

文部科学省「緑の知の拠点事業」の総括

研究代表 田中義人

Result of MEXT Project – “Green Center of Excellence”

Project Leader Yoshito TANAKA

We have finished MEXT project – entitled “Evaluation and Verification of an Intelligent Control System with Modeling of Green Energy Devices by Constructing a Micro-Grid System in University Campus” accepted as Creation of Green Innovation from Universities – “Green Center of Excellence”, aimed to build a center for green energy and intelligent energy management system (EMS). We have constructed a micro-grid system in our campus to study a tidal stream power system, a biomass power system, a photovoltaic system, a fuel cell system, a next generation Li-ion battery system, and an intelligent control system with them.

1. はじめに

長崎総合科学大学では、文部科学省が推進する大学発グリーンイノベーション事業の一つである「緑の知の拠点事業」を2011年12月よりスタートし、2014年3月で終了した。約1.1億円の事業で、全国で名古屋大学と本学の2件が採択された事業である。『次世代グリーンエネルギーデバイスのシミュレーションモデル化と学内マイクログリッドを用いた評価・検証試験』という課題で、潮流発電などの再生可能エネルギーのモデル化を提案し、数値実験（シミュレーション）を行うとともに、大学内にマイクログリッド試験フィールドを構築して模擬試験（エミュレーション）を行うことを目的としている。模擬試験フィールドでは、気温・湿度・日射・風速などの環境モニターリング装置を設置するとともにスマートハウスに電力供給ができるようになってきている。本稿では、本研究で実施した下記の項目について、概要とその展望を述べる。

- マイクログリッドとそのシミュレーションモデルの構築
- エミュレーションシステムの開発
- 太陽光発電システムの試作・評価とそのモデル化
- 潮流発電機の試作・評価とそのモデル化
- バックアップ用バイオマス発電機の評価とそのモデル化
- 高容量・高出力Liイオン電池の開発とそのモデル化
- 家庭用燃料電池システムの特性計測とそのモデル化

2. マイクログリッドシステム

図1は、本研究で構築するマイクログリッドシステムの全体像である。このシステムでは、HVDCライン（約

400V）、系統と連結したACライン、センサ群、分散電源エミュレータ、エネルギーマネジメントシステム

(EMS)を持ち、エネルギーデバイスやマイクログリッドの模擬（エミュレーション）を行うものである。実際には、エミュレーションの前に、コンピュータ上でマイクログリッドのモデルシミュレーションを実施する。

太陽光・バイオマス・潮流発電、燃料電池、高性能Liイオン電池のエネルギーデバイス、および下図のセンサ群とエネルギーマネジメントシステムを除くマイクログリッドをMATLAB上でモデル化した。モデル間インターフェースを統一し、シミュレータ上で開発したエネルギーデバイスモデルは、エミュレータ上のプログラムとし移行できるようにした。エミュレータに移行された実行モデルを利用すれば、エネルギーマネジメントをしながらリアルタイムにエミュレーション検証ができる。

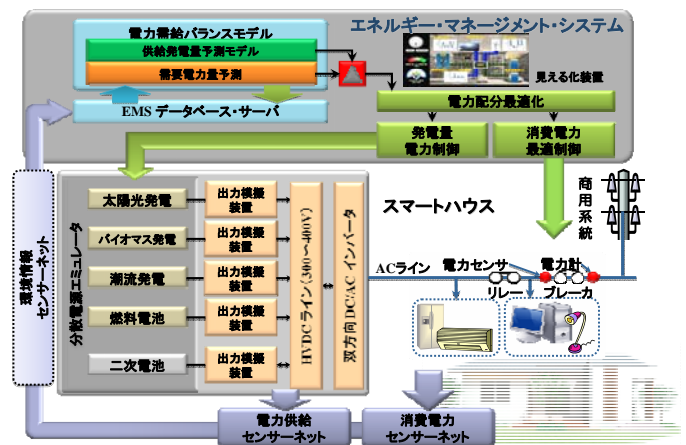


図1 学内マイクログリッドシステムのイメージ図

図2は、マイクログリッドシステムのブロック図を示す。HVDCラインには、DC/DCコンバータと系統連携インバータが接続されている。2台のDC/DCコンバータ

(1.2kW)を介して太陽光パネル(1.2kW)が2基接続、もう一つがコジェネ・太陽光パネル(800W)と電源模擬装置を切り替えることができるようになっており、最大1.2kWまでの太陽光発電エミュレーションが可能である。また、3台のDC/DCコンバータがDC電源に接続されており、それぞれ最大1.15kWまでのエネルギーデバイスエミュレーションができる。また、双方向DC/DCコンバータ(1.2kW)がDC電源・負荷装置(最大25A、400V)に接続されており、二次電池のエミュレーションができ、回路を切り替えることによりスーパーキャパシタと蓄電池を使ったリアルモード試験も可能になっている。これらのDC/DCコンバータと系統連携インバータは、スマートパワーマネージャで制御されている。HVDCラインは約380V程度で制御されており、二次電池や系統インバータへの電力の出し入れにより安定化されている。また、HVDCラインが420Vを超えるようなときは、DC/DCコンバータの出力が停止するようなシステムになっている。リアルタイム性の必要なブレーカー等の制御はREMSサーバで、その他の制御はEMSサーバにより行われている。

