

## I 気候モデル入門

### 1. はじめに

歴史的に全球気候モデル (Global Climate Model, GCM) は、その実行にスーパー・コンピュータなどの設備と熟練プログラマーが必要であった。最も複雑なモデルや最先端のモデルについては、今でもこの状況は変わっていない。そのため、連邦航空宇宙局 (NASA)、米国海洋大気庁 (NOAA) と国立大気研究センター (NCAR) によって運営され、米国内でも最大級かつ最速のコンピュータ設備を有している国立研究所によって、米国の GCM は開発されている。GCM を開発するチームは、大気科学者、物理学者、地球科学者、海洋学者、数学者、生物学者、植物学者、そしてもちろん、コンピュータ科学者など広い範囲の学問分野の研究者から構成される。最近のコンピュータ技術の発展は、それほど高価でないワークステーションやデスクトップ PC でも一部の GCM を実行可能なものとした。その結果、GCM は学校で利用可能なものとなり、広い分野の研究者や学校現場の教員や生徒などにも利用可能なものとなった。

この講座では GCM の利用可能性向上を活かして、地球温暖化問題、特に主な人為起源の温室効果気体である二酸化炭素増加について、その将来気候への影響を学習する。この目標を達成するために、私たちは気候変動を指導・学習する素晴らしい道具である EdGCM プログラムを使用する。数値モデルである EdGCM は、気候システムの様々な構成要素がどのように私たちの気候を決定する上で寄与しているかについて、生徒が自ら実行する作業を通して探求し、気候変動に関する知識体系を構築することを可能とする。また、教室における EdGCM の利用は、研究者が彼らの研究において使用している道具やその利用法について理解する機会を提供する。

注：システムとは複数の要素から構成され、全体としての機能のあるもの。



図 1. 月から見たモデル地球

## 2. 気候モデルと GCM

GCM は元々、大気大循環モデル (General Circulation Model) を意味していたが、最近では全球気候モデルとしても用いられるようになった。GCM は物理過程モデルであり、シミュレーションは基本的な物理法則に基づいている。それ故、GCM の出力結果は単に原因と結果の関係を調べるだけでなく、地球の気候システムで作用している多くのフィードバック過程を探求することができる。

注：フィードバックとは、入力と出力のあるシステムにおいて、出力が入力に影響をあたえること。

基礎方程式 (Primitive Equations) が、温度 (Temperature, T)、気圧 (Pressure, P)、風 (Wind) の東西成分と南北成分と鉛直線分 (U, V, W)、比湿 (Specific Humidity, Q) を算出する。そして、基本的な物理法則では明示的に記述できない過程、例えば、雲の形成過程や放射の相互作用などは、様々な経験式や理論式を用いて、間接的に再現する。

注：比湿は湿潤空気に含まれている水蒸気量の全湿潤空気量に対する比。

気候システムでは、図 2 に示したように異なる現象の間に単純な因果関係はほとんど存在せず、ある強制要因が作用すると、一連のフィードバック過程が機能し始め、最終的に気候の平衡状態を変化させる。しばしば、これらのフィードバック過程が、元々の強制要因よりも大きな強制力となることがある。

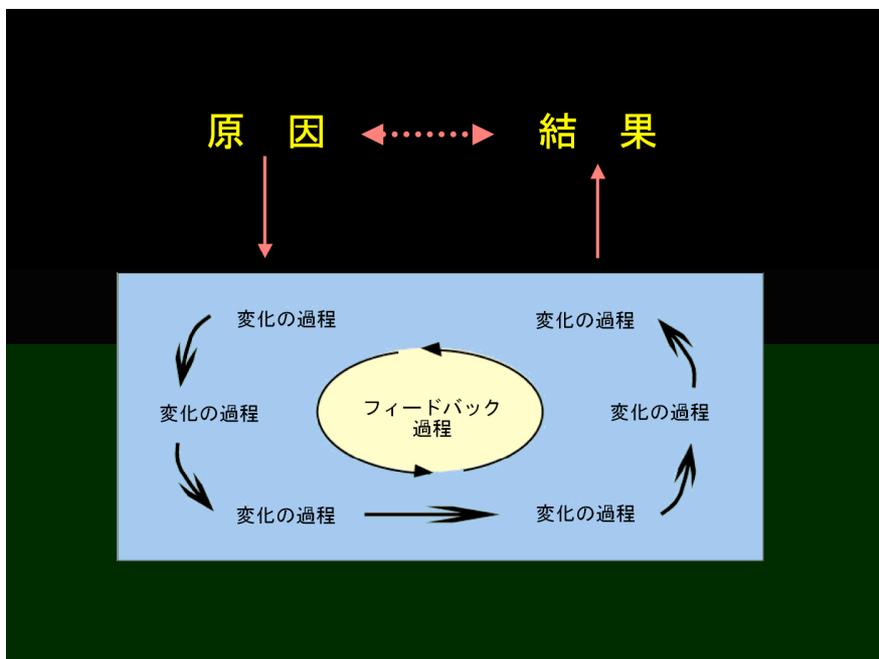


図 2. 気候システムにおけるフィードバック過程

スーパー・コンピュータや強力なワークステーションを用いて、気候シミュレーションを実行するためには、GCM の様々設定や条件を記述したランデッキ (rundeck) と呼ばれる設定ファイルが必要である (図 3 参照)。この rundeck は、ユニックス (UNIX) と呼ばれるオペレーティング・システム (OS) に対する台本 (Unix scripts) である。Unix scripts

