

中島 孝

東海大学 情報技術センター／情報理工学部
教授

分散協調型 EMS における地球科学情報の可用性向上とエネルギー需要モデルの開発

※記載要領

■所属・役職は以下の点に留意し、**2019 年 3 月時点**のものを正式名称で記載してください。

- ・所属は第 2 階層(研究科レベル)まで記載してください。
- ・一般的な法人格(国立研究開発法人、独立行政法人、大学法人、大学共同利用機関法人、国立高等専門学校機構など)は省略してください。
- ・法人格は以下のとおり略記してください。
株式会社→(株)／公益財団法人→(公財)／一般財団法人→(一財)
- ・異なる組織の兼務は / を用いて併記してください。同一組織内の役職の兼務は ・ を用いて併記してください。

例) 市ヶ谷大学 大学院理工学研究科 センター長・教授／麴町大学 大学院工学研究
院 招へい教授

※注意

- ・本報告書の内容は、**2018 年度中かつ CREST 研究が実施されている期間**における CREST 研究の成果を対象としています。
- ・§ 1 及び 2 について、「実績報告書」(年報)として、CREST の HP に掲載します。(2019 年 9 月頃の予定)
- ・§ 3 は、公表を予定していません。
- ・公開する部分の項目は、知的財産等に十分ご配慮のうえ、作成をお願いします。
- ・フォントは、和文英文とも:MS P 明朝、10.5 ポイントをお使いください。

§ 1. 研究成果の概要（公開）

中島最強チームは、地球科学分野とエネルギー需要科学分野の融合チームである。地球科学は地球物理学をベースとする理学分野であり、一方のエネルギー需要科学は工学分野である。すなわち、中島チームは理学と工学の境界領域に軸を置く戦略的なチーム構成となっている。H30年度も、これまで通りに地球科学サブグループ(SG)、エネルギー需要科学サブグループ(SG)、データ・インタフェースサブグループ(SG)それぞれにおける研究活動を推進させるとともに、サブグループ同士の有機的な交流を図ることでチームとしての成果の最大化を図った。H30年度における当チームの顕著な成果としては、(1)基礎研究の発展に寄与するもの、として地球科学SGが実施した国際地上リモートセンシング観測ネットワーク(SKYNET)を活用した研究がある。SKYNETを活用して、ひまわり8号衛星の全天日射量データを系統的に評価することができた。(2)社会経済に波及するもの、としては、データ・インタフェースSGが実施した、GISツールの開発がある。本プロジェクトで独自作成された日射量計算の画像生成スキームを開発し、WebベースのGISツール上で準リアルタイムに可視化することに成功した。このツールは電力マネジメントはもちろんのこと、気象や防災、福祉や教育などでの利活用が可能である。

それ以外にもH30年度は多くの研究成果を得ることができた。以下に地球科学SG、エネルギー需要科学SG、データ・インタフェースSG毎に概要を記す。

まず地球科学SGであるが、(1)衛星データ解析システムの開発においては、ひまわり8号大気移動ベクトル解析に基づく短時間予測手法の改良を行った。大気移動ベクトル解析に基づく短時間予測技術はベクトル解析の精度が重要な要素となるが、多くの場合実際の大气とMSM/GPVなど参照するモデル大気場は必ずしも一致することはないため、観測に整合する流れ場を仮定することが重要である。本研究では、直近10分のクラスタ分類から速度の速い高高度と速度の低い低高度の雲を分類した。これにより予測時の雲の速度差による不整合を解消する可能性があることが分かった。(2)地球科学とエネルギー需要科学の融合分野にも進捗があった。本研究では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ている。AMATERASSデータセット(日射量データ)を入力値として当チーム阪大グループが開発した電力需要推定手法によって日本全国を網羅的に解析した。(3)日射量を大きく変動させる要素として大気中の水蒸気がある。H29年度までの研究において、ひまわり8号が有する4つの赤外波長を用いて可降水量を推定するアルゴリズムを開発した。H30年度は従来の4チャンネルのほかオゾンや炭酸ガスを主としたチャンネルを用いて、GPSによる観測された可降水量を真としつつ、各チャンネルの輝度温度差の2乗と地表の比湿を2乗の項まで考慮して重回帰式を構築した。(4)衛星データ解析のための基礎研究も進捗した。なかでもひまわり衛星雲特性解析は日射量推定の前提となる解析であり、重要である。H30年度は氷雲の解析手法についての検討を実施した。結果、氷雲の雲粒半径を推定するひまわり8号の波長として、1.6 μm あるいは2.2 μm は適切であるが、3.7 μm は感度不足のため利活用は適当でないことが明らかになった。(5)モデルによる地球物理量算定システムの開発においては、非静力雲解像数値モデルNICAMを使用し、雲水データの同化手法の検証のための理想化実験と衛星データから推定した雲水データを同化した現実実験を行い、地表面日射量の再現性とその

予報の可能性についての検証を行なった。以前の実験とは異なり、理想化実験から雲水データ同化の手法自体の詳細な(利点や傾向などの)検証が可能であり、また長期(1年分)の実験を行う事で季節間の傾向をより正確に解析することが可能になった。(6)日射量等の品質保証の研究においては、ひまわり8号等のデータの誤差評価のさらなる精緻化を図った。特に太陽周辺に存在した雲が直達光を反射して周辺の放射量が増大する現象(Radiation Enhancement)についての追跡調査を行った。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。さらなる全天日射量データの高精度化を達成するためには、そのような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。(7)気象データの変動解析においては、「日射変動を対象とした時空間的な非同期性の定量化」及び「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の検討」を行った。

次にエネルギー需要科学SGであるが、まずは(1)居住者行動モデルの開発が行われた。H30年度は、H29年度までに開発された行為生成過程をもとに、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。東京都の全小地域に開発モデルを適用し、ロジスティック回帰モデルで生活行為生成パラメータを推計し、地域の世帯の集積状況が生活行為生成パラメータに及ぼす影響を評価した。(2)家庭用エネルギー最終需要モデルの開発においては、2030年および2050年における我が国の国家家庭部門エネルギー需要予測に関する研究を行った。H29年度まででおこなってきた我が国家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をおこなった。(3)業務用エネルギー最終需要モデルの開発においては、日本に立地する事務所、宿泊、医療、商業、文教、飲食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。(4)需要データプラットフォーム構築に向けた分析においては、需要データの成果、共有方法の検討として基礎的なモデル構築を行った。また、(5)HEMSによるデマンドレスポンス(DR)ポテンシャルの抽出の研究においては、宮古島をフィールドとして実施する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、説得、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調査を行った。(6)HEMSモデルの実運用展開においては、ヒートポンプ(HP)給湯機及び電気自動車(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。次に、(7)需要家行動モデルの開発においては、H29年度までに対馬市フィールドにおいて実験参加世帯を募り、相応の世帯数を確保、スマートメータ設置工事を完了させた。H30年度は、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。また、R元年度に行う予定の画面設計に関する事前協議を行った。(8)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では、各電力会社の顧客へのアンケート調査を行い、電力契約変更における行動理由・要因を分析するとともに、電力契約変更行動、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を分析した。(9)「エネルギー需要科学」分野の確立に向けた研究では、H28年度に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、H29年度には、効果的な介入計画を立てるためには、環境配慮行動を決定する影響要因、環境配慮行動に影響を与える介入手法、介入による効果検証の3つの関連

性を明らかにすることが必要であると考え、過去の研究のレビューを行った。H30 年度には、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い、需要科学サブグループにて ACEEE、電気学会、behavior, energy & climate change (BECC)で発表を行った。

最後にデータ・インタフェースSGの成果の概要を記す。データ・インタフェースの目的は、本チームの日射量準リアルタイム解析システムが算出する各種日射量など (AMATERASS データセット) のデータおよび他の気象データなどを、チーム内研究者を含む EMS に関わる利用者の要望に応じて、データ提供を行うシステムを構築することである。H30 年度は、衛星日射量やモデルによる日射予測値などのデータについてデータの利活用を進めることを目的に、データの提供方法の改善に取り組み、需要科学での利用の促進を図った。(1) データ・インタフェースの環境構築と機能追加においては、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が可能な 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、短期間のみだが一般公開を予定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。また、提供可能なデータの種類を追加した。データ・インタフェースSGでは(2)気象・需要データの可視化にも着手している。H29 年度は日射量推定値の現在・過去データの GIS 可視化システムの開発を行い、EMS のためのデータ提供の可能性を広げた。予測値の利用希望が多いため、H30 年度は太陽光発電量の 6 時間後までの予測値を可視化するための設計を行った。さらに H29 年度の GIS 可視化としては未実装である湿度、風向、太陽光発電量などについても可視化した。可視化においては、日射量などの気象情報データおよび需要データ(行動モデルデータ、電力消費モデルデータ)のスケラブル可視化を実装した。(3)衛星データの収集・処理においては、千葉大学環境リモートセンシングセンターにおいて、世界の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いる。世界の主要な静止気象衛星データの収集と処理は完了し、ひまわり 8 号データの科学利用のためのアーカイブ、および NASA Ames 研究センターとの共同研究による GOES-R シリーズのデータ収集に繋がっている。AMATERASS データ(日射量プロダクト)のアーカイブとデータ提供も順調である。これまでに、6,100 万ファイル以上のデータダウンロードの実績がある。(4)大画面可視化についての取り組みも行った。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、大画面設備を独自に開発することは現実的ではない。タイルドディスプレイ(TDW)はその名の通り複数のモニタをタイル状に並べ、一つの大きな画面として映し出す装置を指す。36 面 TDW は元々約 10 年前に NICT サイエンスクラウドチームにて構築されたものだが、共同研究の一環として H29 年度末に千葉大 CReS に移設した。理化学研究所と九州大学が開発している 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 を実現した。(5)EMS プラットフォームの構築にも着手した。EMS プラットフォームは、本研究チームの地球科学 SG やエネルギー需要科学 SG などから算出された各種データをスケラブルでシームレスに共有するための可視化技術である。具体的には、中島最強チームの日射量データ及び需要データを含む EMS の関連データを時空間において連動して可視化し、さらに EMS プロジェクト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。H30 年度は基本設計と試作を行った(図参照)。

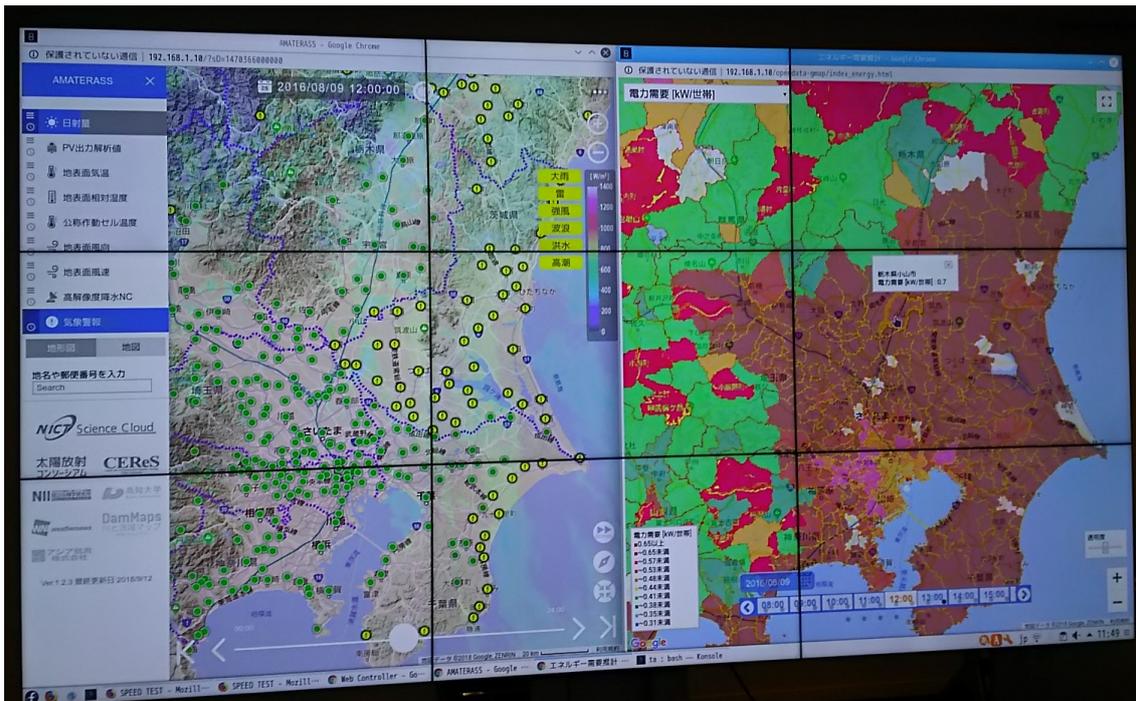


図 時空間統合可視化機能によるデモンストレーション事例

【代表的な原著論文】

1. Damiani, A., H. Irie, T. Horio, T. Takamura, P. Khatri, H. Takenaka, T. Nagao, T. Y. Nakajima, R. R. Cordero, "Evaluation of Himawari-8 surface downwelling solar radiation by SKYNET observations", Atmospheric Measurement Techniques, 11, 2501-2521, Apr 2018
2. Goto, D., M. Kikuchi, K. Suzuki, M. Hayasaki, M. Yoshida, T. Nagao, M. Choi, J. Kim, N. Sugimoto, A. Shimizu, E. Oikawa, and T. Nakajima, "Aerosol model evaluation using a geostationary satellites over East Asia in May 2016", Atmos. Res., 217, 93-113, Mar 2019
3. Yamaguchi, Y., S. Yilmaz, N. Prakash, S.K. Firth and Y. Shimoda, "A cross analysis of existing methods for modelling household appliance use", Journal of Building Performance Simulation, 12(2), pp.160-179, Jul 2018

※記載要領

- 2018年度のチーム全体の研究実施概要について、一般の方向けに簡単に分かり易く、図表等を交えて概ね1ページ程度でまとめてください。
また、今年度で代表的な原著論文を3報以内で記載ください。
- 未公開特許に関する内容など、公開すべきでない研究実施内容は、本セクションには記載せず、§3.研究実施内容に記載してください。

§ 2. 研究実施体制 (公開)

※記載要領

■下記の記載例にならって研究グループ毎(研究機関毎)に記入してください。また、計画書に記載された体制に基づいて記入してください。

■②の研究項目は箇条書きの簡単なもので構いません。

(1) 東海大グループ

- ① 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)
- ② 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・インタフェースの開発

(2) JAXA-東大グループ

- ① 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)
- ② 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

- ① 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)
- ② 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

- ① 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)
- ② 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

- ① 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)
- ② 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

- ① 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)

② 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

① 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)

② 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

§ 3. 研究実施内容 (非公開)

研究総括及び JST が今年度の研究の進捗を把握し、次年度の研究領域のマネジメントに活用することを主な目的としていますので、非公開情報を含む最新の研究情報について記載してください。(※本セクションの公表は予定しておりません。)

(3-1) 顕著な成果

<基礎研究の発展に寄与するもの>

国際地上リモートセンシング観測ネットワーク(SKYNET)を活用して、これまでにない高時間・高空間分解能を有すひまわり8号の全天日射量データを系統的に評価した。雲やエアロゾルの不均一な時空間変動が最大の不確実性をもたらすことを定量的に明らかにするなど、静止気象衛星を利用した広範囲の全天日射量(さらには太陽光発電量)の時空間分布監視技術を家庭や地域を越えたエネルギーマネジメントとして社会実装する上での不可欠な科学的知見を得た。(Damiani et al., 2018)^{原著論文³⁾}

<社会・経済に波及するもの>

本プロジェクトで独自開発された日射量計算のピラミッド画像生成スキームを開発し、Web ベースの GIS ツール上で準リアルタイムに可視化することに成功した。可視化結果は一般にも公開可能であり、電力マネジメントはもちろんのこと、気象や防災、福祉や教育など幅広い利活用が可能である。さらに、町丁目単位(市区町村よりも詳細な単位)で計算される世帯行動パターンモデル計算結果も可視化することで、需要(行動モデル)と供給(日射量)の関係を直接比較することが可能となる。

※記載要領

■今年度の**最も顕著な成果**について、基礎研究の発展に寄与するもの、社会・経済に波及するものについて、可能な範囲でそれぞれ **200 字程度**で説明してください。なお、基礎研究の発展に寄与するものについては、**代表的な論文 1 報**を引用してください。

(3-2) 研究進捗状況

※記載要領

- 今年度の研究実施内容について、自己評価を記載してください。(該当する記載を残し、残りは削除してください。)
- 研究のねらい、これまでの研究内容、研究進捗状況、研究成果、目標達成状況、自己評価の理由、今後の見通し等の研究実施の具体的内容について、図表等を交えてまとめてください。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分かるように記載してください。研究計画書に記載された研究スケジュール(当初と変更後)を踏まえて記載してください。
- **本文中に、原著論文(2018年度に本 CREST 研究課題の成果として得られたもの)を引用してください。**なお、引用した原著論文の書誌事項は 2018 成果情報収集シート「(4-1)①原著論文」に列記し、引用した番号と「(4-1)」の番号が合致するようにしてください。(引用例:~の測定手法を開発し¹⁾、~を実証した²⁾。)
- 図、表、写真等にも**番号の記載**を、お願いします。(例:図1, 図2, 表1, …)

当チームの研究実施内容を以下の研究項目別に記載する。なお、データ・インタフェースの進捗に伴い3-2-11と12を新設した。3-2-13は H30 年度後半に開始した新項目である。

図表番号は章ごとに連番とした。文中に論文等の引用番号がある場合は 2018 年度成果情報収集シートに対応し、それ以外は脚注として表記した。

【地球科学】

3-2-1 第三世代ひまわり観測データに基づく日射量算定システムの開発	10
3-2-2 モデルによる地球物理量算定システム	32
3-2-3 品質保証とデータ異常検出	41
3-2-4 気象データの変動解析	53
3-2-5 地球物理量データによるシナリオデータの作成	59

【エネルギー需要科学】

3-2-6 エネルギー需要モデルの開発	60
3-2-7 需要データプラットフォーム構築に向けた分析	69
3-2-8 需要家行動モデルの開発	79
3-2-9 需要家情報の整理	89

【データ・インタフェース】

3-2-10 データ・インタフェースの開発	91
3-2-11 気象・需要データの可視化	95
3-2-12 データハンドリングおよび大画面可視化	100

【チーム外との研究等】

3-2-13 EMSプラットフォーム構築	105
3-2-14 異分野交流・国際交流	108

3-2-1 衛星データ解析システム(JAXA-東大、東海大)

【自己評価】

A 当初の計画以上に進展している

【研究進捗状況】

(1) 基盤整備

H27年度では本研究課題の実施に不可欠な日射量推定用の計算機を導入した。この基盤整備により衛星観測データに基づく日射量の準リアルタイム解析を開始、日射量データを軸とした EMS に不可欠となる気象パラメータ・データの配布を実施している。また、衛星観測及び地球物理量算定モデルによる出力を保持するためのデータアーカイバも設置した。H28年度は H27年度に続き 120TB のアーカイバを追加した。また、シナリオデータ作成のための計算機も整備した。これを利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からシナリオデータセットが作成された。データアーカイバはデータ・インタフェース SG と共有しつつシナリオデータ等の配布に利用されている。さらに、衛星解析に基づく短時間予測技術として大気の流れ場を解析する手法が開発されたことから大気移動ベクトル解析用の計算サーバを追加予算にて整備した。H29年度は地球科学データアーカイバの整備としてさらに 160TB のアーカイバを追加した。これにより計画当初に予定していた 300TB 超のデータアーカイバの整備を完了している。また、衛星解析の高度化に伴う進展が認められたため新しい解析アルゴリズム開発用の計算機を整備した。H30年度は新しいアルゴリズムの有用性が認められたため計算サーバーを整備した。これにより以前より効率的に開発を進められるようになった。また、AMATERASS GIS を実現するための予測情報等を広く共有し活用するためのサーバが整備され日射量予測情報等の展開が進められ AMATERASS web による可視化が有効に作用する予定である。

(2) 第三世代ひまわり観測データに基づく日射量算定システムの開発

(2-1) ひまわり 8 号大気移動ベクトル解析に基づく短時間予測手法の改良

東日本大震災から8年が経過した。再生可能エネルギーの一つであり日本の環境に適したエネルギー源である太陽光発電はこの間大きく導入量が増加し関連する技術開発が活性化した。当初は気象条件に大きく依存する太陽光発電の不安定さが大きく取り上げられたがその状況も変化している。太陽光発電が不安定と言われるその主な要因は短時間で大きく変動することである。条件によっては数分で得られるエネルギー50%以上変化する場合もある。その積み重ねが日別のエネルギー変化となるが、多くの場合日毎の天候状態に依存して不安定であると語られることが多いだろう。任意の時刻の状態を把握もしくは予測することが出来れば日単位の把握/予測も可能である。突き詰めれば瞬時の状態及び短時間の変化の解析が最も重要な要素となる。そのための技術開発は日射量の予測として各方面で行われてきた。しかしながら技術開発が進みつつあることから再生可能エネルギーの導入に関する課題は新しい段階へ入ったように見える。蓄電池の導入が幾

つかの問題を解決することは自明である。太陽光の時間変化に対して蓄電池はコンデンサとして働くことから周波数の高い変動の問題から開放されるだろう。加えて蓄電池によって太陽光の存在する日中しか利用できない太陽光発電の欠点も緩和されるだろう。今後数十年から百年を見据えれば一般の家屋を含めた電力網に何らかの蓄電システムが配置されることは想像に難しくない。今後はそれに対応するための蓄電残量の把握と予測(蓄電池の健全性点検にも関わる)に対応する太陽光の把握/予測技術が必要となるだろう。

本研究では衛星による現況把握技術と大気移動ベクトル解析に基づくアンサンブル短時間予測手法の開発を行ってきた。H27年度は日本の新しい静止衛星である「ひまわり8号」観測データを使った日射量及び太陽光発電出力の現況把握技術の開発を行い準リアルタイム解析システムを稼働させた。H28年度は解析アルゴリズムをブラッシュアップし2.5分毎の準リアルタイム解析を開始した。H29年度は衛星解析に基づくアンサンブル短時間予測技術の開発を行った。H30年度は衛星観測に基づく短時間予測技術の改良について報告する。これらの改良はウェザーニューズ社との連携で実施された。大気移動ベクトル解析に基づく短時間予測技術はベクトル解析の精度が重要な要素となるが、同様に参照する大気場との整合性も重要な要素となる。多くの場合実際の気象とMSM/GPVなど参照するモデル大気場は必ずしも一致することはないため観測に整合する流れ場を仮定することが重要である。特に雲の高度は流れ場にとって支配的であるため整合的な流れ場の中でその決定は難しい。雲頂高度は基本的に熱赤外チャンネルの値を元に決定されているがモデルの流れ場と経験的に一致させるため光学的厚さ、雲頂気圧、BTD(7.3um-10.4um)の値を元に高度の高い雲を分類する。図1に分類結果の例を示す。赤い雲場が低高度に分類される。また、図2に高度と速度を示す。一般的に高度が高くなると風速が速いため移動速度は速くなるがよく一致しているように見られる。さらにこの情報から高高度と低高度のクラスタリングを行う。光学的厚さ、雲頂気圧、BTD(7.3um-10.4um)の値を三次元ベクトルとみなしk-means及びGMM(Gaussian Mixture Model)を用いて属性付けを行う。このとき直近10分のクラスタ分類から速度の速い高高度と速度の低い低高度の雲を分類した。これにより予測時の雲の速度差による不整合を解消する可能性があることが分かった(図3)。ピクセル値に基づく点毎の判別では整合的な値でなかったがクラスタ分類による層分けにより最適な流れ場を構築する。今後は精度検証を通じてより最適な改良を適時行っていく予定である。

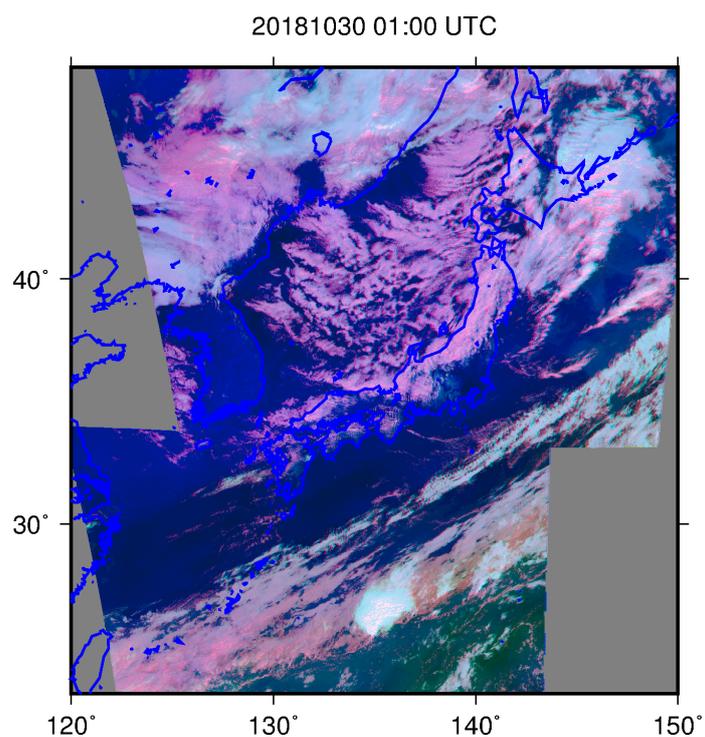


図1 RGB 合成による高度判別。2018 年 10 月 30 日の例。

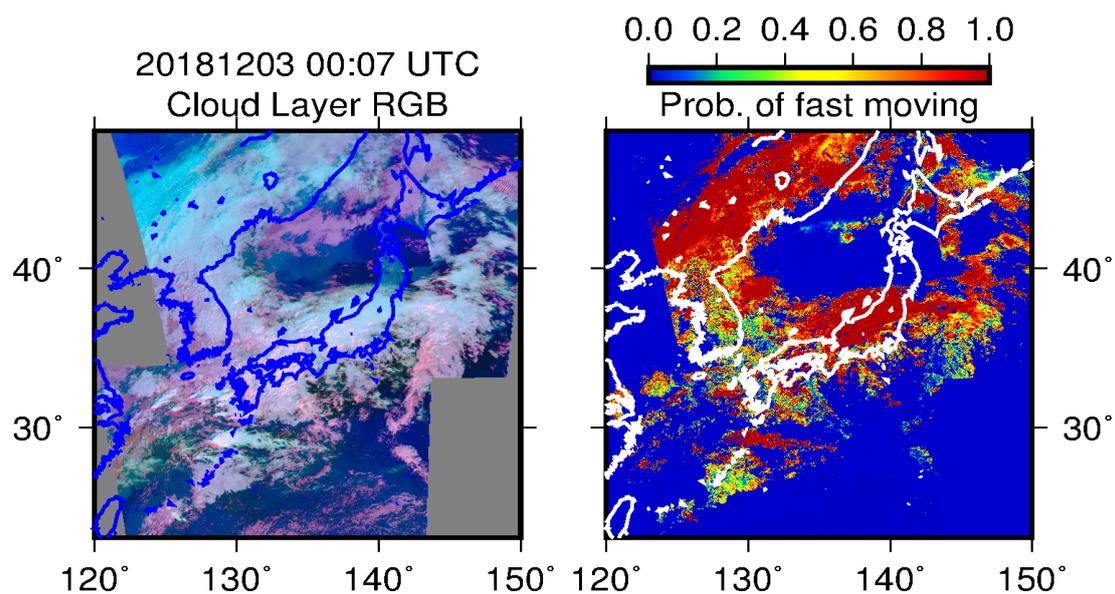


図2 高度と速度の関係性を示す例。速度と高度の分類がよく一致している。

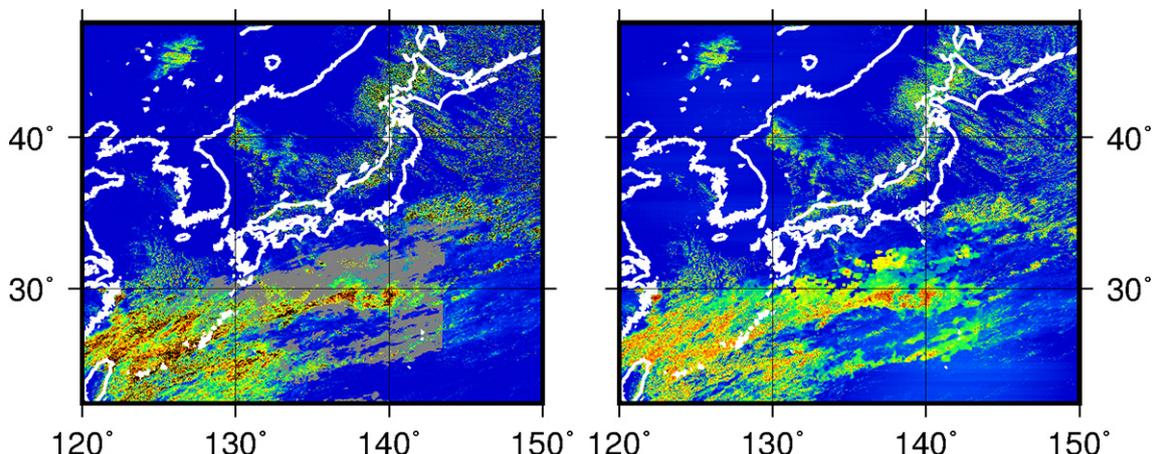


図3 クラスタ分類に基づく雲場の短時間予測の例。高高度/低高度の速度差の大きな場所において不整合を是正することが出来る事が分かった。

(2-2) 日射量を核とする高時空間分解能気象情報による電力受給推定へのアプローチ

再生可能エネルギーの一つである太陽光発電の導入に際し電力網の安定的な運用に必要な情報として AMATERASS データセットは地球科学の知見から環境情報である気象情報と地上に到達する太陽放射、即ち日射量に基づく太陽光発電出力の情報を提供してきた。今回 CREST/EMS における異分野連携を加速させるため需要科学との連携に取り組んだ。これまで電力需要予測では電力管区毎の需要推定が主流であったが環境要素である気象場や日射量の特徴を考えれば電力管区全体を一つとみなすことは無理があった。特に日射量に着目すれば電力管区全体で需要推定にとって有意な代表値を求めることは不可能である。本研究では 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た。具体的には AMATERASS データセットを入力値として当チーム阪大グループの開発した電力需要推定手法によって日本全国を網羅的に解析する。

AMATERASS データセットは 1x1km 空間の情報を持つことから行政コードが割り振られている 1922 の市区町村に対応する情報を入力データとして切り出した。入力ファイルの作成は電力需要推定モデルフォーマットに合わせて行った。電力需要の推定そのものは大阪大学から報告されることから、ここでは地球科学的視点から需要推定結果と気象現象の関係性、とりわけこれまで行われてきた電力管区毎の需要解析よりも多くの情報を取り出せることについてその優位性を報告する。図4に 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示す。これは当チーム NICT グループで開発された AMATERASS web にて可視化されたものである。ここでは関東を中心に議論する。太陽光発電出力のほとんど無い早朝と夕方において関東平野では一世帯あたりの電力需要は比較的安くそれ以外の地域では高い。太陽光発電を十分利用可能な時刻になるとその傾向は逆転し人口密集地で高い値となることが分かる。図5に気温と電力需要の絶対値を示す。ここで着目すべきは電力需要のピーク時刻と気温の時間変化である。14 時頃には関東平野の気温が上昇し高い値となっているが電力需要の絶対値は朝方から日中は大きく変化していない。日

没付近から急速に上昇し19時にピークをむかえている。2016年8月9日は台風5号の通過に伴いフェーン現象によって関東を中心に198地点で猛暑日が観測された。日中の気温上昇はこの影響によるものである。しかしながら、このとき湿度は低い状態に保たれた。これはフェーン現象によって暖かく乾いた空気が関東に流れ込んだためと考えられる。従って気温は高い状態に保たれたが8月という時期でありながらも湿度の低下によって人間が不快に感じることを軽減しエアコン等の電力需要が上昇しなかった可能性がある。東京電力が公開している電力ロードカーブを参照するとこの日の東京電力管区のピークは19時付近であった。これらのことから、時空間的に密な情報を用いることによって再生可能エネルギーの供給と電力需要を得ることで、これまでよりも多くの情報を取り出すことが出来ることが分かった。電力網全体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だろう。また、これらの時空間的に密な情報は行政区画と紐付けられているため、より長い期間の解析結果が適切に整備されれば今後のエネルギー政策の決定過程における基礎情報の一つとしても有効となる可能性があるだろう。

