

平成 21 年 6 月 3 日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：平成 19 年～平成 20 年度
 課題番号：19560175
 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機の研究開発：
 空力騒音の低減
 研究課題名（英文）Development of Intelligent Wind Power Unit with Tandem Wind Rotors
 and Double Rotational Armatures: Reduction of Acoustic Noise
 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：タンデム風車ロータの特徴的な回転挙動に則して騒音を把握した。相反回転時：騒音の卓越周波数はブレード通過周波数およびその高調波とは一致せず、前後段風車ロータの干渉騒音が支配的となる。後段風車ロータ停止時：前段風車ロータのブレード通過周波数の高調波で卓越周波数が確認され、後段の大規模剥離による騒音が顕著となる。同方向回転時：相対周速比が増加すると干渉騒音レベルが高くなり、広帯域周波数の騒音レベルも上昇する。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2008 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
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・流体機械

キーワード：風力発電，風車，タンデムロータ，騒音，発電機

1. 研究開始当初の背景

(1) 社会的要請：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叫ばれており、風力資源についても積極的な有効利用が望まれている。

(2) 従来風車の技術的問題点：良好な風況に適した単段プロペラに固執した従来技術の延長線上では、適用範囲の限定、増速機構や大径/多極発電機の搭載、複雑な回転速度制御機の搭載などの問題が残されている。

(3) 風況への不適合性：風車にとって良好な風況が得られない地域で、従来風車の定格

運転開始風速 11m/s 以上に達する地域や季節/時間はかなり限定される。

(4) 研究動向と解決すべき課題：流体力学/航空力学を基盤にした単段のプロペラ開発を踏襲する限り、今以上より格段の発展は望めない。性能とともに重要な環境に目を向けて、生態系との共生に関しても精力的に研究されているが空力騒音は取り残されている。

(5) 空力騒音を低減する価値：筆者が提案している風力発電ユニット(図 1)は、従来風車では不可能な風車ロータと発電機の連携プレー能力(図 2)を備えている斬新で独創的なものである。

以上のような背景は、風況と住環境に適した静かな風力発電ユニットの出現が望まれていることを示唆している。

2. 研究の目的

(1) 本研究の位置づけと目標：出力増大のみを狙ったタンデム風車ロータが提案されているが、風車ロータと発電機に的確な連携プレー機能を持たせる独創的な着想とはかけ離れている。既にこの着想を実証するとともに、微風速下での出力増大、定格運転開始風速の低速化、回転速度制御機構の排除、が実現できる風車ロータ形状の姿を提案しつつある。引き続き本研究では、実用化、言い換えると環境への影響を視野に入れて、唯一残された課題、すなわち騒音低減を流体力学観点から本格的に取り上げることにした。

(2) 本研究の意義：斬新な連携プレー能力の着想は独自のものであり、環境まで考えた望ましい姿を世界に先駆けて提案する価値があると思っている。クリーンエネルギー確保を目指す本研究の意義は国を越えて計り知れないものがある。

