

特集：風力発電の技術開発動向

風力発電の現状と展望

荒川 忠一*1
ARAKAWA Chuichi

キーワード：風力発電、風車、洋上風車、系統連系、社会受容性

wind power generation, wind turbine, offshore wind, grid connection, social acceptance

1. はじめに

世界風力エネルギー学会（WWEA）から、風力発電設備容量の最新データが届いた。2011年末の世界の総設備容量は239GWに達し、1年間の新設は42GWであった。世界の電力需要のおよそ3%を賄うに相当する量である。図1は最近10年の設備容量の成長を示し、10年で10倍に増加していることが読み取れる。当分の間、世界の成長は続くものと予想されている。図2は国別の設備容量を示しているが、ここ2年ほどは中国が圧倒的な伸びを示し、63GWで世界のトップを占めている。米国は47GWで2位、長年首位を走っていたドイツは29GWで3位となっている。残念ながら、日本は世界13位であり、2.5GWに留まり、筆者がWWEAの副会長を務めているという因縁で、トップ13位という不自然なグラフのなかで、辛うじて名前を残しているといった寂しい状況である。

世界の視点としては、風力がもっとも経済的なエネルギーであることから、世界各地で大規模に普及している。

一方、日本で大きな話題となる太陽光は、おおよその世界のその設備容量は20GWに過ぎず、風力エネルギーの1/10に過ぎないのが実績である。なぜ、日本では風力エネルギーがこれまで普及しなかったのであろうか。

筆者が10年前に、風力エネルギーの研究を開始しようとしたとき、「日本には風力に適した風はない、場所もない、普及するはずはない」との批判をいたしました。しかし、ヨーロッパの情報を知る限りにおいて、日本にも風力が普及する十分なチャンスがあると信じていた。もちろん、日本では、台風を代表とする強風、山岳地形による乱流、冬の日本海に発生する強烈な冬季雷があり、世界基準を超えた大きさであるため、導入当初はさまざまなトラブルが発生した。これらの課題は、日本型風車のガイドラインを設定することにより、乗り越えつつある。現在は、風力に立ちはだかる大きな課題は、電力系統への接続問題、そして社会受容性であると判断している。

東日本大震災と原子力発電のトラブルを受けて、風力

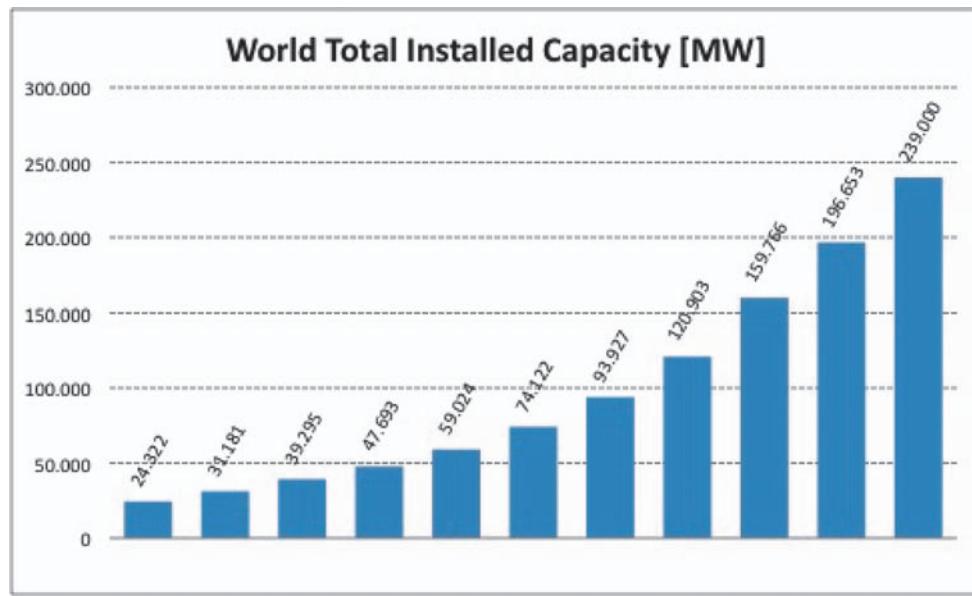


図1 世界の風力エネルギー総設備容量の推移（2000年から2011年末まで、WWEAより）

原稿受付 2012年2月20日

*1 東京大学 大学院 工学系研究科 機械工学専攻
〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

エネルギーの重要性が増している今般の情勢を踏まえて、技術的視点からこれらの展望を解説する。

2. 電力系統と風車

国内の風力の最適地は、風の強い北海道、東北、あるいは九州と言った電力の大消費地から離れている。また、地域毎の電力会社は、従来の手法により、それぞれの地域の発電総容量の5%を風力発電導入量の上限との方針を維持している。それを超える場合は、大型蓄電池を併用する、あるいは電力会社の求めに応じて必要な時は系統から解列するとの条件がつくことが多い。図3は、日本の地域毎の電力会社の発電容量と、現状で備えている地域間連系線の運用容量を示している。つまり、最低限

の地域間の連系の運用可能性はあるが、再生可能エネルギー導入を促進する役割には利用されていない。最近の事情でもわかるように、非常時の運用には利用されている。

ヨーロッパで風力エネルギーが普及した要因のひとつに、国境を越えた連系線の存在があり、国ごとの風力エネルギーの導入量は、発電総設備容量の20%を超える国も存在している。つまり、大規模な地域の連系線を活用するなら、地域の制約を外すことができることを実証している。もちろん、これまで、日本とヨーロッパの系統の配置などが違うとの説明はあったものの、地域間連系を強化することによって可能になることは明らかである。

現在、経済産業省で、「地域間連系線等の強化に関する

Country	Total Capacity end of 2011 [MW]	Added Capacity 2011 [MW]	Total Capacity end 2010 [MW]	Added Capacity 2010 [MW]	Total Capacity end 2009 [MW]
China *	62,733	18,000	44,733	18,928	25,810
USA	46,919	6,810	40,180	5,600	35,159
Germany	29,075	2,007	27,215	1,551	25,777
Spain	21,673	1,050	20,676	1,515	18,865
India *	15,800	2,700	13,065	1,258	11,807
Italy *	6,747	950	5,797	950	4,850
France	6,640	980	5,660	1,086	4,574
United Kingdom	6,018	730	5,203	962	4,245
Canada	5,265	1,267	4,008	690	3,319
Portugal *	4,290	588	3,702	345	3,357
Denmark	3,927	180	3,803	309	3,460
Sweden	2,816	746	2,052	603	1,450
Japan	2,501	167	2,334	251	2,083
Rest of the World*	24,200	6,000	18,201	3,191	15,010
Total*	238,604	42,175	196,629	37,642	159,766

*- Preliminary Data

© WWEA 2012

図2 国別の風力エネルギーの総設備容量などの情報 (WWEAより)

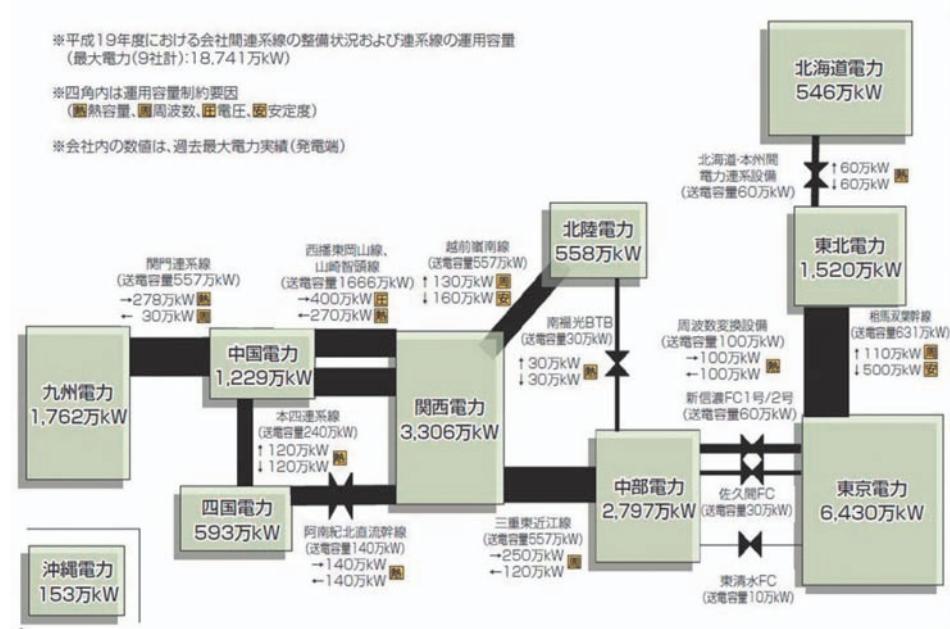


図3 連系線と運用容量 (平成22年度、エネルギー白書より)

るマスター・プラン委員会」が開催され、議論が開始された。日本の東西の50/60Hzの連系の在り方がはじめの話題となるであろうが、続いて、再生可能エネルギー導入の促進に対する手法も議論されることを期待している。

図4は、環境省が2011年4月に公表した再生可能エネルギーのポテンシャルを示したものの中から、陸上風力エネルギーを抜粋したものである。北海道や東北などに偏って風力エネルギーが存在していることが容易に読み取れる。日本の発電総設備容量はおおよそ2億kWであるから、その10%を風力エネルギー導入可能とすると、2000万kWまで容易に導入可能であり、現在のおおよそ10倍となる。その時、明らかに、東京と東北、あるいは北海道との地域間連系線を強化し、風力エネルギーを有効活用する必要性があることを示している。一刻も早く、変動する再生可能エネルギーを大きく受け入れができる連系線の体制が整うことを期待している。

3. 風車の社会受容性

風車の標準的な大きさは、おおよそ2MW、直径80mであり、世界の洋上向けの大規模風車は6MW、直径120mとなり、大規模は建築物とみなされる。日本では、住宅地域に比較的近くに、これらの大型風車が建設される、あるいは別荘地帯といった特殊な地域に十分な話し合いが行われずに計画が進むと言ったこともあり、いわゆる低周波騒音などの社会受容性が話題となっている。

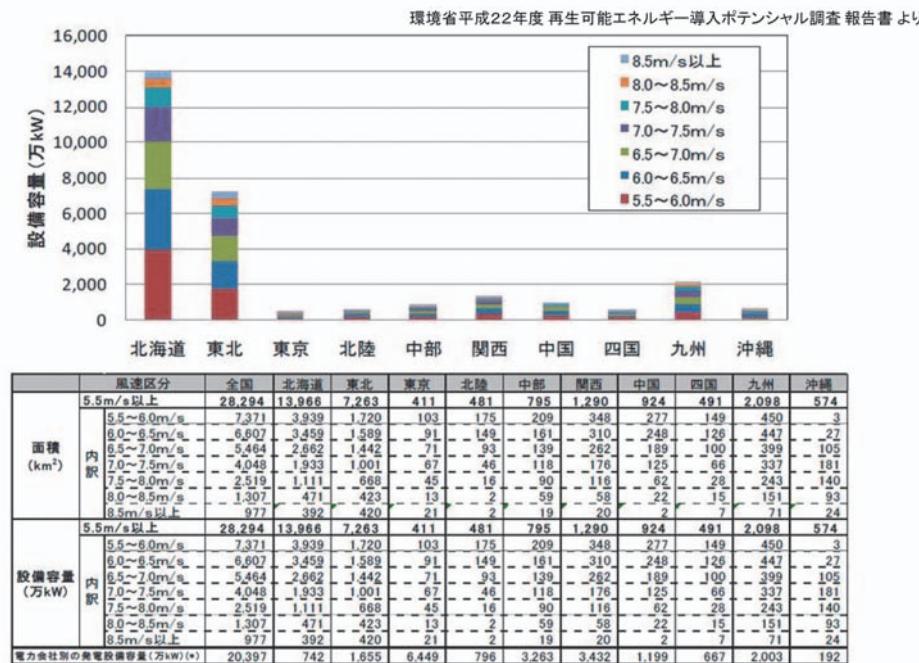
図5は世界遺産にも指定されている、オランダ・キンデルダイクの風車群である。17世紀から灌漑用に利用され始め、現在も地元の生活や観光に大きく貢献し、だれもが愛する風車である。筆者も3度訪問し、そのたびご



図5 オランダ・キンデルダイクの世界遺産に指定された風車群

とに新しい感動を覚えている。近代風車にはない優雅さがオランダ風車にあることは事実であるが、やはり、風車そのものが地元の生活と密着しているということであろう。つまり、現在にアレンジするなら、エネルギーの地産地消であろう。まず、風車で発電された電力は、まず地元住民が利用し、利益があるようなシステム作りである。現在のウインドファームの多くは、東京に本拠地がある発電事業者が、電力そのものも、あるいは利益すべてを東京に持って行ってしまうとの誤解も存在している。わかり易い形で、地元への貢献が大きいことを示すシステム作りが肝要である。

もちろん、騒音については、技術的に過去の風車より低減が図られているが、一層の技術的な改良が求められることは事実である。回転翼とタワーが重なることによ



※電力会社別発電設備容量は、北陸電力 FACT BOOK 2010 の 2009 年度データを基としている。

図4 陸上風力の地方ごとの導ポテンシャル分布（環境省平成22年度再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書より）

る「バザバサ音」を軽減するためには、翼形状の大胆な改良を実現することも必要であろうし、また、歯車増速機などのドライブトレインから発生する機械騒音を、ギアレスといったシステムの変更で一層静肅な発電機を構築することも可能である。すべての可能性を排除せず、挑戦的な技術開発が行われることが求められている。

4. 洋上風車

ヨーロッパを中心として、洋上風力の建設が進み、世界の設備容量はおよそ3GWで、日本の総設備容量よりも大きな数値となっている。ヨーロッパでは、陸上での適地が少なくなり、いよいよ洋上に進出する段階に至っている。日本は、まだ本格的な洋上風車の建設は行われていないが、排他的経済水域が世界6位と広大な面積を有しており、将来のエネルギー宝庫として活用されるることは疑う余地はない。

図6は、洋上風力の概念図であり、浅い海のケーソンやモノパイルと呼ばれる着底式、中間の深さのジャケット式、深い海では浮体式が利用される。現在、普及しているのは、浅い海での着底式が主であり、陸上風車と同様に、十分に経済性が成立し、IEA資料によれば、陸上とほぼ同様の10円/kWh程度で発電を続けている。つまり、建設には陸上の1.5倍の費用を要するものの、風速がおよそ2割増しであれば、出力は1.6倍に達し、陸上と経済性は変わらないといった状況である。

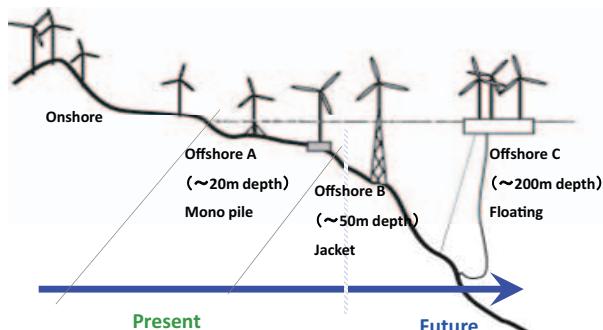


図6 洋上風車の概念図

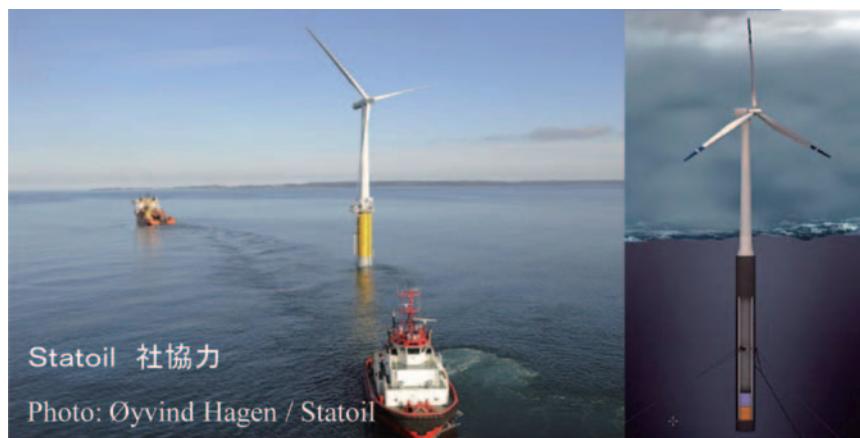


図7 HyWindプロジェクトによるスパー型浮体式洋上風車 (Statoil社, Photo:Øyvind Hagen)

世界で話題になっている洋上風車は、図7に示すノルウェーのHyWindと呼ばれるスパー型の浮体式である。2009年に、水深200mに海面下100mの「浮き」を配置し、上部に2.3MW風車を搭載している。運転後2年順調に発電を続け、設備利用率はほぼ50%という、驚異的な性能を誇っている。引き続き、ノルウェーは、さまざまな浮体式洋上風車の研究開発を続けている。これは、従来北海で石油・天然ガスの事業を行ってきたが、将来それに代替するものとして、積極的に実証研究を行い始めたものである。フィヨルドという港から深い特殊な地形を最大限に利用し、もっとも経済性に優れていると考えられるスパー型を中心に、将来の低廉な洋上風力の事業を展開するべく、活動を続けている。図8は一連の研究成果によるアイデアを示したもので、洋上での模型実験も進んできている。

国内では、着底式として、経済産業省によるプロジェクトが銚子で進む予定であったが、震災などの影響を受け、大幅に遅れしており、順調に進んだ場合、次年度末には姿を現すものと期待している。また、同様の着底式が北九州でも計画が進んでいる。2000年にコペンハーゲンに2MW機20台の洋上風車が設置されたことを考えると、10年以上、大幅に遅れていることは事実であり、十分に反省を加えながら、新しい技術を導入する必要がある。また、浮体式では、環境省が五島列島で挑戦的に実証試験を計画しており、年内に100kW機、次年度に2MW機が浮かぶものと期待している。

一方、震災を受け、経済産業省が3次補正予算として、大規模な福島沖浮体式洋上風車プロジェクトの公募を行ったところである。いわき沖の石油掘削リグが設置されていた地点に、複数台の風車、複数種類の構造をもった浮体を設置することを目指している。大変に心配なことは、日本では、洋上風力の「社会受容性問題」ともいえる漁業権への対応が求められるが、それらの体制が整っていないなどの準備不足が指摘されていることである。世界が注目している大規模浮体式洋上プロジェクトとして、予定通り、順調に船出することを期待している。

5. 結言

東日本大震災により、エネルギーの体系が大きく変わろうとしている。風力エネルギーは再生可能エネルギーの中核として果たす役割を大きい。一方で、伝統的な技術体系から見れば、さまざまな欠点と思える事象が噴き出してきている。しかし、それらの欠点を克服することが、新しい技術をもたらし、新しいシステムを創りだす機会もある。風力エネルギーの大きさを考え、エネルギーの宝庫として十分に活用できるよう、技術を結集していきたい。

図9は茨城県神栖にある洋上風車群であり、世界で大きな話題となっている。つまり、大震災時に津波に耐え、東京地区に電力を送り続けたウインドファームである。

る。純粋に民間プロジェクトとして設置されたものであり、洋上風車の国プロが遅々として進まない中、情報発信を続けている。もちろん、陸上からプロペラを設置したため、一部からは「セミオフショア」と呼ばれているが、洋上風車の他の機能を十分に備え、その沖合に1GW程度の大規模洋上ウインドファームに発展する計画も進んでいる。このように、新しい技術は、必ずしも国プロとしてのみ発展するものではなく、卓越した方向性を見出した民間プロジェクトにも期待が集まっている。風力エネルギーを通して、これまでの常識と思われてきた決まりごとを、ひとつひとつ確認しながら、新しいエネルギー体系を構築することが重要であろう。



図8 ノルウェーの将来の浮体式洋上風車 (IEA Workshop資料より)



図9 津波に耐えた洋上風車 (神栖、ウインドパワーいばらき提供)

特集：風力発電の技術開発動向

大型風車の技術動向

吉田 茂雄^{*1}
YOSHIDA Shigeo

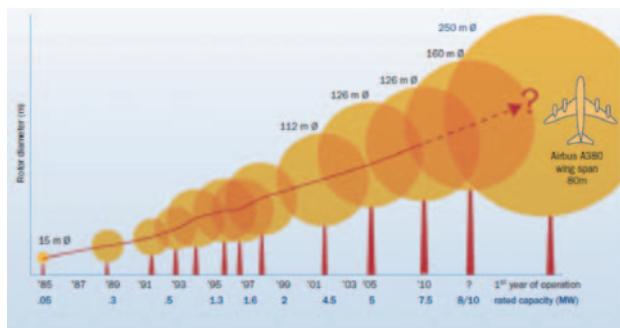
キーワード：風力発電

1. はじめに

CO₂排出削減に加え、将来のエネルギー自給率向上策として再生可能エネルギーが期待されているが、その中でも、風力発電は最も低コストで実用化が進んでいる技術の一つである。風力発電にも様々な用途のものがあるが、主流は、電力系統に連系した大型の風車である。本稿では、大型風車の開発の動向に加えて、その重要な開発課題であるロータ、制御法、ならびに、パワートレインの技術に関する動向と将来性について概要を述べる。

2. 風車開発の概況

風車は風のパワーを電力に変換する装置である。これまでの風車開発の歴史を（図1）に示す。発電用の商業風車の歴史は1980年代の直径約15m、定格出力約50kWの小規模のものから始まり、今日では直径80～100m、定格出力2～3MWが主流となっている。また、5～6MWも実用化し、さらには、10MWや20MW級を視野に入れた研究開発も行われている。

図1 風車の設計サイズの変遷⁽¹⁾

近年の風車の開発における一つ目の流れは、今日の主流である陸上用の風車に関するものである。ここでは、輸送・建設に制約を受けるため、3MW前後のクラスにおいて、経済性を追求した新型機種が開発されている。もう一つの流れが洋上用の風車に関するもので、輸送・建設ならびに環境影響等に制約が少ない反面、基礎のコ

ストが非常に高い洋上用の風車としてマルチメガワット級の大型風車が開発されている。

一般に風車はウインドファームとして集合設置されるが、風車の後流は風速が低く、乱れた風となるため、風車間には適当な離隔が必要となる。例えば、ロータ直径100mの3MW風車で、仮にロータ直径の7倍の離隔を確保すると、風車間の距離が700mにもなる。したがって、数十基規模のウインドファームでは、数km×数kmの風速の高い広大な用地となるが、風力発電の普及がある程度進むと、そのような適地は少なくなってくる。また、系統連系の観点からは、風速の変動により上下する風車の出力変動を吸収するためには、電力の大消費地近くに展開することが望ましい。また、洋上風力発電は、基礎、系統連系、保守などにおいて陸上よりも高コストとなるが、風が高風速で乱れが少ないため発電量が増加する。以上のような観点から、大型の洋上風車が期待されている。

日本風力発電協会の試算では、国内の風力発電の利用可能量は、陸上風力が25GWのところ、洋上が56GW（着床式18GW+浮体式38GW）と報告されている⁽²⁾。洋上風車は、国内でも、ウインド・パワーかみす（図2）など、数サイトで導入されており、今後増加することが予想される。

技術的にも、この洋上への動きは重要な意味がある。1991年に世界初の洋上ウインドファームであるデンマークのVindeby Offshore Wind Farmは陸上用のBonus

図2 ウィンド・パワーかみす⁽³⁾洋上風力発電所

原稿受付 2012年2月1日

*1 富士重工業(株) 風力発電プロジェクト
〒320-8564 宇都宮市陽南1-1-11

450kW×11基で構成していたが、近年開発されている超大型風車は洋上専用機である。洋上風車では、陸上で重要な輸送・建設および騒音、影、景観等の環境影響に関する制約がほとんどなくなる反面、大型化志向は極めて高く、信頼性や整備性に対する要望が高くなる。

また、ここ1~2年間のトピックスとしては、数十m以上の深水域をターゲットとした浮体式洋上風車の開発が挙げられる。図3、図4とともに、既存の風車を利用したものであるが、将来的には浮体式洋上風車システム全体を最適化する専用機が開発される可能性がある。



図3 Hywind⁽⁴⁾浮体式洋上風車



図4 WindFloat⁽⁵⁾浮体式洋上風車

3. ロータ形式

ロータは風のパワーを回転パワーに変換する部位である。本稿では、ロータ軸方向、ブレード枚数、ならびに、ロータ位置で整理した。

(1)ロータ軸方向

風車ロータの最も基本的な分類が風の方向に対するロータ軸の向きによるもので、ロータ軸が風にはほぼ垂直なものが垂直軸風車、ほぼ平行なものが水平軸風車である。

垂直軸ロータは、ヨー制御が不要であることから、小型風車で普及している技術である。また、発電機等の重量物が低い位置にあるなどのメリットが主張されること

も多いが、そのためには、タワーを支持するためのガイドワイヤ（支線）と、そのための広大な敷地が必要となる。さらに、効率や制御の柔軟性においても水平軸風車に劣る。そのため、100kW以上のクラスで垂直軸ロータを採用している機種はない。将来のシステムとして新しいコンセプトの垂直軸風車が検討されている例（図5）もあるが、水平軸ロータの競争勢力になる可能性は低い。



図5 Wind Power, Aerogenerator⁽⁶⁾

(2)ブレード枚数

大型の商業風車のブレード枚数は、1MWの2機種（Vergnet⁽⁷⁾、Nordic⁽⁸⁾）が2枚翼ロータである他は全て3枚翼を採用している。2枚翼ロータでは、ブレード、ピッチシステムの数を削減してコスト低減が期待されるにも関わらず、3枚翼ロータが主流となっている理由として、以下が考えられる。

- ①変動荷重の低減、安全性確保の観点から、各翼の分担する荷重が低い3枚翼が良い。
- ②回転速度の上限が制限されるため、設計周速比（=翼端周速/風速）の低い3枚翼ロータの方が高効率で運転できる範囲が広い。
- ③ソリディティ（=ブレード総面積/ロータ面積）が高く、設計周速比が比較的低くなるため、騒音が低目になる。
- ④視覚的な連続性が高い。

これらのうち、③④は陸上では重視されるが、海上においてはほとんど重要でなくなる。一方、コスト、ならびに、施工・修理におけるメリット（図6）の重要性が向上するため、洋上の専用機用の技術として、2枚翼ロータは、一部で支持されている（2-B Energy⁽⁹⁾、Nautica Windpower⁽¹⁰⁾など）。信頼性、整備性、施工性に優れた2枚翼風車が、低成本で実現すれば、超大型の洋上専用機で3枚翼ロータの競争勢力になる可能性を秘めており、今後の技術開発と技術実証が注目される。

(3)ロータ位置

水平軸ロータには、タワーの風上にロータを配したアップウインドロータと、風下に配したダウンウインドロータがある。

図6 Vergnet GEV HP-1MW施工状況¹¹⁾

大型風車の開発には、商業風車の創成期に地道にスケールアップしながら、今日のマルチメガワット級の風車に繋がった流れと、当初より超大型を目指した2つの流れがあった。特に後者においては、ブレードの軽量化などの観点から、ダウンウインドロータが好まれる傾向があった。しかし、当時は解析法や設計基準が十分に発達していなかったことに加え、風車の経験に極めて乏しく、疲労や超低周波音に起因する不具合が多発し、少なくとも商業的には成功することはなかった。一方、着実な進歩を遂げたアップウインドロータが今日の商業風車の主流となるに至った。今日、数百kW以上のクラスの風車では、2MWの1機種¹²⁾以外は、全てがアップウインドロータを採用している。

しかし、以下のような理由で、将来の超大型風車用の技術としてダウンウインドロータは注目されている。

- ①ブレードに大きな撓みを許容するため軽量で安全性が高い。
- ②フリーヨーにより、暴風待機中、停電時の安全性が高い。
- ③複雑地形の吹上風における効率が高い¹³⁾。
- ④特に浮体式洋上風車においては、傾斜時の効率が高く、ヨーの安定性も高い。

特に、浮体式洋上風車においては④の効果は重要で、SWAY¹⁴⁾、Nautica Windpowerなど、開発中の浮体式洋上風車にはダウンウインドロータを前提にしているものが多くない。

(4)ロータ形式総括

今日の風車では、一部の例外を除いて、ほとんどが水平軸、3枚翼、アップウインドロータを採用している。いくつかの技術課題があるものの、将来の洋上用超大型風車の技術として、2枚翼ロータ、ダウンウインドロータなどのポテンシャルが注目されている。

4. 制御法

風車の制御には、性能や荷重に対する影響が大きく、風車のコンセプトを大きく左右するものである。本稿では、速度制御と出力制御に関して整理した。

(1)速度制御

速度制御の分類として定速と可变速がある。定速制御は、ロータをほぼ一定で回転させ、可变速制御は風速・入力トルクの変動に合わせて回転速度を変化させるものである。定速制御の派生形として、発電機の極数変換（4極/6極）により、低風速域においては低速運転し、高効率化、騒音低減を図ったものもある。また、可变速制御の派生形として、巻線誘導発電機の回転子抵抗を制御することにより、5%程度の限定的な可变速制御を行うものもある。

(2)出力制御

出力制御としては、ほとんどの風車がストール制御とピッチ制御のいずれかを採用している。ピッチ制御は回転速度や出力の目標値からの偏差に応じて、ブレードの迎角が低下するようにピッチ角をフェザー側に操舵するものである。ストール制御は、ロータ回転速度を一定にして、風速が上昇すると流入角が増加し失速（ストール）に至り、トルクが減少することを利用して、出力を制限する技術である。なお、大型の1~2MW級の風車には確実に失速させるためにピッチ角を通常のピッチ制御と逆方向に操舵するアクティブストールという形式のものもある。

前項の速度制御（定速/可变速）と出力制御（ピッチ/ストール）で、4種類の組合せとなる。しかし、一般にストール制御では回転速度を一定に保つ必要があるため、定速制御と組み合わせるのが合理的であり、安定した可变速制御を得るにはピッチ制御と組み合わせる必要がある。定速のピッチ制御、あるいは、可变速のストール制御を採用している風車はほとんどない。したがって、以下、定速・ストール制御と、可变速・ピッチ制御以外の組合せの説明は割愛する。

定速・ストール制御では、ピッチ制御システムが不要となるほか、かご誘導発電機を直接系統に連系するため、低廉で堅牢なシステムとなり、概ね直径60m、1MW前後までは主流であった。それが、概ね直径70m、1.5MW以上で、ほとんどが可变速・ピッチ制御に切り替わり、近年開発されるマルチメガワット級の風車は全てこの形式になっている。

可变速・ピッチ制御では、発電機、コンバータ、ピッチシステムなど、システムが複雑でコストは上昇傾向となるが、大型風車用に適用される必然性がある。

- ①低風速域において最適な周速比で運転できるため、高い効率を維持できる。
- ②風力発電の導入量が増加すると系統維持の観点から出力を制限させる必要が生じる。定速機ではオン/オフ制御しかできないのに対して、可变速ピッチ制御機で

は、柔軟な制御が可能である。

③暗騒音が低い低風速域で回転速度が低いため、騒音が目立たなくなる。

④可変速制御により、過剰な荷重の発生を抑制することができる。さらに、独立ピッチ制御により変動荷重を低減することができる。

以上の傾向は風車の大型化に伴い一層顕著になるため、定速・ストール制御がピッチ制御の対抗勢力として復活することは考えられない。また、超大型風車における比較的高速の変動荷重を低減する技術として、スマートブレード技術^[15]などが検討されており、将来的に、通常のピッチ制御と併用される可能性がある。

(3)制御方式総括

概ね1MW級を境に定速・ストール制御から可変速・ピッチ制御が主流になっており、今後も主流である続けることが予想される。さらに、超大型風車の疲労荷重低減のため、スマートブレード技術が併用される可能性が高い。

5. パワートレイン形式

パワートレインは、風車ロータにより発生した動力を電力に変換するシステムである。元々は、他産業から増速機と発電機を流用されているものが多かったが、今日使用されているものは、全て風車専用に開発されたものである。パワートレインの軽量化、低コスト化、信頼性向上は、近年の大型風車における最も大きな課題の一つであり、パワートレイン形式選定の指標になっている。

パワートレイン形式は多岐に渡り、一般化した評価が難しいが、本稿では、発電機と増速機で整理した。

(1)発電機

風車に使用される発電機は誘導発電機と同期発電機に分類される。各々の流れについて以下に述べる。

ストール制御が主流の直径60m、1MW前後のクラスまでは、低廉で堅牢なかご誘導発電機が一般的であった。その中には、極数変換（4極/6極）により低風速域では回転速度を2/3に低減し、高効率化と騒音低減を図るものも見られた。また、変動荷重低減の観点から、巻線誘導発電機の抵抗を制御することにより5%程度の可変速を許容するスリップ制御の風車も一部に見られたが、多くは普及しなかった。

大型化に伴い、効率・構造の観点から可変速制御の需要が高くなった中で、かご誘導発電機に代わって主役に躍り出たのが、二次励磁巻線誘導発電機（DFIG）である（図7）。これは出力電力の全てを一旦直流に変換するDCリンクと比較して、コンバータの容量を約1/3にすることができるため、1.5～3MWのクラスでは最も普及している。また、マルチメガワット級の風車でも、これを採用しているものが少なくない。

同期発電機は、2000年頃までは、増速機を排除することを主眼として、ギヤレス風車（Enercon, Lagerwey

など）のみが巻線同期発電機を採用してきた。その後、比較的低コストで高性能の永久磁石が普及し、ほとんどのメーカは性能や整備性に優れた永久磁石同期発電機（PMSG）を使用するようになった（図9）。

近年のトピックとしては、超伝導発電機^[17]がある。ターボヘッドの質量を約半減できるため、超大型風車の技術として期待されている。

(2)増速機

多くの風車では増速機が使用されているが、整備性の



図7 DFIG風車の例^[19]



図8 中速PMSG風車の例^[20]



図9 ギヤレス風車の例^[21]

向上や信頼性の向上が、大きな課題になっている。この点、ギヤレス風車はメリットがある。Enerconは一貫して巻線励磁の同期発電を使用したギヤレスの風車を開発しており、今日でもギヤレス風車のシェアのほとんどは同社のものである。しかし、大型化によりナセルが大型化し、質量が極めて大きくなる。これに対して、多くのメーカーが高効率のNe-Fe-B磁石を使用したPMSGを使用するようになってきた。しかし、ギヤレスのPMSGでは大量の永久磁石を使用するため、供給リスクが問題視されている¹⁶⁾。両者の折衷案として、中速の増速機とPMSGの組合せ（図8）が勢力を伸ばしてきている。

今回、事例が少ないため評価対象としなかったものにマルチパスのドライブトレインがある（Clipper¹⁸⁾ほか）。これらは、一つの増速機に複数の発電機を連結するもので、軽量化に効果があるとされており、将来の浮体式洋上風車に期待される技術の一つである。

風車用として比較的新しいコンセプトとして、油圧ドライブ（図10）がある。これは、可変速のロータと定速の同期発電機の間を油圧ドライブで可変にするものである。これにより、比較的信頼性の低いコンバータを排除できるため、洋上用としての適性が主張されている。今後の運用実績が期待される。

1MWクラスまで主流だったかご誘導発電機は、2MW以上のクラスではほとんど使用されなくなった。また、巻線同期発電機も軽量化に適さないため、あまり普及していない。代わって、DFIGは依然堅調であり、効率、信頼性、整備性にメリットのあるPMSGもシェアを伸ばしている。

増速機に関しても信頼性、整備性の向上を図るため、ギヤレスや極力増速比の低い中速増速機が増加してきている。また、マルチパスや油圧ドライブ等の新しいコンセプトも普及しつつある。

将来の超大型風車においても、当面は、様々な様式が林立することが予想される。

6. まとめ

近年の大型風車、ならびに、風車の大型化の動向をロータ形式、制御方式、パワートレイン形式に関して述

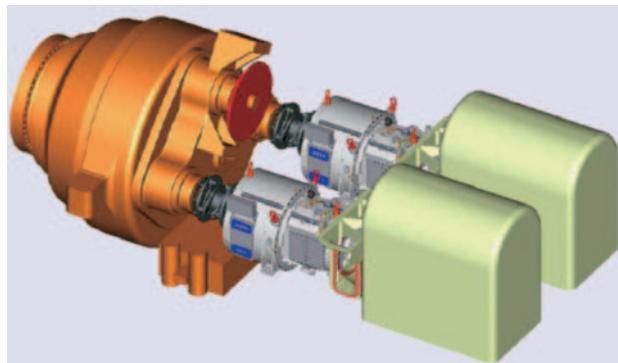


図10 Voith, WinDrive²²

べた。

研究開発の中心が陸上から洋上にシフトし、輸送や環境影響による制約が低下してきている反面、大型化、軽量化、稼働率向上などに関する要求が高くなっており、従来よりもドラスティックな技術が適用可能となってきている。現在、この候補になっている技術のほか、新たなブレークスルーの出現が期待される。

参考文献

- (1) European Wind Energy Association, UpWind - Design Limits and Solutions for Very Large Wind Turbines (2011)
- (2) 日本風力発電協会他, 風力発電の現状と導入量拡大に向けて (2009)
- (3) 小松崎都市開発: ウィンド・パワーかみす洋上風力発電所, komatsuzaki.co.jp/windpower/kamisu.php (2012)
- (4) Statoil, Hywind, www.statoil.com (2012)
- (5) Principle, WindFloat, www.principlepowerinc.com (2012)
- (6) Wind Power, www.windpower.ltd.uk, (2012)
- (7) Vergnet Wind Turbine, GEV HP-1MW, www.vergnet.com/en/gev-hp.php (2012)
- (8) Nordic WindPower, www.nordicwindpower.com/N1000_1MW_Brochure.pdf (2012)
- (9) 2-B Energy: www.2-benergy.com (2012)
- (10) Nautica Windpower: www.nauticawindpower.com (2012)
- (11) Windpower Monthly, GL Signs off Turbine with Detachable Nacelle, 16, Aug, (2011)
- (12) 富士重工業, SUBARU80/2.0パンフレット (2011)
- (13) Yoshida, S., Performance of Downwind Turbines in Complex Terrains, Wind Engineering, Vol.30, No.6, (2006), pp.487-502.
- (14) SWAY, sway.no (2012)
- (15) Bergamin, L., Adaptive Trailing Edge Flap - Recent Development within Smart Blades, Wind Turbine Blade Workshop (2010)
- (16) de Vries, E., Doubly-fed Induction v Permanent Magnet, Windpower Monthly, Jul. (2011)
- (17) Windtech, The 10MW Sea Titan (2011)
- (18) Clipper Windpower, www.clipperwind.com/pdf/Liberty_Brochure_2011_V3_Single.pdf (2011)
- (19) Nordex, http://www.nordex-online.com (2012)
- (20) WinWinD, http://www.winwind.com (2012)
- (21) Siemens, 6.0MW Offshore Wind Turbine (2012)
- (22) Reimesch, U., Meeting The Grid Requirements with New Drive Train Concept - WindDrive, Windpower Asia, (2009)

特集：風力発電の技術開発動向

風力発電を電力システムに大量連系する際の技術課題

七原 俊也*1
NANAHARA Toshiya

キーワード：風力発電、電力システム、連系、需給バランス、周波数、電圧

1. はじめに

近年、風力発電の導入量は地球環境問題への対応等を背景として国内外で急増しており、わが国の総設備容量は2009年度に219万kW程度に達している。また総合資源エネルギー調査会の長期需給見通しでは、2030年度における風力発電を660万kW（最大導入ケース）まで増やすことを目標としている⁽¹⁾。風力発電への期待は、2011年3月の大震災および原子力発電所の事故以降さらに高まっているように見受けられる。

風力発電は、電力システムに接続（連系と呼ぶ）し、その発電電力を系統に送電することが一般的である。しかし風力発電は、出力が気象条件に依存し大きく変動するなど、在来型電源とは異なる特性を有している。また人口密度が低く電力システムの弱い箇所に連系されることも多い。このため風力発電は電力システムへの影響が懸念される電源でもある。

このような事情を勘案し、本解説では、MW級の事業用風力発電設備を電力システムに連系する際の技術課題について概説する。すなわち、まず電力システムの特徴を記し、電力システムから見た風力発電と在来型電源の違いについてまとめる。次いで、風力発電の電力システムへの影響について概説し、需給バランス、電圧変動、事故時の安定性への影響を取り上げ、風力発電増大の影響とその対策技術について論じる。

2. 電力システムから見た風力発電

2.1 電力システムとは

電力システムは、需要家に規定の電圧・周波数を有し波形歪みのない電力を送る使命を有するシステムである。具体的には、同システムは、図1に示すように発電所、送電線、変電所、配電線、負荷等の様々な設備から構成され、それらが有機的に連携することにより上述した電力供給という使命を果たしている。

電力システムは人工のシステムのうちではもっとも大規模なシステムの一つと考えられるが、以下の必ずしも他の大規模システムには見られない特徴を有している。

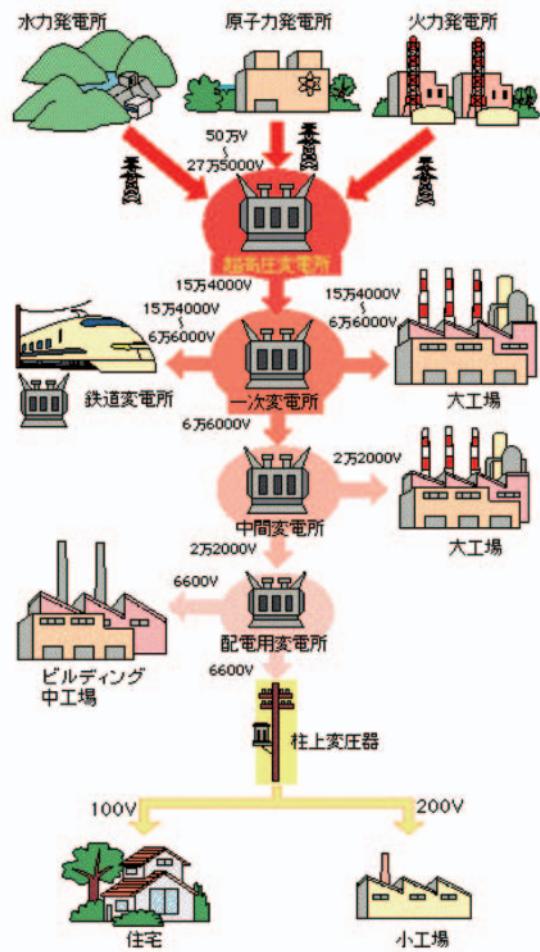


図1 電力システムの概要
[出典] 電気事業連合会ホームページ

- ・雷害、風雪害や地震など様々な苛酷な自然災害に曝される
 - ・電気的現象（たとえば落雷などに伴う過渡現象）はシステム内を高速に伝搬する
 - ・瞬時瞬時に精密に需要と供給（発電）のバランスを取る必要がある
- 電力の安定供給のためには、これらの特徴に配慮した電力システムの計画・運用・制御が必要である。

