

地球環境問題と地球温暖化 ～ 気候変化の科学 ～

山崎 孝治

(北海道大学大学院地球環境科学研究科)

1. はじめに

昨年(1997年)12月に京都で温暖化防止国際会議が開かれ、二酸化炭素の排出規制がスタートすることになった。まずは温暖化防止への第1歩を踏み出したわけで喜ばしい。ここでは、「地球温暖化はどうしておこるのか、どう予測するのか、また実際に気候は変化しているのか」などの点について気候変化の科学の立場から述べたい。

2. 気候システム

天気は、晴れ、曇り、雨など刻々変わる大気の状態である。これに対して、気候とは各季節の天気の平均的状态をいう。どの位の期間の平均かという学問的な定義はないが、気象庁で平年値という場合には、10年ごとに最近の30年平均を用いている。

気候は大気の平均的状态ではあるが、気候を決めるものは大気だけではない。大気は熱容量が小さく長い記憶をもっておらず、大気の運動は2週間以上ではカオス的振る舞いをする。まして、地球温暖化や氷河期-間氷期サイクルのような長い時間スケールでは、大気以外のもっと長期の記憶をもっている系も考慮する必要がある。そのなかで一番重要なのは海洋である。ヨーロッパが高緯度でありながら比較的温暖であるのは、メキシコ湾流という暖かい海流が大西洋北部まで流れているからである。塩分の濃い北大西洋表面海水は冷やされて重くなり深層に沈み込む。これが海のコンベアベルトと呼ばれる深層循環の出発点である。深層循環の変動は気候に大きな影響を与える。また、赤道太平洋で数年に1回発生するエルニーニョ現象は、大気と海洋の相互作用の結果として生じている。その他、高緯度海洋上に存在する海氷や大陸上の雪など雪氷も大気に大きな影響を与える。さらに、生態系も気候に影響を与える。

また大気組成の変動、例えば二酸化炭素濃度の変動も気候に影響するのは地球温暖化問題でよく知られている。このように気候は大気・海洋・雪氷・植生がそれぞれ影響を及ぼし合う総合的なシステムとして捉える必要があり、これを気候システムという。地球環境問題は人類が気候システムを乱すことで生じた問題といえよう。

3. 二酸化炭素濃度は増加している

人類は大気の組成を変えるほどのパワーをもつまでになった。大気中の二酸化炭素濃度は化石燃料の消費や森林伐採等の人間活動のために増加している。二酸化炭素濃度は、産業革命前のおよそ280ppmから1996年現在の360ppmまで約30%増加している。特に、20世紀後半の増加が著しい。近年では毎年1.5ppmずつ増加している。また、この大気中の二酸化炭素濃度の増加は化石燃料の消費による放出量と平行して増加している。しかし、人類起源の放出量 7.1キガトツ/年 (炭素換算: GtC と表す、 キガトツ は 10^9トツ)に対し、大気中の二酸化炭素の増加量はその半分ほどの 3.3GtC/年 である。残りは、海洋によって吸収されたり、陸上の植物が成長したりすることによって吸収していると思われるが、まだよくわかっていない。

二酸化炭素は、地球表面からでる赤外放射を吸収し、上下に再放射することにより、地表を二酸化炭素がない状態より暖かくしている。これを温室効果とよぶ。もし仮に空気が赤外放射に対して透明で地上気温に対応した赤外放射と太陽放射が釣り合っているとして平均地上気温を求めると -18°C となるが、これは現実の地球の平均地上気温の 15°C より30

℃以上も低い。現在の地球がほどよい温度になっているのは温室効果のおかげなのである。したがって、二酸化炭素濃度が増加することは気候の温暖化をもたらすと考えられる。人類はそれとは知らず大気組成を変え、意図せずに温暖化を引き起こそうとしているのである。温暖化によってよい結果をもたらされる地域もあろうが、大陸上での干ばつ・水害の多発などにより農業生産に悪影響を及ぼす危険性もあり、海面水位の上昇により低地帯では水没のおそれもある。また、急激な温暖化による気候帯のシフトに陸上生態系が追従できないのではないかと危惧されている。急激な温暖化は危険であるといえよう。

