

SMIC 会議の概要*

矢 野 直**

はじめに

SMIC (The Study of Man's Impact on Climate)*** は1971年6月28日より7月16日にいたる三週間にわたって、スウェーデンのストックホルムで開かれた会議である。

この会議は1970年に行なわれた SCEP: Study of Critical Environmental Problems の内容を更に発展させるために、同じ M.I.T. 主催によって主催された。日本からも東北大学、山本義一教授および気象研究所、北岡龍海所長が出席した。また真鍋博士も米国、プリンストンから参加された。参加した国は14ヶ国、参加者は各国から30名の著名な科学者であった。

この会議の目的は、全地球的な温度や熱平衡に影響をもち、広い地域や地球全体にわたるような気候の変化を呼び起こすであろうと考えられる人間活動の影響を検討することにあった。この会議の内容となる、人間活動の影響にかんする一致した結論、および勧告についてはわれわれにとって、きわめて興味があり、また有益なものである。

* Summary of Major Conclusions and Recommendations of the SMIC.

** N. Yano, 気象研究所.

*** 1971年6月28日から3週間にわたって、スウェーデン、ストックホルムで開かれた「気候に対する人間活動の影響」の会議が開かれ、重要な結論や勧告がおこなわれた。

この会議の目的は、全地域的な温度や熱平衡に影響をあたえるような人間活動、広い地域にわたる気候の変化をよび起こすような人間活動について評価することにあった。

会議の主なる焦点は：(1)歴史的にみた気候変化。(2)気候に影響をあたえると考えられる人間活動。(3)気候変化のモデルと現在の理論。(4)低層大気の変動。(5)人間による地表変化の影響。(6)成層圏の変動であった。

—1971年1月18日受理—

1. SMIC の焦点

この会議の内容、性格は、きわめて複雑で広範なものであるが、それらは次のような6項目のテーマにまとめることができる：

- 1) Previous climate changes.
- 2) Man's activities that may affect climate.
- 3) Present theory and models of climate change.
- 4) Modification of the lower atmosphere.
- 5) Climatic effects of man-made surface change.
- 6) Modification of the stratosphere.

この会議はまた、それぞれのテーマについて、まず何を確信的にいうことができるか。現在の評価にとって、信頼性の限界となるような知識のギャップは何であるか。将来よりよい評価をうするためには、どのようなデータと情報をえなければならないか。焦点となる研究にどのようなモニタリング、あるいは行動的なプログラムが必要であるか。この研究の勧告をおこなうために必要とされる活動の特徴は何であるか。ということを一般的な設問として用意している。

2. 歴史的にみた気候変化

このテーマについては、人間活動の影響を評価するに当って、地質時代にまでさかのぼって考えてみる必要性を述べている。比較的に精密な温度計によって気温が全地球的に測定されるようになったのは、この100年くらいである。これらのデータによると、1880年から1940年までに地球の平均気温は0.6°Cも上昇し、その後1970年までに、0.3°C降下した。さいきん、これらの変動をさぐるようないくつかの議論がさかんであるが、北極圏の低温化が中緯度のものにくらべて3倍も大きいことや、熱帯地方では平均温度が変化しないか、あるいはわずかに上昇していることなどを考えると、早計な結論づけをすることは危険であるとしている。

古生物学や地球物理学の知識によると、地球の平均気

温は、かなり大きな自然変動があった。この変動のきわめてわかりやすい指標として、氷河や polar ice の消長がある。じっさい、この地球上に比較的高級な生物が出現してから、数億年になる。この期間において、氷河や polar ice のあった期間は、その10%程度であると考えられている。すなわち、氷のない状態のほうがノーマルであり、現在もふくめて極に氷がある状態のほうが異常であると考えられないことはない。

氷河期はこの間、2.5~3億年前にはじまり、3~5万年続き、さらにその後極に氷のない時代が続き、その後再び冷却して約5百万年前の鮮新世中に氷河期が再び南極から始まった。このもっとも近い氷河期中に、何回かの大きい氷床が北アメリカからヨーロッパ大陸をおおった。氷床が後退したのは、わずか8000年から16000年前である。Greenlandの雪の層からの推定によると、この後退期における気温の上昇は、かなりドラマチックなものであったという。その後の変化は比較的一定で現在にいたっている。この間しかしながら、17世紀にあったような厳寒期がなかったわけではない。

