

直線翼式垂直軸風車における
起動性の向上に関する研究

平成25年4月

直井和久

目 次

第1章 序論	1
1. 1 日本におけるエネルギー政策とエネルギーの需給状況	1
1. 2 本研究の背景	6
1. 3 本研究の目的	8
1. 4 本論文に用いる主要な記号と用語	10
第2章 翼枚数による起動性の向上	11
2. 1 起動トルク特性試験	11
2. 1. 1 直線翼式垂直軸風車の概要	11
2. 1. 2 起動トルク特性試験の方法	13
2. 1. 2 翼枚数と起動トルク特性	15
2. 2 負荷特性試験	30
2. 2. 1 負荷特性試験の方法	30
2. 2. 2 翼枚数と負荷特性	32
2. 3 起動風速試験	37
2. 3. 1 起動風速試験の方法	37
2. 3. 2 翼枚数と起動風速	40
2. 4 まとめ	42
第3章 翼取付角度による起動性の向上	44
3. 1 起動トルク特性試験	44
3. 1. 1 翼取付角度 $-6 \sim +6 \text{ deg}$ における起動トルク特性	44
3. 1. 2 翼取付角度 $30 \sim 90 \text{ deg}$ における起動トルク特性	49
3. 2 負荷特性試験	52

3. 3	まとめ	56
第4章	補助翼による起動性の向上	58
4. 1	固定角補助翼による起動性の検討	58
4. 1. 1	補助翼の寸法と取付位置が風車の起動トルクに及ぼす影響	59
4. 1. 2	補助翼の取付角度が風車の起動トルクに及ぼす影響	63
4. 2	開閉式補助翼による起動性の検討	68
4. 2. 1	固定角補助翼により開閉式補助翼を模擬する実験	68
4. 2. 2	開閉式補助翼による起動トルク特性	72
4. 2. 3	開閉式補助翼による風車起動風速への影響	87
4. 3	まとめ	90
第5章	結論	92
	参考文献	95
付 録	直線翼式垂直軸風車の回転原理	98
	著者発表論文	100
	謝 辞	114

第1章 序論

1. 1 日本におけるエネルギー政策とエネルギーの需給状況

図1-1は日本における電源別発電設備構成比の推移⁽¹⁾である。日本における発電設備は、戦後の水力発電設備を中心とした水主火従の設備構成から、当時は安価な資源であった石油による火力発電を中心とした火主水従の設備構成へとシフトした。また、火力発電設備においては国内で産出された石炭による石炭火力が中心であったが、輸入された石油による石油火力を中心とした設備にシフトした。しかし、1973年（昭和48年）からは2度の石油ショックと悪化する環境問題への対応のため脱石油火力の動きとなり電源の多様化が急速に進められた。現在の日本のエネルギー自給率はわずか4%であり石油、石炭、LNG、水力、原子力など多様な電源により構成されたベストミックスと呼ばれる電力供給体制をとっている。

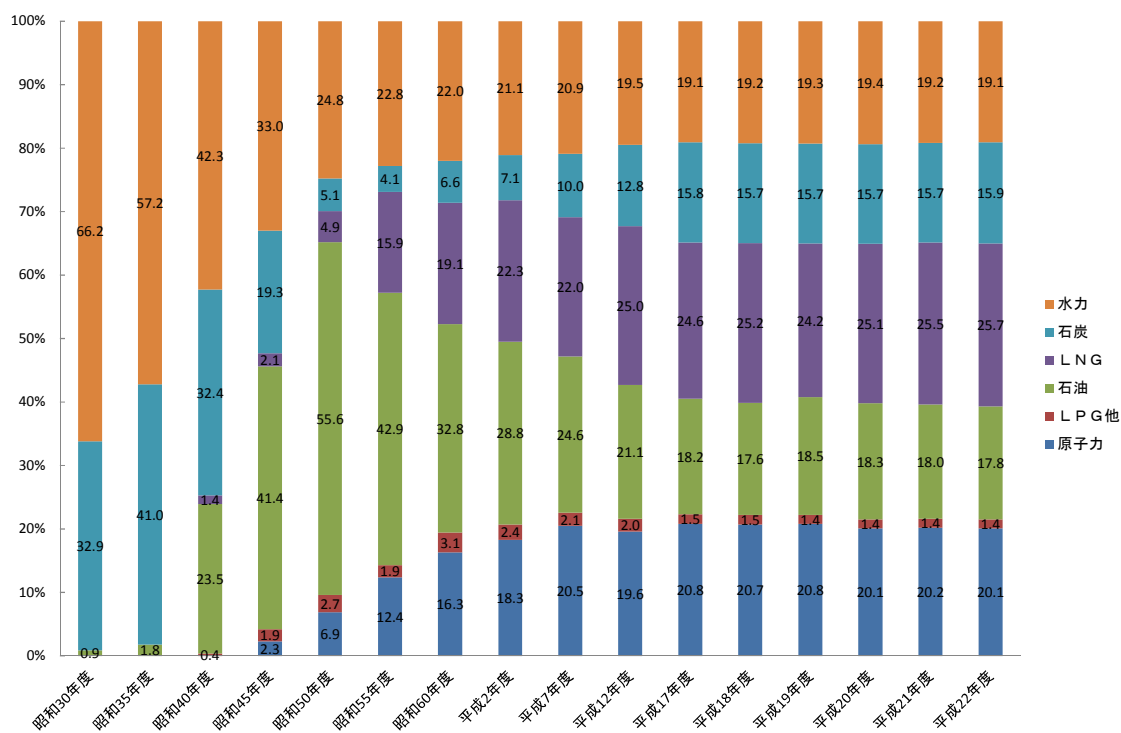


Fig. 1-1. Trends in power generation facilities composition ratio in Japan.

図1-2は世界の一次エネルギー消費量の推移⁽¹⁾である。世界の一次エネルギー消費量は長期的には増加傾向である。2009年における一次エネルギー消費量の世界合計は石油換算111億64百万トンであり、2009年の消費量は1994年に対して1.34倍となっている。世界の一次エネルギー消費量は欧州、ロシア、北米などは比較的低い伸び率であるのに対して、アジア太平洋州、アフリカ、中東、中南米などでは大幅な増加が続いている。また、2009年における日本の一次エネルギー消費量は472百万トンであり、世界全体に占める日本の一次エネルギー消費量は約4.2%である。2009年における日本の一次エネルギー消費量は1994年対比0.98倍、近年で最も消費量の大きい2004年対比では0.90倍であり減少傾向である。

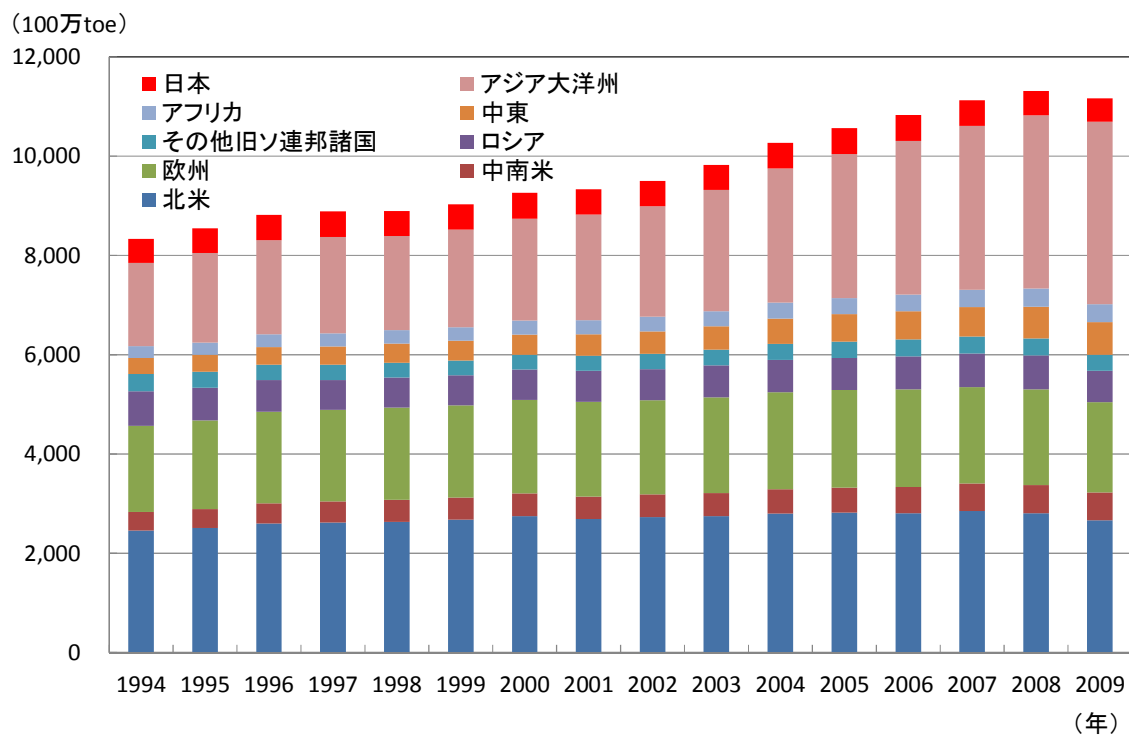


Fig. 1-2. Transition in the world's primary energy consumption.

図1-3に主要国のエネルギー輸入依存度を示す。図1-3に示す主要先進国におけるエネルギーの海外依存度は、日本をはじめ自国にほとんど資源を持たない韓国、イタリア、フランスなどがいずれも高い数値を示している。日本において火力発電や原子力発電の燃料となる石油、LNG、ウランはその殆どを輸入に頼ってい

る状況にある。一方、自国で石油を生産し豊富な水力資源を持つカナダはエネルギーの輸出国となっている。また、イギリスは1975年頃まで石油を中心に全エネルギーの40%以上を海外から輸入していたが、北海油田の開発により、現在はエネルギーの輸入依存度が低くなっている。

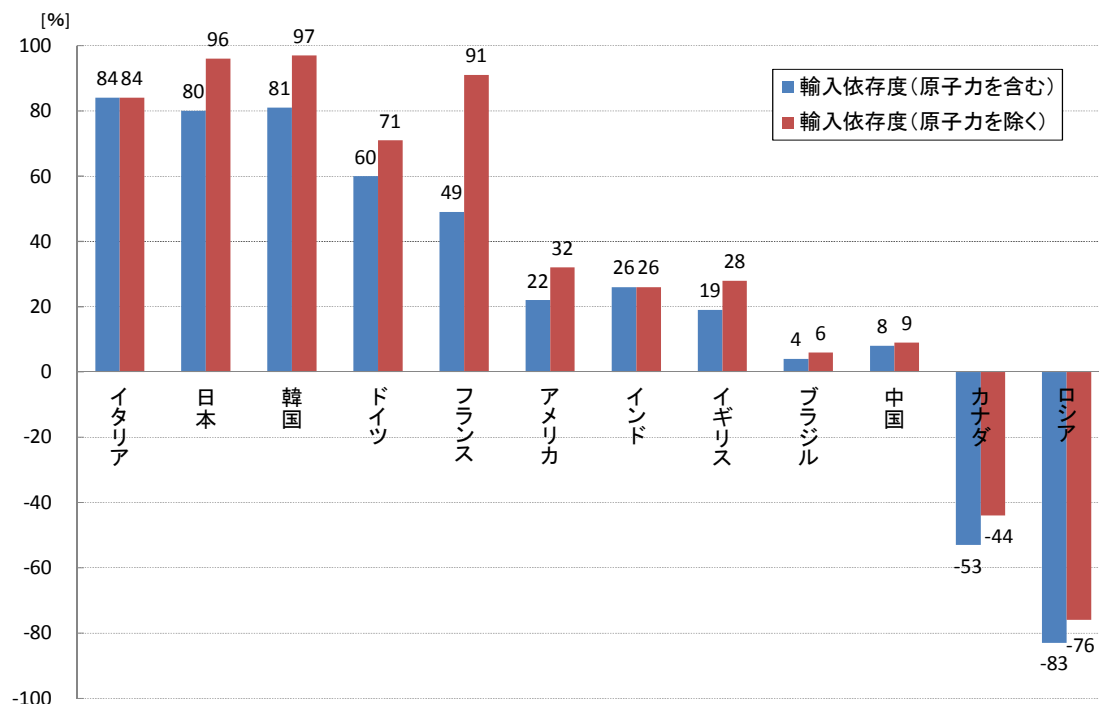


Fig. 1-3. Dependence on energy imports in major countries.

日本では温室効果ガスの約9割をエネルギー起源の二酸化炭素が占める。このため、地球温暖化対策はエネルギー政策の根幹の1つとなっており、日本では2020年までに温室効果ガスを1990年比で25%削減するとの目標を掲げている。平成22年6月に閣議決定された新成長戦略においても、7つの戦略分野の第一の柱である「グリーン・イノベーションによる環境・エネルギー大国戦略」の中で、2020年までの目標として、「日本の民間ベースの技術を活かした世界の温室効果ガスの削減量を13億トン以上とすること（日本全体の総排出量に相当）」が掲げられた⁽²⁾。

図1-4に日本の電源別ライフサイクルアセスメントCO₂の比較⁽¹⁾を示す。図1-4に示すように石炭、石油、LNGなど火力発電所では化石燃料の消費にともな

う二酸化炭素の排出問題がある。一方、太陽光や風力など新エネルギーによる発電では設備の建設や運用に係わる二酸化炭素排出のみであり、化石燃料を消費しないため二酸化炭素の排出は極めて少ない。しかし、太陽光や風力による発電出力は自然条件に左右されるため、電力系統へ連系する発電装置の場合、周波数や需給運用など電力系統に影響を及ぼさないことが必要であり、連系可能量が予め設定される。このため、エネルギー安定供給の点から太陽光や風力と同様に二酸化炭素の排出が極めて少ない原子力は優位であるが、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）による東京電力（株）福島第一原子力発電所の大規模な事故を契機に、安全性について現在再検証されている。このような背景から、エネルギーの安定供給と二酸化炭素排出量の低減を満足する新しい電源として新エネルギーへの期待が再び高まっている。

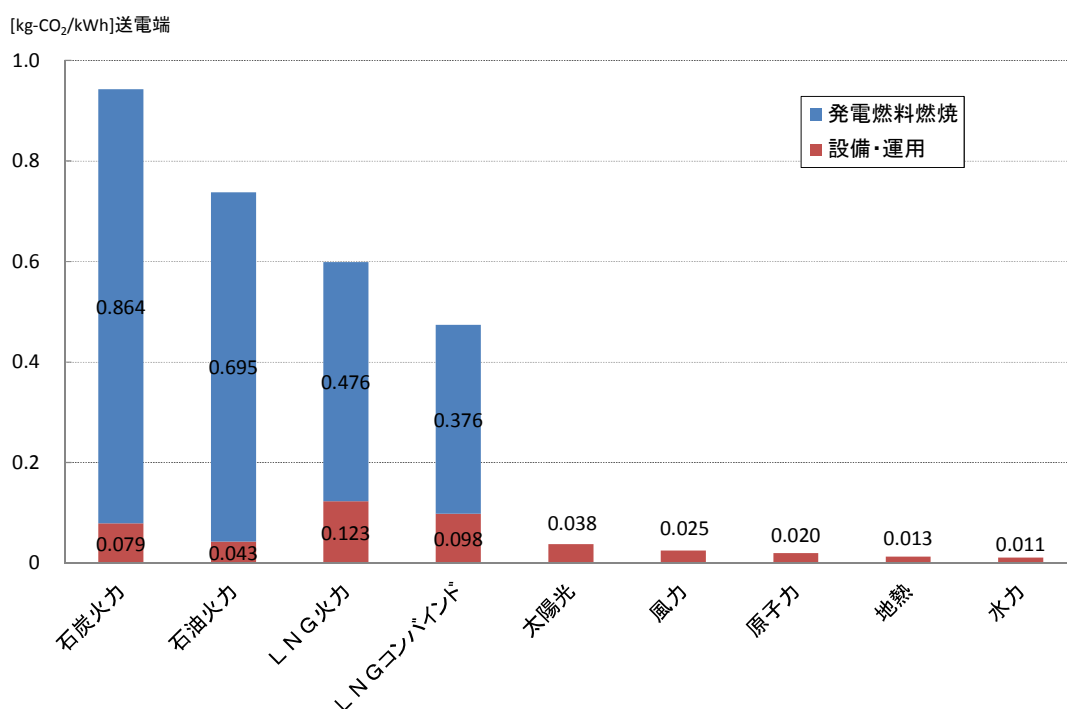


Fig. 1-4. Life Cycle Carbon Assessment Comparison of different power generation facilities of Japan.

新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法施行令（2008年1月改正）において、新エネルギーとは、『非化石エネルギーを利用した発電のうち、バイオマ

ス又はバイオマスを原材料とする燃料を発電に利用すること。地熱を発電（アンモニア水、ペンタンその他の大気圧における沸点が百度未満の液体を利用する発電に限る。）に利用すること。風力を発電に利用すること。水力を発電（かんがい、利水、砂防その他の発電以外の用途に供される工作物に設置される出力が千キロワット以下である発電設備を利用する発電に限る。）に利用すること。太陽電池を利用して電気を発生させること。』とされている。

新エネルギーは地球温暖化の主因とされる二酸化炭素の排出量が少ないことや、石油や石炭など化石資源の使用を抑制できるなどの利点がある一方、自然条件に左右され発電が不安定でコストが高いなどの欠点がある。風力発電の発電コストは、新エネルギーによる発電の中でも比較的優れているといわれ、2010年における発電単価は陸上風力発電9.9～17.3円/kWh、洋上風力発電9.4～23.1円/kWhである。その他の主な新エネルギーによる発電単価は住宅用太陽光発電33.4～38.3円/kWh、メガソーラー発電30.1～45.8円/kWh、地熱発電9.2～11.6円/kWhである⁽³⁾。また、石炭火力発電9.5～9.7円/kWh、LNG火力発電10.7～11.9円/kWh、石油火力発電20.8～37.6円/kWh、一般水力発電10.6円/kWh、小水力発電19.1～22.0円/kWh、原子力発電8.9円/kWh⁽³⁾であることから、新エネルギーによる発電は既存の発電設備と比較して割高である。

離島など燃料の運搬が困難でディーゼル発電装置による電源確保が困難な場所では、新エネルギーのように発電単価の割高な電源であっても経済的なメリットがあると考えられる。たとえば、海上交通安全のための航路標識は、海上交通の要所に設置されているが、これらの場所は商用電源の確保が困難である。大規模な箇所ではディーゼル発電装置を使用するため軽油などの燃料を定期的に補給しているが、前述のような場所で燃料補給を必要としない独立電源を確保するには、太陽光、風力、波力、潮流などの新エネルギーを利用する必要がある。太陽光エネルギーは夜間に使用することはできないが、風力、波力、潮流エネルギーは昼夜を問わず使用することが可能である。また、波力、潮流エネルギーは設置場所が海面に近い場所に限られるのに対して、風力エネルギーは風況の良い場所であれば設置場所が限定されないため有利である。そこで、本論文では新エネルギー発電のなかでも優位な点が多い風力エネルギーによる発電に着目する。

1. 2 本研究の背景

風力エネルギーを動力に変換するために風車が利用される。古くは製粉や揚水のための動力として利用されていたが、近年では発電に利用されている⁽⁴⁾。風車は回転軸の方向によって水平軸風車と垂直軸風車に大きく分けられる。水平軸風車としては商用発電用として主流となっている3枚翼のプロペラ風車(図1-5(a))がある⁽⁴⁾。垂直軸風車は商用発電への利用例は少ないが、風向きに対する依存性がなく、発電機等の重量物を地上に設置できることや、翼の製造がプロペラ風車と比較して容易であるなどの利点がある。

また、風車を回転原理によって分類すると、主に翼の揚力を利用する高速回転の揚力形と、主に翼の抗力を利用する低速回転の抗力形に分けられる。前述のプロペラ風車、後述のダリウス風車や直線翼式垂直軸風車は揚力形に分類される。抗力形風車としてはサボニウス風車や多翼風車、クロスフロー風車などがある。揚力形風車は高回転速度かつ低トルクであり、効率特性に優れているが起動性が悪い⁽⁵⁾という特徴をもつ。抗力形風車は低回転速度かつ高トルクであり、起動性に優れているが効率が悪いという特徴をもつ。発電装置として利用する風車の場合、効率の優れている方が出力は大きく有利なため、揚力形風車を採用する方が多い。



(a) Horizontal axis wind turbine.



(b) Vertical axis wind turbine.

Fig. 1-5. Classification example of a wind turbine.

垂直軸風車のなかでも揚力形のダリウス風車が良く知られている⁽⁵⁾。ダリウス風車はフランスのG. J. M. Darrieusにより提案され特許出願された風車⁽⁶⁾である。当初、ダリウス風車は風車概形は回転軸に対して弓なりの翼をもつトロポスキエン式の翼形状であったが、後に風車の回転軸と平行な直線状の翼を持つ直線翼式垂直軸風車（図1-5（b））が提案され効率特性が改良されている。直線翼式垂直軸風車は効率特性に優れているが、自己起動性に乏しく、ピッチ角制御による回転数制御が難しい等の短所がある。

岬の先端や岩礁上、無人島などでは、複雑な地形のために風の方向や強さが激しく変動し、一般のプロペラ風車では翼の方向やピッチ角の制御が追いつかず風車が破損することもある⁽⁷⁾⁽⁸⁾。垂直軸風車は風向に依存しないため、このような場所では有利であるが、前述したように揚力形風車は抗力形風車と比べて起動性に劣る⁽⁵⁾という問題点がある。たとえば、プロペラ風車では起動性を向上させるため翼のピッチ角を制御しているが、ダリウス風車ではトロポスキエン式の翼形状をもつため、プロペラ風車のピッチ角に相当する翼の取付角度を制御することはできない。ピッチ角の制御が可能な揚力形垂直軸風車に、風車の回転軸と平行な直線状の翼を持つジャイロミル風車を挙げるができるが、風速変化の激しい場所に設置する場合、ピッチ角を風速変化に追従させることが難しい。また、翼の支持部を可動させるため破損のリスクが高まる。したがって、本研究では翼取付角度固定の直線翼式垂直軸風車を利用することを前提とし、利点である高い効率特性を損なわず、起動性を向上させることを目的に次項で述べる検討をおこなう。

1. 3 本研究の目的

我々はこれまでに直線翼式垂直軸水車を利用した潮流発電装置（図1-6）を開発⁽⁹⁾しており，航路標識用独立電源⁽¹⁰⁾などに採用例がある。潮流発電用水車⁽¹¹⁾の翼にはNACA63₃-018⁽¹²⁾を基にした円弧キャンバー翼が用いられており，直線キャンバー翼の場合よりも水車効率が高くなる⁽¹³⁾という特徴がある。



(a) Examples of tidal power generation equipment.



(b) Measurement of characteristics by use of water channel.

Fig. 1-6. Tidal power generation equipment and water turbine.

翼に直線翼を用いた直線翼式垂直軸風車では，起動性を重視して設計した場合，起動装置は不要であるとされている⁽⁵⁾。一方，効率を重視して設計した場合は起動装置が必要とされている。

起動には以下の方法が提案されているが，それぞれ起動に伴う欠点を併せ持っている。高見らはダリウス風車を利用して商用電源と系統連系して使用する風力発電装置の開発において，起動時に発電機を電動機として駆動させている⁽¹⁴⁾。この装置では例えば商用電源と連系せず自立した電源装置として利用することを目的とした場合，駆動用電力を確保する必要があり不利となる。また，L. L a z a u s k a sらは風車の回転軸と平行な直線状の翼を持つジャイロミル風車において起動

時に翼の取付角度を制御する風車を提案している⁽¹⁵⁾。この論文は理論計算による検討であり、提案された風車を風の方向や強さが激しく変動する場所に設置すると、翼の取付角度を風に追従して制御することが難しく、また翼の支持部を可動させるため風車の構造は複雑化し破損の原因になると考えられる。さらに、岡本らは起動時に大きなトルクを発生する抗力形のサボニウス風車と揚力形の直線翼式垂直軸風車を機械的に結合し、揚力形と抗力形のハイブリッド風車として利用する方法を提案している⁽¹⁶⁾。このハイブリッド風車は2つの風車が1本の回転軸を共有するため、サボニウス風車が回転の妨げとなり、直線翼式垂直軸風車のみの場合と比較して揚力形風車が高い効率を示す回転速度において出力が低下するため不利である。

本研究では風車の翼に効率の高い円弧キャンバー翼を採用し、直線翼式垂直軸風車の短所である起動性を向上させることを目的とする。第2章では直線翼式垂直軸風車の翼枚数が起動性および効率に及ぼす影響について検討する。また、寸法の異なる2種類の風車により、風車寸法がそれぞれの特性に及ぼす影響についても検討する。第2章の検討結果をもとに効率を重視した翼枚数を採用し、起動性の向上について検討する。第3章では翼の取付角度により、第4章では風車の翼に補助翼を取り付けることにより風車の起動性を向上させる方法を検討する。第5章では第2章～第4章における風車寸法および翼枚数、翼の取付角度、補助翼の検討結果をふまえ、直線翼式垂直軸風車の起動性を向上させる方法について、それぞれ方法による得失と風車効率の点から考察する。

1. 4 本論文に用いる主要な記号と用語

本論文に用いる式の記号と用語を以下に示す。

記号	用語	単位
A	翼面積	m^2
C_D	抗力係数	-
C_L	揚力係数	-
C_T	風車のトルク係数	-
D	風車直径 ($=2R$)	m
F_D	抗力	N
F_L	揚力	N
F_T	翼 1 枚に働く力	N
H	風車高さ	m
N	回転検出器により測定した風車の回転速度	min^{-1}
P	風車出力	W
r	風車半径 ($=D/2$)	m
S	風車の受風面積 ($=DH$)	m^2
T	トルク検出器により測定した風車のトルク	Nm
T_1	翼 1 枚に働くトルク	Nm
T_q	n 枚翼風車に発生する 1 回転中の平均トルク	Nm
u	翼の周速度	m/s
V	風洞施設の測定風速	m/s
v	風速	m/s
w	翼に対する相対速度	m/s
α	迎角	deg
η	風車の効率	-
θ	$\alpha=0deg$ を基準とした風車の回転位置角	deg
λ	周速比	-
ρ	空気密度	kg/m^3
ω	風車の回転角速度 ($=2\pi N/60$)	rad/s
ω_T	回転角速度	rad/s

第2章 翼枚数による起動性の向上

一般に風車の翼枚数と起動性については、回転円周に対して翼のそり線の長さの占める割合（ソリディティ）と関係がある。翼枚数の増加によりソリディティが大きくなると起動トルクは増加し起動性は良くなるが効率は低くなるとされている。しかし、翼枚数の変化に対して起動トルク特性や起動風速がどのような関係となるかは報告されていない。そこで、本章では風車の翼枚数を変化させて風車の起動性に与える影響について検討する⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。また、風車の翼に働く力は流体力学におけるレイノルズ数を用いると、レイノルズ数を同一とすれば流れの相似性が成り立つとされている。そこで、風車の翼はアメリカのNACA（National Advisory Committee for Aeronautics）による翼型であるNACA63₃-018を基にした円弧キャンバー翼を用いて寸法の異なる2種類の風車を試作し、風車の寸法が起動性に与える影響について検討する。さらに、風車の特性としては風力エネルギーを機械エネルギーに変換する効率、すなわち風車効率が重要であり、この検討のために風車回転時の負荷特性についても検討する。

2.1 起動トルク特性試験

2.1.1 直線翼式垂直軸風車の概要

本研究で用いる直線翼式垂直軸風車の概形を図2-1に、その仕様を表2-1に示す。風車の寸法は直径600mm、高さ450mmのD600×H450風車、直径1600mm、高さ1600mmのD1600×H1600風車の2種類とした。この風車は複数枚の直線翼を回転軸に対して平行に配置したものである。翼枚数はD600×H450風車では1～6枚の6種類、D1600×H1600風車では3,4枚の2種類とした。翼弦長 c はD600×H450風車では100mm、D1600×H1600風車では280mmである。

翼形状は図2-2に示すようにNACA63₃-018をもとに翼の中心線を風車の回転軌跡と一致させた円弧キャンバー翼である。

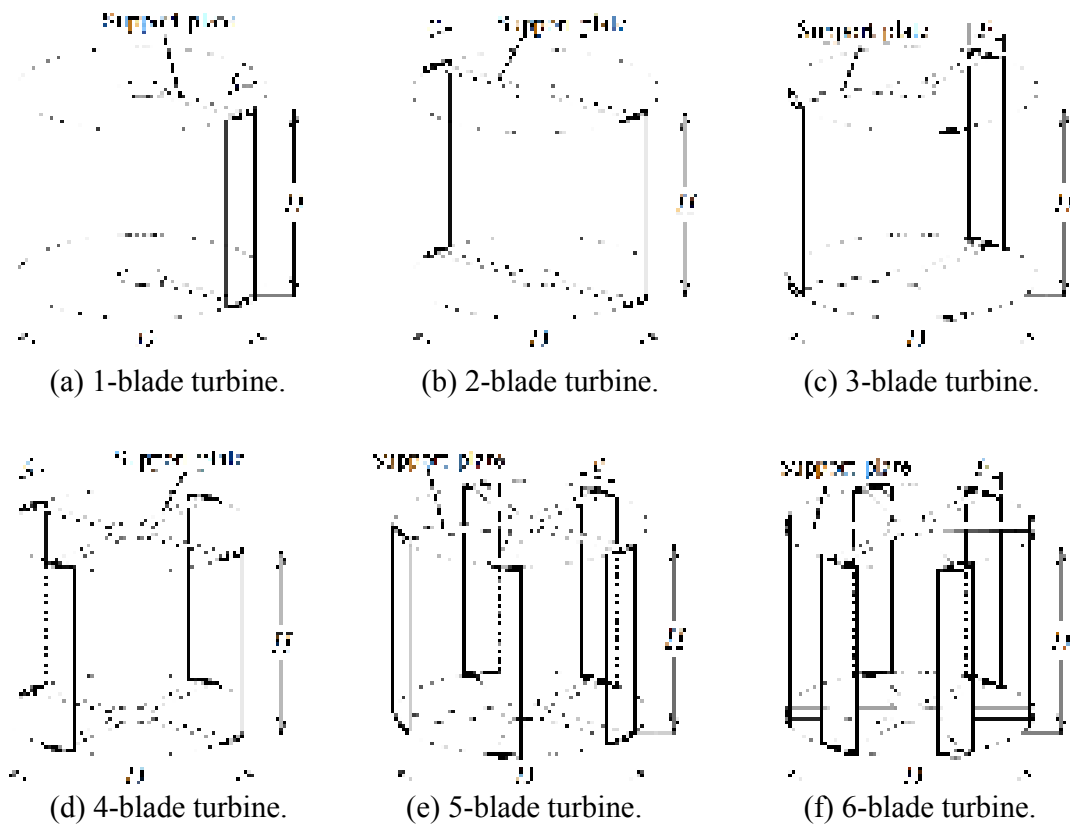


Fig. 2-1. Outline of straight-bladed vertical axis wind turbine.

Table 2-1. Specification of turbine.

Turbine size	D600×H450	D1600×H1600
Number of blade	1,2,3,4,5,6	3,4
Diameter : D [mm]	600	1600
Height : H [mm]	450	1600
Chord length : c [mm]	100	280
Camber length [mm]	105.5	281.5

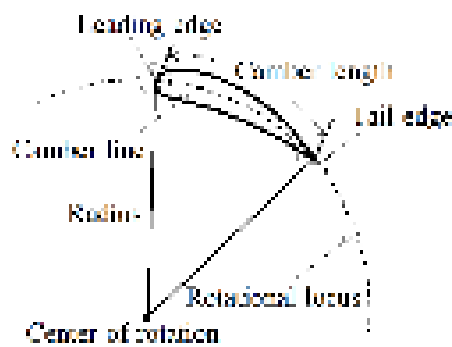


Fig. 2-2. Outline of arc camber blade.

2. 1. 2 起動トルク特性試験の方法

起動トルク特性試験では風車が停止した状態におけるトルクを計測する。風車の翼枚数を1～6枚とした場合の位置角 θ と翼の関係を図2-3に示す。風車の位置角を定義するために基準となる翼を定め、これをA翼とする。翼が複数枚となる場合、A翼以外の翼を翼枚数に応じて時計回りにB翼、C翼、D翼・・・と定めて区別する。風車が静止した状態でA翼が風向に対して迎角0degとなる位置を、位置角0degと定義とする。起動トルクは位置角0degから5deg間隔で測定する。回転方向は反時計回りを正転とする。

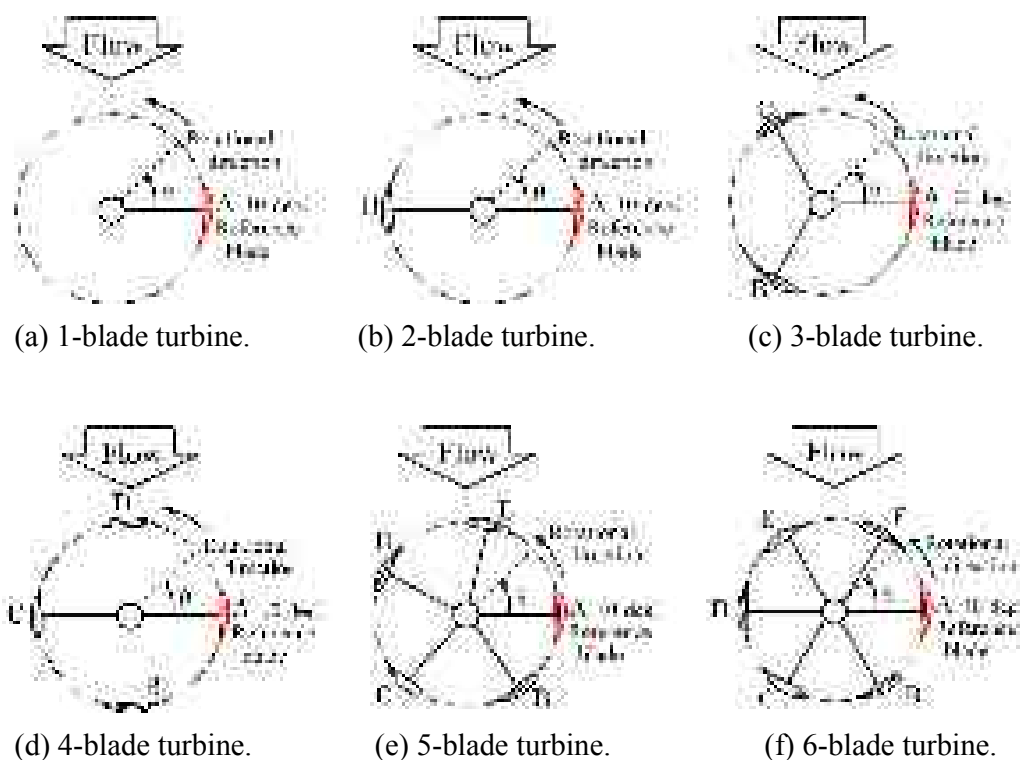


Fig. 2-3. Definition of position angle.

D600×H450風車における起動トルク試験装置を図2-4に示す。D600×H450風車では、サーボモータに内蔵されたエンコーダにより位置制御をおこない任意の位置角に設定する。つぎに風車が回転しないように回転軸を固定し、風洞施設の測定部に任意の風速を設定する。起動トルクの計測にはトルク検出器からのトルク信号をコンピュータに取りこみ、30秒間の平均値として演算処理する。

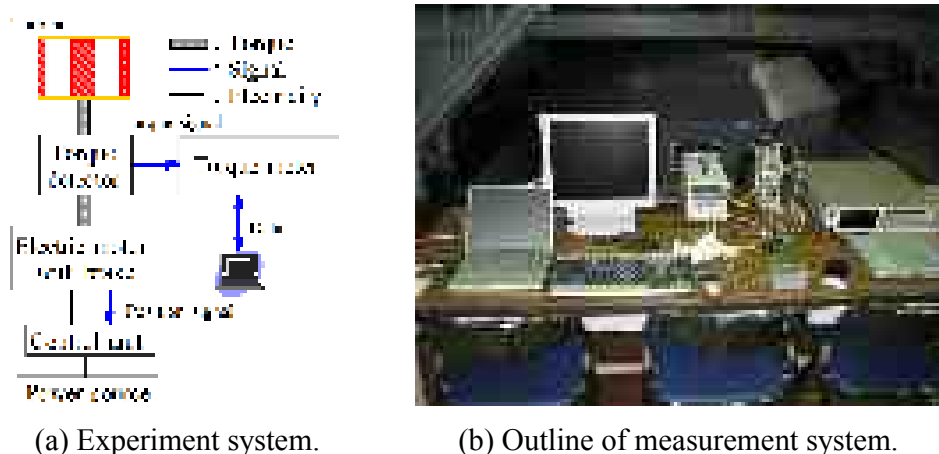


Fig. 2-4. Experiment system of starting torque tests for turbine size of 450mm height and 600mm width.

D 1 6 0 0 × H 1 6 0 0 風車における起動トルク試験装置を図 2 - 5 (a) に示す。D 1 6 0 0 × H 1 6 0 0 風車では、図 2 - 5 (b) に示す回転軸と直結された円盤上に 5 d e g 間隔で空けられた穴に金属製の回転防止ピンを挿入し回転軸を固定する。起動トルクの計測は、位置角と風速を設定したあと検出器からのトルク信号をコンピュータに取りこむ。トルクは 3 0 秒間の平均値として演算処理する。

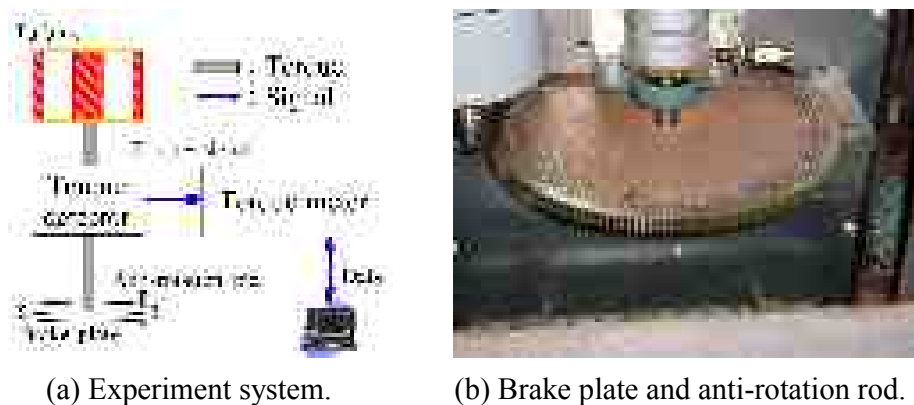


Fig. 2-5. Experiment system of starting torque tests for turbine size of 1600mm height and 1600mm width.

