

特集：自然エネルギー利用とマイクログリッド

自然エネルギー利用とスマートエネルギーネットワーク

柏木 孝夫*¹

KASHIWAGI Takao

1. 低炭素社会の実現に向けた国内外の潮流

政権交代により自然エネルギーの導入促進が一層加速される。11月からは、前政権が打ち出した太陽光発電からの余剰電力を売電価格の約2倍の固定価格で買い取り、電気料金に上乗せすることにより全員参画型の新エネルギー政策が開始される。現状では割高なシステムを市場に導入する訳であるから誰かがそのコスト負担をしなければならない。強力に新エネルギーの市場導入を推進するためには、最終的には政治的決断が必要となり、民主党政権では以前より強力に新エネルギー政策を推進することになる。国民に負担を強いることになるため、その決断は複眼的、多角的、分析的に十分な検討が必要であるが、太陽光発電に関しては、エネルギー・環境政策のみならず、産業、雇用政策上のシナジー効果も大きいことがあげられる。

私は21世紀における日本の成長エンジンが低炭素型の経済モデルを逸早く構築することにあると考えている。科学的、分析的に理論武装された国際世論が必ず低炭素社会の実現を力強く牽引する。この世論はこれまで米国に向けられていたが、オバマ政権誕生に伴い、中国、インド等に向けられ始めた。低炭素社会の実現は加速度的に早まる。

現在、ポスト京都に対する中期目標が注目されているが、各国は地球益を全面に出しながら国益をかけた戦略を国情に応じて激しく展開しているのが現状である。特に、自然エネルギーの導入目標は地域特性に大きく左右され国家戦略そのものであるため、我国としては工業国家として省エネルギー、新エネルギー、原子力をバランスさせた独自の戦略を持ちつつ粘り強い交渉を続けるべきである。

世界は今、大きな転換点にある。今までのエネルギー社会の延長に、これからの社会の未来はない。低炭素社会を実現していくためのパラダイムシフトが求められており、第一に「化石から非化石への燃料転換」、第二に「化石燃料のクリーン化や高度利用技術の確立」が必要になっている。今後10～20年をかけてこれらの課題を克服することで、新たなエネルギーシステムを構築していく時期を迎えている。

例えば、今年の石油価格の高騰は、人々に石油依存型

社会の限界をあらためて自覚させた。新興国による急激なエネルギー消費の増大などを背景に、石油枯渇が社会生活の安定を損なう事態が間近となっている。ここでの石油枯渇とは、石油全体の埋蔵量減少ではなく、良質の石油が不足する事態を意味する。したがって、事態の打開には質の悪い化石燃料にも適用可能な「クリーン化や高度利用技術」が必要であり、従来型の技術開発では得られない新たな技術をもたらしするための基礎研究が重要な役割を果たすことになる。

2. 政治決断された「新エネ・モデル国家日本」の誕生

我国は国際的に「Cool Earth 50」を提唱し、2050年までに二酸化炭素の排出を全世界で現状の半分に低減させようとしている。ここで、重要なことはこれを達成するために、次の3原則を主張していることである。まず、① 主要排出国が全て参加し、京都議定書を超え、世界全体での排出削減につながる。② 各国の事情に配慮した柔軟かつ多様性のある枠組みとすること。③ 省エネ・新エネなどの技術を活かし、環境保全と経済発展とを両立すること、である。民主党政権でも上記①に示した中国、インドをはじめとする主要排出国の参画をベースにした中期目標の策定を主張していることを忘れてはならない。

さて、地球環境問題の理念とは何であろうか？ 私は「衡平性」であると考えている。IPCCでは「Development, Equity, Sustainability」問題について記述されている。すなわち地球環境問題は、人類みな衡平性を保ちながら持続可能な開発・発展をするためには、どのような課題を解決しなければならないか、という難問に取り組んでいることになる。国連加盟国192ヶ国が皆手をつなぎ、192人193脚で走れるような環境をどう作るか問われている。

低炭素型エネルギーシステムに対し、我国では当初、強力で省エネルギーを推進し、供給サイドは原子力のシェア拡大で対応することが、工業国という我国の特性や国民経済を考えると、最も好ましいと考えていた。しかし、現状で着工している新設原子炉が3基であることなどを考えると、再生可能エネルギーを含め低炭素社会が必要とする供給サイドでのエネルギー選択や技術開発など総合的な戦略が極めて重要となっており、低炭素化に対する国際的に共通なコンセンサスは再生可能エネル

原稿受付 2009年10月13日

*1 東京工業大学 統合研究院

〒152-8550 目黒区大岡山2-12-1

ギー比率であると言っても過言ではない。

さて、これまでの経緯を振り返ってみたい。私は2008年6月9日に発表された福田ビジョンで新エネルギーに対する政治的決断が成され、麻生政権に引き継がれ、さらに新政権で加速されたと考えている。今後は新しい技術革新を通して省エネルギー・新エネルギーの一体化政策を強力に推進することがCO₂原単位的大幅な低減をもたらす、世界的にみて経済への貢献も極めて大きい。まさに、効率的な新しいグリーンエネルギー事業の誕生と目しても過言ではない。

3. 新たなエネルギーシステムとスマートグリッド

低炭素社会の実現には、その元となる21世紀型の経済成長エンジンが必要であり、太陽光、風力、太陽熱などの自然エネルギー系の再生可能エネルギーを前面に出したエネルギーシステムを構築していかなければならない。これらを具体化した国が、世界のエネルギー政策をリードしていくことになる。つまり、低炭素社会へのパラダイムシフトを促すための技術開発、そしてイノベーションが求められる。

ここで重要なことは、イノベーションとは「新たな知や技術が牽引する社会経済システムの構造改革」を意味する点である。最初に「開発技術がもたらす新たな価値創造」を明確に示した上で、そのための技術開発はどうあるべきかを描く必要がある。日本の場合、全体として技術先導型のアプローチを取るケースが多く、この面では欧米の取り組みに学ぶことが多い。

例えば、米国のオバマ政権はグリーン・ニューディール政策の大きな柱として、「スマートグリッド」と言う新たなエネルギーシステムを最初に掲げた。スマートグリッドとは、太陽電池や風力発電などの自然エネルギー系の低圧電源、しかもダイヤモンド側で使われた余剰電源を既存の系統制御に取り込むことができるシステムである。現在、世界各国のいずれにおいても化石燃料系や原子力などのメガインフラが中枢を成している。中国では電力全体の80%を石炭火力が占め、これを系統制御でダイヤモンド側に流し込んでいる。これからはその系統制御が変わってくる。

日本を例に取れば、今は電信柱に6.6キロボルトの送配電システムを設け、引き込み線で100ボルト、200ボルトに分けて家庭に送り込んでいるが、このシステムが変わる。各家庭の太陽電池などで発電された100ボルトの電源が系統制御に入り込み、いわば電力に下からの噴出し口ができた形になってくる。その場合、電信柱にもICT（情報通信技術）を装着する必要が生ずる。各家庭にもスマートメーターと呼ばれるICTの計器をつけて、太陽電池などのダイヤモンド側からの逆潮流をすべてチェックする。ICTを活用することでメガインフラとダイヤモンド側を双方向で管理する電力の新しい系統制御を作り出すことになる。

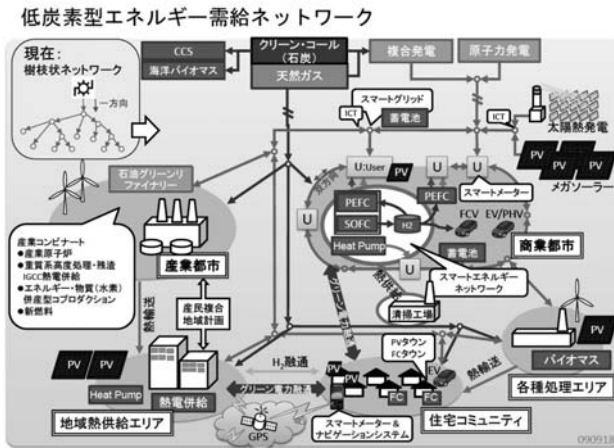
その結果、自然エネルギーを最大限取り込むことでエネルギーコストを大幅に削減したシステムが生まれ、人々に豊かさゆとりのある暮らしがもたらされる。これが、オバマ政権が「スマートグリッド」という新しいエネルギーシステムを通じ掲げたイノベーション、すなわち「新たな知や技術が牽引する社会経済システムの構造改革」であり、米国経済再生の一つのシナリオになる。

欧州ではさらに進んだシステムが議論されている。例えば、オランダにナビゲーションの専門会社がある。この会社は、全世界のナビゲーションの約4割のシェアを握っており、事業戦略としてナビゲーションによる高度情報処理を活かした次世代インフラの構築を目指している。ナビゲーションの端末は日本が優れた機器を提供しているが、システム構築については米国、そして欧州が先導する状況にある。こうした中でその企画は、ナビゲーションを核とした新たなエネルギーシステムの構築を狙っている。

想定しているシナリオは次のようなものである。今までの系統制御では、メガインフラで発電した電力を上から下に流すだけだった。ところが、これからは自然エネルギー系の電力がダイヤモンド側に入ってくる。技術開発が進み太陽電池の発電コストが化石燃料並みに下がれば、家庭用電源としてスタンダード化され、住宅地一体のすべての屋根に太陽電池が設置されるようになる。すなわち、各団地に発電所の機能が付与される。団地は電力の消費地でもあるので、その結果、団地の発電量や消費量が全体の系統制御にかなりの影響を持つようになる。太陽電池の発電量は天候によって左右される。雨の日は発電しないし、晴れの日も日照によって発電量が変わってくる。このため、宇宙衛星のGPSを経由したナビゲーションを使って各地の発電状況を随時チェックするシステムが、全体の鍵を握るようになる。

ナビゲーションとスマートメーターを連動させれば、戸別の発電出力も把握できる。携帯電話などのICTと組み合わせることで、「家庭内の電力を無駄なく使う（例えば、冷蔵庫など常時必要な電力を上回った発電が得られた時に洗濯機を動かす）」「地域の余剰電力を他の地域に回す（例えば、日照の強い地域から雨がふっている地域に電力を融通する）」ことなども可能になってくる。つまり、エネルギーシステムそのものがスマート化する。その上で、車の電化がスマート化に拍車をかける。プラグイン・ハイブリッド車や電気自動車が普及すると、ガソリンではなく電気で車を動かすようになるため、運輸用途にも余剰電力を回すルートが拓けるからである。

結果として、地域のエネルギーシステム全体をナビゲーションで制御しながら最適化するシステムが生まれてくる。これは「新たな知や技術が牽引する社会経済システムの構造改革」がもたらされる一例を述べたにすぎない。



4. 都市エネルギー全体最適化に向けて

我国は低炭素モデル国家として省エネ性、自律性、環境性に富んだ低炭素エネルギー需給構造のグランドデザインを明確に示す責務がある。

私は科学的検証から、電力に関して言えば、原子力・石炭・天然ガスなどのメガインフラが全体のベースを担い、その基盤の上に燃料電池、ヒートポンプなど、省エネルギー性に富んだトランザクティブ機器群や自立性の高い地域共生型の新エネルギーが適切な規模でクラスターを形成してゆくことになると確信している。

低炭素社会に向けた都市エネルギーシステムのグランドデザインには、例えば都市内の商業施設・ビルなどを良質な拠点ストックとして捉え、エネルギーマネジメントシステム (BEMS) などの導入により、新たな省エネルギーをネットワーク的に達成してゆくことが必要となる。これら広域BEMSを都市集積部に構築し、最先端超省エネICTインフラを整備できれば、今後問題となる中小規模施設への双方向遠隔制御インフラとしても利用可能となり、CO₂削減ポテンシャルは極めて大きい。

また、都市部のバイオマス系エネルギー拠点である清掃工場や下水処理場の存在も重要となる。膨大な都市型排熱が有効利用できる面的・ネットワークインフラ、いわば循環型静脈インフラの整備が成されてこそ、低炭素都市が機能する。今後、太陽光発電や燃料電池などの分散型電源が建築物内や屋根などに大量導入されてくると、既存電力システムのスマートグリッド化はもとより、これらのマネジメントシステムは需要地に導入された分散型発電システムとエリア内に形成された電力だけでなく熱力でも融通するスマートエネルギーネットワークと一体化してCO₂を削減するアドバンスドシステムへと発展させるための新しいインフラとなり、低炭素社会の実現には欠かせないものとなる。

一方、燃料電池を見据えた水素社会の到来も電力化傾

向の高まりと共に必ず訪れる。

将来的には需要地に知能を備えた各種分散型システム群が大規模送電系統の一端に最適潮流制御を可能とするスマートネットワークが形成され、系統との調和を図りつつ、既存の空間インフラを高度に活用しながら、電力だけでなく熱や物質 (例えば水素) までも併給する統合型インフラ構造を適切に整備することが、究極の省エネルギーを実現し、再生可能エネルギーを最大限とり込める低炭素社会の公共インフラそのものとなり、結果として社会コストミニマムを達成する。我国は愛知万博をはじめとし、すでにマイクログリッドという型で2030年の低炭素社会の姿を世界に先駆け発信している。

5. エネルギーシステムのグランドデザイン

すでに述べてきたが、世界は今、低炭素社会を実現するためのパラダイムシフトの中にある。今後10～20年をかけて、新たなエネルギーシステムを構築していく必要がある。そのために、最初にシステムとしての全体像を描く、つまり研究の出口イメージを明確に示した上で、基礎から応用までカバーしたシームレスな研究を展開しなければならない。

では、2050年に向け我々が目指すべき未来、エネルギーシステムのグランドデザインとはどのようなものか。すでにおわかりと思うが、私はエネルギーシステムに、二者択一はないと考えている。革新的システムとは、決して、原子力、石炭、天然ガスなどによる既存システムをすべて太陽光や風力発電で置き換えるような二者択一を迫るものではない。

農業国ならば太陽光や風力だけで国内需要に応えることも不可能ではない。だが、工業国や商業国においてその産業を動かすには、自然エネルギーの利用だけではパワーが不足する。原子力、石炭、天然ガスなどによる既存のメガインフラをグリーン化した上で安定供給しながら、全体のエネルギー構造を低炭素型へと変革させていく必要がある。工場や事業所、住宅といった需要により近い場所に太陽光や風力発電、燃料電池などのシステムを導入すると共に、分散したエネルギー供給源をネットワーク化し、上位の基幹系統と融合させる。

その際、ポイントとなる点は情報インフラとしてのICTの活用である。情報通信そのものを省エネ化する「グリーン in ICT」だけでなく、スマートグリッド構想のようにグリーンビジネスの新たなモデルを情報通信で創造していく「グリーン by ICT」を積極的に展開することが大きな効果を発揮することを強調しむすびとした。

特集：自然エネルギー利用とマイクログリッド

マイクログリッドとは

傳田 篤^{*1}
DENDA Atsushi

キーワード：マイクログリッド，スマートグリッド，太陽光発電，自立運転，microgrid, smartgrid, photovoltaics, islanding mode operation

1. はじめに

米国オバマ大統領の掲げるグリーンニューディール政策をきっかけとして，世界的規模でスマートグリッドに注目が集まっている。これは単にスマートグリッドが，電力会社や電力機器メーカーといった分野だけではなく，情報・通信関連業界，リチウムイオン電池などの二次電池業界，さらにはそれらを取り巻く材料業界など，極めて幅広く，さまざまな産業界に新たなビジネスチャンスを提供する可能性があることを示している。

一方，我が国を振り返ってみると，欧米等で考えられているスマートグリッドをそのまま我が国に持ち込むことには，欧米と我が国との電力供給構造が異なるだけかなりの無理がある。それでも風力発電や太陽光発電といった自然変動電源の大量導入政策を背景に，これらの再生可能エネルギーの有効利用を基本スタンスとした高効率，高品質な低炭素エネルギー供給システムの構築を目的として，我が国の電力供給構造に適したスマートグリッドの導入の仕方というものを考える必要がある。

本稿ではまずマイクログリッドとはどのようなものか，どのようなことができるのか，そしてマイクログリッドとスマートグリッドとの相違点，関係等について述べるとともに，マイクログリッドの開発の現況，今後

のスマートグリッドへの取り組みについて述べるものとする。

2. マイクログリッドとその期待される役割

マイクログリッドの定義にはいくつかあるが，そのうちの代表的なものとしては，図1に示すように，系統と一点で接続したある一定地域の中に複数の小型発電機が分散しており，通常においては系統からアンシラリーサービスとして電圧と周波数を受けながら地域内の電力の一部供給しているが，系統の異常時等においては，系統からの受電点において自ら解列することによって自立運転を行い，電圧および周波数を自力で一定範囲に保ちながら高品質安定電力を供給できるシステムである。また，場合によっては地域内の分散型電源から発生する熱エネルギーを空調用の熱源として供給することもある。

このようなマイクログリッドには，その期待される役割として以下のようなものがある。

① 再生可能エネルギー，特に自然変動電源導入に際し，その出力変動をマイクログリッド制御技術によって吸収することにより，既存系統への影響を極力小さくすることができる。したがって，自然変動電源を主体とする再生可能エネルギー導入に当たり，そこにマ

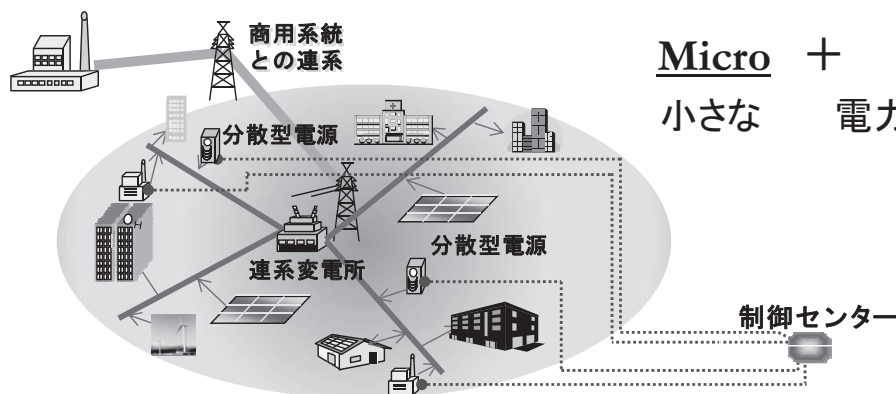


図1 マイクログリッドの概念図

原稿受付 2009年10月14日

*1 清水建設株式会社技術研究所
〒135-8530 江東区越中島3-4-17

マイクログリッドを構築することで、安定的な電力供給が可能となり、系統への負担が軽減できる。特に最近では、太陽光発電や風力発電のような自然変動電源の大規模化の傾向が著しく、このような大規模な自然変動電源と系統との間の橋渡しの役割を果たすことで、系統への影響を極小化することができる。

- ② 非常時においても自立運転が可能であり、安定した高品質な電力供給ができるため、金融、交通、行政、避難関連の施設、さらには半導体工場やデータセンター等、エネルギーセキュリティの高い施設への高信頼性電源として導入が可能である。また、企業のBCP（ビジネス・コンティニュイティ・プラン=企業継続計画）におけるエネルギーの基軸施設の一つとしても考えることができる。
- ③ オンサイトであり、大規模なインフラ施設が不要であるばかりではなく、発電機からの排熱利用が可能な場合には、さらなるエネルギーの有効利用が可能となる。この場合には、所定地域内での電力需給バランスをとりつつ電力品質も保証できる地域冷暖熱供給施設となり、エリア内にホテル、病院などといったエネルギー消費型施設がある場合には、経済的にも成立するものとなる。
- ④ 系統と独立して運転制御が可能であることから、発展途上国における未電化地域対策として、自然エネルギーを主体とした電化対策が可能となる。また、同様に離島などへの電力安定供給もマイクログリッド構築によって可能となる。

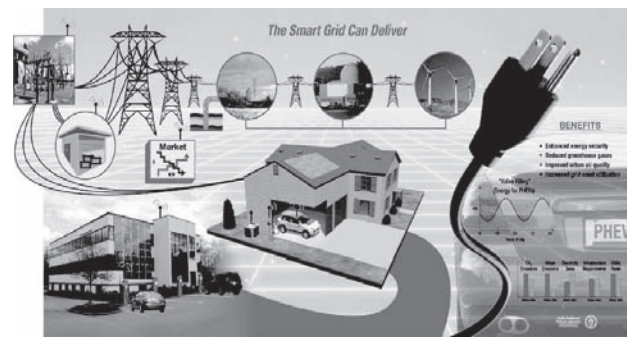
マイクログリッドでは、しばしば「Good Citizen（良き市民）」という表現が使われることがあるが、これは、系統（すなわち社会）に連系されているマイクログリッド内の分散型電源（すなわち市民）が、系統の電圧や周波数といった電力品質（すなわち社会秩序）に悪影響を及ぼさないように、系統の一定のルールに従って制御されなければならない、という要求仕様を言いかえた表現である。

3. スマートグリッド

3.1 スマートグリッドの定義

スマートグリッドの定義についてこれといった確定的なものがあるわけではなく、その立場によっても様々な定義されているが、一般的には次のように言うことができよう。

図2に示すように、原子力発電所、火力発電所といった集中型発電所から、送変電施設、配電施設を経て、最終需要家までの一連の施設を対象に、最新の情報通信技術によって双方向での情報のやり取りをしながら最適管理を行い、効率的で安定的な高信頼性電力供給システムを実現させるものである。併せて、最近普及し始めたメガソーラーやwindファームをはじめとするさまざまな再生可能エネルギーの積極的な導入を図り、これ



(出典: アメリカエネルギー省ホームページより)

図2 スマートグリッドの概念図

らをも含めた最適管理を行うことによって、来るべき低炭素型エネルギー供給システムを志向するものである。

なかでも特徴的なのが、電力供給側と需要家との間で双方向通信によって、デマンドレスポンスやデマンドサイドマネージメントといった手法を積極的に活用することにより、電力負荷のピークカット、平滑化、省エネルギーを図ろうとしている点である。

このように、マイクログリッドとスマートグリッドとはまったく異なるものではあるが、スマートグリッドのなかの或る特定の地域やビルなどの構成要素などを対象にして、効率的な制御を行うためにマイクログリッドの制御技術が利用されたり、あるいは逆にマイクログリッドの制御手法の一つとして、スマートグリッドにおける基本的な考え方を取り入れることができたりするなど、お互いに緊密な関係にあるといつてよい。

3.2 デマンドレスポンスとデマンドサイドマネージメント

デマンドレスポンスとデマンドサイドマネージメントについても、これらの定義やそれらの違いなどについて、明確に述べられているものがなかなか見当たらない。様々なウェブサイトや資料をもとに、筆者なりに理解している内容として整理してみると、おおむね以下のようなものではないかと考えている。

デマンドレスポンスとは、電力市場の存在を前提としており、需要の価格弾力性を活用することによって、電力需要を抑制しようとする市場メカニズムであり、電力需要が逼迫するときに系統運用者が需要削減を要請する緊急プログラムと、市場価格に応じて需要家が負荷削減を行う経済プログラムで構成されている。

緊急プログラムでは、需要家の負荷削減量を発電量と等価なものとし、系統運用者が事前に市場に登録されている発電事業者あるいは需要家から削減電力分あるいは発電電力分を購入するものであり、系統運用者は発電事業者から発電電力を購入するか、需要家から削減負荷電力を買い取ることで需給バランスを取ろうとするものである。この意味で、緊急プログラムは発電予備力とみなされるため、達成義務が課されるケースが多く、達

成できない場合には違約金が生じることになる。

これに対し、経済プログラムでは、事前の需要入札値より実際の需要が小さかった場合にはリベートが支払われるような削減インセンティブが与えられたり、削減可能量をリアルタイム市場に提供して系統運用者に買い取ってもらうような仕組みがあったりなど、様々なものが考えられている。

一方、デマンドサイドマネジメントは、需要総量を抑制することを目的とした省エネルギープログラムと、季節や時間帯による需要変動を平準化させるためのロードマネジメントに分類される。

省エネルギープログラムとしては、需要家のエネルギーの使い方をチェックし、無駄な使い方を指摘したり省エネルギーの方法を指導するようなエネルギー監査をしたりするほか、エネルギー効率の優れた電気製品の製造や購入に際してのリベートやクーポンの付与、工場や住宅などの省電力投資（たとえば住宅の断熱化など）に対する無利子融資や補助金制度などがある。

また、ロードマネジメントとしては、季節別料金制や需給調整契約といった負荷調整の料金制度のほか、割引料金の適用と引き換えに、電力会社が需要家のエアコンを遠隔制御によって温度設定、稼働・停止することや、あらかじめ定められた期日や時間帯とは関係なく供給設備の事故や需給逼迫時に電力供給を遮断する供給遮断契約などがある。

このように、デマンドレスポンス、デマンドサイドマネジメントの両者とも、需要家の負荷を直接的、あるいは間接的に制御する点では共通したところがあるが、前者では電力市場の存在を前提にした電力需給バランスに軸足を置いているのに対し、後者では省エネルギーや需要変動の平準化に主眼を置いたものとなっている。

4. マイクログリッドの開発現況

4.1 我が国におけるマイクログリッドの開発取り組み

これまで、マイクログリッドとスマートグリッドの定義、両者の関係等について述べてきたが、以下の項目では、我が国におけるマイクログリッドに関する開発取り組みの現況について述べる。

国内ではNEDOによるマイクログリッド実証開発として、青森県八戸市、愛知県常滑市（愛・地球博の継続実証）、京都府京丹後市の3地点に加え、仙台市での直流供給を含む品質別電力供給の計4地点が、いずれも実証実験そのものは既に終了してはいるものの、我が国のマイクログリッドに関する実証研究の先導的役割を担ってきた。

一方、民間レベルでは、清水建設技術研究所、東京ガス鶴見研究所でのマイクログリッド実証施設が稼働中であり、さらにいくつかの大学においても小規模な実験研究施設としてのマイクログリッドの設置計画がある。

ここでは、これまで筆者らが精力的に行ってきた清水

建設技術研究所での研究開発を中心にその概要について報告する。

4.2 清水建設におけるマイクログリッドの開発概要

清水建設では、2004年1月より自社技術研究所（東京都江東区）の一実験棟を対象に構築した小規模なマイクログリッド試験設備の実証運転を行ってきた。自然変動電源として太陽光発電（最大出力10kW）、一定の出力運転を得意とするマイクロガスタービン（同27kW）、緩やかな需要変化に追従可能なガスエンジン（同22kW）、非常に速い変化にも追従可能な二次電池として（同20kW）を組み合わせた最大合計出力79kWのシステムである。商用系統に対するアンシラリーサービス依存を低減させるべく、負荷変動分についても供給可能なマイクログリッドの構築を指向して研究開発を進めてきた結果、これらの発電設備群を制御して、負荷追従運転、すなわち商用系統からの買電を一定にする運転を実現できることを実証した。

さらに2006年7月末からは、この小規模な研究施設で開発した分散型電源制御技術をベースとして、天然ガスエンジンコージェネレーションを主電源（発電容量合計440kW）とした発電出力600 kW級の本格規模のマイクログリッドの実用運転を開始した。ガスエンジンコージェネレーションに加えて、ニッケル水素電池（50kW×8時間、最大出力は200kW）と電気二重層キャパシタ（100kW×充放電2秒）といった蓄電装置を制御することで、電圧や周波数などの電力品質を維持しながら、需給バランスを調整し安定的に電力供給を行うシステム構築を目指したものであり、図3にその機器構成の概要、図4にそのレイアウトを示す。

