

「分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論及び基盤技術の
創出と融合展開」

H28 年度
実績報告書

平成 27 年度採択研究代表者

中島 孝

東海大学情報技術センター
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・役職は平成 29 年 3 月時点のものを、正式名称で記載してください((独)、(株)等も記載)。

※注意

- ・本報告書の内容は、**平成 28 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、公表する「実績報告書」(年報)として、CREST の HP に掲載します。(H29 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:MS P 明朝、10.5 ポイント、英文:Century、10.5 ポイントをお使いください。

§ 1. 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機関毎に記入してください。
- 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

(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、EORC センター長)
- 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

§ 2. 研究実施の概要（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。チーム運営においては、以下に示すような5つの課題を設定している。

- Q1. 地球科学データの推定精度はどの程度か
- Q2. エネルギー需要を規定する要因は何であるか
- Q3. EMS における需要家の調整能力にはどのようなものがあるか
- Q4. 地球科学データによってエネルギー需要は如何に影響を受けるか
- Q5. これらは EMS にどのような影響をもたらすのか

これらの課題の解決に資するために、H28 年度は、①地球物理量シナリオデータの作成、②衛星データ解析システムの維持管理と改善、③モデルによる物理量算定システムの開発、④地球科学データの品質保証と異常データ検出、⑤気象データの変動解析、⑥エネルギー需要モデルの開発、⑦需要データプラットフォーム構築に向けた分析、⑧需要家行動モデルの開発を実施した。さらに、地球科学データの効率的な発信と地球科学と需要科学を結びつける研究としての⑨データ・インタフェースの開発を実施した。また、⑩国際交流および異分野交流を図った。H28 年度に行ったこれらの研究活動のダイジェストを下記に記す。

まず、地球科学分野においては、衛星データ解析システム等の研究が大きく進捗した。シナリオデータの作成では、過去に実際にあった猛暑日、厳冬日、および将来のシナリオ(2031 年、32 年、33 年)に基づいた日射量を含む気象情報のデータセットを作成した。衛星データ解析システムにおいては、これまで実施してきた雲特性の解析と並行して新たにエアロゾル特性の解析を開始した。また、衛星観測から得られた大気移動ベクトルの解析に基づく、地上到達日射量のアンサンブル短時間予測の研究を大きく進捗させた。雲解像モデルを用いた日射量予測の研究も進捗した。特に、気象場と衛星雲水量をモデルにナッジ(衛星観測値をモデルに馴染ませる)した場合の日射量の推定精度についての調査が進み、このようなナッジ手法が日射量の予測に有効であることが示された。本成果については現在論文執筆を進めている。その他にも、基礎的研究として、3 次元構造をもつ雲場における地上到達日射量を精度良く計算するための放射伝達計算手法の開発を行った(Okata et al. 2017)。さらに、衛星データやモデルから算出された日射量の検証に関する研究も進捗した。SKYNET 地上観測サイトにおいて、機器整備および機器運用手法の最適化を行い、連続観測を継続的に実施する体制を整えた。検証活動の成果については、国内学会誌に「特集記事」として寄稿した原稿が受理されている。衛星観測雲特性量を用いた地上日射量の変動特徴の推定手法の研究においては、新しい地表面日射量変動の情報として、空間的な広がりを持った情報を提供するためのデータ解析手法を提案した。以上のような研究成果によって、地球科学データの推定精度の定量化が図られる。今後、これらの地球科学データはエネルギーマネジメントシステムにおける電力供給及び需要に対する入力値として役立てられることになる。

エネルギー需要科学分野においては、需要モデルの開発が進捗した。温暖化ガス排出削減

や、電力ロードカーブ調整において重要な役割を示す家庭用コージェネレーションシステムについて、世帯人員や住宅形式によって変化する熱・電力消費を評価できる家庭用最終需要モデルを活用して、ガスエンジン、2種類の燃料電池による省エネルギー効果、CO₂排出削減効果を比較。本研究の結果、世帯構成別の最適コスト・エネルギーシステム、地域の温室効果ガス排出削減効果や電力ロードカーブへの影響などの評価が可能になった(Shimoda et al. 2017)。また、家庭用エネルギーマネジメントシステム(HEMS)データを用いてエネルギー診断を自動的に行うシステムを開発し、効果を検証した(Iwafune et al, 2017)。多数のフィールド(1600世帯)で HEMS を用いた家庭用エネルギー診断の効果を検証した事例としては初となる成果であり、今後の家庭部門の省エネルギー促進に大きく貢献するものである。需要行動の研究では、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(DR)の分析を行い、DR 継続実施時と DR 終了後の需要家の電力消費行動と実際の生活行動の経時変化について検討を行った。これらの需要に関する研究により、エネルギー需要を規定する要因が徐々に明らかになるとともに、EMS における需要家の調整能力についての知見が蓄積されることとなった。

データ・インタフェースにおいては、当チームにおけるデータの共通利用を目指して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、共有データとして提供するデータについての検討を行った。データユーザは Web ブラウザを通して本クラウドシステムにアクセスし、データ取得希望期間および指定地点もしくは指定地域(市区町村)を入力することで、データ入手が可能になる。データ・インタフェースの進捗により、地球科学データの利活用が促進される見込みである。

地球科学分野の国際交流として、アジア・オセアニア気象衛星利用者会合に参加して、アジア諸国での「ひまわり8号」衛星の利用についての動向についての情報収集を実施した。さらに、中国科学院のリモートセンシング&デジタルアース研究所、および同大気物理研究所との研究協力を開始した。日射データ評価地上システム構築の一環として、アメリカ NASA 主導の観測ネットワーク、およびスイス WRC 主導の観測ネットワークとの相互比較実験を実施している。エネルギー需要科学分野の国際交流では、London-Loughborough (LoLo), Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC) Centre 所属研究者との連携を実施した。

【H28 年度の代表的な原著論文】

- Okata, M., et al. "A study of the earth radiation budget in 3-D broken cloudy atmospheres by using satellite data", Journal of Geophysical Research, vol. 122, Issue 1, pp.443-468 (Jan 2017)
- Shimoda, Y., et al. "Residential energy end-use model as evaluation tool for residential micro-generation", Applied Thermal Engineering, vol. 114, pp.1433-1442 (Mar 2017)
- Iwafune, Y., et al. "Energy-saving effect of automatic home energy report utilizing home energy management system data in Japan", Energy, vol. 125, pp.382-392 (Online Mar 2017)

※ § 2. 記載要領

■平成 28 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。

§ 3. 研究実施内容

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

Okata et al. (2017)は、3次元的に不均質な雲場による太陽放射フラックスの反射、透過を正確に扱うことのできるモンテカルロ型放射計算コードを開発し、実際の衛星データに適用して、雲場の3次元構造が地球放射収支に及ぼす影響を調べた。また、放射収支の観点から雲の3次元構造を特徴付けるパラメータを構築した。本手法によって、従来、平行平板近似による放射伝達計算では大きな誤差を引き起こす3次元的に不均質な雲場が存在する場合の太陽エネルギー算定の方法論が確立できた。

この研究成果によって、地球科学データの推定精度の向上が図られる。今後、このような地球科学データは、エネルギーマネジメントシステムにおける電力供給及び需要に対する入力値として役立てられることになる。

【H28 年度の最も顕著な成果】原著論文 18)

Okata, M., T. Nakajima, T. Inoue, T.Y. Nakajima, H. Okamoto, and K. Suzuki, "A study of the earth radiation budget in 3-D broken cloudy atmospheres by using satellite data", Journal of Geophysical Research, vol. 122, Issue 1, pp.443-468 (Jan 2017)

※ (3-1) 記載要領

■今年度の**最も顕著な成果**について、**代表的な論文 1 報**を引用し、**200 字程度**で説明してください。

(3-2) 研究実施内容

当チームの研究実施内容を以下のとおり記載する。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 H28 成果情報収集シートに対応し、参考文献(H28 年度チームの成果以外)がある場合は章ごとに列記した。

3-2-1 地球物理量データによるシナリオデータの作成	7
3-2-2 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	12
3-2-3 モデルによる地球物理量算定システム	22
3-2-4 品質保証とデータ異常検出	32
3-2-5 気象データの変動解析	41
3-2-6 エネルギー需要モデルの開発	45
3-2-7 需要データプラットフォーム構築に向けた分析	52
3-2-8 需要家行動モデルの開発	64
3-2-9 需要家情報の整理	69
3-2-10 データ・インタフェースの開発	70
3-2-11 異分野交流・国際交流	73

※ (3-2) 記載要領

■平成 28 年度の研究実施内容について、研究のねらい、これまでの研究概要、研究進捗状況、研究成果、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。

■本文中に、**原著論文(平成 28 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 H28 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, …)

3-2-1 地球物理量データによるシナリオデータの作成 (JAXA-東大)

(1) 研究計画

期間全体では(i)EMSの有効性評価に資するシナリオ構築のための予備的検討(ii)状況シナリオ設定(iii)地球科学データに基づくシナリオデータの構築を行う予定である。H27年度はシナリオ構築のための予備的検討として、他分野/他チームとの意見交換に基づき、有効なパラメータや時間解像度等の選定に関する予備的検討を行った。H28年度は具体的に猛暑/厳冬の状況シナリオ設定を行い衛星解析/地上観測/気候モデルの将来予測結果等を活用してシナリオデータの試作を実施する。

(2) 基盤整備

シナリオデータ作成のための計算機を整備した。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。また、データアーカイバをデータ・インタフェースGと共有しつつシナリオデータ等の配布準備を進めている。

(3) 猛暑日及び真冬日観測に基づくシナリオ

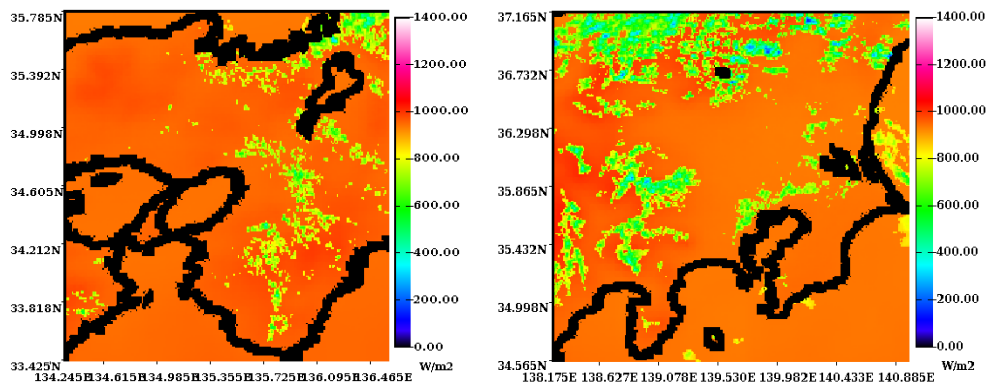
EMSに資する気象情報の提供は日射量をはじめとして多岐に渡り、既に異分野連携の結果が示されつつある[Wasa et al., 2013; Kawano et al., 2016^{原著論文2)}]。このことから分散協調型EMSの研究を行っていくためにはエネルギー需要と供給の基盤となる気候/気象場のデータを共通/共有することが不可欠であることが分かる。平成27年度はシナリオ構築のための予備的検討としてどのようなシナリオが有効であるか検討を行った。その結果第一案として猛暑と真冬のシナリオを選定した。また、ターゲット領域は人口密度によってエネルギー需要が決まっていることから東京電力管区と関西電力管区を中心とした領域を設定し、さらに本チーム需要研究G日高教授からの要請により対馬を別途設定した。平成28年度はこれらのシナリオ設定に基づく具体的なデータの整備を行った。

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

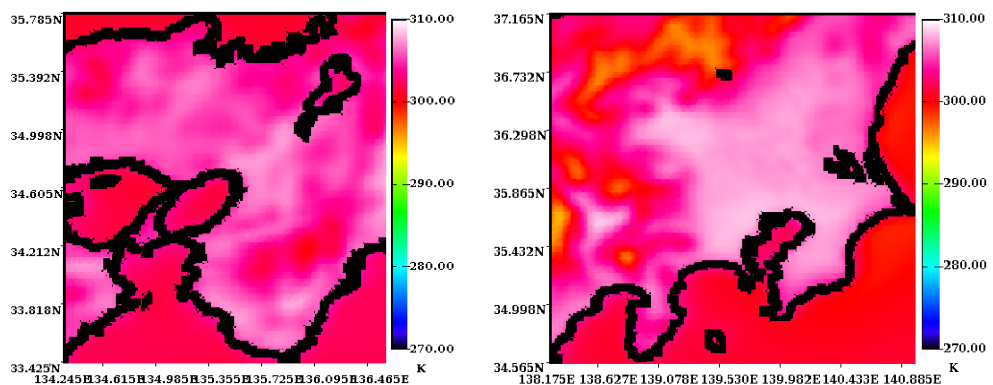
図1-2に真冬日シナリオの日射量、地上気温、太陽光発電出力を示す。東京電力管内は全く日射を得られていない事が分かるが、関西電力管内は人工密集地において日射を得られていることが分かる。しかしながら東京電力管内も関西電力管内も山岳部を中心に非常に気温が低くなっており暖房需要の増加が予想される。太陽光発電出力に着目すると東京電力管内は太陽光によって全くエネルギーを得られないことが分かる。このような場合火力や水力に代表される他電源に完全に頼らざるを得ないが暖房需要が増加しているときに他電源において広域の停電を伴うような重大な事故が起こった場合[Nakajima et al., 2017^{原著論文19)}]、その後の復旧において太陽光発電出力のモニタリングが必要となるだろう。また、関西電力管内は限定的ながら太陽光発電出力が得ら

れるが、広域に雲が分布しているため時間の経過に従って断続的な出力になるだろう。この出力変動に伴う制御技術の検討にこのデータが資する可能性がある。

日射量



地上気温



太陽光発電出力

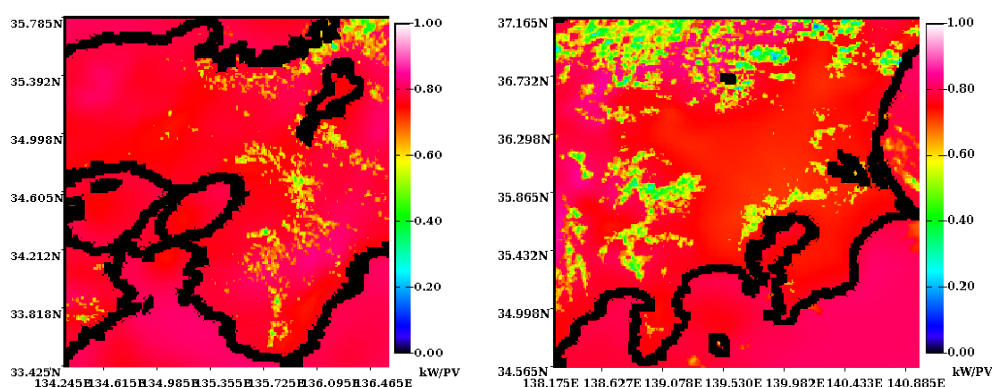
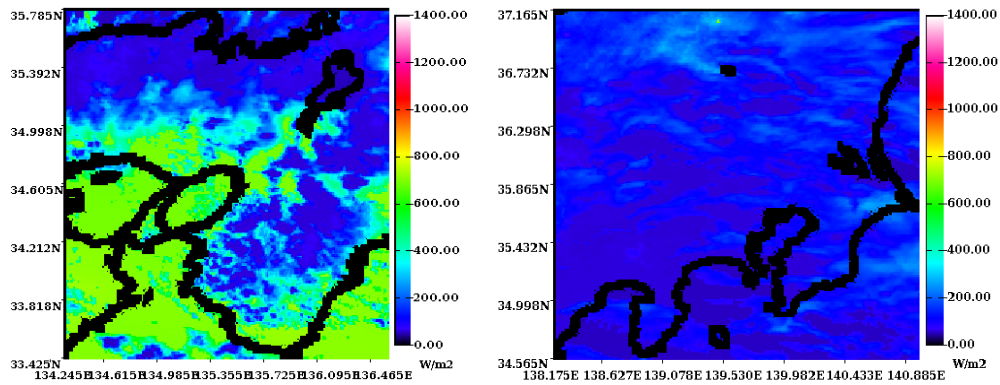
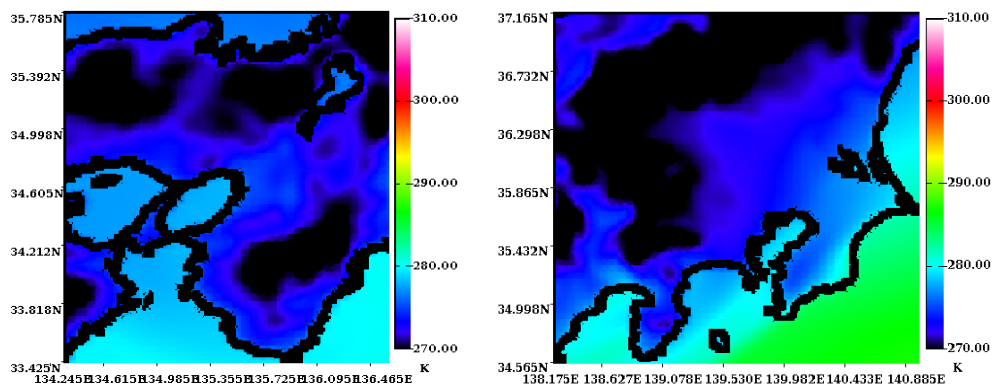


図1-1 猛暑シナリオにおける東京電力管内及び関西電力管内の日射量、地上気温、太陽光発電出力

日射量



地上気温



太陽光発電出力

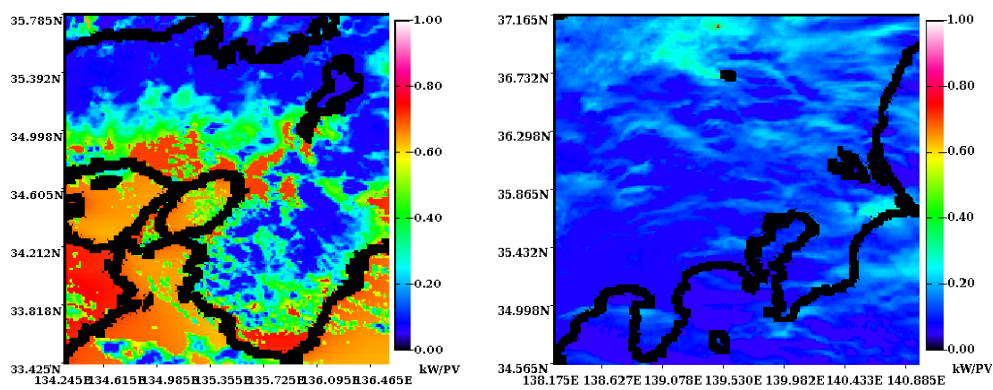


図 1-2 真冬シナリオにおける東京電力管内及び関西電力管内の日射量、地上気温、太陽光発電出力

(4) 擬似温暖化実験に基づく 2030 年代シナリオ

国内において再生可能エネルギーの導入は太陽光発電を中心として増加傾向にある。今後は太陽光発電システムが大量に導入される事は想像に難しくない[Renewables 2016 Global status report]。しかしながら、気候は固定されたものではなく変化していることに注意しなければならない。現在の気候に最適化された再生可能エネルギーの制御技術が長い年月をかけて変化していく気候の中でどのように有効であるのかを評価するシナリオデータが必要である。本研究では気候変動に伴い現在の気候から変化した将来シナリオの作成を行った。将来シナリオは 2030 年代をターゲットとし、気候変動適応戦略イニシアチブ 気候変動適応研究推進プログラム SALSA の成果物である Stretch NICAM による擬似温暖化実験の解析結果をベースとしてシナリオデータの作成を行った。ターゲット期間は 2031 年から 2033 年の三年間である。

図 1-3 に 2031 年 10 月 1 日における日射量、地上気温、地上風速、地上相対湿度を示す。日射量と風速の値は現在と大きくは変わらない印象を受けるが、気温と湿度が一見して現在とは異なる傾向を示していることが分かる。10 月 1 日という既に夏を過ぎた時期であるにも関わらず気温は高い値を示し特に湿度の高い領域が広く分布していることが分かる。日射量に大きな変化がなければ太陽光によって得られる電力は変わらないが、気温と湿度が高い値となれば冷暖房の電力需要に変化があるだろう。

(5) まとめ

猛暑日及び真冬日観測に基づくシナリオに示すように、EMS にはその環境情報としての気象情報が重要な役割を果たすことが分かる。今回は猛暑と真冬に焦点を絞ったが、今後の議論によって他の季節や特徴的な変動を伴うシナリオの作成も必要になるだろう。また、擬似温暖化実験に基づく 2030 年代シナリオから、我々人間の生活環境に関わる情報と再生可能エネルギーのインプットが提供されるため、将来シナリオにおける電力需給シミュレーションなどが可能になるだろう。シナリオデータはデータ・インタフェース G を通じて配布され、今後は将来シナリオも配布される。

(6) 参考文献

Renewables 2016 Global status report, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21). http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/10/REN21_GSR2016_FullReport_en_11.pdf

Wasa Y., T. Hatanaka, M. Fujita and H. Takenaka, 2013: Game Theoretic Receding Horizon Cooperative Network Formation for Distributed Microgrids: Variability Reduction of Photovoltaics, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 6, No. 4, pp. 281-289, 2013.

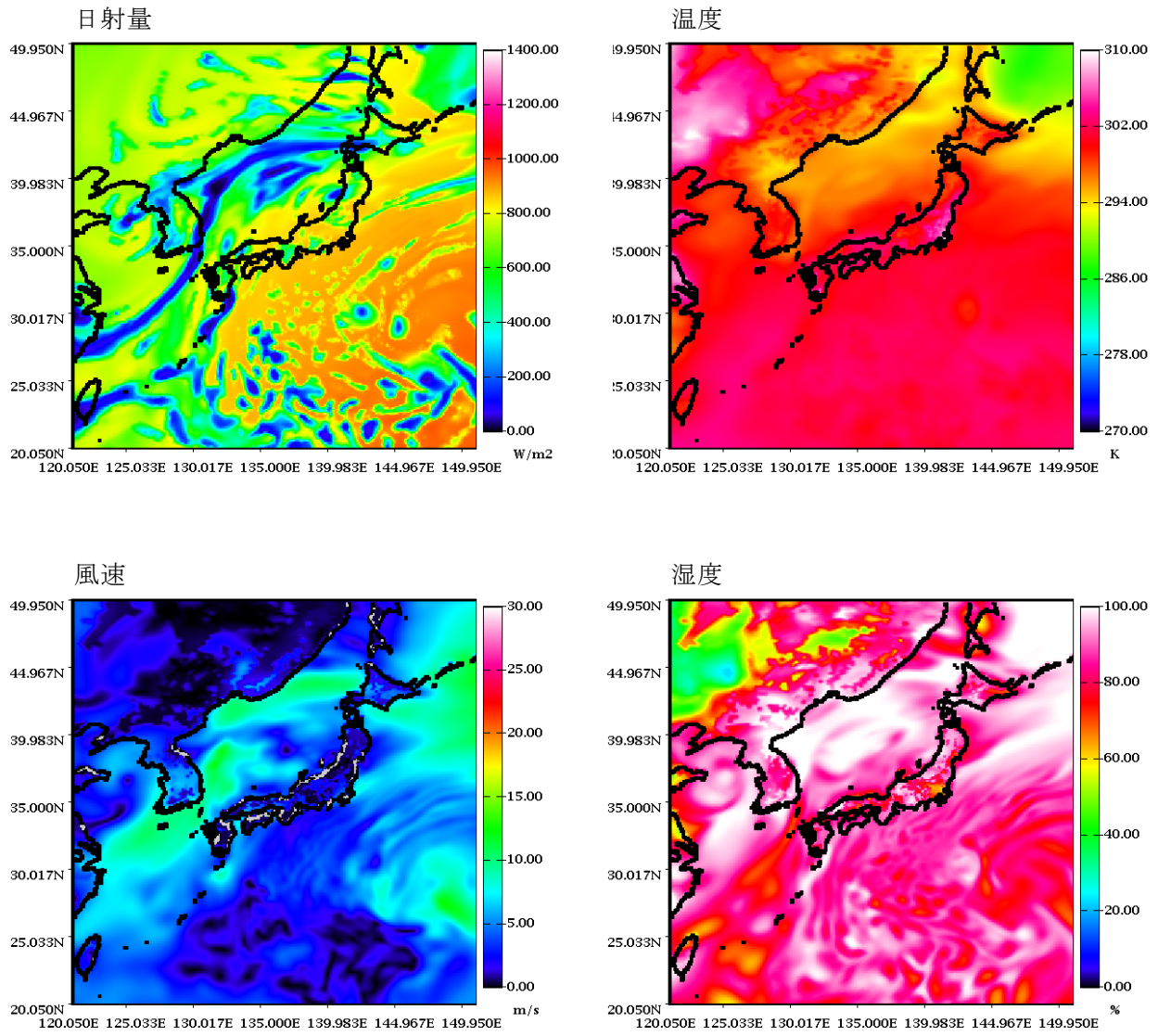


図 1-3 擬似温暖化実験に基づく 2031 年シナリオ(10 月 1 日日本時間 9 時)

3-2-2 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

(JAXA-東大、東海大)

(1) 研究計画

期間全体では(i)第三世代ひまわり観測データに基づく日射量推定アルゴリズムの開発と速報システムの構築(ii)雲とエアロゾル等大気要素の推定アルゴリズム適用高度化を実施する予定である。H27年度は第三世代ひまわり観測データに基づく日射量推定アルゴリズムの開発と速報システムの基礎部分を構築し、雲とエアロゾル、水蒸気の適用高度化について検討を開始した。H28年度は新しいエアロゾル算定アルゴリズムの適用を中心に実施し、雲場解析の応用として衛星観測に基づく短時間予測の適用実験を行う。

(2) 基盤整備

平成 27 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。平成 28 年度は昨年度に続き 170TB のアーカイバを追加した。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。

(3) ひまわり 8 号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

再生可能エネルギーにおける太陽光発電システムの導入量は世界規模で年々急増している。2015 年における世界全体の累積設備容量は 227GW、日本国内における累積設備容量は 34.5GW であり世界全体の 15%を占めるが、この値は中国、ドイツに続いて世界第三位となっている [Renewables 2016 Global status report]。もっとも注目すべき点は 2015 年における年間増加量が世界全体で 50GW、日本国内で 11GW と累積値に対して一年あたりの増加量が極めて高い値を示していることである。全体の総量が増加すれば日射量の変動により短時間で変化する太陽光発電出力も大きなものになる。特に電力システムの安定運用という側面から見れば、その変動を捉える技術の開発は大きな課題の一つである。本研究では衛星観測に基づく日射量及び太陽光発電出力の現況把握技術の開発を先行して行った。現在では時間解像度 2.5 分間隔空間解像度 1x1km における日射量と太陽光発電出力の準リアルタイム解析が行われている。これは雲などの大気要素を物理モデルで記述し地表面に届く日射量を波長毎に計算する技術に基づいている。また、地球物理量算定モデルを用いた新しい雲場同化手法による予測技術の開発にも取り組んできた。本節では新たに衛星による現況把握技術と地球物理モデルによる短時間予測技術を繋ぐ技術として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について報告する。

大気中の微粒子は気圧の変化に基づいて発生する風場によって空間を移動していく。また、エアロゾルは大気中の水蒸気と結びつき凝結することで雲となる。これらの振る舞いの正確な情報を得ることが出来れば何時何処で雲が日射を遮るのかを予測することが出来る。しかしながら、実際の地球は多様な地形を持ち複雑な風場を形成する。また、雲の凝結と発達も複雑な物理過程を持

