



天 気

1984年4月
Vol. 31, No. 4

306 (気候 (世界))

世界の気候はどう変わるか*

山 元 龍三郎**

1. はじめに

異常低温・かんばつなどの異常天候が、農業生産など社会・経済に大きい影響を与えることは言うまでもない。北日本での異常低温の頻発・エルチチョン火山大噴火の影響の懸念・大気中の二酸化炭素の増加の影響の可能性の確認などに関連して、世界の気候がどう変わるかは、重大関心事の一つである。

私は「世界の気候は温暖になる」などの予測を明言する程の蛮勇を持ち合わせていない。また、「10日先の天気予報もおぼつかないのに、10年先の予測など出来る筈はない」と言う批評家的立場を固執する頑固さもない。迷える羊の悩みを述べることにする。

2. 異常天候の意味

最近3年余りの、北海道根室の日平均地上気温を第1図に示す。特に注目されるのは、今年の6月の気温が5月に比べて 1.3°C も低かったことである。夏に向かって暖かくなるという期待に反して、いっこうに暖かくなれないという日々の経過が、このような月平均気温の推移として現れている。

月平均気温は、日々の観測データから30日または31日平均を求めるという統計操作により計算したものである。その際、次に述べるあいまいさが介在する。第2図

は、京都における1980年夏の日最高気温・日最低気温を示したものである。不規則な変化が顕著であって、毎月1日から30日または31日までの値から月平均値を求める際、この不規則変化の極大値が含まれるかどうかによって、求める月平均値が異なってくる。1日から31日までの平均値と、前月の16日から翌月の15日までの平均値との比較を、1980年夏の京都の日最高気温について示したのが第3図である。明らかに、平均範囲によって差異が認められる。これは、月平均値という統計値のあいまいさを示していて、「気候ノイズ」と呼ばれ、この値よりも大きい変化だけが意味をもつのである。根室の5、6月の地上気温の月平均値のノイズは、約 1.5°C であるので、上述した 1.3°C という根室の5月と6月の月平均気温の差は有意なものと云うためには、検討を要する。根室以外の場所でも、同様に6月の気温が5月よりも低かった(例えば、帯広で 1.5°C 、網走で 0.8°C)。広域の平均値に対するノイズは、局地的な値のノイズに比べて小さいことが分かっているので、根室とその周辺での6月の気温が5月よりも低かったことは有意であると言える。

北日本でのこのような異常低温が発現した時に、地球の他の場所では異常高温が起こったりして、異常天候は地球上いたる所で一緒に起こるのではない。しかし、第4図に示すように、10,000 km 以上も離れた地域の降水量が互いに良く関連している例もある(Budyko, 1927)。

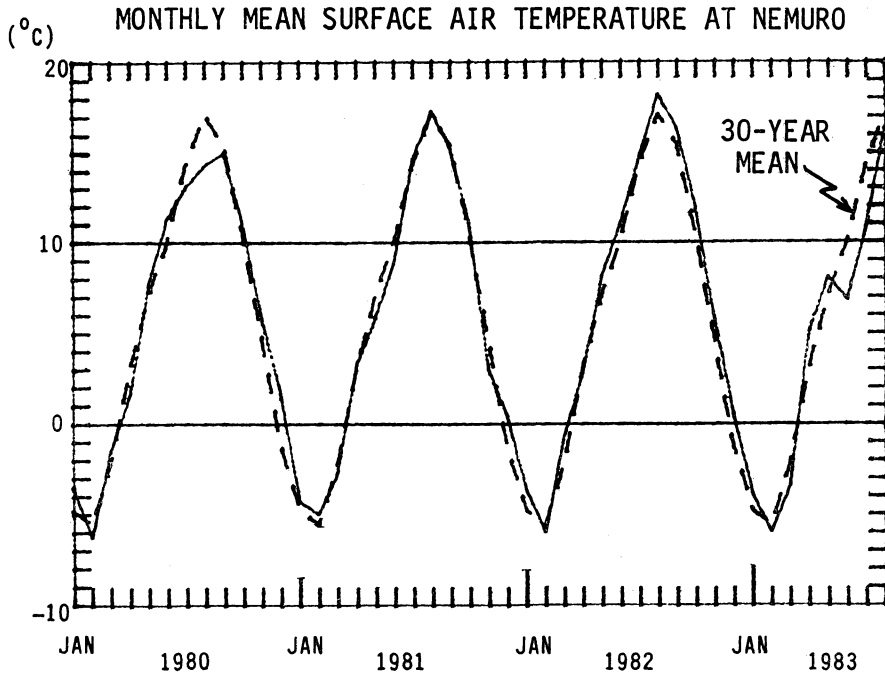
3. 気候変動の予測の可能性

このように、異常天候の発現が地域によって一様では

* Warming or cooling in the next century?

