

# 第2章 気候モデルと温暖化の予測

## 2 1 温暖化予測のあゆみ

「地球温暖化問題」は、多くの「公害問題」と異なり、現実には何も「問題」がないうちに科学者の将来予測と警告に基づいて社会が動き始めた問題である。それだけに地球温暖化予測の科学的根拠を知っておくことは、社会としての判断をするのに必須といえる。「地球温暖化の科学」は人為的CO<sub>2</sub>増加についての研究とCO<sub>2</sub>増加による気候変化の研究に大別されるが、ここではコンピューター・シミュレーションによる将来予測が主役である後者について、述べる。

地球は太陽の放射エネルギーを吸収することで暖まり、その温度から決まる赤外放射エネルギーを放出して、エネルギー的なバランスを保っている。このバランスから計算すると地球の温度は - 18 となる。しかし、実際の平均地上気温は +15 であり、放射バランスから計算された温度に比べると33 も高いことになる。

その理由は、地球大気は太陽放射をほとんど素通しするが、地上からの赤外放射を吸収する気体があり、これがいったん地上からの外向き赤外線を吸収し、再放出する。この再放出された赤外線のうち下向き成分が地表面を暖めるからである。暖められた地表面からの赤外放射は再び大気で吸収されるので、宇宙空間からみると - 18 相当の赤外放射となって釣り合っていることになる。

19世紀前半、このような放射バランスから地表面温度が求められることを始めて論じたのは数学者としても有名なフーリエ【1】であった。その後イギリスの物理学者チンダル【2】は、水蒸気とCO<sub>2</sub>が大気の赤外放射エネルギーを吸収する気体であることに気がついた。さらに19世紀末から20世紀初頭にかけて、スウェーデンの物理化学者アレニウス【3】はCO<sub>2</sub>の変化が地上気温の大きな変動（氷河時代や間氷期）をもたらした可能性があることを論じるとともに、人間の活動によって生じるCO<sub>2</sub>が地球の温暖化をもたらすと予想した。その後、CO<sub>2</sub>の増加による地上気温の増加を定量的に求めることが試みられたが、放射エネルギーのバランスの面だけしか考慮されなかった。

そうした中でManabe and Wethald(1967)が、放射と対流の効果を取り入れたCO<sub>2</sub>増加による温暖化の定量的評価の基礎を確立した。彼らの用いた鉛直1次元放射対流平衡モデルが、現在の大気・海洋結合モデル（3次元気候モデル）による温暖化予測にまで発展した。

【図1】は現在の最新知識に基づく「気候変動に関する政府間パネル（IPCC）」第3次評価報告書における温暖化予想である。これを見ると、地球の平均地上気温は1990年に比べ2100年には1.4～5.8 上昇