つことから再現は容易でない。本研究では衛星観測データから大気の流れ場の情報を抽出し現況把握技術によって解析された雲などの大気要素が時間の経過に従ってどのように流れていくのかを観測事実の観点から得る。図 2-1 に可視チャンネルから得たベクトルの例を示す。これは観測データの位置情報補正アルゴリズムにて使用した位相限定相関法 (Phase Only Correlation method: POC) の応用で実現されている。基準とする衛星観測から Δt 時間進行した観測との POC をとることで大気要素の移動ベクトルを得る。このとき衛星データは波長によって観測しているものが異なることを利用してチャンネル毎に複合的なベクトルを得ることが出来る。さらに MSM/GPV の大気情報を取り込むことで大気全体の流れ場を構成する。図 2-2 に大気移動ベクトル解析に基づいた移動ベクトルを示す。本研究ではさらにこれを MSM/GPV の予測値から時間軸方向にモーフィング処理を施すことで流れ場の時間変化を考慮した予測を実現した。

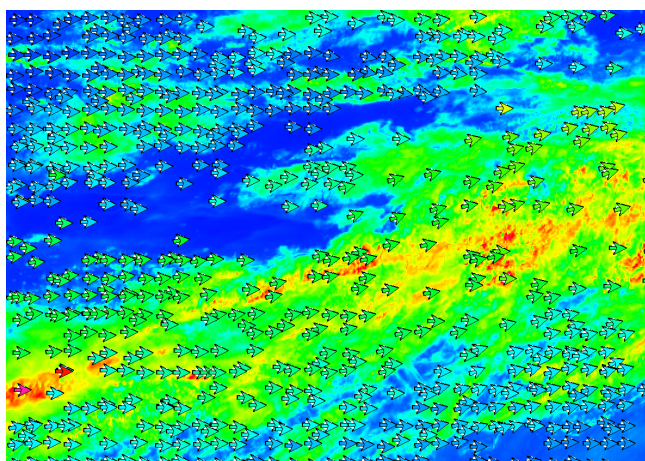


図 2-1 可視チャンネルより位相限定相関法により得られた大気移動ベクトル

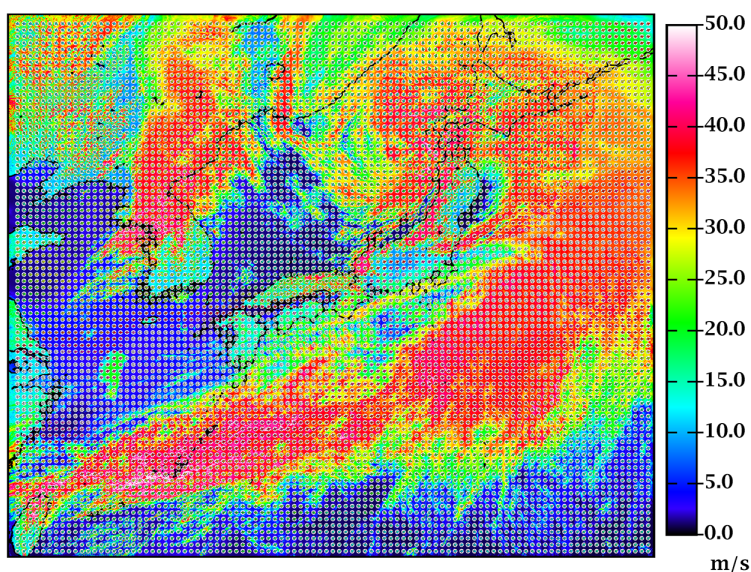
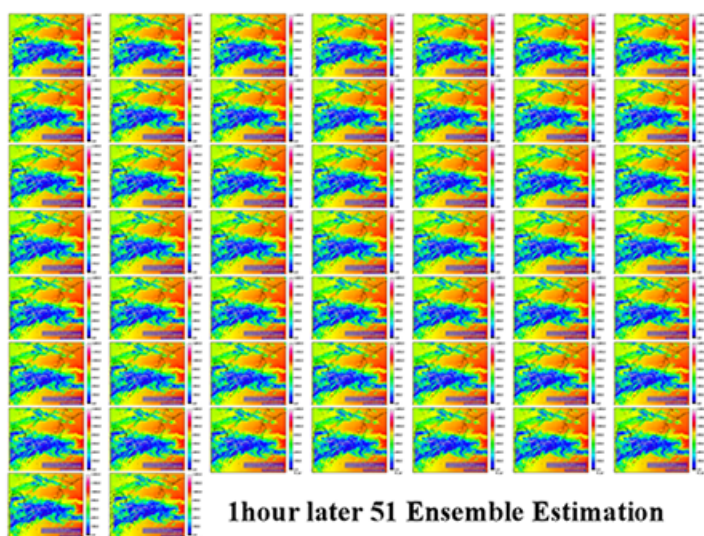


図 2-2 衛星データから算出されたベクトル場と MSM/GPV の大気情報から構築された流れ場

現実大気において雲やエアロゾルが移動した速度及び移動距離は一つであるが、衛星観測でその現象をとらえる場合時間と空間で離散化された値を観測することになる。即ちセンサの空間解像度と時間解像度によって現象は離散化して観測される。従って解析は離散化による量子化ノイズよりも詳細な情報を抽出することが出来ないため、センサの空間解像度よりも小さな移動や時間解像度よりも小さな時間変化を捉えることは出来ない。それらは常に量子化ノイズとして解析結果に付加されることになる。単一の解を唯一の結果として精度を求める場合はこれらが解析精度を下げる方向に働くため一定以上の精度の実現は原理的に不可能である。従って本研究ではこの問題点に対処するため大気移動ベクトルの算出をアンサンブル推定に拡張した。ベクトル解析が量子化によって誤差を持って算出される事を逆に利用してアンサンブルメンバーを作成する。可視 4チャンネル、BTD3種類、そして雲の光学的厚さから500m, 1km, 2kmの解像度を持つデータとして扱い2.5分間隔と10分間隔のデータを組み合わせることによって182のベクトル場を得る。そこから流れ場を構成し51のアンサンブルメンバーを作成した。それらを用いて1時間後、2時間後、3時間後の予測を行ったものを図2-3に示す。また、それぞれのアンサンブル平均とその標準偏差を図2-4に示す。時間の経過に従って標準偏差が増加傾向を示していることが分かるが、これはアンサンブル推定がよく作用している事を示す。標準偏差の極端に低い部分はアンサンブルに関わらず似通った値を返す事を示し、標準偏差の高い部分はアンサンブルによる変化が大きいことを示すことから予測の時空間的な信頼性の情報を取り出すことが出来る。従って本手法は単一の予測手法に対し51倍の情報量を持つことになる。現在は午前と午後の一泊二回試験的な予測を実行している。今後は二時間に一回、もしくは一時間に一回の頻度で6時間程度先までの予測を実行し予測データの試験的配布と評価、それらを踏まえた高精度化に取り組む予定である。また、これら短時間予測情報から、さらに地球物理量算定モデルとの連携によって高精度予測の可能性も考えられるだろう。



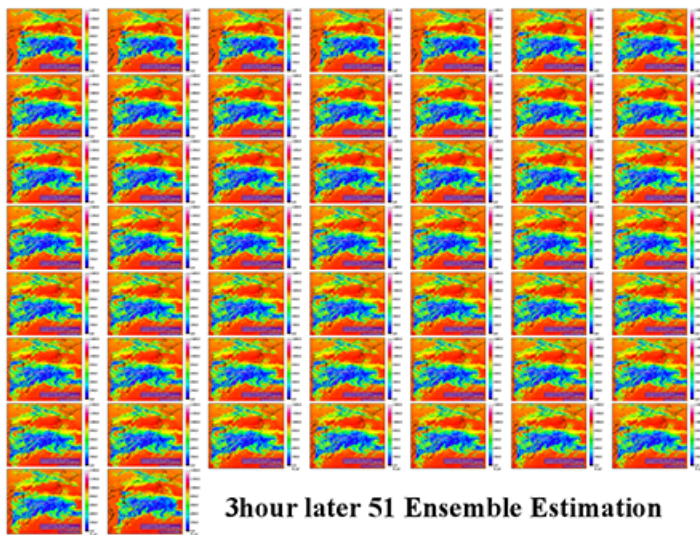
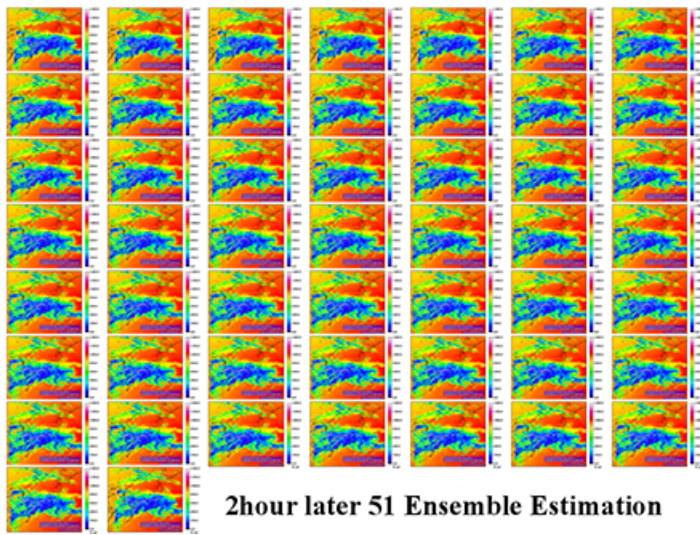


図 2-3 アンサンブル予測のサンプル(1 時間後、2 時間後、3 時間後)

Downward SW flux at the surface 51 mean value

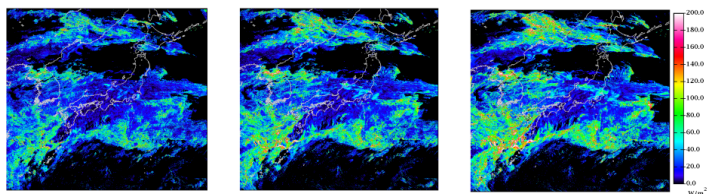
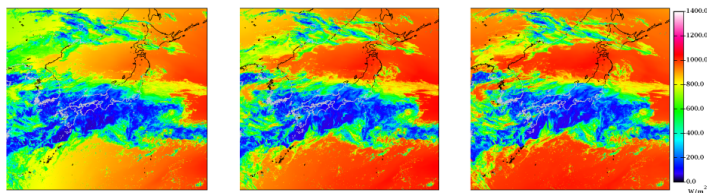


図 2-4 アンサンブル予測の平均値及びその標準偏差。アンサンブル情報から時空間的な信頼性情報を取り出すことが出来る。

(4) ひまわり 8 号エアロゾル推定アルゴリズム

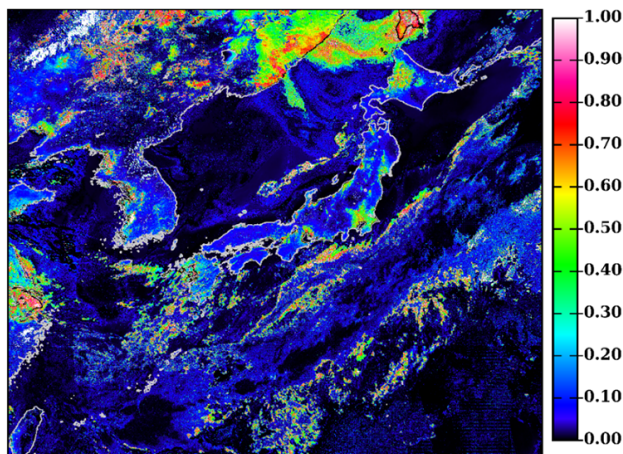
地上に到達する太陽放射の最大不確実要素は雲であるが[Okata et. al., 2017]^{原著論文 18)} 大気中の微粒子であるエアロゾルもまた日射を吸収散乱することから日射の不確実性となる大気要素である。平成 27 年度は海域エアロゾル推定アルゴリズムの準リアルタイム試験運用と陸域エアロゾル推定アルゴリズムの試験適用を行った。

海域エアロゾル推定アルゴリズムは REAP[Higurashi and Nakajima, 1999,2002]を用いている。現在は東アジア西オセアニア領域 4x4km 及び日本領域 1x1km を準リアルタイム解析している。さらに陸域エアロゾルの解析を試行した。アルゴリズムは MWMP(Multi-Wavelength Multi-Pixel)法を用いた[Hashimoto and Nakajima, 2017; Shi et al., 2016^{原著論文 17)}]。東アジアに位置する日本には海洋起源の粒子だけではなく大陸起源の様々な粒子もまた移送されてくる[Goto et al., 2016]^{原著論文 9)}。MWMP 法はエアロゾルの種類や大気中の煤など様々なパラメータを同時に推定する事が出来るため日射量の推定のためのエアロゾル推定には有効なアルゴリズムである。特に近年ではエアロゾルの同化手法による地球規模のシミュレーション手法も開発されており[Yin, X. et al., 2016]^{原著論文 11)} 粒子の種類や詳細な光学パラメータを観測に基づいて得られることは大きな優位性がある。平成 27 年度は都市域をターゲットとして解析を行った。平成 28 年度は MWMP 法を解析対象全体への適用を試行した。

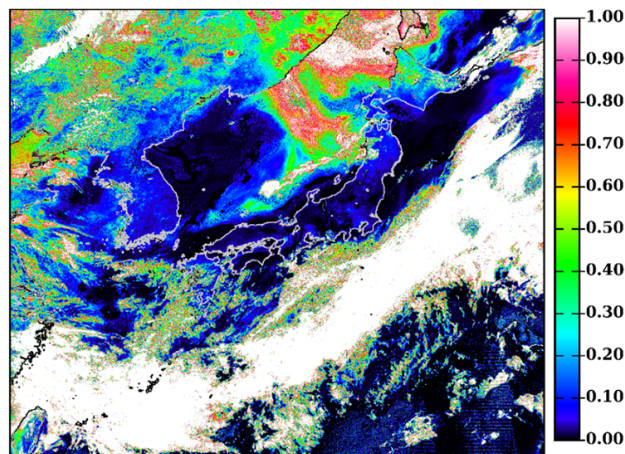
MWMP 法は様々なエアロゾル種の混合状態を表現するため内部に放射伝達計算用の放射コード RSTAR7 を持っているが、解を導くためにその都度放射計算を行い衛星搭載センサのシグナルをシミュレートすることは計算コストを激増させる。一般的な衛星解析では参照テーブル法(Look Up Table: LUT)が適用されるが多くのパラメータを適用する場合パラメータの数に応じてデータベースの容量が増加する。MWMP 法に LUT 法を適用する場合、既にパラメータ数が多すぎるため LUT の作成は現実的ではない。従って日射量計算アルゴリズム EXAM SYSTEM に搭載されているニューラルネットによる放射計算エンジンを利用して衛星搭載センサのシグナルをシミュレートすることを試みた。参照テーブル法の本質的な問題点は次元数の増加によるデータベースサイズの爆発的増加と内挿法の複雑化により解の導出そのものが困難になることである。突き詰めればデータベースそのものの作成が不可能な問題において参照テーブル法の限界があることになる。この問題に対処するため放射伝達計算を効率的に学習するための学習アルゴリズムが開発されている[Takenaka et. al., 2011]。EXAM SYSTEM にはこれによって作成されたフラックス計算用の NN solver が搭載されている。今回はこの学習アルゴリズムを利用して「ひまわり」8 号の観測シグナルをシミュレートするためのソルバーを作成した。便宜上 NN solver を搭載した MWMP を ν -MWMP と呼ぶ。

図 2-5 に解析結果を示す。解析対象領域は日射計算を行っている領域と同一であり空間解像度は 1km である。今回は雲域との連続性を確認するため敢えて雲除去を行っていないが、雲域から晴天域までなめらかにエアロゾルが推定されていることが分かる。Dust エアロゾルと Fine mode エアロゾルのパターンに不自然な箇所が見られるが、これは粒子の光学特性と粒子種の仮定が適切でない可能性がある。しかしながら、大気全体のエアロゾル量は整合的に算出されているように見える。今後は細かいチェックを経て準リアルタイム解析を実行し日射量の解析に組み込みたい。

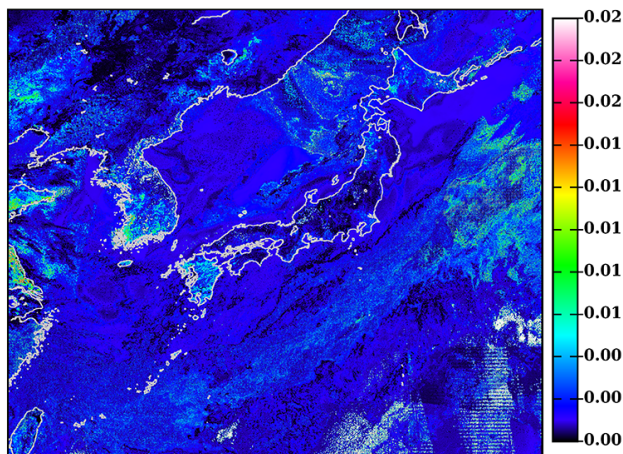
Dust エアロゾル粒子



Fine mode エアロゾル粒子



エアロゾル Soot Fraction



大気中エアロゾルのトータル

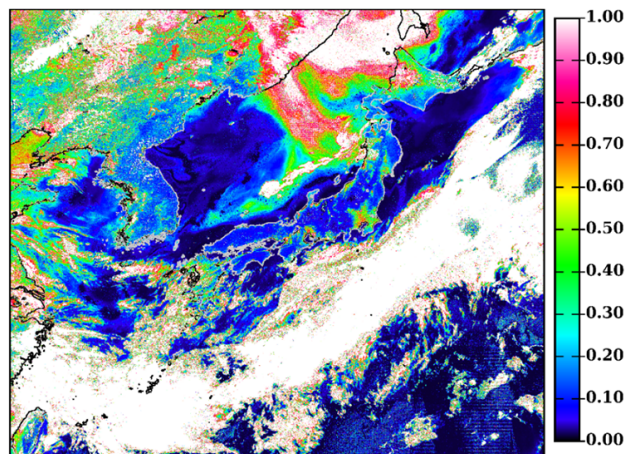


図 2-5 エアロゾルの光学的厚さ

(5) 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)は雲に次ぐ日射の大きな不確定要素である。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。平成27年度は「ひまわり」7号に適用されたものと同様の手法で可降水量の推定を試みた。平成28年度は「ひまわり」8号の多チャンネル化に伴いBTD [Inoue T., 1987]の多パラメータ化を検討した。9umから13umにかけて水蒸気の吸収が強いことから複数のBTDを利用することで水蒸気をより捉えやすくなる可能性がある。また時間に依存して傾向が変化しないか普遍性についても検討した。ターゲット期間は2016年5月から10月とし、基準とする可降水量データは平成27年度と同様国土地理院の電子基準点等観測データを用いて、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GPS可降水量データである。H27年度は2016年3月9日に「ひまわり」8号観測データの地上処理系における不具合修正が気象庁から報告された。今回はこれを受けた追試の意味合いも含まれる。

図2-6に時刻ごとの解析結果を示す。一見して解析が破綻している例や異なる傾向を示しているものがないことが分かる。この結果からも本手法は時刻に依存することなく解析が可能であることが分かった。しかしながら、RMSEは4mmと高い値を示している。本手法は衛星搭載センサの赤外域の差分情報を直接利用することから雲や光学的に厚いエアロゾルなどの混濁には弱い。ここで使用データの徹底した混濁排除を試行した。図2-6の最後に結果を示す。RMSEは1.53mmと良好な値を示すが水蒸気の高い値が抜け落ちてしまっている。これは大気中の水蒸気が上昇することにより混濁が助長されることを示しているかもしれないが、しかしながら晴天域の誤判別も含まれる可能性があるだろう。この状態では日射量の推定に直接利用することは難しい。今後は高精度化と共にどのように日射計算に適用していくかを検討したい。

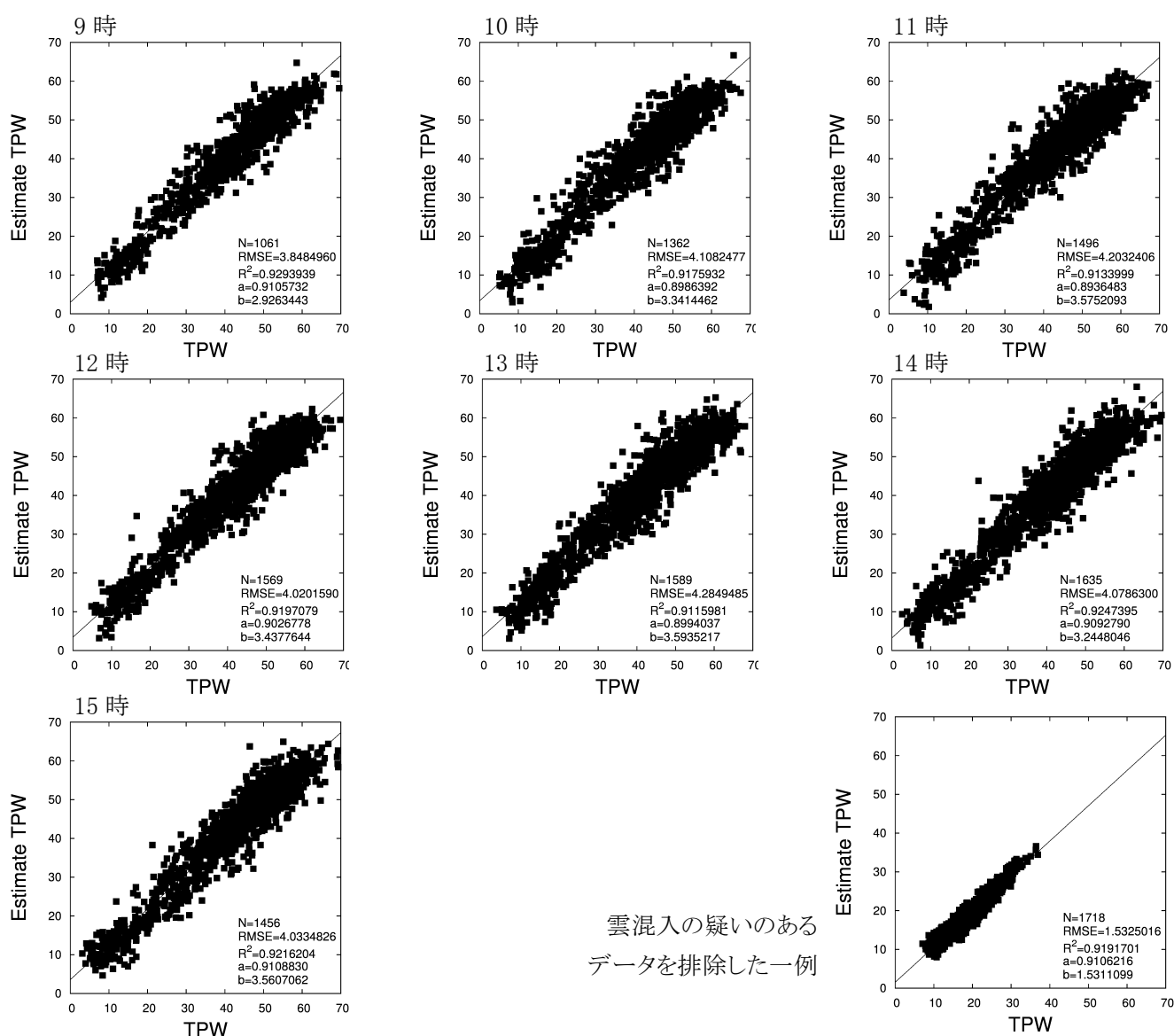


図2-6 ひまわり8号による可降水量推定結果。9～15時はそれぞれ日本時間を表す。最後の図は雲混入の疑いのあるデータを排除した一例。

(6) CAPCOM(雲解析)アルゴリズムとルックアップテーブルの健全性の確認

「ひまわり」衛星から地上到達日射量を理論計算するためには、大気中の雲特性(雲の光学的厚さ、有効半径、雲頂高度)の情報が必要である。これらの雲特性は「ひまわり」衛星の輝度データに CAPCOM アルゴリズム(Nakajima and Nakajima 1995, Kawamoto et al., 2001)と附随ルックアップテーブル(以下、LUT)を適用することで推定することが可能であり、実際に現在もそのようなシステム構成となっている。CAPCOM アルゴリズムは「ひまわり」衛星のみならず、必要なバンドを備えたイメージャー・センサであれば適用することが可能である。必要なバンドというのは、可視光波長(0.64 μm)、短波長赤外光波長(1.6 μm , 2.1 μm , 3.7 μm)、及び熱赤外光波長(11 μm)である。H28年度の研究において、「ひまわり」解析に用いられている CAPCOM アルゴリズムを、米国航空宇宙局(NASA)が打ち上げた Terra 衛星搭載 MODIS センサの1ヶ月分の長期データに適用した。このような研究を行う目的はアルゴリズムと LUT の健全性の確認、維持管理である。すなわち、現システムで使用するアルゴリズムと LUT を他衛星センサ、特にセンサ校正が済まされている衛星センサに適用した解析結果を随時確認することで、アルゴリズムの健全性を確認する。

図 2-7 に 2005 年 8 月の1ヶ月分の MODIS センサの輝度を用いて求めた地表面の最低反射率を示す。ここで求めた最低反射率データは、観測データからの雲ピクセルの抽出および、光学的厚さの推定時に用いられるものである。図 2-7 で該当する波長は、(a)0.64 μm , (b)0.86 μm , (c)0.46 μm , (d)0.57, (e)1.6 μm , (f)2.1 μm である。

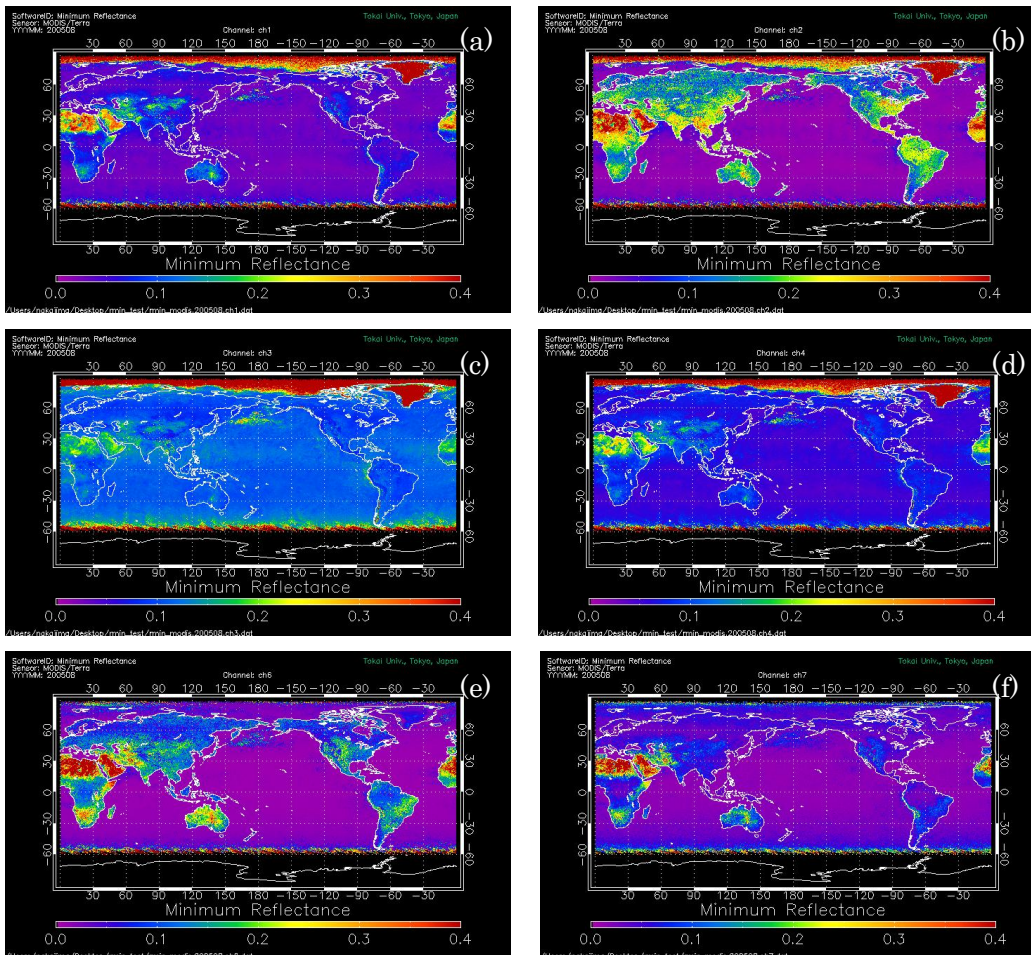


図 2-7 2005 年 8 月の1ヶ月分の MODIS センサの輝度を用いて求めた地表面の最低反射率

次に図 2-8 に示すのは、同期間に取得された MODIS センサデータから CAPCOM アルゴリズムと LUT を用いて推定した(a)雲光学的厚さ、(b)雲粒有効半径、(c)雲頂温度、(d)雲頂高度の 1 ヶ月平均値である。図(a)(b)からは、陸域で光学的厚さが大きくなる(雲粒半径は小さくなる)様子が明瞭にみとれる。雲頂温度、雲頂高度についても従来の結果と整合するものであった。

