

第7回二酸化炭素国際会議報告*

中澤 高 清^{*1}・遠 嶋 康 徳^{*2}・石 井 雅 男^{*3}・伊 藤 昭 彦^{*4}
青 木 周 司^{*1}・井 上 元^{*2}

1. 会議の概要

二酸化炭素(CO₂)国際会議は、Charles Keeling(米・Scripps 海洋研究所)と Hans Oeschger(スイス・ベルン大学)が世話人となって、1981年9月にベルン大学において初めて開催された。その後、4年毎にスイスの Kandersteg, ドイツの Hiterzarten, フランスの Carqueiranne, オーストラリアの Cairns, 日本の仙台で開催され、今回で7回目を迎えた。今回の会議は、NOAA/CMDL(現 NOAA/ESRL/GMD)の Pieter Tans が中心となって準備を進め、米国コロラド州 Boulder 郊外にある Omni Interlocken Hotel を会場として2005年9月25～30日に開催された。参加者は、第1回会議では50～60名程度であったが、CO₂問題の重要性の認識が高まり、回を重ねるに従って増加し、今回は452名に及んだ。日本からの参加者も多く、全体の1割以上(55名)を占めるほどであった。また、参加者の増加を反映し、研究発表の数も増え、口頭発表が64、ポスター発表が310であった。第1回会議での発表が44(全て口頭)であったことを考えると、その増加がいかに大幅なものかよく分かる。

本会議は、大気中のCO₂の変動を解釈するという観点から開催されるようになったため、初期の段階では大気中のCO₂を研究する者が多く出席していたが、その

後、海洋炭素に関する研究者も多く参加するようになった。今回は、炭素循環における陸上生物圏の重要性が近年特に注目されるようになったことを反映し、陸域炭素に関する研究発表が大幅に増え、大きな特徴となっていた。また、従来の会議では取り上げられなかった炭素固定など工学的側面やメタンについての研究成果の発表が取り入れられるとともに、各セッションの最後に当該分野を代表する研究者と参加者との間でパネルディスカッションを行うという新しい試みも行われた。参考のために、今回の会議の日程とセッションを第1表に示す。各セッションの発表の内容については、第2節で紹介する。

会議の運営方法にも幾つかの新しい試みが見られた。例えば、これまでの会議では、extended abstractは紙に印刷されて Proceedings として配布されていたが、今回は発表数が非常に多いこともあり、CDに収録され、配布された。また、参加者全員にIDとパス



第1図 会議が開催された Omni Interlocken Hotel.

* Report on the 7th International Carbon Dioxide Conference.

^{*1} NAKAZAWA Takakiyo, AOKI Shuji, 東北大学大学院理学研究科.

^{*2} TOHJIMA Yasunori, INOUE Gen, 国立環境研究所.

^{*3} ISHII Masao, 気象研究所.

^{*4} ITO Akihiko, 地球環境フロンティア研究センター.

© 2006 日本気象学会

第1表 第7回二酸化炭素国際会議の日程とセッション。

	9月26日	9月27日	9月28日	9月29日	9月30日
午前	Opening Session	The Fate of Fossil Fuel Carbon Emissions	Land Use and the Terrestrial Carbon Cycle	Carbon Cycle Response to Environmental Change	Impacts of High CO ₂ on Land and Ocean Ecosystems
		The Fate of Fossil Fuel Carbon Emissions	Land Use and the Terrestrial Carbon Cycle	Carbon Cycle Response to Environmental Change	Managing the Carbon Cycle
昼 食					
午後	The Fate of Fossil Fuel Carbon Emissions	Poster Session The Fate of Fossil Fuel Carbon Emissions	Poster Session Land Use and the Terrestrial Carbon Cycle	Excursions/ Free Time	Poster Session Managing the Carbon Cycle
	Panel Discussion : Economic Development, Carbon and Climate	Panel Discussion : Fate of Fossil-Fuel CO ₂	Panel Discussion : Land Use and Terrestrial Ecosystems		Banquet Dinner

ワードが付与され、無線 LAN を通して講演中にその要旨ファイルとパワーポイントなどの講演用ファイルを手元にある個人のパソコンで見ることができ、またダウンロードもできるようになっており、発表の内容が理解しやすいように工夫されていた。このシステムは、パネルディスカッションの際に、出席者から質問や意見を求めるためにも利用された。

