



# 地球環境研究センター ニュース

*Center for Global Environmental Research*

&lt;通巻第104号&gt;

Vol. 10 No. 4

## ■ 目次 ■ ● スーパーコンピュータを必要とする「簡単」な計算

北海道大学大学院理学研究科

教授 林 祥介

## ● 地球温暖化対策立案のための政策分析ツールの開発

地球環境研究グループ温暖化影響・対策研究チーム

総合研究官 甲斐沼美紀子

## ● お知らせ

「植物による環境評価」講演会

## スーパーコンピュータを必要とする「簡単」な計算

北海道大学大学院理学研究科

教授 林 祥介

### 1. どこでもシミュレーション？

大規模汎用計算機がスーパーコンピュータと言われるようになってから十数年、流体運動の係わるいろいろな領域で、数値計算手法を用いることは当たり前になってしまった感がある。映画やアニメ、ゲームソフトにおいても流れ場を直接計算してコンピュータグラフィックスするようになりつつあるらしい。もはや、「計算すれば何でも解決ね」という雰囲気が世間に満ち溢れているような気がするのだがどうだろうか？気象・海洋の記述においても、「計算すれば何でも解決ね」の状況に至っていると捉える向きがあるようである。

実際はどうかというと、答え合わせを行ないながらおっかなびっくりやっている、というのが本当のところではないだろうか。気象・海洋系は、本来、自由度が大きすぎてスーパーコンピュータといえどもその容量におさめることのできないような代物である。地表面の状況や生態系活動など、物理的基礎法則だけでは表現しにくいプロセスは当然として、放射過程や流体運動という基礎方程式のしっかりしている物理プロセスにおいてさえ、自由度はすでに十分に大きく、物理学の基礎方程式から出発する直接的な数値計算は困難である。シミュレーションモデルと称している数値モデルは、膨大な自由度の中から計算するべきプロセスを経験（理論や実験や観測）により抽出定式化し、それを組み合わせて計算可能な大きさ（つまりコンピュータの主記憶装置=メモリに乗る大きさ）のシステムに再構成したものに過ぎない。どのようなプロセスが抽出可能なのか、あるいは、抽出すべきなのかは先見的にはわからないし、再構成されたシステムが計算可能かどうかも自明でない。

(次頁へ)

環境庁 国立環境研究所 地球環境研究センター

1999年7月

Homepage: <http://www.nies.go.jp><http://www-cger.nies.go.jp>

## 2. 地球流体力学

気象・海洋なんていう巨大なシステムを持ち出さなくても、単なる流体系の数値計算はすでに十分に厄介である。原因は乱流というものにある。コーヒーに注いだクリームの動きやタバコの煙の動きから推察される通り、流体の運動は一般に乱れている。そのような動きを乱流という。コップの中のコーヒーの運動を数値的に表現するためには、クリームで可視化されるような細かい渦を表現しなければいけないから1mm程度、あるいはもっと細かい間隔で格子点を切り刻んでやる必要がある。したがって、10cm立方程度のサイズの容器の水をちょっととかき混ぜたような流れを計算しようとすると、 $100 \times 100 \times 100$ の格子点が必要になる。一つの数字を表現するのに通常10バイト程度のメモリの大きさを使うので、これだけで10メガバイトの記憶容量が必要となる。

いわゆる汎用大型計算機がスーパーコンピュータと言われるようになったのは、まさにこの程度のサイズの計算が何とか根性ができるようになった時(1980年代)に他ならない。コップの水の計算はできるが金魚鉢は無理、というのがスーパーコンピュータの実体であったのだ。ちなみに、現在の汎用並列計算機をもってしても、流体力学の基礎方程式を直接数値積分して風呂を沸かすシミュレーションを行なうこと( $1000 \times 1000 \times 1000$ の計算)はかなり根性のいるわざである。乱流というものは、かくも悩ましいものなのである。

気象庁の最初の天気予報用全球大気モデルは、1980年代中盤にとりあえず完成の域に達したが、その分解能は $128 \times 64 \times 12$ (経度方向×緯度方向×高さ方向の格子点の数)であった。コップの水だろうが大気だろうが、計算機の主記憶の大きさが制限となって計算サイズが決まってしまうので、自動的にこの程

度の分解能になる。こんなもの(金魚鉢も計算できないようなもの)でもってなぜ全球予報モデルが構築できたかと言うと、細かい乱流の存在とはあまり係わらない大きなスケールの構造が別途存在していたからである。それは、天気図でなれ親しまれている高気圧低気圧とよばれる構造であった。 $128 \times 64 \times 12$ は低気圧高気圧の運動が、それなりに表現できる分解能であったのである。

気象や海洋などの大規模な流れの場に内在する構造を見出す分野を、気象力学あるいは海洋物理学という。系の回転や密度変化が主役となる流体運動の構造を調べる学問領域をさらに一般に地球流体力学という(例、木村1983)。地球流体力学では、①解析がたやすい簡略化された方程式系を導出して解の振舞を調べる、②そのような方程式系の時間発展を数値積分により調べる、③実験室の流体による実験(例、酒井 1997)でデモンストレーションする、等の手法により、流れの場を支配する力学的構造を切りだし、その方程式の解の振舞からひるがえって流れ場の構造を語る、ということを行なって来た。例えば、ロスビー波は大気や海洋の運動を語る上での基本的な地球流体力学的概念となっている。ロスビー波は地球の自転の効果により生じる波動で、高気圧低気圧として知られる現象もロスビー波の相互作用による不安定現象(傾圧不安定波)として理解される。大気海洋の循環に内在されるこのような構造を掌握していくことにより、その数値計算を実現するまでのシステム設計指針(何を表現すべきか)が与えられてきたわけである。

## 3. 地球流体力学とスーパーコンピュータ

地球流体力学は、伝統的には数式の力でもって現象に切り込むことを旨としていたわけなのだが、解析的に扱える範囲は所詮は線形

現象<sup>1)</sup>、あるいはそこから少しずれた弱非線形領域の現象<sup>2)</sup>に過ぎない。また、線形現象と言えども球面上の現象にいたっては紙と鉛筆で扱うことは困難である。計算機がポピュラーになるにつれ、天気予報などのいわゆるシミュレーションを直接目指すのではない、地球流体力学的な理解のための計算にも数値計算が多用されるようになった。

簡略化されたとは言え流体力学の方程式は連続体の式であり、3次元現象を扱うのであれば必要とする計算機の主記憶と速度は、フルシミュレータ<sup>3)</sup>のそれと同じになってしまふことに注意されたい。あるいは、フルシミュレータでは犠牲にせざるを得なかつた分解能を、他のプロセスを削ることによって確保しようとするので結局計算機の最大能力を使い切ることになる。

