

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「分散協調型エネルギー管理システム構築の
ための理論及び基盤技術の創出と融合展開」
研究課題「マルチエネルギーシステムの
動的解析技術」

研究終了報告書

研究期間 平成24年10月～平成27年3月

研究代表者：薄 良彦
(京都大学大学院工学研究科，講師)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

本研究の目的は、多様なエネルギー形態を供給する「マルチエネルギーシステム」(図 1-1)の動的特性に関する解析技術と数理モデリング技術の開発である。多様なエネルギー形態のマネジメントに関わる理論及び基盤技術の確立は、低炭素社会の実現に向けた多様なエネルギー源の最大活用、小容量分散エネルギー源と従来システムとの調和、緊急時も含めたエネルギーシステムの安定性の確保等、様々な社会的課題の解決のベースとなる。本研究では、それらの課題の解決に向けて、マルチエネルギーシステムの動的特性---安定性、信頼性、安全性---の評価技術、動的特性の評価及びエネルギーマネジメントシステム(EMS)構築のための数理モデリング技術の開発に取り組んだ。特に、エネルギーシステムで得られるセンシングデータをどのように動的特性の解析に活用するかという「データ駆動型」のアイデアを中心に研究を進めた。なお、本チームは研究代表者の単独グループで構成されるため、下記全ての成果は研究代表者のグループで得られたものである。

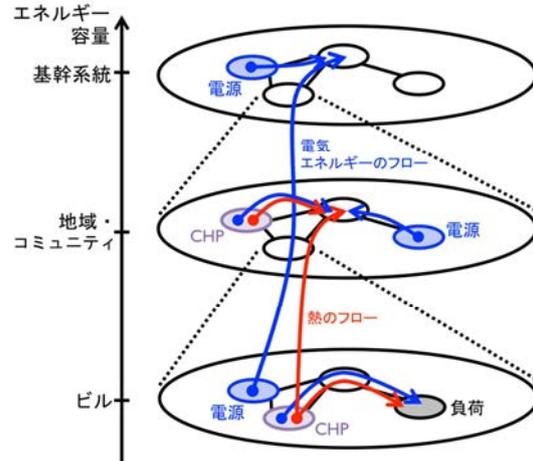


図 1-1: マルチエネルギーシステム。複数のエネルギー形態（本図では電気エネルギー及び熱）の需給管理の対象となる物理システムをエネルギーの流れも含めて示す。

本研究の主な実施内容及び得られた成果を「解析技術」及び「数理モデリング技術」に分けて説明する。

解析技術

- エネルギーシステムの動的特性診断をセンシングデータから実行する技術を検討した。クープマンモード解析と呼ばれる非線形時系列解析法を用いて、エネルギーシステムで得られたデータから数理モデルを介することなくシステムの安定性を診断する技術を新たに提案し、2011年米国アリゾナ・南カリフォルニア及び2006年欧州で発生した波及的故障データへの適用により、提案技術の有効性を示した。
- 続いて、エネルギー供給ネットワークの解析方法について検討した。本検討においてもクープマンモード解析を利用し、ダイナミクスを含むセンシングデータからネットワークのクラスター構造(分割)を同定する方法を新たに提案し、送電ネットワークへの適用により、提案方法の有効性を示した。また、上述2点の成果の汎用化に向けてクープマンモード解析に関するソフトウェアの整備を行った。

数理モデリング技術

- 地域熱供給システムや統合化 BEMS, スマートシティ等を念頭に、地域規模マルチエネルギーマネジメントのための数理モデルを検討した。特に、安定性などの動的特性の評価のためにシステムに生起するダイナミクスに着目し、電気エネルギー及び熱供給に関する統合数理モデルを新たに開発した。本モデルにより、複数のコージェネレーションの協調運用による電気エネルギー及び熱供給の統合マネジメントの可能性を示した。
- さらに、実証プロジェクトとの連携として、建物内エネルギー環境の高解像度モニタリングについてセンシングデータと数理モデルの融合という観点から検討した。実際のオフィス向け建物に対して、時空間に高解像度で得られる人占有センシングデータと熱分布ダイナミクスの数理モデルを融合することにより、室内温度分布の高解像度モニタリングの具体的方法を示した。

以上、本研究では、解析技術及び数理モデリング技術に関する研究開発に取り組み、多様なエネルギー形態を対象とする分散協調型 EMS の構築に向けた要素技術を検討した。特に、データ駆動型のアイデアを中心に、センシングや予測技術、制御技術、情報処理技術等と親和性の高い技術及び方法を提案した。

(2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

1. 地域エネルギー供給システムの統合数理モデル

地域熱供給システムや統合化 BEMS, スマートシティ等を念頭に、地域規模マルチエネルギーマネジメントのための統合数理モデルを開発した。国内外においては定常特性に着目した数理モデルの開発と EMS 設計への適用が進められてきた。一方、本研究では安定性などの動的特性の評価のためにシステムに生起するダイナミクスに着目し、電気エネルギー及び熱供給に関する統合数理モデルの開発を行い、成果を学術論文誌及び国際会議で発表した。本成果は、モデルに基づくシステム設計や制御などに適用可能であり、多様なエネルギー形態を対象とした分散協調型 EMS の開発及び運用のベースとなるものである。

2. エネルギー供給ネットワークのデータ駆動型解析

電気に関わる送電ネットワークやガスに関わるパイプラインネットワークに代表される様に、多くのエネルギーシステムはネットワーク構造を有し、ネットワーク構造とシステムに生起するダイナミクスには密接な関係にある。本研究では、ダイナミクスの情報を含むセンシングデータからエネルギー供給ネットワークのクラスター構造(分割)を同定する方法をクープマンモード解析に基づき提案し、スマートグリッド技術に関わる国際会議において成果発表を行った。本方法はデータ駆動型アプローチであり、センシングデータに基づくエネルギーシステムの状態監視技術のベースとなるものである。

<科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

1. クープマンモード解析によるエネルギーシステムのデータ駆動型診断技術

本研究では、エネルギーシステムの安定性診断をセンシングデータから実行する技術をクープマンモード解析に基づき開発した。従来診断技術の多くは数理モデルに基づく方法論であるのに対して、本研究では、エネルギーシステムで得られたデータから数理モデルを介することなくシステムの安定性を直接診断する技術を提案し、2011年米国アリゾナ・南カリフォルニア及び 2006 年欧州で発生した波及的故障データへの適用により、提案技術の有効性を示した。本成果は学術論文誌に掲載されるとともに、代表者の所属機関及び科学技術振興機構のプレスリリースとして発表され、注目を集めた。本技術は、センシングデータに基づく診断技術という分散協調型 EMS に必須の機能を提供するものであり、今後の社会実装が期待できる。