原稿受付 2012年1月16日

*1 財電力中央研究所 システム技術研究所
〒201-8511 狛江市岩戸北2-11-1

2.2 電力システムから見た風力発電の特徴

風力発電は在来型電源である火力・原子力・水力発電とは相當に異なる特性を有している。また風力発電は、太陽光発電、民生用コーチェネレーション、燃料電池発電などのいわゆる「分散形電源」の範疇に含められることが多いものの、それらに比べても以下のような特徴を有している。

まず風力発電の大多数はウインドファーム（WF）に集合設置される。このため各連系点での設備容量は万kWオーダとなるのが通常であり、上述の分散形電源のうちでは大容量である。またそのため送電線に連系されることが多い。

加えて以下のように在来型電源とは異なる特性を有している。

1) 出力変動が大きいこと

風力発電の発電出力は、風という変動の激しい自然現象を利用しているため、在来型電源に比べ出力変動が大きい。図2にWF出力の例を示すが、この事例によれば気象擾乱（前線）の通過に伴い、WF出力が大きく変動していることが分かる。

風力発電の出力変動には、次の特徴がある。

- ・電力貯蔵装置を併設しない限り、出力の調整が困難である。風力発電機の出力を抑制することは可能であるが、その場合にはエネルギーを無駄とすることとなる。
- ・出力は、年、日、時間、分などいずれの時間オーダで見ても、確率的に変動する。
- ・あるエリアの平均出力であっても、風力発電出力が小さい確率がかなり高い。つまり安定した供給力としては期待しづらい。
- ・風力発電出力の正確な予測は困難である。

2) 在来型電源とは異なる種類の発電機を用いること

在来型電源は、ごく少数の例外を除いて同期発電機を用いているが、風力発電では主として誘導発電機が用いられ、インバータが組み合わされることも多い（図3参照）。

事業用風力発電は、風車回転数が電力システムの周波数から定まる値ではなく一定か否かにより、定速機と可変速機に大別できる。可変速機は、図3に示すように、さらに誘導発電機の二次巻線を交流励磁する方式とフルスケールのインバータを用いる方式*とに大別できる。また定速機は誘導発電機を電力システムに直接連系する方式と、誘導発電機の二次巻線の抵抗を変化させる方法（部分可変速機とも呼ぶ）に大別できる。なお従来は定速機が主流であったが、近年は制御性等が評価され可変速機が導入の主流となっている。

発電機が在来型電源と異なるため、風力発電機は在来型電源と下記の点で異なる特性を有している。

- ・電力システムの擾乱時（電圧や周波数の異常）に、多数の風力発電機が停止し電力システムの信頼性に悪影響を及ぼす可能性がある。
- ・周波数低下時に、同期発電機では回転数低下に伴い慣性エネルギーが放出されるが、誘導発電機やインバータではこれはほとんど期待できない。

なお風力発電機のうちでも、たとえば定速機では、発電機効率（無効電力）の制御ができない、起動時に大きな突入電流が流れるため対策が必要となるなど、発電機のタイプによってその電気的特性はかなり異なっている。

3) 連系する電力系統が脆弱であること

風況の良い地点は概して人口密度の低い地域にあるため、送電線までの離隔が大きい、またもし送電線が近く

*フルスケールのインバータを用いる方式では同期発電機を用いることが多い。

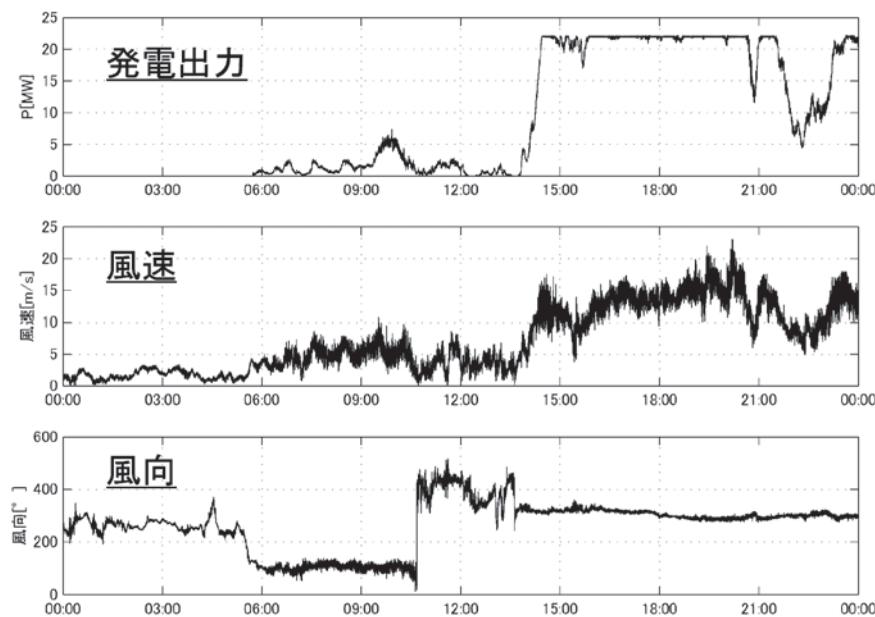


図2 ウィンドファーム出力と風速と変動波形の例^{②)}

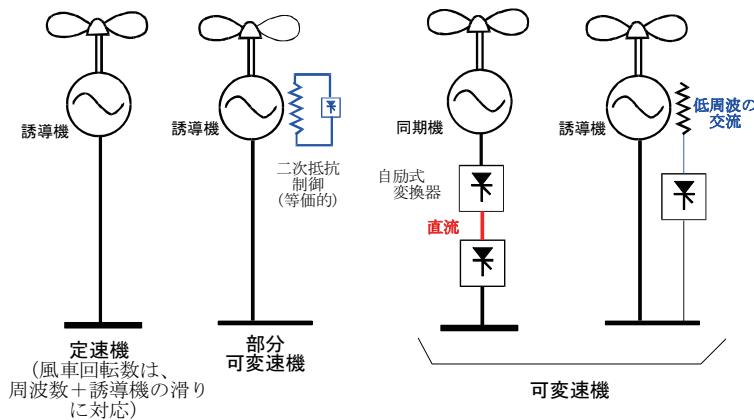


図3 風力発電システムの主要なタイプ

にあっても電力システムが脆弱な場合が多い。このため以下のような課題が生じやすい。

- ・ウインドファーム (WF) から既存の送電線や変電所までの距離が長いため、亘長の長い送電線の新設が必要となる場合がある。
- ・送電線の送電容量 (熱容量) が小さいため、連系可能なウインドファームの容量が限られる場合や、送電線等の増強が必要となる場合がある。
- ・連系点から見た背後インピーダンスが大きいため、電圧問題等の現れやすい傾向がある。

これらの風力発電特有の特徴に起因し、風力発電を電力システムに連系する場合には特別な配慮が必要となることがある。

3. 風力発電の電力システムへの影響

3.1 影響の概要

風力発電機の電力システムに及ぼす影響は、連系点周辺へのローカル影響と系統全体への影響に大別される。表1では、これらの影響を上記の風力発電の特徴の影響度合も含め整理している。

表1 太陽光・風力発電の電力システムへの影響の概要

	影響の内容	影響を左右する要因		
		出力変動	発電機特性	弱い系統
ローカル影響	送電線の熱容量			○
	電圧変動	○	○	○
	高調波・高周波		○	○
	保護協調		○	○
	単独運転			○
	短絡容量増大		○	○
	その他			
全系影響	需給運用・制御	○		
	出力低下時のバックアップ	○		
	系統擾乱時の運転の安定性		○	
	電力システムの安定性	○	○	○
	その他			

まずローカル影響は、ローカル系統の送電容量の課題に加え、電圧や高調波など電力品質に関わる課題、落雷などによる電力システム側の事故に対する保護に関わる

課題などからなる。ここにローカル影響については、太陽光発電や民生用コージェネレーションなどの分散形電源と共に通する部分も多く、「電気設備の技術基準の解釈」、「電力品質に係る系統連系技術要件ガイドライン」⁽³⁾に全般的な規定があり、さらに日本電気技術委員会の民間規格「系統連系規程」⁽⁴⁾に詳しい説明がある。

一方、電力システム全体への影響としては、需給バランスの維持、系統事故時の安定性維持などの課題がある。この全系影響については、風力発電の出力変動が大きいことなど、風力発電特有の特徴に起因するものが多い。また導入量が小さい場合は問題となりにくいが、それが増えると顕在化する傾向がある。

本章では、以下、全系影響の例として需給バランスへの影響、電力システムの安定性への影響、ローカル影響として電圧変動を、代表的な影響として取り上げ説明する。なお個々の電力システムへの影響度合については、各電力システムの状況や特性により異なる点には注意が必要である。

3.2 需給バランス

1) 影響の概要

周波数を安定化することは、需要家に供給する電力品質の維持および電力システムの安定運用の両面からきわめて重要である。ここに系統周波数を規定値に保つためには、供給エリア内で瞬時瞬時に電力システムの需要と供給を一致させる必要がある。

風力発電が大量に導入された場合には、その出力変動を火力発電等の調整力で補償する必要がある。しかし風力発電の出力変動は大きいため、需給バランスの維持が困難となることが懸念される。またその出力の正確な予測は困難であるため、風力発電の出力減少に備えるとともに、予測誤差対策として、多くの火力機を並列し部分負荷で運転する必要が生じることも予想される。

電力システムの需給バランスの維持は、十年オーダーの計画から秒オーダーでの制御、すなわち需給計画・運用・制御を組み合わせて実現している。これらのうち変動周期が短く自動制御で対応している領域での様々な制御の

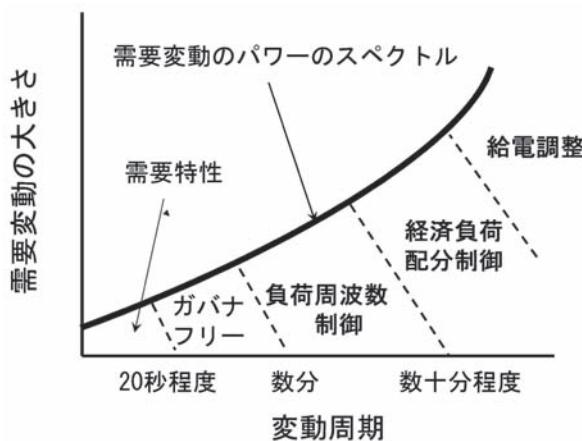


図4 需給制御の役割分担

変動周期別に見た役割分担を図4に示す。風力発電が大量に導入された場合には、負荷周波数制御が制御対象とする数分から20分程度以上の変動周期について、風力発電の出力変動の影響が需給バランスに及ぶことが懸念されている。

具体的には下記の点で影響の現れることが懸念されている。なおこれらについては、連系可能量の算定根拠となっていることもあり、総合資源エネルギー調査会新エネルギー部会などの場で様々な検討がされてきた⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾。

- ・火力発電の下げ代不足（余剰電力）：電力システムの軽負荷時間帯に風力発電出力が大きい場合、火力発電の最低出力を考慮すると、発電出力が需要を上回る可能性がある。
- ・大きな出力変化：風力発電出力の変化が著しい時間帯に、火力発電等での対応が難しくなる可能性がある。
- ・負荷周波数制御：風力発電の出力変化に起因し、20分程度以下の変動を対象とした負荷周波数制御で調整力による対応が困難となる可能性がある。

2) 対策

風力発電の電力システムの需給バランスの影響を解明するには、まず大量導入時におけるその出力変動特性を明らかとすることが必要である。このためこれまで、大量導入時の出力変動の大きさが、定格出力で規格化した場合に、個々の風力発電機の出力変動に比べてどの程度小さくなるか（平滑化効果と呼ぶ）や、WFにより出力

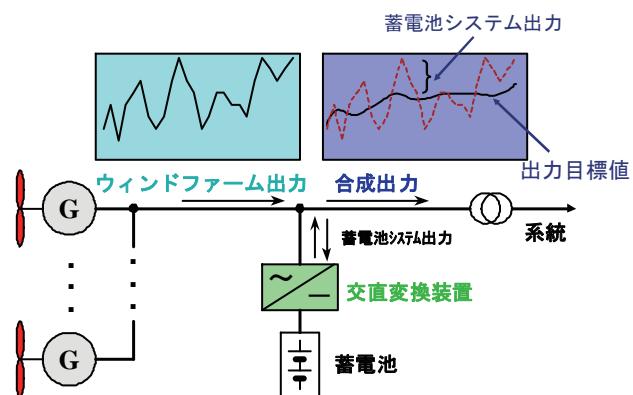


図5 蓄電池による風力発電の出力変動平準化

変動の様相がどのように違うかなどについて分析が行われてきた⁽⁸⁾。しかし対象の多様さ・複雑さを考えると今後の解明を待つ部分も多い。

また需給バランス面からの風力発電の出力変動対策として次等が実用化されつつある。

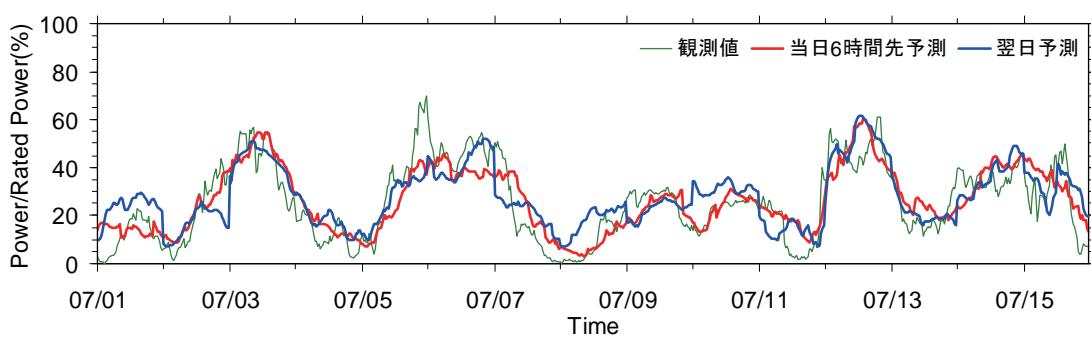
- ・蓄電池による風力発電の出力変動の安定化（図5参考）：青森県の二又、市浦風力発電所で実用化されている。
- ・連系線の活用⁽⁹⁾：地域間連系線を活用し、他地域の調整力を利用することにより、風力発電の出力変動に対応する実証試験が開始される。
- ・風力発電の出力予測：火力発電等の効率的な運用を行うため、数値気象予報を用いた予測手法の開発が行われている。図6に予測結果を例示するが、現段階でもトレンドの予測はある程度可能であるが、予測精度については改良の余地があるように見受けられる⁽¹⁰⁾。

3.3 電圧変動

1) 出力変動に起因する電圧変動

風力発電による電圧問題としては、常時の電圧変動、風力発電機起動時等の過渡的な電圧変動、風力発電出力の短周期変動に伴うフリッカ（ちらつき）などがある。ただし発電機起動時の電圧変動とフリッカについては、近年採用されることの多い可変速機では比較的問題となりにくい。

常時の電圧変動については、気象擾乱（低気圧、前線

図6 蓄電池による風力発電の出力変動平準化⁽¹⁰⁾

など) の通過や強風時の風車のカットアウトに伴う出力変動による変動が懸念される。送電線(特別高圧)への連系にあたっては、電圧変動は、常時電圧の概ね±1~2%以内が適正值とされている⁽³⁾。

電圧を適正值に維持できない場合は、静止形無効電力補償装置(SVC)等の電圧調整装置の設置、風力発電の出力抑制等の対策が講じられる。

2) 瞬時電圧低下に伴う風力発電機の解列

電力システムでは、電力輸送設備への落雷等による短絡故障により、瞬時電圧低下(数秒以下のごく短時間の電圧低下。瞬低と呼ぶ)の発生が避けられない。一方、特段の対策を講じていない風力発電設備では、瞬低が起こった時、インバータの保護や風車の過速度防止のために停止することが多い。瞬低は広いエリアで同時に起こるため、これに起因し多数の風力発電が同時に解列する恐れがある。多数台が同時に解列すると、電力システムの安定運用に悪影響を及ぼす。

このため風力発電の導入が進む諸外国では、風力発電設備が瞬低などの系統擾乱時[†]に運転を継続する能力(Fault-Ride-Through能力、FRT能力と略す)を求める趨勢にある。わが国でも風力発電機のFRT能力が系統連系に際しての要件となる見込みである。

3.4 事故時の電力システムの安定性

電力システムでは落雷等の事故が避けられないため、事故時にも電力システムの安定性を維持することが信頼度維持のためきわめて重要である。

誘導発電機やインバータを用いている風力発電は、電

[†] 系統擾乱としては他に系統周波数の変動などもある。

力システムの安定性の観点からは、次のように同期発電機を用いている在来型電源と異なる特性を有している。

- ・同期発電機間には同期化力が働き、すべての同期発電機は同期して運転されているが、インバータや誘導発電機には同期化力は働く。
- ・同期発電機は慣性を有しているため、その回転数(周波数)が低下した時にエネルギーを放出するが、インバータは慣性を有していないためこれを期待できない。一方、誘導発電機は、回転こそしているものの、発電機の原理の違いに起因し、回転数(周波数)の低下時に同期発電機ほどはエネルギー放出を期待できない。
- ・風力発電機は、瞬低により停止する場合がある。

また風力発電の出力が大きい場合、火力発電機が停止されるなど大規模集中電源の運転状況に変化の生ずる可能性があるが、その場合、電力システムの特性(たとえば電圧維持能力の低下)に変化をもたらす恐れがある。

これらの電力システムの動特性への影響を図7に例示する。ただしインバータや誘導発電機の大量導入が電力システムの安定性に及ぼす影響については、まだ研究が始まった段階であり、今後の解明を待つ部分が多い。

4. おわりに

近年設置量が急増している風力発電は、再生可能エネルギーの中ではコストが安い等の点で優等生である。しかし風力発電は、弱い電力システムに連系されることが多い上に、出力変動が大きく、その正確な予測も困難であるなど在来型電源とは異なる電気特性を有しているため、電力システムへの影響が懸念される電源である。このため、今後とも、運用経験を蓄積し、必要な対策を講じつつ、風力発電の電力システムへの影響を最小化し

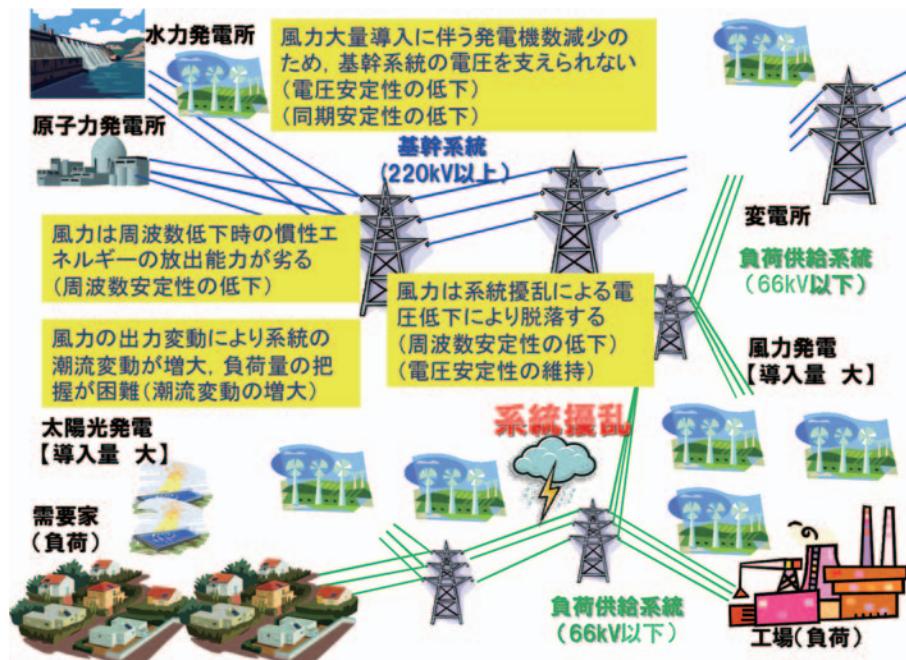


図7 風力発電増大の電力システムの安定性への影響

ていく必要があると考えられる。

風力発電の系統影響に関する問題の多くは、風力発電が従来型電源と大きく異なる特性を有していることに起因している。このため今後は、電力システムの視点からは、風力発電ができるだけ「普通の電源」に近づけるための技術開発が重要と考えられる。

最後に、風力発電の導入が進んでいる諸外国の事情の一例として、ドイツの事情^[11]に簡単に触れておきたい。同国では、風力発電の出力変動に対する需給バランスについては、欧州で発達している会社間ないしは国間の連系線を通じて風力発電の少ない地域の短周期・長周期変動への調整力も活用することで対処している。しかしこれに伴い送電線の潮流（電力の流れ）が大きくなり、送電線に事故があった場合、事故が他の送電線に波及する恐れのある事態が頻発するなど、信頼性上の課題に悩まされている模様である^[11]。ドイツの例からも推察されるように風力発電の電力システムの影響については、各国が直面する課題は各国の電力システム事情による部分が大きい。また影響の見極めにあたっては、需給、系統など広い視野から影響を分析する必要がある点にも注意が必要である。

参考文献

- (1) 経済産業省、長期エネルギー需給見通し（再計算）－最大導入ケースにおける主要対策の具体的な内容について（平21-8）
- (2) 電源開発(株)、(財)電力中央研究所、(財)エネルギー総合工学研究所、風力発電電力システム安定化等技術開発－蓄電システム－、平成19年度NEDO報告書（2008-3）
- (3) 資源エネルギー庁、電力品質に係る系統連系技術要件ガイドライン（平16-10）
- (4) (社)日本電気協会、JESC E0019 (2010)、系統連系規定 JEAG 9701-2010」（2010-6）
- (5) 総合エネルギー調査会新エネルギー部会、電力システム影響評価検討小委員会中間報告（2000-5）
- (6) 総合資源エネルギー調査会新エネルギー部会、風力発電系統連系対策小委員会中間報告書、（2004-7）
- (7) 総合資源エネルギー調査会新エネルギー部会、風力発電系統連系対策小委員会中間報告書（2005-6）
- (8) 七原俊也、電気学会論文誌B、風力発電の系統影響対策技術の開発動向、129-5 (2009-5), p.568-571
- (9) 北海道電力、東北電力、東京電力、北海道地域内、東北地域内における風力発電導入拡大に向けた実証試験の実施および風力発電事業者の募集について（2011-9）
- (10) 東京大学、伊藤忠テクノソリューションズ(株)、(財)電力中央研究所、(財)日本気象協会、イー・アンド・イーソリューションズ(株)、風力発電電力系統安定化等技術開発－気象予測システム－、平成19年度NEDO報告書（2008-3）
- (11) 低炭素電力供給システムに関する研究会（第7回）配付資料、新エネルギー大量導入と系統安定化に向けた取り組みに関する欧州現地調査報告書（2009-4）

特集：風力発電の技術開発動向

風力発電の数値シミュレーション

飯田 誠^{*1}
IIDA Makoto

キーワード：風力発電，空気力学，数値解析，CFD

1. はじめに

風力発電分野では、さまざまなフェーズで数値シミュレーションが活用されている。風力発電の導入可能性、賦存量、設置検討などのフェーズにおいては、世界各地の風をシミュレーションによって推定する。世界規模の風力賦存量の推定では、地球規模の大気シミュレーションが実施される。実務レベルでは、風力発電事業の計画段階で、風力発電機の設置を検討するため、候補地点近傍の風を推定する「風況シミュレーション」が実施される。風況シミュレーションは、風力発電事業の発電量に直接関係することから、重要視され多くの検討がなされている。世界ではWAsPと呼ばれる線形モデル⁽¹⁾が最も利用されているが、非常に簡便なモデルのため、スペインや我が国のような複雑な地形については、不確かさが大きい。そのため、非線形のモデル特に近年は計算機技術の向上からNavier-Stokes方程式をベースにした風況シミュレーションモデルに注目が高まっている⁽²⁾。風力発電の設置場所が、平地から複雑な地形、洋上に移るに従い、風況シミュレーションモデルの標準化⁽³⁾、信頼性評価などの取り組み⁽⁴⁾も開始しつつある。「風況シミュレーション」以外にも、発電量予測のための「発電量予測シミュレーション」、翼構造モデルのための「翼構造シミュレーション」、支持構造物設計のための「タワー構造シミュレーション」、洋上においては波・風を含めた「風波シミュレーション」、発電機、系統連系に関する「発電機シミュレーション」、「電力シミュレーション」など様々なシミュレーションが導入されているが、これらの紹介は別の機会に譲り、本稿では、風力発電機の設計、性能評価という観点での数値シミュレーション「空力シミュレーション」に焦点をあて、近年までの動向について紹介する。

2. 風力発電空気力学の基礎

風力発電は、その名の通り風の力をを利用して発電を行う機械装置である。つまり風力発電の空気力学はその

根幹を支える。初期の風力発電の流れ解析は、図1のような流管内で風車を作動円盤に見立て、そこでの運動量損失から風車の仕事量を導いた。基本的な理論は、Froude⁽⁵⁾らヘリコプターの理論であったが、Betz⁽⁶⁾がはじめてこの理論を風力発電に適用し、以下の仮定のもとながら理論的限界0.59を示した。

【運動量理論の仮定】

- 大気流は定常流れでかつ一様流とする
- 乱れは考慮しない
- 斜め流入風、3次元効果は加味しない

この0.59とは、流入する運動量の約60%までは理論的にはエネルギーを取得することができるという意味である。ただし、Kuik⁽⁷⁾などは運動量理論の仮定では考慮されていない半径方向力をディフューザーや翼端ベーンなどを設定すると、この限りでない可能性があると指摘している。現在設計で使用されている最終形は、Vries⁽⁸⁾によって示された。彼らは、円盤が存在することによって妨げられる流れの減速を誘導係数 a を導入することで表現し、 $a=1/3$ のときにBetzの理論効率を導き出せることを示した。

この運動量理論の発表後Glauert⁽⁹⁾が、風車ブレードを半径位置ごとの微小要素（翼素）と呼ばれる要素に離散化し、それぞれの断面で誘導速度を加味した流入速度を算出、その断面の速度、迎角に応じた揚力、抗力、モ

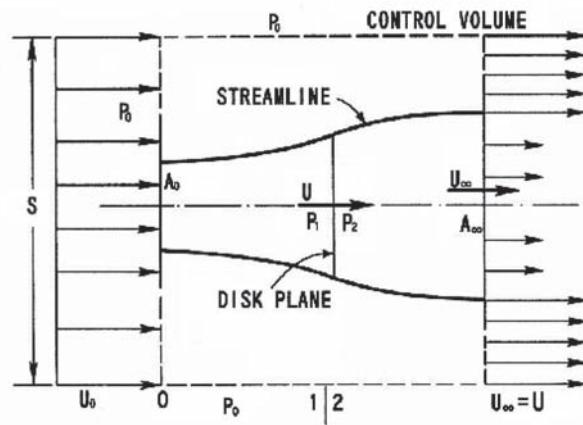


図1 ローターを通過する流れ場の運動量理論モデル

メント力を考慮したブレード全体の翼荷重計算手法を発表する。これが、現在風車設計理論の基礎となる翼素・運動量理論である。この理論にLissamanとWilson^[10]により提案された翼端・翼根補正式 Prandtlの翼端モデルが組み込まれ、実用的な風車の設計、性能、荷重評価シミュレーションモデルが確立する。

3. 翼素・運動量理論と風車設計、動力学解析への展開

先に説明した翼素・運動量理論は、定常一様流中の風車の力学シミュレーションであり、実際の風車に適用するためにGoorian^[11]は環状理論を導入、Hansen^[12]は風向の偏差（ヨーエラー）による空力荷重変動モデル、Schepersらによる動的な流入風変動モデルおよびその影響、回転角（アジマス角）の影響について検討、改良が進められてきた。

現在、風車の設計および荷重解析で使用されているソフトウェアの多くは、翼素・運動量理論を基礎として、確率統計風モデルを流入風とし、前述の翼周りの補正を適用している。導入されている各種補正モデルは、基礎的な翼試験、風洞試験およびフィールド試験により半経験的に求められている。そのため、VEWTDCプロジェクト、Heijdra J. The accuracy of wind turbine design codes derived from VEWTD results. ECN-WIND Note-03-6071. 2003. NREL PhaseVIプロジェクトなど各種風洞試験、フィールド試験での風車荷重計測と風車設計ソフトウェアを比較し、特に、BEMによる不確かさ、信頼性、CFDの可能性について検討が進められた。VEWTDCプロジェクトでは、BEMはブレード荷重推定の不確かさとして20%程度であることが報告されている。

これまで風車は、比較的風の穏やかな平坦な地点に多く設置してきた。これは複雑な地形で風の変動の強いサイト（乱流強度が高いサイト）では、風の変動による荷重変動が風車の耐荷重性、疲労特性にクリティカルに作用してしまったため、コストが高まることが大きな理由で、コストパフォーマンスを考慮して比較的乱れの小さい安定した地点に設置してきた。しかしながら、風車が世界で約180GWまで普及し、徐々に集約化、複雑地形、洋上へ展開が進みつつあり、状況に変化がみられる。風車が高密度化、複雑地形で設定されていくと、他の風車の影響や地形の影響など、流入風の変動について考慮が必要となってくる。このとき、20%不確かさのBEMでの荷重評価、設計では、評価が難しくなる。工学的見地に立つと、風車の荷重変動予測の不確かさが20%で、流入風が確率統計モデルによって与えられるということは、風車が壊れないように設計するためにより大きな安全率を設定する必要が出てくる。これは、風車本体コストを増大させ、ひいては風車による発電事業全体のコスト、事業リスクを増大させてしまうことになる。欧州では、SITEPOTプロジェクトなど、それぞれのサ

イトで最適な風車設計を行うなどコスト低減と信頼性の確保に努めてきた。洋上風力発電では、この信頼性の確保が非常に重要となる。そのため、風車の荷重予測精度を向上させていく必要がでてくる。そこで数値流体力学(CFD)へ期待と関心が高まってきた。

4. 数値流体力学(CFD)への期待と動向

CFDは、連続の式、Navier-Stokes方程式とエネルギー方程式を満足するように、各種数値解析手法によって解を得る方法である。風車のCFDにおいて一番の課題は、広いレイノルズ数範囲、外部流という境界領域と境界条件、そしてそれらに伴う必要な計算資源と時間である。

2 MW風車のレイノルズ数は、 4×10^4 から 6×10^6 の範囲に及ぶ。それは図2に示すように回転数および半径位置ごとに翼素に流入する速度が異なるため、同じ回転数であってもブレード上には2桁オーダーの異なるレイノルズ数の流れ場が存在している。(翼端における流入風速は約100m/s程度) これに加え、風向の変化や流入風の変動などが伴う。これらを解像するための格子解像度が翼周りに必要となる。

また、2 MW風車の直径は約80mあり、風車の後流は、直径の約10倍でその影響がなくなるとされている。回転効果による流れの拡大については、翼素・運動量理論などから最低直径の2倍、風向の変化、斜め流入風の影響などを加味すると、直径の約5倍程度は領域の確保が必要となる。この領域を確保できた場合、境界条件は一様流入条件、これよりも小さい計算領域を設定した場合には、境界条件の設定についても注意が必要となる。

風車の周りには非常に密な格子を、それ以外は疎にするなど、重合格子法、アダプティブメッシュ法などを駆使することで計算格子の最適配置により翼の空力荷重を評価するには可能であるが、後流および他の風車への影響などを評価する場合には、後流領域で数値粘性による

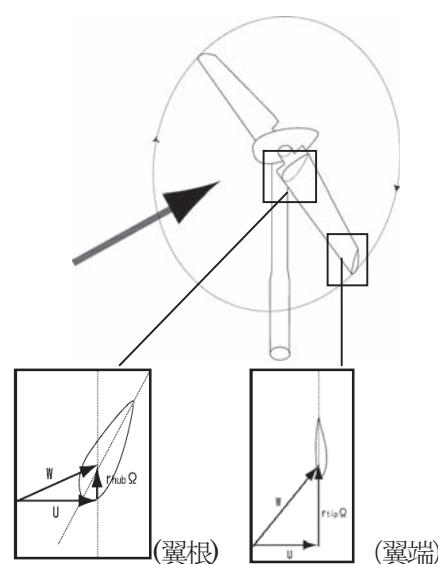


図2 ブレード上速度三角形模式図

渦の減衰が起こらないように一定程度の格子解像度を維持する必要がある。

このような風車の数値シミュレーションにおける課題条件の中で、CFD研究の初期は1993年頃から2000年代初めに頻繁に行われている。欧州では、JOULEプロジェクトとして、フィールド試験、BEM、CFDの検証プロジェクトが開始し、アメリカでもNRELがNASA Ames研究所の風洞試験装置を用いた試験を実施、風車の数値モデリングの検証を実施している。この中でDuque¹⁴、Sorensen¹⁶や著者¹⁵など多くの研究者が、重合格子法、領域分割法により $k-\varepsilon$ 、 $k-\omega$ ²⁰、低レイノルズ数²¹モデルなどのレイノルズ平均Navier-Stokes方程式による解析としてスーパーコンピュータ、PCクラスタなどの大規模計算機による風車翼周りの流れ、トルクやスラストについて計算を行った。その結果設計点付近はBEM同様良い一致を示し、翼の回転による3次元効果を適切に解析できた。しかしながら、翼周りの非定常性、後流の解析については、レイノルズ平均モデルを用いていること、格子解像度が十分達成できていないことなど課題が残った。欧州では、VISCWINDプロジェクト¹⁸として、Navier-Stokes方程式タイプのCFDに対する検証プロジェクトが進められたが、同様の課題を提起している。

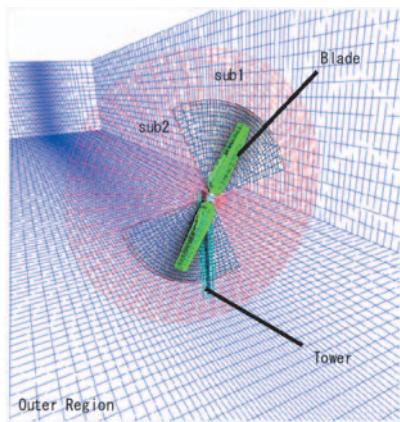


図3 CFD解析初期の重合格子法による風車解析例¹⁵



図4 MEXNEXTプロジェクト風洞実験²²

そのため、翼周りをレイノルズ平均モデル、それ以外をLES (Large Eddy Simulation) によるDESと呼ばれるハイブリッド乱流モデルによる解析が2000年代後半に出現する。これにより風車の後流に関する研究²²⁻²⁴が進む一方、フィールド試験との比較からでは不確かさ、シミュレーションコードごとのばらつきがおおきいことが課題となった。

現在、風車CFDについてはIEA国際研究協力の中で、風車の空力学解析モデル実証として“MEXNEXT”プロジェクトが進んでいる⁴。このプロジェクトでは、ECNの風洞（図4）を用いた数値解析モデルの検証が進められており、翼周りの圧力分布など詳細な測定により、翼端効果やヨー効果などの風車設計において重要な空力データの取得を行っている。同時に翼素・運動量理論などのモデル系とNavier-Stokes解析法など多くの計算モデルが参加し、モデルの検証を進めている²⁵⁻³⁹。

最終レポートはこれから発表される予定であるが、現在のところ、BEMに比べCFD系は、軸方向力や接線方向力などマクロな空力特性については、非常に良い一致を示している（図5、図6）。著者らも本プロジェクトに参加し、図7のような重合格子を作成し、解析を行った。当初、与えられたCADデータから格子を生成し、解析を行ったところ、あまり良い結果にならなかったが、その後、実際のブレード形状を3次元形状計測しその形

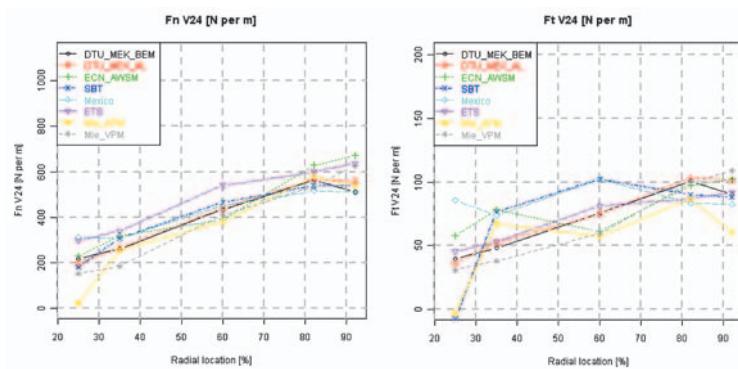


図5 軸方向力（左）と接線方向力（右）の比較²⁴⁻³⁷

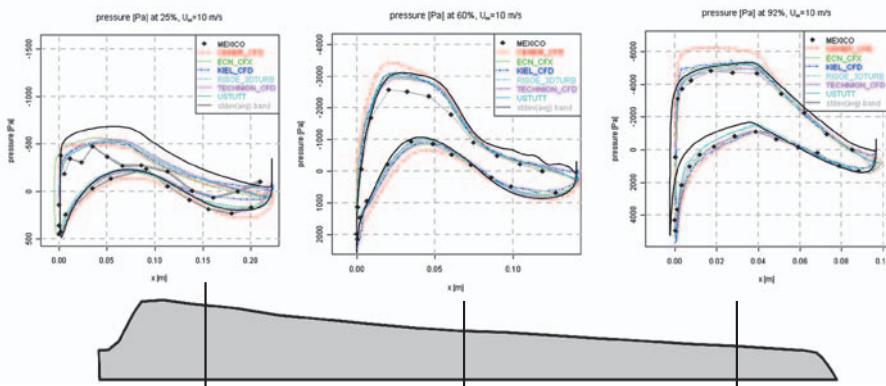


図6 翼面上圧力分布

状を元に格子を生成、解析を行ったところ図6実線のような結果を得ることができた。図6の結果は他の研究者が同様に形状計測結果による形状の修正を行ったものを見ているが、いずれも良い結果を示している。現在、CFD解析結果をもとに流れの後流解析を進めている(図8)。

5. おわりに

風力発電の数値シミュレーションは、物理現象にもと

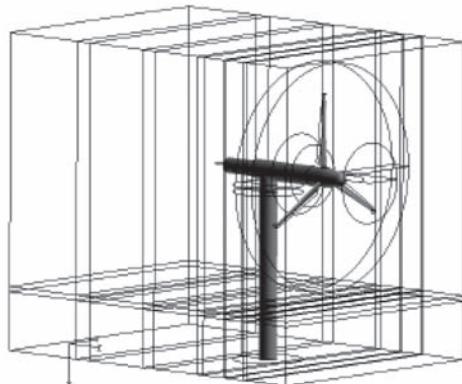


図7 MEXNEXT プロジェクトにおける解析格子

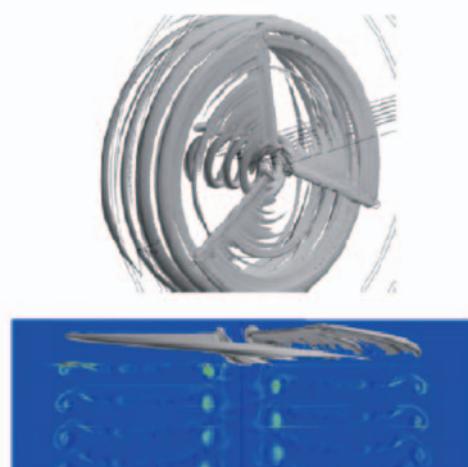


図8 翼周りおよび後流流れ解析結果一例

づくモデル理論から始まり、一様、定常的な流れ解析から数値流体解析を用いた複雑な非定常3次元回転翼周りの解析に展開しつつある。モデル解析の現在の不確かさは風洞試験と比較して15%程度まで改善がなされてきたものの未だ改良していく必要がある。今後、複雑地形や洋上へと展開した際には、より詳細なブレード周りのみならず後流まで含めて検討する必要があり、CFDへの期待が寄せられる。しかしながら、CFDについても未だ発展途上で、ソフトウェアや計算の境界条件によってその結果が大きく変わってしまうこと、計算機資源、コストの課題は未だ大きな壁となっている。今後さらに詳細な検討、研究が進みより精度の高い風車周りの流れ場解析が進むことを期待しているし、また著者自身もCFD研究者の一人として貢献できるよう努力していく。

参考文献

- (1) DTU R., "WAsP-the Wind Atlas Analysis and Application Program."
- (2) 石原孟, 飯塚悟, 2005, "CFDと風力開発," ターボ機械, 33 (2), p. 52-.
- (3) 飯田誠, et. al. 2007, "風車性能評価のための数値サイトキャリブレーションの検討," 第29回30周年記念風力エネルギー利用シンポジウム, 日本風力エネルギー協会, 東京, pp. 255-258.
- (4) 2011, "WAKEBENCH: Benchmarking of Wind Farm Flow Models."
- (5) Froude R. E., 1889, "On the part played in propulsion by differences of fluid pressure," Trans. Inst. Naval Archit., 30.
- (6) Betz A., 1926, Wind-energie und ihre ausnutzung durch windmühlen, Vandenhoeck & Ruprecht.
- (7) van Kuik G. A. M., 1991, "On the limitations of Froude's actuator disc," University of Eindhoven.
- (8) Vries O., 1979, "Fluid dynamic aspects of wind energy conversion," AGARDograph, (AG-243), p. 150.
- (9) Glauert H., 1963, "Windmills and fans," Aerodynamic Theory, W.F. Durand, ed., Division L, Dover, New York, pp. 324-340.