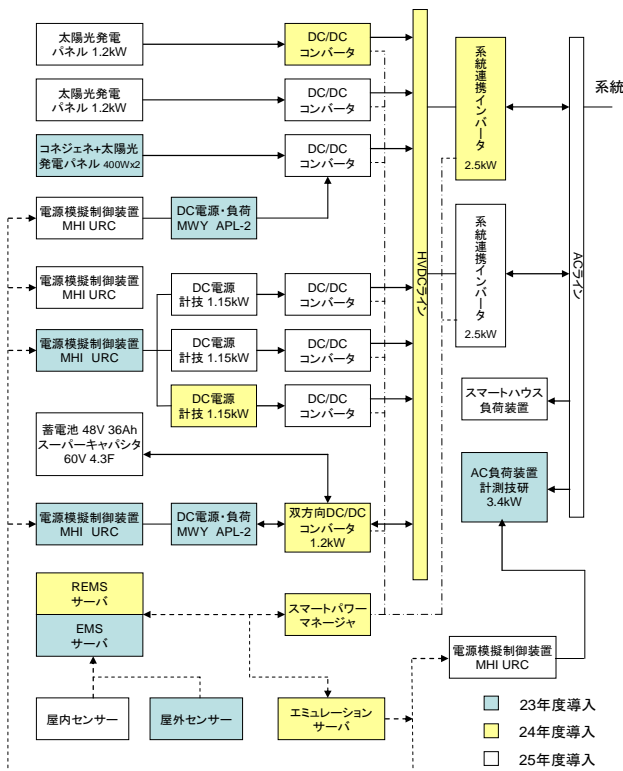


図2 マイクログリッドシステムのブロック図



図3 マイクログリッドシステム制御室

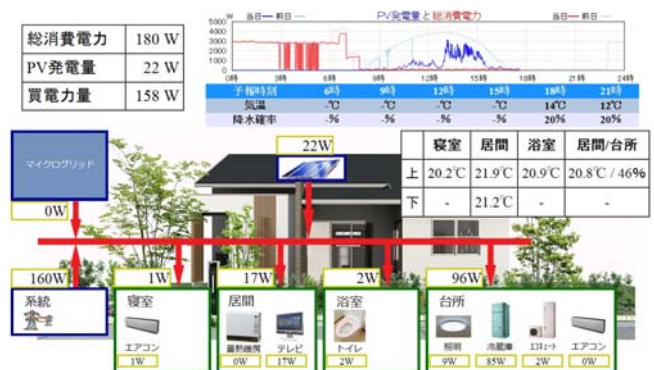


図4 見える化モニター画面

屋外・屋内の環境センサの信号は、EMSサーバに入力されている。エミュレーションサーバは、分散電源エミュレータ(10msステップ)として動作し、電源模擬制御装置に1秒毎に指令を与える。また、AC負荷装置には1秒毎の需要パターンをエミュレーションサーバより入力することができる。EMSサーバ、エミュレーションサーバ、スマートパワーマネージャ、電源模擬制御装置等はTCP/IPネットワーク(点線)で接続されている。これらの装置は学術フロンティアセンター内に設置されており、2基の19インチシステムラックに実装されている(図3)。

システムの電力需給状況は、図4のモニターシステムで監視することができる。モニターシステムは、LabVIEWで開発されており、MATLABシステムと共存しながら動作することができるようになってきている。もちろん、ネットワーク上から遠隔監視・制御できる。この他に、すべての電源システムの動き、電力需給バランス、シミュレーション、エミュレーションの様子もモニターできるようになっている。

3. シミュレーション・エミュレーションシステム

シミュレーションのフレームワークは、MATLAB で提供しているが、モデルは、MATLAB、C 言語、FORTRAN などいずれのツールでも開発できる。図5は、エミュレーションのタスク管理を示したブロック図である。シミュレーションで動作確認したモデルは、共有メモリアクセスインターフェースブロックを追加した上で、MATLAB Corder を用いてコード生成を行い実行ファイル化する。同時にC言語で書かれたタスクコントローラにモデルの関数を追加するだけで自動的に実行されるようになる。現状では、Windows 上のみでサポートしているが、将来はLinuxやMacOS上で動作させることも可能と考えている。タスクコントローラは、10ms 間隔でモデルを起動し、モデルは共有メモリに実行結果を出力する。現状は、電源等の動作スピードの制約から、通信管理サーバは1秒毎のデータを共有メモリからアクセスして、電源の出力設定や二次電池の入出力設定を変更している。また、画面の更新も1秒毎に行っている。