日本気象学会関西支部創立30周年記念講演会
(昭和58年10月7日、於大阪府立労働センター)
での一般市民を対象とした講演の要旨である。

** Ryozaaburo Yamamoto, 京都大学理学部気候変動実験施設。



第1図 1980年1月から1983年8月までの根室の月平均地上気温(実線)。破線は平年値である。1983年5月から6月にかけて、月平均気温の低下が注目される。

なく、一方では、かなり離れた地域の気候が互いに関連している場合もある。こういう現象の予測に対して、電算機を用いたいわゆる数値天気予報法を適用しようという試みは、自然の成りゆきである。しかし、電算機によって将来の大気状態を計算する時の初期条件が、観測誤差程度だけ異なっている場合の予測値は、第5図に示したように、予測期間10日以内ではほぼ同じとみてよい。しかし、10日以上長期予測においては、著しい差異が生じて、延長数値天気予報に限界があることが分かる。

気候変動の予測が全く不可能なのか、それとも、可能性を探る余地があるのだろうか。太陽放射が地球大気の運動のエネルギー源である事は良く知られている。地球にふりそそぐ太陽放射の約70%を地球・大気が吸収している。そして、吸収太陽放射と同じ量のエネルギーを、地球・大気が赤外線として、宇宙へ放出している。このような外部との熱エネルギーの出入りが釣り合って、地球の気候が成り立っている。

このような熱エネルギーの出入りの状態が変わらないで一定であっても、日々の気象状態は移動性高気圧・低気圧の発生・発達・消滅および移動に伴って、変化している。このような自然変動性の存在が、月平均状態を算定

する場合のあいまいさ、すなわち「気候ノイズ」をもたらしている。局地的な気候ノイズはかなり大きい値をもつのが普通であるが、広域、特に全球または半球平均した気候値のノイズはかなり小さい。

太陽放射と地球大気によるその吸収および宇宙への赤外放射のいずれかが、火山噴火による成層圏エアロゾルの増加のような原因で変わった時、大気の状態すなわち気候も変化する。この気候変化(シグナル)が気候ノイズよりも大きい場合に限って、シグナルを確認することができるのである。かくして、気候の変化の予測可能性は、太陽活動など外的要因の変化による気候変動シグナルの予測という問題となる。上に述べたように局地的気候よりも、半球平均の気候のノイズが遙かに小さいので、気候変動シグナルは、半球または全球平均気候について、検出できる場合が多い。

4. 気候変動シグナル

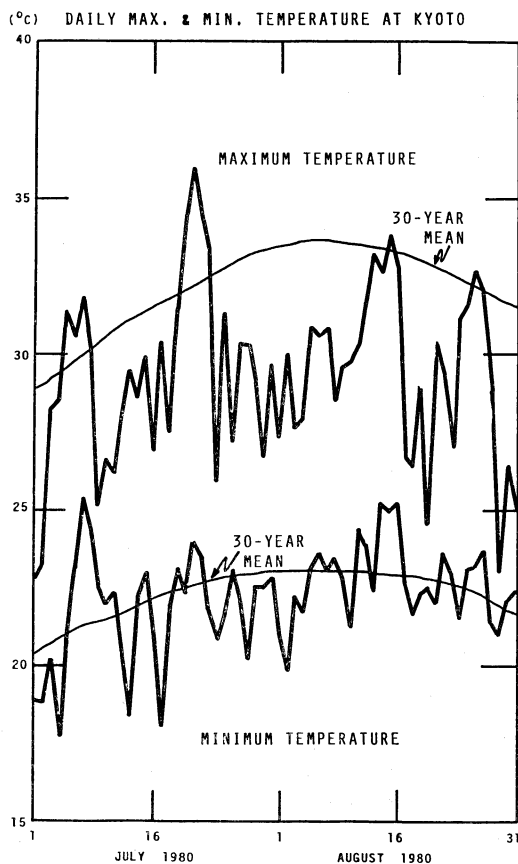
地球の気候を支配している外的要因のうち最も重要なものは、太陽放射であって、その強さを表す太陽定数の直接観測は、Nimbus 7号などに搭載された空洞放射計によって可能となった。それ以前の地上や気球観測で

