九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

九州大学伊都キャンパスにおける流体工学モデルRIAM-COMPACT【○!R】を用いた100kW級風レンズ風車のマイクロサイティング

内田, 孝紀
九州大学応用力学研究所

烏谷, 隆
九州大学応用力学研究所

大屋, 裕二
九州大学応用力学研究所

https://doi.org/10.15017/27079

出版情報：九州大学応用力学研究所所報. 138, pp.41-54, 2010-03. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University
バージョン：
権利関係：

九州大学伊都キャンパスにおける流体工学モデルRIAM-COMPACT®を用いた100kW級風レンズ風車のマイクロサイティング

内田 孝紀* 烏谷 隆* 大屋 裕二*

(2010年1月29日受理)

HIGH RESOLUTION MICRO-SITING OF 100KW WIND-LENS TURBINE AT THE NEW CAMPUS OF KYUSHU UNIVERSITY BY USING THE RIAM-COMPACT® CFD MODEL

Takanori UCHIDA, Takashi KARASUDANI and Yuji OHYA
E-mail of corresponding author: *takanori@riam.kyushu-u.ac.jp*

Abstract

As a countermeasure against global warming, a substantial reduction in CO2 emissions has become an urgent issue. Accordingly, the effective use of wind power energy is attracting attention as a clean and environmentally friendly solution. Given this background, we have developed RIAM-COMPACT® (Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, COMputational Prediction of Airflow over Complex Terrain, a non-stationary, non-linear wind synopsis simulator that is capable of predicting the optimum sites for wind turbine construction to the pin-point level within a target area of a few km or less. In this study, a high resolution micro-siting of 100kW wind-lens turbines was performed under neutral stability in the new campus of Kyushu University.

Key words : Ito campus, Kyushu University, Wind-Lens Turbine, RIAM-COMPACT®, Micro-Siting

1. 緒 言

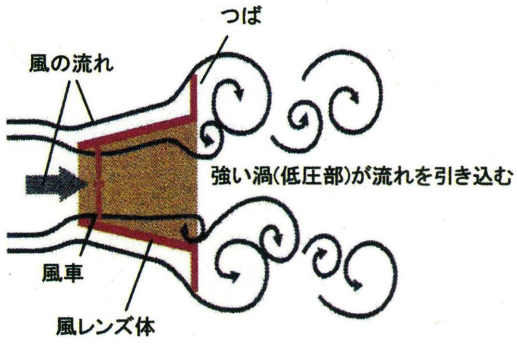
再生可能でクリーンな風力エネルギーは，地球温暖化やエネルギー問題を背景として，現在飛躍的な発展を遂げ，新エネルギー分野の大きな役割を担おうとしている．

「九州大学風レンズ研究グループ」では，年間平均風速が4m/s程度の低風速地域でも十分な発電を可能にし，適度な風が吹く地域ではさらに大きな発電を可能とする新しい風力発電システム「つば付きディフューザ風車」を開発してきた[1]．この風車は，風レンズ風車(Wind-Lens Turbine)と呼ばれる．風力による発電量が風速の3乗に比例することに着目し，つばの付いた簡単な集風体を風車の周りに取り付けることによって風車に当たる風を増速させ，大幅な出力増加を達成した．実際の様子と，その風速の集風および増加のメカニズムをFig.1に示す．「つば(brim)」という渦形成板は，その強い渦形成により，ディフューザ出口付近に低圧部を生成し，風はその低圧部をめがけて流れ込んでくる．そのためにディフューザ入口付近では大きな増速効果が得られる．

風レンズ風車の長所を下記に整理しておく．

◆ 2-5倍の高出力を達成(風エネルギーの集中「風レンズ効果」を利用)．

(a)2009年10月に福岡市百道浜に設置した5kW風レンズ風車



(b)風速の集風および増加のメカニズム

Fig.1 風レンズ風車

* 九州大学応用力学研究所

- 「つば」によるヨー制御（出口端の「つば」は，風見鳥のように風向きの変動に応じて風レンズ風車を回転させ，常に風車が風向きに正対する配置に制御する）．つまり，風向変動に強い．
- 風車騒音の大幅低減（基本的には低周速比翼の採用，周速比λ＝4前後が最適周速比，および翼先端からの渦がディフューザ内部境界層と干渉し，抑制されるという流体力学的メカニズムで空力音が大幅に低減して，騒音はほとんど気になることはない）．
- 安全性の向上（高速で回転する風車ブレードが構造体で覆われている）．

先に記述したように，風車の発電出力は風速の三乗に比例するため，風車の立地に関しては，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（これを「マイクロサイティング」と呼ぶ）．特に日本の地勢は欧米とは著しく異なり，平坦な地形は少なく，多様性に富む複雑地形がほとんどである．こうした状況では，流れの衝突，剥離，再付着，逆流などの風に対する地形効果を考慮することが極めて重要である．最近では，風車の適地が山間部に移り，これに伴い風車近傍の地形起伏や地表面粗度の急変に起因した風の乱れ（地形乱流）が，風車の発電出力に影響を与え，風車の故障が多発しているとの報告がなされつつあり，社会問題になっている[2]．

こうした風車立地の諸問題を解決するため，我々の研究グループでは，数（十）km以下の狭域空間に的を絞り，RIAM-COMPACT®（Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, COMputational Prediction of Airflow over Complex Terrain：リアムコンパクト）と称する非定常・非線形風況シミュレータ（流体工学モデル）を開発している[3]．RIAM-COMPACT®では，乱流モデルとしてLES（Large-Eddy Simulation）を採用している．LESとは，比較的大きな渦構造を直接計算し，それより小さい渦構造のみをモデル化する手法である．現在，国内で開発されている風況予測ソフトは，計算時間の問題からRANS（Reynolds Averaged Navier-Stokes equation）と呼ばれるレイノルズ平均型乱流モデルを採用している[4, 5]．RANSでは，時間的に変化しない定常的な流れ場を対象としている．しかしながら，近年のコンピュータ性能の向上は著しく，計算時間の問題も劇的に解消されつつある．空間平均型の乱流モデルであるLESは，時々刻々と変化する非定常な風況場をシミュレーションすることが可能である．ここが時間平均型の乱流モデルであるRANSと大きく異なる．また，モデルパラメータのチューニングにおいても，LESはRANSに比べて極めて少なく，汎用性に優れた手法である．非定常な風況特性を簡単に数値予測し，その結果をアニメーションなどで視覚的に捉えることが出来れば，多額の費用を要する風洞実験の代替ツールになるとともに，ウィンドファームの事前検討の一助になることが大いに期待される．

RIAM-COMPACT®の長所を下記に整理しておく．

- 非定常・非線形の流体工学（CFD）モデル．
- RANS系モデルよりも有望視されているLES乱流モデルを採用．
- 地理情報システム（GIS）との相互連携により，世界中のあらゆる平坦地形と複雑地形に適用可能．
- 風速分布のみならず，乱流強度分布などの3次元アニメーション表示が可能．
- 野外風況データに基づいて，任意地点の年間発電電力量や設備利用率が評価可能．
- 風車に対する風荷重を評価するための，風の時系列データの出力が可能．
- 風車立地点における風速分布や乱流強度の鉛直プロファイルを表示可能．
- 風車受風面内の風の吹き上げ角度や吹き下げ角度などを出力可能．

以上のように，我々の研究グループでは，風力エネルギーの有効利用に関して，ハードウエアとしての風車（風レンズ風車）と，その立地点を高精度に予測するソフトウエアとしての局地的風況予測モデル（RIAM-COMPACT®）の双方を開発・製作している．

