地球環境研究センターニュース

COP24会場のスタジアムと前面のエントランス施設

2019年3月号　［Vol.29 No.12］ 通巻第339号

国連気候変動枠組条約第24回締約国会議（COP24）報告 政府代表団メンバーからの報告：パリ協定実施ルール、一部を除き採択される

地球環境研究センター 地球環境データ統合解析推進室 主任研究員 畠中エルザ
（地球環境研究センター温室効果ガスインベントリオフィス）
地球環境研究センター 温室効果ガスインベントリオフィス 高度技能専門員 小坂尚史

伝統的な分光法「FTS」及び革新的な分光法「光コム」による最新の大気計測～OSA Light, Energy and the Environment Congress参加報告～

地球環境研究センター 衛星観測研究室 研究員 大山博史

AGU出張報告 最近の人工衛星を用いた大気微量成分の研究動向

地球環境研究センター 衛星観測研究室 特別研究員 染谷有

北海道陸別小学校と陸別中学校で出前授業をしました

地球環境研究センター 衛星観測研究室 主任研究員 野田響

IPCC特別報告書「1.5°Cの地球温暖化」の図を読み解く (2)

地球環境研究センターニュース編集局

愛媛大学で講義を行いました―地球温暖化とその緩和策・適応策―

地球環境研究センター 交流推進係

【最近の研究成果】 2009年11月の南米南端におけるオゾン量低下イベントに関する解析

地球環境研究センター 気候モデリング・解析研究室長 秋吉英治

2019年3月号 ［Vol.29 No.12］ 通巻第339号 201903_339001

国連気候変動枠組条約第24回締約国会議（COP24）報告

政府代表団メンバーからの報告：パリ協定実施ルール、一部を除き採択される

地球環境研究センター 地球環境データ統合解析推進室 主任研究員 **畠中エルザ**
（地球環境研究センター温室効果ガスインベントリオフィス）
地球環境研究センター 温室効果ガスインベントリオフィス 高度技能専門員 **小坂尚史**

国連気候変動枠組条約締約国会議（COP）報告 一覧ページへ

2018年12月2～15日、ポーランド・カトヴィツェにおいて国連気候変動枠組条約（United Nations Framework Convention on Climate Change: UNFCCC）第24回締約国会議（Conference of the Parties: COP24）、京都議定書第14回締約国会合（Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Kyoto Protocol: CMP14）およびパリ協定第1回締約国会合第3部（Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Paris Agreement: CMA1-3）が開催された。また、これと並行して、パリ協定特別作業部会（Ad Hoc Working Group on the Paris Agreement: APA）第1回会合（第7部）および第49回補助機関会合（科学上および技術上の助言に関する補助機関会合： Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice: SBSTA49、実施に関する補助機関会合： Subsidiary Body for Implementation: SBI49）が開催された。国立環境研究所からは、日本政府代表団（交渉）、サイドイベント（発表）、ブース（展示）という3つの立場で参加した。本稿では交渉内容について紹介する。なお、サイドイベントと展示ブースについては、国立環境研究所ニュース37巻6号（2月下旬公開予定）で報告する。

今回のCOP24では、議論が決着しなかった市場メカニズムの議題を除き、パリ協定を実施に移すための詳細ルールが採択された。これでパリ協定の本格運用に向けて大きな部分の準備が整ったことになる。他にもタラノア対話 [注] の政治フェーズが実施され、気候資金等も2025年以降の長期資金目標の検討のあり方などの議論が注目されたが、本稿では筆者らが参加していたパリ協定実施ルール、とりわけ透明性関連議題に注力して政府代表団による交渉について概要を報告する。その他の事項に関する交渉概要は、環境省の報道発表（http://www.env.go.jp/press/106279.html）等に紹介されているので参照されたい。

COP24会場のスタジアムと前面のエントランス施設

1. パリ協定の下での行動と支援のための透明性フレームワークに関する決定

パリ協定には京都議定書のように決められた削減目標はない。各国が自主的に決定する貢献（Nationally Determined Contribution: NDC）を深掘りしていくことは求められているものの、各国がそれぞれに表明してそれぞれに達成を目指す仕組みである。そして排出量や目標達成の進捗状況を、透明性を担保させた形で報告させる。目標を自己決定→表明→達成状況報告→世界全体での進捗確認が繰り返されれば徐々に取り組みが深まり排出を削減できるという考え方だ。京都議定書の際には、国際交渉の綱引きの中で削減目標が議定書本文採択と同時に合意されたが、パリ協定の下では他国や非政府アクターの声を受け事後的に改善していくことになる。そのような意味では、透明性確保の重要性は以前より高まっていると言える。

透明性フレームワークの詳細ルールに関係するCOP24決定の概要だが、まず、新たに透明性報告書（biennial transparency report）という隔年の報告書の作成が求められることになった。各国がこの報告書を提出し、技術的専門家審査を受け、促進的多国間検討を受けることになる。（詳細は後述）

透明性報告書の内容は表1に示すとおりである。義務と推奨とで、要求に強弱がついている。先進国には目標と資金支援の透明性を、途上国には排出報告と目標の透明性を強く求めている。

表1 透明性報告書の構成、義務の程度

(a)	国家インベントリ報告書	すべての国の義務
(b)	NDCの進捗・達成状況の確認に必要な情報	すべての国の義務
(c)	気候変動による影響および適応に関する情報	すべての国に推奨
(d)	途上国に提供された資金・技術移転・能力向上に関する情報	先進国のみ義務、その他の支援提供国は推奨
(e)	必要とされる／受領した資金・技術移転・能力向上に関する支援の情報	途上国のみ推奨

（注）ここで言う先進国／途上国はdeveloped country/developing countryであり、気候変動枠組条約の下で定義づけられていたAnnex I Party/Non-Annex I Party（附属書I国/非附属書I国）とは異なり、具体的な国名を明示していないのがポイントとなる。

最初の透明性報告書の提出期限は遅くとも2024年12月末とされている。なお、透明性報告書の根幹をなす国家インベントリ報告書は、この一部としても、あるいは独立した報告書としてもよいことになっている。また、条約の下の義務を満たすための年次インベントリ報告（すなわち先進国による従来からの報告）においてもパリ協定の下でのルールを使用することになった。これに伴い、従来の形での詳細な先進国のインベントリ審査は隔年での実施となる。

インベントリの方法論の点では、すべての国が「国家温室効果ガスインベントリのための2006年IPCCガイドライン」（https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/）を用いることを義務づけられた。本ガイドラインは最新のものではあるものの、IPCCでの採択からはすでに10年超を経ているもので、これがようやくすべての国に適用されることになる。なお、途上国は今まで1996年改訂IPCCガイドライン等の適用のみが義務であったので、大きな前進となる。

また、IPCC第5次評価報告書の地球温暖化係数（Global Warming Potential: GWP）の100年値を用いることが決まった。（但し、追加的に他の係数の使用も可）これは現行では先進国はIPCC第4次評価報告書、途上国は第2次評価報告書の値の適用が義務であるため、先進国にとってもやや大きな変更となる。

さらに、CO_2、CH_4、N_2O、HFCs、PFCs、SF_6、NF_3の7ガスの報告が求められることになった。但し、途上国であり、かつ対応能力がまだ不足している場合には、CO_2、CH_4、N_2Oの3ガス、および残り4ガスのうちNDCに含まれるガスもしくは市場メカニズム等の活動に含まれるガスもしくは過去報告したことのあるガスだけでもよい、という柔軟性条項が付記された。これは、先進国、途上国とも当面は大きな変更にはならないと思われる。

また、インベントリ提出年の前々年の数値の報告が求められることになった。但し、これも3年前の数値報告も認める柔軟性条項が付記された。先進国にとっては前々年の報告は現行通りだが、途上国にとって現行は4年前の数値報告が義務であり、それさえ守れていない国が多いため、大きな前進になる。

こうした柔軟性条項が付されることによって、基本的に、先進国・途上国共通の実施ルールとなった。これがパリ協定による大きな変更点である。なお、柔軟性に関しては、議論に多くの時間が割かれ、わざわざ個別のセクションを設けてその考え方をガイドラインの冒頭に記載している。具体的には、それぞれの途上国が、どのガイドラインの規定について柔軟性条項を活用するのか、それはどのような能力的制約によるものなのか、またどのようなスケジュールで改善を予定しているのかを説明することになっている。また、審査では、柔軟性条項の活用に関する各国の自己決定そのものや、柔軟性条項の活用なしに当該規定の要求を満たしうるか否かは問えないとされた。

このように、共通ルールとはいえ、随所に異なる取り扱いとなっている箇所があるが、先進国と途上国ではスタート地点が異なるため、致し方のない部分はある。原則として、共通であると言える形に持っていくことは米国などにとっては非常に重要な点だったようである。交渉終盤まで先進国・途上国の責任の程度を差別化する二分論を掲げる途上国がいたことを考えると大きな成果だ。徐々に先進国・途上国の差が狭まることが期待される。

技術的専門家審査（Technical Expert Review）は、現行の先進国のインベントリ・隔年報告書の審査と似ているが、ガイドラインの関連箇所の冒頭に、審査チームがやってはならないことリストが設けられているのが特徴的である。具体的には、政治的な判断を下してはならないこと、審査対象国のNDCや国内行動、提供した支援そのものが十分か否か、また先に述べたように柔軟性条項の活用に関する意思決定そのものを問うてはいけないとされている。

また、審査の後には、進捗に関する促進的多国間検討（Facilitative, Multilateral Consideration of Progress）が実施される。これもカンクン合意（COP16）で決まっていた透明性確保のための仕組みの下で隔年報告書、隔年更新報告書に対して行われている多国間評価（Multilateral Assessment: MA）や促進的意見の共有（Facilitative Sharing of Views: FSV）に類似している。当該検討で取り扱う情報は、表1に記載したもののうち、(c) 適応を除く、(a) インベントリ、(b) NDC進捗、(d) 提供した支援、(e) 受領した支援である。

2. 第3回多国間評価（MA）、第6回促進的意見の共有（FSV）

今次会合では、また、12月3日の午前、7日の午後に、EU、カナダ、エストニア、ラトビア、リトアニア、フランス、ドイツ、チェコ、ハンガリー、スロバキア、オランダの計11カ国に対してMAが実施された。また、12月3日の午後、7日の午前に、アルゼンチン、ボスニア・ヘルツェゴビナ、中国、ヨルダン、アンドラ、レバノン、モンゴル、ナミビア、トーゴ、チュニジアの計10カ国に対してFSVが実施された。政府代表団員でなくとも参加できる会合の割には、始まった頃に比べると傍聴者が少なくなった印象は否めないが、相変わらず興味深いやり取りが行われている。

