

気候システムのモデル化から地球システムのモデル化へ

・地球温暖化予測モデルの現状と今後の展望・

行本 誠史（気象研究所 気候研究部）

要旨

地球の気候をシミュレートする気候モデルは、地球温暖化予測において最も重要なツールとして世界中の研究機関で開発が続けられてきている。そのしくみと最新の予測結果を示し、性能向上と不確実性の低減に向けた地球システムモデルへの発展について解説する。

はじめに

地球温暖化に関して、2007年に発表された気候変動に関する政府間パネル第4次評価報告書(IPCC-AR4)において、2001年の第3次評価報告書から多くの科学的進展があり、最近のより多くの観測データ及びその解析から、温暖化はもはや疑う余地のない事実とされている。また、気候モデルの進歩とモデル数の増加および高度化された観測の解析に基づき、気候変化を数値的な信頼性の範囲とともに示すことが可能となり、またより多くの側面(現象)について将来起こる可能性を量的に評価できるようになった。例えば、気温変化や降水量変化の地域単位の特徴的な変化に関する予測の信頼性は向上した。

気候変動に関連する諸過程について、より理解が進んだ一方、各過程間の新たな相互作用の可能性の発見など、気候変動のメカニズムは、さらに複雑であることがわかってきた。不確実性についての理解は深まったが、その結果として全体の不確実性は低減されていない。

例えば、雲のフィードバックは依然として最大の不確実性要因のままであることが指摘されているが、雲の振る舞いには、これまでの力学的及び熱力学的効果に加え、凝結核となる大気中エアロゾルの効果が重要であり、さらにそのエアロゾルの振る舞いは大気化学過程とも深く関連している。また、気候-炭素循環のフィードバックに関する新たな情報が加わり、例えば海洋の酸性化と二酸化炭素吸収の減少によるフィードバックなどの重要性が示唆されてきている。このように、地球温暖化予測において、これまでの力学的・熱力学的な過程を扱った気候モデ

ルから、生物圏を含む地球化学過程などを含む地球システムモデルへと進化することが求められている。この講義では、このような状況にある地球温暖化予測モデルの現状と今後の展望について解説する。

気候モデル

気候モデルとは地球の大気・海洋・陸面などからなる気候システムを表現する数値モデルであり、単純なゼロ次元エネルギーバランスモデルから複雑な3次元大循環結合モデルまで、階層的なモデルが存在する。気候システムとはフィードバックシステムであり、どの階層の気候モデルにも共通することは、フィードバックを最も重視する点であろう。気候モデルが対象とするものは、システムが自律的に生じさせる内部変動(例えばエルニーニョや北極振動)や外部からの強制(例えば人為的な二酸化炭素排出や自然の太陽活動変動)に対するシステムの応答である。また、その応答と内部変動は複雑に関連すると考えられる。気候モデルはこのような振る舞いを表現することが求められる。

気候モデルのしくみは、例えば大気部分だと基本的に数値予報モデルと同様である。ただし、数値予報モデルが特定の初期値をもとに数日先までの時間発展を求める「初期値問題」を扱うのに対し、気候モデルはある外部条件(境界条件)に対する、大気や海洋の長期間にわたる統計的振る舞いを表現する「境界値問題」を扱う。そこでは、(特に大気などでは)初期状態はあまり重要でなくなり、境界条件となる他のコンポーネント(大気に対しては海洋・陸面など)の表現やそれらとの相互作用が重要である。また、長期間の時間積分を行うため、気候がドリフトしないようコンポーネント内の諸過程やコンポーネント間の物理量の交換において厳密な保存性が求められる。

IPCC-AR4で示されているように、気候モデルは進歩してきており、たとえば以前のモデルは大気海洋間の熱や水フラックスなどに補正を加えなければ、現実的な気候状態を表現することが難しかったが、