は科学者やプログラマーに対しては効率的である。しかし、Unix scripts は、利用者にコンピュータモデルに関する多くの必要な知識を仮定する。それで、利用者は様々なコンピュータ・プログラミング技術を習得する必要がある。

注：スクリプト (scripts) とは、コンピュータに対する一連の命令を記述した文書あるいはファイル。

```

Global_Warming_01.R_ModelII 2/11/05

Creator: Mark Chandler

Comment: based on Modem control run using Model II, which uses predicted SST with deep ocean diffusion
Initial CO2 = 315.4
Increasing CO2 trend is linear with 0.5 ppm increase per year through 2000 then an additional 1.0%
per year exponential increase from 2000 through 2100. This yields a doubled-CO2
(i.e. double the 1958 value = 629.8ppm) around the year 2062.
All other greenhouse gases are held fixed at 1958 values to match the control run

Model version:
Model=Model II 1.0.7
Grid=8x10x9

Data and input files:
9=NOV1960.rstModem_DeepOcean, 15=O8X10.250MLD, 17=otispec_Spec_A3_v106_1.00
19=CD8X10, 21=R.TAU.G25L15, 22=R.PLK25, 23=V8X10, 25=Z10MAX.8X10.250M
26=Z8X101, 29=REG8X10, 62=ED8X10

Label and namelist:
Global_Warming_01 (Global Warming: CO2 gradually increases, doubling by 2069)

&INPUTZ
GEOMETRY=8x10,
TAU=507336, IYEAR=1900,
KOCEAN=2, SRCOR=0.9644674710387354244,
SOX=1366.6198, CO2=314.9, USET=0, TAU=1760760,
USESLP=0, KCOPY=2,
ISTART=3, KCHECKTAUX=1, IRAND=123456789, NDRINT=-1,
KDIAG=0,9,9,9,9,9,9,9,
TAU=507337,
OMEGT=282.9, OBLIQ=23.44, ECCN=0.0167,
&END

&FORCNGS
KTRENDXT=1,
ICO2DATA=200, ICO2DATASTART=1957, ICO2DATAEND=2100,
ZN2O=0.2908,
CH4=1.224,
F11=0.0076,
F12=0.0296,
&END

```

図 3. スーパー・コンピュータを利用した GCM の rundeck (Model rundecks の例)

コロンビア大学 (Columbia University) の研究チームは米国航空宇宙局ゴダード宇宙科学研究所 (NASA Goddard Institute for Space Studies, NASA/GISS) が開発した全球気候モデルを基にして、一般的なコンピュータで動作する大循環モデル, EdGCM (Educational General Circulation Model) を開発した。EdGCM は Unix 系の大気大循環モデルが必要とする rundeck ではなく、グラフィカル・ユーザーインターフェイス (Graphical User Interface, GUI) を導入した (図 4 参照)。

