

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
「地域統合エネルギーシステム設計に向けたシステム
制御理論の構築:グローバル制御の視点」

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:原 辰次
(東京大学大学院情報理工学系研究科、教授)

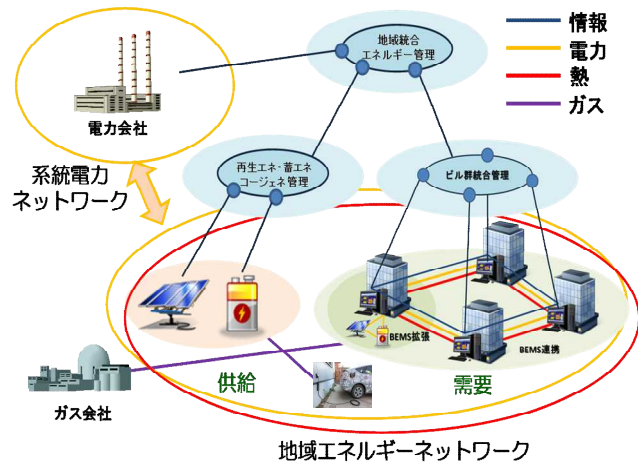
§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

本研究は、自然環境の変動や様々なレベルでの需要変動に対して安定的に稼動し、かつ総エネルギーという視点で効率的な制御システム「地域統合エネルギー制御システム」(右図)を設計する系統的手法を与えるためのシステム制御理論の構築を目的として遂行した。対象システムの特徴は、以下の2つにある。

- ・階層化ネットワーク動的システム
- ・時空間的に様々な分解能・スケールを有し、質的・量的に異なる多くの要素から構成

この認識のもと、異なるエネルギーシステム(エネルギー需給ネットワーク、エネルギー需要ネットワーク、電力需要ネットワーク)の構築を対象とする3つの共同研究グループを構成し、①エネルギーシステムに特化したシステム制御理論の枠組みの設定、②そのもとで目的を達成する解析・設計手法の開発、③それらに基づいて「系統的システム設計手法の開発に向けたシステム制御理論の構築」を目指した。それぞれの項目に対応した主たる研究成果は、以下の通りである。



- ① 枠組みの設定: 3つの異なるエネルギーシステムを「地域エネルギーシステム」として捉える視点で、それぞれモデル化の検討を行うとともに、それら3つのモデルの共通項として「時空間移動要素」という新しい概念を提案した。これに基づき、蓄電池・蓄熱槽・熱融通・ガスエンジンなどの各要素・サブシステム(すなわち、時空間移動要素)を統一的に扱うための数理モデルとして「1次遅れ+飽和要素」が適切であるという結論に至り、それをベースとする多分解能階層化モデルをエネルギーシステム制御のための枠組みとして設定した(3つの企業研究グループの個別成果に基づいて、チーム内ミーティングで議論を重ね、最終的に東大グループで集約)。
- ② 階層化分散制御アルゴリズムの開発: 「時空間移動要素」からなる階層化ネットワークシステムを対象とした「階層化分散制御アルゴリズム」の原理について検討し、その要件を明確にするとともに、主双対最適化手法をベースとするアルゴリズムを開発した。要件に関しては、「情報の部分独立性(秘匿性)」と「状況変化に対する自律性」2つが、従来から指摘されてきた計算量・通信量の低減以上に重要であることを認識した(アズビルグループの応用例を通して、チーム全体として認識)。そこで、それらを考慮したアルゴリズムの開発を行い、受動性に着目した拡張により収束性の改善や適用範囲の拡大を可能にするとともに、グローバル制御の枠組みとの対応関係を明らかにした。
- ③ グローバル制御系の構成法: 本研究の枠組みに焦点を絞り、多分解能階層化モデルをベースとするグローバル制御系の構成について検討を行った(3つの企業研究グループの個別検討結果をもとに、チーム内ミーティングにおいて多分解能・階層性をキーとした議論を重ね、統一的な方法論へと展開した)。その結果、階層毎の自律分散制御器と階層間の目的の違いや制約条件の調整機能を有するグローバルアダプタからなるグローバル制御器の構造を明確にし、階層毎に異なる目的を有する階層化システムへの適用例を通して、その有用性を確認した(井村チーム・薄チームとのFSを通じて、より一般的な構成法について検討した)。

(2) 顕著な成果

＜優れた基礎研究としての成果＞

1. グローカル制御の考えに基づく多分解能階層化分散制御

研究代表者が提案してきた「グローカル制御」(ローカルな計測・制御でグローバルな望みの状態の実現)は、多分解能階層化モデルに基づいた階層化分散制御方式の確立を目指している。本研究は、地域統合エネルギーシステムに焦点を当て、その構成法・設計法について検討し、①グローカル制御器の構造、②そのキーとなるグローカルアダプタの役割りと構成法、③階層化分散制御アルゴリズムの構築、に関して具体的な成果を得たもので、より一般的なグローカル制御システム論への展開が期待できる。

2. エネルギーネットワークシステムの特徴付けと統一的枠組みの設定

多様な要素からなるエネルギーネットワークシステムを統一的に扱うのは困難である。本研究では、「時空間移動要素」という新しい概念を提案し、その数理モデルとして「1次遅れ+飽和要素」を設定した。その結果、エネルギーネットワークシステムを時空間移動要素から構成される階層化システムとして特徴付け、それに基づいた階層化分散制御のための統一的枠組みの設定を行った。今後、この枠組みでの系統的設計法の研究の促進が期待できる。

3. 受動性に基づく階層化分散制御アルゴリズムの構築

「時空間移動要素」のもう一つの側面は、受動性である。この受動性に着目することにより、宇沢の主双対最適化アルゴリズムを拡張した分散制御アルゴリズムを開発した。また、その階層化について検討し、階層毎に異なる目的関数や時空間分解能を持つ制御問題に対して適用することにより、グローカル制御の実現に有用であることを検証した。実応用を意識した理論の展開を図ることにより、系統的かつ統一的な制御アルゴリズムの構築が期待できる。

＜科学技術イノベーションに大きく寄与する成果＞

1. 既設の多様な分散型電源の活用 (東京ガス+東大グループ)

本研究で検討を行った再生可能エネルギーの出力変動のためのガスエンジン(GE)運転制御および複数 GE の制御の枠組みは、エネルギー産業の自由化が進展した後に、分散電源を活用した新ビジネスに繋がる可能性がある。本グループの研究成果は、既に設置されている分散型電源を活用した電力系統安定に貢献できる可能性があるため、分散電源設置者、電力系統管理者両者にとって社会的・経済的な利益をもたらすことを期待できる。

2. 地域統合エネルギーネットワーク構築への展開 (アズビル+東大グループ)

建物間熱融通によるエネルギー面的利用において、熱源設備や未利用エネルギーの有効活用による街区全体の効率向上のメリットを生かすには、複数建物における電力・熱エネルギー需給を統一的に扱う制御方式を確立する必要がある。本グループの研究は、単一建物や電力ネットワークの最適化制御に関する既往研究と異なり、電力・熱ネットワークを持つ複数建物のエネルギー配分問題に対し階層化分散制御の可能性を検討した点に特徴があり、地域統合エネルギーネットワーク構築の基礎技術としてその展開が期待できる。

3. 多様な蓄電池の効率的運用に向けた制御技術 (富士通+東大グループ)

蓄電池を含む大規模エネルギーネットワークで適切なエネルギーマネジメントを行うために、モデル予測制御による蓄電池モード最適化問題を設定した。この問題では、蓄電池台数(空間方向)と予測区間数(時間方向)の積の離散変数を含む最適化問題を解く必要がある。本グループは、蓄電池の観測状態に依存する 2 種類の蓄電池グループ化がそれぞれ空間方向と時間方向の分解能を調整することに着目した。この時空間2つの方向を組み合わせた階層化制御アルゴリズムの提案は、これまでと異なる新しいアプローチであり、状態依存階層化分散制御の確立に貢献しうる。

§ 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

① 「東大」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
原 辰次	東京大学 大学院情報理工学系研究科 システム情報学専攻	教授	H24.10～
藤本 博志	東京大学 大学院新領域創成科学研究科 先端エネルギー工学専攻	准教授	H24.10～
津村 幸治	東京大学 大学院情報理工学系研究科 システム情報学専攻	准教授	H24.10～
Yafei WANG	東京大学 大学院情報理工学系研究科 システム情報学専攻	博士研究員	H25.4～
Kameshwar Poolla	EECS University of California, Berkley	Professor	
Jakob Stoustrup	Albberg University (Denmark)	Professor	
堀 豊	東京大学 大学院情報理工学系研究科 システム情報学専攻	博士研究員	H25.4～H25.8
岡嶋 崇	同上	博士研究員	H25.4～H26.3
Cai Kai	同上	特任助教	H26.3～H26.3
森山 学志	同上	修士2年	H24.2～H26.3
崔 星太	同上	学術支援専門職員	H24.12～H25.11
前田 拓哉	同上	修士2年	H24.2～H25.11
木村 健智	同上	修士2年	H25.4～
小島 千昭	同上	助教	H26.4～
深町 聡一郎	同上	博士2年	H26.11～
鈴木 創	同上	修士1年	H26.11～
大瀬戸 健	同上	修士1年	H26.11～

研究項目

・地域統合エネルギーシステム構築に向けたシステム制御理論の枠組みと解析・設計手法の構

② 「東京ガス」グループ

研究参加者(所属、役職は、参加当時のもので記載)

氏名	所属	役職	参加時期
進士 誉夫	東京ガス 基盤技術部 スマートエネルギー技術センター	所長	H24.10～H25.3

渡部 洋介	東京ガス 基盤技術部 スマートエネルギー技術センター	主幹	H24.10～H25.3
小原 圭史朗	東京ガス 基盤技術部 スマートエネルギー技術センター	研究員	H24.10～H25.3
藤原 純	東京ガス 基盤技術部 スマートメーター・ICT 開発センター	所長	H25.4～
市村 順一	東京ガス 基盤技術部 ICT・メーター開発グループ	チームリーダー	H25.4～H26.3
横山 睦人	東京ガス 基盤技術部 スマートメーター・ICT 開発センター	チームリーダー	H26.4～
佐久間 博久	東京ガス 基盤技術部 スマートメーター・ICT 開発センター	主幹	H25.4～
須澤 健太郎	同上	主幹	H24.10～
坂元 賢太郎	同上	主幹	H25.4～

研究項目

- ・天然ガスのコージェネレーションを含む統合エネルギー需給ネットワーク制御システムの設計

③ 「アズビル」グループ

研究参加者(役職は参加当時のもので記載)

氏名	所属	役職	参加時期
総田 長生	アズビル (株)	課長	H24.10～
黒崎 淳	同上	課長代理	H24.10～
西口 純也	同上	係長	H24.10～
今西 祐	同上	部員	H24.10～H26.3

研究項目

- ・商用ビルおよびビル群統合管理におけるエネルギー需要ネットワークを中心とした統合エネルギー制御システム設計

④ 「富士通」グループ

研究参加者(役職は参加当時のもので記載)

氏名	所属	役職	参加時期
屋並 仁史	富士通株式会社	シニア リサーチャー	H24.10～
金児 純司	同上	統括部長付	H24.10～
佐々木 智丈	同上		H25.4～

研究項目

- ・電力ネットワークの階層化制御システムの開発

(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

・国内での連携：

- ・平成25年度FSとして、井村チーム・薄チームと合同で「地域統合エネルギー管理システム構築に向けた融合研究」を立ち上げ、3チーム間の連携を深め、統合的なシステム設計論への展開を図るとともに、外国人を招聘したワークショップを企画した。
- ・平成26年度は、原チームのメンバーが3つの異なるFSに参加し（津村：井村FS、藤本：鈴木（達）FS、小島：藤崎FS）、原チームの研究成果と他のチームの研究成果との融合を幅広く行った。

・国外研究者・研究機関との連携：

外国人研究者の招聘による意見交換とワークショップやチュートリアルセミナー等の開催を通しての研究成果の発信を積極的に行った。

・外国人研究者の招聘（コンファレンスでの特別セッションの企画を通して）

① CREST特別セッション

“Towards Novel Distributed Management for Power Systems”

日程：平成25年3月7日

会場：アクロス福岡

招聘者：Kamashwar Poolla (University of California, Berkley, USA)

Jakob Stoustrup (Aalborg University, Denmark)

② SICE Annual Conference 2013 in Nagoya (SICE2013)

JST EMS CREST プロジェクト「地域統合エネルギーシステム設計に向けたシステム制御理論の構築－グローバル制御の視点－」オーガナイズドセッション

日程：平成25年9月16日

会場：名古屋大学

招聘者：Lucy Pao (University of Colorado at Boulder, USA),

Anuradha Annaswamy (Massachusetts Inst. of Tech., USA)

・ワークショップ・チュートリアルセミナー等

③ Mini-Workshop on Multiscale Energy Management@東京工業大学

井村チーム、薄チームとのFSにおいて、外国人研究者を交えたミニワークショップを開催

日時：平成25年10月17日

会場：東京工業大学・大岡山キャンパス

④ ワークショップ@CDC2013

The 52nd IEEE Conference on Decision and Control (CDC2013) において、Workshop “Cooperative Distributed Control for Energy Management Systems: New Frameworks and Research Directions” を原（東大）と藤田（東工大）で企画・実施。

