

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月23日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560164

研究課題名（和文）次世代風車設計・開発用の流体－振動連成解析ツール構築

研究課題名（英文）Development of Fluid-Oscillation Coupled Analysis tool for Design of Wind Turbines in the Next Generation

研究代表者

長谷川 豊 (HASEGAWA YUTAKA)

名古屋工業大学・工学研究科・教授

研究者番号：20198732

研究成果の概要（和文）：年々大型化する水平軸風車においては、風車構造系の共振周波数と流体加振周波数（風車ロータ回転数）は近づいている。その結果、共振の危険性が增大すると共に、振動振幅増大に伴う疲労寿命短縮の可能性が生じている。本研究では、風車構造系の振動と風車周り流れ場の相互作用が考慮できる流体－構造連成解析モデルを構築すると共に、風車翼の振動ならびに流入風の乱れが風車翼負荷、特に披露負荷に及ぼす影響を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：The typical size of the horizontal axis wind turbines is increasing in these decades, which brings about the closed values of the eigen frequencies of the turbine structures and the rotor rotation frequencies. It may lead to the resonance occurrence as well as the decrease of the turbine life time due to the increased amplitudes of the turbine oscillation. In the present study, we have developed a “fluid-oscillation coupled analysis model” which can be a design tool for the large wind turbines. We also examined the effects of the blade oscillation and the turbulence characteristics of the inflow wind on the fatigue loads of the wind turbine.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：流体機械、風車、振動、連成解析、乱流、疲労負荷、数値解析

1. 研究開始当初の背景

(1) 大型風力タービンロータの設計時に、ロータ翼に働く変動荷重の見積もりにおいて、流体系と構造系との連成振動解析ならびに乱流特性を含めた流入風条件を考慮することは不可欠である。

(2) 風力タービンは現在に至るまで長年に亘りスケールメリットを達成した大型化が継続している。次世代の10～20MW級超大型風力タービン（ロータ直径140～200m程度）では、空力、重力に基づく励振周波数が構造系固有振動数を上回るため、タービン設計・開発には柔構造設計手法の確立が不可欠

であり、そのための要素技術として流体-振動連成解析ツールの構築は必須である。

2. 研究の目的

以下の項目につき研究を遂行することにより、次世代風車設計・開発に必要な流体-振動連成解析ツールの構築を目指すと共に、我が国の風環境（乱流特性・突風等を含めた風の特徴）への適用可能性を検証する。

(1) 流体系と構造振動系との連成解析モデルの構築：ロータ翼とナセル、マストを含むタービン構造系振動モデルとタービン周り流れ場解析モデル（空力解析モデル）につき、連成解析モデルを構築すると共に、構造系の高次・三次元振動モデル化、流れ場解析モデルの高速化・高精度化を行い、モデルの最適化を図る。

(2) 小型風力タービン実験結果との比較検証による連成解析モデルの妥当性評価：小型風力タービンの実験結果を連成解析結果と比較することにより、連成解析モデルの妥当性を評価・検討する。

3. 研究の方法

本研究は平成 22～24 年度の 3 年間で、以下の 2 項目につき研究を実施した。

(1) ロータ空力特性・構造系振動に関する数値解析：ワークステーション、パーソナルコンピュータを利用して以下の数値解析を実施した。

①タワーの存在を含めた空力解析モデル構築：渦格子法と渦法に基づき解析モデルを構築し、タワーの存在により流入風に及ぼすポテンシャル干渉に伴う影響を考慮することとした。

②流入風モデル構築と空力解析モデルとのリンク：IEC 提案の乱流モデル(Veers モデル)に基づき風車への流入乱流風の数値モデルを構築すると共に、空力解析モデルとリンクさせた。

③ロータ構造系振動解析モデル構築：ロータ振動にロータ軸方向と回転方向のたわみモードを考慮し、マルチボディ・ダイナミクス法に基づきモデル化した。

④構造系振動解析モデルと空力解析モデルのリンク：①～③で確立した 3 つのモデルをリンクさせて連成解析モデルを構築した。ここで、空力解析モデルと構造系振動解析モデルは弱連成させ、相互の影響（解析結果）を引き渡した。

