

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「分散協調型エネルギー管理システム構築の
ための理論及び基盤技術の創出と融合展開」

研究課題「再生可能エネルギーの調和的活用に貢
献する地球科学型支援システムの構築」

研究終了報告書

研究期間 平成24年10月～平成27年3月

研究代表者：中島 孝
(東海大学情報技術センター、教授)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

当研究チームは、再生可能エネルギーの需要と供給の両方に関係する日射量、風、地上気温などの地球物理量を精度良く、かつ適時に把握するため、CREST/EMSの枠組みにおいて特に地球科学をベースとした研究を進めた。最新の衛星観測と大気モデルを用いることで、短い時間スケールで大きく変動するこれら地球物理量の実況・予測値を、地球上の任意の場所と時刻で計算することを目指した。約2年間の研究を実施した結果、原著論文19件、招待講演21件などの多くの研究成果を得ることができた。

平成24年度はチーム内の組織化、情報共有の手段および対外アピールの手段の確立、基盤整備、および衛星、モデル、検証における基礎研究を進めるとともに、学会等における成果発表を活発化させることを目標とした。

平成25年度は本研究の実施で必要となる機器備品等の基盤を継続して整備するとともに、チーム内各研究グループにおける基礎研究をさらに深化させた。そのとき、衛星データに基づく日射量の計算を高速化とモデルによる日射計算を試行することを目標とした。さらに、フィージビリティ・スタディの枠組みを活用した計測制御系や電力系など異なる学術分野との積極的な交流を図りながら、当研究チームの研究項目の一層の具体化を進めることを目標とした。

平成26年度は、現在実施中の衛星データ解析やモデル開発、検証機器の開発を継続しつつ、平成27年度からのCREST/EMS最強チーム構築に向けた準備が進められた。具体的には平成26年10月7日に打ち上げられた第3世代静止気象衛星（ひまわり）の利用に向けた衛星データ流通経路の検討、雲特性解析アルゴリズムの新規点の検討、得られた日射データ等の配布ルート の検討、日射等予測の検討を実施した。加えて地上に設置された日射データ等の分析を進め、日射変動の特徴を把握する研究を実施した。本体研究と並行して、最強チーム構想の構築をFSの枠組みで実施した。FSで連携したチームはCREST/EMSチームのうち、早稲田大学、東京大学生産技術研究所、慶應義塾大学（東大情報）、東京工業大学（東京理科大学・産業技術総合研究所）である。

東海大学、東京大学、千葉大学、気象庁、富山大学の研究者が研究に参加した。東海大学グループはフィージビリティ・スタディを含む研究全体のコーディネート、衛星日射解析の高度化、および日射量変動の分析を通じてチーム全体に貢献した。東京大学グループは衛星日射解析システムの改良、衛星データの補正、日射等の短時間予測に資するモデル開発によってチーム全体に貢献した。千葉大学グループと富山大学は衛星から得られた日射量の検証を通じてチーム全体に貢献した。気象庁は海外の気象現業機関あるいは研究機関との情報交流を積極的に図ることで、成果の世界展開の道筋の開拓に尽力した。

(2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

1. 再生可能エネルギーの導入を前提としたエネルギーマネジメントにおける重要な視点は、エネルギー需要や供給と関係なく変動する日射や風の理解である。そこで、本CRESTの枠組みを活用して、地上日射観測量から日射変動の特徴を抽出する研究を実施した。従来の研究は、例えば日射活用のポテンシャルを得るための年間日射量等の検討で主体であったから、今回実施した短期間の変動に関する解析は今後インパクトを与えうる。現在、論文投稿準備中である。
2. 衛星データを用いた日射量的高速算定と配信を行うEXAMシステムを構築した。ひまわりデータにEXAMを適用し、精度の高いデータセットを構築して、他チームに配信した。またデータを民間企業に配信するために、太陽放射コンソーシアム(NPO法人)を組織し、配信を開始した。同時に、MIROC気候モデルと非静力学大気モデルNICAMを用いた日射算定システムを構築した。特に、NICAMダイヤモンド格子系の稼働と、それを用いた日本付近の日射量算定システムの開発を行った。さらにモデル値を衛星観測による雲データに同化することにより、モデル算定精度を向上させた。また、予測システムのプロトタイプを開発した。これらの成果はエネルギーマネジメント分野のみならず地球科学分野に対してもインパクトを与えうる。
3. 再生可能エネルギーの需要と供給に関わる日射量等の精密検証を担うSKYNETは、唯一、アジア域を中心に国際展開されている地上観測ネットワークである。本課題で実施可能となった継続観測・高度観測(直達/散乱日射の区別、大気成分(雲等)との同時観測、天空観測)により登録サイト数の拡充、誤差要因解明等が進められた。今後、将来の温暖化シナリオ予測精度向上や地球科学データ有効性の評価に不可欠なグラウンド・トゥールースとして重要な役割を果たすことが期待される。

＜科学技術イノベーションに大きく寄与する成果＞

1. 衛星日射算定を6分まで短縮したことにより、新たに打ち上げられたひまわり 8 号から得られる大量のデータを十二分に利用して、精度の高い日射量データを即応的に配信できるので、ビジネス応用などに波及効果が大きい。現在、気候変動に対応するために、気候サービスへの衛星データ等の配信が国際的に大きな課題になっているが、本システムは世界最高速レベルなので、国際競争力のあるデータ提供が可能である。
2. 気候変動に関する政府間パネル（IPCC）評価活動にもシミュレーション結果が提供されているMIROC気候モデルを用いた日射量の算定システムを構築したので、20世紀実験や将来予測実験に対応する日射量の変動を示すことができるようになった。また、次世代型非静力学モデルNICAMによる日射算定システムは、京HPCIを利用した最先端科学計算への道を拓いた。また、衛星データの同時利用によって日射量算定精度を向上させる手法とそれを用いた予測システムのプロトタイプを構築したので、太陽放射エネルギーのマネジメントにも貢献できる。
3. 現在一般化されている全天日射量計測の限界を超え、日射量の天空 2 次元分布等の計測機器開発を再生可能エネルギー活用の議論のもとで推進したことで、衛星による日射量推定値の高精度校正データを得る手段の基盤技術開発・実用化に道を拓いた。安価な民生品の活用をベースに検討したので、多くの地上地点において計測を実現する見通しがあり、次世代標準気象観測機器の国際展開をリードできる基盤を形成できた。

§ 2 研究実施体制

2.1 研究チームの体制について

① 「東海大学」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
中島 孝	東海大学	教授	H24.10～
長 幸平	東海大学	教授、 情報理工学部長	H24.10～
横塚 英世	東海大学	准教授	H24.10～
操野 年之	気象庁・気象衛星センター	データ処理部長	H24.10～
別所 康太郎	気象庁・気象衛星センター	データ処理部長、 システム管理課長	H25.4～
渡邊 武志	東海大学	特定研究員	H25.4～
青木 一真	富山大学	教授	H24.10～

研究項目

- ・ 全体とりまとめ及び雲プロセスの高度化、気象解析

② 「東京大学」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
中島 映至	東京大学	教授	H24.10～
竹中 栄晶	東京大学	特任研究員	H24.10～
井上 豊志郎	東京大学	特任研究員	H24.10～
Mudhaliar. S. Anand	東京大学	特任研究員	H25.2～H26.3

研究項目

- ・ モデル開発、衛星解析高度化、放射に関わる指導監督

③ 「千葉大学」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
入江 仁士	千葉大学	特任准教授	H24.10～
Pradep Khatri	千葉大学	特任助教	H24.10～
久世 宏明	千葉大学	教授	H24.10～
高村 民雄	千葉大学	グランドフェロー	H24.10～

研究項目

- ・ 検証総括、SKYNET維持管理、検証機器開発

④ チーム編成

当研究チーム（以下、TEEDDAチームと呼ぶ：§ 5（2）参照）を、衛星グループ、モデルグループ、検証グループの3サブグループに分け、それぞれの研究担当の明確化を図った。さらにグループ間での情報交換を容易にするためメーリングリストを開設するとともに研究支援担当者を東海大学に置いた。それぞれのグループのメンバー及び実施研究項目は§ 3に記載した。

2.2 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

(1) 国内研究交流

(1-1) フィージビリティ・スタディ (FS) での取り組み

東海大学グループ・東京大学グループ・千葉大学グループが構成する中島チームが算出する地球科学データの利活用を計ることを主な目的として、2013年度のフィージビリティ・スタディ（以下、「FS」）第1フェーズ、および2014年度のFS第2フェーズにおいて幾つかの連携チームと協働の取り組みを行った。連携チームはCREST/EMSの早稲田大学、東京大学生産技術研究所、慶應義塾大学、東京工業大学である。

FS第1フェーズ、第2フェーズの研究テーマを、それぞれ「EMSで使用する地球科学情報を配信するためのビッグデータ・インタフェースの作成」、「地球科学情報の可用性の向上とEMSで考慮すべき環境変動の明確化」とした。このように平成27年度からの最強チームを構築するために必要な研究の階段を1段ずつ上がるようなテーマ設定となっている。連携チームは、それぞれ制御系、電力系を専門としているチームであり、中島チームが算出する地球科学データの利活用のバリエーションが豊富になるように、チーム構成を工夫した。このFSの取り組みにより、地球科学分野-計測制御分野-電力分野のネットワークを構築することが出来た。

(1-2) 情報分野科学者との連携

FSを実施する過程において、データプラットフォーム設計が課題として浮上してきた。すなわち提供するデータのアクセシビリティを向上させるための、データフォーマット、メタデータ、アンシラリデータの設計、および必要なデータを確実に読み出すためのAPI化などである。問題対応及び平成27年度から始まるCREST最強チームによる研究を視野に入れた準備として、データ科学に精通している研究者との交流を開始している。

(2) 海外研究交流

(2-1) 豪州交流

豪州は広い国土の地表面状態のモニタリングのためにリモートセンシング技術を活用しており、今回の地球科学情報の利用ユーザーとして有望である。2014年6月に中島チームメンバーが豪州気象局(BoM)、豪州連邦科学産業研究機構(CSIRO)、豪州連邦地球科学機構(GA)を訪問して、情報交流、ネットワーキングを実施した。

地上での大気放射の観測ネットワークを構築しているCSIROは、太陽日射分野でも気象衛星データの利用技術開発に早くから取り組んでおり、BoMと連携しながら日本の気象庁が運用する静止気象衛星「ひまわり」を1978年から活用している。日本の次世代の静止気象衛星「ひまわり8・9号」搭載の多チャンネル可視・赤外データを用いた日射量の推定技術および利用技術開発にも強い関心を示していることから、現地において当該の技術開発の状況について調査すると共に、技術開発における本共同研究との連携の可能性についても意見交換を行った。豪州では1990年代から電力料金の自由化、送配電網の更新等の施策が進められており、温暖化防止対策の一環としての風力・太陽光発電等の再生可能エネルギーへの転換が促進しており、その結果として、太陽光発電の占める割合が急速に増大し、変動の大きい日射量の正確な予測技術開発が急務となっている。

(2-2) 欧州交流

欧州との交流は欧州気象衛星開発機構(EUMETSAT)、およびドイツ気象局(DWD)が中心である。2013年11月に中島チームメンバーが欧州に出張し、情報交流、ネットワーキングを図った。衛星からの日射量の推定については、特に大気放射モデルの精密化や高速化においては当研究チームの手法がEUMETSAT及びDWDと同等以上のレベルであることを確認した。気象衛星センターが実施している衛星観測画像から算出された雲の移動ベクトルを外挿することで1時間程度先までの雲の分布を推定する試みについても本出張

で紹介した。今後の協力の枠組みについても意見交換を行い、中島チームへの参加機関でもある気象庁気象衛星センターを介して、本研究とEUMETSAT及びDWDが間接的に連携することについて了解を得た。欧州、特にドイツは国策として再生可能エネルギーの普及拡大に取り組んでいる。特に2001年に電力の固定価格買い取り制度が採用された以降、北部の風力発電、南部の太陽光発電共に着実に普及しており、特に太陽光発電のコストは、2006年からの5年間で半額以下に低減している。このような状況で、電力供給システムの制御技術にリアルタイムで日射量の推定値を利用するための技術開発についても先行しているのではと期待したが、実際にはスマート・グリッド等の電力伝送の制御システムの技術開発の立ち上がり、風力・太陽光発電システムの普及よりも後だったため、衛星データをリアルタイムの制御に用いている事例はEUMETSAT及びDWDの担当者からは確認できていない。このように、CREST/EMS領域が特徴的に実施している研究、あるいは先行している部分があることが確認出来た。

(2-3) 米国交流

再生可能エネルギーの導入に積極的な国のひとつが米国である。コロラド州デンバー郊外にある再生可能エネルギー研究所(NREL)は、その傘下に太陽光研究施設(SRRL)および風力技術センター(NWTC)を有し、再生可能エネルギー研究の中心的役割を担っている。そこで2014年度に中島チームメンバーが現地を訪問し、JST、CREST研究課題のひとつとして東海大・東大・千葉大の合同チームで実施している太陽日射推定の研究成果およびCREST/EMS/TEEDDAプロジェクトについてのプレゼンテーションを行うと共に、現地における観測拠点や観測機材の視察を実施した。加えて、コロラド州ボルダーに所在する大気科学研究所(NCAR)で開催された太陽日射予測ワークショップに参加し、米国で実施されている再生可能エネルギー研究、とくに太陽光の予測研究についての情報を収集した。

米国においても地球科学情報をベースとした研究は順調に進捗しているが、例えば衛星による日射推定は必ずしも準リアルタイムをめざしてはならず、日射のポテンシャル解析等での利用が主体であるなど日本との違いはある。また、モデルによる日射予測は一般に入手可能なWRF(Weather Research and Forecasting)モデルを利用した内容が主体であった。また、CREST/EMSで実施している、地球科学と計測制御、地球科学と電力分野、等々の異分野融合の動きについては今回の情報収集の範囲では明確には確認できなかった。NREL所属の研究者らとのネットワーキングが構築されつつあるため、今後とも米国との協調を進めたい。

§ 3 研究実施内容及び成果

本章では、活動グループ単位に報告を記す。活動グループと組織グループの関係は以下の表の通りである。

	衛星グループ (3.1節)	モデルグループ (3.2節)	検証グループ (3.3節)
「東海大学」グループ	○		
「東京大学」グループ	○	○	
「千葉大学」グループ			○

3. 1 衛星グループ

【研究参加者】

中島孝、渡邊武志、Husi Letu（協力）、長幸平、横塚英世（東海大学情報技術センター）、竹中栄晶、井上豊志郎、坂下太陽（東京大学大気海洋研究所）、操野年之、別所康太郎（気象庁気象衛星センター）

3. 1. 1 はじめに

本グループにおける目的・進捗及び成果は以下のとおりである。

(1) 基盤整備

本研究課題の実施に不可欠な日射量推定アルゴリズム開発用計算機やデータ・ストレージを平成24年度、平成25年度、平成26年度に順次導入した。これにより研究に必要な静止衛星「ひまわり」等のデータの収集・整理が開始された。また、研究に必要な計算コードの開発と計算を開始する事ができた。

(2) 日射量算定システムの高度化

日射量を高精度に推定するためには太陽放射を吸収・散乱する大気中のエアロゾルを精度よく見積もる必要がある。時空間的に大きく変動する吸収ガスである水蒸気も日射量の大きな不確定要素となる。また、太陽光発電パネルの効率は直達日射と散乱光の割合に対しても大きく変動する。衛星観測データの位置情報は物理量推定に大きな影響を与えることから、補正方法の検討を行った。日射量推定に必要となる雲、大気エアロゾル、及び水蒸気の定量的把握、及び日射量の直散分離の高度化を実施するための準備を行った。フィージビリティ・スタディ（FS）の枠組みを活用し、異分野の研究グループとの衛星データや気象庁データの共有や活用を図ることが出来た。例えば、事故時復旧手段の研究を例に必要な地球科学データ変動要素の明確化、短期変動や長期変動が太陽光発電に与える影響の評価、機械学習を使った日射予測、PV発電量のリアルタイム把握への適用性検討等がなされた。

3. 1. 2 研究実施報告

(1) 東海大学宇宙情報センターにデータ解析サーバ導入

平成24年度に日射量実況データの速報性を高めるため、衛星データ受信設備がある東海大学・宇宙情報センター（熊本）に日射量準リアルタイム推定システム用のデータ解析サーバを新規導入し、受信系にサーバを隣接させ。平成25年度には実際にサーバが定常稼働し、千葉大学の既存サーバとともにリダンダントなシステムが構築され、従来以上に安定的なデータ提供が可能となった。また、データ解析アルゴリズムや処理手順の最適化を図った結果、従来はデータ受信後約30分を要していたデータ処理が、6分程度にまで短縮され、より準リアルタイムのデータ要望に応えられるようになった。このように当初目標としていた即時性の向上は達成された。さらに、異分野連携の取り組みの中で、過去における日射デー

タが大量に必要な研究課題が発生したことから、2007年、2012年の「ひまわり衛星」観測データの再処理を実施した。これらの成果については次項で詳しく述べる。以上に述べた成果については、論文等（中島ら2013）で発表した。また、得られた成果についての学会発表を多数実施した（中島ら2013[太陽エネルギー学会]、中島2013[気象学会]、Nakajima 2013[ISAP2013]、Takenaka et al. 2013[AGU]、など多数）。さらに、より多くのユーザーを獲得する新しい枠組みを構築するためにNPO法人「太陽放射コンソーシアム」を設立した。日射量データの開発と公開は、研究推進から実利用まで広く有効であると考えられ、コンソーシアムの設立は産業界への働きかけの強化につながっている。