かくして、線形波動理論<sup>4)</sup>の範疇でよく理解されていたはずのロスビー波が、実際に球面上をどう伝搬するかという問題について、本格的かつ結果が簡略な形になるまで調べられた(大円に沿って伝搬するということが認識された)のは、1970年代終りから1980年代にかけてである。現在でも球面上の3次元的なロスビー波伝搬はまだ良好く調べられていない。空間を2次元に限ったシステムを用いても、ロスビー波からの乱流散逸構造<sup>5)</sup>を探求するための計算は、文字通り計算機の限界に挑戦する計算となってしまう。まして、3次元回転成層流体<sup>6)</sup>の乱流散逸構造を探求する試みは昨今ようやくはじまったばかりというところである。

#### 4. 「水惑星」実験

現実的な世界を再現するためのシミュレーションが高度かつ複雑になっていくほど、それを支える地球流体力学的考察、あるいは、理解と基礎技術構築のための数値計算

の担うべき領域が広くなっていく。従来なら「シミュレーション」の域にあった数値モデルも、基礎的考察の道具として利用されねばならないことになるわけである。

そのような考察のひとつに「水惑星」モデル(Hayashi and Sumi 1986)を用いた研究を挙げておきたい。水惑星とは地表面がすべて「海洋」(もっとも、簡単な「海洋」は単に海面水温を固定して与えるだけなので海洋という単語に値しないけれど)に覆われた仮想的な球面上に存在する湿潤大気のことである。そのような仮想的大気の特性を数値的に観測することにより、ひるがえって現実大気の振る舞いを記述する手がかりを得ようというわけである。水惑星実験シリーズは我々のグループのいわば伝統芸能とでも言うべきものになっていて、国立環境研究所・地球環境研究センターのスーパーコンピュータでもって続けさせていただいている。数値コードは、本質的にはHayashi and Sumi(1986)と同じもの、もとを正せば気象庁数値予報課の最初の全球天気予報モデルから端を発したものであり、現在、地球流体電腦俱楽部版AGCM5(Swamp Project, 1998)として公開されているものである。分解能は鉛直方向にちょっと増えただけの $128 \times 64 \times 16$ である。要は、初期の全球モデルと同じ設計なので、非常に単純な降水プロセス、放射プロセス、地表面プロセスしか含んでおらず、従って結果の解釈において複雑なプロセスの混在は考えなくて良い、という点がミソなのである。

この数年来試みてきた実験は、水惑星の赤道上におかれた局所的な高水温域が熱帶全域の降水分布に与える影響を探ること、である(Hosakaら 1998)。高水温域上では活発な降水活動、いわゆる対流中心、が発生する。我々の注目する降水分布はこの対流中心ではなく、対流中心の存在のもとに形成される熱帶

全域の降水分布である。熱帯全域での降水分布に与えるその場の境界条件の影響を極力抑えるために、高水温域以外の領域での海面水温分布は東西一様南北対称なものにする(図1)。現実大気においては、海大陸(Maritime Continent, 西太平洋インドネシア付近のこと)、アフリカ、アマゾンなどの複数の対流中心があり、それらの影響は全球規模で重なりあっている。ここではその1つだけを切り出した仮想的対流中心を作り、それによって生み出される熱帯全域での降水分布の非一様性を調べようというわけである。

実際に図1のような海面水温を与えて数値積分を実行した結果は、奇妙なものであった(図2)。海面水温分布は東西に対称であるのに、暖水域上に形成された対流中心の西側では降水が減少、東側で降水が増加したのである。強い対流域である対流中心の周囲(東西どちらも)では下降流が形成されて降水が抑圧されるはずである、という偏見を持っていた我々は混乱してしまったのである。地表面気圧分布の変化(図3)を眺めてみると、暖水域の東側では低気圧偏差が広がっているのに対し、西側では高気圧偏差が見られる。東側低気圧偏差の領域には、両半球から湿った空気が吹き込んで降水を活発化させているのに対し、西側高気圧偏差の領域には下降流が存在していて、上空から乾いた空気が降りて来て降水を抑圧していた。

降水分布の東西非対称性の発生の原因は、今のところ次のように想像されている。地球流体力学の知識によれば、赤道東側へ情報を伝えるのは赤道ケルビン波という。赤道ケルビン波は、地球の自転の効果によって、赤道が壁の役割を果たすため、赤道に平行な向きを持つ流れを伴う波動である。一方、西側へ情報を伝えるのは赤道ロスビー波とよばれる大気波動である。注意すべき特徴は、赤道ケ

ルビン波にともなって存在する低圧部はそのピークが赤道上にあるが、赤道ロスビー波にともなった低圧部のピークは、緯度で±10度付近にずれているという点である。赤道ケルビン波に対しては湿った空気は低圧部の赤道上に集まるが、赤道ロスビー波に対しては湿った空気は赤道から離れる傾向にあるわけである。赤道上東側では降水による潜熱の解放が進み、そのことがさらに赤道上の低気圧偏差を強め、さらなる水蒸気収束を生む。西側では赤道上で潜熱が解放されず、放射冷却の方が強くなっている結果として高気圧偏差が得られることになる、と考えられるのである。

数値モデルにおける降水は分解能の限界付近でおこっており、それ自身はあまり信用のできないものかも知れないが、さらに大きな力学的構造(波動)の存在により、計算された全体の構造は信頼できる(robust)ものとなっているようである。El Niño時にインドネシアからオーストラリアにかけての西太平洋領域に旱魃がおこることが知られているが、通常の理解では活発な対流活動が西に移動することによるため、とされている。しかし、そもそも西側海面水温が太平洋東側ほどは低くならないのになぜ顕著な旱魃が起こるのかに対しては、現在のところ説得力ある説明がなされているように思えない。少々理論的にジャンプしてみるならば、現実的な状況においても、水惑星実験で示されたような降水構造へのフィードバック傾向(西側の乾燥化)が働いているのではないだろうか、となるわけであるがどうだろう。