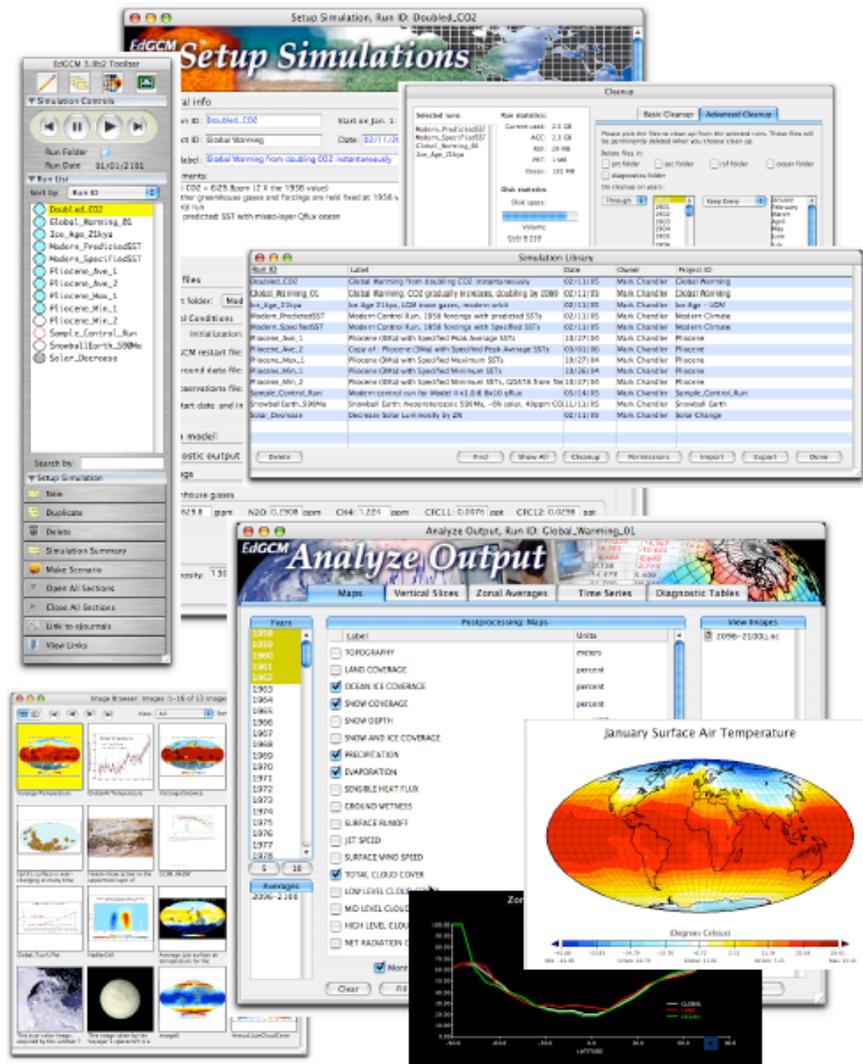


図 4. 家庭用コンピュータを利用した GCM, EdGCM のインターフェイス

### 3. NASA/GISS の全球気候モデル

EdGCM ソフトウェアによって使用される気候モデルは、NASA/GISS（連邦航空宇宙局ゴダード宇宙科学研究所）で開発された。このタイプの 3次元コンピュータモデルは、格子点全球気候モデル（a grid-point Global Climate Model, GCM）として知られている。格子点全球気候モデルは、大気を一連の離散的な格子セルに分割する。EdGCM は、大気を緯度 8° 間隔、経度 10° 間隔、鉛直方向に 9 層に分け、全部で 7,776 (=24×36×9) の格子点から構成される。コンピュータモデルは基本的な物理方程式を格子点間の輸送を考慮して数値的に各格子点について解く。基本となる物理方程式は、各セルに関する質量、エネルギー、運動量、水蒸気の各保存方程式から構成される。

#### 基礎方程式

気候における最も重要な二つの変数、気温と圧力は理想気体の状態方程式によって関連付けられる。観測データや単純化した物理的な仮説に基づくパラメタリゼーションは、基本方程式で扱われないか、またはモデルの格子のスケールより小さい空間スケールで起こる要素を計算するのに用いられる。例えば、植物、対流雲、および河川への流出などの要素は、気候モデルの中で全てパラメタリゼーションによって処理される。

全球気候モデルの心臓部は、地球大気モデルである。地球大気モデルは、五つの基

礎方程式から構成され、大気の状態変化を記述する。それらは質量保存則、エネルギー保存則、運動量保存則、水蒸気量保存則、理想気体の状態方程式（状態方程式の近似式）である（図 5 参照）。

注：運動量 = 質量 × 速度，力積 = 力 × 時間 = 運動量の変化

<p>運動量の保存式</p> $\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} - \frac{1}{\rho} \nabla p - \vec{g} - 2\vec{\Omega} \times \vec{V} + \nabla \cdot (k_a \nabla \vec{V}) - \vec{F}_d$ <p>エネルギーの保存式</p> $\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\rho c_p (\vec{V} \cdot \nabla) T - \nabla \cdot \vec{R} + \nabla \cdot (k_r \nabla T) + C + S$ <p>質量の保存式</p> $\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(\vec{V} \cdot \nabla) \rho - \rho (\nabla \cdot \vec{V})$ <p>水の保存式(気体, 液体, 固体)</p> $\frac{\partial q}{\partial t} = -(\vec{V} \cdot \nabla) q + \nabla \cdot (k_q \nabla q) + S_q + E$ <p>気体の状態方程式</p> $p = \rho R_d T$	<p><math>\vec{V}</math> = velocity 速度  <math>T</math> = temperature 温度  <math>p</math> = pressure 気圧  <math>\rho</math> = density 密度  <math>q</math> = specific humidity 比湿  <math>g</math> = gravity 重力加速度  <math>\Omega</math> = rotation of earth 地球の自転の角速度  <math>F_d</math> = drag force of earth 地球の摩擦力  <math>R</math> = radiation vector 放射のベクトル量  <math>C</math> = conductive heating 熱伝導による加熱  <math>c_p</math> = heat capacity, const. p 定圧比熱  <math>E</math> = evaporation 蒸発  <math>S</math> = latent heating 潜熱  <math>S_q</math> = phase-change source 相変化の源  <math>k</math> = diffusion coefficients 拡散係数  <math>R_d</math> = dry air gas constant 乾燥空気の気体定数</p>
---	--

図 5. 基礎方程式

格子点モデルとスペクトル・モデル

全球気候モデルの中で大気の運動を記述する基礎方程式には、二つの代表的な形式がある。それらは二つの完全に独立したモデル群であり、一つはデカルト座標系の格子点モデル、もう一つはスペクトルモデルと呼ばれる。デカルト座標系の格子点モデルは、大気を水平方向と鉛直方向に区切り、一連の格子点（セル）によって構成される（図 6 参照）。そして、方程式は格子点の各セルについて解かれるだけでなく、EdGCM の全球気候モデルは隣接するセル間の様々な物理量や物質の輸送を算出する。

