

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」

## 研究実施中間報告書

中島 孝  
(東海大学情報技術センター、教授)

《所属は、大学院ならば研究科レベルまで記載をお願いいたします。また、(国研)、  
(独)、(公財)、(株)などの記載漏れがないようお願いいたします。》

## § 1. 研究実施の概要

### (1) 研究の概要

(チームとして、研究開始からこれまでにを行った研究の概要(目的、方法、結果等)について、簡単に、分かり易く、500 字程度でまとめてください。それぞれの研究グループの研究が、どのようにチーム全体の成果につながったのかを中心に記載してください)

本最強チームでは、地球科学サブグループ(SG)、エネルギー需要科学SG、データ・インタフェースSGの各SGそれぞれが目標到達を目指すとともに、各SGを有機的に結びつける研究を実施した。地球科学SGは衛星推定日射の「ひまわり8号」対応を実施し2.5分毎の準リアルタイムデータ提供を実現させた。また、大気移動ベクトル手法及び非静力雲解像モデルを用いた日射予測の研究が進捗した。さらに、日射量検証システムの構築と解析が進捗した。エネルギー需要科学SGでは、居住者の生活行為生成モデルの開発が進捗した。また、HEMSデータベースに基づくエネルギー診断の研究から家庭内需要構造の解明に至る道筋をつけた。さらに、需要家行動モデルの開発に向けて対馬における社会実験の準備が進捗した。データ・インタフェースSGでは、Webインタフェースによる推定日射量データの提供を進めるとともに、GIS可視化システムの実現に至る道筋をつけた。最強チーム内連携として、需要構造分析での気象データの活用や、阪大で開発された給湯需要モデルの結果をベースにした、需要の多様性を考慮したHP給湯機運用のモデル化研究等が進捗した。また、多くの国際交流も図った。H27年4月から現在までの研究成果は、原著論文/総説/書籍64編、招待講演35本、口頭発表172本、ポスター発表58本、受賞5件、等である。

## (2) 顕著な成果

(中間評価時点までの最も顕著な成果を<優れた基礎研究としての成果>と<科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>を各々最大2点まで挙げ、それぞれ 200 字程度で説明してください。研究成果の科学技術上のインパクトや国内外の類似研究の研究動向・状況に対する位置づけについても説明してください。成果は論文、特許、試作品、実用化、展示などが挙げられます。)

## &lt;優れた基礎研究としての成果&gt;

(先導的・独創的であり国際的に高く評価され、今後の科学技術に大きなインパクトを与える成果など)

1. ひまわり衛星推定太陽放射量<sup>アマテラス</sup>AMATERASSデータセット 【JAXA-東大 G】

概要: (200 字程度)

ひまわり 8 号観測データに基づく日射量の準リアルタイム解析システムを構築した。電力網に分散電源である太陽光発電システムを積極的に導入するためにはエネルギー源となる日射量の現況把握技術、及び予測技術が重要な要素となる。本研究では観測事実に基づく日射量推定技術として物理解法である放射伝達解法に基づく日射量解析をひまわり 8 号観測データに適用することで、日本の国土を網羅する面的な日射データ、名称 AMATERASS データセットを 2.5 分毎に準リアルタイムにて解析することを可能とした。

## 2. ヒートポンプ給湯機のデマンドレスポンス効果評価 【東大生研 G】

概要: (200 字程度)

2019 年問題対応として、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を目的とし、給湯機、蓄電池の予測一計画一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した。その結果、給湯機の最適運用によって、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し、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 の導入時と同等の効果があることを確認した。研究成果のプレスリリースは、国内のメディアに多数取り上げられ、ヒートポンプ給湯機の DR の重要性が認識され、実装に向けた開発に先鞭をつけた。

## &lt;科学技術イノベーションに大きく寄与する成果&gt;

(新産業の創出への手掛かりなど出口を見据えた基礎研究から、企業化開発の手前までを含め、科学技術イノベーションに大きく貢献する成果など)

## 1. 三次元離散雲の放射収支算定に関わる放射伝達解法の研究 【JAXA-東大 G】

概要: (200 字程度)

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。

## 2. 住宅エネルギー需要予測モデルの開発 【阪大 G】

概要: (200 字程度)

家庭を対象としたエネルギーマネジメントシステムの計画のためには、電力ロードカーブを、その構成機器別に精度良く予測することが必要である。本研究では、世帯および住宅ストックの分布の再現、居住者行動のモデル化により、高時間解像度のボトムアップ型エネルギー需要予測モデルを構築した。関西地方の約 1200 世帯のスマートメータデータとの比較により、夏期および中間期について電力ロードカーブの予測精度が十分に高いことを確認した。また、家庭における各種節電行動が系統電力ロードカーブに与える影響を評価し、冷房よりも照明に関する節電行動の効果が大きいこと、家族構成による効果の差が大きいことなどを示した。

§ 2. 当初の研究計画に対する進捗状況

(1) 各研究項目の進捗状況

(当初の研究計画(全体研究計画書)に対する現在の研究進捗状況および今後の予定を示して下さい。  
項目毎、あるいはグループ毎に分かり易く記載して下さい。なお、当初の研究計画にない新たな方向性や方針変更等が生じた場合は追記し、そのことが分かるよう明示して下さい。)

黒線が当初計画、赤線が現在の状況

研究項目	H26 年度 (0ヶ月)	H27 年度	H28 年度	H29 年度	H30 年度	H31 年度 (12ヶ月)	変更内容
<b>1. 地球科学データ</b> ・衛星データ解析システム (東海大, JAXA-東大, 千葉大) ・モデルによる地球物理量算 定システム (JAXA-東大) ・品質保証とデータ異常検出 (千葉大) ・気象データの変動解析 (東海大) ・シナリオデータの作成 (JAXA-東大)							・予定通り ・予定通り ・予定通り ・予定通り ・延長
<b>2. エネルギー需要</b> ・エネルギー需要モデルの開 発 (阪大) ・需要データプラットフォーム 構築に向けた分析 (東大 生研) ・需要家行動モデルの開発 (東工大) ・需要家情報の整理 (阪大・東大生研・東工大)							・予定通り ・予定通り ・予定通り ・予定通り
<b>3. データ・インタフェース</b> ・データ・インタフェースの 開発 (東海大、JAXA-東大、 千葉大、東大生研ほか全グ ループ)							・予定通り (リソースの増 強を希望)
<b>4. その他</b> ・異分野との交流 ・研究とりまとめ							・予定通り ・毎年作成



## (2) 今後の進め方、および研究成果の見通し

(今後の研究の進め方、研究成果の見通し、戦略目標に向けての貢献や成果の社会的・経済的なインパクトの見通し等について、1～2 ページ程度でまとめてください。まだ成果展開に至っていないが、もう少しで実用化や他の研究に発展しそうなものがあれば、それをご記入下さい。また、その際に必要な支援があればあわせてお書き下さい。

### ① 地球科学サブグループ

地球科学の知見をベースに、近未来の分散協調型 EMS における基礎データとなる準リアルタイム衛星推定日射量の精度を高めるとともに、EMS において要望の強い日射量予測の技術を確立することを最終目標とする。

本サブグループの研究は、①衛星観測、②モデル開発、③データ検証の3つの柱で成り立っている。このうち①衛星観測において今後実施する事項は、日射量計算におけるエアロゾル効果の反映、計算処理の高速化、氷雲の取扱いの改善である。これらの研究により、いままで以上に精度の高い準リアルタイム衛星推定日射量が得られる見込みである。日射量の予測は①衛星観測と②モデル開発の両方で取り組んでいる。衛星データに基づく大気移動ベクトル手法を用いた日射量予測と、非静力雲解像モデル(NICAM)を活用した日射量予測が現在進行中である。第一原理に立脚した衛星観測とモデルの二本立ての戦略により、任意の地点、時刻における予測技術を会得する見込みである。第一原理に立脚することにより、GOES-R, MTG などの全ての次世代型静止衛星に対応できるので、我が国発の算定システムを世界発信する予定である。NICAM は京コンピュータでも稼働する次世代型の大気モデルであり、気象庁の予報システムとは異なる予報システムが構築できるので、両者を利用するマルチモデル予報システムの実証を行うことができる。世界の予報モデルの動向はこのようなマルチモデル型に向かっている。③データ検証においては、衛星観測とモデルから得られた日射量を活用する際に必須となる品質保証を行うと共に、日射量推定における異常データを自動検出するシステムの開発を進めていく。

本 CREST の戦略目標に対する貢献として、日射量の不確定性に起因する課題の解決がある。例えば、日射量の時空間変動が定量化され、予測精度が向上すれば、ランプ変動等の事前検知が可能となり、太陽光発電の導入量増加が期待できる。また、当チームの「エネルギー需要科学サブグループ」が取りまとめているように、日射量や気温のような自然環境は、生活行為要求、生活行為時間配分、機器操作などに影響を与える可能性があるため、今後は地球科学と需要科学の境界領域の研究による戦略目標への貢献が期待出来る。本サブグループの成果が社会・経済に与えるインパクトは大きい。

本 CREST が始まった 2012 年以降、世界の状況は急速に変化している。なかでも、近年、テスラのような先鋭的な会社が現れ、蓄電池の高性能化と低価格化をもたらしたことは注目に値する。蓄電池の普及は、一般家庭、工場、ビルにおける太陽光発電にかかるボトルネックが氷解することを意味する。電気の地産地消が可能になることから、現在世界の主要国の中で日本だけが低迷している太陽光市場の拡大に弾みがつくことが予想される。このような世界では、これまで以上に各地点における正確な太陽放射の算定と予測が必要になると考えられる。太陽光発電の爆発的増加を迎えるこの時期に本サブグループの研究を進捗させ、分散協調型 EMS に貢献する基盤技術を確固たるものにするには現社会において大きな意義がある。このような基盤技術を早期に会得するためには、現 CREST および継続プロジェクト等の枠組みによる研究支援が必要である。

研究成果のスピノフも重要である。具体的な動きは既に始まっていて、本 CREST で創出した研究成果を社会還元するために、NPO 法人「太陽放射コンソーシアム」を設立した。本コンソーシアムを通じて、衛星日射量等の民間企業におけるビジネス活用が始まっている。これに関連して、日本を代表する電力会社である東京電力等が我々の研究成果に興味を持っていることから、今後も定期的な情報交換を実施していく。

### ② エネルギー需要科学サブグループ

エネルギー需要科学サブグループでは、高解像度の民生部門最終エネルギー需要モデルの開発、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(DR)・ポテンシャルの評価、社会実験によるエネルギー需要家の行動モデルの構築、という課題を通じて、CREST チーム全体に貢献するエネルギー需要関連の知見を創出するとともに、「需要のモデル化」「需要データの収集と分析」「介入と行動変容」という 3 本柱により、エネルギー需要科学の枠組みを構築することを最終目標とする。

阪大では、家庭部門および業務部門それぞれについて、居住者の行動レベルからボトムアップで積み上げるエネルギー最終需要モデルを構築し、実データによる検証を経て各種シナリオに基づく将来予測をおこない、省エネルギーと再生可能エネルギー導入が更に進んだ近未来におけるエネルギー最終需要を予測する。他チームとの協同によりグリッドレベルの EMS が将来直面する課題を提示し、その需要側での解決

策を検討することについては、最終年度までに終了できる目処が立っている。さらに、実データの分析やモデル結果との比較、エネルギー需要科学サブグループ内あるいは地球科学サブグループとの連携を通じて各種のエネルギー需要発生メカニズムを解明することにより、エネルギー需要に関する基礎理論・数理モデルの創出に寄与し、また各種 EMS システム設計のための基盤技術の創出を目指す。

東大生研では、これまでの HEMS データ活用によるヒートポンプ (HP) 給湯機 DR モデル、その他家電の DR ポテンシャル推計結果に基づき、さらに電気自動車も含めた DR モデルを構築し、系統の需給シミュレーションモデルに実装し、日本全体の家庭部門 DR の系統貢献について評価を行う予定である。また、DR 対応可能な機器の導入を予定しているフィールドと協力し、実運用における DR 効果の検証、需要家の DR 受容性に関する調査を行う。これらの研究により、主要な DR 機器が我が国の電力システムにあたる貢献を適切に評価し、かつ、その具現化に向けた動きを加速させる可能性がある。本研究の成果は、今後検討される DR の市場化を含めた制度設計にも指針を与えうるものと考えられる。

東工大では、再生可能エネルギーが導入された社会における EMS の需要家行動に係る基礎的な知見を蓄積し、需要家行動モデルを構築することが目標である。具体的には、「電力使用行動」に加え、「電力契約行動」「設備投資行動」の3行動に影響を及ぼす要因を特定し、かつこれらの行動間の関係を明らかにする。実験室実験ではなく、社会実験を数年にわたり行うことで、数か月単位の行動変容だけではなく、長期間にわたり変化していく行動を捉える。スマートメータを用いた機器分離技術の精度検証と実用化検証も行い、需要の構造化を試みる。これらの結果は、分散協調型エネルギー管理システム構築のための人間行動の基礎技術の創出と需要モデルのためのデータの基盤の構築に寄与すると思われる。

更に需要3大学の連携により、既に学会誌に投稿したエネルギー需要科学の確立へ向けた活動、研究を通じて得た需要家情報の整理を継続していく。

### ③ データ・インタフェースサブグループ

データ・インタフェースグループは、本チームのひまわり衛星推定太陽放射量 AMATERASS が算出する日射量などの EMS に活用できるデータを、エネルギー需要科学 SG 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を構築すること、およびエネルギー需要科学 SG など CREST 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を構築することを最終目標とする。

まずは準リアルタイム日射量推定値データの提供のために、Web インタフェースでのデータ提供の研究を進めた。Web アプリケーションのプロトタイプを構築し、実際の運用においてプラットフォーム構築およびサーバ攻撃などのセキュリティ対策として Microsoft Azureクラウド上でのサービスも同時並行的に運用することとした。本チームに参加している大学(セキュリティ保持のため具体的な大学名は伏せる)に設置した AMATERASS サーバは 150TB の容量を持ち、アーカイブとしても利用する。そのため、組織内でのデータ・インタフェースの構築によりデータ転送等における利便性は高くなる一方で、AMATERASS サーバが攻撃されるとデータ提供およびアーカイブの保有に支障が生じる。そこで、手始めに東海大内にデータ・インタフェースのプロトタイプを構築した。実験的にサービスの提供を開始したところ、東海大のサーバへの攻撃に対応する必要が生じた。その対策として商用のクラウドサービスを利用することも選択肢として考え、H28 年度に Microsoft Azure サービスを利用し、データ・インタフェースをクラウド上に構築した。クラウドへのデータのアップロードは無料であり、データ・インタフェースとしてのデータ通信量は小さく、CPU 利用も少ないためクラウドの稼働費用は想定よりも低いことがわかった(図1参照)。更に、今後のプラットフォーム機能としてクラウドを CREST 内で共有利用する際にも、期間限定利用できる点もクラウドの利点と考える。

H29 年度から、このデータ・インタフェースクラウドからの気象データの提供を本格稼働する。データ・インタフェースクラウドとしての機能としては、(i) 準リアルタイム日射量推定値を含む AMATERASS サーバで生成される気象データの提供(ダウンロード機能)および (ii) 気象データおよび EMS で利用するデータの可視化・分析の2つを充実する(図2参照)。

このようなシステムを構築することにより、エネルギー需要科学にかぎらず、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にすることを目的とした EMS 研究に、高精度、高密度な気象データの提供を中心とした寄与ができる。

更に、これまでも要望の大きかった、日射量の予測値を提供することについても検討し、主要な太陽光パネルの規格に対する太陽光発電量の予測値の提供を行う予定である。予測値はアンサンブル手法を用いて得られる。各メンバーから得られた予測結果の平均値と標準偏差の提供を優先するが、提供データの種別および提供方法についても併せて検討する。予測値の提供は、エネルギー需要科学における需要行動の変化に影響すると考えられるとともに、発電計画にも影響するため、EMS の改善に寄与することが考えられる。

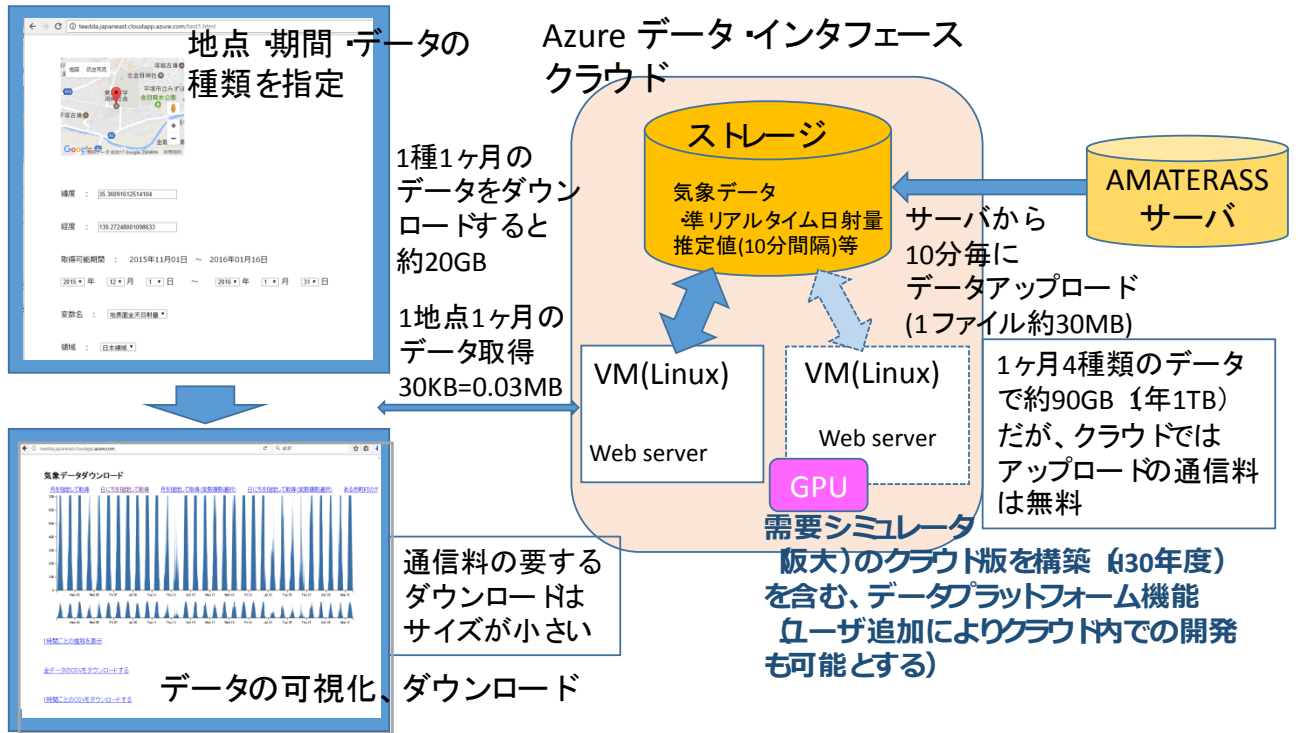


図1:クラウド版データ・インタフェース(現状+目標)

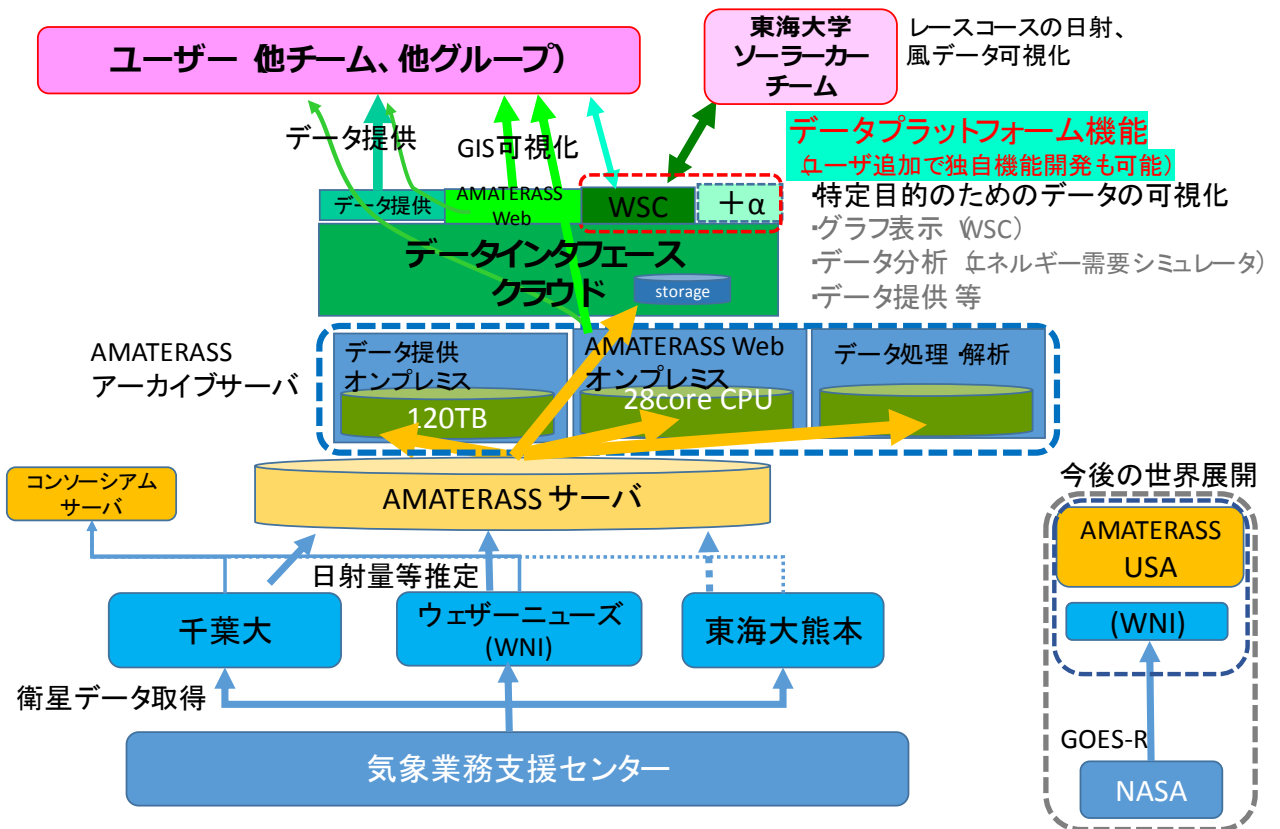


図2:TEEDDA 衛星データのデータフロー(現状+目標)

### § 3. 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、EORC センター長)
- ・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管理システムにおける需要家行動モデルの研究・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

(研究チーム外での連携や協働についてご記入ください。ライフ分野では臨床医等を含みます)

