

気候予測

# 4 気候予測がもたらすもの



鬼頭 昭雄  
KITOH Akio  
気象庁気象研究所/気候研究部/部長

日々の天気予報はスーパーコンピュータによる数値予報と呼ばれる技術を用いており、地球温暖化による長期気候変動予測に使われる気候モデルも同様の物理法則に基づいている。この気候モデルによる予測結果は、気候変動の影響評価や適応策の策定に用いられ始めている。

天気予報

明日明後日や1週間先の天気予報を出す時の基礎になっているのが、現在の大気の状態をもとに、将来の大気の状態を予測する数値予報という技術である。図1に示すように、大気中の現象を支配するプロセスは様々であり、大気、海洋、陸地、生物圏等が、それぞれ異なる時間的・空間的スケールで変動するとともに、互いに影響を及ぼしあっている。大気や海洋の現象は物理や化学の法則に基づいて起きており、この法則をもとに、スーパーコンピュータを使

って、「現在」の大気などの状態から「将来」を予測することが可能である。

世界各国の気象機関は、世界中で同時刻に、地上気象観測を行うとともに、風船にぶらさげた気象測器を上空へ放ち、上空15km程度までの大気の状態(気温、風向、風速、湿度)を観測している。同時刻とは世界標準時の0時(日本標準時では9時)、6時、12時と18時の1日4回である。観測されたデータは専用回線網によって世界の気象機関で共有される。気象機関では、さらに人工衛星、航空機、ウィンドプロファイラ(上空の風の観測)、ドップラーレーダー(移動速度の観測)などのデータを加えて、ある時刻における大気の3次元的状态を把握する。

