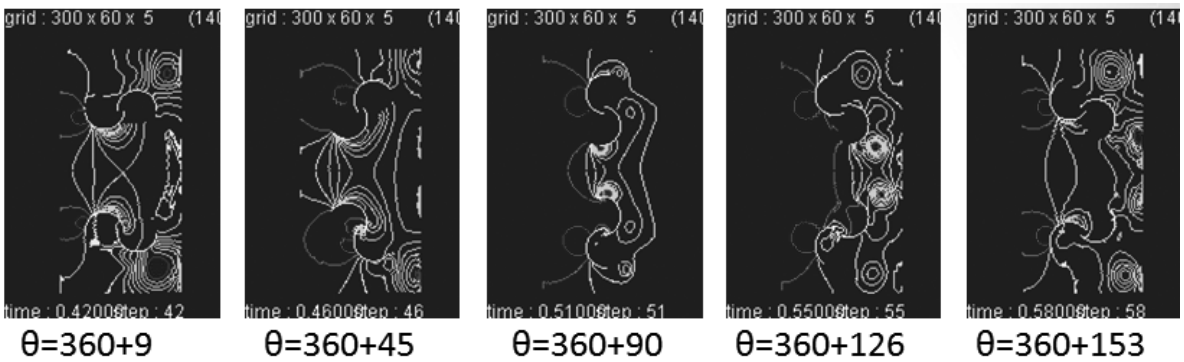


図７　迎角０度（流れは左から右）の場合の２つの回転装置近傍の流れ場（等圧線）

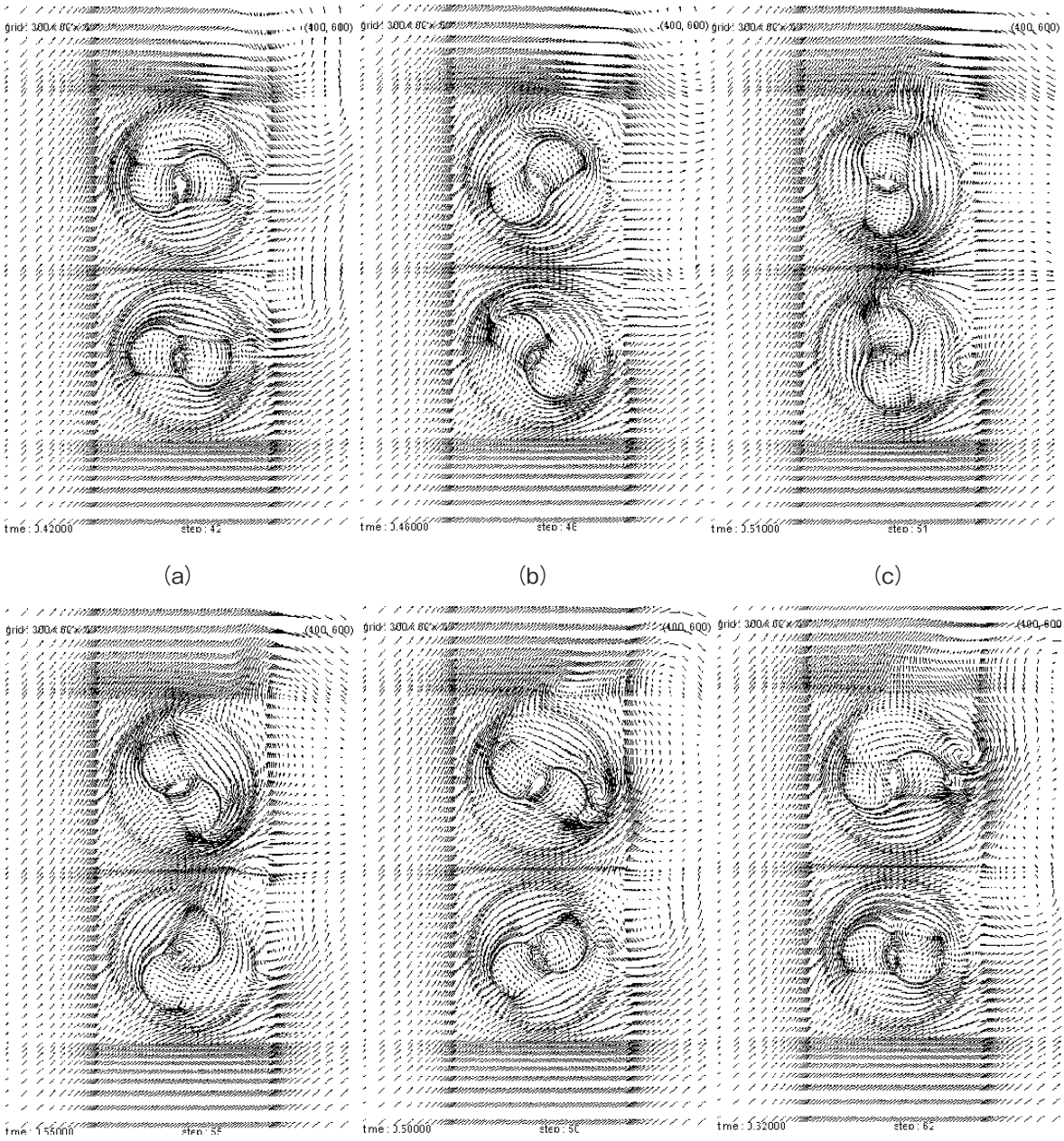