当チームでは、多くの国内外研究者らとの交流を図りながら研究を推進している。下記に主たる交流についてまとめる。

#### 【海外共同研究】

1. London Loughborough/EPSC 所属(H28)研究者(阪大G) :住宅のエネルギー需要推計の構成要素である家電製品の操作に関する実態データ分析とモデル化手法に関する共同研究を実施。
2. NASA の地上観測システム AERONET(世界展開)(千葉大G) :EMSのための日射データ誤差評価地上システムの構築について、国際展開を見据え、我が国の国際地上リモートセンシング観測ネットワーク(SKYNET)・アメリカNASA 主導の国際地上観測ネットワーク(AERONET)・およびスイスの WRC 主導の国際地上観測ネットワーク(WMO-PFR)の主力機材の長期にわたる相互比較実験を実施。
3. 欧州の地上観測システム SKYNET(イタリア他)(千葉大G) :EMSのための日射データ誤差評価地上システムの構築について、我が国の国際地上リモートセンシング観測ネットワーク(SKYNET)の国際展開(特に欧州)、共同研究、共著論文執筆を進めている。
4. アジアの地上観測システムSKYNET(韓国他)(千葉大G) :EMSのための日射データ誤差評価地上システムの構築について、我が国の国際地上リモートセンシング観測ネットワーク(SKYNET)の国際展開(特にアジア域)、共同研究、共著論文執筆を進めている。
5. WMO,GAW(Global Atmosphere Watch)(中島映至教授、千葉大G) :SKYNET を WMO(世界気象機関)の GAW(全球大気監視計画)の Contributing Net Work(協力ネットワーク)に認めてもらい、現在、全スカイラジオメーターとの MOU 締結を結ぶ作業を、国立環境研究所・千葉大と協力して行なっている。
6. NASA,エイムズ研究所(JAXA-東大G) :静止気象衛星日射推定アルゴリズム(EXAM)をエイムズのスパコン(プレアデス)に移植する相談が進んでいる
7. 中国科学院(CAS),大気物理学研究所(IAP)(JAXA-東大G) :CREST で使用している



NICAM-SPRINTARS モデルのエアロゾル同化システムの構築に向けて協力研究を行っている。プロトタイプが完成し、ひまわり8号のデータ解析に使用する。

8. 中国科学院(CAS),リモートセンシング&デジタルアース研究所(RADI)(東海大G) :2016年12月に東海大学情報技術センターと研究協力協定(MOU)を締結した。ひまわり8号を使った、日射に影響を与える大気汚染の観測、及び氷雲特性解析に関する共同研究を実施している。

#### 【国内での連携】

9. CREST 井村最強チーム(中島最強 T) :当チームが計算する準リアルタイム日射量を提供。日本気象学会において共同で専門分科会を開催。
10. CREST 林最強チーム(中島最強 T) :当チームが計算する準リアルタイム日射量およびエネルギー需要データを提供。
11. CREST 鈴木最強チーム(阪大G) :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。
12. CREST 井村最強チーム(東大生研G) :H28年度よりメンバーとして HARPCON 会議に岩船特任教授が参加。

#### 【産業界との交流】

13. 東京電力(東海大G, JAXA-東大G) :当チームの研究内容に興味を持って頂き、定期的に協議を実施中。
14. NPO 法人「太陽放射コンソーシアム」(地球科学サブG) :JST, CREST のスピンオフとして2013年に設立。AMATERASS 日射量データの利用を図りたい企業会員(正利用会員、準利用会員)から年会費を預かることで運営されている。大学や国立研究所などの研究機関の研究者は、非営利利用会員の枠組みで、教育と研究に限定された利用が可能になっている。2017年7月現在、企業会員4社、非営利利用会員16団体(大学、研究所等)となっている。ダウンロードされたデータは2千万件を越え、AMATERASS データが標準データとなりつつあることを示す。
15. 九州電力(東工大G) :九州電力との研究協力。九州電力から過去の島内発電量や需要量データを貸与してもらい、本研究結果を九州電力へフィードバックする予定である。また、島内の教育においては、対馬営業所と連携し、小中学生を対象とした見学会と教育を共同で行うことを検討している。
16. 長崎県・対馬市・対馬環境コンソーシアム(東工大G) :長崎県・対馬市・対馬環境コンソーシアムとの研究協力。3組織と研究連携を行い、実験計画を検討している。また、システム構築にあたっては対馬CATV会社と協力することで、将来的に実用化する際に社会実装できるフィージビリティを検討しながら実験を進めている。

## § 4. 研究実施内容

### (1) 衛星データ解析システム 【JAXA-東大グループ】

#### ①研究のねらい

地球は太陽放射を受けて暖まる一方で、その温度に伴う地球放射(赤外放射)によって宇宙にエネルギーを放出している。これら加熱と冷却の効果によって地球の気候は現在の状態に保たれている。様々な気象現象が太陽放射によって駆動されていることから、気候研究と再生可能エネルギーの研究は切り離すことが出来ない。再生可能エネルギーにおける太陽エネルギーの積極利用のためには、基礎データとなる太陽放射の時空間的な分布を得る現況把握技術と短時間予測技術が重要な要素となる。特に電力システムの安定運用という側面から見れば、その変動を捉える技術の開発は大きな課題の一つであり、時々刻々と変化する太陽放射エネルギーの時空間的な分布を迅速に得る技術が必要である。

#### ②研究実施方法

期間全体では(i)第三世代ひまわり観測データに基づく日射量推定アルゴリズムの開発と速報システムの構築(ii)雲とエアロゾル等大気要素の推定アルゴリズム適用高度化を実施している。H27年度は第三世代静止衛星(ひまわり8号)観測データに基づく日射量推定アルゴリズムの開発と速報システムの構築を中心に実施し、雲とエアロゾル、水蒸気の適用高度化について検討を開始した。H28年度は新しいエアロゾル算定アルゴリズムの適用を中心に実施し、雲場解析の応用として衛星観測に基づく短時間予測の適用実験を行った。H29年度はエアロゾル速報システムの試験運用開始、及び水蒸気量の推定を行うとともに、より高精度な日射量解析のための新しいアルゴリズムについて開発を開始した。

#### ③当初の研究計画(全体研究計画書)に対する現在の研究進捗状況(§2.と関連)と得られた成果

CREST/EMS 第一期では静止気象衛星「ひまわり7号」観測データを用いて地上に到達する日射量を高速に推定するアルゴリズムを開発した。本研究では「ひまわり8号」観測データに基づく日射量準リアルタイム解析システムを構築し日本領域において2.5分毎の日射量プロダクトを作成した(H27年度増額による研究加速)。「ひまわり8号」は2014年10月7日に打ち上げられ、2015年7月7日より正式運用を開始した静止衛星である。センサは可視から赤外まで16のチャンネルを持ち、ひまわり7号までのセンサに比べて観測性能は飛躍的に向上している。特に観測頻度である時間解像度は飛躍的に向上し日本領域では2.5分毎の高速観測が可能となった。これにより時々刻々と変化する日射量の速報が可能となる。処理の初段ではFFT位相限定相関法を用いた衛星観測データの位置精度補正が組み込まれている。ひまわり8号は36,000km上空から地球を観測するが、この際静止軌道上にて衛星の姿勢が変化することにより観測データの位置精度を低下させる。この姿勢変化は非常に小さいものであるが、地上を最大500m解像度で観測する衛星にとっては大きな誤差となる。位相情報の計算には新たにSRTM(Shuttle Radar Topography Mission)の3secメッシュデータを利用した。観測値の位置情報誤差は基本的に衛星の姿勢に起因することからランダムに発生する。図1に誤差統計の一例を示す。最大で東西方向に4ピクセルの誤差がみられることが分かる。このようにひまわり8号のrawデータには位置情報に誤差が含まれるが本手法の適用によりこれらの誤差は修正されている。図2に「ひまわり8号」より推定された日射量を示す。解析アルゴリズムはEXAM SYSTEMを用いている[Takenaka et al., 2011]<sup>1</sup>。それぞれMSM/GPV及びGSM/GPV大気場を用いて雲の光学特性推定し[Nakajima and Nakajima, 1995]<sup>2</sup>、雲と水蒸気の吸収・散乱特性を考慮して地上に到達する太陽エネルギーを計算している。このとき、「ひまわり7号」の日射量プロダクトとフォーマットを揃えることで連続性を得ている。特に「ひまわり8号」はこれまでと異なり高速観測の機能を持っており日本域では2.5分毎の高頻度観測が可能であることから2.5分間隔の新しいプロ

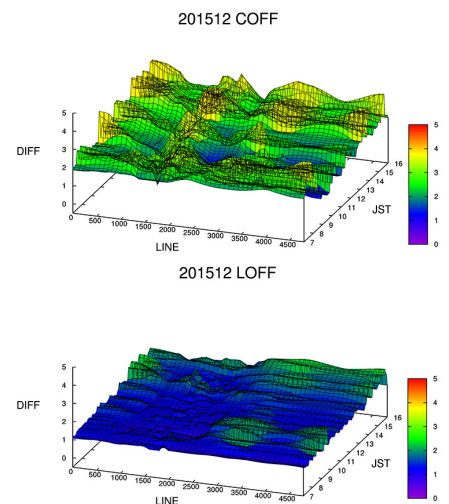
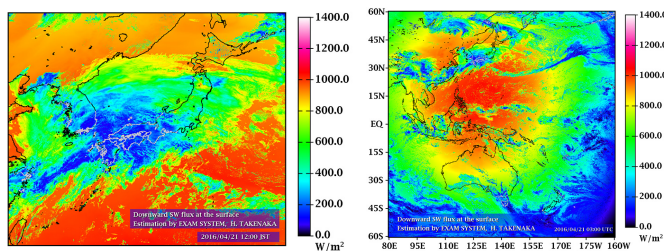


図1: ひまわり8号位置精度月最大誤差評価。X軸は子午線方向の誤差評価点を示し、Y軸は日本時間を示す。Z軸は500m解像度を基準とした位置誤差。上図は東西方向の最大誤差を示し、下図は南北方向の最大誤差を示している。

<sup>1</sup> Takenaka, H., T. Y. Nakajima, A. Higurashi, A. Higuchi, T. Takamura, R. T. Pinker, and T. Nakajima, 2011: Estimation of solar radiation using a neural network based on radiative transfer, J. Geophys. Res. 116, D08215, doi:10.1029/2009JD013337.

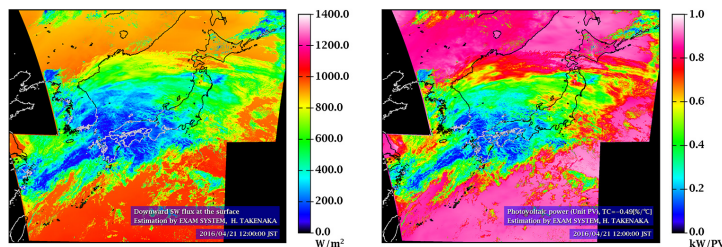
<sup>2</sup> Nakajima, T. Y., and T. Nakajima, 1995: Wide-area determination of cloud microphysical properties from NOAA AVHRR measurements for FIRE and ASTEX regions. Journal of the Atmospheric Sciences, 52, 4043-4059.

ダクトを作成した。ひまわり 8 号用にアルゴリズムの処理をブラッシュアップすることで高速に計算を行い処理時間を約 140 秒に圧縮することで 2.5 分日射量プロダクトの準リアルタイム解析を可能にしている。高解像度化の試験も実行されたがデータセットのコンパクト化の要望が強いため現段階での高解像度化は見送ることにした。また、日射量プロダクトに対応する太陽光発電出力も同時にプロダクトとしている。図3に 2.5 分時間解像度の日射量プロダクトと対応する太陽光発電出力を示す。現在はこれら準リアルタイム解析システムの日射量及び太陽光発電出力の他、分散協調型 EMS の研究に欠くことの出来ない地上気温、湿度などの物理パラメータを加えて 76 種類の物理量を準リアルタイム解析にて AMATERASS データセットとして関連する研究者に公開している。また、再生可能エネルギー普及促進における社会貢献を目指し民間企業に対する出口戦略として NPO 法人太陽放射コンソーシアムを設立し、データセットの配信を開始している。AMATERASS データセットは CREST 他チームへも提供を開始しており林チームでは既に成果を挙げている。井村チームでは HARPCON/HARPS で広範に利用できる体制が整えられている。さらに、研究成果の一般社会へのフィードバックを目的としてスマートフォン/タブレットで利用できるアプリの開発も行った。しかしながら携帯端末の通信料の増大が問題となったため情報通信研究機構、村田健史研究統括に協力を要請し AMATERASS Web (<http://amaterass.nict.go.jp/>)が完成、現在試験運用中となっている。



左: 時間解像度 10 分における空間解像度 1x1km の日本領域日射量プロダクト。  
右: 時間解像度 10 分における空間解像度 4x4km の広域日射量プロダクト。

図2: ひまわり 8 号観測データに基づく日射量準リアルタイム解析の一例



左: 2.5 分観測データによる日射量プロダクト。右: 日射量に基づく太陽光発電出力。  
全処理を 140 秒に高速化したことにより 2.5 分プロダクトの準リアルタイム解析が可能になった。

図3: ひまわり 8 号 2.5 分観測データによる日射量準リアルタイム解析の一例

ひまわり 8 号をはじめとする第三代静止衛星は従来より多くの波長を観測するセンサが搭載されている。従ってこれらの観測情報から今までよりも多くの物理量を求めることが出来る。本研究では日射量高精度推定のための大気物理量推定アルゴリズムの開発を実行している。地上に到達する太陽放射、即ち日射量の最大不確定要素は雲であるが、吸収ガスである水蒸気は雲の次に日射量の大きな不確定要素である。水蒸気量、すなわち可降水量の算定については衛星に搭載された赤外データやマイクロ波データを利用した多くの推定法が提案されている。本研究では衛星観測データに基づく日射量の推定において重要な要素となる水蒸気量(可降水量)を衛星観測データから推定する手法について検討した。図4に吸収ガスによる大気の透過率の関係と水蒸気量推定結果の一例を示す。ひまわり 8 号のチャンネルを活用することにより各チャンネルの輝度温度差を多数利用した解析が有効であることが分かったため、本手法ではひまわり 7 号で検討した可降水量推定を拡張した適用を試みた。その結果、現在では誤差 4mm 程度の精度で推定が可能であることが分かった。また、大気中の微粒子であるエアロゾルも日射を吸収散乱することから太陽エネルギーを議論する上で欠くことの出来ない大気要素である。衛星観測データからエアロゾルの光学的な特性の時空間的な分布を見積もることは太陽エネルギー利用において重要な意味を持つ。既に海域エアロゾル推定アルゴリズムの準リアルタイム試験運用と陸域エアロゾル推定アルゴリズムの試験適用を行っており、現在は海陸を統合したエアロゾルプロダクトの準リアルタイム解析の準備を進めている。図5に海域エアロゾル準リアルタイム解析結果の一例と、新しいエアロゾル解析アルゴリズムの結果を示す。海域エアロゾル推定アルゴリズムは REAP[Higurashi and Nakajima, 1999]<sup>3</sup>を用いている。陸海を統合する新しい解析アルゴリズムは MWMP(Multi-Wavelength Multi-Pixel)法[Hashimoto and Nakajima, 2017]<sup>原著論文 48)</sup>にニューラルネットの放射

<sup>3</sup> Higurashi, A., and T. Nakajima (1999), Development of a two channel aerosol retrieval algorithm on global scale using NOAA/AVHRR, J. Atmos. Sci., 56, 924-941.



計算ソルバを適用した  $\nu$ -MWMP を用いた。MWMP 法はエアロゾルの種類や大気中の煤など様々なパラメータを同時に推定する事が出来るため日射量の算定のためのエアロゾル推定に有効なアルゴリズムである。

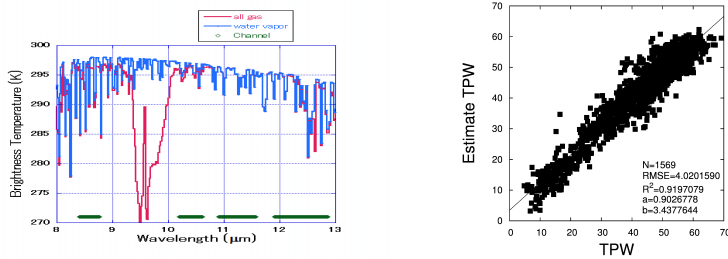


図4: 吸収ガスによる大気の透過率の関係と水蒸気量推定結果の一例

左: 水蒸気及びその他の吸収ガスと大気の透過率の関係。下部緑の帯はひまわり 8 号センサの観測帯を示す。これにより各チャンネルの輝度温度差から吸収ガスの情報を引き出せることが分かる。右: 可降水量推定結果の一例。

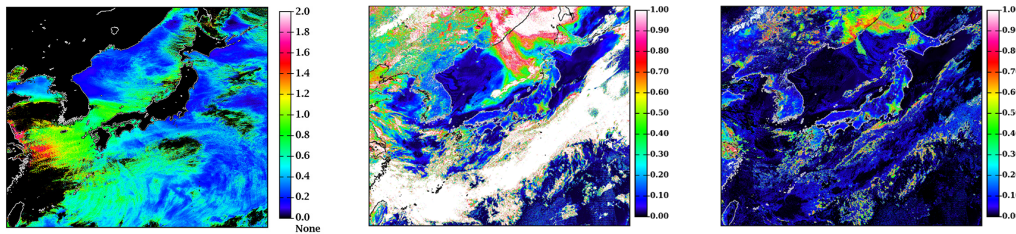


図5: ひまわり 8 号による海陸エアロゾルの解析例。左: 海域エアロゾルの解析例。中央: 海陸を統合したエアロゾル解析例 (500nm におけるトータルの光学的厚さ)。右: 中央に対応するダスト粒子の光学的厚さ

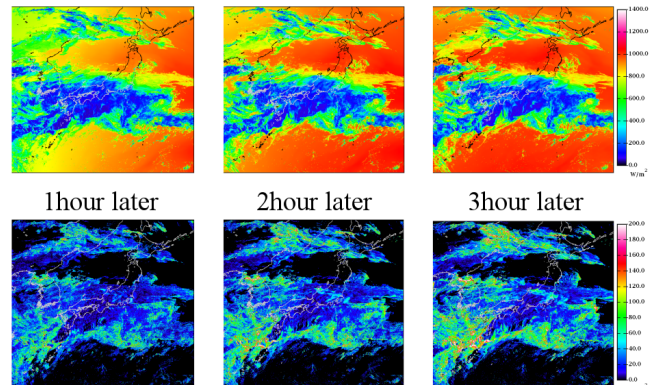
④当初計画では想定されていなかった新たな展開があった場合、その内容と展開状況と得られた成果

電力網の安定化と太陽光発電の積極的導入には短時間予測技術の開発が必要である。本研究では衛星による大気移動ベクトル解析に基づく新しいアンサンブル短時間予測手法について開発を行った (H28 年度増額による研究発展)。本手法は衛星観測データから大気の流れ場の情報を抽出し現況把握技術によって解析された雲などの大気要素が時間の経過に従ってどのように流れていくのかを観測事実の観点から得る。このときベクトルの誤差を利用してアンサンブル化を行っている。図6にアンサンブル予測の結果の一例を示す。これにより時空間的な予測不確実性の情報を得ることも可能である。また、これら短時間予測情報から、さらに地球物理量算定モデルとの連携によって高精度予測の可能性も考えられる。

本研究では衛星観測に基づくエアロゾルや雲などの大気物理量の推定を元に日射量の現況把握技術及び短時間予測技術の開発を行ってきた。即ち大気中粒子の光学特性を正確に見積もることが重要な要素となっているが、既存の参照テーブル法でこれを得ることは情報量の爆発により限界であることが分かった。これに対処するため新しい放射計算ソルバの開発に着手した。初期成果として MWMP 法に新しい学習アルゴリズムによるニューラルネットのソルバを適用することで  $\nu$ -MWMP 法を開発し、ひまわり 8 号からエアロゾルの詳細な光学パラメータを得ることに成功している。今後はエアロゾル、雲、日射計算のソルバ全てを置き換えて高度化していく予定である。

本研究の成果物である日射量プロダクトの利用に関して東京電力と電力安定運用に関する意見交換を実施している。さらに、日射量解析に関して NASA Ames Research Center と共同研究が発生しており、今後米国の GOES-R に本研究で開発されたアルゴリズムを適用し NASA にてプロダクト作成を行いたいとの要請を受け NASA Ames Research Center への短期滞在を予定している (H29 年度国際強化支援)。

Downward SW flux at the surface 51 mean value



Standard deviation of Downward SW flux at the surface

図6: ひまわり 8 号大気移動ベクトル解析に基づく日射短時間予測の一例。上段が 51 のアンサンブル平均を示し、下段が標準偏差を示す。これにより予測の不確実性を得ることが出来る。



## (2) モデルによる地球物理量算定システム 【JAXA-東大グループ】

## ①研究のねらい

本研究では、広域の太陽光発電量を数値モデルによって算定し、さらに予測する技術を確立する。通常の気象予報技術と異なる本研究の世界的にもユニークな点は、次世代型の非静力学大気モデルである NICAM モデル (Sato et al. 2014)<sup>4</sup> を利用すること、人工衛星によって得られる新しい地球物理量の観測量 (雲、エアロゾル等) をデータ同化する点にある。NICAM は全球一様格子、ある領域の格子間隔を小さくするストレッチ格子、またある領域だけを計算する領域格子を装備しているために、全球から領域までを効率よくカバーできるメリットがあり、様々な空間スケールの日射量算定システムを構築することができるため、将来の拡張性がある。また、本研究では、日射量算定に特化するために、通常の気象予報では利用されていない太陽放射域の雲光学的厚さやエアロゾル量の取り込みが可能であり、直達と散乱の両方の太陽光発電量に関する高い精度の算定が可能になる。

## ②研究実施方法

期間全体で (i) 日射量短時間予測技術構築のための新しい雲場同化手法の検討、(ii) 多様な大気場へ適用性実験と検証、(iii) シナリオデータに基づく短時間予測実験を行う予定である。H27 年度は、本 CREST 第一期において検討された新しい雲場同化手法を用いて問題点の抽出を中心とし、多様な大気場への適用手法の検討を行った。H28 年度からは四季による雲場の傾向変化に対する適用性の検討を中心に実施している。H30 年度以降は、確立した雲場同化手法をひまわり8号データに適用して得られる最適な雲場を初期値とした本格的な日射量予測を実施する。また、エアロゾルの取り込みについても検討する。以下に第二期で行った研究をまとめる。

まず、ストレッチ格子の NICAM と領域格子格子の NICAM (D-NICAM) を実用に耐えるように改良・整備して、計算システムを確立した (Uchida et al., 2016, 2017)<sup>原著論文 24, 未発行論文 8)</sup>。領域だけを計算する領域モデルでは、全球モデルと同じく力学や物理過程などに依存するモデルバイアスが存在する。この領域格子 D-NICAM は、全球 NICAM モデルの格子点の位置や力学、物理過程などのプラットフォームを共有するため、NICAM の結果をそのまま境界データとして用いることができるので、モデルバイアスを軽減し、境界から発生するエラーの程度をより直接的に解析をすることが可能となる。本研究では、まず地表面日射量と関係が深い地表面降水量を比べることで、全球モデルと領域格子 D-NICAM で種類の違うそれぞれの雲の再現性がどう変わるのかを検証し、境界エラーの影響を分析した。

H27 年度に行った以上の準備を踏まえて、H28 年度では、衛星データを用いて地表面日射量の再現実験を行なった。D-NICAM の計算領域は、日本を中心とした約 7km の解像度を設定した。衛星データは、2012 年 5 月、10 月、12 月の 3 ヶ月分のひまわり7号データを使用した。この衛星データから得られる光学的厚さの水平分布と雲頂温度を利用して、三次元の雲水量  $q_c(x, y, z)$  を構築した。この手法で得られた  $Q_c(x, y, z)$  と気象庁 MSM メソ客観解析データ (水平風、温度、気圧、水蒸気場) に対して、D-NICAM の計算値が近づくようにナッジしながら、地表面日射量を求めた。

## ③当初の研究計画 (全体研究計画書) に対する現在の研究進捗状況 (§ 2. と関連) と得られた成果

領域モデルの境界エラーの解析の結果、モデルバイアスを極力低減させても、境界エラーの小さな摂動が雲の再現性に強い影響を与えることが分かった。特に、領域自体の大きさにも依存するが、大規模循環の温帯低気圧のようなスケールが大きい雲では影響はさほど見られないが、対流性の雲や熱帯性低気圧のようなカオス的な性質を持った雲に対しては、その影響は大きく、再現性は一概に低くなる事象が見られた (Uchida et al. 2017, in revision)<sup>未発行論文 8)</sup>。

図1に、様々なナッジデータを想定した地表面日射量の再現性を示す。すなわち、MSM の領域境界データだけを使用し、領域内ナッジなしの場合 (黒線)、境界データに加えて MSM 気象場を領域内でナッジした場合 (赤線)、衛星雲水量 ( $q_c$ ) だけを領域内でナッジした場合 (緑線)、気象場と  $q_c$  の両方を領域内でナッジした場合 (青線) について、2012 年 5 月、10 月、12 月の 1 日から 30 日までの日本時間正午時点でのモデル表面日射量と衛星データから直接算出した日射量との空間相関値を計算した。

図によると、一概に、気象場と衛星雲水量の両方を領域内でナッジした (青線) の相関値がもっとも高い日が多く、次に気象場のナッジのみ (赤線)、衛星雲水量のナッジのみ (緑線)、最後に領域内ナッジなし (黒線) と相関が悪くなってゆくことが分かる。特にその傾向が顕著に見られるのは、5 月 1 日正午の場合 (図1 (a))

<sup>4</sup> Sato, M., and Coauthors, 2014: The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: Description and Development. Progress in Earth and Planetary Science, 1, 18, doi:10.1186/s40645-014-0018-1.