日程：平成25年12月9日

会場：Florence, Italy

⑤ 特別セッション@ICCAS2014

The 14th International Conference on Control, Automation, and Systems (ICCAS2014) において、Special Session “Basics on Glocal Control: Concept, Fundamental Theory, and Applications to Energy Management Systems” を原（東大）と井村（東工大）で企画・実施。

日程：平成26年10月22日

会場：KINTEX, Korea

⑥ オーガナイズドセッション@第57回 自動制御連合講演会

第57回 自動制御連合講演会において、「エネルギーネットワークシステムの階層化分散制御」を原（東大）と井村（東工大）で企画・実施。

日程：平成26年11月11日

会場：群馬県渋川市 ホテル天坊

⑦ 講義シリーズ@TUM

Lecture Series “Glocal Control for Hierarchical Dynamical Systems: Theoretical Foundations with Applications in Energy Networks” を原（東大）が実施。

http://www.itr.ei.tum.de/en/news/news-single-view-english/?tx_ttnews%5Btt_news%5D=33&cHash=e3171f4c677ca474b0f911b1133702c9

日程：平成25年10月 - 11月

会場：ミュンヘン工科大学、ドイツ

・**産業界との連携：**

本研究チームは、3つの異なる業種の企業と東大で構成されており、通常の研究活動そのものが産業界と深く連携して遂行してきた。

§ 3 研究実施内容及び成果

本研究は以下の4つのグループで構成されている。

- ① 地域統合エネルギーシステム構築に向けたシステム制御理論の枠組みと解析・設計手法の構築（東京大学グループ）
- ② 天然ガスのコージェネレーションを含む統合エネルギー需給ネットワーク制御システムの設計（東京ガス+東大グループ）
- ③ 商用ビルおよびビル群統合管理におけるエネルギー需要ネットワークを中心とした統合エネルギー制御システム設計（アズビル+東大グループ）
- ④ 電力ネットワークの階層化制御システムの開発（富士通+東大グループ）

各々のグループの研究実施内容および成果を以下に報告する。なお、①については、一部「井村チーム・薄チームとの FS」を通して得られた結果を含めて報告する。

3.1 地域統合エネルギーシステム構築に向けたシステム制御理論の枠組みと解析・設計手法の構築（東京大学グループ）

エネルギー問題は世界レベルで解くべき、喫緊の重要な社会的課題の一つであり、省エネルギー、ピークカット、デマンドレスポンスなど多種多様な制御問題がある。このため、環境や需要の変化に対して様々なレベルで、かつ全体的な視点で効率的に安定供給を実現する統合エネルギーシステムを開発することが重要である。しかしながら、この種の問題はこれまで取り組んできた標準的な制御問題の枠組みに属さないため、全く新しい制御の概念、制御系構造、アルゴリズムを構築することが不可欠である。そこで、本研究では、ローカルな計測と制御によって、所望の局所的な振る舞いだけでなく、望みどおりの大域的な振る舞いも実現する「グローバル制御」（グローバル制御とローカル制御から成る造語）の視点から、このようなエネルギーネットワークシステムの体系的な設計法を与えるためのシステム制御理論の構築を目指した研究を遂行した。

本報告では、まず「グローバル制御」の概念を説明した後、エネルギーネットワークに対するグローバル制御理論確立に向けた方針を述べる。つぎに、エネルギーネットワークシステムの制御への応用に焦点を当てて、時間・空間・周波数・レベルの分解能で階層化された動的ネットワークシステムに基づくグローバル制御の基本的な枠組みを提案し、その枠組みで特に重要となる「グローバル制御器」の構造を説明するとともに、グローバル制御器設計の一例として主双対最適化アルゴリズムに基づく設計手法を紹介する。最後に、今後の課題について述べる。

(1) グローカル制御

・グローバル制御の基本概念

近年、制御工学を含む工学の様々な分野で扱われているシステムは、気象現象やエネルギーネットワーク系、生体系、交通流制御などのように大規模・複雑化し、そうしたシステムに対して、環境の変化に対して適切に適応するような、より高いレベルでの制御が必要になってきている。こうしたシステムでは、計測や制御入力局所的なものに限られるのに対して、その制御目的は、所望の局所的な振る舞いと大域的な振る舞いを同時に達成することが求められる。

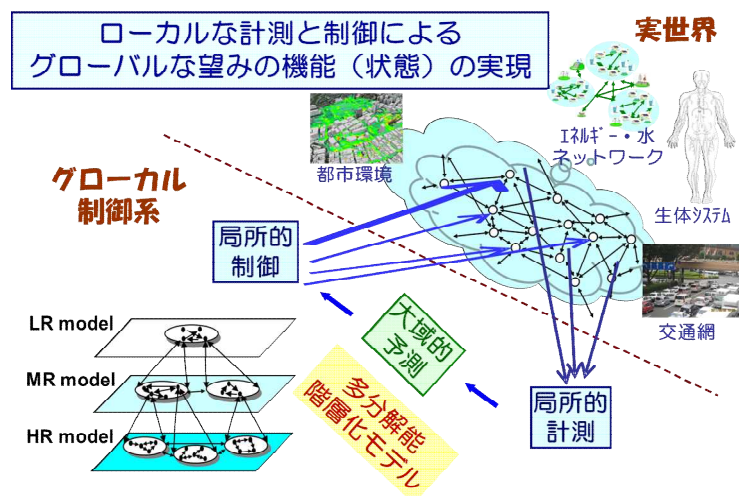


図1：グローバル制御の概念

そこで、図 1 に示すように、局所計測を用いて大域的な振る舞いを予測して、局所制御により、所望の大域的な振る舞いと局所的な振る舞いを同時に実現する新しい制御手法である“グローバル制御”の制御理論を構築することが必要である。そのキーとなるのは多分解能階層ネットワーク動的システムである。

・グローバル制御の目的

大規模ネットワーク動的システムに対して、分解能が異なる大域的な制御目的と局所的な制御目的を同時に達成するために、その制御系の状態を分解能に応じて階層化し、分解能ごとに階層化された分散制御器を設計することを考える。ここで分解能とは、時間や空間だけでなく、周波数やレベル(状態値の量子化等)での分解能を考えている。以下では低(中、高)分解能に対して必要に応じてLR (MR、HR) を用いるものとする。

これらの条件は、超大規模なネットワーク系では、個々の独立な局所的な振る舞いは、大域的な振る舞いに大きく影響しないことに基づくものであり、超大規模系に共通に見られる性質である。したがって、集中制御方式と比べて、大域的な目的関数のわずかな劣化で、個々の局所的な目的を達成する制御アルゴリズムが存在するという特性を有する。グローバル制御は、それを多分解能階層化という視点で実現することを目指すものである

たとえば電力グリッドでは、局所入力/出力として、それぞれ、各消費者に備えられた蓄電池の蓄電量/各消費者の消費電力(受電点電力)を、一方、大域入力/出力として、それぞれ、供給側からの供給電力/グリッド全体の消費電力を考える。このとき、グリッド全体の需給バランスを経済性かつ環境性(CO2 排出削減)を高めて実現するという大域的な(空間分解能が低い)目的と、各消費者の消費電力(受電点電力)を最小化するという局所的な(空間分解能が高い)目的を同時に達成することを目指す問題となる。

そこで、図2 に示すように、消費者ごとの電力需要モデル(消費者モデル)、そして、それが数多く空間的に集まった配電エリアの電力需要モデル、さらにすべての配電エリアが集まったグリッド全体の電力需要モデルで構成される三階層モデルを考える。すなわち、消費者側からグリッド全体まで、高空間分解能から低空間分解能まで階層化した多分解能階層ネットワーク動的システムとしてモデル化する。

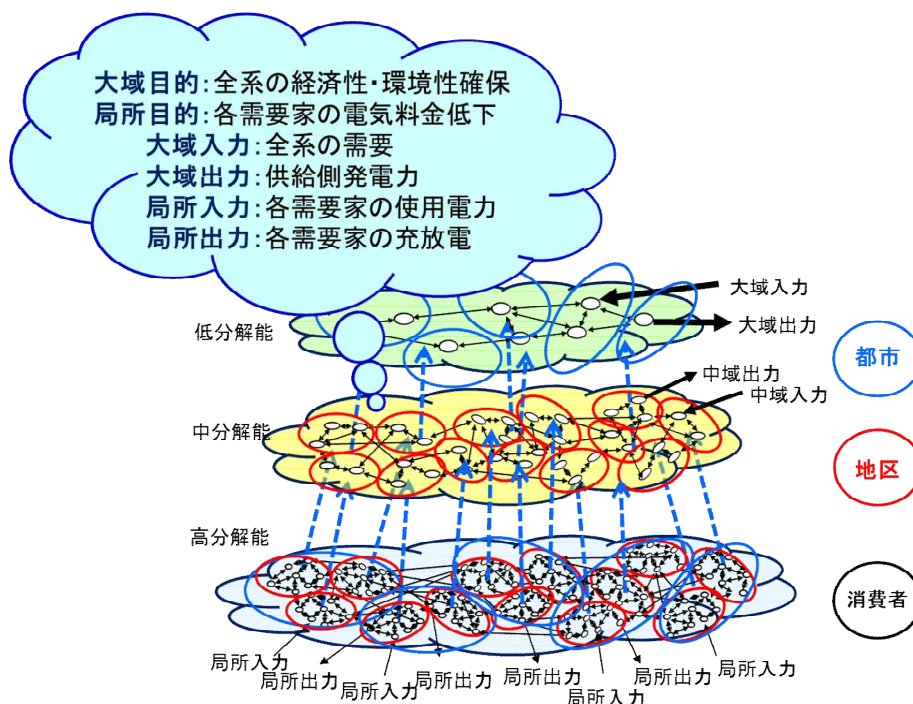


図 2：電力ネットワークに対するグローバル制御

(2) エネルギーネットワークに対するグローバル制御理論確立に向けて

エネルギーネットワークシステムの制御とは、時間・空間両方の意味で需要と供給バランスを保つことである。その困難さの要因の一つには、エネルギーは一般に時空間的に移動させることが難しく、大きなコストを伴うことにある。したがって、抽象化された意味での「時空間移動要素」の役割りが重要となってくる。この「時空間移動要素」という概念は、本研究において新たに提案するもので、通常の蓄電池（電力を時間的に移動させるほぼ静的な要素）やガスエンジン（電力を時間的に移動させる動的要素）に加え、配管を通した熱移動（熱エネルギーの時空間移動要素）などを統一的に扱うための概念である。

電力ネットワークなどエネルギーネットワークは、時空間的にスケールの異なる階層化システムとして捉えることができるので、本研究では「時空間移動要素を有する多分解能階層化システム」という視点で、その階層化分散制御を考え、グローバル制御理論確立に向けた検討を行ってきた。理論の確立に向けた研究項目としては、大きく以下の3つが挙げられる。

<時空間移動要素>

- ・ 動的蓄積要素の標準モデルの設定：
1次遅れ（時定数 T ）＋ 飽和（飽和レベル σ ）
- ・ 解析・設計（パラメータ T & σ に着目）：
解析：達成可能な制御性能限界は？
設計：各階層に適した時空間移動要素の配置？

<多分解能階層化モデリング>

- ・ 時間/空間分解能に着目したモデリング：
階層間の縮約・分配機構（図3参照）と時空間移動要素の特性に特に注目した手法の開発

<階層化分散制御方式>

- ・ 問題設定：階層化モデル＋グローバル＆ローカル 目的関数の設定
- ・ 解法：階層化と整合する制御方式の系統的アルゴリズムの開発

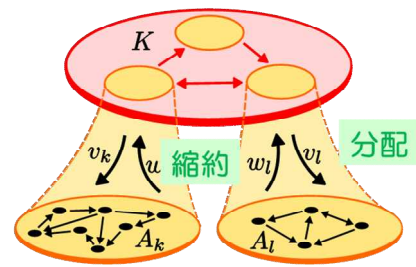


図3：階層間接続（縮約と分配）

これらの検討項目を統一に行うための枠組みとして、均質なマルチエージェントシステムの統一的表现形式の一つとして研究代表者が既に提案してきた「一般化周波数変数を持つシステム」表現を非均質な1次遅れ系に拡張し、さらなる飽和要素（静的な非線形要素の一つ）を導入したシステムを考える（図4参照）。また、多分解能階層化構造は行列 (A, B, C, D) の階層構造と低ランク階層間接続として表現する。