現在，九州大学伊都キャンパスにおいて，水素生成のためのクリーンエネルギー源として風レンズ風車の有効利用プロジェクトが進んでいる．具体的には，風レンズ風車による電気自動車運用プロジェクトや，次世代エネルギー実証施設としての100kW級風レンズ風車の開発（2010年設置予定）である．近い将来，水素社会が到来すると期待されるが，水素は2次のキャリアである．この水素を風力や太陽光などのクリーンエネルギーで生成し，エネルギー生成から消費までの全体システムにおいて，CO_2および温暖化ガスをなるべく排出しないエネルギー循環システムを構築することが主たる目的である．

風レンズ風車は数々の長所を有しているが，さらに大型化が可能になれば，その有用性が増してくると期待される．100kW級風レンズ風車の開発（2010年設置予定）では，耐風速60m/s，構造重量，コストなどを考慮し，できるだけコンパクトな風レンズ集風体を選択した．5kW機とほぼ相似に製作し，定格風速12m/sで出力100kWが可能な中型風レンズ風車の第1号機を実現する．ダウンウィンド型でロータ直径12.8m，風レンズ外径15.4m，ハブ高さは25mである．100kW級風レンズ風車の特徴を以下に示す．立地候補地，5kW機と比較した場合の大きさをFig.2, Fig.3に示す．

- 従来風車と比べ，発電出力が2倍．
- 同じ発電規模の風車に比べ，ロータ直径が3分の2．

Fig.2 100kW級風レンズ風車の建設予定地，次世代エネルギー実証施設，九州大学伊都キャンパス，2010年竣工予定

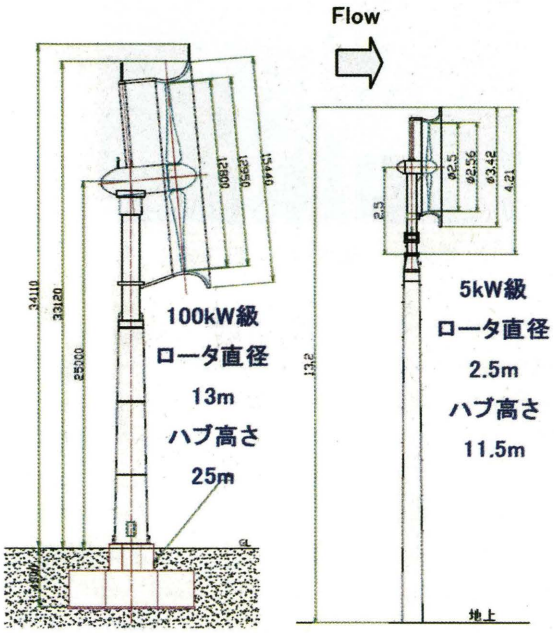


Fig.3 5kW機および100kW機の寸法の比較

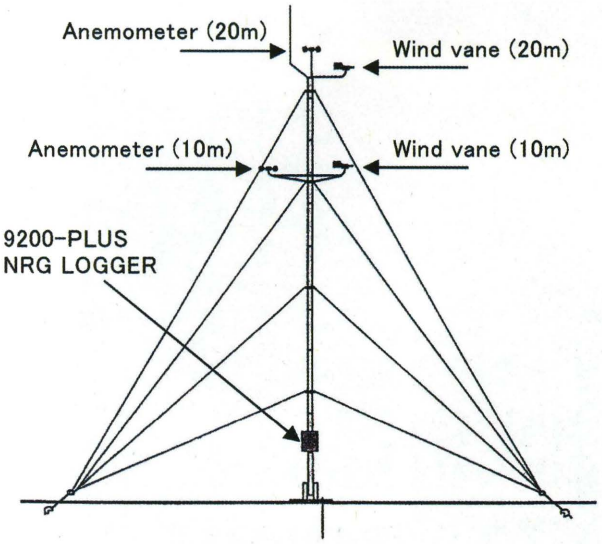
- 従って，騒音源強さは半分以下になる．加えて，風レンズ集風体によるブレード先端渦の抑制で大幅な騒音低下が期待される．
- パッシブなヨー制御が可能．乱れた風に対する追随性が良い．
- 風レンズ集風体の頭頂部に避雷針を付けて，雷を回避可能．
- 必要であればバードストライクも回避可能．

本研究では，流体工学モデルRIAM-COMPACT®を用いて100kW級風レンズ風車を建設した場合の年間発電電力量や設備利用率などを試算する．この目的に対し，我々が過去に実施した野外風況データ(2003.7-2004.6の1年間の1時間値)を使用する[6, 7]．次に，風車周辺の風況特性を詳細に調査するため，卓越風向を対象に高解像度の風況シミュレーションを実施する．

2. 野外風況データ観測システム

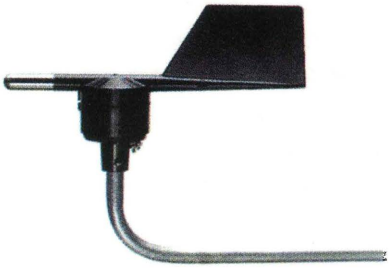
ここでは，過去に実施した風観測システムについて記

述する．風観測システムは「20 Meter NRG-NOW System」を使用した．Fig.4に示すように，20mの観測タワーを立て，10mと20mの位置にFig.5に示す風速計と風向計を設置した．機械式の風速計には，一般に「風杯型(カップ式)風速計」と「風車型(プロペラ式)風速計」があるが，本研究では3杯型風速計を用いた．風向計にはベーン型風向計を用いた．データの取得には，Fig.6に示すNRGロガー9200プラス(自動記録器)を用いた．データの記録間隔は10分(600秒)，サンプリング間隔は



(20 Meter NRG-NOW System)

(a)風速計



(b)風向計

Fig.5 測定機器

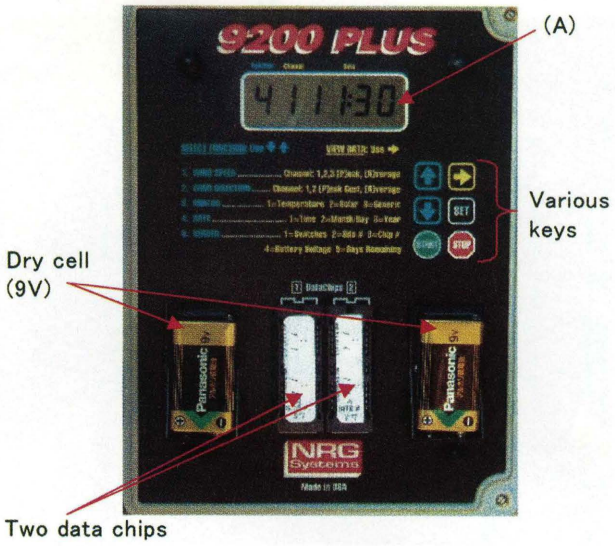


Fig.6 データロガー
(9200-PLUS NRG LOGGER)

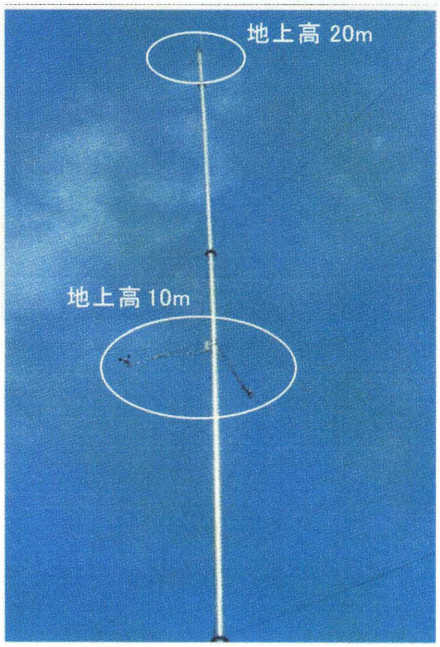


Photo.1 観測マストの様子

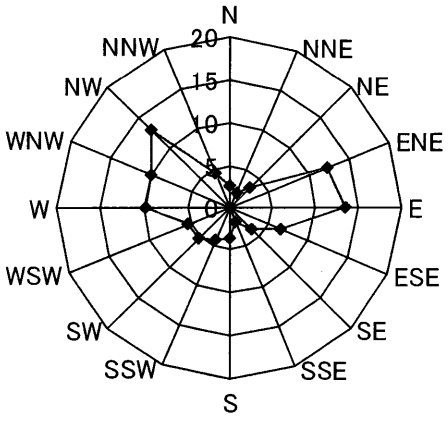
0.5Hz(2秒)で，風速の平均値と標準偏差および風向の平均値が格納される．すなわち，300個のデータに基づいた統計処理の結果である．平均風速は0～97.4m/sまで取得可能であり，その精度は0.022m/sである．風向には補正値があり，地上高10mは330度，地上高20mは350度である．自動記録器には32kBのチップを2個搭載しており，9Vの乾電池2個で56日間のデータ記録が可能である(Fig.6に矢印で表示)．同図に矢印で示す各種キーを操作することにより，(A)には以下の情報を表示することが可能である．Photo.1には観測システムを設置した実際の様子を示す．

