

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

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)

## § 1 研究実施の概要(公開)

### (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/m<sup>2</sup> 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、自分の家庭と似たような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、など電力消費への意識形成が行動変容に結びつくこと等が分かった。なお、電力の使用・契約・設備投資の3行動を対象とした研究は類似事例がない。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。

## (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CO<sub>2</sub>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名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 >

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.

Iwafune Y., H. Sakakibara, 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.

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.

## § 2. 研究構想(および構想計画に対する達成状況)(非公開)

### (1) 当初の研究構想

中島最強チームは、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の3グループに基本機能を分割し、それぞれのサブグループが有する研究テーマを追求すると共に、サブグループ毎の交流を積極的に図ることで、地球科学(気象など)とエネルギー需要の融合を目指すチーム運営を目標とした。研究開始時に目指した地球科学サブグループの最終目標は、「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」、エネルギー需要科学サブグループの最終目標は、「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」、データインタフェースサブグループの最終目標は、「中島最強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」である。

### (2) 新たに追加・修正など変更した研究構想

#### ① 中間評価で受けた指摘や助言、それを踏まえて対応した結果について

中間評価においては、地球科学サブグループの取り組み、エネルギー需要サブグループの取り組みについては一定の高評価を頂いた。また、「需要科学の確立」という学術的に新しい概念構築に取り組んでいることの意義の高さ、エネルギー需要モデルの開発には非常に期待が高いこと、および日射量予測の技術確立に関しては、産業界にとって喫緊の課題であるため、継続して研究を推進して頂きたい、と主旨のコメントがあった。一方で、地球科学データ、エネルギー需要データを中心としたデータインタフェースに関しては、当初の計画より遅延しているため、今後、他チームとの連携を更に強化し、データ活用の効用を示す必要がある、との指摘を頂いた。中間評価以降、前出のコメントと指摘に留意しながらの研究を実施した結果、(1)衛星データを用いた日射量予測の技術を確立し、(2)他の内外研究機関が追随できないほど高精度な最終需要モデルの開発に成功した。さらにデータインタフェース研究に関しては、(3)中間評価での指摘に留意した研究を実施するとともに情報通信研究機構(NICT)を新グループに迎えて、気象・需要データの可視化による気象と需要の融合研究を加速させた。

#### ② 中間報告書の「今後の進め方、および研究成果の見通し」に記載した事項に沿って、研究を進めた結果について

(1) 地球科学サブグループでは、衛星観測において実施する事項として、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を挙げた。中間評価以降、エアロゾルについては MWMP 法によるエアロゾル推定手法が開発された。氷雲の取扱いについては、ボロノイ粒子を想定した氷雲解析用のデータベースが完成した。日射量の予測については、衛星観測に基づく大気移動ベクトル手法による短時間予測手法が開発され、ソーラーカーレースにおいてデータ提供が行われた。本手法は更に発展している。雲解像モデルによる予測手法についても順調な進展があり、中間評価以降、雲水量および水平風の同化の効果が定量化された。気象データの変動解析も中間評価以降に進展した。H30 年度には、日射変動を対象とした時空間的な非同期性の定量化を行うとともに、屋根形状の統計データを反映した PV 日射量解析ツールの開発を行った。研究成果のスピノフとして本 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、広く

社会に対してデータ提供を行っている。

- (2) エネルギー需要科学サブグループでは、阪大グループは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、さらに各種 EMS システム設計のための基盤技術を創出することを目指していた。中間評価以降、エネルギー需要モデルの開発、家庭用エネルギー最終需要モデルの開発が順調に進捗し、それぞれ成果発表が行われている。東大生研グループは、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った。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予定であった。中間評価以降、需要データの成果と共有方法の検討が進行している。また、HEMS による DR ポテンシャルの抽出研究が進行し、宮古島での調査では 1623 世帯のアンケート調査分析から、需要の特徴を抽出することができた。東工大グループでは、「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こととした。中間評価以降、スマートメータを設置した調査対象世帯数を 50 世帯から 100 世帯に増加させると共に、再生可能エネルギーの知識実験のための画面設計を行い、システム追加開発を行った。
- (3) データインタフェースサブグループでは、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こととした。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 つを充実することとした。中間評価以降、上記のシステムが稼働している。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ことを予定していた。中間評価以降、これらのシステムが実装された。さらに、データインタフェースの機能を拡充するために、中間評価以降、情報通信研究機構(NICT)を新グループに迎え、気象と需要データの可視化を実現する GIS システムの開発を行い、EMS データの提供の可能性を広げることに成功した。加えて日射量と需要データを町丁目単位から市町村単位、そして都道府県単位とシームレスに可視化するシステムの開発を行い、実現した。

### ③ 上記①②以外で生まれた新たな展開について

中間評価において、本チームの真骨頂である気象データと需要データの融合活用について課題があることが判明した。そこで、データプラットフォームの研究で実績のある情報通信研究機構(NICT)新たなグループとして本チームに迎えて研究を加速することとした。NICT グループの担当は、気象・需要データの可視化(日射のみならず、湿度、風向、太陽光発電量も含む)、および気象・需要データのスケーラブル可視化表示の実現。そして EMS プラットフォームとして、EMS に関連するデータを時空間において連動して可視化し、チーム間でデータ分析、解析を実現するための協調分散型プラットフォームの設計と試験的実装を行うことである。H30 年度は基本設計と試作を実施し、R01 年度にはプラットフォームを実装し、中島チームのみならず他チームによる電力需要基礎データの可視化を行う予定となっている(新たに加わったグループであるため 2019 年 9 月現在、研究は精力的に進行中)。

本チーム発足後、合田アドバイザーの助言を受け、これまであまり明確にされてこなかった学術分野としての「エネルギー需要科学」の目的と枠組み、主要な研究手段について需要科学サブグループの 3 大学グループで検討をおこない、東京大学でのシンポジウム等を通じて成果をエネルギー・資源学会誌に総説論文として投稿・掲載された。その後、国際的な展開を目指し、米国ローレンス・バークレー国立研究所のアランマイヤー博士との共同で、ACEEE と ECEEE という米欧の 2 つの国際会議でセッションを開催し、更にはオーストリアの国際機関

IIASAと日本のRITEが共催したディスカッションワークショップ Rethinking Energy Demandで下田が講演をおこない、高い評価を得た。現在成果をレビュー論文として国際誌に投稿中である。

(3)達成状況

黒線が当初計画、赤線が実際の状況

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



#### (4) 研究の今後の展開について

(研究のさらなる展開、成果の今後の展開見込、想定される社会・経済への波及効果や科学技術イノベーションへの貢献等について、1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。特に、JSTの他制度につながると思われるものがあれば明示的に書きください。(http://www.jst.go.jp/quick\_search/idx\_funding\_2.html)  
なお、当面は基礎研究で実用化にはつながりそうもないので現段階では案内は不要など、情報共有されては困る案件がありましたら、＜情報共有不可なもの＞の方にご記入下さい。)

9月現在、記述中。

需要グループ3 大学の連携により、新しい学術分野としてのエネルギー需要科学の概念を、国内学会誌での発表を皮切りに、欧米での省エネルギー分野の著名な会議でのセッション、国内外の重要な会議を通じて発表し、国際誌にレビュー論文を投稿するに至った。

＜今後、JST他制度、NEDOなどの支援機関間で情報共有して良いもの＞

- 本研究で開発している都市エネルギー最終需要モデル(家庭部門用については最近 TREES と命名)は、CREST プロジェクトを通じて精度向上が図られ、街区、都市、国土全てのエリアにおいて極めて高い再現性能を有している。特に電力ロードカーブの予測性能については、スマートメータデータとの検証が行われたことで精度が大きく向上し、近年開催された Building Simulation 国際会議でも、本モデルと同等の再現性能を有するモデルは見いだすことができなかった。今後も、自治体や国レベルのエネルギー・カーボンマネジメント、再生可能エネルギー電源大量普及時の発電・送配電のグリッドマネジメントに大いに資するモデルであると自負している。

＜JST内他部署や他の研究支援機関と情報共有不可なもの＞

なし

### § 3 研究実施体制(公開)

#### (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・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

(国立研究開発法人情報通信研究機構・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】

| 研究先・担当グループ・開始時期   | 海外共同研究の内容  |
|---|--|
| 米国ローレンス・バークレー国立研究所の研究者<br>(需要科学サブG)<br>H29～                 | H30 年度に米国で開催された建築の省エネルギーに関する会議 (ACEEE 2018 Summer Study on Energy Efficiency in Buildings) および R1 年度にヨーロッパで開催された同様の会議(CEEE2019 Summer Study on Energy Efficiency)において、ローレンス・バークレー国立研究所の研究者と共同で、需要科学に関するインフォーマルミーティングを開催。3 グループによって口頭発表した。共同研究内容を協議している。協議のために、東工大グループの論文にアドバイスをいただくことで、連携可能性を模索している。                     |
| Geneva 大学所属研究者<br>(阪大G)<br>H28～                             | 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して共同研究中。支援により H28 年度は山口准教授を海外派遣、H29 年度は Dr. Selin Yilmaz を招聘した。   |
| Tennessee 大学所属研究者<br>(阪大 G)<br>H27～                         | H29 年度までに開発したエネルギー需要モデルの応用として、洗濯乾燥機を用いたデマンドレスポンスによる電力需要調整力を推計した。H30 年度は Dr. Chien-fei Chen を招聘し共同研究を進め、住宅における可制御機器を使用したデマンドレスポンスへの参加についてオンライン調査を行った。   |
| NASA, エイムズ研究所<br>(JAXA-東大G)<br>H28～                         | 支援により H29・H30 年度に竹中研究員を海外派遣し、以下の成果をあげた。1. NASA エイムズ研究所がアーカイブしている GOES-16・17 号データをリアルタイムで共有できる体制を整えた。また、ひまわり 8, 9 号のデータを NASA 側に提供し相互に静止衛星のデータを共有し研究できる体制を整えた。2. CREST にて開発された解析アルゴリズムの移植作業を行い、GOES-16 及び 17 号から日射量プロダクトを解析するための基盤を整えた。3. H29 年度からひまわり 8 号及び GOES-16 データを用いた共同研究を開始したことから、AGU2017, 2018 で計 6 件の共著発表が行われた。 |
| 中国科学院 (CAS) , 大気物理学研究所 (IAP)<br>(JAXA-東大G)<br>H27～          | 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して、モデルによるエアロゾル分布の計算値が衛星結果に近づいたことを確認した。  |
| 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)<br>(東海大G)<br>H28～ | H28 年度に研究と教育に関する共同研究協定を締結、H30 年度に契約更新を行った。H30 年度には RADI と東海大グループ情報技術センターの合同で、中国においてワークショップ (International Workshop on Cloud Remote Sensing and Renewal Energy Monitoring, 2018) を開催した。リモートセンシングに関して中国最大の研究所と協力体制を作ることで、チベット高原の雲量(H29 年度)や氷雲解析の共同研究をはじめとした一層の相互交流が期待されている。  |
| NASA の地上観測システム AERONET (世界展開)<br>(千葉大G)<br>H27～             | 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。共同研究、共著論文執筆を進めており、H30年度は2報の論文公開につながった。  |
| 地上観測システム<br>SKYNETの欧州グループ<br>(イタリア他)<br>(千葉大G)<br>H27～ | 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おり、H30年度は2報の論文公開(同上)につながった。   |
| 地上観測システム<br>SKYNETの他アジアグループ<br>(韓国他)<br>(千葉大G)<br>H27～ | 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。   |
| WMO,GAW<br>(中島映至教授,千葉大G)<br>H27～H29                    | 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。<br>H29年度内に主要な機関とのMOU締結は完了した。  |
| アジア・オセアニアの<br>気象衛星運用機関・気象<br>水文機関担当者<br>(東海大G)<br>H27～ | アジア・オセアニア気象衛星利用者会議に出席し、情報交換を目的とした国際交流を行うとともに、本研究課題の成果を発表した。<br>H29年度は「地球科学情報の可用性向上がEMSにおいて果たす役割」について報告し(協力:産総研 大関氏)、欧州の参加者の他、ひまわり8号・9号相当の衛星を2018年に打上げ予定である韓国から、エネルギー関係機関の参加者が特に強い関心を示した。<br>H30年度はインドネシア、韓国、香港の気象局が関心を示した。特にインドネシアは太陽エネルギーの利用促進について赤道直下という好条件を生かすことに強い関心を持っており、日射量分布の短時間予測の精度向上が課題とのこと。<br>このような活動を継続することにより、特にアジア・オセアニア方面における国際展開への足がかりを得られ、これらの国々が抱えるニーズや課題が本課題テーマと共通することが改めて確認された。 |

#### 【国内での連携】

| 連携先・担当グループ・開始時期                    | 国内での連携内容   |
|------------------------------------|--|
| CREST 井村最強チーム<br>(地球科学サブG)<br>H27～ | 当チームが計算する準リアルタイム日射量を提供し、井村チームの研究成果に貢献している。<br>H29年度日本気象学会秋季大会において、共同で専門分科会「再生可能エネルギーなどの気象観測・予測情報の気象ビジネスへの利活用」を開催。計16報の口頭発表が行われた。 |
| CREST 井村最強チーム<br>(東大生研G)<br>H28～   | 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。(H30年度は都合により欠席)  |
| CREST 林最強チーム<br>(中島最強T)<br>H27～    | 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。H30年度は当チーム需要科学サブGが開発したモデルを組み合わせ、配電網の計画を行うことができる評価基盤プラットフォームを共同開発した。                          |
| CREST 鈴木最強チーム                      | 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   |

|  |   |
|--|---|
| (阪大G)<br>H27～                                  | 究。H30 年度は名古屋大学から電気自動車の充放電最適化モデルの提供を受け、統合的検討を行った。  |
| CREST 井村最強チーム<br>鈴木秀幸教授<br>(中島最強T,阪大G)<br>H27～ | H29 年度は、電力需要予測に関してチーム全体および阪大 G と情報交換を行い、予測手法の共同検討を行った。H30 年度は、発電量・需用量予測等に関してチーム全体との情報交換を行った。  |
| 林・内田最強チームの<br>需要研究者<br>(需要科学サブ G)<br>H30～      | 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、東大研究者(林チーム)、京大研究者(内田チーム)と議論中。<br>H30 年度電気学会全国大会にてシンポジウム「エネルギー需要を科学する」を開催(合田 AD 御仲介)。林チーム研究者と共同し、5本の口頭発表が行われた。 |

### 【産業界との交流】

| 交流先・担当グループ・開始時期                      | 産業界との交流内容  |
|--------------------------------------|--|
| 日産自動車株式会社<br>H30.1～R1.5              | 日産自動車株式会社と共同研究契約を締結し、EV 実データの提供を受けた。そして充電行動モデルを構築するとともに、電力系統実データを用いて系統シミュレーション構築を行い、EV を電力系統との電力授受に用いた充放電ビジネスの経済的価値の定量化を行った。   |
| 株式会社 ネクステムズ<br>H30.10～H31.2          | 沖縄県宮古島市にて、アグリゲーターを努める株式会社ネクステムズより、太陽光発電やエコキュート、家庭用蓄電池を第三者所有で普及させ、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に関する受託研究を実施した。   |
| 企業や他調査機関の需要科学研究者ら<br>(東大生研G)<br>H29～ | エネルギー・資源学会が主催するエネルギーシステム・経済・環境コンファレンスおよびエネルギー・資源学会研究発表会にて、「2050 年に向けた日本のエネルギー需給検討」(H29.6, H30.1)、「2050 年のエネルギー需給」(H30.6)、「2050 年のエネルギー需要に関する JST-CRDS/JSER」(H31.1)という企画セッションをそれぞれ開催。企業や他調査機関の研究者らと協働し、H29 年度は計 16 報、H30 年度は計 8 報の口頭発表が行われるとともに、学会参加者と活発な議論が行われた。 |
| 東京電力<br>(東海大, JAXA-東大G)<br>H28～      | 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<br>チームメンバーからは、最新の気象学にもとづく再生可能エネルギーの可用性についての情報提供を行い、東京電力関係者からは近年の再生可能エネルギーの増大がもたらす問題点についての情報を提供して頂いた。後述の中部電力との交流とともに、EMS にとって重要な情報交流であると考えている。H30 年度は 4 月と 6 月に会合を行った。  |
| 中部電力<br>(JAXA-東大, 東海大G)<br>H29       | 中部電力関係者と電力および気象情報についての情報共有を実施した。チームメンバーからは最新の気象学にもとづく再生可能エネルギーの可用性についての情報提供を行い、中部電力関係者からは近年の再生可能エネルギーの増大がもたらす問題点についての情報を提供して頂いた。   |
| 電力会社<br>(阪大G)<br>R1～                 | 共同研究として住宅のスマートメータデータの提供を受ける予定。   |

|   |  |
|---|--|
| <p>NPO 法人「太陽放射コンソーシアム」<br/>(地球科学サブG)<br/>H25～</p> | <p>JST, CREST のスピノフとして 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。2019 年 3 月現在、企業会員 7 社、非営利利用会員 24 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、H30 年度に 1,370 万件、合計 4,580 万件（千葉大内のダウンロードを除く）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。</p> |
| <p>建設会社<br/>(阪大G)<br/>H28～</p>                    | <p>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。H29 年度以降は科研費にて研究を続行中。</p>   |
| <p>九州電力<br/>(東工大G)<br/>H27～</p>                   | <p>九州電力との研究協力。<br/>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。<br/>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。</p>   |
| <p>長崎県・対馬市・長崎環境コンソーシアム<br/>(東工大G)<br/>H28～</p>    | <p>長崎県・対馬市・長崎環境コンソーシアムとの研究協力。<br/>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。</p>  |

## § 4 研究実施内容及び成果(非公開)

### 【地球科学】

#### 4.1 衛星データ解析システム(JAXA-東大、東海大)

##### (1) 研究の背景とねらい

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。H30年度には、AMATERASSシステムを本格稼働して、推定日射エネルギーを蓄積するとともに、他チームおよび太陽放射コンソーシアムに供給した。R1年度には、引き続きシステムの運用をはかるとともに、成果の取りまとめを行なった。

##### (3) 研究成果

2015年7月に正式運用が開始された新しい日本の静止衛星である「ひまわり8号」観測データを用いた日射量及び太陽光発電出力の推定アルゴリズムを開発し準リアルタイムで解析結果を公開するシステムを構築した。また、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として、大気要素の解析アルゴリズムに現在よりも高度な解析を可能とさせるための学習アルゴリズムの開発を行った。CREST/EMS第一期では「ひまわり7号」観測データを利用することで30分の時間解像度を持つ日本域日射量プロダクトの速報システムを構築した。「ひまわり8号」搭載センサは可視から赤外まで16の観測チャンネルを持ち2.5分という非常に短い時間間隔で観測を可能としている。第二期では「ひまわり8号」観測データを最大活用することで2.5分毎の日射量準リアルタイム解析システムを構築し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出来る。

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36000km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

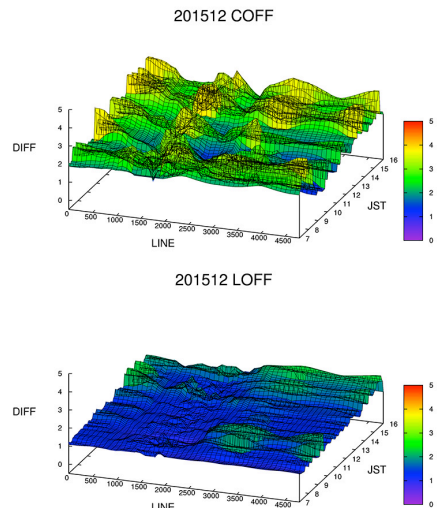


図1: ひまわり8号位置精度月最大誤差評価。X軸は子午線方向の誤差評価点を示し、Y軸は日本時間を示す。Z軸は500m解像度を基準とした位置誤差。左図は東西方向の最大誤差を示し、右図は南北方向の最大誤差を示している。

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に誤差統計値の一例を示す。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>。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。今回は「ひまわり 8 号」の 2.5 分という非常に短い時間間隔の観測データに対応するためにアルゴリズムの処理段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として 1x1km 解像度となっている。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化している。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。さらに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。

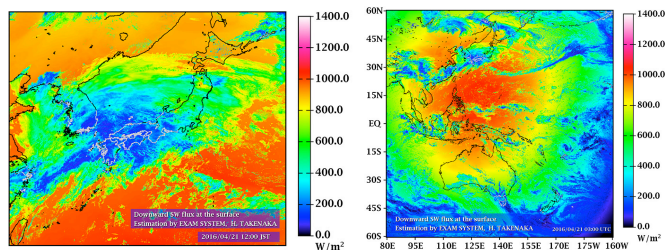


図2: ひまわり 8 号観測データに基づく日射量準リアルタイム解析の一例

左: 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。

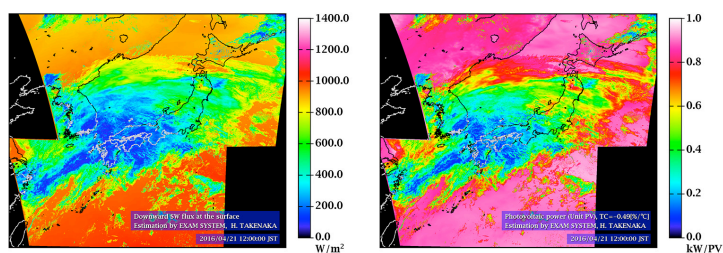


図3: ひまわり 8 号 2.5 分観測データによる日射量準リアルタイム解析の一例

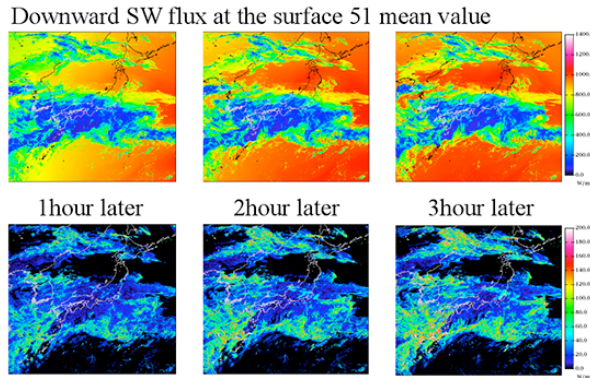
左: 2.5 分観測データによる日射量プロダクト。右: 日射量に基づく太陽光発電出力。

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。

また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。図4に結果の一例を示す。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。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。

<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, 2011.