3. 研究の方法

(1) 実験装置：タンデム風車ロータの回転

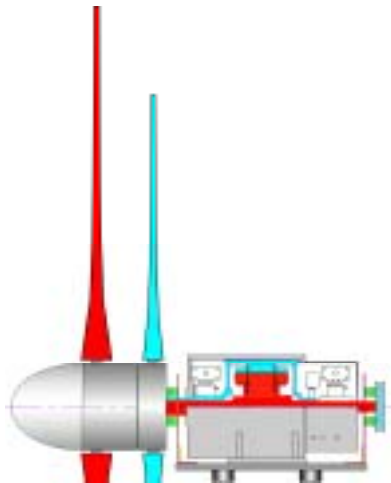


Fig.1 Concept of intelligent wind turbine unit

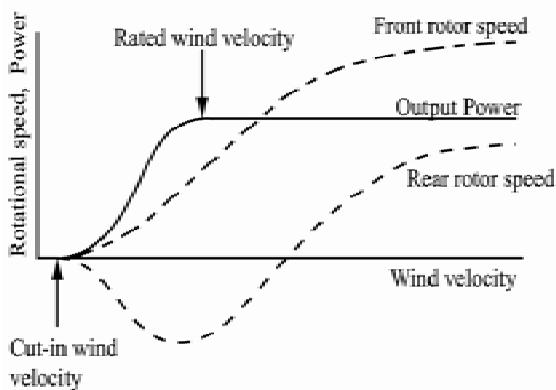


Fig. 2 Superior operation of the tandem wind rotors

挙動の相違(図2参照)が空力騒音に与える影響を調べたため、図3に示すモデル風車を風洞出口(径320mm)に設置した(図4)。本風力発電ユニット本来の姿は、タンデム風車ロータと二重回転電機子型発電機から構成されるが、ここでは電動機を2台用いて前後段風車ロータそれぞれの回転速度を制御した。本風力発電ユニットは、発電機の内外回転電機子に働く回転トルクが一致する点で運転されるが、本実験では別途行っている研究成果⁽¹⁾から得られた周速比から両風車ロータの回転速度を定めた。実験に使用した前後段風車ブレードは、MEL002翼型を用い、設計点において迎え角が一定となるようにひね

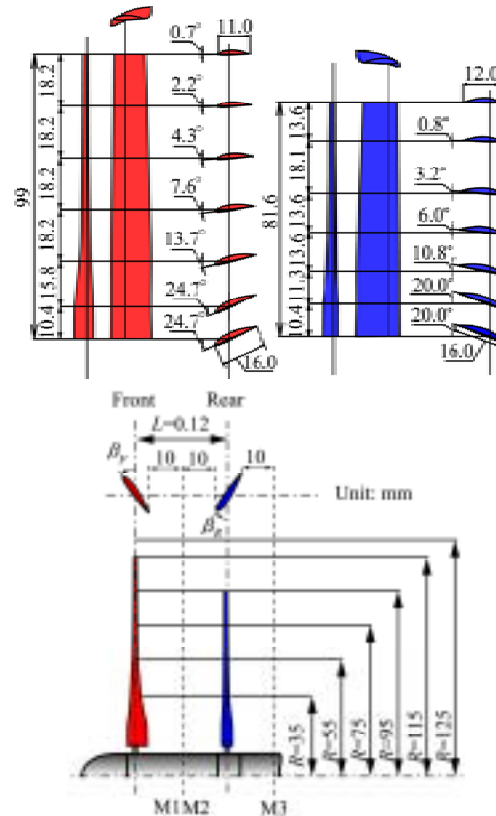


Fig. 3 Tandem wind rotor model

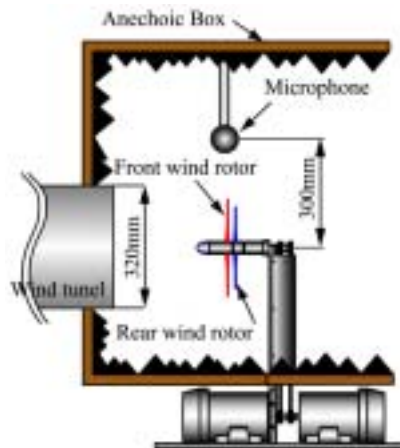


Fig. 4 Experimental apparatus for acoustic noise

りが与えられ、ハブからティップまで翼弦長は一定の割合で減少している(図3) 文献1,2のブレードを縮小したものであり、前段風車ロータ径 $d_F=230$ mm, 後段風車ロータ径 $d_R=193$ mm [$D_{RF}=d_R/d_F=0.84$], 前後段風車ロータのブレード枚数は $Z_F=3$, $Z_R=5$, ティップ位置で周方向から測った取り付け角度は、最高効率が得られる $\beta_F=5$ deg., $\beta_R=15$ deg., 前後段風車ロータの軸方向距離は $L=l/d_F=0.08$ [$l=18.4$ mm] である。

