

風車単体後流の渦構造解明に向けた基礎的研究

内田 孝紀*, 大屋 裕二*

(2005年7月29日受理)

Basic Research for Clarification of Wake Structure behind a Wind Turbine

Takanori UCHIDA and Yuji OHYA

E-mail of corresponding author: takanori@riam.kyushu-u.ac.jp

Abstract

The purpose of this research is to investigate turbulence characteristics in the wake of a wind turbine. The flow around a propeller-type wind turbine with three blades is simulated by using an unsteady three-dimensional numerical simulation (DNS). The simulation technique with the Cartesian staggered grid is adopted as a method of reproducing behavior in the wake as simply as possible. The tip speed ratio is about 5, and the Reynolds number based on an approaching flow and a diameter of blade is about 20,000. A variety of visualization results were shown. As a result, a complex eddy structure that cannot be captured in the wind tunnel experiment is reproduced.

Key words : RIAM-COMPACT, Unsteady numerical simulation, Wind turbine, Wake

1. 緒言

現在,地球温暖化を防ぐため,CO₂の大幅な削減が緊急課題となっている。これに伴い,クリーンで環境に優しい風力エネルギーの有効利用に注目が集まっている。我が国でも,2010年度の300万KWの導入目標に向け,数基の風力タービン(WT)から,数十基の風力タービンから構成される大型のウィンドファーム(WF)に至るまで,風力発電施設は急速に増加している。WTの発電出力は風速の三乗に比例するため,風況の良好な地点を的確に,かつピンポイントに選定することが重要である。

我々は数(十)km以下の狭域空間に的を絞り,風力発電に適した地域をピンポイントに予測する非定常・非線形風況シミュレータを開発している¹⁾。これを,RIAM-COMPACT(Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Computational Prediction of Airflow over Complex Terrain)と称する。乱流モデルにはLES(Large-Eddy Simulation)を採用している。現在,RIAM-COMPACTの高精度化に向けた研究を行っているが,その中でも特に風車間の相互干渉の影響を評価するための後流モデル(ウエイクモデル)の開発に重点を置いている。平坦地が少ない日本で大型風車を複数台集中的に建設する場合,風車相互の干渉で各風車の発電出力が低下しないように風車間隔を決めるウエイクモデルの開発が重要になってきている。本研究の最終目的

は,高精度なウエイクモデルを構築し,風況シミュレータRIAM-COMPACTに実装することである。

第一段階として,風車単体のウエイク中の渦構造と,それに伴う平均風速の欠損量や乱れ分布などの気流性状を明らかにすることを主目的とする。これまでに風車後流に関する風洞実験および野外観測が幾つか報告されている²⁻⁶⁾。しかし,数値シミュレーションによる研究はほとんど報告されておらず,渦構造などに関する詳細な知見は十分に得られていない。風車後流は複雑乱流場を呈するため,これを解明するためには,任意の条件設定が可能である数値シミュレーションが有効であると考えられる。本報では,まずタワーやナセルの影響を省略し,風車ブレード(3枚平板翼,ピッチ角ゼロ)の回転の影響に注目した3次元数値シミュレーションを実施した。ブレードの回転直後から,流れ場が十分に発達した状態における流動現象までを,種々の可視化結果を中心に示し考察する。

2. 数値シミュレーション手法

ここでは,風車全体を過ぎる流れ場の3次元数値シミュレーションの概要について説明する。風車を構成する翼周りの数値シミュレーションが一般的に境界適合座標系(BFC, Boundary-Fitted Coordinate)を用いて行われることから,風車全体のシミュレーションには幾つかの計算格子を重ね合わせる手法,いわゆる,重合格子法などの採用が予想される。しかしながら,この場合には前処理作業のメッシュ生成に多大な時間とコストを要する。

* 九州大学応用力学研究所

本研究では風車の発電性能ではなく、風車後流の流動特性に注目している。よって、出来るだけ簡易な方法でウエイクの挙動を再現する方法として、デカルト座標系のスタガード格子によるシミュレーション手法を提案する。この場合、ブレード表面には格子解像度に依存した凹凸が生じるものの、メッシュ生成や計算アルゴリズムなどは重合格子法に比べて大幅に簡素化される。翼単体の計算において、翼近傍の格子解像度がある程度十分であれば、BFCとデカルト座標系の両計算でほとんど違いが現れないことを事前に確認している。

