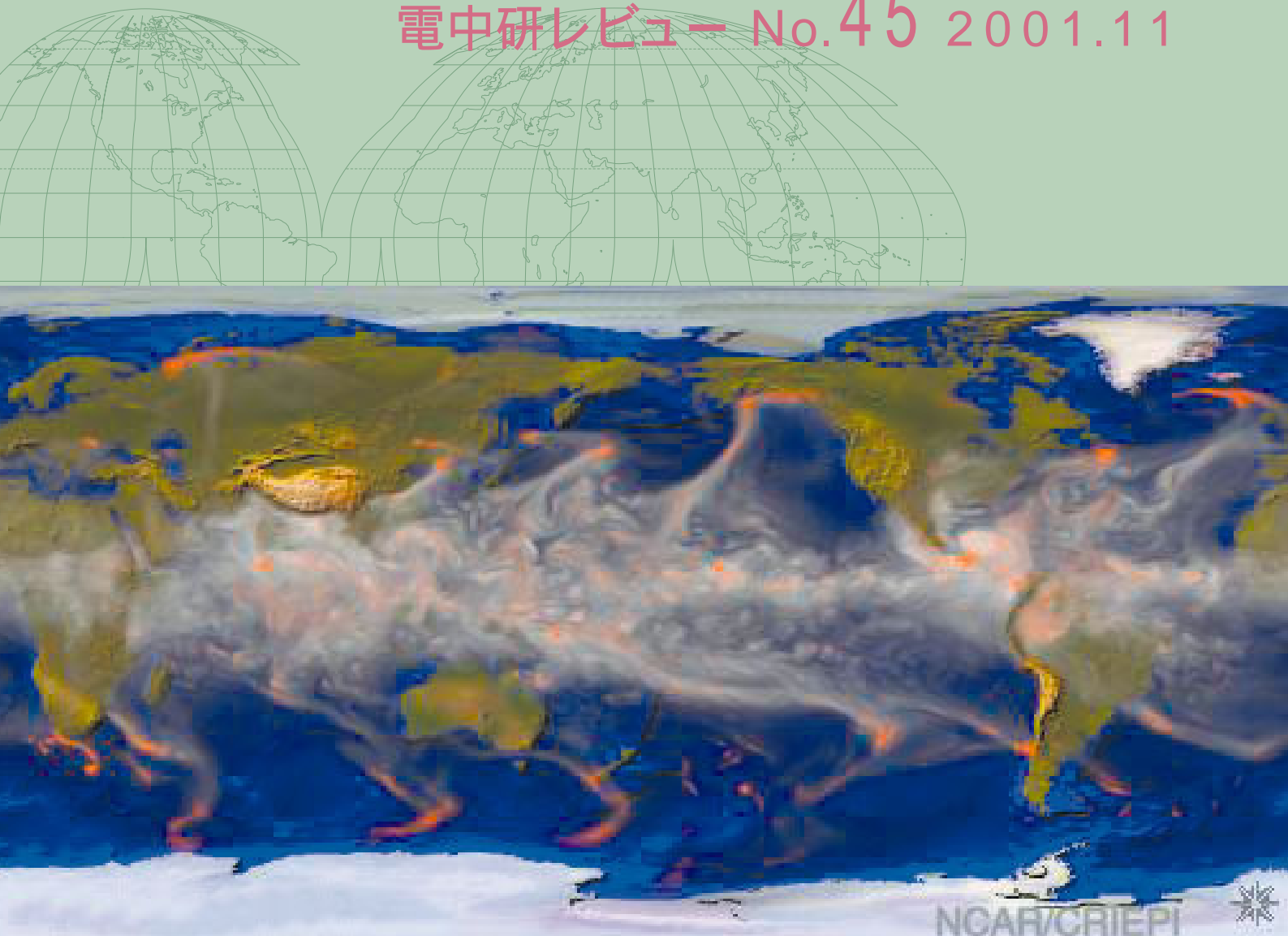


DENCHUKEN REVIEW

地球温暖化の解明と抑制

電中研レビュー No.45 2001.11



NGAR/CRIEPI



財団法人 電力中央研究所

編集担当 狛江研究所 研究調査担当 西宮 昌
我孫子研究所 環境科学 部長 丸山 康樹

巻頭言	米国大気研究センター 笠原 彰	2
「地球温暖化研究」のあゆみ		4
はじめに	理事 我孫子研究所長 加藤 正進	6
第1章 地球温暖化問題の変遷と電力中央研究所の取り組み		7
1 - 1 国際・国内動向		9
コラム1：温暖化防止国際会議（COP）への参加		13
コラム2：IPCC第三次評価書の概要		14
1 - 2 当研究所の取り組み・スタンス		17
第2章 地球温暖化現象の解明に向けて		21
2 - 1 地球観測衛星による温室効果気体の観測		23
コラム3：人工衛星による海洋環境の観測		26
2 - 2 海洋生態系を介した炭素循環機構の解明		27
2 - 3 まとめ		30
第3章 温暖化はどのように予測するか		31
3 - 1 全球規模の気候変化		34
コラム4：CO ₂ 排出量から大気中濃度の推定		38
コラム5：ACACIAプロジェクト『21世紀の気候変化予測』		39
3 - 2 地域規模の気候変化		40
コラム6：エアロゾルの気候影響		45
コラム7：地球温暖化のエネルギー分野への影響		46
3 - 3 地域海洋の変化		47
3 - 4 台風の変化		49
コラム8：長期再解析プロジェクト		51
3 - 5 まとめ		52
第4章 今後の温暖化抑制対策に向けて		53
4 - 1 温暖化抑制のための制度・政策		56

コラム9：電気事業の抑制対策	61
コラム10：地球温暖化問題に関する政策科学研究	62
4 - 2 CO ₂ 排出に関する発電方式のLCA	63
4 - 3 排ガスCO ₂ 回収・海洋隔離・地中処分技術の評価	65
4 - 4 CO ₂ 回収型火力発電システムの評価	72
コラム11：CO ₂ ヒートポンプの基礎研究と実用化	75
4 - 5 生物・バイオ技術によるCO ₂ 固定・資源化技術の評価	76
コラム12：人工衛星による葉面積の計測	80
4 - 6 まとめ	81
第5章 地球温暖化研究の今後の展開	83
5 - 1 当所の使命	85
5 - 2 今後の世界の動向	85
5 - 3 当所における温暖化研究の展開	86
おわりに===== 理事 狛江研究所長 福島 充男	87
引用文献・資料集	89

表紙絵：

電力中央研究所（CRIEPI）と米国大気研究センター（NCAR）の共同研究で実施（1999年）した全球大気モデルCCM3（空間解像度約80km）による水蒸気（白い部分）と降雨（オレンジ）の全球分布の計算結果（現状気候）。

〔NCAR提供〕

巻頭言



地球温暖化問題の解決は21世紀の大きな課題です。この問題は社会に不可欠な電力事業と関係が深いので、電力中央研究所（電中研）が、この問題の理解に努力され、適切な対策をされようとする事は電力の消費者にとって望ましいことです。

天気の変動を研究する気象学は昔からあったわけですが、量的な天気予報ができるように近代化したのは、わずかここ50年にしか過ぎません。その飛躍的な進歩が出来たのは電子計算機の出現と地球規模の上層観測網、特に人工衛星による気象監視、の整備によるものです。南半球も含めた地球上層天気図が日々描けるようになったのは1970年に入って

ですから、地球の気候がどう変化するかということの研究できるようになったのは最近のことです。この間、高速計算機を用いて大気モデルを初期条件から数値積分することによって、天気の数値予報が成功したわけですが、数値計算法も進歩するに従って、長期積分もできるようになりました。また同じ方式を海洋モデルに用いて、大気と海洋のモデルを結合することができるようになり、その結合モデルを10年、100年、1000年と走らせることによって、地球の気候の長期変動の原因が自然のものであるか、または環境の人為的な変化によるものであるかを調べることの出来る道が開かれたのです。

電中研ではこうした研究事情にもとづいて、またそうした気候モデルの長期積分には莫大な計算能力を必要とすることから、すでに1980年後半に世界のエネルギー関連機関と共に、選ばれた研究者達に専用の計算機を提供して研究させるという国際共同研究（MECCA）プロジェクトを発足させました。その際私は研究提案審査会の一員として参加し、電中研の方々が アジア地区、特に日本の気候に及ぼす温暖化の影響について、東アジア地区を対象として局地気候モデルを用いた研究を計画されていることを知りました。その研究対象の一つとして台風活動に及ぼす影響に関心のあるこ

とをお聞きしてから、私の所属する大気研究センター（NCAR）で開発された地域及び全球気候モデルを用いて共同研究を始める段取りが進みました。過去約十年間に電中研は7名の研究員を長くは2年にわたって次々とNCARに派遣され、地域大気モデルの開発とその応用、全球大気モデルによる台風活動、海洋モデルの開発などから気候モデルを異なった計算機種上で如何に効率良く走らせることができるかなど、温暖化問題の解決に必要な研究陣容の強化をされました。その間の特記すべきことはNCAR、NECおよびSONYとの協力で大気海洋結合モデル（NCAR/CSM）による米国ではじめての全球温暖化予測実験をおこなったことで、共同研究が相互にとって有意義である好例といえましょう。

こうした経験を経て、電中研の温暖化研究の陣容も確立し、電中研自体に富士通VPP5000のスパコンも導入され、気候モデルによる研究だけでなく、地球環境の観測、データの解析、温暖化抑制のための技術の開発から対策評価にいたる迄、名実ともに温暖化問題に本格的な研究体制が出来つつあることはご同慶にたえません。

そこでこの際、今までの研究成果をレビューして、今後の方針を立てられることは、“何のために”電中研が“何故やるのか”の認識を各人が自覚するためにも大切なことです。こうして現在迄を振りかえってみますと、学問的にもまた社会に対する貢献という意味でも、今後益々新しい成果が電中研から出るであろうという期待に興奮の念をおぼえます。

米国大気研究センター

笠原 彰

プロフィール

1926年東京生まれ。1948年に東京大学理学部地球物理学科を卒業、54年に台風の研究で理学博士号を取得。同年米国に渡り、テキサスA&M大学海洋気象学部、シカゴ大学気象学部、ニューヨーク大学クーラン数理研究所の研究員を経て、63年以降、NCARで上席研究員の資格で96年引退後もNCARで研究活動を継続。研究課題は積雲対流、台風の発生と移動といった小・中規模な現象から、大気大循環といった全球規模の運動の解明にわたり、数値予報、気候モデルの開発、およびその研究指導にも経験が深い。

1996年に、わが国の気象学の向上に寄与した方を顕彰する「藤原賞」を受けている。

電中研『地球温暖化研究』のあゆみ

西 暦	世 界 の 状 況	日 本 の 状 況	当 所 の 状 況
1860 年代	・ ティンダール、大気組成変化による気候変動を指摘		
1896	・ アレニウス、CO ₂ 濃度が倍増時の気温上昇を計算		
1938	・ キャレンダー、CO ₂ 濃度上昇を観測		
1958	・ 米国、ハワイ・マウナロア山で精密な観測を開始		
1977	・ 地球生化学的炭素循環に関するSCOPEワークショップ(ドイツ)開催		
1979	・ WMO、世界気候計画開始		
1981	・ 米国DOE「CO ₂ 影響研究と評価プログラム」第一次研究プログラム開始		
1983 (S58)			・ 調査報告書「大気中のCO ₂ 濃度増加とその環境への影響」取りまとめ
1985 (S60)	・ フィラハ(オーストリア)で科学的知見の整理のための国際会議		
1987 (S62)	・ フィラハ(オーストリア)で国際会議開催「影響評価のためのワーク・ショップ」 ・ ベラジオ(イタリア)で国際会議開催「政策形成のためのワーク・ショップ」 ・ 米国議会「地球気候保護法」制定		・ 地球温暖化の研究計画策定(環境総合推進室) ・ スパコン/富士通VP50(～93)
1988 (S63)	・ トロント(カナダ)の対策提言国際会議でCO ₂ の20%削減を提言 ・ 米国上院で「地球環境保全法案」の提出 ・ ジュネーブ(スイス)で「気候変動に関する政府間パネル(IPCC)」開催	・ 環境庁、「地球温暖化問題に関する検討会」設置、第一回中間取りまとめ公表 ・ IPCCに対応し、上記検討会を強化	・ 国の人工衛星による地球環境観測プロジェクト(IMG)に参画(～99) ・ 気候モデル評価のための国際共研MECCA発足(～95) ・ CO ₂ 海洋貯留研究に着手
1989 (S64/ H01)	・ オタワ(カナダ)で温暖化対策の法制面に関する専門家会合開催。条約等の提言 ・ ハーグ(オランダ)で「環境首脳会議」開催。特別機関の設置や条約等を提言するハーグ宣言を採択 ・ 国連環境計画(UNEP)管理理事会で気候変動枠組み条約UNFCCCの外交交渉等を決議 ・ ノルドヴェイク(オランダ)で温室効果ガス排出量の安定化させることの必要性に関するノルドヴェイク宣言を採択	・ 環境庁、上記検討会分科会で第一回中間取りまとめ公表 ・ 地球環境保全に関する東京会議開催	・ 広域環境研究室発足
1990 (H02)	・ IPCC第一次評価報告書FARを取りまとめ ・ UNFCCC準備会合 ・ 世界気候会議開催。地球温暖化を巡る一連の国際的議論を総括	・ 環境庁に地球環境部設置 ・ 地球環境保全に関する関係閣僚会議が「地球温暖化防止行動計画」を決定	・ EPRI共研「温暖化の電気事業への影響」開始(90～95) ・ 火力排ガス中N ₂ O濃度調査結果の取りまとめ ・ 狛江研に化学吸収式CO ₂ 回収実験設備設置、模擬排ガスによる実験開始(～94) ・ CO ₂ の深海底貯留実験実施(～96) ・ 海洋中の炭素循環機構に関するカナダ海洋研との共研開始(～02) ・ イベントツリー方式による温暖化影響の定性的評価実施
1991 (H03)	・ UNFCCC交渉会合で条約の政府間交渉実施	・ 東京大学気候システム研究センター設立	・ 「CO ₂ と海洋の関わり」第1回国際ワークショップ開催[第2回/93]

西 暦	世 界 の 状 況	日 本 の 状 況	当 所 の 状 況
1991 (H03)		<ul style="list-style-type: none"> ・資源エネルギー庁、CO₂海洋処分研究の本格開始(～98) ・経団連、「経団連地球環境憲章」を策定 	
1992 (H04)	<ul style="list-style-type: none"> ・IPCC FAR補遺取りまとめ ・UNFCCC交渉会議で条約を採択 ・環境と開発に関する国連会議で155ヶ国が条約に署名 	<ul style="list-style-type: none"> ・環境庁「地球温暖化対策技術評価検討会」報告書を取りまとめ公表 	<ul style="list-style-type: none"> ・気候研究に関するNCAR共研開始(～05) ・電中研レビュー『地球温暖化に挑む』発行
1993 (H05)		<ul style="list-style-type: none"> ・気候変動枠組み条約に加入 ・環境基本法を制定 	<ul style="list-style-type: none"> ・スパコン/日立S3800(～00) ・微細藻類によるCO₂固定化技術研究開始(～98) ・有識者会議発足(～00) ・トリレンマ・シンポジウム開始(～00) ・JAMSTEC共同研究「海洋中炭素循環」を開始(～95)
1994 (H6)	<ul style="list-style-type: none"> ・UNFCCC発効 	<ul style="list-style-type: none"> ・環境基本計画を閣議決定 	<ul style="list-style-type: none"> ・地域気候・台風予測モデルの開発に着手
1995 (H7)	<ul style="list-style-type: none"> ・UNFCCC COP1開催(ベルリン) ・「ベルリン・マンデート」採択 ・IPCC SAR採択 	<ul style="list-style-type: none"> ・CO₂回収・処分技術に関する電力共同研究開始(～00) 	<ul style="list-style-type: none"> ・CO₂固定バイオリアクター基礎実験設備設置、実験開始(～96)
1996 (H8)	<ul style="list-style-type: none"> ・COP2(ジュネーブ) 	<ul style="list-style-type: none"> ・航空・電子等技術審議会地球科学技術部会が地球変動予測計画を提言 ・「電気事業における環境行動計画」策定 	<ul style="list-style-type: none"> ・ADEOS衛星(IMG搭載)打上げ(～97)
1997 (H9)	<ul style="list-style-type: none"> ・COP3(京都)で「京都議定書」採択 	<ul style="list-style-type: none"> ・地球温暖化対策推進本部の設置 ・通産省(NEDO)、CO₂海洋注入実験に関する3国協定調印(日・ノルウェー・米) ・科技厅「地球フロンティア計画」開始 	<ul style="list-style-type: none"> ・気候変動影響に関する国際共研ACACIA発足(97～00) ・CO₂固定プロトタイプ・バイオリアクターの開発に着手(～99) ・初めて全球温暖化予測(125年間)を実施(NEC SX-4)
1998 (H10)	<ul style="list-style-type: none"> ・COP4(ブエノスアイレス)で「ブエノスアイレス行動計画」採択 	<ul style="list-style-type: none"> ・地球温暖化対策推進大綱の決定 ・「電気事業における環境行動計画」第1回見直し：CO₂排出原単位は0.370kg/kWh 	<ul style="list-style-type: none"> ・科技厅振興調整費研究「気候モデル計算技術高度化」の開始(～02) ・NEC共同研究「気候モデル計算技術」を開始(～00) ・RITE共同研究「CO₂海洋貯留」を開始(～02) ・振興調整費総合研究「次世代気候モデル開発(主査：東大/住)」に参加(～02)
1999 (H11)	<ul style="list-style-type: none"> ・COP5(ボン) 	<ul style="list-style-type: none"> ・地球温暖化対策の推進に関する法律の施行 ・エネルギーの使用合理化に関する法律(省エネ法)改正 ・「電気事業における環境行動計画」第2回見直し：CO₂排出原単位は0.360kg/kWh 	<ul style="list-style-type: none"> ・ACACIA21世紀プロジェクト[最新気候モデル(NCAR-CSM)による将来予測]実施
2000 (H12)	<ul style="list-style-type: none"> ・COP6(ハーグ)で「京都議定書」の合意に至らず、審議持ち越し 	<ul style="list-style-type: none"> ・「電気事業における環境行動計画」第3回見直し：CO₂排出原単位は0.370kg/kWh ・排ガスCO₂回収・処分技術のFS終了 	<ul style="list-style-type: none"> ・スパコン/富士通VPP5000(～現在) ・CO₂海洋注入実験に関する3国協定に正式参加(～02) ・森林における炭素収支素過程の解明研究に着手(～05) ・JAMSTEC共同研究「海洋での熱水活動」を開始(～02)
2001 (H13)	<ul style="list-style-type: none"> ・IPCC TARを発表 ・COP6再開会合(ボン)「ボン合意」採択 ・COP7(マラケシュ) 	<ul style="list-style-type: none"> ・文科省地球シミュレータGS40設置開始(運用2002年前期) ・「電気事業における環境行動計画」第4回見直し：CO₂排出原単位は0.371kg/kWh 	<ul style="list-style-type: none"> ・気象データ長期再解析に関する共研(気象庁・気象研)開始(～05)

はじめに

理事 我孫子研究所長 加藤 正進



大量生産・大量消費・大量廃棄に特徴付けられる先進諸国を中心とした物質文明は、このままでは遠からず限界を迎え、地球環境問題が深刻になる可能性がある。互いにトレードオフの関係にある三つのレンマ、すなわち、「経済発展」、「エネルギー・資源」、「地球環境」が複雑に絡み合うこの問題は、21世紀において人類が克服すべき最大の課題であり、電力中央研究所はトリレンマ問題と名づけ、1992年、その解決のため、各界の専門家の参加を得て有識者会議を組織した。ほぼ同じ時期から、当研究所では、研究員を米国大気研究センターNCARに派

遣し、気候変化予測のための共同研究を本格的に開始した。詳細は巻頭言にある通りである。

地球温暖化問題はトリレンマ問題であり、この問題の解決に向けて、当研究所は極めて広範な取り組みを進めている。本レビューでは、およそIPCCの第二次評価書（1995年）から第三次評価書（2001年）までの約5年間における研究成果として、第2章で観測、第3章で予測に関する研究を紹介し、さらに、環境と経済に関わる研究として、第4章前半で制度、第4章後半でエネルギー対策技術について紹介する。これらは、経済社会研究所、狛江研究所、我孫子研究所、横須賀研究所の研究力を結集して得た成果であり、地球温暖化研究は、まさしく電力中央研究所の総合力を發揮して取り組んでいる研究である。

21世紀に入って、米国ブッシュ大統領は、京都議定書の批准に反対しており、温暖化防止が困難な課題であることが改めて浮き彫りになった。しかしながら、温暖化問題の根本原因である大気中CO₂濃度を安定化するには、100年以上の長期的な排出削減が不可欠である。その意味で、温暖化問題への取り組みは始まったばかりである。本レビューが今後の温暖化防止のため、いささかなりともお役に立てれば幸いである。

第 1 章

1

地球温暖化問題の変遷と
電力中央研究所の取り組み

第1章 地球温暖化問題の変遷と当研究所の取り組み 目次

狛江研究所 研究調査担当 上席研究員 西宮 昌
我孫子研究所 環境科学部長 上席研究員 丸山 康樹
狛江研究所 微量物質課題推進担当 上席研究員 朝倉 一雄
研究企画部 上席研究員 研究参事 新田 義孝

1 - 1 国際・国内動向	9
コラム1：温暖化防止国際会議（COP）への参加	13
コラム2：IPCC第三次評価書の概要	14
1 - 2 当研究所の取り組み・スタンス	17



西宮 昌（1968年入所）
地球温暖化課題推進担当(平成6～12年度)。
MECCAやACACIAなど気候変動研究にかかわる国際共同研究プログラムを推進。現在、温暖化条件下におけるアジア・大洋州の脆弱性評価や電力技術移転方策の調査を実施中。



丸山 康樹（1976年入所）
1990年の初めから、温暖化予測研究に従事。一時、経営調査室において、トリレンマ問題の解決のため有識者会議の運営を分担。その後、米国NCARとの共同研究を開始し、CO₂排出シナリオと全球温暖化予測を主に分担。



朝倉 一雄（1971年入所）
火力発電所の排ガス拡散実態調査および排ガス拡散予測手法、石炭火力発電所微量物質の環境影響評価など発電所の大気環境影響評価に係わる研究に従事、企画部で環境研究全般にわたる総合推進業務を担当、現在、微量物質研究課題の総合推進を担当。



新田 義孝（1970年入所）
入所以来20年間、電力ケーブルなどを対象に電気絶縁材料の劣化を研究。その後、石炭ガスか複合発電乾式脱硫方式の開発などを手がけ、最近の15年間は地球環境とエネルギー問題で脱硫石膏によるアルカリ土壌改良などプロジェクトの発掘を手がけている。

1 - 1 国際・国内動向

1-1-1 環境問題の広がり

仁徳天皇作と伝えられている歌『高き屋にのぼりて見れば煙立つ民の竈賑わひにけり』のように、かつては、工場から大量に排出される煙は、経済の繁栄の象徴であった。産業革命以降、我々が営々と築き上げてきた近代工業文明は、人類を飢餓や病苦から解放する一方で、世界人口や人間活動の規模を爆発的に拡大させた。その結果、今では、人間活動による環境への過剰な負荷が、地球温暖化問題に代表されるように、人間社会の健全な維持・発展を脅かす地球環境の破壊という局面を迎えるまでになっている。

人間活動の結果として生じる今日の環境問題は、三つの大きな広がりを持っている。第一は、特定の生産・生活活動から生活・生産・都市活動へ、そして社会・経済の仕組みを経て人間の生存そのものに係る原因となる行為の広がりであり、第二は、その影響が現代のみならず、次世代、将来世代にも及ぶ時間的広がりであり、第三は、局所から地域、地球規模への空間的広がりである。

すなわち、環境問題は、従来の大気汚染や水質汚濁といった地域限定の局所的ないわゆる「産業・都市公害」問題から、石炭や石油など化石燃料の燃焼によって排出される二酸化硫黄や窒素酸化物が大気中での複雑な物理・化学過程を経て発生源から数1,000km離れた地域に酸性降下物として降り注ぐ「酸性雨」、フロンなどの人工化学物質が太陽からの有害な紫外線から地球上の生態系を保護する成層圏のオゾン層を破壊する「オゾン層破壊」、そして大気中の増加し続ける温室効果ガスが地球の気候を変化させる「地球温暖化」等への地球規模の環境変化 - グローバル・チェンジ - の問題に広がったのである。

1-1-2 地球環境問題への警鐘と国際的関心の高まり

人類の存続に関わる問題について研究・提言を行う学識者による国際的な民間団体「ローマクラブ」は、1972年の「国連人間環境会議（ストックホルム会議）」でレポー

ト「成長の限界」を世界に向けて発表し、「成長は地球規模の環境制約により、早晚限界に達する」と警鐘を鳴らした。このまま人口増加や環境悪化が続けば、100年以内に地球の成長が限界に達する、環境は倍々で悪化するが、人々の認識の癖により有効な対策を打てない、結局、地球規模の危機に突然襲われることになる、というものである。この警鐘は、「持続可能な開発」を目指して、さまざまな国際的取り組みが始められるきっかけとなった。

米国カーター大統領は、1980年に、彼のブレーンを総動員して取り纏めた「西暦2000年の地球」を公表した。その中で、世界各国が資源の枯渇と環境悪化の未然防止行動を取らない限り、20世紀末までに、地球の生命維持力の低下、急速な人口増大、耕地・漁業資源・森林・動植物種の減少、地球の大気や水の悪化、が生じると警告し、「地球環境問題」の概念が確立した。

わが国でも昭和55年（1980年）に環境庁長官の私的懇談会「地球規模の環境問題に関する懇談会」が設置され、地球温暖化問題を始めとする地球環境問題について様々な議論を行い、報告書にまとめた。昭和57年（82年）の報告に基づく提案は、国連環境計画（UNEP）管理理事会を通じて、「環境と開発に関する世界委員会（WCED）」の設立（1982年）に繋がった。

1982年に発表されたWCEDの報告書「Our Common Future（我ら共通の未来）」の主題は、『持続可能な開発（将来の世代のニーズを満たす能力を損なうことなく、今日の世代のニーズを満たすような開発）』であり、狭義の環境問題を超えて、食糧安全保障、エネルギーから、人口問題、国際経済、安全保障問題まで、広範なテーマに及んでいる。

世界的な地球環境問題への高まりを背景に、ストックホルムの「国連人間環境会議」から20年を経た1992年にブラジルのリオデジャネイロで開かれた「環境と開発に関する世界委員会（別名「地球サミット」）」には、国連に加盟するほぼ全ての国が参加し、温暖化防止のための気候変動枠組み条約や生物多様性条約等の枠組み作りが合意された。『持続可能な発展』の基本理念の下に、地球環境保全の憲法ともいわれる「環境と開発に関するリオ宣言」やこれを実現するための世界行動指針「Agenda 21」が採択された。

一方、20年前の国連環境会議では、「公害」を経済成長の証として、“We Want pollution（我々は公害が欲しい）”を主張する途上国もあったが、地球サミットではそのような考えは形を潜め、『持続可能な発展』の考え方の下に、「開発途上国の環境と開発」がクローズアップされるようになった。

1-1-3 地球温暖化問題に関する国際的取り組み

地球温暖化問題が急速に国際政治課題として浮上したのは、科学的知見の整理、評価を行うために85年にオーストリアのフィラハで開かれた地球温暖化に関する科学者による初めての世界会議が切っ掛けになっている。その後、フィラハ会議で整理された科学的知見を基に、87年にはイタリアのベラジオで地球温暖化防止策について初めての行政レベルの会議が持たれた。88年のカナダのトロントで開かれた会合では、科学者と政府関係者が一同に会し、「2005年までにCO₂排出量を20%削減する」という具体的な数値目標が提案された。

また、88年には、世界気象機関（WMO）と国連環境計画（UNEP）が、世界の科学者で構成する「気候変動に関する政府間パネル（IPCC：Intergovernmental Panel on Climate Change）」を設立した。

IPCCは、気候変動に関する発表された最新の科学的知見を広く調査・評価し、各国政府に助言・勧告を行うことを目的に、観測事実・予測、影響・適応策・対応策、社会的経済的側面の三つので構成される作業部会で、地球温暖化の知見の収集と整理を行い、評価報告書として取り纏めた。これまで、90年に第一次（FAR）、95年に第二次（SAR）、2001年には第三次（TAR）の各評価報告書が発表された。第三次報告書（TAR）は、気候変動予測を扱う第1作業部会報告書、温暖化の影響・適応を扱う第2作業部会報告書、温暖化への対策・政治経済的側面の評価を扱う第3作業部会報告書および統合報告書の4部構成で、人間活動による気候変化が既に検知されるまでになっており、温暖化の影響が顕在化していることを明確に指摘した。

今後、国際政治の場での「地球温暖化問題」への取り組みは、IPCCによる科学的評価がベースになって進展することになる。

89年にオランダのノルドヴェイクで開かれた「大気汚染と気候変動に関する環境閣僚会議」では温室効果ガスの排出量を「安定化」させる必要性についての認識を促すためのノルドヴェイク宣言が採択され、90年の第二回世界気象会議では、今後の国際的取り組みを方向付けた、各国が協力して地球温暖化防止に取り組むべきことに合意する閣僚宣言が出された。

これを受けて、90年には国連内に「気候変動に関する枠組み条約交渉会議」が設置され、6回に及ぶ激しい議論の結果、92年（平成4年）5月、第5回気候変動に関する政府間交渉で温暖化防止のための「国連気候変動枠組み条約UNFCCC」が採択された。92年6月にリオの地球サミットで各国の署名が始まり、ECを含む154ヶ国が署名し、1994年（平成6年）3月に発効した。

枠組み条約の究極の目標は、「温室効果ガスの濃度を『生態系が気候変化に自然に適応し、食糧の生産が脅かされず、かつ、経済活動が持続可能な様態で進行することができるような期間内に』安定化させること（第2条）」で、IPCC SARによれば、CO₂濃度を現在のレベルに安定化させるには人為的排出量の50～70%を直ちに削減する必要があること、またCO₂濃度を何らかの濃度レベルに安定化させる場合でも排出量を90年レベルより相当量削減する必要があることを指摘している。

参加各国は、2000年までに温室効果ガスの排出量を自主的に1990年レベルに安定化させることを申し合わせた。法的拘束力を課さなかったために、約束を実行できた国はなかった。そのため、各締約国、特に先進国の排出削減計画や実施状況の検証、新たな仕組みなど、「気候変動枠組み条約」の具体的方策を話し合うための最高意思決定機関として「the Conference of the Parties（締約国会議：略称COP）」が設置された。

1995年のCOP1（第1回会合）で2000年以降の取り組みの検討課題や手順を定めた「ベルリン・マンデート」が、97年のCOP3で「京都議定書」がそれぞれ採択された。

「京都議定書」には、温暖化防止のための法的拘束力を持つ数値目標が定められている。

議定書の概要を表1-1-1、表1-1-2に示す。

また、自国内のみで目標達成が困難な場合の柔軟性措置である「京都メカニズム」の概要は以下の通りである。

共同実施（JI）

表1-1-1 京都議定書の概要

項目	内容
対象ガス	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O、HFC、PFC、SF ₆
吸収源	森林等の吸収源による温室効果ガス吸収量を算入
基準年	1990年（HFC、PFC、SF ₆ は1995年としてもよい）
目標期間	2008年から2012年
目標	先進国全体で少なくとも5%削減を目指す

表1-1-2 国別の削減率

国	削減率 (%：90年比)		
EU(15ヶ国)、ブルガリア、チェコ、エストニア、ラトビア、リヒテンシュタイン、リトアニア、モナコ、ルーマニア、スロバキア、スロベニア、スイス	-8		
アメリカ	-7		
カナダ、ハンガリー、日本、ポーランド	-6		
クロアチア	-5		
ニュージーランド、ロシア、ウクライナ		0	
ノルウェー			+1
オーストラリア			+8
アイスランド			+10

- 先進国（市場経済移行国を含む）間で、温室効果ガスの排出削減または吸収増進の事業を実施し、その結果生じた排出削減単位（ERU）を関係国間で移転（または獲得）することを認める制度。

クリーン開発メカニズム（CDM）

- 途上国（非附属書国）が持続可能な開発を実現し、条約の究極目的に貢献することを支援するとともに、先進国が温室効果ガスの排出削減事業から生じたものとして認証された排出削減量（CER）を獲得することを認める制度。
- 先進国にとって、獲得した削減分を自国の目標達成に利用できると同時に、途上国にとっても投資と技術移転の機会が得られるというメリットがある。

排出量取引（ET）

- 排出枠（割当量）が設定されている附属書国（先進国）の間で、排出枠の一部の移転（または獲得）を認める制度。

COP4以降、京都議定書の具体化のための議論が重ねられた。2001年7月COP6再会合における閣僚級会合の合意（ボン合意）の主な内容を以下に示す。

途上国問題

気候変動特別基金（条約）と適応基金（議定書）を新設する。額は政治的宣言の中に折りこむこととされ、示されなかった。

京都メカニズム

- 補完性は「国内対策は目標達成の重要な要素を構成」と定性的な表現になった（排出枠購入の定量的な制限はなし）。
- 排出量取引の売り過ぎ防止措置として、各国は排出枠の90%または2008年の直前の排出量のうち低い方を保持する（一定以上は排出枠を売ることはできないという定量的な制限）。
- 共同実施やCDMにおける原子力は差し控える。

吸収源

森林管理の吸収分は、国ごとに上限を設けることで日本などに譲歩した。日本の上限は共同実施を含め1300万トン（約3.9%）となった。CDMのもとでの吸収源利用は1%を上限とする。

遵守

- 削減目標を達成できなかった場合、超過した排出量は3割増しで次の期間の排出枠から差し引く。
- 遵守委員会の構成は先進国対途上国の構成が4対6。
- 法的拘束力をどう規定するかについては、議定書発効後の第1回会合で決める。

京都議定書は2002年の条約発効を目指し、2000年のCOP6で各国政府間の協議が進められたが、温暖化問題は各国の利害関係が複雑に対立するため、合意形成が難航した。対立する主な論点は、CO₂排出量取引などの「京都メカニズム」、森林などのCO₂吸収の削減分への算入、削減目標を守れなかった場合の措置、途上国の温暖化対策への先進国の支援途上国支援、である。01年のCOP6ボン再会合でこれらの課題についてのボン合意がなされたことは、たとえアメリカの離脱があったとしても意義が深い。

COP6会議の初日冒頭のスピーチで、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）のボブ・ワトソン議長は科学の知見をベースに地球温暖化の深刻な状況について報告をした。

気温や海面の上昇、降水パターンの変化、氷河の後

退、北極海の薄氷化等、地球の気候は変化している
人間活動が温室効果ガスの大気中濃度を変えている
観測される気候変動には人間活動が原因とみられる
科学的証拠がある

21世紀中に地球の年平均気温や海面水位の上昇、
降水パターンの変化が予想される

その結果、乾燥・半乾燥地域の水資源、熱帯・亜熱
帯の農業生産性、生態系資源を原材料とする製品と利
用など生態系の構成と機能、海面上昇による人間居住
環境、媒介性疾病など人間の健康、に多大な影響を与
える

地球の気候の変化は避けられない

気候変化の大きさや速さは、温室効果ガス削減策と
して採用される政策・手段・技術次第である

今日の気候変動や長期的な人間活動に起因する気候
変化に対する社会経済システム・生態系・人間の健康
などの脆弱性を減少させるために適応戦略が採られな
ければならない

このような科学者からの提言・勧告は京都議定書の発
効に向けて大きな弾みになるかに見えたが、各国・各地
域の利害が錯綜し、合意には至らなかった。

1-1-4 日本の対応

わが国は地球規模の環境問題の進行を受けて、平成元
年（1989年）に「地球環境保全に関する関係閣僚会議」
を設置した。翌1990年に地球温暖化問題に対応するた
めに「地球温暖化防止行動計画」を策定し、92年の地
球サミットでは、この計画の達成を国際的に公約した。
「行動計画」においては、CO₂の排出抑制目標につい
ては、一人当たりの排出量について、2000年以降概ね
90年レベルでの安定化を図るとともに、さらに革新
的技術開発などが早期に大幅に進展することにより、排
出総量が2000年以降概ね90年レベルで安定化するよう
努める、としている。以後、これに沿ってわが国の温暖
化対策が進められたが、必ずしも実効性のあるものでは
なく、CO₂の排出を抑制することはできず、2000年時点
の目標達成は困難な状況になった。

一方、92年の地球サミットで「気候変動枠組み条約」
に署名し、93年に批准した。93年には「環境基本法」
を公布・施行し、これを具体的行動に移すための「環境

基本計画」を閣議決定した。

「京都議定書」が採択された97年のCOP3の直後、総
理大臣を本部長とする「地球温暖化対策推進本部」が設
置され、98年には「地球温暖化対策推進大綱」を決定し
た。京都議定書の目標年次2010年に向けて、わが国の温
暖化政策はこの大綱の枠組みで進められることになった。

また、経団連は、1991年に地球サミットに先駆けて、
「経団連地球環境憲章」を策定し、「環境問題への取り組
みが企業の存在と活動に必須の要件である」との認識を
基本理念として掲げ、環境保全にむけて自主的かつ積極
的に取り組みを進めていくことを宣言した。96年には、
地球環境憲章の理念を具体的な行動に結びつけるため、
「経団連環境アピール」を発表し、温暖化対策につい
ては、産業界として実効ある取り組みを進めるべく、自主
行動計画を策定することを宣言した。これを受けて、翌
97年に、「経団連環境自主行動計画」を策定し、温暖化
対策については、「2010年度に産業部門及びエネルギー
転換部門からのCO₂排出量を1990年度レベル以下に抑
制するよう努力する」という統一目標を掲げ、産業部門
及びエネルギー転換部門34業種（2001年度からは36業
種）が目標達成に向けて取り組みを進めている。

これに呼応して、電気事業は環境問題への取り組みを
経営の最重要課題のひとつとして位置付け、1996年11
月に「電気事業における環境行動計画」を策定し、毎年
チェック&レビューを行い、結果を公表している。

一方、研究面においても、1988年に発足した気候変
動に関する政府間パネルIPCCに呼応し、世界やわが国
の気候研究機関では予測精度向上のための研究が活発化
した。

わが国では、平成8年（1996年）に、航空・電子等技
術審議会地球科学技術部会が「地球変動予測計画」を提
言し、97年には科学技術庁プロジェクト（地球フロン
ティア計画/地球シミュレータ開発計画）が開始した。
「地球シミュレータ」は、高度な計算科学技術を駆使し
て地球のさまざまな現象をコンピュータ上で再現する言
わば「仮想地球」を実現するもので、現在のスーパーコ
ンピュータと比較して約1000倍程度の高速な処理能力
を持つ超高速並列計算機で、2002年に運用開始の予定
である。これによって、地球全体の大気や海洋の現象が
数10kmの規模で表現することができるようになるため、
世界の気候研究者から大きな注目を集めている。

コラム1：温暖化防止国際会議（COP）への参加

世界各国が協調して温暖化防止に取り組むため1995年に発足した国連気候変動枠組条約締結国会議（COP）は、1997年12月のCOP3において、歴史的な京都議定書を採択した。その後COPは、京都議定書の詳細な運用ルールの合意形成を目指して、毎年1回開催されており、政府関係者、IGO（内部政府組織）、NGO（非政府組織）、報道機関など多数の参加者が集結し、高い関心を集めている。

COPでは、各国の政府代表団が国益をかけて温暖化対策のためのルール作りに駆け引きを展開する。この温暖化交渉の会議は、限定された政府交渉団が行うものであり、非公開である。しかし、政府関係者以外の参加者は、補助機関会議や全体会議などの傍聴が許可され、会議の進捗状況や各国の主張を知ることができる。NGO（研究機関、産業、関係団体など）の参加者は、これらの公開会議の傍聴を行うとともに、政府代表団による交渉経過の説明会や参加者間の情報交換などを通して、交渉の進捗状況を掴むことができ、議論の成り行きを見守る。さらに、NGOは、国連の許可を得て、ワークショップの開催や展示ブースの設置により、温暖化対策への熱意をアピールすることができる。当所は、わが国の代表的なエネルギー産業の中央研究機関として、情報収集のためにCOP1から参加し、COP3以降は、ワークショップの開催と展示ブースの設置を行い、電気事業が関与する温暖化対策に関する研究成果の発表活動を行って

きた。

当所のワークショップでは、地球温暖化防止に向けて、CO₂削減のための研究開発と国際協力について具体的な研究成果の発表を行った。アジアにおける気候変動予測と対策、電力化が気候変動緩和に及ぼす影響、クリーンコールテクノロジーの温暖化対策に果たす役割、火力発電所副製品利用によるCO₂削減国際プロジェクトの提案など最新の研究成果を発表し、わが国の電気事業が採りうる温暖化対策の選択肢拡大と国際協力の重要性をアピールした。また、当所のワークショップにおいて、COP3では関西電力、COP4では電気事業連合会と豪州連邦産業科学研究所、COP5では中部電力、COP6では中国清華大学教授を招き、それぞれの立場から温暖化対策に関する講演を依頼して、好評であった。さらに、COPの会場内で、当所の研究成果を発表するための展示ブースを設置して、温暖化に関する最新の研究成果を紹介した。特に、COP用に作成した論文集を中心に配布し、世界各国からの参加者に研究成果を発信した。

温暖化対策のためのルール作りの交渉は、限られた政府交渉団に委ねられているが、近年、交渉経過に敏感な反応を示すNGOの行動が益々重要な役割を担いつつある。当所も、COPの場などを通して研究成果や主張をアピールすることにより、温暖化防止対策の立案に貢献していきたい。



