

地球環境研究センターニュース

独立行政法人 国立環境研究所

Center for Global Environmental Research

Vol. 23 No. 1

2012年(平成24年)4月号(通巻第257号)



【富士北麓フラックス観測サイトから見た富士山(9ページ参照)】

Contents

- 気候変動と食料生産の将来予測に向けて 2
- 水循環解明のためのリモートセンシングの有効活用に向けて 5
- お知らせ 8
 - エコライフ・フェア 2012
- 長期観測を支える主人公たちー測器と観測法の紹介ー No.1 9
 - 渦相関法
- 最近の発表論文から 11
- 地球環境研究センター出版物等の紹介 11
- 地球環境研究センター活動報告(3月) 13



気候変動と食料生産の将来予測に向けて

地球環境研究センター 気候変動リスク評価研究室 研究員 横畠 徳太

1. はじめに

地球温暖化による全球的な気温上昇が進行することにより、今後、異常気象が頻発する可能性が指摘されている。異常気象の頻発は、気象条件に左右されやすい、穀物の生産量に大きな影響を及ぼす可能性がある。一方で、経済のグローバリゼーションが進むことにより、穀物生産の増減は世界規模での食料供給量を変動させることを通して、多くの人々に影響を与える可能性がある。このため、気候変動と食料生産に関する信頼のおける将来予測を、幅広い空間スケールにわたり行うことが非常に重要である。この問題についての研究の現状に関する情報交換を目的として、2012年2月9日に、つくば国際会議場において、第26回気象環境研究会「気候変動環境下における広域スケールの食料生産変動予測にむけて」が行われた (<http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/sympo/h23/20120209.html>) 主催：農業環境技術研究所、後援：日本作物学会・日本農業気象学会)。気候変動と食料生産の問題は、地球環境研究センターにおける研究プロジェクト「地球温暖化に関わる地球規模リスクに関する研究」<http://www.cger.nies.go.jp/ja/climate/> においても重要な研究テーマである。ここでは、発表された研究の重要なポイントと、この問題に関する重要なトピックスおよび今後の課題に関して、筆者の私見を交えつつ、報告を行う。

2. 会議の概要

会議では、気候変動と食料生産の将来予測に関わる問題を専門とする研究者から発表があり、最後に総合討論が行われた。研究発表の概要は以下のとおりである。

(1) 気候変動が食料生産に及ぼす大域的影響 (横沢正幸氏・農業技術環境研究所)

食料供給をカロリーベースでみた場合、主要な

要素は穀物であるが、多くの国が穀物を輸入している一方で、穀物を生産・輸出する国は限られている。このため、穀物の主要生産国が同時に異常気象の影響を受けると、食料供給において大きな問題が生じる。近年の穀物生産量全体の変動が大きくなっていること、まれにはあるが、穀物生産量全体が大きく(2割以上)減少したことが示され、今後広域的に穀物生産を予測することの重要性が示された。

(2) 季節的気候予測情報とその農業応用 (佐久間弘文氏・海洋研究開発機構)

大気海洋結合モデルによる、季節から1～2年にわたる気候変動予測に関する研究が紹介された。このような時間スケールの気候変動はエルニーニョ南方振動 (El-Nino Southern Oscillation: ENSO、注1) の影響が全球的に重要であるが、これと同様にインド洋ダイポール現象 (Indian Ocean Dipole: IOD) と関わる変動も存在する。ENSO では太平洋東岸の海面水温が高い状態と低い状態が数年おきに繰り返される。一方、IOD ではインド洋の東岸で海面水温が高く西岸で低い状態とその逆の状態が繰り返されるが、IOD の変動メカニズムに関しては不明な点が多いため、今後の重要な研究課題であることが示された。

(3) 気候変動の農業影響評価と適応策 (金丸秀樹氏・国際連合食糧農業機関)

現在慢性的な飢餓状態にあるのは10億人ほどで、おもに低緯度の発展途上国の人々であるが、彼らは今後気候変動の影響を大きく受ける可能性がある。このため国際連合食糧農業機関 (Food and Agriculture Organization: FAO) では、途上国への気候変動の影響評価と適応策の技術支援を行っている。このうち、気候変動が穀物生産などへ及ぼす



影響を、国のスケールでシミュレートするモデルを用いた取り組みが紹介された。これはモデルの開発や性能評価、そしてモデル利用のための教育をFAOが行い、途上国の専門家がこのモデルを利用して、自国での気候変動影響評価を行うものである。影響評価のシミュレーションから、いかに役立つ情報を抽出し、現場に生かすかなどについて、進行中のプロジェクトについての報告がなされた。

(4) 広域スケールにおける主要作物の生産性環境応答のモデル化 (飯泉仁之直氏・農業環境技術研究所)