### 【1】フーリエ

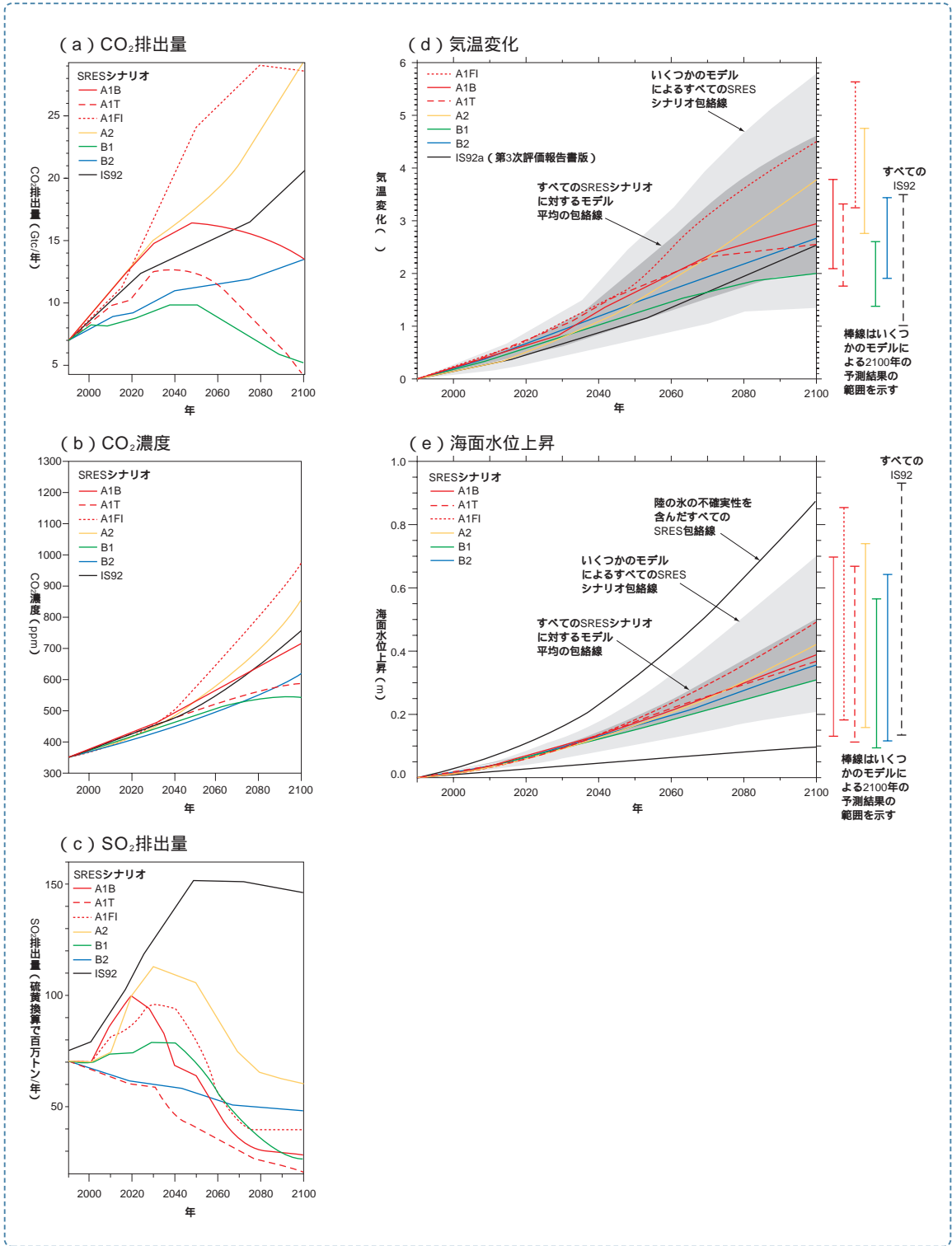
〔Jean Baptiste Joseph Fourier〕  
（1768～1830）フランスの数学者・物理学者。「熱の解析的理論」を著し熱伝導を偏微分方程式における境界値の問題として扱い「フーリエ級数」「フーリエ積分」を導入した。

### 【2】チンダル

〔John Tyndall〕（1820～1893）イギリスの物理学者。チンダル現象を研究。また、アルプスの氷河の観測を行った。科学的啓蒙家・登山家としても知られる。著「アルプスの氷河」

### 【3】アレニウス

〔Svante August Arrhenius〕  
（1859～1927）スウェーデンの物理化学者。1883年電解質溶液の電離説を発表、水素イオンを出す物質が酸であり、水酸イオンを出す物質が塩基であるという酸塩基理論を提出した。反応速度・気象電気・宇宙構造論などの研究もある。



【図1】IPCC第3次評価報告書で用いられた排出シナリオ (a:CO<sub>2</sub>排出量、b:大気中のCO<sub>2</sub>濃度、c:SO<sub>2</sub>排出量) と地球全体の平均地上気温の変化 (d) と平均海面水位の上昇 (e)。 (IPCC, 2001a;気象庁訳)

し、同じく地球の海面水位は、9～88cm上昇すると予想されているのが分かる。

本章では、このような温暖化予測がどのように計算されているか、また地球全体の平均気温以外に地域的な温暖化の特徴としてどのように理解されているかを示す。次に、世界の温暖化予測研究はどのような体制で行われているのか、主要な枠組みを紹介する。そして最後に、日本では気候モデル研究はどのように進められてきて、今後の研究として何が必要と考えられるか、日本の温暖化予測研究の歩みと展望をまとめる。

## 2 2 温暖化予測はどのようにして行われているか

### 2 | 2 | 1 | 地球の気候システム

我々が住んでいる地球の気候は、いったいどんな特徴を持っているのだろうか。IPCCの第3次評価報告書では「気候システム」を次のように定義している。

「気候システムとは五つの主要素(大気圏、水圏、雪氷圏、陸面、生物圏)と、これらの要素どうしの相互作用から構成される高度に複雑なシステムである。このシステムは自らの力学の影響を受けたり、あるいは火山噴火、太陽放射の変動などの外部からの力や、大気組成、土地利用の変化などの人為的な力によって、時間と共に変わっていく。」

