

研究展望

地球温暖化予測の現状—何が分かって何が問題なのか—

GLOBAL WARMING PROJECTION; UP-TO-DATE INFORMATION ABOUT WHAT IS KNOWN AND WHAT IS UNKNOWN

丸山康樹

Koki MARUYAMA

正会員 工博 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 上席研究員 環境科学部長
(〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

Key Words : global warming projection, stabilization of carbon dioxide, emission reduction scenario, carbon cycle model, atmosphere-ocean coupled model, ocean environment change, typhoon change, sustainable development

1. はじめに

1997年末に開催された国連温暖化防止京都会議(COP3)では、先進国はCO₂等の温室効果ガスの削減数値目標の設定に合意した。また、温暖化問題の科学的・学術的な検討に関しては、気候変動に関する政府間パネルIPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)の第3次評価書(2001年版)がまもなく発行される予定である。本論文では、まずその概要を簡単に紹介したい。一方、最近、米国のブッシュ政権は、京都議定書の批准に反対しており、あらためて地球温暖化防止の難しさが浮き彫りになった。このバックグラウンドには、ブッシュ政権閣僚の質問「地球温暖化問題は科学的に見て確かなのか」に対して、米国科学アカデミーNAS(National Academy of Science)が用意した回答書が存在する。米国が京都議定書に反対する理由はなんなのであろうか、その理由を分析することは地球温暖化問題の本質の部分を理解する上で重要と思われるので、これについても簡単に紹介しておきたい。

電中研では、約10年前から米国大気研究センターNCAR(National Center for Atmospheric Research)と協力して、信頼性の高い科学情報を得るため、温暖化予測研究に取り組んできた。本論文では、上述のIPCC第3次評価書およびブッシュ政権の温暖化問題への対応計画との関連性に留意しつつ、その中から、CO₂排出削減と濃度安定化および濃度安定化がもたらす温暖化防止効果についての研究成果を紹介したい。さらに、排出削減について仮に世界的な合意が形成されず、将来温暖化が進行した場合、我が国周辺の海洋環境変化、台風等がどう変化するのかについても研究成果を紹介する。

最後に、以上の点を踏まえて地球温暖化問題への我が国の貢献について考察し、3つの問題、つまりエネルギー

—研究開発、気候変化の科学研究、持続可能な発展のための社会資本整備について、問題点を提起してみたい。

2. IPCC第3次評価書の概要

IPCCでは、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)」について検討している。1991年から5年ごとに評価書(Assessment Report)を発表しており、2001年発刊予定の第3次評価書に関しては、各作業部会の要約版SPM(Summary for Policymaker)をIPCCのホームページ(参考文献1)参照)からダウンロードして精読可能である。

ここでは、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を簡単に紹介する。まず、この要約版の特徴として、①観測データの充実とCO₂排出等人為影響の詳細な分析、②気候モデルによる20世紀の気温上昇の再現計算、③さまざまなシナリオに対する21世紀の温暖化予測、を挙げることができよう。

①に関しては、観測によって明らかになった過去の変化を表-1のように整理している。例えば、気温に関しては、1861～2000年の140年間において、全球平均地表気温が $0.6 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 上昇した。また、20世紀の北半球では、亜熱帯(北緯10～30度)で降水量が減少し、それ以外の熱帯域、中・高緯度域とも降水量が増加した。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に関しては、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

表-1 観測された現象変化

観測項目	内 容
CO ₂ 大気濃度	280±6 ppm (1000～1750年), 現在 368 ppm 過去 20 年間の平均増加率 1.5 ppm/年
CH ₄ 大気濃度	700±60 ppb (1000～1750年), 現在 1760 ppb
N ₂ O 大気濃度	270±10 ppb (1000～1750年), 現在 316 ppb
全球平均地表気温	+0.6±0.2°C上昇 (1861～2000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 (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 (1861～2000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年以來面積 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 0.5～1%/10年の割合で増加, 亜熱帯 (北緯 10度～30度) では 0.3%/10年の割合で減少. 熱帯域 (南北 10度以下) では 0.2～0.3%/10年の割合で増加. 南半球は海洋面積が大きいこと, データ数が少なくことから傾向は不明瞭.
エルニーニョ現象	過去 100年間で比較し, 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

(出典: IPCC 第 1 作業部会要約版 SPM (2001) より抜粋)

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大きな前進である。これについては, 4章で詳しく説明する。

③に関しては, 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 Emission Scenarios) 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。しかし, 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ないので, 簡単な手法で気温上昇や海面上昇を推定している。ただし, 高度な大気・海洋結合モデルであっても, 台風等の異常な現象 (これを異常気候 (extreme climate) と呼ぶことにする) については信頼性の高い予測結果は得られていない。これについては, 6章で詳しく説明する。そうした限界はあるものの, 第1作業部会では, 21世紀に予測される気候変化について, 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。なお, 表には第2作業部会がまとめた影響評価も合わせて示してある。ただし, 米国科学アカデミーでは, 表中の確信度の記述は誤解をまねくとして批判しているので, 次にこの点に触れてみたい。

3. 米国ブッシュ政権の温暖化問題への取組み

(1) 米国科学アカデミーの報告書

IPCCは政治的に偏向しているのではないかという, 米国ブッシュ政権の閣僚からの質問に対して, 米国科学アカデミーが回答書を取りまとめている。興味ある方は回答書をダウンロードして精読されたい (参考文献2)参照)。この回答書は, ブッシュ政権の閣僚のさまざまな質問を6つにグループ化して, それぞれに回答しているが, その最後に, 問題の IPCC への質問の記述がある。それによると, IPCCの要約版 SPMでは予測の確信度を示す表現 (likely, very likely など) が使用されているが, 本文中にはそうした記述はほとんどなく, 政策立案者に誤解を与える可能性がある」と指摘している。が, 1000ページに上る本文を20ページに要約するには, なんらかの判断尺度を導入する必要性は理解できるとし, 政治的に意図的な行為は認められないと回答している。前出の表-2中の確信度にはこうした問題があることに注意する必要がある。

また, 同回答書では, IPCCのメンバーには各国の政策関係者が加わっていること, そのため必ずしも科学分野を代表しているとはいえないと述べており, 今後の IPCCの科学的中立性への疑念を表明している。これに対処するため, 米国科学アカデミーとしては, さまざまな予測等には観測データ等による十分な検証

表2 将来の極端な気候現象により予測される影響

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	
①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
②ほとんど全ての陸地で最低気温上昇；冬日，降霜日，寒波 ^{a)} 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
③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	
④中緯度地域の大陸内部の大半で，夏季の乾燥と，それに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
⑤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可能性大 ^{a)})	<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
⑥多くの異なる地域でエルニーニョ現象に関係する早魃や洪水の増大 (可能性大 ^{a)})	<ul style="list-style-type: none"> ・早魃や洪水に弱い地域で，農耕地，放牧地の生産性が低下 ・早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早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予測を引用：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作業部会の政策立案者用サマリー 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。

(出典：IPCC 第2作業部会概要版 SPM (2001) より作成)

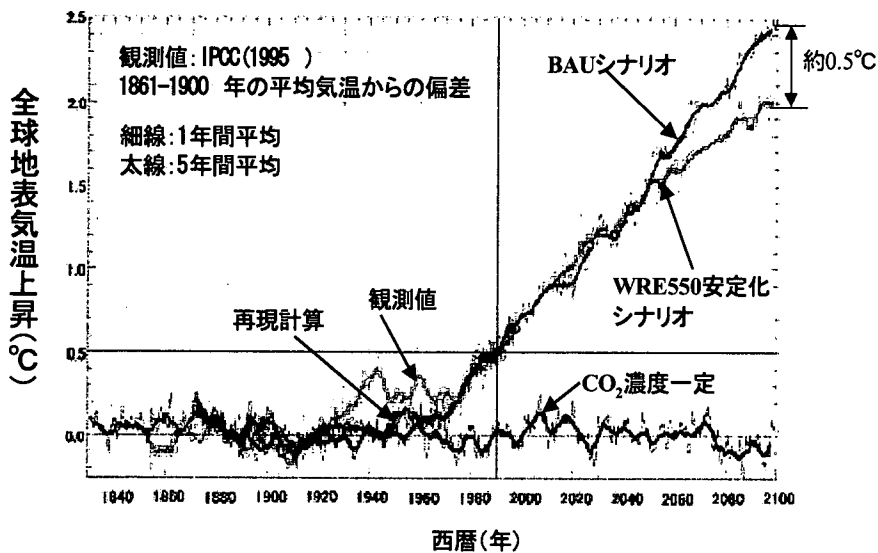
を要求することで，科学的信頼性を維持・向上することを推奨している。これは重要なポイントである。今後，温暖化問題に関して各国の利害の対立が一層激しくなることは十分に予想されることで，例え IPCC の評価書であっても鵜呑みせず，“十分な検証がない予測”には一応疑ってみることが大事であろう。特に，要約版 SPM と本文とはこれまでの評価書でも異なった表現が見られるので，疑念があれば本文にも目を通すことを推奨したい。

