

## 地球温暖化の諸問題

廣田 勇

(京都大学大学院理学研究科)

### 1. はじめに

この10年間、成層圏オゾンや酸性雨の問題とならんで、地球温暖化の議論が、いわゆる「地球環境問題」として世界の注目を集めてきた。我が国でも、新聞・テレビや様々な出版物による解説を通じ、温暖化問題への社会的関心が高まっているように見受けられる。しかしながら、その多くは、化石燃料使用に伴う二酸化炭素濃度増加の温室効果の話と、気温上昇予測に基づく政治経済的対応の議論に終始している。

だが、本当に温暖化問題とはそのような単純な話なのであろうか。或いはまた、二酸化炭素の放出規制ということだけで総て解決する事柄なのであろうか。

この講演では、まず地球科学の立場から、従来の地球温暖化の議論では必ずしも重要視されていなかった問題点を幾つか挙げ、次いで予測と対応の問題を考え直すヒントを示してみたいと思う。

### 2. 気温を決めるもの

地球表面の温度（気温）は、熱帯・温帯・寒帯のように緯度によって異なる。また、夏と冬、昼と夜、のように季節や時刻によっても変化する。しかし、地球全体をまるごと見れば、太陽から入射するエネルギーを受け取り、それに見合うだけのエネルギーを「赤外放射」の形で地球外に放出することによって熱の釣り合いが保たれている。

この釣り合い（熱的平衡状態）を決めているカギとなる重要な過程は三つある。

ひとつは、太陽からやって来る放射エネルギーが全部地球に吸収されるのではなく、その一部が反射されていることである。太陽光の反射は、スキー場の雪面反射を考えればすぐわかるように、主として地球上の雪氷量や雲量で決まる。最近の人工衛星による観測によれば、この反射率はほぼ精確に30%である。そして注意すべきことは、これらの雪氷量や雲量が地球の温度それ自身と深く関わっていることである。

ふたつめは、太陽からの入射エネルギーと同量の赤外放射を地球外に逃がしているというとき、その赤外放射の強さは地球の温度で決まっていることである。

そして三つめには、赤外放射の逃げ出し方が、大気の組成分布に強く影響されることである。これが次に述べる「大気の温室効果」である。

### 3. 二酸化炭素と温室効果

地球大気の主成分は窒素分子 ( $N_2$ ) 78%と酸素分子 ( $O_2$ ) 21%で殆どが占められていて、二酸化炭素（いわゆる炭酸ガス、 $CO_2$ ）は約 0.03%しかない。少量なので、百万分の 1 (ppm) を単位として 300ppm とか 350ppm のように表す。微量とはいえ、この二酸化炭素はメタンやオゾンなどとともに大気温度の決定に重要な役割を果たしている。

太陽から地表に入射するエネルギーに釣り合うだけの赤外放射を地球外に逃がす場合、大気中に含まれている二酸化炭素は上向きの赤外放射の一部を吸収し、それを再び（下向きに）地表に送り返す。そのため、地表の温度は二酸化炭素が無い場合に比べ幾分か高温となる。これは、ちょうど寒冷地で熱帯植物などを育てるガラス屋根の温室のはたらきに似ていることから「温室効果」と呼ばれる。

したがって、もし人間活動の影響などで大気中の二酸化炭素濃度が地球規模で増加したならば、その結果、温室効果で地球全体の気温が上昇する可能性がある。このような問題意識から、1950 年代末から長年にわたって大気中の  $CO_2$  濃度を測定してきた結果が図 1 である。これを見ると、最初は約 315ppm だったものが 40 年間に 360ppm までに増加していることがわかる。1999 年現在では約 380ppm にも達している。（カーブのギザギザは植物の呼吸作用を反映した季節変化である。）