2. 建物内エネルギー環境のデータ駆動型モニタリング方法

建物(ビルディング)は多様なエネルギー形態を対象とするエネルギーシステムであり、その管理に関わるシステムは BEMS と呼ばれ、国内外で研究開発が進められている。本研究では、建物内エネルギー環境の高解像度モニタリングの方法論をセンシングデータと数理モデルの融合という観点から検討した。実際のオフィス向け建物に対して、高解像度人占有データと熱分布ダイナミクスの数理モデルを融合したモニタリング方法を具体的に示した。本成果は BEMS におけるセンシングデータの利活用に新たな方向性を示したものであり、空調制御への適用による低エネルギー消費化や Quality-of-Life (QoL) の向上等の課題解決に貢献するものである。

§ 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

①「薄」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
薄 良彦	京都大学 大学院工学研究科	講師	H24.10～
引原 隆士	同上	教授	H24.10～
John Koo	Hong Kong Applied Science and Technology Research Institute	Director	H24.10～
Igor Mezic	University of California, Santa Barbara	Professor	H24.10～
Bryan Eisenhower	University of California, Santa Barbara	Associate Researcher	H24.10～

研究項目

- ・ マルチエネルギーシステムの動的解析技術

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

国外からの研究参加者とは以前からのコラボレーションを継続し、本チームの研究課題に取り組んだ。研究チーム外の連携や協働として以下が挙げられる。

- **FS 第 1 フェーズ**及び**第 2 フェーズ**の活動として、藤崎チーム及び上田チームと洋上風力発電に関わる**EMS**の融合研究、及びこれを発展させたディペンダブル**EMS**に関する融合研究を実施した。
- **FS 第 1 フェーズ**の活動として、原チーム及び井村チームと地域統合エネルギー管理システムの融合研究を実施した。

§ 3 研究実施内容及び成果

3.1 マルチエネルギーシステムの動的解析技術(京都大学 薄グループ)

(1)研究実施内容及び成果

本研究では、マルチエネルギーシステムの動的特性---安定性, 信頼性, 安全性---の評価技術, 動的特性の評価及び EMS 構築のための数理モデリング技術の開発に取り組んだ. 特に, センシング技術や情報通信技術の進展により, エネルギーシステムにおいて最近利用可能になってきた時空間変動データをどのように動的特性の解析に活用するのかという「データ駆動型」のアイデアを中心に研究を進めた. 実施方法としては, 本チームが単独グループで小規模であることを踏まえて, 研究代表者がコアとなり各研究参加者と個別のコラボレーションを行い, 研究課題に取り組んだ.

本研究の実施内容及び得られた成果を「解析技術」及び「数理モデリング技術」に分けて下記に要約する. あわせて, 成果の当該分野における位置づけや類似研究との比較について言及する. なお, 括弧[*]は § 6 の成果発表における文献番号を表す. 本研究の構想及び成果の一部を解説記事として纏めるとともに[8], 本成果の概要を招待講演も含めて代表者が国内外で口頭発表を行った[9,10,11,12,13,23].

解析技術

(1-a) クープマンモード解析によるエネルギーシステムのデータ駆動型診断技術

本研究では, エネルギーシステムのセンシングデータに基づいて動的特性を診断する技術を検討した. 再生可能エネルギー源導入の 1 つの問題点として出力変動の不確定性は周知である. 通常, 出力不確定性は予測技術と関連付けて議論され, システム運用の観点から考慮される. 一方, 安定性などの動的特性診断においては不確定性の数理モデル化が問題となる. 安定性診断に対するエネルギー関数法のように, 従来の伝統的な診断技術はモデルベースの方法論を採用しており, 不確定性の精緻なモデル化が困難な場合に診断結果の精度が問題となる可能性がある. また, 本研究チームで扱うマルチエネルギーシステムでは, 多様な物理現象を同時に数理モデル化することになるため, 得られたモデルが複雑になることが想定され, 解析も容易ではない. 以上より, 再生可能エネルギー源を含むマルチエネルギーシステムの動的特性をそのメカニズムも含めてセンシングデータから直接診断する方法論を確立することは必要であり, エネルギー形態に限定されない汎用性を診断技術に付加できる.

本研究では, クープマンモード解析と呼ばれる非線形時系列解析法を用いて, エネルギーシステムで実測されたデータから数理モデルを介することなくシステムの安定性を診断する技術を新たに提案し, 2011年米国アリゾナ・南カリフォルニア及び 2006 年欧州で発生した波及的故障データへの適用を通して, 提案技術の有効性を示した[2,15,16,17]. クープマンモード解析とは, 力学系理論で用いられる(線形・無限次元)クープマン作用素の固有値に由来する方法であり, 複雑な振る舞いの時系列データをクープマンモードと呼ぶ複数の単一周波数時系列に分解する方法である(文献としては I. Mezic, *Nonlinear Dyn.*, vol.41, pp.309-325, 2005; C.W. Rowley, I. Mezic *et al.*, *J. Fluid Mech.*, vol.641, pp.115-127, 2009). 本解析は流体やビルディングなどの応用分野において利用されるとともに, 研究代表者及び参加者(Igor Mezic 教授)により電力システム解析に適用されてきた[6].