- ✓ 現在風速風向
- ✓ 現在記録間隔の平均風速風向
- ✓ 現在記録間隔の最大風速とその風向
- ✓ 現在アナログ入力値
- ✓ 現在年月日，時刻
- ✓ 記録間隔
- ✓ 記録モード
- ✓ 地点番号(ユーザーが入力)
- ✓ データチップ番号(ユーザーが入力)
- ✓ 電池電圧
- ✓ データチップの記録可能残存日数

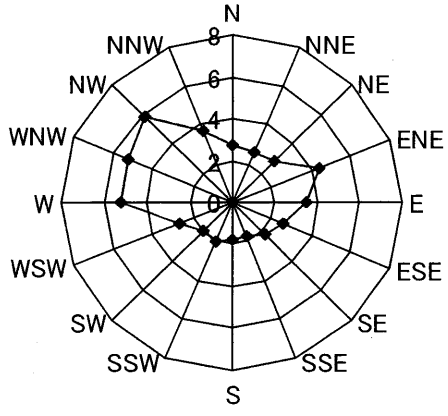
3. 野外風況データの整理

3.1 年間の風況特性(2003年7月～2004年6月)

地上高20mの観測データに基づいて評価した，2003年7月～2004年6月における1年間の風況特性を整理しておく．ここに示す結果は10分値データに基づく．



(a)発生頻度(%)



(b)平均風速(m/s)

Fig.7 年間の風況特性(2003.7-2004.6)，10分値

風向	平均風速(m/s)	出現頻度(%)
N	2.7	2.6
NNE	2.6	1.9
NE	2.8	3.3
ENE	4.4	12.2
E	3.5	13.4
ESE	2.5	6.3
SE	2.2	3.6
SSE	1.8	1.9
S	1.8	3.5
SSW	2.0	4.1
SW	2.0	5.2
WSW	2.6	5.2
W	5.2	9.7
WNW	5.2	9.9
NW	5.8	12.8
NNW	3.9	4.4
地上高20m		

Table.1 Fig.7の数値情報(2003.7-2004.6)，10分値

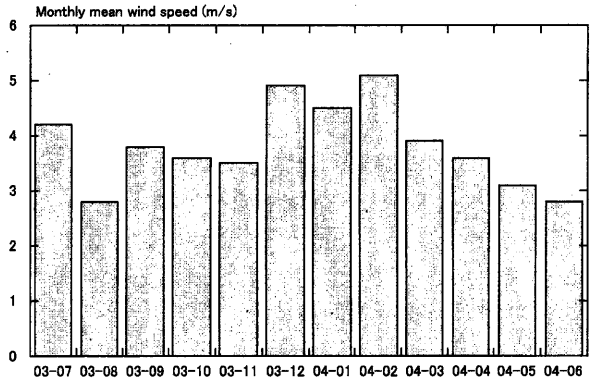


Fig.8 月別平均風速の比較(2003.7-2004.6)，10分値

年および月	平均風速(m/s)
2003年7月	4.2
2003年8月	2.8
2003年9月	3.8
2003年10月	3.6
2003年11月	3.5
2003年12月	4.9
2004年1月	4.5
2004年2月	5.1
2004年3月	3.9
2004年4月	3.6
2004年5月	3.1
2004年6月	2.8
年平均風速	3.8
地上高20m	

Table.2 Fig.8の数値情報(2003.7-2004.6)，10分値

Fig.7には，16風向別の発生頻度とそれに対応した平均風速を示す．伊都キャンパスでは，西～北西と東よりの風が卓越しているのが分かる．

Table.1には，Fig.7の数値情報を示す．

Fig.8には，月別平均風速の比較を示す．縦軸が平均風速を示し，横軸は月である．冬期の12月～2月には，平均風速で5.0m/s程度の風が吹いている．

Table.2には，Fig.8の数値情報を示す．地上高20mにおいて，年間平均風速は3.8m/sであった．

3.2　観測マスト位置での年間発電量などの試算

ここでは，100kW級風レンズ風車をFig.2に示す観測マスト地点(地上高20m)に導入した際の年間発電電力量と設備利用率の試算結果について示す．

年間発電電力量と設備利用率を試算するためには，風速階級別の出現頻度を利用するのが一般的である．本研究で使用する観測マスト位置(地上高20m)での結果をFig.9に示す．同図には，レイリー分布も併せて示している．レイリー分布について簡単に説明する．Fig.9からも分かるように，風速階級別の出現頻度分布は左右非対称である．最大値は左側，すなわち，弱風側に偏っている．この出現頻度分布の関数形に関する研究は過去に数多く行われており，現在ではワイブル(Weibull)分布関数が一般的に用いられる．レイリー分布は，ワイブル分布の特別な場合である．以下に示すように，レイリー分布では，(年)平均風速を設定すれば風速の出現頻度を推定することができる．Fig.9においても，レイリー分布は，観測データを集計して得られた風速階級別の出現頻度を概ね再現している．

$$f(V)=\frac{\pi}{2}\frac{V}{\bar{V}^2}exp\left[-\frac{\pi}{4}\left(\frac{V}{\bar{V}}\right)^2\right] \qquad -(1)$$

$\bar{V}$:(年)平均風速(m/s)

V :風速(m/s)

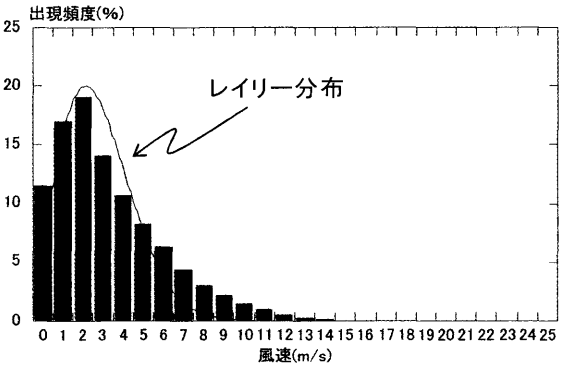
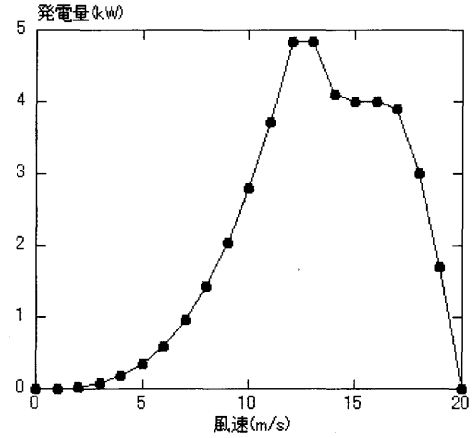
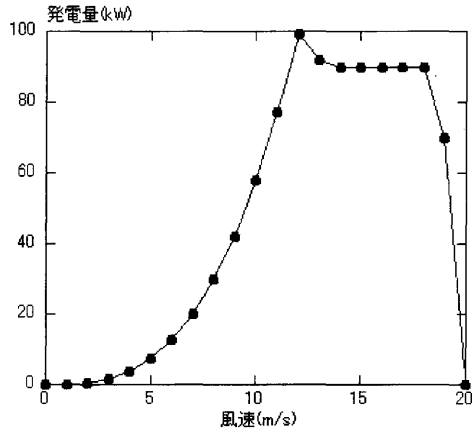