Standard deviation of Downward SW flux at the surface  
 図4: 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。

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量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>)が開発された。また AMATERASS データセットの高時空間分解能の特性を活かし巨視的にも微視的にも整合な太陽光発電出力の供給量と電力需要の情報を得ることを目的とし需要 SG との連携成果として大阪大学下田山口研究室と連携を行った。図5に結果の一例を示す。これは 2016 年 8 月 9 日の太陽光発電出力と一世帯あたりの電力需要を AMATERASS web にて可視化したものである。従来は電力管区毎に解析が行われていた電力需要解析を時空間的に密な情報を持つ AMATERASS データを環境情報として用いることで市区町村に対応する解析結果を得ることが出来た。この異分野間の連携により従来の電力網全体の解析だけではなく巨視的・微視的に整合的な解析で日本全国を網羅的に解析することにより電力網の安定的な運用に資する情報を取り出せる事が分かった。

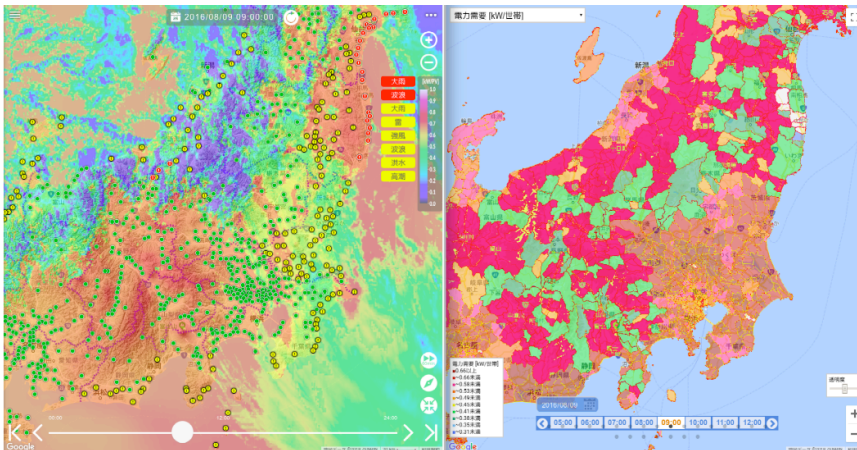


図5: 2016 年 8 月 9 日における太陽光発電出力(左)と一世帯あたりの電力需要の推定結果 (09 時 00 分)。

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行った。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6に可降水量推定結果の一例を示す。ひまわり 8 号のチャンネルを

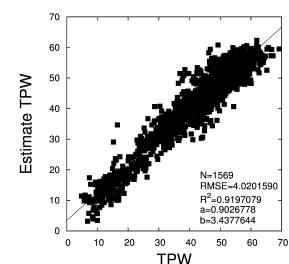


図6: 可降水量推定結果の一例

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。その結果気象庁GPS可降水量データに対し誤差4mm程度の精度で推定が可能であることが分かった。

日射量の推定で最も重要な要素は大気中の雲やエアロゾルなどの物理量を高精度に得ることである。本研究では様々な推定アルゴリズムに応用可能な放射計算ソルバーの作成に必要なニューラルネットの構造と学習アルゴリズムの開発を行った。本研究では新たに問題の分類とニューロンの選択的学習の概念を取り入れている。昨今認識の分野で話題となっているDeep learning手法は広義には中間層の構造を自由に記述することによって単純ニューロンの集合にて複雑な機能を実現する。これは複雑な構造によって複雑な機能を実装しているに他ならない。しかしながらこのアプローチは必然的に中間層の深い構造を前提としていることから、複雑な機能を実現するためにはより複雑で深い構造と多くのニューロンを要求する。それは入力層から出力層へのレイテンシの増加を引き起こすため計算ソルバーとしては問題となる。本研究ではより少ないニューロン数で効果的な学習につなげるように試みた。図7に収束の一例を示し図8に学習結果の一例を示す。従来の学習アルゴリズムで取り扱っていた問題よりも複雑な問題を高精度に学習できることが分かった。この例は三種類のエアロゾルの外部混合にブラックカーボンの内部混合と高湿度状態の吸湿成長を加えさらに水雲粒子の混合を取り扱ったものであるが、これを利用することにより従来の衛星解析手法と異なり実在の地球大気に近い解析が可能となることを示している。また、追加の学習実験においてほとんどの一次元放射伝達計算を学習可能であることが確認された。

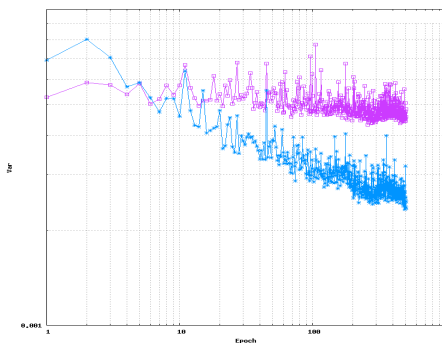


図7: 学習過程における収束の一例。旧アルゴリズムに対してより良い収束が得られることが分かる。  
(横軸) Epoch (縦軸) 誤差平均  $(1/N) * \sum |X_{cal} - X_{truth}|$

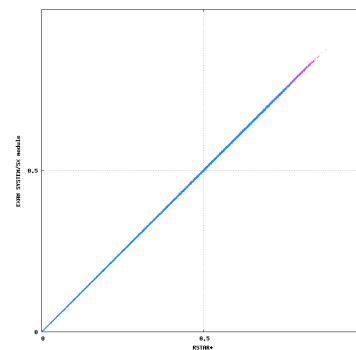


図8: 学習結果の一例。従来の学習アルゴリズムよりも複雑な問題を高精度に学習することが可能となった。

## 4.2 モデルによる地球物理量算定システム(JAXA-東大)

### (1) 研究の背景とねらい

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(Satoh et al. 2014)<sup>2</sup>を利用することと、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)多様な大気場への適用性実験と検証、(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した。また、エアロゾルの取り込みについても検討した。

### (3) 研究成果

詳細な衛星データから雲水データを算出、それを数値モデルに適用した新しい雲水量同化手法システムの構築に成功した。加えて、年単位のモデル実験の結果から雲場の再現性の改善と、このプロジェクトの根幹である高精度の日射量短時間予測の可能性を示した。

まず、同化手法システムを用いての理想化実験を行ない、理論的に雲場の再現性の改善を検証した結果を図1(a-c)に紹介する。検証では、雲場を含む環境場を整合性のある理想値に同化した数通りの領域実験を2011年3月から2012年3月の期間でおこない、その結果として得られた午後1時時点の地表面日射量を理想値と比較する事で空間相関値を算出して、それらを比較した。行なった数値実験は、同化無し(no\_nud\_D)、水平風のみ同化(uv\_nud\_D)、雲場のみ同化(qc\_nud\_D)、水平風と雲場を同時に同化(uv\_qc\_nud\_D)した四つであり、同化の有無による地表面日射量の空間相関値を比較することで、雲水量同化手法システムの同化対象による効果の違いを検証した。

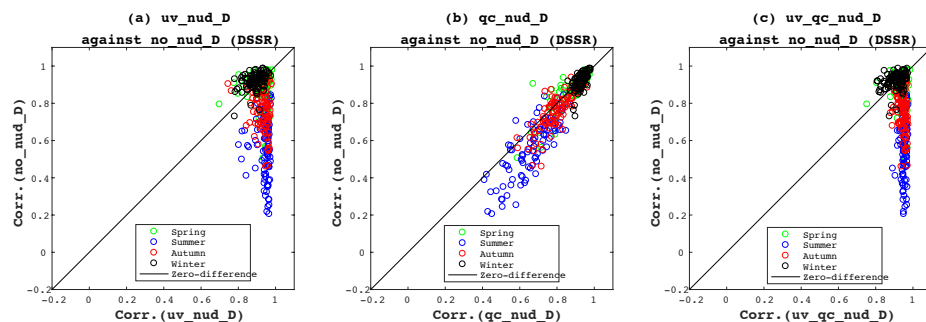


図1: 同化無し実験と比較した水平風の同化実験(a)、雲同化実験(b)、水平風と雲水量の両方も同化した実験(c)を地表面日射量の空間相関値を散布図で示した。

<sup>2</sup> Satoh, M., and Coauthors, 2014: The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: De-scription and Development. Progress in Earth and Planetary Science, 1, 18, doi:10.1186/s40645-014-0018-1.

同化無し(no\_nud\_D)の空間相関値は夏季が特に低く(青い丸印)、水平風を同化する事でその改善が顕著に見られる(図1(a))。また、雲場を同化する事でも改善は見られるがその効果は限定的である(図1(b))、しかし水平風と雲場の同化を併用する事での相乗効果を確認する事はできた(図1(c))。冬季(黒い丸印)では同化無し(no\_nud\_D)の空間相関値が高い傾向にあり、水平風を同化する事で逆に空間相関値が下がる傾向がある(図1(a))が、雲場を同化する事で多少とも空間相関値の改善が見られる(図1(b))。このことで、水平風ほどの効果はないが、雲場の同化によっても地表面日射量の再現性の向上が確認され、特に同化を併用する事でその再現性が最も改善する。

理想化実験とは異なり、実践的な現実実験は実際の環境場の真値が定かではないために、同化手法システムの検証には、モデルによる推定値自体を同化データとして使用する必要がある。その為、使用する推定値の精度によって、その効果も変化する。下に紹介する現実実験では、水平風にモデルの再解析値を適用し、雲場にはより現実に近い衛星データから推定した値を同化データとして用いた。図2では同化無し(no\_nud)、水平風のみ同化(uv\_nud)、雲場のみ同化(qc\_nud)、水平風と雲場を同時に同化(uv\_qc\_nud)した四つの領域実験を行ない、衛星データから直接推定した地表面日射量と比較する事でそれぞれの空間相関値を算出した。

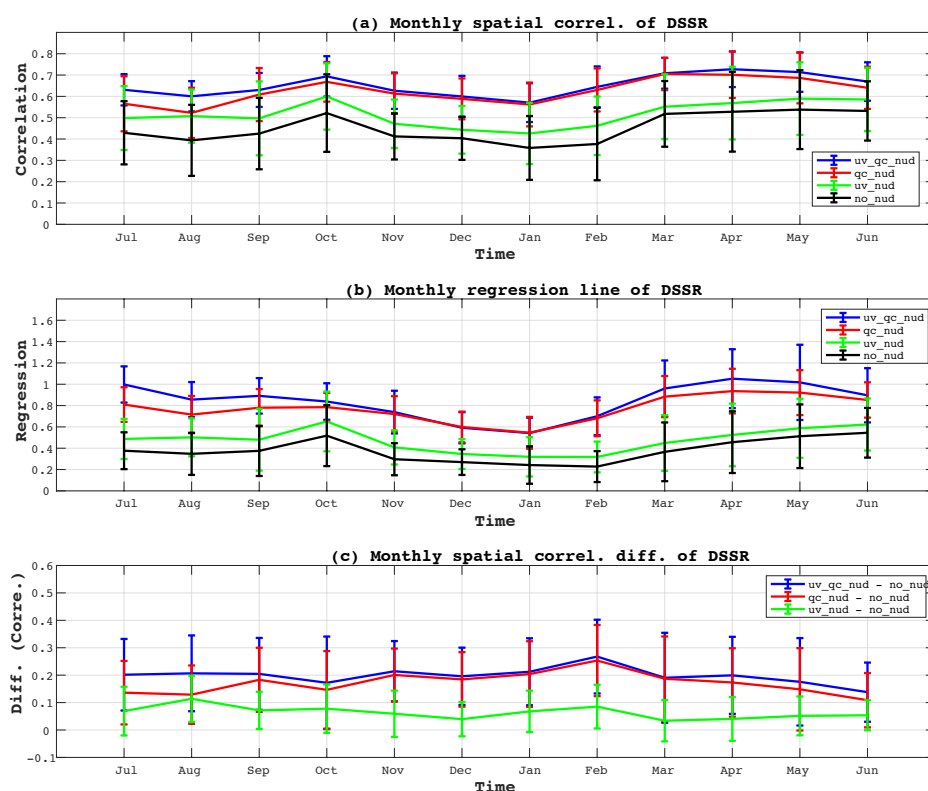


図2: 地表面日射量の空間相関値の月平均と偏差の時間推移(a)と、その線形回帰の傾きの時間推移(b)、同化無し実験と他の同化実験の空間相関値の差異(c)

図2(a)は地表面日射量の空間相関値の月平均とその偏差の時間変化を示しており、真値により近い雲場を同化した(赤線)方が、水平風を同化する(緑線)よりもその再現性の向上が見られ、また理想実験と同様に、同化を併用する事(青線)でその効果が最も顕著に確認できる。図2(b)には線形回帰の傾きを示すが、1に近い値が、実際の日射量に近くなることを意味している。モデルは実際よりも雲量が少なく(黒線)、同化することで雲量が増加する、特に同化を併用する事でその傾向は顕著に表現される。図2(c)は図2(a)の同化ありと無しでの空間相関値の差を取ったもので

冬季に雲場の同化の影響が強く(赤線)、夏季に水平風の同化の併用の効果が確認される(青線)。これらの実験から雲場の同化が地表面日射量の再現性向上に与える影響が確認されたのと同時に、他の環境場データも併用する重要性が認識された。

最後に、この研究の主目的である同化実験での再現性の向上が、短期予報に関してどの程度の影響力があり、またどの程度の持続性があるのかを下の図3で検証した。ここでは、地表面日射量の再現性向上が顕著である夏季(5月と6月)の2ヶ月間に同化ありの実験をなしに切り替えてから、2時間後、26時間後、50時間後の地表面日射量の空間相関値の推移を最初から同化なしの実験値と比較した。

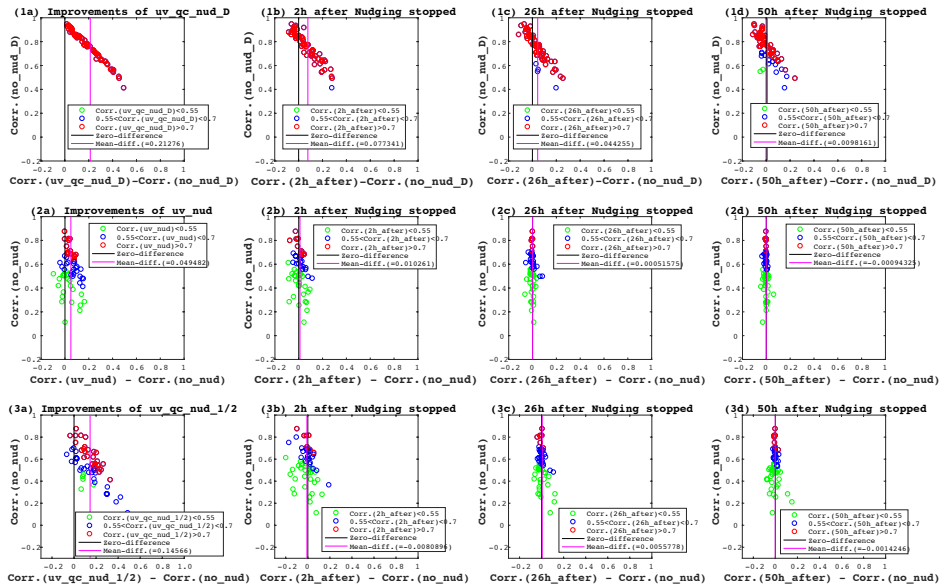


図3: 同化あり実験時での短期日射量予報の空間相関値の推移(同化を止めてから、2時間後、26時間後、50時間後)を初めから同化なし実験と比較し、散布図で示した。

図は上から水平風と雲場の同化併用(理想実験時)、水平風の同化(現実実験時)、水平風と雲場の同化併用(現実実験時)で、左から右に同化を止めてからの時間経過で構成されている。それぞれの散布図は、縦軸に同化なし実験時での空間相関値、横軸に同化あり実験による空間相関値の改善度を示した。図によると、理想化実験時の列(1a-1d)では同化の停止から50時間後(1d)でも再現性の改善が見られる事例が多く確認されるのに対して、現実実験時(2a-3d)では同化による効果が26時間後(2c,3c)には殆ど消えている。良好な予測継続時間のこのような違いは、モデル実験と現実の環境場の誤差に由来すると考えられ、現実実験時の地域規模の地表面日射量の短期予報の向上のためには、環境場の再現性をさらに向上させる必要があることがわかった。このような知見については現在、論文化を進めており、将来的には衛星データの変換から同化システムを適用した予報数値実験までのシステム自動化の構築と共に、より現実的なプロセス(エアロゾルと雲の相互作用など)をシステムに導入した解析なども視野に入れている。

#### 4.3 品質保証とデータ異常検出(千葉大)

##### (1) 研究の背景とねらい

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、本研究開始までは、全くなされていないといえる状況であった。本研究では、その初期および定常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。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た。(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。また、定常観測に移行するとともに、オンラインデータ処理・提供システムを構築した。また、地上観測の過去データのアーカイブ化・公開も行い、地上システム・データベースを確立させた。(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複数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。また、それに基づき、想定内誤差の高精度な評価を実施し、衛星やモデルデータの高精度化に資する知見をまとめた。(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基準を、比較解析等により、高精度化に導出した。異常検出システムの開発に着手、社会実装への道筋を見据えた検出システムへと発展させた。

他最強チームである林最強チームとは、林最強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) 研究成果

###### (a) 地上システム・データベースの最適化

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

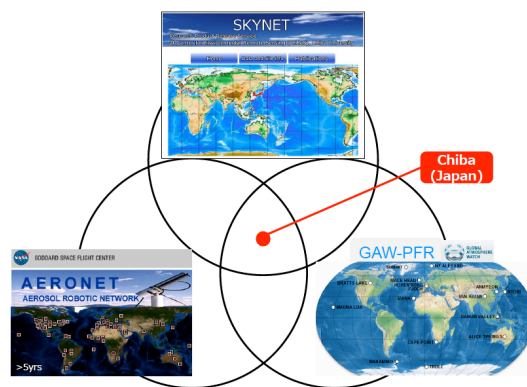


図1 国際展開を視野に入れた3つの国際地上リモートセンシング観測ネットワークSKYNET/AERONET/GAW-PFRの連携のイメージ。千葉サイトで同時連続観測を実施し、国際連携の拠点化を図った。

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、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、今後の基盤とするとともに、地上観測装置群の再配置等を行った。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 の同時観測を実施した。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相互比較を実施したところ、エアロゾル光学的厚さ(AOD)が 0.01 以内で極めて良く一致することが分かった。

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重要である。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 SKYNET 地上観測網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。

衛星データ質評価のための地上システムについて、従来は一定の時間(月から年の時間スケール)を要していたエアロゾルの地上観測のオンサイトキャリブレーション手法を準リアルタイム(一日以内)で行えるよう画期的な進展を図った。これは、迅速な衛星データの補正・評価に役立つ。また、本研究で最適化したオンサイトキャリブレーション手法を用いて、これまで得られた SKYNET 観測網の過去データの再解析を実施し、そのプロダクトをアーカイブ化、SKYNET ホームページで公開した。地上観測の過去データのアーカイブ化の一環として、スカイラジオメーターの共通自動解析アルゴリズム(SR-CEReS)を開発・評価し、大気環境が大きく変動する期間を含めて、SKYNET による地上定常観測を継続するとともに、地上観測の過去データのアーカイブ・公開を行い、地上システム・データベースを確立した。