したがって、過去の地球の歴史的な気候変化については、とくに北極洋が氷で覆われていなかった時代の地球物理的条件の研究が必要であると勧告している。

3. 気候に影響をあたえると考えられる人間活動

このテーマにかんしても、長期的な考察の必要性が述べられた。さいきんでは、とくに工業活動による影響について、主として強調されているが、産業革命の数千年も前から、すでに牧畜や農業による人間活動の影響があらわれている。アフリカと南西アジアは、羊や他の家畜の放牧によって、その一部を半砂漠化させた。トルコからアフガニスタンおよび地中海、ヨーロッパから東方連合諸国におよぶ、山岳地帯の濃密な森林は、牧場と耕地をつくるために切りはらわれた。樹木のない熱帯の草原は、殆んどすべてが人間によるものであると考えられている。このような濫伐は大陸の約20%にわたって激しく変化させ、そこでの熱と水の収支を大幅に変化させた。

これと同じようなことは、現代でも、ダム建設、人工湖、排水沼および移動河川などの地上水の操作によってもつくり出されようとしている。河川の移動が、乾燥した砂漠や半砂漠地帯にむけられると、水の9割は空気中に蒸発する。人工的な自然に対するこのような変化は、熱と水の収支に変化をあたえる可能性が大きい。

凍結核の種まきによる降水調節は、降水量を増大させる実用化にかんして、魅力的であった。しかしどのよう

な降水パタンの変化も、大気中のある部分の熱収支に影響をあたえる。

主として工業活動による影響については、とくに都市を中心に大気汚染が深刻になっているが、その痕跡は全地球上いたるところで検出できるようになった。

人工的な粒子状の汚染質は、おもに工業活動や廃棄物や植物の燃焼によってつくり出されている。粒子は太陽放射を散乱し、吸収し、赤外にも作用するため、広い地域にわたる熱平衡に大きい影響がある。

気体状の汚染質のあるものも、太陽または赤外放射を吸収する。炭酸ガス(CO₂)、水蒸気(H₂O)、およびオゾン(O₃)はこの分類に入るものである。

CO₂の増加は、化石燃料、たとえば石油や天然ガスなどの燃焼によって増加していることがよく知られている。げんざいの増加率をそのまま維持するとして、西暦2000年のCO₂の全地球大気中の増加は、20%に達すると推定されている。

ごく最近まで、大規模な熱の放出の影響を推定評価することができないと考えられてきた。しかし、世界の人口は30年後には2倍にも達しようとしているし、一人当りのエネルギー使用量も増大するであろうから、長期的見通しを考える必要性が高まっている。現在、あらゆる種類のエネルギー生産は地球全体で毎年5~6%の率で増大している。5%の増加率は30年後の西暦2000年には現在の5倍に達することになる。このような熱の放出の影響はGlobalにみると、あまり重要ではないが、工業地帯では局部的に、太陽からの直達放射と偶発的にコンパラブルになることが考えられる。

ここではまた、自動車と航空機などの輸送機関による影響が取上げられた。自動車の排気ガスは、いわゆる「スモッグ」粒子を生成するのに、大きい寄与がある。米国のある都市で観測された結果によると、空気汚染質の約半分が自動車によるものであることが明らかにされた。このことは、他の工業先進国でも多分真実であろうと考えられるとしている。

自動車道路を占める面積は、米国においては、その全面積の約1パーセントをカバーしているにすぎない。これは、すでに述べた牧畜や農耕による樹木の濫伐が20%にもおよんだのと比較すると、大きなものではないが、しかしとるにたらないものではない。

