

1. 地球温暖化問題の現状

1.1 はじめに

2008年7月に洞爺湖で開かれたG8サミットでの中心課題の一つは、地球温暖化問題に対応したポスト京都の枠組み作りであったといわれている。この背景には、地球温暖化問題について世間の見方が大きく変化してきたことがあげられる。例えば、2006年に発表されたスターン報告では、経済学の観点から行うべきは「対策するコスト」と「対策しないコスト」の比較であるとし、「将来の被害を考えると、いま、対策したほうが安い」と主張したのである。また、2007年に、IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change: 気候変動に関する政府間パネル) の第4次報告書 (IPCC, 2007) が発表されたことや IPCC のノーベル平和賞の受賞も大きな影響があった。ここでは、「人間活動の地球温暖化に関する寄与は、90%以上の確からしさ」として、「人間活動が温暖化を引き起こすかどうかは、わからない?」という疑問に決着をつけたという点で画期的である。そして、IPCC は、「いまは行動の時代」と、緩和策と適応策に対する具体的な行動を呼びかけたのである。

しかしながら、このような地球温暖化問題に対する行動が提起された時期に、新たな問題が起こってきた。いうまでもなく、石油の高騰、エネルギー資源の枯渇に関する懸念、資源の高騰、食料の高騰などである (2009年現在では、不況などにより原油高は解消したが、将来的には石油価格は上昇すると思われる)。また、新たな時代を作るかのようにいられていたバイオ燃料に対するバッシングなどが声高に語られるようになってきた。さらに、2008年秋に

2 1. 地球温暖化問題の現状

は、米国のサブプライムローン問題によって世界的な経済不況が引き起こされた。このような世間に起こる出来事の一つ一つが、時代の空気の変化を表しているし、先が見えない現在の状況をよく表していると思う。このようなときには、得てして、流言蜚語や不確かな話が跋扈する。したがって、われわれは、世の中の流れの変化に気を配りながら、正しい知識に基づいて行動していかなければならないということになる。

さて、先に述べたように、IPCCの今回の報告書では、いままでの「人間活動によって温暖化が引き起こされるか、否か？」の議論に終止符を打ち、時代を対応策に向かって進ませる契機となった点が重要である。この変化の背景には、各国で異常気象が続き、多くの国民が、温暖化の可能性を感じ始めたことが大きいと思われるが、同時に、CCS（2章参照）や、石炭利用、原子力、再生可能エネルギーなどの地球温暖化に対する技術的な対応に可能性が出てきたことにも注目する必要がある。さらに、排出権取引などに関する国際交渉の下での国際的なエネルギー使用の枠組みを決める問題が残っている。また、先進国と発展途上国の間の対立を解くのはそれほど容易ではなく、温暖化対策と経済発展の両者を満足させるような対応策が求められている。

これらのことは、気候の温暖化という問題だけに配慮をして行動を決めればよいというわけではなく、現代社会が抱えている問題のすべてに配慮しながら行動を計画しなければならないことを意味している。そして、その指導概念は、サステナビリティなのである。

ここでは、行動の時代にふさわしい行為につなげるためにも、IPCCの第4次報告書で報告されたことを中心に地球温暖化に関するいままでの科学的な知見を整理し、今後の展開を考えてみることにしよう。

1.2 IPCC 第4次報告書の特徴

この節では、IPCCの第4次報告書で得られた新しい知見の中で、筆者が重要と思う点について述べてみたい。

1.2.1 大気中の温室効果気体は増加している

以前から報告されているように、大気中の二酸化炭素（以下、CO₂）は増加し続け、産業革命以前の平均の 280 ppm に比べて 2005 年には 379 ppm になっている。南極やグリーンランドの氷床をくりぬいて得られるアイスコアの中の気泡の分析から得られる過去 1 万年の大気中の CO₂ 濃度と比較してみても（図 1.1）、産業革命以降の濃度の増加が異常に大きいことに改めて気がつかされる¹⁾。最近の CO₂ 濃度の上昇速度を見てみると、1960 年から 2005 年の平均が、1 年当り 1.4 ppm であるのに対し、最近の 1995 年から 2005 年の平均では、1 年当り 1.9 ppm となっている。上昇速度が増大しているように見えるのが特徴である。