図８　迎角 45 度（流れは左下から右上）の場合の２つの回転装置近傍の流れ場（速度ベクトル）

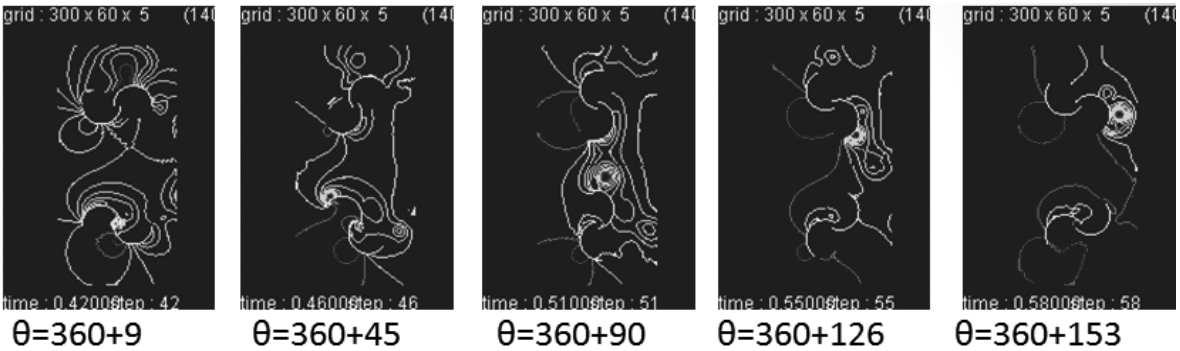
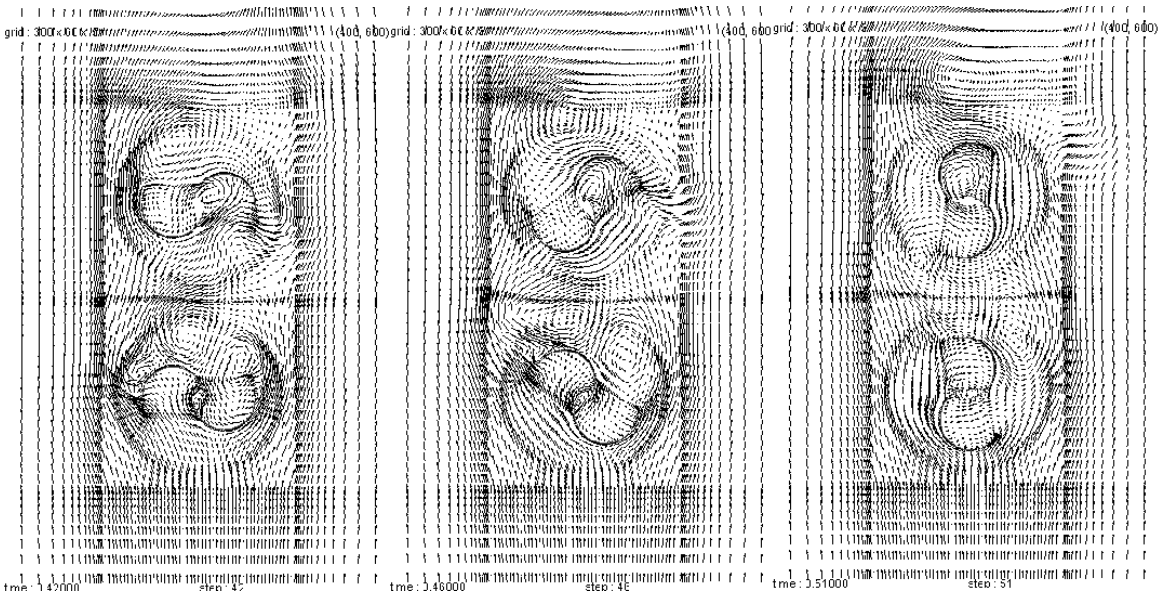