図1 COP5の本会議場

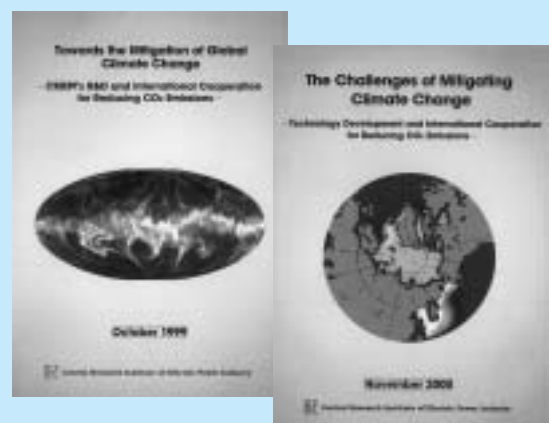


図2 展示ブース等で配布した地球温暖化に関する当所の最新の研究論文集

コラム2：IPCC 第三次評価書の概要

気候変動に関する政府間パネル IPCC (Inter governmental Panel on Climate Change) は、1991年から5年毎に、地球温暖化問題に関する評価書 (Assessment Report) を発表している。2001年夏には第三次評価書が公表され、一般に購読可能である。この第三次評価書は3分冊からなり、第1～第3作業部会がそれぞれ「温暖化の科学的根拠 (The Scientific Basis)」、「影響、適応および脆弱性 (Impact, Adaptation and Vulnerability)」、「温暖化対策 (Mitigation)」について取りまとめている。3分冊とも1000ページに近いボリュームをもつ大作であり、政策立案者に向けた要約版 SPM (Summary for Policymaker) が作成されている。この要約版は、IPCCのホームページ (参考文献参照) からダウンロードして精読可能である。

これまで観測された気候変化

温暖化の科学的な根拠を取りまとめた第1作業部会の要約版 SPMにおいて、過去の観測データから地球環境への人為影響を詳細に分析した結果が紹介されている。表1にその一部を抜粋して示す。

例えば、現在の大気中CO₂濃度は、産業革命以前の濃度280ppm (ppmは体積濃度で0.028%) から年々増加し、現在の濃度は約368ppmとなっている。ちなみに、過去20年間の増加率は平均1.5ppmである。こうしたCO₂などの温室効果ガスの増加により、1861年～2000年の140年間において、全球平均地表気温が0.6±0.2 上昇した。また、20世紀の北半球では、熱帯域、中・高緯度域とも降水量が増加したが、亜熱帯 (北緯10度～30度) では降水量が逆に減少している。これらの観測事実から、IPCCでは人間活動が気候変化の原因とする根拠が強まったことを指摘している。

気候予測モデルの検証

第三次評価書の非常に大きな特徴は、気候モデルによる20世紀の気温上昇の再現計算が実施されたことである。複数の研究機関が最新の気候モデル (大気・海洋結合モデル) を用いて過去の気温上昇の再現計算を試みており、予測の検証プロセスがより厳密になったことがこれまでの第一次～第二次評価書に比べたときの大きな前進である。

表1 観測された地球環境変化

出典：IPCC第1作業部会要約版SPM (2001) より抜粋

観測項目	内 容
CO ₂ 大気濃度	280±6ppm (1000年～1750年) 現在368ppm 過去20年間の平均増加率1.5ppm/年
CH ₄ 大気濃度	700±60ppb (1000年～1750年) 現在1760ppb
N ₂ O大気濃度	270±10ppb (1000年～1750年) 現在316ppb
全球平均地表気温	+0.6±0.2 上昇 (1861年～2000年) 海洋より陸地部分の上昇が大きい
北半球の気温	20世紀は過去1000年間で、どの世紀よりも気温上昇が大 (確実性大)
1日の気温変化	日変化幅 (日較差) が縮小。夜間の最低気温の上昇は、日中の最高気温上昇分の約2倍
全球平均海面水位	潮位計の記録：+10～20cm (1861年～2000年) 地域により異なる
河川・湖沼の氷結	北半球の中～高緯度では、氷結期間が約2週間短縮 (確実性かなり大)
北極の海水面積と厚み	1950年以来面積10～15%減少、夏季の海水厚さは40%減少
極地以外の氷河	広範囲に後退
永久凍土	融解進む
大陸での降水量	20世紀において、北半球の中緯度～高緯度地域では10年間に0.5～1%の割合で増加。ただし、亜熱帯 (北緯10度～30度) では10年間に0.3%の割合で減少。熱帯域 (赤道～南北10度) では10年間に0.2～0.3%の割合で増加。南半球は海洋面積が大きいこと、データ数が少ないことから傾向は不明瞭
エルニーニョ現象	過去100年間と比較し、1970年代中ごろから、エルニーニョの頻度増加、持続期間延長、規模拡大

この点については、3-1章で詳しく紹介する。

将来の気候変化の予測

第三次評価書では、これまでの評価書とは異なり、21世紀の人口増加や経済発展などの差異を考慮した4種類のシナリオをベースに多数のシナリオを想定している。これはSRES (Special Report on Energy Scenario) シナリオとも呼ばれており、A1、A2、B1、B2の4つを基本シナリオとしている。各シナリオは世界各国の発展の違いを考慮した複雑な社会背景をベースにしているため、理解は容易でないが、ごく簡単に要約すると以下の通りである。

A1シナリオ：高成長シナリオ

A2シナリオ：多元化シナリオ

B1シナリオ：持続発展シナリオ

B2シナリオ：地域共存シナリオ

なお、A1の高成長シナリオでは、エネルギー技術の発展に3種類のコースを想定し、次の3つのシナリオに細分している。

A1FIシナリオ：化石燃料依存シナリオ

A1Tシナリオ：太陽光発電、燃料電池を普及させた高効率シナリオ

A1Bシナリオ：両者をバランスしたシナリオ

したがって、合計7つのシナリオを基本シナリオとして想定していることになる。

その結果、シナリオが多すぎて、スパコンを使用する複雑かつ高度な気候モデル（大気・海洋結合モデル）ではすべてを予測できず、簡単な手法で以下のような予測値を示している。

1990年～2100年の全球平均の地表気温上昇は1.4～5.8と予測される。最大の上昇値は、CO₂排出量の最も多いA1FI（化石燃料依存）シナリ

オに対応している。ただし、寒冷化をもたらすイオウ酸化物発生量は、第二次評価書の時より下方修正した。

1990年～2100年の海面上昇は、0.09～0.88mと予測された。第二次評価書より下方修正されたのは南極の降雪量増加を考慮したためである。

異常気候

第三次評価書では、高度な大気・海洋結合モデルを使用しても台風等の異常気候（extreme climate）については信頼性の高い予測結果は得られていないと評価している。これについては、3-4節で詳しく説明する。そうした限界はあるものの、第2作業部会では、21世紀に予測される異常気候について、その確信度（原論文ではlikely, very likelyなどの表現）とともに表2のように取りまとめている。表では、単純な現象として、最高気温上昇、最低気温上昇、降水量の増加を挙げ、その社会におよぼす影響も検討している。さらに、複雑な現象として、乾燥・早魃の増加、台風の風速等の増大、アジアモンスーンの降水量変動幅の増大、中緯度地方のストームの増加を挙げ、それぞれに対する社会への様々な影響を評価している。

ただし、表2にある確信度は、要約版だけの評価尺度であり、米国科学アカデミーNSAでは、読者に誤解を招くとして批判している。また、IPCCの作業グループには政策関係者が参加しており、今後の科学的な中立性確保への懸念が示されている。地球温暖化問題についての各国の利害対立が一層厳しくなると予測されるので、IPCCの評価書といえども、科学的な検証が不足している予測結果は疑ってみるという態度が今後一層重要になる。

表2 将来の極端な気候現象（異常気候）とその影響

出典：IPCC第2作業部会概要版SPM（2001）より抜粋

21世紀に予測される 極端な気候現象の変化とその可能性 ^a	予測される影響の代表例 ^b (一部の地域においては発生の可能性が高いものを示す)
単純な現象	
ほとんど全ての陸地で最高気温上昇；夏日、熱波の増加（可能性大 ^a ）	<ul style="list-style-type: none"> ・高齢者グループや都市部貧困層で死亡や重病発生率増加 ・家畜や野生生物の熱ストレスが増加 ・多数の穀物への被害リスクの増加 ・冷房用電力需要の増加とエネルギー供給の信頼性低下
ほとんど全ての陸地で最低気温上昇；冬日、降霜日、寒波の減少（可能性非常に大 ^a ）	<ul style="list-style-type: none"> ・寒さに関連する人間の疾患や死亡率の低下 ・いくつかの作物では、被害リスク軽減、他ではリスク増大 ・一部の保菌生物や病原虫の生息範囲と活動の拡大 ・暖房用エネルギー需要の削減
降水量の増加（多くの地域において可能性非常に大 ^a ）	<ul style="list-style-type: none"> ・洪水や土砂崩れ、雪崩、泥流の被害増大 ・土壌浸食の拡大 ・洪水による流量増加で一部の氾濫源帯水層の再注水が増加 ・政府や民間の洪水保険や天災救援システムの負担増
複雑な現象	
中緯度地域の大陸内部の大半で、夏季の乾燥と、それともなう干ばつの可能性増大(可能性大 ^a)	<ul style="list-style-type: none"> ・作物の収穫率低下 ・地盤の縮みによる建築物土台への被害増大 ・水資源の質と量の低下 ・森林火災のリスク増大
台風の最大風速、平均雨量、最大雨量の程度増大（可能性大 ^a 、一部の地域において）	<ul style="list-style-type: none"> ・人命損失、伝染病の流行、その他多くのリスクの増大 ・沿岸の浸食、海岸建築物およびインフラの被害増大 ・さんご礁、マングローブなど沿岸の生態系の被害増大
多くの異なる地域でエルニーニョ現象に関する旱魃や洪水の増大（可能性大 ^a ）	<ul style="list-style-type: none"> ・旱魃や洪水に弱い地域で、農耕地、放牧地の生産性が低下 ・旱魃に弱い地域では水力発電の可能性が低下
アジアにおける夏季モンスーンの降水量の変動幅の増大（可能性大 ^a ）	<ul style="list-style-type: none"> ・アジアの温帯、熱帯域における洪水と旱魃の規模と被害の増大
中緯度地域でのストームの強度増大（現在のモデルではあまり予測が一致していない）	<ul style="list-style-type: none"> ・人命や健康へのリスク増大 ・不動産やインフラの損失増大 ・沿岸生態系の被害増大

a ここでの可能性は、第1作業部会で用いられる判断上の確信度を引用：可能性非常に大（確率は90-99%）、可能性大（確率は66-90%）、特に断らない限り気候現象の情報は第1作業部会の政策担当者向けの要約版SPMから引用。

b これらの影響は、適切な対応措置で緩和可能である。

1 - 2 当研究所の取り組み・スタンス

世界気象機関WMOの世界気候計画の開始（1979年）を皮切りに、国連主導の温暖化防止に向けた国際会議や気候変動枠組み条約の採択、気候変動に関する研究や情報収集など、世界的に、政治面、科学技術・研究面での様々な活動が活発化した。

わが国の電気事業から排出されるCO₂の量は、国内の人為起源の1/4、世界全体の1%強を占める。その一方で、地球温暖化による気候変動は電気事業に対して、需要・供給はもちろん、設備の建設、保守・運転等に、多大かつ広範囲にわたる直接的・間接的影響を与えることが予想される。

電気事業は平成8年11月に「地球温暖化防止行動計画」を策定した。電気事業における温暖化対策の基本は、温暖化に関する科学的知見を踏まえ、電源のベストミックス、電力設備の効率向上、省エネルギー、低炭素排出・非化石エネルギー源の導入等の対策を推進することである。

当所は、既に、環境と調和する21世紀のエネルギー利用を目指す電気事業に資するために、全所大で、

原子力の信頼性向上

環境適合型石炭利用技術の開発

自然・再生可能エネルギー利用技術の開発

発・送・配電技術の効率向上

に関する研究を長期的・総合的視点で進めてきた。

電気事業が長期的かつ現実的課題として温暖化問題に適切に対処するためには、地球温暖化に関する種々の要因の因果関係や影響についての科学的な不確実性を取り除き、信頼できる気候予測情報に基づいて、一貫した温暖化の影響と対策の評価を行い、実行可能な方策や対策技術を選択する必要がある。

そのため、当所は、電気事業の「地球温暖化防止行動計画」への的確な取り組みや温暖化に適応する中長期的電力施設計画の策定が、より一層強力かつ効果的に進展することに科学的立場から貢献するために、「地球温暖化」を最重要課題と位置づけ、研究を総合的に推進することとした。

当所の温暖化研究のスタンスは、次の通りである。

- ・温暖化問題に対する電気事業経営における的確な意思決定に資するために、内外情報を含め最新の科学的知見・情報を提供すること
- ・地球温暖化に関する短期的課題と長期的課題に並行して取り組み、電気事業の温暖化問題への柔軟な対応に資すること
- ・電源のベストミックス、電力設備の効率向上、省エネルギー、エネルギー資源の低炭素化・非化石化、等による温暖化抑制効果を明らかにすると共に、これらの対策技術の導入促進に寄与すること
- ・温暖化防止・抑制技術の選択肢を拡大するためのメニュー（CO₂削減技術や制度等）を整備・増強すること
- ・地球温暖化問題は広範・多岐に亘り、一個人・一機関での対応は不可能なため、国際協力・協調を念頭に、内外の研究ネットワークを確立し、有効に活用すること
- ・財団法人の学術研究機関として、国や民間の研究機関では対応が困難な課題に取り組み、科学や技術の発展に寄与するとともに、研究成果を社会に還元すること

このような状況下で、当所の推進課題『地球温暖化』では、電気事業の「行動計画」に示される自主的取り組み（原子力、熱効率の改善等）以外で、「地球温暖化」の理解と科学的解明を促進させるために、次を研究対象とした。

信頼度の高い科学情報の発信

- ・地球規模・地域規模の気候変化や台風の予測と評価
- ・人工衛星による地球環境の観測と解析・評価
- ・火力発電所からの温室効果気体（CH₄、N₂O）の排出実態の調査と評価
- ・森林等によるCO₂吸収の評価

CO₂排出削減技術の選択肢を拡大するための技術開発

- ・排ガスCO₂回収・処分技術の評価
- ・大気中CO₂固定・有効利用技術の評価
- ・排出抑制方策（京都議定書における京都メカニズム、税制度）への電気事業の対応策

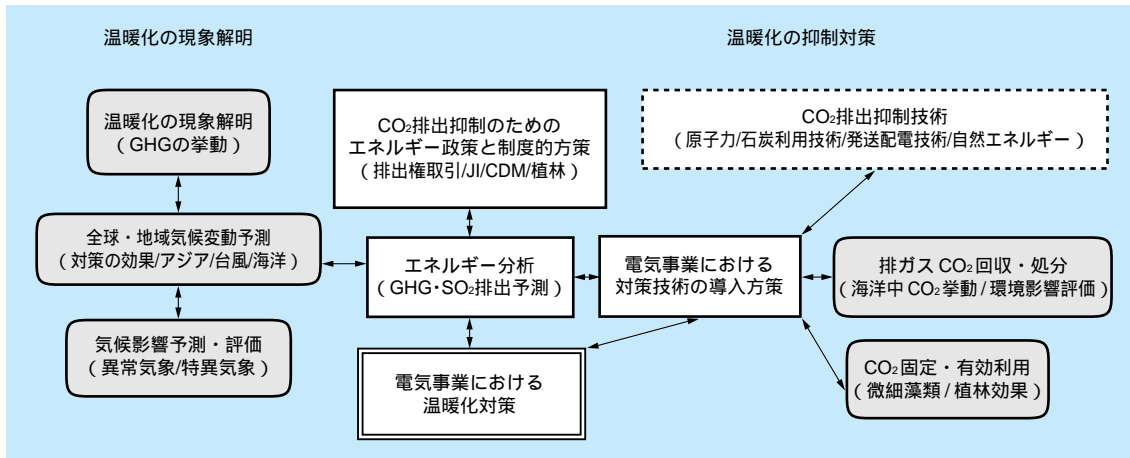


図 1-2-1 電中研の取り組み関連図

なお、当所の気候研究のスタンスは「気候モデルの開発」が主目的ではなく、エネルギー政策の評価や温暖化の影響評価のために、

ユーザーとして「(他機関で開発された信頼性の高い)気候モデル」を利用すること

ユーザーの立場でモデルの評価を行い、その過程で得られる学術的価値の高い研究成果の公表を通じて、気候モデルの高度化・信頼性向上に寄与すること

研究過程で得られる最新予測情報を社会や電気事業に発信すると共に、一般社会の啓発活動に活用すること

および、

これらの研究活動を通じて地球温暖化 気候変化問題の研究・分析・評価能力の向上を図ること

である。

以下に、内外動向と対比させて、当所の温暖化研究の展開を概述する。

第1フェーズ(1987～92年)では、地球温暖化の問題認識と課題の探索を目標に、世界に先駆けてわが国が人工衛星による温室効果ガスの観測を行うIMGプロジェクトや将来の気候変化を予測する道具としての気候モデルの能力を評価する国際共同研究MECCAプログラムへの参加、さらに、温暖化が電気事業に与える影響に関するイベントツリー方式による定性的評価やEPRIとの共同研究など、国際的視点に立った研究推進を行った。また、排ガスCO₂の回収・処分・固定化技術についての

実証研究や海洋中の植物プランクトンを介した炭素循環機構を解明するための新概念の構築も実施した。

なお、当所は、地球温暖化が国際的な地球環境問題としてクローズアップされる遥か以前の1983年に、地球環境問題としてのCO₂問題とその影響に関する調査報告書をまとめている。

1988年に設置された「気候変動に関する政府間パネル(IPCC)」は、1990年に第一次、1995年に第二次、2001年に第三次の各評価報告書を取りまとめているが、このIPCC評価報告書がその時点の科学研究や政策研究のベースとなった。当所は内外の動向を把握しつつ、電気事業、国・社会の温暖化問題への対応に寄与すべく当所の多岐にわたる専門分野を活かした温暖化研究を推進すると共に、研究成果がIPCC報告書に引用されることを目標に、学術誌への積極的な投稿も行った。

第2フェーズ(1993～96年)では、第1フェーズの調査結果を踏まえ、「温暖化問題の科学的解明のためのツールの整備」を目標に、国際研究ネットワークを活用して温暖化問題の科学的解明のための研究手法の整備を進めた。すなわち、人工衛星による温室効果気体・地球環境・海洋環境の推定手法の開発、海洋における炭素循環機構解明のためのメソコスム実験、地域大気・海洋モデルや台風モデルの開発、排ガスCO₂回収技術および海洋処分技術の手法開発のための実験と評価、クロレラ培養等の排ガスCO₂固定・資源化技術の実証実験など、である。これらの実行によって、温暖化研究の基盤が整備・強化され、温暖化問題に科学的側面で寄与する総合研究機関として、国際的に認知されるようになった。ま

た、当所が問題提起した「温暖化問題は20世紀工業文明における典型的なトリレンマ問題である」とした考え方が広く国際社会の共感を呼び、自然科学と社会科学を融合させた総合研究を世界的に加速させる切っ掛けとなった。

第3フェーズ(1997～2000年)では、「科学的ツールの応用と総合化」を目標に掲げ、米国大気研究センター(NCAR)との共同研究による気候研究の充実・強化、最新の気候研究ツールを活用して気候変化問題を解明する国際共同研究ACACIAプログラムの推進、排ガスCO₂回収・海洋隔離技術や固定・資源化技術の技術的・経済的成立性の評価等、これまで蓄積された科学研究手法やデータを適用し、温暖化問題を総合的視点で捉える方向に研究を展開させた。

1994年に発効した温暖化防止のための国連気候変動枠組み条約の具体的ルール作りを行う締約国会議(COP)に、当所はNGOとしてCOP1から継続して参加してきた。京都議定書が採択された1997年のCOP3からはワークショップや展示によって研究成果を発表し、科学技術面から議定書発効に向けた情報発信を行うと

もに、温暖化研究に取り組む総合研究機関としての存在をアピールしてきた。

当所が電気事業や国・社会の温暖化問題に関する多様なニーズに的確に応えるために、これまで蓄積した研究ポテンシャルは次のように総括できる。

- 1) 温暖化抑制のための制度・政策(京都議定書・京都メカニズムなど)に関わる諸課題の分析・評価・提言
- 2) 人工衛星による温室効果ガスの推定技術や海洋環境の解析技術
- 3) 全球モデル、地域大気・海洋モデル、台風モデルによる気候変動予測とその影響、および気候安定化のためのCO₂排出削減効果の評価
- 4) 大気中CO₂濃度を増加させないための排ガスCO₂回収・海洋隔離・地中処分技術の評価
- 5) 生物・バイオ技術(植林、微細藻類、海洋プランクトン、沿岸生態系など)によるCO₂固定・資源化技術の評価

本当所レビューは、これらの研究成果を中心に取りまとめたものである。

第 2 章

2

地球温暖化現象の
解明に向けて

第2章 地球温暖化現象の解明に向けて 目次

狛江研究所	大気科学部	上席研究員	小林 博和
狛江研究所	大気科学部	主任研究員	下田 昭郎
狛江研究所	大気科学部	主任研究員	門倉 真二
我孫子研究所	環境科学部	主任研究員	坂井 伸一
我孫子研究所	応用生物部	主任研究員	西岡 純
我孫子研究所	環境科学部長	上席研究員	丸山 康樹

2 - 1 地球観測衛星による温室効果気体の観測	23
コラム3：人工衛星による海洋環境の観測	26
2 - 2 海洋生態系を介した炭素循環機構の解明	27
2 - 3 まとめ	30



小林 博和（1973年入所）
発電所排ガス拡散に係わる気象の研究に従事の後、1985年より原子力情報センター。1989年より、通産省の衛星搭載温室効果気体センサIMGの開発プロジェクトに取り組む。1992年より大気科学部。1999年までIMGの運用と評価等を実施。現在、IMG後継機用のアルゴリズム開発、衛星データを活用した環境評価研究等を実施。



下田 昭郎（1990年入所）
人工衛星（IMG）データを用いた温室効果気体濃度の測定手法に関する研究に従事。現在は、リモートセンシングを用いた大気環境モニタリング手法の開発に取り組んでいる。



門倉 真二（1993年入所）
人工衛星搭載温室効果気体センサIMGの解析アルゴリズム開発、気候変化予測研究に従事。現在、温暖化時の影響評価に重要な、極端な気象現象の頻度の変化を予測する課題に取り組んでいる。



坂井 伸一（1989年入所）
衛星リモートセンシングや海洋レーダの観測データを用いた海域流動解析、温排水の環境影響評価、3次元温排水拡散予測手法の開発に従事してきた。現在は、高分解能沿岸海洋レーダの開発と、その観測データとデータ同化（アシミレーション）モデルを用いた3次元沿岸流動解析手法の開発に取り組んでいる。



西岡 純（1995年入所）
海洋の植物プランクトンの増殖と微量栄養物質に関する研究に従事。現在は北太平洋亜寒帯域を中心に、微量栄養物質である鉄の供給に対する生態系の応答の解明など、海洋生態系の炭素固定量の評価研究に取り組んでいる。

丸山 康樹（8ページに掲載）

2 - 1 地球観測衛星による温室効果気体の観測

環境問題は地球全体として考えるべきであるというコンセンサスが一般化する中で、地球を均一にかつ短時間で観測することのできる衛星観測手法の必要性はますます高まっている。

通商産業省（現経済産業省）は、大気中の各種温室効果気体の実態を把握することを目的に、宇宙開発事業団、環境庁、NASA 等が提供する 8 つの地球観測センサと共に、地球観測衛星 ADEOS に搭載する温室効果気体センサ IMG（Interferometric Monitor for Greenhouse gases）の開発プロジェクトを平成元年度（1989 年）から推進した。

地球大気から放射される赤外スペクトルを衛星から測定すると（図 2-1-1）、大気中の温室効果気体など各種気体による赤外線吸収を示す特徴的なスペクトルが得られる。IMG は、地球から放射される微弱な赤外光を高い精度で測定するために開発された世界に類を見ない高分解能、大口径の衛星搭載用赤外フーリエ分光計である。この赤外放射スペクトルを解析することによって、大気

中の温室効果気体の濃度を求めることができる。本プロジェクトで当所は、IMG データから温室効果気体の濃度を求める解析ソフトウェアの開発、IMG データの処理・解析設備となるデータ利用地上システムの開発と運用、IMG データを用いた温室効果気体の挙動解明研究、等を担当した。

2-1-1 温室効果気体濃度解析アルゴリズム開発と検証

温室効果気体の全球分布を求めるために、IMG 生データから、大気放射スペクトルを解析するアルゴリズム、大気放射スペクトルから気温・湿度・温室効果気体濃度を解析するアルゴリズム、および大気の運動による温室効果気体の移流・拡散の効果を取り込んで気体濃度の全球的挙動を解析する 4 次元同化アルゴリズムを開発した。これらの開発作業は IMG センサの打ち上げに数年先立って開始された。

衛星打ち上げ後、直ちにセンサから電送されたデータを解析して、赤外フーリエ分光計としての IMG センサ

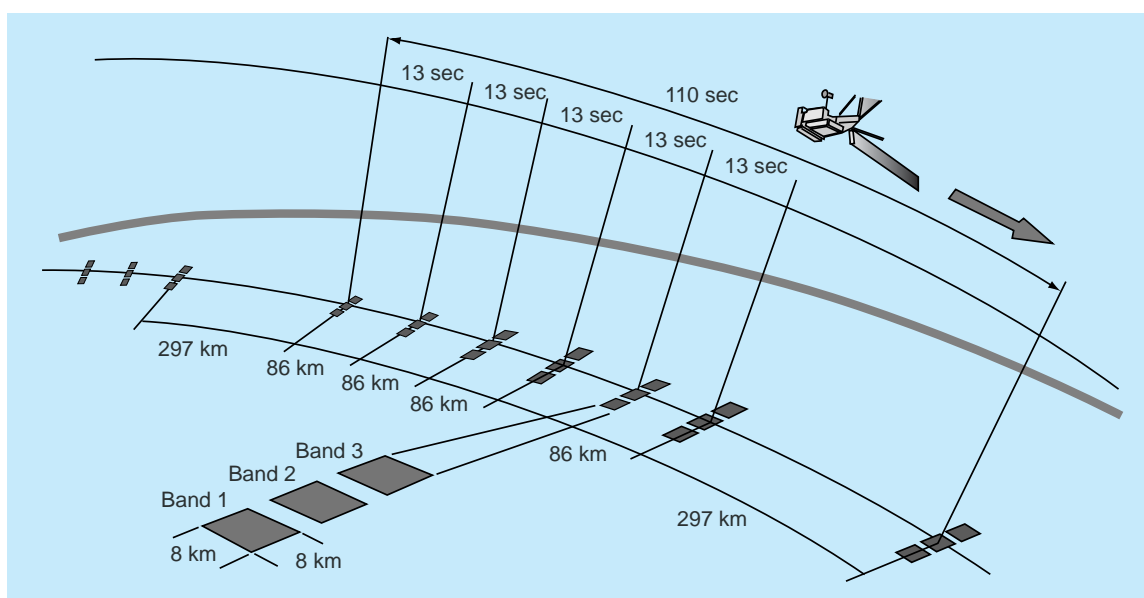


図2-1-1 ADEOS衛星に搭載されたIMGによる観測概念図
衛星軌道直下の地球大気と地表を波長域の異なる三つの検出器によりとびとびに観測され、合成される。

のハードウェアの評価を実施した。ハードウェアの評価においては、センサに内蔵される参照黒体と深宇宙空間の測定データを基準値として地球大気観測データを解析し、得られた大気放射スペクトルが予想される値であることを確認した。

次に、開発した解析アルゴリズムが適切なものであることを検証するために、気温・湿度の鉛直分布などのグラントルースデータを収集し、これとIMGデータの開発アルゴリズムを通して得られた気温・湿度の鉛直分布を比較検討し、開発したソフトウェアが適切であることを検証した。また、検証と同時にソフトウェアの解析精度を向上させるために、地表におけるIMGセンサの観測エリアと同一のエリアを、航空機等を用いて観測するという、いわゆるキャンペーン検証計画を作成し、これを実行した。また検証計画に用いるために、IMGをシミュレートする航空機搭載型の赤外フーリエ分光計を開発した。

衛星を利用した地球観測では、天候に左右されず、ま

た全球を短時間で走査できるため、大量の観測データを取得することができる。そこで、大量のデータを能率よく処理するために、開発したアルゴリズムを多数のワークステーション群で実行する、IMGデータ利用地上システムを開発、運用した。このシステムにより、IMGデータをほぼリアルタイムで処理解析することができた。

IMGデータ利用地上システムにより処理解析されたデータは、地球環境研究に役立たせるために、データを必要とする世界の研究者に配布された。

2-1-2 温室効果気体の全球分布図の作成

IMGの目的は温室効果気体の全球的な挙動解明である。挙動解明研究の一部として、取得生データから、当所が開発した解析プログラム群により、メタン等温室効果気体の全球分布図を作成した。IMGセンサから電送されてきたデータを解析処理して大気放射スペクトルデータを求め（図2-1-2）、これから気温、水蒸気量、各

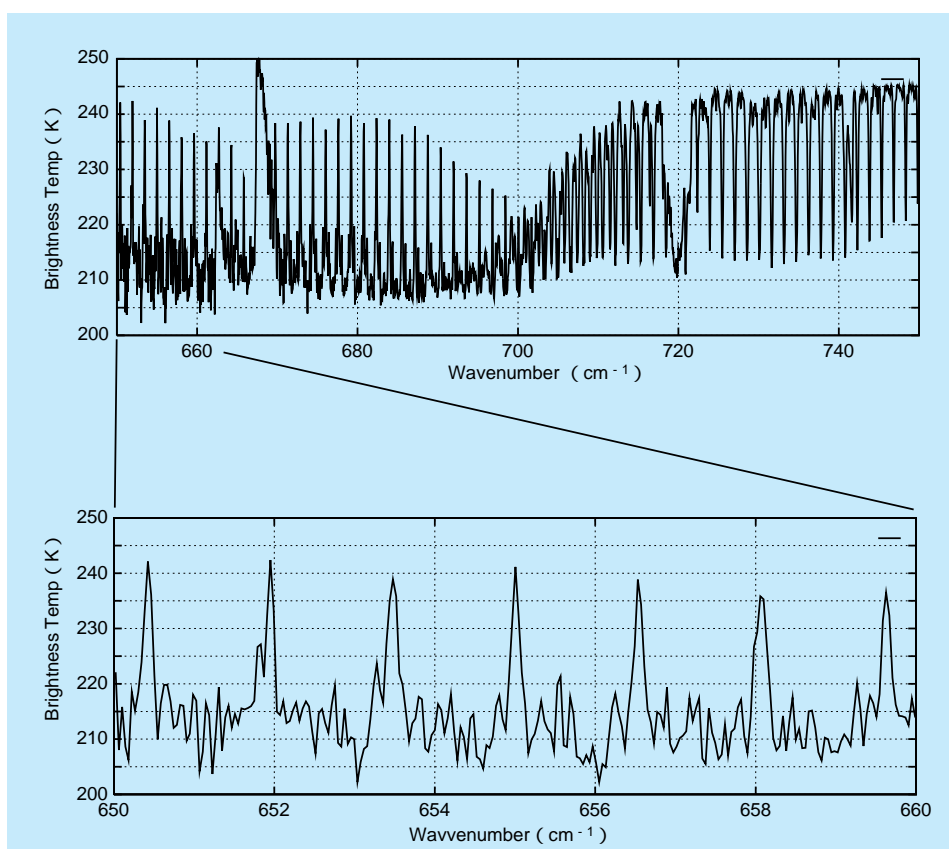


図2-1-2 IMGが測定した大気放射スペクトルの例

IMGの測定範囲（714～3030cm⁻¹: 3.3～14マイクロメートル）の一部（上図）とそれをさらに拡大したもの。CO₂の吸収線が高い分解能で精度よく得られた。

種温室効果気体濃度等を計算する。これを重ね合わせて
全球的な温室効果気体の分布図を得ることができる（図
2-1-3）。

2-1-3 IMG の活用

本計画の最終目的は、IMGを搭載した観測衛星による
温室効果気体の実態解明である。しかしながら
ADEOS衛星故障のため、取得されたIMGデータは平

成8年（1997年）11月から翌年6月末までの8ヵ月間
に限られ、温室効果気体の全球的な季節変動や経年変化
等を捉えることができなかった。

宇宙開発事業団の地球観測データ解析研究センターで
は、次世代温室効果モニタリング用高スペクトル分解能
センサ（ATRAS）の研究を開始した。ATRASはIMG
センサの実質的な後継機であり、当所がIMGデータ解
析ソフトウェア開発を通じて蓄積してきた研究成果がこ
れに活用される予定である。

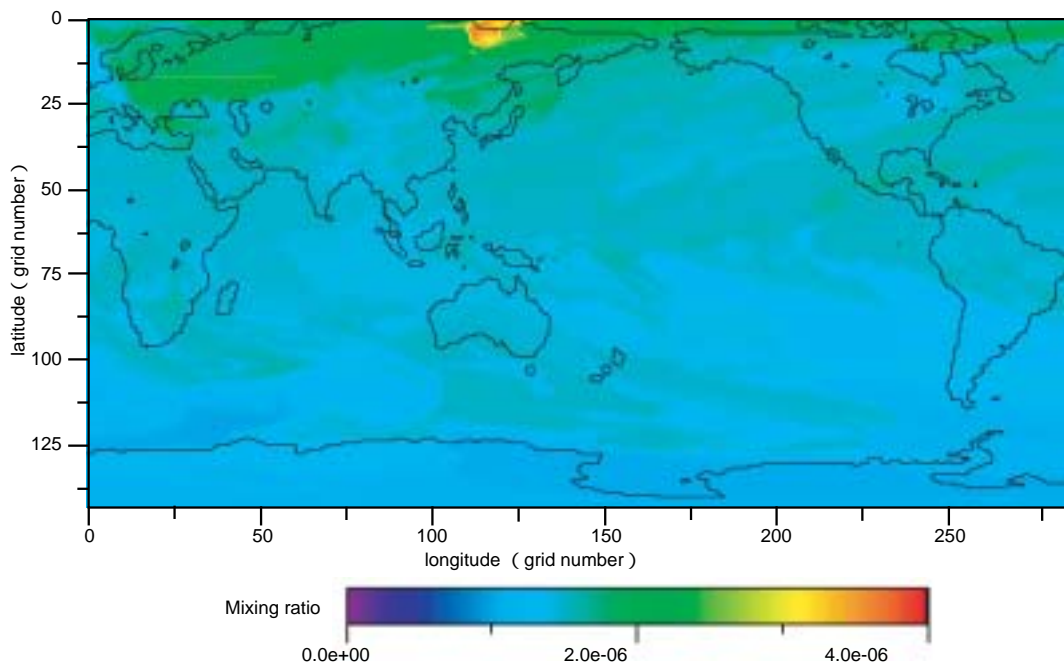


図2-1-3 IMG観測開始後7.5ヶ月後のメタン濃度（高度1000 hPa）のスナップショット
IMGの観測は衛星軌道直下に限られるので、全球の温室効果気体濃度の瞬時値を求めることができない。
そこで、IMG観測から得られた気体濃度を大気の運動による移流・拡散を考慮した4次元同化モデルに投
入して、得られた結果である。北半球、特に北極域で高い濃度が観測されている。

コラム3：人工衛星による海洋環境の観測

地球温暖化予測において、海洋の果たす役割は重要であるが、地球規模で見た場合、未だに海洋の実体は十分に解明されていない。その主な理由として、観測対象である海洋が非常に広大で深いため、その全体を観測すること自体が不可能であり、また海洋の観測は、天候に左右されやすく技術的に非常に難しいという点が挙げられる。過去において、船舶などによる海洋観測が多く行われているが、観測範囲は限定され、また時間的にも不定期なため、海洋の全体像を把握するには至っていない。しかし、1980年代頃から、米国の気象衛星NOAAなどの熱赤外センサーを搭載したリモートセンシング・データが整備されるようになり、観測範囲が表層に限定されるものの、全海洋の水温分布が定期的に観測されるようになってきた。さらに近年になって、衛星高度計によって海面高度（海面の凹凸）が観測できるようになり、ほぼ全球の海流の変動が推定できるようになってきた。

当所では、衛星高度計GEOSAT^{(*)1}とTOPEX/POSEIDON^{(*)2}のデータを利用して、日本周辺の海域環境に大きな影響を及ぼす黒潮とそれに続く

*1：米国海軍がJohns Hopkins大学と共同開発して1985年に打ち上げた初の本格的な衛星

*2：米国航空宇宙局と仏国立宇宙研究センターが共同開発して1992年に打ち上げた高精度な衛星

黒潮続流の実態を調べた。ただし、海流を推定するためには、高度計の観測データから等重力ポテンシャル面であるジオイドの値を差し引かなければならない。しかし、現状では、精度のよいジオイドデータがないため、何らかの工夫をする必要がある。そこで、これまでの黒潮（黒潮続流）の調査結果を基に、力学的な特性を仮定することによって、黒潮と黒潮続流域の実態を推定した。解析した海面高度の分布と、同時期に得られた漂流ブイ（流れに沿って動く浮標）の軌跡を図1に示す。図中、海面高度は高い方を赤色、低い方を青色で示し、漂流ブイは移動開始点を大きな黒丸で示してある。黒潮や黒潮続流などの大規模な海流は、地球自転効果によるコリオリ力と圧力勾配が釣り合った、いわゆる地衡流バランスが成り立っており、その場合北半球においては、海流が図1に示した海面高度の高いところから低い方へ向かって右向きに等値線に沿って流れることになる。図1より、等値線が混み合った黒潮続流の中心付近において、漂流ブイが等値線に沿って流れていることが分かり、用いた手法の妥当性が確認できる。

このような海流の時間的・空間的変動を調べることにより、地球温暖化予測に必要な海洋大循環モデルや大気・海洋結合モデルなどの数値モデルの精度向上が期待できる。

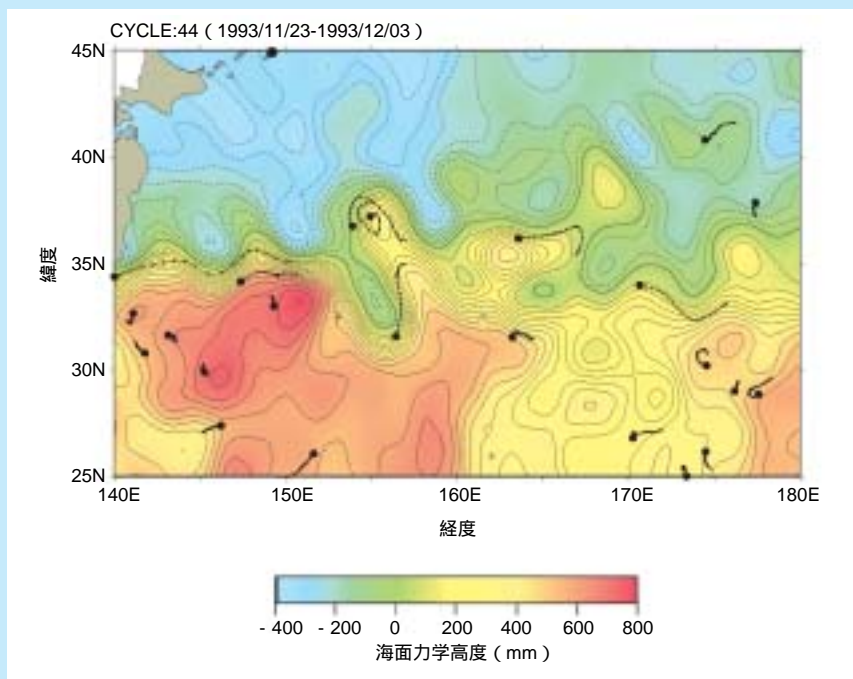


図1 TOPEX/POSEIDONによる海面高度分布と漂流ブイの軌跡との比較

2 - 2 海洋生態系を介した炭素循環機構の解明

2-2-1 はじめに

地球規模の炭素循環を定量的に把握することは、地球温暖化の実態を明確にし、将来の気候変動を予測するための科学的知見をもたらす重要な意味をもつ。中でも海洋は、海面において大気とガス交換を行い、大気中二酸化炭素を吸収・放出しているため、地球の炭素循環に果たす役割は大きい。

2-2-2 海洋における二酸化炭素の吸収過程

大気中二酸化炭素は、いくつかの過程を経て海洋に固定されている。その一つは、大気中の二酸化炭素が無機的全炭酸として海水に溶け込む過程である。溶解ポンプと呼ばれるこの過程で海洋に取りこまれる二酸化炭素量は、海水の持つ二酸化炭素の無機的な溶解度（水温・塩分によって決まる）と海面での気体交換（主に風）によって決まる。また、炭酸カルシウムの殻を持つ円石藻や有孔虫などのプランクトンの死骸が沈降し溶解していくと、中・深層の海水中のアルカリ度が増加する。アルカリ度の増加は海水中の二酸化炭素分圧を減少させるため、このような海水が物理的な過程で海面にもたらされると、二酸化炭素を吸収することになる。このアルカリポンプと呼ばれる過程は、海洋の循環過程によって支配されるため、数百年以上の長いタイムスケールで大気中二酸化炭素濃度を変動させている可能性がある。

大気中の二酸化炭素は、海洋の植物プランクトンの光合成によって、有機物としても固定される。この海洋表層で生産された有機物の粒子は、海底に向かって沈降していく。この沈降有機炭素は、中・深層でバクテリア等の働きを受けて分解再生され無機炭素に戻っていくが、その一部は海底に堆積物となって蓄積される。また、中・深層に溶け込んだ炭素も数百年のオーダーで大気に触れることなく隔離される。このような海洋の生物過程を介した二酸化炭素の固定は、生物ポンプと呼ばれている。海洋の生物ポンプの効率が高ければ、過去の氷河期