温室効果をもつものは二酸化炭素(CO₂)だけではなく、水蒸気(H₂O)、メタン(CH₄)、亜酸化窒素(N₂O)、フロンや対流圏オゾンもそうである。これらの気体の濃度は小さいが、単位質量あたりの温暖化能力は二酸化炭素よりずっと大きい。そして、水蒸気以外のこれらの気体の濃度も人間活動によって、二酸化炭素に負けず劣らず増加している。メタン、亜酸化窒素は産業革命前は700ppb、275ppb(ppbは10億分の1)程度であったのが、1994年時点ではそれぞれ1720ppb、312ppbとなっている。二酸化炭素以外の温室効果ガスの全体としての温暖化効果は二酸化炭素よりやや少ないが、二酸化炭素に近い程度の温暖化能力をもっている。最も強力な温室効果気体である水蒸気は人間活動によって増加しているわけではないが、気温が高ければ大気中に含むうる水蒸気量は多くなるので、温暖化により水蒸気も増加し、温暖化を加速すると考えられている。

人間活動は逆に寒冷化する要因も作りだしている。それは、産業活動などによって排出される亜硫酸ガスの効果である。亜硫酸ガスは大気中で微少な硫酸液滴(エアロゾルの一種)となって浮遊する。硫酸エアロゾルは降水を酸性化し森林に被害をもたらすという弊害があることはよく知られている。一方、エアロゾルは気候にも影響を与える。エアロゾルの増加は太陽放射を反射し地表を寒冷化する働きがある。また、エアロゾルは雲の凝結核となり雲量を増加させ、さらに寒冷化を加速する。しかし、二酸化炭素と違いエアロゾルの寿命は短く全球的に広がることはないため、この効果は北半球にほぼ限られ、量的にも温室効果気体による温暖化をキャンセルするほどではないと考えられている。

4. いかに温暖化を予測するか

二酸化炭素濃度の増加によって全球平均温度がどうなるかは、最初に1次元の放射・対流平衡モデルで計算された。これは米国地球流体力学研究所の真鍋淑郎博士による先駆的な研究である。このモデルは二酸化炭素、オゾン、水蒸気及び雲量の鉛直分布を与えて、太陽放射と赤外放射による大気加熱率を計算して気温分布を予測し、気温分布がもはや変化しない状態すなわち平衡状態を求めるものである。その際、気温減率が6.5℃/kmを越えると対流がおこるとして減率が6.5℃/kmを越えないようにしている。そしていろいろな二酸化炭素濃度のもとの平衡気温分布を求めた。それによると、二酸化炭素濃度が300ppmから600ppmに倍増すると地上気温は2.36℃上昇することがわかった。また、成層圏は逆に寒冷化することも明らかにした。成層圏はオゾンによる紫外線吸収による加熱と二酸化炭素等による赤外放射冷却がほぼ釣り合った放射平衡の状態にあり、二酸化炭素が増えると寒冷化する。また、オゾン減少によっても寒冷化する。

気候変動の地理的分布を知るためには1次元モデルでは不可能で、3次元モデルで計算する必要がある。しかも、100年スケールの長期間の気候変動を扱うので、大気モデルだけではだめで、海洋モデルと結合させる必要がある。大気モデルは、本質的には数値予報に用いられるのと同じモデルであるが、天気を予報するためではなく気候を再現するために用いられるとき、大気大循環モデルと呼ばれる。また、海洋モデルも世界の海洋循環を再現する研究で開発されてきたもので、海洋大循環モデルという。この2つを結合した大気海洋結合モデルでの温暖化予測実験も真鍋博士により始められ、現在では世界の多くの大学・研究機関で実験が行われている。

実験結果によれば、温暖化の起こり具合は地域によって異なる。海洋の鉛直混合が活発で海水が沈み込んで深層水が形成されている北大西洋及び南極海では、温暖化が遅れる。

二酸化炭素が倍増した時点でも目立った温暖化は見られない。多くのモデル実験の結果によれば、北大西洋では、正味の海洋表面への水の供給（降水量及び河川の流入量から蒸発量を引いたもの）が増えて海洋の成層が安定化して、沈み込みが起こりにくくなり、熱塩循環は弱まると予想されている。熱塩循環が弱まれば、北大西洋への海洋による熱輸送が減少し、その地域を寒冷化させる要因となるのである。そのため、北大西洋域では温暖化が遅れると考えられる。