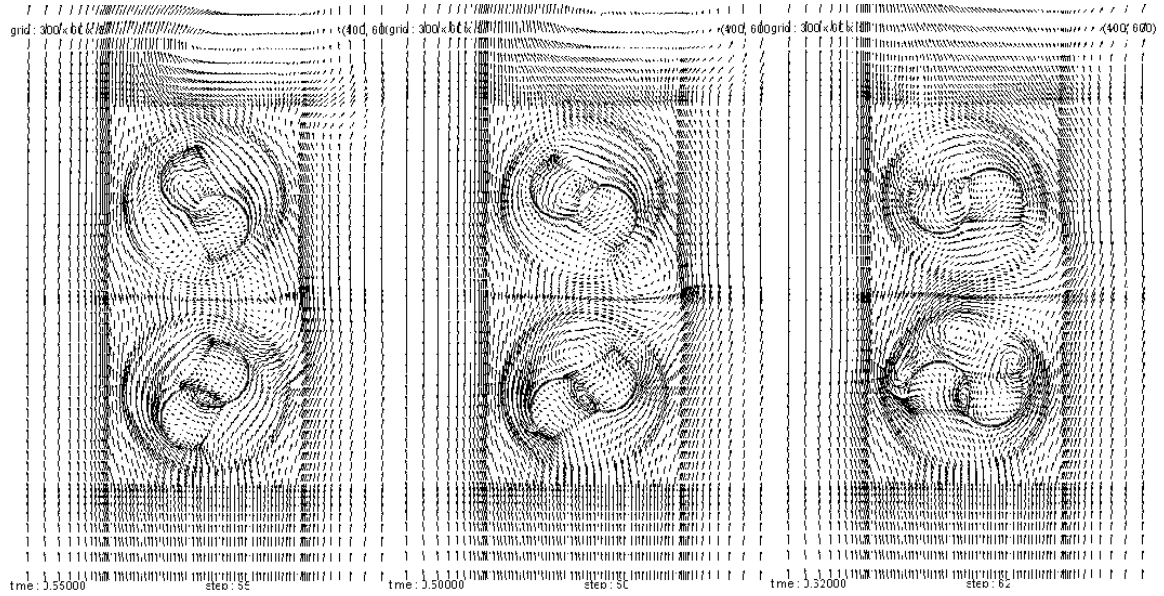


図９　迎角 45 度（流れは左下から右上）の場合の２つの回転装置近傍の流れ場（等圧線）



(a)　　(b)　　(c)



(a)　　(b)　　(c)

