

機関番号：12601

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21760718

研究課題名（和文） 大型風車の部分故障診断予測モデル構築

研究課題名（英文） Study of partial failure prognostic model for large wind turbine

研究代表者

飯田 誠 (IIDA MAKOTO)

東京大学・先端科学技術研究センター・特任准教授

研究者番号：40345103

研究成果の概要（和文）：

本研究では、大型風力発電機の故障予測を目的として、風車構成要素各部位のモニタリングと動的解析モデル、マルチボディ連成解析を用いた部分故障診断予測モデルを構築した。本研究のモニタリング装置により、風力発電機の回転による荷重変動計測の健全性を確認するとともに、制御遅れに着目した動的予測モデルが故障を誘発すると考えられる部位の締結状態に起因する変動を検出し、事前に故障の原因を特定することができた。

研究成果の概要（英文）：

The aim of this research is to construct the partial failure prognostic model for large wind turbine. This model consists on real time monitoring system of partial element of a wind turbine, dynamic analysis model and multi-body coupled analysis. This failure prognostic model was able to detect the fluctuation of the axis that was the cause for failure before the failure occurs.

交付決定額

(金額単位：円)

|         | 直接経費      | 間接経費      | 合計        |
|---------|-----------|-----------|-----------|
| 2009 年度 | 2,100,000 | 630,000   | 2,730,000 |
| 2010 年度 | 1,300,000 | 390,000   | 1,690,000 |
| 総計      | 3,400,000 | 1,020,000 | 4,420,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・自然エネルギーの利用

キーワード：風力、新エネルギー、計測工学、予測診断、電力工学

## 1. 研究開始当初の背景

地球温暖化防止などの環境問題が話題となる世界において、風力発電は、商業レベルとして最も有力なエネルギー資源として、成長を続けている。図1は世界の風力発電設備容量の推移で、2007年末でおよそ100GWの風力発電が設置され、自然エネルギーのトップランナーとして大きな役割を果たしている。

このような風力発電の伸びとともに、風力発電の大量導入によるいくつかの問題点が指摘されている。例えば、騒音問題、鳥問題、

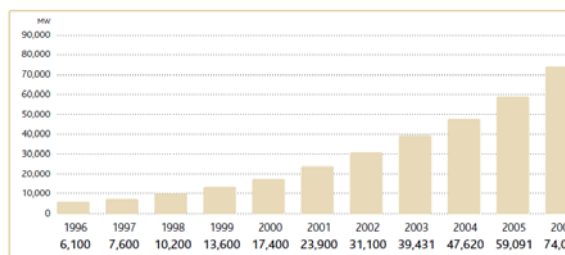


図1 世界の風力発電設備容量の推移

(Global Wind Energy Congress, 2008)

電力系統安定性の問題、そして故障事故の問題である。研究代表者は、風力発電電力系統安定化を目的とした NEDO 委託事業「気象予測に基づく風力発電量予測システムの開発」プロジェクト（以下気象 PJ）に携わり、特に風力発電機本体の予測技術を研究し、非常に有用な成果を挙げてきた。このような「予測」に関する研究は、世界的にも注目が高い分野で、EU は 2000 年頃から年間数億円をかけて、POWOW プロジェクト (<http://powwow.risoe.dk/>) を代表としたいいくつかの予測に関するプロジェクトを進めている。このような「予測」に関する研究は、気象 PJ で取り上げた発電量予測に関するもののみならず、各部位の故障診断や早期の部品調達のための風車本体の状態予測にも注目が集まりつつある。

風車は自然風況下で発電を行うため、入力となる風が常に不定で、また乱流・突風などによる運転エラーが発生する。これにより歯車や軸が破損し、故障や事故を誘発する。また、故障・事故発生後には部品調達などの作業を伴うため、運転停止する期間が多くなり事業のリスクが高くなる。このような問題があるため、風車の状態予測への関心は高い。風車本体の各部位の状態予測が可能になると、これらの故障事故によるリスクが激減することはもちろんのこと、適切な運転による設備利用率の増加にも期待が寄せられる。