スペクトルモデルでは、各保存方程式は一連の正弦関数(sine curve)と余弦関数(cosine curve) からなる連続関数で表現され、気温、気圧、風、そして湿度のような気候変数の全球分布が定義される（図 7 参照）。これらのモデルは、現在の値から現在の変化率を求め、その結果に予報時間をかけて、変化量を求める。現在の値にこの変化量を加えることで、未来の値を求める。次に未来の値から、未来の変化率を求め、更に未来の値を求めていくのである。

将来の値 = 現在の値 + 現在の変化率 × 予報時間

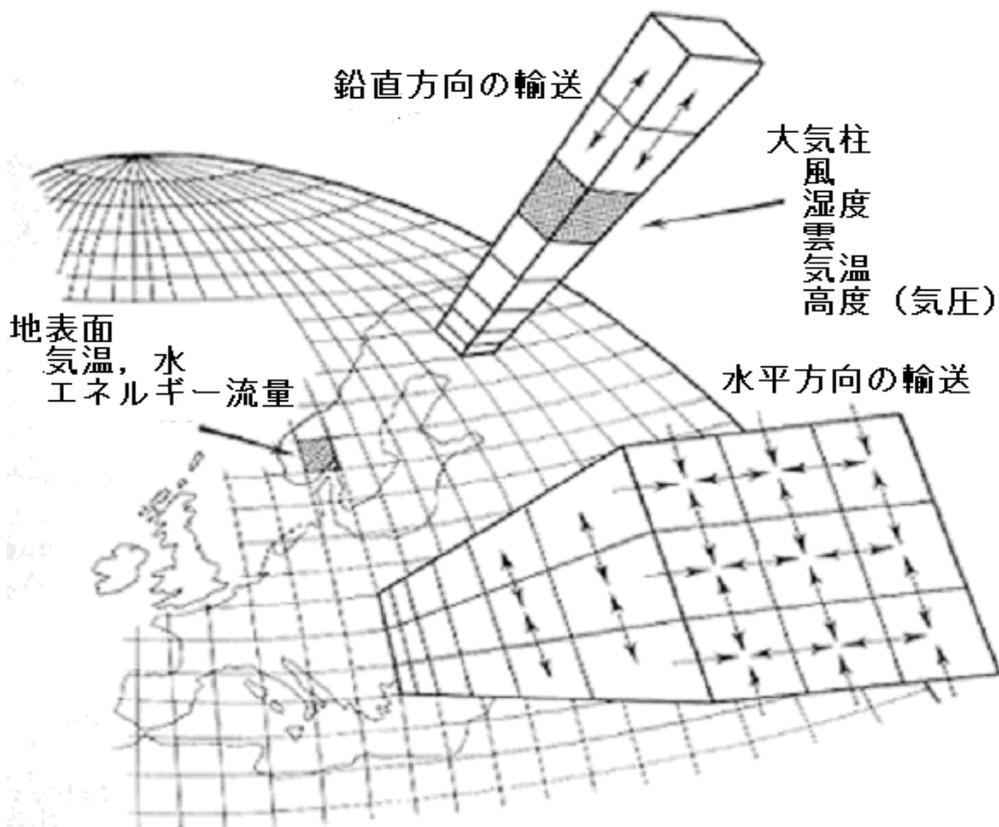


図 6. デカルト座標系の格子点大循環モデル (from Henderson-Sellers, 1985)

