



温暖化で地球の未来は どうなるのか？

最新の気候モデルから地球温暖化を考える

地球温暖化のように、地球全体で何が起きているのか、そして何が起きていくのかを知るためには、コンピュータ・シミュレーションが欠かせません。シミュレーションの性能を決めるのは計算に使うモデルです。より精密なシミュレーションをするために、新しいモデルが研究されています。



取材協力 **中島 映至** なかじま てるゆき

東京大学気候システム研究センター長

1950年生まれ。1973年 東北大学理学部物理学科卒業。東北大学理学部付属超高層物理学研究施設助手、NASAゴダード宇宙飛行センター上席客員研究員などを経て1991年に東京大学気候システム研究センター助教授となる。1994年 同センター教授となり、2004年に3代目センター長に就任する。現在は、エアロゾルや雲が気候に対してもつ影響や人間活動が地球環境にどのような影響を与えているのかなどを、気候モデル、リモートセンシング、地上観測などを駆使して研究している。

温暖化未来予測に 幅がある理由は？

2007年11月に発表された、地球温暖化に関するIPCC※1第4次報告書では、ここ100年の環境変化の評価とともに、次の100年で地球環境がどのように変化するのかの予測も行っています。それによると、2090～99年の地球の平均気

温は、1980～99年までの平均と比べて、1.1～6.4℃上昇すると予測されています。「1.1～6.4℃」と、予測に5℃以上の幅があるのはなぜでしょうか。理由のひとつは、第4次報告書では、温室効果ガスである二酸化炭素（以下CO₂）の排出量によって複数のシナリオがつけられたことにあります。今後、人間の活動によ

って排出されるCO₂が最も少ない場合に予想される平均気温の上昇幅は1.1～2.9℃。逆に、最も多い場合のシナリオでは2.4～6.4℃の上昇幅が予想されています。

2001年に出されたIPCC第3次報告書では、複数のシナリオ全体に対して簡易な気候モデルを使って予測をしていたの

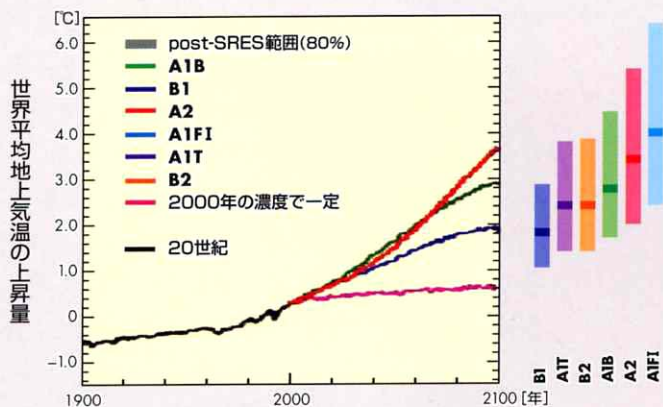


図1 IPCC第4次報告書における2000～2100年の地上気温の予測

IPCC第4次報告書ではCO₂排出量の大きさによって6つのシナリオをつくり、それぞれの温暖化予測をしている。図ではそれらのシナリオのうち、B1、A1B、A2の3つのシナリオについての気温上昇予測の推移を示している。

図2 IPCC第4次報告書における21世紀末の地上気温の上昇予測と海面水位上昇予測

6つのシナリオのうち、一番CO₂排出量が少ないとされているのは、21世紀半ばで世界人口が減少しはじめ、クリーンで省資源の技術が導入されるというシナリオB1。逆に最も多いシナリオA1FIも21世紀半ばで世界人口が減少しはじめるが、化石エネルギー重視の新技術が導入されるというものである。