最近ではそれをしなくても多くの面で観測に近い気候の表現が可能となってきた。しかしそれでも、多くのモデルに共通する系統的な欠点が存在する。モデルが表現する降水分布を見たとき、赤道をはさんで南北の緯度 10 度付近に平行して集中した降水帯が現れる(ダブル ITCZ と呼ぶ)傾向などはその一つの例である。

放射強制力と気候感度

気候システムを表現するために最も基本的な概念が放射強制力と気候感度である。まず地球のエネルギーバランスを考えてみよう。地球は太陽から地球表面積平均で約 342 W/m^2 のエネルギーを受け、それと同じ量のエネルギーを日射の反射および地球放射(長波放射)で宇宙空間へ放出しバランスしている。放射強制力とは、その地球のエネルギーバランスへの外的駆動要因(二酸化炭素濃度や太陽放射などの変化)の強さの尺度であり、一般に対流圏界面における放射強度の正味の変化(下向き放射と上向き放射の差)で表され、その単位は (W/m^2) である。特に地球温暖化の議論においては産業革命前からの変化を示すことが一般的である。例えば、IPCC-AR4 では二酸化炭素の放射強制力は約 $1.66 \pm 0.17 \text{ W/m}^2$ と見積もられているが、これは二酸化炭素濃度が産業革命前の約 280 ppm から 2005 年の 379 ppm に増加した時、二酸化炭素の濃度以外(水蒸気量など)に変化がないと仮定した場合に、(主に地球から外に出て行く長波放射の減少により)放射バランスが下向き約 1.66 W/m^2 増加することを意味している。

このような放射強制力に対して、気候システムが応答して海面水温や大気温度・水蒸気量・循環など様々な変化が生じた結果、別の平衡状態になったときの全球年平均気温変化(単位は $^{\circ}\text{C}$)を気候感度という。つまり、気候感度は複雑な気候フィードバックを単純化して一つの数値で表すものである。放射強制力を $\Delta F(\text{W/m}^2)$ (下向きを正にとる)、地上気温応答を $\Delta T_s(^{\circ}\text{C})$ とすると、気候フィードバックパラメータ λ は

$$1/\lambda = \Delta T_s / \Delta F$$

で定義される。同じ放射強制力 ΔF に対して、この λ の大きさによって地上気温変化 ΔT_s が違ってくる。しかし、現実の気候システムは常に変動して平衡状態になることはなく、気候フィードバックの大きさを知る

ことは困難である。気候モデルにおいては、それぞれのモデルで表現する諸過程が現実と同じでないためフィードバックの強さが異なり、結果としてその気候感度も異なってくる。また、気候モデルに強制力を加えて大気と海洋が平衡状態となるまでに数千年以上の積分計算が必要であるが、複雑な 3 次元気候モデルでは計算機資源の面から現実的でない。このため海洋循環の変化の影響を無視して熱的な表層だけを表現するモデルで求める方法がとられ、これを一般に気候モデルの「平衡気候感度」と呼んでいる。この他に、平衡状態に達しない主要因である海洋の熱吸収の効果を差し引いて「実効気候感度」を求める方法や、一定の増加率(年率 1%複利)で二酸化炭素濃度を増加させて濃度が 2 倍となる時の地上気温変化(TCR と呼ぶ)を気候感度の代わりに用いる場合もある。

気候フィードバックは多くの種類の複雑な相互作用の組み合わせで生じるものであり、上のフィードバックパラメータもいくつかのフィードバックの組み合わせとして考えることができる。主な気候フィードバックには、水蒸気フィードバック(λ_{WV})、地表面アルベドフィードバック(λ_A)、気温減率フィードバック(λ_{LR})および雲フィードバック(λ_C)がある。図 1 は最近の気候モデルにおけるこれら各々のフィードバックの大きさ($1/\lambda$)を示している。水蒸気フィードバックとは、地上気温(あるいは海面水温)上昇により水蒸気量が増加し、その温室効果により下向き長波放射が増加することによりさらに地表を暖める正のフィードバック($\lambda_{\text{WV}} > 0$)として働くことをさす。地表面アルベドフィードバックは、温度上昇により地表の積雪や海氷が減少し、日射をより多く吸収してさらに温度上昇を大きくする正のフィードバック($\lambda_A > 0$)である。