(2) 京都議定書批准反対の根拠

米国ブッシュ政権の京都議定書の批准反対についてはマスコミ等により良く知られているとおりである。ただし，同政権の地球温暖化問題対応計画[Current United States Actions to Address Climate Change (参考文献 3)参照)]に関しては，米国のエネルギー政

策の見直し，エネルギー技術開発および気候変化の科学研究の推進など，重要な政策が盛り込まれているので，関心のある方は精読されることをお奨めする。それでは，なぜ米国は京都議定書に反対するのであろうか。その理由は次のとおりである。

- ① 京都議定書の目標は政治的交渉の帰結であって，科学に立脚した長期的な目標の設定に失敗している。
- ② 途上国の CO₂ 排出量は急速に増加しているにもかかわらず，京都議定書では除外されている。
- ③ 2012 年までの CO₂ 排出量は，米国経済の成長によって 1990 年レベルの約 30% 増と予測される。京都議定書の米国削減率は 1990 年排出レベルの 7% で，排出量増加を加味すると全排出量の約 1/3 (単純合計では 37%) を削減する必要がある。この削減を行うためには，中位予測であっても米国



電中研が参加した国際共同研究 ACACIA プロジェクトの成果 (1999)。予測には NCAR の大気・海洋結合モデル (CSM) が使用された。1940 年前後の約 20 年間には、再現値と観測値にかなりの差がみられる。

図-1 2 種類の排出シナリオについての温暖化予測結果

GDP の 1~2% 程度の損失を伴うと予想され、米国経済および世界経済に重大な危機をもたらす。ちなみに、2% の GDP 損失は 1970 年代のオイルショック時の影響に相当する。

これらの主張のうち、③についてはクリントン前政権時代にも十分予想していたはずであるが、米国好景気のトレードオフとして削減が一層難しくなっているのであろう。米国経済が世界経済を牽引しており、その好不況が日本経済にも大きな影響を与える現実を考えると、CO₂ 削減と米国経済の発展を両立する政策をぜひ採用してほしいものである。①および②についてはその科学的なバックグラウンドを次章で詳しく検討することにしよう。

4. 濃度安定化と温暖化防止について

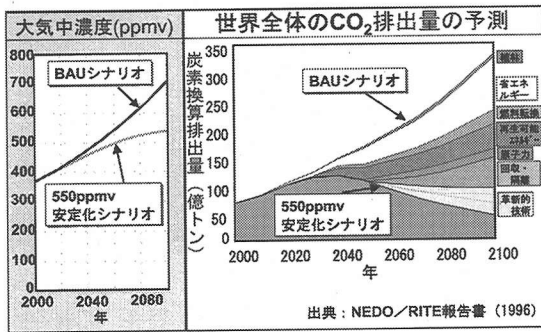
2001 年出版予定の IPCC 第 3 次評価書では、4 種類のシナリオをベースとしたさまざまなシナリオを想定している。しかしながら、シナリオが煩雑すぎてわかりにくく、IPCC の究極の目標である濃度安定化目標や温暖化防止といった従来の観点が希薄になってしまったことは欠点ではなからうか。

(1) 2 つのシナリオと温暖化予測

そこで、本論文では、温暖化対策について大気・海洋結合モデルにより検討した結果を図-1 に示す。この成果は、電中研が参加した国際共同研究 [NCAR/ACACIA プロジェクト (詳細は参考文献 4) 参照] の

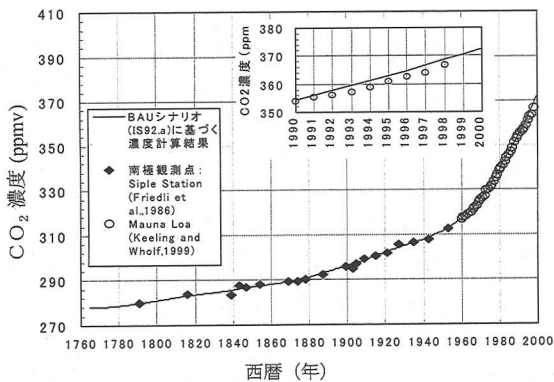
成果である (丸山他)^{5),6)}。まず、特段の排出削減を行わない無対策シナリオとして BAU (Business As Usual) シナリオ (IS 92. a) を想定する。このシナリオでは、2100 年の CO₂ 大気中濃度を 710 ppmv (ppmv は体積濃度で、0.071%) と想定している。ちなみに、2000 年時点の濃度は 370 ppmv 程度 (表-1 参照) であるので、約 2 倍の濃度に相当する。これは年率では約 0.7% の増加率である。さらに、この BAU シナリオの排出量を大幅に削減して、大気中濃度を 550 ppmv に安定化させる WRE 550 安定化シナリオを考える (Wigley et al., 1996)⁷⁾。550 ppmv の値には特に深い意味があるわけではなく、産業革命以前の濃度 280 ppmv の約 2 倍であることから気候研究において比較的良好に使用されているに過ぎない。図-1 は、過去の気候再現とこの 2 種類のシナリオについて将来の気候変化を予測した結果である。予測には、NCAR の大気・海洋結合モデル CSM 1.4 が使用された。

さて、図-1 において、1990 年までの再現計算と観測値の比較を見ると、1940 年を中心とする前後約 20 年間については再現計算は観測値を下回っているものの、1970 年から 1990 年にかけての急激な気温上昇に関して両者は良く一致していることがわかる。一方、CO₂ 濃度一定とした計算では、この急激な温度上昇を再現できず、CO₂ 濃度増加が気温上昇の原因と考えられそうである。しかし、1940 年代の昇温をモデルでは説明できず、モデルの信頼性はまだ不十分といえる。また、BAU シナリオでは 1990 年に比較して 2100 年に約 2.0°C 気温が上昇するのに対して、WRE 550 安定化シナリオでは、約 0.5°C ほど温度上



2150年にCO₂大気中濃度を550ppmvに安定化させるためには、2100年時点の世界全体の排出量を2000年以下に大幅に削減する必要がある。その方法には、植林、省エネ等のさまざまな方法が考えられる。

図-2 2種類の排出シナリオに対応する世界全体のCO₂排出量

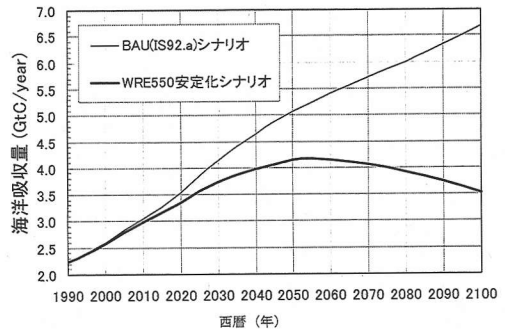


1990年より過去のデータはパラメータ調整に用いられており比較は意味がない。1990年から2000年までの濃度変化については、両者は良く一致する。

図-3 CO₂濃度推定モデル(Wigley, 1993)の予測精度(計算値と観測値の比較)

昇を抑制できる程度である。後述するように、大気中のCO₂濃度を550ppmvに安定化するには大幅な削減が必要であるが、その温暖化防止効果は意外に小さいと言えるであろう。