#### (b) 衛星およびモデルの日射データの誤差評価・誤差要因説明・高精度化

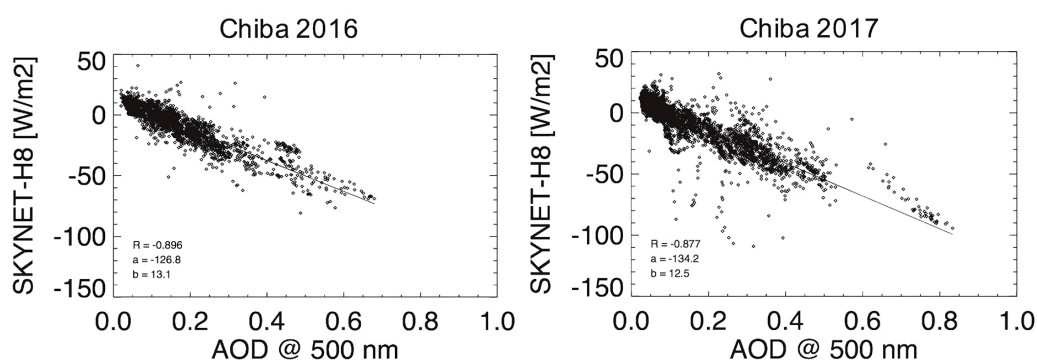


図2 千葉サイトにおける(左)2016年と(右)2017年の各1年間のひまわり8号の全天日射量推定値とSKYNET地上観測値の差とSKYNETスカイラジオメーターのAODデータとの相関プロット。

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  $80 \text{ W/m}^2$  程度であることが見積もられた。この誤差の要因として、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号データの複数年比較解析を行い、想定内誤差の高精度な評価を実施した(図2)。異なる年でも通年データの比較解析結果がほぼ同一だったことから、ひまわり8号の全天日射量推定値が複数年においても安定して高品質なデータを提供したことを実証した。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ついては、それに伴いひまわり8号の値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、図2の相関関係を使ってひまわり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  $20 \text{ W/m}^2$  以内で一致することが明らかになった。ここで得られた  $20 \text{ W/m}^2$  の値は、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。本研究ではまた、雲の影響があると水平距離  $40 \text{ km} \times 40 \text{ km}$  領域のひまわり8号の全天日射量の標準偏差が大きくなることが分かった。さらには、ひまわり8号データの誤差評価のさらなる精緻化を図り、radiation enhancement 現象(Damiani et al., 2018)<sup>原著論文<sup>73)</sup></sup>を含め、現状のひまわり8号の全天日射量推定には三次元の雲分布とそれに伴う三次元の放射伝達が考慮されていないので、さらなる全天日射量を高精度化するためには、その三次元効果を考慮することが不可欠であることが分かった。

### (c) 高度な異常検出システムの構築

EMS 領域チーム再編成前では想定していなかったが、本研究の進展に伴い、社会実装への道筋を見据えた形で、家庭を含め社会に広く実装できる異常検出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、安価なシングルボード PC である Raspberry Pi(ラズベリーパイ)を用いた自動かつ低消費電力の異常検出速報システムを開発した(図3)。その評価を行うとともに、最短1秒から時間分解能を自在に変えて日射量データを測定できるように改良した。上記のひまわり8号データの誤差評価を踏まえ、標準偏差を用いて判定された晴天条件下における全天日射量の誤差からエアロゾルの影響を除去することで、衛星データの想定内誤差の定量化を行った。すると、その誤差は系統誤差が約  $10 \text{ W/m}^2$  で、ランダム誤差は約  $20 \text{ W/m}^2$  の範囲に収まることが分かった(図4)。この範囲外を想定外誤差とした。千葉サイトで得られたデータについて想定外誤差を判定したところ 1%のデータが想定外誤差と判定された。詳細な解析から、想定外誤差と判定された主な原因は衛星画像から捉えられない程度の光学的に薄い雲や小さな雲によることが示唆された。さらには、この判定においてエアロゾルの影響を除去する際にはスカイラジオメータの AOD 値が必要(図2を参考)だが、その制約を無くすために、過去の AOD 観測データを用いて月平均値を計算し、気候値として利用した。すると、気候値を用いても判定合致率は98%と高いことが分かった。また、比較的判定合致率の低い 5-7 月は越境大気汚染の影響であることが示唆された。

このように、本研究の結果は、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。



図3 Raspberry Piを用いた異常検出速報システムの外観。

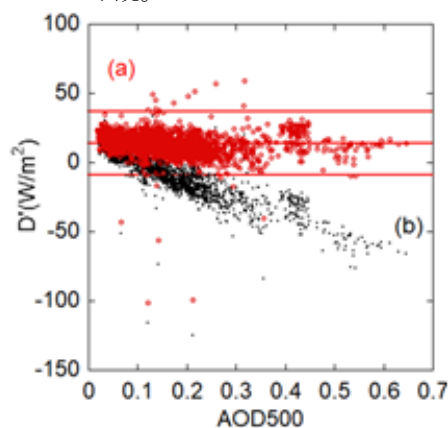


図4 SKYNET スカイラジオメータの AOD データで補正したひまわり8号の全天日射量と地上から測定した全天日射量の差(赤)。参考に補正前の全天日射量の差を黒で示す。



#### 4. 4 気象データの変動解析(東海大)

##### (1) 研究の背景とねらい

世界的なエネルギー需要の低炭素・脱炭素化の取組の推進に伴う太陽光発電システムの急速な導入により、近年、日射変動が世界の電力システムに与える影響は更に大きなものとなってきている。電力システムの安定運用のためには電力の需要と供給を常に一致させる必要があることから、気象の時間変動に由来する再生可能エネルギーの発電量変動は、送電システムの周波数・電圧の不安定化の原因となり得る。更に、分散的に太陽光発電システムが多数導入された電力システムにおいては、日射の時間変動に加えてその空間的な変動もまた送電システムの運用に大きな影響を及ぼす。従って、ESS(Energy Storage System)の容量抑制に加えて多数の太陽光発電システムの導入を可能とするEMS(Energy Management System)の設計という観点から、日射の時空間的な変動に関する解析および特徴の定量化は重要となると考えられる。特に、日射の空間的な非同期性は太陽光発電システムから出力される電力のならし効果と関係があることから、非同期性をあらゆる指標を用いた解析を行うことで、時間的かつ空間的にならし効果を可視化できるようになると期待される。

また、気象解析および電力システムの分野横断的な観点から、日射変動の解析に加えて、日射から変換される太陽光発電出力に関する解析もまた実用的な面から重要であると考えられる。例えば、住宅屋根に設置される太陽光発電システムでは、その設置方位角と傾斜角によって、PV(Photovoltaic)パネルが受光する日射量に変化が生じる。そのため、屋根設置型の太陽光発電システムの出力を詳細に見積もるには地表面日射量を傾斜面日射量へと変換することが必要となる。さらに、屋上へPVパネルを設置する場合、個々の太陽光発電出力が住宅の屋根形状に大きく依存するため、地域的な屋根設置型PV日射量の期待値が屋根形状データの統計的な分布によって異なると考えられる。このことから、屋根形状の統計分布データを反映させた日射解析を行うツールを開発し、地域的な住宅データを考慮したPV出力の変動解析を行う手法について検討をおこなった。

##### (2) 研究実施方法

H28年度では、過去の衛星観測データから推定された日射データの解析によって、日射変動特性の区分によって地域的なクラスタリングが行えることに加え、日射の強い変動性とその時の総観規模気象場の関係について研究を行い、気象場から日射変動の特性が予測可能であることを示唆した。H29年度では、電力システムの安定運用に際し、気象情報に関する解析の即時性が強く求められることから、気象変動解析に用いたサンプルエントロピー解析手法についてオンライン化の検討をおこなった。H30年度では、日射変動の時間的な変動特性に加えて空間的な変動特性に関する解析をすすめ、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。

また、電力システムと日射変動解析の分野横断的なアプローチとして、日射から変換されるPV出力の変動解析として、H28年度までは、気象学の分野においてデータの解析を進めてきたが、H29年度からは、変動する日射が入力されたときのPVシステムの電力変換システムの挙動について解析を行った。H30年度では、屋根設置型PVシステムに入射する日射量について、屋根の統計分布データを反映させるツールの開発を検討し、地域的な屋根形状データの違いがPV出力の地域的な変化に与える影響について検証をすすめた。

##### (3) 研究成果

###### 3.1. 日射変動の非同期性の定量化解析

解析に使用する日射データとして、東京都庁(北緯 35.689, 東経 139.692)を中心とする15 km×15 kmの領域における2018-01-28から2018-01-30の衛星推定日射データ(時間分解能 2.5分, 空間分解能 1 km)を用い、中心地点と各地点とのクロスサンプルエントロピーの時間変化について定量化をおこなった。ここで、図1に表すように各地点について名づけを行うものとする。

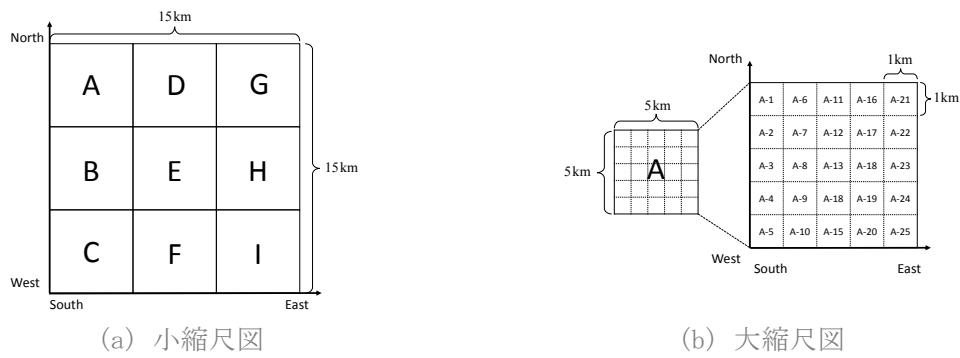
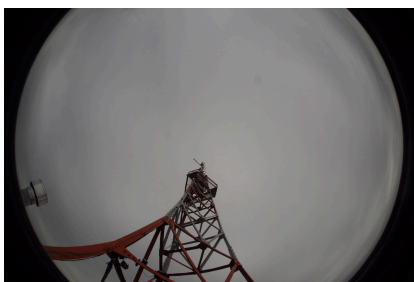


図1 各地点の名づけルール

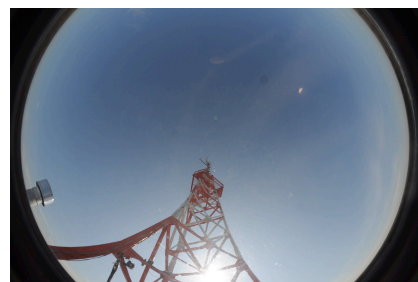
本解析から得られた各日時の地表面全天日射とクロスサンプルサンプルエントロピーの時間変化の一部を図2に示し、東海大学代々木キャンパス(北緯 35.66459, 東経 139.684577)に設置した気象観測システムから得られた全天カメラ画像を図3に示す。



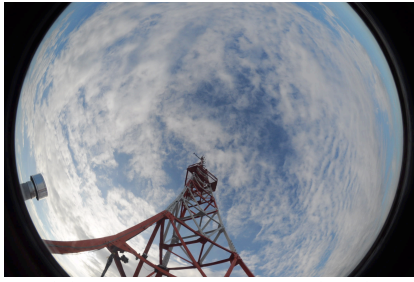
図2 日射とクロスサンプルエントロピーの時間変化



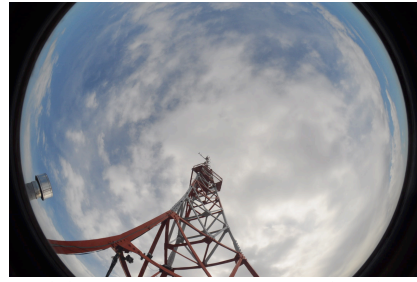
(a) 2018-01-28 11:59(JST)



(b) 2018-01-29 11:59(JST)



(c) 2018-01-30 9:04(JST)



(d) 2018-01-30 12:59(JST)

図3 全天カメラ画像

結論として、本解析によってはじめて日射の非同期性について定量化の試みがなされ、その時空間的な変化を可視化することができた。また、東海大学代々木キャンパスに設置している気象観測装置の全天カメラ画像と得られた時系列データの比較から、日射の非同期性が雲の状態に依存していることが示唆されたといえる。

### 3.2. 屋根形状の統計分布の変化が地域的な PV 出力変動に与える影響の検証

今回、開発を検討した屋根設置型 PV 日射量解析ツールを、各都道府県の屋根形状の統計分布データを反映させ、千葉大学 SKYNET による地上観測日射データを入力として出力した結果を図4に示す。

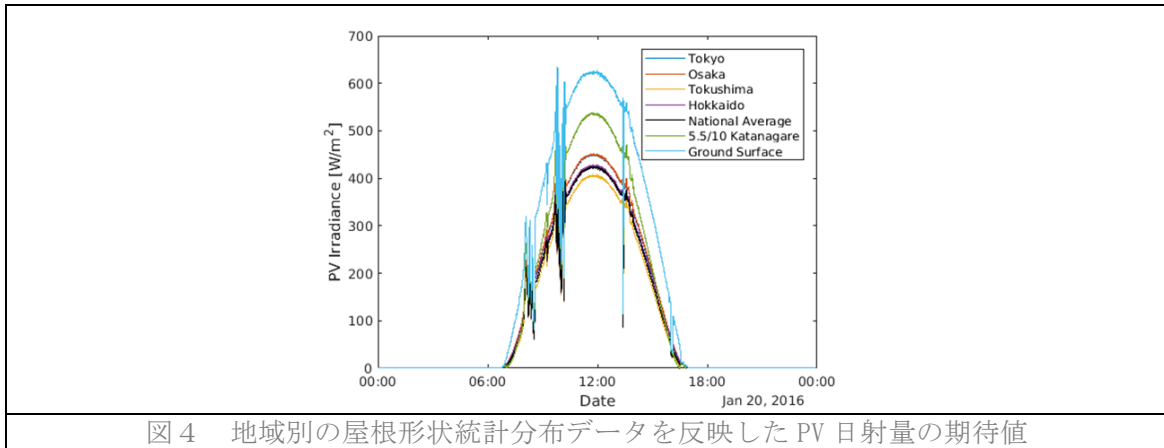


図4 地域別の屋根形状統計分布データを反映した PV 日射量の期待値

本解析ツールにより、地域毎の屋根の統計データを反映させて PV 日射量の期待値を推定することが可能となった。また、住宅金融支援機構の公庫融資を利用した一戸建住宅の建築的事項に関する平成 11 年度の調査データを本解析ツールに反映させて解析した結果、地域間の屋根勾配や形状データによる屋根 PV 日射量の差異はピーク時±8%程度である一方で、地上水平面日射に対し屋根 PV 日射量の期待値は著しく低下する可能性が示唆された。本解析条件においては、屋根 PV 日射量の期待値は地表面全天日射量の 66%程度にまでが低下していることが確認された。

#### 4.5 地球物理量データによるシナリオデータの作成 (JAXA-東大)

##### (1) 研究の背景とねらい

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た。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た。

##### (3) 研究成果

EMS に資する地球物理量データとして、過去の観測事実から特徴的なイベントを抽出する手法と地球物理モデルによる擬似温暖化実験による将来シミュレーションデータをベースとしたシナリオが作成された。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、異分野を横断的に聞き取り調査した結果、最も要請の多いものはエネルギー需要が逼迫する猛暑と真冬であった。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データを構築した。これは過去に起こった事象を再現する Hind cast 実験に利用可能である。

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。また領域規模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、本チーム需要科学 SG 日高教授からの要請により対馬を別途設定した。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、 $5^{\circ}\text{C}$ 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  $35^{\circ}\text{C}$ 以上の日を猛暑日、日最高気温が  $0^{\circ}\text{C}$ 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、人工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工密集地

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。

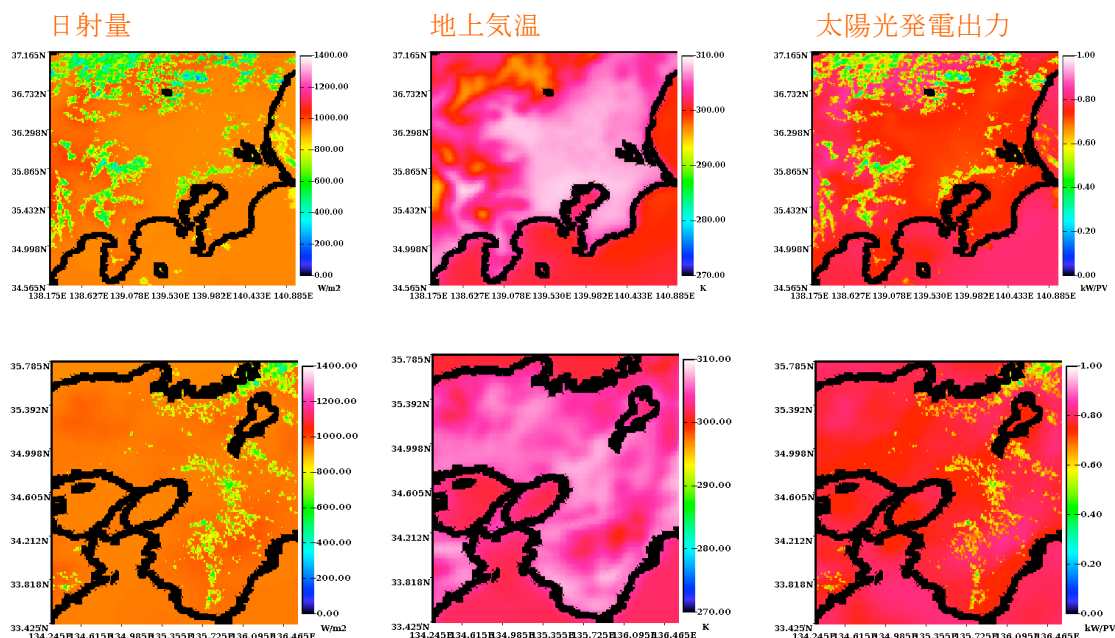


図 1：猛暑シナリオにおける東京電力管内及び関西電力管内の日射量、地上気温、太陽光発電出力。(2013年8月11日11時32分)

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、関西電力管内は人工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 xx]</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。

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。

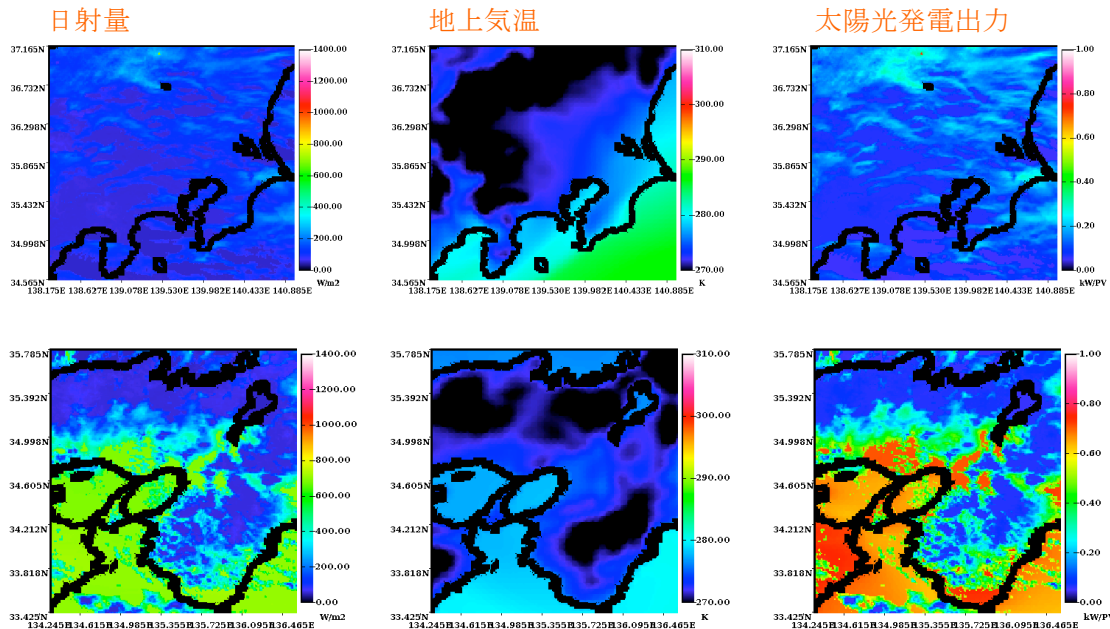


図2：真冬シナリオにおける東京電力管内及び関西電力管内の日射量、地上気温、太陽光発電出力。(関東地域:2014年2月8日11時32分、関西地域:2012年2月2日11時32分/日)

