

エネルギーと気候の予想*

—シナリオ—

H. フローン** 抄訳：能登正之***

1. はじめに

1972年ごろの世界的な異常天候、これと時を同じくして起きた1973年の石油危機や、ローマ・クラブによる「生存の限界」についての研究は、人間活動と気候との問題およびこれとエネルギー問題との関係について世界的な議論を刺激した。1967年に WMO と ICSU によって組織された地球大気開発計画(GARP)は天気予報の改良、精度の向上という目標のほかは「気候の物理学的基礎についての理解を向上させること」を第2の目標として目指している(GARP-Report, 1975)。気候の異常や変動は、我々の目の届く範囲内でみると、現在、どの程度まで人間活動の影響を受けているだろうか。これらの世界的な循環の異常は気候帯の大規模、かつ永続的な変化を告げているだろうか。年々2%の割合で増加しつつある世界の人口、(変動はあるが)同じ率で増加する食糧生産、年々4%以上も増加するエネルギー消費。このような条件のもとで、我々の世界の将来の気候はどうなるのだろうか。

同時に、いろいろなモデルによるシミュレーションは、専門家達の間、我々の世代の気候は不変のものではないという理解を育てつつある(GARP-Report, 1975)。気候の歴史の研究は、氷期と温暖な間氷期の間で、まったく突然の変化が起きるという事実を明らかにしている(U.S. GARP Committee, 1975)。このような2つの全く異なった気候様式の間の変換期は1世紀より長いことはなく、むしろ、短かいという証拠もある。明らかに、300年という測器観測時代は、可能性のあるありとあらゆる気候の変動や偏りをみるには、短かすぎる。

一方、気候モデルの開発はいくつかのグループによって大きく進歩してきており、魅力のある結果が出ている(GARP-Report, 1975; Hess, 1974)。しかし、最も優れたモデルでも、我々の現在の気候の地域的な細部のすべ

てまでも正確に記述することはできない。それは、これらの気候モデルが気候系(大気+海洋+氷+土壌+生物圏)内の全ての物理的なフィードバック・メカニズムの一部しか含んでいないからである。

2. 気候過程のエネルギー論

現在のところ、十分に現実に合ったモデルによる気候変動のシミュレーションは不可能であるし、それが可能になるまでには、これからまだ何年もかかるだろう。したがって、我々は、自然現象(火山爆発や太陽放射の変動)と人為的な効果を、それらのエネルギーが気候系に及ぼす影響の程度を推定することによって比較することしかできない。気候系は太陽放射の地域的な差によって誘起され、そのエネルギーの一部だけが気候形成過程に利用される。そこでは有効位置エネルギーの生成と、最終的には(これに等しい大きさの)運動エネルギーの摩擦による消滅がある(第1表A)。

我々は、気候の変動(fluctuation)の原因になると考えられる種々の要因について、そのエネルギーによる寄与を推定してみた(第1表B)。我々はまず、1883年の

第1表 自然の気候エネルギー

	Global Scale	
	Terawatt(10^{12} W)	W/m ²
A) Solar constant	173000	340
Net radiation, earth's surface	52000	102
Production of avail. pot. energy	1200	2.4
Geothermal heat	32	0.063
B) Photosynthetic processes	104	0.2
Large-scale volcanic eruption	160	0.3
Change of cloudiness(1%)	350	0.67
Change of oceanic evaporation (Equat. Pacific)	~300	
Change of snow-cover(12%)	110	
Change of Arctic sea-ice(20%)	100	
Large magnetic storms	100-200TW	

* Energy and the Prospects of Climate: a scenario.