| ケース | 気温変化 (1980-99を基準とした2090-99における差[°C]) | | 海面水位上昇 (1980-99を基準とした2090-99における差[m]) |
|-------------|---|-----------|--|
| | 最良の見積り | 可能性が高い予測幅 | モデルによる予測幅 流氷の急速な力学的変化を除く |
| 2000年の濃度で一定 | 0.6 | 0.3-0.9 | 資料なし |
| B1シナリオ | 1.8 | 1.1-2.9 | 0.18-0.38 |
| A1Tシナリオ | 2.4 | 1.4-3.8 | 0.20-0.45 |
| B2シナリオ | 2.4 | 1.4-3.8 | 0.20-0.43 |
| A1Bシナリオ | 2.8 | 1.7-4.4 | 0.21-0.48 |
| A2シナリオ | 3.4 | 2.0-5.4 | 0.23-0.51 |
| A1FIシナリオ | 4.0 | 2.4-6.4 | 0.26-0.59 |

(IPCC第4次報告書をもとに作成) 図版：山田浩之

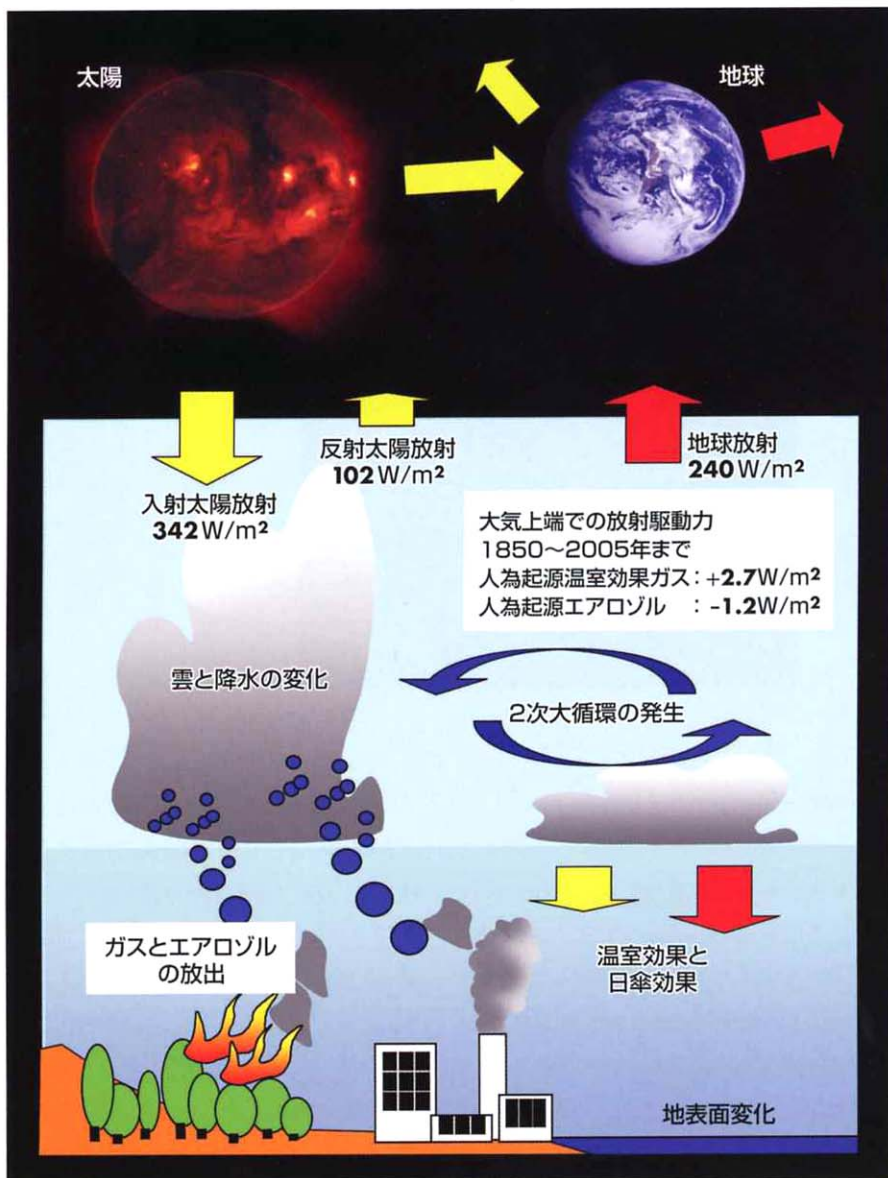


図3 太陽放射エネルギーによって駆動される気候システムとその変化
地球の気候システムは、太陽から送られてくるエネルギーによって動いている。太陽放射から地球に入ってくるエネルギーと地球からの熱放射のエネルギー収支のバランスがとれていないと気候変動が起こる。
 W/m^2 1平方メートルあたりに照射された熱量

に対し、今回の報告書ではシナリオごとに数値気候モデルによるシミュレーションを行っているので、気候予測の精緻さでは前回は上回っています。しかし、それでも、この100年で何℃上昇するのかという予測は、それぞれのシナリオで1.7~4.0℃の幅があります。この予測値の幅に、地球科学の難しさとおもしろさがあるのです。

気象と気候の違いとは何か

私たちが一番身近に感じる地球の変化は、気象の変化だと思います。気象は大気の状態や、雨、風といった大気中