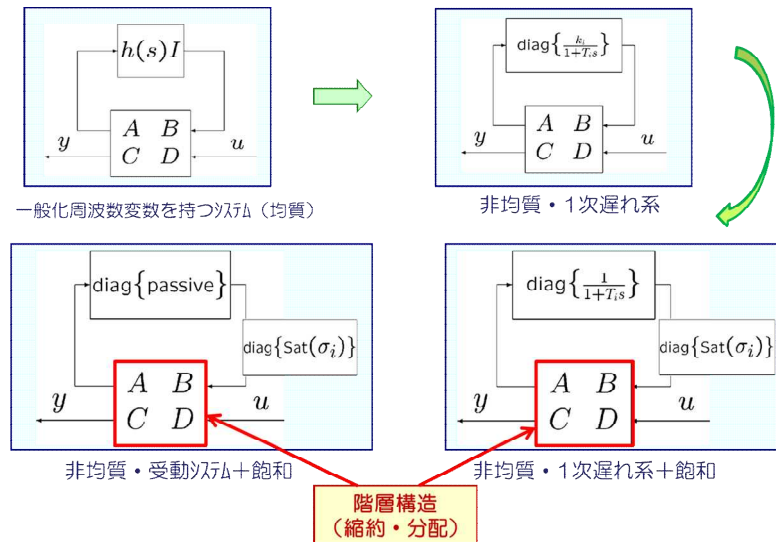


図4：統一のシステム表現

(3) グローバル制御システムの枠組み

図5は多分解能センサ、グローバル予測器、グローバル制御器（グローバルアダプタ＋多分解能分散制御器）の4つの要素から成るグローバル制御システムの枠組みを示す。以下、「グローバル予測器」、「グローバルアダプタ」と「グローバル制御器」について、少し詳しく説明する。

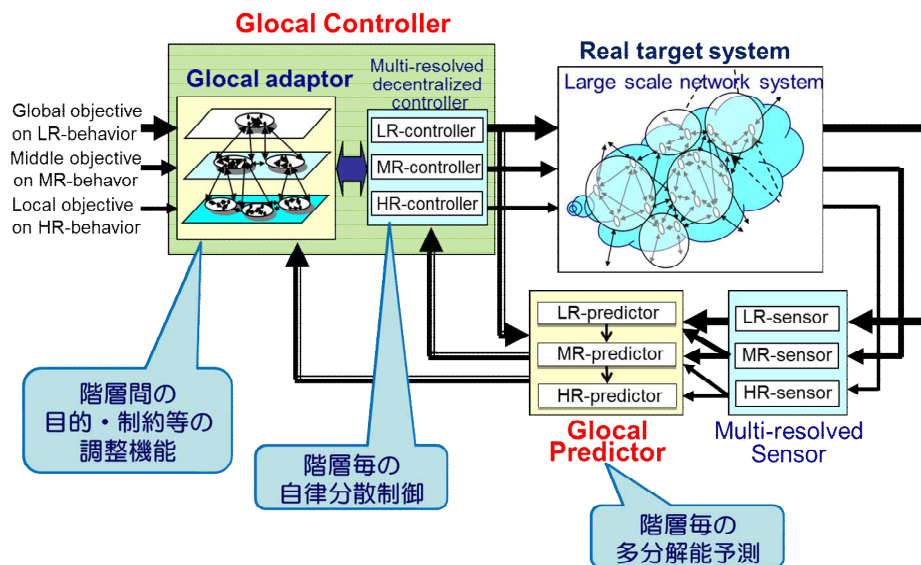


図5：グローバル制御システムの構造

<グローバル予測器>

グローバル予測器は多分解化された計測信号に基づいて、系全体の振る舞いをおのの目的の分解能に応じて予測する。図6で示されているように、同じ分解能の階層レベルだけでなく、高分解能の局所計測を用いて低分解能の大域予測（集約化信号の予測）を実施し、その後、低分解能の大域予測を用いて高分解能の局所予測へと高分解能化していく。

たとえば、ウィンドファームの風力予測を考える。数値予報モデルなどを用いた気象予測データは高々2km 四方程度の分解能でしか風力値を予測できない一方で、ウィンドファームの複数の局所センサによる風力計測は可能である。そこで、気象予測による低空間分解能の風力予測値を2km 四方の境界条件などとして、その四方内のさらに小さなエリアでの空間的に平均化された風力予測値を、そのエリア内に複数設置された局所センサによる風力データを用いて、たとえばカルマンフィルタのような予測器や時系列解析によって求めることに相当する。

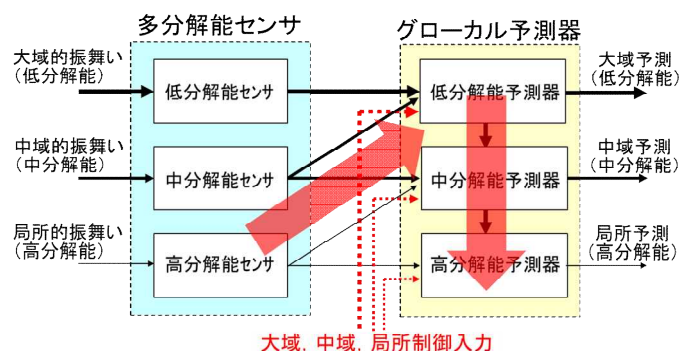


図6：グローバル予測器の構造

なお、低分解能予測には、低時間分解能型（時間集約型）と低空間分解型（空間集約型）が考えられるが、どちらの場合でも分解能を低くすることでローカルの秘匿性を高める効果があり、また階層化することで効率よく予測することが可能となる。

<グローバル制御器>

図7に示すように、グローバル制御器は、「階層毎の自律分散制御器」と制御目的に応じた分解能と階層ごとのコントローラが担う分解能との間の調整機能の役割を担う「グローバルアダプタ」から構成される。従来の制御系と本質的に異なる点は、グローバルアダプタの導入であり、この設計が最も重要となる。

たとえば、電力需給バランス制御において、グローバルアダプタは、分散最適化問題におけるラグランジェ定数（価格とみなせる）を決定することで、決定変数である各電源間で供給すべき電力

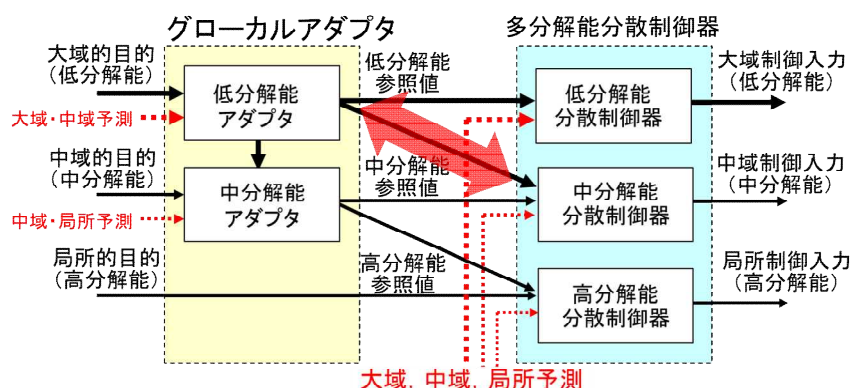


図 7：グローバル制御器の構造

を最適に配分調整する。あるいは、制御目的に応じた分解能ごとに各コントローラに追従させる参照値を生成する場合も考えられる。まず、空間集約化された電力需要予測に基づいて、電力系統全体で供給すべき電力が、大域的な視点から、低分解能参照値として生成される。つぎに、アグリゲータなどの規模で空間集約された中間分解能の目的や需要予測に加えて、上層の低分解能参照値に基づいてアグリゲータに対する消費電力の参照値が生成される。最後に、上層のアグリゲータからの消費電力要求とともに、各需要家に対する最も高い分解能の目的に基づく目標値信号（希望消費電力）が分散制御器に対する最も局所的な参照信号として用いる。

グローバルアダプタ設計のポイントの一つは、上層の大域的な目的を実現する一方で、上層の低分解能の参照値を用いて下層の振る舞いのフレキシビリティを確保することで、下層の局所的な目的も実現することにある。たとえば、後者の例では、消費者への指令値として、1 時間同時同量（1 時間ごとのエネルギー値）などの低時間分解能の参照値や、量子化や区間値を用いた低レベル分解能の参照値などを用いることが考えられる。また空間方向に対して、電力使用におけるTAXなどの一律型（ブロードキャスト型）や消費者への指令値のタイミングをずらすなどの多様型（高空間分解能型入力）の参照値生成も、公平性や多様性を確保する点で重要である。

グローバルアダプタはグローバル/ローカルの両方の目的を調整し、異なる階層ごとに適切な参照値を与える機能を有している。たとえば、上層と中層の間の調整については、図7の太い赤矢印が対応する。この調整機能により、与えられた参照値に基づいて階層ごとに独立に分散制御器を設計することが可能となり階層構造を有するグローバル制御器を構成することができる。

このように、提案する階層構造化された制御器の利点は、単に計算量や通信容量の低減だけでなく、①情報の秘匿性を高めることが可能（サブシステムのすべての情報ではなく必要な情報のみを公開する）、②より柔軟性の高い制御系が実現可能（各サブシステムが独自にその構成を変更しても、他のサブシステムや上位層の制御を変更する必要が生じない）、の2点にある。

(4) グローバル制御器の設計

ここでは、3階層に階層化システムに対する制御問題に対応する最適化問題の一例を考察し、それがグローバルアダプタと分散制御器の機能を持つ階層型分散アルゴリズムによって求解できることを説明する。

・制約付き最適化問題

一例として、制御問題が離散時間システムの有限ホライズンにおけるコスト最小化問題（評価関数最大化問題）と定式化されるものとする。さらに、各階層毎にそれぞれの分解能に応じて異なる目的関数を有し、階層間に課される制約条件が存在する場合を考える。

いま簡単のため、各階層の目的関数の総和を統合目的関数として定義し、それを最大化する問題として定式化すると、図8に示す最適化問題となる。

階層的分散最適化アルゴリズム

ここでは、先述の問題を解く字沢の主双対アルゴリズムを導出し、階層の観点で整理すると、それが階層型分散最適化アルゴリズムとなることが分かる(図9を参照)。ここで、対応する Lagrange 関数は図10で与えられる。

i : index for clusters, k : index for subsystems
 u_{ik} : control input, x_{ik} : state variable

統合目的関数

$$\max_{\{u_{ik}\}} \left(\underbrace{\sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^{M_i} J_{ik}(u_{ik}, x_{ik})}_{\text{lower layer}} + \underbrace{\sum_{i=1}^M J_i(u_i, x_i)}_{\text{middle layer}} + \underbrace{J(u, x)}_{\text{upper layer}} \right)$$

制約条件

$$\begin{aligned} u_i &:= \sum_{k=1}^{M_i} u_{ik} & u &:= \sum_{i=1}^M u_i & u &= U \\ x_i &:= \sum_{k=1}^{M_i} x_{ik} & x &:= \sum_{i=1}^M x_i \end{aligned}$$

図8：3階層最適化問題

Upper Layer (Lower Resolution)

LR-A

$$\dot{p}^\ell = -F_{p^\ell}(s) \left(u - \sum_{i=1}^M u_i \right)$$

$$\dot{p}^w = -F_{p^w}(s) (u - U)$$

LR-DC

$$\dot{u} = F_u(s) (J'(u, x) + p^\ell + p^w)$$

Middle Layer (Middle Resolution)

MR-A

$$\dot{p}_i^m = -F_{p_i^m}(s) \left(u_i - \sum_{k=1}^{M_i} u_{ik} \right)$$

MR-DC

$$\dot{u}_i = F_{u_i}(s) (J'_i(u_i, x_i) + p_i^m - p^\ell)$$

Lower Layer (High Resolution)

HR-DC

$$\dot{u}_{ik} = F_{u_{ik}}(s) (J'_{ik}(u_{ik}, x_{ik}) - p_i^m)$$

図9：階層化最適分散制御

Lagrange function:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(u, p) &:= \underbrace{\sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^{M_i} J_{ik}(u_{ik}, x_{ik})}_{\text{lower layer}} + \underbrace{\sum_{i=1}^M J_i(u_i, x_i)}_{\text{middle layer}} + \underbrace{J(u, x)}_{\text{upper layer}} \\ &+ \sum_{i=1}^M p_i^m \cdot \underbrace{\left(u_i - \sum_{k=1}^{M_i} u_{ik} \right)}_{\text{const. in L.L.}} \\ &+ p^\ell \cdot \underbrace{\left(u - \sum_{i=1}^M u_i \right)}_{\text{const. in M.L.}} \\ &+ p^w \cdot \underbrace{(u - h)}_{\text{const. in U.L.}} \end{aligned}$$

図10：対応ラグランジェ関数

図9に示すアルゴリズムは、次の観点で階層型分散最適化アルゴリズムと解釈できる。

- ・ 下位層では、個々のサブシステム毎に実装されるアルゴリズム(HR-DC)を用い、サブシステム自身の短周期・短期間の速いダイナミクスに関する評価関数の導関数、自身が計算するローカルな制御入力、グローバル予測器から得られる情報、中間層からの配信によって得られるマルチプライアのみを用いて制御入力更新され、その値が中間層にアップロードされる。
- ・ 中間層では、各システム毎に実装されるアルゴリズム(MR-A & MR-DC)を用いて、それ自身の中周期・中期間のダイナミクスに関する評価関数の導関数、下位層の制御入力の総和に対応する要約変数と下位層からアップロードされた総和制御入力、グローバル予測器から得られる情報、自身が計算するマルチプライア、および上位層から配信される上位層と中間層との調整に対応するマルチプライアのみを用いて自身の制御入力とマルチプライアが更新される。それらは、それぞれ上位層と下位層に配信される。
- ・ 上位層は全体システムに実装されるアルゴリズム(LR-A & LR-DC)を用いて、全体システムの長周期・長期間のダイナミクスに関する評価関数、総制御入力に対応する要約変数、中間層からアップロードされる総制御入力、グローバル予測器から得られる情報、自身が計算するマルチプライアを用いてそれぞれ更新され、マルチプライアが中間層に配信される。