航空機による影響は、ジェット燃料消費量が来るべき将来では、5~6年毎に倍化することが推定されている。とくにSSTの就航などによって、上層の絹雲の量を増

大することがすでにわかっている。この増大も、大気の熱平衡にわづかな影響をあたえる。

このテーマでは、社会的な側面については単に、外挿にたよる以外になかったこと。しかもこの外挿が妥当ならば、どのようなことがおこるかを示したにすぎない。

4. 気候変化のモデルと現在の理論

気候そのものは、大気と海洋および陸地のあいだの、いろいろな相互作用をもった物理過程の平衡によって決定される。気候は、したがって時間スケールの変化をうけるが、その物理過程は、適当な物理数学的モデルによって研究ができる。

人間活動による気候への影響を評価するには、現在の気候の物理過程が、どのように生起しているかを理解するとともに、過去の自然の物理過程が、どのようなものであったかを知る必要がある。

げんざいまでに、気候に対するいくつかのモデルが開発されてきたが、それらは4つのタイプに分類できる。

- a) **地球平均モデル** 大気の水平運動は無視されている。
- b) **パラメタライズした半実験式モデル** すべての大気と地表を考えるが、大気や海洋のある部分は実験的に調整した常数のたすけをかりて、シュミレートしている。
- c) **統計一力学モデル** 物理法則は、大気の変数の統計として適用されている。
- d) **純粋な数値モデル** 運動と相互作用は、変数の時間にかんする微分方程式を積分することによって、くわしく取扱われる。ただし、実用的には、経験的パラメタリゼーションや統計的方法が、ある最小スケール以下では置換られている。

気候理論についての予備的な研究に、地球平均モデルがつかわれてきた。たとえば、CO₂の効果を推定するのに、使われた。パラメタライズした半実験式モデルも、気候問題の研究に使われているけれども、パラメタライズの過程中的の問題が残されている。統計一力学モデルについては開発の初期段階にあるが、精密な数値モデルの莫大な計算量を、これによって簡略化することもできる。

これらの気候モデルの現状は、非常に期待できるものであり、しかもこれが可能なことが、解っている。たとえば、北極の sea ice を維持する過程のくわしい平衡にかんするモデルによって、平均気温のわずかな変化や直達日射量のわずかな変化によって、流氷群が相当に拡大

したり、縮小することが示された。このようなことは、人間生活にとって非常に重大な気候変化である。

気候モデルを更に高い精度にするためには、いくつかのデータの適当な改善や、モニタリング・プログラムが勧告されている。

- 1) 地球一大気アルベドの時間的、地理的分布。少くとも1%の精度での全地球上のアウトゴーイング・フラックスのモニタリング。
- 2) 雲量の全地球的分布（水平と垂直）の高分解能によるモニタリング。極氷とスノー・カバーの量のモニタリング。
- 3) 地球上の雲と大気中微粒子の変化傾向と、光学的性質の分布の測定。
- 4) 太陽常数の絶対値の±0.5パーセントよりよい測定と、1,800Å から40,000Å までの太陽放射のスペクトル分布の数パーセント以内での測定。（可視部では、±1パーセント以内。）

5) 衛星からの、遠隔センサーによって情報がえられるならば、海洋の表面温度のモニタリング。

海洋上部の流れと温度分布についてのモニタリング、プログラムを勧告したいが、げんざい経済的に有効な方法がないので、その代償として：

- 6) 海洋温度を結合したモデルを証明するために必要となる海洋データをうるための、もっともよい方法をみいだすための、理論的、観測的研究。

さらに、人間活動の影響を評価するためにも、新しい効果を取り入れた、大気海洋モデルを開発すること。

- 7) 次のような効果を入れた。新しい大気-海洋モデルを開発する。

- a. 雲量。（ここでは、雲量がモデルそれ自身から発生することが、のぞましい。）
- b. 海水とスノー・カバー。（ここで、氷の厚さと量が、このモデルで予知される。）
- c. 海洋-大気相互の熱、湿気、運動量および、境界層の乱流交換。
- d. 大気中の微粒子。

人間の影響については、更にトレース・ガス、エアロゾル、熱の放出および地表の変化による気候変化の効果をテストすることによって、研究すべきであるとして。

- 8) 気候変化と気候の基礎的ファクターのあるものへの洞察をうるために、簡単化されたパラメタライズした気候モデルの拡大的使用。これらのモデルは気候についての各々の因子の影響をテストするために

