風車のシミュレーション

Simulations of Wind Turbines

荒川　忠一*、　飯田　誠**
*東京大学大学院情報学環　　**東京大学大学院工学系研究科

Chuichi Arakawa and Makoto Iida
*University of Tokyo　　**University of Tokyo

E-mail:arakawa@cfdl.t.u-tokyo.ac.jp

１　はじめに

風車は成長しつつある。ここ数年世界規模では風車が毎年30%の割合で増え、設備容量は2700万ｋＷとなり、これは原子力発電の27基に相当している。遅ればせながら、国内でも北海道・東北を中心として30万ｋＷに達するようになってきた。また、発電に用いられる風車は大型化が進んでいる。標準的な大きさは１MWの水平軸プロペラ風車であり、現在、4.2MW風車としてプロペラ直径が110mを越すものも製作されつつある。

本稿では、これら風車の発展の一助となっている様々なシミュレーション技術を、プロペラ風車の空力シミュレーションを中心として紹介する。風車設置地点の選定に重要な影響を与える風況シミュレーションについては、本号の村上らの解説を参考にされたい。また、経済シミュレーションとデザインいついても言及し、風車研究の新しい流れについても紹介する。

２　プロペラ風車の空力シミュレーション

２－１　CFD解析の背景

従来、プロペラ風車の設計では、回転運転中の性能や荷重を予測するのに翼素・運動量理論（Blade Element and Momentum Theory: BEM）が多く利用されてきた。BEMは、ロータ回転面内での誘導速度を軸対称性の仮定をするなどの単純化を行い、また誘導速度を半経験的な手法を用いて見積もることで、設計点付近で非常に精度良く性能や荷重を予測することができ、計算時間も短い。しかしながら、BEMは2次元翼型の性能データを利用して解析を行う方法であるため、風洞試験などで取得したデータが必要であること、3次元流れ場の評価があいまいであること、翼端渦の影響を経験的に導入しなければいけないことなどの問題点を抱え、非設計点での性能評価を困難にしていた。

ナビエ・ストークス方程式を直接的に解く方法（CFD）は、近年のコンピュータ技術の発達により、高速かつ高精度に解析が行えるようになってきた。CFD計算コストは計算時間や格子解像度によるが、BEMに比較すると未だ高価なものである。しかし、非設計点での性能予測を行う場合や新たな翼型形状をもつブレードの性能予測を行う場合には、CFDは風洞試験

©日本流体力学会

やフィールド試験を行う必要がなく、BEM に比較して安価且つ短時間で解析を行うことが可能である。通常、風車は変動する自然風況下で運転されるため、しばしば非設計点で運転される。特に、日本の風車サイトは Imamura[1]らが示すように複雑な流れ場が取り巻き、設計点でよりもむしろ非設計点での運転が多い。このような背景のもとに、プロペラ風車を対象にした著者らの CFD 解析の一例を次節において紹介する。

一方、Navier-Stokes 方程式を解くときに渦点法と呼ばれる解析手法が便利な場合がある。速度差を渦点で表現し、境界条件を利用してその強さと位置を求め、流れ場をシミュレーションする手法である[2]。長所としては、計算時間が小さいこと、前縁剥離などの大規模剥離があるときの流れ場を比較的容易に計算できることである。短所としては、剥離位置予測などの詳細な数値計算の信頼性について、必ずしも評価を得ているとは言えない。しかし、計算時間短縮およびプロペラ伴流のタワーとの干渉などについて、Navier-Stokes 方程式の直接的な解法に対して優位な面もあり、将来はそれらの複合シミュレーションも面白いと判断される。

２－２　CFD 解析の実際

著者らの解法では、これまでのジェットエンジンなどの解析手法を踏襲する観点から、擬似圧縮性解法を用いた。擬似圧縮性解法は、Chorin[3]が考案した連続の式に圧力の時間変化を加えた手法で、定常解を得たとき、圧力の時間変化項は自動的に消滅する。また、本研究では第１段階として定常解を求めることを目的としているため、翼面に固定した座標系である回転座標系を用いた。また、時間進行にはオイラー陰解法を用い、対流項の離散化には、三次精度の風上差分、Harten の TVD スキームを用いた[4]。乱流モデルには、k-ε モデルの低レイノルズ数型の Launder-Sharma モデル[5]を適用した。

