

九州大学伊都キャンパスにおける流体工学モデル RIAM-COMPACT【O!R】を用いた100kW級風レンズ風車 のマイクロサイティング：第2報 土地造成を考慮し た場合

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/10.15017/27097>

出版情報：九州大学応用力学研究所所報. 139, pp.131-139, 2010-09. 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

-第2報 土地造成を考慮した場合-

内田 孝紀* 烏谷 隆* 大屋 裕二*

(2010年7月30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

-2nd Report : THE CASE CONSIDERING LAND PREPARATION-

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, considering the land preparation, was performed in the new campus of Kyushu University.

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

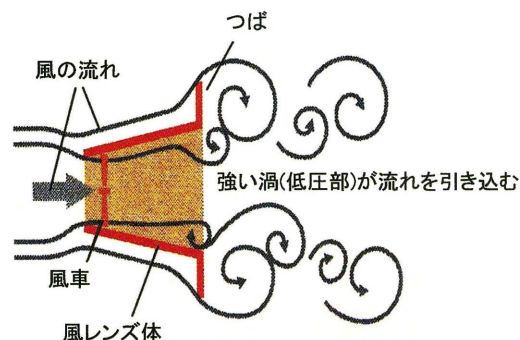
1. 緒言

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



(a)2009年10月、福岡市百道浜に設置した5kW風レンズ風車3台



(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

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)。
- ◆ 「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 $\lambda=4$ 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物で覆われている)。

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(流体力学モデル)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・非線形の流体力学(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、ハードウェアとしての風車(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ェ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、CO₂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機とはほぼ相似に製作し、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

100kW級風レンズ風車の建設予定地



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

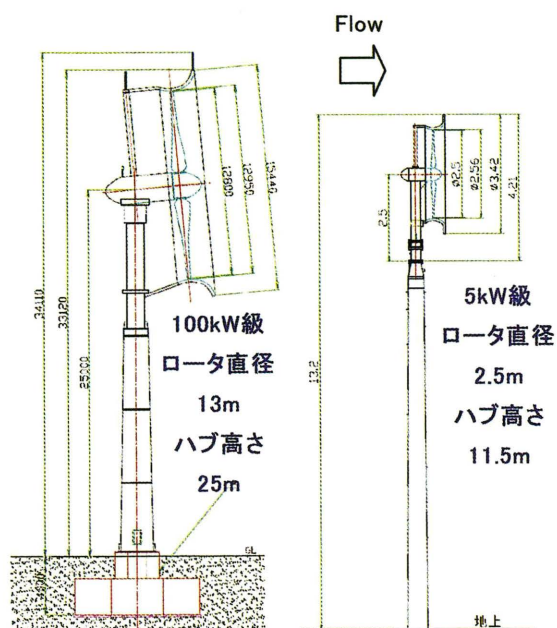


Fig.3 5kW機および100kW機の寸法の比較

地をFig.2に, 5kW機と比較した場合の大きさをFig.3に, 建設後のイメージ図(CG)をFig.4にそれぞれ示す。

- ◆ 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。
- ◆ 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従性が良い。
- ◆ 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。

前報⁶⁾では, 風車周辺の風況特性を詳細に調査するため, 卓越風向である西風を対象に流体力学モデル RIAM-COMPACT[®]を用いて高解像度の風況シミュレーションを実施した。その際, 風車立地周辺の土地造