に大気中二酸化炭素が減少したことも説明が可能であり、生物ポンプで固定される炭素の変動が将来の気候変動に与える影響は大きいと考えられる。しかし、生物ポンプで海洋に固定される炭素を定量的に見積もることは難しく、海洋炭素循環を考える上での大きな課題となっている。

2-2-3 生物ポンプにおける鉄の役割

生物ポンプによる炭素の固定量を把握するために、海水中の生物生産量の測定や有機物沈降粒子を捕捉するセジメントトラップ実験等の現場観測が行われており、生物ポンプの効率が海域によって大きく違っていることが明らかになっている。東部北太平洋亜寒帯域や南極海、東部太平洋赤道域などでは、植物プランクトンの増殖に必要な硝酸塩、リン酸塩、珪酸塩など主要な栄養塩が高い濃度で残存しているにもかかわらず、植物プランクトンの増殖は低く抑えられていることが知られている。これらの海域では、大陸から大気を通して供給される鉄分の量が少ないため、鉄不足となって植物プランクトンの増殖が生理的に制限される結果、栄養塩が残存すると考えられている。このような海域では、天然の鉄分の供給が植物プランクトンの増殖を大きく変化させ、生物ポンプの効率に大きな影響を与える。海洋への鉄の供給量の変動が、過去の海洋炭素循環および、地球全体の気候を大きく変動させていた可能性もある。近年、生物海洋学、化学海洋学、さらには海洋炭素循環モデルの研究者の間では、鉄とプランクトン生態系の関係を明らかにすることは、海洋の生物学的な炭素循環を解明する上で無視できない重要な課題となっている。また、地球温暖化対策の一つとして、このような特徴を持つ海域に鉄を散布することで、植物プランクトンの光合成による有機炭素生成量を増やし、生物ポンプの効率を上げることが提案されている。この、鉄散布については、炭素固定の経済的効率などを含めた賛否両論が交わされ、現在においても大きな議論を呼んでいる。一方では、米国のベンチャー企業が、鉄散布を排出権取引を絡めた商業として

行う動きもみられる。しかし現時点では、科学的調査として行われた鉄散布実験によって、実際に鉄が海洋表層の植物プランクトン量を増加させることが明らかになったのみで、鉄の供給によって海洋プランクトン生態系の構造がどのように変化し、どれだけの炭素が有機物として海洋に固定されるか、環境にどれだけの影響をおよぼすのかについては十分な知見がない。さらなる科学的調査・研究をおこなって、それらの知見に基づいた議論が急務となっている。

2-2-4 生物ポンプ解明の為の当研究所の取り組み

当所では、生物ポンプによって海洋に固定される有機炭素量を見積もることを目的として、鉄と植物プランクトンの増殖に主眼をおいて、海洋生態系内の生物学的な炭素循環について研究を進めている。

海洋において鉄濃度は極めて微量であり、容易に汚染を受ける。当所では先ず、海水中の極微量な鉄濃度を測定し低濃度環境を維持しながら実験をおこなうためのクリーン技術を開発して研究を進めてきた。研究の対象を夏季の東部北太平洋亜寒帯域とし、当該海域の海洋プランクトン生態系の特徴を明らかにするため、船上培養実験により鉄を人為的に供給した場合の海洋プランクトン生態系の応答を調べ、生態系構造の変化について解析を

試みた。その結果、鉄が不足している現場の生態系では、小型の植物プランクトンが優占し、固定された炭素は海洋表層で分解してしまう再生生産型（図2-2-1A）と呼ばれるプランクトン生態系が優占することが明らかとなった。一方、鉄の供給はおもに大型植物プランクトンの増殖を促進し、固定された炭素は沈降粒子となって中・深層に運ばれる新生産型と呼ばれるものになることが明らかになった（図2-2-1B）。

また、鉄を供給した際の海洋プランクトン生態系における有機炭素沈降量を見積もるために、海洋プランクトン生態系をビニールバッグで隔離して系内の物質循環の観測を行う閉鎖生態系（メソコスム）実験（図2-2-2）を実施した。この結果、植物プランクトンの増殖（ブルーム）期における栄養塩・炭素・各生物量等の化学的・生物学的な物質のフローを、生物間の相互作用を含めて定量的に解析することに成功した。

生物ポンプによって海洋の中・深層に沈降していく有機炭素を定量的に評価するために、モデルを利用したシミュレーションを行うことは一つの有効な手段である。当所では、東部北太平洋亜寒帯域に鉄が供給された場合に起こる、中・深層に運ばれる有機炭素の変化を定量的に表すことを目的として、海洋プランクトン生態系モデルを構築した。モデルの構築には、前記した実験で得られた海洋生態系の構造変化についての定性的な知見と、生態系内の物質間の定量的な解析結

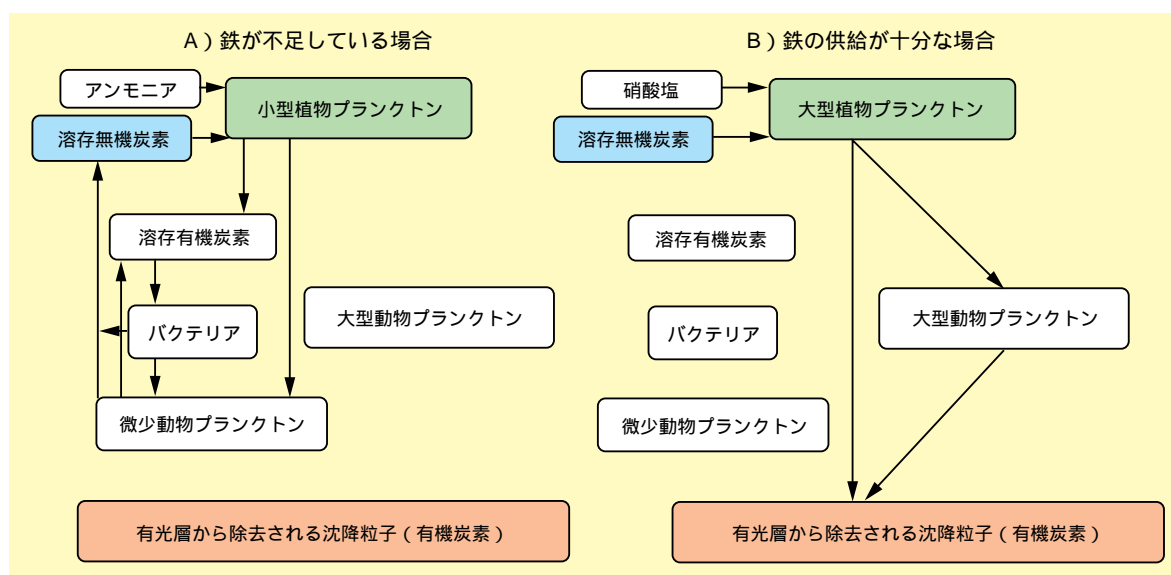


図2-2-1 東部北太平洋亜寒帯域の海洋プランクトン生態系の特徴

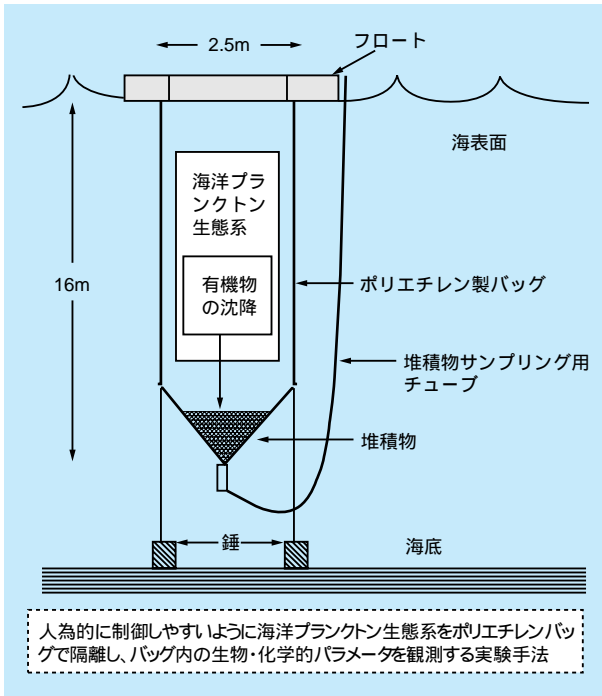


図2-2-2 閉鎖生態系実験（メスコスム実験）概要図

果を利用した。当所の海洋生態系モデルでは、光と栄養塩濃度に加えて、鉄濃度と植物プランクトン増殖の関係を表す式を組み込んで、鉄に対する植物プランクトンの増殖応答を表している。モデルの概念図を図2-2-3に示す。

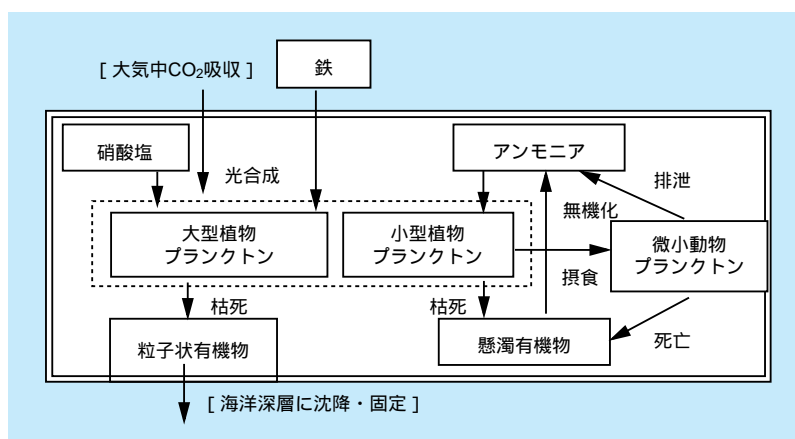


図2-2-3 鉄供給を組み込んだ東部北太平洋亜寒帯域の海洋プランクトン生態系モデル概念図

2-2-5 生物ポンプの定量的な評価を目指して

本研究はこれまで東部北太平洋亜寒帯域を中心に進められてきた。しかし、実際の海洋では海域によって物理、生物、化学的環境が大きく異なるため、微量栄養物質である鉄の役割も大きく違ってくる可能性がある。特に北太平洋亜寒帯域では、黄砂などのダストとして大気から海洋表層へ供給される鉄のフラックスの東西における差が、東西海域の生態系構造および生物による深海への炭素移送量の違いを生み出す要因になっていると考えられている。現在われわれは、北太平洋亜寒帯域を対象を広げ微量栄養物質である鉄の役割を評価するため、東西海域の鉄供給に対する生物の応答の違いと、生物的な炭素等の循環・移送機構に関するデータを集めている。また国際共同プロジェクトとして、北太平洋における鉄散布実験が平成13年度より立ち上げられている。当所もこのプロジェクトに参加し、科学的知見を集める立場でデータの収集を行っている。今後は、これらのデータをもとにモデルの高度化を行い、より正確に生物ポンプによって海洋の中・深層に運ばれる有機炭素量を見積もることにより、地球規模の炭素循環に果たす海洋プランクトン生態系の役割を定量的に評価することを目指す。

2 - 3 ま と め

本章では、温暖化の原因となる温室効果ガスの観測に関して、2つの研究成果を紹介した。以下に補足説明を行うとともに、今後の課題を整理する。

地球全体の炭素収支

化石燃料の燃焼やセメント製造によって発生するCO₂は、図2-3-1の地球全体の炭素収支に示したように、海洋や森林がそれぞれ約1/4を吸収し、残りの約1/2が大気中濃度として残存する。しかし、これらはマクロ的な評価であって、森林や海洋の吸収量を正確に推定するため、世界中で研究が進められている。本章では、大気中のCO₂濃度の観測に関しては、メタン等の温室効果ガス観測とあわせて2-1節で紹介した。海洋のCO₂吸収については、2-2節で述べているが、森林によるCO₂吸収については、4-5節の中で、CO₂の固定化方法の一つという視点から紹介しているので、そちらを参照されたい。

温暖化効果ポテンシャルGWP

京都議定書で削減対象となる温室効果ガスは、CO₂、メタン等6種類である(表1-1-1参照)。大気中に放出されたこれらガスの残存時間や温室効果の程度は様々である。そのため、CO₂を基準とした相対的な尺度として温暖化効果ポテンシャルGWP(Global Warming Potential)という尺度が用いられている。例えば、メタンの大気中残存期間は平均12年程度で、その後は減少し、CO₂の残存期間約100年に比べて相対的に短い。したがって、排

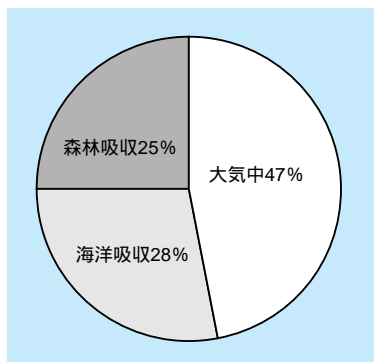


図2-3-1 排出されたCO₂の地球全体の収支バランス (IPCC第二次評価書(1995年)より)

出後20年間の期間で比較すると、メタンの温暖化効果ポテンシャルGWPは56となり、CO₂に比べて56倍も温室効果が大きい。しかし、100年では21倍に低下する。

メタンは、水田や牛のゲップが主な発生源とされているが、大気中濃度分布には不明な点が多い。2-1節で紹介したように、人工衛星観測によってメタンの全球分布が明らかになったが、十分にデータを蓄積する前に、衛星が故障してしまったことは残念なことである。再度の挑戦が待たれるところである。

気候モデル中の温室効果ガスの取り扱い

IPCCの第二次評価書(1995年)までは、各種の温室効果ガスは温暖化効果ポテンシャルGWPを用いてCO₂濃度に換算され、大気中に一様に分布するCO₂とみなされていた。その換算された総CO₂濃度に対して、気候モデル(大気・海洋結合モデル)を用いて温暖化が予測されていた。しかし、大気中に排出された硫酸化物SO₂が寒冷化効果を持つことへの関心が高まってきた。このため、第二次評価書以降の結合モデルでは、メタン等の各種の温室効果ガスの大気中濃度分布をあらかじめ予測し、それらを加算した上で温暖化を予測するという、複雑かつ高度な取り扱いを行うモデルが現れてきた。3-1節で紹介する米国NCARの結合モデルCSMは、そうした高度なモデルの一つである。

気候変化とCO₂吸収の相互作用

温暖化が進んで南半球の降水量が増えると、海水の塩分が薄くなることから成層化が進み、海洋表層での鉛直混合が生じ難くなる可能性がある。その結果、表層の植物プランクトンへの栄養塩の供給が不足し、海洋のCO₂吸収が減少することが考えられる。これにより、大気中CO₂濃度が一層増加し、温暖化が加速するという予測がある。これはいわゆるポジティブ・フィードバックといわれる現象の一つで、現状では科学的な仮説の一つと言ってよい。当所では、NCARと共同で、大気・海洋結合モデルに炭素循環モデルを組み込んだモデルの開発に取り組む予定であり、これにより気候とCO₂吸収のフィードバックの解明が進むものと期待される。

第 3 章

3

温暖化はどのように
予測するか

第3章 温暖化はどのように予測するか 目次

我孫子研究所	環境科学部長	上席研究員	丸山 康樹
我孫子研究所	環境科学部	主任研究員	吉田 義勝
狛江研究所	研究調査担当	上席研究員	西宮 昌
狛江研究所	大気科学部	上席研究員	加藤 央之
狛江研究所	大気科学部	主任研究員	西澤 慶一
狛江研究所	大気科学部	主任研究員	大島 直子
狛江研究所	大気科学部	主任研究員	門倉 真二
狛江研究所	大気科学部	主任研究員	和田 浩治
我孫子研究所	環境科学部	主任研究員	仲敷 憲和
我孫子研究所	環境科学部	主任研究員	坪野 考樹
我孫子研究所	環境科学部	主任研究員	筒井 純一

3 - 1 全球規模の気候変化.....	34
コラム4：CO ₂ 排出量から大気中濃度の推定.....	38
コラム5：ACACIAプロジェクト『21世紀の気候変化予測』.....	39
3 - 2 地域規模の気候変化.....	40
コラム6：エアロゾルの気候影響.....	45
コラム7：地球温暖化のエネルギー分野への影響.....	46
3 - 3 地域海洋の変化.....	47
3 - 4 台風の変化.....	49
コラム8：長期再解析プロジェクト.....	51
3 - 5 まとめ.....	52

丸山 康樹（8ページに掲載）



吉田 義勝（1999年入所）
大気モデル、海洋モデル、大気海洋結合モデルによる高速計算、超並列計算等の計算科学的研究、大気海洋結合モデルを用いた温暖化予測研究に取り組んでいる。

西宮 昌（8ページに掲載）



加藤 央之（1983年入所）
入所以来、大気環境問題に関連した気象メカニズム解析等に従事。1990年代から温暖化問題に携わり、1年余の影響評価に関するEPRI共同研究を経て、気候トレンド解析、地域気候モデルの開発、温暖化予測・評価研究に取り組んでいる。



西澤 慶一（1992年入所）
 専門分野は気象学。入所後、米国大気研究センターとの共同研究として地域気候モデルの開発に携わり、放射モデル・陸面モデルの改良を実施。現在は、地球温暖化に伴う東アジアの水循環変化の予測に取り組んでいる。



大島 直子（1995年入所）
 入所以来、地球温暖化にともなう東アジアにおける気候変動予測研究に従事。主に統計的ダウンスケーリングを用いた地域気候変化予測手法の開発を担当。

門倉 真二（22ページに掲載）



和田 浩治（1998年入所）
 気象学を畑とし、入所以来、夏季の異常気象の発生メカニズムに関する研究に従事。現在、地球温暖化に伴う気候極値の変化に取り組んでいる。



仲敷 憲和（1986年入所）
 入所以来、温排水拡散予測、CO₂海洋貯留等の海洋環境問題に従事。NCAR長期出張後、現在は全球気候モデルの高度化に係る海洋関連部分を担当。また、地域海洋モデルの開発にも従事し、温暖化時の日本周辺の海洋環境変化の予測に取り組んでいる。



坪野 考樹（1995年入所）
 入所以来、温排水拡散予測に関する研究に従事してきた。現在、地域海洋モデルの開発にも従事し、日本周辺の海洋流動の再現計算を行い、CO₂増加後の日本周辺海域の環境変化予測を行う。



筒井 純一（1991年入所）
 入所以来、数値シミュレーションによる温暖化予測研究に従事。特に、温暖化が台風の諸特性におよぼす影響に関する研究に主体的に取り組む。現在は、台風研究に加え、様々な環境予測研究の基盤となる高精度の気候データセットの作成にも携わる。

3 - 1 全球規模の気候変化

3-1-1 はじめに

CO₂などの温室効果ガスが増加した場合、地球全体（これを全球と呼ぶことにする）に対する100年以上の長期の気候変化は、高度かつ複雑な数値モデルにより、スーパーコンピュータを用いて予測されている。この数値モデルは、一般的に、大循環モデルGCM（General Circulation Model）あるいは単に気候モデル（Climate Model）と呼ばれている（注参照）。

IPCCの第二次評価書（1995年）が出版された時点では、全球大気モデルAGCM（Atmosphere GCM）と全球海洋モデルOGCM（Ocean GCM）を結びつけたモデルAOGCMが各国の研究機関で使用されるようになった。このAOGCMは大気・海洋結合モデルあるいは単に結合モデル（Coupled Model）と呼ばれている。

しかし、第一次評価書（1990年）の出版時点では、気候モデルはより単純であった。つまり、世界の約70%を占める海洋は、水深50m程度の一つの層（レイヤー）として近似されていた。この単純化された海洋を全球大気モデルに結合した気候モデルは、大気・海洋混合層モデルと呼ばれていた。このモデルでは、ある大気中CO₂濃度に対して、その状態での大気の平衡状態を求めことしかできなかった。例えば、2倍濃度の平衡状態から、現状濃度の平衡状態を差し引くことにより、温暖化時の気温上昇 ΔT を推定していた。このため、「CO₂の増加に伴って温暖化が何時頃からどの程度の規模で生ずるか？」といった疑問には答えることができなかった。なお、この ΔT は気候感度（Climate sensitivity）と呼ばれ、気候モデルの特徴を示す一つの尺度として現在でも使用されている。

CO₂大気中濃度の将来の増加程度を想定し（濃度シナリオと呼ばれる）、そのシナリオの元で地球がどの

ように温暖化するかを予測できるようになったのは、大気・海洋結合モデルが使用され始めた1995年頃からである。つまり、温暖化の予測研究は、意外に歴史の浅い研究分野と言える。しかし、このころの大気・海洋結合モデルは、深刻な問題点を抱えていた。フラックス調整（flux adjustmentあるいはflux correction）と呼ばれるもので、気候モデルで計算されたフラックス（運動量、熱、淡水）を人為的に調整することを意味する。これは気候モデルの不完全さを示すものと考えられ、温暖化予測の信頼性に疑問が投げられていた。例えば、ある大気・海洋結合モデルを用いて現状の再現計算を行うと、気温が一定とならず、非現実的に上昇あるいは下降し、現状気温とのズレが生じた、としよう。このズレを防止するため、大気と海洋間で交換されるフラックス（運動量、熱、淡水）の計算値を人為的に修正することをフラックス調整と呼ぶ。

この問題点が解決され、フラックス調整無しで温暖化予測が可能になったのはおよそ1997年以降のことである。本節では、まず、当所が米国大気研究センターNCAR（National Center for Atmospheric Research）との共同研究の一環として、フラックス調整なしの結合モデルにより実施した全球温暖化予測結果について紹介する。

信頼性の高い気候モデルが出現すると、20世紀に観測された気温上昇の再現計算が可能になり、計算結果と観測値とを直接比較することができるようになった。この研究成果は、IPCCの第三次評価書（2001年）でレビューされ、気温上昇は人為的な影響であるとの有力な判断材料となっている（1-1章のコラム2参照）。

また、観測データと比較することにより、気候モデルの精度を検証することが可能になり、温暖化予測の信頼性を判断できる客観的データが提供されるようになってきたことも最近の大きな進歩である。当所が参加した国際共同研究ACACIA（本節のコラム4参照）では、フラックス調整を行わないモデルを用いて、過去の気候の再現計算を行うとともに、CO₂濃度安定化シナリオの温暖化防止効果について将来予測を実施した。本節では、次に、この結果についても紹介する。

（注）海面上昇の原因となるグリーンランドや南極の氷床の融解、海洋の深層への熱輸送による海水膨張等は、非常にゆっくりした現象である。このため、海面上昇は数百年～1000年程度の超長期の現象となり、気候モデルでは直接予測できず、気温上昇等の予測値から別の方法で推定されている。

3-1-2 125年間の温暖化予測

当所では、1992年から米国NCARと共同研究を実施してきている。NCARでは、フラックス調整を行わない結合モデルCSM (Climate System Model) の開発を進め、CO₂濃度一定とした300年間の連続計算を行い、温度ドリフトがないことを確認した (Climate System Model Special Issue, 1998)。しかし、このモデルは計算時間が長くなることから、温暖化予測計算は電中研が分担実施することになった。1997年、NEC、SONYの協力を得て、NECの並列スーパーコンピュータSX-4/32CPU (ピーク性能64Gflops) を用いて125年間の温暖化予測を実施した。

モデル概要

図3-1-1に、温暖化予測に用いた大気・海洋結合モデルNCAR・CSMの構成を示す。このモデルは、大気、海洋、海氷、地表面 (陸面) の4つのサブモデルから構成され、約45万行程程度の複雑な3次元プログラムである。各サブモデル間のフラックス (運動量、熱、淡水) はFlux couplerと呼ばれるサブプログラムを介して各要素モデルに伝達される。各サブプログラムは並列コード化されており、それらを結合する方法にはMPIと呼ばれる並列計算用の通信技術が使用されている。この方法は、多数のCPUから構成される並列スーパーコンピュータを効率的に利用出来る点で優れた方法と言える。

濃度シナリオ

地球温暖化の予測にあたっては、まず、将来の大気中

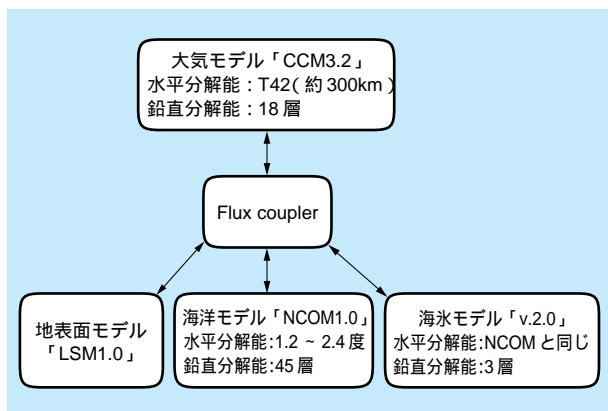


図3-1-1 温暖化予測モデル (NCAR・CSM) の構成

CO₂濃度を前提条件として決定する必要がある。予測に用いたシナリオを図3-1-2に示す。このシナリオでは、10年間は355ppm (1991年時点の濃度) で一定として、その後は年率1%で115年間増加させる。この増加率では、70年後に現状の約2倍濃度、110年後に約3倍濃度に達する。なお、毎年1%増加のシナリオは、単純であるため、気候モデルの性能を比較する目的で良く使用されていた。ちなみに、無対策シナリオBAU (Business as Usual) として有名なIS92.aシナリオは、毎年約0.7%程度の増加率で、約100年後に現状濃度の2倍に達し、濃度増加は若干遅い。

予測結果

大気モデルの計算時間間隔 $t=20$ 分として、125年間の温暖化予測計算を行った。計算時間は、NEC SX-4/32CPUで、1年間では約100分、125年間では約200時間 (約9日間) であった。数値出力データの合計は170GBに達し、当時のスーパーコンピュータの技術水準では計算時間、出力量とも記録的な数値である。ちなみに、この結合モデルを構成する大気モデルの空間分解能は約300kmであり、2001年時点においても世界で最も高解像度の結合モデルの一つである。

さて、図3-1-3は、全球平均地表気温の月平均値に関して、その125年間分の変化を示したものである。図には、年率1%増加シナリオに対する漸増計算の他に、NCARで実施されたCO₂濃度一定計算 (300年間の計算の一部) も示している。いずれも細い線が月平均値で、太い線は年間平均値 (12ヶ月の移動平均) である。両

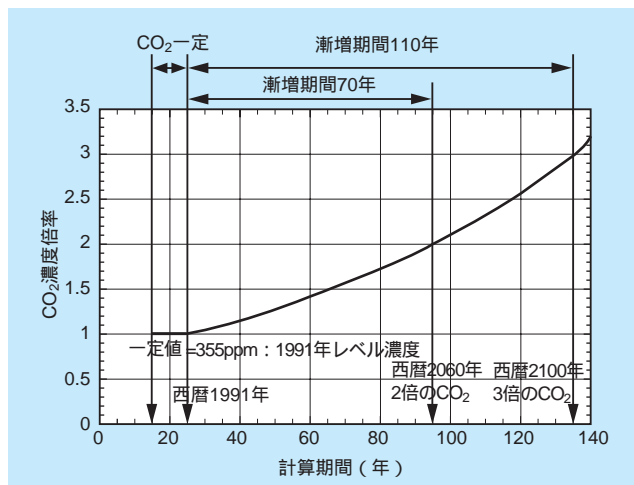


図3-1-2 予測に用いた大気中CO₂濃度シナリオ

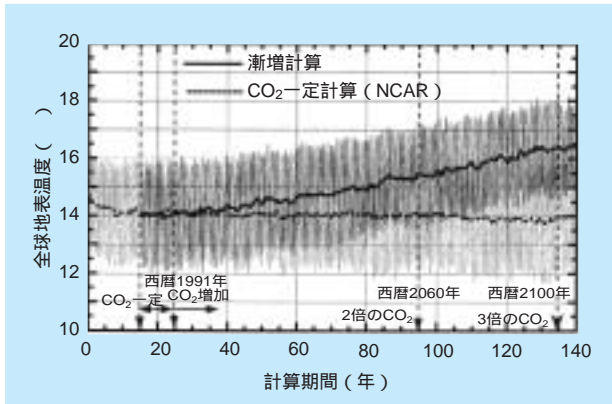


図3-1-3 全球地表気温（月平均）の予測結果

者の差がCO₂増加による気温上昇である。図から、CO₂濃度が2倍になる2060年頃では約1.5℃、3倍濃度になる2100年頃では約2.3℃、全球気温が上昇する。大気中のCO₂増加速度と気温上昇には密接な関係がある（IPCC第二次評価書（1995年）参照）。この予測は年率1%増加シナリオの結果で、BAUシナリオ（IS92.a）より増加する速度が大きく、濃度2倍時と比較すると、温度上昇はBAUに比べて低く予想される（後述の図3-1-6の結果と比較されたい）。つまり、温暖化現象では、CO₂濃度の増加する速度も重要である点に注意が必要である。

図3-1-4は、CO₂倍増時の気温上昇量の空間分布である。この図のように、気温上昇は全球一様ではなく、北

半球ではグリーンランド、ベーリング海周辺、南半球では南極周辺の気温上昇が大きい。これは、温暖化によって海水が融解することが影響している。

図3-1-5は、南北両半球の海水体積の変化を示したものである。細線は1日毎の変化を示し、太線は年間平均値である。北半球の海水体積は、20年前後の周期的な変動を示しながら、徐々に減少していくことがわかる。両半球とも、CO₂濃度が2倍になると、現状の約80%まで減少し、3倍濃度時では約50%まで減少すると予測された。ただし、これは海水の融解なので、これにより海面が上昇することはない。ちなみに、海面上昇に関係するのは、南極、グリーンランドにおける淡水起源の

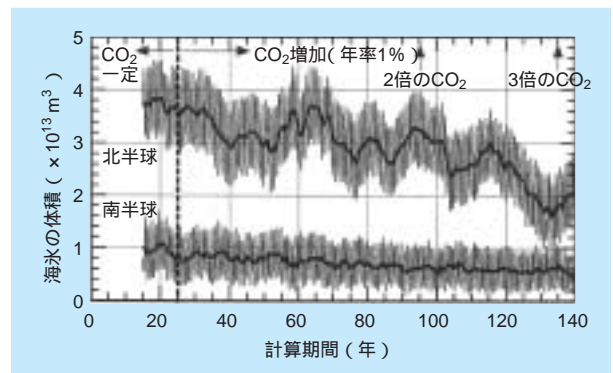


図3-1-5 南北両半球の海水の融解

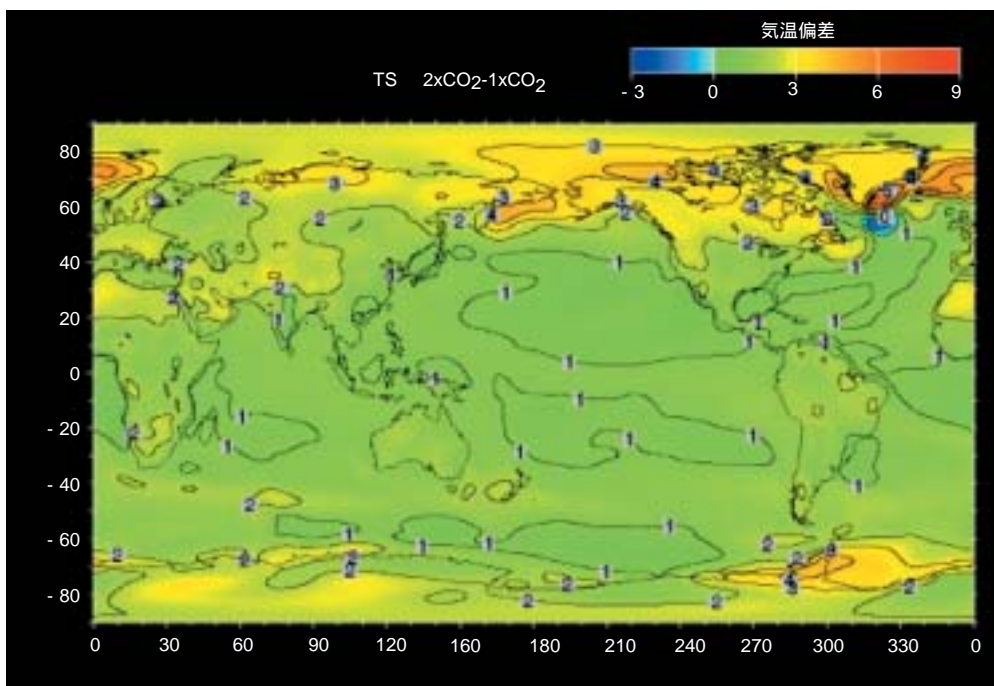


図3-1-4 温暖化時の地表気温の分布（濃度倍増時）

氷床の融解である。

この他に、全球の降水量は、CO₂濃度倍増時では約2.3%、3倍時では約3.8%増加すると予測された。また、海洋の中深層の海流は全般的に減少する傾向にあり、グリーンランド周辺から南下する水深約3,000mの流れ（熱塩循環）の衰退が顕著である。ただし、この予測では、海洋の熱塩循環が停止するまでには至っていない。

なお、この結果は、3-2節の地域規模の気候変化、3-3節の地域海洋の変化、3-4節の台風の変化の各予測において、境界条件として使用されている。

3-1-3 20世紀/21世紀プロジェクト

より現実的なCO₂濃度シナリオについての温暖化予測は、当所が参加した国際共同研究ACACIAの20世紀/21世紀プロジェクトとして実施された（1998年、詳細は本節のコラム4参照）。

その結果を図3-1-6に示す。この予測では、21世紀のCO₂濃度シナリオとして2種類を想定している。一つは、CO₂削減などの特段の対策をとらないBAUシナリオで、IPCCが1992年に作成したIS92.aをベースにしている。もう一つは、産業革命以前の濃度280ppmの約2倍である550ppmに濃度を安定化するWRE550安定化シナリオ（Wigley et al.,1996）である。ちなみに、BAUシナリオ

では、2100年時点の濃度は1990年の約2倍の710ppmとなる。なお、大気中のSO₂は寒冷化をもたらすが、IS92.aでは排出量が非現実的に過大評価されているため、下方修正してある。

使用された結合モデルは、125年間予測に用いたNCAR-CSMの改良版であるが基本的には同じで、フラックス調整を必要としないことが特徴である。これは、図のCO₂濃度一定計算において、気温が一定して安定していることから、その効果を確かめることができる。全球気温の観測値は、19世紀中ごろから1990年までの間に約0.5 上昇した。気候モデルは、この気温上昇を良く再現できるが、1940年の前後約20年間については観測値の上昇を再現できず、モデルの信頼性に依然問題が残されている。

21世紀の予測結果では、BAUシナリオでは1990年比で気温が約2 上昇、WRE550安定化シナリオでは約1.5 の上昇と予測され、CO₂濃度を550ppmに安定化させるとその効果は約0.5 程度と予測される。550ppmに濃度を安定化するには、相当大幅な排出削減が必要となるが、それが地球温暖化の防止におよぼす効果は意外に小さいとも言える。しかしながら、濃度安定化レベルと温暖化防止効果の関係については、台風等の異常気候の変化も含めた高信頼度の予測が不可欠であり、今後の重要な課題である。

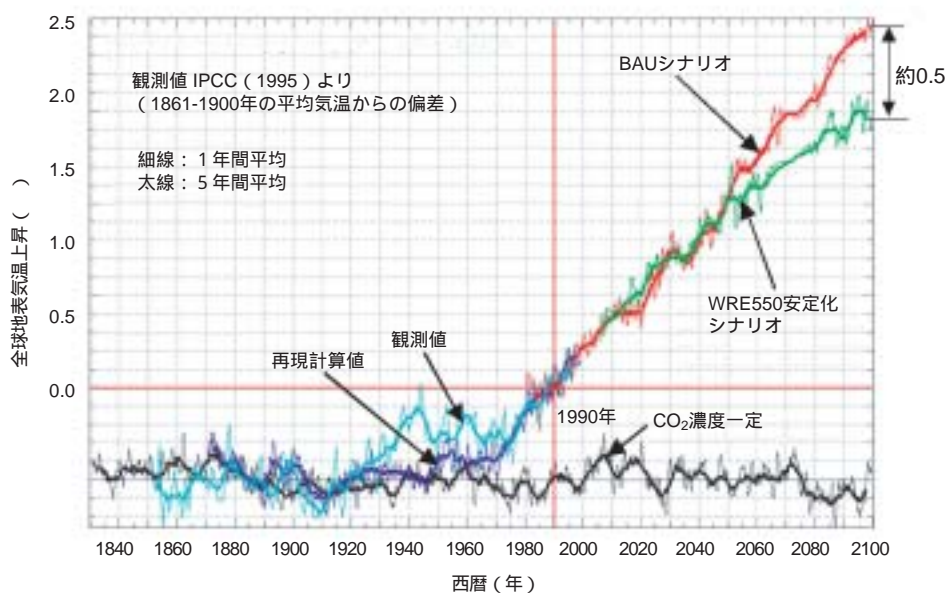


図3-1-6 20世紀の気温再現計算と21世紀の温暖化予測（国際共同研究ACACIA成果）

コラム4：CO₂排出量から大気中濃度の推定

CO₂排出量から大気中CO₂濃度を推定する、あるいは逆に、濃度から排出量を推定する主なモデルには2種類ある(Wigley ; 1993, Joos et al., 1996)。当所の温暖化予測では、Wigley (1993) のモデルを用いている。

推定方法の概要

ある時点(t)の大気中CO₂濃度をC(t)とすると、次式が成立する。

$$2.123dC(t)/dt = \text{排出量} - \text{吸収量} = I + D_n - F - X$$

ここで、濃度C(t)の単位はppmである。Iは化石燃料、セメント製造からの排出量、D_nは土地利用変化(森林破壊等)による正味の排出量である。また、Fは海洋の吸収量、Xは陸上植生による吸収量である。排出量、吸収量の単位はGtC/year(炭素換算で年間10億トン)である。植物吸収量の推定では、CO₂の増加とともに吸収量が増加する効果(施肥効果)や森林の再成長を考慮していることが特徴である。

観測データとの比較

図1に、CO₂濃度推定モデルによる大気中濃度計算結果(1765年~2000年)と観測データとの比較を示す。モデルでは、1990年以前のデータはパラメータ調整に用いているので、観測データとの比較は意味がない。1991年以降では、観測データの平均増加率約1.5ppm/year、計算値約1.8ppm/yearと相違があるが、全体の傾向は良く一致している。

問題点

このモデルでは、CO₂海洋吸収量の推定に無機炭素は考慮しているが、有機炭素(2-2節参照)は考慮していないこと、海洋吸収量を過大に評価するなどの問題点がある。

また、このモデルでは、1980年代に行われた熱帯雨林などの森林破壊による排出量D_n(1980s)の不確実性が、大気中CO₂濃度の推定におよぼす影響が非常に大きい。例えば、2100年で見ると、D_nの上位、下位推定値に対応するCO₂の大気中濃度推定幅は約70ppmにも達する。

京都議定書の大気安定化効果の試算

図2は、京都議定書にしたがって、先進国が2010年に1990年排出量の5%を削減した場合(シ

ナリオ1)、さらに2020年に先進国が25%~75%までの大幅な削減を行った場合(シナリオ2~4)の大気中濃度を試算した結果である。図によれば、先進国の削減だけでは大気中濃度の安定化は極めて難しいことがわかる。これは、途上国の排出量が増加するためである。

今後の課題

国連気候変動枠組み条約(UNFCCC)の究極の目標は、「気候システムに対して、“危険”な人為的干渉を与えないレベルで温室効果ガス濃度を安定化させること」、である。濃度推定モデルは、排出削減が大気中濃度の安定化に及ぼす効果を推定する極めて重要な手法であり、今後その信頼性向上が大きな課題である。当所では、2001年度から、海洋および森林によるCO₂吸収量の推定精度の向上のため、研究を本格的に開始したところである。

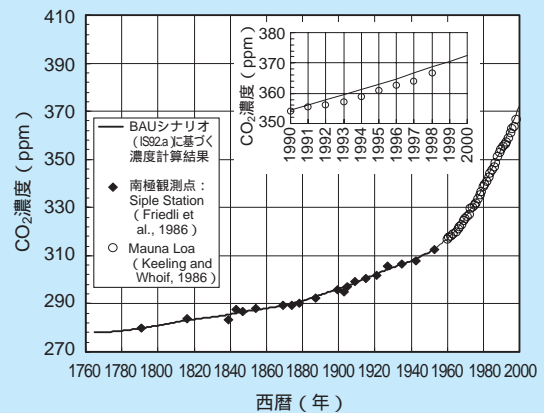


図1 CO₂大気中濃度と観測データの比較

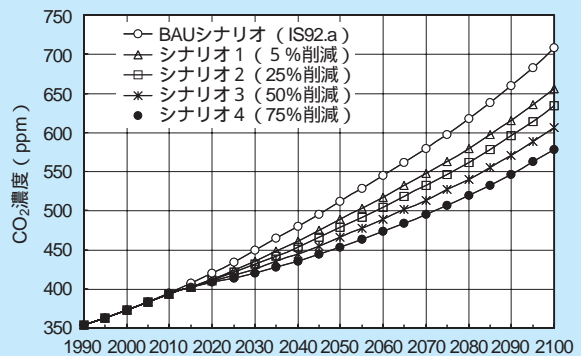


図2 CO₂排出削減の濃度安定化効果の試算

コラム5：ACACIA プロジェクト『21世紀の気候変化予測』

ACACIA (A Consortium for the Application of Climate Impact Assessment ; 気候影響評価応用のためのコンソーシアム) は、その前身である MECCA (Model Evaluation Consortium for Climate Assessment ; 気候影響評価のためのモデル評価コンソーシアム) を引き継ぐ国際研究プログラムとして、当所の他、EPRI (米)、KEMA (蘭)、NCAR (米) がコアメンバー となって1996年1月に発足した (2000年12月まで)。世界の研究機関や研究者が単独では取り組むことが困難な気候変化に関わる特定の問題に焦点を当て、最新の気候モデルGCMを用いて気候変化とその影響を評価することが目的である。