過去数十年間、穀物の収量は変化してきたが、その変化に対して気候変動や栽培技術の改良が及ぼした役割については、不明な点が多い。ここでは作物の生育プロセスを記述する全球スケールの数値モデルを利用して、過去の穀物収量変化の要因分析に関する研究成果が報告された。モデルにはさまざまな不確実パラメータ(注2)が含まれるが、ここでは観測データを用い、観測された穀物収量をよく再現するパラメータが利用されている。米国コーンベルトにおけるトウモロコシの生産量について、過去30年間にわたる解析を行ったところ、過去の気候変化は、トウモロコシ生産量の増加傾向を12%ほど減少させたことが明らかになった。これは夏季の降水量が減少したこと、また夏季の気温が上昇したことが原因であると考えられる。後述するように、モデルにはさまざまな不確実性が含まれるため、今後蓄積されていく観測データのさらなる利用やモデルの改良などが必要であるが、気候変動が穀物生産量に及ぼす影響を示すうえでのモデルの有用性が示された。

(5) 気候変化予測と連携する土地利用シナリオの構築 (山形与志樹・国立環境研究所)

人間活動による土地利用の変化、例えば森林伐採による農地の拡大などは、二酸化炭素排出量を増やすことなどを通して、気候変動に大きな影響を与える。このため将来の土地利用シナリオを考慮することは、気候予測を行う上でも非常に重要な課題である。ここでは、国立環境研究所の研究

グループが中心となって行った、将来土地利用シナリオの構築に関する研究成果について発表が行われた。今後も世界の人口は当面増加することが予測されていることから、世界の人々が十分な食料を得るためには、農業生産性を高めるか、農地の拡大が必要である。土地利用変化の将来予測は、このような食料問題との関係からも研究を進めることの重要性が示された。

(6) 気候変動が世界の食料需給に及ぼす影響の評価 (古家淳・国際農林水産業研究センター)

食料に関わる市場での経済活動を記述することにより、世界の食料需給の将来予測を行うモデル、世界食料モデルによる研究の成果が紹介された。ここでは、気候変動が農作物の生産性に与える影響が考慮されており、過去の観測データに基づき、穀物生産量が気温と降水量の簡単な経験式として表現されている。モデル解析によると、将来の気候変動、すなわち温室効果ガスの増加に伴う温暖化によって、世界の穀物生産量は20年間で1%ほど減少することが示された。また、気温と降水量の年々変動が大きくなると仮定すれば、穀物生産量と穀物価格の年々変動も大きくなることが示された。ここで利用したモデルでは、さまざまな現象のここ数十年のトレンドをうまく説明できるように、モデルの定式化がなされている。このため、気候や社会経済の状態が現在とは異なる、遠い将来の食料需給を推計する、長期予測モデルの開発を行っており、その概要が紹介された。

3. 重要なトピックスと今後の課題

研究発表と総合討論で議論された内容の中で特に重要だと思われる点は、以下の二点である。ひとつは、予測の不確実性を評価することである。気候変動、食料生産のそれぞれの予測に不確実性が伴う。将来気候の予測に関しては、これまで大気海洋結合モデル相互比較プロジェクト(Coupled Model Intercomparison Project: CMIP)において、世界の気候研究機関が共通の境界条件を与え、過去の気候変化再現と将来の気候変化予測が行われており、データが蓄積されている。これまでの気候モデル評価の研究によると、モデルの計算結果は

完全ではないため、その不確実性を考慮するためには、複数のモデル、できるだけ多くのモデルの結果を用いることの必要性が明らかになっている。このことを踏まえ、気候変動が穀物生産に与える影響を考慮する際にも、多くのモデルの結果を利用することが重要だろう。また、穀物生産モデルのコミュニティにおいても、CMIPのようなモデル比較プロジェクト(AgMIP)が進められており、ここで得られるさまざまなモデルによる計算結果も、貴重なデータとなるだろう。特に穀物生産モデルでは、農場の空間スケールで得られたデータをもとに、より広域スケールのモデル化をする必要があり、そこには大きな難しさ、不確実性が存在する(発表[1][3])。また、人間活動による土地利用変化や食料市場での価格決定メカニズム(発表[5][6])といった現象において、単純な法則を見出すことはおそらく難しいため、将来予測を一つのシナリオにとらえ、さまざまなケースについて検討を行うことも重要だろう。

もうひとつの重要な問題は、研究で得られた知見をいかに役に立つ情報としてユーザに提供するかである。FAOでは、発展途上国を対象に、特にこの点を意識したプロジェクトを行っており(発

表[4])、研究によって得られた情報に加えて、農民の経験を積極的に利用して土地固有の対策を考案するなど、さまざまな試みがなされている。これまでの研究でも指摘されているように、研究者と政策決定者との間で情報交換をするとともに、幅広い分野の研究者の協力も必要だろう。

(注1) 熱帯の太平洋では、海洋下層の冷たい水が湧きあがってくることにより、東岸で海面水温が低い状態(ラニーニャ)と、湧きあがり弱いことにより、東岸の海面水温がそれほど低くない状態(エルニーニョ)が、数年ごとに繰り返される。このような海洋の循環の数年スケールの変化により、熱帯の温度状態が変わることを通して、地球上の広い領域の気候状態に影響を及ぼす。