・提案アルゴリズムのグローバル制御器としての解釈

上記アルゴリズムとグローバル制御系との関係を図11を用いて説明する。マルチプライアの更新部がグローバルアダプタであり、制御入力 of 更新部が多分解能分散制御器とみなせる。実際、マルチプライアは、より下位に位置する多数の評価関数の最適解を調整し、集団全体としての最適解へと誘導する役割を果し、その意味でグローバルアダプタが出力すべき参照値とみなせる。

信号の流れは次の通りである。まず、グローバルアダプタの上位層で更新するマルチプライアが多分解能分散制御器の上位層と中間層へ送られる。一方、多分解能分散制御器で更新される制御入力 that グローバルアダプタへとフィードバックされ、マルチプライアの更新に用いられる。特に、下位層・中間層で計算される制御入力は総和として集約され、その縮約された情報のみが中間層・上位層へそれぞれ伝えられれば十分であり、この意味でグローバル制御器が持つべき性質である“情報集約”あるいは“情報の秘匿性”を保つ構造を有していると言える。

最後に、本アルゴリズムは分散的であり、例えば下位層の評価関数の変更や個々のサブシステムの停止あるいは追加といった変化に対し、上位層・中間層のアルゴリズムや下位層の他のサブシステムのアルゴリズムはいっさい変更を加える必要がない。この意味で、グローバル制御器が持つべき性質である“柔軟性”を有していると言える。

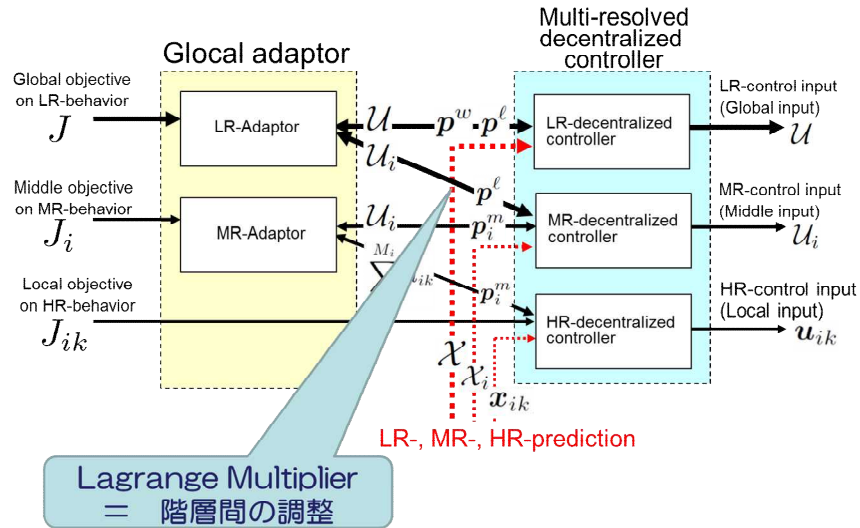


図 11 : 3 階層グローバル制御器の構造

(5) まとめと今後の課題

本研究では、グローバル制御の観点からエネルギーネットワークシステムの制御を捉え、分解能が異なる複数の目的を達成するグローバル制御システム的设计理論について論じた。グローバル制御システムは、グローバル予測器、および、グローバル制御器（グローバルアダプタと多分解能分散制御器）から成り、それぞれ、分解能により階層化された構造を有することにより、多目的制御の実現に加えて、効率（計算量の低減）、情報の秘匿性、制御系の柔軟性などを高めることができる特徴を有する。

本研究で得られたグローバル制御系の構成法ならびに具体的な設計手法の確立が、今後の大きな課題である。その枠組みとしては、図4の右下のブロック線図に示す「1 次遅れ + 飽和」要素をベースとした階層化システム、あるいは左下に示す「受動性 + 飽和」要素をベースとした階層化システムを考えている。具体的な重要課題としては、①グローバル予測器とグローバル制御器を統合した系統的な設計アルゴリズムの開発、②階層化分散制御方式の制御性能限界に関する解析的な結果の導出、③階層化分散制御方式で重要となる「中間層」の位置付け・役割りの明確化とその設計指針の確立、などが挙げられる。

3.2 天然ガスのコージェネレーションを含む統合エネルギー需給ネットワーク制御システムの設計（東京ガス+東大グループ）

本研究では、地域で構成されるこのエネルギーシステムについては、発電設備の設置場所が広域にわたること、および各発電設備の発電出力の周波数特性が異なることから、異なる時空間分解能を持つ階層化システムとして捉える。また、ガスエンジンコージェネレーションシステム (GECGS) については、その発電出力抑制運転によりエネルギーの時間/空間成分を移動可能になると考えられるため、GECGS を動的蓄積要素として捉える。

まず、想定するシステムおよび GECGS のモデルを示し、さらに階層化制御系の概要を示す。次に、GECGS の動作点が与えられた際の制御系設計問題を制御入力飽和を考慮しない H_2 最適制御問題として定式化し、その制御性能をフィードフォワード、フィードバック、2 自由度の各方式について、数値シミュレーションおよび実機実験の結果を元に比較する。その後で階層化制御系設計の際に重要な式となる、制御性能とシステムのパラメータの関係式を示し、階層化制御の方針を述べる。

(1) 問題設定

・GECGS による PV 変動補完システム

本研究では、分散型電源として太陽光発電 (PV)、GECGS を考え、図 1 のように GECGS で PV の変動を補完するシステムを考える。ここで r が太陽光発電から生成される参照信号、 d は外部から印加される外乱、 y は GECGS の動作点から見た発電出力である。また、 $Sat(\sigma)$ は $\pm \sigma$ で飽和する saturation 関数である。

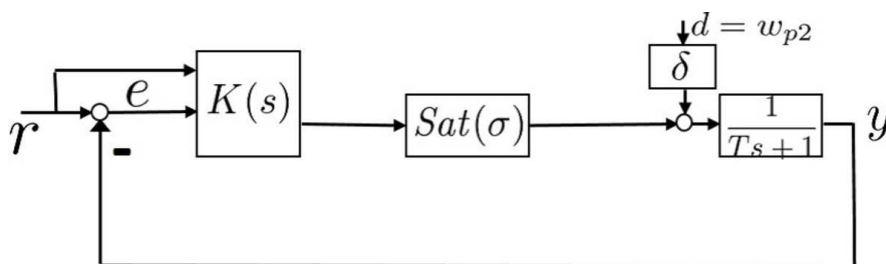


図 1 : GECGS 制御系

図 2 は実際の PV 発電出力 6 時間分の時系列データの例である。このように実際の発電出力は様々な周波数成分を持つ複雑な波形となっており、参照信号 $r(t)$ はこのような実出力を適当なバンドパスフィルタ $H(s)$ に通したものであるとする。ただし $H(s)$ は以下で与えられるとする。

$$H_s = -200s / [(200s+1) * (2s+1)]$$

このような前処理をすることによって変動を補完する必要がない低周波成分や GECGS の帯域で取りきれないような高周波の成分

を $r(t)$ からあらかじめ取り去ることができる。また、複数 PV の合算値を考える場合、均し効果によって高周波成分を減少させることが可能であることに注意する。図 3 が実際に図 2 の時系列データを $H(s)$ に通して得られた $r(t)$ である。

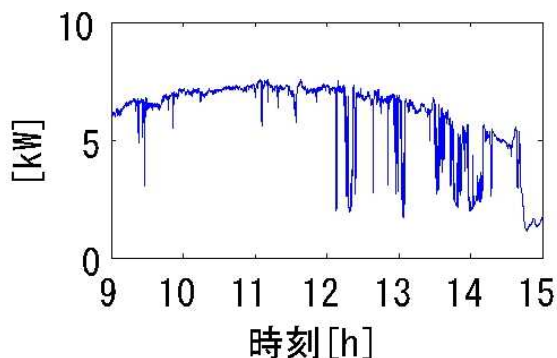


図 2 : PV 発電量実データ (9:00-15:00)

本研究での目的は、 $e(t)=r(t)-y(t)$ をできる限り小さくするような制御系を設計すること、つまり $y(t)$ を $r(t)$ に追従させることである。

・GECGS のモデル

本研究では GECGS を動作点周りで線形化したものを Fig. 4 のように飽和特性と一次系によって表す。ここで、時定数 T および飽和レベル σ が各 GECGS を特徴付けるパラメータである。例えば、定格出力 25[kW] の GECGS を動作点 20[kW] で運転する場合 $\sigma=5$ [kW] となる。このように、飽和レベルと動作点是一对一に対応しているので、GECGS は時定数及び動作点という二つのパラメータで特徴付けることができる。また、適当なスケールリングをすることで一次系のゲインを 1 としても一般性を失わない。

モデルの妥当性を確認するために、以下の二つのステップで GECGS のシステム同定を行った。

- ① ペクトル解析法を用いて GECGS のスペクトル密度の推定値を得る。
- ② 得られたスペクトル密度の推定値を最小二乗法により $k/(Ts+1)$ にフィッティングし、各パラメータの推定値 T 、 k を求める。

同定結果を fig. 5 に示す。各パラメータは $k=0.96$ 、 $T=3.56$ [s] となり、GECGS の周波数特性は一次系として十分よく近似できていることがわかる。

・複数 GECGS の階層化制御

それぞれ性能が異なる GECGS が分散して存在する場合、各 GECGS が自ら最適な動作点を設定し制御を行うことは非常に難しい問題となる。

そこで、ここでは図 6 のように上位層、下位層の二層からなる階層化制御方式を検討する。まず、上位層は中央制御装置からなり、下位層の情報を用いて各 GECGS に最適な動作点を設定しシステム全体として安定的、かつ効率的なエネルギー配分を目指す。また、下位層は上位層から与えられた動作点の情報を用いてローカルに最適な制御系設計を目指す。

このように階層化されたシステムを考えることで、上位層は各 GECGS の制御系設計などの細かいことを考える必要がなく、下位層はシステム全体のことを考えずにローカルな最適を目指せばよいということで、効率的な制御が行えることが期待できる。このとき、上位層では各 GECGS の動作点を決定する必要があり、下位層では与えられた動作点における最適な制御系を設計する必要がある。本研究では、下位層での制御系設計から検討を開始した。

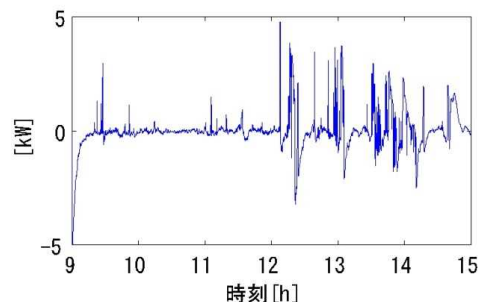


図 3： 参照信号 $r(t)$ の実データ

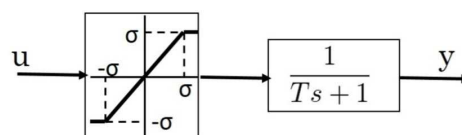


図 4： GECGS のモデル

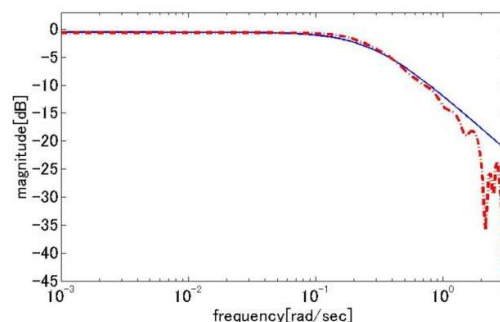


図 5： 破線：スペクトル解析法により得られたスペクトル密度、実線：最小二乗法による同定された一次系のゲイン線図

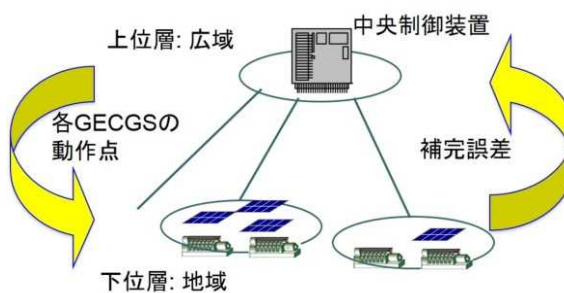


図 6： 階層化制御系イメージ図

(2) 下位層でのローカルな制御系設計

・GECGS の H_2 制御

上層で各 GECGS に動作点が割り振られたものとしたときの下層での制御を、GECGS は制御入力 w の飽和を含まないものとして、 H_2 ノルムを最小化する H_2 最適制御を行うこととし、フィードフォワード制御、フィードバック制御、2 自由度制御の三種類の制御方式を比較する。