図-2は2種類のCO₂濃度シナリオに対応する世界全体のCO₂排出量を予測した結果である(詳細は、参考文献8)参照)。図から、大気中濃度を550ppmvに安定化するには2100年時点の世界全体の排出量を2000年時点の排出量以下に大幅に削減する必要があることがわかる。その方法には、植林、省エネ、燃料転換、CO₂回収・隔離等のさまざまな組合せが考えられる。問題は、はたして実行できるかどうかである。その判断には、先進国、途上国の一人当たりCO₂排出量格差などの問題をもう少し掘り下げて検討する必



人間活動に伴うCO₂排出量が多いと、一時的に大気中濃度が上昇して分圧が増えるので海洋のCO₂吸収量が大きくなる。図中のBAUシナリオでは排出量がモデルの適用範囲の上限に近いので、海洋の吸収量を過大に見積もっている可能性がある。

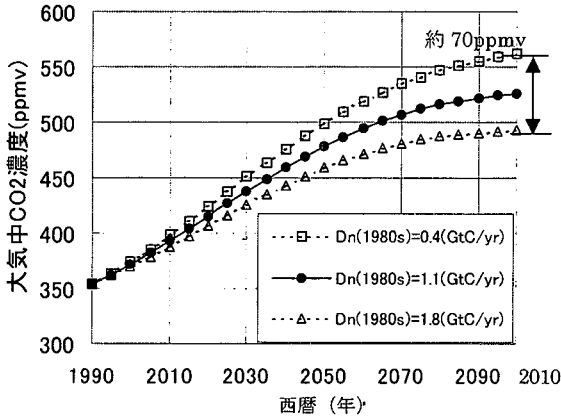
図-4 CO₂濃度推定モデル(Wigley, 1993)による海洋吸収量の推定値

要がある。

(2) CO₂排出量から大気中濃度の推定方法

図-2において、世界全体のCO₂排出量から大気中濃度を推定する、あるいは逆に大気中濃度から対応する世界全体のCO₂排出量を推定するには、炭素循環モデルあるいは濃度推定モデルと呼ばれる手法(Wigley, 1993)⁹⁾が用いられている。このモデルの信頼性はどの程度なのであろうか。以後、CO₂排出量の単位を炭素換算ギガトン/年(GtC/年=10億トン/年)、大気中濃度の単位を(ppmv)とする。図-3は、CO₂濃度推定モデル(Wigley, 1993)⁹⁾の予測精度を調べた結果である(丸山他, 2000)⁵⁾。このモデルでは、まず、海洋および森林のCO₂吸収量を推定し、人間活動(化石燃料消費やセメント製造、森林破壊等)により排出されるCO₂排出量から海洋・森林の合計吸収量を差し引いて、その残余部分から大気中濃度を推定する。図のように、1990~2000年の比較的短期間の比較結果(図の拡大部)を見ると、モデル計算値と観測値は良く一致し、CO₂排出量から大気中濃度を精度良く推定できることがわかる。ちなみに、1990年より過去の観測データはモデル中のパラメータ調整に使用されているので、比較には意味がない。しかしながら、2100年までという長期間にわたる濃度では、海洋と森林の吸収量推定の不確実性から、濃度推定に相当の幅が生ずる。

図-4は、CO₂濃度推定モデル(Wigley, 1993)⁹⁾による海洋吸収量の推定値を示したものである。人間活動に伴うCO₂排出量が多いと一時的に大気中濃度が上昇して分圧が増えるので、海洋の吸収量が増加する。しかし、BAUシナリオでは排出量がモデルの適用範囲の上限に近いので、海洋の吸収量を過大に推定



D_n (1980 s) は、土地利用変化（森林破壊など）により放出された1980年代の平均年間CO₂排出量である。ベスト推定値はD_n (1980 s) = 1.1 GtC/年であるが、かなりの推定誤差（±0.7 GtC/年）を伴う。その高位・中位・低位推定に対応する2100年時点の大気中濃度には、約70 ppmvの差が生ずることがわかる。このD_n (1980 s) の推定精度を向上させることは、土地利用状況は常に変化しているので大変難しい。

図-5 土地利用変化によるCO₂排出量D_n (1980 s)の推定誤差とCO₂濃度の関係

している可能性がある。また、図-5は、土地利用変化（森林破壊）によるCO₂排出量D_n (1980 s)の推定誤差と大気中濃度との関係を示したものである。D_n (1980 s)は濃度推定モデル中に使用されているパラメータで、土地利用変化（森林破壊など）により放出された1980年代の平均年間CO₂排出量である。ベスト推定値はD_n (1980 s) = 1.1 GtC/年であるが、かなりの推定誤差（±0.7 GtC/年）を伴う。図のように、その高位・中位・低位推定に対応する2100年時点の大気中濃度には、約70 ppmvの差が生ずることがわかる。このD_n (1980 s)の推定精度を向上させることは、1980年代と今日の土地利用状況はかなり異なるので難しい作業である。

このように、現状のモデルにはかなりの不確実性がある。これは、今後CO₂排出量を削減しても、モデルが不完全のため、大気中濃度を低下する効果を正しく推定できない可能性を示しており、その解決は今後の大きな課題である。

(3) 京都議定書の濃度安定化効果

濃度推定モデルの不確実性を念頭に置きつつ、京都議定書によるCO₂削減が濃度安定化にどれほど寄与するか検討してみた。まず、図-6は、先進国だけがCO₂排出を削減した場合、世界全体の排出量の予測結果を示したものである。京都議定書に従い先進国が2010年からの10年間に1990年排出量の5%の削減を行い、2100年までその削減を継続する場合、言いか

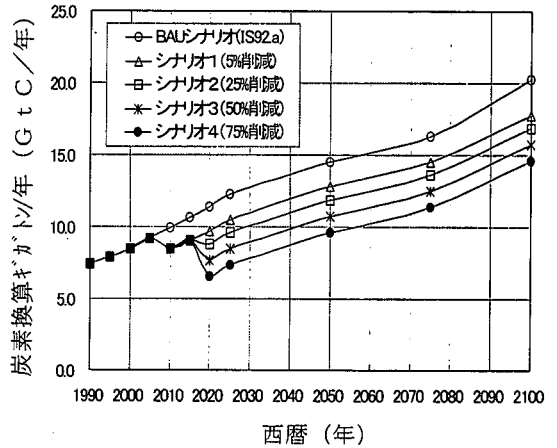


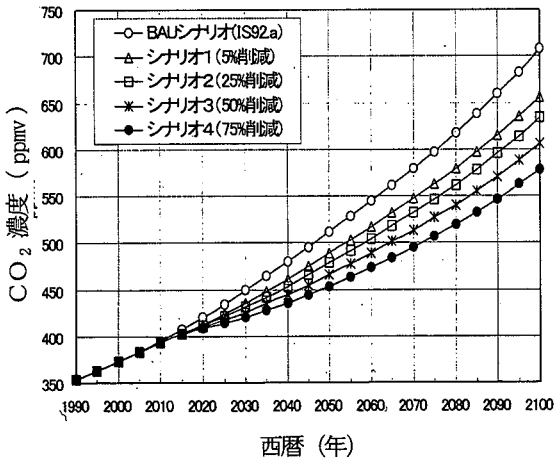
図-6 先進国だけの削減シナリオと排出量予測結果

えると1990年排出量×0.95の排出量のままで増減ゼロとする場合を削減シナリオ1と呼ぶ。ただし、基準シナリオはBAUシナリオとする。さらに、極端な例として、先進国だけが2020年に、25%、50%、75%の削減を行い2100年までその削減を継続する場合をそれぞれ削減シナリオ2~4と呼ぶことにする。図のように、いずれのシナリオでも世界全体のCO₂排出量は確実に増加し、先進国だけが75%の削減を行うシナリオ4でも変わらない。これは、途上国の排出量が増加し、先進国の削減を相殺するためである。

次に、図-7は、図-6の各削減シナリオに相当する大気中濃度を前述の濃度推定モデルで試算した結果である。図によると、京都議定書の5%削減シナリオ1では、特段の対策をとらないBAUシナリオに比べて、濃度増加をおよそ10年程度先送りする効果しか期待できないことがわかる。さらに、先進国が2020年に75%の大幅な削減を行ったとしても、濃度増加をせいぜい30年程度先送りする効果しか期待できない。つまり、先進国だけの削減では、大気中濃度を550 ppmvに安定化することは相当難しいといわざるを得ない。ブッシュ政権が京都議定書は科学に立脚していないと反対する理由の背景には、このような問題点が存在する。

