

一般報告 1

地球温暖化問題の現状
～何がわかって何が問題なのか～

(財)電力中央研究所 我孫子研究所
環境科学部

上席研究員 環境科学部長 丸山康樹

1. なにがわかったのか？

IPCC 第3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3次評価書が公表され、一般に購読可能である。この第3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。

(1) 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 1-1 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

表 1-1 観測された地球環境の変化

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±6 ppm (1000年～1750年)、現在368 ppm 過去20年間の平均増加率1.5ppm/年
CH ₄ 大気濃度	700±60 ppb (1000年～1750年)、現在1760 ppb
N ₂ O大気濃度	270±10 ppb (1000年～1750年)、現在316 ppb
全球平均地表気温	+0.6±0.2°C 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：+10～20 cm (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。

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。

(2) 気候予測モデルの検証

第 3 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 1 次～第 2 次評価書に比べてときの大きな前進である。

(3) 将来の気候変化の予測

第 3 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 2 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 2 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。

(4) 異常気候

第 3 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。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 1-2 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 1-2 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、今後の科学的中立性確保への懸念が示されている。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1-2 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 ^c)
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、それにとま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
台風最大の風速、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 関係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加 ・ 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。

^c 台風の発生分布は変化する可能性があるが、確立された情報ではない。

2. 温暖化は防止できるか？

1997 年末、国連温暖化防止枠組条約(UNFCCC)の第 3 回締約国会議(COP3)が京都で開催され、先進諸国は CO₂ 等の温室効果ガスの削減を行うことになった。国によって削減率は異なるが、平均では 1990 年排出レベルの約 5 %減、我が国は 6%減を数値目標にしている。しかし、最近、米国のブッシュ大統領は、京都議定書の批准に反対し、一方で、気候研究の加速とエネルギー技術開発の重要性を主張している。温暖化防止のための長期的な削減目標が設定されていない、というのが批准反対の理由の一つである。

(1)温暖化防止効果の予測

図 2-1 は、電中研が参加した国際共同研究の成果の一つである(ACACIA プロジェクト、1998 年)。この予測では、21 世紀の濃度シナリオとして、CO₂削減などの特段の対策をとらない BAU シナリオ、産業革命以前の濃度である 280ppm の約 2 倍の 550ppm に安定化する WRE550 安定化シナリオを想定している。予測に使用された気候モデルは、米国大気研究センター-NCAR の大気・海洋結合モデル(CSM1.4)である。気候の再現計算結果と観測値を比較すると、気候モデルは、1990 年より過去約 20 年間の気温上昇約 0.5 を再現できるものの、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ないという問題が残されている。また、21 世紀の予測でみると、BAU シナリオでは、2100 年までに 1990 年比で約 2 の上昇、

WRE550 安定化シナリオでは約 1.5 の上昇となる。550ppm に濃度を安定化しても、その温暖化防止効果は意外と少ないと言えるであろう。

(2)地球温暖化防止のための長期目標

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。図 2-1 のように、550ppm で濃度を安定化するには、21 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。その削減量の推定法(炭素循環モデル)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。しかし、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。

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。図 2-1 のような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、といった疑問に対する信頼性の高い科学的な予測が不可欠である。

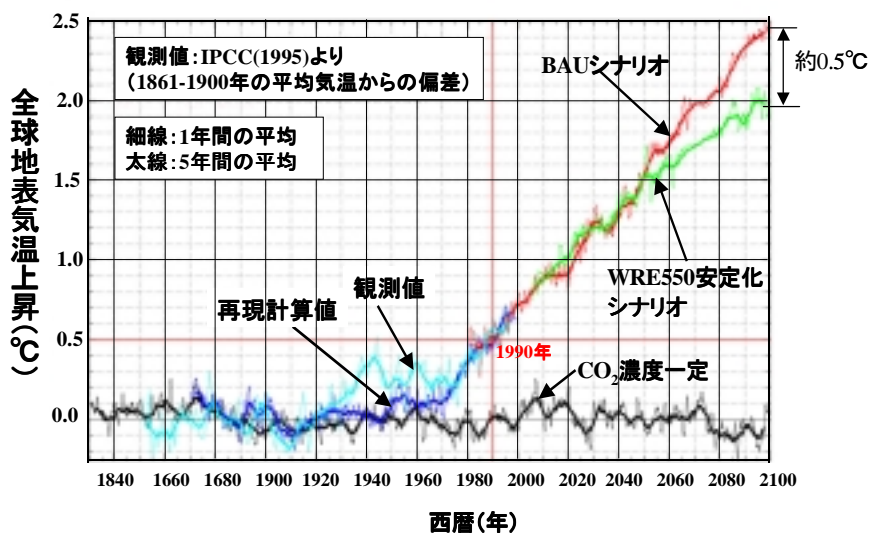


図 2-1 濃度安定化と温暖化防止効果(電中研が参加した ACACIA 成果、1998 年)

3. 京都議定書の濃度安定化効果は？

京都議定書では、2008年～2012年の5カ年間に
いて、先進国は1990年排出レベルに対して平均して
5%の排出削減を行うことを目標としている。ちなみ
に我が国の削減率は6%である。はたして、このCO₂
排出削減により、大気中CO₂濃度は安定化できるの
であらうか。

(1) 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(Wigley; 1993年)

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

ここで、濃度C(t)の単位はppmv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。

(2) 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
1.6ppmv/year、計算値約1.8ppmv/yearと相違がある
が、全体の傾向は良く一致している。