2. 1. 2 翼枚数と起動トルク特性

D 6 0 0 × H 4 5 0 風車よりも D 1 6 0 0 × H 1 6 0 0 風車を採用した方が発電装置として多くのエネルギーを回収できるが、本項では風洞施設の大きさによる制約から D 6 0 0 × H 4 5 0 風車を用いて検討をする。また、後述するように風洞測定部を閉じた状態で使用する場合、風洞施設壁面が風車特性に影響する。このため、その影響を及ぼさないように風洞施設の測定部断面積と風車の受風面積の比は 0. 0 5 ~ 0. 2 の範囲⁽²⁰⁾にする必要があるが、D 6 0 0 × H 4 5 0 風車では 0. 0 6 7 5 であり、これを満たしている。

ここでは D 6 0 0 × H 4 5 0 風車の試験に、図 2 - 6 の循環式開放型風洞装置（測定部：高 1. 3 m，幅 1. 3 m）を使用する。また、風速測定のため熱線式風速計を風洞開口部に設置する。

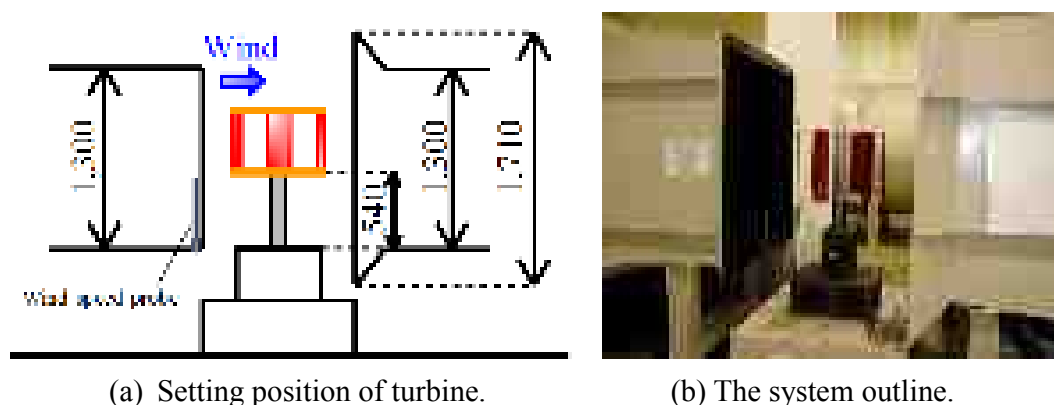
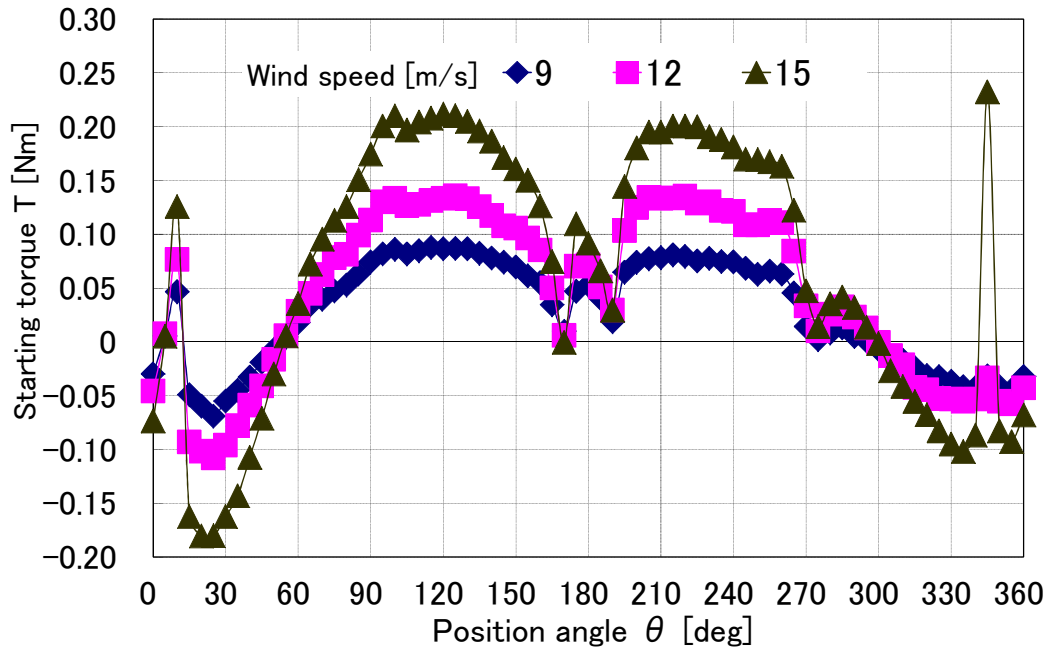


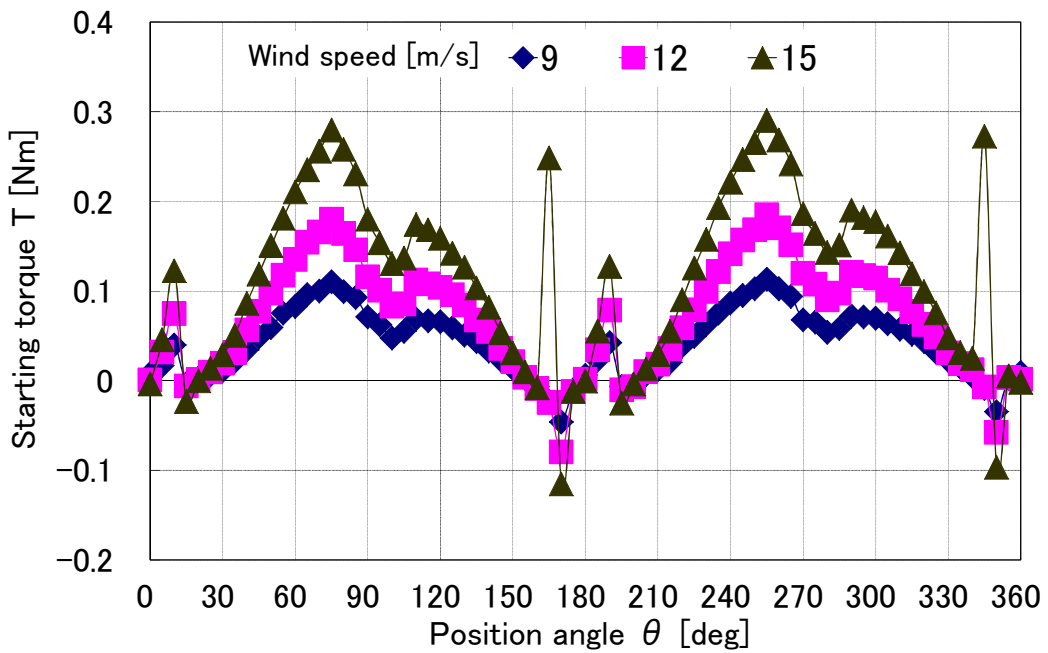
Fig. 2-6. Measurement system about turbine size of 450mm height and 600mm width.

設定風速を 9, 12, 15 m/s としたときの各翼枚数における位置角に対する起動トルク特性を図 2 - 7 に示す。図 2 - 7 (a) ~ (c) に示す 1, 2, 3 枚翼では起動トルクが負になる位置角が存在し、このような位置角からは風車の起動が難しいことが推測される。起動トルクが負になる位置角は、翼 1 枚では 0, 5, 15 ~ 50, 300 ~ 360 deg であるが、2 枚翼では 160 ~ 175, 340 ~ 355 deg, 3 枚翼では 45 ~ 55, 165 ~ 175, 285 ~ 295 deg となり翼枚数の増加にともない負のトルクとなる位置角は減少する。さらに図 2 - 7 (d) ~ (f) に示す翼枚数 4, 5, 6 では起動トルクが負となる位置角は無くな

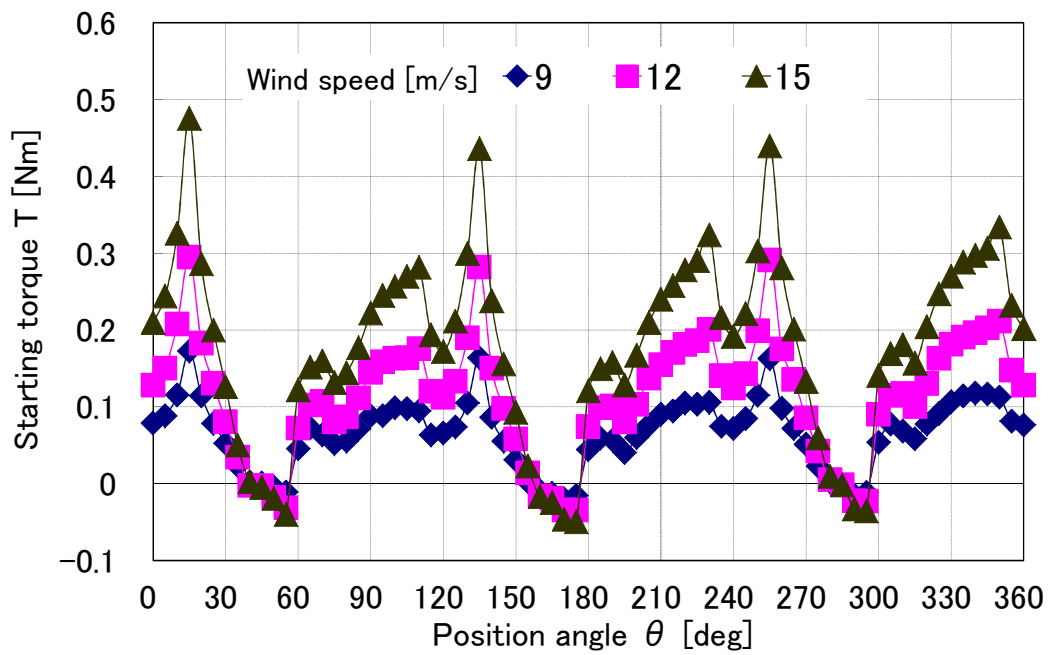
る。



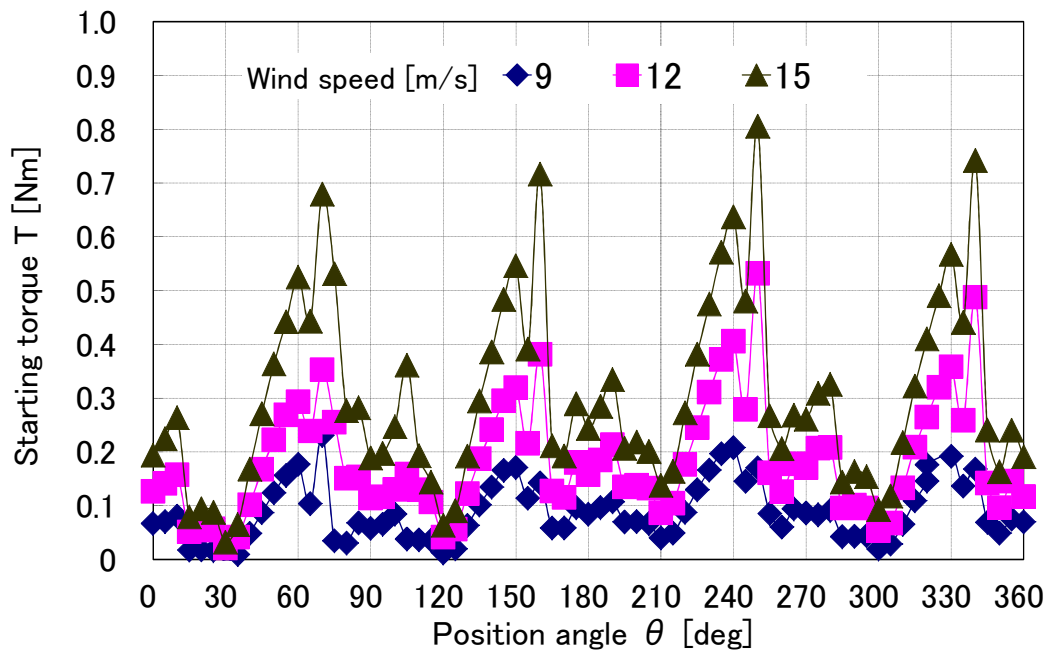
(a) 1-blade turbine.



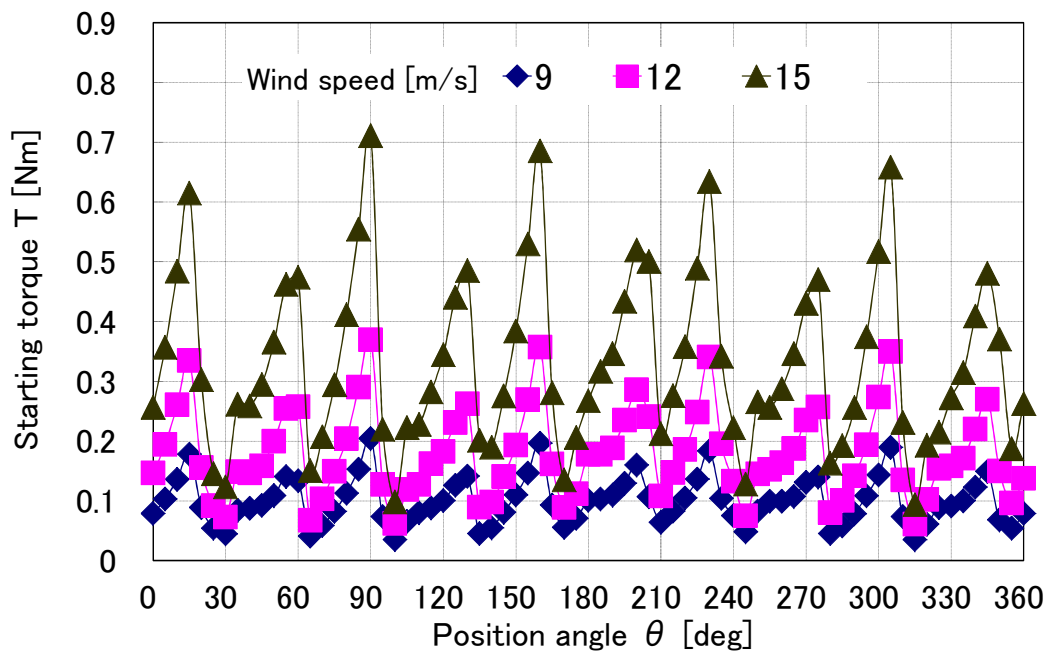
(b) 2-blade turbine.



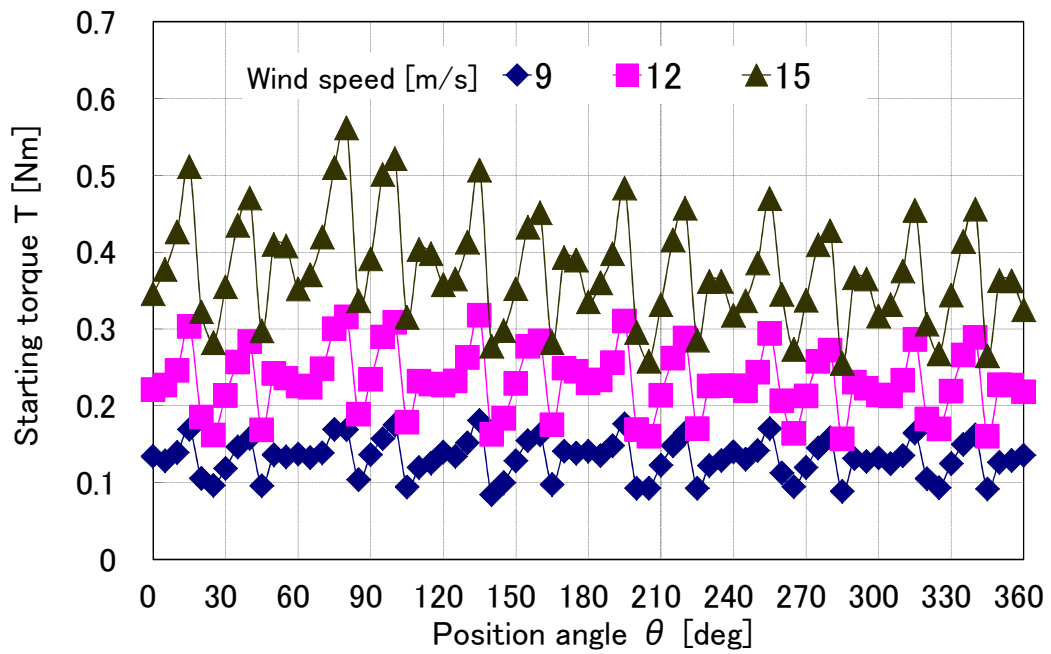
(c) 3-blade turbine.



(d) 4-blade turbine.



(e) 5-blade turbine.



(f) 6-blade turbine.

Fig. 2-7. Characteristics of starting torque.

ここで1回転中の起動トルクを評価するため、風速9, 12, 15 m/sにおける起動トルクの平均値を表2-2に示す。起動トルクの平均値は翼枚数の増加に応じて大きくなり設定した翼枚数1～6枚では設定風速に関わらず翼1枚において最小、6枚翼において最大となる。これは、翼枚数の増加により図2-7に示した起動トルクの負となる位置角の範囲が狭くなるためである。また各翼枚数において起動トルクの平均値は風速の増加に伴い大きくなる。これは、翼に働くトルクは風速の2乗に比例するためである。

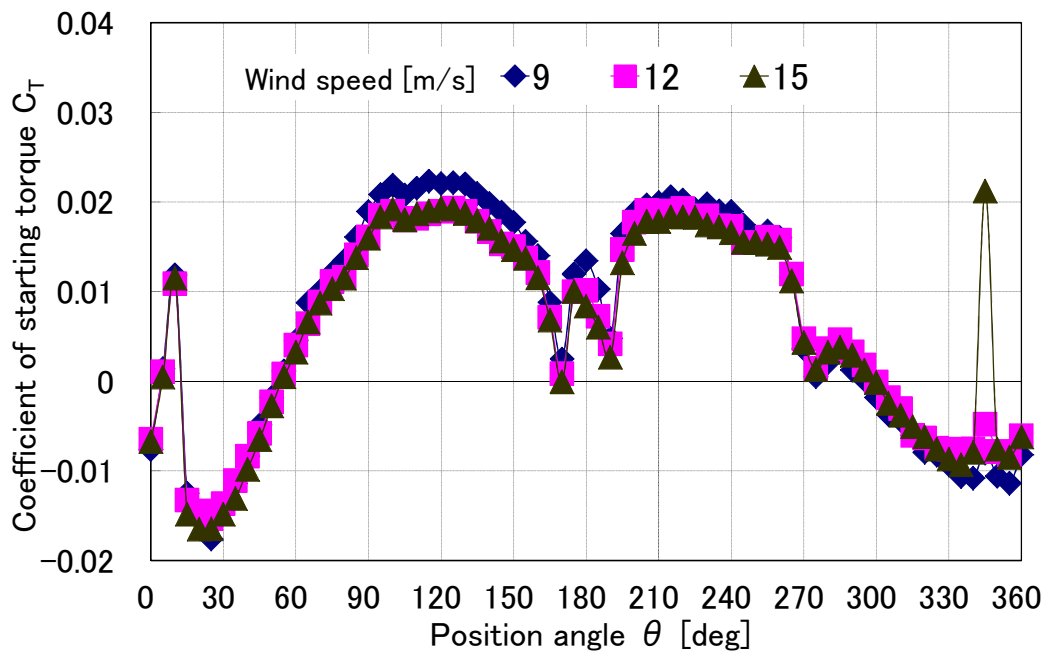
Table 2-2. Average starting torque.

Wind speed [m/s]	Average starting torque [Nm]					
	1-blade	2-blade	3-blade	4-blade	5-blade	6-blade
9	0.029	0.043	0.066	0.088	0.100	0.132
12	0.047	0.070	0.114	0.184	0.179	0.232
15	0.072	0.117	0.178	0.302	0.333	0.377

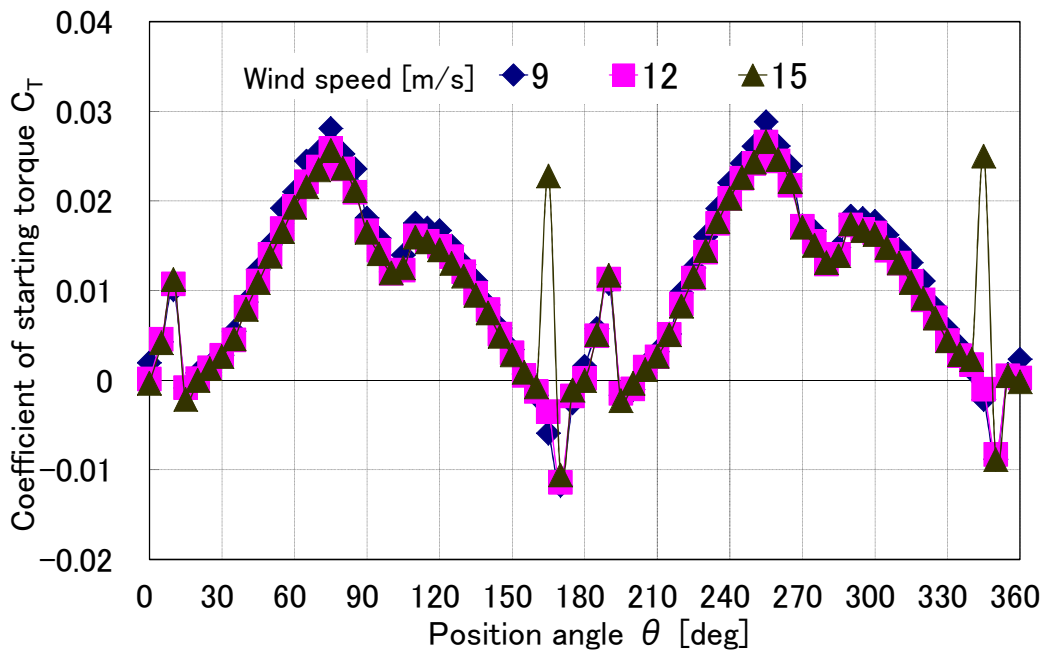
つぎに風速の異なる9～15 m/sの起動トルクを評価するために次式に示すトルク係数を用いる。ただし、 T はトルク検出器により測定したトルク、 S は風車の受風面積、 V は風洞施設で測定した風速の値である。

$$C_T = \frac{T}{0.5\rho S V^2 r} \quad \dots (2-1)$$

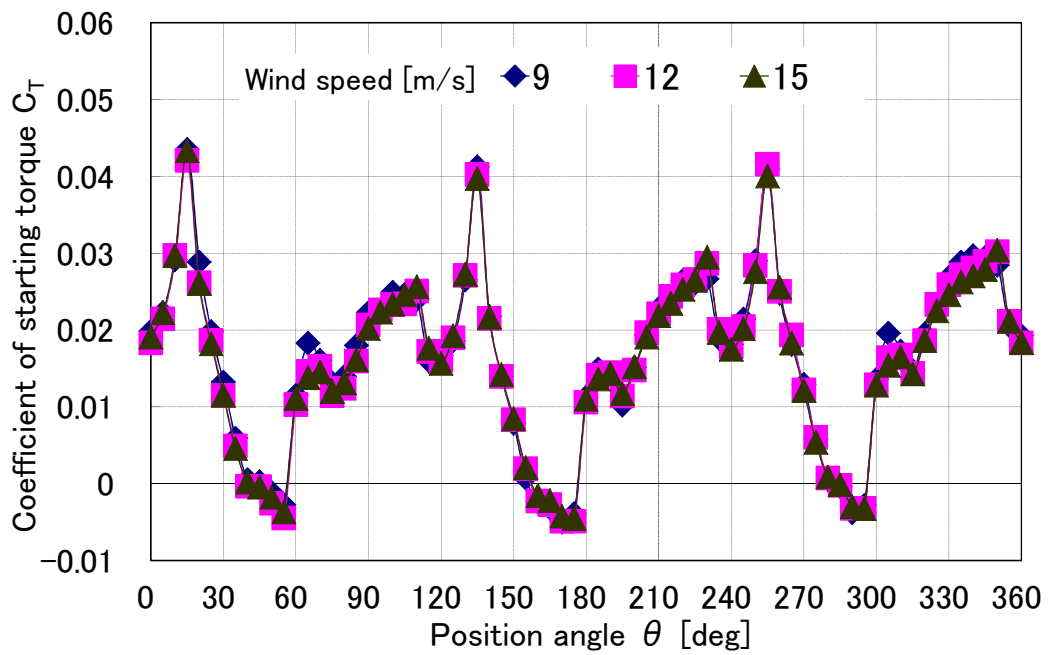
図2-8に各翼枚数における起動トルク係数の特性を示す。翼枚数が等しい場合、起動トルク係数は風速が異なっても位置角に対してほぼ一致する。また、起動トルクには位置角に対して周期性があり、その周期は翼枚数 n に対して $360/n$ [deg]の関係となっている。例えば図2-8(b)に示す2枚翼では起動トルク係数は位置角165deg, 345degの起動トルク係数は風速によって変化するが、それ以外の位置角では風速によらずほぼ一致し周期性が成り立っている。起動トルク特性は n 枚翼風車の場合、位置角 $360/n$ [deg]ごとに周期性が成り立つため、以降、起動トルク特性試験における位置角の測定範囲は $0 \leq \theta \leq 360/n$ とする。



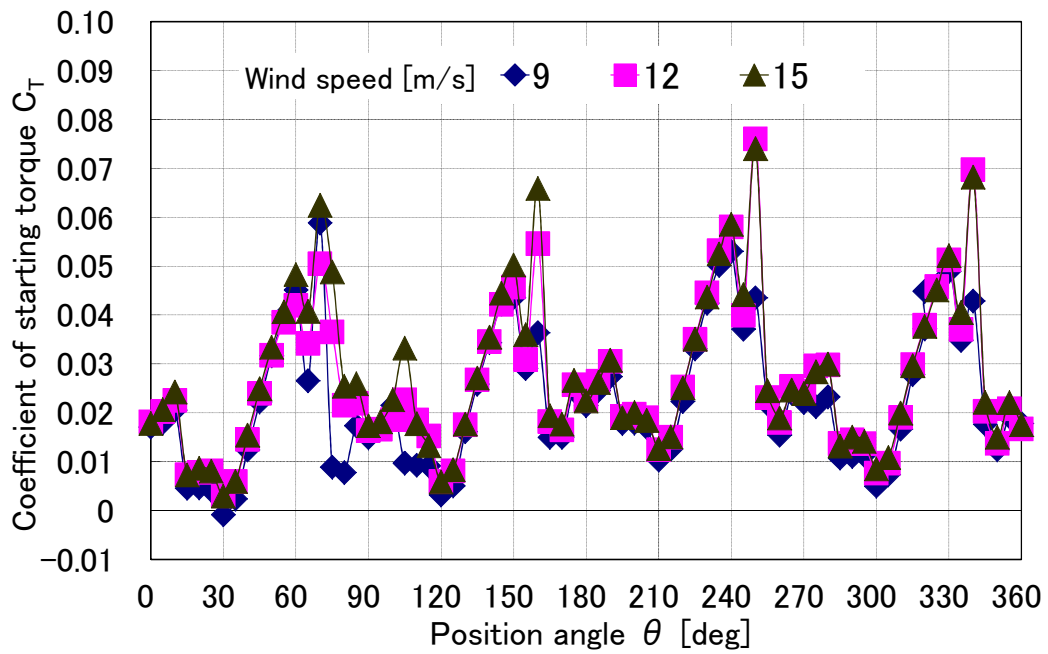
(a) 1-blade turbine.



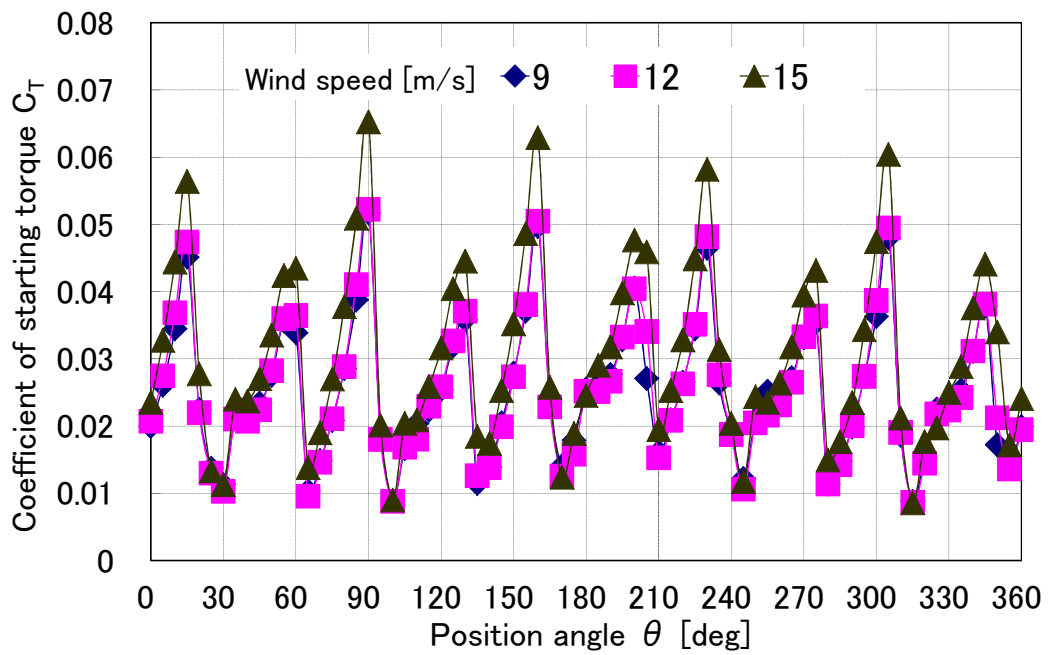
(b) 2-blade turbine.



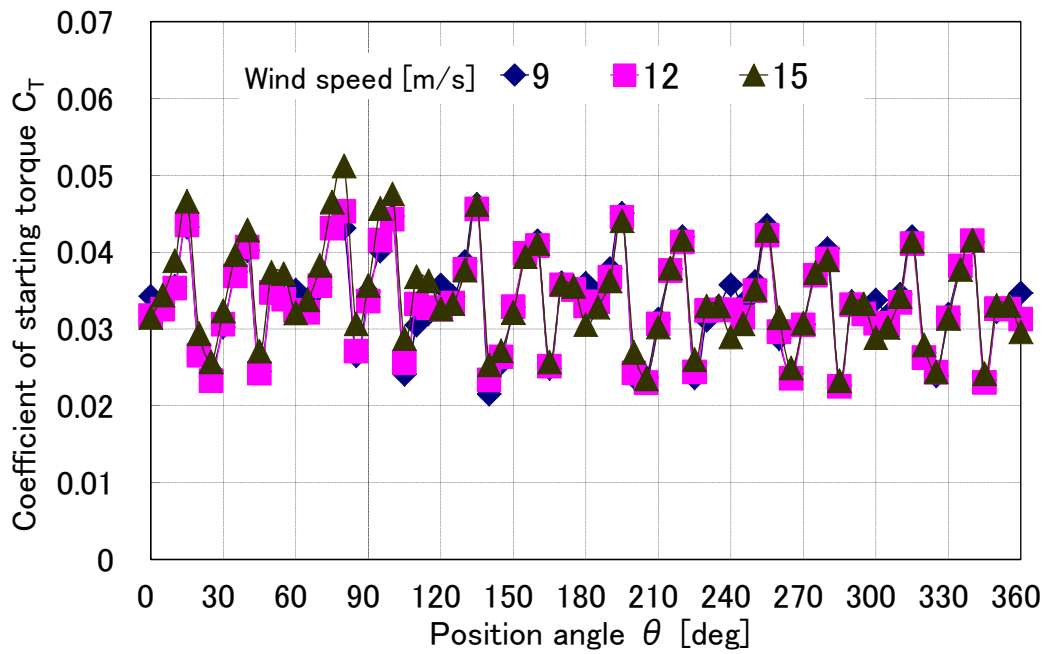
(c) 3-blade turbine.



(d) 4-blade turbine.



(e) 5-blade turbine.



(f) 6-blade turbine.

Fig. 2-8. Characteristics of coefficient of starting torque.

図2-8に示した特性において、風速9、12、15 m/sにおける起動トルク係数の1回転中の平均値を表2-3に示す。同一翼枚数における起動トルク係数の平均値は、風速に関わらずほぼ一致し、起動トルクを係数により評価すれば、その平均値も風速に依存せずに評価可能である。また、表2-2と同じように、起動トルク係数の平均値は翼枚数の増加に応じて大きくなり設定した翼枚数1～6枚では設定風速に関わらず翼1枚において最小、6枚翼において最大となる。

Table 2-3. Average starting torque coefficient.

Wind speed [m/s]	Average starting torque coefficient					
	1-blade	2-blade	3-blade	4-blade	5-blade	6-blade
9	0.007	0.011	0.017	0.022	0.025	0.034
12	0.007	0.010	0.016	0.026	0.025	0.033
15	0.007	0.011	0.016	0.028	0.031	0.034

D1600×H1600風車とD600×H450風車の寸法の異なる2種の風車が起動トルク特性に及ぼす影響を検討する。D600×H450風車の起動トルク特性の測定には図2-9に示す風洞の測定部が高2.0m、幅2.0mの施設により起動トルク特性を測定した。風洞施設は測定部が閉じた状態（閉鎖型）として使用する。風速の測定には風洞測定部に既設のピトー管を使用し、風速は9、12 m/sに設定した。

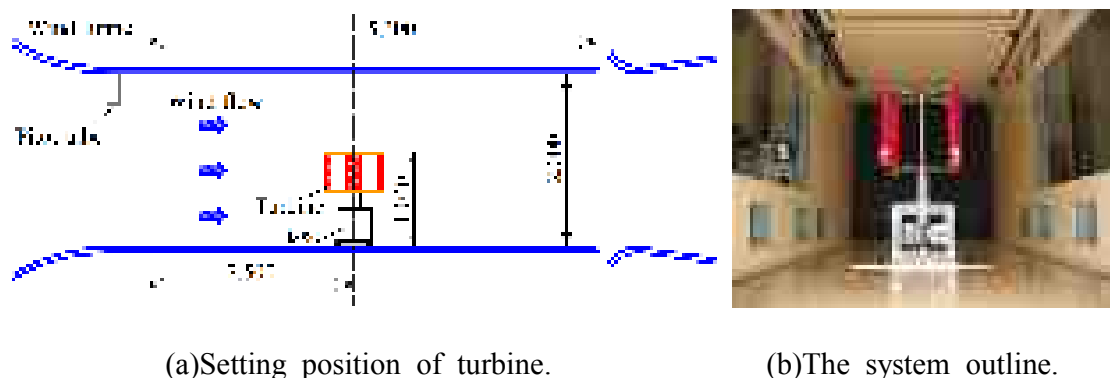


Fig. 2-9. Measurement system about turbine size of 450mm height and 600mm width.

D 1 6 0 0 × H 1 6 0 0 風車における試験には図 2 - 1 0 に示す水平式閉鎖回流型（通称ゲッチング型）風洞装置（測定部：高 2. 0 m，幅 2. 0 m）を使用した。この施設は風洞測定部を閉じた状態として使用可能であるが，D 1 6 0 0 × H 1 6 0 0 風車の試験においては風車寸法による制約から風洞測定部を開放状態（開放型）として使用する。風速の測定には風洞測定部に既設のピトー管を使用し，風速は 9. 1 2 m / s に設定した。

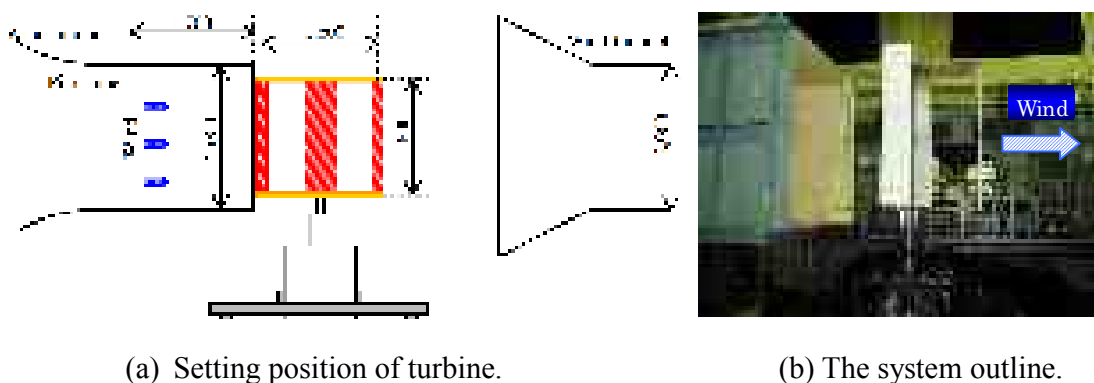
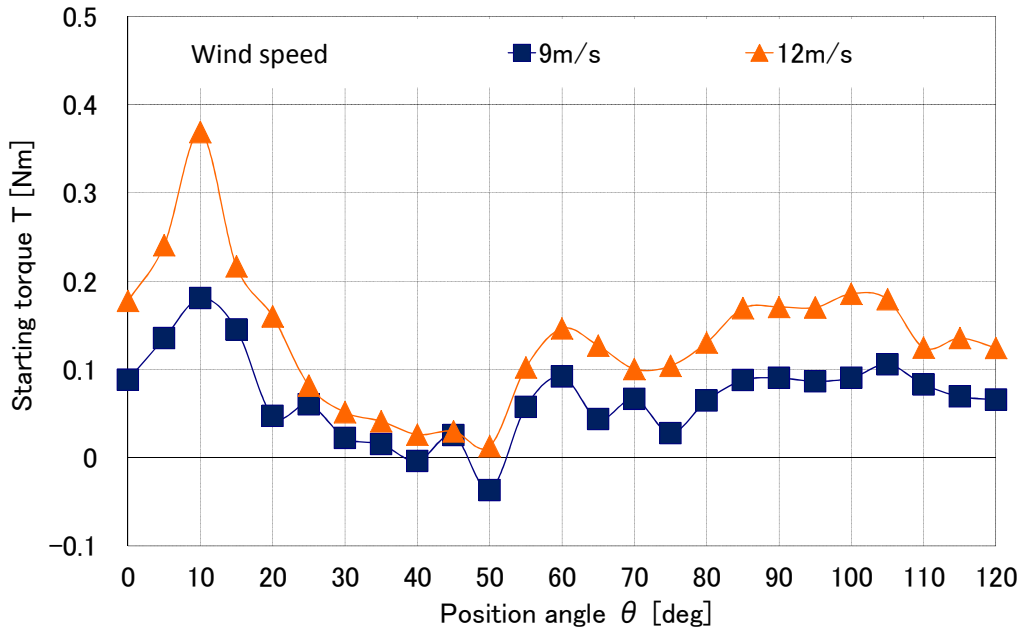


Fig. 2-10. Measurement system about turbine size of 1600mm height and 1600mm width.