ここでは初めてFSVを受けた中国への質問内容を紹介したい。インドからは、インベントリにおいて不確実性が高いと説明されているセクター（土地利用、土地利用変化及び林業、廃棄物、農業）の理由、排出量取引のパイロット事業実施で得られた教訓（EU・ニュージーランドも同様）、第12次5カ年計画期間中の緩和のドライバーについて、同5カ年計画における省エネ施策の削減ポテンシャルの総量、炭素強度と排出量総量の管理の具体的な実施方法、が問われた。豪州・EUは今後のインベントリ改善における優先順位づけ等について質問した。米国は、省レベルで実施されているパイロット事業の経験の共有を求め、省ごとに能力のバラつきが見られるのか、どういったニーズがあるのか、また、植林・緑化プログラムの進捗状況やコベネフィットが見られるかを問うた。韓国は、排出量取引制度の前提となる、事業所ごとのインベントリづくりについて質問した。マレーシアからは、国・地方・企業レベルでの算定・報告・検証活動実施の経験の共有を求める質問があった。ニュージーランドからは、全般的にどういった能力向上のニーズ・国際支援の要望があるかという問いがあった。日本からは、インベントリの国内体制について質問した。上記は、より詳細な情報の提供を求めるものであったが、スイスからはやや踏み込んだ質問が投げかけられた。それは、中国は、エネルギーセクターのうち、燃料の燃焼サブセクターの排出量を2通りの方法で算定している（一つは報告用、もう一つは確認用）にもかかわらず、それらの値の比較分析作業の結果に関する説明が報告書では省略されているが、この比較分析結果の差分はスイスのエネルギーセクター全体の数値よりも大きいため、再検討のうえ報告するようにして欲しいというものであった。ちなみに、本件への回答はなかった。

中国へのFSVは、プレゼン30分、質疑応答30分で、回答が終了しなかったため、ウェブでの追加回答を行うこととなった。今後のパリ協定下の促進的多国間検討も、MAやFSVと同様の場となるのか注目したい。

3. 専門家協議グループ（CGE）

その他、筆者らが担当していた議題に非附属書I国の国別報告書に関する専門家協議グループ（Consultative Group of Experts: CGE）への付託事項のレビューというものがあった。CGEは既存の透明性確保のための仕組みの下で報告書の作成などを支援する組織である。パリ協定の下での透明性報告書の導入の負荷を和らげるためにこのグループの長期間の活動継続を求める途上国と、ニーズを理解しつつも、短期の延長しか認めたくない先進国とで綱引きとなったが、最終的には8年間の長期延長となった。

4. 最後に

実施ルールは概ね決まったが、運用面では細かな精査と解釈が必要な部分が多々残っている。これから各国において決定文書の分析と検討が行われ、他国の動きを横目に見つつ自国にとって不便のない解釈をしていくことになるだろう。大枠でのスケジュールを考えつつ、足元での国内作業が間に合うか否かといったことも考慮する必要がある。途上国の場合は、国内体制や資金繰りも考慮していくことになるだろう。また、詳細ルールのさらなる詳細で検討先送りになった事項もあるためSBSTAなどでの作業が待っている。

せっかくの実施ルールも主要アクターがパリ協定に参加していないと実効性が削がれるが、2017年6月1日にパリ協定の離脱を表明していた米国は、筆者らの参加していた議題では今回もとくに大きな態度の変化は見られず、むしろ先頭に立って途上国に厳しい要求を行っていた印象である。ただ、IPCCの1.5°C特別報告書に関しては、SBSTA閉会会合において報告書に留意（take note）し、IPCCの専門家の努力を歓迎（welcome）する内容のSBSTA議長の文言案について、小島しょ国連合が報告書を歓迎する文言への変更提案を行ったことに関し米国は断固反対するなど、大方針に関しては一貫した立場をとっている。なお、サウジアラビア、クウェート、ロシアも同様の立場をとって紛糾したため、SBSTAでは結論文書の採択に至らず決裂している。次回のチリでのCOP25を含め、トランプ政権中はずっと同じ風景のままになるのか気になるところである。

脚注

- タラノアとは前回COP23の議長国フィジーの表現で、包摂的・参加型・透明な対話プロセスを意味する。パリ協定の目標達成に資する世界の優良事例の経験共有などが行われた。

2019年3月号 ［Vol.29 No.12］ 通巻第339号 201903_339002

伝統的な分光法「FTS」及び革新的な分光法「光コム」による最新の大気計測

～OSA Light, Energy and the Environment Congress参加報告～

地球環境研究センター 衛星観測研究室 研究員 **大山博史**

1. はじめに

2018年11月5日から7日にかけてシンガポールのセントーサ島で開催された光学会の国際会議（OSA Light, Energy and the Environment Congress）に参加した。OSAは元々、1916年に設立されたThe Optical Society of America（米国光学会）の略称であった。2008年に国際学会に移行しThe Optical Societyに名称を変更してからも、OSAという略称が浸透していたため今でもOSAと呼ばれている。今回の会議は、*Fourier Transform Spectroscopy, Hyperspectral Imaging and Sounding of the Environment, Optics and Photonics for Energy & the Environment, Optics in Solar Energy, Solid-State Lighting*の5つの議題に関して行われた。本報告では、筆者の研究と特に関連のあるFourier Transform Spectroscopyのセッションを中心に幾つかの発表を紹介する。このセッションでは、大きく分けて光周波数コム（光コム）による分光計測、空間ヘテロダイン分光計（Spatial Heterodyne Spectrometer: SHS）の開発と大気観測への応用、GOSAT及びGOSAT-2や温室効果ガスカラム量の地上観測ネットワーク（Total Carbon Column Observing Network: TCCON）で使用されているフーリエ変換分光計（Fourier Transform Spectrometer: FTS）による大気観測、の3つの話題を中心とした発表が行われた。

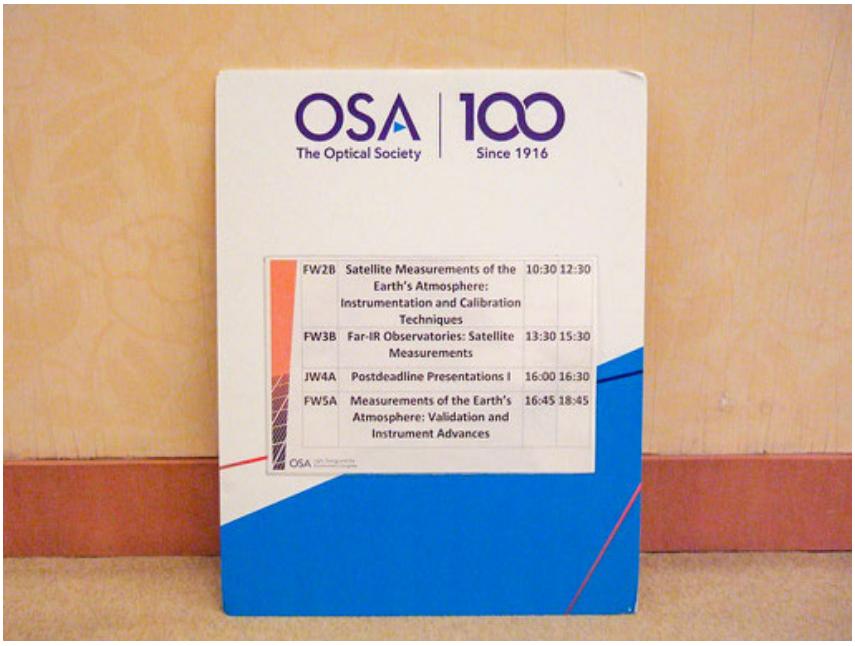


写真1 会場の各部屋の入口に掲示されたセッションのタイトル等に関するプラカード

2. 光コムを用いた分光計測

まず、光コムに関連した発表について紹介する。光コムは、一定の周波数間隔で並んだ櫛状のスペクトルを持つ光、またはその光を発する装置のことをいう。光コムの開発は、2005年にノーベル物理学賞を受賞したT. W. Hänsch氏とJ. L. Hall氏を中心に、「光のものさし」として光周波数を精密に測定するために行われた。最近では、光コムを広帯域の光源として用いる分光法が急速に進展している。さらに2つの光コムを使用したデュアルコム分光法（Dual

Comb Spectroscopy: DCS）により高速かつ高波長分解能・高波長精度での測定が可能となり、実験室分光やフィールドでの大気観測にも応用されるようになってきた。L. Rutkowski氏（Umeå University, Sweden）らは、光コムを用いて1.57μm帯のCO_2の吸収スペクトルを測定し、分光パラメータ（吸収線の強度、線幅、中心波長等）や測定されたスペクトル形状を最も良く表す吸収線形について議論した。E. Waxman氏（NIST, USA）らは、近赤外（1.6μm帯付近）のデュアルコムからの光を1km程度離れた地上に設置したリトロリフレクタ（入射方向に光を反射させる機器）やマルチコプター（複数の回転翼により飛行する機器）に搭載したリトロリフレクタに反射させて大気中の温室効果ガスの濃度を導出する観測装置について紹介した（Cossel et al. (2017) の図1参照）。G. Ycas氏（NIST, USA）らは、アセトンなどの揮発性有機化合物の検出と定量化を目的として、波長帯を中間赤外（3.2μm帯付近）まで拡張したDCSの開発状況について報告した。

3. 航空機搭載SHSの開発

空間ヘテロダイン分光計（SHS）はもともと天文の分野で開発されたものであるが、最近では、2018年5月に打ち上げられた中国の地球観測衛星GaoFen-5にGreenhouse-gases Monitoring Instrument（GMI）と呼ばれる温室効果ガスカラム量の観測を行うSHSが搭載されている。一般的なFTSではマイケルソン干渉計の反射鏡を駆動させて光路差を変化させることで1画素の検出器によりインターフェログラムを取得するのに対して、SHSではマイケルソン干渉計の2つの反射鏡を回折格子に置き換えた光学系になっており、駆動機構を有することなくアレイ検出器（複数の検出素子を配列した機器）によってインターフェログラムを取得することができる。本会議では、将来の衛星搭載を見据えた航空機搭載型のSHSの発表が2件あった。どちらも大気によって散乱されるリム（大気の周縁）方向の太陽光スペクトルを航空機から観測し、J. A. Langille氏（University of Saskatchewan, Canada）らは1.3μm帯から水蒸気の濃度の高度分布を、M. Kaufmann氏（FZJ, Germany）らは0.76μm帯のO2 A-bandから気温の高度分布を算出した結果について紹介した。