数値計算法は(有限)差分法を用いる。計算アルゴリズムは部分段階法(F-S法)に準じ、Navier-Stokes方程式の対流項に3次精度風上差分を用いた直接数値シミュレーション(DNS, Direct Numerical Simulation)を行う。残りの空間項には2次精度中心差分を適用する。風車の主流方向にx軸を、主流直交方向にy軸を、鉛直方向にz軸を設定する。格子点数は101(x) × 101(y) × 101(z)点である。ブレード形状は平板翼とし、大型風車を想定して3枚翼プロペラ型風車を対象とする。但し、ピッチ角ゼロであるので、得られるウエイクの気流性状は、実際の大型風車とはかなり異なると予想される。速度の境界条件に関して、流入境界面は一様流入条件、側方境界面は滑り条件、流出境界面は対流型流出条件とする。ブレードの回転を模擬するため、ブレードが位置する格子点上では周速比に基づいて移動速度を与える。本計算における周速比は5程度である。レイノルズ数はブレード直径Dと一様流入風速Uに基づいて $Re(=Uh/\nu)=2 \times 10^4$ とした。無次元時間刻みは $\Delta t=2 \times 10^{-3}$ とした。

3. 計算結果と考察

ここでは、平板翼(ピッチ角ゼロ)の回転直後から、流れ場が十分に発達した状態における流動現象までを、種々の可視化結果を中心に示し考察する。これ以後の全ての図において、コンターや速度ベクトルの赤色は風速の大きい領域を示す。一方、青色は風速の負値を示す。

図1には、Rear view(y-z面)における主流方向風速のコンター図を示す。これに対応する速度ベクトル図を図2に示す。図2では風車位置における主流風速コンター図も併せて示す。ブレードの回転直後には、図中に矢印Aで示す風車のすぐ背後において、円状の渦構造が出現している。矢印Bおよび矢印Cで示す位置では、流れ場は非常に複雑な様相を呈している。風車位置の翼先端付近

では、赤色のコンターが密集している。これは風車の翼先端付近の風速が周辺の風速に比べて局所的に増速していることを示すものである。この影響は矢印Aで示す風車のすぐ背後でも同様に確認できる。図1のコンター図に注目する。特筆すべき点として以下の2つのことが挙げられる。一つは、矢印Aおよび矢印Bの位置では、風速の負値を示す青色のコンターが明確に観察される。これは風車のすぐ後流には逆流領域が存在することを意味する(図3, 4, 7も参照)。二つ目は、この負値の領域に対応した逆流領域が時間とともに変化している。つまり、逆流領域が局部的・局所的に出現し、その出現位置が時々刻々と変化していることが明らかになった。本計算では、ソリディティが大きいいため、上記の逆流領域が出現したと思われる。ソリディティの大小とそれに応じた逆流領域の出現の有無の相関関係は今後の課題である。

図3には、Side view(x-z面)における主流方向風速のコンター図を示す。これに対応する速度ベクトル図を図4に示す。両図ともに風車位置の主流風速コンター図も併せて示す。無次元時間 $t=3$ に示すブレードの回転直後には、上下対称な渦対が出現している。これは図5および図6からより明確に分かる。この渦構造が時間とともに発達し、風車後流には複雑な乱流場が形成されている。翼先端付近で風速が局所的に増速している様子は、図3および図4からより明確に分かる。また、風車翼の先端付近から渦(翼端渦)が放出されて流下している様子も確認される(例えば、図4(c)に矢印で表示)。図中に実線で囲むように、風車のすぐ背後には風速の負値と、これに伴う逆流領域が明確に観察される。これは図1, 図2で述べた現象に対応する。

図5および図6には、x-z面とx-y面に配置された粒子の軌跡として表示した流線図を示す。両図ともに風車位置の主流風速コンター図も併せて示す。無次元時間 $t=3$ では、先に述べたように上下対称な渦対が観察される。この渦対は図5および図6の両者ともに観察されている。よって、3次元的な構造を有していることが推測される。それがブレードの回転に伴う旋回流の影響により崩壊し、複雑な様相を示していると考えられる。図5, 図6に矢印で示す領域を境にして流線の振る舞いに変化が見取れるのは非常に興味深い。すなわち、矢印の上流側である風車のすぐ背後では、流線の巻き込みを含む3次元的な挙動が観察される。これに対し、矢印より下流の領域では、複雑な流線の動きは観察されない。これは風車のnear wakeとfar wakeで気流性状に有意な違いがあることを示唆するもの