- (10) Wilson R. E., and Lissaman P. B. S., 1974, "Applied aerodynamics of wind power machines," Oregon State University Report, (NSF/R4/N-74113).
- (11) Goorain P., 1972, "An invalid equation in the general momentum theory of the actuator disk," AIAA, 10 (4), pp. 543-544.
- (12) Hansen A. C., 1992, "Yaw dynamics of horizontal axis wind turbines: final report," NREL Technical Report, (442-4822), p. 186.
- (13) A. BjoÈrck, 'Dynamic stall and three-dimensional effects', Final Report for the EC DGXII Joule II Project JOU2-CT93-0345, FFA TN 1995-31, 1995.
- (14) Duque, E.P.N., Van Dam, C.P., Broudeur, R.R. and Chao, D.D.: Navier-Stokes Analysis of Time-Dependent Flows About Wind Turbine Proceedings of the 3rd ASME/JSME joint Fluids Engineering Conference, July18-23, FEDSM99-7814,1999
- (15) M. Iida, C. Arakawa, H. Matsumiya: "Three Dimensional Navier-Stokes Flow-Field Computation Through Horizontal Axis Wind Turbine Blade", 39th AIAA Aerospace Sciences Meeting, pp.340-346, (2001.1)
- (16) Sørensen JN (ed.) VISCWIND, viscous effects on wind turbine blades, ET-AFM-9902, Technical University of Denmark, 1999.
- (17) D. C. Wilcox, Turbulence Modeling for CFD, DCW Industries, La Canada, CA, 1993.
- (18) F. R. Menter, 'Zonal two equation $k-\omega$ models for aerodynamic flows', AIAA Paper 93-2906, 1993.
- (19) J. N. Sorensen, 'Three level viscous ± inviscid interaction technique for the prediction of separated past rotating wing', PhD Thesis, AFM-83-03, Technical University of Denmark, 1986.
- (20) Niels Troldborg, Jens N. Sorensen and Robert Mikkelsen, "Numerical simulations of wake characteristics of a wind turbine in uniform inflow," Wind Energy 2010, 13, 86-99
- (21) L. J. Vermeer, J. N. Sorensen, A. Crespo, "Wind turbine wake aerodynamics," Progress in Aerospace Sciences, 39, (2003), 467-510
- (22) Stefan Ivanell, Jens N. Sorensen, Robert Mikkelsen, Dan Henningson, "Analysis of Numerically Generated Wake Structures," Wind Energy 2009, 12, 63-80
- (23) J. G. Schepers and H. Snel: 'Model Experiments in Controlled Conditions, Final report', ECN-E-07-042, Energy Research Center of the Netherlands, ECN, February 2007, <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2007/e07042.pdf>
- (24) A.K. Kuczaj Virtual Blade Model Simulations of the Mexico experiment, NRG-12810/09.97106, NRG Petten, The Netherlands
- (25) S Breton, C Sibuet, C Masson Using the Actuator Surface Method to Model the Three-Bladed MEXICO Wind Turbine 48th AIAA Aerospace Sciences meeting, January 2010
- (26) S. Schreck et al Rotational Augmentation Disparities in the UAE Phase VI and MEXICO Experiments 'The Science of Making Torque from the Wind', June 201
- (27) S. Gomez-Iradi and X. Munduate: A CFD Investigation of the Influence of Trip-Tape on the MEXICO Wind Turbine Blade Sections 'The Science of Making Torque from the Wind', June 201
- (28) S. Breton, C. Sibuet, C. Masson, Analysis of the inflow conditions of the MEXICO Rotor : comparison between measurements and numerical simulations, 'The Science of Making Torque from the Wind', June 201
- (29) T. Lutz, Near Wake studies of the Mexico Rotor 'EWEA Annual Event', March 2011
- (30) J.G. Schepers, K. Boorsma, C. Kim, T Cho, Results from Mexnext: Analysis of detailed aerodynamic measurements on a 4.5 m diameter rotor placed in the large German Dutch Wind Tunnel DNW, 'EWEA Annual Event', March 2011
- (31) R. Pereira, J.G. Schepers, KM. Pavel, VAlidation of the Beddoes Leishman Dynamic Stall model for Horizontal Axis Wind Turbines using Mexco data, 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting Orlando USA, January 2011
- (32) D. Micallef et al, The relevance of spanwise flows for yawed horizontal-axis wind turbines, 13th International conference on Wind Engineering, ICWE, Amsterdam Holland, July 2011
- (33) Réthoré, P.-E., Sørensen, N.N., Zahle, F., Bechmann, A., Madsen, H.A., "MEXICO Wind Tunnel and Wind Turbine modelled in CFD". AIAA Conference. Honolulu, Hawaii, USA. June 2011
- (34) W.Z. Shen "Actuator Line / Navier Stokes Computations for Flows past the Yawed MEXICO Rotor". Wake Conference. Gotland University, Sweden. June 2011
- (35) N. Sorensen "Near Wake Predictions Behind the MEXICO Rotor in Axial and Yawed Flow Conditions". Wake Conference. Gotland University, Sweden. June 2011
- (36) R. Szasz "LES of the near wake of the MEXICO wind turbine". Wake Conference. Gotland University, Sweden. June 2011
- (37) S. Breton "Numerical Analysis of the Vorticity Structure of the MEXICO Rotor in the Near Wake". Wake Conference. Gotland University, Sweden. June 2011

特集：風力発電の技術開発動向

風力発電における着氷の影響と対策

木村 茂雄^{*1}
KIMURA Shigeo

キーワード：Power production, Windturbine, Cold climate, Icing

1. はじめに

自然エネルギーへの関心が高まって久しい。動機は人によってさまざまであろう。あるものは地球温暖化対策と謳い、またあるものは安全性の高さを理由にあげるかもしれない。テレビをつけても、エネルギー問題を取り上げた番組に出会うことのない日が珍しいほどになった。数多ある自然エネルギー源の中でも発電を目的とすれば現在の世界的な主流は風力となる。風力発電の経済性を決定する一義的な要因は風況である。風力利用先進国においては平野部での立地に限界があるとも言われているが、風況の観点からは、風力タービンの設置対象地域が洋上や山岳地域に向けられることは必然である。洋上に比して建設が容易な山岳地帯への風力利用の展開は速く、ドイツで風力利用が劇的に増加し始めた1986年からの11年後には、オーストリアの海拔1900mの山中に大型風力タービン11台による発電計画が検討・開始されたほどである。他方、風況の良さのみならず、地域社会の容認も容易であったようで、北欧、北米（カナダやアラスカに代表される）といった高緯度地域での利用も盛んとなってきた。こうした地域での風力利用が活発化するにつれ、雪や氷による問題が顕在化し始め、欧州連合（EU）の研究プロジェクトWIND ENERGY PRODUCTION IN COLD CLIMATE (WECO)⁽¹⁾が1996年から開始されるに至った。その後関連したいくつかの研究プロジェクトを経て、IEA Wind Task-19 (International Energy Association)⁽²⁾や COST (European Cooperation in Science and Technology) Action-727 (Measuring and forecasting atmospheric icing on structures)⁽³⁾、Action ES-1002 (Weather Intelligence for Renewable Energies)⁽⁴⁾といったプロジェクトにおいて寒冷環境下での風力利用に関する研究が継続されている。我が国においても風力利用の展開は目覚ましく、2010年において計1742機の風力タービンと2300MWの発電容量を記録している⁽⁵⁾。そしてその多くが雪氷の影響が考えられる日本海に面した地域や山岳丘陵地帯に設置されている。ことに、我が国の日本海側は世界でも有数の豪雪地帯で

あり、このような降雪環境で稼働される風力タービンは、逆に、世界的にみれば稀なケースともいえ、それに伴う問題も十分に考えられることになる。筆者はこれまでに多い数ではないものの国内における風力タービン上の着氷事例や、雪や氷が原因と考えられる問題発生の情報の提供を受けたことがある。また、着氷とは別の目的をもって実施された筆者らによる観測活動の結果から、着氷発生の蓋然性が高いと推定される地域に立地する風力タービンについても、自ら着氷発生の調査・検証を行っていないことや正式な報告がないことから本稿での紹介は控えることとする。特に降雪は風力タービン本体より制御用の風観測機器への影響が大きい。さらに、風力利用全般に目を向ければ、風力タービン建設に先立つ風況観測時にも同様の現象の発生が考えられる。こうした風観測に与える雪氷の影響については、文献6を参照されたい。

本稿では、着氷が風力利用にどのように影響するか、そして現在どのような対策がなされているかを紹介する。

2. 着氷の実際と問題

2.1 着氷とは

着氷（Icing）とは、狭義には大気中に過冷却状態で存在する微小な液相の水滴が物体と衝突することで氷化する現象、あるいは形成された氷を意味し、広義では雪（着雪・冠雪）や着氷性降雨を含める。本稿では、寒冷環境下において、雲や霧を構成する微小な水滴（一般には50ミクロン程度以下）が風で移流し、風力タービンに衝突して着氷を発生させるという狭義の意味の着氷として説明する。

物体上の着氷量の時間的変化は次式で表される⁽⁷⁾。

$$\frac{dM}{dt} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 w U A \quad (1)$$

Mは着氷の質量、wは気流中の単位体積あたりの水滴質量、Uは気流速度、Aは気流に正対する投影面積である。係数 α_1 、 α_2 、 α_3 は以降で略説する。円柱を被衝突物体としたときの、水滴の衝突の様子を図1に示す。水滴aは物体に衝突して着氷を形成する。水滴bは円柱上の衝突限界となり、この水滴の位置より外側にある水滴

原稿受付 2012年1月21日

*1 神奈川工科大学 工学部 機械工学科
〒243-0292 厚木市下荻野1030

(水滴c) は円柱には衝突しない。式(1)中の α_1 は全衝突率を示し、(2)式で定義される。

$$\alpha_1 = \frac{y}{h} \quad (2)$$

α_2 は衝突した水滴が物体表面に（跳ね返り等によらずに）残存する割合を、そして α_3 は残存した水滴のうちでどの程度の割合が氷化するかを示す。式(1)中の α_1 は速度、物体の大きさ (Aに相当)、水滴の大きさの関数であるため、単純な議論はなしえないものの、一般には、気流速 (風速、物体の移動速度) が高いほど着氷量が大きくなることを示唆している。したがって風力タービンでは回転による相対速度の高いブレード上での着氷成長が高く、かつ、ブレードでは根部より先端部でより成長の程度が高くなることが理解される。

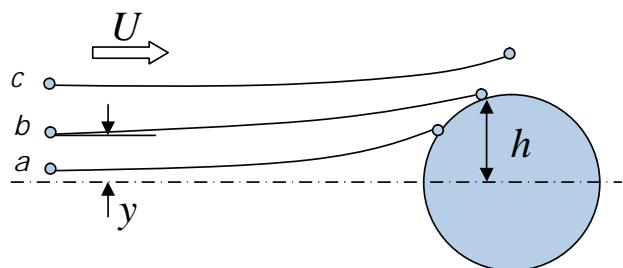


図1 円柱廻りでの微小水滴の挙動

2.2 風力タービン上への着氷の実際

本項では風力タービン上の着氷の例をいくつか紹介する。一般に着氷発生の対象としては、架空電線、航空機、風力タービンが代表格である。航空機では着氷は飛行中に発生し（滑走路での駐機中の冠雪は除く）、そして、飛行安全上の観点から着氷防止策がすぐさまとられるので、特別の目的を持った観測活動でもしない限り着氷の記録を残すことは難しい。架空電線や風力タービンの場合は、着氷の発生が遠隔地で多いことや、着氷発生時の厳しい気象条件から人目に触れる機会が少ない。着氷現象が広く人の知ることとなりにくく原因がまさにここにあると言って過言ではない。

風力タービンが着氷環境に暴露されると、構成要素すべてで着氷が発生する可能性がある。もちろん着氷環境の強度によって、発生部位に異なりが生ずることや、その規模の大小も変わる。加えて、風力タービンは航空機の場合と違い、着氷環境への暴露が長時間に亘ったり、気温の上昇や太陽の日射を受けるなど周辺の気象環境の変化を経験したりするため、着氷形状や範囲も多岐に渡ると同時に、着氷形成機構も複雑なものとなる。また、着氷に関する気象条件の中で、風向風速や気温、気圧、降水量を一定の精度を有して計測する機器は存在するが、大気中の液相の水滴の量（雲水量：Liquid Water Content, g/m³）や水滴の径（μm）とその分布を自動的に独立して測定する機器の開発は十分になされていない^{(8),(9)}。ましてや、厳しい着氷環境では上記の既存の機

器上にも着氷が発生して機能が失われることが多いため、実際には風力タービン上に着氷が発生したときの気象条件を知ることは極めて困難なのである。風力タービンでの着氷現象の調査研究はこのような状況下でなされることは留意する必要がある。

図2 (a) はナセル部を除く風力タービン全体に着氷した様子である⁽¹⁰⁾。北緯70°に近い極域、フィンランド北部のLammasoainiに位置している。出力600kW、ロータ直径44m、ハブ高度41mの風力タービンである。図2 (b) はスイス中央部、アルプス山中のAndermattにあるGuetsch Test Stationの出力600kW、ロータ直径40mの風力タービンブレード上の着氷である⁽¹¹⁾。この写真は風力タービンのナセル上に取り付けられたWebカメラによる常時観測によって撮影された。当該地では前述のCOST Action-727の一環として、着氷現象の把握と風力発電に与える影響調査がなされていた。寒冷環境下での風力利用の先進国であるスウェーデンのAapuaにある風力タービン上の着氷状況を図2 (c) に示す⁽¹²⁾。定格出力1.5MW、ロータ直径82m、ハブ高さは70mのタービンである。当地では着氷関連のプロジェクトにより、前縁部に電気ヒーターを具備したブレードによる着氷対策の可能性の検討、風力タービンナセル上部に着氷検知器（図2 (d)）を設置して着氷環境の計測がなされている。

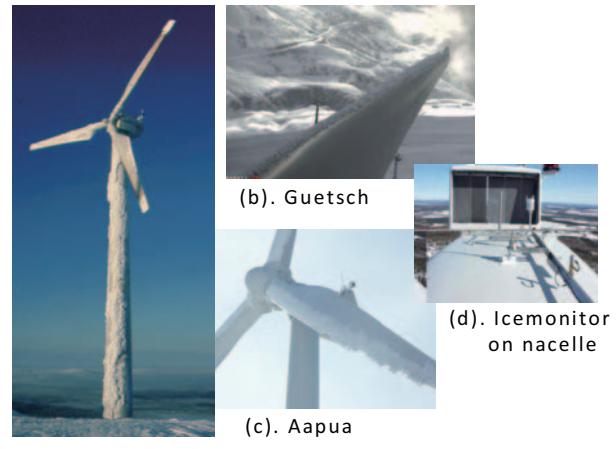


図2 着氷した風力タービンの例

3. 着氷の与える風力タービンへの影響

3.1 ブレード空力特性の変化（劣化）

ブレード上への着氷の最たる影響はブレードの空気力学的特性の劣化である。着氷環境で稼働した風力タービンの出力を図3に示す⁽¹³⁾。着氷が発生しておらない場合でも計測風速に対する風力タービンの出力にはバラツキがみられるものの、着氷環境下での出力は変動が大きいことが特徴である。風速はナセル上の風速計で計測されており、この風速計への着氷も一因であるが、ブレードの空力特性の劣化に依存する割合も大きい。

Seifertらは実際に風力タービンブレード上の着氷の型

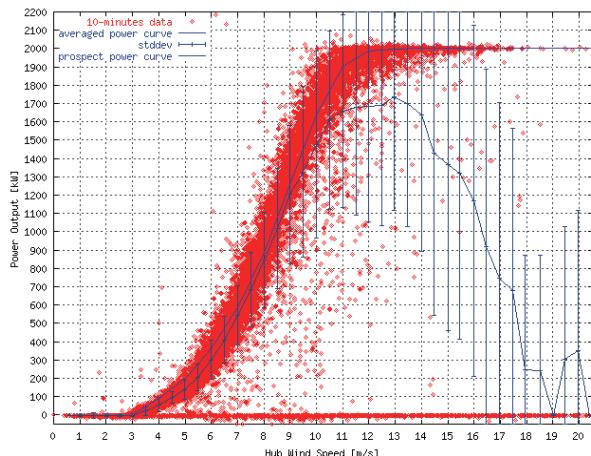


図3 着氷環境下での風力タービンの出力

取りを行い、それをもとに風洞試験用着氷模型を製作して風洞試験を実施した^[14]。図4 (a) に風洞模型を、同じく (b) に風洞測定部に設置された模型の様子を示す。風洞試験結果を図5に示す。図から分かるように、着氷の存在により、抵抗は増加する傾向を示し、形状によっては著しい抵抗の増加が観察される。着氷形状Cのように前縁から前方に伸びた着氷では、最大揚力係数が、無着氷の場合と比して高くなることがしばしば観察されるがこれは、翼弦長が増加することによって増加した揚力を、無着氷時の翼弦長で無次元化することによる。

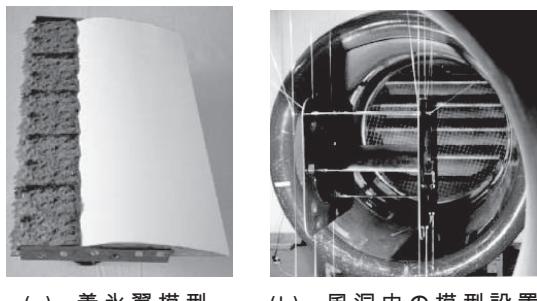


図4 着氷翼の風洞試験

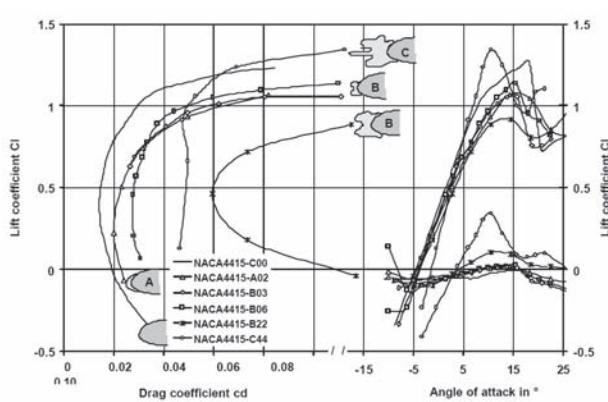


図5 着氷翼の空気力学的特性

3.2 構造強度に与える影響

着氷による風力タービンの構造強度に与える影響を評価する際の問題点は、タービンの構造や材質といったハードと、その設計思想や稼働制御法といったソフトの両面で、風力タービンという構造体を一般化しえないことがある。加えて、着氷条件もさまざま想定しえるわけであるから、一意的な評価は不可能に近い。更に加えて、構造強度を扱おうとしたときに必要な風力タービンの詳細な資料の入手などは全く不可能であることがある。したがって、これまでの研究も、方法論の提示や、仮想的な風力タービンを対象としての結果の例示であった^{[15], [16]}。

ブレードに着氷が発生すると質量が増加し発生空気力が変化することは容易に理解できる。静的には十分に許容しえる範囲であろうが、着氷したままで回転を続けた際のブレードや增速機、タワーへの動的な荷重の増加、あるいは結果としての耐用年数の低減が指摘されている。また、次項でのべるIce throwにより風力タービンの各ブレードにおける着氷質量に不均衡が起こった際の危険性についての指摘もあることから、着氷発生時には風力タービンの運転を停止させることが結論される。運転停止は利用率や稼働率の低下をきたすわけであるから、着氷が予想される地域での風力利用における着氷対策の重要性が改めて確認される。

3.3 Ice throw

風力タービンブレード上の着氷に起因する重要な問題のひとつがIce-throw (氷の飛散) である。図6 (a) に示すように、回転するブレードはあたかも古代の投石器のような役割を果たしてしまう。図6 (b) にみるようなこぶし大、あるいはそれ以上の大きさの氷塊が飛散するのである^[17]。しかも、図にある氷は密度が900kg/m³に近いものであるがために、衝突したときの衝撃力は非常に大きく、付近の建物や、近傍を走行する自動車、あるいは歩行者などへの重大な被害を想定せねばならない。

前記WECOでは、図7に示されるアンケート用紙を風力タービン事業者に配布して飛散した氷片の飛距離を実測する一方、数値解析によって氷片の飛距離を算出し、双方を合わせることで、Ice-throwを回避できる安全距離を次式で提案した。

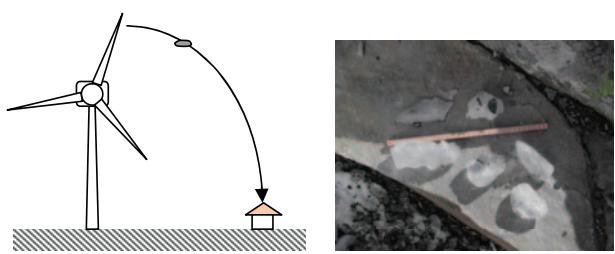


図6 Ice throw

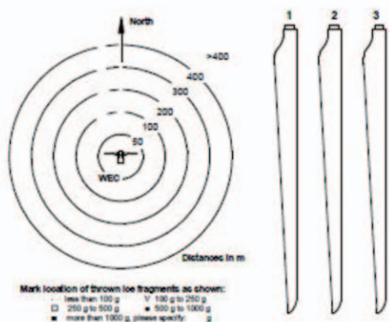


Figure 1 Extract from WECO icing questionnaire regarding ice debris

図7 アンケート用紙

安全距離 = $1.5 \times (\text{ハブ高さ} + \text{ロータ直径})$ (3)
 後述するように、現状において、風力タービンの稼働中、すなわちブレードが回転しているなかでの防水策は、航空機の場合と異なり、未だ十分には確立されておらない。図8中にあるような風力タービン付近を通行する車や歩行者に対して氷飛散への注意喚起が現在のところ唯一の対応策と言える。



図8 着氷飛散の警告板

4. 着氷対策

風力タービンへの雪氷の影響に関する研究が本格的に開始されておよそ20年程度になろうか。風力タービンメーカーが真剣に対策に乗り出したのはここ数年であると記憶している。着氷雪環境下での風力利用が広まり、問題が顕在化したというのが本当のところであろう。後述するようなタービンの運転を停止させることなく対策を講じられるシステムの登場は昨年のことにはすぎない。したがって、これまでに着氷雪の危険性のある地域に建設された多くの風力タービンは十分な着氷雪対策なしで稼働を余儀なくされるか、新たな投資の下、ブレードの交換がなされたに違いない。本項では着氷雪対策についての全般を略説することとする。

4.1 Icing Map

着氷対策そのものではないが、風力タービンの設置の検討時に建設予定地での着氷発生の有無を知りえること

は、着氷問題の発生を回避しえるという経済的な観点と、技術的に困難を伴う建設後の着氷防止策の具体化をさける観点から重要な要素となる。このためにEUのプロジェクトEUMETNET (The Network of European Meteorological Services) SWS (Severe Weather Sensors) -IIにおいて、着氷強度を発生日数で表現したEuropean Icing Mapが作成された(図9)¹⁸。Map作成にあたっては、気温、風速、視程あるいは雲低高度という気象観測データが利用された。解像度は高くないが、着氷危険地帯の大枠を把握できるという利便性から非常に頻繁に利用してきた。

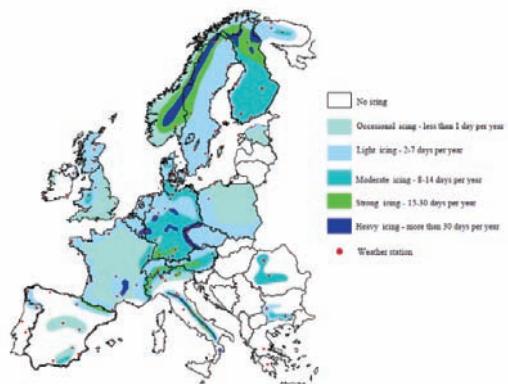


図9 European Icing Map

4.2 着氷検知

加熱装置を作動させる、風力タービンの稼働を停止させるといった能動的な着氷対策には着氷の検知が不可欠である。着氷検知には2種の対象がある。ひとつは、風力タービンが着氷発生環境にあるか否かを判断することであり、他は対象物体表面上に着氷が存在するか否かの判断である。そして、この2種を峻別することが重要であるとともに非常に困難なのである。他方、これら2つの対象において、着氷環境であればその強度を、着氷の存在の有無であればその規模を正しく評価することが効率・経済的な着氷防止策の実施においては要点となる。

着氷検知機器については、前述したCOSTAction-727によって当時市場で利用可能であった着氷検知器の評価がなされた¹⁹。代表的ないくつかの例を紹介する。スウェーデン Combitech社製のIcemonitor Mark-IIを図10 (a) に示す。Icemonitorは、大気着氷現象に関する国際基準であるISO-12494に準拠した唯一のシステムである。当該基準では、直径3cm、長さ50cm以上の円柱を回転を自由にして鉛直に立て、この円柱に着氷を発生せしめ、重量を計測することとなっており、Icemonitorはまさにこの指針に従って製作されている。円柱上の着氷質量を計測できるため、質量の時間変化から着氷強度も推定できるとされている。図10 (b) は、航空機での着氷検知に実績のある米国BF-Goodrich社製Ice Detector0871LH1である。当機は図にみられる長さ

1 inchのプローブが長軸方向に40kHzで振動し、このプローブ上に着氷したときの質量増加による振動数の変化から着氷を検知する機構である。両者とも検知能力は優れているものの、厳しい着氷環境での長期に渡る計測時には、装置全体が着氷に覆われてしまう問題を抱えていることが指摘されている。

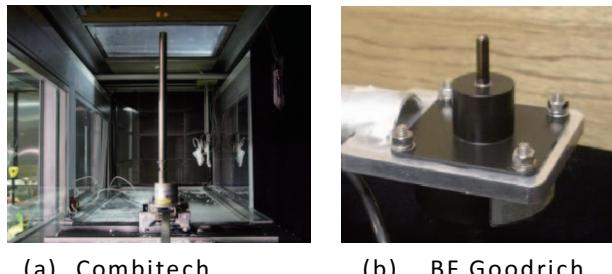


図10 着氷検知器（着氷環境検知用）

これに対し、風力タービンブレード上の着氷の有無を直接に検知する装置がある。一つは赤外線によるブレード上の着氷の有無を直接観察する装置であり、もうひとつはブレード質量を計測し、無着氷時の質量からの変化をもって着氷量とできるシステムである。前者（Infralytec社製 Ice Sensor for rotor blade）は図11（a）にあるように赤外線の送受信部を光ファイバで計測器本体と接続されて構成してある。送受信部はブレード前縁部に小孔をあけて取り付けられ、先端から赤外線を照射し、受信部で反射を測定して着氷の有無を判定する。計測器本体には3本の光ファイバが取り付けられており、風力タービンへの適用の際には、1枚のブレードの半径方向3か所か、多くの風力タービンが3枚ブレードであるためそれらそれぞれの任意の半径位置での着氷検知を可能としている。著者らによる着氷風洞を用いての当該機器の性能評価からは、わずかな量の着氷の検知能力があることが確認されている²⁰。他方、着氷量の計測法の代表はRotor Monitoring System (RMS) と呼ばれるシステム（Incensys社製）で、図11（b）に示すように、ブレード根部に張られた歪センサからの出力を用いてブレードの質量を計測する²¹。6000kgのブレード質量に対



図11 着氷検知器（着氷の存在検知）

し20kgの変化を測定しえる精度を有しているとのことである。真偽のほどは不明であるが、近年当該システムを搭載した寒冷地用の風力タービンが建設されていると聞く。

4.3 対策

風力タービンブレード上に発生する着氷に留意すべきはこれまで述べてきたとおりである。それではこのブレード上の着氷発生をどのように防ぐか、あるいは発生した着氷にどう対処するかを簡単に述べることとしたい。

防水策には、防水（anti-icing）と除氷（de-icing）という2つの概念がある。前者は着氷発生そのものを防止すること、後者は発生した着氷をいかに除去するかを意味する。航空機、中でも大型のジェット機では前者を、小型機では後者を選択する。風力タービンでは着氷研究の歴史の短さゆえであろうか、着氷環境には、着氷対策の施されている風力タービンとそうでないものが混在し、かつ、現状では後者が圧倒的な数を占めている。航空機と異なり着氷対策についての基準がないため、どのように策を講ずるかについては、着氷環境、エネルギー取得状況、立地などによってさまざまである。

防水、除氷に関わらず、現在の主流となっている着氷防止方式はブレード前縁部に装着された電気ヒータである。かつてはブレード根部に大型のヒータ付送風機を置き、ここから熱風をブレード内部を通してブレード全体を暖めるような提案もあった。さらに、現状では除氷方式が一般となっている（防水方式は後述）。こうした着氷対策がなされている場合とそうでない場合の風力タービンの運転制御方式の1例を紹介する。

A. 対策なしの場合

- ブレード上の着氷を検知、あるいは出力低下などの現象が発生するとロータの回転を停止する
- 気温摂氏2度以上の状態が6時間継続した場合には運転を再開する

B. ヒータ具備の場合

- ブレード上の着氷を検知、あるいは出力低下などの現象が発生するとロータの回転を停止する
- ヒータによりブレードを3時間加熱する
- その後運転を再開する

着氷による問題の一つが稼働率および利用率の低下であることは前述したとおりである。この運転制御方式に従う場合、着氷対策がなされておらないと厳冬期には数日（あるいはさらに長期に）にわたり風力タービンの稼働が制限されてしまうことが予想される。除氷装置を設けた場合ですら着氷が発生すると3時間エネルギー取得に寄与しないことになり、かつ、着氷発生時の風況の比較的よいことを加味すれば着氷の影響の大なることが理解されよう。

近年防水策が講じられた風力タービンが現れた。Technical Research Center of Finland (VTT) が開

発したブレード加熱システムを導入したタービンである^{22,23}。図12 (a) にみるように、ブレード前縁部にヒータを組み込んだマットが装着されている。半径方向の加熱範囲はブレード先端から約2/3である(図12 (b) 参照)。前述の除氷型との大きな違いは、当該システムでは着氷対策のため風力タービンの稼働を停止する必要のないことである。これにより着氷対策に要する電力量(年間発電量の2%に相当)を費やしても着氷による損失電力量(年間発電量の10%)を十分に減少させることができるとされている。



(a). Heater mat (b). ブレードの装着された
加熱システム

図12 風力タービン用防水装置

5. おわりに

風力タービン上の着氷雪の影響と対策について略説した。本稿で対象とした風力タービンは基本的には数MWの出力の大型機であった。そのため、中小規模のタービンについての議論がなされておらないという指摘を受けるかもしれない。また、参考とした資料は主に欧州でなされた研究成果であるため、我が国で懸念される雪の影響についての説明はなしえなかった。今後の研究課題としたい。

今回、本稿を執筆するにあたり、各種の文献を調査したり改めて読み直したりすることで、かつて見過ごした個所や新たな知見を得るなど筆者自身にとって非常に勉強となつた。良き機会をお与えくださったと、関係各位に深く感謝する次第である。紙面を借りて御礼を申し上げます。

参考文献

- (1) Tammelin, B., M. Cavaliere, H. Holttinen, C. Morgan, H. Seifert, K. Santti, WIND ENERGY PRODUCTION IN COLD CLIMATE (WECO) , (1998), Finnish Meteorological Institute
- (2) IEA Wind Task-19, <http://arcticwind.vtt.fi/>
- (3) Heimo, Alain, COST 727 Action Final Report http://www.meteotest.ch/cost727/eisundfels/pdf/heimo_EundF_07.pdf
- (4) COST Action ES 1002, http://www.cost.eu/domains_actions/essem/Actions/ES1002
- (5) IEA Wind 2010 Annual Report, 2010, IEA Wind
- (6) 木村茂雄, 風観測に及ぼす着氷雪の影響, 風工学会誌, Vol.37, No.1, (2012) に掲載予定
- (7) Makkonen, Lasse, Models for the growth of rime, glaze, icicles and wet snow on structures, Phil. Trans. R. Soc. Lond. A (2000) 358, , (2000), pp.2913-2939, The Royal Society
- (8) Fikke Svein., et al, COST 727 Action Scientific Report "Measuring and forecasting atmospheric icing on structures", (2010), European Union
- (9) Kimura, S., T. Sato, Y. Yamagishi and A. Heimo, Calibration of the off-the-shelf ice detectors by icing wind tunnel test, COST Workshop in Prague, Prague, Czech, (2008)
- (10) Tammelin, B. , Seifert, H., Wind energy production in cold climate. In: Proceedings of the EWEC, Nice, France 1-5, (1999), pp. 1005-1008
- (11) Dierer, S., R. Oechslin, R. Cattin, Wind turbines in icing conditions: performance and prediction, EMS2010, (2010)
- (12) Ronsten, Göran, Swedish cold climate wind energy projects, Ice & Rocks III, Zadar, Croatia, (2010-5)
- (13) Westerhellweg, Annette, Kai Mönnich, Evaluation of Operational Data in Respect to Production Losses due to Icing, IWAIS2008, (2008)
- (14) Seifert, H. and Richert, F., Aerodynamics of iced airfoils and their influence on loads and power production, EWEC' 97, Proceedings of the International Conference, Dublin, Ireland, (1997-10), pp.458-463.
- (15) Antikainen, Petteri, Sami Peurainen, ICE LOADS, CASE STUDY, The Proc. of BOREAS V, Levi, Finland, (2000-11), Finnish Meteorological Institute
- (16) Frohboese, Peter, Andreas Anders, Effects of Icing on Wind Turbine Fatigue Loads, Journal of Physics: Conference Series 75 012061, (2007)
- (17) Heimo, Alain, COST-727 Action, Measuring and forecasting atmospheric icing on structures, COST Meeting, Brussels, Belgium, (2006)
- (18) Tammelin, Bengt, et al., Improvements of sever weather measurements and sensors, Final Report and Annex of EUMETNET SWS II, (2003) Finnish Meteorological Institute
- (19) Kimura, Shigeo, T. Sato, Y. Yamagishi and H. Morikawa, Evaluation of ice detecting sensors by icing wind tunnel test. Proceedings of the 13th IWAIS Conference, Andermatt, Switzerland, (2009-9)
- (20) Kimura, S., T. Sato, F. Holger, B. Tammelin, Wind Tunnel Test for a New Ice Detector, BOREAS VII International Conference, Levi, Finland, (2002), Finnish Meteorological Institute
- (21) King, Toby, Wind Energy Improving Turbine Energy Generation and Reliability in Cold Climates, Winterwind2008, Norkopping, Sweden, (2008-12)
- (22) Peltola, Esa, VTT rotor ice prevention system development, Technical Research Center of Finland, 2012
- (23) Nordex SE : Nordex builds Sweden's largest farm, Press release, 11 May 2011

特集：風力発電の技術開発動向

風力発電装置用軸受の技術動向について

池田 博志^{*1}
IKEDA Hiroshi堀 径生^{*1}
HORI Michio山田 悠介^{*1}
YAMADA Yuusuke

キーワード：風力発電、軸受、大型化、状態監視、絶縁

1. はじめに

風力発電は二酸化炭素を排出せず、環境への影響が最も少ないクリーンエネルギーとして近年、飛躍的発展を遂げてきた。

2010年の世界の風力発電総設備容量は約205GW⁽¹⁾に到達した。最近の経済状況から多少の足踏みは見られるが、今後も大きな成長が見込まれ、陸上から洋上へ、発電効率の点からより大型化に向けた対応が加速している。

風車には水平軸、垂直軸等多くの形式があるが、代表的な3枚ブレード（翼）で水平軸プロペラ式の大型風車を紹介する。図1は主流となっている誘導発電タイプのナセル部を示したものである。ブレードで風エネルギーを受け、ロータが回転し、発電機で電気エネルギーに変換する機構である。

これまでNTNでは、風力発電装置の主軸、增速機、発電機などに用いられる各種軸受について、要求特性に合致した軸受を供給してきた。ここでは、これまでの技術動向について紹介する。

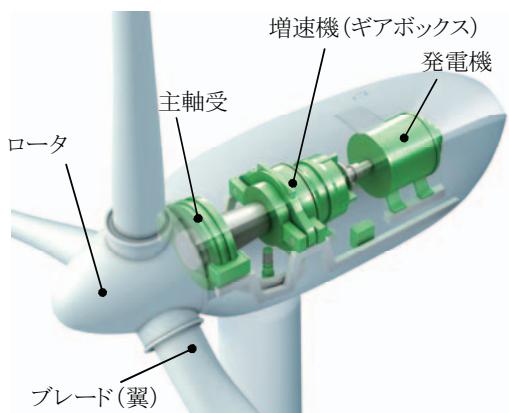


図1 風力発電装置の構造

2. 主軸受

BTM Consult⁽¹⁾によれば、2005年に1.28MW/台であった新規設置風車の平均発電量は、2010年には1.67MW/台に達し（図2）、風車は年々大型化している。更に近

原稿受付 2012年1月20日

*1 NTN(株) 産業機械事業本部 新エネルギー技術部
〒511-8678 桑名市東方尾弓田3066

年は、風車メーカー各社が洋上を見据えた大型風車の開発に乗り出しており、今後も引き続き大型化が進むと予想される。

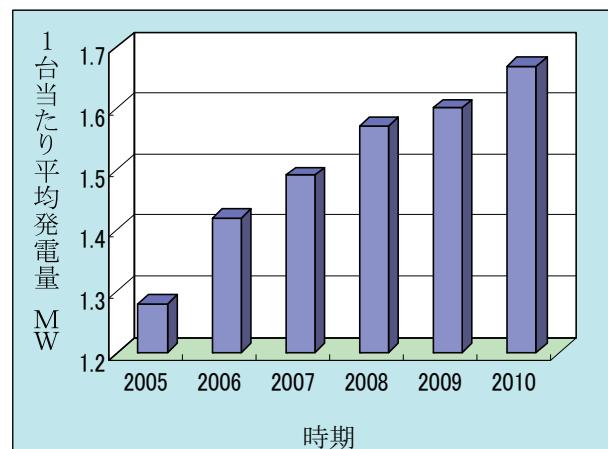


図2 全世界の新規設置風車の1台当たり平均発電量

こうした状況の中、ロータを支える主軸受もまた大型化の一途を辿っているが、その構成には変化が生じている。すなわち、これまで採用例の多かった自動調心ころ軸受、3列円筒ころ軸受で主軸を支持する構成が、入力荷重の増大に伴って表1に示す構成2、3へと変化してきている。

構成1は、主軸を2つの自動調心ころ軸受（図3）で支持する構成であり、軸の伸縮位置や両軸受の荷重分配の点でブレード側を自由側軸受とし、発電機側を固定側軸受とすることが多い。自由側軸受では、外輪と軸受箱が摺動するため、はめあいをすきまばめとする。また、固定側軸受は、主軸の軸方向変位を抑えるため内部すきまを極力小さくした設計とする。本構成の利点は、取付け誤差の許容能力が高い点であり、両軸受の軸受箱が各々独立して設計できるため、ナセルの軽量化と低コスト化に貢献することができる。

構成2は、円筒ころ軸受と内向きの複列円すいころ軸受の構成であり、両軸受を同軸度が管理された一体型の軸受箱に納める必要がある。しかしながら、自由側の円筒ころ軸受は軸の伸縮を軌道面でスムーズに吸収できるほか、固定側の円すいころ軸受は接触角を最適化してア

表1 大型風車の主軸構成

構成	概念図
1	ブレード ブレード側 自由側 固定側 発電機側
2	ブレード ブレード側 自由側 固定側 発電機側
3	ブレード ブレード側 自由側 発電機側



図3 自動調心ころ軸受 (外径: φ1.6m)

キシャル荷重負荷能力を高めることができる。さらに、円すいころ軸受には予圧を付与することで、主軸の特に軸方向の剛性を高めることができる。

構成3は、主軸を外向きの複列円すいころ軸受(図4)1つで支持する構成であり、コンパクトな設計が可能である。また予圧を付与することで、あらゆる方向の剛性を高めることができる。そのため、主軸受の剛性が発電機ロータとステータ間のギャップに直接影響するダイレクトドライブ方式の風車にも適している。

NTNでは上記で紹介した全ての主軸受の製造と販売を行っており、構造解析をはじめとする解析技術にも力を入れている。

図5に解析に使用した主軸構造を示す。外部荷重によって軸受と共に軸受箱や軸も変形する。風車の大型化に伴って外部荷重による変形量が軸受すきまに与える影響が大きくなり、解析上、変形を考慮する必要がある。当社では、構造全体の変形の影響も考慮したうえで設計検討を行い、最適な軸受仕様の決定を行っている。

図5では、ブレード側に複列円すいころ軸受、増速機側に円筒ころ軸受を適用した構造の事例を示している。



図4 複列円すいころ軸受 (外径: φ2.5m)

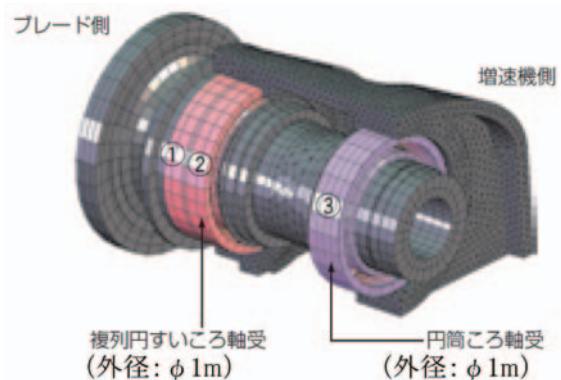


図5 解析に使用した主軸構造

軸受箱などの変形の影響を調べた解析例を図6に示す。図6は、変形を考慮する場合と考慮しない場合の2条件についての転動体荷重分布を示している。

FEM解析では通常、“弾性体”要素を用いた変形解析を行う。

軸受箱、軸受の変形を考慮した場合、変形により負荷圏が広がるため、荷重ピークの緩和が起こり、全体として転動体荷重が低減されていることが示されている。軸受寿命については、剛体とした場合に比べて、円すいころ軸受では約20%増、円筒ころ軸受では10%増の結果が得られている。

本例では変形により寿命増の結果となったが、条件いかんでは軸受寿命の大幅減となる場合も懸念されるため、当社では装置全体の変形解析を行い、軸受の最適設計を行っている。

3. 増速機用軸受

増速機はロータの回転速度 $10 \sim 30\text{min}^{-1}$ を歯車増速機構により誘導発電機に必要な回転速度(一般に $1200 \sim 1800\text{min}^{-1}$)まで増速する装置である。増速機は風車で重要な部位であり、現在のガイドラインは米国歯車製造者協会(AGMA)⁽¹⁾や、IECとISOによって規格化されている(ISO81400-4)。