に生じる現象そのものを表す言葉です。それに対し、気候とは長期的な気象の平均的な変化のことを指しています。つまり、日々、目にする天気予報は気象の変化を予測していることになり、気候予測といった場合は、数年、数十年といった長い期間における大気の変化などを予測することになるのです。

“きれいな夕焼けが出ると翌日は晴れる”とか、“月がかささをさすと雨が降る”というように、空の状態を見て天気を予測する知恵は昔からありました。これらの言葉からも天気、つまり気象の変化に人々の関心がとても高かったことがわか

ります。20年くらい前までは、多くの人は気象に関心はあっても、気候にはあまり関心がなかったと思います。しかし、研究者の間では、1980年代から温暖化は確実に進行しているという確信がありました。そして、この問題は国を越えた世界レベルでの取り組みが必要だという意識からIPCCが組織されました。

気象学の枠を超えた気候学に必要なものとは

さて、気候の変化を詳しく分析し、予測をするためには、気候形成のしくみを知らなければなりません。これは従来の気象学で使われた手法だけでは対応できません。気象学は大気の変化や大気中に起こる現象を扱う学問でした。したがって、多くの現象は大気の波動で説明がつかない。つまり、大気が密になる高気圧と疎になる低気圧の分布を見て、それがどのように動くかを考えて天気の変化を予測していったのです。

しかし、長期的な気候の変化をつかむためには、大気の波動だけでなく、温室効果ガスの光吸収なども考えなければいけません。特に温暖化の議論では、CO₂の赤外線吸収が問題になってきます。CO₂は地表から出た赤外線を吸収し、地表を保温することがわかっています。CO₂がどのくらい増えると温暖化がどの程度進むのかを考えるには、CO₂が赤外線をどのように吸収するのかがわからないといけません。

CO₂の赤外線吸収のしくみや測定方法などの手法は、天気予報などの気象予測には重要ではありませんでしたが、気候予測をするためのモデルづくりには必要不可欠な知識となりました。私がセンター長を務める東京大学気候システム研究センターにおいても、気象学の研究者に加えて、私のように気象研究にあまり縁のなかった大気放射の研究者も参加して、気候のモデルづくりの基礎を固めてきました。