これらの機器構成により、マイクログリッドとして最も重要な機能である以下の2種類の制御機能の実現を目指し、技術開発を行った。

- ①通常時の負荷追従制御（商用系統からの買電一定制御）
- ②一部実験棟群を対象にした自立運転（万一の商用電力停止時の電力供給継続）

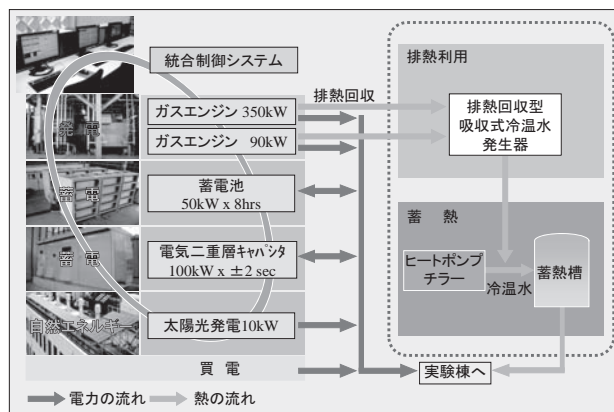


図3 清水建設技術研究所のマイクログリッドの機器構成

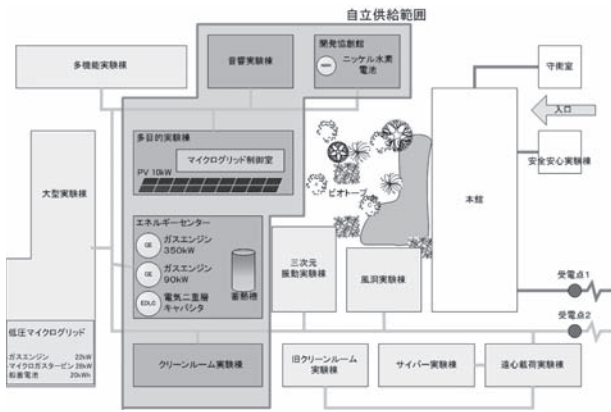


図4 清水建設技術研究所のマイクログリッドのレイアウト

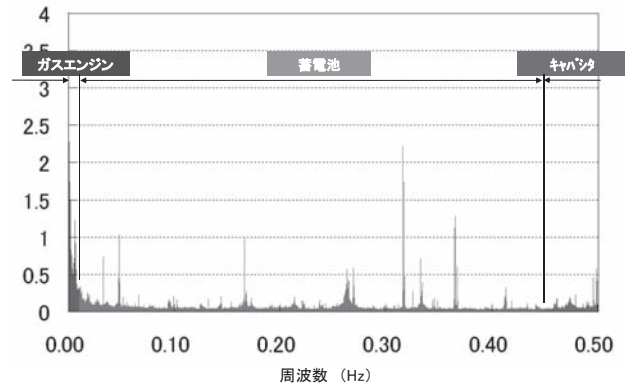


図6 負荷変動のフーリエスペクトルと各分散型電源の役割分担

4.3 建物の負荷変動と分散型電源の組み合わせ

マイクログリッドにおいて負荷変動分を補償し、安定的に制御することは、マイクログリッドが非常に小さなシステムであるだけに、補償すべき負荷変動が相対的に大きくなり、容易なことではない。図5は、ある日の清水建設技術研究所全体での日常的な有効電力の負荷変動の様子を示したものである。オフピーク時の300kW程度からピーク時の600kW程度までの大きな変動の中に、さらに50～100kW程度の速い負荷変動が含まれていることがわかる。

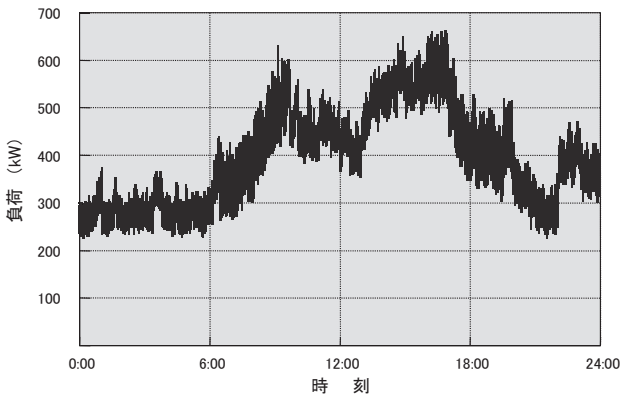


図5 清水建設技術研究所の日常的な負荷パターン

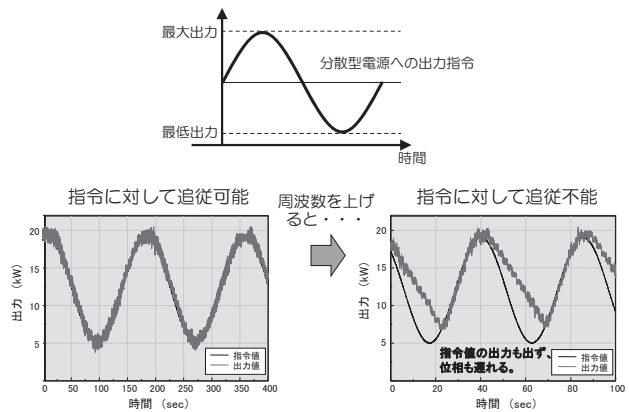
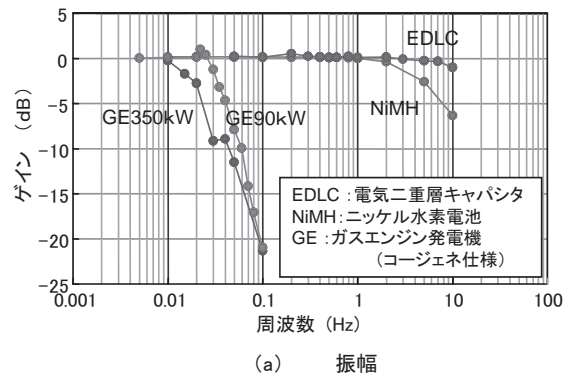


図7 各電源機器の負荷応答試験



(a) 振幅

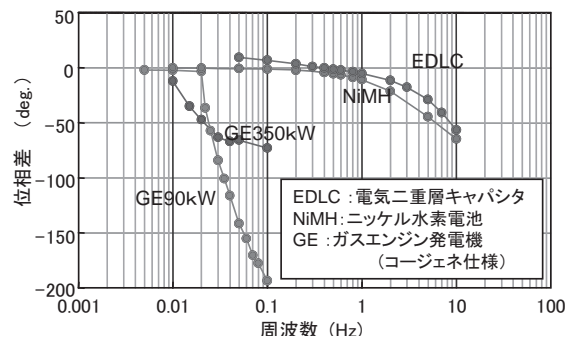


図8 各電源機器の負荷応答特性

図6は、この計測した有効電力データをフーリエ変換により周波数解析した結果である。負荷変動が幅広い変動周期成分から構成されているため、異なる応答速度を有する複数の分散型電源を組み合わせる必要がある。安定運転が得意な電源と、急激な負荷変動への対応が得意な電源、それぞれを最適バランスで組み合わせ、各電源の長所を生かすような制御手法の開発を行ってきた。

このような発電機器に対する様々な負荷応答特性を求めため、図7に示すような正弦波の出力指令を各電源機器に入力し、その指令に対するそれぞれの機器の応答特性を求めたものが図8である。これらの図から明らか

なように、低周波数では指令信号通りに応答して有効電力を発生出来ていても、次第に周波数を上げていくにつれて、指令信号に対して振幅が減少し、位相も遅れていくという現象がみられる。このような試験の結果、具体的には図6に示したように、負荷変動に対する即時の応答は電気二重層キャパシタに、数秒～数十秒オーダーの対応をニッケル水素電池に、それより長周期の変動帯域をガスエンジンにそれぞれ出力分担させている。このように負荷変動成分の周波数帯域によって対応させる電源を変えることによって、連続的な負荷の増減に対して、効果的に負荷追従を行うことが可能となった。

4.4 需給制御の概要

図9に需給制御システムの構成を示す。運転計画は需要予測結果に基づいて、経済性・環境性を考慮した評価関数を最小化するように一日のガスエンジンの発電計画ならびに買電計画を立案し、当日の電力負荷の状況を計測しながら一時間毎に運転計画を修正して経済負荷配分制御により発電計画を決定している。

このような発電計画の下、前節で述べたような電源ごとの負荷応答特性に応じた負荷変動追従をするわけであるが、これを制御ブロックで示したものが図10である。統合カスケード制御と呼んでおり、当社と東京大学とで共同開発したものである。

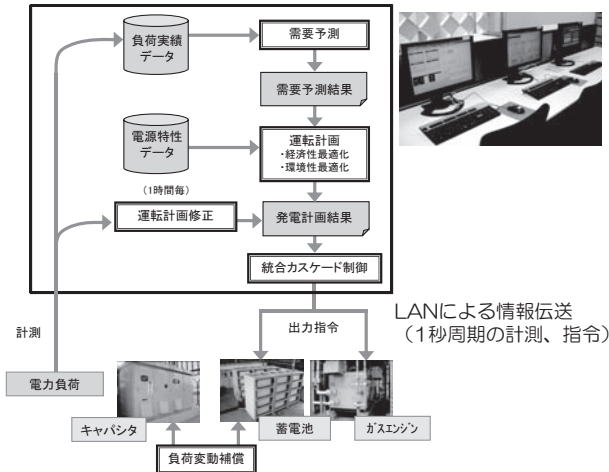


図9 需給制御システムの構成

ここでは電源三台の場合の例を示している。前節で述べた各電源の応答特性等に応じて電源を順序付け、電源1から電源3までを設定する。そして負荷電力から買電目標値を差し引いた差分を計算し、電源1から順番にこの差分を補償させていき、補償できなかった変動成分を下位に順序付けられた電源で補償させる。その結果、図8に示した各電源の周波数応答特性に応じて、連続的な負荷の増減に対して効果的に負荷変動補償が実現できる。因みに、当社マイクログリッドの場合には、電源1が350kWのガスエンジン、電源2が90kWのガスエンジ

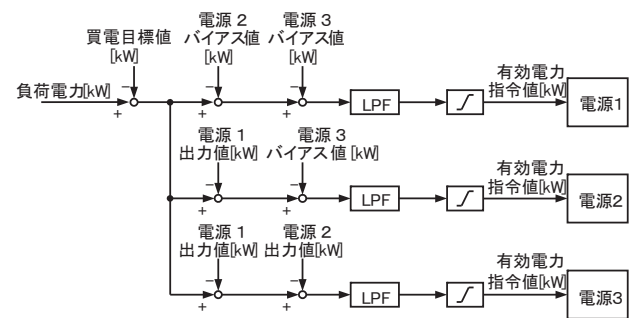


図10 統合カスケード制御システムの制御ブロック図

ン、電源3がニッケル水素電池に割り振られている。電気二重層キャパシタはローカル制御と呼ばれる自律制御をおこなっているため、ここでの制御対象とはなっていない。

4.5 系統連系状態での制御事例

以上のような制御方法によって、系統に連系した状態で負荷追従運転を行い、商用系統からの買電一定制御をおこなった例を図11に示す。供給区域の有効電力負荷は、ある周期的な変動の上さらに100kWものスパイク状の負荷が周期的に乗ってくるといった極めて特異的な変動状況を示している。

初めの数分は制御を行わず、ガスエンジンが250kW、ニッケル水素電池が50kWのそれぞれ一定出力運転を行っているだけであり、商用系統からの買電は、ただ単に供給区域の電力需要から300kW分だけ平行移動した様なパターンで電力を購入している。

数分後に、商用系統から450kWの一定買電目標を入力し制御を開始するとともに、電気二重層キャパシタが特異的なスパイク状の負荷変動に反応し、ニッケル水素電池がそれよりもやや大きな周期的な変動に反応しているのが確認できる。ガスエンジンは残りの非常にゆったりとしたうねりのような変動に反応している。

この結果、このきわめて特異的なパターンを示していた電力需要に対して、完全にフラットではないもの

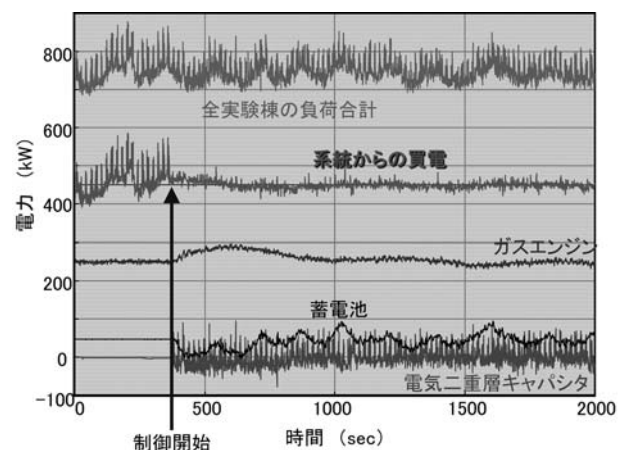


図11 系統連系モードでの制御例

の（制御偏差は20～25kW程度）、ほぼ買電目標値の450kW近傍での一定買電制御が実現できており、一定時間にわたり積分した電力量（kWh）偏差は、直前3分間の同時同量（需要電力量と発電量を一致させること）の精度で1%以下となることを確認している。

4.6 自立運転への取り組み

マイクログリッドに求められる要件のひとつに、既存の電力系統から切り離された自立運転による安定的で高品質な電力供給がある。自立運転を実現するためには、電圧低下や周波数変動を起こさないようマイクログリッド内の需給バランス制御を時々刻々、実現する必要がある。この要求にこたえるため、前述の統合カスケード制御を自立運転に適用した。

自立運転での電力供給範囲は、図4に示す濃い網掛けの区域であり、制御サーバーもこの自立供給範囲に設置されている。

まず、ガスエンジンとニッケル水素電池だけの統合カスケード制御を行い、その後、無瞬断で連系→自立への運転移行、さらに途中で電気二重層キャパシタによる制御を開始、そして最後に連系復帰を試験した結果を図12に示す。

自立運転に移行後、周波数は最大1Hzの幅で大きく変動している。電圧は数10Vの幅で変動し、時折100V以上の電圧低下が見られる。情報伝送系の時間遅れの影響により、ニッケル水素電池が補償しきれない有効電力と無効電力の変動が、周波数や電圧の変動原因と考えられる。約950秒の時点から電気二重層キャパシタにより、変動補償を開始させた。その結果、周波数の変動幅が±

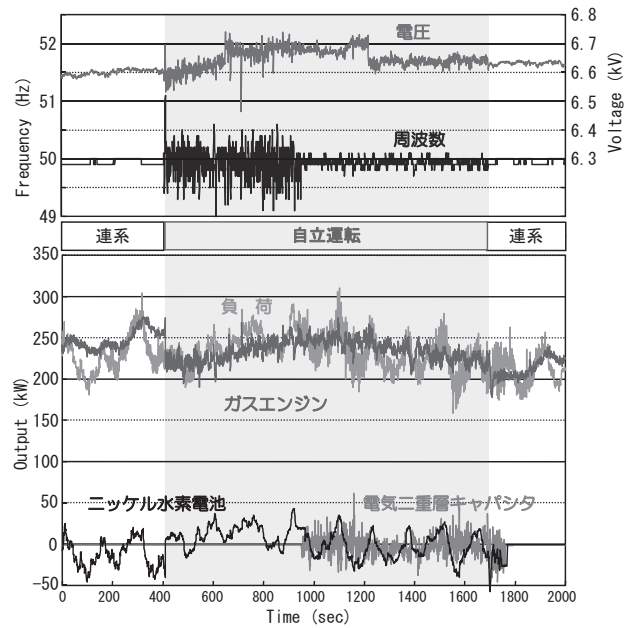
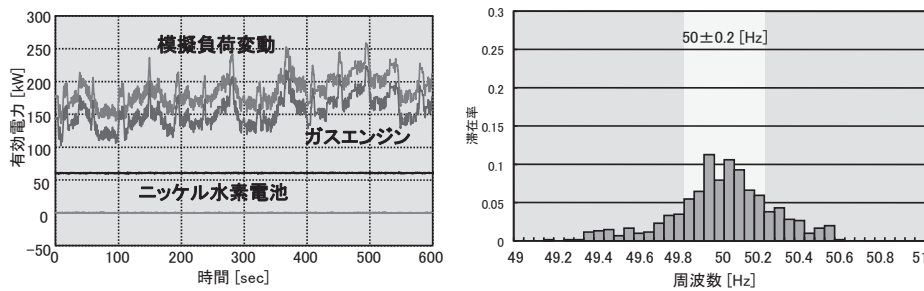


図12 統合カスケード制御による自立運転結果

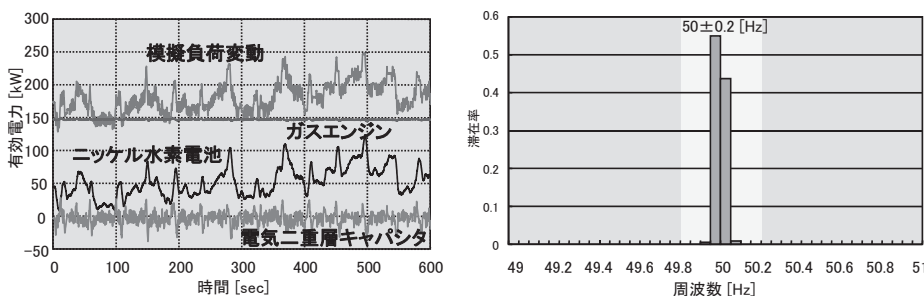
0.2Hzに収まり、約100Vの電圧低下が見られなくなった。

この自立運転では、350kWのガスエンジンが電圧や周波数を維持する中心的役割を担っているが、ニッケル水素電池と電気二重層キャパシタが急速な負荷変動を補償することによって、ガスエンジンの出力変動が穏やかになるように働いている。

この役割を明確にするために、模擬負荷変動による自立運転実験を行った。図13(a)は負荷変動に対して350kWのガスエンジンだけで補償しようとした結果である。これは非常用発電機が動作している状況に相当し



(a)ガスエンジン単独で負荷変動補償したとき



(b)ガスエンジン単独で負荷変動補償したとき

図13 統合カスケード制御による自立運転での蓄電池の役割

ている。一見、負荷変動に対してガスエンジンの出力が追従しているように見える（実際には、ニッケル水素電池を約60kW一定出力運転しているので、その分ずれている）。しかし、このときの周波数分布を見てみると、49.2～50.6Hzとかなり広い範囲にばらついており、管理基準として設定している $50 \pm 0.2\text{Hz}$ を大きく逸脱していることが分かる。

これに対し、二種類の蓄電池も併せて協調運転することにより、図13(b)に示すように、周波数を極めて狭い変動範囲（管理基準値内）に抑えることができています。

また、図14はガスエンジンとニッケル水素電池だけによる負荷変動補償の結果を示したものである。ニッケル水素電池をこのように使用した時の劣化特性の解明という課題は残っているが、ニッケル水素電池に電気二重層キャパシタに替わる役割をさせることも可能となっている。

今後電気自動車やプラグインハイブリッド車などに搭載されるリチウムイオン電池は、エネルギー密度が高いだけでなく、このような瞬時変化や頻繁な充放電の繰り返しにも対応可能な特性を有しており、今後のさらなる普及が期待される場所である。

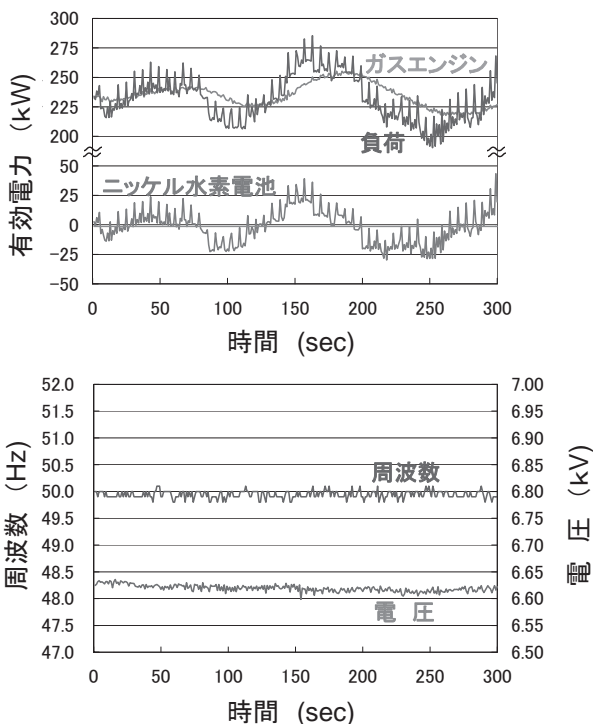


図14 ガスエンジンとニッケル水素電池だけによる自立運転結果

5. 太陽光発電を主電源としたマイクログリッドの開発

わが国では、新政権による1990年比 CO_2 25%削減という大きな目標設定がなされている。現時点ではまだ具体的な方策が示されていないわけではないが、太陽光発電のような自然変動電源への期待には大きなものがあると考

えられている。

しかし、マイクログリッドではその全体としての容量が小さいだけに、マイクログリッド供給範囲内に設置される太陽光発電のような自然変動電源の存在は、高品質電力の安定供給という制御面からみた場合には極めて不利な状況にあるといえよう。

ここでは、中国浙江省、杭州市内にある杭州電子科技大学のキャンパス内で実施している太陽光発電を主電源（総発電量に占める太陽光発電の出力比が50%）としたマイクログリッド実証開発事業の概要について報告する。

本実証事業は、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、NEDO）による「太陽光発電システム等高度化系統連系安定化技術国際共同実証開発事業」の一環として行われているもので、NEDOと中国国家発展改革委員会との間で基本協定書が結ばれ、その下で委託先である清水建設と実証サイトである杭州電子科技大宅との間で実施契約を締結し、平成19年7月より21年12月までの予定で実施しているものである。

5.1 システムの概要と供給エリア

図15にシステムの概要を示す。

機器構成については、基本的には清水建設技術研究所の機器構成とほぼ同じものであるが、前述のように、太

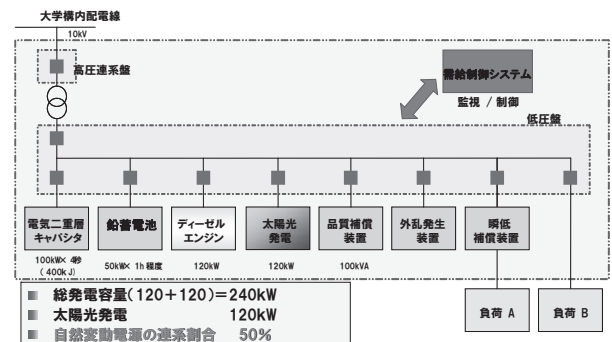


図15 システム構成



図16 杭州電子科技大学におけるマイクログリッド構築エリア

太陽発電の出力が総発電量の50%という制御面からはきわめて難しい状況で、高品質安定電力の供給制御の開発に取り組んでいるものである。

マイクログリッドでの電力供給は、図16に示すように、4棟から成る教室、研究棟を対象としており、ピーク時で250kW程度の電力負荷となっており、それほど大きな特徴的な負荷変動は見られない。

5.2 系統連系時および自立運転時の制御事例

図17は、系統連系時において、太陽光発電が大きく変動した時の制御結果である。

教室、研究等の負荷は125～140kW程度で変動しているのに対し、太陽光発電の出力が40kW程度から急激に90kW程度まで増加し、その後20～30kWの増減を繰り返している。このような状況において、ディーゼルエンジン発電機も大きなうねりを示してはいるが、急速な負荷変動分は二次電池が分担し、結果としてマイクログリッド受電点の電力変動は100kWを中心に±5kW以

内に抑制できていることが分かる。

また、図18は自立運転時における制御結果である。本稿執筆時点では、自立運転時において太陽光発電が大きく変動したデータを収集できておらず、このデータにおいても太陽光発電の出力が60kW付近でほぼ安定した出力状態である。このため、あくまでも参考データの域を出ていないが、この時点においても電圧、周波数とも極めて安定した状態を確保できていることが分かる。

6. スマートグリッドへの展開

以上のように、わが国のマイクログリッドの開発状況は、世界的に見ても圧倒的なリードをしている状況にあるが、その一方で、マイクログリッドを更に展開普及するに当たって、さまざまな課題も抱えている。

その一つは、マイクログリッド制御に必須となっている二次電池のコスト低減、エネルギー密度の向上である。マイクログリッドが経済的に成立するためには、二次電池のコスト低減が不可欠となっている。また、エネ

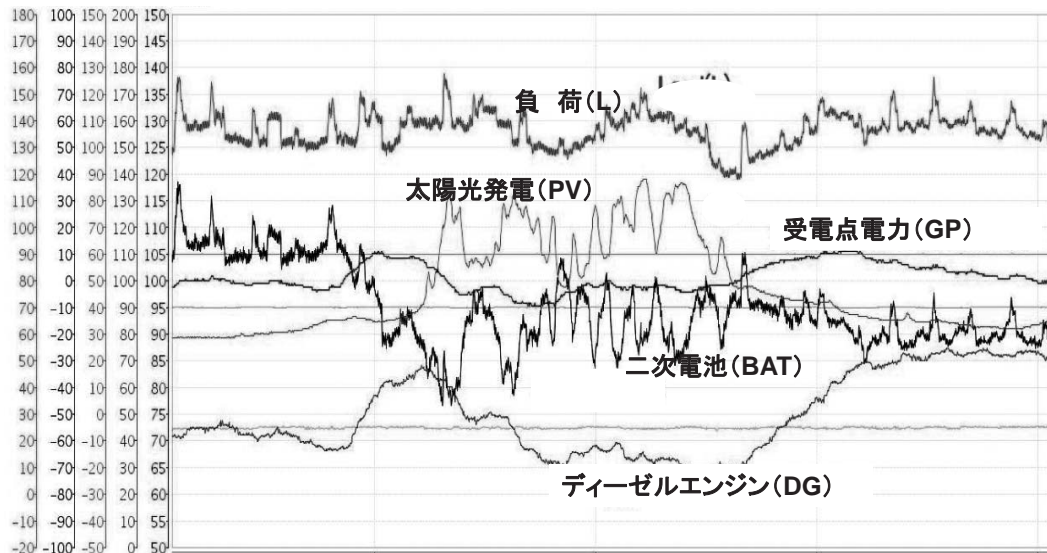


図17 系統連系時の太陽光発電の変動補償結果

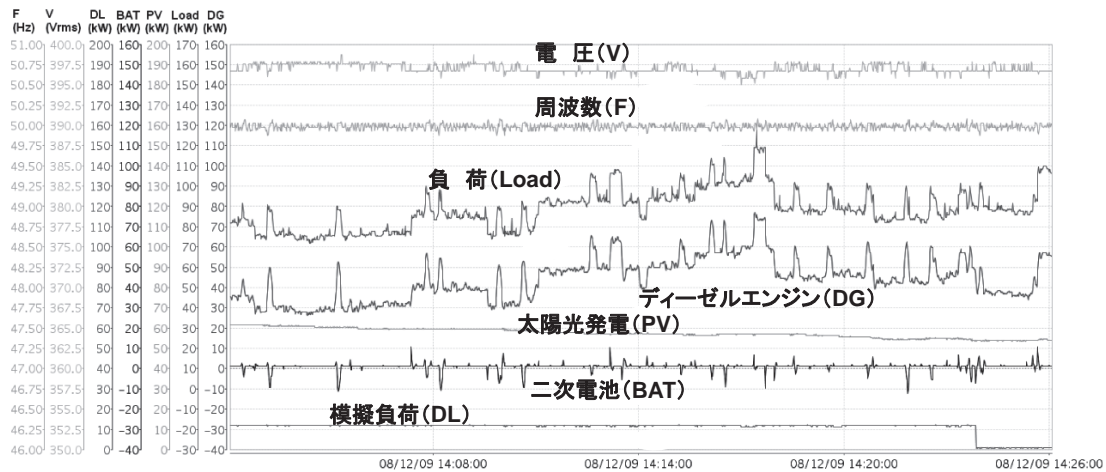


図18 自立運転時の変動補償結果

ルギー密度の向上による、大きい、重いという問題が解決されてこそマイクログリッドの展開普及が現実的なものとなる。

最近毎日のように新聞紙上にぎわしているリチウムイオン電池であるが、従来の二次電池に比較してエネルギー密度が高く、先に述べた電気二重層キャパシタの代替としての特性にも優れているといった利点がある。今後、プラグインハイブリッド自動車、あるいは電気自動車の普及による低コスト化が期待されているわけであるが、自動車での負荷応答特性と、マイクログリッドで期待される負荷応答特性とが必ずしも同じであるとは限らず、もうしばらくはその開発状況を慎重に見極める必要がある。

二つ目は、負荷変動補償による買電量一定制御を行ったところで、現時点では、そこには社会的にも制度上からも経済的なメリットがなにも認められていないことである。ある先端的技術が開発されただけでは、それがそのまま社会に普及展開できるとは限らない。その先端的技術に合わせて、その技術を基とした社会的イノベーションとが組み合わされてこそ、はじめて社会での仕組みが変わるような普及展開が期待されるわけである。

マイクログリッドは、決して既存の系統との対立点にある技術ではない。各種の分散型電源の導入、特に今後予想される再生可能エネルギーの大量導入の動きに対し、いかに系統に悪影響を及ぼさないようにすべきか、いかにその影響を最小にできるのか、そして、いかにこれらの自然変動電源を有効利用することによって、低炭素型エネルギー供給システムを構築できるかといった技術的課題に対して、マイクログリッド制御技術は、既存系統と今後予想される大量の再生可能エネルギーとの橋渡しの技術として、極めて重要な基幹技術であると考ええる。