5. 本当に温暖化しているのだろうか

では、実際に地球は温暖化しているのだろうか？ 測器が整備されてきた19世紀後半以降の1994年までの全球平均気温の変化（図1）を見ると温暖化しているようである。特に温暖化が顕著な時期は、1910年頃から1940年頃までのおよそ30年間と、1970年代半ばから現在（1994）までの期間である。

全球平均地表気温は19世紀後半からみれば約0.5℃上昇し、最近40年間では0.2-0.3℃上昇している。この温暖化が自然の変動だけで説明されるとは考えにくい。温暖化率は、二酸化炭素とそれ以外の温室効果気体の効果を考えるともう少し大きくてもよいが、前述したエアロゾルの冷却効果を考慮するとほぼモデルから期待される値となっている。ところで、図でわかるように、1940年代半ばから1960年代にかけて、やや寒冷化しており、単調に温暖化しているわけではない。この10年スケールの変動は人為的なものであるとは考えにくく、自然的要因による変動と思われるが、この変動の原因はわかっていない。気候は自然の要因によっても変動するので、人為的な変動を分離することは容易ではないが、温室効果気体の放出による人為的原因による温暖化はじわじわと既に起こりつつあると考えられる。前節で述べたように成層圏は二酸化炭素が増加すると寒冷化するはずである。実際に観測によれば、最近、成層圏は寒冷化している。この成層圏の寒冷化はオゾン減少による効果が大きいようであるが、二酸化炭素の効果も寄与していると考えられる。このようないろいろな気象要素の変化を総合して考えると、人類は既に気候を変えつつあると見てよいであろう。

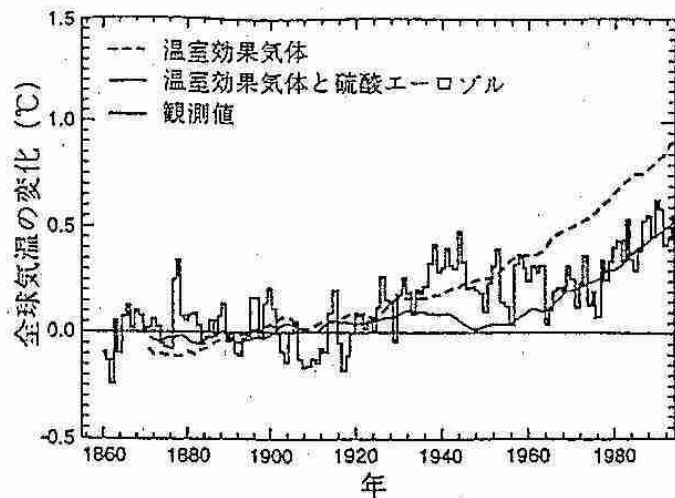


図1 全球の年平均気温の変化（1860～1994年）。階段状になっているのが観測値。破線は温室効果気体による温暖化のシミュレーション。実線は温室効果気体と硫酸エアロゾルを考慮した温暖化のシミュレーション。（IPCC(1995):気象庁訳より）

ここで、苫小牧市の過去50年あまりの気温変化を見てみよう（図2）。全体としてみると温暖化しているように見える。しかし、これをすべて地球温暖化の現れとするのは無理であろう。よく見ると1940年代後半及び1989年以降に急激な上昇が見られる。期間の初めと終わりの昇温を除けば年平均気温は7℃くらいで大きな変動はないようであり、1970年代半ばから1980年代半ばまでは、むしろ寒冷化している。これらの変動は北半球規模の10年スケール変動に伴うものと考えられる。苫小牧で地球温暖化のシグナルがはっきりと現れるのは21世紀になってからであろう。