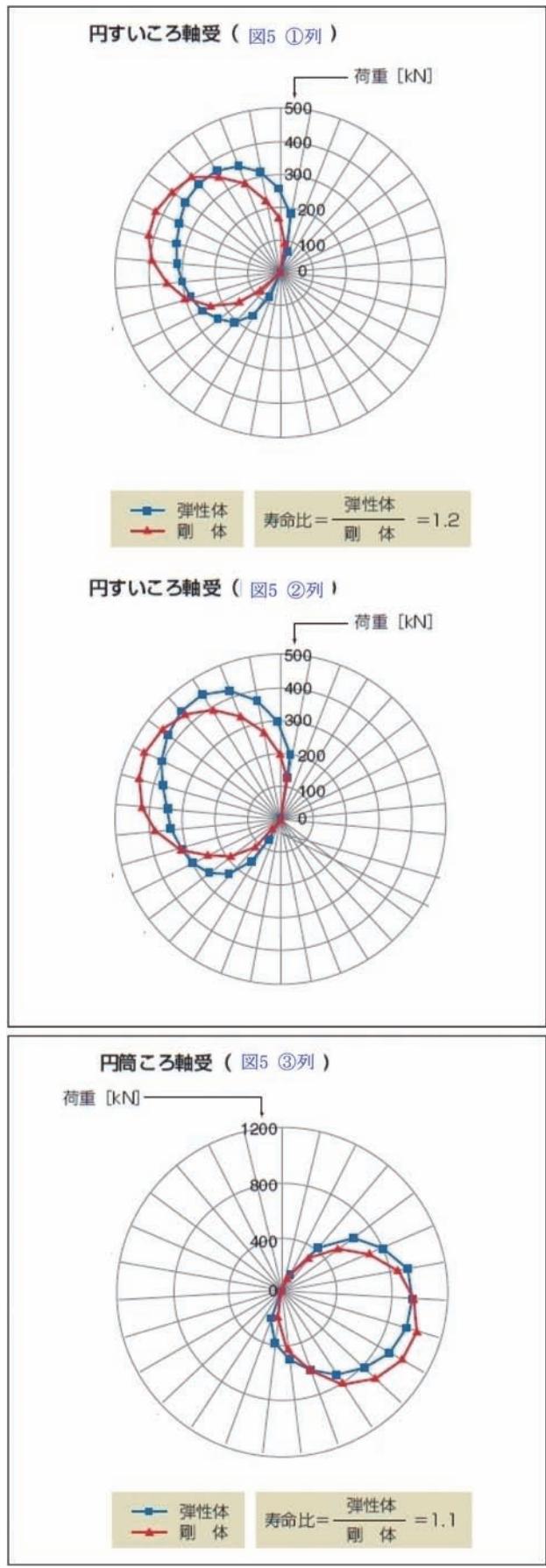


図 6 軸受の転動体荷重分布

代表的な増速機の構造を図 7 に示す。ロータの回転（入力軸）は遊星のキャリアを駆動し、低速軸、中間軸、高速軸へと伝えられ速度を上げ出力される。表 2 に各部位に使用される軸受を示す。

近年では風車の大型化により入力トルクが大きくなり、キャリア軸受、遊星部の大型化も進んでいる。一方で軽量化の必要性から遊星軸受の外輪をギアと一体化する例や、2段遊星タイプもある。

トルク変動がある使用条件の中で、より高い信頼性と長寿命を達成するため、ころ外径面形状の最適化を行っている。図 8 にころの接触応力を示す。ころ外径面形状の最適化を行うことで高荷重が負荷された場合でも標準形状と比較し、エッジ応力を緩和することができる。

また高速性が必要となる中・高速軸では比較的低荷重となるため、滑りによる表面損傷を予防するこことでより

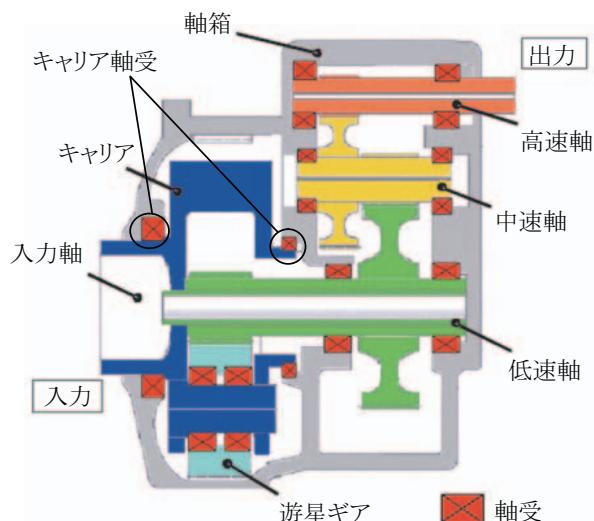


図 7 増速機の構造

表 2 増速機使用軸受形式

部位	軸受形式	
高速軸	固定側	円すいころ軸受、円筒ころ軸受、4点接触玉軸受
	自由側	円筒ころ軸受
中間軸	固定側	円すいころ軸受、円筒ころ軸受、4点接触玉軸受
	自由側	円筒ころ軸受
低速軸	固定側	自動調心ころ軸受、円すいころ軸受
	自由側	自動調心ころ軸受、円筒ころ軸受、総ころ円筒ころ軸受
遊星ギア	円筒ころ軸受、円すいころ軸受	
キャリア	総ころ円筒ころ軸受、円筒ころ軸受、円すいころ軸受	

信頼性の向上が可能である。そのため表面損傷に対する強化策として、内外輪及びころに適用する特殊表面処理を開発した（図9）。特殊表面処理を施すことで油膜形成能力を高め、金属接触による表面損傷を防ぐことができる。図10は標準品と特殊表面処理品の耐スミアリング性能を比較した結果であり、2倍以上の耐スミアリング性が得られている。

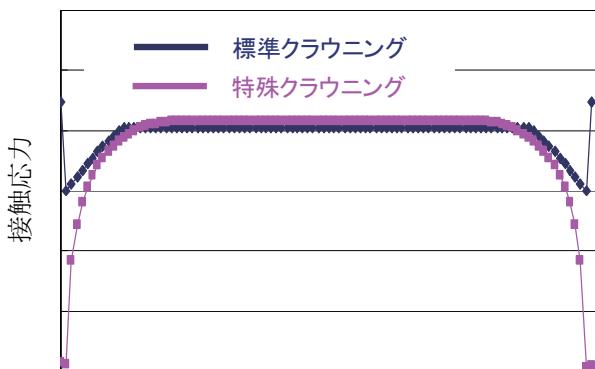


図8 接触応力の比較



図9 特殊表面処理軸受

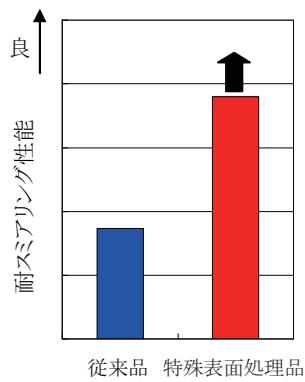


図10 スミアリング試験結果

4. 発電機用軸受

発電機には通常深溝玉軸受が回転子両側を支持配列されており、グリース潤滑で使用される。1.5MWクラスでは軸径が ϕ 150mmを超える。

発電機に使用する軸受では、電食を防止することが必要である。電食とは軸受内部を電流が通過し、転動体と軌道面の接触面にスパーク現象が発生し、軸受の軌道面及び転動面に生じる損傷である。電食が進展した場合には横縞模様（図11）が生じ、摩耗や形状変化により振動を引き起し軸受として機能しなくなる。

電食防止のため、図12に示す軸受外輪の外径部から側面に特殊セラミックスを溶射した絶縁軸受や鋼球の代わりにセラミックスボールを使用した絶縁軸受が使用されるが、ここではセラミックスを溶射した絶縁軸受について紹介する。セラミックス溶射を用いた絶縁軸受は、抵

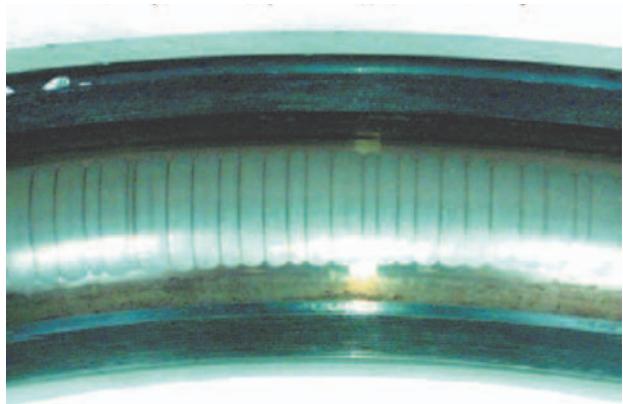


図11 電食破損事例写真

抗値100MΩ以上で、絶縁破壊電圧2kV以上の絶縁性能を持つ。

本軸受は各種使用環境でも高い絶縁性能を発揮するため、NTNでは絶縁軸受“MEGA OHM（メガオームTM）”シリーズとして設定し、風力発電装置向けに留まらず、鉄道車両用主電動機、汎用モータなど幅広く御使用頂いている。

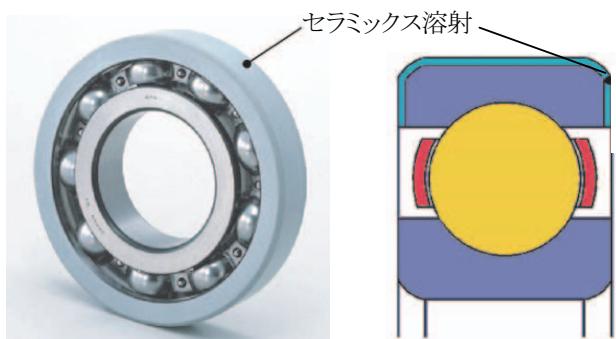


図12 セラミックス絶縁軸受

5. 状態監視システム

風車は風況から、山間地や海岸沿いなどの都会から離れた遠隔地に設置されることが多い。また、欧州では陸上と比較して風況が安定する海上風車の建設が盛んになっている。そのため、遠隔地の風車へのアクセスはメンテナンスを実施する上で負担となっている。

また風車の大型化により、重大故障が発生するとその損害は膨大となる傾向にある。

このような問題を解決する方法として風力発電装置用の状態監視システム（Condition Monitoring System: CMS）が注目されている。CMSを適用することにより、風力発電装置の状態を遠隔地から監視でき、早期の異常検知が可能となる。2次的な損傷を防止することにより、風車の稼働率向上が期待される。

当社では、一層の利便性を高めるため、ナセル内への運搬や設置場所の選定に有利なように、データ収集装置の小型化と、信頼性の高い診断結果を提供することを目標にCMSの開発を進めている。

CMSは、データ収集装置、データ管理ソフト、データ監視・分析ソフトから構成される（図13）。

データ収集装置は、ナセル内に設置され、主軸受、增速機、発電機に付けた加速度センサからの振動データと主軸の回転速度や発電量などの運転情報を収集する。この収集されたデータは、データサーバに送信され、同一の運転状態におけるしきい値と比較、判定される。同じ運転状態のデータと比較することによって安定した診断結果が得られる。

診断結果や振動データは、LANに接続されたPC上のデータ監視・分析ソフトを用いて遠隔地からでも常時監視できる。さらに異常警報はEmailにて担当者に自動送信する機能を持っているため、常時監視は必要ない。さらに、振動データの分析ツールを使用した詳細な診断も可能である。

対象とする故障モードは、軸受、歯車の損傷以外にブレードのアンバランスやミスマライメント、ナセルの異常振動であり、故障モードにより振動の周波数帯域が異なるため、低周波用の加速度センサと高周波用の加速度センサの2種類のセンサを用意している。

6. おわりに

風力発電は今後更に拡大していく期待の新エネルギーであるが、その使用環境、経済性、信頼性に対する要求は高まる傾向にある。

NTNでは、これらの要求に応え、風力発電の発展に貢献することが出来るよう、更なる開発、解析を進める所存である。

参考文献

- (1) BTM Consult : Wind Market Update 2010

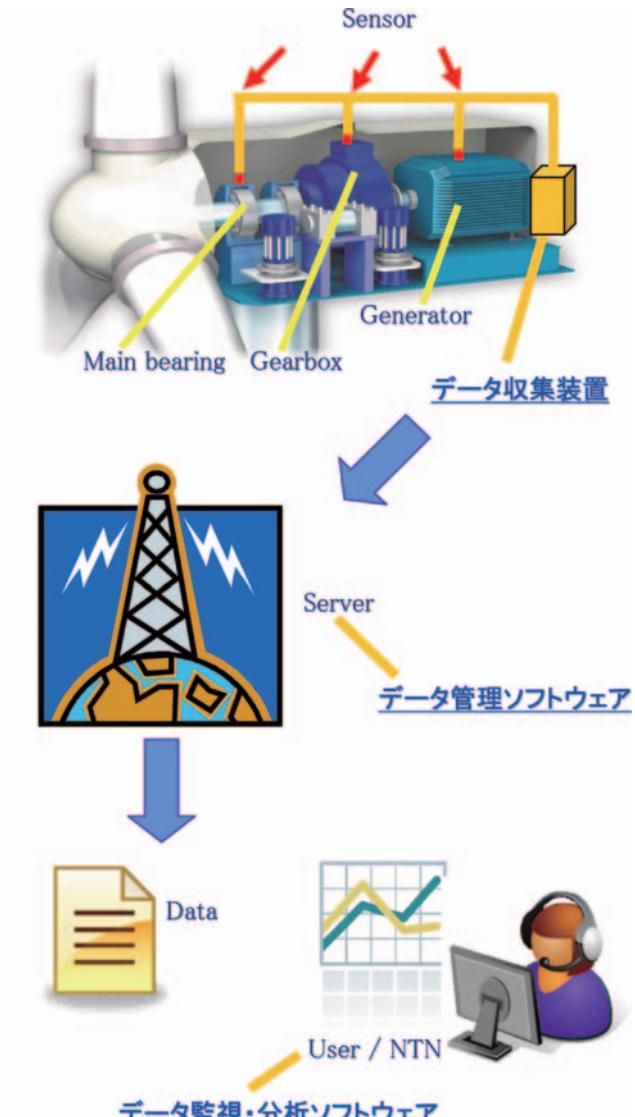


図13 CMSの構成

特集：風力発電の技術開発動向

小型風車に関する研究開発の動向

平野 孝典^{*1}
HIRANO Takanori

キーワード：Wind Turbine, Micro Wind Turbine, Vertical Axis Type, Horizontal Axis Type, Performance

1. はじめに

風力発電に使用される風車には種々の大きさや形式がある。現在、世界の多くの国で風力発電が行われているが、その主流は水平軸型（プロペラ型）風車である。最近は特に大型化による大規模発電が進んでおり、風車直径が100mを超える巨大な風車も登場している。それに対し小型風車は、JISにおいて風車直径が16m以下（受風面積200m²以下）、電気事業法において出力規模が20kW未満の風車として分類される。ただし一般的には風車直径が7m以下（受風面積40m²未満）のものを小型風力発電として位置付けている。また、出力規模1kW未満のものは特にマイクロ風力発電と呼ばれる。

風車の形式としては、水平軸型風車と垂直軸型風車の2種類に分類される。図1に風車の形式と種類を示す。風力発電に使用されるのは揚力型風車である。大型風力発電では水平軸型のプロペラ型風車が使用されるが、小型風力発電では、水平軸型だけでなく垂直軸型風車も使用される。特に日本では垂直軸型風車の方が適しているといえる。その理由として2つの要因が挙げられる。1つは気候的要因で、日本では風向が常に変化するので風向きを問わない垂直軸型風車が有利である。もう一つは構造的要因である。水平軸型風車は、効率が良く大型化が容易である反面、発電機などの重量物も風車上部に設置する必要があり、設置や機器メンテナンス時の操作

性に問題がある。また、風車回転面を常に風向に合わせる機構が必要である。それに対し垂直軸型風車は発電機などの重量物を地上に設置できるので、設置や機器メンテナンスが容易となる。ただし、現状では垂直軸型風力発電機はあまり普及していない。これは自己起動時に大きなトルクが必要で低速風域の機動性が悪いこと、起動後のトルクが低く発電効率が劣るためである。しかし、これらの欠点はかなり改善されてきているので、今後普及が進むことが期待される。

大型風車による風力発電は、原子力発電や火力発電に代わる発電設備としての役割を担うものであり、風車価格、設置コスト、運用およびメンテナンス費用は高い。また、設置場所も制限される。それに対し小型風車による風力発電は、地域分散型発電あるいは個人用発電として地産地消の街づくりに利用できる、設置面積が小さく場所を取らないので設置場所の制限は緩い、工期が短く設置コストやメンテナンスコストは低くて済む、バッテリと組み合わせて非常用・防災用電源として利用できる、などの特徴がある。ただしこのような小電力供給としての利用のみならず、小型風車を数十機並べたウインドファームで大電力供給が可能である。この場合、故障やメンテナンスで数機が停止しても、供給電力の変動を抑えられるというメリットもある。

小型風力発電の機能性として以下の3つの要素が重要なとなる。

- (1) 低騒音性：市街地での使用が想定されるので、低騒音であることが重要である。そのためには風切音の少ない羽構造の開発が必要である。
- (2) 高効率性：発電効率が高いことが必要であるが、特に損失の少ない発電制御システムや放電制御が重要である。
- (3) 耐久性・安全性：電気的制御と機械的制御による強風時の安全性の確保が重要である。

これらの要素における課題や問題点を解決するための研究開発が行われており、市販されている小型風力発電機に応用されている。

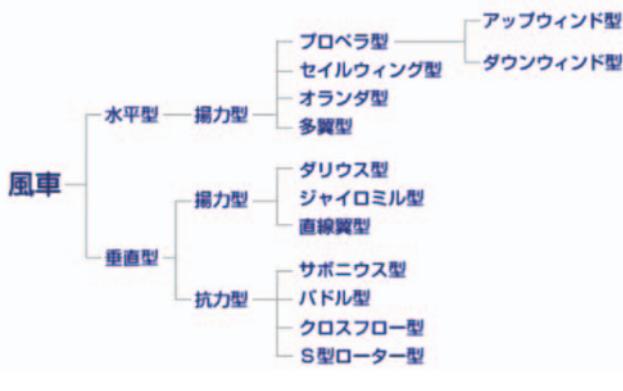


図1 風車の種類

原稿受付 2012年3月2日

*1 拓殖大学工学部機械システム工学科 助教
〒193-0985 東京都八王子市館町815-1

2. 市販の小型風車

ここでは興味深い市販の小型風車について紹介する。

2.1 TOMOの風YG-4000 (株式会社ビルメン鹿児島)⁽¹⁾

図2に写真を、表1に仕様を示す。定格出力4kwhの水平軸型小型風力発電機で、自動ピッチ角調整機能、内蔵フライホイールによる惰性補助機能を有する。さらに独自の設計思想から生まれたブレードにより、2m/s程度の弱風でも発電可能である。また20m/s前後の強風でもブレードが自動的にトルク重視の角度に調整され、過電流・過電圧が生じないような設計が施されている。台風等の最強風時には、自動的に運転を停止してブレードの破損を防ぐ。設置面積も3m四方(9m²)と小さい。



図2 YG-4000⁽¹⁾

表1 TOMOの風YG-4000 諸元⁽¹⁾

ローター直徑	4160mm
ブレード枚数	3枚
定格出力	4000wh (風速12m/s時)
システム電圧	48V
本体重量	380kg
材質	本体: アルミニウム・ステンレス ブレード: FRP
ブレード・ローター制御	自動ピッチ角可変機能・内蔵フライホイール
発電機形式	永久磁石コアレス方式
カットイン風速	1.5m/s
カットアウト風速	20m/s
耐風速	60m/s
強風対策	自動ピッチ角可変機能・自動緊急停止装置
必要設置面積	9m ²
電力制御	インバータ(AC/DC), バッテリー
出力電気方式	三相交流 コントローラで直流にして出力
出力周波数	50/60Hz (コントローラにより初期設定変更可能)

2.2 AIRDOLPHIN (ゼファー株式会社)⁽²⁾

定格出力1kW(12.5m/s)、最大出力3.2kW(23m/s以上)の水平軸型風車で、図3に示すように、姿勢制御用可動式尾翼「スウィング・ラダー」を採用し、乱流下での風向整合を改善している。これによりロータ受風面が常に最大風圧方向に対して瞬時に追従する事ができるので、発電量が大幅に増加する。羽根には図4に示すサイレント・ディスラプタブレードを採用し、大幅な騒音低減を実現している。

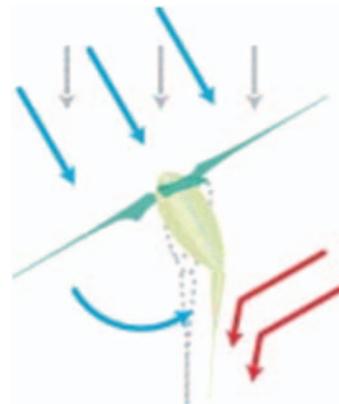


図3 スウィング・ラダー⁽²⁾



図4 サイレント・ディスラプタブレード⁽²⁾

2.3 スパイラルマグナス風車 (MECARO)⁽³⁾

水平軸型風車であるが、通常のプロペラの代りにフィンを付けた5本のスパイラル円柱翼(シリンド)をモータで回転させ、風を受けることで風車を回す。図5に概略図を示す。出力は10kWである。一般のプロペラ型風車の1/4程度の低い回転数のため、騒音レベルは、風の音(暗騒音)と区別がつかないほど静かであり、回転数

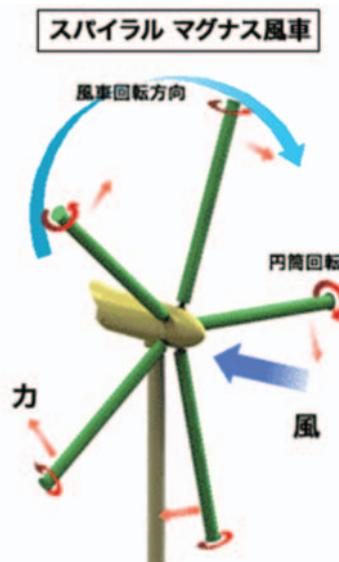


図5 スパイラルマグナス風車⁽³⁾

が遅いので、近年問題となっているバードストライク現象が起こりにくいといった特徴を有する。

2.4 風レンズ風車（株式会社ウンドレンズ）⁽⁴⁾

水平軸型風車に集風レンズを取り付けた風力発電機である。集風レンズで発生する渦により、風速を1.3～1.5倍増加させる。発電量は風速の3乗に比例するので、集風効果だけで2～3倍の発電量が得られる。また增速効果による始動性の向上により、低風速域での稼働率も上昇する。さらに風見鶏効果で風向変動への追随性に優れている。表2に仕様を示す。集風レンズによる風速増加のメカニズムを図6に示す。ロータ周りに取り付けたダクト背後に発生した強い渦により風車後方の気圧が低下するため、流入風速が増加してダクト内の風速が1.3～1.5倍に增速する。

表2 風レンズ風車仕様⁽⁴⁾

定格出力	5kW（独立タイプは3kW）
定格風速	12m/s（独立タイプは10.5m/s）
ローター直径	2.5 m
集風体外径	3.4 m
風車形式	水平軸、ダウンウインド、集風体付き
出力係数	$C_p=0.95$ （ブレード直径基準） $C_p=0.51$ （レンズ外径基準）
ブレード	3枚（固定ピッチ）、GFRP
発電機	IPM発電機
ヨー機構	パッシブヨー（フリーヨー）
ブレーキ	電気的ストール・機械式ブレーキ・短絡ブレーキ
発電制御	コンバータ・インバータ
カットイン風速	3 m/s
カットアウト風速	17 m/s～20 m/s（運転停止）
極限風速	約60m/s
系統連系タイプ	三相AC220V、50-60Hz
出力電圧・周波数	
風車本体重量	650kg

2.5 シグナスミル（株式会社シグナスミル）⁽⁵⁾

図7に示す垂直軸型風車（ジャイロミル型風車）で、低風速域の起動性能を向上させるために、ブレード形状を図8に示すような「つ」の字型形状にしてある。前縁が風に向いているときは揚力を、逆向きでは抗力を利用することにより、微風でも回転を開始できる。小型のものは例えば高層ビルの屋上や各階側壁の角に設置され



図7 シグナスミル⁽⁵⁾

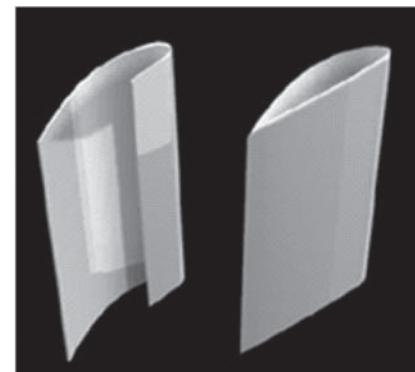


図8 ブレード形状（左が「つ」の字型）⁽⁵⁾

ば、全体として数十kWの発電量が得られるので、非常用電源として使用することも考えられる。マイクロ風車であるシグナスミルNSM-10105型の仕様を表3に示す。

その他にも様々な特長を有する風車が製造販売されている。

3. 研究開発動向

興味深い研究が多くあるが、ここでは過去数年における研究報告の一部を紹介する。

佐藤⁽⁶⁾はマグナス効果を利用した小型風力発電機について報告している。これは前項2.3で紹介したスパイラルマグナス風車として既に市販されている。細江ら⁽⁷⁾は、集風装置による高効率化について報告している。浅野ら⁽⁸⁾は小型風力発電に適したプロペラ型風車の特性について報告している。荒川ら⁽⁹⁾は逆テーパ型ブレードを有

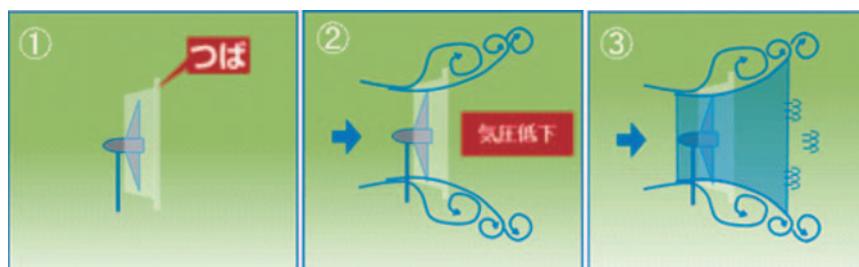


図6 風レンズ風車のメカニズム⁽⁴⁾

表3 シグナスミル (NSM-10105型) 仕様⁽⁵⁾

ブレードの長さ：1 m
ブレード枚数：5枚
回転直径：1 m
ブレード材質：アルミ合金板
風車重量：18kg
風車起動風力：1 m / sec
風車の定格出力：250W
定格出力時の風速：12m / sec

する小型風力発電機について報告している。江尻ら⁽¹⁰⁾は低周速比型の水平軸小型風車のロータ周りの流れの可視化に関して報告している。江尻ら⁽¹¹⁾は水平軸型小型風車のロータ形状とウイングレットに関する実験結果を報告している。西沢ら⁽¹²⁾は低周速比の水平軸小型風車の最適ロータ形状に関する実験結果について報告している。木部ら⁽¹³⁾はつば付小型風車の性能について基礎研究を行い報告している。前田ら⁽¹⁴⁾はディフューザとノーズコーンを組み合わせた場合の性能改善について報告している。鳥翼型垂直軸タービン⁽¹⁵⁾は、通常の翼ではなく柔軟構造の翼を使用し、集風機と組み合わせて発電効率を高めたもので、興味深い研究である。概念図を図9に示す。宮下ら⁽¹⁶⁾は水平軸型風車の翼枚数の影響について報告している。

空力的な研究開発だけでなく、発電機やシステム性能向上に関する研究開発も行われている。

また、小型風車の動向、現状および将来展望などについては文献^{(17)~(20)}を参照されたい。

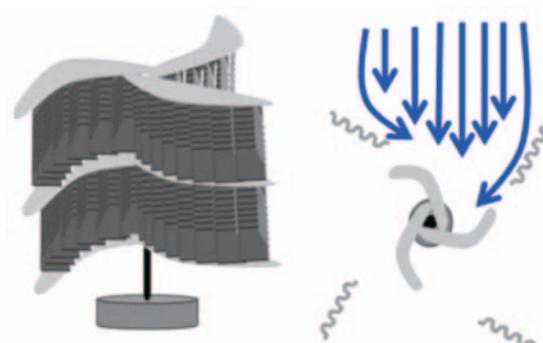


図9 集風器付き鳥翼型垂直軸風力発電機の概念図⁽¹⁵⁾
(右図は上から見たもので4枚の集風器を波線で示す)

4. おわりに

小型風力発電は、日本においては将来的に有望な発電手段であり、今後さらに性能向上が期待される。水平軸型風車、垂直軸型風車とともに、空力性能の向上、発電機の性能向上、システムとしての性能向上など研究開発が進められている。さらに分散型発電としての使用だけでなく、ウインドファームによる大規模発電も有望である。今後、設置補助金などの優遇措置により一層の普及が見込まれる。

参考文献

- (1) <http://www.tomonokaze.jp/>
- (2) <http://www.zephyreco.co.jp/index.html>
- (3) <http://www.mecaro.jp/company.html>
- (4) <http://windlens.com/>
- (5) <http://www.cygnusmill.co.jp/feature/01.html>
- (6) 佐藤、マグナス効果を利用した小型風力発電機の開発、日本機械学会誌111 (1076), 609, 2008
- (7) 細江忠司、神谷高志、雪田和人、後藤泰之、一柳勝宏、日下部哲朗、集風装置による小型風力発電機の高効率用、The transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan. B, A publication of Power and Energy Society 126 (3), 308~314, 2006
- (8) 浅野由久、橋本孝明、井上久弘、小型風力発電に適したプロペラ型風車の特性について、JSME annual meeting 2006 (5), 565~566, 2006
- (9) 荒川美保、宮下敏幸、Elson Ricky、他、逆テーパ型ブレードを有する小型風力発電機の開発研究、太陽/風力エネルギー講演論文集2010, 145~148, 2010
- (10) 江尻宏群、鈴木政彦、谷口英人、西沢良史、牛山泉、低周速比型の水平軸小型風車におけるロータ周りの流れの可視化に関する研究、日本機械学会論文集B編77 (776), 924~928, 2011
- (11) 江尻宏群、守谷真呂、鈴木雅彦、谷口英人、西沢良史、牛山泉、水平軸小型風車のロータ形状およびウイングレットに関する実験的研究、動力・エネルギー技術の最前線講演論文集：シンポジウム2009 (14), 7~10, 2009
- (12) 西沢良史、鈴木政彦、谷口英人、牛山泉、水平軸小型風車のブレード形状に関する実験的研究:低設計周速比ロータの最適形状の検証、日本機械学会論文集B編75 (753), 1092~1100, 2009
- (13) 木部健太郎、南和一郎、つば付き小型風車に関する基礎研究、日本機械学会関東支部総会講演会講演論文集2008 (14), 239~240, 2008
- (14) 前田太佳夫、鎌田泰成、安達健太、鈴木潤、ディフューザとノーズコーンの組み合わせによる小型風車の性能改善、動力・エネルギー技術の最前線講演論文集:シンポジウム2007 (12), 157~160, 2007
- (15) 丹澤祥晃（代表）、NEDO、鳥翼型垂直軸タービン流れの可視化、産技助成Vol.8, 2008
- (16) 宮下敏幸、荒川美保、Elson Ricky、他、高性能水平軸小型風車の開発研究（翼枚数変化の影響について）、太陽/風力エネルギー講演論文集2009, 547~550, 2009
- (17) 徳山榮基、小型風車の現状と将来、電気学会誌, 131 (7), 420~421, 2011
- (18) 和地嘉夫、小型風車の動向および将来展望、日本風工学研究会誌 (126), 39~42, 2011
- (19) 伊藤暁介、小型風車の性能限界に挑む（特集 旺盛な小形風力発電の開発と市場展開）、風力エネルギー 34 (2), 38~42, 2010
- (20) 日本小形風力発電協会、小形風力発電機市場の拡大（2020年までに現在の15倍の導入を目指す）、2011、<http://www.jswta.jp/>

CO₂回収型高効率IG-AHATシステムの性能検討

Performance Study of the High Efficiency IG-AHAT System with CO₂ Capture

岩井 康^{*1}
IWAI Yasushi

荒木 秀文^{*1}
ARAKI Hidefumi

樋口 真一^{*1}
HIGUCHI Shinichi

中尾 吉伸^{*2}
NAKAO Yoshinobu

ABSTRACT

A high efficiency closed-cycle IGCC system with CO₂ capture was proposed in 2007, which enabled high thermal efficiency along with the recovery of CO₂ from flue gases. We study IG-AHAT (Integrated coal Gasification Advanced Humid Air Turbine) system, in which the AHAT system is applied to the high efficiency IGCC instead of the HRSG and ST. A heat and material balance analysis model was developed using a commercial process engineering application code: Aspen Plus. To improve the thermal efficiency, we investigated configurations and conditions of the IG-AHAT system. The results showed a feasibility of the system, whose thermal efficiency was 55.5%HHV (gross) and 40.8%HHV (net) including CO₂ capture and liquefaction loads.

Key words : Closed-Cycle Gas Turbine, Oxy-fuel, AHAT, CCS, CO₂ Capture, IGCC, IG-AHAT

1. はじめに

2005年2月には京都議定書が発効し、地球温暖化防止のためメタンや二酸化炭素等の温室効果ガスの排出量削減が各国に義務付けられ、産業界においても二酸化炭素排出量の削減が急務となっている。方策として技術的には、(A) CO₂の発生低減と(B) 発生したCO₂の除去に分類でき、電気事業者が主体となって寄与できる方策は、(a) 原子力や自然エネルギーへのエネルギー転換、(b) 発電効率向上、(c) 発生源からのCO₂除去などである。この(c)のCO₂除去は、近年特にCCS (Carbon Capture and Storage) と呼ばれ注目されてきており、わが国では、2008年3月に経済産業省が策定した『Cool Earth エネルギー革新技術計画』にも盛り込まれ、火力発電の高効率化とともに推進することが示されている⁽¹⁾。CCSは、(c-1) 燃焼前回収、(c-2) 酸素燃焼、(c-3) 燃焼後回収に大別され、現状の技術では(c-1) 燃焼前回収と(c-3) 燃焼後回収は、CO₂の分離に必要なエネル

ギーが比較的大きくて送電端効率が低下しやすい傾向がある。一方、(c-2) 酸素燃焼は、CO₂濃度の高い排ガスが得られるためCO₂分離エネルギーが小さくて済む一方、ガスタービン(GT)を用いる場合には、クローズドサイクルGTの開発が必要となる。クローズドサイクルGTの研究開発事例としては、NEDOのWE-NET⁽²⁾、ペンシルバニア大・中国技術院のLNG冷熱利用CO₂排出ゼロGTサイクル⁽³⁾、電中研のCO₂回収型高効率IGCC⁽⁴⁾などがある。これらの事例は、CO₂回収が可能で、発電効率が高いことが特徴である。特にCO₂回収型高効率IGCCは、1300°C級GTの場合で約57%HHVと高い発電端効率が試算されている。このシステムは、酸素吹きガス化炉を用いて窒素分の少ない燃料ガスを生成し、乾式脱硫後、燃焼器で燃焼してタービンを駆動し、CO₂が主成分となった排ガスをHRSGで熱回収し、再度圧縮して循環させながら、排ガスの一部を系外に取り出してCO₂を回収するクローズドサイクルのIGCCである。ガス化炉のガス化剤にCO₂を用いており、ガス化効率が向上する特徴がある。

一方、オープンサイクルのGTシステムでは、コンバインドサイクルのHRSGを再生熱交換器や増湿塔などに置き換え、蒸気タービンを用いないAHATシステム^{(5),(6)}

原稿受付 2010年10月13日

校閲完了 2012年2月27日

* 1 (株)日立製作所 日立研究所

〒319-1292 日立市大みか町7-1-1

* 2 (財)電力中央研究所 エネルギー技術研究所

が研究開発されている。そこで、このAHATシステムをCO₂回収型高効率IGCCに適用した高効率IG-AHATシステムの研究を開始した。熱物質取支解析モデルを構築し、熱効率を向上するためのシステム構成と動作条件について検討したので、その結果を報告する。

2. IG-AHATシステム概要

2.1 システム構成

図1にIG-AHATシステムの概略系統図を示す。CO₂回収型高効率IGCCにAHATシステムを適用しており、HRSGを再生熱交換器（REC）、増湿塔、エコノマイザ（ECO）、後置冷却器（AC）、回収水加熱器（RWH）に置き換え、復水器に替えて水回収装置（WR）を備え、圧縮機（C）の入口に水噴霧吸気冷却装置（WAC）を備えており、蒸気タービンを用いないシステムである。

WACにより、微小な液滴を吸気ダクト及び圧縮機内部で蒸発させてガス温度の上昇を抑えることができ、圧縮機動力を低減できる。増湿塔では、ACとECOで回収した熱を利用して加湿しており、ガスの質量流量と比エンタルピを増加させることによってタービン出力を増加させている。また増湿塔出口ガス温度が露点まで低下するため、通常の再生サイクルよりもREC入口ガス温度が下がる。タービン排ガスからの回収熱量が増加するため、蒸気タービンがなくとも高い発電効率が得られる。

また、タービン (T) の翼冷却ガスは通例では圧縮機吐出ガスを抽気して用いる (図1 ①) が、IG-AHATシステムでは温度や組成の異なる高圧ガスが存在し、それらを冷却ガスに利用できる (図1 ②~④)。温度や組成が異なると、冷却に必要な流量も異なり発電効率に影響するので、システム構成の検討において翼冷却ガス①~④を用いた場合についても検討する。

2.2 システム動作条件

IG-AHATシステム各機器の動作条件を表1に示す。ここで、項目3の燃料ガス組成は表2に、項目11の圧力損失は表3に示した。次節の動作条件の検討において感度解析するパラメータについては、その範囲を示した。ガスターインの圧縮機吸気流量は各解析ケースで燃焼器動作条件を満たすように調節している。なお、表1内の項目1～3と項目10については、電中研の文献⁽⁴⁾を参照した。

3. システム検討

3.1 熱物質収支解析モデル

IG-AHATシステムの熱物質収支解析モデルとして、図1に示す解析範囲内をモデル化し、解析範囲内外の取り合いについては境界条件として与えた（表1参照）。解析プラットフォームには、化学反応を含めて熱物質収支を解析できる市販の化学プロセスシミュレータAspen Plus（Ver. 12.1）⁽⁷⁾を使用している。

オープンサイクルのAHAT システムではタービンの翼冷却に高湿分空気を用いると熱効率が上昇することが提示されている⁽⁸⁾。本研究ではWangら⁽⁹⁾ やLund大⁽¹⁰⁾の文献に基づき、図2に示すタービン翼の冷却モデルを構築した。

高温強度の観点から翼表面のメタル温度許容値T_bを決めておき、主流ガスの温度と冷却ガスの温度、流量、比熱の比などから、翼表面の温度をT_b以下に冷却するのに必要な冷却ガスの流量を求める方法である。熱効率への影響を考えると、より低温で比熱が大きいガスを翼冷却ガスとして用いることにより、必要な冷却ガスの流量を少なくでき、高効率化できることを示している。

本研究で想定した翼表面メタル温度や冷媒利用効率などのパラメータを表4に示す。スタントン数Stと

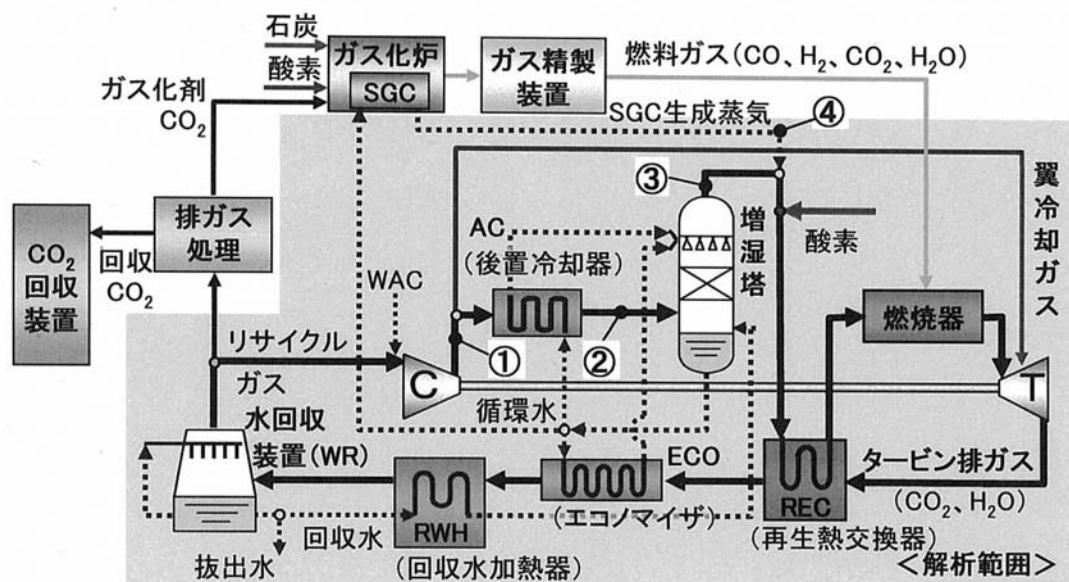


図1 IG-AHATシステムの概略系統図

表1 IG-AHATシステム動作条件

1. 酸素製造装置	
・酸化剤(酸素)	ガス化炉投入量 : 30.8 [kg/s]
温度 : 124.0 [°C]	GT投入量 : 47.3 [kg/s]
供給圧 : 3.5 [MPa]	
酸素純度: 97.5 [vol%] (N ₂ 組成: 2.5 [vol%])	
2. ガス化炉	
・石炭入熱量(HHV) : 992.1 [MW]	・SGC回収熱量: 138.0 [MW]
・ユーティリティCO ₂ (石炭搬送、クエンチなど) : 10.7 [kg/s]	
3. ガス精製装置	
・燃料ガス	
温度 : 400.0 [°C]	流量 : 70.1 [kg/s]
供給圧 : 3.0 [MPa]	組成 : 表2
4. ガスタービン(GT)	
・圧縮機	
ポリトープ効率 : 92.3 [%]	吸気温度: 感度解析(15~75 [°C])
圧力比 : 感度解析(15~45)	吸気流量: 燃焼器条件に合う流量
入口圧力 : 感度解析(0.10、0.20 [MPa])	
WAC(噴霧量) : 3.0 [wt%]	(吸気質量流量比)
・燃焼器	
燃焼ガス温度一定(1364 [°C])	または排ガス温度一定(680 [°C])
・タービン	
ポリトープ効率 : 90.0 [%]	
翼冷却ガス流量 : モデルにより計算	
5. 再生熱交換器(REC) : 温度効率 92.0 [%](被加熱側)	
6. 後置冷却器(AC)	
・出口ガス温度: 増湿塔入口ガス露点+15°C	
・冷却水流量 : 出口水温 = 増湿塔圧力の飽和温度-30°C	
7. エコノマイザ(ECO)	
・出口ガス温度: 入口水温+15°C	
・冷却水流量 : 出口水温 = 増湿塔圧力の飽和温度-30°C	
8. 回収水加熱器(RWH)	
・出口水温 : 入口ガス温度-15°C	
9. 水回収装置(WR)	
・ガス冷却温度(回収水温) : 圧縮機吸気温度まで冷却	
・排ガス処理流量(dry) : 101.8 [kg/s]	
10. 所内動力	
・酸素製造装置 : 99.2 [MW]	
・CO ₂ 回収装置 : 34.1 [MW]	
・その他補機(ガス化設備補機、GT補機等) : 10.2 [MW]	
11. 圧力損失 : 表3	

