

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 24 年 5 月 30 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21560179

研究課題名（和文） タンデムロータ型インテリジェント風力発電ユニットの研究開発：最終章（実証試験）

研究課題名（英文） Development of Intelligent Wind Power Unit with Tandem Rotors: Final Step (Verification Tests)

研究代表者

金元 敏明 (KANEMOTO TOSHIAKI)

九州工業大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：90092642

研究成果の概要（和文）：前後段風車ロータと内外二重回転電機子からなる風力発電ユニットについて、好適な風車ロータ形状を提案した。また、二重巻線形誘導発電機を搭載して実風況下で実証試験を行い、低回転速度から同期回転速度まで最高効率運転が可能であることを確認するとともに、その電機的制御法を提示した。実用上問題となる騒音については、後段風車ロータが小径のため前段風車ロータ翼端渦の影響はなく、ブレード面上の境界層に基づく速度せん断層同士の干渉を抑制すればよいことが判明した。

研究成果の概要（英文）：The profile of the tandem wind rotors was optimized to improve the efficiency of Intelligent Wind Power Unit in which the wind rotors drive the inner and the outer armatures, respectively. The model unit with the doubly fed induction generator was provided for the verification tests at the actual wind circumstances. It was confirmed that the unit can be operated at the maximum efficiency at the rotational speed lower than the synchronous speed (the rated wind speed). Besides, the tip vortex from the front wind rotor scarcely affects the acoustic noise and it is essential to suppress the flow interaction between the wake flow from the front blade and the boundary layer flow on the rear blade for reducing the noise.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度	0	0	0
年度	0	0	0
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

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，風力発電，風車，実証試験，風車ロータ，発電機

1. 研究開始当初の背景

今世紀の最大課題である地球温暖化防止/循環型社会構築に向けて、非再生資源依存型からクリーンな再生可能(循環型)資源依存型への転換が世界的規模で進められている。これに応える一つとして世界中で現在活躍している従来風車は、風況が良好な欧州や米国に

適した単段プロペラに固執した技術の延長線上にあり、(a)高出力には大径風車ロータが適しているが微風速下では稼働せず、(b)微風速下では軽量小径風車ロータが適しているが強風下でも出力が低く、(c)電気の質を保つために増速機構や大径/多極発電機を準備する必要がある、(d)強風速下における風車ロータの

破損と発電機への過負荷を避け、かつ定格運転域で出力を一定に保つため、ブレーキや可変ピッチブレードなどの複雑な回転速度制御機構を必要とする。また、風速約 11m/s 以上で出力一定の定格運転となるが、それに達する地域や季節/時間はかなり限定される。風車出力は風速の 3 乗に比例するから、風況が好ましくない地域では低風速域での出力増大がとくに望まれる。今後は、風況を選ぶ従来風車を設置できる適地は少なくなり、風況を選ばず低風速にも適した環境にやさしい高出力風力発電ユニットの誕生が待たれる。

2. 研究の目的

以上述べた問題点を解決するため研究代表者は、前後二段の風車ロータ(タンデム風車ロータ)と、それぞれに連結された内外二重回転電機子からなる新たなインテリジェント風力発電ユニット(図 1)を提案した。出力増大を狙った二段風車ロータは既存している。しかし、歯車機構を介して、固定子を有する従来通りの発電機を駆動する概念から離れておらず、風車ロータと発電機に的確な連携プレー能力を持たせる本研究の独創的な着想とはかけ離れている。

本研究は、同風力発電ユニットの従前から蓄積してきた研究成果を統合する最終章として位置付けられ、既に準備している定格出力 1.2kW の二重回転電機子方式二重巻線形誘導発電機と電力制御機器を用いて実用化を目指し、(a)最高効率 47%以上、(b)風速 8m/s で後段風車ロータの最高速回転(同期回転速度)、(c)風速 10m/s で定格運転開始、(d)風速 15m/s 前後で後段風車ロータの停止、(e)低騒音化、の達成を目標に掲げ、フィールドでの実証試験を実施することにした。