従来、全解析空間を一つの格子で風車周りの流れを解析した経験があるが、その収束性は非常に悪かった[6]。この格子での解析は風向・風速の変化に十分対応できないなどの問題点を多く抱えていた。さらに風車は通常外部流としての計算が要求され、その外部境界条件として一様流れを課すには、非常に大きな計算領域を取る必要がある。特に非設計点においては、後流が複雑な挙動を示し、収束性が悪化することなどが考えられた。本研究では、これらの問題を克服するために、重合格子法を利用した。重合格子法を用いることで、風向・風速の変化はブレードに影響の低い最外領域で境界条件を変化させることが可能で、翼周りに細かく、ブレードから離れた領域では格子を粗くするといった効率のよい格子を配置することができ、より多くの計算領域をとることができた。また重合格子法を用いることで、格子配置の変化や風向・風速の変化に対応できるようになった。

具体的な検証例として、Vermeer[7]らによる実験を採用した。図 1 は、Vermeer らの小型実験風車の概略図を示す。図から分かるように、通常風車を固定するタワー部分の影響が小さい設計となっている。流入する風速は 5.0m/s と固定し、回転数を調整することで、周速比を変化させている。回転半径は 0.6m である。今回の計算では、周速比 λ=5, 6, 6.75, 7.5, 8.25, 9 の 5 種類の計算を行った。実験における最高効率を有する周速比は λ=7.5 で、このとき Tip での翼弦長、周速をそれぞれ代表長さ、代表速度とするときのレイノルズ数は、1.6×10^5 である。