(2) 実験方法: 暗騒音をできるだけ除去するため、自作の無響音箱内に風車ロータモデルを設置し、前段風車ロータの回転断面上半径方向に 300 mm 離れた所に 1/2 マイクロフォン付積分型騒音計を設置した(図4)。騒音計からの出力信号はFFTアナライザによって周波数分析された。また、風車ロータまわりの断面 M2, M3(図3)における流れを熱線流速計で測定した。このとき、実験装置の都合上、軸方向距離は幾分長くした($L=l/d_F=0.12$)。

4. 研究成果

(1) 相反回転時の騒音: 後段風車ロータが前段と相反回転状態にあるときの空力騒音源を特定するため、性能試験において最高出力が得られた相対周速比 $\lambda_T = \text{相対周速度}/\text{風速} = 5.58$ ⁽¹⁾ における騒音測定を行った。その

Table.1 Estimated value of $|mZ_2N_2+kZ_1N_1|$
 $N_2=1844\text{min}^{-1}$, $Z_2=5$, $N_1=2330\text{min}^{-1}$, $Z_1=3$

Sound harmonic m	Load harmonic k	Frequency f Hz
1	2	387
2	3	657
	4	773
3	4	927
	5	1044
4	7	1430

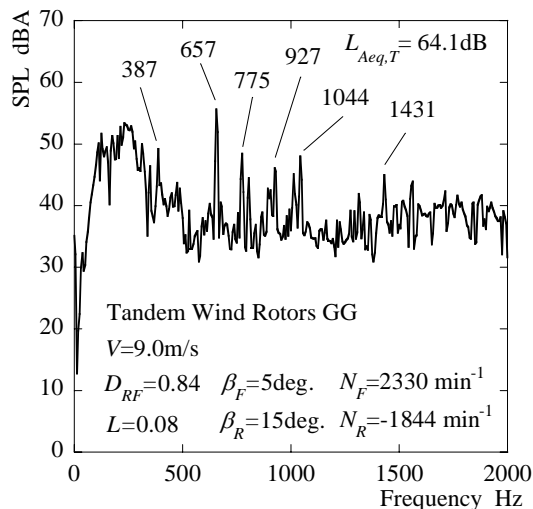


Fig. 5 Power spectral density of counter-rotation ($\lambda_T=5.58$)

結果得られたスペクトル分布と等価騒音レベル $L_{Aeq,T}$ を図5に示す。回転速度に起因する騒音には、ブレード通過周波数 NZ 成分と前段ロータと後段ロータの干渉による干渉騒音の2つがある。観察された卓越周波数は前後段風車ロータブレードの通過周波数($NZ_F=116.5\text{Hz}$, $NZ_R=153.7\text{Hz}$)およびその高周波と一致していない。したがって、これらの卓越周波数は干渉騒音と考えられる。Hansonは自由空間内の二重反転式プロペラの干渉騒音について、前後段プロペラの干渉によって種々の周波数の干渉騒音が発生することを示し、その周波数は $f=|mZ_2N_2+kZ_1N_1|$ [m : 自然数, k : 整数(- ~ +), Z : ブレード枚数, N : 回転速度] で与えられることを見出した⁽⁴⁾。表1に、本実験条件での前後段風車ロータの回転速度を上式に代入して得た周波数 f を示す。実験で得られた卓越周波数とよく一致する。すなわち、卓越周波数は前後段風車ロータの干渉騒音とみなせ、その周波数はHansonの式で予測できる。

(2) 後段風車ロータ停止時の騒音: 後段風車ロータが停止している状態($\lambda_T=4.39$, $N_R=0\text{min}^{-1}$)⁽¹⁾ における騒音のスペクトル密度分布および等価騒音レベル $L_{Aeq,T}$ を図6に示す。同図には、後段風車ロータを取り外した場合(単段とみなした)のも示した。また、Hanson

Table.2 Estimated value of $|mZ_2N_2+kZ_1N_1|$
 $N_2=0\text{min}^{-1}$, $Z_2=5$, $N_1=3288\text{min}^{-1}$, $Z_1=3$

Sound harmonic m	Load harmonic k	Frequency f Hz
0	1	164
	2	329
	3	493
	4	658
	5	822
	6	986