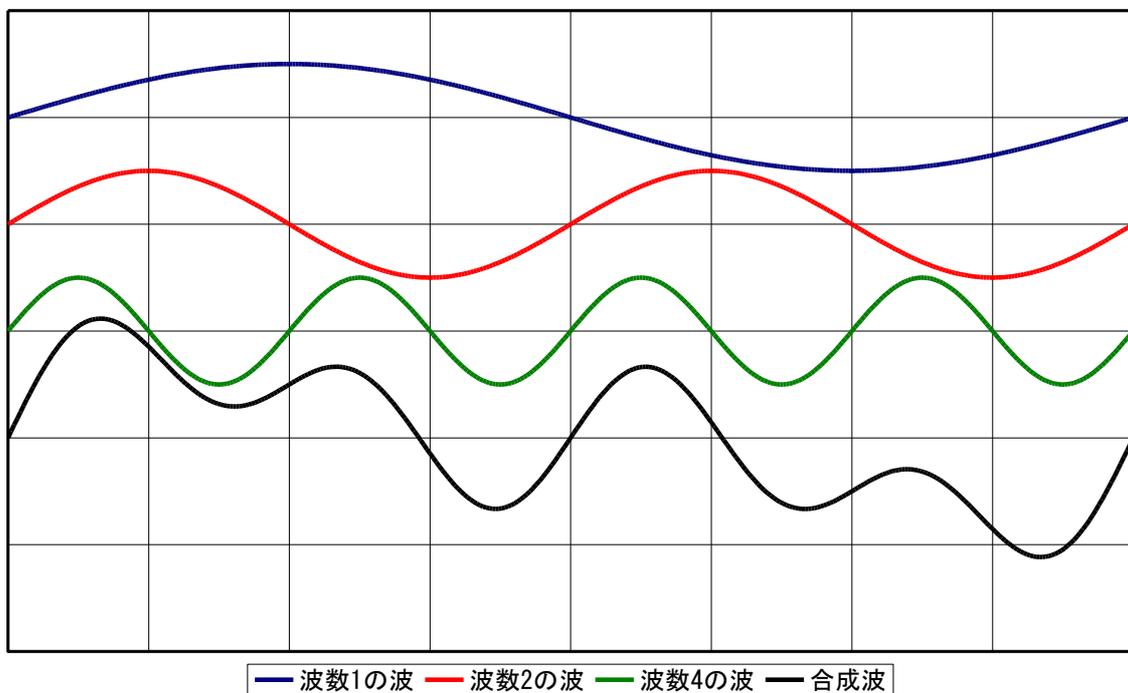


図 7. 波の合成

NASA/GISS 全球気候モデルの解像度は、図 8 に示すように緯度・経度の格子点間隔で表現される。そして、異なる格子点解像度の全球気候モデルが必要とする相対的な計算回数を図 9 に示した。