©日本流体力学会

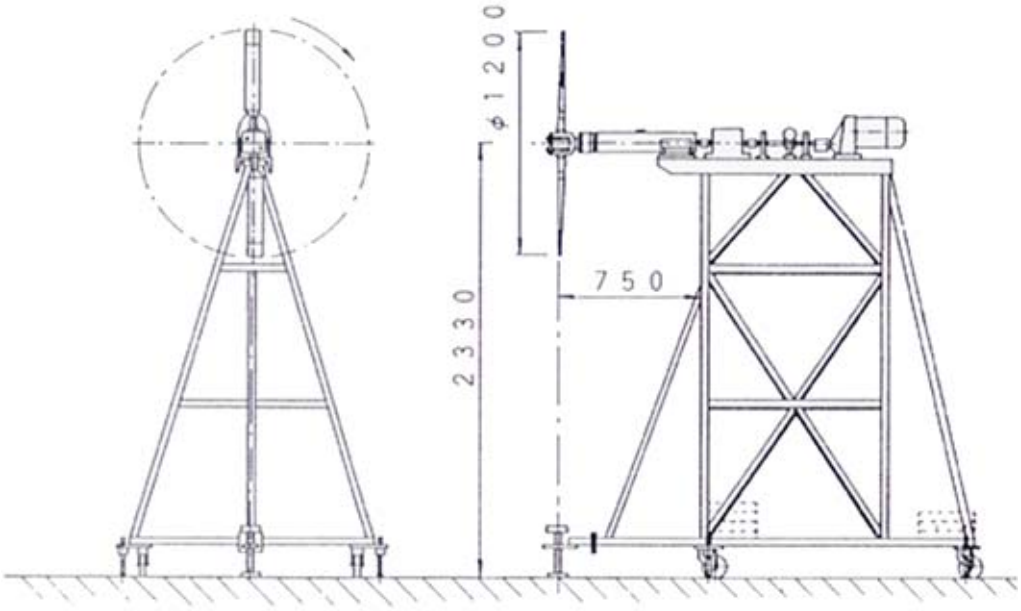

Fig. 1 The small wind turbine for wind tunnel test

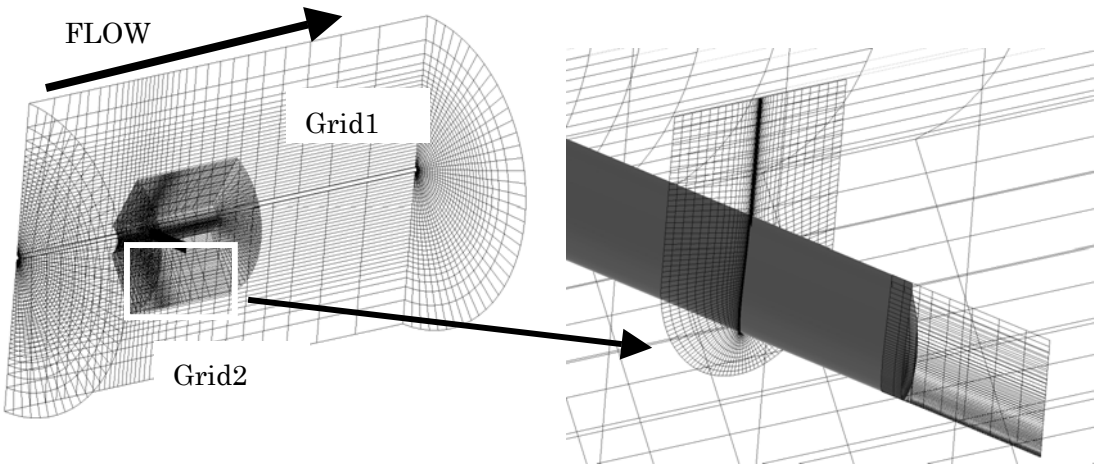

Fig. 2 Overset grid system in the wind turbine and its enlargement around blade

図 2 は計算格子を示す。主流流れを解析する格子は、ブレード前方に直径の 2 倍、後流方向に 10 倍、半径方向に 5 倍の領域をとり、ブレード近傍に格子を集中させた。ブレード周りの格子は C 型格子を用い、その計算格子点数は 173×35×48（流れ方向×スパン方向×壁面垂直方向）である。さらに主流の計算格子とブレード周り計算格子との格子間隔差による補間の不安定性を減らすために、中間格子を生成して各領域間の物理量の補間をスムーズに行えるようにした。全ての格子点数の合計は、約 80 万点である。計算に使用した大型計算機は、経済産業省産業技術総合研究所内設置の HITACHI SR8000 の 3 Node を利用して計算を行った。収束までの計算時間は、およそ 3 時間程度である。

©日本流体力学会

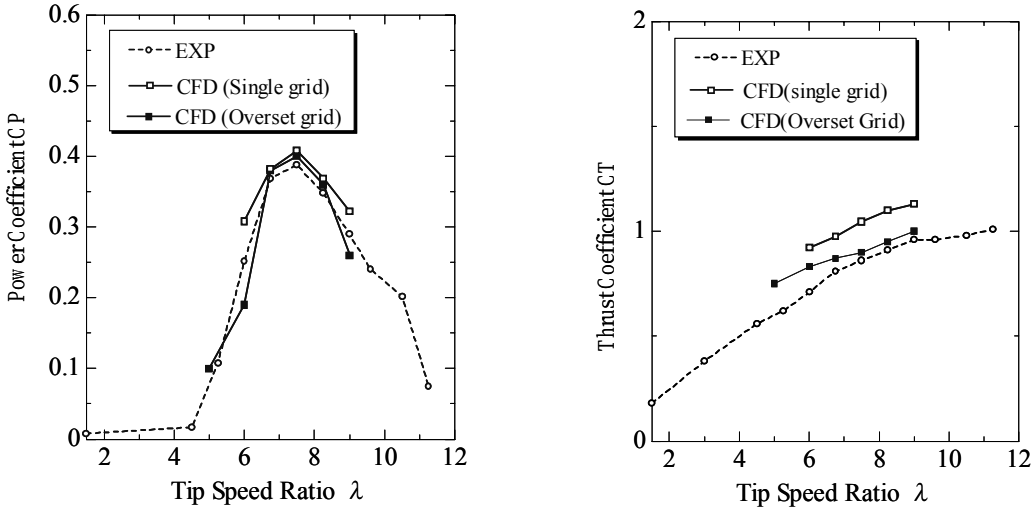

Fig. 3 Power and Thrust coefficients of small wind turbine

図 3 は小型風車の性能曲線を示す。左図はパワー係数 CP-周速比λを、右図はスラスト係数 CT-周速比λを示す。図には、ブレード周りのみに格子を配置した単一格子で計算を行った結果[6]、重合格子で全領域計算を行った結果、そして Vermeer らの実験結果[7]の 3 種類の結果を併せて表現した。図より明らかなように、最大効率付近(λ=6.75～7.5)では、単一、重合格子ともに非常に良く一致している。これは、翼面上流れが大規模な剥離現象が存在せず、流体力学的バランスがとれ安定的に流れていること、また風車のタービン後流があまり影響しないことを示している。設計点に近い状態では、解法の差はあまり無い。しかし、最大効率点を離れると解法の差が顕著に表れている。全体を通して、重合格子を用いた結果が実験値と非常に良い一致を示しており、本数値解析の妥当性と大きな計算領域の必要性が確認できた。単一格子の解析結果は、全体を通してパワー係数およびスラスト係数を過大評価していることがわかる。