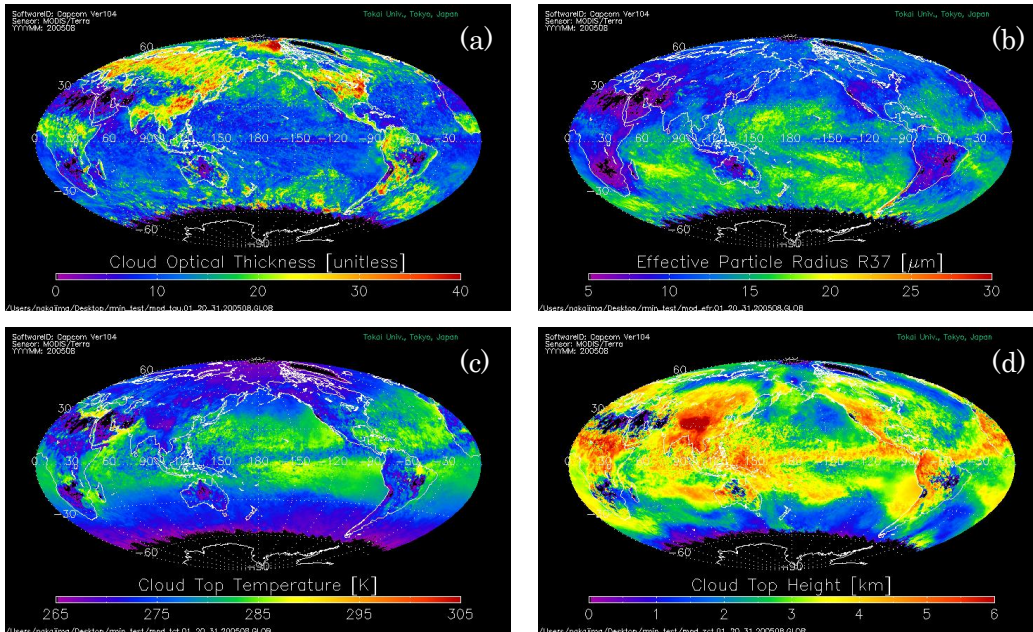


図 2-8 同期間に取得された MODIS センサデータから CAPCOM アルゴリズムと LUT を用いて推定した(a)雲光学的厚さ、(b)雲粒有効半径、(c)雲頂温度、(d)雲頂高度の 1 ヶ月平均値

今回のアルゴリズム維持管理解析においては、過去に解析した同解析事例と同等の結果が得られ、すなわち「ひまわり」衛星データ解析に用いた CAPCOM と LUT の健全性の確認に資することとなった。

(7) 衛星データの利便性向上

H27 年度の成果を踏まえ、H28 年度は東海大学宇宙情報センター(熊本)で受信するひまわり8号を含む複数衛星データの重ね合わせ・特定領域切り出し手法の高度化を実施した。その結果、任意の領域の静止軌道衛星ひまわりの AHI センサ画像と極軌道衛星 Terra および Aqua の MODIS センサ画像(Cho, 2016)^{原著論文 14)}を比較表示できるようになった。これにより、時間分解能が 10 分だが空間分解能が 1km の AHI 画像と時間分解能が 12 時間だが、空間分解能 250m の MODIS 画像を統合利用することが可能となった。

今後、さらにユーザの多様性を考慮し、対象領域、観測期間、データフォーマット等の指定法を含むユーザインターフェースの高度化を進める予定である。

(8) 参考文献

Hashimoto M. and T. Nakajima, 2017: Development of a remote sensing algorithm to retrieve atmospheric aerosol properties using multi-wavelength and multi-pixel information, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, DOI: 10.1002/2016JD025698.

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

Higurashi, A., and T. Nakajima (2002), Detection of aerosol types over the East China Sea near Japan from four - channel satellite data, *Geophys. Res. Lett.*, 29(17), 1836, doi:10.1029/2002GL015357.

Inoue, T. (1987), A cloud type classification with NOAA-7 split-window measurements, *J. Geophys. Res.*, 92, 3991-4000, doi:10.1029/JD092iD04p03991.

Kawamoto, K., T. Nakajima, and T. Y. Nakajima, 2001: A global determination of cloud microphysics with AVHRR remote sensing. *Journal of Climate*, 14, 2054-2068.

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

Renewables 2016 Global status report, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21). http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/10/REN21_GSR2016_FullReport_en_11.pdf

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

3-2-3 モデルによる地球物理量算定システム(JAXA-東大)

(1) 研究計画

期間全体では(i)日射量短時間予測技術構築のための新しい雲場同化手法の検討(ii)多様な大気場への適用性実験と検証(iii)シナリオデータに基づく短時間予測実験を行う予定である。H27年度は本CREST第一期において検討された新しい雲場同化手法を用いて問題点の抽出を中心とし、多様な大気場への適用手法の検討を開始した。H28年度は四季による雲場の傾向変化に対する適用性の検討を中心に実施する。また、衛星側の短時間予測の結果を用いて雲場同化を行うための初期検討を開始する。

(2) はじめに

近年の計算資源の向上に伴って高解像度気候実験が可能になった(Skamarock et al. 2008)。しかし、解像度が数キロ単位になると従来のモデルで使用される静水圧近似や積雲パラメタリゼーションの仮定が適用しない。その為、積雲パラメタリゼーションに頼らない非静力学モデルである雲解像気候モデルが領域モデルで主流になりつつあり、より現実的な対流性の雲の再現が望めるようになった。

本研究では、全球静力学気候モデルである全球一様格子NICAM(Satoh et al. 2008; Satoh et al. 2014)と全球ストレッチ格子であるストレッチNICAM(S-NICAM)(Tomita et al. 2008)、また一特定領域だけを計算する領域格子D-NICAMを使用しての、地表面日射量の予測実験を行う(図3-1)。

NICAMはもともと正十二面体で構成され、存在するグリッド点の中間に新たなグリッド点を加えることで解像度を高めている。その解像度はg-levelによって示され、例えばg-level7だと、全球56km解像度で、g-level8になると、全球28km程度の解像度が望まれる。しかし、高解像度実験では非常に多くの総グリッド数を使用するために、莫大な計算資源が必要となる。そのため全球ストレッチ格子のS-NICAMでは焦点にグリッド点を集中させることで対象領域付近の解像度を高めている。その水平解像度は焦点に近づくほど高くなり、対象領域内と同程度の解像度を持った全球一様格子と比べて、焦点から離れるほど解像度は低いために、格子数の削減に繋がり、計算資源の節約が可能となる。そのストレッチの度合いはストレッチ指数で表されていて、指数が16の場合は焦点で水平解像度が4倍、その反対の領域で解像度が四分の一程度となるため、例えば、g-level8格子と組み合わせた場合は対象領域で約7km、非対象領域で約112kmの解像度となる。問題点として解像度が粗い領域での大気大循環の大きな誤差が発生することが危惧される(Uchida et al. 2016)^{原著論文1)}。領域格子D-NICAMでは焦点を正十二面体の上下合わさった2つのパネルの中心に置き、その2つのパネル内だけで領域計算を行なう。総グリッド数が全球と比べ十分の一となり大幅な計算資源の削減が見込まれる。またストレッチ格子と組み合わせることで、領域自体の大きさを変えることが出来る。ただ、境界面で外部データが必要不可欠であり、またその境界で発生するエラーを考慮する必要がある。本研究では、日本近辺の衛星データから三次元の雲水プロファイルを作り、それをモデルに適用するために領域モデルであるD-NICAMを主に使用するが、まずは最初に領域モデル特有の境界エラー等の問題について言及する。

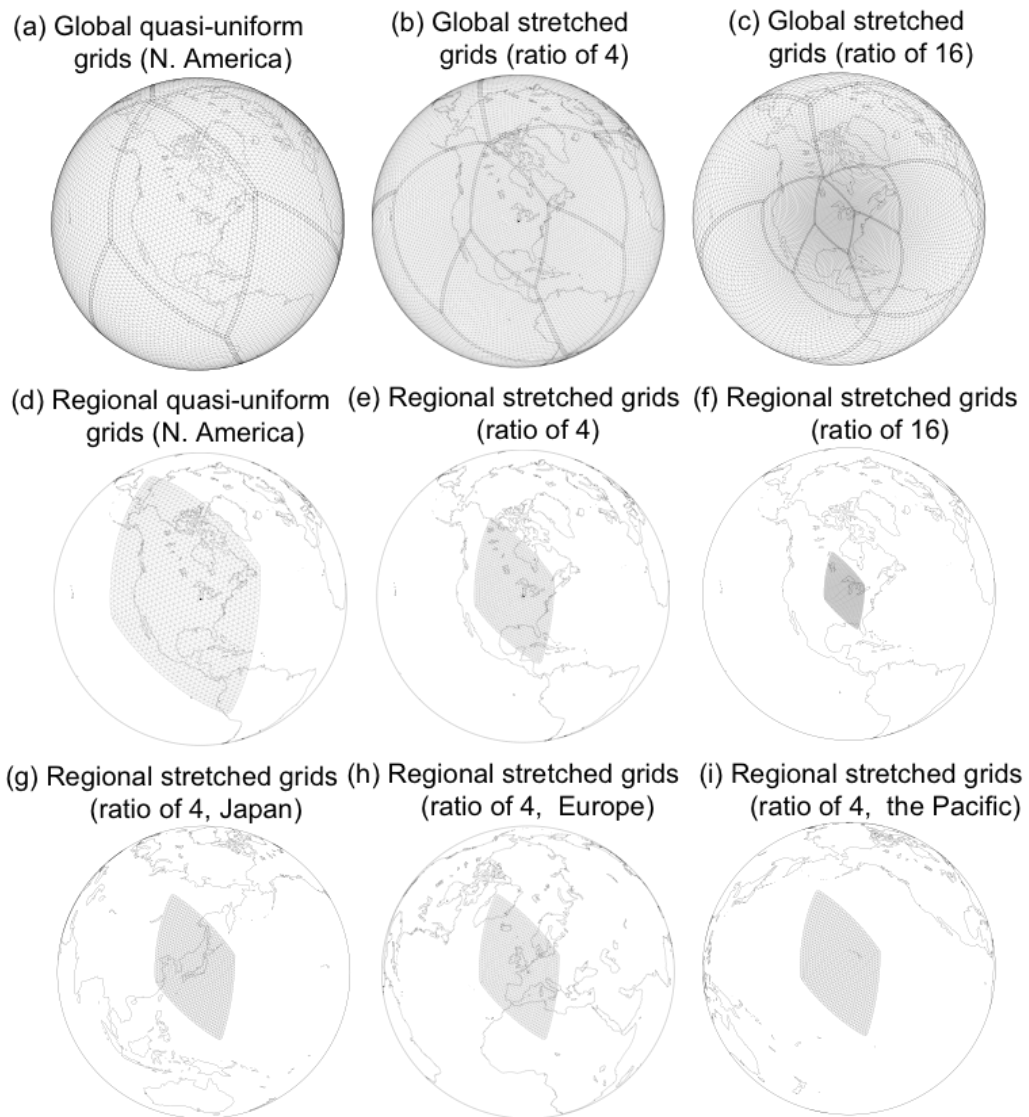


図 3-1 全球一様格子(a)、全球ストレッチ格子(b、c)、領域格子グリッド(d-i)を示している。領域格子グリッドでは一様格子(d)とストレッチ格子(e-i)があり、ストレッチ格子は指数が4と16が適用されている。また、焦点は北米、日本、西ヨーロッパとハワイ沖に置かれている。

(3) 領域モデルの不確実性と再現性

一部領域だけを計算する領域モデルでは、全球モデルと同じく物理過程などに依存するモデルバイアスが存在する。それに加え、境界データ(を算出するために使用した全球モデル)と領域モデルとの境界での不整合や重力波の反射等から発生する境界エラーが存在する。しかし、それらのエラーを分類して解析することは難しく、領域モデルでより手軽に高解像度実験がおこなえることから来る付加価値に対して、境界エラーの程度やその範囲は議論すべきモデルの不確実性として挙げられている。ここで使用する領域格子 D-NICAM は全球モデルの NICAM や S-NICAM とグリッドの位置や物理過程などのプラットフォームを共有するため、NICAM や S-NICAM の結果をそのまま境界データとして用いて、その結果を比較することでモデルバイアスの削減が可能となり、境界から発生するエラーの程度をより直接的に解析をすることが出来る。ここでは、地表面日射量と関係が深い地表面降水量を全球モデルと領域格子 D-NICAM とで比較をして種類の違うそれぞれの雲の再現性がどう変わるのかを検証することで、境界エラーの影響を分析する。まず北米を中心とした領域のサイズが違う3ケースと、焦点の位置を変えて日本、西ヨーロッパ、ハワイ沖を中心にした3ケースを2011年3月1日から2012年3月末までの395日間分で全球モデルと領域モデルの比較実験(図 3-1)を行なった。北米を中心とした実験では全球モデルとして、g-level7の全球一様格子 NICAM、ストレッチ格子 S-NICAM ではストレッチ指数16と4を適用した。また、その全球結果の3時間平均値を境界データに適用した領域格子 D-NICAM の結果と比較した。水平解像度は NICAM 格子と S-NICAM 格子のストレッチ指数4と16で、それぞれ56km、28km、14km となる。図 3-2 は3ヶ月分の季節ごとに毎1時間地表面降水量データを全球と領域格子モデルの時間相関値を示したものである。

図 3-2(1a-1c)、(2a-2c)、(3a-3c)、(4a-4c)がそれぞれ春期(2011年3月から5月)、夏期(2011年6月から8月)、秋期(2011年9月から11月)、冬期(2011年12月から2012年2月)の相関にあたる。時間相関値0.9以上の部分が赤色で表されていて、一概に冬の方が夏よりその割合が大きい。これは冬で見られる降水が大規模循環に伴う前線等によるものが多く、夏の降水で見られる規模の小さい数 km から数百 km の対流性の雲や熱帯性低気圧に比べて再現性が高いことが考えられる。対流性の雲はカオス的であるために境界エラーから発した環境場の小さな摂動に強く影響を受けることが原因と見られる。また領域がもっとも広い全球一様格子 NICAM と領域格子 D-NICAM の冬期の相関(4c)では赤道付近に発生する対流性の雲以外にも値が悪い箇所が見られるが、これは西から入ってくる大規模循環の温帯低気圧の移送中に領域内で徐々に誤差が発生することに由来している。

図 3-3 はある特定の時間での、夏期と冬期の典型的な地表面降水パターンを全球モデル(1a、2a、3a、1c、2c、3c)と領域モデル(1b、2b、3b、1d、2d、3d)で示した。また全球と領域モデル間の空間相関を散布図(4a-4d)で表し、その再現性を数値化した。どのケースでも夏期(1a、1b、2a、3b、3a、3b)は対流性のメソスケールの雲が領域の多くを占め、冬期(1c、1d、2c、3d、3c、3d)はスケールの大きい温帯低気圧が占めている。また、領域モデルでの再現性の違いは一目瞭然で、対流性の雲(4a-4c)の相関は0.5以下だが、温帯低気圧(4d-4f)の相関は一概に高くなっている。特にストレッチ格子のストレッチ指数16と4を使用した実験(4e、4f)では相関がほぼ1である。

他の領域での実験(日本近辺、西ヨーロッパ、ハワイ沖)でも毎1時間地表面降水量の3ヶ月間

の時間相関値を示した(図3-4)。図3-2と同様に日本近辺と西ヨーロッパでは夏期と冬期とで相関値の違いが見られる。日本近辺では夏期(2a)に貿易風からの対流性の雲や熱帯性低気圧の再現性の精度の問題から、また西ヨーロッパ(2b)では大陸上での対流性の雲の再現性が良くないために相関値が低い。また、ハワイ沖のケース(1c、2c、3c、4c)では貿易風からの対流性の雲が一年中領域の多くを占めるため、通年相関値が低くなっている。このように、モデルバイアスを極力低減させても、境界エラーの小さな摂動が雲の再現性に強い影響を与えることが分かる。特に、領域自体の大きさにも依存するが、大規模循環の温帯低気圧のようなスケールが大きい雲では影響はさほど見られないが、対流性の雲や熱帯性低気圧のようなカオス的な性質を持った雲に対しては、その影響は大きく、再現性は一概に低くなる。

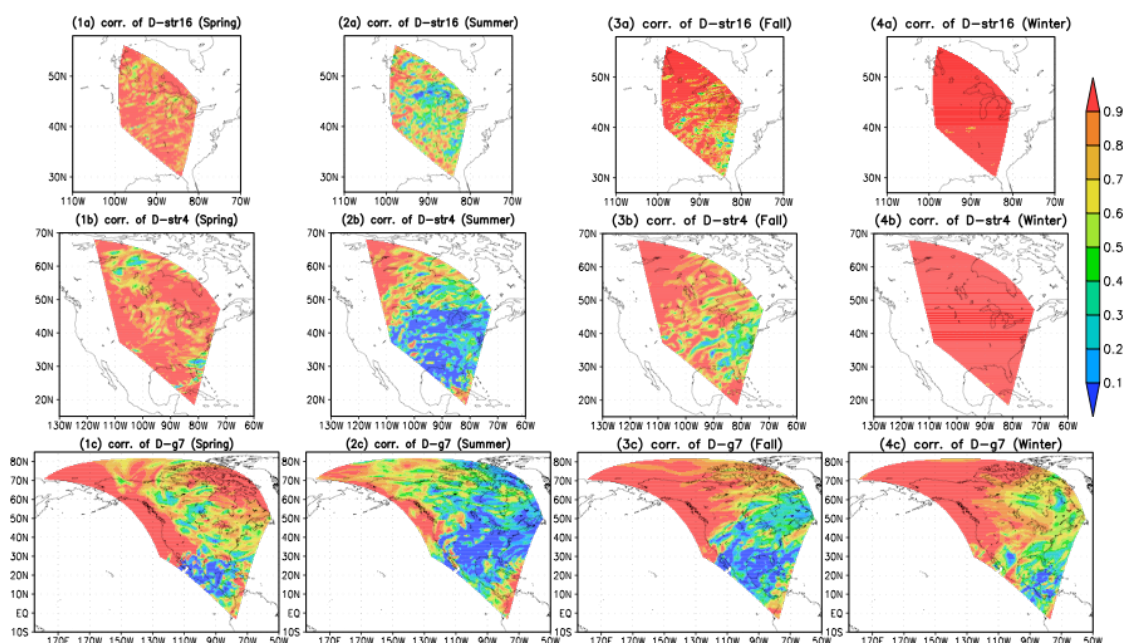


図3-2 全球モデルと領域格子モデルの1時間平均地表面降水量を3ヶ月分(季節)で時間相関を算出した。春期(1a、1b、1c:2011年3月から5月)、夏期(2a、2b、2c:2011年6月から8月)、秋期(3a、3b、3c:2011年9月から11月)、冬期(4a、4b、4c:2011年12月から2012年2月)の相関値をカラーバーで表示した。すべてのケースで焦点は北米に置いているが、一様格子とストレッチ格子の指数4と16を適用することで、異なる領域のサイズを使用した。

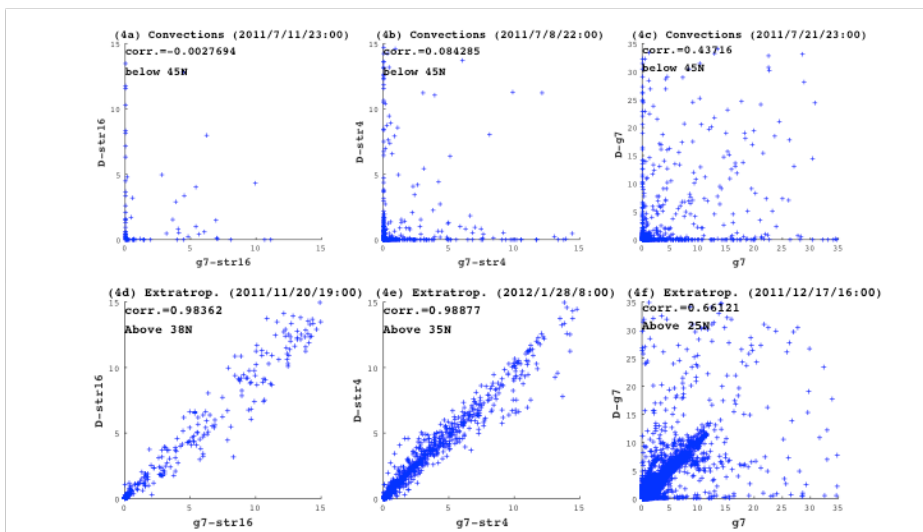
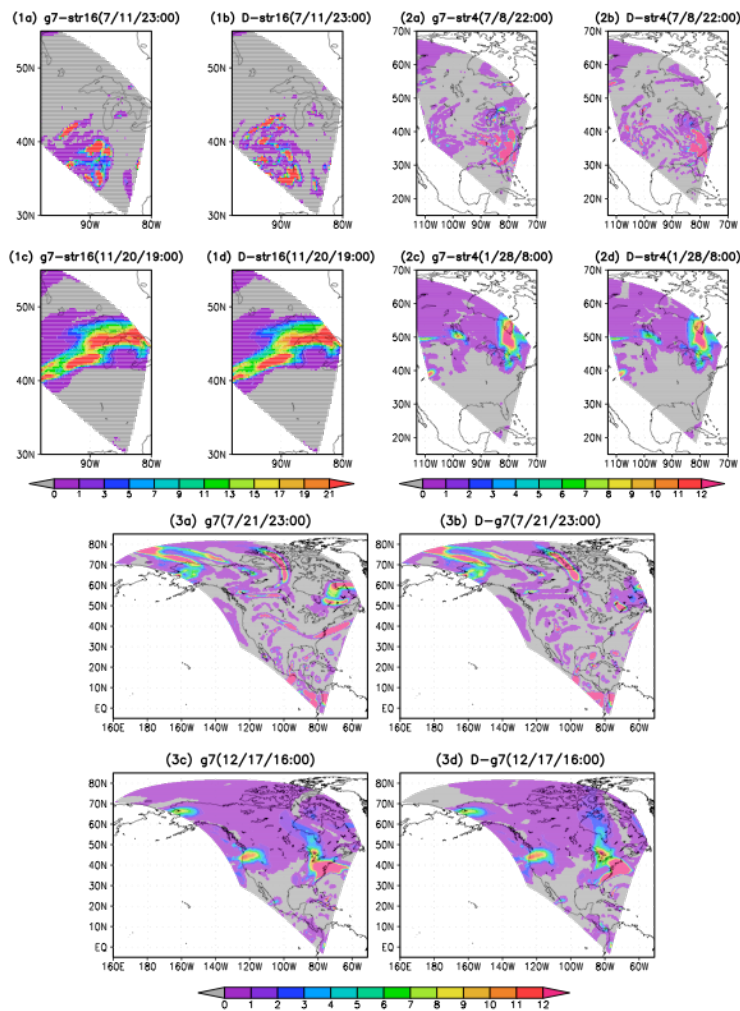


図 3-3 全球モデル(1a, 1c, 2a, 2c, 3a, 3c)と領域格子モデル(1b, 1d, 2b, 2d, 3b, 3d)の瞬間地表面降水量を夏期(2011年7月)、冬期(2011年11月、12月、2012年1月)で示した。また全球モデルと領域モデルとの夏期の対流性の降水(4a - 4c)と冬期の大規模な温帯低気圧による降水(4d - 4f)の瞬間地表面降水量の散布図を示した。

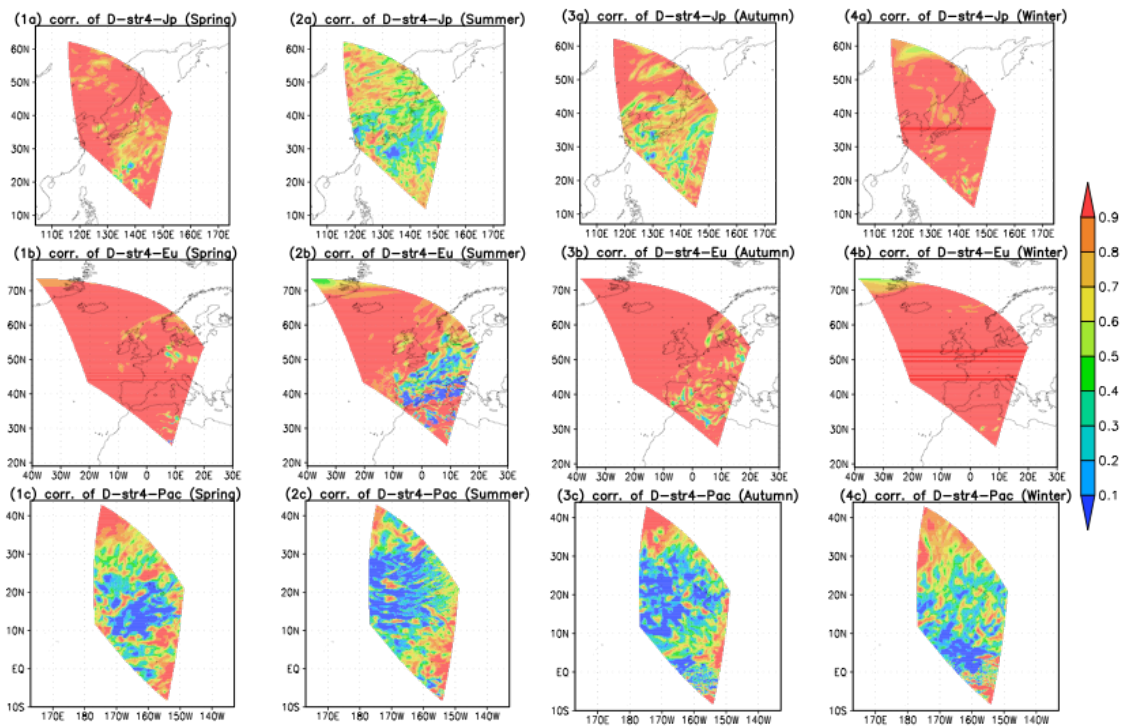


図 3-4 図 3-2 と同様に1時間平均地表面降水量の3ヶ月分(季節)の時間相関値をカラーバーで表示した。図 3-2 とは違いこの図ではストレッチ指数4を用いて、焦点を日本、西ヨーロッパとハワイ沖に置いた実験の結果を示している。

(4) 衛星データを用いての地表面日射量の再現性について

高解像度の衛星データをモデルに活用することで降水量や地表面日射量のより正確な将来予測の可能性を検証する。ここではひまわりの衛星データを使用して、日本を中心とした領域格子 D-NICAM の実験を g-level8 のストレッチ指数16 (領域内解像度約7km) で、2012年の5月と10月の二ヶ月分を行なった。衛星データの二次元光学的厚さと雲頂温度から三次元の雲水量のナッジデータを計算するための手法を次に説明する。まず、気象庁の領域 MSM データからモデル境界データを作り、また領域内の気象場(水平風、温度、大気圧、水蒸気混合比)も MSM データでのナッジを掛けて、D-NICAM で領域実験する。ここで用いるナッジ法は Newtonian relaxation nudging でその強さは一時間ほどに設定しており、領域内ナッジには領域内すべてのグリッド点で等しくこのナッジ法を使用している。領域モデル計算から三次元の温度場と持ち上げ凝結高度を算出して、その持ち上げ凝結高度を雲低高度として、また三次元の温度場のモデル結果と二次元衛星データの雲頂温度から雲頂高度を計算する。その雲低高度と雲頂高度の間で、光学的厚さから算出したカラム雲水量を用いて、雲水量を高度に従って線形に増加する仮定で分配することで三次元の雲水量のナッジデータを算出する。この手法で得られた雲水量のナッジデータを含め、MSM の気象場(水平風、温度、気圧、水蒸気場)の領域内ナッジの組み合わせで地表面日射量の再現性を比較する。