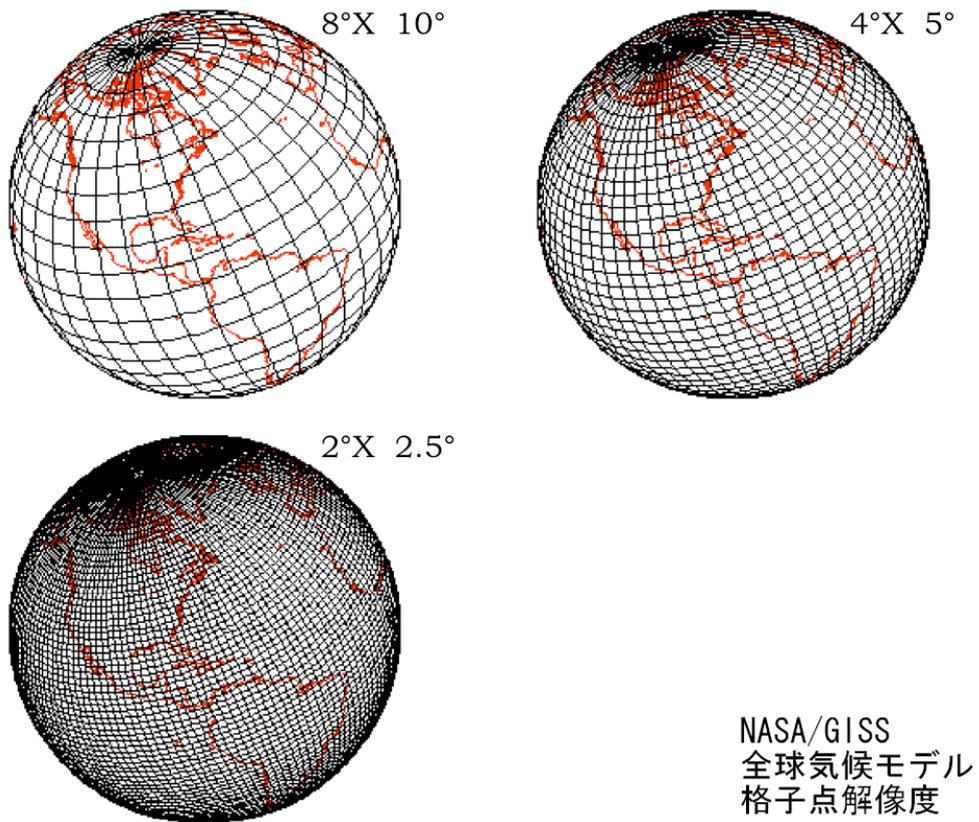


図 8. NASA/GISS の全球気候モデルの格子点解像度

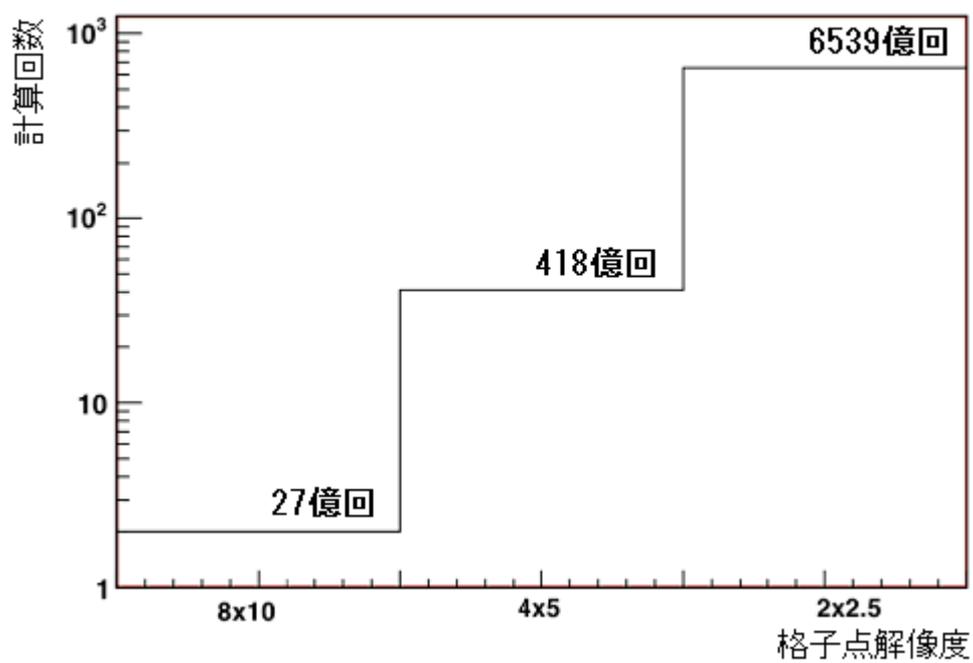


図 9. 格子点解像度と計算回数

4. 気候モデルとその利用法

放射過程

GCMの大気部分の主要な要素は、惑星と太陽放射の相互作用と大気の運動を表現する。大気力学的な計算は大気の大循環を決定するだけでなく、中緯度の天気の大部分を支配する個々の低気圧のようなスケールの小さい渦に対しても重要となる。

放射過程の計算は地球表面と大気による太陽放射の吸収と反射、そして宇宙空間への地球放射を評価し、地球のエネルギー収支を決定する。GCMにおける放射計算では、雲の厚さと水平分布と鉛直分布、地表面の状態（陸または海、地形、植生、雪氷）、全ての重要な温室効果気体とエアロゾルを考慮しなければならない。

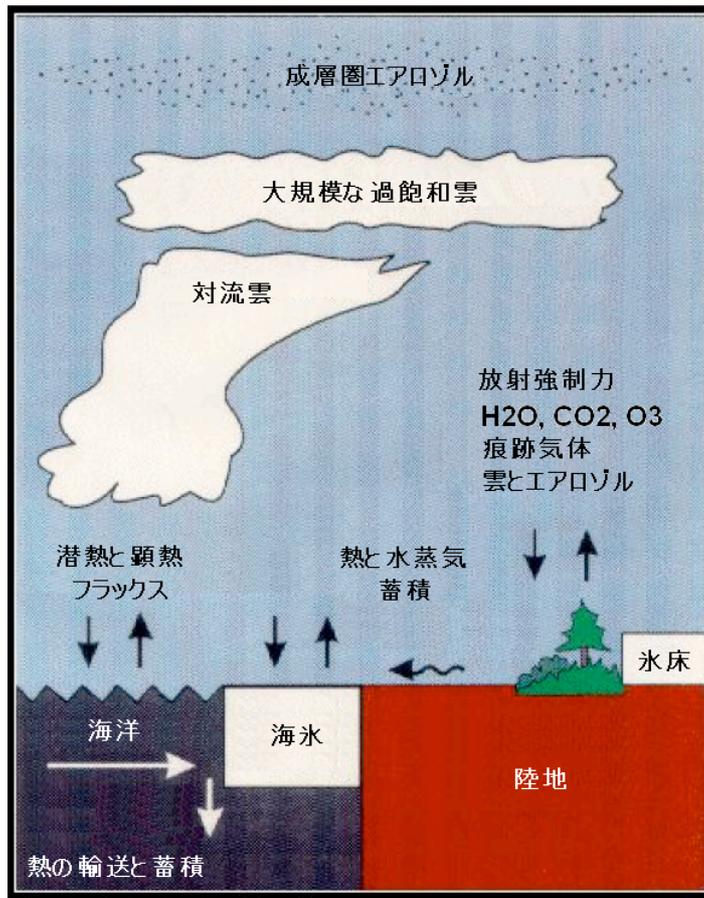


図 10. 格子点モデルによって表現される気候システムにおける物理過程  
(出典：Hansen et al., 1990)

GCM のレベル

気候モデルには様々なレベルが存在しているが、簡単なモデルか高度なモデルかを定義するのはそれほど容易ではない。例えば、気候モデルがより多くの次元を組み込むことで、より高度なモデルと考えられる。また、物理計算の空間的または時間的解像度を上げることで、より高度なモデルと考えられる。そして、より詳細な物理過程や気候システムのより多くの過程（海洋、植生、陸面水文学、氷床、炭素循環など）をパラメタリゼーションとして組み込むことでも、より高度な気候モデルとすることができる。最近の大気モデルに対する最も重要な改良は、大気大循環モデルと3次元海洋大循環モデルの結合である。

## 海洋大循環モデル

気候システムにおけるより多くの物理過程や化学過程を組み込むことで、全球気候モデルは時代と共に進化してきた。初期のモデルでは境界条件として与えられた地球の多くの特徴が、最近のモデルでは計算によりモデルの中で再現することができるようになってきた。

また、最新の科学研究が地球の物理過程に対する私たちの理解を向上させたので、気候モデルは新しい知見に基づき、これまでの計算方法を修正されたり、新たな計算を組み込まれたりしている。その結果、これらの努力は気候モデルが気候システムの振る舞いをより詳細に、より高い精度表現できるようにしてきた。