## 5. 應用計算機科学の振興が必要

並列計算機の登場は、我々のような地球流体力学的立場から自然現象にせまろうとするものに対しても、大きな福音になる可能性がある。先に述べたように、比較的少ないプロ

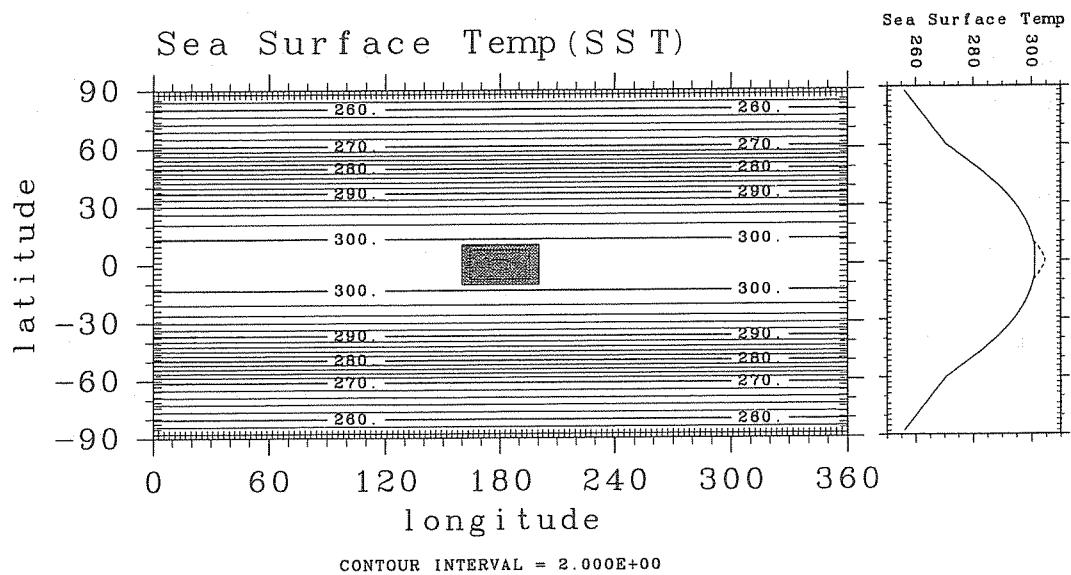


図1 仮想的 Sea Surface Temperature (海面水温)分布。  
影を施した領域が暖水域であり、その最大温度分布(経度180度での値)が  
右図破線で示されている。(Hosaka et al., 1998)

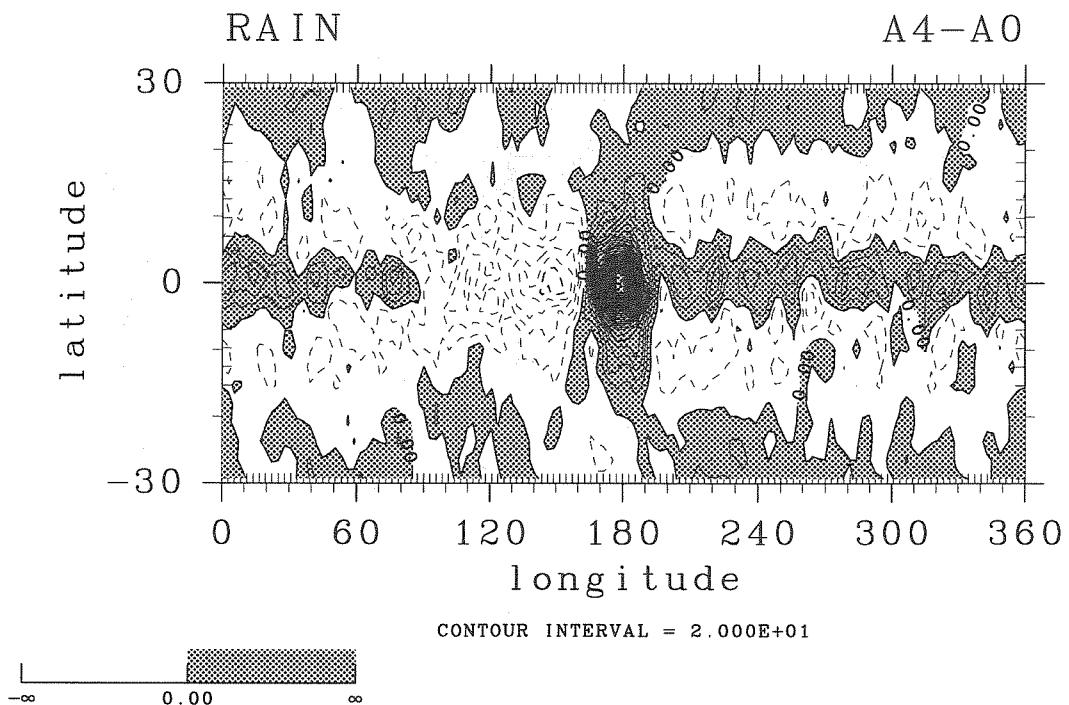


図2 暖水域を導入したことによる降水量の変化。700日間平均。網掛けした領域が降水の増えた領域である。単位は降水量を潜熱に換算してW/m<sup>2</sup>で示してある。  
等価線の幅は20W/m<sup>2</sup>。(Hosaka et al., 1998)

セスの単純な計算と言えども、あるいは単純な計算であるからこそ、高分解能で実験を行ない、未知の流体力学的構造を調べて行かなければならぬ。高分解能シミュレーションモデルを信用に足るものにするためには、その分解能で表現するべき力学的構造を明らかにしておかなければならぬからである。

構造探求者にとって並列計算機のもう一つの使い方は、アンサンブル実験<sup>7)</sup>である。降水分布で見られるような確率的な現象、あるいは、カオス的な<sup>8)</sup>振舞を示す可能性のある非線形現象などは、その振舞を統計的に掌握しなければならない。これまで、計算資源が足りなくて一回の初期値問題を解いて、「まあ、いいか。」と思っていた計算も、多数の実験を行なうことにより、たまたまそうだったので信頼すべきではないのか、おおむねいつもそうなので少々ずれていても安心なのか、を掌握できるわけである。並列計算機なら、異なる初期値からの実験を一挙に進める

ことができるはずだ。

現在、我々は上記水惑星暖水域問題について、その降水分布、地表面気圧分布がどのように形成されたのかを検証すべく、アンサンブル実験を行なっているところである。单一の実験の初期時間発展を眺めてみても、不規則に発生する降水活動に隠され、赤道ケルビン波や赤道ロスビー波の振舞として結果を記述することは、実は、困難であったのである。上記シナリオは過去の経験から想像したものに過ぎない。図2や図3に記した構造も長い時間平均により、ランダムに発生する降水の影響を取り除いたものだったのである。

スパコン時代、あるいは、並列計算機(多数のCPUを備えた計算機)時代、研究のボトルネックとなるものはソフトウェア開発力である。並列計算に適合したソフトウェアシステムを開発するにせよ、システムを開発せずにパラメタ空間で並列化した安直なしか大量な計算(異なる外部条件を与えた実験を、