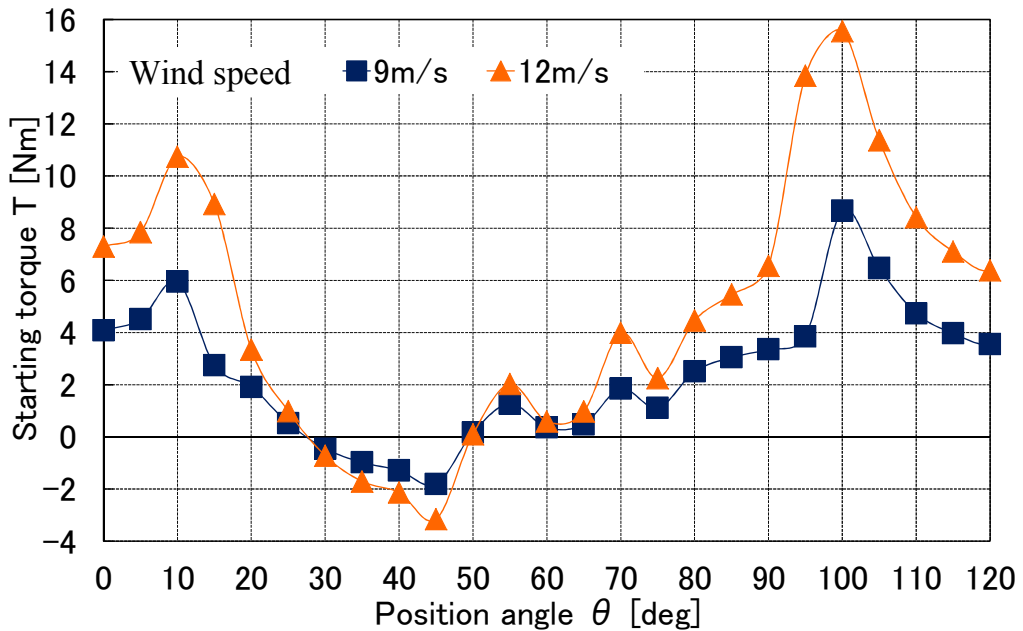
3 枚翼風車における D 6 0 0 × H 4 5 0 風車の起動トルクを図 2 - 1 1 (a) ， D 1 6 0 0 × H 1 6 0 0 風車の起動トルクを図 2 - 1 1 (b) に示す。図 2 - 1 1 に示すように，起動トルクは風車の寸法に関わらず幾つかの位置角で負となっている。たとえば，D 6 0 0 × H 4 5 0 風車では位置角 5 0 d e g において起動トルクは負となり，D 1 6 0 0 × H 1 6 0 0 風車では位置角 3 0 ~ 4 5 d e g において起動トルクは負となる。起動トルクが負となる位置角では，D 6 0 0 × H 4 5 0 風車の場合，風速の増加に伴い起動トルクは正となるが，D 1 6 0 0 × H 1 6 0 0 風車の場合，起動トルクは正とならない。

4 枚翼風車における D 6 0 0 × H 4 5 0 風車の起動トルクを図 2 - 1 2 (a) ， D 1 6 0 0 × H 1 6 0 0 風車の起動トルクを図 2 - 1 2 (b) に示す。図 2 - 1 2 に示すように，4 枚翼風車では起動トルクが負となる位置角はほとんどなくなる。また，D 6 0 0 × H 4 5 0 風車の起動トルクの最高値は約 0. 3 2 N m であるが，D 1 6 0 0 × H 1 6 0 0 風車は約 1. 7 N m である。図 2 - 1 1 および図 2 - 1 2 から，起動トルクは翼枚数に関わらず D 6 0 0 × H 4 5 0 風車よりも D 1 6 0 0 × H

1600風車の方が大きい。D1600×H1600風車の発生するトルクが大きくなるのは、D600×H450風車よりも翼面積が大きいためである。

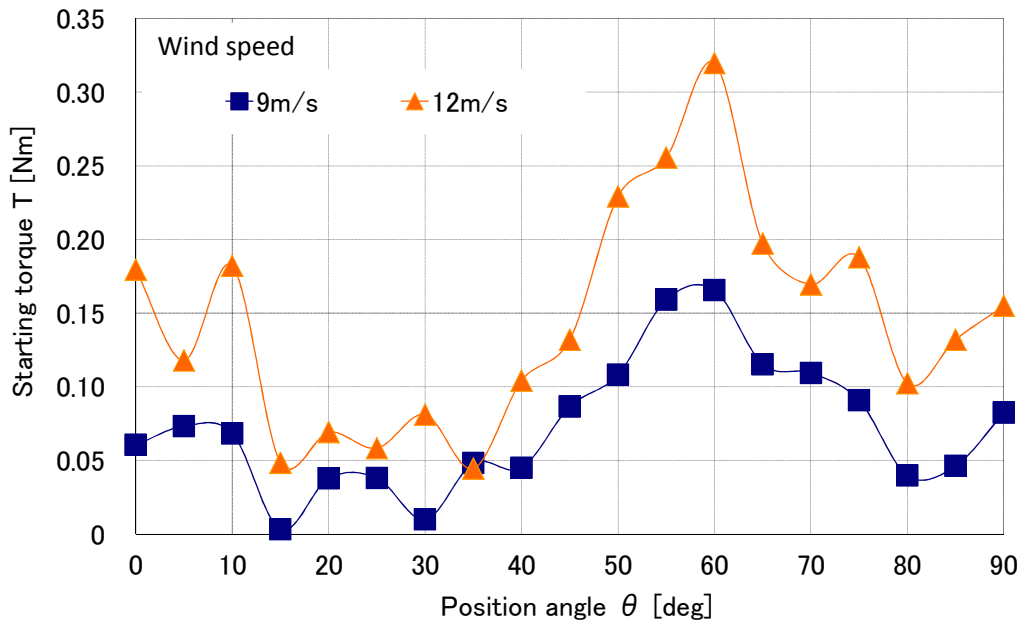


(a) The turbine of 450mm height and 600mm width

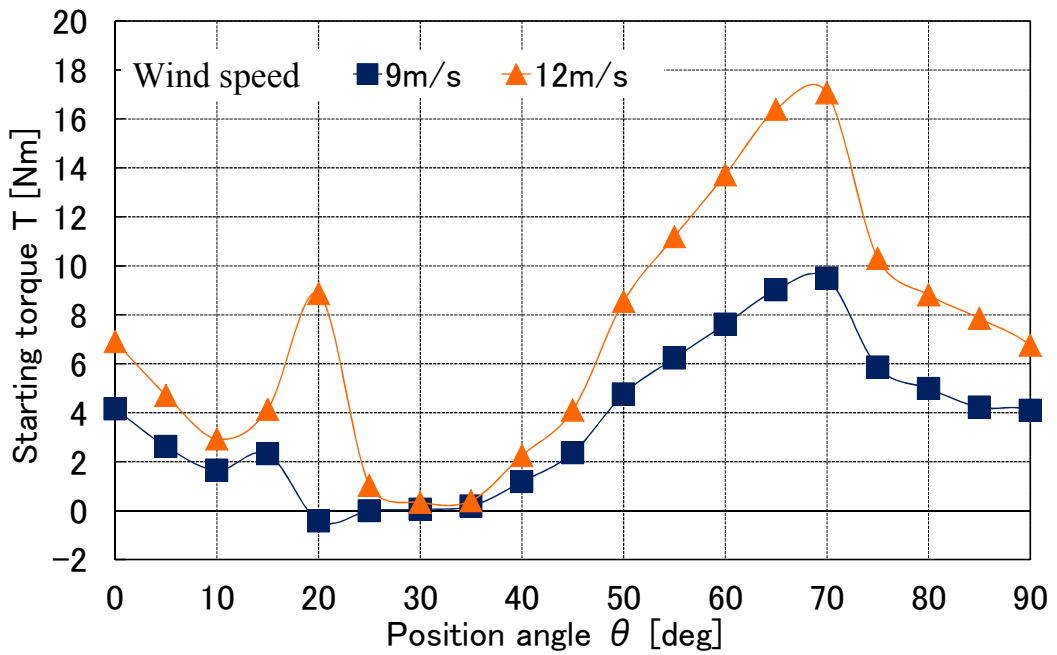


(b) The turbine of 1600mm height and 1600mm width.

Fig.2-11. Characteristics of starting torque for 3-blade turbine.



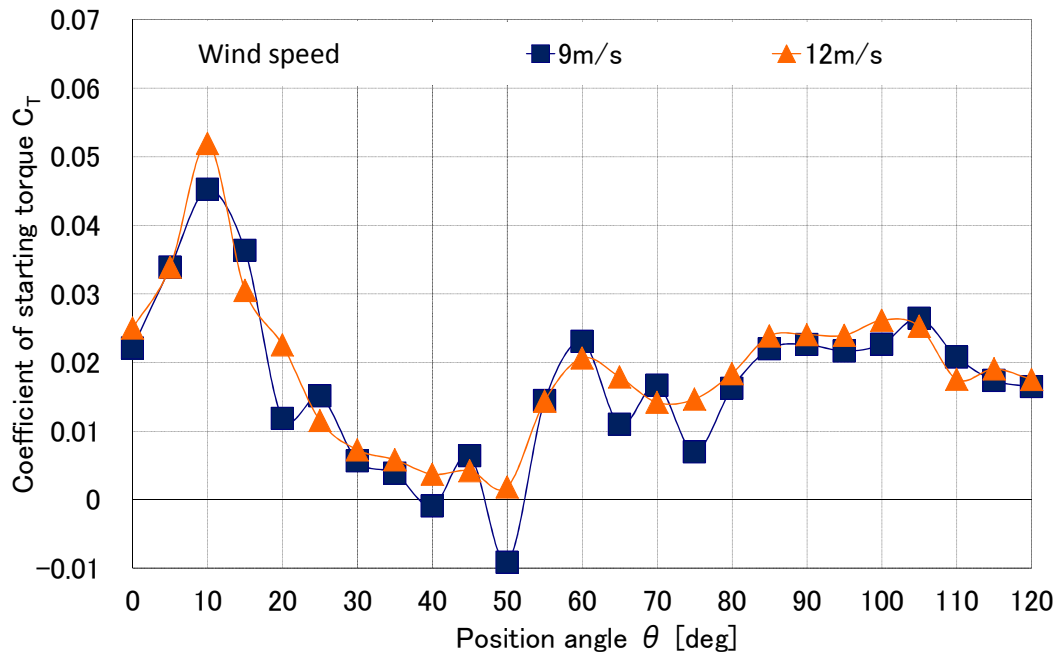
(a) The turbine of 450mm height and 600mm width.



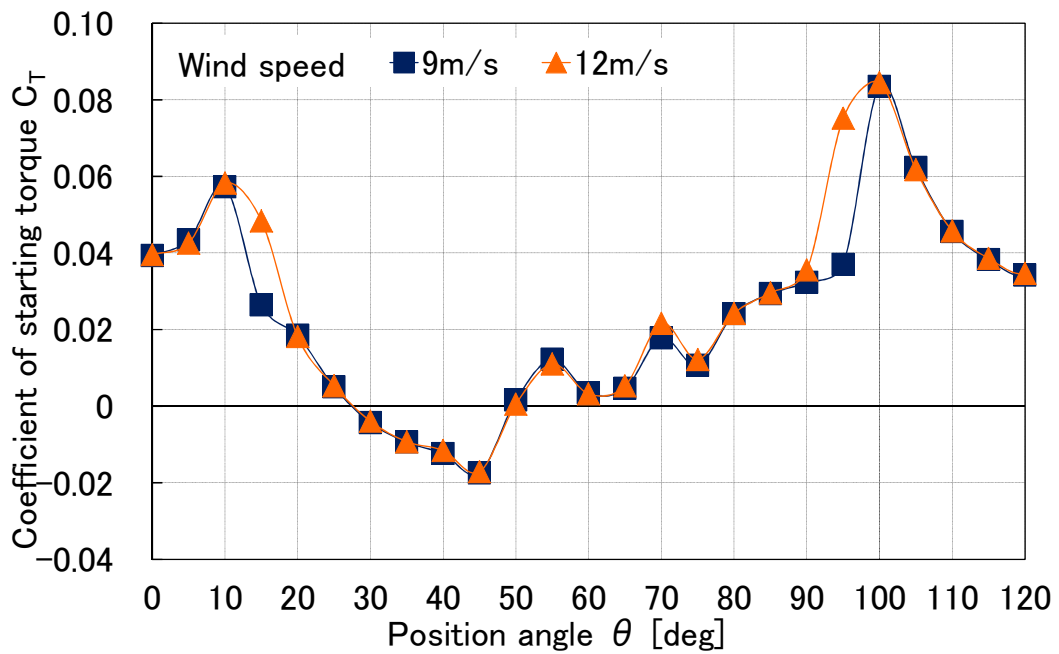
(b) The turbine of 1600mm height and 1600mm width.

Fig. 2-12. Characteristics of starting torque for 4-blade turbine.

つぎに3枚翼風車におけるD600×H450風車の起動トルク係数を図2-13(a), D1600×H1600風車の起動トルク係数を図2-13(b), 4枚翼風車におけるD600×H450風車の起動トルク係数を図2-14(a), D1600×H1600風車の起動トルク係数を図2-14(b)に示す。図2-14に示す4枚翼風車では位置角0~90degにおける1周期分のトルク特性は風速9, 12m/sともに、ほぼ同じ特性となる。しかし3枚翼風車では図2-13(a)に示すD600×H450風車の起動トルク係数の最大値は位置角100degにおいて約0.02であるが, 図2-13(b)に示すD1600×H1600風車の起動トルク係数の最大値は位置角100degにおいて約0.08となり, 起動トルク係数から見ても大きく増加する。位置角100deg付近においてD1600×H1600風車のトルクは最大値であるが, D600×H450風車のトルクは最大値とはなっていない。このような特性の違いは, D600×H450風車とD1600×H1600風車の寸法の違いから翼の空力特性が変化するため生じるものと考えられる。

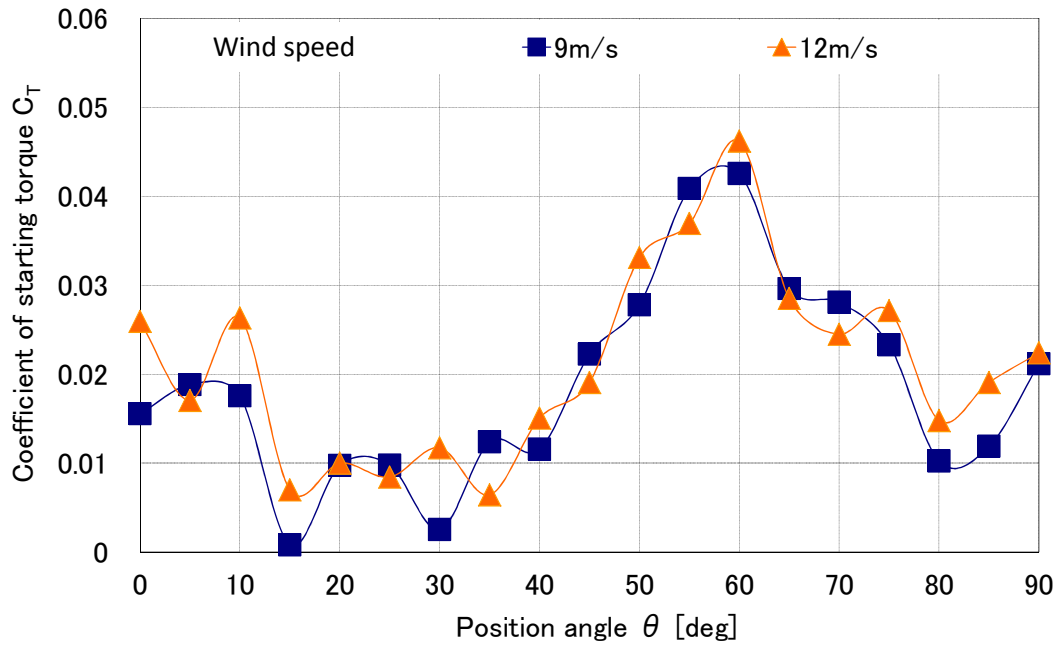


(a) The turbine of 450mm height and 600mm width.

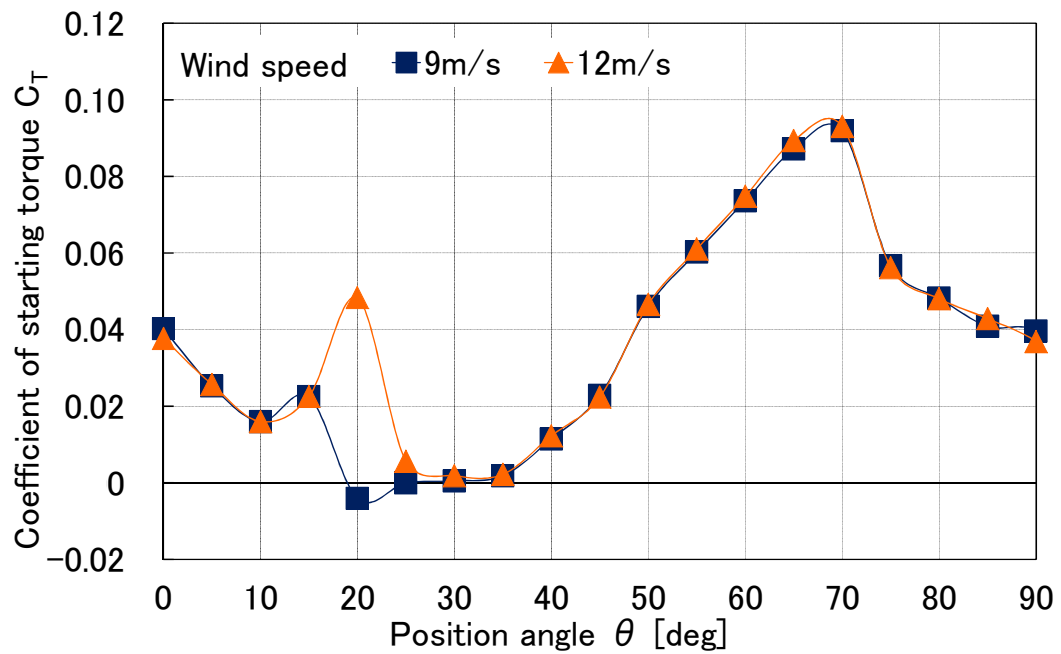


(b) The turbine of 1600mm height and 1600mm width.

Fig. 2-13. Characteristics of starting torque coefficient for 3-blade turbine.



(a) The turbine of 450mm height and 600mm width.



(b) The turbine of 1600mm height and 1600mm width.

Fig. 2-14. Characteristics of starting torque coefficient for 4-blade turbine.

2. 2 負荷特性試験

前節までは直線翼式垂直軸風車の起動性を向上させるため，起動トルク特性について検討してきた。風車の特性としては負荷特性，すなわち風力エネルギーを運動エネルギーに変換する効率を評価することも重要であるため，本節では負荷特性について検討する。

2. 2. 1 負荷特性試験の方法

図 2-15 に負荷特性の試験装置を示す。負荷特性の測定方法は，まず風洞施設の風速を設定する。つぎに発電機により風車を任意の回転速度に制御し，トルク検出器によりトルクを，回転検出器により回転速度を測定する。回転速度とトルクの測定値をコンピュータに取りこみ，30秒間の平均値として演算処理する。

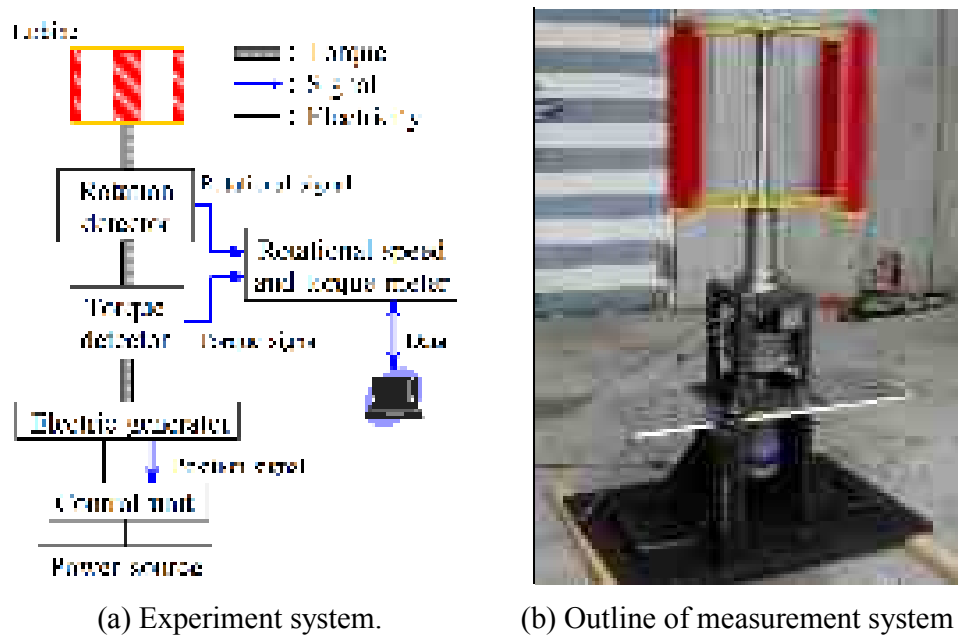


Fig. 2-15. Experiment system of load tests.

測定した回転速度 N ，トルク T から出力 P および効率 η を次式により求める。

$$P = \omega T = 2\pi \frac{N}{60} T \quad \dots (2-2)$$

$$\eta = \frac{\omega T}{0.5\rho S V^3} \times 100 \quad [\%] \quad \dots (2-3)$$

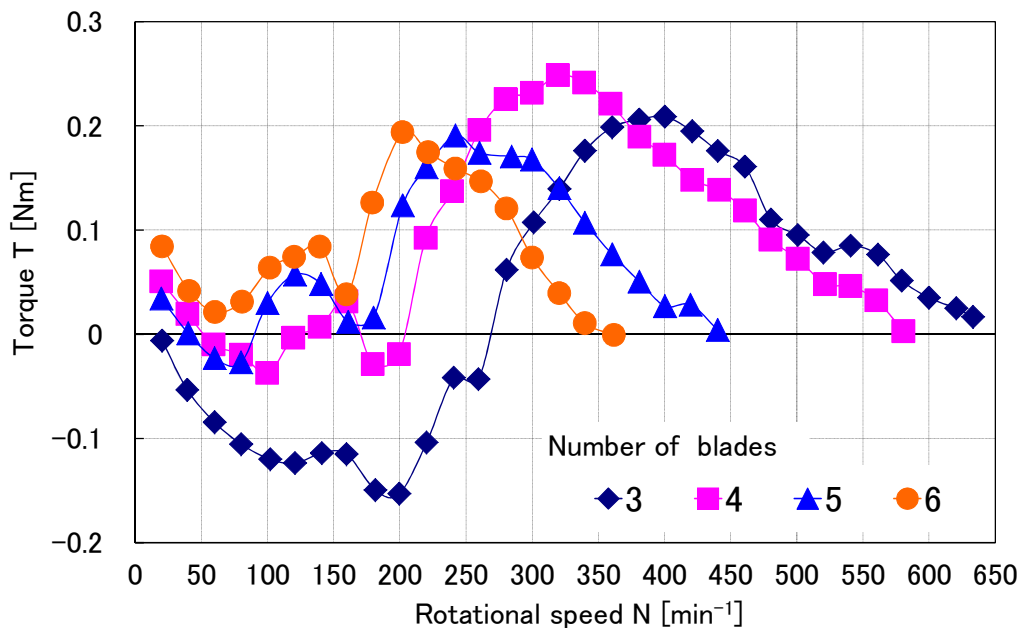
また、周速比 λ は次式により求める。ただし、 V は風速計により計測した風洞施設測定部の風速である。

$$\lambda = \frac{r\omega}{V} \quad \dots (2-4)$$

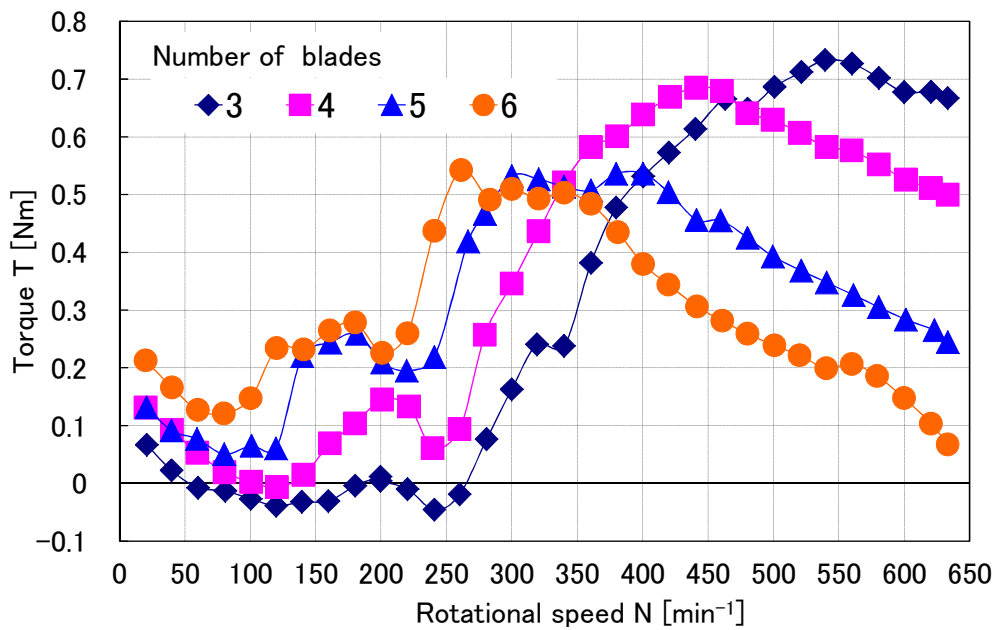
2. 2. 2 翼枚数と負荷特性

前節のD600×H450風車における起動トルク特性から、1～4枚翼風車で起動トルクが負となる位置角が存在した。なかでも1～2枚翼風車は起動トルクが負となる位置角の範囲が広く風車の起動は困難であると考えられる。したがって、D600×H450風車の負荷特性では3～6枚翼について測定した。ただし、D600×H450風車の負荷特性試験は図2-6に示す風洞施設において実施した。

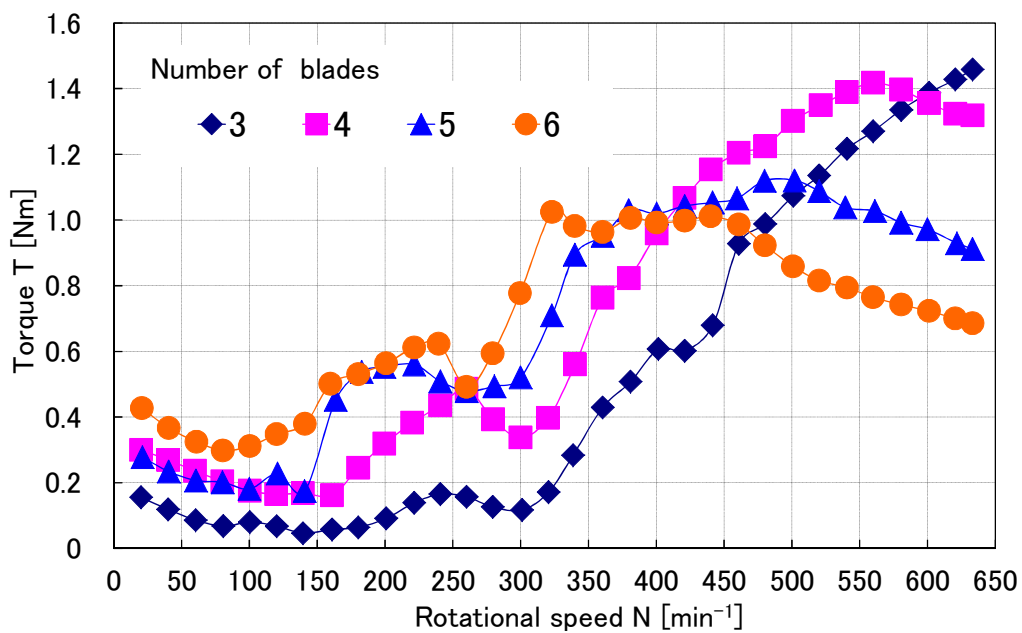
風速9, 12, 15 m/sにおける回転速度に対するトルク特性を図2-16に示す。図2-16(a), (b)に示す風速9, 12 m/sにおける回転速度に対するトルク特性においてトルクが負となる場合がある。このような回転速度では発電機が電動機として動作している状態である。図2-16(a)に示す風速9 m/sでは3枚翼では260 min⁻¹以下、4枚翼では60～200 min⁻¹, 5枚翼では40～80 min⁻¹の回転速度の範囲でトルクは負となる。また, 図2-16(b)に示す風速12 m/sでは3枚翼では回転速度260 min⁻¹以下の回転速度の範囲でトルクは負となる。図2-16(c)に示す風速15 m/sではトルクが負となる回転速度は存在しなくなる。



(a) Wind speed 9m/s.



(b) Wind speed 12m/s.

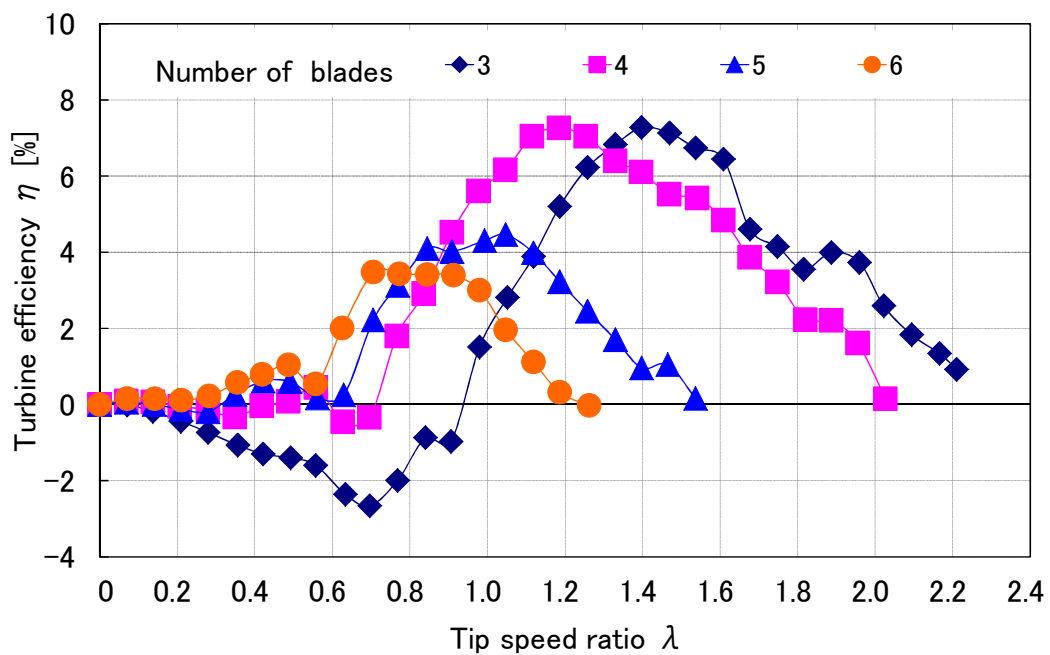


(c) Wind speed 15m/s.

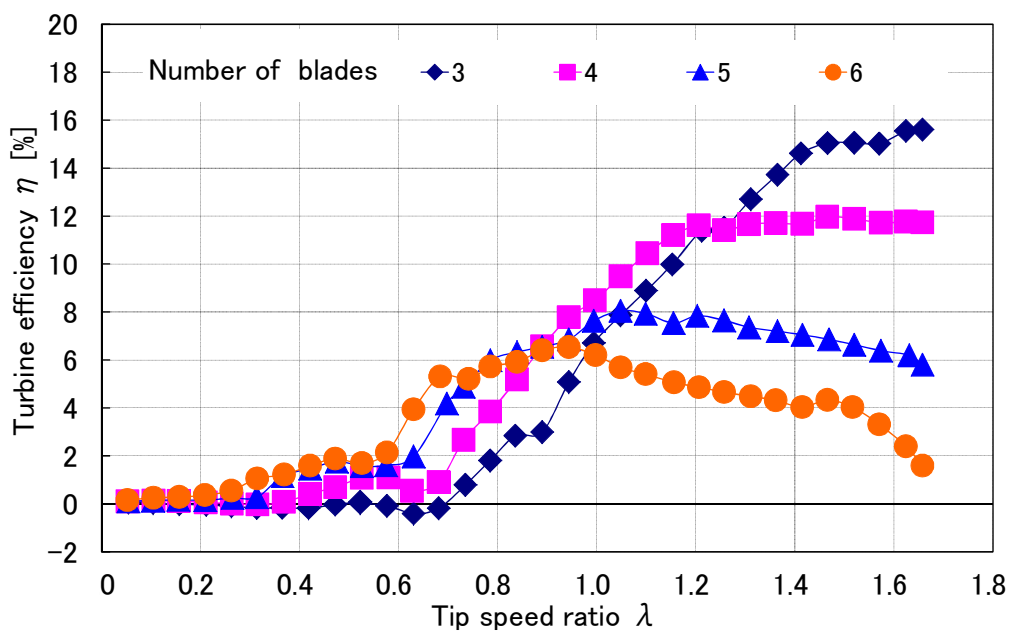
Fig. 2-16. Output characteristics of 450mm height and 600mm width turbine.

D 6 0 0 × H 4 5 0 風車における風速 9, 1 2, 1 5 m / s の周速比に対する効率特性を図 2 - 1 7 に示す。図 2 - 1 7 に示す周速比に対する効率特性から効率の

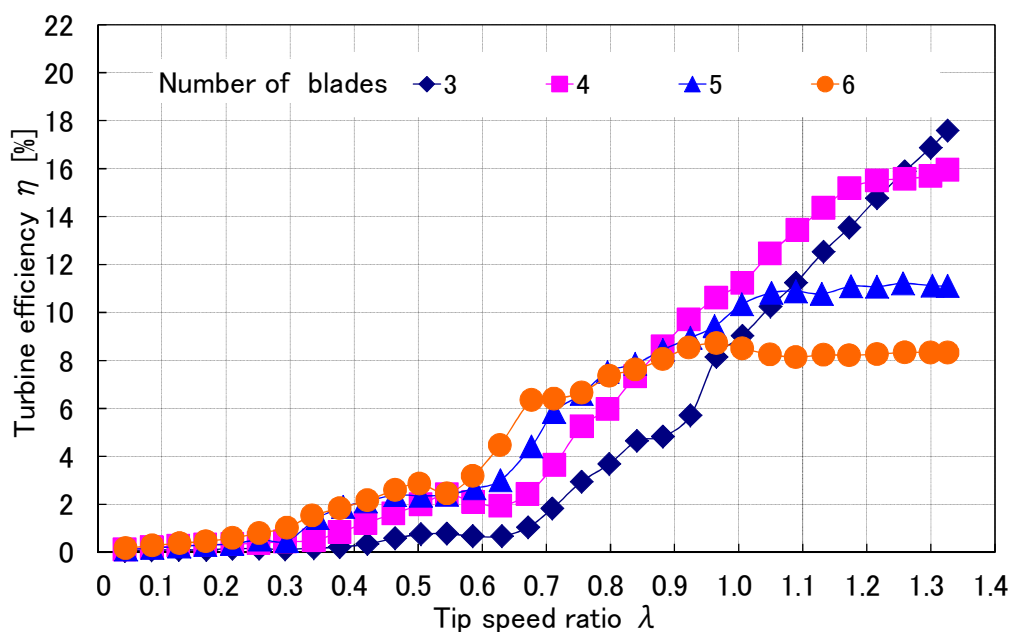
最高値に着目すると、翼枚数が少ないほど効率は高くなり、最高効率を示す周速比は高くなる。図2-17(a)に示す風速9 m/sにおいて効率の最高値は3および4枚翼風車において示され、その値はともに約7%である。また、最高効率を示す周速比は3枚翼では約1.4、4枚翼では約1.2、5枚翼では約1.05、6枚翼では約0.9となる。図2-17(b)、(c)に示す風速12、15 m/sにおいて効率の最高値は3枚翼において示され、その値は風速12 m/sにおいて約16%、風速15 m/sにおいて約18%である。測定した周速比の範囲において、最高効率を示す周速比は、風速12 m/sの3枚翼において約1.7、風速15 m/sの3枚翼において約1.35であるが、風車の回転速度は遠心力が翼に与える影響を考慮して650 min⁻¹以下とした。このため、3枚翼風車の最高効率は測定した周速比の範囲よりも高い周速比において示されると推察される。



(a) Wind speed 9m/s.



(b) Wind speed 12m/s.



(c) Wind speed 15m/s.

Fig. 2-17. Output characteristics of 450mm height and 600mm width turbine.

前節の起動トルク特性試験においてD 6 0 0×H 4 5 0風車よりもD 1 6 0 0×H 1 6 0 0風車のほうがトルク係数は大きくなったことから、負荷特性においても風車寸法の大きい方が効率は高くなると考えられる。D 1 6 0 0×H 1 6 0 0風

車の負荷特性試験を図2-10に示す風洞施設でおこなった。遠心力が翼に与える影響を考慮してD1600×H1600風車の回転速度を 300min^{-1} 以下としたため、設定風速は 9m/s とした。

周速比に対する効率特性を図2-18に示す。効率の最高値は3枚翼では約22%，4枚翼では約18%である。また、最高効率を示す周速比は3枚翼では約2.2，4枚翼では約2.1である。したがって、D600×H450風車と同様に翼枚数が少ないほど効率は高く、最高効率を示す周速比は高くなる。ここで、D600×H450風車の効率と比較すると、3枚翼ではD600×H450風車の最高効率は約7%に対してD1600×H1600風車では約22%，4枚翼ではD600×H450風車の最高効率は約7%に対してD1600×H1600風車では約18%であり、寸法が大きい方が効率は高い。風車の寸法による負荷特性の違いは、同じ設定風速でもD600×H450風車よりもD1600×H1600風車の方が寸法が大きくなり、翼の空力特性が変化するために生じるものと考えられる。

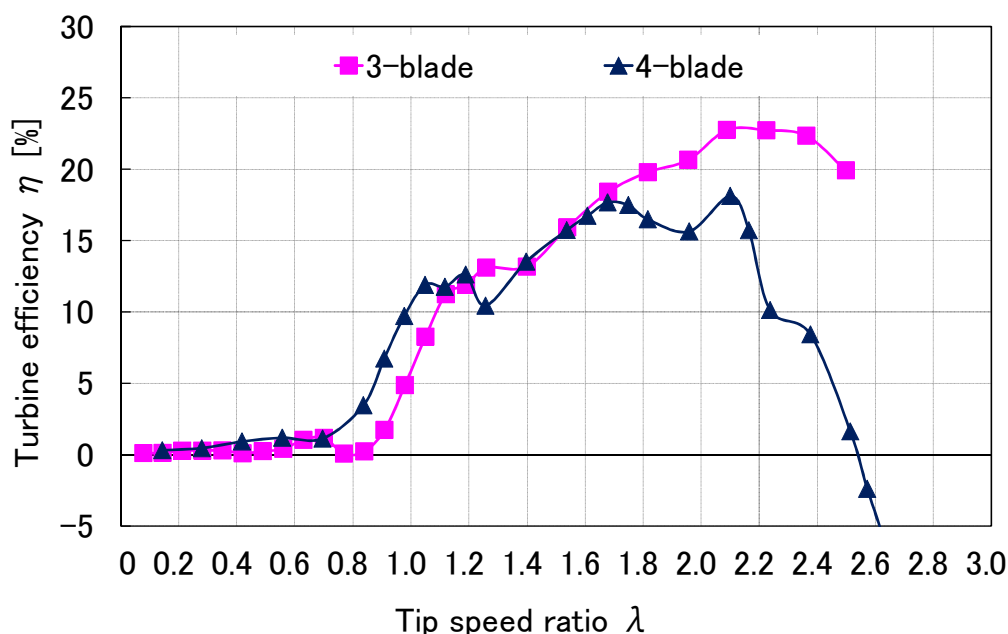


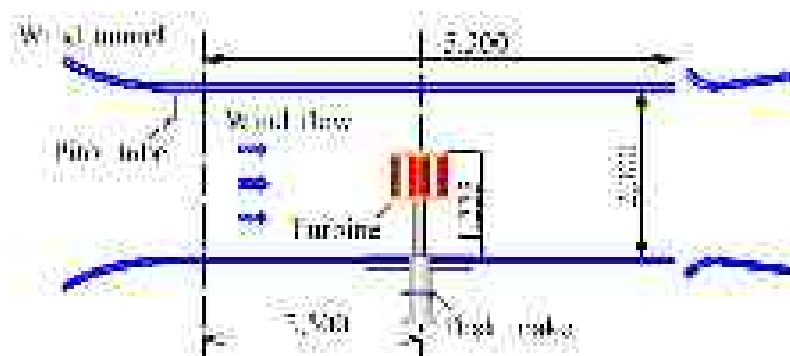
Fig. 2-18. Output characteristics of 1600mm height and 1600mm width turbine.
(Wind speed 9m/s)

2. 3 起動風速試験

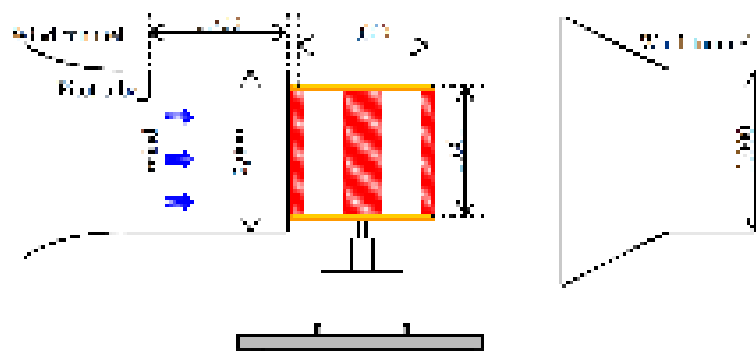
前節では直線翼式垂直軸風車の起動トルク特性について検討してきたが、起動トルク特性からは風車の回転し始める風速の最低値、すなわち風車の起動風速を知ることができない。そこで本節では起動風速について検討する。

2. 3. 1 起動風速試験の方法

試験は図2-19に示す水平式閉鎖回流型風洞装置(測定部:高2.0m,幅2.0m)を使用する。D600×H450風車では風洞の測定部を図2-19(a)に示すように固定壁(閉じた状態),D1600×H1600風車では図2-19(b)に示すように自由壁(開いた状態)で使用する。風速の測定には風洞の測定部に既設のピトー管を使用する。



(a) Experiment system about turbine size of 450mm height and 600mm width.

