



天 気

1982年6月
Vol. 29, No. 6

551, 58

日本気象学会創立100周年記念レビュー

気候学の発展*

山元 龍三郎**

1. 緒言

気候学の泰斗 Hubert H. Lamb [1969] (有名な流体力学の教科書の著者 Sir Horace Lamb の孫) は、第2次世界大戦以前の気象学においては、気候学が、無味乾燥な簿記としてしか評価されなかった事が多いと述べている。また、Durst (1951) も、Köppen や Hann などの気候学者が気候学の体系化に大きく寄与した事を認めながらも、1950年以前の気候学は、基本的には物理学を基礎としない大気統計的研究分野だとしている。しかし、1970年代になって、GARP (Global Atmospheric Research Programme, 地球大気開発計画) の研究成果が集積されると共に、気候を物理学的に研究する事が出来るようになって来た [Joint Organizing Committee, GARP (1975)]。また、大気中の二酸化炭素の増加など人間活動の結果が、世界の気候に著しい影響を与える懸念も生じて来たので (Matthews *et al.*, 1971), 気候学は、日陰から日の当たる場所に位置するようになった。

気候学の発展のレビューとしては、気候学者の福井英一郎 (1971) や吉野正敏 (1976) によるものなど、立派なものが既に出されている。「天気」編集委員会が、気候学者ではない筆者を気候学のレビューに指名したのは、気象学・大気物理学の立場からのレビューを期待しているからだと理解される。それ故、気候学者の既存のレビューに比べると、かなり偏ったものになるかも知れないとの懸念を持ちながら、気候学の最近の発展に重点をおいて、レビューする事とする。

気候学は一般に、大気の時間的・空間的な統計特性

である気候を記述する事と説明する事を目標としている (例えば、Critchfield, 1974)。しかし、実際には記述が大部分を占めていて、気候の説明に立ち入るものは少なかった (Trewartha・Horn, 1980)。最近10数年の間には、物理的・力学的に気候を解明しようとする研究が多くなって来た。過去の気候の研究には、「記述的」または「物理的」という色わけの容易なものもあるが、中には両者にまたがるものもある。しかし、便宜上「記述気候学」と「物理気候学」に分けて、以下、気候学研究のレビューを試みる事とする。

2. 記述気候学の発展 (1) —— 気候学の曙と地上気候の研究

気候学の源流は古くギリシャ時代にあつて、既に天気・天候が場所によって著しく異なる事に注目されていた。そして、地球表面の曲率による傾斜を意味するギリシャ語「κλιμα」から、climate, すなわち気候という言葉が生まれた (例えば、Stringer, 1972)。15世紀から始まった航海により、気候は南北方向のみならず東西方向にも顕著な差異がある事が知られ、海陸分布の影響を受けている事が認められた。16世紀末から17世紀にかけて、温度計や気圧計が発明され、量的に気候を記述する事が始まった。1810年代から、気温・風・気圧・降水量などの広域分布図が作られるようになった (Shaw, 1926)。1860年に、Buys-Ballot が経験的に風と気圧分布との関係を見出してから、海面気圧分布と天気とを関係づける研究および気象サービスが開始された。

19世紀なかばまでの気象学研究の大部分はむしろ気候学の範囲にはいるものであったが、総観天気図が作られるようになってから、気象学と気候学の差異が明白にな

* Recent Development of Climatology.

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

って来た。気圧の同時観測データを用いた日々の天気変化とその予報の研究が、気象学の主題となったのに対して、気候学は平均状態の研究に焦点が当てられるようになった。19世紀の最後の20年間には、気候学上重要な仕事が行なわれた。1883年、大気活動の中心 (centers of action) が Teisserenc de Bort により発見され、また、Assman や Teisserenc de Bort により成層圏の存在が確認された。わが国の初期の気候研究として、中村精男による「大日本風土編」が刊行されたのが、1897年であった。一方、18世紀後半から欧米で始まった組織的気象観測のデータなどを集約、体系化して、Hann が1883年に著書を出版した。これは気候学の本格的な教科書の最初のもので云えよう。