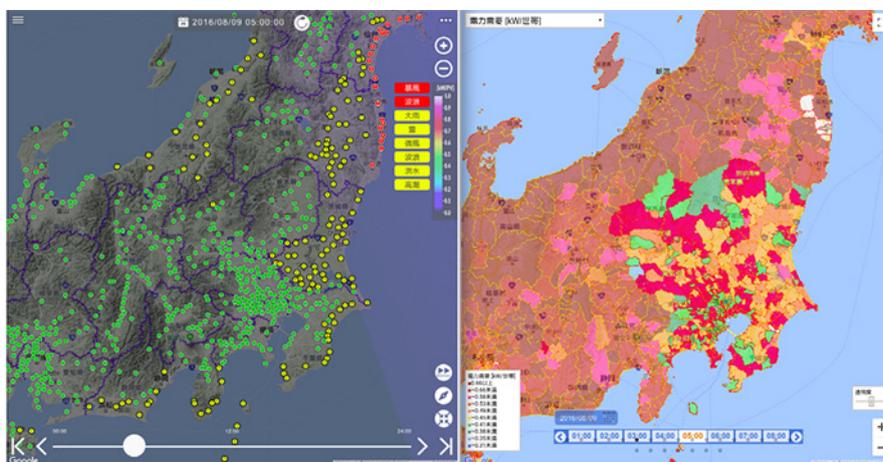


図4(1) 2016年8月9日における太陽光発電出力(左)と一世帯あたりの電力需要の推定結果。05時00分時点。

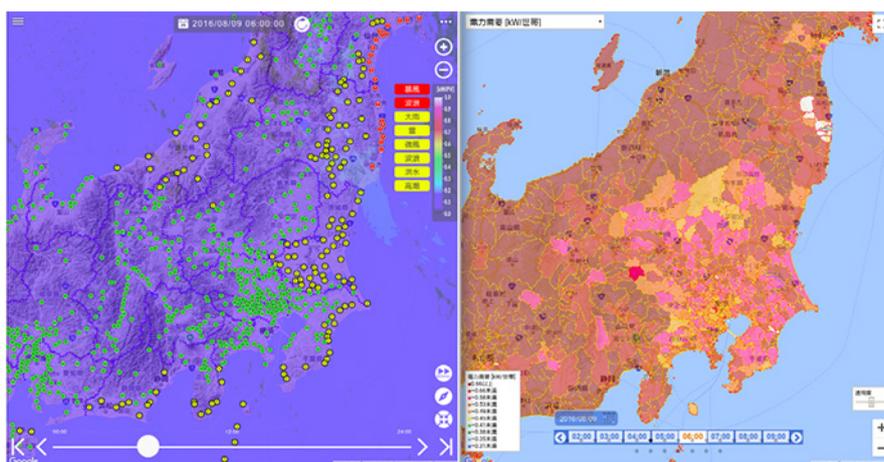


図4(2) 同 06 時 00 分の結果。

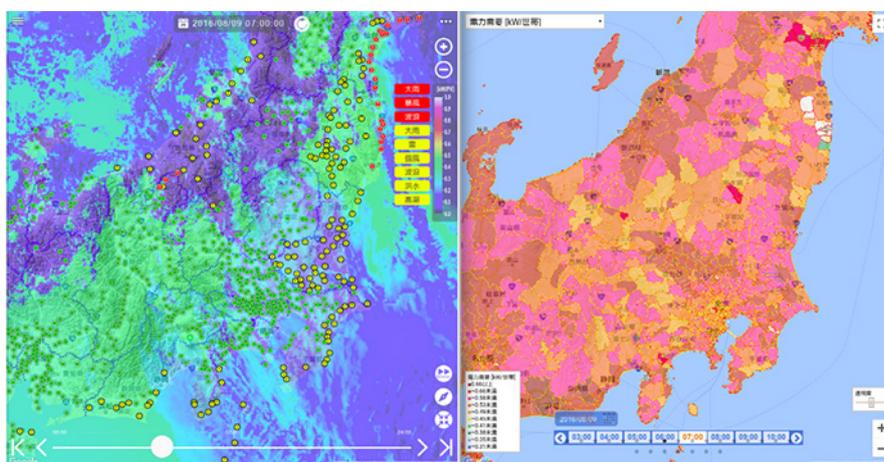


図4(3) 同 07 時 00 分の結果。

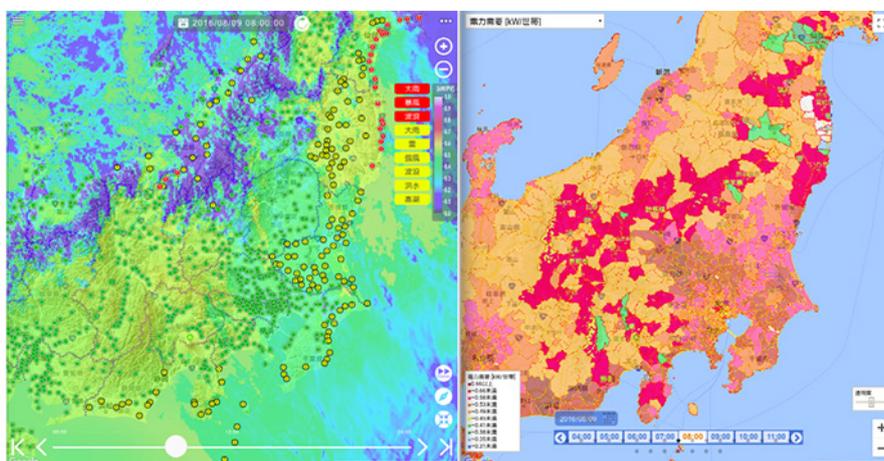


図4(4) 同 08 時 00 分の結果。

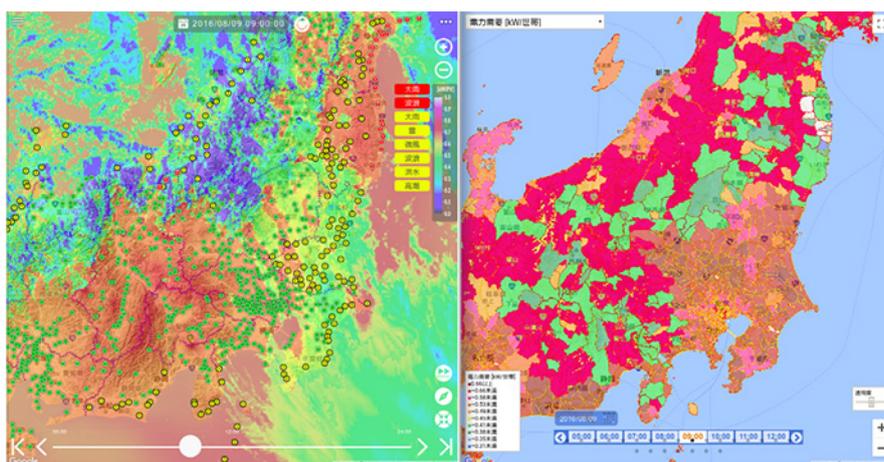


図4(5) 同 09 時 00 分の結果。

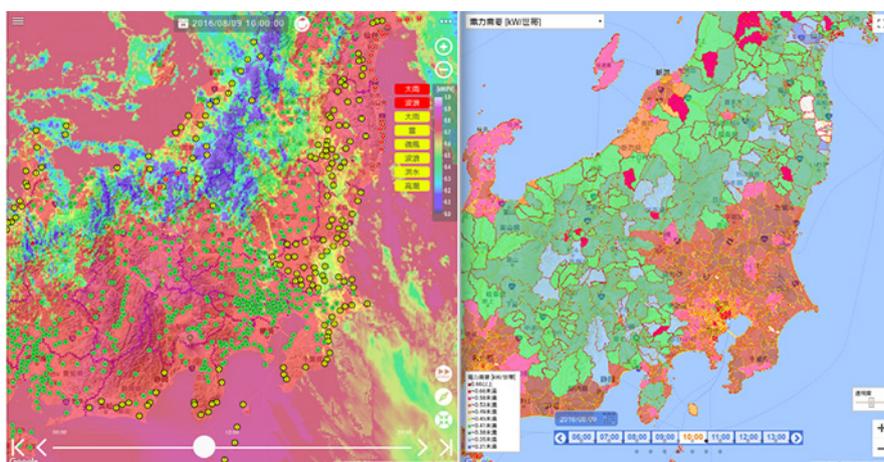


図4(6) 同 10 時 00 分の結果。

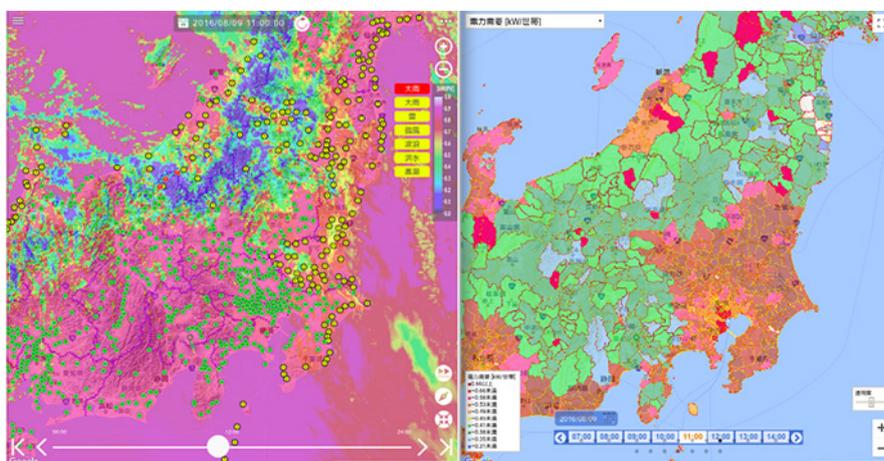


図4(7) 同 11 時 00 分の結果。

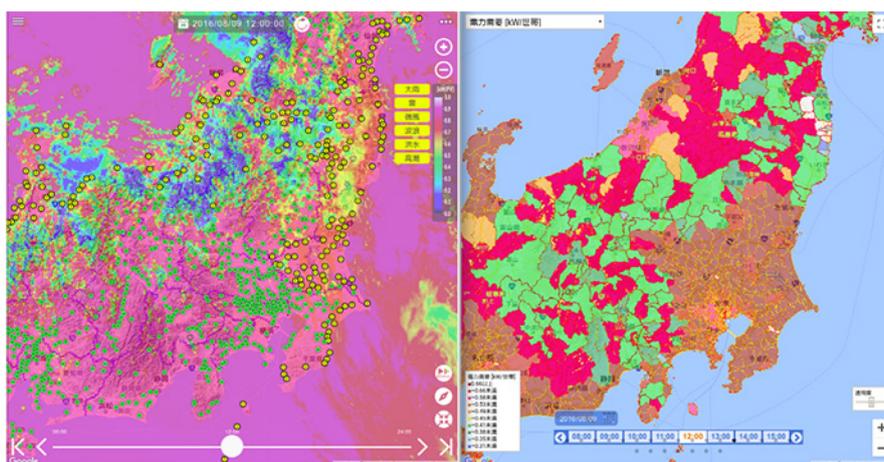


図4(8) 同 12 時 00 分の結果。

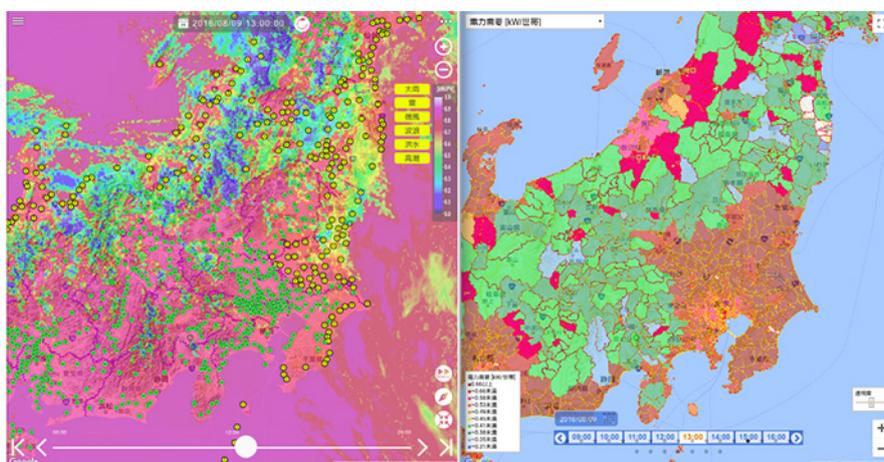


図4(9) 同 13 時 00 分の結果。

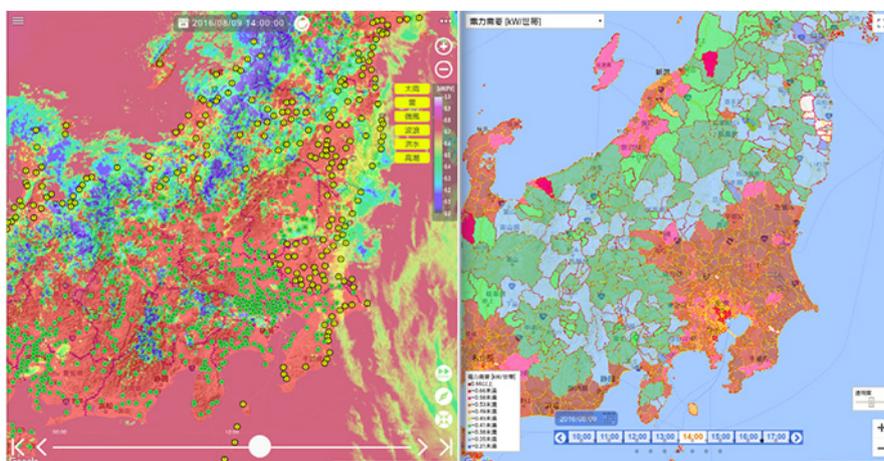


図4(10) 同 14 時 00 分の結果。

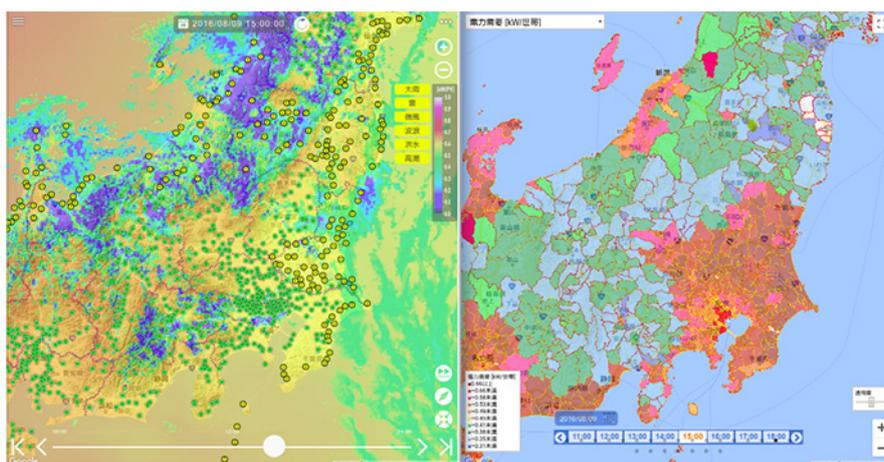


図4(11) 同 15 時 00 分の結果。

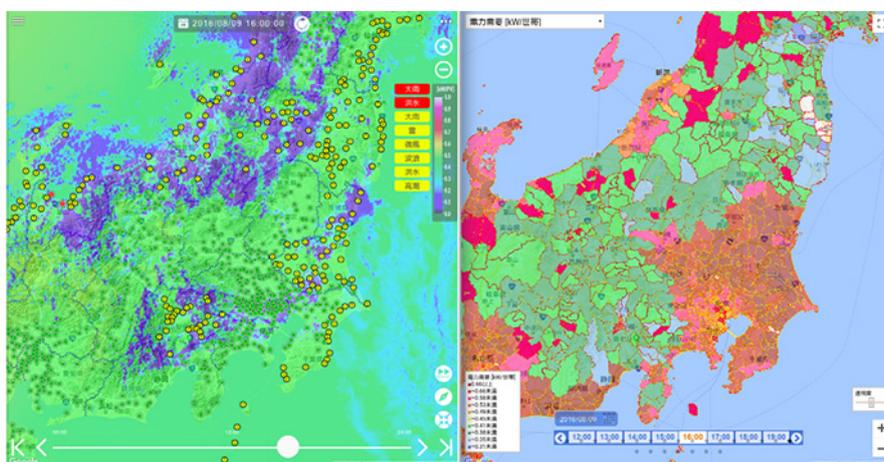


図4(12) 同 16 時 00 分の結果。

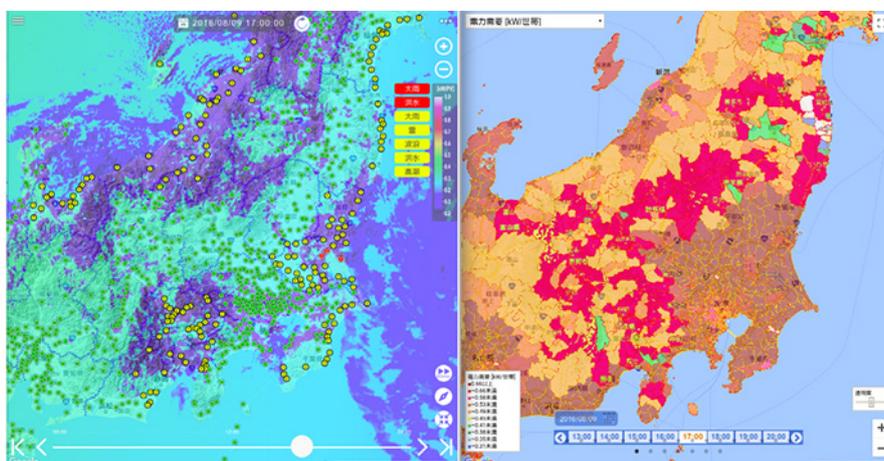


図4(13) 同 17 時 00 分の結果。

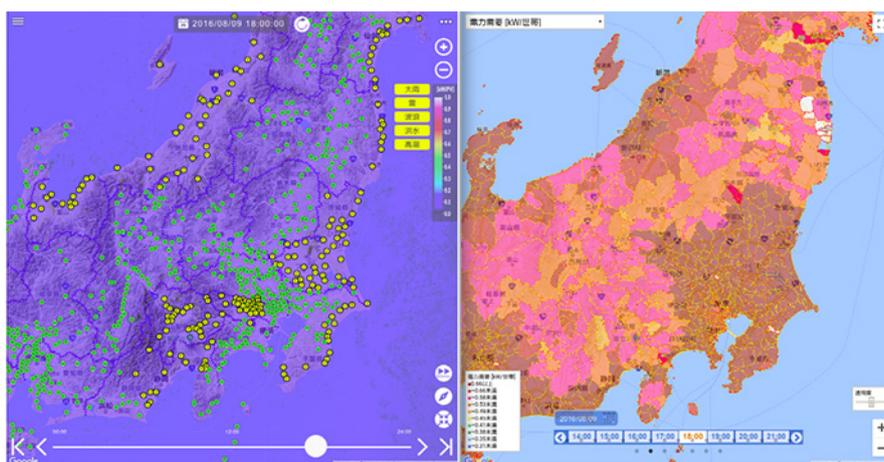


図4(14) 同 18 時 00 分の結果。

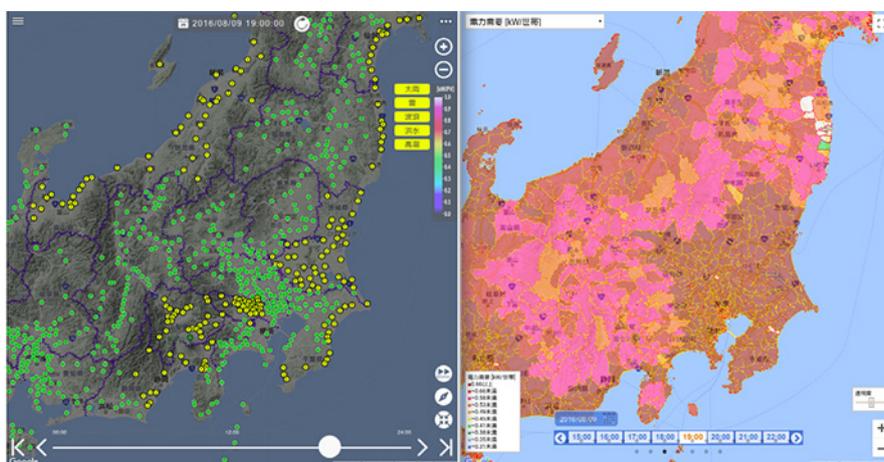


図4(15) 同 19 時 00 分の結果。

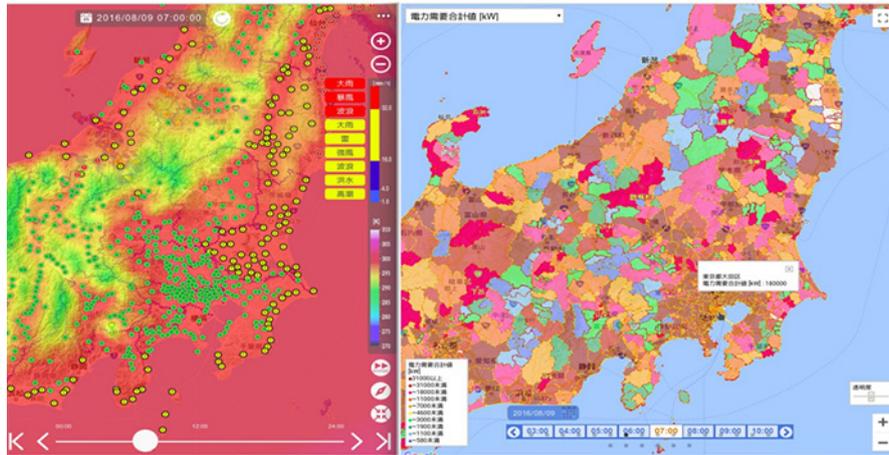


図5(1) 2016年8月9日における気温(左)と電力需要絶対値の推定結果。07時00分時点。

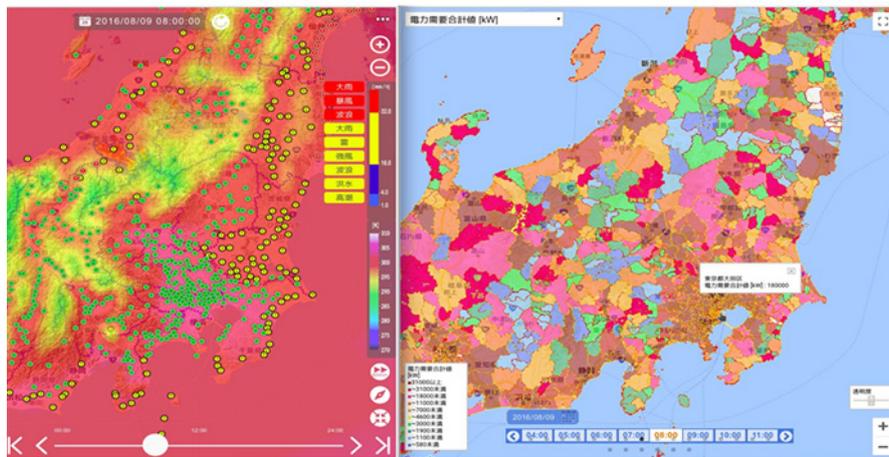


図5(2) 同08時00分の結果。

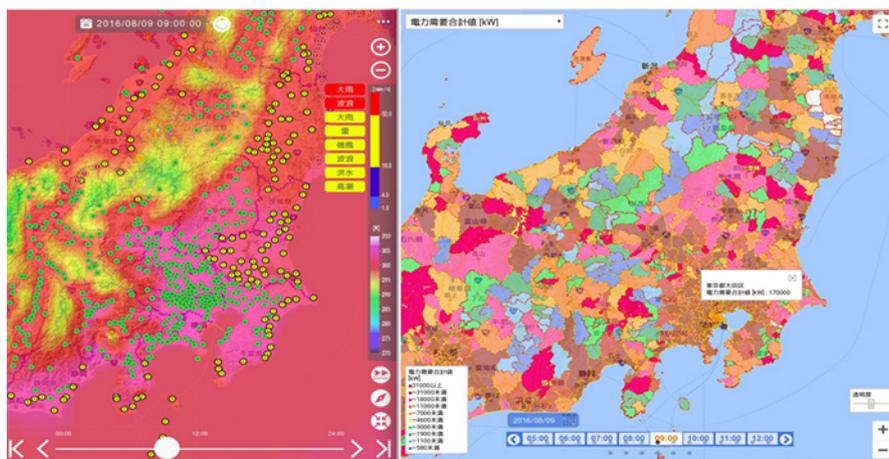


図5(3) 同09時00分の結果。

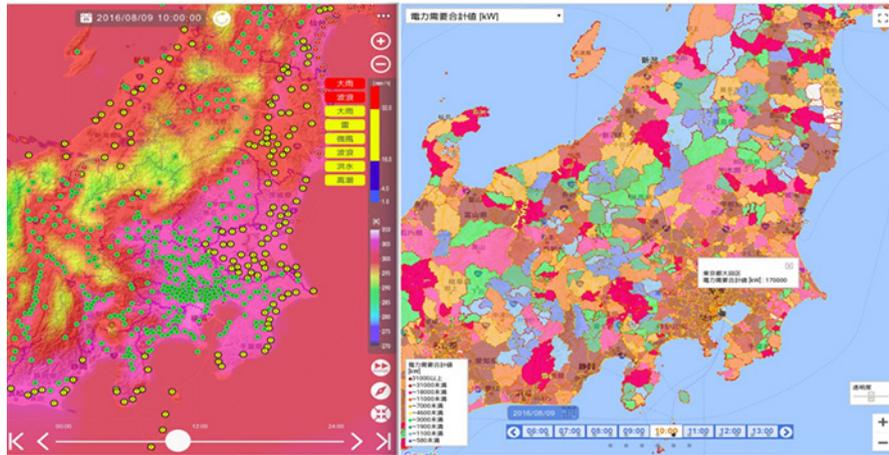


図5(4) 同 10 時 00 分の結果。

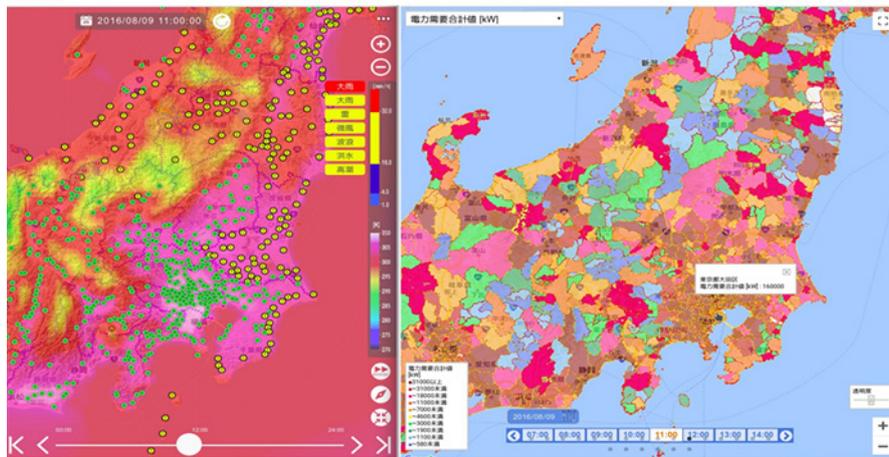


図5(5) 同 11 時 00 分の結果。

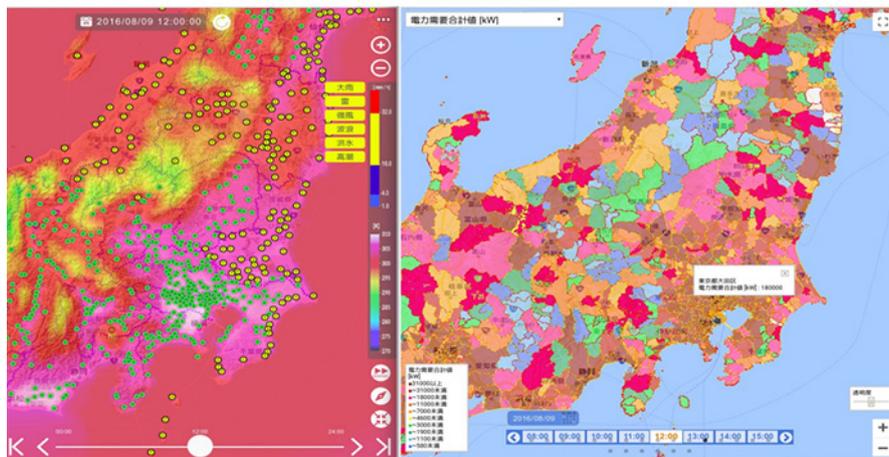


図5(6) 同 12 時 00 分の結果。

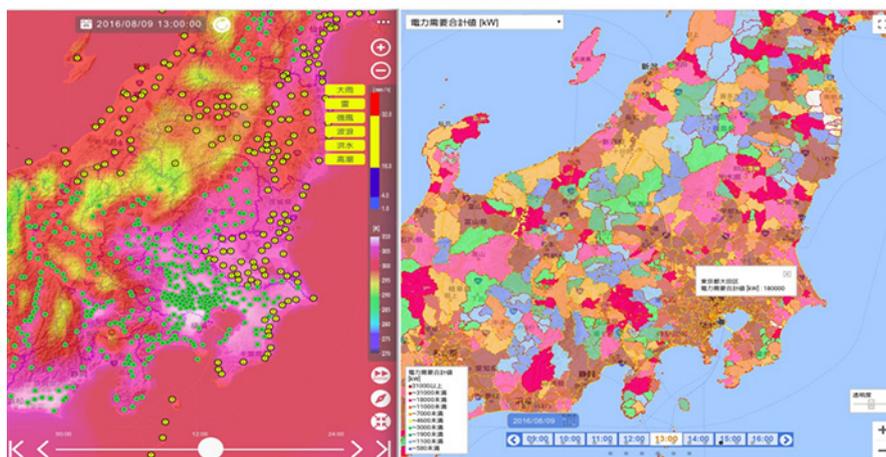


図5(7) 同 13 時 00 分の結果。

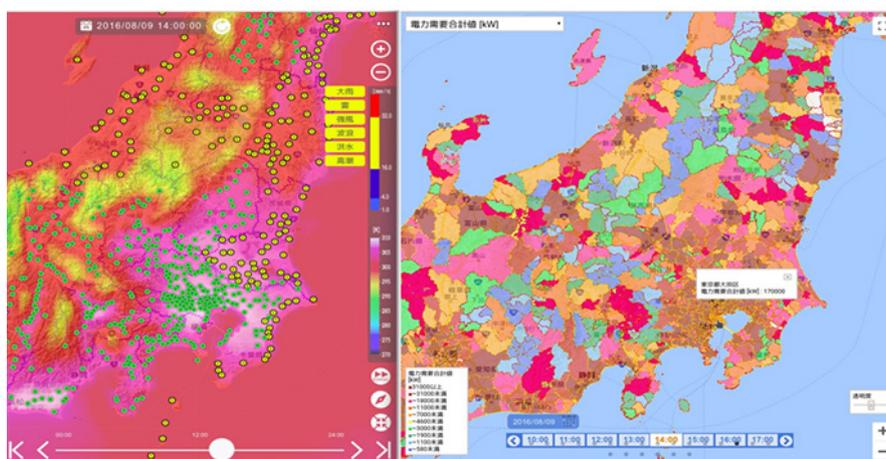


図5(8) 同 14 時 00 分の結果。

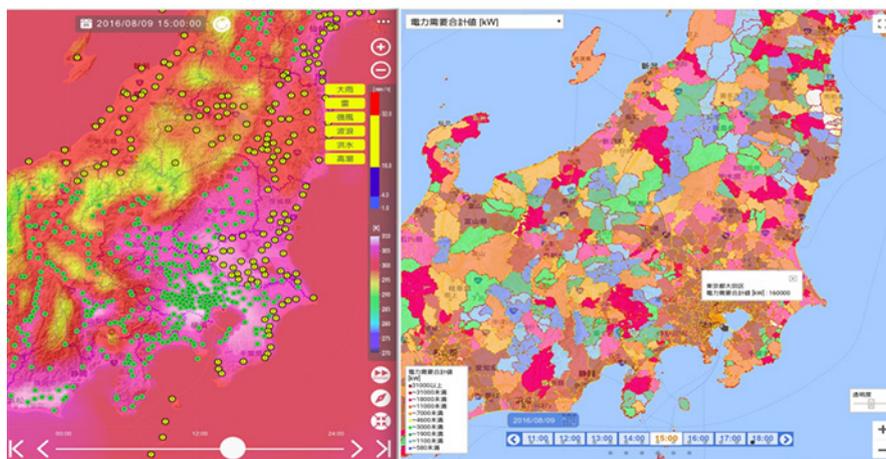


図5(9) 同 15 時 00 分の結果。

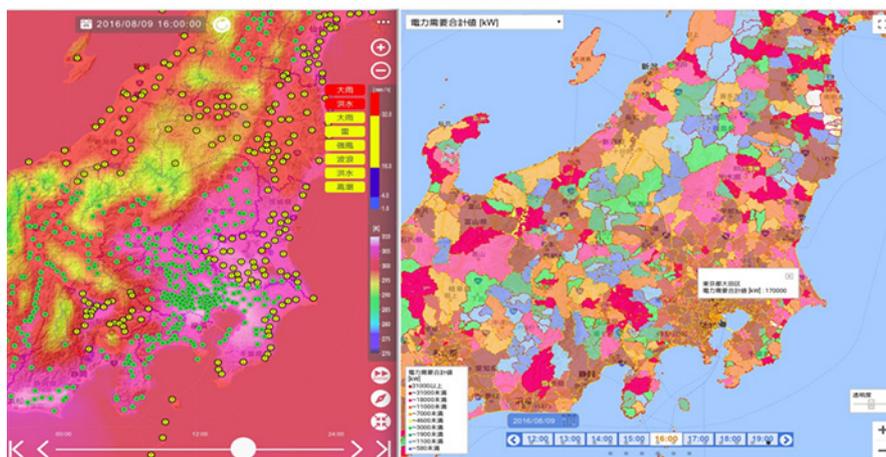


図5(10) 同 16 時 00 分の結果。

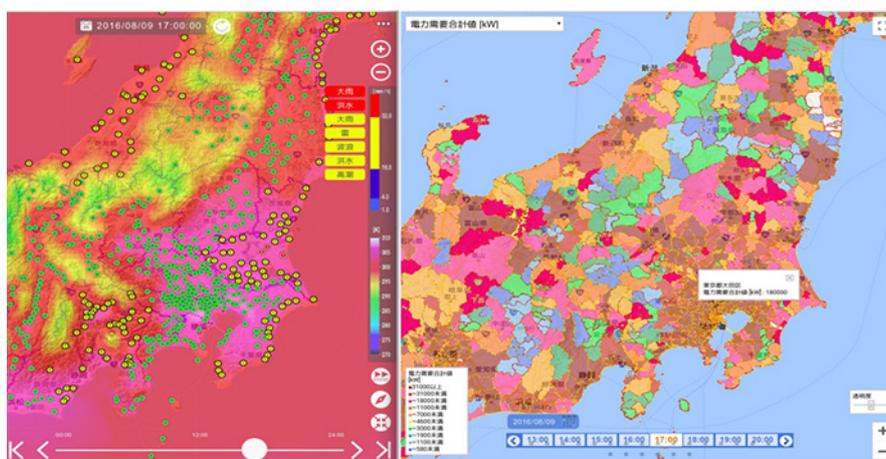


図5(11) 同 17 時 00 分の結果。

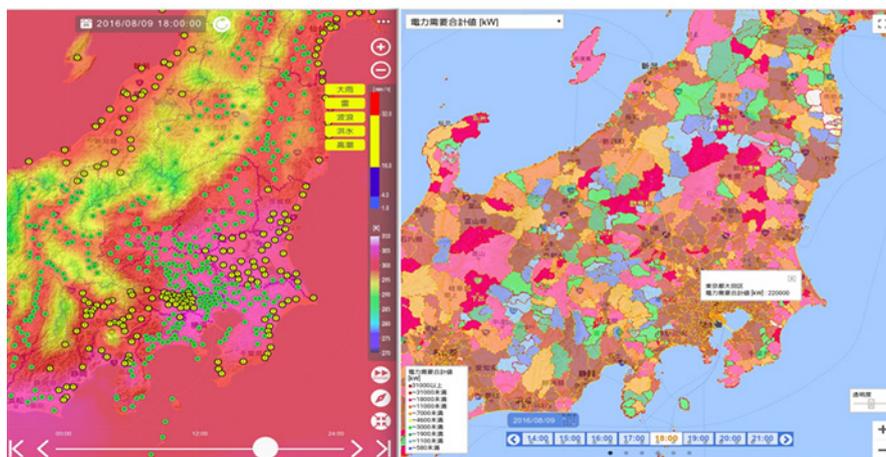


図5(12) 同 18 時 00 分の結果。

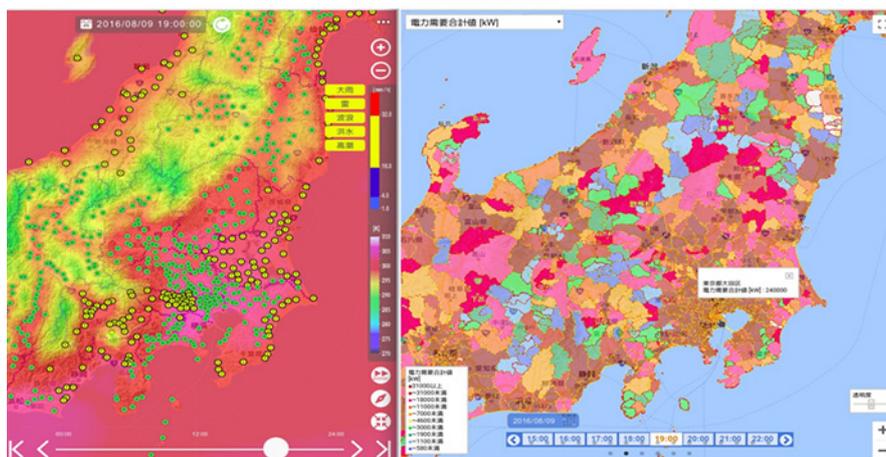


図5(13) 同 19 時 00 分の結果。

(2-3) ひまわり 8 号可降水量推定アルゴリズム

日射量の最大不確定要素は雲であるが、水蒸気(可降水量)は雲に次ぐ日射への大きな影響を及ぼす不確定要素である。本研究では「ひまわり」8号観測データに基づく可降水量の推定を検討する。「ひまわり」8号は 10 μm 帯の波長域に 8.6、10、11、12 μm に中心波長をもつ 4 つのチャンネルが搭載されている。これらのチャンネルの主な吸収気体是水蒸気であるが、その吸収特性は各チャンネルで異なる。赤外 2 チャンネル(10、11 μm に相当)の水蒸気の吸収特性の違いに起因する輝度温度差を用いる手法で可降水量の推定を試みた(H27 年度)。H29 年度は「ひまわり」8号の多チャンネル化に伴い前出の赤外4チャンネルの輝度温度差を利用した。Jin et al. (2008)¹以来数値予報データを初期値として放射伝達式を介した理論的手法が主流となっているが、計算コストの高さが当課題には問題となる。また、先行研究ではできるだけ多くのチャンネルを利用している。このことを考慮して、H30 度はさらにオゾンや炭酸ガスの吸収が主となるチャンネルの利用を試みた。H29 年度に引き続き利用するデータ期間は 2016 年 5 月から 10 月で、10 分間隔の観測値を用いた、真値とする可降水量データは国土地理院の電子基準点等観測データから、カリフォルニア工科大学によるソフトウェア GYPSY-OASISII を使用して算出された気象庁の GPS 可降水量データを用いた。可降水量を算定手法は衛星搭載赤外センサーの輝度情報を直接用いることから光学的に薄い氷雲や光学的に厚いエアロゾルなどの混濁に依る影響を受ける。また、可視データの緯度経度や時間による影響を考慮して、赤外データのみから晴天画素判定可能性を H29 年度に引き続き検討した。

図6に主として水蒸気の影響を受ける4チャンネル(8.6、10、11、12 μm)について、米国熱帯標準大気の温度、水蒸気データを用いて高度 12km に有効半径 30 ミクロンの巻雲を設定し、光学的

¹ Jin, X., J. Li, T. J. Schmit, J. Li, M. D. Goldberg, and J. J. Gurka, 2008: Retrieving clear-sky atmospheric parameters from SEVIRI and ABI infrared radiances. J. Geophys. Res., 113, D15310.

厚さを 0.05 から 1 まで変えた数値計算の結果を示す。ここで用いた氷雲は Ishimoto et.al, (2012)² で開発された非球形粒子を用いて各チャンネルの輝度温度を理論計算した。T11-T12 と T8.6-T12 は光学的厚さ 0.5 で逆転していることが分かる。この二つの輝度温度差の大小から薄い巻雲の影響の有無を判定する指標となる。H30 年度は前出した 4 チャンネルのほかオゾンや炭酸ガスを主としたチャンネルを用いて、GPS による観測された可降水量を真として各チャンネルの輝度温度差の 2 乗と地表の比湿を 2 乗の項まで考慮して重回帰式を構築した。

図7～9に用いた赤外チャンネルによる回帰式から推定した可降水量と GPS で観測・解析された可降水量の散布図を示す。上層の水蒸気に感度を持つチャンネルやオゾンの吸収が主となるチャンネルの追加はやや RMS を大きくしてしまうことが分かる(図8)。一方、炭酸ガスの吸収を主とするチャンネルを利用したものがやや RMS が小さかった(図9)。炭酸ガスは季節変化するため回帰式に導入するためには工夫が必要となる。

図10に 2016 年 6 月 19 日 15 時に「ひまわり 8 号」から解析された可降水量の空間分布を示す。衛星画像から判別される晴天域で可降水量の分布が大きく違うことが分かる。天気図から梅雨前線の位置が分かり、その北側では可降水量が少なく、南側では可降水量が多いことが分かる。また北海道の東にある高気圧域は非常に可降水量が小さいことが分かる。赤外画像から九州の南部で 15 時から 17 時にかけて急速に積乱雲が発達していることが分かる。15 時に算定された可降水量は集中して大きな値を示している。この水蒸気量の多さが積乱雲の発達に寄与していることが示唆される。

図11に 2016 年 7 月 31 日 12 時に算定された可降水量の空間分布を示す。天気図から分かるように台風の北東側で可降水量が多いことが分かり、台風の影響の及ぶ範囲が可降水量の分布から示唆される。

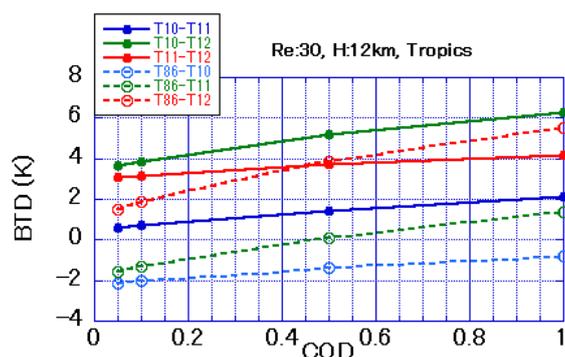


図6 有効半径 30 ミクロンの非球形氷雲を米国熱帯標準大気の高高度 12km に設定したときの、薄い巻雲の光学的厚さによる輝度温度差。T86-T12 の T11-T12 の大小が薄い巻雲の混入を判定する指標となる。

² Ishimoto, H., K. Masuda, Y. Mano, N. Orikasa, and A. Uchiyama, 2012: Irregular shaped ice aggregates in optical modeling of convectively generated ice clouds. J. Quant. Spectr. Radiative Transfer, 118, 632-643.