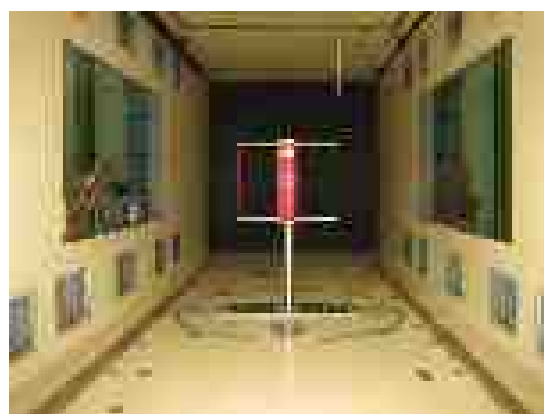
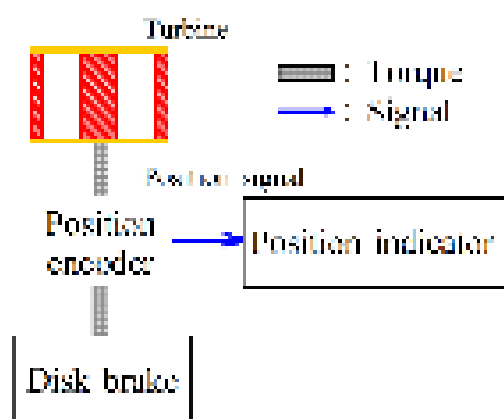


(b) Experiment system about turbine size of 1600mm height and 1600mm width.

Fig. 2-19. Measurement system for wind speed to initiate rotation.

起動風速試験における起動風速とは、ある位置角に停止している風車が風洞施設により与えられた風速によって起動し、回転を継続する場合の風速の最低値と定義する。試験方法は風車を任意の位置角に設定し風洞施設により一定の風速を与える。風車が回転を継続している場合は起動と判定する。起動風速試験における位置角は 2. 2. 2 項の図 2-21~2-24 に示す起動トルク特性において、最も起動しやすいと考えられる起動トルクが最大値を示す位置角 θ_{Tmax} 、および最も起動しにくいと考えられる起動トルクが最小値を示す位置角 θ_{Tmin} に設定する。また、風速は風車の寸法に応じて最高値を定め、この風速に設定しても起動しない場合は、起動風速の測定結果を無しとする。設定風速は D 600×H 450 風車では 20 m/s 以下、D 1600×H 1600 風車では 13 m/s 以下の範囲である。

D 600×H 450 風車における起動風速の測定には、図 2-20 に示す試験装置を用いる。図 2-20 (a) に示すように試験装置は風車の回転軸に直結されたディスクブレーキとエンコーダから構成されている。起動風速の測定方法は、まずエンコーダにより風車を任意の位置角に設定し、ディスクブレーキにより風車の停止状態を保持する。つぎに風洞施設により任意の風速を設定する。風速が安定してからブレーキを解除し、風車が回転を継続する場合は起動と判定する。



(a) Measurement system.

(b) Outline of system.

Fig. 2-20. Outline of measurement system for wind speed to initiate rotation about turbine size of 450mm height and 600mm width.

D1600×H1600風車における起動風速の測定には、図2-21に示す試験装置を用いる。図2-21(a)に示すように風車の回転軸と回転円盤が直結されており、円盤上に5deg間隔で配置された固定穴に金属製の回転防止ピンを挿入し、任意の位置角で停止状態を保持する。起動風速の測定方法は、まず任意の位置角で回転防止ピンにより風車を停止させ、風洞施設により任意の風速を設定する。つぎに風速が安定してから回転防止ピンを取り外し、風車が回転を継続する場合は起動と判定する。



(a) Position angle adjuster.



(b) Outline of system.

Fig. 2-21. Outline of measurement system for wind speed to initiate rotation about turbine size of 1600mm height and 1600mm width.

2. 3. 2 翼枚数と起動風速

3枚翼風車の起動風速を表2-4に示す。表2-4(a)においてD600×H450風車を起動トルクの最大値となる位置角 $\theta_{Tmax}=10\text{ deg}$ にした場合、起動風速は15m/sである。また、表2-4(b)においてD1600×H1600風車を起動トルクの最大値となる位置角 $\theta_{Tmax}=100\text{ deg}$ にした場合、起動風速は9m/sである。起動トルクの最大値 θ_{Tmax} にした場合、D1600×H1600風車の起動風速はD600×H450風車と比較して6m/s低下する。つぎに表2-4(a),(b)において風車を起動トルクの最小値となる位置角にした場合、D600×H450風車では風速20m/s、D1600×H1600風車では風速13m/sに設定しても風車は起動しなかった。

Table 2-4. Wind speed to initiate rotation for 3-blade turbine.

(a) The turbine size of
450mm height and 600mm width.

Position angle at start	θ_{Tmax} 10 deg	θ_{Tmin} 50 deg
Wind speed [m/s]	15	—*1

(b) The turbine size of
1600mm height and 1600mm width.

Position angle at start	θ_{Tmax} 100 deg	θ_{Tmin} 45 deg
Wind speed [m/s]	9	—*2

—*1 : No rotation at maximum tested wind speed of 20m/s.

—*2 : No rotation at maximum tested wind speed of 13m/s.

4枚翼風車の起動風速を表2-5に示す。表2-5(a)においてD600×H450風車を起動トルクの最大値となる位置角 $\theta_{Tmax}=60\text{ deg}$ にした場合、起動風速は11m/sである。表2-5(b)においてD1600×H1600風車を起動トルクの最大値となる位置角 $\theta_{Tmax}=70\text{ deg}$ とした場合、起動風速は4m/sである。起動トルクの最大値 θ_{Tmax} にした場合、D1600×H1600風車の起動風速はD600×H450風車と比較して7m/s低下する。つぎに表2-5(a)においてD600×H450風車を起動トルクの最小値となる位置角 θ_{Tmin}

= 15 degにした場合、起動風速は17 m/sである。表2-5 (b)においてD1600×H1600風車を起動トルクの最小値となる位置角 $\theta_{Tmin} = 30 \text{ deg}$ にした場合、起動風速は9 m/sである。起動トルクの最小値 θ_{Tmin} にした場合、D1600×H1600風車の起動風速はD600×H450風車と比較して8 m/s低下する。

Table 2-5. Wind speed to initiate rotation for 4-blade turbine.

(a) The turbine size of
450mm height and 600mm width.

Position angle at start	θ_{Tmax} 60 deg	θ_{Tmin} 15 deg
Wind speed [m/s]	11	17

(b) The turbine size of
1600mm height and 1600mm width.

Position angle at start	θ_{Tmax} 70 deg	θ_{Tmin} 30 deg
Wind speed [m/s]	4	9

表2-5に示す4枚翼風車の起動風速から、起動トルクの最小値となる位置角 θ_{Tmin} から起動するよりも起動トルクの最大値となる位置角 θ_{Tmax} から起動した場合の方が起動風速は低下する。また、表2-4に示す3枚翼風車と表2-5に示す4枚翼風車の起動風速より、D600×H450風車と比較してD1600×H1600風車の方が起動風速は低下する。これは前項で述べた起動トルク特性において、風車寸法を大きくした方がトルクは増加するためである。

2. 4 まとめ

本章では直線翼式垂直軸風車の起動性を向上させることを目的として、翼枚数が起動性に与える影響について、起動トルク試験、負荷特性試験および起動風速試験により検討した。

D 6 0 0 × H 4 5 0 風車による起動トルク特性試験から、翼枚数 1 ～ 6 枚とした場合、次のことがいえる。

- (1) 翼枚数の増加にともない起動トルクは増加し、測定した翼枚数の範囲では平均起動トルクが最高値となる翼枚数は 6 枚である。
- (2) 翼枚数 4 ～ 6 枚とした場合、起動トルクは負とならない。
- (3) 翼枚数 1 ～ 3 枚とした場合、位置角により起動トルクは負となる。

起動トルクが負となる位置角では風車は逆回転するトルクとなる。したがって、起動トルク特性から起動性を評価する場合、風車の翼枚数は 4 枚以上が望ましいといえる。

D 6 0 0 × H 4 5 0 風車による負荷特性試験から、翼枚数 3 ～ 6 枚とした場合、次のことがいえる。

- (4) 翼枚数の減少とともに効率は向上し、効率の最高値となる翼枚数は 3 枚の場合である。
- (5) 翼枚数 3, 4 枚では負荷特性の風速 9 ～ 1 2 m / s において最大トルクを示す回転速度より低い回転速度の範囲でトルクが負となる場合がある。トルクが負となる回転速度は翼枚数が少ないほど広い範囲であるが、風速の増加にともない狭くなり、風速 1 5 m / s においてトルクは全て正となる。

トルクが負となる場合、発電機が電動機として動作している状態であるため発電装置に用いる風車の特性としては望ましくない。

寸法の異なる 2 種の風車 D 6 0 0 × H 4 5 0 風車と D 1 6 0 0 × H 1 6 0 0 風車を用いて、起動トルク特性試験と負荷特性試験により検討した結果、次のことがいえる。

- (6) D 6 0 0 × H 4 5 0 風車よりも D 1 6 0 0 × H 1 6 0 0 風車の方が起動トルクと風車効率は大きな値となる。これは同じ設定風速でも D 6 0 0 × H 4 5 0 風車よりも D 1 6 0 0 × H 1 6 0 0 風車の方が寸法は大きくなり、翼の

空力特性が変化するために生じるものと考えられる。

起動風速試験から、次のことがいえる。

- (7) 翼枚数3, 4枚では翼枚数の多い4枚翼風車の方が起動風速は低くなる。
- (8) 起動トルクの最小値となる位置角 θ_{Tmin} から起動するよりも起動トルクの最大値となる位置角 θ_{Tmax} から起動した場合の方が起動風速は低下する。
- (9) D 6 0 0 × H 4 5 0 風車と D 1 6 0 0 × H 1 6 0 0 風車を用いた風車寸法と起動風速の関係からは、風車寸法の大きい方が起動風速は低下する。これは起動トルク特性において風車寸法を大きくした方がトルクは増加するためである。
- (10) 翼枚数3, 4枚ではD 6 0 0 × H 4 5 0 風車では起動に必要な風速は1.1 m/s 以上であり、D 1 6 0 0 × H 1 6 0 0 風車にすると4 m/s 以上となる。このため風車寸法を大きくした方が起動風速は低下し、起動性の向上には有利である。

以上の(1)～(10)結論から、次のことがいえる。

- (11) 起動トルク特性試験と負荷特性試験から、起動性を重視すれば翼枚数を多くした方が良いが、効率を重視すると翼枚数を少なくした方が良く、起動性と効率は翼枚数に対して相反関係にある。
- (12) 4枚翼風車では起動トルクは負とならず、負荷特性においてトルクが負となる回転速度が存在しても風速の増加にともないトルクは正となることから、起動性と効率の点から望ましい翼枚数である。
- (13) D 1 6 0 0 × H 1 6 0 0 風車の3枚翼では起動風速は9 m/s 以上であり、風力発電装置の設置目安とされる年間平均風速7 m/s 以上では起動しない場合があるが、4枚翼風車では起動風速は4～9 m/s であり実用上問題ないと考えられる。

したがって、次章以降の検討では4枚翼風車を用いる。

第3章 翼取付角度による起動性の向上

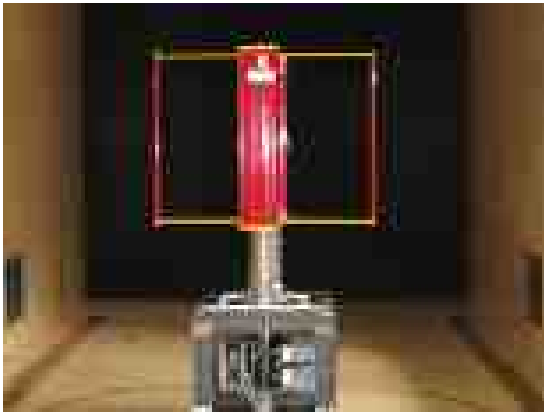
ダリウス風車の場合にはトロポスキエン形状の翼であるため、プロペラ風車のピッチ角に相当する翼取付角度を変化させることはできない。直線翼式垂直軸風車において翼取付角度制御を利用する場合はジャイロミル風車と呼ばれ、翼の支持部を可動構造としている⁽²¹⁾。翼取付角度により風車出力は変化するため、プロペラ風車においてはピッチ角制御が広く利用⁽⁴⁾されているが、本研究のように風の方向や強さが激しく変動し、翼取付角度の制御が追いつかないような場合、翼取付角度を一定とすれば装置の耐久性や導入コストなどの点から有利となる。

直線翼式垂直軸風車における翼取付角度と風車特性の関係については関らにより翼取付角度と風車効率についての報告⁽²²⁾があるが、本論文で目的としている起動性との関係については述べられていない。また、これら報告にはTWT系列の翼型が用いられており、本研究の直線翼式垂直軸風車に用いるNACA 63₃-018に基づいた円弧キャンバー翼については明らかにされていない。このため、本章では円弧キャンバー翼を利用した直線翼式垂直軸風車において、翼取付角度が起動性に及ぼす影響について検討する⁽²³⁾⁽²⁴⁾。また、2章でも述べたように風車特性としては効率も重要であることから、負荷特性試験により翼取付角度と風車効率の関係についても検討する⁽²³⁾。

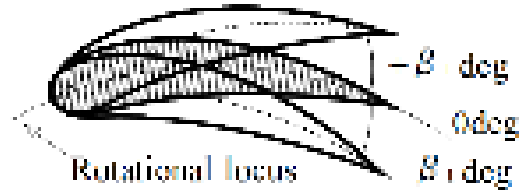
3. 1 起動トルク特性試験

3. 1. 1 翼取付角度 $-6 \sim +6 \text{ deg}$ における起動トルク特性

図3-1 (a) に示すように風車の寸法は直径600 mm、高さ450 mm、翼型はNACA 63₃-018に基づいた円弧キャンバー翼であり、これらは2章で述べたD600×H450風車と同一である。翼枚数は2章における起動トルク特性と負荷特性の検討結果から4枚翼とする。翼取付角度は図3-1 (b) に示すように定義する。翼のキャンバー線が回転軌跡と一致した状態を翼取付角度0 degとする。取付角度は前縁を基準に回転軌跡となす角により定め、翼の後縁を回転軌跡の外側に傾けたときは正、内側に傾けたときは負とする。



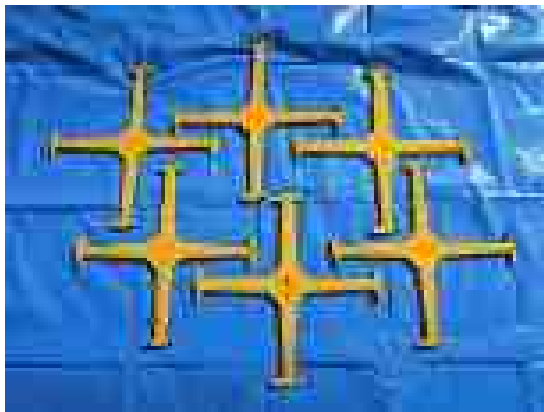
(a) Outline of turbine.



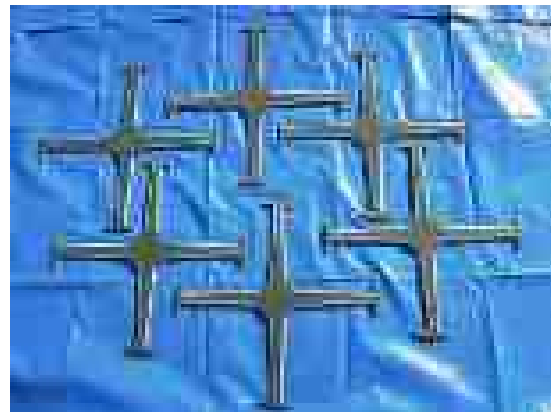
(b) Definition of blade setting angle.

Fig. 3-1. Turbine outline and definition of blade setting angle from -6 to +6deg.

翼取付角度は $-6 \sim +6 \text{ deg}$ の範囲に設定し、図3-2に示すように翼取付角度に応じた支持板を用いる。翼取付角度 $-6 \sim -1 \text{ deg}$ の試験に用いる支持板を図3-2(a)に、翼取付角度 $+1 \sim +6 \text{ deg}$ の試験に用いる支持板を図3-2(b)に示す。



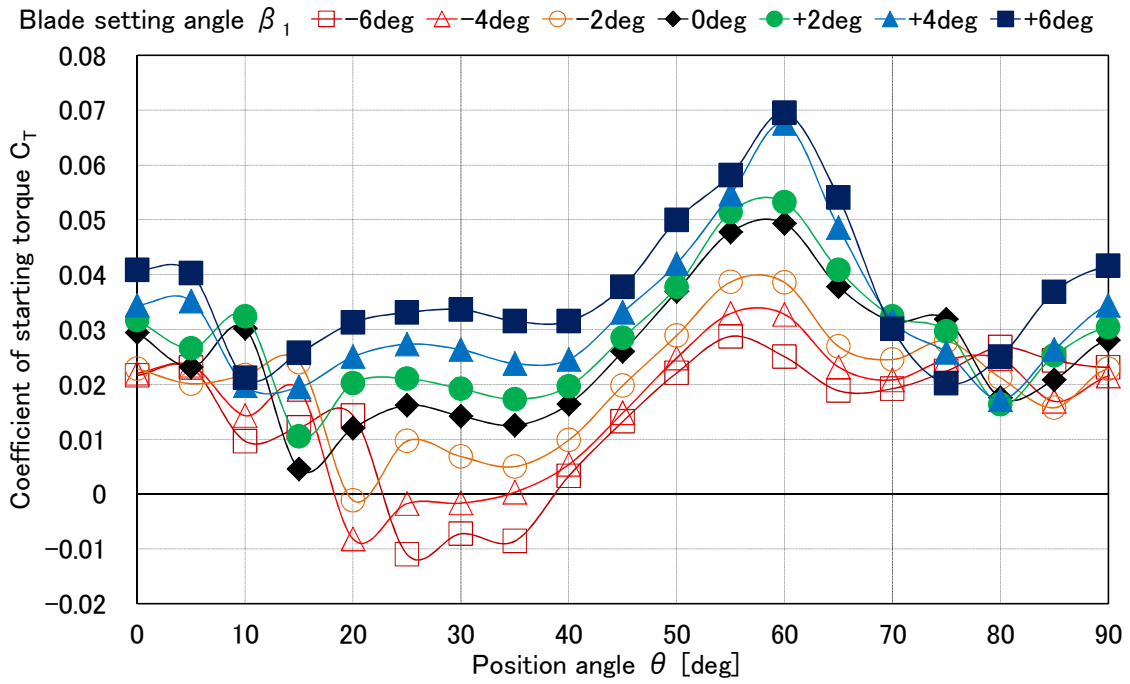
(a) Support plate, from -6 to -1deg.



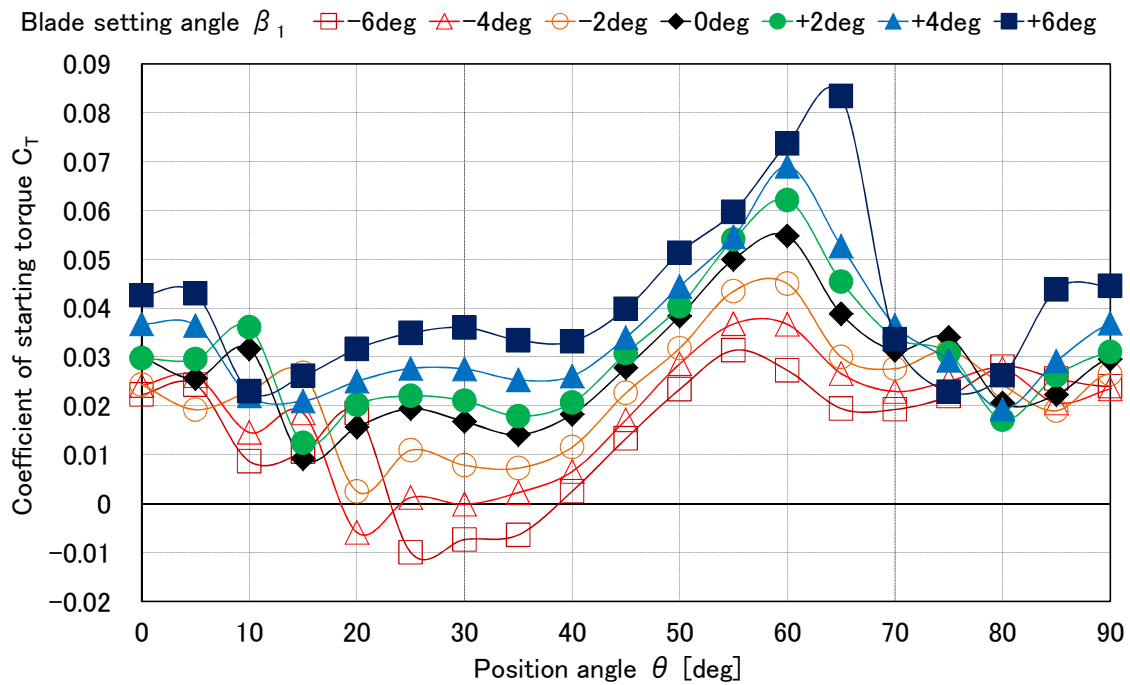
(b) Support plate, from +1 to +6deg.

Fig. 3-2. Support plate for blade setting angle from -6 to +6deg.

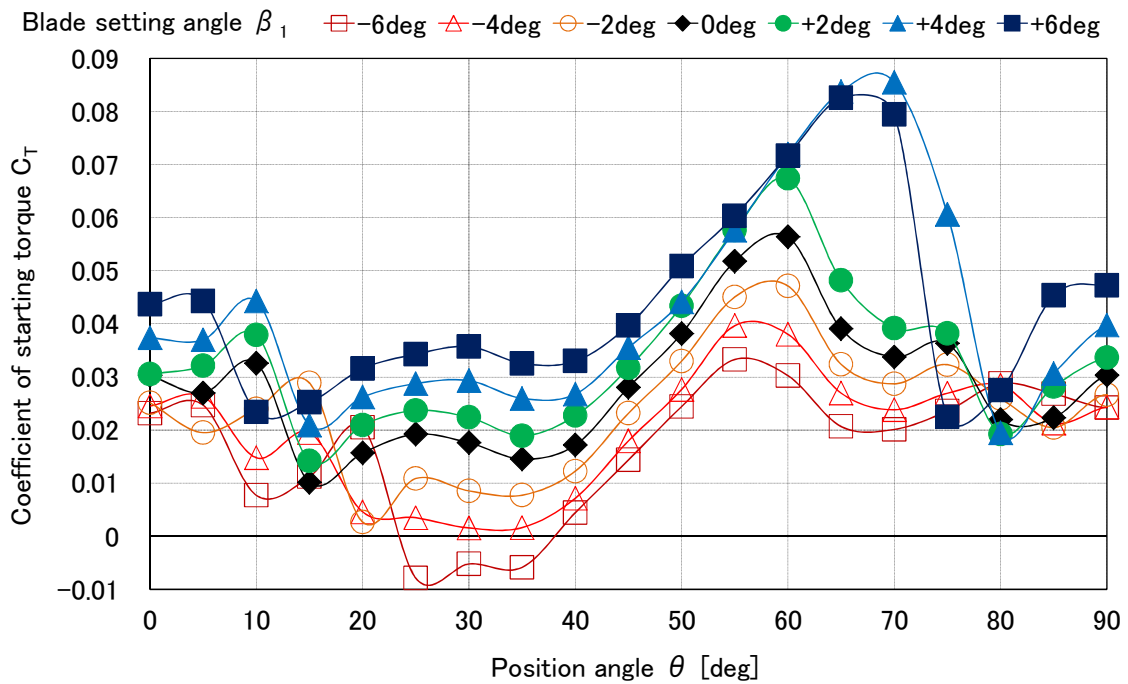
風速 $9, 12, 15 \text{ m/s}$ における位置角に対する起動トルク係数を図3-3に示す。図から設定風速に関わらず、起動トルク係数は翼取付角度 0 deg の場合と比較して翼取付角度が正のとき増加し、翼取付角度が負のとき減少する。また、起動トルク係数の最大値は翼取付角度 $+6 \text{ deg}$ 、起動トルク係数の最小値は翼取付角度 -6 deg において示される。つぎに、風速 9 m/s において起動トルク係数



(a) Wind speed 9m/s.



(b) Wind speed 12m/s.



(c) Wind speed 15m/s.

Fig. 3-3. Characteristics of starting torque about blade setting angle.

が負となる位置角は翼取付角度 -2deg では位置角 20deg 、翼取付角度 -4deg では位置角 $20\sim30\text{deg}$ 、翼取付角度 -6deg では位置角 $25\sim35\text{deg}$ の範囲である。このことから、翼取付角度を負とした場合、取付角度が小さくなるほど起動トルクが負となる位置角の範囲は広くなる。また、起動トルク係数が負となる取付角度は風速 9m/s では $-2\sim-6\text{deg}$ 、風速 12m/s では $-4\sim-6\text{deg}$ 、風速 15m/s では -6deg である。このことから、起動トルク係数が負となっても、風速の増加に伴い起動トルクは正になると考えられる。

起動トルク係数の平均値を図3-4に示す。平均起動トルク係数は翼取付角度 0deg と比較して翼取付角度を正とした場合は増加し、翼取付角度を負とした場合は減少する。また、風速の増加にともなって起動トルク係数の平均値は増加している。この原因は、図3-3に示すようにおよそ $60\sim80\text{deg}$ の位置角の範囲でトルク係数が風速の増加にともなって増加するためであると考えられる。

翼取付角度 $-6\sim+6\text{deg}$ の範囲では、取付角度が大きいほど平均起動トルク係数は増加し、平均値が最大となる翼取付角度は $+6\text{deg}$ である。しかし、平均起動トルク係数の最大値を示す翼取付角度は翼取付角度 $+6\text{deg}$ 以上に存在す

ると推察される。そこで、次項では翼取付角度を+30~+90degの範囲に設定する。

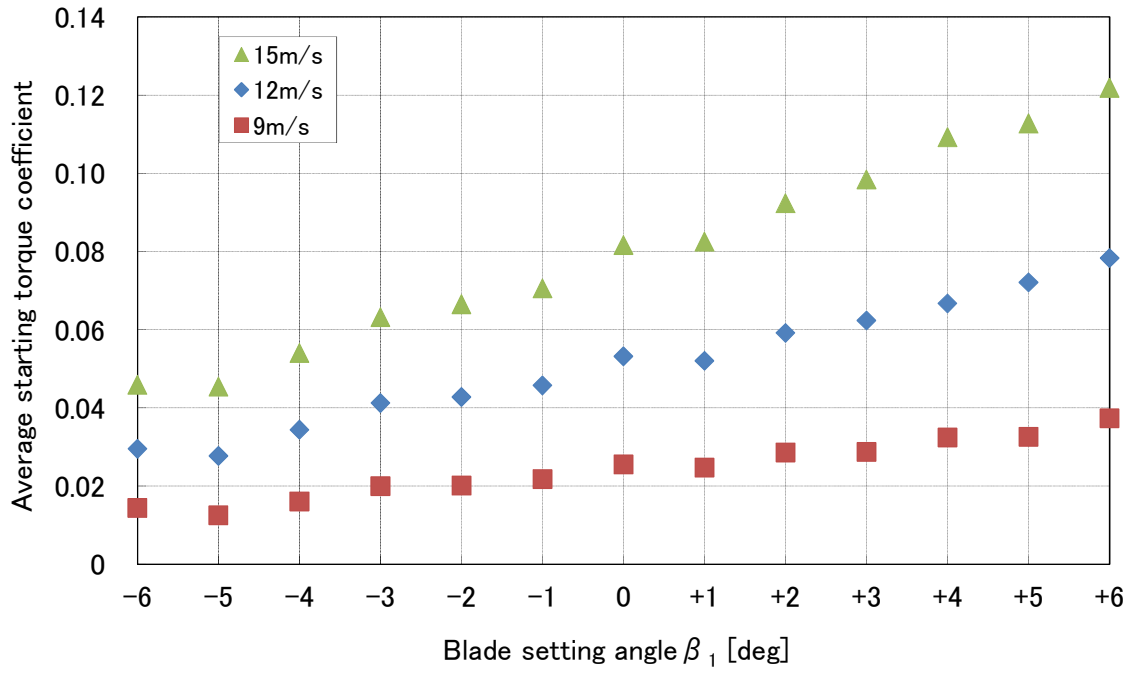
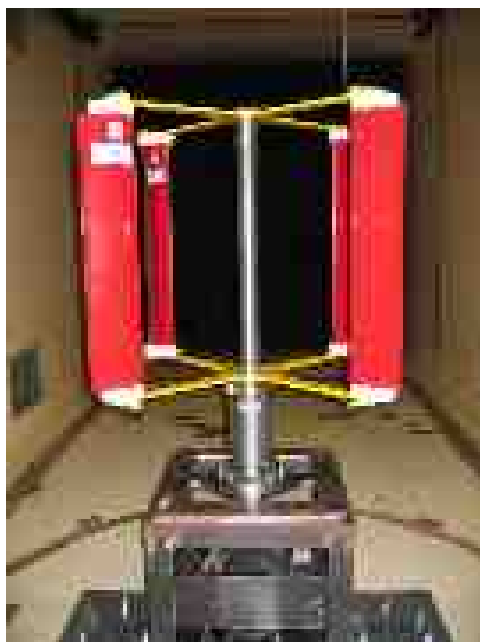


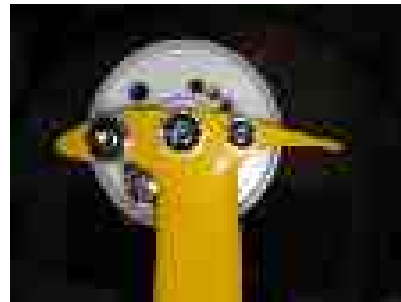
Fig. 3-4. Average starting torque coefficient about blade setting angle.

3. 1. 2 翼取付角度 30 ~ 90 deg における起動トルク特性

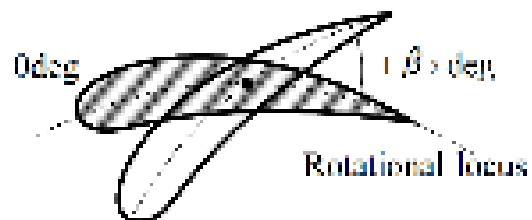
図 3-5 (a) に示すように風車の寸法，翼型および翼枚数は前項と同様であるが，翼取付角度 30 ~ 90 deg にする場合は図 3-5 (b) に示す治具を翼と支持板の間に挿入して設定する。このため，翼の支持方法は治具による制約を受け，翼取付角度は図 3-5 (c) に示すように前縁から 47 mm の位置（翼弦長に対して前縁から 47%）を中心として回転軌跡とのなす角により定める。前項において起動トルクの増加した翼取付角度が正の範囲のみ検討するため，翼の後縁は回転軌跡の外側に傾ける。



(a) Outline of turbine.



(b) Blade setting angle adjuster.



(c) Definition of blade setting angle.

Fig. 3-5. Blade setting angle, from 30 to 90 and 0deg.

風速 9 m/s において翼取付角度を 30 ~ 90 deg とした場合の位置角に対する起動トルク係数を図 3-6 に示す。翼取付角度 30 ~ 90 deg における起動トルク係数は翼取付角度 0 deg の場合よりも概ね増加している。ただし，翼取付角度 50 ~ 70 deg を除いて位置角により起動トルク係数が減少する場合があります，翼取付角度 30 deg においては位置角 45 ~ 50 deg，翼取付角度 40 deg においては位置角 40 deg，翼取付角度 80 deg においては位置角 55 ~

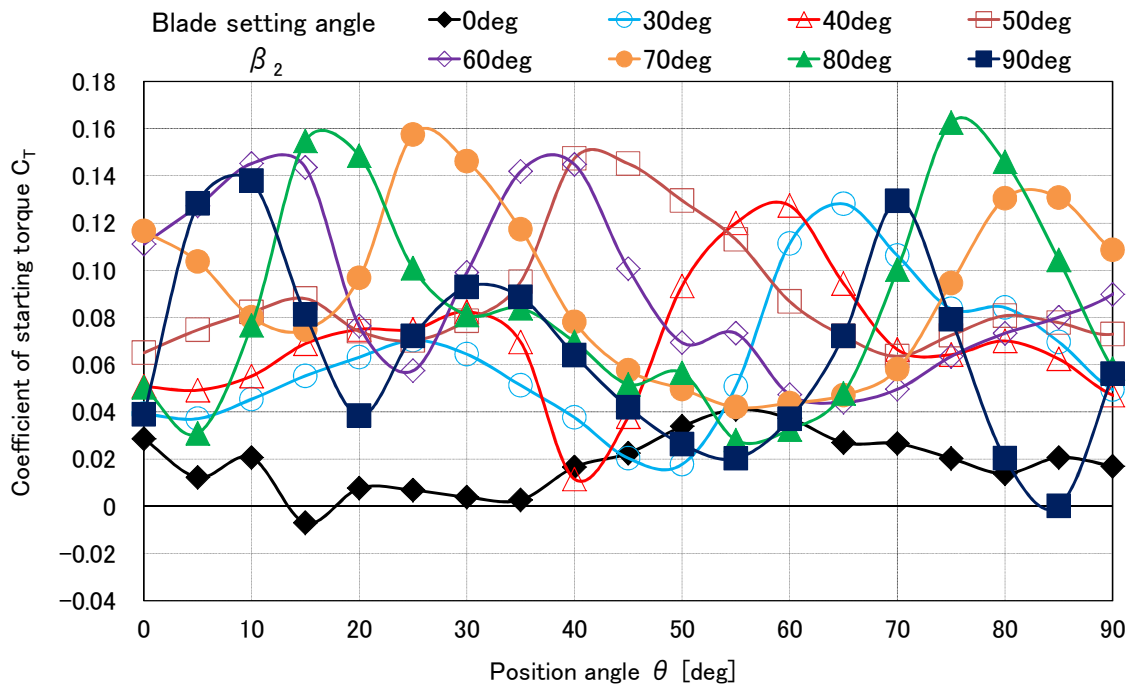


Fig. 3-6. Characteristics of starting torque coefficient.

(Wind speed 9m/s)

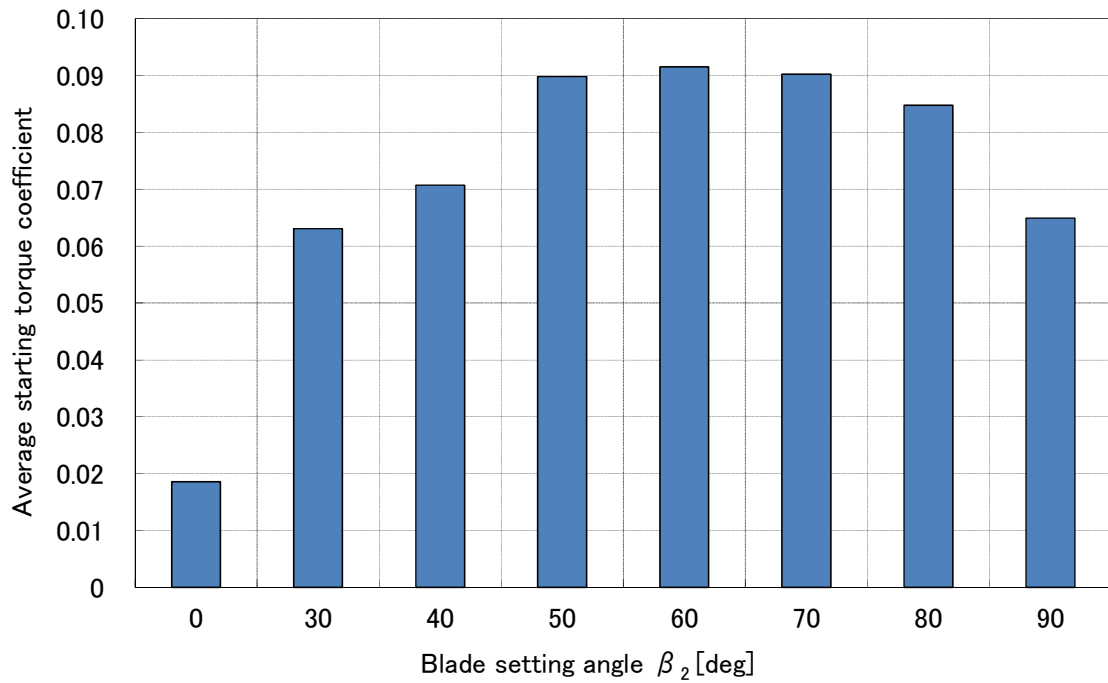


Fig. 3-7. Average starting torque coefficient about blade setting angle.

(Wind speed 9m/s)

60 deg, 翼取付角度 90 deg においては位置角 50 ~ 60, 85 deg において翼取付角度 0 deg よりも起動トルク係数は低下する。

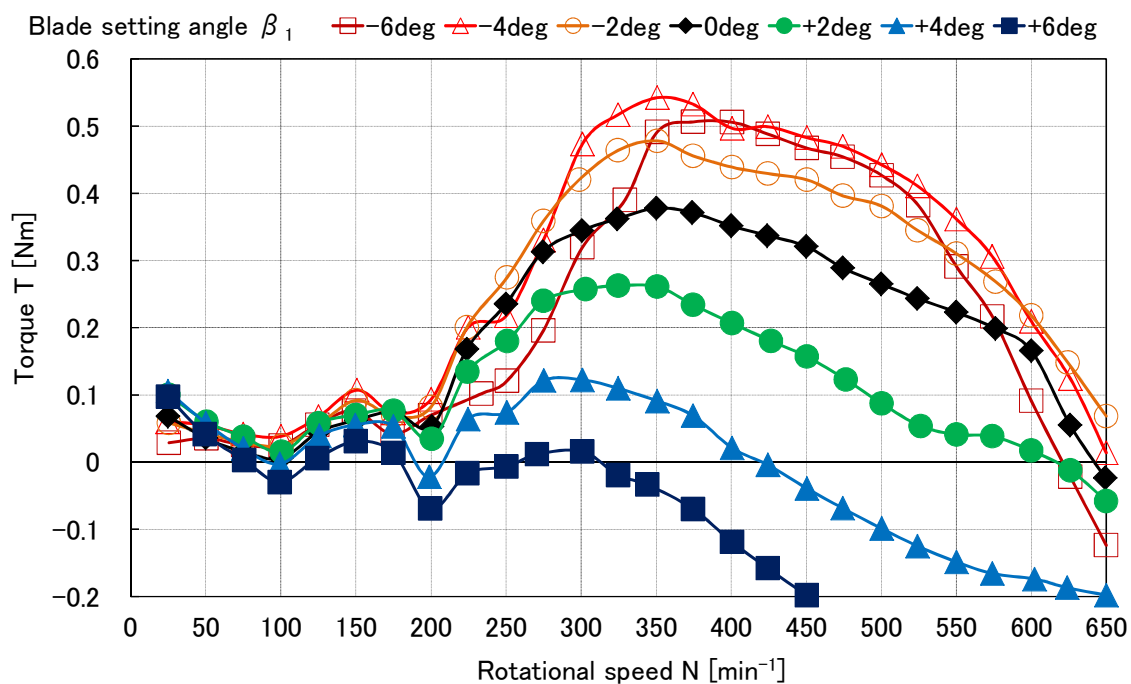
起動トルク係数の平均値と翼取付角度の関係を図 3-7 に示す。起動トルク係数の平均値は翼取付角度 0 deg と比較して設定したすべての翼取付角度において増加した。また, 平均起動トルク係数が最大値となる翼取付角度は 60 deg である。

本節では直線翼式垂直軸風車において, 翼取付角度を正としたとき起動トルクは増加し, 平均起動トルク係数が最大値となる翼取付角度は 60 deg であることを示した。

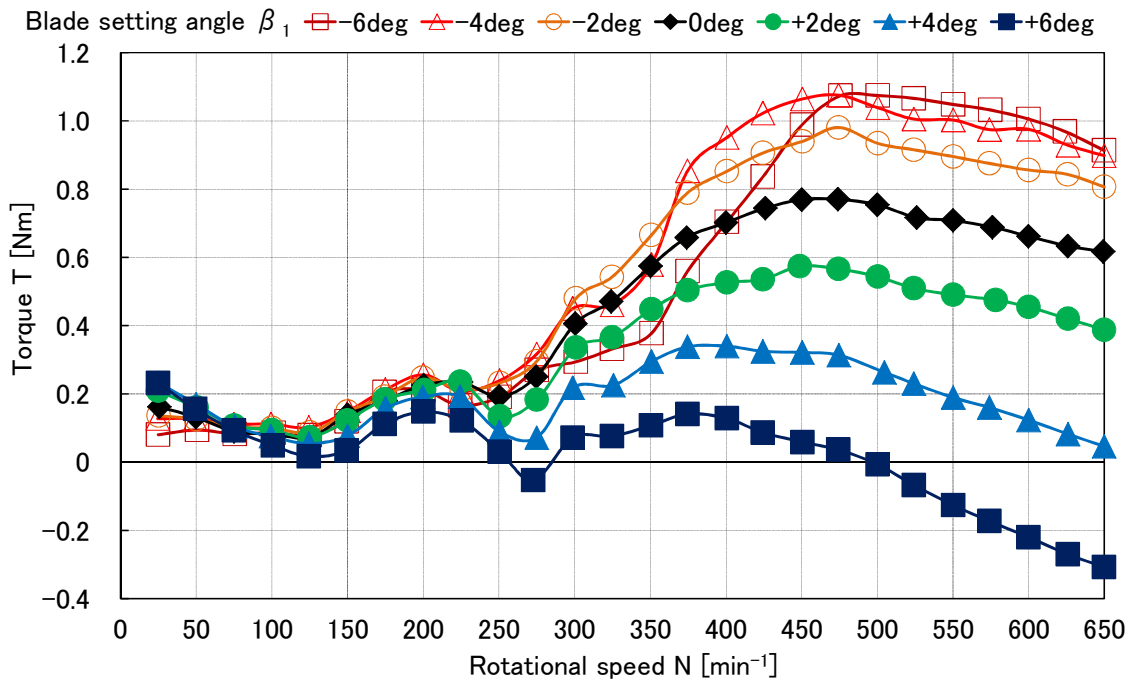
3. 2 負荷特性試験

前節では翼取付角度と起動トルク特性の関係について検討したが、風車を発電装置に用いる場合は回転速度に対する効率などの負荷特性も重要である。そこで、本節では翼取付角度を $-6 \sim +6 \text{ deg}$ に設定し負荷特性試験をおこなう。

図3-8に風速 $9, 12 \text{ m/s}$ における回転速度に対するトルク特性を示す。図3-8から、いずれの設定風速においてもトルクの最大値は翼取付角度 0 deg と比較して、翼取付角度を負にすると増加し、翼取付角度を正にすると角度を増す毎に減少する。図3-8(a)に示す風速 9 m/s におけるトルク特性において、トルクが最大値となる翼取付角度は -4 deg であり、このとき約 0.54 Nm となる。翼取付角度 0 deg におけるトルクの最大値約 0.37 Nm と比較して約 0.17 Nm 増加する。図3-8(b)に示す風速 12 m/s におけるトルク特性において、トルクが最大値となる翼取付角度は $-4 \sim -6 \text{ deg}$ であり、このとき約 1.1 Nm となる。翼取付角度 0 deg における最大値約 0.8 Nm と比較して約 0.3 Nm 増加する。



(a) Wind speed 9m/s.