表2 燃料ガス組成 [vol%]

CO	CO ₂	H ₂	H ₂ O	CH ₄	N ₂	O ₂
66.3	4.9	23.8	3.2	0.3	1.5	0.0

表3 圧力損失

項目	圧力損失値 (入口圧に対する比)	出典
後置冷却器(AC)	1%	文献(6)
増湿塔	0.5%	
燃焼器	6.67%	文献(4)
再生熱交 (REC)	2%	
被加熱側	2%	
エコノマイザ(ECO)	0.5%	文献(6)
回収水加熱器(RWH)	0.5%	ECOと同じ
水回収装置(WR)	0.5%	仮定
リサイクルガス流路 (水回収装置~圧縮機入口)	2%	仮定値
SGC、SGC冷却水流路	28.2%	文献(4)

Ag/Ab 値はLund大の文献¹⁰⁾の値を参照し、冷媒利用効率 η_c と翼表面メタル温度 T_b は、既報告⁸⁾の圧力比20、燃焼ガス温度1350°C条件のオープンサイクルAHATシステムを模擬し、冷却空気流量が同程度となるように想定した。

システム計算においては、各段の静翼(iN)と動翼(iB)に対して、図3に示すように、冷却ガスがそれぞれ混合されるものとしてモデル化した。

また表5に、本解析モデルで想定したタービン段数を示す。この段数は、クローズドサイクル作動流体のマッハ数を考慮したタービンの試設計に基づき想定した。圧力比に応じた段数を用いることで、翼の表面積変化による冷却ガス流量の増減を模擬した。なお、段数の増減に係わらず各段のポリトープ効率は同じとした。

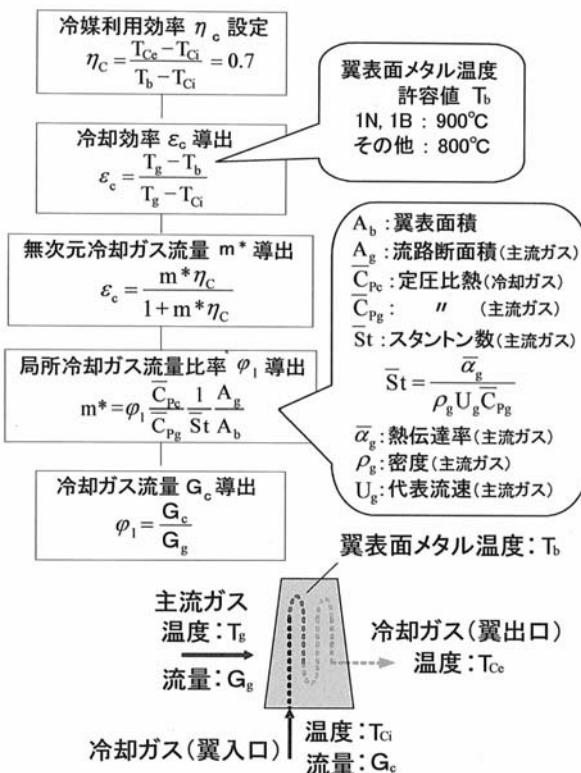


図2 タービン翼冷却ガス流量計算モデル

表4 タービン翼冷却ガス流量計算パラメータ

項目	1N, 1B	2段目以降の静翼(N)、動翼(B)
翼冷却方式	内部冷却(翼後縁排気) ガス温度が許容温度 T_b 以下の場合、無冷却	
翼表面メタル温度 許容値 T_b [°C]	900	800
冷媒利用効率 η_c [-]	0.7	
冷却効率 ϵ_c [-]	$\epsilon_c = (T_g - T_b) / (T_g - T_{Ci})$ より計算 (T_g :ガス温、 T_b :翼表面メタル温度、 T_{Ci} :冷媒温度)	
スタントン数 St [-]	0.005	
ガス流路断面積 /翼表面積比 A_g / A_b [-]	0.2	

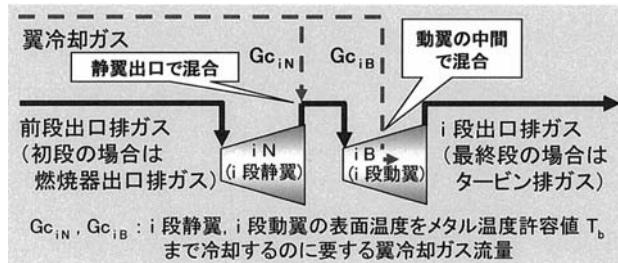


図3 翼冷却ガスのタービン混合モデル

表5 ガスタービン仕様

項目	圧力比(圧縮機) π_c [-]			
	≤8	~20	~40	~70
タービン段数 [-]	2	3	4	5
ボリトロープ効率 [%]				90.0

3.2 圧縮機吸気温度の検討

まずはシステム動作条件として、圧縮機吸気温度について検討した。IG-AHATシステムは、水回収装置(WR)で排ガスを冷却して水分を回収し、循環させるクローズドサイクルであるので、圧縮機吸気温度は、WRで排ガスを冷却する温度となり、比較的自由に設定できる。吸気温度をパラメータとして、発電効率を感度解析した結果を図4に示す。

圧縮機吸気温度を下げるほど、圧縮機動力が低減できるため、発電効率が向上している。また、温度が低いほど吐出温度も下がり、再生熱交(REC)の交換熱量が増加して排熱量が減り、発電効率の向上に寄与していると考えられる。実際の運転状況においては、利用できる冷却水の温度によりWRの冷却温度が制約されると考えられるが、以降の計算においては、圧縮機吸気温度30°Cの場合を検討した。

3.3 翼冷却ガス取出し位置の検討

タービンの翼冷却ガスに関して、図1に示した取出し位置の異なる4ケースを検討した(①圧縮機吐出ガス、②後置冷却器(AC)出口ガス、③増湿塔出口ガス、④SGC生成蒸気)。

図2に示した手法により求まった、翼冷却ガスの定圧比熱(C_{pc})と温度を表6に、各段動翼出口の主流ガス温度を図5に、各段動静翼の冷却ガス流量を図6に示す。また、これら各ケースの発電効率解析結果を図7に示す。

④SGC生成蒸気を翼冷却に用いたケースで発電端効率

表6 冷却ガスの定圧比熱(C_{pc})と温度

翼冷却ガス取出位置	比熱[kJ/kgK]	温度[°C]
① 圧縮機吐出	1.155	257
② 後置冷却器出口	0.978	155
③ 増湿塔出口	1.568	179
④ SGC生成蒸気	3.075	248

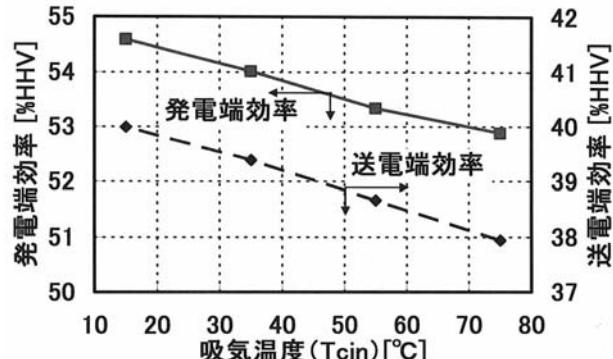


図4 IG-AHATシステムの性能変化(圧縮機吸気温度の検討)

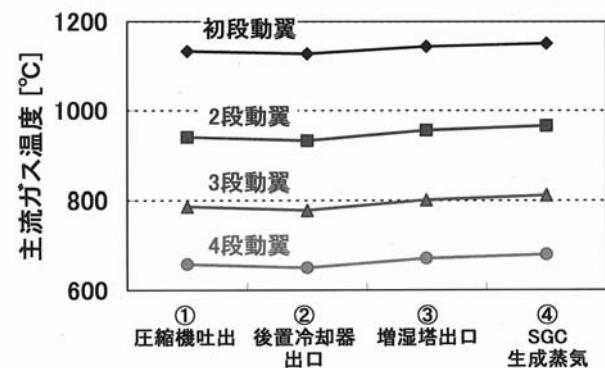


図5 各段動翼出口の主流ガス温度

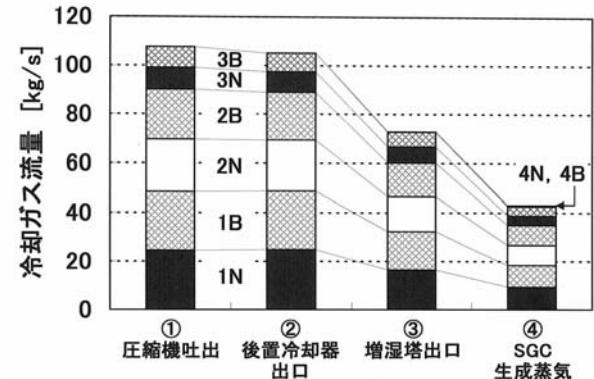


図6 各段動静翼冷却ガス流量

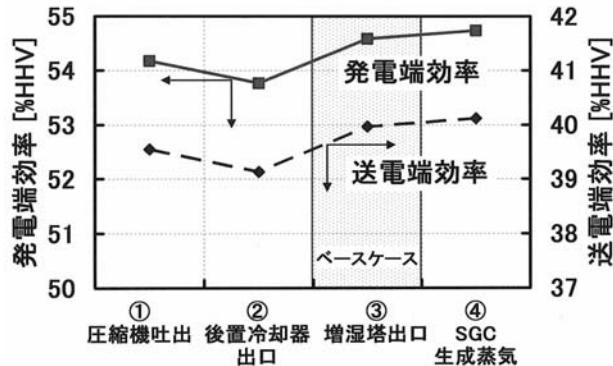


図7 IG-AHATシステムの性能比較(翼冷却ガス取出し位置の検討)

と送電端効率がともに最大となるが、③増湿塔出口ガスを用いたケースでも差は約0.1ポイントであり、同程度の高効率が得られた。

翼冷却ガス③、④と比較して、翼冷却ガス①、②は流量が多く発電効率が低い(図6)。これは、①では比熱が小さい上に温度が高いために、翼冷却ガスの流量が多くなったためである。そのため、翼冷却ガスが混合された後の主流ガス温度が低下し(図5)、タービン出力が減少して発電効率が低くなっている。また②では、③、④より温度は低いが①よりも比熱が小さいため、①と同様に翼冷却ガスの流量が多くなり、発電効率が低い。②は①より低温なので、翼冷却ガス混合後の主流ガス温度が各段で①のケースより低くなり、発電効率が①より低くなっている。

③と④のケースの熱効率差は約0.1ポイントで、性能がほぼ同じであるが、④SGC生成蒸気はガス化炉起動後でなければ供給できない制約がある。そこで、以降の検討においては、③増湿塔出口ガスを翼冷却ガスとしたシステム構成(発電端効率54.6%HHV、送電端効率40.0%HHV)をベースケースとして解析を実施した。

3.4 圧縮機入口圧力と圧力比の検討

圧力条件が変わると、排熱回収量や増湿塔の加湿条件が変化するため、発電効率も変化する。そこで、システム動作条件である圧縮機入口圧力(Pcin)と圧力比(π_c)について感度解析した。解析条件として、燃焼ガス温度(Tcomb)一定条件で、Pcinが標準大気圧の場合(以降0.10MPaと記載:グループ1)と2気圧の場合(同0.20MPa:グループ2)をサーベイした。また、タービン排ガスが供給される再生熱交換器の最高使用温度の観点から、燃焼ガス温度を調整してタービン排ガス温度(Tex)を一定とする場合(グループ3)についてもサーベイした。各々の圧力比 π_c の解析範囲は、Tcomb=1364°CでTexが再生熱交換器の最高使用温度680°Cとなる $\pi_c=30$ を基準として、15~45とした。

図8に、グループ1(Tcomb一定、Pcin=0.10MPa)、グループ2(Tcomb一定、Pcin=0.20MPa)、グループ3(Tex一定、Pcin=0.10MPa)の各場合の送電端効率の計算結果を示す($\pi_c=15$ ~45)。

ここで、Pcinと π_c の組合せによっては燃料ガスや酸素の供給圧力が注入点の圧力より低くなる場合があるため、その場合にはそれぞれ昇圧機により圧力を高めて供給するものとした。IG-AHATシステム全体の作動圧力を上げるよりも、必要となる補機動力の増加が抑えられ、プラント性能への影響が小さくて済むと考えられるためである。図中に白抜きのマーカーと破線で、燃料と酸素の昇圧機を追設したケースを示した。

燃焼ガス温度一定(Tcomb=1364°C)の条件(グループ1とグループ2)では、送電端効率はPcinによらず圧力比の上昇とともに向上している。これは、図9に示す

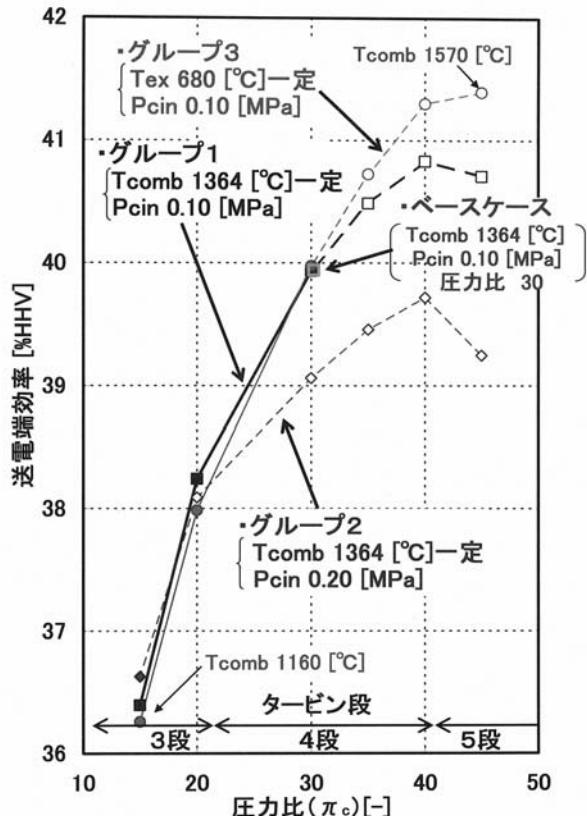


図8 IG-AHATシステムの送電端効率(圧力条件の検討)

圧力比特性による。即ち、圧力比上昇と共に(a)圧縮機出口温度が上昇し、AC回収熱量が増加するため増湿塔の加湿エネルギーが増加して、(b)増湿塔出口湿分流量が増加する。

また、圧力比の上昇によるタービン出力の増大に加え、湿分流量増加による作動流体の流量増加の効果により、(c)タービン熱落差が増加している。その結果、(d)タービン出力の増加が圧縮機動力の増加を上回り、GT出力が増加している。

なお、図8で圧力比が上がるにつれて効率の向上は緩やかになっている。これは圧力比の増加に伴い、燃焼ガス温度一定条件ではタービン排ガス温度が低下して再生熱交換器での交換熱量が減少するためと考えられる。また、タービン段数の増加とともに翼冷却空気の流量が増加していることも寄与していると考えられる。

一方、図8で白抜きマーカーなどで示した、圧縮機吐出圧力(=Pcin × π_c)が約3MPaを超える場合では、酸素及び燃料ガスの昇圧機を追設する必要が生じる。そのため昇圧機動力の影響により、送電端効率が低下する。グループ2(Pcin=0.20MPa)の場合、圧力比が15を超えると昇圧機動力の増加により送電端効率が低下し、同じ圧力比ではグループ1(Pcin=0.10MPa)よりも低くなつた。

以上より、昇圧機を使用しない場合、ベースケース(Tcomb=1364°C, Pcin=0.10MPa, $\pi_c=30$)で送電端効率最大となり、40.0%HHVとなつた。

一方、昇圧機を追設する条件では、 $P_{cin}=0.10$ MPaで圧力比を40まで上げたケースで発電効率が最大となった(発電端: 55.5%HHV, 送電端: 40.8%HHV)。

また、図8の排ガス温度一定条件($Tex=680^{\circ}\text{C}$: グループ3)で圧力比をパラメータとしたサーベイ結果では、圧力比の増加と共に燃焼ガス温度が高くなり、送電端効率も向上している。圧力比45では燃焼ガス温度が 1570°C に達し、送電端効率は41.4%HHVとなった。しかし、燃焼ガス温度の上昇と共に翼冷却ガス流量が増加しており、送電端効率の向上は、燃焼ガス温度 1364°C 一定の場合と比較して0.6ポイントの上昇に留まっている。燃焼ガス温度上昇による効率向上効果は、圧力比上昇による効果ほど大きくない。

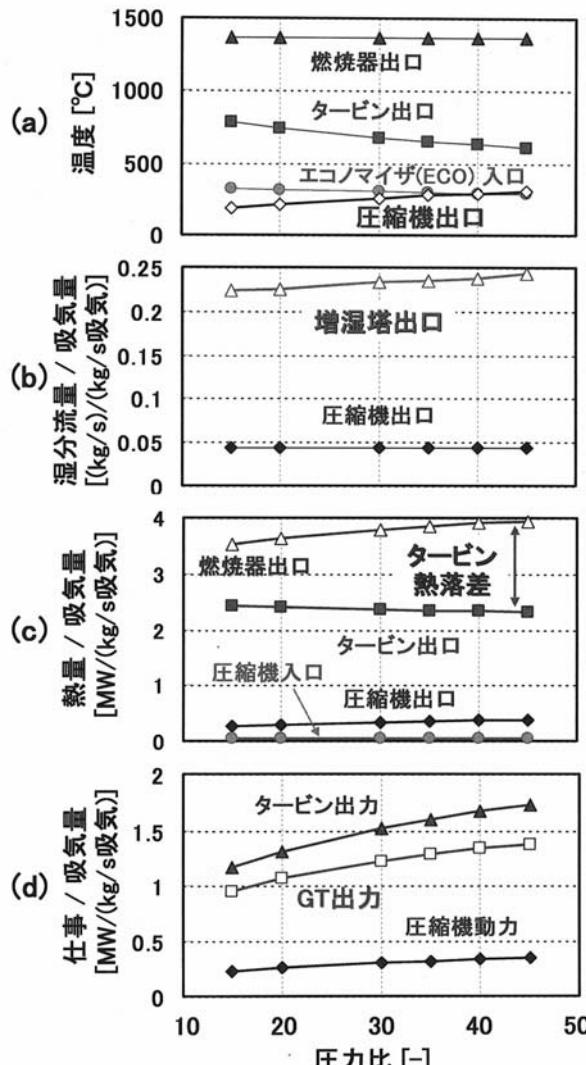


図9 IG-AHATシステムの圧力比特性(グループ1)

4. おわりに

本研究では、CO₂回収型IGCCにAHATシステムを適用したIG-AHATシステムの成立性について、熱物質

収支解析モデルを作成して検討し、吸気ガス温度、翼冷却ガスの取出し位置、GT圧力条件などの感度解析を行った。その結果、酸素及び燃料の供給圧が供給点の系統圧力以下となる条件では、圧縮機入口圧力0.10MPa、圧力比30のベースケースの送電端効率が最も高く、40.0%HHVの試算値を得た。また、昇圧機を追設して酸素及び燃料を供給する条件では、圧縮機入口圧力0.10MPaで圧力比を40まで上げたケースで送電端効率が最大となり、40.8%HHVの試算値を得た。

本研究により、発電効率を向上させるためのシステム構成と動作条件が明らかになった。

今後、CO₂を主要な作動流体としたガスタービン本体や構成機器の成立性を含めた詳細検討を進める予定である。

参考文献

- 経済産業省, Cool Earth-エネルギー革新技術計画, <http://www.meti.go.jp/press/20080305001/03cool-earth-p.r.pdf> (2008)
- 電力中央研究所, 二酸化炭素回収対応クローズド型高効率ガスタービン技術 第I期研究開発 平成13年度成果報告書 (2002-12)
- Na Zhang and Noam Lior, Proposal and Analysis of a Novel zero CO₂ Emission Cycle with Liquid Natural Gas Cryogenic Exergy Utilization, Transactions of ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and power, Vol.128 (2006-1), p.81-91
- 白井 裕三 ほか9名, CO₂回収型高効率石炭ガス化複合発電システムの提案とその課題, 電力中央研究所報告 M07003 (2007-10)
- 幡宮 重雄, 日本ガスタービン学会誌, 34-2 (2006-3), p.100-105
- Araki, H., Higuchi, S., Marushima, S. and Hatamiya, S., Design Study of a Humidification Tower for the Advanced Humid Air Turbine System, ASME Turbo Expo 2005, GT2005-68671 (2005)
- 株式会社アス彭テックジャパン ウェブサイト: 定常プロセスシミュレータ Aspen Plus, <http://www.aspentechno.co.jp/product/pdf/AspenPlus.pdf> (2007-3)
- Shin'ichi Higuchi et al., A Study of Performance on Advanced Humid Air Turbine Systems, Proceedings of the International Gas Turbine Congress 2003 Tokyo, TS-090 (2003)
- Bo Wang et al., Steady-state Off-design Performance of Humid Air Turbine Cycle, Proceedings of the ASME Turbo Expo 2007, GT2007-27350 (2007)
- Kristin Jordal, Gas Turbine Cooling Modeling - Thermodynamic Analysis and Cycle Simulations, Licentiate Thesis, ISRN/LUTMDN/TMVK-7034-SE, Department of Heat and Power Engineering, Lund Institute of Technology (2000)

新しい概念に基づく高温タービンディスク用Ni-Co基超合金の開発

Development of Ni-Co-base Superalloys based on New Concept for High Temperature Turbine Disk Applications

藤岡 順三^{*1}
FUJIOKA Junzo

谷 月峰^{*1}
GU Yuefeng

崔 傳勇^{*1}
CUI Chuanyong

横川 忠晴^{*1}
YOKOKAWA Tadaharu

小林 敏治^{*1}
KOBAYASHI Toshiharu

原田 広史^{*1}
HARADA Hiroshi

福田 正^{*2}
FUKUDA Tadashi

三橋 章^{*3}
MITSUHASHI Akira

ABSTRACT

Recently, we developed a new kind of cast-and-wrought (C&W) Ni-Co base superalloys (TMW alloys) for the applications of turbine disk and high-pressure compressor. TMW alloys were designed by mixing two kinds of γ / γ' two-phase superalloys, Ni-base superalloy and Co-Ti alloy. The temperature capability of TMW alloy aimed 50 °C up compared to the best of current C&W disk superalloys, U720Li. In the subscale study, the forgeability of 50 kg ingot was identified by the processes of extrusion, hot rolling and manufacturing pancakes. The property assessments of the rolled plates indicated the temperature advantage of TMW alloys. The successful manufacturing of full-scale pancakes of some TMW alloys proved that fine grain structures of 10 to 20 μ m could be obtained and good processability could be expected. Results of tensile and creep tests of the pancakes showed that the temperature capability of TMW alloys increased at least 50 °C compared to U720Li.

Key words : Turbine disk, superalloys, C&W, Ni-base alloy, Ni-Co-base alloy, TMW, TMW alloy, TMW-2, TMW-24, TMW-4M3, U720Li

1. はじめに

タービンディスクは最新のターボファンエンジンの重量の20%, 價格の10%を占める重要な部品であり⁽¹⁾, その破壊がエンジンの重大トラブル等に繋がるので最もクリティカルな部品である。

民間航空機エンジン開発の重要な課題である燃料消費率 (SFC) 改善に向けてタービン入口温度 (TIT) 向上や冷却空気量低減を達成するためにタービンディスク材料の耐用温度の向上が求められている。タービンディスク用超耐熱合金はこれまで全て海外で開発されたが, 国内で製造可能でコスト的に有利な鍛造合金の耐用温度は

1980年代以降改善されておらず, 耐用温度向上のために粉末冶金合金を使用するのが趨勢となっている。

(独) 物質・材料研究機構 (NIMS) では新しい概念にもとづいて世界最高の耐熱特性を持ち粉末冶金合金に匹敵するNi-Co基鍛造合金 (TMW合金) を開発した。本稿では高温タービンディスク用超耐熱合金の開発動向, NIMSにおけるTMW合金の開発, そしてNEDOプロジェクトで行ったTMW合金の実規模ディスク模擬形状品の試作・評価の結果について述べる。

2. 高圧タービンディスク材料の開発動向

Fig. 1に航空機用ジェットエンジンの高圧タービンディスク⁽²⁾とその温度・応力を示す。最新のエンジンのTITは1600°C以上に達してタービンディスクの外周部は700°C程度になるためクリープ強度が要求される。またエンジンの回転数は離陸時に10,500rpmに達して内周部

原稿受付 2009年11月13日

校閲完了 2012年3月1日

* 1 物質・材料研究機構

〒305-0047 つくば市千現1-2-1

* 2 MMCスーパーアロイ(株)

* 3 三菱マテリアル(株)

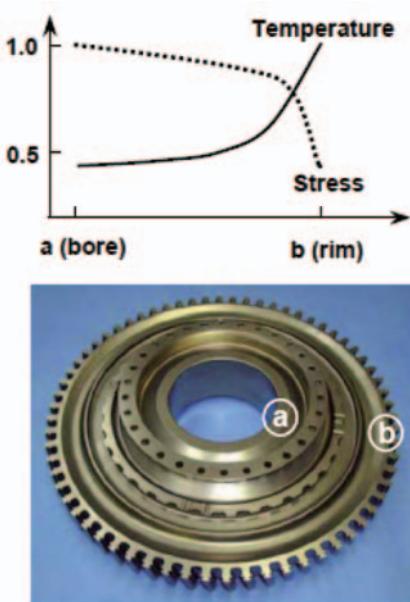


Fig. 1 Temperature and stress in the HP turbine disk.
Latestaero engines : 1000MPa at bore and 700°C at rim.

の応力は1000MPa程度になるため、引張強度と低サイクル疲労強度が要求される。さらに損傷許容設計の適用が必要なことから亀裂伝播特性が重要となる。

Table 1 に代表的なディスク材料の化学組成を示す。ディスク製造法には鋳造・鍛造 (Cast-and-wrought, C&W) 法と粉末冶金 (Powder metallurgy, P/M) 法がある。組成はNiをベースとし、10 ~ 20%のCr、20%までのCo、10%までのMo、6%までのAl、5%までのTi、少量のB、Zr、Cを含む。その他、W、Ta、Hf、Nbなどを含む合金もある。これらの合金はAlとTiの添加による γ' 相 [Ni₃(Al, Ti, 他)] の析出で強度を向上させている。

Table 1 Chemical composition of disk alloys. (wt%, BalNi)

Cast-and-Wrought (C&W) alloys

Alloy	Cr	Co	Mo	W	Nb	Ti	Al	C	B	Zr	Other
Rene41	19	11	10	-	-	3.1	1.5	0.09	0.01	-	
Astroloy	15	15	5.25	-	-	3.5	4.4	0.06	0.03	0.06	
Inconel718	19	-	3	-	5.1	0.5	0.5	0.08	-	-	18.5Fe, 0.15Cu
Waspaloy	19.5	13.5	4.3	-	-	3	1.4	0.07	0.006	0.09	
U720Li	16	15	3	1.25	-	5	2.5	0.025	0.018	0.03	

Powder Metallurgy (P/M) alloys

Alloy	Cr	Co	Mo	W	Nb	Ti	Al	C	B	Zr	Other
Rene95	14	8	3.5	3.5	3.5	2.5	3.5	0.16	0.01	0.05	
IN100	10	15	3	-	-	4.7	5.5	0.15	0.015	0.06	1.0V
Rene88DT	16	13	4	4	0.7	3.7	2.1	0.03	0.015	0.03	
N18	11.5	15.7	6.5	-	-	4.35	4.35	0.015	0.015	0.03	0.45Hf
RR1000	15	18.5	5	-	1.1	3.6	3	0.027	0.015	0.06	0.5Hf, 2Ta
ME3	13.1	18.2	3.8	1.9	1.4	3.5	3.5	0.03	0.03	0.05	2.7Ta

Fig. 2 にタービンディスク材料開発の歴史とNIMSにおける開発ターゲットを示す。C&W法による合金は1950年代から約70°C耐用温度が向上したが、1980年代のU720Li以降耐用温度は改善されていない。U720Li以上の合金はP/M法により開発され、最新のP/M合金はU720Liを50°C上回る耐用温度を有する。国内でも1980年代に国家プロジェクトでP/M超合金の開発やパン

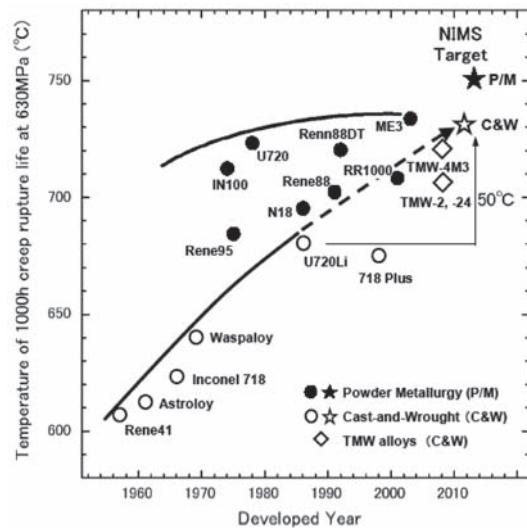


Fig. 2 History of developing turbine disk alloys and target of new TMW alloys at NIMS.

ケーキ試作が行われたが⁽³⁾、その後実用化までには至らず現在国内に設備、技術のポテンシャルは無い。一方海外ではRR社がTrent800以降P/M合金を使用しTrent1000には独自開発したRR1000を採用する予定である⁽⁴⁾。また、GE社はエアバスA380のGP7282エンジンでME3を始めて実用化する⁽⁵⁾。図中に新しいTMW合金を示すが、TMW-4M3は開発ターゲットに近くP/M合金に匹敵する耐用温度を有する。

3. NIMSでのTMW合金の開発

3.1 新しい概念にもとづく合金設計

NIMSでは、Fig. 2 に示したように、国内で製造可能でコストがP/M材の約半分のC&W材についてU720Liより50°C高いP/M合金に匹敵する耐用温度を目標としている。また、P/M法によってさらに耐用温度を上げた材料の開発も目標としている。

Ni基超合金は高温強度を高めるために γ' 相の体積率を増やす努力がなされ、U720Liは45vol%の γ' 相を有する。しかしながら γ' 相の体積率がこれ以上増えると鍛造ができないために、C&W法で製造する限り耐用温度はU720Liが限界でこれ以上の合金の開発は不可能であると長い間世界中で考えられてきた。

一方Co基超合金はジェットエンジンのタービン静翼や燃焼器用材料として使われている。従来Ni基超合金とCo基超合金はそれぞれ別な合金として開発され使われてきた。しかしNIMSではNi基合金とCo基合金、特に γ' 相を析出するCo-Ti合金との組成領域の間にはNi-Co基合金といえる未開拓で有望な組成域が広く存在することに着目して開発を行い、C&W合金の限界を打ち破ることができる実証した。

Fig. 3 にNIMSで考案した新しいコンセプトを示す。このコンセプトは2種類の2相超合金、すなわち、Ni基超合金とCo基超合金の特性を統合したものである⁽⁶⁾。Ni

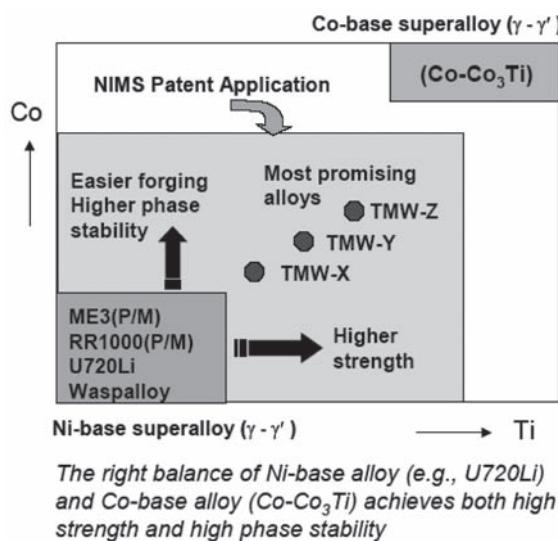


Fig.3 New concept for designing disk superalloys.

基合金からCo基合金までfcc/L12構造の γ - γ' が連続的に存在し^{(7),(8)}、Ni基超合金のCoとTiの量を一定の比率を保ちながら増やしていくところに γ' 析出型Co基超合金が存在する。Ni基超合金のCo量だけを増加させてゆくと鍛造性と組織安定性は良くなるが強度が犠牲となる。一方、Ti量だけを増加させてゆくと強度は高まるが組織安定性が犠牲となる。そこでCoとTiの量を同時に増加していくことで強度が高く、組織安定性に優れ、かつ鍛造可能な新しい合金が誕生する。この新しい合金がTMW合金である。

3.2 サブスケール材料試作による評価

新しいコンセプトにもとづきTMW合金を設計した。Table 2にその化学組成と γ' 量を示す。現用材のU720Liと比較すると、鍛造性と組織安定性を高めるためのCo量が多く、 γ' 量を増加して強度と耐用温度を高めるためのTi量が多いのが特徴で、Co量は21.8～26.2wt%，Ti量は5.1～6.2wt%である。そして有害相である η 相の析出を抑えるために合金設計と実証実験を行った^{(9),(10)}。

設計されたTMW合金についてC&W法でサブスケールの材料試作をSpecial Metals社で行った。その結果をFig. 4に示す。同じ製造条件で比較するためにU720Liの試作も同時に行った。HPコンプレッサーブレードは住

Table 2 Chemical composition and γ' volume fraction of U720Li and TMW alloys. (wt%, Bal:Ni)

Alloy	Cr	Co	Mo	W	Ti	Al	C	B	Zr	γ' v%
U720Li	16.0	15.0	3.0	1.25	5.0	2.5	0.025	0.018	0.03	45
TMW-2	14.4	21.8	2.7	1.10	6.2	2.25	0.023	0.015	0.033	48.7
TMW-24	13.8	25.0	2.6	1.1	5.6	2.2	0.015	0.015	0.03	45
TMW-3	16.5	23.3	3.1	1.2	5.1	1.9	0.026	0.018	0.022	40
TMW-4	14.9	26.2	2.8	1.1	6.1	1.9	0.014	0.017	0.019	45
TMW-4M3	13.5	25.0	2.8	1.2	6.2	2.3	0.015	0.015	0.03	49.5

γ' v% : Volume fraction of γ' at 760°C

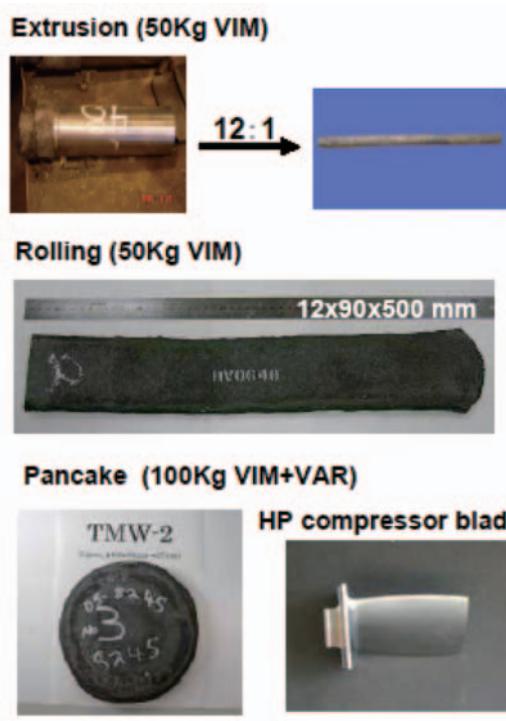


Fig.4 TMW alloy products by C&W process

重フォージング(株)で精密鍛造した後、(株)田口型範で切削研磨加工を行った。

Table 3に評価結果を示す。熱処理方法を検討し⁽¹¹⁾、U720Liで行われる条件とした。TMW-2およびTMW-4はU720Liと同等の成形性と組織安定性、そして高い強度を有する。この2つの合金はU720Liに比べて0.2%耐力の耐用温度が70°C向上し、より高いクリープ強度を有することが確認された^{(6),(12),(13),(14)}。これらのことからTMW合金の高い強度と優れた製造性が実証された。

Table 3 Formability, phase stability and 0.2% proof stress at 750°C of TMW alloys

Alloy	Formability	Rolling	
		Phase stability	0.2% PS at 750°C
U720Li	Good	Acceptable	888MPa
TMW-2	Good	Acceptable	977MPa
TMW-3	Good	η phase	951MPa
TMW-4	Good	Acceptable	993MPa

Heat treatment condition after rolling:
1100°Cx4h, OQ+650°Cx24h, AC+760°Cx16h, AC

4. NEDOプロジェクトでの実規模ディスク模擬形状品の試作・評価

4.1 概要

本試作・評価は国内のC&Wプロセス用設備の適用による高性能タービンディスクの早期国産化を目指して、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)

の『高温タービンディスク製造技術に関する研究開発』(平成19～20年度)にて実施した。いくつかのTMW合金について三菱マテリアル(株)においてC&W法による実用レベルのディスク模擬形状品(パンケーキ)試作を行い、パンケーキの特性を両者で評価した。

4.2 試作合金と溶解・鍛造・熱処理技術

試作合金はTable 2に示した組成を有するTMW-2, TMW-24 およびTMW-4M3である。U720Li合金と開発合金の比較を正確に行う目的でU720Liについてもパンケーキの試作を行った。TMW-24 およびTMW-4M3は、各々、TMW-2およびTMW-4の組織安定性を高めた合金で、TMW-24は以前にも実用レベルのパンケーキ製造を実施している^{(2),(15)}。

Fig.5に製造工程と製作した材料を示す。最初の溶解工程では3種類の方法を組み合わせたトリプルメルトを行う。一次溶解の真空誘導溶解(Vacuum Induction Melting: VIM)で成分調整したインゴットを消耗電極として、二次溶解のエレクトロスラグ再溶解(Electroslag Remelting: ESR)で脱硫し比較的大きな介在物を除去する。さらに三次溶解の真空アーク再溶解(Vacuum Arc Remelting: VAR)でより細かな介在物の除去と脱ガスが行われ、水冷銅モールドの高い冷却能によって大径でも偏析を抑えた微細組織のインゴットを作製することができる。トリプルメルトは介在物の低減効果に非常に有効であり⁽¹⁶⁾、タービンディスクをはじめとして高い品質が求められるエンジン回転部材製造の溶解方法としてしばしば採用される。トリプルメルトによる2トン級インゴットの基礎試験と溶製試作において全てのTMW合金の溶製を良好に完了し、得られたインゴットが分塊鍛造に供することの出来る品質であることを確認した。

2トン級VARインゴットを用いた分塊鍛造では著

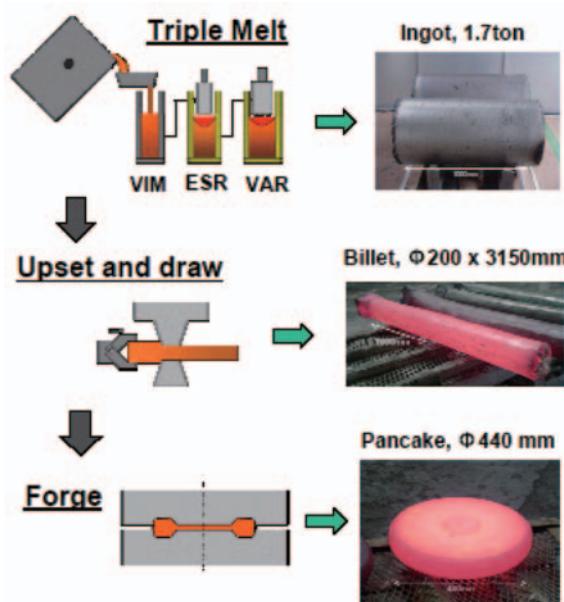


Fig. 5 C&W process of manufacturing real-scale pancakes

しい割れを伴うことなく外径約200mmのビレットを作製することが出来た。ビレットからディスク鍛造を行った結果、いずれのTMW合金も外径約440mmのパンケーキを問題なく作製することが出来た。作製したパンケーキはU720Liで行われるサブソルバス熱処理を行った: 溶体化処理(1100°C × 4h, 油冷) + 時効処理1(650°C × 24h, 空冷) + 時効処理2(760°C × 16h, 空冷)。TMW-4M3の一部はより多くの γ' 相を時効析出させる目的で溶体化処理温度を1120°Cに上げた。Fig.6に示すように、パンケーキ内部の組織はマクロレベルでもミクロレベルでも健全で、10～20 μm の結晶粒が微細均一に分布し、ディスク材として適した品質を有している。

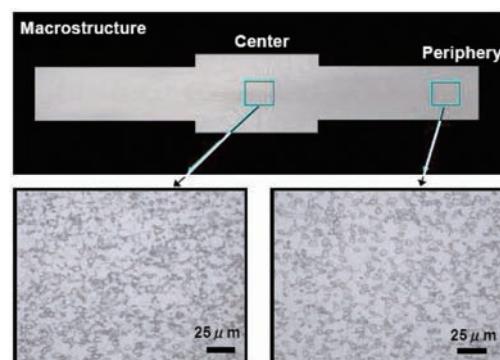


Fig. 6 Macro- and micro-structures in the cross section of the machined pancake (TMW-2, ϕ 400mm)

4.3 ディスク模擬形状品の特性

(1) 目標

現用のディスク用鍛造合金の中で最高のU720Liの耐用温度を50°C上回る実用規模のディスク素材を実現させることを目標とした。平成17～18年度NEDO委託、『高温タービンディスク製造技術開発に関する先導調査』でのエンジンメーカーへのアンケート調査などに基づいて次の項目を耐用温度の評価基準とした⁽²⁾: ①応力630MPaのもと100時間で0.2%クリープひずみを生ずる温度、②U720Liの650°Cにおける引張耐力値を示す温度。

(2) 試験方法

引張試験、クリープ試験、低サイクル疲労試験、疲労亀裂伝播試験、および物理特性評価試験を行った。試験片は ϕ 440×65mmのパンケーキの厚さ方向中心から2個ずつ採取した。引張、クリープおよび低サイクル疲労の試験片は軸方向が円周接線方向になるよう採取した。亀裂伝播試験片はノッチ底が厚さ方向で亀裂進展方向が半径方向となるように採取した。機械特性評価試験は全てASTM規格に準じて行った。

(3) 試験結果

Fig. 7に引張試験結果を示す。TMW合金は全ての温度域においてU720Liよりも高い引張強さを有し、500°C以上の温度ではTMW-4M3が最も高い。0.2%耐力も

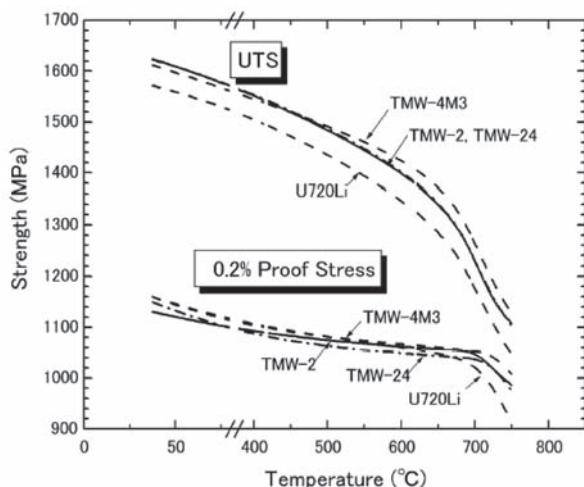


Fig. 7 Tensile strength of U720Li and TMW alloys.