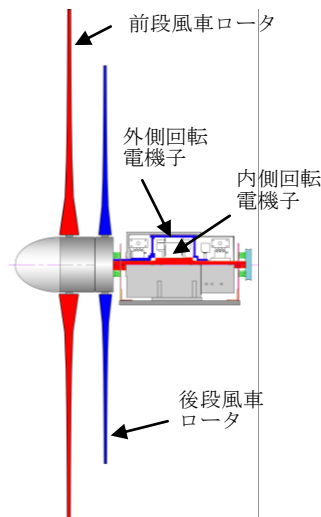


図1 インテリジェント風力発電ユニット

3. 研究の方法

3.1 風車ロータの準備 前後段風車ロータ径比は従前の成果に基づく好適値 $D_{RF} = d_R/d_F = 0.84$ を用いて、前後段風車ロータ径をそれぞれ $d_F = 2000$ mm, $d_R = 1680$ mm とした。このとき、前後段ブレード枚数も同様に実績に基づき $Z_F = 3$, $Z_R = 5$, 前後段風車ロータ間の軸間距離は $l = 160$ mm とした。

前後段風車ロータのブレードは MEL012 翼型を基本とし、設計風速すなわち前章の達成目標 (b) に掲げた通りに $V = 8$ m/s のとき前後段同期回転速度を $N_F = 400$ min⁻¹, $N_R = 500$ min⁻¹ とした。前段風車ロータブレードは一樣軸方向流れに対して、また後段風車ロータブレードは前段風車ロータを通った流れに対して好適な迎え角が得られるように、半径方向にひねられている。なお、両ブレードともトルクにあまり寄与しないハブ側 25% は製作の都合上、翼弦長を減少させた。

3.2 発電機の準備 ここでは大容量系統連系を念頭に置き、二重回転電機子方式二重巻線形誘導発電機(3 相 8 極、定格出力 1.2 kW、誘起電圧 200 V、誘起周波数 60 Hz、同期相対回転速度 900 min⁻¹) を搭載した。2 次側(内側回転電機子)の励磁周波数と励磁電圧の制御により、風車ロータの回転速度によらず一定周波数、一定出力を系統に入力できる利点を備えている。

3.3 制御系の準備 上述した通り 2 次側(内側回転電機子)に入力する励磁周波数と励磁電圧を制御すれば、1 次側(外側回転電機子)から系統への誘起電圧と誘起周波数を一定に保つことができる。このとき、2 次側への入力同期回転速度(設計点)を与える流速 $V=8$ m/s を越えると負、すなわち 2 次側からも電力を取り出すことができ(相の交替)、1 次側からの出力との和が系統への出力となる。

3.4 実証機 上述のタンデム風車ロータと発電機を高さ 3m のタワー上に搭載した発電ユニット(図 2, アップウィンドウ型)を九州工業大学戸畑キャンパス教育研究 2 号棟(2 階建)の屋上に設置した。実証試験ユニットはウォームギアとステップモータによってヨーコントロールができる(ただし自動ではない)。試験に際しては、ランプ負荷、発電機の 2 次側に入力する励磁周波数、励磁電圧をパラメータとし、風速、風向、前後段風車ロータの回転速度、発電機の 1 次側からの誘起周波数、誘起電圧、誘起電流、出力を、1 秒毎にデータロガーに記憶させた。小型風車の場合、風の変動スケールに対する応答性が鋭敏であることから IEC の推奨通り、蓄積されたデータは 1 分間平均値で評価することにした。また、安全確保の配慮から、如何なる場合でも緊急停止ができるよう、実証機では電磁ブレーキを備えている。ここに、実験サイトの風速は 2 m/s から 5 m/s が実