は、太陽定数の変化を確認できるような精度がなかった。太陽黒点数が太陽定数と何らかの関連性を有しているだろうとの推測のもとに、気温と黒点数の変化との比較が、多くの研究者によって行われた。その一例を示したのが第6図である(山元, 1980)。19世紀の終わり頃から1920年代まで、両者の逆相関が明らかであるが、それ以後、その相関が崩れている。第7図は、気象衛星 Nimbus 7号に搭載された空洞放射計による太陽定数の日々の観測値を、太陽活動の指標の一つである波長10 cmの電波の強度と黒点数と対比したものである(Hickeyら, 1982)。黒点数と太陽定数との逆相関が1ヶ月以内の周期について認められる。しかし、1年以上の周期についても、同様であるのかどうかは、今後のデータの集積を待たねばならない。太陽定数の増加によって、地球の気温が温暖になるという結果が、大気循環モデルを用いた数値実験で得られている。しかし、そのような気候変化は、観測データの解析によってまだ確認されていない。

地球にふりそそぐ太陽放射を途中で反射させて、地球大気が吸収する太陽放射のエネルギー量に影響を与えるものとして、火山性成層性エアロゾルが挙げられる。火山噴火時に大気中へ噴き上げられた火山灰などは比較的早く落下してしまう。しかし、噴火の際に成層圏へ噴き上げられた亜硫酸ガスは、太陽紫外線の影響をうけて、水蒸気と結合し、硫酸液滴となって、数年間成層圏に停留する。これが地球にふりそそぐ太陽放射を部分的に反射するので、地表に到達する太陽放射を減らし、地球大気による吸収量を少なくする。そのために地球の気候は1年ないし数年にわたって低温となる。これが火山噴火の寒冷化作用である。成層圏へ噴き上げられた亜硫酸ガスなどの量が少なければ、低温化作用も弱く気候変動シグナルが小さくて、気候ノイズの中に埋没して検出できない。1963年の Bali 島の Agung 火山の大噴火と同程度かそれ以上の場合には、噴火の1年以後に、北半球平均気温が気候ノイズ以上の低温化が発現したことが確かめられている(山元, 1980)。それ故、世界の気候変化を予測するためには、火山の大噴火の予測も不可欠である。

5. 人間活動の影響

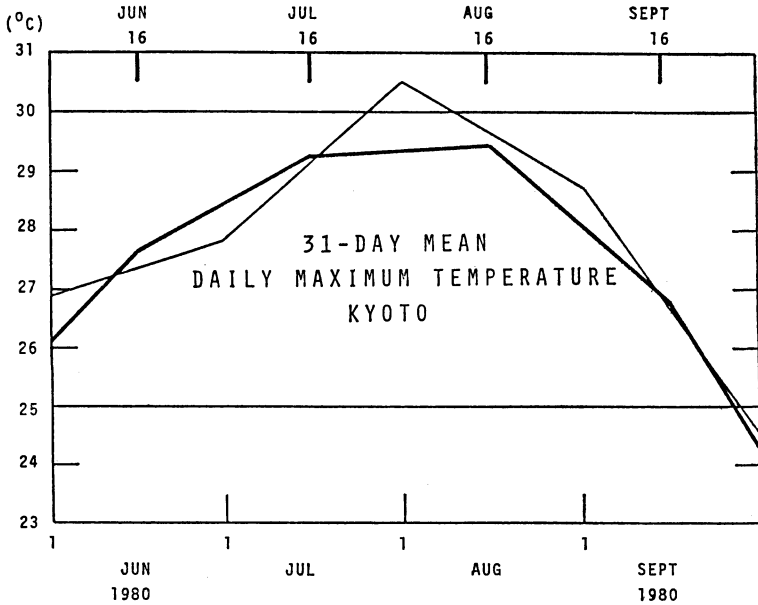
工業活動における汚染物質の排出が、地球の気候を変えるのではないかと懸念されている。すなわち、地球の気候の長いドラマにおいて、これまで人類は観客に過ぎなかったが、意図しないのに、人類は共演者になってい