その意味で、このマイクログリッドをベースとしたス

マートグリッドへの展開について若干の考察を行い、本稿のまとめとしたい。

我が国のような電力供給構造においては、原子力や火力といった大規模発電所から一般需要家までの配電網までは、すでにスマートグリッド化されているといっても過言ではない。

スマートグリッドのイメージを考えた場合、我が国で残されているのは、いわゆるLast One Mileと呼ばれる配電線と一般需要家との双方向通信による電力ピークの抑制、需要の平滑化、省エネルギー化、そして再生可能エネルギーの導入促進とその有効利用による低炭素型エネルギー供給システムの構築といった点に絞られるものと考えられる。

従来のマイクログリッドでは、需要家の電力使用状況を見ながらマイクログリッド内の電力機器の出力制御を行うことに主眼が置かれていたが、スマートグリッド化という観点からは、これに合わせてさらに負荷の制御、あるいは需要家からの電力使用に関する選択メニュー等を信号として受け取ることによって、全体としての最適化を図ることが求められる。

今、世界各地でスマートグリッドの動きが高まるなか、マイクログリッド制御技術がその基幹技術としてますます利用されるとともに、再生可能エネルギーの導入促進とその有効利用に向けて、さらに新たな技術展開を期待している次第である。

7. 謝辞

最後に、清水建設のマイクログリッドの構築、制御については、(財)鉄道技術総合研究所会長正田英介氏、明星大学教授仁田坦三氏、そして東京大学大学院准教授馬場旬平氏の諸氏による技術指導のもと実施しているものである。ここに関係各位の皆様にご感謝の意を表すものである。

特集：自然エネルギー利用とマイクログリッド

自然エネルギー利用の期待と課題 ーグリーン・ニューディールとスマートグリッドー

山家 公雄*¹
YAMAKA Kimio

キーワード：自然エネルギー，再生可能エネルギー，マイクログリッド，スマートグリッド，
グリーンニューディール

はじめに

再生可能エネルギーが注目を集めている。環境制約や、エネルギー資源制約が強まる中で、CO₂を排出しないエネルギーとして、貴重な国内資源、地域のエネルギー資源として期待が高まっている。また、最近のグリーン・ニューディール・ブームの中で、いわゆるグリーン産業として、産業政策の視点、雇用対策の視点からの期待も大きくなってきている。「次世代産業のエース」といっても過言ではない状況にある。

日本政府も、こうした流れの中で、積極的に再生可能エネルギーを推進しようとしている。自民党政権は、発電に占める再生可能エネルギーの割合について、2020年までに20%とすることを目標に掲げていた。新政権を担う民主党は、やはり、2020年までに1次エネルギーに占める割合を10%程度とする、としている。いずれも、きわめて野心的な目標である。

もちろん課題も多く、そこに至るまでの道のりは平坦ではない。エネルギー密度は低いことから、これを広範囲から集める必要があり、物流コストがかかる。化石燃料や既存電力に比べて、品質的にも見劣りする。安全性の面でも配慮が必要である。その対策も含めて、コストが膨大にかかる。これらの課題を克服しつつ、主要産業へ、主要なエネルギー源へと昇華させていかなければならない。

再生可能エネルギーは、分散電源に位置付けられることもあり、従来ガスタービンやその主要燃料である天然ガスと、競合するものと考えられる場合も少なくなかった。今回の特集も、そうした視点がまだ根強く残っているものと推察される。しかし、再生可能エネルギーの位置づけの高まりは、もはや、後戻りしないものと考えられる。従って、再生可能エネルギーとどのように協調していくか、ハイブリッドとして組み合わせられて行くか、が重要になっている、と考えられる。

本論は、再生可能エネルギーへの期待、その背景となっているグリーン・ニューディールの解説、グリーン・ニューディール政策を巡る世界および日本の情勢、再生可能エネルギーの課題と解決策の考え方、期待されるローカルグリッド等について整理する。また、課題解決策として彗星のごとく登場したスマートグリッドについて、マイクログリッドやECOネットワークとの関連をも踏まえながら解説する。

なお、編集からは与えられたテーマは「自然エネルギー」となっていたが、本稿では、欧米では主流の「再生可能エネルギー」として、用語を統一した。

1. 世界で進められるグリーン・ニューディール政策

環境を政策として取り上げる「グリーン・ニューディール」が世界で花盛りである。これにより複数の目的を同時に達成しよう、達成できるという大変魅力的な政策である。温暖化ガス削減の実現を主とする環境対策だけでなく、環境技術を開発・利用することで新たに産業を創設する、それにより雇用も創出しようとするものである。

どの国の「グリーンニューディール」も、主要な施策で共通している。即ち省エネ、再生可能エネルギー、エコカーであり、これは、「グリーン産業の三種の神器」と称することも可能である。日本でも経済対策を打った際に、「新三種の神器」という表現が用いられたところである。

ここで、主要国（地域）のグリーンニューディール政策のポイントをざっと見てみる。

米国は、オバマ大統領が選挙公約で、環境にトッププライオリティを置き、再生可能エネルギー等グリーン産業の事業規模は、政府保証枠を含めて1000億ドルを用意する、2020年までに温暖化ガスを14%削減（2005年対比）する、とした。また、就任後一ヶ月もしないうちに7800億ドルの景気対策法（Stimulus-Package）を成立させた。インフラ整備や低所得者対策等に多額を要するなかで、環境・エネルギー関連に580億ドルが充てられた。

原稿受付 2009年9月28日

*1 エネルギー戦略研究所株式会社

〒105-0004 港区新橋2-5-5 新橋2丁目MTビル

省エネ、再生可能エネルギー、エコカー（PHEV）が主役であり、いずれも普及あるいは推進を支えるインフラとして、スマートグリッドに期待がかけられている。

太陽エネルギー利用、バイオマス利用、風力発電等の再生可能エネルギーが、省エネと並び主役を担っている。「再生可能エネルギー電力の割合を、2012年までに10%、2025年までに25%とする」、「グリーンエネルギー事業に10年で1500億ドルを助成」、「再生可能エネルギーの生産を3年間で倍増」等が掲げられている。また、メガソーラー、ウィンドファームを建設する際、適地が遠隔地である場合が多く、また発電量が一定でない等の特質がある。「送電線の増強」、「スマートグリッドの構築」を進めて、インフラを主とした受け入れ態勢の整備を行う。

EUは、2020年までに、省エネを20%推進、再生可能エネルギーの一次エネルギーに占める割合を20%に、そして温暖化ガスを1990年対比で20%削減するという所謂「トリプル20」の方針を決め、公約している。

中国は、2008年11月に、4兆元（57兆円）もの景気対策を打出すとともに、大胆な金融緩和策を採り、景気回復に向けて世界の牽引役を果たそうとしている。4兆元のうち3500億元は省エネ・環境保護関連に分類される。再生可能エネルギーに関する新しい目標を策定中であるが、エネルギー全体に占める割合を0.7%（2007年）→3%（2010年）→8%（2020）と大きく上げていく方針である。

日本は、深刻な不況に対応するべく、数次にわたる景気対策を打っているが、最大規模で内容も充実しているものが、2009年4月に公表された補正予算である（法律は5月に成立）。15兆円の予算規模で、事業総額58兆円の景気対策である。低炭素社会構築に向けた対策が、柱の一つとして掲げられている。前述したように、「新三種の神器」として、太陽光発電、省エネ機器（エコポイ

ント）、環境対応車への支援措置が盛り込まれた。

ポスト京都を睨んだ温暖化ガス削減に関しては、2020年までに、2005年対比で15%削減することを表明した。また、供給側について、非化石エネルギー比率を過半とする方針が打出されている。民主党政権となり、温暖化ガス削減目標は、1990年対比で25%削減と大きく上方修正されており、今後の世論形成と具体策に注目が集まっている。いずれにしても、グリーン化に一層拍車がかかるのは必至であり、再生可能エネルギーの加速度的な普及は間違いない情勢となっている。

2. 日本のグリーン・ニューディール政策

本項と次項で日本のエネルギー政策について概観し、再生可能エネルギーの位置付けを確認する。

【低炭素社会へ向けたエネルギー政策の取組み】

低炭素社会に向けたエネルギー政策の推移を見ていくと、2008年5月に経済産業省が公表した「長期エネルギー需給見通し」がベースとなっている。2020～2030年を見通したものであり、標準ケースや特に積極的に取り組むケースなどを提示している。この積極ケースが事実上の目標となっていく。

低炭素供給の象徴として太陽光発電が取り上げられる。2008年6月に、洞爺湖サミットに向けて「福田ビジョン」が発表されるが、太陽光発電導入目標について、2010年までに10倍（1400万kW）、2030年までに40倍（5300万kW）とすることが打ち出される。このビジョンは、「低炭素社会作り行動計画」として2008年7月の閣議決定にて、正式に位置づけられる。同時に、原子力発電、再生可能エネルギーの「ゼロエミッション電源」について、発電電力量に占める割合を50%以上とする（2020年度目処）ことも盛り込まれる。

2009年に入って以降、この流れが加速する。補正予算により、2009年1月に住宅用太陽光発電向け補助金が復

図表1 自民党と民主党のマニフェスト比較

項目	民主党	自民党
地球温暖化対策	・CO2排出量：2020年までに25%減（対1990年） ・キャップ&トレード方式の国内排出量取引市場創設	・2020年までに15%減（対2005年）
再生可能エネルギー等	・再生可能エネルギーの全量固定価格買取制度の早期導入 ・1次エネルギー総供給量に占める再生可能エネルギーの割合を2020年までに10%程度に引上げ ・効率的な電力網（スマートグリッド）の技術開発・普及を促進 ・環境に優しく質の高い住宅の普及を促進 *太陽パネル・断熱材設置等の省エネ改修支援	・「低炭素社会づくり推進基本法」の制定 *太陽光発電買取制度等で再生可能エネルギー拡大 *省エネ住宅・エコカー減税等による税制のグリーン化 *カーボンオフセットの本格展開
エネルギー安定供給	・安定供給確立	・資源外交の強化 *領土問題の解決：東シナ海問題を含む ・再生可能エネルギーの開発・利用強化 ・原子力の利用強化：発電比率40%、設備利用率84%
その他	・技術革新で世界をリード	・水の安全保障 ・美しい自然と生物多様性の保全 ・3Rを通じた持続可能な資源循環

（出所）各種資料よりエネルギー戦略研究所（株）作成

活する。2月には、二階経済産業大臣が、余剰太陽光発電分を電力会社が2倍の価格で買取る「固定価格買取制度」の導入方針を発表する。4月に、大規模補正予算による経済危機対策案が「政府・与党会議、経済対策閣僚会議合同会議」により決定されたが、2010年度までの設置目標量が10倍から20倍（2800万kw）に引き上げられた。そして、前項で解説した4月の補正予算成立にいたるのである。

【政党マニフェストにみるグリーンニューディール】

2009年の衆議院選では、自民党と民主党のマニフェストが注目を集めたが、環境を切り口に見てみると、民主党の方が、より“グリーン”であった。現時点で振り返ってみるのも意義があるだろう（図表1参照）。

まず、違いが目立つのは、温暖化ガス削減目標である。自民党が、2005年対比で15%削減であるのに対して、民主党は、1990年対比で25%削減とし、キャップアンドトレード方式による排出量取引市場を整備すると言明している。麻生前首相が、15%削減を打出したときも、これが実現可能なギリギリの線と強調された。経済団体は、2005年対比で4%減を強く主張していた。政権党となった民主党が、本当に公約を実現できるのか、方針を変えない場合にどのような実行手段が導入されるのか、が注目される。

民主党の施策で注目されるのは、再生可能エネルギーに対する積極的な姿勢である。自民党の施策は、太陽光発電に注力した感があった。すなわち、導入目標値を極めて高い水準に置くとともに、「固定価格買取制度」を太陽光発電にのみに導入することを決めた。これに対して、民主党は、かねてより再生可能エネルギー全体への積極的な支援を表明しており、マニフェストでも、再生可能エネルギー全体へ全量固定価格買取制度を早期に導入することを掲げている。太陽光だけでなく、風力、バイオマス、地熱等にも適用するとしている。この点に関しては、斉藤鉄夫前環境大臣も、NHKの番組で「個人的には、再生可能エネルギー全体を支援すべき、と考えている」と語っていた。

また、再生可能エネルギーの割合については、民主党は、2020年までに1次エネルギー総供給量に占める割合を10%程度まで引き上げるとしている。自民党は、麻生前総理が、2020年までに電力に占める割合を20%とすると語っていたが、マニフェストには登場していない。スマートグリッドに関しては、民主党は、「効率的な電力網（スマートグリッド）の技術開発・普及を促進する」と明示しているが、自民党には見当たらない。

3. 再生可能エネルギーの課題とそれをめぐる論議

【高コストと供給信頼性の問題】

再生可能エネルギーの使用は、特に電力インフラが津々浦々まで充実している日本においては、電力の形体

で使用されることが基本であると考えられる。これを前提とすると、再生可能エネルギー普及のための課題は大きく2つある。現状の（従来の）系統体系と比べてコストが高いことおよび所謂「供給信頼度」への悪影響、即ち電力の品質が落ちたり停電する可能性が増えたりすることに対する懸念である。

コスト問題は、技術革新により引き下げていくことが基本であるが、その実現を見るまでの間は、補助金適用や電気料金転嫁等により、社会全体で広く薄く負担していくことが重要になる。ドイツは、固定価格で長期間買取るフィードインタリフ制度（FIT）の導入により、社会全体でコストを負担する仕組みを構築した。これが再生可能エネルギーの爆発的な普及を生んだ。

一方、電気信頼度の問題は、根が深い。技術的に判りにくいこともあり、表立って議論されにくい。貯めることのできない電力は、常に需要にあわせて供給を行っている。所謂同時同量の原則である。発電が不安定な電力に対しては、火力発電等の調整電源を待機させるか、バッテリーを設置して安定させるが必要になる。周波数変動への対応力を維持するために水力発電を待機させる必要も出てくる。

こうした事情を背景に、電力会社（特に技術部門）は、再生可能エネルギー等を活用した分散電源の余剰電力を買い取ることは、基本的にネガティブである。自前で生産したものでなくかつコストの高い電気をネットワークに入れることには、積極的になれない。

より本質的な問題は、川上（電源）から川下（需要端）まで、長年構築し整備してきた、同期電気による交流型のネットワークに、直流等を出自とする不安定な電気が入ってくることに對する違和感である。長年の努力により、世界に冠たる高い信頼度をもつネットワークを全国津々浦々まで構築していた。そこに異分子みたいなものが入ってくることへの違和感である。やや極端な言い方かもしれないが、電力会社の安定供給を守るDNAに抵触するのである。

しかし、ここを解決することが、分散型電源、再生可能エネルギー普及の鍵を握ることになる。解決方法としては、蓄電池や分散型調整用電源の設置とローカルネットワークによる吸収がある。以下、太陽光発電や風力発電大量導入の際に指摘されている、供給信頼度に及ぼす影響と課題を具体的に例示する。

【経産省が整理する太陽光発電の課題】

経済産業省が2009年7月にまとめた「低炭素電力供給システムの構築に向けて」において、太陽光発電等の再生可能エネルギーの大量導入時における電力系統の主な課題として、以下の3つを挙げている。

- ① 配電網の電圧上昇による逆潮流の困難化
- ② 余剰電力の発生（需給バランス）
- ③ 周波数調整力が不足する可能性

①については、「具体的には、太陽光発電の出力が設置箇所の消費電力を上回り、電力系統に電力が逆潮流する場合、配電系統の電圧が上昇。需要家と配電系統との連携点における電圧が電気事業法に基づく適正值（ 101 ± 6 V）を逸脱しそうな場合には、電圧を適正に維持するため、太陽光発電の出力を抑制し、逆潮流を抑える必要が生じる。この課題については、柱状変圧器の分割設置や電圧調整装置（SVC）、自動電圧調整器（SVR）等を活用した電圧安定化対策が必要。」

②については、「太陽光発電が大量に導入された場合、需要の少ない時期に多くて、ベースの供給力と太陽光発電による発電量の合計が需要を上回る可能性があり、余剰電力が発生することとなる。この課題については、需要の少ない軽負荷期に置いて太陽光発電の出力を抑制することにより、軽減することが可能。また、電気自動車やヒートポンプ等の新規需要創出も余剰対策に有効である。」

③については、「現在の電力系統においては、一般電気事業者が需給運用において適正な調整力（LFC容量）を確保することにより周波数を維持。太陽光発電については天候などの影響により出力が大幅に変動する可能性があることから、太陽光発電の導入量の大幅な拡大に伴い、LFC容量の不足等への対応が課題。」との解説がなされている。

なお、風力発電の電力系統への影響に関しては、一般に、次の諸点が指摘されている。突き上げ潮流による電圧上昇、短周期調整力不足（周波数調整力）、長周期調整力不足（余剰電力対策）、系統事故時一斉停止による供給力不足、系統の安定度低下（同期力減少）等である。

【蓄電地、分散電源設置による吸収】

再生可能エネルギーは、いつ、どれだけの量の発電が生まれるか分かりにくい。自家消費の範囲内であればバックアップ電力調達だけの問題になるが、余剰電力がありこれが随時系統に流れるとなると、電力供給全体への影響を考える必要が出てくる。ある程度までは、系統全体のボリュームで飲み込むことにより調整できるが、これは全体の3～5%といわれている。

全体の既存系統での調整が難しくなるほどに再生可能エネルギーの量が増えてくると、①系統全体を拡張する、②バッテリーを配置する、③調整用の分散電源を活用する等の対策が必要になる。系統全体の拡張とは、系統用の大規模調整電源として火力発電や揚水等の水力発電を建設する、送配電網を増強することである。

また、不安定な電気を効率的に充電・放電できるバッテリーの活用が大きな意味をもってくる。需要家側に設置するか、流通側の変電所に設置することになる。あるいはウィンドファームやメガソーラーのような発電所規模の場合は、その敷地内に設置すれば、文字通り制御の

効いた通常の発電所に変身できる。

バッテリーの魅力は、時々刻々の出力等の変動を調整できるほか、電力の使用が減り低価格の時間帯で生じるものを貯めてピーク時に放電することができることである。電力会社にとってもメリットが感じられる運転が可能となるのである。

問題は、バッテリーのコストである。経済産業省では、大量の太陽光発電が導入された場合の安定化対策としていくつかのケースを試算しているが、バッテリーを需要側よりも流通側に設置する方が低コストで済む可能性が高い、としている。

分散型電源による調整機能を活用することも、現実的かつ有力な方法である。ガスエンジン、ガスタービン、燃料電池等をローカルな調整電源としても利用することが可能である。分散電源を利用するメリットは、既に普及していること、従って相対的にかなり低コストであること、普段から電源として使用していることから高い利用率が見込めること等である。しかし、電気自体を貯めることができず（燃料電池技術が発展すれば克服できる）、木目細かい調整についてはバッテリー、キャパシタに及ばないことが課題である。

以上から、当然の帰結として、バッテリーと分散電源を組み合わせるという考えが出てくる。これは、ガス業界が提案しているスマートエネルギー・ネットワークの主要技術でもある。

【ローカルグリッド構築への期待】

ネットワークで吸収するとは、分散した個々の供給と需用が、ローカルなネットワーク（ローカルグリッド）により結びついて、バッテリーの力も借りながら、できるだけその中で過不足を調整し、既存系統（グリッド）への流入（逆潮流）を少なくする、あるいはゼロにすることである。系統は、ローカルグリッドをバックアップするが、そのための電力会社側のインフラ整備コストは、かなり節約できることになる。また、逆潮流による品質劣化を防ぐことが出来る。

なお、本論では、ローカルグリッドとは、所謂マイクログリッドや需要側に再生可能エネルギーを多数導入する際のスマートグリッド等をイメージしている。

過不足をローカルで調整することをイメージしてみる。それはいくつかの段階で行われる。最も一般的なのは、個別主体間の調整である。家庭Aと家庭Bを考えると、それぞれの持つ分散電源の種類や規模が異なり、また電気の使い方（需要形態、ロードカーブ）が異なることから、電力の余りや不足の時間帯に差異が生じる。それを互いに融通し合うのである。地域的なまとまりの中で、複数の家庭がこの輪の中に入ること、過不足調整効果はより大きくなる。

こうしたローカルなネットワークがいくつかできると、それらを繋ぐことで、より広い範囲でローカルな調

整が出来ることになる。少し規模の大きい調整用電源やバッテリーが広域調整用として活躍する。このイメージは、後述するECOネットワークに近い。

【系統への影響の試算例と解決策の比較】

地球温暖化防止対策として、CO₂を排出しない電源の割合を高める政策が打出されている。2008年に発表された「福田ビジョン」では、その割合を5割以上とするとの方向性が出された。福田ビジョン発表の直後に、新エネルギー部会が、達成するための具体策に関する緊急提言を行った。太陽光発電導入目標として「2020年に10倍、2030年に40倍」が、盛り込まれた。コスト負担額の見通しや、どのような負担の仕方が適当かを研究することも盛り込まれた。

それを受けて開催されたのが、電力・ガス事業部長の私的研究会である「低炭素社会に向けた実現」に係る研究会である。2009年1月に報告書案が取り纏められた。そこでは、既存電力ネットワークへの影響を抑える手段として、①需要側に蓄電地を設置する、②系統側に蓄電地を設置する、③柱状変圧器と変電所内に蓄電地を設置する、の3案を比較検討している。その結果は、5兆円弱から6兆円強におよぶ負担が生じると試算している。③のケースが最も小額で済む。なお、影響を与える要因については、前述の通り、配電網の電圧上昇による逆流の困難化、余剰電力の発生（需給バランス）、周波数調整力が不足する可能性である。

負担額である5兆円弱の数字の意味を考えてみる。最大限太陽光発電が普及するケースは、2030年で5300万kWの容量であるが、実際に発電される量は、太陽光発電の利用率10～12%との前提では、実質530～640万kWとなる。一方、この水準は、原子力の稼働が70～80%とすると、660～910万kWに相当する。即ち、原子力発電約5～6基分に相当する（1基140万kW）。一基当たり3500～4000億円とすると1兆7500億万円～2兆4000億万円となる。同量の電力を太陽光から得る場合の対策費を大きく下回ることになる。この計算からは、確かに、原子力に比べてかなりコストがかかることになる。

しかし、ローカルグリッドでコントロールする場合を試算すると、少し異なる結果が出る可能性がある。2009年2月10日に開催された中央環境審議会において、環境省が説明した資料の中に、系統への影響について「スマートグリッド」で克服可能、という下りがある。より小さい負担で共存する可能性がある。筆者が、ガス業界関連者に聞いた話では、分散電源を調整用にも活用する場合は、5300万kWを導入しても2～3兆円の負担で済むと試算される、とのことであった。

4. グリーンのインフラとして注目を集めるスマートグリッド

本論でも、既にスマートグリッドという言葉が登場しているが、ここで、その概要について整理する。再生可能エネルギー普及の切り札として、世界的に注目されているのが、スマートグリッドである。グリーン・ニューディール政策の「三種の神器」は、省エネ、再生可能エネルギー、エコカーである。そのいずれにとっても、特に需要家およびその周辺において、インフラの役割を担う。スマートグリッドは、米国グリーンニューディール政策で主役を演じているが、同国の考え方を主に解説する。

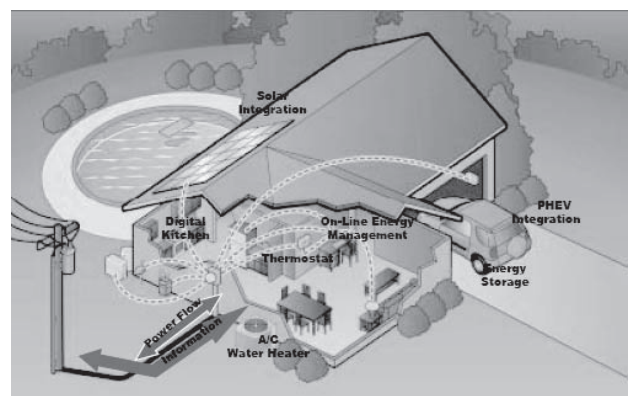
【スマートグリッドの定義と目的】

スマートグリッドは、コンピューターや通信システム等いわゆるIT機能を活用して、現存する電力システムの機能を引上げ、顧客と電力会社の間で、電力の使い方・作り方・貯め方、使われる電気の種類、料金等の情報について、収集し、交換し、賢く利用するものである。

スマートグリッドの整備により、既存の電力インフラを、その名の通り「賢く」活用して、①電気を主とするエネルギーを効率的に利用できる。また、②今後、需要側への設置が増えることが見込まれるソーラーパネル、蓄電池、温度調整機能付き空調等を上手にコントロールする、あるいは③電気自動車が普及する場合に予想される家庭等での充電（チャージ）や給電（ディスチャージ）を円滑に行うようにする、④送配電網の健康診断を容易に行う、ことを目指している（資料1、2参照）。

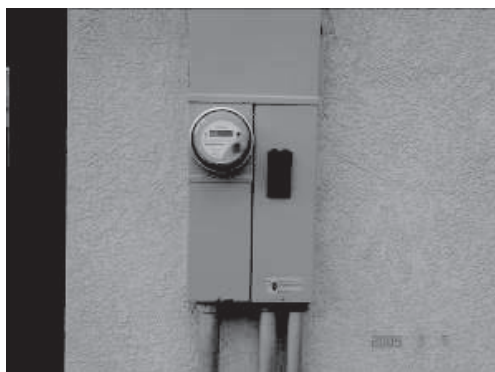
①は、省エネおよびピークシフトの推進であるが、電気の使い方や料金水準が「見える」ことにより、実行しやすくなる。スマートグリッドに期待される様々な効果のなかでも、電気の出し手と受け手双方にメリットがあることから、当面最も期待されているがこの分野である。

低炭素社会の実現に向けて、今後ソーラーパネル等の



(出所) SCE

資料1 スマートグリッドのイメージ



(資料) 著者撮影

資料2 スマートメーター (SCEの実験設備)

分散エネルギーが、需要側に、多く設置されることが予想される(②のケース)。また、電力設備の利用状況にあわせて柔軟に温度設定の出来る空調や蓄電池が普及することが予想される。そのような状況は、需要家のなかで電気を供給する設備が増えることを意味する。これらの設備の稼動状況を把握し、バッテリーの蓄電や電気の出し入れ機能を利用することで、コントロールすることが重要になる。逆に、これが可能となると、ソーラーパネル等の自然エネルギーの導入が進むことになる。

電気自動車やプラグインハイブリッド車が普及してくると、顧客のコンセントやSS等に設置された急速充電器を利用して充電される。また、ピーク時には使用されていない車のバッテリーを利用してグリッドに給電されることも検討されている。電源に余裕のない米国では、給電できる方向で検討が進んでいる。不特定多数の需要端と電力網との間での不定期な電気の出入りをどう制御するか、オフピーク時チャージへいかに誘導するか、移動体に対してどう課金するか等が課題となる(上記③のケース)。これも、スマートグリッドが必要とされる要因である。

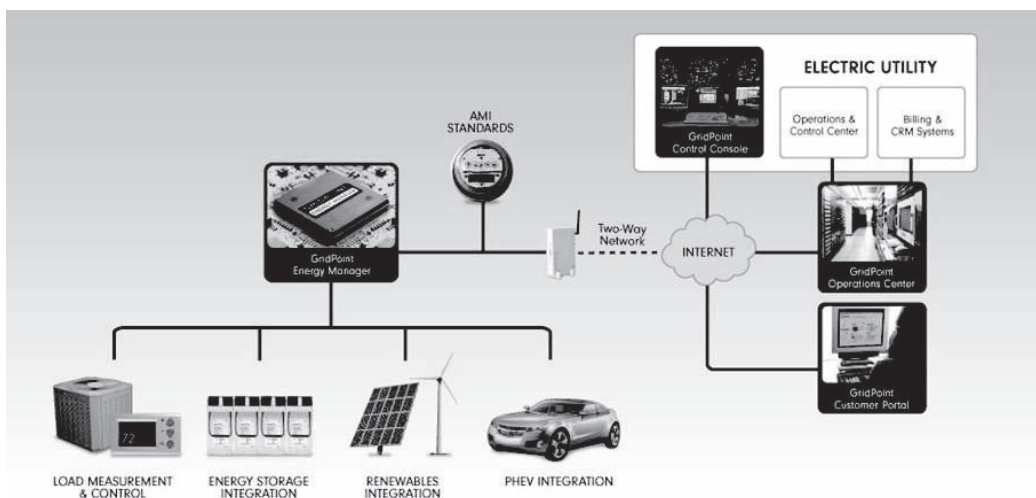
【スマートグリッドのシステム】

スマートグリッドのシステムをみってみる。これも、まだ確立されたものはないのだが、一般に解説・イメージされているものは、家庭を例にとると、家屋や駐車場の外壁にスマートメーター (SM) が取り付けられている。これは、自動検針機に通信インフラとの接続機能を持たせたもので、電気使用量や保安関連情報の測定・検診、分散電源等の発電情報等について、リアルタイムでアクセスできるものである。このSMの近くに電気の使い方や分散電源を制御するコントローラーが設置される。