また International Electrotechnical Commission (IEC)は Typical Solar Year など典型的な事例を統計から算出し基礎データとして使用することを前提としているが、分散型電源等を含む電力網の安定的な運用に資するデータセットとして代表値/統計値は必ずしも実態を示さないことがシナリオデータから簡単に導く事が出来る。図3に猛暑日及び真冬日シナリオにおける8月の日射量月平均値を示す。関西電力管区及び対馬は猛暑日を含む 2013 年の日射量が 2012 年よりも高い値を示している。しかしながら東京電力管区は逆の傾向を持っている。もっとも過酷であった 2013 年 8 月 11 日に着目するならば、三地域において傾向は同様であり関東の一部を除いて日射量は高い値を示している。従ってこれら平均値が示す傾向は実態を表現してはならず統計処理によって重要な情報が失われていることが分かる。

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

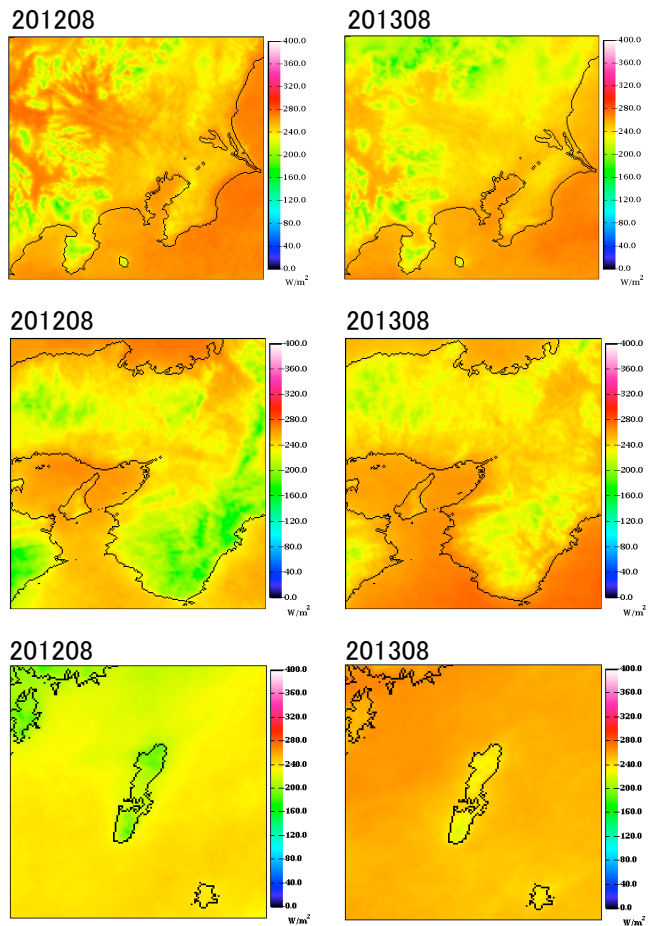


図3: 猛暑日及び真冬日シナリオにおける8月の日射量月平均値。関東のみ 2012 年と 2013 年の傾向が逆転して見られる。

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 SALSA 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 xx)</sup>。ターゲット期間は 2031 年から 2033 年の三年間である。図4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かかわらず、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。

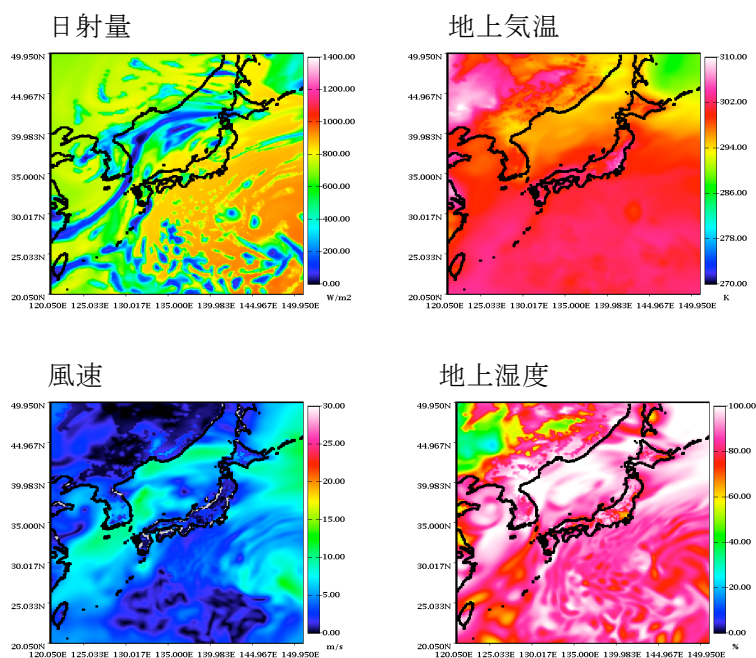


図4: 擬似温暖化実験に基づく将来シナリオにおける日射量、地上気温、地上風速、地上湿度 (2031 年 10 月 1 日 9 時/日本時間)。

本シナリオデータセットは CREST プロジェクト内で展開されており幾つかの重要な研究成果に繋がっている。2018 年の国際シンポジウムに関連して再度データセットの情報展開を行ったことによりデータセットの存在はプロジェクト内でも広く周知された。追加のシナリオ等の要望が特に無かったことからシナリオの作成は 2019 年に終了し、引き続きデータインターフェース SG のデータ展開が行われた。

## 【エネルギー需要科学】

### 4.6 エネルギー需要モデルの開発 (阪大)

#### (1) 研究の背景とねらい

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) 居住者行動、(ii) 機器・設備操作、(iii) 機器・設備仕様と所有状況、(iv) 住宅・建築仕様、(v) 気象条件等の 5 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) 研究成果

##### 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 29)</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>原著論文 66)</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冷房分、暖房分、活動分、ベース分の 4 用途に分解する手法を開発した。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、年度間の気象条件の違いの影響を除去し、電力の使い方を年度間で比較することが可能となった。本手法を節電効果の評価に応用し、冷暖房の使い方の変化の効果を評価した。

##### 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)

地域や世帯の特徴を反映した上で日本全国民が日々に行う生活行為 (睡眠、食事など) を確率的に生成する方法を開発した <sup>原著論文 51, 85, 114)</sup>。これ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を再現したうえで、任意の地域、日本全国の電力需要、またその調整力を推計することが可能となった <sup>原著論文 50)</sup>。

###### 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)

生活行為に伴う機器の稼働を模擬するためのモデルを Dr. Selin Yilmaz (Geneva 大学) との共同で開発した <sup>原著論文 85)</sup>。

###### 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 ((v) に対応)

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が協同で研究を行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。まず、住宅分電盤で計測された実電力消費データに基づき、外気温、天気が部屋稼働率および稼働時消費電力に及ぼす影響を評価した。次に、地球科学サブグループより市区町村別の気象データの提供を受け、B-1 に



説明した世帯生成、生活行為推計を行い、その結果に基づいてエネルギー需要を推計した。ここではB-6に示す各種精緻化のためのデータベースを組み込んでいる。この結果から、空調、給湯用設備の採用状況、気象条件、生活行為の時間配分が電力需要に大きな影響を有することを明らかにした<sup>原著論文 113)</sup>。

#### B-4 時系列電力需要予測の精度検証 ((i)~(v)に關係) (Taniguchi et al., 2016)<sup>原著論文 22)</sup>

住宅群を対象とした EMS 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。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、夏期および中間期について電力負荷曲線の推計精度を確認した(図 1)。このように代表性の高い計測値を用い、高い精度でモデルの検証をおこなった事例は国際的にも見られず、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いえる。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、設定温度緩和よりも照明消灯効果の大きいこと、家族構成の効果の大きいことを示した。

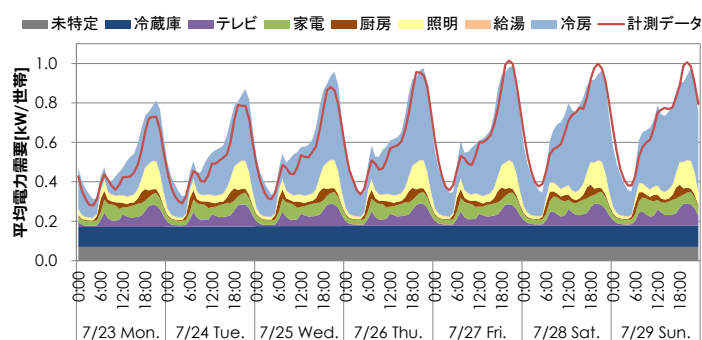


図 1 時系列電力需要の推計結果

#### B-5 家庭部門エネルギー最終需要モデルの精度向上の取り組み

中間評価後、シミュレーションモデルの精度向上を目指し、以下の研究を実施した。

##### ① 湯はり頻度のモデル化(松岡ら, 2018)<sup>原著論文 102)</sup>

エネルギー消費の大きな給湯について各世帯の湯はり頻度に関するアンケートを実施し、世帯が5クラスターに分類されることを明らかにし、各種世帯属性との関係を分析した。

##### ② 機器所有状況の精緻化

環境省の家庭 CO<sub>2</sub> 統計の個表から、冷蔵庫とテレビの所有状況と各種世帯属性との関係を調査し、世帯属性から保有状況(台数, 大きさ, 製造年)が推計できるモデルを開発した。

##### ③ エアコンエネルギー消費の精度向上(山崎ら, 2017, 2018)<sup>口頭発表 196, 323)</sup>

アンケート結果から世帯特性よりエアコンの製造年と大きさを決定するモデルを作成した。また、効率の評価尺度が COP であった時期と APF であった時期を区分した。

##### ④ 給湯器保有と暖房機器保有・使用状況の相関分析(森國ら, 2018)<sup>口頭発表 325)</sup>

世帯特性と給湯器・暖房機器の関係をモデル化した。

以上の改良、特に機器所有状況の精緻化により、家庭のエネルギー消費量および電力ロードカーブの予測精度が大きく改善した。既報<sup>原著論文 22)</sup>では常時 70W/世帯の「未特定分」を加えていたが、現在では平均値および標準偏差がよく一致することを確認している。

#### B-6 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 44)</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。世帯類型毎に 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)から選択し、CO<sub>2</sub> の限界削減費用を世帯類型毎に算出した。

## B-7 地球温暖化対策計画に基づく 2030 年の家庭部門エネルギー需要・ロードカーブの予測

H29 年度まででおこなってきた我が国家庭部門の長期エネルギー需給見通しに基づく 2030 年のエネルギー需要について、同見通しに記載されている対策の効果を含めて、本プロジェクトで開発してきた家庭用エネルギー最終需要モデルによって検証した (Sugiyama et. al (2019) 原著論文 113), 松岡ら 原著論文 101)。この論文は実際政府政策の策定に関わっている関係者から高い評価を受けている。更に先ほどの B-5 の成果を統合し、データ前処理の手順を改造して 2030 年の温室効果ガス排出予測を再計算した。(Matsuoka-Taniguchi, et. al. Submitted) 未発行論文 6) (図 2)

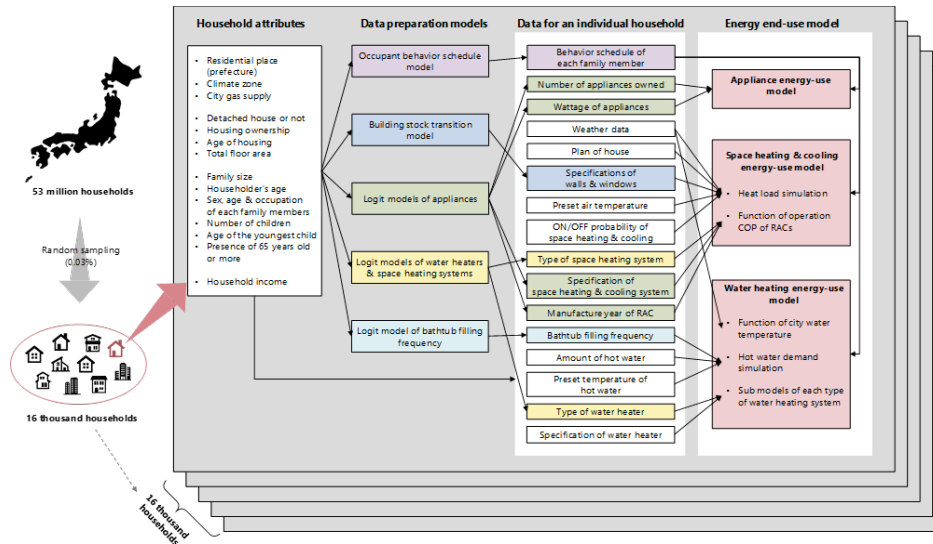


図 2 家庭用エネルギー最終需要モデル (TREES) の計算フロー

現状について高い精度で再現できていることを確認の後、2030 年政府目標を再現したシミュレーションを実施し、計画通りの省エネルギー効果が得られるのかについて評価をおこない、照明について大きな差があることが明らかにされた。図 3 には温暖化対策計画の対策が全て実施された場合の 2030 年のロードカーブを 2013 年と比較している。電力消費は 27% 減少するがピーク電力の減少は 15%にとどまり、負荷率の悪化を招くことがわかる。

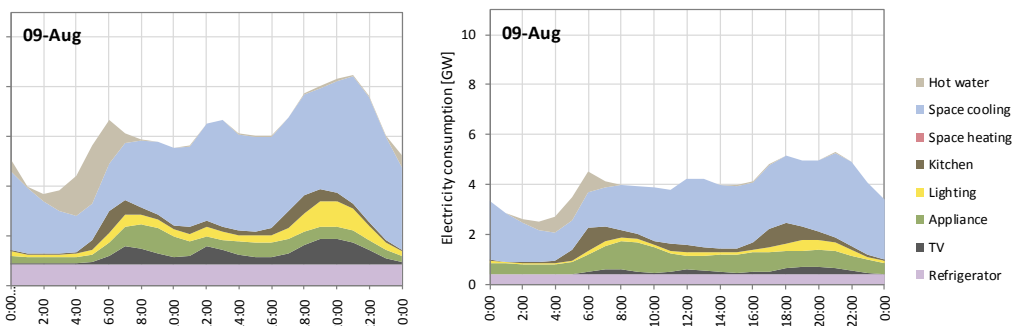


図 3 温暖化対策計画が実行された際の家庭部門電力ロードカーブ (左: 2013 年, 右: 2030 年)

## B-8 2050 年における我が国家庭部門エネルギー需要の予測

次に、2050 年のエネルギー消費削減可能性についてシミュレーションによる評価をおこなった (口頭発表 287)。省エネ徹底シナリオ、人口・世帯分布調整シナリオ、戸建住宅 75%シナリオ、集合住宅 75%シナリオの 4 種を検討し、省エネ徹底シナリオでは一次エネルギー消

費で約 1,800PJ と 2013 年度比約 40%の削減に止まること、人口・世帯分布調整シナリオの効果はあまり大きくないこと、集合住宅を増加させると省エネルギーとはなるがその効果は小さくなく、逆に戸建て住宅を増加させると屋根置き太陽電池の増加により唯一プラスエネルギーを実現する。この場合の近畿地方家庭部門全体の 8 月の電力消費と太陽光発電の関係を図 4 に示すが、大幅な逆潮流が発生しており、大規模なエネルギーマネジメントをおこなう必要のあることを示している。

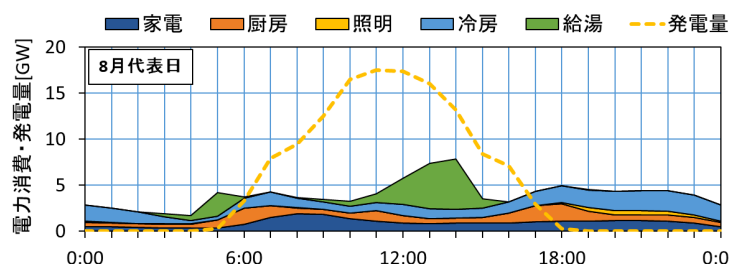


図 4 8月の近畿地方民生家庭部門全体の電力需給（戸建住宅 75%シナリオ）

## 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用いて、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

日本に立地する事務所、宿泊、医療、商業、文教施設ストックを対象としてエネルギー需要を推計するモデルを開発した。開発モデルは多様性、経年変化を含めて業務施設ストックの構成を考慮し、業務施設ストック全体のエネルギー需要を定量化することができる<sup>原著論文 87, 115, 111</sup>。開発したモデルを用いて業務部門の地球温暖化対策計画の達成可能性を評価し<sup>未発行論文 8</sup>、地球温暖化対策計画では年間 13.6 MtCO<sub>2</sub> の二酸化炭素排出量が業務施設の省エネルギーにより削減されるとしているが、この推計は過大である可能性があること、省エネルギーによる CO<sub>2</sub> 排出量は床面積の増加により相殺される可能性があること、地球温暖化対策計画が示す削減目標を達成するためにはさらなる省エネルギー技術普及の促進が必要であることを明らかにした。図 5 にモデルにより推計した電力需要の推計結果を示す。図では、2013 年、2030 年の推計結果を示す。LED や各種省エネルギー技術の普及により大幅に電力需要が減少する可能性があると推計された。

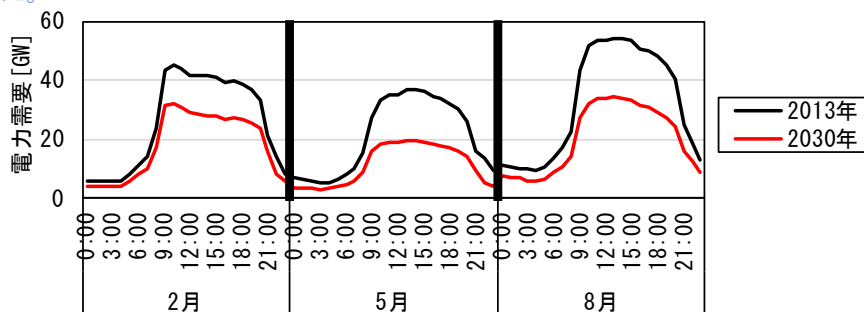


図 5 2月、5月、8月の平均電力需要推計結果

## 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

上記の開発モデルを用いて配電網に接続する住宅、業務施設のエネルギー需要を推計し、林チームと共同で配電網の分析・計画を行うことができる評価基盤プラットフォームを提供した<sup>原著論文 88) Hayashi et al. 2018</sup> ) 3。

## 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い、DR による電力需要調整可能性を評価した<sup>未発行論文7)</sup>。

## D-3 鈴木チームとの連携

鈴木チームとの連携により、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<sup>其他著作物 28)</sup>。

---

<sup>3</sup> Hayashi, Y., Fujimoto, Y., Ishii, H., Takenobu, Y., Kikusato, H., Yoshizawa, S., Amano, Y., Tanabe, S.-I., Yamaguchi, Y., Shimoda, Y., Yoshinaga, J., Watanabe, M., Sasaki, S., Koike, T., Jacobsen, H.-A., Tomsovic, K., 2018. Versatile Modeling Platform for Cooperative Energy Management Systems in Smart Cities. Proc. IEEE 106, 594-612. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2809468>

#### 4.7 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)

##### (1) 研究の背景とねらい

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マネジメントシステムであり、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、分散エネルギーマネジメント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。

##### (2) 研究実施方法

約1600件のHEMSデータを収集するとともに、住宅事業者から住宅属性情報を、HEMS保有世帯からは保有家電の詳細情報、世帯属性やライフスタイルなどをアンケートによって収集するとともに、気象データを収集して、HEMSデータと紐づけることによってデータベース化し、チーム内の他の研究チームとのデータ共有に努めた(図1)。なお気象データは、JAXA-東京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。

ヒートポンプ給湯機や電気自動車によるHEMSモデルの構築、需要家の経済性や系統全体へのインパクトの評価、需要や自動車走行シミュレータの構築による他の研究チームとのデータ共有の可能性についての検討、デマンドレスポンスモデルの実需要への適用、消費者のDRや省エネに対する受容性の調査を行った。