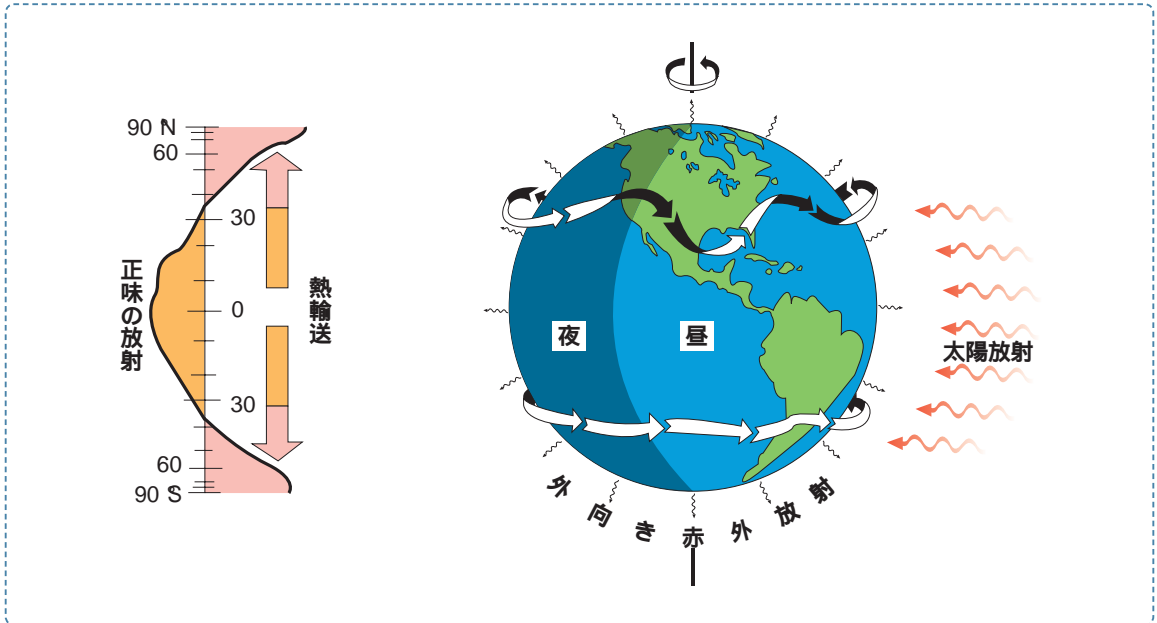
この定義では、システムを構成している要素の間の相互作用が強調されているが、一般に「システム」では、全体として、どういう目的を持って機能しているかという視点も重要である。では、地球の気候システムの場合はどうだろうか。

地球大気は太陽放射に対して透明度が高いために、鉛直方向には、大気よりは地表面で、また、地球は球形のため、南北方向では極域より赤道域で、より多くの太陽エネルギーを吸収している。しかし、これら加熱が卓越する所では、赤外冷却(赤外放射エネルギーの放出)だけで熱のバランスを維持することができない。そこで、地球の気候システムでは、この過剰な太陽エネルギーを熱エネルギーに変えて、太陽エネルギーの吸収が少ない所に運び、赤外線を放出して、システム全体としての熱バランスを達成している。地球の気候システムは、このような熱バランスを維持することを目的とした熱輸送システムと見なすことができる【図2】。

鉛直方向の熱輸送は対流圏【4】という鉛直構造を作り、水平方向の熱輸送は、地球の回転や海陸分布の影響を受けて、低緯度の貿易風帯や中高緯度の西風ジェット、モンスーン循環や黒潮、メキシコ湾

#### 【4】対流圏

地表から高度14～15kmまでの大気の範囲。上層は成層圏に連なる。日射・放射冷却によって対流が起こり、雲の生成や降雨など通常の気象現象が見られる。



【図2】地球のエネルギーバランスと南北の熱輸送を示す模式図。(IPCC, 1996; 気象庁訳)

流などの大規模な大気や海洋の流れを作っている。熱の輸送に伴い、運動量や物質も輸送される。

## 2 | 2 | 2 気候モデル

気候システムの、主要な構成要素、要素間の相互作用の状態と時間による発展を数値的に計算できるように表現したものが気候モデルである。

まず大気・海洋・陸面を、規則的に配列した格子点で覆い、格子点どうしの、エネルギー、運動量、質量の収支を計算する。その際、格子点間隔よりも小さなスケールの流れによる輸送の効果も、収支に影響を及ぼすので考慮する必要がある。

しかしこの効果を、格子点における変数で表わす方法（気象学ではパラメタリゼーションと呼んでいる）は確立しておらず、様々な気候プロセスのパラメタリゼーションが用いられている。この違いによって、世界に多くの気候モデルが存在し、シミュレーション結果の違いを生んでいる。特に雲に関連したパラメタリゼーションの違いはモデル間の温暖化予測のばらつきをもたらす最大の要因になっており、このパラメタリゼーションの改善を図ることが気候モデル開発の最重要課題となっている。