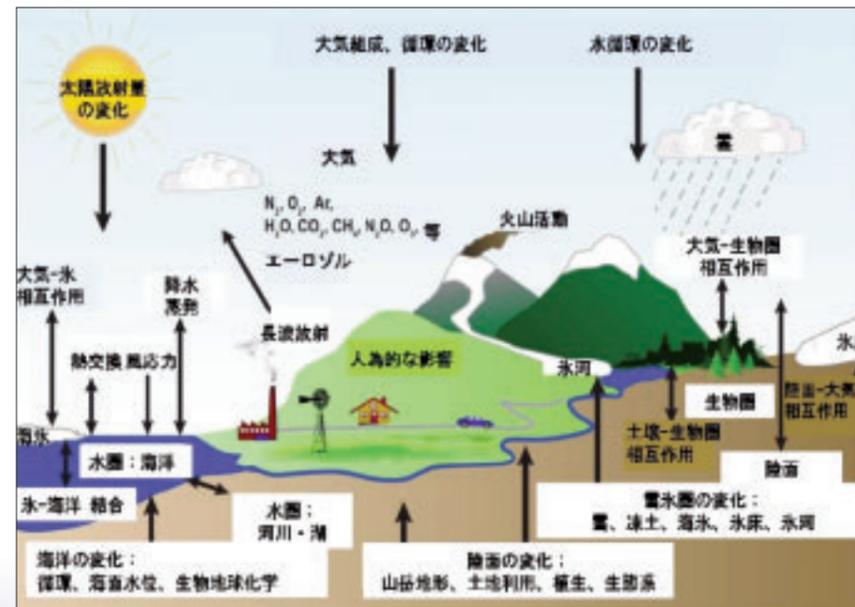


図1 地球の気候系の模式図。地球の気候は大気、海洋、陸地、生物圏等からなる気候系の中で、様々な時間的・空間的スケールで変動している

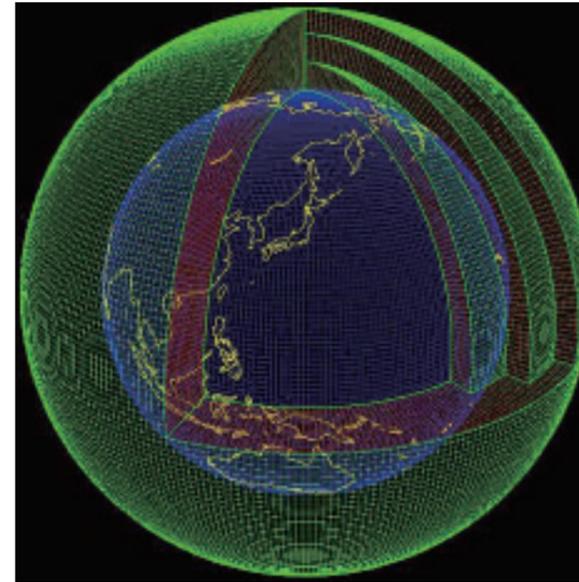


図2 全球大気モデルの格子。地球の大気を東西・南北・高度方向に分割した格子で覆い、それぞれの格子上的大気の状態を数値予報モデルで予測する

1時間程度の観測データを、「同じ0時に観測した」と見なして、異なるデータの誤差を考慮しつつ空間(3次元)的に内挿していた。しかしこれでは実際の観測時刻とのずれを無視しているし、それ以外の時間帯のデータは利用できずに捨ててしまうことになる。そこで現在ではデータを駆使して4次元的に最適な大気の状態(初期値)を求める手法(4次元変分法)が使われている。

どのくらいの格子間隔で地球を覆うかは、使用するスーパーコンピュータの能力に依存する。気象庁では地球の大気全体を水平方向に東西1,920個、南北960個(約20km間隔)および鉛直に60個の格子を用いている。この推定された格子点の初期値をもとに、物理法則(運動方程式、熱力学方程式)に則って、将来の大気の状態を計算する。微分方程式を差分方程式にして時間積分を行うが、1日先の予報を一気に行うのではない。数値計算上の制約から、初期状態からおおよそ30分先の大気の状態を求める。1日先の予報だとこれを48回、1週間先だと336回繰り返し計算を行う訳である。

しかし推定初期値にはどうしても誤差が入ることや、数値予報モデルが完全でないことと相まって、予測誤差が大きくなり、断定的な予測が出来なくなる。これに対処するため、数値予報を始める際の初期値を、観測誤差に対応させて少しずつ変えて多数の数値予報を行い、それぞれの結果から平均やばらつきなどの情報を抽出し、予測の信頼性や確率に関する情報を引き出す「アンサンブル予報」を行っている。

1～2週間先くらいまでだと、主に大気中のプロセスが将来の大気の状態を決定するが、より長期になると、大気よりもゆっくりと変動する海洋の役割が重要となるため、季節予報では大気と海洋を同時に予測する大気海洋結合モデル(気候モデル)が使われる。この時には、日々の天気自体の予測可能性の限界を超えているため、ある期間の気象を平均した「気候」を予測することとなる。

将来の気候の予測

そもそも地球の気候を形作っているのは太陽から届くエネルギーで、地表面に達するエネルギーと地表面から宇宙空間へ逃げるエネルギーのバランスで地表気温が決まる。もし大気中の気体が窒素と酸素だけなら、地表面から大気中に放出される赤外線はそのまま宇宙空間に逃げていくが、大気中にある水蒸気や二酸化炭素、メタンなどの微量気体はこの赤外線を吸収し、吸収したエネルギーの一部を再び地表面へ放射するため、地表面を暖める。これを「温室効果」といい、これにより、地球の地表面は人類にとって適度な気温となっている。この効果を持つ気体を「温室効果ガス」という。このプロセスも物理法則に基づいているため、大気中の温室効果ガスの濃度が分かれば地球の気候をスーパーコンピュータの中で再現することが出来る。

気候モデルによる数値積分を数十年分行うと、大気・陸面や海洋上部はほぼ平衡となる(天気予報と同様にここでも約30分ごとに計算を繰り返していくので、50年分の計算を行うには876,000回の計算が必要で、スーパーコンピュータがなければ出来ないことである)。各地点での日変化や季節変化はもちろん表現し、かつエルニーニョ南方振動現象のような年々変動も再現した上で、与えられた太陽からの入射エネルギーや温室効果ガスの濃度に応じた気候がコンピュータ上で再現できる。ただし深層海洋は別であり、平衡に達するには数千年の時間を必要とする。