今回の会議のもう1つの特徴は、CO₂研究のパイオニアである C. Keeling が6月20日に逝去(享年77歳)されたため、その追悼という雰囲気が随所に見られたことである。例えば、会議の冒頭で Tans が追悼の言葉を述べ、Keeling が口頭発表する予定であった時間スロットでは共著者の Stephen Piper によって Keeling の業績が紹介され、また晩餐会では Keeling のご令嬢によるピアノ演奏があった。

なお、次回の会議は、2009年にドイツで開催されることになり、Max-Planck-Institute for Biogeochemistry の Martin Heimann が中心となって担当することとなった。(中澤高次)

2. 研究発表の概要

会議において発表された研究成果について、口頭で発表されたものを中心に、各セッション毎にまとめて以下に紹介する。

2.1 Opening セッション

個々の研究成果の発表の前に、Ken Caldeira (米・Carnegie 研究所), Jae Edmonds (米・Maryland 大学), David Victor (米・Stanford 大学), James Zachos (米・California 州立大学 Santa Cruz) によって、CO₂が関わる諸問題について概論的・総括的な発表が行われた。Caldeira は、CO₂や温室効果の発見から始まり、炭素循環研究の歴史、今後予想される気候変動など、CO₂と地球温暖化に関わる今日の知見を幅広く解説した。Edmonds

は、長期的な世界のエネルギー需要と炭素放出について考察し、これらにとって今後の人口と開発される技術が最も重要であることを示した。Victor は、来るべき気候変動に対応するためには炭素の放出を抑制することが不可欠であるが、それに有効な方策として国際的規制や地域的努力の蓄積、技術革新などを考察し、その問題点を指摘した。Zachos は、およそ5,500万年前に海洋のメタンハイドレートが突然分解し、それによって温暖化が数万年にわたって継続した現象を解説し、その際起こったと考えられるさまざまなフィードバック作用を基に、将来の炭素循環におけるフィードバックについて考察した。これらの講演は最先端の研究成果について触れたものではないが、いずれも興味深いものであり、CO₂と地球温暖化について知識が豊富になったと感ずることができた。(中澤高次)

2.2 The Fate of Fossil Fuel Carbon Emissions セッション

このセッションでは、主に人為起源 CO₂の収支が扱われた。Ralph Keeling (米・Scripps 海洋研究所。スタッフが急逝したために、彼の博士研究員である Roberta Hamme が代理発表) は、大気中の CO₂増加と O₂減少の観測結果から、海洋と陸域の正味の CO₂吸収量を推定したところ、1990~2000年は1.9±0.6 (海

洋)と 1.3 ± 0.8 (陸域) GtC yr^{-1} , 1993~2003年は 2.2 ± 0.6 (海洋)と 0.5 ± 0.7 (陸域) GtC yr^{-1} となったことを報告した。John Miller (米・NOAA/CMDL) は1992~2003年に観測された大気中 CO_2 濃度を検討し、化石燃料の消費が北半球に集中しているために、 CO_2 濃度は北で高く南で低いという緯度勾配を示すが、その濃度勾配が増加傾向にあることを示した。特に1998~2003年にかけて勾配が急激に増加しており、その原因として早魃による北半球陸上生物圏の吸収量が減少した可能性を指摘した。なお、後述する Carbon Cycle Response to Environmental Changeセッションでの Philippe Ciais (仏・LSCE/CNRS) や Inez Fung (米・California 州立大学 Berkeley) ほかの発表と合わせて考えると、ここ数年に見られる CO_2 増加率の上昇は、陸上生物圏による吸収量の減少に原因があるといえるようである。

Andy Jacobson (米・Princeton 大学) は、海洋インバースモデルから推定されたより不確実性の小さい海洋フラックスを大気インバースモデルに組み込むことによって、 CO_2 フラックスの地表面分布を求める手法について発表した。それによると、これまで正確に求めることができなかった熱帯域および南半球の陸域が CO_2 の発生源となっており、その量は主に森林破壊などの土地利用変化から推定される炭素発生量とよい一致を示すということであった。

また、北米における航空機観測およびタワー観測の結果を利用して、北米の CO_2 収支を解明しようとする研究発表が2件行われた。1つは Cyril Crevoisier (米・Princeton 大学) による発表であり、米国がすっぽりと収まる仮想的な箱の中の CO_2 収支と箱の境界面を通した CO_2 の出入りを観測から求めることによって、地表面からの正味の CO_2 フラックスを直接推定する方法である。もう1つは Wouter Peters (米・NOAA/CMDL) の発表であり、植生および海洋モデル、高分解能大気輸送モデル、観測結果をアンサンブルカルマンフィルター法で同化させることによって、トップダウン的に陸域フラックスを定量化する試みである。今後、North American Carbon Plan (NACP) として北米での観測網が整備される計画になっており、米国の研究能力の底力を感じさせられた。