このSMを基地として、家庭内の空調、洗濯機やソーラーパネル等との情報交換を行うシステムとして家庭内ネットワーク (HAN) が構築される。簡易無線が通信手段として使われ、主要な機器にはセンサーが取り付けられる。また、SMと電力会社との間の情報のやりとりを実施するシステムが必要になる。個々の情報が直接にあるいはブロック毎にまとめられた形で双方向に行き来する。通信手段としては、電力線 (PCL)、光ファイバー、ワイアレス等が候補者である。これは、AMI (Advanced Metering Infrastructure) とも称せられる(資料3参照)。このように、一般にSM, HAN, AMIの三領域に分類され、各領域で、ベンチャー、家電、通信、IT事業者が相次いで参入している状況である。

【積極的な米国の電力会社】

米国では、電力会社もスマートグリッドに積極的である。RPS規制、省エネ規制、設備不足、PHEVが普及する見通しに加えて、送電線新設が難しいことから、既存設備を効率よく活用するテクノロジーに依存せざるを得ないという背景がある。日本に比べて、旧式で老朽化が進み、信頼度の面の改善が大きな課題となっている米国では、スマートグリッドの政策の下で、大規模に更新できることのメリットも大きいのである。



(資料) GridPoint社

資料3 スマートグリッドのシステム

5. スマートグリッドとマイクログリッド、ECO ネットワークとの関連

【スマートグリッドで再生可能エネルギーを普及】

前述したように、米国のスマートグリッドは、再生可能エネルギーやプラグインハイブリッド（PHEV）の普及に関して有効である、という説明になっている。現時点で公表されているスマートグリッド計画を見る限り、省エネやピークシフトそして電気信頼度向上については、理解しやすいのだが、再生可能エネルギーの普及に寄与するという点は、今ひとつピンとこない。

筆者は、2009年3月に米国に調査出張を行ったが、その際にスマートグリッドと再生可能エネルギー大量導入の関係について、何回か質問をしたが、「スマートグリッドにより、各エネルギー資源が統合的にネットワークされ、センサーが至るところに入り込み、情報が増える。これにより再生可能エネルギーの制御が容易になる。」といった回答に集約された。

いずれにしても、既存の電力インフラを利用して、それをテクノロジー、インテリジェンスを付加して、効率的かつ高グレードに使用しよう、ということである。その意味では、デマンドサイドマネジメント（DSM）に近い。DSMとマイクログリッドは異なる考え、システムである。再生可能エネルギーの大量導入に焦点を当てた場合、既存電力システムを前提とするものよりも、マイクログリッド的なものを前提とするシステムのほうが、より可能性が高いように思える。実際に、米国の議論は次第にその方向に向かっていくように見える。

【スマートグリッドとマイクログリッド：米国で高まる マイクログリッドの位置づけ】

連邦エネルギー省（DOE）が景気対策法に基いて用意しているスマートグリッド補助金40億ドル（うち事業用34億ドル、実験用6億ドル）の応募状況を見ると、事業用の殆どはスマートメーターの設置とその関連投資そして配電自動化等の信頼度向上対策である。マイクログリッド的な案件は、事業用には見かけられない。しかし、実験用としては主要なカテゴリとなっており、近い将来の重要な課題として見られていることがわかる。このことから、米国では、マイクログリッドは、スマートグリッドの一領域あるいはその構成要素と位置づけられている。筆者は、米国のスマートグリッド情勢をフォローしてきているが、次第にマイクログリッドへの関心が高まってきているように感じる。

加州の3ユーティリティ（PG&E, SCE, SDG&E）は、いずれもマイクログリッドの実験事業に取り組んでいるが、同州は、多くの再生可能エネルギー導入を義務付ける厳しい規制があり、ユーティリティはそのクリアに躍起になっている。ほかにDuke, Oncor等が実験を行う予定となっている。電力ユーティリティ自体が、マイクログリッドの実験に取り組んでいるところが興味深い。

2009年7月に、GEはネットゼロ住宅構想を発表した。これは、ソーラーパネルやバッテリー、デマンドレスポンス等の組み合わせを工夫することにより、自身が使う電気は自分で賄う、という基本コンセプトに立っている。同年6月には、SDG&EのCEOが、EEI主催のコンファレンスにて、「ユーティリティは、エネルギーシステムが抜本的に変革する事態に備える必要がある。加州では、近い将来にローカルでエネルギーが自律化していくようになる。ユーティリティは、エネルギーのデポジットを担う役割を担うようになる。」とのプレゼンを行っている。同社は、マイクログリッドの実験を行う。

スマートグリッドはまだ黎明期にあり、再生可能エネルギーやバッテリーを大量に吸収できるネットワークについて、いろいろなやり方が登場する可能性がある。そうでないと、再生可能エネルギーやPHEVの普及は実現しないのだ。

【マイクログリッドとECOネットワーク】

マイクログリッドは、スマートグリッドよりも先に話題となった。これは、米国では電力インフラが心もとないことから、自分のところの生活や生産、電気機器類を守るために独自にローカルにグリッドを構築する、というものである。日本では、既存インフラの信頼度が高いこともあり、信頼度確保というよりも、ローカルのエネルギー資源を活用し産業を起し雇用を創出する、との目的が主となる。即ち、再生可能エネルギーの普及と地域振興に重点が置かれている。八戸市をはじめとして、何ヶ所か実証事業が行われたが、実用化にまでには至っていない。

これは、化石燃料やバイオマスを使用した分散型の調整電源やバッテリーを設置することで、グリッド内での自給自足化体制を可能な限り構築し、既存系統グリッドへの逆潮流を極小化し、ローカルと系統間との調整を極小化する、というものである。この考え方は、違和感が小さく、多くの再生可能エネルギーを受け入れる余地がある。

この所謂マイクログリッドと似て非なる概念、より本質的ともいえる概念ECOネットワーク（Electric Cluster Oriented Network）を提唱しているのが、VPEC株式会社代表取締役の永田敏氏である。

永田氏によれば、所謂マイクログリッドは、従来の交流型流通体系の川下に位置するものとする。一方ECOネットワークは、焦点を個別需要家・郡に置き、需要家内で過不足を調整し、また近くの需要家と協同で過不足を調整する。マイクログリッドが、現行流通体系の川下の一角にあり川上からの一方通行を前提としているのに対して、ECOは需要サイドで独立しており、過不足調整のためのネットワークである。従って、最大需要をカバーすることを前提とするインフラよりも、容量が小さくてすむ。また、マイクログリッドは、これまで事業毎

に手作りのシステムを構築してきたが、これはスケールメリットが見込み難い。一方ECOは、標準型を構築しその足し算展開によるソリューションであることから、経済性がより期待できるのである。

その共同過不足調整の輪を拡大して行くことで、効率良く再生可能エネルギーを受け入れるインフラを形成する、という考え方である(図表2, 資料4参照)。過不足調整の輪が広がっていくと、ローカル単位での調整電源やバッテリーが必要になってくるが、これにより更に効率が上がり、自律性も増してくる。

スマートグリッドが世界的に注目を集めてくるにつれて、標準化の議論が盛んになってきている。システム自体の標準化が重要になってくるが、その範囲・広さが大きな焦点となってくる。永田氏は、ここに目をつけており、世界に先駆けて、日本発の標準化の検討・実験を進めるべきだ、と強調している。永田氏は、過不足融通を行なう最適な範囲が存在し、広ければいいというものではない、この最適範囲が重要な標準化の構成要素となる、としている。

永田氏のエコネットワークは、既に、中国、インドという二大大国で、基本特許として認定されている。ECOネットワークの優位性がよりはっきり出る島国のフィリピンでも、特許庁の認可が下りている。米国の連邦エネルギー省高官も、高い関心を示したといわれる。こうした考え方は、いずれ米国のスマートグリッドに影響を与える可能性がある。

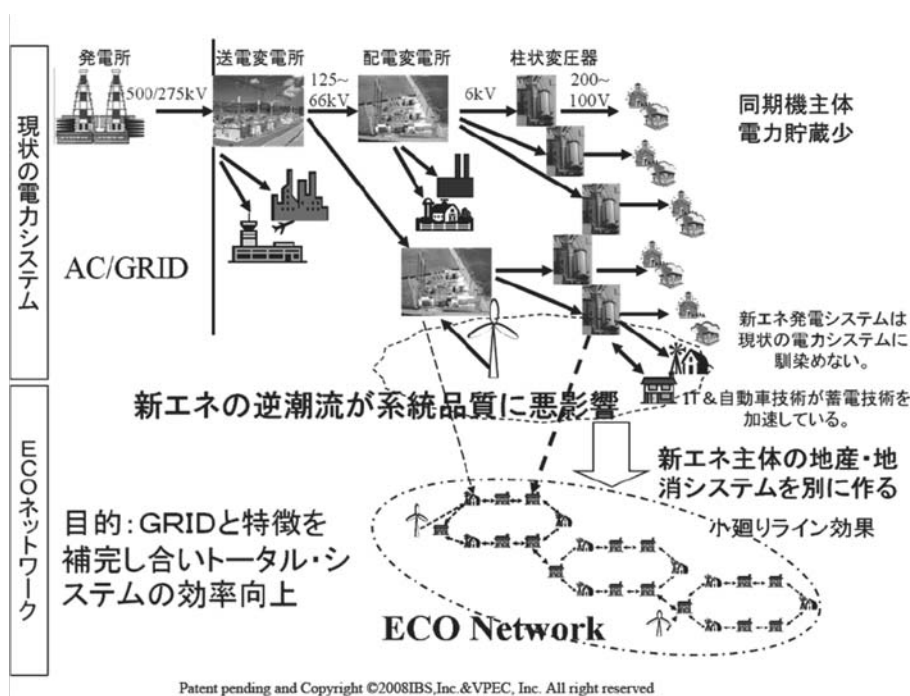
6. 日本におけるスマートグリッドの考え方と情勢

(1) 日米比較にみる日本のスマートグリッドの可能性

図表2 永田敏氏のECOネットワークの概要

<p>エコネットワーク：Electric-Cluster-Oriented-Network -インターネット型自立分散型電力システム-</p> <ul style="list-style-type: none"> *現状のGRIDは、同時同量を基本原則とし、膨大な電気エネルギーが長距離常時移動するシステム。発電技術が同機発電機主体で電力貯蔵技術が未熟な時代に発達。膨大なインフラ初期投資が必要。同期化力のない再生可能エネルギーの発電技術には愛称が悪いシステム。 *エコネットワークは、過不足融通に基き、最新の多様な発電・電力貯蔵・電子・情報技術を駆使する。地産・地消のシステム差分の少量のエネルギーを、近距離・断続的に移動するため、ロスが少なく地球環境にやさしいシステム。初期投資も少なく済む、足し算で展開できる。国土が広く、送配電網の整備がこれからの国に利点が多い。再生可能エネルギー発電向き。 *発電量・使用量の近未来の状況を需要家に知らせ、自立制御を可能にする。最新の電子技術の応用で停電の影響が少ないシステム。 *一般には、2倍の発電能力が必要。インターネット他の情報機器の普及で、民生・小店舗用は3倍の発電能力が必要。ここにエコネットワークを導入し、電力需給を自立制御させれば、予備率の改善に繋がる。電力システム全体の総合効率向上が可能となる。 *再生可能エネルギーを群で導入し、エコネットワークの過不足融通でエネルギー自己完結型の集落を展開できる。 *構成機器は揃っている。システム設計とソフトウェアの一部作成で、直ぐに実証実験可能。費用対効果は大きい。
--

米国グリーン・ニューディールの象徴であり、グリーン三種の神器のインフラであるスマートグリッドについて、日本における可能性を考察してみる。日本におけるスマートグリッドの可能性と課題を考える場合、分野毎に日米を比較すると分かりやすい。アメリカと日本の事情の違いを、①省エネ・ピークシフト、②再生可能エネルギーの導入、③電気自動車・PHEV(プラグイン・ハイブリッド車)の普及、④電気保安・停電対策の4点に分けて整理してみる。いずれも、グリーンニューディール



Patent pending and Copyright ©2008IBS, Inc. & VPEC, Inc. All right reserved

資料4 ECOネットワークの概念

時代における重要事項である。

【米国は全ての項目が重要課題で、効果は絶大】

スマートグリッドを展開することで得られる効果は、上記のように、大きく分けて4つある。アメリカでは①～④のいずれも重要な課題であり、対策も遅れている。この4つの要素をまとめて推進していくことが、環境推進にとっても産業の発展にとっても劇的に効くのである。

特に①に関しては、国民の省エネ意識が低く、贅沢な使い方をしているアメリカでは、消費電力を削減する余地が大きい。また、ピーク時に減らすような電気の使い方をすれば、新たな発電所の建設を抑えることができる。需給が逼迫している米国では、建設コストを抑えることの意味は大きい。さらに③では、自動車産業再生の鍵を握るものであり、雇用と経済力を建て直すことに繋がる。また④では、当事者から電話がないかぎり停電箇所が分からず、大規模停電が頻発するアメリカでは、旧式で老朽化した送配電線網の性能向上は急務となっている。停電による経済コスト損失は膨大である。

このように、アメリカにとっては、スマートグリッドを推進することにより、遅れていた分野で一気に巻き返せる秘策なのである。また、関連する規格を握って、家電を含めて一気に世界市場制覇を狙っていることも想像するに難くない。過去のコンピューター・ネットワーク、テレコム・ネットワークの状況と重なるのである。スマートグリッド対策として、連邦政府予算110億ドルもの予算を投じるのも頷ける。

【日本におけるスマートグリッドの意味】

次に、日本でスマートグリッドを進めるメリットはどこにあるか、について考察する。結論としては、太陽光発電の大量導入を掲げていることから、②に関して最も大きな課題を抱えるといえる。

まず、日本の供給信頼度に関するシステムはかなり高い。需要家1件あたりの年間事故停電時間は、日本19分、米国97分、イギリス88分、フランス51分となっており、諸外国と比べてもその水準は高い。従って、④に関してはスマートグリッドのゴールに近いところまでできているといえる。

次に①であるが、国民の省エネ意識は高い。電力会社も、夜間電力料金の値下げなどさまざまなメニューを用意し、需要家のピークシフトを後押ししてきた。また、ESCOの事業化など省エネは着実に進んでいる。所謂「見える化」への取り組みも始まっており、計測器を使った「見える化」サービスに乗り出す企業も増えてきている。但し、温暖化ガスの大幅な削減が求められている中で、全体的に更に見える化を進めていく必要がある。

③では、技術開発や高効率車の普及で世界をリードしているが、エコカーの最終形はまだ見えていない。すなわち、①③は、米国ほどではないにしても、スマートグ

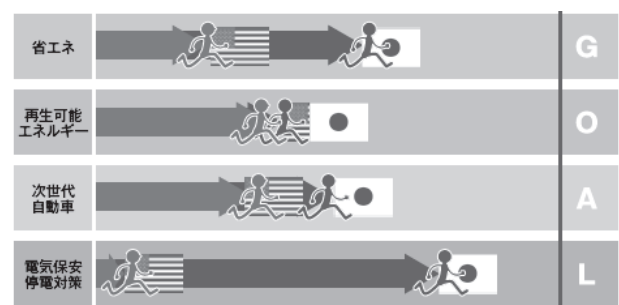
リッドを進めて行く必要があると考えられる。

以上から、日本でスマートグリッドを展開する必要性・効果としては、差し迫った課題としてであり大きな効果が見込めるのは②であり、①と③がそれに続く、ということになる。アメリカでは①～④のすべてが同じような重要性で進行していくが、日本ではそれぞれの要素の濃淡を加味しながらスマートグリッドが構築されていく、と考えられるのである（図表3参照）。

(2) スマートグリッドを巡る国内情勢

それでは、実際の日本のスマートグリッドを巡る情勢はどうであろうか。気の早い人は、今年の産業編流行語大賞になると予想する人もいるなど、予想を超えて大きな盛り上がりを見せている。多くのセミナーが開催されているが、いずれも盛況である。また、環境やエネルギー関連の専門誌は挙って大々的な特集を組んでおり、一般紙も複数回特集を組んでいる。投資を扱う専門誌は、スマートグリッド関連企業の特集を組み、有望株として期待を煽っている。証券会社も、アナリストレポートで取り上げ、機関投資家向けのセミナーを開催している。既に、スマートグリッド関連株という言葉が流布し、関連と思われる会社の株が上がっているとも言われる。

グリーン・ニューディールよりもスマートグリッドという表現の方が、目立つようになってきているようにも思える。政策面でも、スマートグリッド関連の項目が2009年度から盛り込まれるようになっており、2010年度予算編成の目玉になっている。とにかく、省エネ、再生可能エネルギー、エコカーの所謂「三種の神器」に関わるインフラであり、その施策名称はともかく、実質スマートグリッド関連に分類できる。



(出所) 環境ビジネス2009年10月号

図表3 日米スマートグリッド進捗状況

電気機器メーカー等の所謂スマートグリッド関連事業者も、表向きはともかく、大きな期待の下に、準備を進めているようである。スマートグリッドの守備範囲は広く、既存事業でも、流通設備や信頼度関連を主に、スマートグリッドに分類される事業がある。また、住宅やビルの省エネシステム、再生可能エネルギー、バッテリー、電気自動車関連も、スマートグリッドとの関連性

をさぐっていると推測される。

電力会社も、前向きな姿勢を見せ始めている。スマートグリッドの要となるスマートメーターに関しては、関西電力が既に顧客への配布を始めている。東京電力については、スマートメーターの開発体制を整える、ゆくゆくは全戸に配る方針との報道がなされている。九州電力もスマートメーター配布に前向きと言われている。

前述したように、グリーン・ニューディールは、近い将来の生活や産業が、電気を主にエネルギーと密接に関わることから、それを準備するための施策であり、それを支える基本的なシステムやインフラがスマートグリッドとみることができる。このように捉えると、スマートグリッドに関しては、あらゆるといってもいい分野・産業が関連することになり、エネルギー関係者だけでなく、全体として最適解を生むべく国を上げて幅広く議論すべきことであろう。また、日本型とか日本独自の特殊事情とかを言いすぎると、携帯電話でガラパゴス化したことの「二の舞」になる懸念が捨てきれない。

既存のエネルギーシステムと抵触する部分があるかもしれないが、全体最適の中で、そのシステムとどのように折り合いをつけていくか、つけられるのかについて議論が必要であろう。太陽光発電の大規模導入を政策として進めることとなったが、これが既存インフラに及ぼす影響等について、政府の場で検討がなされた。これは、スマートグリッドに係る議論の走りと見ることができる。

最後に

米国では、風力を主に再生可能エネルギー開発ブームが沸きあがっている。一方で、シェールガスの開発により、天然ガスを有効に使うべしという議論も高まりつつある。最近、チュー DOE長官は、ラスベガスでの講演

で、再生可能エネルギー全盛時代が来るまでに、即ち石炭から再生可能エネルギーへ移行するまでに、その経過措置的な動きとして、再生可能エネルギーと天然ガスが共存する時代が存在する、という趣旨の発言をしている。もちろん、化石燃料の中ではクリーンである天然ガスは、将来も主要なエネルギー源として使用されていくことになるが、環境派のチュー長官の発言としては、かなり天然ガスに踏む込んだものとみることが出来よう。

低炭素化社会は、原子力と並んで自然エネルギー等の再生可能エネルギーが大量に導入される世界である。しかし、そのために解決しなければならない課題は大きい。解決策としてバッテリーの設置やスマートグリッド等流通インフラの整備を進めていくことになるが、再生可能エネルギー割合が増えるほどに調整電源への依存は高くなる。比較的クリーンな天然ガスやバイオマスを利用した火力発電は、系統規模にせよ、分散型にせよ、新たな役割が増していくことが予想される。

以上

参考文献

- ・山家公雄「オバマのグリーン・ニューディール」
2009年 日本経済新聞出版社
- ・山家公雄「ソーラーウォーズ」
2009年 エネルギーフォーラム社
- ・山家公雄「エネルギーオセロゲーム」
2006年 エネルギーフォーラム社
- ・「日本版スマートグリッドの論点」
環境ビジネス2009年10月号
- ・The Wall Street Journal
- ・The New York Times
- ・Greentech Media

特集：自然エネルギー利用とマイクログリッド

家庭用燃料電池コージェネ「エネファーム」について

大村 俊哉*¹
OHMURA Toshiya

キーワード：固体高分子形燃料電池, PEFC, コージェネレーションシステム, 家庭用燃料電池

1. はじめに

燃料電池は、高い発電効率や小さな環境負荷と共に、発電と同時に発生する排熱を有効に利用する省エネルギー性に優れたコージェネレーションシステムとして実用化が期待されており、30年以上の長きに渡って種々の燃料電池の開発と実用化が進められている。

近年、喫緊の課題となっている地球温暖化対策技術としても注目され、2008年に日本を議長国として開催された洞爺湖サミットにおいては、日本のエネルギー・環境技術をアピールする「ゼロエミッションハウス」において、家庭用燃料電池「エネファーム」3台が実機運転され、その技術は世界に向けて発信され、日本のみならず世界的にも大きな期待がかけられている。

2. 燃料電池とは

2.1 燃料電池の発電原理の発見

燃料電池の発電原理は、英国の物理学者ウィリアム・グローブ卿 (Sir William Robert Grove, 1811-1896) によって1839年に実証された。硫酸に浸した2つの白金電極に水素と酸素を供給して電力を得る実験に成功したものであり、このタイプの燃料電池が、現在の燃料電池の原型といえる。

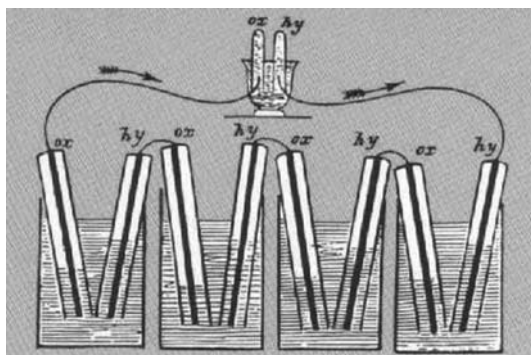


図1 グローブ卿の実験装置
(<http://chem.ch.huji.ac.il/history/grove.htm>)

原稿受付 2009年9月24日

* 1 東京ガス株式会社 技術戦略部 技術戦略G
〒105-8527 東京都港区海岸1-5-20

2.2 開発の歴史

グローブ卿による発電原理実証の後、100年以上の時を経て、1965年に米国NASAの宇宙開発プログラムにおいて、有人宇宙船のジェミニ5号にGE社の固体高分子形燃料電池が搭載されたが、これが燃料電池の実用化第1号といえる。続くアポロ計画では、ユニテッド・テクノロジー社のアルカリ形燃料電池に引き継がれ、人類を月面に送るといふ壮大なプロジェクトの実現に大きく貢献した。

一方民生用に目を転じると、米国では、電力事業者やガス事業者の参画のもと、ユニテッド・テクノロジー社の燃料電池技術の実用化を狙った「TARGET計画」、 「GRI計画」などの開発プロジェクトが1970～1980年代にスタートした。日本でもほぼ同時期の、1978年から通産省がスタートさせた省エネルギー技術開発プロジェクトであるムーンライト計画にて、発電事業用や民生用コージェネ向けの燃料電池の開発が進められ、宇宙向けの技術を地上に展開する努力が続けられた。

自動車用、家庭用コージェネレーション、モバイル機器用など個人向けの燃料電池開発のきっかけとなったのは、カナダのパラード社が1987年に発表した「固体高分子形燃料電池」である。これは電解質にフッ素系のイオン交換樹脂膜を用いたもので、従来の技術に比べ、出力密度において圧倒的な差があったことから、より小型で低コストの燃料電池開発が加速された。

2.3 燃料電池の種類と開発状況





燃料電池には表1に示すように、様々な種類が開発されている。

りん酸形燃料電池は、燃料電池コージェネレーションシステムとして1970年代から粘り強く開発が進められた結果、100kWと200kWのコージェネレーションシステムにおいて、性能および耐久性は既に商用レベルに達し、政府の導入補助策によって着実な導入が進んでいる。

溶融炭酸塩型燃料電池については数百kW～数MWの米国製機を中心に初期市場導入が加速しつつある。

固体酸化物形燃料電池は、古くから開発が進められていた大型事業用が着実に進捗していることに加えて、1～数kW級の小型機の開発が急進展しており、2007年度

表1 燃料電池の種類と特徴

	リン酸形 PAFC	熔融炭酸塩形 MCFC	固体酸化物形 SOFC	固体高分子形 PEFC
電解質	リン酸水溶液	熔融炭酸塩	セラミックス	高分子膜
作動温度	200℃	650～700℃	750～1000℃	常温～90℃
発電効率 (HHV)	36～38%	40～50% 50%以上(コンバインドサイクル)	40～50% 50%以上(コンバインドサイクル)	30～37%
				
開発状況	実用化	実用開始	開発段階	実用開始
用途	工場・業務用	工場・業務用	工場・業務用・家庭用	家庭用・自動車・携帯用
発電容量	100～200kW	250kW～1MW	1kW～1MW	1kW級(家庭用)

から国による実住宅での実証研究が開始され、2008年度末までに65台の実証機が導入された。

現在、最も開発が盛んに行われている固体高分子形燃料電池（以下、PEFC）については、自動車用と定置用に共通な基礎的な取り組みの国家プロジェクトが進展する一方で、家庭用1kW級の定置用燃料電池を対象とした大規模実証事業にて4年間計として3,307台が導入され、2009年度から、業界統一呼称であるエネファームとして、一般販売が開始された。本稿では、このエネファームについて、その特徴や開発状況、今後の展望などについて解説する。

3. 家庭用燃料電池コージェネ「エネファーム」について

エネファームは都市ガス、LPガスなどの化石燃料を用いて家庭で電力と熱の両エネルギーを同時にかつバランスよく生産し、総合エネルギー効率の高い家庭用コージェネレーションシステムを実現することにより、省エネルギーと環境負荷低減を相互かつ持続的に向上することを目的としているエネルギーシステムである。図2に示す通り、従来型発電システムと比べ大幅な省エネルギーとCO₂削減が可能である。

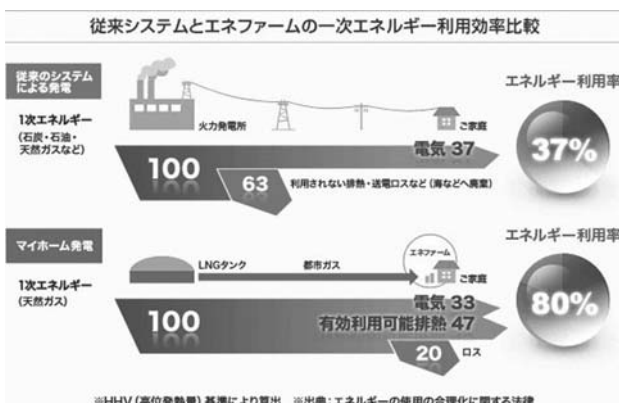


図2 エネファームと従来型発電システムの比較

3.1 発電の仕組み

エネファームのシステム構成を図3に示す。エネファームは、都市ガスから水素を取り出す「燃料処理装置」、水素から直流の電気を発生させる「PEFCスタック」、直流を交流に変換し商用電力系統に接続できるように調整する「インバータ」、発電時等に生じる熱をお湯として回収する「貯湯ユニット」、コージェネレーションシステムとして効率よく運転するための学習機能などを搭載した制御装置、お客様とのインターフェースとなる「リモコン」などから構成される。以下にそれぞれについて詳述する。

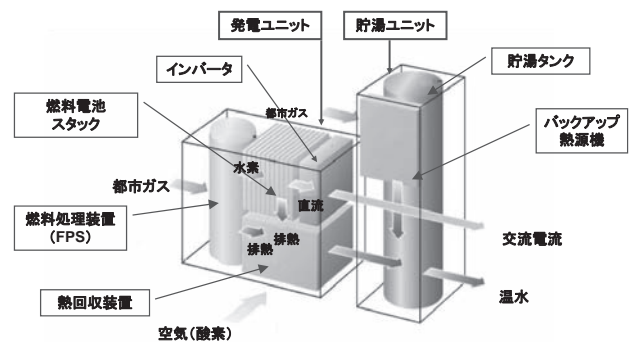


図3 エネファームのシステム構成

3.1.1 燃料処理装置

燃料処理装置の構成例を図4に示す。都市ガスやLPGなどの燃料は、付臭のために燃料に添加されている硫黄分除去のため、まず脱硫部に投入される。その後、水と混合され改質触媒部にて水蒸気改質反応により、水素リッチガスに改質される。この段階ではCOは10%程度含有しているため、CO変成触媒部のCOシフト反応、CO除去触媒部のCO選択酸化反応によりCO濃度10ppm以下まで低減された後、PEFCスタックに供給される。