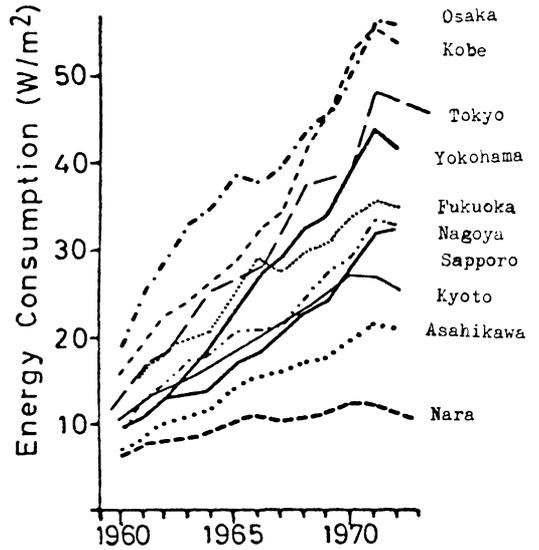
** H. Flohn, ボン大学

*** M. Noto, 気象庁長期予報課

第2表 人工的気候エネルギー

	Terawatt(10^{12} W)	Area
Large-scale irrigation, reservoirs	$2.5 \cdot 10^6$	km^2
Heat input by energy consumption	~ 8	(mostly $0.5 \cdot 10^{-6}$ km^2)
annual increase of CO_2	~ 1.6	15-20 world-wide
Tropospheric dust	~ 6	
Savannah bush-fires etc.	~ 3	(mostly northern hemisphere $10 \cdot 10^6 km^2$)

Krakatoa のような非常に大きな火山爆発後の成層圏の火山灰を考えた(Yamamoto, R.・T. Iwashima, 1975). すなわち, その世界的な冷却効果は数年間持続し, 最初の年には最高 $1^\circ C$ 近くまで及んだが, これは, およそ $160TW$ (テラワット, 10^{12} Watt) のエネルギー損失に相当する. 平均雲量の変化は, 地上または衛星からの観測で検出されなくても $1 \sim 2\%$ は変わり得る. 赤道太平洋上での蒸発はエル・ニーニョの期間に湧昇流が停止することによって, 実質的な増加があるだろう. 衛星から観測される雪原の広がりには年々変化するかも知れない. 北極海の海氷の広がりには過去 100 万年の間に著しく変化した. これらの, 気候系内部の変化は全部で 100 ないし $300TW$ のエネルギー増減の原因となり(GARP-Report, 1975), これは $0.6 \sim 2.0^\circ C$ の地球温度の変化に相当するが, この値は過去 100 年間に経験した程度の典型的な小変動である. これは, 磁気圏の変調を介して影響すると考えられる太陽活動の影響についても言える. これら自然の出来事を背景として, 人間活動の影響をみる必要がある(第2表)(SMIC-Report, 1971; Bach, 1976). もっとも大きな影響は農業用灌漑であり(Lvovich, 1969), 貯水池(その大きなものでは, ひとつの貯水池で $0.4 \times 10^6 km^2$ 以上もある)を含めると, $2 \times 10^6 km^2$ 以上になる. 全体の面積が $2.5 \times 10^6 km^2$, 蒸発散の増加分が $1m^2/a$ になると推定すると—これは乾燥地帯や半乾燥地帯では控え目な数値だが一年間で $2500km^3$ の水分が失なわれることになり, これは約 $150TW$ に相当する. Lvovich (1969) は, 1965年における値として $1700km^3$ を得ている. 化石燃料や核燃料の消費による直接の加熱は, 現在は $8 TW$ に相当する(Flohn, 1973). この数値は換算係数の違いや, 最近のエネルギー消費量の変化などのために多少不確実である. 顕熱だけでなく, 多くの他のエネルギーも最終的には顕熱に変換される. すなわち, その増大する部分のひとつには潜熱(冷却塔からの蒸発など)



第1図 日本におけるエネルギー消費密度(堀江の資料による).

があり, また幾分かは, 化合物の化学エネルギーや位置のエネルギー(たとえば高層ビルディングの)がある. 人口, 工場および交通機関の地域的な集中 ($500,000km^2$ 以下であるが) のために, 大部分は非常に凝縮した形で放出され(第1図), 純放射量(全球平均 $\sim 100W/m^2$)と比較するとき無視できない. 大都会及び工場地帯における典型的なエネルギー消費密度は $10 \sim 20W/m^2$ で, $100 \sim 1000km^2$ の地域に影響がある. ある場合には $10,000km^2$ に影響するが, それでもシノプチック・スケール($\sim 10^6 km^2$)よりは, はるかに狭い. したがって, このような加熱は主として地域的なスケールのものであり, 都市のヒート・アイランドを作り出し, 大気が不安定な場合には対流活動を増大させる. きわめて強い局所的な熱源では, そのエネルギーの放出量は $10^5 W/m^2$ (1943年7月24日の Hamburg の焼い弾による火災, 面積 $13km^2$) から $10^6 W/m^2$ (冷却塔, 表面積 $700m^2$) にも達し, 同時に大気中への実質的な水蒸気の供給も伴う.

