

気候変動と人間活動の地球環境に及ぼす影響*

William W. Kellogg**

紹介 川 平 浩 二***

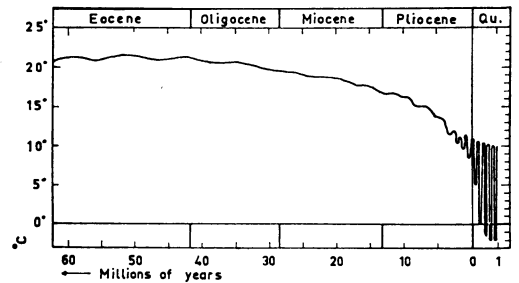
1972年7月10日から12日まで、京都国際会館で「エネルギー、資源、環境に関する国際シンポジウム」が開かれた。そのシンポジウムに、NCARのW. W. Kellogg博士が参加された。この機会に、7月14日、日本気象学会関西支部主催のもとで、京都大学においてKellogg博士に同趣旨の特別講演をしていただいた。多方面の方の参加が得られて環境問題に対する関心の高さが示された。この講演の内容をKellogg博士の報文にもとづいて紹介する。

1. はしがき

過去において何度か気候の変化した証拠は数多く我々の周りにある。例えば、陸地の形や、海洋の沈澱物の成分や、南極やグリーンランドを覆っている巨大な極冠の構造などにその証拠を見い出せる。

人間は、地球という惑星の環境に対して大きな規模で影響を与え得るという認識を我々もつに到った。人間は今までも気候に影響を与えていたけれども、その与え方は小規模なものであった。しかし人間はその影響をより大規模に与え得るであろうし、又将来人間自身と自然の力を調和させることができるであろうというのが我々の認識である。

自然の影響に比較して人間の影響について何を我々は語り得るか？ 地球という小さな惑星における人間の未来について考えるとき、我々が直面する中心の問題はこの疑問である。私はこの講演において、このことについて知っていることや考えている事柄のいくつかについて説明を試みよう。私が紹介する結論のいくつかは、1971年夏にストックホルム郊外で開かれた国際会議 [International Study of Man's Impact on the Climate (SMIC*)] でまとめられたものにその後導入された若干のアイデアを付け加えたものである。多くの確定的解答を出すためにはまだまだ長い道のりを歩むことが必要



第1図 現在の平均気温に対する過去6千万年間の中緯度の温度の推定。(原典：H. Flohn, Ein geophysikalisches Eiszeit-Modell, **Eiszeitalter und Gegenwart**, 20, 204-231, 1969; SMIC, p. 231 に再録)

であるが、気候の変化の原因のよりよき理解への道程が数年前に比べてより一層明白となってきたということが、SMICから出された1つの包括的結論であった。

2. 気候の歴史の概観

過去の気候状態の記録をみるときに、5億年以前の地球の状態についてはほとんど記録はなく、気候の様相もぼんやりとしてはっきり判っていない。生命は約10億年以前に乾いた陸地上に現われたということが信じられており、又、5億年前と2億5千万年前に氷河期が存在し、そしてこれら両期間の間は、地球は現在より温暖であった。

我々が生きている氷河期はおそらく約500万年以前に南極において始まり、それから200~300万年前に北半球に広がった。H. Flohnによる第1図は、中緯度の温度が過去6000万年の間にどのように変化してきたかという

* Climatic Change and the Influence of Man's Activities on the Global Environment

** National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, U.S.A.

*** K. Kawahira: 京都大学理学部地球物理学教室—1972年9月29日受理—

ことについておおよその考えを与えている。この図によって示される如く、10万年から20万年間持続する温暖期と冷却期の傾向が連続して起っていることがわかる。巨大な氷床が北アメリカ大陸を覆い、もう一つの小さな氷床がスカンディナビアとアジアを覆っていた Pleistocene 氷河期という最近の寒冷期より抜け出したところである。最近の氷河期は1万年前に退却したばかりであり、その時期は地球の歴史という時間スケールでみれば数秒間にすぎない。

大陸の大部分の氷河化が、原始人に強い変化を想像して下さい。そして大陸の残りの部分における温度分布と降水に伴って生じたすべての変化を想像して下さい！大陸は基本的には現在の形をなしていたとしても、森、湖そして川は現在と大分異なっていただろうし、又、この氷河期においては、現在のさばくは非常に狭かったし、又、さばくにさえもなっていなかったであろうことはほぼ確かである。