で、気象場の領域内ナッジが有る青線と赤線は 0.8 近くまで相関があり、気象場の領域内ナッジが無い緑線と黒線は 0.5 以下の相関になる。5 月 11 日正午時点には大規模な前線の雲が広範囲に存在し、このようなケースでは雲水データのナッジより気象場のナッジの方が効果的であることが分かる。逆に 5 月 7 日正午(図 1(a))では、衛星雲水データのナッジのみ(緑線)の方が気象場のナッジのみ(赤線)よりも効果的である。このような場合には、対流性の雲がより多い傾向があった。また 季節的(冬期)に対流性の雲が少ない 12 月 1 日から 30 日までの場合(図 1(c))では青線(気象場と雲水の両方のナッジ)と赤線(気象場ナッジのみ)が黒線(ナッジなし)よりも良い相関値が見られることから、気象場ナッジは大規模な雲の再現に効果的であり、また緑線(雲水ナッジのみ)が黒線よりも良い相関が見られることから、雲水ナッジが大規模な雲の再現にもある一定の効果があると思われる。

図2に、ナッジ有り無しの場合の正午時点での日射量の相関係数の差のヒストグラムを示す。全てのケースでヒストグラムの平均が正を示していることは、ナッジで雲場の再現性が改善されたことを示していて、特に気象場と雲水量の両方をナッジした時に、それが顕著に表れている。図3の将来予測実験では、午前 11 時の時点で領域内ナッジを止めた後、境界データだけで実験を続けて領域内ナッジの効果がどの程度持続されるのかを検証した。調査した事例では、ナッジを止めた後、5 時間程度での相関値は若干落ちるものの、それなりに高い水準を保っていて最初から領域内ナッジを行っていないケースに比べ相関が良い状態が続くことが分かる。特に前線の雲が多くを占めている 5 月 11 日(図 3b)と 10 月 7 日(図 3c)の場合には領域内ナッジを止めた後の 5 時間ほどはあまり相関値が変わらなかった。それに比べて、対流性の雲が多く見られる 5 月 7 日(図 3a)と 10 月 16 日(図 3d)の場合では、領域内で雲水ナッジが有る場合(青線と緑線)でナッジを止めた後の相関値が顕著に低くなっている。これは雲水ナッジを止めた場合の対流性の雲の維持が困難であることが一因と考えられる。また、ナッジを止めてから一日以上はその効果が保たれていることも多く、次の日にもナッジ無しの場合よりも相関値が良い場合が多かった。

以上の実験により、ナッジに使用する気象場をアンサンブル法によって最適化することや、大規模な雲か、対流性の雲が領域を覆っているかでナッジの重みを変えることで、より良い地表面日射量の再現が望めることが確認された。

#### ④当初計画では想定されていなかった新たな展開があった場合、その内容と展開状況と得られた成果

最近、別プロジェクトによって NICAM-LETKF 法を用いた気象場アンサンブルが作成されるようになったので、H30 年度以降、気象場アンサンブル法を今年度開発した雲水の同化システムに組み合わせて、さらなる地表面日射量の予測精度向上を図る。

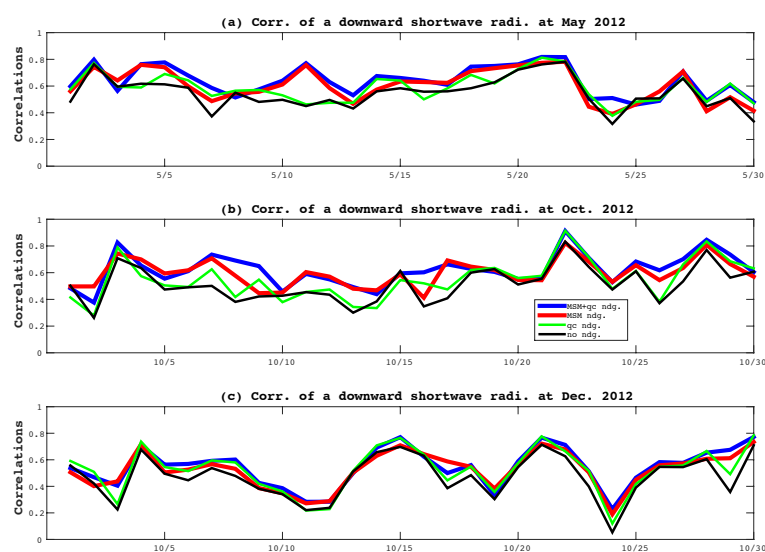


図1: 領域モデル実験の地表面日射量と衛星データから算出された地表面日射量との空間相関の時系列。2012年5月1日から30日までの期間(a)、2012年10月1日から30日までの期間(b)、2012年12月1日から30日までの期間(c)での日本時間正午(JST)における相関値を示す。境界データのみで領域内ナッジ無し(黒線)、衛星データからの雲水量の領域内ナッジ(緑線)、MSM 気象場(水平風、温度、気圧、水蒸気場)の領域内ナッジ(赤線)、MSM 気象場と雲水量の両方の領域内ナッジ(青線)の場合を示した。

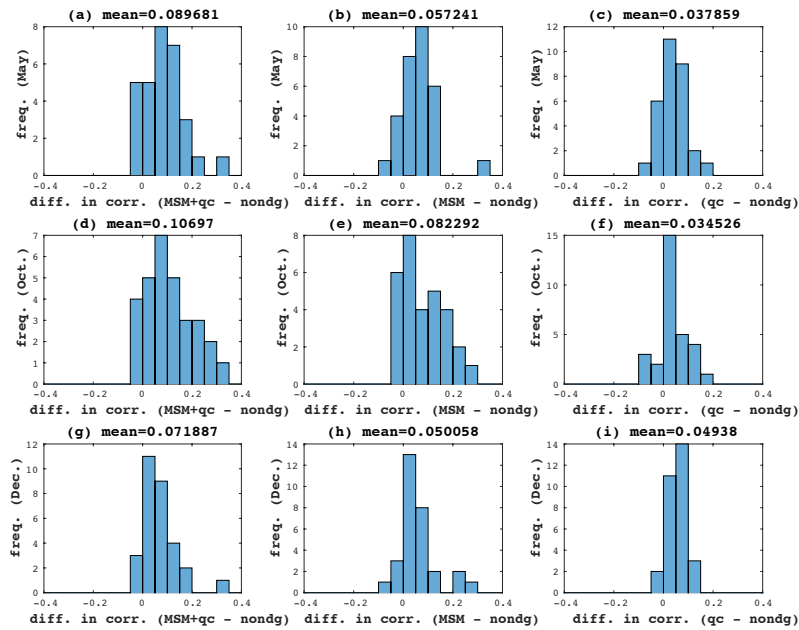


図2: 地表面日射量のモデル値と衛星推定値の間の相関値について、領域内ナッジの有る場合と無い場合の差のヒストグラム。5月(a-c)、10月(d-f)、12月(g-i)の30日分のデータを用い、日本時間正午時点での値を示す。気象場と雲水量場の両方を領域内ナッジした場合(左図)、気象場だけを領域内でナッジした場合(中央図)、雲水量だけを領域内ナッジした場合(右図)。それぞれのヒストグラムの平均値を各図の上に表示す。

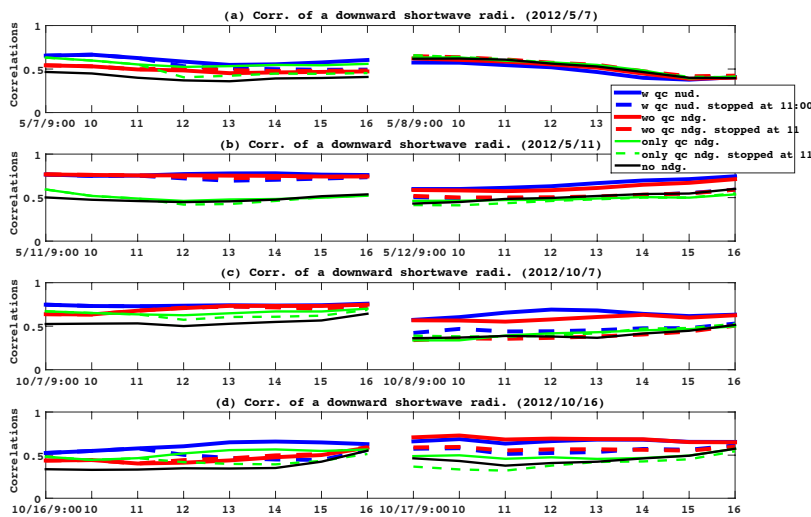


図3: 図1と同様に、領域モデル実験の地表面日射量と衛星データから算出された地表面日射量との空間相関を計算した。図1と異なり、衛星データが存在する昼間(9時から16時まで)は1時間毎にモデル結果との相関値を算出した。また実線は図1と同じ色で示されているが、領域内ナッジを午前11時に止めて、その後、境界データだけで実験したものを点線で示している。(a)は5月7日の午前11時に、(b)は5月11日の午前11時に、(c)は10月7日の午前11時に、また(d)は10月16日の午前11時に領域内ナッジを止めた実験を点線で示し、止めなかった実験はそのまま実線で翌日の16時まで表示している。

## (3) 品質保証とデータ異常検出 【千葉大グループ】

## ①研究のねらい

新しい気象衛星の打ち上げにより、従来に比べて時間的に連続、かつ、空間的に高密度な衛星日射量データが取得されはじめたが、そのデータ質(系統誤差、偶然誤差等)の検証は全くなされていないといえる状況である。本研究では、その初期および定期的なデータ質検証に加え、想定外の異常検出も可能とする衛星データ質評価のための地上システムを構築する。地上システムの構築は国際展開等も視野に入れ実施する。上記の衛星データ質評価は、データ利用者が科学的に裏付けられたデータを定期的に安心して利用することにつながるため、社会実装された形で持続的なEMSシステムの一部を担うと期待される。これまでの研究(第一期 CREST および FS 研究を含む)から、大気中の雲やエアロゾル等の時空間的に不均一な変動が衛星データ質に及ぼす影響が極めて重要であることが浮き彫りとなった。このことを踏まえ、雲やエアロゾル等による大気科学現象が衛星データ質に与える想定内誤差を定量化するとともに、それにより可能となる高度な想定外データ異常検出結果の速報システムを確立させる。また、地球科学に関する地上観測データのデータベースを構築する。本研究は、誤差の定量化・要因解明による衛星データやモデルデータの高精度化を通じて、本CREST/EMSプロジェクトに貢献する。

## ②研究実施方法

本研究グループは、(a) EMSのための地上システム・データベースの最適化、(b) 衛星およびモデルの日射データの誤差評価・誤差要因解明・高精度化、(c) 高度な異常検出システムの構築、を主な項目として研究を進めている。(a)においては、本研究に最適な重点地上検証観測サイトを、国内は本CREST/EMSプロジェクトの他チーム/グループとの連携を強化する観点において、国際的には効果的な国際展開も考慮し、選定した。それを基に、地上観測装置群の再配置等を行った。これら地上システムの最適化を継続するとともに、試験連続観測を行った。また、オンラインデータ処理・提供システムを構築した。(b)においては、2014年10月に打ち上げられた「ひまわり8号」の観測に基づく日射量データを評価するために、地上システムのグラウンドトゥルースデータとの比較に着手、「ひまわり8号」と地上システムによる通年データを活用した比較解析等に基づいた「ひまわり8号」データの誤差評価を実施した。(c)においては、衛星観測データと地上観測データの比較結果をもとに、想定外の異常を検出する予備的な基準を導出し、通年データを活用した比較解析等により異常検出基準の高精度化を図った。

他最強チームである林最強チームとは、林チーム全体会合への参加だけでなく個別の共同研究に関する会合の機会をもった。それらの機会を通じて、進行中の共同研究の議論や論文化を行った。さらには、数年先を見据えた共同研究計画の議論も行い、異分野交流を深めた。

## ③当初の研究計画(全体研究計画書)に対する現在の研究進捗状況(§2. と関連)と得られた成果

本研究は、太陽光発電量を左右する全日射量の時間的・空間的に高密度な把握に有効と考えられている気象衛星データについて、雲やエアロゾル等による大気現象の影響に伴う想定内誤差を定量化するとともに、それにより可能となる想定外データ異常検出システムの構築を目指す。当初の研究計画に沿った形で研究は実施されている。得られた主な成果を以下に記載する。

本研究グループの強みである日射・エアロゾルの SKYNET 地上観測網を国際的な枠組みにより明確に位置付けるために、当初より世界気象機関(WMO)の Global Atmosphere Watch (GAW)から、米国 NASA 主導のエアロゾルネットワーク(AERONET)と WMO-GAW 管轄の放射ネットワーク(GAW-PFR) との同時観測の要請があった。既に国際展開されている SKYNET サイトで顕著な成果を上げつつ、これら欧米主導のネットワークと連携することで、地球科学を軸とした今後のスムーズな EMS 研究の国際展開が期待される中、

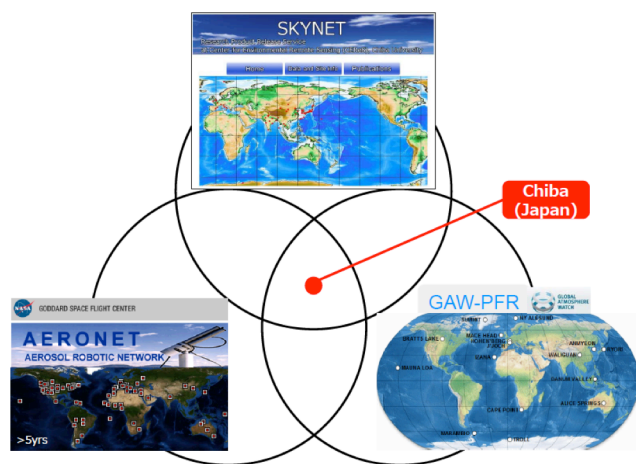


図1 国際展開を視野に入れた 3 つの国際地上リモートセンシング観測ネットワーク SKYNET/AERONET/GAW-PFR の連携のイメージ。千葉サイトで同時連続観測を開始し、国際連携の拠点化を図った。



AERONET と共同観測の実績がある SKYNET 千葉サイトを重点地上観測サイトとして選定し、今後の基盤とすることとともに、地上観測装置群の再配置等を行った。ここでは、本CREST/EMSプロジェクトの他チーム/グループとの連携強化の可能性も考慮し、検討された。H27 年 10 月に千葉サイトの観測機材設置スペースを拡張する大幅な改修を行った。それに伴い、AERONET の主力機材 CIMEL サンフォトメーターと GAW-PFR の主力機材 PFR ラジオメーターを新設し、SKYNET/AERONET/GAW-PFR の同時観測を開始した。これにより、千葉サイトを国際連携のための拠点と位置付けた(図 1)。3つのネットワーク観測の予備的相互比較を実施したところ、エアロゾル光学的厚さが 0.01 以内で極めて良く一致することが分かった。

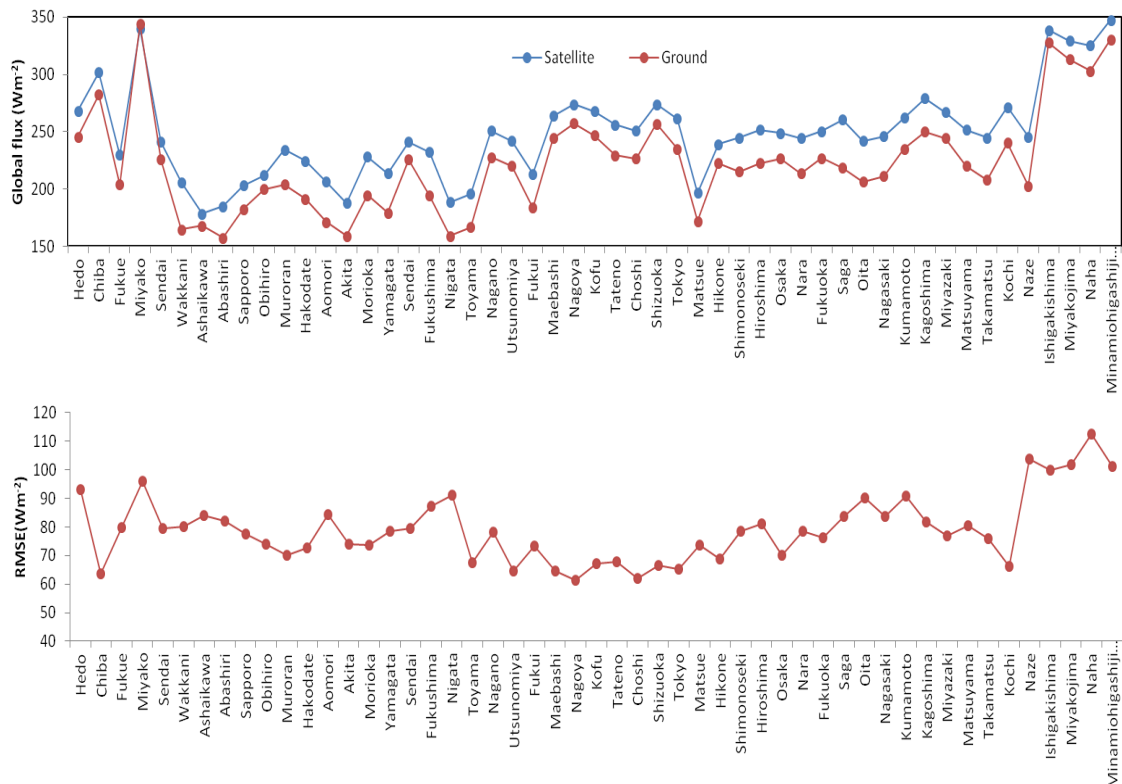


図2 SKYNET および気象庁の各サイトにおける「ひまわり8号」衛星推定日射量と地上観測値の(上)月平均値と(下)二乗平均平方根誤差(RMSD)。2015 年 11 月の予備的結果が示されている。

家庭や地域を越えたエネルギー管理への重要なインプットとして広範囲の太陽光発電量の把握がある。宇宙から静止気象衛星を利用した地表面日射量の推定は、現在、唯一の方法である。しかしながら、第一期 CREST および FS 研究等において、大気中に存在するエアロゾルが日射を弱める効果が推定値の精度に影響を及ぼすことが、両成分を同時に多地点で計測可能な地上システムである国際地上観測ネットワーク SKYNET により明確となった。このような重要性を持つエアロゾルについて、SKYNET と AERONET の主力機器による同時観測を多地点で行ったところ、エアロゾル光学的厚さは良く一致したが、エアロゾルによる散乱のしやすさを表す単一散乱アルベドには有意な差が認められた。さらには、エアロゾル測定値の有意な差は両機器の検定方法の違いが原因であることが明らかになった。これにより、国際連携を強化しつつ、エアロゾル測定値を高精度化させるためには検定方法が鍵であることが明確になった。

SKYNET や気象庁のサイトについて、ひまわり8号の全天日射量と地上観測値の二乗平均平方根誤差(RMSD)は、概して 80 W/m<sup>2</sup> 程度であることが見積もられた(図2)。この差の要因として、衛星観測に基づいて日射量を推定するアルゴリズムに雲やエアロゾルの影響が十分に考慮されていないことが挙げられた。この問題を難しくしているのは、各成分の時間変動が激しく空間分布の不均一性が高いことである。加えて、雲とエアロゾルの両方が衛星視野に含まれることはよくあり、さらには離散雲の場合は衛星と地上観測の空間代表性の違いが比較結果を左右する。この問題を解決するために、地上から日射量とエアロゾルを同時に観測している SKYNET サイトを活用し、晴天時のみのケースに着目して、まずはエアロゾルの影響を定量化することが重要であるという結論に至った。このことを踏まえ、全天日射量の変動因子として極めて重要なエアロゾルの影響を高精度で理解するために、SKYNET のオンライン自動処理システムを構築し、定常運用を開始した。そのシステムを活用して晴天日に着目してひまわり8号の全天日射量データを検証したところ、

ひまわり8号のデータに考慮されていないエアロゾルの効果によって、ひまわり8号の値が過大となっていることが明確となった。相関解析等から、エアロゾル光学的厚さ(AOD)が 0.2 増加するとひまわり8号の値が約  $30 \text{ W/m}^2$ 、過大になる傾向があることが分かった(図3)。また、AOD が非常に小さいとき、ひまわり8号の値は  $20 \text{ W/m}^2$  程度、過小となっていることも分かった(図3)。この原因については引き続き、調査が必要である。これらの系統誤差の補正を施すと、ほとんどのデータは地上観測値と  $20 \text{ W/m}^2$  以内で一致することが分かった(図3)。ここで得られた  $20 \text{ W/m}^2$  の閾値は、上記の  $80 \text{ W/m}^2$  の RMSD よりも格段に小さくなっていることから、誤差評価が格段に高精度化されたことが明らかに分かる。これらの結果に基づき、系統誤差を補正したひまわり8号のデータと地上の全天日射計のデータの差が  $20 \text{ W/m}^2$  上回った場合を想定外異常の予備的基準とした。本研究の衛星データ質評価は、データ利用者が科学的に裏付けられたデータを定常的に安心して利用することにつながるため、社会実装された形で持続的なEMSシステムの一部を担うと期待される。