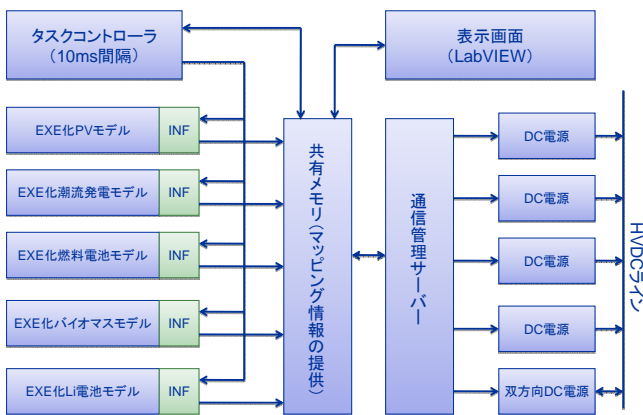


図5 エミュレータのタスク管理

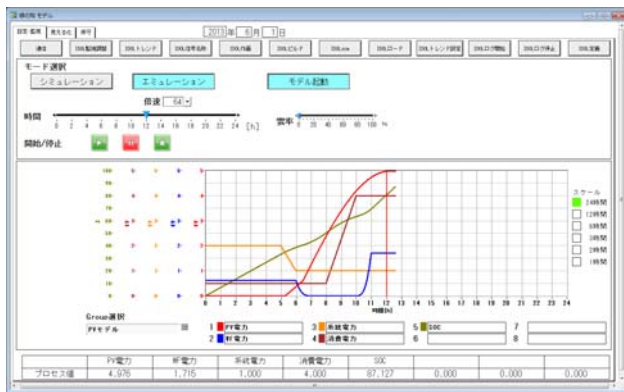


図6 エミュレータ用コンソール画面

図6は、エミュレータ用コンソール画面を示している。コンソールからシミュレータも起動することができるの

で、シミュレータで確認後にエミュレータを起動することができるようになっている。また、起動するモデルや負荷パターンの選択、エミュレータを起動する時間等も設定できるようになっている。

4. エネルギーデバイスモデル

4.1 太陽光発電

学術フロンティアセンター屋上には、日射、気温、湿度、風力、雨量を測ることのできる気象観測装置と太陽光パネル3.2kWを設置している。また、全天日射量、散乱日射量、地表反射を測るアルベドメータとI-Vチェッカーを設置しており、太陽光発電に関する観測ができるようになっている。図7に本研究で設置した太陽光発電システム用計測システムを示す。



図7 太陽光発電用計測システム

本システムで、晴れの日と曇りの日で日射量を測定したものを図8に示す。学術フロンティアセンターは、日の出時はスムーズなカーブとなっているが、日没時に山の影の影響を受けるためテールの落ち方が早い。

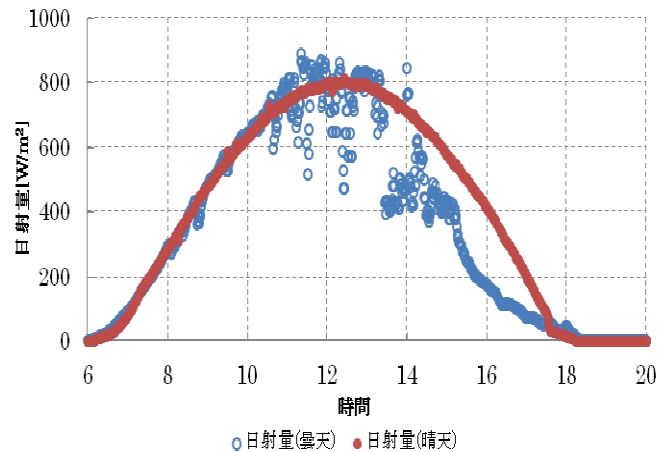


図8 学術フロンティア屋上の日射量

図9は、太陽光パネルの発電量とパネル温度の日射量依

存性を示したものである。発電量は、MPPT (Maximum Power Point Tracking) の値から求めている。日射量と共に温度が上昇しているのがわかる。

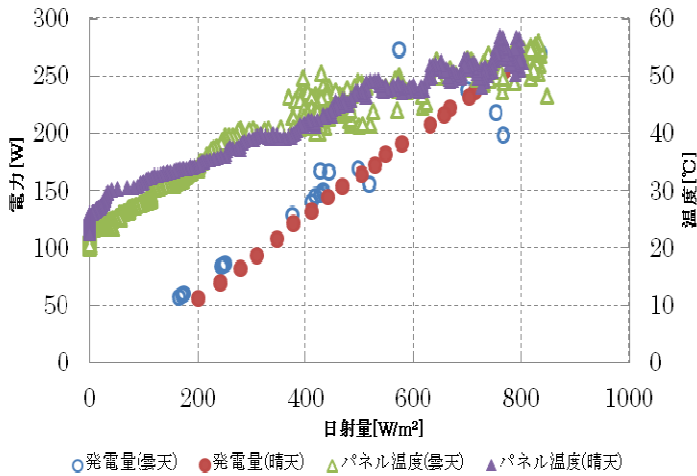


図9 日射量 VS 発電量とパネル温度

図10のように大気温度、日射量、パネル温度をパラメータにして太陽光パネルをモデル化した。図11は、曇り時々晴れの日、このモデルでの計算値を示しており、実測値（青点）とよく一致していることが分かる。