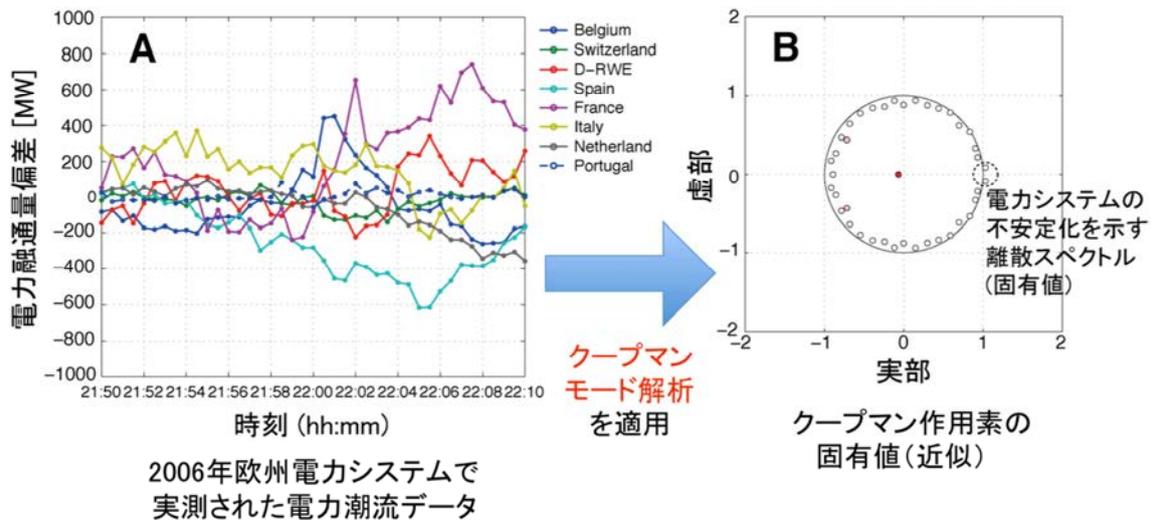


図 4-1: クープマンモード解析によるデータ駆動型安定性診断[2]. 2006 年に欧州電力システムで発生した大規模故障時の電力潮流データへの適用例を示している. 時系列データからシステムの動的特性により定まるクープマン作用素の固有値を近似的に計算し, 固有値の分布を評価することによりシステムの安定性を診断する.

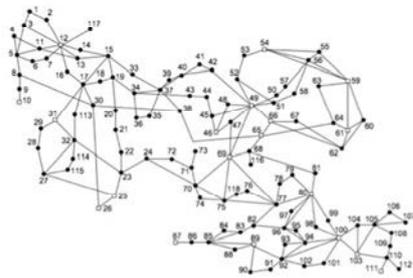
図 3-1 は, 本研究で提案した技術を 2006 年に欧州電力システムで発生した大規模故障時の電力潮流データに適用した結果を示している. 図 3-1A は欧州電力システムの 8 地域の電力融通量偏差(実際の電力融通量と当初計画された融通量との差)の時系列データであり, 電力融通量の複雑な時間変動を示している. 図 3-1A の時系列データに本技術を適用することにより, 電力融通量偏差が発散傾向を有し, 電力システムの安定性が失われていることが明らかになった. 図 3-1B は図 3-1A の時系列データから得られたクープマン作用素の固有値(の近似)であり, 単位円の外側にある固有値は時系列が発散傾向(電力システムが不安定)となる証拠である. なお, 図 3-1A の時系列データ直後の時刻に行った変電所制御により, 欧州電力システムでは故障の波及的伝搬が発生し, 最終的に欧州電力システムは 3 地域に分断される結果となった. 上記の適用結果は, 力学系理論に基づく本技術によりセンシングデータに基づく安定性診断が可能であることを示すものである. なお, 学術論文[2]では, 2011 年アリゾナ・南カリフォルニアで発生した大規模故障時の電力潮流データに対しても本技術を適用し, 複雑な電力潮流の時間変化と故障の波及的伝搬との関係を明らかにしている.

本成果については, 代表者の所属機関(京都大学)及び科学技術振興機構のプレスリリースとして発表され, 複数の新聞報道により注目されるとともに(§ 6(5)を参照), 電力系技術雑誌にも解説記事が掲載された[7]. 本技術は, 実測データに基づく診断技術という分散協調型 EMS に必要な機能を提供するものである.

(1-b) クープマンモード解析によるエネルギー供給ネットワークのデータ駆動型解析

次に, 本研究ではネットワーク構造を有するエネルギーシステムのデータ駆動型解析について検討を進めた. 電力輸送を目的とした送配電ネットワーク, 地域熱供給における蒸気配管ネットワーク, ガス供給を目的としたパイプラインネットワークのように, 多くのエネルギーシステムはネットワーク構造を有しており, ネットワーク構造とシステムに生起するダイナミクスとが密接な関係にあることが知られている. 最近ではネットワーク構造を有する動的システム(ネットワーク化システム)の制御というトピックスとして, 所望のダイナミクスを実現するためのネットワークの設計が, 制御とグラフ理論の融合として研究されている. ここで, ノードに設置されたセンサ出力よりネットワーク化システムの構造---クラスター(類似の振る舞いを呈するノードの集合), ノード間の接続トポロジー, 次数---を同定する方法論は様々な応用分野において意義を有する. 特に, (1-a)と同じ方向性として, エネルギーシステムに対してはセンシングデータに基づく状態監視という EMS に必要な機能の実現につながる.

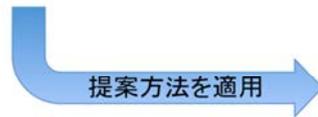
(例) IEEE-118母線系統モデル



1. 母線電圧位相の時間変動データを入手
2. 時間変動データをクープマンモードへ分解

$$\theta[k] = \sum_{j=1}^{\infty} \lambda_j^k \mathbf{V}_j$$

3. クープマンモードベクトルからコヒーレントに動揺する母線をクラスタリング



時空間変動データから
グラフ的性質及びダイナミクスを
考慮したネットワーク分割を同定

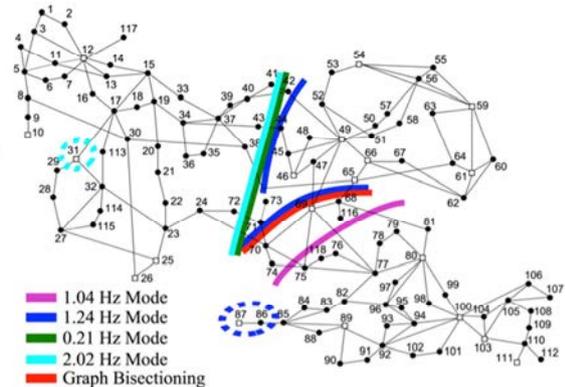


図 3-2: クープマンモード解析による送電ネットワークのデータ駆動型解析. ネットワークに生起する時空間ダイナミクスのデータからクープマンモードを算出することによりネットワークのクラスター構造(分割)を同定する. 右下の適用結果において, ---Hz Mode は本方法により得られたネットワークの分割であり, それぞれのモードの動揺周波数に対して母線のクラスター(類似の振る舞いをするノードの集合)を決定した結果である. Graph Bisectioning はグラフラプラシアンから導かれるネットワーク分割である.