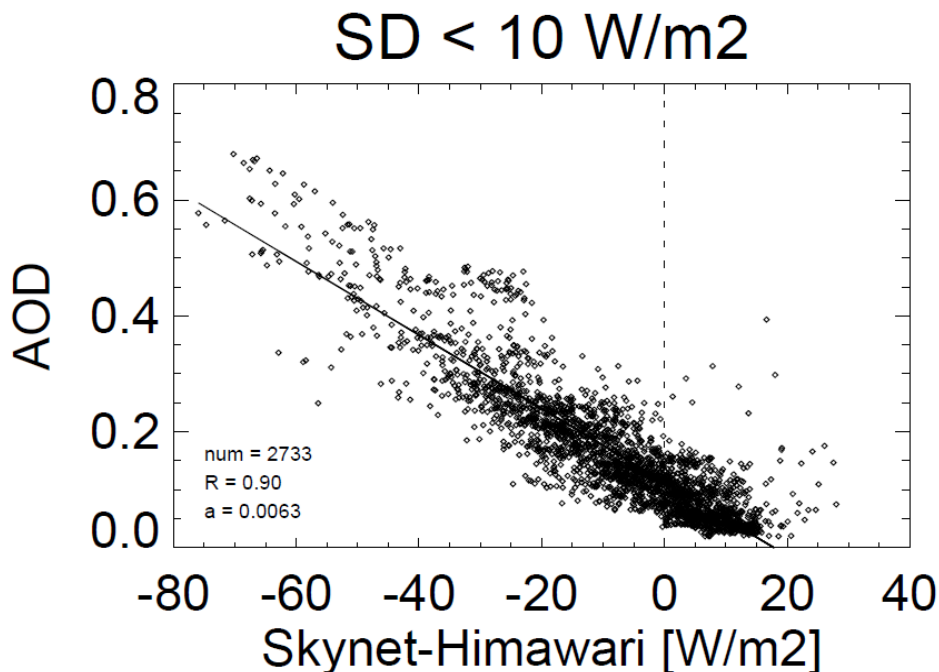


図3 千葉サイトの 2016 年 1 月 1 日から 12 月 31 日までの 1 年間における、ひまわり 8 号の全天日射量推定値と全天日射計の地上観測値の差とスカイラジオメーターの AOD データの相関関数。千葉サイトを中心とした  $40 \text{ km} \times 40 \text{ km}$  の領域におけるひまわり 8 号データの標準偏差が  $10 \text{ W/m}^2$  以下と小さく、晴天とみなせるデータのみが示されている。

#### ④当初計画では想定されていなかった新たな展開があった場合、その内容と展開状況と得られた成果

当初計画では想定していなかったが、本研究の進展に伴い、家庭を含め社会に広く異常検出システムが実装できるシステム構築を行う新展開の着想に至った。その実現のために、自動かつ低消費電力の異常検出システム開発のための予備研究を実施した。安価なシングルボード PC である Raspberry Pi<sup>ラズベリーパイ</sup>に着目し、その利用を検討した。大気観測において時刻の記録は不可欠であるが、Raspberry Pi には内部時計が搭載されておらず、また、停電時なので電力供給が断たれた際に自動再起動が行えない。そのため、本研究では独自で電源制御基板を開発し、インターネットにも接続されていない環境においても、時刻を保持できるようにした。太陽光スペクトル測定用の汎用の分光器や全天日射計を接続し、毎日定時にシステムの自動シャットダウン・起動や、スペクトル・全天日射量の自動計測が行えることが確認された。システムに入力される電流・電圧・電力も計測する機能も付加した。これらの機能を付加した Raspberry Pi は、太陽光発電やバッテリーと連結することによって、自立した異常検出システム構築の基盤として活用できる見通しを得ることができた。異常検出基準の高精度化を継続するとともに、異常検出システムの開発改良を進める。

## (4) 気象データの変動解析 【東海大グループ】

## ①研究のねらい

太陽光発電システムは、pn 接合ダイオードなどから製造される PV セルとパワーエレクトロニクス機器によって構成される PCS(パワーコンディショナー)を通して日射を電気エネルギーに変換するシステムであり、その電氣的な出力は気象条件に大きく依存している。このことから、日射量の変化のような気象の変動により、太陽光発電システムから出力される発電量は大きく変動する。気象データの変動によって太陽光発電システムの出力が大きく変動すると、電力系統内部で余剰・不足電力や擾乱が発生する。そして発生した余剰・不足電力や擾乱に対処するために、予備力による発電量の調整や ESS(エネルギー貯蔵システム)への蓄電、電圧調整などの対策をおこなうことが必要となる。このことから、再生可能エネルギーが大量導入された電力系統において、気象変動に由来する太陽光発電システムの出力不安定性は、電力価格の上昇などのコスト高の一因となる。

気象データの短期変動が電力系統に及ぼす影響が大きいことから、太陽光発電システムの設計・運用や電力系統への接続に際して、年間平均日射量などの長期的な統計値だけでなく、ランブ現象など、短期的な変動について考慮した気象データの解析・応用が重要になる。例えば、気象データの時間的・空間的な変動の特徴を捉えることで、日射変動パターンを加味して各地点をマップ上で分類できるなど、電力系の設計や運用計画の立案・調整などに資する有用な情報を新たに提供することが可能となる。

そのため、当該研究項目では、日射などの気象データの変動を対象として解析を行い、変動を特徴づける新たな指標による時空間的な気象データの変動特性の把握技術を開発するとともに、気象データの変動特性の把握による EMS 領域への貢献を目指す。また、当該研究分野により、気象変動の特徴を定量的に把握することがはじめて可能となることから、気象変動特性を表す新たな指標を用いた効果的な EMS の構築に関し、パワーエレクトロニクスや電力系統技術の分野との融合展開が期待される。

## ②研究実施方法

当該研究項目に関して、これまで、下記のように研究を実施した。

2013 年 7 月から 2014 年 3 月に CREST/EMS 慶應義塾大学グループと実施した FS(フイージビリティースタディー)第 1 フェーズにおいて、日射変動に関して制御領域の研究者と共同研究を行い、Sample Entropy サンプル エントロピーを用いた日射変動の定量化の検討を行った。この FS 第 1 フェーズより、EMS 領域に関して気象分野と主に電力分野を中心とした異分野の研究者との融合研究を推進するため、自動制御連合講演会や電気学会などへ積極的に参加するとともに、地球科学データに関する情報発信を行った。

2014 年 5 月から 2014 年 10 月に実施された FS 第 2 フェーズでは、Sample Entropy による日射変動の定量化について研究を進め、制御領域研究者とともに台風到来時の Sample Entropy の増減やこの指標によるランブ現象の予兆検出可能性に関して共同で研究を行った。

2014 年 10 月から 2015 年 1 月での FS 第 3 フェーズでは、これまで得られた日射変動の定量化に関する基礎研究の EMS 領域への応用可能性に関して、EMS 研究領域内における気象学以外の研究分野である制御工学の研究者との共同研究の初期検討を開始し、第二期 CREST の期間を含めた共同研究につながった。この共同研究により、日射変動のパターンによって PCS に搭載される制御機器の性能が変動する可能性があるという知見が得られたことで、気象データの変動解析に基づいた新たな EMS の構築可能性に関する知見が得られた。

2015 年 4 月から開始された第二期 CREST において、H27 年度は Sample Entropy による日射変動の定量化について平均値、標準偏差、Sample Entropy の 3 つの変動特徴量を用いて詳細な日射変動を定量的に表す手法の提案を行った。更に雲特徴量との比較を行い、地球科学データとの対応関係について考察した。また、これまでに開発した日射変動の定量化手法を用いて、日本国内における気象庁の 47 地点の地上観測所を対象に、日射変動を考慮した地域区分を行い、日射変動に地域的な特徴が存在することを明らかにした。H28 年度では、H27 年度の研究によって得られた雲特徴量と地上観測日射量の変動の関係を用いて、衛星から観測される雲の特性量から地上日射量の変動特性を推定する手法を提案するとともに、地球観測衛星 Terra テラ と Aqua アクア からの MODIS モディス データに本手法を適用することで、衛星観測データによって地表面における日射の変動特性量の空間的な分布を推定することを可能にした。さらに、日射の変動性の高さや総観規模気象場との関係について解析を行い、その特徴を明らかにした。

H29 年度から H31 年度において、気象変動特徴量の EMS への応用と新たな指標から得られる系統管理者を対象とした有用情報の提供を視野に含め、気象データの変動が電力系統やパワーエレクトロニクス機器に及ぼす影響について詳細に研究を進めるとともに、空間的な広がりを持つ気象データの変動特徴量把

握技術が可能とする効果的な EMS 構築手法の開発を行い、地球科学と EMS 領域との融合展開を図る。

### ③当初の研究計画(全体研究計画書)に対する現在の研究進捗状況(§ 2. と関連)と得られた成果

当初の研究計画において、気象データの変動特性の把握と活用に関して研究を実施することを計画した。現在の研究進捗状況は、当該研究項目の基盤ともなる気象データの変動特性の把握に関して一定の成果が得られたという状況であり、気象データの変動特性に関して得られた地球科学的知見を気象分野からパワーエレクトロニクスや電力系統などの EMS 領域へと融合展開することによって、今後、EMS 領域への貢献を図っていく予定である。

気象データの変動特性の把握に関し、第一期 CREST と第二期 CREST で得られた成果を述べる。第一期 CREST において実施された FS 第 1 フェーズから第 3 フェーズにおいて、主に制御工学分野の研究者とともに日射の変動性の評価に関する共同研究を行ってきた。当初は気象データのならし効果の検証に日射変動を用いる予定だったが、Sample Entropy と呼ばれる(主に医療工学で用いられる)指標を用いることで信号の複雑さを定量化できることに着目し、気象データの変動解析という当該項目の研究がスタートした。FS 第一フェーズから第二フェーズの中で、台風到来時の Sample Entropy の増減や、この指標によるランプ現象の予兆検出可能性に関して制御領域研究者とともに検討を行い、Sample Entropy が気象的な特徴を表すことができる可能性について検証を行った。FS 第 3 フェーズから、気象データの変動解析に関し EMS 領域での融合展開を視野に入れた共同研究可能性に関する初期的検討を開始し、日射変動がパワーエレクトロニクス機器に与える影響の評価を制御工学分野の共同研究者と検討した。第二期 CREST では、第一期 CREST の研究を発展させ、Sample Entropy を用いた日射変動の定量化と雲の気象学的な特徴量との関連性について研究を進めるとともに、気象庁の 47 地点での地上観測日射量を解析することで日射の変動に地域性が存在することを明らかにした。図 1 に静岡地方気象台での 2010 年から 2014 年の 5 年間の地上日射観測データを平均、分散、Sample Entropy の 3 つの変動特徴量によって定量化した結果を示す。この結果から、これらの 3 変数特徴量を用いることで詳しく日射変動の構造が定量化できることがわかる。Sample Entropy は時間的な変動を表現した特徴量であり、短周期変動が支配的な場合に大きな数値を出す傾向がある。このことから、平均と分散のみでは考慮できなかった気象データの時間的な変動の特徴について、Sample Entropy を用いて定量化することが可能となる。図 2 では日射変動の定量化手法を用いて、日本国内の気象庁の観測所のうち地上日射量観測を行っている 47 地点を対象として日射変動の特徴を考慮した地域区分を行った結果を示す。この結果は k-mean 法により 6 つのクラスターへ分類した場合についてあらわしたものであり、同一のクラスターに属する観測点は同一な色および印で表される。クラスタリングの結果から、日射変動の特性の違いが地域別に現れていることが確認できる。

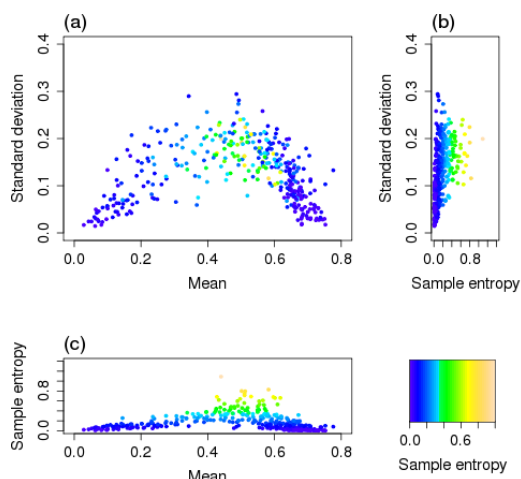


図 1 (a) 平均—標準偏差, (b) sample entropy—標準偏差, (c) 平均—sample entropy

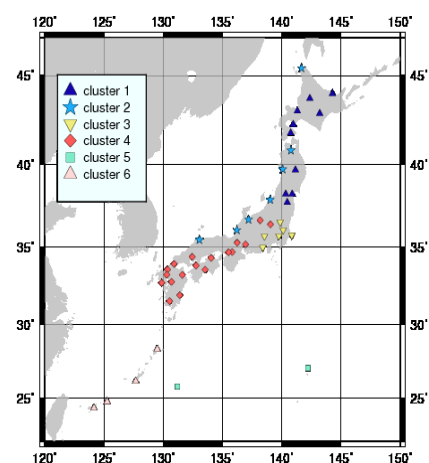


図 2 クラスタ分析の結果

さらに、第二期 CREST のなかで本研究を発展させ、雲特徴量と地上観測日射量の変動の関係性について解析を行い、その解析結果をもとに衛星観測データから地上観測日射量の変動の空間的な分布を推定して把握する手法を開発した。図 3 に衛星データを用いて推定した地上日射変動の地域的な区分を表す。図 3 において、各色は変動区分に対応しており、灰色は晴天(雲がない)に対応している。ここでは、地球観測衛星 Terra と Aqua から MODIS データを用いたが、新しい静止気象衛星データにも本手法の適用が可能



であることから、ひまわり 8 号のデータを用いることで、2.5 分間隔で気象変動の特徴に基づいた地域区分をマップとして表示することが可能となる。

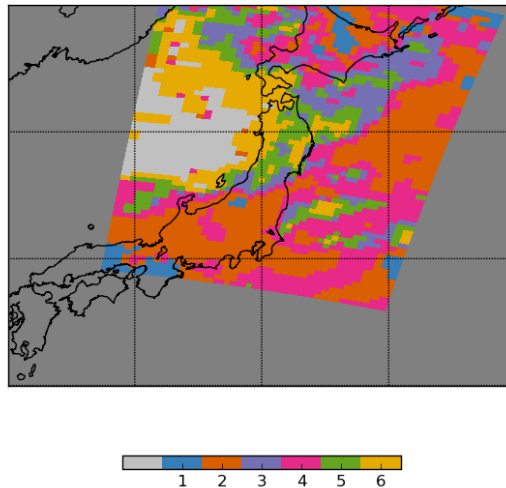


図 3 衛星観測雲特性量から推定された日射変動区分

また、日射変動の予測可能性を検討するため、日射の変動性が高くなる場合の総観規模気象場の特徴について研究を行い、その特徴を明らかにすることに成功した。図 4 に九州地域の 10 月において日射量の強い変動性が生じる場合に関する総観規模気象場を示す。この研究により、気象モデルから得られる気象場の予測にもとづいて日射の変動性に関して予報可能であることを示しており、モデルベースによる新たな日射変動予測の手法の開発が可能となる知見が示された。

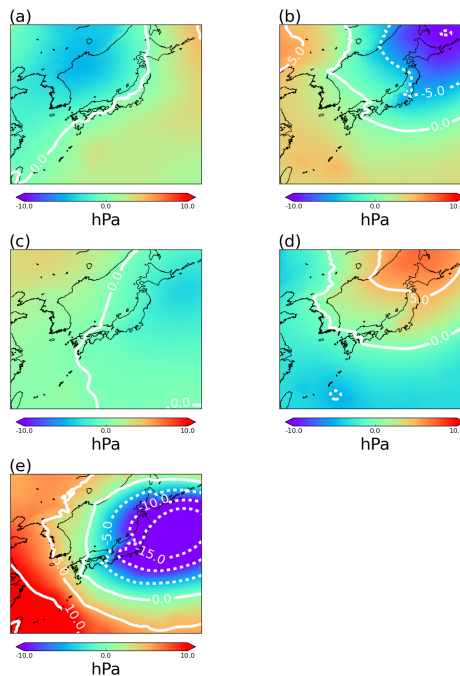


図 4 九州地域の10月における地表面日射量が強いときに表れる総観規模気象場。  
(a)から(e)はクラスター分析より分類された5つの区分に対応する。

以上の成果から、気象データの変動について、Sample Entropy を用いた定量化、地域特性に関する分析、衛星データを用いた地域区分の推定が可能となったことに加え、総観規模気象場との関係性の解析によってモデルベースによる日射変動の予測可能性を明らかにすることができた。気象データの変動を対象としたこれらの研究が進展したことにより、気象データの変動を詳細に考慮した新たな EMS の構築に向けて、地球科学、パワーエレクトロニクス、電力系統工学などの新たな融合展開が期待できる。

## (5) シナリオデータの作成 【JAXA-東大グループ】

### ①研究のねらい

異分野間の連携を有効化し理想実験ではなく現実の問題に資する分散協調型 EMS を構築するための研究を実行するためにはエネルギー需要と供給の基盤となる気候/気象場のデータを共通/共有することが不可欠である。CREST 第一期及び FS から他チームとの連携を積極的に展開し EMS 研究のために必要となる気象パラメータの情報交換を行った。これらの情報を元にシナリオデータの構築を行った。シナリオデータ構築の目的は CREST 研究対象である EMS 理論を実際の地球環境の状況下に投入することで、その有効性/健全性を評価するための基盤データを構築する事である。

### ②研究実施方法

期間全体では(i)EMS の有効性評価に資するシナリオ構築のための予備的検討、(ii)状況シナリオ設定、(iii)地球科学データに基づくシナリオデータの構築、これらの手順を経てシナリオデータセットを作成した。このうち H27 年度はシナリオ構築のための予備的検討としてどのようなシナリオが有効であるか検討を行い、H28 年度はシナリオデータ作成のための計算機を整備し、これを活用して過去の観測事例と将来のモデルシミュレーションデータの結果からシナリオデータセットが作成された。H29 年度はこれらをチーム内で活用し、また他チームとの連携/共同研究の可能性について検討している。また、猛暑/真冬などに分類されないものの特徴的な気象イベントに対応するシナリオの作成について検討を行っている。

### ③当初の研究計画(全体研究計画書)に対する現在の研究進捗状況(§ 2. と関連)と得られた成果

現在は H27 年度におけるシナリオ設計の検討、H28 年度における計算機基盤整備、猛暑日及び真冬日観測に基づくシナリオデータセットの試作が完了している。EMS のシミュレーションには様々な状況シナリオが考えられるが、聞き取り調査を行った結果最も必要とされるものはエネルギー需要が逼迫する猛暑と真冬であることが分かった。したがって、第一に構築するシナリオを猛暑及び真冬の二つに絞り、第一段階として実際に起こった過去の観測データからシナリオを構築した。これは過去に起こった事象を再現する Hind cast 実験の意味を持つ。ターゲット領域は人口密度によってエネルギー需要が決まっていることから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た。領域を小さく設定することでデータの小型化の要請に答える。これはエネルギー需要と供給、そして配電網研究を網羅するために最大公約数として設定したものである。また、本チームのエネルギー需要科学 SG 日高教授からの要請により対馬を追加設定した。猛暑日の定義は世界気象機関(WMO)によって最高気温の平年値を連続 5 日間以上、5℃以上上回るとされているが、実際は各国の気候傾向によって様々な定義がなされている。ここでは気象庁の定義に合わせて日最高気温が 35℃以上の日を猛暑日、日最高気温が 0℃未満の日を真冬日とする。この定義が 2007 年以降の気象庁観測データから該当する最も過酷な日時を選択する事とした。調査の結果、猛暑日は三地域ともに 2013 年 8 月 11 日であった。東京電力管内では猛暑日を観測した地域が広く分布しているが、真冬日を観測した地域は栃木、群馬を中心としている。このことから関東域のエネルギー需給としては夏場が過酷である事が分かった。関西電力管内では大阪を中心に広く猛暑日を記録しているが、真冬日の観測はまばらである。これにより関西においても関東と同様に夏場が過酷であることが予想される。また、AMATERASS データセットによる日射解析において 2013 年は日射量の高い年であったことが分かっている。気温の高さに対して日射量が高いということは太陽光発電の利用の観点からもエネルギー需給の研究に有効なシナリオを構築できることになる。真冬日はそれぞれ 2014 年 2 月 8 日、及び 2012 年 2 月 2 日であった。また、対馬は真冬日に該当する観測は存在しなかった。シナリオデータとしての基本パラメータは日射量、太陽光発電量、気温、湿度、風向風速とした。

図1に猛暑シナリオにおける東京電力管内及び関西電力管内の正午付近における日射量、地上気温、太陽光発電出力を示す。東京電力管内及び関西電力管内ともに若干の雲はあるものの人口密集地域を中心に高い日射量となっている。また、このときの気温の分布もまた人口密集地域を中心に高い値となっている。これは冷房需要の増加を促し管内の電力需要を押し上げる可能性があることを示している。しかしながら、太陽光発電出力に着目すると管内の広い領域で十分な出力が得られる事が分かる。これは上昇した冷房需要のピークを太陽光発電の大量導入により相殺できる可能性を示している。しかしながら、雲が点在しておりゆっくりと流れていくことから局地的には太陽光発電システムに影を落とし出力を下げる方向に働くため、これらのモニタリングが必要になるだろう。そのための制御技術の開発とシミュレーションテストのために猛暑シナリオデータは有効に働くと考えられる。

図2に真冬日シナリオの日射量、地上気温、太陽光発電出力を示す。東京電力管内は全く日射を得られていない事が分かるが、関西電力管内は人口密集地において日射を得られていることが分かる。しかしながら東京電力管内も関西電力管内も山岳部を中心に非常に気温が低くなっており暖房需要の増加が予想さ

れる。太陽光発電出力に着目すると東京電力管内は太陽光によって全くエネルギーを得られないことが分かる。このような場合火力や水力に代表される他電源に完全に頼らざるを得ないが暖房需要が増加しているときに他電源において広域の停電を伴うような重大な事故が起こった場合[Nakajima et al., 2017]<sup>原著論文 42)</sup>、その後の復旧において太陽光発電出力のモニタリングが必要となるだろう。また、関西電力管内は限定的ながら太陽光発電出力が得られるが、広域に雲が分布しているため時間の経過に従って断続的な出力になるだろう。この出力変動に伴う制御技術の検討にこのデータが資する可能性がある。このように EMS にはその環境情報としての気象情報が重要な役割を果たすことが分かる。今回は猛暑と真冬に焦点を絞ったが、今後の議論によって他の季節や特徴的な変動を伴うシナリオの作成も必要になるだろう。