図 10　迎角 90 度（流れは下から上）の場合の２つの回転装置近傍の流れ場（速度ベクトル）

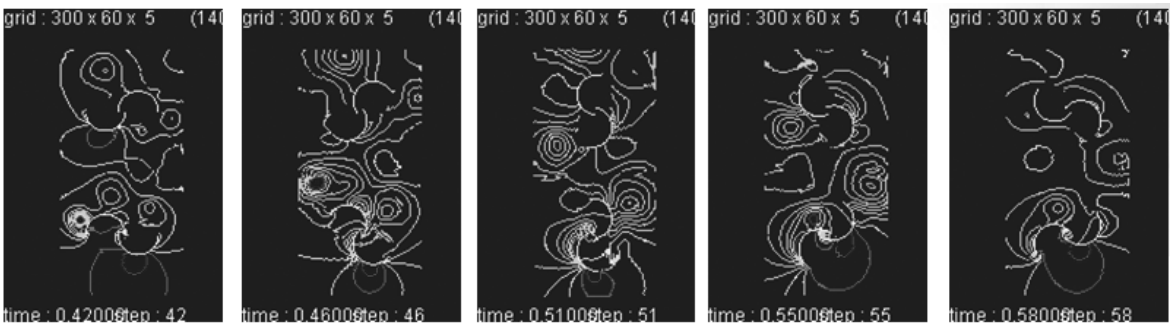


図 11　迎角 90 度（流れは下から上）の場合の２つの回転装置近傍の流れ場（等圧線）

次に迎角が０度、45 度、90 度の場合の流れ場を、風車が半周する間のいろいろな回転角に対して、２つの装置を含む領域での流れ場を速度ベクトルと等圧線により表示した図で示す。図６と図７は迎角が０度、すなわち流れが左から右に向かって流れている場合、図８と図９は迎角が 45 度の場合、すなわち流れが左下から右上に向かって流れている場合、図 10 と図 11 は迎角が 90 度、すなわち流れが下から上に向かって流れている場合である。

領域を細かく分割して計算したにもかかわらず各等圧線において、各小領域の境界において不自然さはなく領域間のデータの受け渡しに問題がなかったことがわかる。

迎角が０度の図６、７において、流れはほぼ上下対称になっていることがわかる。また図６において、２つの回転装置に挟まれた部分に着目すると、特に（c）から（f）にかけて回転装置の回転に伴って流体が左から右に押し出されている様子がわかる。

迎角が 45 度の場合（図８、９）、流れの上下対称性が崩れている。図６ほどは強くないが、２つの回転装置に挟まれた部分では流体の押し出しがみられる。また詳しく観察すると風上側の下側の回転装置をよけた流れが風下側にあたっている様子もわかる。

迎角が 90 度の場合（図 10､11）は風上側の回転装置がつくる後流部分に､風下側の回転装置が入っていることがわかる。すなわち、風下側の回転装置には弱い流れしかあたっていないことがわかる。

３．２　トルク係数

流れの計算結果からブレードの表面に働く圧力が求まるため、それを用いて回転装置に働くトルクを計算することができる。実際には接線応力も考慮する必要があるが圧力によるものよりずっと小さく、本報告では無視した。

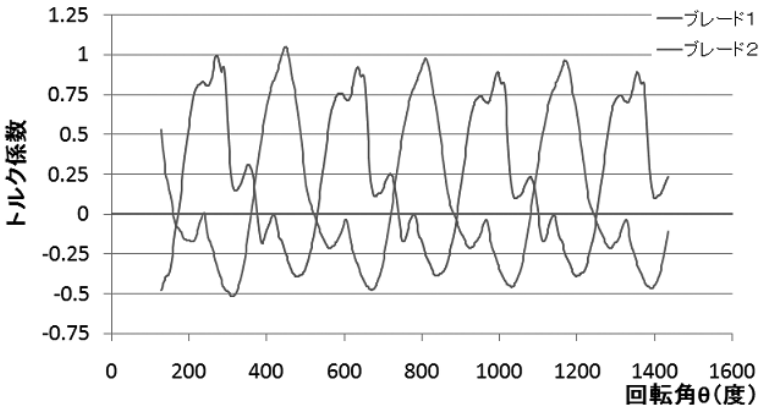


図 12　迎角が０度の場合における下側の回転装置の２つのブレードに働くトルク

図 12 は､迎角が０度の場合に､下側の回転装置の２枚のブレードに働くトルクを回転角に対してプロットした図である。値は２枚のブレードでほぼ等しく、回転装置の形状から位相が１８０度ずれていることがわかる。