本研究では, (1-a)と同様にクープマンモード解析を利用し, 時空間変動データからエネルギー供給ネットワークのクラスター構造(分割)を同定する方法を新たに提案し, 送電ネットワークへの適用検討を通して, 提案方法の有効性を示した[1,18]. 図 3-2 に IEEE 118 母線系統モデルに適用した具体例を示す. 電力システムでは, GPS 技術を用いたフェーズ計測装置 (Phasor Measurement Unit) を分散配置することにより, 送配電ネットワークにおける電圧位相の時空間変動データが近年入手可能になっている. このことを踏まえて, 母線電圧位相の実測データにクープマンモード解析を適用した. 本適用では, 多数算出されるクープマンモードの中から着目するモード(動揺周波数)に基づいて母線のクラスターを決定し, ネットワークの分割を与えるものである. 特に, 着目するクープマンモードにより, グラフ理論から導かれる分割(グラフラプラシアンの第 2 固有ベクトル (Fiedler Vector) に基づく分割)や類似手法である Slow-Coherency に基づく分割が得られる等, 従来の分割同定法を包含したデータ駆動型解析方法を提案することができた.

さらに, (1-a)及び(1-b)の成果の汎用化に向けてクープマンモード解析に関するソフトウェアの整備を行った. クープマンモードをデータから算出する方法には 2 種類があり, 離散 Fourier 変換と類似の公式を用いる方法と Arnoldi アルゴリズムを発展させた方法がある[6]. 後者の方法はクープマンモードに加えて周波数も合わせて算出可能であるため有用であり, 上述の検討に用いてきた. 本研究では, 後者のアルゴリズムを数値解析ソフトウェア MATLAB の関数 (M-function) として実装し, 上述の技術及び方法が EMS 構築研究において汎用的に利用可能になるように整備を進めた.

(1-c) RRT アルゴリズムによるエネルギーシステムのモデルベース診断

次に, 本研究ではエネルギーシステムの信頼性・安全性診断のモデルベース診断についても検討を進めた. 信頼性・安全性は EMS の確保すべき動的性質である. 信頼性において, 擾乱の発生した場合にエネルギー供給が継続できるか否かを表す概念として「セキュリティ」があり, 1 つの設備がフェイルする場合を対象とした「N-1 セキュリティ」が評価基準として用いられている. また, 安全性は Safety-Critical なシステムの動作検証と密接に関連しており, 対象とする動的システムの可

到達性 (Reachability)として評価されている。両者いずれにおいてもダイナミクスに関わる診断を行う場合、動的システムの状態空間を解析する必要があり、連続値状態変数を有するシステムを扱う場合に計算論的問題(可到達性解析に関わる決定可能性 (Decidability))が不可避である。(1-a)で述べたように、本研究チームで扱うマルチエネルギーシステムでは数理モデル自体が複雑になることから、従来とは異なる方法論とツールの開発が求められる。

本研究では、信頼性(セキュリティ)・安全性のモデルベース診断への RRT (Rapidly-exploring Random Tree)アルゴリズムの適用を検討した[26]。本アルゴリズムは動的システムの状態空間において確率的サンプリングを用いる方法であり、ロボットの行動計画に対して当初提案され、幅広く利用されてきた(文献としては S.M. LaValle, Rapidly-exploring Random Trees: A New Tool for Path Planning, Department of Computer Science, Iowa State University, 1998)。確率的サンプリングを採用することにより、厳密な信頼性・安全性の診断を行うことは叶わないが、連続値状態変数を扱うことによる計算論的問題を回避できる可能性がある。本研究では、いくつかの適用例により信頼性・安全性診断を確率的に実行する可能性を示した。本方法では、信頼性維持を目的とした制御ロジックを決定することができるため、モデルベース解析から制御へと展開することが可能である。

(1-d) 多分解能データの利用に向けた電力システムの階層的安定性診断

さらに、本 CREST 研究領域内の原辰次教授チームとの融合研究として、電力システムの安定性に関する階層的診断を検討した。洋上ウインドファームやメガソーラーのような大規模な再生可能エネルギー源が導入された電力システムにおいて、安定性の確保は EMS に求められる基本的機能である。従来の化石燃料ベースの発電プラントと異なり、再生可能エネルギーの出力変動には不確定性が不可避であることから、安定性の診断及び制御において出力変動を陽に考慮した方法論が求められる。(1-a)でも言及したように、従来の安定性診断技術はモデルベースであり、出力変動を必ずしも陽に考慮できるものではない。ここで、出力変動に関する利用可能なデータとして、個々の電源における出力が実測データとして得られる一方、システム全体の出力分布は予測データとして得られることに着目する。前者のデータは高い時間分解能を有するものの(空間的に局在化しているという意味で)ローカルな情報を含む。一方、後者は低い時間分解能であるものの(空間的に粗野に得られるという意味で)グローバルな情報を含んでいる。このような多分解能性を有するデータを安定性診断に活用するために、本研究ではローカルとグローバルという階層性をふまえた電力システムの安定条件を新たに導出した。具体的には、回転機(発電機又は電動機)の運動を記述するモデルに対して、図 3-3 のように個々の発電機の速い運動とシステム全体の遅い平均運動を階層的に表現する等価なモデルを導出した上で、個々の回転機の運動に関わる安定条件とシステム全体の平均運動に関わる安定条件をそれぞれ導出することにより、システムの安定性を分散的に診断する可能性を示した。ローカルな安定条件には出力実測データを利用し、グローバルな条件には出力予測データを利用することを想定している。洋上ウインドファームやメガソーラーを含む電力システムに対する適用が今後期待できる。

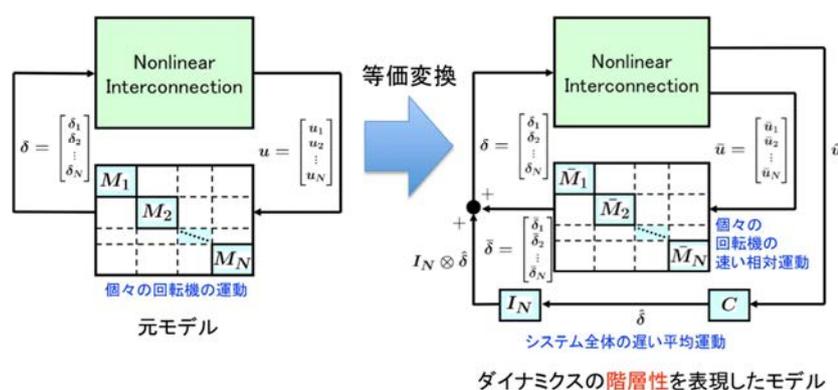


図 3-3: 電力システムに生起するダイナミクスの階層的表現. 左の N 機の回転機に対する元モデルより等価な右のモデルを導出する. N 機の回転機の速い相対運動とシステム全体の遅い平均運動との関係を陽に表現している. 本研究では上記の階層的表現に基づいてシステムの安定条件を導出した。