(2) 小型風力タービン実験結果との比較検証：小型風力タービン（NREL 風洞風車）の実験結果を連成解析結果と比較することにより、空力解析モデル・振動解析モデル・連成解析モデルの妥当性を評価・検討した。

4. 研究成果

(1) 本研究の主な成果

本節では、本研究で構築した解析モデルを説明すると共にその妥当性評価する。また、流入風の乱流特性が翼に働く疲労負荷に及ぼす影響についても紹介する。

①空力解析モデル：HAWT ロータ翼に働く空力負荷は、パネル法に基づく渦格子法を用いて求めた。パネル法では、図 1 に模式的に示すようにロータ翼表面を四辺形パネル要素に分割し、パネル要素が持つ空気力学的効果を循環量 Γ の渦糸を四辺に持つ格子パネルにより表す。各パネルにおいて未知数である Γ はパネル撰点における Neumann 型境界条件を満足するように求める。翼面周りの循環量 Γ は Kelvin の定理により保存され、時間進行により風車後流に渦パネルとして翼後縁から放出される。HAWT のような回転翼の場合には、その軌跡は螺旋を描く、渦パネルの移流には、後流渦パネルの位置を時間ステップごとに各パネル接点の局所速度で移動させる自由後流モデル（Euler 法）を用いた。

パネル法は非粘性を仮定しているため、粘性の影響は 2 次元翼型静特性データにより考慮する。また、迎角の変動に対して生じうる動的失速の影響は、ONERA 法を用いることで考慮する。風車タワーがロータ翼に及ぼす影響を考慮するために、タワー周りの流れ場をパネル法により表現した。流れ場は円柱周りの非粘性流れとして単純化し、円柱後流の渦の影響は無視した。

②流入風乱流モデル：乱流流入風の生成には、Veers モデルを用いて、各タイムステップの全ての翼パネル撰点位置での非等方 3 次元乱流成分の生成を行った。生成時に用いた乱流スペクトル、コヒーレンス関数は、IEC 規格により推奨されている Kaimal スペクトルモデル、指数型コヒーレンスモデルをそれぞれ用いた。

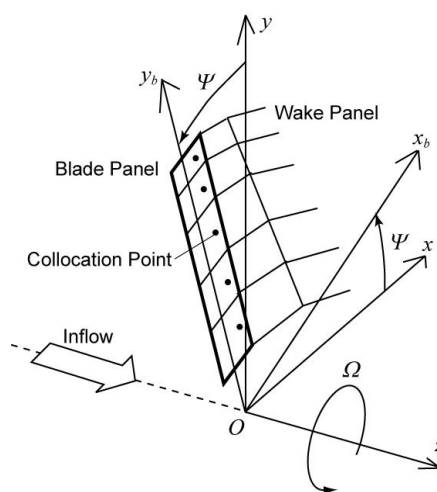


図 1 座標系と後流渦パネル

③構造系振動モデル：本研究では、剛体ボディとヒンジスプリングの多自由度系によりロータ翼を表現するマルチボディダイナミクスにより、ロータ翼のたわみ振動を扱った。対象としたたわみ方向は、回転軸方向（フラップ方向）と回転方向（エッジ方向）であるが、以下では簡単のため、フラップ方向についてのみ振動モデルを概説する。

ロータ翼を n 個のボディに分割し、それぞれのボディがヒンジにより連結されているとすると、 i 番目のヒンジに関する拘束方程式は次式のようになる。

$$\Phi_i = \begin{cases} z_i - z_{i-1} - l_{Li} \sin \theta_i - l_{Ui-1} \sin \theta_{i-1} \\ y_{bi} - y_{bi-1} - l_{Li} \cos \theta_i - l_{Ui-1} \cos \theta_{i-1} \end{cases} = 0 \quad (1)$$