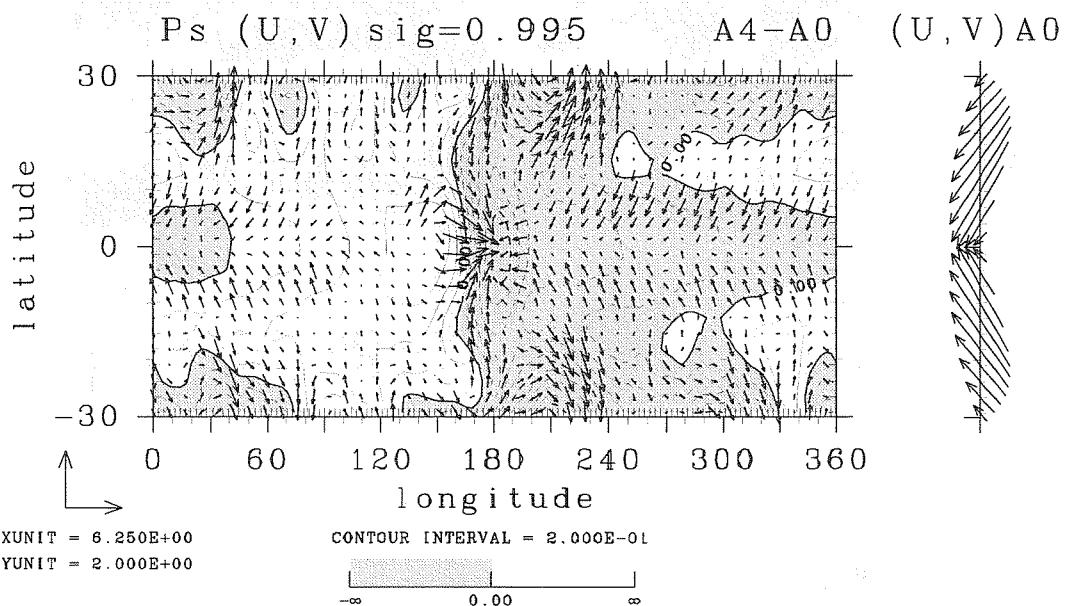


図3 暖水域を導入したことによる地表面気圧の変化(hPa)と地表風の変化(矢印 m/s).  
700日間平均. 網掛けした領域が気圧が下がった領域である. (Hosaka et al., 1998)

それぞれの条件に対して、1つのCPUを割り当てて同時に使う計算)を行なうにせよ、3次元流体計算の最大の問題点は結果をどのように加工し可視化するかにあるが、それは、見たいものに対する知識と、見せることができるようにするための技術との双方を兼ね備えている者でないと解決して行くことができない問題である。しかし、昨今、数値計算が当たり前になってしまった結果、もはや、世界を計算するソフトウェア群は完成されたもので、あとは計算機買って走らせるだけ、と思っている学生諸君(研究者も?)が非常に多くなっているように思われる。最近の計算機(というよりはパソコンかな)が得意で熱心(?)な学生から受ける質問は、「そのソフトウェアはどこから取って来たんですか?」、であったりする。Windowsの世界は彼ら多くにとって十分に完成されたものであって、新しいプログラムを開発しようなどという意欲(欲求不満)がなかなか起きないようなのであるらしい。昔はちょっとした理系の人間ならば、

自分でプログラムを組まなければ何もできなかつたわけであるが、今はプログラムを組むのはむしろ小数派である。大抵の仕事はユーティリティソフトウェアで完了することができる。さらに多くの人々にとっては計算機といえばメールとウェブのための道具だったりするのだから、プログラミングから離れる方向への影響を受けることはある一方、プログラミングをエンカレッジするのは容易ではない。かくしてせめて専門課程あるいは大学院課程での文化として、計算機科学の成果を応用していく(ことができる)若手を作ろうと試みているのだが(それが地球流体電腦俱楽部という秘密結社?である)、本業(伝統的理学)の片手間では遅々として進まない。子どもたちはあっという間にmade in USA software群に支配されてしまっているのが現状であり、もはや、ソフトはアメリカの誰かが作ってくれるもの、ということになってしまっているようなのである。

## 注

### 1)線形現象

入力が2倍になると応答も2倍になるような、にいう。

### 2)弱非線形領域の現象

原因と結果の比例関係が成り立たなくなるようなパラメタ(外部条件)の領域を非線形領域といふ。非線形性が弱くて原因と結果がかなり線形的関係に近いような状況を弱非線形領域の現象といふ。

### 3)フルシミュレータ

関与することが想定されるあらゆるプロセスを組み込んだシミュレーションモデル。

### 4)線形波動理論

流体力学の方程式など偏微分方程式の解の振舞を波として定式化する数学が波動理論であり、その波の中で線形的な振舞をする部分だけをとりだして議論する枠組を線形波動理論といふ。

### 5)乱流散逸構造

流れ場の運動エネルギーや熱などの消散は、乱流という形を経由した後、分子レベルでの混合に至って完結する。途中の乱れは一様に起こっているのではなくさまざまな渦の力学が関与している。その中間段階の力学的状況を総称して乱流散逸構造といふ。

### 6)3次元回転成層流体

大気や海洋など重力(浮力)と自転との影響を受ける流体のことを一般に回転成層流体、特に空間3次元性を強調する場合に3次元回転成層流体といふ。

### 7)アンサンブル実験

多数の初期値から時間積分を行って、多数の解を求める実験のこと。

### 8)カオス的な

初期値の微少な誤差によって、解が大きく異なるよう。

## 参考文献

- Hayashi, Y.-Y., Sumi, A., 1986: The 30–40 day oscillations simulated in an "aqua planet" model. *J. Met. Soc. Japan*, 64, 451–467.
- Hosaka, M., Ishiwatari, M., Takehiro, S., Nakajima, K., Hayashi, Y.-Y., 1998: Tropical precipitation patterns in response to a local warm SST area placed at the equator of an aqua planet. *J. Met. Soc. Japan*, 76, 289–305.
- 木村 竜治, 1983: 地球流体力学入門, 東京堂出版, 247pp.(いわゆる専門の入門書)
- 酒井敏 1997: 実験室の中の空と海, [http://www.gfd-dennou.org/library/gfd\\_exp/](http://www.gfd-dennou.org/library/gfd_exp/) 地球流体電腦俱楽部. (実験室での流体実験集. 知識が無くても楽しめるかも.)
- Swamp Project, 1998: AGCM5. <http://www.gfd-dennou.org/library/agcm5/> 地球流体電腦俱楽部.