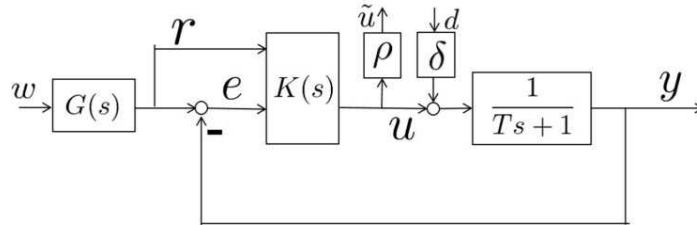


図 7： GECGS 制御系のブロック線図(2 自由度方式)

図 7 において、 $\delta=0.1$ 、 $\rho=0.05$ は、それぞれ入出力の重みで、 $G(s)$ は PV 発電出力の周波数帯域を表すフィルタであり、 $G(s)=24.7/(54.3s+1)$ 、制御器 $K(s)$ への入力 w は PV 発電出力 r 及び追従誤差 e であり、フィードフォワード制御方式の場合は r のみ、フィードバック制御方式の場合は e のみとなる。各制御方式において入力 $[w \ d]^T$ から出力 $[e \ \rho u]^T$ の H_2 ノルムを最小化するような制御器を構成する。

・シミュレーションによる検証

図 3 の時系列データを参照信号 $r(t)$ 、外乱 d は Band-Limited White Noise ブロックによって生成される擬似的なホワイトノイズであるとし、GECGS は制御入力に $\sigma=5$ [kW] の飽和を含むとして、三種類の制御方式をシミュレーションにより比較した。図 8 は、追従誤差 $e(t)$ の 60 秒分の時系列である。表 1 に示すように、フィードフォワード方式に比べてフィードバック方式、2 自由度方式が追従誤差を抑制できている。また、表 1 に示すように、追従誤差の 2 乗積分は、2 自由度方式が一番小さい。

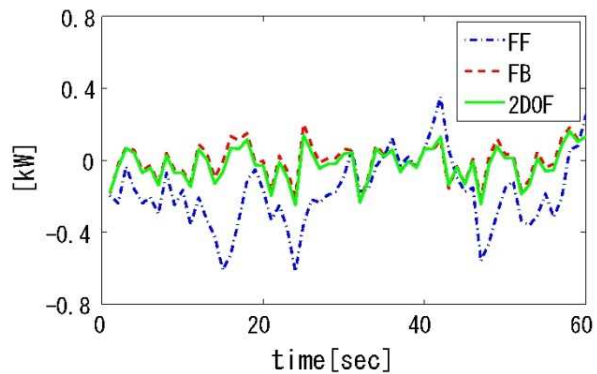


図 8： 追従誤差 $e(t)$ の各方式比較

表 1：各制御方式の偏差の二乗積分 ($\int_0^T e(t)^2 dt$)

フィードフォワード方式	フィードバック方式	2 自由度方式
1676.7	358.75	343.95

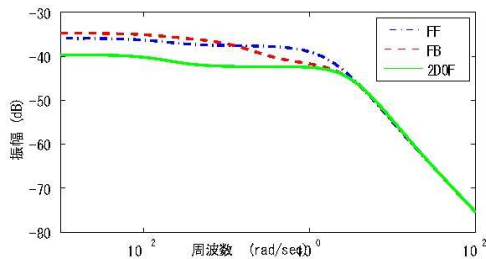


図 9： $w \rightarrow e$ の伝達関数のゲイン線図

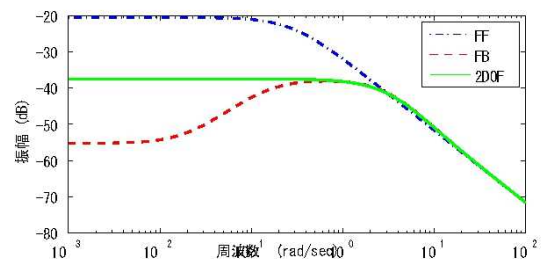


図 10： $d \rightarrow e$ の伝達関数のゲイン線図

これは図 9 と図 10 に示すように、フィードフォワード方式は外乱から追従誤差への、フィードバック方式では参照信号から追従誤差へのゲインが比較的大きくなっているのに対し、2 自由度制御方式ではどちらの伝達関数でもゲインを比較的小さく抑えられているからだと考えられる。

・GECGS 実機による検証

GECGS は定格出力 25[kW] のものを用い、定常出力を 20[kW] ($\sigma=5$ [kW]) として、実機検証を行った。

図 11 で、2 自由度制御方式の場合が他に比べて比較的追従誤差を小さく抑えられていることが示されている。また、表 2 に示すように、追従誤差の 2 乗積分は、2 自由度方式が一番小さく、2 自由度制御方式での追従誤差が一番小さいことが示されている。

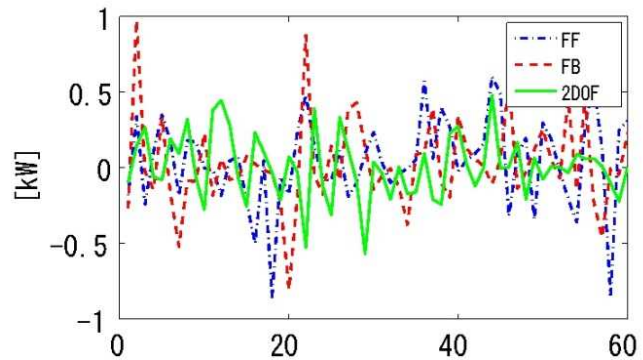


図 11： 各制御方式の追従誤差 $e(t)$ 比較
(60 秒分時系列プロット)

表 2： 各制御方式の偏差の二乗積分 ($\int_0^T e(t)^2 dt$)

フィードフォワード方式	フィードバック方式	2 自由度方式
2.03×10^4	1.7891×10^4	1.7667×10^4

(3) 階層化制御に向けた制御系設計に向けた考え方

・システムのパラメータと制御性能の関係の活用

階層化制御に向けた制御系設計のため、外部入力から評価出力への L_2 -ゲインが最小となる場合のその最小値 $\gamma(\sigma)$ を解析的に表現した。このように制御性能を飽和レベル σ の関数としてあらわすことで、各 GECGS にどの程度の変動補完幅をもたせるべきかを定量的に評価することができ、階層化制御系設計問題において有用であると考えられる。

・最適化制御に向けた方針

上位層による各 GECGS の動作点設定において、 σ を大きくすれば PV 出力変動補完性能は上がるが GECGS の発電効率は下がるトレードオフが存在する。複数の GECGS を用いて PV 変動補完制御を行う際、それぞれ性能の異なる GECGS に最適な動作点を与えて、全体の制御性能とシステム全体の発電効率を両立させることが必要である。

定量化の考え方の一つとして、発電効率は飽和レベル σ の関数として表されると仮定して、制御性能をある値で保証したうえで発電量を最大化させるという問題を最適化問題として定式化した。

(4) 今後の課題

本研究では、単一のガスエンジンを対象として、達成可能な制御性能の限界を与える関係式も導出し、その工学的観点からの考察も行った。階層化制御系設計を考える際には、各 GECGS の動作点をどのように設定したらよいかという問題に解を与えるべく、解析的に求めた達成可能な制御性能とシステムのパラメータが満たすべき関係式を利用して、複数の GECGS を含むシステムでの階層化制御系設計問題の適正な定式化とその解法の確立が今後の課題である。

3.3 商用ビルおよびビル群統合管理におけるエネルギー需要ネットワークを中心とした統合エネルギー制御システム設計（アズビル+東大グループ）

オフィスビルなど業務用ビルにおいて、空調に要するエネルギー消費量は現在でも増加傾向にある。空調用熱源システムの効率向上施策としては、エネルギーの面的利用が有効であるとされているが、この代表的な実施形態である地域冷暖房は一極集中型のエネルギー供給を想定しているため、対象街区全体に対する事前の計画と大規模な先行投資が必要であった。一方、近年注目されている建物間熱融通は、熱源・蓄熱機器の有効活用（ピーク電力削減、設備縮小）や、地中熱、河川水熱、下水熱などの未利用エネルギー活用を実現することで、部分的な改修による高効率機器の段階的導入で街区全体の効率向上が期待できる。

しかし、このような建物間熱融通によるエネルギー面的利用を実現するには、複数建物間における電力、熱エネルギーの需給を統合して扱う制御方策を構築する必要がある。本研究では、上記課題に対応するために、階層化分散型の最適化制御を採用し、その特徴である大域/局所目的を考慮しながら需要家間の情報独立性や自律性の向上が実現できることを数値実験により示す。

(1) ビル群統合エネルギー管理システムの要件

建物間熱融通によるエネルギー面的利用を実現するには、複数建物間における電力、熱エネルギーの需給を統合して扱う制御システムとして、下記の要件を満たす必要がある。

①大域/局所目的の整合性

各建物は自身のエネルギーコストを最小化するという局所目的を達成したいが、一方、街区全体では電力使用制限や未利用エネルギーの共用を考慮した大域的な制約を満たす必要がある。

②需要家間の情報独立性

街区内に多くの異なる事業者が共存することが想定されるため、設備情報や消費エネルギーなどの情報については他の事業者から秘匿する必要がある。特に産業用途の建物では、生産にかかわる情報は他の事業者に開示しない仕組みが必要である。

③状況変化に対する自律性

エネルギー管理の対象街区内部では、各建物の段階的な設備改修や、熱融通配管の敷設、対象建物の追加・離脱の可能性がある。このような状況変化に対し、システム全体の設定変更を行うことは現実的ではなく、変更による影響を局所的に抑えたい。

上記要件を満たすエネルギー管理システムとして、図1に示すような階層化分散型の最適化制御を採用した。階層化分散型の制御システムでは、建物群を統括して管理する上位制御システム（統合エネルギーセンター）と、個別建物の省エネを目指す下位制御システム（BEMS）から構成され、上位と下位で協調して街区全体の大域的最適化を達成する。

このように階層構造を有する分散制御方式を採用することにより、上位と下位の制御システムは

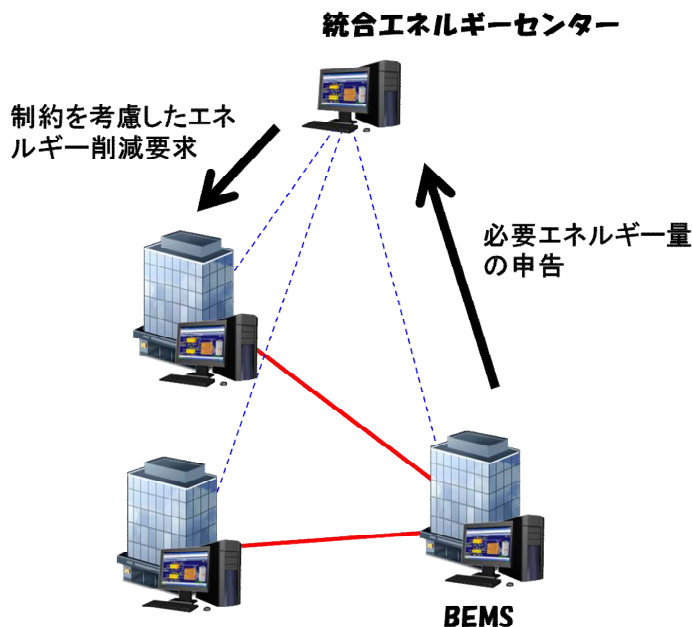


図1：階層化分散型制御システム

それぞれ、大域的な目的と局所的な目的を同時に最適化することが可能となり、要件①を満たすことができる。また、本手法では個別建物のエネルギー最適化は基本的には当該建物の下位制御システムが担うため、要件②の建物間の情報独立性を確保することが可能となる。さらに、対象建物が新規に参加または離脱した場合や建物内設備が更新劣化した場合、上位制御システムの設定と当該建物の効用関数の局所的な更新のみで、複数建物全体の最適化制御を継続実施することができる点で要件③も満たしている。

(2) ビル群エネルギー制御問題の定式化

制御対象のシステムは、冷凍機やボイラのような熱源機器、蓄熱槽や貯湯槽のような蓄熱機器が備わっている一般的な建物の空調熱源システムとする。電力などのエネルギーはエネルギー供給会社から購入し、熱源機器で熱に変換された後、一定期間蓄熱機器に蓄えられ、空調用途の需要を満たすために消費される。また、建物間には熱融通配管が敷設され、蓄熱機器から取り出した熱を異なる建物で消費することができる。これら蓄熱と建物間熱融通は、それぞれ時間・空間方向にエネルギー消費のパターンをシフトさせる機能と捉えることができ、これらを最適に運転することで、上記の大域/局所目的を満足させることが可能となる。以下ではサブシステムの数理モデルと最適化問題について述べる。