（2）衛星観測データに基づく日射量の推定（再解析及び準リアルタイム解析）

再生可能エネルギー、特に太陽放射をエネルギーとして積極的に利用するためには、基礎データとなる地表面日射量の時空間的な分布とその現況を準リアルタイムで把握する技術、そして現況観測に基づく予測技術が重要な要素となる。本研究では静止衛星観測データに基づく太陽放射量の高精度推定手法を開発し、高速な準リアルタイム解析システムを構築した。また、過去の静止衛星観測データ・アーカイブを活用することで日射量の時空間的な変化の履歴を解析し、日本全体を網羅する日射量データベースを構築した。平成24年度は衛星観測データ緯度経度情報をShuttle Radar Topography Mission (SRTM)の高度データを用いた位相限定相関法によって高精度に補正する位置情報補正アルゴリズムの開発、気象庁MSM/GPV(Meso-Scale Model/Grid Point Value)大気場を適用した日射量プロダクトの開発、そして衛星観測データに基づく日射量解析結果を用いた太陽光発電出力マッピングを行った。平成25年度はそれらを統合した新しい準リアルタイム解析システムの構築と、解析アルゴリズムを過去データに適用した日射量アーカイブの作成、またそれによって得られた東アジア域の日射特性について議論した。平成26年度は再解析によるデータ・アーカイブのさらなる追加と、準リアルタイム解析システムの解析結果を最大限に活用し、2007、2012、2013、2014の約4年間の日射データによって明らかになった東アジア域の日射特性について議論した。

a 日射量準リアルタイム解析システムによる現況把握

衛星観測データに基づく日射量の推定は広域の日射量を面的に得ることができるため、日本全体を網羅する日射量データを作成することができる。また、静止衛星を利用するならば、静止軌道の特性から定点を任意の時間分解能で観測できる。従って時々刻々と変化する日射量を把握することに適している。太陽光発電システムが多数接続された電力システムを運用するためには、現在の太陽光発電システムの発電状況を正確に把握する技術がひとつの重要な要素となる。本研究では太陽光発電システム等の、分散型電源とみなされる発電機が複数存在する電力システムを運用するための制御技術の開発等に資する新しい準リアルタイム解析システムを構築している。平成25年度は先行して開発されていたMSM/GPV大気場を用いた新しい放射プロダクト作成用アルゴリズムと、衛星観測データの位置精度高精度補正アルゴリズムを統合し、新しい準リアルタイム解析システムを構築した。また、細部の処理を見直し積極的に並列処理を導入することで計算時間は約6分まで短縮された。これにより本チームが研究開始時に公約として掲げていた処理時間10分以下を実現している。さらに、実際の運用を想定し千葉大学環境リモートセンシング研究センターと東海大学宇宙情報センターにおいて解析システムを運用し、災害時などでも安定的にデータを供給できるリダンダントなデータ提供を実現している。また、準リアルタイムにて解析された日射量データはNPO法人太陽放射コンソーシアムを窓口として既に企業へ提供されている。

b 静止衛星観測データ過去アーカイブによる再解析日射量データ

構築した解析システムを「ひまわり」衛星観測データの過去アーカイブに適用することで日射量の時空間的な変化の履歴を得ることができる。これにより猛暑や冷夏など特定の現象における数値実験などを可能とすることができる。太陽光発電システムが現在よりも

多く導入されている条件を仮定するならば、電力制御や系統運用のシミュレーションにおいて重要な情報を提供できるだろう。平成25年度は2012年のデータを中心に再解析を行った。また、CREST/EMSにおいて連携している他チームの要請をうけて2007年の解析も同様に行っている。今回はさらに2013年の再解析を実行した。ここでは時間分解能30分、空間解像度1kmの日射量データベースを構築している。

c 考察

2013年及び2014年の全天日射量月平均値を図3.1-1、及び図3.1-2に示す。ここでは日本時間の6時から18時までを平均し日中平均を作成した後、月別の平均値を月平均としている。昨年度作成した2007年、2012年と合計するならば4年分のデータとなる。一見して各年の月毎のパターンは異なるものであることがわかる。特に梅雨の時期に当たる6月、7月は、年ごとに顕著な違いが見られる。2007年7月は北海道と沖縄周辺を除いて低い値をとっているが、2014年は全体的に日射量が高かったことがわかる。また、8月は2014年において沖縄周辺を除く領域が全体的に低い値をとっている。これは東アジア域の雲活動に起因する変化であると考えられるが、隣接する年の同じ月でも大きく異なるということに注意したい。昨年の結果と同様に、6月から7月にかけて梅雨の時期に日本列島全体としては日射量が低くなる傾向が見られ、通年としては5月の日射量が高い傾向が見られる。また、1月から3月、9月から12月までは対流活動が穏やかなためか、比較的似たパターンを持ちやすいことがわかる。

図3.1-3～図3.1-6に散乱日射量と直達日射量を示す。6月から7月にかけて散乱日射量の増加と直達日射量の減退が見られるが、これは昨年の結果と同様にTakenaka et al. (2011)¹によって示された東アジア域から北太平洋にかけての散乱日射量と直達日射量の季節変化を捉えたものだと考えられる。日本領域では散乱日射量は6月に最も高い値となっているように見えるが、直達日射量は6月に最も低くなる場合と7月に最も低くなる場合がある。これは雲特性の違いによって引き起こされているが、この傾向の違いに関しては今後調査していく必要があるだろう。

図3.1-7及び図3.1-8に年平均全天日射量と年平均直達日射量を示す。各年の全天日射量はよく似たパターンを持っている。また、関東から南において2007年、2012年に比べて2013年の日射量が高い傾向が見られる。ここで直達日射量に着目すると、2007年、2012年に比較して2013年は関東、中部から九州まで広範囲で高い値を示していることがわかる。このことから、2013年は雲活動の変化によって日射量が他の年よりも高い傾向であったと考えられる。これは東アジア域の雲活動に起因しているが、しかしながら北海道や東北地方では目立った大きな変化が無いことに注意したい。以上より、準リアルタイム解析と再解析を活用しながら、中長期的な日射データの解析を行うことで東アジア域の日射特性を知ることが可能であることが分かった。これらは再生可能エネルギーである太陽放射の活用に重要な情報を与える可能性がある。

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

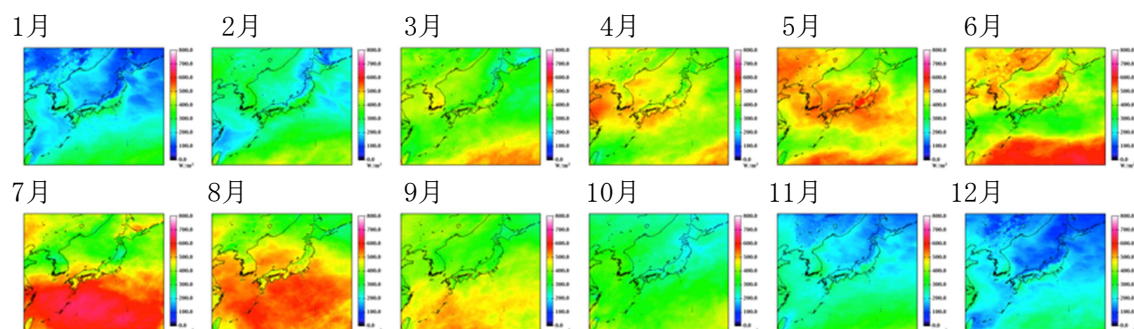


図3.1-1 衛星推定全天日射量（2013）。日本時間午前06時から18時までの平均を日中平均として算出し、12ヶ月の日中における月平均を算出した。使用した衛星推定値は1x1km解像度30分毎のデータである。

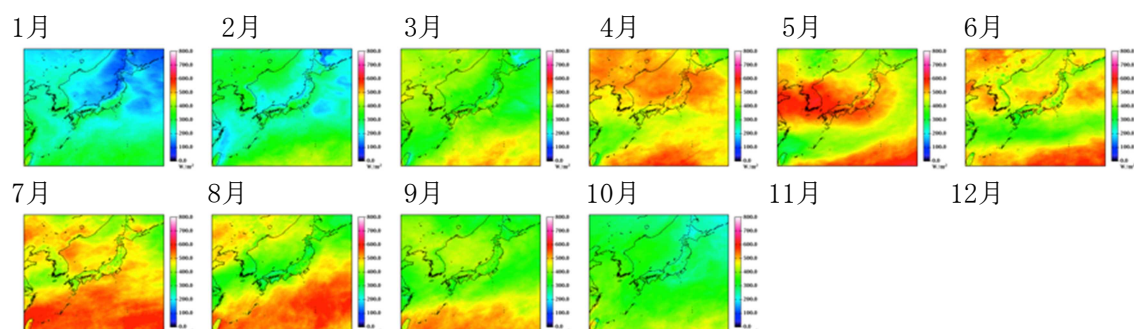


図3.1-2 図3.1-1に対応する2014年12ヶ月間の全天日射量。
（本報告書の提出が2014年12月であるため、2014年は10月までとなっている）

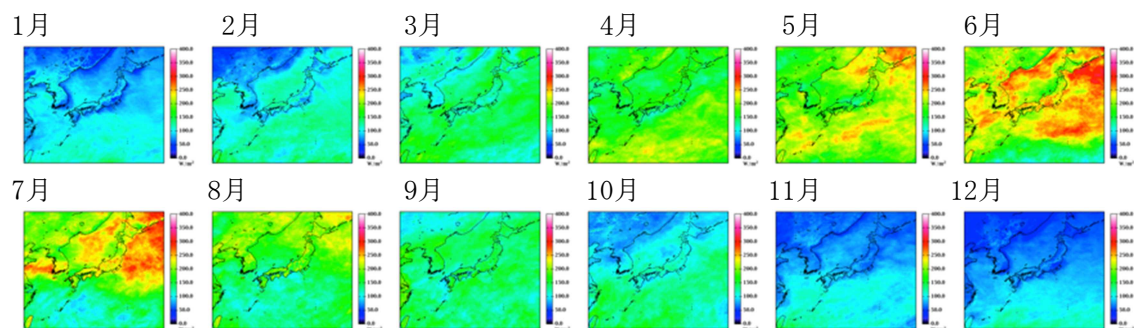


図3.1-3 図3.1-1に対応する2013年散乱日射量

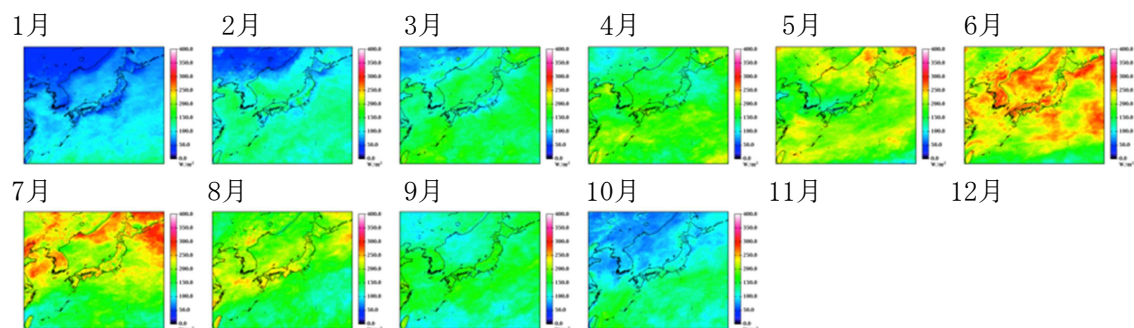


図3.1-4 図3.1-1に対応する2014年散乱日射量
（本報告書の提出が2014年12月であるため、2014年は10月までとなっている）

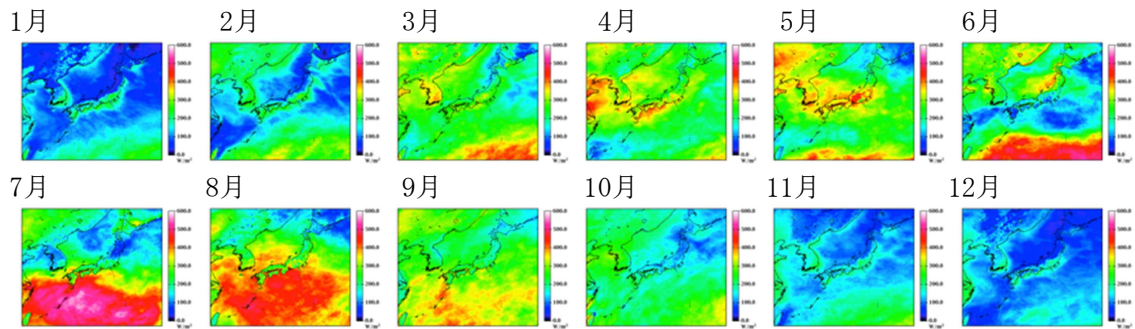


図3.1-5 図3.1-1に対応する2013年直達日射量。

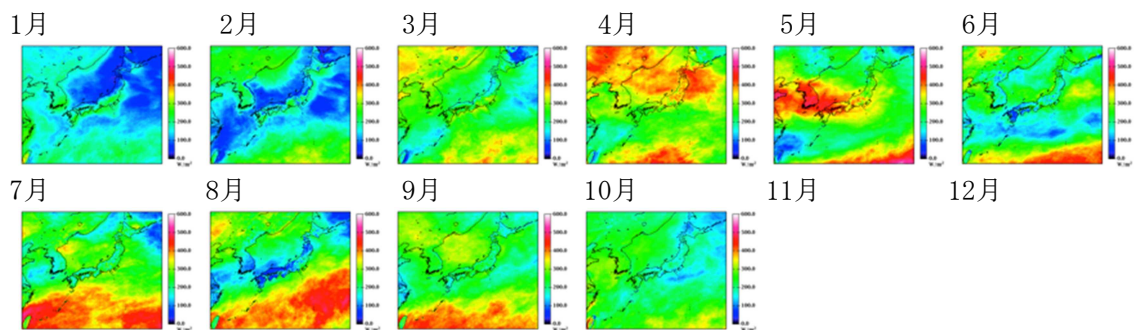


図3.1-6 図3.1-1に対応する2014年直達日射量。

(本報告書の提出が2014年12月であるため、2014年は10月までとなっている)

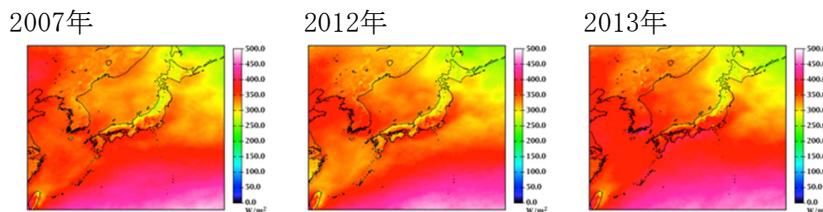


図3.1-7 各年の年平均全天日射量 (2007, 2012, 2013)。

(本報告書の提出が2014年12月であるため、年平均値は2013年までとなっている)

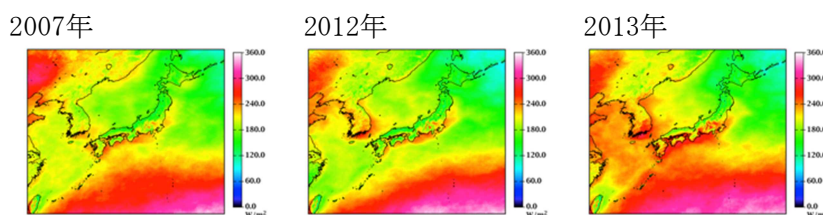


図3.1-8 各年の年平均直達日射量 (2007, 2012, 2013)。

(本報告書の提出が2014年12月であるため、年平均値は2013年までとなっている)

(3) 日射量推定アルゴリズムの高精度化 (報告書分量調整のため概要のみ記す)

大気上端に到達した太陽放射は大気を通過して地上に到達する。日射量を高精度に評価するためには、大気中の雲やエアロゾル、水蒸気などの吸収ガスを高精度に得る必要がある。特に静止衛星による観測では日本全体を高時間分解能で網羅的に観測できるため、日射量の推定には有効な手段となる。本研究では衛星観測データに基づく日射量の推定において重要な要素となる水蒸気とエアロゾルの推定手法の研究を行なった。CREST/EMS開始初年度(平成24年度)は衛星観測データから水蒸気量(可降水量)を直接推定するための手法とその可能性について調査した。平成25年度はそれに基づき実際にUTC02時32分の衛星観測

データから可降水量を推定し、その精度の検証を行った。平成26年度は日中の日射推定時間に対応する時刻の可降水量推定を行い、その精度について調査した。基準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。

得られた結果を吟味したところ、RMSEは5mmを下回っているため十分な精度が出ていることがわかり、この手法で衛星観測データから日射量の推定に必要な水蒸気量を高精度に推定することは十分に可能であることが分かった。

(4) データアクセス・ツールの整備

平成24年度に開始したフィージビリティ・スタディ (FS) では、大量の地球科学データを配信するシステムの検討を早稲田大学チーム、東京工業大学チーム、東京大学生産技術研究所チーム、慶應義塾大学チームと共同で取り組んだ。10数回開催した各種会合や領域会議の場、及びメールベースでの情報交換による多くの討議と検討を重ねた結果、EMS研究においては地球科学データへのアクセスツール（読み出し、統計値計算、等）が必要であることが明らかになった。そこで、FSの仕組みを利用してデータアクセス・ツールを整備しFS専用ホームページから公開した。なお、これらのツールについてはFS成果報告会等において更なる改善要望が出されていることから、継続して整備する。

(5) 豪州ソーラーカー支援（報告書分量調整のため概要のみ記す）

2013年10月に豪州で開催された世界最大級のソーラーカー・レース、World Solar Challenge (WSC)を支援するために、衛星に基づく地上日射データ、及び気象庁データ（気温、風など）の地球情報を現地の東海大学チームに提供し、同レース準優勝に貢献した。データ提供においては、時々刻々と変化するレースカーの位置をデータ提供システム側で常時把握し、レースカーおよび周辺領域の地球情報が明瞭に判明するような工夫を行った。結果、移動体を追跡しながらの地球情報の提供が十分に可能であることが示された。

(6) 地上観測日射量データを用いた日射量変動

日射量は様々な時間スケールの変動を示す。そこで本研究では、地上観測日射量データを用いて、日射量の変動特性を調べた。平成26年度には「R a m p（気象の急激な変化）」の予兆検出システムの構築に必要な研究テーマ設定のための基礎的な検討を実施した。ここで使用した変動指標は、サンプルエントロピー (Sample entropy) である。サンプルエントロピーは気象分野ではなじみの薄い指標であるが、その可用性について確認することとした。まず、サンプルエントロピーが日射量の急激な変動をとらえることができるかどうかを確かめる必要がある。そこで、短時間の日射データが存在する石垣島における気象データとサンプルエントロピーのデータセットを作成した。対象日は、2012年9月26日と同年9月30日である。9月26日と9月30日はそれぞれ日射変動が早い日と、変動がほとんど無い日に相当する。図3.1-9に示すように、計算の結果、日射量の変動が大きい時間にサンプルエントロピーが大きくなることが分かった。サンプルエントロピーの値の大小に関係する雲の種類、空間分布の特徴を理解することは、日射量の急激な変化を予測するためには重要な知見となる。