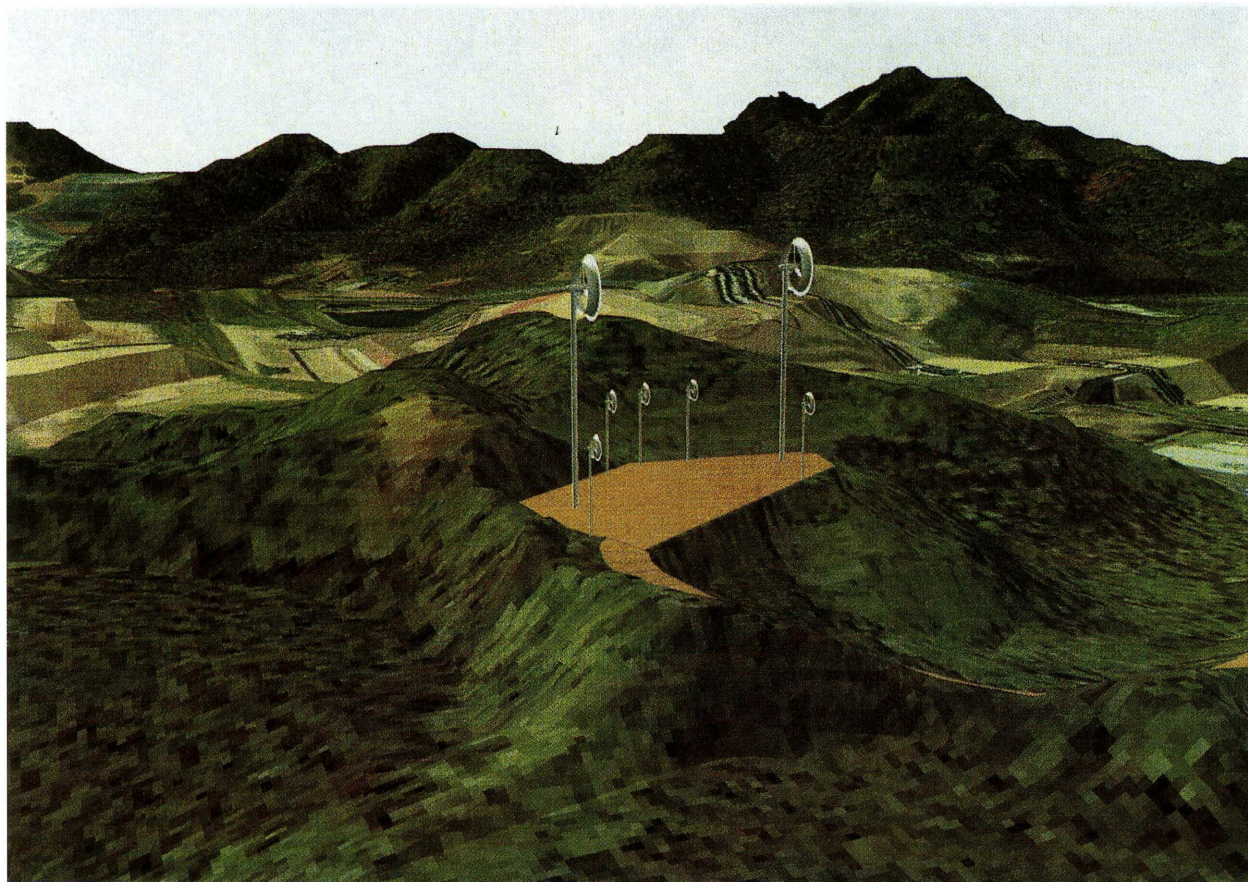


Fig.4 5kW級および100kW級の風レンズ風車の建設イメージ(CG), 注意:樹木の高さは考慮していない.
日本スペースイメージング(株)提供のIKONOS(イコノス)衛星画像(2009年5月9日撮影)を利用した.

成状況は考慮していなかった.そこで本研究では, Fig.4に示す実際の土地造成状況を反映した計算を行ったので,その結果を報告する.

2. 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)

2.1 数値計算手法など

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^{2, 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).

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

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

$$\tau_{ij} \approx \overline{u'_i u'_j} \approx \frac{1}{3} \overline{u'_k u'_k} \delta_{ij} - 2\nu_{SGS} \bar{S}_{ij} \quad (4)$$

$$\nu_{SGS} = (C_s f_s \Delta)^2 |\bar{S}| \quad (5)$$

$$|\bar{S}| = (2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij})^{1/2} \quad (6)$$

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

$$f_s = 1 - \exp(-z^+ / 25) \quad (8)$$

$$\Delta = (h_x h_y h_z)^{1/3} \quad (9)$$

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 $\alpha=3$ に対して、 $\alpha=0.5$ 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。

境界条件の設定は下記の通りである。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.5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 $\Delta t=2 \times 10^{-3}h/U_{in}$ とした。本研究では、西風を対象とした。

2.2 標高データおよび計算格子など

本研究では、Fig.6(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データを手入れし、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1mの標高データを1km四方構築した(Fig.7も参照)。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750m、主流