4. 地上設置FTSによる観測

国立環境研究所（NIES）の森野勇主任研究員らは、フィリピンのBurgosに設置している高分解能FTSによる温室効果ガスカラム量の観測について紹介した。BurgosはTCCONサイトの1つであり、2017年3月の観測開始以降順調にデータが取得されており、GOSATやOCO-2の検証に利用されるだけでなく、東アジアの森林火災や人間活動によると思われるCOやCH_4の増加が検出されている。化学輸送モデル（Goddard Earth Observing System-Chemistry: GEOS-Chem）の計算値と比較したところ、モデル計算値の過小評価が明らかになり、インベントリの改善が必要であることが報告された。また、ドイツの航空機観測キャンペーンであるEffect of Megacities on the Transport and Transformation of Pollutants on the Regional to Global Scales（EMeRGe Asia）において、Burgosサイト上空の飛行に同期して実施した高分解能FTS及び可搬型FTS（EM27/SUN）観測についての紹介があり、速報値ではあるが航空機とFTSのデータは良い一致を示していることが報告された。

写真2 口頭発表を行う森野勇主任研究員

筆者らは、NIESとJAXAがそれぞれ所有する2台の可搬型FTSを用いて実施した2017年度の観測キャンペーンについて招待講演として発表した。本キャンペーンは、2台の可搬型FTSを国内の石炭火力発電所の近傍とその発電所の影響をほとんど受けないローカルなバックグラウンド地点にそれぞれ設置し、太陽を光源として温室効果ガスカラム量の観測を行うものである。2地点で観測したCO_2カラム量の差とウィンドプロファイラ（火力発電所から約40kmの地点に設置されている気象庁の装置）の風向風速データを用いて、火力発電所からのCO_2排出量を推定し、石炭消費量に基づいて算定された1年間のCO_2排出量の公表値と比較した。領域気象モデル（Weather Research and Forecasting: WRF）等を用いた誤差解析の結果、CO_2カラム量と風の観測地点の違いに起因する風速の不確かさがCO_2排出量を推定する際の最大の誤差要因となることがわかった。最後に、これらの結果を受けてCO_2排出量の推定精度を向上させるために2018年度実施した、可搬型FTSによるCO_2カラム量とドップラーライダによる大気境界層内の風の場の同時観測の様子について紹介した。

5. 衛星搭載FTSによる観測

衛星に搭載されたFTSによって観測された大気微量成分のプロファイルやカラム量に関するレビュー的な発表が招待講演により行われた。K. W. Bowman氏（JPL, USA）は2018年の1月に運用を終了したTropospheric Emission Spectrometer（TES）の約14年間にわたる成果について、 S. Safieddine氏（LATMOS-IPSL, France）らはInfrared Atmospheric Sounding Interferometer（IASI）による最近の大気汚染物質の観測について、K. A. Walker氏（University of Toronto, Canada）らはAtmospheric Chemistry Experiment-Fourier Transform Spectrometer（ACE-FTS）データの検証結果についてそれぞれ紹介した。GOSATに搭載されているTANSO-FTSについては、NIESの松永恒雄衛星観測センター長らによって短波長赤外バンドのスペクトルから得られたCO_2とCH_4のカラム平均濃度に関する発表があり、全大気平均濃度のトレンドや検証結果の概要、観測された人為起源増大量とインベントリから計算した増大量に相関関係があることなどについて紹介があった。また、2018年10月29日に打ち上げが成功したGOSAT-2についても、現地（JAXAの種子島宇宙センター）での写真を交えて紹介があった。齋藤尚子氏（千葉大学）らは熱赤外バンドの解析から得られたCO_2とCH_4の高度別濃度の検証結果について発表した。また、FTS以外にも、X. Liu氏（Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, USA）らの発表ではOzone Monitoring Instrument（OMI）の対流圏オゾンについて、D. Crisp氏（JPL, USA）による基調講演ではOrbiting Carbon Observatory-2（OCO-2）によるCO_2観測の最近の成果が紹介された。

6. 静止衛星からのイメージングFTS観測

上述の比較的長期間のデータが取得されている衛星に対して、L. Ding氏（中国科学院）らは2016年12月に打ち上げられた中国の静止気象衛星FengYun-4Aに搭載されているGeostationary Interferometric Infrared Sounder（GIIRS）の初期観測について紹介した。GIIRSは地球表面や大気から放射される熱赤外領域（4.45–6.06μm, 8.85–14.28μm）のスペクトルを静止衛星から高い波長分解能で観測できる世界初のセンサである。特筆すべき特徴は、32 × 4のアレイ検出器により1回の観測（約4秒）で128個（128画素）のスペクトルを取得できることで、ポインティングミラーを使って観測シーンをスキャンして1時間以内に中国全土をカバーすることができる（Hua et al. (2018) の図1参照）。FengYun-4Aに搭載されているGIIRSは試験的なセンサであるが、FengYun-4B以降（FengYun-4Gまである）に搭載されるGIIRSは波長分解能とフットプリントサイズがそれぞれ改良される予定である。今回紹介されたのは地表面温度のみであったが、気温や水蒸気のプロファイルについても解析中とのことである。

7. おわりに

OSAでは会議ごとに幾つかの議題を設けて年間40程度の国際会議が開催されている。ここで報告した会議と関連する次回の会議は、2019年6月25–27日の間、カリフォルニア州・サンノゼにおいてOSA Sensors and Sensing Congressとして開催される。2018年の会議でも取り上げられた*Fourier Transform Spectroscopy, Hyperspectral Imaging and Sounding of the Environment, Optics and Photonics for Energy & the Environment*に新たに*Optical Sensors*を加えた4つの議題で行われる予定である。

参考文献

- K. C. Cossel, E. M. Waxman, F. R. Giorgetta, M. Cermak, I. R. Coddington, D. Hesselius, S. Ruben, W. C. Swann, G.-W. Truong, G. B. Rieker, and N. R. Newbury, “Open-path dual comb spectroscopy to an airborne retroreflector,” Optica 4(7), 724–728 (2017).
- J. Hua et al., “Review of Geostationary Interferometric Infrared Sounder,” Chin. Opt. Lett. 16(11), 111203 (2018).

2019年3月号 ［Vol.29 No.12］ 通巻第339号 201903_339003

AGU出張報告 最近の人工衛星を用いた大気微量成分の研究動向

地球環境研究センター 衛星観測研究室 特別研究員 **染谷有**

1. はじめに

2018年度の地球物理学会（American Geophysical Union: AGU）Fall Meetingは、12月10日～14日にワシントンD.C.のコンベンションセンターで行われた。これまでは、毎年サンフランシスコでの開催であったが、会場の都合により、2017年度のニューオーリンズに続く、サンフランシスコ以外での開催となった。AGU Fall Meetingは3万人規模の参加者が集う、地球物理学分野では世界で最大規模の学会である。本稿では、筆者の発表とそれに関連する衛星を用いた大気汚染物質や温室効果ガスの観測的研究の動向について報告する。

写真1 会場となったWalter E. Washington Convention Center

2. AGUでの関連分野の動向

筆者はImproving the Science of Emissions Through Inventories, Observations, and Modelsというセッションで、温室効果ガス観測技術衛星GOSAT (Greenhouse gases Observing SATellite) のデータから導出したアンモニア濃度の全球分布とヨーロッパのMetop衛星に搭載された観測装置であるIASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) のデータによる同様のプロダクトとの比較結果についてポスター発表した。アンモニアは産業革命以降、人口増加とともに大気中への排出量が急激に増加している物質であり、海洋や湖沼の富栄養化、酸性物質との大気中での反応によって発生するエアロゾルによる健康影響や、それらが雲核となり、雲が増加することによって起こる放射収支の変化といった影響をもたらすといわれている。近年、地球上の物質から射出される赤外放射（熱赤外放射; TIR）を高波長分解能で観測できるハイパースペクトルサウンダーを用いて、人工衛星による大気中のアンモニア濃度の観測が行われ、プロダクトも公開され始めている。今大会ではIASIやAqua衛星搭載のAIRS (Atmospheric Infrared Sounder) によるアンモニアプロダクトを用いた、中国の大気汚染に関する報告が何件か見られた。筆者の発表にも中国や韓国を研究対象とした研究者が訪れてくれ、東アジアでの大気汚染に関する関心の高さが感じられた。アンモニアは中国

内での排出量の推計がいくつも行われているが、その数値には大きな違いが見られており、このような不確実性の低減のために衛星データが今後さらに利用されていくのではないかと考えられる。今回発表したGOSATによるデータにもアメリカの研究者から利用の申し出があり、化学輸送モデルの計算結果との比較研究を行うことになった。中国では、近年、大気汚染物質の排出が規制され、二酸化窒素や二酸化硫黄の濃度もここ5〜10年程度で減少傾向にあることがAuraに搭載されたOMI (Ozone Monitoring Instrument) やSuomi-NPP (Suomi National Polar Partnership) に搭載されたOMPS (Ozone Mapping Profiler Suite) による衛星観測でも見られており、このような排出規制によって大気汚染は改善傾向にあるようである。一方、アンモニア濃度についてはあまり改善傾向が見られておらず、アンモニアの排出量も減少させることで東アジアの大気汚染はさらに急速に改善すると考えられるため、今後も継続的にモニタリングすることが必要である。今大会では、アンモニアプロダクトと二酸化窒素、二酸化硫黄プロダクトなどを複合的に利用した研究は見られたものの、インバージョン計算によるアンモニアの排出源や量の推定といった研究はあまり見られなかったため、このような研究についてはこれからの発展に期待したい。

写真2 ポスター会場の様子

衛星による大気観測では、TROPOMI (Tropospheric Monitoring Instrument) を搭載したSentinel 5 Precursorが打ち上げられて1年が経ち、Atmospheric Monitoring from Space: The Copernicus S5P and Suomi NPP Constellationというセッションも立ち上げられた。プロダクトが公開されて間もないということもあり、TROPOMIに関する発表はプロジェクト関係者からの観測結果に関するものが主であった。TROPOMIは紫外から近赤外域の波長に観測バンドを持つ、回折格子型スペクトルセンサーであり、メタン、一酸化窒素、 二酸化窒素、 オゾン、 二酸化硫黄の気柱平均濃度や、雲やエアロゾルの高度と光学的厚さといった物理量を全球的に高水平分解能で観測することが可能である。メタンやエアロゾルプロダクトはまだ公開されておらず、2019年に公開予定であるものの、それ以外のプロダクトに関しては既に公開されており、今後、これらのデータがOMIのデータに取って代わることが予想される。発表では、OMIと比較してTROPOMIの高い水平分解能を強調したものも多くみられ、二酸化窒素の移流がより詳細に捉えられている様子や、より小さな高濃度域を捉えた様子などが示されていた。