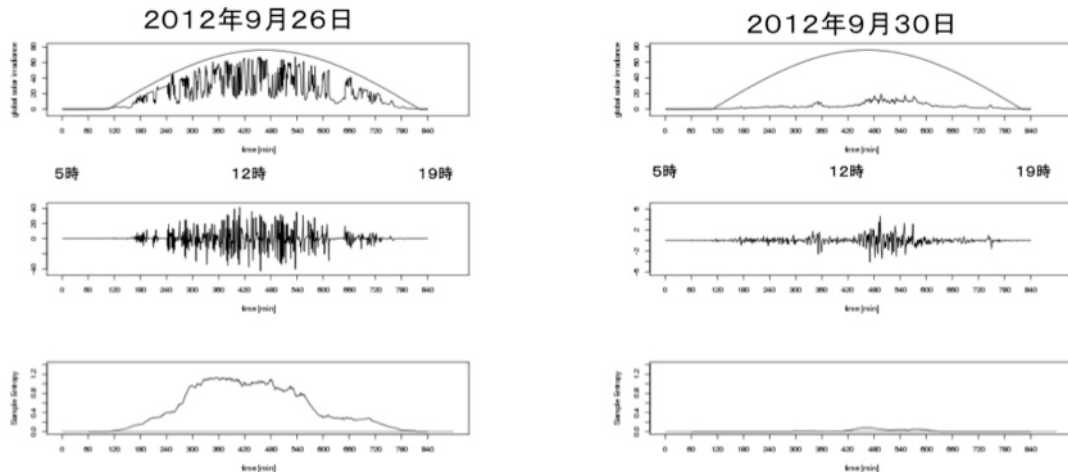


図3.1-9 2012年9月26と9月30日の解析結果。図は（上段）地上観測1分間全天日射量（中央）全天日射量の階差系列（下段）Sample entropy $N=120$, $r=6.7$, $m=2$ 。ウインドウの中心時刻をプロット

（7）衛星推定日射量に基づく太陽光発電出力マッピング（報告書分量調整のため概要のみ記す）

再生可能エネルギーを国の基幹電力の一つとして導入するためには、時々刻々と変化するその出力の実態を把握する事から始めなければならない。特に太陽光発電による出力は時空間的に変動が大きいと、その時間変化と空間分布の両者を観測に基づいて得ることが重要である。また、日本における太陽光発電設備の導入量は総発電量の1%よりも十分に小さいが現在は増加傾向にある。従って、既に設置されている太陽光発電設備における電力を記録として集約するだけでは不十分であり、任意の性能をもった太陽光発電設備が任意の地点に設置されていた場合、どの程度の出力を得ることが出来るのかを把握する基礎データが必要である。本研究では衛星推定日射量に基づく発電量マッピングによって、時空間的な発電量把握のための新たな基礎データの構築を目的とした。研究の結果、太陽光発電システム全体の発電効率をモデル化して、衛星推定日射量に基づき任意の地点における発電量を見積もることが出来た。

（8）FFT 位相限定相関法による「ひまわり」HRIT データの位置情報高精度補正アルゴリズムの開発（報告書分量調整のため概要のみ記す）

太陽光発電出力を高精度に推定するためには、衛星観測に基づく高精度な日射量の推定が重要な要素となる。しかしながら、近年において日本の静止気象衛星「ひまわり」における観測の位置精度が低いことが問題となっている。観測情報の位置精度に誤差がある場合はゲリラ豪雨などによる小さな積乱雲の発生の検知などを見誤る可能性もあり、これは気象/気候研究から産業界のみならず、広く一般の利用に関しても大きな問題となる。特にラピッドスキャンなどの高頻度観測においては観測対象の短時間における変化を迫りかけることから、高精度な位置情報が不可欠である。本研究では静止気象衛星「ひまわり」の位置精度を補正する高精度かつ高速なアルゴリズムの開発を目的とした。「ひまわり」観測データにSRTM(Shuttle Radar Topography Mission)の30秒メッシュデータを基準としてFFTによる位相限定相関法を適用し、位置補正を行なった。地球センサ抑止運用後の大きな誤差が発生しているが、高精度に補正されていることが分かった。これによって高精度に位置情報を補正できることが分かった。

3. 2 モデルグループ

【研究参加者】

中島映至、打田純也、竹中栄晶、井上豊志郎、三澤翔大、大方めぐみ、坂下太陽（以上、東京大学大気海洋研究所）、Mudhaliar S. Anand (Bhabha Atomic Research Centre, India)、Tie Dai（中国大気物理研究所）

3. 2. 1 はじめに

本グループの目的・進捗及び成果は以下のとおりである。

(1) 基盤整備

本研究課題の実施に不可欠な地球物理量算定モデル開発用計算機を平成25年度に導入した。

(2) 地球物理量算定モデルの開発

再生可能エネルギー、特に太陽光発電出力を電力として利用するためには、日射量の短時間予測技術が不可欠となる。ここでは衛星推定日射量との融合的解析による地球物理量算定モデルの開発を行った。平成25年度以降に日射量短時間予測技術の検討を行った。また、気候変動に伴い再生可能エネルギーに関わる風、日射量、地表面温度が将来気候においてどのように変化するかについてのフィージビリティ研究を進めた。平成26年度には、これまで開発してきたNICAM+SPRINTARS非静力学エアロゾル輸送モデルを利用した日射量算定計算を、「ひまわり」静止衛星から得られる雲特性データに同化するシステムを開発した。それによって日射量のモデル算定精度を向上させた。さらに、この新しい衛星推定値を初期値とした日射量予測システムのプロトタイプを作成した。また、3次元離散雲が存在する場合の日射量のモンテカルロ型放射計算システムを開発した。

3. 2. 2 平成24年度までの研究実施成果

(1) 地球物理量算定モデルの開発

地球科学型支援システムのモデリング部分を担うモデルの開発に着手した。このモデリングのために、大気流体計算コードとしてはNICAMモデルおよびNHMモデルを用いた。前者は非静力学全球大気モデル、後者は気象庁で開発された非静力学領域モデルである。これらにSPRINTARSエアロゾル放射・輸送放射モデル²を組み込んだシステムを開発した。特に、NICAMモデルでは、全球の数値計算を行うために全球をほぼ均質に覆う六角形の標準格子のほかに、シュミット変換によって注目する領域により多くの格子点を配置するストレッチ格子系が装備されている。本研究ではさらに注目する領域のみに計算機のリソースを与えて領域大気モデルとして利用できるダイヤモンド格子系を開発した（成果学会発表：打田ら，2012）。平成24年度は、これらの多機能の格子系を利用して、NICAM+SPRINTARSが全球計算から領域計算をひとつのモデルでカバーできることを確認した。その例として図3.2-1に、ストレッチNICAM+SPRINTARSによって計算された日本付近における硫酸塩エアロゾルの地表面濃度および関東域におけるPM2.5の分布を示す（成果学会発表：中島ら，2012）。図3.2-2には図3.2-1の気象場における地表面日射量の分布を示す。

本研究では、さらに日射量に影響を与えるエアロゾル場の推定の精度を上げるために局所アンサンブル・カルマンフィルター法を用いたエアロゾル同化システムを開発した。この手法によって、関東域に存在する浮遊粒子状物質 (Suspended Particulate Matter; SPM) 観測値をモデルによって同化すればより現実的なエアロゾル場を用いた日射量の算定が可能になる。SPM 観測局は関東域だけで400 点以上存在する。エアロゾル濃度の過小評価は、全球シミュレーションに関する過去研究においては、これまでに指摘されており、エアロゾル場のデータ同化の必要性は高い。

² 中島映至を含む著者らが論文発表(2000, 2002, 2005)

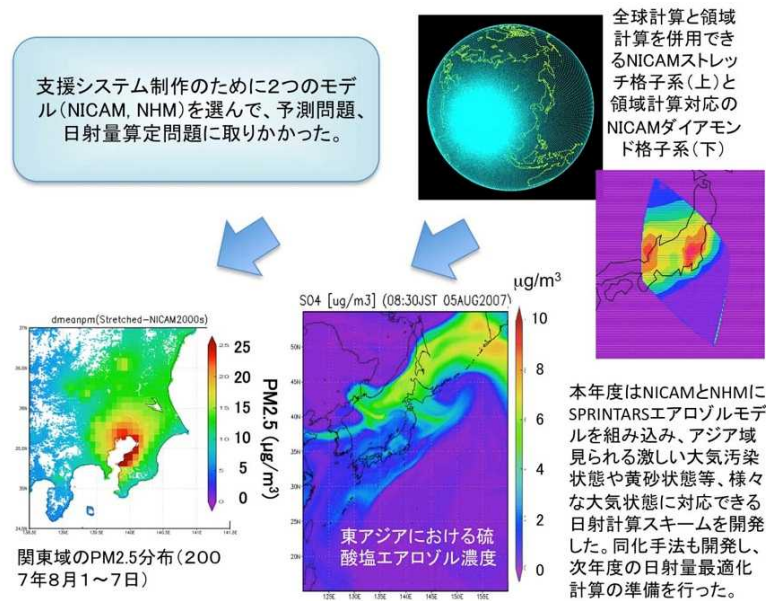


図3.2-1 様々なスケールのモデル整備。NICAMの2つの数値計算格子システム（ストレッチ格子とダイヤモンド格子）、ストレッチ格子を用いたNICAM+SPRINTARSモデルによるPM2.5と硫酸塩エアロゾルの地上付近の濃度。2007年8月1-7日の平均値。

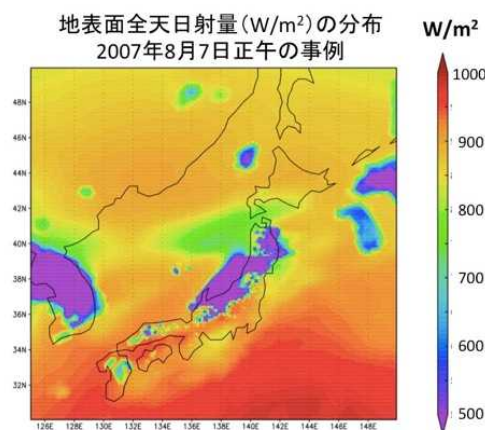


図3.2-2 上図に示したエアロゾル場を与えた場合の日本付近での地表面日射量分布（左）。2007年8月7日正午の事例。

3. 2. 3 平成25年度の研究実施成果

平成25年度は、平成24年度までに高度化してきたMIROC+SPRINTARSとNICAM+SPRINTARSの2つのモデルを用いて日射量の計算を行った（成果論文：Nakajima et al., 2013）。図3.2-3はGoto et al.³の方法によってMIROC+SPRINTARSから計算した地表面日射量を、CERES衛星搭載放射計からの推定値と比較した。全球での全天大気状態での月平均値の標準偏差は 31.3 Wm^{-2} 、バイアスは 9.1 Wm^{-2} であった。この偏差はCERESと地上観測値との間の偏差と同程度であり、MIROC気候モデルも衛星と同程度の精度で全球平均を計算できることを示唆している。しかし、各領域を見ると東アジアにおいては、偏差が 60 Wm^{-2} 、バイアスが 30 Wm^{-2} と大きく、今後より改善を必要としている。一方、晴天条件では偏差が 14.0 Wm^{-2} 、バイアスが 7.5 Wm^{-2} であった。

³ Goto, D., S. Kanazawa, T. Nakajima, and T. Takemura, 2012: Evaluation of a relationship between aerosols and surface downward shortwave flux through an integrative analysis of modeling and observation. Atmos. Environ., 49, 294-301. (March 2012)

気候モデルは100年間程度の過去および将来の数値シミュレーションに向いているが、発電を行う個々の地点での日射量等のシミュレーションを行うためには、より空間解像度の高いシミュレーションが必要である。本研究では、前年度に開発したNICAM+SPRINTARSモデルを利用した。NICAM+SPRINTARSは、準全球一様格子、ストレッチ格子、ダイヤモンド領域格子によって様々な空間スケールの応用問題に精度よく対応できる。直達日射量に与える大気汚染エアロゾルや砂塵の影響計算も可能である。平成25年度はNICAM+SPRINTARSを利用して、全球の客観解析気象データやMIROC気候モデルによる全球のシミュレーション場を日本付近にダウンスケールする手法を開発した。NICAMは非静力学大気モデルとして高解像度計算の為に開発されており、図3.2-4に示すように雲や降雨量の再現性は高いので、NICAMを用いたダウンスケール法は日射量についても精度が高いと考えられる。

本研究では、日本付近で10km分解能程度の解像度を持つようにセットされたストレッチNICAMをMIROCで計算された全球気象場（気温、水平風）にナッジしながら走らせて、2000年代の代表的な8月の1ヶ月の計算を行った。そのうえで、得られた日平均場を使って、MIROCの月平均値にNICAMの月平均値が最適に一致するように最適化した。図3.2-5は、このように計算されたNICAMの月平均場をMIROCの月平均場と比較する。図によるとこのような最適化によって求められた地表気温（2m高）と日射量の月平均場は、それぞれの単純月平均場に比べてよりMIROCの月平均場に近づくことがわかる。図に示した領域（26.15° N-46.40° N, 125.43° E-149.62° E）での最適化によって求められたものと単純月平均場における領域平均の気温のズレはそれぞれ0.01~0.06℃、0.02~0.6℃であった。

この手法を用いて、1970年代、2000年代、2030年代のMIROCの月平均地表気温と日射量の場から日本付近にダウンスケールした場を図3.2-6と図3.2-7に示す。MIROCの計算値は文部科学省の予測革新プログラムによる20世紀再現実験と21世紀近未来予測実験結果を利用した。MIROCの水平空間分解能はT213（水平格子60km程度に対応）で、温室効果ガスの将来排出シナリオはRCP4.5を選び、それぞれの期間の10年平均値を利用した。得られた結果によると、日本とその周辺海域において、2030年代には2000年代と比べて温暖化と同時に20 Wm⁻²程度日射量の増加が期待される。

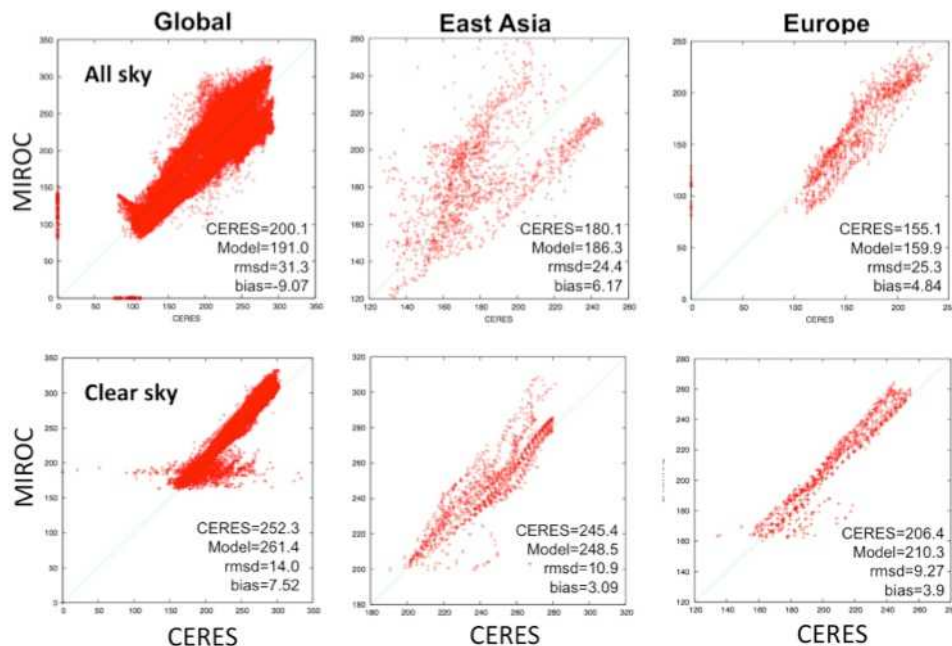


図3.2-3 地表面日射量. MIROC気候モデルの計算値をCERES衛星搭載放射計からの推定値との比較。各地域での全天大気（上）と晴天大気（下）の場合の月平均値の比較。

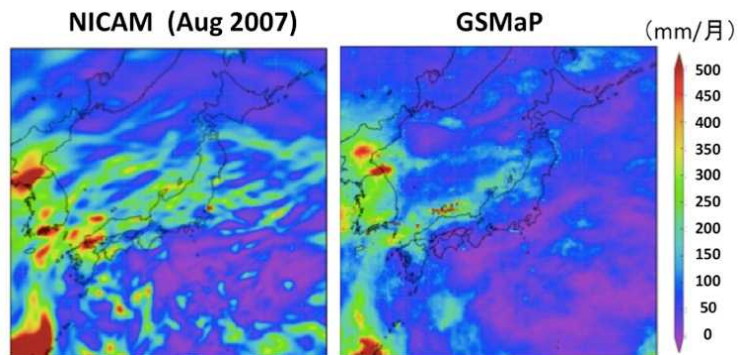


図3.2-4 降水量のNICAM計算値（左）と衛星観測値（右）の比較。2007年8月の月平均降水量(mm/月)。

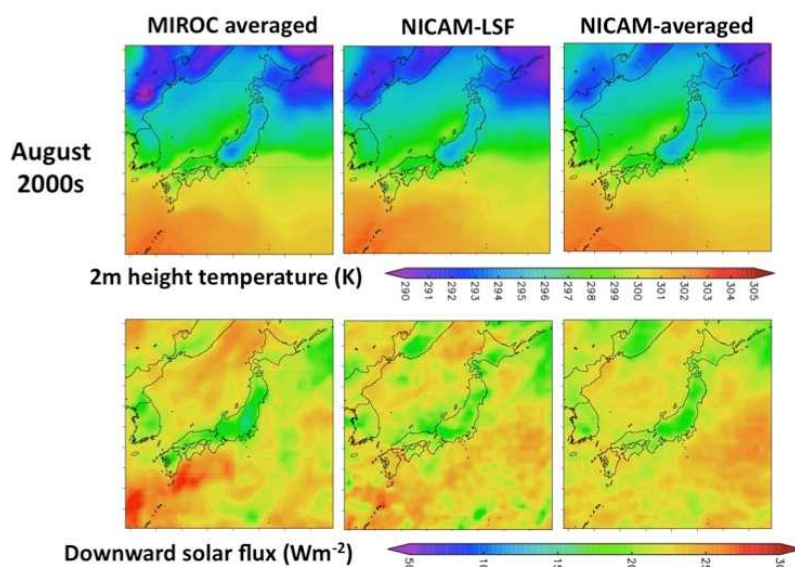


図3.2-5 典型的な2000年代のMIROC地表気温場と日射量の8月の月平均（左列）とMIROC場にナッジングされたNICAM場の単純月平均場（右列）。このようにして得られNICAMの日平均場から最適化された場（中央）も示す。