ここで、 z_i 、 y_{bi} 、 θ_i はそれぞれ i 番目のボディの重心の z 座標、 y_b 座標、ボディのロータ面からの傾きを表している。また、仮想仕事の原理より、次式が得られる。

$$M\ddot{q} + \Phi_q^T \lambda = Q^A \quad (2)$$

ここで M は質量マトリクス、 q は一般化座標、 Q^A は一般化作用力である。式(1)、(2)を基に各ボディに働く加速度を計算し、ロータ翼の運動を求める。なお、本研究ではロータ翼に生じる構造減衰は無視している。

風車周り流れ場と構造系振動の相互作用を考慮するため、空力解析モデルと構造系振動モデルとの弱連成解析モデルを構築した。空力解析結果より、翼に働く流体力を求めこれを振動解析モデルにて外力の一つとする。一方、振動解析モデルにより得られた翼の変位ならびに振動速度は、翼形状の変形と翼表面上の Neumann 型境界条件により考慮した。

④計算条件：計算対象としたのは、米国の NREL (National Renewable Energy Laboratory) により行われた風洞実験において使われた半径 $R=5.029$ [m]、翼枚数 2 枚のモデル風車である。この風車を対象に連成解析を実施し、実験結果との比較を行った。

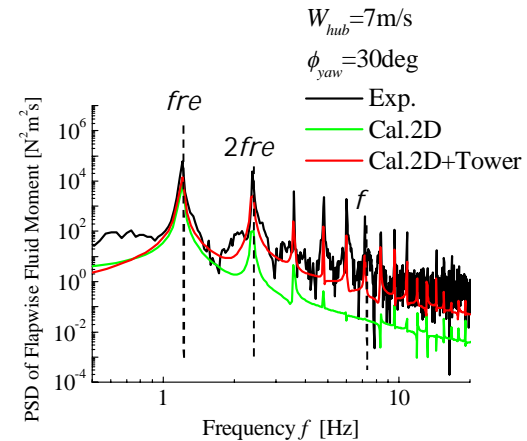
この NREL モデル風車は発電用の大型風車に比べると随分と小さいため、流入風乱流が翼疲労負荷に及ぼす影響解析を実施する際には、乱流流入風の流れスケールに対する風車スケールを実際の大型風車に合わせ、風車の大きさを実物の 5 倍の半径 $R=25.145$ [m] にスケールアップして計算を行った。この際、風車の 2 次元翼型等の幾何形状はそのままにし、同じ流入風速に対する周速比を一致させるために、ロータ回転速度を 1/5 とした。また、ロータ翼の材料や構造も同じと仮定している。

HAWT ロータ負荷解析により得られた負荷変動から、Rainflow 法により含まれる変動振幅 ΔM_i とその出現回数 N_i をカウントし、それを基に Miner 則によりその疲労ダメージを計算し、さらに、この総疲労ダメージと等しい疲労ダメージを生じさせるロータ回転周期の一定負荷変動振幅として定義される等価疲労負荷 S_{eq} を求め定量的な評価に用いた。

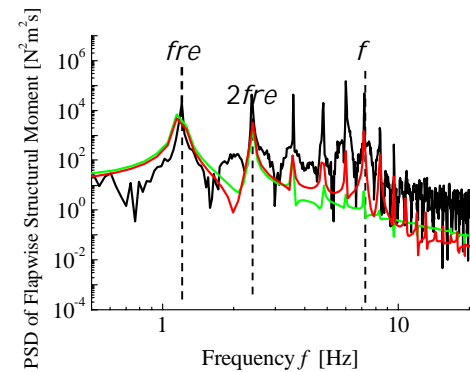
$$S_{eq} = \left(\frac{\sum_i \Delta M_i^m N_i}{N_{rot}} \right)^{1/m} \quad (3)$$