第1次世界大戦直後に提唱されたノールウェー学派の温帯低気圧論は、前線や気団という概念を含んでおり、気候学に新風を吹き込んだ。気象観測所でのデータの統計値で表現するという今までの静的気候学に対して、前線や気団に準拠した気候学—動的気候学が生れて来た。気候を記述する場合に、月平均気温など時間平均値のみでは不十分である事が19世紀後半に既に認められており、動的気候学の提唱は意義のある事であった。Bergeron (1930) は、この分野を *dynamische klimatologie* と呼んだが、力学的研究というよりは、やはり記述的なものであった。わが国の研究者は、この分野で多くの業績を発表して来た (高橋, 1955)。

測器による気候データが少ないために、極域の気候の把握は、中・低緯度に比べるとかなり遅れていた。しかし、1950年のなかば以後、観測がかなり充実して来た。北極域では、ソ連・米国・英国の科学者による氷の島での観測が行なわれて、気温分布とその変化の実態が明らかになった (Walsh, 1977)。熱帯・亜熱帯も観測データが一般に疎であったが、印度では古くからモンスーンの長期予報を目指して観測・研究が行なわれて来た (Walker, 1910)。特に、1960年代後半から1970年代はじめにかけてのアフリカのサヘル地方の大干ばつは、低緯度地方の気候に国際的関心を集中させ、世界気候計画(WCP)の提案の1つの契機となった (White, 1979)。

気候に対する海洋の影響は古くから認められていた。1950年末に、Rossby 記念論文集の中で、Bjerknes (1959) は北大西洋の表面水温の著しい変化を見出し、また、赤道太平洋での水温変化 (El Niño) が大気気候に大きい変化を与える事を示した (Bjerknes, 1969)。これは、1920年代に Walker (1923) によって発見された Sou-

thern Oscillation の機構に関して、赤道太平洋での東西循環—Walker 循環—の役割を確かめたものとして重要な貢献であった。El Niño が熱帯に限らず中緯度の気候にも大きい影響を与える事を確認する研究が続々と発表されている (Horel and Wallace, 1981)。

3. 記述気候学の発展 (2) —近代観測技術による気候の研究

1950年代から、ラジオゾンデレーションによる高層気象のルーチン観測が普及して来たので、上層大気気候が次々と明らかにされて来た。極前線ジェット気流の存在の発見は、第2次世界大戦末期に、南東海上からわが国を爆撃すべく来襲した米国の空軍機がほとんど西進出来なかった事実によって (シカゴ大学, 1947)。成層圏の突然昇温を Scherhag (1952) が発見し、また、赤道成層圏の帯状流の準2年振動が Ebdon *et al.* (1961) と Reed *et al.* (1961) によって検出されたのは、今世紀のなかばであった。これらの振動ないしは突発的現象を含めた成層圏の気候は、Scherhag の主宰した西ドイツのベルリン自由大学のスタッフにより精力的に研究されて来た (例えば、Labitzke, 1972)。また、成層圏オゾンの系統的な観測は、1920年代から始められ (Dobson・Harrison, 1926)、そして、1957/58年の地球観測年 (IGY) から国際的にも組織化された。特にオゾン全量のデータは、通常の気象観測網に比べると密度が著しく疎ではあるが、成層圏オゾン全量の気候を研究し得る程度に集積されて来た (London・Kelley, 1974)。また、気象衛星に搭載された赤外分光計による気温の鉛直分布の観測が行なわれて、特に成層圏気候の確立が進んでいる (広田, 1972)。1981年より、更に高高度の中間圏の気候を明らかにすべく、国際協同研究計画、MAP (中層大気観測計画) により、研究者の努力が傾けられている (広田, 1978)。

1950年末から始まった気象衛星観測は、気候学の発展にも大きく寄与している。雲画像のデータの集積は、今まで限られた目視観測データに基づいていた平均雲量の広域分布を、信頼のおけるものに置きかえる事が出来た (Clapp, 1964)。雲の存在は運動場にも密接に関係しているので、通常の気象観測網の欠除した地域での雲画像の解析による運動場の解明にも、気象衛星観測は貢献した (Bjerknes *et al.*, 1969)。雲気候に関して、WCRP の一環として国際協力の下に、国際衛星雲気候計画 (ISCCP) が1983年頃から実施すべく準備が進められているので、

その成果が雲気候学の画期的発展の契機となると期待される。

気象衛星によって海洋上の降雨量の観測が試みられた事も、注目すべきである (Rao・Theon, 1977). 広域の水収支を研究する際、広い海洋上の降水量などの精度は、結果に大きい影響を与える。船舶上での従来の観測法によるデータの集積によって、いくつかの海洋上の降水に関する報告が出ているが (たとえば, Baumgartner *et al.*, 1975), 月降水量など気候データについては慎重に処理する必要がある (Tucker, 1961). このような状況下で、マイクロ波帯を利用して海上の降雨量が求められた事は、画期的な事である。現在では十分な精度が得られていないが、将来の改善が期待される。