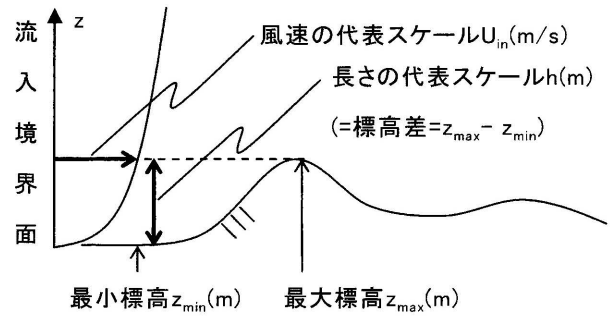
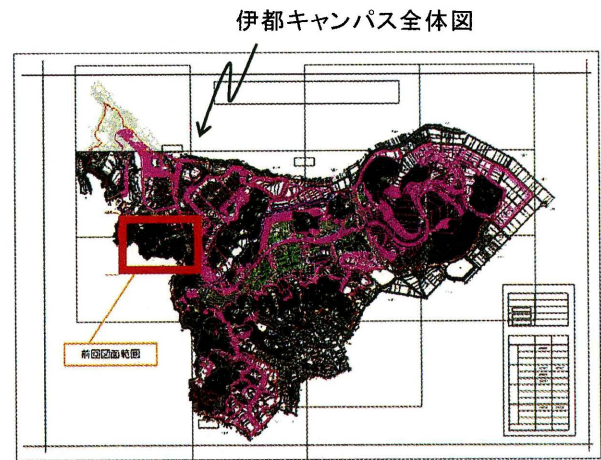
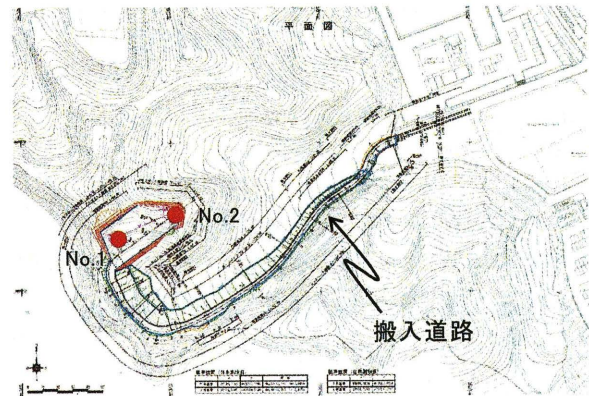


Fig.5 本研究における風速および長さの代表スケールの取扱い



(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)上図の赤線部分の拡大図、赤丸:100kW機の立地点

Fig.6 100kW級風レンズ風車の建設予定地

直交方向(y)に300mとした。計算領域中の標高差は58m(最大標高:120m, 最小標高62m)であり、計算領域の上端は標高340mである。格子点数は、x方向、y方向、z方向(鉛直方向)に251×101×51点である。水平断面

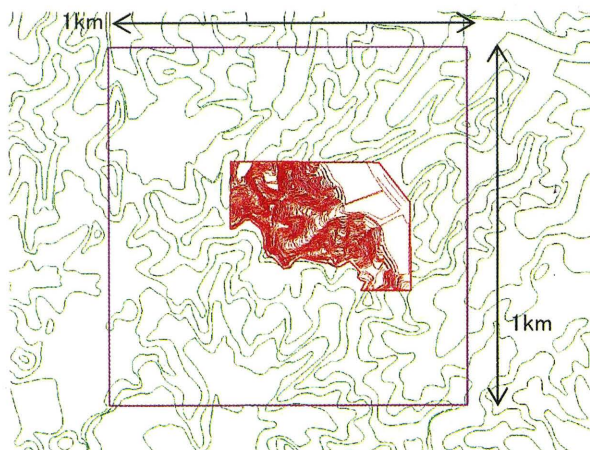


Fig.7 詳細計算用の地形構築範囲, 紫色の線, 赤線で示す部分はCADデータの範囲, 1km四方を空間解像度1mで再現した.