海洋については、未だに評価の定まらない南大洋の大気・海洋間 CO_2 フラックスと、海洋への CO_2 蓄積速度を中心に議論が進められた。Taro Takahashi (米・Columbia 大学) ほかは、2002年に、世界の多くの機関

がそれまでに取得した CO_2 分圧のデータを総合して、全海洋の気候値的な大気・海洋間 CO_2 フラックスを評価した。その際、南大洋(南緯44度以南)は、観測データが相対的に少なく評価が難しいものの、およそ 0.9 GtC yr^{-1} の CO_2 を吸収していると見積もった。これに対して TRANSCOM グループは、大気インバースモデルを基に、南大洋の CO_2 吸収が平均して 0.47 GtC yr^{-1} に過ぎないと評価しており、両者の間に大きな隔たりがあった。今回の会議では、Nicolas Gruber (米・California 州立大学 Los Angeles) ほか WOCE などの海洋観測データを用いた海洋インバースモデルによる結果を示し、Ben McNeil (豪・New South Wales 大学) ほか同様のデータに基づく海洋 CO_2 分圧の経験的推定法を紹介した。しかし、彼らが推定した南大洋の CO_2 吸収速度は、それぞれ 0.40 GtC yr^{-1} と 0.19 GtC yr^{-1} であり、手法による大きな違いが改めて浮き彫りになった。

Galen McKinley (米・Wisconsin 大学) が海洋生物地球化学モデルに基づいて報告したように、南大洋は赤道域に次いで大きな CO_2 フラックスの年々変化が予測される海域である。したがって、このような年々変化を考慮すると、南大洋に見られる CO_2 フラックスの大きな違いが、各々の評価手法に内在する問題に起因するだけでなく、元になるデータの観測時期にも関係している可能性を否定できない。しかし、Jaqueline Boutin (仏・LOCEAN/IPSL) ほか報告したフロート搭載センサーによる自動観測など、新たな観測手法の開発にもかかわらず、4年前に仙台で開催された第6回会議以降、南大洋における CO_2 データの質と量に格段の改善が見られていないのが現状である。南大洋をはじめ、全球規模での観測の充実と、これを実施する上での国際的な連携の必要性を改めて感じた。

今回の会議では、WOCE による全球的な海洋断面観測からおよそ10年が経過したことを受けて、その再観測による CO_2 蓄積速度の評価が始まっていることも印象的だった。Richard Feely (米・NOAA/PMEL) ほかや石井雅男 (日・気象研究所) ほかによる北太平洋での再観測、村田昌彦 (日・海洋研究開発機構) ほかや Richard Wanninkhof (米・NOAA/AOML) ほかによる大西洋での再観測、Claire Monaco (仏・LOCEAN/IPSL) ほかによるインド洋での再観測の結果は、 CO_2 の蓄積が海洋表面から内部にかけて着実に進んでいることを示している。Christopher Sabine (米・NOAA/PMEL) が指摘したように、このような

CO₂蓄積速度の評価を全球規模に広げ、その時間変化を解明することが、今後の重要課題であろう。

さらに、CO₂蓄積に伴う海水の酸性化が、炭酸塩の殻を持つサンゴ、円石藻、有孔虫などの海洋生物の生存を脅かし、海洋生態系に深刻な打撃を与えないか、危惧が高まっていることを印象づけたのも、今回の会議の特徴であった。海洋が人類の排出したCO₂を多く吸収し、地球温暖化を遅らせる役割を果たしていることは、もはや疑いようがない。しかし、海洋が今後どれほどのCO₂を吸収できるか、そして海洋生態系がどこまでそれに耐えられるかについて解答を得ることが、今求められていると言えよう。

(遠嶋康德, 石井雅男)



第2図 会議の一風景。

2.3 Land Use and the Terrestrial Carbon Cycle セッション

陸域炭素収支は、グローバルなCO₂収支において最も大きな不確定性が残された部分である。陸域には自然生態系だけでなく農業生態系や人間社会の活動が混在しており、今回の会議でも多様な切り口の研究発表が行われた。ポスターセッションでは約90件の発表が行われたが、タワーを用いたフラックス測定について日本の研究者による発表が目立った点が印象的であった。