Fig.9　風速階級別の出現頻度分布(2003.7-2004.6)，10分値

Fig.10には，風レンズ風車のパワーカーブを示す．比較のため，5kW機のパワーカーブも併せて示す．



(a)5kW機



(b)100kW機

Fig.10　風車パワーカーブの比較

Fig.10(b)に示す100kW機のパワーカーブとFig.9に示した風速階級別の出現頻度分布に基づいて算出した年間発電電力量と設備利用率の結果をTable.3に示す．なお，風速値を発電量に換算する際，風速ビンは最小値を用いた．すなわち，例えば4.9m/sでの発電量は4m/sの発電量とした．このビンの取り方で設備利用率は数%変動する．また通常，観測マストの風速値(本研究では地上高20m)は，ベキ法則によりハブ高さ(例えば地上高25m)に換算する．ここでは，地上高20m位置で諸量を算出した．年平均風速が3.8m/sである観測マスト地点では，100kW級の風レンズ風車を想定した場合の設備利用率は，約8%程度となった．

4.　RIAM-COMPACT®による風車立地点のマイクロサイティング(発電電力量，設備利用率の評価)

4.1　数値計算手法など

風速 (m/s)	発生時間(h)	発電量 (kW)	kWh (=発電量×時間)
0	1012.45	0.0	0.0
1	1488.34	0.1	89.3
2	1666.86	0.5	766.8
3	1238.34	1.6	1931.8
4	939.81	3.7	3486.7
5	726.05	7.2	5256.6
6	548.69	12.5	6864.2
7	386.46	19.9	7675.2
8	262.46	29.7	7782.0
9	187.83	42.2	7928.3
10	126.00	57.9	7296.4
11	87.27	77.1	6725.6
12	46.38	99.0	4591.2
13	24.77	92.0	2278.6
14	11.30	90.0	1017.3
15	4.99	90.0	448.8
16	1.00	90.0	89.8
17	0.50	90.0	44.9
18	0.33	90.0	29.9
19	0.17	70.0	11.6
試算結果	合計:8760h (1年間)	年間発電電力量(kWh) 64,315	
		設備利用率(%) 8.2	
100kW級風レンズ風車を想定 地上高20mの風速値を利用(年平均風速3.8m/s)			
設備利用率(%)=100×(年間発電電力量)/(定格出力90kW×発生時間)			

Table.3 100kW級風レンズ風車を想定した際の年間発電電力量および設備利用率の試算結果

数値不安定を回避し，複雑地形上の風の流れを高精度に数値予測するため，一般曲線座標系のコロケート格子に基づいたRIAM-COMPACT®を用いた[3]．ここでコロケート格子とは，計算格子のセル中心に物理速度成分と圧力を定義し，セル界面に反変速度成分にヤコビアンを乗じた変数を定義する格子系である．数値計算法は差分法(FDM)に基づき，乱流モデルとしてLESを採用する．LESでは流れ場に空間フィルタを施し，大小様々なスケールの乱流渦を計算格子よりも大きなGS成分の渦と，それよりも小さなSGS成分の渦に分離する．GS成分の大規模渦はモデルに頼らず直接数値シミュレーションを行う．一方で，SGS成分の小規模渦が担う，主としてエネルギー消散作用はSGS応力を物理的考察に基づいてモデル化される．流れの支配方程式は，フィルタ操作を施された非圧縮流体の連続の式(式(2))とナビエ・ストークス方程式(式(3))である．本研究では，平均風速6m/s以上の強風を対象にしているので，大気の温度成層の効果は省略した．また，地表面粗度の影響は地形表面の凹凸を高解像度に再現することで取り入れた(水平解像度は数mオーダー)．

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \qquad -(2)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{Re}\frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \qquad -(3)$$

$$\tau_{ij} \approx \overline{u_i' u_j'} \approx \frac{1}{3}\overline{u_k' u_k'}\delta_{ij} - 2\nu_{SGS}\bar{S}_{ij} \qquad -(4)$$

$$\nu_{SGS} = \left(C_s f_s \Delta\right)^2 \left|\bar{S}\right| \qquad -(5)$$

$$\left|\bar{S}\right| = \left(2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}\right)^{1/2} \qquad -(6)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}\right) \qquad -(7)$$

$$f_s = 1 - exp\left(-z^+/25\right) \qquad -(8)$$

$$\Delta = \left(h_x h_y h_z\right)^{1/3} \qquad -(9)$$

計算アルゴリズムは部分段階法(F-S法)に準じ，時間進行法はオイラー陽解法に基づく．圧力に関するポアッソン方程式は逐次過緩和法(SOR法)により解く．空間項の離散化は式(3)の対流項を除いて全て2次精度中心差分とし，対流項は3次精度風上差分とする．ここで，対流項を構成する4次精度中心差分は梶島による4点差分と4点補間に基づいた補間法を用いる．3次精度風上差分の数値拡散項の重みは，通常使用される河村-桑原スキームタイプの α=3に対して，α=0.5としその影響は十分に小さくする．LESのサブグリッドスケールモデルには標準スマゴリンスキーモデルを用いる(式(4)-式(9))．壁面減衰関数を併用し，モデル係数は0.1とした．

4.2　実風速推定法の手順

野外観測で取得された風況時系列データと時間平均風況場の計算結果を用いて，複雑地形上の任意地点における実風速の時系列データ(スカラー風速値の時系列データ)を推定する手順は以下の通りである[8]．

1．Fig.11に示すように，RIAM-COMPACT®を用いて対象サイトを対象に16風向別の風況シミュレーションを実施する．十分に流れ場を発達させた後，引き続き計算を行い，時間平均風況場を取得する．

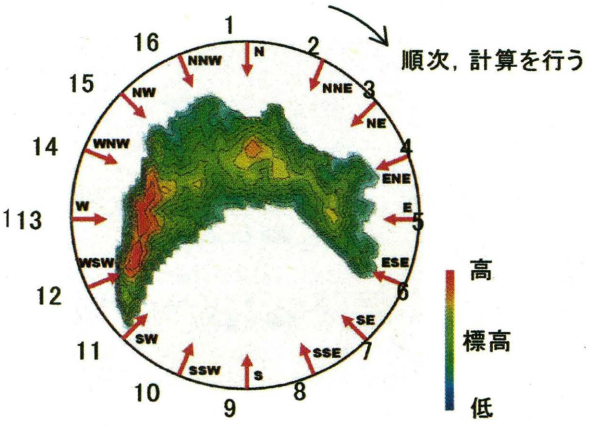
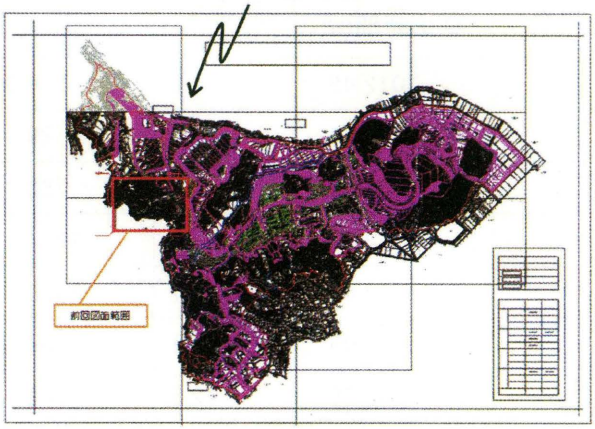