その代表的な研究プロジェクトが『21世紀の気候と環境の変化』である。

これは、世界最先端の気候予測のための大気海洋結合モデル (NCAR-CSM) を用いて、2100年の大気中CO₂濃度が710ppmになる無対策シナリオ (BAU) と、現状の1.5倍 (産業革命前の約2倍) の550ppmに安定させたときの気候変化をシミュレーションし、気候安定化効果を比較・評価するものである (図1)。気候予測のための結合モデル (NCAR-CSM) は、温室効果ガス (6種) と冷却効果を持つ硫黄化合物の化学と輸送を模擬できるアルゴリズムを持ち、ドリフトを避けるための「フラックス調整」の必要がないなど、従来の気候モデルには見られない多くのユニークな特徴を持っている。

IPCC第二次評価書では、エネルギー (化石燃料) 消費の増大によって大量のSO₂が排出され、大気中で形成された大量の硫酸エアロゾルの冷却効果によって温暖化が一部相殺される、というシナリオが主流だったが、ACACIAでは1992年のIPCCシナリオとは異なり、中国等の途上国においても酸性雨や大気汚染防止対策の導入を考慮した21世紀の現実的なSO₂排出シナリオが設定された。

シミュレーションの結果は図3-1-6に示す通りであり、1990年から2100年の間で、地上気温はBAUでは2.5、安定化ケースでは2.0 上昇する。即ち、

安定化ケースはBAUに比べ2100年の気温を0.5低下させる効果があることがわかった。また、降水量は地域によって異なるが、全体としては数% ~ 10%増加すると予想された。

これらのシミュレーション結果は、GCMによるエネルギー削減シナリオ評価に弾みをつけた。また、結果およびSO₂排出シナリオはIPCC第三次評価報告書に採用され、政策決定者・気候研究者から高い評価を得た。

当所は、地域気候モデルの境界条件やエネルギー・シナリオの検討・評価に利用すると共に、人間の健康、水資源、農業、自然生態系および経済、等に対する将来起こり得る影響を分析・評価する際の有力な情報として、活用する予定である。

なお、NCAR-CSMは、本文で述べたように、現在もNCARによって改良研究 (第2世代結合モデル) が鋭意継続されており、当所は適宜、当所のスパコン (VPP5000) への移植を行っている。数年以内に気候の変動性の再現性向上を目指した温暖化予測計算を行う予定である。

また、ACACIAは気候研究をリードするその分野の第一線研究者によるエキスパート・ワークショップを企画し、これまで、急激な気候変動をもたらす恐れのある「熱塩循環」(1999.11) や「降雨の極値」(2001.4) に関するワークショップを開催した。

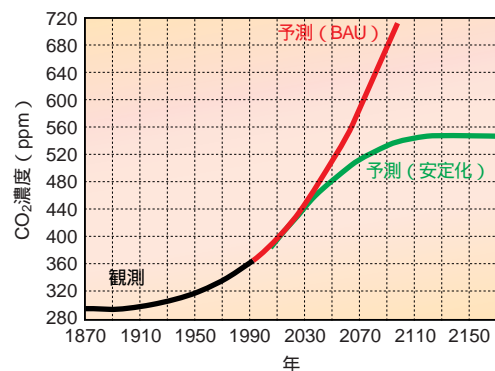


図1 CO₂排出シナリオ (ACACIA, 1998)

3 - 2 地域規模の気候変化

3-2-1 地域規模の気候変化を予測する手法

前節で述べたように、気候の変化を予測するには全球気候モデルが有用である。しかし、現在の段階では全球気候モデルの水平解像度は200～300km程度にしか過ぎないため、温暖化に伴う気候変化が自然環境や生態系、社会などに与える影響を評価する場合には入力情報としては不十分である。わが国における影響評価を考えた場合、少なくとも数10kmのスケールの情報が必要とされる。現在、スーパーコンピューターの発達に伴い、より高解像度の全球気候モデルによる予測を行う研究は着々と進められているが、その完成を待ってから影響評価を行い、対策を考えていたのでは間に合わないことが懸念される。そこで、粗い解像度の全球気候モデルの情報から、より詳細な地域情報を取り出す手法が検討されてきた。このような手法のことをダウンスケーリングと呼ぶ。ダウンスケーリングは統計的な手法（以下Stat-DS）および全球モデルと同様な物理モデルである地域気候モデル（以下RegCM）を用いた方法の2つに分けられる。

統計ダウンスケーリング（Stat-DS）

冬季における地上の寒さの指標として、天気予報では例えば輪島上空の5,500mの気温を用いることがある。すなわち、ある時刻の上空の気温と、同時刻（あるいは数時間後）における地上の観測地点の気温との間に何らかの統計的な関係があれば、上空の気温がわかっている場合に地上の気温を推定することができる。Stat-DSはこのような原理に基づき、一般に多変量解析法と呼ばれる統計手法を用いて構築される。図3-2-1には当所が開発した手法の概念図を示す。この場合、上空の気温の分布は比較的一様であるので、全球気候モデルの粗い解像度のデータでも地上の気温の予測には十分利用できる。

地域気候モデル（RegCM）

RegCMは全球気候モデルと同じ物理モデル（数値モデル）であるが、水平解像度はさらに細かく、一般に数10～100km程度になっている。この手法では、特定の地域（例えば東アジア）を対象としたRegCMが全球気候モデルの中にはめ込まれ、全球気候モデルで計算された粗い解像度の情報をRegCMの側方および下方から入力してやり、その特定地域の気象要素を更に高解像度で

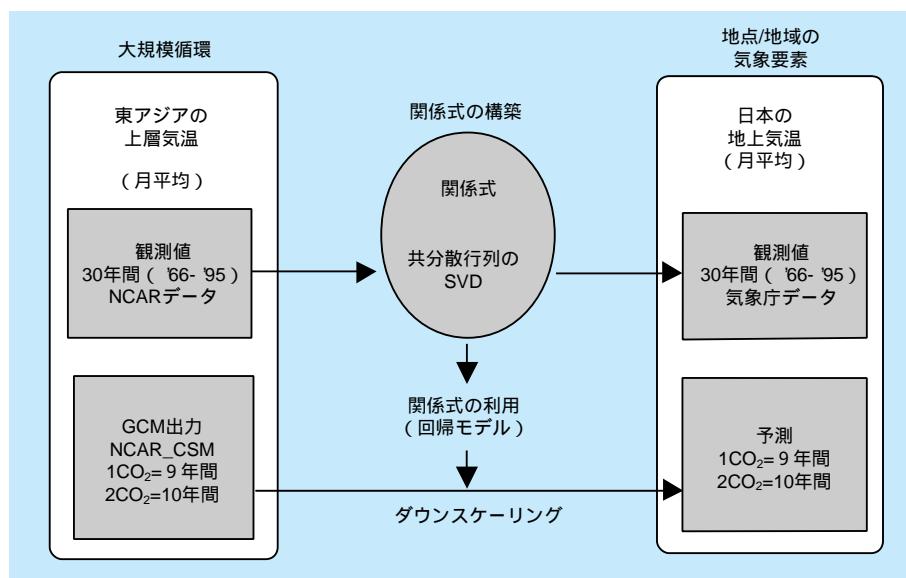


図3-2-1 統計ダウンスケーリング手法を用いた気候変化予測手法の概念図
観測値から得られる上層と地上気温の関係式を利用し、全球気候モデルの出力結果を地域レベルの情報に翻訳する。

計算するものである（図3-2-2）。この手法は現在の天気予報に用いられている手法と基本的には変わらないが、地球温暖化の予測といった長期的な計算のためには気候状態を正しく再現することができるような様々な工夫がなされている。

Stat-DSは過去の気象観測データがあればRegCMのように多大な計算機資源を必要としないことから、比較的に利用しやすいが、物理的な変動メカニズムは別途解析によって明らかにする必要があり、また、将来の統計的な母集団が過去の母集団から大きく逸脱しないという前提に成り立っている点に弱点がある。一方RegCMはこうした制約はないものの、計算機資源の制約から解析の例は限られてくる。このように両手法には長所・短所があるため、相互補完しながら適用することが必要である。

3-2-2 統計ダウンスケーリングを用いた気候変化予測

当所では上空の気温から地上の観測地点の気温を推定するStat-DSを開発した。この手法では、東アジア地域の上空3高度（500hPa、700hPa、850hPa：地上高度に直してそれぞれ約5,500m、3,000m、1,500m）の気温分布パターンからわが国の地上気温分布パターンを求めるもので、多変量解析手法を用いた回帰を利用している。

1月の月平均気温に関する手法を検証するため、過去20年間のデータを用いて上空と地上気温の関係式を構築し、それに続く10年間の地上気温を上空の気温から推定した。推定値と観測結果との比較によれば、各年を推定した推定誤差の平均（RMSE）は年々変動の大きい北海道の一部を除いて1程度程度の値であった。

本手法では関係式の構築に必要なデータ期間がまだ限られていることから、今後、利用できる観測データの期間が増えれば、誤差はより少なくなるとみられる。また、夏季の気温では、冬季よりも誤差が大きくなる傾向にあったが、これは地上の気温が上層の気温のみならず、周辺海域の海面水温などに大きく左右されることも関係しており、今後、関係式の構築にあたってはこうした様々な気候要素も取り入れていく必要があると考えられる。

降水量の変動メカニズムはさらに複雑なため、降水現象をその類似性に基づくいくつかのパターンに分けて、予測の体系化を図る試みもなされているが、気温に比べて精度はまだ十分ではなく、更に多くの気候要素を取り込んだ検討が必要である。

3-2-3 地域気候モデルを用いた気候変化予測

当所はNCAR（米国大気研究センター）との共同研究においてRegCMの開発を行ってきた。計算で用いた

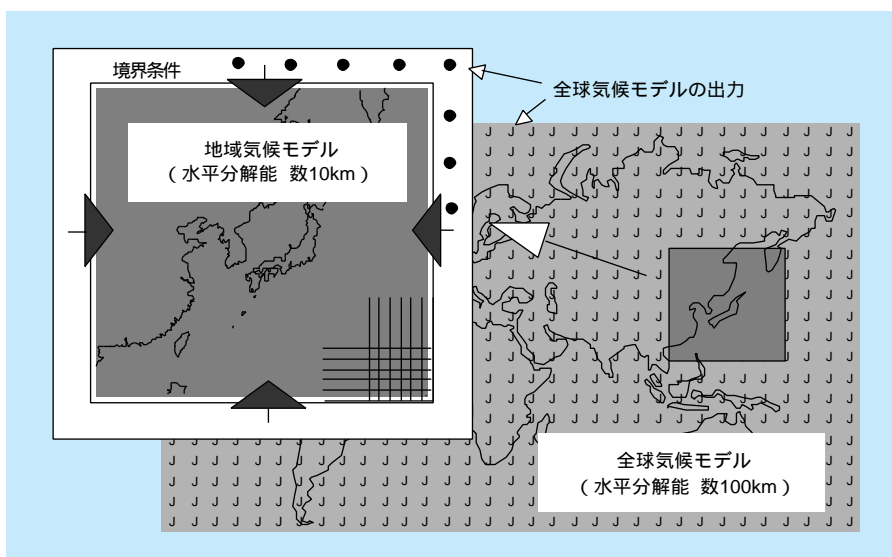


図3-2-2 地域気候モデルを用いた気候変化予測手法の概念図

粗い解像度の全球気候モデルの出力結果を側方境界条件として特定地域の気候変数の分布を高解像度の地域気候モデルにより計算する。

モデルはNCAR-RegCMバージョン2.5および3.0であり、東アジアの東西約5000km、南北約5000kmを対照として水平解像度は50km、鉛直14層で構築されている。RegCMを用いた気候変化予測を行う場合、まず、全球気候モデル/RegCMの結合計算において現在の気候変化を正しく再現できるかを検討しておく必要がある。図3-2-3にはRegCMで計算された1月の10年平均降水量を全球気候モデルで計算された結果の直接的な内挿結果と比較して示している。冬季の季節風に伴って生じる日本海側の降水量がRegCMでは明瞭に再現されている。一方、夏季の特徴である梅雨前線についても全球気候モデルではあまり明瞭に再現されないものの、RegCMでは日本付近の気流の収束に伴う降水帯が再現されており、その有用性が示されている。

RegCMを用いた気候変化予測実験用に、前節で示さ

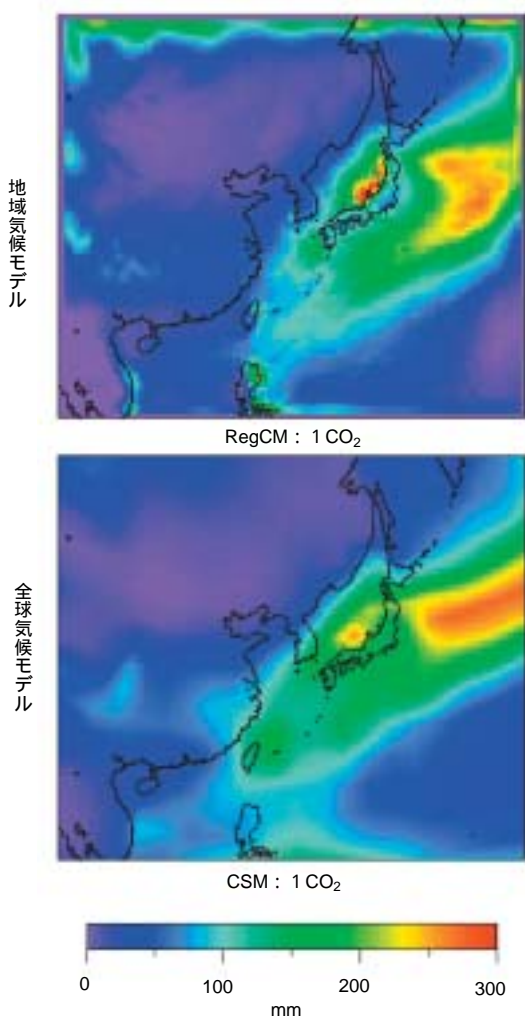


図3-2-3 地域気候モデルおよび全球気候モデルにより計算された現状の1月の降水量の比較

れたNCAR-CSMのCO₂漸増実験結果を利用した。図3-2-4にはCO₂倍増に伴う6月の降水量変化が地域気候モデルによる計算結果と、全球モデルの内挿結果で比較されている。一般に海面気圧、気温などの要素については全球モデルの結果とRegCMの概略的な分布パターンはそれほど差がない。ところが、この例のように、降水量については前線帯の再現性が異なっていたり、細かい解像度で示された地形の影響が、地域気候モデルでのみ良く再現されたりするため、季節的にはパターンに大きく差が見られ、地域によっては全球モデルとRegCMで増減傾向さえも異なる。

図3-2-5にはわが国の4つの地域（北海道、北陸、関東、九州）を対象とした計算結果をまとめて示す。今回用いた全球気候モデルの結果が地域レベルの再現または予測計算を行うにはまだ十分ではなかったため、地域、季節によっては再現計算にまだ誤差が見られた。従って、

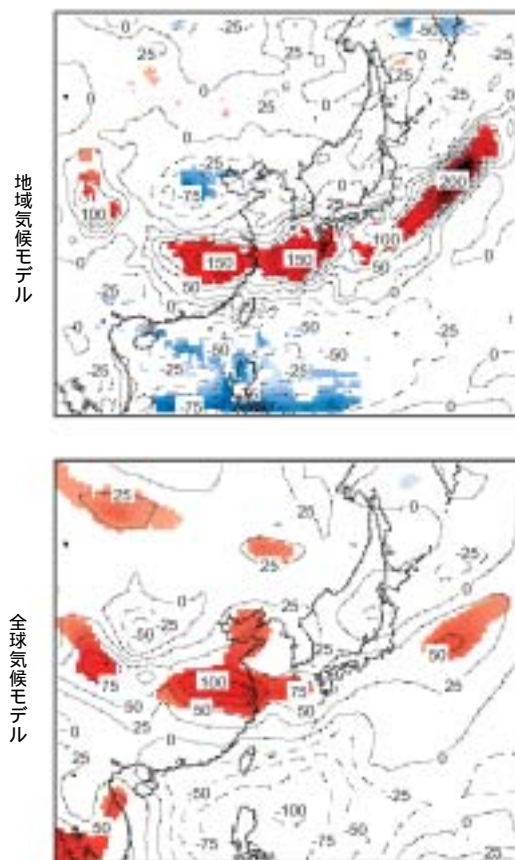


図3-2-4 地球気候モデルおよび全球気候モデルにより計算されたCO₂倍増に伴う6月の降水量の変化の比較
変化が統計的に有意な地域のみ赤(増加)青(減少)のカラーで表示。

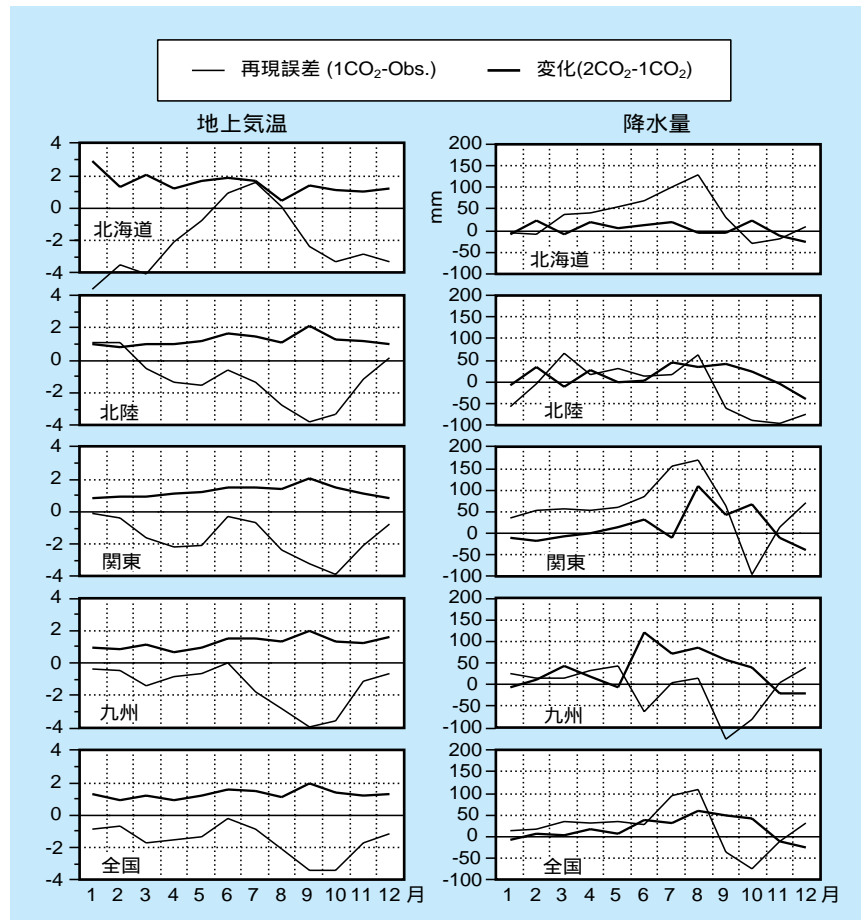


図3-2-5 わが国の4つの気候地域における月平均気温(左図)、月降水量(右図)の再現誤差(細線)およびCO₂倍増に伴う変化(太線)の季節性
黒丸(白丸)は1%(5%)の水準でCO₂倍増に伴う変化が統計的に有意であることを示す。最下段の図はわが国の全国平均値に対する結果

地域気候変化予測結果としての妥当性を評価する段階に至るにはまだ時間がかかるが、北海道の冬季の気候上昇を除けば気温の上昇は夏季に有意であること、気温の変化傾向は降水量の変化傾向に比べて比較的顕著であることなどは系統だった傾向として示されている。これらを含めて結果には興味深い点もあり、今後の予測実験との比較で検証が望まれる。

3-2-4 手法の比較

全球気候モデルの結果をStat-DS、およびRegCMでダウンスケーリングした結果を図3-2-6に比較して示している。ここでは1月の月平均気温に関する現状の全国平均値の再現結果(9年間)とCO₂が現状の2倍に増加した時(10年間)の結果を例として示している。現状、CO₂倍増時ともRegCMの相対的な低温傾向を除けば、

年々変動は両手法で良く一致した。RegCMの低温傾向は全球気候モデルにおける海氷領域の過大評価がRegCMでのみ強く反映されていることなどが原因である。

7月の気温の再現・予測結果は1月より両手法の差が大きかったが、これは地上気温を支配する要素が夏季にはより複雑であるためである。今後、RegCM結果との比較検討を通じて変動メカニズムと支配要因(気候要素)を明らかにし、例えば、海面温度などの要素の追加などによりStat-DSはより改善されると見られる。

地球温暖化の影響評価を行うにあたって、地域レベルでの気候変化予測情報が必要であり、これらのダウンスケーリング手法の開発は重要である。しかし、今後、最も重要なのは最終的な結果を左右する全球気候モデルの気候再現精度をより向上させることである。

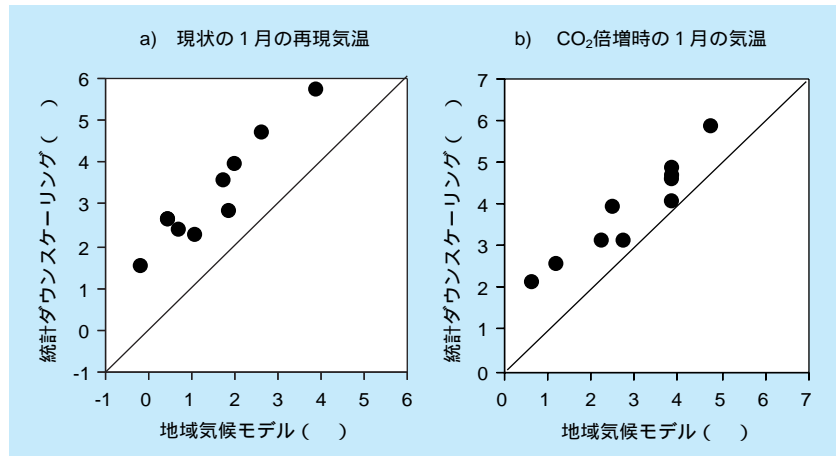


図3-2-6 NCAR-CSMの出力結果に対し、地域気候モデルと統計ダウンスケーリング手法を用いて得られた結果の比較

- a) 現状の1月の日本の地上平均気温(9年分)の再現結果
- b) CO₂倍増時の1月の日本の地上気温の予測結果(10年分)

コラム6：エアロゾルの気候影響

エアロゾルによって引き起こされる人為的な気候変化が社会的な関心を集めている。エアロゾルとは、大気中に懸濁している液体または固体の微粒子の総称であり、その地理的な分布が非一様だけでなく、化学組成および粒径分布が非常に多様という特徴がある。エアロゾルの気候影響に関して、最近、多くの知見が蓄積されつつあり、IPCCの最新レポート『気候変化2001』でも、主要な課題のひとつとして取り上げられているが、まだ不確定な部分も多い。

東アジアは、ヨーロッパ、北アメリカ東部と並んで二酸化硫黄（ SO_2 ）の人為的な排出量が多い地域であり、結果として、硫酸塩（ SO_4^{2-} ）エアロゾルも多く存在している。21世紀の東アジアにおける気候変化を予測するためには、硫酸塩エアロゾルの放射効果を、気候変化の予測モデルに取り入れる必要がある。硫酸塩エアロゾルの放射効果には、

直接放射効果（エアロゾル自体が太陽放射を散乱する効果）

間接放射効果（雲凝結核としてはたらい、雲の放射特性を変える効果）

の2種類がある。

当所では、硫酸塩エアロゾルの直接放射効果を考慮した地域気候モデルを開発してきた。さらに、このモデルを用いて、現状のエアロゾル気柱量（図1）を4倍した感度実験を行った。東アジアの地上気温低下を見積もったところ（図2）、硫酸塩気柱量が大きい中国大陸の工業地帯を中心として、地表面での下向き放射量の減少による、比較的大きな地上気温低下が認められた。

今後、硫酸塩エアロゾルが地域気候に及ぼす放射影響をより正確に見積もるためには、直接放射効果のみならず、間接放射効果をも含めた総合的な評価が必要となる。また、東アジアにおける将来の気候変化は、二酸化硫黄の排出量に依存するので、できるかぎり現実的な排出シナリオを用いて予測しなければならない。

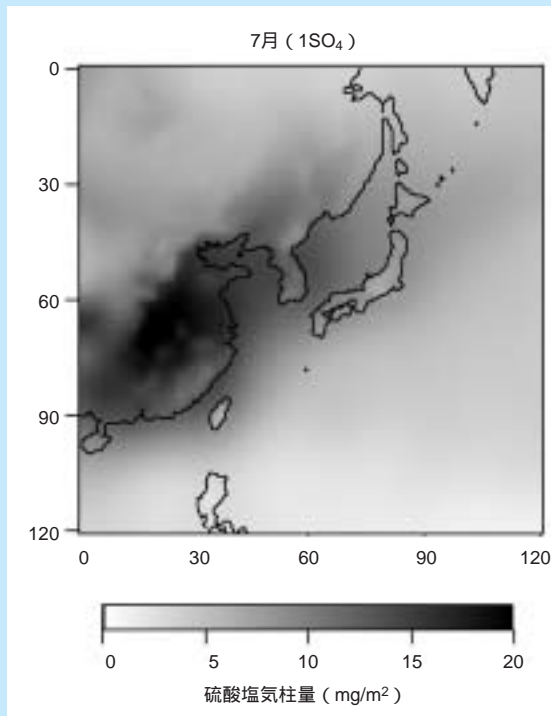


図1 NCARの硫酸塩化学モデルを用いて再現された、夏期（7月）の東アジアにおける硫酸塩気柱量

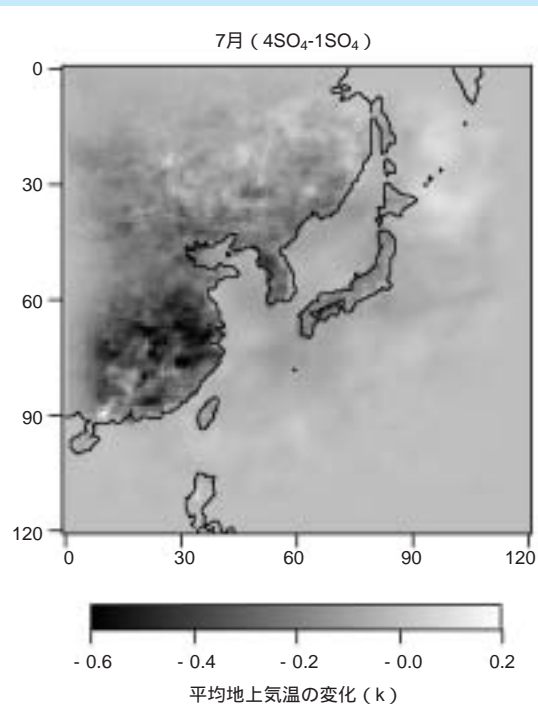


図2 地球気候モデルにより計算された、硫酸塩気柱量を4倍増したときの平均地上気温の変化

コラム7：地球温暖化のエネルギー分野への影響

[産業・エネルギーへの影響]

産業活動は気象の変化に敏感であり、エネルギー需要もそれに応じて常に変動している。

一般に、気温が上昇すると、空調用の電力需要が増え、給湯用のガス需要が減る。6～8月の平均気温が1℃上昇すると、夏物商品の消費が約5%増加する。夏季の電力需要の40%は冷房需要であり、気温が1℃上昇すると電力需要は約500万kW（一般家庭の160万世帯分）増加する。また、降水パターン（降水量・強度・時期、継続時間）の変化は産業・農業・民生などにおける用水の利用形態に影響を及ぼす。

温暖化により、エネルギー消費構造が変化し、遂には産業構造の変化に波及するのは避けられない。

高温期の長期化は夏物商品の消費増をもたらし、その結果、夏物商品を扱う電機・食品・衣料メーカー等の生産体制が強化され、電力需要が増加する。さらには、健康被害や罹患率が増加し、少子高齢化社会と相俟って、社会全体の労働供給力の低下も考えられ、生産性を保障する社会基盤も揺るがしかねない。

異常渇水は生活用水に影響し、工業用水依存型業種における給水制限による減産や操業停止をもたらす。特に、産業・民生・農業用水等の水・電力需要が最多となる夏季の渇水の継続は、晴天・高温の継続をも意味し、冷房用電力需要にも拍車がかかるだろう。

サービス経済化の進展、情報通信社会の形成、快適指向の高まり、電力料金の値下等を反映して、エネルギーの電力シフトは今後も続くと考えられる。省エネとともに非化石エネルギーが増えない限り、発電に伴うCO₂排出量は増加する。

温暖化は、電力供給にも様々な影響を及ぼす。降水量や積雪量の変化は水力発電に大きな影響を与える。火力・原子力発電所の発電効率は冷却水温度に依存するため、冷却水温が1℃上昇すると火力で0.2～0.4%、原子力で1～2%の発電出力が低下する。雷、雪氷、塩害などの架空送電線に対する影響も考えられる。

[産業・エネルギーの適応策]

わが国のエネルギー・産業分野は、ハード・ソフト両面で安全係数の考慮やセーフティ・ネットにより、一般には気候平均値の変化であれば影響は軽微であると考えられる。他方、温暖化によって、過酷・突発的・予期せぬ事象等、極値の増加や不可逆的事象の発生による深刻な災害（リスク）が懸念される。図1に示すように、気温の出現頻度分布は分散（変動成分）が大きく変化する可能性がある。分散の拡大やシフトは、極値の増加や継続時間の長期化を意味する。しかし、現状では予測が困難なため、このような極値の発生（質・量・可能性など）に関する予測手法を確立し、現行システムが極値の変化に対しどこまで耐えられるか、そのリスクを評価し、リスクを克服するための長期戦略が必要であろう。それによって、温暖化のリスクを軽減・回避するための技術開発・システム設計が進む。

また、異常気象（猛暑・冷夏・大雨等）の影響を回避する保険システムとして「天候デリバティブ」の導入も加速するであろう。

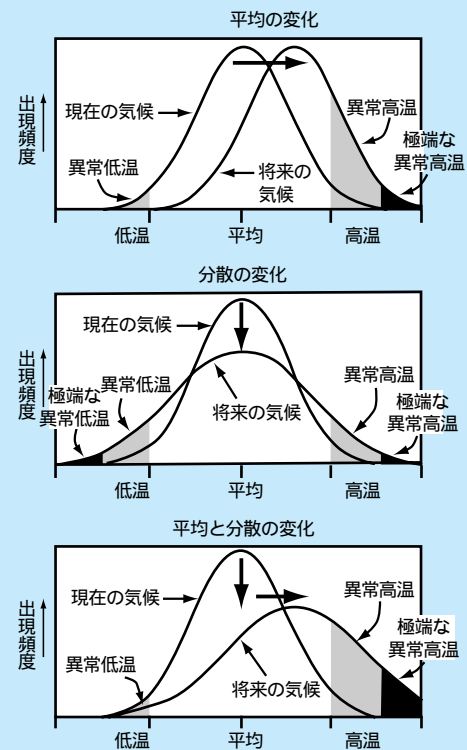


図1 予想される気温の出現頻度の変化
(IPCC TAR WGIIの報告書より作成)

3 - 3 地域海洋の変化

3-3-1 温暖化と海洋環境

地球温暖化が海洋に及ぼす影響としては、気温の上昇、海上風や降雨の変化、陸上からの淡水供給や海水分布の変化などに伴う、海水温の上昇、海流の変化、海面の上昇、塩分の変化等が考えられる。海面上昇は、沿岸域での構造物の水没や氾濫、自然環境の破壊等をもたらす可能性があり、特にさんご礁やマングローブ等によって沿岸線が形成される地域では、温暖化に対する脆弱性を評価する上で重要な要素となる。海流や水温、塩分等の変化は、水産資源の分布や海洋の一次生産量等に影響を与えるものと考えられる。さらに、沿岸域や内湾での流動の変化や水温の上昇は、水質の悪化等を引き起こす可能性がある。また、海水温等の変化は海面からの水蒸気の供給量を変化させるため、台風の頻度や規模、日本周辺では降雨量や降雪量を変化させるものと考えられる。特に、日本海では、海面からの蒸発散量は冬季の降雪量等を左右するものであり、その水平循環や鉛直循環の変化による熱量バランス等の変化に対する検討も必要である。

3-3-2 全球温暖化予測と地域海洋モデル

全球規模の温暖化については、全球大気・海洋結合モデルを用いた計算が行われており、気温上昇等の種々の現象が予測されている。しかしながら、全球結合モデルでは、計算時間等の制約からモデルの解像度が粗く、局所的な環境変化を予測するには不十分である。また、海洋では、温暖化の影響について局所的な検討を行う手法は確立されておらず、海水温の上昇や黒潮の流軸の変化など、日本周辺の海洋環境変化を詳細に検討するためには、高解像度の地域海洋モデルを用いた予測手法の開発が必要である。

地域規模の計算としては、例えば、Smith, R.D.ら(2000)はPOP(Parallel Ocean Program: 米国 Los Alamos National Lab.で開発された海洋モデル)を用いて湾流等の北大西洋の流動を高解像度で計算している。日本周辺の海域では、Kagimoto, T.ら(1997)が、

POM(Princeton Ocean Model: 米国 Princeton 大学で開発された海洋モデル)を用いて黒潮の流動等の計算を行っている。また、日本海については、Kim, C.-H.ら(1996)がMOM(Modular Ocean Model: 米国 NOAA/GFDL(Geophysical Fluid Dynamics Lab.))で開発された海洋モデル)を用いて海流等の計算を行っている。これらの計算は、主として現在の海洋環境を対象としたものであり、全球規模の温暖化予測結果等と組み合わせた将来的な予測はほとんど行われていない。

当所が開発した地域海洋モデルは、計算領域に開境界が存在する場合でも、流速や水位の境界条件を容易に設定することができる。また、海底や側方境界条件の設定も容易であり、日本周辺のような水深が急激に変化する複雑な海域にも適用可能である。

3-3-3 日本周辺の海洋環境変化

第3-1節で示したNCAR/CSMによる温暖化予測結果を、この地域海洋モデルに適用し、局所的な海洋環境の変化について予測を行った。日本周辺の海洋環境は、黒潮の流動等広範囲な海域の影響を受けている。このため、西部北太平洋全体を対象として、南北: 20 °S-65 °N、東西: 90 °E-180 °Eの範囲で計算を行った(図3-3-1)。計算領域の水平方向の解像度は、計算時間等を考慮して全球結合モデルの3倍(2/3 °×2/3 °(約60km))とした。また、鉛直方向の解像度は、全球結合モデルと同様に45層とした。全球結合モデルでは、2 °×2 °と解像度が粗いため、フィリピンや朝鮮半島が省略されており、南シナ海や日本海が十分には再現されていない。今回の計算では、地形の再現性が流動特性に及ぼす影響をより詳細に検討するため、西部北太平洋や南シナ海、インド洋の一部を同時に計算した。

NCAR/CSMによる温暖化予測結果(図3-1-3)のうち、大気中のCO₂濃度が現状の2倍(全球平均値表面温度が1.5 上昇)、3倍(全球平均値表面温度が2.3 上昇)になった時点の予測結果を用いて、日本周辺の海洋環境の変化(年間平均値)を検討した結果、以下のことが明らかになった(図3-3-2)。

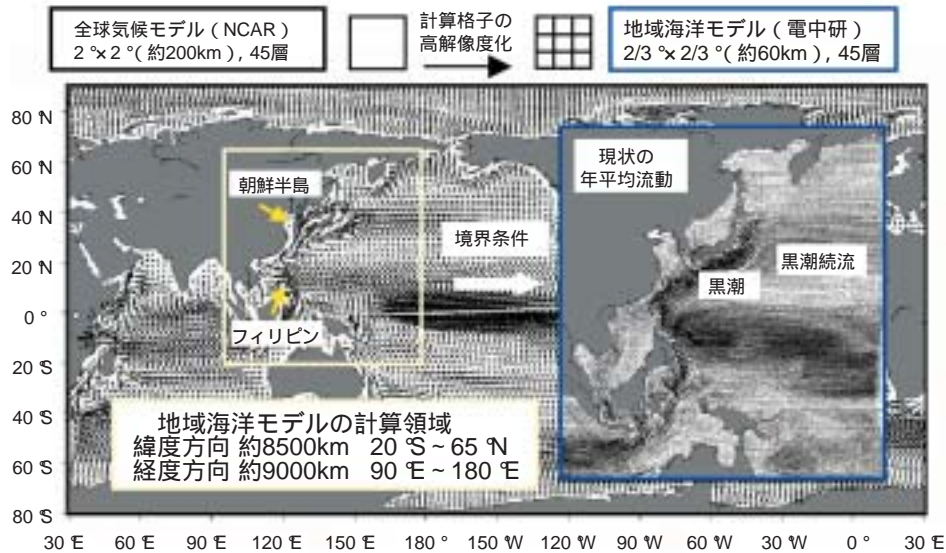


図3-3-1 地域海洋モデルの概要

- 1) 全球結合モデルでは、朝鮮半島やフィリピンが再現されていないため、特に日本海やインドネシア通過流等が過大評価になっている。地域海洋モデルでは、黒潮やその他海流とも観測値に近い値となり、日本周辺の流動の再現性は向上している。
- 2) 温暖化時には、流動の変化にとともない、力学的海面高度^{注1}が上昇する。特に黒潮流域にあたる太平洋側の影響が大きくなっている。
- 3) 太平洋域では、黒潮や黒潮続流などの流動が強化される。また、日本海においても、対馬暖流や日本海の流動は強化される傾向にある。逆に、インドネシア通過流の流量は減少する。

- 4) $3 \times \text{CO}_2$ 時には、日本周辺の年平均水温は約2℃上昇する。特に北海道東方沖の海域では昇温が大きく、黒潮続流の北上域や日本海の朝鮮半島東岸域の昇温が大きくなっている。

3-3-4 まとめ

全球結合モデルでは、計算時間等の制約により高解像度の計算格子を使うことは困難である。高解像度の地域海洋モデルを用いると流動計算の精度が向上し、より精度の高い海洋環境の変化の予測が可能である。今後は、大気温、海上風の季節変動や冬季の海水の影響を考慮できるように、モデルの高度化を図り、温暖化時の日本周辺の詳細な気候変化予測に適用する。

注1：海流などの流動に釣り合う海面高度で、流速の大きさや分布により変化する。温暖化時の水位上昇（熱膨張、陸氷・海水の融解など）では、通常考慮されていない。

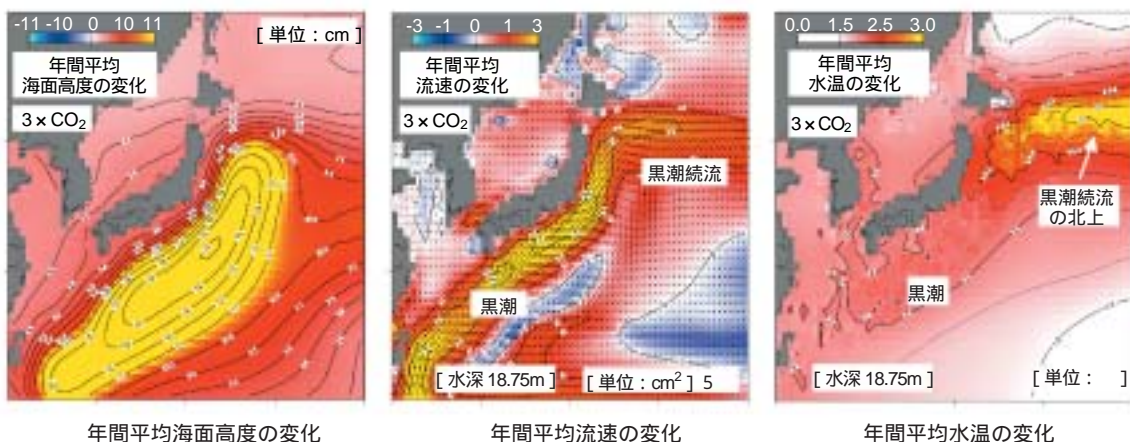


図3-3-2 温暖化時（ $3 \times \text{CO}_2$ ）の海洋環境変化

3 - 4 台風の変化

3-4-1 温暖化と台風の関係

台風^{注1}が人間社会におよぼす影響は極めて大きく、温暖化と台風の発生頻度や強度との関係に社会的関心が高まっている。温暖化による台風活動の変化を予測することは、観測データの蓄積期間が短いことや、数値気候モデルの精度が不十分であることから、現状では困難を伴う。2001年に発刊されたIPCC第三次レポート（コラム2参照）でも、将来の台風の変化については不明な点が多く、次のような数値モデルによる予測結果が紹介されるに留まっている。

- ・ 台風の存在する位置は変化しないが、地域的な台風の頻度には何らかの変化が生じる。ただし、その変化傾向は、予測に用いられる数値モデルによって結果が異なる。
- ・ 台風の最大強度は5%から10%増加し、台風に伴う降水強度は20%から30%増加する。

台風のエネルギー源は、暖かい海面から蒸発した水蒸気が、大気中で凝結する時に出す熱である。したがって、温暖化によって蒸発量が増えるのに伴い、台風頻度も増加するのではないかと懸念される。ところが、実際の台風発生には、海面水温の他に、気温・水蒸気の鉛直分布や大規模な風の三次元的な分布も関係しており、将来の台風の動向には総合的な評価が必要である。現在の気候モデルでは、特に全球規模の水の循環の表現精度が不十分であり、モデルによって予測結果が異なる一因と考えられる。