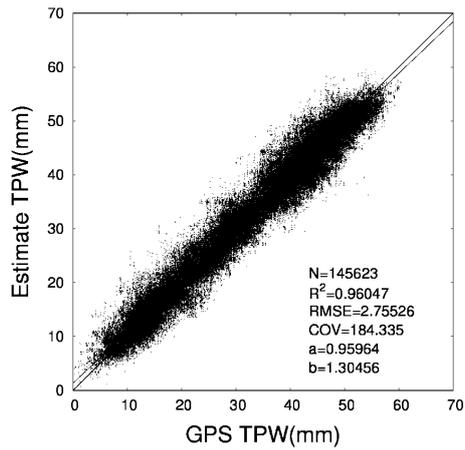


図7 10, 11, 12 および 8.6 μm データから決定した回帰式を用いて推定した可降水量と GPS の可降水量の散布図。

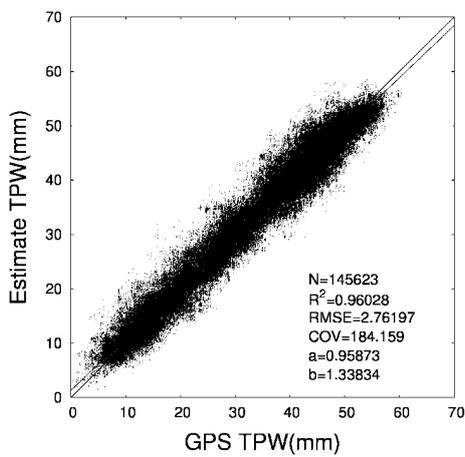


図8 図7に上層の水蒸気に敏感な 6.7, 7.3、9.6 μm を追加して決定した回帰式から算定した可降水量と GPS の可降水量の散布図。

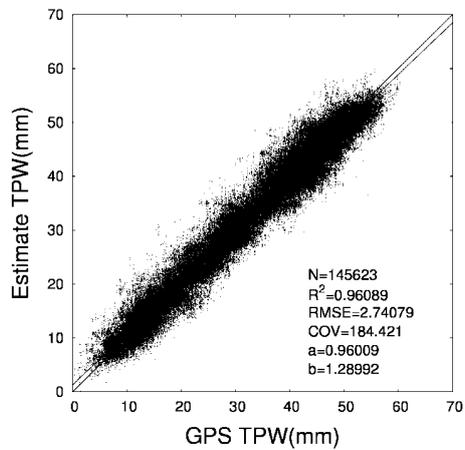


図9 図7に 13.3 μm を追加して決定した回帰式から算定した可降水量と GPS の可降水量の散布図。

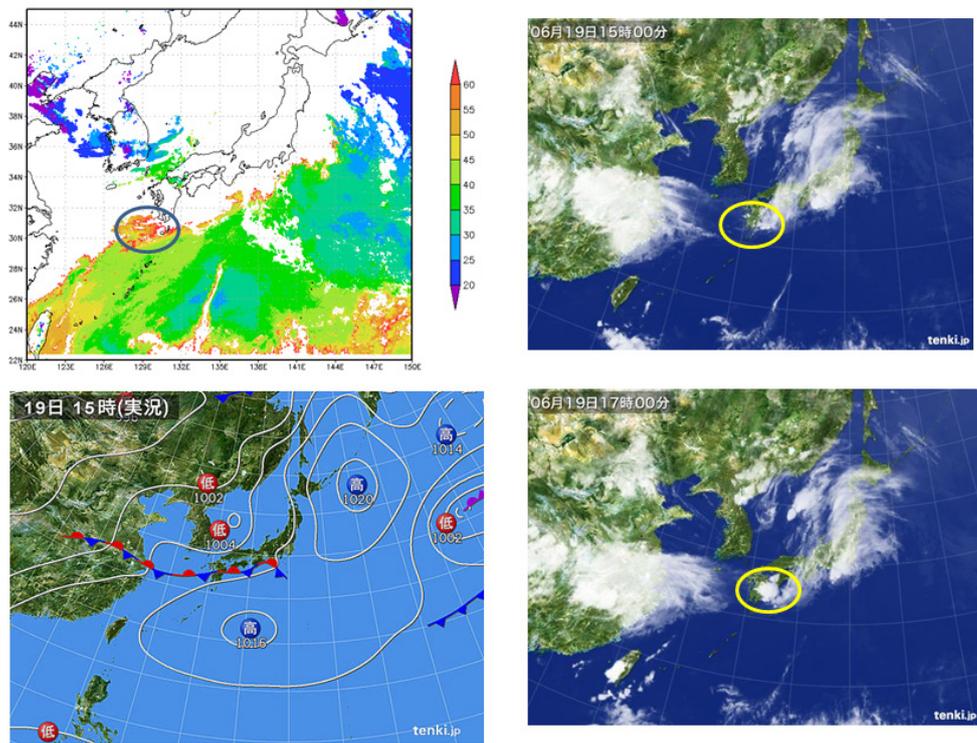


図10 2016年6月19日15時の算定された可降水量(左上)、天気図(左下)、赤外画像(右上)及び17時の赤外画像(右下)。天気図の梅雨前線の北側で可降水量が少なく南側で可降水量が多いことが分かる。北海道の東の高気圧付近では可降水量が少ないこと、太平洋域でも可降水量の分布は一様でないことが分かる。右の赤外画像の楕円で示した九州南部で15時から17時にかけて急速に積乱雲が発達していることが分かる。15時の可降水量の算定では九州南部で可降水量が多いことが示されている。この水蒸気が積乱雲の急激な発達に寄与していることが示唆される。(天気図と衛星画像は気象協会のものを使わせていただいた。)

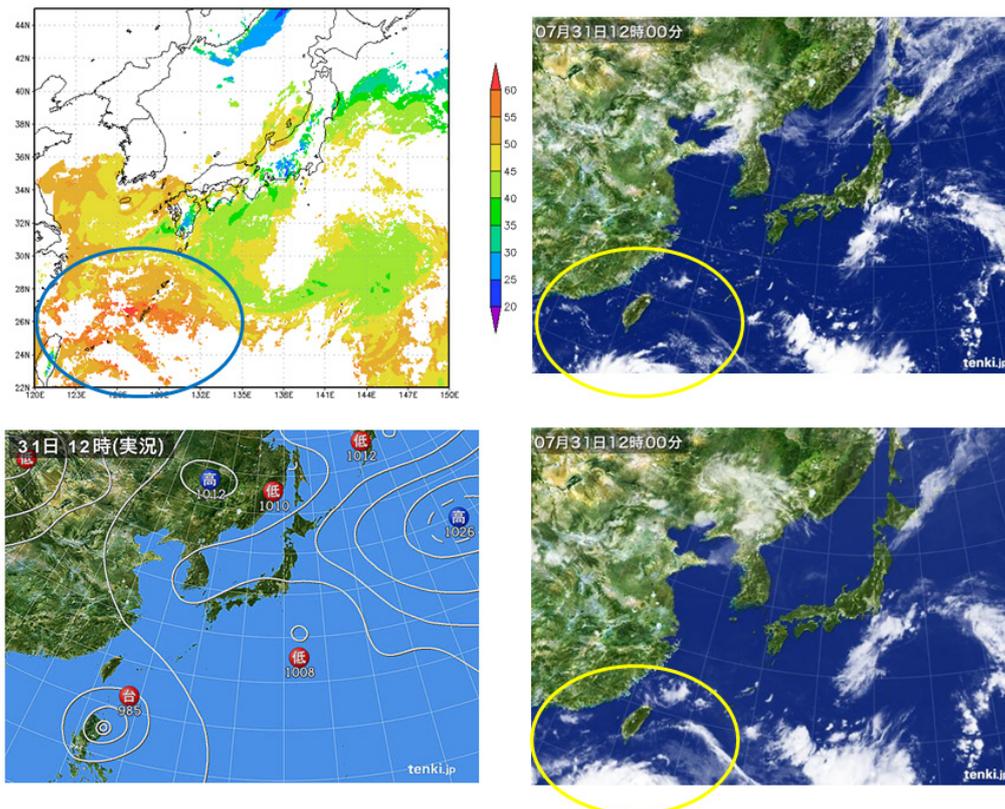


図11 2016年7月31日12時に算定された可降水量(左上)、天気図(左下)、可視画像(右上)、赤外画像(右下)を示す。楕円で示した領域は天気図にみられる台風の北側に位置しており、可降水量が多いことが分かる。可降水量の多い領域の北側の可降水量はそれほど多くないことが分かり、台風の影響がそこまで達してないことが示唆される。(天気図と衛星画像は気象協会のものを使わせていただいた。)

(3) 衛星データ解析のための研究

(3-1) 雲解析アルゴリズムの高度化

日本の静止気象衛星は2015年7月に「ひまわり8号」に移行され、2019年3月現在も観測が継続している。本研究課題における主力アウトプットのひとつである衛星日射の処理で用いられる雲特性解析アルゴリズムは、衛星搭載センサー毎に最適化されたデータベース(ルックアップテーブル)を必要とする。H27年度の研究では気象衛星の切り替えに伴うルックアップテーブルの作成を行った。H28年度はルックアップテーブルの健全性の確認とデータ解析結果の確認を実施した。H29年度は、氷雲解析の改善のために、新しいルックアップテーブル(ボロノイ粒子を想定したルックアップテーブル)の試作を行った。ただし、試験解析に想定外の結果が見られたためH30年度はその原因調査を行うこととした。なお、本研究課題では、ひまわり衛星のみならず、日本の主力衛星であるGCOM-C/SGLI, EarthCARE/MSI, Terra/MODIS, Aqua/MODIS 各センサー用のルックアップテーブルについても計算し、さらに放射伝達方程

式を用いて得られた模擬観測輝度から雲物理特性(光学的厚さ τ 、雲粒有効半径 E_{fr})を推定する試験計算を行った。その結果、暖かい雲、すなわち水雲の解析については結果が良好であることが H29 年度の成果に示されている。このような方法で雲特性解析アルゴリズムの発展と健全性維持の研究を進めている。

冷たい雲の粒子としてボロノイ粒子を想定したルックアップテーブルの作成時に見られた想定外の結果の概要は以下の通りである。通常、雲粒有効半径 E_{fr} の推定には $1.6\mu\text{m}$ 、 $2.2\mu\text{m}$ 、 $3.7\mu\text{m}$ のいずれかが用いられる。水雲解析においては上記のどの波長を用いた推定を行っても、良好な結果が得られることが過去の研究から判明している。ところが、氷雲解析を想定したボロノイ粒子について同様の試験を行ったところ、 $1.6\mu\text{m}$ 、 $2.2\mu\text{m}$ を使用した解析については想定通りの結果を得たが、 $3.7\mu\text{m}$ の結果については、 E_{fr} の推定結果がばらつくという結果になった。そこで、まずは単散乱データベースの不備や解析アルゴリズムの不具合の可能性についても調査したところ、これらには問題が無いことが分かった。そこで、次の可能性として $3.7\mu\text{m}$ 波長による氷雲粒子の感度について調査することとした。感度不足であれば E_{fr} の推定結果がばらつくという現象は理解可能である。その調査方法であるが、ボロノイ粒子単散乱データベース不具合の可能性を排除するために、粒子形状をボロノイ粒子の設定から一旦離れ、球形の氷粒子(通常の水雲の粒子は結晶状態になっているため球形ではない)を仮定したルックアップテーブルを作成してみることにした。そのルックアップテーブルを使用して τ 、 E_{fr} を推定した結果が図12である。横軸はモデル設定された τ あるいは E_{fr} 、縦軸は解析アルゴリズムが推定した τ あるいは E_{fr} である。図12の結果をしてみると、 τ については多少の過小評価の傾向が見られた。問題は E_{fr} の結果である。 E_{fr} の値が 30 を超えると明らかに過小評価していることが分かった。このような傾向は使用する観測波長に対して E_{fr} の感度が不足している場合に見られる結果である。このことは図13に示す複素屈折率の図からも示される。すなわち $3.7\mu\text{m}$ における複素屈折率の虚部(吸収を意味する)の値は 0.007 と大きいので $3.7\mu\text{m}$ 波長の光を大きく吸収してしまうことが分かる。一方で、水雲に対する $3.7\mu\text{m}$ の複素屈折率虚部は約 0.003 であるから氷雲の約半分である。そのため吸収の小さな水雲の解析は可能であるが吸収が大きい氷雲の解析は、感度不足のため解析が安定しないということが分かった。先に述べたように、雲粒有効半径 E_{fr} の推定には $1.6\mu\text{m}$ 、 $2.2\mu\text{m}$ 、 $3.7\mu\text{m}$ 波長が用いられる。水雲についてはいずれの波長を使用しても良好な E_{fr} が推定されるが、氷雲については $1.6\mu\text{m}$ ないし $2.2\mu\text{m}$ の使用が推奨されることが分かった。現在、本プロジェクトの日射推定で使用している雲特性解析アルゴリズムでは、水雲は球形粒子を想定したルックアップテーブルを使用しており、一方の氷雲では一世代前の六角柱粒子を想定したルックアップテーブルを使用している(Nakajima et al. 2009)³。しかしながら、氷雲モデルにはボロノイ粒子のような複雑な形状をし

³ Nakajima, T. Y., T. Nakajima, K. Yoshimori, S. K. Mishra, and S. N. Tripathi, 2009: Development of a light scattering solver applicable to particles of arbitrary shape on the basis of the surface integral equations method of Muller-type (SIEM/M): Part I. Methodology, accuracy of calculation, and electromagnetic current on the particle surface., Applied Optics, 48, 3526–3536.

た粒子が適切であるという研究結果がこれまでに得られており(Letu et al. 2016)⁴、今後はボロノイ粒子を使用したルックアップテーブルへの入れ換えが推奨される場所である。

その他にも、H30年度は、SGLI センサーを用いた雲フラグ解析と雲特性解析を試験的に実施し、それぞれの結果が良好であることを示した論文を投稿した(Nakajima et al. 2019, 投稿中)^{未発行論文 2)}。この論文は本 CREST で使用している雲特性解析アルゴリズムの健全性を示すものである。SGLI センサーの健全性の確認を通じて、ひまわり衛星 AHI センサーによる雲特性推定の妥当性を示すものでもある。また、静止衛星と極軌道衛星の同時利用のアイデアに関する研究発表を行った(Nakajima et al. 2018)^{原著論文 13)}。加えて、千葉大グループと東北大との共同で太陽放射量の検証に関する研究(Damiani et al. 2018, Khatri et al. 2018)^{原著論文 3, 10)}、林チームと共同によるパワーグリッドに関する論文(Ohtake et al, 2018a, 2018b)^{原著論文 9, 11)}、ひまわり 8 号を利用した氷雲解析に関する論文(Letu et al, 2018)^{原著論文 23)}、井村チームと共同によるエネルギーマーケットに関する論文(Watanabe et al, 2019)^{原著論文 24)}が発表されている。

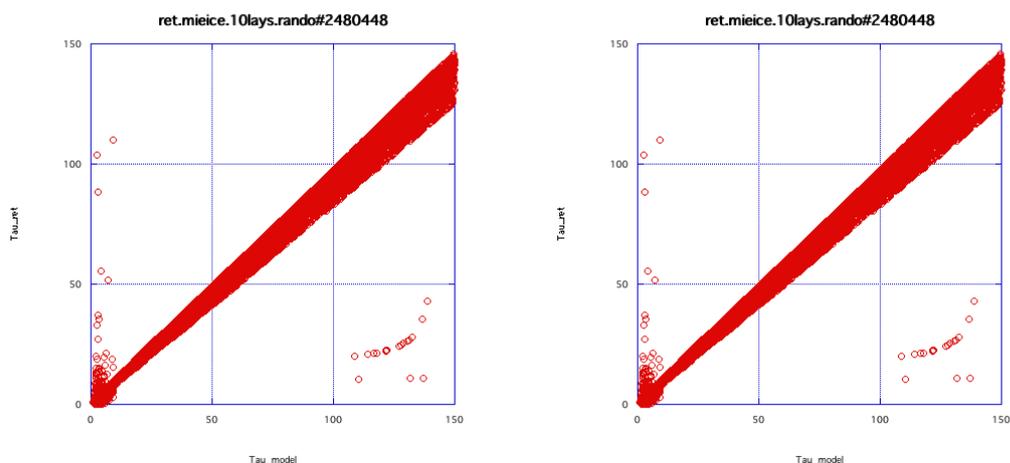


図12 ひまわり衛星で氷雲(球形氷粒子)を想定したインバージョン試験の結果

⁴ Letu, H., H. Ishimoto, J. Riedi, T. Y. Nakajima, L. C-Labonnote, A. J. Baran, T. Nagao, M. and M. Sekiguchi, "Investigation of ice particle habits to be used for ice cloud remote sensing for the GCOM-C satellite mission", Atmospheric Chemistry and Physics, vol. 16, No. 18, pp.12287-12303, Sep 29, 2016.

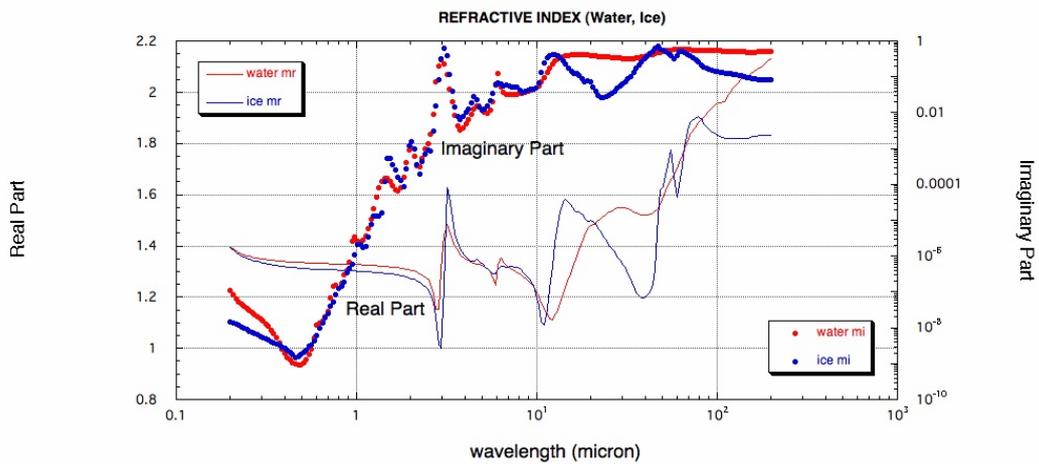


図13 水と氷の複素屈折率

(3-2) 衛星データの利便性向上

H30年度は、8月末に熊本にある宇宙情報センターの屋上に完成した新しい衛星受信システムにより、湘南校舎の受信システムとの2局体制になり、観測時間が重なる衛星の受信を取りこぼすことがほとんど無くなった。これに合わせてデータ処理系の見直しを行い、2局で受信処理の作業分担をしつつ、データベースの統合を進めた。これにより、多衛星データ利用の利便性が向上した。また、指定した地域に関して、複数衛星の画像を切り出し、地図上に表示するシステムを構築した。これにより、空間分解能、時間分解能の異なる衛星データの統合利用が可能となった。今後、こうしたデータを利用して、ひまわりの画像を用いた雲分布識別の精度評価等に活用する計画である。

3-2-2 モデルによる地球物理量算定システム(JAXA-東大)

【自己評価】

B おおむね順調に進展している

【研究進捗状況】

H30 年度は、非静力雲解像数値モデル NICAM を使用し、雲水データの同化手法の検証のための理想化実験と衛星データから推定した雲水データを同化した現実実験を行い、地表面日射量の再現性とその予報の可能性についての検証を行なった。以前の実験とは異なり、理想化実験から雲水データ同化の手法自体の詳細な(利点や傾向などの)検証が可能となり、また長期(1年分の)実験を行う事で季節間の傾向をより正確に解析した。この報告書では2つの実験設定とその結果の一部を記述する。

ここで使用した非静力雲解像数値モデル NICAM は全球と領域モデルの両方でグリッド位置(図1)や雲微物理などを共有し、全球実験を真値と見なした領域実験を行うことで理想化実験(Uchida et al, 2017)⁵が可能となる。他に、メソ数値予報モデル GPV を領域モデルの境界データとして使用する事でより現実に即した実験(現実実験)も可能である。この2つの実験を通して雲水データ同化実験の検証を行なった。

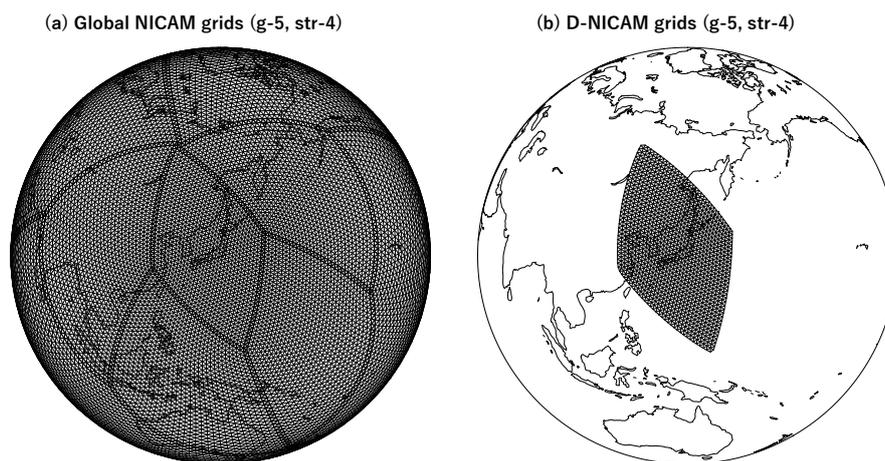


図1: 全球 NICAM と領域 D-NICAM のグリッド位置と領域範囲

(1) 理想化実験の設定

日本を中心とした領域に水平解像度28km で4つの実験を行い、側面境界値に全球実験デー

⁵ Uchida, J., M. Mori, M. Hara, M. Satoh, D. Goto, T. Kataoka, K. Suzuki, and T. Nakajima, 2017: Impact of Lateral Boundary Errors on the Simulation of Clouds with a Nonhydrostatic Regional Climate Model. Mon. Wea. Rev., 145, 5059 - 5082, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-17-0158.1>

タを直接代入する事で、実験精度を全球実験データとの誤差から算出することを可能(理想化実験)とした。これらの領域実験はそれぞれ同化する対象が異なり、同化無し(no_nud_D)、水平風のみ同化(uv_nud_D)、雲水量のみ同化(qc_nud_D)、水平風と雲水量の両方を同化(uv_qc_nud_D)した4つケースから成り立っている。実験期間は2011年 3 月 1 日から2012年3月31日までの395日間で、季節によってそれぞれの同化の効果がどう異なるかの検証も考慮した。ここでの同化手法は Goto et al. 2019 や Dai et al. 2018 (原著論文 26, 6) と同様に Newtonian relaxation scheme を使用して、タイムスケール(e-folding time)は水平風が 360 秒で、雲水量が 1200 秒と強めに設定した。

(2) 実験結果(理想化実験)

図2は全球実験と領域実験での昼13時の時点の地表面日射量と日平均の地表面降水量を比較し、その空間相関値(a, b)と平均二乗誤差(c, d)をそれぞれ一年分示した。ここ(a, c)では夏季に見られる対流性の雲の正確な再現が非常に困難であり(水色)、それが水平風データの同化を行うことでほぼ完全な再現が見込まれる事(緑色)が確認された。また雲水量データ同化では地表面日射量(a)に関しては改善が見られるが、地表面降水量(b)では誤差が少々大きくなった(赤色)。ただ、雲水量データ同化の効能が最も顕著に見られるのは水平風と雲水量の両方の同化を行なった際であり、特に地表面日射量の再現性が領域実験の中で最も良い結果となった。

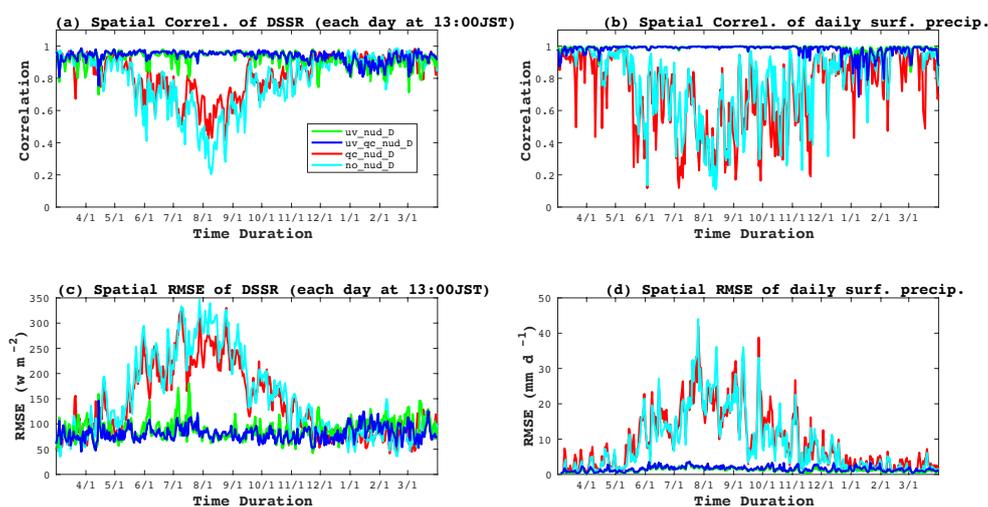


図2: 全球実験と領域実験の空間相関値(a, b)と平均二乗誤差(c, d)を昼13時の時点の地表面日射量と日平均の地表面降水量で示した。

図3は同化を使用することでの空間相関値の変化を散布図で示した。図3(1a - 2c)は同化を使用した実験(uv_nud_D, qc_nud_D, uv_qc_nud_D)と同化無しでの実験(no_nud_D)の空間相関値の差を横軸に取り、縦軸に同化無しの実験(no_nud_D)の空間相関値を置いた。ここでは、同化無しの実験で相関値が総じて低い夏季(青色)の相関値の改善が最も顕著でそれにより、改善の効果が線型に見られる。特に水平風の同化を行なった実験(uv_nud_D, uv_qc_nud_D)でその傾向が強い。次の図3(3a - 4c)では同化実験と同化無し実験の空間相関値の差を縦軸にも置くことで、同化対

象が異なる実験の改善の度合いを比較した。特に図3(3a)では水平風の同化と雲水量の同化をそれぞれ使用した際の空間相関値の改善度を比較しているが、夏と秋(青と赤色)では水平風の同化での改善度が高いのに比べて、冬季(黒色)では雲水量の同化がより有効であることが確認された。また、図3(3c)からは水平風の同化に雲水量の同化も加えた方が地表面日射量の空間相関は良くなるが、反対に図3(4c)からは、雲水量の同化を加えるよりも、水平風だけの同化の方が地表面降水量の相関が高い事が示された。

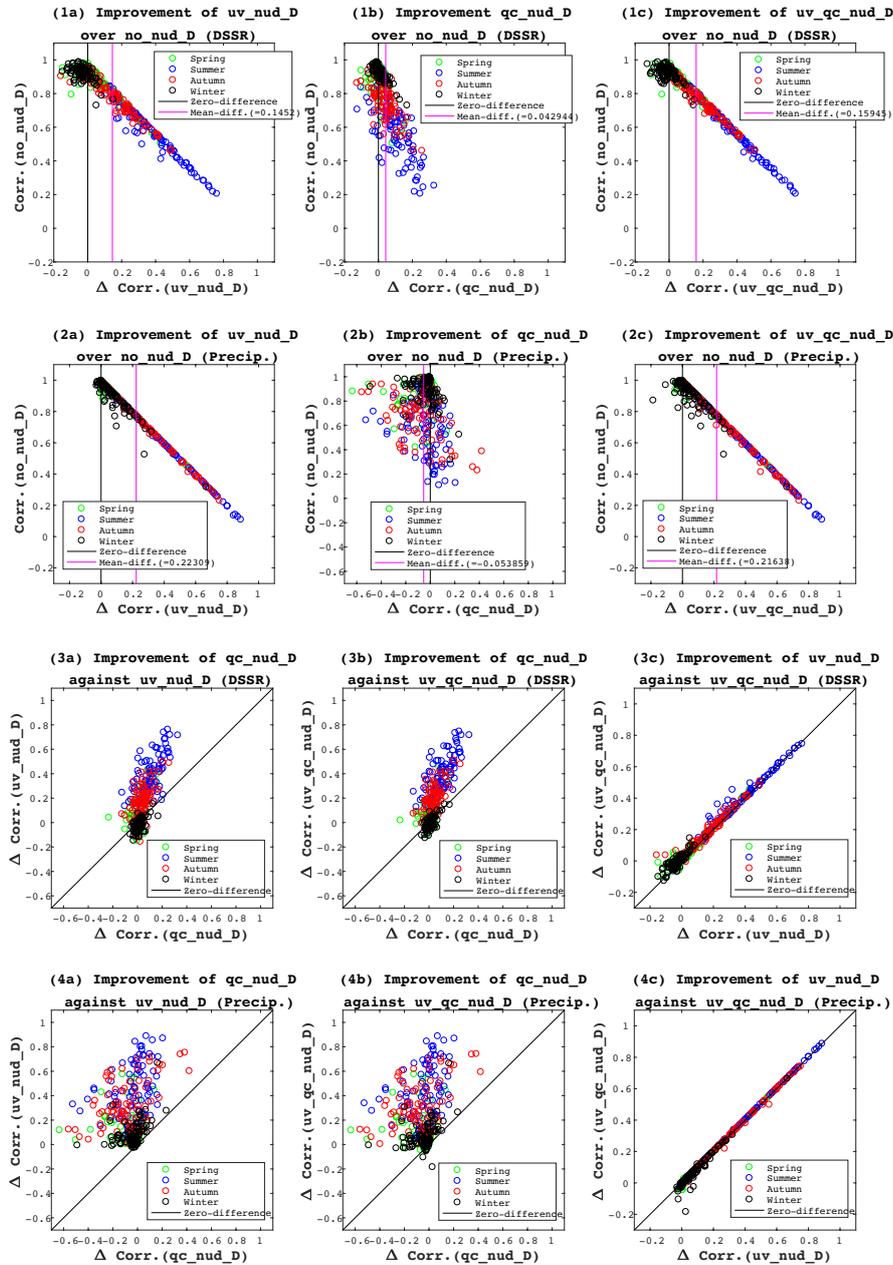


図3: 同化実験と同化無しの実験の比較と異なる同化対象による空間相関値の違いを散布図で示した。

図4は全球と領域実験の昼13時の時点の地表面日射量の結果を表示した。図に示した日時は、同化により相関値の改善が最も大きく確認されたケースと最も改悪したケースで選んだ。相関値の改善が最も大きいケースは同化無し実験での相関値が低い夏季に見られ、細かいメソスケールの対流性の雲が多く存在すること(1a)が確認できる。水平風を同化する事で対流の再現性が向上した為、雲の位置や大きさが全球実験とほぼ一致(1c)する。また、雲水量の同化ではメソスケールの雲の増加が見られるが、その位置は現実との若干のずれ(1d)が確認される。逆に相関値が改悪したケースでは、温帯低気圧による大規模な雲が確認され、同化無し実験での相関値が一概に高い。水平風の同化実験で相関値が落ちるのはデータ精度(時間解像度が3時間)に寄与するものと考えられる。また、水平風と雲水量を同時に同化する事で、それぞれの同化実験の中から相関値が高い方に近似する傾向があり、これは精度が高いデータを使用できるなら、複数の同化を同時に行う事でその効果が最も発揮できることを示唆している。

(3) 現実実験の設定

先に記述した理想化実験よりも高解像度の5km 水平解像度で日本を中心とした領域実験を2017年7月から2018年6月までの一年の期間で行なった。側面境界値には気象庁メソ数値予報モデル GPV データを使用することで現実に則した実験を可能とし、その結果を衛星データから推測される地表面日射量と比較する事で雲の再現性を解析した。ここでも、同化無し(no_nud)、水平風のみ同化(uv_nud)、雲水量のみ同化(qc_nud)、水平風と雲水量の両方を同化(uv_qc_nud)した 4つの領域実験を行い、使用した水平風の同化データには側面境界値と同様の気象庁メソ数値予報モデル GPV データ、また雲水量の同化データは衛星データから推計し、それぞれ一時間ごとに更新した。

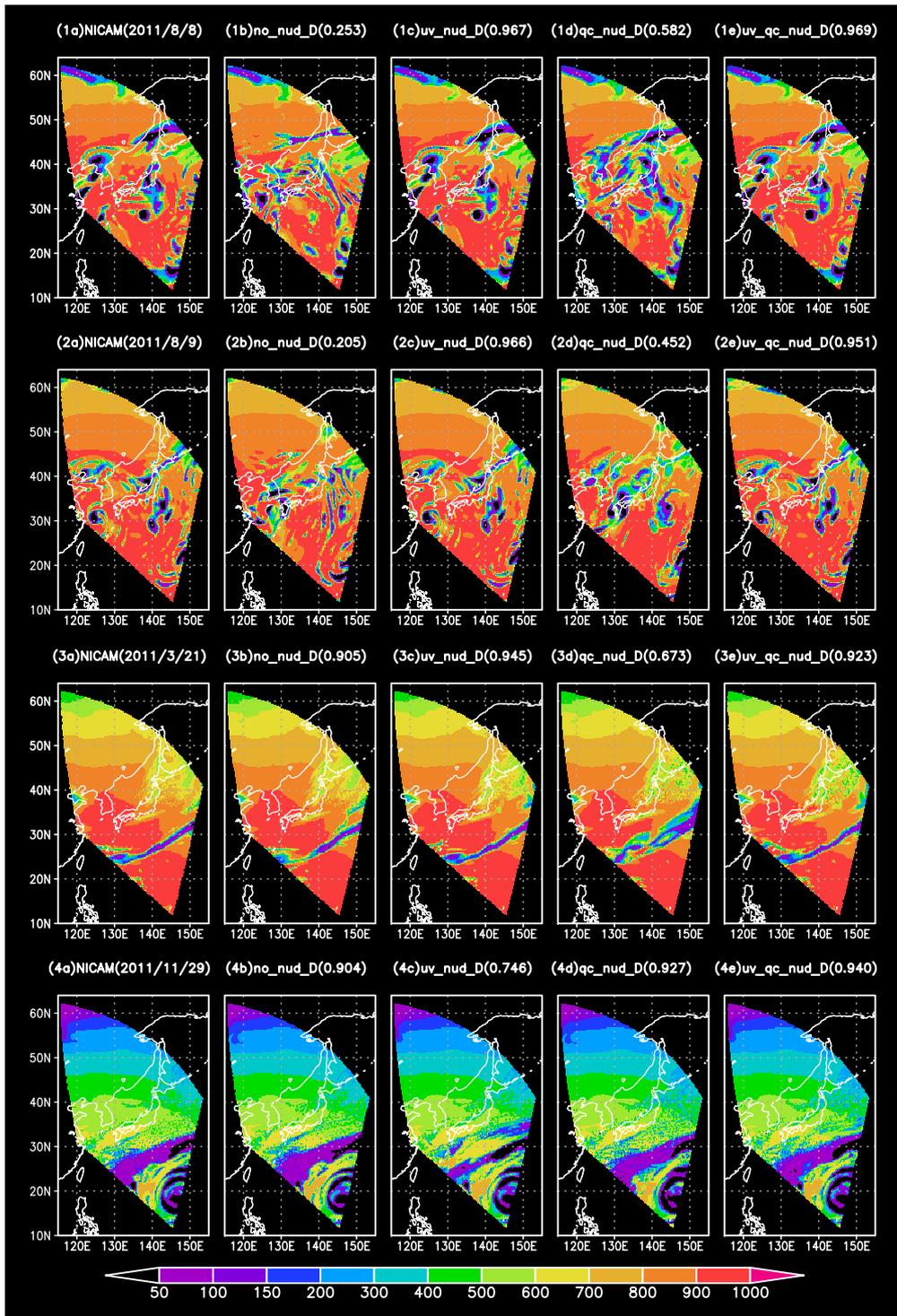


図4: 昼13時の時点の全球と領域実験の地表面日射量

(4) 実験結果(現実実験)

図5は衛星データと領域実験での昼13時の地表面日射量を比較し、一年分の空間相関値と回帰直線を左手(a, c)に、月平均と標準偏差を右手(b, d)に示した。理想化実験とは異なり、現実実験では雲水量の同化(b: 赤線)が水平風の同化(b: 緑線)よりも空間相関の改善の効果が大きくな

った。これは雲水量の同化データが、比較対象である現実の地表面日射量データと同様に、衛星データから推計されたのに対し、水平風の同化には数値予報モデル結果を使用した為、そのデータ精度が低下したことに寄与すると考えられる。しかし、先の実験と同様に雲水量と水平風を同時に同化する事で、空間相関値を最も改善する事ができ(b:青線)、特に夏にその傾向が強く見られる。それと同時に、雲量の顕著な増加(c, d:青線)も確認される。下の図(e, f)は同化実験と同化なし実験での空間相関値の違いを示しており、ここでは雲水量の同化による効果は冬に顕著であること(f:赤線)が示唆される。次の散布図(図6)は先の図4(3a - c)と同様に、異なる同化対象を適用した際の空間相関の改善の度合いを比較している。図6(e)から夏季(青)では雲水量と水平風を両方同時に同化の方が雲水量だけの同化よりも改善の効果が高いことから、水平風の同化の効果は夏の対流性の雲に対して、より顕著に働くことが再確認された。この様に、水平風の同化の効果は夏の対流性の雲の発生に、そして雲水量の同化の効果は冬の温帯低気圧の雲に特に強く見られるのは、先の理想化実験でも確認された事象であり、逆に言えば、局地的な雲を強制的に発生させることで起こる対流だけでは、その雲の維持も難しいとも示唆される。

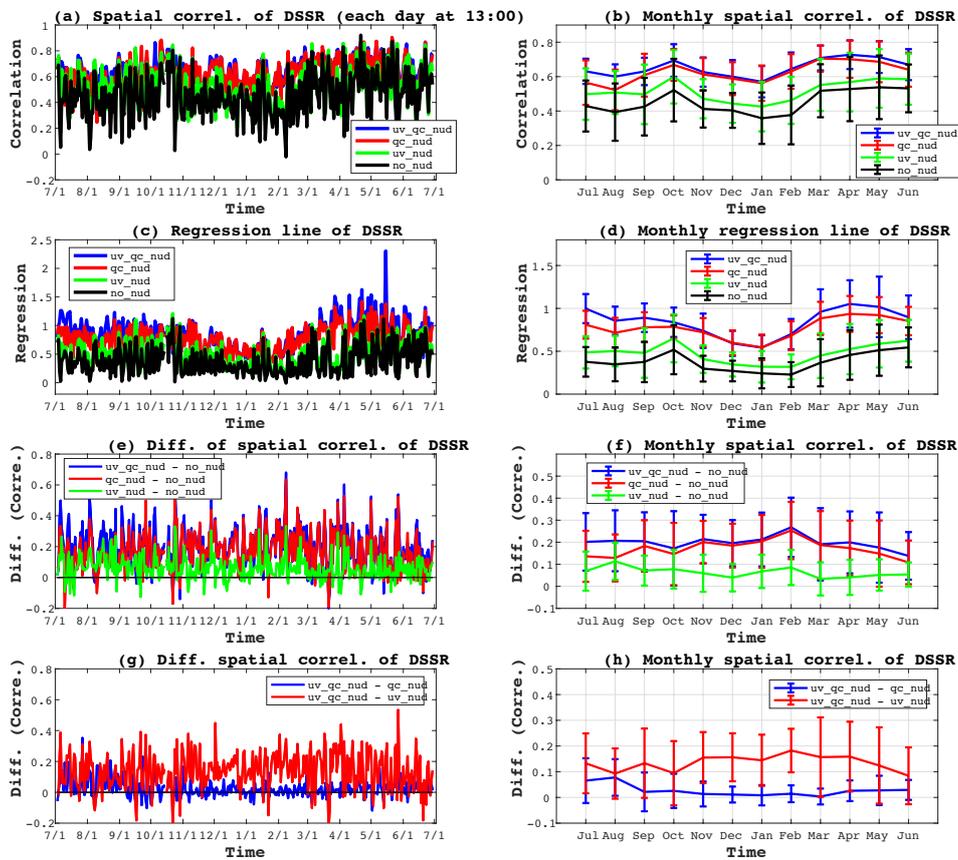


図5:衛星データと領域実験の昼13時の時点の地表面日射量の比較を空間相関値と回帰直線で示した。

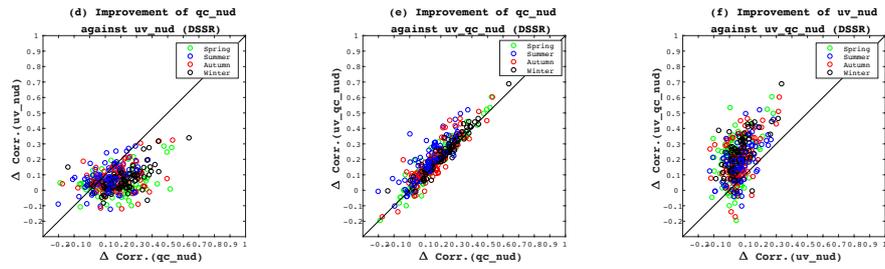


図6:異なる同化対象による空間相関値の違いを散布図で示した。

図7の一番上の図は領域実験と衛星観測により推定された地表面日射量の領域平均の月平均を示した。同化無しでの実験は、衛星と比較すると一年を通じて雲量が少ない傾向(モデルバイアス)があり、それは水平風の同化でも(多少の改善は見られるが)同様である。雲水量の同化では逆に、実際よりも雲量が増加することが確認され、その傾向は夏季に強く見られる。このような雲量の増大を抑える為に、衛星データから推計される鉛直積算雲水量(LWP)を以前の1/2と1/3に減少させて雲水量の同化データを再推定し、雲の増加が特に顕著な2018年5月から6月の間で実験を行なった結果を図7(a - f)に示した。ここでは、LWPを元の1/2にしての実験を水色で、1/3にした実験を薄茶色の線で表示しており、相関値は高く保ったままで、雲量もより現実に近い値まで抑える事が確認できた。この最適値は使用する数値モデルや雲微物理で異なると思われるが、今回の実験では1/2から1/3程度に削減するのが適切だと考えられる。