## 2. 研究の目的

風力発電機の挙動モデリングでは、厳密な情報が少ない多機種・多地点(風況)に及ぶ風力発電機の周辺情報をどのように解析し、モデリングしていくかが重要となる。過去の研究および経験から、風情報や風車情報のみ、または風車モデルシミュレーションのみでは、風車本体の各部位における挙動を予測することは、不確かさが多分に含まれる。

本研究では研究期間内に、過去、故障事故などで蓄積してきたデータおよび現在も続けているデータの再整理、そして本研究で予定している各部位の詳細計測データにもとづく挙動の解析を行う。また、多様な風力発電機に対するモデリング理論の確立、検証をおこなう。

本研究を通じて、通常・危険を判断できるような予測モデル構築を目指す。

## 3. 研究の方法

風力発電機の故障箇所、各部位の挙動を取得するため、SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition; 監視制御/データ収集システム) データ以外にも各部位を計測している研究が見られる。計測機器については、ひずみセンサ、変位計、加速度センサ、温度センサなどを主に使用している。モニタ

リングシステムについては、ISET

(<http://www.iset.uni-kassel.de/>) の研究が興味深い。彼らは、2002 年頃からモニタリングに関する研究、データ取得を行っている。ISET 以外にも、Endrenyi らの研究では、個別の部位のモニタリング方法について述べられている。Endrenyi によると、風力発電機のモニタリングにおいて重要な点は、モニタリング方法のみならず、モニタリング間隔がそれぞれの部位によって異なる点が挙げられている。このモニタリング間隔の違いなどは、コンディションモニタリングモデルの設計、故障診断モデル構築のために重要となる。

一般的には、SCADA データに加えて、モニタリング用センサは、①ハブ変位、②③軸受変位、④心力、⑤シャフト変位、⑥⑥伝達系変位、回転数を計測している。サンプリングレートは数十～数 kHz である。これらを基礎実験より取得しているデータを参照して、モニタリングモデル、故障診断モデルに渡している。

コンディションモニタリングモデルは、前述のモニタリングをするとともに、故障診断につなぐ。代表的なモニタリングモデルとしては、各モニタ情報をもとに、AR, AR-X, RMS などの一般的な統計モデルを使用することが多い。近年では、McMillan らは、それぞれの各部位をモニタリングするとともに、マルコフ連鎖モデルを使用し、各部位の接続を重視したモニタリングモデルを提案している。

彼らはギアボックスの故障率を約 15%低減することに成功している。各部位の詳細なモニタリングは、制御を高度化することができる。

図 2 は、制御技術によって故障率を改善することができることを示している。各部位の高度なモニタリングシステムの開発、効率化は、風力発電設備の故障率を減らすだけでなく、稼働率、信頼性を向上していくことが可能となる。

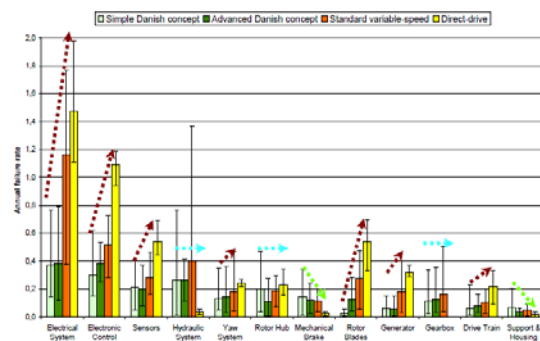


図 2 制御方式の違いによる故障率の改善

[Faulstich ら]