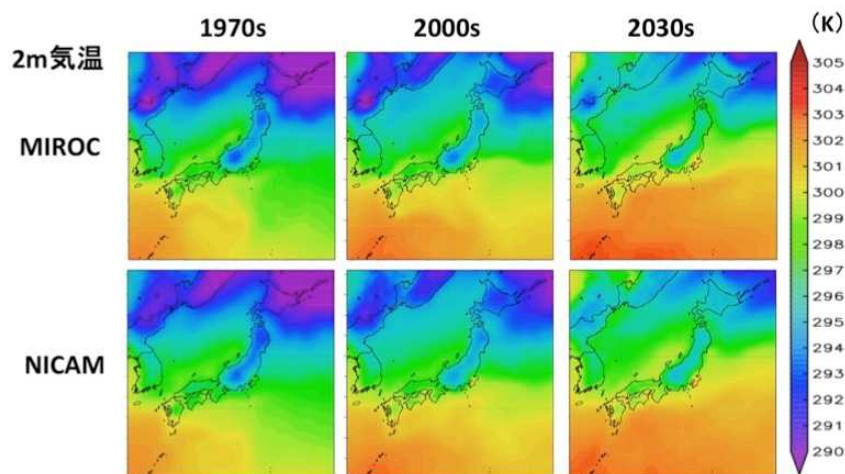


図3.2-6 図3.2-5の方法で得られた1970年代、2000年代、2030年代のMIROC場からダウンスケールされたNICAMによる地表気温場。

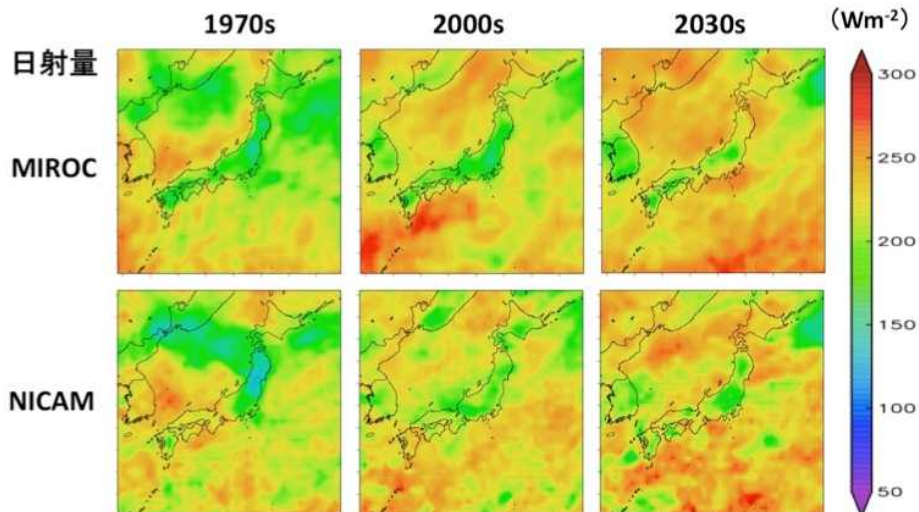


図3.2-7 図3.2-6と同じ。ただし、NICAMによる日射量。

3. 2. 4 平成26年度の研究実施成果

平成26年度は、これまで開発してきたNICAM+SPRINTARS非静力学エアロゾル輸送モデルを利用した日射量算定計算を、「ひまわり」静止衛星から得られる雲特性データに同化するシステムを開発した。この手法では、NICAM+SPRINTARSモデルによって計算される雲水密度 q_c を、衛星観測からの推定値 $q_{c, obs}$ にナッジング法によって同化する。図3.2-8はこの方法で得られた2012年5月1日から2日から9日の12時 (JST) の日射量 ($MSM+Q_c$) の分布を示す。比較のために、EXAMから推定された日射量 (GMS)、気象庁メソ客観解析気象データのみに同化した結果 (MSM) を示す。 $q_{c, obs}$ は、EXAMシステムから得られる雲光学的厚さと赤外輝度から得られる雲頂高度から算定した。光学的に厚い対流雲が卓越する5月3日と薄い上層雲が卓越する8日の事例について、衛星から得られた雲光学的厚さ (COT) と放射輝度温度 (TBB) を図3.2-9に示す。図3.2-8と比較してみるとわかるように、期間前半では5月2日のように光学的に厚い対流雲が卓越するために日射量は小さめであり、一方、期間後半は晴天状態に薄い上層雲が存在するために日射量は大きめの場合であった。雲水密度の算定には雲底高度も必要であるが、図3.2-8の場合は高度500mに設定した。図によると、MSMのみでモデルを拘束するよりも、衛星からの雲水密度も拘束する方が、日射量が衛星から推定したものに近づくことがわかる。特に、光学的に厚い対流雲が卓越する期間前半で改善の度合いが良い。図3.2-10に図3.2-8から作られた散布図を示すが、MSMのみに同化した場合の相関係数0.58が、雲水密度の同化を追加することによって0.73に増加し、また回帰線の傾きも1に近づいて、推定が改善されたことがわかる。しかし、傾きが0.43とモデル推定値が大幅に過大評価しており、今後検討する。前年度に報告したMIROCモデルからダウンスケールする手法では日射量の過大評価が見られないので、今回のNICAMモデルのMSMへの同化システムの問題であると考えている。

上記の評価において明らかになったもう一つの点は、上層雲が卓越する5/6から5/9の期間では、雲底高度を500mに設定したために、雲水密度が大幅に過小評価されており、そのために衛星雲水密度の同化過程で、雲形成が適切に促されない可能性がある点である。事実、図3.2-8では期間後半ではナッジングによる改善があまり見られないことがわかる。今後、雲底高度の適切な設定法について検討する必要がある。

平成26年度は、このようにして作成された日射量推定システムを適用して日射量の予測システムのプロトタイプも開発した。図3.2-11に、5月2日12時までMSMと衛星雲水密度でナッジングした後に、 Q_c ナッジングを止めた場合の5月3日と4日の結果も同時に示す。図が示すように、ナッジングを止めても1日程度は、改善効果が持続することがわかる。このことは、今回開発した雲水密度の衛星推定値の同化によってより良い初期値を用意すれば、日射量の予測問題が24時間程度は改善することを示している。

図には示さないが、平成26年度はさらに、3次元離散雲が存在する場合の日射量を適切に計算できるモンテカルロ型放射伝達コードを開発した。このコードを、MODIS衛星イメージャーとCLOUDSAT衛星搭載雲レーダーで観測された3次元離散雲の事例に適用した（成果学会発表：Okata et al., 2014）。その結果、日射量の算定には平行平板近似では誤差が大きいが、Independent Pixel Approximation (IPA) を適用すれば、誤差が大幅に減少することを示すことができた。EXAMシステムでは平行平板近似を用いているために、3次元離散雲を含む場合に地上観測値と比べて誤差が拡大する傾向があるが、IPA原理を利用した空間平均操作を行えば、平均値を適切に推定できると考えられる。

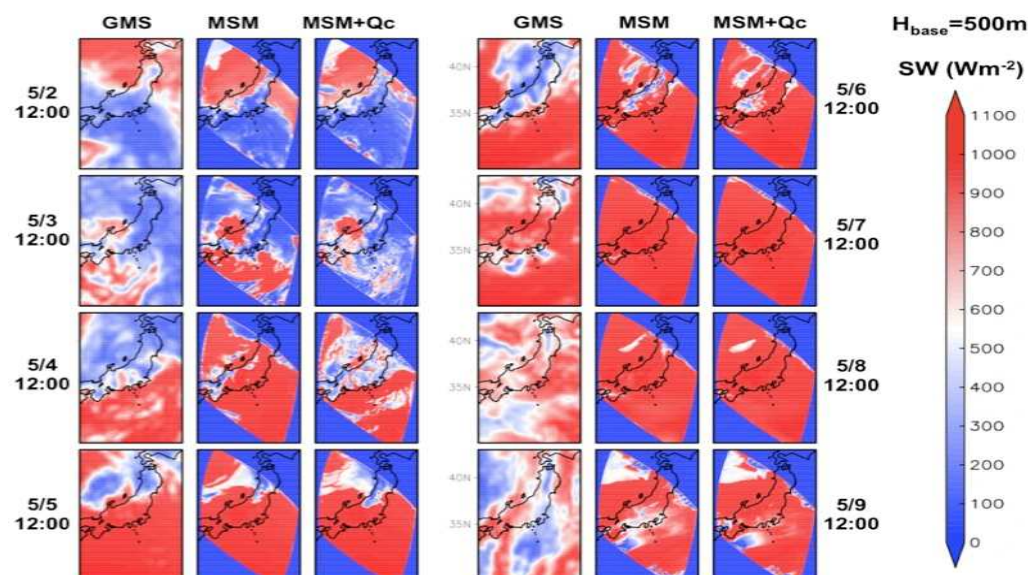


図3.2-8 2012年5月2日から9日の期間における正午（JST）の日射量（SW）のひまわり衛星推定値（GMS）、気象庁メソ客観解析データにナッジングしたNICAM計算値（MSM）、さらに衛星から得られた雲水密度でナッジングしたNICAM計算値（MSM+Qc）。衛星雲水密度の算定において雲底高度を500mに固定した結果。

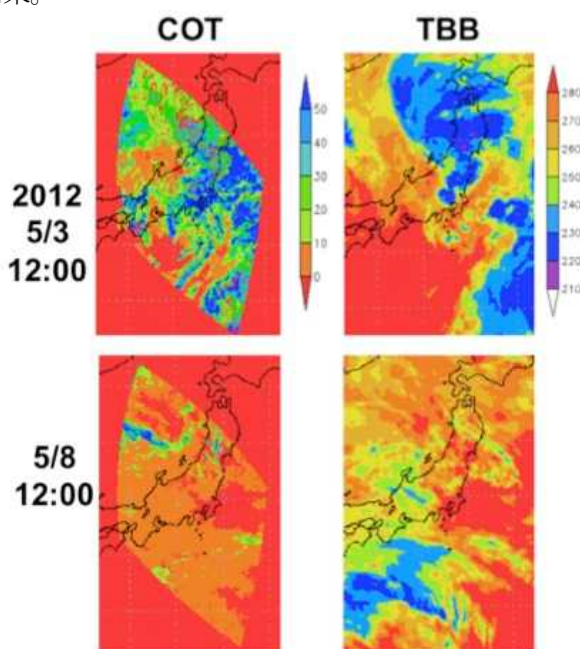


図3.2-9 2012年5月3日と8日正午（JST）の事例におけるひまわり衛星から得られた雲光学的厚さ（COT）と放射輝度温度（TBB）。

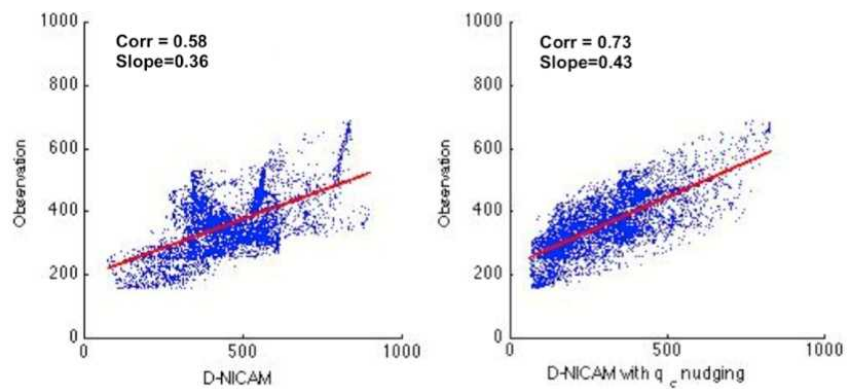


図3.2-10 図3.2-8の事例における衛星推定日射量とNICAM観測値の散布図。MSMナッジングのみと場合（左）とMSM および衛星雲水密度のナッジングの場合（右）。

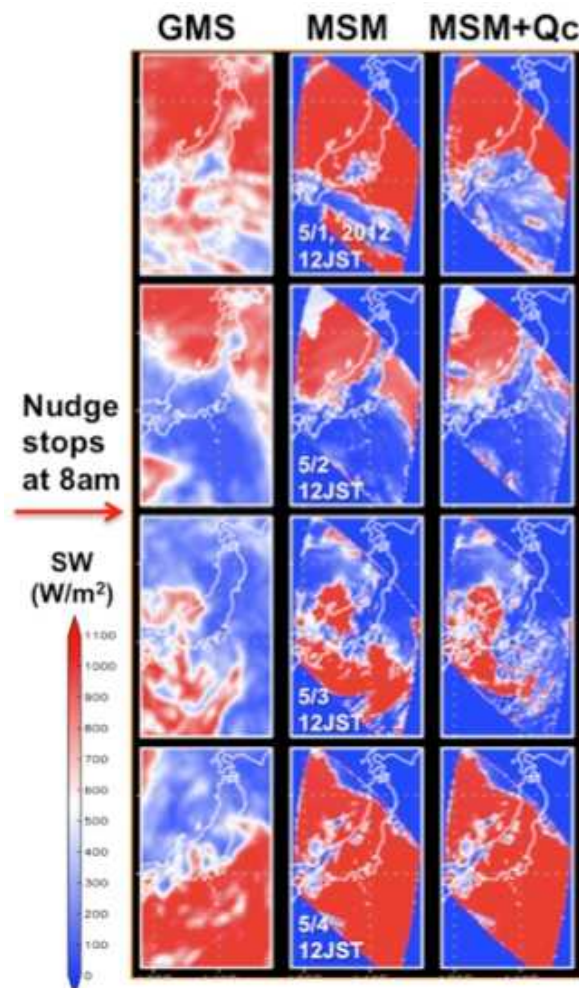


図3.2-11 図3.2-8の事例で、5月2日正午に衛星雲水密度のナッジングを停止した場合。

3. 3 検証グループ

【研究参加者】

入江仁士、久世宏明、Pradeep Khatri、高村民雄、眞子直弘（千葉大学環境リモートセンシング研究センター）

3. 3. 1 はじめに

地表面で受ける太陽エネルギーの推定精度は、推定に必要とする大気の光学パラメータの精度に強く依存している。この光学パラメータにはいくつかあるが、大気中での粒子状物質では雲とエアロゾル、気体成分では主として水蒸気とオゾンである。この中で、最も大きく関与するものは雲であり、その光学パラメータ（光学的厚さCOD; 有効粒径 r_{eff} ）の推定精度にかかっている。衛星データの利用による日射量推定を目指す、雲は他の要素に比較して極めて時間変動が激しく、時系列的に高精度の推定を行うことは容易でない。また、一定地域での予測には、その正確な位置情報もまた推定精度に大きく影響する。一方、晴れている場合にはエアロゾル情報が重要である。また気体成分では水蒸気が最も敏感であり量的に重要であるが、局所性が強く変わりやすい特徴を持っている。

広域での太陽エネルギーの推定には衛星データの利用が最も有利であり、さらに静止気象衛星は高頻度（現在、MTSAT2では北半球でほぼ30分ごと）に雲情報を得ることが出来る点で有利である。地表での太陽エネルギー推定には的確な上記の情報が不可欠であり、中でも雲情報は精度評価の中心となる。一方、太陽エネルギーはおよそ5800 K程度の黒体に近い放射を持っており、大気上端でおよそ1366 W/m²程度の全エネルギーであるが、大気中での散乱・吸収のために地上での全エネルギーや分光特性は状況によって変化する。植生やソーラーセルのような分光特性に依存するエネルギーの利用形態では、そうした情報も同時に必要となる。

衛星データを利用した太陽エネルギーの推定はこれまで地球環境の基本情報として多くの研究がある。物理モデルに由来する推定では、上記のようにその物理パラメータに依存するために、その精度が重要である。そのためにはこうしたパラメータの精度とその結果予想される日射量の検証が必要である。

千葉大学環境リモートセンシング研究センター(CEReS)では、エアロゾル・雲・放射に関する地上観測ネットワーク(SKYNET)を、内外の大学、各種研究機関と協力して維持しており、太陽エネルギーの推定だけでなく地球放射収支について研究を推進している。地上日射量の検証やそれに対応するパラメータの検証はこうしたデータを利用して実現することが可能となる。気象庁では、主として地球観測年(1957年)以降に放射に関する観測を行っており、最近ではBSRNへのデータ提供も行っており気候変動に関する調査研究に寄与している。こうした信頼性の保証された継続性のあるデータは衛星推定日射量の検証に極めて重要である。

本報告では、こうした衛星データを利用した日射量推定に関して、推定の元になる雲・エアロゾルのパラメータの観測とその推定手法の開発・検証、推定された日射量の検証について成果を述べる。

3. 3. 2 目的と実施方法

本研究の実施内容は以下の3つに大別される。

(1) 検証用データ取得のための地上観測ネットの維持・管理

千葉大学CEReSでは、地球環境研究の基礎資料として太陽エネルギーを含む放射エネルギーの地球大気内の行方について衛星データによる推定とともに、地上検証活動を実施している。検証の核になるのがSKYNET(<http://atmos.cr.chiba-u.ac.jp/>)と呼ばれる地上観測ネットワークである。これは唯一、アジア域を中心に国際的に展開されており、これらの地域の研究者との協力によって推進されている。国際的な評価・協力のもと、SKYNETへの

登録サイト数は右肩上がり、本研究期間中には100サイトを越えた。SKYNETには、全天日射量だけでなく、直達／散乱日射を区別する放射観測機器、さらには日射量に影響を与える雲・エアロゾル等の様々な大気成分を計測する多様な器材が展開されていることから、これらのデータを利用して、放射量及び雲・エアロゾルの検証を行った。こうした物理量の観測精度維持のため、SKYNETの維持・管理を定期的に行う必要がある。

衛星による日射量推定の精度を評価するには、直接地上で計測した日射量と比較することが最も直接的である。両者の差を定量化し、その要因解析を行うことは、精度向上に必須である。本検証グループはこうした観点で活動を行っている。日射量の変動は、雲・エアロゾルといった粒子状物質、水蒸気・オゾンといった微量気体の変動に起因する。大気中において、これらの因子は複雑なメカニズムで発生・発達・消滅を繰り返しており、時間的・空間的スケールも多岐にわたる。このような観点において、SKYNETでは異なる大気条件が期待される複数の検証サイトが維持運営されている。本研究では、これらの因子の変動を地上から精度良く計測し、同時に計測している日射量との整合性について新しい知見を得る。定量的な知見を得るには、それぞれの機材が正しく校正され、適切に運用されていることが前提となる。そのための校正に関する活動を定期的の実施し精度維持を図る。

(2) 検証用データセットの作成と比較検証

衛星観測から推定される日射量は、地上観測値と比較検証され、品質が保証される必要がある。本研究では、地上観測値としてSKYNETによるものと気象庁によるものを使用する。SKYNETでは主としてエアロゾルについては継続観測・解析を実施しており、日射量同様、千葉大学のホームページを通じて公開している。SKYNETの6サイト(千葉、辺戸岬、福江島、宮古島、仙台、ソウル)の地上観測データを検証データとして使用する。

気象庁の日射量観測は、沖縄気象台を含む全国の6管区、及び、51の地方気象台のうち47地点と父島・南鳥島の2地点を加えた49地点で行われている。これらの地点では全天日射量の計測が行われ、1分積算値でデータが記録されている。また、札幌、つくば(館野)、福岡、南鳥島及び石垣島では、直達日射量と散乱日射量をそれぞれ分離して計測しており、精度の高い評価が可能である。本研究では気象庁との共同研究によりこれらのデータも使用する。データは、2012年1月分から提供されており、現在も比較検証が進行中である。本研究では衛星から推定された日射量の検証を精密に行うために、推定日射量の時刻の±10分以内に得られた地上観測データを用い、その平均値を推定日射量と比較する。本研究のための検証サイトを図3.3-1に示す。