ここで、 N_{rot} は負荷変動の時系列データ長に対応する風車回転回数、 m は S-N 曲線の傾斜の逆数で、本研究では GFRP を想定し $m=10$ としている。解析はロータ 20 回転分を行い、後流渦が十分に形成されたと考えられる最後の 15 回転分のデータを疲労負荷解析に用いた。

⑤連成解析モデルの妥当性検証：風速 $W=7$ m/s、流入偏差角度 30deg の運転条件において風洞風車に働くフラップ方向変動負荷のスペクトルを解析し、図 2 において実験結果と比較する。(a)には流体力によるモーメントを翼



(a) 流体力モーメント



(b) 構造負荷モーメント

図 2 フラップ方向変動負荷のスペクトル

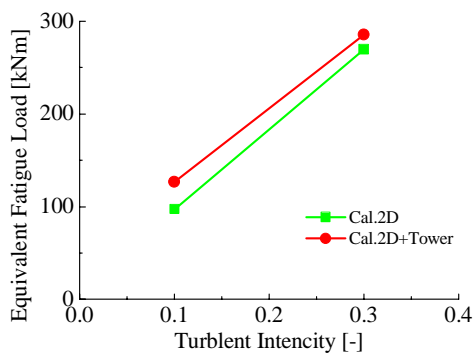
根部で評価した値を示し、(b)には構造系に働く翼根部周りの負荷モーメントを示す。図中には実験結果（黒線）と共に、タワーの影響を考慮しない解析結果（緑線）と考慮した解析結果（赤線）を比較する。

図2(a)より、タワーの影響を考慮することによりフラップ方向の流体力モーメントの解析結果は実験結果により近付き、タワーの影響を考慮する必要が示される。また、図2(b)に示す構造負荷モーメントにおいても、特に振動系の共振周波数付近にて、タワーの影響を考慮することにより解析結果の妥当性が改善されている。

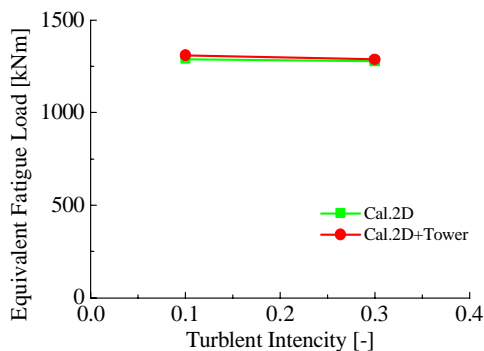
ロータ回転方向のたわみ負荷変動に関しては（図省略）、翼に働く重力の影響が支配的であり、流体力の影響が小さいため、タワーの考慮有無による解析結果の違いは小さいことが分かった。

なお、図2中のスペクトルに現れる複数のピークは翼回転周波数 f_{re} とその高調波成分ならびに構造系の共振周波数に相当し、それらのピークが実験結果と解析結果で一致することからも連成解析モデルの妥当性が検証できる。

⑥流入風乱れが疲労負荷に及ぼす影響：風速 $W=7\text{m/s}$ 、流入偏差角度 30deg の運転条件において、風洞風車の5倍に拡大した風車を対象に連成解析モデルを用いて疲労負荷解析を行った。



(a) フラップ方向変動負荷



(b) エッジ方向変動負荷

図3 流入風乱れの疲労負荷への影響

流入風の乱れ強さ（風速変動の標準偏差を平均風速で割ったもの）ならびにタワーの存在が等価疲労負荷に及ぼす影響を図3に示す。ここで、(a)はフラップ方向負荷変動、(b)はエッジ方向負荷変動に基づく疲労負荷である。

図3より、流入風の乱れ強さはフラップ方向負荷変動に大きな影響を及ぼし、等価疲労負荷は乱れ強さにほぼ比例することが分かる。一方、エッジ方向負荷には乱れ強さの影響は見られない。タワーの影響もまたフラップ方向にのみ現れ、特に乱れ強さが小さい場合には、タワーが疲労負荷に及ぼす相対的な影響が大きくなっている。