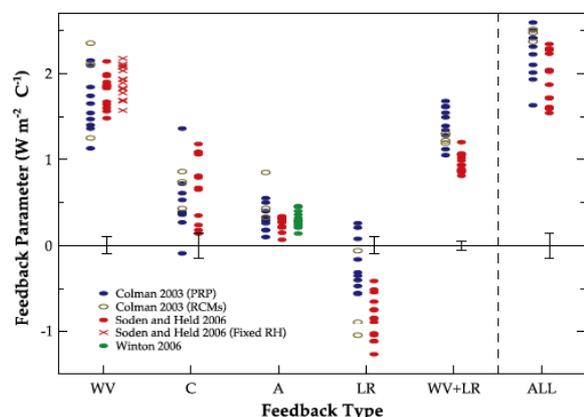


図1 気候モデルにおける各種フィードバックパラメータ。IPCC (2007) Fig. 8.14 より。

気温減率フィードバックは、(主に熱帯)大気の気温減率の変化に関連したフィードバックである。気温上昇によって水蒸気量が増加すると、大気の鉛直構造がより安定化する(気温減率が小さくなる)ため、地表付近よりも対流圏界面付近での気温上昇が大きくなり長波放射による冷却が強まる、すなわちこれは負のフィードバック($\lambda_{LR} < 0$)として働く。最後に雲フィードバックであるが、これはかなり複雑かつ微妙なものである。雲には日射を反射して地表の加熱を抑える効果(日傘効果)と地表からの長波放射を吸収する温室効果がある。これらは雲の種類にも依存し、おおまかに言えば下層の雲は主に日傘効果が大きく、上層の雲は温室効果が大きい。季節や場所により様々な種類の雲が卓越するため、地球全体で平均した効果を評価することは難しい。さらに放射強制力が加えられて地上気温・海面水温が上昇した時、どの種類の雲がどの程度変化するのか予測するのはさらに難しい。以前はその符号さえ分からなかったが、最近ではほとんどのモデルが正のフィードバック($\lambda_c > 0$)を示している。しかし、最新のモデルの結果においてもモデル間のばらつきは大きく、雲のフィードバックが気候感度全体の不確実性の最大の要因となっている。気温減率フィードバックは大気の水蒸気量でだいたい規定され、水蒸気フィードバックを緩和するように働くため、水蒸気フィードバックと気温減率フィードバックを合わせたフィードバック

(λ_{WV+LR})は不確実性が小さくなることがわかってきた。

気候変化予測の不確実性

ここまで述べたように全球的な気候変化は放射強制力と気候感度から定まるものであるが、それぞれに種々の不確実性が存在する。まず放射強制力の不確実性を考えてみる。図2は各種の放射強制力とそれぞれの信頼性(科学的理解の水準)の幅を示している。二酸化炭素をはじめとする温室効果気体による放射強制力についての不確実性は小さい。

大気中のオゾンはほとんどが成層圏に存在するが対流圏にも発生し、両者で生成・消滅のメカニズムは大きく異なっている。成層圏オゾンはオゾンホールが発生などを契機に盛んに研究され、振る舞いのメカニズムもある程度解明されているが、対流圏オゾンは関連する化学反応が複雑で寿命が短く、また時間的・空間的に偏在するため科学的理解が十分でなく不確実性が大きい。

大気中には様々な種類の微粒子(エアロゾル粒子)が存在する。エアロゾル粒子は日射を散乱・反射または吸収し、これをエアロゾルの直接効果と呼ぶ。硫酸エアロゾルなどは日射を散乱・反射する効果が卓越するため負の放射強制力を生じさせると考えられているが、エアロゾルの粒径や種類の分布など十分わかっていない部分があり放射強制力の不