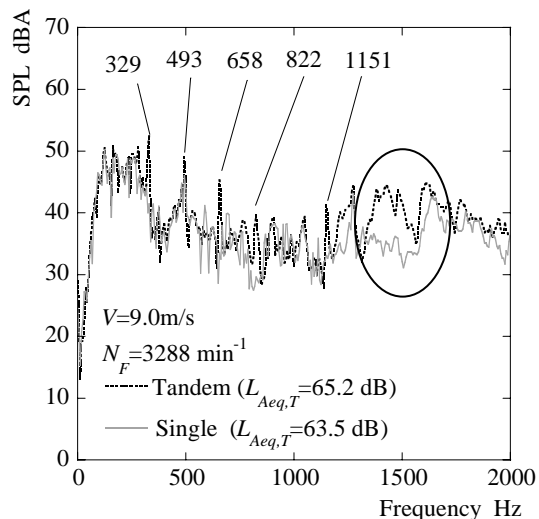


Fig. 6 Power spectral density of single and tandem wind rotor(s)

の式から求めた卓越周波数を表 2 に示す．タンデムあるいは単段にかかわらず， k がブレード枚数と同じ 3 の公倍数に当たる高調波成分(たとえば 493Hz)で顕著な卓越が見られるが，それ以外の k の高調波成分の卓越は確認できない．しかし，タンデム風車ロータにおいては相反回転の場合と異なり，前段風車ロータのブレード通過周波数($NZ_F=164$ Hz)の全ての高調波成分が卓越し，単段風車ロータの場合よりも大きな騒音レベルを示す．この原因は，前段風車ロータの後流が停止している後段風車ロータ，すなわち大きな障害物を横切るためと考えられる．また，タンデム風車ロータのスペクトル密度は，1200Hz 以上の広帯域周波数で，単段風車ロータの場合に比べて騒音レベルが上昇している．これは，大規模剥離を生じている停止した後段風車ブレード後流に起因する乱流騒音が原因と考え

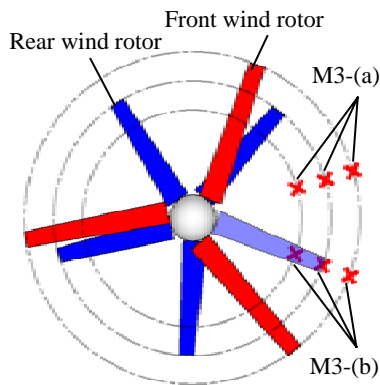


Fig. 7 Measurement points of hot wire anemometer

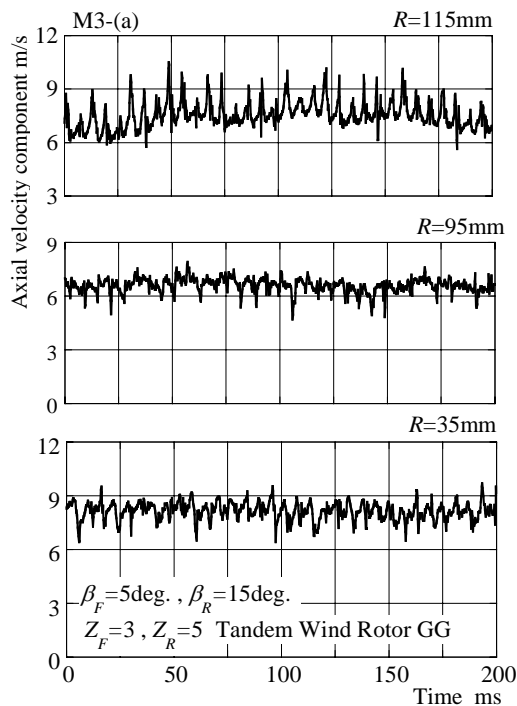


Fig. 8 Axial velocity fluctuations of tandem rotors at M3 (Mainstream of the rear wind rotor)