第2図 冷夏であった1980年7月と8月の京都における日最高および日最低地上気温(太い実線)。細い実線は、それぞれの年平均値である。

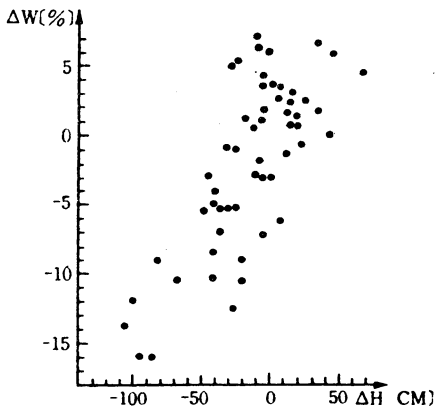
るのではないかと心配されるようになった。人類が大気中へ出している汚染物質の主なものは、対流圏エアロゾルと二酸化炭素(CO₂)である。

対流圏エアロゾルは、上述の火山噴火によるものと同様に、日射を一部反射するが、また部分的に日射を吸収もする。エアロゾルが対流圏にあるために、吸収した太陽放射の熱エネルギーは気温上昇に寄与する。反射効果と吸収効果の大小関係が、温暖化作用か寒冷化作用かを決定する。同じ性質のエアロゾルであっても、その下の地表面が日射をよく反射する陸地であるか、それとも、日射をよく吸収する海面であるかによって、気候に対する作用は変わる(第8図)。反射率の大きい陸上でエアロゾルが存在すると、エアロゾルの日射吸収が顕著となり加熱作用を及ぼす。一方、吸収率の大きい海上の場合、



第3図 1980年6～9月の京都における日最高地上気温の31日平均値。平均する範囲をずらせると、31日平均の値が異なる。「気候ノイズ」の存在を示す例である。

カスピ海の水位の変化 (ΔH) と米国の小麦生産額の相対変化 (ΔW)



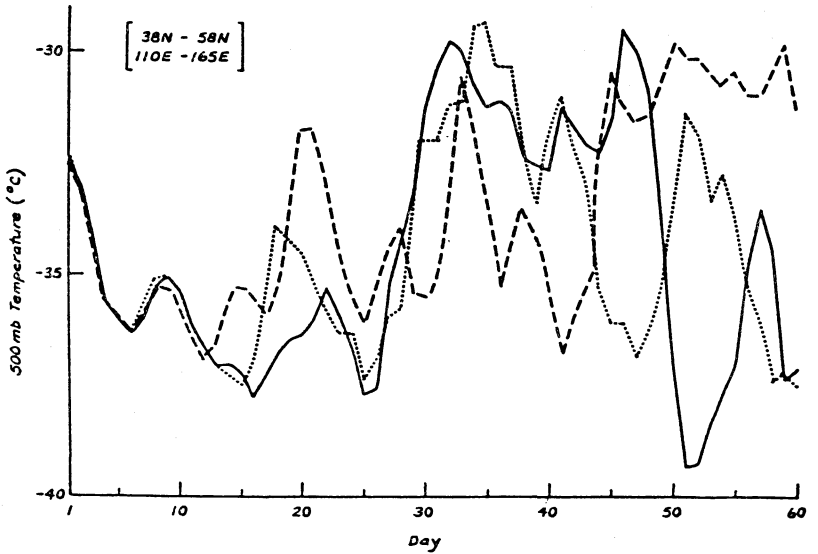
第4図 カスピ海の水位の変化 (ΔH) と、米国の小麦生産額の相対変化 (ΔW) の関係を示したものである (1977年の Budyko の論文より転載)。干ばつのために、米国の小麦の生産額の少ない年には、カスピ海の水位が低下している。水位の低下はボルガ河の水のカスピ海への流入が減少したためであり、これはボルガ河流域の降水量が平年より少なかったためである。

エアロゾルの存在は海面に達するはずの日射を途中で反射してしまうので、海面での日射吸収を著しく減らす。それ故、海上のエアロゾルは冷却作用を及ぼす。Kellogg (1978) によると、人為的対流圏エアロゾルの大部分は陸上に浮遊していて、気候を温暖化するように働いている。

1950年代の終わり頃から、大気中の二酸化炭素 (CO_2) の信頼できる観測が継続されて来た (第9図)。顕著な季節変化の上に、年々着実に増加していることが明らかであって、1950年代の終わり頃の 315 ppm に対して、1960年代の終わり頃には 325 ppm、1970年代の末には 337 ppm に増加している。前世紀の末においては約 290 ppm だったと信じられていて、来世紀には 600 ppm 以上になるだろうというのが大方の意見である。