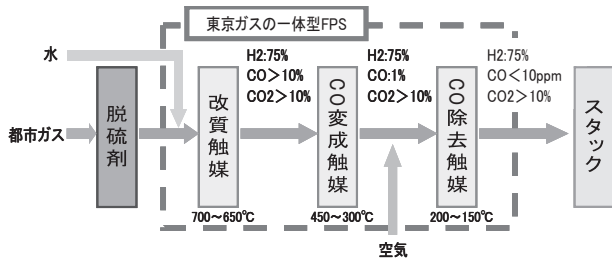


図4 燃料処理装置の構成

水蒸気改質反応 $CH_4 + H_2O \rightarrow 3H_2 + CO$ (吸熱反応)

COシフト反応 $CO + H_2O \rightarrow H_2 + CO_2$ (発熱反応)

CO選択酸化反応 $CO + 1/2O_2 \rightarrow CO_2$ (発熱反応)

このように、燃料処理装置は、反応温度の異なる発熱反応部と吸熱反応部を組み合わせた複雑な熱バランスによって成り立っており、小型化して効率良く水素を取り出すために、図5のような一体型構造とするなどの設計上の工夫を施している。⁽²⁾

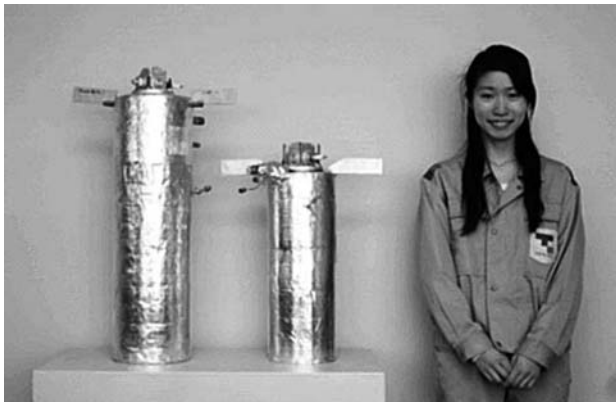


図5 一体型燃料処理装置の外観
(写真左は旧モデル、右は新モデル)

3.1.2 PEFCスタック

発電部の最小単位となる膜電極接合体は、図6に示すように、プラスの電極 (= 空気極) と、マイナスの電極 (= 燃料極) が、電解質である固体高分子膜をはむサンドイッチ構造となっている。燃料処理装置からセパレータを通して燃料極に供給された水素は、電子を切り離して水素イオンとなり、電解質の中を移動し、反対側の空気極に送られた空気中の酸素と反応して水を生成する。この反応の過程で、外部に電気を取り出すことが可能となる。発電出力を大きくするためには、電極面積を増やす必要があるが、家庭で必要とされる1kW程度の電力を得るためには、単セルを数十枚直列に重ねて、スタック構造をとることによりこれを実現している。

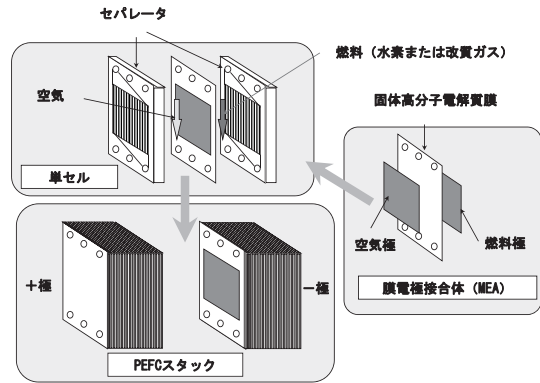


図6 PEFCスタックの構造

3.1.3 インバータ

PEFCスタックで発電した電力は、50V未満の直流であるため、これを家庭の200Vの商用電力系統と接続（系統連系）するために、昇圧し交流への変換する必要がある。これを実現する装置がインバータである。系統連系のためには、「電気設備の技術基準の解釈」や「電力品質確保に係る系統連系技術要件ガイドライン」で定める各種技術要件に対応する必要があるが、そのための保護機能等もインバータに備えられている。

3.1.4 貯湯ユニット

PEFCスタックや燃料処理装置から生じる余剰熱を回収して、温水としてタンクに蓄え、需要に合わせて適宜給湯・暖房に供するためのユニットが貯湯ユニットである。貯湯ユニットは、貯湯タンクと、万が一タンクが湯切れした際にバックアップするための熱源機から構成されている。バックアップ熱源機は瞬時に給湯が可能であるため、他の貯湯式給湯器などのような湯切れの心配は無い。

3.1.5 運転制御装置

エネファームはコージェネレーションシステムであり、熱と電気をバランスよく利用することにより最大限のメリットを得ることができる。更に、部分負荷効率も高いものの定格出力付近で効率が最大である、起動時には一定のエネルギーを消費する、という特徴もあるためこれらを考慮して最適な運転計画を立てる必要がある、これ

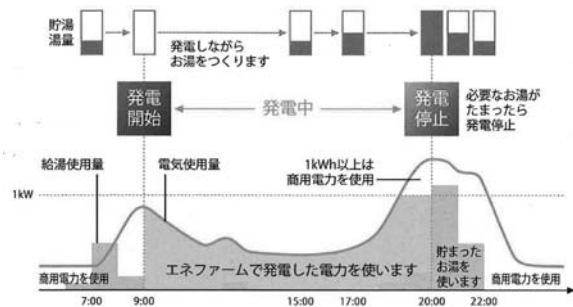


図7 運転パターンイメージ

を運転制御装置が担っている。一例として、以下に、エネファームの運転制御方法の例を以下に、運転パターンのイメージを図7に示す。

運転パターンを考える上で最も重要な点は、給湯需要にあわせた熱主電従運転を実施し、無駄なお湯を作らないことである。一般的な家庭では電力需要に比べて給湯需要が相対的に小さいため、仮に電力需要にあわせた（電主熱従）運転をおこなうと、熱が過剰となってしまう。熱主電従運転では、電力が不足することになるが、これは商用電力系統から補う。熱主電従運転の考え方にに基づき、未来の電力需要・給湯需要を、いわゆる「事例ベース推論」により予測したうえで、1次エネルギー消費量が最小となる運転パターンを決定している。このとき、逆流電力は1次エネルギー消費量から除外しない。もし除外すると、電力需要によらず常に定格で発電する運転パターンが選択されることになる。電気事業者が買電しない現状では、そのような運転パターンは、ユーザーにとって経済的に不利であるためこのコンセプトを採用している。

3.2 エネファームの特徴

3.2.1 基本性能

一例として、東京ガスのエネファームの外観を図8に、基本仕様を表2に示す。高い効率に加えて、騒音値も40dBを下回っており、優れた環境特性を実現している



図8 エネファームの外観

表2 エネファームの基本特性

発電出力	300W ~ 1kW
発電効率	33%HHV 以上 (37%LHV 以上)
熱回収効率	47%HHV 以上 (52%LHV 以上)
貯湯槽容量	200 リットル
貯湯温度	60℃ 温水
騒音値	燃料電池ユニット 39dB 以下 (発電時)
耐久性	4万時間運転または4千回起動停止 (10年相当)
信頼性	故障率5%未満

と同時に、課題であった耐久性・信頼性についても仕様達成の見通しをつけ、2009年5月から一般販売を開始した。

3.2.2 実運転性能

「実際の家庭に数多くの燃料電池を設置し、実使用条件下の運転データを収集し、市場創出段階における民間技術レベルの問題点を把握し、商用化に必要な技術課題を抽出し、市場導入の基盤形成を図る」という目的の下、2005年度から開始された「定置用燃料電池大規模実証事業」が2008年度に最終年度を迎えた。4年間累計で、3,307台が導入され、耐久性・信頼性の向上に資するとともに、コストダウン・大量生産への布石となり着実に成果を挙げている。図9、10に示すように、省エネ性・環境性については、2007年度設置サイトのトップペアサイトについては、従来システムに比較して一次エネルギー使用量において年間12,180MJ/年 (25%) 削減、CO₂排出量において年間1,200kg-CO₂ (39%) 削減の効果が実

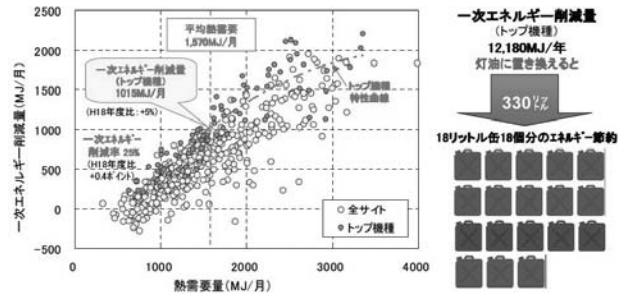


図9 エネファームの一次エネルギー削減効果⁽¹⁾

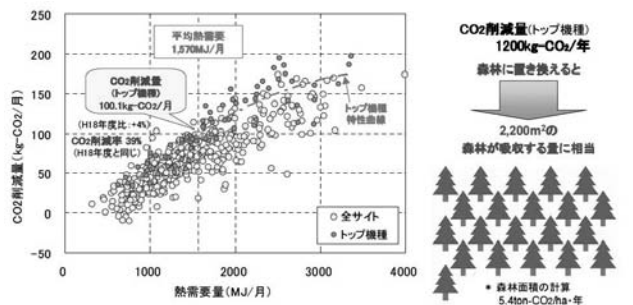


図10 エネファームのCO₂削減効果⁽¹⁾

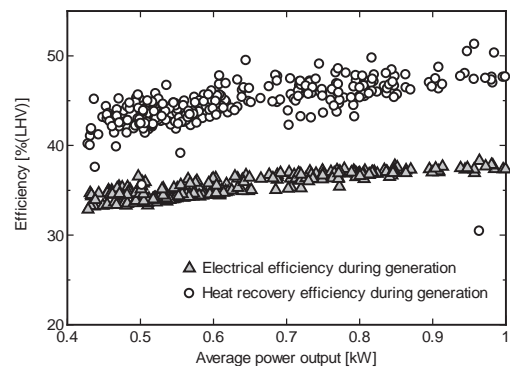


図11 エネファームの部分負荷特性⁽³⁾

証されるなど、カタログスペックだけでなく、実運転環境下でも優れた特性を示すことが実証されている。⁽¹⁾

また、図11に示すように、平均発電出力が0.5kW以下の領域においても高い発電効率を維持できることが実サイトでの運転でも確認できており⁽³⁾、前述の運転制御の効果と合わせて、高い環境特性を実現する要因となっている。

4. 今後の課題

これまで述べた通り、エネファームの開発は着実に進展し、環境性能、耐久・信頼性については商品と呼べるレベルに到達し、2009年度からは国による導入補助金制度も整備され、本格普及の第一歩を踏み出した。

一方で、コストについては2009年度時点で300万円を超えており、補助金制度を活用しても初期投資をランニング費用で賄えるレベルではなく、より一層のコストダ

ウンが必要である。そのためには、セルスタックを構成する触媒や固体高分子膜等におけるサイエンスレベルでのブレークスルーだけでなく、生産技術における技術革新や量産効果も重要であり、狭小住宅や集合住宅市場への展開も見据えた技術開発や、防災用電源としての活用などの付加価値向上による新たな市場創出も欠かせない。我々エネルギー事業者は、今後も、大学や研究団体、エネファームメーカーと一致団結して、このハードルを乗り越えるべく取り組んで行きたい。

参考文献

- (1) 平成20年度定置用燃料電池大規模実証事業報告会資料，平成21年3月10日 (<http://happyfc.nefor.jp/pdf/20fc.pdf>)
- (2) 斎宮久幸ほか，第16回燃料電池シンポジウム講演予稿集，2009，P51
- (3) 河村将史ほか，燃料電池，VOL.9 NO.1 2009，P15

特集：自然エネルギー利用とマイクログリッド

マイクログリッドの需給制御技術の動向

辻 隆男*¹
TSUJII Takao橋口 卓平*²
HASHIGUCHI Takuhei合田 忠弘*²
GODA Tadahiro

キーワード：分散型電源，マイクログリッド，需給制御，電力貯蔵装置

1. はじめに

エネルギー・環境問題の解決に向けて、太陽光発電等の自然エネルギーを利用した分散型電源（以下、自然エネルギー利用型DG（Distributed Generator））の導入が推進されている。自然エネルギー利用型DGは出力が不安定であるため、その導入量が増加すると、需給制御が困難になる問題が懸念されている。つまり電力の需要と供給は常に一致させる必要があるため、自然エネルギー利用型DGの出力が大きく変動した場合は、他の電源の出力を調整して需給を一致させる必要がある。しかし自然エネルギーの導入量が飛躍的に増加すると、その大きな出力変動に発電機の出力調整が追従できない問題が生じてくる。この問題を解決し、自然エネルギーの導入を推進することを目的として、近年ではマイクログリッドの概念が進展している。

マイクログリッドは、図1に示すように様々な種類の分散型電源と負荷を組み合わせた小規模システムとして構成され、自然エネルギー利用型DGの出力や負荷の変動を、マイクログリッド内部の可制御電源や電力貯蔵装置の充放電制御により吸収するように運用される。このとき上位システムから見たマイクログリッドは変動の少ない負荷として捉えることができ、上位システムの発電機制御に問題を生じることなく、自然エネルギーの導入を拡大できる。このようなマイクログリッドの一面は、「良き市民（good citizen）」として表現される。さらに近年では、他のマイクログリッドや上位システムの運用制御を支援する「模範市民（model citizen）」の概念も進展している。また離島や僻地のように、上位システムとの連系が困難な地域においても、自然エネルギー利用型DGの導入を目的とした自立運転型のマイクログリッドが検討されている。この場合、自然エネルギー利用型DGの出力変動時にも安定した自立運転を継続し、周波数や電圧等の電力品質を維持することが運用の目的となる。

本稿ではマイクログリッドにおける主要な技術課題で

ある需給制御に着目し、その研究動向について紹介する。まず第2章ではマイクログリッドの特徴を確認し、その利点や課題について整理する。次に第3章と第4章では、それぞれ後述する「連系運転型」及び「自立運転型」マイクログリッドを対象に、需給制御の概要について述べる。

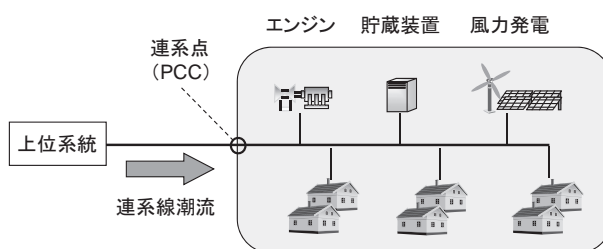


図1 マイクログリッドの概念図

2. マイクログリッドの特徴

マイクログリッドは各種の分散型電源と負荷を含む小規模システムであり、主に上位システムと1点（Point of Common Coupling: PCC）で連系するように構成される。前述の通り、自然エネルギー利用型DGの出力変動をマイクログリッド内の可制御電源の制御により補償し、上位システムから融通される連系線潮流を計画値に維持することを目指す。一般に自然エネルギー利用型DGの出力は急激に変化する可能性があるが、マイクログリッド内に含まれる各種回転機等の分散型電源は、制御応答速度の面から、この変動を補償するための可制御性が十分ではない可能性がある。この対策として、制御応答が高速な二次電池や電気二重層キャパシタ等の電力貯蔵装置の導入が検討されている。これにより自然エネルギー利用型DGの出力変動を平滑化すると共に、昼間の太陽光発電で生じた余剰電力のピークシフト等により、日間運用の最適化を推進する効果が期待できる。

以下にマイクログリッドの利点と課題を示す。

【利点】

① 自然エネルギー利用型DGの出力変動の抑制

上記の通り、自然エネルギーの導入拡大を実現するこ

原稿受付 2009年10月13日

*1 横浜国立大学大学院工学研究院
〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5*2 九州大学大学院システム情報科学研究院
〒819-0395 福岡市西区元岡744

とで、電力供給の1次エネルギーの多角化を推進し、環境性の改善に大きく寄与する。

② 熱エネルギーの有効利用

ローカルなエネルギーネットワークであるため熱エネルギーの融通が比較的容易であり、電熱双方のエネルギーを統合した効率的なエネルギー供給を柔軟に実現しうる。このためコージェネレーションの導入が広く検討されている。

③ 供給信頼度の改善

上位系統で故障が発生して供給支障が発生した場合にも、連系点を開放してマイクログリッド単独で電力供給を継続する「自立運転」に移行できれば、供給信頼度の向上が期待できる。既存の電力系統の供給信頼度が比較的低い米国においては、特に供給信頼度改善を目的としてマイクログリッドの導入が推進されてきた経緯がある。

[課題]

① 需給制御技術の開発

前述の通り、自然エネルギー利用型DGの出力変動を適切に補償し、上位系統への影響を低減する制御手法の確立が必要となる。また、電力貯蔵装置の充放電制御について、日間を通じた最適運用手法の開発も重要な課題である。

② 電力貯蔵装置の容量削減

自然エネルギー利用型DGの導入に合わせて、大容量の電力貯蔵装置が必要であるとすれば、これに要するコストやCO₂排出量の増加が見込まれるため、環境性への効果は限定的なものになりうる。したがって、より少ない電力貯蔵装置の導入により、適切な需給制御を達成することが重要である。

③ 系統電圧の維持

分散型電源の導入量が増加すると、逆潮流の発生に伴い過電圧の生じる可能性があり、適切な電圧維持制御手法の確立が必要となる。

④ 故障への対応

大量の分散型電源を含む配電系統では、短絡容量の増大や保護リレーの誤動作、さらに単独運転の検出など多くの問題が生じる。マイクログリッドにおいてもこれらの課題はいずれも重要である。

本稿では上記の「利点①」および「課題①」に着目し、マイクログリッドの需給制御技術について解説する。前述の通り、マイクログリッドは上位系統との連系の有無により、「連系運転型マイクログリッド」および

「自立運転型マイクログリッド」に分類することができる。次章以降で、各マイクログリッドにおける需給制御の概要について述べる。

3. 連系運転型マイクログリッドの需給制御技術

上位系統と連系を有する「連系運転型マイクログリッド」では、マイクログリッド内の需給変動は連系線を介して上位系統から補償される。このためマイクログリッドの需給運用の目標は、連系線潮流の変動を抑制しつつ、電力と熱の双方を考慮して経済性および環境性を最適化する点にある。この実現のために、マイクログリッド内の各種電源や電力貯蔵装置を結ぶ情報通信網を完備し、統合的な制御の実現が多く試みられている。各種電源は互いの制御量や連系線潮流量の情報を共有し、協調的に制御される。

連系運転型マイクログリッドの需給運用の方針としては、既存の系統運用と同様に、週間・日間の運用を事前に計画し、さらに電力需要の変化に合わせてリアルタイムに需給調整することが基本となる。具体例として、以下のような手順が考えられる。

[手順1] 運用当日に対し1週間前の段階で、分散型電源の発電量および電力・熱需要を予測し、週間の運用計画を立てる。

[手順2] 運用当日の発電量・需要量から事前の計画を見直し、数時間毎に分散型電源の起動停止状態ならびに出力配分を、最適化計算に基づいて決定する。

[手順3] リアルタイムの運用として、連系線潮流の変動抑制を目的として、電力貯蔵装置の充放電制御を実施する。また制御応答の速い分散型電源について、同様に出力制御を実施する。

マイクログリッドのような小規模系統では系統容量が小さいため、個々の需要変動が全体に占める割合が比較的大きくなる。このため需要予測の精度を向上させることは困難であり、リアルタイムでの制御の重要性が非常に高いと考えられる。

手順3の連系線潮流一定制御について、複数台のガスエンジンと二次電池から成る制御システム例を図2に示

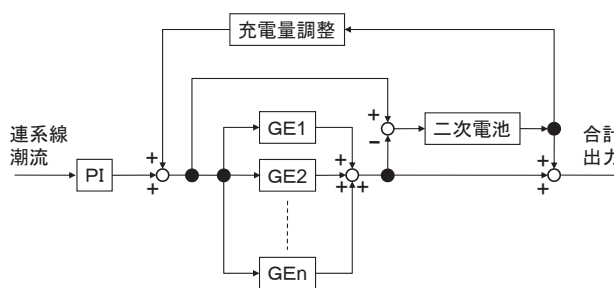


図2 連系運転モードの制御ブロック例

す⁽²⁾。まず連系線潮流の大きさを制御入力として、PI制御論理に基づいて必要な出力調整量を決定する。これを複数台のガスエンジンで容量比に応じて分担するよう、各ガスエンジンの出力目標値を決定する。ガスエンジンの制御応答には遅れが伴うため、直ちに出力目標値に追従することはできない。このために生じた、「連系線潮流偏差量」と「ガスエンジン出力の合計値」との差分を、二次電池で補償する。ここで二次電池制御は急激な需給偏差を一時的に補償することが主目的であるため、定常的には0に戻ることが望ましい。したがって二次電池出力はガスエンジンの制御入力に加算され、これによって二次電池制御量はガスエンジンに引き渡されるよう設計される。なお二次電池の充電量は、日間を通じた最適運用計画に基づいた目標値が設定されている。このため定常的には充電量が目標値に戻るよう、二次電池制御量の調整がなされている。

連系線潮流の変動抑制効果を評価する指標としては、次式で表わされる「同時同量」の概念が広く用いられている。

$$\frac{\Delta P \text{の} m \text{分間移動平均値}}{P \text{の} m \text{分間移動平均値}} \times 100 [\%] \quad (1)$$

ここで、

ΔP ：連系線潮流の計画値からの偏差

P ：想定した電力需要

同時同量では、指定した時間内 (m 分間以内) における電力量偏差の総量のみを対象とし、 m が小さい程厳しい条件下での評価を意味する。マイクログリッドの検討が開始された当初は「30分同時同量」が多く用いられていたが、近年ではより厳しく「5分同時同量」での評価等も見られる。

4. 自立運転型マイクログリッドの需給制御技術

4.1 自立運転型マイクログリッドの概要

上位系統と連系を有さず、自立して運用されるマイクログリッドを「自立運転型マイクログリッド」と定義する。図3のように、連系運転型マイクログリッドにおいて上位系統に故障が発生し、一時的に連系を解列したマイクログリッドもこれに相当する。ここでは自立運転型の具体例として、離島の電力系統を対象に議論する。離島系統では従来からディーゼル発電機による電力供給がなされてきたが、化石燃料の利用による環境への影響が問題と考えられるため、近年では太陽光発電や風力発電を導入した「離島マイクログリッド」の構築が進められている。同系統においても、自然エネルギー利用型DGの出力変動の平滑化を目的として、電力貯蔵装置の導入が検討されている。このような系統ではディーゼル発電機の回転数が系統全体の周波数を決定するが、ディーゼ

ル発電機の回転数は、離島系統内の需給偏差に応じて変動する。したがってマイクログリッド内の需給偏差は周波数変動となって系統全体に表れるため、需給制御の目標は「系統周波数の適正值への維持」と考えることができる。マイクログリッドは既存系統と比較すると電源容量が小さいため、発電機の慣性定数も小さい。したがって、需給偏差の発生により比較的大きな周波数変動が生じやすく、周波数維持制御は非常に重要な課題となる。

系統周波数は自立運転型マイクログリッド内で同一の値となるため、特別な情報通信網を整備しなくとも、各電源は連系端で系統周波数を計測することが可能である。次節以降で、系統周波数を制御入力とした周波数制御方式の概要について述べる。

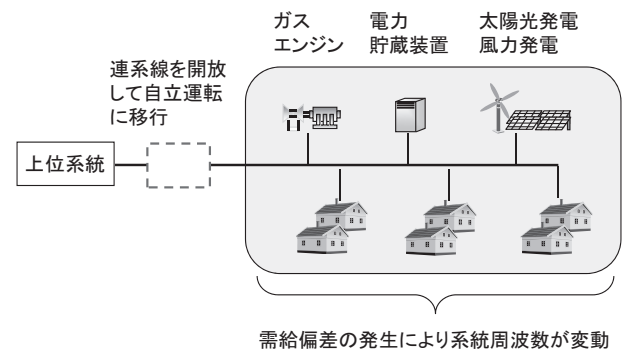


図3 自立運転型マイクログリッド

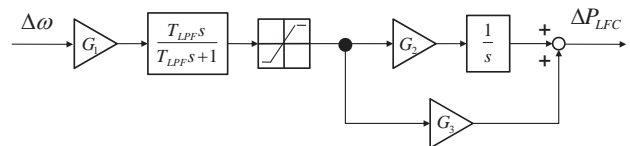


図4 LFC制御のブロック図

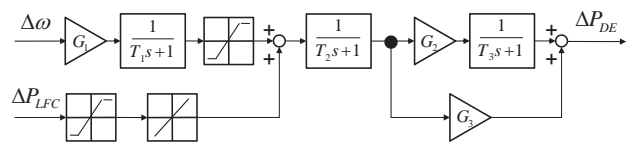


図5 ガバナフリー制御のブロック図

4.2 回転機型発電機の制御系モデル

ディーゼル発電機等の回転機型発電機の制御器として、周波数偏差に対する積分動作であるLFC制御 (Load Frequency Control) と、比例動作であるガバナフリー制御を想定する。図4、図5に一般的なLFC制御、及びガバナフリー制御のブロック図を示す。

4.3 電力貯蔵装置の制御方式

太陽光発電の急峻な出力変動が発生した場合は、ディーゼルエンジンの出力調整が目標値の変動に十分に

追従できず、大きな周波数変動の発生が問題となる。この対策として、電力貯蔵装置の高速な充放電制御の活用が有効である。本節では電力貯蔵装置として二次電池を扱い、その制御手法としてPD制御と外乱オブザーバの適用について述べる。

4.3.1 PD制御

二次電池の制御手法として、PD制御の適用が多く試みられている⁽³⁾。二次電池制御の主目的は急峻な電圧変動の抑制であるため、周波数変動の発生時には一時的な需給バランス維持を目的とした補償制御を実施し、周波数変動が抑制された後は出力を計画値に戻し、ディーゼル発電機に制御分担を引き渡すことが望ましい。分散的に上記のような制御を実現するため、周波数偏差の発生に対しハイパスフィルタを通して、急激な周波数変動のみを制御対象とする。制御応答の異なる複数の電源で周波数制御を実施する場合は、ボード線図等の活用により、各電源の制御対象とする周波数領域を適切に分割することが望ましい。図6にPD制御のブロック図の例を示す。なお二次電池の制御入力に対する追従性は、時定数の短い1次遅れで表現している。

4.3.2 外乱オブザーバ

PD制御は周波数変動の発生後に機能するため制御開始が遅く、結果的に大きな周波数変動が生じやすい問題がある。より高速に補償制御を実現する手法として、外乱オブザーバの適用が考えられる。微小時間において発生した周波数変動から需給偏差量を推定し、ただちに補償動作を行うことで、大きな周波数変動が発生する以前に需給偏差を改善することが可能となる。外乱オブザーバの概念を図7に示す。自立運転型マイクログリッドでは、需給偏差がディーゼル発電機の動特性を介して、周波数変動量を決定する。したがってディーゼル発電機の正確な動特性モデルが既知であれば、逆に周波数変動量から需給偏差量を推定することが可能であり、これが外乱オブザーバの基本原理となる。

外乱オブザーバの構成方法には複数の手法があるが、最も概念的に分かりやすいものは、制御対象の動特性モデル（伝達関数）の逆関数を用いて図6のように推定す

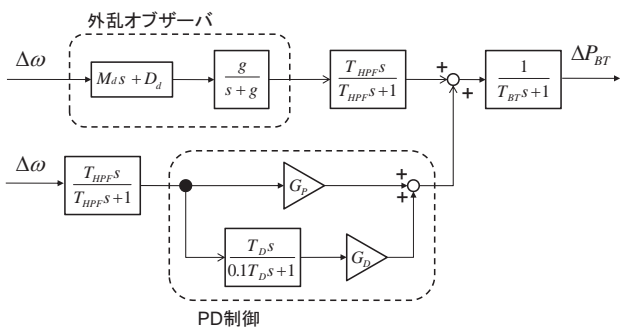
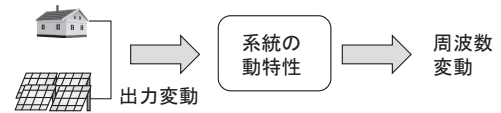