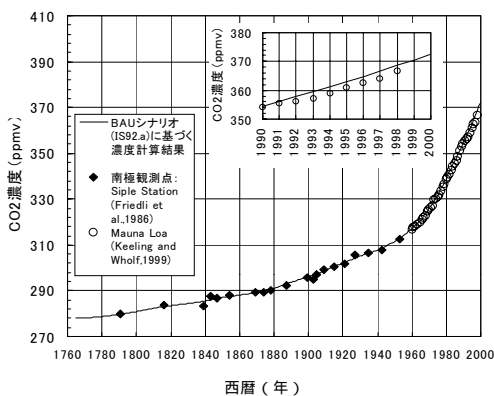


図3-1 CO₂大気中濃度と観測データの比較

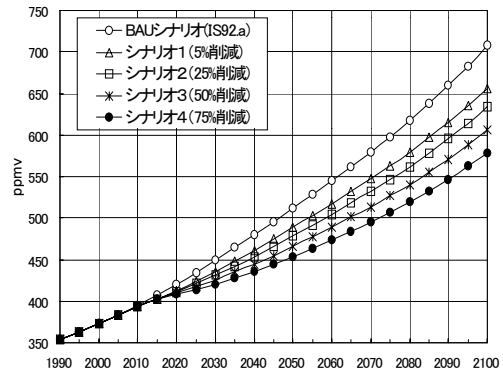


図3-2 CO₂排出削減の濃度安定化効果の試算

(3) 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70ppmv
にも達する。

(4) 京都議定書の大気安定化効果の試算

図3-2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。

(5) 今後の課題

国連(UNFCCC)の温暖化防止の究極の目標は、「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。電中研では、
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。

4. 今後の課題

電中研では、過去 10 年間にわたって米国 NCAR との共同研究により、温暖化予測研究を実施してきた。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。

(1)気候モデルの問題点

IPCC の第 3 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 4-1 は、SRES シナリオのうち A2 シナリオ (1-2 コラム参照) 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。

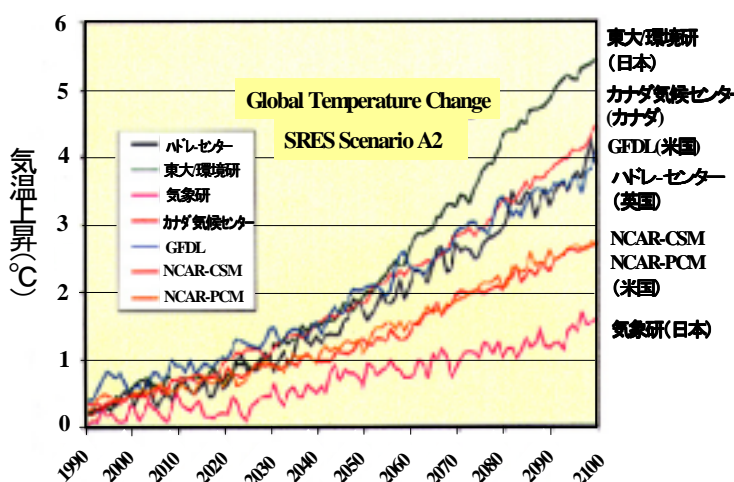


図 4-1 気候モデルの違いと温暖化予測結果 (IPCC 第 3 次評価書 (2001 年) より)

(2)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、電中研では 2000 年 10 月から新並列スーパーコンピュータ VPP5000/32CPU が導入された。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。前出の図 2-1 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。電中研では、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。

(3)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、550ppmv で濃度を安定化するには、21 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。その削減量の推定法 (炭素循環モデル) 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。

参考文献

(電中研成果を中心として)

- (1) Climate Change 2001 - The Scientific Basis - , Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of IPCC, Cambridge University Press, 881 pp.
- (2) Climate Change 2001 - Impact, Adaptation, and Vulnerability - , Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of IPCC, Cambridge University Press, 1032 pp.
- (3) Climate Change 2001 - Mitigation - , Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of IPCC, Cambridge University Press, 752 pp.
- (4) IPCC のホームページ (<http://www.ipcc.ch/>)
- (5) Wigley T.M.L.(1993) : Balancing the carbon budget: Implications for projections of future carbon dioxide concentration changes, Tellus, 45B, 409-425, 1993.
- (6) Joos, F. et al. (1996): An efficient and accurate representation of complex oceanic and biospheric models of anthropogenic carbon uptake, Tellus, 48B, 397-417.
- (7) 丸山・Steven Smith・西宮 (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.
- (8) 丸山・平口・筒井・仲敷・門倉・角湯 ; 大気海洋結合モデル(NCAR・CSM)による全球温暖化予測、電中研研究報告 U97034,1997.10.
- (9) 筒井・笠原・平口・丸山 ; NCAR 共同研究「温暖化時の台風予測モデルの開発(その2)」-領域モデルによる台風の再現性の検討 -、電中研研究報告 U97049、1997.11.
- (10) 筒井・笠原・平口・丸山 ; 温暖化による台風気候の変化(その1)-全球大気モデル(T42 CCM2)による数値実験 -, 電中研研究報告 U99014,1999.10.
- (11) 筒井・笠原・丸山 ; NCAR CCM3 を用いた台風シミュレーション 積雲対流過程の改良および高解像度化 、電力中央研究所報告 U00049、2001.3.
- (12) 坪野・仲敷・丸山 ; 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
- (13) 仲敷・坪野・丸山 ; 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 (印刷中)
- (14) 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.
- (15) 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.