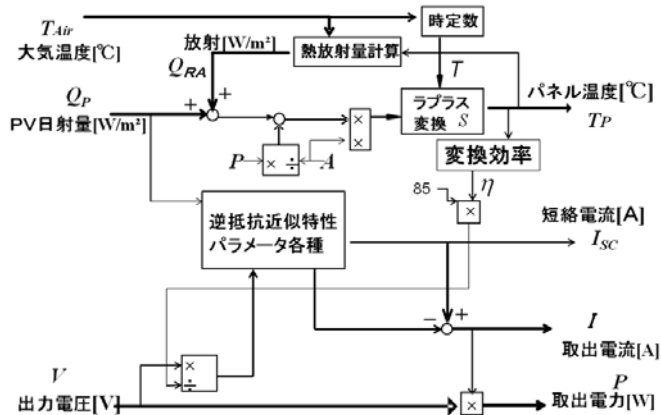


図10 太陽光パネルのモデル

4.2 潮流発電

本研究では、図12に示すような、2 m程度の翼を持つ係留式風車型潮流発電装置の開発を行った。CFDシミュレーションと水槽を用いた実験の結果、シミュレーションがほぼ実験値と一致することを確認し、より出力が高くなるような翼形状の研究を実施した。また、係留方法に関する考察も行い、2件の特許を申請した。この結果、当初目標としたパワー係数0.42は達成できることがわかった。また、最適と考えられる翼を使って潮流と

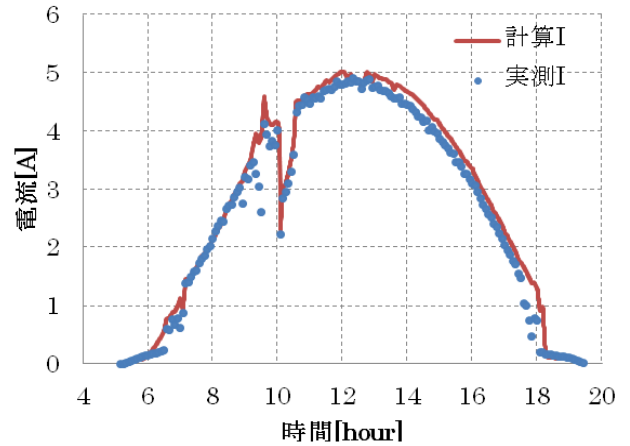


図11 測定結果とモデルの比較

発電量の関係を図13のようにモデル化することができた。図14に示すように、月と太陽の動きによる潮流もほぼ正確に計算できるようになり、設置現場の地形の影響が分かれば発電量がほぼ計算できるようになった。