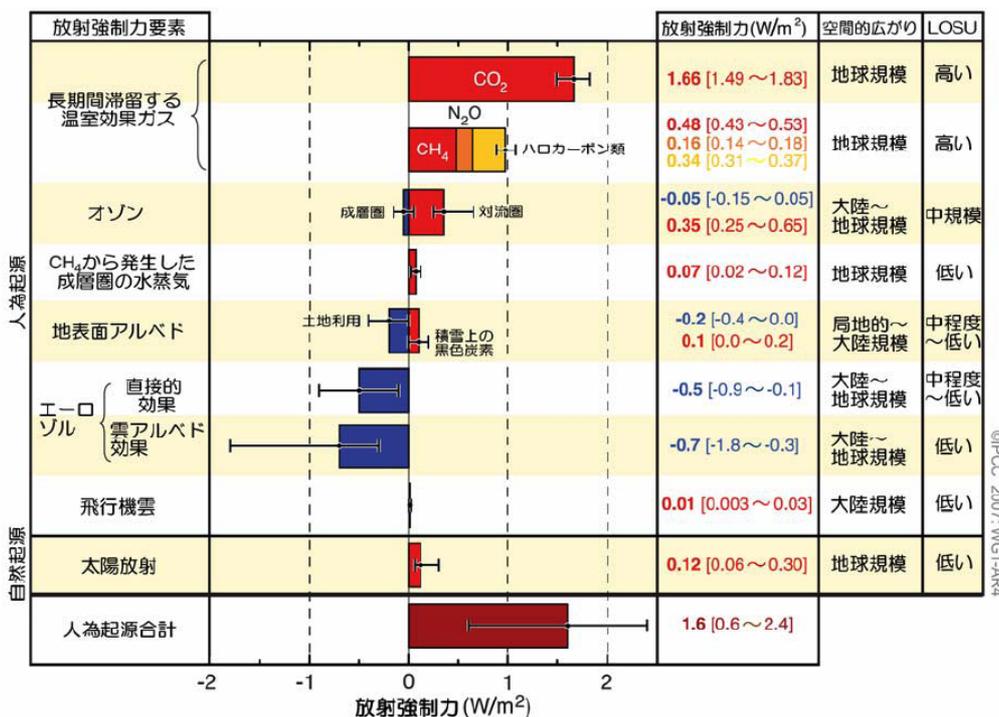


図2 主な放射強制力の大きさと科学的理解の水準。IPCC (2007) SPM, Fig. 2(気象庁訳)より。

確実性はかなり大きい。また、エアロゾル粒子は雲粒が生じるときの凝結核として働くものがあり、雲粒数に影響して雲の光学的特性や雲の寿命に影響を与える。これをエアロゾルの間接効果という。一般にエアロゾル粒子数が多いと雲粒数が増加し、雲はより多く日射を反射する。すなわち負の放射強制力となると考えられているが、定量的な不確実性が大きい。さらに、雲粒数の増加は雲粒から降水への変換効率を低下させ雲の寿命を延ばす(雲を増加させる)に影響すると考えられているが、これも定量的には不確実性が大きい。以上の放射強制力の要因は過去の観測された濃度変化等をもとにしたものであり、将来の変化については、その濃度等が気候変化と相互作用して変化すると考えられるため、さらに不確実性は大きくなることが予想される。

将来の気候変化の予測にとって、放射強制力の不確実性に加えて、モデルが表現する気候感度の不確実性が掛け合わされてさらに不確実性は大きくなる。前節に述べたように気候システムは多くの複雑なフィードバックが組み合わさって変化するものであるが、特に雲のフィードバックは不確実性が大きい。温室効果の放射強制力が加えられた場合に、まず熱力学的効果すなわち水蒸気量や気温が変化すること、あるいは力学的効果すなわち大気循環、上昇流や下降流の場所や強さが変化することにより雲量や雲水量が変化する。これらについての定量的見積りの信頼性も未だ十分ではない。さらに上述のよ