図2 実証機

証試験中の約 70%を占めており、発電にとって良好な風況とは言い難い。なお、この場合でも平均風速はレイリー分布で予測できることを確認した。

4. 研究成果

4.1 風車ロータの開発 風車ロータは半径が大きいところの仕事が重要である。すなわち、直径の 50%以下の回転トルクは、テップ側の 8%程度と極めて小さいことを確認した。そこで、前段風車ロータのブレードは、回転トルクにあまり寄与しない半径の小さいハブ側 50%で極力抗力が小さい翼素を採用して無負荷を実現し(合力が軸方向)、半径の小さいところでは仕事をせず風を通り抜かせ、後段風車ロータに上流側の風のエネルギーをそのまま受け渡すようにする。そして、残りの半径が大きい位置では好適な迎え角となるようにひねりを与えた前段風車ロータのブレードを開発した。これと従前技術のままの後段風車ロータからなるタンデム風車ロータ (Tandem Wind Rotor HG)の相対周速度比 λ_T [(前後段風車ロータ外周の相対速度)/(風速 V)]に対する出力係数 C_p [$=P/\rho AV^3/2$]を図 3 に示す。ここに、 L は前段風車ロータ径で除した前後段風車ロータ間の軸方向距離であり、ブレード枚数とともに事前に最適化されている。従前技術による Tandem Wind Rotor GG に比べ高出力となる。すなわち、前段風車ロータは半径が小さいところで仕事をしないので前段の出力係数は低下するものの、後段の出力係数がそれ以上に向上するのでタンデム風車ロータとしての出力は向上し、とくに高周速度比側で目立つ。

上述で開発した前段風車ロータに適した後段風車ロータを風洞実験と CFD を併用して開発しつつある。その一例の C_p を図 3 に示す (Tandem Wind Rotor HK)。MEL002 翼型を用い、発生トルクを増大させることを目的として半径位置によらず翼弦を一定とし、上述の前段風車ロータからの流れに対して好適な揚抗比が得られるようにひねりが与えられている。その効果により、後段風車ロータの出力は幾らか向上することが証明された。

図 3 の出力係数は前段風車ロータ径 500 mm の実験結果であり、10 倍以上の寸法を有する実用機ではレイノルズ数も高く、ブレード面上の流れは全域乱流となるので、 C_p は格段に高くなると考えてよい。なお、風車ロータのブレードは上述した最新の最適形状が望まれるが、経費と時間の関係からここでの採用は残念ながら断念し、図 2 の実証機には従前の風車ロータ (Tandem Wind Rotor GG がベース)用いることにした。

4.2 実証試験 ここでは前述のように系統連系を念頭に、二重回転電機子方式二重巻線形誘導発電機の制御に着眼した。

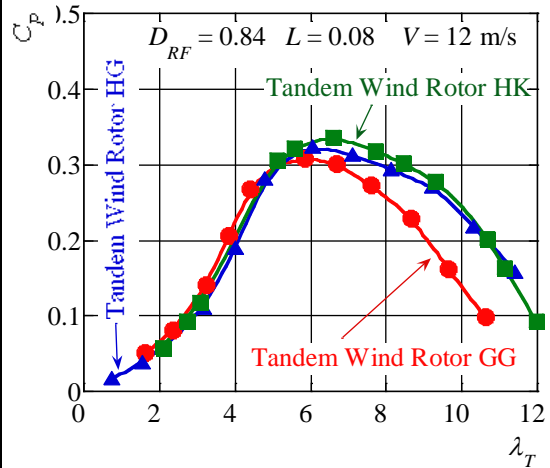


図 3 風車ロータの出力係数

(1) 出力電圧一定運転 2 次側への励磁周波数を一定に保ち、風速の増加に伴う相対回転速度が一定に達した後、1 次側の誘起電圧を一定に保つことが可能なことを実証し、前後段風車ロータの回転速度、1 次側からの出力、誘起電流、誘起周波数、またこの時に必要な 2 次側の励磁電圧を提示した。上記条件で 2 次側の励磁電圧を提示のように制御すると、高風速で誘起電圧を一定に保つことができる。なお、ここでは 2 次側への励磁周波数を固定しているため、1 次側からの誘起周波数は相対回転速度に比例して増加する。また、1 次側の励磁電圧一定の範囲では、外部負荷が同じなら当然誘起電流も一定値を保ち、結果的に 1 次出力もほぼ一定となる。

(2) 周波数一定運転 次に 1 次側からの誘起周波数を系統の $f_1 = 60 \text{ Hz}$ に保つ運転を実証した。このとき、2 次側への励磁電圧は 30 V 一定に保った。2 次側への励磁周波数は相対回転速度に反比例させる必要があり、1 次側からの誘起電流、誘起電圧は相対回転速度の増加とともにほぼ直線的に増加する。

