

戦略的創造研究推進事業
—チーム型研究(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」

研究領域事後評価用資料

研究総括：藤田 政之

2020年1月

目 次

1. 研究領域の概要	1
(1) 戦略目標	1
(2) 研究領域	4
(3) 研究総括	5
(4) 採択研究課題・研究費.....	6
2. 研究領域および研究総括の設定について.....	9
3. 研究総括のねらい.....	11
4. 研究課題の選考について.....	12
5. 領域アドバイザーについて.....	16
6. 研究領域のマネジメントについて.....	17
7. 研究領域としての戦略目標の達成状況について.....	31
8. 総合所見	51

1. 研究領域の概要

(1) 戦略目標

① 戦略目標名

「再生可能エネルギーをはじめとした多様なエネルギーの需給の最適化を可能とする、分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論、数理モデル及び基盤技術の創出」

② 達成目標

本戦略目標で設定されている達成目標は以下の3点である。

- ・再生可能エネルギー需給の状態把握・推定・予測に関わる理論及び基盤技術の創出
- ・多様なエネルギーの需給制御による分散協調型エネルギー管理システム構築に関わる理論及び制御基盤技術の創出
- ・需要側と供給側のエネルギーネットワークの統合メカニズムと人間行動を考慮したエネルギー管理の最適化及びシステム全体の社会的合理性を追求する理論及び基盤技術の創出

③ 将来実現しうる重要課題の達成ビジョン

太陽電池パネルや蓄電池など再生可能エネルギーをはじめとした多様なエネルギーの需給に関わる技術群を地域性や利用形態等に応じて組み合わせて動かし、その需給状況を双方向かつリアルタイムに把握・分析し、分散エネルギーシステムと既存の電力系統が需給予測や消費予測情報に基づいたエネルギーシステムの最適化を行って、優れた経済性や災害時安定性等を有するエネルギー需給システムの実現を目指した、分散協調型エネルギー管理システム構築に関する理論及び基盤技術の開発を目指すものである。

また、国や自治体が支援する都市エネルギーインフラのスマート化(知能化)・グリーン化関連の実証事業との連携にも留意しつつ、出口を意識した基礎研究を行うことによって、得られる研究開発成果を社会実装に向けた取り組みへと繋げていくことを目指す。これにより、分散協調型エネルギー管理システムの構築実現や、そのシステムの社会的普及が促進され、発電量が不安定な再生可能エネルギーの受容可能量を増大させ、災害にも頑強なエネルギーインフラの実現につなげることを目指す。さらには、第4期科学技術基本計画に掲げられているグリーンイノベーションの目標実現に向けた重要課題「安定的なエネルギー供給と低炭素化の実現」の達成に貢献する。また、本戦略目標下で構築された理論およびシミュレーション技術をエネルギー政策の立案にも展開することにより、より高度化したスマートコミュニティの実現に貢献することを目指す。

さらには、社会インフラパッケージとして海外事業展開を視野に入れ、新しい分散協調型エネルギー管理システムを構築する基盤技術の国際標準化につなげ、我が国の社会・技術シ

システムの構築力強化に貢献することを目指す。また、世界各国への技術移転による CO2 排出量削減の達成により地球温暖化対策にも貢献することを目指す。

④具体的内容

今後、我が国が社会インフラとしてどのような新しいエネルギーシステムを構築していくべきかというエネルギー戦略の議論にあたっては、再生可能エネルギーを含む分散型エネルギーシステムと従来の電力系統システムとの調和をどう図るか、熱エネルギーなど多様なエネルギー源の最大限の活用、災害時も含めたエネルギーシステムの安定性、社会への導入コストなどに関して、科学的根拠に裏付けられた検討が必要である。この科学的検討には、これまで我が国でエネルギーシステム構築に主として携わってきた送配電工学分野、パワーエレクトロニクス分野や電力計測分野に加え、新しいエネルギー管理システム(EMS)を確立するために、システム科学をはじめとした様々な分野の研究者の参画が必要となる。

たとえば、多様で複雑なシステムを構築・運用するための制御技術、最適化技術、数理モデルやシミュレーション技術、取得データを高速に処理し分析するためのセンサネットワーク技術やデータマイニング技術、複雑なシステムの構造と機能を分析するネットワーク論や、自然エネルギーを予測するための地球環境計測・予測技術、人間行動を考慮したエネルギー消費予測などさまざまな研究分野の研究者を結集し、研究開発を推進することが必要である。

このような分野融合的な研究開発を通じて、再生可能エネルギーを含む多様なエネルギーを最大限活用するための分散協調型エネルギー管理システムの構築に資する、複雑分散系に対応した理論研究及び基盤技術開発を進める。

これにより、我が国のエネルギー政策への貢献だけでなく、情報通信分野と計測制御分野等の融合(実世界と情報社会の融合)による新しい学理や学問分野の創出が期待される。また、地域やその時の社会状況に応じてエネルギーシステムの要件も動的に変化していくため、様々な要求に応えられる普遍的・基盤的な理論・技術の構築を目指す。このためには、現状のエネルギーシステムを前提とした実データに基づくアプローチや、自動車、ロボット工学など他分野で実績のあるシステム制御理論・技術の展開、既存のエネルギーシステムにかかる制約等の前提をゼロベースに理想的なシステムを検討するアプローチなど、様々な切り口が考えられる。

また、以下に具体的なアプローチ例を挙げる。

- ・分散協調型エネルギー管理システムの安定化、最適化のための理論及び基盤技術に関する研究
- ・人間行動を考慮したエネルギー消費モデルの構築と、それに基づくエネルギー需給バランスの最適化メカニズムの設計
- ・衛星データや地域気象観測、地理情報、過去の需給実績から学習して予測性能を向上させる手法等により、精度の高い需要予測と再生可能エネルギー発電予測を可能にする

研究

- ・ 計算機シミュレーションや模擬シミュレータの開発及びそれを用いた上記理論やシステム技術の統合分析・評価研究

⑤政策上の位置付け

新成長戦略(平成 22 年 6 月 18 日閣議決定)における成長分野の一つであるグリーンイノベーションの実現に向け、第 4 期科学技術基本計画(平成 23 年 8 月 19 日閣議決定)では、「エネルギーを安定的に供給、確保していくため、革新的な再生可能エネルギーの開発と普及の拡大、分散エネルギーシステムの構築、強靱な社会インフラの整備等を速やかに進めなければならない」として、「基幹エネルギーと分散エネルギーの両供給システム及びエネルギー需要システムを総合的に最適制御するスマートグリッド等のエネルギーマネジメントに関する研究開発や自律分散エネルギーシステムの研究開発を促進し、これらの海外展開を図る」ことが目標として掲げられている。本戦略目標は、この目標達成に必要な基礎研究段階の課題解決を目指すものである。

また、本戦略目標では、制御、信号処理、モデリング、シミュレーション、ネットワーク、適応学習などシステム科学技術分野を含む基礎的な制御研究や衛星データを活用した気象予測に関する成果との連携による領域横断的な展開も想定している。これは、第 4 期科学技術基本計画における「先端計測及び解析技術等の発展につながるナノテクノロジーや光・量子科学技術、シミュレーションや e-サイエンス等の高度情報通信技術、数理科学、システム科学技術など、複数領域に横断的に活用することが可能な科学技術や融合領域の科学技術に関する研究開発を推進する」ことに貢献する。

さらに、東日本大震災以降の状況変化により、再生可能エネルギーの本格的な系統導入は、より緊急の政策課題となっている。新成長戦略実現会議下のエネルギー・環境会議において、従来の集中型システムの改良だけでなく、分散型の新システムを目指す議論が始まり、その中間的な整理において、「分散型のエネルギーシステムの実現」が「基本理念 2：新たなエネルギーシステム実現に向けた三原則」の一つとして取り上げられるなど、必要性の高い課題として位置付けられている。

⑥科学的裏付け

米国電気電子技術協会(IEEE)の論文誌“IEEE Transactions”に、2010 年より新たに“IEEE Transactions on Smart Grid”としてスマートグリッド研究分野が追加されたことに象徴されるように、この数年でスマートグリッドに関する学会発表数や論文数、特集号、学会での特別セッションなどが増加している。システム科学技術分野においてもトップクラスの研究がこの分野に参入し、最先端の数学的・統計的モデル、アルゴリズムを利用して、分散型エネルギーシステムの安定性、最適性のための理論及び基盤技術開発に関する研究が盛んとなっている。

動的かつ柔軟に電力価格を変更するリアルタイムプライシングについても、この問題は社会システムである需要側と技術システムである供給側との間の戦略的な相互関係として表現することができるため、制御工学、応用数学、経済学、電力工学の境界分野の課題として、様々な研究者によって研究が進められているが、その中でもゲーム理論、チーム理論に基づいたアプローチが特に盛んに議論され始めている。

日本はこれまでもパワーエレクトロニクス分野など個々の要素技術としては世界でも先導的な立場を担ってきた。今後は、スマートグリッド向け要素技術全体をシステムとしていかに構築していくかが問題となる。システム科学技術研究を豊かな要素技術の成果と結び付けて戦略的に振興することにより、世界をリードする研究体制と実施体制を我が国が築くことは不可能ではない。

米国ではエネルギー省が、気象・気候予測を行う商務省海洋大気庁と連携してスマートグリッドに取り組むとしている。多国籍企業においても、中東での発電に気象予測情報を活用することを考えており、我が国の気象・気候予測研究を実施する大学に対して技術提供を求めてきている。我が国の研究開発成果を我が国の利益として守りつつも国際展開する必要があり、研究開発の促進は重要であるといえる。

人類の共通課題である地球環境問題への貢献として、再生可能エネルギー大量導入に向けたエネルギーインフラ技術の早期確立と実用化、海外への技術提供も含めた水平展開は、世界における我が国の役割である。そのためには経済性、拡張性も視野にいたしたシステム構築の方法論の確立が急務である。

(2) 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」
(2012年度発足)

本研究領域では再生可能エネルギーをはじめとした多様なエネルギー源と様々な利用者をつなぐエネルギー管理システム(EMS)において、エネルギー需給を最適制御するための理論、数理モデル及び基盤技術の創出を目的とするものである。具体的には、エネルギーと情報を双方向かつリアルタイムで処理し、分散して存在する需要と供給間の状況把握や協調制御を可能とする理論及び基盤技術の研究を推進するものである。また、需要と供給それぞれの利己的意思決定をエネルギーシステム全体の社会的利益につなげるために、人間行動や社会的合理性を組み込んだ理論及び基盤技術の研究を推進するものである。さらには、再生可能エネルギーの需給を気象や地理的条件、過去の実績等を考慮して予測する理論及び基盤技術の研究を推進するものである。これらの研究を推進するにあたり、分散協調型エネルギー管理システムの構築という出口を見据え、システム、制御、情報、通信、エネルギー、社会科学など様々な研究分野をつないだ連携や融合に取り組むことが求められる。

(3) 研究総括

藤田 政之（東京工業大学工学院・教授）

(4) 採択研究課題・研究費

(百万円)

採択年度	研究代表者	所属・役職*1	研究課題	研究費*2
2012 年度	石井 秀明	東京工業大学大学院総合理工学研究科・准教授	電力システムにおける系統・制御通信ネットワークに対する分散型侵入検知手法の構築	68
	井村 順一	東京工業大学大学院情報理工学研究科・教授	太陽光発電の予測不確実性を許容する超大規模電力最適配分制御	90
	岩船 由美子	東京大学生産技術研究所・准教授	消費者の受容性を考慮した住宅エネルギー管理システム	32
	上田 博	名古屋大学地球水循環研究センター・教授	洋上風力発電に必要な洋上風況把握と予測方法の開発	85
	内田 健康	早稲田大学理工学術院・教授	エネルギー需給ネットワークにおけるエージェントの戦略的行動を公共利益に統合する最適化メカニズム	121
	太田 快人	京都大学大学院情報学研究科・教授	事故時運転継続要件を満たしつつ分散協調された系統連系インバータと蓄電池を含む送配電系の構築	88
	大森 浩充	慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科・教授	電力需要の約 75%を自然エネルギーによって賄うことを可能とする分散ロバスト最適制御	71
	加藤 丈和	京都大学大学院情報学研究科・特定研究員	「エネルギーの情報化」に基づく地域ナノグリッドの構築および実証	116

	薄 良彦	京都大学大学院 工学研究科・講師	マルチエネルギーシス テムの動的解析技術	18
	鈴木 達也	名古屋大学大学 院工学研究科・教 授	車載蓄電池を活用した モデル予測型エネルギ ー管理システムの設計	62
	鈴木 秀幸	東京大学生産技 術研究所・准教授	再生可能エネルギーの 大量導入を考慮した電 力システムの複雑ネッ トワーク動力学モデル 構築とその最適化理論 の創成	41
	中島 孝	東海大学情報技 術センター・教授	再生可能エネルギーの 調和的活用に貢献する 地球科学型支援システ ムの構築	120
	馬場 旬平	東京大学大学院 新領域創成科学 研究科・准教授	エネルギー貯蔵デバイ スの新しい応用方法お よび負荷側機器の制御 手法に必要な基礎 的な理論・モデルの構築	26
	林 泰弘	早稲田大学理工 学術院先進理工 学部・教授	協調エネルギー管理シ ステム実現手法の創出 とその汎用的な実証お よび評価の基盤体系構 築	241
	原 辰次	東京大学大学院 情報理工学系研 究科・教授	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	70
	藤崎 泰正	大阪大学大学院 情報科学研究科・ 教授	ネットワーク構造をも つ大規模システムのデ ィペンダブル制御	30
	東 俊一	京都大学大学院 情報学研究科・准 教授	リアルタイムプライシ ングの設計原理	37

2013 年度	依田 高典	京都大学大学院 経済学研究科・教授	スマートグリッドの社会実装化を見据えたエネルギー消費のデマンドレスポンスの行動経済学的研究	57
	大橋 弘	東京大学大学院 経済学研究科・教授	太陽光発電の大量導入における電力需給システムに関する理論的・定量的な経済分析	37
	下田 吉之	大阪大学大学院 工学研究科・教授	分散協調型エネルギー管理システムのためのエネルギー需要シミュレーションモデルの開発	23
	杉原 英治	大阪大学大学院 工学研究科・准教授	多数の経済主体が参加する公平かつ合理的な電力ネットワークインフラの最適運用手法	20
	造賀 芳文	広島大学大学院 工学研究院・准教授	パワーデバイスレベルまで考慮した高精度なシミュレーション技術に関する基礎的理論および方法論の構築	40
	日高 一義	東京工業大学大学院イノベーションマネジメント研究科・教授	需要家の行動変容に影響を与える要因に関する基礎的研究	85
	2015 年度 (再編)	井村 順一	東京工業大学大学院情報理工学研究科・教授	太陽光発電予測に基づく調和型電力系統制御のためのシステム理論構築
内田 健康		早稲田大学理工学術院先進理工学部・教授	エネルギー需給システム構築のための経済モデルと物理モデルの融	449

			合に基づく設計理論及び実証・実装・提言	
	鈴木 達也	名古屋大学大学院工学研究科・教授	エネルギー消費行動の観測と分散蓄電池群の協調的利用に基づく車・家庭・地域調和型エネルギー管理システム	430
	中島 孝	東海大学情報技術センター／東海大学情報理工学部・教授	分散協調型 EMS における地球科学情報の可用性向上とエネルギー需要モデルの開発	489
	林 泰弘	早稲田大学理工学術院・教授／スマート社会技術融合研究機構・機構長／先進グリッド技術研究所・所長	汎用的な実証基盤体系を利用したシナリオ対応型分散協調 EMS 実現手法の創出	771
			総研究費	4,451

*1 所属・役職：採択時、または再編時の所属、役職を記載。

*2 研究費： 2012 年度採択は 2.5 年間、2013 年度採択は 1.5 年間の実績。
2015 年度再編は 2019 年 10 月 31 日現在の 5 年間の見込み総額