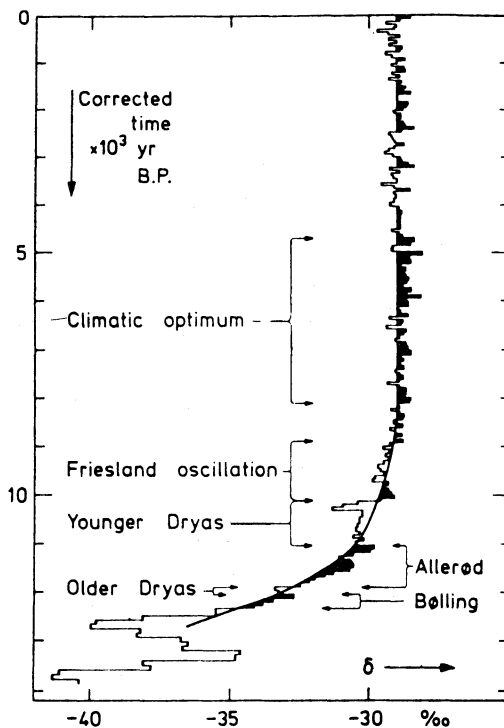
つい最近、1000年前に、歴史書によると、ヴァイキングは小さく長いボートで北アメリカ大陸まで航海することができた。そして西暦1100年頃には寒冷化が北極の水をはるか南まで押し下げてしまい、ヴァイキングはもはや彼らの集落へ達することが出来なくなった。この冷却期に、グリーンランドからのエスキモーは、氷床の南側の縁に沿って猟をしなが、Faroe 群島にいたことが報告されている。

極く最近でも、17世紀の寒冷化はヨーロッパに多大な困難を起しており、それは“小氷河期”として知られている。しかしこの気候変動は北ヨーロッパにおける平均気温の1~2°C にすぎない変動に対応しているであろう。一方、はるか昔における主要な氷河化に伴う変化は、同緯度における温度の5~10°C かあるいはそれ以上になるであろう。

この事を心にとめて、Dansgaard, Johnson, Clausen と Langway により作製された、第2図に示されるグリーンランド ice core の記録を研究することは興味深い。プロットされた量は酸素同位元素の比であるが、それはグリーンランドの緯度における平均気温に大体比例していると考えられるし、私や他の人が言及している比較的暖かい時期や比較的冷たい時期という異なった期間がこの1万4千年の記録に示されている。

3. 気候変動の理論

何故地球の気候は変わるのか？ これはもちろん我々が喜んで答えたくなる疑問であるし、又、それに対する



第2図 Camp Century におけるグリーンランド氷床から取れた氷床中心部における深さに伴う酸素同位体比 O_{18}/O_{16} の変化（ここでは年代に換算されている）。この比の増加は北半球中・高緯度における温度の上昇に対応しており、滑らかな曲線よりはみ出ている黒く塗りつぶした値は長い時間変化よりも温度の高い期間に相当する。気候の年代名はヨーロッパで指定されたものに従っている。（原典：W. Dansgaard, S. J. Johnsen, H. B. Clausen, and C. C. Langway, *The Late Cenozoic Ages*, symposium edited by K. K. Turekian, Yale University Press, New Haven, Conn., 1971; SMIC. p 38 に再録）

多くの試みがなされてきている。気候変動を説明する理論は、太陽からのエネルギーの変化の如き全く外的影響を考える理論から、海洋—大気系をいくつかの安定な状態をもっているものとして描き、したがって過去にあったように、1つの状態から他の1つの状態へ急激に移行するというまったくの toss-of-coin 理論まで含まれている。これは MIT の E. Lorenz によって発表された“almost intransivity” “自動性” の理論である。これらの間に、いくつかの理論があり、それらは描写するすべての部分を含んでいるが、しかし火山活動（一時期、何