(3) 定格運転までの最高出力運転 ランプ負荷を $P_{bulb} = 300 \text{ W}$ 、系統への誘起周波数を $f_1 = 60 \text{ Hz}$ に保ち、同期回転速度 ($V = 8 \text{ m/s}$, 相対回転速度 $N_T = 900 \text{ min}^{-1}$)まで最高出力運転をして、定格運転における誘起電圧 $E_1 = 200 \text{ V}$ を達成する実証をした。このときの前後段風車ロータの回転速度 N_F , N_R , 2 次側への励磁電圧 E_2 , 励磁周波数 f_2 を図 4 に示す。誘起周波数 f_1 を一定に保つため励磁周波数 f_2 は相対回転速度 N_T に反比例させ、励磁電圧 E_2 は N_T とともに増加させた後、ある程度 N_T が速くなった時点から低下させるように制御すればよい。このとき到達した出力 P_1 は外部負荷を越えてしまった。本来の系統連系運転では低風速域でも 1 次側からの誘起周波数 f_1 のみならず、誘起電圧 E_1 も一定に保つ必要があるが、本実証試験では良好な風況が得られないこともあり、そこまでの実証には至らな

かった。

4.3 空力騒音 上述の実証機に採用したブレードと相似なミニチュアブレード(9/20に縮小)からなる Modified Tandem Wind Rotor GG (Small rear) の騒音スペクトル密度分布の一例を図5に濃実線で示す。ここに、 L_{SA} は比騒音 $[= L_A - 10 \log(QP_T^2) + 20 = L_A - 10 \log(QH^2)]$, L_A : 騒音レベル(A特性), Q : 流量, P_T : 全圧, H : 入口の速度ヘッド $(= V^2/2g)$ である。後段風車ロータを取り外した Single Wind Rotor G の場合の $L_{SA} = 40.6$ dB(図略)に比べ、騒音レベルは高くなる($L_{SA} = 48.4$ dB)。図中には卓越周波数も示すが、これらは前後段風車ロータのブレード通過周波数の高調波と一致しない。Hanson は自由空間流中に置かれた二重反転プロペラの干渉騒音の周波数は $f = |mZ_R N_R + kZ_F N_F|$ [m : 自然数, k : 整数 $(-\infty \sim +\infty)$] で与えられることを見出しているが、図5に示した卓越周波数とよく一致する。

タンデム風車ロータの場合、翼端渦の干渉にも着目する必要がある。上述の前後段を入れ替えた(Large rear)の騒音スペクトル密度分布を図5に薄破線で示す。前段に小径風車ロータを採用すると、後段ブレードが前段からの翼端渦を切断することになるから騒音レベルは高くなる。このことは、前段ブレードで発生した翼端渦が後段ブレードに流入する際に発生する騒音が無視できないことを示している。幸いにして、本風力発電ユニットは大径の前段風車ロータと小径の後段風車ロータから構成されるため、このことを問題にする必要はない。事実、Small rear の比騒音 L_{SA} は Large rear に比べて低く、本風力発電ユニットの空力騒音源はブレード面上境界層に基づく速度せん断層同士の干渉の影響が主因と考えるとよさそうである。

4.4 目標の達成度合 ここでは第2章の末尾に掲げた目標について、その達成度合いを評価する。

(a) 最高効率 47%以上: 図6にモデル風力発電ユニット(図2)の出力係数 C_p を示す。前述のように既存技術で設計された風車ブレードにもかかわらず、世界で現存している風車の最高出力係数に勝るとも劣っていない。すなわち、図3に示した Tandem Wind Rotor GG(前段風車ロータ径 500mm)のブレードをほぼ相似に拡大(同 2m), すなわち高レイノルズ数になった効果で C_p が 0.308 から 0.433 まで向上している。このとき、最高出力を与える周速比 λ は 5.84 から 13 まで、所望通り格段に速くなっている。図3の Tandem Wind Rotor HK の C_p を同様な比率でスケールアップすると出力係数は 0.47 に達し、丁度目標値となり、世界のトップレベルをはるかに越えている。しかし倍率で見ると、Tandem Wind Rotor HK の C_p は Single Wind Rotor G の 1.16