(4) 途上国のCO₂排出量削減

それでは、仮に、途上国も排出削減を行うとしたら、550 ppmv安定化のためには、どの程度の削減が必要になるかを試算してみた。図-8は、一つの試みとして、先進国、途上国とも段階的にCO₂を削減する場合について、世界全体の排出量を試算した結果で

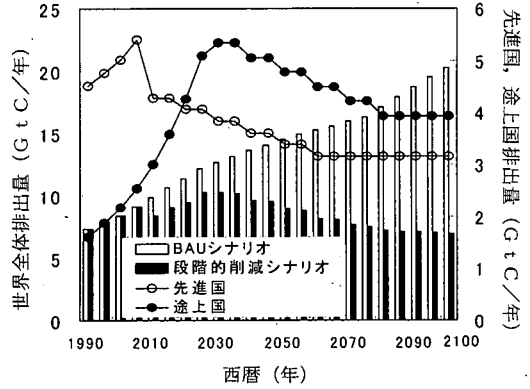


京都議定書の削減率ではBAUシナリオに対して約10年程度濃度増加を遅らせる効果しか期待できない。また、先進国だけが2020年に75%もの削減を行っても、高々30年程度濃度増加を遅らせる効果しか期待できない。

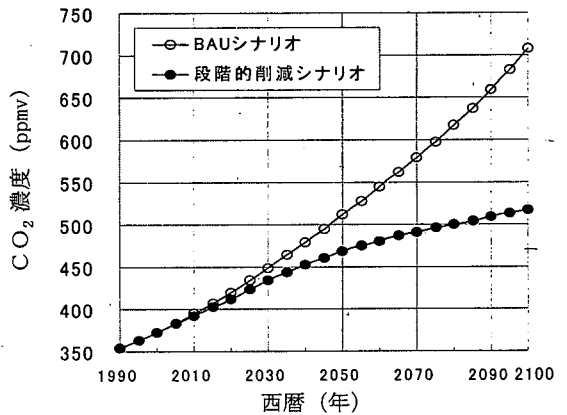
図-7 先進国だけの削減による濃度安定化効果の試算結果

ある。同図(a)に示したように、このシナリオでは、先進国は、2010年から10年毎に1990年排出レベルの5%の追加削減を行い、削減率が30%になるとそれ以降は削減を行わないとする。途上国も、2030年の排出レベルを基準として、2030年から同様の削減を行う(下限=30%)。この段階的削減シナリオでは、図のように、先進国と途上国の最大排出量がほぼ等しくなることが特徴である。さらに、同図(b)は、この段階的削減シナリオの排出量から大気中濃度を推定した結果である。2100年時点の濃度はBAUシナリオの約710ppmvに比べて約520ppmvと大幅に減少し、更に継続して削減を必要とするものの、濃度を550ppmvで安定化することは不可能ではなさそうである。

しかしながら、このシナリオには一人当たり排出量格差の面で大きな問題がある。BAUシナリオでは、世界人口として、1990年の52.9億人から2100年では約113.1億人(約2倍)を想定している。この人口予測をベースとして、段階的削減シナリオに関する先進国と途上国の一人当たり年間平均CO₂排出量を試算した結果が図-9である。1990年では一人当たり排出量の先進国/途上国比は約9倍であり、2100年では約5.5倍と縮小するものの依然として格差は大きい。ブッシュ政権は、京都議定書が途上国を除外している点を非難しているが、大気中濃度安定化という科学的側面から見ると間違いとは言えない。しかし、一人当たり排出量格差、いいかえると消費の公平性という点になると、世界各国から支持を受けるのは難しいのではなかろうか。この格差は一人当たり累積消費量(生



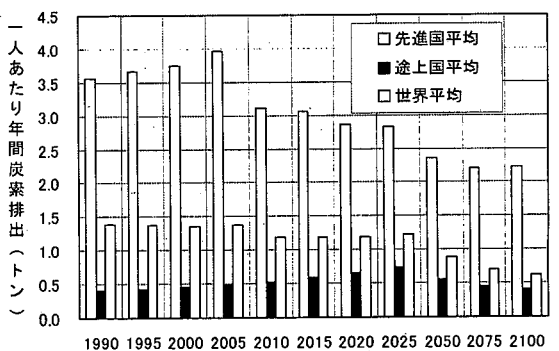
(a) 先進国、途上国の段階的削減シナリオによる排出量



(b) 段階的削減シナリオによる大気中濃度

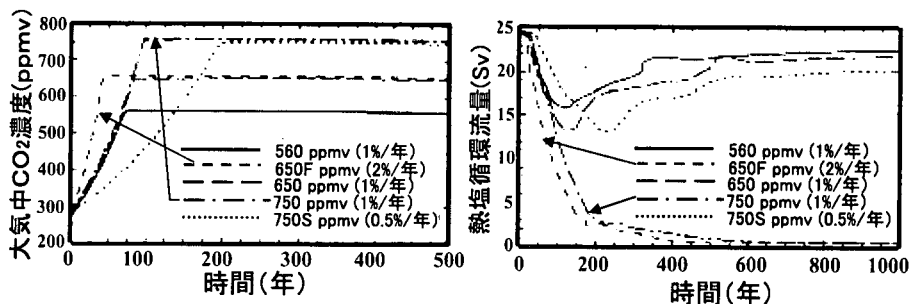
先進国は2010年から10年ごとに1990年排出量の5%ずつ追加削減を行い、削減下限を30%とする。途上国は、2030年から同様に10年ごとに2030年排出量の5%ずつ追加削減を行い、30%を削減下限とする。このシナリオでは、大気中濃度を550ppmvに安定化できる可能性がある。

図-8 先進国、途上国がともに段階的削減をした場合の大気中濃度推定結果



1990年では、一人当たり排出量の先進国/途上国比は約9倍あり、2100年では約5.5倍に縮小するが、格差は依然大きい。

図-9 段階的削減シナリオの一人当たり炭素排出量



熱塩循環の単位 Sv=毎秒 100 万 m³. 大気中 CO₂ 濃度として、2%/年の速い割合で増加し 650 ppmv で安定化したシナリオ (650 F)、1%/年の割合で増加し 750 ppmv で安定化したシナリオ (750) では熱塩循環は衰退し復元しない (非可逆現象). それ以外のシナリオでは、熱塩循環は弱まるが再び復元する。

図-10 さまざまな大気中 CO₂ 濃度増加シナリオに対して、簡単なモデルによる北大西洋の熱塩循環 (overturning) の予測結果 (Stocker and Schmittner, 1997)