図6 二次電池の制御ブロック図

● 出力変動が周波数に影響



● 周波数変動から出力変動を予測

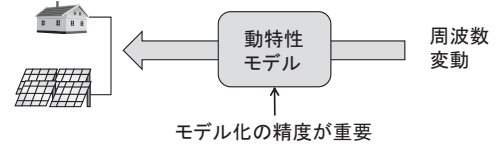
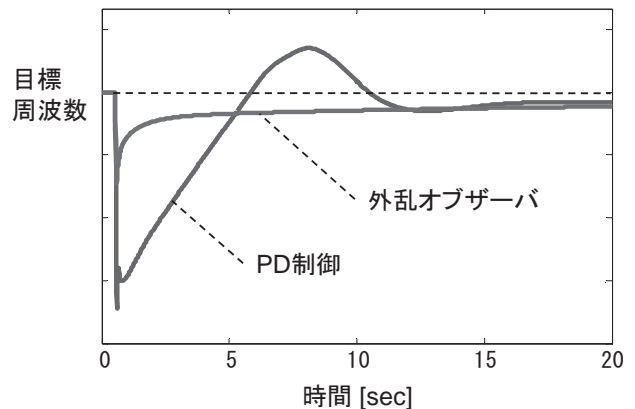


図7 外乱オブザーバの概念

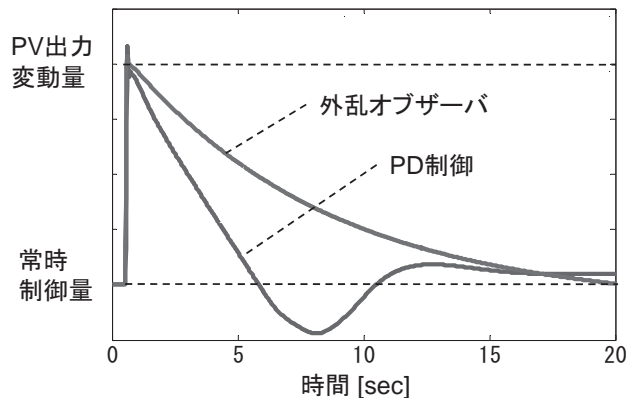
るものである⁽⁴⁾。ただし逆関数をそのまま用いると、安定性の面で望ましくないため、一般的にはローパスフィルタを挿入する。このようにして推定された需給偏差を直ちに解消するように制御することで、高速な補償動作が実現可能となる。

4.4 適用結果例

ディーゼル発電機、太陽光発電、二次電池を含む自立運転型マイクログリッドを対象に、周波数維持制御を適用した結果を図8に示す。時刻0 [sec]で定格出力で運転していた太陽光発電が、日射の影響により時刻



(a) 周波数変動



(b) 二次電池出力の変化

図8 制御結果例

0.5 [sec] で、ステップ状に出力が減少する設定としてある。ここで二次電池のインバータ容量は十分に大きく、出力変動を吸収可能であるものとする。制御手法として、前節までに述べたPD制御と外乱オブザーバを用いた結果を示した。PD制御の各種制御ゲインは、極配置法により決定した。両手法のハイパスフィルタのカットオフ周波数は、ボード線図を用いた考察より、ディーゼルエンジンが追従できない周波数領域を二次電池が制御するよう設定した。

図8より、太陽光発電出力の減少時には両手法とも二次電池出力が急増し、太陽光発電の出力変動をよく補償できていることが分かる。外乱オブザーバの適用時には、太陽光発電の出力変動量を適切に推定できている。これによりPD制御に比較して、周波数変動を更に抑制できている。またハイパスフィルタの効果によりディーゼルエンジンに制御量を移行する過程においても、外乱オブザーバを用いた制御では非常に滑らかな移行が実現できている。その有効性が分かる。

4.5 ロバスト制御の適用

外乱オブザーバが適切に動作するためには、動特性モデルの精度が非常に重要である。しかし現実には様々な要因によるモデル化誤差が生じるため、精度良い動特性モデルの構築には限界がある。そこで近年では、マイクログリッドの制御システムにもロバスト制御を適用する試みがなされている。本節ではその動向について紹介する。

1960年代に、R. E. Kalmanが提唱した状態空間表現に基づく制御理論をきっかけに、現代制御理論が発展した。この現代制御理論により、多入力・多出力システムへの制御理論の適用や、制御量と操作量のトレードオフを考慮した最適なコントローラの導出などが可能となった⁵⁾。この現代制御理論に基づき、制御対象などに不確かさがある場合でも、所望の安定性や制御応答の保証を提供する制御系の解析及び制御理論のことをロバスト制御という。

設計された制御系が想定される条件においてロバスト（頑丈な）であることは重要である。例えば、もし制御対象が不安定であり、想定される外乱やノイズによる影響、または、モデル化されていない動特性による影響（不確かさ）や状態変化に伴うパラメータ変動（不確かさ）がもたらされるような状態においても、安定性や制御仕様を満たす制御系を設計する必要がある。よって、ロバスト制御の基本は、このような不確かさを含む制御対象モデルにおいても、ロバスト安定性とロバスト制御性能を満たすコントローラを設計することである。ロバスト安定性とは、制御対象のモデルに不確かさが含まれている場合でも、フィードバック系が安定となる条件を求め、その条件を満たすことである。また、ロバスト制御性能とは、制御対象のモデルに不確かさが含まれてい

る場合でも、目標追従性や外乱抑制、耐センサーノイズ性を満たすことである。

現在、ロバスト制御として知られている制御手法として、 H_{∞} 最適制御理論⁶⁾⁷⁾や、 H_{∞} Loop-shaping手法⁸⁾、 μ 設計法などがあり、特に、非線形システムに対する適用研究が多く、実際に航空機やロケットなどの制御系に適用されている。

これまで、ロバスト制御を用いた電力系統の安定化制御に関する研究として、発電機の系統安定化装置 (Power System Stabilizer: PSS) の設計・チューニングに関する研究や、電圧・周波数安定化制御に関する研究などが行われてきた。最近では、ロバスト制御手法をマイクログリッドや小規模離島系統、ウインドファームなどの安定化制御に適用する研究が行われている。

マイクログリッドへの適用としては、例えば、力率改善用のコンデンサ (Power Factor Correction capacitor: PFC capacitor) を用いた電圧制御の制御設計に H_{∞} 最適制御理論が用いられている⁹⁾。この論文では、PFC capacitorのスイッチングにより、電圧型インバータ (Voltage Source Inverter: VSI) のフィルターキャパシタに影響をもたらす変動分を乗法的な不確かさと設定し、制御仕様を満たす重み関数をコントローラの設計時に適切に与えることで、混合感度問題により導出された制御系を利用している。また、離島に風力発電設備が導入された場合の電圧制御を、静止型無効電力補償装置 (Static Var Compensator: SVC) と発電機の自動電圧調整装置 (Automatic Voltage Regulator: AVR) により達成するために、 H_{∞} Loop-shaping手法によるコントローラの設計が行われている¹⁰⁾。この論文では、システムパラメータや発電・需要の状態変化を、非構造的な不確かさを示す既約分解的表現で設定し、また、コントローラの設計時に用いる重み関数の決定では、最適化計算手法の一つである、PSO (Particle Swarm Optimization) が用いられている。

ウインドファームへの適用研究としては、二次巻線型誘導発電機 (Doubly Fed Induction Generator: DFIG) の有効・無効電力制御に関する研究¹¹⁾や、 H_{∞} 制御を用いた風力発電機のピッチ角制御による出力変動抑制に関する研究¹²⁾、ウインドファームにおける風力発電機の全動作領域に有効なピッチ角制御による出力電力平準化に関する研究、最小分散制御を用いた風力発電機のピッチ角制御による出力変動の抑制に関する研究、風力発電システムにおける風車と蓄電池の協調制御に関する研究¹³⁾などにロバスト制御が用いられている。

5. まとめ

自然エネルギーの導入推進のために、マイクログリッドの構築は非常に有効であるが、更なるエネルギーの高効率利用を進めるためには、多くの課題が存在する。本稿では需給制御技術に着目し、連系運転型と自立運転型

に分類して、近年の研究動向について解説した。マイクログリッドは、そこに含まれる需要種別、発電機種別、系統構成の特性等に応じて、目指すべき機能や課題が異なる。そのため、マイクログリッドの制御システムも、個々の特性に応じて柔軟に設計される必要がある。

太陽光発電の導入は、導入目標の見直しに応じて、今後急速に進展すると思われる。更なる大量導入にも対応できるエネルギー供給システムを構築するためには、マイクログリッドは模範市民としての働きを強化し、スマートグリッドの概念と連携していく必要があると考えられる。

参考文献

- (1) 辻隆男・原亮一・大山力：“分散電源と需給運用制御技術”，電気学会論文誌B, Vol.129, No.9, pp.1066-1069 (2009)
- (2) S.Bando, Y.Sasaki, H.Asano, and S. Tagami: “Balancing control method of a microgrid with intermittent renewable energy generators and small battery storage”, 2008 IEEE Power Engineering Society General Meeting (2008)
- (3) 江頭諒・辻隆男・大山力・橋口卓平・合田忠弘・上田泰則：“太陽光発電を含む離島系統における周波数制御方式の検討”，電気学会電力技術電力系統技術合同研究会, PSE-08-143 (2008)
- (4) R.Egashira, T.Tsuji, T.Oyama, T.Hashiguchi, T.Goda, E.Gotou, and T. Yarimitsu: “A Study of System Frequency Control of Island Power Network using Disturbance Observer with Adaptive Behavior Controller”, Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering (2009)
- (5) 藤森 篤：“ロバスト制御”，コロナ社 (2001-8)
- (6) Zames, G.: “Feedback and optimal sensitivity: Model reference transformations, multiplicative seminorms, and approximate inverses”, Automatic Control, IEEE Transactions on Volume 26, Issue 2, pp.301 - 320.
- (7) Zames, G.; Francis, B.: “Feedback, minimax sensitivity, and optimal robustness”, Automatic Control, IEEE Transactions on Volume 28, Issue 5, pp.585 - 601.
- (8) McFarlane, D.; Glover, K.: “A loop-shaping design procedure using H_{∞} synthesis”, Automatic Control, IEEE Transactions on Volume 37, Issue 6, pp. 759 - 769.
- (9) Yun Wei Li; Vilathgamuwa, D.M.; Poh Chiang Loh: “Robust Control Scheme for a Microgrid With PFC Capacitor Connected”, Industry Applications, IEEE Transactions on Vol. 43, Issue 5, pp.1172 - 1182.
- (10) Sitthidet Vachirasricirikul, Issarachai Ngamroo and Somyot Kaitwanidvilai: “Robust Voltage Stabilization in an Isolated Wind-Diesel Power System using PSO based-Fixed Structure H_{∞} Loop Shaping Control”, 電気学会論文誌B, Vol.129, No. 6, pp.756-764.
- (11) Kong S, Majumder R: “ H_{∞} Robust Control Design for Wind Driven Doubly-Fed Induction Generator”, Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE, 20-24 July 2008, pp1-6.
- (12) 坂元 良成・千住 智信・金子 敏章・浦崎 直光・高木 輝夫・杉本 重幸：“ H_{∞} 制御を用いた風力発電機のピッチ角制御による出力電力変動抑制”，電気学会論文誌B, Vol. 127, No.1, pp.86-93 (2007)
- (13) 千住 智信・菊永 康朗・徳留 元樹・上原 明恵・與那 篤史・舟橋 俊久：“風力発電システムにおける風車と蓄電池の協調制御”，電気学会論文誌B, Vol.129, No.5, pp.653-660 (2009)

翼面フィンによる高負荷翼列2次流れ損失の低減に関する研究

Research on Secondary Flow Loss Reduction of High Loaded Cascade by Blade Fins

寺尾 敏浩*¹
TERAO Toshihiro藤井 賢志*²
FUJII Kenji川田 裕*²
KAWATA Yutaka

ABSTRACT

The high temperature gas turbine with high loaded turbine cascade is under development to prevent the global warming effect by the carbon dioxide and to save natural resources. The larger loss at the high loaded turbine cascade is generated by the horseshoe vortex and the passage vortex. In this research, flow visualization and the loss measurement were carried out to understand the behavior of the horseshoe vortex and its effect on the loss. The suction surface fins were tested as a countermeasure and proved to reduce the peak loss of the secondary flow.

Key words : Horseshoe vortex, High loaded cascade, Flow visualization, Blade fins, Secondary flow

1. 緒 言

近年、地球環境保護の観点から地球温暖化に対する各種対策が進められている。その中でも全CO₂発生量の40%強を占める発電部門からのCO₂削減は重要である。CO₂削減の有効な手段として、現在発電方式で主流となっているガスタービンコンバインドサイクルの高効率化がある。これを達成するためにタービン入口温度の高温化が進められており、その実現のために高負荷翼列が開発されている。しかし、翼列の高負荷化により転向角が大きくなり、入口境界層が翼前縁と干渉して生じる馬蹄渦⁽¹⁾⁽²⁾による2次流れ損失の増大とそれによる空力性能の低下が引き起こされる。そのため、損失低減手法が必要となるが、最近では、トリッピングワイヤによる2次流れの制御⁽³⁾、3次元エンドウォールコンタリング⁽⁴⁾や渦発生器⁽⁵⁾の開発が進められている。

本研究では特に高負荷翼における損失の低減を目的に、内部流動現象の解明および損失低減手法の検討を行った。まず内部流動の把握のため、可視化実験により翼列内部の馬蹄渦挙動の把握をおこなった。また翼列風洞実験により全圧損失分布を計測した。以上の結果を基に考案した低減手法の効果を、可視化実験および翼列風洞実験により確認した。

2. 実験装置・実験手順

2.1 風洞試験装置と供試翼列

図1に示す翼列風洞実験装置を用いて、全圧損失分布の計測を行った。計測には5孔ピトー管、高精度多点圧力計を用いた。計測では入口流速をおよそ10m/sに設定した。計測位置は翼後縁から50mmの位置とし、翼列出口下流側断面の計測領域をピッチ方向に100mm、スパン方向に95mmに設定し、5mm間隔でトラバースを行い、計420点の計測を行った。得られた全圧分布から全圧損失を算出し、高負荷翼列における損失および2次流れ制御の効果を確認した。

図2の煙可視化実験装置では、翼列風洞と同サイズの高負荷翼を用いた。そして、壁端壁面付近に設置した煙注入管から煙を注入し、CCDカメラにより渦の軌跡を撮影した。煙注入管を3本設置することで、翼の正圧面側および負圧面側の馬蹄渦および流路渦の挙動を同時に観察することを可能とした。煙注入管は移動可能とし、

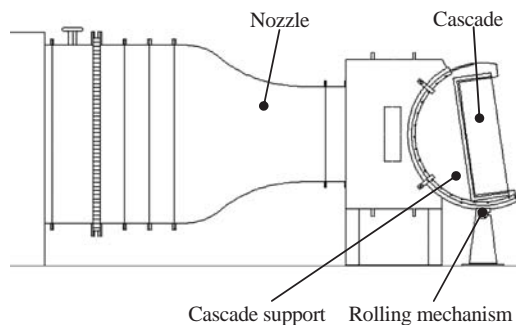


図1 翼列風洞実験装置

原稿受付 2009年3月30日

校閲完了 2009年8月10日

*1 ホンダ技研

*2 大阪工業大学

〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1

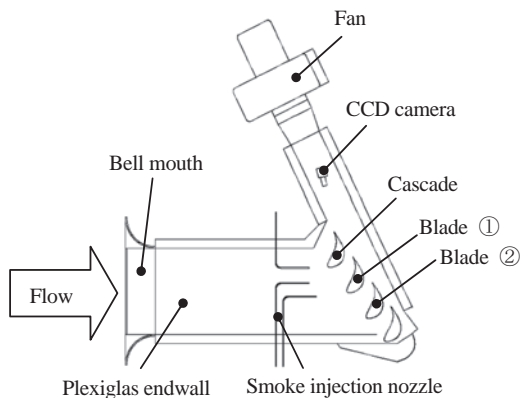


図2 可視化実験装置

表1 高負荷翼列の仕様

Turning angle (deg.)	118.0
Incidence angle (deg.)	0
Aspect ratio	2.70

翼列上流側の任意の位置に煙を注入できるようにした。入口流速は渦の可視化に適した約1 m/sに設定した。本研究で用いた検討用高負荷翼の仕様を表1に示す。

2.2 可視化手法

本研究では、油膜法および注入流脈法の2種類の可視化手法を用いた。これらの手法を用いたことで、翼面および端壁近傍での流動現象を明らかにすることができた。今回用いた油膜およびトレーサ物質を以下に示す。

油膜用液

軽油, アルミナ粉, オレイン酸, 食紅

トレーサ物質

グリコール, 精製水, 香料

油膜法は翼列風洞実験装置, 注入流脈法は可視化実験装置に対して行った。油膜は, 刷毛を用いて翼表面および端壁面に油膜用液を塗布した。トレーサ物質は, 専用の煙発生装置を用いて気化させ煙状にし, 煙注入管を通して翼列内に注入した。そして, 渦のポテンシャルコア部に煙を注入することにより, 煙を拡散させずに渦の可視化を可能とした。

3. 実験結果

3.1 入口境界層

可視化実験および翼列風洞実験における翼列への流入条件を比較するために, 境界層厚さの計測を行った。可視化実験装置における境界層速度分布を図3に, 翼列風洞実験装置における境界層速度分布を図4に示す。可視化実験装置では熱線流速計, 翼列風洞実験装置では小型ピトー管を用いて流速分布を計測した。

レイノルズ数が可視化実験装置では 6.23×10^3 , 翼列風

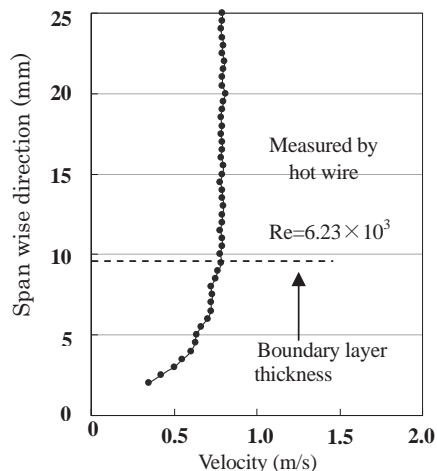


図3 可視化実験装置の境界層速度分布

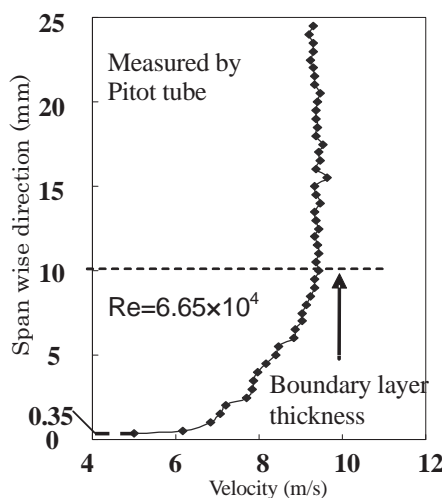


図4 翼列風洞実験装置の境界層速度分布

洞実験装置では 6.65×10^4 と異なるが, 計測結果より境界層厚さは共に10mm程度であることがわかる。従って, 境界層によって生じる馬蹄渦の大きさはほぼ同じであり, 可視化実験および翼列風洞実験で得られる馬蹄渦には, 一定の対応関係があるものと考えられることができる。

また, 可視化実験装置および翼列風洞実験装置における境界層の形状係数 ($H = \delta^* / \theta$) はそれぞれ1.68, 1.30となり, 可視化実験装置は遷移境界層, 翼列風洞実験装置は乱流境界層であることが確認できた。

3.2 高負荷翼の可視化実験

高負荷翼列の可視化実験を行い, 翼列内部における渦挙動の確認を行った。まず, 油膜法における実験結果を示す。図5に翼間における端壁面の可視化結果を, 図6に翼負圧面における可視化結果を示す。入口流速をおよそ10m/sとし, 全圧損失計測と同条件とした。

図5より, 端壁面上の翼正圧面側から負圧面側に2次流れが流れ込む様子が確認できる。また図6より, 翼負圧面端壁付近を流れる馬蹄渦の軌跡が確認できる。後方

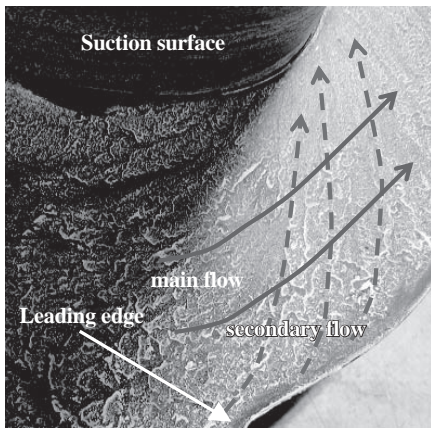


図5 翼間端壁流れの可視化結果

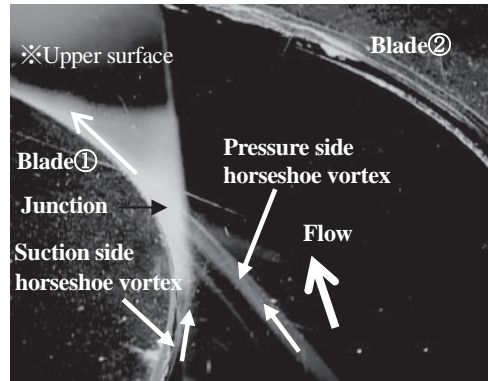


図8 翼間流れの可視化結果

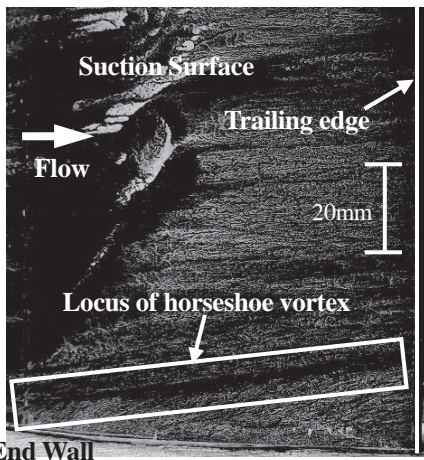


図6 翼負圧面の可視化結果

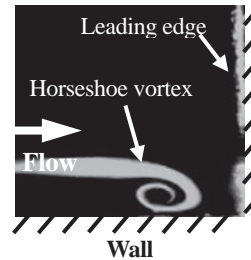


図9 馬蹄渦の可視化

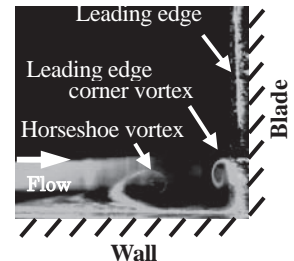


図10 前縁コーナー渦の可視化

に流れるにつれて渦が端壁面から離れていく様子が分かる。次に注入流脈法による可視化結果を示す。煙を翼正圧面側および負圧面側に注入した。翼後縁付近における可視化結果を図7に示す。また、翼間流れの可視化結果を図8に示す。

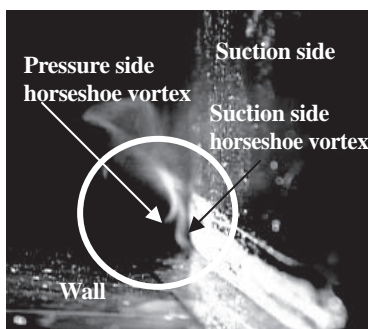


図7 翼後方からの可視化結果

図7の結果より、正圧面側および負圧面側からの渦が合流していることが確認できる。さらに図8からは、正圧面側からの馬蹄渦が負圧面側で合流する様子が分かる。

この点を合流点と称することにする。

次にレーザーライトシートを用いて流れ方向の各断面の可視化を行った。まず翼前縁部に向かう流れと平行に上方から光を入れた馬蹄渦の可視化結果を図9、図10に示す。図9より翼前縁部で馬蹄渦の発生が確認できる。図10からは前縁コーナー渦の存在も確認できる。

次に、翼後縁部から10mm間隔で流れに対して垂直にレーザーを当て、計13ヶ所の可視化を行った。可視化位置を図11に、可視化結果を図12に示す。

図12からは正圧面側および負圧面側からの馬蹄渦（正圧面：Hp，負圧面Hs）と流路渦（Pv）が下流に向かって変化していく様子が分かる。(c)~(i)においては、負圧面側に2つの馬蹄渦が観察でき、それが翼面付近を移動する様子が確認できる。この挙動は端壁と翼とで挟まれ

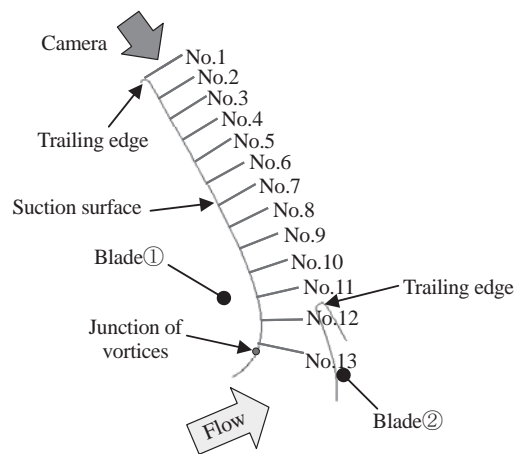


図11 可視化位置

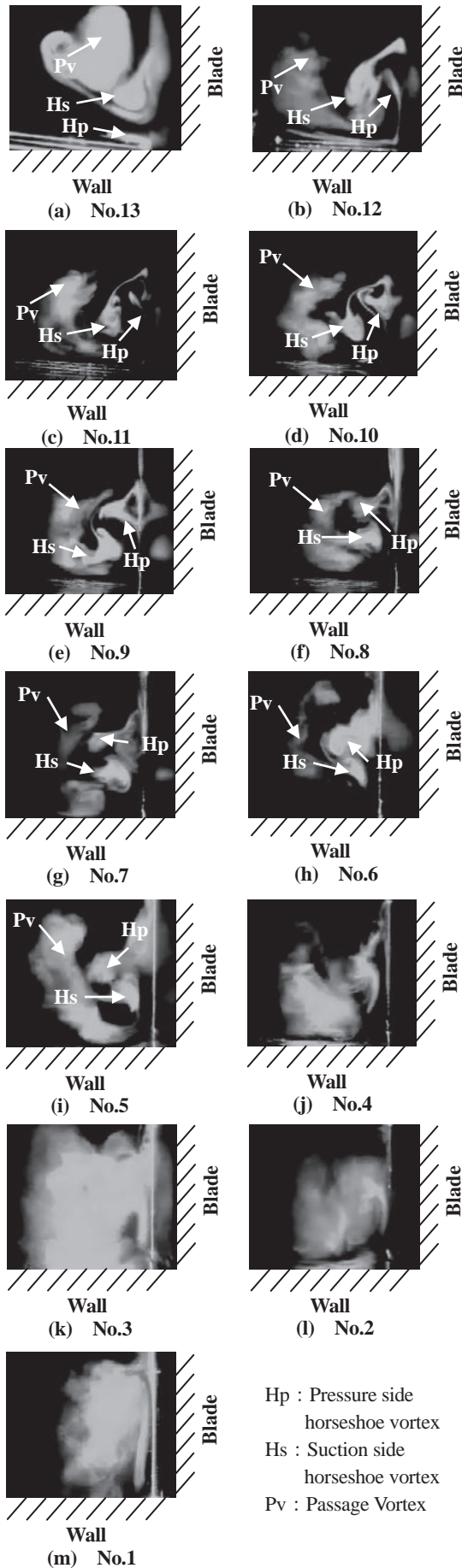


図12 流れ方向の各断面における可視化結果

たコーナ部で正圧面、負圧面からの2つの馬蹄渦の干渉効果により生じる。このように馬蹄渦は渦同士、端壁、翼面からの力を受け、回り込む過程でHp, Hsの境界が徐々にぼやけていく。(j)~(m)では正圧面側および負圧面側の馬蹄渦、さらには流路渦が相互に強く干渉、混合して境界が不明瞭になっていくことが分かる。

3.3 高負荷翼の損失計測

次に高負荷翼列の翼後縁下流50mmにおいて、5孔ピトー管を用いて全圧損失分布および出口流速分布を計測した。

図13に全圧損失係数分布、図14に出口流速分布を示す。図13の結果より、2次流れ損失のピークが確認できる。図14からは、2次流れ損失ピークにおける速度が約33m/sと、主流速度40m/sよりも約7m/s小さいことが分かる。このことから、2次流れ損失は可視化で見られた渦のコアに存在する低流速部が対応すると考えられる。