うにエアロゾルの間接効果がからんだ変化も考慮しなければならない。

地球システムモデル

このように、気候変化予測の不確実性低減にはまだ多くの課題があるのが現状である。したがって、今後はこれら不確実性の要因となる諸過程およびそれらと気候変化との相互作用を適切に表現するモデルを用いることが求められる。これまでの一般的な気候モデルで扱われてきた大気大循環、海洋大循環、陸面水文過程、および海氷過程とそれらの間の相互作用に加え、大気化学や海洋・陸面の生物地球化学過程と気候の相互作用まで表現できる地球システムモデルが必要である。図3は気象研究所(MRI)で開発されている地球システムモデル(MRI-ESM)の構成図である。これにより炭素循環の変化を考慮した将来の大気中二酸化炭素濃度をはじめ、人間活動の影響や太陽活動(紫外線量の変化により成層圏オゾンに影響する)、火山活動(大規模な火山噴火により成層圏にエアロゾル粒子が生じる)の気候への影響をより精緻に表現することが可能となる。

○ 炭素循環

地球システムモデルの大きな目的の一つが炭素循環の表現である。地球の炭素は大気、海洋、陸上の間を循環しており、大気中ではほとんどが二酸化炭素として存在している。大気中に放出された二酸

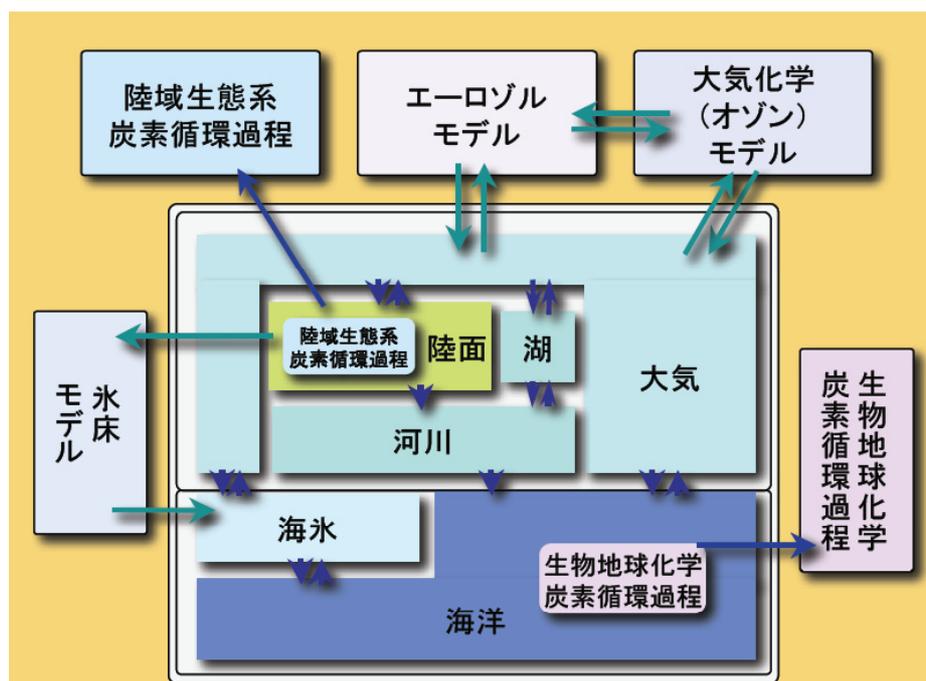


図3 気象研究所の地球システムモデル(MRI-ESM)の構成。

化炭素はそれぞれ異なる時間スケールの様々な過程を通じて大気中から除去され、生物圏を含む海洋あるいは陸上に取り込まれる。現在 MRI-ESM で扱っている炭素循環過程はかなり単純化されたモデルである。海洋に関しては、海洋大循環モデルに全炭酸、アルカリ度、溶存酸素、リン酸塩をパッシブ・トレーサとして導入し、Obata and Kitamura (2003) に基づいて生物(植物プランクトン、動物プランクトン、魚類の区別などはしていない)の生産によって海面付近で炭素を消費し、その死骸が深海に運ばれて溶けることによる炭素の輸送の効果を表現している。陸面では、植物の生産(光合成をして成長)による二酸化炭素の吸収と呼吸による放出、落葉や倒木が腐葉土となりさらに炭化していく過程におけるバクテリアの呼吸による放出の効果を単純化して、大気大循環モデルからの気温と降水量をもとに表現している(Obata, 2007)。海洋・陸上ともに実際は多様な生物が関与していて、これらの過程は非常に複雑である。他の研究機関では生物の多様性も考慮した複雑なモデルも研究されている。大気中の二酸化炭素は化学的に安定なので、ほとんど大気の循環によって移流・拡散するだけであるが、海や陸での吸収・放出に呼応して観測に見られるような南北半球での季節変化の違いなどが表現できている。