この比較実験(図 3-5(a))では D-NICAM を MSM の境界データだけで実験して領域内ナッジなしのケース(黒線)、境界データに加えて MSM の気象場を領域内でナッジしたケース(赤線)、衛星データからの雲水量(qc)の場だけを領域内でナッジしたもの(緑線)、MSM の気象場と衛星データからの雲水量の場の両方を領域内でナッジしたケース(青線)で行ない、2012年5月1日から30日までの日本時間正午12時時点でのモデル表面日射量と衛星データから直接算出した日射量の相関値を示して比較した。

一概に、MSM の気象場と衛星データの雲水量の場の両方を領域内でナッジしたケース(青線)の相関値がもっとも高い日が多く、次に MSM の気象場のナッジだけ(赤線)のケース、衛星雲水量データのナッジだけ(緑線)、最後に領域内ナッジなし(黒線)のケースと続く。特にその傾向が顕著に見られるのは5月11日正午12時で気象場の領域内ナッジがある青線と赤線は0.8近くまで相関があり、気象場の領域内ナッジがない緑線と黒線は0.5以下の相関になる。図 3-6 の地表面日射量で示される様に、5月11日正午12時点には大規模な前線の雲が広範囲に存在し、このようなケースでは雲水データのナッジより気象場のナッジの方が効果的であることが分かる。

逆に5月7日正午12時では衛星雲水データのナッジだけ(緑線)の方が MSM の気象場のナッジ(赤線)だけよりも効果的であり、その場合は対流性の雲がより多い傾向がある(図 3-7)。

同様に10月1日から30日の正午12時時点の相関値(図 3-5(b))でも、値が高い日時が多いケースは気象場と雲水量の場の両方を領域内でナッジした青線で、次に MSM の気象場のナッジだけ(赤線)、衛星からの雲水量データのナッジだけ(緑線)、最後に領域内ナッジなし(黒線)のケースと続く。また、図では示さないがここでも前線の様な大規模な雲がある場合は MSM の気象場のナッジが効果的であり(10月8日正午12時)、熱帯低気圧の様なカオス的な対流性の雲の場合(10月16日正午12時)では衛星雲水量データのナッジが非常に効果的であることが確認された。

将来予測実験では、午前11時時点で領域内ナッジを止め、その後は境界データだけで走らせて、領域内ナッジの効果がどの程度持続されるのかを検証した。

図 3-8 ではナッジを止めた後の地表面日射量の相関をより詳細に検証する為に、衛星データが存在する昼間(9時から16時まで)は1時間毎に、領域内ナッジを止めてから30時間後まで、モデル結果と衛星データとの相関値を比較した。ここでは例として、ナッジを止めた時刻を5月7日正午11時、5月11日正午11時、10月7日正午11時で検証した。図は気象場と雲水量の場の両方を領域内でナッジしたケース(青線)、MSM の気象場のナッジだけ(赤線)、衛星からの雲水量データのナッジだけ(緑線)のケースでナッジを止めた場合を同じ色の点線で示している。ここで示されたのは、ナッジを止めた後5時間程度での相関値は若干落ちるものの、それなりに高い水準を保っていて最初から領域内ナッジを行なっていないケース(黒線)に比べ相関が良い状態が続くこと。また、ナッジを止めてから一日以上はその効果が保たれていることも多く、次の日にも黒線に近づいてはいるもののそれより相関値が良い場合が多く見られる。これを踏まえると、ナッジの最適化を行ない、大規模な雲か対流性の雲かの種類でナッジの重みを変えることで、良い相関が望め、また、その効果は領域内ナッジを止めても一日程度は持続する可能性が高い。

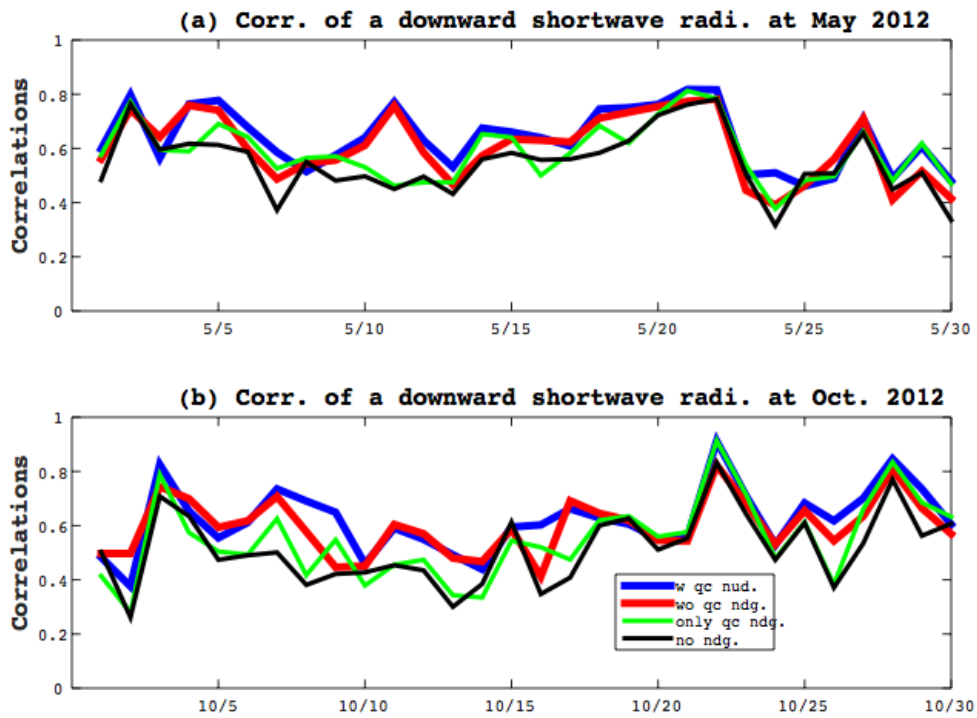


図 3-5 正午12時時点での領域モデル実験の地表面日射量と衛星データから算出された地表面日射量との空間相関を計算し、(a)は2012年の5月1日から30日まで、(b)は2012年の10月1日から30日までの相関値を示した。黒線は境界データのみで領域内ナッジなし、緑線は衛星データからの雲水量の領域内ナッジ、赤線は MSM データからの気象場(水平風、温度、気圧、水蒸気場)の領域内ナッジ、そして青線はMSM データからの気象場と雲水量の領域内ナッジの両方を適用した。

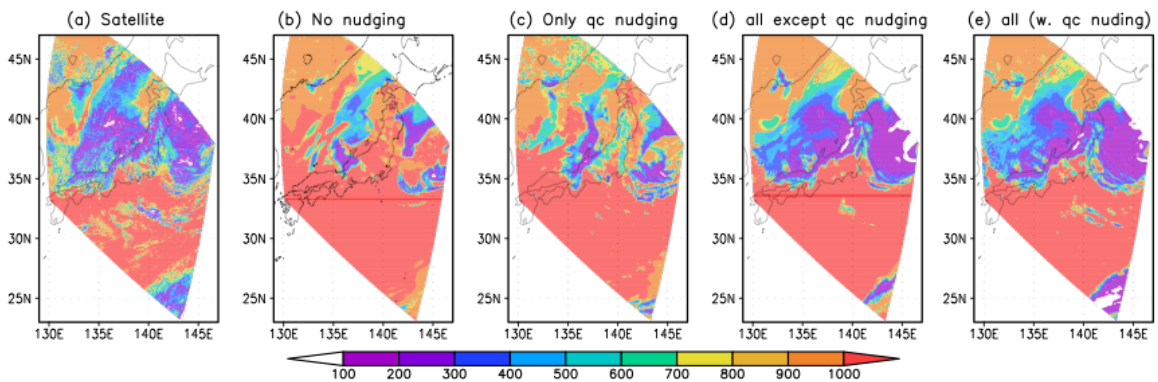


図 3-6 5月11日正午12時時点で地表面日射量をカラーバーで示している。左から、衛星データから直接算出したケース、境界データだけでのモデル領域実験、衛星データから計算した雲水量の領域内ナッジを使用したモデル実験、MSM の気象場の領域内ナッジのモデル実験、衛星データからの雲水量とMSM の気象場の両方の領域内ナッジのモデル実験結果を表示した。

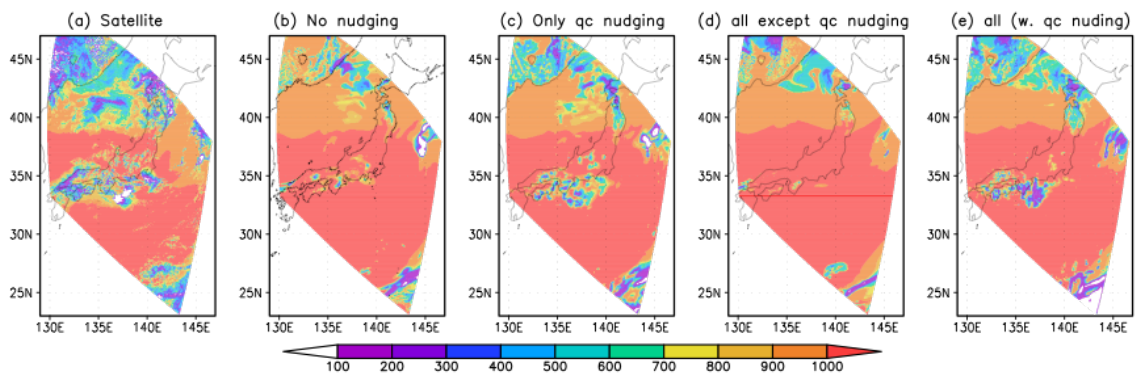


図 3-7 図 3-6 と同様であるが、5月7日正午12時点での地表面日射量をカラーバーで示している。

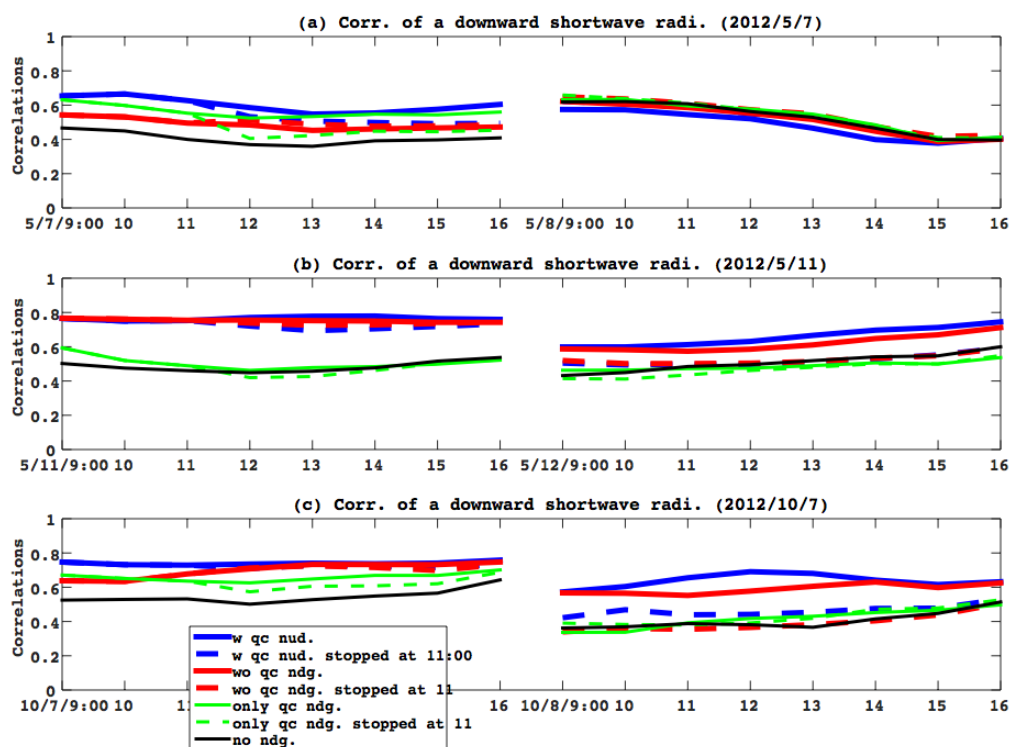


図 3-8 図 3-5 と同様に、領域モデル実験の地表面日射量と衛星データから算出された地表面日射量との空間相関を計算した。図 3-5 と異なり、衛星データが存在する昼間(9時から16時まで)は1時間毎にモデル結果との相関値を算出した。また実線は図 3-5 と同じ色で示されているが、領域内ナッジを午前11時に止めて、その後、境界データだけで実験したものを点線で示している。(a)は5月7日の午前11時に、(b)は5月11日の午前11時に、また(c)は10月7日の午前11時に領域内ナッジを止めた実験を点線で示し、止めなかった実験はそのまま実線で次の日の16時まで表示している。

(5) 参考文献

Satoh, M., Matsuno, T., Tomita, H., Miura, H., Nasuno, T., Iga, S., 2008: Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM) for global cloud resolving simulations. *J. Computational Phys.*, 227, 3486-3514.

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

Skamarock, W. C., and Coauthors, 2008: A description of the Advanced Research WRF version 3. NCAR Tech. Note NCAR/TN-4751STR, 125 pp. [Available online at http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf.]

Tomita, H., 2008: A stretched grid on a sphere by new grid transformation. *J. Meteor. Soc. Japan*, 86A, 107-119.

3-2-4 品質保証とデータ異常検出(千葉大)

(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)の検証は全くなされていないといえる状況である。本研究では、その初期および定常的なデータ質検証に加え、想定外の異常検出も可能とする衛星データ質評価のための地上システムを構築する。地上システムの構築は国際展開等も視野に入れ実施する。上記の衛星データ質評価は、データ利用者が科学的に裏付けられたデータを定常的に安心して利用することにつながるため、社会実装された形で持続的なEMSシステムの一部を担うと期待される。これまでの研究から、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。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、千葉などの主要なSKYNET地上観測サイト(全天日射量とその変動因子を同時に観測)において、必要な整備・最適化等を集中的に行い、試験連続観測を継続的に実施した。ひまわり8号のみならず他の複数の雲・エアロゾル衛星観測の重要な検証データのニーズが原動力のひとつとなり、SKYNETの枠組みにおいて実施されるスカイラジオメーターによる観測のサイト数が増加している。このような当該研究分野の側面からも、なるべく多くのサイトについてのオンラインデータ処理・提供システムが求められ、これまでにない一貫した形の共通自動解析アルゴリズムの開発の必要性が生じた。

そのような中、まずは、解析アルゴリズムの中核プログラムを最新バージョンであるSKYRAD.pack v5.0 (Hashimoto et al., 2012)へ完全移行すると共に、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)の新規開発を行った。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

ム解析は困難であったが、SR-CEReS では過去 30 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良したことにより、準リアルタイム解析が可能となった。また、 F_0 算出への大気中の屈折の影響等を最小に抑えるための一貫した統計的処理方法も検討し、高精度化を図った。本研究ではまた、SR-CEReS の評価を国際レベルで実施するために、NASA の集中観測キャンペーン (KORUS-AQ) の一部として、2016 年 5-9 月に韓国・ソウルの延世大学において、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) 等との同時観測を実施した。

図 4-1 は、2016 年 5-9 月に韓国・ソウルの延世大学で行ったスカイラジオメーターによる観測について、SR-CEReS の Improved Langley 法で算出した F_0 の時系列を示す。異なる波長の F_0 値が異なる色で示されている。どの波長においても、安定して毎日 F_0 が算出できていることが分かる。

7 月から 8 月にかけて、 F_0 値がわずかに増加した。この期間、National Centers for Environmental Prediction (NCEP) の再解析データによれば、屋外の気温の日平均値は 20°C を越えていた。それと対応して、スカイラジオメーター内部の機器温度 (可視チャンネル、日中の平均値) は 30°C を越えていたことが分かった (図 4-1)。このことから、機器温度が上昇したことで F_0 が上昇したことが示唆された。この結果に加え、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 の単一散乱アルベド (SSA) データを比較したところ、両者の値は概ね ± 0.03 以内で一致したことが分かった。スカイラジオメーターの SSA データは、 F_0 の確度に依存する (Khatiri et al., 2016)^{H27 年度成果}。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ていることが示唆された。

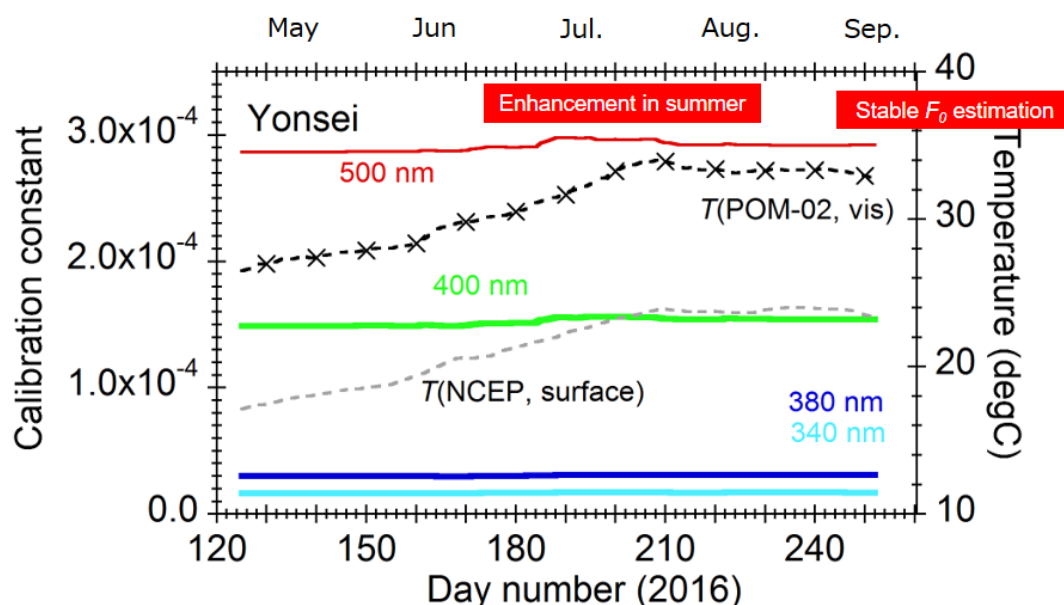


図 4-1 2016 年 5-9 月に韓国・ソウルの延世大学において測定されたスカイラジオメーターのデータから SR-CEReS の Improved Langley 法で算出した F_0 の時系列。水色、青、緑、赤はそれぞれ、波長 340, 380, 400, 500 nm の F_0 値を示す。灰色の点線は NCEP の地表面気温の日平均値、黒の点線はスカイラジオメーターの機器温度 (可視チャンネル、日中の平均値) を示す。

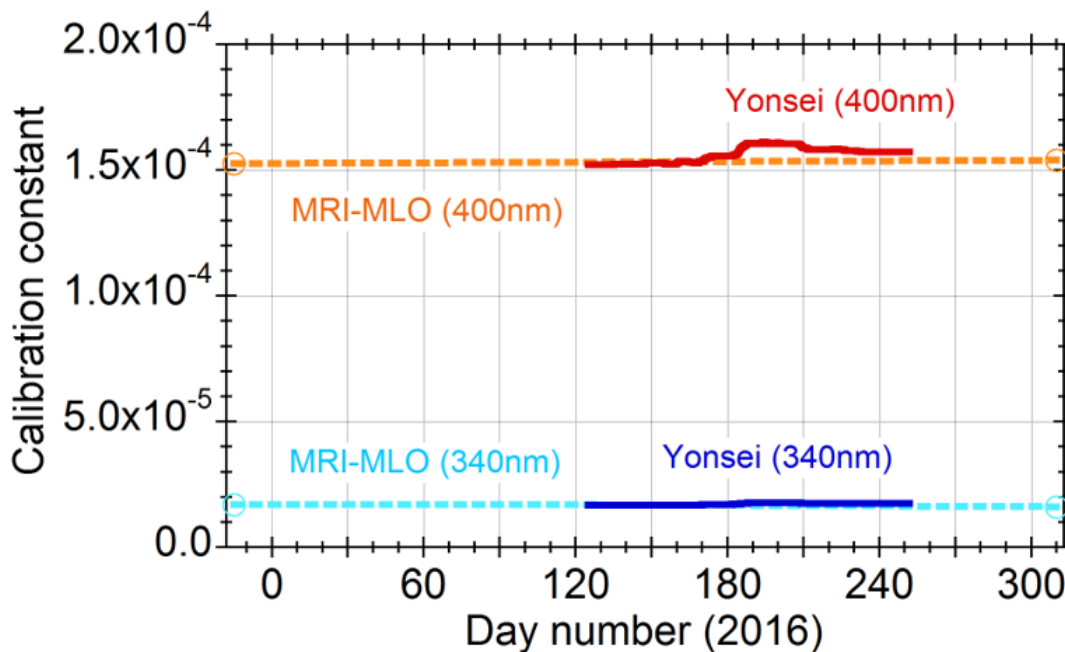


図 4-2 スカイラジオメーターの千葉大学標準機の F_0 値の時系列。青と水色は波長 340 nm の値を、赤と橙は 400 nm の値を示す。実線は延世大学での観測データから SR-CEReS の Improved Langley 法で算出した F_0 値、点線は Langley 法に基づいて算出された F_0 値。H27 年度に気象研究所での検定比較観測から算出された F_0 と H28 年度にマウナロア観測所での観測から算出された値が直線(点線)で結ばれている。

本研究ではまた、2016 年 10-11 月にハワイ・マウナロア観測所において千葉大学標準機の検定観測を行った。この検定観測データを Langley 法で解析し、 F_0 を求めた。他方、2015 年 12 月には気象研究所にて同機の検定比較観測が行われ、その直前にマウナロア観測所で検定された気象研究所のスカイラジオメーターの F_0 を千葉大学標準機に転写した。これらマウナロア観測所での観測と Langley 法に基づく F_0 を、図 4-2 において丸と点線で示す。図 4-2 にはまた、図 4-1 で示した Improved Langley 手法による F_0 の時系列もプロットされている。これらの比較から、比較的温度が低く、装置が良く温調されていると想定される期間では、両手法で算出された F_0 がとても良く一致したことが分かった。機器温度が比較的高いときは顕著な差が生じた。このことから、マウナロア観測所での観測と Langley 法に基づく F_0 値は、機器の温調が不十分な条件下においては、不適切になる場合があり得ることが分かった。本研究ではさらに、2016 年 11 月に千葉キャンペーン 2016 集中観測を実施した。同期間におけるスカイラジオメーターの F_0 の時系列を図 4-3 に示す。 F_0 はほぼ一定であることから、SR-CEReS における F_0 の決定精度が極めて高いことが確認された。

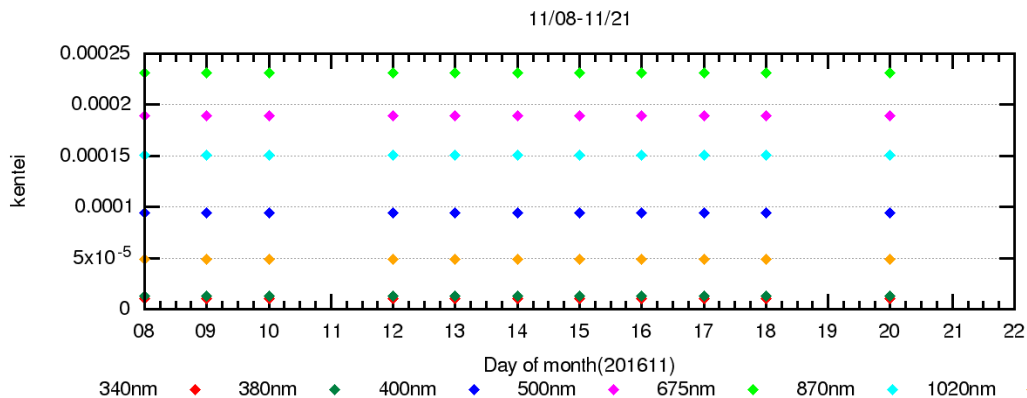


図 4-3 2016 年 11 月に実施した千葉キャンペーン 2016 集中観測におけるスカイラジオメーターの F_0 の時系列。SR-CEReS の Improved Langley 法で求められた値。波長毎の値が異なる色で示されている。

これらの研究をもとに、地上日射計の全天日射量の計算とともに、その変動因子として重要なエアロゾルのオンライン自動データ処理システムを構築し、定常運用を開始した。さらには、ユーザーの利便性が向上するよう SKYNET ホームページを改良し、関連の各種 SKYNET データの公開を開始した。今後は、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・誤差要因説明・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。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。

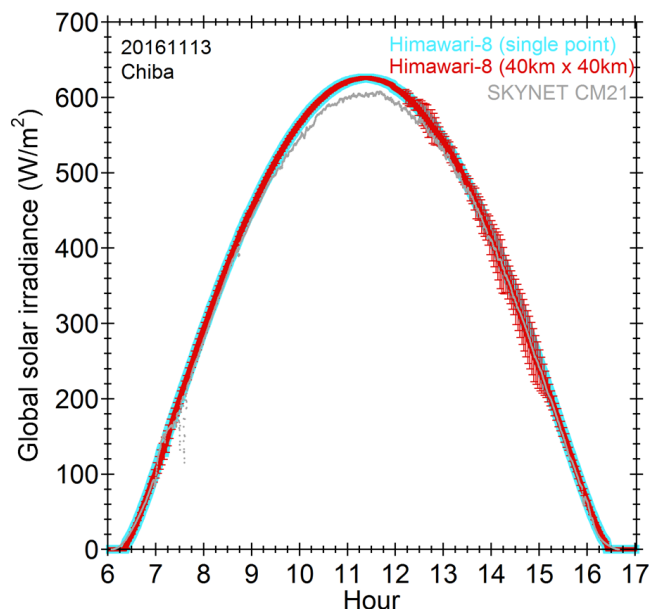


図 4-4 千葉キャンペーン 2016 集中観測期間の 2016 年 11 月 13 日における SKYNET 千葉サイトでの、ひまわり 8 号の全天日射量データと地上設置型全天日射計(CM21)のデータ(灰色)の日変化。千葉サイト上空のひまわり 8 号の値が水色で、千葉サイトから東西南北 40 km 四方に含まれるひまわり 8 号データの平均値が赤で示されている。その標準偏差はエラーバーで示されている。標準偏差が非常に小さいことから千葉サイト周辺は晴天であったことが分かる。

図 4-4 は、SKYNET 千葉サイトにおいて 2016 年 11 月 9～22 日の 2 週間に実施した集中観測(千葉キャンペーン 2016)のうち、最も天気の良い 11 月 13 日における、ひまわり 8 号の観測から推定した全天日射量と地上に設置した全天日射計による全天日射量の比較を示す。千葉サイトにおける全天日射計のデータは灰色で、ひまわり 8 号のデータ(1 km×1 km グリッド)は水色で示されている。加えて、千葉サイトにおける全天日射量は千葉上空だけでなくその近傍の雲・エアロゾル・水蒸気等の影響も受けるため、その影響を調べるために、千葉サイトを中心とした 40 km×40 km の領域におけるひまわり 8 号データの平均値と標準偏差も赤で示す。平均値が千葉サイト上空の値とほぼ一致し、標準偏差も極めて小さいことから、この日は日中、晴天であったことが分かる。このことは、同サイトで同時稼働している全天カメラの画像からも確認できた。このような全天カメラの 2 分毎の画像から雲の小片が 7 時 20-40 分頃に太陽直達光の一部を遮ったことが分かった。その時間帯を除き、ひまわり 8 号の全天日射量推定値は全天日射計の地上観測値と 6%以内、あるいは、20 W/m² 以内で一致したことが分かった(図 4-4)。このように、ひまわり 8 号の観測に基づく面的な全天日射量推定データは EMS に役立つことが期待される。このことは Kawano et al.(2016)^{原著論文 2)}の研究からも支持される。しかしながら、例えば、8 時頃(11 時頃)では全天日射計の値は 279 W/m² (602 W/m²)であったのに対し、ひまわり 8 号の値は 295 W/m² (621 W/m²)であり、ひまわり 8 号が系統的に 6%(3%), あるいは、16 W/m² (19 W/m²), 過大であった。この系統的な差は前年に 2 台の全天日射計の同時観測で見積もられた全天日射計の測定誤差(<2%)よりも大きかった。