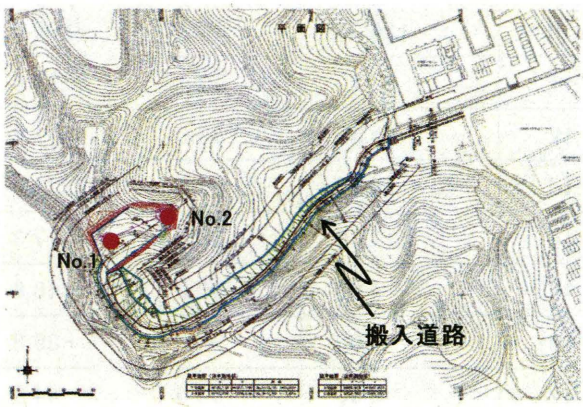
Fig.11　16風向別の風況シミュレーションのイメージ

本研究では，Fig.12(a)に示す赤線で囲む風レンズ風車の建設予定地の高解像度CADデータを入手し，これを国土地理院の基盤地図情報(縮尺レベル25000)の等値線と接続させて空間解像度5mの標高データを5km四方構築した[9]．16風向別の計算領域は100kW級風レンズ風車のNo.2を中心として3km四方とした(Fig.13，Fig.14を参照)．計算領域中の標高差は160m(最大標高：160m，最小標高0m)であり，計算領域の上端は標高800mである．各方向の格子点数は主流方向(x)，主流直交方向(y)，鉛直方向(z)方向に61×61×41点である．x方向およびy方向の格子幅は等間隔で50mとした．z方向の格子幅は不等間隔とし，地表面付近に滑らかに引き寄せた．地表第一セル，すなわち，最小メッシュ幅は約0.5mである．流入境界面は1/7乗のベキ法則に従う速度プロファイルを与え，側方境界面と上部境界面は滑り条件，流出境界面は対流型流出条件とした．地面には粘着条件を課した．式(3)の無次元パラメータReはレイノルズ数($=U_{in}h/\nu$)であり，$Re(=U_{in}h/\nu)=10^4$とした．ここで，本計算における代表スケールの取扱いはFig.15に示す通りである．hは計算領域の標高差，U_{in}は流入境界面の最大標高地点における風速，νは動粘性係数である．時間刻みは$\Delta t=2\times10^{-3}h/U_{in}$とした．

伊都キャンパス全体図

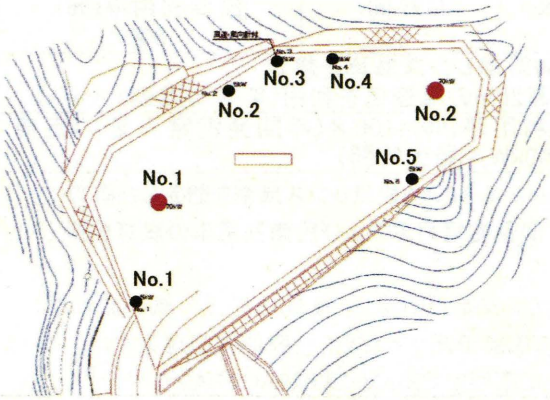


(a)全体図，図中の赤線部分が本研究で入手したCADデータの範囲



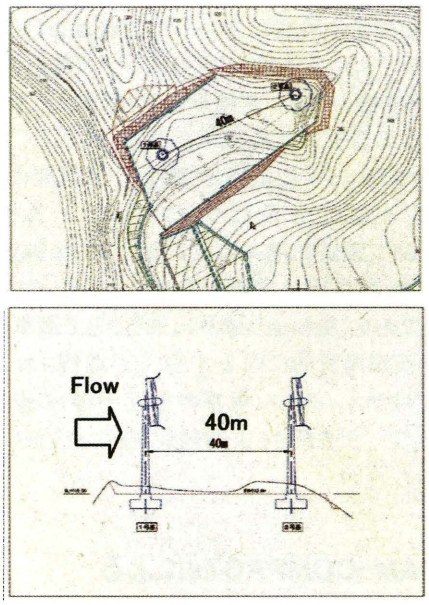
(b)上記赤線部分の拡大図，赤丸：100kW機の立地点

Fig.12　100kW級風レンズ風車の建設予定地



(a)5kW機および100kW機の配置計画，
赤丸：100kW機の立地点，黒丸：5kW機の立地点

Fig.13　風レンズ風車の配置図，次ページに続く



(b)100kW機の離隔距離と側面図

Fig.13 風レンズ風車の配置計画

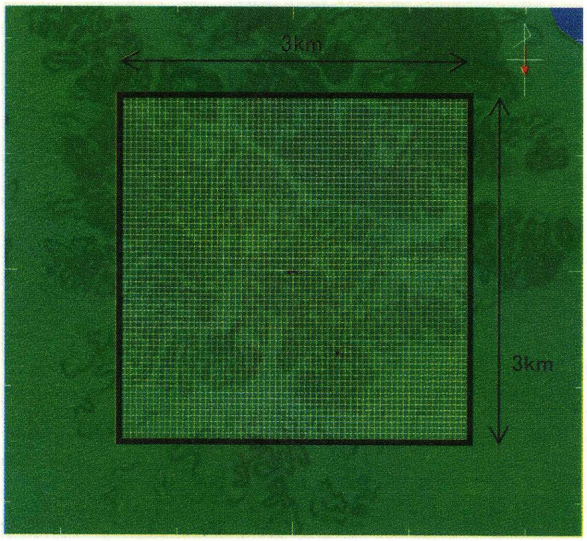


Fig.14 計算領域，格子点数：61×61×41点

2. それぞれの流入風向毎に参照点，すなわち，観測マスト高さにおける風速値と，評価点位置におけるハブ高さ風速値との比を16セット求める．参照点の風速値は“1”と正規化しておく．ここで，流入境界面で設定した風向と参照点における風向は一致するということを仮定している．なお，スカラー風速値VELはx方向，y方向の時間平均された風速成分を用いて以下の式で算出した．

$$VEL=\sqrt{\left(\overline{U}^2+\overline{V}^2\right)} \qquad -(10)$$

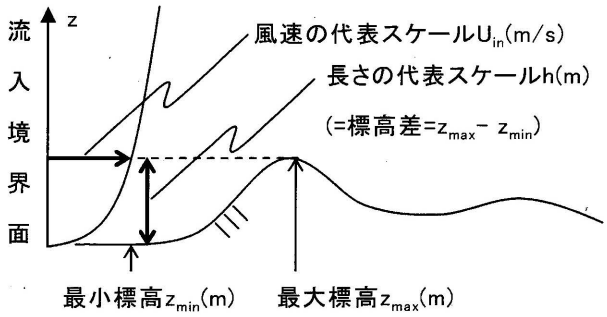
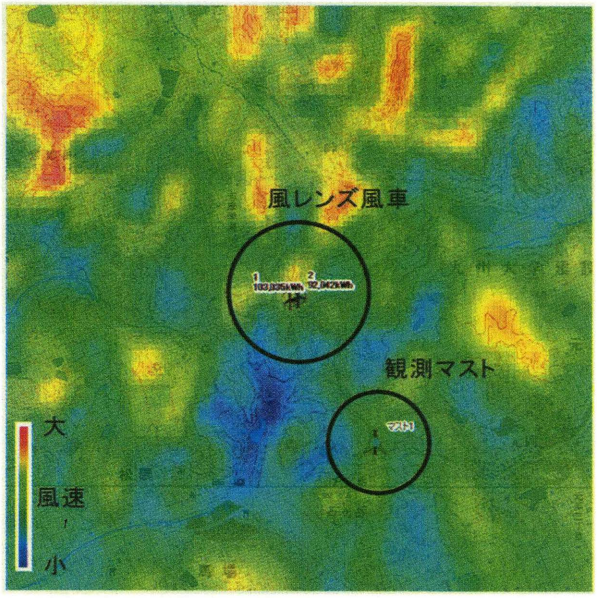