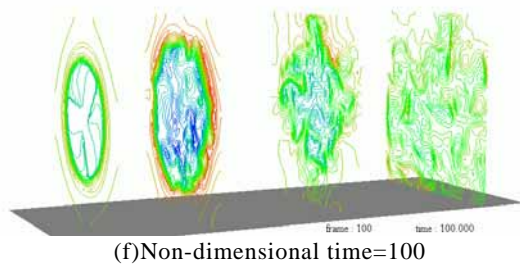
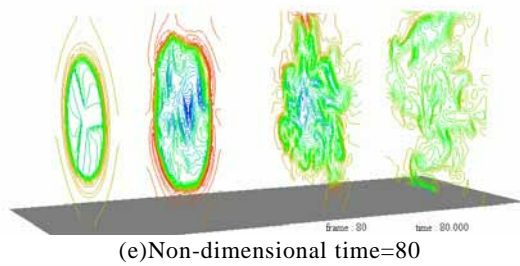
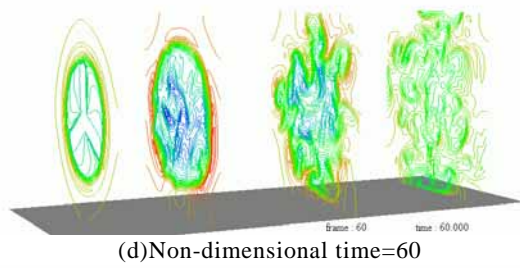
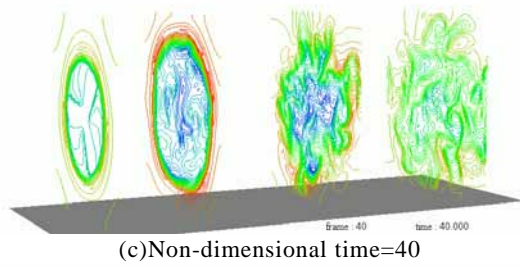
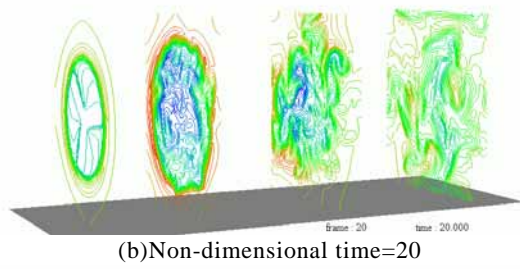
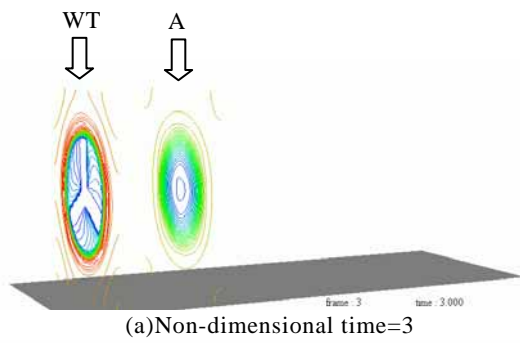