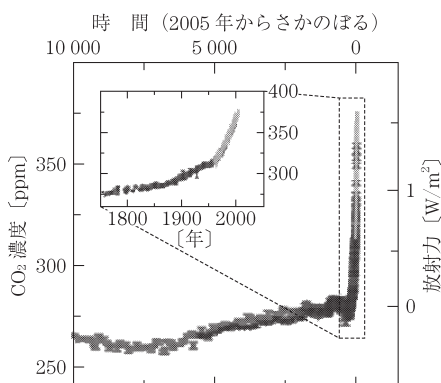


図 1.1 1 万年前からの大気中の CO₂ 濃度 [ppm]。産業革命以降の濃度の増加が急激であることに驚かれることであろう¹⁾。

温室効果気体は CO₂ だけではない。京都議定書では、削減対象気体として、CO₂ のほか、メタン、一酸化二窒素、ハイドロフルオロカーボン、パーフルオロカーボン、六フッ化硫黄をあげている。報告書では、メタンも一酸化二窒素についても、いずれも、産業革命以降急速に増加していると報告している。

1.2.2 放射強制力とは？

地表面の温度とは、地表面に出入りするエネルギーの釣合いで決まってい

[†] 肩付き数字は、章末の引用・参考文献の番号を表す。

4 1. 地球温暖化問題の現状

る。このような状況で、大気中の温室効果気体の濃度が変化すれば、地表からの放射エネルギーを濃度の増加に対応して余分に吸収するので、再度、地表に向けての放射エネルギーが変化することになる。そこで、大気中の温室効果気体による温室効果によって地表面に向かう放射フラックスがどの程度増加するかを示す量として、放射強制力という物理量が使われている。

このような温室効果気体の温室効果については、物理的な理論計算や測定によって求められるので信頼度が高いと考えられている。一方、依然として、推定精度が悪いのは、エアロゾルと呼ばれる大気中の浮遊物質による直接効果、および、間接効果である。エアロゾルの直接効果とは、大都市の空が白っぽいように、大気中の浮遊物質が太陽光を反射する効果であり、間接効果とは、大気中の浮遊粒子が雲の核として働くことによって、雲の粒子の半径を変化させたり、雲の寿命を変化させて、太陽光を反射する能力を変化させる効果のことである。このような効果は、場所・季節により異なると考えられており、地上からの観測や人工衛星観測などにより推定しようとして研究が続けられているが、「地球平均としてどの程度か？」という値を求めるのには依然として困難が伴っている。

なお、温暖化の原因としてよく主張される太陽放射の変化に関しても推定を行っていることに注目してもらいたい。最近では、太陽放射が強くなっていることは事実であるが、その寄与は、第3次報告書の推定に比べて半分以下で、温室効果気体に比べてずっと小さいという結果が得られている。

1.2.3 地 表 温 度

産業革命以降の20世紀の全球平均の地表気温の変化の図は、毎回の報告書でもおなじみであり、新たに、観測データが付け加わり、期間が長くなり、ますます温度の上昇が確認されたというのが第4次の報告書の知見である。政策担当者向けの報告に掲載されている図を図1.2に掲げる。ここで、強調されているのは、第3次報告書で報告された温度上昇（1901年から2000年までの100年間で 0.6°C （幅は、 0.4°C から 0.8°C ））であるのに対し、本報告の1906