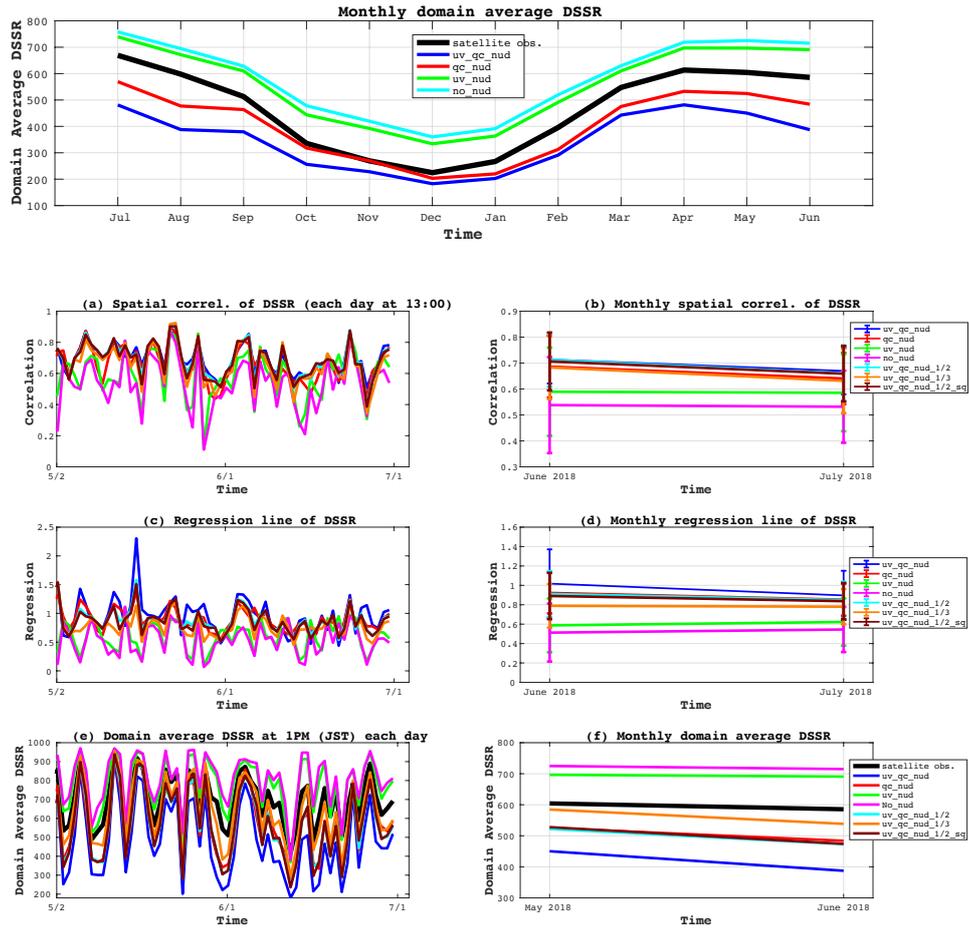


図7: 地表面日射量の領域平均と雲水量の同化データを再推計した実験の結果

(5) 同化による地表面日射量の予報実験の可能性

物理法則に伴った数値モデルは、より現実に則した予報が可能である。そこで予報実験の際に、同化の効果がどの程度保持されるかを検証する為、5月と6月の2ヶ月間に毎日11時で同化を止めて、そこから同化無しでの50時間分の予報実験を行なった。現実実験からは水平風と雲水量の両方を同化した実験を使用しての予報(図8(1a - 1d))、理想実験では水平風だけの同化(図8(2a - 2d))とより現実に近い雲水量と水平風の両方での同化実験(図8(3a - 3d))での予報を検証した。図8では、もし同化を続けていた時の昼13時の空間相関値(1a, 2a, 3a)、そして同化を11時に止めて、その2時間後の空間相関値(1b, 2b, 3b)、その26時間後の空間相関値(1c, 2c, 3c)、50時間後の空間相関値(1d, 2d, 3d)を示している。横軸は同化の効果によつての相関値の改善度、縦軸は同化無し実験での同時間の空間相関値を示している。理想化実験では50時間後でも同化の影響が再現の難しい(同化無し実験で相関値が低い)対流性の雲に対しては確認できる(1d)が、現実実験では同化を止めて数時間(2c, 3c)でその効果が消えてしまう。これは環境場が真値と乖離している為、同化の効果が持続しないと考えられる。この解決にはより高解像度で詳細な実験を行なう事や側面境界に与えるデータの正確性を高める事が挙げられる。

これらの実験により、地表面日射量の推定ではデータ同化の効果が認められ、特に複数の同化データ(本実験では水平風と雲水量)を併用する事での改善が強く見られた。また、水平風の同化は夏季の対流性の雲に、雲水量の同化は冬季の大規模な温帯低気圧の雲の再現性の改善に、より効果的である事が確認された。予報実験においては、データ同化による改善の持続がモデル環境場に大きく影響される事から、より精密な数値モデルと正確な側面境界データを使用する事で、同化を停止した後の数日はその効果が持続することが期待される。

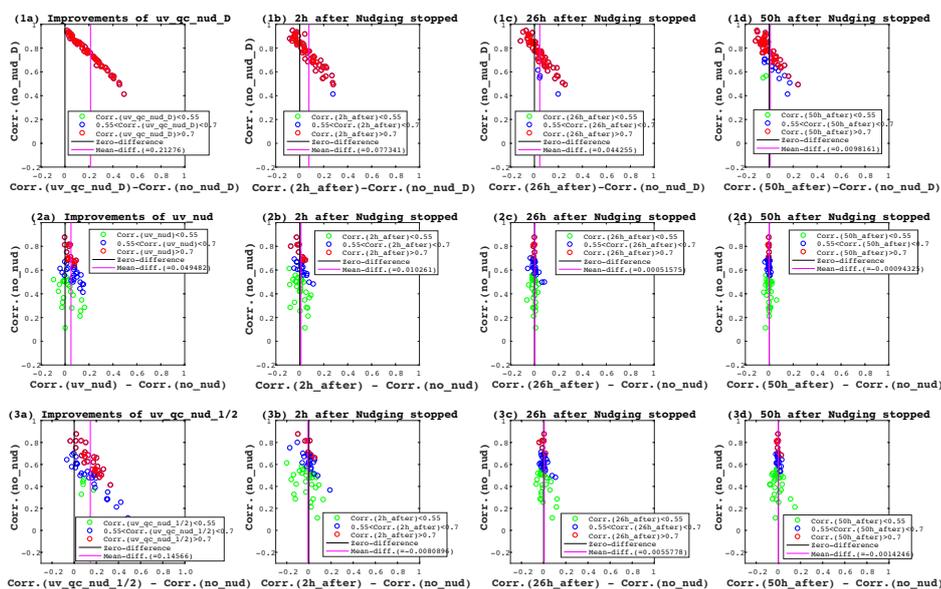


図 3-2-2.8 同化の影響が予報実験でどの程度持続されるかを散布図で示した。

(6) エアロゾルモデリング

地表面日射エネルギーの算定に重要な衛星リモートセンシング情報として、エアロゾルの光学特性(光学的厚さやオングストローム指数)があるが、本プロジェクトでは、このようなリモートセンシングデータへのモデルの同化技術を開発してきた。H30年度は、開発してきたNICAM-Chem大気化学輸送モデルの性能評価を行った。すなわち、東アジア域におけるモデル結果を衛星データ(ひまわり8号 AHI、AQUA/MODIS、COMS/GOCI 衛星データ)と比較し、森林火災などの特徴的なイベントを含めて両者がよく一致することを示した(Goto et al., 2019) 原著論文²⁶)。また、AD-Net ライダーによるエアロゾルの鉛直成層状態もほぼ再現できることを確認した。

さらに、NICAM-SPRINTARS エアロゾル化学輸送モデルの気象場を、NCEP 客観解析気象場でナudgingする拘束を行うことによって、土壌性エアロゾルの 30-40%にも及ぶ過大評価が解消することがわかった(Dai et al., 2018) 原著論文⁶)。乾燥域で卓越する土壌性粒子は、太陽光発電効率を大きく変えるために、この知見は重要である。今後、改良した NICAM-CHEM (エアロゾル部分は NICAM-SPRINTARS)を利用したエアロゾル場の予報システムの開発を行う予定である。

3-2-3 品質保証とデータ異常検出(千葉大)

【自己評価】

B おおむね順調に進展している

【研究進捗状況】

(1) はじめに

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システムの一端を担うと期待される。これまでの研究から、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。

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る。各項目の実施内容を以下に述べる。

(2) EMSのための地上システム・データベースの最適化

本項目において、H27年度は、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、特に地球科学とエネルギー需要科学の関連研究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。H28年度は、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。H29年度は、定常観測へ移行するとともに、地上観測の過去データのアーカイブ化を進めた。H30年度は、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方法の改善・公開を行った。このことについて、具体的な研究進捗状況、研究成果、今後の見通しを以下に述べる。

本研究では、地上観測の過去データのアーカイブ化の一環として、H28、H29年度にSKYRAD.packを核として開発した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, version 1; Mok et al., 2018; Irie et al., 2019)^{原著論文 1, 25)}を試験運用し、その評価・改良を実施した。特筆すべき開発要素は、スカイラジオメーターのオンサイトキャリブレーション手法である Improved

Langley 法と Solar Disk Scan 法を最適化したことである。具体的には、これまでは月毎に検定定数 (F_0) を半自動的に算出していたために準リアルタイム解析は困難であったが、SR-CEReS では過去 90 日のデータを使って Improved Langley 法で日毎に F_0 を算出するように改訂したことにより、準リアルタイム解析が可能となった。精度も高めつつ、安定させることもできた。また、Solar Disk Scan 法については、連続観測時に定期的な実施される Solar Disk Scan において求められる立体視野角(Solid View Angle; SVA)を客観的な条件でスクリーニングし、統計的手法で代表値を得るよう改良した。これらは、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キャリブレーションを準リアルタイム(一日以内)で行える画期的な進展であり、迅速な衛星データの補正・評価に役立つ。

F_0 については、2016 年 5-9 月に韓国・ソウルの延世大学において NASA の集中観測キャンペーン (KORUS-AQ) の一部として実施されたスカイラジオメーターの千葉大学標準機と米国メリーランド大学の Multifilter rotating shadow-band radiometer (MFRSR)等との同時観測の解析を進め、特に両者のエアロゾル特性の相互比較を通じて評価を行った。図1は、延世大学での観測の全期間におけるスカイラジオメーターと MFRSR のエアロゾルの単一散乱アルベド(SSA)データの相関プロットを示す。スカイラジオメーターの SSA データは、 F_0 の確度に強く依存する⁶。しかしながら、両者の値は概ね±0.03 以内で一致したことが分かった。このことから、SR-CEReS で算出した F_0 には機器の温度等による特性が十分に考慮され、精度良く F_0 が導出できていることが示唆された。成果は Atmospheric Measurement Techniques 誌(Mok et al., 2018; Irie et al., 2019)^{原著論文 1, 25)}にて公表した。

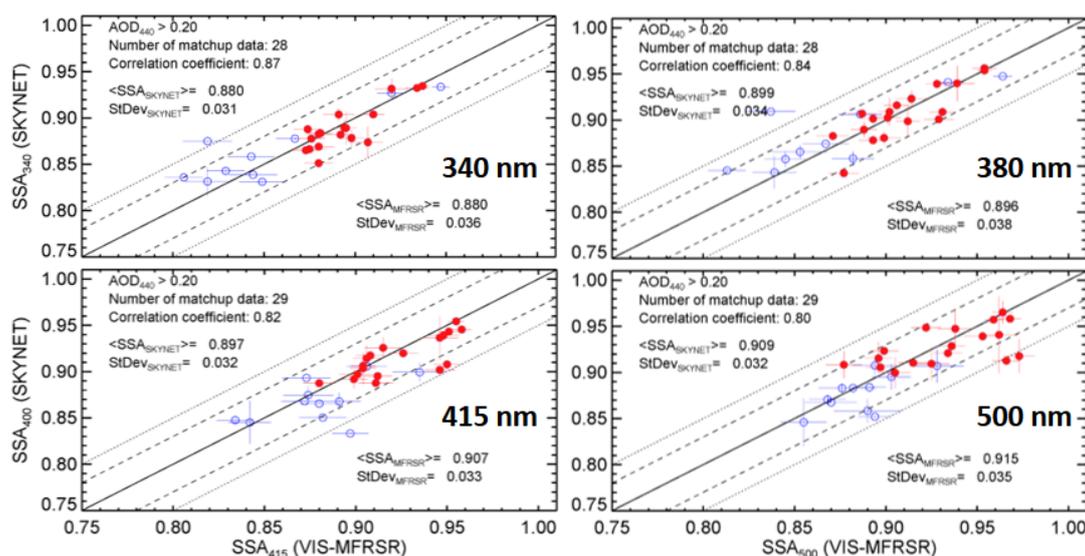


図1 2016 年 5-9 月に韓国・ソウルの延世大学で実施したスカイラジオメーターと MFRSR(米国メリーランド大学の測器)の同時観測の比較結果。波長毎にエアロゾル単一散乱アルベド(SSA)データの相関プロットを示す。波長 440 nm におけるエアロゾル光学的厚さ(AOD)が 0.4 よりも大きいデータが赤で、0.2-0.4 のデータが青で示されている。

⁶ Khatri, P., T. Takamura, T. Nakajima, V. Estellés, H. Irie, H. Kuze, M. Campanelli, A. Sinyuk, S. -M. Lee, B. J. Sohn, G. Padhithurai, S. -W. Kim, S. C. Yoon, J. A. M. Lozano, M. Hashimoto, P. C. S. Devara, and N. Manago, 2016: "Factors for inconsistent aerosol single scattering albedo between SKYNET and AERONET", Journal of Geophysical Research, 121, 1859-1877.

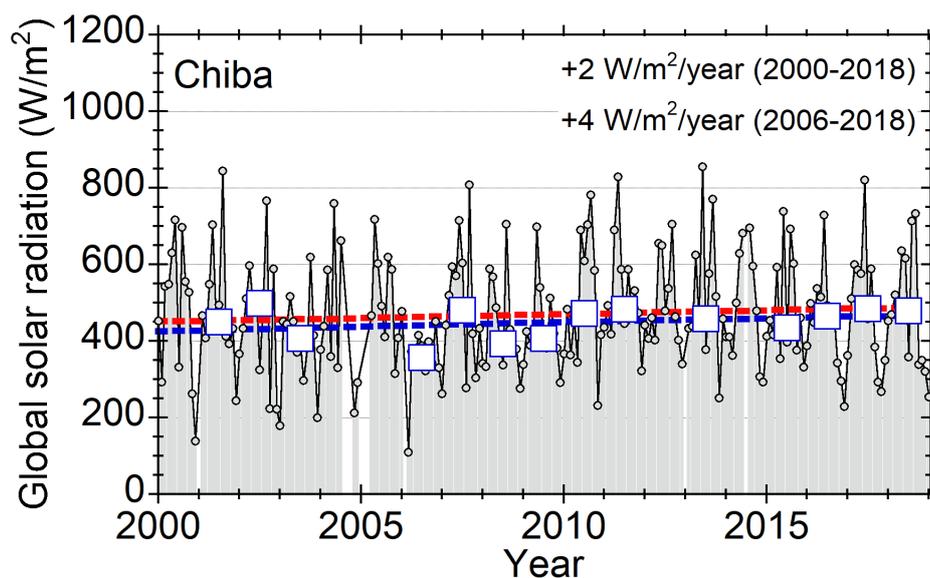


図2 2000年1月から2018年12月までにSKYNET千葉サイトで測定された日中(9~15時)の全天日射量の時系列プロット。黒丸は月毎の中央値を示す。その回帰直線を赤線で示す。青い四角は年毎の中央値を示す。月毎の中央値が12ヶ月存在していた年のみ、値がプロットされている。その回帰直線を青線で示す。なお、データはSKYNETホームページ(<http://atmos3.cr.chiba-u.jp/skyenet/>)でアーカイブ・公開されている。

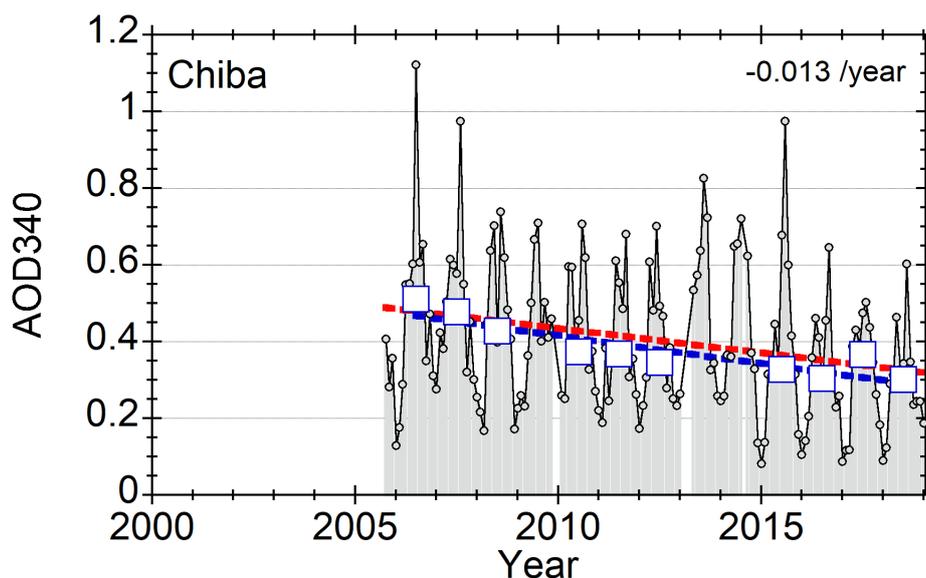


図3 2005年9月から2018年12月までにSKYNET千葉サイトでスカイラジオメーターで測定されたエアロゾル光学的厚さAOD(波長340nm)データの時系列プロット。黒丸は月毎の中央値を示す。その回帰直線を赤線で示す。青い四角は年毎の中央値を示す。月毎の中央値が12ヶ月存在していた年のみ、値がプロットされている。その回帰直線を青線で示す。なお、データはSKYNETホームページ(<http://atmos3.cr.chiba-u.jp/skyenet/>)でアーカイブ・公開されている。

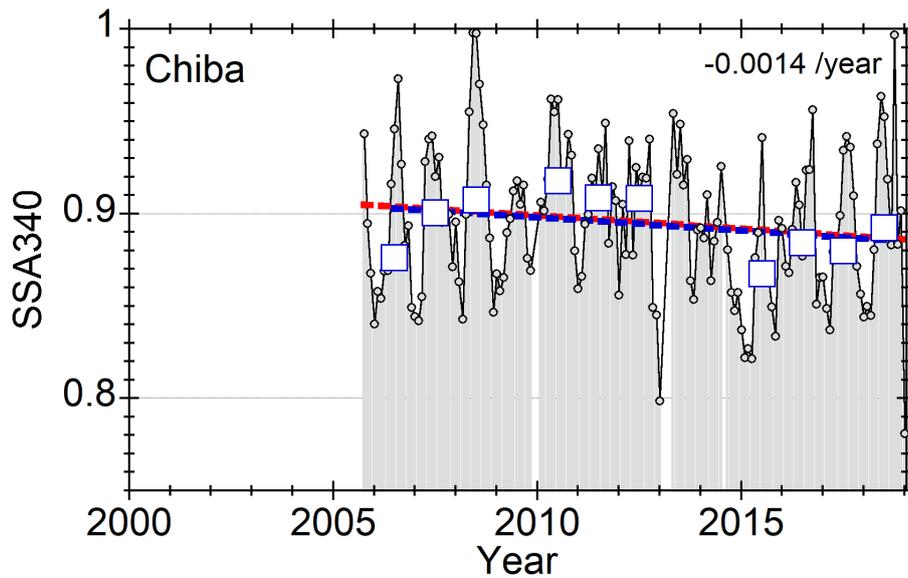


図4 図3と同様の図だが、単一散乱アルベド SSA (波長 340 nm)データの時系列プロット。

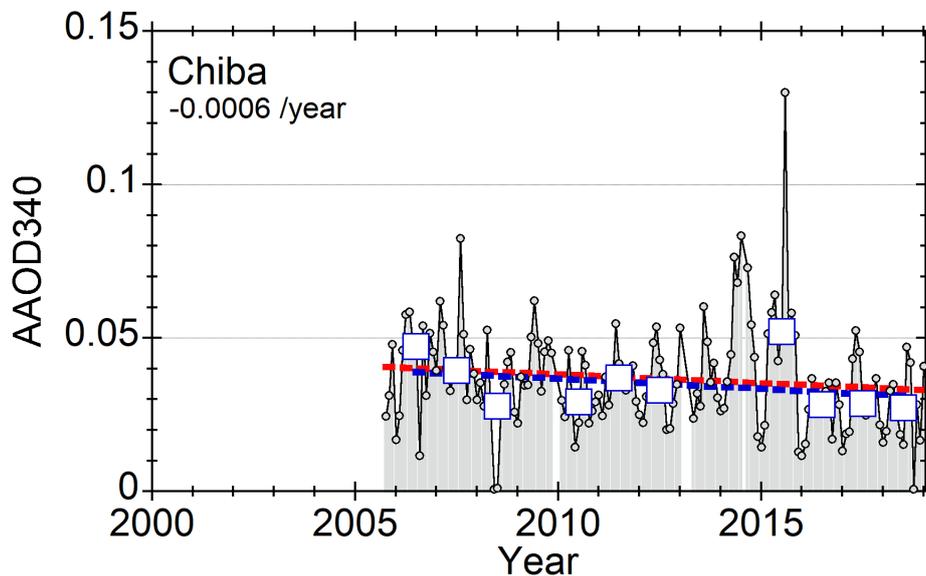


図5 図3と同様の図だが、光吸収のエアロゾル光学的厚さ AAOD (波長 340 nm)データの時系列プロット。

このスカイラジオメーターの共通自動解析アルゴリズムの開発を踏まえ、地上定常観測を継続するとともに、これまで得られた SKYNET 観測の過去データの再解析を実施し、全天日射計によって測定された全天日射量データなどとともにスカイラジオメーターのデータをアーカイブし、SKYNET ホームページ(<http://atmos3.cr.chiba-u.jp/skyenet/>)で公開した。データの例として、2000年1月から2018年12月までの期間のSKYNET 千葉サイトにおける日中(9~15時)の全天日射量

データの時系列を図2に示す。同じ月であっても、天候の違いにより年毎に変動が大きい、この長期間の過去データを使って回帰分析を行ったところ、2000年から2018年までの期間に、日中の全天日射量が $2\text{ W/m}^2/\text{year}$ の割合で増加したことが見積もられた。また、同様に2006年から2018年までの期間では、 $4\text{ W/m}^2/\text{year}$ の割合で増加したことが見積もられた。

図3、4、5はそれぞれ、2005年9月から2018年12月までにSKYNET千葉サイトでスカイラジオメーターで測定されたエアロゾル光学的厚さAOD(波長340nm)データ、単一散乱アルベドSSA(波長340nm)データ、吸収のエアロゾル光学的厚さAAOD(波長340nm)データの時系列プロットを示す。これらのデータは、本研究で開発したスカイラジオメーターの共通自動解析アルゴリズムにより再解析されたデータである。スカイラジオメーターの340nmといった紫外域のデータはこれまでほとんど公表されてこなかった。

図3が示すように、今から10年前のAOD(340nm)の年中央値は0.4-0.5程度であったが、最近では0.3程度まで減少したことが分かる。回帰分析によると、 $0.013/\text{year}$ の割合で減少していた。その原因を調べるために、SSA(340nm)のトレンドを解析してみると、SSAは $-0.0014/\text{year}$ の割合で減少したことが分かった(図4)。SSAは散乱係数と消散係数の比なので、AODとSSAの両方が減少しているということは、光散乱性のエアロゾル量が減少したことを意味する。他方、光吸収性のエアロゾル量の変動を調べるために、光吸収のエアロゾル光学的厚さ(AAOD; Absorption Aerosol Optical Depth)をAODと $(1-\text{SSA})$ の積として計算した。すると、AAODのトレンドも減少傾向($-0.0006/\text{year}$)を示した。これらのことは、国内の大気汚染規制のために光散乱性エアロゾルだけでなく、光吸収性エアロゾルも減少し、その結果として、全天日射量が増加したことを示唆する。このように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・公開を行った。今後は、引き続きJAXA-東大グループやデータ・インタフェースSGと連携しながら、地上定常観測、地上観測データのアーカイブ化・公開を継続して、それら地上システム・データベースを確立させる。

(3) 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

本項目において、H27年度は、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した。その継続として、H28年度は、「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。H29年度は、「ひまわり8号」の複数年比較解析を実施した。また、それに基づき、想定内誤差の高精度な評価を実施した。H30年度は、ひまわり8号等のデータの誤差評価のさらなる精緻化を図った。このことについて、具体的な研究進捗状況、研究成果、今後の見通しを以下に述べる。

図6に、SKYNET千葉サイトにおける、ひまわり8号の全天日射量データと地上に設置した全天日射計(CM21)で測定した全天日射量データの相関プロットを示す。ひまわり8号は2.5分毎、CM21は10秒毎に観測を行っているため、ひまわり8号の観測時刻に最も近いCM21の全天日射量の瞬間値が比較に使用されている。両者の相関係数は0.87と高いことが分かった。しかしながら、同時にばらつきも大きく、場合によっては 900 W/m^2 以上の差が生じていたことも分かった。

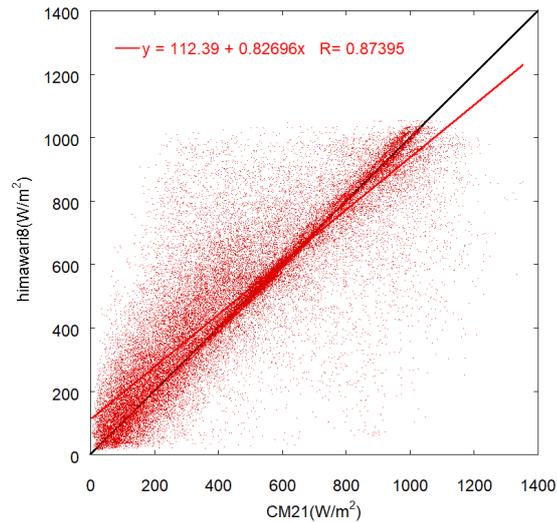


図6 SKYNET 千葉サイトにおける2016年1-12月のひまわり8号とCM21の全天日射量の相関プロット。回帰直線を赤線、1対1の関係を黒線で示す。

そこでCM21の全天日射量とひまわり8号による全天日射量のあいだに比較的大きな差が見られた日に着目し、詳細な解析を行った。その代表例として、2016年3月1日、4月29日、7月11日における、全天日射量の時系列、天空画像、および衛星画像を図7、8、9に示す。全天日射量の時系列プロットを見ると、CM21の全天日射量が大きく減少した直前と直後に、radiation enhancement現象(太陽周辺に存在した雲が直達光を反射する現象)(Damiani et al., 2018)が起り、全天日射量が上昇したことが確認される。また、3月1日14時、4月29日14時、7月11日10時30分頃において、ひまわり8号ではCM21で見られるような全天日射量の大きな減少が見られなかった。そこで、誤差が生じ始めた時刻の天空画像を調べたところ、直達光が雲によって遮られていたことが分かった。また、衛星画像から千葉上空には雲はないが千葉周辺に雲があることが分かった。ひまわり8号等の雲データの評価(Khatri et al., 2018a, b)や差分吸収分光法による地上観測(Manago et al., 2018, Hoque et al., 2018a,b)・衛星観測(Boersma et al., 2018)などから、雲データの誤差やエアロゾル等の大気汚染物質による影響も除外できることが分かった。これらのことから、ひまわり8号とCM21の全天日射量の差は、ひまわり8号の全天日射量推定において遠方の雲の影響を考慮していないことが明確となった。

遠方の雲の影響をさらに詳しく調べるために、影響を及ぼしうる雲と観測サイトのあいだの最長水平距離 x を次式で計算した。

$$x = h \times \tan(\text{SZA})$$

ここで、 h は雲の高度、SZAは太陽天頂角(Solar Zenith Angle)である。雲の高度は、一般的な中緯度の雲の最高高度として15 kmを仮定した。SZAは直達光が雲を遮っていた時刻から計算した。このようにして計算された x が最大で20 kmを示したことから、地上の全天日射量は約20 km離れた雲の影響を受けうることが分かった。

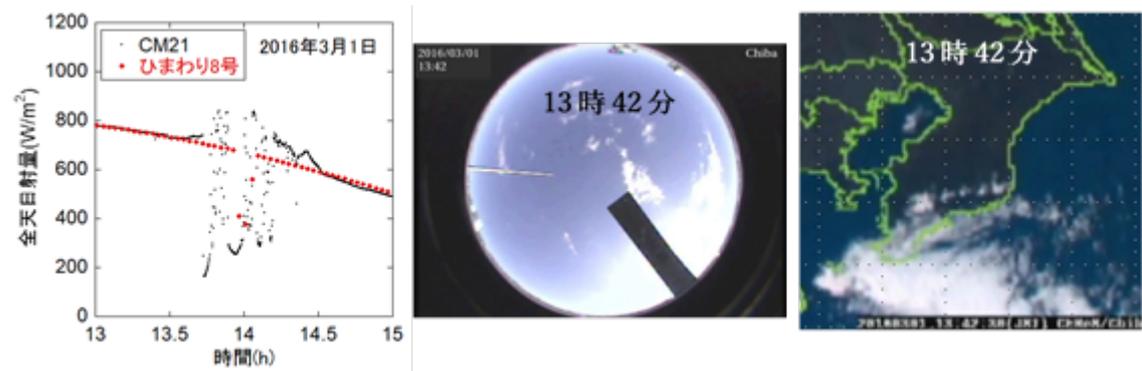


図7 2016年3月1日における(左)CM21とひまわり8号の全天日射量のグラフ。(中央)差が生じ始めたときの天空画像と(右)千葉周辺の衛星画像。

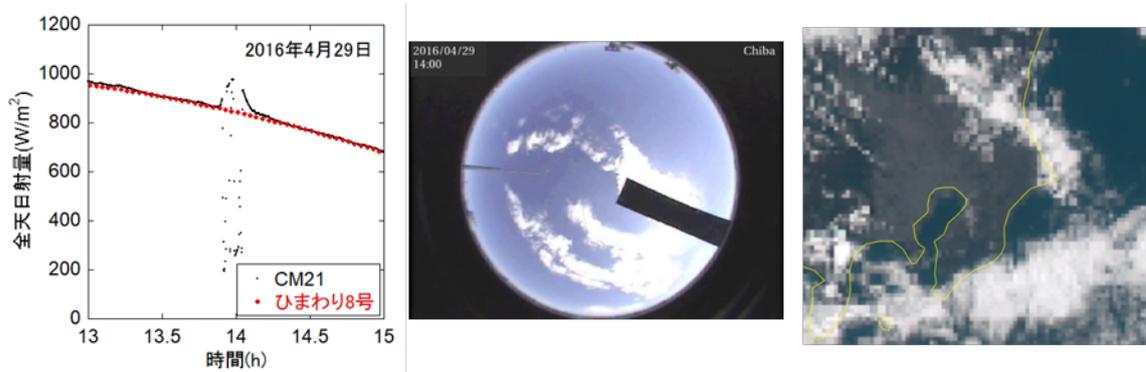


図8 2016年4月29日における(左)CM21とひまわり8号の全天日射量のグラフ。(中央)差が生じ始めたときの天空画像と(右)千葉周辺の衛星画像。

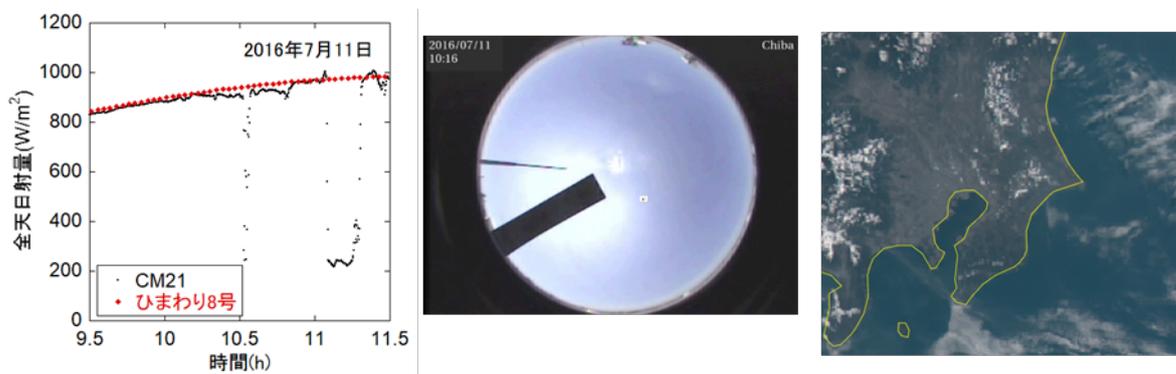


図9 2016年7月11日における(左)CM21とひまわり8号の全天日射量のグラフ。(中央)差が生じ始めたときの天空画像と(右)千葉周辺の衛星画像。

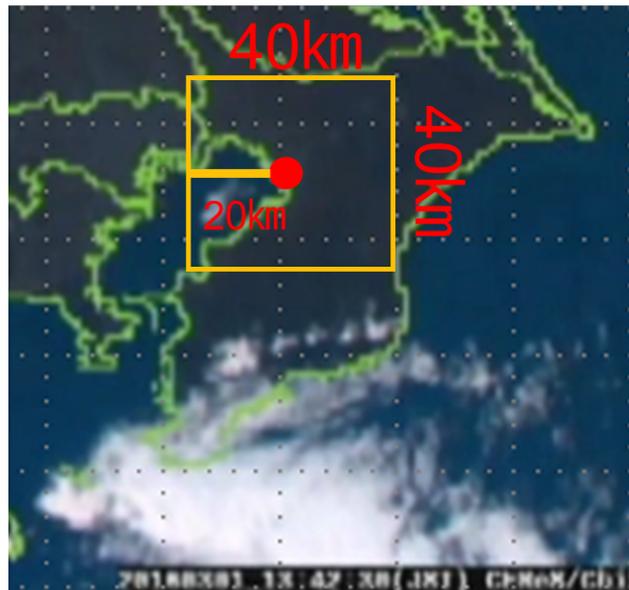


図10 千葉上空の衛星画像の上に 40 km×40 km の領域が示されている。赤点は観測地点。

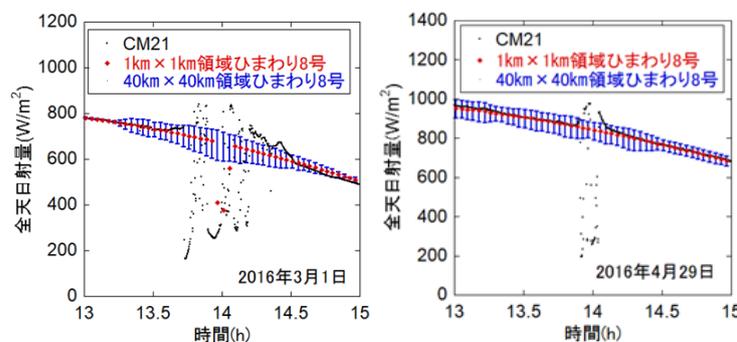


図11 (左) 2016年3月1日と(右)2016年4月29日における千葉上空の全天日射量データの時系列プロット。CM21の全天日射量が黒で、1 km×1 km 領域のひまわり8号の全天日射量データが赤で、40 km×40 km 領域の全天日射量の平均値と標準偏差が青で示されている。

本研究ではさらに、実際に 20 km 離れた雲の影響を受けているかを次のように確認した。まず、図10に示すように千葉サイトを中心とした 40 km×40 km 領域をとり、その中のひまわり8号の全天日射量の平均値と標準偏差を計算した。2016年3月1日と4月29日における全天日射量の時系列プロットを図11に示す。1 km×1 km 領域のひまわり8号とCM21による全天日射量に差が生じたときに、40 km×40 km 領域の全天日射量の標準偏差(エラーバーで示されている)が大きくなったことが分かった。これらのことから、ひまわり8号の全天日射量は雲による影響を十分に考慮できていないこと、また、しかしながら、標準偏差を用いることで雲の影響を除去した晴天日の判定を行えることが分かった。また、上記の radiation enhancement 現象(Damiani et al., 2018))も含め、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。さらなる全天日射量データの高精度化を達成するためには、そのような三次元効果

を考慮することが不可欠であることが分かった。今後は、引き続き JAXA-東大グループと連携して社会実装を見据えた形で、ひまわり8号等の高精度な誤差評価・誤差要因解明を継続し、衛星やモデルデータの高精度化に資する知見をまとめる。

(4) 高度な異常検出システムの構築

本項目において、H27年度は、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た。H28年度は通年データを活用した比較解析等により異常検出基準を高精度化した。H29年度は、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に着手した。H30年度は、異常検出基準の高精度化をさらに進めつつ、異常検出システムを改良した。このことについて、具体的な研究進捗状況、研究成果、今後の見通しを以下に述べる。