一方、台風強度の変化については、数値モデルの結果に加え、理論的考察からも増加傾向が示唆される。台風のエネルギー源である大気中の水蒸気は、気温が高いほど多く含むことができる。温暖化による台風強度の増加傾向は、水蒸気を介した海洋から大気への熱供給が、温

注1：熱帯低気圧の呼称は強度や発生海域によって異なり、台風もその一つとされるが、ここでは、台風を風速17.2m/s以上の熱帯低気圧全体を指す用語とする。

暖化によってより効率的に行われるためと解釈される。

3-4-2 NCAR CCM2 を用いたケーススタディ

目 的

温暖化による台風の変化については、特に台風頻度の変化に対して不確実な点が多い。仮に、将来、強大な台風の来襲頻度が増加するとすれば、社会・経済におよぼす影響は甚大である。中でも電気事業に対しては、電力施設の耐風・耐波浪設計基準や、ダム周辺域の異常出水に対する管理手法などに改善が求められることになる。このため、当所では、1994年以降、米国大気研究センター（NCAR）との共同研究により、温暖化と台風活動の関係について信頼性の高い将来予測を得ることを目的として、気候モデルを用いた数値シミュレーションによる研究を行ってきた。

数値モデル

ここでは、NCARのCCM2と呼ばれる全球大気モデルを用いた研究成果を述べる。CCM2の空間解像度は、水平約300km、鉛直18層である。現実の台風は、水平方向に1000km程度の広がりをもち、中心には10-100km程度の大きさの台風の眼がある。CCM2の解像度では、台風の中心付近の構造を表現することはできないが、前線のない渦としての台風の特徴は表現可能である。本研究では、モデルの台風として、北緯40度から南緯40度までの間に出現する低気圧のうち、中心気圧および気温の鉛直分布について一定の基準を満たすものとして定義している。したがって、モデルの台風には、中心付近の構造や強度について現実の台風とは異なる点があることに注意を要する。

計算条件

この研究では、現状およびCO₂濃度が現状の2倍となった気候の条件に対し、それぞれ8年間の数値シミュレーションを行った。温暖化気候の条件では、CO₂濃度に加えて、境界条件として与えられる海面水温について、

現状気候で用いた平年値データに、CO₂倍増時に予想される温度変化を加えたデータを用いた。この温度変化は、3-1で述べた大気・海洋結合モデルによるCO₂漸増シミュレーションから得られたもので、熱帯域では概ね1程度の昇温量である。

結 果

ここでは、台風の頻度を台風が存在した延べ日数で示すことにする。図3-4-1に計算格子毎に数えられた台風延べ日数を東西方向に合計したものを示す。温暖化しても台風が出現する緯度帯は変わらず、全球的な台風頻度にはほとんど変化が見られないことがわかる。

台風活動の変化が小さいという結果は、熱帯大気の気温および水蒸気の鉛直分布の変化と関連が深い。このモデルでは、温暖化によって対流圏上層でより大きな気温上昇が生じたが、それによる大気安定化の効果を打ち消すように、下層では水蒸気量が増加した。すなわち、湿潤大気に対する不安定度の変化は小さく、台風頻度が

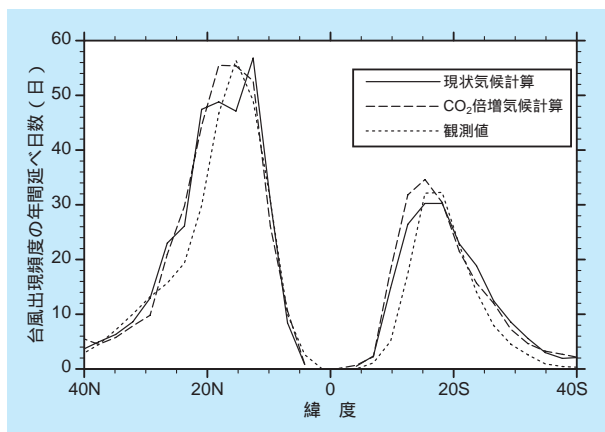


図3-4-1 台風の緯度別出現頻度

一定であったことと対応する。

表3-4-1に、台風海域別の年間延べ台風日数の変化をまとめる。温暖化の影響は海域によって異なり、北太平洋西部および南インド洋では増加傾向、北大西洋および北太平洋東部では減少傾向を示している。しかしながら、いずれの海域でも年々の変動が大きく、北大西洋における変化が90%の統計的有意水準を満たすのみである。

3-4-3 ま と め

定性的には、温暖化は台風の最大強度を増加させる効果がある。しかしながら、電力施設をはじめとして社会・経済に影響をおよぼす強い台風が、どこでどの程度増えるかといった情報については、現状では信頼できる予測は得られていない。この問題について、上記ケーススタディは決定的な結論を与えるものではないが、次の点については、ある程度の理解が得られたと言える。

- ・温暖化による海水温の上昇や水循環の強化は、必ずしも台風の活発化には寄与しない。
- ・地域的な台風の変化は、自然の気候変動の影響も大きく、一般的に、温暖化による変化の有意性はあまり高くない。

現在の数値モデルでは、水蒸気分布に関する雲や対流の表現について改良の余地が多く残されている。また、信頼性の高い予測結果を得るには、台風の表現能力に直接関係するモデルの空間解像度を高めることも重要である。物理過程の改良や計算機性能の向上によるモデルの高解像度化は着実に進められており、今後の台風予測の精度向上が期待される。

表 3-4-1 台風の発生海域別の頻度変化

台風海域	現状気候 (A)	CO ₂ 倍増気候 (B)	(B-A)	信頼区間	
				90%	95%
北大西洋	88.6	76.4	- 12.2	± 11.1	± 13.5
北太平洋東部	48.8	44.4	- 4.4	± 5.1	± 6.2
北太平洋西部	171.4	189.4	18.0	± 19.6	± 23.8
北インド洋	11.6	13.4	1.8	± 2.8	± 3.5
南インド洋	33.3	41.4	8.1	± 8.3	± 10.1
南太平洋西部	131.5	130.3	- 1.2	± 12.3	± 14.9
全球	499.9	509.3	9.4	± 29.5	± 36.0

コラム 8 : 長期再解析プロジェクト

地球をとりまく大気の観測データは、時間的・空間的に均一ではなく、特に、大陸の奥地や地球表面の7割を占める海洋上ではデータが不足している。日々の気象観測データは、世界の主要な天気予報センターに配信され、空間的に一様なデータに変換するための解析手続きを経て、天気予報に使われている。観測データは、特に、大陸の奥地や地球表面の7割を占める海洋上で不足している。そこで、時間的・空間的に不均質な観測データから、気温や風速などの気象要素の全球分布を得るために、全球四次元データ同化（以下、単にデータ同化と記す）と呼ばれる数学的手法が開発されてきた。

データ同化は発展途上の技術であり、世界の主要な予報センターや研究機関では、天気予報精度の向上を目指して継続的に改良が行われている。そのため、天気予報の過程で蓄積された解析データには、データ同化手法の改良に伴う品質・特性の不連続性が避けられない。全球の気象解析データは、気象・気候研究にとって極めて有用な基盤データである。そこで、1990年代になって、ヨーロッパとアメリカの代表的な予報センターを中心として、過去の観測データを最新のデータ同化手法を用いて再び解析するという再解析プロジェクトが立ち上げられた。

再解析によって得られた成果（再解析データ）は、気象・気候研究の発展に大きく貢献してきた。温暖化予測などの気候変動研究においては、これまでの気候の推移を正確に把握するため、再解析

データが不可欠である。また、温暖化の予測に使われる気候モデルの開発にも再解析データが有用である。予測モデルが信頼できるものかどうかは、計算された気候状態がどの程度現実的であるかによって判断される。現実の大気には、様々な時間・空間スケールの変動があり、モデル大気の検証では、各種気象要素の平年値に加え、それらの変動性にも留意する必要がある。したがって、検証に用いる観測データとしては、少なくとも10年以上の期間にわたり、品質の一様な再解析データが望ましい。

これまでのところ、欧米の研究機関において表1に挙げられる再解析プロジェクトが実施されてきた。再解析研究には、膨大な人的・計算機資源を必要とするため、これを実行できる研究機関は非常に限られている。日本においても、最近になって独自の再解析を実施する気運が高まり、2001年度から当所と気象庁との共同研究を核として、大学等の研究者の参加を広く募り、全日本的な体制で長期再解析プロジェクトが開始された。前述のように、データ同化技術が発展途上であることから、既存の再解析データは、特に熱帯の海洋上において特性が大きく異なっている。日本が、これまでに蓄積された観測データを整備し、独自のデータ同化モデルを用いて、新たな再解析データを作成することは、国際的に大きな貢献となり得る。温暖化予測の信頼性を高めるためにも、日本初の長期再解析プロジェクトから得られる知見が大いに期待される。

表1 長期再解析プロジェクトの実施機関(同一の実施機関のプロジェクトについては、最新のもののみ掲載)

実施機関	解析期間	空間解像度	備考
ヨーロッパ中期予報センター	1958年～現在	TL159/60層	実行中
米国環境予測センター/米国大気研究センター	1948～1996年	T62/28層	終了(1996年以降の解析は延長実行中)
米国環境予測センター/米国エネルギー省	1979～1999年	T62/28層	実行中
米国航空宇宙局	1979年～	1x1度/48層	実行中
気象庁/電力中央研究所	1979～2004年	T106/40層(予定)	準備中

空間解像度のTやTLは、スペクトルモデルにおける切断波数を表す。
T106およびTL159は計算格子間隔で110km程度、T62は180km程度に相当する。

3 - 5 ま と め

本章では、当所がこれまで進めてきた温暖化予測研究の成果について紹介してきた。予測のために必要な気候モデルを整備するという観点からは、所期の目標をほぼ達成できたと言えるであろう。しかしながら、温暖化現象自体は極めて複雑な現象であり、分かってきたことも多いが、一方で研究の進展によって明らかになった新たな問題もある。

気候モデルの問題点

IPCCの第三次評価書（2001年）によれば、世界各国の気候モデル（大気・海洋結合モデル）には、相当大きな予測幅が存在することが明らかになってきている。図1は、SRESシナリオのうちA2シナリオ（1-1節コラム2参照）に対する世界各国の7種類のモデルによる温暖化予測結果を示したものである。図のように、2100年時点の気温上昇の予測幅は1990年比で約1.6（気象研のモデル）～約5.3（東大/環境研モデル）と相当大きい。今後、地球観測技術の進歩により、詳細なデータの蓄積への期待が大きい。そうしたデータと比較検討する等によって、気候モデルの問題点をいち早く把握し、予測の信頼性を向上することが今後の緊急の課題であろう。

計算科学の問題点

最近のスーパーコンピュータの性能向上は目覚ましく、当所では2000年10月から新並列スーパーコンピュータ

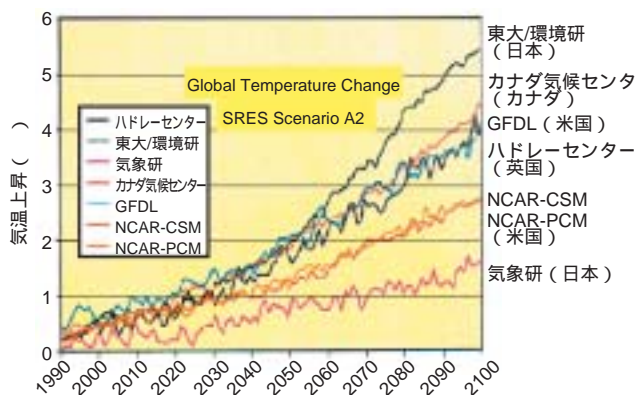


図1 気候モデルの違いと温暖化予測結果
（IPCC 第三次評価書（2001年）より）

VPP5000/32CPUを導入した。また、文部科学省のプロジェクトにより、2002年度には、世界最高速の地球シミュレータGS40/5120CPUが完成し、運用される計画である。3-1節の図3-1-4の予測例では、100年間の予測に約1週間（SX-4/32CPU, 64Gflops）の計算時間を必要とした。しかし、地球シミュレータでは僅か15分程度ですむことになる。当所では、1998年より文部科学省の振興調整費総合研究として、地球シミュレータに適した超高速・超高解像度の気候モデル開発を進めているところである。

温暖化防止の長期目標

国連気候変動枠組条約の究極の目標は、「気候システムに対して、“危険”な人為的干渉を与えないレベルで温室効果ガス濃度を安定化させること」、である。しかし、その目標となる濃度レベルがどの程度なのか、何時の時点で安定化するのか、依然としてはっきりしていない。例えば、550ppmで濃度を安定化するには、22世紀中葉までに、全世界のCO₂排出量を現在の1/3程度まで大幅に削減する必要がある。その削減量から濃度の推定法（コラム3参照）に科学的な不確実性があるにしろ、濃度安定化は相当困難と言わざるを得ない。

一方、安定化の濃度レベルが高ければ高いほど、実際の削減は容易になるし、現実的な削減対策を検討することも、気候変化に備えた適応等の行動をとることも可能になる。濃度安定化レベルの議論は、我が国電気事業ばかりでなく、世界のエネルギー産業にとって、極めて重要な関心事である。

そのためには、様々な濃度安定化レベルに対して、気候状態がどの程度異なるのか、という疑問に対する科学的な高精度の予測が不可欠である。気温上昇の予測だけでは不十分で、削減シナリオによって台風等の異常気候はどの程度差があるのか、あるいは非可逆的現象が発生しないかどうか、例えば海洋の熱塩循環が停止しないかどうか、といった疑問に答えられる必要がある。今後の大きな課題である。

第 4 章

4

今後の温暖化抑制
対策に向けて

第4章 今後の温暖化抑制対策に向けて 目次

経済社会研究所 研究コーディネーター 上席研究員	大河原 透	経済社会研究所 主任研究員	永田 豊
経済社会研究所 主任研究員	田頭 直人	研究企画部 主任研究員	西村 嘉晃
狛江研究所 微量物質課題推進担当 上席研究員	朝倉 一雄	経済社会研究所 主任研究員	杉山 大志
経済社会研究所 主任研究員	本藤 祐樹	狛江研究所 大気科学部 上席研究員	横山 隆壽
我孫子研究所 環境科学部 上席研究員	大隈多加志	我孫子研究所 環境科学部 主任研究員	仲敷 憲和
横須賀研究所 エネルギー機械部 上席研究員	森塚 秀人	横須賀研究所 エネルギー機械部 上席研究員	斎川 路之
我孫子研究所 生物科学部 上席研究員	渡部 良朋	我孫子研究所 生物科学部 主任研究員	森田 仁彦
我孫子研究所 応用生物部 主任研究員	立田 穰	我孫子研究所 応用生物部 主任研究員	小林 卓也
我孫子研究所 応用生物部 主任研究員	中屋 耕	我孫子研究所 環境科学部 主任研究員	石井 孝
		狛江研究所 研究調査担当 上席研究員	西宮 昌

4 - 1 温暖化抑制のための制度・政策	56
コラム9：電気事業の抑制対策	61
コラム10：京都議定書を巡る国際動向	62
4 - 2 CO ₂ 排出に関する発電方式のLCA	63
4 - 3 排ガスCO ₂ 回収・海洋隔離・地中処分技術の評価	65
4 - 4 CO ₂ 回収型火力発電システムの評価	72
コラム11：CO ₂ ヒートポンプの基礎研究と実用化	75
4 - 5 生物・バイオ技術によるCO ₂ 固定・資源化技術の評価	76
コラム12：人工衛星による葉面積の計測	80
4 - 6 まとめ	81



大河原 透（1982年入所）
 全国9地域の中長期経済予測、発電所立地が地域経済に与える社会経済影響評価などの研究に従事。現在は温暖化対策に関する経済政策が電力会社経営や日本経済に与える影響を評価する研究にも取り組んでいる。



永田 豊（1987年入所）
 これまで、日本のエネルギー・電力需要予測、環境税の影響分析、最適電源構成の分析、省エネルギー技術の経済性評価などに従事。



田頭 直人（1992年入所）
 地球温暖化を抑制するための都市の交通、エネルギーシステム、および都市構造に関する研究に従事。現在は、再生可能エネルギー利用の支援制度に関する調査・分析も行っている。



西村 嘉晃（1992年入所）
 ダム流域の融雪や貯水池の結氷など、陸・水面の熱収支の研究に従事。現在は環境に関する研究の総合推進業務を担当。

朝倉 一雄（8ページに掲載）



杉山 大志（1993年入所）
 エネルギーシナリオ分析および政策科学における政策過程分析の2つの手法による温暖化防止政策研究に従事。現在は京都議定書に関する国際交渉や国内対策のあり方など、温暖化対策制度設計に関する研究に取り組んでいる。



本藤 祐樹 (1992年入所)
主に環境面および経済面からの技術評価に関する研究に従事。これまでに、発電技術の環境対策コスト分析、LCAによる発電技術の評価、産業連関表を利用したLCA手法およびデータベースの開発などを実施した。



横山 隆壽 (1975年入所)
1980年代後半から、地球温暖化防止技術の研究に従事。特に、火力発電所排ガスからのCO₂回収技術、火力発電プラントからの一酸化二窒素の排出係数、地球温暖化問題とエネルギー利用などの研究活動を実施。



大隈多加志 (1987年入所)
現在、地球環境産業技術研究機構 (RITE材) CO₂貯留研究室 主席研究員として出向中。
入所以来、高レベル放射性廃棄物地層処分の研究、地熱貯留層評価、圧縮空気貯蔵などの研究に、地球化学の専門家としてなどに従事。1989年からは、CO₂の海洋隔離、地中隔離に関わる研究に取り組んでいる。

仲敷 憲和 (33ページに掲載)



森塚 秀人 (1981年入所)
入所以来IGCCフィージビリティスタディ、IGCCの熱効率および動特性解析等に従事してきた。現在は、高温水素分離膜を用いたCO₂回収型火力発電、ガスタービン高温部品の保守管理等の研究に取り組んでいる。



齋川 路之 (1986年入所)
圧縮式ヒートポンプの研究開発や新型火力発電システムの評価研究に従事。現在は、自然冷媒を利用したヒートポンプの研究開発、燃料投入型分散型電源による熱電併給システムの適用性評価研究に取り組んでいる。



渡部 良朋 (1988入所)
微細藻類の光合成機能を利用したCO₂固定・資源化技術の開発に携わってきた。現在は、微細藻類機能の環境保全技術への適用を図るとともに、バイオマスを利用したCO₂対策に関する検討を行っている。



森田 仁彦 (1996年入所)
排ガス中の高濃度炭酸ガスを利用して微細藻類を培養するための光バイリアクター開発に携わってきた。現在は、微細藻類機能の多面的な利用に関する研究に取り組んでいる。



立田 穰 (1981年入所)
放射性核種の海洋生態系における挙動、海産生物における放射性核種の濃縮係数、海洋生態系における放射性核種の動的移行モデル、同位体比を用いた沿岸海洋生態系によるCO₂固定量の測定法について研究。1995-1996年 IAEA海洋環境研究所外来研究員。



小林 卓也 (1992年入所)
酸性降下物の植物影響評価、森林の物質循環に関する研究に従事。現在は、安定同位体比情報を用いた森林における炭素・水収支の解明に関する研究に取り組んでいる。



中屋 耕 (1993年入所)
緑化植被面における熱収支の解明、レーザー誘起蛍光を利用した植物生理反応推定手法の開発に従事。現在は、森林におけるCO₂フラックス評価に関する研究に取り組んでいる。



石井 孝 (1990年入所)
森林植生と降雨流出特性に関する調査研究に従事し、衛星データによる森林植生計測手法を開発してきた。現在、マングローブ林の現存量評価や水循環評価に向けた森林蒸発散量の研究を行っている。

西宮 昌 (8ページに掲載)

4 - 1 温暖化抑制のための制度・政策

4-1-1 環境税

すでに欧州のいくつかの国で導入されている環境税には、化石燃料の価格を人為的に引き上げることによりその節約を促すことと、得られた税収で所得税や法人税など一般的な税を軽減することにより経済全体の効率性を高めるといふ、2つの目的がある。しかし、図4-1-1に示すように、ある国だけが環境税を導入すると、製造に多くのエネルギーを必要とする鉄鋼などの生産物価格が上昇して国際的競争力が低下することから、環境税を導入したほとんどすべての国において、何らかの減免措置が設けられている。以下、当所の長期経済予測システムを用いて、日本で環境税を導入した場合の経済的影響について、このような減免措置の有無や、税収の使途、課税方式の違いなどを考慮しながら定量的に分析した結果を紹介する。

試算したケースの概要と結果を表4-1-1に示す。環境税を導入しない参照ケースでは、2010年のCO₂排出量は90年比13.1%増となり、経団連の自主行動計画や省エネ基準の強化だけでは、国が目標とするCO₂排出量の安定化（2010年の排出量を90年水準に抑制）は達成

できない。環境税を2003年に導入して安定化を達成するためには、2010年に炭素1トン当たり33,000円程度という非常に高い税が必要であり、同年の実質GDPは参照ケースより0.83%減少する（環境税導入基準ケースの場合）。税収の大きさからみると、同じCO₂削減目標を達成する場合、減免措置がない場合よりある場合の方が、所得税減税より公共投資拡大の方が、炭素含有量比例の課税（炭素税）よりエネルギー量比例の課税（エネルギー税）の方が多くの税収を集めなくてはならず、CO₂削減という観点からは非効率であると言える。これは、減免措置はエネルギーに対する価格弾力性が大きく、かつ炭素税によるエネルギー価格の上昇率が大きい製造業におけるCO₂の削減を鈍らせること、公共投資拡大はセメントや鉄鋼など素材産業への波及が大きいため、産業構造の“脱CO₂化”を遅らせること、エネルギー税はCO₂排出原単位が小さい天然ガスなどへの燃料転換のインセンティブを持たないこと、などの理由による。以上のことから、環境税を導入する場合は炭素含有量に比例して課税し、減免措置は設けず、税収は公共投資に支出する場合に最も経済的ダメージが少ないといふことができる。このときの実質GDPの減少分（約2兆円）を多いとみるか少ないとみ

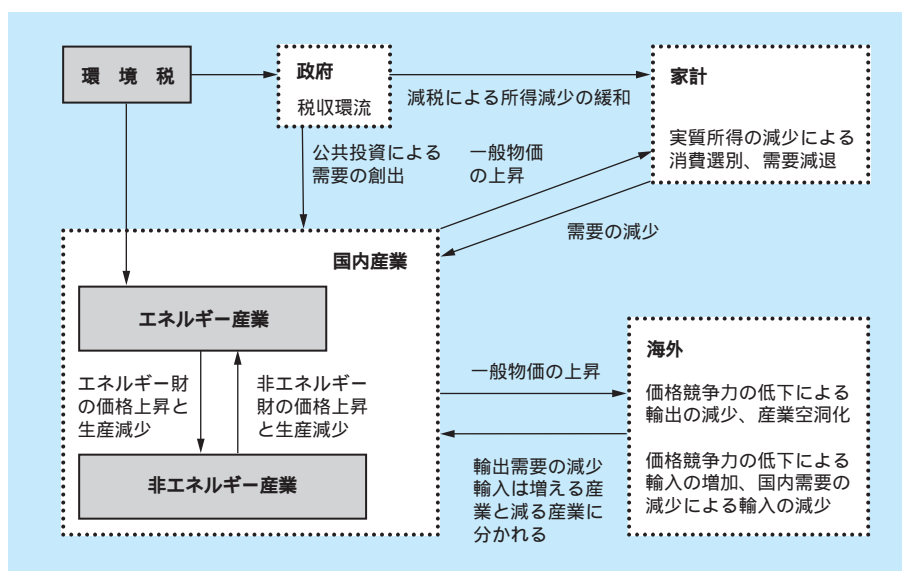


図4-1-1 環境税の国内経済への波及経路

表4-1-1 試算ケース名とその設定条件および試算結果

ケース名	ケースの設定条件			試算結果（2010年）		
	課税方式	税収還流方式	減免措置	税率	税収 (兆円)	参照ケースからの 実質GDPの変化率
参照ケース	課税なし					
環境税導入基準ケース	炭素含有量比例	所得税減税	なし	33,000円/t-C	9.48	- 0.83%
減免ケース	炭素含有量比例	所得税減税	あり*1	50,600円/t-C*2	11.96	- 0.92%
公共投資ケース	炭素含有量比例	公共投資拡大	なし	34,700円/t-C	9.97	- 0.28%
エネルギー税ケース	エネルギー量比例	所得税減税	なし	590円/GJ	12.80	- 1.03%

*1 製造業の税率を他の部門の半分に減免する

*2 非減免部門の税率

るかは意見が分かれるところであるが、環境税によるダメージは産業によって大きく異なっているため、その導入に当たっては、被害が大きい産業の抵抗が避けられないと思われる。

4-1-2 排出権取引

気候変動枠組み条約締約国会議（COP）では温暖化対策のために、CO₂排出権取引などの柔軟性措置を用いることを合意しており、今後の国際交渉では、国際排出権市場をどのように設計するかが重要な討議事項となるであろう。

排出権取引には、COPで検討される国際取引、一部の国で導入が始まっている国内取引など、様々な形がありうるが、取引のメカニズムは、国際取引でも国内取引も基本的には同じで、国内取引を例に取り、基本的な仕組みをはじめに概観しよう。

企業や団体に与えられる排出枠の設定は、経済的利害に直接絡むため、大きな対立点になるが、排出枠ないしは排出削減目標の設定が、取引を行うための前提条件になる。排出枠は、一般的には基準年の排出量より少なく、取引対象年の排出量と排出枠の差が排出削減目標量となる。この削減を行うためには、当然ではあるが、努力が必要で、費用もかかる。企業が保有している技術には多様性があり、排出削減を低い費用で達成できる企業、高い費用を要する企業が存在する。

このとき、国全体の経済効率を高めるという観点からは、排出削減費用の高い企業が目標を達成するために、自ら保有する削減技術のみで対応するのは合理的でなく、安い費用で削減を行いうる企業の技術を借りて排出削減に当たるのが望ましい。排出権市場が存在するならば、

排出権の交換により、異なる削減技術を市場で交換することができる。市場で成立する排出権価格が与えられたとき。それよりも高い費用をかけて排出削減を行う企業はない。排出権価格より安い費用で削減できる企業が、排出権の売りに回り、買い方も、売り方も互いに得をするというのが排出権市場である。

既に、デンマークでは発電会社を対象にCO₂排出権の割り当てを行い、発電会社間でCO₂排出権取引を行う制度が2001年1月より実施に移されている。さらに英国においては、産業全体を視野に入れたCO₂排出権の国内取引が、英国で2002年4月から実施されることになっており、産業界との合意も成立し、現在、施行関連法案が国会で審議されている状況にある。そして、欧州連合では、2005年の域内取引の実施に向け、取引の概念設計の調整に入っている。

京都議定書を批准すれば、わが国も排出権の国際取引に参加することになり、国内にも排出権市場が創設されることになる。また、経団連が検討するという排出削減実績の登録機関ができれば、利潤動機で排出権取引所を開設する業者が出てくるだろう。

ここでは国内排出権取引が始まり、電力産業内で排出権取引が行われる事態を想定し、どのようなことが起きるかを実験により検討した当所の研究を紹介する。

実験では、9つの仮想電力会社を設定し、当所職員がプレーヤーとしてネットワーク上で、電力と排出権の取引を行った。これは、CO₂が発電を行う際に生み出されるマイナスの価値を持った副産物であり、この外部性が排出権というかたちで内部化されたとき、主生産物である電力の生産にも影響が及ぶことに着目しての実験である。実験は、仮想状況を設定したものであり、実験で設定した数値、実験より得られた数値に定量的な意味は

ない。

実験では、コンピューターネットワーク上に電力と排出権の会社間取引を扱う2つの市場を設けた。仮想電力会社は、電力需要の不確実性に直面するなかで、ピーク期、オフピーク期の電力需要を満たすように、発電設備の形成・運用、会社間電力取引・排出権取引に当たる。終了期間を事前に通知しない多期間取引、電力取引における空間的な取引費用なども導入した。仮想各社への排出権の割り当ては、たとえば、2008年から2012年の5年間については、全社の発電あたりの排出原単位を、1990年比20%減とし、これを排出量比例と発電量比例の実績値で各社に配分する方式を採用した。なお、燃料費や資本費、顧客に販売する電気料金は実験期間を通じ、便宜的に一定に保った。

これら仮想電力会社の行動原理と市場取引の構造を図4-1-2に示した。

各仮想会社がCO₂排出量制約と電力供給義務制約に従うとき、各社が利益の最大化を図るために、会社間でなされる電力取引とCO₂排出権取引、各社の発電設備の形

成と運用にあたる実験を2回行い、取引量や価格の変動を確認し、実験参加者の成績評価と市場が産み出す成果について評価した。また実験を通じ、不確実性を伴う電力需要に直面する電力会社が、供給義務制約のもとで、異なる費用構造を持つ発電（排出削減）技術の組み合わせ、どのように対応しうるかなどを確認した。さらに、両市場で設定した取引ルールや不遵守罰則金がCO₂排出権と電力の取引結果（数量、価格）などに与える影響も評価した。取引実験の結果については、1回目と2回目の排出権取引の結果を図4-1-3、図4-1-4に示した。

1回目の実験では、排出権、電力価格は初期段階での緩やかな上昇、中間段階での安定を経て、上昇に転じた。一方、2回目の実験では、初期段階の安定を経た後、一転して低下に転じた。1回目の実験では、仮想電力会社全体で排出目標が達成できなかったのに対し、2回目の実験では、新規電源の開発費用は要したが、仮想電力会社全体で排出目標は達成することができた。

2つの実験の基本的な差異は、実現した電力需要の規模と発電設備の投資規模の差にある。1回目の実験では

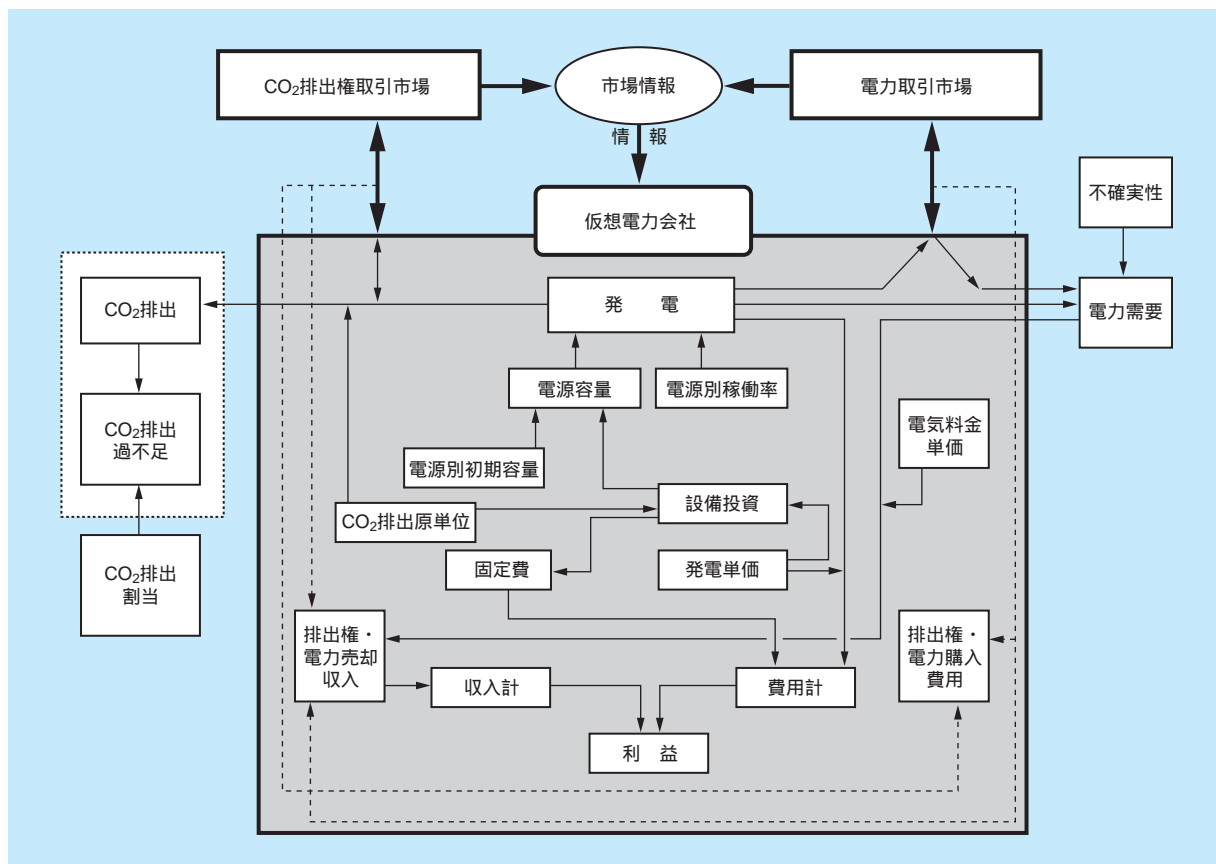


図4-1-2 仮想電力会社の行動原理と市場取引の構造

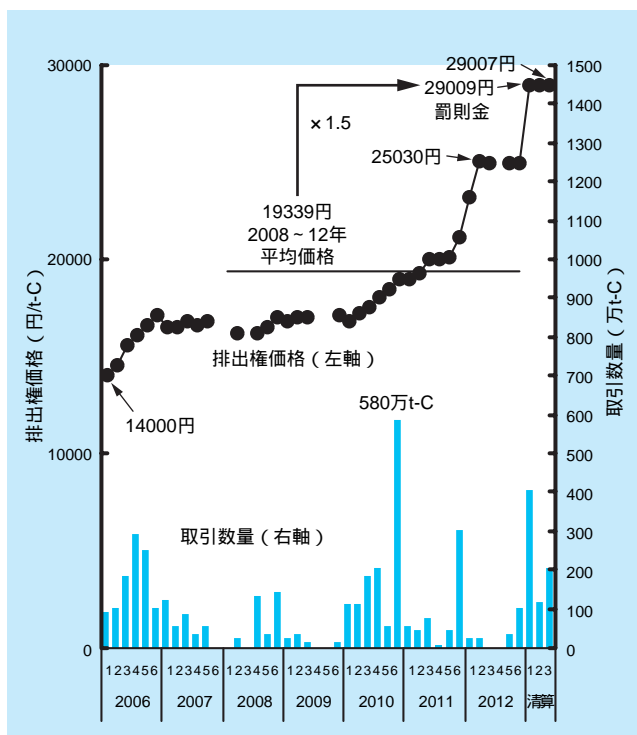


図4-1-3 第1回実験の排出権取引市場

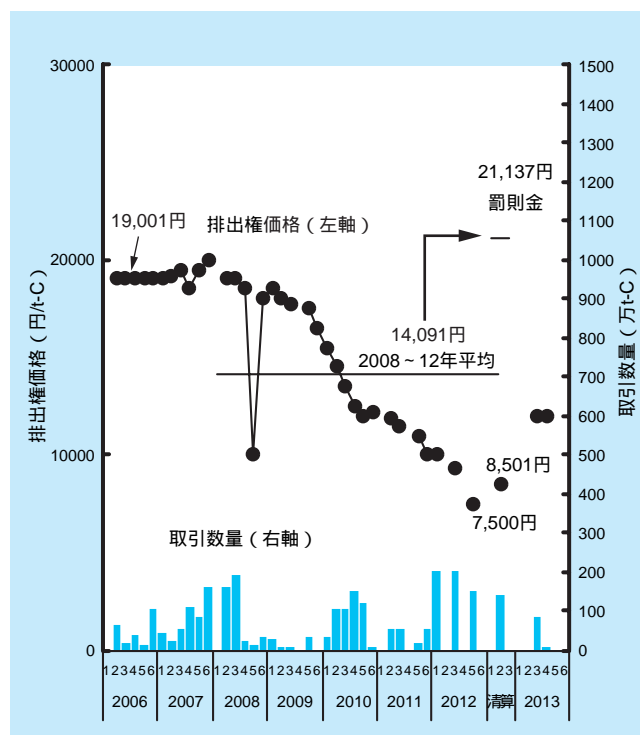


図4-1-4 第2回実験の排出権取引市場

電力需要の規模は2回目に対して約5%大きかったが、発電の設備投資は小さかった。電力産業のように需要を受身とする産業にとっては、需要想定を正確に行い、対応する設備投資を適切に行うことが重要であるが、1回目の実験では発電設備の供給予備力が少なかったことが、電力価格と排出権価格の高騰を招いていた。また、2回目の実験では、より多くの原子力発電が早期に導入されたことが、CO₂の排出抑制に貢献し、結果として排出権の抑制に寄与した。

実験で与えた2008年から2012年の排出目標は電気事業が掲げている自主行動計画に対応するものであるが、目標の達成には向け原子力の導入が果たす役割は大きいことが実験を通じて確認することができた。

また、不遵守罰則金の導入形態が取引価格に大きな影響を与えており、この導入方式は排出権市場の制度設計を考えると、重要なポイントとなることが明らかになった。

4-1-3 グリーン証書取引システム

温暖化抑制対策の一つとして、太陽光、風力等の再生可能エネルギー利用の重要性が高まっている。この再生

可能エネルギー利用の促進策として、近年注目されているのが「グリーン証書取引システム」である。「グリーン証書」とは、再生可能エネルギーを用いて発電された電力の発電量等を証明するために発行される証書である。グリーン証書取引システムでは、この証書に対する取引が行われる。すなわち、グリーン証書取引システムは、再生可能エネルギーを用いて発電された電力に対して、電力自体の価値とは別に、グリーン証書による価値を与える。

図4-1-5を用いて、一般的なグリーン証書取引システムの概略を説明する。発電事業者が再生可能エネルギーを用いて発電した場合、まず電力を一般の電力市場に販売する。次に、発電事業者は、グリーン証書を発行する組織に発電量を報告し、その発電量を証明するグリーン証書の発行を受け、証書をグリーン証書取引市場に販売する。すなわち、再生可能エネルギーにより発電された電力は、電力とグリーン証書の二つから対価を得る。ただし、このシステムが成立するためには、グリーン証書に対する需要が必要となる。第一の需要は、政府等が、再生可能エネルギーによる発電を促進するために、電力供給事業者、あるいは需要家に、グリーン証書の一定量の保有義務を課すことにより発生する。この義務制度は、

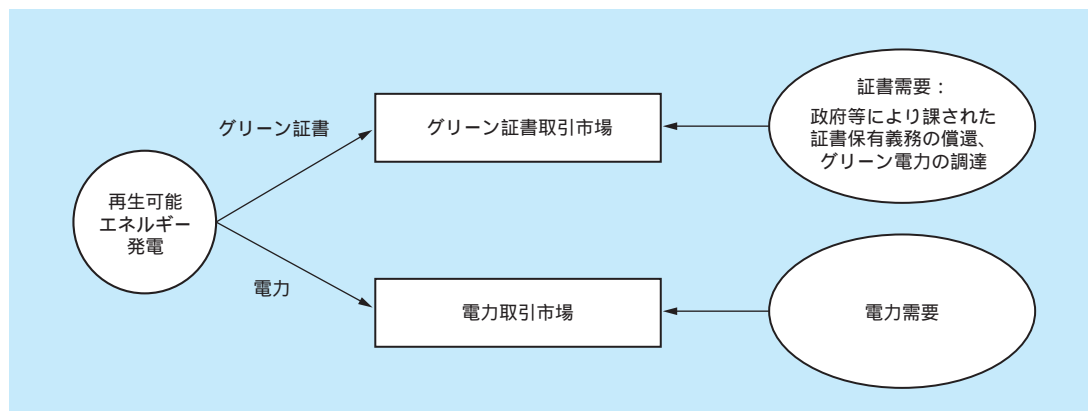


図4-1-5 グリーン証書取引システム

一般にRPS (Renewable Portfolio Standard) と呼ばれる。保有義務の対象が電力供給事業者の場合、事業者は電力供給量の一定割合に相当するグリーン証書の保有義務が課される。義務の対象が需要家の場合、需要家は電力消費量の一定量に相当するグリーン証書を購入しなければならない。

第二の需要は、「グリーン電力制度」からの需要である。需要家が通常の電気料金に加えて、自発的に、一定額、あるいは電力消費量等に比例した額を支払い、電力供給事業者がその金額を、再生可能エネルギーを用いた発電設備の建設、助成、あるいは再生可能エネルギーにより発電された電力の調達等に用いる制度を、グリーン電力制度という。すなわち、需要家にグリーン電力を提供している事業者が、グリーン電力の調達のために、グリーン証書を購入する。

グリーン証書取引システムの大きな長所の一つは、再生可能エネルギーの地理的偏在性に起因するコスト上昇の抑制効果にある。例えば、風力発電は立地場所の風力の強さ、安定性により、発電コストが大きく異なるので、発電コストを抑制するためには、適地において発電を行うことが重要である。近辺に適地が存在しない供給事業者が、風力発電による電力を調達する場合、適地に存在する風力発電事業者等も参加しているグリーン証書取引市場で証書を購入することにより、調達コストを抑制することが可能となる。したがって、グリーン証書取引システムは、出来る限り広い地域で実施した方が、コスト

抑制効果が高い。

実際に行われた事例としては、世界初のグリーン証書取引システムとして、1998年より2000年まで実施されたオランダの「グリーンラベルシステム」が挙げられる。「グリーンラベル」とは、1Mh毎に再生可能エネルギーにより発電された電力に付与されるグリーン証書である。オランダでは、1996年にエネルギー事業者連合が、政府と2000年末までに1700GWh (1995年における大規模需要家を除く供給量の約3%) を発電するという目標に合意し、この合意目標が、各電力供給事業者に割り振られた。供給事業者は、この割当量を達成するために、グリーンラベルシステムを利用した。さらに、オランダでは前記したグリーン電力制度も実施されており、この制度からの証書需要も存在した。グリーンラベルシステムは2000年末で終了したが、現在は、新たに政府によるグリーン証書取引システムが導入されており、グリーン電力のみが証書の需要となっている。