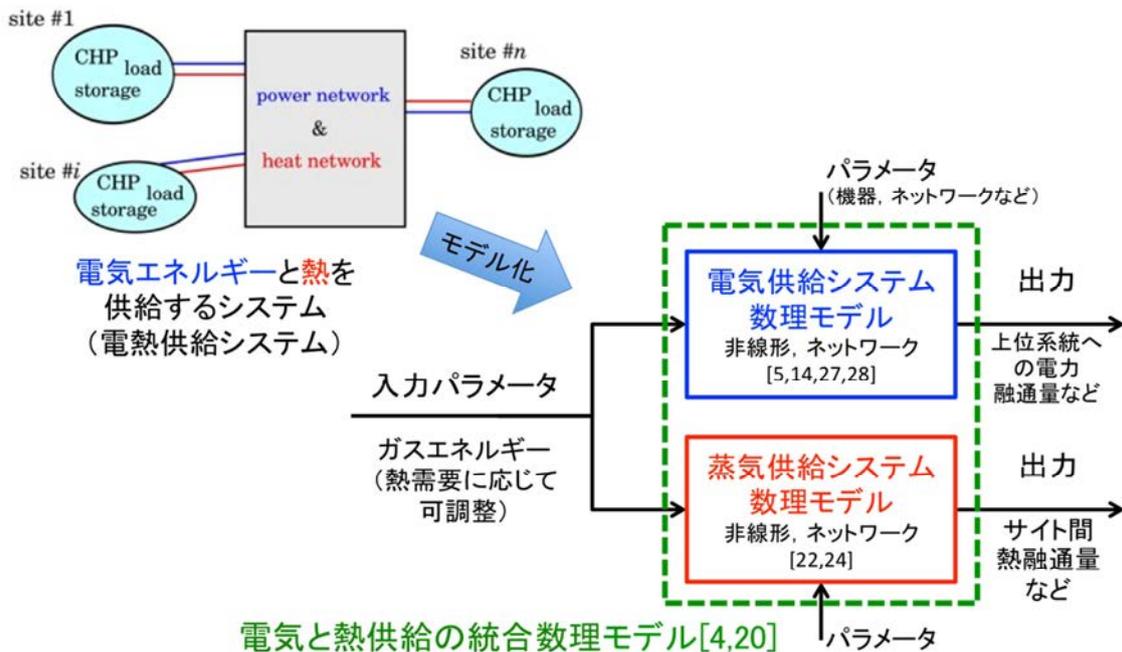


図 3-4: 電気及び熱を供給するシステム---電熱供給システム---に対する統合数理モデル. コージェネレーションプラント (CHP), 負荷, 蓄エネルギー装置から構成されるサイトが電気及び熱ネットワークを介して複数連系したシステムに対して, 電気供給, 蒸気供給システムのダイナミクスを表す数理モデルを導出した.

(成果発表) 小島 千昭, 薄 良彦, 津村 幸治, 原 辰次, 集団動揺ダイナミクスを呈する電力ネットワークの階層的安定条件, 信学技報, vol.114, no.348, NLP2014-108, pp.51-56, 2014年12月; ---, 大規模電力ネットワークの階層的過渡安定条件, 計測自動制御学会 第2回制御部門マルチシンポジウム, 階層・大規模システム1, 東京電機大学, 2015年3月.

数理モデリング技術

(1-e) 地域エネルギー供給システムの統合数理モデル

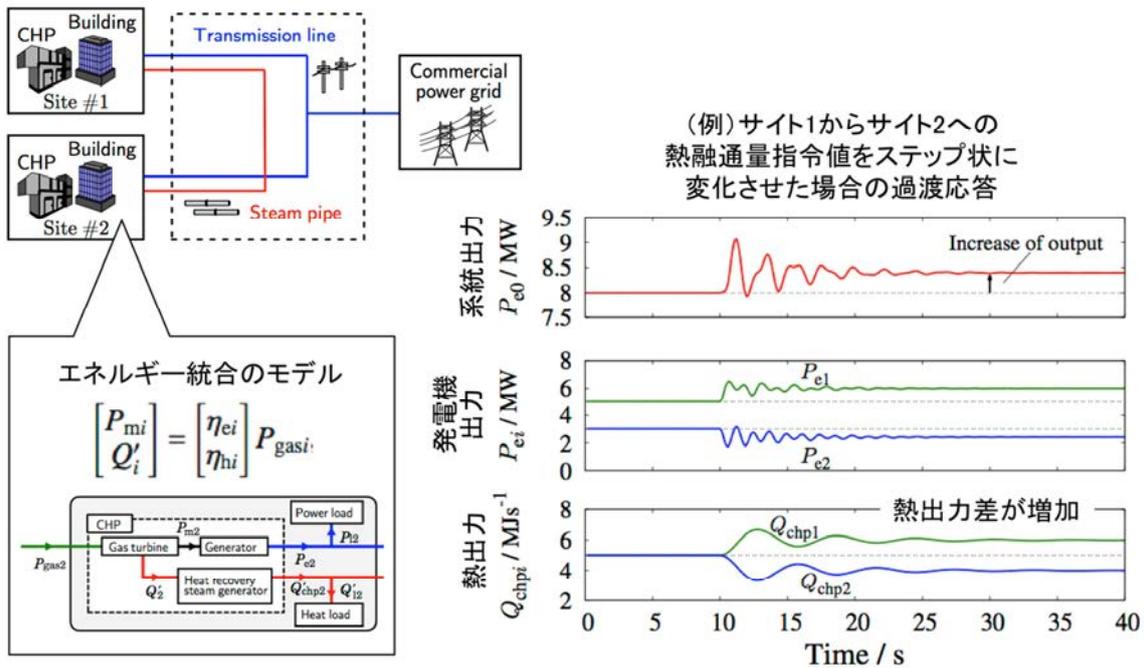
本研究では, 地域規模マルチエネルギーマネジメントのための数理モデルを検討した. 地域熱供給システムや統合化 BEMS, スマートシティのように, 図 1-1 の中間規模に相当する地域・コミュニティにおいて多様なエネルギー形態を対象とする EMS (以下では地域 EMS と呼ぶ) のプロジェクトが複数展開されてきた. このようなプロジェクトでは通常の (定常的な) 需給管理の方法論が主に検討されており, 省エネルギー性や経済性などが EMS 構築の評価基準となっている. これらに加えて, 緊急時を含むエネルギーシステムの安定性のような動的性能の確保は EMS に要求される必須の機能であり, この機能の実現に向けてダイナミクスを表す数理モデルの開発が求められる.