ところが、人間活動によって二酸化炭素などの温室効果ガスの大気中濃度が増え続けると、温室効果が増加することで気温が上昇する「地球温暖化」が問題となってくる。気候変動に対する緩和策や適応策などの議論の基礎となる精度の高い気候変動予測が不可欠であり、日本を始め世界各国で研究が行われている。

気象庁気象研究所でも地球温暖化などの気候変化に伴う大気・海洋・陸面・海水などの変化を表現す

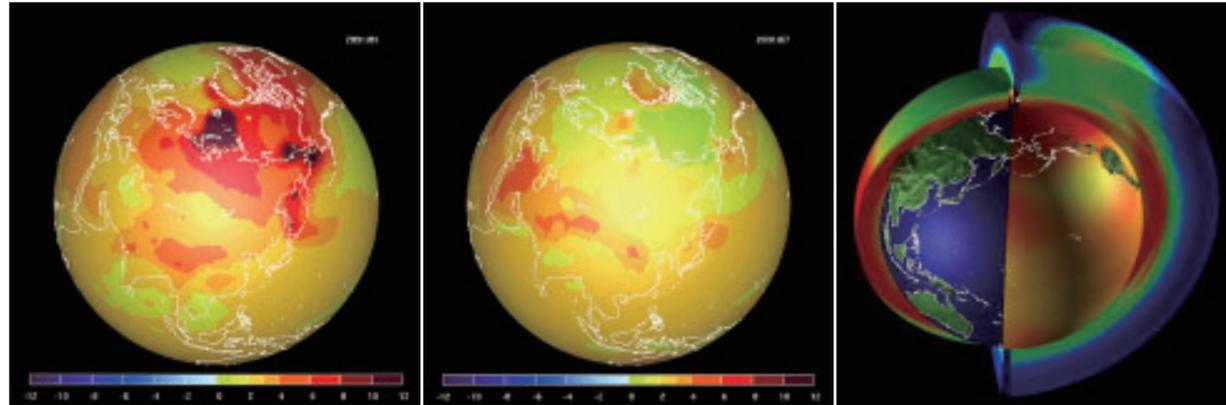


図3(左、中) 気象庁気象研究所の気候モデルを用いたシナリオ(SRES-A1B)実験における2081~2100年平均の地上気温変化。(左)1月、(中)7月。1961~1990年平均との差で示した。赤色が濃いほど温暖化の程度が大きい  
 図4(右) 図3と同じ。ただし1月の大気温度変化の3次元構造。地球温暖化により、対流圏は気温が上昇する一方、成層圏では気温が低下する。熱帯では上部対流圏で昇温が大きく、北半球高緯度では対流圏下層で昇温が大きい。このような気温変化の3次元構造に対応して大気循環が変化する

る気候モデルの開発を行っている。気候モデルを用いて19世紀半ばから現在までに観測された気候変化を再現する実験を行った結果、現在までに全球平均気温が約0.7℃上昇してきたことをよく再現できていた。このモデルを用いて、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)が提案するいくつかのシナリオに基づく21世紀の気候変化を予測する実験を行った。この結果は21世紀の終わりに、シナリオによって1.5℃から2.8℃上昇することを予測している。また、モデルは気温変化の季節による違いや地理的分布も表現している。例えば北半球高緯度では、主に海水や積雪の変化に関係して、気温の上昇が冬には大きく夏には比較的小さくなっている(図3)。さらに気温変化の3次元的構造もモデルは表現している(図4)。温室効果ガスの増加で対流圏の気温は上昇するが、成層圏では気温が低下する。熱帯では対流圏の上層で昇温が大きく、北半球高緯度では雪氷面積が小さくなることで対流圏下層での昇温が大きい。このような気温構造の変化に応じて風速などの大気循環も変化する。