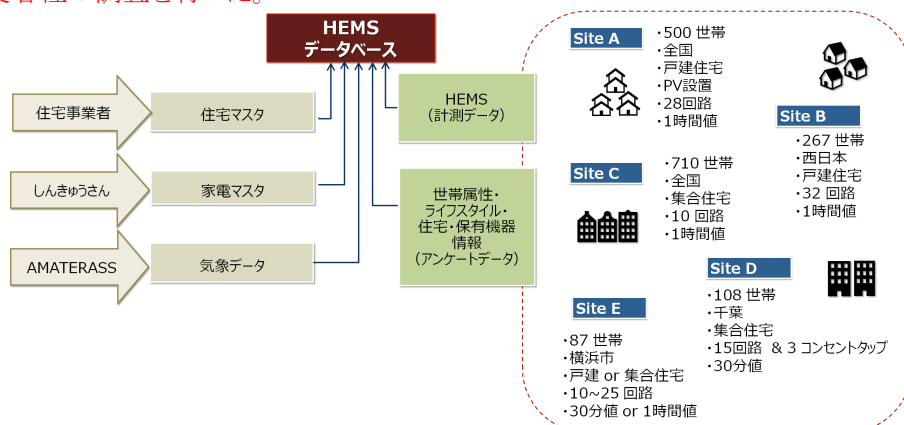


図1 HEMS データベースの構造

##### (3) 研究成果

###### 1. データ共有のための走行及び家庭エネルギー消費シミュレータ構築

上述したHEMSデータ及び電気自動車(EV)メーカーが保有するEV走行データを用いて、ある世帯における8760時間の需要及びEV走行を模擬するシミュレータを構築した。各世帯の消費量データより特徴量を集計し、クラスタリングを行ったのち、需要あるいは走行行動の遷移確率を集計し、マルコフ連鎖モンテカルロ法を用いて、8760時間の需要及びEV走行を模擬するものである。このシミュレータによって、協力世帯の秘匿情報を公開することなく、特徴別の需要を模擬することが可能となる。住宅の位置情報により屋根置き太陽光発電の発電量も併せてシミュレートするものとした。走行データの模擬結果を図2に示す。

本シミュレータにより、様々な属性を有する一住戸あるいは、アグリゲートされた需要の模擬を気象やカレンダー情報と紐づかせて実現することが可能となり、配電単位、需給系統レベル、建物レベルなどにおける需要の柔軟性評価が可能となる。

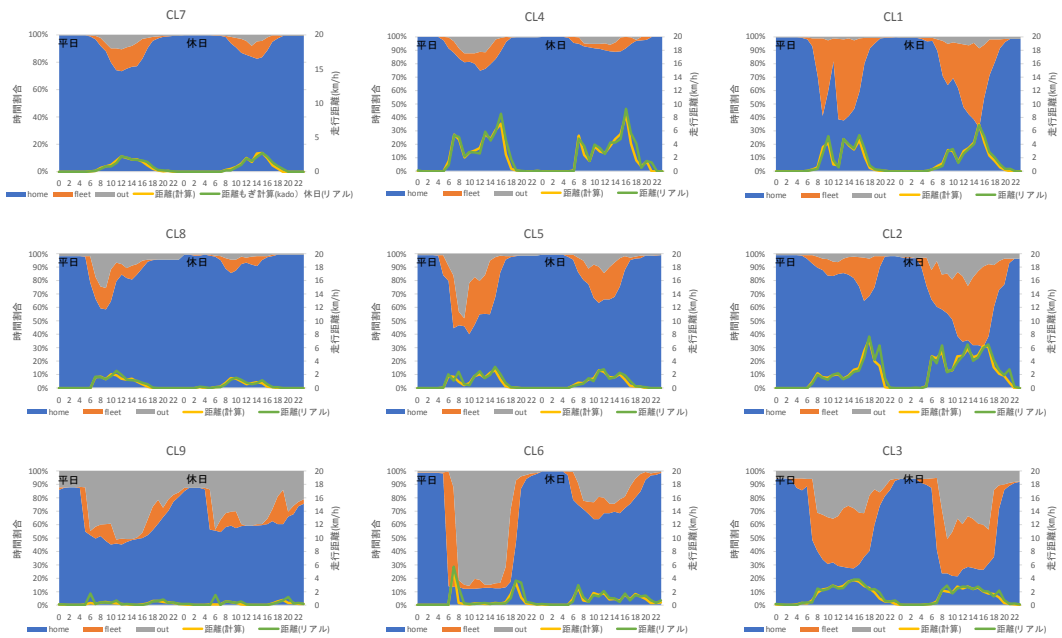


図2 100世帯模擬結果平均(時間割合は全台数)状態割合及び走行距離

## 2. 系統全体のデマンドレスポンスのインパクト評価

ヒートポンプ (HP) 給湯機及びEVを含めたアグリゲーションモデルを構築し、全国大の系統需給シミュレーションモデルに実装し、デマンドレスポンス (DR) の定量的な評価を行った (図3)。本検討は、電力系統全体の需給バランスを確保するための調整力としてのDRの価値も併せて評価できるため、現在検討されている需給調整市場の制度設計にも指針を与えるものと考えられる。

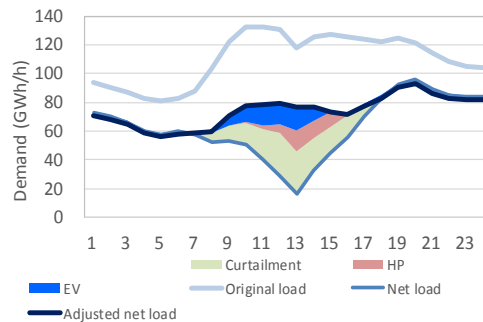


図3 日間運用結果例 (Case5、全国 2030年4月1日)

## 3. HEMSモデルによる需要家におけるメリット評価

HP 給湯機、EV、定置式蓄電池のデマンドレスポンスを評価するための総合的な HEMS モデルを構築した (図4)。給湯機メーカーや EV メーカーとの共同研究により、実運用を踏まえたモデル化を行い、柔軟な料金メニューによる需要家における DR 効果の評価を行った。また、再エネ余剰買取制度終了に伴う、太陽光発電の自家消費拡大の効果を定量的に評価した。

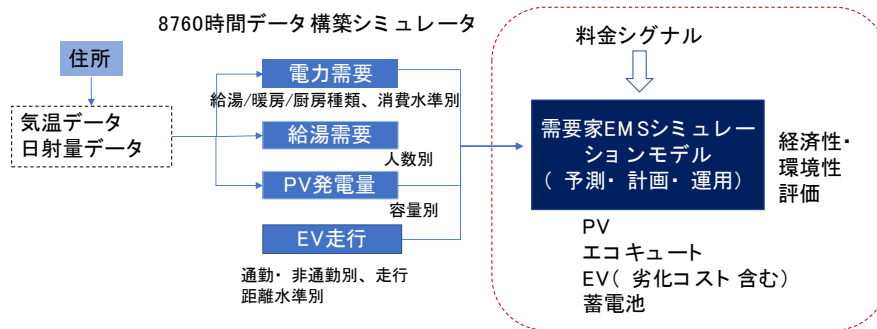


図4 住宅 DR モデル

#### 4. 消費者の受容性調査

DR ポテンシャルの利用制約の一つとして、それを受け入れる消費者の行動がある。消費者がどのように行動するかによって、利用可能 DR ポテンシャルも異なってくる。よって消費者が実際にどの程度制御を受容するか、どの程度行動を変容するか、そのためのコミュニケーションには、どのような方法があるかなどの点を捕捉することを目的とした調査対象世帯(上述の HEMS 設置世帯)や、実フィールドを確保して検討を行った。

デマンドレスポンスの手段としては、自動 DR(以下、ADR)と手動 DR(以下、MDR)がある。デマンドレスポンスの効果を考えると、不確実性の高い MDR よりも、人を介さず DR を実施できる ADR の方が確実である。しかし需要を制御されるという ADR を受容してもらうことと、需要制御のための HEMS を設置してもらうことは非常に障壁が高い。H27~29 年度には、エネルギー利用について理解してもらうとともに、普段のエネルギー消費行動を変化させるためのコミュニケーション方法(MDR における行動変容促進方法)について、HEMS 設置世帯に対してエネルギー診断という手段を用いて検討を行った。診断書を印刷して郵送配布したり、診断結果を伝える手段を変更して、エネルギー診断を web 上で表示したりして、送付頻度を上げるなど、フィードバックの方法について検討を行った。

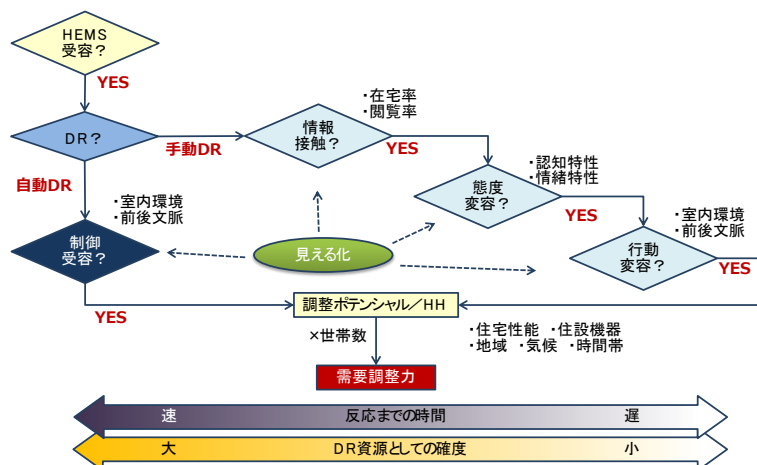


図5 ADR と MDR の消費者受容性

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 Energy Research にてディスカッションをするなどして、実フィールドの重要性を認識し、H29 年度からは DR 実証実験のためのフィールド確保に努め、その結果、沖縄県宮古島市において、宮古島市役所や現地のアグリゲーター企業などの協力を得てフィールド確保に至った。そして H30~31 年度は、このフィールドにて DR 実証実験に向けて、参加世帯における DR ポテンシャルの抽出や、参加者への DR の

説明や説得や理解のためのコミュニケーション方法の検討、および 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マイクロな観点からの 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。評価に必要な需要や自動車走行シミュレータの構築も、将来的にデータの可用性を向上させるための重要な布石となる研究である。



#### 4.8 需要家行動モデルの開発(東工大)

##### (1) 研究の背景とねらい

社会における電力の消費は需要家の電力消費行動で決定される。従って、需要家の電力消費行動に影響を及ぼす要因を理解し整理することが、電力システムの需要を考える場合に、きわめて重要なこととなる。現在、需要家を取り巻く環境として、再生可能エネルギーの導入や電力小売り全面自由化が開始されるなどの外部環境が変化している。我々は、電力に関する需要家行動モデルとして、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」を研究対象とし、この3行動に影響を与える要因を特定し、これら3行動の関係を明らかにすることを研究の目的とした(図4-8-1)。「電力使用行動」「電力契約行動」「設備投資行動」の3行動における行動変容の関係性を明らかにするためには、行動間の関係性を検討するだけでなく、行動に作用する Intention (行動意図) を計測することで、電力に関する需要家行動の基礎を研究する(図4-8-1)。3行動を対象とした研究は類似事例がない。

また、これまでの需要行動に関する研究においては、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一方、効果が一時的であることが問題とされてきた。行動が継続する為には、人が「自律的に動く」という状況を作り出す必要がある。この視点からの行動のモデル化のために、行動には「目標意図(goal intention)」「行動意図(Behavioural intention)」「実行意図(implementation intention)」の意図が作用する(Gollwitzer & Moskowitz, 1996<sup>4</sup>, Ajzen, 1985<sup>5</sup>)とした既存モデルを組み合わせることによって仮説モデルを構築した(図4-8-2)。

図4-8-1に基づき、①電力使用行動、②電力使用行動、電力契約行動、設備投資行動の関係性、また、需要科学SGとしての③「エネルギー需要科学」分野の確立に向けた東工大Gの順に、研究実施方法と研究成果を以下に説明する。

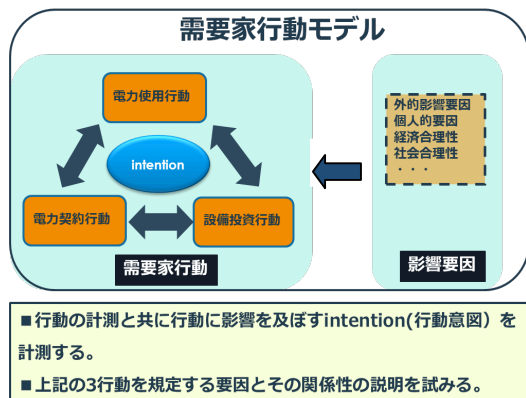


図4-8-1 需要家行動モデル

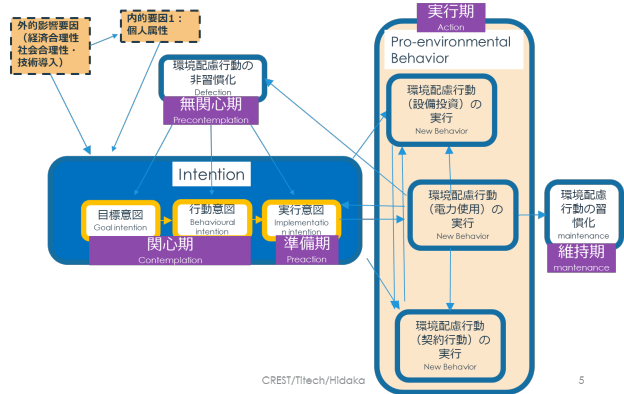


図4-8-2 意図と行動変容のモデル

##### (2) 研究実施方法

##### ① 電力使用行動

福岡県北九州市と長崎県対馬市の2つの実フィールドで研究を行った。

北九州フィールドでは、ダイナミックプライシング(以下、DP)などの経済的手法による需要家の経時変化を研究対象とした。DPを継続して行った際に起こる価格に対する反応が少なくなる理由を明らかにするためにアンケートとインタビュー調査を行った。

<sup>4</sup> Gollwitzer, P. M., & Moskowitz, G. B. (1996). Goal effects on action and cognition. In E.T. Higgins & A. W. Kruglanski (Eds.), Social psychology: Handbook of basic principles (pp. 361-399). New York: Guilford Press.

<sup>5</sup> Ajzen, I. (1985) From intentions to actions: A theory of planned behavior. In J., Kuhl, J. Beekman, (eds), Action-control: From Cognition to Behavior, pp. 11-39. Heidelberg: Springer.

対馬フィールドでは、省エネルギー行動、再生可能エネルギー電力利用行動の2つに係る行動変容を研究対象とした。再生可能エネルギー電力利用行動の研究事例は見当たらない。省エネルギー行動変容は、情報を用いた介入（情動的介入）を通じ、省エネルギーの意図や行動に影響のある要因を明らかにした。再生可能エネルギー電力利用行動変容は、再生可能エネルギーが導入されたEMSを想定し、これまでの省エネではなく、再生可能エネルギーで発電された電力を賢く使う意図や行動（再エネ電力利用行動）に影響のある情報を探索した。フィールド構築では、九州電力の協力を得て、実験世帯にスマートメーターの設置を行い、電力使用量を計測した。H30年度までは50世帯、H30年度から100世帯に実験参加世帯を増やした。スマートメーターから、Bルートを経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。行動の結果は電力使用量としてスマートメーターで計測する一方、行動の意識や意図を計測するためにアンケート調査を実験前後で行うことで、実験前後の意識と行動の結果を分析できるように設計した。

### ②「電力使用行動」「電力契約行動」「設備投資行動」における行動変容の関係性

電力会社をその特徴により4つのタイプ（再生可能エネルギーを重視する会社、地域とのつながりを重視する会社、経済的メリットを重視する会社及び既存の電力会社）に分類し、各社の顧客に対してインターネットアンケート調査を実施し、取得した調査データを基に分析を行った。アンケート調査はH30年度6月から8月に行われ、4つのタイプの電力会社の回答数合計は4,688件であった。

契約の変更行動は、先行研究において契約変更行動に影響を及ぼすと示されている顧客満足度やスイッチングコストに加え、エネルギーに対する関心などのアンケート項目を作成し、共分散構造分析を用いて顧客の契約スイッチ意図に影響を及ぼす要因を分析した。

「電力使用行動」「電力契約行動」「設備投資行動」における行動変容の関係性は、電力契約変更行動を考えている、または契約変更済の需要家に対し、電力消費行動及び設備投資行動の関係において共通する要因や、その関係性を検討できるようにアンケート項目を作成し、分析を行った。

### ③「エネルギー需要科学」分野の確立

建築学、数理モデリング、電気工学、サービス科学など異なる分野の研究者による論文の共同執筆、学会などワークショップにおける国内・国外の研究者との研究討議により、エネルギー需要科学の分野の確立を目指した。

## (3) 研究成果

### ①電力使用行動

#### 【経済的手法による需要家の経時変化】

需要家行動変容の経時変化に対する研究として、北九州で行われたDPの効果分析を行った。得られた主な知見は1) 継続的なDRの実施に対して需要家の継続的な省エネ反応はあるものの価格変化に対する省エネ反応（価格弾力性）に変化が見られたこと、2) 実験参加者の一部には生活行動（ルーティン）の変化が見られたこと、である。1)および2)の結果から、DP実験参加者は実験開始時には価格情報に対して反応するが、参加者の一部は日常生活行動のそのものに変化が見られ、価格情報に対する反応は弱くなっていることが示された。

#### 【省エネルギー行動変容：電力消費量の比較情報による行動変容】

長崎県対馬市の一般家庭48世帯に対して電力消費の比較情報を与えたときの電力消費量を測定した。このとき自分の過去の電力消費量を比較できる情報と、自分と他者の電力消費量を比較できる情報を用いて、

- A 電力消費量を表示しないグループ
- B 自分の家庭における過去の電力消費量を比較できない形で表示するグループ
- C 自分の家庭における過去の電力消費量を比較できる形で表示するグループ
- D 自分の家庭と似たような家庭における過去の電力消費量を比較できる形で表示するグループ

に分けて実験した。

パネルデータ分析により、グループ D は他のグループより電力削減効果を得た。これは電力消費への意識が形成され行動した結果だと考えられる。また、グループ B は初回実験では電力消費量が増加し、2 回目実験では電力消費量が減少するという異なった結果を得た。グループ B において、初回実験と 2 回目実験では電力消費行動に対する計画を示す「実行計画能力」に大きな差が見られた。初回実験と 2 回目では電力消費への意識の形成が異なっており、電力消費に対する行動が異なると考察される。またグループ C においては「実行計画能力」の低下に加えて電力消費への意識が低下したため、グループ B やグループ D よりも電力消費量が上昇してしまったと考えられる。これらの結果は、意識と行動は密接な関係性があることを示し、より効果の高い行動変容を達成するためには、適切な意識の変容が必要であることを示唆する。

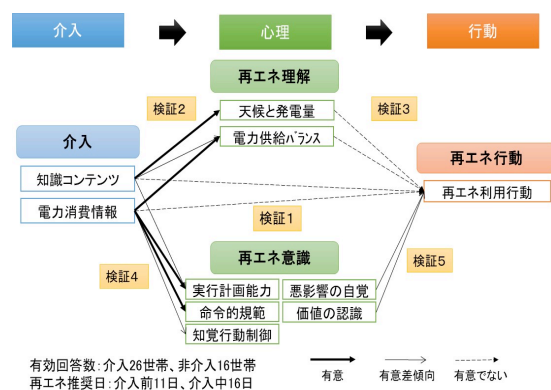
### 【再生可能エネルギー電気利用行動変容】

#### a. 電力消費量の比較情報による再生可能エネルギーに関する意識の変容

電力消費の比較情報提供による再生可能エネルギーに関する意識変容を見るために、意図に影響を及ぼす 8 つの心理要因（悪影響の自覚、命令的規範、責任の自覚、知覚行動制御、態度、実行計画能力、協調的自己効力感、知識）における介入前と介入後のアンケート結果を集計し、介入前後で差があるかを検証した（実験群 A-D は前項と同じものである）。その結果、グループ D においては、責任の自覚、協調的自己効力感で有意な変化があることが分かり、グループ D への介入効果は、他のグループ B、C よりも高かったと考えられる。また、システムの閲覧行動と 8 つの心理要因の関係を明らかにするために、システムの閲覧回数を目的変数、8 つの心理要因を説明変数として重回帰分析を行った。その結果、知識と協調的効力感がシステムの閲覧行動に有意な影響を与え、悪影響の自覚、知覚行動制御に有意傾向があることが分かった。以上より、他者との比較情報を一般家庭に対して提供した場合に、再生可能エネルギー利用に関する意識の変容を伴う行動が実施されている可能性が示唆された（川本ほか，2019）<sup>口頭発表 370</sup>。

#### b. 再生可能エネルギーに関する知識が再生可能エネルギーを利用する行動に与える影響

長崎県対馬市在住の 90 世帯を調査対象とし、平成 31 年 2-3 月の間にインターネット経由で各世帯の電力消費量と再生可能エネルギーに関する基礎的な知識コンテンツの提供を行った。結果（図 4-8-3）として、検証 1 より知識コンテンツと電力消費情報の提供が再エネ利用行動を変容させるような傾向は確認できなかった。また、検証 2 より、今回の介入が天候と発電量及び電力供給のバランスに関する知識を向上させている傾向が見られた。しかし、検証 3 より、再生可能エネルギーの理解度が高いからといって、再生可能エネルギーの利用行動に結びついていないことは確認できなかった。また、検証 4 より、今回の介入で実行計画能力、命令的規範、知覚行動制御の 3 つの心理要因に影響を与えたこと、検証 5 より、再生可能エネルギーの利用行動をとっている人は悪影響の自覚と価値の認識が高いことが示唆された（川本ほか，2019）<sup>口頭発表 370</sup>。