2. 研究領域および研究総括の設定について (JST 記載)

(1) 研究領域選定の理由

本研究領域は、再生可能エネルギーをはじめとした多様なエネルギー源と様々な利用者をつなぐエネルギー管理システムにおいて、エネルギー需給を最適制御するための理論及び基盤技術の創出を目指す。このため、再生可能エネルギーを大量導入する場合のエネルギーシステムの安定化・最適化研究や、エネルギー消費において人間行動や社会的合理性を組み込んだ理論、再生可能エネルギーの需給を気象や地理的条件、過去の実績等を考慮して予測する技術など、多岐にわたる研究を対象としている。また、これらの研究を推進するにあたり、分散協調型エネルギー管理システムの構築という出口を見据え、要素技術の統合化に

取り組むことが科学技術イノベーションの実現のために求められる。よって、システム、制御、情報、通信、エネルギー、社会科学など様々な研究分野をつないだ連携や融合が不可欠であり、研究推進体制として、チームで研究を推進できる CREST を選定することは適切である。

以上のことから、対象とする研究課題を含め、本研究領域は戦略目標達成に向けて適切に設定されている。また、研究領域選定における調査において上記の研究分野の有識者から本研究領域の重要性についてご意見をいただいたことから、幅広い分野から優れた研究提案が多数見込まれる。

なお、CREST の領域設定においては、異分野の研究者の相互理解を促し、真の異分野連携・融合の実現と優れた研究者の力を社会的課題の解決に向けて最大限発揮できる仕組みを鋭意検討していくことが必要である。

(2) 研究総括指定の理由

研究総括 藤田政之 氏は、分散協調制御ならびにロバスト制御についての研究で世界的に著名な研究者である。分散協調制御の研究は、受動性に基づく分散協調型の制御によってネットワーク化されたシステム全体の安定化・最適化を達成する方法論を提案するものであり、世界に先駆けて非線形推定制御論を確立するという研究成果を上げている。またさらに、不確かなシステムに対するロバスト制御では、理論を実システムへ技術展開する研究に精力的に取り組んでいる。このような同氏の研究業績は、日本人として初めて IEEE

Transactions on Control Systems Technology Outstanding Paper Award を受賞したことなどに表われているように、国際的に高く評価されている。

このことから、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や、これらの要素技術をシステムとして展開することを目指す本研究領域の運営と推進に関し、優れた先見性と洞察力を有していると考えられる。

同氏はまた、IEEE Control Systems Society の Vice President、Board of Governors のメンバーならびに国際会議 IEEE Multi-conference on Systems and Control の General Chair を歴任しており、かつ複数の英文誌編集委員を務めてきたことから、国際的にも多くの研究者から信頼され、適切な評価と公平な選考を行い、適切な研究マネジメントを行っていると判断される。

さらに、本研究領域では多様な研究分野の連携と融合が不可欠であり、同氏は関連する多分野の研究者が参加する計測自動制御学会の理事や部門長を務めてきていること、複数の大学で機械系、電気系、情報系分野の研究教育職を経験していることから、分野を越えた俯瞰的な視野と豊富な人脈を備えていると見られる。

以上より、同氏は本研究領域の研究総括として適任であると考えられる。

(JST 記載)

3. 研究総括のねらい

(1) 基本的な考え方

戦略目標「再生可能エネルギーをはじめとした多様なエネルギーの需給の最適化を可能とする、分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論、数理モデル及び基盤技術の創出」を受け、本研究領域「分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論および基盤技術の創出と融合展開」で、研究総括は、以下のような点をねらいとした。

- ・ 異分野融合：実際の環境に適應できるシステムの理論、数理モデルの研究を行うために、エネルギー、情報通信、システム科学、気象、さらに、人間行動や経済学など人文社会科学分野も含めた異分野融合を行う。
- ・ 国際連携：再生エネルギーの導入や、電力自由化で先行する海外のトップレベルの研究者/研究機関との国際連携を行う。
- ・ システム科学：個別の要素技術に留まらず、システム全体としての統合化を目指す。
- ・ システム構築：理論および数理モデルを空論でなく実証・評価するためのシステム構築を行う。
- ・ 社会連携：システム構築を通じた社会連携への糸口をつかむ。

(2) 異分野融合のためのスキーム：スモールスタートとチーム再編

エネルギー、情報通信、システム科学、気象、等の科学技術分野のみならず、人文・社会科学分野も含む様々な研究分野を融合した研究チームを、公募の段階で編成することは非常に困難であると考え、これを解決する新しい手法として、CRESTのスキームを改良し、要素技術を磨く小規模チームを公募し(スモールスタート)、一定期間後に多様な分野の小規模チームを融合した「最強チーム」を複数へ編成する方針とした。

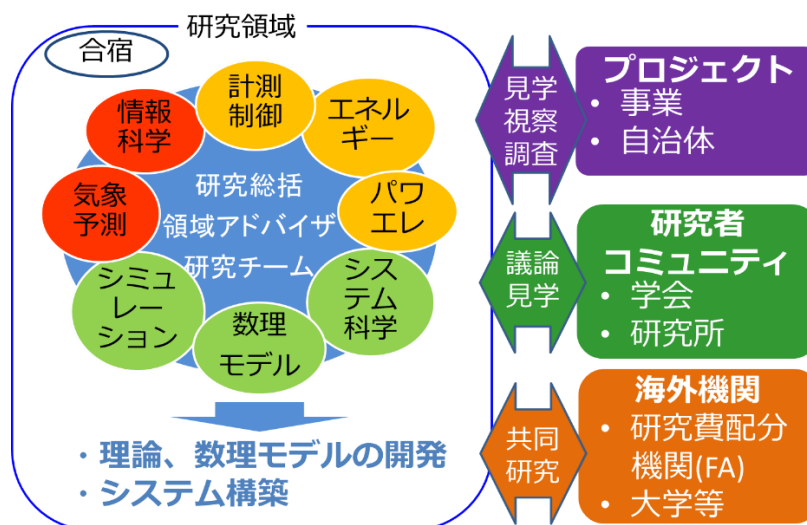


図1 研究領域運営の概要

4. 研究課題の選考について

(1) 研究課題の選考方針、及び選考結果

一般的な CREST の研究領域では通常 5.5 年間の研究課題を 3 年度に渡って公募することで、戦略目標の達成に向けて研究体制を構築する(図 2)。

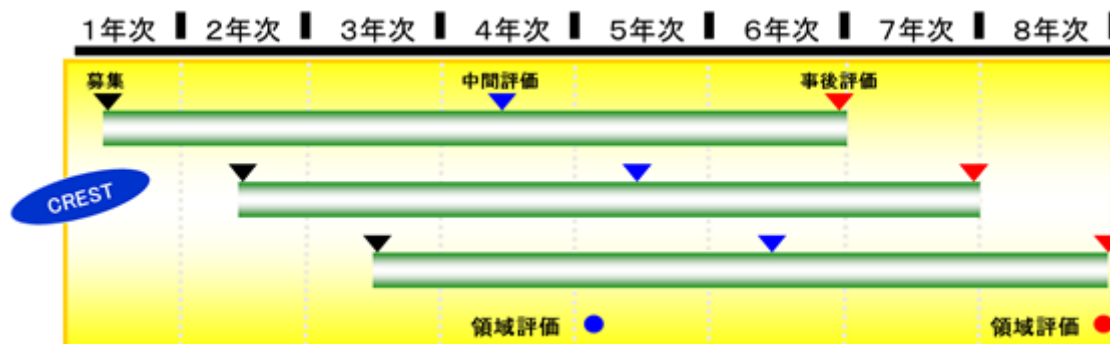


図 2 一般的な CREST の公募、評価、再編スケジュール

本研究領域では、先端的な基礎研究を推進するとともに、その成果を社会実装に向けてシステム統合するため、チーム再編方式を CREST に初めて導入した。本研究領域の公募、評価、再編に関するスケジュールを図 3 に示す。初年度(2012 年度)は 2.5 年間の研究課題、2 年目は 1.5 年間の研究課題をそれぞれ公募し、3 年目の公募は実施しないこととした。これにより、採択課題は 2014 年度に全て終了となり、再編された最強チームが新たに 2015 年度から始動することとした。このように研究期間を中断するのではなく、研究終了後にチーム再編をすることで、採択時の研究目標達成に向けて研究を推進できる環境を整えた。また、最強チームへの移行を既得権化せず、真に必要な研究チームのみが次のステージに進むことになるため、公募採択後も常に競争環境を維持することに寄与した。

また、募集要項に「優れた研究を行いつつ分野を越えた議論を徹底的に行える、研究者の頭脳が十分活かせる小規模チーム」、「若手の研究者の積極的な応募に強く期待」と明記し、更に 2 年目(2013 年度)の募集要項には「最強チームへの再編を見越して、2012 年度採択チームとどのような協働を想定しているのか提案書に記載して欲しい」などを明記した。併せて募集説明会の開催、本研究領域単独での学会周知(特に社会科学分野)などを行い、積極的な周知に努めた。



図3 本研究領域の公募、評価、再編スケジュール

選考にあたっては、最強チームへの再編を意識しつつ以下の方針を申し合わせた。その結果、2012年度に16チーム、2013年度に7チームの計23チームを公募にて採択した。

【2012年度の選考方針】

- ・最強チームとして、目標達成を期待出来る体制を構築する。
- ・最強チームの方向性は、日々変化するエネルギー問題を考慮しつつ、その時点で最適なアプローチを検討することで模索していく。
- ・まずは基礎研究としての評価を行う。
- ・他分野の知識不足や誤認がある(実態と乖離している)ことはある程度想定内であり、今後修正できる余地があれば良い。
- ・研究提案の範囲は狭くとも、しっかりした要素研究であれば、最強チームへの再編に必要となる。

【2013年度の選考方針】

- ・2012年度の選考方針を踏襲する。
- ・研究提案書に、「2012年度採択チームとの協働」について記載を求めて、これを審議の参考にする。
- ・2012年度の公募で採択できなかった社会科学、パワーエレクトロニクスの研究提案を重視する。

表1 研究代表者および研究課題(採択時の役職)

2012年度採択(研究期間2.5年)		
1	石井 秀明(東京工業大学大学院 総合理工学研究科・准教授)	電力システムにおける系統・制御通信ネットワークに対する分散型侵入検知手法の構築
2	井村 順一(東京工業大学大学院 情報理工学研究科・教授)	太陽光発電の予測不確実性を許容する超大規模電力最適配分制御
3	岩船 由美子(東京大学生産技術 研究所・准教授)	消費者の受容性を考慮した住宅エネルギー管理システム
4	上田 博(名古屋大学地球水循環 研究センター・教授)	洋上風力発電に必要な洋上風況把握と予測方法の開発
5	内田 健康(早稲田大学理工学術 院・教授)	エネルギー需給ネットワークにおけるエージェントの戦略的行動を公共利益に統合する最適化メカニズム
6	太田 快人(京都大学大学院情報 学研究科・教授)	事故時運転継続要件を満たしつつ分散協調された系統連系インバータと蓄電池を含む送配電系の構築
7	大森 浩充(慶應義塾大学理工学 部・教授)	電力需要の約 75%を自然エネルギーによって賄うことを可能とする分散ロバスト最適制御
8	加藤 丈和(京都大学大学院情報 学研究科・特定研究員)	「エネルギーの情報化」に基づく地域ナノグリッドの構築および実証
9	薄 良彦(京都大学大学院工学研 究科・講師)	マルチエネルギーシステムの動的解析技術
10	鈴木 達也(名古屋大学大学院工 学研究科・教授)	車載蓄電池を活用したモデル予測型エネルギー管理システム的设计
11	鈴木 秀幸(東京大学生産技術研 究所・准教授)	再生可能エネルギーの大量導入を考慮した電力システムの複雑ネットワーク動力学モデル構築とその最適化理論の創成
12	中島 孝(東海大学情報技術セン ター・教授)	再生可能エネルギーの調和的活用貢献する地球科学型支援システムの構築
13	馬場 旬平(東京大学大学院新領 域創成科学研究科・准教授)	エネルギー貯蔵デバイスの新しい応用方法および負荷側機器の制御手法に必要な基礎的な理論・モデルの構築
14	林 泰弘(早稲田大学理工学術院 先進理工学部・教授 /先進グリ ッド技術研究所・所長)	協調エネルギー管理システム実現手法の創出とその汎用的な実証および評価の基盤体系構築

15	原 辰次(東京大学大学院情報理工学系研究科・教授)	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： グローカル制御の視点
16	藤崎 泰正(大阪大学大学院情報科学研究科・教授)	ネットワーク構造をもつ大規模システムのディペンドブル制御
2013年度採択(研究期間1.5年)		
17	東 俊一(京都大学大学院情報学研究科・准教授)	リアルタイムプライシングの設計原理
18	依田 高典(京都大学大学院経済学研究科・教授)	スマートグリッドの社会実装化を見据えたエネルギー消費のデマンドレスポンスの行動経済学的研究
19	大橋 弘(東京大学大学院経済学研究科・教授)	太陽光発電の大量導入における電力需給システムに関する理論的・定量的な経済分析
20	下田 吉之(大阪大学大学院工学研究科・教授)	分散協調型エネルギー管理システムのためのエネルギー需要シミュレーションモデルの開発
21	杉原 英治(大阪大学大学院工学研究科・准教授)	多数の経済主体が参加する公平かつ合理的な電力ネットワークインフラの最適運用手法
22	造賀 芳文(広島大学大学院工学研究院・准教授)	パワーデバイスレベルまで考慮した高精度なシミュレーション技術に関する基礎的理論および方法論の構築
23	日高 一義(東京工業大学大学院イノベーションマネジメント研究科・教授)	需要家の行動変容に影響を与える要因に関する基礎的研究

(2) 研究課題、研究者の採択状況

選考方針に基づき、2012年度、2013年度に研究課題を募集した。2012年度の採択課題は、システム科学、電力システム、数理モデル、シミュレーション、気象、セキュリティ等を専門とする要素研究・理論研究に優れた16提案を採択した。2013年度は、前年度に採択に至らなかった経済、パワーエレクトロニクスを重点分野とし、2012年度採択チームと連携可能である7提案を採択した。

様々な分野からトップクラスの研究者の参画を得ることができ、戦略目標を達成するために必要な異分野融合、国際連携、システム構築を推進する研究課題を適切に採択できたと考える。

5. 領域アドバイザーについて

領域アドバイザーの氏名、役職等を表2に記載する。

表2 領域アドバイザー

領域アドバイザー (専門分野)	終了時の所属	役職	任期
浅野 浩志 (エネルギー工学、 エネルギー経済)	電力中央研究所	副研究参事	2012年10月～2020年3月
足立 修一 (制御工学)	慶應義塾大学	教授	2012年10月～2020年3月
飯野 穰 (エネルギー工学、 制御工学)	早稲田大学	准教授	2012年10月～2020年3月
岩野 和生 (情報科学)	三菱商事 株式会社	顧問	2012年10月～2015年10月 (途中退任)
喜連川 優 (情報科学)	国立情報学研究所 /東京大学	所長/教授	2012年10月～2013年9月 (途中退任)
合田 忠弘 (エネルギー工学)	愛知工業大学	客員教授	2012年10月～2020年3月
三平 満司 (制御工学)	東京工業大学	教授	2012年10月～2020年3月
杉江 俊治 (制御工学)	京都大学	教授	2012年10月～2020年3月
マルタ マルミローリ (エネルギー工学)	三菱電機 株式会社	部長	2012年10月～2020年3月
山西 健司 (情報科学)	東京大学	教授	2012年10月～2020年3月

エネルギー工学、制御工学、情報科学、エネルギー経済学などの専門家を領域アドバイザーとして委嘱した。領域アドバイザーは、アカデミアだけではなく企業でスマートコミュニティプロジェクトを推進した方や電力システムの開発を担当する方など、その立ち位置についても多様性を考慮した。