Fig.15 本研究における代表スケールの取扱い

3. 参照点において，野外風況データの各時刻における風向に従い，それに対応した(事前に求めていた)風速比を野外風況データに乗じる．こうして，参照点の野外風況データが，評価点での時系列データ(スカラー風速値)に変換される．この操作を1年間ないし，ある期間の野外風況データに適用し，統計処理を施せば任意評価点の月別平均風速や年間平均風速などが取得できる．

4.3 計算結果および考察

Fig.16に本研究で作成した局所風況マップを示す．これは，地上高20mの野外風況データ(10分値)から，1時間間隔のデータを作成し，これとRIAM-COMPACT®による16風向別の計算結果から，その出現頻度などを考慮して作成したものである．図中には，



(a)全体図

Fig.16 局所風況マップ，2003.7-2004.6の野外風況データに基づいて作成，次ページに続く

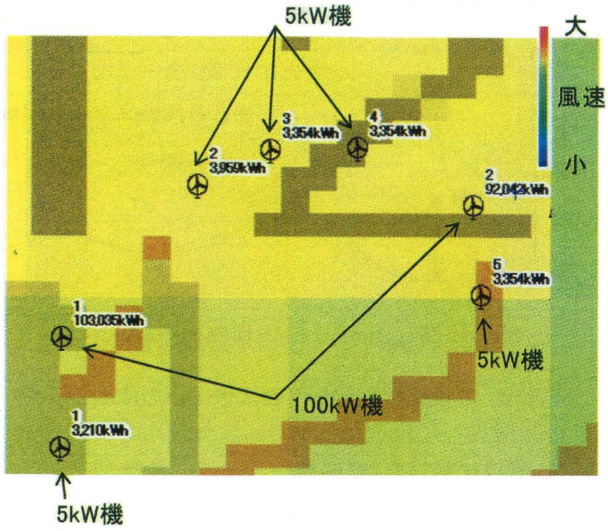


Fig.16　局所風況マップ，2003.7-2004.6の野外風況データに基づいて作成

	100kW機
No.1	103,035
No.2	92,042
	5kW機
No.1	3,211
No.2	3,959
No.3	3,354
No.4	3,354
No.5	3,354
合計値	212,309

Table.4　年間発電電力量(kWh)の試算結果

	100kW機
No.1	11.9
No.2	10.6
	5kW機
No.1	7.6
No.2	9.4
No.3	7.9
No.4	7.9
No.5	7.9
平均値	9.0

Table.5　設備利用率(%)の試算結果

各風車の年間発電電力量を表示している．各数値については後述する．各風車ともに概ね風況の良好な地点に立地している様子が見て取れる．

年間発電電力量と設備利用率の結果をTable.4およびTable.5に示す．なお，風速値を発電量に換算する際，風速ビンは線形内挿で処理した．すなわち，例えば4.9m/sならばその風速に対応した発電量を計算した．Fig.13に示すように，100kW級の風レンズ風車2台の周辺には，5kW機の風レンズ風車5台を配置する計画である．よって，本研究では各風車の諸量とウィンドファームとしての全体値(or平均値)を試算した．本研究の試算では，年間発電電力量はウィンドファーム全体で212,309kWh，設備利用率の平均値は約9%程度となった．今後，風車建設予定地の西側の森林などの伐採が計画されており，風の通り道が出来ることで風車建設予定地の風況が局所的に向上することが期待される．また，本研究ではウエイクロス(風車の相互干渉)の影響を考慮していない．引き続き，より詳細な検討・検証を行う予定である．

5.　RIAM-COMPACT®による風車立地点のマイクロサイティング（風車近傍の風況特性の評価）

5.1　数値計算手法など

本研究では，風車近傍の地形の凹凸などによる風況特性の詳細検討も実施した．この目的に対し，前章よりもさらに高解像度の標高データを構築し，それに基づいた風況シミュレーションを行った．ここでは，その結果などを説明する．

詳細計算用の高解像度標高データは，先に説明したように，CADデータと国土地理院の基盤地図情報(縮尺レベル25000)の等値線を接続させて1km四方の領域を再構築した(Fig.17を参照)．この領域の空間解像度は1mである．但し，土地造成の影響などは考慮していない．この標高データに基づいて，西風および東風を対象とした計算を実行した(Fig.18を参照)．ここでは，紙面の都

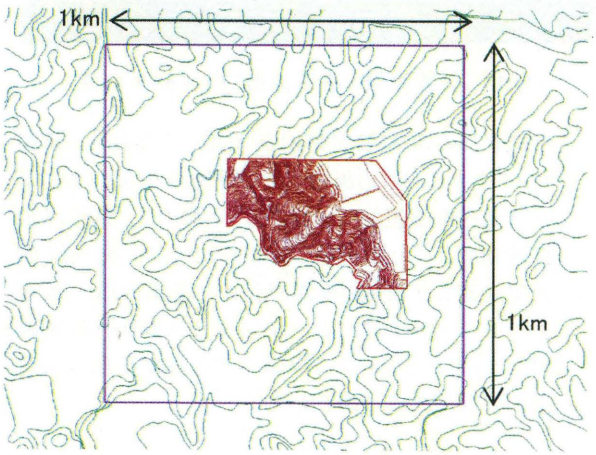
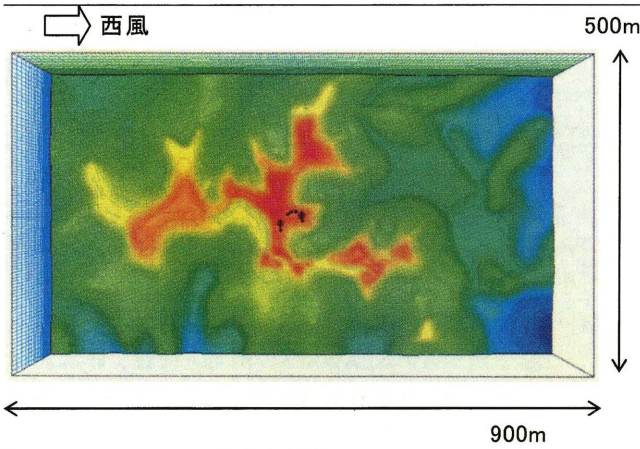
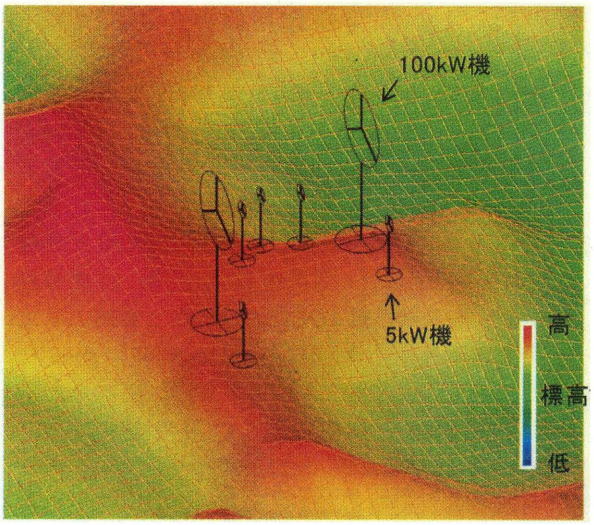