(注2) 数値モデルは一般に、物理法則や経験式を記述しており、その時間発展を解くことで、さまざまな現象をシミュレーションすることができる。このうち、モデルで用いられる経験式は、複雑な現象(例えば植物の光合成過程など)を、二酸化炭素濃度・温度・水蒸気量などの関数として表現したものであるため、その関数で用いられる定数(ここでは、これをモデルのパラメータと呼ぶ)には大きな不確実性がある。





水循環解明のためのリモートセンシングの有効活用に向けて

地球環境研究センター 物質循環モデリング・解析研究室 主任研究員 中山 忠暢

1. はじめに

2012年2月19日～22日にかけて、アメリカ・ハワイで陸域水循環のリモートセンシングに関するアメリカ地球物理学連合チャップマン会議 (AGU Chapman Conference on Remote Sensing of the Terrestrial Water Cycle) が開催された。今後新たに始まるさまざまな衛星ミッションでよりクリアな水圏の映像が得られると予想され、現段階で水文学的 (注1) にリモートセンシングの総合化を行い、これからの水循環研究への対策を立てることが急務である。今回の会議はAGUの水文学支部 (Hydrology Section) を中心とした有志により立案されたものである。ニューヨークタイムズの A. C. Revkin が「Water and the Knowosphere (注2)」というタイトルで地球における水資源の希少性および技術を用いた解決可能性について興味深い基調講演を行った (写真1)。人間の叡智による問題解決に向けた提言は、本会議のテーマであるリモートセンシングを用いた早期警報・危機診断システムのような枠組みと統合することで具現性が増すと思われ、会議の前座として研究意欲をそそる話題提供であった。参加者約300名、一つの基調講演、五つの口頭セッション、二つのポスターセッションで構成され、17件の口頭発表、約200件のポスター発表が行われた。以下に筆者の意見を交えつつ概要を報告する。

2. 水循環把握のためのリモートセンシングの必要性

地球規模での気候変動に伴う降水量の偏在化や急激な経済成長・人口増加等により、水資源の枯渇や水質悪化が深刻になっている (注3)。生態系の劣化により人間生活に必要な供給サービス (Provisioning Services) としての水資源の枯渇に拍車をかける状況に対して国連環境計画 (UNEP) をはじめさまざまな研究機関および行政組織でグ

ローバル水ストレスに関する研究が行われ、保全・再利用・脱塩等も含めた持続可能性に向けた新たな水資源管理への関心も高まっている。現在、アメリカ地質調査所 (USGS) が公開している HydroSHEDS による全球水文学的データセットおよび WHYMAP (World-wide Hydrogeological Mapping and Assessment Programme) による地下水の全球分布をはじめとして、さまざまなデータセットが利用可能であるが、それらの間には表面流に比べての地下水流の不明確さに加えて、水資源量・利用可能量・必要量には依然として大きな相違があり、さらに陸域-海域間での水循環の相互作用に関しても未解明な点が多い。本会議ではこのような水資源の現状把握や将来予測のベースとなる水循環解明に向けてのリモートセンシングの有効活用方法が焦点であった。

水循環把握には数値モデル・現地観測・リモートセンシング等の方法がある中で、リモートセンシングは空間把握能力に優位な特性を有し、近年のコンピュータおよび画像解析手法の急激な進展と相まって、ポイントレベルでの観測や測定では不可能な物理パラメータの空間異方性 (heterogeneous) の評価に有効である。J. Entin (アメリカ航空宇宙局) は ESD (Earth Science



写真1 A. C. Revkin (ニューヨークタイムズ) による基調講演



Division) プログラムのオペレーティング・ミッションとして 16 衛星の計画、および、地球観測衛星コンステレーションのフォーメーションフライトとしての地球観測衛星隊列 (Afternoon Train: A-Train) について述べている。また航空科学計画 (Airborne Science Program) では、地球観測システム衛星の重要性に加えてイラク戦争で使用されたグローバルホークをはじめとする無人航空機システムの利用計画も増加している。いずれにせよ、大気組成・炭素循環・気候変動・水および、エネルギー循環・地表面および地球内部等の重点分野に対し、今後リモートセンシングの役割が増加するのは確かである。

水循環研究での対象領域は河川・湖沼等の表面流に加え降水・積雪・表面貯留・土壌水分・蒸発散・地下水等も含まれる。降水量については、TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission: 熱帯降雨観測衛星)・GPCP (Global Precipitation Climatology Project: 全球降水気候値プロジェクト)・CMAP (Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation) 間での相互比較に加えて、CMORPH (Climate Prediction Center MORPHing technique) および ERA (ECMWF Re-Analysis) 等の再解析データも用いられてきている。積雪については光学センサー等による観測の一方で、T. H. Painter (ジェット推進研究所) のように MODSCAG (MODIS Snow Covered Area and Grain size/albedo) アルゴリズム開発を通して雪量・雪アルベド・積雪水量等の評価精度向上を行っている例もある。氷河・氷床については ICESat (ICE, Cloud, and Land Elevation Satellite) や GLIMS (Global Land Ice Measurement from Space) 等で評価が行われてきている。湖沼・湿原・氾濫原は全水資源容量の約 15% を占め、可視光センサーや高度計を用いた容量評価が一般的である。土壌水分量については表層数 cm しか現況のセンサー (L-バンド) では計測できない。地下水については現状ではリモートセンシングでの評価は難しいが、全水容量変化については海岸域での湧出問題や低解像度の問題はあるものの GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) での評価の意義は大きい。また、T. G. Farr (ジェット推進研究所) が発表したように、井戸データは有効だが