大気は、可視光に対しては透明であるが、赤外線に対しては、一部の波長域を除いて不透明である。それは、 CO_2 が水蒸気と共に、赤外線を吸収するからである。吸収日射量と同量の熱エネルギーを、地球大気が赤外線として宇宙へ放出している事は上述した。 CO_2 が増加すると、地球大気が宇宙へ赤外線を放出する途中で、 CO_2 による吸収 (遮断) が大きくなる。すなわち、温室効果が強くなる。そのために、吸収太陽エネルギーと

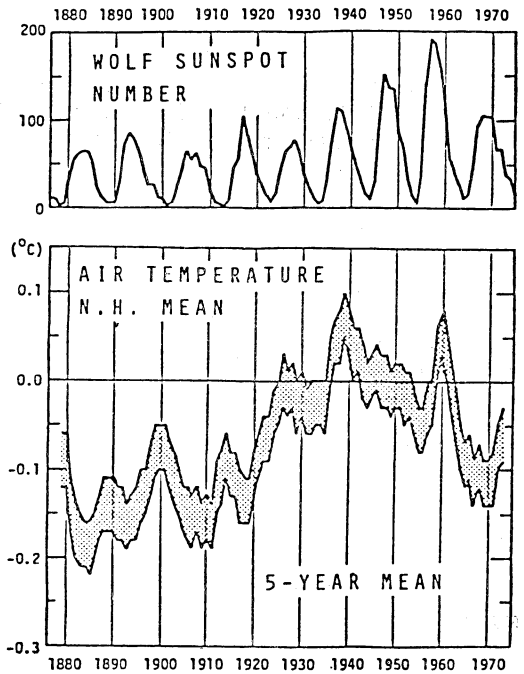
第5図 大気大循環モデルを用いて、1976年1月1日の観測値に基づいて、38-58°N、110-165°Eの地域での500 mbの気温を数値的に予報した結果（実線）。1月1日の値を観測誤差程度だけずらした場合は点線および破線で示してある。10日以下の予報期間においては、3つの結果はかなり一致しているが、それより長い予報期間においては、著しい差異が目される（Shukla (1981) による）。



同じ量の赤外放射を宇宙へ放出するためには、地球大気は、より高温とならねばならない。このように、CO₂の増加は地球の気候の温暖化をもたらすと考えられている。

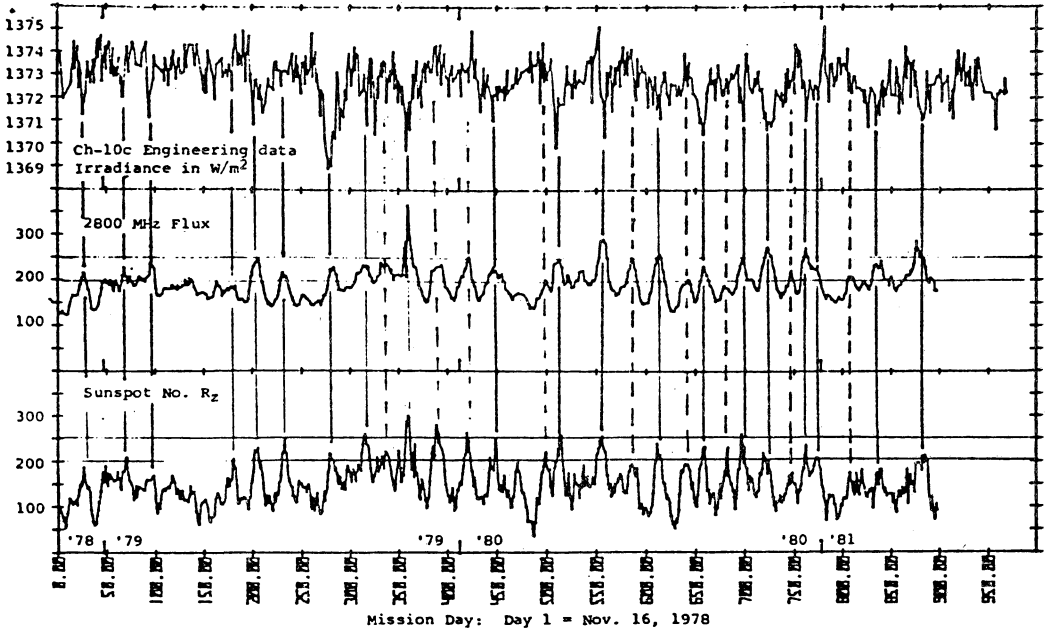
CO₂の倍増が、地球の気候をどの位温暖化するかに、電算機を用いた数値実験が1970年代から、多くの学者によって行われて来た。その結果の多くは、全球的に平均した年平均気温が2.0°Cないし3.9°C上昇することを示している。緯度と高さによって、この変化がどのように分布しているかの一例として、真鍋ら(1980)の結果を第10図に再録する。この図は緯度円に沿う気温変化の年平均を示していて、対流圏の昇温に対して成層圏では降温である事および、極地方の下層の昇温が極めて大きい事が注目される。このような結果は、最先端の計算機・計算技術を駆使して得られたものである。それでも、計算の途中では、現実の大気の中で起こっている現象を簡略化するなど、実際の気候のメカニズムを忠実に計算しているとは云えない。それ故、CO₂倍増時の昇温の大きさについて、意見の相違もあるが、しかし、CO₂増加による地球の気候の温暖化は、多くの学者の一致した意見である。