6. 研究領域のマネジメントについて

(1) 研究領域のマネジメントの概観

研究総括のねらいで記載した通り、本研究領域では、エネルギーの需要と供給を効率よく制御する理論、及びそれに基づく数理モデルおよび基盤技術の創出を行い、さらに社会連携への糸口をつかむことを目指しており、異分野融合、国際連携、システム構築等をねらいとして挙げている。本研究領域のマネジメントにおいては、このために、様々なマネジメント上の取り組みを行った。

前述の通り、異分野の研究者が融合したチームを最初の公募の段階から編成することは非常に困難であると考え、要素技術を磨く小規模チームを公募し(スモールスタート)、一定期間後に複数チームを1つの「最強チーム」として統合・再編する従来のCRESTにはなかったスキームを採用した。また、国際連携においては、単なる研究者同士のネットワークではなく、各国のファンディング機関と連携したワークショップを開催することで、面的な研究者ネットワークの構築をおこなった。また、各種のモデリングや制御手法を検証するための、シミュレーションおよびハードウェアインザループのシステムの構築を行ったことで、これらの実動するシステムが企業等の関心を惹き、領域の研究成果の社会連携へのいくつかの動きを実現できた。

以下では、これらの具体的なマネジメントの取り組みや研究推進における効果について述べる。

(2) 異分野融合の推進

① 異分野融合の取り組み(再編前)

(i) 研究総括と領域アドバイザーの相互理解・融合

研究総括と領域アドバイザーが課題選定および数年後の最強チーム再編に臨むことになるため、役割や労力が非常に大きくなることが考えられた。そのため、まずは研究総括と領域アドバイザーの相互理解・異分野融合に取り組んだ。

相互理解を進めるには、共感をすることが最も効果的であると考え、見学会を開催した。具体的には、2012年7月17日～18日の1泊2日で北九州のスマートコミュニティ実証事業および九州電力への見学会を企画し、本研究課題における課題や問題点を更に深めつつ交流する場を設定した。初日は北九州スマートコミュニティ創造事業の見学を行い、事業概要に続き地域節電所の運営について説明を受けた。その後、コミュニティ設置型蓄電池、ビルエネルギーマネジメントシステム(BEMS)の実証事業所をめぐり、運営担当者と意見交換を行った。2日目は九州電力の総合研究所を訪問し研究者との意見交換、さらには中央給電指令所において実際の電力制御システムを見学した。この取組により、研究総括および領域

アドバイザーの EMS に関する最新の知識が補強され、更に 1 泊 2 日の時間の共有で相互理解を深めることができた。

(ii) 領域会議

研究領域内の交流促進や外部との連携を加速するため以下の工夫を行った。

- ・ 戦略的創造研究推進事業「さきがけ」の領域会議で一般的である合宿形式とし、密な時間を共有することによる相互理解を促した。
- ・ 領域会議全体を通して各チームのポスターを掲示し、休憩時間等を利用したディスカッションが自由にできる環境を提供した。
- ・ EMS に関連した外部講師を招聘し、現状や動向についての見識を深めた。
- ・ 将来の連携を見据えて、東京電力株式会社(以下東京電力)、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)スマートコミュニティ部等を領域会議に招待し、ネットワーク形成に努めた。

上記の工夫等により、現在では東京電力と最強チームとの協働による世界初の実配電網を利用した実証研究が進められており、また NEDO とは国際ワークショップにおける米国ハワイ州スマートグリッド実証事業の視察の実現につながるなど、研究領域を越えた連携拡大に成功した。

(iii) 見学会

研究課題採択後の見学会は、これまでに国内外含 11 カ所を対象として実施した(表 3)。企業の取り組みや大規模実証事業の最前線を見学することにより研究総括、領域アドバイザー、研究者が EMS に関する知識や現状認識を深め、本研究領域の目指す方向性やビジョンを議論することに非常に効果的であった。

表3 見学会訪問先

時期	見学先	代表的な内容
2012年11月	三菱電機株式会社尼崎地区	太陽光パネル、変電所、発電所、模擬需要家設備
2012年12月	横浜市スマートグリッド実証事業	HEMS、BEMS
2013年5月	宗谷岬ウインドファーム	ウインドファーム、メガソーラ
2014年1月	NEDOマウイ島スマートグリッドプロジェクト(米国)	蓄電設備、風力発電所等
2014年5月	東京電力株式会社 本店	中央給電指令所、変電所
2014年9月	株式会社東芝 未来科学館	BEMS、スマートコミュニティ関連事業

2015年5月	オークリッジ国立研究所(米国)、 テネシー大学(米国)	HEMS、マイクログリッド NSF/ERC CURENTプログラム
2015年10月	清水建設株式会社 技術研究所	マイクログリッド
2016年4月	電力広域的運営推進機関	電力の広域的運営
2016年6月	IREN2 research project(ドイツ) (SIEMENSの実証地)	マイクログリッド

(iv) 分野を横断した研究者コミュニティへの参画

CREST に参画しているトップクラスの研究者は所属している研究コミュニティで重要な役割を果たしていることが多い。一方で、研究内容に関連があっても、所属していない研究者コミュニティへの参画や関与はあまり活発ではないことが多い。研究者コミュニティの壁を越えて、必要な異分野連携をするために、研究総括が率先して他分野の研究コミュニティに参画し、また、研究者にも積極的に参画するように求めた。代表的な実施例を下記に記載する。

・第16回情報論的学習理論ワークショップでの講演(2013年11月)

機械学習に関する日本で最大級のワークショップあり、機械学習の理論やアルゴリズムを深化させるための議論の場となっている。研究総括が「システム制御と機械学習、そしてエネルギーマネジメントへ」と題して講演を行い、異分野融合の必要性やエネルギーマネジメントにおける機械学習の重要性を説明した。

・日本リモートセンシング学会誌 Vol. 34(2014) No. 1 への寄稿(2014年8月)

リモートセンシングを専門とする研究者が中心となって参画している日本リモートセンシング学会の学会誌に研究総括が「社会課題の解決に向けて」と題して寄稿した。その中で、専門分野を超えた議論の重要性や研究者の力の結集が社会課題の解決に必要であることを述べた。

・環境経済・政策学会 2014年大会での特別企画開催(2014年9月)

環境と経済・政策の関わりについて理論的・実証的な研究活動を目的とした学会であり、社会科学を専門とする研究者が主に参画している。研究代表者である内田教授の研究チームが年次大会で特別企画「エネルギー需給ネットワークにおけるエージェントの戦略的行動を公共利益に統合する最適化メカニズム」を開催した。制御工学や経済学を専門とする研究者が発表を行い、制御工学と経済の連携の重要性や研究内容を発表し、議論を深めた。

・電気学会 B 部門大会での座談会の開催(2014年9月)

「2020年に向けた多様性を考慮した次世代型 EMS の研究・開発」と題して、研究総括が

ら研究領域の概要や異分野融合の必要性を説明し、更に、経済学、気象学、制御工学等を専門とした研究者が研究成果を発表し、活発な議論を実施した。

・ JST 研究開発戦略センター主催ワークショップにおける研究者の講演(2016年12月)

JST 研究開発戦略センターにより、研究成果の実用化や複雑な社会的諸課題の解決に必要な自然科学と文理・社会科学の融合を推進するためのワークショップが開催された。実際の文理融合研究の進捗や経験を報告するため、内田チームの経済学を専門とする研究者が参加し発表を行った。本研究領域では、CREST の全研究領域の中でも唯一、実際の研究で文理融合を推進しており、その経験や課題を発表した。

(v) 共通プラットフォームの準備

研究領域内の共通基盤ツールを整備・共有することで、各チームが開発した技術をシステムチックに統合できる考え、電力分野や制御分野で広く使用されている Mathworks 社の MATLAB/Simulink について説明する場を企画した。領域会議で、MathWorks 社の担当者を招き、MATLAB/Simulink の機能や使用法を研究者に紹介して頂いた。更に、研究者の要望に応じて個別セミナーが無料で開催された。実際に電力や制御を専門とする研究者は MATLAB/Simulink ベースで研究を進めている例が多く、気象、経済、半導体を専門とする研究者が初めて MATLAB/Simulink を導入し、データやモデルのやり取りを試行しながら、議論や共同研究を進めることができた。

②最強チーム再編

(i) トップダウン型とボトムアップ型アプローチの融合

最強チームの再編においては、ボトムアップ型の「研究者の自主性」とトップダウン型の「研究総括・領域アドバイザーの助言・指導」という2つのアプローチをバランス良く融合させることを基本とした。つまり、研究者の提案を尊重することにより高いモチベーションを保ちつつ異分野融合を進め、一方で研究総括と領域アドバイザーから戦略目標の達成や実用化へ向けたビジョンを研究者に示すことで、次世代 EMS という出口に向かって基礎研究者の力が最大限発揮できる研究開発体制を構築するためである。

【ボトムアップ型アプローチ】

異分野融合には、相互の研究者が尊敬しながら理解を深めることが非常に重要である。しばしば、研究者の団結や尊敬が欠如することにより、異分野融合が上手く進まないことが言及されている。研究者が最強チームの再編および再編後の最強チームとしての研究を積極的に進めるには、研究者のモチベーションを高く保ち、互いの研究分野に理解を深め、かつ積極的に活動することが求められる。そのため、まず研究チーム再編に当たってはフィージビリティスタディ (FS(Feasibility Study)) という手法を導入し、研究者が自主的に異分野の研究者との連携可能性を探りつつ FS 研究グループを試行的に構築し、その中で徹底的に

議論を行い、試行錯誤的により良いグループを構築していけるよう促した。FSの結果により、先端基礎研究をベースにした最強チームの姿が明らかになっていくものと考えた。

【トップダウン型アプローチ】

一方で研究者の自主性だけに任せると、各FSのテーマが戦略目標から逸脱することや、安易な異分野融合を目指すことによる研究レベルの低下、研究内容の偏り、実社会の問題解決からの乖離といった事態に陥る可能性が考えられた。そのため、担当アドバイザー制という仕組みを作り、領域アドバイザーが各FSの主担当(1名)、副担当(2名)に就任した。担当アドバイザーはFSのグループ会議に参加し、FS進捗の把握や指導・助言を行い、その状況を総括・アドバイザー会議で報告・議論し、全体共有する方針とした。各FSのテーマ設定、異分野融合の進捗、研究体制、代表者のリーダーシップ等を十分に確認するために、非常に有効な制度となった。

(ii) フィージビリティスタディ(FS)

図4および5に最強チーム再編に向けた概要、日程を示し、最強チーム再編の具体的な仕組みであるFS第1フェーズ、FS第2フェーズ、FS第3フェーズの運営について説明する。なお、このFSと公募採択した研究課題は並行して取り組んだ。

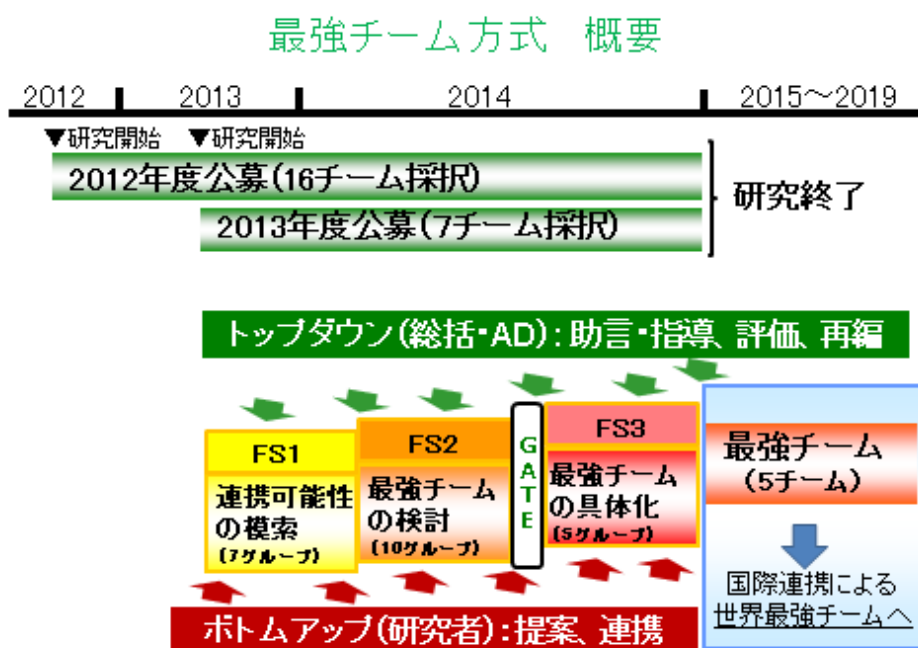


図4 最強チーム再編の概要

【FS 第 2 フェーズ (FS2)】 実施期間：2014 年 5 月～2014 年 9 月

FS2 では FS1 での経験を踏まえながら、本格的な最強チーム編成の場とし、「最強チームの研究提案」を募集した。FS2 におけるグループ代表者が最強チームの代表者になることを想定し、FS2 代表者は他の FS2 グループへは参加不可とした。FS2 提案に期待するポイントとしては、戦略目標の達成、異分野融合、国際展開、理論・数理モデルの新規性、社会実装への道筋とすることを募集時に周知した。FS2 では、最終報告会が FS3 への継続可否を判断するステージゲートとなることとした。

FS2 における検討内容

- ・最強チームの研究提案(内容、体制)

(iii) 研究総括・アドバイザー会議

最強チーム再編のトップダウン型アプローチとして、研究総括・アドバイザー会議を 2013 年 10 月から 2015 年 1 月までに 8 回開催し、最強チームの構成および再編方法について議論を行った。初回の会議では、CREST は課題達成型基礎研究であること、本研究領域では出口を見据えた基礎研究を推進することから、以下の要素を重視することとした。以降は、FS チームの進捗を担当アドバイザーから報告を受け情報共有するとともに、FS2、FS3 の実施方法や評価方法について議論をおこなった。

- 研究者の発想をベースとしたチーム編成
- 社会的課題の解決の視点からのトップダウン的チーム編成
- 理論・数理モデルから実証までを視野に入れた、複数の最強チームを編成

(iv) ステージゲート (FS2 最終報告会)

FS2 の最終報告会をステージゲート審査の場とし、「最強チームの研究提案」の提案について、研究総括、領域アドバイザー、JST 事務局で FS3 へ移行するグループの絞り込みについて議論した。

【提案内容の審議】

領域アドバイザーの評点が上位となった FS グループから個別に議論し、FS2 の報告内容や代表者のリーダーシップを重視して、FS2 実施の 10 グループから 5 グループを次の FS3 へ移行することとした。

(v) 編成会議 最終審査

FS3 の実施期間で研究総括、アドバイザーからの助言、指導を反映させて最強チームの研究提案を報告するため、2015 年 1 月 25 日に最強チーム編成会議を開催した。FS3 代表者からブラッシュアップされた最強チームの目標、研究体制等の報告を受け、研究総括、領域アド

バイザーに審議した。この最終審査において、FS3 の全グループは、研究総括および領域アドバイザーから最強チームとして承認をした。

この結果を受けて、JST では研究主監会議への報告、決裁等の内部手続きを進め、2015 年 4 月から表 4 の 5 チームが始動することになった。

表4 最強チームの課題名・研究代表者

課題	研究代表者
太陽光発電予測に基づく調和型電力系統制御のためのシステム理論構築	井村 順一
エネルギー需給システム構築のための経済モデルと物理モデルの融合に基づく設計理論及び実証・実装・提言	内田 健康
エネルギー消費行動の観測と分散蓄電池群の協調的利用に基づく車・家庭・地域調和型エネルギー管理システム	鈴木 達也
分散協調型EMSにおける地球科学情報の可用性向上とエネルギー需要モデルの開発	中島 孝
汎用的な実証基盤体系を利用したシナリオ対応型分散協調EMS実現手法の創出	林 泰弘

③異分野融合の取り組み(再編後)