入手可能性・計測尺度や精度等の技術的問題に加えて政治的実用的な困難を伴うため、表面歪み測定によるレーダイメージングを用いた地下水流動や氷床の評価が有効である。ENVISAT (ENVironment SATellite)・ALOS (Advanced Land Observing Satellite: 陸域観測技術衛星)・RADARSAT 等で得られる高分解能の微細地形とインターフェロメトリ (注 4) を組み合わせることで表面変化量の解析が可能となり、低解像度の GRACE を補完する (特に都市域での解析に対する) 役割は大きいと思われる。このような現状に対し、D. P. Lettenmaier (ワシントン大学) が発表したように、観測降水量やモデルによる蒸発量・貯留量との比較を通してリモートセンシングによる水収支各成分の評価を行った結果、降水量の評価の不確実性が最大で、収支差分である河川流量は過大評価である。

一方、J. M. Melack (カリフォルニア大学サンタバーバラ校) や M. R. Raupach (オーストラリア連邦科学産業研究機構) も発表したように、地球システムではエネルギー・水・炭素・栄養塩循環が複雑に絡み、植物・有機物・土壌・大気間での相互作用を理解する必要がある (注 5)。気候システムとのフィードバックの観点に加えて、陸水が地球レベルでの炭素循環に果たす役割を無視することはできない。水域面積の大きいならかな湿原や氾濫原を含む地域では、小規模な水位変化でも大きな容量変化になるため鉛直方向の計測精度が重要である。現状のリモートセンシングでは短波による冠水エリア評価、InSAR (Interferometry Synthetic Aperture Radar: 干渉合成開口レーダもしくは SAR インターフェロメトリ) 利用による水面勾配評価、GRACE による低解像度な冠水量評価等が可能であるが、氾濫モデルによる概念的・経験的理解、地形・測深 (bathymetry)・水位・流速等の計測精度の問題もある。JERS (Japanese Earth Remote Sensing Satellite) Amazon Multi-season Mapping Study (JAMMS) の湿原マッピング・MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer)、GLC-2000 (Global Land Cover 2000)・GLWD (Global Lakes and Wetlands Database) を用いた氾濫原と湿原エリアの比較により、河川や氾濫原からの局地的な炭素放出フラックスは意外と大きい可能性が示され



ている。さらに、炭素-気候システムの観点からは二酸化炭素排出・二酸化炭素濃度・気温の変化には密接な関係があり、リモートセンシングによるパラメータ推定とデータ同化を通じたモデルとデータの融合が必要である。先験値(事前)情報を併せることでプロダクトの精度向上が得られ、地上からのFTS(Fourier Transform Spectrometer: フーリエ変換分光器)観測であるTCCON(Total Carbon Column Observing Network)との比較もまた有意義である。このように水・炭素循環は互いに制約条件となるため、不確実性の減少およびモデル性能の向上のためにはエネルギー・水・炭素・栄養塩間でのリモートセンシング・現地観測・モデル間での同化の意義は大きい。また、合成開口レーダデータの連続性、一次生産量の評価精度の向上、短波による氾濫および植生の時系列評価等を通して、水域が炭素循環に果たす役割を解明する必要があると思われる。

3. これからのリモートセンシングとは？

以上述べたようにリモートセンシングを用いた水循環解明には近年大きな進展が見られるが解明・改良すべき点は未だ多く残されており、空間解像度の向上や衛星・航空機・地上観測システムの統合化に併せて以下のような項目が特に必要であると思われる(注3)。

- ・バイアス、アルゴリズム改良、再処理等のさらなる高精度化
- ・雨量計観測、レーダ、および衛星の融合解析による降水量の高精度化
- ・現地観測データによる蒸発量推定の高精度化
- ・直接および間接評価法の組み合わせによる地下水量評価のスケールアップおよび高精度化
- ・P-バンドとモデルの結合による深い地層での土壌水分量評価の可能性
- ・先行履歴降雨指標(Antecedent Precipitation Index: API)モデルおよび補助データを用いた分割による高解像度土壌水分量データの作成
- ・SWOT(Surface Water and Ocean Topography)等を用いた河川流量の評価可能性
- ・InSARを用いた、地下水流動や氷河・氷床の評価の有用性

- ・CoReH20(Cold Regions Hydrology High-resolution Observatory)を用いた積雪水量評価の有効性
- ・フォーメーションフライトや打ち上げ日等に関する水循環ミッション間でのさらなる協調の必要性