衛星による温室効果ガス観測に関する発表はRemote Sensing of CH_4 and CO_2 from Space: New Observing System Capabilitiesというセッションを中心に行われた。ここでは、アメリカのOCO-2 (Orbiting Carbon Observatory-2) やGOSATによるデータを用いた研究成果のほか、今後予定されている衛星ミッションに関する発表も行われた。GOSATのスペクトルセンサーであるTANSO-FTSは近赤外域（SWIR）とTIRの観測を行い、SWIRから二酸化炭素とメタンの気柱平均濃度、TIRからそれらの鉛直濃度プロファイルを推定する。GOSATのSWIRプロダクトと同様に、温室効果ガスの気柱平均濃度はアメリカのOCO-2と中国のTanSatによって二酸化炭素が、TROPOMIによってメタンが観測されている。OCO-2による新しいXCO_2プロダクトであるv8はスペクトル校正やアルゴリズムの改良などが行われ、その結果、v7に比べて値が大きく変化しており、検証の結果、さらに精度の向上に成功しているということであった。また、v8からポインティングのエラーや地表気圧の先験値などを見直したv9もリリースされている。GOSATシリーズに関する口頭発表では、JAXA菊地氏からSWIRとTIRを複合利用したアルゴリズムから推定した二酸化炭素とメタンの下部対流圏での濃度データを用いた、大都市での排出量変動が示された。国立環境研究所（以下、

NIES）松永恒雄衛星観測センター長からは、2018年10月に打ち上げられたGOSATの後継機であるGOSAT-2について、今後配信予定のプロダクトの概要やそれらの検証計画について発表があった。また、それらの詳細についてはポスター発表にてNIES森野勇主任研究員や吉田幸生主任研究員らによって発表が行われた。TanSatに関する発表は今回のAGUではあまり見られなかった。

衛星による観測ではないが、今回最も印象に残った発表はMontzka et al.によるトリクロロフルオロメタン（CFC-11）に関する発表である。これは、2010年までに排出が終了しているはずのCFC-11がどこかから排出されているという、Montzka et al., *Nature*, 2018の続報であった。しかし、この発表に関しては次号掲載予定の中島英彰主席研究員の報告にお任せすることにする。

＊AGU Fall Meetingに関するこれまでの記事は以下からご覧いただけます。

- 平野高司「AGU2001年度秋季大会報告ー炭素循環と陸上生態系に関する研究の動向についてー」2002年2月号
- AGU (American Geophysical Union) Fall Meeting 2005参加報告
    - 梁乃申「陸域炭素循環に関する発表と研究の動向」2006年2月号
    - 江口菜穂・吉田幸生「GOSATプロジェクト研究発表」2006年2月号
    - 勝本正之・森範勝「ブース展示報告」 2006年2月号
- 井上誠「AGU Fall Meeting 2011参加報告ー航空機と衛星リモートセンシングによる大気観測の動向ー」2012年2月号
- 大森裕子・工藤慎治「さまざまな分野の垣根を越えた研究者同士の交流を体験して」2013年2月号
- 野田響「陸域生態系リモートセンシングの動向ーAGU Fall Meeting参加報告」2015年3月号
- 廣田渚郎「AGU (American Geophysical Union) Fall Meeting 2016参加報告 [1] Madden Julian Oscillationに関する研究の動向」2017年3月号
- 平田竜一「AGU (American Geophysical Union) Fall Meeting 2016参加報告 [2] 20年目を迎えたフラックスネットワークとビッグデータ時代」2017年3月号
- 髙木宏志「AGU (American Geophysical Union) Fall Meeting 2016参加報告 [3] 2基の人工衛星による温室効果ガスの全球観測が導くこれからの温暖化研究」2017年4月号

2019年3月号 ［Vol.29 No.12］ 通巻第339号 201903_339004

北海道陸別小学校と陸別中学校で出前授業をしました

地球環境研究センター 衛星観測研究室 主任研究員 **野田響**

1. はじめに

2018年11月8日に、北海道足寄郡陸別町の陸別小学校および陸別中学校において出前授業を行いました。陸別町は「日本一寒い町」として全国的に知られていますが、2018年の秋は全国的に暖かく、授業当日の陸別も11月にしては珍しく雪も積もっていない穏やかな日でした。

陸別町では、ここに観測拠点をおいている国立環境研究所（以下、国環研）、名古屋大学、北海道大学、北見工業大学、国立極地研究所と陸別町とが情報交換や地域振興などを目的に陸別町社会連携連絡協議会を設立しており、その活動の一環として、これらの研究・教育機関が年に一度、陸別小学校・陸別中学校への出前授業を行っています。国環研でも、陸別町の銀河の森天文台に設置した観測拠点で成層圏オゾンや地上到達有害紫外線のモニタリング、さらにフーリエ変換分光計による二酸化炭素およびメタン濃度の観測を行っており、出前授業は陸別町への恩返しのひとつでもあります。私は、前年の2017年に初めてこの出前授業に参加しました。前年の出前授業の折は、中学1年生のクラスを対象に、講師二人で1コマの授業を担当しましたが、今回の出前授業では小学校と中学校のそれぞれ1コマずつを講師一人で担当しました。

2. 陸別小学校での出前授業

陸別小学校での出前授業は、3・4年生、5年生、6年生の3つに分かれ、それぞれで異なる講師が担当しました。私は5年生（15名）のクラスを担当し「地球温暖化を引き起こす二酸化炭素の話」というタイトルで授業を行いました。

地球温暖化問題やその主要因が人間活動により排出された二酸化炭素であるということについては、担当した５年生の生徒たちもテレビなどを通じて既に知っているとのことでしたが、ゲリラ豪雨や大雪、山火事などの最近のニュースを例に挙げながら地球温暖化が社会に与える影響について説明をし、様々な観測で明らかになった過去から現在までの二酸化炭素濃度の変化について話をすると熱心に聞いてくれました。大気中の二酸化炭素濃度は長期的には増加しながらも、1年の中では季節による増減を繰り返します。生徒たちに、「この季節による増減の中で二酸化炭素が減るのはいつか？」そして、「それがなぜ起こるのか？」のふたつの問をクイズとして出したところ、生徒たちは楽しそうに答えてくれました。最初の問の答えが、北半球の夏の間、二番目の答えが、夏の間に植物の活発な光合成活動により二酸化炭素が吸収されるから、です。さらに、陸別町社会連携連絡協議会からは、出前授業では実験などを入れてほしいとの要望がありましたので、授業の後半では「二酸化炭素が海水に溶けるのだろうか？」「二酸化炭素が海水に溶けるとどうなるのだろうか？」ということを知ってもらうための実験を行いました。この実験については過去の出前授業の記事に詳しく書かれていますので、そちらをご参照ください（町田敏暢「北海道の陸別小学校と陸別中学校で出前授業を行いました」地球環境研究センターニュース2015年1月号）。人間活動により排出された二酸化炭素は、近年、そのかなりの量が海水に溶け込んで海洋酸性化を引き起こしていますが、このことは、温暖化に比べると認知度が低いように思います。今回の授業では、まず、生徒自身で小瓶に海水を入れてもらい、ここに1–2滴のBTB溶液（液体の酸性・アルカリ性を調べる溶液）を入れて青色になる様子を見せて、海水が弱アルカリ性であることを示しました。次に、各自で小瓶に息を吹き込んで蓋をして振ってもらい、海水が緑色（中性）から黄色（酸性）に変化する様子を見せました。自分の吹き込んだ息で溶液の色が変わるというのは、生徒たちにとっても楽しい体験だったようです。

写真1　陸別小学校での出前授業の様子。熱心に聞いてくれました

3. 陸別中学校での出前授業

小学校での授業を終えると、その30分後には道路を挟んで向かい側の中学校での出前授業を開始しました。陸別中学校では、1年生（13名）のクラスを担当し、物理実験室をお借りして「地球温暖化と植物ー人工衛星いぶき・いぶき2号の挑戦ー」というタイトルで授業を行いました。

小学校と同様に温暖化と二酸化炭素についての話をしましたが、中学校では植物の光合成との関係を中心に話を進めました。人間活動により排出された二酸化炭素の3割程度は植物の光合成により陸域生態系に取り込まれていると推定されています。光合成による吸収量の大きさを理解してもらうために、ここでも小学校でも出した二酸化炭素濃度の季節的な変動についてクイズを出しました。生徒さんがそれぞれよく考えて答えを出してくれました。さらに、植物の光合成により二酸化炭素を固定して生産される炭水化物は、生態系が人間社会にもたらすあらゆる恩恵の基盤となります。これらを合わせて「植物はえらい」と一言でまとめたところ、生徒の皆さんには好評でした。

日本の人工衛星GOSAT（愛称「いぶき」）は、本来の目的である大気中の二酸化炭素とメタン濃度だけでなく、植物が光合成をする際に発している光であるクロロフィル蛍光を観測できることがいくつかの研究で報告されています。また、GOSATの後継機であるGOSAT-2（「いぶき2号」）では、観測したクロロフィル蛍光のデータを正式に公開する予定です。現在、GOSAT、GOSAT-2により観測されたクロロフィル蛍光から陸域生態系の光合成生産の推定を試みる研究が世界中で進められています。光合成については小学校・中学校の理科で習いますが、クロロフィル蛍光については習う機会もありませんので、実際に実験で植物が発光している様子を見せることにしました。同様の実験は、前年の陸別中学校の出前授業でも行いましたので、実験の詳細については2017年の出前授業についての記事（森野勇・野田響「北海道の陸別中学校で出前授業を行いました」地球環境研究センターニュース2018年3月号）をご参照ください。クロロフィル蛍光の波長付近だけを写すカメラで、実際に生きている植物の葉やサボテンの胴が光っている様子を見せると、生徒の皆さんと教室のすみで見学していた他の出前授業講師の皆さんからどよめきが上がりました。授業の最後に、出前授業の10日前に行われた種子島でのGOSAT-2の打ち上げの動画を見せて締めとしました。

写真2 陸別中学校での出前授業の様子。授業開始前から、生徒の皆さんは実験のために教卓の上に準備されていた植物に興味津々でした

4. 今後に向けた反省点

今回の出前授業は、概ね良い反応をもらえましたが、スライドの使い方については工夫が足りなかったと反省しています。研究者は、学会発表などでスライドを使った発表に慣れているため、出前授業でもスライドに頼りがちです。しかし、小学校や中学校の教室で行う出前授業では学会発表のようなプロジェクターや大きなスクリーンが使える環境とは限りません。代わりにTVモニターにパソコンを繋いで、準備したスライドを生徒に見せながら話を進めることになります。今回は小学校、中学校ともに比較的大きなモニターを使わせていただきました。しかし、生徒たちが普段見慣れている黒板の文字に比べると、スライドの文字はとても小さいものとなります。実際、授業後に生徒からもらった授業の感想アンケートの中でも、スライドの文字が小さくて困ったとの意見がありました。この点は、今後に活かしたいと思います。