# 地球温暖化対策立案のための政策分析ツールの開発

地球環境研究グループ温暖化影響・対策研究チーム

総合研究官 甲斐沼 美紀子

## 1. はじめに

当研究所では、温暖化対策立案のための政策分析ツールとして、アジア太平洋地域統合評価モデル(通称AIM)を京都大学と共同で開発している。AIMモデルは1990年に開発を始め、当初3~4年の間は当研究所森田恒幸博士(現環境経済室長)と京都大学の松岡謙教授を中心とした日本のメンバーで、モデルの基本部分の設計・開発を行なった。この時の基本方針は、政策分析に使えるもの、発展途上国において使えるものを開発することであった。温暖化対策モデル開発においては当然の要求ではあるが、なかなか難しい問題である。基本モデルを開発した時点で中国、インド、韓国、インドネシアの4ヶ国との共同研究を開始した。現在は、それぞれの国別モデルが稼動し、政策分析に利用されている。

具体的な温室効果ガスの削減を検討するには、家庭での電気製品や工場での生産設備などで、どの程度の二酸化炭素が排出されるか、また、省エネ機器を導入することにより、どれだけの二酸化炭素の排出量を抑えることができるか、を見積もある必要がある。このためのモデルはボトムアップ型のエンドユース(最終消費)モデルと呼ばれる。しかし、エンドユースモデルだけでは、対策の経

済影響を分析することは困難であり、トップダウン型の経済モデルが必要となる。AIMモデルではボトムアップ型のエンドユースモデルで選択されるエネルギー機器の組み合わせから、エネルギー効率を求め、トップダウン型の経済モデルから経済的影響を推計している。

AIMモデルには、温室効果ガスの排出量を推定するモデルだけでなく、気候変動による影響を推計するモデルも組み込まれており、温暖化による穀物生産への影響や動物媒介による感染症への影響なども推計している。AIMモデルの最近の成果については、AIMのホームページ(<http://www-cger.nies.go.jp/ipcc/aim>)に紹介されており、これまで世界中で提案された主な温室効果ガス推計シナリオや、IPCCの新しい将来シナリオなども掲載されている。

ここでは、1997年12月に合意された京都議定書の数値目標を達成するための、コストに関する計算結果について紹介する。

## 2. 京都議定書による削減シナリオ

地球温暖化問題の解決を目指して1997年に採択された京都議定書では、付属書I締約国(先進国とロシア、東欧諸国)に対して2008年

から2012年までの温室効果ガス排出量の数量目標が設定された。また、その目標達成の費用を緩和するために、排出量取引、付属書I締約国間の共同実施、クリーン開発メカニズム(CDM)の3つの制度が認められた。排出量取引制度は、温室効果ガスの排出許容枠を売買する仕組みで、温室効果ガス削減目標未達成の国が、排出量に余裕のある国から排出権を買い取る仕組み。共同実施およびCDMは、複数国で共同プロジェクトを実施したときにそのプロジェクトによって削減された分を当該諸国間で配分する仕組みで、国際協力に経済的インセンティブを付加した制度として注目されている。共同実施は付属書I締約国間での共同プロジェクト、CDMは途上国で実施するプロジェクトである。

数値目標については交渉の結果、EU8%、アメリカ7%、日本6%の削減という数値に落ち着いた。ロシアやニュージーランドが0%、ノルウェー1%増、オーストラリア8%増、平均すれば、先進国全体としては5.2%削減という目標となった。基準年は原則1990年、目標年は2010年の前後2年の期間をとて、2008年から2012年の5年間とし、対象とする温室効果ガスは、二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素の3種類に加えて、代替フロンガスのハイドロフルオロカーボンなど3種類を含めた、計6種類となった。京都議定書で取り上げられた2010年の先進国削減目標は、気候安定化の面からみると必ずしも十分とは言えないが、先進国が削減開始に取り組もうとする第一歩として、数値目標が合意された点で評価されている。では、京都議定書に沿って削減目標を実行した場合の経済的影响はどの程度になるのであろうか。京都議定書では、二酸化炭素の森林によるシンクや二酸化炭素以外のガスにも大きな関心が寄せられているが、ここでは、二酸化炭素の削減について排出量取引に焦点を当てて分析した。

### 3. 京都議定書を達成するためのコスト

京都議定書の数値目標を達成するためには、いろいろな省エネ技術やリサイクル技術を導入しなければならない。これらの技術を導入して二酸化炭素排出量を削減する場合、目標を達成するためには、少なくとも必要となるコスト(二酸化炭素1トン当たり)を、京都議定書達成のための「限界費用」と呼ぶ。「目標達成のための最後の1トンの二酸化炭素を減らすときにかかる費用」という意味である。

図1に、AIMを含めた世界の9つの経済モデルが算定した限界費用の値を示した。G-Cubedはオーストラリア国立大学のMackibbin、GREENは経済協力開発機構(OECD)、MERGEはスタンフォード大学のManne、MRTはアメリカの民間コンサルタント、POLESはフランス、RICEはエール大学のNordhaus、SGMはアメリカ国立太平洋北西研究所、WorldScanはオランダ政府がそれぞれ開発もしくは利用している経済モデルである。なお、これらの限界費用の推定値のなかには、省エネ技術などの需要サイドのコストだけでなく、発電施設の効率改善などの供給サイドのコストも一部反映されている。

いずれの推計結果からも、日本の二酸化炭素の限界費用が相対的に高く、アメリカの限界費用が最も安い傾向が読み取れる。わが国の限界費用が相対的に高い理由として、過去に省エネを徹底して実施したために、省エネ対策の追加的なコストが高くつくこと、原子力発電などの低炭素エネルギーの供給に制約があること、などが指摘されている。なお、図1に上げた推定値のなかでGREENモデルのみが、わが国の限界費用を相対的に低く見積もっているが、これは、わが国において、安いコストで大量の原子力エネルギーが導入可能という前提を置いたためと思われる。

モデルによって限界費用の推定結果がかなり違ってくるのは、標準ケース(対策をとらないで成り行きにまかせる場合)において経済成長やエネ

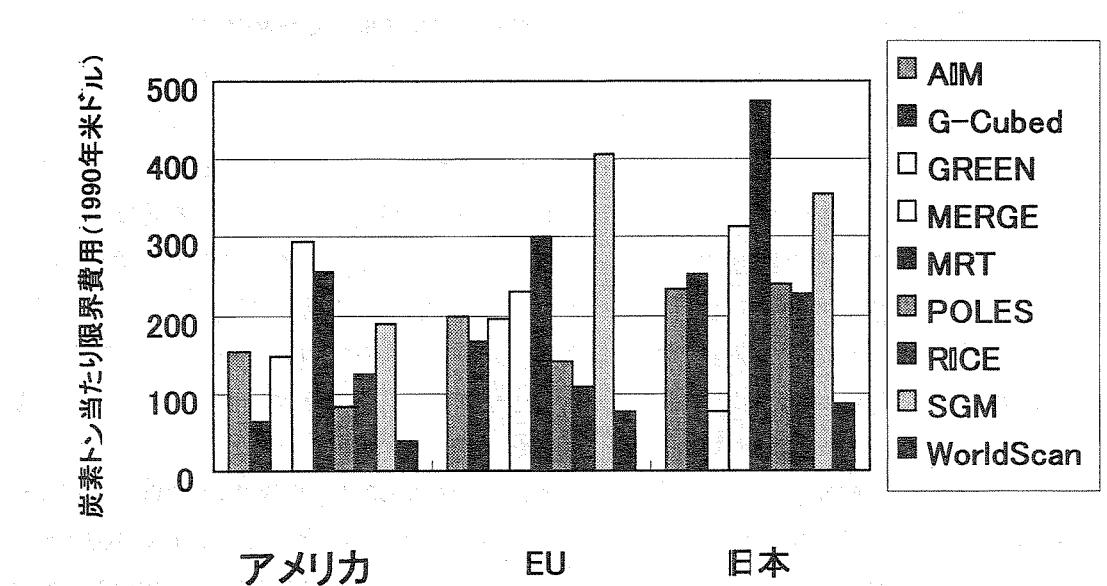


図1 京都議定書を達成するための限界費用推定の比較(2010年時点)