次に風車周り流れを詳細に検証する。図 4 にはλ=6.0 におけるブレード周りの流れ場の様子を示した。ハブ付近で流れが剥離し、ブレードの後流で渦を形成している。また翼端付近で強い翼端渦が流出している様子を鮮明に捕らえることができた。

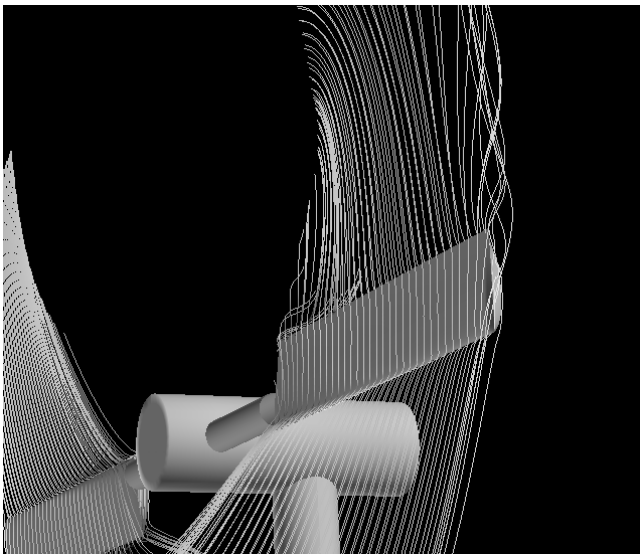

Fig.4 Stream lines around the blade

©日本流体力学会

２－２　CFD 解析のまとめ

小型プロペラ風車の流れを、Navier-Stokes 方程式を用いた数値解析でシミュレーションした一例を紹介してきた。風車の数値解析では、タービン直径の 10 倍以上の解析領域が必要とされ、また変動する風向・風速についても考慮する必要がある。このような自然界の複雑な条件において、重合格子法を用いた解析をおこない、設計点のみならず幅広い周速比で実験結果と非常に良い一致を得ることができた。

ここに紹介した CFD 解析例の他に、デンマークの RISO 研究所において Sorensen らが遷移を含めた回転プロペラ周りの流れを数値解析し、完全乱流よりも良い結果を得ている[8]。また、アメリカ NASA の研究所において、圧縮性流れのシミュレーションコードを直接的に応用することにより、回転翼の流れ場を詳細に解析することに成功している[9]。今後は、タワーとの干渉、風況シミュレーションとの組み合わせなどを含めて、応用範囲の広いシミュレーションが期待される。

３　風車経済シミュレーションとデザイン

将来の風車普及を予測するために、筆者らの手でエネルギー経済のシミュレーションを試みてきた。従来のエネルギーに関する経済シミュレーションは、電力会社系の研究所あるいは特定の目的を有した研究者が行うことが多く、風車に関しては十分な情報を含まないことが多かった。そのため、風車が冷遇されてきた面もあるため、洋上風車などの最新の情報を取り込みながら、風車研究者自らが経済シミュレーションを行うこととした。