日本付近では梅雨期の降水量が将来は増加することが予測されている(図5)。2007年に発行されたIPCC第4次評価報告書では、多数の気候モデルによる予測実験結果を基に、21世紀末には高緯度と熱帯(例えば、モンスーン地域や熱帯太平洋)で降水量が増加し、亜熱帯(例えば、北アフリカの大部分やサハラ北部)では減少する可能性が高いと評価した。河川流量は高緯度と一部の湿潤熱帯地域で増加、中緯度の一部の乾燥域と熱帯乾燥地域で減少すると予測されている。もともと降水量の多い東南アジアでは、土壌が湿っているため雨はそのまま河川に流

入しやすくなり流量は増加するであろう。特に6月から11月の増水期に河川流量がさらに増加することが予測されており、洪水頻度が増えることが示唆されている。

ひと雨あたりの降水の強さの増加と降水量の変動度の増加が、多くの地域で洪水と干ばつの双方のリスクを増加させると予測されている。日降水量1mmを閾値として降水日と無降水日(乾燥日)を定義し、年間総降水量を年間降水日数で割った値を降水強度とする。図6は20世紀末と21世紀末の降水強度および乾燥日数の変化比である。降水強度はほとんどの地域で増加すること(総降水量が減少するところでも強度は増加)および連続して雨の降らない最大日数も増加することが示されており、これらはより短い期間により強い雨が降るようになることを示唆しており、鉄砲水および都市洪水のリスクに直接影響する。

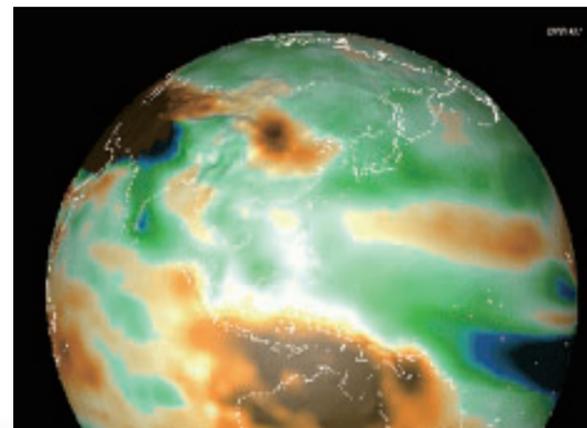


図5 図3と同じ。ただし7月の降水量変化。1961~1990年平均との比で示した。緑~青色は増加、薄茶~茶色は減少する地域を示す。日本付近の梅雨降水帯付近で降水が増加することが予測されている

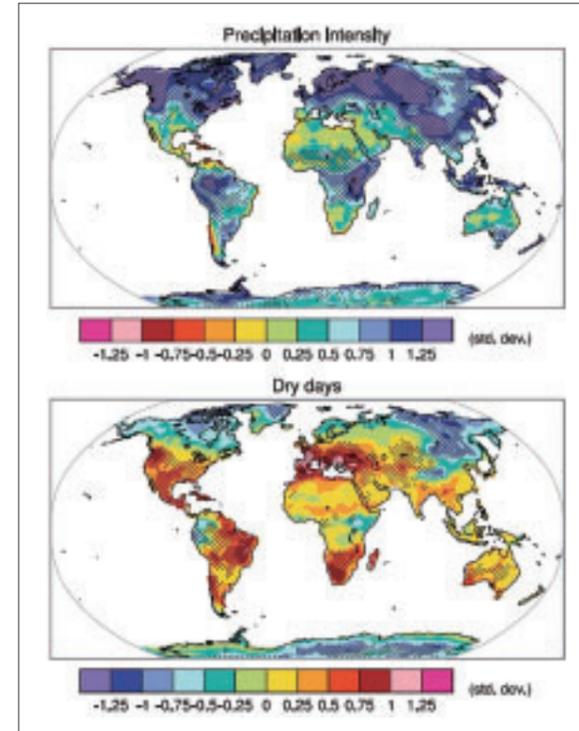


図6 シナリオ(SRES-A1B)実験における20世紀末と21世紀末の(上)降水強度、(下)乾燥日数の変化比。多数のモデルで平均したものの(IPCC 2007)