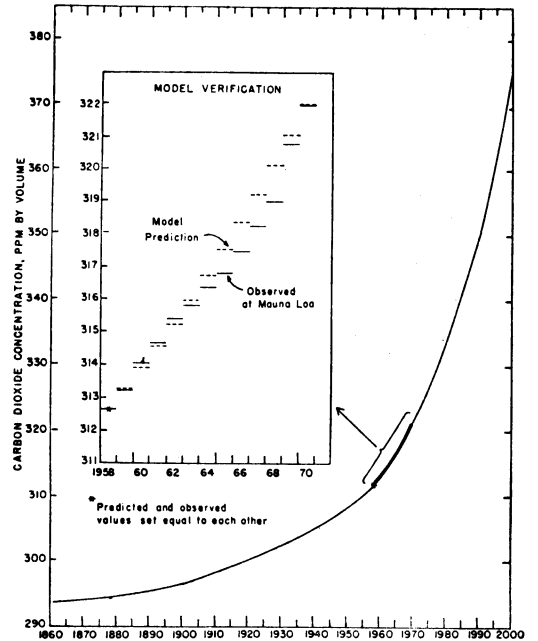
10年か何世紀にわたって大空を暗くする)や、大陸の移動(非常に長い時間スケールにおいて、大気や海洋の様相を変え得る)、海洋循環の変動等の事柄の相対的重要さというのはまだ解明されていない。気候に関する完全な理論は、過去に起った事柄を再現するために上述の異なる影響を考慮する必要があるだろう。海洋—大気—大陸系というものは複雑なものであり、すべての重要な要素をとり入れた理論はまだ提案されていない。実際、大気の大循環の日々の様相を成功裡に simulate しているモデル化のテクニックといえども、気候の研究のモデルに対しては用をなさないであろう。その点については SMIC 報告で幾分述べられている。

4. フィードバック機構の概念

我々は気候に関する十分な理論なりモデルというものをもたっていないが、私が言及したこの準平衡状態を支配する非常に重要ないくつかの関係を知っている。これらを理解するために、エレクトロニクスにおけるフィードバック機構の考えを思い出そう。そこでは、回路にある増幅器によって小さな振動を増幅でき、又、抵抗によって振動を減衰させることができる。大気中において作動しているフィードバック機構の例を示そう。

この中の第1は、大気中に排出されている炭酸ガスという有名な例である。大気中の炭酸ガスの量は過去数十年において増加している。そして、これはこの期間の多量の石炭の燃焼の結果によるものであり、このことは、地下の炭素を掘り出して大気と海洋へ排出したことになる。L. Machta による第3図は、炭酸ガスの過去における増加と西暦2000年までの増加傾向を示している。炭酸ガスの大気中における影響の1つは赤外放射の形で空間へ逃げていく熱のいく分かを止めることである……これは一種の“温室効果”として働いている。日射は大気中の炭酸ガスを突き抜けて入射し地面を加熱する。しかし地表面からの赤外放射は大気中に多量の炭酸ガスがある時には空間へ逃げることは容易でない。これは温室効果として知られており、多量の炭酸ガスが大気中に増加すると地表面の温度が容易に上がる。

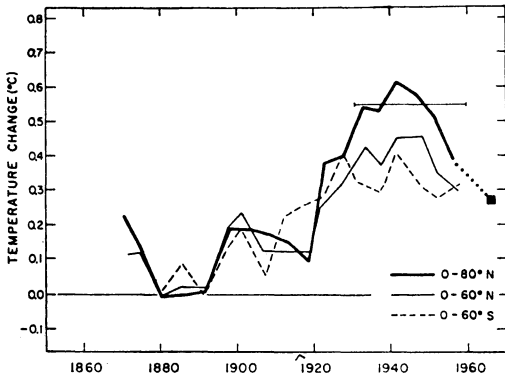
さて、このことを仮定して、地表面温度を上げた時に他に何が起こるだろうか？ 1つは、海面から多量の水蒸気が蒸発するだろうということである。水蒸気は炭酸ガスが温室効果に対して果す役割とまったく同様な役割を果す。したがって、大気中に増加した水蒸気は温室効果をさらに強めることになり、より一層地表面温度を上げることになる。炭酸ガスの小さな増加は水蒸気量の小



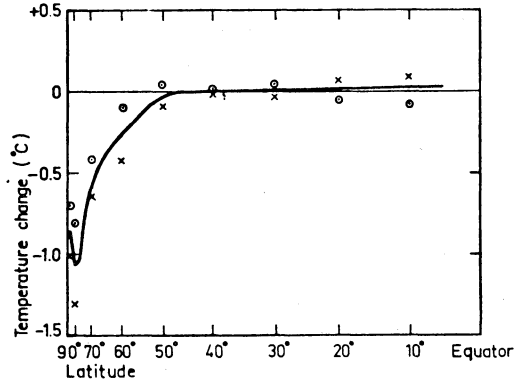
第3図 “きれいな” 大気中の炭酸ガス濃度の過去と未来におけるモデル計算値と観測値。増加は世界的な石炭燃焼による。(原典: L. Machta, The role of the oceans and biosphere in the carbon dioxide cycle, Nobel Symposium 20, Gothenborg, Sweden, August 16-20, 1971; SMIC, p 237 に再録)