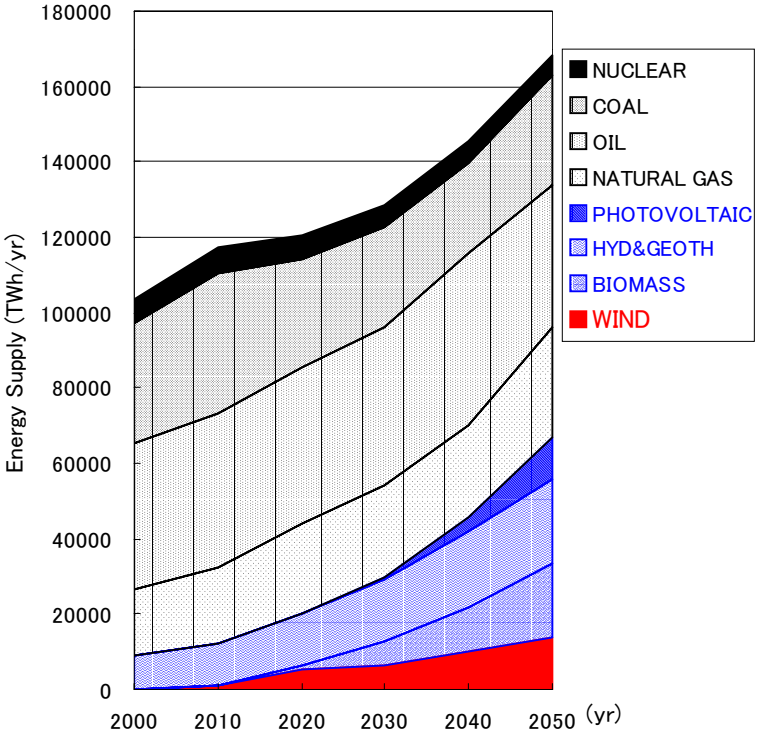

Fig.5. Prediction of wind turbine popularization in energy-economy simulation

東京大学山地憲治教授らが開発した「New Earth 21」をもとに、洋上風車などの新しい情報を加えながら、風車を中心に据えた 2050 年までのエネルギー・シミュレーションを行った。図 5 に示されているのは、「COP３（京都議定書）を遵守する」「原子力発電の新設はない」等の仮定のもとに予測した結果であり、50 年後には総エネルギーの 8%を風車が賄いうることになる。「京都議定書」により、2010 年から化石燃料の使用量が制限されることになるが、それを補うかたちで再生可能エネルギーの利用が伸びる。

国内でエネルギーの 8%を風力発電で賄うためには、1MW の風車を 10 万台設置する必要がある。1MW クラスの風車は、タワーの高さが 50m、プロペラの直径が 50mを超え、言わば大型建

©日本流体力学会

築物である。これらが 1 都道府県あたり 2000 台必要となり、大型風車が林立する計算になる。そこで、大規模な風車の普及が進む前に、それぞれの地域に受け入れやすいデザインを真剣に検討する時期であると判断される。

ヴァナキュラー風車とは、それぞれの地域の地形や景観と融和し、その地域に固有の文化や伝統を表現しうるデザイン性の優れた風車を意味している。「ヴァナキュラー」は、直訳すれば「風土性・地域性」であるが、「風土」という言葉の語感が、なにか古めかしく固定化されたものを喚起しかねないこともあり、あえてカタカナ表記を採用した。

現在、東京都のお台場地域に風車を建設するプロジェクトが進行している。研究室の大学院学生が、研究成果をもとに「東京湾に風がある、風車を中心とした環境公園を創ろう。」と石原知事の前でスピーチを行ったことに端を発している。来年 3 月には、お台場南側の埋立地に、東京都区内としては初めての大型風車 2 台が稼動することになっている。電力会社に売電するのみならず、都会型の風車としてライトアップし、環境教育や都民のメッセージを伝える役割を果たす。幸いにも、羽田空港への航空路の真下にもあたり、そのメッセージ性が遺憾なく発揮されることが期待されている。

お台場地域南側には、さらに広大な埋立地域と海が広がっている。筆者らは、東京という大都会と、エネルギー・環境の源泉である海を結びつけた風車プロジェクトを展開している。つまり、埋立地には「風車を中心とした環境公園」を、海には 10MW の超大型風車の研究開発、そしてデザイン性の優れた東京らしい風車の提案を目指している。

これらの情報をもとに、ヴァナキュラー風車の具体的なデザインを心がけている。図 6 は風車環境公園を想定してデザインした「風のベンチ」であり、風が弱いときには風車の真下にあるベンチに座り、思索に耽ったりすることも考えられる。図 7 は海岸に設置することを想定したものであり、防風林である松の幹の曲線をモチーフにしている。東京あるいはそれぞれの街にふさわしい風車のデザインは何なのかということを、景観シミュレーションあるいは前述の様々なシミュレーション技術を駆使して表現し、社会・文化といった様々な観点から研究を進めていきたいと筆者らは意気込んでいる。