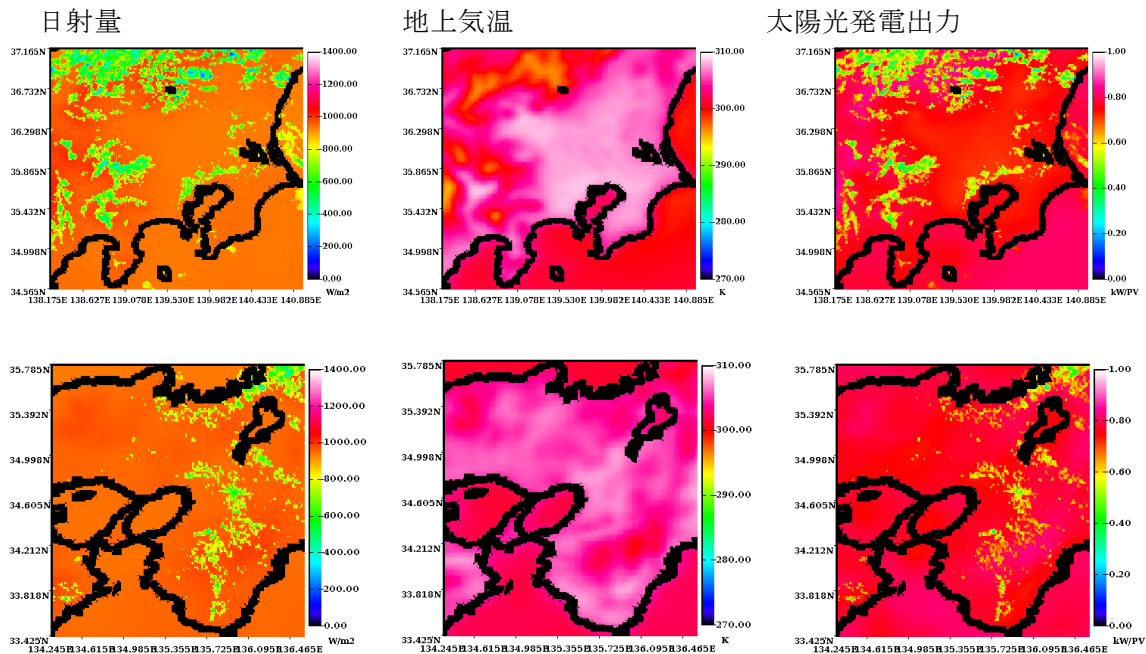


図1: 猛暑シナリオにおける東京電力管内及び関西電力管内の日射量、地上気温、太陽光発電出力。  
(2013年8月11日11時32分)

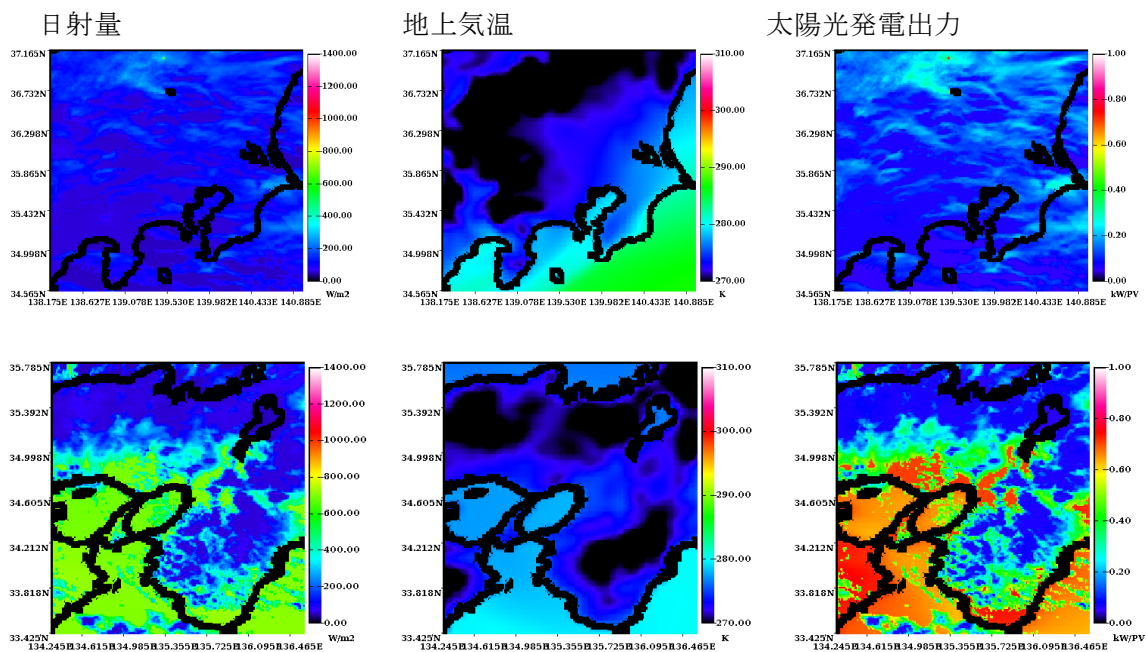


図2: 真冬シナリオにおける東京電力管内及び関西電力管内の日射量、地上気温、太陽光発電出力。  
(関東地域:2014年2月8日11時32分、関西地域:2012年2月2日11時32分/日本時間)



猛暑と真冬の両シナリオは観測事実から構築されている。しかしながら気候は固定されたものではなく変化していることに注意しなければならない。現在の気候に最適化された再生可能エネルギーの制御技術が長い年月をかけて変化していく気候の中でどのように有効であるのかを評価するシナリオデータが必要である。本研究では気候変動に伴い現在の気候から変化した将来シナリオの作成も行った。将来シナリオは 2030 年代をターゲットとし気候変動適応戦略イニシアチブ 気候変動適応研究推進プログラム SALSА の成果物である Stretch NICAM による擬似温暖化実験の解析結果をベースとした[Goto et al., 2016]<sup>原著論文<sup>32)</sup></sup>。ターゲット期間は 2031 年から 2033 年の三年間である。図3に 2031 年 10 月 1 日における日射量、地上気温、地上風速、地上相対湿度を示す。日射量と風速の値は現在と大きくは変わらない印象を受けるが、気温と湿度が一見して現在とは異なる傾向を示していることが分かる。10 月 1 日という既に夏を過ぎた時期であるにも関わらず気温は高い値を示し特に湿度の高い領域が広く分布していることが分かる。日射量に大きな変化がなければ太陽光によって得られる電力は変わらないが、気温と湿度が高い値となれば冷暖房の電力需要に変化があるだろう。このように我々人間の生活環境に関わる情報と再生可能エネルギーのインプットが提供されるため、このデータセットを参照することで将来シナリオにおける電力需給シミュレーションなどが可能になるだろう。今後はデータ・インタフェース G を通じて各シナリオが配布される。

また、ここまでは主に電力需給に密接な関係のある気温の変化に着目しシナリオを作成したが現在は他の気象現象の特徴的なイベントについての検討も開始している。しかしながら一般的に台風、大雨洪水等は危機管理の側面が強く単純に電力需給のシミュレーションに資するシナリオ構築は難しいことが分かっている。今後は他チームとのコミュニケーションを通じてシナリオの追加について検討する。

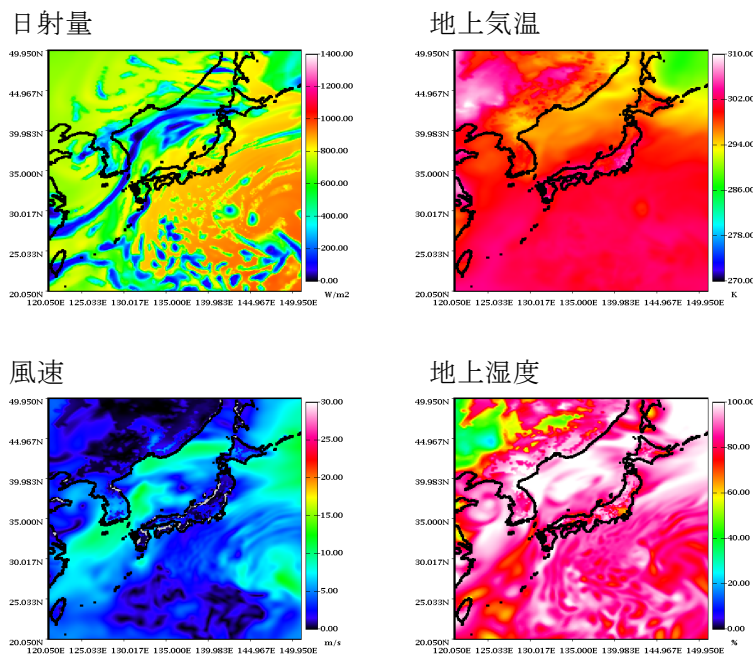


図3：擬似温暖化実験に基づく将来シナリオにおける日射量、地上気温、地上風速、地上湿度 (2031 年 10 月 1 日 9 時/日本時間)。

#### ④当初計画では想定されていなかった新たな展開があった場合、その内容と展開状況と得られた成果

当初はシナリオデータのターゲット期間を一ヶ月と定め、AMATERASS データセット、気象庁客観解析データ、地上観測データ等を複合的に利用して猛暑/真冬日シナリオデータセットを構築した。しかしながらエネルギー需要科学 SG 岩船特任教授よりシミュレーションにおいて春季のデータが重要であることが強く要望されたため猛暑及び真冬シナリオを 12 ヶ月に拡張し各々 1 年間のデータセットとした。これにより猛暑日及び真冬日のイベントを含みつつ四季の変化も表現できるより強固なデータセットとして整備された。

**(6) エネルギー需要モデルの開発 【阪大グループ】****①研究のねらい**

本研究では住宅・業務建物および建物群を対象として、エネルギー需要、特に電力ロードカーブや可制御負荷を推計するエネルギー需要モデルを開発し、省エネルギーの進んだ将来など各種シナリオ下でのエネルギー需要を推計して他チームが使用可能な需要データを供給すると共に、研究を通じてエネルギー需要発生メカニズムを解明することを目的とする。

**②研究実施方法**

住宅・業務施設のエネルギー需要の決定要因である (i) 居住者の生活行為、(ii) それに伴う機器・設備操作、(iii) 機器・設備仕様、(iv) 機器・設備の所有状況、(v) 住宅・建築仕様、(vi) 気象条件等外界条件の 6 要因についてモデル化をおこない、エネルギー需要モデルを構築する。また、各種実測データを用いてモデルの検証と共に、DR 効果を含め各要因のモデルを高度化する。このモデルを国の地球温暖化対策計画の評価等に応用すると共に、EMS 領域内の各プロジェクトに提供することで、需要モデルの要件を明らかにし、特に EMS 分野への応用が可能なモデルを構築する。

**③当初の研究計画(全体研究計画書)に対する現在の研究進捗状況(§ 2. と関連)と得られた成果****A エネルギー需要の決定構造に関する調査****A-1 住宅エネルギー計測データに基づくエネルギー需要決定要因への分解**

住宅エネルギー需要の決定構造を把握するため、集合住宅の分電盤で計測された回路別電力消費から、居住者の在室状況(部屋稼働状況)を把握する方法を開発した。照明専用回路がある部屋において、夜間の照明稼働状況を正解データとして部屋稼働状況推定方法を開発した。

本手法を豊田市のデマンドレスポンス(以下、DR)実証試験の対象世帯に適用し、DR 効果が「機器の稼働を抑制する行動」と「機器のサービス水準を抑制する行動」のいずれによるものかを評価した(伴場ほか, 2016)<sup>原著論文 28)</sup>。この結果、冬期の実証試験では、後者による効果より前者による効果が大きく、特にエアコンの稼働抑制による貢献が大きかった。一方、夏期には有意な削減が得られなかった。これは気温上昇に伴いエアコン稼働率が上昇したことに起因する。エアコン以外の回路では電力需要が若干減少した。

**A-2 スマートメータデータの用途分解手法の開発(井上ほか, 2017)<sup>未発行論文 10)</sup>**

スマートメータで計測した時刻別の平均主幹電力消費を用途分解する手法を開発した。外気温を用いた回帰モデルを構築し、冷房分、暖房分、活動分、ベース分の 4 用途にスマートメータデータを分解する。冷暖房使用の閾値気温が年度によって変化すること、冷暖房期間の前半と後半で電力消費の気温依存性が異なることを考慮していることが本手法の特徴である。また、回帰モデルに共通の外気温データを入力することにより、年度間の気象条件の違いの影響を除去することができ、電力の使い方を年度間で比較することが可能となった。本手法を関西電力エリアにおける節電効果の評価に応用し、節電効果が得られた用途を特定するとともに、冷暖房の使い方の変化による節電効果を定量的に評価した。

**B 住宅エネルギー需要のモデル開発****B-1 住宅居住者の生活行為生成モデルの開発(エネルギー需要決定要因の(i)に対応)**

住宅エネルギー需要の時刻変化は居住者の生活行為の変化により形成される。国の統計である社会生活基本調査では、日記形式で時間の使い方をサンプリング調査している。このデータを「生活時間」と呼ぶ。本研究では生活時間の個票データに基づいて居住者の時々刻々の生活行為の変遷を確率的に生成する生活行為生成モデルを開発した(Yamaguchi and Shimoda, 2017)<sup>未発行論文 3)</sup>。既存の住宅エネルギー需要推計では、居住者の生活行為は考慮せず機器の稼働を直接決定するモデルが多く、生活行為を精度よく推計するモデルとして確立されているものは Wilke ら(Journal of Building Performance Simulation 2013)のモデルのみであった。本モデルはこれに代わるものであり、居住者間の同時行動の考慮や入力条件の整備によって地域性や個々の世帯の特性の考慮が可能であり、応用可能性について優れている。このように、居住者の生活行為を明確にモデルで表現することにより、実社会においてエネルギー需要が生成される構造が再現でき、また、電力需要の調整力の推計において居住者の在不在や行為の時間配分を考慮できるようになった。Fujimoto et al. (2017)<sup>原著論文 49)</sup>では、本モデルを用いて家電製品を用いたエネルギー管理による電圧制御への貢献をシミュレーションにより評価し、居住者に起因する管理上の制約がもたらす影響を明らかにした。

**B-2 住宅居住者の生活行為に伴う機器操作モデルの開発(同(ii)に対応)(Yamaguchi et al., 2017)<sup>未発行論文 13)</sup>**

London-Loughborough (LoLo) EPSRC Centre の Dr. Selin YILMAZ と共同で、住宅における機器操作モデルの評価を行った。機器操作モデルには大きく 4 種類があり、これまでその性能や応用可能性などについて相互比較は行われてこなかった。共同研究では 4 種のモデルを相互比較し、その特性を明らかにした。

**B-3 エネルギー需要に対する気象データの影響に関する検討 ((vi)に対応)**

地球科学チームとエネルギー需要科学チームが協同で研究をおこなう本チームにおいて、エネルギー需要に及ぼす気象要素の影響は重要な研究課題である。そこで、気象要因とエネルギー消費の関係を以下の 2 つの観点から検討した。【直接要因】地域・国土スケールでのエネルギー需要予測に関する研究は多いが、気象データの最適な空間解像度についての検討例はほとんど存在しない。本研究では、兵庫県を 1 地点(神戸)の気象データで代表させる従来手法(神戸ケース)と、4 つの地域(神戸、姫路、豊岡、洲本)に区分しそれぞれの気象データを用いる手法(積み上げケース)でエネルギー需要の推計誤差を確認した。気象条件が電力負荷曲線に与える影響は時刻によって異なる。顕著なのは夏期夜間のピーク需要であり、神戸ケースより積み上げケースが 10%小さくなる場合があった。年間一次エネルギー消費量では気象データの空間解像度による影響は 1~2%であった。【間接要因】A-1 の部屋稼働状況の判定結果を用いて、部屋稼働率および稼働時消費電力と外気温の関係を評価した。外気温および季節変化は居間・食堂の稼働率に対して統計的に有意な変化をもたらさない一方、稼働時電力消費は冬期に外気温が低くなるほど増加する。居間・食堂以外の部屋でも同様の傾向がみられた。また、雨天時はいずれの部屋も昼間の稼働率が晴天時より高く、降雨により在宅率が高まることが確認された。

**B-4 暖冷房エネルギー需要推計の精度検証 ((ii)、(iii)に関係)**

暖冷房エネルギー需要について、モデルにおける推計フローの各段階で精度検証を行う手法を開発した。本モデルでは暖冷房エネルギー需要を①在室者有無の決定、②自然室温の算出、③エアコン ON/OFF の決定、④熱負荷の算出、エアコン電力消費の算出というフローで推計している。まず分電盤回路別電力消費データ(集合住宅 144 世帯分)より推定したエアコン稼働スケジュールを本モデルに外挿してシミュレーションし、④熱負荷の算出、⑤エアコン電力消費の算出の推計精度を検証した。次に、電力消費データより推定した居住者の在室スケジュール(A-1 の部屋稼働状況)を本モデルに外挿してシミュレーションし、③エアコンの ON/OFF 判定の精度を検証した。これらより、本モデルは各段階で概ね良好な推計精度を持つことが確認できた。

**B-5 時系列電力需要予測の精度検証 ((i)~(vi)に関係) (Taniguchi et al., 2016) 原著論文 21)**

住宅群を対象としたエネルギーマネジメントシステムの計画のためには、電力負荷曲線をその構成機器別に精度良く予測することが必要である。本研究では、家族構成および住宅仕様の多様性や気象条件による影響を考慮していること、居住者の生活行為をモデル化したことなどにより、高時間解像度(5 分間隔)でのボトムアップ型モデルを構築した。今回電力会社より関西地方の約 1200 世帯分のスマートメータデータ平均値の提供を受けた。このデータとの比較により、夏期および中間期について電力負荷曲線の推計精度が十分に高いことを確認した(図 1)。このように多数の住宅で計測された信頼性の高いデータを検証に用いた事例は他に見られない。B-4, 5 を通じて、EMS で特に問題となる冷暖房によるエネルギー消費の構造はかなり高い精度でモデル化できていると考えられる。さらに、各種節電行動の系統電力負荷曲線に与える影響を評価し、冷房設定温度緩和よりも照明消灯による効果が大きいこと、家族構成による効果の差が大きいことを示した。

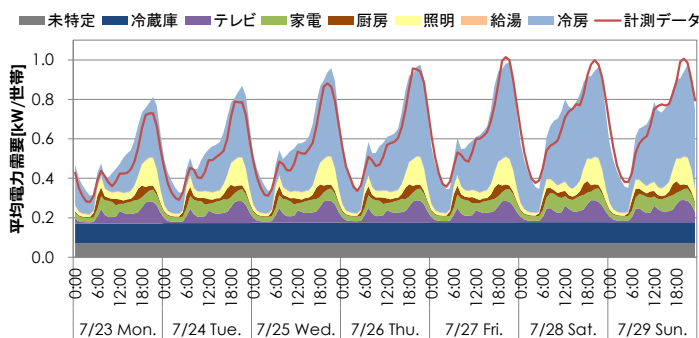


図 1 時系列電力需要の推計結果

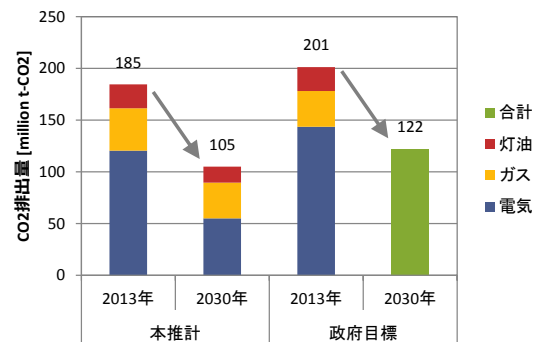


図 2 家庭部門年間 CO<sub>2</sub> 排出量の推計結果

**B-6 家庭部門における 2030 年の CO<sub>2</sub> 排出削減に向けた対策の定量的評価 (Momonoki et al., 2017) 原著論文 50)**

本モデルを用いて、政府による 2030 年の家庭部門 CO<sub>2</sub> 排出目標の検証を行った。本モデルは様々な入力条件を自由に設定できること、実際のエネルギー消費構造を再現していることから、将来社会における家庭部門エネルギー需要を高い信頼性で予測できる。2030 年においては長期エネルギー需給見通しに示されている、高効率給湯器のシェア、家電機器の普及率、家電機器のエネルギー効率、住宅ストックの熱性能が全て達成された状況を想定した。図 2 に家庭部門年間 CO<sub>2</sub> 排出量の推計結果を示す。本推計における 2013 年度から 2030 年度にかけての CO<sub>2</sub> 排出削減率は 43%であり、長期エネルギー需給見通しの対策を確実に実行できれば 39%削減という目標は実現可能であることが示された。ただし、削減効果の対策毎の内訳は政府の試算と異なり、本推計では高効率給湯器の普及による効果が最も大き



く、次いで住宅ストックの熱性能の向上が大きい。このことから、特に高効率給湯器の普及、新築住宅の省エネ基準達成を確実に実施することが重要であることが明らかとなった。

#### **B-7 家庭用コージェネレーションシステムの省エネルギー性評価** (Shimoda et al., 2017)<sup>原著論文 43)</sup>

本モデルを用いて家庭用コージェネレーションシステムの省エネルギー性を評価した。本モデルでは 19 種類の家族類型を考慮しており、各類型の居住者の行動に応じた電力需要および給湯需要を 5 分間隔で推計できる。この機能を利用し、類型毎に CO<sub>2</sub> 排出量が最適となるシステムをガスエンジン、PEFC (固体高分子形燃料電池)、SOFC (固体酸化物形燃料電池) から選出した。最適システムへの更新にかかる費用を補助金で賄うと仮定し、10 年間で 1 単位の CO<sub>2</sub> を削減するために必要な費用 (限界削減費用) を類型 (世帯人数、元々保有していた給湯器による分類) 毎に算出し、世帯人数の多い世帯での電気温水器からコージェネレーションへの更新が最も費用対効果が高いことを明らかにした。

#### **C 業務施設エネルギー需要のモデル開発**

##### **C-1 BEMS データの解析**

(一社)環境共創イニシアチブは BEMS で計測された電力需要を公開している。このデータに基づき、延床面積あたり、契約電力あたりの電力需要原単位を業態別にデータベース化し、CREST の他チームへ提供した。

##### **C-2 業務部門を対象とするエネルギー需要モデルの開発**

業務施設ストックのエネルギー需要を推計するモデルを開発した。本モデルは Archetype Engineering Modelling 手法を採用している。まず業務施設ストックを施設の用途、規模、空調設備、気候区分により類型化した。次に、類型を代表する建物モデルを作成した。これはシミュレーションの入力条件となるデータセットである。シミュレーションには米国 DOE が開発した EnergyPlus を用いた。シミュレーション結果を床面積あたりで原単位化し、最後に対象とする地域における類型別延床面積と原単位を積和し、エネルギー需要を定量化する。現在本モデルの推計精度を検証している。また関連して、空気調和設備の採用状況を表す統計モデルを開発した (Yamaguchi et al., 2017)<sup>5</sup>。清華大学 Dr. Fulin Wang と業務施設の空調設備を対象とする DR について 2016 年 11 月に打ち合わせを行い連携について協議したが、具体的な連携には至らなかった。

#### **D 他の CREST チーム・グループへのエネルギー需要推計結果の提供**

##### **D-1 林チームとの連携: エネルギー需要データの提供**

林チームでは、配電線、バンク、変電所、営業所の階層的な構造を持つ配電システムを包括し、各単位で物理的な構成や挙動を模擬する都市規模解析モデルを開発している。個々の配電線では年間時刻別の電力需要、エネルギー管理の資源である調整力、制約となる居住者生活行動や設備など EMS に関わる特性を持つ具体的な高圧需要家、柱上変圧器に連系される低圧需要家を想定する。さらに、住宅、業務施設、産業施設の立地状況を考慮して配電システム構成 (トポロジー) や配電線間の接続関係を決定し、上記の階層的な配電システムを構築する。このように実社会の配電システムを可能な限り模擬し、分散協調型 EMS の評価基盤とする。本研究は①エネルギー需要データの提供、②住宅、業務施設、産業施設の立地状況の考慮方法の開発 (2017 年電気学会全国大会発表) に貢献した。①については、業務・産業部門に関して環境共創イニシアチブ公開データに基づく BEMS データベースを提供するとともに、住宅に関して国勢調査データから個々の居住者の世帯構成・世帯構成員属性をランダムに生成するモデルの開発、生活行為生成モデルとの統合、住宅での所有機器とその仕様を決定するランダムサンプリングモデルの開発を実施し、共同でケーススタディを行っている東京都狛江市を対象に、配電網に接続している個々の住宅、業務施設、産業施設の電力需要データの推計結果を提供した。