#### c. 再生可能エネルギー発電情報が再生可能エネルギーを利用する行動に与える影響

令和元年 8 月、再生可能エネルギーの発電量とそれに伴った環境配慮行動の提示が、電力需要家の再生可能エネルギーを利用する行動に与える影響を明らかにすることを目的に

実験を行っている。

長崎県対馬市在住の 90 世帯を調査対象とし、インターネット経由で各世帯の電力消費量、対馬の天気、再生可能エネルギーの発電量予測値の情報を提供する介入を行っている（図 4-8-4）。実験期間は 2 か月間を予定している。

8 月末までの途中結果として、介入グループにおいて、晴れた日の昼間の電力消費量の増加率が、非介入グループに比べて高い傾向が見られ、介入効果の可能性が示唆された。ただし、現時点では統計的に有意な差があるとは判定されていない。実験を継続し、分析を進める予定である。

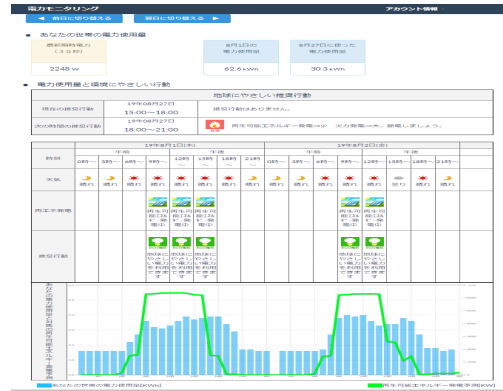


図 4-8-4 再生可能エネルギー発電状況の画面イメージ

## ②電力契約行動・設備投資行動および電力使用行動との関係性に関する研究

契約変更行動においては、先行研究にて契約変更行動に影響を及ぼすと示されている顧客満足度やスイッチングコストと同程度に、エネルギー節約行動、電源構成に対する選好、エネルギー供給に対するニーズ、つまりエネルギーに対する顧客の関心・行動が影響を及ぼすことが示された（図 4-8-5）。このエネルギーに対する関心・行動の内容に関して先行研究等調査した結果、消費者行動研究分野における「関与」の概念にて説明できる可能性が示された。この点は新たな発見である(Amaha et al., 2019) 原著論文 105)。

「電力使用行動」「電力契約行動」「設備投資行動」における行動変容の関係性について、契約変更行動、電力消費行動及び設備投資行動の間に共通する個人的要因が影響を及ぼしている可能性が示唆された。例として、再エネ新電力又は地域新電力の顧客は、環境配慮機器への投資意欲が相対的に高い傾向にあることが示され、他社顧客よりも環境意識が高い事が両社顧客に共通する要素であることが明らかとなった（図 4-8-6）。また、電力契約行動と電力消費行動、また電力消費行動と設備投資行動の間には、夫々電力にかかるコストを低減したい顧客の意図が 2 つの行動に共通する個人的意図として存在することが明らかとなった（天羽ほか, 2019) 口頭発表 369)。3 行動を対象とした研究結果は類似事例がない。

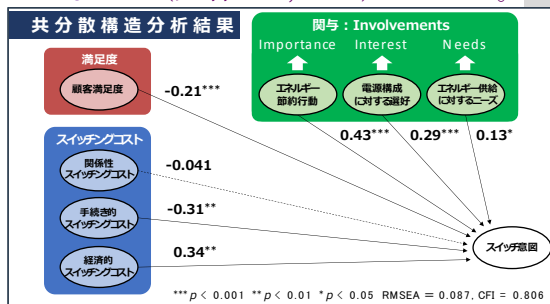


図 4-8-5 契約変更意図分析結果

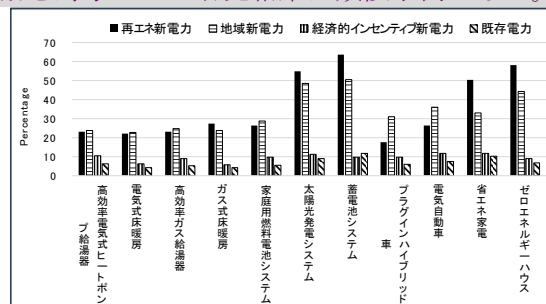


図 4-8-6 設備投資意図比較

## ③「エネルギー需要科学」分野の確立に向けた研究

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の体系的整理を行い、エネルギー需要科学に関わる基礎的知見の整理という形で貢献することが出来た（川本ほか, 2019) 未発行論文 9)。さらに、需要家への価値を新たな視点でとらえなおし、かつ、従来から研究されてきた提供者への価値（operand resource の最小利用における企業としての利潤獲得）、社会・環境価値（自然環境と調和のある社会・経済の持続的な発展）の 3 者を同時に向上させるサービスシステムを構築する方法について需要家の役割を中心に研究していくことを通じ、エネルギーシステムにおける能動的なアクターとしての需要家の役割を体系化するための科学として、需要科学の再定義を行った（Hidaka et al., 2018) 口頭発表 259)。

#### 4.9 エネルギー需要科学の確立(需要科学サブグループ)

##### (1) 研究の背景とねらい

本プロジェクトの開始に当たり、領域アドバイザーより、本領域全体に対してエネルギー需要の研究がどのように貢献しうるのか、需要研究全体の枠組みを明確にするようアドバイスがあった。これを受けて、当初全体研究計画に掲げた「需要家情報の整理」のテーマを大幅に拡大し、3グループの共同作業として「エネルギー需要科学」の確立をテーマに取り組んだ。

##### (2) 研究実施方法

「エネルギー管理における需要科学」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、アプローチや手法論についての文献レビューと整理、国内外でのワークショップを実施した。なお当初計画通り需要家情報の相互利用も進めており、阪大Gと東大生研G間で計測データ(東大)を用いたモデル検証(阪大)、モデル(阪大)による給湯需要予測結果のDR効果予測(東大)活用などの実績を挙げている。

##### (3) 研究成果

国内外のエネルギー需要研究をレビューし、今後脱炭素化に向けたエネルギー需要の削減と、再生可能エネルギーの大量普及に応じた需要のフレキシビリティの確保の相矛盾する2つの要求を達成しなければならないこと、そのためにエネルギー需要の科学をより進展させなければならないこと、国際的にも IPCC などエネルギー需要に関する研究が注目されていることを明らかとした。また、エネルギー需要がいわゆる「派生需要」であることから、その調整可能性の評価には「エネルギーサービス」に対する需要家の欲求を解明することも必要であり、工学、経済学、医学、心理学等、多様な学問領域の知見から構成されることがエネルギー需要科学の特徴である。特に分散協調型エネルギー管理においては、①エネルギー需要を十分な時間粒度でエネルギー消費機器レベルへ分解②各々の機器稼働とサービス・快適性の関係の明確化③可制御負荷(供給側の要請で制御可能な負荷)の分離とサービスへの影響評価が必要である。このためには、居住者行動など「ひと」を中心とするアプローチが重要である。

エネルギー管理のための需要研究においては、「要素分解型」と「全体挙動型」のアプローチがある。図1に、筆者らによる家庭におけるエネルギー需要の発生構造モデルを示す。要素分解型需要科学では、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。

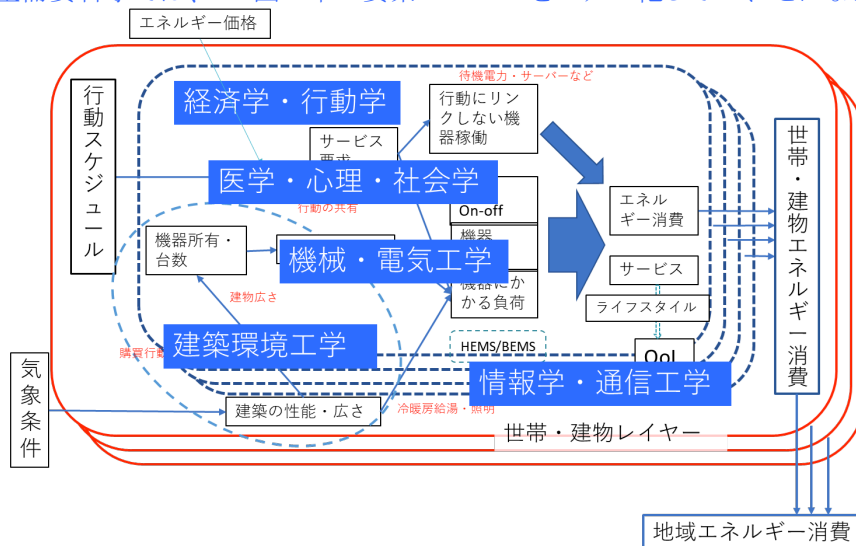


図1 エネルギー需要の発生メカニズム案 (住宅を例に)

この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、それぞれについて文献レビューと整理をおこなった。エ

エネルギー需要データの収集と分析では、スマートメータデータの用途分解手法の開発や、非接触型計測システムの開発が今後重要になると考えられる。エネルギー需要モデルでは、居住者行動の考慮など需要モデルの新しい展開について整理した。影響要因の解明と介入では、環境に優しい行動を促す要因の分析を行い、今後要素分解型のアプローチが求められること等を示した。

H30 年度より省エネルギー研究の世界的拠点である米国 Lawrence Berkeley National Laboratory の Alan Meier 博士と共同で研究を進め、次項に示す様に多くの場面で発表の機会を得、高い評価を受けた。成果をレビュー論文として Renewable and Sustainable Energy Review 誌に投稿した<sup>未発行論文 5)</sup>。

#### (4) エネルギー需要科学確立のための広報活動

2016 年 11 月 21 日に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、日高、山口、岩船によりそれまでの検討成果が紹介され、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」が展望解説<sup>その他著作物 13)</sup>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」において下田が「エネルギーマネジメントにおける需要研究」と題して講演した。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をとりまとめ、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。

2018 年 8 月 13 日には、米国の民生部門省エネルギー研究における著名な学会である ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings に岩船、日高、山口、下田が合田アドバイザーと共に参加し、前述の Alan Meier 博士のコーディネートにより、「インフォーマルセッション” Energy Demand Science in a De-carbonized Society – Aiming for Energy Efficiency and Energy Demand Flexibility in a De-carbonized Society-”<sup>口頭発表 255)</sup>を開催したところ、数十名の参加者を得て 2 時間にわたって活発な議論がおこなわれた。2019 年 6 月 5 日には、ECEEE Summer study on Energy Efficiency においても同様なセッションを開催した。2018 年 9 月 18 日には CREST の EMS 領域公開シンポジウムにおいて、下田が講演をおこなった。更に、同月 26 日には RITE がオーストリアの IIASA と共同で開催した Discussion Workshop “Rethinking Energy Demand”<sup>招待講演 71)</sup>で講演の機会を得、エネルギー需要科学の枠組みおよび家庭モデルの 2030 年および 2050 年の推計結果について発表したところ、IPCC 第 3 部会副議長の Diana Urge-Vorsatz 氏はじめエネルギー需要の分野で著名な各国の関係者から非常に高い評価を受けた。(概要は IIASA の HP に掲載<sup>6)</sup>)

更に、2019 年 3 月 13 日には北海道科学大学にて開催された電気学会全国大会において、シンポジウム「エネルギー需要を科学する」を開催し、下田、岩船、林チームの東大大橋教授、日高、山口が講演した<sup>招待講演 92-95)</sup>。また、3 月 13 日には経済産業省産業技術環境局長と文部科学省研究開発局長が共同議長を務める「エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会」の第 8 回会合にて「脱炭素社会の実現に貢献するエネルギー需要科学」<sup>招待講演 97)</sup>というタイトルで講演をおこなった。この会議は CO<sub>2</sub> 大量削減に貢献する技術の評価を行い、パリ協定に基づく我が国の「長期戦略」にインプットするための会議であり、ここで発表することの政策的な価値は極めて高いものと考えている。

(5) 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

<sup>6</sup> IIASA Rethinking Energy Demand,

[http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/TransitionstoNewTechnologies/event/180925\\_RE D.html](http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/TransitionstoNewTechnologies/event/180925_RE D.html)

「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く、その成果が論文だけで無く JST-CRDS により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。

## 【データ・インタフェース】

### 4.10 データ・インタフェースの開発(東海大学)

#### (1) 研究の背景とねらい

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と考える。データ・インタフェースにより、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

まず初めに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を行い、継続的な対話により、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、提供方法について改善を行う。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順次提供する。

まずプロトタイプを東海大学において開発し、次に多様な利用を考慮して Azure 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し、並行してオンプレミスサーバにより長期間のアーカイブを利用できる環境を構築する。オンプレミスサーバでは、予測値に加え、2030 年のシナリオデータも提供する。

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できる環境を構築する。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、WSC2019 でも同様の支援を行う。太陽光発電量の実況値に加え、WSC2017 からは予測値についても提供した。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ことも検討する。

AMATERASS Web で過去の気象データの GIS 可視化が可能となり、そのシステムへのデータの提供をスムーズにするために Web フォームでのデータ提供に加え、WebAPI により JSON 形式のデータを提供する方法を加える。

#### (3) 研究成果

H27 年度には、チーム内の需要科学グループの要望をヒアリングし、日射量推定値を含む衛星からの気象データを、簡単な操作で提供することを可能とする Web ベースのデータ・インタフェースのプロトタイプを構築し、気象データの利用を要望するグループのヒアリングによりシステムの改善を行った。

さらに、日射量のナウキャスト推定値を含む気象データの EMS への活用のケーススタディとして、豪州ソーラーカーレース WSC2015 へ参戦した東海大学ソーラーカーチームを支援するための、気象データの可視化システムを構築し、実際にレース支援を行った。(図1)

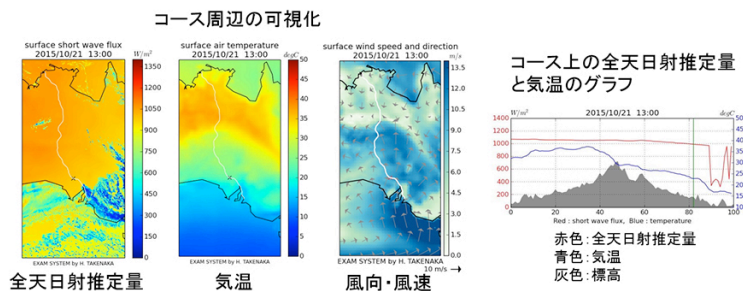


図1 ソーラーカーレース支援のための気象情報の可視化



H28年度には、TEEDDA チームにおけるデータの共通利用を目指し、クラウド環境の利用を検討し、気象データの提供システムをクラウド環境に移植した。更に、共有データとしてチーム内やCREST 内で共有可能なデータについての検討を行った。(図2)

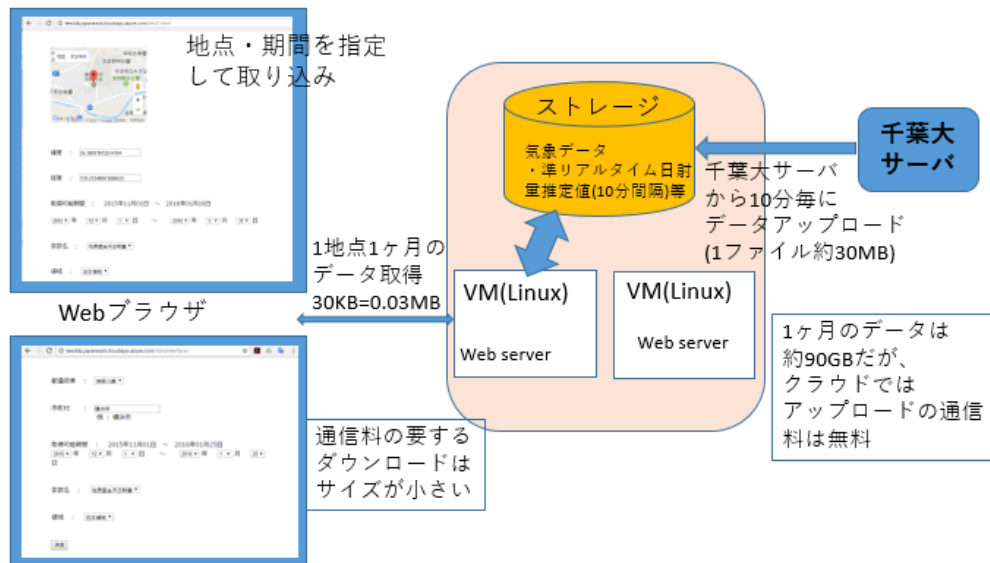


図2 データインタフェースクラウドシステム

H29年度は、H28年度にクラウド上に構築したシステムを実際に運用し、データ提供の処理速度とクラウド費用について検討した。CREST 内での利用においては、大容量のダウンロードを定期的に行いたいグループもあり、クラウドとオンプレミスの2つの環境を使い分ける必要性について検討し、CREST 内における利用者からヒアリングにもとづきサービスの提供方法を使い分ける必要があった。(図3)

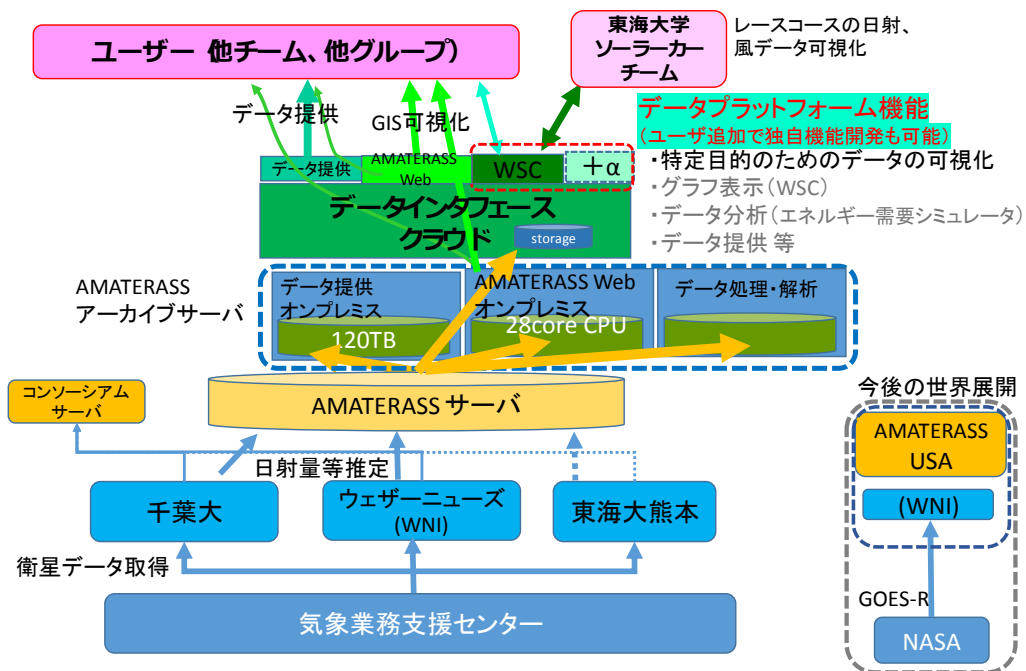
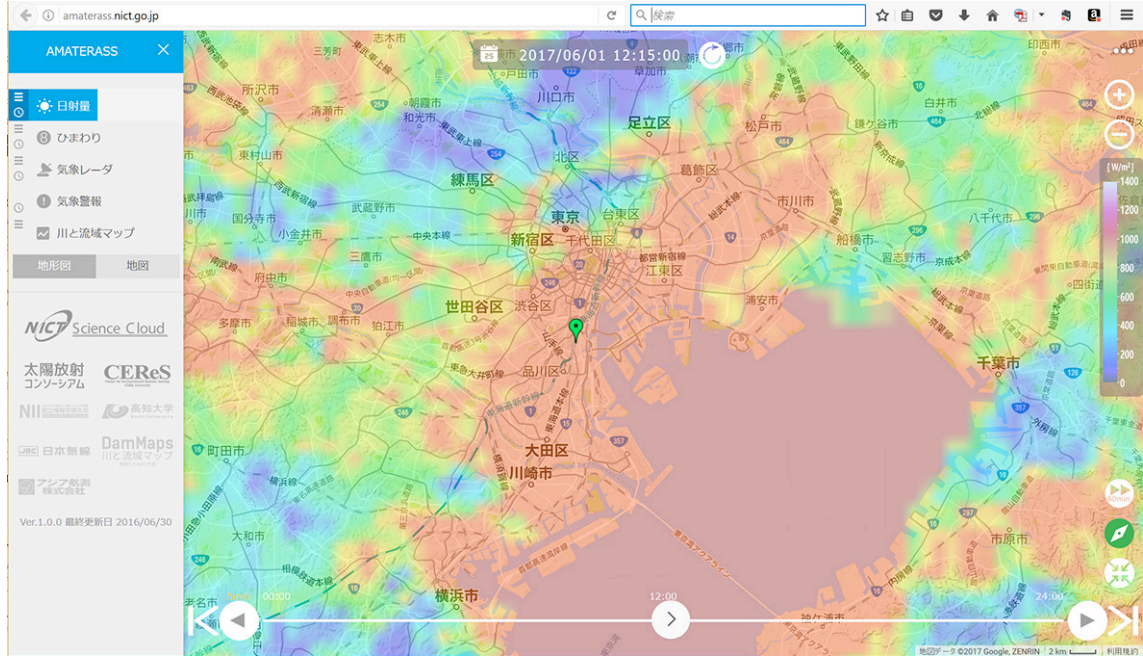