(2) 得られた成果の位置づけとインパクト

欧米ではアメリカ国立再生可能エネルギー研究所(NREL、米国)と Garrad Hassan & Partners (英国) が、それぞれ FAST、Bladed と呼ばれる連成解析ツールを開発している。使用するロータ空力負荷解析モデルは何れも主に翼素運動量理論(BEM)に基づく2次元準定常解析モデルであり、実際の3次元非定常現象を考慮するために、実験に基づく補正係数等を利用している。それに対して、本解析モデルは渦法に基づくパネル法を用いており、3次元非定常現象を直接取り扱うことが可能である。

また、本変動荷重解析モデルにおいては、流体系と構造系との物理的相互作用を考慮した連成解析を実施している。その結果、例えば翼空力負荷に及ぼす翼振動・翼変位の影響に関して、従来は空力弾性係数、空力減衰係数と呼ばれる経験定数として考慮していたのに対して、本解析モデルではそれらの経験定数は不要となる点で優れている。

(3) 今後の展望

流体-振動連成解析ツールは、次世代の10~20MW級超大型風力タービンを柔構造設計する際の負荷解析ツールとして活用できる。また、本解析ツールは風車構造系に働く変動荷重を低計算負荷で算出可能なため、疲労負荷解析にも有用であり、風力タービンサイズに寄らず疲労寿命予測ツールとしての適用も期待される。これらの成果が、風力タービンの信頼性向上・コスト低減につながるものと期待する。

また、本連成解析モデルの構造系振動モデルにタワーならびに浮体等を加えると共に、波浪等による流体力を外力として加えると、浮体式洋上風車の基礎設計ツールとなる。一方、発電機ならびに電力システムをモデル化し、本連成解析モデルへリンクさせれば、系統連系された風力発電設備の制御システムに関する設計ツールが構築できる。

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① 鈴木博喜、長田孝二、酒井康彦、長谷川豊、輝度分布補間による PIV 計測精度向上 (擬似粒子画像によるフーリエ補間の導入効果の解析)、日本機械学会論文集 B 編、査読有、78 巻-790 号、2012、1248-1259
DOI:http://dx.doi.org/10.1299/kikaib.78.1248
- ② S. Y. Bircan, H. Kamoshita, R. Kanamori, Y. Ishida, K. Matsumoto, Y. Hasegawa, K. Kitagawa, Behavior of heteroatom compounds in hydrothermal gasification of bio-waste for hydrogen production, Applied Energy, 査読有、88 巻、2011、4874-4878
DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.06.031
- ③ S. Y. Bircan, R. Kanamori, Y. Hasegawa, K. Ohba, K. Matsumoto, K. Kitagawa, Microchemical Journal, 査読有、GC-MS ultra-trace analysis of dioxins produced through hydrothermal gasification of bio-wastes, 99 巻、2011、556-560
DOI: 10.1016/j.microc.2011.07.009
- ④ Y. Hasegawa, Y. Takagi, J. Murata, K. Kikuyama, Proc. of ASME-JSME-KSME Joint Fluid Eng. Conference, 査読有、AJK2011-07001、2011、1-6
- ⑤ Y. Hasegawa, K. Narita, J. Murata, H. Imamura, K. Kikuyama, Numerical Study of Aerodynamic Damping Effects on Oscillating Rotor Blade, Proc. of Renewable Energy 2010, 査読有、RE2010, 2010, 1-4

[学会発表] (計 14 件)

- ① 渡邊雅也、鈴木博喜、長谷川豊、牛島達夫、一般座標系コロケート格子を用いた風車翼まわり流れ場の解析、日本機械学会東海支部第 62 期総会・講演会、2013 年 03 月 18 日～2013 年 03 月 19 日、三重大学
- ② 原文哉、長谷川豊、鈴木博喜、牛島達夫、水平軸風車の翼負荷特性に及ぼす翼弾性の影響に関する研究、日本機械学会東海支部第 62 期総会・講演会、2013 年 03 月 18 日～2013 年 03 月 19 日、三重大学
- ③ 佐藤良輔、長谷川豊、鈴木博喜、牛島達夫、ウイングストローク風車翼の空力特性に関する実験的研究、日本機械学会東海支部第 62 期総会・講演会、2013 年