られる．この時のタンデム風車ロータにおける断面 M3 での軸方向速度成分の変動波形を図 8, 9 に示す．なお，停止している後段風車ロータブレードの影響も明らかにするため，後段ブレード間の主流中を M3-(a)，後流中を M3-(b)とした(図 7 参照)．主流中(図 8)での速度変動は，単段風車ロータの場合と比較してとくに大きな違いは見られない(図略文献 5 参照)．一方，後段ブレード後流中(図 9)では，主流中あるいは単段風車ロータと比較してもハブ側で大幅に速度が減少し，顕著な速度変動が確認できる．また，各半径位置での平均速度もハブ側($R=35$ mm)からティップ側($R=115$ mm)にかけて増速しており，半径外向き流れが推測できる．

(3) 同方向回転時の騒音：後段風車ロータが前段風車ロータと同方向に回転している場合(相対周速比 $\lambda_T=1.43$ および 3.99)⁽¹⁾のスペクトル分布と等価騒音レベル $L_{Aeq,T}$ を図 10 に示し，Hanson の式から求めた干渉騒音の周波数 f の予測結果を表 3, 4 に示す．相対周速比が増大すると，干渉騒音による騒音レベルが全体的に高くなり，1200Hz ~ 1900Hz の広帯域周波数の騒音レベルの上昇が顕著になる(図 10)．これは，後段風車ロータが前段風車ロータと同方向に回転することにより，後段ブレードの迎え角が著しく大きくなり，ブレード全域で大規模な流れの剥離を起こすことによる乱流騒音と考えられる．この時の M3 断面における軸方向速度変動波形(図 11, 12)を比較すると，後段風車ロータ(前段と同方向に回転)の回転速度が遅い $\lambda_T=3.99$ にお

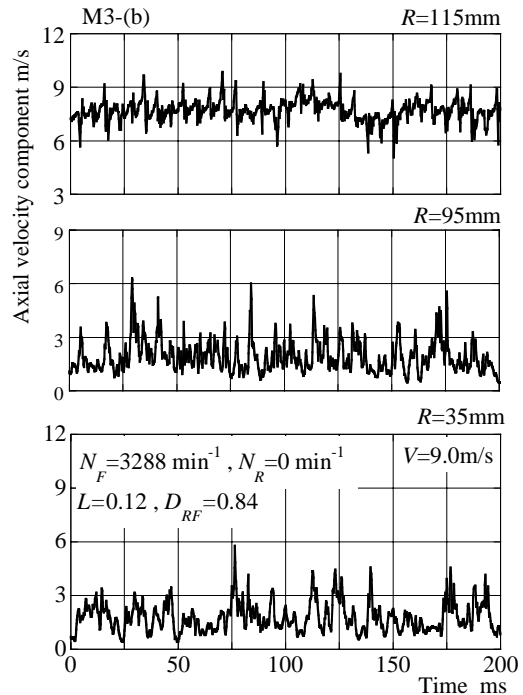


Fig. 9 Axial velocity fluctuations of tandem rotors at M3 (Downstream of the rear wind rotor)

いて、周期的に激しい速度変動が表れていることがわかり、これは後段が停止している時よりも顕著である(図 8, 9 参照)。以上のことは、後段風車ロータが大規模な剥離を伴い停止している状態から同方向に回転を始めると、ブレードの迎え角が更に増大する。それに伴って、極端な速度変動が誘発され、その速度変動に伴う乱流騒音が顕著になる。

文献

- (1) Kubo, K. et al, JSME International Journal of fluid science and technology Vol.3, No.3, Special Issue on Utilizations of Renewable Fluid Energy, (2008), pp. 370-378 .
 (2) Kubo, K. et al, Proceedings of 18th International Offshore and Polar Engineering Conference Vol.1, (2008), pp.441-446 .
 (3) 金元海翔月ほか, 日本機械学会 2006 年度年次大会, (2006) .