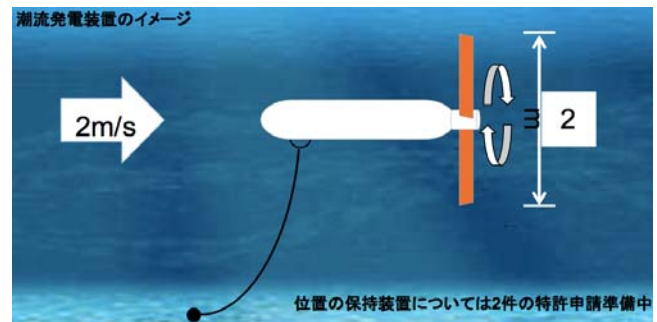


図12 開発した潮流発電機

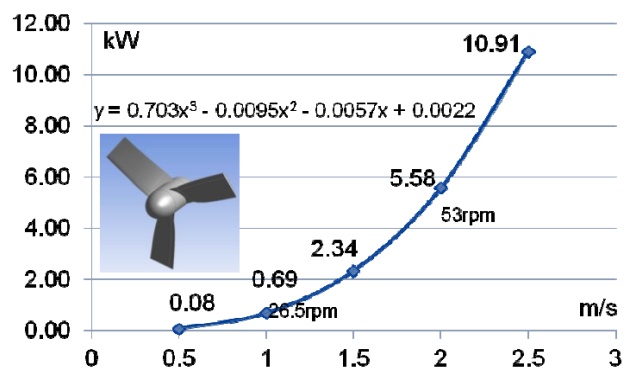


図13 潮流と発電量のモデル化

4.3 バイオマス発電

本研究では、バイオマス燃料を使用したディーゼル発電機を「バックアップ電源」として使うための燃料の研究および発電特性のモデル化を実施した。図15は、

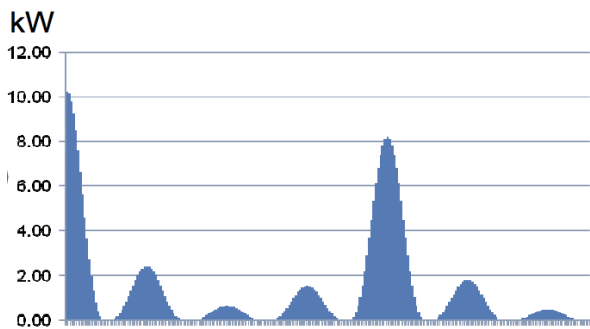


図14 潮流による発電量の変化の計算 (横軸:日時)

本実験で使用したディーゼル発電機である。バイオマス原料として、菜種油、大豆油、パーム油等を使用し、エタノールと混合することでディーゼルエンジンの燃料とした。図16は、発電出力を変化させた場合の熱効率を表している。実験の結果、ディーゼル燃料とほぼ遜色のないバイオマス燃料を作ることができた。また、発電特性のモデル化にも成功し、バイオマスを使ったバックアップ電源として利用できることがわかった。



図15 実験で使用したディーゼル発電機

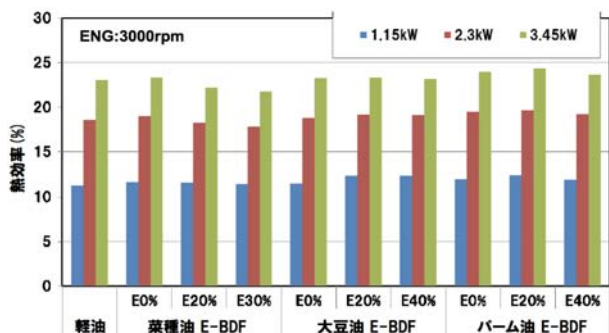


図16 様々なバイオマス燃料の熱効率の実験結果

4.4 高性能Liイオン電池

本研究の目的は、低温焼成した難黒鉛化炭素材料であるハイドログラフエン (HGR) を負極として用いた高出力・高容量を有する新しいタイプのスーパーリチウムイオン

電池 (S-LIB) を試作するとともに、その電池特性を評価し、さらに本学で開発するスマートグリッドの蓄電系としての役割を検証することにある。キシレン樹脂を原料とする HGR の一種であるポリフェン系材料 (PPhS) を負極に用いた場合の負極電極特性を検討し、特にプリドープを行った後の最も有効な条件を見出し、この負極との組み合わせにおいてコバルト酸リチウム (LiCoO₂) を正極材として用いた正極の特性を調べ、最適の条件も得た。図17は、試作したリチウムイオン電池である。この電池を用いて、初期充放電特性、内部抵抗、交流インピーダンス、サイクル特性等の電池特性を測定し、モデル化を行った。今回試作した高性能 Li イオン電池は、既存リチウムイオン電池の 1.8 倍程度のエネルギー密度を有することがわかった (図18)。また、充放電時にはヒステリシス特性を持つこともわかり、関数として表現しモデル化にも成功した。