本研究でこれまで得られた結果から雲やエアロゾル等による大気科学現象がひまわり8号による全天日射量に及ぼす影響が極めて大きいことが分かった。また、雲の影響があると 40 km × 40 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。このことを踏まえ、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 D 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。エアロゾルの影響を除外した後の誤差 D' は次式で求めた。

$$D' = D - \text{AOD} \times \frac{\Delta F}{\Delta \text{AOD}}$$

ここで、 $\Delta F / \Delta \text{AOD}$ は、AOD に対する全天日射量(F)の応答を表す。 $\Delta F / \Delta \text{AOD}$ は、 D 値とスカイラジオメーターから観測された AOD 値(波長 500 nm)の相関プロットを作成し、その回帰直線の傾きから経験的に算出した。このようにしてエアロゾルの影響を除去した誤差 D' と AOD の相関図を図12に示す。この図から、 D' はおおむね 0-20 W/m² の範囲に収まることが分かった。さらに、この解析結果をもとに、次式で想定外誤差の判定を試みた。

$$|D' - \bar{D}'| > 2\sigma$$

ここで、 \bar{D}' は D' の平均値、 σ は D' の標準偏差である。図12の赤線は D' の平均値及び $\pm 2\sigma$ を表している。 \bar{D}' は 13 W/m² であり、ひまわり8号の全天日射量が CM21 よりも系統的に過小となっていることが分かった。本研究で実施した CM21 の精度評価によると、CM21 の誤差は 8-9 W/m² 程度であり、 D' と同じオーダーであることから、上記の系統的な差の一部は CM21 の誤差に由来する可能性がある。また、ひまわり8号の全天日射量の推定時にインプットとしている水蒸気濃度データの誤差にも由来するかもしれない。図12の赤線の範囲の内側であれば本研究で考慮した要因から想定される誤差で説明できることより、範囲外を想定外誤差とした。このように2016年の1年間に千葉で得られたデータを元にし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。そのときの全天日射量、天空画像、および衛星画像を図13、14、15に示す。このような詳細な解

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。このように異常検出基準の高精度化をさらに進め、その方法を取り入れた異常検出システムへと改良した。今後は、これまでの成果を基に、社会実装への道筋を見据えた形で高度な異常検出システムを確立させる。

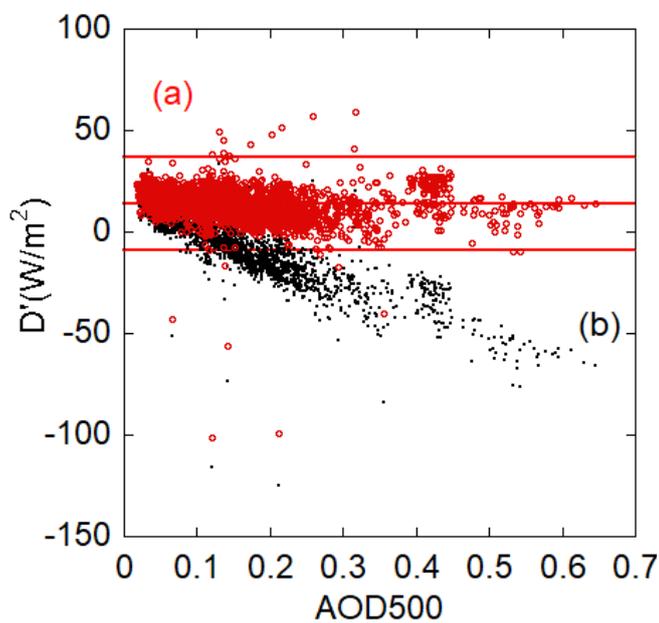


図12 スカイラジオメータのエアロゾルデータ(波長 500 nm の AOD データ)で補正したひまわり8号と CM21 の全天日射量の差(赤)。参考に、補正する前の全天日射量の差を黒で示す。



図13 想定外誤差と判定された 2016 年 1 月 4 日の全天日射量(左)、そのときの天空画像(中央)及び衛星画像(右)。



図14 想定外誤差と判定された2016年3月17日の全天日射量(左)、そのときの天空画像(中央)及び衛星画像(右)。



図15 想定外誤差と判定された2016年10月27日の全天日射量(左)、そのときの天空画像(中央)及び衛星画像(右)。

(5)まとめ

本研究は、太陽光発電量を左右する全天日射量の時間的・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。H30年度は、地上観測の過去データのアーカイブ化の一環として、H28、H29年度にSKYRAD.packを核として開発した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)を試験運用し、その評価・改良を実施した。その開発を踏まえ、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・公開を行った。H30年度ではまた、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)^{原著論文³⁾}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。また、雲の影響があると40 km×40 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。このことを踏まえ、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、その誤差はおおむね0-20 W/m²の範囲に収まること分かった。この範囲外を想定外誤差とした。このように2016年の1年間に千葉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。このように異常検出基準の高精度化をさらに進め、その方法を取り入れた異常検出システムへと改良した。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システムの一端を担うと期待される。

3-2-4 気象データの変動解析(東海大)

【自己評価】

B おおむね順調に進展している

【研究進捗状況】

(1) はじめに

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、非同期性をあらわす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評価することが可能となると期待される。

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ことで、地域的な PV 出力の推定を更に精緻化できるものと期待される。

H30 年度では、本研究項目において、「日射変動を対象とした時空間的な非同期性の定量化」及び「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の検討」を行った。

(2) 日射変動を対象とした時空間的な非同期性の定量化

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。

クロスサンプルエントロピー解析は、RQA (Recurrence Quantification Analysis: 再帰定量化解析) と呼ばれる複雑な時系列を解析するために用いられる解析法の一種である。主に経済物理学や生態物理学の分野でクロスサンプルエントロピーは非同期性を表す指標の一つとして用いられており、下記の手順によって推定が行われる。

1. 異なる二つの時系列データを遅れ時間座標系上のベクトルとして埋め込みを行い、得られた二組のベクトル集合からクロスリカレンスプロットを作成する
2. クロスリカレンスプロットから相関積分を近似的に求めてCRR (Cross Recurrence Rate)を導出。
3. CRR が埋め込み次元パラメータに対して指数関数的減衰をするものとして、その崩壊定数を推定し、得られた推定値をクロスサンプルエントロピーとする。

取り扱う時系列データが同一であるとき、クロスサンプルエントロピーはカオス時系列におけるKSエントロピーとは比例関係にある。また、クロスサンプルエントロピー解析に対し、タイムウィンドウを導入することで、非同期性の指標の時間的な推移を表すことが可能となる。

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。

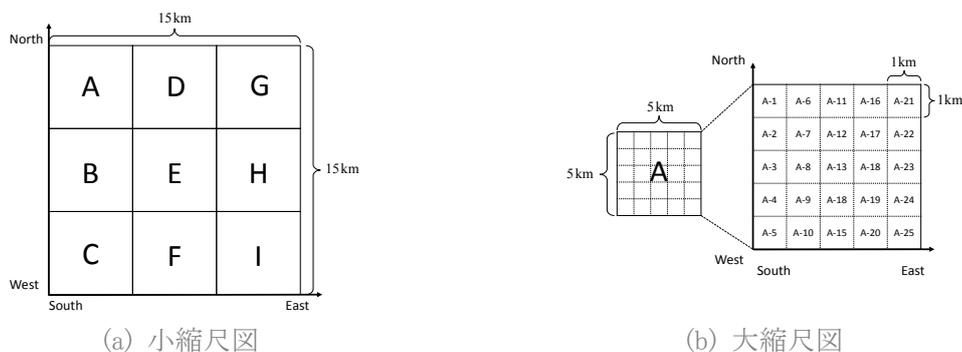


図 1 各地点の名づけルール

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。

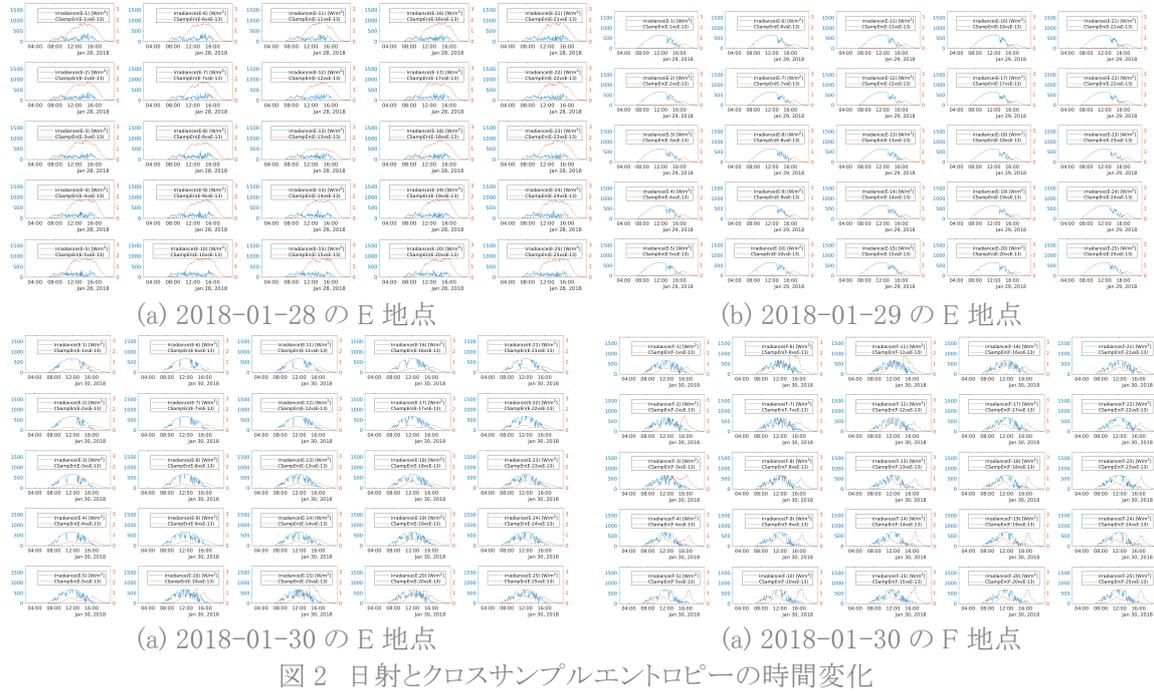


図2 日射とクロスサンプルエントロピーの時間変化

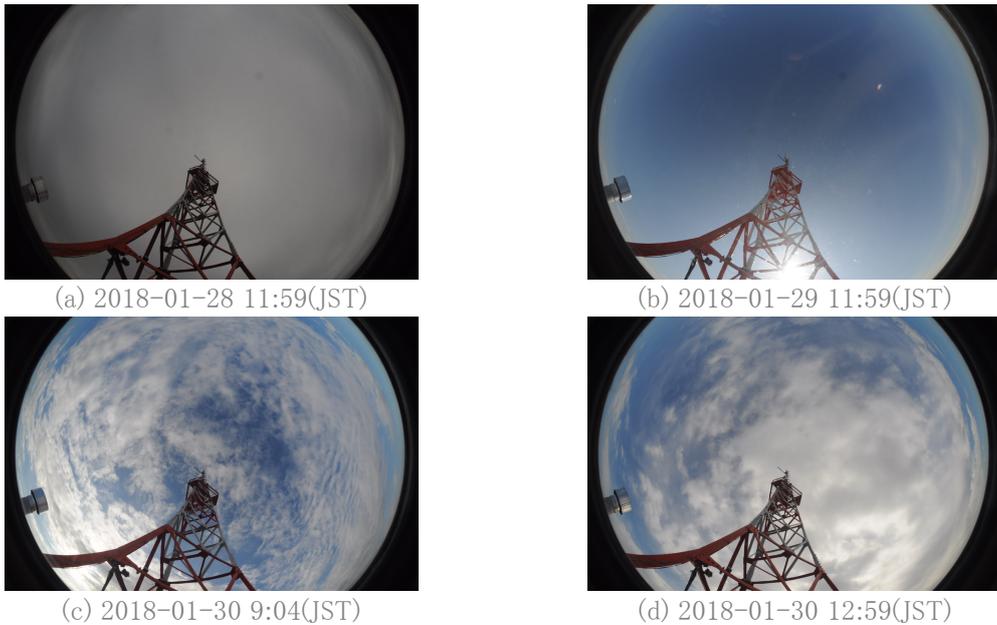


図3 全天カメラ画像

図 2 をみると、2018-01-28 は一日を通して日射の空間的な非同期性は一様に高い値を示し、2018-01-29 は一日を通して空間的な非同期性は一様に低い値を示した。これは、それぞれ、2018-01-28 では完全曇天で散乱日射が支配的となったことと、2018-01-29 では一日中晴天で散乱日射がほとんど存在しなかったことに対応していると考えられる。一方で、2018-01-30 では、日射のクロスサンプルエントロピー値の変化が、時間的にも空間的にも非一様であること(例えば、E-15 地点や F-19 地点でのクロスサンプルエントロピーの時間変化などで違いがはっきりとみられる)が確認された。2018-01-30における全天カメラ画像を確認すると、この日はさまざまな種類の雲が全天に表れていることが確認できた。この解析結果から、日射の空間的な非同期性の変化は、雲の状態に依存している可能性があると考えられる。

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。今後の課題として、クロスサンプルエントロピー解析に対する更なる気象学的な詳細分析や、本解析結果の EMS 分野への工学的応用の検討などが挙げられる。

本解析の結果について、2018 年度に、ICRERA2018 での学会報告および IEEE Xplore 上での掲載が行われた。原著論文 21)

(3) 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の検討

太陽光発電システムは日射を電気エネルギーへと変換するシステムであり、日射が電力システムへ与える影響を詳細に見積もるためには、電力変換システムの挙動や実際に PV へと入射される日射量について解析を行う必要がある。例えば、屋根設置型 PV システムに入射される日射量は、屋根形状に依存しており、天空状態に応じて地表面日射量を傾斜面日射量に変換して解析を行う必要などが生じる。特に、図 4 に示すように、都市部においては住宅などの建築物が占める面積が大きく、国内での PV 導入可能量の多くが屋根に設置する住宅用 PV システムによるものである。このことから、屋根形状の統計データを反映させた PV 日射量の解析ツールは、EMS 領域の研究者にとって有用となると考えられる。

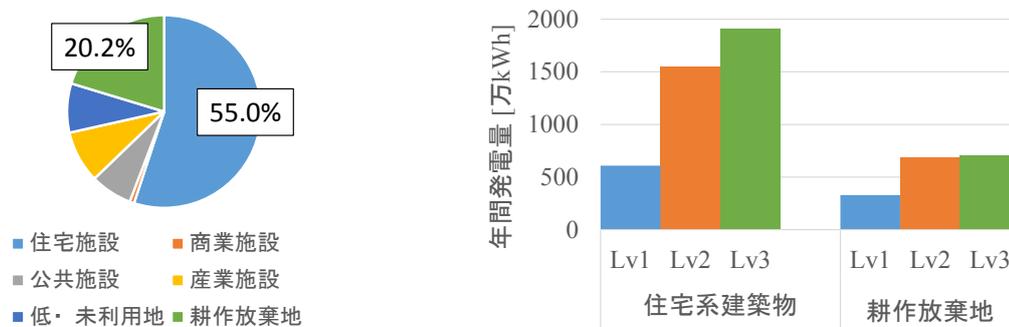


図 4 PV の導入ポテンシャル推計結果
 “平成 24 年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報整備報告書”(環境省, H25.8)より集計

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。H29 年度では、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た。

統計データを反映させた屋根設置型 PV 日射量の解析には、斜面日射量の計算と統計分布を反映させるための住宅のモデル化やいくつかの仮定を行う必要がある。ここで、斜面日射量の計算には、松本の式による太陽位置計算アルゴリズムと Perez の非一様天空モデルを用いた。また、屋根形状について、三角屋根(切妻・逆M字)、寄棟、方形、片流れ、陸屋根の五種に分類し、屋根の形状と勾配の統計データを反映させるようにした。屋根の方位角データに関しては、現時点では、統計データが存在しないことから、切断正規分布などを仮定して計算をおこなうものとした。さらに、北向きの傾斜面に PV を取り付ける場合、投資費用に対する PV 発電量のコストパフォーマンスが悪化することが知られていることから、PV 設置に関して、設置禁止角を設定できるものとした。図 5 に屋根材の方位角分布の切断正規分布を用いた計算例を示し、図 6 に設置禁止帯域以外の PV 方位角の分布の例を示す。(南方を 0 度とし、西回りを正とする)

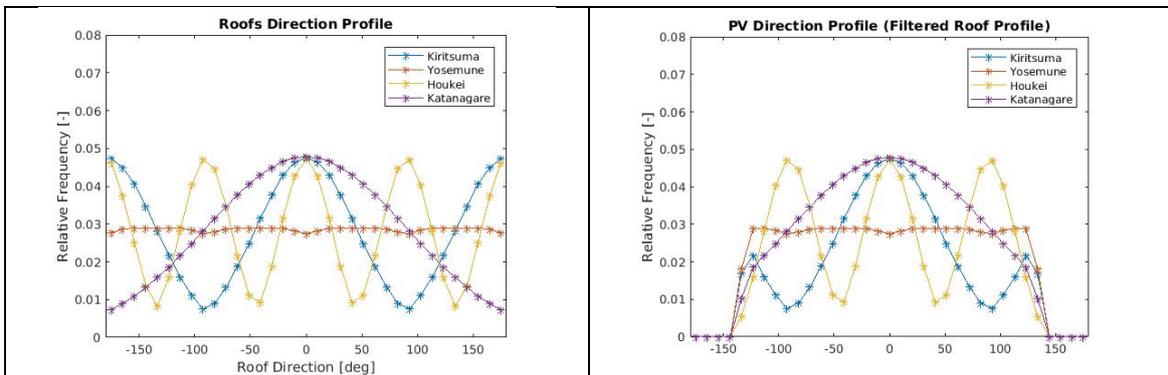


図 5 屋根材の方位角分布の計算例

図 6 設置禁止帯域以外の PV 方位角分布

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 7 に示す。

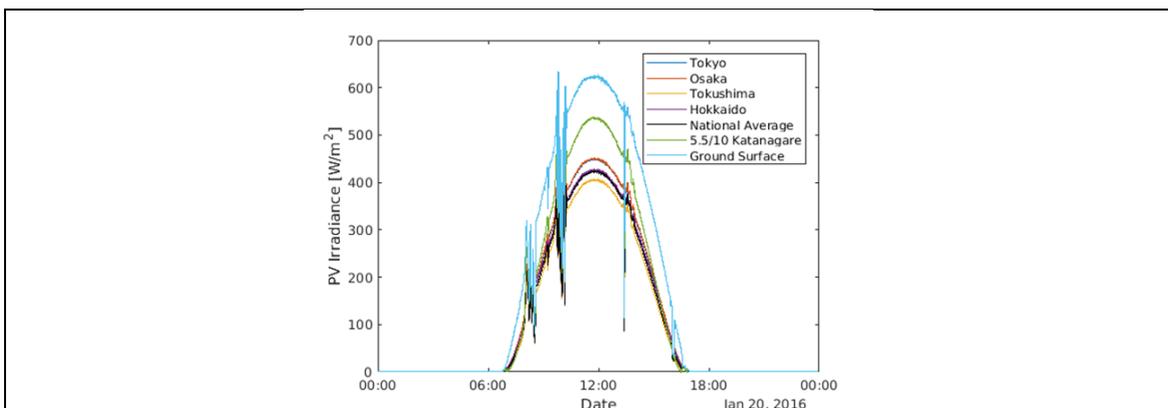


図 7 地域別の屋根形状統計分布データを反映した PV 日射量の期待値

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。

本解析ツールを用いた地域別の屋根形状分布を反映させた PV 日射量に関する解析結果は、平成 31 年電気学会全国大会にて、学会発表がなされた。口頭発表 87)

3-2-5 地球物理量データによるシナリオデータの作成 (JAXA-東大)

【自己評価】

B おおむね順調に進展している

【研究進捗状況】

太陽光発電を代表とする再生可能エネルギーを電力網に積極的に導入するためにはその基礎情報データベースが必要である。EMS に資する地球物理量データは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。H27 年度は EMS に資するシナリオ設計が行われた。ターゲット領域を東京電力管区及び関西電力管区と定めエネルギー需要が逼迫すると考えられる猛暑日及び真冬日観測が集中した期間を過去 10 年間の観測事実から精査し猛暑日シナリオと真冬日シナリオと定義した。また、需要科学とのチーム内連携のため東工大日高教授からの要請に基づき対馬領域を別途設定した。H28 年度はこれらのシナリオ設定に基づくデータセットの作成を行った。この段階ではシナリオデータの期間は一ヶ月を想定していた。また、平行して擬似温暖化実験に基づく将来シナリオデータの作成が行われた。これは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 2030 年代の擬似温暖化実験データに基づくシナリオでありターゲット期間は 2031-2033 の三年間である。これにより過去の観測事実に基づく猛暑日及び真冬日シナリオと擬似温暖化シミュレーションに基づく将来シナリオの整備が整った。H29 年度は猛暑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。これまでの議論の中から東大生研グループ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。これは需要のあまり大きくない時期に電力会社の発電量も絞られることに対して予想よりも気温が大きく振れた場合需要も予測より大きくなることなどにより需要と供給のアンバランスが発生しやすいためである。従って猛暑日及び真冬日シナリオを 12ヶ月に拡張し 1 年間のデータセットとした。これにより猛暑/真冬のイベントを含みつつ四季の情報を持つ強固なデータセットとなった。

これまでの本研究活動により必要なシナリオは既に整備された。既に CREST プロジェクト内でシナリオデータの展開は開始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 9 月の公開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データセットの作成はここで閉じることとする。今後は引き続きデータ・インタフェース SG のデータ展開が行われる予定である。

3-2-6 エネルギー需要モデルの開発(阪大)

【自己評価】

B おおむね順調に進展している

【研究進捗状況】

(1) 居住者行動モデルの開発

住宅居住者の生活行為は住宅エネルギー需要の時刻的变化を生じさせる最も重要な因子である。一方で、エネルギー需要の解析、モデル化においては十分な蓄積が行われておらず、特に、エネルギー需要推計の時間・空間解像度を向上させる方法について十分に検討が行われてこなかった。この一つの要因は、既存のモデルでは多数の世帯・人から収集した生活時間データを集計してモデル入力データを生成することであり、これによって地域や世帯の特徴による影響が消失していた。本研究では以上の背景に基づいて、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を開発した。

開発した方法は①時刻別の生活行為生成過程と②生活行為生成パラメータ準備過程の二つの過程に分類することができる。行為生成過程はH29年度までに開発したものであり、生活行為を開始時刻と継続時間を持つ離散データの変遷としてとらえ、行為生成用パラメータに従って行為の遷移を確率的に模擬するものである⁷。本モデルでは図1右側に示すように、生活行為を睡眠、仕事・学業、食事、入浴の定型的に行うルーチン行為とそれ以外の非ルーチン行為に分類してルーチン行為、非ルーチン行為の順で行為を配置する。それぞれについてシミュレーション対象者個人個人に生活行為生成用のパラメータが用意される。例えば、ルーチン行為では日行為実施確率、行為継続時間、行為開始時刻頻度分布、非ルーチン行為では時刻別行為実施確率、行為継続時間頻度分布を用いる。②行為生成パラメータ準備過程では、図左側に示すように、これらの生活行為生成パラメータをシミュレーション対象者の個人属性、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。ロジスティック回帰モデルは社会生活基本調査の個票を用いて開発されたものであり、個人属性、世帯構成、居住地を説明変数として持つことから、それぞれの影響を反映したパラメータをシミュレーション対象者に付与することができる。①時刻別の生活行為生成過程と②生活行為生成パラメータ準備過程を用いることによって、任意の属性を持つ世帯の構成員の生活行為を精度高く生成することができるようになった。本内容は Yamaguchi et al. (2018b)^{原著論文¹⁵⁾} にまとめた。

⁷ Yamaguchi, Y., & Shimoda, Y., 2017. "A stochastic model to predict occupants' activities at home for community-/urban-scale energy demand modelling". Journal of Building Performance Simulation, vol. 10, pp. 565-581. <http://doi.org/10.1080/19401493.2017.1336255>

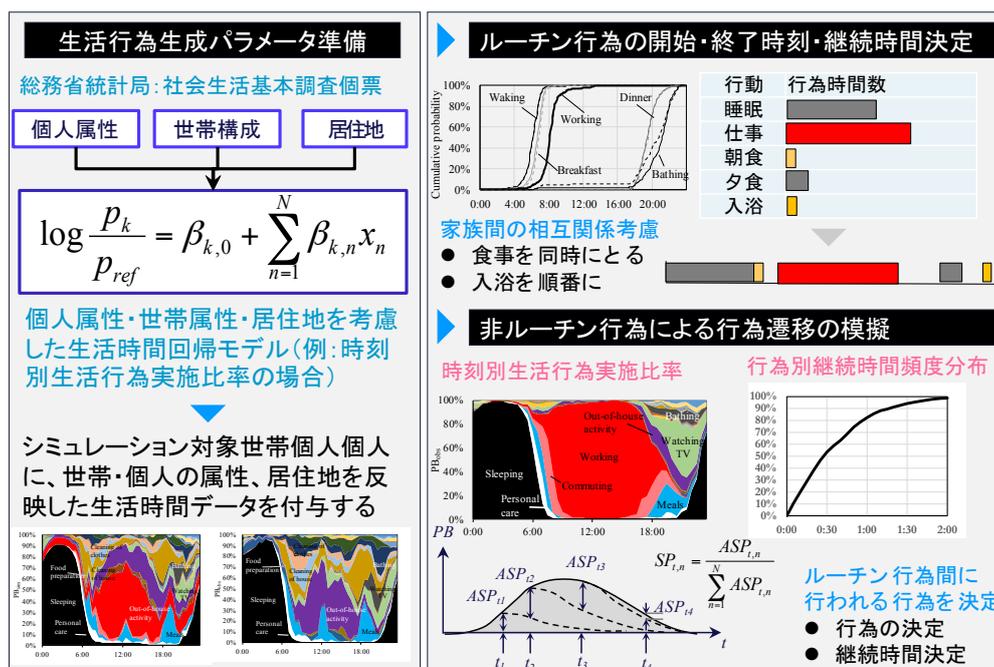


図1 生活行為生成モデルの構成
(左:生活行為生成パラメータ準備過程、右:生活行為生成過程)

H30年度はさらに、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。ここでは「世帯・住宅情報推定モデル」により総務省統計局の e-Stat に公表されている国勢調査のデータ⁸に基づき、計算対象の小地域に居住する全世帯について表1に示す世帯属性及び住宅の仕様の組み合わせを推定する。世帯属性のうち世帯類型は単独、夫婦のみ、夫婦と子供、片親と子、3世代で構成される世帯の5区分とし、世帯人数は1~6人を想定した。世帯構成員は年齢、性別、就業・就学形態、職種(有職者)を属性として有し、就業形態は2区分、就学形態は4区分、その他は未就学と非就業を含むとした。住宅の仕様は建て方、所有の関係、延床面積をそれぞれ2区分、5区分、7区分に分類した。本手法では表1の項目を表す確率分布を算出し、一様乱数によりランダムサンプリングする。サンプリングは非復元抽出とした。Kambayashi et al. (2018)¹⁸⁾ 原著論文では、本モデルの方法論を説明し、Yamaguchi et al. (2018c)²⁰⁾ 原著論文では、東京都の全小地域に開発モデルを適用し、前述のロジスティック回帰モデルで生活行為生成パラメータを推計し、地域の世帯の集積状況が生活行為生成パラメータに及ぼす影響を評価した。

⁸ 総務省統計局, 2010, “平成22年国勢調査”, <http://www.stat.go.jp/data/kokusei/2010/> (アクセス日: 2018.11.30)

表1 世帯及び世帯構成員に付与する情報

項目	分類	
世帯属性	構成 類型	単独, 夫婦のみ, 夫婦と子供, 片親と子, 3 世代
	人数	1-6 人
	年齢	0-104 歳
住宅の様	就業・就学 形態	フルタイム, パートタイム, 小学生, 中学生, 高校生, 短大・専門学校・大学生, その他
	建て方	集合, 戸建
	所有の関係	持ち家, 公営・都市再生機構・公社の借家, 民営の借家, 給与住宅, 間借り
	延床面積	0-19 m ² , 20-39 m ² , 40-59 m ² , 60-79 m ² , 80-99 m ² , 100-119 m ² , 120 m ² 以上

以上の開発により、高い空間解像度、時間解像度で生活行為を生成することが可能となった。次に、Yamaguchi et al. (2018a)^{原著論文7)}において、生活行為実施時の機器稼働を模擬するモデル化手法を確立した。本研究では、Dr. Selin Yilmaz (Geneva 大学)との共同で実施した成果をまとめたものである。本論文では、機器の操作に関するモデルをレビューするとともに、既存モデルの比較評価を行った。比較評価ではモデル開発に使用可能なデータ、モデルの適用先などの条件を合わせ、モデルが開発される文脈を共通化することによって、モデルの仕様の差異がもたらす影響を定量的に評価可能とした。得られた知見は以下の通りである。

- 文献レビューにより、機器別のエネルギー消費を推計するモデルには大きく4つの種類があることを明らかにした。4つのモデルは、モデル化に実測されたデータから時刻別の機器稼働確率を算出し、時刻別に乱数を与えて機器の稼働を再現するデータ駆動型モデルと、人の時間の使い方を表す生活時間データを用いて機器の稼働を模擬する生活時間データベースモデルに分類される。生活時間データベースモデルでは、時刻別行為実施確率に基づいて機器稼働確率を算出するモデル、同様に時刻別機器稼働確率を算出するが世帯構成員の在宅状況を考慮するモデル、時刻別の機器稼働確率を使用せずに、世帯構成員全員の生活行為を模擬し、それに伴う機器稼働の生起を模擬するモデルに分類される。
- データ駆動型モデルは個々の世帯の電力消費の挙動を正確に模擬することが可能である。一方、生活時間データベースモデルは平均的な挙動を模擬することができるものの、世帯間のばらつきや、世帯内での稼働時刻の集中を模擬することができない。
- データ駆動型モデルを開発するために必要な実測データの取得には大きな費用が必要となるため、世帯構成などの要因がエネルギー消費にもたらす影響を模擬することができない場合が多い。一方、生活時間データベースモデルは、生活時間データでは世帯構成などの多様な因子が付与されていることから、モデルにおいてその影響を考慮することが可能である。この点では、世帯構成員全員の生活行為を模擬するモデルが最も優れている。
- 上記のような性質により、データ駆動型モデルでは地域差などを再現することができない。一方、生活時間データベースモデルでは、世帯構成等を設定することによりコミュニティや都市圏の単位でエネルギー需要を推計することができる。

このように、モデル化手法とモデルの精度・性質の関係について体系的な整理を行うことができた。このように複数のモデルを同じ条件の下で比較した研究はこれまでに実施されておらず、エネ

ルギー需要研究に大きく貢献すると考えられる。本研究の家庭用エネルギー最終需要モデル（下記(2)参照）では、上記の「世帯構成員全員の生活行為を模擬し、それに伴う機器稼働の生起を模擬するモデル」を用いている。

Prakash et al. (2018)^{原著論文 19)}ではパーソントリップ調査データを用いて外出行動時における自動車利用を模擬するモデルを開発し、電気自動車を考慮したエネルギー需要推計が可能とする準備を整えた。

(2) 家庭用エネルギー最終需要モデルの開発

(2-1) 2030年および2050年における我が国家庭部門エネルギー需要の予測

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をおこなった(松岡ら, 2019a)^{原著論文 27)}。地域別の世帯あたり年間エネルギー消費量について、環境省の家庭CO₂統計との比較をおこなったものが図2である。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よく表していることがわかる。

表2には長期エネルギー需給見通しで示されている具体的な省エネルギー対策を示している。これらを再現したシミュレーションを実施し、世帯毎のエネルギー消費の違いや地域による気象条件の違い、居住者の行動スケジュールを考慮することで、国の予測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った。結果を図3に示すが、照明について大きな差があることが明らかにされた。

この論文について、実際長期エネルギー需給見通しの策定に関わっている担当者と呼んで頂いたところ、その精度の高さについて高い評価を受けている。

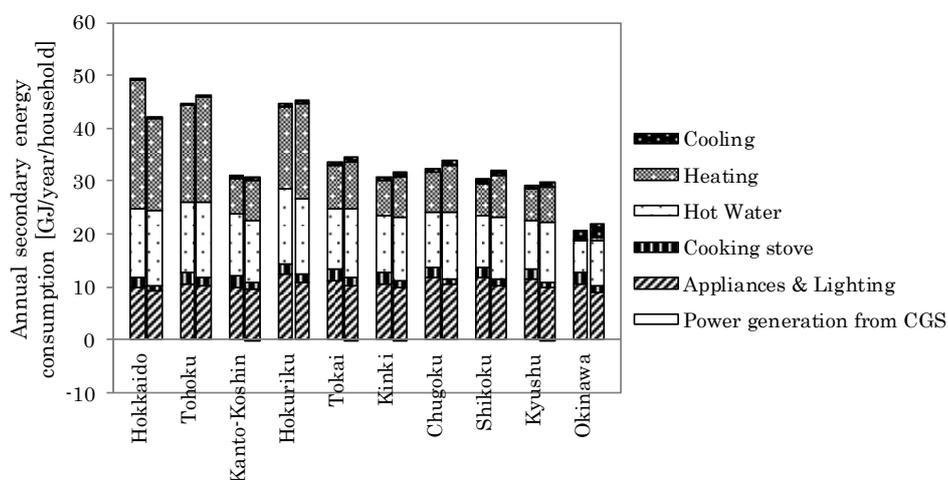


図2 全国を対象とした家庭部門最終エネルギー消費のシミュレーション結果と統計値の比較

表2 長期エネルギー需給見通し記載の我が国の2030年までの省エネルギー対策

Countermeasure	2013	2030	
Energy saving standard for newly-built houses	6%	30%	
Insulation retrofit of existing houses			
Installation of high-efficiency water heaters	Electric heat pump water heater	4,220,000	14,000,000
	Condensing gas/oil water heater	4,480,000	27,000,000
	Fuel cell cogeneration system	50,000	5,300,000
Installation of high-efficiency lighting devices	9%	Approximately 100%	
Improvement of appliance energy efficiency by the top-runner standard	—	—	
Energy management by HEMS and smart meters	0.2%	Approximately 100%	
Behavior change of occupants	—	—	

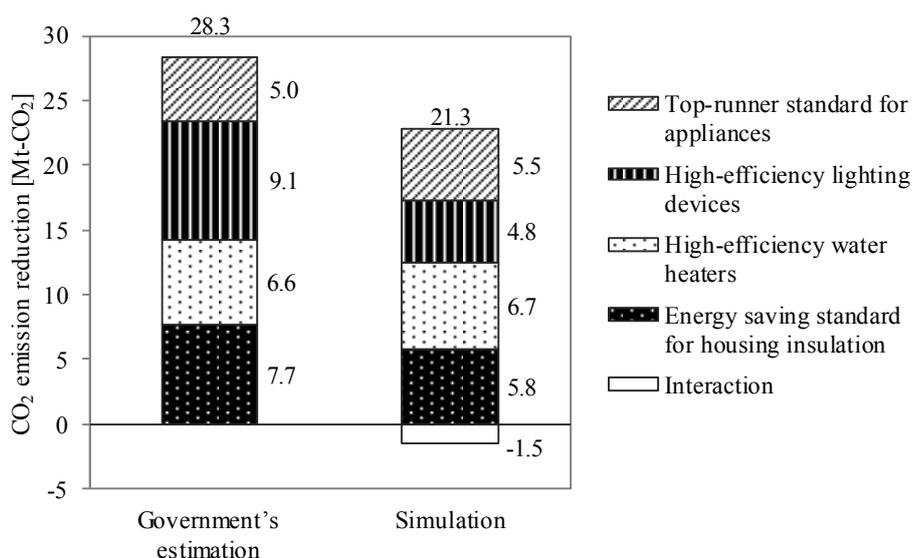


図3 2030年までの温室効果ガス削減量のシミュレーションによる評価結果

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[□] (頭発表 22)。以下の4つのシナリオの下で2050年のエネルギー消費を予測した。

① 省エネ徹底シナリオ

機器の高効率化・機器数の削減・住宅省エネルギー基準の完全適合、全戸建に5kWのPV

② 人口・世帯分布調整シナリオ

①に加えて、少人数世帯の同居の促進による世帯数減少

③ 戸建住宅75%シナリオ

②に加えて、全住宅ストックにおける戸建住宅の比率を75%まで増加

④ 集合住宅75%シナリオ

②に加えて、全住宅ストックにおける集合住宅の比率を75%まで増加

シミュレーション結果を図4に示す。省エネ徹底シナリオは前述のようによりかなり極端な省エネルギーの進展を想定しているが、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。人口・世帯分布調整シナリオの効果はここで設定した条件ではあまり大きくない。集合住宅 75%シナリオでは建物の熱損失の抑制による省エネルギー効果は認められるが、全体ではその効果は大きくない。戸建て住宅 75%シナリオでは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している。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5に示すが、大幅な逆潮流が発生しており、昼間は住宅地は発電所として機能することになるであろうことを示している。

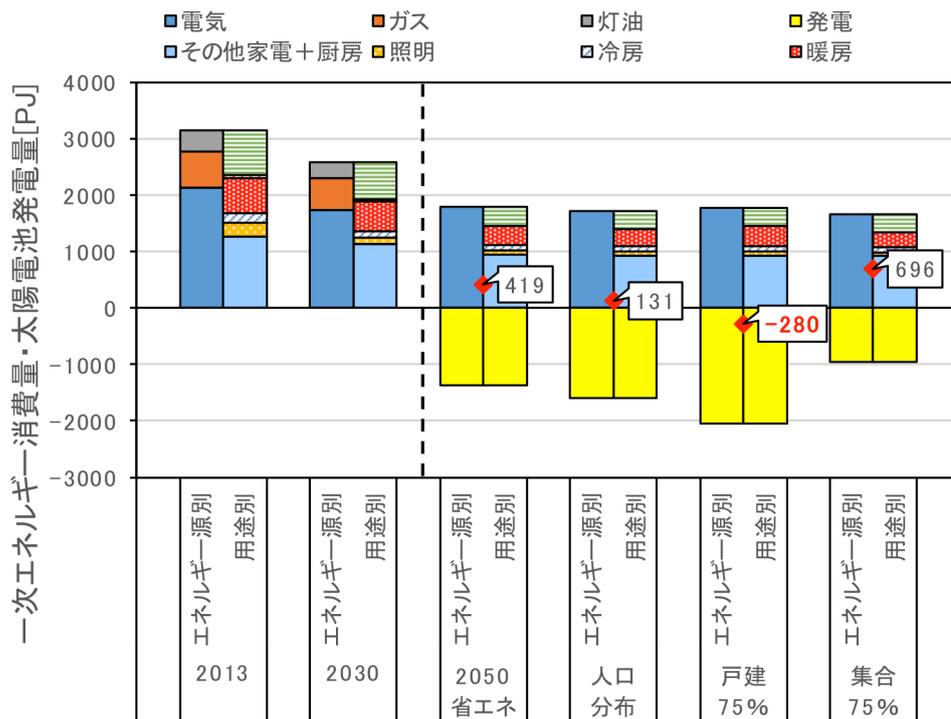


図4 2050年エネルギー消費のシミュレーション結果

(棒グラフはエネルギー消費量・発電量を別に示し、プロットは両者を合計した正味エネルギー消費を示す)

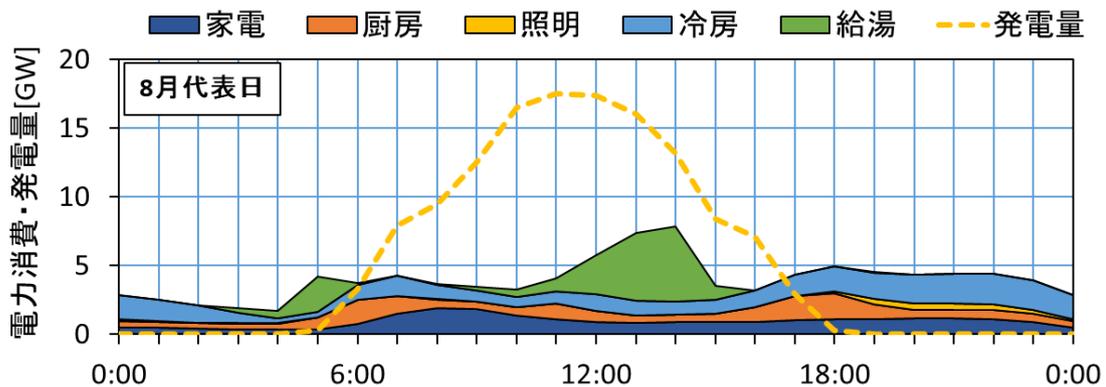


図5 8月の近畿地方民生家庭部門全体の電力需給(戸建住宅 75%シナリオ)

(2-2) 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

シミュレーションモデルの精度向上を目指して、H30年度は以下の取り組みをおこなっている。

① 湯はり頻度のモデル化 (Taniguchi-Matsuoka et al., 2018; 松岡ら, 2019b) 原著論文 16, 28)

各世帯の湯はり頻度に関するアンケートを実施し、その結果を分析することで、湯はり頻度について図6に示すような5つのクラスターに分かれることを明らかにした上で、各種世帯属性が5つのクラスターの構成比率にどのような影響を与えるかを明らかとした。

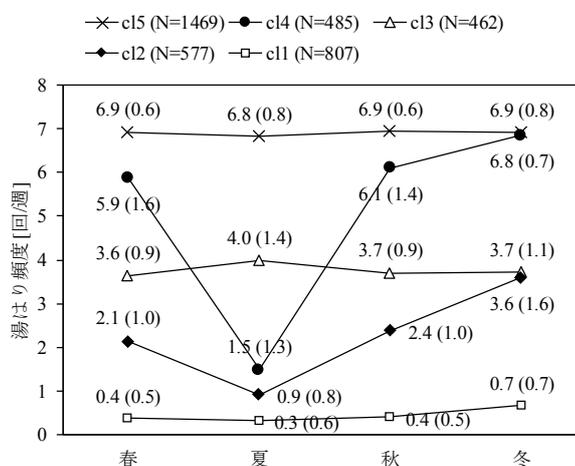


図6 湯はり頻度の5つのクラスターの季節別湯はり頻度

② 機器所有状況の精緻化

環境省の家庭 CO2 統計の個表の提供を受け、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、世帯属性から両機器の保有状況(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, 2018) 口頭発表 75)

世帯のエアコン保有に関するアンケート結果を分析し、世帯特性から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、省エネルギー法の評価尺度が COP であった時期と APF であった時期で部分負荷特性が異なることに着目し、製造年によって異なる機器モデルを使い分けるようにした。

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) 口頭発表 77)

世帯特性から住宅の給湯器の種類を決定する回帰モデルを作成すると共に、給湯器の選択によって暖房機器の選択も変化することに着目し、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。例えばロードカーブ予測において、2016年発表論文⁹では常時 70W/世帯の「未特定分」を加えることが必要であったが、現在では「未特定分」を加えなくても電力ロードカーブの平均値および標準偏差がよく一致することが明らかとなっている。

⁹ Ayako Taniguchi, Takuya Inoue, Masaya Otsuki, Yohei Yamaguchi, Yoshiyuki Shimoda, Akinobu Takami, Kanako Hanaoka: Estimation of the Contribution of the Residential Sector to Summer Peak Demand Reduction in Japan Using an Energy End-Use Simulation Model, Energy and Buildings, Volume 112, 15 January 2016, Pages 80–92.