世界の9つの経済モデルが算定した限界費用の値

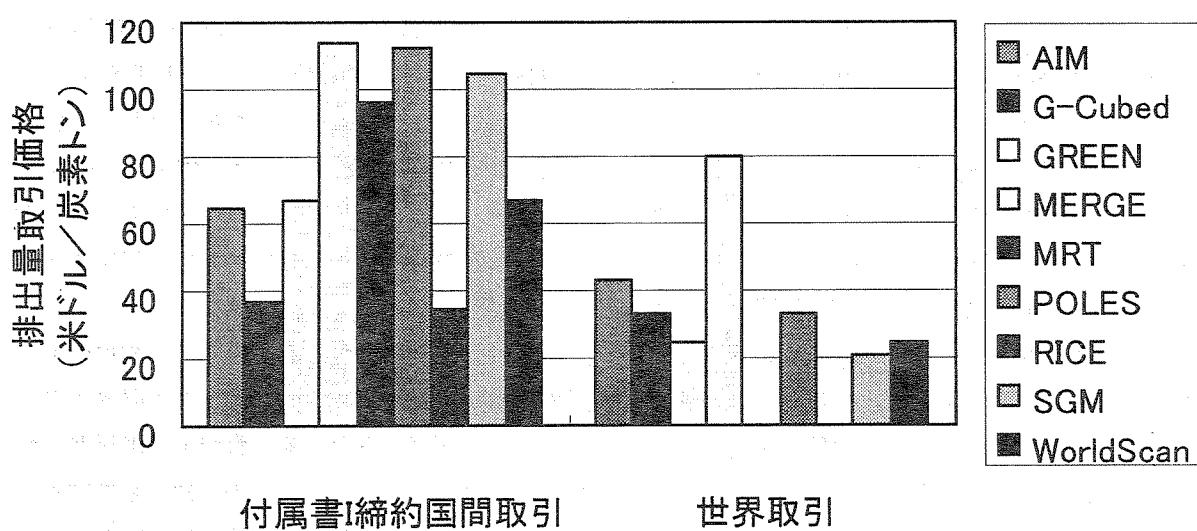


図2 排出量取引価格の推定値比較(2010年時点)

ルギー効率改善などの前提が違うため、2010年時点の削減目標は同じでも削減のベースとなる排出見通しが大きく異なり、このため二酸化炭素をどの程度減らすかが大きく違つてることによる。また、新規に導入可能な省エネ技術のコストやクリーンエネルギーのコスト、さらにはこれらコストを基礎としたエネルギーと資本の代替弾力性やエネルギー間の代替弾力性など、他の要因によつ

ても限界費用の推定が違つてくる。

#### 4. コスト削減の方策

コスト削減の方策として、京都議定書で承認されたものに、排出量取引、共同実施、クリーン開発メカニズムなどの柔軟性措置があるが、ここでは、排出量取引を行なった場合、どの程度コストが削減されるかについて紹介する。

排出量取引とは、ある国が割り当て量を超えて排出削減を実施した場合、その超過分を他の国に有償で譲り渡し、譲り受けた国の削減量に繰り入れる制度である。現在のところ、この排出量取引は付属書I締約国の中だけに認められており、これらの国々の間で取引が行われた場合、排出権の価格がどのくらいになるかについて、図1で紹介したいいろいろな経済モデルによる試算結果を図2に示す。図2には、途上国も含めて排出量取引を行った結果についても示してある。途上国も含めた排出量取引については、現在から第一約束期間(2008~2012年)までに、国連気候変動枠組み条約に参加する全ての参加者を巻き込んだ取引の枠組みを設計する時間がなく、現実的ではないが、比較のために示した。この場合、付属書I締約国以外の国の排出量はそれぞれの国の標準ケースの排出量を上限としている。どのモデルも排出量取引を行った場合、大幅に限界価格が減少しており、排出量取引の範囲を広げて検討する意義が見られる。排出量取引なしのケースから付属書I締約国間で排出量取引のケースに移行すると、多くのモデルで限界費用が半分以下になっている。これは限界対策費用を等しくしたためである。付属書I締約国間取引のケースと世界取引のケースを比較した場合もその効果は顕著である。これは、ほとんどのモデルで先進国の二酸化炭素の増加以上に途上国での増加が見込まれており、途上国での対策費用の方が安いと推定されているためである。

図2に示されているような価格により排出量を取引すれば、日本の二酸化炭素削減コストは大幅に減少する。日本の限界費用が排出量取引の価格を超える場合は外国から買った方が安上がりとなるため、日本の排出削減量は限界費用と排出量取引価格が等しい所まで減ることになり、その減った分を外国からの排出権購入で充当することになる。

排出量取引によって先進国は自国での対策コストを削減できること予想される。しかし、いくつかの問題があるのも事実である。その第一は、ホッ

トエアーの売買である。現在想定されている排出量取引では、アメリカ、EU、日本が排出量を買い、ロシア連邦が売るという構図になっている。ロシアは京都議定書により温室効果ガス排出量の削減数値目標が0%(1990年レベル維持)となったが、ソ連崩壊後の経済の低迷により、2010年の二酸化炭素の排出量は1990年よりも約2億トンも少なくなる見込みである。このため、この余った排出枠を売ろうとする。この余った排出量がホットエアートと呼ばれている。つまり、もともと排出されることのないものが、排出量取引によって大気中に排出されてしまう。この結果、排出量取引がない場合には先進国および移行経済国全体で2010年に1990年レベルの約10%が削減されることになるところを、排出量取引の導入によってホットエアートが売却され、5%強の削減にとどまってしまう。このことは、排出量取引が排出量を実体的に増やす効果を持つことになる。今後、発展途上国も含めて排出量取引を行うケースを想定する場合に、発展途上国の許容排出量をいくらにするかによって、同じような問題が生じる可能性がある。