人類の様々な活動によって発生するCO<sub>2</sub>の排出は、地理的に偏った分布をしているが、CO<sub>2</sub>の寿命は長く、大気の循環によってかき混ぜられるため、世界各地のCO<sub>2</sub>濃度はほぼ一樣に増加している。しかし、温室効果の現れ方は一樣にならないと予想されている。このことを示す例として、気象研究所の気候モデルで得られた温暖化パターンを【図3】に示す。世界各地の気候モデルの温暖化予測結果にはばらつきがでるが、【図3】と同様の特徴的分布は、どの気候モデルにも共通に見られるもので、IPCCの過去三つの評価報告書でも、定量的な違いはあるが、定性的には共通の結果であるとして紹介されている。さらに、計算結果を解析することによってその特徴的分布をもたらすメカニズムも解明されており、温暖化の検証や原因特定の研究の基礎となっている。

しかし、現在の気候モデルでは十分にモデル化されていないもの（雲・エアロゾル【5】、陸面植生【6】、海氷、炭素循環等）あるいは、取り入れられていない気候プロセス（大陸氷床の力学等）があり、これらが実際の温暖化と気候モデルによる温暖化予測の違いをもたらす可能性は十分にありえるので、気候モデルの高度化と観測による検証は今後とも継続する必要がある。

### 気候モデルで予測された温暖化の特徴

鉛直方向の変化として次のように予測されている。

対流圏では、温室効果のメカニズムによって気温が上昇する。成層圏では、太陽放射の加熱（O<sub>3</sub>）と赤外放射冷却（CO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>）の釣り合いによって気温が下降する。近年のオゾン減少も成層圏の温度を下降させる効果がある。

海氷の減少による冬季海洋からの大気加熱の増加、雪氷減少（アルベド減少）による太陽加熱の増加のフィードバック効果によって、北極域の対流圏下層で大きく温度が上昇する。冬季の大気は安定なので、温暖化は上層に伝わらない。

積雲対流が盛んな低緯度帯では、気温減率【7】が湿潤断熱気温減率【8】に近い。湿潤断熱気温減率は温度が高いほど小さくなるので、温暖化すると、上層の温度上昇が下層の温度上昇より大きくなる。

水平方向に関しては以下のように予測されている。

高緯度の地上気温の昇温に南北半球間で違いが著しい。北半球高緯度で大きく昇温する。南極大陸周辺では海流が深層に沈み込むので、海面付近に熱が加えられても、北半球のように、海氷や雪氷のフィードバック効果が有効に働かず、海面水温があまり上昇しない。

#### 【5】エアロゾル

大気中に浮遊している固体あるいは液体の微細な粒子のこと。様々な種類があり、たとえば光化学スモッグ中には硫酸粒子と有機物粒子が含まれている。降雨や降雪の核となる。また、大量のエアロゾルは太陽光を反射して地表面に到達する量を減らすため、気候変動にも大きな影響を与えと言われる。

#### 【6】植生

ある場所に生育している植物の集団。荒原・草原・森林などはその例。

#### 【7】気温減率

対流圏内では気温は高度と共に低下する、その割合をいう。実際の大気の気温減率は、場所と季節で異なるが、平均的には100mにつき0.65である。

#### 【8】湿潤断熱気温減率

空気塊が断熱的に上昇する場合、その空気塊の温度が減少する割合（下降する場合は、増加する割合）。普通、乾燥空気の場合は100mについて約1（乾燥断熱減率）、湿潤空気の場合（湿潤断熱減率）は気温と気圧に依存し、地表付近では、25の時0.397、30の時0.365。

蒸発量は温度が上昇すると急激に大きくなるため、海洋では温度変化がわずかでも、大きな蒸発熱（潜熱）の増加で温暖化による地表面における下向きの赤外放射の増加分とバランスできる。また陸面と海洋の熱容量には大きな差がある。そのため、低中緯度の同じ緯度帯では大陸の方が海洋より昇温が大きい。