さな増加をもたらし、というように、この相補的な影響は無限に進んでいくかのように思える。この正のフィードバック機構、又は増幅というのは“runaway greenhouse”とも言われる。そしてこの“runaway greenhouse”効果の完全な段階にある惨めな例として金星をとり上げることができる…この惨めな惑星では、表面温度は鉛をとかすまでに高く、又海洋にあるべき水分子のすべてや岩石に含まれているべきすべての炭素は大気中にあり、super-greenhouse 効果を高めている。

正のフィードバック機構のもう1つの例として、極氷がある。極氷は陸地や海面に比べて多量の日射を反射することを考えると、もしも極氷の面積が増加すると、より一層反射が増加するであろう。1度か2度のわずかの温度低下が(とくにもしも夏期に)極氷冠を赤道方向へ広げることになり、したがって多量の日射が反射され、更に温度を低下させ、極氷は更に赤道方向へ広がり、そしてついに(予想出来るように)赤道に極氷が達して、



第4図 1870年から1967年までの各緯度における年平均気温の変化。1960年までは以前に Mitchell (1961) によって発表されたものであり、1965年から1967年までの値は R. Scherhag の北半球データに基づき Mitchell 自身がつけ加えたものである。水平線は1931年から1960年までの0°から80°緯度帯における温度の平均値である(この期間は第5図を作る際にも用いた。(原典: J. M. Mitchell, Jr., Pollution effects on the Climate, chapter 8 in **Man's Impact on the Climate**, ed. by W. H. Mathews, W. W. Kellogg, and G. D. Robinson, M. I. T. Press, Cambridge, Mass., 1971; SMIC, p 42 に再録)。



第5図 10度ごとの緯度帯での北半球の平均温度であり、1931年から1960年までの期間の平均値からの差として表わしている。実線は1961年から1970年までの10年間における変化を表わし、○印は1961年から1965年までの変化を表わし、×印は1966年から1970年までの変化を表わしている。(原典: Prepared for SMIC by H. Flohn using data published by F. R. Pütz, Klimatologische witterkarten der nordhemisphere für den temperature im dezen niusn 1961/70, **Bilage zur Berliner Witterkarte**, 106, 23, 1971.)

地球という惑星は全表面を氷で覆われた氷菓子のようになるであろう。米国とソ連の気象学者の興味をそそったこの機構は runaway ice cap と呼ばれている。

明らかに現在の地球全表面は凍っていない。しかし、極地域が惑星の熱的バランスの小さな変化に対していかんにか反応しやすいかということはこの例から学びとることができる。氷河期においても赤道地域の温度変化はほとんどなかったことに対して、極地域は温度変化が著しかったという事実からも上述の事を知ることができる。J. M. Mitchell による第4図に示されるように、過去において地球の平均温度は1°C以下程度の変化をしている期間に、極地域は、第5図に H. Flohn が示した如く、過去10年においても1°C以上の温度変化が起こっている。

このような比較的単純な考察から引き出される結論は、海洋一大気系のバランスは変化し得るものであり、時にはまったく突然に変化する。1種のあふなっかしい平衡状態があるに違いないこと、又、地球は10億年間も生物が住むに適した状態にあることは驚くべきことである。

る。どういいうわけか。これら runaway 機構は地球の物質を金星のように取り返しのつかない程に破滅させてはいない。いくつかの安定化要素があり、それらは地球の気候を適切な狭い範囲内に保ち、氷河期の出現、消滅はあるが大きな変動は減衰させ得る程に十分に強いものであることは明らかである。

5. 気候変動の1要素としての文明人

さて人間を考慮に入れて、人間がこの壮大な機構のいくつかの支点を動かす得るか、そして、その機構に影響を与えうるかということを開いて正してみる必要があるだろう。もしも人間が動かす得る支点がいくつかあるとすれば、良きにつけ悪きにつけ、人間はその支点を動かしたくなるだろうということを歴史は示している。