今後打ち上げ予定の衛星に関する次世代ミッションとして、GPM(Global Precipitation Measurement)・SMAP(Soil Moisture Active Passive)・SMOS(Soil Moisture and Ocean Salinity)・ICESat-2・SWOT・GRACE-FO(Grace Follow-On)・CoReH20・LDCM(Landsat Data Continuity Mission)・OCO-2(Orbiting Carbon Observatory 2)等が計画されている。R.F.Adler(メリーランド大学)は空間解像度やデータ利用可能性の観点から次世代に要求されるグローバル衛星降水量プロダクトについて報告したが、異なる周波数・幾何学・解像度等の相互比較コンステレーション放射計データ・共通の雲データを用いた統一的な降水リトリバルの可能性・ダイナミックダウンスケーリング・可変解像度の可能性・リアルタイムデータ・統合的な利用目的を目指す科学的ミッション等も重要である。また、R.Bennartz(ウィスコンシン大学)が指摘したように、CloudSat・GPM/DPR(Dual-frequency Precipitation Radar)・EarthCARE(Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer)等を通して雲・エアロゾルの全球の三次元構造のモデル化を目指す意義も大きい。これらの用途はさまざまであるが、上記項目の解決に加えて湿原や氾濫原での高精度な標高図作成等も期待される。

また、水資源脆弱性の特定および定量化のためにはJ.S.Famiglietti(カリフォルニア大学アーバイン校)も指摘したミッション誘導型データ同化モデルシステムが必要である。筆者は本会議において、現地観測および衛星データとの結合による三次元グリッド型の統合型流域管理NICE(National Integrated Catchment-based Eco-hydrology)モデル(注3)を用いて中国の長江および黄河を対象とした大陸スケールの流域での洪水や渇水といった極値現象の検出可能性について発表を行ったが、衛星データとの融合で生まれる新たな相乗効果を最大限発揮できるモデルの柔軟性こそが上記で述べたような目標達成のために不可欠であることを痛感させ

られた。さらに、地域水資源管理のための高解像度モデルと気候変動や大スケール水資源シナリオのための低解像度モデルをうまく組み合わせオペレーショナルモデル（注5）のようなリアルタイム Community Hydrologic Modeling Platform (CHyMP) を目指すとともに、トレンド検出・プロセス把握・モデルとセンサーの検証・異なる時空間スケールでのデータ相互適用・新たなセンサーや計測技術の開発等を並行して進める必要がある。CEOS (Committee on Earth Observation Satellites)・WGCV (Working Group on Calibration and Validation)・LPV (Land Product Validation)・ECVs (Essential Climate Variables) 等により、参照基準や不確かさバジェット (Uncertainty Budget) 等に基づく品質尺度を通じた Quality Assurance for Earth Observations (QA4EO) や水同盟 (Water Alliance) の意義も大きい。リモートセンシングを用いた学問的な水循環の解明を越えて、水市場や水利権改革を含むソフト対策もまた水資源問題の解決には不可欠である。

(注1) 水文学 (hydrology) は地球の水の発生、循環、分布、およびそれらの物理的・化学的特性と人類活動に対する反応を含む物理学のおよび生物学的環境への相互作用を扱う科学。

(注2) Knowosphere は人間の思考の圏域 (Noosphere) もしくは Plant of the Mind) の拡張としての造語。

(注3) 例えば、Nakayama T. (2012) Development of process-based NICE model and simulation of ecosystem dynamics in the catchment of East Asia (Part III). CGER's Supercomputer Monograph Report, 18, NIES, 98p., <http://www.cger.nies.go.jp/publications/report/i103/en/>.

(注4) Sansosti E, et al. (2010) Space-borne radar interferometry techniques for the generation of deformation time series: An advanced tool for Earth's surface displacement analysis. Geophys. Res. Lett., 37, L20305, doi:10.1029/2010GL044379

(注5) 中山忠暢「これからの生態系モデルには何が必要なのか？」地球環境研究センターニュース 2011年11月号

Information

エコライフ・フェア 2012

6月5日は環境の日です。これは、1972年6月5日からストックホルムで開催された「国連人間環境会議」を記念して定められたものです。日本では平成3年度から6月の1カ月間を「環境月間」とし、環境問題への関心と理解を深めるために環境省が呼びかけて、全国でいろいろな行事が行われています。

都立代々木公園では「エコライフ・フェア」が開催され、環境省、企業・団体、NGO/NPO などからさまざまなブースが出展されます。国立環境研究所も「エコライフ・フェア 2012」に参加しています。子どもからおとなまで、楽しみながらライフスタイルを見つめなおすきっかけとなる「エコライフ・フェア 2012」。入場は無料です。お気軽にご来場ください。

- ◆日時◆ 2012年6月2日(土) 11:00～17:00 および3日(日) 10:00～17:00 (入場無料)
- ◆場所◆ 都立代々木公園 (ケヤキ並木・イベント広場)
- ◆エコライフ・フェア 2012 ホームページ◆ <http://www.ecolifefair.go.jp/>