Table.3 Estimated value of $|mZ_2N_2 + kZ_1N_1|$
 $N_2=1224\text{min}^{-1}$, $Z_2=5$, $N_1=2293\text{min}^{-1}$, $Z_1=3$

Sound harmonic m	Load harmonic k	Frequency f Hz
0	-8	1084
2	2	104
6	5	427
	2	771
	1	885

Table.4 Estimated value of $|mZ_2N_2 + kZ_1N_1|$
 $N_2=494\text{min}^{-1}$, $Z_2=5$, $N_1=3474\text{min}^{-1}$, $Z_1=3$

Sound harmonic m	Load harmonic k	Frequency f Hz
0	1	174
1	2	306
2	3	439
	4	612

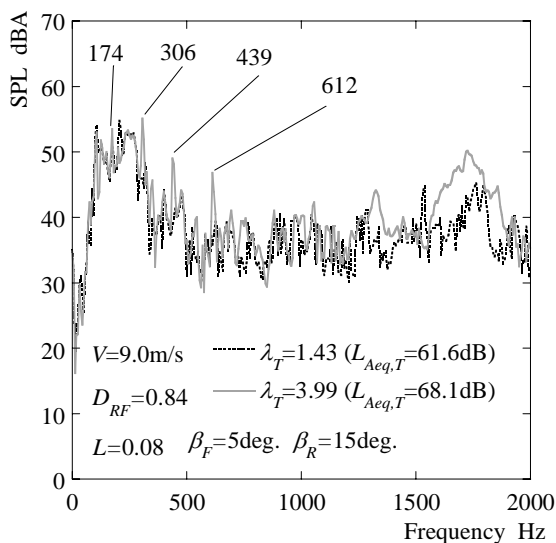


Fig.10 Power spectral density at $\lambda_T=1.43, 3.99$

- (4) Hanson, D.B., Noise off Counter-rotation Propellers, J. Aircraft, 22,(1985), P.609 .
 (5) 久保幸一ほか, 第61回ターボ機械協会総会講演会, (2009), pp. 226-231 .

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)

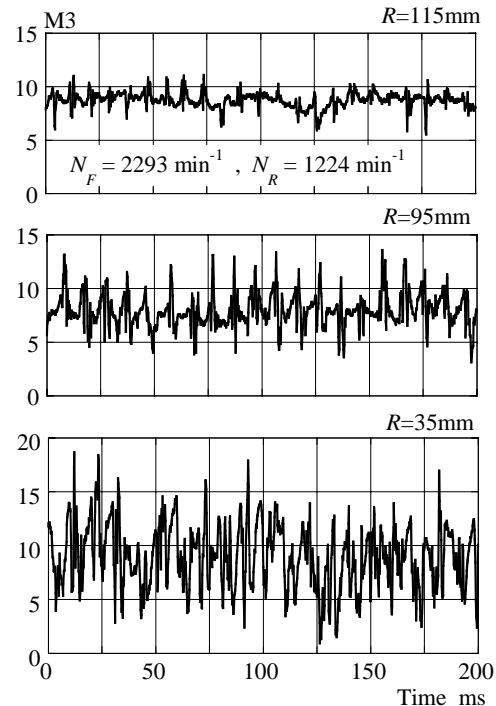


Fig.11 Axial velocity fluctuations at M3 at $\lambda_T=1.43$

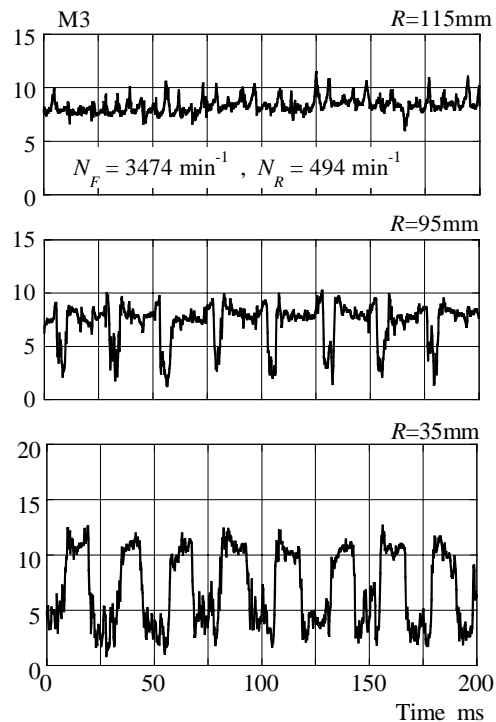


Fig.12 Axial velocity fluctuations at M3 for $\lambda_T=3.99$

〔雑誌論文〕(計8件)