本研究では, 地域レベルで電気エネルギー及び熱を供給する統合システムを対象に, 電気と熱供給の数理モデルを構築した [4,5,14,20,22,24,27,28]. システムに生起するダイナミクスの時間スケール及び地域 EMS に要求される制御仕様を踏まえて, 電気供給システム, 熱供給システム, それらを統合した電熱供給システムに生起するダイナミクスを各々明確にした上で, EMS 構築研究のための数理モデルとして整備した. 図 3-4 に整備した統合数理モデルの構成を示す. 以下に主な検討結果 3 点を説明する.

- 従来電力システムに対する解析・制御技術の電熱システムへの有効性 (及び適用限界) を明確にすることを目的として, 熱の需給管理が定常的である場合の電熱供給システムのダイナミクスを検討した [5,14,27,28]. 地域 EMS の対象として最小構成である 2 サイト電熱システム

図 3-5: 2 サイト地域電熱供給システムの統合数理モデルを用いた過渡応答シミュレーション [4]. サイト 1 からサイト 2 への熱融通量指令値をステップ状に変化させた場合, 各サイトのガス入力が増加することにより熱出力の差が生じて熱融通が実現する. 一方, ガス入力の変化が CHP を介して発電機に現れ, 2 サイトシステムの上位系統への出力電力が変化している様子が示されている.

2サイト電熱供給システム



(図 3-5)を取り上げ、発電機の同期運転に関わる数秒から数十秒オーダの時間応答、熱のサイト間融通、蓄熱槽の時間応答を表す数理モデルを提案した。本モデルは、従来電力システムの知見より任意のサイト数のシステムに拡張可能であり、汎用性を有している。本モデルの妥当性評価を進めることにより、エネルギー関数や潮流解析等の従来方法が、熱の需給管理が定常的な場合は電熱システム、特に電気供給システムの安定性などの解析に有効であることを示した。

- 続いて、蒸気供給による熱システムの数理モデルを検討した[22,24]。地域規模の蒸気による熱供給は複数の実用例が知られている。ここで、電気と熱に関わるダイナミクスの時間スケールを考慮すると、地域 EMS を検討するためには熱供給ダイナミクスのマルチスケール性を明らかにすることが必要となる。本研究では、蒸気供給ネットワークをグラフ理論的観点からモデル化することにより、蒸気供給システムの汎用数理モデルを提案した。本モデルを検討することにより、蒸気供給システムの安定運用はマルチスケール性に起因する法双曲型不変多様体の存在と安定性により決定されるという非線形力学系として興味深い結果を得た。本結果は、電気・熱の統合モデルを低次元化し EMS の設計に用いるための数学的根拠を与えるものである。
- 最後に、上記 2 点のモデルを統合することにより、電気と熱の統合数理モデルを構築した[4,20]。これにより、数秒から数十秒(数分)の時間スケールに関して、地域レベルで電気及び熱を需給管理するための数理モデルを整備できた。図 3-5 に 2 サイトシステムに対する過渡応答の数値シミュレーションの一例を示す。実際、本統合モデルを用いることにより、複数のコージェネレーションの協調運用による電気エネルギー及び熱供給の統合マネジメントの可能性を示した。

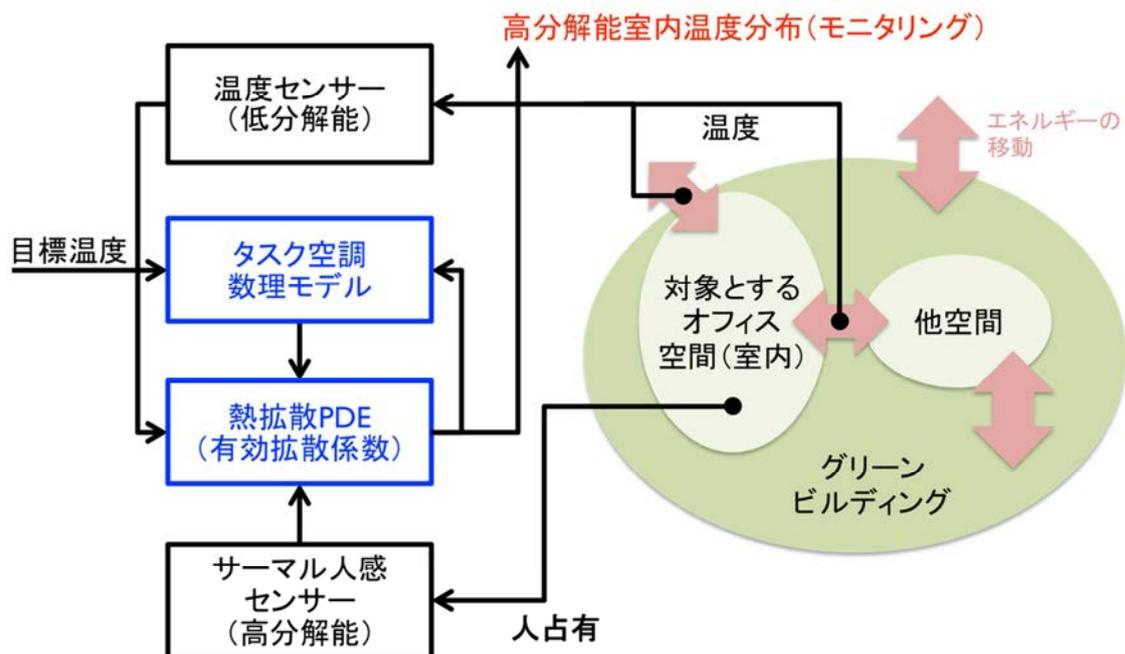


図 3-6: 建物内エネルギー環境のデータ駆動型モニタリング. 室内で得られるセンシングデータ (高解像度人占有, 外気温等) を数理モデルに組み込むことにより, センシングデータの解像度を越えた室内温度分布のモデリングを行う. 本研究では実測データとの比較により提案方法の有効性と可能性を示した.