人間が動かす得ると考えられるすべての支点(重要な1つは除いて)は大気-海洋系の熱バランスを通じて作用している。人間の主要な影響を、多少なりとも考えられる重要さの順に列挙すると次のようになる。

- ・炭酸ガス—これについてはすでに述べたとおりである。大気中における炭酸ガスの増加は地表面の加熱

をもたらす。

- 大気中に加えられる微粒子——これらの粒子は放射を吸収したり乱散したりする。粒子の増加がもたらす正味の影響はおそらく寒冷化であろう。しかしこの結論は現在のところ確定的ではない。というのは、粒子は1週間以下の期間、下層大気中に浮遊しているにすぎないし、又、生成された緯度帯に留まる傾向にあるからである。
- 地球の吸収特性と反射特性の変化——地球のアルベドの変化。草地の耕作、森林の伐採、都市建設等々の多くは熱を表面付近に留めるので、正味の影響は加熱である。
- 農地の灌漑と水の蒸発——灌漑地域の蒸発は直接的かつ局所的には冷却の役割を果すが、結果的には加熱の役割を果す。というのは、そこではより多くの日射量が灌漑地域では吸収され、かつ水分が他地域で雨や雪の形で凝結し、熱を大気中へ放出するからである。
- エネルギー生産に伴う熱の直接的解放——このことが加熱をもたらすことは明らかである。もしも人間が依然と変らぬ割合でエネルギー生産を続けるならば、今後数10年以内に、この項目は今取り上げているリストの順位の第1位を占めるという重要な役割を果すだろう。

このリストを振り返ってみると、人間が石炭を燃焼し続けるにつれて、大気中の炭酸ガスの量は増加し続けるだろう。他の要素は、ほとんどが表面温度を上昇させる傾向にある——ただし dust は温度を下降させる役割を果す。

リストにあげた最初の項目の、人間のエネルギーに対する飽くことのない必要性から大気中へ直接放出される熱は増加し続けるだろうし、又、人間が石炭燃料に換えて、核燃料に頼るか頼らないかにかかわらず加熱の傾向は変わらないだろう。すべての人が認めるように、人間が必要とするエネルギー量の増加を推定すると、西暦2000年を過ぎる頃に顕著な変化があるが、SMIC 報告によると、現在の熱の放出と西暦2000年までのその推定についていくつかの興味ある統計結果がある。

地表面における太陽放射のフラックスは 1400 w/m^2 であり、大気頂での日中夜間を通しての平均の純放射量はおよそ 350 w/m^2 である。この量は当然緯度に依存す

る。この内30%は反射され、残りの約50%弱は地表面によって吸収されるので、地表面や下層大気を加熱するのに使用される放射量は、平均すると、約 100 w/m^2 である*。さて、もしも世界の工業地帯(約 $0.5 \times 10^6 \text{ km}^2$)が世界のエネルギー生産高の75%になっており、そして熱の形で放射していると考え、人為的に作られた熱の平均フラックスはおよそ 12 w/m^2 である。いくつかの国における都市のエネルギー生産はこの平均値より極めて大きい値をとり、ニューヨーク市では 630 w/m^2 、モスクワでは 127 w/m^2 、西ベルリンとロスアンゼルスや 21 w/m^2 、 10^4 km^2 の面積を有するロスアンゼルス郡部全体では 7.5 w/m^2 である。したがって、大体 10^4 km^2 から 10^5 km^2 の面積の領域では、人為的に作られるエネルギーは吸収される純太陽放射量の5~10%であることは妥当といえる。エネルギー生産の増大に対する妥当な推定によれば西暦2000年までに5倍増加することが見込まれているので、発達した国の工業地帯ではエネルギー生産は吸収される純放射量の25~50%になるだろうし、全陸地部について換算したその生産の平均値はほぼ1%になるであろう。

H. Kahn の幅広い未来に対する見解によると、西暦2100年には、世界人口は200億になり、各家庭はアメリカの現在の家庭が使用して年間2万ドルの収入に相当するエネルギーの使用が見込まれると言われる(Kahnの20—20ヴィジョン)。このような社会が生産する全エネルギー量は推定することができ、それによると、人間のエネルギーフラックスは地球が吸収する全太陽放射量の2%に達する。そして、大陸部だけについて比較するとその4~5倍になる。このような人為的な加熱源は大陸部の平均温度を数度上昇させることになるだろうし、極地域ではおそらくもっと上昇させることになるだろう。この input に対する大気—海洋系の非線形反応は非常に複雑でかつ非一様であろうし、現在の我々のモデルではまだ予測することはできないと考えられる。