口頭発表では、陸域炭素に関して第一線で活躍している研究者が揃っており、稀に見るほどの充実ぶりだった。George Hurtt (米・New Hampshire 大学) ほか、James Randerson (米・California 州立大学 Irvine) ほか、Sergey Venevsky (露・Obukhov 大気物理研究所) ほかは、人為的な土地利用変化や森林火災といった不連続なイベントがもたらす影響について、陸域生態系だけでなく大気組成や気候変化の観点からも論じた。これらのみならずその他の発表も含めて印象的であったことは、特に広域にわたる陸域炭素収支の研究においては、数値モデルがもはや必須のツールとなっていることである。観測データの詳細な解析を基にして、陸域炭素循環について深い洞察と解釈を与えている発表もあった。例えば大谷義一 (日・森林総合研究所) らは、日本国内のフラックス観測サイトにおけるデータを比較し、異なるタイプの森林でのCO₂交換の特徴を示した。また、David Turner (米・Oregon 州立大学) による炭素収支マッピングなど、衛星リモートセンシングによって地表状態の変化を広域で連続的にモニタリングすることが可能となっている

ことも紹介された。その一方で、大気や海洋の分野の研究発表と比較すると、陸域炭素循環の研究に欠けている点は、議論のベースラインとなる観測事実 (大気中のバックグラウンド濃度測定や海洋CO₂交換マッピングに相当するもの) が十分に整えられていないということだと感じた。いみじくも Hanqin Tian (米・Auburn 大学) は、北米と欧州の研究者がそれぞれの地域を主要な炭素シンクであると主張している現状を揶揄したが、同様な矛盾は陸域炭素循環の多くの側面で見つかるだろう。その意味で、「Impacts of High CO₂ on Land and Ocean Ecosystem, Managing the Carbon Cycle」セッションにおいて Yiqi Luo (米・Oklahoma 大学) が例示したように、メタ分析によって現状を概観する作業は、陸域炭素収支に関する議論の方向性を定めていく上で極めて重要であると感じた。

(伊藤昭彦)

2.4 Carbon Cycle Response to Environmental Change セッション

このセッションでは、気候変動に伴って炭素循環にどのような影響が及ぶかということが扱われ、観測データの解析やモデルシミュレーションを基にして、11件の口頭発表と50件のポスター発表が行われた。最も印象に残ったのは、Jean Barnola (仏・LGGE) ほかによる氷床コア解析についての発表である。これまでにも南極ポストークコアを解析することによって、過去42万年にわたる気候変動とCO₂やCH₄などの温室効果気体の変動との関係が明らかにされているが、今回の発表では南極ドームCコアを解析することにより、さらに過去65万年まで遡ったデータが公表され

た。すなわち、42～40万年前の間氷期（MIS11）を境にして気候変動の様子が大きく変わっているが、期間全体を通してCO₂とCH₄は気温に同期した変化を示していること、42万年より前の間氷期のCO₂とCH₄濃度はそれ以降の間氷期の濃度に比べて低かったこと、一方氷期最寒期のCO₂濃度は全期間を通して同じ値（約180 ppm）になっていたことが明らかにされた。Peter Koeller（独・Alfred Wegener 極地海洋研究所）は、BICYCLE と名付けたボックスモデルを用いて更新世後期の炭素循環をシミュレートし、Barnola らが明らかにした過去42万年より前のCO₂濃度変動を予測することに成功したとの報告を行った。次に印象に残った発表は、将来の炭素循環を予測するためのいくつかの基礎研究である。Inez Fung（米・California 州立大学 Berkeley）ほかは、1960年度以降温暖化が進行していることと、ハワイマウナロアで観測されたCO₂濃度の季節変化振幅が1960年代から1980年代にかけて拡大傾向にあったが、1990年代以降は逆に縮小していることに着目し、炭素循環の短期変動について解析を行った。それによると、1990年代以前には温暖化に伴って北半球の陸上生物圏の光合成活動が活発化し、その結果CO₂濃度の季節変化振幅が増大したが、1998～2003年に起こった北米大陸の旱魃によって陸上生物圏の光合成活動が弱まり、生物圏によるCO₂吸収が大幅に減少したと報告した。また、長期的な気候変動と炭素循環の変動をモデルによりシミュレートした結果も示し、化石燃料消費によるCO₂放出に規制をかけないと、陸上生物圏や海洋によるCO₂吸収能力が低下し、現在49%程度である化石燃料起源CO₂の大気への残存率が今後大きくなる可能性を指摘した。炭素循環の短期変動については、Philippe Ciais（仏・LSCE/CNRS）らも2003年にヨーロッパを襲った熱波による影響について詳細な解析を行い、興味深い結果を報告した。今後の温暖化によって熱帯域や高緯度域では生物圏がCO₂の放出源になると予測されているが、このような熱波の回数が増加することによって、中緯度域の生物圏もCO₂の放出源になる可能性があることと彼らは警告した。その他、大気および海洋の3次元モデルと陸上生物圏モデルを結合させた大規模な地球システムモデルの開発もいくつかの研究グループによって進められており、将来の気候変動に伴う炭素循環の変化に関する研究が本格化していることも印象に残った。