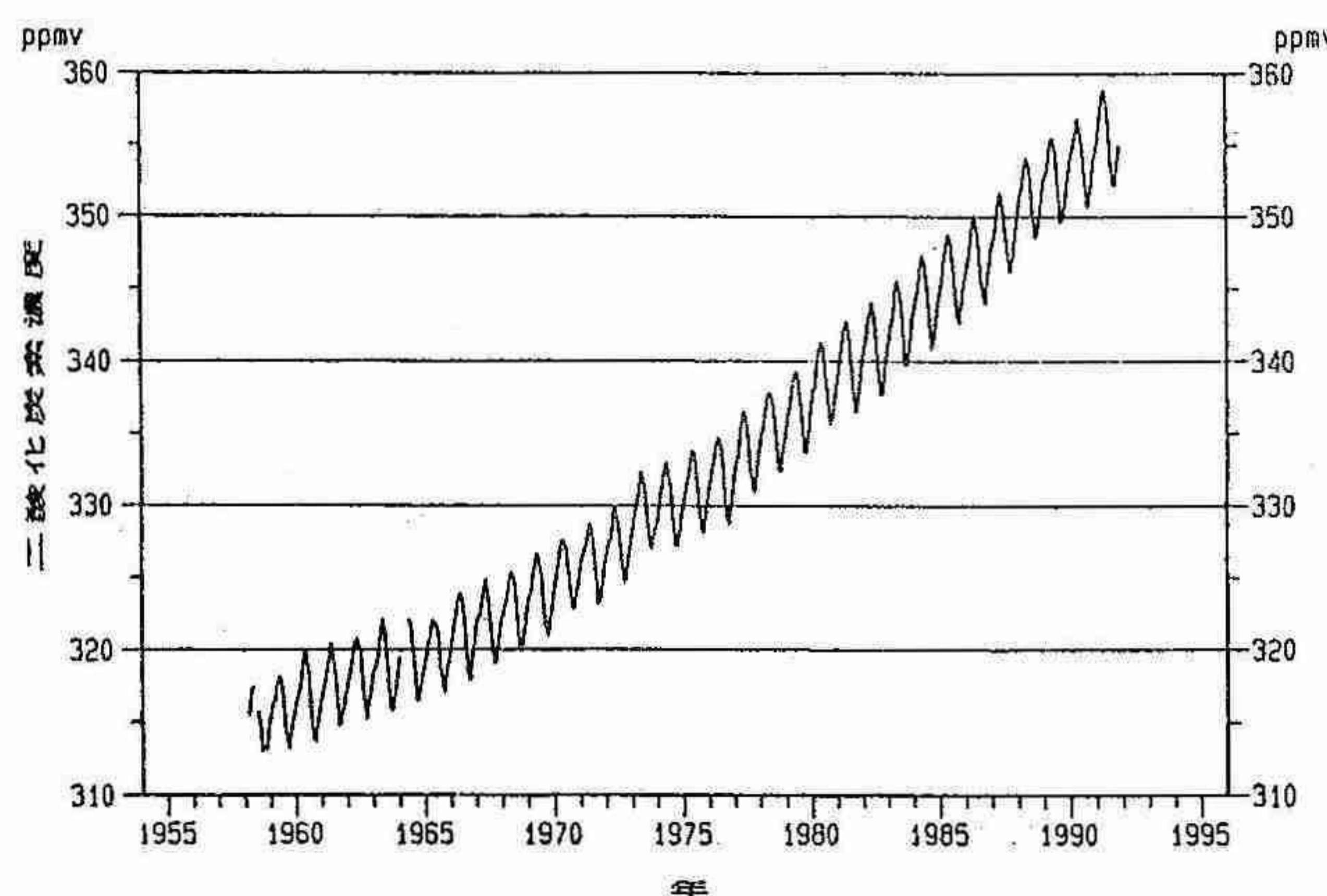


図 1 ハワイにおける二酸化炭素濃度の変化

一方、地球全体で平均した地上気温変化に関する統計（図 2）によれば、過去 100 年間に約 0.5 度の昇温が見られる。それゆえ、多くの人々はこれが二酸化炭素濃度増加のもたらした温室効果の反映だと考えている。さらに、未来予測として、21 世紀なかばまでに  $CO_2$  濃度が現在の値の 2 倍になると仮定したとき、平均地上気温はおよそ 1.5 度ないし 2.5 度程度上昇するとの計算もなされている。