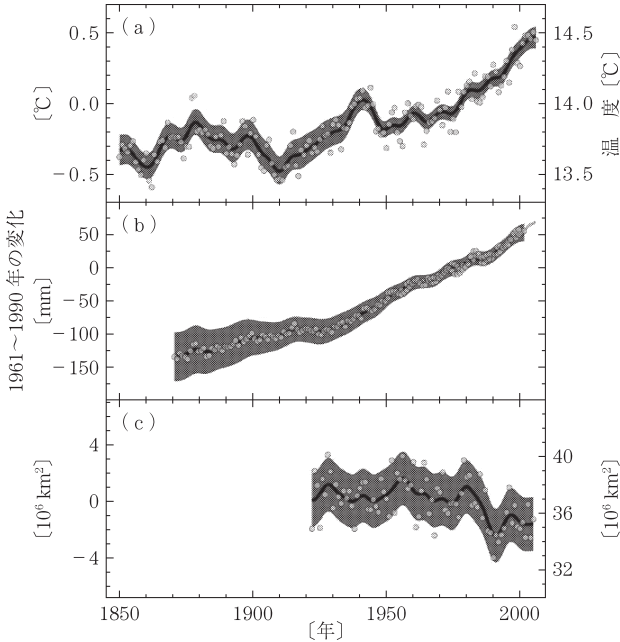


図 1.2 温度、海面高さ、北半球の雪水面積の変化。(a) 全球平均の地表面気温の変化 [°C]。1990 年を基準としてある。黒線の周りの幅は、推定の幅を示す。(b) 同様に、全球平均の海面水位の変化 [mm]。(c) 北半球平均の積雪面積の変化 [10^6 km^2]。

年から 2005 年の 100 年間で 0.74°C (幅は、 0.56°C から 0.92°C) と増加したことである。この増加には、最近の温度の上昇が大きいことが効いていることは間違いがない。このほかにも、20 世紀の温度上昇を示唆するデータは、数多くある。一番顕著に見られるのは、アルプスなどの山岳氷河の後退である。また、図 1.2 (c) には、北半球の積雪面積の減少が示されている。最近の 50 年間の温度上昇は、100 年間の平均の温度上昇に比べて倍になっているとされるが、1990 年代から暖かい年が多いことは経験されていることであり、この結論は納得されることと思う。

従来は、地表気温の増加に関して、「都市のヒートアイランドの効果が混在

6 1. 地球温暖化問題の現状

している、温度が上昇しているのは、北半球高緯度のみである、衛星観測では違う」などの批判が加えられていたが、これらの批判に対しても（正直に言えば、言いなりに近いが）検討が加えられている。まず、ヒートアイランドの効果については、都市化の進んでいない地域のデータをとっても温暖化を示していることや、海洋上のデータからも温暖化の傾向が示されているので、ヒートアイランドの効果は全球平均や北半球平均といった地球規模の温暖化に関する寄与は小さいと考えられる。もちろん、東京などの大都市などでは、ヒートアイランドの効果はものすごく大きいことには間違いはない。しかし、地球は広いので、それらが地球全部の温度を支配するとは考えにくいことは理解されよう。

衛星観測と地上観測データの不一致については、一般の人には理解しにくいことと思う。衛星による地球観測といっても、人工衛星に温度計が積んであって地表の温度を測っているのではなく、地球大気分子から放射される微弱なマイクロ波を測定している。当然、地表と人工衛星の間には、空気や水蒸気などが存在するので、マイクロ波は、その影響を受けた形で人工衛星によって測定される。そこで、得られたデータから途中のさまざまな影響を除去することによって地表付近の温度を推定するわけである。前にも述べたように、人工衛星の軌道の誤差や成層圏の温度の補正が不十分なので人工衛星からのデータは温暖化を示さなかったと考えられ、適切な補正を行ったところ、地表観測のデータと矛盾はなかったという報告がされている。

1.2.4 海面上昇

温暖化により確実に起こると考えられているのが海面上昇である。これは、グリーンランドや南極の氷が解けるかどうかということを除いても、海水の温度が上昇すれば、膨張により体積が大きくなるので海面は上昇することになる。なお、海に浮かんでいる氷が海面上昇に寄与しないのは、アルキメデスの原理により、氷の重量は海面下の氷が占めている体積に相当する海水の質量と等しいため、氷が溶けるとちょうど氷が占めていた海面下の容積を埋めることになるからである。この海面上昇の時間的変化が、図 1.2 (b) に示してあ

る。これも、観測データによって20世紀から21世紀に引き続く海面上昇の傾向は確認されたといつてよい。ちなみに、20世紀の100年間の全球平均の海面高度の上昇は、17 cm (12~22 cm) とされている。

1.2.5 降水量と異常気象

人間生活に大きな影響を与えるのは降水量の変動である。しかしながら、降水量変動は、局所的であり、また、すべての降水量を観測することができないので、明確な結論を得ることは不可能である。しかしながら、強い降水があちこちで増えていることは、気象庁による異常気象レポートなどに報告されている。