TMW-4M3が最も高い値を有する。TMW-2およびTMW-4M3は、U720Liの650°Cでの耐力値を700°C以上の温度でも保持しており、耐用温度50°C向上という開発目標を達成することができた。

Fig.8に、0.2%クリープひずみに達するまでの時間をラーソンミラー・パラメータ（LMP）で整理した結果を示す。図中の温度はTMW合金とU720Liの耐用温度（630MPaの応力で100時間後に0.2%クリープひずみに到達する温度）の差を示している。TMW合金はU720Liに比べていずれの応力レベルでもLMP値が高く、TMW-2は58°C、TMW-4M3は76°Cの耐用温度の向上を示しており、引張試験結果と合わせて「現用の鍛造ディスク用合金の中で最高の耐用温度を有するU720Liに比べて50°C耐用温度を向上させる」という目標を達成することができた。

Fig.9にクリープ破断時間をLMPで整理した結果を示す。TMW合金はU720Liに比べて大きなLMP値を示し、高いクリープ破断強度を有することがわかる。U720Li

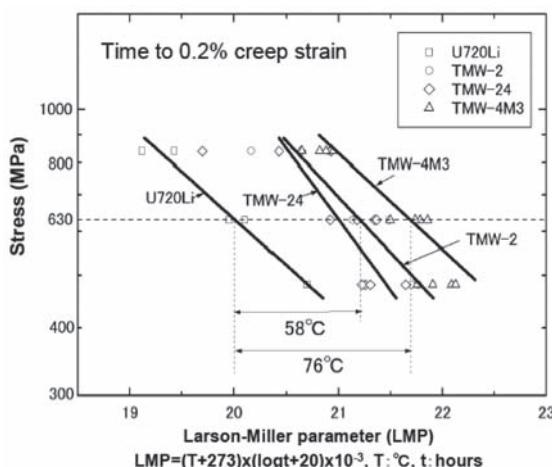


Fig. 8 Larson-Miller plot of 0.2% creep life of U720Li and TMW alloys.

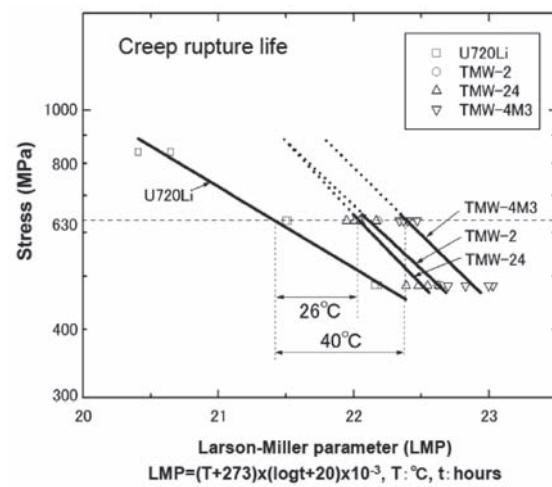


Fig. 9 Larson-Miller plot of creep rupture life of U720Li and TMW alloys.

に比べてTMW-2およびTMW-24は26°C、TMW-4M3は40°Cの耐用温度（630MPaの応力で100時間後に破断に到達する温度）の向上を達成することができた。

Fig.10に650°Cにおける歪制御型低サイクル疲労試験結果を全ひずみ範囲と破損繰り返し数との関係で整理した結果を示す。TMW合金はU720Liに比べて長い低サイクル疲労寿命を有している。

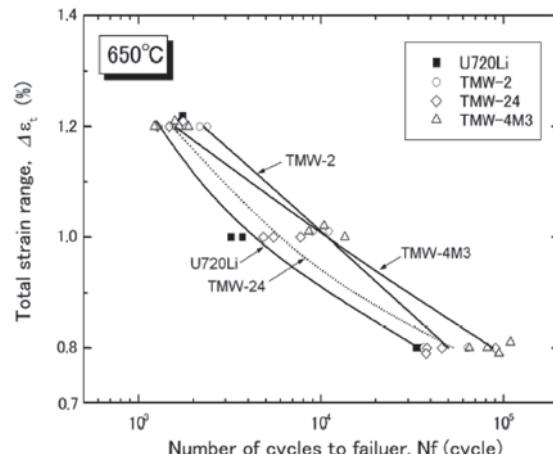


Fig. 10 Strain-controlled low cycle fatigue life at 650°C.

Fig.11およびFig.12に、応力比（ $R=P_{min}/P_{max}$ ）が0.05の条件で400°Cおよび650°Cでの亀裂伝播速度（ da/dN ）と応力拡大係数（ ΔK ）の関係を示す。TMW合金の亀裂伝播特性がU720Liに比べて同等以上であることがわかる。

以上示したTMW合金の優れた高温強度特性は、TMW-24の γ' 量（Table 2）はU720Liと同等であることから、 γ' 量向上によるものだけではないと考えられる。他の強化機構に関して転位観察などを行って究明中であるが、1つは、Co, Ti量が多いTMW合金の γ' 相組成： $(Ni, Co, 他)_3(Al, Ti, 他)$ がU720Liと異なるために、転位による γ' 相のカッティングで進行する変形が抑制さ

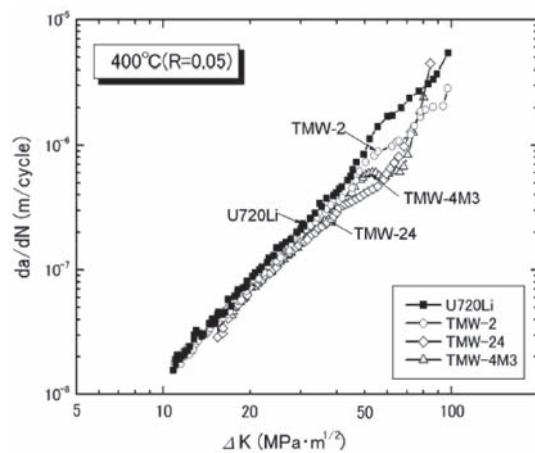


Fig.11 Fatigue crack growth rate at 400°C.

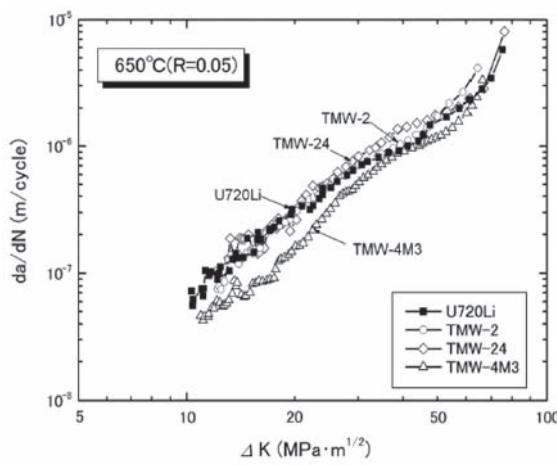


Fig.12 Fatigue crack growth rate at 650°C.

れたことが考えられる。もう1つは、TMW合金では強度試験後に双晶が観察されていることから、Co添加により積層欠陥エネルギーつまり双晶の形成エネルギーが低下して双晶が容易に形成され、転位と双晶の相互作用が働いて変形抵抗を高めたものと思われる^[17]。

5.まとめ

航空機エンジンの高温タービンディスク用超耐熱合金の耐用温度向上を目的として、新しい概念にもとづくNi-Co基合金(TMW合金)の開発を行った。50Kg溶解から出発するサブスケールの鋳造・鍛造法(C&W法)による鍛造品試作を行ない、既存合金の中で最強のU720Liに対し耐用温度が向上し、組織安定性、鍛造性も良好であることを実証した。

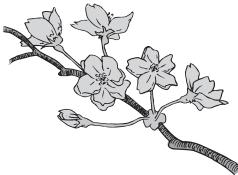
次に、2ton級トリプルメルトから出発する実用規模のディスク模擬形状品をC&W法によって試作した結果その製造に成功し、ディスクに求められる結晶粒径10~20μmの微細均一組織を有していることを確認した。これにより、TMW合金が実用プロセスによる量産適合性を有することを実証した。

ディスク模擬形状品を評価した結果、TMW合金はU720Liに対して0.2%クリープ強度では58°C~76°C、0.2%耐力では50°C以上の耐用温度向上を示した。低サイクル疲労強度および疲労亀裂伝播特性は同等以上であった。

今後は研究機関、素材メーカー、エンジンメーカーなどが連携を図りながら国産初の高温タービンディスク用C&W合金であるTMW合金の実用化を進め、国内はもちろん世界の航空機産業のさらなる発展に貢献したい。

参考文献

- (1) R.C.Reed: The Superalloys-Fundamentals and Applications, Cambridge University Press, Cambridge UK (2006)
- (2) NEDO: 高温タービンディスク製造技術開発に関する先導調査報告書, 平成18年9月.
- (3) 山崎道夫: 高性能結晶制御技術ハンドブック, 日本規格協会, 1991.
- (4) I.Molyneux : "Rolls-Royce Ti Supply Chain", CBM Global Trends Conference 2005, Oct. 2005.
- (5) UEET (Ultra-Efficient Engine Technology Program) : Fiscal Year 2002 Performance Report.
- (6) Y.Gu, H.Harada, C.Cui, D.Ping, A.Sato, J.Fujioka : Scripta Materialia, 55 (2006), pp.815-818.
- (7) C.Y.Cui, Y.F.Gu, D.H.Ping, T.Fukuda, H. Harada : Materials Transactions, Vol.49, No.3 (2008), pp.424-427.
- (8) C.Y. Cui, Y.F.Gu, D.H.Ping, H.Harada : Intermetallics, 16 (2008), pp.910-916.
- (9) C.Y.Cui, Y.F.Gu, D.H.Ping, T.Fukuda, H.Harada : Materials Science and Engineering A, 485 (2008), pp.651-656.
- (10) C.Y.Cui, Y.F.Gu, D.H.Ping, T.Fukuda, H.Harada : Metallurgical and Materials Transactions A, Vol.40A (Feb. 2009), pp.282-291.
- (11) 福田 正, 谷 月峰, 崔 傳勇, 原田広史: 日本金属学会誌, 第71卷, 第9号 (2007), pp.667-671.
- (12) C.Y.Cui, Y.F.Gu, H.Harada, A.Sato : Metallurgical and Materials Transactions A, Vol.36A (Nov.2005), pp.2921-2927.
- (13) Y.F.Gu, C.Cui, H.Harada, T.Fukuda, D.Ping, A.Mitsuhashi, K.Kato, T.Kobayashi, J.Fujioka : Superalloys 2008, Eds. R.C. Reed et al. (Seven Springs, PA, USA:TMS, Sept. 2008), pp.53-61.
- (14) Y.F.Gu, C.Cui, D.Ping, H.Harada, T.Fukuda, J.Fujioka : Materials Science and Engineering A, 510-511 (2009), pp. 250 -255.
- (15) 福田 正, 三橋 章, 加藤公明, 原田広史, 谷月峰: 日本ガスタービン学会誌, Vol.35, No.4 (2007.7). pp.275-279.
- (16) J.M.Moyer, L.A.Jackman, C.B. daszak, R.M. Davis, R.F. Jones : Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives, Eds. E.A. Loria (TMS, 1994), pp. 39-48.
- (17) Y.Yuan, Y.F.Gu, C.Cui, T.Osada, T.Yokokawa, H.Harada : Advanced Engineering Materials, 13 (2011) , pp. 296 -300.



人生の転換点

橋木 康夫^{*1}

OHTEKI Yasuo

私は今年の1月で79歳となり丁度日本人男性の平均寿命に到達したことになる。人生にはいくつかの転換点があり、あの時もし別の道を辿っていたらと考えることはできても実際にやり直すことはできない。私の転換点を思い出すまま喫茶室にいるつもりで書いてみたい。

(1)ガスタービンとの出会い

日立製作所に入社（1955年）して数年間蒸気タービンの設計を担当していた。1960年代前半、ガスタービンの需要も次第に高まって日立でも米国のGE社と提携することとなり、私はガスタービンの設計担当に業務が変わった。これがガスタービンとの出会いである。1号機受注まで来る日も来る日も全国をとびまわった。何とか1号機の受注が決定したのは1965年のことである。ただちに私はGE社との連絡のため米国出張を命ぜられ生まれて初めて航空機に搭乗する。空から見るロッキー山脈はまるで地球の襞のように雄大で、ニューヨークの摩天楼に圧倒されこんな国となぜ戦争したのかとしばし感慨に耽った。この1号機は出力6,000kW、圧力比6.0、タービン入口温度800°C、2軸機で、現在の最新鋭機とは比較にならないが当時は最先端のガスタービンであった。最大の課題は1年という短納期で、提携先のGE社では「初めて製作するのに1年では無理だ!」と言われたが、寝食を忘れ頑張った。この努力が報いられ約束した納期で完成することができた。その後長年にわたりガスタービンの業務に携わることになるが、これが私のガスタービン技術者としての原点である。

(2)茨城県工業技術センター

社会人になって30年たった1985年の真夏のある日工場長に呼ばれ「今度、茨城県の工業技術センターに行ってセンター長になってもらうことになった。」と告げられた。正に青天の霹靂、ガスタービン、原動機、発電所など狭い範囲の技術しか経験したことのない私である。いきなり県庁の地方公務員とか工業技術センターと言われてもどんなことをすればよいのか理解できない。当時つくばでは科学万博が開催され、テレビでは日本航空123便が御巣鷹山に墜落した事故を放映していたことが記憶に残っている。数日後、休日に県庁から自宅にお見えになり工業技術行政全般の説明をうけ状況がようやく理解できた。工業技術センターはそれまであった工業試験所・食品試験所・窯業指導所・繊維工業指導所を組織的

原稿受付 2012年1月20日

*1 〒312-0053 ひたちなか市外野1-18-12

に統合した新しい組織であること、県内の中小企業に対する技術支援を強化し下請け形から研究開発形に脱皮させたいと言うことであった。その後県知事から正式な辞令をもらい工業技術センターに向かう。全職員を前にして就任の挨拶、これが地方公務員としての第1歩であった。翌日「茨城新聞」の一面トップ記事で大きく報道され責任の重さに身の引き締まる思いであった。

工業技術センターが公設の試験研究機関として依頼試験中心の業務形態から研究業務へと重点を移す過程で、業界との関係が薄くなるのを緩和しようと研修事業を強化することにした。これが企業の若い技術者との交流を深める良い機会となって、共同研究につながったと思っている。

(3)東日本大震災と火災

2011年3月11日の大地震、この時私は所要のため隣の町まで外出していたが、初めて経験した震度6強の大きな地震に驚きすぐ帰宅することにした。通常なら車で20分のところであるが、停電で交通信号は消え、車は渋滞し、石垣が倒壊し、店舗の側壁やガラスが道路上に散乱しており自宅にたどり着くのに1時間以上必要とした。帰宅してみると自宅の屋根瓦は壊れ地上に散乱しており、部屋の中の箪笥は倒れ引き出しの中のものは飛び出し足の踏み場もない有様であった。停電で断水の状況の中で時間のみ過ぎていく。3月13日ようやく復電、ホッとしたのも束の間、夜になって隣家から出火、消防はすぐかけつけてくれたが地震の影響で断水中のため手間取った。近くの小学校のプールから水を引いて約1時間後に鎮火することができた。この火災のもらい火で自宅も部分的に被害を受け電力の引き込み線も焼損し再び停電することとなり、通算18日間電気のない生活を強いられることとなる。勿論電灯は点らず、電話は不通、テレビは視聴不能、冷蔵庫・電気釜など家電品は使用不能で、情報から隔離され夜間は細々とロウソクの明かりで過ごすことになり、電気の有難味を改めて認識することとなった。

大地震とその後の火災、これが私の人生の転換点になるか、まだ分からぬ。しかし災害に対する考えが大きく変わったことは確かである。

1965年の北アメリカ大停電の時は対策としてガスタービンの需要が高まり、私の勤務していた工場でも受注が急伸し多忙を極めたことが思い出されるが、今回の東日本大震災では如何であろうか。

2011年国際ガスタービン会議大阪大会

1. 全般

武石賢一郎^{*1}
TAKEISHI Kenichiro

第10回国際ガスタービン会議が、大阪中之島の大阪国際会議場にて、2011年11月13日(日)から18日(金)までの6日間にわたり開催された。前回に引き続いて米国ASMEのガスタービン部門であるInternational Gas Turbine Institute (IGTI)、日本機械学会、日本航空宇宙学会をはじめとして英国、ドイツ、フランス、イタリア、韓国等世界各国の10学会および国内の25の共催・協賛団体の多大なる協力のもと実施された。本大会は日本ガスタービン学会が公益社団法人に移行した後の初めての国際会議の開催である。

参加登録者数は、国内から366名、海外から16ヶ国、115名の合計481名であり、海外からの参加者が前回に比べ36%以上増え、国際会議に相応しい会議となった。

本大会が10回大会であることを記念して、第1回大会が開催された1971年からの40年間におけるガスタービンの発展について、開会初日のPlenary Talkとして講演が行われた。また第1回大会から第9回大会を振り返るIGTC10回大会記念写真展示が催され、さらに高校生から大学生・一般に向けた3件のガスタービンの講演からなる無料公開セミナーを開催し、いずれも盛況であった。

大会を盛り上げる行事として、ウエルカムレセプション、バントケット、見学会が計画され、いずれも盛会裏に行われ、好評を得た。展示会は大阪国際会議場10階の展示ホールにおいて実施された。展示ホールではガスタービン実機・模型、ターボ過給器、関連計測機器および数値解析ツール等を中心に39機関からの出展(79小間)があり、また出展者有志による展示イベントを実施する企画などにより、4日間の展示期間中の延べ入場者数は3,950名を越え大変好評であった。また、10階展示室においては、IGTC記念写真展示と同室で、10大学14研究室を中心とした研究活動紹介がなされた。

今回の国際会議において採択された論文総数は175編であり、内国内101編、海外74編と前回大会と比較して海外からの採択論文数は40%増加し国際会議に相応しい論文割合になった。講演参加者は多数にのぼり、講演会は大変盛り上がった。

Keynote Speechでは(1)作動安定のための遷音速軸流圧縮機のケーシングトリートメントの形状の最適化、(2)ターボ機械の空力騒音の最新動向、(3)低炭酸ガス排出の車両用超小型ターボチャージャー、(4)太陽熱発電および



図1.1 大会会場の大阪国際会議場

蒸気タービンの最新技術動向、(5)リークおよび段間のシールを考慮した蒸気タービンの空力性能の最適化について、(6)軸流ファンに空気分離器を適用した場合の旋回失速の抑制メカニズムについて、(7)フィルム冷却の有り無しにおける空力損失について、の7件の講演があった。

Plenary Talkでは(1)日本ガスタービン学会主催国際ガスタービン会議(IGTC)の40年にわたる発展を振り返って、(2)ヨーロッパの航空および飛行における研究プログラムの紹介、の2件の講演があった。

Invited Lectureでは、(1)NASAにおける将来推進システムの研究開発プログラムの紹介、(2)航空機の地球環境負荷低減に向けた最新の航空エンジン技術について、(3)如何に日本およびアジアで低炭素循環型社会を作り上げるか—モデルによるシミュレーションとロードマップ—、の3件の講演があった。

Special Talkでは、(1)「プロのように学び考える！」、(2)「若いガスタービン専門家に期待すること」の2件の講演があった。

Forumでは、(1)地球環境問題と炭酸ガス排出抑制のための航空エンジン技術のトレンド—長期展望—、(2)アジアにおけるエネルギー・環境問題、の2件につき活発な討議がなされた。

Panel Discussionでは、(1)地球環境問題と炭酸ガス排出抑制のための航空エンジン技術のトレンド—短中期の

*1 IGTC'11実行委員長

大阪大学 大学院工学研究科 機械工学専攻

展望-, (2)動力エネルギー機器における炭酸ガス排出の抑制, の2件のテーマに付き活発な討議があった。

Technical Sessionでは、66室で172編の論文が発表された。採択論文数175編に対して3件のキャンセルが発生した。Technical Sessionの会場は、大阪国際会議場の10階および12階に会議室が集中していることもあり、8室パラレルの講演ではあったが、聴講者の移動もスムーズで好評であった。ガスタービンに関連したテーマとして実機開発、軸流ファン、遠心・軸流圧縮機技術、遠心・軸流タービン技術、燃料・燃焼技術、タービン冷却技術、騒音、翼・軸振動、材料・コーティング技術、CFD技術、運用・補修技術、制御・計測技術、新サイクル技術など、広い分野にわたり最新の開発および研究成果が発表され活発な質疑がなされた。本大会から新しくテーマとして蒸気タービンが加えられ13件の発表があり活発な討論がなされた。

会議中に行なった行事では、Welcome Receptionに約100名、リーガロイヤルホテルの山楽の間で開催した



図1.2 初日開催の公開セミナーの聴講風景

Banquetには190名以上が参加した。

Plant Tourは訪問先の異なるTour-1とTour-2がアレンジされた。Tour-1には27名が参加し、大阪ガス(株)泉北LNG Power Plantおよび関西電力(株)堺港発電所を見学、Tour-2は、38名の参加のもと、三菱重工業(株)高砂製作所および川崎重工業(株)明石工場＆西神工場を見学した。

東日本大震災、福島第一発電所の災害そして円高という三重苦を乗り越え、以上のように、わが国および海外の共催・協賛団体、関連企業および関係者のご尽力により、参加者総数が481名、採択論文総数は175編と国際会議を成功裏に終了させることができた。1971年の第1回大会以来、同規模の国際会議をほぼ4年に一度のペースで継続的に開催することができ、本国際会議は名実ともに国際的なものとなった。これは、本国際会議が、わが国で唯一のガスタービンに関する国際会議として世界的にも認知されていることの証であると考えられる。ガスタービンの益々の発展と平行して、国際交流の場としての本会議のさらなる発展を祈ります。



図1.3 パンケットでの琴の演奏

2. 10回大会記念行事

藤岡 照高^{*1}
FUJIOKA Terutaka

岡井 敬一^{*2}
OKAI Keiichi

長谷川武治^{*3}
HASEGAWA Takeharu

野崎 理^{*4}
NOZAKI Osamu

1. 10回大会にあたって

IGTC'11は、1971年に第1回大会が行われてから40周年であるとともに10回目の開催という節目にあたる国際会議であった。これまでの取り組みを振り返り、さらに

未来志向で本会議が位置づけられることを期して、特にアナウンスはなかったが、従来とは異なる3つの取り組みを行った。1つ目は、Plenary Lectureの枠で、大田英輔早稲田大学名誉教授(IGTC 2007実行委員会委員長)による、10回大会記念講演を実施した。2つ目は、川口修慶応義塾大学名誉教授(IGTC 2003実行委員会委員長)による10回大会記念写真展示である。3つ目は、これまでIGTCでは行われていなかった、一般向けセミナーで

* 1 IGTC'11総務委員長、(財)電力中央研究所 エネルギー技術研究所
* 2 IGTC'11実行委員会幹事、宇宙航空研究開発機構研究開発本部
* 3 IGTC'11総務委員会、(財)電力中央研究所 エネルギー技術研究所
* 4 IGTC'11総務委員会、宇宙航空研究開発機構研究開発本部

ある。渡辺紀徳東京大学教授、宇宙航空研究開発機構（JAXA）二村尚夫氏、元プラット・アンド・ホイットニー・カナダ（PWC）吉中司氏による講演が行われた。これら3件はIGTC'11実行委員会で計画され、具体的な企画・準備は、筆者らによって進められた。

2. 10回大会記念講演

国際ガスタービン会議が1971年に東京で最初に開催されてから数えて今回が10回目であることから、この40年間におけるわが国のガスタービン関連の技術開発の歴史、およびこれまでの9回の国際会議の変遷を辿る記念講演が企画され、“Steps of IGTC; from 1st to 10th, with Background of Gas Turbine R&D in Japan”というタイトルの下、大田英輔教授によって講演がなされた。概要は以下のようなものであった。

戦後のガスタービンの開発、生産を禁止された期間にガスタービン関連の技術、研究設備の多くが失われたが、関係者の努力により研究、開発が継続して行われ、1971年には第1回の国際ガスタービン会議を開催するに至った。その後は初回の会議を契機として設立された日本ガスタービン会議（1976年から日本ガスタービン学会）によって今日まで4～6年に一度の頻度で国際会議が開催されてきた。

第1回当初から講演会と併せて展示会を行うという現在の形がスタートした。その後の国際会議は我が国のガスタービン技術の開発の進展とともに各国から多くの参加者と論文を集め、海外の学会との協力関係も得ることが出来、名実ともに国際的に認められる会議となつた。

毎回の国際会議ではその時々の最新技術や技術的課題などを取り上げ、各国の研究者、技術者を招いて特別講演やパネルディスカッションが行われた。また、国際会議では幅広い専門分野の講演発表と質疑応答のみでなく、ウェルカムレセプション、パンケットや見学会などのイベントも各国のガスタービン技術者の情報交換と交流の場として利用してきた。

国際会議の継続的な開催の背景には数多くのガスタービン関連の国家プロジェクトへの企業、研究機関の参加があり、その成果は我が国を支える産業技術としてガスタービンの先進技術の開発、発展を支えてきたことを歴史的経緯を交えながら解説された。こうしたこれまでの努力の積み重ねの結果として、我が国のガスタービン技術は事業用発電装置、非常用発電装置、コーチェネレーション装置、航空エンジンなど、我が国の多くの分野で活用され続けており、東日本大震災でもその信頼性が証明されている。

過去40年のガスタービン関連技術の発展を振り返り、これまでの国際会議の歴史と関連させて総括的にまとめられたその内容は多くの参加者、特に若い技術者、研究者には大変興味深いものであったと推察され、今後の研究、技術開発の参考になるものと思われる。



図2.1 10回大会記念講演の状況

3. 10回大会記念写真展示

IGTC第10回開催を記念し、1971年の第1回国際会議から2007年の第9回国際会議までの概要と講演会場や展示会場の風景、パンケット、見学会等の写真を各回毎にポスターに纏めて展示がなされた。また、初回以来40年における発表論文数等の推移や時代背景などを表に纏めたポスターを展示するとともに、図2.2に示すように、各会議のProceedings, Abstracts, Circular等をポスターの下に展示した。

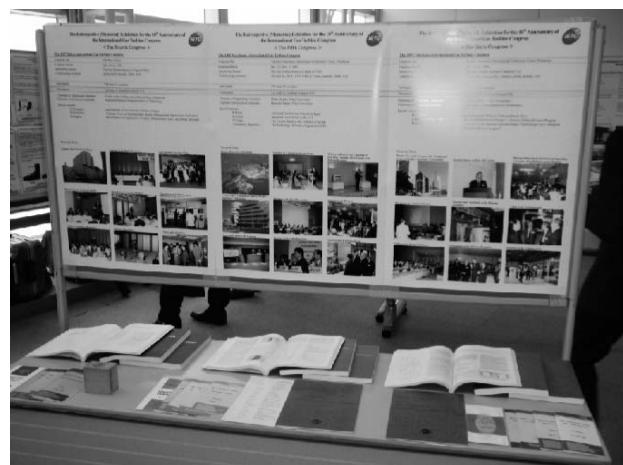


図2.2 展示パネルと展示物

10階の大学研究成果をポスター展示している展示会場に併設して、また12階のメインホール前のRegistration desk横の壁面への展示ボードを設置することによって、前記した写真および資料を会議開催中常設展示した。メインホールが多くの参加者が集まる場所であったため、記念展示に目を止める人も多く、ボードの前で写真を見ながら思い出話をする姿も見られた。先に紹介した記念講演と合わせて、常設の写真展示を行うことで、過去10回にわたっての技術や人の交流の積み重ねを振り返る機会にもなり、さらに次の第11回大会へ向けた意気込みが参加者らの間で語られていたようあり、節目の今回にこうした写真展示を実施することが出来たことは意義があったものと思われる。今後、こうした写真は、計画的継続的に収集し、学会活動を保存していくことと致したい。

4. 一般向けセミナー

11月14日(月)17時より特別会議場において、ガスタービンを一般の方々に理解していただく事を目的として、高校生・高専生・大学生・一般を対象としたガスタービン公開セミナーが開催された。特に2011年はガスタービンが世間から注目された事もあり、ガスタービンの有効性等について一般の方々に知っていただき、これからガスタービン産業について若者たちに考えて貰える機会となるよう、内容の充実を図った。その結果、発電用を含めたガスタービン全般にわたる概説に始まり、産業としての日本の航空エンジンの歴史と将来、及び航空用ガスタービン技術開発の歴史と方向性について、それぞれ専門の方々にご講演いただく事にした。国際会議開催中の一般向け講演であったにもかかわらず、学生149名を含む多数の参加を得ることができた。

セミナー開会にあたり司会の野崎より三名の講師が紹介され、リレー形式で講演が行われた。

第一登壇者は東京大学教授渡辺紀徳教授で、「ガスタービンのしくみ・電力とジェットパワーの源 -」と題して、ガスタービンの仕組みと種類、発電用ガスタービンならびに航空用ガスタービンについて、現状の課題、東日本大震災での活躍の事例、今後の方向性等について具体例を交えた説明が行われた。広範な内容をコンパクトにまとめたものであり、学生や専門家にとっても密度の濃い内容であった。渡辺教授による基本の解説は、続く2氏の講演への導入となった。

次に、JAXA二村尚夫氏による、「がんばれニッポン匠の技を空に活かそう」と題した、特に日本におけるジェットエンジンの開発の歴史を中心に据えた講演がな

された。我が国における技術開発の積み重ねがV2500の国際共同開発に至る経緯や、個々の要素の製造技術においても日本の技術は世界でトップレベルにある事などが紹介され、日本経済にとって航空産業は重要であり、そのために日本の伝統的な基盤技術を活かす必要性が強調された。

そして最後に、元PWC吉中司氏により「飛行機の心臓-ジェットエンジンの変遷と将来像」と題した講演がなされた。ターボファンエンジンの実用化が一気に進んだ歴史的背景が示された後、現在のジェットエンジンの課題が説明され、そして今後の方向性としてギアードファン、オープソローターなどが紹介された。最新のA380による航空機と自動車の燃費の比較や例え話などもあり、一般の入場者も多く関心を抱いていた。

以上の講演の後、会場から戦後の米国での技術開発や将来の燃焼器の温度上昇に関する質問があった。いずれも講師より的を射た回答をいただき、本公開セミナーに出席された専門家も一般の方々も十分に納得されたと考えられる有意義なセミナーであった。



図2.3 一般向け公開セミナーの講師の方々

3. 特別講演

渡辺 紀徳*¹
WATANABE Toshinori

中田 俊彦*⁴
NAKADA Toshihiko

辻本 良信*²
TSUJIMOTO Yoshinobu

山本 誠*³
YAMAMOTO Makoto

今成 邦之*⁵
IMANARI Kuniyuki

牧野 敦*⁶
MAKINO Atsushi

1. Plenary Talk

2件のPlenary Talkが企画された、そのうち、Plenary Talk 1は、第10回国際会議を記念したものとして開催した。詳細は2章(10回大会記念行事)を参照されたい。

IGTC'11論文委員会

- * 1 東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻
- * 2 大阪大学大学院基礎工学研究科機能創成専攻
- * 3 東京理科大学工学部機械工学科
- * 4 東北大学大学院工学研究科技術社会システム専攻
- * 5 (株)IHI 航空宇宙事業本部技術開発センター
- * 6 宇宙航空研究開発機構研究開発本部

ここではPlenary Talk 2の概要を述べる。

Plenary Talk 2 : Europe's Framework Programme for Research in the Field of Aeronautics and Air Transport

航空エンジン環境技術の長期戦略に関するフォーラムの直後に、欧州委員会のDenos博士による標題のPlenary Talkが行われた。本講演では、現在の7th Framework Programmeで実施されている航空関係の研究が紹介されるとともに、近年設定された日欧共同研究プログラムの概要と今後の展望について解説された。

このProgrammeは2007年から2013年まで実施されている科学技術全般にわたる欧州の研究開発の枠組みであること、航空関係には年間約1億4千万ユーロが割り当てられていること、その内容は環境（温暖化対策・エミッション）、経済性、エネルギー（燃費、代替燃料）、社会（低運賃、安全、定時性）の4つに分類されていること、研究項目としては機体空力特性および新概念・複合材・推進技術・代替燃料・設計システムなどが取り上げられていること、新たな構成のエンジンとしてギアードターボファンの高度化・反転ファン・オープンローター方式反転ファン・中間冷却再生なども取り上げられていること、などが解説された。また、2012年の研究提案公募が紹介され、応用研究（L1）の中にCoordinated Call with Japanという枠があり、欧州と日本からそれぞれ400万ユーロが提供されることであった。

2. Plenary Invited Lecture

3件のPlenary Invited Lectureが企画された。

Plenary Invited Lecture 1 : NASA's Future Propulsion Systems Research and Development

NASAにおける推進システムの研究開発動向が紹介された。講演予定であったNASA Glenn Research Center (GRC) のRamon Lugo氏が急用で来日できなくなり、NASAの同センターのChunill Hah博士が代理で講演を行うこととなった。

具体的に説明された技術内容は、Air-Breasing Propulsion, In-Space Propulsion and Cryogenic Fluids Management, Physical Science and Biomedical Technologies in Space, Communications Technology and Development, Materials and Structure for Extreme Conversionなどであるが、航空分野では経済性、環境適合性、安全性に力を入れている旨説明があった。高揚/抗力機構、軽量構造、層流翼、燃料適合低NOx燃焼器、オープンローター、超高バイパス比ターボファン、空力音シールド構造、分散型推進などを用い、70%の燃料節約、75%のNOx削減、90%の騒音削減等のターゲットが示された。



図3.1 Plenary Invited Lecture 1 の講演状況

Plenary Invited Lecture 2 : Advanced Aeroengine Technologies to Reduce the Effect of Aviation on the Environment

本講演は、環境問題に直面している航空エンジンの最新テクノロジーの紹介を意図して企画された。講演者として予定したRolls-Royce社のParker教授が来日できなかつたため、Rolls-Royce社David Koyama氏によって講演がなされた。

講演内容は、航空エンジンに課せられた環境適合性に関する概要、Rolls-Royce社で取り組んでいる環境適合型の要素技術に関する紹介であった。CO₂削減とSFC低減に関する動向が示された後、オープンローター、希薄燃焼技術、バイオ燃料の利用、統合電子制御システム、先進サイクルなどに関する技術開発例が紹介された。一口に環境対応といつても様々なアプローチ方法があることを改めて実感できる内容であった。また、Charles RollsとHenry Royceが1904年に初めて会ったときから、Rolls-Royceの精神は変わっておらず、常に革新的な航空エンジンの開発に挑戦し続けている旨の説明があった。

Plenary Invited Lecture 3 : How to Develop Sustainable Low-Carbon Society (LCS) for Japan and Asian Countries? -Model Simulation and Roadmap

喫緊の世界的課題である環境問題を取り上げるために本講演が企画された。本講演では、特に日本を含めたアジア地区を対象とし、未来に低炭素社会を実現するためのロードマップと、それを確実にするためのシミュレーション手法を取り入れた研究成果について国立環境研究所の藤野博士によって講演がなされた。

地球環境問題を緩和するための政策目標を3E (Energy, Environment, Economy) に安全保障Securityを加えた「3EプラスS」とすれば、今後我々が進むべき方向は3S (Smart, Secured, Sustainable) にResilienceを加えた「3SプラスR」であるべきとの持論が展開された。東日本大震災を経てエネルギー供給の脆弱性を体験した今だからこそ、原油備蓄だけに依存した備えに加えて、地域毎に最小限の自立性と持続性を保有する分散型エネルギーシステムの構築が不可欠であるとの認識は、新鮮でかつ的確であった。

従来までの低炭素社会へのシナリオは、先端技術に依存する「ドラえもんの社会」と、自然環境への調和を重視する「サツキとメイの社会」を唱ってきた。今後は、先端技術の利点を取り入れた社会システムデザインの重要性と、回生力の高いレジリエンスを地域社会に実装する仕組み作りへと、我々の取り組む課題がシフトしてきたことをおおいに実感させられた内容であった。

3. Special Talk

2件のSpecial Talkが企画された。

Special Talk 1 : Learn to Think Like an Expert

IGTC'11において元GEのWisler博士への日本ガスタービン学会名誉会員の授与式が行われ、式典への参加と合わせて同氏による工学教育に関する講演がなされた。

本講演では技術エキスパートと初心者（novice）との違いが知識構造論的な観点から詳細に分析され、エキスパートになるための留意点や方法論が分かりやすく示された。様々な情報において、事実（Facts）、概念（Concepts）、一般化（Generalization）が基本的なタイプであり、これらを明確に区別しつつ利用することで問題の解決が可能となる。エキスパートは技術情報を整理して概念の枠組み（Conceptual Framework）を自分の中に形成しており、個々の設計課題や問題をパターンとして捉え、構造化された知識を基礎として総合的に考える。これに対して初心者は、個々の事象に対応して断片的な解決を試みる。技術者は構造化された知識体系を構築し、新しい現象・問題に対峙したときに、知識体系に立脚して決定的な判断を下せるような思考（Critical Thinking）を行える、エキスパートの思考法を身につける必要がある。そのためには式や理論を覚え込むような旧来の大学における教授法では限界があり、実践を伴い、学生が自ら物事を体験できるような教育プログラムを整備する必要があると指摘された。

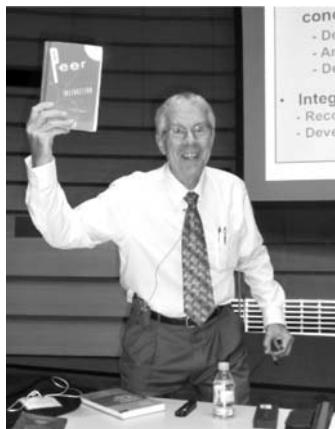


図3.2 Wisler博士の熱弁

Special Talk 2 : My Hope in Young Gas Turbine Professionals -Approach to Technical Opportunities-

元Pratt & Whitney Canadaの吉中司氏を講師として、学生や若手技術者を対象として本講演が行われた。

最初に、コンプレッサ・タービンの効率向上、圧力比上昇、タービン入り口温度上昇によりどれだけのサイクル効率並びに出力上昇が見込まれるかを定量的に示し、どれも簡単ではないがチャンスは残されていることが示された。これらの問題にチャレンジするには、短期的には過去の成功や失敗に学ぶことができるが、長期的には”Outside-the-box thinking”が必要で、その例として超音波による境界層制御や半導体による温度差発電が示された。また、確立された設計基準にはその理由や背景があり、これらを良く理解したうえで適用・改善する必要があることが述べられた。次いで、現状のCFDはたとえば軽負荷の場合は損失をうまく見積もるが、高負荷の場合はそうでないことを例に、過度にCFDに依存することは不十分であり、ターボ機械の基本的な内部流れに対する物理的な理解が大切であることが示された。

多くの人の生命・生活や地球温暖化がガスタービン技術者にかかっていることが東日本大震災の実例も用いて説明され、“困難ではあるがやりがいのある問題にチャレンジしてほしい”ことが若い技術者に対する期待であることで締めくくられた。

4. Panel Discussion

2件のPanel Discussionが企画された。

Panel Discussion 1 : Trends in Aero Engine Technology Associated With Environment Issues and CO₂ Reduction (Short- and Mid-Term Strategy)

環境問題に対する航空エンジンの短・中期戦略を総括テーマとするパネルディスカッションが、6名のパネリストを招いて実施された。

最初に、国土交通省の山口氏が、環境規制を策定する立場から、国際航空に対して年率2%の燃費改善が要求されており、今後、CO₂についても規制化の準備が進みつつあることを解説した。次に、Pratt & Whitney の



図3.3 Panel Discussion 1 の状況

Epstein博士は、Geared Turbo Fanエンジン(GTF)の開発状況を中心に、従来エンジンに対する低燃費、低騒音メリット等について述べた。Rolls-RoyceのWeeks博士は、問題をCO₂と騒音という相矛盾する2つの間のトレードオフとして捉え、燃料消費を減らしてCO₂を大幅低減できるものの低騒音化では劣るオープンローターと、逆にCO₂低減では劣るが大幅な騒音低減が可能なターボファンエンジンの2つの道が存在することを示した。IHIの児玉博士は、CO₂低減には燃料消費量の低減が重要であることを述べた上で、対応として軽量化を挙げ、炭素繊維強化複合材、セラミックス複合材と言った軽量複合材のファン部およびタービン部への適用に向けた技術開発状況を概説した。JALの齊藤氏からは、バイオ燃料の現状とJALにおけるバイオ燃料飛行試験結果を中心に、環境に対する社会活動の報告がなされた。ANAの野口氏は、ANAグループエコロジープラン2008-2011におけるCO₂削減目標の進捗について紹介した。さまざまな議論の後、経済産業省の金井氏から、環境負荷を低減する先進技術開発に対する政府支援をこれからも継続して行っていくとの応援演説があった。

Panel Discussion 2 : CO₂ Reduction in Power Plants

大阪国際会議場における本会議最終日の最後のセッションは、発電部門からの低炭素化をテーマとして、各分野で活躍する専門家3名によるパネルディスカッションを開催した。

はじめに、司会者の東北大の中田教授から、エネルギーおよびカーボンフロー図の日米比較、シナリオ解析の手法、技術習熟の意義、今後のイノベーションへの期待などについて話題提供があった。次いで、ETHのAbhari教授からは、中長期にわたる人類の生活環境の変遷を振り返り、今後進むべき方向性を考える問題提議がなされた。関西電力の砥山氏からは、電気事業者から見た火力発電の効率化への期待が述べられた。ガス複合火力の熱効率向上、微粉炭火力の高度化、IGCC等クリーンコール技術など、これまでの技術向上の変遷と、今後予想される到達目標について、具体的な導入事

例を含めて説明がなされた。東芝の鈴木氏からは、二酸化炭素の回収と貯留技術の最新動向について紹介があった。現在開発が進行中の二酸化炭素回収技術である、高圧条件下での燃焼前回収、定圧条件下での燃焼回収、酸素燃焼による回収といった三種類の技術について、それぞれの特徴と今後の導入見通しが述べられた。全体討議では、高度エンジニア養成におけるマネジメント、金融、政策の重要性、CO₂回収における環境倫理と社会的受容性の確保などについて意見が及び、低炭素技術導入に伴う経済・社会的側面の配慮とその認識を印象づける内容となった。

5. Forum

2件のForumが行われた。

Forum 1 : Trends in Aero Engine Technology Associated with Environmental Issues and CO₂ Reduction.