お知らせ

No.1 渦相関法

地球環境研究センターのモニタリング事業で用いている実験装置、測器について、観測方法や原理などをシリーズ紹介していきます。

長期観測を支える主人公たち

— 測器と観測法の紹介 —

地球環境研究センター 陸域モニタリング推進室 主任研究員 高橋 善幸

渦相関法（乱流変動法とも呼ぶ）は大気乱流理論に基づいて地表に近い大気中の物質や熱エネルギーの輸送量を評価する手法で、陸域生態系が吸収・放出する二酸化炭素（CO₂）量を群落スケールで定量する際に用いられる標準的な観測アプローチです。地表に近い大気の中では風や気温、湿度などはさまざまな大きさ・時間スケールの乱流渦により時間的に変動しています。この大気の乱流により上層と下層の混合が行われ、ここに気温や物質の濃度に差があれば、その差をなくす向きに熱エネルギーや物質が輸送されることとなります。

森林や農耕地など陸域生態系が吸収・放出するCO₂の量を測定する場合には、群落の上での乱流渦による空気の動き（鉛直風速）とそれに連動したCO₂濃度の変動を、高速な応答性をもった三次元超音波風速計とCO₂分析計で計測し、その相関からCO₂鉛直輸送量（単位面積当たりのCO₂フラックス）を計算します。

この手法には以下のような長所があります。

- ①少数のセンサーから広い範囲を代表するCO₂フラックスをほぼ直接的に定量できる
- ②数分から数年という広いタイムスケールでの変動の把握が可能
- ③データを得るための人的労力の少なさ
- ④省電力化と自動化により長期無人観測やアクセスの困難な場所での観測が可能

この手法の実用化と普及により、気温や水分、日射量といった環境因子の複雑な変動に対する陸域生態系の応答を直接的に観察できるようになりました。また、観測システム全体の省電力化が進んだことにより太陽電池のみでの長期無人観測が可能となったため、これまで電力供給の問題やアクセスが困難なことで観測の実施が難しかった地域への観測網の展開が進みました。こ

れにより、長期的な気候変動に対する陸域生態系のCO₂収支の変動の予測を行うための実観測データの集積が飛躍的に進展しつつあります。現在では世界で500を超える観測サイトで、森林地帯等でタワーを用いた渦相関法によるCO₂フラックスの観測が行われています。

一方、渦相関法の短所として、以下のようなことがあります。

- ①水平方向に輸送されるCO₂の量を把握できないため、傾斜地や複雑地形では鉛直輸送量に観測誤差を生じやすい
- ②夜間などの大気の鉛直方向の動きが安定した状況では、乱流渦によるCO₂の輸送が起こりにくく計算式の適用に不適切な条件となる

こうした手法固有の理論的な短所のほかにも、降雨や霧などの影響で超音波風速計やCO₂分析計から正常な信号が得られない場合など、観測機材の特性に起因する観測値の異常もあります。実際の観測においては、連続した観測データの中から、計算に不適切な条件下のデータを検出・除外し、信頼性の高い時間帯のデータをもとに欠測期間の補完処理を行うなど、精度の高い結果を得るためには現在でも高水準のスキル（データ解析の能力）とそれぞれの観測に即したノウハウの集積が必要となっています。

CO₂フラックスの観測に用いられる分析計には測定部が閉鎖系となっているクローズドパス型と外気に開放されているオープンパス型があります。前者は周囲の温度や気圧などの影響を受けにくく安定していますが、空気取り入れ口から分析計までチューブを通してポンプで空気を輸送する必要があるため、スケールの小さな変動成分の情報損失があり、また電力消費量も多くなります。後者は、周囲の環境の変動の影響を受けやすく気

象条件により異常値の発生やデータ欠損が発生しやすいという欠点があるものの、微小な変動の情報の損失が少なく、小さな消費電力で運用できるという利点があります。地球環境研究センターでは、苫小牧フラックスリサーチサイトや富士北麓フラックス観測サイトにおいて、クローズドパス型とオープンパス型の、特性の異なるCO₂分析計を用いた複数のシステムを用いて、渦相関法により観測されたCO₂フラックスの比較を行い、渦相関法に関わる観測技術の検証を継続的に行っています。また、高い信頼性と汎用性のあるデータ処理技術の確立を目指して、AsiaFluxなどの国際的な観測ネットワークを介して、国内外の研究グループとデータ処理手法の比較検証を実施し、技術的な知見の集積と共有を推進しています。さらに、クローズドパス型CO₂分析計については毎日定時に標準ガスによる自動校正を行い、オープンパス型CO₂分析計については実験室で校正を行ったセンサーユニットと定期的に交換することで効率的に精度維持ができるようになっています。

渦相関法を適用するには、高い時間分解能（1秒間に10回以上）と、対象とする成分の大気の流れに伴う微細な変動を観察するのに十分な精度をもった分析計が必要となります。CO₂や水蒸気（H₂O）に関しては、20年以上前から十分な精度と時間分解能をもった赤外吸収ガス分析計が市販されており、最近では前述したオープンパス型の分析計が実用化され普及したことにより、市販の機

材を用いて容易に観測システムの構築ができるようになってきました。オープンパス型とクローズドパス型の分析計を用いた場合の測定結果の差も、測器や補正法の改良が進むにつれて小さくなってきましたが、それでも両者の間に生じるごくわずかな系統的な差が、年間炭素収支量を見積もる際には無視できない誤差を生むことも指摘されており、両者を長期的に比較しながら観測することが推奨されています。また、分析計の発展により大気中のオゾンやメタンといった温暖化物質や温暖化関連物質を対象とした渦相関法によるフラックス観測も実用化されており、さらに濃度の低い亜酸化窒素や揮発性有機物なども観測可能な対象となりつつあります。