さて、異常気象というと、「地球の温暖化が進むと異常気象が増えるのではないか？」という質問が一般の人から頻繁に寄せられる。自らの生活には異常気象と呼ばれる天気大きな影響を及ぼすのであるから、このような質問が出るのは当然であろう。しかし、気象は、本質的に確率統計現象であり、暑い日も寒い日も存在し、また、猛暑の年も冷夏も存在する。一般的には、まれに起こる現象は社会に対する影響も大きいので異常気象と呼ばれているが、本来、気象には正常も異常もない。ただ違っているのは、まれに起こるか、頻繁に起こるか、という頻度の違いなのである。そこで、IPCCでは、まれに起こる現象という意味で異常気象のことを極端現象と呼んでいる。

このような極端現象の例としては、猛暑、冷害、集中豪雨、台風などがあげられる。これを見ると、多くの極端現象が降水プロセスに関連していることがわかる。しかしながら、現在の気候モデルでは、降水プロセスの表現は弱点の一つであり、降水量が、十分正確に表現されているかは注意しなければならない。それに対し、気温に関連しては気候モデルの精度は高いと考えられるので、真夏日の増加などの予測の信頼度は高いと考えられる。また、降水プロセスの精度が悪いのは、降水をつかさどる積乱雲などの水平スケールが小さいためである。だから、どこで集中豪雨が起こるか、どの程度の雨量があるか？というような点に関しては、気候モデルの精度が十分とはいえないのである。一般的には、気温が増加すれば、大気中に含まれる水蒸気量が増加し、積乱雲に

8 1. 地球温暖化問題の現状

伴う降水量は増加することは間違いがないと思われる。熱帯地方の積乱雲に伴う降水が激しいことを想定すれば、容易に、理解できることであろう。ただ、問題は、頻度である。この問題が端的に示されているのが、台風の変化である。現在の研究結果では、強い台風の発生する確率は高くなると考えられているが、弱い台風の数が減るのではないかとされている。

1.3 気候モデル

地球温暖化は将来の問題であるために、気候モデルを用いた数値シミュレーションが重要な役割を果たしている。そこで、ここでは、今後とも地球温暖化問題で中心的な役割を果たす気候モデルについて簡単に説明を行いたい。

気候システムは、大気や海洋などのさまざまなサブシステムから成り立っている。そして、これらのサブシステムは、それぞれ固有の力学と時空間スケールをもっていると同時に、それらの間には相互作用が存在し、その結果として気候システム全体の振舞いが決まってくるのである（図1.3）。例えば、大気は気体であるのに対し、海洋は液体、氷床は粘弾性体である。したがって、それぞれに適した方程式系を用いる必要がある。また、これらのサブシステムの間では、エネルギーや物質が交換されており、その相互作用は物理的・化学的な法則によって支配されている。例えば、大気や海洋は、流体であるので、物理的な変数としては、速度（風速や流速）、圧力、温度、質量などが用いられるのが普通である。これに対し、速度に関しては、ナビエ-ストークスの方程式、そして、温度、圧力、質量に関しては、エネルギー保存則、質量の保存則、そして、状態方程式によって記述される。したがって、これらの連立方程式を解けば、解が求まる、ということになる。ただ、解を解析的に求めるのは不可能なので、地球上に格子点を展開し、差分などの近似計算を用いて数値計算を行うのである。

将来の予測をするということは、初期値問題を解くことであり、時間軸方向に積分を行わなければならない。つまり、一定の時間間隔で数値積分を繰り返

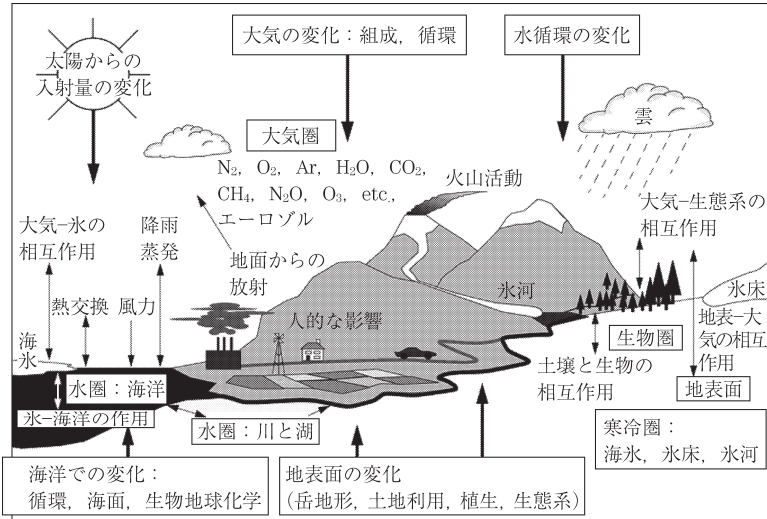


図 1.3 気候システムの模式図。気候システムは、大気や海洋、雪氷、植生などのサブシステムから成り立っている。それらには相互作用が存在し、エネルギーや水、さまざまな物質が循環している²⁾。