(1-f) 建物内エネルギー環境のデータ駆動型モニタリング方法

次に, 本研究チームの実証プロジェクトとの連携として, 建物内エネルギー環境の高解像度モニタリングを検討した. 建物内エネルギー管理システム (Building EMS: BEMS) は, 電気, 熱, ガスなどの多様なエネルギー形態を対象とするため, 本研究チームの対象とするマルチエネルギーシステムの 1 つの具体例として見なされるとともに, EMS 構築において建物と人間とのインタラクションを検討する必要がある, EMS の中心的な研究対象である. BEMS については国内外に多くの研究報告や実証プロジェクトがある. その中で今日の課題として, BEMS で収集された膨大なデータ---ビッグデータ---をどのように管理に生かすのかについては検討の余地が依然大きく, エネルギーの見える化への利用を除いて十分に活用されているとは言い難い. 特に, エネルギー環境だけではなく人の活動に関するセンシングデータをどのように活用するかについては未だ多くのアプローチが提案されている段階である.

本研究では, 実際に運用下にあるオフィス向け建物を対象として, 時空間的に高解像度で得られる人占有センシングデータと熱分布ダイナミクスの数理モデルを融合した建物内エネルギー環境のモニタリングの具体的方法を提案した [19,21,25]. (1-d)と同じ方向性として, データを数理モデルに組み込むことにより, センシングの解像度を越えた室内温度分布の詳細なモデリングを行うことが可能になった. 図 3-6 に提案方法の概要を示す. 対象とするオフィス向け建物では, 室内温度の計測に加えて, 室内の人占有分布をサーマル人感センサーにより計測している. ここで得られる人占有データは高分解能であることを踏まえて, 本データを室内熱拡散モデルに組み込むことにより, センシングの解像度を越えた温度分布のモデリングを行い, 実測データとの比較により, 提案方法の有効性と可能性を示した. 本成果は BEMS におけるセンシングデータの利活用に新たな方向性を提示したものであり, 空調制御への適用による低エネルギー消費化や QoL の向上等の課題解決のベースになるものである.

(1-g) 洋上風力発電の大量導入を可能にする EMS 構築に向けた数理モデル

最後に, 上田チーム, 藤崎チームとの融合研究の一貫として, 洋上風力発電の大量導入に向けた EMS 構築に向けた数理モデルを検討した. 風況予測データの組み込みが可能で, かつ制御系設計のためのモデルを検討し, 誘導発電機のネットワークに対する結合力学系モデルを構築した

[3]. そして、数値計算及び解析的手法を用いて、誘導発電機ネットワークに生起する集団不安定性の発生メカニズムを明らかにした。

§ 4 成果発表等

(1)原著論文発表(国内(和文)誌1件, 国際(欧文)誌4件)

- [1] F. Raak, Y. Susuki, T. Hikihara, H.R. Chamorro, and M. Ghandhari, Partitioning power grids via nonlinear Koopman mode analysis, *Proceedings of the 5th IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT2014)*, Washington, DC, USA, February 19-22 (2014).
- [2] Y. Susuki and I. Mezic, Nonlinear Koopman modes and power system stability assessment without models, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.29, no.2, pp.899-907, March (2014).
- [3] Y. Susuki, H. Hoshino, T. Hikihara, and I. Mezic, Nonlinear instability of a network of fixed-speed induction generators, *Proceedings of the 13th European Control Conference (ECC2014)*, pp.1313-1318, Strasbourg, France, June 24-27 (2014).
- [4] H. Hoshino, Y. Susuki, and T. Hikihara, A nonlinear dynamical model of electricity and heat supply system, *Proceedings of the 2014 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2014)*, pp.482-485, Luzern, Switzerland, September 14-18 (2014).
- [5] 星野 光, 薄 良彦, 引原 隆士, 2 サイト地域電熱供給システムの安定性---熱融通指令値のステップ状変化に対する数値的検討, システム制御情報学会論文誌, vol.27, no.11, pp.452-460, November (2014).

(2)その他の著作物(総説, 書籍など)

- [6] 薄 良彦, 電力システムの動的解析技術---データから非線形ダイナミクスを理解する, シミュレーション, vol.32, no.3, pp.185-192, September 2013.
- [7] 薄 良彦, 分散協調型 EMS の実現に向けた大規模電力システムの安定性診断技術, 技術総合誌 OHM, vol.101, no.4, pp.41-43, April 2014.
- [8] 薄 良彦, スマートグリッドに向けたマルチエネルギーシステム技術の可能性, スマートグリッド, vol.4, no.3, pp.9-12, October 2014.

(3)国際学会発表及び主要な国内学会発表

①招待講演(国内会議1件, 国際会議3件)

(主要な国際会議への招待講演の前に * を付記してください)

- [9] * Y. Susuki, Analysis of multi-scale power grids, SICE Annual Conference 2013 (SICE2013), Tutorial Lecture on Smart Grid and Energy Saving Technology, Nagoya University, Japan, September 14 (2013).
- [10] * Y. Susuki, Analysis of multi-scale multi-energy systems, 52nd IEEE Conference on Decision and Control (CDC2013), Workshop on Cooperative Distributed Control for Energy Management Systems: New Frameworks and Research Directions, Palazzo del Congressi, Florence, Italy, December 9 (2013).
- [11] Y. Susuki, Applied nonlinear dynamics in energy systems technology, RIMS Conference/6th CREST-SBM International Conference on New Directions in Applied Dynamical Systems, Kyoto University, Japan, March 11 (2014).
- [12] 薄 良彦, 電力・エネルギーシステムにおける応用非線形ダイナミクス, 電子情報通信学会総合大会, チュートリアルセッション 情報通信ネットワークと非線形ダイナミクス AT-3-3, 新潟大学, 2014年3月19日.

②口頭発表(国内会議12件, 国際会議2件)

- [13] Y. Susuki (京都大), Analysis of multi-scale multi-energy systems, 計測自動制御学会

制御部門大会, CREST 特別企画 電力システムの新たな分散型管理を目指して, アクロス福岡, 2013 年 3 月 7 日.