本研究では、図 3 に示す風車の設計から運

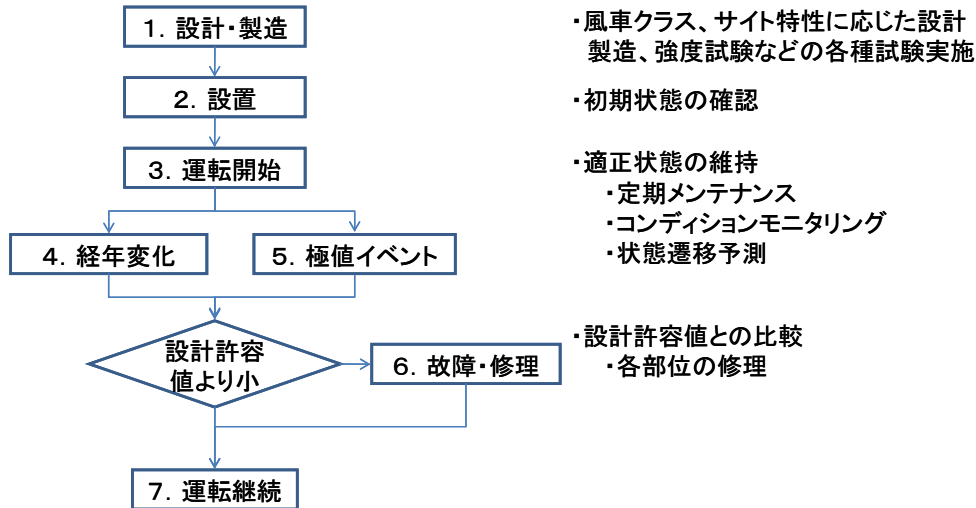


図3 風車の故障診断モデルのフローと実際の利用法

転状態における維持管理に関するイベントフローを用いて、設計条件と故障が発生する状態についてシステムを設計し、データを取得する。「1. 設計・製造」フェーズでは、実翼試験などの各種部品の特性試験を行い、各部品の基本特性について、データ収集を行った。「2. 設置」においては、それぞれの締結が、設計モデル、本研究で使用する動的荷重変動モデルと同一の状態であることを確認する。「3. 運転開始」以降、各種ウィンドファーム設置情報より、サイト特性に応じた制御、締結トルクなど設計時不確かだった部分に関する調整を行った。その後、2010年度に実施した運転期間試験では、各部位が適切に機能していること、故障につながる状態でないことを、2009年度に設計、実装したコンディションモニタリングによって監視した。通常運転では「4. 経年変化」、「5. 極値イベント」が発生する。これらを、本システムでは、制御の遅れ状態を計測し、マルコフ連鎖モデルの基本データとして、解析を行った。実用面では、これに加えメンテナンス時に風車の状態診断を行い、設計許容値に比べて影響がなければそのまま運転を継続(7.)、そうでない場合には修理、交換(6.)となる。

#### 4. 研究成果

本研究では、制御遅れ状態のモニタリングとともに、動的解析モデルFASTにより各部位の変動を解析している。図4には、成果の一部として、モニタリング検出性能の評価を行うため、実機に対して、ブレード連結部分の締結を10%減らし、通常のピッチ制御とヨー制御に周期的な微弱変動を与え、その際、その回転軸の挙動をモニタリングしたものを示す。図より変動状態によって周期的な軸の

変動が発生していることがわかる。

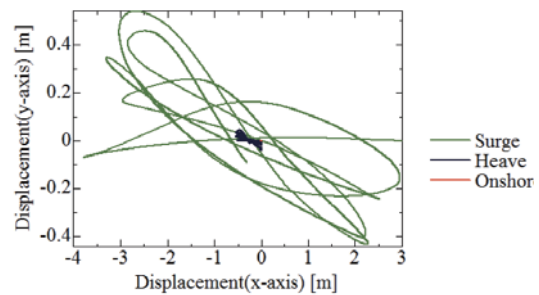


図 軸の x,y 変動の様子

このように、本研究のモニタリング装置により、風力発電機の回転による荷重変動計測の健全性を確認するとともに、制御遅れに着目した動的予測モデルが故障を誘発すると考えられる部位の締結状態に起因する変動を検出し、事前に故障の原因を特定することができた。