Fig.17　詳細計算用の地形構築範囲，紫色の線，赤線で示す部分はCADデータの範囲，1km四方を空間解像度1mで再現した．



(a)上から見た平面図



(b)鳥瞰図

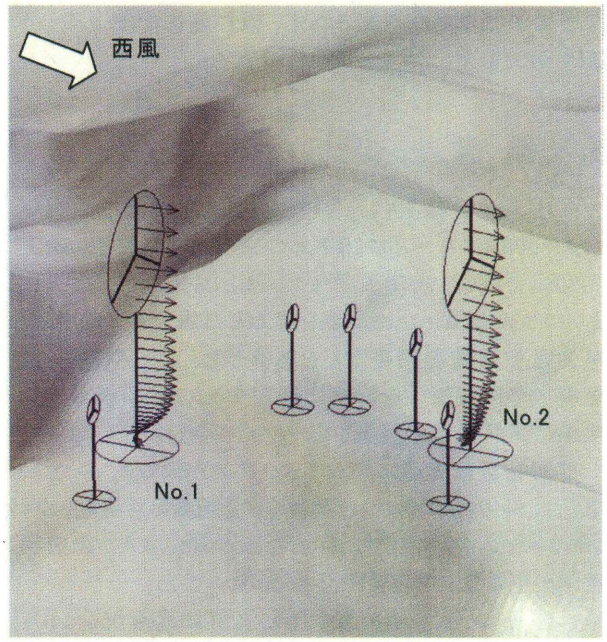
Fig.18 詳細計算用の計算領域，
格子点数：181×101×51点

合上，西風を対象にした場合のみを示す．

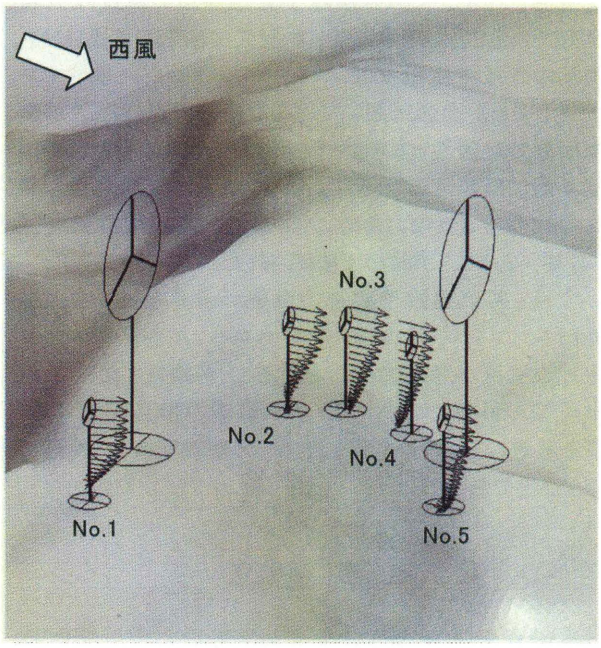
計算領域は100kW級風レンズ風車のNo.2を中心として主流方向(x)に900m，主流直交方向(y)に500mとした．計算領域中の標高差は75m(最大標高：120m，最小標高45m)であり，計算領域の上端は標高422mである．格子点数は，x方向，y方向，z方向(鉛直方向)に181×101×51点である．水平断面内の格子幅は等間隔で5mとした．z方向の格子幅は不等間隔とし，地表面付近に滑らかに引き寄せた．地表第一セル，すなわち，最小メッシュ幅は約0.2mである．その他の条件は第4章と同じである．

5.2 計算結果および考察

Fig.19に各風車立地点における速度ベクトルの鉛直分布(時間平均場)を示す．今回の場合のように，複雑地形上に風車を建設する場合には，風車の上流側に位置する地形からの剥離流の影響を風車が受けないか



(a)5kW機の結果



(b)100kW機の結果

Fig.19 時間平均場に対する速度ベクトルの鉛直分布，
西風の場合

どうかを調査する必要がある．すなわち，風車上流の地形から形成される境界層に風車の受風部分が埋没しないようにしなければならない．風車立地点が最高標高では無い場合には，大きな風速が期待できるわけではなく，周辺地形との干渉によって風車立地点が境界層に埋没している可能性もあるため，その適地選定は十分な注意を要する．Fig.19を吟味すると，各風車ともに大き

な速度欠損などは観察されず，概ね適切な地点であることが示された．

6. 結 言

九州大学伊都キャンパスで実施してきた野外風況データ(2003年7月～2004年6月の1年間，1時間値，地上高20m)を用い，流体工学モデルRIAM-COMPACT®により100kW級風レンズ風車を建設した場合の年間発電電力量や設備利用率などを試算した．また同時に，風車周辺の風況特性を詳細に調査するため，卓越風向を対象に高解像度の風況シミュレーションを実施した．

年間発電電力量に関しては，100kW級の風レンズ風車2台，5kW機の風レンズ風車5台を配置した場合，ウィンドファーム全体で212,309kWhとなった．また，設備利用率の平均値は約9%程度となった．

卓越風向(西風)を対象にした高解像度風況シミュレーションでは，各風車ハブ高さにおいて大きな速度欠損は確認されず，今回の建設予定地周辺の風況は概ね良好であることが示された．本研究で検討した風レンズ風車の設置予定地点は，周辺を山に囲まれた地形であり，そういった地形においては最も高い地点の周辺が風車設置の最適地とならず，周辺との干渉によって風車が境界層に埋没する可能性がある．風車の受風部分を境界層に埋没させないためにも，事前に風況場解析を行う必要があることが改めて確認された．

今後，風車建設予定地の西側の森林などの伐採が計画されており，風の通り道が出来ることで風車建設予定地の風況が局所的に向上することが期待される．また，本研究の計算ではウエイクロス(風車の相互干渉)の影響を考慮していない．引き続き，より詳細な検討・検証を行う予定である．

謝 辞

本研究を行うに際し，九州大学応用力学研究所技術室の渡辺公彦氏，杉谷賢一郎氏には多大な協力を頂いた．(株)環境GIS研究所の荒屋亮氏には，数値シミュレーション用の地形データ作成に関して多大な協力を頂いた．ここに記して感謝の意を表します．

参 考 文 献

[1] 大屋裕二，風レンズ風車から見た世界の風力・水力利用，日本風力エネルギー協会誌，印刷中

[2] T.Uchida and Y.Ohya, Micro-siting Technique for Wind Turbine Generator by Using High Resolution Elevation Data, JSME International Journal「Environmental Flows」, Series B, Vol.49, No.3, pp.567-575, 2006

[3] T.Uchida and Y.Ohya, Micro-siting Technique for Wind Turbine Generators by Using Large-Eddy Simulation, Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, Vol.96, pp.2121-2138, 2008

[4] 村上周三，持田灯，加藤信介，木村敦子，局所風況予測システムLAWEPSの開発と検証，日本流体力学会誌「ながれ」，Vol.22，No.5，pp.375-386，2003

[5] 石原孟，非線形風況予測モデルMASCOTの開発とその実用化，日本流体力学会誌「ながれ」，Vol.22，No.5，pp.387-396，2003

[6] 内田孝紀，杉谷賢一郎，大屋裕二，九州大学元岡キャンパスにおける風観測-第一報　平均的な風況特性について-，九州大学応用力学研究所所報，第128号，pp.37-51，2005

[7] 内田孝紀，杉谷賢一郎，大屋裕二，九州大学伊都キャンパスにおける風観測-第二報　乱流強度分布と発電電力量の試算について-，九州大学応用力学研究所所報，第131号，pp.13-24，2006

[8] 内田孝紀，大屋裕二，CFDを用いた複雑地形上の実風速推定法の提案，応用力学論文集，Vol.10，pp.733-740，2007

[9] 内田孝紀，大屋裕二，荒屋亮，田辺正孝，川島泰史，風況シミュレーションのための紙地図からの高解像度地形データの構築，九州大学応用力学研究所所報，第129号，pp.135-141，2005