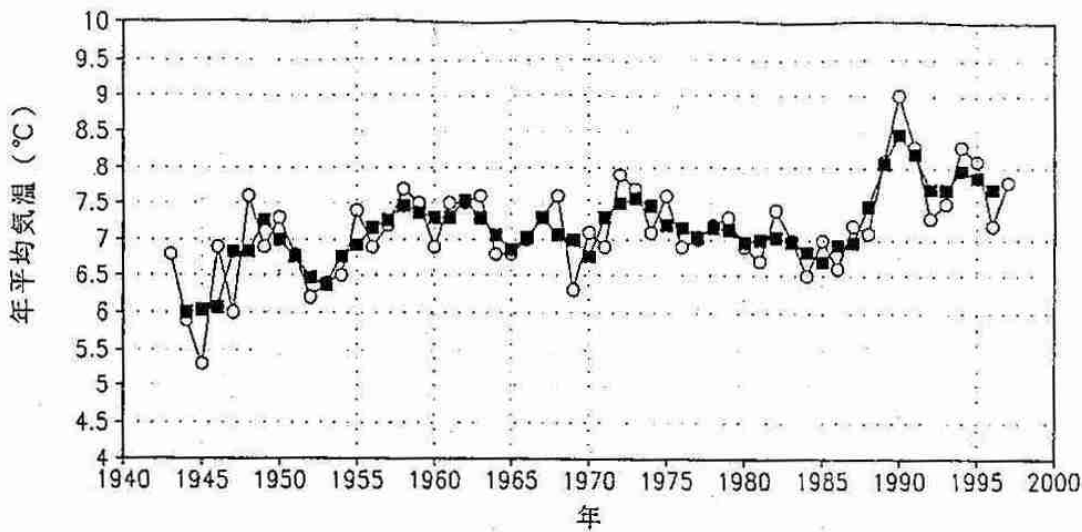


図2 苫小牧の年平均気温の推移（1943年から1997年）。○は各年の値、■は3年移動平均。

6. 将来はどうなるか

以下の予測は「気候変動に関する政府間パネル（IPCC）」の1995年の報告書に基づいている。将来の気候がどうなるかを予測するためには、まず、温室効果ガスの放出量が予測されなければならない。放出量は政策的に変わりうるので、予測というより起こりうるシナリオといったほうがよいであろう。放出量のシナリオがわかれば、二酸化炭素循環のモデルから将来の大気中の二酸化炭素濃度を予測する。現在では、年々、二酸化炭素の放出量は増大しているが、21世紀の途中で放出量を一定にしても、大気中の濃度は増加し続ける。産業活動の活発化に伴い放出量も増大するとするシナリオによれば、21世紀末には二酸化炭素濃度は700ppmあまりになる。このシナリオによって二酸化炭素など温室効果ガス濃度が増えると、エアロゾルの冷却効果を考慮に入れ、平均的気候モデルの結果を用いて、21世紀末には1990年に比べて、年平均全球平均地上気温は2℃上昇すると予測されている。地域的には、この値よりも大きかったり小さかったりする。また、たとえ21世紀末に二酸化炭素濃度が安定化したとしても、海洋の大きな熱慣性のために、22世紀以降も温暖化しつづけるであろう。降水量については増加すると予測されている。また、海面水位については、もっともらしいシナリオによれば、現在（1990年）から21世紀末までに50cm上昇すると予測されている。

地域的な気候がどうなるかについては、まだ十分な信頼性で予測することはできない。日本でいえば、梅雨期の雨はどうなるか、冬の積雪はどうなるか、台風はどうなるかなどまだわからないことが多く、将来の課題である。

7. おわりに

実際の気候変化や海面水位変化が、徐々にではなく、急激に起こる可能性もないわけではない。最終氷期や約1万1千年前のヤンガー・ドライアス期（寒の戻り）には、大西洋の深層循環の変動によると推測される大きな気候変化が起こっていたことが明らかになっている。その遷移時間はわずか数10年とされている。したがって、温暖化によって急激に大西洋深層循環が弱まる可能性もある。また、西南極の氷床は不安定ではないかとの推測があり、温暖化に伴い急激に氷床が滑落して、大幅な海面上昇を引き起こす可能性も指摘されている。我々の自然に対する理解はまだ完全ではなく、自然は時として予想外の変動をみせることを忘れてはならない。