航空エンジン技術に関する長期戦略に関するフォーラムが開催され、米・欧・日からそれぞれの長期計画の紹介が行われた。

米国からはNASAのKenneth L. Suder氏が講演を行った。NASAの航空部門としては、騒音、NOx、燃費に関するすでに数値目標を設定しており、その実現に向けて種々の検討が開始されているとのことであった。機体と翼に関しては、先進型と一体型の二つが検討されており、いずれもエンジンの改善に命運がかかっているとのことであった。さらなる長期計画の中には、航空機の電動化や高温耐熱材料の導入も視野に入れているとのことであった。

欧州からはEuropean CommissionのDenos氏が講演を行った。EUの取組みとしてはNOxの80%減、騒音の50%減、CO₂の50%減を目指しているとのことで、短・中期目標で実現されるであろう翼の三次元設計、失速の制御などに加えて、GTFの先を行く推進機構の導入などに取組んでいくとの内容であった。

日本からはJAXAの西澤氏が講演を行った。エンジン性能の向上に寄与しうる高バイパス比の実現のためには、



図3.4 Panel Discussion 2 の状況



図 3.5 Forum 1 の状況

橿円形状の新形式エンジン等を研究レベルで検討している旨の説明があった。

会場からは、水素を燃料に用いる可能性について質問が寄せられた。これに対して、水素を燃料に用いることは「challenging」ゆえにNASAは当面、炭化水素燃料、特に、天然ガスを主体に考えているが、長々期的には水素を取上げざるを得ない旨の発言があった。また、EUについては、関連技術の統合に30年は必要であるし、空港等への水素供給体制についても、その確立には時間を要するとの見解が述べられた。一方、JAXAからは、ロケット部門が水素の取扱いに実績もあり、長期的展望では可能性がある旨の心強い発言があった。

Forum 2 : Asian Energy and Environmental Strategy

近年、中国の急速な経済発展などにより、アジア地域のエネルギー状況は非常に流動的である。一方、エネルギー価格の高騰、資源確保、環境保全など地球規模のエネルギー問題も重大となっている。このような状況の中で、日中韓3カ国における最近のエネルギー事情と今後の展望に関する情報交換の場として、このフォーラムが開催された。

はじめに、中国のWen氏が中国における最近のエネルギーに関するトピックスを紹介した。中国では石炭が主要なエネルギー源であることから、IGCCの研究開発が盛んに行われており、また環境対応の必要性からCCS

の技術開発が急務と説明された。同じく、中国のLin氏が地域の温暖化に対する人工的な熱放出の影響に関する考察を発表した。中国の諸都市における温度上昇とCO₂増加のトレンドが示され、1970年代から80年を境に急激な上昇カーブが描かれていることが示された。

次にInha大学のKim教授が韓国におけるエネルギー事情と今後の戦略を解説した。韓国はエネルギー源のほぼ全てを輸入に頼っている状況とのことである。将来的にエネルギーミックスの戦略を立てており、セキュリティが最優先課題と説明された。ガスタービンに関してはIGCCの国家プロジェクトが2006年から2014年までの計画で実施されており、300MWのモデルプラントで42%以上の効率を目指している。

最後に日本の代表として、エネルギー総合工学研究所の黒沢氏が最近のエネルギー状況を紹介した。東日本大震災の地震と津波により、東北電力と東京電力の発電量の30%が失われたが、何とか夏を乗り切ったこと、今後原子力発電が縮退して行くであろうことが述べられた。現状では国のCool Earth 21が維持されており、2050年までにCO₂を50%削減する目標は変更されていない。このための技術として、Clean Coalや安全な大規模原子力が考えられ、またオフショア風力、太陽電池、バイオマスなどの新エネルギーの導入を進める計画とのことであった。



図 3.6 Forum 2 の状況

4. 空力分野

太田 有^{*1}
OHTA Yutaka

柴田 貴範^{*2}
SHIBATA Takanori

伊藤 栄作^{*3}
ITO Eisaku

空力分野の論文の構成は、軸流圧縮機関係が9編（3セッション）、遠心圧縮機関係が4編（2セッション）、タービン関係が15編（5セッション）、CFD関係が6編（2セッション）、空力設計関係が3編（1セッション）で合計37編であった。

軸流圧縮機関連分野では、CFDを用いた11段圧縮機の最適化とOGVの設計法（#064）や、遷音速段での損失低減を指向した翼の最適設計手法の提案（#055）、段数削減に向けた高負荷圧縮機の開発（#136）、遷音速圧縮機におけるスパン方向混合予測（#046）など、設計手法の提案や最適設計に関する論文が発表され、多くの聴衆を集めると共に活発な討論が展開された。この他には、高流量ウインドミル運転時の非定常流れ場に関する実験とCFD（#030）、翼端隙間が広い場合に失速点近傍で発生する翼端漏れ渦の崩壊の影響（#056）、翼面上リプレットによる流れ場への影響と形状抗力の低減（#106）、静翼シール部分からの漏れ流れと主流との干渉に起因する二次流れ損失に関する実験とCFD（#220）など、翼間非定常流れ構造の把握と性能改善に関する論文が発表された。また、エントロピ計測用全温全圧プローブの開発とCFDを用いた検証（#108）も発表された。遠心圧縮機関連分野では、2段圧縮機に発生するサージ特性とその検知（#035）、羽根車-ディフューザ間距離が騒音・性能に与える影響（#040）、GAを用いた低弦節比ディフューザの最適設計（#165）、およびCFDを用いた渦型室の最適設計法の提案（#174）が発表された。遠心圧縮機に関するセッションは、最終木曜日に設定された影響もあり、広大な講演室に比して参加人数が少なく、残念ながら質疑応答や討論も低調であった。

タービン関連分野では、発表の大半が軸流タービンであり、ラジアルタービンに関する発表は小形ラジアルタービン入口流れの最適化（#162）と基本的設計開発手法の提案（#007）の中に適用例として取り上げられたに過ぎなかった。軸流タービン関係では、翼間通路内

の燃焼ガス解析（#020）、計測用プローブとの干渉問題（#194）、二次流れ損失とその最適化に向けた詳細な内部流計測（#113）、翼端漏れ渦が静翼の非定常流れ構造に及ぼす影響に関する実験研究（#117）、超音速タービン翼列の動静翼干渉に関するCFD解析（#248）、など翼間の非定常流れ構造に関する内容が多く発表された。この他には、翼負荷の変化に伴う二次流れ損失と性能との関係（#063）、非軸対称エンドウォールと壁面コンターリングによる二次流れの低減と性能向上（#076）、入口不均一流の影響に関する全周CFD解析（#175）、1700度級ガスタービン開発に向けた翼の熱・空力設計法（#215）、翼間二次流れとフィルム冷却気流との干渉（#152）が発表された。特色のある発表としては、混合ガスモデルを用いたCFD手法の開発と軸流タービンへの適用例（#125）、層流境界層の遷移メカニズムに関する主流の非定常性の影響が詳細に調査された（#254,#255）。

CFD関連では、ラビリングシールからの漏れ流れ解析（#114）、予冷ターボエンジン用Mixed-flow圧縮機のウインドミル作動時の解析（#205）、車両用過給機の可変タービンノズル部分の解析（#239）、航空エンジン用圧縮機の動静翼列干渉下での着氷現象の解析（#241）などか発表された。また、Cambridge大学のW.N. Dawes教授による格子形成と計算スキームの高速化手法の提案とその実例紹介に関する発表（#072）は多くの聴衆を集めると共に質問も相次ぎ活発な議論が展開された。

空力設計関連では、wide-chord翼列の基本設計法の提案（#135）、Tesla圧縮機のディフューザ設計法に関する実験とCFD（#201）、前方および後方へのスイープ翼が遷音速ファン性能に与える影響（#127）が発表された。

空力設計分野は、Stability EnhancementやTurbocharger Technologyが独立したセッションになった影響もあり、4年前の大会より論文数が減少する結果となった。

5. 伝熱分野

船崎 健一*¹
FUNAZAKI Ken-ichi

伝熱分野は、前回の大会から大きくセッション数を増やし、13のセッションで合計34編（Keynote Lecture 1編を含む）の論文が講演された。セッション構成及び論文数としては、膜冷却関連5セッション（Heat Transfer on Film Cooling I～V）の中で12編、衝突噴流冷却関連2セッション（Heat Transfer with Impinging Jet I,II）の中で5編、数値解析関連2セッション（Numerical Simulation of Heat Transfer I,II）の中で5編、内部冷却関連2セッション（Internal Cooling I,II）の中で6編、連成解析関連1セッション（Conjugate Heat Transfer）の中で3編、計測法関連セッション（Heat Transfer Measurement）の中で2編であった。

国別の発表者（筆頭執筆者）の数は、日本15、中国6、タイ2、欧州5、米国5、韓国1である（韓国からの件数が少ない原因は震災の影響も否定できない）。国外からの発表件数が多く、研究内容も多彩かつハイレベルであり、国際会議に相応しい研究発表になっている。

次に、発表された論文の中から、いくつか注目すべきものを取り上げ簡単に紹介する。

膜冷却関連セッションでは、Keynote Lectureとして、Ligrani教授による膜冷却による空力損失に関する研究例が紹介された。#138では、翼正圧面側の膜冷却特性に与えるインシデンスの変化とそれによる剥離泡の効果が、翼列試験装置及びPSP技術を用いて解明されている。#148では、トランスピレーションタイプを含む4種類のフィルム孔配置についてTSP（Temperature Sensitive Paint）を用いた実験により求めた冷却効率が報告された。#057では、多列のフィルム孔を持つ冷却パネルの冷却効率の計測と流れの詳細な構造を調べるためにLDVを用いた計測結果を実施し、フィルム空気流れの渦構造と冷却効率の関係について詳細な報告がされた。#227では、翼前縁根元部で形成される馬蹄形渦に与えるエンドウォール部からの膜冷却の影響が、PIV/LIF法を用いて詳細に解明されている。#122では、タービン翼列のエンドウォール上流側に設けられた冷却孔からの冷却空気の熱流体特性を、Random Flow Generation法により上流側変動成分を考慮したLES解析

で明らかにしている。#234では、Open FOAMを用いて単孔冷却孔からの冷却空気の非定常挙動をLES解析により解明を試みている。

#085では、Double Jet Film Coolingを発展させ冷却孔出口形状を猫耳状にした場合の熱流体特性をRANS解析によって調査し、その形状が有望であることを報告している。#058では、冷却孔を有する翼前縁モデルを用いて、主流乱れが翼面上膜冷却効率や主流と冷却空気との混合過程に与える影響を、感温液晶法及び非定常RANS解析で詳細に調査している。#195では、翼後縁での冷却空気吹き出し口（Cutback）の冷却側にディンプルを形成したモデルでの膜冷却効率及び熱伝達分布を、IRカメラを用いた過渡応答法により明らかにしている。

衝突噴流冷却関連セッションでは、#257では、噴流に旋回を与えた場合の伝熱特性を調査している。#003では、噴流対向面に3種類の粗面化を施したテストモデルを用いて、高温風洞にてそれらの冷却性能を調査している。噴流孔の形状の効果も調査しており、粗面としては凹化が効果的であるとしている。

内部冷却関連セッションでは、突起付流路に関する詳細な調査（#216, #226）や最適化（#077）、ディンプルなどの比較的新しいタイプの伝熱促進機構を備えた流路に関する調査（#103, #149）やピンフィンの傾斜角の効果に関する調査（#203）も報告されている。

数値解析関連及び連成解析関連セッションでは、#086が膜冷却を有する翼前縁部の温度分布を、#164では蒸気冷却システムで用いられる冷却翼の温度分布を、#204は境界層遷移を有する場合の翼面温度分布を、それぞれ連成解析によって予測している。#198では膜冷却を有する翼面上熱伝達率分布に関する実験データに対して、RANS解析での予測を試みており、乱流モデルとしては遷移モデルを有するSSTモデルが比較的良好な結果をもたらすことを示している。複雑な流れ場の解析を、DESやLESで行っている例も紹介されている（#016, #060）。

その他の研究としては、CMC材で製作されたHP冷却タービン静翼に関する環状翼列試験結果が報告されており、その冷却性能の妥当性とトリップに対する耐久性などが報告されている。

6. 燃焼分野

赤松 史光^{*1}

AKAMATSU Fumiteru

6.1 概要

燃焼関連の一般講演は、CB（1）（燃料）3件、CB（2）（燃焼排出物Ⅰ）3件、CB（3）（燃焼排出物Ⅱ）2件、CB（4）（燃焼現象Ⅰ）2件、CB（5）（燃焼現象Ⅱ）3件、CB（6）（燃焼器開発Ⅰ）3件、CB（7）（燃焼器開発Ⅱ）3件、CB（8）（燃料の微粒化と着火）3件、CB（9）（燃焼の数値解析Ⅰ）3件、CB（10）（燃焼の数値解析Ⅱ）3件の、合計28件（国内21件、国外7件）であった。東日本大震災の影響が心配されたが、前回の2007年とほぼ同数（前回は29件）の講演数となり、燃焼に関連した環境問題や燃料多様化への関心が高い状況が続いていることが伺われる。

6.2 燃料

CB（1）（燃料）のセッションにおいては、バイオ燃料関連の3件の発表が行われた。#013では、天然ガスやバイオマスから合成された液体燃料の燃料特性をジェット燃料と比較するとともに、大型・中型・小型の航空機に使用した際の航続距離や輸送効率などに及ぼす影響に関する報告がなされた。#092では、微生物発酵により生成されたバイオガスの小型ガスタービン用燃料としての燃焼特性に関する報告がなされた。#171では、調理用廃油から合成したメチルエステルをガスタービン燃料として用いた際の燃焼特性に関する報告がなされた。共通する質問としては、バイオ燃料の価格についてであり、これに対しては、通常燃料に比べて高価とのことで、経済的な理由というよりも政治的な理由が背景にあってのこととの感を持った。

6.3 燃焼排気物

CB（2）（燃焼排出物Ⅰ）のセッションにおいては、燃焼排出物関連の3件の発表が行われた。#038においては、完全攪拌反応器、完全攪拌反応器と部分攪拌反応器の連結による燃焼モデルを用いて、異なる組成の天然ガスや合成ガスを燃料として使用した際の、250MWのシングルシャフト産業用ガスタービン燃焼器のNOxとCOの排出特性の予測に関する報告がなされた。#142では、焼結金属上に形成された平面火炎の燃焼温度をバーナへの熱損失を利用して1800K以下としてサーマルNOxの生成を抑制することにより、希薄予混合燃焼の際のプロンプトNOxの生成機構に関する実験結果と、その検証のための詳細素反応を取り入れた一次元伝ば火炎に関する

IGTC'11論文委員会

*1 大阪大学 大学院工学研究科 機械工学専攻

数値解析の結果が報告された。#232においては、ECOエンジンに関して、燃料と空気の急速混合を実現できるNew Jet Swirlerを用いた低NOx燃焼器に関する実験結果が報告された。

CB（3）（燃焼排出物Ⅱ）のセッションにおいては、燃焼排出物関連の2件の発表が行われた。#101においては、航空機用ならびに産業用ガスタービンを対象とし、調理用廃油から合成したメチルエステル化されたバイオディーゼルオイルの燃焼特性に関する報告がなされた。#084では、18MWクラスの希薄予混合燃焼を用いた産業用ガスタービンを対象とした2-scalar flamelet approachを用いたLarge-Eddy Simulation（LES）に関する報告がなされた。

6.4 燃焼現象

CB（4）（燃焼現象Ⅰ）のセッションにおいては、燃焼現象に関連した2件の発表が行われた。#059においては、ダブルスワーラーのプレフィルミングタイプ燃料噴射ノズルを有する1/2スケールのRQL燃焼器の燃料過濃燃焼領域を対象とし、PDA（phase Doppler anemometer）を用いた燃料液滴の速度と粒径の同時計測結果を用いて、燃焼器内の燃料噴霧液滴の燃焼特性に関する報告がなされた。#129においては、実験室スケールの噴霧燃焼バーナに対して、非燃焼時と燃焼時の燃料噴霧ならびに燃焼領域に関する詳細な2次元平面計測結果を用いて噴霧火炎の瞬時構造に関して、燃料噴霧領域と燃焼領域が交互に存在する油滴群燃焼構造が見られることが報告された。

CB（5）（燃焼現象Ⅱ）のセッションにおいては、燃焼現象に関連した3件の発表が行われた。#209においては、高速度時系列PIV計測により得られた伝ば火炎面上流の詳細な速度場を用いて、希薄予混合燃焼時の逆火現象に関する報告がなされた。#235においては、高圧下のマイクロガスタービンの燃焼器の振動燃焼の抑制に関する報告がなされた。#224においては、非燃焼時のガスタービン燃焼器モデルに対して、PIVを用いた速度場の計測結果が報告された。

6.5 燃焼器開発

CB（6）（燃焼器開発Ⅰ）のセッションにおいては、燃焼器開発関連の3件の発表が行われた。#068においては、小型航空機用エンジンに関して、Lean Staged Combustion Conceptに基づく5つの燃料噴射ノズルの試験が実施され、CAEP/4 NOx standardに対して、大

幅なNOx排出量の低減が可能であるとの報告がなされた。#179においては、蒸気冷却を用いたタービン入口温度が1500°C級の産業用ガスタービンに関する報告がなされた。#182においては、NOxとCOの排出濃度が非常に低いDLE(Dry Low Emission)ガスタービン燃焼器に関する報告がなされた。

CB(7)(燃焼器開発II)のセッションにおいては、燃焼器開発関連の3件の発表が行われた。#217では、現在、国家プロジェクトとして推進されているEGR(Exhaust Gas Recirculation)を用いたタービン入口温度が1700°C級の産業用ガスタービン燃焼器に対して、PIVとLESを用いた研究結果が報告された。#236においては、航空機用ガスタービン用の低NOx燃焼器を対象とし、OHラジカル自発光、レザーシートを用いた燃料噴霧からのMie散乱光、PIVを用いた実験結果が報告された。#184においては、ECOエンジンに関して、Lean Pre-mixed Pre-vaporized(LPP)燃焼器に関する実験結果が報告された。

6.6 燃料の微粒化と着火

CB(8)(燃料の微粒化と着火)のセッションにおいては、燃料の微粒化と着火に関する3件の発表が行われた。#081においては、Coaxial Typeの燃料噴射ノズルの液体噴流に対する可視化実験と界面追跡法による詳細数値解析に関する報告がなされた。#145においては、ピコ秒オーダーの極短パルスレーザを用いたLaser-Induced Breakdownによる希薄予混合気のレーザ着火に関する実験結果が報告された。#223においては、ナノ秒オーダーの短パルスレーザを用いた燃料噴霧の着火に関する報告がなされた。

6.7 燃焼の数値解析

CB(9)(燃焼の数値解析I)のセッションにおいては燃焼の数値解析に関連した3件の発表が行われた。#027においては、航空機用エンジンを対象とした、RANSを用いた数値解析に関する報告がなされた。#066においては、#059で発表されたダブルスワーラーのプレフィルミングタイプ燃料噴射ノズルを有する1/2スケールのRQL燃焼器の燃料過濃燃焼領域に対するLESに関する報告がなされた。#071においては、液膜の空気流による微粒化過程の可視化実験と界面追跡法による詳細数値解析に関する報告がなされた。

CB(10)(燃焼の数値解析II)のセッションにおいては、燃焼シミュレーション関連の3件の発表が行われた。#256では、Equivalent Reactor Network(ERNs)を用いた詳細素反応解析の有用性に関する報告がなされた。#187では、メインとパイロットから構成される二段燃焼器に関して、PIV計測、Mie散乱光計測、CFD解析を用いた研究結果についての報告がなされた。#043では、高圧場に形成された噴霧燃焼を対象とし、浮き上がり火炎位置はG方程式を解くことにより決定するという新しい概念を導入したFlameletモデルを用いたLESに関する報告がなされた。

6.8 雜感

終わりに、今回の燃焼関連の一般講演は、噴霧燃焼場に対する複合的光学計測法の適用、燃焼のLESや液体燃料の微粒化機構に関する界面追跡法による詳細数値解析など、質・量ともに充実したものであったが、質疑・応答に関してはさらに活発な議論が必要であるように感じられた。

7. 構造・振動・騒音分野

金子 成彦*1
KANEKO Shigehiko

構造振動関係では、1件の基調講演と10件の論文発表が行われた。

基調講演は、MITガスタービンラボ室長のZoltan Spakovszky先生によるもので、ターボ機械の空力騒音の新展開と題して、目下取り組んでおられる研究について分かりやすく説明して頂いた。内容は、①新型航空機から発生する騒音のシールド効果の評価法、②入口が超音速となる場合のファンローター騒音の評価方法、③低騒音新型二重反転式プロペラファンの騒音設計法の3つであった。新型航空機や新型推進システムには空力騒音の問題が付随しており、解決が困難な問題が多いが、斬

IGTC'11論文委員会

*1 東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻

新たなアプローチによって空力性能を損ねることなく対策できる方法が求められていると結ばれた。

講演の#047は、日本の企業からの発表で、CGS(コジエネレーションシステム)から発生する騒音評価に関するものである。#207は、日本の研究機関からのもので、JAXAで最近行われたジェット騒音を軽減するためのデバイスの性能評価に関するものである。#065は、日本の大学からのもので、ミスチューンによる翼の振動特性改善に関する理論的研究である。振動低減効果に及ぼすパラメータの影響をモンテカルロ法によって評価しているところに特徴がある。#079は、日本の大学からの発表で、超音速ジェットエンジンから発生する空力騒音の低減に関する理論的研究である。#186は、ア

メリカの大学からの発表で、ミスチューンによる翼の振動に関する理論的研究で、MMDA (Modified Modal Domain Approach) という独自の手法を適用しているところに特徴がある。#218は、日本の大学からの発表で、振動翼に作用する3次元非定常空気力の数値計算による解析に関する研究である。#034は、日本の企業からの発表で、調和バランス法に基づいたフラッタ解析ツールの提案とその有効性の検証に関するものである。#093は、韓国の企業からの発表で、遠心圧縮機のインペラ翼がケーシングと接触する現象の解明と対策に関する事例

報告である。#246は、日本の企業からの発表で、新型ファンブレードのスタッキング方法に関するものである。最後は、日本の大学からのもので、フォイル軸受の性能、熱変形、安定性に関する設計ツールの紹介である。

今回の会議では、構造振動関係は4つのセッションで構成されていた。内容が、構造、振動、騒音、軸受と多岐に亘ったためか、各セッションの参加人数はそれほど多くはなかったが、議長の円滑な運営により質問を引き出すことに成功しており、内容の伴った質疑応答が行われていた。

8. 性能分野

壹岐 典彦^{*1}
IKI Norihiko

性能分野では、航空エンジンから航空転用ガスタービン、マイクロタービン、コンバインドサイクルまで様々なガスタービンが取り上げられ、3セッション9件の発表が行われた。

航空エンジンについて二次空気の設計手法が発表された (#010)。また、UAV用ターボプロップエンジンについて、高空での性能試験を試験容器内で実現するために、エンジンの入口、出口の流れと圧力損失に着目して数値解析が行われ (#087)、障害診断についての人工知能的方法が検討された (#107)。航空転用ガスタービンについて、再生可能エネルギー導入のバックアップ電源としてフレキシブルに対応できる様々なシステム導入例が発表された (#259)。

マイクロガスタービンの遠心圧縮機について1次元のモデルを用いた新しいモデリング手法が提案され、性能評価が試みられた (#144)。また、永久磁石発電機付きのラジアルタービンについてシンプルなスラスト荷重の推定方法が提案された (#0170)。

発電用の大型ガスタービンについては、ガス化ガスを燃料とした場合に起こるタービンブレードの過熱について、Fクラスのガスタービンで対策と効果が検討された (#020)。また、既存のガスタービンを酸素燃焼のセミクローズドのコンバインドサイクルとした場合について性能予測が行われた (#231)。さらに、リモートモニタリングセンターのデータによるガスタービンコンバインドサイクルの状態診断について発表された (#190)。

9. 蒸気タービン

田沼 唯士^{*2}
TANUMA Tadashi

齊藤 英治^{*3}
SAITO Eiji

IGTC'11で新たに設けられた蒸気タービンセッションは6セッション (GS 2, OS 4) で15件の論文 (Keynote Lecture 2件を含む) が発表された。

蒸気タービン性能向上に関してはオーガナイズドセッション "Efficiency Enhancement of Steam Turbine" とジェネラルセッションにおいて4件の発表があった。静翼・動翼間の外周側キャビティ形状の軸方向距離と半径方向距離を変化させて、上流の静翼列と下流の動翼列から異なる周期変動を受けるキャビティ領域にお

ける主流との混合現象を制御するモデルタービン試験によって、最大1.7%の段落性能向上が達成できるとの結果を報告した論文 (#002) は、非定常現象に注目した新しい性能向上技術であり、性能向上効果が大きいことで注目された。Keynote Lectureとして発表された "Fluid Dynamic Efficiency Optimization of Steam Turbine Stages Considering Leakage Influences and Inter-Stage Reciprocal Interferences" (清華大学、袁教授) は典型的な高圧タービン2段落を対象として、静翼内径側と動翼先端のシールフィンからの蒸気漏洩も考慮したCFDを用いて、1段目動翼の3次元設計を最適設計システムで自動的に形状を変更しながら、下流段落への影響も考慮するために2段落効率を目的関数として性

IGTC'11論文委員会

* 1 産業技術総合研究所つくば東事業所エネルギー技術研究部門
* 2 帝京大学応用流体力学・エネルギー機械系
* 3 株日立製作所 火力事業部 火力技術本部

能向上を図る最適設計法の発表で、会場に関連する研究をしている参加者が多く、細部に及ぶ質疑討論があった。また、低圧タービン翼列を準3次元流線曲率法を用いて最適設計する方法を用いて300MW機低圧タービンを3.1%性能向上した例が示された(#155)。ラビリンスシール内部にステップを設けて発生させた渦によって漏洩蒸気を削減する新型高性能ラビリンスシールの開発の発表(#173)では、実験と解析で約30%の漏洩量低減が確認されたことが報告された。

タービン翼面の機械加工精度がタービン性能に及ぼす影響を解析的に調べた論文(#146)の発表もあった。

オーガナイズドセッション“Long Blade Technology of Steam Turbine”では、国内蒸気タービンメーカー3社(日立、三菱重工、東芝)において最近開発された1.2m～1.3m級(3600rpm)の最終段長翼の開発に関する発表(#168, #211, #249)がなされた。一般に、このクラスでは動翼先端の入口マッハ数が1を超える超音速翼型設計が必要となり、更に遠心応力が材料強度の限界に近づくことから、各社とも解析と実翼を含むモデル試験を繰り返して信頼性と性能を確保した設計としており、海外から及び国内からの多数の聴衆の関心を集めた。

蒸気タービン翼列の湿り蒸気流れに関しては、凝縮水滴径分布を適切に考慮するためにQuadrature Method of Moments (QMOM)を用いた非平衡湿り蒸気流れのRANS 2次元非定常圧縮性翼列解析法開発の発表(#104)があった。

蒸気タービン翼の非定常流体力予測に関しては、非定常圧縮性RANS 2次元解析と静翼後縁にカスプを付けて近似的に後縁厚みをゼロにした非定常非粘性2次元流れ解析を同時にすることで、静翼列と動翼列とのポテンシャル干渉効果によって動翼に加わる非定常流体力と静翼の後流と動翼列との干渉効果による非定常流体力を分離し、静動翼列間軸方向距離が非定常流体力に及ぼす影響を考察した論文(#053)が発表された。

Keynote Lectureとして発表された”Recent Technologies for Concentrated Solar Power Systems and Steam Turbines”(東芝、沖田氏)の発表には、

海外及び国内からの多数の聴衆が集まり、この分野の技術動向が大変注目されていることが示された。太陽熱を反射鏡で集光してオイルや溶融塩媒体を加熱し、熱交換して発生させた蒸気でタービンを駆動して発電する太陽熱発電システム(Concentrated Solar Power Systems)は北アフリカ、中東、南欧などの地中海沿岸諸国及び北米地区で建設が進められており、既に単機容量50MW以上の太陽熱発電用蒸気タービンが稼働している。CSPの将来性、太陽熱蒸気タービンに求められる特性などが詳細に紹介され、地熱タービンと並ぶ再生エネルギー利用蒸気タービンとして、今後の重要な開発・研究課題になる可能性を感じた。

蒸気タービンの超々臨界圧のセッションでは4編の論文が発表された。そのうち、3編は700°C級A-USC(Advanced Ultra-Super Critical steam condition)の日本の国プロによる材料開発や設計開発を中心としたものであり、1編は欧州でのタービンケーシングなどに適用する鋳造材及びその溶接の開発に関する報告であった。日本からの発表として、大型製造性に限界があるNi基合金をタービンロータに適用するにあたり、12Cr鋼の線膨脹係数に近いNi基合金を開発し、12Cr鋼とNi基合金の異材溶接ロータのモックアップ例の紹介があった(#169)。中圧ロータの高温部に、高圧タービン出口の比較的低温な蒸気を利用して冷却を行うことにより、中圧ロータに12Cr鋼を採用しても700°C以上の蒸気を利用できるタービン構造の設計例の紹介があった(#210)。また、Ni基合金のクリープ強度を支配する析出強化相の温度変化を調整し、相反関係にある鍛造性と高温高強度を満足して800°C級での使用が期待できる新たな材料開発の紹介があった(#176)。これらの発表は、A-USC開発における日本固有のオリジナル技術であって、先進的な技術発表となった。一方、開発着手が最も早かった欧州からは、鋳物材としてAlloy625を推奨している理由や製造例の紹介があった(#188)。また複数の鋳物から溶接モックアップを製造検証した紹介もあり、700°C級の蒸気タービンケーシングや高温弁弁箱などの実用化に向けて準備が整いつつある印象を受けた。

10. 材料分野

吉岡 洋明^{*1}
YOSHIOKA Yomei

材料セッションは、今回蒸気タービン材料のセッションを新設し、先進超超臨界蒸気タービンプロジェクトの材料開発・評価関連の投稿を募ったが、この関連は同じく新設された蒸気タービン分野でプロジェクト報告と

IGTC'11論文委員会

*1 (株)東芝電力システム社

してまとめられたことから、従来通りガスタービン部品の「保守・寿命評価」、「先進材料・補修技術」、「コーティング技術」で分類し、プログラムを構成した。なお、「保守・寿命評価」は応募件数が多かったことから、「損傷・寿命評価」と「き裂進展」とに分割し全体を5つのセッションとし、初日は前者の「保守・寿命」関連の発表

を、二日目は材料開発中心の講演とした。全体で13件の発表ではあったが、初日は30人程度、二日目は立ち見が出るほどで50人程度の参加者が集まり、材料技術への関心の高さを伺い知ることができた。

発表内容は、「保守・寿命評価」では、#199, #185, #075の3件がガスタービンディスクの損傷に関する実機事象解析、実験室での再現試験に基づく現象解明、対策として施工されているショットピーニングの有効性評価に関する一連の研究成果報告であり、#069はガスタービン動翼植え込み部のフレッティング疲労の問題解決のための評価解析結果の報告が、#042と#031ではガスタービン初段静翼の損傷事例紹介および材料劣化と絡めた損傷解析結果の報告が、#061ではNi基合金の疲労き裂進展挙動への結晶方位依存性の基礎的な評価結果の報告が行われ、実機で現在問題となっている動・静翼の損傷を対象とした電力会社を含めた産学の最新の研究成果の報告が行われた。

「先進材料・補修技術」に関しては、#181ガスタービンの高温化には必須な材料となったNi基単結晶合金の

最近のトレンドであるReの添加量を抑えた合金の開発および評価結果についての報告、#008では開発合金の耐食性評価技術として開発したバーナーリグ試験機の開発コンセプトと性能評価結果に関する報告、#074では静翼の拡散ロウ付け補修材料の開発および実機適用評価結果の報告が行われた。

「コーティング」のセッションでは、#118において遮熱コーティングの損傷評価法として、インデンテーション法を用いた界面強度評価法および熱サイクル試験および実機損傷材に適用し損傷解析を行った結果に関する報告が、また、コーティング材の開発では、#180で低熱伝導率遮熱コーティング材の開発および実機への適用事例の報告が、最後の#253では、遮熱コーティング材で最近注目されている、バイオクロア系、ペロブスカイト系およびアルミニ酸塩系の新材料である $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$, SrZrO_3 , $\text{LaLiAl}_{11}\text{O}_{18.5}$ 、新構造ではセグメント構造、プロセスではサスペンションプラズマ溶射および極低圧プラズマ溶射に関する遮熱コーティングの研究成果のオーバービュー的な報告が行われた。

11. ターボチャージャー分野

玉木 秀明^{*1}
TAMAKI Hideaki

茨木 誠一^{*2}
IBARAKI Seiichi

過給機のセッションは、今回のIGTC'11で初めて設けられた。発表件数はKeynote Lectureを含め9件であり、9件中5件が海外からの発表であった。セッションは英国インペリアルカレッジのDr. Ricard Martines-BotásによるKeynote Lectureで始まった。演題は”Boosting and Turbocharger Needs for Highly Downsized Low Carbon Vehicles”。高ブーストシステムの導入による乗用車用エンジンの燃費改善の可能性および、エンジンと過給機のマッチングに影響するエンジン脈動流下におけるタービン性能についての講演であった。高圧過給化でエンジンのダウンサイ징を図り、摩擦損失と熱損失を大幅に低減して燃費の向上を図り、電動圧縮機でエンジン低速側での過給機のレスポンスを改善する。更に、パワータービンによってエネルギーを回収するシステムを組み込んだガソリンエンジン開発プロジェクトHyboost Projectに関する紹介があり、内燃機関の更なる燃費改善の可能性が示された。また、エンジンからの排気ガスのエネルギーを効率的回収するタービン設計のための課題と指針が述べられた。

一般講演8編の概要を以下に紹介する。

過給機開発に関する論文には、IMOの2次規制対応

舶用4ストロークエンジン向け過給機の開発があり、圧縮機、タービンの空力設計を中心に発表がなされた。圧縮機にはベーン付き循環流型ケーシングトリートメントを採用して作動域の拡大を図り、タービンはインペラの薄翼化と出口羽根角の最適化によって高効率化を果たしている(#026)。

圧縮機関連では、不安定現象を扱ったものが3件、性能を扱ったものが1件あった。不安定現象を扱ったものとしては、過給機圧縮機下流部に、ある一定のボリュームを持つ貯気槽と配管(圧縮機出口から吐出バルブ間の容積)を置き両者が引き起こすサージ特性の差異を調査した発表があった(#121)。また、#080では異なる性能・サージ特性を示す2つの圧縮機について非定常CFD解析を実施した。性能・サージ特性に優れる圧縮機インペラでは失速セルが存在せずインデューサシャウド部分に全周に及ぶ安定した剥離が発生している。また、性能・サージ特性に劣る圧縮機インペラでは旋回失速と思われる周方向に伝播する局所的な剥離が存在することを明らかにした。#088では循環型ケーシングトリートメントのキャビティ内に設けられたベーン形状(直線翼とCurved Vaneの2種類)が性能・サージ特性およびインペラの流れ場に及ぼす影響をCFDによって調査をしている。キャビティ内に設けられたベーン(特にCurved Vane)は、循環流がインペラ入口でもつ正の

予旋回を抑制し、サージ発生流量の低下および圧力比の上昇をもたらすことを明らかにした。圧縮機性能に関するものとしては、MGT向け遠心圧縮機の設計基礎データを取得するために、4種類のクリアランスおよびクリアランスが無い場合の数値計算を実施し、クリアランスが圧縮機性能に及ぼす影響を調べた論文が発表された(#233)。

ラジアルタービンについては次の4件の論文発表があった。この内2件が可変ノズルを対象としたものである。過給機に用いられるラジアルタービンはエンジンの作動状況に応じて、様々な回転数で使用される。このため、ノズルウェークに起因するインペラ翼共振を完全に避けることは困難であり、振動応力レベルを把握することは過給機の信頼性を確保する上で不可欠な技術である。#109ではミスチューンによって増加する振動応力の予測のためのモデルおよび、その課題について論じている。また、#112では可変ノズルの構造と流れ場および空力性能の関係をCFD解析により調べている。対象とした可変ノズルには、ノズルクリアランスを保持するためにノズル上流に円柱状のスペーサーが存在し、ノズルの両

端面にはノズル回転軸とノズルベンを接合するボタン形状のCylindrical shaft sealが存在する。これらの要素およびノズルクリアランスの各々が空力性能へ及ぼす影響を詳細に述べている。

残る2件は、Keynote Lectureに関連するテーマである。#052では、ターボコンパウンドエンジン用の低圧力比パワータービンの開発プロセスについての発表が行われた。膨張比1.1で1kWの発電をターゲットにしたもので、タービンインペラは(タービンインペラ出口面積)/(タービンインペラ入口面積)=0.35というユニークな形状である。開発されたラジアルタービンは、膨張比1.05~1.3において従来タービンに比べて高い効率を示したことが報告された。もう1件はタービンのエンジン脈動流下での性能を扱ったものである。ミーンラインモデルと1次元のCFDとを用いて非定常タービン性能を推定したものである。流量変動についてやや予測精度が劣るもの、他のパラメータについては良い一致を得ている。また、脈動1サイクルあたりの平均的なタービン性能について実用的な予測レベルであることが報告された(#158)。

12. 開発・運用分野

幸田 栄一^{*1}
KODA Eiichi

谷村 和彦^{*2}
TANIMURA Kazuhiko

開発・運用分野では3つのセッション(DO(1), DO(2), DO(3))で合計8件の発表が行われた。火力プラントのレトロフィットに関するセッションDO(1)では、汽力ユニットのコンバインドサイクル化に関する発表(#005)、および経年コンバインドサイクルユニットのガスタービン更新に関する発表(#021)がなされ、現有設備の最大限活用によるコスト低減や工期短縮などの工夫、設備更新による熱効率および環境性能の向上などが報告された。

DO(2)では数MWクラスのガスタービン開発に関する発表が3件あり、川崎重工のM1A-17の開発に関する発表(#51)ではCFD適用などにより同寸法のM1A-13と較べ出力で200kW、熱効率で2.5ポイント向上し、NOxも15ppmをクリアしたことが報告された。MAN社からは新規開発中の6MWガスタービンに関し、要素試験や非定常CFDの結果が発表された。また、Doosan Heavy Industry & Constructionからはウクライナと共同開発中の5MW級ガスタービン発電機DGT-5についての発表(#94)があり、DGT-5の概要、パフォーマンス試験の結果および起動スケジュールの最適化などについ

て報告された。

DO(3)では3件の発表があり、アクセサリーギアボックス内の潤滑油流れに関する発表(#214)ではフローガイドの効果が可視化試験とCFDシミュレーション結果でよく一致したことなどが紹介された。三菱重工の1600°C級ガスタービンに関する発表(#189)では、TIT1600°Cを達成するためのTBCの改良や冷却技術の改良について説明されるとともに数百時間の運転試験によって高温部品に全くダメージがなかったことなどが紹介された。1700°C級ガスタービンに関する発表(#197)では、高温高効率化と低NOx化を両立するための技術として排ガス再循環システム用のDLE燃焼器の構造やシミュレーション結果が紹介されるとともに、翼冷却技術、コーティング技術、空力設計など幅広く最新の研究成果が紹介された。

各セッションともに参加者が多く、特にDO(2)およびDO(3)では立ち見の聴衆も出るほどであった。質疑応答も活発であり、新型ガスタービンの開発に関する関心の高さが窺われた。