気温の変化は、大気大循環の変化をもたらすので、当然、降水量や蒸発量の変化をひき起こす。温度に関する計算に比べると、降水量分布の計算には多くの問題点があって、CO₂倍増時の降水量分布に関する信頼できる結果はまだ発表されていない。数千年前の気候が現在よりかなり温暖であったので、その頃の植生などを調査し

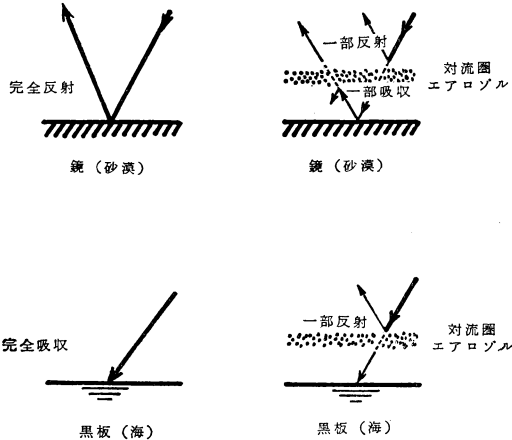


第6図 太陽黒点数と北半球平均地上気温（5年平均）との対応。影は空間平均を求める際の誤差を示す（山元 (1980) による）。

て、CO₂倍増時の降水量を、Kellogg (1981) が推測している（第11図）。それによると、米国の穀倉地帯が乾燥化し、そして、アフリカのサハラ砂漠が湿潤となる。しかし、このような推測がどの位信頼できるものなのか



第7図 Nimbus 7号搭載の空洞放射計観測から求めた太陽定数(上の曲線)。1978年11月16日から1981年7月13日までの日々の値である。太陽活動の指標として波長10 cmの電波強度(中の曲線)および黒点数(下の曲線)も示されている。黒点数の極大と太陽定数の極小との対応が、線を結んで示されている(Hickeyら, 1982)。



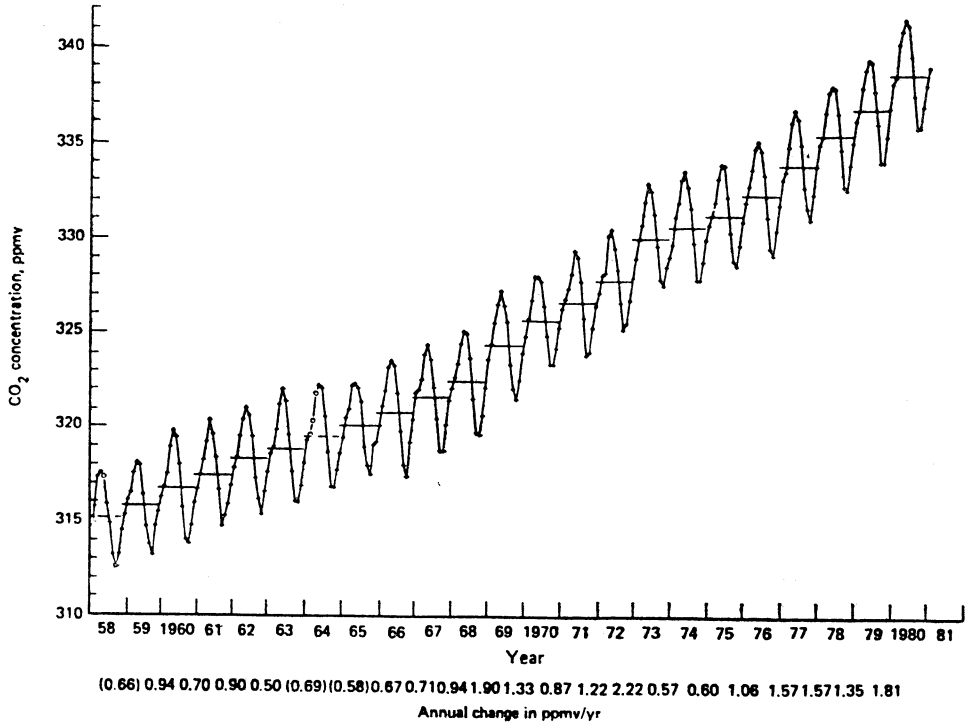
第8図 対流圏エアロゾルの気候に及ぼす効果の概念図。日射の吸収・反射の性質が同じようなエアロゾルに関して、下の地表面が良く反射する陸地であるか、それとも反射が少なく吸収の大きい海面であるかによって、効果が異なることを示している。