北半球のこのような平均昇温に対してとくに敏感な系の一部分があり、それは北極海である。これについてはSMIC 報告に述べられており、基本的なことは以下の通りである。北極海の浮氷の厚さは冬は平均して3mであり、夏、融解期の終りには2m弱の厚さになっている。とくに夏には凍っていない水路があるが、冬には又すっかり氷結がおこり、しかもその氷結は北極海の10~30m 位の水深における低塩分によって促進される。換言すると、氷に覆われた表面下に比較的塩気のない水層

* 大陸は中緯度にはほとんどあるので、陸地に対する平均は約 67 w/m^2 である。

が漂っており、しかも、それは凍っていない海洋上にみられる波動によって混合されていないということである。

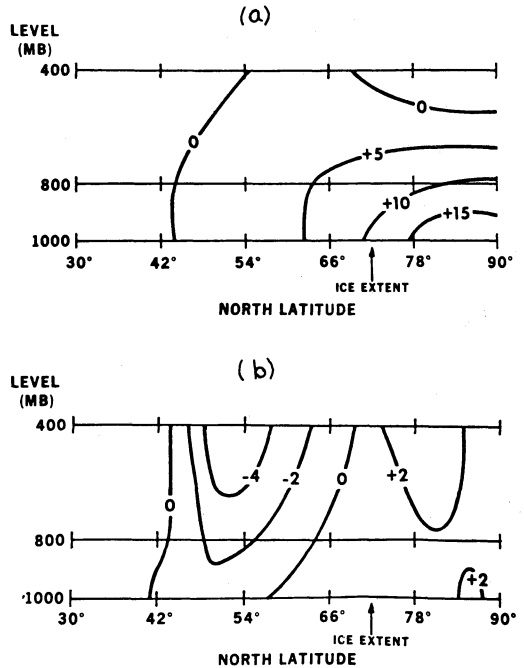
平均温度がどの程度上昇すれば、冬に水結できない状態まで浮氷をとかすことになるかは判っていないが、おそらく数度位であろう。夏期の温度は冬期の温度に比べてより強い影響力がある。北極海を波動が何らかの形で作用すると、塩気のない氷は下層の塩水と混じり合い、そして同様な波動が湾内や河口以外の所で氷結するのを妨げることになるだろう。凍っていない水域の低アルベドは太陽輻射の吸収をより一層容易にし、したがって北極海域をさらに温暖化することになるだろう。蒸発の増大により、夏にはより多量の降雨をもたらす、冬にはより多量の降雪をもたらすことになるであろう。

北極洋の氷を除去したときに起る状態についての研究の1つが RAND Corp. によって、Mintz-Arakawa の2層モデルを用いてなされている。第6図は Marshaw と Rapp によってなされた結果であるが、氷のあるときとないときの状態の間の温度の差と帯状風の差が示されている。海洋の氷が除去されたときに生ずる熱源によって、循環の様相は著しく変化しており、とくに、北極海域上の cold core low vortex が弱まっていることが特徴である。残念ながら、モデルは降雨分布の明瞭な差異を示さなかった。

以上の事より、人間は気候における明確な要素となりうるに足る熱を大気中に供給可能であろうということ、又、北半球では、熱の供給が一定量に達すると、その影響をさらに押し進めていくということは確実である。

人間の居住地域で大気中に熱を加えた時に気候がどの程度変わるかをみるために、W. Washington が NCAR でいくつかの実験を行なっている。太陽エネルギーの50%程に相当する人為的エネルギーが地球上の広い地域に加えられると、大気循環の様相は明らかに変化していき、その変化は気候の変化として解釈されるだろう。第7図に示される通り、この変化は著しく非一様なものであるが、モデルはこの種の実験には全く不適当なので、この問題の研究は今後更に進めていく必要がある。