その他、欧米各国、オーストラリアでも様々な取組みが行われている。また、わが国でも、経済産業省総合資源エネルギー調査会新エネルギー部会新市場拡大措置検討小委員会において、再生可能エネルギーによる発電を促進するためのさまざまな施策が議論されており、グリーン証書の保有義務およびグリーン証書取引システムは、施策の有力候補として挙げられている。小委員会は、2001年内に報告書を取りまとめる予定であり、今後の展開に注目していく必要がある。

コラム9：電気事業の抑制対策

電気事業は、地球温暖化問題を経営課題の最重要課題の一つに位置付け、CO₂の抑制対策に自主的、積極的に取り組んでいる。このため、毎年、1996年に策定した「電気事業における環境行動計画」のチェック＆レビューを行い、結果を公表している。この環境行動計画の中で電気事業は、CO₂削減目標として「2010年度のCO₂排出原単位を1990年度に比べ20%程度低減する」を掲げている。具体的には、CO₂排出原単位の1990年度の実績は0.42kg-CO₂/kWhであったので、2010年度の目標値を0.3kg-CO₂/kWh程度と設定している。現在、原子力発電、LNG火力発電および水力発電の導入、火力発電所の熱効率向上などにより、2000年度のCO₂排出原単位は0.37kg-CO₂/kWhにまで低減されているが、2010年度の目標達成に向けて一層の対策強化が必要となっている。

電気事業は、環境行動計画で設定したCO₂削減目標を達成するため、電気の供給面および使用面での対策に取り組んでいる。

電気の供給面の対策では、CO₂を排出しない原子力発電の推進を中心に、LNG火力発電の導入拡大、水力・地熱・太陽光・風力など自然エネルギーの開発・普及を進めている。電力設備の効率向上を図るため、複合発電の導入や石炭火力の高効率化、高圧送電による送配電ロス率の低減などに取り組んでいる。

電気の需要面の対策では、省エネルギー対策とし

て、ヒートポンプなど高効率活用・省エネルギー機器の開発・普及、未利用エネルギーの活用、蓄熱システムなどの普及・促進による負荷平準化の推進などを行っている。これらの対策の中で、特に原子力発電の導入を中心としたエネルギーのベストミックスによるCO₂排出抑制効果が大きいことが示されている。

当所は、電気事業のCO₂抑制対策の実践に貢献するため、様々な分野で地球温暖化対策に関連する研究課題を展開している。電気の供給面での主要な対策である原子力発電については、経年炉対策、高燃焼度燃料など軽水炉発電の経済性向上、バックエンド対策、原子力発電の信頼性向上に関する研究を進めている。自然エネルギー発電については、太陽光・風力発電の導入技術、高温岩体発電技術の開発などを行っている。化石燃料発電については、ガスタービン超高温化技術など火力発電の高効率化、石炭ガス化複合発電技術や燃料電池発電技術の実用化研究を進めている。電気の需要面での対策として、住宅・ビルの省エネ革新技術、リチウム二次電池によるエネルギー貯蔵技術などの開発を行っている。また、これらの短期的なCO₂抑制対策技術の開発を支えるため、当研究所は温暖化現象の予測・影響評価や環境政策分析など、中・長期的な研究課題にも積極的に取り組み、電気事業の温暖化抑制対策技術の開発に総合的に取り組んでいる。

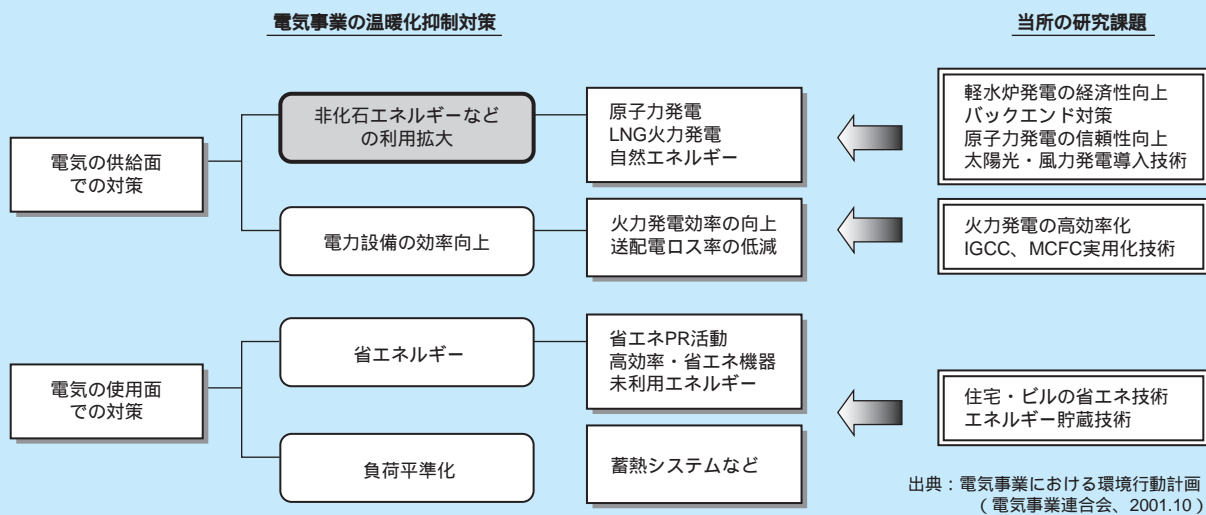


図1 電気事業の温暖化抑制対策と当所の研究課題

コラム 10 : 地球温暖化問題に関する政策科学研究

地球温暖化防止京都会議（正式名称は気候変動枠組み条約第3回締約国会議）は1997年12月に開催され、京都議定書がまとめられた。京都議定書の特徴は先進国に課せられた「厳しい数値目標」と、その達成のために認められた「柔軟性」である。厳しい数値目標とは、2008年から2012年までの平均で、1990年水準の排出量に比べて、日本は6%、米国は7%、EUは8%削減する、というものである。「柔軟性」には3つある。第1が「京都メカニズム」と総称されるもので、これには排出権取引、共同実施およびクリーン開発メカニズムの3つがある。第2は植林などによるCO₂の吸収で、吸収源、シンク、土地利用および森林活動（LULUCF）といった呼び方をされている。第3はバスケット方式と呼ばれるもので、CO₂だけでなく、CH₄、N₂O、HFC、PFC、SF₆といった計6種類の温室効果ガス排出量の合計を対象とするというものである。

「厳しい数値目標」に関してはよく知られている。仮に無対策時に排出量が年率1%で伸びるとすれば、2010年までには1990年に比べて20%以上排出が増えることになり、6%削減とはこの「なりゆきケース」に比較して26%という大規模削減を意味する。これは容易ではない。

このような厳しい目標が先進諸国に受け入れられた背景に「柔軟性」の確保があった。ただしこれらは原則として認められたものの、それが実際にどのような制度設計につながり、結果としてどの程度の費用対効果および規模を持つものになっていくか、その運用則については、不透明な点が多かった。これがブエノスアイレスにおける1998年のCOP4以降、今日まで議論され続けている。COP6ではこれに関する政治合意が成立し、2001年11月のCOP7ではさらに法文書を採択して、運用則を確定することを目的としている。

当所では、国際交渉の動向を把握する一方で、初めはエネルギーシステム分析（2～30）後には政策科学の方法論（31～77）によって分析し、学術誌や業界誌・新聞などを通じて政策提言活動を行ってきた。これについて紹介しよう。

* * *

京都議定書の最大の「武器」は、数値目標を法的に設定したことだ。これによって、各国は批准にあたり、向こう10年の排出削減計画を整備し、それに対応した法制度整備を行い、政策措置を打つことになる。これは温暖化防止政策を押し進めようとする官民にとっての強力な足がかりになる。問題への関心が高まり、対策推進に利益を見出す企業が生まれる。政府はこの動きにさらに呼応する。温暖化防止へ向けて歯車が回り始める。

他方でこの数値目標は「野心的」に過ぎたこれが議定書の最大の欠陥となった。数値目標は技術的に真剣な検討をすることなく政治的勢いだけで決まった。日本はこれまで増加し続けたCO₂排出を、ほぼ同じペースで減少させることになっているが、本当に可能だろうか。

政策科学では、環境条約における数値目標の性格やその国内政策との関連についての詳しい分析がなされている。京都議定書に関する国際交渉および国内制度設計の在り方は、このような分析から得られるものが多い。

当所ではこれを行ってきた。中でももっとも重要な成果は、京都議定書の「遵守システムの理論」ひらたく言えば「数値目標未達成の場合に罰則を設けるか否か？」という議論である。

民主主義国家の政府には、基本的にCO₂を制御する能力は無い！ 環境条約に関する政策科学の知見は衝撃的である。しかし、事実認識として正しい。政府は計画を立てたり政策を打つことはできるが、その達成を確実なものにすることはできない。CO₂削減のためにこれまで経営や生活の前提としてきたコストの在りようが大きく変わるとなると、企業や個人レベルでみれば異議を唱えるところがたくさんでてくる。問題は経済的というより政治的である。さまざまな利害を調整して排出に関する“経済構造を改革”していくことは政治的に難しい。国の総排出量の結果を保証することは政府の能力を超える。

このため数値目標達成には高い不確実性がつきまとう。しかしなお、京都議定書はその達成を謳っている。議定書は基本的には出来ない約束をしている。この欠陥をカバーすることが議定書運用則づくりの要諦である。

このことを理解していない議論が横行している。「数値目標に達しない国を罰しよう」という意見がある。しかし、主権国家を罰で追い詰めたり実際に罰したりするということは大変なショック療法であって、政治的にも経済的にも大変な混乱をもたらす。これに耐えられない国は議定書から離脱してしまう。もし議定書に留まっても、そのような罰があれば、決して野心的な目標を掲げないようになる。これでは温暖化防止政策の推進が停滞してしまう。現在の国際交渉では環境条約に前例のない厳しい罰則を設けようとする主張が強い。このままでは京都議定書はうまく立ち行かない。過去の環境条約に学び、京都議定書に関する国際交渉において、どのような政策判断が地球環境保全のために適切かを分析し、提言する。これが当所における政策科学研究である。

4-2 CO₂ 排出量に関する発電方式のLCA

4-2-1 はじめに

我が国のエネルギー政策の立案において地球温暖化の視点は重要である。当所では、地球温暖化の観点からライフサイクルアプローチによる発電技術の評価を行ってきた。発電に伴うCO₂排出量を考えるとき、発電燃料が燃焼する際に排出されるCO₂のみを思い浮かべてしまいがちである。しかし、実際には、発電燃料の生産や輸送、発電所の建設などに伴いCO₂が排出されていることにも着目すべきである。原子力や太陽光発電においても、ウラン燃料の製造や太陽光電池の製造時にCO₂が排出されている。一般に、資源の採取から、製造、使用、廃棄に至るすべてのプロセスを踏まえて環境負荷を評価する方法は、広くはライフサイクルアプローチ（LCA）と呼ばれている。

4-2-2 ライフサイクルアプローチ

地球温暖化という観点から発電技術の評価する場合には、1kWh（送電端）あたりのライフサイクルCO₂排出量(式1)が、指標として有効である。これは、発電所の耐用年数において排出される温室効果ガス量を、その期間中の総発電量(送電端)で割ることで求められる。CO₂以外の温室効果ガスは、GWP（地球温暖化ポテンシャル）を用いてCO₂量に換算される。ライフサイクルにわたり排出される温室効果ガスは、発電燃料の燃焼による直接排出、設備建設、設備運用、設備解体に伴う間接排出の4つに大きく分けられる。このうち、発電所などの設備建設に伴うCO₂排出量の推計が最も煩雑である。一般に、ライフサイクルからの排出量を推計するためには、そのライフサイクルに含まれるプロセスをひとつずつ検討する手法（積み上げ法）が採用される。しかし、発電システムのように多種多様な製品で構成されている設備の製造および建設のプロセスをひとつずつ把握するのは極めて困難である。そこで、設備の製造および建設に伴うCO₂排出量については、産業連関表を用いて推計する

手法（産業連関法）が有効である。本研究では、積み上げ法と産業連関法の長所を生かした融合手法を利用して、ライフサイクルにわたるCO₂排出量（LC-CO₂）を推計している。

ライフサイクルCO₂排出原単位[g-CO₂/kWh(送電端)]

$$= \frac{(\text{発電燃料} + \text{設備建設} + \text{設備運用} + \text{設備解体})[\text{g-CO}_2]}{\text{耐用年間の発電電力量(送電端)}[\text{kWh}]} \quad [\text{式1}]$$

4-2-3 検討対象とライフサイクルの定義

対象とした発電技術を表4-2-1に示す。既存の発電技術である火力、原子力、水力、地熱と、新エネルギーの代表である太陽光、風力を対象とした。基準ケースとして、我が国の平均的な技術レベル（熱効率など）を想定した。また、発電燃料の生産や輸送などのプロセスについても我が国の現状を反映している。例えば、輸入に大きく依存している化石燃料やウラン燃料の生産については、海外での生産活動の実態を反映している。ただし、現状を基準とした前提条件が変化する場合、その変化がLC-CO₂へ与える影響についても分析している。なお、温室効果ガスとしてはCO₂とメタンを対象としている。メタンの温室効果はCO₂の21倍（積算年数100年）としてメタンをCO₂に換算している。

電力のライフサイクルは大まかには図4-2-1のように表現できる。各段階におけるエネルギーや消耗資材など

表4-2-1 検討対象とした発電技術

	出力 (MW)	設備利用	熱効発電	所内	耐用年数 (年)
石炭火力	1000	70%	39.6%	6.9%	30
石油火力	1000	70%	38.4%	5.7%	30
LNG火力	1000	70%	38.9%	4.3%	30
LNG複合	1000	70%	44.6%	2.2%	30
原子力 ^[1]	1000	70%	33.7%	4.3%	30
水力 ^[2]	10	45%		0.7%	30
地熱 ^[3]	55	60%		7.0%	30
太陽光 ^[4]	0.003	19%		0.0%	30
風力	0.3	20%		10.0%	30

[1] 沸騰水型軽水炉（BWR）[2] 中規模ダム水路式 [3] ダブルフラッシュ方式 [4] 家庭屋根設置型、多結晶シリコン太陽光電池

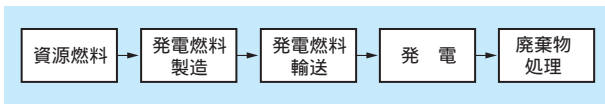


図4-2-1 電力ライフサイクル

の消費に伴うCO₂排出量を考慮している。また、各段階における設備の製造に伴うCO₂排出も含めている。ただし、設備の解体については、原子力以外は考慮していない。

4-2-4 各発電技術のライフサイクルCO₂排出量

火力発電

火力発電のLC-CO₂は、他の発電システムのそれと比べて10倍以上である。石炭火力と石油火力は、発電燃料の燃焼に伴う直接排出量が全体の9割以上を占めている。間接排出量の占める割合は小さいが、発電燃料の輸入国の違いによって幅をもつ。これは、主に各国からの輸送距離そして石炭採掘時のメタン漏洩量が異なるためである。他方、LNG火力については、LC-CO₂に占める直接排出量の割合は約8割である。天然ガスの液化に伴うCO₂排出や天然ガス中に含まれるCO₂放出のために、石炭火力や石油火力に比べて間接排出量が多い。これらの間接排出量は、いずれの国からLNGを輸入するかの想定によって異なり、その想定の違いでLC-CO₂には

16%程の差異が生じる。

原子力発電

原子力では核燃料の濃縮に伴う排出量が全体の3分の2程度を占める。現状では、我が国で使用されているウラン燃料の約3分の2は、石炭火力の比率の高い電源構成を持つアメリカで、多量の電力を消費するガス拡散法を用いて濃縮されているために濃縮プロセスからの排出量が多い。他方、使用済み燃料を再処理してMOX燃料として利用する場合（リサイクル）についても検討したが、22g-CO₂/kWhと現状ケースとほとんど変わらない。再処理や高レベル廃棄物の処分などの追加的なプロセスからの排出量は増加する。しかし、使用済み燃料を再処理して得られたウランやプルトニウムの利用に伴いウラン新燃料の必要量が減少するために、濃縮プロセスからの排出量が減少するからである。なお、利用する濃縮技術と濃縮実施国の電源構成はLC-CO₂に大きな影響を与え、これらの濃縮条件の違いによってLC-CO₂は10～30g-CO₂/kWhの幅をもつ。

水力、地熱、太陽光、風力発電

水力、太陽光、風力発電では、発電設備の建設に伴う排出量がライフサイクル全体の8割近く以上を占めている。地熱は、運転開始後に補充井の追加掘削や設備交換が必要となるため、運用時の排出量が全体の6割以上となる。設備建設に伴うCO₂排出量が大きな割合を占める

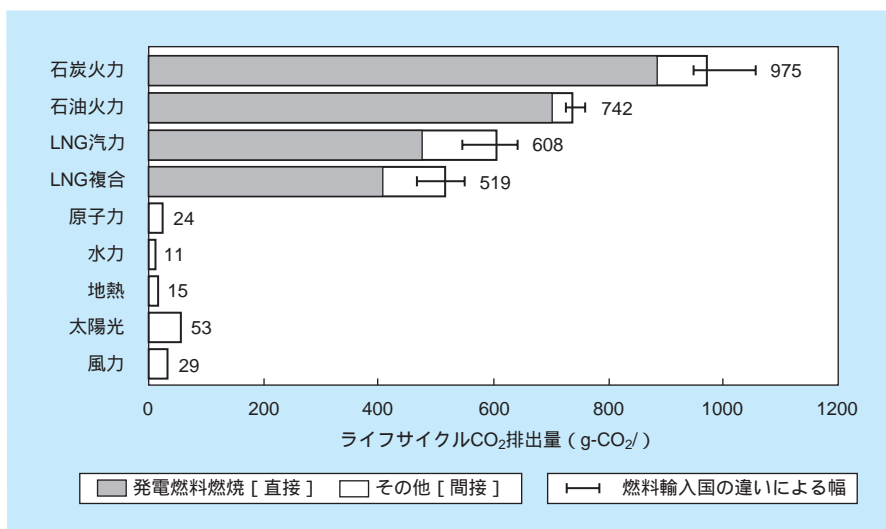


図4-2-2 ライフサイクルCO₂排出量

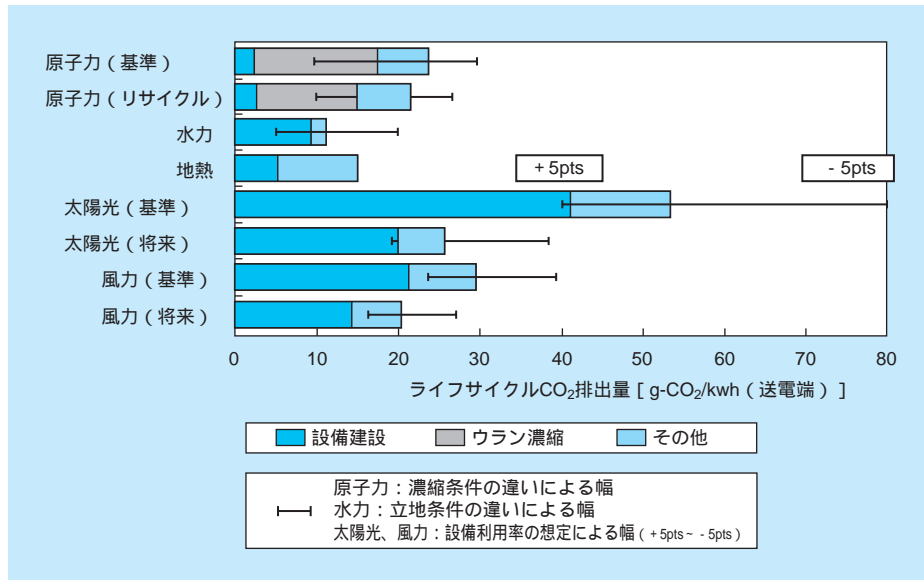


図4-2-3 火力発電以外のライフサイクルCO₂排出量

発電技術では、設備利用率の想定が結果に大きな影響を及ぼす。例えば、太陽光と風力は、設備利用率の変化によってLC-CO₂は大きく変化する。他方、水力のLC-CO₂は立地場所や型式に強く依存し約4倍の開きがある。また、太陽光と風力は、今後の普及に伴う生産規模の拡大や技術改善により、設備製造からの排出量が削減される余地があり、現状に比べて、太陽光は26g-CO₂/kWhと約半分に、風力は20g-CO₂/kWhと7割程度になる可能性がある。

4-2-5 意思決定の材料のひとつとして

当所では、ライフサイクルアプローチにより地球温暖化の面から各発電技術の特性を分析してきた。今後の発電技術の導入や技術開発においては、環境性はもちろんのこと、経済性、供給安定性など様々な要因を考慮する必要がある。上述した分析結果が意思決定における材料のひとつとして活用されることが期待される。

4 - 3 排ガス CO₂ 回収・海洋隔離・地中処分技術の評価

4-3-1 CO₂ の回収・隔離の沿革

地球温暖化防止を目的とした「排ガスからの二酸化炭素 (CO₂) の回収の技術開発研究」は1990年代初頭から始まった。1992年アムステルダムで開催された第1回CO₂除去に関する国際会議 (FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON CARBON DIOXIDE REMOVAL) では、火力発電所等からの大量のCO₂回収を対象として、実証あるいは商用規模の現有技術に基づく様々な技術が

発表された。加えて、EOR (原油増進回収) 地中貯留、海洋処分など隔離技術も発表された。しかし、必ずしも、CO₂回収技術及び隔離技術との統合あるいは連携が十分に意識されて、研究の目標が設定されてきたとはいえず、特に、CO₂回収技術は、当時すでに一般化学工業、石油産業及び燃料製造などの分野で約半世紀に近い技術に基づき、回収の可能性が示唆されていただけに、以降、革新的技術的進展は見られていない。

一方、1996年秋にノルウェーの沖合北海 Sleipner 鉱区 (天然ガス田) において、CO₂地中圧入事業が年間

100万トン規模で開始された。これは、天然ガス精製を目的としたCO₂回収・貯留であり、「回収・貯留規模」において大きく、「CO₂回収技術と処分技術とが連携」された商用プラントであり、炭素税とのトレードオフにより回収・貯留を行う点で地球温暖化防止と密に関連したものである。これを機に近年、排ガスからのCO₂回収技術についての開発研究戦略が隔離技術と連携する具体的なシナリオに基づき、活発に練り直されている。

また、米国のブッシュ大統領は、2001年6月11日にワシントンで行った演説の中に、地球温暖化ガスの削減技術について、いくつかの見解を示しているが、(抜粋、Greenhouse Issues, No.55, July 2001, IEA Greenhouse Gas R&D Programme) そのなかに以下のように回収・貯留及び隔離技術が述べられていることは、今後の回収・貯留技術の国際的研究展開になかで注目すべき点がある。

“ There are only two ways to stabilize concentrations of greenhouse gases. One is to avoid emitting them in the first place; the other is to try to capture them after they are created. And there are problems with both approaches. We are making great progress through technology, but have not yet developed cost-effective ways to capture carbon emissions at their source; although there is some promising work that is being done. ”

「温室効果ガスの濃度を安定させる方法は2つある。一つはまず第1に温室効果ガスを排出しないことである；もう一つは生成してしまった温室効果ガスを捕集することである。だが、どちらのアプローチにも問題がある。我々の技術はあまねく大きく進歩しているが、排出源からの炭素(二酸化炭素)を経済的に捕集する方法を開発するまでには到っていない。もちろん、将来見込みのある研究が行われてはいるが。」

“ We all believe technology offers great promise to significantly reduce emissions - especially carbon capture, storage and sequestration technologies ”

「我々は皆、技術(特に、回収、貯蔵および隔離技術)が二酸化炭素の排出を大きく低減させることを、しっかり約束してくれるものと信じている。」

以下では、火力発電所を対象とした排ガス中からのCO₂の回収技術及び隔離技術について概説する。技術的視点として重要なことは大規模、エネルギー所要量、回収・隔離の連携、地球温暖化防止策としての対費用効果である。これに加えて、重要なことは、CO₂削減策としてのCO₂の回収+隔離技術の開発は、従来の排煙脱硫や排煙脱硝技術のように技術的完成がそのまま直接実用化に結び付くとは限らない、国内・国際的エネルギー政策と関連する政治局面をもっていることである。これに関しては、ここでは触れない。

4-3-2 火力発電所排ガスからのCO₂の回収技術

大規模システムに適用されているCO₂の回収技術

一般的なCO₂回収法には、吸収法(化学吸収液及び/または物理吸収液を用いる方法)、吸着法(吸着剤による吸着分離)、膜分離(膜による選択分離)法及び深冷法(沸点の違いによる分離)がある。

現在までに、大容量の化石燃料燃焼排ガスに適用された実績があるのは吸収法であり、石油工業をはじめとする化学工業の分野で広く用いられている(表4-3-1)。

化学吸収法については、過去に石油の強制回収(EOR: Enhanced Oil Recovery)のために、天然ガス焼き火力発電所(50Mw × 2基Lubbock Power & Light Holly Plant, Texas, USA)に適用された実績がある。ここではMEA(モノアタノールアミン)吸収液による化学吸収法(Dow Chemical社、Gas/Spec FT-1(MEA + 添加剤))を用いて1100t-CO₂/日の規模でCO₂を回収した。この設備は1980年代始めにすでに解体されている。現在稼動中のものではKerr-McGee/ABB Lummus Crest社によるものが最大であり、CO₂の回収規模は約800t-CO₂/日である。多くのプロセスではMEAをベースとする化学吸収液が用いられている。最新のプロセスでは、三菱重工業及び関西電力が開発したKS-1(2級アルカノールアミン系立体障害アミン)を吸収液として用いられているものがある。

表4-3-1 稼働中のCO₂回収プロセス

排ガス源	プロセス ライセンサー	プロセス名 (吸収剤)	CO ₂ 回収量 (t-CO ₂ /日)	サイト	目的/用途 運開年
石炭ボイラ ¹⁾	Kerr-McGee/ ABB/Lummus Crest	CO ₂ Recovery (MEA+添加剤)	800	Trona, Seales Valley, California, USA	ソーダアッシュ 製造用 1978～稼働
石炭ボイラ ¹⁾	Kerr-McGee/ ABB/Lummus Crest	CO ₂ Recovery (MEA+添加剤)	300	Sua Pan, Botswana	ソーダアッシュ 製造用 1991～稼働
石炭流動床 燃焼コジェ ネプラント ¹⁾	Kerr-McGee/ ABB/Lummus Crest	CO ₂ Recovery (MEA+添加剤)	200	Applied Energy System, Shady Point Plant, Oklahoma, USA	食品用 1991～稼働
天然ガスタ ーピン ²⁾	Fluor Daniel	Econamine FG (MEA+添加剤)	320	Bellingham, Massachusetts, USA	化学品用 1991～稼働
蒸気改質器 排ガス ³⁾	MHI/KEPCO	KS-1 (立体障害 アミン)	160	Petronas Fertilizer Kedah, Kedah Darul Aman, Malaysia	尿素合成原料 1999運開予定

4-3-3 電気事業におけるCO₂回収技術の研究

当所の研究(化学吸収法を用いた排ガスからのCO₂回収技術)

この研究は、1991年に開始し、1995年に電力共同研究が開始する時点で終了した。これは排ガスからのCO₂回収技術に関する包括的研究である。化学吸収式CO₂回収実験装置(CO₂回収規模3 t-CO₂/日)を設置し、運転特性及び所要エネルギーを実験により検討し、その結果に基づき、600MW級LNG火力発電所を想定し、フィジビリティスタディを行った。この研究では20wt%のMEA水溶液を用いた化学吸収法による。

この研究は以下の内容を含む：

運転特性

熱消費特性

所要熱量の低減化に関するパラメータスタディ

吸収液の劣化及び装置材料の腐食

600Mw級LNG火力発電所に設置するCO₂回収・液化設備(CO₂の処理・処分は除外)

(詳細な機器・建屋構成、機器要領・寸法、基本設計図、プロセス物質・熱バランス、全体配置図、建設費・変動費・運転費)

フィジビリティスタディは、図4-3-1に示すようなかなり具体的なプラント設計にまで踏みこんだものである。

排ガスからCO₂を吸収する吸収塔の高さは約44 m以上になり、こうした一連の装置が数基以上必要とされる結果が示された。このような設計結果から回収設備の設置を現実的なものとするには課題が多いことが予想された。

得られた主要な結論は以下の通りである。

所要動力は回収及び液化で、それぞれ発電出力の6.8%及び4.7%を要し、発電出力の大幅な低下を招くとともに、通常設置されている排煙脱硫装置に比べて極めて大きい(電力消費だけでも数倍以上)、広い敷地面積(201m×241m)を要する。

発電減価(当時10円/kWhに設定)の約50%の上昇を招く。

電力共同研究

CO₂回収技術に関する電力共同研究会は、電力各社、当所及び三菱重工業を構成メンバーとして1994年～1998年まで行われた。その内容はパイロットプラントによるシステム評価を中心とするものであり、当初は化学吸収法(関西電力、東京電力)及び物理吸着法(東京電力PTSA：温度圧カスイング法、東北電力PSA圧カスイング法)後に、移動床を用いた物理吸着法(北陸電)が加わり実施された。加えて、エネルギー所要量の低い化学吸収液の開発や物理吸着法で用いられる吸着材の開発も行われた。

そのねらいは以下の点であった。

エネルギー消費量低減
大容量化

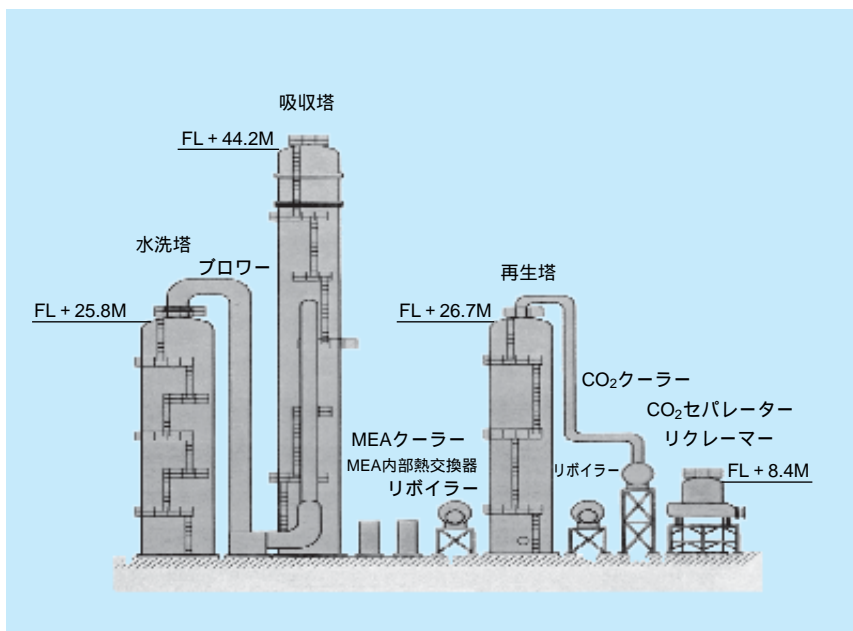


図4-3-1 主用機器構成 (CO₂回収設備)

腐食対策

排ガス中不純物 (SO_x) 対策

環境特性

長期連続運転

負荷変動追従性

ここで得られた主要な結論は以下の通りであり、さらなる課題が残された。

化学吸収法については、エネルギー所要量が大きく、さらなる低減が必要である。

物理吸着法には、PSA (Pressure Swing Adsorption) やPTSA (Pressure Temperature Swing Adsorption) による方法があるが、吸着法を化石燃料燃焼排ガスに適用するには、大容量化とともに、充填材や大型真空バルブなどの周辺機器の技術課題を解決する必要がある。

化学吸収法及び物理吸着法ともに広大な敷地面積を要する。

4-3-4 その他のCO₂回収に関する研究

膜分離法・深冷法

排ガスからのCO₂回収技術として、さらに膜分離法や深冷法がある。膜分離法は、まだ研究段階である。深冷法では、数段にわたって排ガスを圧縮・冷却することが

必要であり、CO₂の回収するためには多量のエネルギーが要求される。さらに、石炭燃焼排ガスの場合では、共存ガス (SO₂、NO_x) による冷却の干渉や材料腐食の可能性もある。今後さらに研究が必要である。

発電方式とCO₂回収技術との適切な組合せ

石炭火力の発電方式は、従来型のボイラータービン方式のみならず、PFBC (加圧流動床燃焼方式) やIGCC (石炭ガス化複合発電方式) などがあり、排ガス特性 (温度、圧力、組成) が異なる。そのため、当所では発電方式とこれに適したCO₂回収技術との組合せによるコスト削減の可能性の検討も行った。これは、発電方式として、微粉炭燃焼方式、PFBC及びIGCCを選定し、それぞれに対し、化学吸収法及び純酸素/CO₂燃焼 (IGCCの場合はガス化) の2通り、IGCCの場合には、さらに、酸素吹きガス化 + シフト反応 + CO₂PSA を加えた3通りを想定して、それぞれ、発電端効率、所内率、送電端効率、コストについてベースケースとの比較を行った。

最良の特性が得られたケースは、IGCCの酸素吹きガス化 + シフト反応 + CO₂PSA のケースであった。しかし、これは、IGCCの実証も含め等、さらなる研究を要するものである。

4-3-5 CO₂ 隔離技術

隔離技術の現状と分類

CO₂の隔離に関して、大きく海洋隔離及び地中隔離の2通りのアイデアがある。前者は海洋での炭素循環の研究成果に立脚した地球温暖化防止の最後の手段としての位置付けから出発し、一方、後者は、むしろ、原油増進回収法として利用されていた、CO₂注入という化石燃料生産における実用現場から発想されたと考えられる。こうした、科学的研究及び実用現場という発想の違い及び環境適合性に関する要因が、現在、両者の研究における進展の違いに反映している。しかし、1996年にノルウェー沖合西 Spleiner 鉱区(ガス田)でのCO₂地中圧入事業が開始されたことを契機として、欧州のエネルギー産業では、CO₂の隔離方策を京都議定書の目標達成の手段として組み入れようとする動きも、近年、活発になってきた。

隔離技術について、隔離の概念、特徴、技術的なポイント及び技術開発の現状について表4-3-2に概括する。

海洋隔離方策

海洋隔離技術は、隔離量と隔離場所を限定し、具体的

に副次的な“adverse effect”の生じる空間領域や時間について明らかにし、周辺海洋環境への影響評価の研究が重要となる。これが、CO₂の海洋への溶解(隔離)に関する具体的な技術開発を進める要点である。そのため、CO₂海洋隔離については、「副次的に生じうる海洋環境影響を極小化する技術」を開発するとともに、海洋環境影響評価のための材料を揃えて社会の判断あるいは合意を仰ぐことが不可欠である。

影響を小さくすることを考慮した隔離方式に溶解型と貯留型がある。溶解型は、CO₂を海水中に溶かし希釈することによって、本来海洋中に溶解しているCO₂の濃度を許容範囲内で上昇させるという考え方である。一方、貯留型は、深海底の窪みにCO₂を溜めることができれば、影響の範囲を局所化できるという考え方である。貯留型の方式は、地球表層に特異点を人類が設計し、その隔離性能を長期にわたって担保するという考え方であり、地中隔離の諸方式との親近性が高い。

当所では、1989年からCO₂海洋隔離の研究を開始し、1991年からは資源エネルギー庁からの受託研究にも携わり、現在、NEDOが進める「CO₂海洋隔離環境影響予測技術開発」(1997年度～2001年度)に協力し、その枠内では、特に国際共同研究としてのCO₂海域注入実験の

表4-3-2 様々な隔離技術の現状と分類

隔離の概念	特徴	技術的なポイント	技術開発の現状
海洋溶解	大気中に放出されたCO ₂ はいずれ海洋中に吸収され溶解する。海洋表層と中深層とが躍層によって混合が妨げられているため、溶解には1000年以上を要する。海洋表層をバイパスして、パイプを介して人為的に直接、大洋の中深層へCO ₂ を注入・溶解させ、大気中CO ₂ 濃度の急激な上昇を回避する方策。	例えば大気中でのCO ₂ 濃度の安定化目標を550ppmとすれば、その時点で想定される中深層中のCO ₂ 濃度にまで、人為的に希釈するためには、30万倍希釈が目標である。30万倍希釈にまで到らないCO ₂ 濃度を持つ水塊が出現することになるが、その継続時間と空間的広がりなどが、海洋環境に許容できるよう設計すること。	環境影響評価手法を検討するために、少量のCO ₂ を深さ800mの水深の海域に注入し挙動を観察する国際共同研究が進行中(日本・米国・ノルウェー・カナダ・オーストラリアなど)。
帯水層貯留	長期間にわたって地表水との連絡が絶たれている地下深部の塩水帯水層に、坑井から超臨界CO ₂ を圧入する。注入率の大きい対象層を選び、その間隙水を超臨界CO ₂ で、置換する場合に、最大の経済性が得られる。	サイトの特性(陸域が沖合いか? 帯水層の上部のシール層に遮断性能をどれほど期待できるか? など)に応じて、長期的な漏洩の可能性が排除できるよう圧入坑井の配置や圧入量をコントロールすること。	1996年から北海のスライプナー天然ガス田で事業として実施中(年間CO ₂ 100万トン規模) 水深80mの海域の海底下1000mの帯水層に圧入中のCO ₂ の地下挙動をモニタリングする国際共同研究プログラムSACSが進行中。
炭層吸着	石炭がCO ₂ を吸着することを応用し、将来とも採炭の見込みのない炭層に坑井を通じて吸着固定させる。	CO ₂ を吸着させる地下の炭層に効率的に、最少の坑井数で、CO ₂ を送りこむ技術を確立すること。	米国、カナダでは、フィールド実証試験段階。日本、欧州、オーストラリアでも研究計画を立案中。
地熱利用中和	大気中にもたらされた過剰なCO ₂ は、百万年スケールでは、ケイ酸鉱物から供給される陽イオンと反応し、中和されることに着目し、反応速度を加速する場としての地中深部の地熱に期待する。	効率的な地熱エネルギー利用に適さない温度域で、CO ₂ の注入効率が高く、圧入坑井が経済的な掘削深度であるような、サイトが選定できること。	欧州で、地中隔離のオプションとして検討されている程度。
深海底貯留	海洋隔離の考え方として古典的な概念。海洋で水深3000mを超えると、液体CO ₂ のほうが海水より大きい密度となることから、深海底の窪地に、水溜り状にCO ₂ lakeとして安定的に貯留することが可能。	地表の貯水池に比較しても特異で、かつ大規模な人工物を地球環境の一構成物として設計することになるため、管理方策を含め技術を越えた多岐にわたる検討が必要。	検討事例として、当所や船舶技術研究所の研究がある。

成功に向けて注力しているところである。

溶解型の海洋隔離の技術的方策として、当所は三菱重工業株式会社とともに、前述の資源エネルギー庁からの受託研究の中で、1993年に、船による希釈放流 - Moving ship 方式を提案している。これは船から長さ 1,000 ~ 2,500m のパイプを吊り下げ、液化 CO₂ を放流しつつ船を前進させる。海洋の自然の混合に委ねる前に、放流点の移動により人為的に一定以上の希釈をする技術である。

曳航されるパイプの下端近傍に多数の小孔を設けて CO₂ を放流すると、放出口において CO₂ 液滴は周囲流体によって形成途中で引きちぎられ、さらにパイプ背後に生じられる渦流によって分裂し微細化する。図 4-3-2 に記すように、液滴の浮上・溶解挙動を予測した結果によると、実機規模の 150kg 毎秒の CO₂ を深度 2,000m にて 3 m/sec で曳航しながら放出した場合、最も濃いところで海水に対し 1/60,000 の重量比の CO₂ 濃度上昇になることが示される。この値の影響評価における位置付けはまだ論じられないが、工学的に可能な初期希釈のレベルを提示する一例である。

地中貯留方策

1990 年代前半の CO₂ 地中隔離に関する研究対象は、世界での隔離容量推定、CO₂ 地中挙動シミュレーションや経済性検討といった分野に限られていた。しかし化石燃料生産現場での具体的な取り組みは、着々と進み、1996 年秋に開始された北海 Sleipner 鉱区における年間 100 万トン規模での CO₂ 圧入事業を皮切りに、現在では、多方面にわたる研究プログラムが公的な研究資金を受けつつ産業界の積極的な関わりのなかで実施されるにいたっている。この動きは欧州および英連邦系の国々で顕著

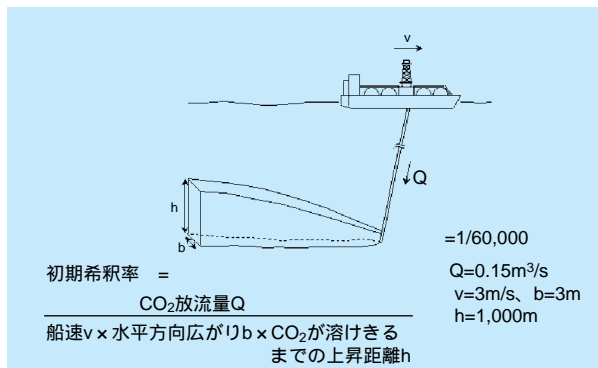


図4-3-2 概略の初期希釈率

となり、下記に概観するように、それぞれに特色を持った多数の、研究プログラムが現在進行中である。こうした中で、米国のブッシュ政権が温暖化対策として打ち出した研究開発パッケージにある CO₂ 隔離研究の重点が、「海洋隔離および地中隔離」となっていることは注目される。