この顕熱による大気の加熱は放射冷却によって, (約 $0.1^\circ C/hour$ の割合で) 急速に失なわれてしまう. しかし, CO_2 は大気中における残留時間が長いために(約 6年), その影響はかなり異なる(GARP-Report, 1975; Bolin, 1975). $12 \sim 15\mu m$ 領域での地球の放射吸収は大気中における温暖化を持續させ, 成層圏における若干の冷却をもたらす. Manabe・Wetherald (1975) は海洋に

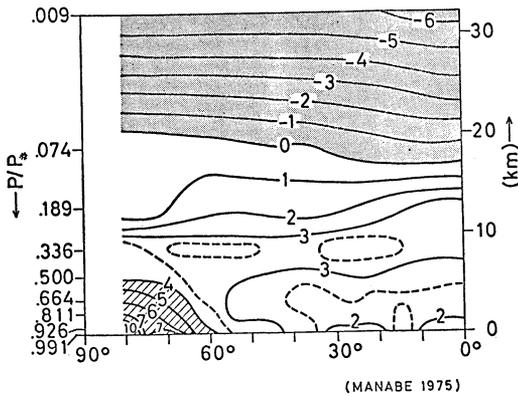
おける移流を省略し、不完全な地形効果を採用するなど温暖化を過小評価する結果をもたらすような条件を含んだ気学モデルを用いたにもかかわらず、大気中の CO_2 が2倍になった場合に北極で $8 \sim 10^\circ\text{C}$ 、全球で 2.9°C の昇温が起きることを計算した（第2図）。対流圏の塵埃の役割については、吸収の効果を無視して、もっぱら大気を冷却する散乱の効果について多くの研究が行なわれてきた。吸収の効果を無視することは、夜間の気温および平均気温が工場地帯ばかりでなく塵埃の多い乾燥地帯で、ほかの地域よりも高いという事実と矛盾する。適切な吸収係数が与えられたモデルによると、少なくとも、

い。しかし、この過程の効果についても、また成層圏の煙霧に対する人工粒子の影響についてもほとんど何もわかっていない。

3. 北極海氷のセンシティブリティと重要性

将来の温暖化が当然のことであるとすると (Budyko, 1974; Flohn, 1975, 1977), これは我々の気候の有利な修正として歓迎し、受け入れられるものであろうか? 残念ながら、それは大気と海と氷からなる多相系の、高いセンシティブリティのために好ましくない結果をもたらすであろう (Flohn, 1973; Budyko, 1974). このことは、過去5000年間の気温の変動と大規模な循環パターンとの相互関係から実証されている。平均的な年間の広がり $11 \times 10^6 \text{km}^2$ となる北極海氷は平均寿命が5~6年、平均の厚さが2~3mの個々の浮氷 (ice-floes) から成る。この流水 (drifting ice) は融氷期6月半ばから8月末まで) に上部から融け、その他の期間には下部から成長する。これは、シベリアやカナダの大きな河川から流入する淡水によって維持される、浅く (~50m)、塩分濃度の低い、上層部で起きる。このように北極海の水氷は、融氷期と成氷期の長さや寒暖の程度にきわめて敏感である。北極の水氷の中心部分は100~200万年来維持されてきた。北大西洋では5000年前と同様に、海水の南限は中世紀の初期にグリーンランドの北部まで後退し、また200年前には Faroe Islands の方へ広がった。氷の厚さの変動は観測された地上の温度変化と相互に関係があるが、北極の地上気温の変化は中緯度の変動の5~6倍にもなる。

歴史上の証拠は、北半球の $1 \sim 1.5^\circ\text{C}$ の気温変化が北極海の水氷の2000km もの前進と後退に一致することを示している (U.S. GARP Committee, 1975, Budyko, 1974) このことは海水の広がりの変動が気候の進展に重要な役割をもっていることを示す。もしも大気中の CO_2 含有量が50%以上になると北極海には強烈な変化が生じ、海水は急速に減少、あるいは完全な消滅にさ至るかも知れない。氷のない北極海の可能性については、ほとんど疑いはない (Flohn, 1973; Budyko, 1974). このような進展はすぐ逆もどりすることもある。夏季の極地方における強い太陽の放射は海洋に貯えられ、そして表面水と空気を温める。赤道と極の間の気温傾度は大規模な気候帯の風系と降雨帯の位置を制御するから (Korff-Flohn 1969), この結果として氷でおおわれた北極海と、これら気候帯の300~600km 北への変位とを予期せざるを得ない。また人口が稠密な地域の水収支に厳しい結果をもた