涯消費量) になるとさらに拡大する。その解消のため、先進国は直ちに CO₂ ゼロエミッションとすべきという極端な意見もあることを紹介しておきたい。

5. 日本周辺の海洋環境変化予測

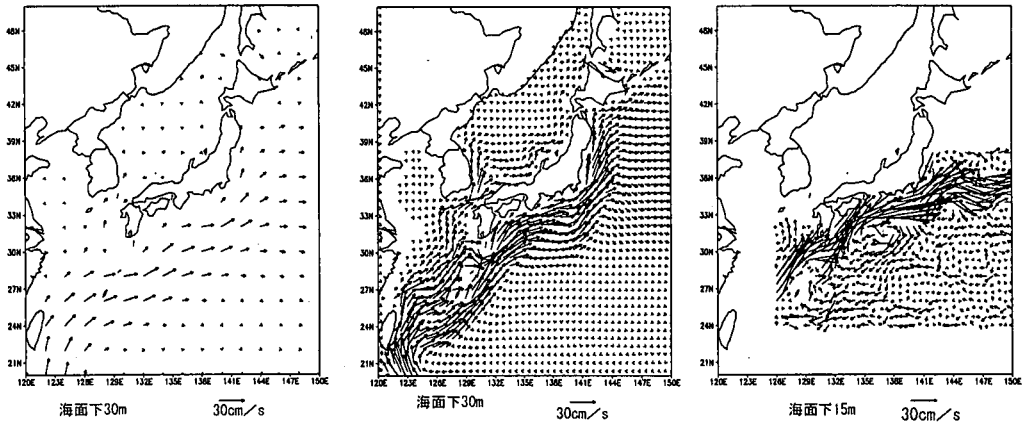
(1) なにが問題なのか

以上見てきたように、CO₂ 排出削減には相当難しい問題を抱えている。それでは、仮に温暖化が将来進むとしたら、世界の海洋や日本周辺の海洋にはどんな変化が起こるであろうか。海洋の大規模な流れは、風応力による風成循環と海水の密度差を駆動力とする熱塩循環 (Thermohaline Circulation) から構成されている。大西洋では、赤道域の暖かい海水がメキシコ湾流となって高緯度地方に移動し、北ヨーロッパの気候を緩和するとともに、グリーンランド周辺で冷やされて海水を形成したり、あるいは海水から放出される高塩分を含んだ重い海水となって沈降し、深層水となって逆方向に流れて南半球に至るといった大規模な熱塩循環 (overturning と呼ばれる) が形成されている。温暖化して大量の陸水の融解水が北大西洋に流入すると、密度の薄い淡水が海面を覆い、その下の海水との対流を阻害し、海水の沈降が生じにくくなる。有名な Broecker 教授 (1985)¹⁰⁾ は、熱塩循環が弱まると、海流による熱の高緯度地方への輸送が弱まり、北ヨーロッパが寒冷化するという仮説を唱えている。これらは、急激な気候変化と呼ばれている。

ただし、将来の CO₂ 濃度の増加によって、熱塩循環がどう変化するかについては諸説ある。図-10 は、さまざまな大気中 CO₂ 濃度増加シナリオに対して、簡単なモデルによる北大西洋の熱塩循環 (overturning) の流量 (Sv=10⁶ m³/s) を予測した結果である

(Stocker and Schmittner, 1997)¹¹⁾。この試算では、大気中 CO₂ 濃度を年率 2% で急激に増加して 650 ppmv で安定化させるケース、年率 1% で比較的ゆっくりと濃度を増加させ 750 ppmv で安定化させるケースでは、いずれも熱塩循環が停止し、不可逆な現象が生ずることを示している。また、日本海は、「太平洋の 1% にも満たない海域であるが、そこには海洋大循環に相当する流れが存在し、地球上稀有な海洋 (竹松, 1994)¹²⁾ であるため、同じような不可逆な現象の発生が懸念されている。しかしながら、冷戦時代の影響で観測データが少なく、流れの構造は良くわかっていない。

電中研では、米国大気研究センター NCAR の大気・海洋結合モデル (CSM 1.0) を用いて、年率 1% の増加率で連続 115 年間の全球温暖化予測計算を行った (丸山他, 1997)⁹⁾。このモデルは、前出の図-1 に用いられたモデルの原型で、約 45 万行のプログラムコードからなり、高速の並列スーパーコンピュータ (NEC SX-4/32 CPU, ピーク性能 64 Gflops) でも 100 年間の予測に約 6.5 日かかる (詳細は、丸山他, 1997 参照)⁹⁾。また、このモデルは、いわゆる計算誤差調整 (フラックス調整) を行っていないモデルで、かつ一般に公開されており、その意味において信頼性・透明性の高いモデルである。この計算では、110 年後に 1991 年時点の濃度 (355 ppmv) の約 3 倍 (1065 ppmv) の濃度に達する。その結果によると、確かに北大西洋の熱塩循環が弱まる傾向が予測できたが、停止するまでにはいたらなかった。しかし、図-10 の試算では 200 年以上もの長期計算を行っているため、Stocker and Schmittner (1997) の仮説を大気・海洋結合モデルで確認することは現状の計算能力では難しい。



現在の標準的な大気・海洋結合モデルを構成する海洋モデルの水平空間解像度は2度×2度（約200 km×約200 km）程度であり、日本周辺の海洋環境の再現には不十分である。地域海洋モデル2/3度×2/3度（約60 km×約60 km）にすると、日本海で対馬暖流が2つに分かれる現象（沿岸分枝流，東韓暖流）を再現できるが、漂流ブイの観測結果と比較すると、黒潮が北上しすぎる問題（オーバーシュート）が依然として残されていることがわかる。

図-11 海洋モデルの水平空間解像度と海流の再現性（坪野他，2001）

(2) 何がわかったのか

一方、この大気・海洋結合モデルを構成する全球海洋モデルの解像度は、水平方向2度×2度（約200 km×約200 km）、鉛直方向45層であり、現在の結合モデルの中でもっとも解像度の高いモデルである。しかし、その解像度であっても朝鮮半島を正確に表現できないなどの問題があり、日本周辺の海洋環境を把握するには不十分である。そこで、図-11に示すように、全球海洋モデル（約200 km×約200 km）に高解像度の地域海洋モデル（2/3度×2/3度＝約60 km×約60 km）を接続して、日本周辺の海洋環境変化を詳細に予測する手法を開発した（坪野他，2001）¹³⁾。この地域海洋モデルによれば、海流を現実的に再現することが可能であり、日本海で対馬暖流が2つに分かれ山陰海岸にそった沿岸分枝流と韓国の東海岸にそった東韓暖流に分かれる現象を再現できる。しかし、漂流ブイの観測結果と比較すると、黒潮が北上しすぎる問題（オーバーシュート）が解決されていないことがわかる。黒潮やメキシコ湾流などの西岸境界流の離岸現象を正確に再現するには、約1/6度（約15 km）～1/10度（約10 km）まで水平空間解像度を向上しないと問題を解決できないといわれており、高速のスーパーコンピュータへの期待が大きい。

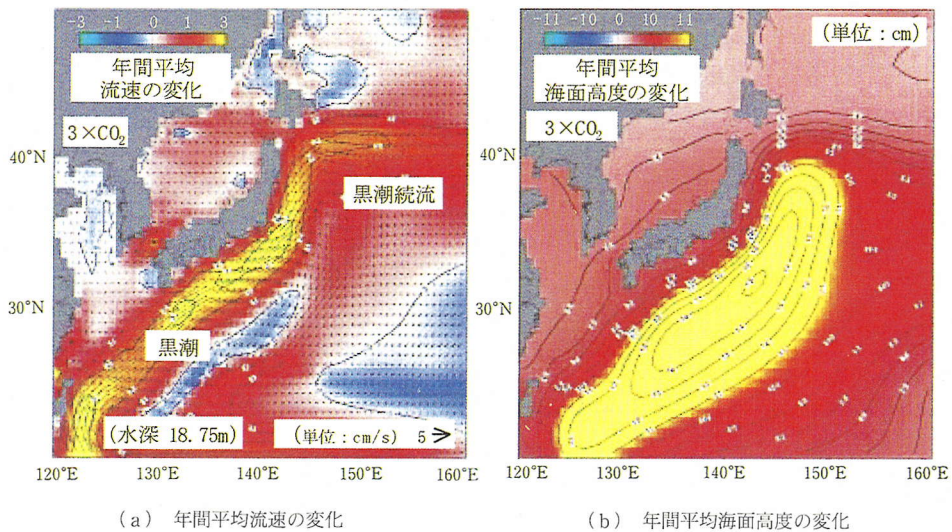
そうした現状モデルの限界を念頭に置きつつ、図-12は、前述の115年間の温暖化予測計算において、CO₂濃度が3倍（3×CO₂）になった前後10年間の結果を境界条件として、地域海洋モデルにより日本周辺の海洋環境変化を予測した結果である（仲敷他，2001）¹⁴⁾。同図（a）は、海流の変化を示しており、

3×CO₂時では、黒潮や対馬暖流等が強化され、高緯度地域まで北上することがわかる。同図（b）は、力学的海面高度（水位）の変化を示す。温暖化による黒潮の強化にともない、日本の太平洋側で水位が上昇する。したがって、日本周辺では、通常の上昇分（海水熱膨張、氷河の融解、グリーンランド・南極の氷床の融解等）に海面力学高度による海面上昇（約10 cm）を加算する必要がある。ただし、数値自体は解像度に依存するので、今回の予測結果は参考程度と考えるべきであろう。また、この地域海洋モデルでは海水のダイナミクスを考慮していないので、日本海の熱塩循環が停止するかどうかの問題は検討できなかった。これらは、今後の重要な課題の一つである。