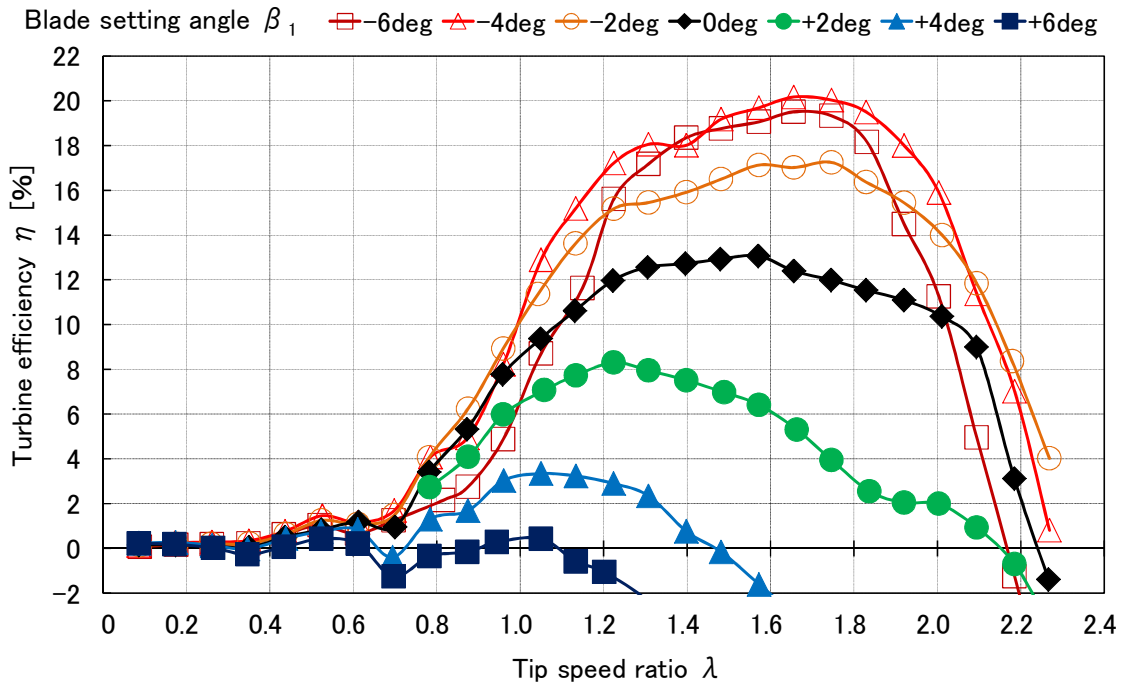


(b) Wind speed 12m/s.

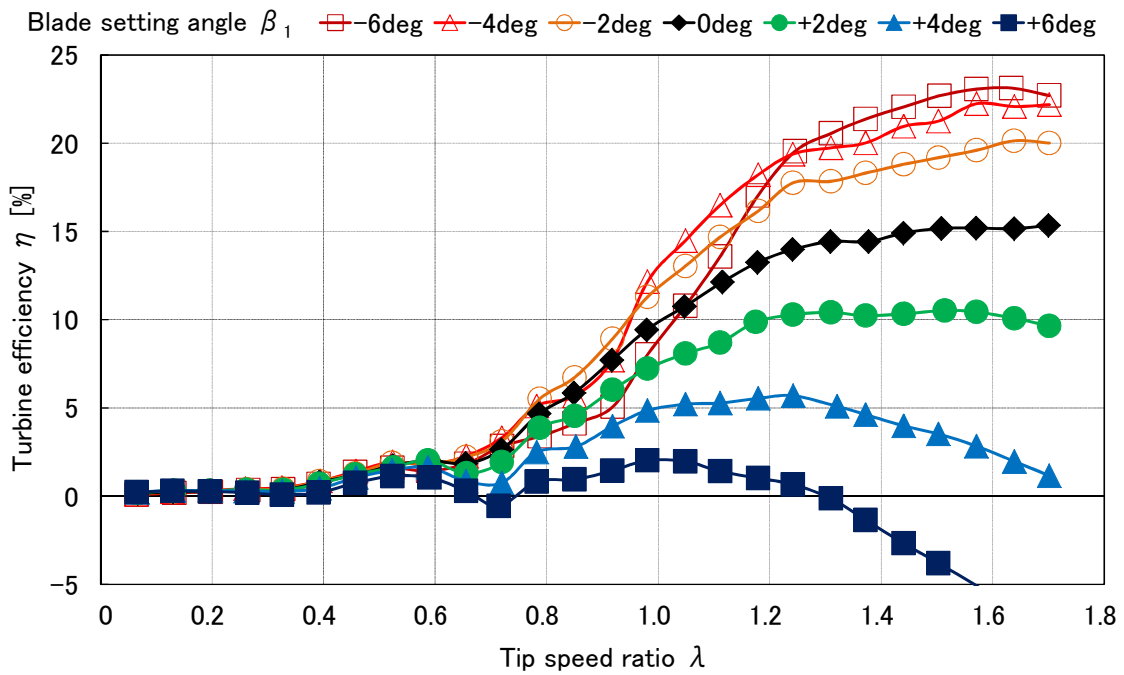
Fig. 3-8. Characteristics of rotational speed and load torque about blade setting angle.

周速比に対する効率特性を図3-9に示す。図3-9からいずれの設定風速においても効率の最高値は翼取付角度0degと比較して、翼取付角度を負にすると増加し、正にすると角度を増す毎に低下する。図3-9(a)に示す風速9m/sでは効率が最高値となる翼取付角度は-4~-6degであり、このときの効率は約20%となる。翼取付角度0degにおける効率の最高値約13%と比較して約7%増加している。また、図3-9(b)に示す風速12m/sでは効率が最高値となる翼取付角度は-6degであり、このとき効率は約23%となる。翼取付角度0degにおける効率の最高値約15%と比較して約8%増加している。

効率が最高値となる翼取付角度は-4~-6degとなったが、発電用途に使用する場合、広い回転速度域で高い効率を示す方が負荷の変動に対して高効率な運転が可能であると考えられる。そこで、風車効率が15%以上となる周速比の範囲に着目すると、風速9m/sにおいて翼取付角度-4degのとき約1.1~2.1の範囲で最も広く、翼取付角度-6degでは約1.2~1.9の範囲となり、翼取付角度-4degと比較して狭くなる。また、風速12m/sにおいて風車効率が15%以上となる周速比は翼取付角度-4degでは約1.05以上であるが、



(a) Wind speed 9m/s.



(b) Wind speed 12m/s.

Fig. 3-9. Characteristics of tip speed ratio and turbine efficiency about blade setting angle.

翼取付角度 -6 deg では約 1.15 以上である。したがって、発電時の運用を考慮した場合、広い回転速度域で高い効率を示す翼取付角度は -4 deg が有利であると考えられる。

3. 3 まとめ

翼取付角度を $-6 \sim +90 \text{ deg}$ の範囲に設定し、翼取付角度が起動トルク特性および負荷特性に及ぼす影響について検討した結果、起動トルク特性試験から次のことがいえる。

- (1) 起動トルクは翼取付角度が正のとき増加する。
- (2) 起動トルクの平均値は翼取付角度 60 deg において最大となる。
負荷特性試験から次のことがいえる。
- (3) 効率は翼取付角度を負に設定したとき取付角度 0 deg における特性よりも改善する。
- (4) トルクおよび効率の最高値は設定風速により変化するが概ね翼取付角度 $-4 \sim -6 \text{ deg}$ の範囲となる。

発電装置に利用する風車の性能として考えた場合、次のことがいえる。

- (5) 翼取付角度 $-4 \sim -6 \text{ deg}$ のなかでも、広い回転速度域で高い効率を示す翼取付角度 -4 deg が有利であると考えられる。
- (6) 起動トルク特性試験では翼取付角度が正のときトルクは増加し、負荷特性試験では効率は翼取付角度が負のとき改善することから、翼取付角度に対して両者は相反関係にある。

直線翼式垂直軸風車において翼取付角度により起動性と効率を同時に満足することはできず、ジャイロミル風車と同じ翼の支持部を可変構造とせざるをえない。しかし、前述したように風車の耐久性やコストの点からは翼取付角度は固定して利用する方が有利である。本研究では風車の起動性を改善することを目的としており、起動トルク特性を改善することを優先し翼取付角度は正することが望ましい。起動トルクの平均値が最大値となる翼取付角度 60 deg を採用すると仮定した場合、翼取付角度を正にすると角度を増す毎に風車出力は低下したことから、取付角度 0 deg における風車出力と比較して、風車出力が著しく低下することが推察される。

一方、負荷特性を改善することを優先し翼取付角度 -4 deg を採用すると仮定した場合、起動トルク係数が負となる位置角は $20 \sim 30 \text{ deg}$ の範囲であり狭いことや、風速の増加により起動トルク係数は正となることから、起動性に及ぼす影響は少ないと考えられる。したがって、翼取付角度は 0 deg のままとするか、負

荷特性を優先して翼取付角度 -4 deg とし，起動性は次章に述べる方法により改善する。

第4章 補助翼による起動性の向上

直線翼式垂直軸風車において、補助翼は強風時に風車が高速回転になり破損するのを防止するために用いられることがある。その場合、補助翼はフラップ⁽²⁵⁾やスポイラ⁽²⁶⁾と呼ばれ、強風時に風車が高速回転となった場合、補助翼が開いて風車を減速させることを目的としている。したがって、本研究のように風車の起動性を向上させることを目的として補助翼を利用する場合については検討されてない。本章では風車の起動性を向上させるため、風車の翼に補助翼を取りつけて、以下の検討⁽²⁷⁾をおこなう。まず、補助翼が風車の起動トルク特性に及ぼす影響を検討するため、翼に対して補助翼の取付角度を一定とした固定角補助翼を用いる。実験の結果から起動トルクは位置角により増加または減少し、固定角補助翼を備えた風車の起動トルクの平均値は補助翼の無い場合と比較して大きく増加しないことを示す。つぎに、開閉機構を備えた補助翼を固定角補助翼によって模擬し、起動トルクの増加する位置角のみ固定角補助翼を風車に取り付けた実験（開閉式補助翼を模擬した実験）をおこなう。

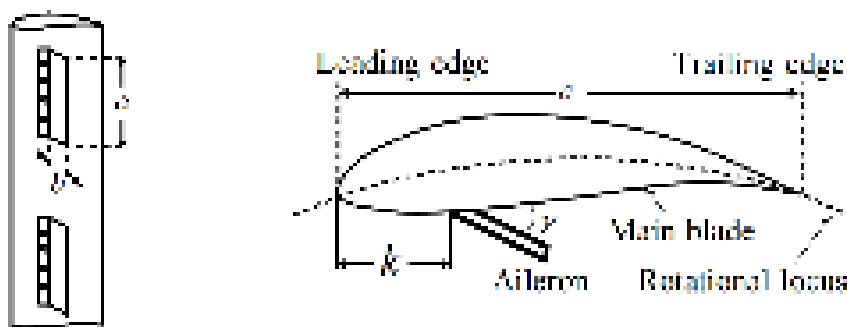
4.1 固定角補助翼による起動性の検討

2章で述べたように、風車の起動性を向上させるには翼枚数を増やした方が有利であるが、効率を重視した場合、翼枚数は少ない方が有利である。翼枚数5枚以上では平均起動トルクが大きく起動性に優れるが、本章では補助翼を取り付ける翼枚数は効率の面から2～4枚とする。また、補助翼が翼の特性に及ぼす影響を検討するため翼枚数1枚を追加し、本節において検討する翼枚数は1～4枚とする。

固定角補助翼による起動性の検討では、まず補助翼の寸法および翼への取付位置が起動性に与える影響について、つぎに補助翼の取付角度が起動性に与える影響について検討する。前章までの実験と同様に、風車の寸法はD 6 0 0 × H 4 5 0、翼型はNACA 63₃-018を基にキャンパー線を回転軌跡と一致するように変形した円弧キャンパー翼とし、試験は本学空気力学実験センターの水平式閉鎖回流型（ゲッチングン型）風洞にておこなった。

4. 1. 1 補助翼の寸法と取付位置が風車の起動トルクに及ぼす影響

翼および補助翼の関係を図4-1 (a), 翼に対する補助翼の取付位置および取付角度を図4-1 (b)に示す。本節の検討に用いる固定角補助翼はアルミニウム製である。固定角補助翼の取付角度 γ は翼の下面に対して70degとする。これは、次節の開閉式補助翼において70degを採用するためである。また、固定角補助翼は翼の前縁から位置 k に取り付ける。取付位置 k は翼の構造から補助翼を取り付け可能な36mmおよび58mmとし、 k が36mmの場合を位置F、58mmの場合を位置Rと表記する。位置Fは翼弦長 c に対して前縁から36%, 位置Rは58%である。



(a) Main blade and aileron.

(b) Setting position of aileron.

Fig. 4-1. Outline of turbine, main blade and aileron.

補助翼の寸法を大きくした方が風車の起動トルク特性への効果が大きくなると考えられる。しかし、風車回転時の遠心力による翼の変形が補助翼に影響を及ぼすことが推察されるため、この影響が少なくなるように、補助翼の翼幅 a は風車の翼幅（高さ）450mmよりも十分に小さい120mmおよび50mmとする。ただし、補助翼による風車の起動トルク特性への効果が大きくなることを期待して、翼1枚に補助翼2枚を取り付ける。補助翼の翼弦長 b は、翼に補助翼を位置Fに取り付けた場合、補助翼が翼の翼弦長105mmを超えない40mmとした。補助翼の寸法は翼幅120mm、翼弦長40mmをL、翼幅50mm、翼弦長40mmをSと表記する。補助翼の寸法および取付位置の組合せはS-F、S-R、L-F、L-Rの4種類と翼に補助翼を取り付けない場合について検討する。

4枚翼風車における風速12m/sの起動トルク特性を図4-2に示す。起動トルク特性は、補助翼を取り付けない場合と比較して、補助翼を取り付けることで増加する位置角と減少する位置角が存在する。

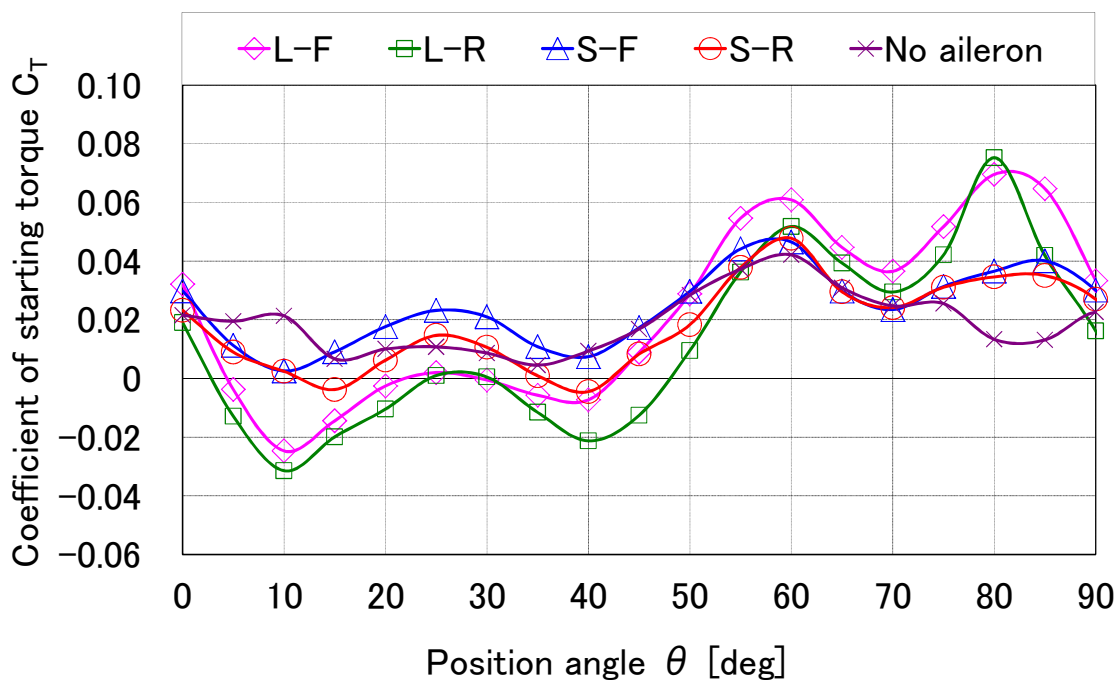


Fig. 4-2. Starting torque for 4-blade turbine with the fixed-angle aileron.
(Wind speed 12m/s)

図4-2において測定した位置角0～85degの範囲における起動トルク係数の平均値を表4-1に示す。起動トルク係数の平均値は、補助翼L-Fでは0.022, S-Fでは0.024であり、補助翼を取り付けない場合の0.019よりも平均値は増加する。しかし、補助翼L-Rでは0.013, S-Rでは0.018であり、補助翼を取り付けない場合よりも平均値は減少する。補助翼L-RおよびS-Rにおいて起動トルクが補助翼を取り付けない場合よりも減少するのは、図4-2の起動トルク特性において、位置角0～50degの起動トルクが補助翼を取り付けない場合よりも概ね減少するためである。起動トルク係数の平均値は補助翼の取付位置はRよりもFの場合の方が大きく、取付位置Fの場合、補助翼を取り付けない場合よりも起動トルクの平均値は大きい。

補助翼の寸法は大きい方が起動トルクの平均値も大きくなると考えられるが、図4-2において補助翼を取り付けない場合よりトルクの減少する位置角の影響により、補助翼の寸法はLよりもSの場合の方が起動トルクの平均値は大きい。そこで、補助翼の寸法は、起動トルクの平均値ではなく、以下に述べる翼1枚における起動トルク特性への影響の大きさから検討する。

Table 4-1. Average starting torque coefficient for 4-blade turbine
with the fixed-angle aileron.

Aileron type	F	R	No aileron
L	0.022	0.013	0.019
S	0.024	0.018	

補助翼が翼の特性に及ぼす影響を検討するため、風速12 m/sの翼1枚における起動トルク特性を図4-3に示す。補助翼の寸法および取付位置に関わらず、位置角150～270 degでは補助翼を取り付けた方が補助翼を取り付けない場合よりも起動トルクは増加しているが、位置角0～30, 270～360 degでは減少している。また、位置角30～150 degでは補助翼を取り付けても補助翼を取り付けない場合とほぼ同じ値の起動トルクであり増減しない。トルクの最大値と最小値に着目した場合、補助翼を取り付けない場合の最大値は位置角230 degにおいて約0.02, 最小値は位置角30 degにおいて約-0.02である。補助翼L-Fのとき最大値は位置角225 degにおいて約0.09, 最小値は位置角325 degにおいて約-0.08であり、補助翼が起動トルク特性に及ぼす影響が最も大きい。一方、補助翼S-Rのとき最大値は位置角210 degにおいて約0.03, 最小値は位置角330 degにおいて約-0.04であり、補助翼が起動トルク特性に及ぼす影響は最も小さい。

つぎに図4-3において補助翼を取り付けることによりトルクの増加する位置角150～270 degに着目し、この位置角の範囲における起動トルク係数の平均値を表4-2に示す。起動トルク係数の平均値は、補助翼の寸法や取付位置に関わらず、補助翼を取り付けない場合よりも補助翼を取り付けた場合の方が大きくな

る。補助翼の寸法はSよりもLの場合の方が起動トルクの平均値は大きく、補助翼の取付位置はRよりもFの場合の方が起動トルクの平均値は大きい。平均値が最大値となるのは固定角補助翼L-Fのときで、このとき平均値0.057であり補助翼を取り付けない場合の平均値0.012と比較して約4.8倍となる。

本項の検討結果から、補助翼により起動トルク特性への影響が大きく現れる補助翼の寸法および取付位置の組合せはL-Fである。よって、以降の検討では補助翼L-Fを用いる。

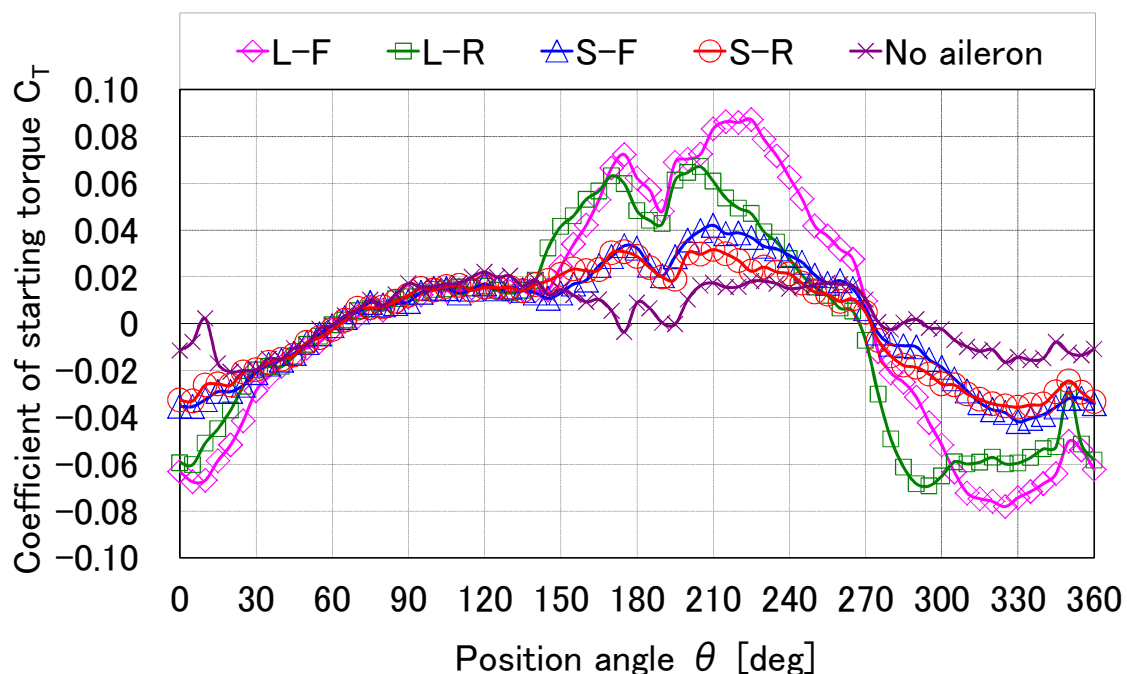


Fig. 4-3. Starting torque for 1-blade turbine with the fixed-angle aileron.
(Wind speed 12m/s)

Table 4-2. Average starting torque coefficient for 1-blade turbine with the fixed-angle aileron of position angle between 150 and 270deg.

Aileron type	F	R	No aileron
L	0.057	0.041	0.012
S	0.027	0.022	

4. 1. 2 補助翼の取付角度が風車の起動トルクに及ぼす影響

本項では補助翼の取付角度が風車の起動トルク特性に及ぼす影響について検討する。補助翼には固定角補助翼を用いて、取付角度を40～110degの範囲で10deg毎に設定した。

風速12m/sの4枚翼風車における起動トルク特性を図4-4に示す。補助翼を取り付けた場合、補助翼を取り付けない場合よりも位置角により起動トルクは増加または減少している。概ね位置角0, 70～90degでは取付角度に関わらず補助翼を取り付けた方が補助翼を取り付けない場合よりもトルクは増加しているが、位置角5～15degでは取付角度に関わらず補助翼を取り付けると補助翼を取り付けない場合よりもトルクは減少している。また、補助翼を取り付けない場合は起動トルクが負となる位置角は存在しないが、補助翼を取り付けることにより位置角10～15degでは取付角度に関わらずトルクは負となる。

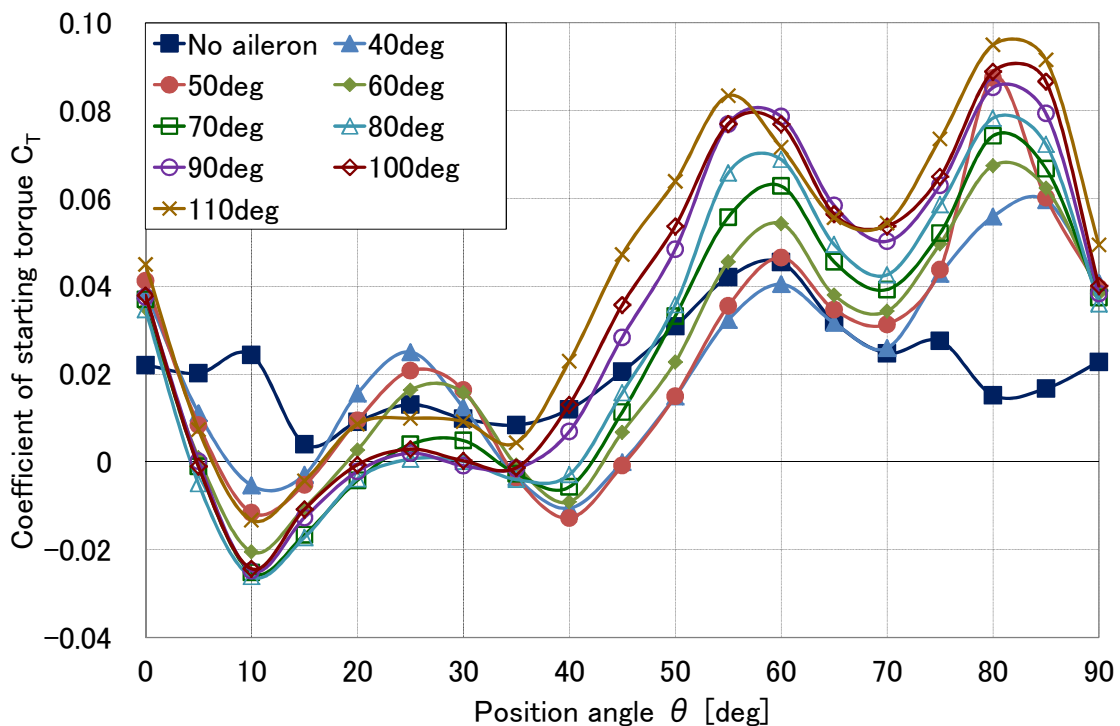


Fig. 4-4. Starting torque for 4-blade turbine with the fixed-angle aileron.

(Wind speed 12m/s)

図4-4において測定した位置角0～85degの範囲における起動トルク係数の平均値を図4-5に示す。補助翼を取り付けた場合の起動トルクの平均値は、補助翼の取付角度に関わらず、補助翼を取り付けない場合の平均値0.018よりも増加する。設定した取付角度40～110degの範囲では、取付角度が大きくなるほど起動トルクの平均値は増加し、取付角度110degの場合に起動トルクの平均値は最大値0.040となる。起動トルクの平均値が増加することにより、風車の起動性は向上すると考えられるが、図4-4において起動トルクが負の位置角から起動する場合、逆回転するトルクのため風車の起動が困難になると考えられる。

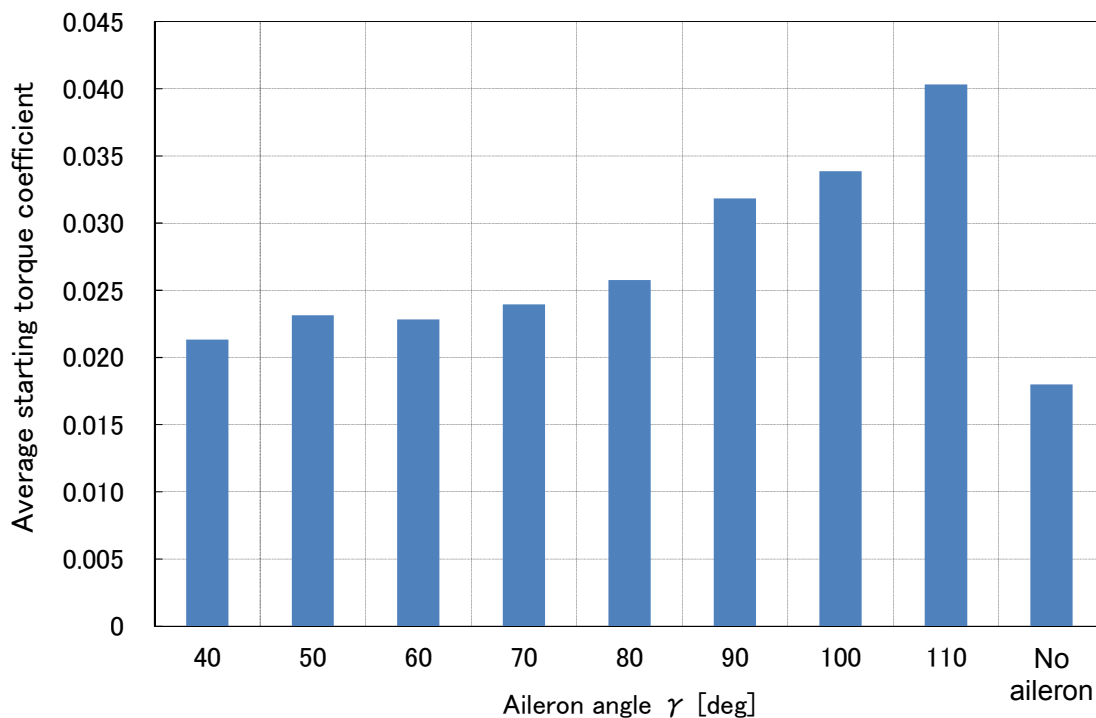


Fig. 4-5. Average starting torque coefficient about aileron angle.

(Wind speed 12m/s)

風速 12 m/s の翼 1 枚における起動トルク特性を図 4-6 に示す。位置角 $150 \sim 270\text{ deg}$ における起動トルクは補助翼の取付角度に関わらず、補助翼を取り付けない場合よりも増加し、位置角 $0 \sim 30$ および $270 \sim 360\text{ deg}$ における起動トルクは補助翼の取付角度に関わらず、補助翼を取り付けない場合よりも減少している。補助翼の抗力は翼の後縁側から風を受けた方が大きい。したがって、位置角 $150 \sim 270\text{ deg}$ では翼の後縁側から風を受けるためトルクが増加し、位置角 $0 \sim 30$ および $270 \sim 360\text{ deg}$ では翼の前縁側から風を受けるためトルクが減少する。また、位置角 $30 \sim 150\text{ deg}$ では補助翼を取り付けてもトルク特性は変化していない。この原因は位置角 $30 \sim 150\text{ deg}$ では流向に対し補助翼が翼の下流側に位置し、翼により風の流が遮られるためであると考えられる。

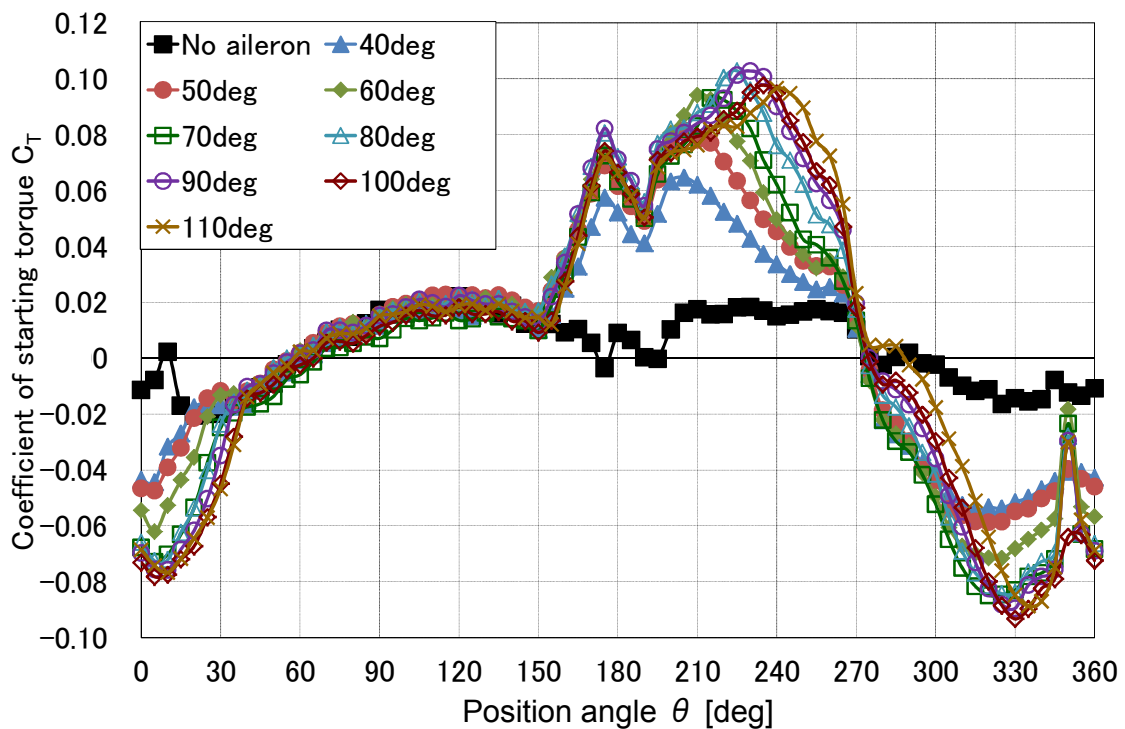
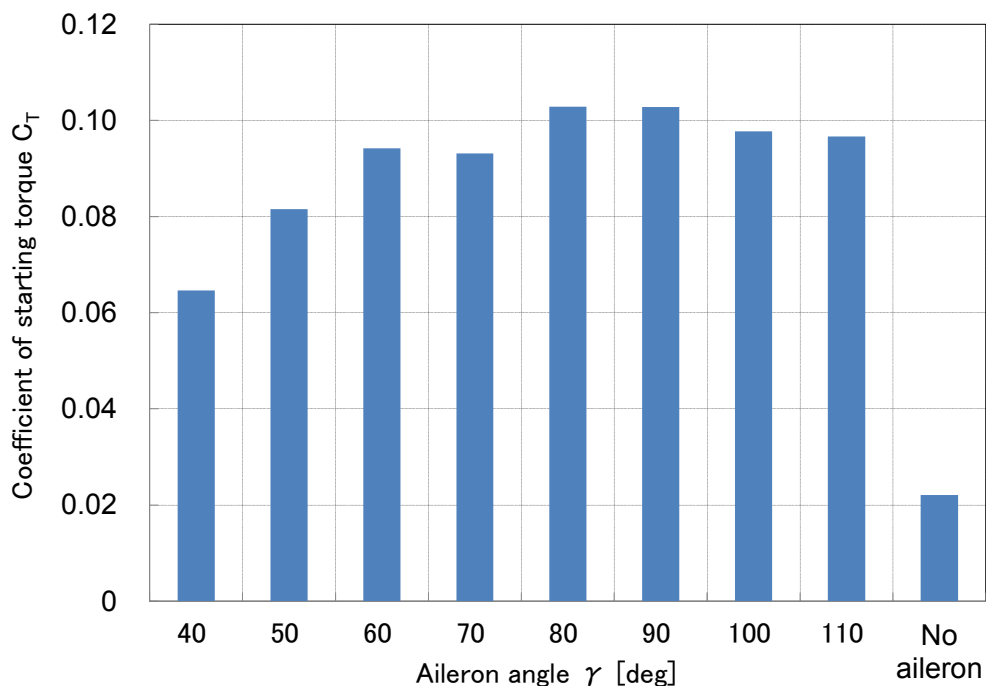


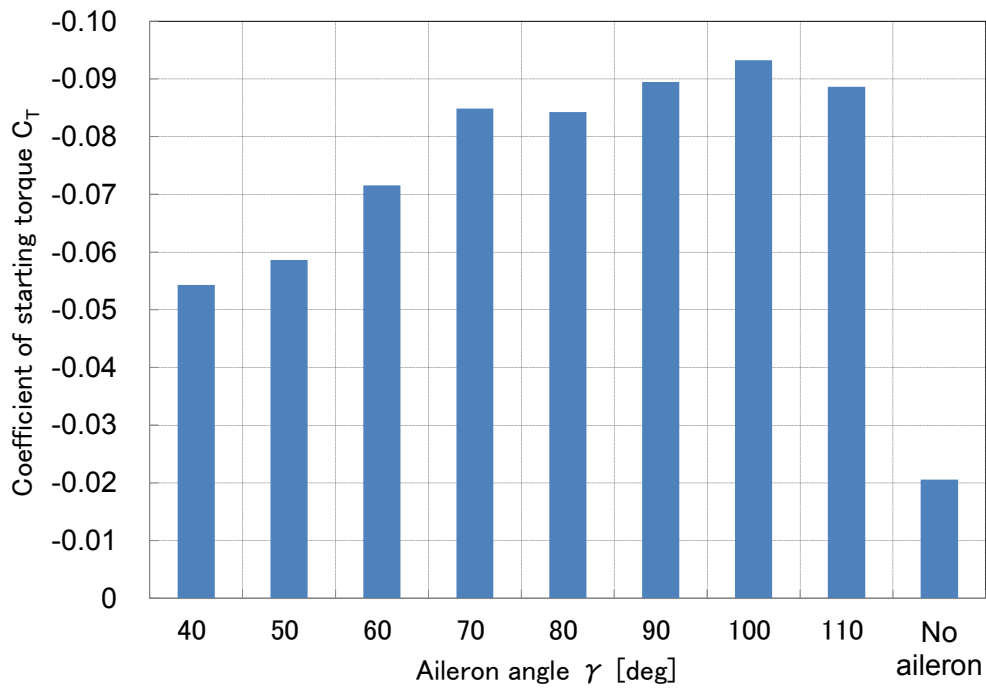
Fig. 4-6. Starting torque for 1-blade turbine with the fixed-angle aileron.