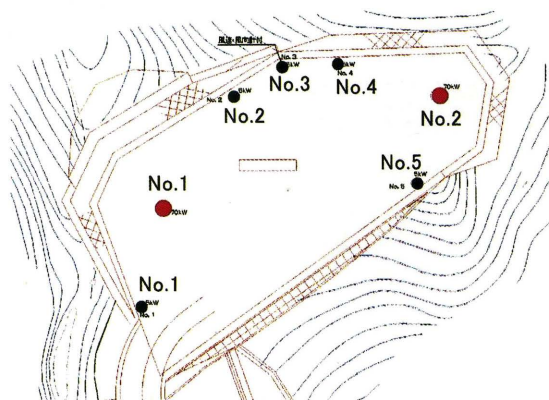
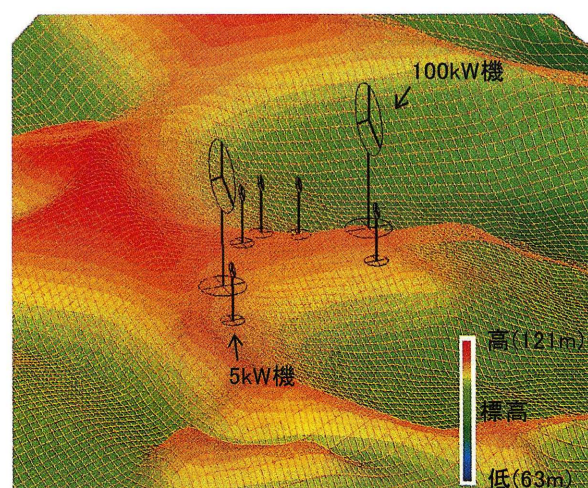


Fig.8 5kW級および100kW級の風レンズ風車の配置計画, 赤丸:100kW機の立地点, 黒丸:5kW機の立地点

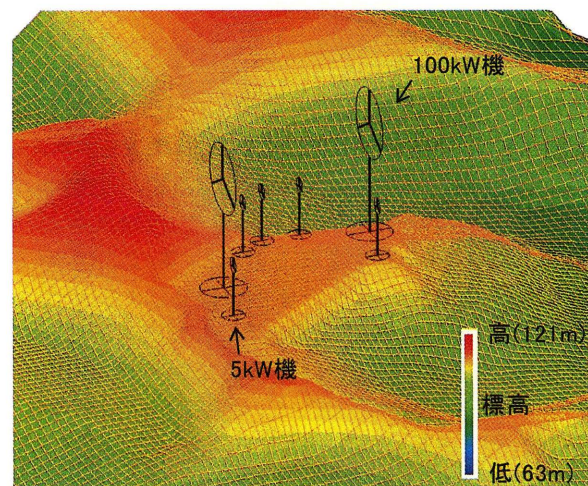
内の格子幅は不等間隔で1.2~12.6mとした。z方向の格子幅は不等間隔とし、地表面付近に滑らかに引き寄せた。地表第一セル, すなわち, 最小メッシュ幅は約0.175mである。Fig.8に風レンズ風車の配置計画を示す。Fig.9に土地造成前後の様子を比較して示す。表1には, 土地造成前後の各風車建設位置における標高および標高差を示す。

2.3 計算結果および考察

Fig.10およびFig.11には, 土地造成前後の100kW機を通る主流方向速度成分の鉛直分布(瞬間場)を示す。両ケースともに, 風車ハブ高さ付近に注目すると, 土地造成前後で気流の劇的な変化は観察されず, 地形効果によって局所的に増速された風が風車受風面を通過している様子が見て取れる。この地形効果による局所的な風速増速の程度は, 近寄り流れ U_{in} に対して最大で約