6. 日本周辺の台風変化予測

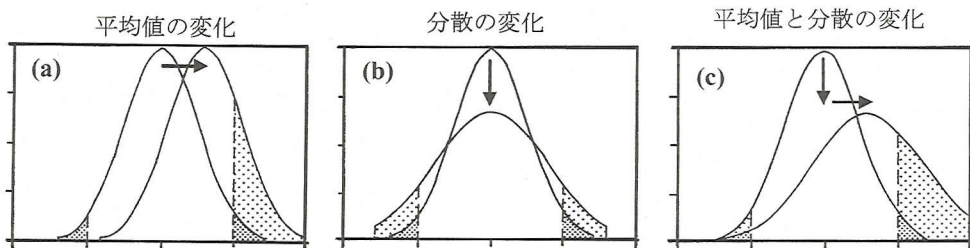
(1) 何が問題なのか

温暖化によって、台風が増加しても逆に減少しても、災害や水資源の面で我が国に大きな影響を及ぼすことが懸念される。IPCCのとりまとめた前出の表-2においては、台風の最大風速、平均雨量、最大雨量などの変化については、一部の地域で可能性大（likely over some areas）と評価されている。しかし、同要約版SPMの中では、「世界の研究機関の予測結果は様々であり、共通認識は得られていない」とも述べている。これは、温暖化による平均的な気温上昇や降水量変化に比べて、豪雨や早魃、熱波、台風等の異常気候（extreme climate）の予測が難しいためである。



大気中 CO_2 濃度が3倍になったときの年間平均値の変化量を示す (温暖化時-現状). (a)は海流の変化を示しており, CO_2 が増加すると, 黒潮や対馬暖流等が強化されることがわかる. (b)は力学的海面高度の変化を示す. 黒潮の強化にともない, 日本の太平洋側で水位が上昇する. したがって, 日本周辺では, 通常海面上昇分 (海水熱膨脹, 氷床の融解等) に海面力学高度による海面上昇を加算する必要がある.

図-12 温暖化時 ($3 \times \text{CO}_2$) の海洋環境の変化 (仲敷他, 2001)



各図は, 気候データの統計分布を模式的に示している. (a)は平均値 (mean) が変化する場合, (b)は分散 (variance) が変化する場合, (c)は平均値と分散が同時に変化する場合である. いずれの場合も影をつけた右側の部分 (異常気候) が増加するが, (c)の場合はその頻度が大幅に増加することが分かる.

図-13 異常気候の変化についての3種類のパターン分類 (Meehl et al., 2000)

異常気象 (extreme weather) と異常気候の違いはあまりはっきりしていない. ある期間の平均的な気象状態を意味する気候 (climate) のうちの異常な事象 (extreme event) を指すようで, 最近では IPCC 等でもよく使用されている.

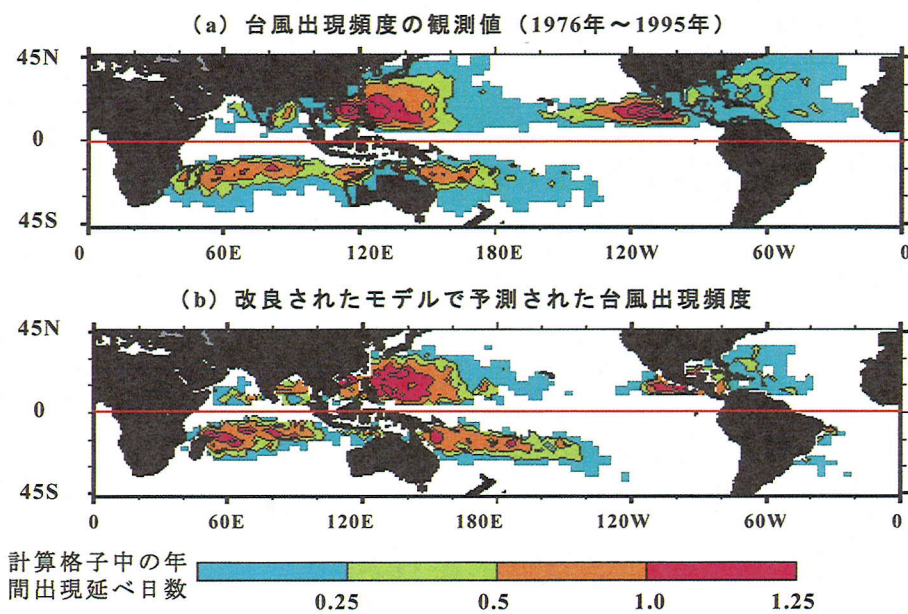
図-13は, 異常気候の変化を3種類のパターンに分類した模式図である (Meehl et al., 2000)¹⁵⁾. 同図 (a) のように, 気候の平均値 (mean) が変化する場合, (b) のように分散 (variance) が変化する場合, (c) は平均と分散が同時に変化する場合を示している. いずれの場合も影をつけた右半分 (異常気候) が増加する. 特に, (c) の場合に異常気候の頻度の増加が著しい. つまり, 気温や降水量の平均値の変化だけでなく, その分散が温暖化によってどう変化するか

問題である. しかし, 現在の気候であっても年々変動や10年変動などの長期の変動があり, 自然変動 (natural variability) 自体が正確にわかっているとはいいがたく, これが温暖化による異常気候の変化を予測することを難しくしている一因である.

なお, 日本で観測された過去の異常気象については, 気象庁編の異常気象レポート '94¹⁶⁾, '99¹⁷⁾ に詳しく, 米国気象学会誌の2000年3月号には米国の異常気象・気候や保険損害額の推移などに関する興味ある論文が発表されている (参考文献18), 19), 20), 21) 参照).

(2) 何がわかったのか

電中研では, 温暖化によって台風が変化すると, 電



NCARの全球大気モデル (CCM 3) をベースとして、積雲対流スキームを改良し、限界相対湿度 RHc を導入した。この改良により、観測値と再現値は、カリブ海、東太平洋、インド洋に多少の相違があるが、それ以外では比較的良く一致するようになった。

図-14 台風出現頻度の20年間の観測値 (1976～1995年) と改良した全球大気モデルの再現値の比較 (筒井他, 2001)

力施設等への様々な影響が懸念されることから、約10年前より米国のNCARと共同研究を実施してきた。これまでに、①温暖化によっても台風発生数はほとんど変化しないこと、②日本周辺では台風強度が増加する可能性があること、等の予測結果を報告している (筒井他, 1997)²²⁾。しかしながら、台風はむしろ減少するなどの結果も報告されており、これが前述のIPCCの評価となっている原因である。

原因の一つは、予測に使用されている大気モデル中の雲の扱い方にある。最近の研究によると、雲の計算法と台風発生数との興味ある関係がわかってきた (筒井他, 2001)²³⁾。図-14はその成果の一部である。NCARの全球大気モデル (CCM 3) をベースとして、熱帯域に特徴的な雲 (積雲対流過程) の計算方法を改良したモデルによる台風出現頻度の計算値と、20年間の観測値 (1976～1995年) を比較した結果である。ただし、台風出現頻度とは、大気モデルの水平計算格子 (約300 km×約300 km) 内に出現した台風の日数 (年間出現延べ日数) を意味する。両者を比較すると、カリブ海、インド洋に多少の違いがあるが、両者は良く一致していることがわかる。

さらに、図-15は、台風の出現頻度を東西方向に地球を一周して合計し、観測値と比べた結果で、縦軸は台風出現の年間延べ日数、横軸は緯度である。観測値には、赤道付近で台風が発生しないこと、南北両半球