Fig.1 Rear view of contour lines in the x-direction at various times

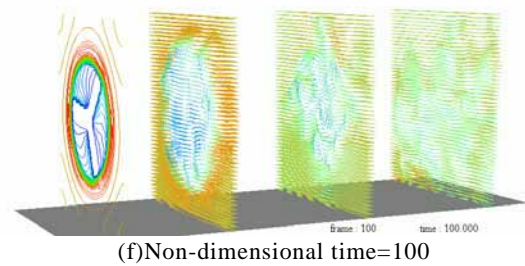
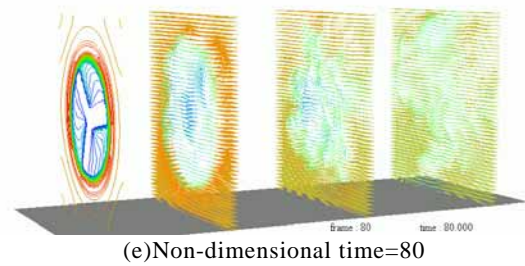
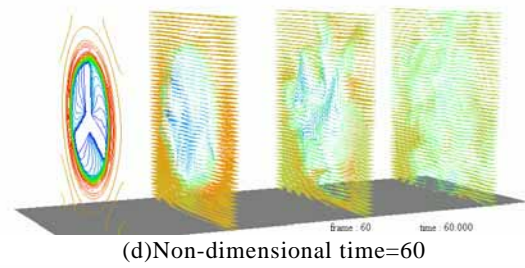
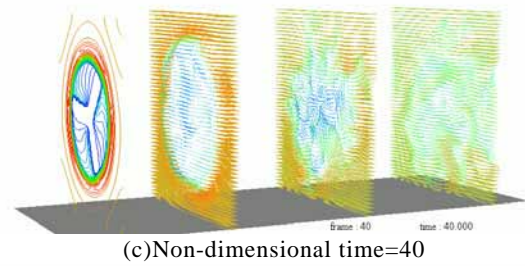
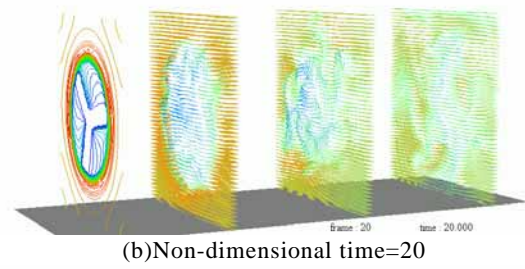
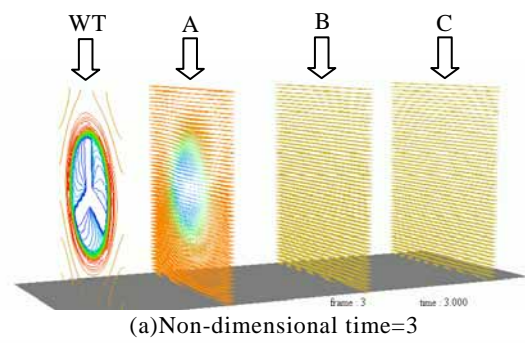