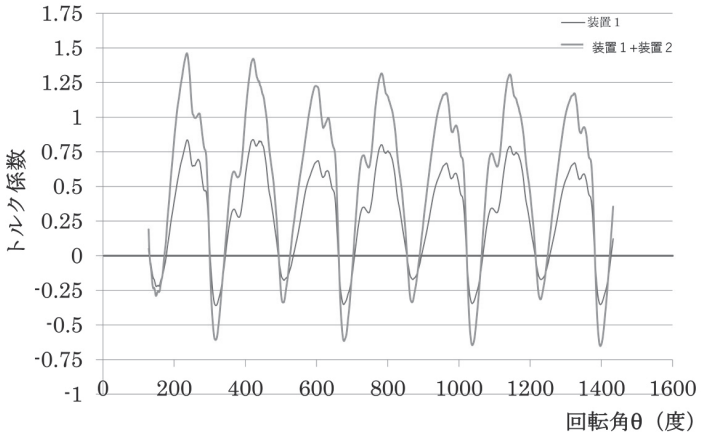


図 13　迎角０度の場合における１枚のブレードに働くトルクと２枚の合計値の回転角依存性

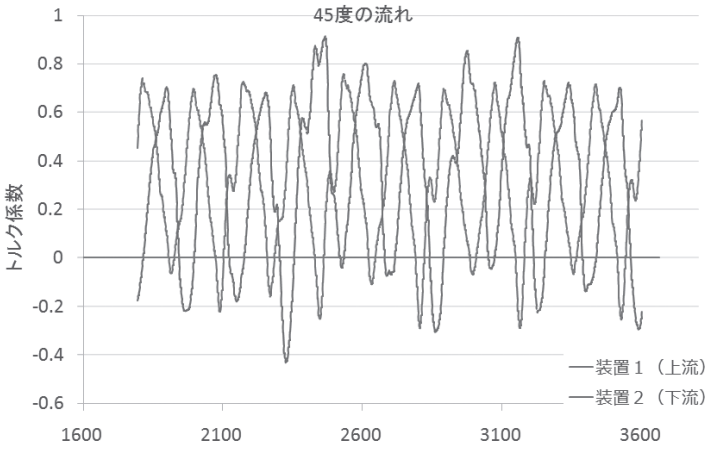


図 14　迎角 45 度の場合における風上側と風下側の回転装置に働くトルクの回転角依存性

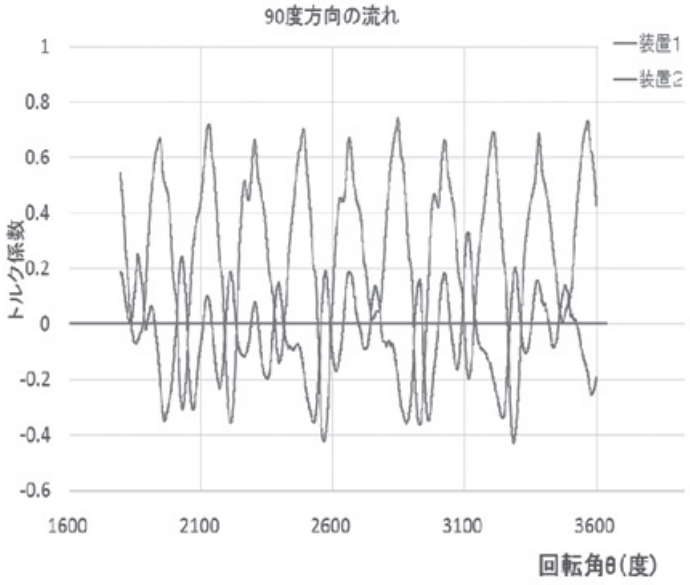


図 15　迎角 90 度の場合における風上側と風下側の回転装置に働くトルクの回転角依存性

図 13 は迎角０度の場合における下側の回転装置のトルク（２枚のブレードのトルクの和）が回転角によってどのように変化するかを示した図で、参考のためブレード１（初期に左にあったもの）に働くトルクも同じ図に示している。ただし回転角０は２つのブレードの先端を結ぶ線が流れに平行な初期状態を表す。この初期配置は迎角が 45 度の場合も 90 度の場合も同じである（たとえば迎角 90 度の場合は初期にこの配置に直角に流れがあたる）。なお、上側の回転装置に働くトルクは下側の回転装置に働くトルクとほぼ同じであるため、図にはプロットしていない。

図 14 は、迎角 45 度の場合の図 13 に対応する図である。２種類の曲線があるのは２つの回転装置を別々にプロットしたためで、瞬間値が大きい方が風下側である。位相は風上側と風下側でずれているのは相互作用の結果と考えられる。