(3) 業務用エネルギー最終需要モデルの開発

日本に立地する事務所、宿泊、医療、商業、文教、飲食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 Swan ら¹⁰ による国・地域のストックを対象とするエネルギー需要モデルの分類のうち、Archetype Engineering Bottom-up Modellingというモデル開発法に基づくものである。この開発法は国の単位でエネルギー需要を推計するために多くの国で用いられており、特に住宅部門の適用例が多い。図7にモデル開発手順を示す。図の手順では、手順2における代表モデルの設計、手順3におけるシミュレーションによって業務施設でエネルギー需要が決定される構造を反映したうえで、手順1の類型化および手順4の積み上げによって対象とする建築ストック全体でのエネルギー需要の定量化が可能となる。本研究では、業務施設用途（事務所、宿泊、医療、商業、飲食、文教）、立地（全国を10地域に分類）、規模・業態、建築設備種別により全国の業務施設を22千類型に分類した。代表モデルは各類型の標準的な建築仕様、設備仕様、運用条件を有するものである。図中手順3では米国DOEが開発したEnergyPlus8.6を用い、代表モデルを用いて算出したエネルギー需要を延床面積あたりで原単位化する。手順4では全22千類型について延床面積と原単位を積和し、日本全国の業務施設のエネルギー消費を定量化する。このような手順により、各類型の特徴のほか、現実的な機器・設備の運用条件の下で、導入技術の相互作用を含めて、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、また、将来における技術的な変化がもたらしうるエネルギー需要の変化を定量化することが可能である。Ikeda et al. (2018)^{原著論文¹⁷} は開発したモデルを発表したものである。

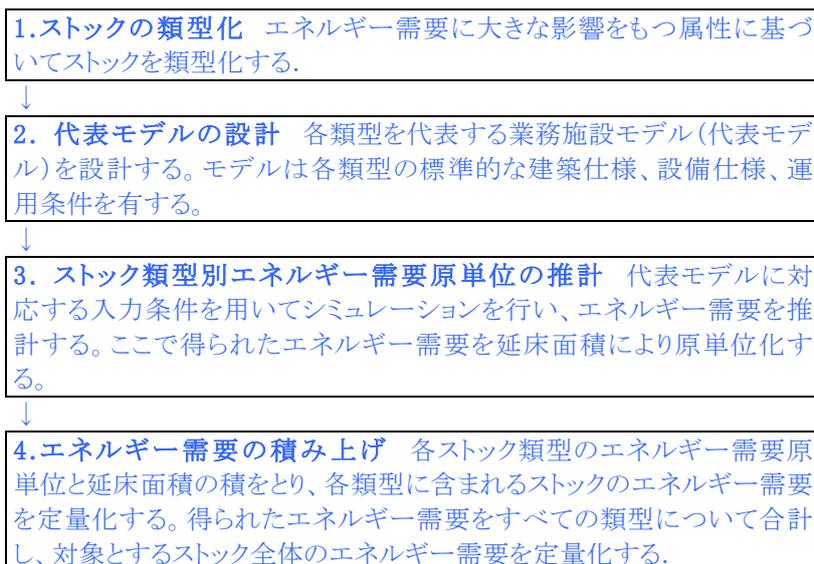


図7 エネルギー需要モデル開発手順

¹⁰ Swan, LG, Ugursal, V.I., 2009. "Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques". Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 13, pp. 1819-1835.

Kim et al. (2019)^{未発行論文³⁾}では本モデルの事務所ビルを対象とした部分についてまとめたものである。本論文では、Energy and Buildings 誌に掲載された Yamaguchi et al.¹¹⁾に基づいて空気調和設備のストックを推計し、空気調和設備の多様性、経年変化がエネルギー需要に及ぼす影響を評価した。これまでに空気調和設備の多様性、経年変化を考慮した国家スケールのエネルギー需要モデルは存在しておらず、有用なアプローチであると考えられる。現在までに対象とする全ストックに対して同様のアプローチを適用し、政府の地球温暖化対策計画の評価を行っている。

(4) 小地域別エネルギー需要モデルの構築と、配電グリッドシミュレータへの提供

配電網の検討においては過去に観測された電力データを用いて計画が行われてきたが、長期的には太陽光発電の大量連系や需要家における給湯の電化、各種省エネルギー技術普及により需要家の電力負荷プロファイルが大きく変化する可能性がある。本研究では、(1)に述べた小地域単位での生活行為生成モデル、機器稼働モデル、(2)に述べた家庭用エネルギー最終需要モデルを組み合わせ、将来における電力負荷プロファイルを想定したうえで、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林チームと共同で開発した。H30 年度は東京都狛江市を対象としたケーススタディを実施し、電気工学で用いられている配電損失量、太陽光発電量の出力抑制量、建築工学で用いられている二酸化炭素排出量を指標として需要家における省エネルギー対策、新規技術の普及、配電網におけるエネルギー管理の双方を考慮した検討が可能であることを示した (Kabayashi et al., 2018)^{原著論文¹⁸⁾}。

¹¹⁾ Yamaguchi, Y., Miyachi, Y., & Shimoda, Y., 2017. “Stock modelling of HVAC systems in Japanese commercial building sector using logistic regression”. Energy and Buildings, 152, 458-471.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.007>

3-2-7 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)

【自己評価】

A 当初の計画以上に進展している

【研究進捗状況】

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った。

(1) 需要データの精査、共有方法の検討

本グループは、過去に集計した約 1300 件の 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中である。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。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。H30 年度は、基礎的なモデル構築を実施し、H31 年度は、一般公開も視野に入れつつ、モデルの精緻化、精度検証を行う予定である。

(2) HEMS によるデマンドレスポンス(DR)ポテンシャルの抽出

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が重要である。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 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。

(2-1) 調査方法

沖縄県宮古郵便局における 2018 年 5 月現在の配達可能箇所データのうち、多良間村の 446 箇所を除く 27,786 箇所に調査票を配布した。配布の際には、明らかに業務用建物だと思われる箇所は除き、最終的に 25,528 箇所へ配布完了した。調査票配布期間は、2018 年 11 月 26 日~12 月 8 日である。最終的に 1,623 件からの有効回答を得ることができた(有効回答率 6.4%)。

調査項目は、環境省の「家庭部門のCO2排出実態統計調査」（以降、家庭CO2統計）の調査項目を基本的に踏襲し、この全国調査結果と比較検討できるようにした。その他、宮古島市においてH29年度に訪問インタビュー調査した結果を踏まえ、宮古島特有だと思われるライフスタイルに関して項目を追加するとともに、電化やデマンドレスポンスに関連する認知や態度に関する心理的な質問項目も追加した。調査項目の概要を表1に示す。家庭CO2統計では、調査結果を県別および地域別に集計している。本調査結果は「沖縄県」、「九州地域」、「関東甲信地域」と比較することとし、本報告書中では、これら3つの比較対象地域をそれぞれ「沖縄」「九州」「関東」と以降、記述して引用することとする。

表1 調査項目

1	デモグラフィック属性	世帯人数、世帯構成、世帯主年齢、世帯主最終学歴、世帯年収、職業、出身地、地域(郵便番号)、昼間の在宅割合	
2	住宅属性	使用形態、種類、建設時期、所有関係、延べ床面積	
3	エネルギー使用状況	暖房	使用機器の種類
		厨房	使用機器の種類、使用回数、使用時間
		給湯	使用機器の種類、使用頻度、浴槽の有無、入浴頻度、入浴時間
		太陽光発電	太陽電池の有無、容量
		照明	使用電球の種類、最も使用する電球の種類
		テレビ	使用台数、使用頻度、種類、サイズ、製造時期
		冷蔵庫	使用台数、種類、内容積、製造時期
		エアコン	使用台数、種類、製造時期、冷房設定温度、使用時間帯
		洗濯乾燥機	使用頻度、使用時間帯
		炊飯器	使用時間帯(炊飯、保温)
		その他の電化製品	保有機器の種類
		エネルギー使用量	電気・ガス代が多い月少ない月、使用量、使用料金
4	エネルギーに関する意識	車両	使用有無、使用台数、自動車の種類、排気量、使用頻度、年間走行距離、使用時間帯
		オール電化について、自然エネルギーについて、電気代に伴う行動変容について 停電や電気使用量の制限について、省エネルギー行動について、普段の生活について	
5	情報収集源	新聞購読について、インターネットサイト閲覧について	

(2-2) 調査結果

①調査対象世帯の主なデモグラフィック属性

本調査では世帯構成について、世帯員数とともに、世帯構成員一人ずつ世帯主との関係と年齢を訊いている。世帯員数と、世帯員別の設問に対する回答とに矛盾が生じる内容が少なからず存在し、このような矛盾回答は「不明」と分類したところ、全体の15%程度にのぼった。

家庭CO2統計で家族類型は、単身・高齢、単身・若中年、夫婦・高齢、夫婦・若中年、夫婦と子・高齢、夫婦と子・若中年、その他 の7つのカテゴリに分かれている。そして家庭CO2統計では高齢とは60歳以上を指し、高齢夫婦とはどちらかが60歳以上である夫婦を指す。本調査結果をこのカテゴリに沿って分類した結果を図1に示す。沖縄県の世帯構成と比較すると、高齢世帯からの回答が多く、若中年世帯からの回答が少ない。次に家庭CO2統計の値は沖縄県の値なので、本調査の回答者世帯構成を、宮古島市の統計における「65歳以上の世帯員がいる世帯員数」で比較してみても、本調査結果は65歳以上の高齢者がいる世帯が多い傾向がある。従って本調査結果は母集団よりも、高齢世帯からの回答、特に高齢夫婦世帯からの回答が多く、若中年世帯からの回答、特に夫婦と子・若中年世帯からの回答が少ない傾向があるといえる。

本調査世帯の世帯年収を図2に示す。調査票では、収入がある世帯員全員の年収(税込)の

合計を用意した選択肢の中から選ぶよう依頼している。その際に本調査では「答えたくない」という、家庭 CO2 統計にはない選択肢を用意している。結果は、家庭 CO2 統計の沖縄県の分布とほぼ同じで、500 万円未満世帯で 65%を占める。

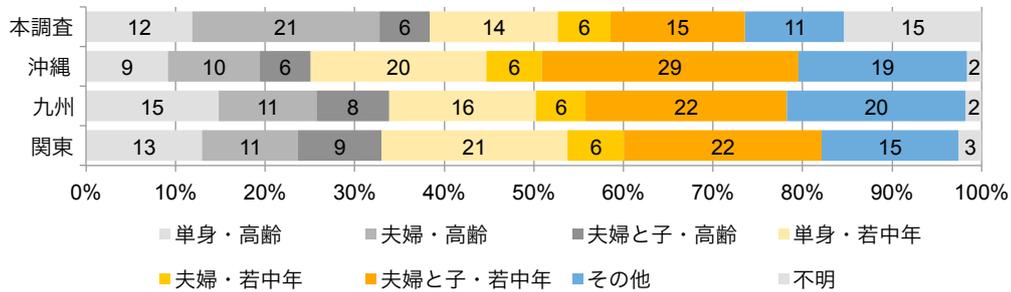


図 1 世帯構成

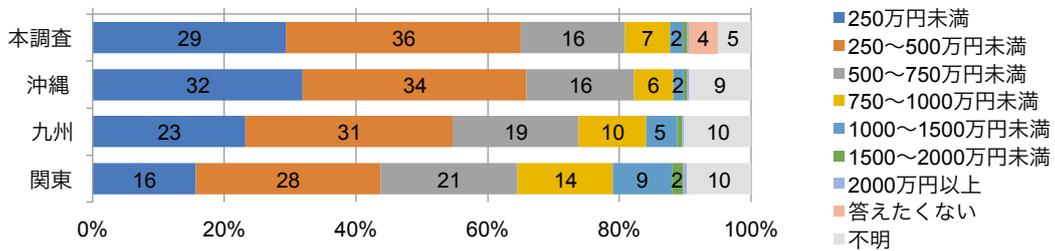


図 2 世帯年収

表 2 最も報酬が多い職業と 2 番目の報酬が多い職業

【値は回答数】

	農業	漁業	建設業	製造業	電気・ガス・水道業	情報通信業	運輸郵便業	卸売・小売業	金融・保険業	不動産・賃貸業
主職業	191	11	115	35	18	6	41	36	22	34
副職業	98	5	31	16	8	8	7	26	8	26
	研究・技術サービス	宿泊・飲食サービス	生活関連・娯楽サービス	教育・学習支援業	医療・福祉サービス	公務	無職(年金)	その他	不明 または副職業無し	
主職業	14	89	42	38	139	230	387	71	104	
副職業	5	47	33	34	56	52	158	46	959	

次に、世帯収入のうち、最も報酬が多い職業と 2 番目に報酬が多い職業を回答してもらったところ、回答は表 2 のようになった。高齢者からの回答が多いことから、無職(年金)という回答が最大数となっていた。次いで多いのが、公務、農業であった。最も報酬が多い職業と 2 番目に報酬が多い職業の回答数を合計し、その割合を H27 年国勢調査の宮古島市の職業分布と比較すると(図 3)、本調査は母集団より、公務従事者からの回答が多く、卸売・小売業への従事者がいる世帯からの回答は少ない傾向がみられた。公務従事者の割合が多かった理由としては、今回の調査の募集に関して宮古島市役所から依頼をお願いしたことに起因する可能性がある。

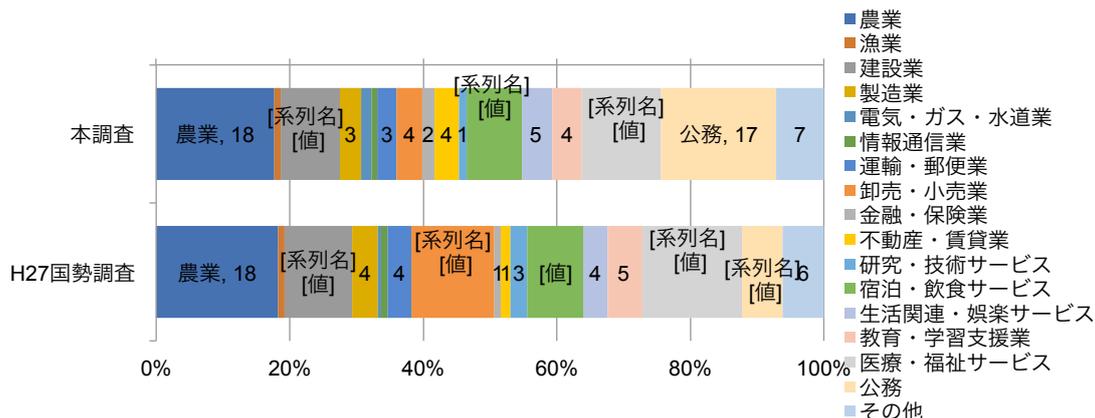


図 3 世帯の職業

②宮古島市において特徴的なエネルギー消費行動

②-1 給湯需要について

宮古島市では、気温が高いことと、以前より水資源不足という問題を抱えていたことなどから、給湯需要が少ないというのが大きな特徴である。島内にある県営・市営住宅には浴槽がなく、浴槽を保有していない世帯が約4割にのぼり、保有する浴槽も循環型ではなく湯はりしない習慣が強い。給湯機を可制御負荷として利用していくのは、この需要の低さからすると難しいようにも思われるが、島外から宮古島に来た人は、お湯を使う習慣をそのまま踏襲するし、夏であっても暑くても湯はりする習慣がある旅行者は多く存在する。そして近年では中国・台湾からの旅行者が増えていると聞くと、中華系の人たちもよくお湯を使う。一般家庭のみならず宿泊業などの業務用需要も併せて捉えていくことが重要であると考え。

また水資源不足という問題も過去にあったためか、宮古島市では省エネというより節水の意識の方が強いように思われる。エコキュートなどの訴求には、省エネやデマンドレスポンスというよりも、エコキュートを設置すると、外に水タンクがあり、いざというときに非常用水として利用することができるといった訴求の仕方も有効な可能性があると考え。

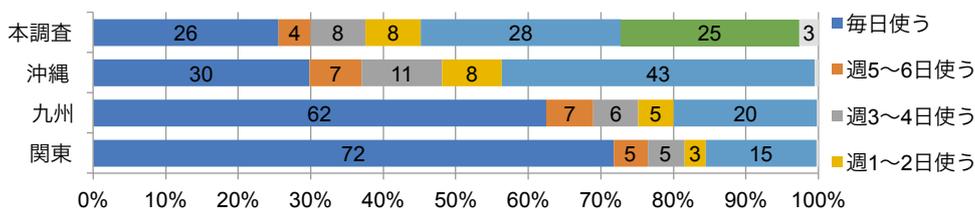


図 4 冬の台所での給湯使用頻度

②-2 冷房需要について

宮古島市の冷房の特徴としては、エアコン台数はさほど多くないが、冷房のみエアコンの割合が他県より多い。そして冷房設定温度が低く、使用時間が長い。夏季の最も暑い時期に、24時間エアコンをつけっぱなしという世帯が20%、12時間以上使用している世帯が半数以上であった。そし

て冷房を利用する時間であるが、関東近県で冷房の調査をすると、夜寝る前に部屋を冷やしておくが、寝ている最中の冷房はつけないという回答が意外と多いものの、今回の調査では夜 18～24 時の時間帯は 8 割近くの世帯で冷房を利用し、夜中 0～6 時においても半数近くの世帯で冷房している。特に若い世帯で冷房をよく利用しているようである。日差しのない夜中に冷房を多用する原因の一つとして、住宅の断熱性能の低さが考えられる。日中の暑さ対策として遮熱について述べる人は多かったが、断熱という発想は皆無に等しかった。プレクーリングなどを実施するにも家の断熱性能は極めて重要である。そして宮古島では暑さの厳しさを訴える人が多いので、帰宅した際にプレクーリングで部屋が涼しい、などといった効用は好まれるように思われる。今回は住宅性能については調査できていないので、プレクーリングの導入などを視野に入れて今後の課題とした。

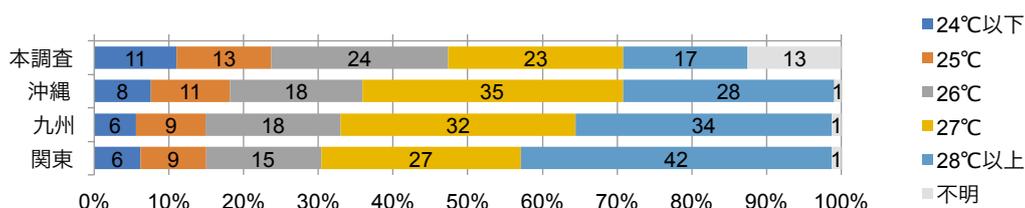


図 5 エアコンの冷房設定温度

②-3 自動車利用について

宮古島市の自動車利用の特徴として、使用台数が多く、保有自動車小さく軽自動車が 64%を占めた。これは家庭 CO2 統計の、沖縄、九州、関東と比較しても顕著である。そして使用頻度が高く毎日使用するという人が 8 割以上を占める。しかしながら使用頻度が高いものの、年間走行距離となると他の都道府県より短い傾向があり、小さい車で短距離を頻繁に利用している様子が伺える。走行距離が短いような使い方は、連続航続距離の短い電気自動車には好ましいと考えられ、現時点では高価格のために普及は難しいかもしれないが、世帯属性別、エリア別にカーシェアなどの仕組みを導入したり、公共交通の少ない宮古島で観光客を対象にしたりするなど、インシャルコストを下げる形での導入は可能性があるのではないだろうか。

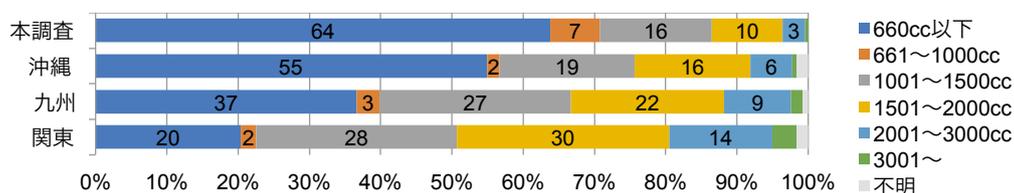


図 6 最も使用する自動車の排気量

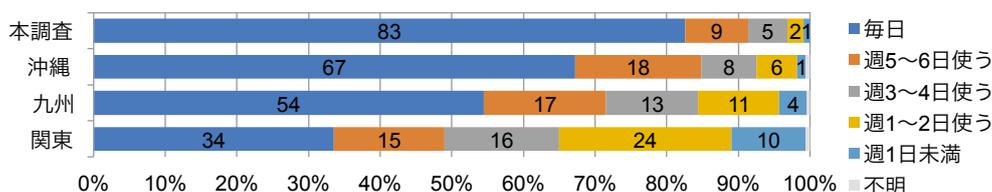


図 7 最も使用する自動車の使用頻度

②-4 ベース消費について

家庭 CO2 統計で沖縄県の CO2 排出量を他の都道府県と比較すると照明・家電用途が大きい(図 8)。この理由として、保有家電が古いことを想定していたが、上述したようにエアコンについては製造年が古い傾向は見え、同様に冷蔵庫やテレビについても(有効回答率が低いために断定はできないが)製造年が古い傾向は確認できなかった。しかしながら、本調査にて宮古島市の家庭のベース消費を押し上げている要因として次のような点が考えられた。

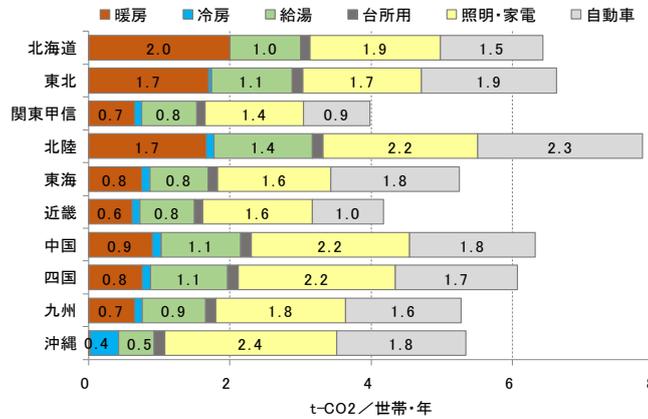


図 8 地方別世帯当たり年間用途別 CO2 統計

A) 米飯の保温

本調査を実施する前の事前調査にて、何件かの世帯を訪問した際に、炊飯器に米飯が保温されている世帯が多い印象を受けた。そこで今回、炊飯と保温別に使用頻度を訊いてみたところ、炊飯はもとより、保温している時間が長いことが明らかになった。特に米飯を保温する傾向があるのは、高齢で、家大きい世帯、かつ宮古島以外の出身者がいない世帯である。

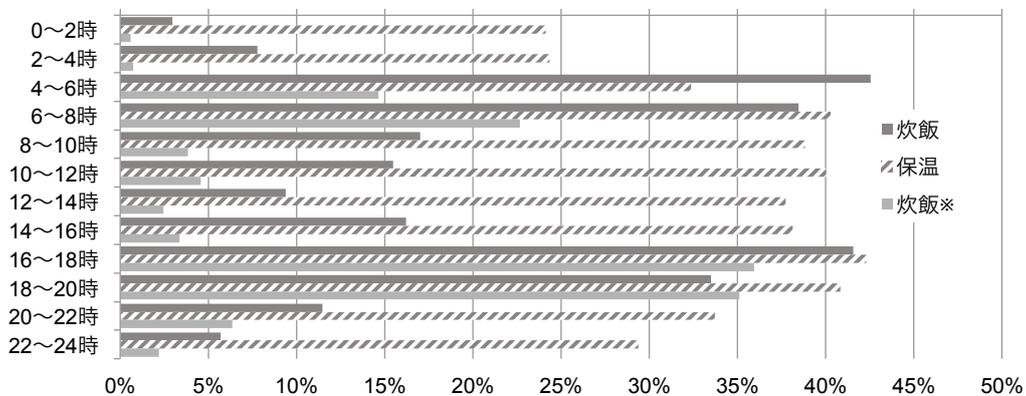


図 9 炊飯器の使用時間

※岩船研 WEB 調査: 調査時期は 2017 年 3 月で、全国を対象とした家電利用に関する調査。炊飯器の使用についての回答は、“洗濯物を機械乾燥する人”が対象で、回答者は約 1 万人。「炊飯器を使う時間」を訊く設問に対する回答。

B) ウォーターサーバ

東日本大震災の際に、停電で水も出なかったという世帯が多かったことから、本州では震災後にウォーターサーバの普及率が上がっている。宮古島でもスーパーやガソリンスタンドで容量の大きいボトル水が販売されている傾向がみられたため、本調査にも質問項目を挿入しておいたところ、ウォーターサーバの普及率は全国平均の2倍以上であった。水道水が硬水であることから、そもそも飲料水を購入する習慣が高かったということも影響する可能性がある。機器にもよるが、ウォーターサーバの電力消費量は冷蔵庫並みである。ウォーターサーバを保有するのは若年世帯、世帯人数の大きい世帯、所得の高い世帯であった。

C) 冷蔵庫・冷凍庫

冷蔵庫の使用台数が多いとともに、冷凍庫の使用台数も本州と比較して多い傾向がみられた。島内の家電量販店においても冷凍庫の販売点数が多い印象を受けた。冷蔵庫と比較して、冷凍庫で省エネ性能が高い製品が少ない傾向があるため、これもベース消費の底上げ要因となり得る。冷凍庫を比較的利用しているのは、高齢で、城辺地区、下地地区、伊良部地区、築年数が古い、住宅面積が広い、傾向がみられた。

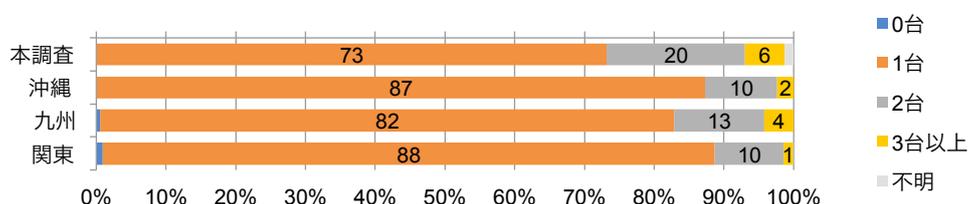


図 10 冷蔵庫の使用台数

このように見ていくと、宮古島市の家庭には省エネ余地が比較的残されているような印象を受ける。島独自の習慣や風習があるので、簡単にはできないかもしれないが、エネルギーマネジメントシステムなどの導入の前に、まずは省エネ診断等を実施して、省エネを推し進めることも重要であると考えられる。

③宮古島市における電化やデマンドレスポンスの導入について

台風によって停電することがある宮古島において、停電に対する嫌悪感を抱く住民が少なからず存在した。停電が嫌な人には、電化は敬遠される。本調査にてオール電化や停電に対する感情を訊いてみたところ、若年世帯、宮古島以外の出身者がいる世帯において特に敬遠されている傾向がみられ、高齢者がいる世帯では、今までの経験が長いせいであろうか、停電に対する許容度は高いようで、オール電化に対してもさほど抵抗はないようであった。そして、オール電化や太陽光発電などのシステム、蓄電池などを積極的に導入していきたいと考えている世帯は、若年世帯、世帯人数が多い世帯、所得の高い世帯であった。またこれらの世帯は、電気代が気にはなるが、省エネ行動など自分の行動で節約していこうとは考えておらず、新しい技術を取り入れて省エネになればよいと考えているようである。その逆で高齢世帯においては、積極的に自分で省エネ行動をとることは別に厭わないという反応であった。

宮古島では、年収 500 万円未満の世帯が 65%で、その年収 500 万円未満の大半は高齢世帯である。高齢世帯では、冷凍庫の保有や、米飯の保温など、増エネにつながるような習慣も多いが、省エネ行動を取ることにあまり抵抗がないことから、このような世帯には、省エネ診断等を実施して省エネコミュニケーションを図ることが、光熱費削減にもつながり好ましいのではないかと考える。また電化にも抵抗はないので、収入の低さからイニシャルコストを下げる形での導入であれば可能なのではないかと考える。

その逆で若年世帯で、世帯規模が大きく、富裕層においては、省エネ診断等は敬遠される可能性がある。省エネや光熱費削減などの点からアプローチするのではなく、快適性や利便性を訴求し、積極的にオール電化や太陽光発電などのシステム導入を勧めることが好ましいと考えられる。そして宮古島以外の出身者がいる世帯、若年で世帯規模が小さい世帯においては、停電への嫌悪感が強いために、停電を回避できる手段として PV、EV や蓄電池などを訴求ポイントとすることが効果的な可能性がある、などの点が明らかとなった。

(3) HEMS モデルの実運用展開

H30 年度は、ヒートポンプ (HP) 給湯機及び電気自動車 (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。

(3-1) モデル

VRE の大量導入・利用のためには、電力システムが必要とする様々な時間領域の需給調整力を、VRE 自体の出力制御、さらには電力需要の調整など、より多様な資源から獲得することが必要となる。このような需給調整力の最適な導入評価のための有用なツールとして、長期電力需給解析・計画手法である ESPRIT や運用解析に焦点を当てた MR モデルを開発し、需要、PV と風力発電の出力変動特性と、これに対する需要の能動化を含めた負荷平準化や需給調整力評価を行うことにより、全国の電力需給の詳細モデルの作成、将来の電力需給の特性分析、最適設備計画策定の検討などを実施してきた。本研究では、この電力需給シミュレーションモデルに、ヒートポンプ給湯機及び電気自動車を含めたアグリゲーションモデルを構築し組み込み、全国大の DR 効果について評価を行った。

DR リソースに関しては、エリアごとに、導入される EV 台数、HP 給湯機台数を想定し、時間別の EV 走行パターン、自宅あるいは勤務地での EV 利用可能割合、給湯需要を模擬し、EV バッテリーの充放電、HP 運転を最適化する。EV 走行及び給湯需要の形状から、それぞれ 5 つのクラスタに分け、各エリア×クラスタ内で、EV 電池及び貯湯槽の運用が完結する。したがって、個別のモデル化はされていない。EV バッテリー蓄電量及び貯湯量が一日の最初と最後で一致する制約式を、需給シミュレーションモデルに追加した。EV 走行及び滞在情報、給湯需要は既知とし、余分な充電、HP 運転はしない

(3-2) シミュレーション

①シミュレーション条件

EV における勤務地充電の有無、制御方法 (充電制御のみあるいは充放電制御あり)、HP 給湯機

の最適制御を考慮し、以下のシナリオを設定した。ケース 1 が最適化を行わないベースケースとなる。

表 3 ケース設定

No	EV		HP給湯機
	運転パターン	勤務地利用	運転パターン
1	帰宅後即充電		深夜運転
2	充電制御	なし	最適化
3	充電制御	あり	最適化
4	充放電制御	なし	最適化
5	充放電制御	あり	最適化

EV に関しては、充電制御のみの場合、稼働車のみが制御対象であり、充放電制御の場合は非稼働車含めたすべてが対象となる。勤務地充電ありの場合、通勤車は勤務地でも充放電ができるものと想定した。EV 成り行き充電は、帰宅後すぐ 3kW の充電容量で走行分を充電するとして計算した。バッテリーの蓄電量の初期値と終端値は 50%と想定した。

HP 給湯機に関しては貯湯量の初期値と終端値を最大貯湯量(85℃換算)の 25%と想定した。深夜運転時の消費電力量は、過去の実績値から外挿して推計した 2030 年の給湯用電力需要推計値の 8760 時間のパターンをベースに、今回想定のコピー特性(気温の一次関数)、HP タンクロス(1.1%)を用いて補正することにより算定した。

②シミュレーション結果

成り行き充電の EV 需要は、一台当たり 1067kWh/年、深夜電力利用時の HP 給湯機の需要は一台当たり平均で 1380kWh/年である。2030 年の想定普及台数による需要合計は、2017 年度実績需要(4)に対して、EV が 1.0%、HP が 2.1%という水準である。HP の最適運用により、運転は PV が余剰となる昼間に多くシフトするが、お湯利用までの時間が短くなることによるタンクロス削減と気温が高い時の運転による COP 向上の効果により、一台当たりの電力需要は約 1,170kWh/年と 15%程度省エネとなる。

各ケースにおける年間運用費(燃料費+起動費)を算定した結果を図 11 に示す。最適化なしのケース 1 に比べて、HP 給湯機の最適運転及び EV の充電あるいは放電制御により、650-820 億円/年削減することが可能となる。HP 給湯機のみを最適化したときの効果が約 700 億円/年であることを考えると、EV と HP 給湯機の両方の負荷平準化効果が取り合いになったと考えられる。PV+風力の発電量抑制率は、最適化なしのケース 1 で 18.6%であるが、であるが、HP 給湯機の最適運転及び EV の充電あるいは放電制御により、2.4-4.1 ポイント減少した(図 12)。CO2 排出量は、最適化なしのケース 1 で 328.2Mt/年であったが、HP 給湯機の最適運転及び EV の充電あるいは放電制御により、2.7-3.2Mt/年削減した。図 13 は 4 月 1 日の運用結果を示したものである。EV 充電、HP 給湯機ともに最大 15GW 程度昼需要を押し上げている。

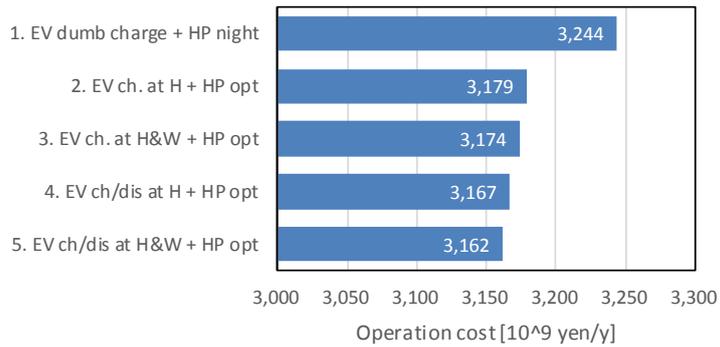


図 11 運用費用(全国)

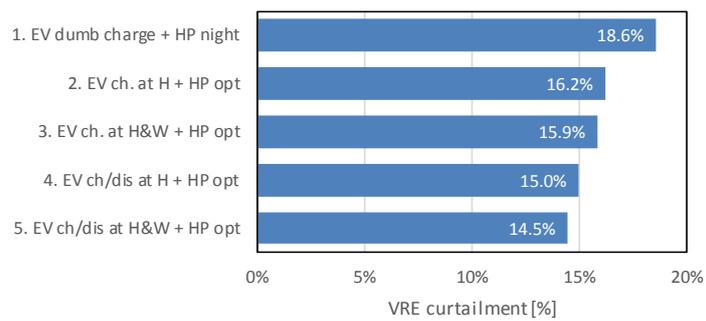


図 12 再生可能エネルギー抑制量(全国)