晴天条件下において、ひまわり 8 号の全天日射量推定値と全天日射計の地上観測値の差を生じさせる原因として、ひまわり 8 号のデータに考慮されていないエアロゾルの効果が挙げられる。エ

エアロゾルの全天日射量への影響を調べるために、放射伝達モデル SBDART (Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer) (Ricchiazzi et al., 1998)を用いた計算を行った。図 4-5 は、SBDART モデルで計算した全天日射量が波長 500 nm のエアロゾル光学的厚さ(AOD)の関数としてプロットされている。この計算において、オングストローム指数 1.0, 単一散乱アルベド 0.95, アシンメトリーファクター0.68, 可降水量 2.0 cm を仮定した。また、地表面アルベドは千葉付近の MODIS(中分解能撮像分光放射計)による観測に基づき、波長に依存する形で 0.05-0.10 を仮定した。図 4-5 より、AOD の増加に伴い、全天日射量が減少することが分かる。このシミュレーションによれば、太陽天頂角 50 度において、千葉におけるおおよその年平均値である AOD = 0.2 の全天日射量は、AOD = 0.0 の値に比べて、系統的に約 30 W/m² (約 5%), 太陽天頂角 70 度においては系統的に約 31 W/m² (約 10%), 減少する。

2016 年 11 月 13 日において、千葉で同時に稼働していたスカイラジオメーターや多軸差分吸収分光法(MAX-DOAS)(e.g., Irie et al., 2015; Frieß et al., 2016 ^{原著論文})装置による観測から、AOD は 0.1-0.3 程度であったことが分かった。これらのデータと上記のモデル計算値から、この日に生じた全天日射量の系統的な差は、ひまわり 8 号データに考慮されていないエアロゾルの効果で概ね説明できることが分かった。

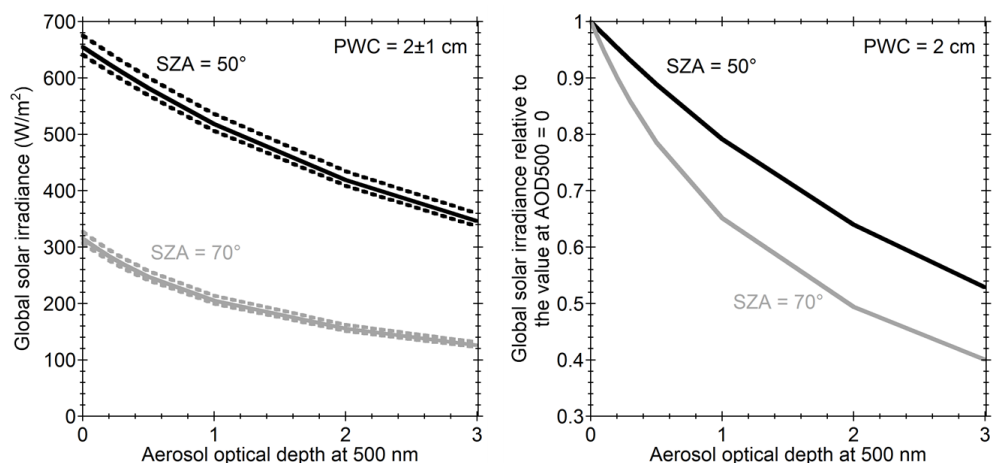


図 4-5 (左)放射伝達モデルで計算した全天日射量とエアロゾル光学的厚さ(波長 500 nm)の関係。太陽天頂角が 50 度と 70 度の計算値がそれぞれ黒と灰色で示されている。実線と点線で可降水量 2±1 cm の計算値を示している。(右)エアロゾル光学的厚さが 0 のときの全天日射量に対する相対値が示されている。

この千葉キャンペーン 2016 集中観測のケーススタディーの結果をもとに、解析を通年データに拡張した。図 4-6 では、千葉サイトの 2016 年 1 月 1 日から 12 月 31 日までの 1 年間において、ひまわり 8 号の全天日射量推定値と全天日射計の地上観測値の差がスカイラジオメーターの AOD データの関数としてプロットされている。ケーススタディーより、全天日射量は観測点上空だけでなく近傍の雲・エアロゾル・水蒸気等の影響も受けるため、千葉サイトを中心とした 40 km×40 km の領域におけるひまわり 8 号データの標準偏差を計算し、その標準偏差が 10 W/m² 以下と小さいときに、晴天であるとみなした。図 4-6 には、この条件で選ばれた晴天条件下におけるデータのみが

示されている。この通年データの解析より、ひまわり8号の全天日射量推定値と全天日射計の地上観測値の差がAODと強く相関することが分かった。相関関係の傾きから、AODが0.2増加するとひまわり8号の値が約 30W/m^2 、過大になる傾向があることが分かる。前述した放射伝達モデルによるシミュレーション結果と定量的にも良く一致する。このことから、ひまわり8号のデータに考慮されていないエアロゾルの効果によって、ひまわり8号の値が過大となっていることがより明確となった。日本はエアロゾルやその前駆体を含む大気汚染物質の重要な排出源である大陸の風下に位置している(Irie et al., 2016^{原著論文7)}; Chandra et al., 2016^{原著論文10)}ため、このエアロゾルの影響を考慮することは極めて重要である。本研究で得られた結果はまた、放射伝達モデルに適切なエアロゾル等の情報をインプットすれば、ひまわり8号の全天日射量データの補正が可能であることを強く示唆する。ひまわり8号エアロゾルデータについては、SKYNETデータを使った予備的検証により、その有効性の議論が始まったところである(Yumimoto et al., 2016)^{原著論文6)}。他方、AODが非常に小さいとき、ひまわり8号の値は 20W/m^2 程度、過小となっていることも図4-6から分かる。この原因については引き続き、調査が必要である。これらの誤差を想定誤差とし、図4-6の相関関係を使ってひまわり8号のデータを補正すると、ほとんどのデータは地上観測値と 20W/m^2 以内で一致することが分かった。次章で述べるように、この結果をもとに、H28年度は、想定外の異常を検出する基準を定めた。

今後は、ひまわり8号の複数年比較解析を実施する。また、それに基づき、想定内誤差の高精度な評価を実施する。

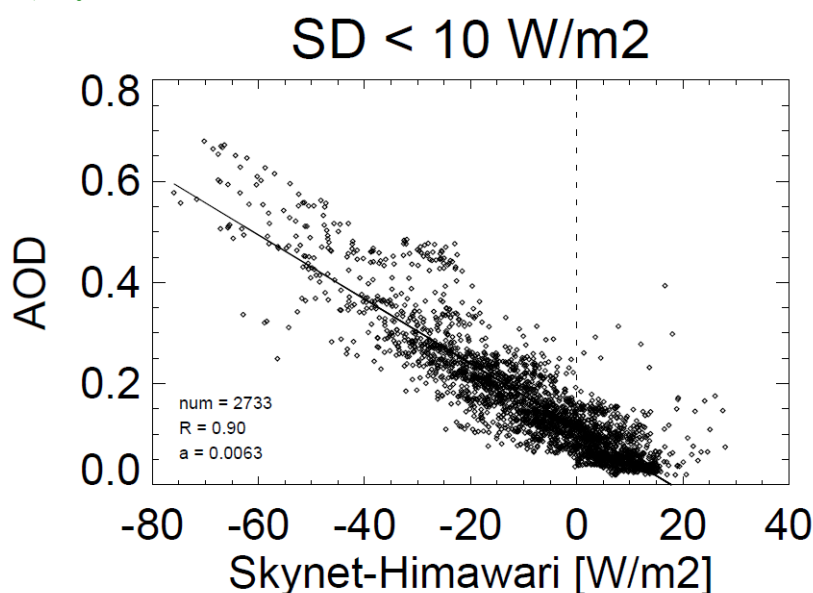


図4-6 千葉サイトの2016年1月1日から12月31日までの1年間における、ひまわり8号の全天日射量推定値と全天日射計の地上観測値の差とスカイラジオメーターのAODデータの相関関係。千葉サイトを中心とした $40\text{km} \times 40\text{km}$ の領域におけるひまわり8号データの標準偏差が 10W/m^2 以下と小さく、晴天とみなせるデータのみが示されている。

(4) 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。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。

通年データを活用した比較解析の結果は前章で述べた。この結果に基づき、H28 年度は、ひまわり 8 号の 40 km×40 km の面データの全天日射量の標準偏差が 10 W/m² 以下の時に晴天とみなし、その条件下において、地上の全天日射計のデータとの比較において差が 20 W/m² を上回った場合を、想定外異常の予備的基準とした。

これに加えて、家庭を含め社会に広く異常検出システムが実装できるように、自動かつ低消費電力の異常検出システム開発のための予備研究を実施した。安価なシングルボード PC である Raspberry Pi に着目し、その利用を検討した。大気観測において時刻の記録は不可欠であるが、Raspberry Pi には内部時計が搭載されておらず、また、停電時なので電力供給が断たれた際に自動再起動が行えない。そのため、本研究では独自で電源制御基板を開発し、インターネットにも接続されていない環境においても、時刻を保持できるようにした。太陽光スペクトル測定用の汎用の分光器を接続し、毎日定時にシステムの自動シャットダウン・起動や、スペクトル自動計測が行えることが確認された。システムに入力される電流や電圧も計測する機能も付加した。これらの機能を付加した Raspberry Pi は、太陽光発電やバッテリーと連結することによって、自立した異常検出システム構築の基盤として活用できる見通しを得ることができた。今後は、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改良に着手する。

(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。H28年度は、全天日射量の変動因子として極めて重要なエアロゾルの影響を高精度で理解するために、地上検証観測のオンライン自動処理システムを構築し、定常運用を開始した。そのシステムを活用してひまわり8号の全天日射量データを検証したところ、ひまわり8号のデータに考慮されていないエアロゾルの効果によって、ひまわり8号の値が過大となっていることが明確となった。相関解析等から、AOD が 0.2 増加するとひまわり8号の値が約 30 W/m²、過大になる傾向があることが分かった。また、AOD が非常に小さいとき、ひまわり 8 号の値は 20 W/m² 程度、過小となっていることも分かった。この原因については引き続き、調査が必要である。これらの系統誤差の補正を施すと、ほとんどのデータは地上観測値と 20 W/m² 以内で一致することが分かった。これらの結果に基づき、系統誤差を補正したひまわり 8 号のデータと地上の全天日射計のデータの差が 20 W/m² が上回った場合を想定外異常の予備的基準とした。本研究の衛星データ質評価は、データ利用者が科学的に裏付けられたデータを定常的に安心して利用することにつながるため、社会実装された形で持続的なEMSシステムの一端を担うと期待される。

(6) 参考文献

Hashimoto, M., T. Nakajima, O. Dubovik, M. Campanelli, H. Che, P. Khatri, T. Takamura, and G. Pandithurai, 2012: “Development of a new data-processing method for SKYNET sky radiometer observations”, *Atmos. Meas. Tech.*, 5, 2723–2737.

Irie, H., T. Nakayama, A. Shimizu, A. Yamazaki, T. Nagai, A. Uchiyama, Y. Zaizen, S. Kagamitani, and Y. Matsumi, 2015: “Evaluation of MAX-DOAS aerosol retrievals by coincident observations using CRDS, lidar, and sky radiometer in Tsukuba, Japan”, *Atmos. Meas. Tech.*, 8, 2775–2788, doi:10.5194/amt-8-2775-2015.

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, doi:10.1002/2015JD023976.

Ricchiazzi, P., S., Yang, C., Gautier., and D., Sowle, 1998: “SBDART: A research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the Earth’s atmosphere”, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 79, 2101–2114.

3-2-5 気象データの変動解析(東海大)

(1) 衛星観測雲特性量を用いた地上日射量の変動特徴の推定手法

地表面日射量の変動性は、太陽光発電の出力の変動の原因となる。このため、日射変動に関する情報や知見は太陽光発電システムの導入時や、導入後の運用時に有益な情報となると考えられる。

これまでの地表面日射量の変動に関する研究は、主に地上観測により得られた日射量データを使用して行われてきた。地上観測の利点は、データの品質をコントロールされたデータを得ることができ、また比較的短い時間解像度のデータが得られる点である。しかし、空間的な広がりを持ったデータを得ることは困難が伴う。

H28 年度の研究では、新しい地表面日射量変動の情報として、空間的な広がりを持った情報を提供するためのデータ解析手法を提案した。本研究に関する詳細な議論は、Watanabe et al. 2016a 原著論文¹⁶⁾ において行っている。

提案をした手法は、衛星観測データから得られた雲特性量と地上観測から得られた日射量変動の特性量との関係を利用している。衛星データは、地球観測衛星 Terra と Aqua に搭載された MODIS センサによる観測から得られる雲特性量である。本研究時点では、解析のために長い期間のデータが必要であったために MODIS データを使用した。HIMAWARIS号などの新しい静止気象観測衛星のデータへの応用も可能であると考えている。日射量変動の特性量は前年度の研究成果(Watanabe et al. 2016b) 原著論文¹⁵⁾ を用いて、3つの特性量(平均、標準偏差、Sample entropy)による日射量変動の定量化手法を行った。

まず、日射量変動特性量を対象としてクラスター分析を行い、変動の特徴に応じた区分(変動区分)へ分類した。本研究では区分数を6とした。この区分化により、各変動区分における雲特性量の特徴を知ることができる(図 5-1)。このようにして得られた各変動区分に対する雲特性量の関係をもとに、雲特性量から変動区分を推定する判別器の設計を行う。本研究では、統計的判別分析により、判別器を作成し、性能の評価を行った。以上の手順により、衛星観測から得られた雲特性量から、空間的な広がりをもった地表面日射量の変動に関する特徴の推定が可能となった(図 5-2)。

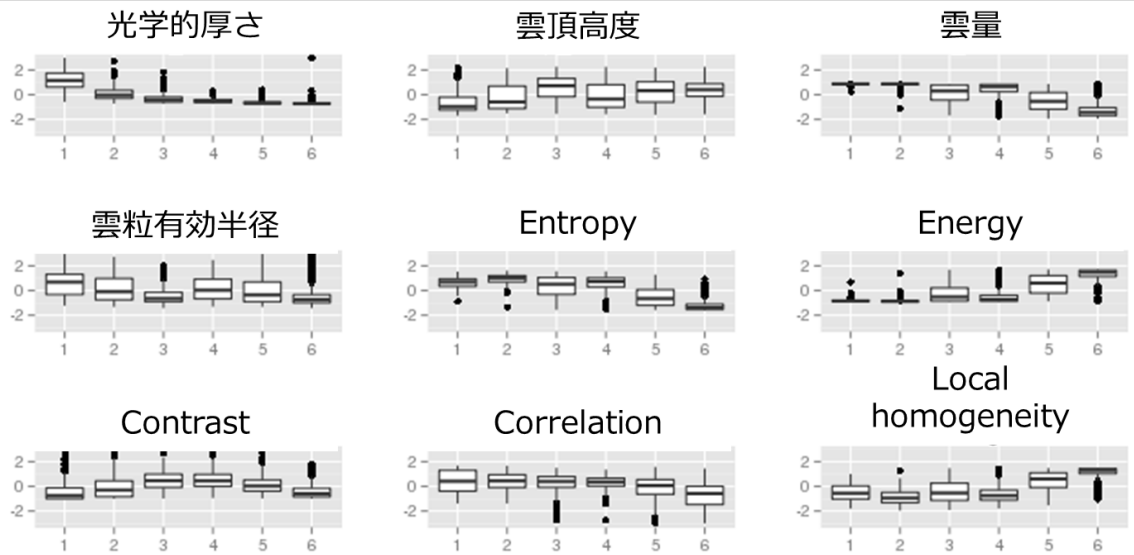


図 5-1 各変動区分の雲特性量の分布。横軸は変動区分をあらわす。それぞれの特性量は規格化されている。

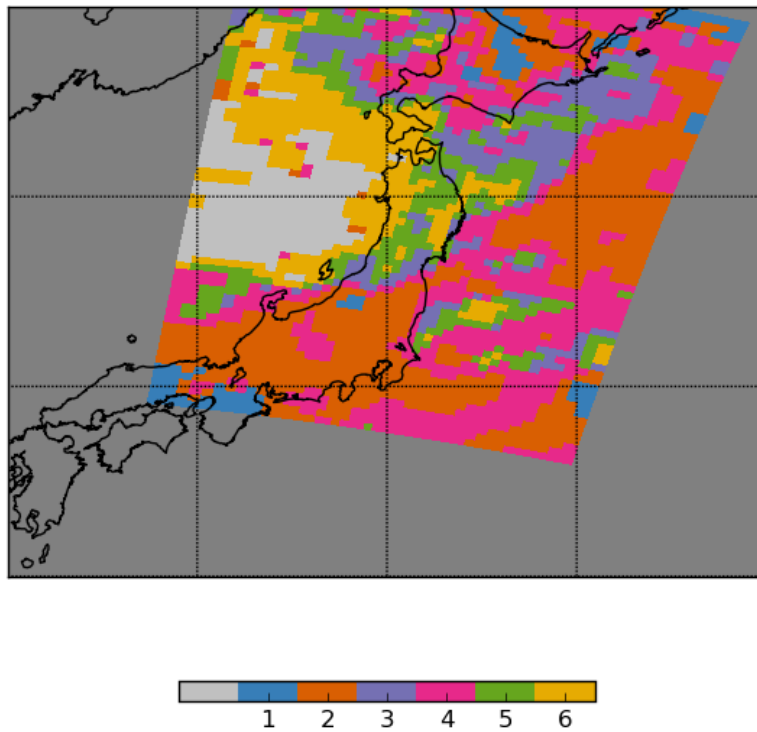


図 5-2 衛星観測雲特性量から推定された日射変動区分。色は変動区分に対応し、灰色は晴天(雲がない)に対応する。

(2) 地域規模での日射変動と総観規模気象場との関係

1日以内での地表面日射量の変動にとっては雲が最も重要な要因である。中緯度に位置する日本では、日々の気象現象は総観規模の気象現象に強く影響を受けている。総観規模気象現象とそれに起因して生じる雲の関係性については、気象学分野においては多くの知見が得られている。このような背景に基づいて、日射量の変動性が強くなる時の総観規模気象場の特徴について解析し、その特徴を明らかにした。本研究の結果は、太陽エネルギー学会^{口頭発表 48)}や電気学会全国大会^{口頭発表 61)}で発表をし、気象学分野だけでなく関係分野の研究者への情報提供と異分野交流を行った。

解析手順の概要は、以下のとおりである。

1. 九州地域での7つの観測地点を対象にし、地表面日射量の変動性の強い時刻を抽出する。強い変動性は、ローパスフィルターをかけた後の日射量時系列の変化率(ramp rate: RR)の絶対値が、基準値より大きい時とした。九州での観測点のうち、複数(本解析では4つ以上)で強い変動性が抽出された時刻を解析対象とする。
2. 気象庁メソ気象予測モデル(MSM)データの初期値データを使用する。海面更正気圧(MSLP)を対象に主成分分析(PCA)を行い、面的なMSMデータの次元圧縮をする。得られた主因子(PC)のうち、固有値の大きいほうから7番目までのものを使用する。
3. 1で抽出した日射量変動の大きい時と同時刻のPCを対象にクラスター分析を行う。クラスター分析は、季節性を考慮して各月ごとに行う。クラスター分析で得られた各区分での平均PCを用いて気象場を再構築することで、日射量の変動性が大きいときの総観規模気象現象を知ることができる。

図 5-3 は、九州地域の10月において日射量の強い変動性が生じる場合に関する総観規模気象場である。この結果は5つの区分に分類した場合のものである。これらのような気象場が生じるときに、九州地域内の広い地域で地表面日射量の変動が強くなる傾向にあると考えることができる。この解析手順は、日本の他の地域でも実施可能である。

(3) まとめ

太陽光発電出力の変動の原因となる日射変動に関する情報や知見は、太陽光発電システムの導入時や運用時に有益な情報である。本研究は、衛星観測データを利用することで、これまで得られなかった空間的な広がりをもった日射量変動に関する情報を得ることができることを示した点が重要である。具体的には、気象モデルから得られる気象場の予測値から日射量の変動性の予測可能性を示しており、日射変動予測のための手法開発の基礎となるものである。より研究を進めることで、日射量の変動性の予測手法の確立ができると期待でき、気象学や衛星リモートセンシング分野がエネルギーシステムマネジメントへ貢献できる新たな手法の一つとなるものと考えられる。

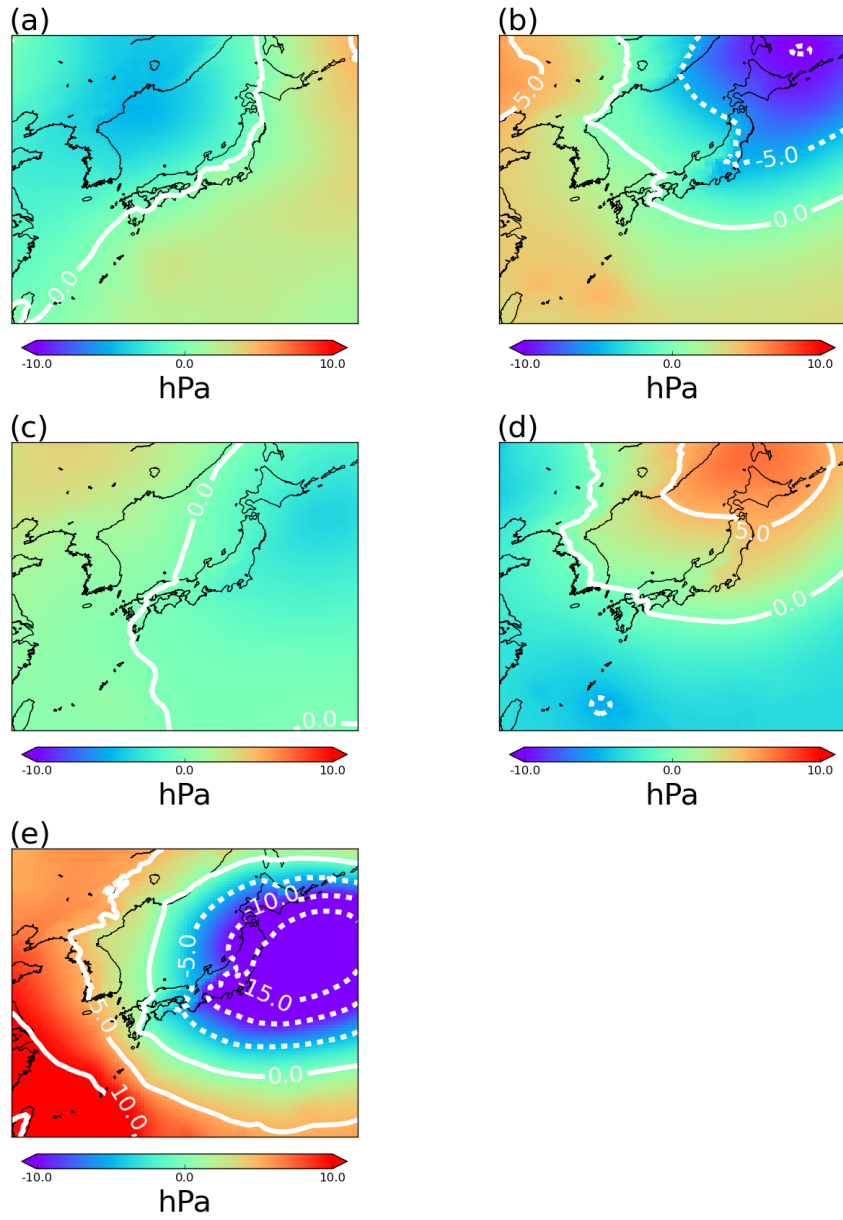


図 5-3 九州地域の10月における地表面日射量が強いときに表れる総観規模気象場。(a)から(c)はクラスター分析より分類された5つの区分に対応する。

3-2-6 エネルギー需要モデルの開発(阪大)

(1) はじめに

本研究では住宅・業務施設群を対象として、電力ロードカーブを中心とするエネルギー需要、とりわけ分散協調型エネルギー管理システムにおいて調整が可能な可制御負荷の大きさ・応答速度を分オーダーで推計するエネルギー需要モデルの開発を進めている。

住宅・業務施設のエネルギー需要の決定要因は①住宅居住者および建物利用者の生活行為・活動、②生活行為・活動に伴う機器・設備の操作、③機器・設備の仕様、④機器・設備の所有・設置状況、⑤住宅・建築仕様、⑥気象条件等外界条件の 6 要因に分類することができる。本研究では、このようなエネルギー需要が決定される構造そのものを理解し、数値情報と数学モデルによって記述することを目指す。

(2) エネルギー需要の決定構造に関する調査

住宅のエネルギー需要が決定される構造を把握するため、集合住宅の分電盤で計測された電力消費量から、部屋の在室、住宅での在宅状況を把握する方法を開発した。住宅内に設置されている機器の電力消費は、居住者の生活行為に伴って生じる電力消費と居住者の行為に関係なく常に発生する電力消費の 2 つに分離することができる。前者は居住者が起床かつ在室状態(以下、起床在室状態と呼ぶ)時に電気機器を操作することによって発生し、後者は冷蔵庫のように常時稼働している機器の電力消費とその他の機器の待機電力によって構成される。本研究は前者を稼働時電力消費、後者をベース電力消費と呼び、分電盤回路別に両者を分離し、稼働時電力消費が観測された時刻は当該回路が稼働状態にあるものとした。日没状態時に照明が非稼働状態のとき、居住者が睡眠状態または不在状態であると考えられ、部屋は非稼働状態であると判断することができることから、日没時間帯における照明の稼働状況を正解データとして上記の在室状況推定方法の精度検証を行った。照明専用回路がある部屋の場合、精度は 93%、照明専用回路がない部屋では 80%であった。

在室状況の判定結果を用いて外気温と在室状況および在室時消費電力の関係性を評価した。**図 6-1** に 14:00 から 15:00 における居間・食堂の稼働率および稼働時消費電力の世帯平均値を示す。この結果から外気温、季節の変化は居間・食堂の稼働率について統計的に有意な変化をもたらさないことがわかった。一方、稼働時消費電力は冬季において外気温が低くなるほど大きくなる。居間・食堂以外の部屋についても同様の傾向がみられた。また、雨天時はいずれの部屋も昼間における稼働率が晴天日より高く、降雨によって在宅率が高くなることが確認された。

ここで述べた手法を豊田市において行われたクリティカルピークプライシングを用いたデマンドレスポンス実証試験の対象世帯に適用し、デマンドレスポンスの効果が「機器の稼働を抑制する行動」と「機器のサービス水準を抑制する行動」のいずれによるものかを評価した(伴場ほか, 2016)^{原著論文 4)}。この結果、冬季に行われた実証試験では、機器のサービス水準を抑制する行動による効果よりも機器の稼働を抑制する行動による効果が大きく、特にエアコンの稼働状況の変化による貢献が大きいことを確認した。一方、夏季においては有意な削減が得られなかった。これは気温の上昇に伴ってエアコンの稼働率が増加したことに起因する。エアコン以外の回路においては若干の電力需要の減少が確認された。このように、デマンドレスポンスの効果がもたらされた要因を評価することが可能となった。