（青木周司）

2.5 Impacts of High CO₂ on Land and Ocean Ecosystem, Managing the Carbon Cycle セッション

上でも述べたように、今回の会議の特徴の1つは、人間活動によるCO₂の放出とその対策が新たな分野として加わったことである。この会議はもともと大気中のCO₂濃度を観測していた研究者が始めたものであり、その増加の原因は言うまでもなく人間活動によるものであるから、当然の成り行きとも言える。

CO₂増加への対策に関連して、どのような排出シナリオを描くかという論争がある。A1（経済・技術発展型）とかB2（循環社会）などと記号化されたシナリオに基づいて、気候モデルによって今後どのような気候変化が起こるかについて予測がなされている。米国を中心に、新たなシナリオとして、「急激な経済発展によってCO₂を大量に発生しても、その結果として技術発展とそれを社会的に適用しうる経済力が獲得できるようであれば、その後大幅な排出削減ができる」という提案がある。その場合、徐々にCO₂排出が増えていく場合と比べ、温暖化はどのように進展するか、また、森林や海洋への吸収がどのようになるかという疑問に答えようという試みがなされている。Chris Jones（英・Hadley Center）ほかは、気温上昇や森林吸収の飽和というフィードバックを考慮すると、安定化目標550 ppmまでに放出できるCO₂量は、従来の値に比べ3割小さくなるという報告をした。このような研究は、炭素循環研究が政策決定に直接貢献するよい例であると言える。

CO₂の排出削減策は、省エネルギー、新エネルギー、炭素隔離などに分類される。炭素隔離としては、森林による吸収、海洋への注入、地下への注入などが考えられる。海洋へのCO₂注入による大気中CO₂濃度の安定化に関して、Peter Haugan（ノルウェイ・Bergen 大学）ほかは、炭素循環気候モデルを用いてシミュレーションを行い、その結果について報告した。石油や天然ガスの採掘跡への注入、利用価値のない石炭層に吸着させる方法、帯水層への注入など、地質隔離は最もコストが少なく、容量的にも大きいと言われている。すでに石油採掘時にCO₂を注入し、通常であると圧力が低下して廃油田となることを最後まで採掘しつくす事により、炭素隔離と生産増大を併せて実現している例もある。これらについて、Lynn Orr（米・Stanford 大学）は、米国におけるそれぞれの容量や安全性に関して報告を行った。この方法は、様々な心配があり、

次世代に負の遺産を残すという道義的な疑念はあるが、もし大幅なCO₂排出削減が必要ならば一つの選択ではあろう。

炭素循環の研究は、全球的な議論からスタートし、その変動を理解するために領域的な現象に細密化し、さらに様々な場でのプロセスを研究するという発展を示している。これらの研究において確実に成果を上げるためには、多くの研究者の参画と大きな経費を必要とする。それについて人々の支持を得るためにも、また気候の激変を避けるためには何をすれば良いかという人々の疑問に答えるためにも、このセッションの主題のように、技術（工学）・農業・社会科学など様々な分野との連携が必要になっている。（井上 元）

略語一覧

NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration

NOAA/CMDL : National Oceanic and Atmospheric

Administration/Climate Monitoring and Diagnostics Laboratory

NOAA/ESRL/GMD : National Oceanic and Atmospheric Administration/Earth System Research Laboratory/Global Monitoring Division

LSCE/CNRS : Le Laboratoire des Sciences du Climat et l' Environnement/Centre National de la Recherche Scientifique

TRANSCOM : Atmospheric Tracer Transport Model Intercomparison Project

LOCEAN/IPSL : Laboratoire d' Oceanographie et de Climatologie par l' Experimentation et l' Analyse Numerique/Institut Pierre Simon Laplace

WOCE : World Ocean Circulation Experiment

NOAA/PMEL : National Oceanic and Atmospheric Administration/Pacific Marine Environmental Laboratory

LGGE : Laboratoire de Glaciologie et Geophysique de l' Environment

MIS11 : Marine Isotope Stage 11