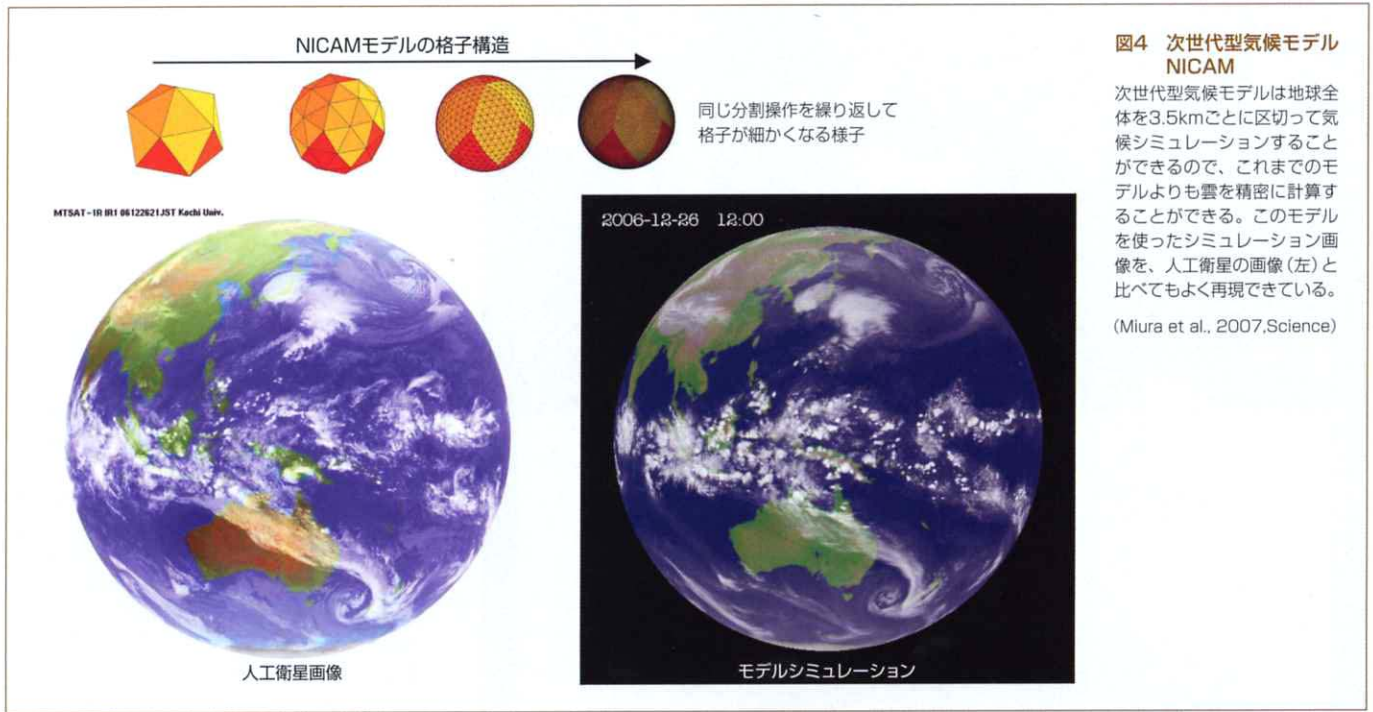


図4 次世代型気候モデル NICAM

次世代型気候モデルは地球全体を3.5kmごとに区切って気候シミュレーションすることができるので、これまでのモデルよりも雲を精密に計算することができる。このモデルを使ったシミュレーション画像を、人工衛星の画像(左)と比べてもよく再現できている。

(Miura et al., 2007, Science)

雲が温暖化予測の幅をつくる

地球環境が今後どのように変化していくのかは、いまのところシミュレーションを通してでしかわかりません。そのために、より精度の高い気候モデルをつくるのが、私たちに与えられている課題です。よい気候モデルは、温暖化をはじめ、大気汚染などの問題を適切に解決していくための指針を、人類に示してくれるのです。

気候研究の重要課題のひとつが雲に関する研究です。雲は気象にも大きな影響を与えることはよく知られていますが、実は、気候の変化にも大きく関わっているのです。先ほど、IPCC第4次報告書で、この100年で上がると予想されている地球の平均気温は、それぞれのシナリオで1.7~4℃の幅があるといいました。この幅ができる理由のひとつが雲にあります。

雲は主に海上から発生した水蒸気によって発生します。ひとつひとつの雲の大きさは数百mから数kmです。ところが、現在シミュレーションに使われている気候モデルは一辺100kmの正方形や三角形に区切るのがやっとなのです。東京の中心部から100kmというと、静岡県沼津