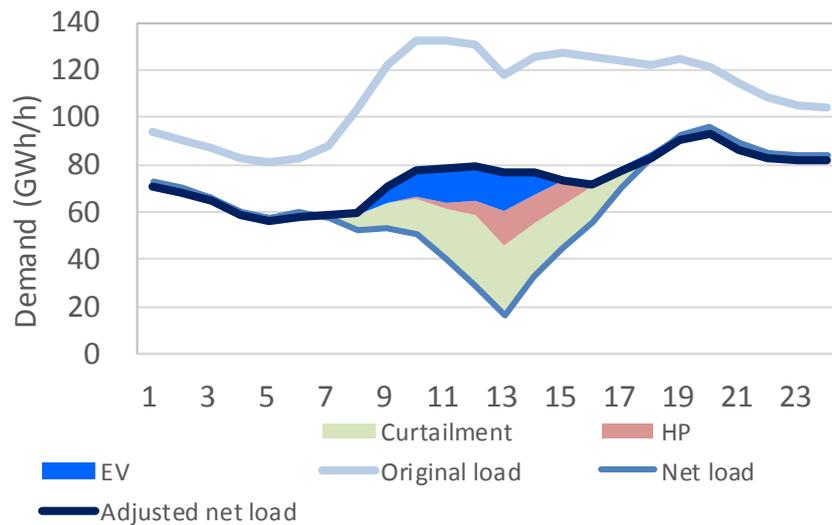


図 13 日間運用結果例(Case5、全国 2030 年 4 月 1 日)

3-2-8 需要家行動モデルの開発(東工大)

【自己評価】

B おおむね順調に進展している

【研究進捗状況】

(1) 研究目的-需要家行動モデルと仮説

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ためには、実際の環境における人間行動そのものを研究対象としなくてはならない。これは、心理学者 R. バーカーも論じており、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の実世界に通用するとは限らないとしている。

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」を想定している(図3-2-8-1)。

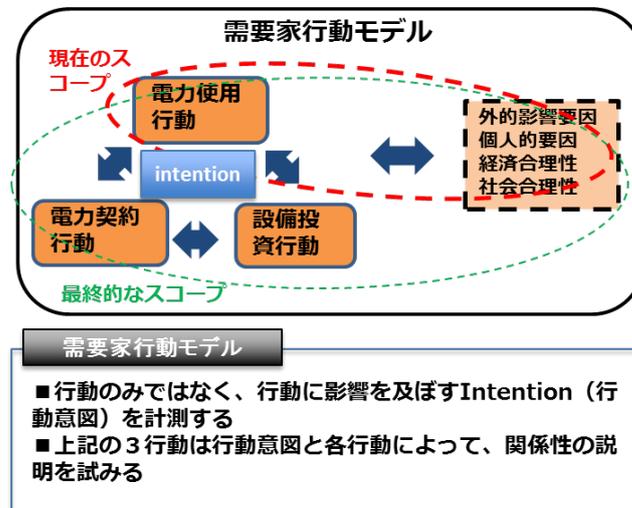


図3-2-8-1 需要家行動モデル

「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、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 (行動意図) 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3-2-8-2)。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。

行動変容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3-2-8-2となる。

図3-2-8-1に基づき、電力使用行動、電力契約行動、設備投資行動に分けて、計画と実績を以下に説明したうえで、需要科学SGとして「エネルギー需要科学」分野の確立に向けた東工大Gの研究内容を説明する。

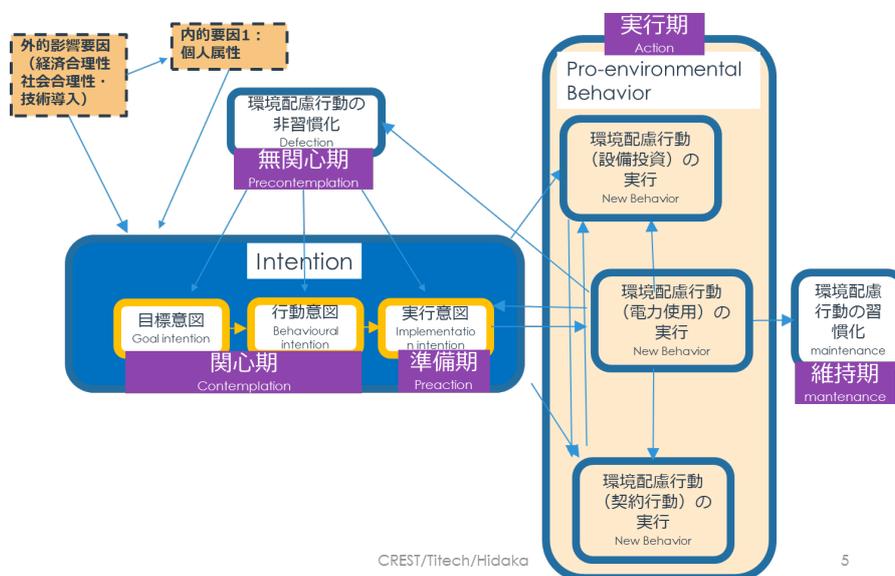


図3-2-8-2 需要家行動モデル(仮説)

(2-1) 電力使用行動研究-実証実験環境整備

電力使用行動の研究について、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。

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。

H29年度は、実験参加世帯をさらに50件増やすために、募集およびシステム整備を行った。当初予定していた実験世帯数は100世帯である。H29年度にて設置目標世帯数は達成した。

【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
- ・H29年度では、追加50件の応募者に対するスマートメーター設置工事を行った。H29年度にて工事は完了した。

【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。

【経済的手法による需要家の経時変化】

H28 年度では、需要家行動変容の経時変化に対する研究として、論文(辻本ら, 2016)¹²に発表した北九州で行われた経済的手法を用いたデマンドレスポンスの分析を行った。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反応はあるものの価格変化に対する反応(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、DR 実験参加者は当初は価格情報に対して反応するが、参加者の一部は日常の生活行動のそのものに変化が見られ、価格情報に対しての反応は弱くなっていることがわかった。

【実験 1・2(電力消費量の比較情報による行動変容)】

H29 年度では、実験 1 および実験 2 を実施した。実験内容は、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、

- i. 電力消費量を表示しないグループ A
 - ii. 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 B
 - iii. 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 C
 - iv. 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 D
- に分けて実験した。また実験前後において電力消費行動に関する意識のアンケートを行った。実験 1 では i と ii のグループを、実験 2 では全てのグループにおいて実験した。

パネルデータ分析により、iv のグループ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、ii のグループは実験 1 では電力消費量が増加し、実験 2 では電力消費量が減少するという異なった結果を得た。ii のグループにおいて、実験 1 ではいっどこでどのような電力消費行動を行えばよいという「実行計画能力」が有意に上昇することが確認された。一方、実験 2 では「実行計画能力」の上昇がみられず平均値としては減少していることを確認した。このことから実験 1 と実験 2 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 iii のグループにおいては「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、ii のグループや iv のグループ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。

H30 年度では、H29 年度に実施した実験 2 の結果を基に、再生可能エネルギーに関する心理変化に着目した分析を行った。

¹² 辻本将晴, 錦織聡一, 日高一義, 荒牧敬次, 森谷孟史, “デマンドレスポンスによる需要家行動の経時変化に関する考察”, BECC Japan 2016(査読有り), Sep 6, 2016.

① 電力消費行動の変化

介入を実施しなかったグループ A をコントロールグループ、介入を実施したグループ B、C、D をトリートメントグループとして、世帯ごとの電力消費量をパネルデータとみなし、パネルデータ分析を行った。その結果、グループ B と D において電力消費量の削減効果が確認された。

② 電力モニタリングシステムの閲覧行動の変化

システムへの閲覧回数は、多い順からグループ D、B、C となった。また、1回以上閲覧した世帯数に違いがなかったことから、各グループでの閲覧行動は徐々に変化していったと考えられる。また、グループ B と D では、週 1 回以上の閲覧が行われていることからシステムによる介入が電力消費量の削減に関与している可能性を示唆している。一方、グループ C ではシステムの閲覧が少なく、介入効果が表れなかったと考えられる。

③ 再生可能エネルギーに関する意識の変化

介入による再生可能エネルギーに関する意識変化を見るために、8つの心理要因(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)の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。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った。また、悪影響の自覚、知覚行動制御、実行計画能力でも有意傾向が見られ、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。

④ システム閲覧行動と再生可能エネルギーに関する意識の関係

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形成を伴う節電行動が実施されている可能性が示唆された(図3-2-8-4)。

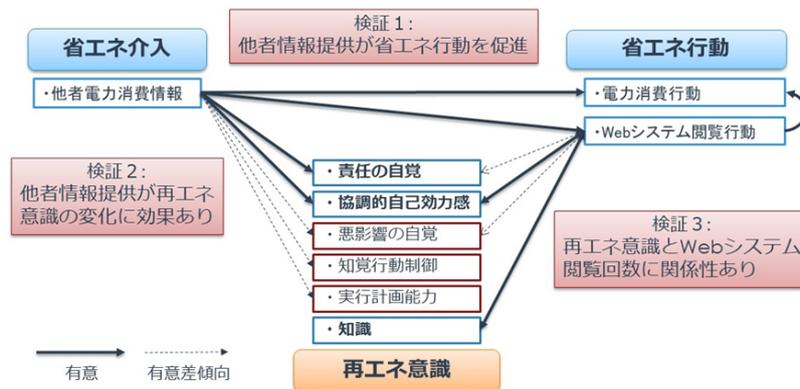


図3-2-8-4 情動的介入による行動変容と心理変化の関係(電気学会 2019) 口頭発表 92)

【実験 3(再エネに関する基礎的な知識が与える影響)】

実験 3 について、H30 年度では再生可能エネルギーに関する基礎的な知識が電力需要家の行

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た。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。

方法としては、長崎県対馬市在住の90世帯を調査対象とし、2019年2～3月の間にインターネット経由で再生可能エネルギーに関する基礎的な知識の提供を行った(図3-2-8-5)。提供した知識は、再エネの特徴や問題点、対馬での再生可能エネルギー利用に関する内容であった。検証は、知識提供を行ったグループと行わなかったグループにおいて、再生可能エネルギーの発電量予測値と実際の世帯での電力消費量の差異を分析した。また、アンケート調査を実施し、再生可能エネルギーに関する知識や意識の変化を測定した。現在実験が終了し、分析中である。

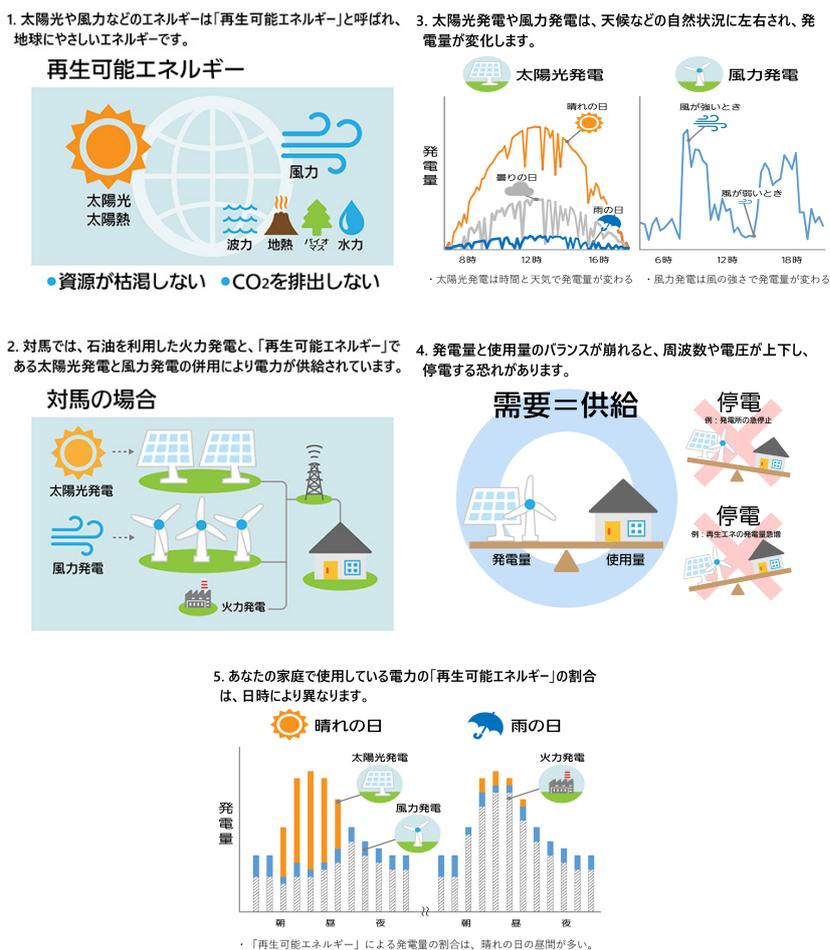


図3-2-8-5 再生可能エネルギー基礎的な知識画面例

(3) 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

経済産業省によると 2017 年 11 月末時点での新電力会社への契約先切替え(スイッチング)は約 8.2%(約 514 万件)となり、また登録されている電力小売事業者数は 2018 年 3 月 8 日現在で 464 社に及ぶ¹³。最近では、事業縮小や撤退の事例が見られる等事業者側の変化とともに、再生可能エネルギーの普及により、顧客がプロシューマー化していく等、需要側にも変化が現れている。

H29 年度では、先行研究調査とアンケート設計を行った。先行研究では、電力小売全面自由化に伴う顧客の意識や理解状況¹⁴、また購入先変更意向や実施状況などの研究は多く見られるが、電力会社の契約特徴毎に分析した顧客の契約変更行動に関する研究は少ないことが判明した。アンケートの目的を次の通りに設定した。目的:新たな電力小売事業者へ契約を変更した家庭用顧客に対して、契約の特徴毎に変更行動理由とその行動が生じる要因と属性、契約特徴毎の電力消費行動の違い、設備投資行動の違いが生じているかを明らかにする。

新電力会社をリスト化し、契約の特徴を調査した。結果として、再生可能エネルギーを重視する会社(再エネ新電力)、地域とのつながりを重視する会社(地域新電力)、経済的メリットを重視する会社(経済インセンティブ新電力)及び既存の電力会社と4つのタイプに区分した。

H30 年度には、各電力会社の顧客へのアンケート調査を行い、電力契約変更における行動理由・要因を分析するとともに、電力契約変更行動、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を分析した。

電力契約変更の行動に関して、電力契約を変更していない既存電力会社の顧客を対象に契約スイッチ意図モデルを設計し、共分散構造分析により契約変更意図に影響を及ぼす要因を分析した結果、図3-2-8-6に示すように、先行研究にてスイッチング行動に大きく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、エネルギーに対する顧客の関心・行動が影響を及ぼしている可能性が新たに示された。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。

実際に契約を変更した顧客を対象とした契約変更理由に関する分析結果からは、再エネ新電力に契約を変更した顧客の理由で最も大きな割合を占めたのは、「再生可能エネルギーで作られた電気を選びたいと考えたから」であり、地域新電力に契約を変更した顧客では、「自分の地域に根ざした会社だから」となり、次に「再生可能エネルギーで作られた電気を選びたいと考えたから」となった。再エネ新電力及び地域新電力に変更した顧客の共通するポイントは他の電力会社の顧客よりも環境に対する意識が高い傾向にある事であり、前述した変更理由の要因について当該傾向により説明できる可能性が示されている。アンケート項目の中に「契約変更前の電力会社に不満があったから」という顧客満足度に関連する項目もあったが、当該内容よりも電力会社の夫々の特徴の方が相対的に大きな割合を示す理由となっていた。先行研究にて顧客満足度は契約変更行動に大きな影響を及ぼすと示されているが、本研究では、会社に対する満足度よりも電力会社の

¹³ http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/denryoku_gas/denryoku_gas_kihon/008_haifu.html (アクセス日:2018/5/2)

¹⁴ Shin, K. J., Managi, S., 2017. Liberalization of a retail electricity market: Consumer satisfaction and household switching behaviour in Japan. Energy Policy 110, 675-685.

特徴に関連した顧客のエネルギーに対する関心がより影響を及ぼしていると考えられる。

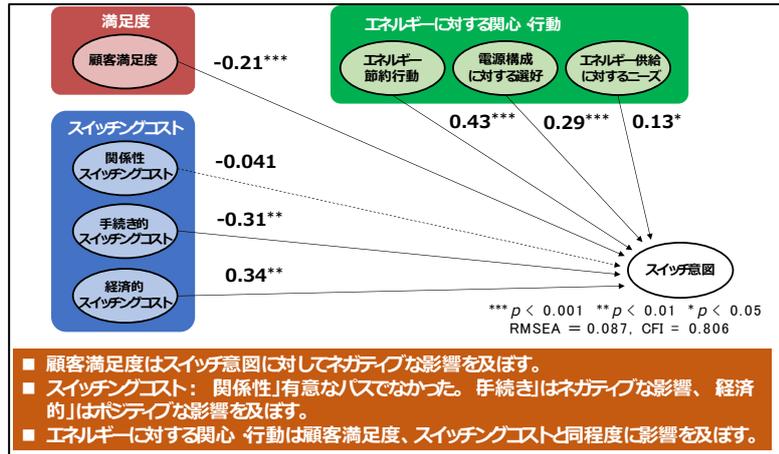


図3-2-8-6 契約変更意図分析結果 (ECEE 2019) 未発行論文 1)

また、電力に関わる顧客行動として、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。契約特徴毎に設備投資行動の相違を分析した結果、図3-2-8-7に示すように、再エネ新電力又は地域新電力の顧客は、環境配慮型機器へ投資する意欲が経済インセンティブ新電力や既存電力会社の顧客よりも相対的に高い傾向にある。両社に変更した顧客に共通するポイントは、他社顧客よりも相対的に環境意識が高い事であった。電力消費行動に関しては、経済的インセンティブ新電力を選んだ顧客は、他の会社を選択している顧客よりも多くの電気料金を支払っていたことが明らかとなった。経済的インセンティブ新電力に変更した顧客は、他の会社に変更した顧客よりも電気料金を安くしたいからという契約変更理由が最も大きな割合を占めており、電力消費行動と電力契約変更行動は当該個人的要因により説明できる関係性があると示唆された。本研究により示された結果により、顧客獲得が重要な課題となっている電力会社にとって、マーケティング戦略、商品・サービスの開発及び提供への活用の一助となる事を期待する。

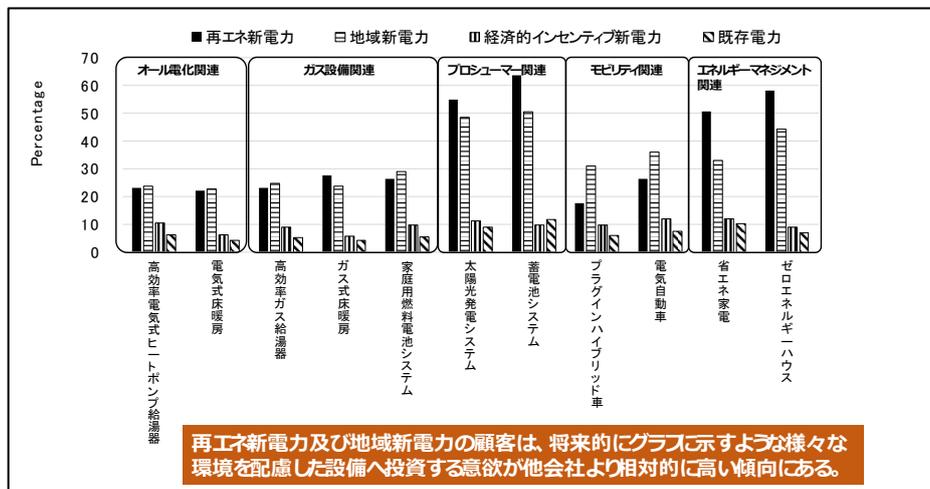


図3-2-8-7 電力会社毎の設備投資意図比較 (ECEE 2019) 未発行論文 1)

(4)「エネルギー需要科学」分野の確立に向けた研究

H28 年度において、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、総説論文「エネルギーマネジメントシステムに貢献する地球科学と需要科学」, 計測と制御, 第 55 巻, 第 7 号」(中島ら 2016)の中で報告した。

H29 年度では、効果的な介入計画を立てるためには、(1)環境配慮行動を決定する影響要因、(2)環境配慮行動に影響を与える介入手法、(3)介入による効果検証の3つの関連性を明らかにすることが必要であると考え、過去の研究のレビューを行った。環境配慮行動への介入手法に関して、いくつかの体系化がなされ、その効果との関係性も明らかになりつつあることがわかった。(1)に関しては、環境配慮行動は、状況的要因、個人的要因の大きく2つの要因に影響を受けると考えられている。(2)に関しては、環境配慮行動を促進するためには、(1)の2つの要因を意図的に刺激し、行動変容を促す介入が必要であると考えられ、最近では、構成的介入手法、事前的介入手法、事後的介入手法の大きく3つに分類されている。(3)に関しては、欧米を中心に、世界中で様々な介入実験が行われ、介入手法の効果が検証されている。さらに、複数の論文の介入効果を統合したメタアナリシスにより、介入効果を体系的に整理する試みも実施されている。これらの体系的整理を行い、総説論文「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 Energy and resources 38(5), 236-240, 2017-09」(下田ら 2017)の中で報告され、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。

H30 年度には、需要科学サブグループにて ACEEE ^{口頭発表 32)}・電気学会 ^{招待講演 40-43)} で、需要科学に関する発表を行い、東工大 G にて behavior, energy & climate change (BECC) 2018 ^{口頭発表 57)} で発表を行った。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を、新たな資源となりつつある需要家の役割を中心に研究していくことが、サービス科学から見たエネルギー需要科学であると考えられる。この視点から学術対象は図3-2-8-8のように整理される。様々な需要家行動を研究対象とし、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。

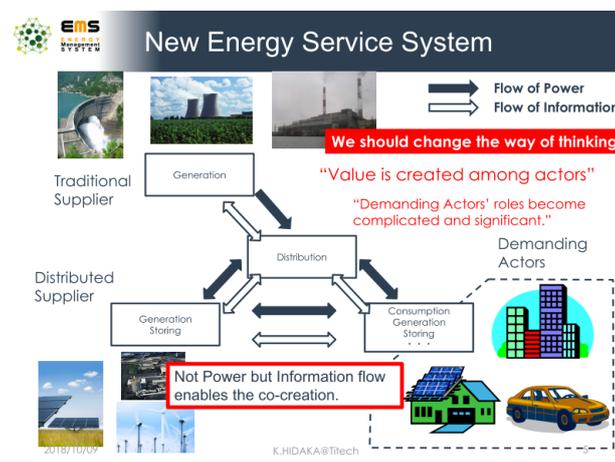


図3-2-8-8 New Service System (BECC 2018) ^{口頭発表 57)}

また、総説論文「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
Energy and resources 38(5), 236-240, 2017-09」(下田ら 2017)の続編として、行動変容要因・介
入・介入効果に関するレビュー論文を作成し、投稿準備を行っている。

3-2-9 エネルギー需要科学の確立

【自己評価】

A 当初の計画以上に進展している

【研究進捗状況】

(1) エネルギー需要科学の確立に関する研究

本プロジェクトにおけるエネルギー需要研究、すなわちエネルギーマネジメントにおけるエネルギー需要研究の課題・意義・手法をとりまとめ、目指すべき研究の方向性、手法論の整理、更には今後エネルギー需要科学を研究分野として確立することなどを目的として、阪大、東大生研、東工大の3グループで需要関係グループの会議を実施した。エネルギー需要科学についての従来のアプローチのレビュー、分散協調型EMSにおいてエネルギー需要を研究する目的、「要素分解型」(図1)と「全体挙動型」の2つのアプローチがあること、研究分野として「エネルギー需要の計測と分析」、「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、介入」の3つがあることを整理した。

H30年度は次項に示すように数多くの場面で検討結果を紹介する機会を得、各方面から高い評価を受けた。現在、検討の成果をレビュー論文として国際誌に投稿すべく執筆中である。同時に、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、本グループメンバーおよび東大大橋教授、京大依田教授がその議論に参加している。

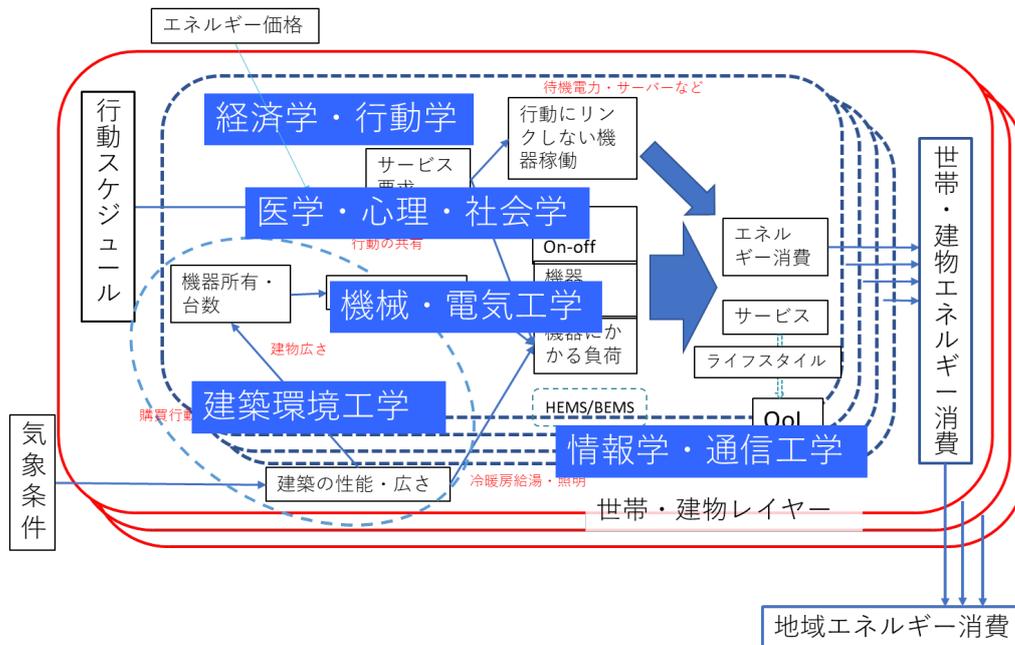


図1 要素分解型のエネルギー需要モデル事例

(2) エネルギー需要科学確立のための広報活動

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、Lawrence Berkeley National Laboratory の Alan Meier 博士にコーディネートをいただき、「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-”」を開催したところ、前日のビラまきと当日の朝のニューズレターのみでの告知にもかかわらず、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。その際、2019年6月にフランスで開催される、ヨーロッパにおける同等な位置づけの学会 ECEEE Summer study on Energy Efficiency においても同様なセッションを開催することについて招請を受け、現在準備中である。

9月18日にはCRESTのEMS領域公開シンポジウムにおいては、下田が「EMSのためのエネルギー需要の科学的扱い」というテーマで講演をおこなった。更に、同月26日にはRITE(地球環境産業技術研究機構)がオーストリアのIIASA(International Institute for Applied Systems Analysis)と共同で開催したDiscussion Workshop “Rethinking Energy Demand” にRITE関係者のご厚意により講演の機会を得、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。(当日の概要はIIASAホームページに掲載¹⁵)

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、合田アドバイザーの御仲介によりシンポジウム「エネルギー需要を科学する」を開催し、下田が「EMSのためのエネルギー需要の科学的扱い」、岩船が「電力システムから見た需要部門に対するニーズとEMSの役割」、林チームの東京大学大橋教授が「エネルギー需要とは何か:経済学の視点から」、日高が「サービス科学から見たエネルギー需要科学」、山口が「エネルギー需要のモデリング」の各テーマで講演をおこなった。また、3月13日にはJST関係者の御仲介により、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」というタイトルで講演をおこなった。この会議はCO2大量削減に貢献する技術についてそのポテンシャル評価等をおこない、結果を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。

¹⁵ IIASA Rethinking Energy Demand,
http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/TransitionstoNewTechnologies/event/180925_RE D.html

3-2-10 データ・インタフェースの開発(東海大学)

【自己評価】

B おおむね順調に進展している

【研究進捗状況】

(1) はじめに

データ・インタフェースは、本チームの日射量準リアルタイム解析システムが算出する各種日射量など(AMATERASS データセット)のデータおよび他の気象データなどを、チーム内研究者を含む EMS に関わる利用者の要望に応じて、データ提供を行うシステムを構築するのが目的である。H27 年度には、チーム内の需要科学サブ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するとともに、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。また、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。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。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というチームもあった。そこで、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たところ、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ることがわかった。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予測値の提供を行った。更に、H29 年度には AMATERASS Web として GIS 可視化サービスが提供できることとなり、追加予算により GIS 可視化の充実をはかることができた。H30 年度は、衛星日射量やモデルによる日射予測値などのデータについてデータの利活用を進めることを目的に、データの提供方法の改善に取り組み、需要科学での利用の促進も図った。

次にシステム開発の経緯を述べる。H28 年度は 10 分間隔および 30 分間隔の日射量等のデータを取得するデータ・インタフェースのプロトタイプを作成し、チーム内で紹介し、インタフェースの改善を行った。H29 年度は準リアルタイムデータについて長期間のデータ提供にも対応するシステムとして他チームにも提供可能とした。その際に、衛星データの取得間隔が短くなりアーカイブのデータサイズが膨大になることに対応するため、効率的なアーカイブ方法についても検討し対応を図った。H30 年度は、より大量のデータ提供にも対応する改善を行い、オンプレミス環境とクラウド環境においてデータインタフェースサービスを提供し、提供データとして準リアルタイム 2.5 分間

隔気象データ、日射量の 6 時間後までの予測値、2030 年シナリオデータを、Web フォームに加え JSON 形式の提供も追加した。

(2) データ・インタフェースの環境構築と機能追加

データインタフェースについては、H29 年度に GIS 可視化として AMATERASS Web の機能を加え、気象データの活用を考える利用者に対して、データに関する時間および空間解像度を視覚的にとらえることを可能とし、気象庁が提供する観測所からのデータ等からは考察できない詳細なデータが利用できることを示した。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が可能な 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短期間のみだが一般公開を予定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。さらに、提供可能なデータの種類を追加した。10 分間隔に加え 2.5 分間隔の準リアルタイムデータ、6 時間後までの 10 分間隔予測値、2030 年シナリオデータについて、緯度・経度を指定することでそれぞれ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。

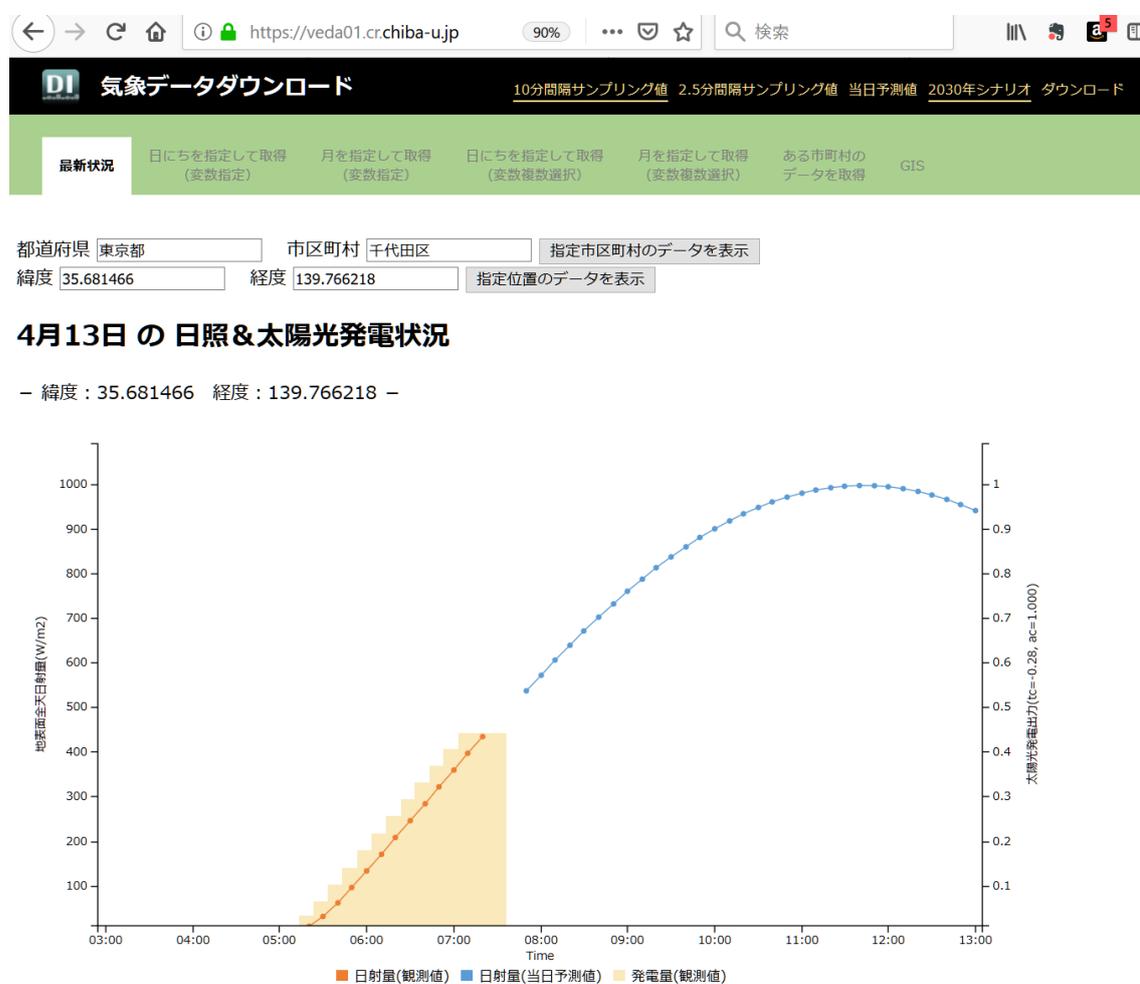


図1: オンプレミスサーバでのデータインタフェースサービスのトップページ

図1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、ここで入手できるデータを理解しやすくした。

提供データ・提供方法は、以下のとおりである。

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

データの提供方法 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2左のようにブラウザでデータが確認でき、Excel で必要なデータを収集できる。

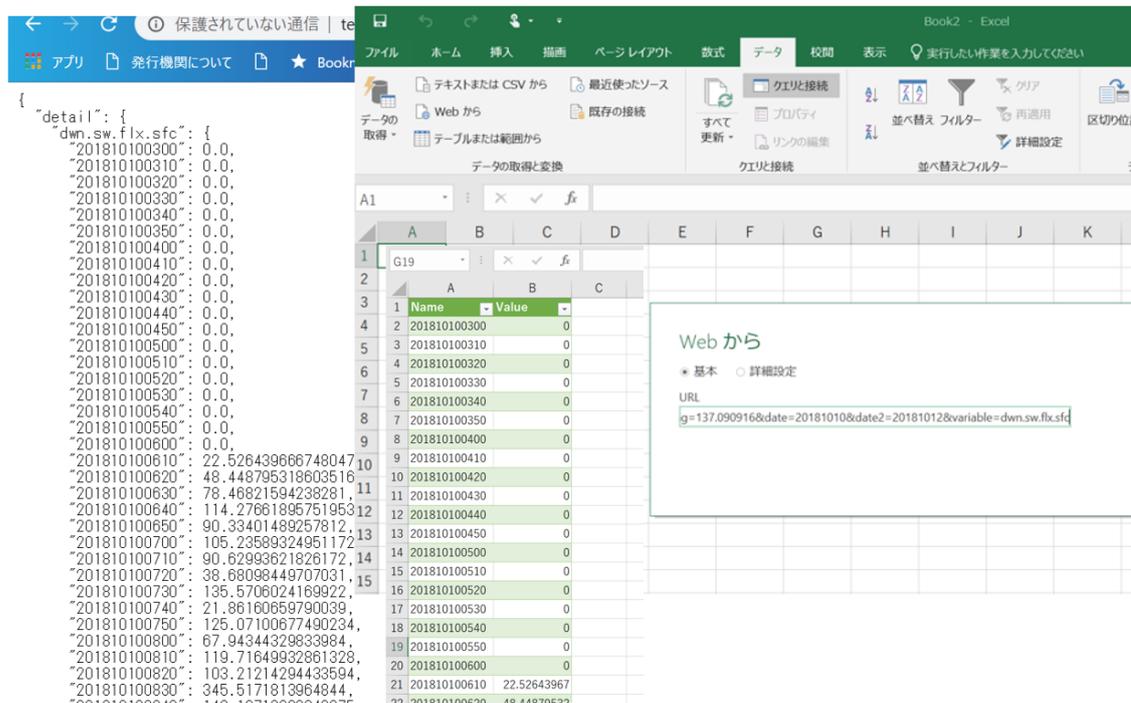


図2: JSON 形式のファイルを Excel で処理

また、アプリケーションからも JSON 形式は扱いやすい。図3は統計解析ソフトウェアの R から JSON 形式で指定日付の日射量データをインターネット経由で受取り、整形後、グラフに描画している様子である。

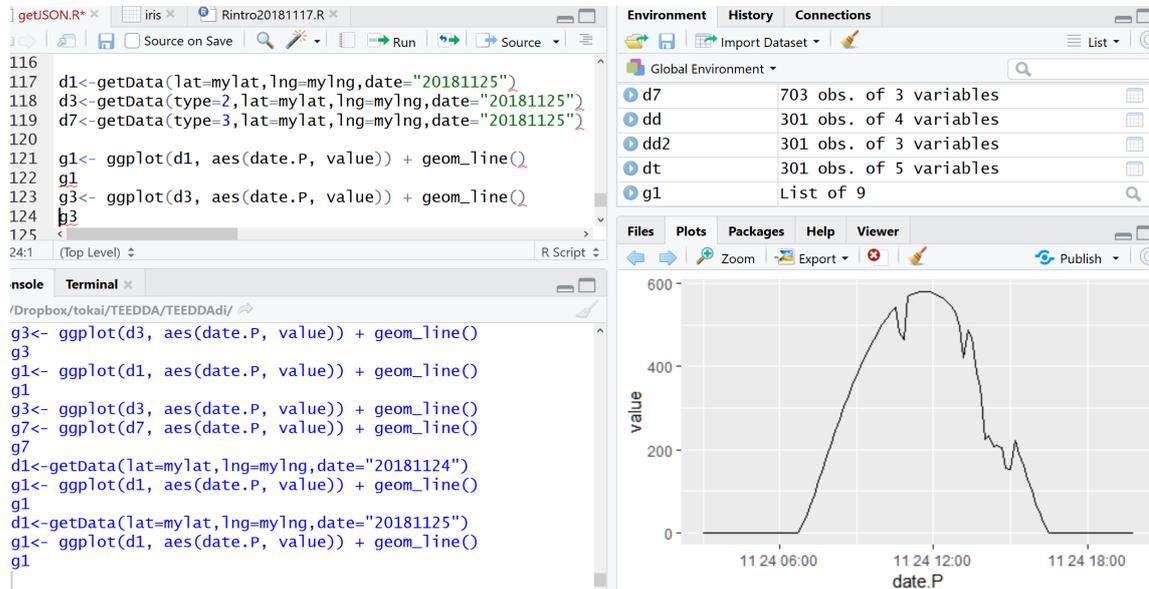


図3:統計ソフトウェア R で、JSON 形式でデータをダウンロードしグラフ描画

3-2-11 気象・需要データ可視化(NICT)