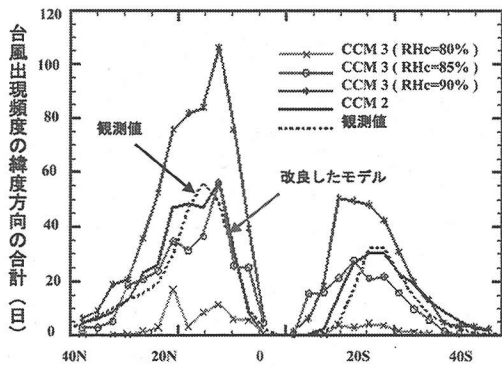
とも緯度20°前後において台風発生数がピークを示すこと等の特徴が読み取れる。一方、計算された台風出現頻度は、予測モデル (CCM 3) のパラメータ RHc (限界相対湿度) に極めて敏感であること、その値を適切に調整 (RHc=85%) すれば、予測モデルにより観測値を良く再現できることがわかった。しかし、反面、大気モデルの全球平均放射エネルギー収支のバランスが若干崩れてしまっており、その改善を検討中である。またあわせて、全球大気モデルを並列計算技術の導入によって高解像度化することも実施中であり (吉田他, 2000)²⁴⁾、信頼性の高い予測が今後の重要な課題である。

7. 地球温暖化問題への我が国の貢献

以上述べてきた点を踏まえ、地球温暖化問題の解決に向け、我が国にはどのような貢献が期待されるのか、あるいは土木技術者・研究者にはどのような貢献が期待されるのかといった観点から、次に3つの問題を提起してみたい。

(1) エネルギー研究開発の推進

CO₂排出量を削減するには、燃料電池などの将来のエネルギー技術が大きな役割を果たすことは確かであ



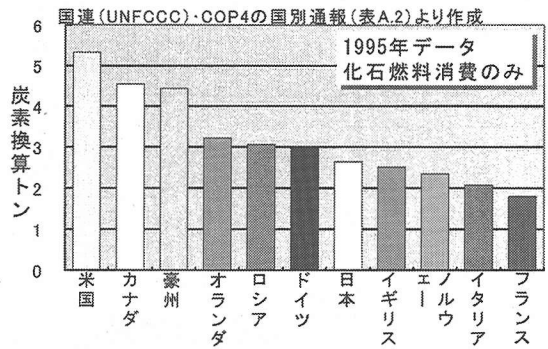
観測値では赤道付近では台風は発生しないこと、南北両半球とも緯度20度付近に出現頻度のピークがあることがわかる。全球大気モデル (CCM 3) の限界相対湿度 RHc=85% とすると、観測値と良く一致することがわかった。なお、オリジナルの大気モデル (CCM 3) では、台風は全く発生しなかった。

図-15 台風出現頻度の観測値と改良した大気モデルによる再現値の比較 (筒井他, 2001)

る。さらに、途上国へのスムーズな技術移転が行われれば、途上国において経済発展と CO₂ 削減を同時に達成することが期待できる。しかし、世界のエネルギー技術開発の動向はけっして明るいものではない。

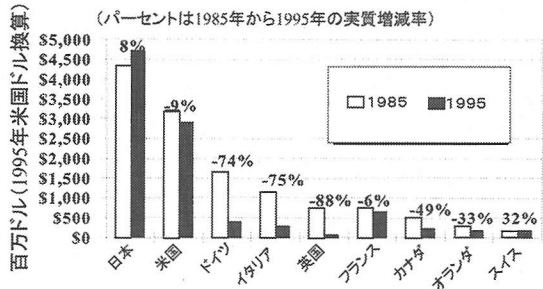
まず、図-16 は、化石燃料消費による先進国の一人当たりの CO₂ 排出量を示したもので、国連の国別通報²⁵⁾より作成したものである。ただし、セメント製造や森林破壊による CO₂ 発生量はカウントしていない。図によると、日本の一人当たり排出量は特に少ないわけではないが、米国は日本の約2倍も排出していることがわかる。また、EU 諸国も原子力比率の高いフランスを除き、いずれも一人毎年2トン以上の炭素を排出していることになる。

一方、図-17 は、OECD 諸国のエネルギー研究開発費について、1985年から1995年の推移を示したものである。この9カ国で先進国全体のエネルギー研究開発費の96%を占める。ただし、これらは公共部門 (Public Sector) の研究費で、国家および連邦レベルの研究費の合計であり、地方自治体や州レベルの研究費は含まない。エネルギー研究開発の内訳は、省エネ、化石燃料、再生可能エネルギー、原子力、発電・エネルギー貯蔵等である。日本は1985年以来、世界一のエネルギー研究開発投資国で、しかも1995年まで投資を増やし続けた世界でほぼ唯一 (スイスを除く) の国である。それ以外では、米国をはじめ全ての諸国が研究開発費を削減しており、特に EU 諸国でその程度が著しい。EU 諸国は、地球温暖化問題への関心が高いが、その一方でエネルギー研究開発費を急激に削減しているのは電力自由化の影響とは言え意外で



化石燃料消費による CO₂ 排出量を示す。ただし、セメント製造や森林破壊による CO₂ 排出等はカウントしていない。日本の排出量は特に少ないわけではない。米国は日本のほぼ2倍排出している。EU 諸国では、原子力比率の高いフランスが最小であるが、それ以外ではいずれも一人当たり毎年2トン以上の炭素を排出している。

図-16 先進国の一人当たり CO₂ 排出量の比較 (1995年)



出典：米国 DOE/PNNL

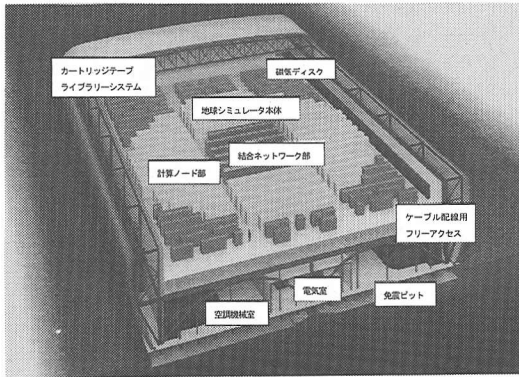
上記の9カ国で先進国全体のエネルギー研究開発費の96%を占める。日本、米国を除く EU 諸国はいずれも著しく研究開発費が減少していることがわかる。これらは公共部門 (Public sector) の研究費で、国家および連邦レベルの研究費の合計であり、地方自治体や州レベルの研究費は含まない。

図-17 OECD 諸国のエネルギー研究開発費の変化 (1985~1995年)

ある。他方、ブッシュ政権の温暖化問題対応計画では、CO₂ 排出を削減するため技術開発の推進を主張している点にも注目しておく必要がある。いずれにしても、CO₂ 排出量の少ない優れたエネルギー技術開発に向け、日本をはじめ先進国の努力を期待したいところである。

(2) 気候変化の科学研究の推進

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依然としてはっきりしていない。前出の図-2 に示し



(出典：地球シミュレータ研究開発センター)
(<http://www.gaia.jaeri.go.jp/>)

このスーパーコンピュータは、640 ノード×8 CPU の合計 5120 台の CPU を有する。ピーク性能≒40 Tflops (5120×8 Gflops) で、世界最高速の並列ベクトル計算機で、2002 年 2 月に横浜の研究施設に完成する。

図-18 地球シミュレータ (GS 40) 配置図

たように、550 ppm で濃度を安定化することは相当困難といわざるを得ない。がしかし、それより濃度レベルが高ければ高いほど目標達成は容易になるし、現実的な削減対策を検討することもそれに備えて行動することも可能になる。そのためには、さまざまな濃度安定化レベルに対して、熱塩循環の停止などの非可逆過程が発生しないかどうか、台風等の異常気候はどの程度差があるのかないか等に関する信頼性の高い科学的な予測が不可欠である。残念ながら、現在の予測の科学ではそれに十分に答えることができない。

ブッシュ政権の温暖化問題対応計画では、米国の気候変化の科学研究費は毎年約 2 000 億円で世界全体の半分以上を占めること、日本および EU 諸国の 15 カ国合計研究費を上回ることを指摘している。そのため、先進国には、その CO₂ 排出量に見合うだけの研究費を支出することを提案しているが、正論であると思う。日本では、科学技術庁（現在は文部科学省）が、地球温暖化の科学に関する地球フロンティア研究システムを発足させた。また、図-18 に示したように、同省のプロジェクトにより、2002 年 2 月には従来のスーパーコンピュータの 1000 倍高速で世界最高速のスーパーコンピュータ“地球シミュレータ GS 40”が完成し稼働を始める予定である。しかしながら、一方で、科学研究に携わる国立・民間の研究者数は定員削減や景気低迷の影響もあって伸び悩んでおり、大学新卒者の新規採用もほとんど期待できない状況である。この状況を打破するため、土木工学や他の工学分野から気候変化の研究に挑戦する人が多数現わ