図 15 は、迎角 90 度の場合の図 14 に対応する図である。値が小さい方が風下側で、この場合は風上側と風下側にはっきりした差がみられる。

図 16 は２つの回転装置のトルクの値の回転角による積算値である。90 度の場合は、明らかに積算値は小さく０度や 45 度の場合の半分以下になっている。０度と 45 度は角度が小さい間は０度の方が大きいが 1400 度（４回転）あたりで逆転し、45 度の方が大きくなっている。風上側の回転装置をよけた流れがもとの流れと合わさって強められて風下側の回転装置にあたったのが理由と考えられる。90 度の場合には風下側の回転装置が風上側の後流の中に入り、回転に有効な流れにならなかったためと考えられる。

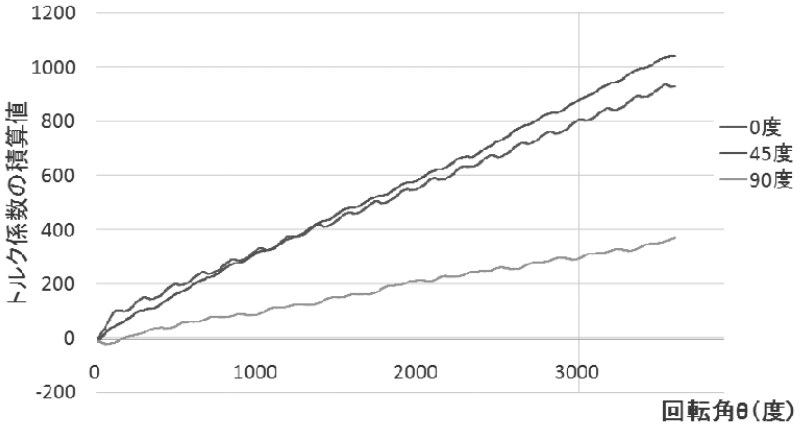


図 16　トルクの回転角に対する積算値（迎角０、45、90 度）

４．まとめと今後の課題

本報告では、逆回転する２台の垂直軸サボニウス型回転装置について２次元シミュレーションを行い、主流とのなす角を変化させることで相互作用の影響を調べた。そのとき、流れの領域を各回転装置の近接領域と回転しない外部領域に分割し、各つなぎ目を精度よくつなげる手法を用いた。また。サボニウス型回転装置内はブレード領域と重なり領域に分割することで重なりの隙間部分を通過する流れを解析可能とした。

主流の方向を変化させたところ、２つの回転装置の位置関係により複雑な流れが生じていることが観察された。０度、45 度はほぼ同じトルクが得られたのに対し、90 度の場合は０度、45 度と比較してトルクの値が小さくなった。

今後の課題として以下のことがあげられる。

・２台の装置のトルク合計の積算値が回転とともにほぼ直線的に増加するという結果になり、装置２つで安定した出力が得られることがわかった。

⇒さらに装置の数を増やした計算を行い、海流発電システム全体の配置を検討する。

・今回は周速比を 0.5 に固定した計算を行い、トルクの変化を調べた。

⇒周速比を変化させた場合のトルクを調べ、最大出力を得るための条件を検討する。

なお、この研究はの一部は文部科学省科学研究費基盤研究（C）19K04165「CFD による海流発電用回転の動特性の解析と形状の最適化」の補助を受けて行われた。

参考文献

（1）河村哲也：サボニウス型回転装置まわりの差分格子生成法、滋賀文教短期大学紀要 23 号（2021）
（2）石松克也、篠原俊夫、詫磨史孝：サボニウス風車に関する数値計算、日本機械学会論文集 B 編 60 巻 569 号 pp154-160（1994）
（3）高久有幹：サボニウス風車の動向と展望、ターボ機械 19 巻 5 号 pp62-67（1991）
（4）牛山泉：風車工学入門、森北出版　ISBN4-627-94651-1（2002）
（5）河村哲也：流体解析の基礎、朝倉書店　ISBN978-4-254-13111-6（2014）
（6）河村哲也：流体シミュレーションのヒント集、インデックス出版 ISBN978-4-910058-11-5（2021）

河村哲也　湖国カルチャーセンター客員教授