(a)土地造成前



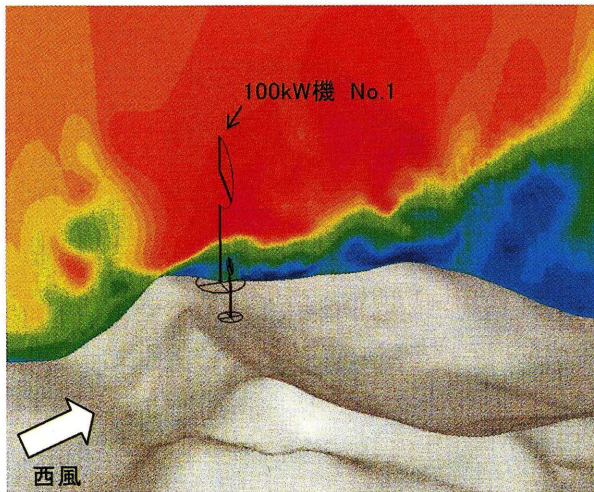
(b)土地造成後

Fig.9 風レンズ風車近傍の地形の様子, 最下層の計算格子も表示している。

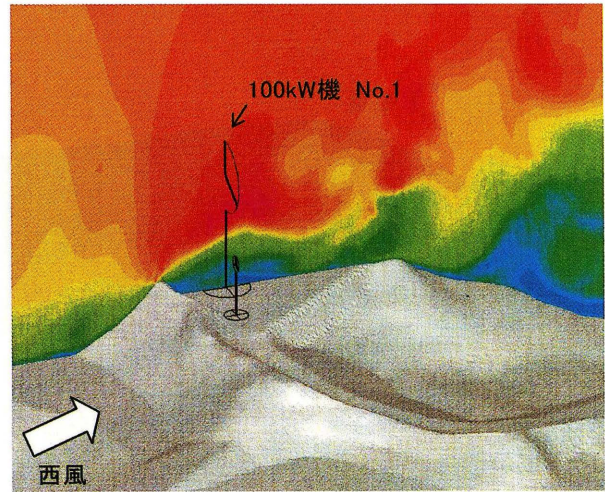
	土地造成前の 標高(m)	土地造成後の 標高(m)	標高差(m) (前-後)
No.1 100kW	111.4	110.0	+1.4
No.2 100kW	111.3		+1.3
No.1_5kW	110.0		+0.0
No.2_5kW	113.0		+3.0
No.3_5kW	112.7		+2.7
No.4_5kW	109.8		-0.2
No.5_5kW	110.1		+0.1

Table.1 各風車建設位置の標高および標高差

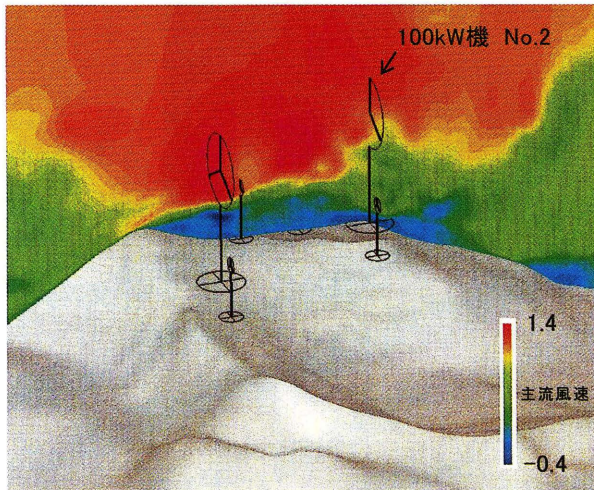
1.4倍になることが示された。



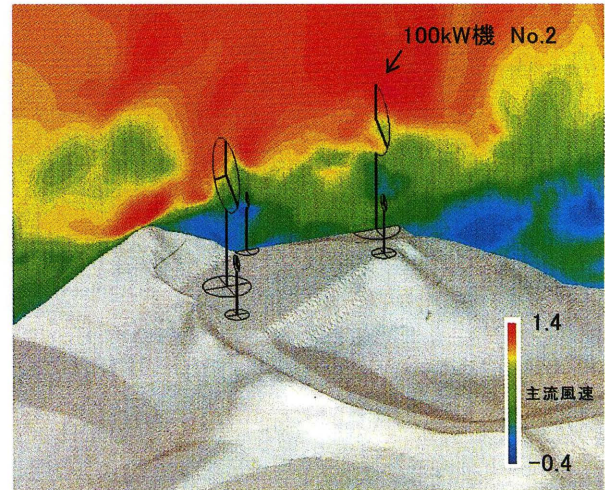
(a)No.1を通る場合



(a)No.1を通る場合



(b)No.2を通る場合



(b)No.2を通る場合

Fig.10 100kW機を通る主流方向速度成分の鉛直断面内の分布, 瞬間場, 土地造成前の場合, 西風

Fig.11 100kW機を通る主流方向速度成分の鉛直断面内の分布, 瞬間場, 土地造成後の場合, 西風

Fig.12およびFig.13には, 土地造成前後の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。本研究の場合のように, 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。加えて, 実際の風車立地では, 山の斜面を削り取ったり(切土:きりど), 土を新たに盛ったり(盛土:もりど)という土地造成の影響を考慮したマイクロサイティングが重要になる。最近の著者らの研究²⁾によると, 風車直近の地形の凹凸から形成される地形乱流が, 風車の発電成績の低