第2図 大気中の CO_2 が2倍になったときの気温変化。

地表のアルベードが小さいか、平常である領域では昇温するという結果が得られている。我々の推定は850mb以下の地域的な塵埃層の温暖化に基づいている。第2表に示した推定値が正確なものではないとしても、野焼や焼畑の影響は、とくに熱帯サバンナでは無視すべきでない。この問題については多少の議論はあるが、たいていの気候学者はいまや人間が作り出した温暖化が優勢であることを認めている。 CO_2 の温室効果については時に注目されているが、冷蔵庫やスプレーなどに広く利用されている塩素化炭化水素類は大気の窓領域付近 (9~12 μm) に吸収帯をもち、温暖化に寄与し (Ramanathan, 1975), 30年ぐらいいは大気中に残留する。

ここで Bryson (1974) が、人間が作り出すエロゾル粒子がジェットストリーム付近での交換過程で成層圏内に輸送されると主張していることに言及しなければならない。火山性煙霧層 (volcanogenic haze layer) は地球のアルベードを増して地球の寒冷化を起すが、ここでは人工的なエロゾル粒子がこれに加わるとしてもよ

らすことになろう(第3図)。

4. 21世紀の気候予想——シナリオ——

現時点では、気候の進展についてのいかなる予報も次の2つの理由で不可能である。すなわち、実際の気候を十分に表わすモデルがないこと、そして気候変化の自然の原因の変動を予報する能力がないことである。我々が試みることができるのは、人間の影響の増加によって起きるかも知れない気候の変動について、一定の仮定の下で臆測することではない。ここで採用する仮説は、ここでは詳しい議論は行なわないが (GARP-Report, 1975; U.S. GARP Committee, 1975; Hess, 1974; Flohn, 1973; Budyko, 1974), 次のようなものである。

- (1) 太陽放射(太陽定数)一定。
- (2) 火山の大爆発が異常に頻発することがない。
- (3) 南極大陸の氷棚(ice shelf)の異常な拡大がない。
- (4) 地球の平均雲量に重要な変化がない。

このような条件を前提とする21世紀の気候の進展についてのシナリオは、1931~1960年のような気候状態から始まるだろう。過去500年と比較すると、この期間はきわめて例外的である。その第2幕は西暦900年から1200年間の温暖な期間、すなわちthe postglacial optimumへの帰還で、北極の永久流氷(the permanent arctic drift ice)が、大西洋域で著しく(北緯80°辺まで)後退するのはかなり確かである。残念なことに、この期間についての明白なデータは若干の地域からしか得られない。とくに熱帯および亜熱帯地域のデータが欠けている。中世のアラビアの旅行者の報告によると、当時はサハラ砂漠の広い周辺部は樹木が散在する草原であった。この辺りの最近の砂漠化は気候の変化が主たる原因であることを示すものではなく、人間によって誘発された植生の破壊によるものであることを証明するものであり(Charney, 1975), この破壊は完全な保護対策が行なわれない限りは元へはもどらないだろう。

「最適気候」状態の安定化は100~150億に達する人口増加と、多かれ少なかれ均等な高い生活水準を指向して増大するエネルギー使用と矛盾するように思われる(U. S. GARP Committee, 1975; Flohn, 1977)。たとえ21世紀の中ごろに人口増加とエネルギー需要の増加が指数変化からロジスティック変化に変わって安定化するとしても、持続するCO₂の増加は将来の温暖化を保証するのに十分である。