温暖化により、水蒸気の極向き輸送量が增大し、降水は高緯度で増加する。

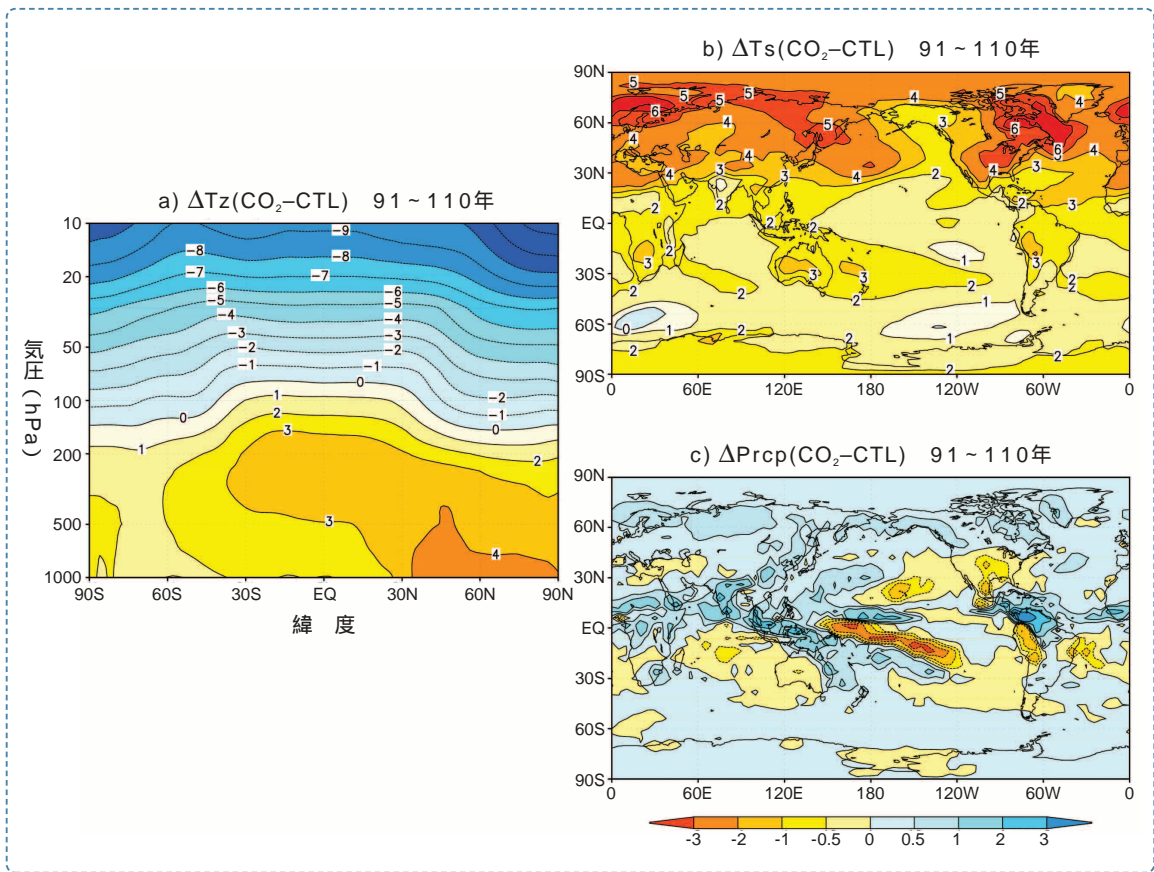
赤道太平洋域では、下層の東風が、海面温度が高く積雲対流活動の盛んな西側で上昇し、東に向い、海面温度の低い東側で下降するウォーカー循環が卓越している。エルニーニョ【9】の時は、この循環が弱まり、反対に、ラニーニャ【10】の時は、強まる。もし、温暖化でこの循環が全般的に強まると、ちょうど、ラニーニャの時と同様な海面水温、降水量、気圧の変化が生じ、逆に弱まるとエルニーニョに似た変化が起こると考えられる。【図3b、c】に示す気象研究所モデルの場合は、ラニーニャ類似の変化だが、エルニーニョ類似の変化を予測する気候モデルの方が多い。

#### 【9】エルニーニョ

ペルー沖でクリスマス頃から南東貿易風が弱まり、赤道海域から暖水塊が流れ込むために海水温が上昇する現象。現在は、カタクチイワシの不漁や沿岸地域の集中豪雨をもたらす、数年に1度の大規模な異常高水温現象をさすことが多い。

#### 【10】ラニーニャ

東太平洋赤道海域で海面水温が著しく低下する現象。



【図3】気象研究所気候モデルで計算されたCO<sub>2</sub> 1%/年（複利）漸増による100年後（91～110年の20年平均）の a) 東西平均年平均気温の変化（ $\Delta T_z$ ； $^{\circ}\text{C}$ ）の子午面分布、b) 全球年平均地上気温の変化（ $\Delta T_s$ ； $^{\circ}\text{C}$ ）の地理分布と c) 降水量の変化（ $\Delta \text{Pr}_{\text{c}}\text{p}$ ； $\text{mm}/\text{日}$ ）の地理分布。（野田，2000）