熱源機器特性: 時刻 t における熱源機器 i ($\in N$) の電力消費量を $E_i[t]$ 、生成熱量を $u_i[t]$ 、機器効率を単調増加の凸関数 $P_i(\cdot)$ 、定格生成熱量を $u_{i\max}$ と表記すると、熱源機器 i に関する特性は次式で表すことができる。

$$E_i[t] = P_i(u_i[t]) \quad (1)$$

$$0 \leq u_i[t] \leq u_{i\max} \quad (2)$$

ここで、(1)式は熱源機器に投入した電力消費量と生成熱量の関係を、(2)式は生成熱量の上下限制約を表している。

蓄熱機器特性: 時刻 t における蓄熱機器 i ($\in N$) の残蓄熱量を $Q_i[t]$ 、放熱量を $v_i[t]$ 、放熱係数を η_i 、残蓄熱量の上下限制約をそれぞれ $Q_{i\max}$ 、 $Q_{i\min}$ と表記する。このとき、蓄熱機器 i 周りのエネルギーバランスは、自己放熱量が残蓄熱量に比例すると仮定すると、

$$Q_i[t+1] = (1 - \eta_i)Q_i[t] + u_i[t] - v_i[t] \quad (3)$$

$$Q_{i\min} \leq Q_i[t] \leq Q_{i\max} \quad (4)$$

$$v_i[t] \geq 0 \quad (5)$$

のように表すことができる。(3)式は蓄熱機器の熱収支の関係式を、(4)式は蓄熱量の上下限制約を、(5)式は放熱量の非負制約を表している。

熱需給バランス: 時刻 t における蓄熱機器 i ($\in N$) からの放熱量 $v_i[t]$ は、各建物 j ($\in N$) に $d_{ij}[t]$ で分配され、この分配された熱量は建物 j の供給熱量 $b_j[t]$ に、各建物 i から合流する。これらの分配、合流の収支は、それぞれ次の(6)、(7)式で表される。

$$v_i[t] = \sum_{j \in N} d_{ij}[t] \quad (6)$$

$$b_j[t] = \sum_{i \in N} (1 - \kappa_{ij}) d_{ij}[t] \quad (7)$$

ここで、 κ_{ij} は建物 i から建物 j へ敷設された熱融通配管の損失係数で、同一建物間は 0、異なる建物間で配管が存在しない場合は 1 とする。

総消費電力制約: 時刻 t における電力消費量 $E_i[t]$ の全建物での総量に対し、上限制約 $E_{\text{limit}}[t]$ が課せられているものとする。

$$\sum_{i \in N} E_i[t] \leq E_{\text{limit}}[t] \quad (8)$$

目的関数: 最適化問題の目的関数は、時刻 t ごとに異なる電力単価を $E^C[t]$ 、室内快適性を、要求熱量 $b_i^{demand}[t]$ に対して供給熱量 $b_i[t]$ が一致するときに最大となるような単調増加の凹関数 $A_{i,t}(\cdot)$ で表記すると、次式で表すことができる。

$$\max \left[- \sum_{h=1}^T \sum_{i \in N} E^C[t] E_i[t] + \sum_{h=1}^T \sum_{i \in N} A_{i,t}(b_i[t] | b_i^{demand}[t]) \right] \quad (9)$$

ここで、(9)式の第1項と第2項は、各建物における空調エネルギーコストの最小化と、快適性の最大化に対応している。

上記(1)-(9)式から、時刻 $t=1, \dots, T$ の評価区間を対象とした最適化問題を構成できる。

(3) 階層化分散制御の導入

次に階層化分散制御方式として、Uzawa の主双対最適化アルゴリズムをベースとした求解アルゴリズムを示す。主双対最適化アルゴリズムでは、制約付最適化問題の目的関数が狭義凹関数、不等式制約が広義凹関数、等式制約がアフィン関数で記述されるとき、ラグランジュ関数を用いた更新則が大域的最適解に収束することが知られている。ここで、目的関数が設計変数の一部の要素のみで記述される関数の和で記述できる場合、個別の更新アルゴリズムと、それらの間の情報交換に問題が分離でき、分散的に解くことが可能となる。前述の最適化問題(1)-(9)式に対応する更新則は、 $\mu_{Q_i}[t]$ 、 $\mu_{v_i}[t]$ 、 $\mu_{b_i}[t]$ 、 $\mu_{E_i}[t]$ 、 $\lambda_E[t]$ をそれぞれ、時刻 t における蓄熱量、放熱量、供給熱量、電力消費量、総電力消費量に関するラグランジュ乗数、 $A'_{i,h}(\cdot)$ を快適性関数 $A_{i,h}(\cdot)$ の導関数とすると、次式で表される。

$$\dot{\mu}_{v_i}[t] = v_i[t] - \sum_{j \in N} d_{ij}[t] \quad (10)$$

$$\dot{\mu}_{b_j}[t] = b_j[t] - \sum_{i \in N} (1 - \kappa_{ij}) d_{ij}[t] \quad (11)$$

$$d_{ij}[t] = \begin{cases} \max(\mu_{v_i}[t] + (1 - \kappa_{ij}) \mu_{b_j}[t], 0) & (d_{ij}[t] = 0) \\ \mu_{v_i}[t] + (1 - \kappa_{ij}) \mu_{b_j}[t] & (d_{ij}[t] > 0) \end{cases} \quad (12)$$

$$\dot{\lambda}_E[t] = \begin{cases} \max\left(\sum_{i \in N} E_i[t] - E_{\text{limit}}[t], 0\right) & (\lambda_E[t] = 0) \\ \sum_{i \in N} E_i[t] - E_{\text{limit}}[t] & (\lambda_E[t] > 0) \end{cases} \quad (13)$$

$$\dot{b}_i[t] = A'_{i,h}(b_i[t] | b_i^{demand}[t]) - \mu_{b_i}[t] \quad (14)$$

$$\dot{v}_i[t] = \begin{cases} \max(-\mu_{Q_i}[t] - \mu_{v_i}[t], 0) & (v_i[t] = 0) \\ -\mu_{Q_i}[t] - \mu_{v_i}[t] & (0 < v_i[t] < v_{i,\max}) \\ \min(-\mu_{Q_i}[t] - \mu_{v_i}[t], 0) & (v_i[t] = v_{i,\max}) \end{cases} \quad (15)$$

$$\dot{E}_i[t] = \begin{cases} \max(-\mu_{E_i}[t] - \lambda_E[t] - E_i[t], 0) & (E_i[t] = 0) \\ -\mu_{E_i}[t] - \lambda_E[t] - E_i[t] & (E_i[t] > 0) \end{cases} \quad (16)$$

実際の制御機器でこのアルゴリズムを実現させる際には、(10)-(13)式からなる更新則を上位制御システムに、(14)-(16)式からなる更新則を下位制御システムの処理に分離し、両者の通信によりラグランジュ乗数の値を更新することになる。上位制御システムはパラメータとして、建物間の熱融通配管の接続状況 κ_{ij} と全建物の上限電力消費量 $E_{\text{limit}}[t]$ のみを管理し、建物間熱収支の不一致と総電力量の制約を監視する。このとき、上位から下位にブロードキャストされるラグランジュ乗数 $\mu_{v_i}[t]$ 、 $\mu_{b_i}[t]$ 、 $\lambda_E[t]$ の更新には、下位の個別建物のパラメータは不要である。一方、下位制御システムは、熱源特性 $u_{i,\max}$ 、 $P_i(\cdot)$ 、蓄熱槽特性 η_i 、 $Q_{i,\max}$ 、 $Q_{i,\min}$ 、電力単価 $E^C[t]$ 、快適性 $A_{i,h}(\cdot)$ 、要求熱量 $b_i^{demand}[t]$ 、などの個別建物のパラメータを管理し、自身の状態量 $b_i[t]$ 、 $v_i[t]$ 、 $E_i[t]$ を更新する。このとき、他の建物に関する情報は不要である。

本手法のように階層化分散型の制御システムの構成をとることで、各建物が異なる事業者で構成される場合であっても設備情報や快適性関数などの情報は秘匿性が守られる。

(4) 検証のための数値実験

本手法を検証するために、表1で示すようにオフィスビル、ホテル、商業ビルの3建物からなる熱源システムを想定した。各建物には電気式熱源と蓄熱槽を各1台ずつ備え、ホテルおよび商業ビルと比較してオフィスビルは高効率な熱源を使用し、蓄熱槽はすべての建物で同一性能とした。さらに、地中熱による熱供給を表した仮想的な建物を定義し、3建物すべてと熱融通配管で接続した。要求熱量 $b_i^{demand}[t]$ は、建物用途別に延床面積で正規化された文献値から中間期(4月)の冷房負荷を取得し、図2のように全建物の延床面積を 10,000m² として換算した。また、電力単価 $E^C[t]$ は 8~21 時台を 9.3 円/kWh、22~7 時台を 10.5 円/kWh と設定し、機器効率関数 $P_i(\cdot)$ と室内快適性関数 $A_{i,h}(\cdot)$ は次式を用いた。

$$P_i(u) = u / COP_i \quad (17)$$

$$A_{i,h}(b) = -\alpha_i[t] \times (b - b_i^{demand}[t])^2 \quad (18)$$

ここで、 $\alpha_i[t]$ は供給熱量が要求熱量に満たない場合の快適性低下による損失として、建物と時刻ごとに定義できるパラメータであるが、ここでは一定値 50 とした。

検証結果の一例として、制御中に熱融通配管が使用不可になるような状況変化に対する自律的な追従性を示す。図3は Receding Horizon 制御により評価区間 24 時間($T=24$)の最適化問題を、開始時点を1時間ずつずらしながら計算したもので、12 時に建物間の熱融通配管が破損し、熱融通ができなくなるものとした。この際、パラメータ変更の対象は上位制御システムが管理している熱融通損失 κ_{ij} のみで、各建物の下位制御システムに関しては何も変更していないことに注意する。

グラフの破線は最適化計算を実施した時刻を表しており、破線より左側はそれまでの運転結果、右側はこの時点での運転計画を表している。図3によると、パラメータ変更前(a)~(c)は、オフィスビルは自身の熱源で熱量生成を実施し、地中熱はホテルと商業ビルに供給されているが、一方パラメータ変更後(d)~(f)では、地中熱からの熱供給はオフィスのみに切り替わっていることが分かる。このようなシステム全体の変化に対しても、上位制御システムのパラメータ設定変更のみで状況変化に適応できていることがわかる。

表 1 : 建物別設備パラメータ

	オフィスビル	ホテル	商業ビル	地中熱
熱源効率 $COP_i[-]$	5.0	4.0	4.0	100.0
熱源定格 $u_{i,max}[GJ]$	4.0	3.0	3.0	1.0
蓄熱槽容量 $Q_{i,max}[GJ]$	10.0	10.0	10.0	10.0

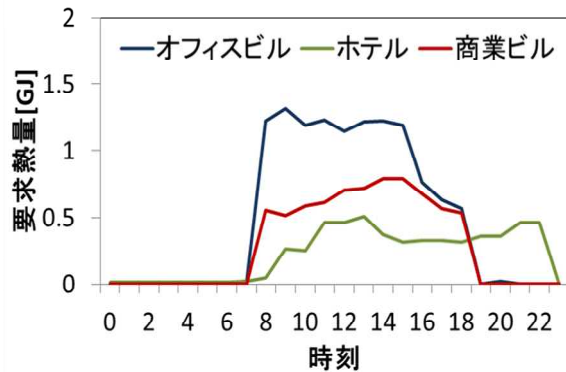


図 2 : 建物別要求熱量

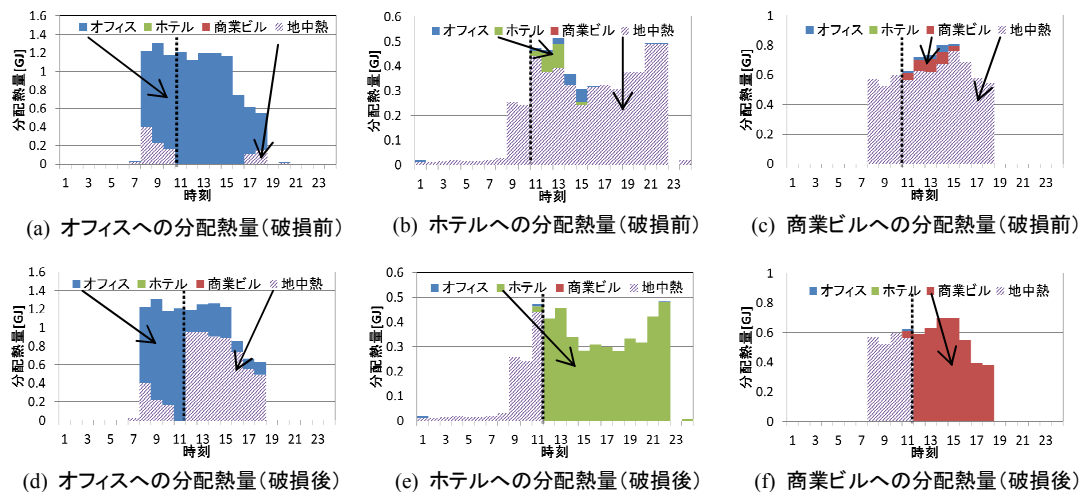


図 3：状況変化に対する自律的な追従性

(5) 実用化へ向けた課題

最後に、本手法を実システムに適用する際の実用課題について整理する。

- 需要家間の公平性担保
異なる事業者間での熱の融通を実現させるには、融通熱量に対する価格またはインセンティブを取り決める必要がある。既往研究では、階層間で交換されるラグランジュ乗数がエネルギー価格を反映しているとされており、このような観点から公平な仕組みを設計できる可能性がある。
- 実際の空調計装での実現性
本研究では、採熱した地中熱を直接空調に利用できるものとしたが、実際の空調計装ではヒートポンプ等による間接的な熱利用なども考えられる。そのため、ケーススタディにより、地中熱の直接/間接採熱のエネルギー消費の比較も検討した。今後、より現実的な設備・計装を想定した導入の検討が必要である。
- 導入コストを考慮した適用条件
階層化分散型方式の特徴は、特に対象建物数が多くなると顕著になるが、一方で建物間の熱融通に関しては、現在のところ融通配管敷設の初期コストが課題とされており、スケーラビリティの観点での適用条件の検討が必要である。
- 階層間通信負荷の抑制
現状の情報通信ネットワークの性能を考慮すると、上位制御システムと各建物間に設置した制御システムとの通信負荷はなるべく抑えたほうが望ましい。主双対最適化アルゴリズムの収束性については既往研究で論じられているが、通信頻度を下げた際の制御性能の劣化や収束性に関する定量的な検討が必要である。