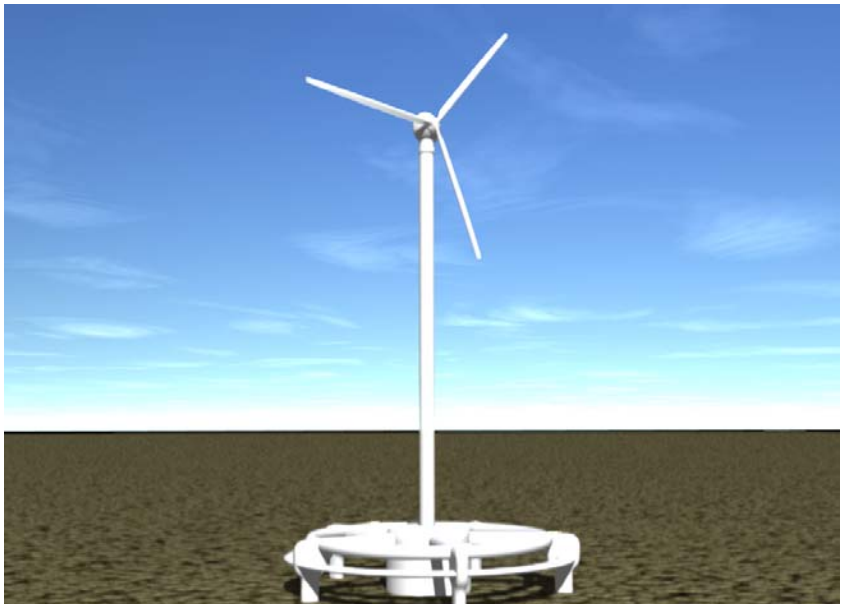

Fig.6 Design of vernacular wind turbines for environmental park in Tokyo by Seiichi Ariga

©日本流体力学会

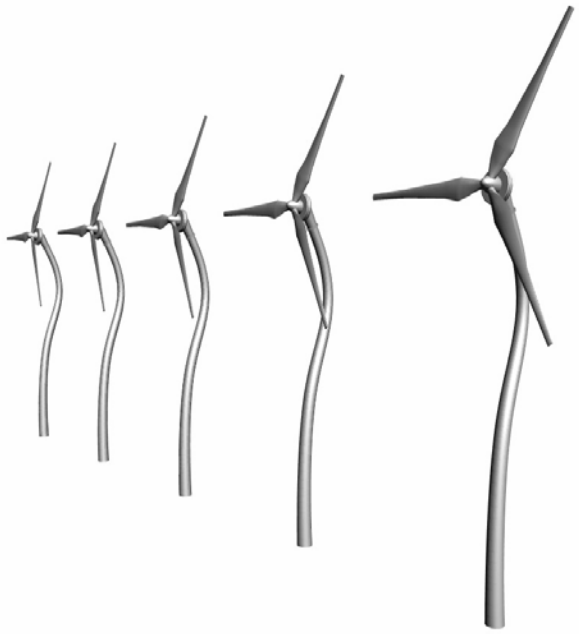

Fig.7 Design of vernacular wind turbine for seashore area by Professor Seiichi Onobori in Tokyo National University of Fine Arts

参考文献

(1) H.Imamura, H.Matsumiya and K. Tsuchiya,　Wind Measurements and Performance Analysis of a WTGS in Complex Terrain, Proceedings of International Conference on Fluid Engineering, 3(1997), 1557-1561.

(2) 小島　成，亀本喬司，渦法による水平軸風車翼周りの非定常流れ解析，第 14 回数値流体力学シンポジウム，E10-2, (2000).

(3) Chorin, A.J., A Numerical Method for Solving Incompressible Viscous Flow Problems, J. Comp. Phys. 2(1967), 12-26.

(4) Harten, A., On a Class of High Resolution Total-Variation-Stable Finite-Difference Scheme, SIAM Journal Numerical Analysis, 21-1(1984), 1-23.

(5) Launder, B.E. and Sharma, B.I., Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of a flow near a spinning disk, Letters in Heat Mass Transfer, 1(1974),131-138.

(6) 飯田 誠・荒川 忠一・松宮 煇，　擬似圧縮性解法による三次元風車の数値解析，第 12 回数値流体力学シンポジウム講演論文集, (1998),525-527.

(7) Vermeer, N-J. and van Bussel, G.J.W.,　Velocity Measurements in the Near Wake of a Model Rotor and Comparison with Theoretical Results, Proceedings of European Community Wind Energy Conference,(1980),218-222.

(8) Jess A. Michelsen, Niels N. Sorensen, Current Developments in Navier-Stokes Modeling of Wind Turbine Rotor Flow, Proceedings of the European Community Wind Energy Conference, (2001), 367-372

(9) Earl P.N. Duque, Wayne Johnson, C.P. vanDam,　Regina Cortes and Karen Yee, Numerical Predictions of Wind Turbine Power and Aerodynamic Loads for the NREL PHASE II Combined Experiment Rotor, AIAA-2000-0038, (2000).

©日本流体力学会