現在の我々自身の消極性と見通しの欠如は我々の子孫に報復することになる。残された森林や海洋と大気

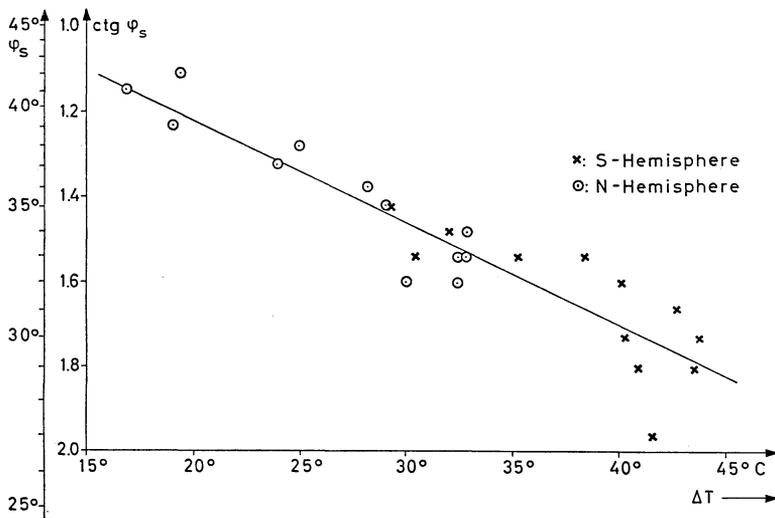
の広範な破壊に加えて、シベリアやカナダから流れ出る淡水の(灌漑等による)減少が予想されるが、これは北極海の塩分を増加させ(Aagaard・Coachman, 1975), その安定性を減少させる。北極海に浮遊する海水は急速に減少し(Budyko, 1974), 遂には、その中心域の海水も消滅するだろう。しかし、冬にできる薄い、季節的な流氷原ぐらゐは、少なくとも沿岸地帯には残るかも知れない。

北極の大気+氷+海洋からなる、多相系のセンシティブティは一次元の熱収支モデルで調べることができる(Maykut・Untersteiner, 1971)。ここでは融氷期における流氷のアルベードの効果きわめて重要である。夏期に融氷が増加し、1年の間の他の期間にできる氷が減少するという過程が1度起きると、全く急速に、非可逆的な氷の減少が進む。この場合には明らかに、海水基準面の上昇は起きない。

この過程はどうかすると、過去100~200万年には恐らく経験されなかった状態にまで進むかも知れない。この時点では、氷に閉ざされていない北極海に対して、南極大陸はまだ非常に厚い氷におおわれていて、大気の環流はかなり非対象的である。現在の単純化された気候モデルでは、氷のない北極についてまとめた結果は得られない。そのような結果について議論をするかわりに、さらに簡単ではあるが、すでに経験的に検証されている1次元モデルを引用するほうが良い(Korff・Flohn, 1969)。それによると、亜熱帯高圧帯の位置は対流圏における赤道と極の間の温度差の関数として表わされる(第3図)。氷のない北極上の対流圏の温度の妥当な推定に基づいて、このモデルにより外挿すると、亜熱帯高気圧は冬季には北方へ300~600km変位するが、夏季には少ししか変化しない。ITCゾーンは、南極の氷が無くならない場合、150~300km北へ変位する。このような気候帯の変位、とくに冬の亜熱帯降雨帯の変位がこの地域の水の需給バランスやその農工業および経済に与える影響を過大に評価することはできない。それはある地域では有利な事かも知れないが、他の地域では破滅的な事かも知れない。

5. エネルギー問題に対する推論

このシナリオは警告的な内容の推論を含んでいるが、それは、エネルギー問題にとってどんな意味があるのだろうか。この事についてここでは簡単にしか議論できない(Flohn, 1977)。最も重要なことはエネルギーの節約であることは確かである。中間的な時間スケールで



第3図 亜熱帯高気圧の緯度(φs)と赤道-極間の気温差(300/700mb)の12ヵ月間の関係 (Korff・Flohn, 1969)

は、我々は化石燃料か核エネルギーかの選択の問題に当面する。これまで述べた事を考慮するならば、化石燃料の無理な消費がリスクを貯えつつあると結論せねばならない。核の安全性に対するリスクは技術的に小さくすることができるし、また、そうできなければならないが、これに比べて増大する化石燃料の消費がもたらすリスクの方がより大きいとさえ言える。一方、いま我々が核エネルギーの開発を(核融合を含めて)無制限に推進するならば、もう1つの問題が最前に出てくるだろう。もし、この地球上のエネルギー需要が現在の10~15倍に増えたと、——たとえば、世界の人口が 12×10^9 、エネルギー供給量が1人平均8 KWになると——自然の気候の変動(fluctuation)と同じエネルギー水準に達し、その結果は思わぬところにまで及ぶだろう。地熱などの他のエネルギーの重要性はおそらく主要なものではないだろう。