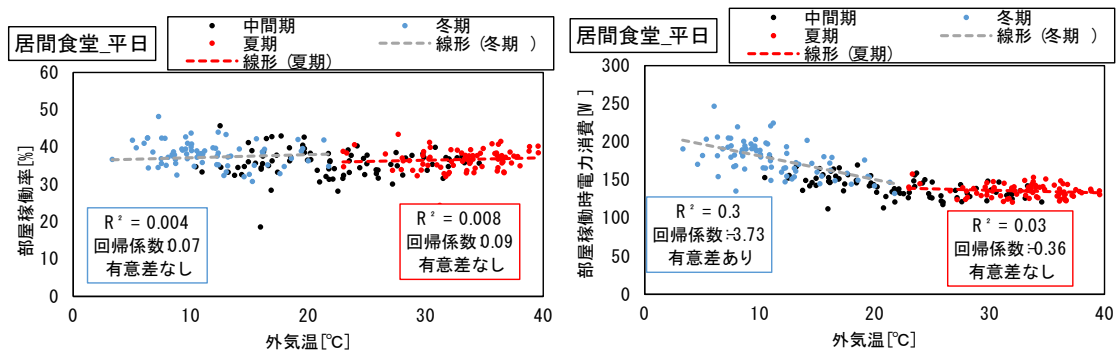


図 6-1 居間食堂における部屋の稼働率（左）、部屋稼働時電力消費（右）と外気温の関係

(3) 住宅エネルギー需要のモデル開発

● 暖冷房エネルギー需要推計の精度検証

本モデルでは、図 6-2 に示すフローで暖冷房エネルギー需要を推計している。HEMS により計測された電力消費データ(大阪府の集合住宅 144 世帯分)を用いて、このフローに沿った精度検証手法を開発した。まず、各部屋のエアコン専用回路の電力消費データより推定したエアコン稼働スケジュールを本モデルに外挿する。このシミュレーション結果を計測データと比較することで、熱負荷およびエアコン稼働時電力消費(図 6-2 の④および⑤)の推計精度を検証することができる。次に、各回路の電力消費データより推定した居住者の起居在宅スケジュールを本モデルに外挿する。この検討により、エアコンの ON/OFF 判定(図 6-2 の③)の精度を検証することができる。これらの検討の結果、本モデルはフローの各段階で概ね良好な推計精度を持つことが確認できたが、窓開け行為の考慮、暖冷房 ON/OFF の習慣性の考慮などにより、さらなる精度の向上が可能であることが明らかになった。

また、新たに入手した冬期のスマートメータデータ(近畿地方の 1237 世帯分)と本モデルの推計結果を比較し、電力系統スケールでの暖房エネルギー需要推計の精度を検証した(図 6-3)。図より、平日・休日ともに昼間の時間帯および深夜から早朝にかけての時間帯に 100 W/世帯程度小さく推計されている。昼間については居住者の外出率および暖房 ON/OFF 判定、深夜から早朝については就寝時の暖房のタイマー使用に関してさらなる調査を行うことで改善できると考えられる。

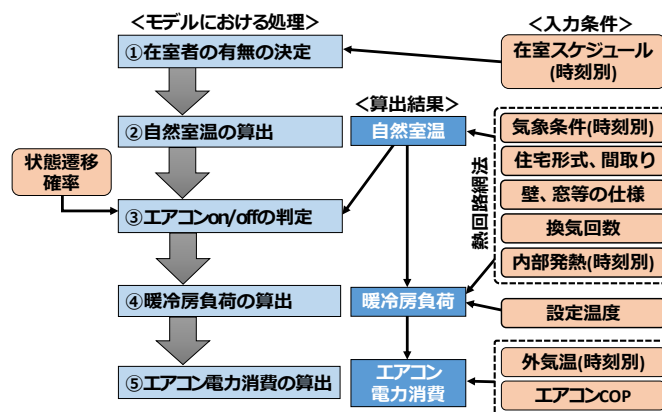


図 6-2 暖冷房エネルギー需要の推計フロー

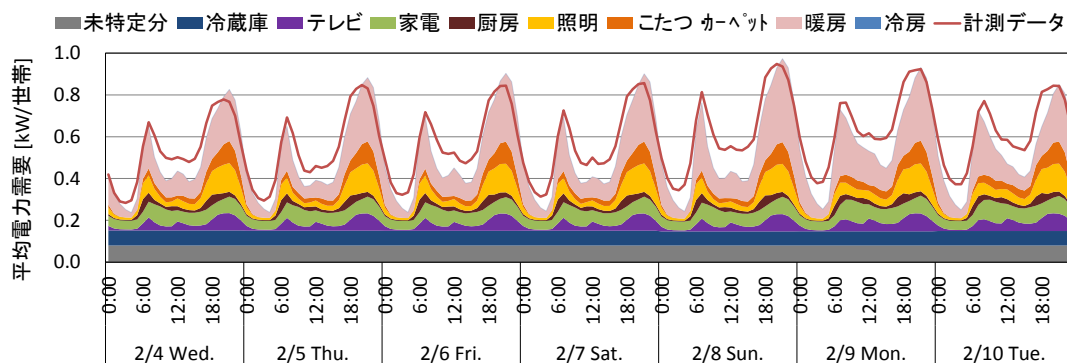


図 6-3 近畿地方の冬期における電力ロードカーブの比較

● 需要予測に用いる気象データの空間解像度に関する検討

都市スケールや電力系統スケールでエネルギー需要推計を行う場合、対象地域内でも気象条件が異なる場合がある。そのため、入力条件として使用する気象データの地点を選択すること、気象データの空間解像度を適切に設定することが重要である。特に気象条件の影響を受けやすい家庭部門のエネルギー需要に着目する。本研究ではこれまで、地域を代表する入力条件として人口集中地の気象データを地域全体に適用してきた。本年度の研究では、兵庫県を対象に、4 地点（神戸、姫路、豊岡、洲本）の気象データを用いて気象データの地点の選択および空間解像度に関する検討を行った。

気象データの地点の選択に関する検討として、同一の地点の気象データを兵庫県全体に適用した場合の県全体の家庭部門エネルギー需要を4つのケース（神戸、姫路、豊岡、洲本）で推計し比較する。また、気象データの空間解像度に関して以下の検討を行う。兵庫県を1地点の気象データで代表させる従来手法と、4つの地域に区分しそれぞれの気象条件を用いる手法でエネルギー需要の推計誤差を確認する。後者に関して、外気温の観測データに基づいて兵庫県を4つの気象クラスター（神戸、姫路、豊岡、洲本）に区分し、それぞれの気象条件を用いて算出したクラスター毎のエネルギー需要を積み上げることで兵庫県全体のエネルギー需要を推計した（積み上げケースとする）。積み上げケースにおける気象クラスター区分を図 6-4 に、神戸、姫路、豊岡、洲本、積み上げの各ケースにおける電力ロードカーブ推計結果を図 6-5 に示す。

図 6-5 より、気象条件が電力ロードカーブに与える影響は時刻によって異なる。特に顕著なのは夏の夜のピーク需要であり、神戸ケースより積み上げケースが 10%小さい。また、年間一次エネルギー消費量の比較より、気象データの地点の選択がエネルギー需要に与える影響は6~7%であり、気象データの空間解像度が与える影響は1~2%であることが分かった。

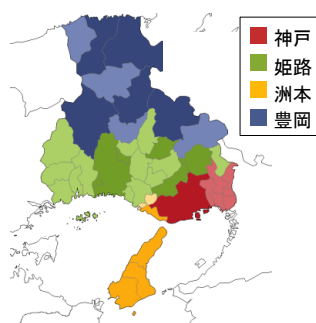


図 6-4 気象クラスター区分

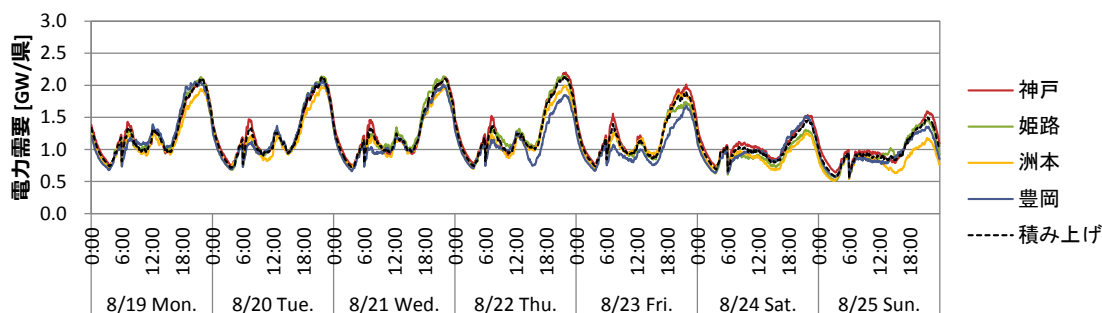


図 6-5 電力ロードカーブ推計結果

● 家庭部門における 2030 年の CO₂ 排出削減に向けた対策の定量的評価

本モデルを用いて、2030 年における家庭部門 CO₂ 排出量の推計を行う。2030 年においては長期エネルギー需給見通しに示されている対策が実現される想定で推計する。計算条件を表 6-1 に示す。給湯器のシェア、家電機器の普及率、家電機器のエネルギー効率、住宅ストックの熱性能について、表 6-1 のように変化を想定した。なお、長期エネルギー需給見通し関連資料には上記の対策に加えて「国民運動・家庭エネマネ」という項目があるが、詳細が不明であるため本研究ではこの項目を考慮しない。電力の CO₂ 排出係数は 2013 年度では 0.551 kg-CO₂/kWh、2030 年度では 0.370 kg-CO₂/kWh を用いた。

図 6-6 に家庭部門年間 CO₂ 排出量の推計結果を示す。年間 CO₂ 排出量は、2013 年度から 2030 年度にかけて 171 百万 t-CO₂/年から 98 百万 t-CO₂/年に削減された。削減率は 42% であった。特に給湯および暖房用途において削減量が大きい。以上の結果から、これらの対策を確実に実行することができれば、39%削減という目標は実現可能であり、特に高効率給湯器の普及促進、新築住宅の省エネ基準達成を確実に実施することが重要であると言える。

表 6-1 計算条件

計算条件	2013 年度	2030 年度
総世帯数および 類型別世帯数分布	国勢調査結果(2010年)より設定	国立社会保障・人口問題研究所推計結果(2030年)より設定
給湯器のシェア	電気温水器, ガス給湯器, 石油給湯器, HP 給湯機, 潜熱回収型ガス給湯器のシェアを考慮	長期エネルギー需給見通しの目標普及台数を各地域に割り振り(現在の電化率を考慮)
家電機器普及率	長期エネルギー需給見通しの想定に倣う	長期エネルギー需給見通しの想定に倣う
家電機器の エネルギー効率	本研究における設定を用いる	2013年度からのエネルギー効率の改善率は, 長期エネルギー需給見通しの想定(新築住宅の省エネ基準達成率は2020年以降100%)に倣い, 住宅熱性能ストックモデルを用いて設定
住宅ストックの熱性能	住宅熱性能ストックモデルにより設定	長期エネルギー需給見通しの想定(新築住宅の省エネ基準達成率は2020年以降100%)に倣い, 住宅熱性能ストックモデルを用いて設定

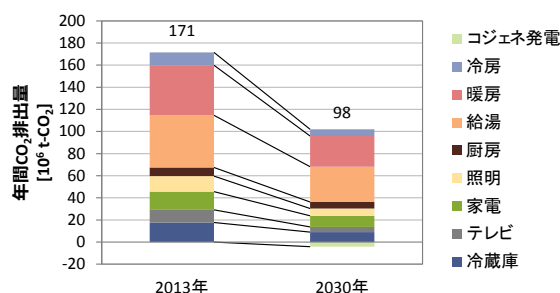


図 6-6 家庭部門年間 CO₂ 排出量の推計結果

● 家庭用コージェネレーションシステムの省エネルギー性の評価

本モデルを用いて、家庭用コージェネレーションシステムの省エネルギー性を評価する(Shimoda, et al. 2017)原著論文¹⁵⁾。また、これらのシステムが普及した場合の電力ロードカーブの変化も予測する。対象地域は大阪府とする。各世帯類型で CO₂ 排出量が最適となるコージェネレーションシステムをガスエンジン、PEFC、SOFCから選出した結果、ほとんどの類型でSOFCが最適となった。

従来型給湯器から最適システムへの更新にかかる費用を補助金で賄うと仮定し、10年間で1単位のCO₂を削減するために必要な費用(以下、限界削減費用)を算出した。類型(世帯人数、元々保有していた従来型給湯器の種類による分類)毎の限界削減費用は式 6-1 で表される。

$$AC_{i,j} = \frac{\sum_{h \in i} (N_h \times RC_{h,j})}{\sum_{h \in i} (N_h \times CER_{h,j})} \tag{6-1}$$

i : 世帯人数、 h : 世帯類型、 j : 元々保有していた従来型給湯器の種類(ガス給湯器、石油給湯器、電気温水器)、 N_h : 世帯類型 h の世帯数、 $AC_{h,j}$: 限界削減費用、 $RC_{h,j}$: 給湯器の更新にかかる費用、 $CER_{h,j}$: 運用時(10年間)のCO₂排出削減量

限界削減費用の推計結果を図 6-7 に示す。横軸は大阪府全体の年間CO₂排出削減量を示す。電気温水器からコージェネレーションへの更新が最も費用対効果が高い。また、限界削減費用は世帯人数が少なくなるほど高くなる。

図 6-8 に、コージェネレーションシステムの導入による大阪府家庭部門電力ロードカーブの変化を示す。20% micro-generation case では、費用対効果の高い順に 20%の世帯がコージェネレーションシステムを導入する。ベースケースでは電気温水器の沸き上げによるピーク需要が早朝に

見られるが、コージェネレーションシステムの導入によりこのピーク需要は見られなくなる。日中は電力需要が 270～300 MW 削減され、夜においては約 300 MW 削減される。

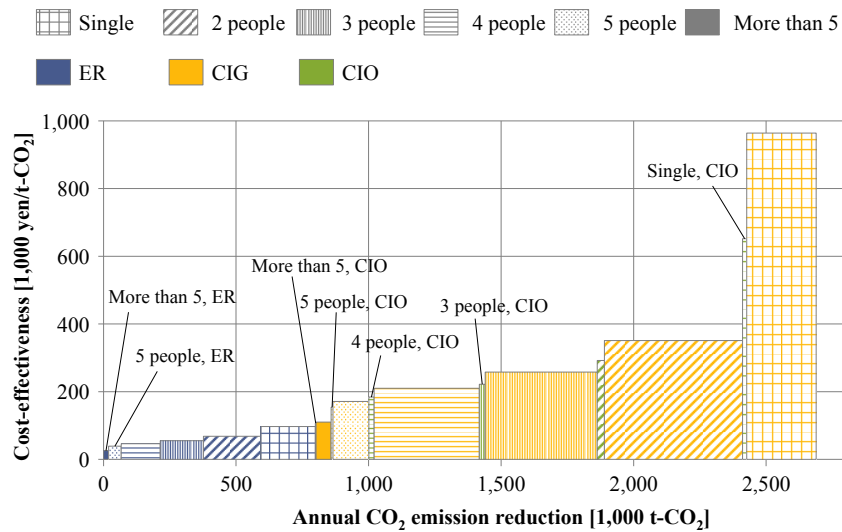


図 6-7 最適システム導入時の限界削減費用

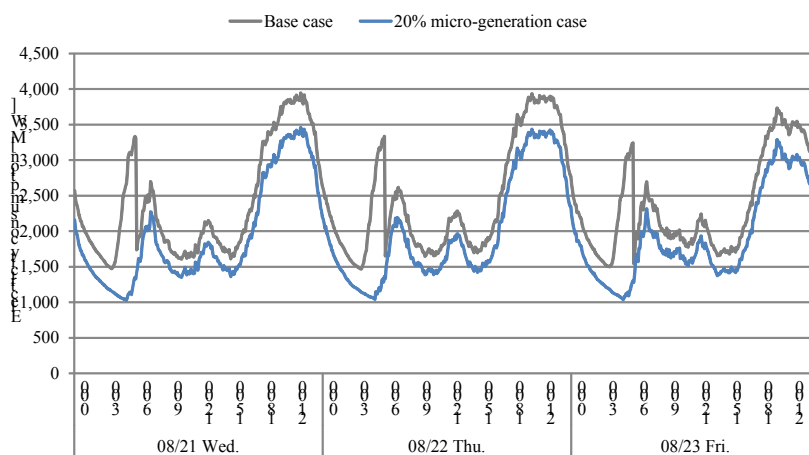


図 6-8 コージェネレーションシステムの普及による電力ロードカーブの変化

(4) 業務施設エネルギー需要のモデル開発

日本に立地する事務所、宿泊、医療、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。まず、用途、規模、空気調和設備種別、都道府県によって業務施設を類型化し、各類型を代表する業務施設モデルを作成した。業務施設モデルは建築仕様、設備仕様、運用について具体的な条件を持つもので、代表モデルを入力条件としてアメリカ DOE が開発している EnergyPlus を用いてエネルギー需要を推計した。この結果を延床面積により原単位化し、類型別延床面積との積和により業務施設全体のエネルギー需要を定量化した。本モデルを開発するにあたり、空気調和設備の選択を模擬するロジスティック回帰モデルを開発し、対象ストック全

体に適用した。この結果、規模が小さい業務施設ほどパッケージエアコンやビル用マルチエアコンなどの個別方式のシステムの採用率が増加すること、経年的に規模の大きい業務施設でも個別方式の比率が高くなってきていることなどが明らかとなった。開発したエネルギー需要モデルを用いてエネルギー需要の推計を行い、各種省エネルギー技術の普及によるエネルギー需要の変化を定量化した。

(5) 他の CREST チームへのエネルギー需要推計結果の提供

コミュニティ・都市などの規模で面的に広がる配電系統の仕様を決定する方法を林チームと共同で開発した。本手法はモデル配電線における代表 2 日の電力負荷と契約電力等の契約情報から需要家構成(モデル配電線に接続されている需要家の業務施設用途や住宅軒数など)を決定する。次に、対象とする地域における需要家構成と最も近い需要家構成を持つモデル配電線を選択し、配電線の仕様を決定する。最後に、各配電線の接続関係を決定し、配電網全体の仕様を決定する。開発するモデルは都市規模解析モデルと呼ばれ、配電線、バンク、変電所、営業所の階層的な構造を持つ配電系統を包括し、それぞれの単位で物理的な構成や挙動を模擬するものである。H28 年度末までに配電網に連系している需要家の用途、規模などが決められたことから、今後、個々の需要家に年間時刻別の電力需要、エネルギー管理の資源である調整力、制約となる居住者生活行動や設備など EMS にかかわる特性を与える予定である。

(6) まとめ

以上の阪大グループの研究は、エネルギー需要予測モデルの開発および応用、実態データ分析の 2 つに大別できる。

エネルギー需要予測モデルの開発および応用((3)住宅エネルギー需要のモデル開発、(4)業務施設エネルギー需要のモデル開発)については、あらゆるタイプのエネルギーマネジメント計画のテストベッドとして使用することができる。実際のエネルギー消費が発生するプロセスをモデル上で再現したボトムアップモデルであるため需要の内訳を説明することが可能であり、可制御負荷の定量評価等に应用できる。また、配電系統スケール、電力系統スケール、国単位など、任意の空間スケールでの需要予測が可能であり、配電計画や電源設備計画など、それぞれのスケールにおけるエネルギーマネジメント計画に貢献できる。さらに、入力条件を整備することで、人口構成が変化し省エネルギー技術の普及が進んだ将来における需要さえも予測できるため、再生可能エネルギーの普及と同時に需要が減少し、より制御が困難になることが予想される中長期の将来のエネルギーマネジメントシステムの開発に貢献することができる。

実態データ分析((2)エネルギー需要の決定構造に関する調査)については、分析結果をエネルギー需要予測モデル結果と比較することで、需要予測モデルの精度を検証できるだけでなく、需要予測モデル中のパラメータ決定に用いることができる。特に人の行動、実使用時の消費電力については、統計調査やメーカーカタログだけでは需要予測に必要な情報が十分に入手できないため、実態データ分析に基づくモデル入力条件の生成は重要である。

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)

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、H27年度までに約1600件のHEMSあるいは住宅における計測データを保有しており、H28年度もこれらの世帯において継続してデータ収集を行った。またデータ収集を行う過程で、今までは新築・若年世帯に偏りがある傾向が見られたため、既築・高齢世帯のデータ収集を追加で行った。これまでに収集できたHEMSデータは、表1のとおりである。

表 1 HEMS データの収集状況

サイト	N	地域	住宅	燃料種類	計測間隔(分)	計測回路数	HEMSメーカー	計測期間	備考
A	500	全国	戸建	全電化	60	電気8	NEC	H24.7~	PV設置世帯 3年以上継続
B	267	関東以西	戸建	全電化 ガス併用	60	電気 24~28	デンソー	H25.10~	電流値のみ
C	710	全国	集合	全電化 ガス併用	60	電気 8~15	FNJ	H25.1~	電流値のみ
D	108	関東	戸建	全電化 ガス併用	15~30	電気 14	シャープ 東芝	H26.1~	一部、 クランプ&タップ形式
E	87	横浜	戸建 集合	全電化 ガス併用	30~60	電気 10~25	パナソニック 東芝	H28.7~	既築 60代以上中心

合計 1,672

また住宅事業者からの住宅属性情報や、保有家電の詳細情報、および気象データにおいてもH27年度までと同様に引き続き併せて収集し、HEMSデータと紐づけることによってデータベース化し、他の研究チームとのデータ共有に努めた。なお気象データは、JAXA 東京グループ他で開発されたAMATERASSの解析結果を参照した。これは気象衛星ひまわりの観測データをもとに雲粒などの散乱や水蒸気の吸収などを考慮して、日射量を放射伝達理論に基づき物理的な解法で推定したものであり、気圧や温度、湿度などの基礎的な大気物理量は気象庁MSM/GPVに基づいている。そして郵便番号より緯度経度を算出し、AMATERASSデータベース上の気温、日射量データを抽出するシステムを構築した(図1)。

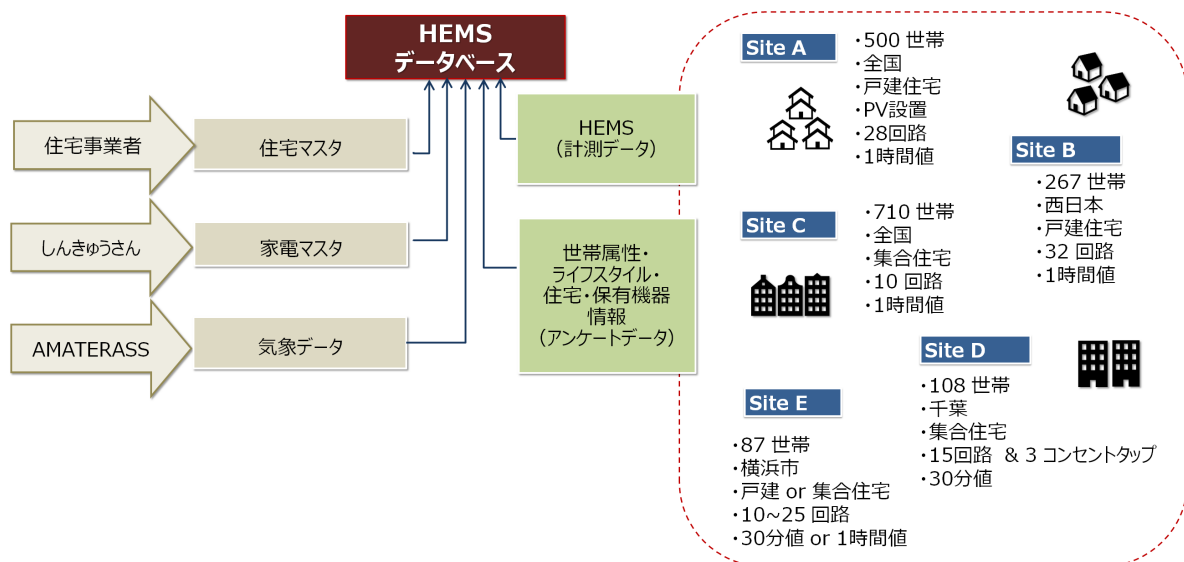


図 1 HEMS データベースの構造

(2) HEMS によるデマンドレスポンス (DR) ポテンシャルの抽出

需要の精査により、要求される利用可能時間、応答速度などに対応する、HEMS による DR ポテンシャルを推計することが可能となる。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消費しており、どこまでが制御可能なのかによって、利用可能 DR ポテンシャルは異なってくる。そこでまず、(2)-1 そもそも各家庭において可変な消費量はどの程度存在するのかを明らかにすることを目的として、固定的な消費と、可変な消費について検討を行うとともに、(2)-2 可変な部分を消費者に提示した場合、どのように行動変容が可能なのか、どのように情報提供することが行動変容につながるのかを明らかにすることを目的とした検討を行った (Iwafune et al, 2017) ^{原著論文 21)}。

(2)-1 ライフスタイル要因消費の抽出

HEMS により収集した家庭用電力消費量に対し、まず下記のような説明変数を用いて重回帰モデルを作成した。

世帯属性： 世帯人数、乳幼児の有無、高齢者の有無、学生の有無、在宅率

住宅属性： 床面積、戸建／集合、全館空調の有無、オール電化の有無、主暖房の種類

環境属性： 月平均外気温、湿度

これらの説明変数は、世帯属性や住宅、環境に起因する固定的な要因であり、消費者側で容易に変更することができないものである。これらを「固定要因」とよぶこととする。そして得られる重回帰式による予測量を「固定要因消費」とすると、固定要因消費とは、固定要因によって説明される消費量とそれ以外の説明できない定数項の和で表現されることとなる。固定要因消費は固定要因に基づいた平均的な予測値であるが、実際の消費量との間には差が生じる。この差が固定要因では説明のできない消費で、各世帯のライフスタイルによって変動する消費と考えることができる (図 2 参照)。ライフスタイル要因に起因する消費とはどのように存在するのか検討を行った。

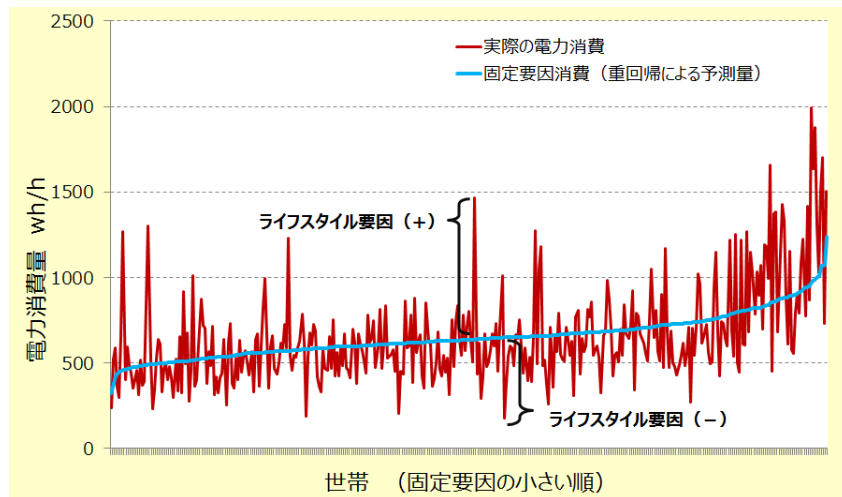


図 2 固定要因消費とライフスタイル要因消費

その結果、固定要因消費の内訳は、図 3 のようになり、家電用途の固定要因は、床面積と世帯人数が大部分を占めた。空調は気温がマイナスの要因となり、床面積や全館空調がプラスの要因になっている。給湯用途は、床面積と世帯人数がプラスの要因に、気温と湿度がマイナスの要因になっていた。