- 1 K.Kubo, Y.Hano, H.Mitarai, K.Hirano, T.Kanemoto and A.M.Galal, "Intelligent Wind Turbine Unit with Tandem Rotors (Discussion of Prototype Performances in Field Tests)", Proceedings of the International Conference and Exhibition of Renewable Energy 2008, CD-ROM O-WE-014, 2008, 査読有.
- 2 K.Kubo, T.Kanemoto, H.Mitarai, Y.Hano and K.Hirano, "Intelligent Wind Turbine Generator with Tandem Rotors Applicable to Offshore Wind Farm (Profiles and Performances as Tandem Wind Rotors)", Proceedings of 18th International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol.1, 2008, pp.441-446, 査読有.
- 3 A.M.Galal and T.Kanemoto, "Field Tests of Wind Turbine Unit with Tandem Wind Rotors and Double Rotational Armatures", JSME International Journal of Fluid Science and Technology, Vol.3, No.3, 2008, pp.359-369, 査読有.
- 4 K.Kubo and T.Kanemoto, "Development of Intelligent Wind Turbine Unit with Tandem Wind Rotors and Double Rotational Armatures (2nd Report, Characteristics of Tandem Wind Rotors)", JSME International Journal of Fluid Science and Technology, Vol.3, No.3, 2008, pp.370-378, 査読有.
- 5 N.Mihara, T.Kanemoto and H.Mitarai, "Intelligent Wind Turbine Generator with Tandem Rotors (Optimization of Wind Rotor Profiles and Acoustic Noise)", Proceedings of the International Symposium on EcoTopia Science 2007, 1, 2007, CD-ROM 24E03-10(1141), 査読有.
- 6 H.Mitarai, K.Kubo, K.Ikeda and T.Kanemoto, "Preparation of Prototype Intelligent Wind Turbine Generator", Proceedings of 9th Asian International Conference of Fluid Machinery, CD-ROM AICFM9-329, 2007, 査読有.
- 7 T.Kanemoto, H.Mitarai, K.Kubo et al., "Almighty High Output Intelligent Wind Turbine Generator with Tandem Wind Rotors", Proceedings of 5th ASME/JSME Joint Fluid Engineering Conference, CD-ROM FEDSM-2007-37541, 2007, 査読有.
- 8 T.Kanemoto, A.M.Galal, K.Ikeda, H.Mitarai and K.Kubo, "Intelligent Wind Turbine Generator with Tandem Rotors Applicable to Offshore Wind Farm (Characteristics of Peculiar Generator, and Performance of Three Dimensional Blades)", Proceedings of 17th International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol.1, 2007, pp.363-368, 査読有.

〔学会発表〕(計3件)

- 1 金元敏明, 風況を選ばない高出力インテリジェント風力発電機の実用化研究, 北九州学術研究都市第8回産学連携フェアセミナー, 2008年10月10日, 北九州

- 2 金元敏明, タンデムロータ型インテリジェント風力発電機の研究開発, ターボ機械協会第59回総会講演会, 2008年5月16日, 東京
- 3 金元敏明, タンデムロータ型インテリジェント風力発電機: 風車ロータの最適化, 日本機械学会平成19年度年次大会, 2007年9月10日, 大阪

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称: 風力発電装置
発明者: 金元 敏明
権利者: 九州工業大学
種類: 特許
番号: 特願 2009-020675
出願年月日: 2009年1月30日
国内外の別: 国内(PCTルート)

取得状況(計1件)

名称: 風力発電装置およびその装置を使用した風力発電方法
発明者: 金元 敏明
権利者: 科学技術振興機構
種類: 特許
番号: 特許第 4040939 号
出願年月日: 2007年10月 9日
国内外の別: 国内

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