Fig.2 Rear view of velocity vector at various times

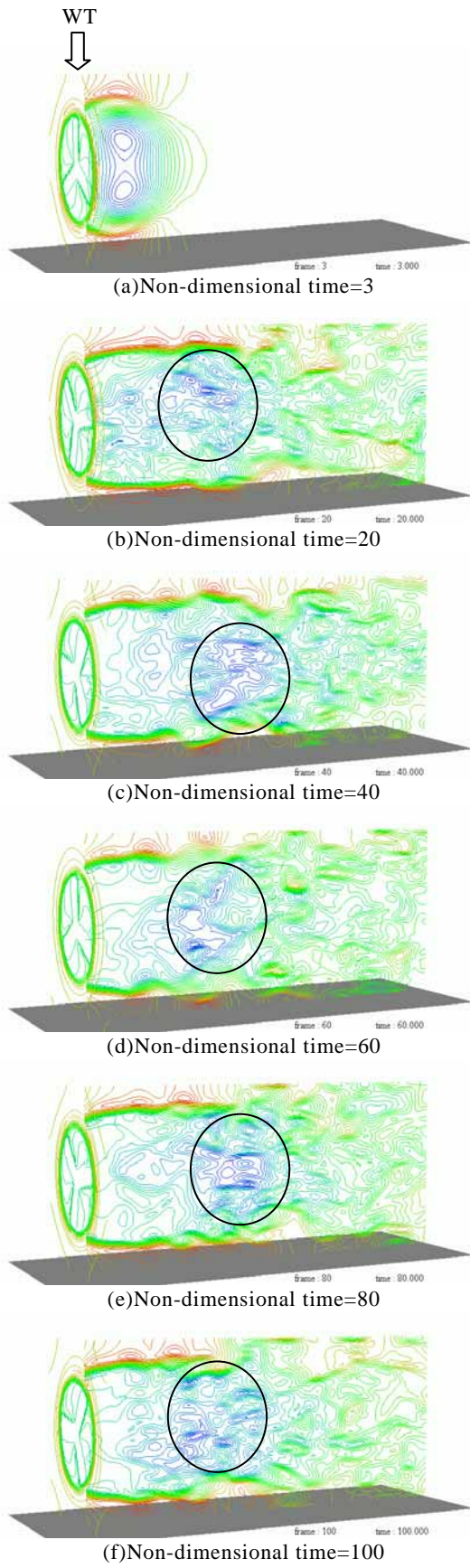


Fig.3 Side view of contour lines in the x-direction at various times

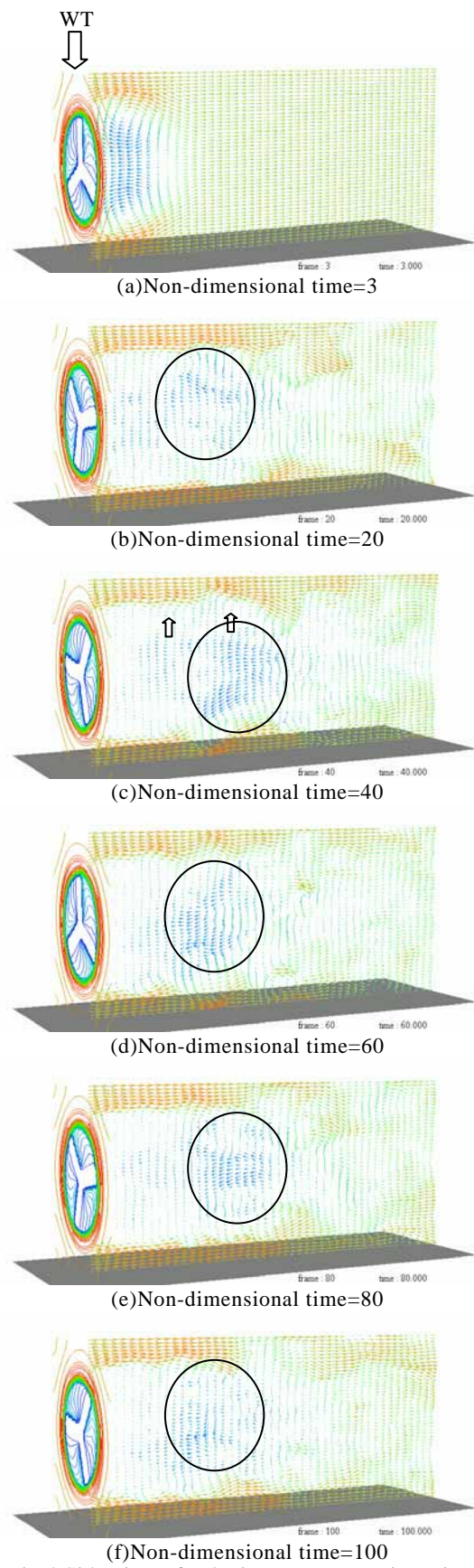


Fig.4 Side view of velocity vector at various times

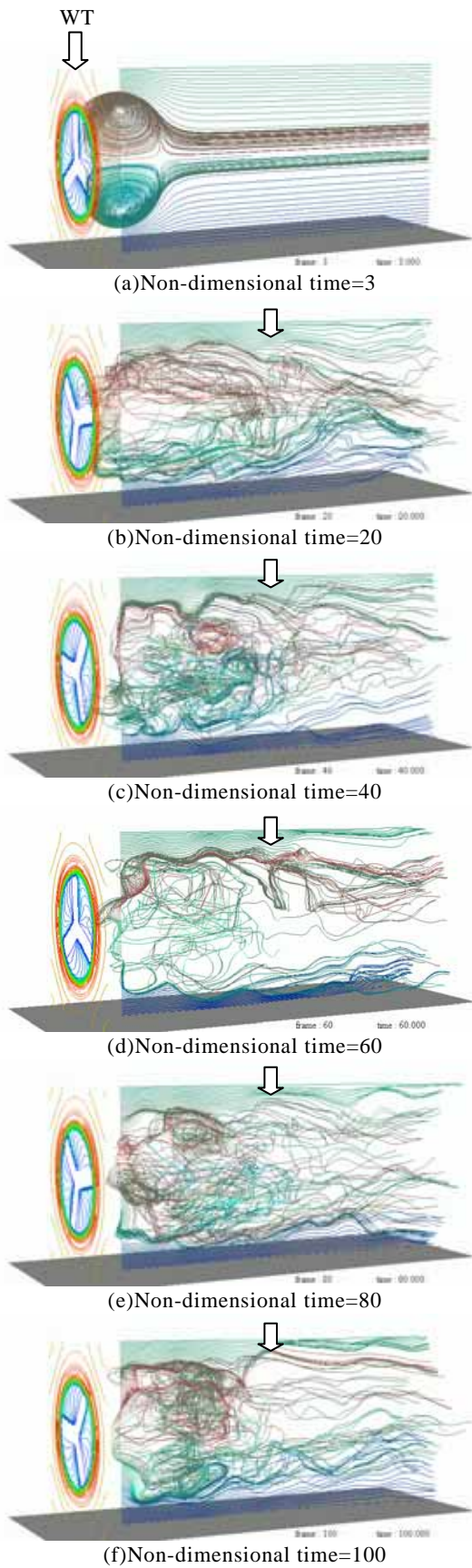


Fig.5 Tracks of particle arranged in the x-z section

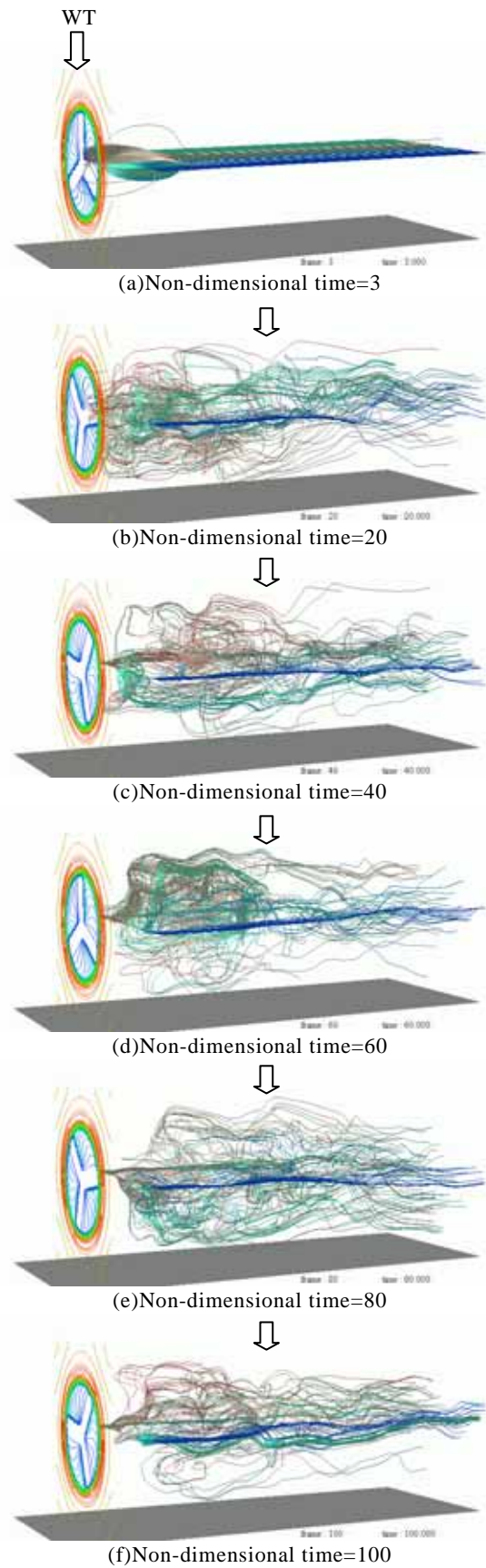


Fig.6 Tracks of particle arranged in the x-y section

である。これをさらに定量的に考察するために、風車後流の平均速度プロファイルを示す。

風車下流(1D, 2D, 3D, 4D)の平均速度プロファイルの鉛直分布を図7に示す。ここで、Dはブレード直径を示す。表示面は主流直交方向(y)の中央面(y=0)である。図7(a)に示す主流方向(x)の速度プロファイル($\langle u \rangle / U$)に注目する。風車のすぐ背後の1Dの位置では、実線で示すように翼先端付近で局所的な増速が示された。但し、計算領域と風車のブロック比の影響で若干過大評価されている。これは、計算領域の大きさを見直し再度検討を行う予定である。風車下流の2Dの位置では、逆流領域が広範囲に形成されている。この問題は、ソリディティを変化させた計算を行い、逆流領域の出現の有無との関係を調べる予定である。風車下流の3D, 4Dでは、風速は徐々に回復している。図7(b)に示す鉛直方向(z)の速度プロファイル($\langle w \rangle / U$)では、全ての位置で高さ方向にほぼゼロであった。