##### **D-2 林チームとの連携: Tennessee 大学 Dr. Chien-fei Chen との共同研究**

Tennessee 大学の Dr. Chien-fei Chen と早稲田大学の共同研究として、住宅向け DR に関するアンケートを行った。ここでは時刻別に変動する電力料金を想定した上で、ユーザが設定した時間帯の中で洗濯機、乾燥機、食洗機の稼働時間を自動決定する DR を想定した。このような DR は欧州で実証試験の実績があるが、日本では十分な研究が行われていない。2017 年 1 月に Web アンケートを実施し、需要家の受容性について調査した。これまでアンケート結果の統計解析、対象機器の電力消費、DR による電力需要調整可能性を評価している。

##### **D-3 鈴木チームとの連携**

鈴木チームでは住宅と電気自動車 (EV) を連携したエネルギー管理システムを共同で開発している。本研究のエネルギー需要モデルでは居住者の生活行為を生成する。生活行為のうち「外出行為」、「通勤行為」での自動車の使用を決定する確率モデルを新規開発し、鈴木チーム開発の EV モデルと統合するものとした。統合計画を第 4 回制御部門マルチシンポジウム (2017 年 3 月) に発表した。

(H27 年度増額および H27 年度国際強化支援により、研究加速)

<sup>5</sup> Y. Yamaguchi et al., Stock modelling of HVAC systems in Japanese commercial building sector using logistic regression, Energy and Buildings (2017), in press, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.007>

(7) 需要データプラットフォーム構築に向けた分析 【東大生研グループ】

①研究のねらい

再生可能エネルギーシステムが大量に導入された社会において、大きな役割を果たすのが分散エネルギー管理システムであり、その核となるものは制御対象である「需要」である。本グループでは需要、特に家庭用需要に着目し、分散エネルギー管理システムの評価に有用な需要データの収集および精査を行い、その物理的特性や消費者の受容性を考慮した可制御性の検討を行う。阪大グループの需要モデル構築の検証に貢献し、他の研究チームとのデータ共有の可能性について検討する。さらにすでに構築したHEMSモデルの実際のサイトへの適用を試み、ロジックの簡素化、実運用への道筋を明らかにする。

②研究実施方法

本グループは、H27 年度までに約 1600 件の HEMS あるいは住宅における計測データを保有しており、H28 年度もこれらの世帯において継続してデータ収集を行った(H27 年度増額による研究加速)。またデータ収集を行う過程で、今までは新築・若年世帯に偏りがある傾向が見られたため、既築・高齢世帯のデータ収集も追加で行った。また住宅事業者からの住宅属性情報や、保有家電の詳細情報、および気象データにおいても H27 年度以降継続して収集し、HEMS データと紐づけることによってデータベース化し、他の研究チームとのデータ共有に努めた。

なお気象データは、JAXA-東大グループ他で開発された AMATERASS の解析結果を参照した。これは気象衛星ひまわりの観測データをもとに雲粒などの散乱や水蒸気の吸収などを考慮して、日射量を放射伝達理論に基づき物理的な解法で推定したものであり、気圧や温度、湿度などの基礎的な大気物理量は気象庁 MSM/GPV に基づいている。そして郵便番号より緯度経度を算出し、AMATERASS データベース上の気温、日射量データを抽出するシステムを構築した(図 1)。

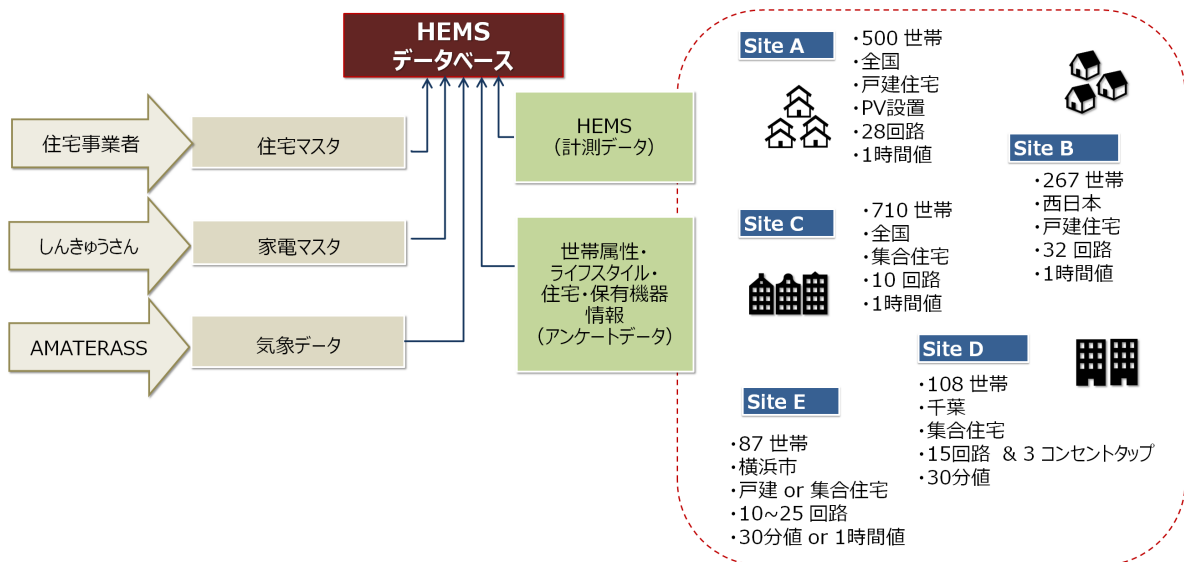


図 1 HEMS データベースの構造

③当初の研究計画(全体研究計画書)に対する現在の研究進捗状況(§ 2. と関連)と得られた成果

東大生研グループは、需要データの EMS への活用を目指し、HEMS データ収集、将来的に EMS を実現するためのモデル化を実施してきた。

HEMS データベースに基づいたエネルギー診断は、家庭におけるエネルギー管理を進めるうえで、需要家の受容性を高めるためのツールとなり得る。本研究により、HEMS ベースのエネルギー診断の効果に関する一定の見通し、家庭内の需要構造を明らかにすることが可能となった。



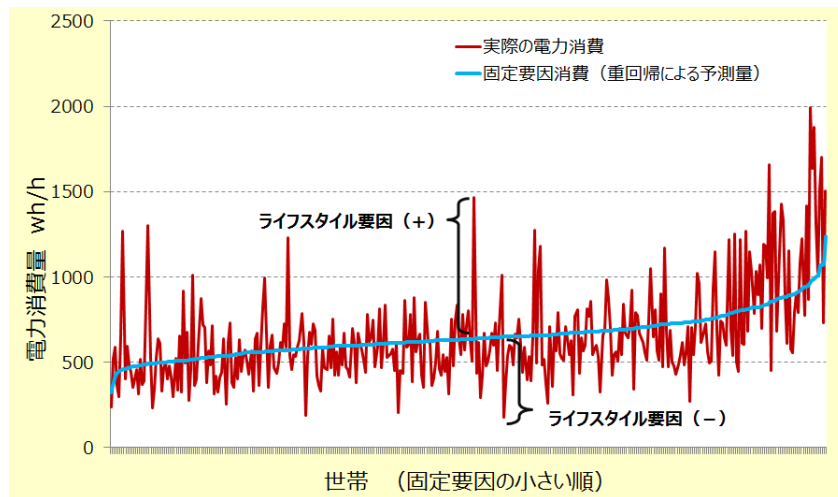


図2 家庭内需要における固定要因消費とライフスタイル要因消費

HP 給湯機を用いたエネルギーマネジメントは、短期的にはFIT が終了した時点での PV 自家消費拡大方策として、長期的には、市場価格と連動した系統全体の需給バランス貢献策として重要な技術であり、その価値を定量的に評価した本グループの貢献は大きく、実運用に向けて政策を後押しするものである。また、業務用も含めた EV の充電促進ポテンシャルを定量化することによって、EV を含めた EMS を検討するための重要な情報を与えた。

チーム内の連携としては、各住宅における気象データ(日射量、気温)を JAXA-東大グループの AMATERRASS データから取得し、需要構造分析に用いたこと、HP 給湯機の気温特性に反映させたことが挙げられる。また、阪大グループからは、九州地区の 3000 世帯の給湯需要のモデル化の結果を提供してもらい、需要の多様性を考慮した HP 給湯機運用のモデル化が可能となった。その際、東大生研グループが保有するオール電化住宅の HEMS データにおける給湯電力量の実データを分析し、シミュレーション結果と突き合わせることで、阪大グループの給湯需要シミュレーションモデルの精度向上に貢献した。今後は、DR 要素を網羅的に定量化し、各要素の相互関係も含めた定量的な評価を行っていく予定である。

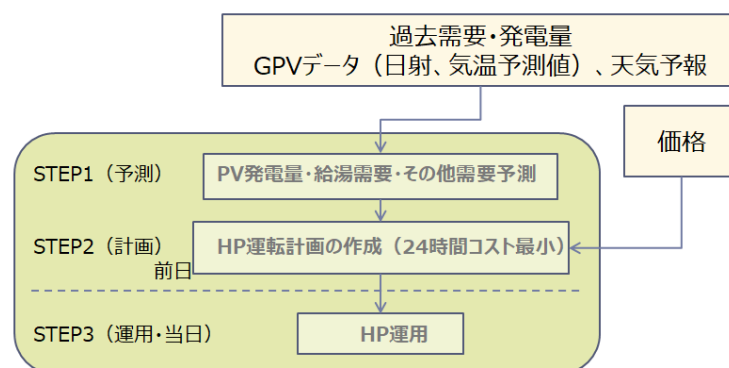


図3 PV-HP 最適運用モデル

④当初計画では想定されていなかった新たな展開があった場合、その内容と展開状況と得られた成果

- 2015 年 9 月に、Clemson 大学の G. K. Venayagamoorthy 教授の研究室を訪問し、系統連系型家庭用エネルギーマネジメントシステムに関する研究内容の詳細について情報交換し、モデルやデータの共有の可能性を模索した。そして、Consumer preference を取り入れた DR 最適化モデルの構築、HEMS モデルにおける Adaptive critic design, Heuristic DP 手法の採用、DC ハウス建設 (Cyber DC House) 等に関して共同研究提案を作成、NSF に提出した。残念ながら採択には至らなかったが、Adaptive Critic Design という、新しい概念を含むモデル化の可能性が広がった。今後は、DC ハウスと東京大学が保有する

「COMMA ハウス」をフィールドにした共同の研究内容も考えていきたい。2017 年 6 月の日本におけるワークショップ後、岩船研が保有する HEMS データのサンプルを Venayagamoorthy 教授側に提供し、予測精度の向上などがマネジメントに与える影響について今後検討を進める予定である。(H27 年度国際強化支援による研究発展)

- 2016 年 3 月に、SINTEF Energy Research を訪問し、SINTEF における Smart tariff プロジェクトや Demand response プロジェクトの、需要家の受容性や応答性(価格シグナルに対する行動変容など)等に関する研究に関して情報交換を行い、モデルやデータの共有の可能性を模索するとともに、ノルウェーにおける DR の受容性について意見交換を行った。SINTEF Energy Research ではマニュアル DR・オート DR ともに実証実験を行っており、需要家へ価格シグナルの伝え方やその反応についての検討を行っている。実際に家庭の負荷制御実験のためのフィールドを保有し実験を行っており、制御時間帯の直後に大きなリバウンド現象が生じたなど、実証実験ならではの需要家反応について知見を得ることができた。(H27 年度国際強化支援による研究発展)

デマンドレスポンスの受容性については、東大生研 G でも以前より検討してきたが、調査票ベースのみで実証実験はできていない。消費者行動、特にエネルギー消費行動では調査票で計測可能な態度と実際の行動との間の乖離が大きいと、実証実験にて得られた知見は極めて重要である。デマンドレスポンスは、日本の消費者にとっては未知のもので、全く知らないものに対する消費者の反応を探索することは困難を極める。そこで既にデマンドレスポンスの仕組みをもち、実証実験を行っている SINTEF にて何か有効な手がかりを見つけることが出来ないかと期待していた。残念ながら消費者を取り巻くエネルギー利用の背景や生活環境が、日本とノルウェーではあまりにも違いすぎ、今回の訪問では、参考となるような手掛かりを見つけるには至らなかったが、デマンドレスポンスに対する需要家の反応・応答に対する問題意識(例えば需要家インセンティブの欠落)などは類似している様子を把握することができた。将来の我が国において、自然エネルギーで家庭需要がほぼ賄える状況になった場合、デマンドレスポンスへの反応のみならず、消費者の省エネ意識が消失してしまう可能性などを検討するには、絶好のフィールドであると考えられ、こちら側の提供できるデータやモデルを整理し、情報を提供し、共同研究の提案に結び付く可能性を検討していく予定である。

- H28 年度に井村チームの HARPCON 設立準備委員会にて「再生可能エネルギーの普及拡大に向けた政策の動向」というタイトルで岩船が講演し、その後継続的にメンバーとして参加するものとした。

(8) 需要家行動モデルの開発 【東工大グループ】

① 研究のねらい

研究のねらいは、需要家の行動変容に影響を与える要因に関する知見を蓄積することである。需要家の行動変容の対象として、従来からある「電力使用行動」に加え、「電力契約行動」「設備投資行動」を想定している(図 4-8-1)。「電力使用行動」「電力契約行動」「設備投資行動」の3行動の関係性を明らかにするために、各行動との関係性を検討するだけでなく、行動に影響を及ぼす Intention(意図)を計測することで、電力に関する需要家行動モデルの基礎を探索する(図 4-8-2)。これまでの需要行動に関する研究においても、情報的手法や経済的手法にて行動変容効果があることが分かっているが、効果が一時的であることが問題とされてきた。効果が継続することは、人が「自律的に動く」という状況を作り出す必要があり、それは大きく2つの要素に分解して考えることが可能である。Gollwitzer は、ある目標や目的に向けて人が行動を起こすときには「目標意図(goal intention)」と「実行意図(implementation intention)」の2つの意図が作用するとしている。これらの既存研究を踏まえて、仮説モデルと作成したのが、図 4-8-2 となる。

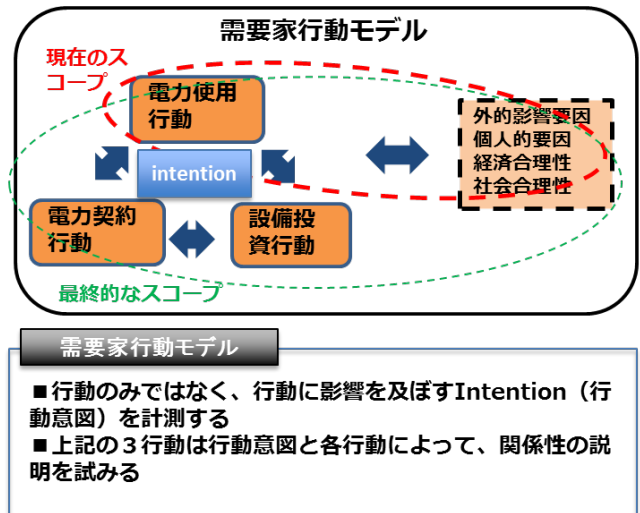


図 4-8-1 需要家行動モデル

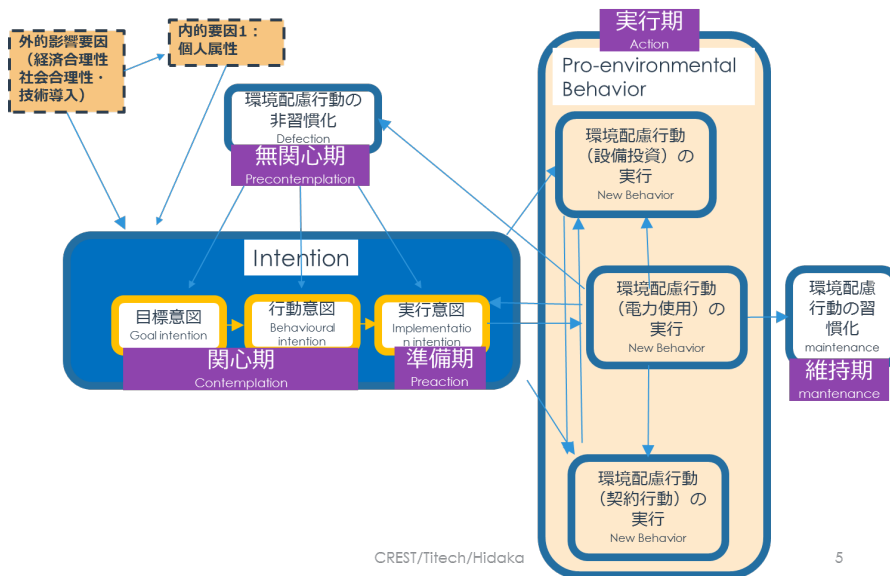


図 4-8-2 需要家行動モデル(仮説)

② 研究実施方法

a. 実証地選定

研究仮説の検証のためには、実際の環境における人間行動を研究しなくてはならない。心理学者 R. バーカーは、実験室という特殊環境で明らかにされた事実はそのまますべてに通用するとは限らないとしている。よって、実験室という特殊環境の実験ではなく、現実に近い実験が可能な社会実験を行うこととした。また、実証地選定にあたっては、次の要素を検討項目として選定を行った。①実験を行うためのフィージビリティがあること ②分散協調モデルの構築のための分散環境の 1 つのモデルとして系統連系がないこと ③スマートメーターが電力会社によって順次配置されていくことを前提に、近い将来の実際の環境と同じにすべくスマートメーターを利用したシステム構成を設計できること。

H27 年度では様々な自治体や関係者との協議を重ね、長崎県の離島である対馬市を実証地として選定した。

b. 実証実験環境整備

H28 年度においては、九州電力、対馬市役所と対馬の CATV 提供会社である株式会社コミュニティメディアと連携し、実験環境の整備を行った。具体的には、次のとおりである。

【実験参加者の募集】

- ・対馬市全戸に対する回覧にて、実験参加者の募集を行った
- ・対馬市役所にて、各部署に対する周知を行った
- ・結果として、50 件の応募者を得ることができた

【スマートメーターの設置工事】

- ・九州電力に協力を得て、実験参加者に対しては、スマートメーターの設置工事を優先的に行ってもらった
- ・実験参加者 50 世帯に対しては、スマートメーターの設置及び B ルートの開設工事を行った

【システム設計・構築】

島内のケーブルテレビ網を利用した将来的な情報提供の実現と、プロジェクトを踏まえた出口としてケーブルテレビ運営会社によるサービス化を視野に入れるために、システム構築会社として対馬市CATV指定管理者である株式会社コミュニティメディアを選定した。

システム構成図は、図 4-8-3 の通りである。九州電力による九州電力内のスマートメーター配置工事後、B ルートを經由してサーバーへアップロードし、各家庭の電力データが画面上で確認できるようなシステムを構築した。

構築したシステム自体は、研究期間内において複数の実験が実現できるようにシステム拡張や改変を行えるような柔軟な設計とした。また、電力使用量データの管理方法についても、個人が特定できない形でのデータ保有形式で受け渡しが可能になるシステムを設計した。

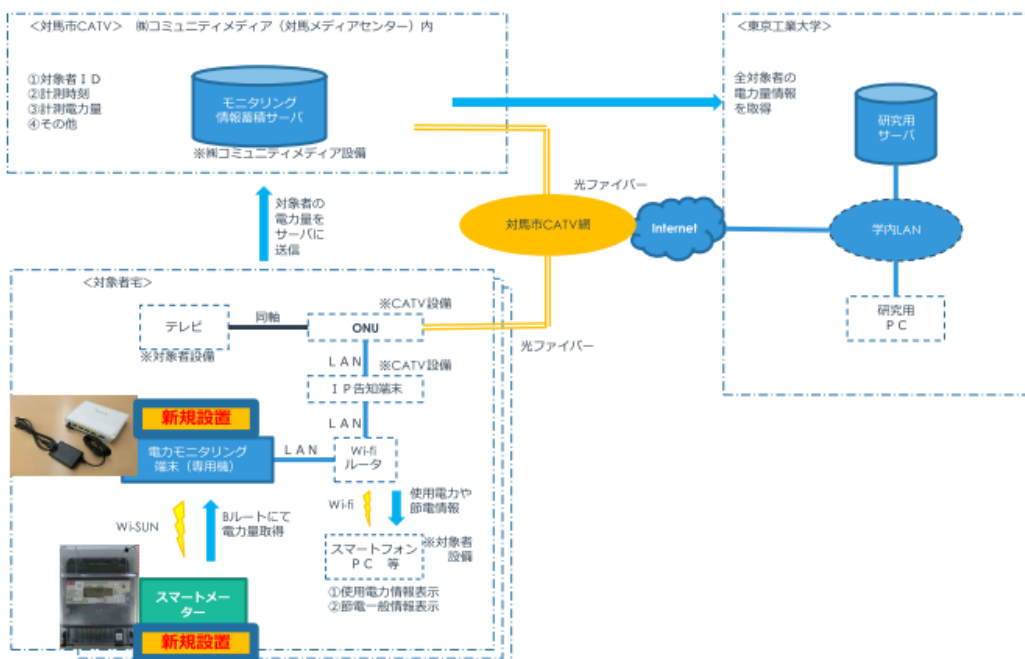


図 4-8-3 対馬市実証実験システム構成図

③ 当初の研究計画(全体研究計画書)に対する現在の研究進捗状況(§ 2. と関連)と得られた成果

a. 電力使用行動

図 4-8-2 の仮説モデルをもとにシステム構築と同時に実験計画を策定した。今後も対馬市や住民との協議を重ねるが、現時点では表 4-8-4 に示すスケジュールと実験内容を検討している。

H29 年度の実験では、再生可能エネルギーの発電量表示と教育手法の組み合わせ等を実施予定している。対馬のほとんどの住民は、再生可能エネルギーがどのくらい発電しているか、自然条件によってどのくらい変動するかわかっていない。現状が分かっていない中で、行動変化を促しても、一時的になる可能性が高い。発電状況を把握することで、行動意図と行動変容に影響があるかを明らかにする。この実験結果を踏まえ、CATV 網を利用して全島に情報提供を行うことで、全島の行動変容を観察し大規模で行った場合の結果を明らかにする。

b. 設備投資行動

投資行動に関する研究は、①対馬での実証研究 ②インターネット調査を並行して実施する予定である。

- ① においては、情報提供を通じて、意図と行動の変容を調査する。また、スマートメーターを利用した機器分離技術導入を行うことで、古い家電や効率の悪い家電を発見し、投資のアドバイスを行うことを合わせて行うなどをあわせて検討する。

② においては、意図の調査を行う。①の実験結果との整合を検証する目的で、すでに投資行動を行っているグループを選定し、インターネットを用いたアンケート調査を行う。

表 4-8-4 実験スケジュール

時期	項目	実施内容
2016年12月	実験環境整備	50世帯の募集・システム構築
2016年12月～2017年3月	電力使用に関する行動変容実験① <b>(H27年度増額により研究加速)</b>	実験前の行動意図に関するアンケート調査 電力消費量見える化の実施 実験後の行動意図に関するアンケート調査
2017年4月～2017年8月	実験環境整備	50世帯追加募集開始と第二期実験のシステム構築
2017年9月～2018年3月	電力使用に関する行動変容実験②	再生可能エネルギーの発電量表示と教育手法の組み合わせ (図4-8-5参照)
2018年4月～2018年8月	実験環境整備	第三期実験のシステム構築
2018年9月～2019年9月	電力使用に関する行動変容実験③	CATVを用いた全島に対する情報提供実験
2019年9月～2020年3月	研究のまとめ	行動変容に関する研究結果のまとめ