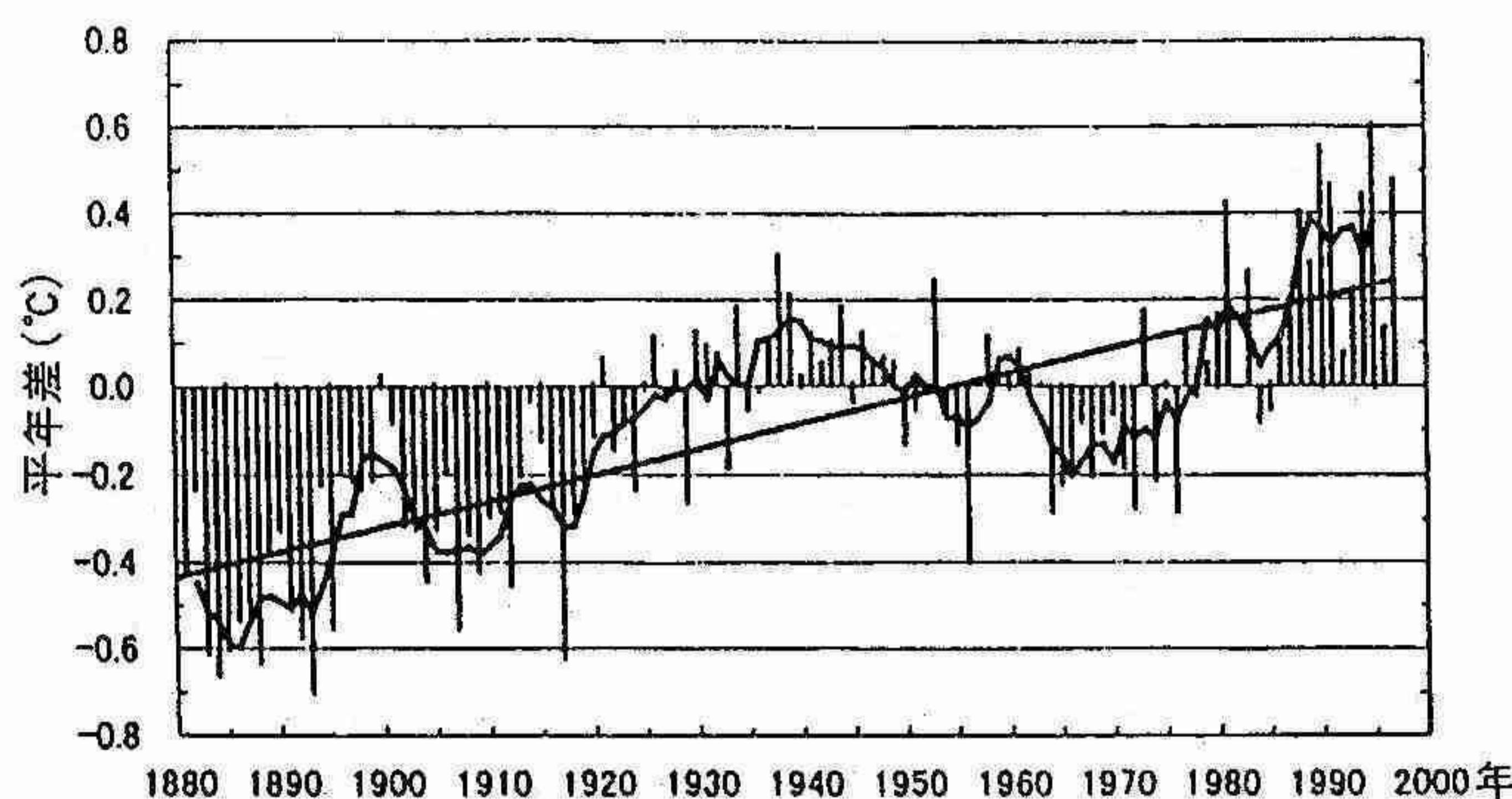


図2 最近約百年間の全球平均地上気温変動。1961—1990年の平均からの偏差

#### 4. 自然変動の不思議

確かに図の1と2を見る限り、人為的影響による二酸化炭素濃度の増加に起因する温室効果が現れているようにも思えるが、自然現象としての地球温度変動はもっと奥の深いものである。その一例として図3には南極氷柱のボウリングから得られた過去16万年にわたる二酸化炭素濃度、気温、およびメタン濃度の変動の様子を示す。これを見ると、二酸化炭素濃度は180から300 ppm、気温の偏差は約8度もの幅で変動し、しかもそれらは互いに極めてよく対応していることがわかる。

まず言えることは、これは20世紀後半のような人為的変化とは全く異なり、地球というひとつのシステムの自然変動だということである。ふたつめは、その対応関係が単純に二酸化炭素の増加による気温上昇だけは限らないことである。なぜなら、気温の上昇が海洋中の溶解度の変化を通して二酸化炭素濃度の増加をもたらした可能性も否定できないからである。