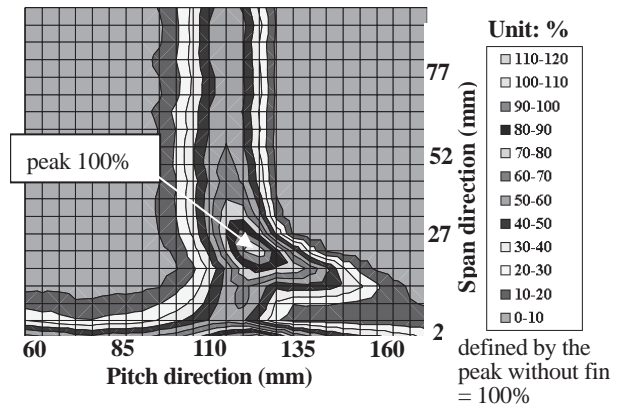


図13 全圧損失分布

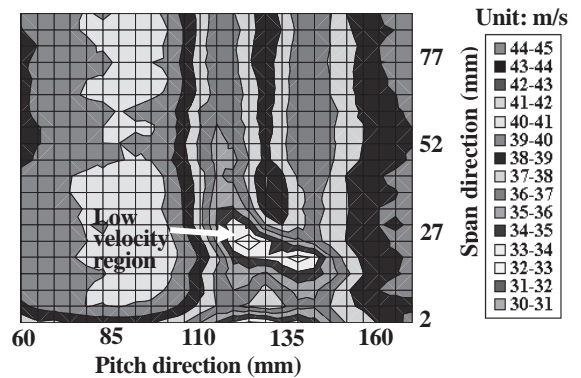


図14 出口流速分布

4. 損失低減手法

高負荷翼列の内部流動実験結果を基に損失低減手法を考案し、その効果の検討を行った。正圧面側および負圧面側から合流する馬蹄渦の干渉を弱めることを目的とした負圧面フィンを考案した。正圧面側からの馬蹄渦および前縁コーナ渦が負圧面側に流れ込んで合流する位置から下流側に、コード長の約1/3のフィン(厚み0.5mm)

を取り付け、渦同士の干渉を防ぐ手法を試みた。取り付け条件を図15に示す。図に示すように、翼面の渦の軌跡に近い傾斜をつけて取り付けた。取り付け角度は、フィン前縁のはく離回避を考慮して10度とし、取り付け位置は前縁から50%コード長の位置として実験を行った。

煙可視化実験により翼後半部分における内部流動の様子を確認した。図16に結果を示す。煙は正圧面および負圧面側両方に注入した。

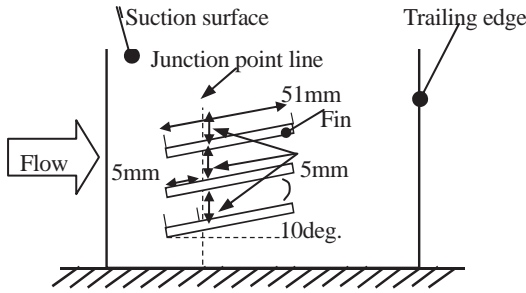


図15 翼面フィン①の取り付け条件

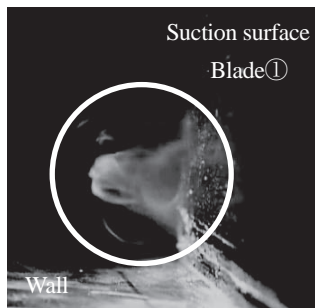


図16 翼面フィン①の可視化結果

図16の結果より、対策を行っていない可視化結果の図7と比較すると、煙の拡散が強く全体に上方に向かっていることがわかる。さらに翼列風洞実験により、空力損失の詳細を調べた。図17に全圧損失分布を示す。

図17より、全体的に全圧損失は増加していることがわかる。特に、2次流れ損失の増加が顕著に表れている。正圧面側および負圧面側からの馬蹄渦の干渉を防止できず、損失増大を引き起こす結果となってしまったと考えられる。

次に翼面付近を流れる正圧面側の馬蹄渦を翼端壁面に導くようにフィンを取り付け、渦の進路を制御することにより負圧面側の馬蹄渦との干渉を弱めることを狙った。そのため、フィン翼翼端壁面側に傾けて取り付けた。取り付け角度はフィン①と同様に10度とし、図15と同様、長さの等しいものとした。取り付け位置は先端が翼弦長の約50%コード長の位置として実験を行った。

取り付け条件を図18に示す。また煙可視化実験により翼後縁部付近における内部流動の様子を確認した。図19に可視化結果を示す。

図19の結果を図7の可視化結果と比較すると、渦の干渉が弱まっていることがわかる。さらに詳しく調べるた

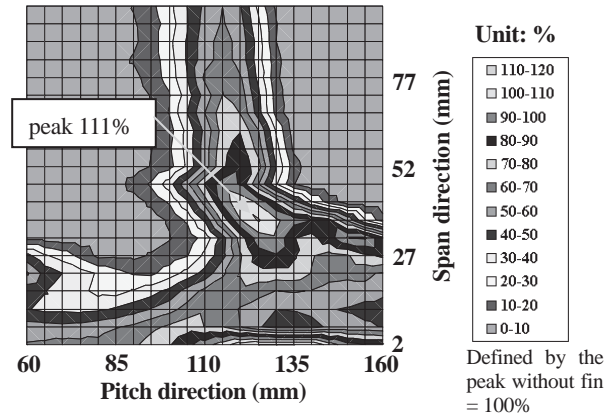


図17 翼面フィン①の全圧損失係数分布

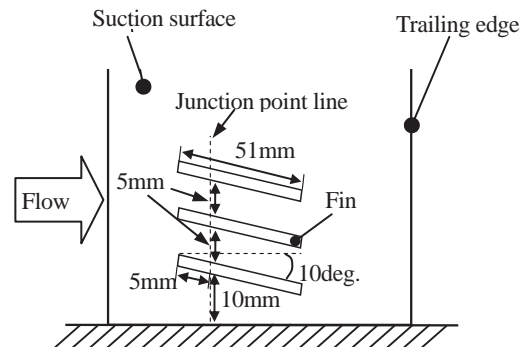


図18 翼面フィン②の取り付け条件

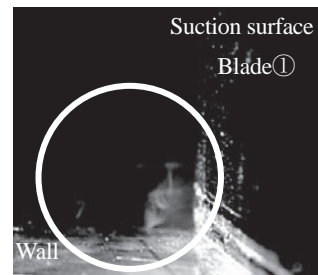


図19 翼面フィン②の可視化結果

めに、フィン周辺の渦挙動を流れ方向の各断面で観察した。図20に可視化結果を示す。計測位置は対策前の可視化位置に対応するNo.5～11とした。

図20の(a)～(d)では、負圧面側の馬蹄渦の挙動が明確に観察できる。特にフィンを取り付けたことにより、2つの馬蹄渦の干渉が弱まったことが観察される。

翼列風洞実験により、空力損失の詳細を調べた。図21に全圧損失分布を示す。図21を対策前の図13と比較すると、境界層付近の損失が増加し、2次流れ損失ピークが減少している。これは可視化結果からも分かるように、正圧面側および負圧面側からの馬蹄渦が分離されて弱まったのと、正圧面側からの馬蹄渦が端壁側に導かれたことにより、境界層損失が増加したものと考えられる。

フィンなし、フィン①、フィン②における2次流れ損失ピーク値、壁面から5mm以内の境界層損失を除いた

全圧損失係数を表2に示す。フィンなしの条件を基本(100%)として、2次流れ損失ピーク値および壁面から5mmまでの境界層損失を除いた全圧損失係数を比較した。各スパンにおける全圧損失係数平均値を図22に示す。

表2からはフィン②では、2次流れ損失ピーク値が26%減少していること、また図22からはフィン②では境界層損失が対策前よりも大きくなっているが、中央に向かって損失が減少していることが分かる。

表2 対策前後での比較 (Unit: %)

Test case	Peak value	Average value
Without fins	100.0	100.0
Fin ①	110.8	138.8
Fin ②	74.3	97.7

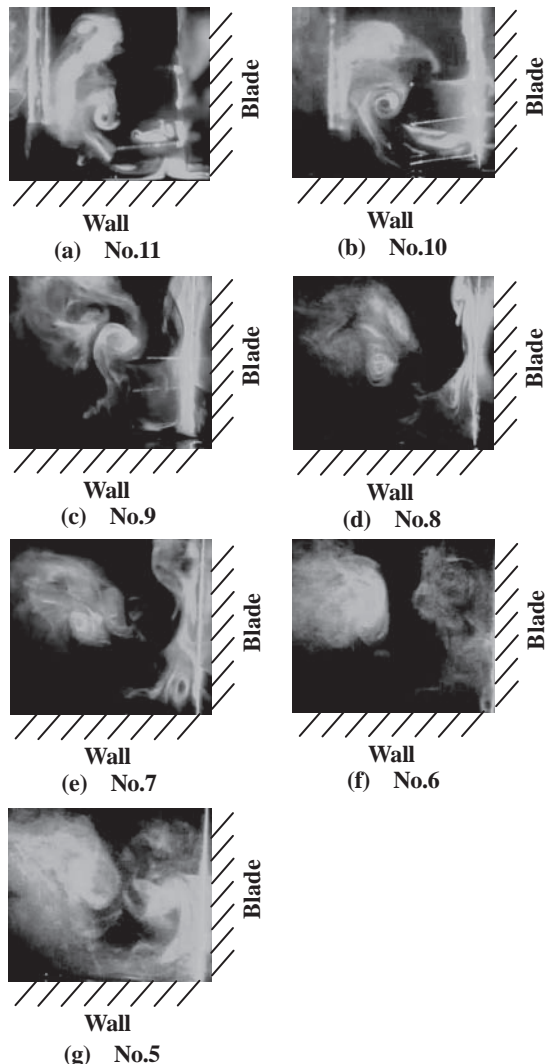


図20 翼面フィン②における流れ方向各断面での可視化結果

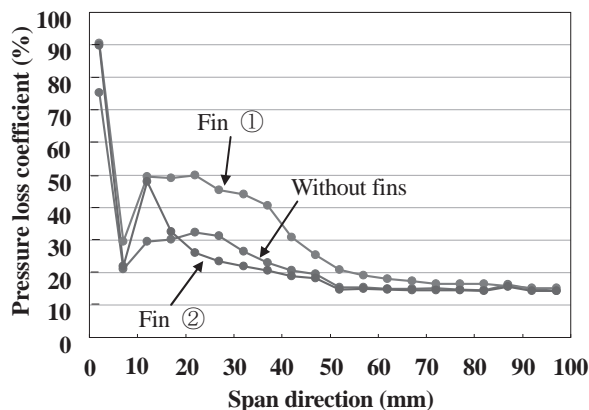


図22 各スパンでの全圧損失係数平均値

5. 結 言

本研究では、可視化実験により高負荷翼列内での馬蹄渦の挙動を明らかにすることができた。さらに、損失低減手法の検討として正・負圧面からの馬蹄渦合流部にフィンを取り付け、正圧面側の馬蹄渦を翼端壁面側に送り込むことで、馬蹄渦同士の干渉を弱め、2次流れ損失の低減が図れることを明らかにした。

文献参考

- (1) 園田豊隆, タービン翼列内の2次流れ, ターボ機械, 14-6 (1986), p.356-361
- (2) 山本孝正, タービン翼列の2次流れ損失と発生メカニズム, ターボ機械, 14-4 (1986), p.234-241
- (3) 井深孝彦, 佐藤浩二, 他3名, PIVによる超高負荷タービン翼列内の流れの可視化 (トリッピングワイヤによる2次流れの制御), 第30回ガスタービン定期講演会講演論文集, (2002), p.181-186
- (4) Sakamoto, Y., Ito, E., et al., Development of high loaded and high efficiency turbine for the next generation gas turbine, IGTC2007 Tokyo TS-060, (2007)
- (5) 遠藤慎也, 本阿弥真治, 他2名, 可動渦発生器下流に生じる縦渦の周期的挙動 (回転X形熱線流速計を用いたレイノルズせん断応力の挙動), 日本機械学会論文集 (B編), 72-714 (2006), p.238-245

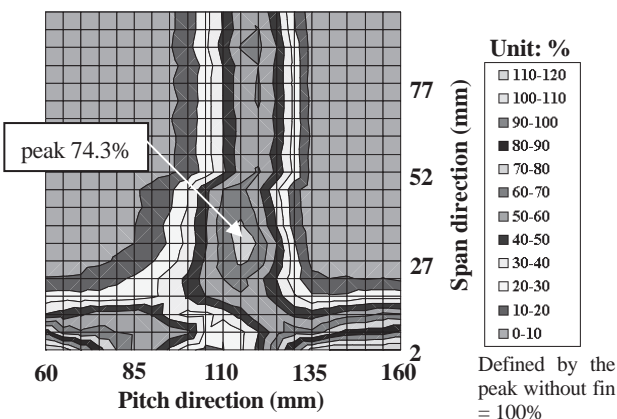


図21 翼面フィン②の全圧損失係数分布

次世代高温ガスタービン翼における熱伝達および フィルム冷却に関する研究

Study on Heat Transfer and Film Cooling for Next Generation High Temperature Industrial Gas Turbine Blades

北村 剛*¹
KITAMURA Tsuyoshi

松浦 正昭*¹
MATSUURA Masaaki

羽田 哲*¹
HADA Satoshi

塚越 敬三*¹
TSUKAGOSHI Keizo

武石賢一郎*²
TAKEISHI Ken-ichiro

ABSTRACT

Heat transfer coefficient and film cooling effectiveness on a rotating turbine blade have been studied by using a Low-Speed Research Turbine (LSRT) facility. The turbine model airfoils applied to LSRT were high loaded type suitable for next generation industrial gas turbines. The measurements of film cooling effectiveness on the platform have been conducted with pressure sensitive paint (PSP) technique. The horseshoe vortex, the passage vortex and the flow near the suction side of leading edge strongly influence heat transfer and film cooling around the inlet on the platform. They cause the increase of heat transfer and the decrease of film cooling effectiveness.

In addition to the experimental works, this paper deals with CFD (Computational Fluid Dynamics) to predict the heat transfer coefficient around the turbine airfoil. The comparison between experimental results and the analytical one has been considered.

The useful information to attain high performance cooling design for high reliability turbine blades has been obtained.

Key words : Gas turbine, heat transfer, film cooling, pressure sensitive paint, CFD

1. はじめに

液化天然ガスを燃料とする大容量ガスタービンは、1980年代から高効率コンバインド発電プラントの主機として需要が増加し、我が国のみならず、世界的にエネルギー消費の低減、排ガスの低公害化に大きく貢献してきた。ガスタービンの高効率化のためには、タービン入口温度 (TIT) の上昇がもっとも有効な方法の一つであるため、ガスタービンメーカー各社で高温ガスタービンの開発が進められた結果、現在では1500℃級ガスタービンが実用化されている。さらに最近では、1700℃級ガスタービン⁽¹⁾の実現にむけた要素技術開発が進められてい

る。

ガスタービンの高温化により、その高効率化が実現されてきたが、これを可能にしてきた技術として、冷却技術、材料技術、コーティング技術がある。そのうち最も高温化に有効な技術は冷却技術である。特に高温ガスに直接さらされる燃焼器壁、タービン動静翼、タービン翼環の信頼性確保は重要である。なかでもタービン動翼はクリープ強度を確保し、高温酸化を防止する必要がある。翼面、プラットフォームおよび翼ティップの信頼性を把握するため熱負荷を正確に予測し、それに応じた冷却技術を適用することが不可欠である。

タービン翼面における熱伝達、フィルム冷却については、これまでに多くの研究が報告されている。しかし、回転する動翼に関する熱伝達、フィルム冷却は、前方静翼によるウェークの影響、回転場の影響をうけると考えられるが、その計測が困難なこともあり、報告されてい

原稿受付 2009年5月25日

校閲完了 2009年10月21日

*1 三菱重工

〒676-8686 兵庫県高砂市荒井町新浜 2-1-1

*2 大阪大学

る研究は比較的少ない。

Guenetteら⁽²⁾, Blairら⁽³⁾は動翼面上の熱伝達を調査した。近年ではBergholzら⁽⁴⁾, Tallmanら⁽⁵⁾, Haldemanら⁽⁶⁾が衝撃風洞にて動翼面上の熱伝達率を取得するとともに、CFDによる予測値との比較を実施している。

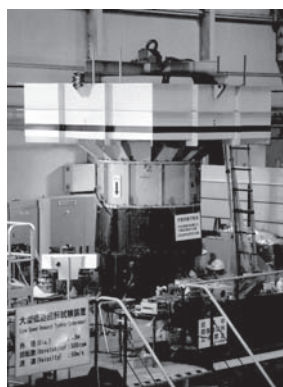
動翼面上のフィルム冷却効率を測定した研究として、Dringら⁽⁷⁾, Takeishiら⁽⁸⁾⁽⁹⁾, AbhariおよびEpsteinら⁽¹⁰⁾の研究があげられる。最近ではSuryanarayananら⁽¹¹⁾, およびYangら⁽¹²⁾が感圧塗料を用いて、動翼プラットフォーム面上のフィルム冷却効率を測定し、さらにCFDによるフィルム冷却効率の予測を試みている。

本研究では、回転する動翼面上の熱伝達、フィルム冷却につき実験した結果を報告する。また実験と同体系の形状および条件でCFDによる熱伝達率評価を実施し、その予測精度について比較、検討した結果について述べる。

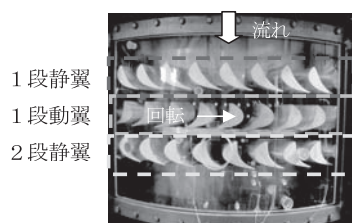
2. 試験装置

試験装置としては、三菱重工業(株)高砂研究所に設置の大型低速回転試験装置 (LSRT: Low Speed Research Turbine) が用いられた。図1, 表1に試験装置および仕様を示す。本装置は、1.5段のタービン動静翼で構成されている。導入したタービン翼は、Sakamotoら⁽¹³⁾により高負荷条件用に翼形設計された。各翼列の翼枚数はすべて同じ50枚である。

下流側に設置されたブローによって主流空気は吸い込まれ、フィルタ、整流格子を通して1段静翼へ流入する。主流速度とタービン回転数をそれぞれ調整し、動翼の流入角、すなわち主流の速度三角形を計画値に合せた。



(a) LSRT 装置全景



(b) 翼列部

図1 大型低速回転試験装置

表1 LSRT仕様

外径	1500mm
回転数	480rpm
1段静翼入口主流速度	12m/s
1段静翼入口乱れ度	2%

LSRTは、静止系および回転系の翼列間流路内で生じる複雑な流れの計測を行うためのレーザー計測装置、各種小型プローブおよび回転系からの圧力・温度信号を取り出すシステムを有しており、回転場における空力・伝熱に関する詳細な計測が可能である。

3. 翼面、プラットフォーム面における熱伝達

3.1 熱伝達率の計測

図2に熱伝達率計測翼およびプラットフォームの外観を示す。本計測翼およびプラットフォームは低熱伝導率のABS樹脂で製作されていて、それぞれの表面に、合計55点の熱電対が埋め込まれている。これらの計測翼、プラットフォームの表面に無電解メッキ加工を実施し、幅5mmの通電加熱用ヒーターを製作した。ヒーターを通电加熱することにより等熱流束壁を形成し、壁に埋め込んだ熱電対によって壁温を計測した。加熱量は0.1～0.2W程度である。そして次式から翼面熱伝達率 h を評価した。

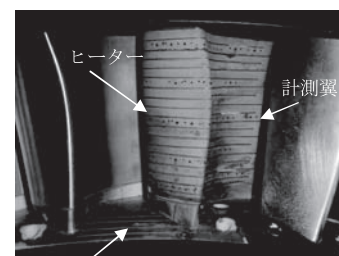
$$h = q / (T_w - T_\infty) \quad (1)$$

ここで(1)式中の q は通电加熱による熱流束、 T_w は壁面温度、 T_∞ は主流温度である。

静圧計測翼⁽¹³⁾には、約160点の静圧タップを設置した。

ヒーターへの電源の供給、熱電対計測信号および圧力計測信号の回転体からの取り出しが必要であるため、試験装置軸端にはスリップリング、回転スキャニバルブを装着した。

局所熱伝達率の計測精度は $\pm 10\%$ である。



計測プラットフォーム

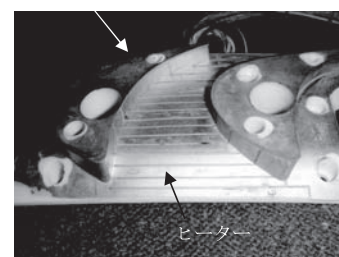


図2 熱伝達率計測翼、プラットフォーム

3.2 数値解析

2.の1.5段タービン翼列と同じ体系で、かつ同実験条件における三次元圧縮性粘性解析を実施した。解析にはFluent6.1を用い、乱流モデルにはRealizable $k-\epsilon$ モデル⁽⁴⁾を採用した。

1段静翼入口から2段静翼出口までを解析対象とした、1.5段タービン翼列の解析体系を図3に示す。1段動翼のチップクリアランス、および静動翼間の段間のギャップもモデル化した。

解析に用いた解析格子を図4に示す。数値解析では移動する動翼周りには、スライディングメッシュを適用した。解析格子総数は約150万である。なお局所熱伝達率を評価する1段動翼の翼面、およびプラットフォームには、実験条件と同じ等熱流束条件を与えた。

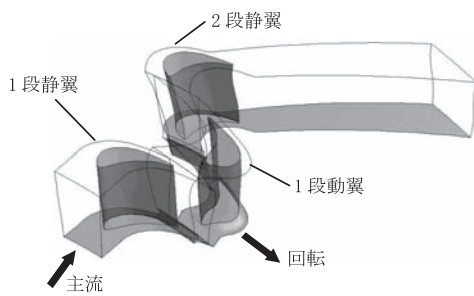


図3 解析体系

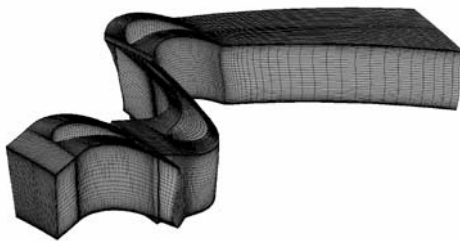


図4 解析メッシュ

3.3 結果および考察

図5に1.5段タービン運転時の3位相における1段動翼と、静止系との位置関係を示す。

図6に動翼の位相が $t=1/3T$, $2/3T$, $3/3T$ における、50%高さの速度ベクトル図を示す。1段動翼が1段静翼で発生したウェークの影響を受けている状況が確認でき

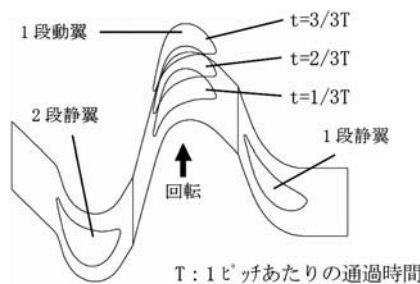
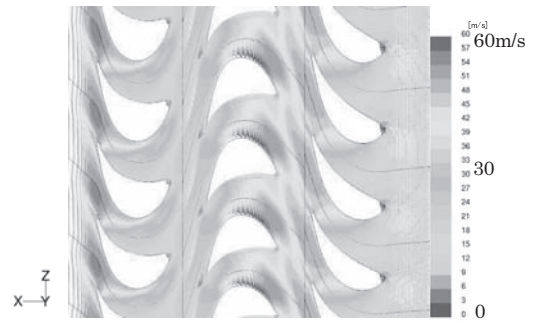
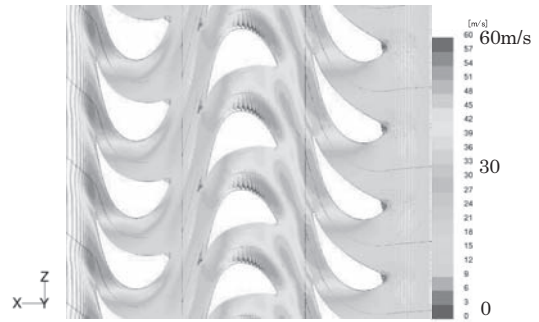


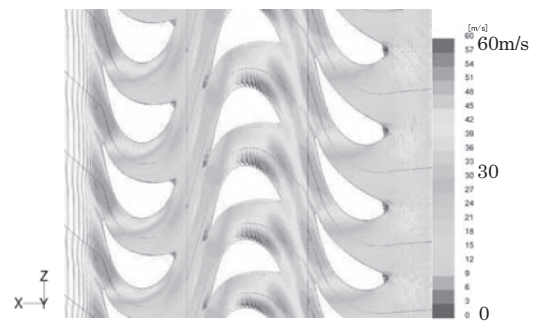
図5 1段動翼と静止系の位置関係



(a) $t=1/3T$



(b) $t=2/3T$



(c) $t=3/3T$

図6 速度ベクトル図 (50%高さ)

る。また2段静翼まわりの流れ場が、位相によって変化していることがわかる。

図7に1段動翼の50%高さにおける、翼面静圧の計測値と解析値を比較して示す。両者は良い一致を示している。

図8に1段動翼の50%高さにおける翼面熱伝達率分布の計測結果を示す。図中には計測値との比較のために前縁部をSchmidt⁽⁵⁾の式で、他の部位を層流平板および乱流平板の式から求めた値もあわせて示している。背側において、翼後縁の近くまで計測値は層流平板を基に計算した熱伝達率値に近く、背側後縁近傍において乱流遷移し、計測値は乱流平板評価値に近い。以上より背側翼面長75%程度の位置で熱伝達率が増加する傾向にあり、遷移域を経て、乱流遷移が生じていると考えられる。類似の現象がBlair⁽³⁾らの実験でも報告されている。また背側翼面長55%の位置にトリッピングワイヤーを設置した場合、その下流で直ちに乱流遷移し、熱伝達率が乱流平板評価値を大きく上まわる。そして、後縁近傍では乱流平板評価値と同程度となる。

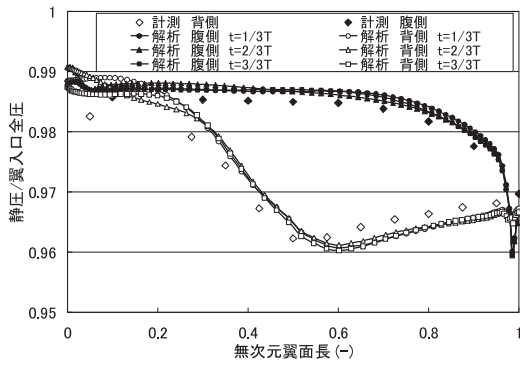


図7 翼面静圧分布 (50%高さ)

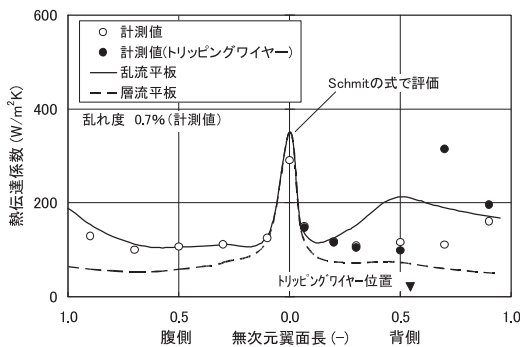


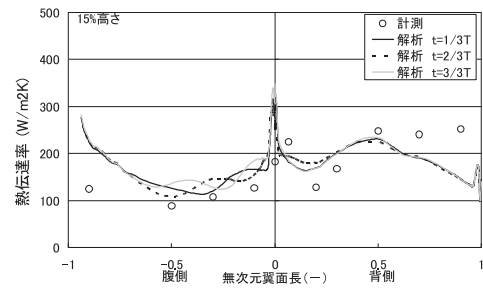
図8 翼面熱伝達率分布 (50%高さ)

一方、腹側では、計測結果と乱流平板の評価結果がよい一致を示している。これは全域で乱流境界層となっているためと推測される。翼背側に比べ翼腹側の流速は遅く、レイノルズ数が低いにもかかわらず乱流境界層になる理由は、腹側面における境界層の不安定と、1段静翼からのウェークの影響と考えられる。前縁部では、計測値とSchmidt⁽⁴⁵⁾の式による評価値は比較的良く一致している。