Appendix

ここでは，第2章および第3章で示した，観測マスト位置での野外風況データとメソ数値予測モデル(MSM)のGPVデータとの比較を示す．GPVデータとは，(財)気象業務支援センター(http://www.jmbsc.or.jp/)を通して公開されている気象庁作成の数値予報データである．観測マスト近傍の4格子からGPVデータを抽出し，水平方向および高度補間を行った(Fig.20を参照)．メソ数値予測モデル(MSM)の格子間隔はTable.6に示す通りである．配信間隔は6時間毎である．本研究では，下記に示す二通りのデータを用いた．

ケース1:地上(地上高10m)の風速値をべき指数7で地上高20mに上方補間

ケース2:気圧面(975hpa, 950 hpa)の風速値からべき指数を算出し，地上高20mに下方補間

メソ数値予測モデル（MSM）	格子間隔		予測領域			
			北緯		東経	
	緯度方向	経度方向	南端	北端	南端	北端
地上物理量	0.1度	0.125度	22.4度	47.6度	120度	150度
気圧面物理量	0.2度	0.25度				

Table.6 メソ数値予測(MSM)の予測範囲

(a)ケース1：地上データ

Fig.20 GPVデータ(MSM)の取得位置

(b)ケース2：気圧面データ

GPVデータ(MSM)の取得位置

■ケース1：地上データ(Fig.20(a))

1. N33. 5 E130. 125
2. N33. 5 E130. 250
3. N33. 6 E130. 125
4. N33. 6 E130. 250

■ケース2：気圧面データ(Fig.20(b))

1. N33. 4 E130. 000
2. N33. 4 E130. 250
3. N33. 6 E130. 000
4. N33. 6 E130. 250

Fig.21には，GPVデータ(ケース1，ケース2)と野外風況データの風速時系列データの比較(2003年7月～2004年6月における1年間，1時間値，8760個)を示す．全てのデータともに地上高は20mである．GPVデータ(ケース1，ケース2)は，野外風況データの傾向を概ね再現していることが分かる．但し，GPVデータ(ケース2)は若干過大評価であることが見て取れる．年平均風速は野外観測が3.8m/sであるのに対し，GPVデータ(ケース1)は3.9m/s，GPVデータ(ケース2)は5.63m/sであった．

Fig.22には，GPVデータ(ケース1，ケース2)と野外風況データに関して，風速階級別の出現頻度の比較を示す．観測値とGPVデータ(ケース1)を比較すると，全体的な傾向は概ね一致している．観測値とGPVデータ(ケース2)では，全体的な傾向に差異が生じている．この結果と，第3章で示した100kW機の風レンズ風車のパワーカーブに基づいて年間発電電力量と設備利用率を地上高20mで試算した．観測値の年間発電電力量63,829kWh，設備利用率約8%に対し，GPVデータ(ケース1)では，年間発電電力量42,954kWh，設備利用率約6%，GPVデータ(ケース2)では，年間発電電力量149,963kWh，設備利用率約19%となった．

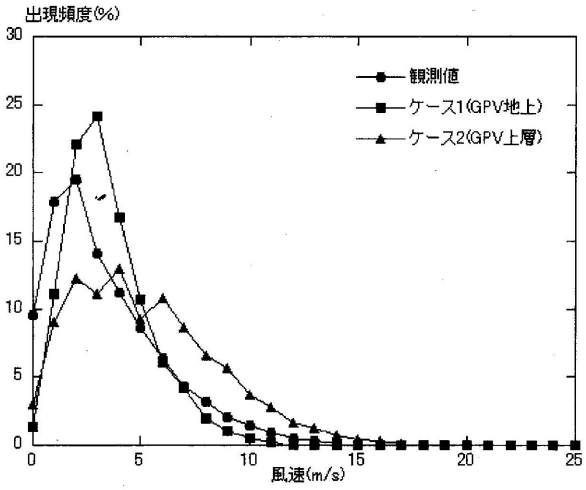


Fig.22 風速階級別の出現頻度の比較

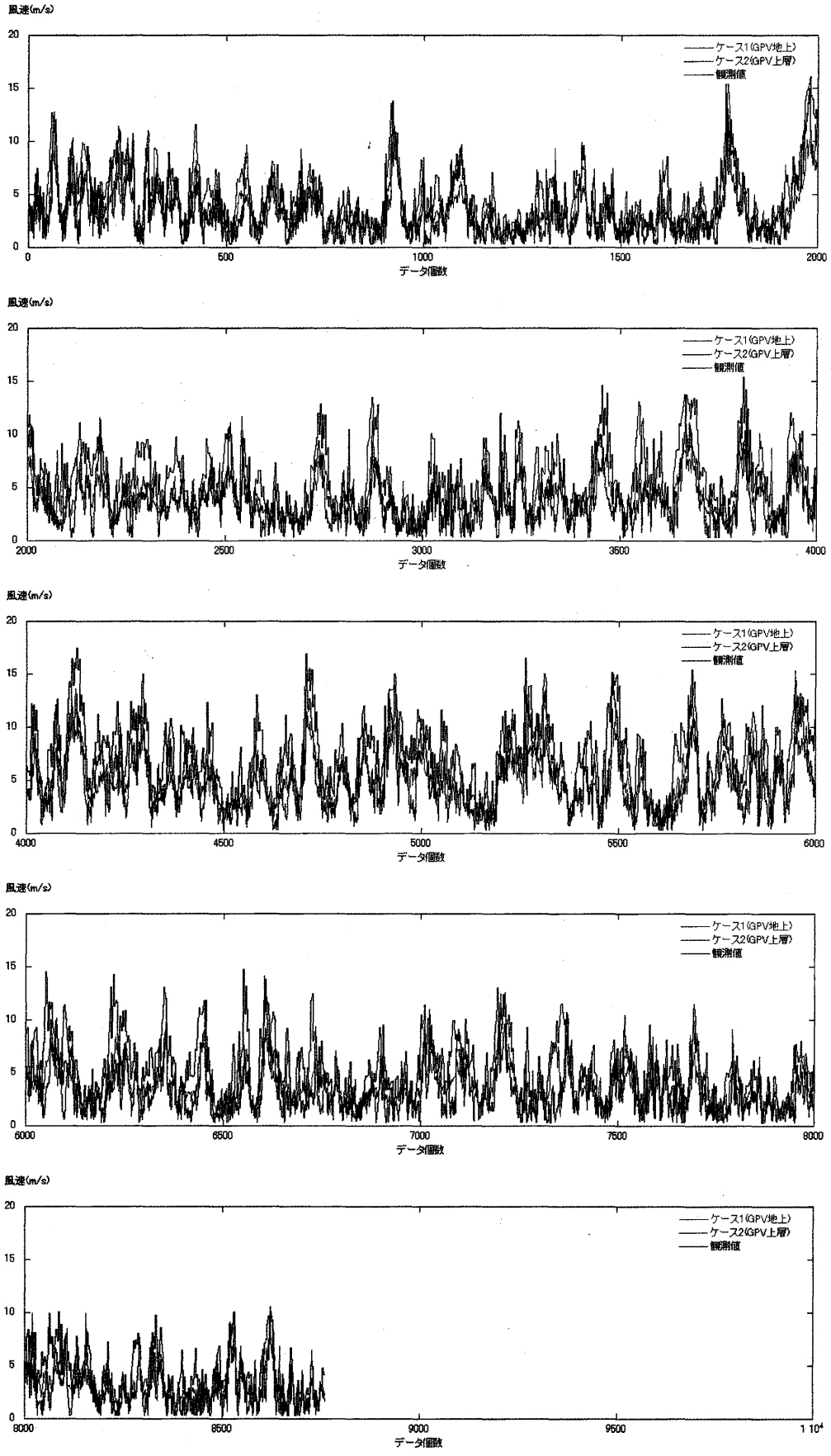


Fig.21 GPVデータ(MSM)と野外観測データの風速時系列の比較，2003年7月～2004年6月における1年間