○ エーロゾルモデル

MRI-ESM では、Tanaka et al. (2003) をもとにしたエーロゾルモデル MASINGAR-mk2 を組込んでいる。このモデルでは硫酸塩、黒色炭素、有機炭素、土壌ダスト、および海塩の5種類のエーロゾルを扱っている。土壌ダスト及び海塩については粒子の大きさの分布も考慮している。大気大循環モデルから与えられる気象場(風、気温、降水など)を使用し、エーロゾルの発生過程から大気中の輸送、化学反応、重力落下や降水による大気からの除去過程などを計算している。計算された結果の各種エーロゾル分布は大気大循環モデルにフィードバックされ、大気放射や雲への影響の見積りに使用される。

○ 大気化学(オゾン)モデル

成層圏にはオゾン層が存在し、有害な紫外線から地上付近の生命を守っている。オゾンは酸素分子が太陽からの紫外線を吸収して光化学反応で生成される。しかし 20 世紀後半、人為起源であるフロンなどのハロゲン化ガスによって破壊されてきた。また、オゾンやフロンは温室効果気体でもあり、気候

変化予測にはその変化予測が重要となる。MRI-ESM には、これら成層圏オゾンに関連する大気微量気体の振る舞いを表現するための大気化学気候モデル(MRI-CCM, Shibata et al. 2005)が組込まれている。現在のモデルは約 50 種類の微量物質の化学(光化学)反応を扱っている。これによりオゾンホール再現やオゾン変化と気候との相互作用などを調べることが可能となっている。さらに、気象研究所では対流圏オゾンに関する過程を導入したモデルを開発中である。これにより NOx などの大気汚染から光化学反応で生成されるいわゆる光化学オキシダントなどの再現も可能となるが、150 種類以上の物質を扱う必要があるため、大幅に計算量が増加することが見込まれる。

○ 雪氷圏

極域は地球温暖化の影響が最も顕著に現れると考えられているが、それには雪氷圏が重要な役割を果たす。これまでの気候モデルにおいても海水モデルが組込まれており、20 世紀末の海氷域の広がりについてはかなりよく再現できていた(IPCC, 2007, Fig.8.10)。しかし最近数年の急激な夏季の北極海氷の減少は(必ずしも温暖化だけが原因とは限らないが)どの気候モデルでも予測できていない。これまでの気候モデルの海氷は(観測データが乏しかった)厚さ分布の表現に問題がある可能性がある。海氷は薄くなると風によって動きやすくなり、ドラスティックな変化をされると言われている。また、これまで考慮されていなかったエーロゾルの海氷面(積雪)への沈着が影響する可能性も考えられる。海氷モデルにおいてこれらの振る舞いを表現するモデル開発が行われている。