3.4 電力ネットワークの階層化制御システムの開発（富士通＋東大グループ）

本グループでは、エネルギー蓄積要素として蓄電池を取り上げ、蓄電池を含む統合電力ネットワークシステムでエネルギーを有効活用するための階層化及び階層化に基づく蓄電池制御アルゴリズムを開発した。

(1) 問題設定

オフィスや地域などの電力ネットワーク中に多数の蓄電池が存在する状況での蓄電池制御を考える。蓄電池には何らかの計算機が付随しており、LAN や WAN などの通信ネットワークを通じてサーバに充電率情報を送ることができ、逆に、サーバからの指示を受けて動作（「駆動モード」）を変更できるとする。サーバは、オフィスや地域全体の需要電力量データや気温データなどから需要電力量予測を行う機構を持つとする。需要電力量予測と蓄電池の充電率情報等に基づき、各蓄電池を適切に充放電してオフィスや地域全体のピーク電力を削減することが目的である。

蓄電池システムは次の 3 つの動作が可能な標準的なものを考える。

- ・系統電力を接続された機器にバイパスする（バイパスモード）
- ・接続された機器に対して放電する（放電モード）
- ・蓄電池を充電しながら系統電力を接続された機器にバイパスする（充電・バイパスモード）

また、蓄電池と電力ネットワークに関して以下の仮定を置く。

- ・蓄電池の充電に使用される電力は一定であり、かつ、充電率の増加速度も一定であるとみなせる。放電電力に対する充電率の減少速度も一定であるとみなせる
- ・全ての蓄電池仕様（満充電容量、充電に使用される電力等）は同程度である
- ・一つの蓄電池に接続される機器の合計消費電力は時不変であり、かつ同程度である
- ・全ての蓄電池には系統電力のみが供給される

この電力ネットワークを含むエネルギーマネジメントシステムの全体像を図1に表す。

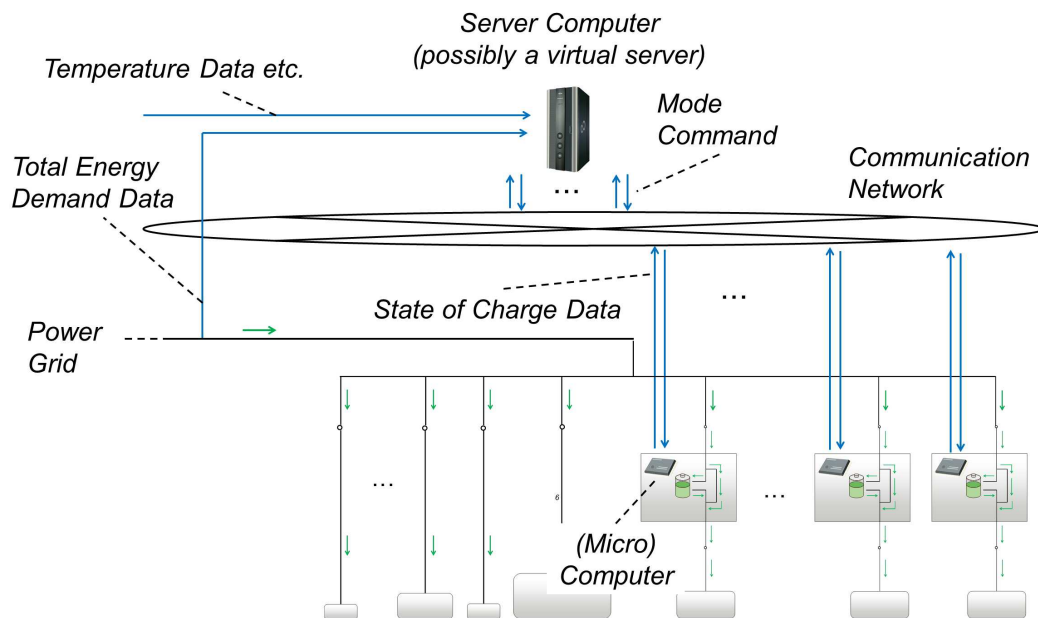


図1: エネルギーマネジメントシステム

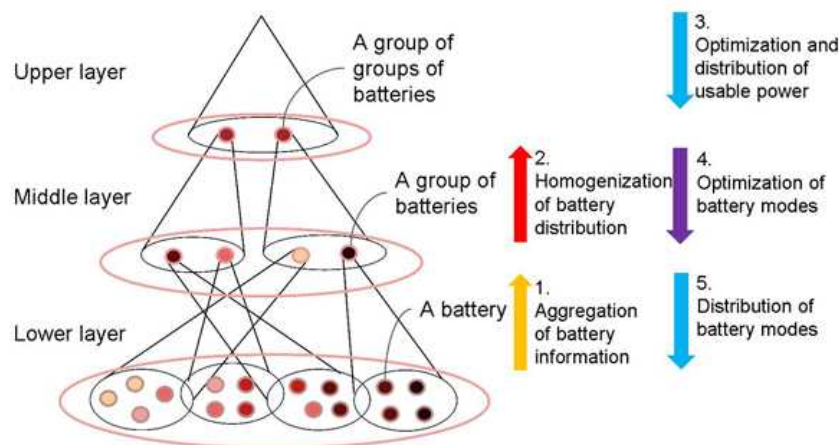
充放電モデルを用いた蓄電池システムの動特性に基づくモデル予測制御により蓄電池の駆動モードを最適化する。目的関数はピーク電力削減量と最終時刻での充電残量の総和の 2 つにウェイトを掛けて足し合わせたものを考え、これを最大化する問題である。

蓄電池を用いたエネルギーマネジメントは、局所的な測定（蓄電池の充電率測定）と局所的な操作（蓄電池の充放電）によって大域的な目的を達成する問題であり、グローバル制御問題と捉えることができる。地域レベルにおいてピーク電力量削減を実現するにはスケーラビリティが必要となる。また、長期的な効果を考慮したエネルギーの有効活用が行われることが望ましい。

しかしながら、上記の最適化問題は蓄電池台数とモデル予測のホライズンの長さの積に比例する数のバイナリ変数を含む混合整数計画問題となる。多数の蓄電池が存在する場合に最適化計算を時間内に終わらせるにはホライズンを短くする必要があるが、ピーク電力とピーク時刻の情報を取り込もうとすると時間分解能が粗くなってしまう。何らかの意味でこの困難を解決し、エネルギーマネジメントにおけるグローバル制御を実現する手段が必要となる。

(2) 階層化に基づく制御の設計

階層化は、蓄電池充電率に依存したグルーピングによる状態依存の 3 階層構造を成す(図2)。グループ内の残量分散を小さくしグループ平均残量の分散を大きくするグループ化(図2の下層の部分)と、グループ内の残量分散を大きくしグループ平均残量の分散を小さくするグループ化(図2の中層の部分)とを組み合わせる。下層では蓄電池グループ(仮想蓄電池)では、グループ内の蓄電池の大きさは同程度なので、蓄電池グループの充電率をグループ内蓄電池の充電率の平均値で代用する(平均値による情報縮約)。中層のグルーピング(仮想蓄電池のグルーピング)では、どの仮想蓄電池グループも似た平均充電率を持ち、各グループの充電率分散が大きくなっている(分布均一化)。



最適化と情報分配のアルゴリズムは次の 3 つのステップから成る。

上層ではシステム全体の電力需要予測を考慮して、最終時刻までの各区間に各仮想蓄電池グループが使用する電力を計画する。サブシステムの均一化により個々の仮想蓄電池のモード（空間方向の最適化）を考える必要がないため、時間分解能を制御間隔の 30 分にしたままモデル予測区間を一日の最終時刻まで取って最適化計算が可能になる。さらに、ピーク電力等の情報は予測値であることを考慮して、ピーク時刻での目標充電量を定め、消費電力が徐々に上がっていくような制約を入れて電池による需用電力の区間毎の和を最小にする最適化問題を解き、区間毎の使用可能電力量を上層のグループ数で割り、中層の各グループでの今後の使用可能電力量として分配する。

中層では上層から分配された使用可能電力量を制約として、グループに属する仮想蓄電池の駆動モードの最適化計算を行う。分配された電力量はネットワーク全体のピーク電力情報を入れて計算されているため、中層では配分された電力量をできるだけ無駄なく使うような数区間分の仮想蓄電池モード（空間方向）の最適化を行う。最適化計算は上層でのグループ数の回数だけ繰り返されるが、グループ間の残量分布の差異が小さければ 1 回の最適化結果を全グループで流用す

ることで計算時間を削減することも可能である。

下層では仮想蓄電池(蓄電池の集合)に割り当てられた次の区間の駆動モードを、通信ネットワークを通じてグループに属する個々の蓄電池システムに分配する(ここまでがサーバ内の処理である)。中層の仮想蓄電池を構成する蓄電池の充電率の分散は小さいため、それらは分配された駆動モードで動作できることが多い。例えば放電で動作させたいが充電率が小さくそれが不可能など、分配されたモードを適用できない場合は個々の蓄電池に付随した計算機が適宜駆動モードを制御する。

(3) 計算実験結果

シミュレーションによる提案アルゴリズムの評価を示す。より現実的で具体的な問題設定にするため、ノート PC (バッテリーを蓄電池とみなす) を多数含む電力ネットワークシステムのピーク電力削減を目的とした制御問題を考える。ここで、電力は単位時間(30 分間)の電力量の“平均電力”のことである。以下の計算実験では 1000 台、または、10000 台のノート PC を持つオフィスを想定した。需要予測は実際のデータを想定ノート PC 台数に合うようスケーリングしたデータを使用した。上層と中層のサイズはそれぞれ 10, 100 とし、中層のホライズンを 3 区間とした。制御間隔は 0.5 時間(30 分)である。計算実験は 2.40 GHz CPU、16 GB のメモリを持つ計算機上で行い、最適化エンジンは Symphony 5.2.0 を使った。

図3は 10000 台のノート PC を持つシステムに提案制御アルゴリズムを適用する前(全ての PC が全区間バイパスモードと仮定)と適用後(制御後)の需要電力の比較である。赤線はシステム内の全ノート PC をバイパスモードで動かした時のシステム全体の需要予測カーブを、緑線はシステム全体からノート PC を除いた需要予測カーブを、青線は制御アルゴリズム適用後のシステム全体の需要電力カーブを表している。

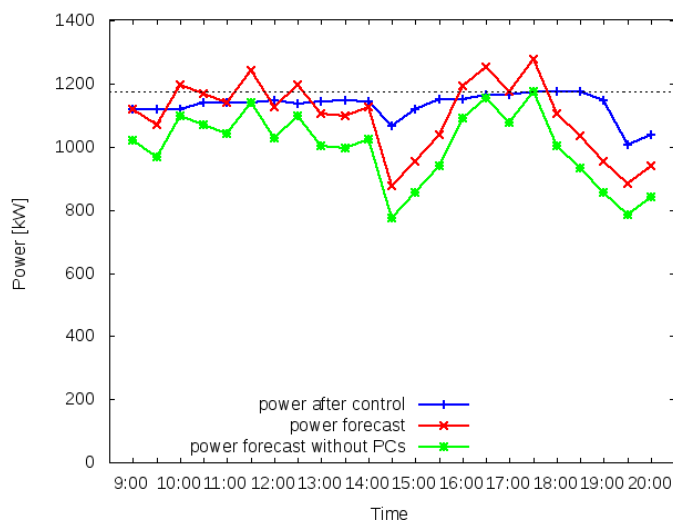


図3:10000 台のノート PC 制御

図4は、各区間で充電+バイパスモード、バイパスモード、放電モードを取ったバッテリーの台数を表している。ピーク電力の予測値は 1.28 MW だったが、制御後は 1.18 MW へと 7.8%削減した。各区間での最適化計算時間は数秒で、これは制御間隔 30 分に比べて十分小さく、制御に影響を与えない。よって蓄電池を多数含む電力エネルギーネットワークに対して本制御手法が適用可能である。