下や風車故障の原因になることが報告されている。

Fig.12およびFig.13を吟味すると, 風車上流の地形からの境界層の影響, 地形の凹凸に伴う地形乱流の影響, 土地造成に伴う気流の劇的な変化などは観察されず, 土地造成後においても各風車ともに概ね適切な地点であることが示された。

3. 結 言

本研究では, 土地造成の状況を考慮した詳細地形データを用い, 卓越風向(西風)を対象にした数値風況シミュレーションを行った。その結果, 風車上流の地形からの境界層の影響, 地形の凹凸に伴う地形乱流の影響, 土地造成に伴う気流の劇的な変化などは観察されず, 土地造成後においても各風車ともに概ね適切な地点であることが示された。

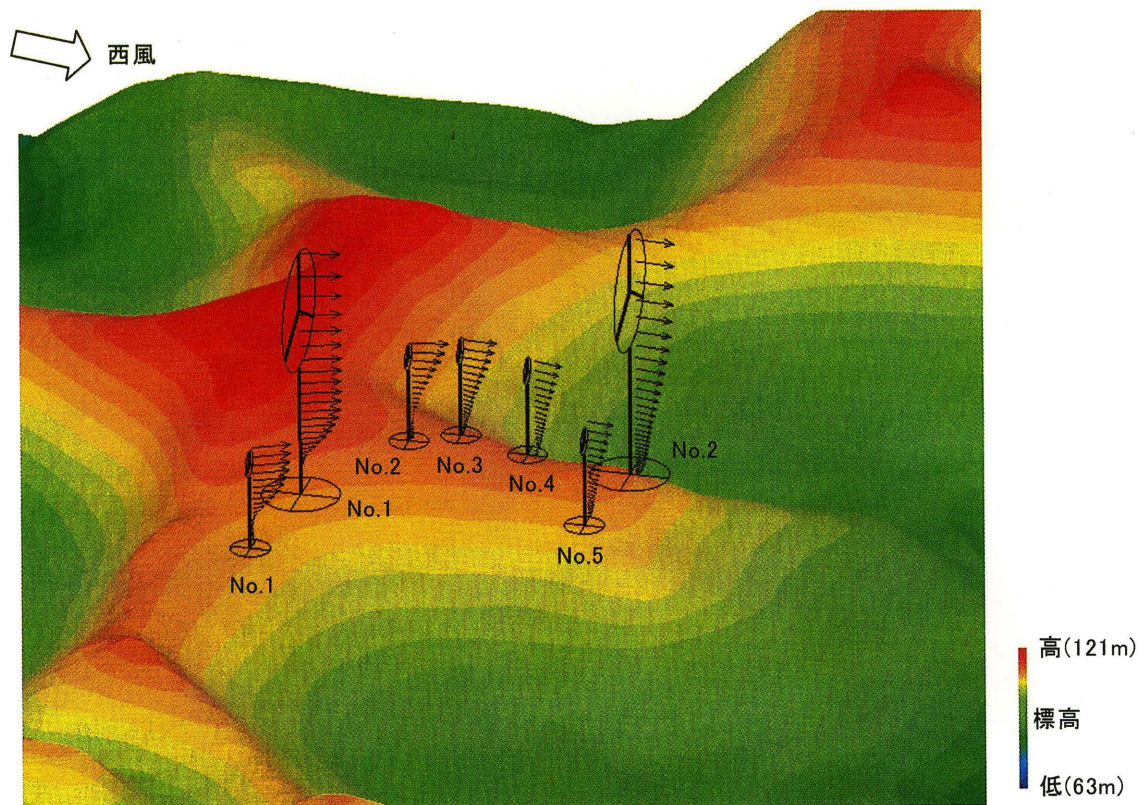


Fig.12 各風車の立地点における速度ベクトルの鉛直分布, 時間平均場, 土地造成前の場合, 西風

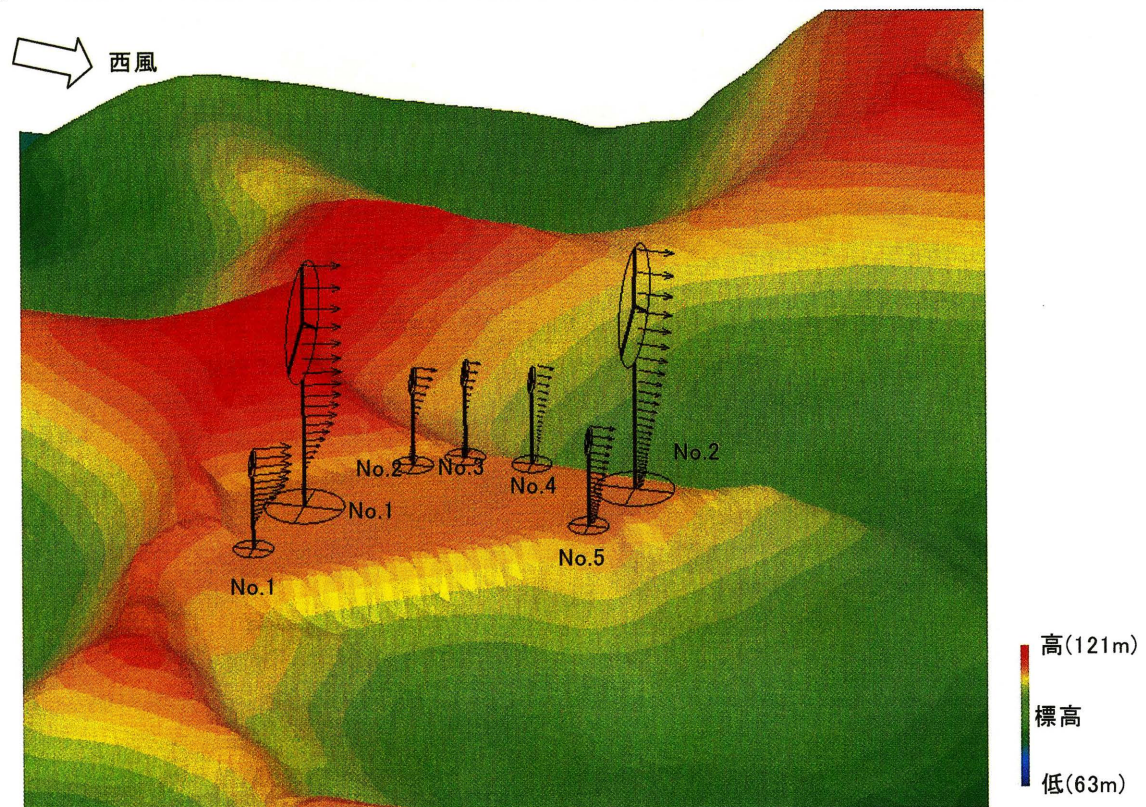


Fig.13 各風車の立地点における速度ベクトルの鉛直分布, 時間平均場, 土地造成後の場合, 西風

謝 辞

本研究の一部は、2009年度～2011年度、科学研究費補助金・基盤研究(A)、「超高効率風レンズ風車と新炭繊維材料の革新的技術を融合した洋上風力発電の開発研究」(研究代表者:大屋裕二)、科学研究補助金・若手研究(A)、「アジア巨大都市の大気環境改善と風力エネルギー有効利用のための局所風況予測技術開発」(研究代表者:内田孝紀)、2010年度(財)中部電力基礎技術研究所 第21期研究助成、「風力発電普及のための高精度マイクロサイティング手法の開発」(研究代表者:内田孝紀)、2010年度(財)畠山文化財団研究助成、「風力発電の適切な導入に資する風車マイクロサイティング手法の開発」(研究代表者:内田孝紀)の援助を受けました。また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やCG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, Vol.33, 通巻91, pp.39-44, 2009
- [2] 内田 孝紀, 大屋 裕二, 李 貫行, 風車立地点近傍に発生する地形乱流の高解像度LES, 日本風力エネルギー協会誌, Vol.34, 通巻93, pp.121-126, 2010
- [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, 烏谷隆, 大屋裕二, 九州大学伊都キャンパスにおける流体力学モデル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, 九州大学応用力学研究所所報, 第138号, pp.41-54, 2010