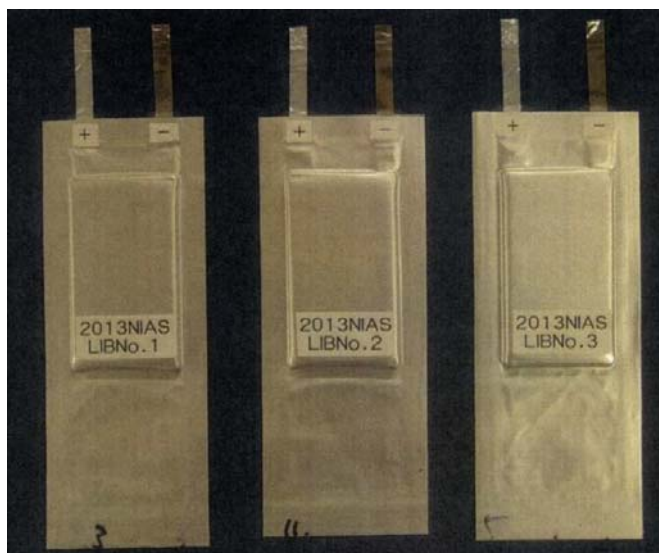


図17 試作したハイドログラフエンリチウムイオン電池

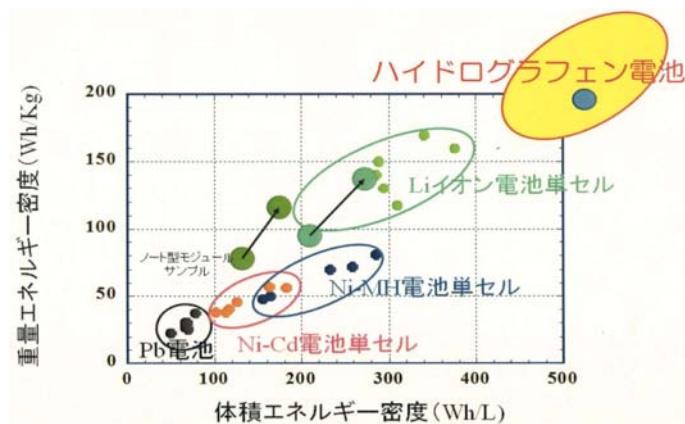


図18 ハイドログラフエンリチウムイオン電池のエネルギー密度

4.5 燃料電池システムと電力需要データ測定

一般家庭のPEFC型燃料電池であるENEファームの出力電圧と電流を測定し、燃料電池の過渡特性を測定した。図19は実際に測定した結果である。燃料電池もバックアップ電源として使用することを想定しており、過渡応答特性としてモデル化を行った。燃料電池は、交換膜を加熱しておく必要がある。今回は、コールドスタートとホットスタートの特性を測定したが、PEFC型は加熱温度が低いので起動時間はあまり影響を受けないこともわかった。

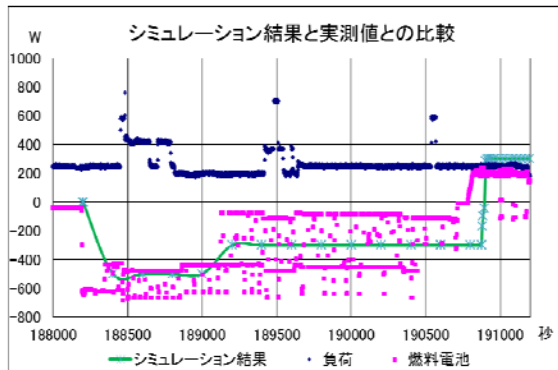


図19 燃料電池の計測結果とシミュレーション結果

九州電力の協力で、東長崎エコタウン構想区域内で電力需要データの測定を3カ所で行っている。電柱に測定器を取り付け、5軒〜10軒程度の家のデータを測定している。図20と図21は、測定地域と測定例を示している。

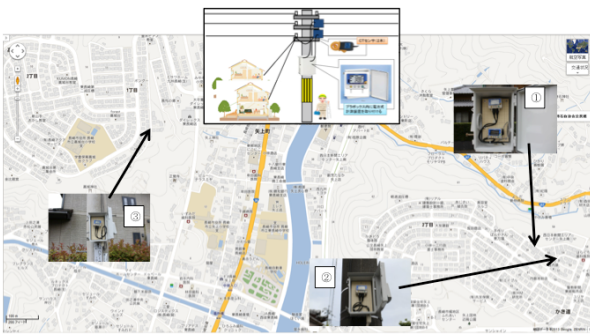


図20 東長崎エコタウン構想地域の需要電力測定

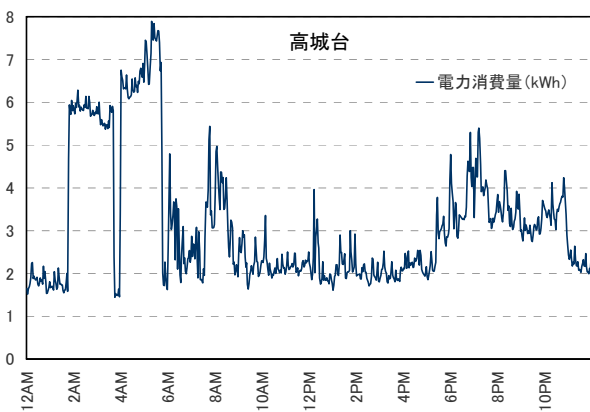


図21 24時間需要電力測定結果

5 これから期待される研究

現在、世界中で再生可能エネルギーを使ったスマートグリッドの研究・実証事業が行われている。一方、国内では太陽光や風力発電の再生可能エネルギーを含めた電力供給信頼度のシミュレーション研究が行われている。特に、短絡や系統喪失などの突然の擾乱を考えない信頼度をアデカシーと呼び、国全体や離島等の孤立した地域での電源アデカシーの研究が盛んに行われている。国家レベルでは、電力系統利用協議会を中心として、電力中央研究所が開発した STREAM に太陽光と風力発電の供給力を確率分布として組み込み拡張し、電源アデカシーの調査を行っている。これらの解析では、モンテカルロシミュレーションを実施し、電力不足確率 (LOLP) 等を算出し、電源アデカシーを求めている。風速の分布は、ワイブル分布で示され、特定の時間帯に強くなることはない。しかしながら、太陽光発電は時間や雲の動きに左右されるため確率分布的に取り扱うことが難しく、年間を通した評価方法が確立していない。緑の知の拠点事業では、Erbs モデルを改良して特定の設置場所での傾斜日射量を高精度でモデル化を行い、太陽光発電量を高精度で計算できることを確認した。しかし、薄雲等の影響、気象の変化には対応することはできないこともわかった。日本気象協会では、数値気象予測モデル (SYNFOS-3D) を開発、改良を重ね、薄雲の影響も数値表現できるようになってきている。しかし、1時間毎に33時間先までの予測しかできず、年間を通したシミュレーションには適用できない。