しながら、目標とする時間まで計算を繰り返すのである。この時間間隔は、格子間隔により異なってくるが、大気の場合で格子間隔が 300 km のときには、おおよそ 5~30 分程度になる（この違いは、計算手法による）。このようなモデルを 100 年間積分しようとしたときには、非常に多くの計算時間が必要なことを理解していただけたらと思う。また、気候の計算の場合には、1日2回、できれば、1日4回、すべての変数をデータとして残しておく必要がある。100 年後の値が重要なのではなく、100 年間にわたる時間変化が重要だからである。このため、気候モデルの関係者は、つねに、最高速のスーパーコンピュータと最大量の記憶媒体を求めているのである。また、このような計算は近似計算であるので、誤差が集積したりして必ずしも正しい解が求まる保証はない。そこで、効率的な時間積分法やその精度の解析など膨大な研究が存在する。

幸いにして、日本では、1997 年から 5 年間かけて、世界一のスーパーコンピュータ“地球シミュレータ”を開発するプロジェクトが行われた。この“地

球シミュレータ”の成功は、米国に“スプートニク以来の衝撃”を与え、スーパーコンピュータの開発競争が再発したのである。現在では、米国勢に抜かれ、地球シミュレータは世界7位程度に落ちてしまったが、これを挽回すべく、2006年から新たな国家プロジェクト「京速コンピュータ計画」が始められている。

この地球シミュレータの開発と同時に、地球温暖化に貢献する「日本モデル」開発プロジェクトが行われた¹³⁾。この中で、東京大学気候システム研究センター、国立環境研究所、海洋開発研究機構の3者は共同して、世界で最も細かい大気海洋結合モデルを開発し、地球温暖化のシミュレーションを行った。最も細かいといっても、大気モデルの格子が、約100 km程度、海洋モデルの格子が約20 km程度である（注：気候モデルという場合には、普通は、大気大循環モデルと海洋大循環モデルを結合したものを意味するが、厳密にいう

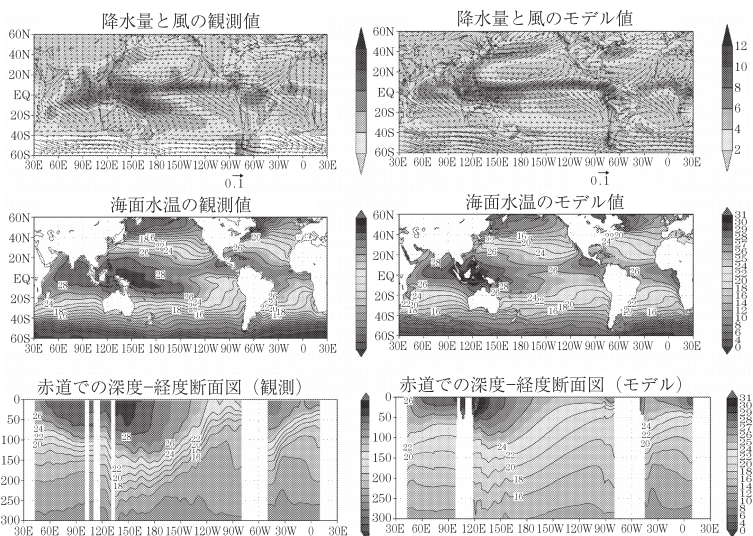


図1.4 海面水温と降水量と気候モデルのシミュレーション結果（口絵1）。（左上）観測された年平均日降水量分布と地表の風の分布。（右上）高分解能大気海洋結合モデルで計算された年平均日降水量分布と地表の風の分布。（中）同様に、年平均海面水温分布。左側が観測、右側がモデルの値。（下）赤道太平洋での深度-経度断面図。