#### 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 15 件)

1. Hikaru Matsumiya, Ryosuke Ito, Kawakami, Daisuke Matsushita, Makoto Iida, Chuichi Arakawa: ``Field Operation and Track Tests of 1-kW Small Wind Turbine Under High Wind Conditions'', Journal of Solar Energy, Vol. 132, Issue 1, 8pages (ASME Digital Lib), 査読有 (2010)

2. Iida, M., Goto, N., Arakawa, C.: "APPLICABILITY OF SEMI-EMPIRICAL ACOUSTIC MODEL WITH LARGE EDDY SIMULATION FOR WIND TURBINE", Renewable Energy, 6pages 査読有, (2010)
  3. Iida, M., Araya, T., Arakawa, C.: "WIND TURBINE COUPLING SIMULATION FOR DYNAMIC ANALYTIC MODEL AND SYSTEM SIMULATION MODEL", Renewable Energy, 6pages 査読有, (2010)
  4. Iida, M., Miyagawa, K., Kamio, T., Arakawa, C., Sugimura, T., Takahashi, K.: "SIMULATION METHOD OF CFD FOR COMPLEX TERRAIN", Renewable Energy, 6pages 査読有, (2010)
  5. Kamio, T., Miyagawa, K., Iida, M., Arakawa, C., Sugimura, T., Takahashi, K., et al.: "Study of Wind Simulation for Complex Terrain Focusing on Inlet Condition.", Renewable Energy, 6pages 査読有, (2010)
  6. Kentaro SANNO, Makoto IIDA, & Chuichi ARAKAWA. : "LES FLOW ANALYSIS AROUND EXACTLY CONFIGURATED WIND TURBINE USING OVERSET GRID. ", RENEWABLE ENERGY, 6pages, 査読有, (2010).
  7. Hideaki SUETSUNA, Makoto IIDA, Chuichi ARAKAWA : "STUDY OF AERODYNAMIC NOISE PREDICTIONS ON SEVERAL TRAILING EDGE SHAPES FOR WIND TURBINE BLADE", European Wind energy, 6pages(Digital Library), 査読有, (2009)
  8. Takeshi Kamio, Shingo Kanazawa, Makoto Iida, Takeshi Sugimura, Keiko Takahashi, Chuichi Arakawa: "The Wind Direction Error Problem in Numerical Site Calibration", European Wind energy, 6pages(Digital Library), 査読有, (2009)
  9. Hikaru Matsumiya, Ryosuke ITO, Masafumi KAWAKAMI, Daisuke MATSUSHITA, Makoto IIDA, Chuichi ARAKAWA: "PERFORMANCE MEASUREMENT AND EVALUATION OF 1-KW SMALL WIND TURBINE", European Wind energy, 6pages(Digital Library), 査読有 (2009)
  10. 飯野光政, 飯田誠, 荒川忠一. "小形風車の動的解析モデリングによる設計荷重評価". 機械学会 2010 年度年次大会講演論文集, 査読無, 103-104. (2010).
  11. 寺田慎吾, 飯田誠, 荒川忠一, "CFD 援用翼素・運動量理論の検討". 機械学会 2010 年度年次大会講演論文集, 査読無, Vol. 2, 117-118, (2010).
  12. 寺田慎吾, 飯田誠, 荒川忠一, "数値モデリングの翼端損失に対する考察". 第 32 回風力エネルギー利用シンポジウム予稿集. 査読無, (2010)
  13. 永井暁彦, 飯田誠, 荒川忠一, "準経験的手法による風車発生音推定の基礎検討". 機械学会 2010 年度年次大会講演論文集, 113-114. 査読無, (2010)
  14. 神尾武史, 飯田誠, 荒川忠一, "複雑地形 CFD の変動流入風に関する検討". 機械学会 2010 年度年次大会講演論文集, 2:139-140, 査読無(2010).
  15. 飯野光政, 飯田誠, 荒川忠一. "小型風車の長期運転に対する荷重評価". 第 32 回風力エネルギー利用シンポジウム予稿集, 167-170, 査読無, (2010).
- [学会発表] (計 14 件)
1. 神尾武史, 飯田誠, 荒川忠一: "複雑地形上風の数値流体解析における入口条件に対する検討", 電気学会新エネルギー・環境研究会. (2010. 3. 10).
  2. 飯田誠, 後藤 尚貴, 荒川 忠一: "LES による風車翼騒音推定に関する研究", 第 31 回風力エネルギー利用シンポジウム, No. 25, (2009. 11. 27)
  3. 飯田誠, 荒谷 徹, 荒川 忠一: "動的解析モデルと機構解析モデルによる風車の連成解析", 第 31 回風力エネルギー利用シンポジウム, No. 26, (2009. 11. 27)
  4. 飯田誠, 宮川 圭介, 神尾 武史, 荒川 忠一, 杉村 剛, 高橋 桂子: "複雑地形 CFD における地形解像度に関する考察", 第 31 回風力エネルギー利用シンポジウム, No. 27, (2009. 11. 27)
  5. 飯田誠, 宮川 圭介, 荒川 忠一, 杉村 剛, 高橋 桂子: "数値サイトキャリブレーションにおける方位区分に関する研究", 第 31 回風力エネルギー利用シンポジウム, No. 28, (2009. 11. 27)
  6. 飯田誠, 神尾 武史, 宮川 圭介, 荒川 忠一: "複雑地形数値流体解析における入口条件に対する検討", 第 31 回風力エネルギー利用シンポジウム, No. 29, (2009. 11. 27)
  7. 荒谷 徹, 飯田誠, 荒川 忠一: "動的解析モデル FAST を用いた風車の機構解析に関する研究", 日本機械学会 2009 年次大会, Vol. 7, pp. 89-90, J0503-2-4, (2009. 9. 14)
  8. 神尾武史, 飯田誠, 荒川忠一: "複雑地形