(Wind speed 12 m/s)

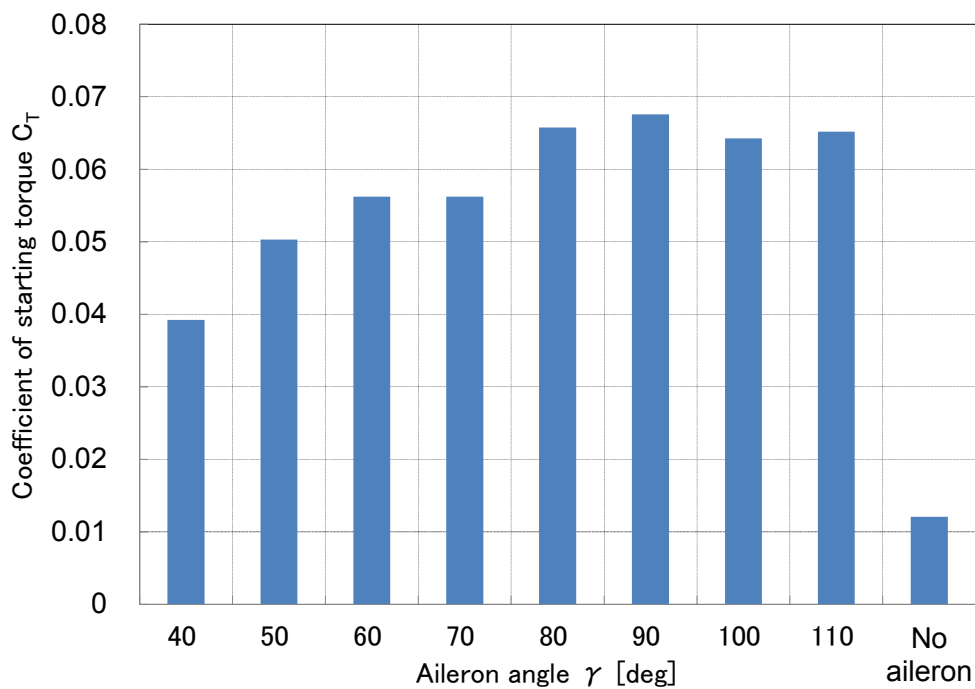
図4-6の翼1枚における起動トルク係数の最大値および最小値を図4-7(a)に、トルクの増加する位置角150~270degにおける起動トルク係数の平均値を図4-7(b)にそれぞれ示す。図4-7(a)において、起動トルク係数の最大値は補助翼の取付角度に関わらず補助翼を取り付けない場合の起動トルク係数の最大値0.022よりも増加する。起動トルク係数の最大値が最大となるのは取付角度80~90degであり、このとき最大値は0.103である。また、起動トルク係数の最小値は補助翼の取付角度に関わらず補助翼を取り付けない場合の起動トルク係数の最小値-0.021よりも減少する。起動トルク係数の最小値が最小となるのは取付角度100degであり、このとき最小値は-0.093である。図4-7(b)において、位置角150~270degにおける起動トルク係数の平均値は、補助翼の取付角度に関わらず補助翼を取り付けない場合の起動トルク係数の平均値0.012よりも増加する。起動トルク係数の平均値が最大となるのは取付角度90degであり、このとき平均値は0.068である。



(a) Maximum starting torque coefficient about aileron angle.



(b) Minimum starting torque coefficient about aileron angle.



(c) Average starting torque coefficient of position angle between 150 and 270deg about aileron angle.

Fig. 4-7. Starting torque coefficient for 1-blade turbine with the fixed-angle aileron.
(Wind speed 12m/s)

4. 2 開閉式補助翼による起動性の検討

前節の検討結果から固定角補助翼を取り付けた4枚翼風車は、補助翼を取り付けない場合よりも起動トルクの増加する位置角と減少する位置角が存在し、起動トルクの平均値は補助翼を取り付けない場合よりも大きく増加しなかった。また、翼1枚に補助翼を取り付けた場合、補助翼を取り付けない場合よりも起動トルクの増加する位置角は150～270degであり、この位置角における起動トルク係数の平均値は、補助翼を取り付けない場合の起動トルク係数の平均値よりも大きく増加する。したがって、翼1枚において位置角150～270degのみ補助翼が開き、それ以外の位置角では補助翼が閉じた状態にできれば、補助翼を取り付けない場合よりも起動トルクの平均値は大きく増加すると考えられる。そこで本節では、補助翼により起動トルクの増加する位置角のみ補助翼が開き、それ以外の位置角では閉じるような開閉機構を備えた補助翼（開閉式補助翼）について検討する。

4. 2. 1 固定角補助翼により開閉式補助翼を模擬する実験

翼1枚において補助翼により起動トルクの増加する位置角は150～270degであった。翼1枚における位置角は翼が静止した状態で風向とのなす角、すなわち迎角と一致する。このため、翼枚数2枚以上の場合、各翼の位置を位置角ではなく迎角を用いて表現する。

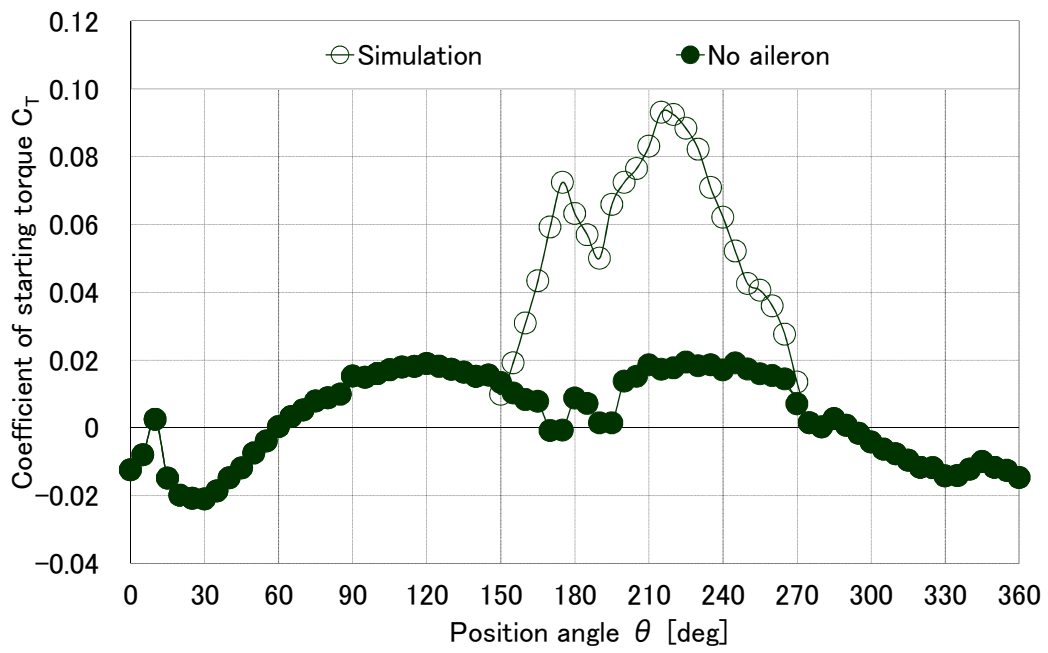
本項では翼枚数2枚以上の風車において、翼が迎角150～270degに位置するとき補助翼が開き、それ以外の迎角に翼が位置するとき補助翼が閉じるような開閉機構を備えた補助翼（開閉式補助翼）について検討する。固定角補助翼を利用して開閉式補助翼を模擬するための実験をおこなう。この実験では翼が迎角150～270degに位置するとき補助翼が開いた状態となるとして固定角補助翼を翼に取り付け、翼が迎角150～270deg以外に位置するとき補助翼が閉じた状態となるとして固定角補助翼を翼から取り外し、起動トルクを測定する。この実験を本論文では、固定角補助翼により開閉式補助翼を模擬する実験と呼ぶ。

前節で述べたように、補助翼の面積は大きく、取付位置は前縁に近い方が風車の起動トルクに対する効果は高くなるため、固定角補助翼はL-F（高さ120mm、

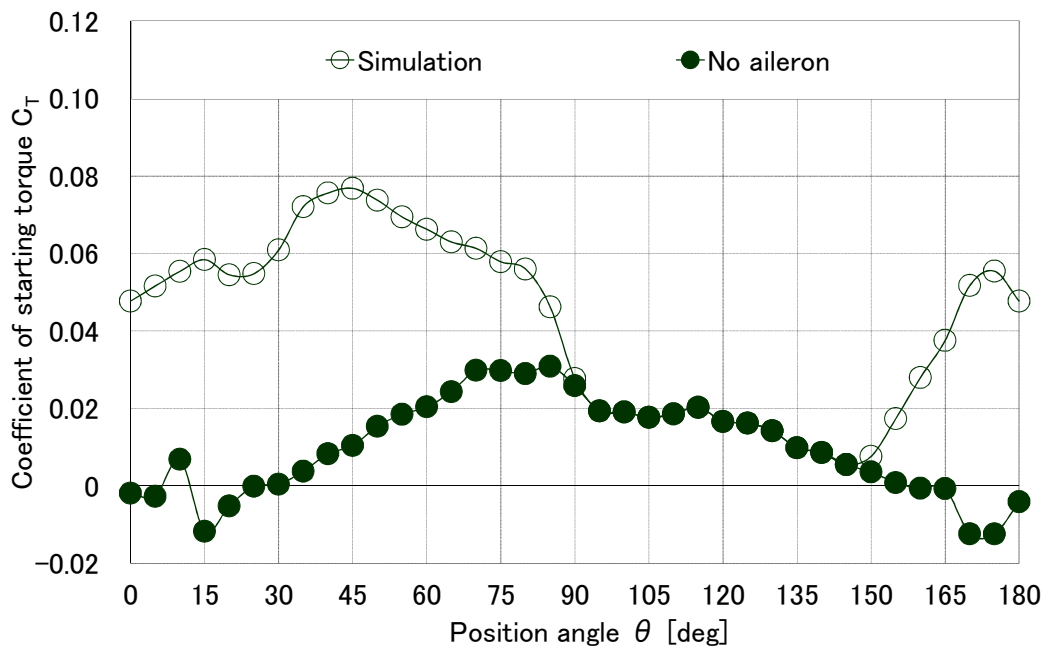
幅40mm, 取付位置36mm)を用いる。また, 取付角度は前節の検討において, 位置角150~270degの起動トルク係数の平均値が最大となる角度として90degを得たが, 開閉式補助翼には70degを採用するため, 本項の取付角度は70degとする。

図4-8に風速12m/sの実験の結果を示す。図に示す1~4枚翼の起動トルク特性において, 補助翼を取り付けることにより補助翼を取り付けない場合よりもトルクが減少する位置角は存在しない。また, 補助翼を取り付けない場合よりも起動トルクが増加する位置角は, 図4-8(a)に示す翼1枚では位置角150~270deg, 図4-8(b)に示す2枚翼風車では位置角0~90, 150~180deg, 図4-8(c)に示す3枚翼風車では位置角0, 30~120degであり, それ以外での位置角では補助翼を取り付けない場合と起動トルクは同じである。図4-8(d)に示す4枚翼風車では全ての位置角において起動トルクは補助翼が無い場合と比較して増加する。さらに, 2枚翼以上の風車では, 補助翼を取り付けることにより起動トルクが負となる位置角は存在しなくなる。

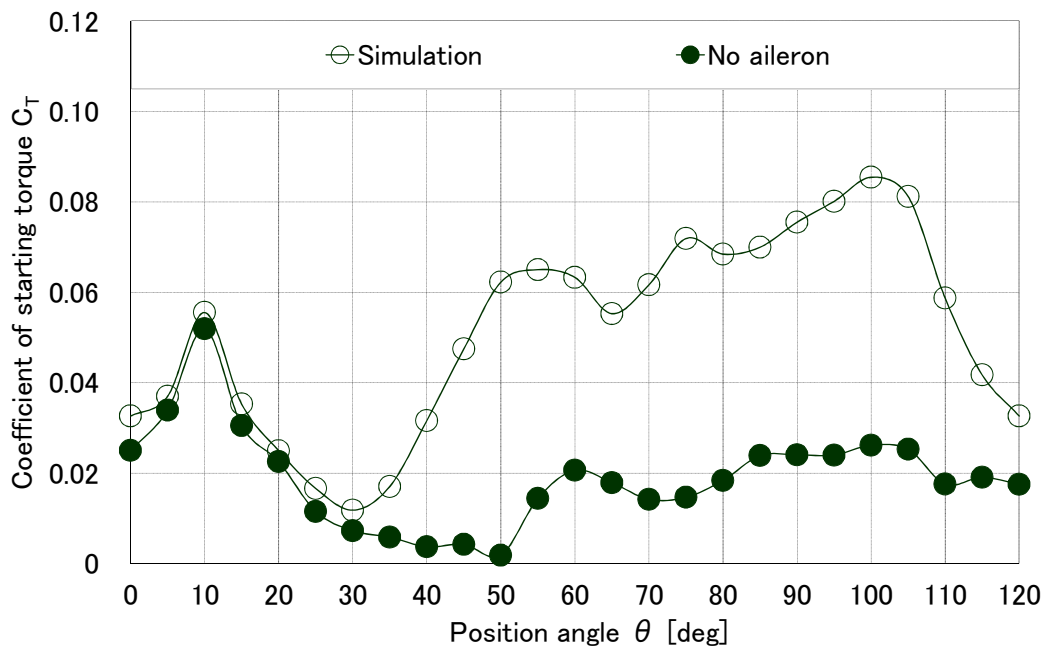
したがって, 各翼が迎角150~270degに位置するとき補助翼が開き, それ以外の迎角に各翼が位置するとき補助翼が閉じるような開閉機構を備えた補助翼を実現することができれば, 風車の起動トルクは大きく増加し起動性が向上することが推察される。



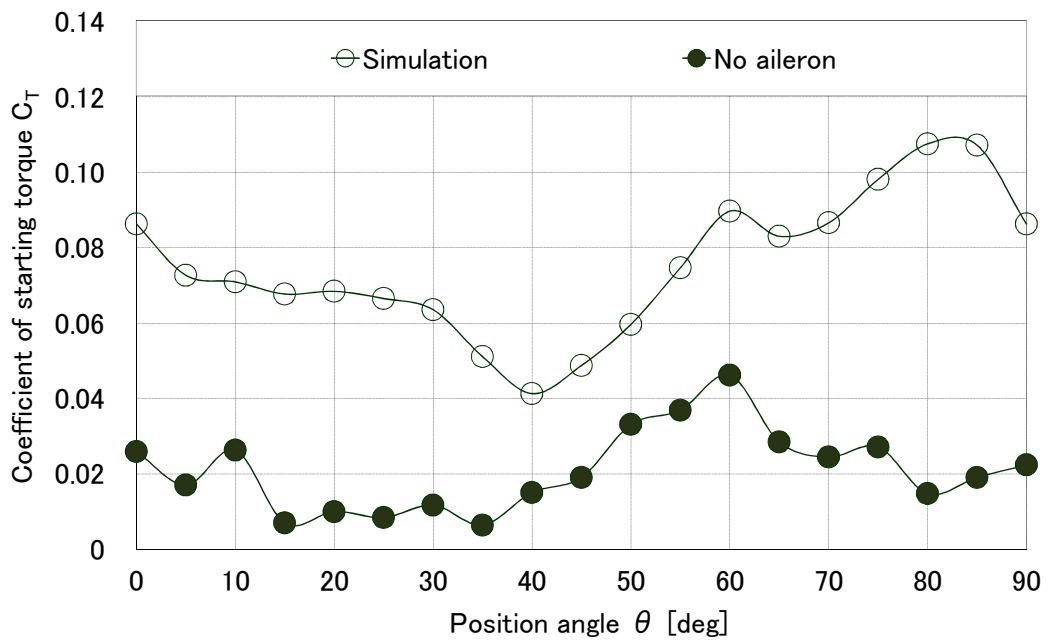
(a) 1-blade turbine.



(b) 2-blade turbine.



(c) 3-blade turbine.



(d) 4-blade turbine.

Fig. 4-8. Starting torque with $\gamma=70$ deg aileron on blade attack angle 150 to 270deg.

(Wind speed 12m/s)

4. 2. 2 開閉式補助翼による起動トルク特性

前節で述べたように翼1枚の場合，固定角補助翼を取り付けて起動トルクが増加する位置角 $150 \sim 270 \text{ deg}$ は翼の後縁側から風を受ける場合に相当し，固定角補助翼を取り付けて起動トルクが減少する位置角 $0 \sim 30$ ， $270 \sim 360 \text{ deg}$ は翼の前縁側から風を受ける場合に相当する。そこで，翼の前縁側から風を受ける場合，補助翼が閉じ，それ以外の位置角では開く状態を維持するような開閉機構をもつ2種類の補助翼を試作した。蝶番，バネおよび角度調整金具によりアルミ板が開閉する機構をもつH (Hinge) 方式の開閉式補助翼を図4-9 (a)に，PET樹脂シートと角度調整金具から構成されるR (Resin) 方式の開閉式補助翼を図4-9 (b)に示す。開閉式補助翼の寸法および取付位置はこれまでの実験と同様にL-F (高さ 120 mm ，幅 40 mm ，取付位置 36 mm)とした。取付角度は前節の検討において，位置角 $150 \sim 270 \text{ deg}$ の起動トルク係数の平均値が最大となる角度として 90 deg を得たが，翼の前縁側から風を受けて補助翼が閉じやすなるように，開いた状態の取付角度を 70 deg とした。

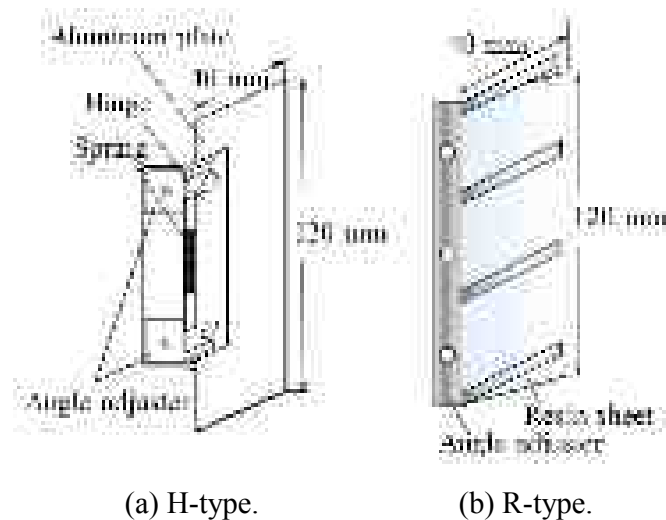
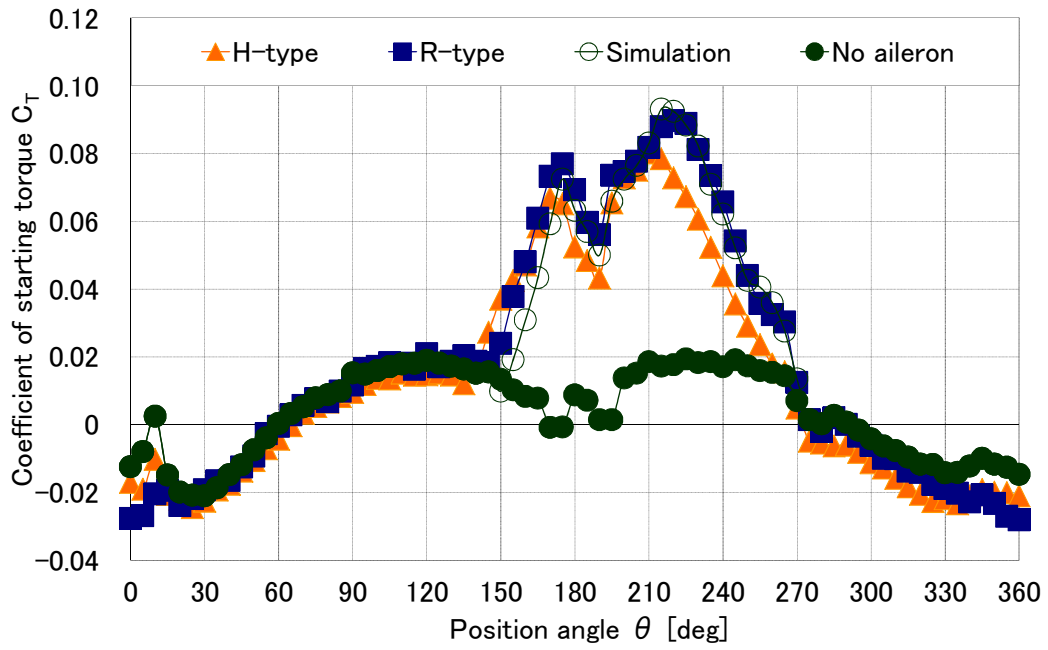
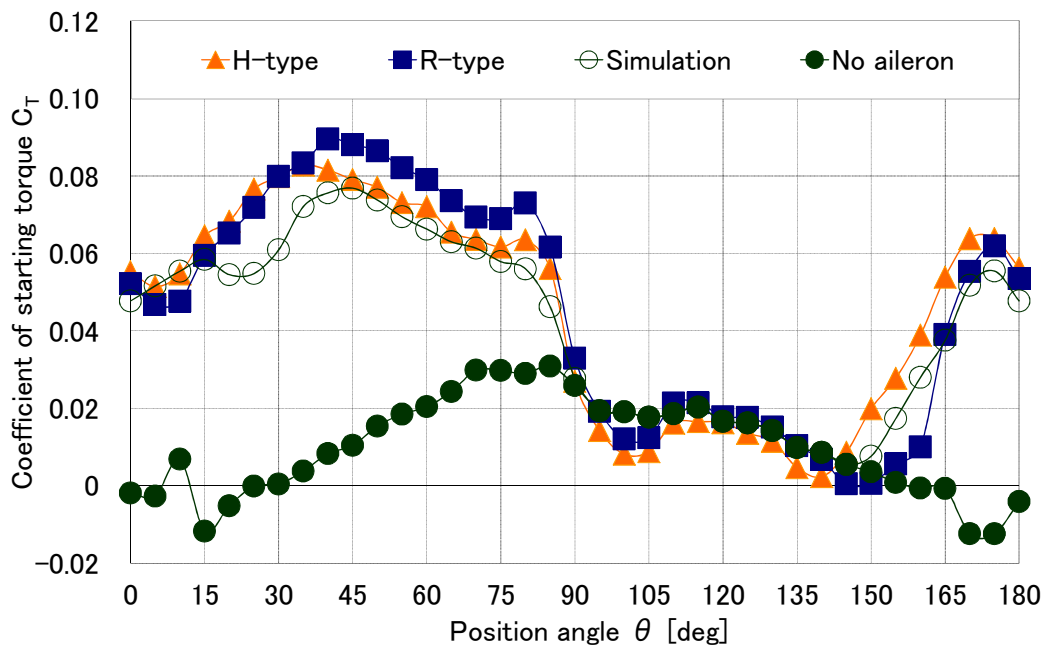


Fig. 4-9. Opening-and-closing aileron.

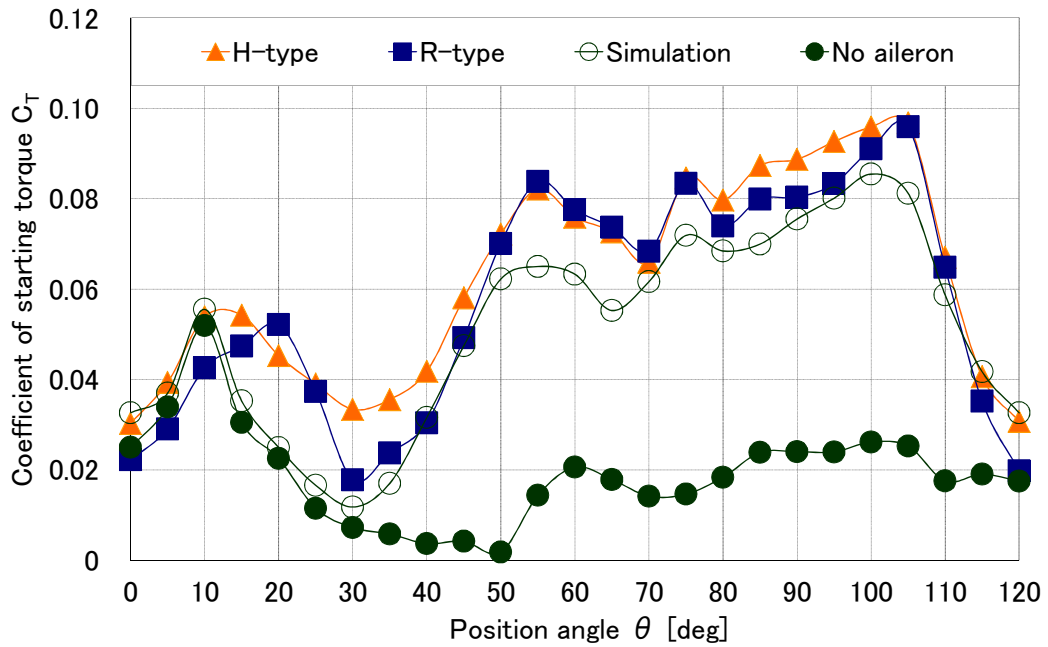
前項の実験で得られた起動トルク特性とH方式およびR方式の開閉式補助翼を取り付けた風車の風速 12 m/s における起動トルク特性を図4-10に示す。図において翼の翼枚数に関わらず，HおよびR方式の補助翼を取り付けた風車の起動



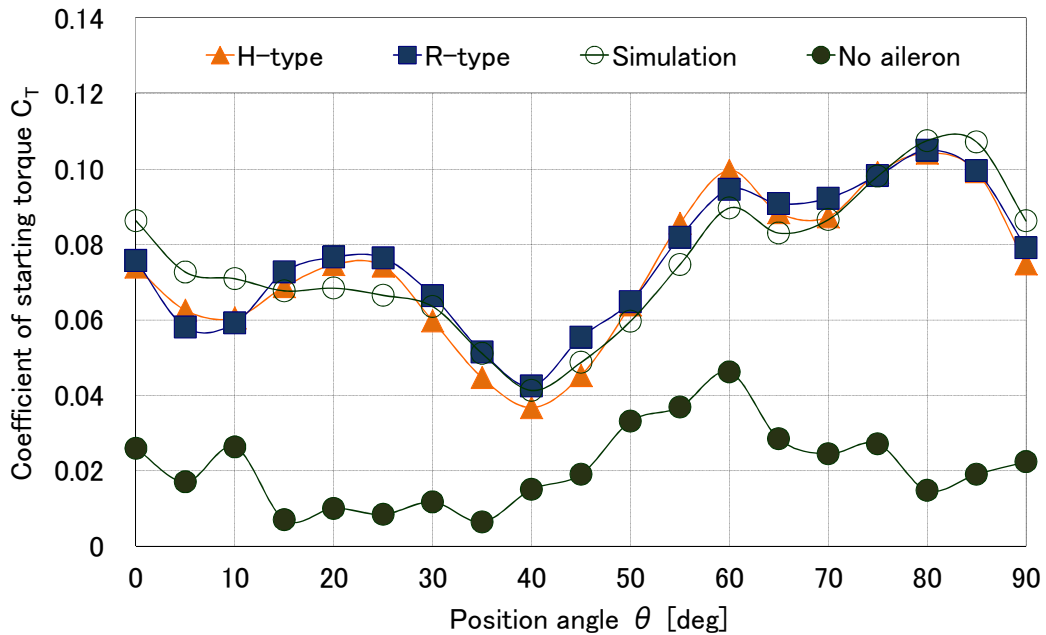
(a) 1-blade turbine.



(b) 2-blade turbine.



(c) 3-blade turbine.



(d) 4-blade turbine.

Fig. 4-10. Coefficient of starting torque for 1-, 2-, 3- or 4-blade turbine.(Wind speed 12m/s)

トルクは、前項において検討した実験で得られた起動トルク特性とほぼ一致した。2～4枚翼風車においてはHおよびR方式の補助翼を取り付けることによりトルクは増加し、トルクが負となる位置角は存在しなくなる。HおよびR方式の補助翼を取り付けることにより、補助翼なしの場合よりも起動トルクの増加する位置角は、図4-10(a)に示す翼1枚においてはおよそ150～270deg、図4-10(b)に示す2枚翼風車はおよそ0～90、150～180deg、図4-10(c)に示す3枚翼風車はおよそ15～115deg、図4-10(d)に示す4枚翼風車は0～90deg全ての位置角となる。

起動トルクの平均値を表4-3に示す。HおよびR方式の補助翼を取り付けた場合、起動トルク係数の平均値は補助翼を取り付けない場合よりも増加した。HおよびR方式の補助翼を取り付けた風車の起動トルク係数の平均値は補助翼を取り付けない場合よりも2枚翼風車において約4.3倍増加、3枚翼風車において約3.3倍、4枚翼風車において約3.6倍増加する。また、HおよびR方式の補助翼を取り付けた風車の平均起動トルク係数は、前項において検討した実験の平均起動トルク係数と概ね一致した。

Table 4-3. Average starting torque coefficient for 2-, 3- or 4-blade turbine.

Number of main blades	H-type	R-type	Simulation	No aileron
2	0.046	0.046	0.042	0.011
3	0.064	0.059	0.052	0.019
4	0.074	0.076	0.075	0.021

風車の位置角と補助翼の開閉状態を表4-4に示す。HおよびR方式の開閉式補助翼では、前項で検討した固定角補助翼による実験の開閉状態と一致しない位置角がある。たとえば表4-4(c)に示す3枚翼風車において、A翼の位置角20～115degおよびC翼の位置角0～25degにおける開閉状態は、前項の実験では閉じるとしたが、HおよびR方式の開閉式補助翼では、開いた状態もしくは開閉を繰り返す状態となった。このような位置角でも、図4-10(c)の起動トルク特性からHおよびR方式の開閉式補助翼による起動トルクと固定角補助翼により開閉式補助翼を模擬した実験の起動トルクはほぼ一致した値となっている。この

理由として、HおよびR方式の開閉式補助翼と開閉状態が異なる位置角では、補助翼に対して風上側に翼が存在し、補助翼へあたる風が遮られるためと考えられる。

Table 4-4. Aileron condition for 1-, 2-, 3- or 4-blade.

(a) 1-blade turbine.

Position angle [deg]	Aileron type			Position angle [deg]	Aileron type			Position angle [deg]	Aileron type			Position angle [deg]	Aileron type		
	H	R	Sim		H	R	Sim		H	R	Sim		H	R	Sim
0	×	×	×	90	○	—	×	180	○	○	○	270	—	—	○
5	×	×	×	95	○	—	×	185	○	○	○	275	—	—	×
10	×	×	×	100	○	—	×	190	○	○	○	280	—	—	×
15	×	×	×	105	○	—	×	195	○	○	○	285	×	×	×
20	△	—	×	110	○	—	×	200	○	○	○	290	×	×	×
25	△	—	×	115	○	—	×	205	○	○	○	295	×	×	×
30	○	—	×	120	○	—	×	210	○	○	○	300	×	×	×
35	○	—	×	125	○	—	×	215	○	○	○	305	×	×	×
40	○	—	×	130	○	—	×	220	○	○	○	310	×	×	×
45	○	—	×	135	○	—	×	225	○	○	○	315	×	×	×
50	○	—	×	140	○	—	×	230	○	○	○	320	×	×	×
55	○	—	×	145	○	—	×	235	○	○	○	325	×	×	×
60	○	—	×	150	○	○	○	240	○	○	○	330	×	×	×
65	○	—	×	155	○	○	○	245	○	○	○	335	×	×	×
70	○	—	×	160	○	○	○	250	○	○	○	340	×	×	×
75	○	—	×	165	○	○	○	255	○	○	○	345	×	×	×
80	○	—	×	170	○	○	○	260	○	○	○	350	×	×	×
85	○	—	×	175	○	○	○	265	○	○	○	355	×	×	×

H: H-type opening-and-closing aileron,

R: R-type opening-and-closing aileron,

Sim: Simulation by use of the fixed-angle aileron,

○: Open, △: Half open, ×: Close, —: Repeat switching.

(b) 2-blade turbine.

Position angle [deg]	Main blade and aileron type						Position angle [deg]	Main blade and aileron type					
	A			B				A			B		
	H	R	Sim	H	R	Sim		H	R	Sim	H	R	Sim
0	×	×	×	○	○	○	90	○	△	×	—	—	○
5	×	×	×	○	○	○	95	○	△	×	—	△	×
10	×	×	×	○	○	○	100	○	△	×	×	×	×
15	△	×	×	○	○	○	105	○	△	×	×	×	×
20	△	△	×	○	○	○	110	○	△	×	×	×	×
25	○	△	×	○	○	○	115	○	△	×	×	×	×
30	○	△	×	○	○	○	120	○	△	×	×	×	×
35	○	△	×	○	○	○	125	○	△	×	×	×	×
40	○	△	×	○	○	○	130	○	△	×	×	×	×
45	○	△	×	○	○	○	135	○	△	×	×	×	×
50	○	△	×	○	○	○	140	○	△	×	×	×	×
55	○	△	×	○	○	○	145	○	△	×	×	×	×
60	○	△	×	○	○	○	150	○	△	○	×	×	×
65	○	△	×	○	○	○	155	○	△	○	×	×	×
70	○	△	×	○	○	○	160	○	○	○	×	×	×
75	○	△	×	○	○	○	165	○	○	○	×	×	×
80	○	△	×	○	○	○	170	○	○	○	×	×	×
85	○	△	×	○	○	○	175	○	○	○	×	×	×

(c) 3-blade turbine.

Position angle [deg]	Main blade and aileron type								
	A			B			C		
	H	R	Sim	H	R	Sim	H	R	Sim
0	×	×	×	○	—	○	○	△	×
5	×	×	×	○	—	○	○	△	×
10	×	×	×	○	○	○	○	△	×
15	×	×	×	○	○	○	○	△	×
20	△	×	×	○	○	○	○	△	×
25	△	×	×	○	—	○	○	△	×
30	○	△	×	×	×	×	○	△	○
35	○	△	×	×	×	×	○	○	○
40	○	△	×	×	×	×	○	○	○
45	○	△	×	×	×	×	○	○	○
50	○	△	×	×	×	×	○	○	○
55	○	△	×	×	×	×	○	○	○
60	○	△	×	×	×	×	○	○	○
65	○	△	×	×	×	×	○	○	○
70	○	△	×	×	×	×	○	○	○
75	○	△	×	×	×	×	○	○	○
80	○	△	×	×	×	×	○	○	○
85	○	△	×	×	×	×	○	○	○
90	○	△	×	×	×	×	○	○	○
95	○	△	×	×	×	×	○	○	○
100	○	△	×	×	×	×	○	○	○
105	○	△	×	×	×	×	○	○	○
110	○	△	×	×	×	×	○	○	○
115	○	△	×	×	×	×	○	○	○

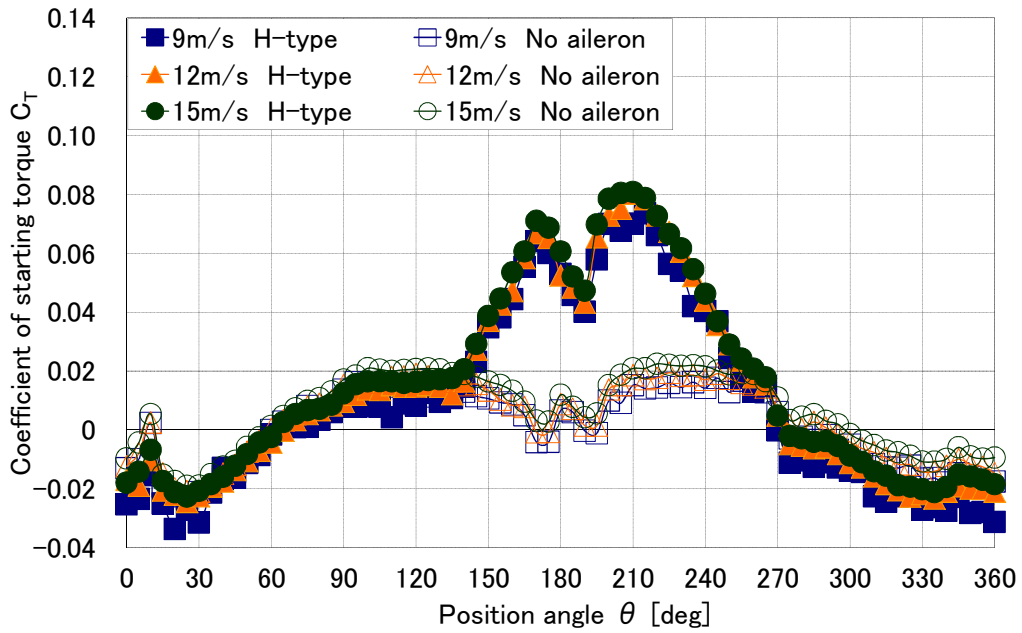
(d) 4-blade turbine.

Position angle [deg]	Main blade and aileron condition											
	A			B			C			D		
	H	R	Sim	H	R	Sim	H	R	Sim	H	R	Sim
0	×	×	×	△	—	○	○	○	○	○	—	×
5	×	×	×	×	—	×	○	○	○	○	—	×
10	×	×	×	×	—	×	○	○	○	○	—	×
15	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○	—	×
20	×	—	×	×	×	×	○	○	○	○	—	×
25	×	—	×	×	×	×	○	○	○	○	—	×
30	○	×	×	×	×	×	○	○	○	○	—	×
35	○	×	×	×	×	×	○	○	○	○	—	×
40	○	—	×	×	×	×	○	—	○	○	—	×
45	○	—	×	×	×	×	○	△	○	○	△	×
50	○	—	×	×	×	×	○	○	○	○	△	×
55	○	—	×	×	×	×	○	○	○	○	△	×
60	○	—	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○
65	○	—	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○
70	○	—	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○
75	○	—	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○
80	○	—	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○
85	○	—	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○

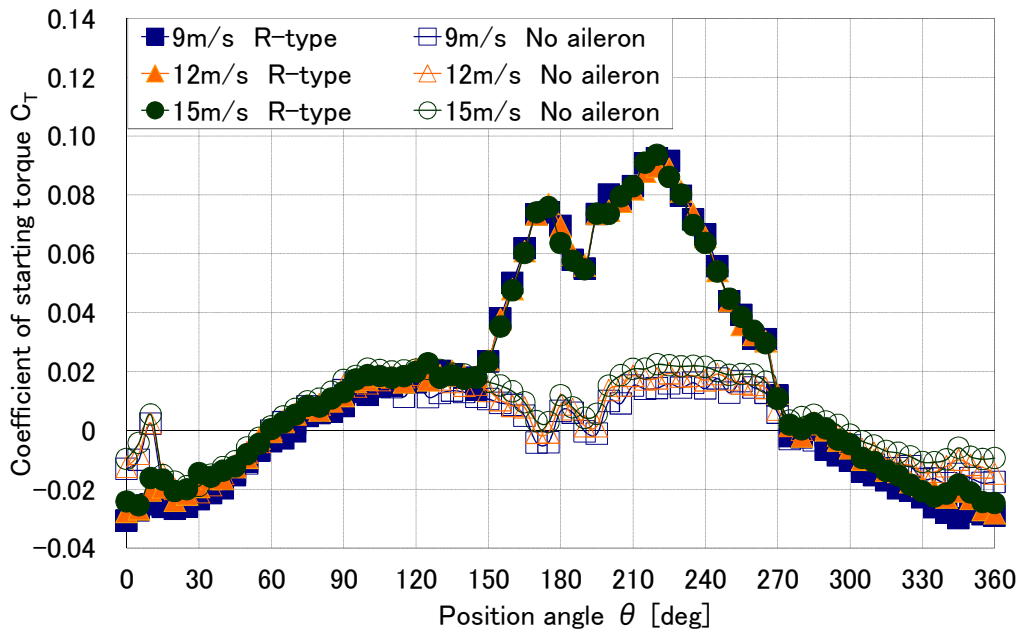
つぎに、風速変化がHおよびR方式の補助翼の開閉状態と起動トルク特性に与える影響を検討するため、設定風速を9, 12, 15 m/sとして起動トルク試験をおこなった。翼枚数1～4枚におけるHおよびR方式の起動トルク特性を図4-11～図4-14、補助翼の開閉状態を表4-5～表4-8に示す。

図4-11～図4-14に示す翼枚数1～4枚の起動トルク特性において、位置角に対して起動トルク係数は風速に依らずほぼ一致している。また、表4-5～表4-8に示す補助翼の開閉状態において、風速によって開閉状態の異なる位置角が存在する。例えば表4-5(b)に示すR方式の開閉式補助翼を取り付けた翼1枚では、位置角15, 145, 280 degの開閉状態が風速によって異なっている。また、表4-7(b)に示すR方式の開閉式補助翼を取り付けた2枚翼風車では、位置角80～95 degの開閉状態が風速によって異なっている。これらの位置角は、補助翼が閉から開もしくは開から閉に推移する位置角および上流側に位置する翼によって乱れた風の流れによる影響を下流側に位置する補助翼が受ける位置角でありトルク特性への影響は小さい。したがって、このような位置角では開閉状態が異なっても図4-11～図4-14に示すようにトルク係数は風速に依らずほ

ば一致している。



(a) H-type.