グリーンランドや南極の氷床の変化の海面水位の変化へ寄与は重要である。また、地球システムモデルでは、炭素循環の変化などが関連した氷期・間氷期など古気候の再現性によっても評価がなされる。古気候の再現には氷床の変化を取り扱うことが必要となる。MRI-ESM には Hosaka and Greve (2007) にもとづく氷床モデルを組込む(開発中)。この氷床モデルでは氷の粘性流体力学、熱力学、地殻の熱力学、アイソスタシーを定式化している。ただ、最近知られるようになった氷床上に存在する速い氷流のモデル化については研究途上の段階である。

○ カップラー

地球システムモデルの開発では、大気大循環モデ

ル、海洋大循環モデル、エーロゾルモデル、大気化学モデルなど、各コンポーネントを独立して開発している。各コンポーネントモデル間で各種フラックスや物理量をやりとりするのであるが、モデル間で解像度や時間ステップなどが異なる場合があるため、それをうまく行うには効率が良くかつ柔軟性のあるカップラーが必要である。MRI-ESM では、それに適したカップラー Scup (Yoshimura and Yukimoto, 2008) を開発し、それを用いている。

おわりに

今後の地球温暖化の予測において重視されることは、不確実性の低減あるいは定量化である。不確実性には、先に述べた放射強制力や雲フィードバックをはじめとする気候フィードバック(気候感度)の不確実性の他に、排出量や濃度シナリオに含まれる仮定の不確実性もある。たとえば IPCC-AR4 で用いられたシナリオ(SRES)では、グローバルまたは地域的な経済発展、エネルギー技術革新などは考慮されているが、追加的な CO₂ 削減対策(政策的なもの)は含まれていない。気候-炭素循環のフィードバックを含む地球システムモデルを用いることにより、達成すべき二酸化炭素濃度を仮定してそのために必要な排出量の削減を計算することが可能となる。これは政策決定者に対し重要な資料となるであろう。

もちろん自然科学的にも今後理解を深める必要がある多くの課題が残されている。熱帯低気圧を含む小スケールあるいは地域的現象および極端現象の変化、昇温による氷床の脆弱化、南極氷床の質量増減、最近の北極海の海氷激減のメカニズム、、、などと挙げれば限りがない。諸過程の精緻化・改良、気候システム以外の要素との相互作用、新たな過程の導入、モデルの高解像度化、雲解像(非静力学)モデルを使用した現象の理解など研究者の努力が求められている。しかも、それを急がなければならない。そうでなければ実際に起きてきている気候変化のスピードに我々の理解が追いつけないかもしれないのである。

参考文献

Hosaka, M. and R. Greve, 2007: Change of Greenland Ice Sheet due to Global Warming Simulated by SICOPOLIS. IUGG, July 02-13, Perugia.

- IPCC, 2001: Climate Change 2001, The Scientific Basis. Cambridge University Press, UK. pp944.
- IPCC, 2007: Climate Change 2007, The Physical Science Basis. Cambridge University Press, pp996.
(<http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm>)
- Obata, A., and Y. Kitamura, 2003: Interannual variability of the sea-air exchange of CO₂ from 1961 to 1998 simulated with a global ocean circulation-biogeochemistry model, *J. Geophys. Res.*, 108, 3337, doi:10.1029/2001JC001088.
- Obata, A., 2007: Climate-carbon cycle model response to freshwater discharge into the North Atlantic. *J. Climate*, 20, 5962-5976.
- Shibata, K., M. Deushi, T. T. Sekiyama, and H. Yoshimura, 2005: Development of an MRI chemical transport model for the study of stratospheric chemistry, *Pap. Meteor. Geophys.*, 55, 75-119.
- Tanaka, T. Y., K. Orito, T. T. Sekiyama, K. Shibata, and M. Chiba, 2003: MASINGAR, a global tropospheric aerosol chemical transport model coupled with MRI/JMA98 GCM: Model description. *Pap. Meteor. Geophys.*, 53, 119-138.
- Yoshimura, H. and S. Yukimoto, 2008: Development of the Simple Coupler "Scup" for Earth System Modeling. *Pap. Meteor. Geophys.*, *accepted*.