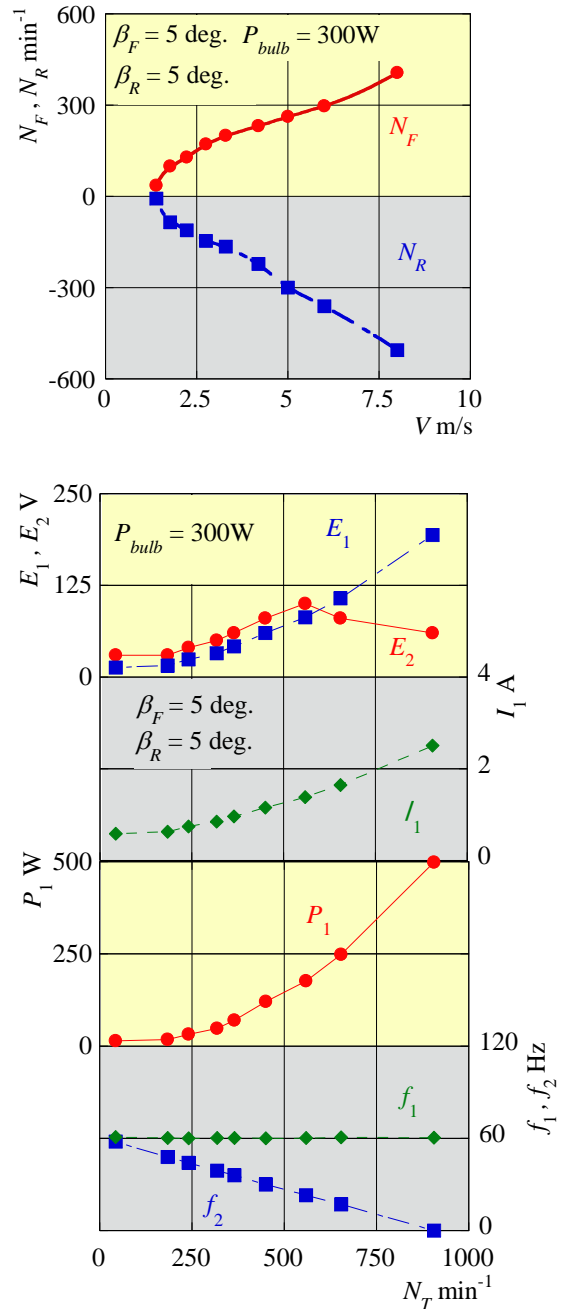


図4 低風速域での最高出力運転時の特性

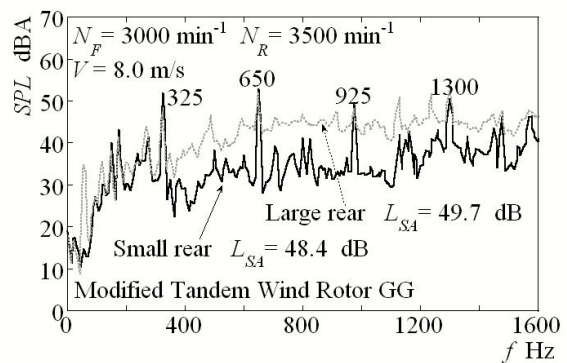


図5 タンデム風車ロータの空力騒音

倍程度である(図略)．本目標値をクリアしても，従来風車の 1.1 倍強の出力向上に止まっている現状を打破するのが今後の課題となる。

(b) 風速 8m/s で後段風車ロータの最高速回転(同期回転速度)：実証機に搭載した発電機は風速 8m/s で同期相対回転速度 $N_T=900\text{min}^{-1}$ となるように設計した．これを実証できるほどの十分な風況が得られなかったが，4.2(1)の結果は $N_T=350\text{min}^{-1}$ を同期相対回転速度として，それより風速が増すと出力を一定に保つ運転を実証した例である．風速と回転速度はほぼ比例するので，この結果は上記の目標が達成できることを証明している．

(c) 風速 10m/s で定格運転開始，(d) 風速 15m/s 前後で後段風車ロータの停止：安全を最優先して強風時の実験を避けたので，この数値目標はクリアしていないが，このことが可能なことを風洞実験で確認している．

(e) 低騒音化：目標値設定はしていないが，風洞実験により前段ブレードの離脱渦の影響がないことを確認しており，今後は騒音の低減策を講じる．なお，この研究は暗騒音が高いフィールドでは不可能なことがわかったので，実験室で行っている．

以上，本研究目標の達成度合いを評価したが，更に次のような特筆すべき成果も得た．

(f) カットイン風速 1m/s 以下の実現：発電量は期待できないが誘導発電機の採用により，カットイン風速 1m/s を達成した(図 4 参照)．コアレス発電機を採用するとゴギング問題が解消でき，さらに低風速にすることも可能である．