図3 TEEDDA 衛星データのデータフロー

また、日射量を含む気象データの予測値についても提供されることとなったため、まずは豪州ソーラーカーレース WSC2017 において、気象データの追加として提供を行った。予測値としては、毎時 0 分に 1 時間ごとに、6 時間後まで 10 分単位のデータが提供されたが、WSC2017 では 6 時間後まで 30 分単位のデータを可視化してソーラーカーチームに提供した。

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。



H30 年度は、データインタフェースサービスと AMATERASS Web との連携をスムーズにするとともに、よりシームレスにデータの受け渡し可能な JSON 形式でのデータ提供を可能とした。さらに、大量のデータ提供を可能とするオンプレミスサーバと直近の短期間に限りデータを提供するクラウドサーバの 2 つの環境でデータ提供環境を整えた。

準リアルタイムデータは 2.5 分間隔のデータも提供可能とし、予測値としては 6 時間後前の 10 分間隔の予測値およびシナリオデータについて緯度・経度を指定することで提供可能なシステムとして、Web フォームからの指定と JSON サービスの 2 つの方法を実装した。

図4は、オンプレミスサーバのトップページであり、準リアルタイムデータとして日射量(オレンジの折れ線)と太陽光発電出力(棒グラフ)、6 時間後までの予測値(青の折れ線、7 時までのデータを用いて 6 時間後の 13 時までの予測値を算出している)を示すことで、本システムで入手できるデータについての理解しやすくした。提供データ・提供方法をまとめる。

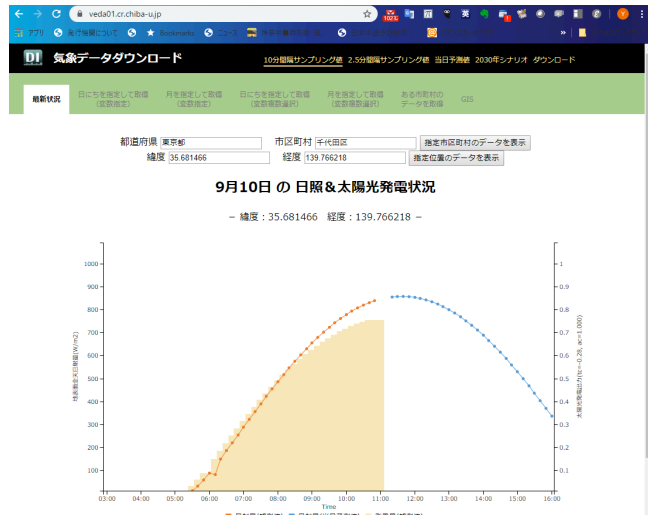


図4 オンプレミスサーバでのデータインタフェースサービスのトップページ

|  |   |                           |             |
|--|---|---------------------------|-------------|
| (a) 準リアルタイム気象データ<br>(日射量、太陽光発電量、セル温度、気温、風速、風向) | (a-1) 10 分<br>間隔データ                     | オンプレミス<br>(Web フォーム、JSON) | 1 年前からのデータ  |
|  | (a-2) 2.5 分<br>間隔データ                    | クラウド<br>(Web フォーム、JSON)   | 2 ヶ月前からのデータ |
| (b) 日射量予測値                                     | Web フォーム・JSON、オンプレミスサーバのみ、<br>認証により使用制限 |                           |             |
| (c) 2030 年シナリオデータ                              |   |                           |             |

データの提供方法として、JSON 形式での提供方法を加えたことで、以下のように、URL に緯度・経度、期間、データ種別を指定することで、JSON 形式でデータ取得できる。

<http://teedda.japaneast.cloudapp.azure.com/v1/json/TEST?lat=36.511711&lng=137.090916&date=20181010&date2=20181012&variable=dwn.sw.flx.sfc>

これにより、ブラウザに上記のような URL を指定すると、図5左のようにブラウザでデータが確認でき、Excel でも直接データの取得ができるようになった。同様に、アプリケーションからも JSON 形式は扱いやすく、統計解析ソフトウェアの R から JSON 形式で指定日付のデータをインターネット経由で日射量データを受取り、整形後、グラフに描画するサンプルプログラムも提示した。JSON 形式の API を提供できることにより、データへのアクセスしやすさは飛躍的に向上した。

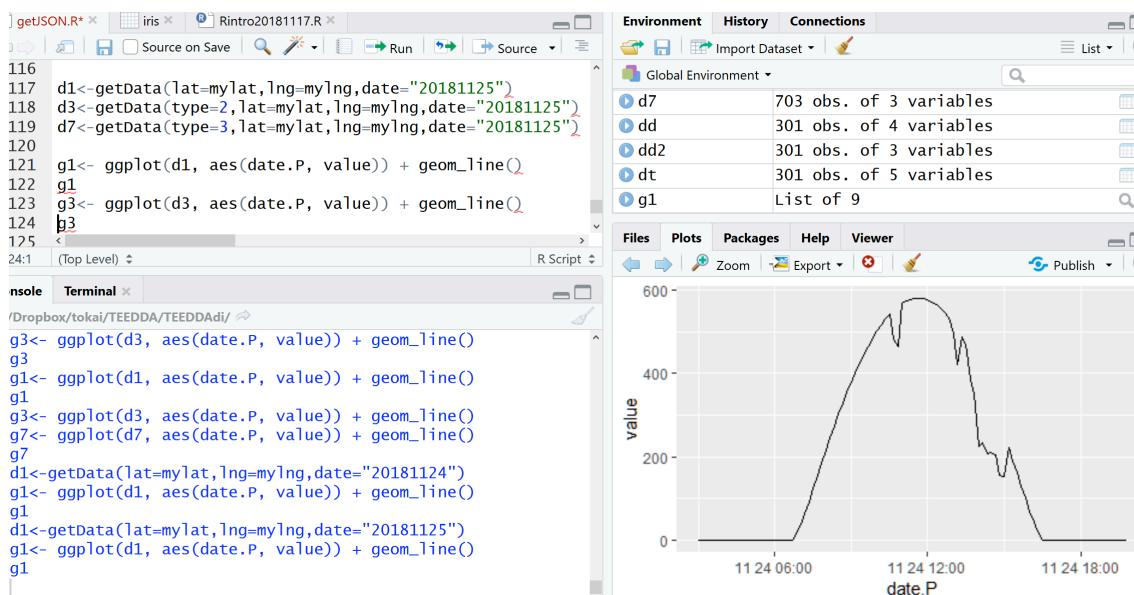


図5 統計ソフトウェア R で、JSON 形式でデータをダウンロードしグラフ描画

#### 4.11 気象・需要データの可視化(NICT)

##### (1) 研究の背景とねらい

本研究では、中島最強チーム内の異なる 2 種類のデータ(太陽光発電量データをベースとした電力供給データと行動モデルをベースとした電力需要データ)を一つのプラットフォーム上で時系列 GIS(地理情報)可視化する。

##### (2) 研究実施方法

4.13 協調分散型 EMS プラットフォームで開発した基盤技術を融合し、WebGIS アプリケーションとして実装する。

##### (3) 研究成果

図1は太陽光発電量データ(日射量データ)を可視化した WebGIS(AMATERASS Web)である。他の気象データ(気温・湿度・風向風速・ひまわり雲画像・高解像度降水ナウキャストなど)とオーバーレイ可視化が可能である。また、これ以外にメッシュデータを基にした行政境界日射量データも作成した。これにより、図3で後述する需給バランスの直接比較がより容易になった。さらに、これをスマートフォンアプリケーション開発することで、一般ユーザが任意の地点で日射量に現在地と予測値をグラフ表示できるようにした。アプリの利用事例は他項(4.10)において紹介した。

図2は行動モデルをベースとした電力需要データの WebGIS マップである。図は町丁目単位の行動モデル可視化を示しており、平日の一般家庭の家事確率である。(都心に近いエリアと、中央線等の沿線エリアに低確率世帯が集中している。)行動モデルデータは 24 時間・町丁目スケールで可視化、需要モデルデータは 2016 年モデル(気象データを含むモデル)・市町村スケールで可視化した。

図3は図1と図2の異なる二種類のデータを、4.13 で述べる STARScontroller で同期可視化したものである。時空間を同期して需要と供給を比較できるため、独立に作成されたデータの直接比較が可能となる。なお、STARScontroller は CREST 全体会議(2018)および国際会議(2019)でデモ展示した。

図4は千葉大学に設置した 36 面 TDW(タイルドディスプレイ)に複数の Web ブラウザ上のデータを表示したものである。ミドルウェアとして理化学研究所が開発したオープンソース ChOWDER を用いている。利用事例は他項(4.12)において議論する。後述のアジア・オセアニア版 Amaterass では、3 次元可視化 WebGIS である iTowns または Cesium による可視化を行う予定である。ChOWDER と iTowns を融合することで TDW 上に球面にマッピングした日射量をリアルタイム可視化することが可能となる。

図5は本研究で開発した一般ユーザ向け Amaterass スマホアプリ開発である(R1 年度中に

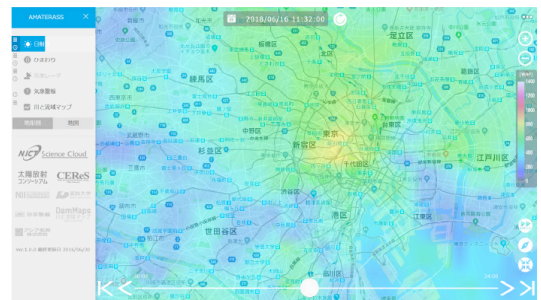


図1 日射量データ WebGIS (Amaterass Web) (<https://amaterass.nict.go.jp>)

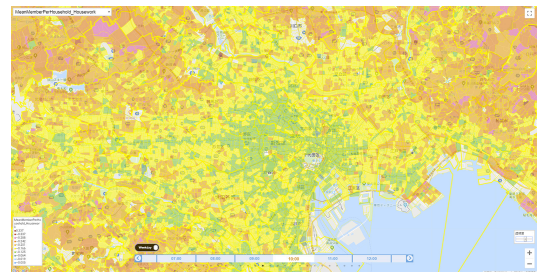


図2 行動データ・需要データ可視化 Web



図3 日射量データ・需要データの融合可視化



図4 36面 TDW@千葉大



図5 一般ユーザ向け Amaterass スマホアプリ

iOS および Android のストアにおいて無償公開予定)。アプリケーションは OAuth2.0 でユーザ管理することにより、ユーザ家庭ごとの太陽光パネルデータを用いた発電量計算が可能である。

図1の国内日射量データは1km メッシュデータであるが、それとは別に 4 kmメッシュの全球(フルディスク)データを作成している。こちらは、3次元可視化が可能な WebGIS である iTowns または CESIUM 上で可視化する。これによりアジア・オセアニア域のリージョナル(グローバル)スケールでの日射量評価が可能となる。リージョナル日射量データは、ソーラー発電所などでの利用とは別に IoT(Internet of Things)での利活用が可能である。IoT では主として自立型のセンサーが必要となるが、ソーラー給電は最も期待されている電力源である。日射量の影響を受けるため、Amaterass データを用いたインテリジェントな電源制御が重要となる。図6は Amaterass を用いた IoT センサーシステムの例である。NICT が開発中の映像 IoT(自立型カメラを用いた映像系 IoT 技術)システムであり、現在他のプロジェクト(JST/e-ASIA)においてタイ・NECTEC と共同開発中である。インターネット側から Amaterass による日射量予測値を取得し、マイクロコントローラ上でこれに基づくオペレーションスケジューリングを行う。この技術の利活用について、マイクロコントローラ 2020 年にアジア地域数カ国の IoT 研究者によるワークショップを開催する。

また、林最強チームから提供される狛江市の送電線・配電線データを<iframe>を用いたオーバーレイにより GIS 可視化する。これにより、需要や供給(日射量)と直接比較が可能である。

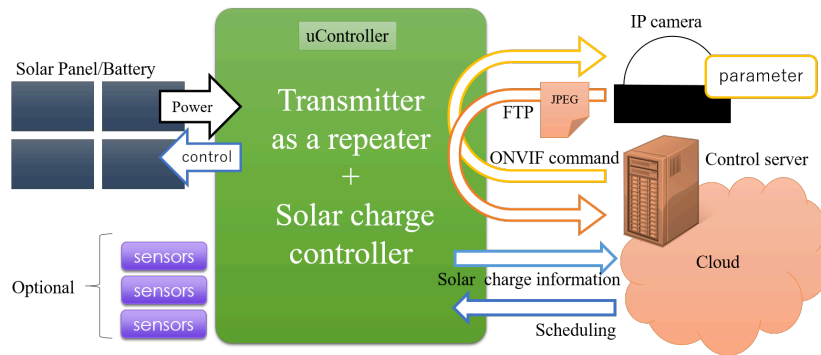


図6 Amaterass を用いた IoT センサーシステム

## 4.12 データハンドリングおよび大画面可視化(千葉大学)

### (1) 研究の背景とねらい

千葉大学環境リモートセンシング研究センター(千葉大 CEReS)は、文部科学省が認定する環境リモートセンシング分野の共同利用・共同研究拠点である。特に人工衛星・環境データのアーカイブ(データハンドリング)および公開、研究利用・社会実装に向けたアーカイブデータの利活用の推進は千葉大 CEReS の使命としてうたわれている。この文脈の中、2007 年度から 4 大学連携バーチャルラボラトリー(VL <http://www.cr.chiba-u.jp/~4vl/>) に参画しており、千葉大 CEReS の VL 活動の一環として、世界の主要な静止気象衛星データの収集・処理・公開を継続して実施してきた。リアルタイム取得分も含めたこれらの静止気象衛星データ群は CREST/TEEDDA の基盤となる AMATERASS プロダクト生成のための基礎データとして機能するため、膨大なデータの効率的なハンドリングはベースラインの確保の観点から極めて重要である。そのため、これまでのデータハンドリングに関する取り組みについて報告する。

加えて、大幅な機能強化が図られたひまわり8号を代表として、人工衛星データは高解像度化・大容量化をしており、その全貌を俯瞰するためには大規模なディスプレイ装置が必要となる。タイルドディスプレイ(TDW)はその名の通り複数のモニターをタイル状に並べることで一つの大きな画面として映し出す装置を指す。TDW は TEEDDA の活動で得られた需要推定と AMATERASS による太陽光発電推定データとが同時に見えることでその真価を発揮する。ここでは TDW に関する千葉大 CEReS を中心とした活動について報告する。

### (2) 研究実施方法

AMATERASS 開発は VL 初期より行われ、JAXA-東大グループの竹中博士による AMATERASS 開発に寄り添う形で計算された準リアルタイムプロダクトのアーカイブサポートをしてきた。初期段階ではデータフローのノウハウが不足しており、アーカイブされたデータに抜けが多かった。TEEDDA 立ち上げより AMATERASS アルゴリズムが刷新され、MTSAT (ひまわり 6, 7 号)時代の再計算が実施された。そのプロダクトアーカイブも千葉大 CEReS の VL で担ってきた。TEEDDA により、MTSAT から 10 年以上の放射量プロダクトアーカイブがなされ、長期 AMATERASS データ提供の基盤を担ってきた。

データフローは VL, TEEDDA の活動を通じ多くのノウハウを得た。系統内での混雑、混線、トラブル波及を防ぐため、系統を分けて接続・管理を行うことを基本としている。外向きの公開は SINET (学術インターネット回線:<https://www.sinet.ad.jp/>)直結が許され、大量データ公開が可能となっている。加えてサーバ室内のみのプライベート回線によりサーバ間通信を明示的に分け、外部からの無用な攻撃の影響を低減させている。さらに2016年度に実施した、文部科学省 DIAS フィジビリティ研究の一環として、千葉大 CEReS と海浜幕張にあるウェザーニューズサーバ室とをダークファイバ回線を用いて 1Gbps で直結回線を持つことで、CREST 活動による成果を NPO 法人「太陽放射コンソーシアム」のサーバ(<http://www.amaterass.org/> 事務局のウェザーニューズ)へ、よりスムーズに AMATERASS データの提供が行えている。

ビックデータを確認するには大画面での定常表示の活用が好都合であるが、ハードウェア的に特化した大画面設備を独自に開発することは現実的ではない。千葉大 CEReS に設置された 36 面 TDW は約 10 年前に NICT で構築され、共同研究の一環として 2017 年度末に移設された。理化学研究所と九州大学が共同開発している TDW をソフトウェア的に実現するシステムである ChOWDER (Collaborative workspace driver)を用いて 36 面 TDW を実現している。同様の機能はオープンソースである SAGE/SAGE-2 (<https://sage2.sagecommons.org/>) が世界的には主流であるが、開発者と直接共同研究ができることから、2018 年度に千葉大 CEReS・理研・NICT・九州大の TDW 開発に関する共同研究の覚書を結ぶことで、活動をスムーズに実施することができている。

### (3) 研究成果

データハンドリングに関しては、これまでのデータアーカイブおよび公開により、2019年8月末日迄の集計値で千葉大学外のユーザーにより約 6,400 万ファイル(64,493,740)のデータダウンロードがなされており、このダウンロード数は千葉大 CEReS のひまわり 8 号 gridded data (これも JAXA-

東大グループの竹中博士による貢献である)の千葉大学学外ユーザーによるファイルダウンロード数(約3,000万;30,248,330, 同じく2019年8月末日迄の集計値)の倍以上に達する。特に2017年以降, 毎年コンスタントに1,000万ファイルを超えており(FY2017: 16,120,222, FY2018: 13,784,444; FY2019: 15,684,073; FY2019は2019年8月末日迄), CREST/TEEDDAの歩みと共に認知度と利用数を着実に増やしていると言える。

TDWに関しては, 千葉大 CEReS に設置された NICT オリジナルのハードウェア仕様では, コンシューマ向け GPU の GeForce470(Full HD 2画面出力)を1つの PC に2枚搭載し, 同仕様の PC 9台を管理用 PC1台で束ねることで1つの大きな画面を作り出していた。この仕様は画面投影のためのセットアップ時に1PCあたり4画面(画像の縦4台のモニタ)の設定を行い, 同じ作業を残り8台全てに対して毎回行う必要があったため, 使い勝手の観点では非常に煩雑であり, その煩雑さが気楽な利活用を躊躇させる側面もあった。2018年度に締結した TDW に関する共同研究の中で, CREST/TEEDDA データインターフェイス活動で利用可能なよう, TDW のハードウェア構成中 GPU を見直し, 業務用途に用いられる Quadro P2000 に挿し換えた。P2000 は 4K 出力可能な Display Port を4つ搭載し, 消費電力も 75W と GeForce470 の 30%程度でかなり低いことから1PC中に3枚搭載可能となり, TDW を構成する PC の台数を減らすことに成功, 消費電力の削減とセットアップの効率化にも大きく寄与した。本仕様変更で NVIDIA の mosaic による画面連結機能が利用可能となり, 副産物として ChOWDER を使用しなくとも 12面モニタを1デスクトップで扱うことが可能となった。つまり PC1台で12面(6K・5Kサイズ)を用いた高解像度動画表示や, Google Earth を用いたマルチデータの可視化, またこれらを3組用いて ChOWDER を用いた 36面全体を用いた可視化する等, ニーズに応じた多彩な使い方に対応させることが可能となった。加えて, 稼働の手間も大きく低減したことから, 来客用の大画面動画デモンストレーションもその日のリクエストで気楽に行えるようになり, TDW の利用頻度も増えている。

さらに副次的効果として, TDW を構成する PC の OS が Linux(ubuntu)であることから, 今回の TDW 仕様変更やその後の試行錯誤を通じ, linux ベースでの TDW 構築のノウハウが千葉大 CEReS 内に蓄積され, 千葉大学の目玉となっている, 千葉大学西千葉キャンパス附属図書館オープンスペースに設置され, 連続稼働している 4k ディスプレイ6枚で運用されている「高解像度ひまわりリアルタイムモニタリング (<https://news.mynavi.jp/kikaku/20150826-a002/> に本システム紹介記事が掲載されている)のリプレースが可能となった。図書館に設置されたシステムは windows 7 で構成され, OS のサポート終了の前にリプレースする必要があった。Windows 10 ベースでは自動 OS アップデートにより, 予期しないトラブルに度々見舞われたため, 連続自動稼働を実現させる上でオープンソースの活用が必要であった。そのため, 2019年度中に附属図書館に設置されたシステムも Linux ベースのものにリプレースする予定である。