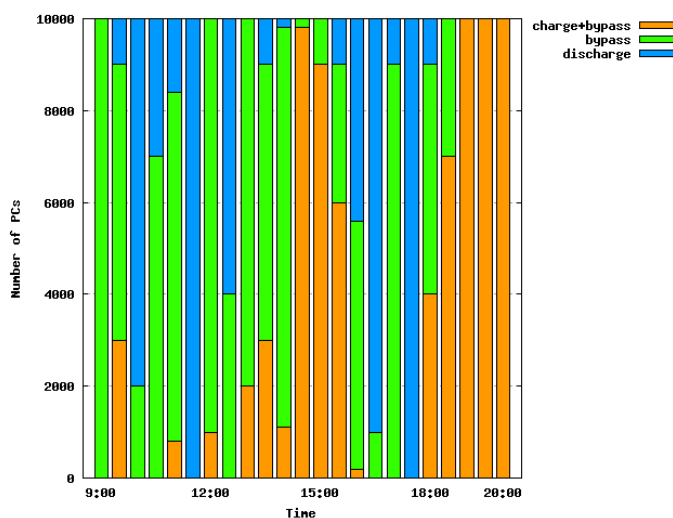


図4: 区間毎のバッテリーモード

また図3は、上層での最適化の効果も示している。上層ではピーク電力値だけでなく、一日の需要予測カーブのトレンドを加味して最適化計算を行っており、制御後の需要電力は 17:30 のピーク時刻に向けて徐々に増えている。これは需要予測の不確実性を考慮した制約を入れてモデル予測制御しているからである。1000 台の

ケースで従来の集中制御(図5)と3階層制御の計算結果(図6)を比較すると、図5のように早い時刻でピーク電力予測値と同レベルの実績値が出ていると、後に需要予測が下方修正された時に、ピーク値を下げるができなくなる。

本研究では状態依存の3階層仮想階層構造を導入し、階層間の情報縮約と分配機構、および、階層毎の最適化問題定式化により、階層化制御を提案した。システム全体の時間空間的な最適化問題を、層毎に適した目的関数を設定することで上層ではピーク電力の削減という時間方向の最適化問題、中層では仮想蓄電池の駆動モード決定という空間方向の最適化問題、に分割することができた。蓄電池の仮想階層化と階層化に基づく制御アルゴリズムによりエネルギー蓄積要素を含むエネルギーネットワークにおいて、局所的な蓄電池の状態計測と制御によりピーク電力削減という大域的な目的を達成するグローバル制御を実現した。

(4) 今後の課題

今後の研究として、容量や特性の異なる蓄電池が物理ネットワークのいろいろな層に存在するエネルギーネットワークシステムの制御への展開が考えられる。また、蓄電池の長期的な制御による充電率分布の変化も研究課題の一つである。

さらに、電気自動車を含むシステムでは、電気自動車を蓄電池と捉えた電力を直接空間的に移動することが可能になる。このようなシステムの蓄電池制御も興味深い課題である。

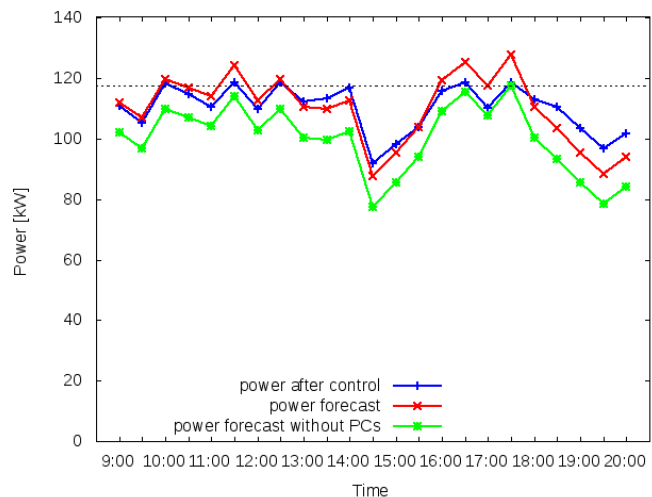


図5:従来手法(集中制御)

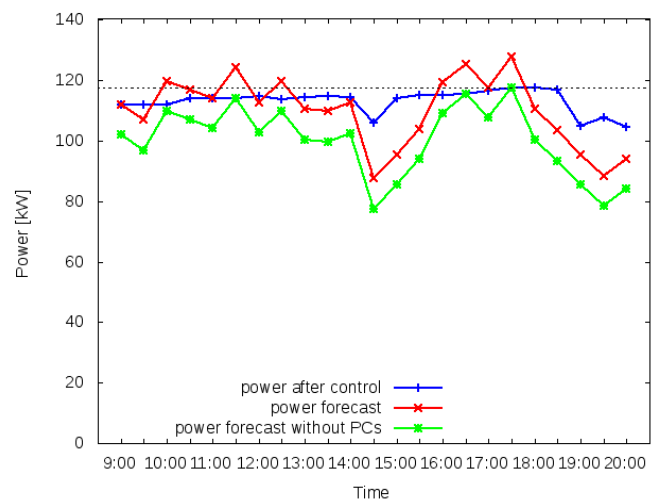


図6:3 階層制御

§ 4 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 0件、国際(欧文)誌 0件)

(2)その他の著作物(総説、書籍など)

・該当無し

(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 0件、国際会議 0件)

② 口頭発表 (国内会議 6件、国際会議 2件)

1. 藤田卓(東京大学), 原辰次(東京大学), 屋並仁史(富士通), 岩根秀直(富士通研究所), 佐々木智丈(富士通研究所), “ノートPCバッテリシステムの階層化モデル予測制御”, 第13回計測自動制御学会制御部門大会, アクロス福岡(福岡市), 2013年3月8日
2. 屋並仁史(富士通), 佐々木智丈(富士通), 金児純司(富士通), 森山学志(東京大学), 岡嶋崇(東京大学), 原辰次(東京大学), 岩根秀直(国立情報学研究所/富士通研究所), “階層化モデル予測制御—状態依存階層化とノートPCバッテリシステムへの応用”, 第5回横幹連合コンファレンス, 香川大学(高松市), 2013年12月22日
3. 原辰次(東京大学), 井村順一(東京工業大学), 津村幸治(東京大学), 植田譲(東京理科大学), “エネルギーネットワークシステムに対するグローバル制御系設計”, 第57回自動制御連合講演会, ホテル天坊(群馬県伊香保), 2014年11月11日
4. 木村健智(東京大学), 堀豊(California Institute of Technology), 原辰次(東京大学), 藤原純, 横山睦人, 須澤健太郎, 進士誉夫, 市村順一, 小原圭史郎, 渡部洋介(東京ガス), “天然ガスのコージェネレーションを含む統合エネルギー需給ネットワークに対する階層化制御”, 第57回自動制御連合講演会, ホテル天坊(群馬県伊香保), 2014年11月11日
5. 西口純也(アズビル), 黒崎淳(アズビル), 総田長生(アズビル), 前田拓哉(東京大学), 津村幸治(東京大学), 原辰次(東京大学), “ビル群統合エネルギー管理への階層化分散制御の適用”, 第57回自動制御連合講演会, ホテル天坊(群馬県伊香保), 2014年11月11日
6. 屋並仁史(富士通), 佐々木智丈(富士通), 金児純司(富士通), 原辰次(東京大学), 森山学志(東京大学), ワンヤフェイ(東京大学), 岩根秀直(国立情報学研究所), “状態依存仮想階層化によるグローバル制御—オフィスの蓄電池制御によるピーク電力削減”, 第57回自動制御連合講演会, ホテル天坊(群馬県伊香保), 2014年11月11日
7. Hitoshi Yanami (Fujitsu Ltd.), Tomotake Sasaki (Fujitsu Ltd.), Junji Kaneko (Fujitsu Ltd.), Shinji Hara (The University of Tokyo), Yafei Wang (The University of Tokyo), Satoshi Moriyama (The University of Tokyo), and Hidenao Iwane (National Institute of Informatics), “State-Dependent Virtual Hierarchization of Batteries and Its Application to Energy Management Systems”, The 34th Benelux Meeting on Systems and Control (BMSC 2015), Lommel, Belgium, March 24-26, 2015
8. Hitoshi Yanami (Fujitsu Ltd.), Tomotake Sasaki (Fujitsu Ltd.), Junji Kaneko (Fujitsu Ltd.), Shinji Hara (The University of Tokyo), Yafei Wang (The University of Tokyo), Satoshi Moriyama (The University of Tokyo), and Hidenao Iwane (National Institute of Informatics), “State-Dependent Virtual Hierarchization of Batteries for Realizing a Glocal Control in Energy Network Systems and Its Application to Peak Power Reduction in

Office”, The 10th Asian Control Conference (ASCC 2015), Kota Kinabalu, Malaysia, May 31–June 3, 2015

ポスター発表 (国内会議 0 件、国際会議 0 件)

(4)知財出願

①国内出願 (2 件)

1. ≪ 発明の名称: “制御方法、制御サーバ及び制御プログラム”、発明者: 屋並仁史, 佐々木智丈, 原辰次, 森山学志、出願人: 富士通株式会社, 国立大学法人東京大学、出願日: 2013/12/20、出願番号: 2013-264646 ≫
2. ≪ 発明の名称: “電源制御装置、電源制御プログラム、電源制御方法及び電源制御システム”、発明者: 佐々木智丈, 屋並仁史, 金児純司, 原辰次、出願人: 富士通株式会社, 国立大学法人東京大学、出願日: 2014/11/28、出願番号: 2014-241371 ≫

②海外出願 (0 件)

③その他の知的財産権

・該当無し

(5)受賞・報道等

①受賞

・該当無し

②マスコミ(新聞・TV等)報道

・該当無し

③その他

・該当無し

(6)成果展開事例

①実用化に向けての展開

・該当無し

② 社会還元的な展開活動

・該当無し

§ 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
H25 年 3 月 7 日	CREST 特別セッション “Towards Novel Distributed Management for Power Systems”	アクロス 福岡 (SICE 制御 部門大会と 併設)	約 80 人	海外招待者 3 名と CREST 研究者 5 名の講演。すべて英語で講演 IFAC Japan NM0 と共催

H25 年 3 月 7 日	CREST 特別国際セッション	アクロス 福岡(SICE 制御部門大 会と併設)	約 50 人	海外招待者の講演。 R. Tempo 教授を招聘 IFAC Japan NMO と共催
H25 年 9 月 16 日	SICE Annual Conference 2013 in Nagoya (SICE2013) JST EMS CREST プロジェ クト「地域統合エネルギ ーシステム設計に向け たシステム制御理論の 構築－グローバル制御 の視点－」オーガナイズ ドセッション	名古屋大学	約 45 人	招聘者:Lucy Pao (University of Colorado at Boulder, USA), Anuradha Annaswamy (Massachusetts Inst. of Tech., USA)
H25 年 10 月 17 日	Mini-Workshop on Multiscale Energy Management	東京工業大 学・大岡山 キャンパス	約 30 人	井村T, 薄Tとの FS におい て、外国人研究者を交えた ミニワークショップを開催
H25 年 12 月 9 日	CDC2013 ワークショップ	フィレンツェ フィエラコングレ ス&エキシビショ ンセンター	約 30 人	国際学会での Workshop (企画:原・藤田)
H26 年 10 月 22 日	ICCAS2014 Special Session	ソウル KINTEX	約 35 人	国際学会での Special Session(企画:原・井村)
H26 年 11 月 11 日	第 57 回 自動制御連合 講演会 “エネルギーネットワ ークシステムの階層化 分散制御”	群馬県 渋川市 ホテル天坊	約 50 人	国内学会でのオーガナイズ ドセッション (企画:原・井村)
H24 年 11 月 30 日	チーム内ミーティング (非公開)	東京大学	10 人	研究進捗報告のための ミーティング
H25 年 1 月 21 日	チーム内ミーティング (非公開)	東京ガス千 住テクノステ ーション	10 人	研究進捗報告のための ミーティング 東京ガス千住テクノステーシ ョンの見学も実施
H25 年 2 月 27 日	チーム内ミーティング (非公開)	東京大学	12 人	研究進捗報告のための ミーティング
H25 年 5 月 29 日	チーム内ミーティング (非公開)	東京大学	10 人	研究進捗報告のための ミーティング
H25 年 7 月 25 日	チーム内ミーティング (非公開)	東京大学	12 人	研究進捗報告のための ミーティング
H25 年 9 月 11 日	チーム内ミーティング (非公開)	東京大学	11 人	研究進捗報告のための ミーティング
H26 3 月 27 日	チーム内ミーティング (非公開)	東京大学	12 人	研究進捗報告のための ミーティング
H26 3 月 27 日	チーム内ミーティング (非公開)	東京大学	10 人	研究進捗報告のための ミーティング

H26 年 6 月 23 日	チーム内ミーティング (非公開)	東京大学	12 人	研究進捗報告のための ミーティング
H26 年 9 月 8 日	チーム内ミーティング (非公開)	東京大学	11 人	研究進捗報告のための ミーティング
H26 年 10 月 14 日	チーム内ミーティング (非公開)	東京大学	12 人	研究進捗報告のための ミーティング
H26 年 11 月 11 日	チーム内ミーティング (非公開)	渋谷 ホテル天坊	9 人	研究進捗報告のための ミーティング
H26 年 12 月 8 日 (予定)	チーム内ミーティング (非公開)	東京大学	12 人	研究進捗報告のための ミーティング

§ 6 最後に

・特になし