比較的短い計算時間ですむ。

- 9) 自然系における固有の長期的気候変動にたいするテストのための実際的な大気海洋、気候モデルの長期的積分。

5. 低層大気の変異

低層大気中の組成は、人間活動の原因によって、わづかではあるが変化しつつあることが証明されている。大気中の微粒子の濃度も増加しつつあるし、 SO_2 や CO_2 のようなガスの濃度で増加しつつある。また大気中の雲量も重大な変化がおこっているのではないかと疑われている。局地的には、人間活動によって雲が生成していることが、明らかにされている。

粒子は、第一に、大気中の放射エネルギーの伝達に影響するばかりでなく、雨や雪へと導く過程と性質を変質させる。 CO_2 量の変化もまた、大気中の放射エネルギーの伝達に影響する。

げんざい、これらの変化が、地球の気候に重大な影響をあたえるかどうか、明らかでない。すなわち、その機構を明らかにするような知識に、まだ大きなギャップが存在するからである。

地球上では、自然の粒子発生源がそんざいして、これがひろく拡散されているが、これらの粒子集団の説明がきわめて不十分である。また、モデルによる診断を行なうとしても、粒子の光学的、化学的性質は未だよく解っておらず、汚染大気の放射の特性も観測がよく行なわれてないために、困難である。しかし、粒子濃度と屈折率の適当な推定による計算では、低層大気では、それが、冷却の原因とならないとしている。

大気の放射伝播の理論的研究では、絹雲が大気中の諸過程に重要なえいきょうをもつことがあることを示した。しかし、絹雲の生成、存続および光学的諸性質については、ほとんどわかっていないので、人間活動による変異の効果を大きさをも推定することはいまのところ不可能である。

CO_2 については、SCEP のときよりも更にその影響評価が明瞭になった。さいきんの測定結果によると、 CO_2 の平均増加率は、毎年 0.2 パーセントであることがわかった。したがって、いまでは、 CO_2 量の正確な測定というよりも、 CO_2 の海洋—大気への分配の問題のほうが、より重要であるとしている。化石燃料をげんざいのような増加率で燃焼させるとすると、 CO_2 の気候的影響は年毎に大きくなるし、効果的となることが考えられる。

地球上の酸素は、そもそも生物によって生産され蓄積

されたものであるといわれている。しかし、化石燃料の燃焼による酸素の消費は、その重大な枯渇をきたさないという SCEP の結論を変更するものではなかった。

このテーマの研究として、次のようなことが勧告された。

- 1) 大気中の粒子の直接的影響：
 - a. 粒子と反応する微量ガスの全地球的生成率のよりよき数値。
 - b. トレース・ガスから粒子への相変化の研究。
 - c. 清浄および汚染大気中の短波および長波放射の放射領域の研究。
 - d. 大気粒子の屈折率に関する研究。
 - e. 混濁度、全粒子濃度、氷核および雲核の測定による時間変化傾向と全地球的分布のモニタリング。
- 2) 雲に関する粒子の影響：
 - a. 大気汚染による雲のアルベドの変化に関する研究。
 - b. 汚染による雲量、雲形、降水の変化にかんする総合的野外観測。
 - c. 高精度と信頼性をもつ衛星による雲のモニターにかんする Objective methods の開発。
- 3) CO_2 と水蒸気：
 - a. 約 10ヶ所の観測所（世界で）による CO_2 のモニタリング。
 - b. 上部成層圏と低部成層圏における H_2O のモニタリング。
 - c. 絹雲の形成過程の研究。
 - d. 絹雲量の傾向モニターにたいする適当な方法の開発。

6. 人間による地表変化の影響

ほかのテーマのところでも論じてあるように、地表の変化というのは、それが自然のものであるか、あるいは人工的なものであるかにかかわらず、気候にたいして大きな影響を及ぼす。

このような地表の状態の変化のなかで、氷と雪によって蔽われる影響、とくに北極の海水の影響は、気候にたいして重要である。この状態変化は、アルベドを大きく変化させ、気候の変異を容易にする。