市や群馬県前橋市の辺りまで届いてしまいます。その間に、雲はいくつもできますし、形も複雑になります。現在使われている気象モデルでは、ある簡単な法則を使って雲をつくり出す計算をしますが、この雲ができるときの計算式が気候モデルによって違います。モデルが違っていると、同じ条件でも、雲のできる高さや量に違いができ、採用されたモデルによって、温暖化が進んだときの雲のでき方が変わってきます。各モデルの雲の算出方法の違いが、気温上昇予測に幅のできる大きな原因になっているのです。

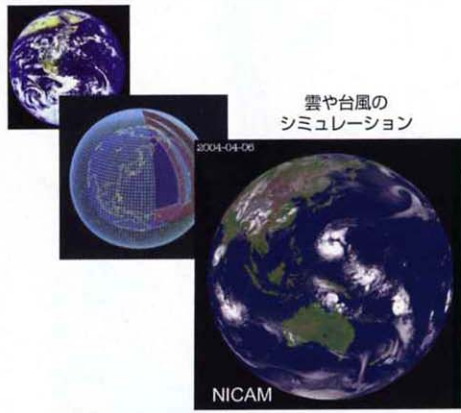
また、雲の問題は大気汚染とも密接な関係があります。雲は上空大気の中にある水蒸気がチリなどのまわりに集まってできます。ただ、大気がチリひとつないともきれいな状態だったら、飽和水蒸気量^{※2}を少し越えただけでは雲はできませんが、現実には飽和状態を少しでも越えると水蒸気は凝結して雲をつくります。これは、大気の中にあるチリが核の役割を果たし、そのまわりに水蒸気がくっつき雲粒となるからです。チリのように大気中を漂う浮遊物質をエアロゾルというのですが、工業化により大気汚染が進むと、エアロゾルの量がとても多

くなります。エアロゾルが多くなると、それを核にして雲粒がたくさんできます。雲粒がたくさんできると雨が降りやすくなると思うかもしれませんが、反対に、雨が降りにくくなります。雲粒がたくさんできるとひとつひとつの粒の大きさが小さくなり、重力により落下しにくくなるからです。実際に、中国の大気汚染が激しい地域では、いま、雨が降らなくなっています。

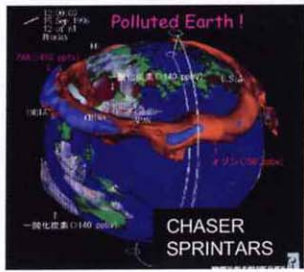
次世代技術で予測の幅を狭める

地球の将来像を予測するときに、CO₂の排出量だけでなく、エアロゾルの量、そして雲のでき方なども考える必要があります。この問題を解決するカギとなるのが、若手研究者たちを中心に開発している次世代気候モデルNICAM(ニッカム)です。NICAMは、地球全体を3.5km単位に区切ってシミュレーションできるので、雲が発生して雨が降るまでのしくみをよりリアルに再現でき、これまでよりも正確な気候変動の予測ができます。IPCC第4次報告書にあったような気温上昇の幅は、このNICAMによってかなり狭められるのではないかと思います。

ただ、いまの段階では、NICAMのも



雲や台風のシミュレーション



大気汚染のシミュレーション

CCSR/NIES/FRCGC

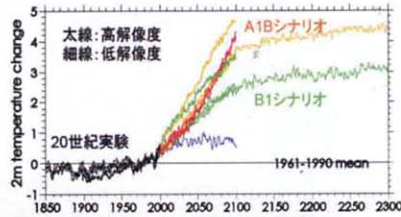
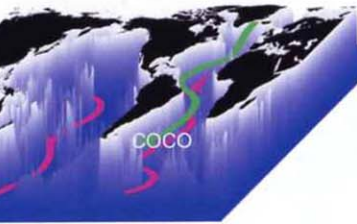
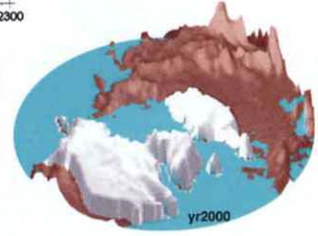