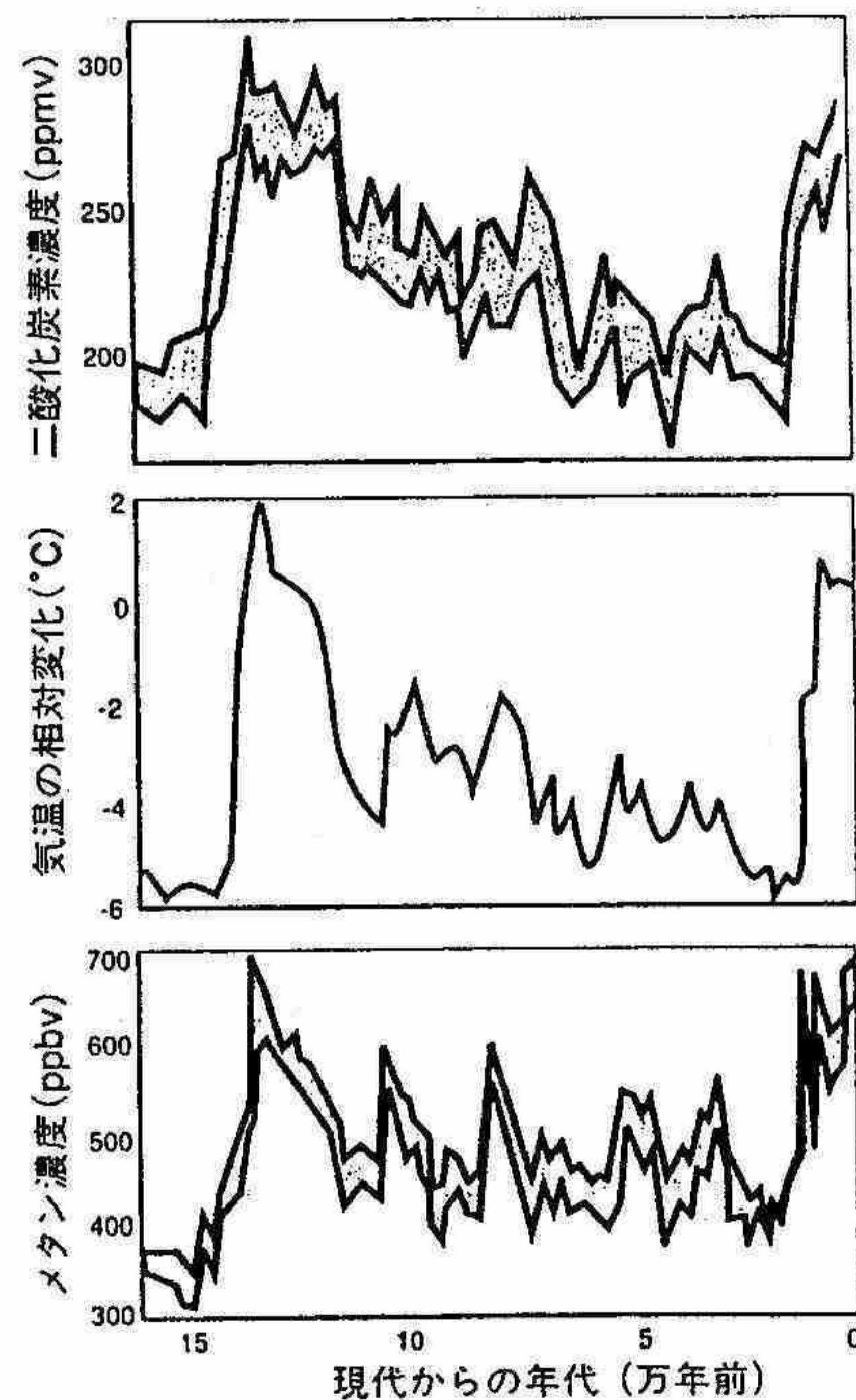


図3 南極氷柱の分析から得られた過去16万年の変動

## 5. 雲のはたらき

地球の温度決定に関与するもうひとつの重要な事柄は雲のもつ働きである。先に述べたように、雲は地球に入って来る太陽放射の一部を反射し、気温を低める作用をもたらす。ところが一方、天気予報解説でおなじみの「晴れた夜は放射冷却で気温が下がり云々」を裏返して言えば、雲の存在は地表からの赤外放射の逃げ出しを遮るから気温を高める効果も持っていることがわかる。この事情は、直射日光の下では衣服を着ていたほうが涼しいのか、それとも暑いのか、という話と良く似ている。

このような気温に及ぼす雲のはたらきの相反する二面性は、気候の長期変動を考えるとき、二酸化炭素による温室効果とは別に、極めて重要な問題となる。

現在の地球の気候はそれなりに安定していて、地球全体で見た総雲量もほぼ 50% と一定している。だからこそ、太陽放射の反射率も非常に精確に 30% で殆ど変動していない。しかし、雲の出来る過程を考えると、地面海面からの水蒸気の蒸発、上空での水蒸気の凝結、ともに温度に極めて敏感なはずである。したがって、もし何らかの原因で地球全体の温度が少し上昇したなら、そのときその温度に対応した雲の出来かたがどう変るのかを見積もることが必要である。これは簡単のように見えて実は非常に難しい問題である。その上さらに、もし雲量の変化がわかったとしても、その雲が地表気温を高めるほうに働くのかそれとも低温化をもたらす方向に作用するのか、これまた今もって未解決の大問題なのである。

現在、社会的要請に基づいて行われている 21 世紀の気候予測では、これら雲の働きについての厳密な考察は取り入れられていない。わからないのだから止むを得ない、と言ってしまえばそれまでであるが、先に述べた化石燃料（石油）使用量から推定した 50 年後の約 2 度の気温上昇というのは、その意味で単なるひとつの目安に過ぎないことに留意する必要がある。

## 6. 予測と対応

ここまで見てきたように、地球科学の立場からすれば、地球温度の長期的変動とは温室効果だけでなく他の多くの重要な過程が相互に関与している複雑でかつ興味ある現象である。それゆえ、地道な観測の継続とともに、地球温度決定のメカニズムに関する研究が熱心に続けられている。未来予測はその延長線上に築かれる作業であるが、そもそも予測という営為の持つ意義には、純粋な自然現象の探求心と、人間社会の実用的要請、という両面のあることも意識する必要があろう。これはまた、科学と技術のちがいだと言ってもよい。誤解を恐れずさらに敢えて言うなら、環境問題とは、人間社会の側から見た都合・不都合という基準で判断されるべき事柄なのである。

程度問題は別として、地球温暖化は本当に起こるかもしれない。そのときそれをどう受け止め如何に対処するかはひとえに人間の側の問題なのである。