また、メガソーラーや風力発電所の建設に伴い、送電容量の不足が深刻になりつつある。このため、地域レベルで電力融通可能な自立したマイクログリッドの研究が重要になってきている。現在、離島等の電力的孤立地域では、太陽光発電、風力発電と巨大な蓄電池システムによるマイクログリッドの実証研究が行われているが、適正な蓄電池のサイズはよくわからず、ディーゼルエンジン等のバックアップ電源に頼った電源システムとなっている。しかしながら、離島など燃料の供給リスクのある地域においては、エネルギーリソースとして当該地域の自然エネルギーを100%利用できることが望ましい。

近年、潮流 (潮汐) 発電やマイクロ水力発電は、天候に左右されない安定なエネルギーとして注目されている。緑の知の拠点事業では、潮流発電をモデル化し、発電量の予

測を行ってきた。しかし、潮流発電でメガワットクラスの発電を行うためには水深 25m 以上が必要となり、設置場所も限られ漁業権等の問題や送電線敷設の問題も発生している。緑の知の拠点事業で行った翼長 2m クラスのマイクロ潮流発電 (100kW 以下) は、それほど場所を選ばず設置可能で、多数設置すればマイクログリッドのベース電力としての可能性があるものと考えられる。しかし、マイクログリッド内での需要に対する太陽光パネルの設置台数や風力発電装置の設置台数など不確定なパラメータが多く、ベース電源としてどの程度の数のマイクロ潮流発電 (マイクロ水力等) を設置すれば、どの程度の電源アデカシーがあるか全くわからない。また、このような研究は、世界的に見てもまだ行われていない。

緑の知の拠点事業で開発した太陽光発電モデルをさらに拡張すれば、設置場所近傍の過去の統計からその日の天候や雲率を確率的に発生させ年間を通じたシミュレーションを可能にすることができる。特定地域内において、マイクロ潮流発電 (100kW 以下) をベース電源とした太陽光と風力発電、蓄電池等を用いて年間を通じたシミュレーション、エミュレーションを実施し、発電容量最小で電源アデカシーを確保する LOLP 最小条件の評価方法 (評価関数) を見出すこともできる。具体的対象地域としては、電力需要データが入手可能なハウステンボス、長崎総合科学大学キャンパス、九州電力の協力で実施している東長崎エコタウン構想地域の家庭データ等を利用することができる。規模と形態が異なる電力需要に対し、評価方法の一般性とスケラビリティについて研究し、マイクログリッド内での電源アデカシーを明らかにすれば、一般性を導き出すこともできる。

太陽光発電の 2 日先程度の予測モデルは、現在もたくさん研究がなされている。本研究により、潮流発電をベース電源としたマイクログリッドだけではなく、太陽光発電と蓄電池のみのシステムに対しても、需要データを基にした年間予測が可能となる。

エネルギー管理システム (EMS) は、環境条件によりリアルタイムで変化するので、MATLAB/Simulink のシミュレーションができない。緑の知で開発したエミュレータを使えば、収集したセンサデータなどを用いて、繰り返しエミュレーションすることが可能になり、最適な EMS アルゴリズムの知見を得ることができる。

また、従来、電源システムや EMS の構築は、シミュレーションや計算にだけ頼っていたが、このシステムを活用して入念なシミュレーションやエミュレーションをシームレスに実施でき、最適なシステムの構築が可能となる。さらに、本研究で得られた成果は、変動する小水力発電等をベース電源とした、スマートグリッドやマイクログリッドの設計のための基礎的知見を与えることもできる。

さらに、緑の知の拠点事業で開発したエミュレータをこれまでの知見と共に公開すれば、新しいエネルギーデバイスの開発にも繋がる可能性がある。

6 まとめ

我々は、シミュレーションとエミュレーション技術を用いて、潮流発電やバイオマス発電などの再生可能エネルギーのスマートグリッド内での利用の可能性を示し、再生可能エネルギー実用化のスピードアップを図るための学内マイクログリッドを構築した。このシステムでは、あらゆる場所の負荷パターンを用いたマイクログリッドシミュレーション・エミュレーションをシームレスに行うことができ、今後は東長崎エコタウン構想などのスマートコミュニティ普及のための「緑の知の拠点」としての役割を果たす予定である。そして、これらの成果が、日本のエネルギー政策のよりどころになることを期待している。