旧来の全球気候モデルに対する最も有意義な変化は、恐らく大気大循環モデルと3次元海洋大循環モデルの結合モデルの出現であろう。3次元海洋モデルは大気モデルと同じくらい長い時間をかけて開発されてきた。過去十数年間、最も多くのコンピュータ資源を必要とする多くの重要な実験は、大気海洋結合モデルを適用してきた。しかし、現在進行中の広い範囲の気候実験のシミュレーション、例えば、地質時代の気候や多くのシナリオに基づいた未来気候の状態再現などにおいて、大気海洋結合モデルが標準モデルとして利用されるようになったのは、つい最近のことである。

全球気候モデルに完全に動的な海洋を組み込む上での遅れは、海洋の計算が多大なコンピュータ資源を必要とすることもその一因であった。海洋は地球表面の約三分の二を占め、大気と比較してゆっくりと循環しているので、より長いシミュレーションが必要となる。海洋において鍵となる平均的特徴は（例えば、渦運動、西岸境界流、湧昇、深層水の生成）、同様な大気中の現象（平均で1000kmのスケール）よりも小さなスケール（10kmスケール）で生じている。

一方、大気海洋結合モデルの開発や応用の遅れは、単純に私たちが海洋の物理過程について非常に僅かしか理解できていなかったという事実にも関係している。過去20年間で私たちの地球の海洋に対する理解、例えば短い時間スケールや長い時間スケールで海洋がどのように振舞うかという理解は驚くほど向上した。全球気候モデルで大気海洋結合モデルが標準モデルとなった最終的な理由は、大気海洋結合モデルを科学者がより自信を持って利用でき、信頼性の高い結果を得ることができるようになったからとも言える。

## 気候モデルにおけるパラメタリゼーション

予報目的で構築された気候モデルは、理想的には自然界の基本法則で完全に記述されるべきである。例えば、図4で示した理想気体の状態方程式はGCMの中で、大気の運動やエネルギー収支の決定に利用され重要な二つの変数、気温（ $T$ ）と気圧（ $p$ ）の間の正確な関係を常に決定する。しかし、気候システムで作用している多くの過程に対する私たちの理解は未だ限定的である。その上、これらの過程の多くは、現在のコンピュータで再現するには小さ過ぎる空間スケールで作用している。それ故、モデルは気候システムにおけるいくつかの鍵となる要素を、要素間の経験則や統計関係から導出した一連の計算によって再現している。この種の計算はパラメタリゼーションと呼ばれ、それらは単純な一行の方程式（例えば、海洋セルにおける結氷を判断する方程式は、塩分だけに基づいて決定される温度からなる）から、雲物理過程、植生、氷床、大気化学、地面の水文学などの高度に複雑な一連の方程式群まで様々である。事実、多くのパラメタリゼーションはそれ自体が、気候システムのある一部分だけではあるが、再現することのできるモデルでもある。しかし、大気のGCMと海洋モデルとその他のパラメタリゼーションを注意深く関係付けるこ

とによって、仮想地球の気候システムを構築することができる。大気の GCM と海洋の GCM,そして複雑なパラメタリゼーションを統合したモデルは急速に普及し,従来の GCM の後継機に置き換わってきている。

## 全球気候モデルと地球の大気

全球気候モデルにおいて鍵となる方程式は、全ての惑星に適用できる自然界の基本法則と考えられるが、明らかに地球に固有の定数をいくつも含んでいる。そのような変数として、惑星の半径、表面重力、大気の質量、理想気体の状態方程式における気体定数  $R$  などがあり、地球以外の大気を有する球状天体ではなく、地球に対して適切に定義されなければならない。しかし、単に適切な定数を定義するだけでは十分でない。その他にいくつもの情報が必要とされる。

## 境界条件

全ての GCM 実験は、気候に影響する特徴を説明する一連の特定状態に関する情報を提供する必要がある。しかし、ここで提供する状態はその後の気候モデルの計算で変更されることはない。これらの指定された特徴はモデルの境界条件と呼ばれる。最も重要な境界条件は大陸と海洋の分布と地形に関する情報である。更に、氷床の位置や高さ、季節変化する植生、湖沼の位置や広がりなどの地表面の被覆情報が定義される。ある種の実験、特に過去の気候を再現する試みでは、存在する観測データを仮定して海面水温と海水の経年変化もまた境界条件として定義されることもある。しかし、境界条件として定義された情報は指定されているので、モデル計算によって変化することはなく、これらの特徴を定義することは再現された気候システム内のその他の変化全体を制限することになる。

## 初期条件

境界条件に加えて、GCM はいくつかの初期条件を用いて開始される必要がある。初期条件はその名称が示すように、モデルの初期状態に関する情報である。大気に関する立場からは、初期条件とは大気全ての場所における最初の気温、気圧、風、湿度である。観測データに基づいたとしても、初期条件に含まれる小さな誤差が実験の進行と共にある特殊な結果をもたらすことがある。この理由で、厳密な実験では初期条件に僅かな摂動（違い）を与えてシミュレーションを複数回実行して、結果の分析を行う。そのようなシミュレーションでは、それぞれの実験をアンサンブルと言い、各アンサンブルの結果の範囲を、実験の精度の指標としてエラーバーで表現されることがある。