もう一つの問題として挙げられているのは、排出量取引が発展途上国の温暖化対策へのインセンティブを著しく減退させてしまうおそれがあることである。京都議定書によって日米欧は6~8%削減の数値目標に合意した。しかし、排出量取引を導入すれば、いずれも10%以上も温室効果ガスの増加が認められることになる。日本の二酸化炭素排出量は、基準ケースで2010年には約8千万トン増加すると予想されているが、付属書I締約国間の排出量取引では、そのうち約75%を輸入した方が経済的な損失が少ないと推定される。2010年での目標削減量は約1800万トンであるから、約6000万トンを輸入した場合の日本の総排出量は1900年レベルより約4200万トンも増えることになる。もちろん排出権の輸出国であるロシア連邦の排出量は相当分だけ減少している訳であるが、自国での削減対策を実施しないことに対して途上国はどう

思うであろうか。温暖化問題の解決のためには途上国の参加が不可欠であり、長期的にみれば、自国への省エネ機器導入あるいは新エネルギー開発への投資による削減努力や、途上国への投資による世界全体の排出量削減が有効である。

## 5. おわりに

京都会議で提案された温暖化防止対策の効果について、分析した結果を紹介した。AIMモデルについては昨年および一昨年とアジア・パシフィック・ネットワーク(APN)の協力を得て、中国およびインドでトレーニング・ワークショップを実施するとともに、毎年当研究所においてAIMワークショップを実施し、政策分析が行えるよう開発、改良、普及に努めている。

京都会議で先進国が守るべき排出削減目標が定められたことは大きな意義がある。しかし、数値目標自体は、気候の安定化を考えると必ずしも満足のいくものではない。このまま対策を何もしないと仮定すると、2100年には気温が約2°C、海面

が約50cm上昇すると予想されている。京都議定書で定められた数値目標に従った場合、2100年の気温上昇は0.26°C、海面上昇は4.8cmだけ抑えられるが、2010年の削減目標を守るのみでは、気温上昇、海面上昇は依然として危険なゾーンにある。

今後、発展途上国の二酸化炭素排出量が増加すると予想されることから、発展途上国の参加が温暖化対策の一つの鍵を握る。発展途上国の参加を促すためには、発展途上国で現在問題となっている国内政策と組み合わせて、温暖化対策をデザインする必要がある。例えば、発展途上国の大気汚染対策を推進する一つとしてエネルギー効率の向上を図れば、同時に二酸化炭素の削減にもつながる。わが国の過去の二酸化硫黄削減対策において、実に4割が省エネに依っていることを勘案すれば、このような対策の組み合わせの有効性は容易に予想できる。このような地球規模の環境対策と地域規模の環境対策を組み合わせる方策は、アジア地域の環境対策として有望視されており、中国、インド、韓国などの研究者とともに解析を進めている。



アーメダバード(インド)におけるAIMトレーニング・ワークショップ(1999年2月)

「植物による環境評価」講演会のお知らせ

国立環境研究所地球環境研究センターでは、「『植物による環境評価』－長期・継続の事例を中心に－」をテーマに、下記のとおり講演会を開催いたしますので、ご案内申し上げます。

本講演会は、毎年1回テーマを定めて講演会を開催している、大気環境学会関東支部植物影響部会との共催にて開催されます。本年度は、野外における植物影響調査について、影響評価・指標・モニタリングの観点から、3人の方に講演をお願いしております。ご関心のある方をはじめ、多くの方のご参加をお待ちしております。

記

日 時：平成11年12月3日（金） 14：00～17：00

場 所：茨城県つくば市小野川16-2 国立環境研究所中会議室

主 催：国立環境研究所地球環境研究センター・大気環境学会関東支部植物影響部会

参加費：無料（但し、レジュメが入り用の方は、資料代として500円いただきます）

＜プログラム＞

14：00 「光化学オキシダントによる植物影響調査」  
－関東及びその周辺の1都9県共同調査－

岡崎淳（千葉県環境研究所）

14：50 「福岡県環境指標の森」調査  
須田隆一（福岡県保健環境研究所）

15：40 「Effects of Air Pollution on Vegetation in China」  
－Past, Present and Future－

鄭有斌・清水英幸（国立環境研究所地球環境研究センター）

16：30 総合討論／その他

司会者：清水英幸 国立環境研究所地球環境研究センター

河野吉久 電力中央研究所

大橋 肇 東京都環境科学研究所

連絡先：国立環境研究所地球環境研究センター 総合化・交流

Tel.: 0298-50-2347, Fax.: 0298-58-2645 E-mail: hshimizu@nies.go.jp, cgercomm@nies.go.jp

## 地球環境研究センター(CGER)活動報告(7月)

### 地球環境研究センター主催会議等

1999. 7. 1～2 北方林フラックスモニタリングに関する現地予備調査(北海道/藤沼研究管理官・高田課長補佐)  
12～13 地球環境モニタリング検討会北方林フラックスモニタリング専門分科会委員等が現地調査(北海道)  
14～16 Species2000国際ワークショップ(第14回地球環境研究者交流会議)を開催(つくば)

### 所外活動(会議出席)等

7. 2 環境・防災モニタリング技術研究会第3回研究会(東京/井上総括研究管理官)  
2 吸収源関連会合(東京/山形研究管理官)  
5 環境安全保障検討会(東京/山形研究管理官)  
6 土木学会地球環境シンポジウム(東京/一ノ瀬主任研究員)  
11～13 第9回地球温暖化アジア太平洋地域セミナー(彦根/山形研究管理官)  
13 戦略基礎研究現地観測(東京/一ノ瀬主任研究員)  
14 土木学会誌編集委員会(東京/主任研究員)  
16 吸収源検討会(東京/山形研究管理官)  
22～28 IUGG99(英国/藤沼研究管理官・勝本特別流動研究員)  
26～29 航空機による燃焼排出ガス及び大気移動速度の測定実験(北海道/井上総括研究管理官)  
29 LUCC小委員会(東京/一ノ瀬主任研究員)  
29～30 農業気象学会(松山/藤沼研究管理官・勝本特別流動研究員・橋本重点支援研究員)

### 見学等

7. 6 中国貴州省訪日考察団(第2陣)(7名)  
12 東京大学農学部3年生(18名)  
14 JICA「平成11年度第2回技術協力専門家養成研修(地球環境・環境アセスメント)」研修員(12名)  
28 環境庁企画調整局環境研究技術課長(外1名)  
29 福岡県立八幡高等学校(理数科)(20名)  
30 岡山県立津山高等学校2年生(16名)

### 地球環境研究センター出版物在庫一覧(CGERシリーズ)

(ご希望の方は地球環境研究センター交流係までご連絡下さい。)