(i) チーム内の連携

再編によって生まれた最強チームは、それぞれにチーム内に異なる分野の研究者を内包する形となった。各チームの研究推進は難易度の高いものとなったが、研究代表者の尽力により、チーム内での異分野融合が推進された。たとえば、内田チームでの、経済及び物理の融合視点からの再生可能エネルギーの変動への耐性を備えたメカニズム構築、林チームでの需給バランスのオークションに基づく EV 充電シフト手法の開発、井村チームでの、太陽光発電予測を活用した次世代電力系統制御、中島チームでの、日射量データと需要データを同時に地図上にリアルタイムに表示して、これまで発見が難しかった日射量と需要の関係などを認識できるシステムなど、経済学、人文科学、自然科学、制御工学、電気工学、情報工学の研究を融合する形で、従来には無かった高度なモデルや理論、また、システムの構築が行われた。

(ii) チーム間の連携

チーム再編直後はあまり意識されていなかったが、領域として個別の要素技術ではなく全体を統合するシステム的な方針、これを促進する領域アドバイザーの働きかけにより、各チーム間でも、さらなる異分野の融合が行われた。ここからも多くの成果が産出され、本領域を特徴付けるものとなった。たとえば、中島チームと林チームの連携で需要モデルを組み

合わせた配電網計画の可能な基盤プラットフォームの共同開発や、中島チームと鈴木チームの連携で、住宅と電気自動車を連携したエネルギー管理システムの研究などがある。また、内田チームによる、価格提示による分散型の最適運用方策の理論的成果は、井村チームや鈴木チームとの共同研究へも展開された。他にも中島チームの日射量推定データが、井村チームの発電量予想に提供されるなど、多くのチーム間の連携が行われた。

(3) 国際連携の積極的な推進

① 国際ワークショップの開催

研究総括が「Distributed Energy Management System」という概念を打ち立て、「Distributed Energy Management System」を題した国際共同ワークショップを開催した。本研究領域では、電力自由化や再生可能エネルギーの大量導入等で先進的な欧米に学ぶべき部分があるとともに、次世代エネルギーマネジメントシステムの目指すべき方向性は日欧米で大きな隔たりはないと思われることから、次に示す目的のため研究推進にメリットのある国際連携を力強く進めた。この国際連携により、今回再編した最強チームが「世界最強チーム」としてさらに進化することを目指す。

- ・ 国際レベルの先端研究者との異分野交流の促進
- ・ 最強チームとの連携・取込みの価値がある海外研究者の探索
- ・ 領域の研究チームの国際的なベンチマーキング
- ・ 他国ファンディング機関に対して、最強チームと相補的關係となる研究テーマの設定誘導

具体的な方策として、研究総括が調整等を実施し、「Distributed Energy Management System」と題した国際合同ワークショップを、アメリカ国立科学財団(NSF)、ドイツ研究振興協会(DFG)、ノルウェー研究会議(RCN)と各国のファンディング機関と共催する会議を6回開催した。

- ・ 第1回「JST-NSF-DFG 国際合同ワークショップ」
2014年01月11日～01月13日 米国ハワイ州
- ・ 第2回「JST-NSF-DFG-RCN 国際合同ワークショップ」
2015年4月20日～4月22日 米国バージニア州
- ・ 第3回「JST-NSF-DFG-RCN 国際合同ワークショップ」
2016年5月23日～25日 ドイツ ハイデルベルク

・第4回「2017 JST-NSF-DFG-RCN 国際合同ワークショップ」

2017年6月12日～13日 日本 東京(秋葉原)

・第5回「2019 JST-NSF-RCN 国際合同ワークショップ」

2019年1月13日～15日 インド ムンバイ

第6回「2019 JST-NSF-RCN 国際合同ワークショップ」

2019年6月20日～21日 日本 東京(六本木)

第1回目の国際合同ワークショップは、2014年1月11日～1月13日に米国ハワイ州にて開催した。本研究分野ではファンディング機関が共同研究を模索する初の国際合同ワークショップとなり、総勢100名以上が参加する大規模なワークショップとなった。各国のエネルギーマネジメントシステムの現状や研究対象について活発な議論が行われ、有効なネットワーキングの場となった。日本からは、本研究領域の取組みの発表に加え、これまでの領域活動で構築してきたネットワークを活用し、NEDO スマートコミュニティ実証事業見学(マウイ島)も実施した。

第2回目の国際合同ワークショップは、2015年4月20日～4月22日に米国バージニア州のNSF本部にて開催した。新たにRCNが参加し、より拡張したワークショップとなった。研究者の発表だけでなく、各国のファンディング機関から国際連携のための支援プログラムの発表を行った。RCNについては、国際合同ワークショップの後、日本のノルウェー大使館で、ワークショップのフォローアップ会議を通じたネットワーキングを実施した。

第3回目の国際合同ワークショップは、2016年5月23日～25日にドイツ ハイデルベルクにて開催した。国際共同研究の成果と今後の可能性について議論するセッションが設けられ、各国の共同研究の状況についての発表があった後、参加者からは、テストベッドの相互利用、各国のシミュレーションの比較やベンチマークの可能性など、今後の活動についての多くの提案が議論された。

第4回目の国際合同ワークショップは、2017年6月12日～13日に東京で開催した。日本からはCRESTの研究者を中心に約110名の参加があり、総勢140名に上る盛大なワークショップとなった。過去3回のワークショップを通じて多くの共同研究が促進されたことから、研究代表者である井村教授、内田教授、鈴木教授、中島教授、林教授がそれぞれ、これまでの研究内容や国際連携の進捗および課題について講演を行った。

第5回目の国際合同ワークショップは、2019年1月13日～15日にインド ムンバイでインド IITB (Indian Institute of Technology Bombay : インド工科大学ムンバイ校) のサポートのもとで開催された。日本からはCRESTの研究者を中心に15名の参加があり、インド国内の研究者やその他各機関が支援している研究者を中心に、総勢70名を上回る盛大なワークショップとなった。過去4回のワークショップで築いた共同研究の進展についての

発表があり、今後もこのネットワーキングをさらに深化し、社会における実課題であるエネルギー問題を解決すべく、より一層の国際連携により成果を出していくことが共通の認識となった。

本研究領域最後となる、第6回目の国際合同ワークショップを、2019年6月20日～21日に東京で開催した。領域の最終年度にもかかわらず、米国からNSFの研究者を中心に17名が参加した他、ノルウェー、ドイツ、イタリア、インド、マレーシアの各国から研究者が来日し、総勢150名を上回る盛大なワークショップとなった。研究総括から、本研究領域の成果として既に800件を超える論文が発表され、うち約100件がトップジャーナルへの掲載であること等が報告された。研究者よりの研究成果の報告に加えて、今年最終年度を迎えたCREST/EMS領域が終了した後も、六回のワークショップを通じて形成されたトップレベルの国際コミュニティを次のステージへと発展させ、引き続き連携に取り組みたい、との意欲的な要望が研究者コミュニティ及びNSF・RCNの国外ファンディング機関の双方から寄せられ、今後の取り組みが期待される中での閉会となった。



第1回(ハワイ)



第2回(ワシントン)



第3回(ハイデルベルク)



第4回(東京)



第5回(ムンバイ)



第6回(東京)

図6 国際合同ワークショップ風景

②研究者の交流

これらの国際合同ワークショップの結果、本研究領域での国際交流が活発化した。他国の研究者の招聘や、研究者の派遣が多数行われ、双方の研究の理解が進み、共同研究が議論され実施された。たとえば、鈴木チームは規制の違いから米国で先行する Vehicle to Grid でのトップランナーのデラウェア大学と連携・技術交流を行った。

③国際共同研究・共著論文

国際連携の具体的な成果として、多くの共同研究が行われ、100件を超える国際共著論文が執筆された。また、ノートルダム大学の Gupta 教授を PI とする共同研究での NSF の EAGER Grant への採択（内田チーム）、ノースカロライナ州立大学の Chakraborty 准教授を PI とする共同研究での NSF EPCN Project への採択など、NSF のファンディングを受ける共同研究も生まれている。

(4) システム構築と社会連携

① 公開シンポジウムの実施

2018年9月18日に東京 秋葉原 アキバホールにおいて、大学の研究者だけでなく、企業の技術者・研究者等を想定した公開シンポジウムを実施した。再生可能エネルギーの予測と大量導入、エネルギー経済、デマンドレスポンス、電気自動車（移動する蓄電池）、EMS プラットフォーム、エネルギー需要科学をキーワードとして、これまでの研究成果やシステム構築例を紹介し、将来予測されるエネルギーマネジメントの姿を議論した。本公開シンポジウムに参加した企業から問い合わせがあり、その後の共同研究につながった例もあり、アウトリーチ活動としての効果があった。

② 企業等との連携

本研究領域の各チームは、企業・自治体等との実証実験や共同検討を含めた社会連携活動を積極的に実施した。これらの活動や関係構築を通して、実際のデータや実際の環境での実証実験のデータを入手・取得することで、質の高い研究をおこなうことができた。例えば、2017年10月11日にプレスリリースされた「早大、地域特性を都市規模で捉えた配電システムモデルを国内外で公開、東電 PG・中電・関電が運用する実配電線データに基づきモデル構築」、2019年7月31日にプレスリリースされた『「どんなときに従業員は節電に協力するのか」産学協同でフィールド実験を実施」などが、挙げられる。

さらに、いくつかの研究成果は社会への応用展開へむけ、様々な業種の企業との連携の検討が始まっている。

また、本研究領域において、以下の二つの産学連携のコンソーシアムが設立され、現在も継続的に積極的な活動が行われている。

・ HARPS コンソーシアム（井村チーム）

社会連携に向けた研究展開を実現するために、2016年3月に設立した。8企業22名の外部専門家を開始し、2019年10月末現在、11企業および42名の外部専門家が参加している。1～2回/年のペースで開催しており、本研究領域の他チームの研究者や外部の専門家による特別講演に加え、研究内容の報告を行うなど、積極的に意見交換を行っている。

・「太陽放射コンソーシアム」（中島チーム）

2013年にNPO法人として設立し、2019年9月末現在、企業会員7社、非営利利用会員(大学・研究所等)が参加して、日射量データを利用している。

その他の特筆すべき産学連携として、林チームでは、開発を進めてきた配電系統模擬システムなどからなる「EMS 新宿実証センター」を形成し、日本を代表する複数企業と共にこれらの設備を利用した実証などを実施してきている。このような産業界・省庁とのネットワーク連携を軸に、先進グリッド技術研究所を中心とした研究所に加え、電力、ガス、通信、ゼネコン、ハウスメーカー、デベロッパー、メーカー等、様々な分野の民間企業(41社)により構成された「スマート社会技術融合研究機構」を2014年7月に早稲田大学に設立し、より大きな産官学連携の枠組みを作りながら研究活動を実施してきた。

(5) 研究課題の進捗状況の把握と評価

最強チーム再編前の計23チームに関しては、研究総括のサイトビジットを行い、研究進捗の把握と最強チーム再編に関する方針説明や質疑の対応を実施した。また、最強チーム再編にあたっては各FSに対して、担当アドバイザー制を採用し、担当アドバイザーがより密着して指導、助言をすることとした。この担当アドバイザー制は最強チーム再編後も継続しており、各研究チームの会議に担当アドバイザーが出席し、状況の把握や指導を実施している。領域関係者が幅広く出席する領域会議に関しては、基本的に年間2回開催し、研究総括、アドバイザーで進捗の把握をしている。更に必要に応じて、研究総括やアドバイザーとの面談を実施し、研究方針等について助言や指導を実施している。

2019年度は再編後の各チームの最終年度であるため、各チームの研究成果の仕上げへ向けた活動を行った。担当アドバイザーが各チームと成果内容についての意見交換を行い、これを踏まえて各研究代表者が研究実施内容の成果を中心に報告し総括および他の領域アドバイザーを交えて議論アドバイスを行うPI会議を実施した。

(6) 研究費配分上の工夫

再編後の最強チームの予算については、研究総括、領域アドバイザーがグループ内のサブグループの予算額まで決定し、代表者に通知することとした。ただし、研究代表者には予算の最大10%を変更できることとし、代表者のチームマネジメントに裁量を持たせた。

また、国際強化支援や裁量経費を活用し、国際連携のための旅費等を拡充し、更に、裁量経費によりシステム構築に向けた予算を拡充している。

(7) 研究領域中間評価結果への対応

領域中間評価において、「各分野の著名な論文誌などに論文を公表している点および多数の国際会議などを通じてグローバルな展開をしていることが評価できる」、「エネルギーマ

ネジメントから始まった理論を、一般的なシステム手法まで昇華できれば学問的に意義深い」、「経済学と各種技術の境界領域などについては、新たな発想などが出てくることを期待したい」、「林チームにおける東京電力の協業があり、この成果を大きく育ててほしい」、「電力の種々の技術者や研究者が集い、エネルギーマネジメントの様々な評価関数の下、問題が解かれていくことを期待している」、「シミュレーションの場の利用手法を一般化し、オープン化することで現実問題に直面している技術者、研究者に解法の場合としての基盤技術提供を期待する」、といった趣旨の評価を受けた。

これらの評価内容を、中間評価以降の領域マネジメントに反映し、新しいシステム理論の提案、異分野連携に基づく多くの論文、多くの企業等との社会連携の進展が実現した。井村チーム、林チームのシミュレーション/評価環境そのものの一般企業等への公開というオープン化には至らなかったが、具体的な共同研究などにおいて、様々な状況に対応できる汎用性の高いシミュレーション/評価環境を利用することは可能になった。また、井村チーム、中島チーム、林チームでは、各種のデータをオープン化して公開を行い、利用できる取り組みも行った。

(8) その他（人材育成等）

本研究領域および各チームの様々な取り組みによって、多くの人材が育成された。それぞれの研究者の研究能力、視野、人脈が拡大した。また、開始当初は博士研究員であった研究参加者が、助教、講師、准教授といった大学等の研究者として多数採用され、継続してプロジェクトに参加している。若手研究者に多くの発表機会を与えるといった、一般的な取り組み以外の、特筆すべき取り組み例を以下に示す。

① さきがけ研究員とのワークショップの開催

将来のエネルギー需給構造を見据えた最適なエネルギーミックスに向けたエネルギーの安定的な確保とエネルギー利用の効率化の重要性が指摘されている。その実現のためには、エネルギーの生成、貯蔵等に重要なデバイス技術と系統運用技術に代表されるようなエネルギーマネジメントシステム技術の融合が重要であると考えられる。そのため、JST 戦略的創造研究推進事業の「さきがけ」でデバイスの観点からエネルギーの高効率化をめざしている「エネルギー高効率利用と相界面」研究領域と本研究領域の各々の研究領域の若手研究者が共同して、将来のイノベーションを誘発する研究課題とは何か、そのために、今、取り組むべきことは何か、という視点で自由な議論を行い、今後のエネルギー問題の解決に有用な新たな研究領域を提案するワークショップを開催した。

本ワークショップでは、若手研究者からの提案を両研究総括、及び領域アドバイザー等がその場で採点し、採点内容についてコメントするという仕組みも取り入れ、緊張感を保ちつつ、真剣な議論ができる環境構築も実施した。

若手研究者らは約半年の間打合せやメールでの活発な意見交換を実施し、真摯な議論を

することで、ネットワーク作りや将来のデバイスとマネジメントの融合の必要性を確認し、将来の研究活動の視野を広げる機会となった。

②国際連携を通じた人材育成

前述の通り、本研究領域では多くの国際連携が行われた。その際、各チームは、研究者を1週間から数ヶ月間、先方に派遣・滞在させたことで、先方研究者との交流、共同研究やその成果をまとめられる段階まで進展させる経験をすることができた。

③学生・若手異分野の研究交流会

井村チームでは、専門家を招待し特定の研究分野を勉強したり、学生メンバーによる発表会を行う学生・若手異分野研究交流会や、国内外からの著名な研究者や新進気鋭の若手研究者によるセミナー、見学会3回を実施し、外部との交流の場の企画を行った。