れることを期待したいものである。

(3) 持続可能な発展と社会資本整備

温暖化問題が一国だけの環境問題であるならば、CO₂ 排出削減にかかるコストと、気候変化による損害コストあるいはその未然防止のための対策コストを比較することによって、最適なコスト妥協点を見出すということは可能であろう。しかし、温暖化問題では、影響を最も受けやすい国は乾燥国あるいは半乾燥国ではないか、ということが最近かなりはっきりしてきたことも確かである (IPCC の脆弱性 (vulnerability) 特別報告書参照)¹⁾。しかもこれらの諸国は、必ずしも CO₂ 排出量の多い国とは限らない。また、気候変化の影響を受けるのは現世代の人々と限らず、後世の人々である可能性もあり、問題解決を一層難しくしている。このような問題はこれまででも数多く議論され、また参考になる書物^{26), 27)}も数多く出版されているので、これ以上は触れないことにする。

地球温暖化問題の解決には、経済発展と環境との調和を目指す【持続可能な発展 (sustainable development)】という理念がよく使用されている。これは、1987 年のブルントランド国連委員会以来、継続して使用されてきた有名な理念であるが、次のような新しい定義にも注目したい。すなわち、持続可能な発展とは、【将来の世代の要求を阻害することなく、現在の世代の要求をできるだけ公正に満たせるように、社会資本を形成することによって、人々の能力と選択の幅を拡大すること (Banuri et al., 1994)²⁸⁾】である。IPCC のワトソン議長によれば、いずれにしろ気候変化は不可避である (COP 6, 2000.11)²⁹⁾。どうすれば、持続可能な発展に合致した社会資本整備ができるのか、真剣な議論をするべき時期にきたのではなかろうか。

8. おわりに

ブッシュ政権の京都議定書の批准反対という重大な局面にあたって、その反対根拠を 4 章で科学的に考察してみた。地球温暖化問題とは、4 章で考察したように、長期的な視点からは、途上国の今後の発展のあり方の問題といってよい。それらの諸国が経済発展を達成しながら CO₂ を削減する方法を探し出す必要がある。世界が平和であれば、安全性に優れた原子力発電は、そのような両面の要求を満足する方法の一つであろう。また、5 章、6 章では、温暖化時の日本周辺の海洋環境変化、台風変化の最新の予測結果を紹介し、依然として予測には大きな不確実性があることを紹介

した。7章で述べたように、我が国は、ブッシュ政権に指摘されるまでもなく、これまでもエネルギー研究開発や気候変化の科学研究への投資を着実に増やしてきた世界で唯一の国である。本論文が、今後温暖化防止のためのさまざまな分野において活躍される方の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) IPCC のホームページ (<http://www.ipcc.ch/>)
- 2) 米国科学アカデミーの報告: Prepublication Copy: Climate Change Science-An Analysis of some key questions (<http://books.nap.edu/html/climatechange/climatechange.pdf> 参照)
- 3) 米国ブッシュ政権の温暖化対応策: Current U.S. Actions to Addressing Climate Change (<http://www.whitehouse.gov/news/releases/2001/06/climatechange.pdf> 参照)
- 4) NCAR/ACACIA プロジェクト (<http://www.cgd.ucar.edu/cas/ACACIA> 参照)
- 5) 丸山, Smith, 西宮: CO₂ 排出削減による濃度安定化効果の検討, 電中研調査報告 U 99043, 2000. 5.
- 6) 丸山, 平口, 筒井, 仲敷, 門倉, 角湯: 大気・海洋結合 (NCAR・CSM) による全球温暖化予測, 電中研研究報告 U 97034, 1997. 10.
- 7) Wigley, T. M. L., Richels, R. and Edmond, J. A.: Economic and environmental choices in the stabilization of atmospheric CO₂ concentrations, *Nature*, Vol. 379, 18 January, 240-242, 1996.
- 8) 地球再生計画の実施計画の作成に関する調査事業, 平成 8 年度調査報告書, NEDO-GET-9623, 新エネルギー産業技術機構 (NEDO), (財)地球環境産業技術研究機構 (RITE), 1997 年 3 月.
- 9) Wigley, T. M. L.: Balancing the carbon budget: Implications for projections of future carbon dioxide concentration changes, *Tellus*, 45 B, 409-425, 1993.
- 10) Broecker, W. S., Peteet, D. M. and Rind, D.: Does the ocean-atmosphere system have more than one stable operation?, *Nature* 315, 21-25, 1985.
- 11) Stocker, T. F. and Schmittner, A.: Influence of CO₂ emission rates on the stability of the thermohaline circulation, *Nature* 388, 862-865, 1997.
- 12) 竹松正樹: CREAMS 計画と日本研究, 月間海洋, 26-12, 747-748, 1994.
- 13) 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, 電中研研究報告 U 00057, 2001, 4.
- 14) 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-地域海洋モデルの適用-, 電中研研究報告 U 00058, 2001, 4.
- 15) Gerald A. Meehl, Thomas Karl, David R. Easterling, Stanley Changnon, Roger Pielke Jr., David Changnon, Jenni Evans, Pavel Ya. Groisman, Thomas R. Knutson, Kenneth E. Kunkel, Linda O. Mearns, Camille Parmesan, Roger Pulwarty, Terry Root, Richard T. Sylvester, Peter Whetton, Francis Zwiers: An Introduction to Trends in Extreme Weather and Climate Events: Observations, Socioeconomic Impacts, Terrestrial Ecological Impacts, and Model Projections, *BAMS*, Vol. 81, No. 3, pp. 413-416, March 2000.
- 16) 気象庁編: 「異常気象レポート, '94-近年における世界の異常気象と気候変動, 444 p., 1994 年 3 月.
- 17) 気象庁編: 「異常気象レポート, '99-近年における世界の異常気象と気候変動 (各論)」, 341 p., 1999 年 9 月.
- 18) Easterling, D. R., Evans, J. L., Groisman, P. Ya., Karl, T. R., Kunkel, K. E. and Ambenje, P.: Observed Variability and Trends in Extreme Climate Events: A Brief Review*, *BAMS*, Vol. 81, No. 3, pp. 417-426, March 2000.
- 19) Gerald A. Meehl, Francis Zwiers, Jenni Evans, Thomas Knutson, Linda Mearns, Peter Whetton: Trends in Extreme Weather and Climate Events: Issues Related to Modeling Extremes in Projections of Future Climate Change*, *BAMS*, Vol. 81, No. 3, pp. 427-436 March 2000.
- 20) Stanley A. Changnon, Roger A. Pielke Jr., David Changnon, Richard T. Sylvester, Roger Pulwarty: Human Factors Explain the Increased Losses from Weather and Climate Extremes*. *BAMS*, Vol. 81, No. 3, pp. 437-442, March 2000.
- 21) Camille Parmesan, Terry L. Root, Michael R. Willig: Impacts of Extreme Weather and Climate on Terrestrial Biota*, *BAMS*, Vol. 81, No. 3, pp. 443-450, March 2000.
- 22) 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 (T 42 CCM 2) による数値実験-, 電中研研究報告 U 99014, 1999, 10.
- 23) 筒井, 笠原, 丸山: NCAR CCM 3 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-, 電中研研究報告 U 00049, 2001, 3.
- 24) 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 2) -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 U 00017, 2000. 11.
- 25) 気候変化枠組み条約会議 (UNFCCC) ホームページ (<http://www.unfccc.de/>)
- 26) 地球問題研究会編: トリレンマへの挑戦-人類, いま選択のとき-, 毎日新聞社, 1993. 3, 5.
- 27) 電力中央研究所編: どうなる地球環境-温暖化問題の未来-, トリレンマ問題群, 電力中央研究所編, 依田直監修, 電力新報社, 1998, 9, 7.
- 28) Banuri, R., Hyden, G., Jume, C. and Mivera: Sustainable human development: from concept to operation: a guide for the practitioner. United National Development Programme, New York, 1994.
- 29) Presentation of Robert T. Watson, Chair Intergovernmental Panel on Climate Change, at the Sixth Conference of Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change, November 13, 2000.

(2001.7.7 受付)