一方で、アンケートではクイズや実験など、今回の出前授業が面白かったという感想もたくさんいただき、大いに励みになりました。

＊これまでの陸別小学校・陸別中学校での出前授業に関する記事は以下からご覧いただけます。

- 田上厚子「日本一寒い町の陸別小学校・陸別中学校の出前授業に参加して」2014年1月号
- 町田敏暢「北海道の陸別小学校と陸別中学校で出前授業を行いました」2015年1月号
- 高橋里帆「それは一枚のカラー写真から始まったー北海道陸別町が地球環境に関する科学教育にとても熱心なわけー 日本で一番寒い町での出前授業レポート」2016年1月号
- 石澤かおり「宙（そら）、生徒、研究者。それぞれの純粋さ。 星空が美しい町、陸別での出前授業。」2017年2月号
- 森野勇・野田響「北海道の陸別中学校で出前授業を行いました」2018年3月号

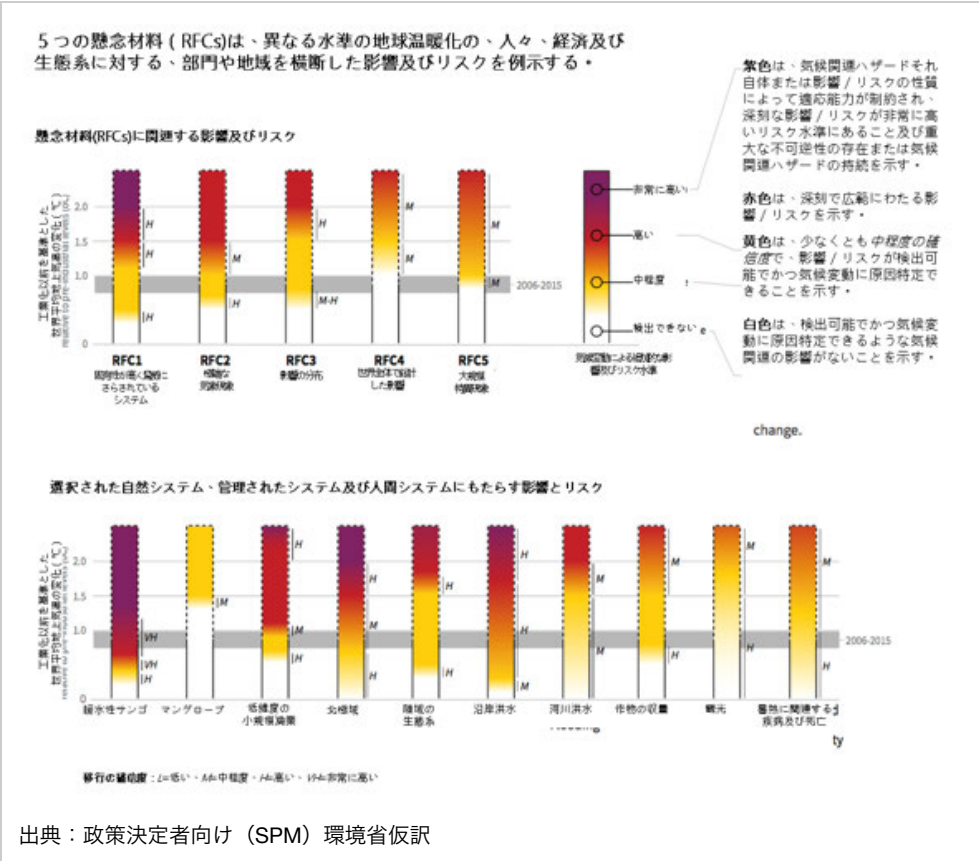
2019年3月号 ［Vol.29 No.12］ 通巻第339号 201903_339005

IPCC特別報告書「1.5°Cの地球温暖化」の図を読み解く (2)

地球環境研究センターニュース編集局

気候変動に関する政府間パネル（Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC）が2018年10月8日に公表した1.5°C特別報告書に掲載されている「図の内容」を専門家のさらなる解説を加えて読み解いていきます。

2回目は、1.5°C上昇の場合と2°C上昇の場合で生態系や人間への影響やリスクがどのように違ってくるのかを比較した図を取り上げます。色分けがされており一見わかりやすいようにも見えますが、いろいろな指標が同時に記載されていて、非常に複雑な図になっているので、グラフを分解しながら、解説します。



出典：政策決定者向け（SPM）環境省仮訳

上の図は地球温暖化による世界平均地上気温の上昇の度合いによって、5種類の「懸念材料（RFCs: Reasons for Concern）」と呼ばれる事項及び10種の自然・人間管理システムを対象として、どのように影響、リスクが及ぼされうるかを示しています。

この図をわかりにくくしている要因の一つは、それぞれの縦棒グラフの横に書かれているM、H、VHの表示です。これは予測の確信度を下記図のように5段階（VL、L、M、H、VH）の総合評価で表しているのですが、影響やリスクの「程度」を示しているのではないかと誤解されやすいので注意が必要です。

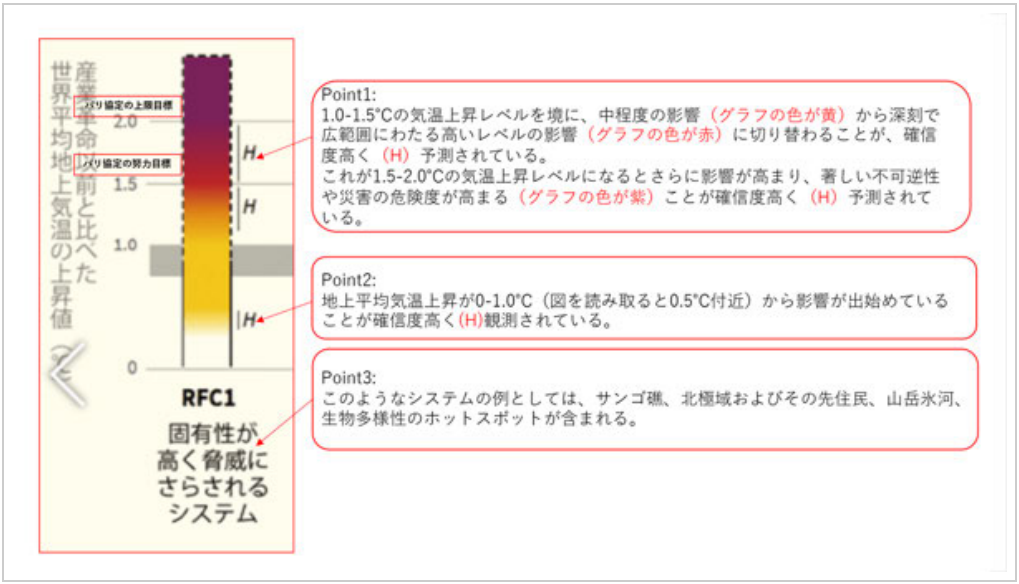
確信度について

IPCCでは、確信度を証拠（evidence：種類、量、質、整合性）と見解の一致度（agreement）に基づき、VL（Very low：非常に低い）、L（Low：低い）、M（Medium：中程度）、H（High：高い）、VH（Very high：非常に高い）の5段階で総合的に評価しています。

出典：環境省「IPCC第5次評価報告書の概要ー第1作業部会（自然科学的根拠）ー」

この報告書では、徹底してリスクレベル（色）の「遷移」についてどの温度帯で生じるかを一つひとつ評価して、各々の評価に確信度を付与しています（赤が何°Cか黄が何°Cかではなく、黄（中程度）から赤（高い）にリスクレベルが変わるのはどの温度帯で生じるか、というのを、一つひとつ専門家判断の理由を明記して評価しています）。

例えば、RFC1（固有性が高く脅威にさらされているシステム）については他の4つのRFCsと比較して、地上平均気温上昇が小さくても大き目の影響（グラフの色が赤から紫）が出てしまうように見えます。ここでのポイントは、このシステムに対しては気温上昇が1.0°Cから1.5°Cの間にリスクレベルが黄色（中程度）から赤（高い）に切り替わること、同様に1.5°Cから2.0°Cの間にリスクレベルが赤色（高い）から紫（非常に高い）に切り替わること、です。見方を少し変えると、平均気温上昇が小さくても影響が既に検出され中程度のリスクが出始めており、今後パリ協定が上限目標にしている2.0°C上昇になってしまうと、非常に高いリスク水準になってしまう予測といえます。この予測の確信度（どれくらい自信をもっていえるか）は、リスクレベルが切り替わる気温上昇の3つの範囲（1.0°C以下、1.0〜1.5°C間、1.5〜2.0°C間）のいずれに対しても高い（確信度はH）とされています。



RFC2（極端な気象現象）については、地上平均気温上昇が0〜1.0°C（すでに現実になりつつある温度上昇の範囲）を境に中程度の影響（グラフの色が黄色）が現れていることが確信度が高い（H）（すでに観測されている）としています。さらにこのグラフでは気温上昇1.0°Cから1.5°Cの間を切り替え点として、「中程度の影響」が「深刻で広範囲にわたる影響が出る」状況に切り替わることが確信度中程度（M）で起こるとしています。つまり、極端な気象現象はすでに起き始めていて、今後温度上昇が1.0°Cから1.5°Cになる間に、影響の程度が広範囲かつ深刻なものになってしまうことを確信度中程度（M）で示していることになります。

なお、5つの懸念材料とその内容は以下です。

RFC1：固有性が高く脅威にさらされているシステム　気候条件による限られた地理的な範囲内にある、固有性が高いまたはその他の特徴的な性質をもつ生態系および人間システム。たとえば、サンゴ礁、北極域およびその先住民、山岳氷河、生物多様性のホットスポットが含まれる。

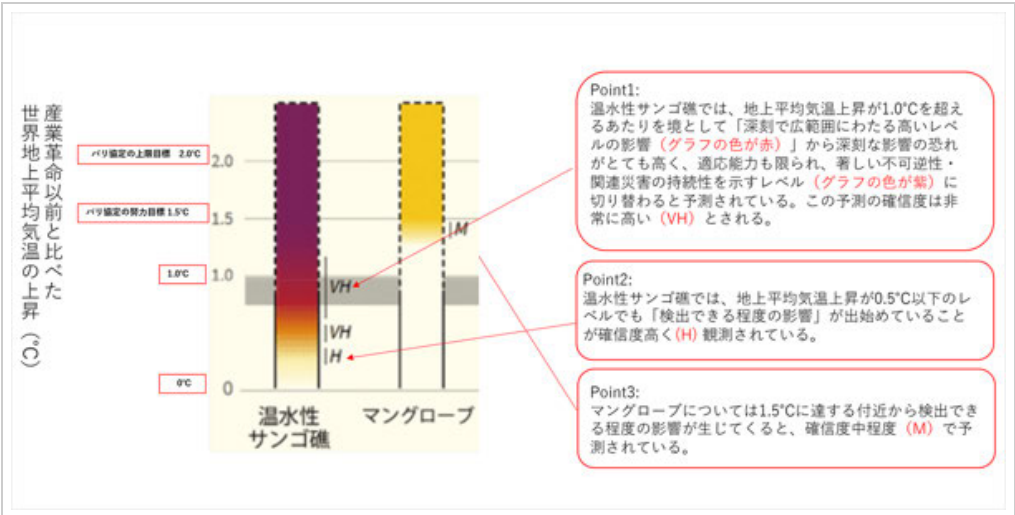
RFC2：極端な気象現象　熱波、豪雨、干ばつおよび関連する森林火災、沿岸洪水などの極端な気象現象によって引き起こされる人間の健康、生計、財産および生態系へのリスクや影響。