### 顕著現象の変化予測に向けて

台風や集中豪雨といった極端な気象現象は災害に結びつき易く、人々の暮らしや社会に大きな影響を与えるため、地球が温暖化した時の防災対策を考えるためにも、台風や集中豪雨の変化に関する正確な情報が必要である。しかし、台風や集中豪雨は、水平方向に細かい構造を持っているため、従来の気候モデルでは十分に表現できなかった。

気象庁気象研究所では、地球温暖化に用いられて

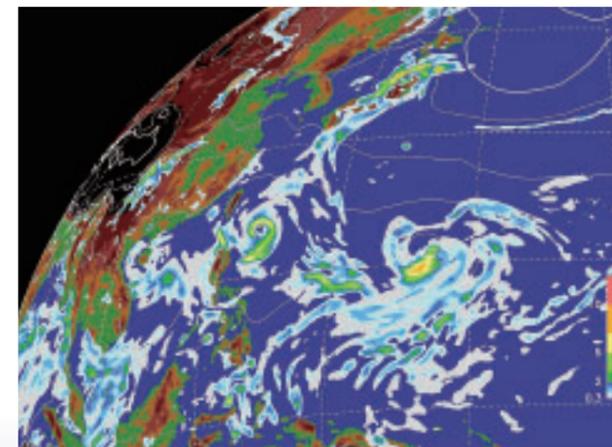


図7 気候モデルで再現された台風。カラーは降水量をあらわし、台風周辺や日本付近の前線上で黄色や赤色で示す大雨が再現されている

きた従来の気候モデルに比べて、水平方向の細かい構造をはるかに詳細に表現できる、20km格子間隔で地球全体を覆う大気モデル(天気予報に用いられている数値予報モデルと同じ解像度)を用いて、台風やハリケーンの変化、梅雨の変化などの予測を行っている(図7)。実験の結果、温暖化した世界では、地球全体の台風やハリケーンの発生頻度は現在よりも減少するものの、平均強度や強い台風やハリケーンは増加することが分かった。

一方、積乱雲の水平スケールは10km以下なので、集中豪雨などの極端現象の正確な予測には、格子間隔20kmの大気モデルではまだ不十分である。そのため、日本付近に領域を限定した5kmおよび1km格子間隔の大気モデルで、日本における集中豪雨などの極端現象の正確な予測を目指している。

雲解像モデルは、1~2km以下の格子間隔を持つ数値予報モデルで、雲を構成する水粒子・氷粒子、雨水・雪・あられなどを直接表現することで、水平スケールが10kmほどの積乱雲を表現できる(図8)。数値計算の時間間隔は5kmモデルでは約24秒、1kmモデルでは10秒という時間刻みが使われている。この雲解像モデルで再現された積乱雲の高さは約10km、大きさは20~30kmであり、積乱雲の南東側では南風により湿った空気が流入し、強い上昇流域が作られている。

現時点では、竜巻などの非常に空間スケールの小さな現象について気候予測シミュレーションでは再現できていないため、その活動が将来どう変化するかは予測は困難だが、このような雲解像モデルを用いた研究が進むことで、顕著現象の発生メカニズムの解明や将来変化の精度が上がるものと期待される。

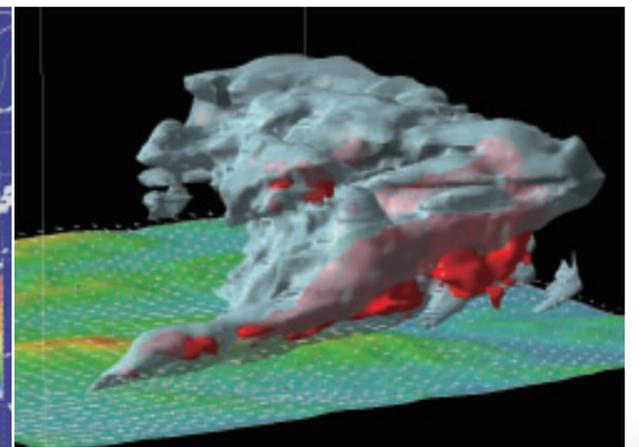


図8 雲解像モデルで再現された積乱雲。雨雲をグレーで、上昇気流が強い領域を赤色で示す(提供:加藤輝之)