(b) R-type.

Fig. 4-11. Starting torque for 1-blade turbine with opening-and-closing aileron.

Table 4-5. Aileron condition for 1-blade.

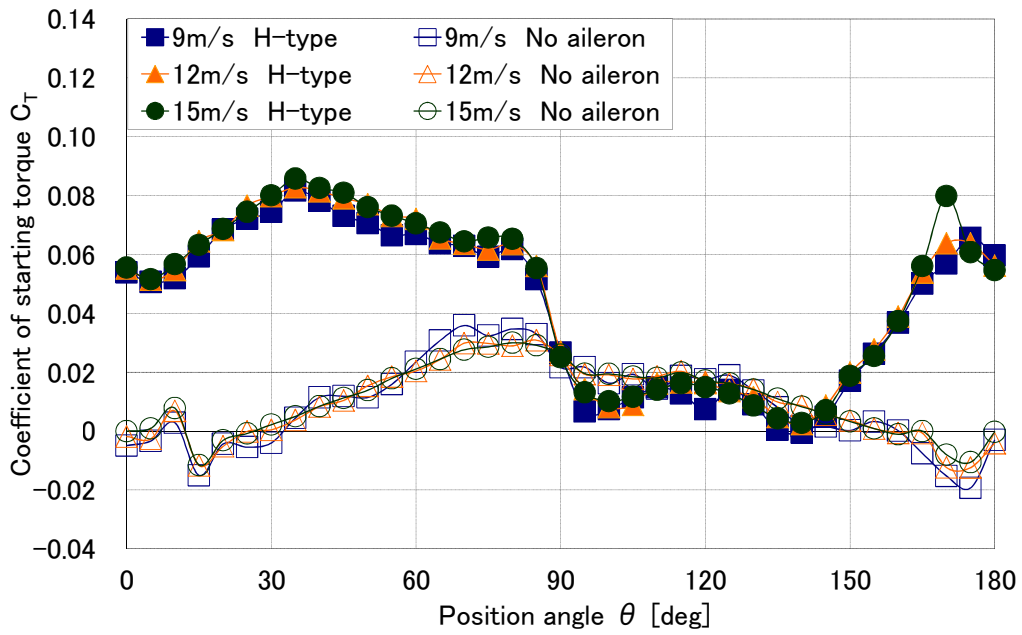
(a) H-type.

Position angle [deg]	9m/s	12m/s	15m/s	Position angle [deg]	9m/s	12m/s	15m/s	Position angle [deg]	9m/s	12m/s	15m/s	Position angle [deg]	9m/s	12m/s	15m/s
0	×	×	×	90	○	○	○	180	○	○	○	270	—	—	—
5	×	×	×	95	○	○	○	185	○	○	○	275	×	—	×
10	×	×	×	100	○	○	○	190	○	○	○	280	×	—	×
15	×	×	×	105	○	○	○	195	○	○	○	285	×	×	×
20	△	△	△	110	○	○	○	200	○	○	○	290	×	×	×
25	△	△	△	115	○	○	○	205	○	○	○	295	×	×	×
30	—	○	○	120	○	○	○	210	○	○	○	300	×	×	×
35	○	○	○	125	○	○	○	215	○	○	○	305	×	×	×
40	○	○	○	130	○	○	○	220	○	○	○	310	×	×	×
45	○	○	○	135	○	○	○	225	○	○	○	315	×	×	×
50	○	○	○	140	○	○	○	230	○	○	○	320	×	×	×
55	○	○	○	145	○	○	○	235	○	○	○	325	×	×	×
60	○	○	○	150	○	○	○	240	○	○	○	330	×	×	×
65	○	○	○	155	○	○	○	245	○	○	○	335	×	×	×
70	○	○	○	160	○	○	○	250	○	○	○	340	×	×	×
75	○	○	○	165	○	○	○	255	○	○	○	345	×	×	×
80	○	○	○	170	○	○	○	260	○	○	○	350	×	×	×
85	○	○	○	175	○	○	○	265	○	○	△	355	×	×	×

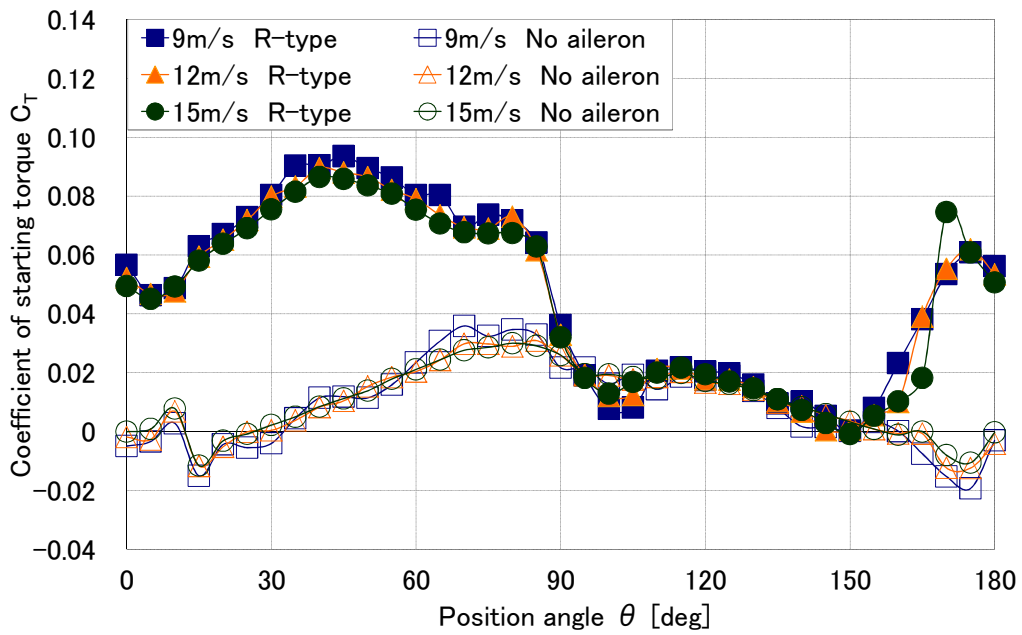
○: Open, △: Half open, ×: Close, —: Repeat switching.

(b) R-type.

Position angle [deg]	9m/s	12m/s	15m/s	Position angle [deg]	9m/s	12m/s	15m/s	Position angle [deg]	9m/s	12m/s	15m/s	Position angle [deg]	9m/s	12m/s	15m/s
0	×	×	×	90	—	—	—	180	○	○	○	270	—	—	—
5	×	×	×	95	—	—	—	185	○	○	○	275	—	—	—
10	×	×	×	100	—	—	—	190	○	○	○	280	—	—	×
15	×	×	×	105	—	—	—	195	○	○	○	285	×	×	×
20	—	—	—	110	—	—	—	200	○	○	○	290	×	×	×
25	—	—	—	115	—	—	—	205	○	○	○	295	×	×	×
30	—	—	—	120	—	—	—	210	○	○	○	300	×	×	×
35	—	—	—	125	—	—	—	215	○	○	○	305	×	×	×
40	—	—	—	130	—	—	—	220	○	○	○	310	×	×	×
45	—	—	—	135	—	—	—	225	○	○	○	315	×	×	×
50	—	—	—	140	—	—	—	230	○	○	○	320	×	×	×
55	—	—	—	145	—	—	○	235	○	○	○	325	×	×	×
60	—	—	—	150	○	○	○	240	○	○	○	330	×	×	×
65	—	—	—	155	○	○	○	245	○	○	○	335	×	×	×
70	—	—	—	160	○	○	○	250	○	○	○	340	×	×	×
75	—	—	—	165	○	○	○	255	○	○	○	345	×	×	×
80	—	—	—	170	○	○	○	260	○	○	○	350	×	×	×
85	—	—	—	175	○	○	○	265	○	○	○	355	×	×	×



(a) H-type.



(b) R-type.

Fig. 4-12. Starting torque for 2-blade turbine with opening-and-closing aileron.

Table 4-6. Aileron condition for 2-blade.

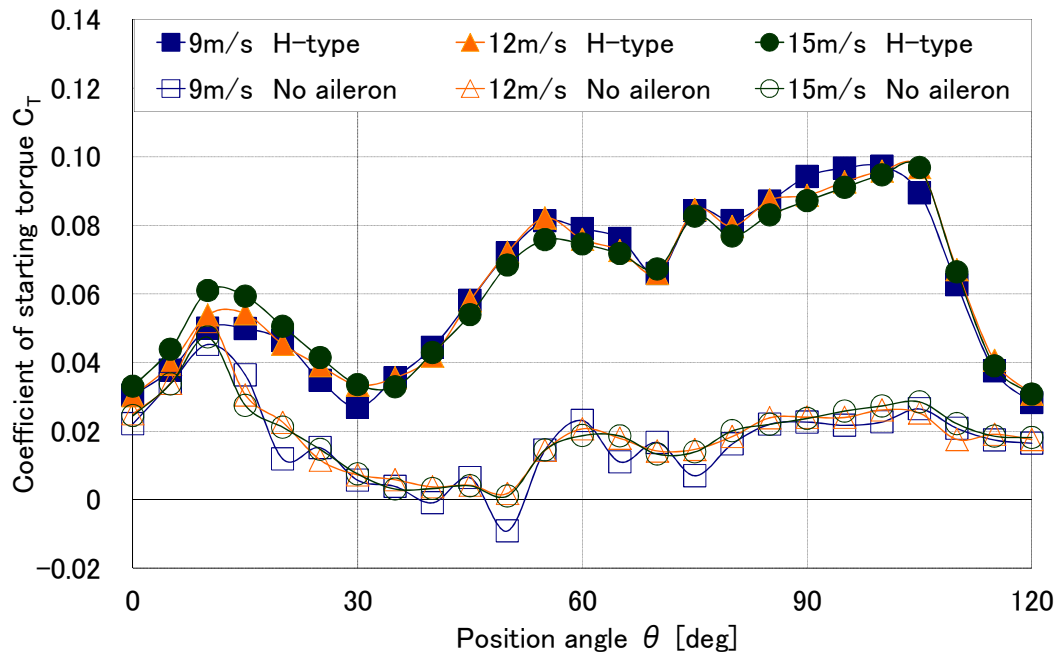
(a) H-type.

Position angle [deg]	Main blade and wind speed						Position angle [deg]	Main blade and wind speed					
	A			B				A			B		
	9m/s	12m/s	15m/s	9m/s	12m/s	15m/s		9m/s	12m/s	15m/s	9m/s	12m/s	15m/s
0	×	×	×	○	○	○	90	○	○	○	—	—	—
5	×	×	×	○	○	○	95	○	○	○	—	—	—
10	×	×	×	○	○	○	100	○	○	○	×	×	×
15	△	△	×	○	○	○	105	○	○	○	×	×	×
20	△	△	△	○	○	○	110	○	○	○	×	×	×
25	○	○	○	○	○	○	115	○	○	○	×	×	×
30	○	○	○	○	○	○	120	○	○	○	×	×	×
35	○	○	○	○	○	○	125	○	○	○	×	×	×
40	○	○	○	○	○	○	130	○	○	○	×	×	×
45	○	○	○	○	○	○	135	○	○	○	×	×	×
50	○	○	○	○	○	○	140	○	○	○	×	×	×
55	○	○	○	○	○	○	145	○	○	○	×	×	×
60	○	○	○	○	○	○	150	○	○	○	×	×	×
65	○	○	○	○	○	○	155	○	○	○	×	×	×
70	○	○	○	○	○	○	160	○	○	○	×	×	×
75	○	○	○	○	○	○	165	○	○	○	×	×	×
80	○	○	○	○	○	○	170	○	○	○	×	×	×
85	○	○	○	○	○	○	175	○	○	○	×	×	×

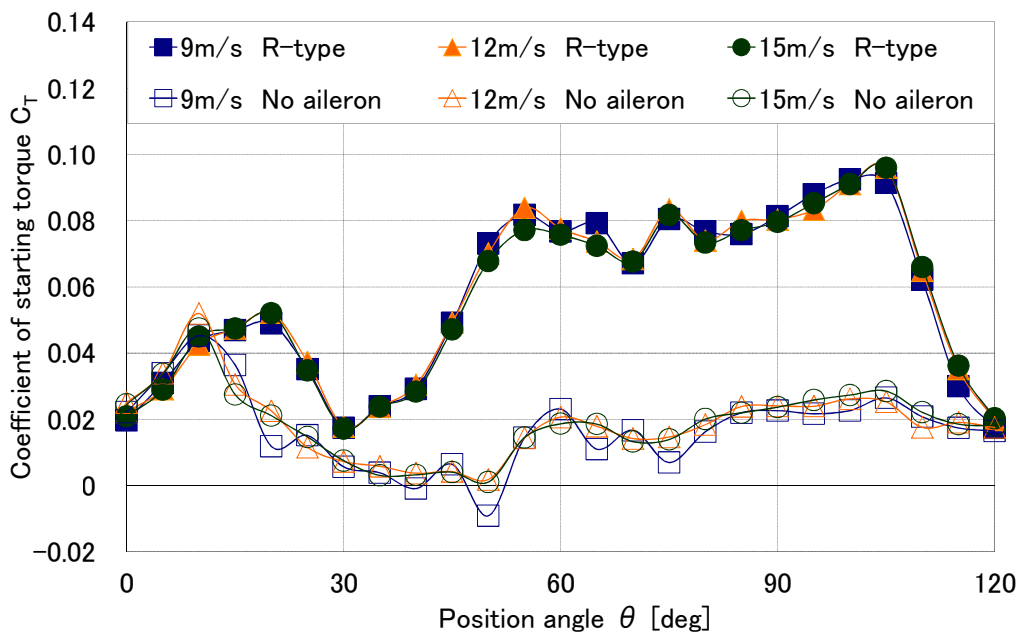
○: Open, △: Half open, ×: Close, —: Repeat switching.

(b) R-type.

Position angle [deg]	Main blade and wind speed						Position angle [deg]	Main blade and wind speed					
	A			B				A			B		
	9m/s	12m/s	15m/s	9m/s	12m/s	15m/s		9m/s	12m/s	15m/s	9m/s	12m/s	15m/s
0	×	×	×	○	○	○	90	△	△	△	—	—	—
5	×	×	×	○	○	○	95	△	△	△	△	△	×
10	×	×	×	○	○	○	100	△	△	△	×	×	×
15	×	×	×	○	○	○	105	△	△	△	×	×	×
20	△	△	△	○	○	○	110	△	△	△	×	×	×
25	△	△	△	○	○	○	115	△	△	△	×	×	×
30	△	△	△	○	○	○	120	△	△	△	×	×	×
35	△	△	△	○	○	○	125	△	△	△	×	×	×
40	△	△	△	○	○	○	130	△	△	△	×	×	×
45	△	△	△	○	○	○	135	△	△	△	×	×	×
50	△	△	△	○	○	○	140	△	△	△	×	×	×
55	△	△	△	○	○	○	145	△	△	△	×	×	×
60	△	△	△	○	○	○	150	△	△	△	×	×	×
65	△	△	△	○	○	○	155	○	△	△	×	×	×
70	△	△	△	○	○	○	160	○	○	○	×	×	×
75	△	△	△	○	○	○	165	○	○	○	×	×	×
80	△	△	—	○	○	○	170	○	○	○	×	×	×
85	△	△	△	—	○	○	175	○	○	○	×	×	×



(a) H-type.



(b) R-type.

Fig. 4-13. Starting torque for 3-blade turbine with opening-and-closing aileron.

Table 4-7. Aileron condition for 3-blade.

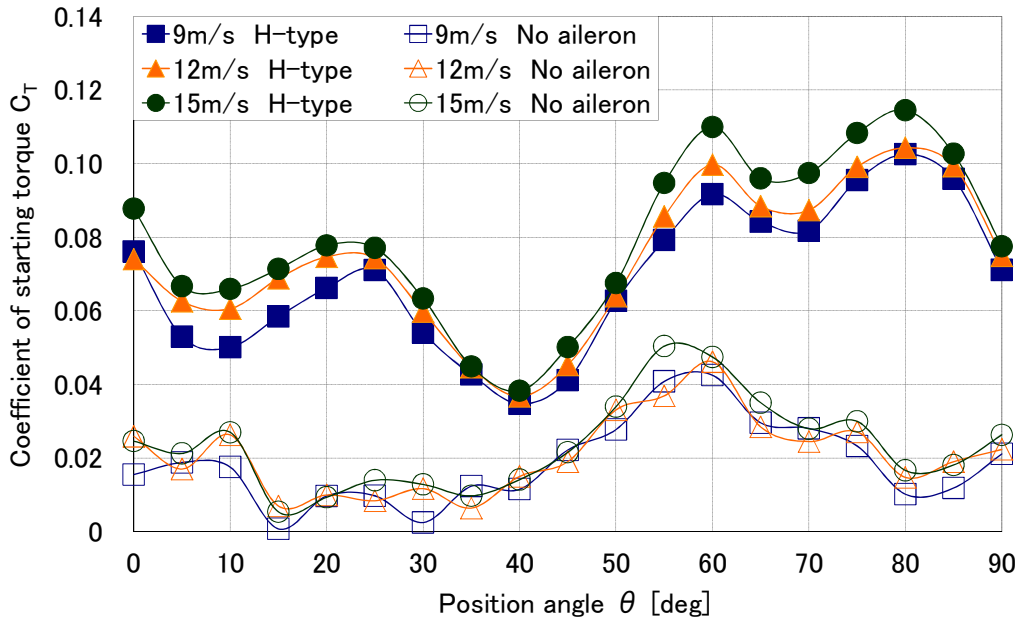
(a) H-type.

Position angle [deg]	Main blade and wind speed								
	A			B			C		
	9m/s	12m/s	15m/s	9m/s	12m/s	15m/s	9m/s	12m/s	15m/s
0	×	×	×	○	○	○	○	○	○
5	×	×	×	○	○	○	○	○	○
10	×	×	×	○	○	○	○	○	○
15	×	×	×	○	○	○	○	○	○
20	△	△	×	○	○	○	○	○	○
25	△	△	○	○	○	○	○	○	○
30	○	○	○	○	×	○	○	○	○
35	○	○	○	○	×	—	○	○	○
40	○	○	○	×	×	×	○	○	○
45	○	○	○	×	×	×	○	○	○
50	○	○	○	×	×	×	○	○	○
55	○	○	○	×	×	×	○	○	○
60	○	○	○	×	×	×	○	○	○
65	○	○	○	×	×	×	○	○	○
70	○	○	○	×	×	×	○	○	○
75	○	○	○	×	×	×	○	○	○
80	○	○	○	×	×	×	○	○	○
85	○	○	○	×	×	×	○	○	○
90	○	○	○	×	×	×	○	○	○
95	○	○	○	×	×	×	○	○	○
100	○	○	○	×	×	×	○	○	○
105	○	○	○	×	×	×	○	○	○
110	○	○	○	×	×	×	○	○	○
115	○	○	○	×	×	×	○	○	○

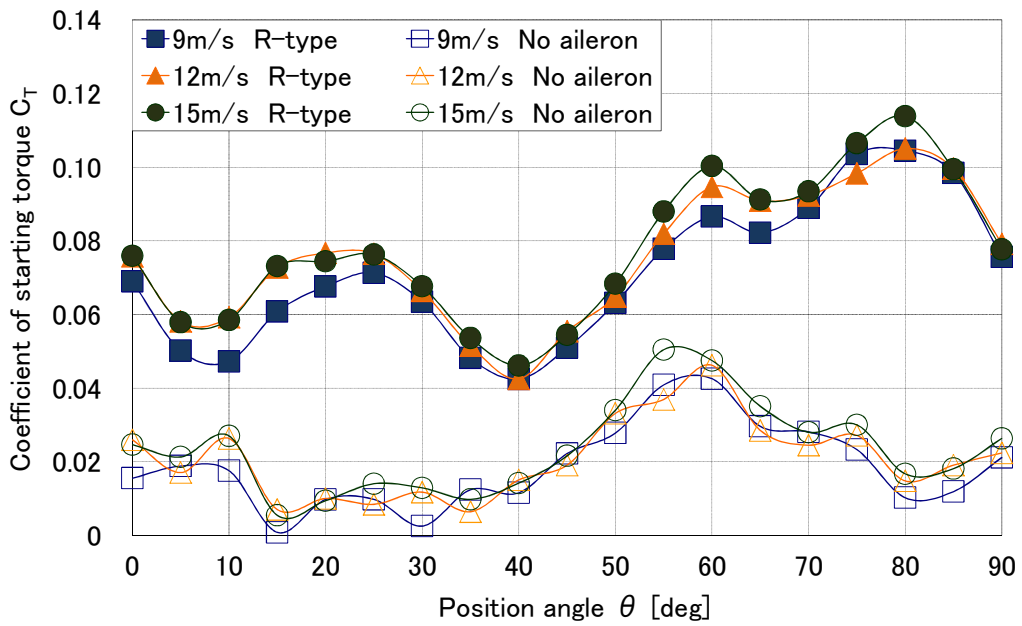
○: Open, △: Half open, ×: Close, —: Repeat switching.

(b) R-type.

Position angle [deg]	Main blade and wind speed								
	A			B			C		
	9m/s	12m/s	15m/s	9m/s	12m/s	15m/s	9m/s	12m/s	15m/s
0	×	×	×	—	—	—	△	△	△
5	×	×	×	—	—	△	△	△	△
10	×	×	×	—	○	△	△	△	△
15	×	×	×	—	○	×	△	△	△
20	×	×	×	—	○	○	△	△	△
25	×	×	△	—	—	—	△	△	△
30	△	△	△	—	×	×	△	△	△
35	△	△	△	×	×	×	○	○	○
40	△	△	△	×	×	×	○	○	○
45	△	△	△	×	×	×	○	○	○
50	△	△	△	×	×	×	○	○	○
55	△	△	△	×	×	×	○	○	○
60	△	△	△	×	×	×	○	○	○
65	△	△	△	×	×	×	○	○	○
70	△	△	△	×	×	×	○	○	○
75	△	△	△	×	×	×	○	○	○
80	△	△	△	×	×	×	○	○	○
85	△	△	△	×	×	×	○	○	○
90	△	△	△	×	×	×	○	○	○
95	△	△	△	×	×	×	○	○	○
100	△	△	△	×	×	×	○	○	○
105	△	△	△	×	×	×	○	○	○
110	△	△	△	×	×	×	○	○	○
115	△	△	△	×	×	×	○	○	○



(a) H-type.



(b) R-type.

Fig. 4-14. Starting torque for 4-blade turbine with opening-and-closing aileron.

Table 4-8. Aileron condition for 4-blade.

(a) H-type.

Position angle [deg]	Main blade and wind speed											
	A			B			C			D		
	9m/s	12m/s	15m/s	9m/s	12m/s	15m/s	9m/s	12m/s	15m/s	9m/s	12m/s	15m/s
0	×	×	×	△	△	×	×	○	○	○	○	○
5	×	×	×	—	×	—	×	○	○	○	○	○
10	×	×	×	—	×	×	○	○	○	○	○	○
15	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○
20	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○
25	△	×	—	×	×	×	○	○	○	○	○	○
30	△	○	○	×	×	×	○	○	○	○	○	○
35	○	○	○	×	×	×	○	○	○	○	○	○
40	○	○	○	×	×	×	○	○	○	○	○	○
45	○	○	○	×	×	×	○	○	○	○	○	○
50	○	○	○	×	×	—	○	○	○	○	○	○
55	○	○	○	×	×	—	○	○	○	○	○	○
60	○	○	○	×	×	×	○	○	○	○	○	○
65	○	○	○	×	×	×	○	○	○	○	○	○
70	○	○	○	×	×	×	○	○	○	○	○	○
75	○	○	○	×	×	×	○	○	○	○	○	○
80	○	○	○	×	×	×	○	○	○	×	○	○
85	○	○	○	×	×	×	○	○	○	×	○	○

○: Open, △: Half open, ×: Close, —: Repeat switching.

(b) R-type.

Position angle [deg]	Main blade and wind speed											
	A			B			C			D		
	9m/s	12m/s	15m/s	9m/s	12m/s	15m/s	9m/s	12m/s	15m/s	9m/s	12m/s	15m/s
0	×	×	×	—	—	—	○	○	○	—	—	—
5	×	×	×	—	—	—	○	○	○	—	—	—
10	×	×	×	—	—	—	○	○	○	—	—	—
15	—	×	×	—	×	×	○	○	○	—	—	—
20	—	—	×	—	×	×	○	○	○	—	—	—
25	—	—	×	—	×	×	○	○	○	—	—	—
30	—	×	×	×	×	×	○	○	○	—	—	—
35	—	×	×	×	×	×	○	○	○	—	—	—
40	—	—	—	×	×	×	—	—	○	—	—	—
45	—	—	—	—	×	×	—	△	○	—	△	—
50	—	—	—	—	×	×	○	○	○	—	△	—
55	—	—	—	—	×	×	○	○	○	—	△	—
60	—	—	—	—	×	×	○	○	○	○	○	○
65	—	—	—	×	×	—	○	○	○	○	○	○
70	—	—	—	—	×	—	○	○	○	○	○	○
75	—	—	—	—	×	—	○	○	○	○	○	○
80	—	—	—	—	×	×	○	○	○	○	○	○
85	—	—	—	—	×	×	—	○	○	○	○	○

4. 2. 3 開閉式補助翼による風車起動風速への影響

本節ではHおよびR方式の開閉式補助翼が風車の起動風速に及ぼす影響について検討する。風車の起動風速の測定は2章と同様におこなった。風速は20 m/s以下の範囲で設定し、風速20 m/sに設定しても起動しない場合、試験結果は無しとした。

2～4枚翼風車における起動風速試験の結果を表4-9に示す。HおよびR方式の補助翼を取り付けた風車の起動風速は翼枚数に関わらず補助翼が無い場合よりも低下した。表4-9(a)に示す2枚翼風車では補助翼の無い場合 θ_{Tmax} における起動風速は17 m/sからHおよびR方式ともに8 m/sに低下する。表4-9(b)の示す3枚翼風車では補助翼の無い場合 θ_{Tmax} における起動風速は15 m/sからHおよびR方式ともに8 m/sに低下する。 θ_{Tmin} から起動した場合、補助翼の無い場合は20 m/sにおいて起動しなかったが、H方式では9 m/s、R方式では12 m/sで起動した。表4-9(c)の示す4枚翼風車では補助翼の無い場合 θ_{Tmax} における起動風速は11 m/sからHおよびR方式ともに7 m/sに低下する。同様に補助翼の無い場合 θ_{Tmin} における起動風速は17 m/sからH方式では9 m/s、R方式では8 m/sに低下する。

ここで、図4-10(d)に示す起動トルク特性から、4枚翼風車において補助翼の無い場合の位置角 $\theta_{Tmax} = 60 \text{ deg}$ では起動トルク係数は約0.05、HおよびR方式の補助翼を取り付けた場合の位置角 $\theta_{Tmin} = 40 \text{ deg}$ では起動トルク係数は約0.04であり、起動トルク係数の大きな補助翼の無い場合の位置角 $\theta_{Tmax} = 60 \text{ deg}$ から起動した方が起動風速は小さくなると考えられる。しかし、表4-9(c)に示す4枚翼風車の起動風速において、補助翼の無い場合 θ_{Tmax} の起動風速11 m/sよりも補助翼を取り付けた場合 θ_{Tmin} の起動風速8～9 m/sの方が低くなる。これは、図4-10(d)において位置角 θ_{Tmin} から起動する場合、起動後、つまり位置角の増加に対して、HおよびR方式の補助翼を取り付けた風車のトルクは停止状態よりも大きな値になるのに対して、位置角 θ_{Tmax} から起動する場合、起動後のトルクは停止状態よりも小さな値になるためである。

Table 4-9. Results of starting wind speed tests.

(a) Wind speed to initiate rotation of 2-blade turbine.

Position angle at start	H-type		R-type		No aileron	
	θ_{Tmax}	θ_{Tmin}	θ_{Tmax}	θ_{Tmin}	θ_{Tmax}	θ_{Tmin}
at start	35 deg	140 deg	40 deg	145 deg	85 deg	175 deg
Wind speed [m/s]	8	—	8	—	17	—

— : No rotation at maximum tested wind speed of 20m/s.

(b) Wind speed to initiate rotation of 3-blade turbine.

Position angle at start	H-type		R-type		No aileron	
	θ_{Tmax}	θ_{Tmin}	θ_{Tmax}	θ_{Tmin}	θ_{Tmax}	θ_{Tmin}
at start	105 deg	0 deg	105 deg	30 deg	10 deg	50 deg
Wind speed [m/s]	8	9	8	12	15	—

(c) Wind speed to initiate rotation of 4-blade turbine.

Position angle at start	H-type		R-type		No aileron	
	θ_{Tmax}	θ_{Tmin}	θ_{Tmax}	θ_{Tmin}	θ_{Tmax}	θ_{Tmin}
at start	80 deg	40 deg	80 deg	40 deg	60 deg	15 deg
Wind speed [m/s]	7	9	7	8	11	17

HおよびR方式の補助翼を取り付けた場合の起動風速は4枚翼風車の7～9 m/sである。風力エネルギーは風速の3乗に比例して増大し、風力発電装置の設置目安として年間平均風速は7 m/s以上とされている⁽²⁾。これを考慮すると測定した開閉式補助翼と直線翼式垂直軸風車の組合せでは必ずしも実用的な起動風速に達していない。したがって、本研究で提案した直線翼式垂直軸風車を実用化するには起動風速をさらに低くする必要がある。本研究では風洞施設の壁面により風車特性が影響を受けない風車寸法としてD 6 0 0 × H 4 5 0 風車を採用したが、2章のD 1 6 0 0 × H 1 6 0 0 風車を用いた実験で述べたように、起動風速は翼枚数や寸法に依存する。たとえば、風速12 m/sにおける4枚翼のD 1 6 0 0 × H 1 6 0 0 風車の起動トルクの最大値は約17 Nmであり、これはD 6 0 0 × H 4 5 0 風車

の起動トルクの最大値約0.32 Nmと比べて約5.3倍となる。このため、同じ翼型の風車でも寸法の大きな風車を採用すれば翼面積の増加により起動性は向上すると考えられる。そこで、風車寸法を大きくして起動性を向上させ、開閉式補助翼により設置場所の風況に合わせた起動風速に設計することも考えられる。

4. 3 まとめ

直線翼式垂直軸風車における起動性の改善を目的として補助翼を利用することを提案し、風洞実験により以下の事項を検討した。

翼に対して取付角度が一定の固定角補助翼を取り付けた風車による起動トルク特性試験の結果から、次のことがいえる。

- (1) 翼が風向に対して迎角 $150 \sim 270 \text{ deg}$ に位置するとき、固定角補助翼により起動トルクは補助翼の無い場合と比較して増加する。
- (2) 翼が迎角 $0 \sim 30, 270 \sim 360 \text{ deg}$ に位置するとき、固定角補助翼により起動トルクは補助翼の無い場合と比較して減少する。

(1) (2) より、補助翼により風車の起動トルクを増加させるには、各翼が風向に対して迎角 $150 \sim 270 \text{ deg}$ に位置するとき補助翼が開いた状態となり、各翼が迎角 $0 \sim 30, 270 \sim 360 \text{ deg}$ に位置するとき補助翼が閉じた状態とする必要があるといえる。このような開閉状態を実現するため、本論文では開閉する機構をそなえたHおよびR方式の開閉式補助翼を提案した。試作したHおよびR方式の補助翼を風車に取り付け、位置角と開閉状態、起動トルク特性および起動風速について検討した結果、次のことがいえる。

- (3) 2～4枚翼風車においてはHおよびR方式の補助翼を取り付けることによりトルクは増加し、トルクが負となる位置角は存在しなくなる。
- (4) HおよびR方式による起動トルク特性は、開閉式補助翼を模擬した実験における起動トルク特性とほぼ一致する。
- (5) HおよびR方式の補助翼による開閉状態は開閉式補助翼を模擬した実験と異なる位置角がある。開閉状態が異なる位置角は、補助翼に対して風上側に翼が存在し、補助翼へあたる風が遮られるために生じると考えられる。
- (6) 開閉状態が風速によって変化する位置角は、補助翼が閉から開もしくは開から閉に推移する位置角や上流側に位置する翼によって乱れた風の影響を下流側に位置する補助翼が受ける位置角である。このためトルク特性への影響は小さく、開閉状態が異なってもHおよびR方式の開閉式補助翼による起動トルク係数と固定角補助翼により開閉式補助翼を模擬した実験の起動トルク係数は風速に依らずほぼ一致する。

(7) 起動風速は2～4枚翼のD600×H450風車にHおよびR方式の補助翼を取り付けた場合、最大9 m/s低下するが、4枚翼風車において起動風速は7～9 m/sである。

(7) で述べた起動風速は7～9 m/sであり、開閉式補助翼と直線翼式垂直軸風車の組合せでは必ずしも実用的な起動風速7 m/s⁽²⁾に達していない。そこで、実際の風力発電装置に採用するには、風車寸法を大きくして起動性を向上できることを示した。したがって、風車寸法を大きくすることで開閉式補助翼により設置場所の風況に合わせた起動風速まで低下できる可能性がある。

本研究では、開閉式補助翼を取り付けた風車の負荷特性試験をおこなっていないが、今回試作したHおよびR方式の補助翼では角度調整金具の影響により補助翼を取り付けない場合よりも風車効率は低下すると推察される。したがって、今後はHおよびR方式の補助翼を風車に取り付けた場合の負荷特性を明らかにするとともに、補助翼を取り付けない場合と同等の効率特性を有する開閉式補助翼の構造について検討する必要があると考える。

第5章 結論

直線翼式垂直軸風車の起動性を向上させることを目的として翼の枚数および取付角度，補助翼が風車特性に及ぼす影響について検討した。

風車の翼枚数が起動性に与える影響について翼枚数1～6枚の場合について検討したところ，次の結論が得られた。

- (1) 起動性を重視すれば翼枚数を多くした方が良く，効率を重視すると翼枚数を少なくした方が良い。すなわち，起動性と効率は翼枚数に対して相反関係になる。
- (2) 翼枚数3，4枚とした場合，起動風速は翼枚数の多い4枚翼風車の方が低い。
- (3) D1600×H1600風車の3枚翼では起動風速は9 m/s以上であり，風力発電装置の設置目安とされる年間平均風速7 m/s以上では起動しない場合があるが，4枚翼風車では起動風速は4～9 m/sであり実用上問題ないと考えられる。
- (4) D600×H450風車では翼枚数を4枚とすれば起動トルクは負とならないが，効率は翼枚数3枚よりも劣る。また，4枚翼は翼枚数5枚以上よりも高い効率となり有利である。
- (5) 4枚翼のD600×H450風車では負荷特性においてトルクが負となる回転速度が存在するが，その範囲は狭い。このような回転速度が存在しても設定した風速9～12 m/sの範囲では風速の増加にともないトルクは正となった。

(1)～(5)のことから，4枚翼風車は起動性と効率の点から優れているといえる。

つぎに，風車の翼取付角度が起動性に与える影響について，取付角度を $-6 \sim +90$ degの範囲に設定し検討した結果，次の結論が得られた。

- (6) 起動トルクは取付角度が正のとき増加し，その平均値は取付角度60 degにおいて最大となる。
- (7) 負荷特性試験から翼取付角度を正にすると，効率は取付角度0 degよりも著しく低下する。

(6) ~ (7) のことから、起動トルクは取付角度が正のとき増加し、効率は取付角度が負のとき改善することから、翼取付角度に対して起動性と効率は相反関係にある。

ここで、広い回転速度域で高い効率となる取付角度は -4 deg である。取付角度を -4 deg とした場合、起動トルクが負となる位置角は $20 \sim 30 \text{ deg}$ であり、その範囲は狭く、このような位置角が存在しても風速の増加により起動トルクは正となる。したがって、取付角度を -4 deg とすれば効率に優れ、起動性に及ぼす悪い影響も少ないと考えられる。

翼の枚数や取付角度に依らず風車の起動性を改善する方法として補助翼の利用を提案し、固定角補助翼の実験から次の結論が得られた。

(8) 翼が風向に対して迎角 $150 \sim 270 \text{ deg}$ に位置するとき、起動トルクは増加する。

(9) 翼が風向に対して迎角 $0 \sim 30, 270 \sim 360 \text{ deg}$ に位置するとき、起動トルクは減少する。

(8) ~ (9) の結果より、補助翼により風車の起動トルクを増加させるには、翼が風向に対して迎角 $150 \sim 270 \text{ deg}$ に位置するとき補助翼が開いた状態となり、翼が迎角 $0 \sim 30, 270 \sim 360 \text{ deg}$ に位置するとき補助翼が閉じた状態となる必要がある。これを実現するため、開閉する機構をそなえたHおよびR方式の開閉式補助翼を試作し、2~4枚翼風車に取り付けた。開閉式補助翼により起動トルクは増加し、トルクが負となる位置角も存在しなくなった。また、2~4枚翼のD600×H450風車に開閉式補助翼を取り付けた場合、起動風速は補助翼を取り付けない場合と比較して最大で 9 m/s 低下し、4枚翼風車において最低起動風速 $7 \sim 8 \text{ m/s}$ となった。風力発電装置の設置目安とされる年間平均風速は 7 m/s 以上⁽²⁾であることを考慮すると、この起動風速ではまだ実用的ではないが、風車寸法を大きくして開閉式補助翼を取り付けることにより起動風速が実用上問題のない風速まで低下できる可能性があることを示した。また、本研究で試作した開閉式補助翼の構造では補助翼を取り付けない場合よりも風車効率は低下することが推察される。したがって、今後は開閉式補助翼が負荷特性に及ぼす影響を明らかにする必要がある。

風車の翼枚数や翼取付角度により起動性の向上を図る場合、風車効率の低下などの問題点があることを指摘し、開閉式補助翼を提案することにより今後、風車効率を落とさずに風車の起動性を向上することが可能であるとの見通しを得た。

参考文献

- (1) 電気事業連合会:「電気事業のデータベース(FEPC INFOBASE 2011)」, <http://www.fepec.or.jp/library/data/infobase/index.html> (2011)
- (2) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構:「NEDO 再生可能エネルギー技術白書~新たなエネルギー社会の実現に向けて~」, エネルギーフォーラム, ISBN.978-4-88555-384-4, pp.1-2, 96 (2010)
- (3) エネルギー・環境会議コスト等検証委員会:「コスト等検証委員会報告書」, 新大綱策定会議(第10回)資料第2-2-3号, pp.48~57 (2011-12-19)
- (4) 松宮輝, 青木繫光, 飯田誠:「風力発電のすべて」, 工業調査会, ISBN.4-7693-7142-X, p.12, pp.23-24 (2005)
- (5) 関和市, 牛山泉:「さらなる風を求めて垂直軸形風車[基礎・設計から応用まで]」, パワー社, ISBN.978-4-8277-2401-1, pp.8-11, pp.94-99, pp.108-109, pp.151-152 (2008)
- (6) Ion Paraschivoiu:"Wind Turbine Design With Emphasis on Darrieus Concept", インデックス出版, ISBN.978-4-901092-49-4, p.43, p.88 (2007)
- (7) 大田勝郎:「垂直軸形風車に関する調査研究」, 海上保安庁平成16年度研究成果報告書 (2005-9)
- (8) 大田勝郎:「垂直軸形風車に関する調査研究」, 海上保安庁平成17年度研究成果報告書 (2006-12)
- (9) 木方靖二, 塩野光弘:「来島海峡におけるダリウス形水車による潮流発電」, 電気学会論文誌 D, Vo.112-D No.6, pp.530-538 (1992)
- (10) 塩野光弘, 辻健太郎, 直井和久, 鈴木勝行:「灯浮標用潮流発電装置の出力特性」, 電気学会論文誌 B, Vol.132, No.11, pp.914-921 (2012-11)
- (11) 塩野光弘, 鈴木勝行, 木方靖二:「潮流発電に用いるダリウス形水車の特性」, 電気学会論文誌 B, Vol.118-B, No.7/8, pp.781-787 (1998)
- (12) I.H.Abbot and A.E. VON Doenhoff:"Theory of Wing Section", Dover Publication Inc (1959)
- (13) 塩野光弘, 鈴木勝行, 木方靖二:「潮流発電に用いるダリウス形水車におけるブレードの違いによる水車特性の比較」, 電学論 B, Vol.123, No.1 pp.76-82 (2003)
- (14) 高見俊一, 中原堅司, 高原弘, 清水誠, 武藤浄, 市川晃, 関屋慎, 坂井時弘:「ダ

リウス形風力発電装置の開発・運転試験」, エネルギー・資源論文誌, Vol.5, No.4, pp.89-95 (1984)

(15) L.Lazauskas and B.K.Kirke:"Performance Optimization of a Self-acting Variable Pitch Vertical Axis Wind Turbine", Wind Engineering, Vol.16, No.1, pp.10-26 (1992)

(16) 岡本延浩, 牛山泉, 萩原忠久, 牧野章汎:「垂直軸ハイブリッド方式風車に関する研究」, 日本風力エネルギー学会誌, Vol.18, pp.37-42 (1994-6)

(17) 鈴木亮介, 直井和久, 塩野光弘, 鈴木勝行, 小山茂夫:「円弧翼垂直軸型風車の基礎特性~風車特性に対する翼枚数の影響~」, 平成 16 年度電気設備学会全国大会論文集, pp.265-266 (2004-9)

(18) K.Naoi, M.Shiono, K.Suzuki:"A Wind Power Generation System using the Vertical Axis Wind Turbine with Arc Camber Blades", Proceedings of the Sixteenth (2006) International Offshore and Polar Engineering Conference, pp.369-374 (2006-5)

(19) K.Naoi, M.Shiono, K.Suzuki:"Characteristics of VAWT using Arc Camber Blades for Wind Generation System", Recent Advances in Marine Science and Technology, 2006, ISBN 0-9634343-7-3, pp.63-72 (2007-6)

(20) 外立政隆, 石田洋治:「風車の風洞試験法の研究」, 日本機械学会第 73 期通常総会講演会講演論文集, Vol.73, No.3, pp.247-248 (1996-4)

(21) L.Lazauskas:"Three Pitch Control Systems for Vertical Axis Wind Turbines Compared", Wind Engineering, Vol.16, No.5, pp.269-282 (1992)

(22) 関和希, 大谷勇:「直線翼垂直軸風車の性能」, 太陽エネルギー学会誌, Vol.16, No.3, pp.31-38 (1990)

(23) K.Naoi, M.Shiono, K.Suzuki:"Study on Blade Setting Angle of VAWT using Arc Camber Blades", RENEWABLE ENERGY 2006 Proceedings, pp.905-908 (2006-10)

(24) 関雅洋, 直井和久, 塩野光弘, 進藤康人, 柳平和寛, 武藤實, 鈴木勝行:「円弧キャンバー翼垂直軸形風車の翼取付角度が起動特性に及ぼす効果」, 平成 19 年電気設備学会全国大会論文集, pp.153-154 (2007-9)

(25) 川本久之助, 杉森勝宣, 安食浩:「ダリウス形風車を用いた通信用自立電源」, 電気通信学会論文誌 B, Vol.J64-B, No.2, pp.150-157 (1981-2)

(26) 外立政隆, 馬場滋夫:「スポイラ付き回転翼の空力特性ースポイラによる風車の回転数制御についてー」, 第 16 回風力エネルギー利用シンポジウム予稿集, Vol.16,

pp.107-110 (1994-11)

(27) 直井和久, 辻健太郎, 塩野光弘, 鈴木勝行:「補助翼による直線翼式垂直軸風車の起動特性の改善に関する検討」, 電気学会論文誌 B, Vol.132, No.10, pp.862-871 (2012-10)

付 録 直線翼式垂直軸風車の回転原理

ダリウス形風車の動作原理について述べる。図2-1の回転面を単純に2次元と
考え、翼1枚が風車半径 r の円周上の回転位置 θ にある場合、風速 v と翼の周速度
 u の関係を示すと図A-1のようになる。

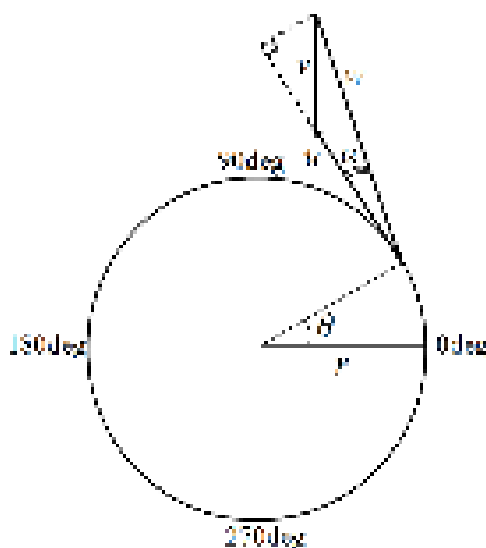


Fig. A-1. Flow speed to blade.