図5 気候モデルの発達によって可能になったさまざまなシミュレーション
気候モデルが発達することによって、地球温暖化シミュレーションをはじめ、台風、大気汚染、海洋循環などさまざまな現象についてシミュレーションをすることができるようになった。

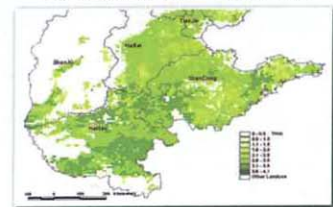


海洋循環のシミュレーション



氷河時代のシミュレーション

温暖化に伴う
冬小麦(河北平原)生産量変化の評価



っている能力を十分に発揮することはできません。なぜなら、コンピュータの性能が追いついていないからです。現在のコンピュータ環境では、NICAMで地球全体のシミュレーションができるのはせいぜい1か月程度です。NICAMを本格的に利用してさらに精密な予測ができるようになるのは、次世代スーパーコンピュータが本格運用される2011年以降になると思います。神戸の理化学研究所に設置される次世代スーパーコンピュータは、日本最大級のスーパーコンピュータである「地球シミュレータ」の約300倍の計算速度をもつように設計されるので、地球全体を細かく区切る気候モデルであるNICAMを使って、数十年分のシミュレーションをすることができるようになります。そうなれば、いままでよくわからなかった雲形成のしくみがわかるようになり、曖昧だった予測がよりはっきりしたものになります。

いろいろな分野の知識をつなげる気候モデル

気候のモデルづくりは、この20年間で

めざましい進歩を遂げました。現在でもわからない問題はたくさんありますが、それを解決するための新しいアイデアや技術がどんどん入ってきています。最初は大気のみだったところから、大気と海の連結モデルができ、台風やエルニーニョ現象※3なども再現できるようになりました。そして、現在はエアロゾル、CO₂といった人間の排出している環境汚染物質の影響をモデルの中に入れることができるようになってきました。

その次の課題としては、氷や雪の問題が挙げられます。地球上には、南極氷床、グリーンランド氷床、北極海の海氷、大陸の氷河などの雪氷圏があります。これらの氷床が急激な速度でとけていけば地球環境に与える影響は計り知れないものがあります。現在、極域では予想以上に氷がとけていると指摘する研究者もいます。ただ、増加している部分もあるためトータルで予想以上の変化が起こっているかはよくわかりません。

気候モデルはさまざまな知識を集約して、地球の気候をより正確に再現したり、未来予測の確度を上げようと努力を

してきました。この流れは今後も続いていきますし、いろいろな分野の専門家とも協力していく必要も出てきます。たとえば、植物の専門家と協力すれば、地球の植生の変化によって地球にどのような影響が出るのかがわかりますし、都市設計の知識が入ってくれば、地球環境に負担をかけない都市づくりもできるようになるかもしれません。

一見、気候とは関係ないような分野に見えても、地球環境という同じ土俵の上に乗ることで、お互いに協力できることがあるのです。このような新しい分野の研究者との共同作業の中から新しい科学が生まれてきます。地球の気候モデルはさまざまな分野をつなぐ媒介として発展し、私たちに新たな知識を示してくれる存在になると思います。 □

※1 IPCC…気候変動に関する政府間パネル (IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change)

※2 飽和水蒸気量…大気を含むことのできる水蒸気量は、気温によって決まっている。この限界量を飽和水蒸気量という。

※3 エルニーニョ現象…太平洋赤道域の中央部から南米ペルー沖にかけての広い海域で海面水温が平年に比べて高くなる現象。エルニーニョ現象が発生すると、日本では冷夏、暖冬になりやすい。