これらの研究プログラムに共通する特徴は、「エネルギー文明が積極的に気候変動に対応してゆくためには、CO₂ 地中貯留が社会に受け入れられることが重要」であり、社会合意形成もねらいに入れたものとなっていることである。こうした背景には、エネルギーと環境に関わる社会的な接点（環境や社会へのエネルギーシステムの影響に関するライフサイクル分析、高レベル放射性廃棄物の深地層処分あるいは海底下処分の安全評価研究）で、これまで科学者・技術者が果たしてきた役割についての経緯が反映している。

SACS (Saline Aquifer CO₂ Storage) 研究プログラム

1996 年 9 月から、ノルウェー沖合約 240km の北海中央部のスライプナー鉱区ガス田では、海底帯水層に 100 万 t/年規模の CO₂ 地中圧入を開始した。この商業プロジェクトの目的は、あくまでもスライプナー鉱区の天然ガス開発が主体であることに留意する必要がある。地中隔離実施のきっかけは、ノルウェー政府が沖合油田に対して炭素税を課したことであり、CO₂ 圧入事業計画当時の炭素税額は CO₂ 排出量 1t あたり 350 クロネ（約 55 米ドル）であった。同鉱区の権利保持者スタットオイル社（ノルウェー国有の石油会社）は、同鉱区の開発を 1980 年代半ばから検討していたが、ネックは、生産ガスに不純物として 9% 含まれる CO₂ であり、天然ガス中の「CO₂ 濃度 3% 以下」という技術基準をクリアする必要があった。炭素税の負担を回避するために、CO₂ を化学吸収法のひとつであるアミン法で分離・回収することとし、高さ 20m で重量 240t の吸収塔 2 基を備えた 8,000t のプラントが新しく設置された。回収された CO₂ は海底下の深度 1,000m の砂岩帯水層「Utsira」（厚さ 200m）に、CO₂ は地中圧入されている。一方、技術基準を満たすように精製された天然ガスは既設の海底敷設のパイプラインを用いて陸上へ輸送される。地球温暖化防止に関連した研究プロジェクトとして世界で最初である。

この事業を利用してCO₂の地中挙動をモニタリングするSACS研究プログラムは、1998年から開始された。欧州共同体から研究費の49%を受け入れ、欧州に本拠を持つ石油会社・ガス会社・電力会社なども資金を提供して実施されることになった。SACS研究プログラムの具体的な中身を審議し、立案するための専門家会合は1997年11月にノルウェーはトロンハイム市にあるスタットオイル社の技術開発センターで実施され、当所の研究者も参加した。

SACS研究プログラムの成果のハイライトは、“time-lapse seismic”であった。1999年秋に得られた地震探査結果は、圧入事業開始以前の1994年の地震探査データとの差を解析することによって、みごとに「地層間隙の塩水を置き換えている超臨界状態CO₂」と思われる影を捉えていた。これは「地中に圧入された超臨界のCO₂の原位置での溶解は、どれほど時間のかかる過程なのだろうか?」「超長期的なリスクの評価に盛り込む必要がある要素なのであろうか?」という技術課題を提起することとなった。

現在、我が国でも有望な地中貯留の方式は、沖合帯水層への圧入であるとして、2000年度からNEDO/RITEの技術開発プログラムが開始されたところであり、SACS研究プログラムの動向は今後とも注視しつづける必要がある。

Weyburnモニタリング研究プログラム

Weyburn EOR（原油増進回収）プロジェクト（カナダ・サスカチュワン州）は、Pan Canadian社によって操業され、2つの特徴を持っている。第一に、国境線の南にある米国ノースダコタ州の石炭ガス化炉をEOR用のCO₂供給元とし、本プロジェクトのためにパイプラインが建設された。第二に、本格的なEOR商業プロジェクトであり、営利を目的としてビジネスとして行われていることである。2000年秋から20年間にわたって、年間100万トン、総計2000万トンのCO₂がEORの目的で地下の油層へと送りこまれる。CO₂は再利用される。

プロジェクトの研究側面として、Weyburnモニタリング研究プログラムの実施主体は、カナダのPTRC（Petroleum Technology Research Center）である。モニタリング研究プロジェクトは2001年より3年間とされているが、事業期間が20年であるところから、多くの研究参加機関がより長いスコープを考えている。研究の目的としては、「注入されたCO₂のモニタリングを通して、隔離されたCO₂の挙動、隔離のメカニズムや長期の安全性の問題に関する知見を集めること」が、掲げられている。

このプロジェクトには欧州共同体の資金も投入され、ヨーロッパの科学者（デンマーク、フランス、イタリア、英国）も参加している。

4 - 4 CO₂ 回収型火力発電システムの評価

ガスタービンによる複合発電は高効率であることから、世界各国の電力会社で導入されている。効率向上により単位発電電力当たりのCO₂排出量は8～9割に低減する。さらに積極的にCO₂排出量の削減を行うために、CO₂を排出しない新しい発電システムの開発が必要となる。ここでは、従来の発電システムとは基本的に異なるシステム構成を持つCO₂回収型火力発電システムであるクローズド型タービン発電システムと水素分離型タービン発電システムについて紹介する。これらの新しい発電システムで回収したCO₂を海中または地中に封じ込むことにより大気との隔離が実現できれば、原理的に大気へCO₂を排出せずに発電することが可能となる。

クローズド型タービン発電システム

クローズド型ガスタービン発電システムは、水蒸気やCO₂等の作動流体を循環使用するものであり、わが国でも、水力資源等の自然エネルギーが豊富にある諸外国にて水素を製造、輸送し、国内で発電を行うという水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術（WE-NET）プロジェクトが行われ、水素を酸素燃焼する水素燃焼タービンの研究が行われた。水素は酸素と当量燃焼すれば非常に高温の水蒸気を発生させることができる。この性

質を利用したものに、変形ランキン統合タービン発電システムとグラーツサイクルがある。（詳細は文献参照）

この2つのサイクルの特徴は、複合サイクルの低温側であるランキンサイクルが超高温の水素/酸素燃焼器を経由していることである。熱効率は共に水素/酸素燃焼器出口温度が1700℃の場合、酸素製造動力を差し引いて約54%である。

なお、これらのクローズド型ガスタービンは燃料に天然ガスを用いることも可能である。その場合は、燃焼ガスは水蒸気とCO₂の混合ガスとなるため、非凝縮ガスであるCO₂を復水器からCO₂圧縮機により抽出する。図4-4-1に天然ガス燃焼グラーツサイクル（CO₂回収対応クローズド型高効率ガスタービン）の構成図を示す。

水素分離型タービン発電システム

水素分離型タービン発電システムの基本的な概念は、燃料の水蒸気改質による再生サイクルガスタービンである。メタノールを燃料とする再生サイクルガスタービンは、中国電力 大崎発電所において国プロジェクトとして研究開発が行われた。メタノールは水蒸気を加えることにより比較的低温（250～350℃）で水素とCO₂に改

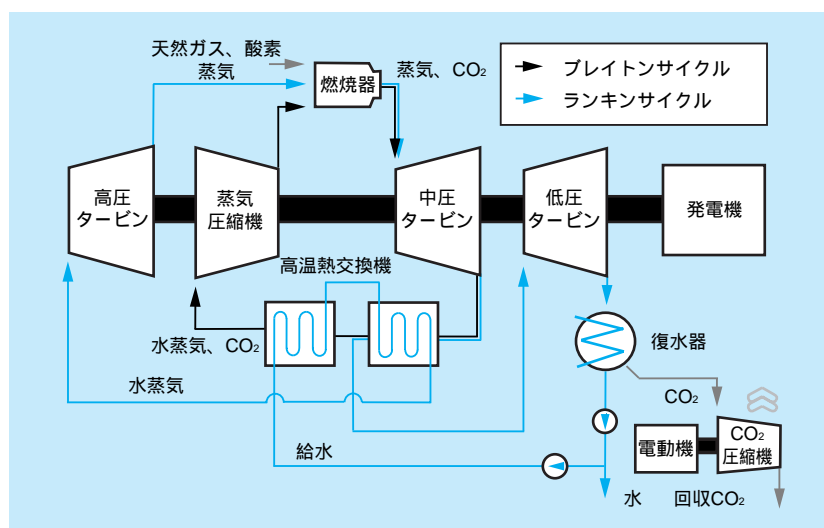


図4-4-1 天然ガス燃焼グラーツサイクル構成図
(CO₂回収対応クローズド型高効率ガスタービン)

質させることが出来る。メタノール - 水蒸気改質反応は吸熱反応であるため、低温のガスタービン排熱を高温のガスタービンに戻すことが出来る。これを再生サイクルと呼び、この再生サイクルの効果により、サイクル全体の熱効率が向上する。

主成分がメタンである天然ガスの場合、メタン - 水蒸気改質反応も吸熱反応であるが、十分な改質率を得るためには化学平衡上 900 以上の高温下で反応させる必要があるため、燃料電池用の改質器では、天然ガスの一部を燃焼することにより、高温にして反応熱を供給する。よってガスタービンの排熱は利用できない。しかし図 4-4-2 に示すような膜改質器を用いれば、水素分離膜により反応系から生成ガスの水素が除去されるので、水蒸気改質反応が進み、550 ~ 600 程度の比較的低い温度でも水蒸気改質が可能となる。この温度レベルであれば、天然ガスでもガスタービン排熱を利用した再生サイクル

を組むことが可能となる。

当所はこの膜改質器を排ガスボイラの中に設置した天然ガス改質水素分離型タービン発電システムを考案した。このシステムは改質に必要な反応熱と改質用水蒸気の発生両方にガスタービン排熱を用いることにより最大限に再生サイクルの効果を得ることができる。図 4-4-3 に提案システムの構成図を示す。1300 級ガスタービンの場合、メタン水蒸気比 3.5、水素分離率 98 % の条件で送電端熱効率は 51 % となる。再生サイクルの効果により、通常の複合発電を超える高い熱効率で CO₂ を回収できる唯一の発電システムと思われる。

本システムの実現には、セラミック多孔質膜、パラジウム膜等の膜改質器に使用可能な高温無機水素分離膜技術の開発が、鍵となる。近い将来、高信頼性、低コストな高温技術の開発が期待されている。

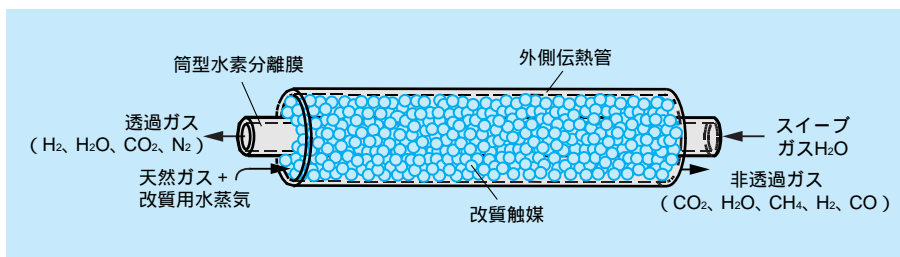


図4-4-2 膜改質器モジュール

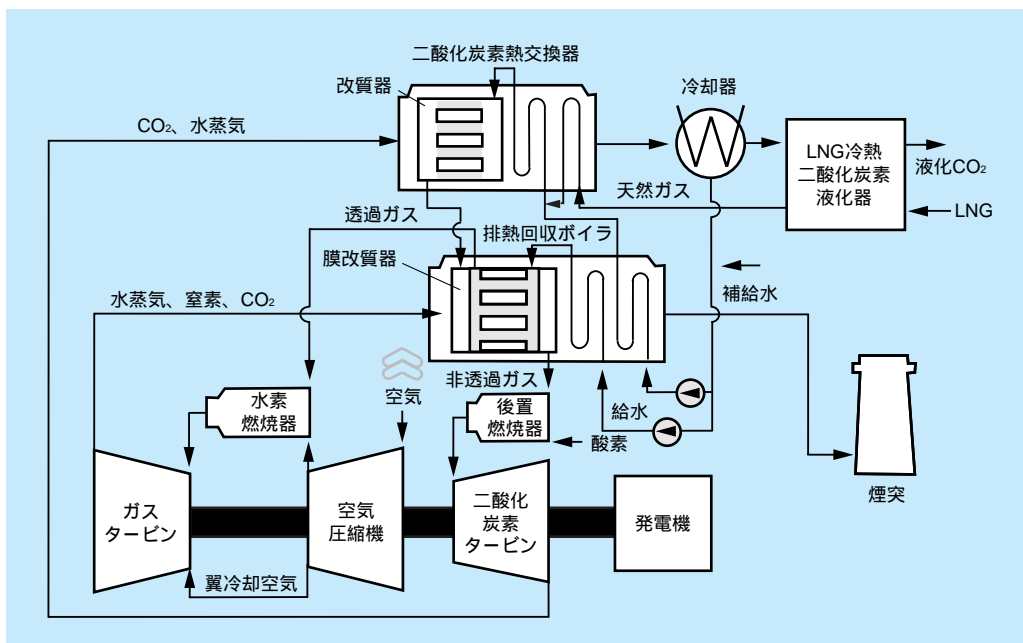


図4-4-3 天然ガス改質水素分離型タービン発電システム構成図

水素分離型IGCC 発電システム

石炭ガス化複合（IGCC）発電は、高効率で環境保全性に優れた新しい石炭焼き火力発電プラントとして内外で鋭意研究開発が行われている。当所は石炭焼き火力発電プラントから排出されるCO₂を回収するために、このIGCC発電システムをベースとした水素分離型IGCC発電システムを提案している。水素分離型IGCC発電システムは、図4-4-4に示すように石炭ガス化設備、ガス精製設備、ガス分離設備および複合発電設備から構成される。本発電システムは、石炭を水を加えてスラリー化してガス化炉に供給し、酸素でガス化し、水素とCOを主成分とする可燃性ガスに変換し、COはCO₂に変換した後、ガス精製設備で硫黄分とばいじんを除去する。このクリーンとなった燃料ガスから、水素分離膜で水素とCO₂を分離し、透過した水素はガスタービンに供給し、CO₂を含む非透過ガスは回収して海中に注入処分する。本システムにおいても高温水素分離膜が重要な構成要素である。水素/CO₂分離率を500と想定した場合、1300級ガスタービンを用いた本システムの送電端出力は約41万kW、送電端効率は40%（高位基準）以上

となる。そして、CO₂回収率は99%、CO₂排出単位は僅か0.007kg-CO₂/kWhである（通常の石炭火力は約0.92kg-CO₂/kWh）。また、SO_xとNO_x排出濃度は10ppm以下である。

CO₂回収型火力発電システムの熱効率と単位発電電力量あたりのCO₂排出原単位を従来型微粉炭火力、天然ガス焼き複合発電と比較して図4-4-5に示す。

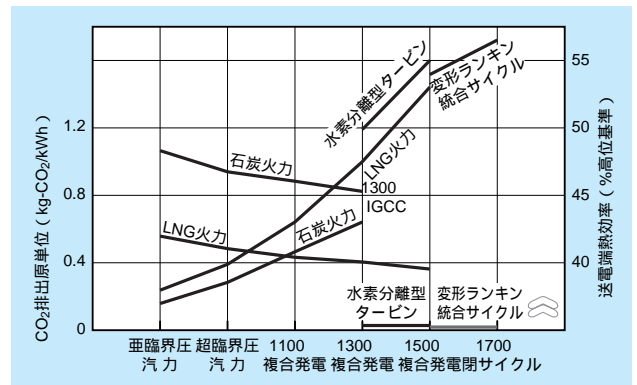


図4-4-5 各種CO₂回収型火力発電システムのCO₂排出原単位比較

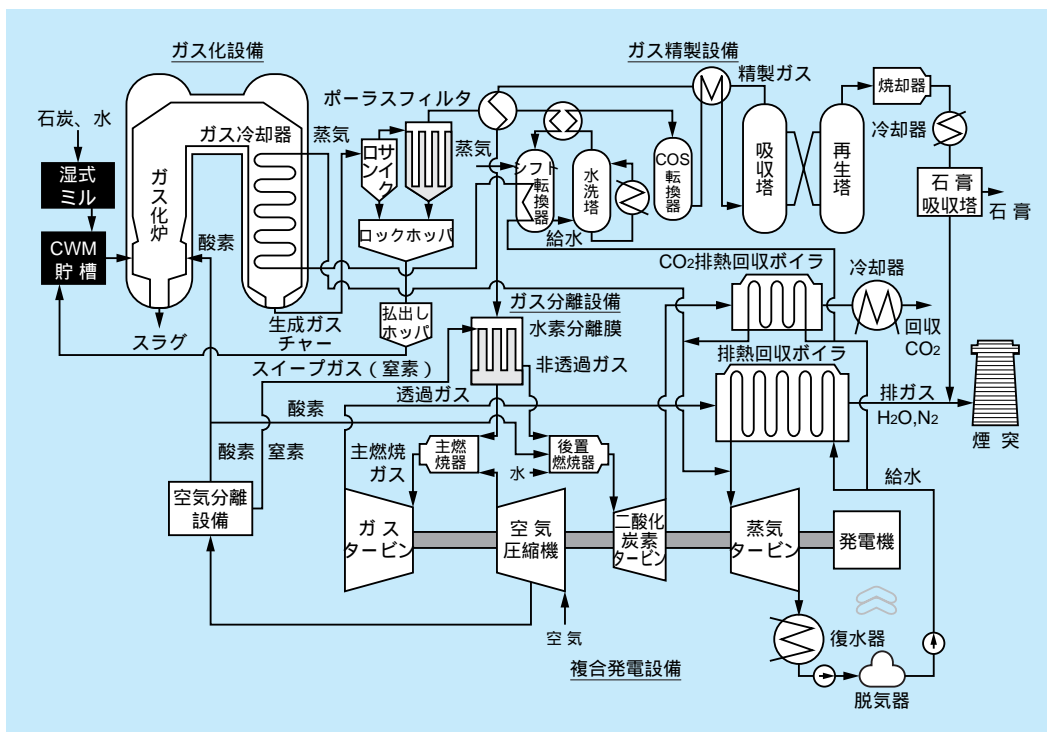


図4-4-4 水素分離型IGCC発電システム構成図

コラム11：CO₂ヒートポンプの基礎研究と実用化

わが国の家庭用最終エネルギー消費の約1/3は給湯であり、そのほとんどが化石燃料の直接燃焼により賄われている。従って高効率な給湯ヒートポンプの開発・普及は省エネルギーの観点から重要である。一方、地球環境保護の観点から、フロンのような合成品ではなく、環境に負荷の小さい自然冷媒を利用したヒートポンプの開発が必要となっている。

このような状況のもと、当所は、自然冷媒の中でも、毒性・可燃性が無いCO₂に着目し、わが国ではいち早く、1995年からその可能性を評価するための基礎的な研究を開始した。

冷暖房や給湯用ヒートポンプの冷媒としてCO₂を利用する場合、フロンと異なり、サイクルの高圧側が超臨界状態となる。このため、研究課題が多く、**図1**に示すCO₂ヒートポンプ基礎実験ループ等を用いて基礎的な研究を進めてきた。その結果、CO₂はヒートポンプの冷媒として十分利用可能であること、特に給湯用に関しては、サイクル上の特別な工夫をしなくても高いCOP（給湯能力/圧縮機入力）が得られるため、将来有望であることを明らかにした。

これら基礎的な研究成果をベースに、1998年9月から、当所は、東京電力、デンソーと共同で、家庭用CO₂ヒートポンプ給湯機の研究開発を開始した。共同研究において、当所は、圧縮機や熱交換器の開発・改良等を技術面からサポートし、8段階に渡って試作機を改良、試験風洞に試作機を設置して試験を行った。その結果、高い省エネ性や機能を含む技術的な課題をクリアし、年間平均のCOPで3以上を達成できる家庭用CO₂ヒートポンプ給湯機を開発し、世界初の商品化を達成した。**図2**に試作機の外観を、**図3**に開発機の外観を示す。

開発機は、**図4**に示すように、広く普及している燃焼式の給湯器に対し、約3割の省エネルギーを達成でき、CO₂排出量は約半分に削減できる。国も本技術の優位性を評価し、その普及促進を図る施策を決めるに至っており、省エネルギーの推進、地球温暖化防止に有効な技術として普及が期待されている。



図1 CO₂ヒートポンプ基礎実験ループ



図2 試作機の外観
(4.5kW出力、80×35×100cm)



図3 開発機の外観

左：ヒートポンプ（4.5kW出力、81×32×65cm）
右：貯湯タンク（300、109×45×152cm）

	ガス方式	発電設備+CO ₂ 冷媒HP給湯器	比較
ガス給湯器との比較	100 ガス給湯器 = 78%	78 HP給湯器 COP3.0以上 電気 26 発電設備 70 大気熱エネルギー 52 発電ロス+送電ロス 44 給湯エネルギー	37.4% 一次エネルギー効率 30%削減

図4 開発機の省エネ性

4 - 5 生物・バイオ技術による CO₂ 固定・資源化技術の評価

4-5-1 はじめに

地球温暖化問題が社会に広く認知されるようになった1990年前後から、温暖化対策技術として、生物やバイオ技術を利用したCO₂固定ならびに資源化技術の検討が進められた。この生物的なCO₂対策技術は、陸上の森林生態系や沿岸の生態系（マングローブや珊瑚礁等）をCO₂吸収源（シンク）として利用するものと、クロレラ等の微細藻類の高い光合成能力を利用してCO₂を固定し、家畜飼料等として有効利用できる微細藻類の藻体として資源化するものに分けられる。本節では、各技術の概要について述べる。

4-5-2 森林の炭素吸収 CO₂ 固定量の評価

森林の炭素吸収源としての利用に関しては、まず、その意味づけ、ポテンシャル、概略的なコストなど、全体像を把握する調査研究が行われた。これにより、森林シンク利用を包括的にとらえる基本的情報が整理された。さらに1997年のCOP3で先進締約国がとることができる温室効果ガス削減の政策措置として、森林シンクの利用が国際的に認められる方向性となり、その具体的な実施方策についても電力各社で検討されるようになった。

この森林シンクの利用において、森林の炭素吸収量の評価が重要となってきた。すなわち、京都議定書にある森林シンクの利用に関しては、2008年～2012年の第一約束期間への適用を目標として、国際的なルール作りが求められている。このルール適用を支える技術的な基盤が、森林によるCO₂吸収量をどのようにして、正確にかつリーズナブルなコストで計測・認証するかということである。当所では現在、今後の森林シンクの利用を見越し、森林の炭素吸収量の評価に関する包括的な技術体系を確立するための研究に取り組んでいる。

この研究では、森林の炭素収支測定が重要な項目である。森林に吸収された炭素の量は植物および土壌中の炭素量の変化から推定することができる。しかし、調査に

多大な労力と時間を必要とするとともに、調査が生態系自体の変化を伴うため実用的ではない。また、将来的には生態系モデルによる評価が有望であるが、モデルの高度化に必要な基礎データの蓄積不足や検証方法が確立されていないなどの問題点が残っている。そこで、森林全体の炭素収支を評価するための手法として、タワー観測によるCO₂フラックス測定が、国内外で計画・実施されるようになってきている。フラックス測定の利点は、森林の炭素吸収量の評価の基礎となる「陸上生態系と大気との間での正味の炭素の移動量」を測定できると同時に、広域的な炭素収支の評価や、森林生態系の短期的な応答への対応が期待できることである。また、大気・植物・土壌それぞれの系における炭素収支素過程と森林のフラックスを総合的に解析することにより、森林における炭素収支を理論的に説明することが可能となる。さらに将来的には、フラックス観測データの蓄積が、生態系モデルの高度化にも寄与する。

こうした背景を受け、当所では現地観測に基づいて森林の炭素収支を評価するために、CO₂フラックスの長期観測を平成13年から開始した（写真4-5-1）。ダケカンバを主な樹冠構成種とする樹高約18mの落葉広葉樹林内に高さ28mのタワーを設立し、このタワー上で、森林上のフラックスを算定するために様々な気象要素（風向風速、放射、気温、湿度など）と大気CO₂濃度を連続測定している。同時に、森林の大気・植物・土壌・土壌



写真4-5-1 落葉広葉樹林におけるフラックス測定

水それぞれの系内における炭素収支の素過程を調査し（表4-5-1）総合的に解析することで、森林における炭素動態を明らかにする計画である。これらの研究の成果は、森林シンク利用による炭素クレジット確保に必須のカーボンアカウンティング法の確立に役立つことが期待される。

4-5-3 沿岸海洋生態系の炭素吸収・固定量の評価

陸上の森林生態系と同様に、沿岸海洋生態系においても、光合成を行う生物が有機物を生産し（CO₂固定）、一部が呼吸等の活動でCO₂として再放出され、残りが生物体として貯蔵される。また、生産された有機物の一部については沿岸堆積物や深海に運搬され、最終的に生態系の中で難分解性有機物として貯蔵される。沿岸海洋生態系の中で、特にマングローブやサンゴ礁生態系は、光合成に必要な太陽エネルギーの豊富な亜熱帯・熱帯に位置することから、その生産力は大きく、CO₂固定・貯蔵源として期待されている。

これまでの研究結果により、サンゴ礁については、サンゴの石灰化によるCO₂放出により、温暖化対策としては必ずしも効果的なものとならないことから、サンゴ礁のCO₂吸収効果については、観光資源・水産資源育成効果・防波効果・生物多様性保存効果に加えて、付加的に

取り扱うのが現実的と考えられている。一方、亜熱帯・熱帯沿岸生態系のもう一つの代表的生態系であるマングローブ生態系については、年間炭素純固定量は、マングローブ地上・地下部でおよそ5～10t-C/ha/年と推定され、熱帯雨林と同様に高いCO₂吸収能力を持つと推定されている。さらに、その炭素貯蔵量はマングローブ地上部で200t-C/ha、地下部で100t-C/ha、さらに堆積した有機物は1000t-C/ha程もあると推定される。これらの量は大きい数値であるが、様々なマングローブ生態系のCO₂貯蔵量の評価例は少なく、その評価手法も完全には確立されていない。また、マングローブ生態系は湿地帯であり、メタンや亜酸化窒素等の温室効果ガスが発生する可能性があることが示されており、それらの放出による温暖化効果の評価も必要となっている。

これらの知見をふまえて当所では、マングローブ沿岸生態系におけるCO₂貯蔵量評価研究において、生態系における（炭素）現存量、陸上部のCO₂純吸収量、有機物分解に伴うCO₂放出量、有機物堆積によるCO₂貯蔵量、メタンや亜酸化窒素等の収支、等の評価手法開発に取り組んでいる。結果の概要を以下に述べる。

マングローブ沿岸生態系では、海水の潮汐により生産された有機物が沿岸域に運搬後に分解され、また有機物が堆積して形成される泥炭層が非常に長期間の炭素貯蔵を行うことから、陸上生態系の群落内CO₂濃度フラックスの変化のみでは、炭素貯蔵量の評価は困難である。本

表4-5-1 森林の炭素収支を解明するための当研究所における調査項目

	主な調査項目	目的
森林CO ₂ フラックス	乱流変動法	フラックス、熱収支
	傾度法	フラックス、熱収支
	シンチロメータ法	平均化された顕熱フラックス
	関連調査項目	温湿度プロファイル 風速プロファイル 上下方向長短波放射量 地中温度・地中熱流量
土壌面CO ₂ フラックス	チャンバー法 濃度勾配法	フラックス 年間炭素収支
炭素安定同位体比	植物・土壌・大気中炭素安定同位体比 炭素含有量	森林内炭素動態
土壌理化学性	土壌・土壌水中形態別炭素含有量 土壌水中イオン組成 雨水中イオン組成	土壌中炭素量・動態
森林基本量調査 他	毎木調査（樹高、胸高直径等） 落葉落枝量 葉量調査 個葉の光合成速度 植物体中元素含有量	生長量、バイオマス量 葉量、土壌への炭素供給量 光合成器官 基本生理反応 養分状態

研究では、まず直接マングローブ群落の光合成や呼吸を測定した。その結果、日本のような中緯度（光エネルギーが小さい）のマングローブ陸上生態系は、CO₂吸収速度は5 t-C/ha/yであるが、タイのような低緯度（光エネルギーが大きい）のマングローブ陸上生態系は、さらに大きなCO₂吸収速度を有することが示されている。また、マングローブ生態系の底質における有機物堆積は、数千年に渡るCO₂貯蔵プロセスであるとされるが、天然放射性トレーサーを用いた堆積物の年代測定の結果、熱帯雨林土壌に比較して、より大きな炭素貯蔵効果が有することも示された（図4-5-1、写真4-5-2）。

東南アジアでは、エビ養殖池造成のためにマングローブ生態系の消失が進んでおり、タイではマングローブ面積の半分が消失した上、造成されたエビ養殖池も経営上の理由から遺棄されている場合が多い。この伐採されるマングローブと環境が変わった低質土壌から、年間数百t-C/haの炭素が放出されると推定されている。

マングローブ沿岸生態系は水産稚仔魚の育成場所であり、また水質浄化作用や波浪に対する防波堤および護岸効果、さらに観光的価値も有する。多様な価値を持つマ

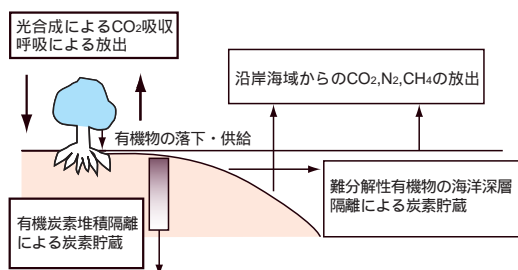


図4-5-1 マングローブ生態系におけるCO₂その他の温暖化ガスの吸収・放出



写真4-5-2 マングローブ生態系における温室効果ガス収支測定の様子

ングローブ沿岸生態系保全の観点に、CO₂固定・貯蔵源としての役割を付加することにより社会的な波及効果が高まることで、これら沿岸生態系の回復方策が進むことが期待される。

4-5-4 クロレラを用いたCO₂固定・資源化技術

クロレラ (*Chlorella*) は、微細藻類（小さな藻の総称）の一種で、高等植物等に比較して高い光合成能力を有する。光合成の結果としてCO₂を吸収固定し、自分の体（藻体）に変換する。この藻体は、健康食品や家畜飼料等、さまざまな用途がある。

当所では、微細藻類によるCO₂固定・資源化による温暖化抑制のコンセプトを提案した。これは、微細藻類を利用して火力発電所の排ガス中に含まれるCO₂を吸収固定して藻体を生産し、それらの家畜飼料等として利用することで温暖化抑制に役立てるというものである。CO₂固定産物である藻体は何十年という長期間にわたって貯蔵できるものではなく、炭素を大気中から隔離しておく効果は小さい。しかし藻体は、栄養価の高い家畜飼料として利用できる可能性がある。現状では、家畜飼料として穀物を主成分とした配合飼料が多く使われている。飼料穀物の生産では、畑での耕作の際に作物残さの堆肥化や土壌中の微生物による肥料の分解によって、強力な温室効果ガスであるメタンや亜酸化窒素が発生する。一方、藻体の生産ではこのような温室効果ガスを発生する可能性が少ない。当所の試算では、1 t-Cの飼料穀物を藻体飼料で代替すれば、約6 t-CのCO₂に相当するメタンや亜酸化窒素の放出を抑制することが可能である。さらに本方法は、農耕地に適さない土地でも適用の可能性があるので、将来の飼料穀物増産のための森林耕地化を抑制する効果もあわせ持つと考えられ、CO₂の吸収源である森林の保護についても潜在的な効果を持っていると考えられる。

このコンセプトを実現するため、さまざまな技術開発を進めた。本技術は、太陽光を利用する光合成を基本とした技術である。このため、生物的、工学的なアプローチにより、従来技術よりも極めて光合成生産性の高い新規技術確立を目標とし、新しい光バイオリクター開発や、新規の有用なクロレラを発見する等の成果を修めた。

新しい光バイオリアクターの特徴や概略を図4-5-2に示した。このバイオリアクターは螺旋状チューブリアクターと呼ばれ、光合成の効率が高いなどの特徴を持ち、基本ユニットを連結化することで、容量増加を図ることができる。また、排ガスを直接バイオリアクターに吹き込んで成長するクロレラ、高温でも活発に成長するクロレラなど、当所が新たに発見した新規株を用いることで、年間を通じて効率的に培養することも可能であることを示した。

これらの技術を適用した場合にCO₂固定・資源化できる量は、培養に用いる土地面積によって規定される。例えば、60万KW級LNG火力に適用した場合、排出総量の10%を固定するためには2,000haという広大な面積が必要である。COP3で議論された現実的な数値目標への

貢献を考えた場合、難しい面があるため、現状では技術適用の誘因は大きくなっていない。しかし、人類にとって必要な資源を作るという点では、大きな意味がある。すなわち、現在の農業で同じ量の穀物飼料を作る場合、約10～20倍の面積の耕地が必要である。将来的には、自然環境に負担の少ない小型で経済的な技術が必要となってくると考えられるが、本技術は生物資源生産の分野でこれに寄与するものであろう。微細藻類を利用した効率的なCO₂固定・資源化技術に関する研究は、90年代を通じて、国のプロジェクトや、当研究所をはじめとして電力各社において行われ、広範な技術を生み出した。今21世紀にグローバルな視点から、温暖化抑制への貢献のみならず人口・食糧問題については人類の幸福に貢献できる重要な技術として、発展が期待される。

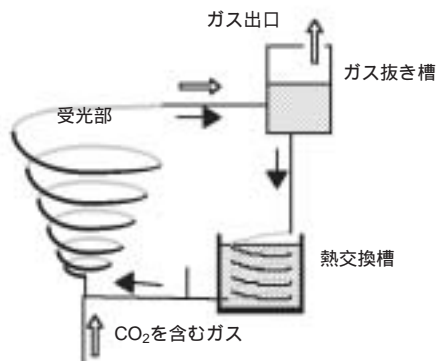
・リアクターの特徴

- 受光面積/設置面積：大 → 光エネルギーの利用効率：向上
- CO₂吸収経路：長 → CO₂利用効率：高
- 半閉鎖系のシステム → 他の微生物の混入：少
- 通気による培養液の循環 → リアクター運転エネルギー：低減

・連結化したリアクターの写真



・リアクターの該略図



・大規模化のイメージ図



図4-5-2 クロレラを用いたCO₂固定光バイオリアクターの概念図

コラム 12：人工衛星による葉面積の計測

森林は、降水の河川への急激な流出を防ぐなど、人々が安全かつ快適に生活していく上で重要なさまざまな役割を果たしている。当所では、こうした森林の役割を積極的に利用して、降水を有効に水資源化する方法を検討している。広範囲の森林状況を把握するためには、衛星データの利用が効率的である。そこで、わが国のダム流域を対象に、人工衛星がとらえた様々な波長の電磁波のデータを解析し、森林の分布、種類、および葉量などの森林植生の計測技術を開発した。

森林の葉の茂り方は、雨水が樹木に遮断されたり、葉から蒸散する量に関係し、ダムに蓄えられる水量を左右する重要なパラメータである。この葉の茂り方は、地表に何枚の葉が重なっているかという葉面積指数（LAI）で表すことができるが、これまで、広域で定量的に測定する方法がなかった。そこで、森林調査と衛星データによる解析から、日本全域での1km四方ごとの葉面積測定法を開発した。

具体的には、スギやヒノキの人工林で樹木を伐採して葉面積を実測するとともに、葉に遮られる太陽光の強さを測定することで葉の面積を計測し、こうした地上のデータをフランスの地球観測衛星が

観測した20m四方単位の植生分布と比較し相互の関係を定式化した。これに米国の観測衛星で撮影した約1km四方単位の植生の様子をもとに葉面積の分布を計算する方法を開発し、1km四方という細かいブロック単位で分かるようにした。

樹木によって葉のしげり方が違うため、森林からの水蒸気発生量などをより正確に割り出すには、森林の面積ではなく、葉の総面積を知る必要がある。葉の総面積のデータは地球規模で100km四方のものが存在するが、日本国内を詳しく見るには粗すぎた。今回の方法は、日々の衛星データから分布図が得られるため、季節ごとの変化を追うなど、よりきめ細かい利用が可能となった。

葉面積の把握により、森林の水蒸気発生量や光合成の能力などについて、従来より厳密に森林の効果を考慮した気象や水循環の計算が可能となる。また、正味の緑の増減が正確につかめるので、地球温暖化に関係する森林の二酸化炭素吸収量の評価にも活用できると考えており、現在、NEDO/JOIA（日本海洋開発産業協会）からの受託研究の一環として、石垣島や東南アジアのマングローブ林を対象に、本手法を使った炭素貯蔵量推定法の開発を行っている。

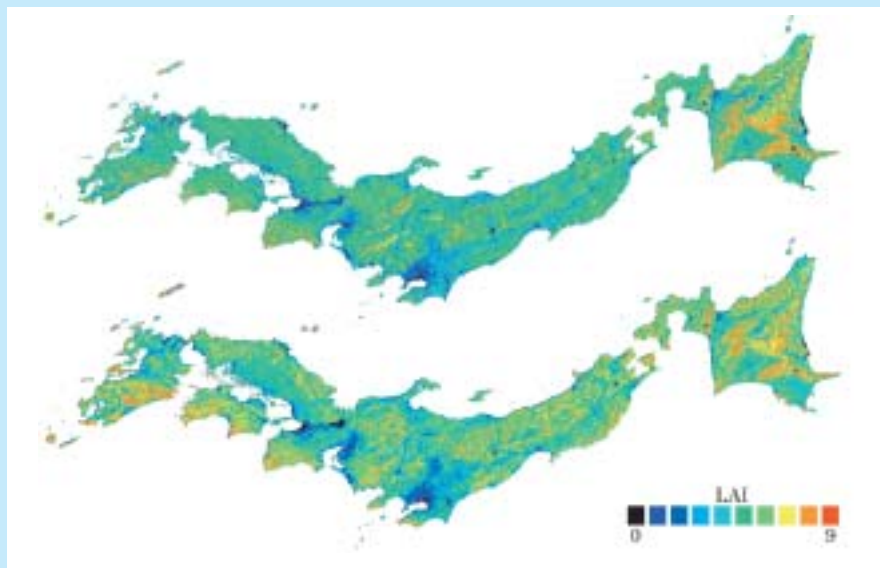


図1 日本全域の葉面積指数最大値マップ
上図：植生図、土地利用図、文献値により作成した文献値マップ
下図：衛星データ、変換式、補正計数により作成したマップ

4 - 6 ま と め

地球温暖化の原因やメカニズムには、未解明の点や不確かさが多々ある。しかし、有効な防止対策を講ぜず、放置したまましていると、温暖化の影響が顕在化した時の対策コストは膨大になるだけでなく、原状回復が困難か、既に手遅れになっている危険性が高い。これが地球温暖化問題の特質である。

本章では、当所が行っている、国や電気事業における温暖化防止・軽減対策を支援するための政策・制度的側面および技術的側面に関する研究を紹介した。

[政策・制度的側面]

京都議定書の批准・発効に向けて、国内法の整備や制度設計に関する具体的な議論が進められている。

京都メカニズムの中で、ボン会議（COP6再会合）で最大の争点となった「遵守システム（罰則規定）」における「法的拘束力のある措置」の解釈について、わが国の主張（「強制」ではなく「促進」が、国際条約への参加や履行を円滑にするための基本である）に政策科学面で貢献し、最終決定はCOP7に委ねられることになった。

環境税には二つの目的がある。すなわち、化石燃料の価格を人為的に引き上げるによりその節約を促すこと 得られた税収で所得税や法人税など一般的な税を軽減することにより経済全体の効率性を高めること。産業構造の“脱炭素化”を目標に炭素税を導入する場合は、炭素含有量に比例して課税し、減免措置は設けず、税収は公共投資に支出する場合に最も経済的ダメージが少ないことを明らかにした。

市場メカニズムを活用したCO₂の国内排出権取引を、仮想電力産業内で排出量制約と供給義務制約の下で行う場合、電力取引とCO₂排出権取引、各社の発電設備の形成と運用がどうなるか、の実験を行い、その仕組みや効果を明らかにした。利益の最大化には、当該電力の需要規模や原子力の導入計画、不遵守罰則金の導入形態、等に依存することを明らかにした。

温暖化抑制対策の一つとして注目されている再生可能エネルギーによる発電を促進するための「グリーン証書取引システム」について、再生可能エネルギーの地域偏在性に起因するコスト上昇を抑制できることを、海外事例を踏まえて解説した。

[技術的側面]

排ガスからのCO₂回収・処分技術については、電気事業としてのフィジビリティ・スタディが完了し、国の研究開発方針でも、2030年以降の技術と位置づけられていたが、京都議定書を巡る国際交渉において産油国の参加を得るには、欠かせない技術として再浮上する機運にある。本章では、実規模プラントを想定した排ガスCO₂の回収・隔離技術のFSの結果と回収CO₂の海洋隔離・地中処分技術の評価・課題についてまとめた。

また、当面、豊富な石炭を温暖化対策技術として有効活用するために、CO₂回収型発電システム「水素分離型石炭ガス化複合発電」を紹介した。これによって、発電効率を低下させることなくCO₂の分離回収が可能で、海洋隔離技術などとの組み合わせでCO₂の排出を大幅に抑制できることが示された。

京都議定書における「森林シンク」の扱いに関する科学的透明性を高めるために、陸上の森林生態系や沿岸の生態系（マングローブや珊瑚礁等）のCO₂吸収源としての効果を評価する研究を紹介した。また、クロレラ等の微細藻類の高い光合成能力を利用してCO₂を固定し、家畜飼料等として有効利用できる微細藻類の藻体として資源化する技術を取り纏めた。生物やバイオ技術を利用したCO₂固定・資源化技術は、生態系のもつ自然サイクルを最大限活用する試みであり、長期的取組みが必要である。

IPCC TARでも指摘されているように、現在の地球温暖化は人間活動に由来する温室効果ガスの増加が原因であるから、真の温暖化防止対策はその排出を減らすことで、森林吸収や炭素固定化等の対策は本流ではない。

今後予想される国際的な大幅削減に向けての動きに対応するには、効率向上や節約などの省エネルギーの徹底と低炭素・無炭素排出エネルギーへの燃料転換、等による温室効果ガスの大幅な発生抑制とそれが実現可能な社会システムの構築である。