図3.3-1 衛星から推定された日射量の地上観測検証サイト。SKYNETの検証サイトは青色で、気象庁の検証サイトは赤色で示されている。SKYNETサイト数は少ないものの、多様な観測データが同時に得られるため、衛星推定値と地上観測値の差の要因解析が可能である。

(3) 天空輝度計測装置の開発

衛星からの推定日射量の誤差には多様な原因が含まれるが、雲・エアロゾル・水蒸気などの物理量推定時の誤差も重要な誤差要因である。特に、雲・エアロゾルの光学パラメータの推定にはスカイラジオメータ(波長別走査型天空輝度計測装置)を使用している。しかし、多様な世界各地域における雲・エアロゾルの精度評価には、広範にしかも簡易に利用可能な器材が必要である。本サブテーマで、従来の天空輝度分布が位相関数計測に重点を置いた天空の点の観測であったものを、2Dアレイを使用したカメラタイプのものにし、天空全体の輝度計測装置を開発する。これは従来のエアロゾル中心の計測から、雲の空間分布計測も可能にするもので、雲の空間非均質性に伴う推定精度の低下の原因解明への寄与が期待されるものである。

3. 3. 3 成果と考察

(1) 検証用データ取得のための地上観測ネットの維持・管理

検証用SKYNETサイトのうち本研究で特に重要なスーパーサイトでは、日射量だけでなくエアロゾル・雲に関する観測を並行して行っている。各種観測機材は屋外に設置されているため、その劣化等に対して適切に対応した。また、連続観測に支障の出た計算機等については従来よりも安定かつ安価なパーツ類に交換し、低消費電力化も図れるシステムとした。さらに、解析に際しては、地表面での日射影響評価を行う上で重要であるSKYNETによる可降水量とオゾン量の推定手法の開発等を実施した(成果論文: Campanelli et al., 2013; Khatrri et al., 2014)。

2013年7月には千葉大学において、SKYNET国際ワークショップを主宰した。また、2014年9月には中国合肥において同様のワークショップが開催された。これらのワークショップでは通常の研究成果発表に加えて、持続的な国際展開を視野に入れた形で、現在の地上観測ネットワークに関する情報共有・意見交換が行われた。特に、国際観測ネットワークのさらなる拡充を狙った戦略や、観測精度向上のための装置の校正方法・改良方針について議論がなされた。本研究で実施している再生可能エネルギー活用と関連した議論も研究成果発表とともになされたが、その方向性は先進国・発展途上国等を加えた形である点、また、地球科学を超えた活動である点で革新的であった。

国際ワークショップでの議論を踏まえ、本研究では次のように校正に関する研究を進めた。エアロゾルによる日射の吸収は大気を直接加熱させるため、地球温暖化の観点から特に重要視されているが、これを表すパラメータである単一散乱アルベド(SSA)の計測精度が不十分であり、現在SKYNETとAERONET(NASA主導の大気エアロゾル観測ネットワーク)の結果に一定の違いがあることが判明している。AERONETとSKYNET間のSSAの差の原因を明確にするために、SKYNETで採用している解析方法を用いて、AERONETの校正後のデータからSSAを推定し、オリジナルのAERONETのSSA値と比較した。この比較から、両者のSSA値の差が大幅に減ることが分かった(図3.3-2)。この結果によると、SSAの差は、解析方法ではなく校正方法に主に起因することが分かった。SSAを正しく推定するためには直達光と散乱光に対する校正定数が必要である。AERONETとSKYNETのエアロゾル光学的厚さ(AOT)はほぼ一致した。このことから、両者の直達光に対する校正定数はほぼ一致していたと考えられる。一方、AERONETと同様に積分球を用いてSKYNETの機材を検定したところ、AERONETに比べてSKYNETの方法を採用した場合、340-1020 nmにおけるエアロゾル観測用の特定波長の校正定数は1-7 %程度で過大評価することが分かった(図3.3-3)。さらに厳密には、AERONETと完全に同じ条件でSKYNETの機材を検定し、校正定数に関する不確定性を減らす必要がある。

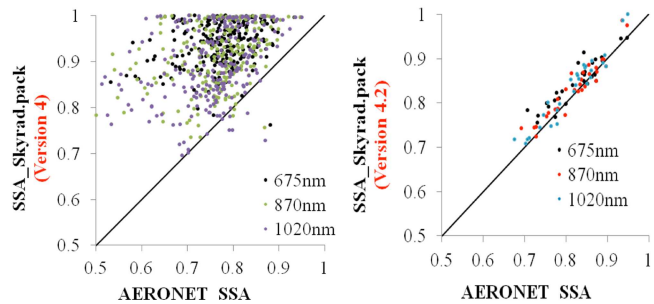


図3.3-2 (左) SKYNETとAERONETそれぞれのデータと解析方法から推定したSSAの比較。(右) AERONETのデータを用いてSKYNETとAERONETそれぞれの解析方法から推定したSSAの比較。Pune(India)における2004年10月～2005年12月のデータを使用した。

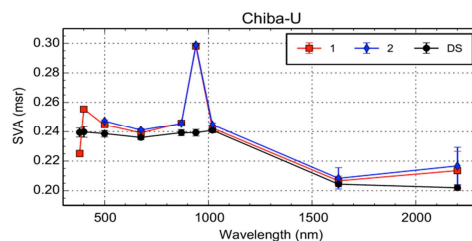


図3.3-3 ディスクスキャン法(Disk scan (DS); SKYNETで採用されている方法)と積分球から求めた直達光に対する校正定数(立体視野角, SVF)の比較。1はBaSO₄, 5.8 A(150 W)×4の積分球を, 2はBaSO₄, 4.8 A(150 W)×4の積分球を使用した結果である。DSはディスクスキャン法による結果である。

(2) 検証用データセットの作成と比較検証

本課題では、推定された日射量に含まれる誤差の詳細検討を実施し、現在もなお継続している。2012年1月からの各サイトにおける検証結果は千葉大学CEReSホームページにて準リアルタイムで公開されている。衛星観測から推定した日射量の瞬間値を地上観測のデータ（衛星撮影時の±10分の平均値）で検証を行い、日ごとの時系列図・散布図を示し、併せてこれらのデジタルデータを公開している。図3.3-4から、推定値は地上観測値と良く相関しているが、平均100 W/m²程度のバラツキを示しており、やや衛星計測値が高めに推定されていることが分かる。雲がある場合には適切にエアロゾルを評価することが出来ず、その誤差もこの中に含まれている。衛星から推定された日射量はSKYNETや気象庁による地上観測のデータを用いて2014年9月までの比較検証が済み、検証に関する時系列図・散布図と共にデジタルデータは千葉大学CEReSホームページにて公開した。このような検証は、今後も継続する予定である。本研究でこれまで行った検証の総合的な結果を図3.3-5と図3.3-6にまとめた。図3.3-5には、2012年1月から2014年9月までの期間における推定日射量と地上観測日射量の平均値、および、瞬間値から求めた二乗平均平方根誤差（RMSE）をサイト毎に示す。サイトの位置は緯度経度の座標で示されている。図3.3-6は、図3.3-5に示した様々なサイトの推定日射量と地上観測日射量の平均値の相関を示す。ホームページでも公開されている日毎の比較結果によれば、推定された日射量が雲等の気象条件によって過小評価された幾つかのケースが認められたが、本研究で実施した統計的な解析により、概して全サイトの推定日射量が過大評価される傾向があることが分かった（図3.3-5、図3.3-6）。また、衛星から推定された日射量の緯度経度分布が地上観測の日射量の分布とほぼ一致していることが図3.3-5から確認出来る。図3.3-6に示したように、平均値として、各サイトにおける衛星からの推定値と地上観測値の相関は強いが、推定値は地上観測値より系統的に10%程度過大評価している可能性が見い出された。一方、2012年1月から2014年9月までの期間中の瞬間値から求めたRMSEを見ると、サイトによって約75 Wm⁻²から約127 Wm⁻²の範囲で異なり（図3.3-5）、約半数のサイトではRMSE値は100 Wm⁻²以上であった。推定日射の精度を上げるためには、このような顕著な誤差を検出し、系統的に要因解析を進めることが極めて重要である。そのためには、地表に到達する日射量を左右する大気中のエアロゾル・雲と気体成分（水蒸気、オゾン）の取り扱いが適切に行われるよう、日射量推定アルゴリズムに組み込む必要があると考える。本研究では、SKYNETサイトで日

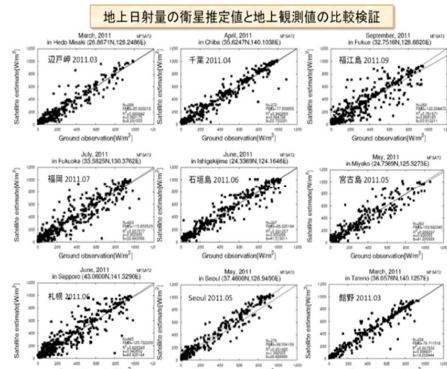


図3.3-4 気象庁及びSKYNET観測地点での日射量の衛星推定値と地上観測値の比較。図中には、1対1の線と両者の回帰直線が示されている。

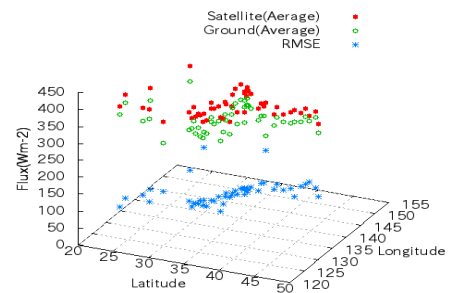


図3.3-5 検証用の各サイトにおける2012年1月から2014年9月の期間における推定日射量(赤)と地上観測日射量(緑)の平均値、および、サイト別における二乗平均平方根誤差(青)。

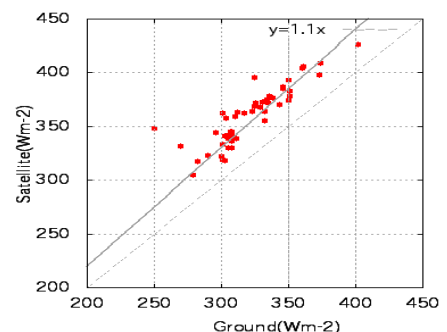


図3.3-6 上記の図3.3-5に示した様々なサイトの推定日射量と地上観測日射量の平均値の相関プロット。

射計と同時に稼働中のスカイラジオメータからオゾン
を推定する方法を開発した（成果論文：Khatr et al.,
2014）。これにより、スカイラジオメータからオゾンと
水蒸気の推定を行い、推定日射量へ気体成分の役割を
検討する段階まで到達することができた。

推定日射量の誤差に対するエアロゾルの影響を調べる
ために、典型的なSKYNETスーパーサイト（千葉、辺
戸岬、福江島）について、2012年1月から2014年8月ま
での期間のうち晴天のみのデータを解析した。推定日
射量の時刻の10分前後（計20分平均値）に得られた地上
観測の日射量データを用いて推定日射量の誤差評価を
行った。この20分間における波長500 nmのエアロゾル
の光学的厚さ（AOT）データを利用し、エアロゾルの影
響を調べた。AOTはスカイラジオメータ（POM-02）によ
り計測したものである。推定日射量の誤差とAOTの関係を
図3.3-7に示す。図3.3-7が示すように、推定日射の
誤差とAOTの間に強い相関があることが分かった。AOT
はエアロゾルの量の指標である。従って、大気中のエ
アロゾルの量が増えるほど誤差が増える傾向がこの結
果から明らかとなった。現在の日射量推定アルゴリ
ズムには、エアロゾルの効果は厳密に考慮してないため、

図3.3-7のように推定日射の誤差は
エアロゾルの量に強く依存したのだと考えられる。黄砂飛来のような例外のケースを除き、
日本領域におけるAOT（500 nm）は一般に1.0以下であることを考慮すると、現在のアルゴ
リズムを用いて推定された日本領域における晴天の日射量の最大の誤差は10%程度である
と考えられる。また、図3.3-7は、大気中に薄いエアロゾルがある場合、推定日射量が数パ
ーセントの割合で過小評価される可能性も示す。これは、気体成分の影響と考えられ、さ
らなる高精度な日射量の推定には気体成分の考慮も不可欠であることを支持する。

エアロゾルに起因する推定日射量の最大の誤差はおよそ10%であることは、図3.3-7から
定量化することができた。他方、10%を越す誤差は主に曇天時に多く、その要因としては
雲の光学的パラメータ、雲量などが挙げられる。SKYNETスーパーサイト（千葉、辺戸岬、
福江島）において、2013年1～12月の推定日射量の誤差と雲の光学的厚さ（COD）の関係、お
よび推定日射量と有効半径（ r_{eff} ）の関係を調べたところ、エアロゾルの効果と違って、日射
量の誤差と雲の光学的パラメータ間の関係は不明瞭であり、誤差のバラツキも晴天時より
広いことが分かった。これは、光学的厚さは同程度でも、雲の微物理状態（ r_{eff} 、氷雲か水
雲など）が異なるためだと考えられる。曇天の場合は適切にエアロゾルの影響を評価する
事が出来ず、その誤差もこの中に含まれているが、これよりも雲に関する不確実性が卓越
していると考えられる。推定日射量の検証を20分平均の地上観測のデータで行う際、この
時間の雲変動、雲の水平および垂直方向の非均質性などの影響が推定日射量には含まれな
い事により、曇天の場合は比較的大きな誤差が生じる可能性がある。また、日射を推定す
る際の単一層の平行平面雲の仮定も重要な誤差要因となると考えられる。広い衛星観測視
野に対して地上観測は点の観測であり、離散雲の場合、地上観測機材が直達光を観測して
いるか否かによって推定と地上観測の間に大きな誤差が生じる可能性もある。曇天時の日
射量の推定の精度を向き上げる為には、離散雲まで対応出来る3次元放射伝達を利用し、
雲の水平および垂直方向に対する光学的パラメータを考慮する必要がある。こうした問題
が認識されたことにより、今後は、イメージングスカイラジオメータ、狭視野日射計、ミ
クロ放射日射計などの地上観測機材による雲の観測データとCloudSATなどの宇宙観測よ
る3次元雲観測のデータを同時に利用し、雲の3次元構造を把握し、推定日射量の検証を実施
することが望ましい。

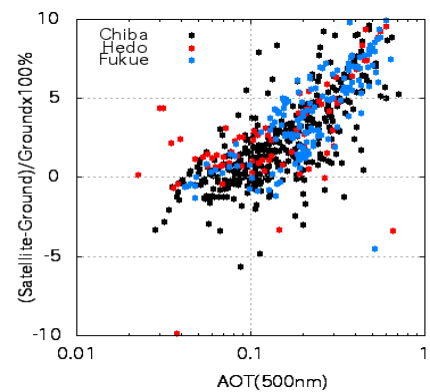


図3.3-7 衛星から推定された日射量と地上
観測値の差がエアロゾル光学的厚さ(AOT)
に対してプロットされている。典型的な
SKYNETスーパーサイト(千葉、辺戸岬、福
江島)における2012年1月から2014年8月ま
での晴天時の結果。各観測間の時間差は10
分以内である。

(3) 天空輝度計測装置(イメージングスカイラジオメータ)の開発

直達太陽光からエアロゾルの光学的厚さを測定するサンフォトメータや、散乱太陽光と直達光の比からエアロゾルの光学特性を導出するスカイラジオメータは、すでに長年にわたる実績を持った装置であり、SKYNETやAERONETなどの世界的規模のネットワークによる放射計測でも用いられている。これらの測器において問題となるのは、その計測の原理上、正確な太陽追尾が欠かせないことであり、そのための追尾装置が大掛かりになることである。そこで、本研究では、民生用として高性能の装置が比較的安価で入手可能なモノクロCCDおよびCMOSカメラによって、いわばイメージングスカイラジオメータとも言えるような測器を構築することを目指し、カメラを入手してその性能確認を行った。カメラによって画像が取得できれば、太陽位置は画像自体から正確に見出すことが可能で

あり、したがって、方位角方向の回転は簡易な回転ステージを用いて行うことが可能となる。安価な民生品を活用して太陽光の放射照度等を定量的に計測することが可能になれば、多くの地上地点においての計測が実現でき、衛星による広域の放射量測定 of 校正データを得る手段として、また、特定の地点における即時的なデータ取得手段としての利用価値は大きい。

本研究では、様々な検討の末、市販のCMOSカメラをベースにテレセントリック光学系を付加し、仰角方向に3段階の全周囲撮影をすることで、全天を撮影する方法を最終的に採用した。撮影された画像にはフラット補正と画角校正を施して各波長の全天画像を作成することに成功した。さらに、得られた全天画像に、仰角および方位角とも 0.1° の等間隔グリッド上にマッピングして平均値を計算した(リサンプリング)。このリサンプリングの結果として、第一にそれぞれの画像の隣り合っていて重なっている部分を滑らかに平均することができ、第二に画像の大きさを大幅に削減することができ(1波長あたり 9.2×10^7 画素から 3.2×10^6 画素)、第三に、各画素の値を放射計算にすぐに用いることができるようになった。しかしながら、このことと同時に、太陽周辺のデジタルナンバー(DN)が飽和しているため、その周辺についての定量的な解析を行うことができないことも判明した。そのため、太陽位置を細い棒状の遮蔽物によって隠し、太陽周縁光(オリオール)を別に撮影した。

高度角、方位角について ± 5 度の移動平均を計算し、DN値を適宜調整してオリオール画像を加え、最終的に得た画像が図3.3-8である。元画像の太陽近傍の飽和の影響が残っているために、とくに500 nmと670 nmのオリオールとその周囲との値の差が大きくなっているが、この方法により太陽近傍を含めた全天を測定することが原理的には可能であることが理解できる。図3.3-9は670 nm、500 nm、400 nmの画像をそれぞれR、G、Bに割り当てたRGB合成画像である。

以上のように、市販のCMOSカメラにテレセントリック光学系レンズを取り付けたシステ

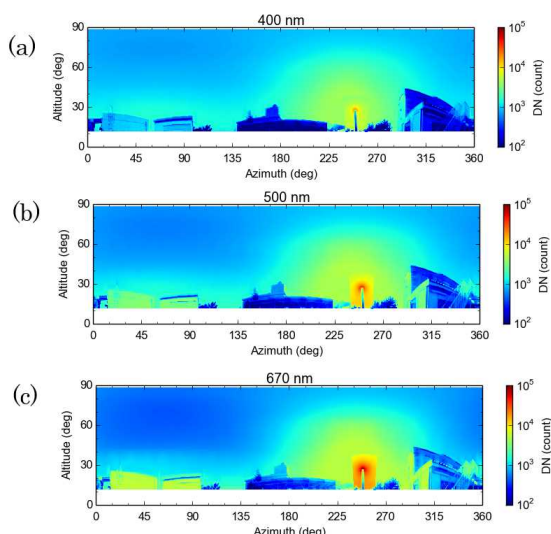


図3.3-8 オリオールを加えた全天画像 : (a) 400 nm, (b) 500 nm, (c) 670 nm.