- 形 CFD の変動流入風に関する検討’’, 機械学会 2010 年度年次大会, (2010. 9. 7).
9. 寺田, 慎吾; 飯田, 誠; 荒川忠一: ``CFD 援用翼素・運動量理論の検討’’, 機械学会 2010 年度年次大会. Nagoya, September, (2010. 9. 6).
  10. 寺田, 慎吾; 飯田, 誠; 荒川忠一: ``数値モデリングの翼端損失に対する考察. 第 32 回風力エネルギー利用シンポジウム. Tokyo, November, (2010. 11. 25).
  11. 永井暁彦, 飯田誠, 荒川忠一, 2010. 準経験的手法による風車発生音推定の基礎検討. 機械学会 2010 年度年次大会. Nagoya, (2010. 9. 6).
  12. 飯野光政, 飯田誠, 荒川忠一. ``小形風車の動的解析モデリングによる設計荷重評価’’. 機械学会 2010 年度年次大会. Nagoya, September, (2010. 9. 6).
  13. 飯野光政, 飯田誠, 荒川忠一. ``小型風車の長期運転に対する荷重評価’’. 第 32 回風力エネルギー利用シンポジウム, ポスター. Tokyo, November, (2010. 11. 25).
  14. 飯野光政, 飯田誠, 荒川忠一. ``小型風車の長期運転に対する荷重評価’’. 第 32 回風力エネルギー利用シンポジウム. Tokyo, November, (2010. 11. 25).

[その他]

ホームページ

<http://www.eco.c.u-tokyo.ac.jp/iida/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

飯田 誠 (IIDA MAKOTO)

東京大学・先端科学技術研究センター・

特任准教授

研究者番号: 40345103