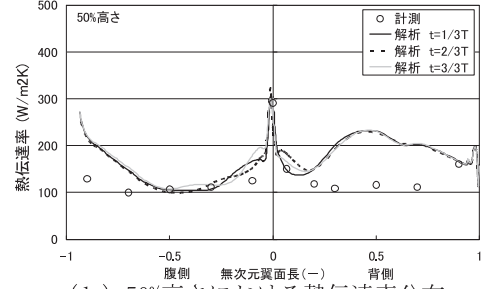
図9に15%、50%、90%高さにおける翼面熱伝達率分布の計測値と解析値を比較して示す。計測値は、トリッピングワイヤーなしのものである。50%高さの背側では、前述のとおり層流境界層の領域で、計測値と乱流モデルを用いたCFDによる解析値との差が大きい。また二次流れの影響の大きい、翼面背側下流域の15、90%高さでは、解析は過小評価している。そして腹側下流域において、解析は熱伝達率を過大評価する傾向がある。RANSモデルは腹側下流域のような加速域で、乱流エネルギーを過大評価する傾向があり、これが原因の一つと考えられる。その他の部位においては、両者は概ね一致している。

図10に動・静翼の異なった3位相のプラットフォーム面熱伝達率分布のコンター図を示す。これらの図を比較することにより、翼出入口付近で熱伝達率が高い領域が観察される。またそれらが静止系と1段動翼の位置関係と、1段静翼からのウェークの影響により、変化していることがわかる。

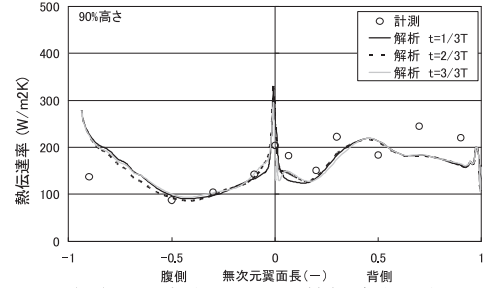
以上の現象をより定量的に評価するために、図11に



(a) 15%高さにおける熱伝達率分布



(b) 50%高さにおける熱伝達率分布



(c) 90%高さにおける熱伝達率分布

図9 翼面熱伝達率分布計測値と解析値との比較

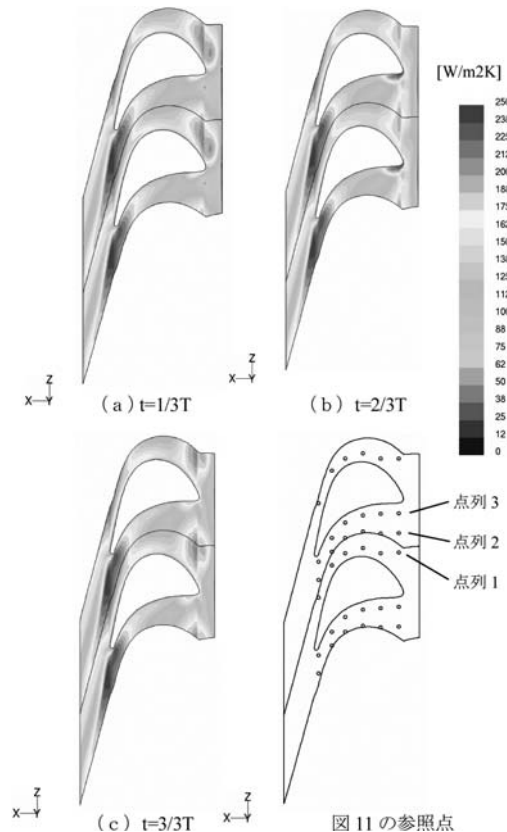


図11の参照点

図10 プラットフォーム面熱伝達率コンター図

プラットフォーム面における熱伝達率分布の計測値と解析値を比較して示す。点列3の結果から、特に前縁の腹側付近で計測値と解析値の差が大きいことがわかる。Pasinatoら⁽⁶⁾によると、この領域はRANSモデルによる予測が過小評価すると報告されている。Takeishi⁽⁷⁾らがその複雑な流れの状況を図12に示したごとく、エンドウォール面上の流れは馬蹄渦、流路渦の影響が強い領域でもある。RANSモデルによる数値解析が、それらによる熱伝達促進を模擬できていないためと考えられ、Hadaら⁽⁸⁾のような数値解析を含めた研究を、今後とも継続してゆく必要がある。その他の部位においては、両者は概ね一致している。

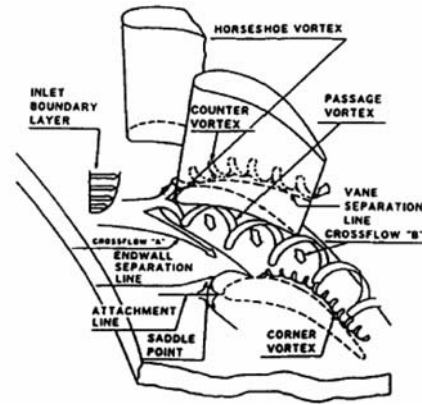
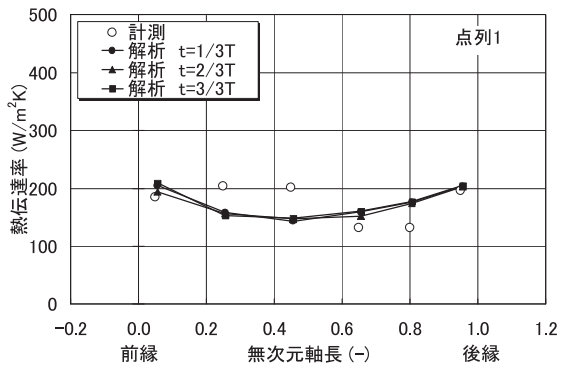
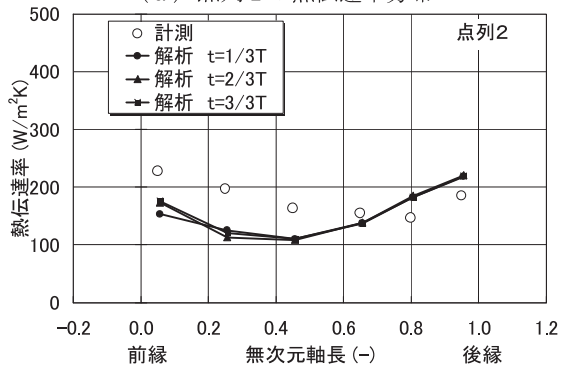


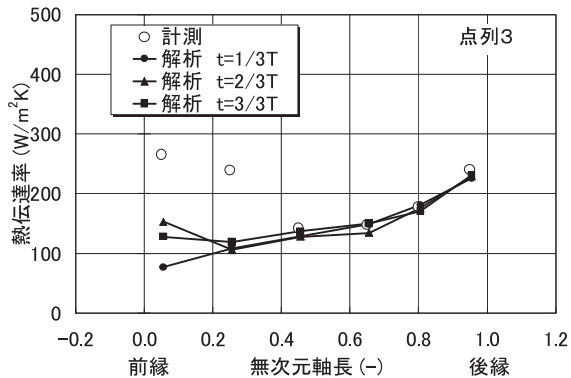
図12 翼端壁まわりの二次流れ状況⁽⁷⁾



(a) 点列1の熱伝達率分布



(b) 点列2の熱伝達率分布



(c) 点列3の熱伝達率分布

図11 プラットフォーム面熱伝達率分布計測値と解析値との比較 (図10 参照)

4. プラットフォーム面におけるフィルム冷却

4.1 フィルム冷却効率計測

本研究では、フィルム冷却効率の計測に感圧塗料 (PSP: Pressure Sensitive Paint) が用いられた。本計測は、感圧塗料の蛍光発光強度が酸素濃度に依存することを利用してしている。

図13に動翼プラットフォーム面にシェイプトフィルムを加工した供試モデルを示す。フィルム孔径の円孔部の直径は0.8mmである。またプラットフォーム全面にわたって、感圧塗料が塗装されている。

図14にフィルム流体の回転動翼への供給システムを示す。フィルム流体は、ローターシールをとおして、回転しているタービン1段動翼へ供給される。

感圧塗料としては、ISSI社製のFIB PSP Single Coat (405nm excitation) が用いられた。LED光源から波長

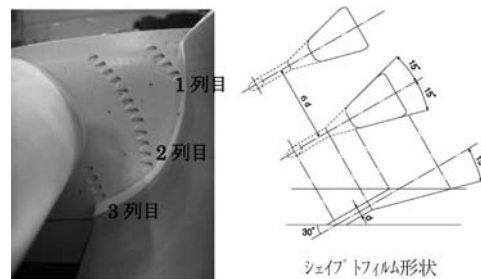


図13 動翼プラットフォーム面供試モデル

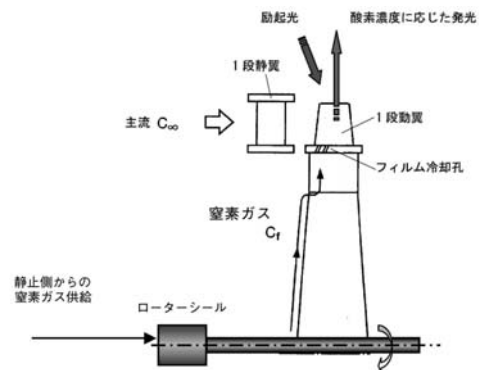


図14 フィルム流体供給システム

405nm の励起光が感圧塗料に照射され、バンドパスフィルター付きCCDカメラを用いることによって、感圧塗料が発した波長650nm の燐光のみを撮影する。図15に示すように、LSRT から1回転ごとに発信されるパルス信号を検出し、ディレイ回路を用いて計測対象のプラットフォーム面の回転方向位置と、撮影位置を同期させることで撮影した。



図15 撮影時のディレイ回路による制御

なお本計測では、計測上の制約により回転数を120rpmとし、入口主流速度を3m/sとして主流の速度三角形を計画値にあわせた。

フィルム冷却効率 η は次式で定義される。

$$\eta = (T_{\infty} - T_{aw}) / (T_{\infty} - T_f) \quad (2)$$

ここで T_{∞} は主流温度、 T_{aw} は断熱壁温度、 T_f はフィルム流体吹き出し位置におけるフィルム流体温度である。一般に断熱壁温度 T_{aw} を計測することで、フィルム冷却効率が求められる。しかし理想的な断熱壁を達成することは至難であるため、壁温度を用いてフィルム冷却効率を求める場合かならず測定誤差が存在する。一方、熱伝達と物質移動のアナロジーを利用すると、(2)式は次式に書き換えられる。

$$\eta = (C_{\infty} - C_{mix}) / (C_{\infty} - C_f) \quad (3)$$

ここで C_{∞} は主流の酸素濃度(21%)、 C_{mix} は空気と窒素の混合ガスにおける酸素濃度(0~21%)、 C_f はフィルム流体の吹き出し直前の酸素濃度より0%である。本計測では主流に空気、フィルム流体に窒素を用い、主流とフィルム流体の混合割合によって変化するプラットフォーム表面の酸素濃度 C_{mix} を感圧塗料により計測した。別途、取得した酸素濃度と燐光強度の校正曲線を用いて C_{mix} を算出し、(3)式からフィルム冷却効率を評価した。

フィルム流体の条件として、次式で定義される吹き出し比 M は1.0である。

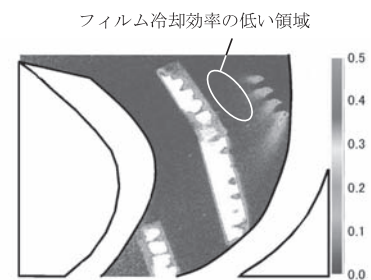
$$M = \rho_f v_f / \rho_{\infty} v_{\infty} \quad (4)$$

ここで ρ 、 v は密度、速度で、添え字 ∞ 、 f は主流、フィルム流体を示す。

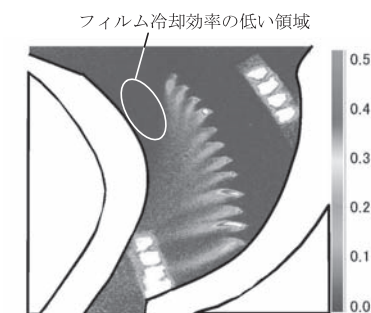
フィルム温度は主流温度と同じ常温である。本実験の密度比 ρ_f / ρ_{∞} は、実機条件とは異なって、ほぼ1.0となる。

4.2 結果および考察

図16にプラットフォーム面のフィルム冷却効率分布をコンター図の形で示す。フィルム冷却流体は、概ね腹側から背側に向かう二次流れに沿って流れ、エンドウォール面上をカバーしていることが確認できる。ただし図16の1列目吹き出しのフィルム冷却効率分布が示すごとく、前縁近傍であるフィルム冷却孔1列目の翼入口側においては、フィルム冷却効率が低い傾向にある。2列目吹き出しにおいても前縁近傍の翼背側に近い部分にフィルム冷却効率の低い領域がある。Kitamuraら⁽¹⁰⁾は1段静翼においても同様の現象を報告している。これらは背側前縁近傍の流れとの干渉、および図12⁽⁷⁾に示す馬蹄渦、流路渦の影響と考えられる。



(a) 1列目吹き出し



(b) 2列目吹き出し

図16 プラットフォーム面のフィルム冷却効率コンター図

5. まとめ

大型低速回転試験装置を用いて、回転する動翼面上およびプラットフォーム面上の熱伝達率、フィルム冷却効率を実験的に調査し、さらCFDによる熱伝達率予測を実施した。それらより、以下の結論を得た。

- 1) 回転動翼面上の50%高さの熱伝達率分布は、従来の経験式、すなわち流れに垂直に置かれた円柱まわり、および平板面上の熱伝達率評価式で評価可能であることが確認できた。
- 2) プラットフォーム面上の前縁まわりは、馬蹄渦、流路渦の影響が強い領域であり、それらによる熱伝達促進がみとめられる。
- 3) RANSモデルの数値解析による動翼面上およびプラットフォーム面上の熱伝達率分布予測は翼面腹側の下流域で過大評価し、翼面背側下流域の15、90%高さ、プラットフォーム面の前縁まわりでは過小評

価する傾向がある。今後とも、研究を継続してゆく必要がある。

- 4) 回転動翼プラットフォーム面における、シェイプトフィルムフィルム冷却効率分布を、感圧塗料を用いて測定することにより確認した。
- 5) 動翼プラットフォーム面における翼入口側では、フィルム冷却効果が低い領域が存在する。これらの現象は、静翼シュラウド面のフィルム冷却効率特性と類似している。ともに、馬蹄渦、流路渦および背側前縁近傍の流れとの干渉の影響と考えられる。

謝辞

本研究は経済産業省補助事業「高効率ガスタービン実用化要素研究」にて実施した。関係者に謝意を表します。

参考文献

- (1) Ito,E. et al., "Development of Key Technologies for the Next Generation Gas Turbine" ASME Turbo Expo 2007, GT2007- 28211.
- (2) Guenette,G.R. et al., "Fully Scaled Transonic Turbine Rotor Heat Transfer Measurements" ASME Journal of Turbomachinery, Vol.111 (1989), pp.1-7.
- (3) Blair,M.F., "An Experimental Study of Heat Transfer in a Large-Scale Turbine Rotor Passage" ASME Journal of Turbomachinery, ASME Paper 92-GT-195 (1992).
- (4) Bergholz,R.F. et al., "Rotor/Stator Heat Transfer Measurement and CFD Predictions for Short-Duration Turbine Rig Tests" ASME Turbo Expo 2000, 2000-GT-0208.
- (5) Tallman,J.A. et al., "Heat Transfer Measurement and Predictions for a Modern, High-Pressure, Transonic Turbine, Including Endwalls" ASME Turbo Expo 2006, GT2006-90927.
- (6) Haldeman,C.W. et al., "Aerodynamics and Heat Flux Measurement in a Single Stage Fully Cooled Turbine - Part II: Experimental Results, High-Pressure, Transonic Turbine, Including Endwalls" ASME Turbo Expo 2006, GT2006-90968.
- (7) Dring,R.P. et al., "An Experimental Investigation of Film Cooling on a Turbine Rotor Blade" ASME Journal of Engineering for Power, Vol.102 (1980), pp.81-87
- (8) Takeishi,K. et al., "Film Cooling on a Gas Turbine Rotor Blade" ASME Journal of Turbomachinery, Vol.114 (1992), pp.828-834.
- (9) Takeishi,K. et al., "Research on Film Cooling of a Rotating Turbine Blade by Using Low Speed Turbine Test Facility" Proceeding of the 12th International Heat Transfer Conference Grenoble, France (2002).
- (10) Abhari,R.S. et al., "An Experimental Study of Film Cooling in a Rotating Transonic Turbine" ASME Journal of Turbomachinery, Vol.116 (1994), pp.63-70.
- (11) Suryanarayanan,A. et al., "Film-Cooling Effectiveness on a Rotating Turbine Platform Using Pressure Sensitive Paint Technique" ASME Turbo Expo 2007, GT2007-27122.
- (12) Yang,H. et al., "Prediction of Film-Cooling and Heat Transfer on a Rotating Blade Platform with Stator-Rotor Purge and Discrete Film-Hole Flow in a 1-1/2 Turbine Stage" ASME Turbo Expo 2007, GT2007-27069.
- (13) Sakamoto,Y. et al., "Development of High loaded and High Efficiency Turbine for the Next Generation Gas Turbine" IGTC2007 Tokyo, TS-060.
- (14) Shih,T.H. et al., "A New $k-\epsilon$ Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flow" Computers Fluid, Vol. 24 No. 3 (1995), pp.227-238.
- (15) Schmidt,E., Wenner,K., Forschung, Vol.12 (1941), pp.65
- (16) Pasinato,H.D. et al., "Assessment of Reynolds-Averaged Turbulence Models for Prediction of the Flow and Heat Transfer in an Inlet Vane-Endwall Passage" Trans ASME J Fluids Eng, Vol.126 No.3 (2004), pp.305-315.
- (17) Takeishi,K. et al., "An Experimental Study of Heat Transfer and Film Cooling on Low Aspect Ratio Turbine Nozzles" ASME Journal of Turbomachinery, Vol.112 (1990), pp.488-496.
- (18) Hada,S. et al., "The Effect of Leading Edge Diameter on the Horse Shoe Vortex and Endwall Heat Transfer" ASME Turbo Expo 2008, GT2008- 50892.
- (19) Kitamura,T. et al., "Study on Film Cooling for the Next Generation Gas Turbine" IGTC2007 Tokyo, TS-115.



JO-1の話

高田 浩之*1
TAKATA Hiroyuki

JO-1はわが国の戦後最初のジェットエンジンである。昭和27年4月平和条約が発効して航空工業の再開が可能になると、当時の大宮富士工業（のち合併して富士重工業）は早々にジェットエンジンの試作を企画し、通産省の補助金を得て試作研究をスタートさせた。戦後の空白を取り戻し、同時に将来の発展をも睨んで、材料、軸受、工具、補機類などはすべて国産として計画されたものである。素材の入手や耐熱部品の加工には多くの困難が伴った。

エンジンの仕様を別表に示す。構造上の特徴として：

圧縮機は8段の翼車を貫通軸で締結し、1段及び8段翼車は特殊鋼、他の翼車はアルミ合金の鍛造である。動翼はアルミ合金の精密鍛造、静翼はアルミ合金の精密鍛造で、前置静翼および1段動翼はそれぞれ18-8および13Cr不銹鋼の鍛造である。おおむね50%定反動度で設計され、地上静止時最大マッハ数は0.7以下である。

タービンは軸流1段で、タービン軸と圧縮機軸は歯型噛合いの中間軸接手により接続される。翼車の材料はTimken16-25-6であり、静翼はNimonic80Aの精密鍛造でAISI310の取付環に熔接され、動翼は特殊耐熱合金の精密鍛造で翼車とはクリスマスツリー嵌合、ピンにより軸方向に固定されている。

8ヶの缶型燃焼室は接続管で連絡し、外筒はAISI321、内筒はAISI310の板金構造で、燃料噴射弁はduplex型渦巻噴射弁を用いている。主として富士精密工業が担当した燃焼実験による内筒温度は1,500℃であった。

主軸受は圧縮機前方に球軸受と円筒軸受を並列、圧縮機後部に円筒軸受を配置し、タービン軸は前方に推力軸受、後部に円筒軸受を配置している。

ところで、さきに航空工業再開にあたって、ジェットエンジン工業に対する関係各社の関心は極めて高く、エンジン研究計画や国に対する補助金の申請などは過熱気味であった。このため、通産省の方針もあって結局、石川島重工業、富士重工業、富士精密工業、新三菱重工業の4社は昭和28年7月、日本ジェットエンジン株式会社を設立することになった。（のち昭和30年11月に川崎航空機工業が参加した。）そして、この日本ジェットは自らの研究として、当時部品の製作が大部分既に完了していたJO-1を富士重工業から引き継いで組立および運転試験を行い、同時に大型エンジンJ1（推力3t）の試験

原稿受付 2009年7月31日

*1 東京大学名誉教授 日本ガスタービン学会 名誉会員

JO-1仕様

型式	1軸ターボジェット	
圧縮機	軸流8段	
タービン	軸流1段	
燃焼室	缶型8個, duplex 燃焼噴射弁	
推力	1,000kg	
燃料消費率	1.0kg/kg/h	
空気流量	18kg/s	
タービン入口温度	800℃	
圧力比	4.0	
回転数	12,000rpm	
乾燥重量	450kg	
寸法	全長	2,800mm
	外径	680mm

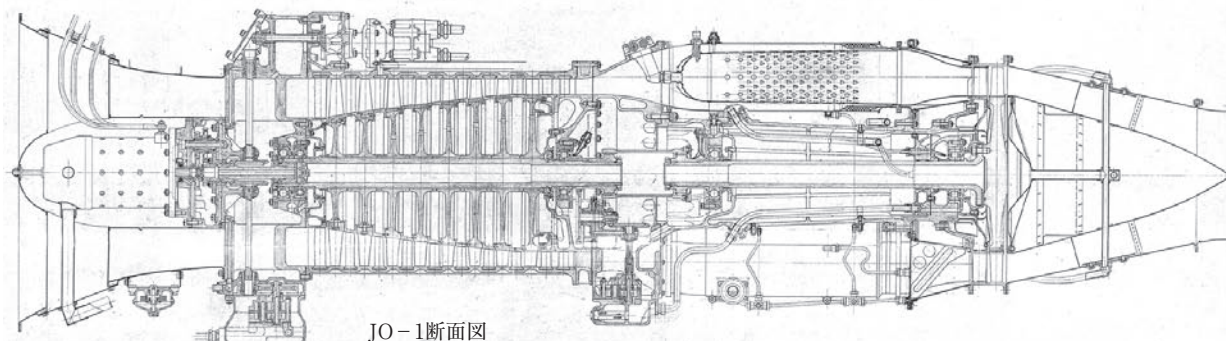
計を行うことからスタートした。

かくてJO-1は日本ジェットの手によって昭和29年7月に組立完了、12月に火入れが行われた。組立および運転試験は日本ジェットが富士重工業・大宮工場の一部および運転場を借り受けて行われ、昭和30年4月までに回転数11,000rpm、推力540kgを確認した。しかし同4月22日10,500rpmで運転中異常音と共にバーストし、圧縮機翼の約半数が破壊・飛散した。原因は静翼とローターの間隔が小さく、両者が接触したためと考えられた。

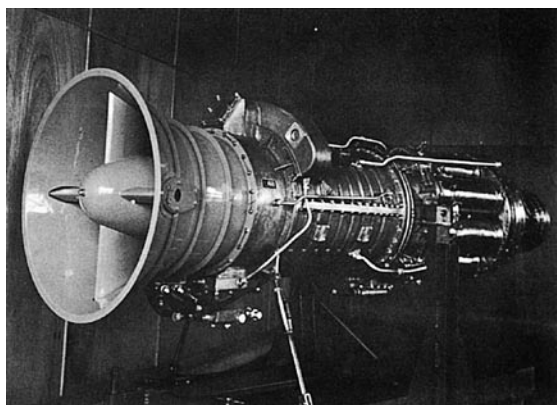
その後、2号機用の翼を入れ替えて再び性能試験を実施し、12月、12,000rpmで推力870kgを確認し、12月中旬より長時間連続運転が行われた。

しかしながら、ここでそれ迄の運転結果などに基づいて検討が行われ、JO-1は重量超過や推力不足など改良すべき点が多々あり、また最初の計画以来3年余を経てその間の欧米各国のジェットエンジンの進歩は著しいため、これを実用化するにはかなりの大改造を要し、時期的にも経済的にも新構想のもとに再出発の方が得策であるとして、12月下旬を以ってJO-1エンジンの試作研究は打ち切りとなった。

他方この間に、日本ジェットは、昭和30年1月防衛庁がジェット中間練習機の国内開発の方針を決定して推力1,200kg程度のエンジンを要求したことに対応し、前記J1に引き続いて計画していた小出力のJ2（推力750kg）を推力1,200kgのJ3エンジンに切り替え、既に設計に着手していた。そして、このJ3エンジンは昭和31年7月に社用機の組立が完了し、8月に運転試験が開始されて、その後次第に開発が進められていくこととなった。



JO-1断面図



JO-1エンジン

この様にして、JO-1の計画は歴史的役割を果たして終了した。JO-1の結果はJ3の基礎研究となって引き継がれていったことであろう。

ここで私がJO-1に関心を持った理由について触れておきたい。大宮富士工業でJO-1の設計の中心であった西野宏さんは、戦後再開された東京大学航空学科で、昭和29年から非常勤講師として「ジェットエンジン」の講義を担当された。おそらく大宮富士工業でJO-1の計画がスタートしたときに私の師、八田先生や岡崎先生がそれに関与されたことに関係があったのであろう。講義の中ではJO-1での経験が生かされたことであろうと思われる。そして、その講義は昭和38年に私が、幾らかの資料と共に、あとを引き継ぐまで9年間にわたって続いた。

西野さんはまた、当時の学部で4年生が卒業直前に行う「卒業設計」においても学生を指導された。これは原動機コースの学生の場合、3～4ヶ月かけてジェットエンジンか、あるいは何か他のエンジンを書くというものであって、学生にとっては卒業後も非常に印象に残る科目であった。西野さんはそのジェットエンジンの設計において学生を熱心に指導されたが、そのとき具体的に図面を示してしばしば参考にされたのがJO-1であった。私はその指導の際にいつも横について見ていたので、その意味でもJO-1は私にとって馴染みの深いエンジンである。

JO-1との接点はもう一つある。昭和30年か31年だと

思うが、私は田中英穂先生と一緒に、熱線風速計を持って大宮工場の運転場へJO-1（二人とも、それがJ3ではなくJO-1だったと信じているのだが）の旋回失速の計測に行ったことがある。当時の熱線の技術は未熟なものだったので、万一壊れてもエンジンに害を及ぼさないよう特殊なプローブを作って、それを持って行った。ただし、結果がどうだったかについては全く憶えていない。多分、目ぼしい結果が得られなかったからであろう。

そんなこんなで、私はいつか機会があればJO-1の計画の経緯や、試作・運転の経過などを少し詳しく調べてみたいものだとかねがね思っていた次第である。また、それがこの小文に至った所以でもある。

さて話は変わるが、以前私が東大にいたとき、それ迄富士重工にいた友人から退職の際に、数枚のJO-1の図面を寄付して貰った。また、かつて大宮富士工業でJO-1の工作に関わった別の友人からは圧縮機およびタービンの動翼を1枚ずつ貰った。現在は共に東大航空学科に保存している。図面の方はエンジンの縦断面や圧縮機・タービンの組立図等を含み、今では他にあまり残っていないものではなかろうか。

最後に、JO-1エンジンの所在については、暫らく前まで東京・神田の交通博物館に展示・保存されていた。しかし、埼玉へ移転後の交通博物館では航空関係の展示は行わないとのことであり、今後の扱いがどうなるか案じている。何処か適当な博物館などに保存され、公開されることを望みたいものである。

本稿の執筆に当たっては下記の資料を参照した。

- (1) 西野宏、「JO-1噴射発動機について」、熱機関（工業資料社）、1巻3号（昭和30年3月）
- (2) 須賀善之、「ターボジェットエンジン工作法」、熱機関（工業資料社）、1巻6号（昭和30年6月）
- (3) 渋谷巖、「ジェットエンジン発達 trends」、日本機械学会誌、昭和30年9月
- (4) JANE航空年鑑、1957-1958年版
- (5) 石川島重工業株式会社108年史、1961
- (6) 日本ジェットエンジン株式会社社史、1967
- (7) 富士重工業三十年史、1984
- (8) IHI航空宇宙30年の歩み、1987