【自己評価】

B おおむね順調に進展している

【研究進捗状況】

(1) 概要

H29年度は日射量推定値の現在・過去データのGIS可視化システムの開発を行い、EMSのためのデータ提供の可能性を広げた。予測値の利用希望が多いため、H30年度は太陽光発電量の6時間後までの予測値を可視化するための設計を行った。さらにH29年度のGIS可視化としては未実装である湿度、風向、太陽光発電量などについても可視化した。なお、R元年度はこれまでに実装したツールをGoogle MapsからCESIUMなどのオープンソース環境に移行するための調査を行う。

(2) 日射量など気象情報データ(供給データ)のスケラブル可視化

中島最強チームの【地球科学 SG】において計算された太陽放射データ(日射量データ)のスケラブルGIS可視化を行った。図1は日射量データのリアルタイム可視化の事例である。左メニューにあるとおり、当初の日射量データに加えて、地表面気温、地表面湿度、地表面風向・風速(図2)等の気象データ、ひまわり雲画像データ(図3)、高解像度降水ナウキャストデータ(図4)などを追加した。

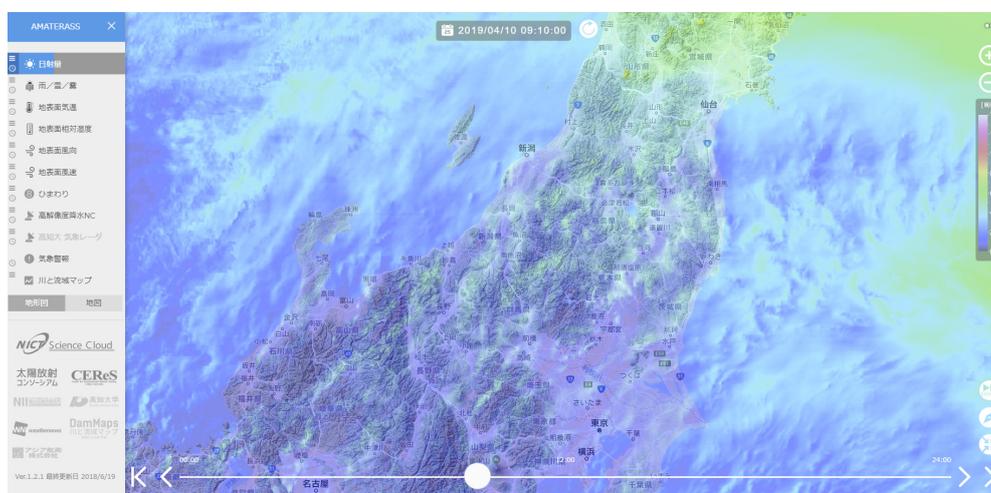


図1 太陽放射データ(日射量データ)のスケラブルGIS可視化事例

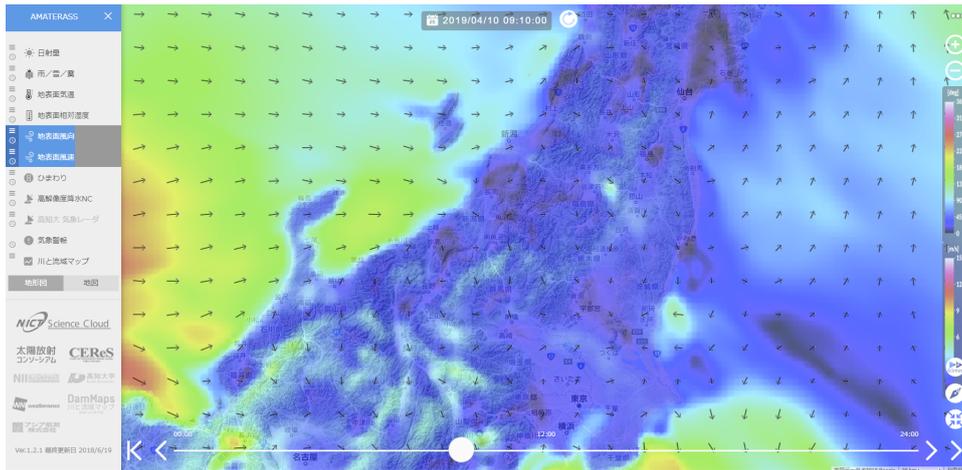


図2 地表面風向・風速データのスケラブル GIS 可視化事例

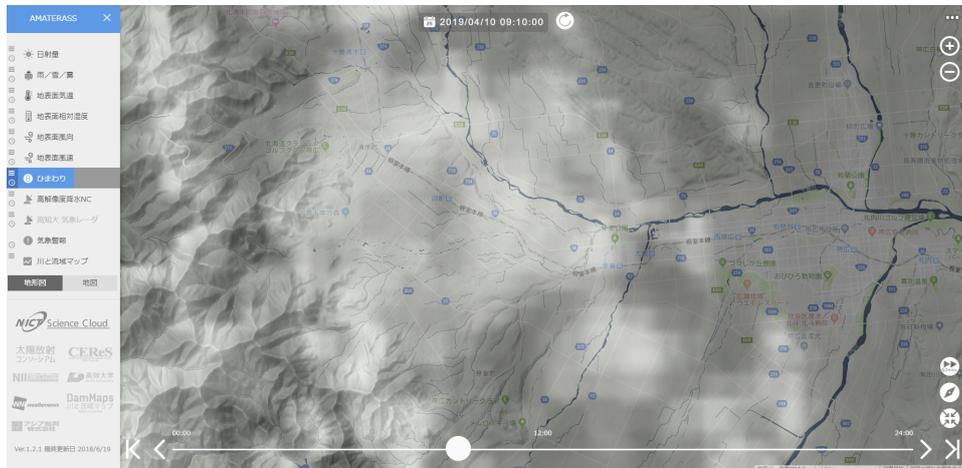


図3 ひまわり雲画像データのスケラブル GIS 可視化事例

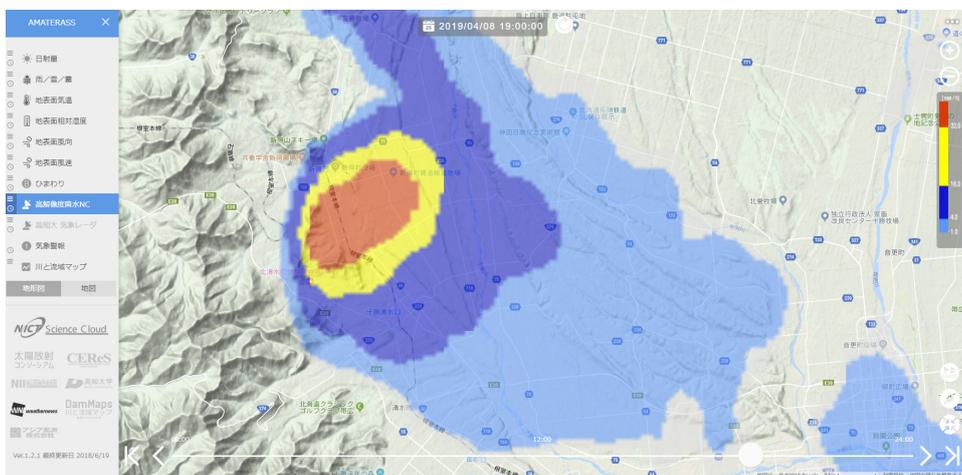


図4 高解像度降水ナウキャストデータのスケラブル GIS 可視化事例

(3) 需要データ(行動モデルデータおよび電力消費モデルデータ)のスケラブル可視化

中島最強チームの【エネルギー需要科学 SG】において計算された町丁目単位での行動モデルおよびエネルギー需要モデルのスケラブル GIS 可視化を行った。まず、日本全域の町丁目境界線データベースを作成した。さらに、エリア内に任意データのカラーマップ表示を行うプログラムを実装した。図5はその例である。杉並区の町丁目単位における行政境界での人口数を可視化した。図に示す通りマウスオーバーすることで、各町丁目のパラメータ(図の場合は杉並区荻窪 2 丁目の人口数)を取得することもできる。可視化はスケラブルに行っており、一定サイズ以上ズームアウトすると、データ表記は町丁目単位から市区町村単位、さらには都道府県単位へと自動的に変わる。

この技術により、スケラブルかつインタラクティブに行動モデルおよびエネルギー需要モデルを可視化し、情報を抽出することができるようになった。たとえば図6は西日本全域の世帯当たりの人数(市町村ごと)である。都市型(世帯当たりの人口数が少ない)と地方型(世帯当たりの人口数が多い)が明らかに見て取れる。一方、地方においても過疎地域は都市型と同様に世帯当たりの人口数が少なくなる。図7は関西中心地域の世帯当たりの人数(市町村ごと)である。大阪、京都および神戸の三都が図6の都市型であり、他の地域は地方型となっている。このエリア内には過疎型地域は見られない。図8は京都市の世帯当たりの人数(町丁目ごと)を示している。市内全域が都市型であるが、地方型の世帯人口分布となっている町丁目が市内中心部にも散逸しているのが分かる。この理由は不明(京都独特の地域性などの影響である可能性が高い)であるが、このような可視化により初めて得られた知見と言える。

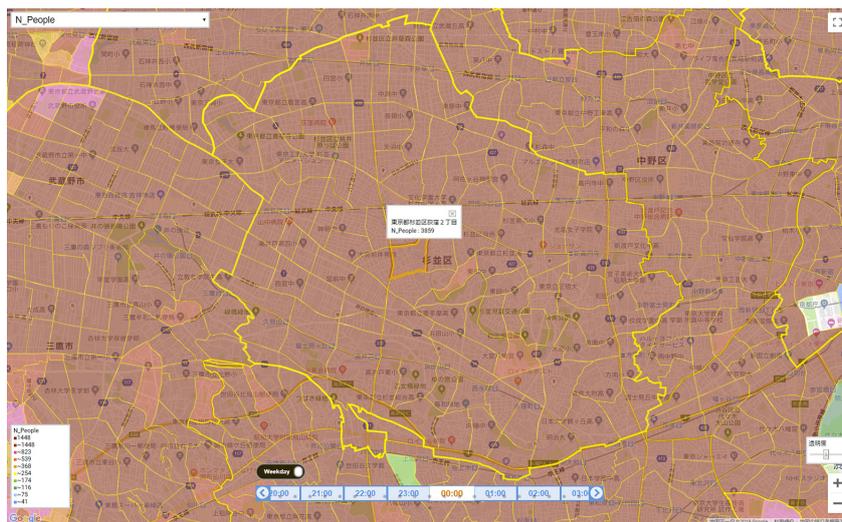


図5 杉並区の町丁目境界線とデータ取得例

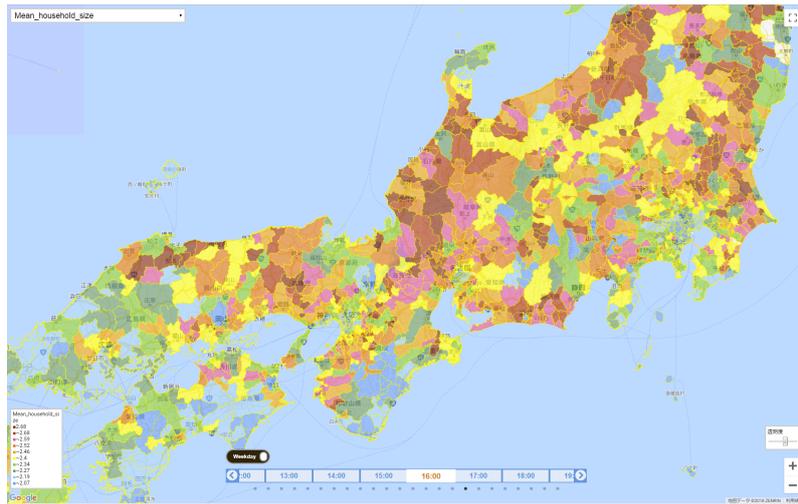


図6 西日本全域の世帯当たりの人数(市町村ごと)

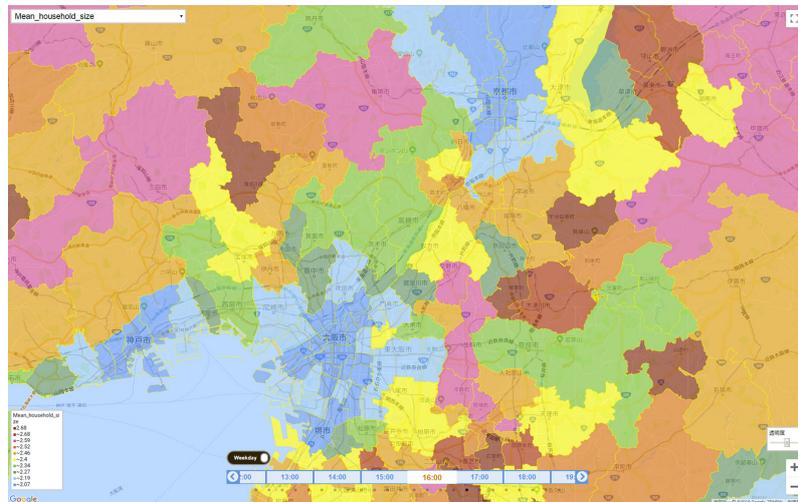


図7 関西中心地域の世帯当たりの人数(市町村ごと)

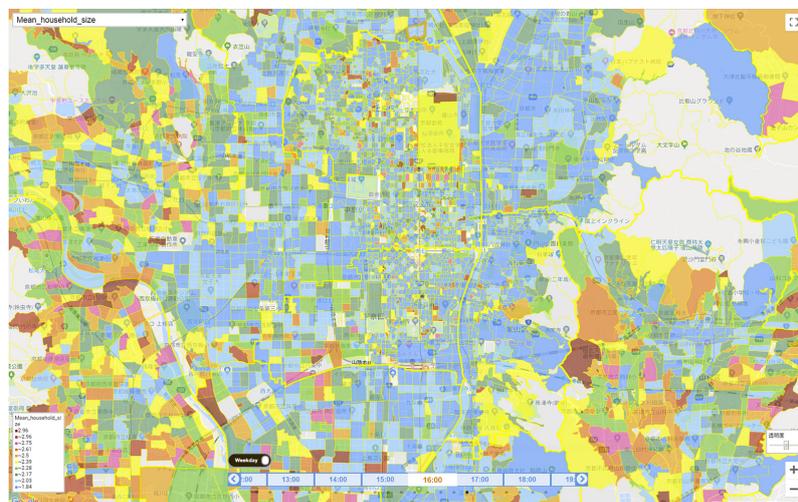


図8 京都市の世帯当たりの人数(町丁目ごと)

図5～図8は世帯人口であるが、行動モデルの可視化も行った。図9は東京全域の平日 18 時の世帯ごとの家事確率を市区町村単位で可視化した結果である。家事確率は都心に向かうほど確率が低く、都市型生活パターンが都心ほど顕著になっていると言える。都市型生活パターンを町丁目単位で可視化することで、より詳細な情報を得ることができる。図10は東京全域の平日 10 時の世帯ごとの家事確率である。都心に近い方が都市型生活パターンである点は同様であるが、その他の市区町村単位では見えなかった同じ市内(区内)での地理的な違いが読み取れる。たとえば、荒川東岸のいわゆるゼロメートル帯と比べて西岸では都市型生活パターンの傾向がより強く見られる。中央線や京王線などの主要鉄道路線は同じ区内(市内)でもより都市型生活パターンが強い。



図9 東京全域の平日 18 時の世帯ごとの家事確率

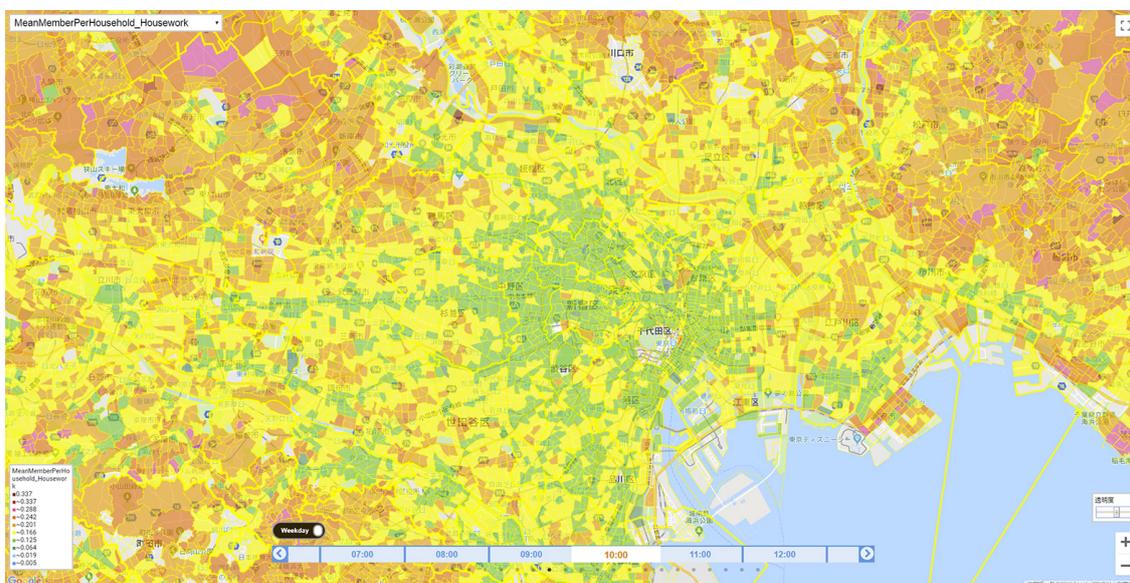


図10 関東全域の平日 10 時の世帯ごとの家事確率(町丁目分類)

3-2-12 データハンドリングおよび大画面可視化(タイルディスプレイ)(千葉大学)

【自己評価】

A 当初の計画以上に進展している

【研究進捗状況】

(1) 衛星データの収集・処理(仮タイトル)

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)では 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、その活動の一環として、世界の静止気象衛星データの収集、処理、および公開を継続して実施してきている。表1に示す通り、世界の主要な静止気象衛星データの収集、処理は完了し、この一連の活動が評価され、ひまわり 8 号データの科学利用のためのアーカイブ、および NASA Ames 研究センターとの共同研究による GOES-R シリーズのデータ収集に繋がっている。

表1 千葉大学環境リモートセンシング研究センターにてアーカイブされた
静止気象衛星データ一覧(2019年3月現在)

静止気象衛星収集・処理状況

	*1: 3hourly data only			ftp://hmwr127.cr.chiba-u.ac.jp/ で公開					
Asia 1 (HIMAWARI)	GMS1*1 198103- 198406	GMS2*1 198112- 198409	GMS3*1 198409- 198912	GMS4 198912- 199506	GMS5 199506- 200305	GOES9 200305- 200507	MTSAT1R 200506- 201007	MTSAT2 201006- 201507	H-08 201507- 現在
Asia 2 (FY2 Series)	ftp://fy.cr.chiba-u.ac.jp/					FY2-C 200605- 200809	FY2-D 200809- 201512	FY2-E 201512- 201901	FY2-G 201902- 現在
Asia 3 (IODC)	ftp://meteosat.cr.chiba-u.ac.jp/ EUMETSATデータポリシーのため、 IP制限公開			MFG5 199804-200702			MFG7 200607- 201703	MSG1 201702- 現在	
EU- Africa (ODeg)		MFG4 198912- 199402	MFG5 199402- 199707	MFG6 199610- 200212	MFG7 199806- 200607	MSG1 200401- 200612	MSG2 200609- 現在	MSG3 201212- 201802	MSG4 201802- 現在
America (GOES- EAST)	ftp://goes.cr.chiba-u.ac.jp/ ftp://goes3g-est-nc.cr.chiba-u.ac.jp/			GOES08 199409-200303		GOES12 200304-201004		GOES13 201004- 201801	GOES-R 201712- 現在
Pacific (GOES- WEST)	ftp://goes.cr.chiba-u.ac.jp/ ftp://goes3g-est- nc.cr.chiba-u.ac.jp/		GOES07 -199509	GOES09 199507- 199807	GOES10 199807-200606		GOES11 200606- 201112	GOES15 201112- 201811	GOES-S 201812- 現在

(2) AMATERASS データ(放射プロダクト)のアーカイブ

放射プロダクト開発は VL 初期(2007)より行われ、JAXA-東大グループ竹中博士による 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

(3) 太陽放射コンソーシアムおよびデータ・インタフェースへのデータ提供

データフローは VL, CREST を通じて多くのノウハウを得てきた. 系統内での混雑, 混線, トラブル波及を防ぐため, 系統を分けて管理することを基本としている. 外向きの公開は大学本部の理解もあり, SINET 直結が許されており, 大量のデータ公開がスムーズに行えている. 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て行い, 外部からの無用な攻撃を避ける運用をしている. さらに 2016 年度に実施した文部科学省 DIAS フォ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スサーバ室と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(事務局のウェザーニュース)によりスムーズにデータ提供を行うことができています(図1). 最近の 1U サーバは複数のネットワーク口(10 Gbps, 1Gbps 共に)を持っているものが多く, このような運用が行いやすい.

CEReS サーバ室のネットワークフロー

- 3.5系統+1(竹中計算機)
- ✓10Gbps SINET直結 : xxx.cr.chiba-u."ac".jp
- ✓1Gbps 千葉大FW内 : xxx.cr.chiba-u.jp
- ✓サーバ室(1, 3F計算機室) ローカル 10Gbps
- ✓CEReS – WNI 直結回線 : 1Gbps ダークファイバ
→殆どは2系統利用

とあるサーバの例 (3系統同居)

The image shows a server room network rack with various cables. Labels point to different connections: '10Gbps private 回線' (blue), '10Gbps SINET直結' (red), and 'CEReS-WNI回線' (white).

図1 千葉大 CEReS サーバ室でのネットワーク系統

図2に AMATERASS server の実際の通信モニタリングの例を示す. 10Gbps SINET 直結回線では, JAXA-東大グループから計算された結果の入力(冗長性も確保して2系統からの入力), および一般データ公開を行い, CEReS-WNI 直結回線を通じて太陽放射コンソーシアムにデータ提供を行い, 10Gbps サーバ室内 local ネットは内部利用(本データ・インタフェースの活動もこの回線を通じて行う)で分けており, 同一サーバ内できれいに同居していることがわかる.

3系統回線は同一サーバ内で“きれいに”同居する

amaterass server の例

10G直結SINET: 入力+公開 1GCReS-WNI直結: コンソへ

10Gprivate: 内部利用
→なので基本outのみ

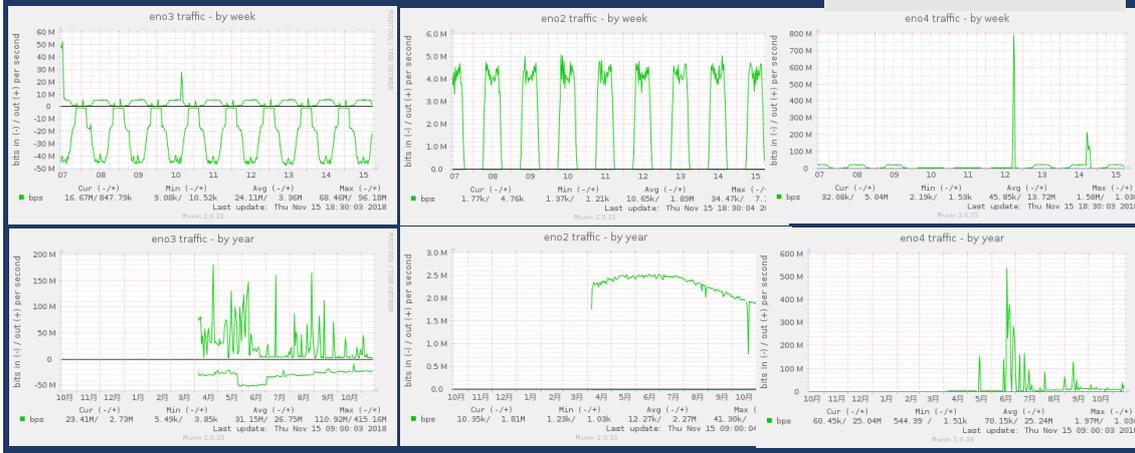


図2 AMATERASS sever の複数系統ネットワークによる運用モニタリング

(4) 大画面可視化(タイルディスプレイ)についての取り組み

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。タイルディスプレイ(TDW)はその名の通り複数のモニタをタイル状に並べ、一つの大きな画面として映し出す装置を指す。36面TDWは元々約10年前にNICTサイエンスクラウドチームにて構築されたものだが、共同研究の一環としてH29年度末に千葉大CEReSに移設した。理化学研究所と九州大学が開発している、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。このTDWはオリジナルのハードウェア仕様は、コンシューマ向けGPUであるGeForce470(Full HD 2画面出力)を1つのPCに2枚搭載し、同仕様のPC9台を管理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、使い勝手の観点でみると、必ずしも良い状態とは言えなかった。今回、CREST/TEEDDAのデータ・インタフェース活動でも利用可能なようハードウェア構成の中でGPUを見直し、業務用途に用いられるQuadro P2000に差し換えた。P2000は4K出力可能なDisplay Portを4つ搭載しており、定格消費電力も75WとGeForce470の30%程度でかなり低いことから、1PCに3枚搭載可能となり、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。また、映像伝送においては、NICTが開発したHpVTプロトコル技術を活用した(Murata et al., 2018)^{原著論文¹²⁾}。この仕様変更でNVIDIAのmosaicと呼ばれる画面連結機能が利用可能となり、12面のモニタを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。図3左は構成を変更した36面

TDWでNASA 22K 解像度 Blue Marble 画像を等倍表示で映し出した様子を示す。Google Earthのようなユーザーが直接触れるコンテンツを大画面で利用可能な環境の提供は圧倒的に多くの情報を共有することを可能にし、活発なディスカッションをもたらすと思われる。



図3 NASA Blue Marble 画像を等倍で千葉大 CEReS 16 面 TDW に映し出した様子

3-2-13 EMS プラットフォーム構築 (NICT)

【自己評価】

B おおむね順調に進展している

【研究進捗状況】

(1) 協調分散型 EMS プラットフォーム目的

本研究チームの地球科学 SG やエネルギー需要科学 SG などから算出された各種データをスケラブルでシームレスに共有するための可視化技術開発を促進する。プロジェクトチーム内およびプロジェクトチーム間でのアクセス性を高め、さらにはシステムの社会実装につながるためのプラットフォームを設計・開発する。

具体的には、中島最強チームの日射量データ及び需要データを含む EMS の関連データを時空間において連動して可視化し、さらに EMS プロジェクト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。さらに、これらのデータを電力会社や一般市民を含めた幅広い利用が可能なデータ提供インタフェースを検討する。H30 年度は基本設計と試作を行うが、R 元年度には実際のプラットフォームを実装し、中島最強チームのこれまでのデータに加えて林最強チームによる電力需要基礎データ(配電網モデルデータを含む)の可視化対応を行う。

(2) 協調分散型 EMS プラットフォーム実装状況

EMS プラットフォームは、これまでに構築してきた AMATERASS Web をベースとして開発を進めている。AMATERASS Web はオープンソース GIS(地理情報システム)ツールである Leaflet 上での実装を進めているが、2018 年度は予備実装として Google 社の Google Maps 上に実装した。H30 年度は、協調分散型 EMS プラットフォーム実現のための時空間統合的可視化機能の設計を行った。

図1は、本テーマが対象とする協調分散型 EMS プラットフォームのイメージ図である。協調分散型 EMS プラットフォームは、各最強チームがモデル計算(または観測、シミュレーションなど)により生成される各種データ(図では需要データや気象データとしたがこれらに限定しない)を吸収し、一つのデータとして利用者に提供するシステムを意味する。データ利用者としては、CREST プロジェクト参加研究機関はもちろんのこと他の学術機関も対象と考える。また、エネルギー事業者や一般市民(個人)による利用も想定する。図2は、図1の協調分散型 EMS プラットフォームを実現するための時空間統合可視化機能(STARS:Spatially and Temporally Acquired Records Synchronizer)のシステム図である。各時空間可視化アプリは時空間移動情報を共通データ形式で有しており、時空間制御用 Web アプリ(STARS controller)を介して時空間情報をリアルタイムに共有する。これにより、独自に開発されたことなる Web アプリの時空間状況をリアルタイムに共有し、同期可視化することができる。このシステム実装は R 元年度の課題となるが、試作版を 2018 年 9 月 18 日の

CREST 公開シンポジウムにおいてデモ展示した(図3)。左は日射量データ、右は電力需要データの同期可視化であり、一方の位置をマウス操作で動かすことで他方も同期して表示される。また、時刻についても両者で同期可視化できる。

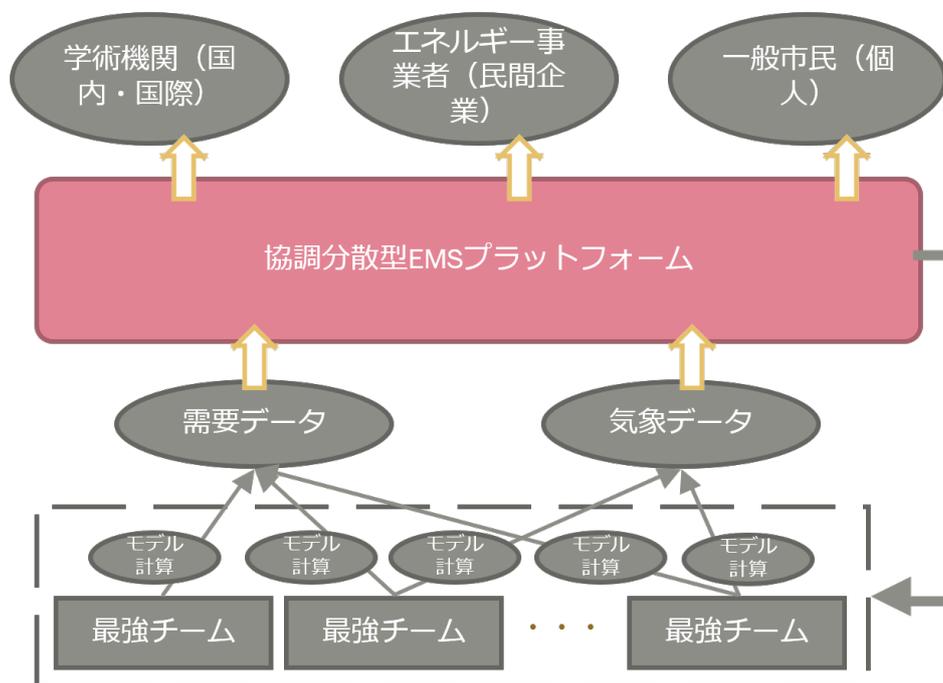


図1 協調分散型 EMS プラットフォームのイメージ図

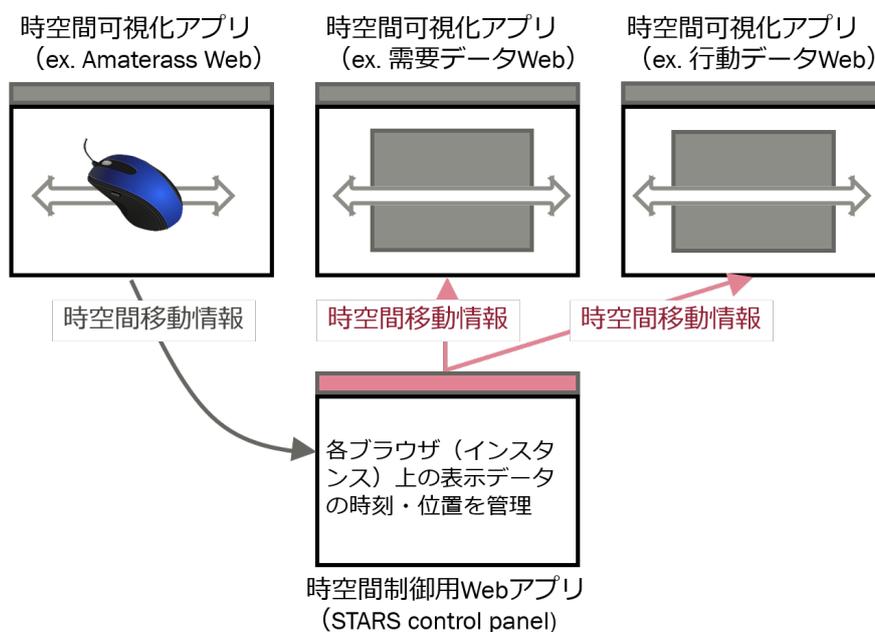


図2 協調分散型 EMS プラットフォームを実現するための時空間統合可視化機能

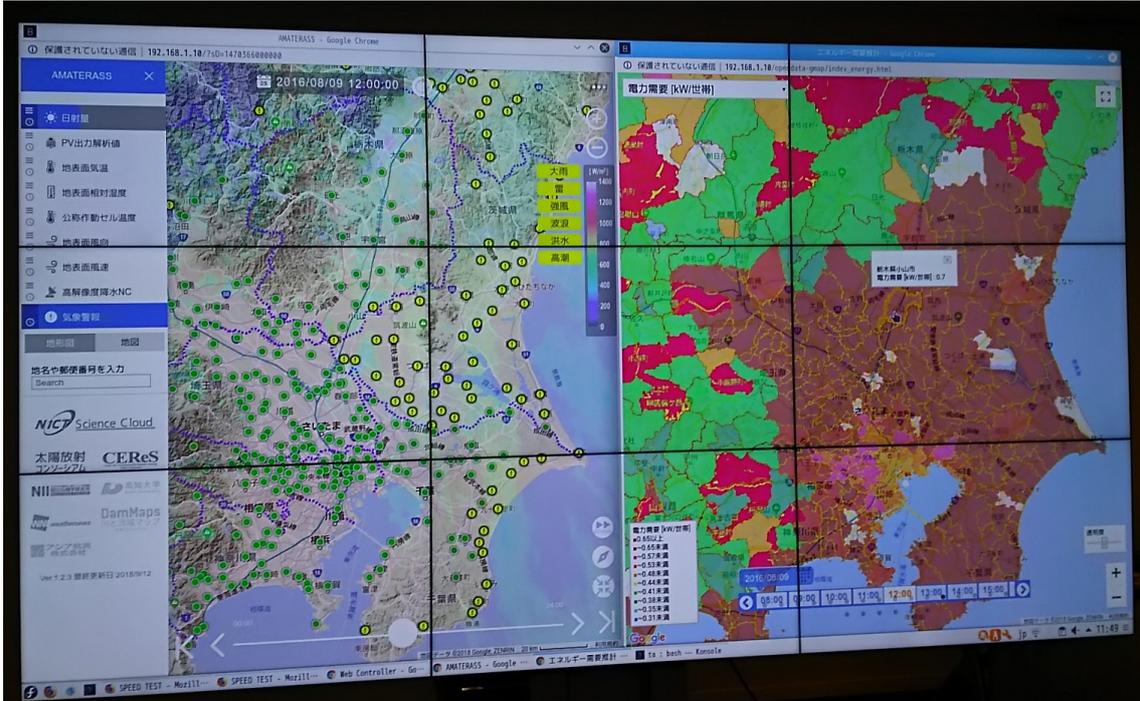
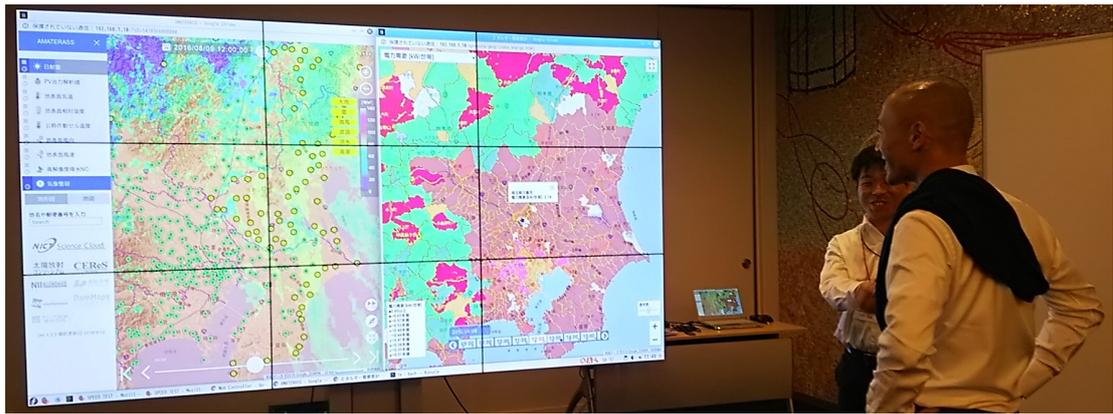


図3 時空間統合可視化機能によるデモンストレーション事例

3-2-14 異分野交流・国際交流

【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 (需要科学サブG) 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) 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。下田教授が代表で口頭発表した。 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 (阪大G) 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 (阪大 G) 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 (JAXA-東大G) 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) (JAXA-東大G) 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) (東海大G) 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(Letu et al., 2018) 原著論文 ²³⁾ 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) (千葉大G) 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 (Mok et al., 2018, Irie et al., 2019) 原著論文 1, 25) につながった。
地上観測システム SKYNET の欧州グループ (イタリア他) (千葉大G) 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 SKYNET の他アジアグループ (韓国他) (千葉大G) 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 (中島映至教授,千葉大G) 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)に認められ、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っている。 H29年度内に主要な機関との MOU 締結は完了した。
アジア・オセアニアの気象衛星運用機関・気象水文機関担当者 (東海大G) 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。 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。 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。 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 (地球科学サブG) 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(Ohtake et al, 2018a, 2018b)(Watanabe et al, 2019)原著論文 9, 11, 24) 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 (東大生研G) 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 (中島最強T) 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 (阪大G) H27～	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。 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 鈴木秀幸教授 (中島最強T,阪大G) 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・内田最強チームの需要研究者 (需要科学サブG) 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。 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 H30.1～H31.5	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 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 (東大生研G) 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 (東海大, JAXA-東大G) 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 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 (JAXA-東大,東海大G) 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。
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

H25～	<p>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。</p> <p>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>
建設会社 (阪大G) H28～	<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>
九州電力 (東工大G) H27～	<p>九州電力との研究協力。</p> <p>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。</p> <p>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>
長崎県・対馬市・長崎環境コンソーシアム (東工大G) H28～	<p>長崎県・対馬市・長崎環境コンソーシアムとの研究協力。</p> <p>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>

(3-3) 研究成果の展開について

- 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 4,580 万ファイルを突破 (45,809,667: 2019 年 3 月末)。
- 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。
- 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。

※記載要領

- CREST 研究の成果について、企業との共同開発、特許実施許諾、サンプル供与等、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への展開、科研費等の他制度への展開等がありましたら、ご記入ください。
(JST 内における成果把握、JST による成果展開の支援可能性の検討に使用します。成果展開の支援や成果事例としての公表等を JST が行いたいと考えることになりましたら、予め研究代表者にご相談いたします。)