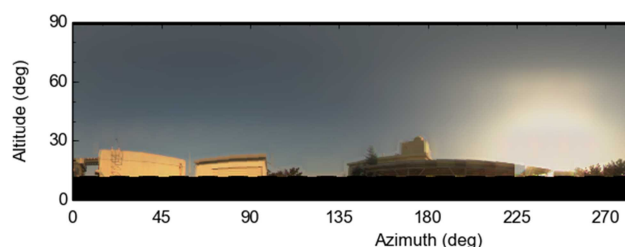


図3.3-9 RGB合成した全天画像

図3.3-9は670 nm、500 nm、400 nmの画像をそれぞれR、G、Bに割り当てたRGB合成画像である。

ムは、直達光および天空光（散乱太陽光）の定量的な測定に用いることが可能であることが明らかになった。画像が取得できるカメラにより天空光強度を計測する試みは行われているが（Román et al., 2012; Toshing et al., 2014）⁴、こうした既存研究では本研究のような狭帯域フィルターは使用されておらず、サンフォトメータやスカイラジオメータとの同時計測も行われていない。そのため、本研究は世界に先駆けて放射伝達計算結果との比較が可能な形でのCMOSカメラを使った計測結果を示す。

今後の実用化に向け、CMOSセンサの温度特性を詳細に確認することが必要であり、また、フィルターホイールを電動化することによって、測定時間を短縮することが考えられる。さらに、異なる天空光状況下で測定した全天画像と放射伝達計算により得られた値をサンフォトメータやスカイラジオメータの測定値と比較していく。こうした簡便なシステムを用いてひまわり7号、8号など気象衛星のデータを地上検証できれば、千葉大学のような測器が整備された場所における同時計測によってCMOSイメージング測器を校正し、日本全国やアジア諸国での現地校正にも活用できるものと期待される。

3. 3. 4 謝辞

本研究に使用した地上日射量観測データの一部は、気象庁によって提供されたものである。ここに、深甚の謝意を表する。

⁴ Román, R., M. Anton, A. Cazorla, A. de Miguel, F. J. Olmo, J. Bilbao, and L. Alados-Arboledas, Calibration of an all-sky camera for obtaining sky radiance at three wavelengths, *Atmos. Meas. Tech.*, 5, 2013–2024, 2012, doi:10.5194/amt-5-2013-2012

Tohsing, K., M. Schrempf, S. Riechelmann, and G. Seckmeyer, Validation of spectral sky radiance derived from all-sky camera images – a case study, *Atmos. Meas. Tech. Discuss.*, 7, 69–97, 2014, doi:10.5194/amtd-7-69-2014.

§ 4 成果発表等

(1) 原著論文発表 (国内(和文)誌 1 件、国際(欧文)誌 18 件)

■ 和文論文発表 <年度別・著者名順>

(平成25年度)

1. 中島孝, 竹中栄晶, 石田春磨, 永尾隆, 胡斯勒図, 渡邊武志, 2014: 可視赤外イメージャーから観る雲、放射、エアロゾル間接効果. *低温科学*, **72**, 169-175. (2014.3)

■ 欧文論文発表 <年度別・著者名順>

(平成 24 年度)

1. Katagiri, S., M. Sekiguchi, T. Nakajima, and T. Hayasaka, 2013: Cirrus cloud radiative forcing caused by the 1987 El Nino using the nighttime global distribution of microphysical parameters derived from AVHRR. *Umi to Sora*, **88**, 71-83. (2013.3)
2. Schutgens, N., M. Nakata and T. Nakajima, 2012: Estimating aerosol emissions by assimilating remote sensing observations into a global transport model. *Remote Sens.*, **4**, 3528-3543; doi:10.3390/rs4113528.
3. Zhang, H., Y. Qing, T. Nakajima, M.M. Nakata, L. Peng and H.E. Jihnai, 2013: Influence of changes in solar radiation on changes of surface temperature in China. *Acta Meteorol. Sinica*, **27**, 87-97; doi:10.1007/s13351-013-0109-8. (2013.2)

(平成 25 年度)

4. Campanelli, M., T. Nakajima, P. Khatri, T. Takamura, A. Uchiyama, V. Estelles, G. L. Liberti, and V. Malvestuto, 2013: Retrieval of characteristic parameters for water vapour transmittance in the development of ground-based sun-sky radiometric measurements of columnar water vapour. *Atmos. Meas. Tech. Discuss.*, Vol. 6, 8071-8105, doi:10.5194/amtd-6-8071-2013.
5. Goto, D., T. Dai, M. Satoh, H. Tomita, J. Uchida, S. Misawa, T. Inoue, H. Tsuruta, K. Ueda, C. F. S. Ng, A. Takami, N. Sugimoto, A. Shimizu, T. Ohara, and T. Nakajima, 2014: Application of a global onhydrostatic model with a stretched-grid system to regional aerosol simulations around Japan. *Geoscientific Model Devevelopment Discussion*, **7**, 131-179, doi:10.5194/gmdd-7-131-2014. (2014.1)
6. Khatri, P., T. Takamura, A. Shimizu, and N. Sugimoto, 2014: Observation of low single scattering albedo of aerosols in the downwind of the East Asian desert and urban areas during the inflow of dust aerosols. *J. Geophys. Res.*, Vol. 119(2), doi:10.1002/2013JD019961. (2014.1)
7. Koike, M., N. Moteki, P. Khatri, T. Takamura, N. Takegawa, Y. Kondo, H. Hashioka, H. Matsui, A. Shimizu, and N. Sugimoto, 2014: Case study of absorption aerosol optical depth closure of black carbon over the East China Sea. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, J. Geophys. Res.*, Vol. 119(1), 122-136, doi:10.1002/2013JD020163. (2014.1)
8. Nakajima, T., H. Takenaka, D. Goto, S. Misawa, J. Uchida, and T.Y. Nakajima, 2013: Measurements and Modeling of the Solar Radiation Budget. *Journal of the Japan Society for Simulation Technology*, **32**(3), 199-207, 2013.
9. Ningombam, S. S., S. P. Bagare, R. B. Singh, M. Campanelli, P. Khatri, and N. Dorjey, 2014: Calibration of a sky radiometer (PREDE) using observations obtained from Hanle and Merak high-altitude stations in Ladakh. *Atmos. Res.*, Vol. 143, 118-128. (2014.2)
10. Schutgens, N. A. J., M. Nakata, and T. Nakajima, 2013: Validation and empirical correction of MODIS AOT and AE over ocean. *Atmos. Meas. Tech.*, **6**, 2455-2475,

doi:10.5194/amt-6-2455-2013, 2013.

(平成 26 年度)

11. Dai, T., N.A.J. Schutgens, D. Goto, G.-Y. Shi, and T. Nakajima, 2014: Improvement of aerosol optical properties modeling over Eastern Asia with MODIS AOD assimilation in a global non-hydrostatic icosahedral aerosol transport model. *Environ. Pollution*, in press.
12. 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, *Atmospheric Measurement Techniques Discussion*, **8**, 1013-1054. (2015.1)
13. Kanaya, Y., H. Irie, H. Takashima, H. Iwabuchi, H. Akimoto, K. Sudo, M. Gu, J. Chong, Y. J. Kim, H. Lee, A. Li, F. Si, J. Xu, P. -H. Xie, W. -Q. Liu, A. Dzhola, O. Postlyakov, V. Ivanov, E. Grechko, M. Sviridenkov, S. Terpugova, and M. Panchenko, 2014: Long-term MAX-DOAS network observations of NO₂ in Russia and Asia (MADRAS) during 2007–2012: instrumentation, elucidation of climatology, and comparisons with OMI satellite observations and global model simulations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **14**, 7909-7927.
14. Khatri, P. T. Takamura, A. Yamazaki, and A. Uchiyama, 2014: Use of 315nm channel data of sky radiometer to estimate columnar ozone concentration: A preliminary study. *J. Meteor.Soc. Japan*, Vol.92A.
15. Letu, H., T. Nakajima, and F. Nishio, 2014: Estimation of electric power and power plant CO₂ emissions using DMSP/OLS nighttime satellite data. *Environmental Science & Technology Letters*, **1**, 259–265.
16. Shi, C. and T. Nakajima, 2015: The Eddington approximation calculation of radiation flux in the atmosphere–ocean system. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol.157, 34-41. (2015.3)
17. Nakajima, T. Y., T. M. Nagao, H. Letu, and H. Okamoto, 2014: Synergistic use of spaceborne active sensors and passive multispectral imagers for investigating cloud evolution processes. *ISTIS*, 2013-n-2062, 12, Tn_19-Tn_24, 2014.
18. Wang, Z., D. Liu, Z. Wang, Y. Wang, P. Khatri, Z. Zhou, T. Takamura, and G. -Y. Shi, 2014: Seasonal characteristics of aerosol optical properties in SKYNET Hefei (31.90N, 117.17E) site from 2007 to 2013. *J. Geophys. Res.*, Vol. 119(10).

(2) その他の著作物(総説、書籍など) <発行日順>

(平成 24 年度)

1. 中島映至, 鶴田治雄, 五藤大輔, Nick Schutgens, 中田真木子, 2012: CAI 衛星解析とモデルシミュレーションの統合システムの構築. 平成 23 年度国立環境研究所スーパーコンピュータ利用研究年報, 70-77, ISSN 1341-4356, CGER-I106-2012.

(平成 25 年度)

2. 中島映至, 2013: 広域大気汚染の問題と大気清浄化に向けた努力. 岩波科学, 83, 433-438. (2013.4)
3. 中島映至, 2013: 新しい大気科学の方向性について—地球環境研究との接点—. 気象学会シンポジウム「変化する地球環境と気象学の役割」, 2013 年 5 月 17 日, 東京, *Tenki*, 投稿中. New directions of the atmospheric science - Common ground with the earth environmental sciences-
4. Tateishi, R. et al. (中島孝は共著者のひとり), 2013: *Remote Sensing: An Introductory Textbook*. 丸善プラネット. (2013.12)

5. 竹中栄晶, 中島孝, 高村民雄, 中島映至, 2014: [解説]太陽放射と再生可能エネルギー(特集 大規模エネルギーマネジメントシステムを支える省エネソリューション). *計測と制御*, 53(1), 24-30. (2014.1)
6. 中島孝, 竹中栄晶, 中島映至, 高村民雄, 渡邊武志, 2014: 大気科学と太陽エネルギー. *太陽エネルギー学会誌*. 39, 57-64, (2013 年度第 4 四半期)

(3) 国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演 (国内会議 7 件、国際会議 14 件)

(主要な国際会議への招待講演の前に*を付記しています)

■招待講演 国内会議 <年度別・発表者名順>

(平成 24 年度)

1. 片山正昭(名古屋大学), 阪口啓, 植田譲, 竹中栄晶, 武田朗子, 西宏章, 永原正章, 畑中健志, 滑川徹, 2012: エネルギー管理システム構築に向けた学理融合展開 -学界の境界を越えて-. セッション内「衛星観測データに基づく太陽放射量の推定と太陽光発電出力の把握」, 第 55 回自動制御連合講演会, 京都, 2012/11/17.
2. 竹中栄晶(東京大学), 中島孝, 井上豊志郎, 高村民雄, 中島映至, 2013: 衛星観測データに基づく日射量の推定と太陽光発電出力の準リアルタイムモニタリング. 東海大学情報技術センター研究開発報告会, 代々木. 2013/2/23.
3. 竹中栄晶(東京大学), 2013: 次世代エネルギー需要・供給ネットワークシステムの構築へ向けて-分野融合による新展開チュートリアル講演. 第 13 回計測自動制御学会 制御部門大会, SICE, 福岡, 2013/3/8.

(平成 25 年度)

4. 中島孝(東海大学), 2013: 衛星データを利用した再生可能エネルギーの推定. 公開気象講演会, 社団法人日本気象学会、教育と普及委員会およびメソ気象研究連絡会, 東京, 2013/5/18.
5. 中島孝(東海大学), 竹中栄晶, 渡邊武志, 中島映至, 高村民雄, and TEEDDA 研究チーム, 2013: 日射量推定における気象学・大気放射学の活用. 太陽光発電部会第 5 回セミナー「太陽光発電システムの発電出力把握・予測技術」, 日本太陽エネルギー学会, 東京理科大学, 東京, 2013/8/5.

(平成 26 年度)

6. 入江仁士(千葉大学), 倪聞涛, 陳誠, 武藤拓也, 加藤知道, Pradeep Khatri, 高村民雄, 2014: 衛星と地上からのリモートセンシングの複合利用による大気中 NO₂ とエアロゾルの時空間変動解析. 日本リモートセンシング学会第 56 回学術講演会, 茨城県つくば市, 2014/5/15.
7. 中島孝(東海大学), 2014: 地球科学とエネルギーマネジメントの接点. 平成 26 年度 電気学会 電力・エネルギー部門大会 座談会, 同志社大学, 京都, 2014/9/11.

■招待講演 国際会議 <年度別・発表者名順>

(平成 24 年度)

1. * Kurino, T.(気象衛星センター), 2012: Future Plan and Recent Activities for the Japanese Follow-on Geostationary Meteorological Satellite Himawari-8/9. *AGU fall meeting*, San Francisco, 2012/12/3~7.
2. Nakajima, T.(東京大学), 2013: Climate impacts of atmospheric aerosols and clouds. Invited lecture, *European Research Course on Atmospheres (ERCA2013)*,

organized by Université Joseph Fourier of Grenoble and CNRS, Grenoble (France), 2013/1/7~2/8.

3. Nakajima, T.(東京大学), 2013: What we learn from the Fukushima nuclear power plant accident? Invited lecture, *European Research Course on Atmospheres (ERCA2013)*, organized by Université Joseph Fourier of Grenoble and CNRS, Grenoble (France), 2013/1/7~2/8.
4. Nakajima, T.(東京大学), 2013: Major scientific developments related to ABC-Asia. Invited, *IGES Workshop*, Hayama, Japan, 2013/2/19.
5. * Nakajima, T. Y.(東海大学) et al., 2012: Multi-sensor observations of warm water clouds for surveying vertical inhomogeneity and droplet growth in clouds. *AGU fall meeting*, San Francisco, 2012/12/3~7.
6. Nakajima, T. Y.(東海大学) et al., 2013: Estimation of the terrestrial renewable energy using the atmospheric sciences. 第 13 回計測自動制御学会 制御部門大会, SICE, 福岡, 2013/3/7. (国際セッション)

(平成 25 年度)

7. Nakajima, T.:(東京大学), 2013: Thoughts for Skynet system development - toward future. *International Skynet Workshop*, Chiba, 2013/7/4~5.
8. Nakajima, T.(東京大学), 2013: Prospects of using the UNEP/ABC-Asia project heritage for SLCP impact studies. *ABC-SLCP Symposium*, Seoul, Korea, 2013/9/9~11.
9. * Nakajima, T.(東京大学), D. Goto, S. Misawa, E. Oikawa, M. Hashimoto, J. Uchida, T. Dai, and N. Schutgens, M. Ohara, T. Masui, A. Takami, and T. Takemura, 2013: A strategy for studying the air pollution effects on climate and public health in Asia. *AGU fall Meeting*, San Francisco, USA, 2013/12/9~13.
10. Nakajima, T.(東京大学), 2014: Climate impacts of atmospheric aerosols and clouds. Invited lecture, *European Research Course on Atmospheres (ERCA2014)*, organized by Université Joseph Fourier of Grenoble and CNRS, Grenoble, France, 2014/1/27.
11. Nakajima, T. Y.(東海大学), 2013: Estimation of solar irradiance from satellites. *Seventeenth International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems(ISAP2013)* (電力システムへの知能システム応用の国際会議), 明治大学, 東京, 2013/7/2.
12. * Takenaka, H.(東京大学), T. Y. Nakajima, H. Kuze, T. Takamura, R. T. Pinker, and T. Nakajima, 2013: Quasi-real-time monitoring of SW radiation budget using geostationary satellite for Climate study and Renewable energy. *AGU fall meeting*, San Francisco, USA, 2013/12/13.

(平成 26 年度)

13. * Nakajima, T.(東京大学), 2014: Air pollution in Asia and its effects on the climate and public health. Invited Lecture, *AOGS*, Sapporo, 2014/7/28~8/1.
14. * Nakajima, T. Y.(東海大学), H. Takenaka, T. Nakajima, T. Takamura, T. Watanabe, and T. M. Nagao, 2014: Retrieval of cloud properties from satellite imagers and application for the renewable energy estimation. *AOGS 2014*, Sapporo, 2014/8/1.

② 口頭発表 (国内会議 32 件、国際会議 55 件)

■口頭発表 国内会議 <年度別・発表者名順>

(平成 24 年度)

1. 青木一真(富山大学), 竹村俊彦, 松本篤, 西澤智明, 佐野到, B. Holben, 2012: DRAGON Japan 2012 観測期間中のエアロゾルの光学的特性. 日本気象学会秋季大会, 札幌, 2012/10/3~5.
2. 入江仁士(千葉大学), 山地一代, 池田恒平, 鶴野伊津志, 板橋秀一, 大原利眞, 黒川純一, 2012: SCIAMACHY, OMI, GOME-2 の対流圏 NO₂ カラム濃度を複合利用した CMAQ モデルの評価. 気化学討論会, 福岡県, 2012/11/6~8.
3. 打田純也(東京大学), 五藤大輔, 原 政之, 中島映至, SALSA プロジェクトチーム, 2012: Diamond-NICAM-SPRINTARS を用いた関東域での将来気候予測. 日本気象学会秋季大会, 札幌, 2012/10/3~5.
4. Khatri,P.(千葉大学), T.Takamura, A. Yamazaki, Y. Kondo, A. Shimizu, and N. Sugimoto, 2012: Necessity of aerosol vertical profile information to understand aerosol climatology: A study based on a combination of ground based remote sensor and aircraft observation data collected over the East China Sea region in the spring season. 日本リモートセンシング学会第 53 回学術講演会, 広島大学, 2012/11/9~20.
5. Khatri,P.(千葉大学), T. Takamura, M. Hashimoto, and T. Nakajima, 2012: An improved procedure to analyze the sky radiometer data of SKYNET network: Reanalysis of sky radiometer data, 日本リモートセンシング学会第 53 回学術講演会, 広島大学, 2012/11/19~20.
6. 竹中栄晶(東京大学), 福田悟, 中島孝, 石田春磨, 日暮明子, 中島映至, 2012: エアロゾルの間接効果に関する観測可能性. 日本気象学会 2012 年度秋季大会, 札幌, 2012/10/3~5.
7. 中島孝(東海大学), 土屋拓視, 石田春磨, 松井隆, 下田陽久, 松前義昭, 2012: 可視赤外イメージャーの雲判別性能に関する基礎調査 (その 2). 日本気象学会秋季大会, 札幌, 2012/10/3~5.
8. 中島孝(東海大学), 2013: 衛星リモートセンシングとモデルの相互協力に関する提案. 超高解像モデルにおける、放射モデルに関するワークショップ, 理化学研究所・計算科学研究機構, 神戸 2013/2.
9. 中島映至(東京大学), 五藤大輔, Tie Dai, Nick Schtgens, SALSA プロジェクトチーム, 2012: アジア域の大気環境物質のデータ同化について. 日本気象学会秋季大会, 札幌, 2012/10/3~5.