判断できないのが現状である。ここでは、このような研究もなされていることを紹介する意図で引用した。

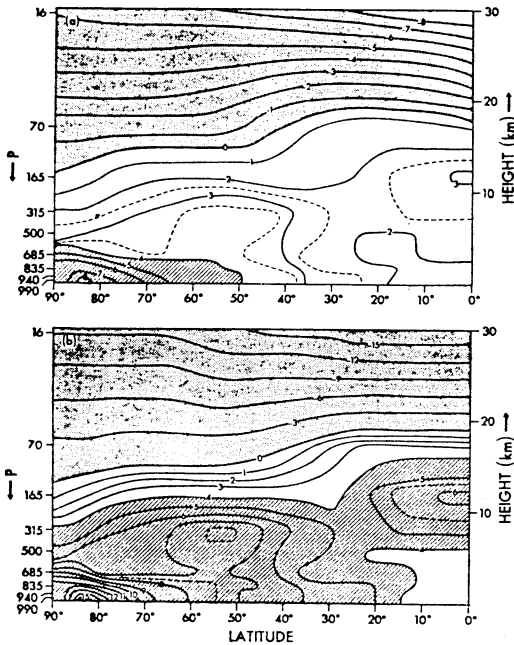
CO₂ 倍増による温暖化のために、極氷の融解が促進されて、世界の海面が数メートルも上昇すると懸念を表明する学者もいる。南極西部の氷は、海水に浮かんだ不安定な状態にあって、気候の温暖化に伴って、唐突に部分融解し海上に流れ出すのではないかとするのである。しかし、このような事が近い将来に起こる事に疑問をもつ向きもあるので、極氷のふるまいに関する今後の研究にまたねばならない。

6. 結語

過去100年間の全球平均気温の推移を、CO₂ 増加、火山大噴火および太陽活動によって、十分に説明できることを、米国航空宇宙局の学者が述べている(第12図)。しかし、この研究で採用されている太陽定数の変化については、疑問がある。このような外的要因の変化(CO₂ 増加を含めて)が、世界の気候を変化させる主な要因であることには、あまり異論はないが、これらの外的要因のいずれについても、確実に予測できるものはない。