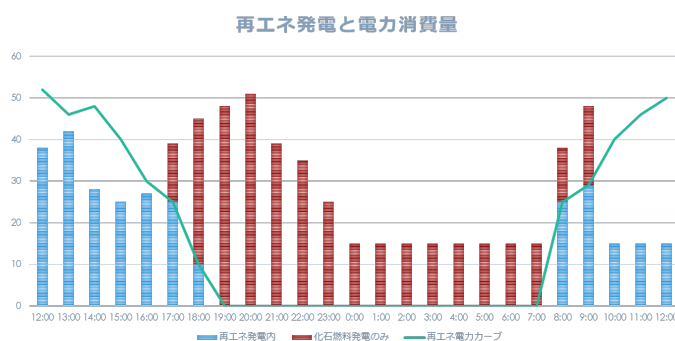


図 4-8-5 対馬市実証実験画面例

c. 電力契約行動

対馬では、電力契約の変更ができない。別途、電力契約変更を行っている需要家を対象に、インターネットによるアンケート調査を行う。電力契約においては、経済性や環境重視など新電力の契約を選別し、契約変更の意図と行動を調査する。

④ 当初計画では想定されていなかった新たな展開があった場合、その内容と展開状況と得られた成果

■スマートメーターを利用したディスアグリゲーションシステムの導入

スマートメーターを用いた機器分離技術導入の検討も行っている。この技術導入により、機器別行動が把握できることによる需要行動の構造化と行動推定の高度化、さらには具体的な行動にあわせた行動アドバイスが実現できると考えている。

■地球科学 SG のデータ利用

地球科学 SG で生成された日射量予測データを需要家に提示できるシステムを構築し、自然によって変動する発電量を理解するとともに、行動変容に繋がる情報提供を検討する。

■九州電力との研究協力

九州電力から過去の島内発電量や需要量データを貸与してもらい、本研究結果を九州電力へフィードバックする予定である。また、島内の教育においては、対馬営業所と連携し、小中学生を対象とした見学会と教育を共同で行うことを検討している。

■自治体との研究協力

長崎県・対馬市・対馬環境コンソーシアムと連携し、実験計画を検討している。また、システム構築にあたっては対馬 CATV 会社と協力することで、将来的に実用化する際に社会実装できるフィージビリティを検討しながら実験を進めている。

■国際連携

米国ローレンス・バークレイ国立研究所の省エネルギーに関する有数の研究者と、人間や機器がエネルギーをいかに使用しているか、どこに削減の可能性があるかに関する研究打ち合わせを行う。また、学内等における講演も予定する。(予算つかず計画段階)



## (9) 需要家情報の整理 【需要科学サブグループ】

## ①研究のねらい

本プロジェクトを開始するに当たり、領域アドバイザーより、エネルギー需要関連研究については、個々のグループの研究課題を遂行するだけでなく、本領域全体に対してエネルギー需要の研究がどのような貢献をしようのか、需要研究全体のフレームワークを明確にするようアドバイスがあった。

これを受けて、当初の全体研究計画に掲げた「需要家情報の整理」というテーマを大幅に拡大し、需要研究を実施する 3 グループの共同作業として「エネルギー需要科学」の確立をテーマにとして阪大グループ、東大生産研グループ、東工大グループの 3 者で実施することとした。

## ②研究実施方法

ワシントン WS における予備的な打ち合わせののち、2015 年春より 2 年間に 7 回の会合を持ち、「エネルギーマネジメントにおける需要科学」についての研究論文レビューやエネルギー需要研究のフレーム作りに関するディスカッションをおこなった。その結果、「エネルギー需要科学」の定義についての包括的な取り組みは世界的に見てもあまりおこなわれていないことを確認し、本分野の確立を目指して需要そのものの体系的解明を目指すための需要研究方法の網羅的な整理をおこなった。

## ③当初の研究計画(全体研究計画書)に対する現在の研究進捗状況(§2. と関連)と得られた成果

当初の計画における、需要家データの整理については、上記の会合などを通じて情報の共有を図り、相互利用も進んでいる。たとえば、阪大グループと東大生研グループの間では、東大生研グループによる電力消費計測データの分析結果を用いて阪大グループの需要予測モデルの検証を行う、阪大グループによる給湯需要予測結果を東大生研グループでの DR 効果予測に用いるなどの連携を行っている。

従来のエネルギー需要研究について関係学会の書籍などを基に整理すると、国土レベルのマクロなエネルギー需要については、GDP などの経済指標、床面積、人口、世帯数などの人口学的指標をベースに予測がおこなわれてきたといえる。しかし、その予測精度はあまり良くなく、たとえば近年では東日本大震災後に大きなエネルギー需要の減少が起きているが、その要因は上記指標だけでは説明することができない。すなわち、実際にエネルギーを消費しているのは各々のエネルギー消費機器であるものの、各機器のエネルギー消費あるいはその操作のレベルに分解して需要を論じる研究はこれまであまり見られなかった。

しかし、現在の長期エネルギー需給見通しや地球温暖化対策計画のように、大幅な省エネルギーの実現が要求される状況では、エネルギー需要を用途別・機器別に分解した上で、機器の効率向上の可能性、普及の速度などを基にエネルギー需要の調整可能性を精査する必要がある。

エネルギー需要を研究する場合に留意すべき重要な点の一つに、エネルギー需要がいわゆる「派生需要」であり、その調整可能性の評価のためには、本来の需要である「エネルギー消費によってもたらされるサービス」に対する需要家の欲求を解明することも必要である。従って、エネルギー需要科学には、エネルギーやエネルギー消費機器に関する工学的、経済学的な側面だけでなく、室内熱・光環境などサービスの成り立ちに関わる医学・心理学等とも密接な関わりを有するなど、多様な学問領域の知見から構成されること、また、分析科学と設計科学の二面性を同時に有することもエネルギー需要科学の特徴である。

文献レビュー(レビュー論文 10 件を含む約 70 件について調査)の成果等より、以前より数多くのエネルギー需要に関する研究がおこなわれてきたことが判明している。たとえばエネルギーシステム研究の研究者が多くの論文を発表しているエネルギー・資源学会の研究論文リストを見れば、これまで三十数年間でおよそ 50 編のエネルギー需要に関する論文が発表されていることがわかる。それらのテーマは、地区別民生用エネルギー需要原単位、住宅におけるエネルギー需要実測、情報提供による省エネルギー効果、需要と気象の関係、需要の用途分解、需要のモデル化、需要に対するエネルギー価格の影響、東日本大震災以降の節電効果の分析、国レベルのマクロな需要の見通し、ピーク電力抑制、需給調整ポテンシャル評価等である。

本研究プロジェクトのテーマである分散協調型エネルギーマネジメントシステムにおいてはデマンドレスポンスのようにエネルギー需要を能動的に変化させることがエネルギーマネジメントの重要な対象となる。街区や都市といった小さな単位で省エネルギーを指向しつつ、太陽光などコントロールできない再生可能エネルギー電源の変動を吸収し、かつ広域の大規模な電源の最適運転への寄与やその依存度の低減を目的として、エネルギー需要を調整していくことが求められる。そのため、エネルギー需要研究では電力ロードカーブ予測とその可制御性の評価、エネルギー制御ポテンシャルの推計が課題となる。また、小規模の需要を扱うため、系統大ではあまり問題にならない建物毎のエネルギー需要の分散も重要になる。

従って、分散協調型エネルギーマネジメントにおいては、

- ① エネルギー需要を電力ロードカーブの推計可能な時間粒度でエネルギー消費機器レベルに分解し
- ② 各々の機器稼働とサービス・快適性の関係を明らかにした上で
- ③ 可制御負荷(供給側の要請で制御可能な負荷)とそれ以外に分解し、前者について制御(サービスレベル調整, 時間シフト)によるエネルギー需要の変化とサービスの変化の関係を明らかにする必要がある。

このように、エネルギーマネジメントのためのエネルギー需要学では需要の分解と可制御負荷の分離が重要なテーマになる。特に再生可能エネルギー電源の出力変動との調整をおこなうためには、需要についても1時間より短いステップでの時間解像度の向上が必要となる。そのためには、例えば家庭においては、居住者の行動がエネルギー需要の発生・変化と密接な関係を持つことから、居住者行動の予測や機器操作の選好など「ひと」を中心とするアプローチ、すなわち国際的に関心を集めている Occupants' Behavior に関する研究が重要になってくることが整理された。

エネルギーマネジメントのための需要研究においては、エネルギー需要の取り扱いについて大きく分けて以下の2つのアプローチがある。

一つは「要素分解型」である。この手法は、エネルギー需要をさまざまなサービスを生み出すエネルギー消費機器と、それを操作する人間行動や制御装置などの要素から構成されるシステムとして表現し、同時にこのシステムが気象条件や機器の普及、人間の慣習の変化、DR信号など外部からの働きかけによって変化するメカニズムを明らかとし、エネルギー需要の発生構造を数理モデルとして表現しようとするアプローチである。図1に、筆者らが考えた家庭におけるエネルギー需要の発生構造モデルを示す。要素分解型では、この図の中の要素一つ一つをモデル化していくことになる。

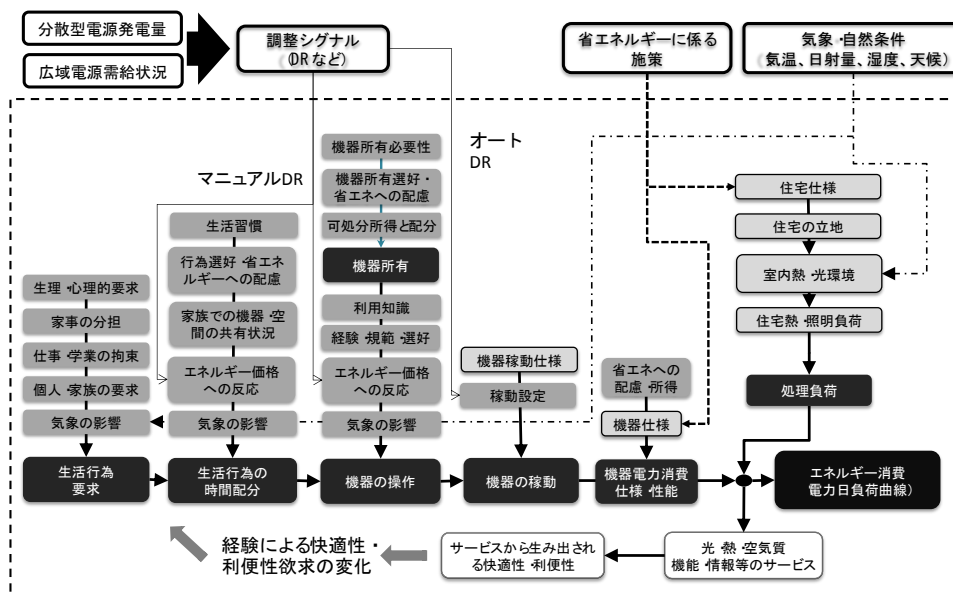


図1 エネルギー需要の発生メカニズム案 (住宅を例に)

前述のように、エネルギーマネジメントの基本的な考えにおいては需要を要素分解することが必要であることから、要素分解型アプローチが重要であると考えられる。このアプローチでは可制御負荷について機器毎のエネルギー消費量とサービスの質との関係を定量化することが可能であるので、自動デマンドレスポンス(Automated Demand Response)の計画には必須のアプローチとなる。

もう一つは「全体挙動型」である。このアプローチは、エネルギー需要を要素分解せずに、その全体が居住者の消費性向・行動性向等によって決まる複雑なシステムであると考え、その総体的な挙動をモデル化する。このアプローチの背景としては、エネルギー需要をできるだけ簡易に扱いたいというニーズもあるが、一方で、エネルギー需要の成り立ちは極めて複雑で、家庭部門における世帯毎の差異、業務部門における同じ用途の建物間の差異があることなども考慮すれば、§4(6)図1で示したような要素分解型でエネルギー需要を完全に再現することは不可能であるという仮説も存在するように思われる。すなわち、要素をあまり分解しすぎると、却ってエネルギー需要予測の精度が下がる可能性があるため、敢えてエネルギー需要をまとめてモデル化するアプローチであるといえる。このアプローチでは建物・家庭におけるエネルギー需要全体の挙動を対象とするので、需要の調整の内容を居住者の自主的な判断に委ねる手動デマンドレスポンス(Manual Demand Response)の評価にはむしろこちらの方が適している。

前述した 2 つのアプローチを踏まえて、エネルギー需要科学の具体的な研究方法として、「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 つの手法に分解し、それぞれについて整理した。

需要データの収集と分析について、エネルギー需要が簡単にはモデル化できない複雑なメカニズムから形成されている以上、実際の需要データをより数多く、より高い粒度で計測してその形成要因を分析することはエネルギー需要科学研究の基本であり、前述の要素分解型と全体挙動型の 2 つのアプローチの両方において必要とされ、2 つのアプローチをつなぐ役割を果たすものと位置づけた。

需要のモデル化は、要素分解型研究の典型であり、エネルギー需要の発生の成り立ちを各要素と要素間の関係に分解してシミュレーションモデルとして構築するものである。各要素のモデル化は基本的に関係するメカニズムの実測結果や統計情報をもとにおこなわれ、また実測データについてもシミュレーションを援用する事によってその形成構造が明らかになることがあるので、実測とシミュレーションは相補的な関係にあると言える。また、エネルギー需要を忠実に反映するモデルが完成できれば、それは § 4(6) 図 1 で示したようなエネルギー消費の形成構造が正しく理解できたことと同じこととなる。

介入、行動変容、需要の誘導メカニズムに関する研究は、エネルギー消費行動や環境配慮行動が変容する要因を分析したり、デマンドレスポンスなど行動変容を導くような介入をおこなう方法を検討する分野である。その方法論を図 2 に示すように整理した。

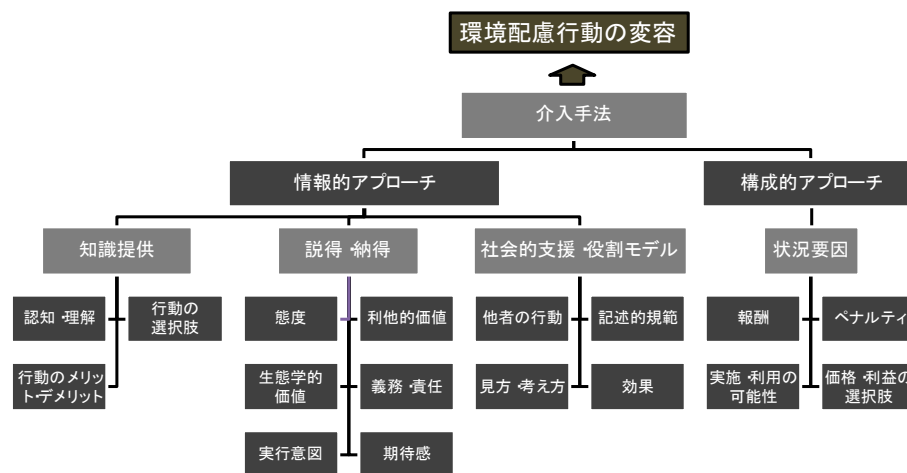


図 2 エネルギー消費行動や環境配慮行動を促す介入の方法論 (Steg, Vlek(2009)を基に作成)

以上の成果は、2016 年 11 月 21 日には東京大学生産技術研究所エネルギー工学連携センター第 26 回シンポジウム「エネルギー需要を科学する」において、下田(阪大)、日高(東工大)、山口(阪大)、岩船(東大)により紹介され、エネルギー・資源学会誌 2017 年 9 月号に「エネルギー需要科学の確立—エネルギーマネジメントにおける需要研究」と題して展望解説原稿として掲載されるとともに、2017 年 1 月 17 日には JST-CRDS の科学技術未来戦略ワークショップ「未来エネルギーネットワークと需要科学」に下田が招聘されて「エネルギーマネジメントにおける需要研究」と題して内容を発表した。JST-CRDS では 2017 年 3 月に「未来エネルギーネットワークの基盤技術とエネルギー需要科学～2050 年超の一般家庭でのエネルギー需給構造変化に向けて～」と題した戦略プロポーザルにとりまとめられ、2050 年の家庭のエネルギー需給におけるボトルネック課題の一つとして需要予測の問題が取り上げられるに至った。

今後は、領域アドバイザーからのアドバイスもあり、エネルギー・需要科学の考え方を海外に紹介していくレビュー論文等の執筆活動などを予定していくとともに、収集された各種エネルギー需要家データを整理し、データ・インタフェースのグループとも連携し、本来の活動も平行して実施していく予定である。

④当初計画では想定されていなかった新たな展開があった場合、その内容と展開状況と得られた成果

冒頭で述べたように、「エネルギー需要科学の確立」に関する調査研究活動自体が当初計画に無いものであり、その成果が論文として発表されるだけでなく、JST-CRDS により今後重点的に取り組むべき研究開発戦略として取りまとめられたことは非常に重要な成果であると考えている。



## (10) データ・インタフェースの開発 【東海大グループ】

## ①研究のねらい

ひまわり衛星推定太陽放射量 AMATERASS が提供する準リアルタイム日射量および太陽光発電データを、EMS に有効に利用できるようにするとともに、EMS の効率化に寄与するデータについて共有することで、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 EMS 研究の推進を後押しすることができる。データ・インタフェースクラウドにより、気象データの提供を本格稼働する。データ・インタフェースクラウドとしての機能として、(i) 準リアルタイム日射量推定値を含む AMATERASS サーバで生成される気象データの提供(ダウンロード機能)および (ii) 気象データおよび EMS で利用するデータの可視化・分析の 2 つを充実させる。

## ②研究実施方法

エネルギー需要科学サブグループに対するヒアリングをもとに、データの提供方法の改善に取り組んでいるが、この対話を継続して行き、日射量データの提供のみならず、チーム内で共有することができるデータについて、入手方法、保管方法、提供方法について検討を行う。そのために、データ共有システムを構築し、提供可能なサービスから随時提供を開始する。

データ・インタフェースをクラウド上に構築することで、サーバ攻撃に対する耐性をもたせ、計算機環境の効率的な利用についても検討するとともに、クラウドの機能としてオープンデータの入手などを API ベースで行う。

日射量の予測については、地球科学サブグループで衛星データ手法とモデル手法の両面で開発が行われている。この日射量の予測を太陽光発電量に変換して提供する予定である。提供方法については、エネルギー需要サブグループとのヒアリングにより優先順位を決めて実装する。

プラットフォーム機能として、特定の目的のためのデータの可視化や分析に対応する。すでに、WSC(World Solar Challenge)2015 では東海大学のソーラーカーチームに対して、レースコース近辺の日射及び気象情報を提供しており、WSC2017 でも同様の支援を行うことが決まっている。WSC2017 では太陽光発電量の実況値に加えて予測値についても初めて提供することを計画している。また、エネルギー需要科学において共有できるデータを提供するとともに、阪大グループの需要モデルが開発しているシミュレータを使って任意の地域に対するシミュレーションを行うことができる環境をクラウド内に構築する。クラウド環境であることから、シミュレーションが必要な際に CPU コアを増やすことができる。このように、目的に即したシミュレーションを行えるクラウドシステムに変更し、コストの削減をはかる。

## ③当初の研究計画(全体研究計画書)に対する現在の研究進捗状況(§ 2. と関連)と得られた成果

衛星日射量やモデルによる日射予測量などのデータについてデータの利活用を推進するために、Web インタフェースでのデータ提供について、Web アプリケーションを構築した。

エネルギー需要科学サブグループに対するヒアリングをもとに、データの提供方法の改善に取り組んでいるが、この対話を継続して行き、日射量データの提供のみならず、共有することができるデータについて、入手方法、保管方法、提供方法についてヒアリングをもとに検討を行い、データ共有システムを構築し、提供可能なサービスから随時提供を開始する。

H28 年度よりデータ・インタフェースをクラウド上に構築し、アーカイブの量や CPU コア数に対する課金などについて調査を行っている。クラウドも含め、データ・インタフェースとしてデータの提供のしやすさについて改善を行う。

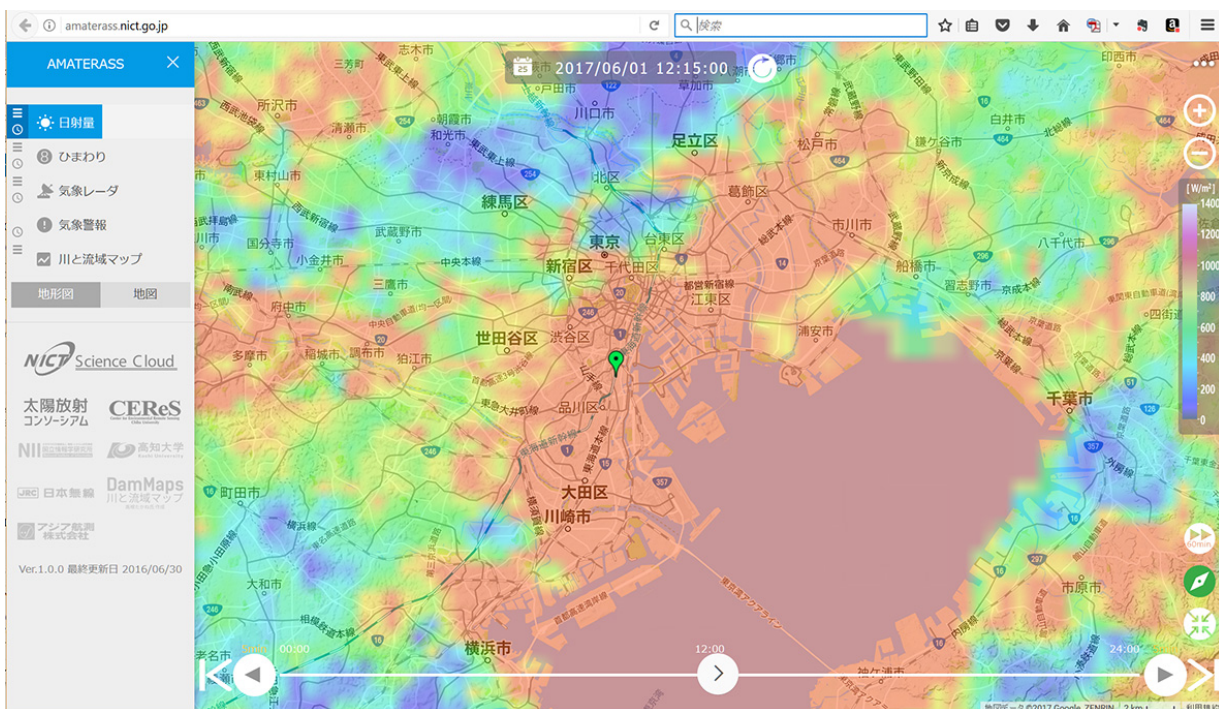
日射量予測の一般公開は気象業務法によって制限されているため、日射量の短時間予測を太陽光発電量に変換した値の提供方法について検討し、提供可能なものから提供を始める。提供方法としては、データの提供だけでなく、データ・インタフェースの機能として、予測値のグラフなど必要なものを提示する。この提供方法についても、エネルギー需要科学グループとのヒアリングにより優先順位を決めて実装する。