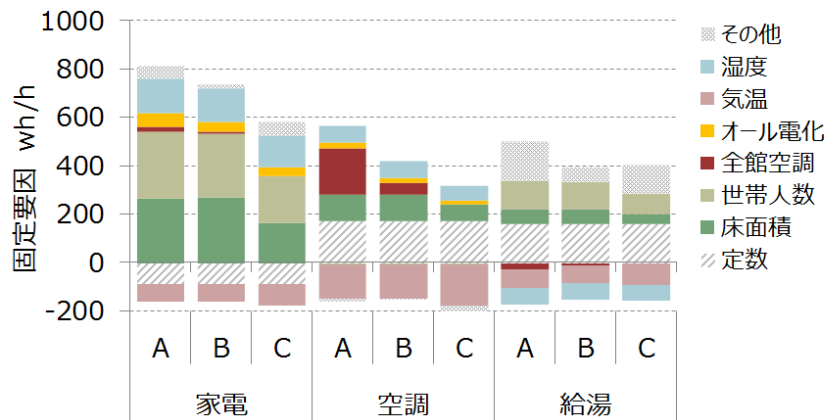


図 3 固定要因消費の特徴

次に、ライフスタイル要因について検討したところ、ライフスタイル要因消費の大きい世帯には、以下のような傾向が見られた。まず家電用途においてライフスタイル要因消費の大きい世帯では、①食器洗い乾燥機・洗濯乾燥機・浴室乾燥機・暖房便座・炊飯器の保温機能の利用頻度が高い、②ペットを飼っている、③冷蔵庫を 2 台以上使用もしくは大型の冷蔵庫を使用している、④加湿器・空気清浄機・除湿器を使用している、である。空調用途におけるライフスタイル要因消費の大きい世帯では、①全館空調を使用している、②複数の暖房器具を併用している、③暖房使用時間が長い、などの特徴がみられた。給湯用途におけるライフスタイル要因消費の大きい世帯では、①給湯器の省エネモードを使用していない、②風呂は高温足し湯より保温をしている、③容量の大きいエコキュートを使用している、などであった。

DR ポテンシャルを考える際には、このようなライフスタイル要因消費の大きい世帯が重要となってくる。今後はこのようなライフスタイル要因の精査と、ライフスタイル要因の大きい世帯の抽出方法について更なる検討を行いたい。

(2)-2 HEMS データを活用した家庭用エネルギー診断の効果検証

デマンドレスポンスの家庭への導入を考える際、消費者の理解を得るためには、消費者のエネルギー利用に対する知識や考え方を把握し、それに合わせた情報提供が重要である。そして、どのような情報提供をした場合に、どのような行動変容が、どの程度生じるかを把握しておくことは極めて重要である。

そこで、上述した HEMS データベースを構築し、そのデータに基づいて、家庭用エネルギー診断を作成するシステムを開発した(Iwafune et al., 2017)^{原著論文 21)}。このシステムを用いることで、世帯ごとのテーラーメイド型のエネルギー診断内容(A4 用紙 2 枚分の分量)が作成される(図 4)。診断内容は季節に応じて変わり、世帯属性情報から抽出した類似世帯との比較、月別、時間別の回路別の電力使用状況、主空調の使用時間と電力消費の関係、過去データとの比較、他者の成功例、その他各世帯の特徴に応じたアドバイス等が示される。



図 4 エネルギー診断書

診断書の送付を、2015 年冬、2015 年夏、2016 年冬の三回にわたって行い、診断書送付世帯(実験群)と未送付世帯(統制群)における省エネ効果を、パネルデータ回帰ランダム効果モデルを利用して検証した。なお比較の際には、統制変数として、床面積、人数、外気温、主空調種類(全館・ガス灯油・電気床暖)を選択し、診断の効果のみを抽出できるようにしている。

世帯全体では、夏季の診断では診断書送付の効果が出なかったが(図 5)、冬季の診断(2016 年)は対前年比 3.4%の消費電力量の削減効果が確認された(図 6)。具体的には、空調が 10.1%減少し、給湯が 2.3%減少した。冬季に関しても類似世帯より多い、と診断された世帯のほうが削減効果が大きく、全体で 5.4%(対前年比)となった。これは 56kWh/月に相当する量であり、全世帯平

均削減効果の 22kWh / 月に比べて大きな削減効果といえる。つまり、多消費世帯への診断が特に効果が高いことが分かる。

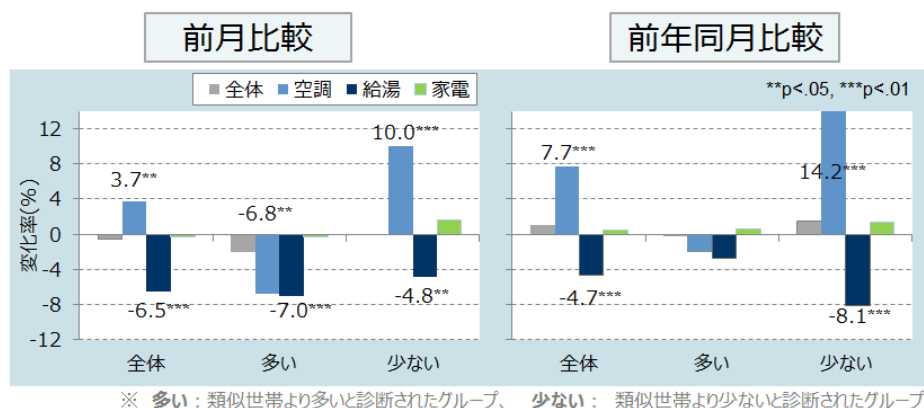


図 5 夏の診断効果

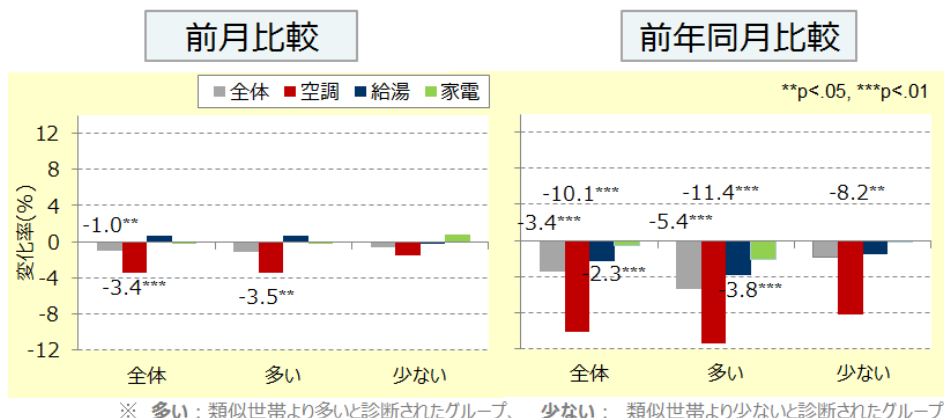


図 6 冬の診断効果

また、2 年間に渡って診断を実施した世帯では、冬季において 7.5%の累積の削減効果が確認された。これにより継続的な診断が効果的であることが確認された。HEMS データを利用したエネルギー診断は、特に冬季、類似世帯よりも比較的消費量の大きい世帯において、一定の効果を有していることが確認できた。また、継続的な診断も効果的なことも明らかになった。

現状、HEMS への注目度は、以前より下がっている。しかし今後安定的な電力需給のためには、家庭においてもデマンドレスポンスは必須であるため、エネルギー管理の機能を住宅に実装していくことは必要になると予想される。そして、そのようなエネルギー管理システムから副次的に取得される住宅のエネルギー消費量の情報を活用して、消費者へフィードバックをしていくことは、デマンドレスポンスへの理解を得るためにも重要であると考えられる。今後は、診断に対する消費者の反応について引き続き検証するとともに、郵送に頼らず、Web 等を活用したより安価なエネルギー診断手法の開発やその効果について検討していく予定である。

(3) HEMS モデルの実運用展開

HP給湯機および電気自動車のデマンドレスポンス運用に関する研究を行った。給湯器メーカーの協力を得て、実フィールドにおける運転データを取得し、システム効率やタンクロスなどを精査し、現実的な条件下で HEMS モデルによる最適化を行った。また、太陽熱利用 HP 給湯機についても太陽熱取得量および給湯需要量の予測を行い運用の最適化について検討を行うとともに(池上と矢野, 2016)^{原著論文 4)}、道路交通センサスデータを用いて電気自動車の充電ポテンシャルを推計し定量的な評価も行った(勅使河原と池上)^{未発行論文 3)}。以下に、(3)-1 電気自動車の充電ポテンシャルについての検討結果、(3)-2 太陽光発電システムの導入が急速に進んだ九州地区を対象とし、ヒートポンプ給湯機の実運用データに基づく系統貢献効果を定量的に評価した結果と、(3)-3 家庭用のルーフトップ太陽光発電の自家消費拡大のためのヒートポンプ給湯機の活用について検討を行った結果について示す。

(3)-1 道路交通センサスデータを用いた電気自動車の充電促進ポテンシャルの定量的評価

運輸部門の低炭素化に向けて電気自動車の普及が進んでおり、我が国では、2030 年までにプラグインハイブリッド車を含めたEVの普及率を自動車全体の 20~30%まで高めることが目標に掲げられている。近年では、家庭用の乗用車としてのEVだけでなく、タクシーやバス、トラックなどのEV化も行われており、普及に向けた取り組みが行われている。将来これらが大量に普及すると、大きな電力負荷が新たに創出されることになり、またEVに搭載された蓄電池を活用することにより、利便性を損なわない範囲で電力負荷の時間をシフトすることが考えられる。

電力システムの運用に貢献するEV蓄電池を用いた充放電制御に関しては、V2GやV2Hを含めて既に多くの検討がなされているが、本研究では、再生可能エネルギー発電の余剰電力の発生を防ぐ、あるいは、出力抑制を回避することを目的として、ある時刻における電力負荷を増大させるためにEVの充電を促進することを考えた。EVに搭載された蓄電池は定置型の蓄電池と比べ、EVの本来の利用目的のために走行中には充電できないことや、個々のEVの走行量の違いにより充電要求量が異なることなどの制約により、自由に充電負荷を集中させることができるわけではない。電力システム側の要求と個々のEVの利便性を損なわない要求の両方を同時に満たす必要があるため、これら両方の要求を管理するEVアグリゲータの存在を想定し、あるEV群の充電時刻を一括して管理・制御することにより、余剰電力の発生を効果的に防ぐ充電促進ができると考えられる。このようなアグリゲータによる特定の時間帯のEV群の充電負荷を集中・促進させる制御についてこれまで研究が行われておらず、そのポテンシャルも明らかになっていない。そこで本研究では、EV群の一括管理による充電促進可能量を定量的に評価することを目的とした。車種によって走行パターンが異なることから充電可能時刻制約が異なることが考えられ、また、充電を促進させる時間帯によってもポテンシャルは異なると考えられることから、車種や充電促進時間帯による充電促進可能量の違いを定量的に評価した。

本研究では、平成 17 年度交通センサスのOD調査の個別データを活用し、車種別の走行パターンのデータを作った。そして、500 台のEVがアグリゲータによって直接充電制御されることを想定し、作成した走行パターンデータから車種別平休日別に 500 台分のデータを無作為に抽出した。

この 500 台のデータを用いて、ある時間帯に充電負荷を集中させた場合の充電促進可能量を計算した。そして設定した充電促進時間帯に基づいて 500 台のEVの充電時刻を同時に最適化する混合整数線形計画法を用いたモデルを開発した。

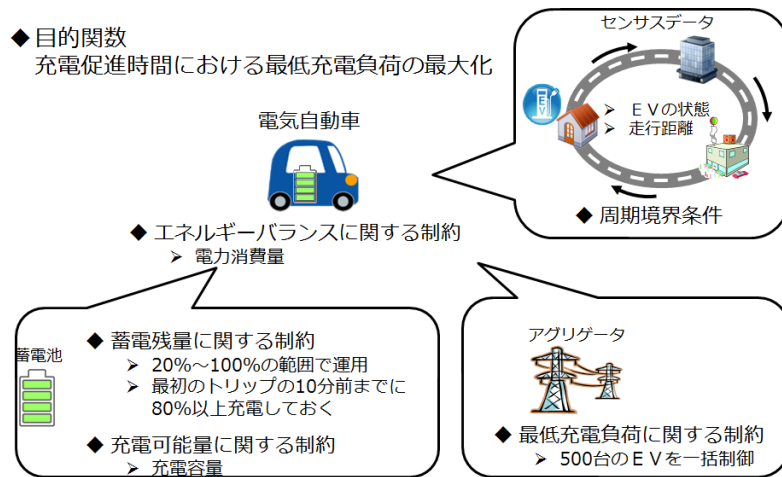


図 7 最適化計算の概要

乗用車、バス、小型貨物車、普通貨物車の 500 台の走行パターンデータに開発したモデルを適用して、充電促進ポテンシャルの評価を行った結果、集中させる時間帯幅が大きいほど、効果的に充電負荷を集中させることができるため、余剰電力が発生する時間帯を考慮した充電促進時間の設定が重要であることがわかった。また、車種別にみると、1日の電力消費量が多く、昼間に事業所に戻るなどにより、バスの昼間の充電促進ポテンシャルが他の車種と比較して高いことがわかった。バスの充電制御による余剰電力吸収の効果が高い可能性が示された (図 8)。

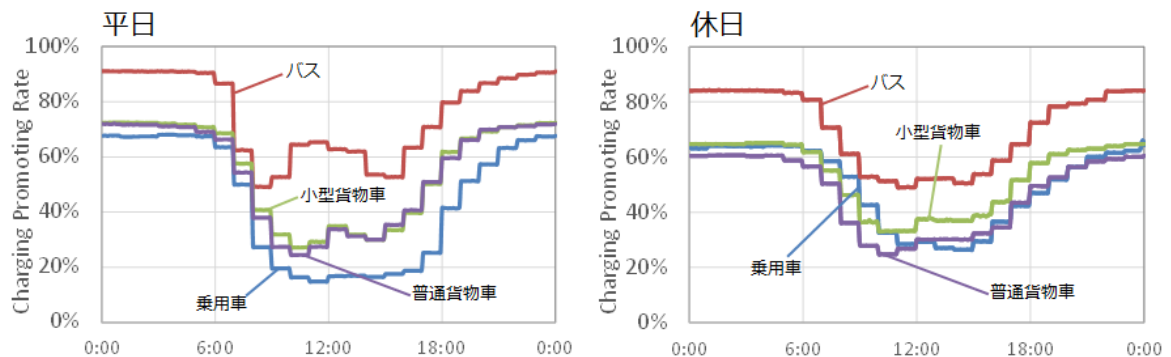


図 8 車種別の充電促進ポテンシャル

(3)-2 九州地区における HP 給湯機を用いたデマンドレスポンスの定量的評価

再生可能エネルギーの更なる普及拡大を目指して 2012 年に開始された固定価格買取制度により、全国的に太陽光発電システム(以下 PV システム)の導入が急速に進んだ。中でも日照条件の良い九州地区では、10kW 以上の PV システムの導入申込みが集中し、その規模が系統容量規模に照らして著しく過大となったため、2014 年 9 月の時点で、いったん接続契約を中断する事態が発生した。2015 年 1 月に無制限に発電停止を指示できる新ルールを導入し、再開したが、いまだに供給過剰の懸念が払拭されていない。このいわゆる「九電ショック」によりその後の申請件数は減ったものの、旧ルールで契約していた設備の完成が相次ぎ、2015 年 6 月 4 日、正午からの 1 時間に管内の太陽光発電の平均出力が過去最高 407 万 kW に達し、この時の需要 1016 万 kW の 4 割に達したという。2015 年 9 月時点で、接続検討申込みが 1747 万 kW に達しており、今後も更なる PV 導入量の増加、それに伴う出力抑制の可能性が見込まれる。この問題の解決策の一つとして、需要家側の需要の調整による系統の柔軟性向上を図るデマンドレスポンス(以下 DR)の導入可能性が検討されている。本研究では、家庭用ヒートポンプ給湯器(以下 HP 給湯機)を用いた九州電力管内のデマンドレスポンスによる系統貢献効果について定量的に評価を行った。HP 給湯機の実運用データに基づくモデル化、予測・計画・運用モデルの構築、世帯属性毎の需要の多様性を考慮した評価が本研究の特徴である。

その結果、PV が大量に導入された系統においては、昼間の卸価格が低下し、これに連動したダイナミックプライスが家庭に適用されると、HP 給湯器の昼間運転が発生し、PV の発電を相殺する大きな需要創生ポテンシャルとなる結果が得られた(図 9)。しかし単純にダイナミックプライスに基づいてすべての世帯の HP 給湯器が運用されると、別のピークを生じさせる可能性もあり、アグリゲータによってもっと穏やかな反応をさせるロジック等を検討する必要がある。また、DP に基づく HP の運用結果が、再度電力系統側にフィードバックされると、系統オペレーションも変化し、DP も変化する。最適な系統運用と最適な HP 給湯器の運転について、Win-Win となる HP 給湯器の運転パターンを探る必要がある。さらに、HP 給湯器の昼間運転は、省エネ、貯湯タンク容量削減という点においても大いに可能性があることが確認された。需要マージン、貯湯タンク容量、適応しうる世帯類型等、従来の HP 給湯器の導入条件を大きく変えて、多様なシミュレーションを実施し、HP 給湯器の省エネと DR で担う役割を明確にしていく予定である。

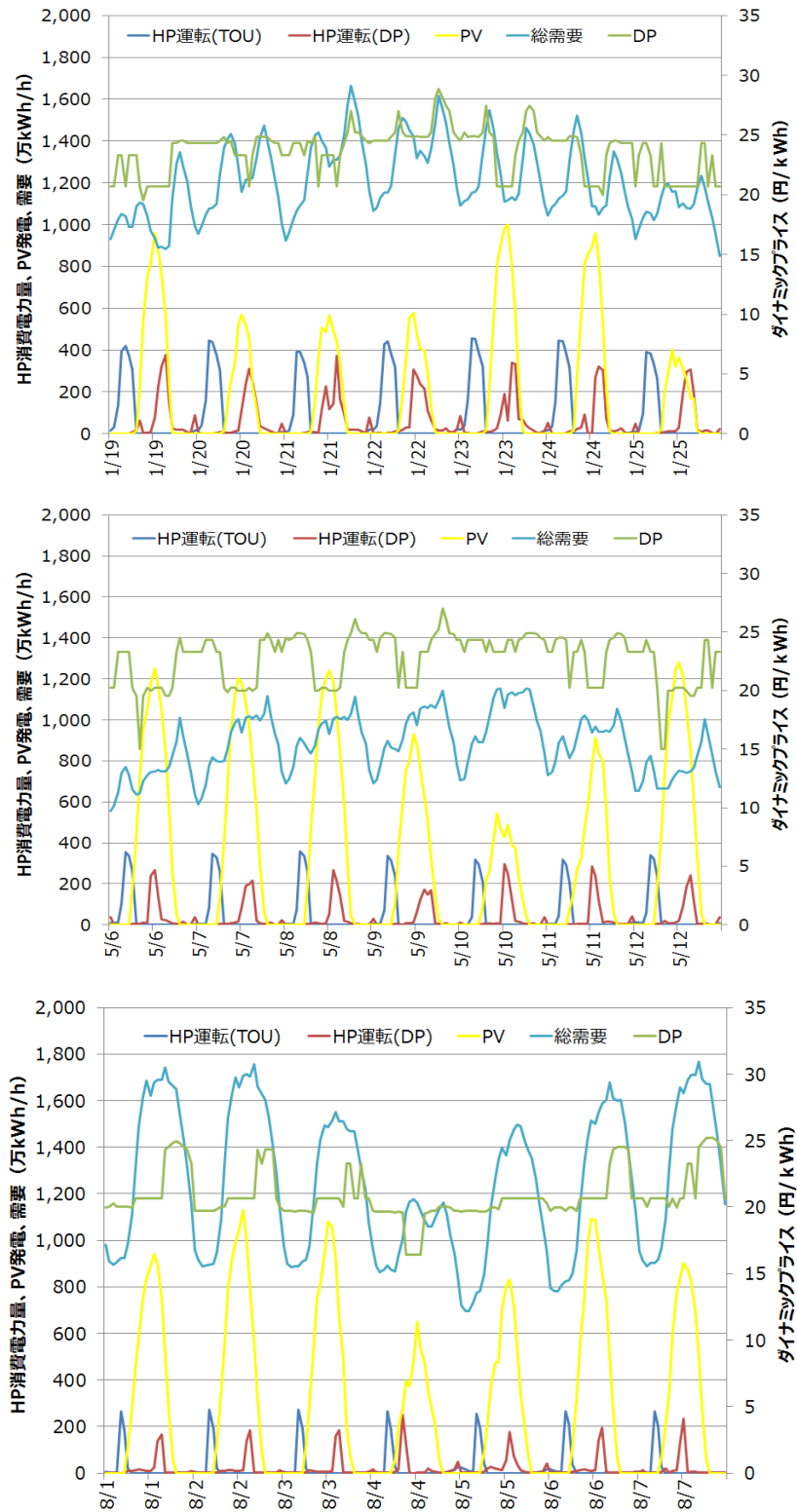


図 9 HP 給湯機運用および DP のシミュレーション結果
(上から、2030 年 1 月、5 月、8 月)

(3)-3 ポストFIT時代のHP給湯機の最適運用に関する検討

再生可能エネルギーの更なる普及拡大を目指して2012年に開始された固定価格買取制度(FIT)により、PVシステムの導入が急速に進んだ。FIT以前から導入されていた住宅用PVシステムに対しては、余剰電力買取制度の下、48円/kWhの買取価格が適用されてきたが、その買取期間は10年であり、最も早いもので2019年11月に買取期間が終了する。2019年に終了する対象は、1992年7月～2009年10月設置分の45万件(180万kWh)といわれており、その後、FITの対象設備も含めて毎年20万件程度が買取期間終了を迎えるという。買取期間終了に伴い、PVシステムの余剰買取価格は、48円/kWh(FIT対象は33～42円)から大幅に下がることになる。現在の見通しでは、回避可能費用から考えて5～10円程度ではないかと考えられる。これが、いわゆる太陽光発電の2019年問題である。この2019年問題への対応として、太陽光発電の自家消費拡大に対するニーズが増すのではないかと考えられており、定置式の蓄電池に注目が集まっているが、蓄電池は依然として高価である。そこで、本研究においては、ルーフトップ太陽光発電の自家消費拡大のオプションとして、ヒートポンプ給湯機(HP給湯機)の活用について検討する。

HP給湯機は基本的に安価な深夜電力で運転されているが、最近では、消費者が湯沸かしする運転時間を設定できるようなタイプのものも登場している。著者らは、柔軟な料金に対応できるようなHP給湯機最適運用モデルをすでに提案しており、ダイナミックプライス適用時の、九州電力管内全体のデマンドレスポンス効果について検討している。今回は、2019年問題への対応について検討するために、太陽光発電とHP給湯機を保有する世帯において、24時間先までの料金を最小化するような運用を行うモデルを開発した。モデルの構造を図10に示す。過去需要・発電量、気象予測情報を用いて前日夜23:00に、翌日の給湯需要、その他電力需要、PV発電量の予測を行い、それに基づいてHP給湯機の運転計画を作成し、当日は計画と実需要に基づいて運転するものである。本モデルは、フレキシブルな料金に対応できるが、今回の想定では、購入電力に関しては、旧一般電気事業者のオール電化向け新料金を想定し、PV余剰買取価格は、10円/kWhと想定している。

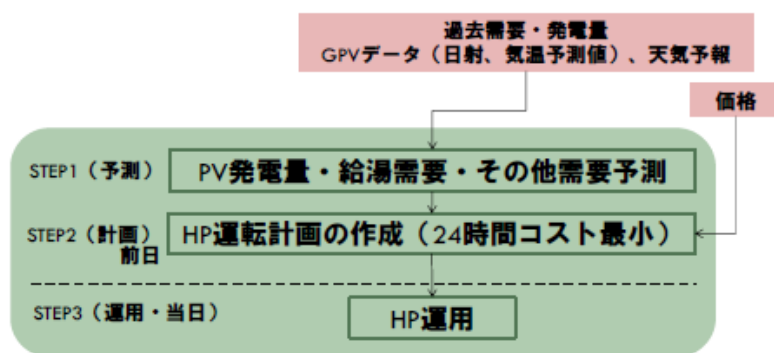


図10 PV-HP最適運用モデル

シミュレーションの結果を以下に示す。図11は、蓄電池とHP給湯機の最適運用による357世帯平均の年間コストメリットと蓄電池の単純償却年数を示したものである。2～10kWhの蓄電池のみの導入により、10,000～22,000円/年のコストメリットが生じており、これはHPの最適運用に比べ

大きな金額である。HP 最適運転と蓄電池 2~10kWh 導入の組み合わせでさらに大きな 15,000~32,000 円/年のコストメリットが得られる。蓄電池容量が大きくなるにつれてコストメリットは飽和する。蓄電池容量が小さいほど償却年数は短くなっているが、たとえ最短の償却年数であっても、電池の公称寿命である 10~15 年では回収できない結果となっている。蓄電池単体に比べて、蓄電池+HP 最適運転のほうが単純償却年数が長いのは、余剰電力による HP 運転が増加するため、蓄電池が最適に運用できる範囲がより限定されるためである。図 12 は、正味の電力消費量と PV 自家消費量の変化を示す。蓄電池の場合、充放電によるロスが発生するため、正味の電力消費量はベースケースに比べて大きくなるが、HP 給湯機の最適運転は、既述のとおり省エネになるため正味の電力消費量も 8%減少している。HP 給湯機最適運転によって、PV 自家消費率は 32%から 45%に増加しているが、これは、2~4kWh のバッテリー導入によってもたらされた効果に相当するものである。

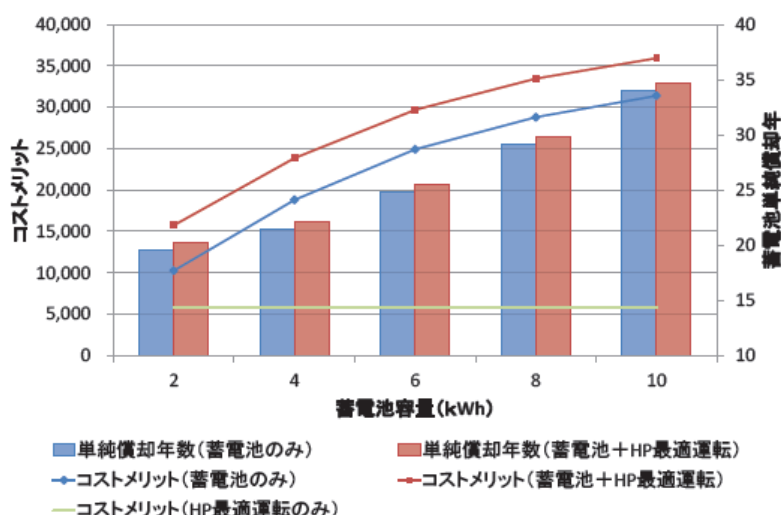


図 11 HP 最適運転および蓄電池導入によるコストメリットおよび蓄電池の単純償却年数

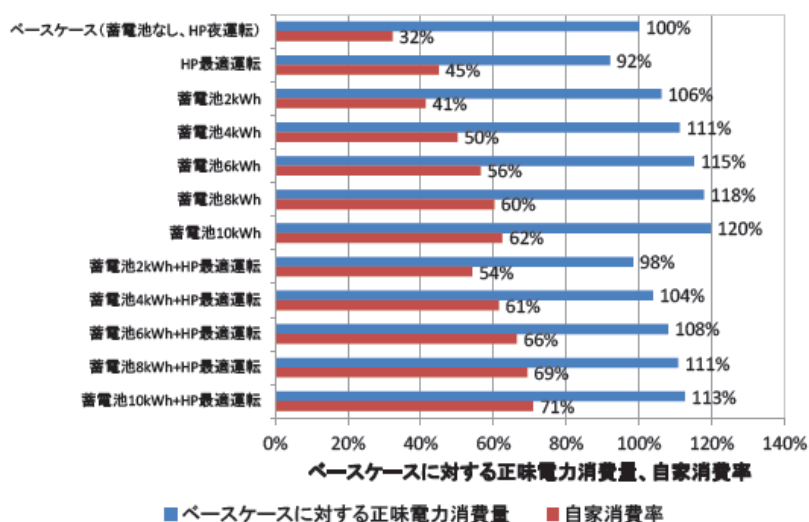


図 12 各ケースにおける正味電力消費量および自家消費率

本研究では、ルーフトップ PV 発電の自家消費を増加させる DR 資源としての HP 給湯機の価値を評価した。357 世帯の実データにおける分析の結果、HP 給湯機の最適な運用は、年間 5,800 円のコストメリットをもたらし、7%の省コストに貢献することがわかった。電力消費量の 7 割が昼に移行し、自家消費率が 32%から 45%に増加した。HP 給湯機の昼運用は基本的に省エネであり、全体でも 8%の正味電力消費量の削減が実現する。より簡易的には、天気予報データを使って PV の発電量を推計し、翌日晴れか否かを判断し、晴れと想定された時に 10 時から HP を運転するような簡易モデルでも一定の効果を有することが分かった。その場合は、GPV データも必要なく、その他需要の予測も最適化も必要ない。HP 給湯機単体でも翌日の天気予報情報を受け、運転時間を変更する機能を有すれば十分実現できる。そのようなシステムは、電池の導入に比べて費用対効果が良いと考えられるため、関係各位の積極的な取り組みが望まれる。