(g) 風況予測法，所望する性能を満たす風車ブレード設計法の提案：CFD による風況予測法を確立し，キャンパスシミュレーションに展開しつつある．また，シリーズとしてのブレード設計は行っていないが，数値シミュレーションで風車ロータまわりの流れと性能の予測が可能になった．すなわち数値シミュレーションでは風速，寸法を自在に選定できるので，風車ロータのシリーズ設計が可能になったことは目標以上の成果である．

4.5 方向制御の自動化準備 従来からアップウィンド型風車は発電機等を格納するナセルの上に設けた風向計によって風向制御されるのが普通である．本提案の風車ロータは前述したように複雑な回転挙動をすることもあり，改めてナセル上方の風向と実風向の関係を把握する必要がある．そこで後段風車ロータ径に対して 0.12, 0.18, 0.3 の後方，軸心から上方 0.15 の位置で，風向と風速を調べた．10 秒平均した値を採用すると時間経過に対する風向の変化が激しく，実風向と風車ロータ後方での計測結果の角度差(風向偏差) ϕ_r が大きくなる．30 秒平均値も多少の変化は見られるものの ϕ_r の値は比較的小さ

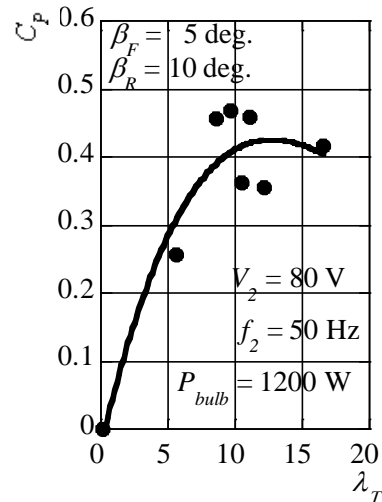


図 6 実風況下の実証機出力係数

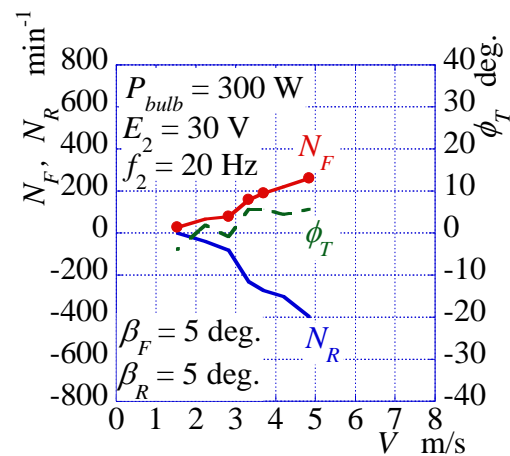


図 7 後段風車ロータ径に対して 0.18 後方における風向偏差

い．なお，5 秒平均は 10 秒平均と同様，60 秒平均は 30 秒平均と同様となるので，ここでは 30 秒平均値の採用を提案することにした．本実証機について，後方 0.18 の位置で計測した 30 秒平均の相対回転数 N_T と角度差 ϕ_r に及ぼす風速 V の影響をビン(風速ビン幅は 0.5 m/s とした)によって求め，図 7 に示す．風速によらず ϕ_r はほぼ 5 deg. の値を保ち，風車ロータの向きを決める風向計を取付ける位置に適している．なお，後方 0.12 では，風速が増して相対回転数が大きくなるにつれて ϕ_r も大きくなり，0.3 では風速の変化とともに， ϕ_r も大きく変化した．

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 12 件)

- ① Yuta Usui and Toshiaki Kanemoto, "Optimization of Front Blade Profile in Intelligent Wind Power Unit", Proceedings of the 8th KSME-JSME Thermal Fluids Engineering Conference, (2012), CD-ROM:

- GTS16-007, 査読有.
- ② Yuta Usui, Toshiaki Kanemoto and Koichi Kubo, “Flow and Performance Simulations of Wind Power Unit”, Proceedings of the 1st International Conference on Mechanical Engineering & Renewable Energies, (2011), CO-Rom PI199, 査読有.
- ③ Tatsuro Nunoya, Chika Takata, Kazumasa Makita and Toshiaki Kanemoto, “Field Test of the Intelligent Wind Power Unit”, 2011 COWEOE Conference Proceeding (International Conference on Offshore Wind Energy and Ocean Energy), (2011), CD-Rom2011-ICOWE OE-21, 査読有.
- ④ Fumiha Odo, Akira Enishi, Yuta Usui and Toshiaki Kanemoto, “Acoustic Noise from Tandem Wind Rotors of Intelligent Wind Power Unit”, 2011 COWEOE Conference Proceeding (International Conference on Offshore Wind Energy and Ocean Energy), (2011), CD-Rom 2011- ICOWEOE-2, 査読有.
- ⑤ Koichi Kubo and Toshiaki Kanemoto, “Performances and Acoustic Noise of Intelligent Wind Power Unit”, Renewable Energy & Power Quality Journal, No.9, 445, (2011), 査読有.
- ⑥ Koichi Kubo, Sho Nonoshita and Toshiaki Kanemoto, “Intelligent Wind Power Unit”, International Symposium on Low Carbon & Renewable Energy Technology, (2010), O-WE-016, 査読有.
- ⑦ Sho Nonoue, Koichi Kubo, Yohei Hano, Akira Enishi and Toshiaki Kanemoto, “Field Test of Intelligent Wind Power Unit”, Proceedings of Renewable Energy 2010, (2010), CD- ROM : O-Wd-11-2, 査読有.
- ⑧ Koichi Kubo, Toshiaki Kanemoto, “Intelligent Wind Power Unit with Tandem Wind Rotors (Performances and Acoustic Noise of Tandem Wind Rotors)”, Proceedings of European Wind Energy Conference and Exhibition 2010, (2010), PO265, 査読有.
- ⑨ Koichi Kubo, Nobuhiko Mihara, Akira Enishi and Toshiaki Kanemoto, “Acoustic Noise from Tandem Wind Rotors of Intelligent Wind Power Unit”, Journal of Thermal Science Vol.19, No.2 (2010), pp. 120–125, 査読有.
- ⑩ Koichi Kubo, Yohei Hano, Hiromi Mitarai, Kiyotaka Hirano and Toshiaki Kanemoto, “Intelligent Wind Turbine Unit with Tandem Wind Rotors (Discussion of Prototype Performance in Field Tests)”. Current Applied Physics, 10 (2010), pp. S326–S331, 査読有.
- ⑪ Koichi Kubo, Toshiaki Kanemoto, Nobuhiko Mihara, Youhei Hano and Akira Enishi, “Intelligent Wind Power Unit with Tandem Rotors Applicable to Offshore Wind Farm, (Performances and Acoustic Noise of Tandem Wind Rotors)”, Proceedings of European Offshore Wind 2009, (2009), 96EOW2009, CD-ROM, 査読有.
- ⑫ Nobuhiko Mihara, Koichi Kubo, Akira Enishi, Toshiaki Kanemoto and Yang Duk Park, “Acoustic Noise from Tandem Wind Rotors of Intelligent Wind Power Unit”, Proceedings of the 9th International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows, (2009), Paper No. 6D-2, CD- ROM, 査読有.
[学会発表] (計 3 件)
- ① 小戸 詞葉・江西 彬・久保 幸一・金元敏明・臼井 祐太, タンデム風車ロータから発生する空力騒音, 第 6 5 回ターボ機械協会総会講演会論文集, 東京 (2011), pp. 49-54.
- ② 羽野洋平, 久保幸一, 金元敏明, タンデムロータ型インテリジェント風力発電ユニットの実証試験, 日本機械学会流体工学部門第 8 7 期講演会講演論文集, 名古屋 (2009)pp. 405-406. No.1214.
- ③ 久保幸一, 三原信彦, 江西彬, 金元敏明, タンデム風車ロータの空力騒音, ターボ機械協会 2009 年第 61 回総会講演会講演論文集, 東京 (2009), pp. 226-231.
[図書] (計 1 件)
- ① Edited by Wei Tong, “Wind Power Generation and Wind Turbine Design” Total pages 725, Toshiaki Kanemoto and Koichi Kubo, “Chapter 10 Intelligent wind power unit with tandem wind rotors”, pp. 333-360, (2010), WIT Press.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金元 敏明 (KANEMOTO TOSHIAKI)

九州工業大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：90092642