温暖化防止対策への取組みには国際協力・協調が不可欠である。そのため、内外の研究機関と連携し、特に、アジア・大洋州の持続的発展を保障する温暖化抑制策を推進することがわが国に課せられた課題であり、当所の課題でもある。

第 5 章

5

地球温暖化研究の
今後の展開

第5章 地球温暖化研究の今後の展開 目次

粕江研究所 研究調査担当 上席研究員 西宮 昌
我孫子研究所 環境科学部長 上席研究員 丸山 康樹
粕江研究所 大気科学部 上席研究員 加藤 央之

5 - 1 当所の使命85
5 - 2 今後の世界の動向85
5 - 3 当所における温暖化研究の展開86

西宮 昌（8ページに掲載）

丸山 康樹（8ページに掲載）

加藤 央之（32ページに掲載）

5 - 1 当所の使命

地球温暖化対策は「待った無し」の段階に突入した。

IPCCの科学的知見がベースとなって、世界的な地球温暖化への関心が一層高まり、途上国を含めた国際世論が急進・先鋭化している。現在、国連で議論されている「京都議定書」の数値目標程度の温暖化抑制策では、温暖化の進行を抑止できず、近い将来、温暖化がさらに進行し、偶発性も重なって影響の顕在化が懸念される。そのため、京都議定書を超えるより強いCO₂削減策が求められる機運にある。

国内では、京都議定書批准に向けた国内制度の設計、わが国の温暖化対策としてのエネルギー政策を方向付ける「環境基本計画」や「長期エネルギー需給見通し」の改訂等、さらに、科学技術の集大成としての地球フロンティア計画の本格的遂行が目前に迫っている。

当所はこれまで、電気事業や国・社会の温暖化問題に関する多様なニーズに対応するために、内外の研究機関等の協力を得て、最新の科学的知見の創出やより信頼性の高い情報の発信に努め、それに応じて研究ポテンシャル

も向上してきた。今後さらに、これらの研究ポテンシャルを活用し、地球温暖化に関する種々の要因の因果関係や影響についての科学的な不確実性を取り除き、電気事業にとって必要な気候変化の予測と、これに基づく最適な対応戦略と適応方策のあり方を検討するための情報発信が、当所の使命である。

「地球温暖化対策」の基本は、エネルギーの効率的利用やゼロ・低炭素エネルギーの利用であり、それを可能にする社会・経済システムの実現である。この観点で見ると、「地球温暖化」研究は、最早「自然科学」や「環境工学」の専売領域ではなく、世界あるいはアジア・大洋州を視野に入れた「エネルギー問題」として、長期的・総合的視点で電気事業が如何に取り組むべきか、という段階にある。

そのため、今後は、長期的な「エネルギー・環境政策」に基づく「地球科学」「エネルギー利用」に関わる総合的な研究領域として捉え、電気事業の「長期エネルギー戦略」に役立つ情報として発信する必要がある。

5 - 2 今後の世界の動向

地球温暖化の科学

地球フロンティア計画の一環として進められている「地球シミュレータGS40」が2002年春には本格運用が始まる。また、「京都議定書」を離脱した米国は、気候研究や地球環境の観測等、地球温暖化の科学研究を一層推進することを宣言している。地球温暖化には未だ多くの不確実性が残されていることを考えると、現状知見に基づく温暖化対策の実践と同時に、科学研究の重要性が一層増すと考えられる。米国の動きに対応し、わが国でも、国策としての気候モデルの開発や衛星観測の再開も予想される。

温暖化抑制対策

温暖化防止・軽減対策には、政策・制度的側面（京都

議定書の批准・履行と省エネ社会の構築）と、技術的側面（温室効果ガス的人為的プロセスからの発生量削減と徹底した省エネ技術の開発）がある。その推進には、国際的視点に立った長期的・総合的な取り組みが求められる。

温暖化への適応

気候モデルによる将来の気候予測や炭素循環（CO₂排出量と大気中濃度の関係など）には未だに多くの不確実性が存在するものの、現状の予測情報を基に温暖化のリスクを極力回避し、進行する温暖化世界に如何に順応するか、という適応策の検討が始まっている。

一般に、現在予測される程度の気候（平均場）の変化では、わが国のような高度工業化社会への温暖化リスク

は軽微と見られているが、極端な事象や突発的な現象に対しては科学的知見が皆無である。また、わが国のエネルギー・食糧の安全保障面から温暖化問題を捉え、気候変動に最も脆弱とみられるアジア・大洋州への影響を如何に軽減できるかが重要な課題となる。

そのため、わが国・電気事業、およびこれに直接・間接的影響を及ぼすアジア・大洋州を対象に、現状の社会システムを脅かす恐れのある気候変動の発生可能性を科学的に解明し、それに基づいた温暖化の影響を最小化するリスク管理手法の構築が求められる。

5 - 3 当所における温暖化研究の展開

地球温暖化の科学

温暖化問題を検討するベースとなる気候予測の信頼性をあげるために、米国大気研究センター（NCAR）との緊密な研究協力の下で、最新全球気候モデルによる気候変化予測や影響評価の目的に合致する時間・空間規模の気候変化予測（特に、異常気象や気候極値の変化の発生可能性や出現頻度の変化など）を行うと共に、最新の予報・解析モデルと過去の観測データの再解析によって得られる長期間の均質な客観解析データの作成とそれによる台風予測の信頼性評価、等の研究を並行して推進する。

また、地球温暖化の実態を正しく把握するために国が行う人工衛星による温室効果気体の観測プロジェクトへの協力や、樹木や海洋生態系を介した炭素循環機構の解明やCO₂吸収量の評価、等を行い、科学的知見の充実を図る。

温暖化抑制対策

電気事業の短・中期的ニーズ（京都議定書履行のための地球温暖化対策制度の分析・評価、CO₂排出抑制技術の評価、CO₂排出抑制策としての世界エネルギー・シナリオが電気事業に与える影響の分析・評価、等）および長期的ニーズ（温暖化抑制・緩和のための技術・システムの導入戦略、人為的CO₂固定技術、等）に応え、電気事業の温暖化問題への適切な対応に資する科学的情報を発信する。

なお、多岐多様で流動的な温暖化防止対策への取り組みには国際的視野と柔軟かつ臨機応変な対応が不可欠なため、内外の適切な研究機関との連携を強化する。特に、温暖化問題は国内対策だけでは解決しないため、アジア・大洋州の持続的発展を保障する温暖化抑制策を推進するための地域環境エネルギーネットワークの視点を考

慮する。

また、温暖化抑制対策の総合評価に際しては、森林・沿岸生態系によるCO₂固定やCO₂回収海洋隔離技術に関する所内および受託研究の成果も取り入れる。

温暖化への適応

予想される異常気象や気候の極値の頻発に、電気事業が直接、あるいは社会・経済システムを通して間接的にどのような影響を受けるか、イベントツリーによる評価を行い、温暖化の影響を緩和する方策を探る。

気候安定化のためには如何なるCO₂排出抑制対策が有効かを、種々の世界エネルギー・シナリオの下でのシミュレーションを行い、気候安定化のための道筋を考察する。

また、アジア・大洋州地域を視野に入れ、現状の電気事業や人間社会に深刻な災害（経済的リスク）をもたらす恐れのある気候変化（台風や海流・海水温度の変化、異常気象や極端な気象）の予測や発生可能性について科学的な解明を行い、それに基づいた影響評価と影響（リスク）を最小化するリスク管理手法を構築する。

当所は、各研究分野について今後5カ年の中期研究計画を策定し、それを基に2001年度から具体的課題を設定し、総合的かつ独創的に研究に取り組んでいる。

当所の地球温暖化に関する中期研究計画の概要をここに述べた。地球温暖化問題は多くの不確かさを包含する半面、それだけ研究への期待は大きい。研究に携わる者として、温暖化問題を正しく認識し、国内外の研究ネットワークを通じた相互協力・補完を行いつつ、研究の推進を図りたい。

お わ り に

理事 狛江研究所長 福島 充男



われわれ人類はこれまで体験したことのない大きな困難「地球環境問題」に直面している。

無限の地球資源を前提とする20世紀までの人間活動の結果として、このまま人口と地球資源の消費が増え、環境への負荷が増加すれば、地球の環境容量を超えてしまう。その結果として地球環境の劣化が進み、生活レベルのみならず、生命をも脅かしかねない事態を迎えるという。「宇宙船地球号」に象徴される地球の資源と環境という二つの有限性のなかで、どのような形の持続可能な社会を成熟した社会として築きあげるかが今後の人類に課せられた重大な課題である。

「気候変動に関する政府間パネル（IPCC）」によれば、「地球温暖化」は、既にその姿を現し始めている。

待った無しの「地球温暖化問題」は、「気候変動枠組み条約」の「京都議定書」を巡る一連の動きでわかるように、「科学」の世界から「政治」の舞台に移っている。しかし、温暖化対策を確実に実行に移すには、長期的エネルギー戦略と科学的事実に基づいた「地球温暖化」の正しい理解が不可欠である。そして、「地球温暖化問題」は「自然科学」や「環境工学」の専売領域ではなく、長期的な「エネルギー・環境政策」に基づく「地球科学」「エネルギー利用」に関わる総合的な研究領域として捉えていくことが肝要である。

当研究所はこれまで、国内外の研究ネットワークの下でさまざまな協力や指導を仰ぎながら、温暖化の原因とメカニズムの解明および温室効果ガスの抑制についての「科学的ツール」の開発や確立に努めてきた。その過程で得られた科学的知見は、電気事業や一般社会の温暖化問題についての理解促進に幾分でも貢献してきたものと考えております。

当研究所は、今後とも、最新の科学技術を用いて信頼できる気候変化の「予測」を行い、これを基に、温暖化抑制のための「対策」と不可避な温暖化への「適応」に関する研究を推進し、随時科学的情報として発信していく所存ですので、関係各位のより一層のご指導とご鞭撻を賜ることを念ずる次第です。

引用文献・資料等

第1章

IPCC, 1996 : Climate Change 1995: The Science of Climate Change. J. T. Houghton et al. Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK

IPCC, 2001 : Climate Change 2001: The Scientific Basis. J. T. Houghton et al. Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK

Dennis L. Meadows et al., 1972 : The Limits to Growth. Universe Books, New York (『成長の限界 (大来佐武郎監訳)』ダイヤモンド社、1972)

WCED, 1982 : Our Common Future

UNFCCCのホームページ : <http://www.unfccc.de/>

第2章

2-1節

小林博和、下田昭郎、西宮昌、温室効果気体センサIMGのデータ解析手法 - データ解析システムの予備調査 -、調査報告 : T91018、平成4年1月

下田昭郎、小林博和、高分解能赤外分光計を用いた地球大気の観測 - IMG模擬データによる気温及び水蒸気鉛直分布の推定 -、研究報告 : T92068、平成5年5月

小林博和、下田昭郎、門倉真二、赤外天空放射特性に対する雲の影響評価法の検討 - 高分解能赤外フーリエ分光計による天空放射スペクトルの観測 -、研究報告 : T93077、平成6年4月

門倉真二、下田昭郎、小林博和、逆問題型多チャンネル計測のためのチャンネル選択アルゴリズムの開発-高分解能赤外分光計を用いた大気探査の利用データ選択への適用-、研究報告 : T93074、平成6年4月

下田昭郎、小林博和、門倉真二、赤外フーリエ分光法を用いた大気放射スペクトルの観測(1) - 位相補正を考慮したスペクトル較正手法の開発-、研究報告 : T94059、平成7年6月

T.Ogawa, H. Shimoda, M. Hayashi, R. Imasu, A. Ono, S.Nishinomiya, and H.Kobayashi, INTERFEROMETRIC MEASUREMENT OF GREENHOUSEGASES FROM SPACE, Adv.Space Res. Vol. 14, No. 1, pp. 25- 28, 1994

A.Shimoda H. Kobayashi, S. Kadokura, Radiometric calibration for the airborne IMG simulator, Appl. Optics, Vol. 38, No. 3, 571-576, 1999

H. Kobayashi, A.Shimoda, C.Yoshigahara, I. Yoshida,

Y.Uehara, K.Kondo, Satellite Borne High Resolution FTIR for Lower Atmosphere Sounding and Its Evaluation, IEEE Trans. Geos. Remote Sensing, Vol. 37, No. 3, 1496-1507, 1999. RT99008

H. Kobayashi, A.Shimoda, K.Kondo, E.Okumura, Y. Kameda, H.Shimoda, and T.Ogawa, Development and evaluation of the IMG: a high-throughput FTIR for nadir earth observation, Appl. Optics, Vol. 33, No. 33, 6801-6807, 1999. RT99042

2-2節

野崎義行、1994、地球温暖化と海 東京大学出版会

Broecker, W. S., 1982, Glacial to interglacial changes in ocean chemistry, Prog. Oceanogr. 11, 151-197

Jim, G. 2000, Carbon fixation, Nature, 405, 412

Wong, C. S., Whitney, F., Iseki, K., Page, J. S. and Zeng, J., 1995, Analysis of trends in primary productivity and chlorophyll-a over tow decades at Ocean Station P (50N, 145W) in the subarctic Northeast Pacific Ocean. In: Climate change and northern fish populations, R. Beamish, editor, Canadian Special Publication in Fisheries and Aquatic Sciences, 121, 107-117

本多牧生、今井圭理、野尻幸宏、2001、セジメントトラップ実験から推定する北西部北太平洋の生物ポンプ能力、月間海洋、No 25、108-113

Martin, J. H. and Fitzwater, S. E., 1988, Iron deficiency limits phytoplankton growth in the north-east Pacific subarctic, Nature, 331, 341-343

Martin, J. H., 1992, Iron as a limiting factor in oceanic productivity, Primary productivity and Biogeochemical Cycles in the sea, Woodhead, Plenum Press, New York
De Baar, H. J. W and Boyd, P. W., 2000, The role of iron in plankton ecology and carbon dioxide transfer of the global oceans, The Changing Ocean Carbon Cycle, Cambridge University Press, UK

Moor, J. K. and Doney, S. C., 2000, Incorporating iron into a global ecosystem model, U. S. JGOFS NEWS, 10, 1-5

Martin, J. H., 1990, Glacial-interglacial CO₂ Change; the iron hypothesis, Paleoceanography, 5, 1-13

Workshop to identify the Scientific and Legal Questions Behind Fertilization of the Ocean to Sequester Atmospheric Carbon Dioxide, 2001, ASLO Workshop, Washington DC

Coale KH, Johnson KS, Fitzwater SE, Gordon RM, Tanner

S, Chavez FP, Ferioli L, Sakamoto C, Rogers P, Millero F, Steinberg P, Nightingale P, Cooper D, Cochlan WP, Landry MR, Constantinou J, Rollwagen G, Trasvina A, Kudela R, 1996, A massive phytoplankton bloom induced by an ecosystem-scale iron fertilization experiment in the equatorial Pacific Ocean. *Nature* 383, 495-501

Boyd, P. W., Watson, A. J., Law, C. S., Abraham, E. R., Trull, T., Murdoch, R., Bakker, D. C. E., Bowie, A. R., Buesseler, K. O., Chang, H., Charette, M., Croot, P., Downing, K., Frew, R., Gall, M., Hadfield, M., Hall, J., Harvey, M., Jameson, G., LaRoche, J., Liddicoat, M., Ling, R., Maldonado, M. T., McKay, R. M., Nodder, S., Pickmere, S., Pridmore, R., Rintoul, S., Safi, K., Sutton, P., Strzepek, R., Tanneberger, K., Turner, S., Waite, A., Zeldis, J., 2000, A mesoscale phytoplankton bloom in the polar Southern Ocean stimulated by iron fertilization. *Nature* 407, 695-702

Takeda, S., 1998, Influence of iron availability on nutrient consumption ratio of diatoms in oceanic waters. *Nature*, 393, 774-777

Takeda, S., Obata, H., 1995, Response of equatorial Pacific phytoplankton to subnanomolar Fe enrichment. *Mar. Chem.* 50, 219-227

Nishioka, J., Takeda, S., Wong, C. S., Johnson, K., 2001, Size-fractionated iron concentrations in the northeast Pacific Ocean: Distribution of soluble and small colloidal iron, *Mar. Chem.* 74, 157-179

西岡純・武田重信、東部北太平洋亜寒帯域における生物学的な炭素移送量評価のための海洋プランクトン生態系モデルの構築、電力中央研究所報告：U00010、(2000年11月)

Nishioka, J., Takeda, S. and Wong, C. S., 2001 Change in the concentrations of iron in different size fractions during a phytoplankton bloom in controlled ecosystem enclosures., *J. Exp. Mar. Biol. and Ecol.* 258, 237-255

2-3節

IPCC second assessment report (1996): *Climate change 1995, The science of climate change, Contribution of working group I to the second assessment report of IPCC*, edited by J. T. Houghton et al., Cambridge University Press, P. 572

Sarmiento, J. L., T. M. C. Hughers, R. J. Stouffer and S. Manabe (1998): Simulated response of the ocean carbon cycle to anthropogenic climate warming, *Nature*, Vol. 393, 245-248

第3章

3-1節

Climate Change 1995, *The Science of Climate Change, Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of IPCC*, Cambridge University Press, 1995

Climate System Model Special Issue, *Journal of Climate*, AMS, Vol.11 No. 6, pp. 1496, 1998

丸山康樹・平口博丸・筒井純一・仲敷憲和・門倉真二・角湯正剛(1997): 大気・海洋結合モデル(NCAR・CSM)を用いた全球温暖化予測、電中研研究報告 U97034、24p

丸山康樹・Steven Smith・西宮昌(2000): CO₂排出削減による濃度安定化効果の検討 - CO₂濃度推定モデルの適用と問題点、電中研調査報告：U99043、33p

Wigley, T. M. L., R. Richels and J. A. Edmond (1996) Economic and environmental choices in the stabilization of atmospheric CO₂ concentrations, *Nature*, Vol. 379, 18 January, 240-242

3-2節

大島直子、加藤央之、「統計気候モデルを用いた地域気候変化予測手法の開発」、電中研研究報告、T97003、1998-1

加藤央之、門倉真二、大島直子、平口博丸、「地球温暖化に伴う東アジア地域の気候変化 NCAR-CSMによる予測結果のパターン分析」、電中研研究報告、T97045、1998-3

西澤慶一、F.Giorgi、「地球温暖化に伴う東アジア地域の気候変化予測 - NCAR-CCM3放射モデルの適用による地域気候モデルの開発 - 」、電中研研究報告、T97055、1998-3

大島直子、加藤央之、門倉真二、「統計気候モデルを用いた地域気候変化予測手法の開発(その2) 東アジアにおける上層気温場からの地上気温の推定」、電中研研究報告、T98055、1999-3

加藤央之、門倉真二、西澤慶一、大島直子、和田浩二、平口博丸、「地球温暖化に伴う東アジアの気候変化 - NCAR-CSM/RegCM2.5を用いてシミュレートされた現状気候およびCO₂倍増気候の評価」、電中研研究報告、2001-3

Kato, H., H. Hirakuchi, K. Nishizawa and F. Giorgi, "Performance of NCAR-RegCM in the simulation of June and January climate over eastern Asia and the high-resolution effect of the model", *J. Geophys. Res.*, 104, 6455-6476, 1999

Giorgi, F., Y. Huang, K. Nishizawa and C. Fu, " A seasonal cycle simulation over East Asia and its sensitivity to radiative transfer and surface processes ", J. Geophys. Res. 6403-6423, 1999

Kato, H., K. Nishizawa, H. Hirakuchi, S. Kadokura, N. Oshima and F. Giorgi, "Performance of RegCM25/NCAR-CSM nested system for the simulation of climate change in East Asia caused by global warming", J. Met. Soc. Japan. 79, 99-121, 2001

3-3節

丸山、他：大気・海洋結合モデル（NCAR・CSM）による全球温暖化予測。電力中央研究所報告 U97034（1997年10月）

仲敷：自由海表面を考慮した海洋循環モデルの開発。電力中央研究所報告 U94016（1994年8月）

坪野、他：地域海洋モデルの開発と日本周辺海域への適用。電力中央研究所報告 U00057（2001年4月）

仲敷、他：温暖化による日本周辺の海洋環境変化の予測。電力中央研究所報告 U00058（2001年4月）

Smith, R.D., M. E. Maltrud, F. O. Bryan, and M. W. Hecht, 1999: Numerical simulation of the North Atlantic at 1/10-degree. J. Phys. Oceanogr., 30, 1532-61（2000）

Kim, C.-H. and J.-H. Yoon, 1996: Modeling of the wind-driven circulation in the Japan Sea using a reduced gravity model. J. Oceanogr., 52, 359-373,（1996）

Kagimoto, T. and T. Yamagata, Seasonal transport variations of the Kuroshio: An OGCM simulation, J. Phys. Oceanogr., 27, 403-418,（1997）

3-4節

Tsutsui, J. and A. Kasahara, Simulated tropical cyclones using the National Center for Atmospheric Research Community Climate Model (CCM2) J. Geophys. Res., 101, D10, 15, 013-15, 032, 1996

筒井純一、笠原彰、平口博丸、丸山康樹、温暖化による台風気候の変化(その1) - T42 CCM2による数値実験 -、電力中央研究所研究報告 U99014、1999

3-5節

吉田・平口・丸山・筒井：全球気候モデルへの並列計算技術の高度活用（その1） - 大気モデルの並列計算性能と次世代並列機に向けての課題 -、電中研研究報告 U99006、1999. 7

吉田・丸山・平口：全球気候モデルへの並列計算技術の高度活用（その1） - 大気モデルの高速化と並列計算性能予測手法の開発 -、電中研研究報告U00017、2000. 11

第4章

4-1節

服部恒明、大河原透、人見和美、永田豊、星野優子、若林雅代：「2025年までの経済社会・エネルギーの長期展望」、電力中央研究所研究報告Y99018（2000）

服部恒明、永田豊、若林雅代、大河原透：「環境税導入の日本経済、エネルギー需要に及ぼす影響 - 長期経済予測システムによるシミュレーション分析 -」、電力中央研究所研究報告Y01007（2001）

大河原透：「デンマークの二酸化炭素排出権取引システム」、電力中央研究所研究調査資料Y00919（2001）

大河原透、若林雅代、松屋親広：「電力と二酸化炭素排出権の取引実験」、電力中央研究所研究報告（2001<予定>）

田頭直人：「オランダ、ドイツにおけるグリーン電力制度、及び諸関連施策について」電力中央研究所研究調査資料 Y00918（2001）

本藤祐樹、内山洋司、森泉由恵：「ライフサイクルCO₂排出量による発電技術の評価」、電力中央研究所研究報告 Y99009（2000）

本藤祐樹：「ライフサイクルCO₂排出量による原子力発電技術の評価」、電力中央研究所研究報告Y01006（2001）

4-2節

本藤祐樹、内山洋司、森泉由恵「ライフサイクルCO₂排出量による発電技術の評価」電力中央研究所研究報告 Y99009、2000年3月

本藤祐樹「ライフサイクルCO₂排出量による原子力発電技術の評価」電力中央研究所研究報告Y01006、2001年8月

R. Barchas, R. Davis: Energy Conversion and Management 33 pp. 333-340（1992）

M. T. Sander, C. L. Mariz: Energy Conversion and Management 33 [5-8] pp. 341-348（1992）

4-3節

横山隆壽、工藤聡：電力中央研究所 研究報告 T94057 67pp（1995）

横山隆壽、工藤聡、モノエタノールアミンプロセスによる炭酸ガス回収プロセスの実験的検討、電力中央研究所研究報告 T92025（1992）

横山隆壽、工藤聡、化学吸収式CO₂回収技術の評価 - モノエタノールアミンプロセスの運転特性及びLNG焚き火力発電プラントへの適用に関するフィージビリティスタディ -、電力中央研究所 研究報告 T94057、(1995)
Ito, S., Makino, H., Carbon dioxide separation from coal gas by physical adsorption at warm temperature. In: greenhouse gas control technologies, Proceedings of the 4th international conference, Interlaken, Switzerland, 30 Aug - 2 Sept 1998. Eloasson, B., Riemer, P., Wokaun, A., (eds), Oxford, UK, Elsevier Science Ltd., pp 131-136 (1999)

4-4節

森塚秀人、幸田栄一：水素燃焼タービン発電システムの検討 - 変形酸素燃焼ランキンサイクル統合タービン発電システムの基本性能 -、電中研研究報告 W94022 (1995/6)
森塚秀人：新しい化石エネルギーの開発 - 地球環境問題の解決に向けて -、日本機械学会誌 Vol. 98-9 pp10-15 (1995/9)
森塚秀人：CO₂回収型ガスタービン発電について、第27回ガスタービンセミナー (1999/1)
森塚秀人、渡辺和徳：CO₂回収のための水素分離型タービン発電システムの提案、日本ガスタービン学会誌 Vol. 27-4 (1999/7)
森塚秀人、幸田栄一：水素分離型IGCC発電システムの提案 - 第一報 高温セラミック水素分離膜を用いたシステムの性能について -、電中研研究報告 W99022 (2000/4)
西宮昌、中田俊彦：CO₂削減に向けた次世代エネルギー技術ハンドブック、リアライズ社 (2001/5)
Jericha, etc.: CO₂-Retention Capability of CH₄-O₂ Fired GRAZ Cycle, CIMAC (1995)
Moritsuka: Hydrogen Decomposed Turbine System for Carbon Dioxide Recovery, GHGT-4 Interlaken, pp563-568 (1998/9)
Moritsuka: Hydrogen Decomposed Turbine (HYDET) for Carbon Dioxide Recovery, IGTC'99 Kobe TS-17 (1999/11)
Moritsuka, Koda: Hydrogen-Oxygen fired Integrated Turbine Systems -Comparison on MORITS and GRAZ-, IGTC'99 Kobe TS-18 (1999/11)
Moritsuka: CO₂ Capture using a Hydrogen Decomposed from Natural Gas Turbine, ASME Turbo Expo 2001 GT0093, New Orleans (2001/6)

4-5節

品田泰、松村秀幸、坂口勇、渡部良朋、寺脇利信、荒木洋、河野吉久：植物による炭素固定に関する文献調査 森林樹木・海産植物・微生物の炭素固定量、電力中央研究所報告、調査報告 U91054、(1992)
品田泰、松村秀幸、坂口勇、渡部良朋、寺脇利信、河野吉久：炭酸ガス削減のための植物利用 植林方策と海産植物・微生物の利用、電力中央研究所報告、調査報告 U92003、(1992)
及川武久：森林生態系におけるNEPと炭素循環モデル。森林は地球の温暖化を止められるか、高山試験地(冷温帯落葉広葉樹林)におけるタワー観測とプロセス調査による炭素循環研究の成果から、岐阜大学流域環境研究センター 第6回シンポジウム要旨集、2-7、(1999)
文字信貴：森林における温室効果ガスフラックス観測手法に関する提言、国立環境研究所 環境研究センター報告書、(2000)
中屋耕、小林卓也、池田英史、安池慎治：ダケカンバ林における炭酸ガスフラックスの評価について、農業環境工学関連4学会2001年合同大会講演要旨、187、(2001)
立田穰：沖縄サンゴ礁の生物群集によるCO₂吸収量、電中研報告 U00063、(2001)
Clough, B. F., J. E. Ong and W. K. Gong: Estimating leaf area index and photosynthetic production in canopies of the mangrove *Rhizophora apiculata*. Mar. Ecol. Prog. Ser. 159. 285-292. (1997)
Twilley, P. R., R. H. Chen and T. Hargis: Carbon sinks in mangroves and their implications to carbon budget of tropical coastal ecosystems. Water Air, and Soil Pollut. 64. 265-288. (1992)
マングローブ等熱帯沿岸生態系における地球温暖化ガス収支評価要素技術の開発。NEDO受託研究平成12年度報告書。(2000)
Ong, J. E. : Mangroves- a carbon source and sink. Chemosphere. 27. 1097-1107. (1993)
Watanabe, Y., Ohmura, N. and Saiki, H. : Isolation and determination of cultural characteristics of microalgae which function under CO₂ enriched atmosphere. Energy Conversion and Management. 33, 545-552 (1992)
Y. Watanabe and D. O. HALL: Photosynthetic production of the filamentous cyanobacterium *Spirulina platensis* in a conical-shaped helical tubular photobioreactor, Applied Microbiology and Biotechnology, 44, 693-698 (1996)

Y. Watanabe and H. Saiki: Development of a photobioreactor incorporating *Chlorella* sp. for the removal of CO₂ in stack gas, *Energy Conversion and Management*, 38, Suppl., S499-S503 (1997)

Y. Watanabe, M. MORITA and H. SAIKI: photosynthetic CO₂ fixation performance by a helical tubular photobioreactor incorporating *Chlorella* sp. under outdoor culture conditions, *Advances in Chemical Conversions for mitigating Carbon Dioxide, Studies in Surface Science and Catalysis*, Vol. 114, 483-486 (1998)

M. MORITA, Y. Watanabe and H. SAIKI: Investigation of a cone-shaped helical tubular photobioreactor design in terms of practical use, *Proceedings of the 4th International conference on greenhouse gas control technologies*, 609-614, Elsevier Science Ltd, Oxford (1999)

Y. Watanabe, M. MORITA and H. SAIKI: Analysis of practical application of photosynthetic CO₂ fixation/conversion technologies using microalgae, *Proceedings of the 4th International conference on greenhouse gas control technologies*, 373-378, Elsevier Science Ltd, Oxford (1999)

M. MORITA, Y. Watanabe and H. SAIKI: The high photosynthetic productivity of the green microalga *Chlorella sorokiniana*, *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 87, 203-218 (2000)

M. MORITA, Y. Watanabe and H. SAIKI: Investigation of photobioreactor design for enhancing the photosynthetic productivity of microalgae. *Biotechnology and Bioengineering*, 69, 693-698 (2000)

M. MORITA, Y. Watanabe, T. OKAWA and H. SAIKI: Photosynthetic productivity of conical helical tubular photobioreactors incorporating *Chlorella* sp. under various culture medium flow conditions. *Biotechnology and Bioengineering*, 74, 136-144 (2001)

M. MORITA, Y. Watanabe and H. SAIKI: Evaluation of heat balance in photobioreactor for predicting the culture medium temperature. *Biotechnology and Bioengineering*, 74, 466-475 (2001)

渡部良朋、大村直也、斉木博：微生物によるCO₂固定 2 . 高濃度CO₂条件下で機能する *Chlorella* 属微細藻の検索とその培養特性、電力中央研究所報告、研究報告 U92014, pp. 21 (1992)

渡部良朋、嶋盛吾、斉木博：微生物によるCO₂固定 3 .

クロレラと水素細菌の高密度培養条件の検討と微生物体の栄養価評価、電力中央研究所報告、研究報告 U92058 (1993)

渡部良朋、斉木博：微生物によるCO₂固定 5 . 螺旋状チューブリアクターにおけるクロレラの光合成生産性、電力中央研究所報告、研究報告 U95040 (1996)

渡部良朋、森田仁彦、斉木博：微生物によるCO₂固定 6 . 螺旋状チューブリアクターを用いたクロレラの屋外培養における光合成生産性、電力中央研究所報告、研究報告 U97025 (1997)

森田仁彦、渡部良朋、斉木博：微生物によるCO₂固定 7 . 光強度とクロレラの光合成生産性の関係からみた螺旋状チューブリアクターデザインの有用性、電力中央研究所報告、研究報告 U97035 (1997)

森田仁彦、渡部良朋：微生物によるCO₂固定 8 . 連結した螺旋状チューブリアクターにおける培養液の流れの諸条件とクロレラの光合成、電力中央研究所報告、研究報告 U98051 (1999)

森田仁彦、渡部良朋、斉木博：微生物によるCO₂固定 9 . 夏季における適用を目指した高温耐性クロレラの探索とその光合成生産性、電力中央研究所報告、研究報告 U99015 (2000)

森田仁彦、渡部良朋、斉木博：微生物によるCO₂固定 10 . 螺旋状チューブリアクターでの受光に伴う熱収支評価、電力中央研究所報告、研究報告 U99054 (2000)

コラム

コラム 2

Climate Change 2001 - The Scientific Basis - , Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of IPCC, Cambridge University Press, 881 pp.

Climate Change 2001 - Impact, Adaptation, and Vulnerability - , Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of IPCC, Cambridge University Press, 1032 pp.

Climate Change 2001 - Mitigation - , Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of IPCC, Cambridge University Press, 752pp.

IPCCのホームページ (<http://www.ipcc.ch/>)

コラム 3

坂井伸一、1997、マイクロ波高度計 TOPEX/POSEIDON による黒潮続流域の地衡流解析、電力中央研究所研究報告 U97074

コラム4

Wigley T. M. L. (1993) : Balancing the carbon budget: Implications for projections of future carbon dioxide concentration changes, *Tellus*, 45B, 409-425, 1993

Joos, F. et al. (1996) : An efficient and accurate representation of complex oceanic and biospheric models of anthropogenic carbon uptake, *Tellus*, 48B, 397-417

丸山康樹・Steven Smith・西宮昌 (2000) : CO₂排出削減による濃度安定化効果の検討 - CO₂濃度推定モデルの適用と問題点、電中研調査報告 : U99043、33 p.

コラム5

ACACIAのホームページ :

<http://www.cgd.ucar.edu/cas/ACACIA/>

コラム6

Penner, J. E., M. Andreare, H. Annegarn, L. Barrie, J. Feichter, D.Hegg, A. Jayaraman, L. Leaitch, D. Murphy, J. Nganga, and G. Pitari, 2001: Aerosols, their direct and indirect effects. In "Climate Change 2001: The Scientific Basis," Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 881 pp.

Rasch, P. J., M. C. Barth, J. T. Kiehl, S. E. Schwartz, and C. M. Benkovitz, 2000: A description of the global sulfur cycle and its controlling processes in the National Center for Atmospheric Research Community Climate Model, Version 3. *J. Geophys. Res.*, 105, 1367-1385

Kiehl, J. T., T. L. Schneider, P. J. Rasch, M. C. Barth, and J. Wong, 2000: Radiative forcing due to sulfate aerosols from simulations with the National Center for Atmospheric Research Community Climate Model, Version 3. *J. Geophys. Res.*, 105, 1441-1457

コラム7

異常気象レポート'99 (気象庁1999)

IPCC第三次評価報告書 (IPCC 2001)

地球温暖化の日本への影響2001 (環境省 2001)

コラム8

萬納寺信崇、小出寛、他11名、JRA-25長期再解析計画について、天気、2001 (投稿中)

コラム9

電気事業連合会のホームページ : <http://www.fepec.or.jp/>

コラム10

Sugiyama, Taishi (2000) Strategic Value of Carbon Recovery and Storage Technology: Political and Administrative Dimension, *Energy and Environment*, Vol.11, No.6. (電力中央研究所学術論文 RY00006)

Sugiyama, Taishi (1999) Strategic Value of Carbon Recovery and Storage Technology: Political and Administrative Dimension, *Proceedings of The 2nd International Symposium on Ocean Sequestration of Carbon Dioxide*, Joint Conference of International Conference of CO₂ Fixation and Efficient Utilization of Energy 1999, New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) and Tokyo Institute of Technology, p 134-137

Sugiyama, Taishi and Axel Michaelowa (2001) Reconciling the Design of CDM with Inborn Paradox of Additionality Concept, *Climate Policy* vol. 1, No.1, January, p. 75-84. ISSN 1469-3062. (downloadable at internet homepage <http://www.elsevier.nl/inca/publications/store/6/2/1/2/6/7/>) . (電力中央研究所学術論文 RY00005)

Sugiyama, Taishi (2000) Designing CDM for Effective Technology Transfer, in *The Challenge of Mitigating Climate Change*, p. 31-34, CRIEPI, November 2000

杉山大志・富澤昌雄 (2001) 途上国は早期に数値目標を持つべきか? - 温暖化対策の時間的柔軟性と衡平性、エネルギー・資源 Vol. 22、No. 1、p. 97-101 (電力中央研究所学術論文 RY00007)

Sugiyama, Taishi (2001) Enforcement or Management? Two Schools of Thought in the Institutional Design of the Kyoto Regime, *Energy & Environment*, Vol.12, No. 1. (電力中央研究所学術論文 RY00004)

杉山大志 (2001) 京都議定書の行方はどうなるのか?、エネルギー、Vol. 34、No. 1、p. 78-81

杉山大志 (2000) 地球環境と電力化、電力中央研究所研究報告 : Y00005

杉山大志 (2001) COP6パート1の概要、原子力eye 2001年2月号 (*Nuclear Viewpoints*, Vol.47, No.2) p. 12-17

杉山大志 (2001) クリーン開発メカニズム (CDM) の制度設計に関する諸概念について、NIRA政策研究 Vol. 14、No. 7、p. 37-41、総合研究開発機構

円借款による発電部門のCO₂排出削減ポテンシャル試算、エネルギー・資源 Vol. 22 No. 4 (2001) p. 316-321、エ

エネルギー資源学会

Bernhard Schlamadinger, Michael Obersteiner, Axel Michaelowa, Michael Grubb⁴, Christian Azar, Yoshiki Yamagata, Donald Goldberg, Peter Read, Miko U.F. Kirschbaum, Philip M. Fearnside, Taishi Sugiyama, Ewald Rametsteiner, Klaus B. Swald (2001) Capping the Cost of Compliance with the Kyoto Protocol and Recycling Revenues into Land-Use Projects, *The Science World* 1, 271-280 ISSN 1532-2246, www.thescientificworld.com
杉山大志 (2001) COP6パート2 - 分析と今後の展望、*原子力eye* Vol. 47、No. 10 (2001年10月号)

Sugiyama, Taishi, Koji Nagano and Masahito Takahashi, *By-Sector Analysis of Time Flexibility to Reduce Costs for Greenhouse Gases Mitigation: A Case for Japanese Utility Sector*, CRIEPI Report EY98001, Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI) May 1998

コラム12

石井孝、梨本真、下垣久、「衛星データによる森林植生計測手法の開発 - その2. 葉面積指数LAIの推定 - 」、*電中研研究報告* U98013、1998年11月

既刊「電中研レビュー」ご案内

- NO. 32 「人間と技術の調和に向けて ヒューマンファクター研究 」1995. 3
NO. 33 「放射線ホルミシス 研究の意義と取り組み 」1996. 3
NO. 34 「ガスタービン研究 高効率発電の主角を担う 」1997. 1
NO. 35 「地下の探査・可視化技術」1997. 5
NO. 36 「送電線コンパクト化技術の開発 高分子材料の適用 」1998. 3
NO. 37 「乾式リサイクル技術・金属燃料FBRの実現に向けて」2000. 1
NO. 38 「大気拡散予測手法」2000. 3
NO. 39 「新時代に向けた電力システム技術」2000. 6
NO. 40 「原子燃料サイクルバックエンドの確立に向けて」2000. 11
NO. 41 「需要家と電気事業のエネルギーをトータルで考える
需要家の特性解明と省エネ技術 」2000. 11
NO. 42 「原子力発電所の人工島式海上立地」2001. 1
NO. 43 「酸性雨の総合評価」2001. 2
NO. 44 「石炭ガス化複合発電の実現に向けて
実証機開発の支援と将来への研究展開 」2001. 10

編集後記

電中研レビュー第45号「温暖化の解明と抑制」をお届けします。

観測された事実と客観的な科学研究から明らかにされた地球温暖化の進行を減速させ、予想される未曾有の異常事態を回避するには地球規模での対策が不可欠です。

このレビューがお手元に届く頃には、温暖化防止の京都議定書の批准に向けて種々の運用ルールを最終決定する気候変動枠組み条約・第7回締約国会議（COP7：2001年10月29日から11月9日までモロッコのマラケシュで開催）も無事終了し、2002年の発効に向けた国内制度の整備に全国民の叡智が結集していることでしょう。

有限な地球の環境と資源を上手に利用し、人間社会の持続的発展を確実にする方法を確立することが、新しい世紀の幕開けに人類に課せられた最重要課題になっております。

温暖化問題への対応には、温暖化防止に向けた国内外の制度作りなどの短期的・現実的課題と、温暖化の緩和

や適応のための様々な技術開発や社会システム設計などの長期的課題に、総力をあげて取り組まなければなりません。

本レビューでは、温暖化問題に関する当研究所の取り組み姿勢や研究ポテンシャルを紹介しました。しかし、問題が巨大なだけに一研究機関にできることは自ずと限りがあります。逆に、それだけ挑戦甲斐のある問題でもあります。これからも当研究所に課せられた課題に精一杯取り組み、適宜、役に立つ情報の発信に努めたいと考えておりますので、皆様のご理解とご鞭撻を賜りたいと思います。

身に余るような巻頭言を寄せて下さったNCARの笠原先生には当研究所の気候研究能力の向上に言葉では言い尽くせないほどの暖かいご指導をいただきました。また、研究ネットワークを通じて世界の大勢の方から温暖化研究を推進するための「パワー」をいただきました。最後になりましたが、皆様に心から感謝いたします。



電中研レビュー NO.45

平成13年11月14日

編集兼発行・財団法人 電力中央研究所 広報部
100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1 [大手町ビル7階]
(03) 3201-6601 (代表)
E-mail : www-pc-ml@criepi.denken.or.jp
<http://criepi.denken.or.jp/index-j.html>
印刷・株式会社 電友社

本部 / 経済社会研究所	100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1	(03) 3201-6601	我孫子研究所	270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646	(0471) 32-1181
狛江研究所 / 情報研究所 / 原子力情報センター			横須賀研究所	240-0196 神奈川県横須賀市長坂2-6-1	(0468) 36-2121
ヒューマンファクター研究センター / 低線量放射線研究センター / 事務センター			赤城試験センター	371-0241 群馬県勢多郡宮城村苗ヶ島2567	(027) 283-2721
201-8511 東京都狛江市岩戸北2-11-1	(03) 3480-2111		塩原実験場	329-2801 栃木県那須郡塩原町関谷1033	(0287) 35-2048