7. 研究領域としての戦略目標の達成状況について

(1) 研究総括のねらいに対する研究成果の達成度

戦略目標「再生可能エネルギーをはじめとした多様なエネルギーの需給の最適化を可能とする、分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論、数理モデル及び基盤技術の創出」を受け、本研究領域「分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論および基盤技術の創出と融合展開」で、研究総括は、異分野融合、国際連携、また個別の要素技術に留まらないシステム科学の視点により、理論およびモデルの創出を行うこと、また、理論およびモデルを空論でなく評価するためのシステムの構築を行うこと、また、システム構築を通じた社会連携への糸口をつかむことをねらいとした。

異分野融合、国際連携等の研究推進マネジメントのねらいに関する取り組みおよび成果は前章に記載したとおりであり、ここでは研究成果に関して記載する。

理論およびモデルの観点では、領域全体で、1000本を超える論文が生み出され、世界のトップジャーナルに掲載された。国際共著も100本を超え、従来無かった異分野融合の論文も多く生みだされた。また、井村チームはCyber Physical Value Systemというシステム概念による新しいシステム理論枠組みを創出した。これは、基本的なシステムの安定性と需給バランスに加え、システム全体の価値と局所的なユーザーの価値を同時に最適化する多価値共最適性、最悪ケースを想定して保守的になることなく実際の運用と調和してロバストにする調和的ロバスト性、特性の変化への対応や局所的なアドオンで対応できるオープン適応性をもつシステム概念である。中島チームは需要科学という新しい分野の創出を行った。

システム構築の観点では、各チームで理論やモデルの評価のためのシミュレーション環境/評価環境が構築された。井村チームの電力コラボルームでは、チーム内の研究者が開発

した数理モデルを組合せて、デジタルシミュレーションの実行や議論を可能とした。林チームの EMS 評価システムでは、電気自動車や需要など、他チームの成果も含め、都市規模 EMS 技術の導入に関する多角的・定量的な議論や新たなシステム最適化技術開発や技術普及促進にむけた判断指標の評価を可能にした。システム構築は社会連携の糸口としても機能し、実社会への展開に関してのいくつかの企業との関係も始まっている。

上記のような研究成果から、研究総括のねらいに対する研究成果は十分に達成されたと見える。

(2) 研究領域全体として見た場合の特筆すべき研究総括の活動

研究領域の運営にあたっては、これまで述べた様にシステム科学の視点を取り入れ、異分野間の融合展開や国際連携に注力してきた。これらの取り組みは、全ての CREST 領域を代表する形で研究総括が下記において発表し、大きな反響を得ることができた。

・U. S. - Japan Workshop on Effective Project Management

(July 13 2015 at IDA in Alexandria, VA)

このワークショップの目的は日米のプログラマネージャによる発表や議論を通して、プログラマネージャに必要となる素養及び行動原理・直面するマネジメント上の諸課題への対応を抽出し、効果的なプロジェクト・マネジメント手法について理解を深めることである。研究総括は CREST を代表して、それまでの研究領域の運営手法について発表し、DARPA をはじめとする米国を代表する研究機関のプログラマネージャと議論を深め、大きな反響を得ることができた。

・第3回 戦略的創造研究推進事業 国際評価委員会

(2016年1月28日(木)、東京)

戦略的創造研究推進事業全体の総合的な評価を受けるとともに、今後 JST として取り組むべき提言・助言や、科学技術イノベーション創出に資するための提言・助言を得るために、戦略的創造研究推進事業の国際評価委員会が実施された。

研究総括は CREST を代表して、それまでの研究領域の運営手法について発表し、評価委員からの高評価を得ることができた。

(3) 研究領域全体として見た場合の特筆すべき研究成果

以下、再編後の各チームの研究実施の概要および特筆すべき研究成果を記載する。

①井村チーム

太陽光発電の大量導入のもとで調和した電力供給を実現するために、太陽光発電・需要予測を活用し、そして、運用層とユーザー層に加えて、様々なアグリゲータが想定される集配層の機能や特性に着目した、次々世代の電力系統制御のためのシステム理論を構築することを研究目的とした。そのため、電力システムの一部の機能ではなく、システム全体を見据えた研究展開を図るため、「PV発電予測を活用した調和型電力系統制御」と「運用層-集配層-ユーザー層から成る電力システム構造設計」を軸に、電力システム分野、システム制御分野、気象分野、数理工学分野の異分野連携により、包括的なシステム設計理論と技術に関する研究を展開してきた。

特に、「太陽光発電のスマート基幹電源化」を目標に掲げ、分散電源から成る電力システムを図7に示すCyber Physical Value System (CPVS) と呼んで特徴づけた。ここで、動的システムとしての安定性と限られたリソースの配分(需給バランス)という基本的なシステム要件に加えて、(a)多価値共最適性は、CO2削減などシステム全体の価値と、ユーザー側の局所的な価値を同時に最適化すること、(b)調和的ロバスト性は、予測外れによるリスクや故障・事故、サイバーセキュリティに対して、最悪ケースを想定することで保守的になることなく、実際の運用と調和してロバスト化すること、そして(c)オープン適応性は、太陽光発電システムの増加により動特性が変化していくシステムに適応的に対応したり、局所的にアドオンするだけで対応できることを意味する。また、図8では、情報、物、価値から成るネットワーク構造として、サイバー層と集配層という2つの中間層から成る縦横階層構造により、次々世代の電力システム構造を特徴づけることで次世代の電力システム全体を見通し良く設計するための基礎を構築した。

Cyber Physical Value System (CPVS)
 膨大かつ多様なプレイヤーが情報、物、価値からなる大規模ネットワーク構造のもとで相互作用するシステムに対し、多様なセンシング情報に基づいて多様な制御アクション(学習・予測・制御)が有機的に協調しあうことで、つぎの要件を満たし、物理から情報を通じて価値を実現するシステム

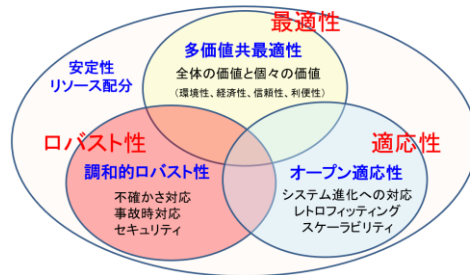


図7 CPVS

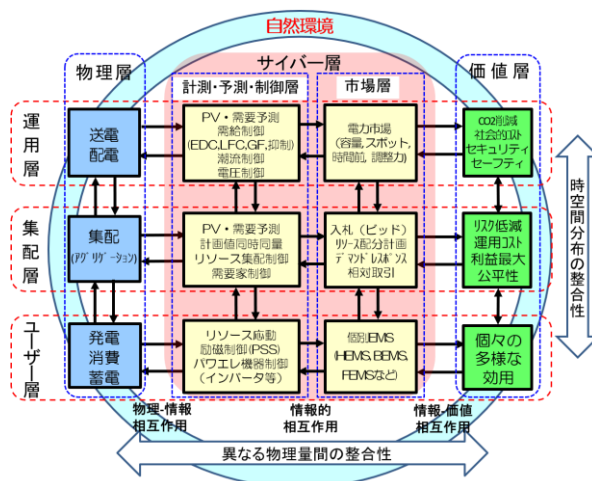


図8 CPVS としての次々世代電力システム構造

このもとで、図9に示すように、7つの研究領域に分けてシステム設計の理論及び技術を構築した。たとえば、「共有モデル集合」という概念を提案し、それにより縦の階層間の分散設計を可能にし、階層間の自由度を表す設計パラメータを導入することで、多価値共最適性と調和的ロバスト性を実現するシステム理論を構築したり、多様なプレーヤが変化するシステムに対して多価値共最適化を実現する

(オープン適応化)手法として、蓄電池を活用し、エネルギーシフトを実現する電力プロファイル市場とそのアグリゲータの入札戦略や、局所エリアで電力融通を行う配電系統市場などの設計手法を開発した。さらに、ユーザー層の物理システムの制御におけるオープン適応化と調和的ロバスト化の一手法として、アドオンにより分散設計を可能とする局所制御である、同期化カインバータや、発電機励磁系へのレトロフィット制御などの制御理論を構築した。

以下に顕著な研究成果を示す。

(i) 太陽光発電のスマート基幹電源化のためのシステム理論の枠組みと基礎理論・技術を構築

太陽光発電のスマート基幹電源化を提唱し、それを実現するためのシステム理論の枠組みとして Cyber Physical Value System というシステム概念を提案してきた。それに基づき、7つの研究領域に分けて、階層ごとの分散設計を可能とする共有モデル集合理論、局所制御のための分散設計を実現するレトロフィット制御理論、全体と個の共最適化を実現するインバータの電圧制御などの基礎理論および技術を開発した。

(ii) 時空間に着目した次世代市場設計とアグリゲータ設計

分散電源と蓄電池活用に適した次世代型市場として、時間方向および空間方向に着目することで、それぞれ、蓄電池のダイナミクスを考慮し、かつ電力時系列に着目した電力プロファイル市場と、ブロックチェーン技術を活用した配電系統市場の設計法を提案し、多価値共最適化の基礎手法を開発した。また、アグリゲータ設計として、その役割を特徴づけ、ユーザー側の不確かさを考慮したデマンドレスポンス、モデル予測制御型デマンドレスポンス、計画値同時同量を実現するための需要家制御の基礎技術を開発した。

(iii) 太陽光発電予測を活用した次世代電力系統制御

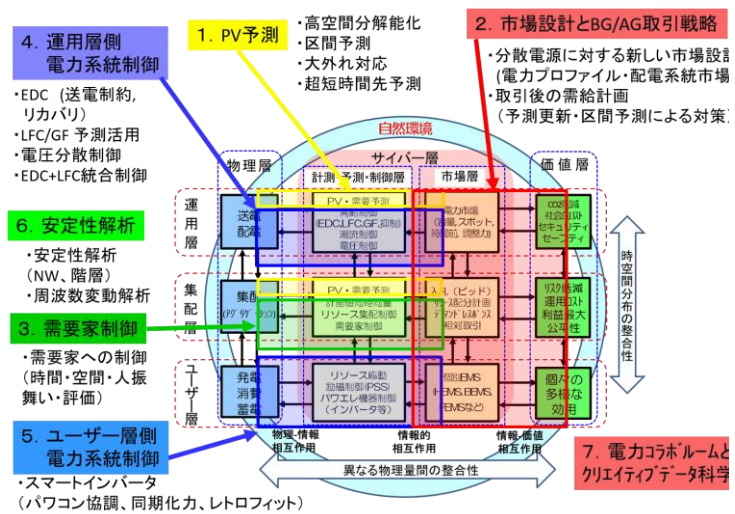


図9 システム理論としての7つの研究領域

信頼度付きの区間予測を用いた需給制御の基礎となる区間最適化問題の厳密解を、世界最速で求める技術を開発し、また、予測を利用した従来電源・蓄電池システムの計画・運用については、6時間ごとに予測を更新することを前提とし、送電制約まで考慮した需給計画手法を開発し、大規模な数の発電機を想定した場合の蓄電池活用における解析を行った。また、大外れによる計画外時の系統制約を考慮した経済負荷配分制御の修正運用法や、予測型LFCの設計法を開発した。

②内田チーム

我が国の電力システム改革の一環としてエネルギー取引の完全自由化が2016年から開始された。自由化の波が広がる中で、もう一つの変化として、今後再生可能エネルギー利用の大幅な拡大が予想されている。電力システム改革の目的である経済効率性、厚生最大性、並びに信頼性をもつエネルギー需給システム - 経済システムであると同時に物理システムでもある - を実現するために、これまでにない仕組みをもった需給システムが必要となる。そこで本研究チームは、次世代のエネルギー需給システムのあるべき姿を明らかにし、その姿を実現するための基礎となる理論を創出するとともに、経済実験による実証や社会実験による実装化を踏まえた提言を行うことを目標とした。エネルギー需給システムは環境システム、経済システム及び物理システムの複合システムであり、そのあるべき姿の追求には異分野の融合研究が不可欠である。本研究は今までに例を見ない経済グループ（行動経済、環境経済）及び物理グループ（電力システム、システム制御、情報工学）の研究者・技術者を結集させた異分野融合型研究である。本研究ではこのような異分野融合を可能にするために、専門分野の概念・知見に対して分野を横断するモデルという「共通言語」をもちいて融合させることによって、来るべき将来のエネルギー需給システムの新たな仕組み - メカニズムと呼ぶ - の創生を目指してきた。研究課題名「エネルギー需給システム構築のための経済モデルと物理モデルの融合に基づく設計理論及び実証・実装・提言」は本研究の目標とねらいを端的に表したものである。

内田チームでは本研究の目標を次の4つの研究課題に分割し、それぞれの研究を遂行することによって研究全体の目標達成を目指した。4つの研究課題とは、課題1：人間行動を考慮したエネルギー消費モデルの構築と、そのモデルに基づくエネルギー需給バランスの分析と最適化、並びにADR（Automated Demand Response）促進策、課題2：消費者行動、エネルギー市場、並びに長期エネルギー政策のエネルギー経済モデルの構築と分析、課題3：需要者と供給者の利己的・戦略的な意思決定・制御を束ねて公共の利益を確保する動的統合メカニズムの設計理論、経済的効率性の評価、並びに分散型アルゴリズム／高速アルゴリズム／信頼性向上とエネルギーサービス、課題4：再生可能エネルギーに対する経済及び物理の融合視点からの統合メカニズム及び制御方策である。

研究成果の全体概要を4つの課題に沿って述べる。課題1および課題2（消費者行動）については、エネルギー消費における省エネルギー行動に繋がるDR（Demand Response）評価

のために、フィールド実験、ラボラトリー実験、並びに両者を融合した新しい実験を実施し、エネルギー消費行動を行動経済学の視点から明らかにした。省エネルギー促進策の指針となる成果である。課題2のエネルギー市場については、市場における制度・政策、その他の電気事業規制の経済的効果の理論・実証分析を実施し、さらに物理モデルと経済モデルを融合し、契約理論を応用した市場モデルを構築した。これらは自由化市場と政策のあり方を検討する基盤となる成果である。課題2・課題4の長期経済モデルについては、長期プロジェクトにおける割引率のあり方や代替エネルギーの普及とエネルギー需給・経済への影響に関して理論・実証両面から分析し、温暖化政策下の中・長期エネルギー需給及び投資行動・計画の基礎となる知見を得た。投資行動とエネルギー需給・経済の長期動態解析については、現在、研究継続中である。課題3・課題4については、エネルギー需給に関わる戦略的ステークホルダーを統合する多くの新たな需給モデルおよび動的メカニズムを考案した。インセンティブ・契約、高速性、分散性、高信頼性、並びに再生可能エネルギーの変動への耐性を備えたメカニズム構築を4つのグループで分担した。自由化達成を前提とした次世代需給システムに対する統合メカニズムの設計・実装の基盤となる成果である。メカニズムの追求とともに、その性能を比較・評価する場としてのマーケットシミュレータを構築した。以上、当初の計画の全ての目標を達成するとともに、新たな方向への研究展開により計画にはなかった成果を挙げることもできた。

以下に顕著な成果を示す。

(i) エネルギー需給の3タイムスケール経済モデル

経済学の視点からエネルギー需給システムを短期（日）、中期（年）、長期（30年以上）の3つのタイムスケールでモデル化し、そのモデルに基づく分析を通してエネルギー需給のあるべき姿を明らかにした研究である。3つのタイムスケールの様々なモデルを提案して、それらのモデルを統合してエネルギー需給を幅広いタイムスケールから分析することによって、従来の研究からは得られないエネルギー需給の姿をモデル化することが可能となった。経済・物理連携の成果である。