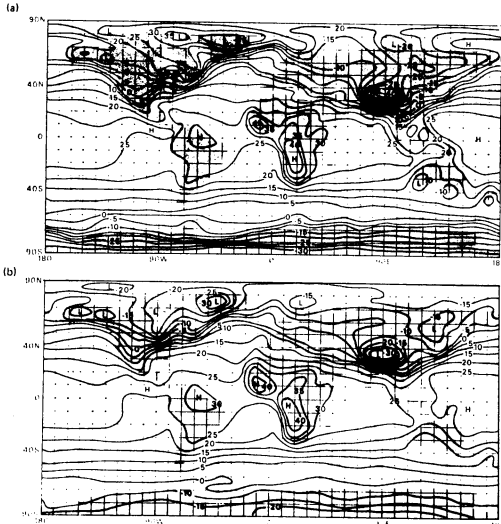
輻射平衡に直接関係していないが人間環境に対する1つの要素は、成層圏におけるジェット機の大規模な飛行がオゾン層に対して影響を与える可能性である。皆さんも覚えておられるように、1年程前に、米国で SST の原型開発費に関する討論期間に、出版された重要な本の事である。この重要な点は The Study of Critical



第6図 上の(a)図は、Mintz-Arakawa の大循環モデルにおいて北極海流のあるときとないときの温度の差を緯度平均した高度と緯度の関数として表わしている。また、下の(b)図は同様に東西風(帯状流)の差を(m/sec)で表わしている。北極の氷を除去すると、中緯度の西風が弱まり、高緯度における西風が少々強くなる。(原典: M. Marshaw and R. R. Rapp, An experiment on the sensitivity of a global circulation model: Studies in climate dynamics for environmental security, RAND Report No. R-908-APPA, Sant Monica, California, 1972.)

Environmental Problem (SCEP) においてまず最初に提出された、これは1970年の MIT の企画による夏期研究会であるが、さらに、1971年の SMIC の研究会で検討され、その後多くの人々によって更に検討されてきた。その考えは次の通りである。つまり、高高度飛行ジェット機によって排出される窒素酸化物と水蒸気が成層圏でオゾンと反応して、オゾンを減らすということである。オゾンの減量は、地球表面へ到達する紫外線の量を増加させることになるだろう。

このことは予測可能な1つの影響であろうが、SST の影響を明確に推定するために知る必要のあるいくつか



第7図 55日後の NCAR 6層モデルにより求められた表面温度の分布。上の図では、熱の供給は太陽からのみによっており、下の図では、“熱的汚染”を陸地の加熱として太陽からの熱供給の50%与えた。海洋の温度は両方共同であり、条件は1月の場合を考えた。このモデルにおいては、山岳と同じく完全な水循環を考慮している。(原典: W. M. Washington, On the possible uses of global atmospheric models for the study of air and thermal pollution, Chapter 18 in **Man's Impact on the Climate**, ed. by W. H. Mathews, W. W. Kellogg, and G. D. Robinson, M. I. T. Press, Cambridge, Massachusetts, 1971.)

の要素はなお研究中であり、この研究の主要な展望は大気のモデルを発展させることと、とくにそのモデルと一緒に実験するのに適当なオゾン層のモデルを発展させる

ことから出てくるであろう。すなわち、数多くの SST のもたらす影響を示せるように大気の様相を simulate 出来る数値モデルを用いることである。これまでの若干の推定によれば、非常に多数の SST は紫外線の地表到達量をかなり変え、ひいては我々に大きな影響を与える地球規模の環境変化をもたらすであろう。しかし、私は次のことを強調したい。すなわち、この問題に関する我々の課題は終わったことにはなっていないし、数多くの SST の影響が非常に小さくて考慮する必要のないものであるということになるかもしれない。

6. 結 論

上述のことより、人間が地球の気候に影響を与え得ることが結論づけられるだろう。

もし人間が増大する人口を考慮して生活の水準を改良するための熱望を満足させるために、より多くのエネルギーを必要とし続ける限り、来たる数十年間の人間の影響というもの温度上昇を持たらすという方向に行くに違いない。とくに北半球ではそうである。北極海の氷床は海洋一大気系の不安定な部分である。つまり、氷床を除去する昇温は主要な一方的変化をもたらし、北極海は年中不凍の大海となるであろう。このことは地球上のいくつかの地域にとっては極めて重大なことになるが、人類にとって惨事をもたらすものであるとは言えない。

我々はこのような変動の予測の仕方も知らないし、この変動が見通し得る未来に起こるものかどうかとも知らないが、この変動が人間による影響の結果として起こり得るという明白な可能性は、気候と気候変動を支配する機構を理解しようとするあらゆる努力の結果、正当であると言える。この問題は気候科学の未来における主要な研究課題の一つであろうし、又、すでに始められている課題でもある。