RFC3：影響の分布　自然の気候変動による危険性、暴露、脆弱性の不均衡な分布により特定の集団に偏るリスクや影響。

RFC4：世界全体で集約された影響　世界的な金銭的損失、地球規模の生態系や生物多様性の劣化および損失。

RFC5：大規模で特異な事象　地球温暖化によって引き起こされる、比較的大きく突発的で場合によっては不可逆的なシステムの変化。たとえば、グリーンランドや南極の氷床の崩壊が含まれる。

下段の図についても見てみましょう。温水性サンゴ礁、マングローブ（熱帯・亜熱帯の潮間帯に形成される植物群落）への影響とリスクに関して、まず、マングローブより温水性サンゴ礁の方が小さい気温上昇で影響が出てしまうと予測されています。温水性サンゴ礁では気温上昇が0〜1.0°Cの間に、まず検出できる影響（黄色に相当する中程度）が現在（若しくは過去にも）現れており（確信度H）、さらにまさに現在、赤に相当する深刻で広範囲にわたる影響が現れていて（確信度VH）、これから気温上昇1.0°Cをすぎるあたりから、紫に相当する深刻な影響のおそれがとても高く、適応能力も限られ、著しい不可逆性・関連災害の持続性を示すレベルに達する（確信度VH）とされてます。一方、マングローブについては、1.5°Cに達する付近から検出できる程度の影響が生じてくることが、確信度中程度（M）で予測されています。



専門家に聞いてみよう

回答者：高橋潔さん（社会環境システム研究センター 広域影響･対策モデル研究室長、IPCC第5次評価報告書でRFCsの評価を実施する第2作業部会19章「新しいリスクと主要な脆弱性」の主執筆者）

Q：棒グラフの下方は実線に、上方は破線になっています。どういう意味があるのでしょうか。

A：図中、縦軸で1°C弱のところに産業革命前から現在（2006～2015年）までに観測された気温上昇を示す灰色の帯があります。一方、その灰色の帯より上の部分で、全ての棒グラフの枠線が破線になっています。報告書にははっきりとは書かれていないようですが、これまでに観測された影響に基づく懸念の水準の判断が実線の枠線の部分、予測された影響に基づく懸念の水準の判断が点線の枠線の部分、という理解で間違いないと思います。

Q：上段のRFC1～5と下段の10のシステムとは対応しているのでしょうか。RFC1～5の代表的なものが10のシステムということでしょうか。

A：下段の10のシステムのリスク評価は、いずれも、5つのRFCのうち1つあるいは複数のRFCのリスクレベルの評価に関連しますが、各RFCのリスクレベルは下段の10のシステムのリスク評価のみに依拠して評価されているわけではありません。下段の10のシステムの評価は（いずれも政策判断に際して見落とせない重要な影響ですが）必ずしも網羅的ではなくあくまで例示であり、より幅広い分野・地域のリスク評価を総合的に考慮してRFC1～5のリスクレベル評価が行われています。

Q：温水性サンゴ礁とマングローブで影響やリスクが大きく違っているのはなぜでしょうか。

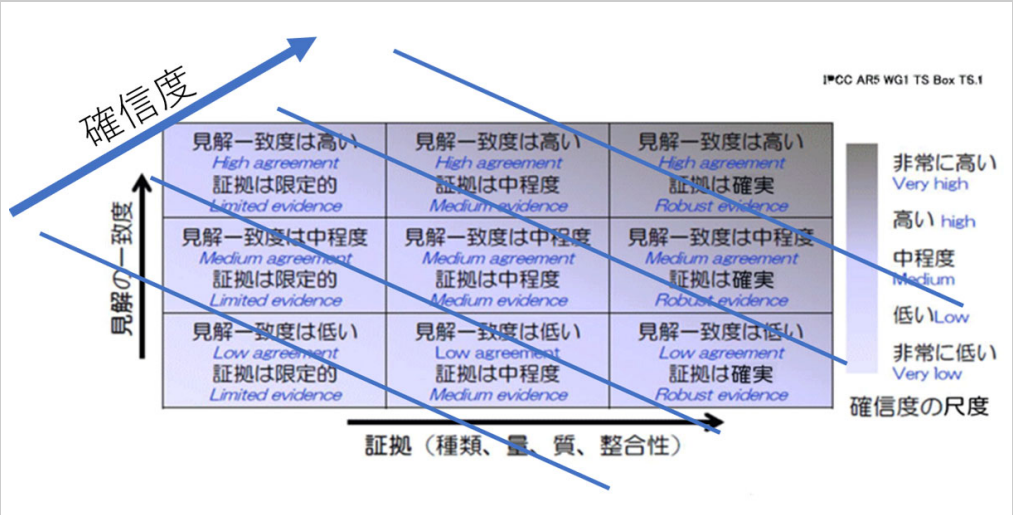
A：両者の曝露（分布）と気候変化への感度・応答の違いにより、リスクの評価結果は異なるものになります。それぞれについて、過去観測ならびに将来予測の知見が調査・評価されましたが、近年の熱波により温水性サンゴ礁の広範な被害が観測されたこと、一方でマングローブについては伐採や持続的でない沿岸開発が気候変化よりも大きなリスク因子となっていることなどをふまえた評価になっています。

Q：低緯度地域小規模漁業と北極域については、過去から将来に向けて、確信度が高い→中程度→高いとなっています。中程度に下がった確信度がその後高くなるのはなぜでしょうか。

A：図に付記された確信度の高さ（VH、H、M）は、気温上昇に応じてリスクレベルが非検出（白）から中程度（黄）へ、中程度（黄）から高い（赤）へ、あるいは高い（赤）から非常に高い（紫）に移行するという各評価の確信度を示しています。本文にもあるように、図では色あいで表現されているリスクレベルと混同しやすいので注意が必要です。リスクレベルの移行の評価は、単一の研究に依拠して行われるのではなく、異なる時空間スケール、被害対象、予測手法などを有する複数の研究知見をふまえて総合的に行われますが、評価に利用可能な研究の数や水準にも濃淡があるため、稀にですが、質問にあるような確信度の評価となることもありえます。リスクレベルの移行の温度帯の評価と同様に、その評価の確信度も、関与した研究者らの専門家判断で付与されます。

Q：1.5°C特別報告書の図ではありませんが、確信度について、見解一致度（High、Medium、Low）と証拠（Robust、Medium、Limited）は3段階なのに確信度の尺度は5段階になっています。これはどう見ればいいのですか。

A：本文の確信度の図にもあるように、報告書執筆者らに対しては、見解の一致度（調査対象となった複数の研究知見の間で主張の一致が見られるかどうか）と、証拠の種類・量・質等（測定・予測等の分析手法とその精度、関連の研究論文数、論文掲載誌の水準にも関わる研究の信頼性等）の2軸を組み合わせて、評価の確信度を示すことが求められます。見解の一致度が高い場合でも、例えばごく最近に分かってきた事項で関連の研究論文がごく限られた研究グループからの1～2本しか発表されていない場合、多様な方面からの研究発表の蓄積があり良く吟味されてきた事項に比べ、研究数が少ない分、見解が一致する割合は高くなります。確信度評価の二軸の双方について高い評価が得られるものについてより高い確信度を付与して区別できるよう、5段階の尺度になっています。


IPCC AR5 WG1 TS Box TS.1
確信度
見解の一致度
見解一致度は高い
High agreement
証拠は限定的
Limited evidence
見解一致度は高い
High agreement
証拠は中程度
Medium evidence
見解一致度は高い
High agreement
証拠は確実
Robust evidence
見解一致度は中程度
Medium agreement
証拠は限定的
Limited evidence
見解一致度は中程度
Medium agreement
証拠は中程度
Medium evidence
見解一致度は中程度
Medium agreement
証拠は確実
Robust evidence
見解一致度は低い
Low agreement
証拠は限定的
Limited evidence
見解一致度は低い
Low agreement
証拠は中程度
Medium evidence
見解一致度は低い
Low agreement
証拠は確実
Robust evidence
非常に高い
Very high
高い high
中程度
Medium
低いLow
非常に低い
Very low
確信度の尺度
証拠（種類、量、質、整合性）

2019年3月号 ［Vol.29 No.12］ 通巻第339号 201903_339006

愛媛大学で講義を行いました

―地球温暖化とその緩和策・適応策―

地球環境研究センター 交流推進係

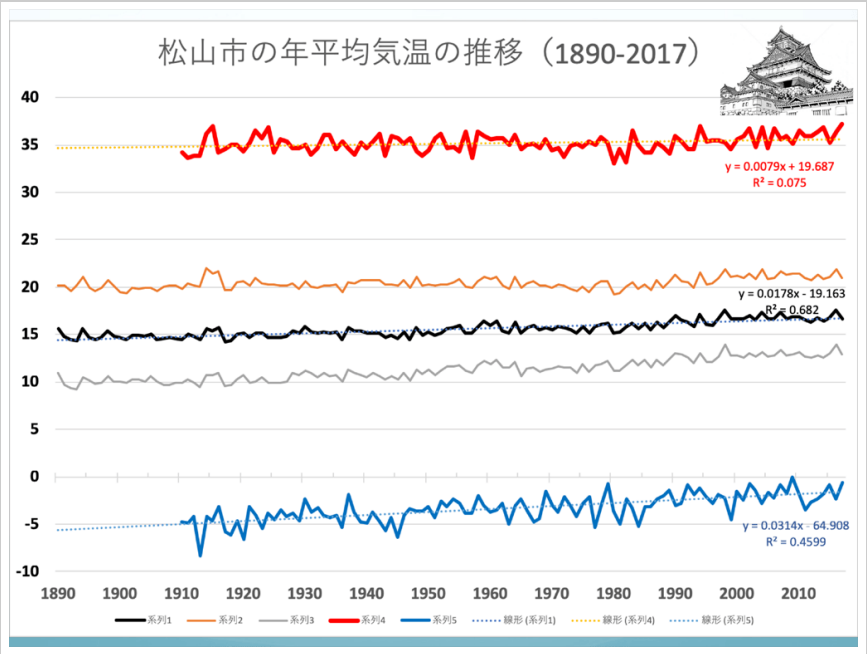
2017年度に引き続き、2018年度も12月21日と2019年1月8日に、愛媛大学工学部1年生に地球環境研究センター主幹の広兼克憲が、非常勤講師として、地球温暖化に関する基本的な知識と対策の現状に関する講義を行いました。その概要をご紹介します。なお、2017年度の講義概要は「愛媛大学での講義録『地球温暖化とその緩和策・適応策』」2018年4月号をご参照下さい。