(ii) インセンティブ設計に基づく統合メカニズム

エネルギー需給のメカニズムは、エージェント（需要者、供給者）に対する制約条件、並びに目的関数のモデルが与えられれば、最適化問題（厚生最大化）の解として得られる。しかし自由化環境下では、各エージェントはこの最適解に沿って行動するとは限らない。他のエージェントが最適解に従わないならば、最適解以外に自身の利益を増やす（戦略的）解があるからである。本研究では、この自由化にともなう統合メカニズムの問題を解決するために、プリンシパル（市場管理者）から動的エージェントに与えるインセンティブの設計法を確立した。経済・物理連携の成果である。

(iii) 合意形成による市場を介さない統合メカニズム

多数のエージェントからなるエネルギー需給システムの統合メカニズムは市場（清算）原理に基づいている。本研究は、隣接エージェント間の局所的な情報交換によるマルチエー

メントシステムの合意形成理論に基づく統合メカニズムの可能性、すなわち市場清算を用いない統合メカニズムの可能性を明らかにした。需給システムのネットワーク構造や局所的な情報交換を調整することによって合意形成の性質（収束速度や耐雑音性など）を変えることができる。新たなエネルギー需給システムの構築に向けた先進的な成果である。

③鈴木チーム

自然条件の影響を強く受ける再生可能エネルギーが大量導入される将来において、発電量の変動を吸収し、需給バランスを適切にとるために蓄電池が果たすべき役割は大きい。このとき、電池の容量・台数・配置の設定、および充放電スケジュールの決定は重要な設計ポイントの一つになる。一方、電気自動車やプラグインハイブリッド車等の電動車両の普及に伴い、これらに内蔵される車載蓄電池を需要家内、あるいは系統の安定化システムに組み込むことで、より効率的なエネルギーマネジメントが実現される。本プロジェクトでは、電動車両を用いたエネルギーマネジメントに関する諸課題について、(1)データ収集、(2)車利用予測手法の開発、(3)各拠点におけるローカルなエネルギーマネジメント設計、(4)地域やコミュニティにまたがるエネルギーマネジメントの設計、(5)サイバーセキュリティ、の各観点から取り組み、次世代のエネルギーマネジメントとモビリティシステムの融合につながる重要な成果を創出した(図9)。

データ収集に関して
は、30世帯程度を対象として約2年間にわたり、車の利用と家庭での電力消費の継続的観測を行った。このデータは以後のアルゴリズム開発のベースとなっている。

車両利用予測手法の開発に関して、観測された車の使用履歴データをもとに、いつ、どこに向けて出発し、何時に戻るか、を予測するアルゴリズム

を時間付きマルコフモデル上で構築した。提案する手法では、車両利用の将来予測に関する最尤推定問題が動的計画法に帰着されて解くことができるため、高速な予測が可能となる。また、この成果を単一の車両ではなく、車群の予測に拡張し、パーソントリップデータを活用してその有用性を検証した。

各拠点におけるローカルなエネルギーマネジメントの設計に関して、まず、上記の車両

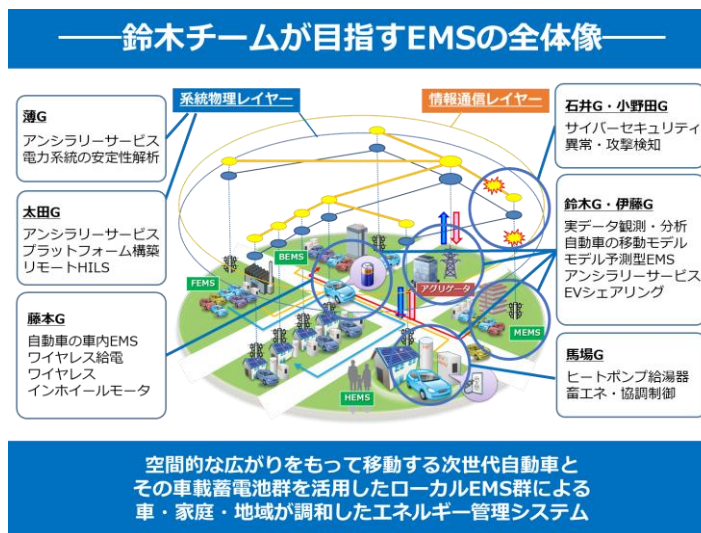


図10 鈴木チームが目指すEMSの全体像

利用予測を組み込んだ Vehicle to Home 型の HEMS を提案した。提案した HEMS では、クルマの利用予測に基づいて充放電計画がオンラインで更新され、電気代の削減に大きな効果をもたらす。この成果は IEEE の Trans. on CST 上で公開され、公開後 2 年足らずで被引用数 20 以上 (Google Scholar 調べ) となっており、注目の高さがうかがえる。また、この成果を拡張し、電動車両とヒートポンプ給湯器を協調的に利用した HEMS を構築し、その有用性を検証した。ここでは得られたヒートポンプ給湯器の動的モデルが重要な役割を果たしている。また、電動車両に対する路面からのワイヤレス給電の開発に取り組み、その試作結果からワイヤレス給電が社会実装されたときのインパクトを試算し、充放電ステーションが不要となる可能性を見出した。

地域やコミュニティにまたがるエネルギーマネジメントの設計問題では、以下の諸課題に取り組んだ。(a) V2H-HEMS の連携によるコミュニティの電気代削減、(b) 電動車両や V2H-HEMS のアグリゲーションによるアンシラリーサービスへの対応、(c) EV シェアリングとの連携による配電系統電圧の安定化。(a)に関しては、分散最適化の視点から問題を定式化し、規模の増大に対する計算リソースの分散化、拠点と電動車両との間で電気のやり取りが発生した時の取引価格を合理的に決めることを可能にした。(b)に関しては、米国デラウェア大学の Prof. Kempton の研究グループと連携し、車両を活用したアンシラリー市場への参加形態について先駆的な研究を行った。また、具体的なアンシラリー信号生成のためのアルゴリズムを開発し、その有用性を検証した。(c)に関しては、配電系統の電圧変動解析モデルを構築し、開発した EV シェアリングにおける車両割り当て、充放電計画と連携させることで、配電系統の電圧変動安定化を考慮した EV シェアリングの運用計画が可能となった。これらの成果は、エネルギーマネジメントとモビリティシステムが融合した次世代のスマートコミュニティデザインの基盤になると期待される。

また、EMS におけるセキュリティ問題に取り組み、データセントリック、およびモデルベースの両着眼点から多くの成果を上げた。

以下に顕著な成果を示す。

(i) 車の使用予測に基づく車載蓄電池を活用したモデル予測型 HEMS の開発

車載蓄電池を活用した家庭向けエネルギー管理システム (HEMS) のための充放電制御手法を構築した。家庭内での電気機器の使用状態予測と太陽光発電の予測に、独自に開発した車の使用状態予測を組み合わせ、家庭での電気代をリアルタイムで最小化する充放電計画の最適化により、車の使用に関する制約が明示的に考慮された車載蓄電池のモデル予測型充放電制御を実現できる。HEMS のプロトタイプを用いた検証実験により、日本の平均的な家庭において 10%~40%程度の電気代を削減できる可能性があることが明らかになった。

(ii) 電力システムの状態推定機構に対するセキュリティ向上

電力システムの安全で効率的な運用に、状態推定機構は不可欠である。しかし、系統の計測情報は送信中にサイバー攻撃を受ける危険性がある。攻撃者がデータを改ざんした場合、推定精度に影響を与え得るが、さらに従来の異常検知では分からないクラスの攻撃が存在する。

本研究では、とくにシステムのトポロジーや物理パラメータのデータが改ざんされる状況を考えた。そのような悪意性の高いサイバー攻撃を検知し、その影響を抑制するために、ロバスト統計の分野における最小二乗刈込み法を適用し、その有効性およびセキュリティ向上のための手段を考案した。

(iii) Design and Analysis of Distributed Energy Management Systems

電気自動車などの普及に伴い、これらに内蔵される車載蓄電池を駐車時に需要家内、あるいはシステムの安定化システムに組み込むことで、より効率的なエネルギーマネジメントが実現される。一方、再生可能エネルギーが大量導入される将来において、発電量の変動を吸収し、需給バランスをとるために蓄電池が果たす役割は大きい。電池の容量・台数・配置の設定、および充放電スケジュールの決定は重要な設計ポイントである。本書は、車載蓄電池をエネルギーマネジメントに使う際に必要な要素技術やそれらのインパクト、今後の可能性について述べた書籍である。(出版社: Springer)

④中島チーム

本研究チームでは、分散協調型 EMS の構築のために必要な学理基盤として、地球科学情報の可用性向上とエネルギー需要モデルの構築に注目した研究を実施した。本研究チームは、東海大グループ、JAXA-東大グループ、千葉大グループ、阪大グループ、東大生研グループ、東工大グループ、NICT グループの 7 グループで構成される。これらのグループのメンバーは、地球科学サブグループ、エネルギー需要科学サブグループ、データインタフェースサブグループに分かれ、各々の研究課題に取り組んだ。3 サブグループのうちデータインタフェースサブグループは、チーム内外へのデータ提供の機能の他、地球科学サブグループとエネルギー需要科学サブグループを繋ぐ役割を担っている。

[地球科学サブグループ]の最終目標は、①準リアルタイム衛星推定日射量の精度向上、②日射量予測技術の確立である。①についてはひまわり 8 号衛星を主幹衛星とし、フルディスク領域 10 分毎、日本域 2.5 分毎の時間分解能で地上到達日射量の推定が可能となった。日本域では観測から 10 分以内の速報を実現している。これにより時々刻々と変化する日射量を詳細に得ることができる。解析手法の開発では第 1 原理にこだわり、経験則に依拠せず物理的に整合しているため応用範囲が広いのが特徴である。また、ニューラルネットワークによる放射伝達計算という最新の手法も併用している点にも注目したい。②の予測技術については、衛星データに基づく方法と、雲解像モデルに基づく方法について実施した。衛星データに基づく方法では、大気移動ベクトル解析により 6 時間後の雲場を予測し、その雲場における日射量を計算することができた。日射量予測値を用いて世界最大のソーラーカーレースである WSC の東海大チームを支援した結果、上位の成績を収められた。雲解像モデルに基づく手法では、雲水量および水平風の同化を行った。その結果、雲水量と水平風の両方を同化することで地表面日射量の再現性が良くなることが分かった。さらに本サブグループでは衛星から算出される日射量の検証も実施した。その結果、エアロゾルの定量化と、三次

元の雲分布に伴う三次元放射伝達を考慮する必要があることが分かった。ひまわり 8 号の日射量データに考慮されていないエアロゾルの効果については、ひまわり 8 号の日射量が過大となっていることが分かった。この誤差を想定誤差とし、ひまわり 8 号のデータを補正すると、ほとんどのデータは地上観測値と 20 W/m^2 以内で一致することが明らかになった。その他にも、気象データの変動解析や地球物理量データによるシナリオデータの作成を行った。気象データの変動解析では、クロスサンプルエントロピー解析と呼ばれる異なるデータ同士の非同期性を表す手法へタイムウィンドウを導入し、日射の空間的な非同期性に関して定量化をおこない、その時系列変化について可視化をおこなった。シナリオデータの作成では、東京電力管区と関西電力管区を中心とした領域を設定し、猛暑日と真冬日を含む 1 年間のデータを整備した。

[エネルギー需要科学サブグループ]の最終目標は、①民生部門最終エネルギー需要モデルの開発、②住宅の詳細エネルギー消費データを活用したデマンドレスポンスポテンシャルの評価、③社会実験によるエネルギー需要家の行動モデルの構築、④「エネルギー需要科学」分野の確立である。①については住宅エネルギー需要モデル、業務施設エネルギー需要モデルの開発が行われた。特に前者において地域や世帯の特徴を反映した上で、日本全国の国民の時間の使い方を推計する方法は他に類を見ないものである。②については、HEMS によるデマンドレスポンス (DR) ポテンシャルの抽出において沖縄県宮古島をフィールドに指定し、参加世帯における DR ポテンシャルの抽出、コミュニケーション方法の検討、DR プログラムの消費者受容性などの検討を目的とした全島調査を行った。電力系統全体のマクロな観点及び住宅単位というミクロな観点からの HEMS モデル構築・分析は、従来の局所的な評価にとどまらず新規性の高い研究である。③については長崎県対馬を主な対象フィールドとし、実際の環境における人間行動を研究対象とした研究を実施した。その結果、自分の家庭と類似した家庭に於ける過去の電力消費量を比較できる形で表示すると電力削減効果が大きいこと、再生可能エネルギーの発電量と環境配慮行動に係る情報の提示は再エネ発電量の多い時間帯に積極的に電気を使う消費行動を促すこと、など電力消費の行動変容に関する新たな結果が示された。さらに電力の使用・契約・設備投資の 3 行動についてアンケート調査を用いた分析を行い、3 行動には関係があることを初めて明らかにした。④については、エネルギー需要研究には要素分解型と全体挙動型があり、さらにエネルギー需要データの収集と分析、エネルギー需要モデルの開発、エネルギー需要に対する影響要因の解明と介入の 3 分野があることを提示した。

[データインタフェースサブグループ]の最終目標は、①エネルギー需要科学サブグループや他最強チームを含む研究グループの要望に応じてデータ提供を行うシステムの構築、②CREST/EMS 内で共通利用できるデータの可視化やシミュレーション環境となるプラットフォームの構築である。前述のように、データインタフェースサブグループは、地球科学サブグループとエネルギー需要科学サブグループを繋ぐ役割も担っている。①についてはデータ提供方法にはクラウド環境 (短期間データ) とオンプレミス環境 (大量データ) の両方

が必要であることを明らかにし、日射現況値や日射予測値の提供を行う環境を構築した。②については GIS 可視化サービスを開始することで、各種データに関する時間と空間解像度を視覚的に捉えることを可能にした。さらに、町丁目単位から都道府県単位へ連続的に日射データや需要データを表示できるスケーラブル可視化にも成功した。スケーラブル可視化により、EMS に関連するデータを時空間において連動させ、チーム間でのデータ分析、解析を実現する環境が整った。他にもタイルドディスプレイ技術開発によりビックデータの画面表示が容易となった。

以下に顕著な成果を示す。

(i) ヒートポンプ給湯器のデマンドレスポンス効果を評価

家庭用太陽光発電システムの固定価格買取制度 (FIT) による買い取りが終了し、買取単価が大幅に下落する太陽光発電の「2019 年問題」への対応として、ヒートポンプ給湯機のデマンドレスポンスと家庭用蓄電池の活用による家庭用太陽光発電システムの自家消費量拡大の効果について評価を行った。本研究では、ヒートポンプ給湯機のデマンドレスポンスと家庭用蓄電池の活用を目的とし、ヒートポンプ給湯機、蓄電池の予測—計画—運用モデルを構築し、357 世帯の実電力消費量データを用いて分析を実施した。その結果、給湯機の最適な運用、すなわち、晴れた日の昼間に湯沸かし運転を行うことによって、従来の夜間運転に比べて、平均で年間 5800 円のコストメリットと、8%の省エネ効果をもたらすことが分かった。このとき家庭用太陽光発電量の自家消費率は 32%から 45%へ増加し、家庭用蓄電池 2~4 kWh を導入した時と同等の効果があることを確認した。

(ii) エネルギー需要モデルの開発

居住者行動は、住宅エネルギー需要の時刻変化を生じさせる最も重要な因子である。本研究では、地域や世帯の特徴を反映した上で、日本全国の国民の時間の使い方を推計する方法を開発した。生活行為、生成パラメータを対象者の個人属性、世帯構成、居住地に関する情報に基づいてロジスティック回帰モデルにより付与することに成功。日本全国の小地域を単位として、各地域に居住する世帯群へ開発モデルを適用した。そのとき総務省統計局が作成した e-stat の国勢調査データを用いた。東京都の全小地域にモデルを適用し、生活行為、生成パラメータを推計し、地域の集積状況が生活行為パラメータに及ぼす影響を評価した。