第9図 ハワイ島マウナロア山の中腹で継続観測されて来た大気中の CO₂ 濃度 (Keeling によるデータ)。

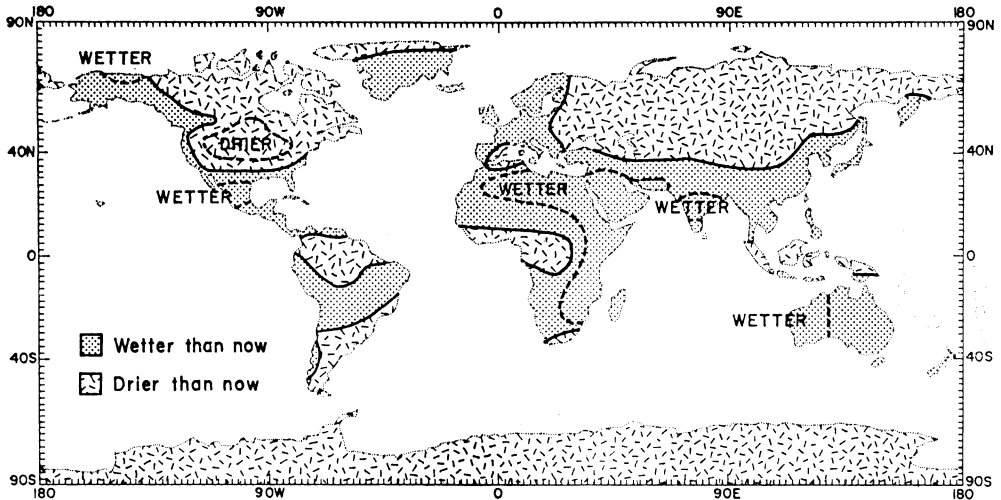


第10図 大気中の CO₂ 濃度が現在の2倍 (a) および4倍 (b) である時の温度上昇の分布 (単位は °C)。対流圏で昇温、成層圏では降温であり、極地方の下層での大きい昇温が注目される (真鍋ら (1980) による)。

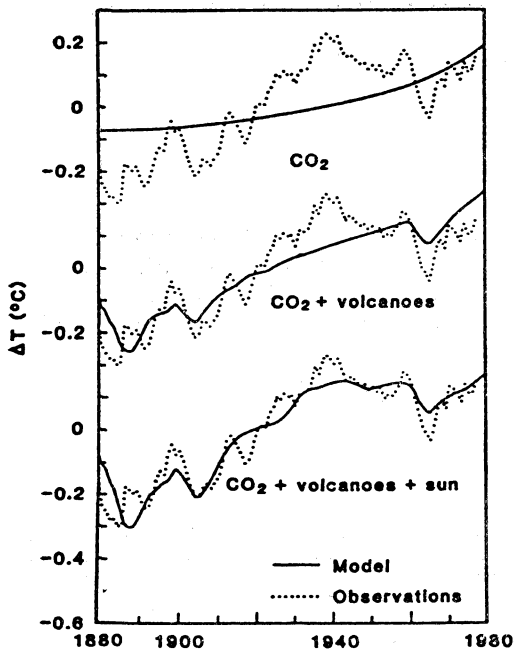
今後、当分の間、大気中の CO₂ が増加し、そのために地球の気候に対して温暖化作用が働くことはほとんど疑いがない。しかし、この温暖化作用が、火山大噴火や太陽活動のために相殺される可能性もある。世界の気候がどのように変わって行くのかという質問に答えるためには、今後一層研究を進める必要がある所以である。

文献

Budyko, M.I., 1977: On present-day climatic changes, *Tellus*, 29, 193-204.
 Hansen, J.E., D. Johnson, A. Lacis, S. Lebedeff, P. Lee, D. Ring and G. Russel, 1981: Climate impact of increasing atmospheric carbon dioxide, *Science*, 213, 957-966.



第11図 数千年前の古気候データに基づいて作られた温暖化後の土壌水分の変化。破線で囲み WETTER または DRIER で示した地域は、それぞれ湿潤化また乾燥化する可能性が大きい地域である (Kellogg (1981) による)。



第12図 過去100年間の全球平均気温の推移(点線)とそれを説明するためのモデルの結果(実線)。ここでは、大気の外に深さ 1,000 m までの海洋をも考慮している。CO₂ の増加の効果のみを考えた場合(上の曲線)、火山大噴火の影響も加味した場合(中の曲線)、さらに太陽活動の影響も含めた場合(下の曲線)について、Hansen ら (1981) が発表したものである。

Hickey, J.R., B.M. Alton, F.J. Griffin, H. Jacobowitz, P. Pellegrino, R.H. Maschhoff, E.A. Smith and T.H. Von der Haar, 1982: Extraterrestrial solar irradiance variability: two and one-half years of measurements from Nimbus 7, Solar Energy, 28, 443-445.

Kellogg, W.W., 1978: Global influences of mankind on the climate, Climatic Change, ed. by J. Gribbin, Cambridge Univ. Press., Cambridge.
 _____ and R. Schwart, 1981: Climate Change and Society, Westview Press, Boulder, Colorado.
 Manabe, S. and R.T. Wetherald, 1980: On the horizontal distribution of climate change resulting from an increase in CO₂ content of the atmosphere, Jour. Atmos. Sci., 37, 99-118.
 Shukla, J., 1981: Dynamical predictability of monthly means, Jour. Atmos. Sci., 38, 2547-2572.
 Yamamoto, R., 1981: Change of global climate during recent 100 years, Proc. Tech. Conf. on Climate-Asia and Western Pacific, (Guangzhou, China, Dec. 1980), pp. 360-375.