13. 制御・システム分野

古川 洋之^{*1}
FURUKAWA Hiroyuki

制御／システムのセッションでは、前回と比べて論文は倍増し、6編が2セッションに分かれた。いずれも低NOx化や燃料消費量低減に取り組む研究が増え(#041, #200, #208, #240)、社会ニーズに対応した技術開発の関心が高まっていることが伺える。また、能動安定化制御やシステム同定といった制御基盤の研究も健在である(#159, #251)。

#041では、航空エンジン用燃料ポンプを従来のAGBから電動モータで駆動した電動燃料システムが紹介され、熱収支が改善されることでACOC(ファンエアオイルクーラ)が削除されるが、燃費の向上についてケーススタディを実施。#200では、途上国向け原子炉とガスタービンとのコジェネレーションシステムにおいて電力負荷変動に対する制御シミュレーション結果を紹介している。#208では、触媒燃焼を利用したガスタービンで触媒の

劣化に対しても燃焼性能を維持するために、主燃料は始動制御と回転数加速制御をファジーロジックで切り替え、予燃焼燃料は触媒前後の温度差に応じて補正する特徴を持っている。#240では、2軸ターボファン／1軸ターボジェットエンジンを一定ゲインカルマンフィルタで推力およびSFCを推定し、燃料と可変機構を操作することでSFCの最小化制御をエンジン試験で実証している。

#159では、能動安定化制御に関する発表で、圧縮機壁圧変化率の移動標準偏差で圧縮機不安定性を検出し、壁圧変化率の指標加重移動平均を使って始動燃料スケジュールを調整する方法をシミュレーションで確認している。#251では、2軸ターボファンエンジンにおいて燃料および可変機構に対するエンジン応答のシステム同定が紹介され、エンジン試験とモデルとの比較検証が実施されている。

セッションの聴講者は各論文とも20～30名で、数件の質疑に対して活発な議論が行われ、時間配分も適切に運営された。

14. 安定性向上分野

西岡 卓宏^{*1}
NISHIOKA Takahiro

Stability enhancementのオーガナイズセッションでは、Keynote Lecture 2件を含む5件の論文が2つのセッションで発表された。本セッションではケーシングトリートメントとエアセパレータによる軸流圧縮機と軸流ファンの作動範囲拡大に関する発表が4件あり、1番目のKeynote Lecture (KL-01)では、周方向グループ型のケーシングトリートメントの最適化に関する報告があった。発表では、サロゲートモデリングに基づくグループの溝深さの最適化結果とケーシングトリートメント無しに比べて失速マージンが拡大したことが報告された。周方向グループの効果を定常と非定常のRANS解析を用いて検討した報告(#014)では、周方向グループ型のケーシングトリートメントの性能には非定常流れが大きく影響を及ぼしており、この影響を非定常RANS解析またはLES解析で捕らえることが重要であることが示された。動翼前縁上に設置された1本の周方向グループ

の効果を検討した報告(#082)では、2種類の動翼に対する効果がCFDを用いて検討されており、周方向グループ型のケーシングトリートメントの効果がグループによって誘起される流ればかりでなく、動翼単独時の失速の初生メカニズムにも依存することが示された。

2番目のKeynote Lecture (KL-06)では、半径方向ベーンを備えたエアセパレータによる作動範囲拡大効果とそのメカニズムに関する報告があった。発表では、対象とされたエアセパレータが失速の抑制と作動範囲拡大についていくつかの特徴をもっていることが示された。この他、3次元翼形状を考慮した失速の初生モデルに関する報告(#070)もあった。また、インジェクションによる作動範囲拡大に関する論文(#099)も投稿されており、失速の初生メカニズム解明とそれに基づく作動範囲拡大方法が今後も活発に研究されると考えられる。

15. 展示

正田淳一郎^{*1}
MASADA Junichiro

1. はじめに

11月14日(月)から17日(木)の4日間に亘り、2011年国際ガスタービン会議大阪大会の展示会を大阪国際会議場内10階の約1000m²の展示会場および同フロアの展示室で実施した。展示会場では、国内外から39社の企業・団体が参加して企業展示を行った。また、展示期間中に希望出展社9社による製品や技術についての一般向けおよび学生向けのプレゼンテーションを実施して展示会の盛り上げを図った。展示室では10大学から14の研究室が研究室のアクティビティーをパネル展示した。さらに、特別イベントとして会場近隣の小学生を招待し、講演と工作教室も行ない小学生のみならず一般来場者の聴講も見られ、多数の参加となった。

IGTCの10回記念写真展示については、2章に記載する。

2. 企業出展状況

11月14日の開催初日11:30から企業展示会場前でオープニングセレモニーが実施された。展示委員長の開会挨拶に始まり、ガスタービン学会会長、IGTC'11組織委員会副委員長、IGTC'11実行委員長の3名によるテープカットに合わせて、展示会場の扉が開放された。このオープニングセレモニーは、論文発表の休憩時間にあわせて開催したこともあり、約100名の参加があり盛会であった。

企業展示は、ガスタービン及びガスタービン過給機・蒸気タービン等エネルギー関連技術、並びに関連機器・部品・部材、工作機械、計測・データ処理機器・試験器、コンピュータ・関連ソフト、出版物等のガスタービンやジェットエンジンなどを取り巻く幅広い分野から、製品の実物やモックアップ、ビデオ・パネル等の展示があった。また、製品やソフトを使った実演を行っているブースもあり、各社とも趣向を凝らした興味深い内容であった。

展示会開催期間中、展示会場の企業展示会場内に特設ステージを設け、出展社によるイベントを実施した。希望のあった9社による自社製品や最新技術の紹介、大学生向け講演が行われた。この大学生向け講演は、学生向け公開セミナーの開催に合わせてスケジュールを組み、国内ガスタービンメーカー各社が講演し、学生のみならず、一般の聴衆も多く、非常に盛況であった。また、今回初めての試みとして会場近隣の小学生約100名(約50人×2回)を招待して、小学生向け講演(飛行機はなぜ飛ぶ

出展社一覧表

小間番号	出展社名
1	タイコサーマルコントロールズジャパン株式会社
2	ブリュエル・ケー・ジャパン
3	独立行政法人 宇宙航空研究開発機構
4	ゼネラル・エレクトリック・インターナショナル・インク
5	進和テック株式会社
6	新川電機株式会社
7	株式会社第一システムエンジニアリング
8	株式会社大手技研
9	B&B - AGEMA
10	コンカレント日本株式会社
11	ウエムラ技研株式会社
12	Softinway, Inc.
13	スプレーイング システムズ ジャパン株式会社
14	マルヤマエクセル株式会社
15	株式会社ヴァイナス
16	厚板プレス工業株式会社
17	株式会社大村製作所
18	独立行政法人 産業技術総合研究所
19	株式会社IHIキャスティングス
20	日本無機株式会社
21	日本ウッドワードガバナー株式会社
22	富士テクノ工業株式会社
23	丸和電機株式会社
24	三菱重工業株式会社
25	川崎重工業株式会社
26	三菱重工精密铸造株式会社
27	財団法人 日本航空機エンジン協会
28	Honda
29	イーグル工業株式会社
30	株式会社東芝
31	アイコク アルファ株式会社
32	株式会社日本エアテック
33	WOOD GROUP
34	ロータデータ社
35	エバーロイ商事株式会社
36	三協インタナショナル株式会社
37	リアクション・デザイン・ジャパン株式会社
38	株式会社IHI
39	株式会社日立製作所 電力システム社

IGTC'11展示委員長

*1 三菱重工業(株) 原動機事業本部 ガスタービン技術部

か？）と工作（ウインドカー作成）を行いながら、ガスタービンを理解してもらった。出展社イベントは、大学生や小学生を含め、延べ約660人の参加があった。

展示会場入場者数

日 程	開催時間	入場者数
11月14日（月）	11:30～17:00（5時間半）	1013名
11月15日（火）	10:00～17:00（7時間）	874名
11月16日（水）	10:00～17:00（7時間）	1155名
11月17日（木）	10:00～14:00（4時間）	910名
（合計開催時間）延べ入場者数	（23時間半）	3952名

3. 大学出展状況

大学展示は、初日の11月14日(月)から展示が始まり、11月17日(木)の終了まで、各大学の最新の研究内容をパネル上に展示、一部は紹介ビラを配布した。ガスタービンエンジンについて研究している大学の研究動向が一目で概観することができ、盛況であった。

出展大学一覧表

出展大学研究室名
大阪工業大学 川田研究室
東京大学 渡辺研究室
大阪大学 武石・小宮山研究室
早稲田大学 太田研究室
東京理科大学 山本研究室
首都大学東京 湯浅研究室
法政大学 林研究室・辻田研究室
九州大学 山崎研究室
大阪大学 辻本研究室
東京理科大学 本阿弥研究室
岩手大学 船崎研究室
九州大学 古川研究室
東北大学 山本・笹尾研究室
京都大学 吉田・岩井・斎藤研究室



図15.1 オープニングセレモニー



図15.2 企業展示会場の状況

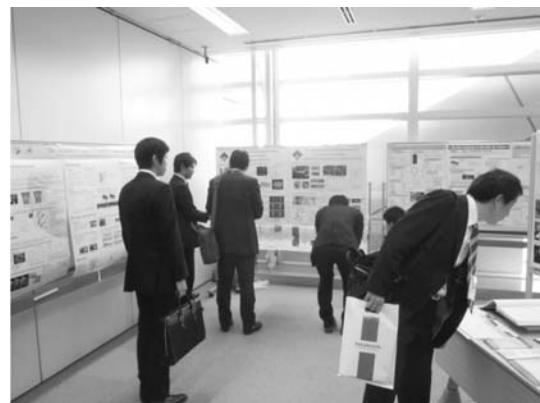


図15.3 大学展示の状況



図15.4 出展社イベントの状況

16. 見学

木下 康裕^{*1}
KINOSHITA Yasuhiro

本会議最終日の11月18日に、プラントツア（見学会）を2コースに分け実施した。

ツアー1は、大阪ガス(株)の泉北ガス製造所と関西電力(株)を訪問した。3カ国からの参加者27名（うち日本人23名）と行事委員2名の29名でのツアーとなった。午前は大阪ガス(株)の泉北ガス製造所を見学した。ガス科学館でビデオによる大阪ガス(株)ならびに泉北ガス製造所の紹介を頂いた後、バスと徒歩で所内を見学した。タービン建屋内では、パッケージ外観になるが、7EA+eガスタービンならびに蒸気タービン、発電機を間近でみることができた。質疑応答では、3月11日の震災後ということもあり、沿岸部にある発電所の地震・津波への対策について質問が出された。

昼食後、小観光として堺市役所の展望所を訪問した。生憎の曇り空ではあったが、仁徳天皇陵、大阪湾岸の景色を楽しむことができた。

その後、関西電力(株)の堺港火力発電所構に到着し、セミナールームでビデオによる関西電力(株)ならびに堺港発電所の紹介を頂いた。中央制御室を見学し、その後は主にバスの中からの発電設備全体の見学となった。発電所内には緑が溢れ、緑化活動に熱心に取組まれている様子も伺えた。

ツアー2は、三菱重工業(株)高砂製作所と川崎重工業(株)西神工場・明石工場を訪問した。5カ国からの参加者36名（うち日本人19名）と行事委員2名の38名満員でのツアーとなった。定刻に大阪国際会議場をバスで出発し、午前は三菱重工業(株)高砂製作所を見学した。はじめにビデオによる同社ガスタービン事業の紹介があり、その後は要素製造からアセンブリ、さらには所内のコンバインドサイクル(T-point)の見学を行い、2時間弱の滞在で充実した内容であった。昼食後、川崎重工業(株)西神工場で航空機用大型エンジンの中圧圧縮機の組立工場を見学した。その後、明石工場に移動して産業ガスタービン

のオーバーホールショップと所内自家発電を行なっているエネルギーセンターを見学した。両社とも参加者を2グループに分けての見学とするなど、十分な質疑応答ができるようご配慮をいただいた。盛りだくさんの見学コースで帰路の時間を大幅に超えたため、帰りに立ち寄る予定であった舞子公園は時間的に諦めざるをえなかつたが、バス車窓から虹色にライトアップされた明石海峡大橋を間近に見られたのは幸いだった。



図16.1 ツアー1 大阪ガス(株)泉北ガス製造所にて



図16.2 ツアー2 三菱重工(株)高砂製作所にて

2011年度 第2回見学会報告

松沼 孝幸
MATSUNUMA Takayuki

2011年12月16日（金）の午後に、茨城県つくば市の産業技術総合研究所（AIST）（以下産総研と称す）と宇宙航空研究開発機構（JAXA）の見学会が、参加者20名で開催された。

1. 産業技術総合研究所

産総研つくば東事業所の会議室にて、今回の見学先となるエネルギー技術研究部門の宗像鉄雄副部門長にご挨拶いただいた後、産総研の紹介ビデオが上映された。その後、2班に分かれて次のような研究を見学した。

熱流体システムグループの高橋三餘氏から「エジェクターを用いた燃料リサイクルSOFC」が説明された。SOFC（固体酸化物形燃料電池）とスターリングエンジンとのコンバインドシステムの開発を最終目的として、外部からの水蒸気供給が不要となる燃料リサイクル法を研究開発するための1kWクラス燃料電池システムおよび燃料リサイクル用エジェクターの要素試験装置が紹介された。

統合水素システムグループの伊藤博氏から「固体高分子形可逆燃料電池」が説明された。固体高分子を電解質とする一体型可逆セルは、通常の固体高分子形燃料電池と水電解装置の機能を一つのセルに統合・集約化したものであり、運転モードの切り替えにより任意に両運転モードで動作させることができる。この研究では、セル内水分管理に着目し、セル構成部材の最適化を行っている。

統合水素システムグループの前田哲彦氏から「太陽光発電・水電解による水素製造及び定置用水素貯蔵」が説明された。まず、太陽光発電と固体高分子型水電解を組み合わせた水素製造の研究について紹介された。この研究の特徴は、太陽光発電の出力を直流のまま、水電解槽に接続し電解する方法を用いていることであり、水電解槽の直列にする数を調節することで、太陽光発電の最大電力点を追随させている。その追随効率は、方法によるが98%程度を達成している。さらに、定置用水素システムのキーコンポーネントの1つである水素吸蔵合金を用いた水素貯蔵装置に関する研究が紹介された。水素吸蔵

合金は水素放出時に吸熱反応となるので、この反応熱を冷熱として利用することを特徴としている。

ターボマシングループの壹岐典彦氏から「水素リッチ燃料の燃焼実験」が説明された。将来のCO₂回収貯留システム（CCS）に対応する燃料改質を組み込んだガスタービン発電システムの実現には、数値計算用の水素燃焼モデルを確立することが重要となるため、ノルウェーのSINTEF等との国際共同研究で実験・解析を進めている。

ターボマシングループの菊島義弘氏と阿部裕幸氏から「非接触吸着デバイス」が説明された。従来から知られている非接触吸着原理（ベルヌーイ法など）とは異なるコアンダ現象とエジェクト効果を用いた新しい吸着デバイスを考案し、吸着力特性などを調べている。デバイスの実演も行われ、参加者が吸着現象を体感できた。

約1時間半の短い滞在であったが、どの研究説明でも活発な質疑応答が相次ぎ、充実した見学となった。

2. 宇宙航空研究開発機構

続いて、JAXA筑波宇宙センターに移動して「宇宙ステーションコース」の見学ツアーに参加した。筑波宇宙センターの紹介ビデオが上映された後、国際宇宙ステーションに取り付けられた日本実験棟「きぼう」の運用管制室に案内され、24時間体制で対応している様子を見学した。さらに展示館「スペースドーム」で、様々な人工衛星・ロケット・宇宙ステーションに関する展示を見学した。展示されている人工衛星は、予備機として製作された本物である。外には、50mのH-IIロケット実機が展示されており、迫力満点であった。説明員による案内の後、各自、展示館をじっくりと見たり、JAXAや宇宙に関するグッズを豊富に揃えた売店でお土産を買ったりと、楽しい一時を過ごした。

最後に、本見学会を実施するにあたり多大なご協力をいただいた産業技術総合研究所と宇宙航空研究開発機構の関係者の皆様、そして参加してくださった皆様に、厚くお礼を申し上げます。

（集会行事委員会委員）



産総研見学の様子



JAXA見学の様子

2011年度シンポジウム報告

山本 誠
YAMAMOTO Makoto

2011年3月11日の東日本大震災は、日本人にエネルギーの重要性を再認識させました。毎日潤沢に供給されていた電力やガソリン等のエネルギーが突然止まってしまった衝撃・不便さは、会員諸氏の記憶に新しいことと思います。また、社会が電力供給におけるガスタービンの重要性を確認する機会ともなったのではないかでしょうか。2011年度のシンポジウムは、このような背景を踏まえ、「災害時の危機管理と非常用発電・電力備蓄技術の動向」をテーマとして、12月22日(木)14:00～17:00に東京理科大学・九段校舎において開催されました。以下、概要を報告いたします。

シンポジウムの構成としては、最初に3名の専門家から危機管理、非常用発電設備、電力備蓄技術の現状と問題が解説・紹介され、その後、総合討論が行われました。まず、平塚三好先生（東京理科大学）から「災害とエネルギーの危機管理」と題して、災害に備えた事業継続（Business Continuity Plan (BCP), Business Continuity Management (BCM)）の基礎についての解説があり、社会インフラ、企業や工場、家庭における非常時の電力確保等に関する危機管理方法について、今回の東日本大震災の事例を交えながら、紹介いただきました。次いで、倉橋浩氏（川崎重工業株）から「非常用ガスタービン発電設備の役割と現状」と題して、非常用ガスタービン発電設備の概要（特に、信頼性とコスト）とその最新動向についての解説があり、阪神淡路大震災、首都圏大停電、東日本大震災における非常用ガスタービン発電設備の稼働実績（東日本大震災では99.9%）や最近の顧客からのデュアル燃料方式に対する要望などが紹介されました。3番目として、池谷知彦氏（電力中央研究所）から「低炭素社会実現に向けた電池電力貯蔵技術への期待」と題して、東日本大震災後の電力供給の見直しや地球温暖化問題への対応を踏まえて、不安定な電源である太陽光や風力発電をガスコジェネレーションなどと組み合わせた分散型電源の活用に期待が集まっていること、既存の安定した火力発電・原子力発電等と分散型電源を組み合わせて需給バランスを取るために電力蓄電技術が不可欠であることなどが解説され、電力貯蔵技術、特に電池への期待と技術的な課題が紹介されました。

参加者は合計34名（正会員20名、非会員社会人4名、学生10名）でやや少な目ではありましたが、皆さん真剣かつ積極的に本シンポジウムに参加していただきました。総合討論においては、危機管理に対するノウハウ・リーダーの役割、非常用発電の法的な問題・サポート体制、電力備蓄技術を組み合わせたベストミックス方法、スマートグリッド、電気自動車の活用などに関して活発な討論が展開されました。

本シンポジウムが災害等に対するエネルギーの危機管理（特に、電力とガスタービン）を見直す契機となっていただけだとすれば幸いです。



シンポジウム会場の様子

第40回ガスタービンセミナー報告

松沼 孝幸

MATSUNUMA Takayuki

「ガスタービンの最新技術動向およびエネルギー資源の展望」と題して、第40回ガスタービンセミナーが、2012年1月19日(木)と20日(金)に、(株)IHI横浜事業所のゲストハウスにて開催された。講師には当該分野において第一線でご活躍の方々を迎え、8件のご講演をいただいた。また、2日目には「旅客機関連技術の進化と液体燃料資源の将来」と題したパネルディスカッションが開催され、座長と5名のパネリストを迎えて、ご討論いただいた。参加者は79名で、全体を通して活発な質疑応答が行われて盛況であった。以下に概略を報告する。

1日目の午前には、GT吸気冷却装置の開発と実機適用(東芝、福武英紀氏)、最新の発電GT用高温材料の動向(日立製作所、吉成明氏)の2件の講演が行われ、夏季のGT出力低下対策用に小改造で既設機に適用できる給気加湿冷却装置の開発と運用実績、GT高効率化の鍵となる単結晶合金の開発動向について説明された。

1日目の午後には、ロールスロイスの最新製品と将来の技術動向(ロールスロイスジャパン、小山大祐氏)、高推重比ターボファンエンジン構成要素の試験研究(防衛省、山根秀公氏)、航空機エンジン部品の修理技術開発の現状(JALエンジニアリング、中野剛氏)、放電のエネルギーを利用した新技術MS Coatingの現状と課題(IHI、落合宏行氏)の4件の講演が行われ、航空用ガスタービンの試験・開発の状況、コスト削減のためのエンジン部品の修理技術開発の具体例、耐久性と対摩耗性に優れた高品質な機能性皮膜を安定的に形成する新コーティング技術などについて説明された。

2日目の午前には、クリーンエンジン技術と将来展望(宇宙航空研究開発機構、二村尚夫氏)、世界のエネルギー資源の動向調査(電力中央研究所、小沢靖氏)の2件の講演が行われ、ジェットエンジン騒音・排気エミッション・CO₂排出の低減のための研究開発の現状と将来の方向性、化石燃料資源の輸入状況・埋蔵量・可採年数

やエネルギー資源の生産量・消費量の調査結果などが報告された。

2日目の午後には、パネルディスカッションが開催された。まず、各パネリストのご講演が行われ、国産飛行機100年と航空安全への取り組みの変遷(東京大学、鈴木真二氏)、コックピットから見た地球環境の変化と日本航空の環境への取り組み(日本航空、松並孝次氏)、21世紀も続く炭化水素の時代(石油天然ガス・金属鉱物資源機構、本村真澄氏)、液体燃料合成技術の最新動向(富山大学、椿範立氏)、原発事故を踏まえた世界の長期エネルギー需給見通し(日本エネルギー経済研究所、松尾雄司氏)という多彩な話題が提供され、航空機技術の変遷と展望、石油・ガス埋蔵量と非在来型資源の展望などが、各分野の専門家から詳しく説明された。また、ボーイング機の現役機長である松並氏からは、上空から撮影した写真で見る地球環境の変化、環境負荷低減のための具体的な取り組みが話された。続いて、座長(京都大学、吉田英生氏)の司会で総合討論が行われた。石油・ガス埋蔵量は現在も増加しており、化石燃料がすぐに枯渇するわけではないことを確認して安心とともに、今後も着実に省エネルギー技術の研究開発を進めていくことが重要であることを再認識した。会場からは、オイルサンドなどの非在来型資源の展望、バイオ燃料のジェットエンジンへの適合性、CO₂回収・貯留(CCS)技術の将来などに関する質問が相次ぎ、将来のエネルギー資源の展望を考えることができて、たいへん興味深いものであった。

最後に、貴重な内容をご発表いただきました講師・パネリスト・座長の方々、会場の提供と運営にご協力いただきました(株)IHIの関係者の方々、そしてご参加いただきました皆様に、厚く御礼を申し上げます。

(集会行事委員会委員)



講演



パネルディスカッション

日本ガスタービン学会創立40周年記念行事のお知らせ

創立40周年記念事業実行委員会

本学会は1972年（昭和47年）6月に日本ガスタービン会議として発足し、その後1976年（昭和51年）6月に社団法人に改組されました。更に昨年3月には公益社団法人として再出発し、現在に至っています。これまで創立20周年、25周年、30周年と記念事業を実施して参りましたが、創立40周年を迎えるこの機会に、下記のような記念行事を通常総会に合わせて実施することとなりました。学会の歩み、日本のガスタービン技術の歩みを振り返るとともに、今後の一層の発展に向けて話し合う機会になれば幸いに存じます。多くの皆様にお集まりいただきますよう、ご案内申し上げます。

記

公益社団法人日本ガスタービン学会創立40周年記念行事

日時：2012年4月20日（金）15:30～20:00（通常総会終了後）

場所：三菱重工横浜ビル33階 大会議室（神奈川県横浜市西区みなとみらい3-3-1）

プログラム：

1. 記念式典 15:30～16:30
実行委員長・会長挨拶、来賓祝辞（協力学協会）、功労賞表彰、感謝状贈呈、
40周年記念出版事業紹介
2. 記念講演 16:30～18:00
(1)航空エンジンの展望
(2)産業用ガスタービンの展望
3. 祝賀パーティー 18:30～20:00
参加費4,000円を当日申し受けます。

事前登録：

原則として事前登録をお願い致します。事前登録には学会事務局まで、電話、FAX、またはE-mailにて(1)氏名、(2)勤務先、(3)連絡先をお知らせ下さい。（締切：4月17日（火）

以上



「公益社団法人日本ガスタービン学会 2011年度通常総会」招集通知発送のお知らせ

正会員各位には当学会2011年度通常総会招集通知を3月中に発送いたします。

招集通知がお手元に届きましたら、内容をご確認のうえ、ご出席くださいますようお願い申し上げます。なお、当日ご出席願えない場合は、書面またはインターネットによって議決権行使することができますので、2012年4月17日（火）午後5時30分までに議決権行使くださいますようお願い申し上げます。

（総会等の概要）

日 時： 2012年4月20日（金） 13:00～15:30

場 所： 三菱重工横浜ビル33階 大会議室（神奈川県横浜市西区みなとみらい3-3-1）

次 第：

公益社団法人日本ガスタービン学会 2011年度通常総会

学会賞授与式

名誉会員推薦状授与式

終了後、15:30から創立40周年記念式典および懇親会（詳細は上記掲載）を開催いたします。

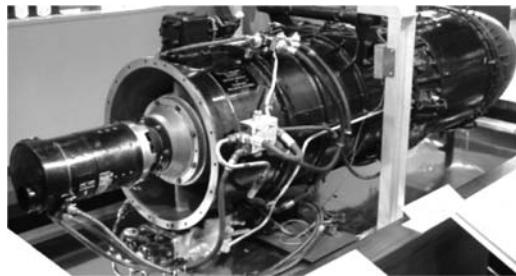
第21回ガスタービン教育シンポジウム開催のお知らせ（予告）

学生および技術者（ガスタービン初心者）を対象とした標記シンポジウムを開催しますので、奮ってご参加下さい。

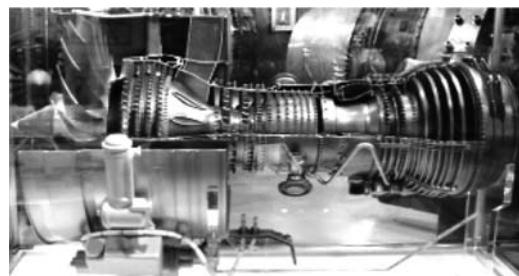
1. 日時： 平成24年7月5日(木)、6日(金)
2. 場所： 株式会社 IHI 航空宇宙事業本部 瑞穂工場（東京都西多摩郡瑞穂町殿ヶ谷229）
昭島事業所（東京都昭島市3975-18 IHI昭島ビル）
3. プログラム：
 - ・ガスタービン概論
 - ・ガスタービンと流体工学／伝熱工学／燃焼工学／材料工学／制御工学
 - ・IHI特別講演
 - ・懇親会（無料）
 - ・見学会 ①瑞穂工場 航空エンジン生産設備・試験設備（官学参加者）
②IHIの航空機用ガスタービン技術の紹介・IHIそらの未来館
(昭島事業所 1F)（企業参加者）
4. 募集概要： ①対象者：大学、大学院、高等専門学校在籍者、ならびに技術者（ガスタービン初心者）



IHIそらの未来館の様子



日本初のジェットエンジン（ネ20）



ジェットエンジンカットモデル

- ・教育シンポジウムの詳細及び申し込み方法等は本誌5月号、ポスター及びホームページをご覧下さい。
 - ・IHI瑞穂工場の見学は官学参加者に限らせて頂きますので、予めご了承下さい。
 - ・本ガスタービン教育シンポジウムに2日間参加された方には、「ガスタービン教育シンポジウム受講証」を発行します。
- ★ 今年度は関西地区において、第22回ガスタービン教育シンポジウムを平成24年9月13日(木)、14日(金)に川崎重工業株式会社 明石工場で開催する予定です。

（画像提供：株式会社 IHI）

Asian Congress on Gas Turbines 2012 (ACGT2012) 開催のお知らせ

ACGT2012実行委員会

日本ガスタービン学会では2005年にアジア地区のガスタービン国際会議Asian Congress on Gas Turbines (ACGT)を立ち上げ、この年に第1回を韓国ソウル国立大学で、韓国流体機械協会Korean Fluid Machinery Association (KFMA)との共催により実施しました。その後、共催団体に中国科学院工程熱物理研究所が加わり、第2回を日中韓3カ国との共催により2009年に東京大学にて開催しております。当初は4年ごとに実施する計画でしたが、その後の検討により第3回を本年8月に開催し、その後は2年ごとに3カ国持ち回りで行う計画に変更となっています。

第3回のACGT2012は、すでに学会ホームページやE-mailでお知らせしておりますように、中国科学院が中心となつて8月に上海で開催します。アジア地域のガスタービン・エネルギー関連分野の情報交換の場として貴重な機会ですので、皆様奮ってご参加下さいますよう、宜しくお願ひ致します。

なお、会議の詳細は下記ウェブサイトをご覧下さい。

記

会議名：アジア・ガスタービン会議2012 (Asian Congress on Gas Turbines 2012, ACGT2012)

会期：2012年8月20日(月)～22日(水)

場所：上海交通大学 800 Dongchuan Road, Minhang District, Shanghai 200240, China

共催団体：中国科学院工程熱物理研究所Institute of Engineering Thermophysics/ Chinese Academy of Sciences (CAS)

日本ガスタービン学会 (GTSJ)

韓国流体機械協会 Korean Fluid Machinery Association (KFMA)

会議ウェブサイト：<http://acgt2012.csp.escience.cn/> (学会ホームページにもリンクしています。)

以上



第40回日本ガスタービン学会定期講演会・見学会のお知らせ（予告）

第40回日本ガスタービン学会定期講演会を以下の日程で開催いたします。

講演会開催日 2012年10月17日(木), 18日(木)

講演会開催場所 釧路市観光国際交流センター（北海道釧路市幸町3-3）
(URL <http://www.kushiro-kankou.or.jp/kkc/>)

見学会 2012年10月19日(金)
(炭鉱関連施設等の見学を予定)

講演申込要領は、学会ホームページ (<http://www.gtsj.org/>) (4月掲載予定) および学会誌5月号に掲載いたします。奮ってご応募くださいますよう、お願い申し上げます。

講演申込締切 2012年6月18日(月)

講演採否結果連絡 2012年7月27日(金)

論文原稿締切 2012年8月27日(月)

また、参加申込に関しては、学会誌7月号および9月号、学会ホームページに掲載予定です。

▷ 入会者名簿 ◇

〔正会員〕

村松 正巳(I H I)	太田 豊彦(エイ・エス・アイ総研)	渡辺 正宏(検査技研)
坂井 俊彦(デンソー)	八木 学(日立製作所)	横山 喬(日立製作所)
吉田 知彦(日立製作所)	田中 征将(日立プラントテクノロジー)	小林 博美(日立プラントテクノロジー)
前田 泰宏(ヤンマー)	宮川 和芳(早稲田大学)	

〔学生会員〕

亀井 智一(豊橋技術科学大学) 鮎川 翔太(大阪工業大学)

〔賛助会員〕

SKYエアロスペース研究所



○本会共催・協賛・行事○

主催学協会	会合名	共催/協賛	開催日	会場	詳細問合せ先
日本実験力学会	日本実験力学会2012年度年次講演会	協賛	2012/7/14-15	豊橋技術科学大学	岡山理科大学工学部機械システム工学科 林直美 E-mail: office-jsem@mech.ous.ac.jp, URL http://jsem.jp/
European Turbine Network	The 6th International Gas Turbine Conference "The Future of Gas Turbine Technology"	協賛	2012/10/17-18	Thon Hotel EU, Brusseles, Belgium	European Turbine Network, URL http://www.etn-gasturbine.eu
日本機械学会	第23回内燃機関シンポジウム－世代を超えたエンジンシステムへの再挑戦－	協賛	2012/10/31-11/2	北海道大学学術交流会館	日本機械学会 http://www.jsme.or.jp/
日本燃焼学会	第50回燃焼シンポジウム	協賛	2012/12/5-7	愛知県産業労働センター「ウインクあいち」	第50回燃焼シンポジウム事務局 URL http://www.combustionsociety.jp/sympo50/



◇2012年度会費納入のお願い◇

2012年度会費をお納めいただく時期となりました。
下記金額を所定の口座または事務局宛お送りください。
尚、既に銀行引き落としの手続きをされている方は、
2012年3月23日貴口座より引き落としとなります。

賛助会員	1口	70,000円
正会員		5,000円
学生会員		2,500円

郵便為替	00170-9-179578
銀行	みずほ銀行 新宿西口支店
	普通預金口座 1703707
いずれも口座名は「日本ガスタービン学会」です	

※会費の納入には、簡単、便利な「口座引き落とし」をお勧めいたします。未だ手続きをなさっておられない方は、巻末の預金口座振替依頼書にご記入の上、事務局までお送り下さい。自動振替をご利用されると振込手数料は学会負担となります。
事務手続き合理化のため、皆様のご協力をお願いいたします。

化石燃料（枯渇性エネルギー）を必要とするガスタービン発電に対して、再生可能エネルギーを利用する各種の発電技術が、地球温暖化などの環境問題の解決策を模索する中で、世界的に市場を拡大しております。国内においても輸入依存度の高い化石燃料に対して、エネルギー自給率の向上にもつながるため、その普及を徐々に拡大しつつあります。そのような状況下で、1年前の3月11日に東日本大震災が発生し、「喫茶室」の記事内容を引用させて顶くなら、多くの人々にとって人生の転換点ともなりうる甚大な被害をもたらし、電力不足の生活を強いられる中で電力の確保および安定供給の重要性に対する認識が高まり、さらにエネルギー政策の抜本的な見直しを迫られており、その注目度を急激に増しています。本誌においても過去に「自然エネルギー利用とマイクログリッド」（2009年11月号）、「再生可能な自然エネルギー利用の現状」（2011年9月号）などの特集が企画されております。本号では再生可能エネルギーを利用する発電技術の中で、特にエネルギー変換の概念上ガスタービンに最も近く、さらにそれらの発電技術の中核とも考えられる風力発電に注目し、その国内外の普及、技術開発の現状および将来動向についてご紹介するために「風力発電の技術開発動向」と題して特集を企画しました。記事の内容は、国内外の風力発電の普及状況と将来の展望、大型風車の開発の動向および電力システムに連系する際の技術課題、また、風車の主要要素の設計・開発技術として、流体数値シミュレーション技術の応用の状況、風力タービンブレード上の着氷の影響および対策、大型化に対応する軸受技術の動向について、さらに小型風車においても優れた性能を有する発電機が開発されており、その研究開

発の動向を紹介する構成となっております。また、本企画によりガスタービンの開発と風力発電装置の開発における類似もしくは相違点などについても、読者の皆様に認識していただける機会をご提供できればと考えております。

本号には昨年11月に開催された本学会主催の2011年国際ガスタービン会議大阪大会についての詳細な報告が同実行委員会の方々の迅速なご対応により、掲載されております。会議に参加できなかった関係者の方々へも臨場感の溢れる情報提供の場となっております。

最後になりましたが、本号刊行にあたり執筆者の方々にはお忙しい中、原稿執筆を快くお受け頂いたことに編集担当者一同感謝いたします。

本号の企画編集は寺本委員（東京大学）、早田委員（ダイハツディーゼル）、服部委員（三井造船）と辻田（法政大学）が担当いたしました。

（辻田星歩）

（表紙写真）

（表紙写真）

今回の表紙については論説・解説の各著者より提供・流用しております。詳細については各記事を御参照ください。

・風力発電の現状と展望

..... (P.65 ~ 69)

・風力発電装置用軸受の技術動向について

..... (P.92 ~ 96)

だより 事務局

当学会は公益社団法人2年目に入りました。新法人として新たに整備していかなければいけないことも多く四苦八苦しつつ仕事に取り掛かっておりますが、年齢も高くなると諸事柔軟に対応するにも時間がかかり、体の固さに加えて頭の固さにも我ながら辟易してしまいます。プラス体の重さも加えて三重苦です。先日、誰かが「運動しないと行動力や決断力が落ちる」と言っていました。加齢にはなかなか抑えませんが、せめて何かスポーツくらいは始めたほうがいいのだろうなと感じております。

さて、新年度に入り、連絡事項とお願いがございます。

正会員の方には、学会誌3月号（本誌）と前後して4月開催の通常総会招集通知を発送しております。メール発信、郵

便による発送と2種類（どちらかの方法）の発信となっております。お手元に届きましたら、必ず、期限までに所定の方法でご返信くださいますようご協力をお願いいたします。また、2012年度会費の納入時期となりました。こちらも手続きをよろしくお願いいたします。自動口座引落しの方は3月23日引落しとなります。

4月には通常総会当日の創立40周年記念式典の開催、8月には上海でのアジアガスタービン会議（ACGT2012）、10月釧路での定期講演会、と今年度もたくさんの行事が開催されます。会場で気力みなぎる皆様とお会いできることを楽しみに、気持ちは軽やかに活動したいと思っております。

（中村）

学会誌編集規定

2003.8.29改訂

1. 本学会誌の原稿はつきの3区分とする。
A. 投稿原稿：会員から自由に随时投稿される原稿。
執筆者は会員に限る。
B. 依頼原稿：本学会編集委員会がテーマを定めて特定の人に執筆を依頼する原稿。執筆者は会員外でもよい。
C. 学会原稿：学会の運営・活動に関する記事（報告、会告等）および学会による調査・研究活動の成果等の報告。
2. 依頼原稿および投稿原稿は、ガススタービン及び過給機に関連のある論説・解説、講義、技術論文、速報（研究速報、技術速報）、寄書（研究だより、見聞記、新製品・新設備紹介）、随筆、書評、情報欄記事、その他とする。刷り上がりページ数は原則として、1編につき次のページ数以内とする。

論説・解説、講義	6ページ
技術論文	6ページ
速報	4ページ
寄書、随筆	2ページ
書評	1ページ
情報記事欄	1/2ページ
3. 執筆者は編集委員会が定める原稿執筆要領に従って原稿を執筆し、編集委員会事務局まで原稿を送付する。事務局の所在は付記1に示す。
4. 会員は本学会誌に投稿することができる。投稿された原稿は、編集委員会が定める方法により審査され、編集委員会の承認を得て、学会誌に掲載される。技術論文の投稿に関しては、別に技術論文投稿規程を定める。
5. 依頼原稿および学会原稿についても、編集委員会は委員会の定める方法により原稿の査読を行う。編集委員会は、査読の結果に基づいて執筆者に原稿の修正を依頼する場合がある。
6. 依頼原稿には定められた原稿料を支払う。投稿原稿および学会原稿には原則として原稿料は支払わないものとする。原稿料の単価は理事会の承認を受けて定める。
7. 学会誌に掲載された著作物の著作権は原則として学会に帰属する。

但し、著作者自身または著作者が帰属する法人等が、自ら書いた記事・論文等の全文または一部を転載、翻訳・翻案などの形で利用する場合、本会は原則としてこれを妨げない。ただし、著作者本人であっても学会誌を複製の形で全文を他の著作物に利用する場合は、文書で本会に許諾を求めなければならない。

8. 著作者は、学会または学会からの使用許諾を受けた者に対し著作者人格権を行使しない。

9. 本会発行の著作物に掲載された記事、論文などの著作物について、著作権侵害者、名誉毀損、またはその他の紛争が生じた場合、当該著作物の著作者自身又は著作者の帰属する法人等を当事者とする。

付記1. 原稿送付先および原稿執筆要領請求先
〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4
Tel. 03-5733-5158 Fax. 03-5733-5164
ニッセイエプロ(株) 制作部 編集制作課
E-mail : eblo_h3@eblo.co.jp
学会誌担当 佐藤孝憲

技術論文投稿規定

2010.8.27改訂

1. 本学会誌に技術論文として投稿する原稿は次の条件を満たすこと。
1) 主たる著者は本学会会員であること。
2) 投稿原稿は著者の原著で、ガススタービンおよび過給機の技術に関するものであること。
3) 投稿原稿は、一般に公表されている刊行物に未投稿のものであること。ただし、要旨または抄録として発表されたものは差し支えない。
2. 使用言語は原則として日本語とする。
3. 投稿原稿の規定ページ数は原則として図表を含めてA4版刷り上がり6ページ以内とする。ただし、1ページにつき16,000円の著者負担で4ページ以内の増ページをすることができる。
4. 図・写真等について、著者が実費差額を負担する場合にはカラー印刷とすることができる。
5. 投稿者は原稿執筆要領に従い執筆し、正原稿1部副原稿(コピー)2部を学会編集委員会に提出する。原稿には英文アブストラクトおよび所定の論文表紙を添付する。
6. 原稿受付日は原稿が事務局で受理された日とする。
7. 投稿原稿は技術論文校閲基準に基づいて校閲し、編集委員会で採否を決定する。
8. 論文内容についての責任は、すべて著者が負う。
9. 本学会誌に掲載される技術論文の著作権に関しては、学会誌編集規定7.および8.を適用する。

日本ガススタービン学会誌 Vol.40 No.2 2012.3

発行日 2012年3月20日
発行所 公益社団法人日本ガススタービン学会
編集者 船崎 健一
発行者 筒井 康賢
〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13
第3工新ビル402
Tel. 03-3365-0095 Fax. 03-3365-0387
郵便振替 00170-9-179578
銀行振込 みずほ銀行 新宿西口支店
(普) 1703707
印刷所 ニッセイエプロ(株)
〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4
Tel. 03-5733-5158 Fax. 03-5733-5164

©2012, 公益社団法人日本ガススタービン学会

複写をご希望の方へ

本学会は、本誌掲載著作物の複写に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。

本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は、(社)学術著作権協会より許諾を受けて下さい。但し、企業等法人による社内利用目的の複写については、当該企業等法人が社団法人日本複写権センター(学術著作権協会が社内利用目的複写に関する権利を再委託している団体)と包括複写許諾契約を締結している場合にあっては、その必要はございません(社外頒布目的の複写については、許諾が必要です)。

権利委託先 一般社団法人 学術著作権協会
〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル3F
FAX: 03-3457-5619 E-mail: info@jaacc.jp

複写以外の許諾(著作物の引用、転載、翻訳等)に関しては、(社)学術著作権協会に委託致しておりません。直接、本学会へお問い合わせください。