(iii) 日射量プロダクトの品質保証

衛星観測やモデルシミュレーションで算出された日射量については品質保証が必要である。これまでの研究から、雲やエアロゾルの時空間的な不均質性の変動が衛星日射量に及ぼす影響が極めて重要となった。本研究では、まずは EMS のための地上システムデータベースの最適化を行い、地上検証観測サイトを選定した。次に衛星とモデルの日射データの誤差評価を行った。その結果、ひまわり 8 号と全天日射計の相関係数は 0.87 であったが、ばらつきも大きく場合によっては $900\text{W}/\text{m}^2$ 以上の差が生じていた。その原因として、太陽周辺に存在した雲が直接光を反射する、いわゆる radiation enhancement が発生していることが分かった。現在のひまわり衛星日射量推定では 3 次元放射伝達が考慮されていないが、今後は

改善が必要であることが示された。

⑤林チーム

本研究では太陽光発電 (PV)、蓄電池、燃料電池、ヒートポンプ給湯機 (HPWH)、車載蓄電池を搭載した次世代自動車 (EV) などの次世代エネルギー機器が多様な形で設置され自律分散的に制御される住宅の EMS (HEMS)、商業・オフィスビル等における EMS (BEMS)、及びこのような需要家への面的な電力安定供給を効率的に担う中央制御型の配電系統の EMS (GEMS) を主な対象とした次世代協調型 EMS 実現手法の創出を実施してきた。研究推進にあたっては次のような 4 項目に着眼して実施した。

- (A) 協調 EMS 実証基盤の開発
- (B) 次世代 EMS 実現手法の開発
- (C) 協調 EMS 実証基盤を用いた統合協調 EMS 実現手法の開発と評価
- (D) 開発 EMS 実現手法の実証試験

研究項目 (A) の実施にあたっては、早大林サブグループ (SG) が中心となり、東京電力パワーグリッド・中部電力・関西電力との協働により実際の配電系統の情報に基づく配電系統解析のための計算機シミュレーションモデルの精緻化を進め、また開発 EMS 手法の実用性評価のための模擬シミュレータ (CREST-ANSWER) を始めとする統合 EMS 評価基盤プラットフォームの集約整備を実施してきた。また、阪大下田 SG、千葉大入江 SG と林 SG が中心となり、上記のような評価を実施する上でエネルギーマネジメントの対象となる尤もらしい電力需要や気象由来の太陽光発電の変動などについて、想定される様々なシナリオを議論しながら評価に用いるための多様な電力変動プロファイルの生成を実施してきた。

研究項目 (B) では、将来的な社会実装を見据えた EMS 実現手法の研究開発を目的とし、電力分野のみならず、建築学、経済学、情報工学、通信工学、気象科学、制御工学、機械工学などの様々な分野の専門家によって構成される早大林 SG、東工大石井 SG、東大馬場 SG、名大稲垣 SG、東大大橋グループ、慶應大大森グループなどが強みとして持つ各分野の専門知識と技術を活かしながら、多様な観点から EMS の方法論や設計にまつわる研究開発を実施してきた。

また、研究項目 (C) では、各 SG が持つ専門知識と技術を活かしながら、研究代表者のリーダーシップの下で研究項目 (B) で得られた開発成果や知見を融合することで分散協調 EMS にまつわる方法論の練成を行い、研究項目 (A) において開発された評価用プラットフォームを活用する形で方法論の多面的評価を実施し、その内容を開発にフィードバックして用いる形で分散協調 EMS の方法論の研究開発を推進してきた。

研究項目 (D) は研究当初は予定していなかった項目となるが、本プロジェクトの推進過程で得られた成果を、社会実装を見据えて展開していくために、開発技術に関する実証試験を行ってきたものとなる。本項目では特に林 SG が開発してきた成果の一部である「配電損失最小化手法」に着目し、東京電力パワーグリッドと協働の下でパイロット的に実証対象とな

る配電系統を複数個選定し、対象配電系統に対して適用を行う技術実証を行った。ここで行われた実証は、世界的にも類を見ない実配電系統における損失最小構成運用の実証試験となっており、本プロジェクトにおいて実施された開発成果である EMS 技術が実社会に対して実装可能であり、しかも引き続き継続的な活用展開に資するというを示した。

以下に顕著な成果を示す。

(i) 配電系統の電圧制御のサイバーセキュリティ

配電系統上で実施される電圧制御に着目し、系統内のセンサ情報が改ざんされた場合に引き起こされる制御系の異常な振舞いを解析し、その検知のための対策手法を考案した。実系統の情報に基づいて構築された配電系統モデルを用いた検証により、情報の改ざんによる電圧逸脱リスクや PV 発電の出力抑制に対して与える影響の定量評価、攻撃の検知可能性の議論を行った。IEEE Transactions on Smart Grid に掲載された本成果は配電系統におけるサイバーセキュリティを議論する先駆的な取り組みとなり、高い注目を浴びている。

(ii) PV 出力の包括的活用のための予測・運用・制御一貫の分散 EMS スキームの開発

予測・運用・制御の枠組みに基づき需要家 EMS (HEMS)、及び電力系統 EMS (GEMS) の実現手法の開発を行い、配電系統から需要家までの電氣的挙動を再現・評価するシミュレーションモデルに基づき、複数 EMS の相互作用なども考慮した上で、提案する分散 EMS が PV 出力の過度な抑制を削減し、設置設備の有効利用に資することが検証された。IEEE Transactions on Smart Grid に掲載された本成果は主体の異なる EMS 間の相互影響を具体的に議論するという観点で、予測・運用・制御というフローに基づく分散 EMS の 1 つの有力な設計指針を提示するものとなる。

(iii) 需要家 PV の出力抑制回避のためのオークションに基づく EV 充電シフト手法の開発

PV 出力抑制の軽減を目的として低圧配電系統下の周辺 EV 所有者の充電時間シフトを対象としたセカンドプライス・シールドビッド・オークション方式を活用した需要家 EV の充電管理の手法の提案を行った。充電時間シフトを行う際の需要家の自主性や、出力抑制削減に貢献した EV 所有者が系統貢献の観点から受けられる対価の公平性などを経済的な行動原理の活用により担保する本提案は、IEEE Transactions on Sustainable Energy に掲載され、今後の PV・EV のさらなる普及の下で PV 発電の出力抑制回避のための経済学的な解決策を提示する独創的なものと言える。

(4) 研究成果の科学的・技術的な観点からの貢献

以下、各チームの代表的な論文および書籍について記載する。

① 井村チーム

- (i) T. Sadamoto, A. Chakraborty, T. Ishizaki, J. Imura, “Dynamic Modeling, Stability, and Control of Power Systems with Distributed Energy Resources,”

IEEE Control Systems Magazine, 39(2), 34-65, 2019.

概要：本論文では、第一に、PV や風力発電機を含む次世代電力システムの包括的な数理モデルを概説している。さらに、再エネ電源導入による電力システム全体の安定度の改善に向けて、局所制御器と大域制御器の併用による階層的な制御方策を提案した。特に、局所制御器は対象とする再エネ電源の数理モデルのみを用いて設計・実装でき、必要に応じて取り付け・取り外しが可能であるという特徴をもつため、今後も変化してゆく次世代電力システムに対する有効な制御手法として期待できる。提案手法は、実データをもとにしたベンチマークモデルを通して数値的に検証した。

(ii) T. Ishizaki, A. Chakraborty, J. Imura, "Graph-Theoretic Analysis of Power Systems," Proceedings of the IEEE, 106(5), 931-952, 2018.

概要：電力ネットワークのモデリング・解析・制御に関する一連の研究成果をグラフ理論で検討し、ネットワーク結合された発電機群の同期を実現するための基本原理を明らかにした。この原理に基づき、送電網で複雑に結合された発電機群の振る舞い（回転子の位相角や連結点の電圧値など）を効率的に解析・制御できる電力ネットワークの集約モデルを構築する手法を世界に先駆けて開発した。（2018.5.2 東工大&JST プレスリリースより引用）

(iii) B. Schäfer, C. Beck, K. Aihara, D. Witthaut, M. Timme, "Non-Gaussian Power Grid Frequency Fluctuations Characterized by Lévy-Stable Laws and Superstatistics," Nature Energy, 3, 119-126, 2018.

概要：北アメリカ、ヨーロッパおよび日本の電力網で観測された周波数時間変動のビッグデータを用いて、その変動の統計的特性を解析した。その結果、従来想定されていた正規分布（ガウス分布）よりも大きな周波数変動を伴う非正規分布特性を示すことを明らかにし、その数理モデルを構築した。また、再生可能エネルギーや電力取引の導入が、このような大きな周波数変動の要因となり得ることを明らかにした。（2018.1.9 東大生研プレスリリースより引用）

以下の研究書および解説書の執筆および出版を行った。

(iv) 次世代電力システム設計論：再生可能エネルギーを活かす予測と制御の調和

井村 順一，原 辰次、オーム社（2019/11/29）

(v) 太陽光発電のスマート基幹電源化-IoT/AI によるスマートアグリゲーションがもたらす未来の電力システム

井村 順一，原 辰次、日刊工業新聞社（2019/3/20）

② 内田チーム

(i) T. Ida, N. Motegi, Y. Ushifusa, "Behavioral Study of Personalized Automated Demand Response in Workplaces", Energy Policy, 1(32), 1009-1016, 2019.

概要：2014年7月、竹中工務店本社をフィールドとして、従業員約200人のタスクライトを自動制御するオートデマンドレスポンスの実証実験を行った。本論文における研究成果

として3点が得られた。第一に、節電参加率は、節電参加がデフォルトで、参加できない場合に辞退するオプトアウト型が高い。第二に、節電参加時の節電効果は、節電に参加したら報酬を支給する成果報酬型が大きい。第三に、グループ全体では、オプトアウト型・成果報酬型の節電効果が大きい。

- (ii) Y. Wasa, K. Hirata, K. Uchida, “Optimal Agency Contract for Incentive and Control under Moral Hazard in Dynamic Electric Power Networks”, IET Smart Grid, 2019 (online published, 10.1049/iet-stg.2018.0256).

概要:本論文では、エネルギー需給・動的ネットワークにおける戦略的エージェントの振る舞いをネットワーク全体の利益へと導く統合メカニズムを追求し、予算均衡性を考慮できる包括的なメカニズムを導くことに成功した。この結果は予算均衡性を保証するインセンティブ設計への一般化も可能である。さらに、このメカニズムはエージェントの戦略的な行動(決定や制御)を厚生最大化へ誘導する、すなわち、モラルハザードの問題を克服できる。この結果は、動的エネルギーネットワークにおいて世界初の成果であり、物理と経済の連携研究による成果である。

- (iii) Y. Okawa, T. Namerikawa, “Distributed Optimal Power Management via Negawatt Trading in Real-Time Electricity Market”, IEEE Transactions on Smart Grid, 8(6), 3009-3019, 2017.

概要:蓄電設備の充放電を考慮した分散型電力需給管理手法を提案した論文である。提案手法は、各地域に設置された大型蓄電設備を市場管理者が利用することによってネガワット取引を可能とし、その結果、当日に生じた発電不足および発電超過いずれの場合に対しても電力需給調整を可能にしている。また、市場管理者と電力市場参加者である各地域の電力需要家がインセンティブ価格を介して情報交換を行うことによって、当日市場における電力需給調整を分散的に達成する分散型電力市場アルゴリズムで実現している。

以下の書籍を執筆し出版予定である。

- (iv) Economically-enabled Energy Management: Interplay between Control Engineering and Economics, T. Hatanaka, Y. Wasa, K. Uchida, Springer

③ 鈴木チーム

- (i) A. Ito, A. Kawashima, T. Suzuki, S. Inagaki, T. Yamaguchi, Z. Zhou, “Model Predictive Charging Control of In-vehicle Batteries for Home Energy Management based on Vehicle State Prediction”, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 26(1), 51-64, 2018.

概要:車載蓄電池を活用した家庭向けエネルギー管理システム(HEMS)のための充放電制御手法を構築した。家庭内での電気機器の使用状態予測と太陽光発電の予測に、独自に開発した車の使用状態予測を組み合わせ、家庭での電気代をリアルタイムで最小化する充放電計画の最適化により、車の使用に関する制約が明示的に考慮された車載蓄電池のモデル予

測型充放電制御を実現できる。HEMS のプロトタイプを用いた検証実験により、日本の平均的な家庭において 10%~40%程度の電気代を削減できる可能性があることが明らかになった。

- (ii) Y. Chakhchoukh, H. Ishii, “Enhancing robustness to cyber-attacks in power systems through multiple least trimmed squares state estimations”, IEEE Transactions on Power Systems, 31(6), 4395-4405, 2016.

概要：電力システムの安全で効率的な運用に、状態推定機構は不可欠である。しかし、系統の計測情報は送信中にサイバー攻撃を受ける危険性がある。攻撃者がデータを改ざんした場合、推定精度に影響を与え得るが、さらに従来の異常検知では分からないクラスの攻撃が存在する。本研究では、とくに系統のトポロジーや物理パラメータのデータが改ざんされる状況を考えた。そのような悪意性の高いサイバー攻撃を検知し、その影響を抑制するために、ロバスト統計の分野における最小二乗刈込み法を適用し、その有効性およびセキュリティ向上のための手段を考案した。

- (iii) N. Mizuta, Y. Susuki, Y. Ota, A. Ishigame, “Synthesis of spatial charging/discharging patterns of in-vehicle batteries for provision of ancillary service and mitigation of voltage impact”, IEEE Systems Journal, 13(3), 3443-3453, 2019.

概要：本論文では、車載蓄電池 (EV) 群の協調的利用によるアンシラリーサービス提供に必要となる、EV 群に対する充放電指令値の決定アルゴリズムを提案した。提案アルゴリズムは、移動手段としての EV の利用と調和しながら、電力システム運用者に対して周波数ならびに電圧の調整に関するアンシラリーサービスを EV 群から提供することを可能にする。シェアリングとして供された EV 群の実運行データ及び実システムを模倣した配電網モデルを用いて、提案アルゴリズムの有効性を示した。

以下の書籍を執筆し出版予定である。

- (iv) Design and Analysis of Distributed Energy Management Systems Integration of EMS, EV, and ICT, T. Suzuki, S. Inagaki, Y. Susuki, A. T. Tran, Springer

④ 中島チーム

- (i) Y. Yamaguchi, S. Yilmaz, N. Prakash, S. K. Firth, Y. Shimoda, 2018, “A cross analysis of existing methods for modelling household appliance use”, Journal of Building Performance Simulation, 12(2), 160-179, 2019.

概要：本論文は家庭部門エネルギー需要推計の方法論確立に貢献するものである。エネルギー需要を推計する方法には実測されたデータに基づくデータ駆動型のモデル、生活時間データ等に基づいてエネルギー需要が決定される構造を再現する決定構造ベースのモデルがある。モデル構築に利用可能なデータなど文脈に依存して性能や分析能力が異なるが、本論文は既往研究で確立された 4 種のモデルについて同じ条件の下で性能、分析能力を比較

し、モデル設計において考慮すべき要因を明らかにした。

- (ii) Y. Iwafune, H. Sakakibara, J. Kanamori, "A comparison of the effects of energy management using heat pump water heaters and batteries in photovoltaic -installed houses", *Energy Conversion and Management* 148, 146-160, 2017.

概要：ヒートポンプ給湯機と家庭用蓄電池の活用による太陽光発電システムの自家消費量拡大の効果について検討し、実データに基づいて経済性を評価した。結果、家庭用太陽光発電システムが大量普及していく日本で、ヒートポンプ給湯機と家庭用蓄電池を最適運用させることによって、デマンドレスポンスによる系統の柔軟性向上と省エネ効果を同時に実現することが可能であることが明らかになった。

- (iii) M. Okata, T. Nakajima, K. Suzuki, T. Inoue, T.Y. Nakajima, H. Okamoto, K. Suzuki, "A study on radiative transfer effects in 3-D cloudy atmosphere using satellite data", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(1), 443-468, 2017.