## 気候強制力

初期条件と境界条件が GCM 実験に提供されると、次に実験結果により劇的に影響を与える気候強制力を適用する。一般的にこれらの強制力は一つの実験では、一つかそれ以上である。よく知られた例としては、20 世紀中の気温上昇、そしてこれからの数十年で発生する地球温暖化を説明する温室効果気体による強制実験である。境界条件のように、気候強制力もまた実験において定義される。しかし、それらは多くの場合、シミュレーションの進行に伴い、時間と共に変化したり、空間的に変化する。このような方法で、変化する気候強制力の影響が研究される。

最も一般的な例は、ここでも二酸化炭素やメタン、フロン、二酸化窒素などの痕跡気体の増加に伴う温室効果気体に関する実験である。地球の気候に定常的に影響するその他の強制力としては、大規模な火山噴火中に大気に噴出されるダスト（塵）や硫酸液滴、人間活動による汚染としてのエアロゾル、太陽黒点周期にともなって変化する太陽光度などがある。これら全ての強制力は全球気候モデル実験で集中的に調査され、その結果は「私たちの気候システムが変化に対してどのように応答するか」という情報を提供する。

## 気候におけるフィードバック過程

個々の気候強制力の直接的な影響は、多くの場合前述したその全体的な影響と比較すると相対的に小さい。その理由は、気候システムでは多くの種類のフィードバックメカニズム（フィードバック過程）が機能しており、それらは最初の強制力による影響を増幅したり、減衰させる。それらが作用する時間スケールとフィードバック過程の種類に、実際の制限がないが、地球温暖化や寒冷化に影響する主要なメカニズムとしては、次に例示する三つのフィードバック過程がある。それらは、水蒸気のフィードバック過程、氷-アルベドのフィードバック過程、そして雲のフィードバック過程である。

大気中の温室効果気体が増加すると、それらは惑星表面から射出される熱放射をより強く吸収し、その結果熱を蓄え、大気を加熱する。二酸化炭素のような気体の相対的に大きな増加ですら、大気に対するその直接的な加熱はそれほど劇的ではない。しかし、小さな加熱がいくつかの影響を及ぼす。それらの中で重要な二つは、どちらも強制力による初期の影響を増幅することを意味する正のフィードバックである。二酸化炭素による大気の直接加熱は、海洋表面からより多くの水分を蒸発させる。これは大気中の水蒸気量の増加、特に熱帯での増加を導く。水蒸気はそれ自体が強力な温室効果気体であり、増加した水蒸気が更に大気を加熱し、更に水蒸気を海洋から蒸発させ、正のフィードバックループを完成する。

同様に  $\text{CO}_2$  による最初の大気加熱（そして、増加した水蒸気による大気加熱）により、海水が融解し、降水における降雪の割合が減少するという正のフィードバックループが機能し始める。反射率の高い氷や雪に覆われた地表面の減少は地表面のアルベドを低下させ、その結果、地表面が入射する太陽放射を宇宙空間へ反射せずに、吸収する割合を増加させる。それで惑星の加熱が更に進み、正のフィードバックループが機能する。

雲のフィードバックはより複雑だと考えられ、全ての気候モデルがフィードバックの符号（正または負）で一致しているわけではない。私たちは下層雲が太陽光線を強く反射する傾向があり、上層雲が全体として保温効果のあることを知っている。上層雲は低温なので吸収したエネルギーを地表面よりもとても低い温度で宇宙区間へ再放射する。多くの GCM シミュレーションでは、温室効果気体の増加が全球を温暖にし、下層雲を減少させるところを示した。それは温暖化した大気では大気中の水蒸気が凝結し難くなるからである。これは温暖化を進行させる正のフィードバックである。しかし、もし高層雲もまた減少すると負のフィードバックとなり、下層雲の変化を低減できる。全球気候モデルを利用した研究として一般的に雲フィードバックが正であると言う一般的な一致がある一方、そこには確実に不確実性と結果の程度には大きな差がある。その上、気候モデル (GCM) の中で再現される雲は、雲のフィードバックの本質を決定できるほど十分に正確でない信じて

いる大気研究者がいることも事実である。

### 気候感度

National Academy Press は「気候変動科学」という彼らの出版物で「気候感度」を次のように定義している。

「強制力に対する気候システムの感度（気候感度）は，気候強制力の変化に対して大気と海洋が平衡状態になるために十分な時間経過後に予想される全球平均気温の変化として最も一般的に表現される。」

気候変動に関する政府間パネルのような組織からの刊行物は，これから数十年間に予想される気候変化の説明として，気候感度シミュレーションの結果を参照するであろう。例えば，CO<sub>2</sub> が二倍になった場合の気候感度は，気候モデルの予測に大きな幅があることに基づいて，2～4℃と予想されている。

---

### メモ