C G E R No.	タ イ ト ル
A001-'91	地球環境研究センタ一年報
A002-'93	地球環境研究センタ一年報 Vol.2 (1991年10月～1993年3月)
A003-'94	地球環境研究センタ一年報 Vol.3 (平成5年4月～平成6年3月)
A005-'96	地球環境研究センタ一年報 Vol.5 (平成7年4月～平成8年3月)
A006-'99	地球環境研究センタ一年報 Vol.6 (平成8年4月～平成9年3月)
D003-'94	温暖化の影響評価研究文献インベントリー(日本編)
D004-'94	GRID 全球データセットユーザーズガイド
D006-'94	GRID DATA BOOK

D007(CD)-'95	Collected Data of High Temporal-Spatial Resolution Marine Biogeochemical Monitoring by Japan-Korea Ferry (June 1991- February 1993)
D008-'95	GRID-TSUKUBA(パンフレット)
D009-'96	DATA BOOK OF SEA-LEVEL RISE
D010-'96	'94IGAC/APARE/PEACAMPOT 航空機・地上観測データ集
D011-'96	'95IGAC/APARE/PEACAMPOT 航空機・地上観測データ集
D012(CD)-'97	東アジア定期航路モニタリングデータ(1994年4月～1995年12月)
D013-'97	DATA BOOK OF Desertification/Land Degradation
D014(CD)-'98	Data of IGAC/APARE/PEACAMPOT Aircraft and Ground-based Observations '91-'95 Collective Volume
D015(CD)-'97	北太平洋海域植生プランクトン分布衛星画像時系列データベース CD-ROM
D016-'97	産業関連表による二酸化炭素排出原単位(FD付)
D017-'97	国際研究計画・機関情報 II
D018(CD)-'97	IGAC/APARE/PEACAMPOT 航空機・地上観測データ'91～'95 集成版
D019(CD)-'97	東京23区の人工排熱(エネルギー消費)時空間分布
D020(CD)-'98	東アジア植生指数月別モザイク図(1996年) CD-ROM (Monthly NDVI in East Asia in 1996 CD-ROM)
D021(CD)-'99	Collected Data of High Temporal-Spatial Resolution Marine Biogeochemical Monitoring from Ferry Tracks: Seto Inland Sea (Jan.1996-Nov.1997)and Osaka-Okinawa (Jan.1996-Mar.1998)
D022-'99	マテリアルフローデータブック～日本を取りまく世界の資源のフロー～ Material Flow Data Book -World Resource Flows around Japan-
M003-'93	ANNUAL REPORT ON GLOBAL ENVIRONMENTAL MONITORING 1993
M004-'94	MONITORING REPORT ON GLOBAL ENVIRONMENT -1994-
I001-'92	GLOBAL WARMING AND ECONOMIC GROWTH
I010-'94	CGER'S SUPERCOMPUTER ACTIVITY REPORT 1992 Vol.1
I011-'94	Global Carbon Dioxide Emission Scenarios and Their Basic Assumptions -1994 Survey-
I014-'94	PROCEEDINGS OF THE TSUKUBA OZONE WORKSHOP
I015-'94	IPCC Technical guidelines for Assessing Climate Change Impacts and Adaptations
I016-'94	CGER'S SUPERCOMPUTER ACTIVITY REPORT Vol.2-1993
I018-'95	PROCEEDINGS OF THE TSUKUBA GLOBAL CARBON CYCLE WORKSHOP -GLOBAL ENVIRONMENT TSUKUBA '95-
I019-'96	GLOBAL WARMING, CARBON LIMITATION AND ECONOMIC DEVELOPMENT
I020-'95	CGER'S SUPERCOMPUTER ACTIVITY REPORT VOL.3 - 1994
I021-'96	CGER'S SUPERCOMPUTER MONOGRAPH REPORT VOL.1 (TURBULENCE STRUCTURE AND CO <sub>2</sub> TRANSFER AT THE AIR-SEA INTERFACE AND TURBULENT DIFFUSION IN THERMALLY-STRATIFIED FLOWS)
I022-'96	CGER'S SUPERCOMPUTER MONOGRAPH REPORT VOL.2 (A TRANSIENT CO <sub>2</sub> EXPERIMENT WITH THE MRI CGCM -ANNUAL MEAN RESPONSE-)
I023-'96	第8回地球環境研究者交流会議報告書〈地球環境研究の新たな展開〉 －人間・社会的側面の研究推進に向けて－
I024-'96	CGER'S SUPERCOMPUTER ACTIVITY REPORT Vol.4-1995
I025-'97	CGER'S SUPERCOMPUTER MONOGRAPH REPORT Vol.3 (Study on the Climate System and Mass Transport by a Climate Model)
I026-'97	第10回地球環境研究者交流会議報告書〈社会科学面からの地球環境研究の取組み〉－IHDP 研究者交流会議－
I027-'97	LU/GEC プロジェクト報告－アジア・太平洋地域の土地利用・被覆変化の長期予測(II)－

I028-'97	CGER'S SUPERCOMPUTER MONOGRAPH REPORT Vol.4 (Development of a global 1-D chemically radiatively coupled model and an introduction to the development of a chemically coupled General Circulation Model)
I030-'97	CGER'S SUPERCOMPUTER ACTIVITY REPORT Vol.5-1996
G001-'93	アジア太平洋地域における社会経済動向基礎調査データ <各国別資料集>

## 地球環境研究総合推進費報告書

地球環境研究総合推進費 平成 7 年度終了研究成果報告集(中間報告)  
 地球環境研究総合推進費 平成 7 年度研究成果報告集(概要版)  
 地球環境研究総合推進費 平成 8 年度終了研究成果報告集(II)  
 地球環境研究総合推進費 平成 8 年度研究成果報告集(概要版)  
 Global Environment Research of Japan in 1995  
 Global Environment Research of Japan (Final Reports for Projects Completed in 1995) PART 1  
 Global Environment Research of Japan (Final Reports for Projects Completed in 1995) PART 2  
 Global Environment Research of Japan in 1996  
 Global Environment Research of Japan (Final Reports for Projects Completed in 1996)

## 地球環境変動に関する日米ワークショップ報告書

PROCEEDINGS OF THE THIRD JAPAN-U.S. WORKSHOP ON GLOBAL CHANGE MODELING  
 AND ASSESSMENT Improving Methodologies and Strategies

平成 11 年 11 月発行

編集・発行 環境庁 国立環境研究所  
 地球環境研究センター  
 連絡先 総合化・交流

〒 305-0053 茨城県つくば市小野川 16-2  
 TEL: 0298-50-2347  
 FAX: 0298-58-2645  
 E-mail: cgercomm@nies.go.jp  
 Homepage: <http://www.nies.go.jp>  
<http://www-cger.nies.go.jp>

このニュースは、再生紙を利用してます。