CO_2 の大気中濃度の増大や、熱の人工的な発生量の増大によって、地球の平均温度が上昇することが考えられており、このままでゆくと、地質学的時間単位からみれば、きわめて劇的なものとなることが予想され

る。しかし、今後の数十年については、その影響は、地域的な重要性をもつにすぎない。

すでに述べたように、北極の海氷の消長は、地球の熱平衡にかすする敏感な指標となる。あるモデルからの計算結果によると、北半球の平均温度の数度の変化は北極の海氷を融解させるのに十分であることを示した。またある研究は、北極海上の広い地域にある海氷は、将来おこるべき結果として、完全に消滅してしまうことを示した。ひとたびとけてしまったら、それが再び直ちに凍ることは多分ないと考えられている。

もし、海氷が完全に消滅してしまうとすれば、その後のような気候変化がおこるかを十分に知ることはできないが、降水、季節変化、風系あるいは海洋の流れに、大きな変化が起るであろうことが考えられる。しかし、海面の上昇は影響がないと推定されている。これらの重大な環境の変化の予知にかんしては当然、気候モデルの開発と発展に期待する以外にない。

地球の平均温度にかんして、CO₂の増加などとともに重要なものに熱の放出がある。これは近い将来、地域的にはかなり大きい影響が伴うであろうことが推定されている。

地表水や地下水の問題も考察された。人間活動による地表水の処理は、たとえば灌漑によって局地的な寒冷化を生ずるといような影響がある。グローバルにはアルベドの変化や蒸発量の変化をもたらし、このような影響も、モデルによって今後研究されるべきであるとしている。また、とくに熱帯ジャングルの濫伐によって、烈しい蒸発が強制され、局地的な加熱を増加させたことの研究が必要であるとしている。

このテーマにかんする勧告として次のようなことが示された。

1. 科学的な諸団体がモディフィケーションの結果についての合意に達するまで、持続的あるいは長期的な気候のモディフィケーションの大きな実験(直接10⁶ km²に及ぶような)を防ぐための国際的合意を見出すこと
2. 半砂漠地域の境界のようなところで地表の直接的加熱と蒸発率の変化の結果を解明するような、モデル実

験を行なうべきであろう。

3. 北極海水、氷河の量、海水レベルおよび燃料消費量、あるいは灌漑と都市の面積というような、気候に影響のあると考えられる人間活動の記録保存のための気候調査が行なわれる必要があること。
4. 気候変化の研究に必要な、当面の課題に関連した季節的地域平均が直ちに利用できるようにすべきこと。

6. 成層圏のモディフィケーション

ここでは、まず高々度飛行する航空機からの排気ガスが問題にされた。とくに SST の就航による大量の水蒸気、窒素酸化物、その他のガスの放出が検討された。すでに行なわれた SCEPT のある仮定にもとづく気候にたいする影響は、SST にかんして次のようである。

1. 冬季極地域における成層圏雲量が増加するであろうが、その変化量や気候への影響は不明である。
2. 炭酸ガス、一酸化炭素、水蒸気および窒素酸化物の局地的放出量による放射への効果は、これらのガスの他の人間活動による発生源によるものに比べて小さいであろう。
3. 亜硫酸ガス、炭化水素および窒素酸化物は、粒子を生成するであろうし、それは火山爆発によるような大気中の熱平衡に影響するであろうが、その地表温度にたいする結果は不明である。
4. オゾン変化は変動が小さい。

SCEPT くらい、オゾン量の減少が問題になっている。しかし、オゾンの化学反応と輸送過程についての知識が不完全であるため、このような予想はきわめて困難な状況下にある。

このテーマの勧告としては、人間活動による影響を明らかにするには、まず上部対流圏における、トレースガスと粒子についてのルーチンのモニタリングが必要であるとしている。また成層圏化学のための、実験室的測定を行なうことである。またこれと同じ程度に重要なこととして、オゾンやトレース・ガスの輸送の研究の必要であり、これらの結果を結合したモデルで解明する必要があるとしている。