## 【チーム外との研究等】

### 4.13 EMSプラットフォーム構築

#### (1) 研究の背景とねらい

本 CREST プロジェクトは、全部で5つの最強チームから構成されている。中島最強チームはこれらを統合するための協調分散型 EMS システム開発を担当しており、NICT が同システム的设计開発(図1)と協調分散型 EMS プラットフォーム開発を行う。これにより、時系列 GIS(地理情報)可視化アプリケーション開発が可能となり、中島最強チーム内外の異なるデータ(電力需要データ、電力供給データ(太陽光発電データ)、狛江市の送電線データ等)を一つのプラットフォーム上で時系列 GIS(地理情報)可視化基盤を構築できる。可視化アプリケーションについては、別項(4.11 気象・需要データの可視化)において議論する。

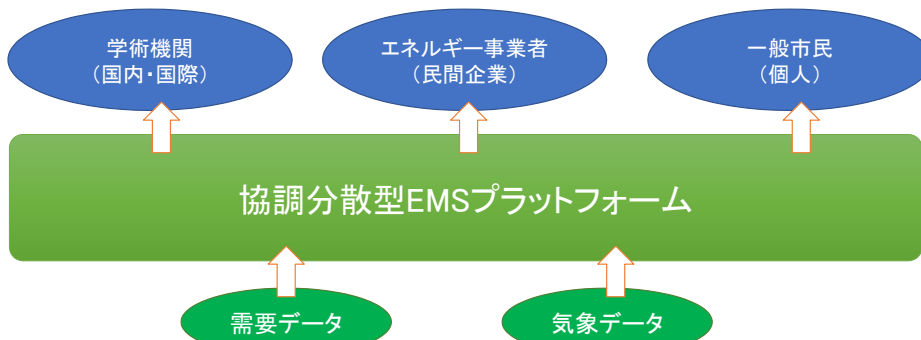
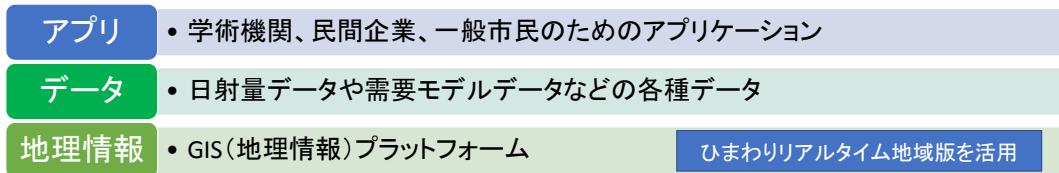


図1 協調分散型 EMS システムの3層構造

#### (2) 研究実施方法

協調分散型 EMS プラットフォームの基盤として、複数の新しい Web 可視化技術を導入する。これらを組み合わせることで再利用性が高い時系列 GIS(地理情報)可視化アプリケーションを低コストで開発することが可能となる。

#### (3) 研究成果

時空間連動可視化 Web 用 jquery プラグイン (<http://www.k2go.jp/public/>)

本研究開発では、複数の時空間連動可視化 Web 用 jquery プラグインを開発した。これらのプラグインはオープンソースとして Web 公開(図2)し、さらに Github 等への登録も検討中である。

##### ① Timeline (jquery プラグイン)

多くの GIS ツールには標準的な時間管理 API が用意されておらず、また時間軸バーをスタイルシートを用いて自由にデザインする環境がない。Timeline は WebGIS に時間軸バーを容易に組み込むことができる jquery プラグインである。



図2 時空間連動可視化 Web 用 jquery プラグイン (<http://www.k2go.jp/public/>)



② STARScontroller

独立に開発された複数の WebGIS アプリケーションデータを、同日の日時や同一の時点で比較したい事例は多くある。STARScontroller は、複数の WebGIS ブラウザの時空間情報を同期するために用いられる。各 WebGIS アプリはあらかじめ定義されたグローバルなメソッドを組み込み、STARScontroller がこれらをコールすることで時空間同期処理を実現する。

③ TileViewer

Web 上にタイル化された高解像度画像ビューアを構築する際に用いる jquery プラグインである。オプションとして緯度経度情報を処理することで簡易的な WebGIS ビューアとしても用いることができる。また、Timeline と組み合わせることで、時間変化する時系列高解像度画像ビューアを構築することもできる。

<iframe>による HTML オーバーレイ機能

NICT が中心となり開発・公開を行っているひまわりリアルタイム Web アプリケーション (<http://himawari.asia>) では、機能追加によるプログラムの複雑化が課題の一つとなっている。特定データのタイル画像表示だけではなく、これらに台風位置情報や気象警報 XML をオーバーレイしたり、科学館や学校で利用するためのゲームパッド等に寄るエフェクトをオーバーレイしたりすると、HTML ファイルは複雑化し、再利用性が著しく低下する。協調分散型 EMS プラットフォームでも、例えば中島最強チームによる日射量 Web (AMATERASS) 上に林最強チームによる狛江市電力網データや中島最強チームによる全国域での行動モデル・電力需要モデルをオーバーレイする場合、プログラムが複雑化するだけではなく、単独利用が困難となる。(例えば日射量閲覧ユーザには、行動モデルメニューが不要である。) そこで、本計画では、幅広い種類のコンテンツを Web に埋め込むことができる要素技術の一つである<iframe>を用いたオーバーレイを実装する。基盤となる WebGIS では、上記の STARScontroller でも用いられる時空間場を他の Web アプリから呼び出すことができる。この機能を活用し、対象となる Web アプリケーションをフレームとして埋め込むことで、異なる機能を有する Web アプリケーションをオーバーレイする。図 3 は<iframe>を用いたオーバーレイのために試作した井村最強チームによる HARPS Web の例である。日射量予報値の Web アプリ上にユーザが独自に発電所をドラッグ&ドロップできる。

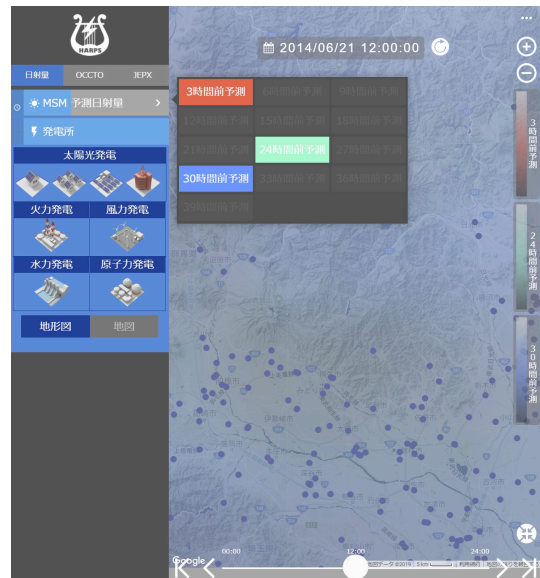


図 3 日射量 Web への発電所オーバーレイ機能

Gfarm/Pwrake (筑波大) を用いたリアルタイム並列タイル画像生成

日射量データや気象状況を加味した行動モデルデータはリアルタイム処理されるため、データ処理速度が大きな課題となる。本研究開発では、筑波大学による Gfarm/Pwrake を用いてタイル画像生成を行うシステムを開発し、千葉大学および NICT のクラスタ計算機環境 (一部は 4.10 データインターフェースのシステム) においてシステムを実装および実運用することで、低コストで高い並列化効率を得ることができた。

表 1 需要マップで使用している全国町丁目境界データサイズ (TopoJSON)

|        | ファイル数     | ファイルサイズ (合計) |
|--------|-----------|--------------|
| 町丁目データ | 1896 ファイル | 592MB        |
| 市町村データ | 47 ファイル   | 12MB         |

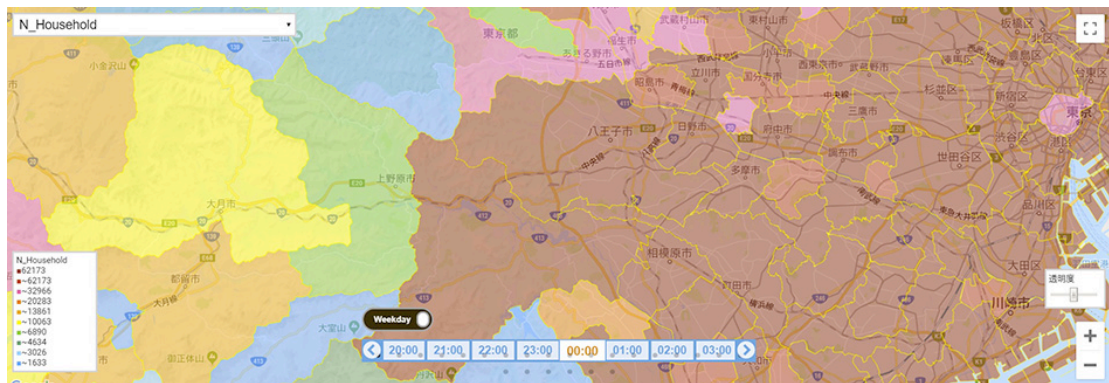


図4 Mapbox/tippecanoeによるバイナリベクトルタイル化した市町村境界 (TopoJSON)

#### GeoJSON/TopoJSONによる行政境界データセット

中島最強チームによる全国規模での行動モデル・電力需要モデルは市町村単位よりも詳細な町丁目単位で計算が行われる。そこで本計画では、全国の町丁目データをGeoJSON化した。さらにデータを軽量化するため、同データをTopoJSON化した。表1はTopoJSONの市区町村および町丁目データサイズを示している。市区町村データは元データ(国土数値情報行政区域データ2015年版)から簡素化し、かつ市区町村でマージしている。元データはShapeファイル形式で記述されておりファイルサイズは217MBである。これをGeoJSON変換(ファイルサイズは511MB)後に都道府県に分割し、TopoJSONに変換し、簡素化および市区町村でマージすることでサイズダウンしている。変換途中の同じ解像度でマージ無しのGeoJSONおよびTopoJSONファイルサイズはそれぞれ約50MB、約27MBであった。

また、データ表示高速化のため、バイナリベクトルタイル化を実装した。行動モデルや需要モデルの場合、タイル画像化では属性情報が落ちてしまうため、望ましい可視化手法ではない。また画像生成のためにQGIS等のFOSS4G等をデータ変換用インターフェースとして利用する必要があり、画像生成手順も複雑化する。また、タイル画像の場合出力ファイル数も膨大となるため、効率が良い方法ではない。テキストベースのベクトルタイルはGeoJSONになるが、これは地理院が提供実験を行っている(<https://maps.gsi.go.jp/development/vt.html>)。一方、本研究ではオープンソースのMapbox/tippecanoeを使ってコマンドラインでバイナリベクトルタイル化することで、さらに軽量化を実現する。市区町村境界のバイナリベクトルタイルを低ズームレベルで作成してみたところ、LeafletとMapboxの両方のプラグイン使用で地図表示できることを確認した(図4)。

#### ChOWDER(理研)を用いたTDW可視化

本プロジェクトのような多種多様なWebGISアプリケーションを上記のSTARScntrollerにより同期表示する場合、ブラウザ数が膨大になるという課題がある。理化学研究所で開発しているChOWDERはタイルドディスプレイウォール(TDW)上に複数ブラウザを表示するオープンソースミドルウェアである。本研究開発では、協調分散型EMSプラットフォームをChOWDERを用いて千葉大学環境リモートセンシング研究センター設置のTDW上に展開し、画像表示が可能であることを確認した。同時に、STARScntrollerを用いた時空間同期表示のためにChOWDERのアップグレードを行うことで対応する。

## § 5. 研究費の使用状況(非公開)

### ① 執行した研究費の概要(東海大グループ)

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～R01年度は渡邊氏の後任として雇用した高松尚宏氏が電力システムとの分野横断研究を実施した。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、国際誌での論文発表の他、CREST 国際ワークショップ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国際学会で成果を発表した。物品・旅費等については、H27年度は、衛星データ事前解析を行う<sup>デラスキャン</sup>TeraScanひまわり8号衛星高次処理パッケージ、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。H29年度にはEUMETSAT会議や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った。H30年度は、東海大で構築したRAIDシステムのサービス延長を行った。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行った。H31年度とR01年度は、特定研究員と技術支援員の雇用を中心に執行した。研究の全体とりまとめ作業、研究論文の執筆等を実施した。学会発表としては、JSTが開催する国際ワークショップ、ICRERA等の国内外での学会発表、制御系学会での発表を行った。

### ② 執行した研究費の概要(JAXA-東大グループ)

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した。また、学会参加を行なった(AGU)。

H30年度は研究員1名、技術補佐員1名の体制で本研究課題にあたった。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/高精度化が必要であったために、計算サーバの補充を行なった。AGUへの参加を行なった。

R1年度は研究員1名、技術補佐員1名の雇用とデータ処理・アーカイブデータの保守作業のための請負を行う予定である。また、研究成果を発信しデータ活用を促進するためのサーバの購入とAGU等の学会参加を行う予定である。

### ③ 執行した研究費の概要(千葉大グループ)

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。

H28～31/R1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い、成果を国際学会や国際共著論文等で公表した。

### ④ 執行した研究費の概要(阪大グループ)

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。また、H28年度以降においても継続して開発ソフトウェアを改修し、研究の進捗内容をモデルに反映した。

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。

H29年度はエネルギー需要推計の結果を検証するために住宅エネルギー消費量計測データ集を購入した。加えて、機器・設備保有に関するWEBアンケート調査を実施し、モデルのデータベースを拡充した。また、国勢調査情報を用いたエネルギー需要推計方法を考案し、ArcGIS Stat Suite H27 国勢調査データを用いて実装した。

H30年度は Dr. Chien-fei Chen を招聘し共同研究を進め、住宅における可制御機器を使用したデマンドレスポンスへの参加についてオンライン調査を行った。このほか、家庭用エアコンの所有、仕様に関する Web アンケートを実施した。

R1 年度は将来の時間断面を想定したエネルギー需要推計など、多数の計算を実施した。これに対応するため、計算サーバの購入により計算リソースを増強し、大量の計算を行った。

H26年度から R1 年度、松岡特任助教を雇用し、住宅部門のエネルギー需要関連研究を推進した。

#### ⑤ 執行した研究費の概要(東大生研グループ)

H27～29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 設置世帯を募集した。確保した調査対象世帯に対しては、HEMS データを収集するとともに、世帯情報に関するアンケート調査、訪問インタビュー調査などを期間中定期的に実施したり、調査結果のフィードバックや、介入を実施したりし、消費者の反応を計測するための調査書費用や調査協力世帯への謝礼費用として執行した。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、HEMS 設置世帯とは別に、調査会社の全国の登録モニターを利用した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し、そのための諸費用として予算執行した。

H30～31年度は、沖縄県宮古島市において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した。そして全島アンケート調査を郵送で実施し、調査書費用や旅費、調査協力世帯への謝礼として予算を執行した。また、上記研究を実施するに際して、年度を問わず、特定研究員(ポストドク研究員)と技術支援員の雇用のために予算を執行した。

#### ⑥ 執行した研究費の概要(東工大グループ)

研究期間を通じて、対馬におけるデータ収集とそのシステム構築の外注費、研究員の雇用費用、国内・国外の学会における研究成果の発表のための学会参加費・交通費として予算執行した。また H30 年度には契約変更行動調査のためのアンケート実施の費用として予算執行した。大がかりな機器などの購入はなかった。

#### ⑦ 執行した研究費の概要(NICT グループ)

研究期間を通じて、気象・需要データの可視化および EMS プラットフォーム構築のための外注費として執行した。ソフトウェア開発が主であり、その他の大がかりな機器などの購入はなかった。論文投稿費、旅費、人件費等は NICT 予算を用いたため計上していない。

## § 6 成果発表等(非公開)

(本研究期間中に本研究課題の成果として得られたものを対象として記載してください。)

### (1)原著論文発表

別資料に記載

このうち発行済の原著論文の情報(別ファイルのエクセルに記載いただくもの)については、JSTのデータベースに収録し、データベースとして今後公表する場合があります。

### (2)その他の著作物(総説、書籍など)

別資料に記載

### (3)国際学会発表及び主要な国内学会発表

別資料に記載

### (4)知財出願

別資料に記載

### (5)受賞・報道等

別資料に記載

### (6)成果展開事例

#### ①実用化に向けての展開

- 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 6,400 万ファイルを突破(64,493,740: 2019 年 8 月末)。
- 2007 年度から気候変動研究に関わる4大学の研究所・研究センター群(千葉大学環境リモートセンシング研究センター, 東京大学大気海洋研究所, 名古屋大学宇宙地球環境研究所, および東北大学理学研究科附置大気海洋変動観測研究センター)が大学間連携「地球気候系の診断に関わるバーチャルラボラトリーの形成(通称 VL)」事業を開始し, その中で千葉大学環境リモートセンシング研究センターは世界の主要な静止気象衛星データの収集, 処理, 公開を行ってきた. VL 初期から AMATERASS (当時は EXAM)のプロダクトアーカイブを VL 活動で支援し, 現在もアーカイブの支援, および JAXA-東大グループの竹中博士の千葉大 CEReS 内での活動支援(千葉大学客員准教授として)を行っている。
- 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)
- NICT グループより, 日射量データを GIS 可視化した AMATERASS web の試験公開開始。PC、携帯等で閲覧可能。(http://amaterass.nict.go.jp/)
- 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(H28 年度)。H29 年度以降、科研費にて研究を実施中。
- 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)
- 日産自動車株式会社と共同研究契約を締結し、EV 実データの提供を受けた。そして充電行動モデルを構築するとともに、電力系統実データを用いて系統シミュレーション構築を行い、EV を電力系統との電力授受に用いた充放電ビジネスの経済的価値の定量化を行った。
- 沖縄県宮古島市にて、アグリゲーターを努める株式会社ネクstemズより、太陽光発電やエコキュート、家庭用蓄電池を第三者所有で普及させ、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に関する受託研究を実施した。
- 対馬市の CATV 提供会社コミュニティメディアに実験結果および実験コンテンツを提供する。プロジェクト完了後、対馬市の CATV コンテンツとして、コミュニティメディアがサービス提供できないかを対馬市役所と検討される予定である。

## ②社会還元的な展開活動

- 本 CREST の成果を東海大学産学連携フェアに出展し、多くの来客を集めた(2019/8/7)
- 本研究成果をインターネット(URL: <http://www.nkj.ds.u-tokai.ac.jp/~teedda/index.html>) および、Facebook(URL: <https://ja-jp.facebook.com/TEEDDA/>) に公開し、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(非公開)

### 7.1 若手研究者のキャリアパス支援

#### (1)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。高松尚宏氏については、当チームでの研究活動により研究範囲が広がり、また多くの内外学会への参加により人的ネットワークを獲得するなど、研究者としてのポテンシャルが向上した。

#### (2)JAXA-東大グループ

本研究費により、竹中栄晶氏を2015年4月～2020年3月の間、特定研究員として雇用している。竹中氏の研究範囲は、人工衛星からの日射エネルギー算定システムであるAMATERASSシステムの開発とそれをういた日射エネルギーの算定である。国際学術集会を含めた様々な研究成果の発進と意見交換に努めて、プロジェクト成果の波及効果のみならず、本人の研究経験を蓄積している。これらの研究成果を通じて、NASAや欧州の研究者との研究交流を図り、その結果、AMATERASSシステムやその基礎技術を海外でも利用される見通しとなった。

#### (3)千葉大グループ

本研究費により、2016年3月までPradeep Khatriを特任助教として雇用した。また、2016年4月からはAlessandro Damianiを特任助教として雇用している。両名には、将来のキャリアパスを支援するために、とりわけ教育経験を積ませることを意図し、千葉大学に限らず他の研究機関の学生にも助言を行ったり共同研究等を行う機会(合同セミナーや合同フィールド実験)を設けた。また、本研究の成果公表としての位置付けを第一にしつつ、国内のCREST関連の研究集会では異分野交流を念頭に研究発表を行わせた。また、国際共同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工夫した。

#### (4)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2019年まで雇用したが、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。結局本人は大手電機メーカーのスマートグリッドの研究グループの主席研究員に採用されたが、本来建築分野のキャリアであったものがこのような職に就けたのは本プロジェクトに従事した成果と言える。

### 7.2 主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動

別資料に記載

## § 8 最後に(非公開)

### CREST の制度、JST の運営に対する意見・要望(非公開)

8年間の研究期間は想像以上に中身の濃いものとなった。研究開始後3年目から最強チームに移行してからは、地球科学と需要科学の融合という困難な課題が待ち受けていたが、蓋を開けてみれば、参加研究者らのモチベーションの高さを背景に、有意義な融合ができたと考えられる。その成果のひとつが、データインタフェースである。中間評価では必ずしも評価が高くなかったデータインタフェースであるが、サブグループメンバーの発奮や新たに情報通信研究機構の研究者を迎えたことで、研究が加速され順調な成果が得られた。JST および藤田総括に対しては、中島最強チームのような他分野融合チームを許容して頂いたことに感謝している。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。