03 月 18 日～2013 年 03 月 19 日、三重大学

- ④ Y. HASEGAWA, Effects of Inflow Wind Condition and Structural Oscillation on Blade Loads of HAWT Rotor, Japanese-Danish Joint Workshop (招待講演)、2012 年 12 月 10 日～2012 年 12 月 12 日、福岡電機ビル
- ⑤ 長谷川豊、谷口祐太、鈴木博喜、牛島達夫、水平軸風車ロータの後流慣性効果に関する研究、日本機械学会第 90 期日本機械学会流体工学部門 講演会、2012 年 11 月 17 日～2012 年 11 月 18 日、同志社大学
- ⑥ Y. Hasegawa, M. Ohira, S. Koga, K. Kikuyama, Blade Loads Analysis of HAWT Rotor by using Fluid-Oscillation Coupled Analysis (Aerodynamic Effects of Turbine Tower), The Eighth KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, 2012 年 3 月 18 日～21 日, Incheon, Korea
- ⑦ S. Koga, Y. Hasegawa, K. Kikuyama, Unsteady Aerodynamic Characteristics of Small HAWT Rotor due to Speed Control, International Symposium on EcoTopia Science 2011, 2011 年 12 月 9 日～11 日, Nagoya Univ.
- ⑧ M. Ohira, Y. Hasegawa, Y. Takagi, Numerical Study on Aerodynamic Characteristics of Wing-Stroke Wind Turbine, International Symposium on EcoTopia Science 2011, 2011 年 12 月 9 日～11 日, Nagoya Univ.
- ⑨ 長谷川豊、風力エネルギー利用における技術課題(招待講演)、東海流体熱工学研究会第 47 期総会・講演会、2011 年 8 月 4 日、名古屋大学
- ⑩ Y. Hasegawa, Y. Takagi, J. Murata, K. Kikuyama, Flapwise and Edgewise Blade Loads Analysis of HAWT Rotor by using Fluid-Oscillation Coupled Calculation Model, ASME-JSME-KSME Joint Fluid Engineering Conference, 2011 年 7 月 26 日～29 日, Act-City, Hamamatsu
- ⑪ Y. Hasegawa, Fluid-oscillation coupled analysis for HAWT rotor blade (招待講演), Asia-Pacific Symposium on Off-shore Wind Energy Technology, 2010 年 11 月 19 日, Mokpo Hyundai Hotel, Mokpo, Korea
- ⑫ Y. Hasegawa, J. Murata, Y. Takagi, H. Imamura, Load Analysis of Flexible Blade for HAWT Rotor, International Symposium on Low Carbon and

Renewable Energy Technology 2010,
2010年11月16~17日、Hotel Lotte
Jeju, Jeju, Korea

- ⑬ 高木勇輔、長谷川豊、村田淳介、今村博、
菊山功嗣、水平軸風車ロータ翼の流体一
振動連成解析（振動モデルに関する妥当
性評価）、日本機械学会第88期流体力学
部門講演会、2010年10月31日、山形
大学
- ⑭ 長谷川豊、成田浩一、古賀信悟、村田淳
介、今村博、菊山功嗣、翼ピッチ角制御・
回転数制御に伴う水平軸風車の空力動
特性、第63回ターボ機械協会総会講演
会、2010年5月21日、東京大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長谷川 豊 (HASEGAWA YUTAKA)
名古屋工業大学・工学研究科・教授
研究者番号：20198732

(3) 連携研究者

鈴木 博貴 (SUZUKI HIROKI)
名古屋工業大学・工学研究科・助教
研究者番号：10626873