1. 地球温暖化を科学的に理解：12月21日の講義から

(1) 地球温暖化とは？ 松山市における影響は？

最初に、太陽と地球の関係を示しながら、地球温暖化について以下のように解説しました。「温室効果ガスを含む大気は身近な例えをするなら地球を寒さから守る防寒着のような機能をもっており、現在は適度な保温効果がある（大気のない地球は本当はとても寒い）が、厚着する（温室効果ガスがいまより増加する）と地球の肌の温度（地表面温度）は高くなってしまいます。」

主要な温室効果ガスである二酸化炭素（CO_2）の平均濃度は、産業革命前には280ppmで安定していたが、その後急速に増加し、現在は400ppmを超えました。温室効果ガスの濃度上昇とともに地球の平均温度も上がってきました。愛媛大学のある松山市でも1890年から2017年の間に100年あたり1.8°Cの割合で年平均気温が上昇しています。なお、この上昇には地球温暖化に加えてヒートアイランド効果なども加わっています。



(2) 温室効果ガスの観測

次に、国立環境研究所（以下、国環研）が進めている温室効果ガスの観測について紹介しました。国環研は波照間島（沖縄県）と落石岬（北海道）にある地球環境モニタリングステーションでCO_2濃度を毎日観測しています。CO_2濃度は一年のうちでは、春先の4～5月頃に一番高く、夏場の植物の光合成による吸収により8月～9月に一番低くなり

ます。

また、北海道天塩、北海道苫小牧、富士北麓の3箇所で、植物（成長過程の異なる森林）が、それぞれどれくらいCO_2を吸収しているかという観測結果を紹介しました。森林は成長過程に沿ってCO_2の吸収量が異なるので、この3箇所で比較してみました。天塩は2003年に森林の一定区画を伐採し、その後植林しました。植林直後は木の成長量もまだ大きくないため、CO_2排出量が吸収量を上回っていたのですが、10年後には木がどんどん成長を始めたため、吸収量のほうが多くなりました。苫小牧では2004年に北海道に上陸した台風によりカラマツ林の9割が倒れてしまいました。苫小牧では倒木後、すぐに植林せず、自然のまま放置したのですが、この状態では、天塩のように人工的に植林した場合よりも、正味のCO_2吸収が始まるまでの時間が長くなる傾向があることがわかりました。一方、富士北麓のカラマツ林は樹齢55年程度ですが、まだ成長を続けており、一定のCO_2を吸収し続けているという観測結果が出ています。

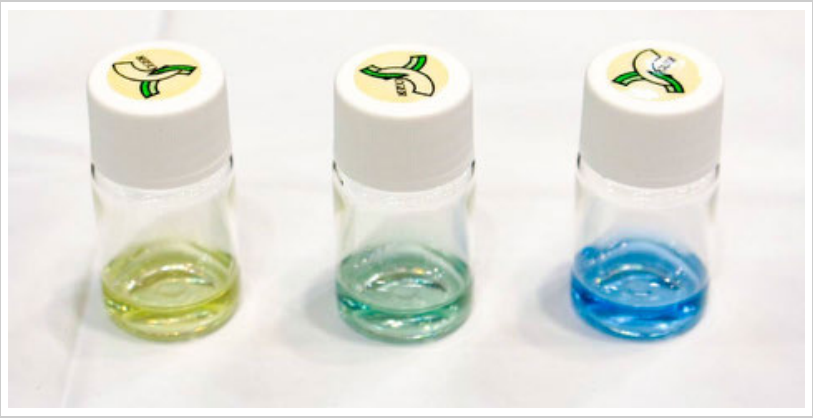
他の機関と共同で進めている観測についても紹介しました。JAL（日本航空株式会社）などと協力し、国際線旅客機に国環研が共同開発した小型の測定器を搭載して世界中の空でCO_2濃度を測っています。さらに、環境省、国環研、宇宙航空研究開発機構（JAXA）が共同で推進しているGOSATプロジェクトでは、人工衛星によって宇宙からCO_2やメタンの濃度を観測しています。2018年10月29日に打ち上がったGOSAT-2により、今後新しいデータが出てくることを期待しています。

(3) 地球温暖化の影響

国環研では、富山県立山の室堂山荘に定点カメラを設置して、立山（3029m）のような山岳生態系に現れる温暖化の影響を2009年から写真画像により監視しています。今後もさらに長期の観測を行うことで温暖化の明確な影響が出てきた場合には過去との連続的な比較により確認できるようになります。

【実験】海はCO_2を吸収する？

石炭や石油を使うと大気中に過剰なCO_2が出てしまいます。排出されたCO_2の半分はそのまま大気中にとどまり、残りの半分は陸上の植物と海水に吸収されます。本当に海がCO_2を吸収するのか、さらにその海水の酸性度に影響が出るのかを簡単な実験で確かめました。



実験は、液体の酸性・アルカリ性を調べる溶液（BTB溶液）を混ぜた海水入りの小瓶に、CO_2を強制的に注入して、振り混ぜた時の色の変化を観察するというものです。海水は弱アルカリ性（BTB溶液は青色）ですが、小瓶に人間の息（大気中の50倍の濃度である約2%のCO_2が含まれる）を吹き込み、びんをよく振ると海水は酸性（黄色）に変わりました。この状態で再度小瓶の蓋をあけ、今度は呼気を追い出して部屋の空気と入れ替えて振り混ぜる（換気する）と、また元に近い青色に戻ります。色が変わるたびに学生の間から歓声が上がっていました。

CO_2が大気中に増えると、地球温暖化を進めるだけでなく、海にCO_2が溶け込み海水の酸性化に向かいます。酸性化が進むと生物が炭酸カルシウムを作れなくなり、たとえばウニや貝などの堅い殻（炭酸カルシウム）をもつ生き物に影響が出ると報告されています。

2. 温室効果ガス排出量と世界の地球温暖化対策（緩和策・適応策）：1月8日の講義から

(1) パリ協定

はじめに、「パリ協定」という言葉を聞いたことがあるかと質問したところ、半分以上の学生が手を挙げました。

2015年に採択され、2016年に発効したパリ協定では、産業革命前からの平均気温上昇を2°Cより十分低く抑え（さらに1.5°Cを目指す）、今世紀後半には人為起源の温室効果ガス排出量を実質ゼロにすることが合意されました。2017年にアメリカは離脱を宣言しましたが、実際に脱退が可能となるのは、最早でもパリ協定発効（2016年）から4年後の2020年11月4日以降です。

2015年の世界のCO_2排出量は、中国、アメリカ、インド、ロシアの順で、日本はそれに次ぐ世界第5位の排出大国です。一人あたりの排出量では日本は9トンなので、世界平均の約2倍です。1位の中国など他国の取り組みへの期待も重要ですが、日本は自ら模範となる削減を実施しなければなりません。ちなみに松山市は、一人1日当たりのごみ排出量が人口50万人以上の都市の中で最少（平成28年度）だそうですが、ごみを少なくすることは循環型社会に貢献し、同時にCO_2の排出削減にも寄与するわけで、一人当たりの排出量が少ないことは非常に重要です。

(2) 緩和策と適応策

地球温暖化対策には「緩和」と「適応」の2種類があります。温暖化の原因であるCO_2を減らすことが緩和策です。しかし、もうすでに地球温暖化の影響は現れていますから、変わっていく気候に適応（たとえば上昇する海面水位に対応して堤防の高さを上げるなど）していく必要があります。これからの地球温暖化対策には緩和と適応の両方が必要です。

パリ協定を踏まえ、日本政府は地球温暖化対策計画を2016年5月に閣議決定しました。そして2018年6月には気候変動への適応を推進することを目的とした気候変動適応法が公布され、12月には施行されました。

地球温暖化対策計画では2013年度（東日本大震災後、国内の原発が止まり、CO_2排出量が高いとき）を基準として、2030年度に26%削減するという目標になっています。しかし、削減目標は各部門一律ではありません。削減が十分進んでいると思われている産業部門で6.5%、家庭部門と業務その他部門ではそれぞれ約40%です。具体的な目標達成方法として、業務その他部門でLEDなどの高効率照明をストック（新製品販売だけでなく既存購入品も含め）で100%にすることなどを掲げています。家庭部門ではゼロエミッション住宅の推進などを進めていくことが計画されています。日本の2030年度削減目標は他国の数値と比較してチャレンジングなものとはいえませんが、それでも達成するのは大変なことです。長期的にはさらに20年後の2050年までに80%削減、2100年にはゼロかマイナスにしなければパリ協定の目標に達しません。今後は、これまでの対策の延長ではなく、技術やライフスタイル、経済社会におけるイノベーションなどの大きな転換が必要になるでしょう。

【体験】自転車で発電

エネルギーは目に見えません。私たちはスイッチ一つであかりをつけられますが、それがどれくらいのエネルギーを必要とするのかを実感することはありません。そこで、今回は学生さんに教室の中で自転車をこいでもらい、そこで発電したエネルギーであかりをつけてもらいました。

LEDなら、それほど力を入れなくても20個以上点灯できます。しかし白熱電球を明るくつけようとすると坂道を登るような、かなりの力が必要です。この体験で消費電力の違いをペダルの重さを通じて理解していただけたと思います。

講義の後、地球温暖化問題に関する意識についてのアンケートにご協力いただき、84人から回答をいただきました。質問と回答の概要は以下のとおりです。

(1) 気候正義（climate justice）という言葉をご存知ですか？ Yesの場合、その意味をご回答下さい。

Yesと答えた人は残念ながらいませんでした。気候正義（地球環境豆知識 [34] 2018年4月号参照）とは、気候変動問題は、世代間、加害者・被害者の不公平が存在する国際的な人権問題であるという認識で、世界各地で気候正義を求める社会運動が展開されています。諸外国では学生が、この考え方に基づいて政府に対策を訴えたり具体的な活動をしたりすることも多くなっています。

