

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「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」

研究終了報告書

研究期間 2015年4月～2020年3月
(新型コロナウイルス感染症の影響を受け2021年3月まで延長)

研究代表者: 中島 孝
(東海大学 東海大学情報技術センター／情報理工学部、教授)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

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/m² 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。

(2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

1. ヒートポンプ給湯器のデマンドレスポンス効果を評価

概要：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2~4kWhを導入した時と同等の効果があることを確認した。

2. エネルギー需要モデルの開発

概要：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。

3. 日射量プロダクトの品質保証

概要：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。

< 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

1. 気象・需要データの可視化

概要：気象・需要データの可視化を行うために地理情報システム(GIS)可視化のシステム開発を行い、当チームで算出している各種EMSデータの提供可能性を大きく広げた。本研究では、まず6時間後までの予測値を可視化するための設計と開発を行った。また、湿度、風向、太陽光発電量なども同時に可視化することでデータの認識性を向上させた。次に日射量データや需要データの一層の活用を図るために、スケーラブル可視化を行った。スケーラブル可視化というのは、データユーザーがwebシステム上で地図をズームアウトすると、町丁目単位→市町村単位→都道府県単位へと表示範囲がシームレスに切り替わるシステムである。スケーラブル可視化の実装により、これまでグラフ表示等では発見が難しかった需要データと日射データの関係性について明瞭に認識出来るようになった。

2. 家庭用エネルギー最終需要モデルの開発

概要：2030年、2050年における日本の家庭部門エネルギー需要の予測を可能とした。地域別の世帯あたり年間エネルギー消費量において、環境省の家庭CO₂統計との比較では、シミュレーション結果が冷暖房を中心とした地域別のエネルギー消費の差異を良く表している。4つのシナリオで2050年のエネルギー消費を予測した。そのうち省エネ徹底シナリオでは、2013年比で40%の削減が見込まれる。集合住宅75%シナリオでは、建物の熱損失や抑制による省エネが認められるが全体では効果は大きくない。戸建て75%シナリオではPVの増加により唯一プラスエネルギーとなった。すなわち昼間時は住宅地が発電所になりうることを示した。

3. ひまわり衛星および雲解像モデルに基づく日射量算定・予測システムの開発

概要：ひまわり衛星を使った地上到達日射量と太陽光発電出力の現況把握技術の開発および、短時間予測技術の開発を行った。また、雲解像モデルに雲水量と風向の同化技術を適用した予測技術の開発を行った。まず、ひまわりであるが、初期段階として、2.5分毎の準リアルタイムにおける日射量と太陽光発電出力の算出技術を開発した。次の段階として、大気移動ベクトル(AMV)手法を用いたアンサンブル短時間予測技術の開発を行った。予測技術では、雲光学的厚さ、雲頂気圧、輝度温度差の値を元に高高度と低高度のクラスタリングを行うことで最適な流れ場を構築することができた。高時間分解能の特性を活かし、巨視的にも微視的にも整合した太陽光発電出力の供給量と電力需要の情報を得ることが可能となった。雲解像モデルについては、衛星推定雲水量および風向の同化技術を開発し、同化パラメータと日射量の予測精度の関係を定量化することに成功した。

< 代表的な論文 >

1. Yamaguchi, Y., S. Yilmaz, N. Prakash, S.K. Firth, and Y. Shimoda, 2018, "A cross analysis of existing methods for modelling household appliance use", Journal of Building Performance

Simulation, 12(2), 160-179.

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。

2. Iwafune Y., H. Sakakibara and J. Kanamori, 2017, "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.

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システム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。

3. Okata, M., T. Nakajima, T. Inoue, T.Y. Nakajima, H. Okamoto, and K. Suzuki, 2016, "A study of the earth radiation budget in 3-D broken cloudy atmospheres by using satellite data", Journal of Geophysical Research: Atmospheres, vol. 122, Issue 1, pp.443-468.

概要：本論文では、3次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。

§ 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

① 東海大グループ

研究代表者: 中島 孝 (東海大学情報技術センター／情報理工学部 教授)

研究項目:

- ・衛星日射量推定手法の改善と気象変動量解析
- ・データ・インタフェース開発

② JAXA-東大グループ

主たる共同研究者: 中島 映至 (宇宙航空研究開発機構・地球観測研究センター 参与・特任教授)

研究項目:

- ・衛星観測に基づく日射量推定システムの高度化
- ・地球科学モデルによる雲場同化手法の開発
- ・シナリオデータの構築

③ 千葉大グループ

主たる共同研究者: 入江 仁士 (千葉大学環境リモートセンシング研究センター 准教授)

研究項目:

- ・EMSのための日射データ誤差評価地上システムの構築

④ 阪大グループ

主たる共同研究者: 下田 吉之 (大阪大学大学院工学研究科 教授)

研究項目:

- ・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モデルの開発

⑤ 東大生研グループ

主たる共同研究者: 岩船 由美子 (東京大学生産技術研究所 特任教授)

研究項目:

- ・需要データプラットフォームの構築とHEMS実装に向けた研究

⑥ 東工大グループ

主たる共同研究者: 日高 一義 (東京工業大学環境・社会理工学院 教授)

研究項目:

- ・分散協調エネルギーマネジメントシステムにおける需要家行動モデルの研究・開発

⑦ NICTグループ

主たる共同研究者: 村田 健史 (情報通信研究機構オープンイノベーション推進本部 研究統括)

研究項目:

- ・気象・需要データ可視化とEMSプラットフォーム構築

(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

(海外共同研究)

エネルギー需要科学サブグループ(以下需要科学SG)はローレンス・バークレー国立研究所の研究者と共同で複数のインフォーマルミーティングを開催するとともに同研究者をJST主催の国際合同ワークショップにも招聘した。東工大グループは同研究者との連携可能性を模索している。こ

の他、3グループが研究加速のため国際強化支援を受けた。阪大グループ(以下G)は Geneva 大学所属研究者とは家電製品の操作実態に関して、Tennessee 大学所属研究者とは住宅における可制御機器を用いたデマンドレスポンスによる電力需要調整力をそれぞれ共同研究中であり、招聘2件、海外派遣1件を実施した。また JAXA-東大Gは NASA エイムズ研究所へ継続して海外派遣を行い、日米の静止気象衛星データの相互共有および解析アルゴリズムの米国への適用を行い共同研究中である。さらに NICT グループは、AMATERASS データのアジア各国への国際展開として、世界中のセンサーをネットワーク化するにあたりソーラー給電技術に着目している IoT (Internet of Things) 研究者を招聘し国際ワークショップを開催する予定であったが、新型コロナウイルス感染拡大による延期を経て 2020 年 11 月に一部内容を変更しオンラインで開催した。

千葉大Gは地上観測システム SKYNET が世界気象機関に認められ全スカイラジオメーターとの MOU 締結を完了させた。また EMS のための日射データ誤差評価地上システム構築について米国・欧州・アジアへの SKYNET 国際展開、共同研究、共著論文執筆を進め、複数の論文公開につながった。このほか、NICAM-SPRINTARS モデルのエアロゾル同化システム構築(中国科学院 IAP と JAXA-東大G)、リモートセンシング研究と教育に関する共同研究協定締結(中国科学院 RADi と東海大G)、各国気象関連機関との EMS に関する情報交換を目的としたアジア・オセアニア気象衛星利用者会議出席(東海大G)をそれぞれ行っている。

(他最強チームとの連携)

いずれの最強チームともネットワークを形成している。

他最強チームとの協働については、当チーム需要モデルを組合せた配電網計画を行うことができる評価基盤プラットフォームの共同開発(林チームと需要科学SG)、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共同研究(鈴木チームと阪大G)、電気自動車の充放電最適化モデル提供を受けての統合的検討実施(同)、電気学会全国大会でシンポジウムの共同開催(林チームと需要科学SG)、日本気象学会で専門分科会の共同開催(井村チームと地球科学SG)をそれぞれ行った。また、JST が 2020 年度の戦略目標候補として検討している「需要の科学」の準備プロセスにおいて、林・内田チームの研究者と議論中である(需要科学SG)。

この他、当チームの準リアルタイム日射量データを井村・林チームに、エネルギー需要データを林チームに提供している他、林チームデータ可視化のための打合せ開催(NICT グループ)、他最強チームの会議にメンバーとして参加(東大生研G)など他最強チームの研究成果に貢献した。

(産業界との交流)

2013 年に設立した NPO 法人「太陽放射コンソーシアム」では 2019 年 9 月末現在、企業会員 7 社(正・準利用会員)、非営利利用会員 24 団体(大学、研究所等)が AMATERASS 日射量データを利用している(地球科学SG)。

電力会社との交流を持った。定期的な情報交換(電力会社と地球科学SG)、発電量や需要量データの貸与と研究結果のフィードバック(電力会社と東工大G)を行った他、住宅のスマートメーターデータの提供を受けた(電力会社と阪大G)。

企業からの受託研究としては、遠隔制御にて受容制御可能にするためのフィールド実証実験(アグリゲーター会社と東大生研G)および新規スマートコミュニティ計画に関するエネルギー性能シミュレーション予測に関する研究(建設会社と阪大G)の2件があり、後者は科研費にて研究続行中である。また、数々の共同研究が行われた。住宅コミュニティを対象とするエネルギー需要分析(阪大G)、EV(東大生研G)に関する共同研究を大手自動車会社と行った他、エネルギー需要による世帯特性推計方法の確立(ガス会社と阪大G)、給湯器実測データに基づく世帯別給湯需要の分析((株)デンソーと阪大G)について共同研究した。また、東工大Gの実験については長崎県・対馬市・長崎環境コンソーシアムの3組織、および対馬 CATV 会社と研究連携を行った。この他、エネルギー・資源学会主催学会にて企業や他研究機関の需要科学研究者らと共同で、2050 年エネルギー受給に関する企画セッションを年 2 回継続的に開催した(東大生研G)。