7 メンバー構成

研究開発代表	田中義人 教授
モデル化リーダー	日當明男 教授
モデル化担当	岸川忠弘 非常勤研究員
電気系モデル化	池田雅博 教授
燃料電池モデル化	田中僚 助教
太陽電池パネルモデル化	清山浩司 准教授
太陽電池パネルモデル化	水野裕志 講師
アドバイザー	田中昭雄 客員教授
EMS リーダー	下島真 教授
EMS 担当	蒲原新一 講師
EMS 担当(ユーザビリティ)	田中俊彦 教授
HTB 連携	斉藤参郎 客員教授
アドバイザー	中村良道 客員教授
アドバイザー	有馬仁志 客員教授
アドバイザー	江藤春日 客員教授

アドバイザー	鈴木高宏 客員教授
潮流発電リーダー	林田滋 教授
シミュレーション	松尾博志 非常勤研究員
HTB 連携	池上国広 教授
バイオマス発電リーダー	平子 廉 教授
アドバイザー	村上信明 特命教授
リチウムイオン電池リーダー	山邊時雄 特命教授
負極性能評価	杉田 勝 客員教授
正極性能評価	芳尾真幸 客員教授

参考文献

- [1] Erbs, D.G., S.A. Klein, J.A. Duffie, "Estimation of the Diffuse Radiation Fraction for Hourly, Daily and Monthly Average Global Radiation, Solar Energy," Vol.28, No.4, pp.293-302 (1982)
- [2] Y.Mizuno, et al. "Evaluation and Verification of an Intelligent Control System with Modelling of Green Energy Devices by Constructing a Micro-Grid System in University Campus (reportI)", International Conference on Renewable Energy Research and Application(2012)
- [3] Y.Mizuno, et al. "Evaluation and Verification of an Intelligent Control System with Modelling of Green Energy Devices by Constructing a Micro-Grid System in University Campus (reportII)", International Conference on Renewable Energy Research and Application (2013).
- [4] RadwaSayed, Y. G. Hegazy, "Modeling of Photovoltaic Based Power Station for Reliability Studies Using Markov Chains", ICRERA2013, No.241, Oct.2013.
- [5] R. M. Moharil, and P. S. kulkarni, Reliability analysis of solar photovoltaic system using hourly mean solar radiation data, Solar Energy, Vol.84, No.4, pp.691-702, Jan.2010.
- [6] RajeshKarki, and Roy Billinton, Reliability/Cost of PV and wind energy utilization in small isolated power systems, IEEE trans. Energy Convers., vol.16, No.4, pp.368-373, Dec.2001.
- [7] 平成21年度電力系統関連設備形成等調査、低炭素社会に向けた今後の我が国の連系システムの在り方に資する調査、一般社団法人 電力系統利用協議会、平成22年3月
- [8] H.Kagigano et.al, "DC Voltage Control of the DC Micro-grid for Super High Quality Distribution", Power Conversion Conference - Nagoya, 2007. PCC '07
- [9] Lee, J., et.al, "DC micro-grid operational analysis with detailed simulation model for distributed generation", Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010
- [10] Lee, J., Han, B., Choi, N., Myongji university Korea, "DC micro-grid operational analysis with detailed simulation model for distributed generation", Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010
- [11] XiongLui et.al. , "A Hybrid AC/DC Microgrid and Its Coordination Control", IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, VOL. 2, NO. 2 pp. 278-286, JUNE 2011
- [12] Guerrero, J.M., Vasquez, J.C., Matas, J., de Vicuna, L.G., Castilla, M. Xiong Lu, "Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids—A General Approach Toward Standardization", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 58, NO. 1, JANUARY 2011, 158-172
- [13] A Tani, M.B. Camara, B. Dkyo, "Energy management in the Decentralized Generation Systems based on Renewable Energy Sources", ICRERA 2012, Dec. Japan
- [14] O. Tremblay, L. A. Dessaint, and A. I. Dekkiche, "A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles," in *Proc. IEEE Veh. Power Propulsion Conf. (VPPC 2007)*, pp. 284–289.
- [15] K. H. Chao, C. J. Li, and S. H. Ho, "Modeling and fault simulation of photovoltaic generation systems using circuit-based model," in *Proc. IEEE Int. Conf. Sustainable Energy Technol.*, Nov. 2008, pp. 290–294.
- [16] PhatiphatThounthong, et.al, "Analysis of Supercapacitor as Second Source Based on Fuel Cell Power Generation, IEEE TRANS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 24, NO. 1, MARCH 2009 pp.247-245
- [17] M.B. Camara, B. Dkyo, et. al , "DC/DC Converter Design for Supercapacitor and Battery Power Management in Hybrid Vehicle Applications—Polynomial Control Strategy", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 57, NO. 2, FEBRUARY 2010 & ICRERA 2012
- [18] M.Uzunoglu et.al, "Modeling and Analysis of an FC/UC Hybrid Vehicular Power System Using a Novel-Wavelet-Based Load Sharing Algorithm IEEE TRANS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 23, NO. 1, MARCH 2008