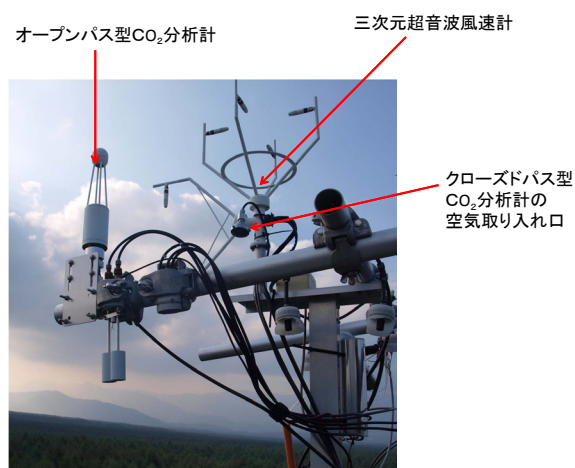



写真1 富士北麓のタワーの頂上に設置されたセンサー群



図1 森林群落の上を風が吹くと、大小さまざまなスケールの渦が発生し、これによりいろいろな物質の鉛直輸送が起ります。応答性の高いセンサーで計測された空気の鉛直方向の動きとCO₂濃度の変動の関連から鉛直方向の輸送量を計算することができます



最近の発表論文から

* 地球環境研究センター職員および地球温暖化研究プログラムメンバーの最近の発表論文を紹介します。



Analysis of $\Delta O_2 / \Delta CO_2$ ratios for the pollution events observed at Hateruma Island, Japan

(波照間島で観測された汚染イベントにおける $\Delta O_2 / \Delta CO_2$ 比の解析)

峰島知芳, 久保恵美, 遠嶋康徳, 山岸洋明, 古山祐治, Maksyutov S., 北和之, 向井人史 (2012)
Atmos. Chem. Phys., 12, 2713-2723, doi:10.5194/acp-12-2713-2012.

波照間島で観測された汚染イベント (大気中 CO_2 の高濃度が観測された期間) における大気中の O_2 濃度変動に対する CO_2 濃度変動の比 ($\Delta O_2 / \Delta CO_2$ 比) を解析した。汚染イベントの起源が中国の場合と日本・韓国の場合で $\Delta O_2 / \Delta CO_2$ 比に有意な違いが見られ、前者で -1.14、後者で -1.37 であった。これらの $\Delta O_2 / \Delta CO_2$ 比は中国および日本・韓国における化石燃料の種類別消費量から予想される燃焼時の O_2 消費 / CO_2 放出比とよく一致していることがわかった。ラグランジュ型大気輸送モデルによる解析の結果、波照間の $\Delta O_2 / \Delta CO_2$ 比は中国の化石燃料の組成に敏感であることが示唆された。



Ozone loss rates in the Arctic winter stratosphere during 1994–2000 derived from POAM II/III and ILAS observations: Implications for relationships among ozone loss, PSC occurrence, and temperature

(POAM II/III と ILAS 観測から得られた 1994 ~ 2000 年の冬期北極成層圏オゾン破壊速度: オゾン破壊・PSC 発生・気温の関係について)

寺尾有希夫, 杉田考史, 笹野泰弘 (2012) J. Geophys. Res., 117, D05311, doi:10.1029/2011JD016789, 2012.

衛星搭載センサーである POAM II/III と ILAS による観測データを用いて、1994 ~ 2000 年の冬期 (1 ~ 3 月) の北極成層圏における化学的なオゾン破壊速度ならびに極成層圏雲 (PSC) 発生頻度について定量的な評価を行い、オゾン破壊速度、PSC 発生頻度、気温の関係について調査した。その結果、PSC 発生頻度が 10% 増加すると、1 日当たりのオゾン破壊速度が 25 ± 6 ppbv 増加することなどが明らかになった。



地球環境研究センターのウェブサイト (<http://www.cger.nies.go.jp/ja/about/results/>) には、この他の論文情報も掲載されています。



地球環境研究センター出版物等の紹介



地球環境研究センターから発行されている出版物をご希望の方は、送付先、送付方法を記入し、E-mail、FAX、または郵便にて【申込先】宛にご連絡下さい。送料は自己負担とさせていただきます。出版物の PDF ファイルはウェブサイト (<http://www.cger.nies.go.jp/ja/activities/supporting/publications/report/index.html>) からダウンロードすることもできます。ご参考までに 2009 年以降に発行された出版物は次ページのとおりです。2008 年以前に発行されている出版物および送付方法等につきましては、上記ウェブサイトを参照してください。

【申込先】

国立環境研究所 地球環境研究センター 交流推進係

〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2 FAX: 029-858-2645 E-mail: www-cger@nies.go.jp