(平成25年度)

10. 岩撫宏明(千葉大学), 齊藤隼人, 眞子直弘, 久世宏明, 2013: CMOS カメラを用いたイメージングスカイラジオメータ開発. 日本リモートセンシング学会第 55 回学術講演会, 日本大学 福島県郡山市, 2013/11/21~22.
11. 岩撫宏明(千葉大学), 齊藤隼人, 眞子直弘, 久世宏明, 2014: CMOS カメラによる太陽周辺光分光イメージング測定. SICE リモートセンシングフォーラム, 首都大学東京 東京, 2014/2/27.
12. Khatri, P.(千葉大学), T. Takamura, A. Yamazaki, A. Uchiyama, B. Holben, and I. Sano, 2013: Comparison of single scattering albedo of aerosols obtained from observation data PREDE sky radiometer and CIMEL sun photometer. 日本気象学会秋季大会, 仙台, 2013/11/19~21.
13. 中島孝(東海大学), 永尾隆, フスリート, 石田春磨, 松前義昭, 2013: 将来型地球観測衛星を用いた雲の観測. 地球惑星科学連合, 幕張, 2013/4/28~5/2.
14. 中島孝(東海大学), 竹中栄晶, 石田春磨, 永尾隆, フスリート, 2013: 受動型イメージャーから観る雲・エアロゾル・放射. 日本気象学会春季大会, 東京, 2013/5/15~18.

(平成 26 年度)

15. 入江仁士(千葉大学), 中山智喜, 清水厚, 山崎明宏, 永井智広, 2014: MAX-DOAS 法に

- よるエアロゾル観測の評価：CRDS 法・ライダー・スカイラジオメーター観測との比較. 日本気象学会秋季大会, 福岡市, 2014/10/21~23.
16. 岩撫宏明(千葉大学), 齊藤隼人, 眞子直弘, 久世宏明, 2014: CMOS カメラとテレセントリック光学系を用いたイメージングスカイラジオメータの開発. 日本リモートセンシング学会第 57 回学術講演会, 京都大学, 2014/11/6~7.
 17. 岩撫宏明(千葉大学), 齊藤隼人, 眞子直弘, 久世宏明, 2015: CMOS カメラを用いた天空光強度分布の画像計測. 第 40 回 SICE リモートセンシングシンポジウム, 東京, 2015/3/2.
 18. 及川栄治(東京大学), 西澤智明, 中島映至, 2014: クラスタリングを用いた AERONET データのエアロゾルタイプ分類 その 2. 日本気象学会春季大会, 横浜, 2014/5/21~24.
 19. 大方めぐみ(東京大学), 中島映至, 2014: 三次元離散雲の放射収支算定に関わる放射伝達解法の研究 (3). 日本気象学会春季大会, 横浜, 2014/5/21~24.
 20. Khatri, P.(千葉大学), T. Takamura, H. Irie, H. Kuze, T. Nakajima, and B. Holben, 2014: Single scattering albedo inconsistency between CIMEL sun photometer (AERONET) and sky radiometer (SKYNET): Algorithm or data? 日本気象学会秋季大会, 福岡市, 2014/10/21~23.
 21. 金谷有剛(JAMSTEC), 入江仁士, 高島久洋, 岩渕弘信, 秋元肇, 須藤健悟, M. Gu, J. Chong, Y.-J. Kim, H. Lee, A. Li, F. Si, J. Xu, P. Xie, W. Liu, A. Dzhola, O. Postlyakov, V. Ivanov, E. Grechko, S. Terpugova, M. Panchenko, 2014: 日中韓露 MAX-DOAS 長期観測網によるNO₂計測(2007-2012): OMI 衛星データの系統的検証. 日本地球惑星科学連合大会, 千葉県幕張市, 2014/4/30.
 22. 五藤大輔(環境研), 中島映至, 上田佳代, Ng Chris-Fook-Sheng, 村田諒, SALSA project Team, 2014: 都市における大気汚染物質シミュレーションとその健康影響評価. 日本気象学会春季大会, 横浜, 2014/5/21~24.
 23. 齊藤隼人(千葉大学), 眞子直弘, 恒吉智明, 中村快平, 久世宏明, 2014: スラントパスライダーとハイパースペクトルカメラを利用した雲計測. 第 32 回レーザーセンシングシンポジウム, 2014/9/4-5.
 24. 齊藤隼人(千葉大学), 眞子直弘, 恒吉智明, 中村快平, 久世宏明, 2014: ハイパースペクトルカメラとミー散乱ライダーの同期観測による雲の光学特性評価. 日本リモートセンシング学会第 57 回秋季学術講演会, 2014/11/6-7.
 25. 竹中栄晶(東京大学), 2014: 静止気象衛星「ひまわり」観測データに基づく日射量の推定と太陽光発電出力の準リアルタイム・モニタリング. 日本気象学会春季大会, 横浜, 2014/5/21~24.
 26. 中島映至(東京大学), 2014: 大気放射学とそれに関わる気候・環境科学の推進. 日本気象学会春季大会 藤原賞受賞講演, 横浜, 2014/5/22.
 27. 中島映至(東京大学), 今須良一, 植松光夫, 高見昭憲, 五藤大輔, 打田純也, 井上豊志郎, 鶴田治雄, 三澤翔大, 村田 諒, Tie Dai, Nick Schutgens, 上田佳代, Ng Chris-Fook-Sheng, 佐藤正樹, 佐藤陽祐, 村上暁信, 樋口篤志, SALSA プロジェクトチーム, 2014: 大気環境物質のためのシームレス同化システム構築とその応用. 日本気象学会春季大会, 横浜, 2014/5/21~24.
 28. 眞子直弘(千葉大学), 高村民雄, 久世宏明, プラディープ・カトリ, 山崎明宏, 2014: SKYNET/スカイラジオメーターの立体視野角校正. 日本気象学会秋季大会, 福岡, 2014/10/21~23.
 29. 渡邊武志(東海大学) and 中島孝, 2014: 地上観測日射量データを用いた日射量変動の解析. 日本気象学会春季大会, 横浜, 2014/5/21~24.
 30. 渡邊武志(東海大学), 高松尚宏, 志田宇信, 大森浩充, and 中島孝, 2014: サンプルエントロピーを用いた日射量の変動の評価. 日本気象学会秋季大会, 福岡市, 2014/10/21~23.

31. 渡邊武志(東海大学), 高松尚宏, 志田宇信, 大森浩充, and 中島孝, 2014: 再生可能エネルギーの大量導入時に考慮すべき気象変動. 第 57 回自動制御連合講演会, 2014/11/10.
32. 渡邊武志(東海大学), 高松尚宏, 志田宇信, 大森浩充, and 中島孝, 2014: 日射量の急激な変動の特徴. 日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会, 2014/11/13.

■口頭発表 国際会議 <年度別・発表者名順>
(平成 24 年度)

1. Irie, H.(千葉大学), K. F. Boersma, Y. Kanaya, H. Takashima, X. Pan, and Z. F. Wang, 2012: Quantitative bias estimates for tropospheric NO₂ columns retrieved from SCIAMACHY, OMI, and GOME-2 using a common standard for East Asia. *2012 AGU fall Meeting*, San Francisco, 2012/12/5.
2. Khatri, P.(千葉大学) and T. Takamura, 2012: Aerosol climatology of the East Asia region studied by using ground-based remote sensor data of SKYNET network. *Proc. of the 18th CReS Int'l. Symposium –Asian Network for Environmental Monitoring and Related Studies*, Chiba, Japan, 2012/10/24.
3. Nakajima, T. Y.(東海大学), 2012: New research plan for the weather driven renewable energy study. *Third Joint Project Meeting on "Interannual variations of upper tropospheric humidity (UTH) and radiation budget over the North Pacific High*, 2012/6/4.
4. Nakajima, T. Y.(東海大学), 2013: Remote sensing of clouds from A-Train. in *Mini-Workshop on A-Train Science*, edited, University of Tokyo, Tokyo, 2013/3/8.

(平成 25 年度)

5. Bi, J.(中国, 蘭州大学), J. Huang, T. Takamura, P. Khatri, and SACOL Team, 2013: Investigate the SSA of dust aerosols and their impact on climate in Northwest China. *International SKYNET workshop 2013*, Chiba University, Chiba, 2013/7/4~5.
6. Irie, H.(千葉大学), T. Takamura, T. Takano, K. Aoki, A. Higurashi, A. Shimizu, P. Khatri, T. Nakajima, and T. Nagao, 2014: Utilizing SKYNET toward validation for GCOM-C products. *Joint PI Workshop of Global Environment Observation Mission*, Tokyo, 2014/1/17.
7. Khatri, P.(千葉大学), T. Takamura, A. Yamazaki, and A. Uchiyama, 2013: Use of 315nm channel of sky radiometer to retrieve columnar ozone amount. *International SKYNET workshop 2013*, Chiba University, Chiba, 2013/7/4~5.
8. Khatri, P.(千葉大学), T. Takamura, Y. Kondo, A. Yamazaki, A. Shimizu, and A. Sugimoto, 2013: A study on vertical profiles of aerosol radiative parameters and aerosol direct effects over the East China Sea region using a combination of aircraft and ground based observation data. *International SKYNET workshop 2013*, Chiba University, Chiba, 2013/7/4~5.
9. Khatri, P.(千葉大学), T. Takamura, Y. Kondo, A. Shimizu, and A. Sugimoto, 2013: Study of vertical distribution of optical properties and direct radiative forcings of aerosols over the Fukue-jima, Japan using aircraft and surface remote sensing data. *International conference on climate change in arid and semi-arid region*, Ulaanbaatar, Mongolia, 2013/9/19~21.
10. Manago, N.(千葉大学), H. Saito, Y. Mabuchi, Y. Takara, T. Fujimori, F. Ando, N. Noro, M. Suzuki, and H. Kuze, 2013: Application of newly-developed hyperspectral cameras to retrieve aerosol optical properties. *International Symposium on Remote Sensing (ISRS) 2013*, B1-01 1532, Narashino, 2013/5/15~17.
11. Nakajima, T.(東京大学), 2013: Derivation of atmospheric aerosol and cloud

- parameters from the satellite sensors on board Himawari 8-9, GCOM-C, EarthCARE, and GOSAT2 satellites. *4th Asia/Oceania Meteorological Satellite Users' Conference*, Melbourne, 2013/10/9~11.
12. Nakajima, T. Y.(東海大学), T. M. Nagao, H. Letu, K. Suzuki, and H. Okamoto, 2013: Synergistic use of the spaceborne active sensors and the passive multi-spectral imagers for investigating cloud evolution process. *International Symposium on Space Technology and Science (ISTS)*, Nagoya, Japan, 2013/6/7.
 13. Nakajima, T. Y.(東海大学), 2013: New research plan for the weather driven renewable energy study. *Third Joint Project Meeting on "Interannual variations of upper tropospheric humidity (UTH) and radiation budget over the North Pacific High.*, Tokai University Space Information Center, Kumamoto, 2013/6/10.
 14. Nakajima, T. Y.(東海大学), H. Takenaka, T. Nakajima, T. Takamura, and T. Kurino, 2013: Estimation of the solar radiation at the ground surface using geostationary satellites and radiative transfer calculation: renewable energy and the satellite remote sensing. *2013 joint EUMETSAT/AMS Meteorological Conference*, EUMETSAT, Vienna, 2013/9/19.
 15. Nakajima, T. Y.(東海大学), H. Takenaka, T. Watanabe, T. Nakajima, T. Takamura, and T. Kurino, 2013: Renewable energy and the atmospheric sciences. *AGU fall meeting*, San Francisco, 2013/12/9.
 16. Nakajima, T. Y.(東海大学), T. Watanabe, T. Nakajima, T. Takamura and TEEDDA Team, 2014: Development of the Geo-scientific data analysis systems for harmonized utilization of the terrestrial renewable energy. *JST/NSF/DFG EMS International Workshop*, Hawaii, USA, 2014/1/12.
 17. Nakajima T. Y.(東海大学), H. Takenaka, T. M. Nagao, H. Letu, and T. Watanabe, 2014: Cloud properties retrieved from passive imagers and application to the shortwave flux estimation, regarding renewable energy. *CREW-4*, Grainau, Germany, 2014/3/6.
 18. Takamura, T.(千葉大学) and P. Khatrri, 2013: Aerosols in SKYNET - Operation and development -. *International SKYNET workshop 2013*, Chiba University, Chiba, 2013/7/4~5.
 19. Takamura, T.(千葉大学), P. Khatrri, B. J. Sohn, N. Tugjsuren, B. Thana, M. Campabelli, and G. Pandithurai, 2013: Aerosol optical properties and aerosol direct effects over typical sites of SKYNET network. *International conference on climate change in arid and semi-arid region*, Ulaanbaatar, Mongolia, 2013/9/19~21.
 20. Wang, Z.(AIOFM/CAS), D. Liu, Y. J. Wang, P. Khatrri, T. Takamura, and G. Y. Shi, 2013: Ground-based remote sensing of aerosol seasonal character over Hefei in East China. *International SKYNET workshop 2013*, Chiba University, Chiba, 2013/7/4~5.
- (平成 26 年度)
21. Alimuddin, I.(ハサヌディン大学), H. Saito, Y. Mabuchi, N. Manago, H. Hara, and H. Kuze, 2014: Development of a non-scanning fiber sensor for direct sunlight-DOAS measurement of nitrogen dioxide. *IJJSS2014*, Yogyakarta, 2014/10/29-30.
 22. Dai, T.(中国大気物理研究所), N. A. J. Schutgens, D. Goto, G. Shi, T. Nakajima, 2014: Improvement of aerosol optical properties simulation over eastern Asia with MODIS and assimilation. *ABC-SLCP Symposium*, Tokyo, 2014/7/21~23.
 23. Dai, T.(中国大気物理研究所), N.A.J. Schutgens, D. Goto, G. Shi, and T. Nakajima, 2014: Improvement of aerosol optical simulation over Eastern Asia with data assimilation. *Skynet International Workshop*, Hefei, China, 2014/9/10~12.
 24. Estelles, V.(スペイン バレンシア大学), M. Campanelli, P. Khatrri, T. Nakajima, D. Serrano, M. P. Utrillas, and J. A., Martinex-Lozano, 2014: Evaluation of the improved langley plot technique on a PREDE POM radiometer by comparison with

- AERONET transferred calibrations. *Proc. of the 2014 International workshop on SKYNET and Asian Lidar Network*, Hefei, China, 2014/9/10~12.
25. Goto, D.(環境研), T. Nakajima, T. Dai, H. Yashiro, R. Murata, K. Sudo, S. Misawa, J. Uchida, SALSA Project Team, 2014: Simulation of SLCP in Japan using a new atmospheric aerosol-chemistry model (NICAM-Chem) with a stretched-grid system. *ABC-SLCP Symposium*, Tokyo, 2014/7/21~23.
 26. Hashimoto, M.(東京大学), S. Morimoto, H. Takenaka, and T. Nakajima, 2014: A study of multi-pixel and multi-parameter satellite remote sensing for aerosol properties. *JpGU 2014*, Yokohama, 2014/4/28~5/2.
 27. Hashimoto, M.(東京大学), T. Nakajima, S. Morimoto, H. Takenaka, 2014: Development and application of a new algorithm of satellite remote sensing using multi-pixel and multi-parameter information for aerosol properties by GOSAT/CAI and other satellite-borne imagers. *AMS Radiation*, Boston, 2014/7/7~11.
 28. Higuchi, A.(千葉大学), R. Tateishi, H. Irie, P. Khatri, H. Takenaka, N. Saitoh, A. Kondoh, H. Kuze, M. K. Yamamoto, M. Hayasaki, N. Manago, and H. Hirose, 2014: Center for Environment Remote Sensing (CEReS), Chiba University archived datasets for environmental studies, *AOGS*, Sapporo, 2014/7/28~8/1.
 29. Higuchi, A.(千葉大学), H. Takenaka, H. Hirose, M. K. Yamamoto, S. Kotsuki, H. Irie, K. Tanaka, and M. Hayashi, 2014: CEReS archived satellites related datasets and these applications, *International CEReS workshop*, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia, 2014/10/28~30.
 30. Irie, H.(千葉大学): 2014: Utilizing SKYNET for GEMS validation, *The 5th GEMS Science Meeting*, Seoul, 2014/10/8.
 31. Irie, H.(千葉大学), T. Takamura, T. Takano, K. Aoki, A. Higurashi, P. Khatri, H. Okamoto, T. Muto, T. Kato, T. Hatakeyama, S. Onuma, and SKYNET community, 2015: Utilizing SKYNET toward validation for GCOM-C products. *Joint PI Meeting of Global Environment Observation Mission 2014*, Tokyo, 2015/01/15.
 32. Iwanade, H.(千葉大学), H. Saito, I. Alimuddin, N. Manago, and H. Kuze, 2014: Measurement of sky radiance using a CMOS camera for the retrieval of aerosol optical properties. *IJJSS2014*, Gajah Mada University, Yogyakarta, Indonesia, 2014/10/29~30.
 33. Kanaya, Y.(JAMSTEC), H. Irie, H. Takashima, H. Iwabuchi, H. Akimoto, K. Sudo, M. Gu, J. Chong, Y.J. Kim, H. Lee, A. Li, F. Si, J. Xu, P. -H. Xie, W. -Q. Liu, A. Dzhola, O. Postlyakov, V. Ivanov, E. Grechko, S. Terpugova, and M. Panchenko, 2014: Long-term MAX-DOAS network observations of NO₂ in Russia and Asia (MADRAS) during 2007-2012: Climatology and comparisons with OMI satellite observations and global model simulations. *AOGS*, Sapporo, 2014/8/1.
 34. Kawano, S.(早稲田大学), Y. Fujimoto, S. Wakao, Y. Hayashi, H. Takenaka, H. Irie, and T. Y. Nakajima, 2014: A Basic Study of Distribution Automation for Service Restoration in a Distribution System with Distributed Generators. *IREN 2014*, Kyoto, 2014/11/17~20.
 35. Khatri, P.(千葉大学), T. Takamura, H. Irie, H. Kuze, T. Nakajima, and B. Holben, 2014: Comparison of single scattering albedo retrieved from PREDE sky radiometer and CIMEL sun photometer. *Skynet International Workshop*, Hefei, China, 2014/9/10~12.
 36. Letu, H.(東海大学), T. M. Nagao, and T. Y. Nakajima, 2014: A proposal for validation method of the satellite derived cloud mask data using all-sky camera data. *AOGS 2014*, Sapporo, 2014/7/28~8/1.
 37. Manago, N.(千葉大学), H. Saito, Y. Takara, M. Suzuki, and H. Kuze, 2014: Development of a non-scanning fiber sensor for direct sunlight-DOAS measurement of nitrogen dioxide, *IJJSS2014*, Yogyakarta, 2014/10/29-30.
 38. Misawa, S.(東京大学), T. Dai, N. Schutgens, and T. Nakajima: A study of