(2) 今後の地球温暖化対策では、世代間衡平（原因者と対策者・影響者が同じ世代ではない）、先進国と途上国（さらには温室効果ガス大量排出国とそうでない国）の「差異ある責任」などの論点があります。あなたは地球温暖化問題に対する今後の「責任分担」についてどう考えるべきと思いますか？

ア. 世代間衡平（原因者と対策者・影響者が同じ世代ではない）について
後の世代のことを考えて、全員で対策に取り組むべき（32人）に対して、主に原因者が対策を取るべき（6人）という意見でした。

イ. 先進国と途上国（さらには温室効果ガス大量排出国とそうでない国）の差異について
大量排出国が積極的に対策を進めるべき（6人）、先進国が責任を負う、またはまず先進国が対策を進め、途上国を支援すべき（29人）、先進国と途上国それぞれに合わせた対策が必要（5人）という回答でした。

(3) 地球温暖化に関する国連気候変動枠組条約に基づくパリ協定では今世紀末までに世界における温室効果ガスの排出量を実質ゼロにする目標を掲げています。これは実現可能だと思いますか？

可能と思う（10人）、不可能と思う（43人）、わからない（31人）で、半数以上の人が実現不可能と答えていまし

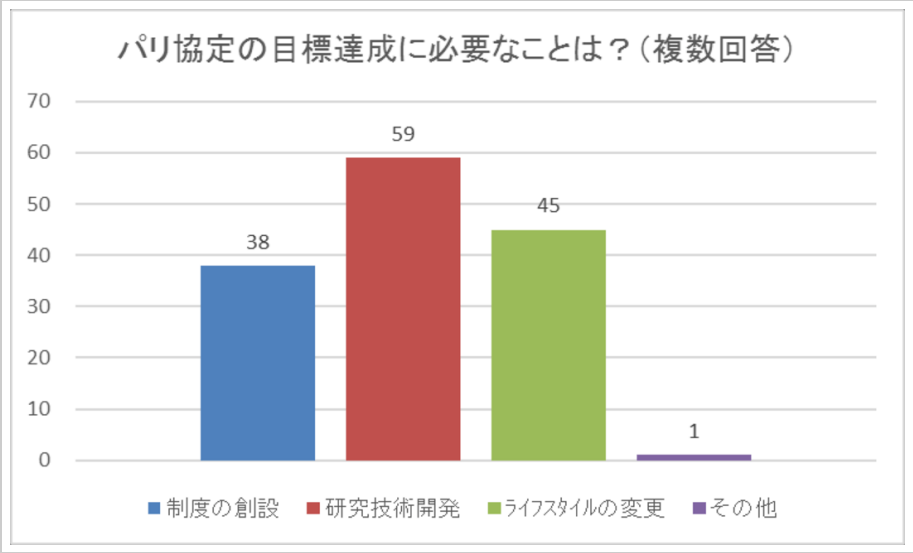
た。可能と思う理由については、研究や技術の進歩を挙げている人が多く、不可能と思う理由については、ライフスタイルを変えることは難しいことや世界中の人が削減に取り組むことが困難という意見がありました。

(4) あなたは、気候変動や地球温暖化を身近なことと感じていますか？

感じている（68人）、自分には関係のないところで起きている（10人）でした。感じていると答えた人の理由としては、異常気象を体験したり（愛媛県は2018年7月の西日本豪雨の被災地でもあります）、テレビで見たりしたからという内容が最も多く31人いました。

(5) パリ協定の目標を達成するために必要なことは何だと思いますか？

制度の創設、研究技術開発、ライフスタイルの変更から複数回答可で質問した上記の問いに関する回答は以下のとおりです。



その他として、人間全員のやる気・理解度という答えがありました。

(6) 今後、地球温暖化対策も含めた環境問題に対し、「日本」が果たすべき役割は何だと考えますか？（自由記述）

他国の模範となるように、削減量を増やす努力をする（22人）、高度な技術を発展させ環境改善を目指す技術を途上国と共有する（20人）という意見が多く見られました。

(7) 最近、物を所有することやお金を儲けること（物質的な満足）よりも、自分の存在価値を確認したい・社会の役に立ちたい（精神的な満足）というような価値観の変化が出てきているとも言われます。これら価値観の変化（もしくはそれが変化していないこと）と、持続可能な社会の関係について、ご自身がお考えになることを自由に記述ください。

一人ひとりの社会貢献につながる活動は持続可能な社会づくりに役立つ（9人）、物質的な満足より精神的な満足は長く続く（7人）という意見もありましたが、物質的な満足やお金の方が大切（2人）という回答もありました。

3. 終わりに

アンケートによると、気候正義という考え方はまだ認知度が低いような結果でした。ベルギーなど諸外国では気候正義という考えのもと、若い世代が地球温暖化対策の転換を求め、デモをしたり政府に訴えたりするケースも報道されています。日本でも、将来の社会をどういうものにしたいのか、どういう環境にしていきたいのかを長期的かつ多様な観点で議論していけたらいいと思います。

2019年3月号 ［Vol.29 No.12］ 通巻第339号 201903_339007

最近の研究成果

2009年11月の南米南端におけるオゾン量低下イベントに関する解析

地球環境研究センター 気候モデリング・解析研究室長 **秋吉英治**

2009年11月に南米南端部において、約3週間にわたるオゾン量の低下が続いた。南米では初夏にあたり、紫外線への影響が懸念された。この現象は、9月～10月にかけて最盛期を迎えるオゾンホールの場となっている南極渦が、季節の進行に伴って11月になって不安定になり、南米方面へ変形・移動し、南米上空にとどまりながら崩壊を始めたことが原因である。それでは、どのようなメカニズムによってこの南極渦の南米方面への変形・移動が起こったのであろうか？ また、同様な現象は過去にも起こっていたのであろうか？ この2つの疑問を明らかにするため、1979年～2015年の37年間のERA-Interim再解析気象データの解析を行った。その結果、極渦崩壊が起こり始める11月に、対流圏でブロッキング[1]と呼ばれる現象が起こった時に対流圏から成層圏への波動伝搬が強化され、ブロッキングが起こった領域の東の成層圏に南極渦が伸張あるいは移動し、南極周辺の中高緯度域のオゾン量を低下させる場合が多いことがわかった（図に2009年11月のケースについて示す）。また、11月における同様なブロッキングと南極渦の大規模な伸張・移動との関係は、2009年の他にも5回程度あり、そのうち3回（1994年、1997年、2011年）は南米付近で見られた。しかしながらこれらの年のオゾン量低下の持続期間は2009年ほど長くはなかった。以上の結果は、11月のブロッキングパターンの診断を行うことで、南極渦が崩壊するときの移動・変形の方向（経度）をある程度予想できることを意味し、それはオゾンホール空気塊のその地域への襲来とそれによってもたらされる紫外線増加の予測に役立つ。極渦崩壊時のような大気の変化が激しい時期は数値モデルを用いた予測の精度が落ちる場合があり、そのような場合に本研究は、対流圏の気象場を診断することで予測のための追加情報を提供し予測の精度を上げることができる可能性を示唆している。オゾンホールによる紫外線の脅威にさらされている南米南部の人々に本研究の成果が役立つことを願っている。本研究は地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム（SATREPS）[2]の2012年度から2017年度に行われた課題「南米における大気環境リスク管理システムの開発」[2]（代表：水野亮 名古屋大学）の一環として行われた。

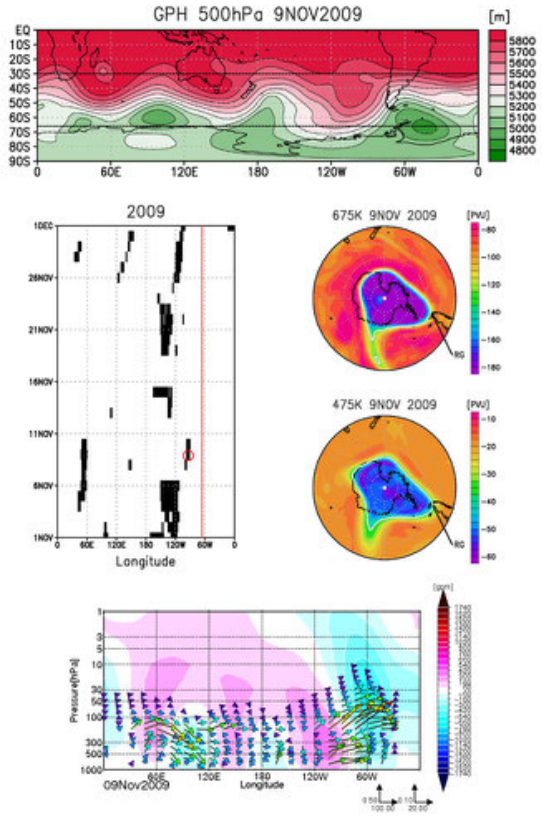


図 2009年11月9日の中部対流圏500hPa気圧面の南半球におけ

るジオポテンシャルハイトの緯度－経度分布（上段）、2つの温位面（中部成層圏675Kと下部成層圏475K）における南極周辺の渦位分布（中段右）、南緯50–60°の波活動フラックス（下段図の矢印）。中段左図は、2009年11月の南緯30–65°の緯度範囲において500hPa気圧面上でジオポテンシャルハイトの分布にブロッキングパターンが表れた日と経度を黒塗りで示している。上段の図で南米大陸南部の西側に波頭のような構造が見え、これがブロッキングと診断されている（中段左図の赤丸で示された部分）。この時ブロッキングが起こった経度の対流圏から南米大陸上空の成層圏へ波動フラックスが増加し（下段図）、成層圏（図で100hPaより上の高度）でのジオポテンシャルハイトの東西偏差が大きくなり（水色とピンクはそれぞれ、ジオポテンシャルハイトの経度平均からの負偏差、正偏差を表す）、これが、極渦の南米大陸方面への移動と対応している（中段右図の白実線によって囲まれた青または紫で示される部分が極渦）。極渦の中は低温のため、ジオポテンシャルハイトが低くなっており、これが下段図の水色の部分の発達と対応している

脚注

1. 偏西風などの大規模な風の南北の流れの蛇行が大きくなって、その状態が長期間続き低気圧あるいは高気圧が移動せず停滞する現象。このとき、中・高緯度帯にブロッキング高気圧が形成される。
2. 杉田考史「南米南端域での成層圏オゾンの比較～地上からのオゾン観測の空白域に寄与するリオ・ガジェゴス～」地球環境研究センターニュース2018年2月号 の脚注5および6を参照してください。

本研究の論文情報

Analysis of the ozone reduction event over the southern tip of South America in November 2009

著者： Akiyoshi, H., Kadowaki, M., Nakamura, H., Sugita, T., Hirooka, T., Harada, Y., Mizuno, A.
掲載誌： Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 123, 12,523–12,542.
https://doi.org/10.1029/2017JD028096