共有するデータについては、阪大グループの需要モデルによるシミュレーションについて、他の地域でのシミュレーションを行うのに必要なデータをクラウド内に用意し、シミュレーションが必要な際に CPU コアを増やしてシミュレーションを行えるクラウドシステムの構築を行う。更に、CREST 内でのデータ・インタフェースクラウド利用希望グループに対して、ユーザアカウントを発行して独自機能の開発を許す形でのプラットフォーム機能の提供を行う。

時期	データ・インタフェースクラウド	関連事項
H28 年度	・クラウド版データ・インタフェース(データダウンロード機能)構築	・エネルギー需要 SG のヒアリング
H29 年度前半 (～9 月)	クラウド版調整(VM、Storage 機能) WSC 2017 支援準備	・AMATERASS Web (NICT) による過去日射量の可視化実現
H29 年度後半 (～2018 年 3 月)	・WSC 2017 レース支援 ・Azure データ・インタフェースクラウド -太陽光発電量データ取得機能追加 -太陽光発電量予測値取得機能追加	・AMATERASS Web -データ取得機能追加(DI 機能利用) -太陽光発電量予測値 GIS 可視化
H30 年度	・Azure データ・インタフェースクラウド -データプラットフォーム機能追加検討 -エネルギー需要シミュレータ実装準備	・AMATERASS Web でのオープンデータの GIS 可視化 ・需要 SG と GIS 可視化に関する情報交換
H31 年度	・Azure データ・インタフェースクラウド -データプラットフォーム機能追加 -エネルギー需要シミュレータ稼働	・AMATERASS Web での需要表示も含めた EMS 情報の GIS 可視化 ・AMATERASS サーバとデータ・インタフェースクラウドの役割整理(サービス継続検討)

④当初計画では想定されていなかった新たな展開があった場合、その内容と展開状況と得られた成果

当初は、データ・インタフェースの機能として、アーカイブしているデータの中から日射量や発電量を地図上に可視化することを計画していたが、DIAS の成果物<sup>6</sup>である NICT Science Cloud 研究成果を利用し、日射量やひまわり画像(雲)の高精度な可視化を実現することができた(AMATERASS Web)。この日射量の可視化システムでは、日時の指定により過去の日射量を確認できる。気象情報なども追加表示可能となっており、人口密度など、EMS で利用され、日射量と関連して表示したいオープンデータについて追加が可能である。



日射量データ提供のための Web インタフェースと連携し、関心のある地域のデータを提供することが可能となる。更に、この可視化システムで発電量の予測値についても実装する。

<sup>6</sup> H28 年度「地球環境情報プラットフォーム構築推進プログラム基幹アプリケーション FS」

## § 5. 研究費の使用状況と今後の見込み

(現在までに執行した費目(物品費、人件費、旅費、その他)について、その概略(年度ごとに、どの費目を重点的に執行したか)を記載してください。また、今後、購入する高額な機器や雇用する研究員について、具体的な計画が決まっていればその概要を記載してください。)

### ① 現在までに執行した研究費の概要

<例:平成×年度は物品費を重点的に執行した。購入した〇〇という機器がたんばく質解析に寄与した。平成●年は人件費を中心に執行し、研究員として雇用した△△氏が研究項目■■について研究を行った。>

### ② 今後購入する物品、雇用する研究員等の計画

<例:次年度は結晶の構造解析を行うため□□という機器を購入予定。またその解析のため、研究員も 1 名雇用する予定である。>

## (1) 東海大グループ

### ① 現在までに執行した研究費の概要

年度を問わず、特定研究員(ポスドク研究員)と技術支援員の雇用を中心に執行した。H27~28 年度は渡邊武志氏を雇用して太陽放射の変動について研究を実施し、H29 年度は雇用した高松尚宏氏が電力システムとの分野横断研究に着手した。技術支援員3名は本研究に必要となる地上観測システムのメンテナンス等および研究全般におけるサポートを実施した。研究者らは、国際誌での 3 報の論文発表の他、CREST 国際ワークショップ、AGU 学会、IRS 学会等にて継続的に成果発表を行った。データ・インタフェースについても H28 年度に COMPSTAT 学会で成果を発表した。

物品等については、H27 年度は、衛星データ事前解析を行う<sup>テラスキャン</sup>TeraScanひまわり 8 号衛星高次処理パッケージ(H27 年度増額により研究加速)、衛星データを研究室へ格納するための RAID ユニット、データ提供システムのプロトタイプ用サーバ、日射変動の研究用サーバをそれぞれ調達した。H28 年度は、データ提供クラウドシステムの構築を執行した。また社会還元として、ひまわり 8 号画像閲覧ウェブサイトの整備を H27~28 年度に行った。

### ② 今後購入する物品、雇用する研究員等の計画

H29 年度下半期にはデータインタフェース・システム構築用の PC を購入する予定である。本 PC は長期の準リアルタイムデータ提供システムの構築に寄与する。EUMETSAT 会議や AGU 学会、IASC 学会において気象あるいはデータ・インタフェースの成果についての発表を行う予定である。H30 年度は、特定研究員と技術支援員の雇用を中心に執行する予定である。特定研究員は、太陽放射と制御の境界領域に関する研究に寄与する予定である。技術支援員は本研究に必要となる地上観測システムのメンテナンスや研究全般のサポートを継続する予定である。物品としては、東海大で構築した RAID システムの中核となるコントローラサーバを換装する計画である。これは前回の同サーバの調達から相応の年限が経過し、保証期間が満期になることに伴う処置である。学会発表としては JST が開催する国際ワークショップや制御系の学会での発表を予定している。H31 年度は、特定研究員と技術支援員の雇用を中心に執行する予定である。研究の最終年度に実施する予定の全体とりまとめ作業、新たな研究計画の策定、研究論文の執筆等を実施する予定である。最終年度は研究の取りまとめに必要なハードディスク等の少額物品を幾つか調達する予定である。学会発表としては、JST が開催する国際ワークショップ、AGU 等の国内外での学会発表、制御系学会での発表を計画する。

## (2) JAXA・東大グループ

### ① 現在までに執行した研究費の概要

H27 年度は研究員 1 名、技術補佐員 2 名を雇用して本研究課題にあたった。基盤整備として衛星データ準リアルタイム処理用の計算機と統計処理を行うためのデータアーカイバの整備を行った。その他は学会/ワークショップ参加費用(IUGG2015,AMS,JST-NSF-DFG-RCN ワークショップ)及び研究打ち合わせに関する交通費等、そして所属研究機関の異動に伴いデスクトップパソコン等の購入を行っている。H28 年度は研究員 2 名、技術補佐員 1 名で本研究課題にあたった。基盤整備として日射量推定アルゴリズム開発用計算機の整備を行い、データアーカイバの整備も引き続き行った。その他は学会/ワークショップ参加費用(日本気象学会、JpGU、AGU、JST-NSF-DFG-RCN ワークショップ)及び研究打ち合わせに関する交通費等となっている。H29 年度は研究員 1 名(補助的に 4-7 月まで+1 名)、技術補佐員 1.5 名で本研究課題にあたって



いる。基盤整備として新しい日射量算定アルゴリズム開発用計算機とデータアーカイバを購入する準備を進めている。また、学会参加手続きも進めている(AGU)。

② 今後購入する物品、雇用する研究員等の計画

**H30 年度以降**は研究員 1 名、技術補佐員 2 名程度の体制で本研究課題にあたる予定である。また、新しい放射計算ソルバによる日射量推定アルゴリズムの高速化/高精度化が見込まれるため計算サーバの補充を予定している。

(3) 千葉大グループ

① 現在までに執行した研究費の概要

**H27 年度**は人件費を重点的に執行し、特任助教として雇用した Pradeep Khatri 氏が衛星/地上観測による全天日射量やエアロゾルの等に関わる研究を行った。**H28 年度**も人件費を重点的に執行し、特任助教として雇用した Alessandro Damiani 氏が衛星/地上観測による全天日射量やエアロゾル等に関わる研究を行った。

② 今後購入する物品、雇用する研究員等の計画

**H30 年度以降**も人件費を重点的に執行し、衛星/地上観測による全天日射量やエアロゾル等に関わる研究を進め、成果を論文等で公開する予定である。

(4) 阪大グループ

① 現在までに執行した研究費の概要

**H27 年度**はその他の費目を重点的に執行した。エネルギー需要モデルの改修(研究要素を伴わない外注)により計算条件の自由度が高まり、居住者行動の多様性を考慮したシミュレーションが可能となった。**H28 年度**は物品費を重点的に執行した。計算用サーバの更新により計算時間が削減され、エネルギー需要推計の計算スケールを国単位へと拡張することができた。

② 今後購入する物品、雇用する研究員等の計画

**H30 年度以降**も松岡特任助教(住宅部門のエネルギー需要を担当)の雇用を継続する予定である。また、エネルギー需要予測モデルに実装するための改修(研究要素を伴わない外注)を実施する予定であり、居住者の生活行為と機器操作の関係性のモデルへの実装、EnergyPlus のバージョンアップに対応するためのモデル改修を計画している。

(5) 東大生研グループ

① 現在までに執行した研究費の概要

**H27 年度**は、HEMS データ収集のために、HEMS メーカーから保有データを大規模に購入するとともに、HEMS 設置世帯から HEMS データを収集して、調査協力のための謝礼を支払った。また、研究員として雇用した八木田克英氏が、HEMS データの収集および HEMS やデマンドレスポンスに関する消費者受容性に関する研究を行った。**H28 年度**は、前年度に引き続き HEMS 設置世帯より HEMS データを収集して、調査協力のための謝礼を支払った。また HEMS データ収集のための協力世帯への対応や、世帯情報に関するアンケート調査等の作業として、技術補佐員 2 名を雇用するとともに、研究員として雇用した八木田克英氏が、前年度に引き続き HEMS データの精査や、デマンドレスポンスに関する消費者受容性に関する研究を行った。またデマンドレスポンスの賦存量を定量化するためのパラメータ取得のために、消費者のエネルギー消費行動に関するインターネット調査を実施のために予算執行した。

② 今後購入する物品、雇用する研究員等の計画

今後は、**H28 年度**までに収集した HEMS データの継続的な収集のために、協力世帯への謝礼、データ収集作業のための技術補佐員の雇用、データ分析のための研究員の雇用を計画している。また **H28 年度**までに、制御可能なヒートポンプ給湯機を導入予定の約 5000 世帯規模のデマンドレスポンス実証実験のためのフィールドを確保することができたため、このフィールドにおける DR 実証実験に向けた費用として、主に協力世帯への謝礼や、調査実施のための研究員の雇用、旅費などを計画している。



(6) 東工大グループ

① 現在までに執行した研究費の概要

H27 年度、28 年度は社会実験のデータ収集とそのシステム構築の外注費に200万円、研究員の雇用の為に500万円を主に使った。大がかりな機器などの購入はなかった。

② 今後購入する物品、雇用する研究員等の計画

今後は、社会実験のデータ収集とそのシステム構築の外注費に250万円、研究員の雇用の為に500万円を(年間)使う予定である。

## § 6. 成果発表等

## (6) 成果展開事例

## ① 実用化に向けての展開

《CREST の成果として得られた成果が、企業との共同開発、特許実施許諾、ノウハウ供与契約、サンプル提供等、技術移転や実用化に向けた展開、あるいはJSTや NEDO などの実用化プログラムに展開しましたら、記載例を参考にご記入ください。実施に支障をきたす恐れのあるものは含めなくて構いません。》

## 記載例

- 成果として出てきた特願〇〇-〇〇について、民間企業に向けて実施権許諾を2件行い、2件交渉中。
  - JST「A-STEP」事業に採択され、現在実施中 課題名「  
」(H22～24)
  - 開発したプログラム「  
」について、研究室HP(URL;  
)にて公開中。
  - 開発したナノ材料作成技術について、(株)〇〇と共同研究中
  - 本研究で得られた〇〇技術について、民間企業1社(守秘義務有り)と共同研究中。
- NPO 法人太陽放射コンソーシアムより AMATERASS データセットを会員ユーザに提供。
  - AMATERASS データセットのダウンロード数が2千4百万ファイルを突破(24933710: 2017年8月23日)。
  - NICTより AMATERASS Web の試験公開開始(<http://amaterass.nict.go.jp/>)PC、携帯等で閲覧可能。
  - AMATERASS を日射入力とし、陸面過程・作物成長モデルをカップリングさせた形で駆動させた研究を H25-H27 年度に実施(食糧安全保障に向けた衛星入力を活用した環太平洋域での広域推定および短期予測の試み;文科省宇宙利用促進調整委託費;A 評価)。
  - AMATERASS の全球展開(世界展開)に向けたフィジビリティ研究を H28 年度に実施(静止気象衛星群より導出された太陽放射・太陽光発電量推定の世界展開;文部科学省地球環境情報プラットフォーム構築推進プログラム基幹アプリケーション FS)
  - 建設会社と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のシミュレーション予測に関する受託研究を実施中(H28～)
  - 住宅コミュニティを対象とするエネルギー需要の分析について、トヨタ自動車(株)と共同研究を実施(H27～28)
  - エネルギー需要による世帯特性推計方法の確立について、大阪ガス(株)と共同研究を実施(H27～28)
  - 給湯器実測データに基づく世帯別給湯需要の分析について、(株)デンソーと共同研究を実施(H28)

## ② 社会還元的な展開活動

《CREST の成果で、実用化にはつながらないが社会的に役立っている活動をお書き下さい》

## 記載例

- 得られた成果は、国際的な報告書〇〇〇に用いられている。
  - 本研究成果を元に、〇〇という提言を行った。
  - 得られた成果××について、〇〇という展示会に出展し、観客〇〇名を集めた。
  - 発展途上国に対し、得られた成果〇〇を提供した。
  - 本研究成果をインターネット(URL;  
)で公開し、一般に情報提供している。
- 東大生研グループの論文が工学的に注目すべき研究結果として、カナダのリサーチ会社 HP に掲載。  
<https://advanceseng.com/civil-engineering/high-resolution-determinant-analysis-japanese-residential-electricity-consumption-home-energy-management-system-data/>
  - エネルギー需要科学サブグループでの成果を、「エネルギー需要を科学するーエネルギーマネジメント時代の家庭用エネルギー需要を考えるー」というタイトルで、東京大学エネルギー工学連携研究センターと共催したシンポジウムにて紹介し、約 160 名の参加者を集めた。  
<http://www.iwafunelab.iis.u-tokyo.ac.jp/html/crest.html>

## § 7 研究期間中の活動

### 7.1 若手研究者のキャリアパス支援

(研究費で雇用する若手の博士研究員が任期終了後に国内外の多様なキャリアパスを確保できるように支援する取り組みがあれば記載して下さい。)

「文部科学省の公的研究費により雇用される若手の博士研究員の多様なキャリアパスの支援に関する基本方針」(平成 23 年 12 月 20 日 科学技術・学術審議会人材委員会)の趣旨をふまえ、研究代表者および主たる共同研究者は、研究費で雇用する若手の博士研究員を対象に、国内外の多様なキャリアパスの確保に向けた支援に積極的に取り組むことを推奨しています。具体的には以下のような取り組み例があります。

- ① 若手の博士研究員と任期終了後のキャリアパスについて意思疎通を図り、企業への就職を含めた多様なキャリアパスに挑戦できるように配慮する。
- ② 若手の博士研究員の任期終了後の多様なキャリアパスを確保するために、例えば、セミナーやインターンシップの参加を推奨することや、異分野も含めた研究活動への主体的な参加を推奨するなど、若手の博士研究員自らが行う活動を支援する。
- ③ 若手の博士研究員の進路状況を、機関と協力して把握する。

#### 【東海大グループ】

本研究費により、渡邊武志を 2013 年 4 月から 2017 年 3 月の間、特定研究員(博士研究員)として雇用した。また、2017 年 4 月からは高松尚宏を特定研究員として雇用している。特定研究員には、自らが行うべき研究項目の大目標を明確に意識させる一方で、実際の研究の実施については自主性を尊重している。特任研究員には、特に研究論文の執筆と国際学会での発表を重点項目として意識させ、将来のキャリアパスにつながるように留意している。国内での研究会等への参加も積極的に支援し、既に身につけた研究能力や基盤を越えた研究力を付けさせるように意識している。このような支援を行った結果、渡邊武志については、東海大学研究員としてのキャリアの後に電力中央研究所の職に結びついている。

#### 【阪大グループ】

本研究費により、松岡綾子を 2014 年 4 月より特任研究員(2015 年 9 月までは博士後期課程学生、2015 年 10 月よりフルタイムの博士研究員)として雇用しているが、将来のキャリアパスを支援するために教育経験を積ませることを意図し、2016 年 4 月からは敢えてエフォート 100%の特任研究員とせず、10%分の雇用費を研究室の独自資金より捻出して CREST エフォート 90%の特任助教として雇用し、教育や CREST 以外の研究に参画できるよう配慮した。これにより、学生演習の指導や学生の研究指導の担当、本課題にも関係した産業界との共同研究(新規スマートコミュニティの計画を支援するエネルギーシミュレーション研究)への参加が可能になっている。本学の規定では学位取得後 3 年を経れば特任助教による講義の担当も可能となるので、本プロジェクト遂行の支障にならない範囲で教育経験を更に積んでもらうことを計画している。

## CREST の制度、JST の運営に対する意見・要望

(自由に記載して下さい。)

JST、CREST は、研究者の自主的な研究活動を尊重しつつ領域目標に沿った研究を行うことができるため、研究を実施しやすい研究枠組みであるといえる。また、必要かつ正当な研究費の支出をスムーズに行うことができるため、科研費などと同様に使い易い研究費のひとつであるといえる。この仕組みをさらにブラッシュアップさせることにより、我が国の科学技術がさらに発展することを願う。

中島最強チームは地球科学サブグループ(SG)、エネルギー需要科学 SG、データ・インタフェース SG の3グループが有機的に結びついて研究を進めているところに特徴がある。これらの SG のうち、データ・インタフェース SG の立ち位置はやや特殊で、地球科学 SG とエネルギー需要科学 SG の各々の研究進捗と歩調を合わせながら研究内容を柔軟に調整していく必要がある。この度の中間評価のタイミングにおいて、データ・インタフェース SG の研究進捗の見通しを改めて吟味した結果、本 SG の活動を補強する必要があるようになった。具体的には、本報告書の § 4(1)③にも記したように、情報通信研究機構(NICT)の村田健史氏を新メンバーに迎えたいと考えている。村田氏は、高速ネットワークプロトコルの開発や各種データの GIS 可視化などの基盤技術に長けていることから、約半年前から様々な場面で助言を受けてきており(サブグループミーティングを4回開催)、現在では、データ・インタフェース SG の実施に不可欠な人材となりつつある。現在、同 SG の H30 年度、H31 年度の研究項目の具体化を行っているところであるが、予算増強を JST にお願いしたいと考えている。

## [ご自由にお書きください]

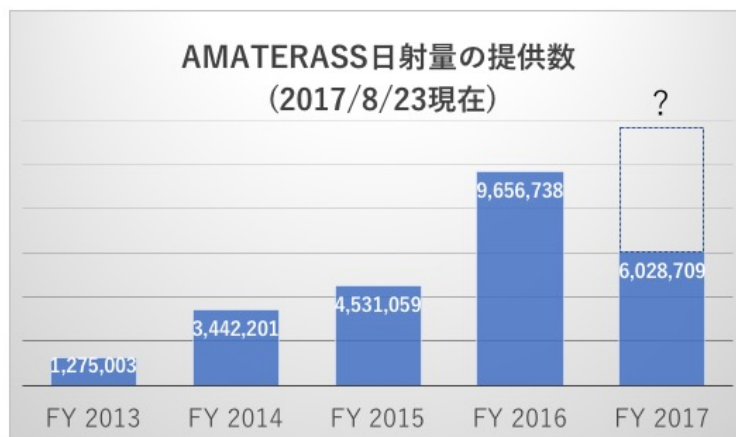
(研究の達成度や得られた成果の意義等の自己評価、今後の研究の展開、その他自由に記入してください。)

第二期 CREST は H27 年 4 月から 2 年半が経過した。中島最強チームからは多くの研究成果が得られ、相当数の論文発表や学会発表を行ってきたところであり、当初想定していた以上の達成度となっている。これまでの研究進捗は順調と考えて良い。このような自己評価に至った根拠を以下に述べる。

特に特筆すべきは地球科学における「ひまわり 8 号」を用いた AMATERASS 日射データである。本データのダウンロード数が H25 年度以降現在までに 2 千 4 百万ファイルを突破し、しかもダウンロード数は年々増大している(図参照)。このように AMATERASS 日射データが本業界の標準データになりつつある点は評価ポイントのひとつとなると考えている。また、電力供給、需要家サイドから特に要望が強かったにもかかわらず当初は困難な研究項目の一つと考えていた日射量の近未来予測については、衛星観測、モデル開発の両面から進展した。予測データの提供に至る道筋が付いた点は大きく評価出来ると考えている。加えて、不均質な雲場による太陽放射の反射、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の開発にも成功した点も強調したい。需要科学の研究進捗も目を見張るものがある。電力ロードカーブを再現・予測するために進めている居住者の生活行為生成モデルの開発が進捗し、実際のロードカーブの再現に成功した点は評価のポイントとなる。また、HEMS データベースに基づく研究により、家庭内の需要構造の解明に至る道筋を付けることが出来たことも特筆すべき事項である。さらに、「実験室という特殊環境で明らかにされた事実はそのまま実世界に通用するとは限らない(R. バーカー)」という考えに着想を得て、本チームの需要科学サブグループでは対馬実証サイトを整備している。これは他の最強チームに無い大きな特徴であり、今後の進展が期待出来る分野である。

他チームとの連携も実施した。井村最強チーム、林最強チームには地球科学データ、需要データの提供をおこなっている。また鈴木最強チームとはエネルギー需要 SG が連携を行っている。海外との共同研究も順調に推

移している。地球科学 SG は、NASA/AERONET、欧州/SKYNET、アジア/SKYNET グループとの研究交流を継続し高精度な地球科学データの収集に努めている。また、NASA エイムズ研究所に AMATERASS 日射システムを移植する計画が進んでいる。これは AMATERASS 日射量システムの世界展開戦略の一環である。中国科学院とは大気物理学研究所およびリモートセンシング & デジタルアース研究所との共同研究が進んでいる。アジア主要国である日本と中国では EMS 研究の進展が必要とされており、気象等データ解析の共同研究が必要である。エネルギー需要科学 SG は、英ロンドン・ラフバラー研究所所属の研究者、米クレムソン大学、ノルウェーの SINTEF との研究交流を図った。後半戦ではさらなる共同研究が望まれる。なお、今後はデータ・インタフェースが重要となってくる。諸研究から得られた膨大な地球科学データ、需要データの提供、共有、フィードバックのためには高性能なデータインタフェース・システムが不可欠となる。そのとき、年々巧妙になっているサーバ攻撃を避ける工夫も必要となる。また、研究成果の一般公開のために GIS 可視化システムの整備も不可欠である。そのため、後半戦ではデータ・インタフェース SG 体制の増強を図る予定である。



図：AMATERASS 日射量データのファイル提供数