- [14] 星野 光 (京都大), 地域電熱供給システムの力学モデルに対する数値的検討, 信学技報 非線形問題研究会, vol.113, no.15, NLP2013-4, pp.19-24, 中京大学, 2013 年 4 月 25 日.
- [15] Y. Susuki (京都大), Detecting unstable Koopman modes from power grid disturbance data, SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems (DS13), Snowbird Ski and Summer Resort, USA, May 19-23 (2013).
- [16] Y. Susuki (京都大), Stability assessment of power grids using Koopman mode analysis, 電気学会 電力・エネルギー部門大会, 安定度解析 148, 朱鷺メッセ, 2013 年 8 月 27 日.
- [17] Y. Susuki (京都大), Data-based stability assessment of power grids without models: Application of Koopman operator methods, 信学技報 非線形問題研究会, vol.113, no.341, NLP2013-118, pp.29-34, City University of Hong Kong, P.R. China, 2013 年 12 月 6 日.
- [18] F. Raak (京都大), Connecting graph and dynamic properties of power grids with spectrum of Koopman operator, システム制御情報学会 研究発表講演会, 応用ダイナミカルシステム 112-5, 京都テルサ, 2014 年 5 月 21 日.
- [19] 河野 洋平 (京都大), オフィス内室温分布の有効拡散係数を用いたモデル化, システム制御情報学会 研究発表講演会, システムデザインのための応用マルチスケールシミュレーション 223-5, 京都テルサ, 2014 年 5 月 22 日.
- [20] 星野 光 (京都大), 熱融通の動特性を考慮した地域電熱供給に関する数値的検討, システム制御情報学会 研究発表講演会, スマートグリッド制御技術 324-3, 京都テルサ, 2014 年 5 月 23 日.
- [21] Y. Kono (京都大), Modeling of temperature distribution in office incorporated with human sensor data, 信学技報, vol.114, no.55, NLP2014-1, pp.1-6, ビッグハート出雲, 2014 年 5 月 26 日.
- [22] H. Hoshino (京都大), A dynamical analysis of heat transfer in electricity and heat supply system, 信学技報, vol.114, no.145, NLP2014-39, pp.43-48, 函館市中央図書館, 2014 年 7 月 22 日.
- [23] 薄 良彦 (京都大), マルチエネルギーシステムの動的解析技術, 電気学会 電力・エネルギー部門大会, 科学技術振興機構・CREST の中間報告会 2020 年に向けた多様性を考慮した次世代型 EMS の研究・開発, 同志社大学 京田辺キャンパス, 2014 年 9 月 11 日.
- [24] 星野 光 (京都大), 蒸気供給ネットワークの安定性のグラフ構造に基づく考察, 信学技報, vol.114, no.414, NLP2014-120, pp.41-46, コンパルホール, 2015 年 1 月 26 日.
- [25] 河野 洋平 (京都大), ビル内アトリウムにおける温度分布データのダイナミックモード分解を用いた解析, 信学技報, vol.114, no.414, NLP2014-124, pp.65-67, コンパルホール, 2015 年 1 月 26 日.
- [26] 薄 良彦 (京都大), エネルギーシステムの信頼性解析への RRT アルゴリズムの適用, 信学技報, vol.114, no.414, NLP2014-128, pp.89-94, 2015 年 1 月 27 日.

③ポスター発表(国内会議 2 件, 国際会議 0 件)

- [27] 星野 光 (京都大), 電熱供給ネットワークの力学モデルに関する一検討, 計測自動制御学会 制御部門大会, 学生ポスターセッション PS-025, アクロス福岡, 2013 年 3 月 6 日.
- [28] 星野 光 (京都大), 地域電熱供給システムのガスタービンの動特性を考慮した安定性解析, 電気学会 電力・エネルギー部門大会, ポスターセッション P13, 朱鷺メッセ, 2013 年 8 月 27 日.

(4)知財出願

①国内出願 (0 件)

②海外出願 (1 件)
非公開

③その他の知的財産権
なし

(5)受賞・報道等

①受賞(顕著な受賞の前に * を付記してください)

1. *平成 25 年 1 月 18 日・エヌエフ基金研究開発奨励賞「マルチスケール電力システムのモニタリング・診断・制御技術」・(一社)エヌエフ基金

②マスコミ(新聞・TV等)報道(プレス発表をした場合にはその概要もお書き下さい。)

1. 平成 25 年 11 月 11 日, 科学技術振興機構/京都大学, 大規模電力システムのセンシングデータに基づく安定性判別技術の開発に成功 [URL:
<http://www.jst.go.jp/pr/announce/20131111/index.html>,
http://www.kyoto-u.ac.jp/static/ja/news_data/h/h1/news6/2013_1/131106_2.htm].
2. 平成 25 年 11 月 12 日, 日経産業新聞「大規模停電を予測 京大 電圧や電流を精密計測」
3. 平成 25 年 11 月 15 日, 電気新聞「不安定な潮流の兆候特定 京大グループ 監視高度化へ成果」
4. 平成 25 年 11 月 22 日, 科学新聞「分散協調型エネルギー管理システム実現に期待 京大 安定性判別技術開発」

上記一連のプレス発表及び新聞報道は, 分散協調型 EMS 構築に向けた大規模電力システムのセンシングデータに基づく安定性判別技術の成果に関するものである。

③その他
なし

(6)成果展開事例

①実用化に向けての展開

<公開可能なもの>

- クープマンモード解析に基づく安定性診断技術については電力会社からの問い合わせがあり, 本技術について紹介するとともに, 電力分野の他の技術課題への展開について共同研究を実施している。

②社会還元的な展開活動

- クープマンモード解析に基づく安定性診断技術をプレスリリースとしてインターネット(URL は上記)で公開し, 一般に情報提供している。

§ 5 研究期間中の活動

主なワークショップ, シンポジウム, アウトリーチ等の活動

年月日	名称	場所	参加人数	概要
平成 25 年 9 月 9 日	Special Session on Nonlinear Analysis and Control for Future Energy Management Systems (非公開)	Santa Fe Community Convention Center, Santa Fe, NM, USA	約 30 名	国際会議 NOLTA2013 の特 別セッションとして, 滑川徹 氏 (内田チーム), 鈴木秀幸 氏 (鈴木秀チーム) と共同で 企画し実施した.
平成 25 年 10 月 17 日	Mini-Workshop on Multi-Scale Energy Management	東京工業大 学大岡山キ ャンパス	約 40 名	原チーム, 井村チームと FS 活動として実施した.
平成 26 年 9 月 1 日	Mini-Workshop on Dependable Energy Management	グランキュ ープ大阪	38 名	藤崎チーム, 上田チーム, 造賀チーム, 杉原チームと FS 活動として実施した.
平成 26 年 12 月 16 日	講演会 (学内公開)	京都大学桂 キャンパス	約 20 名	講演者: 荒牧敬次氏 (技術 研究組合 北九州スマートコ ミュニティ推進機構; 日高チ ーム) 題目: スマートシティへの挑 戦「北九州スマートコミュニ ティ想像事業」