- regional-scale aerosol assimilation with the Stretch-NICAM atmospheric model. *AOGS*, Sapporo, 2014/7/28~8/1.
39. Nagao, T. M.(東海大学), and T. Y. Nakajima, 2014: A new method for estimating bias in multi-spectral-retrieved cloud parameters caused by cloud horizontal inhomogeneity. *JpGU 2014*, Yokohama, 2014/4/28~5/2.
 40. Nagao, T. M.(東海大学), H. Letu, and T. Y. Nakajima, 2014: Retrieval of Cloud Parameters of Horizontal and Vertical Inhomogeneous Clouds Using Multi-Spectral Imagers. *AOGS 2014*, Sapporo, 2014/7/28~8/1.
 41. Nakajima, T.(東京大学), M. Hashimoto, S. Fukuda, S. Morimoto, H. Takenaka, and Y. Yoshida, 2014: On the capability of aerosol remote sensing by CAI-2 imager aboard the GOSAT-2 satellite. *AMS Radiation*, Boston, 2014/7/7~11.
 42. Nakajima, T.(東京大学), 2014: A thought for seeking optimum mitigation and adaptation paths of SLCP. *ABC-SLCP Symposium*, Tokyo, 2014/7/21~23.
 43. Nakajima, T.(東京大学), R. Imasu, M. Uematsu, A. Takami, D. Goto, J. Uchida, T. Inoue, H. Tsuruta, S. Misawa, R. Murata, T. Dai, N. Schutgens, K. Ueda, C.F.S. Ng, M. Satoh, Y. Sato, A. Murakami, A. Higuchi, 2014: SALSA Project Team: Development of a seamless assimilation system for atmospheric materials and its applications. *AOGS*, Sapporo, 2014/7/28~8/1.
 44. Nakajima, T.(東京大学), D. Goto, H. Takenaka, J. Uchida, T. Inoue, H. Tsuruta, S. Misawa, R. Murata, T. Dai, N. Schutgens, and M. Satoh, 2014: Modeling and observation of aerosols, clouds and radiation for societal issue applications. *AOGS*, Sapporo, 2014/7/28~8/1.
 45. Nakajima, T.(東京大学), and SKYNET Science Team, 2014: An overview of the recent progresses in the skyradiometer technology and SKYNET operation. *Skynet International Workshop*, Hefei, China, 2014/9/10~12.
 46. Nakajima, T. Y.(東海大学), 2014: Synergistic use of the geostationary and the polar orbit satellites for surveying the cloud evolution process: plan *JpGU 2014*, Yokohama, 2014/4/28~5/2.
 47. Nakajima, T. Y.(東海大学), T. M. Nagao, and H. Letu, 2014: Advanced cloud observation using next-generation satellite systems for surveying the cloud evolution process. *AOGS 2014*, Sapporo, 2014/7/28~8/1.
 48. Nakajima, T. Y.(東海大学), H. Takenaka, T. Nakajima, T. Takamura, T. Watanabe, and T. M. Nagao, 2014: Retrieval of cloud properties from satellite imagers and application for the renewable energy estimation. *AOGS 2014*, Sapporo, 2014/7/28~8/1.
 49. Oikawa, E.(東京大学), T. Nakajima, and D. Winker, 2014: Direct radiative forcing of fine mode aerosols using CALIPSO satellite data. *AOGS*, Sapporo, 2014/7/28~8/1.
 50. Okata, M.(東京大学), T. Nakajima, T. Inoue, Y. Sato, D. Donovan, H. Barker, 2014: A study of the earth radiation budget using a 3D Monte-Carlo radiative transfer code (2). *JpGU 2014*, Yokohama, 2014/4/28~5/2.
 51. Okata, M.(東京大学), T. Nakajima, T. Inoue, Y. Sato, D. Donovan, H. Barker, 2014: A study of the earth radiation budget using a 3D Monte-Carlo radiative transfer code. *AOGS*, Sapporo, 2014/7/28~8/1.
 52. Suzuki, K.(米国 NASA/JPL), J. Golaz, A. Bodas-Salcedo, T. Yokohata, M. Wang, T. Koshiro, G. Stephens, and T. Nakajima, 2014: Satellite-based evaluation of the warm cloud processes in global models and its implication for aerosol indirect forcing. *AOGS*, Sapporo, 2014/7/28~8/1.
 53. Takamura, T.(千葉大学) and P. Khatrri, 2014: Cloud Observation in the SKYNET. *MAIRS Open Science Conference 2014 -Future Earth in Asia -*, Beijing, China, 2014/4/7~14.

54. Takamura, T.(千葉大学), P. Khatri, R. Ohmori, and K. Imaoka, 2014: Validation of liquid water path (LWP) of AMSR2/GCOM-W1 using MODIS and SKYNET observation data. *Proc. of the 2014 International workshop on SKYNET and Asian Lidar Network*, Hefei, China, 2014/9/10~12.
55. Uchida, J.(東京大学), D. Goto, T. Nakajima, 2014: Analyzing a regional limited area and variable length modes in global climate model NICAM. *AOGS*, Sapporo, 2014/7/28~8/1.

③ ポスター発表 (国内会議 1 件、国際会議 6 件)

■ポスター発表 国内会議

(平成 26 年度)

1. Khatri, P.(千葉大学), T. Takamura, H. Irie, and A. Kuze, 2014: Study of aerosol direct effects over typical sites of Japan using long-term observation data of SKYNET. 日本リモートセンシング学会第 56 回学術講演会, 筑波市, 2014/5/15~16.

■ポスター発表 国際会議 <年度別・発表者名順>

(平成 24 年度)

1. Saito, S. S.(東京大学), M. Sekiguchi, T. M. Nagao, and T. Y. Nakajima, 2012: Global and regional effects of aerosol optical properties on warm water clouds: Long-term analysis of MODIS data. *AGU fall meeting*, San Francisco, 2012/12.
2. Takenaka, H.(東京大学), T. Y. Nakajima, T. Inoue, T. Takamura, R. T. Pinker, and T. Nakajima, 2012: Estimation of SW radiation budget using geostationary satellites and quasi-real-time monitoring of PV power generation. *AGU fall meeting*, San Francisco, 2012/12.

(平成 25 年度)

3. Khatri, P.(千葉大学), T. Takamura, and T. Y. Nakajima, 2013: Study of aerosol characteristics and aerosol effects on atmospheric radiative balance over the East Asia using observation data of SKYNET network. *AGU fall meeting*, San Francisco, 2013/12/9~13.
4. Okata, M.(東京大学), T. Nakajima, Y. Sato, T. Inoue, Donovan, and H. Barker, 2013: A study of the earth radiation budget using a 3D Monte-Carlo radiative transfer code, *AGU Fall Meeting*, San Francisco, 2013/12/9~13.

(平成 26 年度)

5. Irie, H.(千葉大学), S. Chin, W. Ni, T. Nakayama, A. Shimizu, A. Yamazaki, T. Nagai, T. Takamura, and P. Khatri, 2014: Temporal variations of aerosol, glyoxal, and formaldehyde at urban sites of Japan as observed by MAX-DOAS based on detailed error analysis. *AGU Fall Meeting*, San Francisco, 2014/12/19.
6. Nakajima, T. Y.(東海大学), and Coauthors, 2014: Importance of observing the cloud evolution process from satellites for studies of climate and energy. *The Climate Symposium 2014*, Darmstadt, Germany, 2014/10/14

(4) 知財出願

- ① 国内出願 (0件)
該当なし。
- ② 海外出願 (0件)
該当なし。
- ③ その他の知的財産権
該当なし。

(5) 受賞・報道等

① 受賞

該当なし

② マスコミ(新聞・TV等)報道

(平成 24 年度)

- 1. 日経新聞記事「内部被曝、大気データから推定」で、ベータ線のデータ解析結果について報道 2013 年 3 月 5 日掲載 中島映至
- 2. マイナビウェブ記事「黄砂の季節到来！ PM2.5「越境汚染」で日本が危ない」で大陸起源の越境汚染について説明 2013 年 3 月 6 日掲載 中島映至

(平成 25 年度)

- 3. 東海大学新聞「太陽放射コンソーシアム設立」2013 年 8 月 1 日号 (1002 号) 掲載
- 4. 毎日新聞「日射量、短時間で見積もり可能に」2013 年 9 月 12 日 掲載
- 5. 北日本放送(KNB) 富山大学青木准教授の紹介 2013 年 10 月 6 日 番組協力
- 6. 毎日.jp TOKAISM インタビューVol.27「雲を通し地球温暖化に挑む」2013 年 12 月掲載 取材対応 中島孝
- 7. JST news「特集1 雲をつかむ話で太陽光を賢く利用」科学技術振興機構(JST)2014 年 1 月号掲載 取材対応 中島孝他
- 8. TV 朝日特番「挑戦！オーストラリア縦断 3000 キロ 世界最高峰ソーラーカー密着ドキュメント」2014 年 1 月 19 日放映 取材対応 木村・中島孝・渡邊・竹中・長 他

(平成 26 年度)

- 9. NHK サイエンス ZERO「雲のニュータイプ出現！ エアロゾルが気候変動を支配する」2014 年 9 月 7 日放映 番組製作協力と出演 中島孝・中島映至 他
- 10. 日刊工業新聞「ひまわり 8 号打ち上げ」(太陽日射推定への言及)2014 年 10 月 3 日掲載 中島映至
- 11. 日経新聞、東京新聞、西日本新聞、中日新聞、京都新聞、神戸新聞、中国新聞、琉球新報、共同通信、新幹線電光掲示板など 16 誌以上での報道「衛星データで日射量把握」2014 年 10 月 6 日掲載 取材協力 中島映至、竹中栄晶
- 12. NHK BS プレミアム コズミックフロント「若田飛行士が見た宇宙絶景」2014 年 10 月 16 日放映 取材協力 中島孝

③ その他

該当なし

(6) 成果展開事例

① 実用化に向けての展開

- 当研究チームが開発した日射解析システムの民間利用の仕組みとして、NPO 法人「太陽放射コンソーシアム」を設立した。平成 25 年 7 月 2 日には東京大学にて発足準備会を開き、約 30 社と研究者が参加した。その後、規定の手続きを進めて平成 26 年に発足させた。コンソーシアム会員は、正会員、準会員、教育・研究機関の 3 会員に分かれ、正会員と準会員については、太陽日射データを使用したビジネス展開が可能になっている。コンソーシアムホームページは <http://www.amaterass.org/> である。
- 平成 26 年度のフィージビリティ・スタディ (FS) において、東京理科大学 (東京工業大学チーム) が提供する「しっかり SUN」(<http://ssspv.net/>) に対して衛星を利用した日射推定値の提供を行った。

② 社会還元的な展開活動

- 当研究チームが提供する地球科学データのデータにアクセスするためのプログラム群 (ツールキット) を公開した。これらのツールキットを使用すると、任意の経度緯度点での日射データの抽出、時系列データの作成、日平均、及び月平均・標準偏差マップの作成、最大値最小値マップ、CVS データへの変換ツールなどが、FORTRAN, C, JAVA, MATLAB 言語で整備されている。データユーザーはこれらのツールキットを自由にダウンロードして活用することが出来る。ツールキットは以下のホームページから入手できる。
(<http://helios.aori.u-tokyo.ac.jp/teedda/fs/download.html>)
- CREST で実施している衛星日射推定システムについては、気象庁の「静止衛星データ利用技術懇談会 (議長: 中島映至) においても紹介されている。
- 本研究において再生可能エネルギーの需要と供給の両方に関係する衛星日射量等の精密な検証を担っている SKYNET の各種地上観測データおよび衛星日射量と地上観測日射量との準リアルタイム比較検証結果は、千葉大学環境リモートセンシング研究センターの HP (URL: <http://atmos.cr.chiba-u.ac.jp/>) にて公開されている。
- SKYNET はまた、地球科学分野においては将来の温暖化予測精度向上に、再生可能エネルギーの活用に関しては精度の観点からの地球科学データの有効性の評価に不可欠なグラウンド・トゥールースとして活用されつつある。

§ 5 研究期間中の活動

主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動

(1) チーム主催のワークショップ等

年月	名称	場所	参加人数	概要
2012年 10月 吉日	facebook開設（後述）	ネット上	週あたり閲覧数 100-300人 研究総括も読者	活動経過等の発信
2013年 3月14日	CREST/EMS/TEEDDA 中島チーム会合 （非公開）	横 浜	5 人	研究進捗報告のための ミーティング
2013年 6月26日	中島FS準備会	東海大学 代々木	1 0 人	FS準備
2013年 7月2日	太陽放射 コンソーシアム 発足準備会	東京大学 駒場	約 7 0 名 研究総括も参加	衛星データ利活用のための NPO法人設立
2013年 8月27日 -28日	TEEDDA会議 +FS会議 （非公開）	東海大学 熊本TSIC	1 4 人	FS構築のための会合
2014年 2月27日	CREST/EMS/TEEDDA 中島チーム会合 （非公開）	東海大学 代々木	1 3 人	研究進捗報告のための ミーティング
2014年 2月27日	中島FS会合	東海大学 代々木	2 2 人 領域アドバイザー 3名参加	FS成果発表と意見公開 のための会合
2014年 4月25日	FS第 2 フェーズ相談会	東海大学 代々木	10人	FS第 2 フェーズへの準備
2014年 6月9日	FS第 2 フェーズ キックオフ会議 （非公開）	東海大学 代々木	22名 領域アドバイザー 3名参加	各研究グループの代表が研究 内容について発表し、議論を 行うとともにアドバイザーから の意見を頂いた。
2014年 7月25日	FS第2フェーズ 第 1 回サイエンスチー ム会合（非公開）	東海大学 代々木	19名	各研究グループの代表が研究 実施内容について発表し、議 論を行った。
2014年 8月20日	FS第2フェーズ 第2回サイエンスチー ム会合（非公開）	東海大学 代々木	15名	最強チーム編成を念頭に、各 研究グループの代表が構想を 発表し、議論を行った。
2014年 9月3日	FS第 2 フェーズ 最終会議（非公開）	東海大学 代々木	23名 領域アドバイザー 3名参加	各グループ代表が最新の研究 成果と最強チームへ向けての 準備状況の発表を行うと共に アドバイザーからの意見を頂い た。
2014年 10月3日	シナリオ構築打合せ （非公開）	東海大学 代々木	5名	主要チームメンバーが集ま り、最強チームにおけるシナ リオ作りの相談を実施した。
2014年 10月9日	領域会議準備会 （非公開）	東海大学 代々木	10名	第6回領域会議に向けて、最強 チーム構想の最終確認及び発 表リハーサルを実施した。
2014年 12月25 日	FS第3フェーズ 会議その 1（非公開）	東海大学 代々木	14名	各研究グループの代表が研究 実施内容について発表し、議 論を行った。

2015年 1月19日	FS第3フェーズ 会議その2（非公開）	東海大学 代々木	14名	最強チーム編成を念頭に、チームとしての方向性の議論を進めた。
----------------	------------------------	-------------	-----	--------------------------------

（２）チーム主催のアウトリーチ

① チーム名およびFacebook ページの運営（平成 24 年度～）

平成24年度に、チーム研究の成果を広く対外アピールし理解を促すために、チーム名称を「TEEDDA（ていだ）」と定め、ロゴマークを作成した（図5.2-1）。「ていだ」は沖縄地方の言葉で「太陽」を意味する。またアルファベット表記TEEDDAは英語Terrestrial Energy Estimation by Diurnal Data Analyses（訳：日内変動解析による地球エネルギーの推定）の頭文字となっている。

さらに、チームの紹介、研究進捗、イベント通知・報告、地球科学と再生可能エネルギーに関するコラム等を掲載するFacebookページを開設し、研究活動を一般に公開する目的で運用中である（図7.2-2）。これまでの記事掲載は月平均8件前後で、それぞれ50～100名の読者に読まれている。このうち、関東煙霧発生時の衛星画像（2013年3月）は900名に閲覧される等、数百名以上に届く記事も何本もあり、研究活動の一般公開に役立っている。

② チームパンフレット作成、配布（平成 26 年度）

関連する研究機関・大学への配布、EMS関連の会合や関連学会への持参、取材協力を受けた際の送付などから、研究者、学生およびNHKなどのメディアに当研究チームの研究を紹介した。

③ 社会見学向けのポスター作成（平成 26 年度）

東海大学宇宙情報センター(TSIC)に訪れる小学生5～6年生、中学生および引率教師らを対象として、当研究チームの研究を紹介するA0ポスターを作成し、展示している。

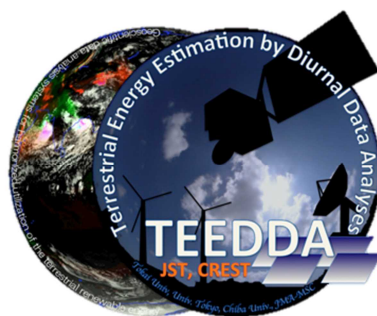


図5.2-1 TEEDDAチームロゴ



図5.2-2 facebookバナー用ロゴ(<http://www.facebook.com/TEEDDA>)

§ 6 最後に

CREST/EMS領域の戦略目標のひとつに「再生可能エネルギー需給の状態把握・推定・予測に関わる理論及び基盤技術の創出」がある。当研究チームは2012年10月以降のCREST研究において、特にこの戦略目標を中心にした研究、すなわち衛星による状態把握と推定、モデルによる予測研究、検証による品質保証を実施した。さらに地球科学分野の垣根を越えた研究展開を図るため、フィージビリティ・スタディの枠組みを活用して異分野グループとの連携を強化した。領域会議等での積極的な質問、発言、懇談会等への参加を通じて、分野間の理解が促進された。実際に地球科学、電力、計測制御の共同による基礎的研究を幾つか実施した結果、地球科学データの利活用が図られるなど成果が得られている。国際展開については、日欧、日豪、日米の研究ネットワークの構築を行った。当研究チームは第1原理に基づく地球科学データの解析を得意としていることから、EMS領域の主要素のひとつである理論の構築、学理基盤の構築にも貢献できた。また社会実装の一環としてNPO法人を設立し、得られたデータの民間活用の道を拓いた。以上の通り、研究目標に対する当研究チームの達成度は高いと考えている。