複数の風車を配置する際の間隔は、図8が一般的である。これは経験的な指標である。本研究で

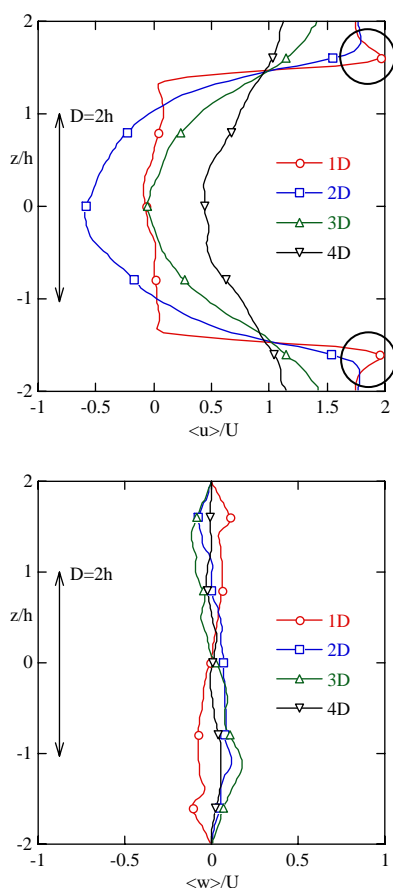


Fig.7 Time-averaged velocity profile in the downstream of a wind turbine. The display line is a span central section (y=0).

風車後流の気流性状が明らかになれば、平坦地が少ない日本において、大型風車を複数台集中的に建設する場合の風車間隔の指標として活用することも可能である。また、ウエイクモデルを構築する際にも有用な情報源になると期待している。

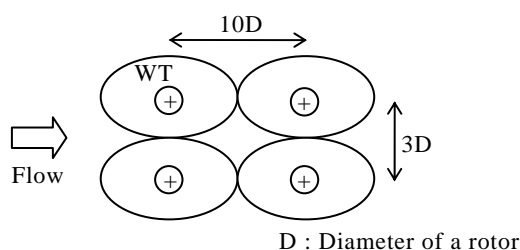


Fig.8 Arrangement interval of wind turbines

4. 結言

風車単体のウエイク中の渦構造と、それに伴う平均風速の欠損量や乱れ分布などの気流性状を明らかにすることを目的とし、3次元数値シミュレーションを実施した。その際、出来るだけ簡易な方法でウエイク中の挙動を再現する方法として、デカルト座標系のスタガード格子によるシミュレーション手法を提案した。その結果、風洞実験では捉えることが困難である渦構造や、その非定常性などが再現された。数値シミュレーションでは、さらに詳細な考察を進めるとともに、風車形状の精緻化と風車を複数台設置した場合の検討、さらに流入気流の乱れを考慮した場合の検討などを行う予定である。

さらに、数値シミュレーションの精度検証を目的として、縮尺模型を用いた風洞実験(ウエイク中の流れの可視化と気流計測)を行う予定である。

参考文献

- (1) 内田ら, 風力タービン適地選定のためのコンピュータによるマイクロサイトング技術 実地形を対象にした非定常風況・拡散シミュレータRIAM-COMPACT, 土木施工, Vol. 45, No. 8, 2004, pp. 49-55
- (2) 河野ら, 風車模型後流の流れ性状に関する風洞模型実験, 第17回風工学シンポジウム, 2002, pp.149-154
- (3) 平井ら, 実測による大型風車後流の検討, 第25回風力エネルギー利用シンポジウム, 2003, pp.157-160
- (4) 清水ら, 風洞実験による風車相互干渉の基礎的研究, 日本機学会論文集(B編), 70, 2004, pp.140-146
- (5) 服部ら, 風車後流部の乱流挙動, 第18回風工学シンポジウム, 2004, pp.157-162
- (6) 山本ら, 風力発電用風車に作用する風力特性, 第18回風工学シンポジウム, 2004, pp.163-168