翼に対する流体の流れ（相対速度） w は、 v と u の合成となり、次式となる。

$$w = v\sqrt{1 + 2\lambda \cos\theta + \lambda^2} \quad \dots (付-1)$$

ここで、 λ は周速比であり、風車の回転角速度を ω_T とすれば、 λ は次式となる。

$$\lambda = \frac{r\omega_T}{v} \quad \dots (付-2)$$

流体が翼に当たると翼に力が発生する。この力は図A-2のように相対速度の直
線上に働く抗力 F_D と垂直に働く揚力 F_L に分解でき、空気密度を ρ 、翼面積を A と
すると各力は次式で表される。

$$F_L = \frac{1}{2} \rho A w^2 C_L \quad \dots (付-3)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho A w^2 C_D \quad \dots (付-4)$$

ここで、 C_L 、 C_D は、それぞれ揚力係数、抗力係数であり、翼形状、迎角、レイノルズ数および翼表面の粗さなどに影響される。これらの関係から、翼1枚に働く力 F_T は次式のようになる。

$$F_T = F_L \sin \alpha - F_D \cos \alpha \quad \dots (付-5)$$

ここで、 α は迎角であり、図2-2より次式で表される。

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \theta}{\cos \theta + \lambda} \right) \quad \dots (付-6)$$

翼1枚に発生するトルク T_1 は

$$T_1 = \frac{1}{2} \rho A w^2 r (C_L \sin \alpha - C_D \cos \alpha) \quad \dots (付-7)$$

となる。 n 枚翼風車に発生する1回転中の平均トルク T_q は

$$T_q = \frac{n}{2\pi} \int_0^{2\pi} T_1 d\theta \quad \dots (付-8)$$

となる。

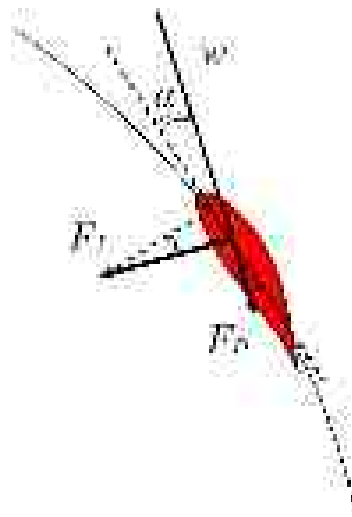


Fig. A-2. Force received from flow.

参考文献

塩野光弘, 鈴木勝行, 木方靖二:「潮流発電に用いるダリウス形水車の特性」, 電気学会論文誌 B, Vol.118-B, No.7/8, pp.781-787 (1998)

著者発表論文

学術論文

1. 飯塚,直井,塩野,愛澤,鈴木:「離散ウェーブレット変換を用いた高調波解析の検討」,電気設備学会誌,Vol.29,No.8,pp.663-670,2009-8
2. 直井,塩野,鈴木:「潮流発電システムにおける発電電力量による増速比の最適化」,電気学会論文誌 B ,Vol.131,No.2, pp.222-230,2011-2
3. 直井,辻,塩野,鈴木:「補助翼による直線翼式垂直軸風車の起動特性の改善に関する検討」,電気学会論文誌 B ,Vol.132,No.10, pp.862-871,2012-10
4. 塩野,辻,直井,鈴木:「灯浮標用潮流発電装置の出力特性」,電気学会論文誌 B ,Vol.132,No.11, pp.914-921,2012-11

著書

1. K.Naoi, M.Shiono, K.Suzuki:"Characteristics of VAWT using Arc Camber Blades for Wind Generation System",Recent Advances in Marine Science and Technology, 2006, ISBN 0-9634343-7-3, pp.63-72 (2007-6)

国際シンポジウム(英文発表：査読あり)

1. K.Naoi, M.Shiono, K.Suzuki:"A Wind Power Generation System using the Vertical Axis Wind Turbine with Arc Camber Blades", Proceedings of the Sixteenth (2006) International Offshore and Polar Engineering Conference, pp.369-374 (2006-5)
2. K.Naoi, M.Shiono, K.Suzuki:"Study on Blade Setting Angle of VAWT using Arc Camber Blades",RENEWABLE ENERGY 2006 Proceedings, pp905-908 (2006-10)
3. M.Shiono, K.Naoi, K.Suzuki:"Study on Development of Power Generation System from Tidal Currents for Navigation Buoy",RENEWABLE ENERGY 2006 Proceedings, pp1458-1461 (2006-10)
4. M.Shiono, K.Naoi, K.Suzuki:"Output Characteristics of Power Generation System from Tidal Currents for a Navigation Buoy", Proceedings of the Seventeenth (2007) International Offshore and Polar Engineering Conference, pp.288-292 (2007-7)

5. K.Naoi, M.Shiono, K.Suzuki:"Study of Gear Ratio in Tidal Current Power Generation System", Proceedings of the Twenty-first (2011) International Offshore and Polar Engineering Conference, pp.735-742 (2011-6)

国際シンポジウム(英文発表：査読なし)

1. K.Naoi, M.Shiono, K.Suzuki:"Characteristics of VAWT using Arc Camber Blades for Wind Generation System",Pacific Congress on Marine Science and Technology,PACON 2006 (2006-6)
2. K.Naoi, S.Nishikawa:"Fundamental Operational Characteristics of Grid-Conneced Clustered PV System",Pacific Congress on Marine Science and Technology,PACON 2006 (2006-6)
3. Seiji Kiho, Kazuhisa Naoi, Mitsuhiro Shiono, Katsuyuki Suzuki:"Power Generation by Tidal Current",Pacific Congress on Marine Science and Technology,PACON 2006 (2006-6)
4. Seiji Kiho, Mitsuhiro Shiono, Kazuhisa Naoi, Katsuyuki Suzuki:"Experimental Study on Power Generation System from Tidal Currents for Navigation Buoy",Pacific Congress on Marine Science and Technology,PACON 2006 (2006-6)

国内学会口頭発表

1. 直井,木方,伊東,石隈:「単相 200V 系無停電電源装置における高効率電力変換器の特性」,平成 13 年度電気設備学会全国大会論文集,No.P-6,pp.473-474,2001-8
2. 直井,木方,伊東,石隈:「パワーマルチプロセッシング方式による三相電力変換器」,平成 14 年電気学会全国大会論文集,No.4-003,p.5,2002-3
3. 濱口,直井,塩野,大野,鈴木,小山,木方,進藤:「サイリスタ整流器を含む工場内配電系統における非整数次高調波について」,平成 14 年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集分冊 A,No.15,pp.565-566,2002-8
4. 金田,直井,鈴木,塩野,小山,木方:「高周波インバータによる誘導加熱の負荷特性」,平成 15 年電気学会全国大会論文集第 4 分冊,No.4-224,pp.362-363,2003-3

5. 谷口,直井,塩野,鈴木,小山,木方:「潮流発電用ダリウス形水車の基礎特性—直径寸法の特性への影響—」,平成 15 年電気学会全国大会論文集第 7 分冊,No.7-118,pp.179-180,2003-3
6. 竹内,直井,塩野,鈴木,小山,木方:「潮流発電における独立電源システムの出力電圧安定化に対する基礎検討」,平成 15 年電気学会全国大会論文集第 7 分冊,No.7-119,pp.181-182,2003-3
7. 菊池,直井,塩野,鈴木,小山,木方:「日本国内における主な海峡断面の流速分布を考慮した潮流エネルギー賦存量の算出」,平成 15 年電気学会全国大会論文集第 7 分冊,No.7-120,pp.183-184,2003-3
8. 佐藤,直井,塩野,進藤,鈴木,小山:「太陽光・風力によるハイブリッド発電における負荷容量と蓄電池容量の関係について」,平成 15 年度電気設備学会全国大会論文集,pp.327-328,2003-8
9. 直井,塩野,進藤,鈴木,小山:「潮流発電システムの系統連系に関する基礎的検討-スプライン関数を用いたダリウス形水車の出力特性の近似-」,平成 15 年度電気設備学会全国大会論文集,pp.357-358,2003-8
10. 鈴木,直井,塩野,小山,鈴木,進藤:「異なる流体における潮流発電用ダリウス形水車の特性」,平成 16 年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集,No.474,pp.55_7-55_8,2004-8
11. 石鍋,直井,塩野,鈴木,小山:「地域エネルギー供給におけるコージェネレーションの評価」,平成 16 年度電気設備学会全国大会論文集,pp.107-108,2004-9
12. 守田,直井,塩野,鈴木,小山:「電力系統への太陽光発電の導入効果に関する検討」,平成 16 年度電気設備学会全国大会論文集,pp.233-234,2004-9
13. 鈴木,直井,塩野,鈴木,小山:「円弧翼垂直軸型風車の基礎特性~風車特性に対する翼枚数の影響~」,平成 16 年度電気設備学会全国大会論文集,pp.265-266,2004-9
14. 高畑,直井,塩野,鈴木,大野,進藤:「サイリスタ整流器を含む工場内配電系統における非整数次高調波について—負荷条件の検討—」,平成 17 年電気学会全国大会論文集第 6 分冊,No.6-173,pp.307-308,2005-3
15. 直井,塩野,進藤,武藤,木方,鈴木:「円弧キャンバー翼垂直軸形風車の特性—翼取付角度が風車特性に及ぼす影響—」,平成 17 年電気学会全国大会論文集第 7 分冊,No.7-066,pp.96-97,2005-3

16. 鈴木,直井,塩野,武藤,木方,鈴木:「潮流発電に用いるダリウス形水車の特性－水路・風洞におけるタービン特性の比較－」,平成 17 年電気学会全国大会論文集第 7 分冊,No.7-074,pp.105-106,2005-3
17. 直井,塩野,進藤,武藤,木方,鈴木:「流体密度が異なる場合のダリウス形タービンの特性－水路と風洞における負荷特性に関する検討－」,平成 17 年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集,No.252,pp.29-7-29-8,2005-8
18. 塩野,直井,鈴木:「明石海峡における灯浮標用潮流発電装置の開発に関する研究」,平成 18 年電気設備学会全国大会論文集,pp.79-80,2006-9
19. 関,直井,塩野,進藤,鈴木:「円弧キャンバー翼垂直軸形風車の翼取付角度が風車特性に及ぼす効果」,平成 18 年電気設備学会全国大会論文集,pp.97-98,2006-9
20. 石川,直井,塩野,鈴木:「静翼付抗力形多翼風車の特性」,平成 18 年電気学会電力・エネルギー部門大会,p.Y-5,2006-9
21. ト部,直井,塩野,鈴木:「スプライン関数による潮流発電用ダリウス形水車の特性の近似」,平成 18 年電気学会電力・エネルギー部門大会,p.Y-11,2006-9
22. 関,直井,塩野,鈴木:「円弧キャンバー翼垂直軸形風車の翼取付角度による特性への効果」,平成 18 年電気学会電力・エネルギー部門大会,p.Y-36,2006-9
23. 直井,塩野,進藤,鈴木:「円弧キャンバー翼垂直軸形風車による風力発電装置の特性」,平成 19 年電気学会全国大会論文集第 7 分冊,No.7,p.49,2007-3
24. 関,直井,塩野,進藤,柳平,武藤,鈴木:「円弧キャンバー翼垂直軸形風車の翼取付角度が起動特性に及ぼす効果」,平成 19 年電気設備学会全国大会論文集,pp.153-154,2007-9
25. 直井,塩野,柳平,武藤,鈴木:「強風時における風力発電装置の出力制御法~円弧キャンバー翼垂直軸形風車における検討~」,平成 19 年電気設備学会全国大会論文集,pp.155-156,2007-9
26. 石川,直井,塩野,柳平,武藤,鈴木:「静翼付抗力形多翼風車の解析~風車特性の計算法の検討~」,平成 19 年電気設備学会全国大会論文集,pp.157-158,2007-9
27. 野本,直井,塩野,柳平,武藤,鈴木:「釧路灯台における円弧キャンバー翼垂直軸形風車を用いた風力発電装置の特性」,平成 19 年電気設備学会全国大会論文集,pp.159-160,2007-9

28. 飯塚,卜部,直井,塩野,進藤,鈴木:「潮流発電システムにおける最適増速比および定格容量の検討」,平成 19 年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集,No.393,pp.48-17-48-18,2007-9
29. 野本,直井,塩野,柳平,武藤,進藤,鈴木:「明石海峡における灯浮標用潮流発電装置の特性」,平成 20 年電気学会全国大会論文集第 7 分冊,No.7,pp.12-13,2008-3
30. 直井,塩野,柳平,武藤,鈴木:「抗力形多翼風車において静翼が特性に及ぼす効果」,平成 20 年電気学会全国大会論文集第 7 分冊,No.7,p.32,2008-3
31. 清水,直井,塩野,進藤,柳平,武藤,鈴木:「円弧キャンバー翼垂直軸型風車における補助翼の起動特性に及ぼす影響(その 3)」,平成 20 年電気学会全国大会論文集第 7 分冊,No.7,pp.33-34,2008-3
32. 野本,直井,塩野,柳平,進藤,鈴木:「ダリウス形水車による航路標識用潮流発電装置の特性」,2008 年電気設備学会全国大会論文集,pp.63-64,2008-9
33. 鈴木,清水,直井,塩野,進藤,柳平,鈴木:「円弧キャンバー翼垂直軸形翼風車による補助翼が起動トルクに及ぼす影響(3 枚翼風車における検討)」,2008 年電気設備学会全国大会論文集,pp.65-66,2008-9
34. 清水,直井,塩野,進藤,柳平,鈴木:「円弧キャンバー翼垂直軸形風車における補助翼が起動特性に及ぼす影響~取付位置と寸法に関する検討~」,平成 21 年電気学会全国大会論文集,pp.38-39,2009-3
35. 鈴木,清水,直井,塩野,柳平,進藤,鈴木:「円弧キャンバー翼垂直軸形風車に用いる開閉式補助翼の基礎検討」,平成 21 年電気学会全国大会論文集,pp.42-43,2009-3
36. 野本,直井,塩野,柳平,進藤,鈴木:「潮流発電装置における発電電力量に関する検討」,平成 21 年電気学会全国大会論文集,p.121,2009-3
37. 飯塚,正木,直井,塩野,進藤,鈴木:「離散ウェーブレット変換を用いた高調波解析 - 高調波解析の適用性の検討 - 」,平成 21 年電気学会全国大会論文集,pp.268-269,2009-3
38. 飯塚,正木,直井,塩野,進藤,鈴木:「離散ウェーブレット変換を用いた高調波解析 - 工場内配電システムへの適用 - 」,平成 21 年電気学会全国大会論文集,pp.270-271,2009-3
39. 池田,直井,塩野,進藤,鈴木:「ダリウス形タービンに用いる翼形の違いによる性能の検討」,2009 年電気設備学会全国大会論文集,pp.243-244,2009-8

40. 鈴木,新田,直井,塩野,進藤,柳平,鈴木:「ダリウス形風車における開閉式補助翼を用いた起動トルク特性の検討(その 1)」,2009 年電気設備学会全国大会論文集,pp.245-246,2009-8
41. 新田,鈴木,直井,塩野,進藤,柳平,鈴木:「ダリウス形風車における開閉式補助翼を用いた起動トルク特性の検討(その 2)」,2009 年電気設備学会全国大会論文集,pp.247-248,2009-8
42. 正木,直井,塩野,愛澤,進藤,鈴木:「離散ウェーブレット変換を用いた配電系統の高調波解析-高調波の振幅変動の抑制-」,2009 年電気設備学会全国大会論文集,pp.345-346,2009-8
43. 辻,鈴木,直井,塩野,柳平,進藤,鈴木:「円弧キャンバー3 枚翼垂直軸形風車において補助翼が起動トルクに及ぼす影響—二種類の開閉式補助翼の比較—」,平成 22 年電気学会全国大会論文集第 7 分冊,pp.9-10,2010-3
44. 池田,直井,塩野,進藤,鈴木:「円弧翼を用いたダリウス形タービンの翼取付角度の違いによる性能の検討」,2010 年電気設備学会全国大会論文集,pp.119-120,2010-8
45. 浅野,直井,塩野,進藤,鈴木:「潮流発電システムにおける設備利用率からみた増速比の検討」,2010 年電気設備学会全国大会論文集,pp.121-122,2010-8
46. 川田,辻,直井,塩野,柳平,進藤,鈴木:「円弧キャンバー2 枚翼垂直軸風車において開閉式補助翼が起動トルクに及ぼす影響」,2010 年電気設備学会全国大会論文集,pp.123-124,2010-8
47. 茂木,直井,塩野,柳平,進藤,鈴木:「明石海峡におけるダリウス形水車を用いた潮流発電装置の特性(その 3)」,平成 22 年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集,No.212,pp.23-7-23-8,2010-9
48. 浅野,直井,塩野,進藤,鈴木:「潮流発電システムの増速比と発電電力量の検討—流速の出現確率を用いた方法—」,平成 22 年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集,No.213,pp.23-9-23-10,2010-9
49. 辻,直井,塩野,柳平,進藤,鈴木:「4 枚翼の円弧キャンバー翼垂直軸形風車において開閉式補助翼が起動特性に及ぼす影響」,平成 22 年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集,No.214,pp.23-11-23-12,2010-9
50. 新田,直井,塩野,進藤,柳平,鈴木:「静翼付抗力形多翼垂直軸風車における静翼間流路の風速分布」,平成 23 年電気学会全国大会論文集第 7 分冊,pp.124-125,2011-3

51. 中村,辻,直井,塩野,柳平,進藤,鈴木:「垂直軸形風車における開閉式補助翼が起動風速に及ぼす影響」,平成 23 年電気学会全国大会論文集第 7 分冊,p.126,2011-3
52. 正木,直井,塩野,進藤,鈴木:「離散ウェーブレット変換を用いた配電系統の高調波解析-直列リアクトル付進相設備の高調波-」,平成 23 年電気学会全国大会論文集第 7 分冊,pp.151-152,2011-3
53. 辻,直井,塩野,柳平,進藤,鈴木:「円弧キャンバー翼垂直軸形風車における開閉式補助翼が負荷特性に及ぼす影響」,2011 年電気設備学会全国大会論文集,pp.161-162,2011-9
54. 高橋,直井,塩野,進藤,柳平,鈴木:「風速の速度比を考慮した多翼垂直軸風車の静翼流路の風速特性」,平成 24 年電気学会全国大会論文集第 7 分冊,p.96,2012-3
55. 宮前,直井,塩野,柳平,鈴木:「ダクト設置による円弧キャンバー翼垂直軸形風車の特性に関する基礎検討」,2012 年電気設備学会全国大会論文集,pp.123-124,2012-8
56. 田中,直井,塩野,進藤,鈴木:「2 段多流管モデルによる円弧翼を用いたダリウス形タービンの翼取付角度の違いによる風車特性の検討」,2012 年電気設備学会全国大会論文集,pp.125-126,2012-8
57. 布施,直井,塩野,柳平,鈴木:「静翼付多翼垂直軸風車における静翼流路の風量と風車出力に関する検討」,2012 年電気設備学会全国大会論文集,pp.127-128,2012-8
58. 板山,辻,直井,塩野,柳平,進藤,鈴木:「開閉式補助翼を備えた円弧キャンバー翼垂直軸形風車の負荷特性に及ぼす影響」,2012 年電気設備学会全国大会論文集,pp.129-130,2012-8
59. 辻,直井,塩野,進藤,鈴木:「巻線形誘導発電機を用いた潮流発電装置における最大出力制御方式の検討」,平成 25 年電気学会全国大会論文集第 7 分冊,pp.45-46,2013-3
60. 田中,辻,直井,塩野,進藤,鈴木:「潮流発電システムにおけるダリウス形水車の近似法からみた増速比の検討」,平成 25 年電気学会全国大会論文集第 7 分冊,pp.47-48,2013-3

日本大学理工学部学術講演会

1. 直井,木方,伊東,石隈:「3 アーム電圧型電力変換器の三相無停電電源装置への応用」,平成 13 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,Lp31,pp.1038-1039,2001-11

2. 大手,直井,塩野,鈴木,小山,木方:「潮流発電用ダリウス水車のアスペクト比に関する検討」,平成 14 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,Lp44,pp.1126-1127,2002-11
3. 大熊,直井,塩野,鈴木,小山,木方:「船橋校舎における太陽光・風力ハイブリッド発電システムの基礎的検討」,平成 14 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,Lp46,pp.1128-1129,2002-11
4. 照沼,直井,塩野,鈴木,小山,木方:「日本大学理工学部駿河台校舎における電源の電力品質についての検討」,平成 14 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,Lp47,pp.1130-1131,2002-11
5. 濱口,直井,塩野,大野,鈴木,小山,木方,進藤:「サイリスタ整流器を含む工場内配電システムにおける非整数次高調波について」,平成 14 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,Lp48,pp.1132-1133,2002-11
6. 加瀬,直井,塩野,鈴木,木方,小山:「太陽光発電システムの導入における配電システムへの影響に関する検討」,平成 14 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,Lp49,pp.1134-1135,2002-11
7. 濱口,直井,塩野,大野,鈴木,小山,木方,進藤:「サイリスタ整流器を含む工場内配電システムにおける非整数次高調波について」,平成 15 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,La26,pp.1108-1109,2003-11
8. 成田,木方,小山,鈴木,進藤,塩野,直井:「潮流発電システムの系統連系に関する基礎的検討-スプライン関数を用いたダリウス形水車の出力特性の近似-」,平成 15 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,La27,pp.1110-1111,2003-11
9. 菊池,直井,塩野,小山,木方,鈴木:「流速分布を考慮した潮流エネルギー賦存量による海底設置型潮流発電装置の設置場所の検討」,平成 15 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,La28,pp.1112-1113,2003-11
10. 竹内,木方,小山,鈴木,進藤,塩野,直井:「潮流発電における独立電源システムの出力電圧安定化に対する基礎検討」,平成 15 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,La29,pp.1114-1115,2003-11
11. 谷口,木方,小山,鈴木,進藤,塩野,直井:「円弧翼垂直軸風車の開発-風車の翼枚数による特性への影響-」,平成 15 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,La30,pp.1116-1117,2003-11

12. 金田,直井,塩野,進藤,小山,鈴木,木方,金田,前池:「高周波インバータを用いた誘導加熱における条件の検討」,平成 15 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,La31,pp.1118-1119,2003-11
13. 佐藤,木方,小山,鈴木,進藤,塩野,直井:「太陽光・風力によるハイブリッド発電における負荷変動を考慮した場合の負荷容量についての検討」,平成 15 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,La32,pp.1120-1121,2003-11
14. 守田,直井,塩野,鈴木,小山:「需要変動曲線が最適電源ミックスに及ぼす影響の検討」,平成 15 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,La33,pp.1122-1123,2003-11
15. 湯本,小山,鈴木,塩野,直井:「多数の太陽光発電が配電系統の電圧分布に及ぼす影響」,平成 15 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,La34,pp.1124-1125,2003-11
16. 石鍋,小山,鈴木,塩野,直井:「集合住宅へのエネルギー供給におけるコージェネレーションシステムの評価」,平成 15 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,La35,pp.1126-1127,2003-11
17. 山本,小山,鈴木,塩野,直井:「風力発電装置の出力変動による系統動揺に関する検討」,平成 15 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,La36,pp.1128-1129,2003-11
18. 境,直井,塩野,西川,進藤,鈴木,小山:「太陽光・風力によるハイブリッド発電システムの検討」,平成 16 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-1,pp.992-993,2004-11
19. 成田,直井,塩野,西川,進藤,鈴木:「潮流発電システムの系統連系に関する基礎的検討-水車トルク近似の評価指標における重み係数の影響-」,平成 16 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-2,pp.994-995,2004-11
20. 守田,直井,塩野,鈴木,小山:「電力系統における太陽光発電の位置づけに関する検討」,平成 16 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-3,pp.996-997,2004-11
21. 直井,塩野,武藤,木方,鈴木:「円弧翼垂直軸形風車の特性-翼取付角度が風車特性に及ぼす影響-」,平成 16 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-4,pp.998-999,2004-11
22. 石鍋,直井,塩野,鈴木,小山:「コージェネレーションを含む地域エネルギー供給の経年的推移の検討」,平成 16 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-5,pp.1000-1001,2004-11

23. 鈴木,直井,塩野,武藤,木方,鈴木:「円弧キャンバー翼垂直軸型風車の基礎特性-異なる寸法をもつ2種類の風車特性の比較-」,平成16年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-7,pp.1004-1005,2004-11
24. 石川,直井,塩野,武藤,木方,鈴木:「円弧キャンバー翼垂直軸型風車の特性-翼取付角度が回転数-トルク特性に与える影響-」,平成17年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-44,pp.1136-1137,2005-11
25. 関,直井,塩野,鈴木:「タービンの回転数-トルク特性測定装置」,平成17年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-45,pp.1138-1139,2005-11
26. 卜部,直井,塩野,鈴木:「潮流発電システムの系統連系に関する検討-増速比の最適化-」,平成17年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-46,pp.1140-1141,2005-11
27. 野本,直井,塩野,柳平,武藤,鈴木:「ダリウス形タービンを用いた風力発電装置の実験的検討」,平成18年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-26,pp.1176-1177,2006-11
28. 飯塚,卜部,直井,塩野,鈴木:「潮流発電システムにおける増速比の最適化」,平成18年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-27,pp.1178-1179,2006-11
29. 清水,直井,塩野,武藤,柳平,鈴木:「風車の回転数-トルク特性測定装置の検討~静翼付抗力形多翼風車における負荷特性の測定~」,平成18年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-28,pp.1180-1181,2006-11
30. 卜部,飯塚,直井,塩野,鈴木:「潮流発電システムの発電電力量に関する検討-潮流の流速の出現確率による方法-」,平成19年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-21,pp.1144-1145,2007-12
31. 石川,直井,塩野,柳平,武藤,鈴木:「静翼付抗力形多翼風車の解析(その2)~風車特性の計算法の検討~」,平成19年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-22,pp.1146-1147,2007-12
32. 関,直井,塩野,柳平,武藤,鈴木:「円弧キャンバー翼垂直軸形風車における補助翼の起動特性に及ぼす影響(その2)」,平成19年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-23,pp.1148-1149,2007-12
33. 鈴木,直井,塩野,進藤,鈴木:「ダリウス形風車の理論解析における基礎検討」,平成19年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-24,pp.1150-1151,2007-12

34. 野本,直井,塩野,柳平,武藤,鈴木:「明石海峡におけるダリウス形水車を用いた潮流発電装置の特性」,平成 19 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-41,pp.1184-1185,2007-12
35. 鈴木,関,直井,塩野,柳平,武藤,鈴木:「円弧キャンバー翼垂直軸型風車において補助翼が起動トルクに及ぼす影響(その 1)」,平成 19 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-42,pp.1186-1187,2007-12
36. 飯塚,直井,塩野,進藤,鈴木:「ウェーブレット変換を用いた高調波解析の検討(その 1)」,平成 20 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-18,pp.1194-1195,2008-11
37. 清水,鈴木,直井,塩野,柳平,鈴木:「円弧キャンバー翼垂直軸形風車における補助翼の寸法が起動特性に及ぼす影響」,平成 20 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-19,pp.1196-1197,2008-11
38. 鈴木,直井,塩野,鈴木:「ダリウス形タービンの複数流管モデルによる解析ーブレード形状の違いによるパワー係数の検討ー」,平成 20 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-20,pp.1198-1199,2008-11
39. 池田,鈴木,直井,塩野,柳平,鈴木:「垂直軸タービンに用いる円弧キャンバー翼の特性」,平成 20 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-35,pp.1228-1229,2008-11
40. 新田,鈴木,直井,塩野,柳平,鈴木:「垂直軸タービンに用いる直線翼の特性」,平成 20 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-37,pp.1232-1233,2008-11
41. 正木,直井,塩野,柳平,鈴木:「明石海峡における潮流発電データの解析ー翼枚数が異なる場合の発電電力に関する検討ー」,平成 20 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-38,pp.1234-1235,2008-11
42. 野本,直井,塩野,柳平,鈴木:「劔埼灯台・松前小島灯台における垂直軸形タービンによる風力発電装置の特性」,平成 20 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-39,pp.1236-1237,2008-11
43. 鈴木,清水,直井,塩野,柳平,鈴木:「補助翼の取付位置が円弧キャンバー翼垂直軸形風車の起動トルク特性に及ぼす影響」,平成 20 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-40,pp.1238-1239,2008-11
44. 鈴木,新田,直井,塩野,柳平,鈴木:「円弧キャンバー翼垂直軸形風車における開閉式補助翼を用いた起動トルク特性の検討」,平成 21 年度日本大学理工学部学術講演会予稿集,S3-15,pp.33-34,2009-11

45. 辻,鈴木,直井,塩野,柳平,鈴木:「3枚翼の円弧キャンバー翼垂直軸形風車において開閉式補助翼が起動トルクに及ぼす影響」,平成21年度日本大学理工学部学術講演会予稿集,L-26,pp.1009-1010,2009-11
46. 浅野,直井,塩野,鈴木:「潮流発電システムの増速比の検討~流速の出現確率を用いた方法~」,平成21年度日本大学理工学部学術講演会予稿集,L-27,pp.1011-1012,2009-11
47. 茂木,直井,塩野,柳平,鈴木:「明石海峡におけるダリウス形水車を用いた潮流発電装置の特性(その2)」,平成21年度日本大学理工学部学術講演会予稿集,L-29,pp.1015-1016,2009-11
48. 川田,池田,直井,塩野,柳平,鈴木:「ダリウス形タービンに用いる翼形の違いによる起動特性の基礎検討」,平成21年度日本大学理工学部学術講演会予稿集,L-31,pp.1019-1020,2009-11
49. 正木,直井,塩野,鈴木:「離散ウェーブレット変換を用いた配電系統の高調波解析ー直列リアクトル付進相設備における高調波障害の解析ー」,平成22年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-16,pp.951-952,2010-11
50. 新田,直井,塩野,柳平,鈴木:「静翼付抗力形多翼風車における動翼の空力特性を用いた性能解析」,平成22年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-17,pp.953-954,2010-11
51. 池田,直井,塩野,鈴木:「円弧翼を用いたダリウス形タービンの翼取付角度の違いによるトルク特性の検討」,平成22年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-18,pp.955-956,2010-11
52. 中村,辻,直井,塩野,柳平,鈴木:「円弧キャンバー翼垂直軸形風車における補助翼の取付角度に関する基礎検討」,平成22年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-51,pp.1021-1022,2010-11
53. 高橋,新田,直井,塩野,鈴木:「静翼付抗力形多翼風車に用いる動翼の空力特性」,平成22年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-52,pp.1023-1024,2010-11
54. 浅野,直井,塩野,鈴木:「潮流発電システムのダリウス形水車特性の検討-スプライン関数による効率特性の近似-」,平成23年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-25,pp.997-998,2011-11

55. 川田,直井,塩野,鈴木:「2 段多流管モデルによるダリウス形タービンの翼取付角度の違いにおける性能の検討」,平成 23 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-26,pp.999-1000,2011-11
56. 辻,直井,塩野,柳平,鈴木:「円弧キャンバー翼垂直軸形風車における開閉式補助翼が負荷特性に及ぼす影響—発電運転領域の風車性能に着目した開閉式補助翼の基礎検討—」,平成 23 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-27,pp.1001-1002,2011-11
57. 茂木,直井,塩野,鈴木:「多流管モデルを用いたダリウス形タービンのパワー係数の検討」,平成 23 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-28,pp.1003-1004,2011-11
58. 高橋,直井,塩野,柳平,鈴木:「静翼付抗力形多翼垂直軸風車における静翼入力風速の変化に対する周速比を考慮した静翼間流路の風速分布」,平成 23 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-29,pp.1005-1006,2011-11
59. 板山,辻,直井,塩野,柳平,鈴木:「円弧キャンバー翼垂直軸形風車における開閉式補助翼が起動トルク特性に及ぼす影響—固定式補助翼を用いた取付角度に関する基礎検討—」,平成 23 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-50,pp.1047-1048,2011-11
60. 田中,川田,直井,塩野,柳平,鈴木:「NACA63₃-018 翼形の空力特性を用いたダリウス形風車の起動トルクに関する基礎検討」,平成 23 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-51,pp.1049-1050,2011-11
61. 布施,高橋,直井,塩野,柳平,鈴木:「静翼付抗力形多翼垂直軸風車における静翼入力風速の変化に対する回転数を考慮した静翼間流路の風速分布」,平成 23 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-54,pp.1055-1056,2011-11
62. 宮前,茂木,直井,塩野,柳平,鈴木:「ダリウス形タービンに用いる円弧翼のレイノルズ数を考慮した空力特性に関する基礎検討」,平成 23 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-57,pp.1057-1058,2011-11
63. 辻,田中,直井,塩野,鈴木:「潮流発電システムの発電電力量の検討-流速の出現確率密度関数を用いた方法-」,平成 24 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-18,pp.1001-1002,2012-11

64. 高橋,直井,塩野,柳平,鈴木:「風速の速度比を用いた多翼垂直軸風車の風車トルクに関する基礎検討」,平成 24 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-19,pp.1003-1004,2012-11
65. 田中,辻,直井,塩野,鈴木:「潮流発電システムの発電電力量の検討-Heier の式による効率特性の近似-」,平成 24 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,L-20,pp.1005-1006,2012-11

謝 辞

本論文は日本大学理工学部電気工学科 鈴木勝行教授，塩野光弘教授のご指導のもとに進めてきた研究成果をまとめたもので，先生方には常に有益なご助言，討論していただきました。ここに謹んで深くお礼申し上げます。

本研究をまとめるにあたり，専門的な立場からご指導いただきました航空宇宙工学科安田邦男教授に心より感謝いたします。同様に，本論文の構成・内容等にわたり有益な助言ばかりでなく公私にわたり数多くのご指導いただきました日本大学理工学部電気工学科 木方靖二元教授 ならびに 小山茂夫元教授に深く感謝の意を表します。

また，フィールド試験用風力発電装置の製作にご助力いただいた日本光機工業株式会社の関係者各位，風洞施設を快く提供して下さった海上保安庁海上保安試験研究センター大田勝郎氏，松田正俊氏ならびに本学 空気力学実験研究センター安部健一先生，高橋賢一先生，元空気力学実験研究センター所属大竹智久先生（現 航空宇宙工学科）には厚くお礼申し上げます。実験装置と風車の設計から製作・改造まで多大なご支援をいただきました本学工作技術センター 柳平和寛先生，吉田和範先生をはじめ工作技術センターの皆様ならびに元工作技術センター職員 武藤實先生，佐々木春雄先生には深く感謝いたします。

さらに，常にご指導ご鞭撻を賜りました電気工学科および電子情報工学科の教授ならびに諸先生方に感謝いたします。

また，電気工学科 山崎恆樹教授には有益なご助言を多数いただき，お礼申し上げます。著者が本研究を遂行するにあたり，都立産技高専 進藤康人教授，本学 五十嵐誠非常勤講師，本学 井澤勇元非常勤講師のご支援を頂き，ここに深く感謝いたします。さらに，風洞実験では過酷な環境の中で実験およびデータ整理等にご協力いただいた本学大学院生 関雅洋君，石川渉君，卜部紘彰君，清水遼君，鈴木慶子君，新田寛和君，辻健太郎君ならびに本研究室の卒業生，在校生の諸君に感謝します。