長い期間のエネルギー消費においては、我々の気候系に反しない選択は明らかにただひとつしか残されていない。太陽エネルギーは産油国の、何もない、広大な乾燥地帯で利用することができる。太陽エネルギーの選択は地球表面のエネルギー収支の再配分を意味するが、その気候に対するリスクについては、これまでに詳しい検討は何も行なわれていない。しかし、このリスクは他の選択に比べれば著しく小さいだろう。ここに我々が挑戦すべき重要かつ有望な場所の1つがある。我々の努力と才能と技能とを結集できれば、我々は疑いなくこの問題を

「時間までに」克服することができる。無制限な経済成長による、避けることのできない気候系のリスクは非常に大きく、我々は次の2-3世代のために、この極めて根の深い問題に、どうしてもいま手を着けなければならない。そのためには経済成長率の強力な抑制を避けることはできない。しかし、これ以外に、無制限な経済成長からもたらされる、耐えることのできないリスクを防ぐ方法はないかも知れない。我々にはほとんど時間がない。残されているのは10数年ないし20数年である。この重大問題についての政治的な決断は国際的な合意を必要とする。このような、当然人々の支持を得にくい決断は、先見の明と現実を感知する力と、そして勇氣と忍耐を必要とする。政治家や経済学者がこの問題についての長期の見通しを怠ることは絶対に許されない不面目である。

我々の孫達が直面しなければならない全地球規模の問題に対する責任は我々の世代にある——我々はその責任にふさわしい努力をしようではないか。

文 献

Aagaard, K. and L.K. Coachman, 1975: Toward an Ice-Free Arctic Ocean, EOS Transact, Amer. Geophys. Union, 484-487.
 Bach, W., 1976: Changes in the composition of the atmosphere and their impact upon climatic variability——an overview, Bonner Met. Abh-

- ndl, 24, see also this volume.
- Bolin, B., 1975: Energy and Climate, Stockholm, 55 pp.
- Bryson, R., 1974: A Perspective on Climate Change, Science, 184, 753-760.
- Budyko, M.I., 1974: *Izmeneniya Klimata, Gidrometeorizdat, Leningrad*, 280 S.
- Charney, J.G., 1975: Dynamics of Deserts and Drought in the Sahel, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 101, 192-202. cf. also Otterman, J., 1974, Science, 186, 531-533.
- Flohn, H., 1973: Globale Energiebilanz und Klimaschwankungen, *Bonner Met. Abhandl.*, 19, sowie Rhein. Westfäl. Akad. Wiss., Vorträge N 234, 75-117.
- Flohn, H., 1977: Climate and Energy: A Scenario to a 21st Century Problem, *Climatic Change* 1, in print, German Version see: *Bild der Wissenschaft* 1975, Nr. 11, 82-88.
- GARP-Report, 1975: The Physical Basis of Climate and Climate Modelling, WMO-GARP Publication Series, No. 16, 263 pp.
- Hess, W.N., (Editor) 1974: Weather and Climate Modification, J. Wiley, (New York), 1025 pp.
- Korff, H.C. and H. Flohn, 1969: Zusammenhang zwischen dem Temperaturgefälle Aquator-Pol und den planetarischen Luftdruckgürteln, *Ann. Met. N.F.* 4, 163-164.
- Landsberg, E. H., 1970: Man-made climatic changes, *Science*, 170, 1265-1274.
- Lvovich, M.J., 1969: Water Resources for the Future (in Russian), Moscow: see also H. Flohn, 1973: *Naturwissenschaften*, 60, 340-348.
- Manabe, S. and R.T. Wetherald, 1975: The Effects of Doubling the CO₂-Concentration on the Climate of a General Circulation Model, *J. Atmos. Sci.* 32, 3-15.
- Maykut, G.A. and N. Untersteiner, 1971: Some Results from a Time-dependent Thermodynamic Model of Sea-Ice, *J. Geophys. Res.*, 76, 1550-1575.
- Ramanathan, V., 1975: Greenhouse Effect Due to Chlorofluorocarbons: Climatic Implications, *Science*, 190, 50-52.
- SMIC Report, 1971: Inadvertent Climate Modification, Report of the Study of Man's Impact on Climate, MIT Press, Cambridge, Mass., 308 pp.
- Yamamoto, R. and T. Iwashima, 1975: Change of the Surface Air Temperature Averaged over the Northern Hemisphere and Large Volcanic Eruptions during the Year 1951-1972, *J. Met. Soc. Japan*, 53, 482-486.
- U.S. GARP Committee, 1975: Understanding Climatic Change, a Program for Action, *Nat. Ac. Sci. Washington*, 239 pp.