出版物はテーマ別になっております。

D：データベース関連 I：研究の総合化および総合化研究関連 M：モニタリング関連

CGER No.	タイトル
I103-2012	CGER'S SUPERCOMPUTER MONOGRAPH REPORT Vol.18 Development of Process-based NICE Model and Simulation of Ecosystem Dynamics in the Catchment of East Asia (Part III)
I102-2011	Proceedings of the 9th Workshop on Greenhouse Gas Inventories in Asia (WGIA9) -Capacity building for measurability, reportability and verifiability - 13-15 July 2011, Phnom Penh, Cambodia
I101-2011	日本国温室効果ガスインベントリ報告書 2011年4月
I100-2011	National Greenhouse Gas Inventory Report of JAPAN -April, 2011-
I099-2011	国立環境研究所スーパーコンピュータ利用研究年報 平成22年度 NIES Supercomputer Annual Report 2010
I098-2011	CGER'S SUPERCOMPUTER MONOGRAPH REPORT Vol.17 Atmospheric Motion and Air Quality in East Asia
I097-2011	CGER'S SUPERCOMPUTER MONOGRAPH REPORT Vol.16 Idealized Numerical Experiments on the Space-time Structure of Cumulus Convection Using a Large-domain Two-dimensional Cumulus-Resolving Model
M021-2010	有害紫外線モニタリングネットワーク活動報告Ⅱ
M020-2010	苫小牧フラックスリサーチサイトにおける森林生態系環境の総合的観測 -モニタリングデータブック-
I096-2010*	Proceedings of the 8th Workshop on Greenhouse Gas Inventories in Asia (WGIA8) Capacity building for measurability, reportability and verifiability 13-16 July 2010, Vientiane, Lao People's Democratic Republic
I095-2010	国立環境研究所スーパーコンピュータ利用研究年報 平成21年度 NIES Supercomputer Annual Report 2009
I094-2010	日本国温室効果ガスインベントリ報告書 2010年4月
I093-2010	National Greenhouse Gas Inventory Report of JAPAN -April, 2010-
I092-2010*	CGER'S SUPERCOMPUTER MONOGRAPH REPORT Vol.15 Algorithms for carbon flux estimation using GOSAT observational data
I091-2009	Proceedings of the 7th Workshop on Greenhouse Gas Inventories in Asia (WGIA7) Capacity building for measurability, reportability and verifiability under the Kobe Initiative 7-10 July 2009, Seoul, Republic of Korea
I090-2009	国立環境研究所スーパーコンピュータ利用研究年報 平成20年度 NIES Supercomputer Annual Report 2008
I089-2009	日本国温室効果ガスインベントリ報告書 2009年4月
I088-2009*	National Greenhouse Gas Inventory Report of JAPAN -April, 2009-
I087-2009	Proceedings of the 6th Workshop on Greenhouse Gas Inventories in Asia (WGIA6) "Capacity building support for developing countries on GHG inventories and data collection (measurability, reportability, and verifiability)" as a part of the "Kobe Initiative" of the G8 Environment Ministers Meeting 16-18 July 2008, Tsukuba, Japan
D041-2009	Carbon Sink Archives An integrated system for storing, retrieving and analyzing 2-dimensional data related to the problem of terrestrial carbon sink

(*は在庫なし)

地球環境研究センター (CGER) 活動報告 (2012 年 3 月)

国立環境研究所主催・共催による会議・活動等

2012. 3. 1～2 都市における水-エネルギー-炭素の関連に関するワークショップ(Water-Energy-Carbon Nexus in Cities: Drivers, footprints, and implications) (東京)
9カ国の大学および研究機関より30名の専門家の参加を得て開催し、都市における水・エネルギー・炭素の関連に関する知識と情報の共有およびモデル構築の可能性等について議論を行った。詳細は、本誌に掲載予定。

所外活動(会議出席)等

- 2012.3. 6～7 第5回ライダーによる温室効果ガス観測に関する国際会議(5th International Workshop on CO₂/CH₄ DIAL remote sensing)にて技術発表(高木高度技能専門員/福岡)
7～9 第1回温暖化するシベリアの自然と人—水環境をはじめとする陸域生態系変化への社会の適応に関する国際会議(1st International Conference on “Global Warming and the Human-Nature Dimension in Siberia: Social Adaptation To the Changes of the Terrestrial Ecosystem, with an Emphasis on Water Environments”)に参加・研究発表(Maksyutov 室長・金特別研究員/京都)
19～23 IPCC 第3作業部会第5次評価報告書第2回執筆者会合に参加(Dhakai フェロー/ニュージーランド)
26～29 Planet Under Pressure 2012 に参加・研究発表(三枝室長ほか/イギリス)
詳細は、本誌に掲載予定。

見学等

2012. 3. 8 高層気象観測ネットワーク(GRUAN)会議出席者(40名)
12 会計検査院第三局 環境検査課(3名)

2012年(平成24年)4月発行

編集・発行 独立行政法人 国立環境研究所
地球環境研究センター
ニュース編集局

〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2
FAX: 029-858-2645
E-mail: www-cger@nies.go.jp
<http://www.cger.nies.go.jp/>