概要：本論文では、3次元的に不均質な雲場による太陽放射フラックスの反射、透過を正確に扱うことのできるモンテカルロ型放射計算コードを開発し、実際の衛星データに適用して、雲場の3次元構造が地球放射収支に及ぼす影響を調べた。また、放射収支の観点から雲の3次元構造を特徴付けるパラメータを構築した。本手法によって、従来、平行平板近似による放射伝達計算では大きな誤差を引き起こす3次元的に不均質な雲場が存在する場合の太陽エネルギー算定の方法論が確立できた。

⑤ 林チーム

- (i) Y. Isozaki, S. Yoshizawa, Y. Fujimoto, H. Ishii, I. Ono, T. Onoda, Y. Hayashi, "Detection of Cyber Attacks Against Voltage Control in Distribution Power Grids with PVs," *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(4), 1824-1835, 2016.

概要：本論文では、配電系統における変電所で行われる電圧制御に着目し、系統内のセンサ情報が改ざんされた場合に引き起こされる制御系の異常な振る舞いを解析し、その検知のための対策を考案した。検証は、実データに基づいて小規模な配電系統モデル上で数値シミュレーションを通じて行った。特に情報改ざんにより、系統の一部で電圧逸脱が起こり得ること、および簡便な検知アルゴリズムにより大半の攻撃が検知可能であることを示した。また、PV発電の出力抑制に対する影響評価も行った。

- (ii) Y. Hayashi, Y. Fujimoto, H. Ishii, Y. Takenobu, H. Kikusato, S. Yoshizawa, Y. Amano, S. Tanabe, Y. Yamaguchi, Y. Shimoda, J. Yoshinaga, M. Watanabe, S. Sasaki, T. Koike, H.-A. Jacobsen, K. Tomsovic, "Versatile Modeling Platform for Cooperative Energy Management Systems in Smart Cities,"

Proceedings of the IEEE, 106(4), 594-612, 2018.

概要：本論文では、都市規模の分散協調 EMS 技術の相互作用を考慮し、導入技術に対する都市のエネルギー視点での持続可能性を定量評価するための汎用的な評価の手法を提案した。提案手法は、実世界の電力需要家の電力消費推移の特性を都市規模で反映し、東京電力パワーグリッド・中部電力・関西電力が運用する配電線データに基づいて構築した配電システムモデルから構成される評価プラットフォームを活用することで、住宅・ビルなどにおいて EMS 技術が分散的に導入された時の相互作用・協調効果を定量的に評価することを可能にする。本論文では、開発プラットフォームを用いた都市規模の分散協調 EMS 技術の多角的評価の事例を示し、本技術がスマートシティの実現において重要な役割を果たすエネルギーマネジメントの持続可能性を議論するための核心的な技術基盤となることを述べた。

(iii) H. Kikusato, Y. Fujimoto, S. Hanada, D. Isogawa, S. Yoshizawa, H. Ohashi, Y. Hayashi, “Electric Vehicle Charging Management Using Auction Mechanism for Reducing PV Curtailment in Distribution Systems,” IEEE Transactions on Sustainable Energy, in press) DOI: 10.1109/TSTE.2019.2926998.

概要：配電系統に連系された住宅用 PV 発電設備は、系統への電力逆潮流によって誘発される電圧の過剰な上昇を防止するため、パワーコンディショナによる出力抑制機能を一般に有する。抑制が発生している時間帯に EV の充電のような消費行動を需要家が実施すると、自宅に設置された PV 発電の抑制が回避できると共に、同一配電線に連系される周辺の需要家宅で発生している PV 出力抑制も軽減され得る。本論文は EV 所有者が PV 出力抑制を目的として充電時間をシフトする際の自主性や、系統貢献に対する対価の公平性などを考慮した、セカンドプライス・シールドビッド・オークション方式を活用した需要家 EV の充電管理手法の提案を行った。

(5) 研究成果の社会的・経済的な観点からの貢献

林チームでは開発した区分開閉器の制御に基づく配電損失最小化の方法論の有用性を検証するため、東京電力パワーグリッド株式会社との協働により、実配電系統を対象とした実証評価を実施した。実系統の配電損失を区分開閉器の制御に基づき削減するためには、系統上で取得されるセンサ情報に基づき天文学的な数の構成候補の中から適切な開閉器状態を導出する必要があり、実規模系統に対する適用がこれまで検討されていなかった。本実証は世界的にも類を見ない実配電系統における損失最小構成運用の実証試験となり、開発成果である EMS 技術が実系統に対して実装可能で配電損失の削減をもたらすことが示された(2016年4月20日 プレスリリース「国内初、スマートグリッド実現に向けた配電網の電力損失最小化の実証試験開始について」)。

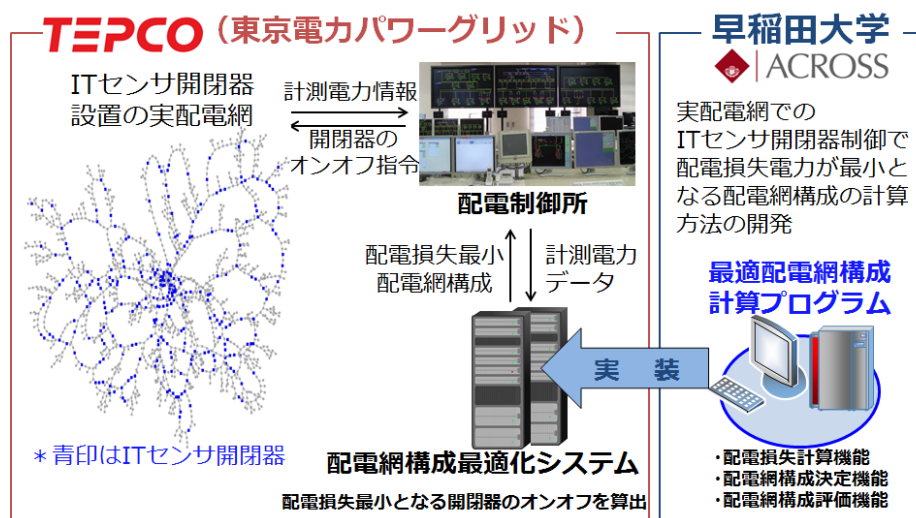


図 11 IT センサ開閉器制御による実配電網での配電損失電力最小化の実証実験概要

本研究領域では、工学だけでなく、異分野融合として経済学、社会学、人文科学の視点を取り入れたことで、人間行動に対するインセンティブの効果（2019/7/31 北九州大学他プレスリリース「『どんなときに従業員は節電に協力するのか』産学協同でフィールド実験を実施」内田チーム）、オークションによる電気自動車の充電管理手法（2019/7/24 プレスリリース「太陽光発電有効活用のための電気自動車充電管理手法を開発～所有者にとって公平で無理のない充電時間シフトをオークションで実現～」林チーム）、また、内田チームによる「エネルギー需給の3タイムスケール経済モデル」など、社会的・経済的な観点からの研究成果も多く出ている。

(6) 本研究領域に続く研究資金の獲得状況

①井村チーム

鈴木秀幸 教授 JST CREST 革新コンピューティング 課題名「光ニューラルネットワークの時空間ダイナミクスに基づく計算基盤技術」2018～

②鈴木チーム

藤本 博志 准教授 JST 未来社会創造事業 課題名「電気自動車への走行中直接給電が拓く未来社会化」2017～

薄 良彦 准教授

JST SICORP 課題名「交流・多端子直流電力システムの性能に関するモジュールウェア・モデリングと評価」2018～

JST さきがけ 課題名「データ駆動型クーブマン作用素による非線形力学系の解析と

設計」 2019～

③林チーム

林 泰弘 教授 JST 未来社会創造事業 「超スマートシティ・サービスマネジメント・プラットフォームの構築」 2017～

(7) その他特記事項

本研究によってもたらされた特筆すべき顕彰・受賞として、次のようなものがある。

受賞者名	賞の名称	授与者名	受賞日 (時期)
Kotaro Hashikura, Katsuya Umeda, Koura Hiroyuki and Akira Kojima	Best Application Paper Award (runnerup)	10th Asian Control Conference	2015年5月
櫻間一徳	制御部門賞パイオニア賞	計測自動制御学会制御部門	2017年3月
Chiaki Kojima, Yoshihiko Susuki, Koji Tsumura, Shinji Hara	IEICE Best Paper Award 2017	NOLTA Society	2018年9月
阪本浩章	学術賞	環境経済・政策学会	2015年9月
和佐泰明	計測自動制御学会学術奨励賞 (研究奨励賞)	計測自動制御学会	2019年2月
Izumi Masubuchi, Takayuki Wada, Yasumasa Fujisaki, and Fabrizio Dabbene	The 12th Asian Control Conference Best Paper Award	Asian Control Association	2019年6月
石井秀明	IEEE Control System Magazine Outstanding Paper Award	IEEE Control Systems Society	2015年12月
Katsuhiro Hata, Takehiro Imura,	Best Paper Award	IEEE ITEC Asia-Pacific 2018	2018年6月

Hiroshi Fujimoto, Yoichi Hori			
河野洋平、薄良 彦、引原隆士	論文賞・武田賞	計測自動制御学会	2019年9月
中島映至	IAMAS 国際放射委員会ゴ ールドメダル賞	International Radiation Commission	2016年4月
中島映至	平成 29 年春 紫綬褒章	内閣府	2017年4月
橋本真喜子	JGR Highlight paper	American Geophysical Union	2017年6月
林泰弘	平成 31 年度 文部科学大 臣表彰 科学技術賞 研究 部門	文部科学省	2019年4月

8. 総合所見

(1) 研究領域のマネジメント

本戦略目標を達成するため、先端的な基礎研究を要素技術開発に留まること無く、1つのシステムとして統合化する段階(もしくは統合化の道筋がみえる段階)までを目標とした。これまでのCRESTより広範な分野におけるトップクラスの研究者を集めた「最強チーム」を構築する領域運営を実施することと定めた。システム、制御、情報、通信、エネルギー、社会科学など様々な研究分野を横断した最強チームを公募の段階で編成することは非常に困難であると考え、これを解決する新しい手法として、要素技術を磨く小規模チームを公募し(スモールスタート)、一定期間後に複数チームを1つの「最強チーム」として統合・再編する計画を立て、遂行した。更に、国際連携の積極的な推進やシステム構築についてマネジメントを行った。

これらの様々な推進策は効果的に機能し、さまざまな分野の研究者の融合された5個の最強チームが形成され、さらにそれら最強チームが本研究領域の期間の最後まで並走したことで、チーム間での融合も行われた。この結果、従来は無かった異分野の視点を取り込んだ理論や基礎研究に関する論文が多数創出された。当初、本研究領域は応用研究という認識をされることもあったが、システムに関する基礎研究としての成果をだせたことは意義深い。

国際連携においても、各国のファンディング機関を含めた国際ワークショップを継続的に開催したことで、様々なレベルの交流や連携が生まれ、100件以上の国際共著論文、また、共同研究によるNSFのファンディングの獲得等が達成された。

システム構築の視点でも、電力、気象、需要などを含めたシミュレーションにより様々な評価や議論を行える電力コラボレーションルームや、都市規模の EMS 技術の評価の可能な EMS 評価基盤プラットフォームをはじめ、各チームでソフトウェアおよびハードウェアインザループのシステムが構築された。これらのシステムは社会連携の糸口としても機能し、電力会社をはじめいくつかの企業との実証評価等へつながった。

以上の点から、本研究領域のマネジメントは十分に機能したといえる。

(2) 研究領域としての戦略目標の達成状況

戦略目標「再生可能エネルギーをはじめとした多様なエネルギーの需給の最適化を可能とする、分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論、数理モデル及び基盤技術の創出」および達成目標

- ・再生可能エネルギー需給の状態把握・推定・予測に関わる理論及び基盤技術の創出
- ・多様なエネルギーの需給制御による分散協調型エネルギー管理システム構築に関わる理論及び制御基盤技術の創出
- ・需要側と供給側のエネルギーネットワークの統合メカニズムと人間行動を考慮したエネルギー管理の最適化及びシステム全体の社会的合理性を追求する理論及び基盤技術の創出

に対し、領域として 1000 本以上の理論や数理モデルを含む各種のモデルに関する論文が執筆され、トップレベルジャーナルに多く掲載された。達成目標にあるように、気象を含む状態把握や予測、制御、人間行動や経済学をふくめた理論および基盤技術の創出が行われた。また、これらを体系化した 3 冊の研究書が出版された（予定含む）。さらに、システム構築および評価を通して様々な基盤技術が創出された。将来の様々なエネルギー需給のシナリオを評価できるようになった。

以上の点から、本研究領域は、当初の戦略目標を十分に達成した。

(3) 本研究領域を設定したことの意義と今後の展望

2011 年の東日本大震災以降の状況変化により、再生可能エネルギーの本格的な導入が期待された。しかし、再生可能エネルギーを基幹電源化するには、自然現象に依存する不安定な供給力と需要のバランスを管理できるエネルギー管理システムの構築が必要となる。これには、気象、予測、制御、需要といった様々な観点を含めた理論や数理モデルに基づいたシステム構築が必要である。異分野融合は重要と言われるものの、例えば融合で良い結果がえられるかは未知であり困難を伴う取り組みである。本研究領域では、気象や経済を含む、さまざまな分野の研究者の融合を目指し、目標を達成できたことは大変有意義である。

昨今の自然災害の激甚化は、レジリエント（回復力のある）な電力システムの必要性を高めた。また、本研究領域の研究課題でもあった、電気自動車を移動する電力源として利用することが先の台風の停電の際に実際に行われた。さらに、SDGs や温室効果ガス排出量増加

への対応などからも、今後、エネルギー管理システムの本格的な社会実装が求められると想定される。本研究領域で生み出された各チームの多くの基礎研究成果の展開が期待される。

電気自動車の広がり、カーシェアリングなどに加え、人工知能技術の急速な発展から、自動運転車の研究や一部機能の実装が広がっている。このようなモビリティ環境の大きな変化は、V2Xのような電力の制御や、電気自動車の充電タイミングといった電力需要に影響を与える。すなわち、モビリティとエネルギーマネジメントは一体化して考えることが必要な時代となった。本研究領域で創出された多価値共最適性等を特徴とする Cyber Physical Value System は、電力システムにかぎらず、モビリティとエネルギーといった複数のシステムからなる社会システム設計の理論の枠組みを与えるものである。また、同様に「需要の科学」も、エネルギー分野からより広く次の社会システム設計へむけた新しい分野として萌芽した。

今後の展望へのつながりも含め、本研究領域を設定した意義は十分に大きいと考える。

(4) 所感、その他

これまでの CREST では例のない異分野融合を目的とする研究チームの再編やファンディング機関が主導する国際合同ワークショップの開催等、研究領域運営に関する様々な試みを実施してきた。他の研究領域と比較して、研究総括、領域アドバイザー、研究代表者、研究者、JST スタッフらが初めて直面する課題も多かったと思われるが、関係者が一丸となって解決にあたり、結果として、より強固なネットワークを形成することが出来たと感じている。

特に本領域においては領域アドバイザーの貢献が大きかった。発足当初は敢えて面識のない領域アドバイザーも含めた体制とし、領域会議、AD 会議等により総括・アドバイザーの融合を図った。再編時及びそれ以降は、各チームに担当アドバイザーを置き、研究およびチーム間の連携についてアドバイスを頂いた。これらは領域としての大きな成果を創出できた一因であり感謝したい。

また、各国のファンディング機関同士の連携を起点として国際共同研究を推進し、研究者の育成や研究ネットワークの拡大という今後の新たな研究の創成にもつながる資産を形成できたことは、今後の CREST の国際連携を考える上で示唆を与えるものとなるであろう。

最期に、本研究領域の多数の成果が、再生可能エネルギーの本格的導入や、モビリティの革新など、技術と社会が融合する新しい時代の社会システムの実現につながることを期待したい。

以上