(4) まとめ

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

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

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

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

今後は、DR 要素を網羅的に定量化し、各要素の相互関係も含めた定量的な評価を行っていく予定である。

3-2-8 需要家行動モデルの開発(東工大)

(1) 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を研究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3-2-8-2はGDPおよび電力需要(東京電力管内)の伸び率の関係を表したものであるが、概ね GDP が成長すると電力需要も伸びていることが分かる。しかし、近年においては GDP の伸びにも関わらず、電力販売が伸び悩んでいる現状にある。近年10電力全体としても電力販売の減少が続いている理由は、GDPとは別に要因があり、東北大震災における電力ひっ迫状況の節電が続いているという解釈もあるが、省エネに対する投資が進んでいるという議論もある。このように、需要モデルに対しては、電力消費のみを対象としていると説明ができない状況がある。

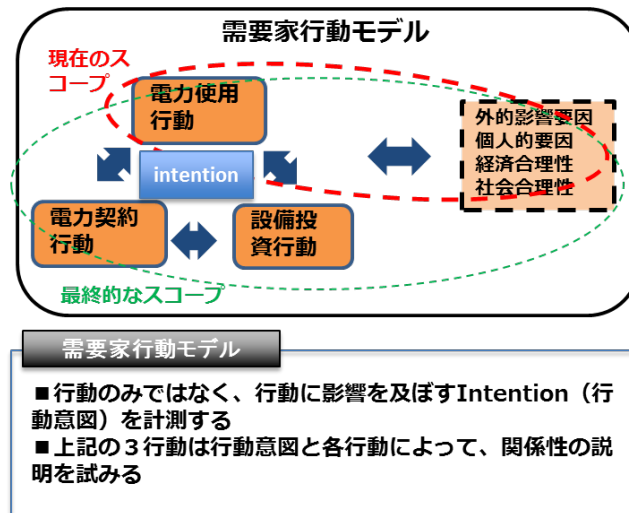


図3-2-8-1 需要家行動モデル

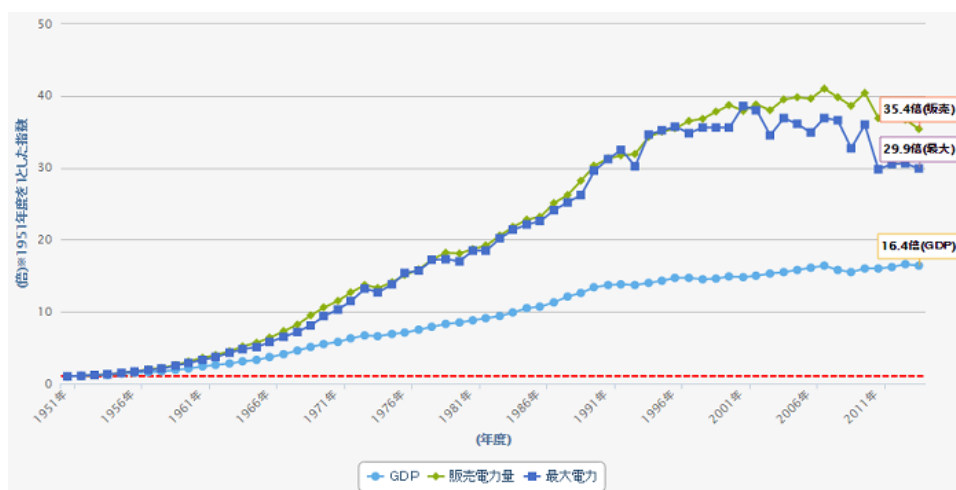


図3-2-8-2 GDPと電力需要の関係 (東京電力管内、出典:東京電力¹⁾)

そこで、「電力使用行動」「電力契約行動」「設備投資行動」の3行動の関係性を明らかにするためには、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3-2-8-3)。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。この問題点を明らかにするために、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)^{原着論文¹²⁾}に発表した。これまでの研究では DR の中長期的な効果がどのように推移するのか、DR に対応して需要家がどのように実際の生活行動を変化させているのか、その生活行動の変化がルーティン化することで DR 終了後も効果が中長期的に維持される可能性があるのではないかと、といった観点からの考察は十分には行われていない。そこで、この研究では、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い、1) DR 継続実施時と 2) DR 終了後の需要家の電力消費行動と実際の生活行動の経時変化について検討を行った。それぞれ 1) 需要家が価格変化にどのように反応しているのかの定量的検証、2) 実証実験関係者からのヒアリング調査に基づく定性的調査を行った。1)および2)における結果から、DR 実施における需要家の電力消費行動、生活行動の経時変化とそれが DR の中長期的効果に及ぼす影響について考察した。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。

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

¹ <http://www.tepco.co.jp/corporateinfo/illustrated/power-demand/gdp-demand-j.html> (2017/5/2)

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3-2-8-3となる。

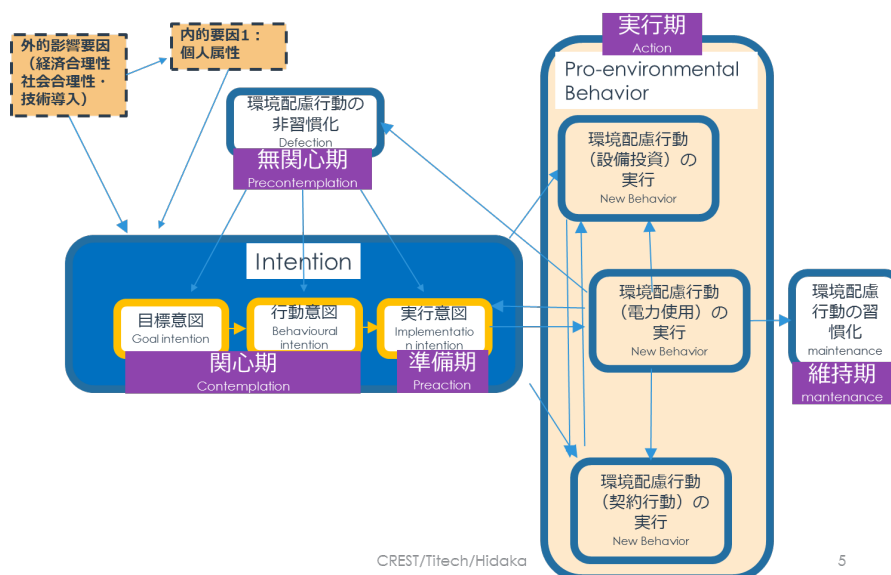


図3-2-8-3 需要家行動モデル(仮説)

平成28年度は研究計画を検討するために、多岐にわたる既存研究分野の論文の調査、仮説モデルの設定、実証実験環境整備、実験計画策定を行った。今後、スマートメーターが電力会社によって順次配置されていくことを前提に、近い将来の実際の環境と同じにすべくスマートメーターを利用したシステム構成を設計した。

実証地選定とシステム設計・構築、実験計画について、以下に説明する。

(2) 実証実験環境整備

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ケーションメディアと連携し、実験環境の整備を行った。

具体的には、次のとおりである。

【実験参加者の募集】

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

【スマートメーターの設置工事】

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

【システム設計・構築】

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

システム構成図は、図3-2-8-4の通りである。九州電力によると九州電力内のスマートメーター配置工事後、B ルートを経由してサーバーへアップロードし、各家庭の電力データが画面上で確認できるようなシステムを構築した。

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

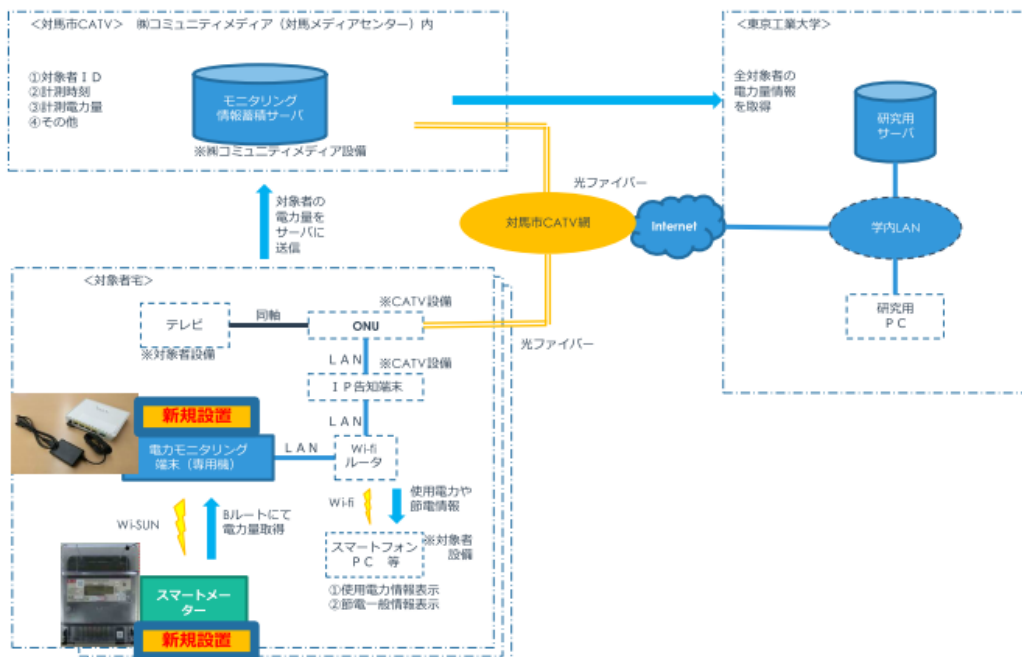


図3-2-8-4 対馬市実証実験システム構成図

(3) 実験計画と進捗状況

図3-2-8-3の仮説モデルをもとにシステム構築と同時に実験計画を策定した。今後も対馬市や住民との協議を重ねるが、現時点では次の通りのスケジュールと実験内容を検討している。

2016年12月～2017年3月	実験前の行動意図に関するアンケート調査 電力消費量見える化の実施 実験後の行動意図に関するアンケート調査
2017年4月～2017年8月	50世帯追加募集開始と第二期実験のシステム構築
2017年9月～2018年3月	再生可能エネルギーの発電量表示と教育手法の組み合わせ (図3-2-8-5参照)
2018年4月～	対馬市CATVによるブロードバンドによる実証実験

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

H29 年度の実験としては、再生可能エネルギーの発電量表示と教育手法の組合わせ等を実施予定である。対馬のほとんどの住民は、再生可能エネルギーがどのくらい発電しているか、自然条件によってどのくらい変動するかわかっていない。現状が分かっていない中で、行動変化を促しても、一時的になる可能性が高い。発電状況を把握することで、行動意図と行動変容に影響があるかを明らかにする。

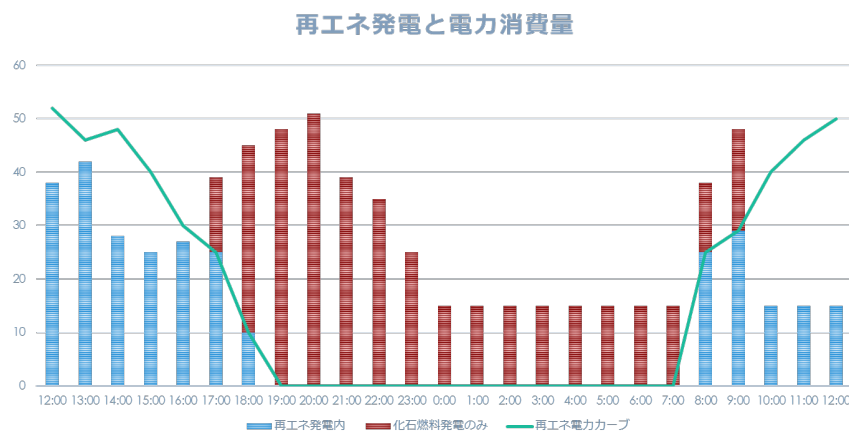


図3-2-8-5 対馬市実証実験画面例

(4) チームへの貢献および成果発表

H28 年度の研究成果の一部である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は、チームで執筆した「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)^{その他著作物 4)}の中で報告され、エネルギー需要科学の基礎的知見として貢献することが出来た。また、事業所需要家の EMS における資源化の研究の一環として、ビル空調業者のリモートモニタリングシステムの適応可能性の調査を行い、論文(Hidaka et al., 2016)^{原著論文 3)}に発表した。

3-2-9 需要家情報の整理

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意義をとりまとめ、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、東工大の3グループで2年間に7回の需要関係グループ会議を実施した。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9-1)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。

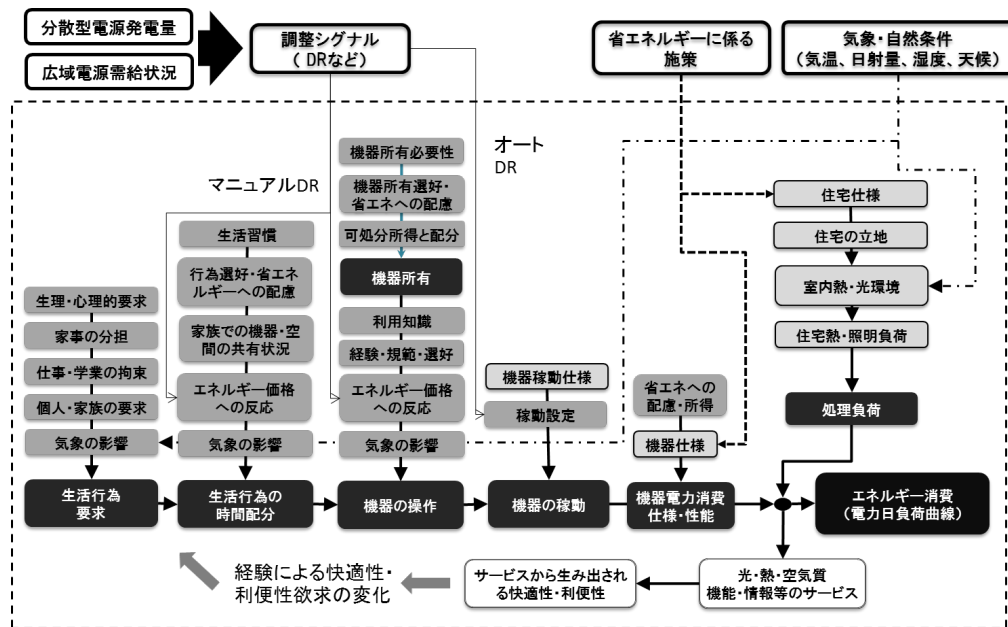


図9-1 要素分解型アプローチの一例

得られた成果を以下の形で発表、あるいは発表予定である。

- 1) 2016年11月21日には、東京大学生産技術研究所エネルギー工学連携センター(CEE)第26回CEEシンポジウム「エネルギー需要を科学する」を開催し、本グループから下田、日高、山口、岩船、内田Tから依田(京大)、その他西尾(電中研)が講演した。
- 2) エネルギー・資源学会学会誌に総説として投稿:本グループ全員の連名として「エネルギー需要科学の確立～エネルギーマネジメントにおける需要研究」として2017.4.11に投稿済みである。
- 3) 2017年1月17日には、JST-CRDS 科学技術未来戦略ワークショップ「未来エネルギーネットワークと需要科学」～2050年超の一般家庭でのエネルギー需給構造の変革時代到来に向けて～において、下田が「エネルギーマネジメントと需要研究」として、上記検討結果の一部について発表した。

3-2-10 データ・インタフェースの開発(東海大)

(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のデータおよび他の気象データなど、当チーム需要科学グループを含むEMSに関わるもの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。H28年度は、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、共有データとして提供するデータについての検討を行った。

(2) クラウド環境を利用したデータ提供サーバの導入

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データなどの気象データは、H27年度にデータ提供サーバとしてデータ提供が行えるプロトタイプを作成した。気象庁が提供しているデータや、総務省統計局が提供するオープンデータなどのデータは、需要科学分野でも利用されるデータであり、その種のデータを取得しやすくすることもデータ・インタフェースの目的としている。それを実現するためのアプローチとして、各種オープンデータの取得が API により取得し易いクラウド環境の利用について検討した。Amazon AWS や Microsoft Azure など利用者の多いクラウドに関して長所・短所を検討した結果、日本語などへのサポート状況を考慮して Microsoft Azure を選定した。構築したクラウド環境の全体像を図 10-1 に示す。

H27年度に構築した気象データ提供サーバを、Microsoft Azure クラウド上へ移植し、データ提供が可能となった。想定するデータ提供先は、大阪大学(下田教授)や早稲田大学(藤本准教授)などである。ユーザは本クラウドシステムに Web ブラウザを通してアクセスし、データ取得希望期間および指定地点もしくは指定地域(市区町村)を入力すれば、データ入手が可能である(図 10-2)。

(3) 今後の展開計画

クラウドシステムでは、データ提供サーバの CPU 性能、スペックは性能を考慮して随時変更可能であるため、まずは CPU2 コア、4GB RAM で構築したが、今後の実利用の状況を考慮して費用対効果に優れたスペックに拡充できる。(20 コア 140GB RAM まで拡充すると価格は約 15 倍)。更に、クラウドの機能として、SINET 内での高速通信が可能なインターフェースの利用や、データ処理速度を高速化するための並列処理機能やシミュレーションなどの際に高速化できる GPU 利用、予測モデル構築のための深層学習機能なども利用が可能であり、これらの機能を有効に利用することを検討している(図 10-3)。

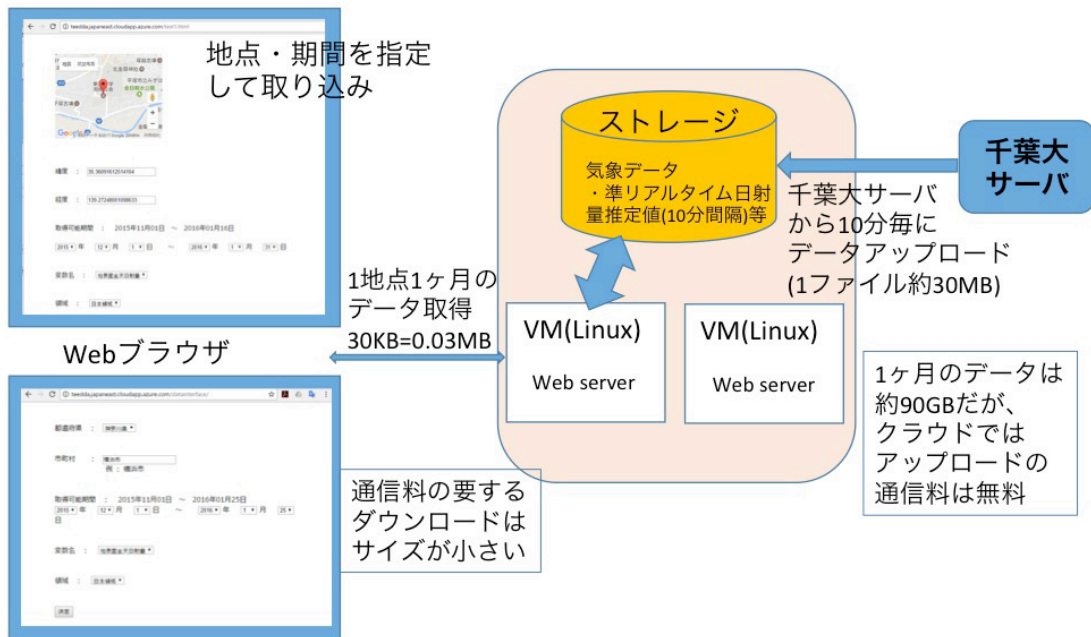


図 10-1 構築したクラウド版データ・インタフェースの全体像

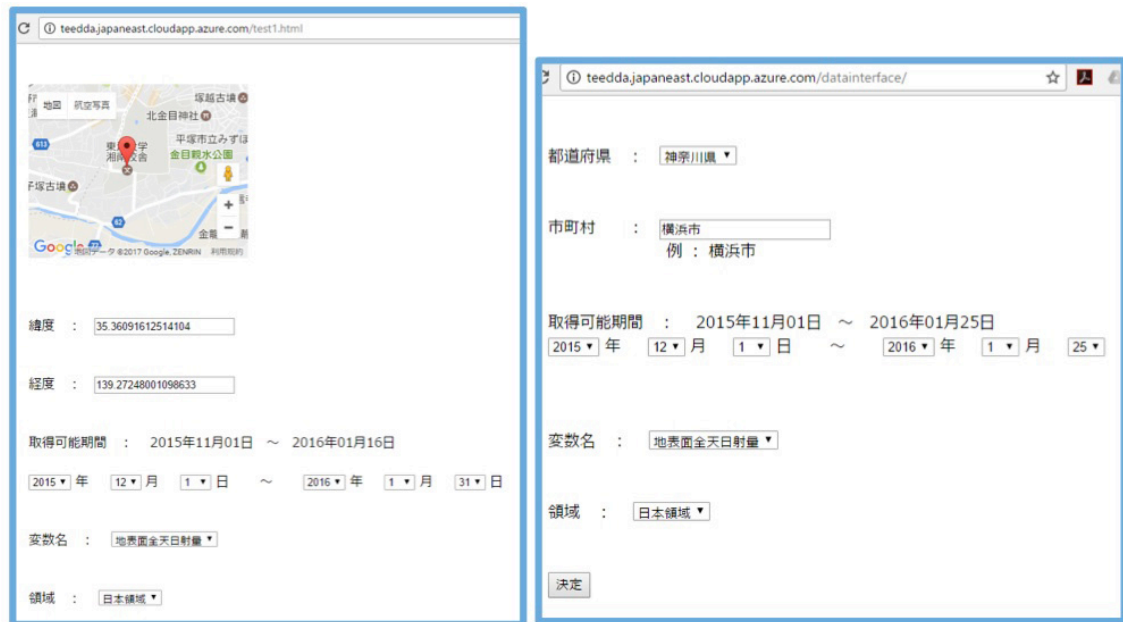


図 10-2 クラウド版データ・インタフェースへのアクセスとデータ指定方法
左図:データ取得地点を地図から指定。右図:データを市町村単位で指定。

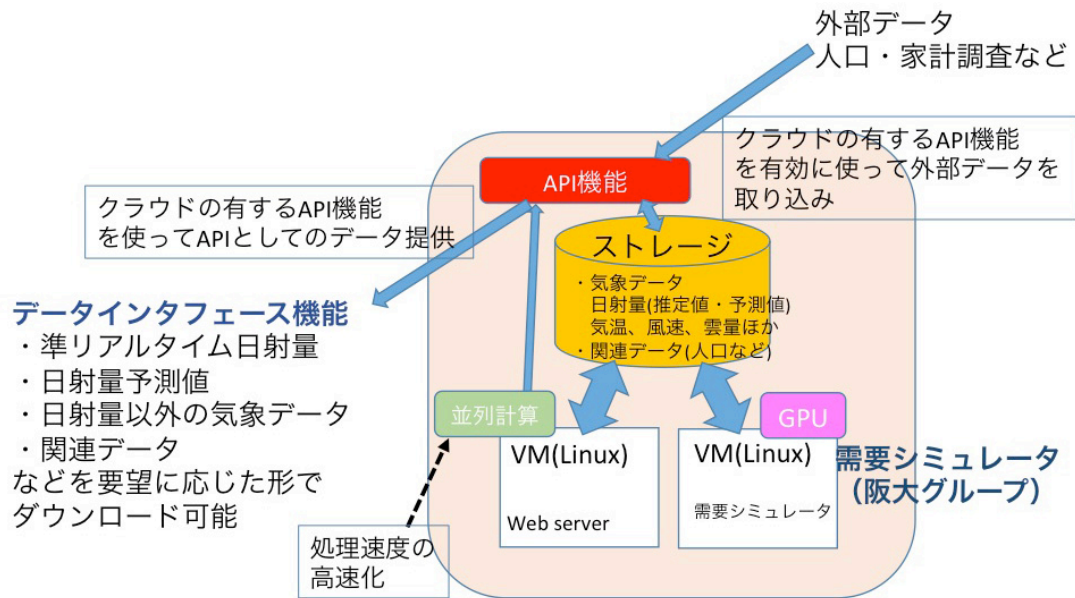


図 10-3 クラウド版データ・インタフェースの今後の展開計画

3-2-11 国際連携・国際交流

(1) 東海大グループによる取り組み

2件の交際交流を報告する。

東海大グループの情報技術センターは、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)と研究・教育協力に関する共同研究協定を締結した。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、氷雲解析の共同研究(Letu et al., 2016)^{原著論文¹³⁾}をはじめとした一層の相互交流が期待される。

気象庁はひまわり 8・9 号の気象業務への利用についてアジア・オセアニアの国家気象水文機関を支援しており、当チーム東海大グループ所属の気象庁メンバーはこれらの機関への CREST プロジェクトの説明および連絡窓口を請け負っている。H28 年度は各国の代表が参加する The 7th Asia-Oceania Meteorological Satellite Users' Conference に出席した。会議後にインドネシア気象局の専門家との国際連携の可能性について模索し、次の知見が得られた。

現在、各国の国家気象機関のデータ利用は、限られたリソースの中で出来ることから始めつつある状況である。放射伝達モデルの準リアルタイムな計算を実現する当チームの技術は、気象業務において根幹的な技術の一つである放射伝達計算において、そのリアルタイム性を向上し、必要な計算機資源や開発・更新に必要なリソースを抑制し得るものと考えられる。今後、アジア・オセアニアの国々において、ひまわり8号・9号を始めとした新世代の静止気象衛星の利用技術が醸成され高度化するにつれて、この CREST で扱っている技術(数値モデルへのエーロゾル同化や予測を含めて)へのニーズが顕在化していくものと考えられる。

(2) JAXA-東大グループによる取り組み

中国科学アカデミー大気物理研究所の Shi 教授、Dai 准教授との連携が続いている。CREST で使用している NICAM-SPRINTARS モデルのエーロゾル同化システムの構築に向けて協力研究を行い、ほぼプロトタイプが完成し、今後、ひまわり8号のデータ解析に使用する予定である。

(3) 千葉大グループによる取り組み

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 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している。またアジア・欧州研究者らとの共著論文執筆もそれぞれ進めている。H28 年度は AERONET 担当者が来日し、千葉大学にて比較相互実験を実施した(2016.5)。他に、タイ環境研究所(2016.6)、モンゴル科学技術大学(2017.2)との学術交流も行われた。

(4) 阪大グループによる取り組み

複数の国際連携を試みた中で、London-Loughborough (LoLo) Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC) Centre 所属研究者との連携に進捗があった。LoLo の Selin Yilmaz が大阪大学下田研究室に 2017 年 1 月から 2 か月間滞在した。研究の対象は住宅のエネ

ルギー需要推計モデルの開発であり、特に、家電製品の操作に関する実態データ分析とモデル化手法に関する共同研究を実施している。現在共著論文を執筆している。

(3-3) その他(技術移転など)

(1) 太陽放射コンソーシアム

地球科学分野における研究成果のスピノフを目的としてNPO 法人「太陽放射コンソーシアム」を設立・運営している。太陽放射コンソーシアムでは、正利用会員、準利用会員、非営利利用会員の3種の会員を募っている。正利用会員と準利用会員としては企業会員を想定しており、これらの会員は衛星推定太陽放射量を用いたビジネス展開が可能となっている。非営利利用会員は大学や研究所などの研究者を想定しており、研究・教育目的に限定した活用がなされている。

(2) 文部科学省の研究公募に採択

本チームのメンバーである樋口准教授(千葉大学環境リモートセンシング研究センター)を研究代表者とする研究チームにより、平成 28 年度文部科学省「地球環境情報プラットフォーム構築推進プログラム 基幹アプリケーション FS」に応募し、採択された実績がある。研究開発課題名は「静止気象衛星群より導出された太陽放射・太陽光発電量推定の世界展開」である。

※ (3-3) 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。)