海面水温 (SST) の気候に対する重要性は上述したが、雲のない所での SST データの衛星観測はかなりの精度で得られる (Tabata・Gower, 1980). 1978年に米国が打ち上げた海洋観測衛星 (SEASAT) によって、SST を 1°C 以内の精度で求める事が出来る (Chester, 1981). また、SEASAT は大気中の水蒸気全量や波高などのデータを与えてくれる (Chelton *et al.*, 1981). これらのデータは海上の気候の発展に大きく寄与すると考えられるので、その集積が待たれる。

気象衛星による雪氷被覆面積のデータは、被覆の粗密などが充分正確に把握し得ない憾みがあるが、気候の研究に貴重な情報を与える (Kukla, 1978). 1971年から1973年にかけて、年平均雪氷被覆面積が約15パーセント増加した事が、衛星データの解析から判明している (Kukla・Kukla, 1974). これは、雪氷圏の気候学における役割を確かめる好個のデータである。雪氷の中でも、海氷は海面と大気との間のエネルギー交換を阻止するので、特に海氷の変化に関心が集中して、そのデータが集積されつつある (Weaver, 1982).

4. 記述気候学の発展 (3) —— 気候変動の記述の近代化

月平均気温などの気候データは、たとえば30日間の日々の気象観測データを平均して算出されたものである。有限個のサンプルから求めた気候データは、当然、標本抽出の誤差を持つ。このような気候データにおける誤差については、かなり昔から論じられて来た (例えば, Brooks・Carruthers, 1953). 特に、いわゆる気候変動を研究する際、たとえば30年平均値が時代によって見かけ上変化していても、その変化量が上述の誤差 (気候ノ

イズ) 以下であれば、有意な変動とはいえない。このような統計的有意性に留意すべき事が、気候変動の確認に対して必須である事を、1973年に Leith があらためて強調したので、それ以後の研究では気候ノイズに関する SN 比が取り上げられるようになった (例えば, Maddeu・Ramanathan, 1980).

同様な有意性は、時間平均値のみならず分散・共分散など他の統計量についても、必ず検討する必要がある。また、移動平均操作によって、本来存在しない周期性が見かけ上出現する事もあるので (藤井, 1974; Reynolds, 1978), 今まで発表された気候変動データを再検討すべき段階となって来た。

たとえば、太陽黒点数と気温変化との関係は、古くから Köppen (1974) を始めとして多くの研究がある (Herman・Goldberg, 1978). Brooks (1950) は、その著書において、黒点極小期の熱帯の気温は極大期よりも 2°F 高いと述べている。この結果は、黒点極大期には太陽定数が大きであろうという期待とは逆であったので、Huntington・Visher (1922) により、今から考えると誠に奇妙な説——solar cyclonic hypothesis が提案されたりした。Brooks のまとめた上記の結果は、1920年代までのデータに関するものであって、それ以後のデータについて、Troup (1962) が太陽黒点数との関係を調査した。そして、1920年以前とは異なり、両者の間の有意な相関は認められないか、むしろ正とみなすべきだと述べている。この問題も、統計誤差の算定を行い、今後の再検討が必要となろう。

英国王立気象学会は1950年に創立100年の記念論文集を出版した。その中で Willett (1950) は、1845—1940年の約100年間にわたる南・北両半球の平均気温の推移を求めた。利用し得る平均気温は、中緯度の陸上に集中している実状から、空間平均を算定するのは容易ではない。Willett は、各地の季節平均気温の5年平均値は空間相関が広い範囲にわたって良いであろうとの想定の下に、限られた経度域のデータで帯状域の空間平均気温を代表させる事とした。この方法を踏襲して、Mitchell (1961, 1975) は今世紀なかばまでの過去100年間の南北両半球の平均気温の推移を求め、平均気温は1880年代に最低であったが、1940年代に最高値を示し、その後、低温化傾向が見られるとしている。その後、北半球平均気温の推移を求める試みが、Willett-Mitchell 法とは異なる方法によって行なわれ [Budyko, 1969; Yamamoto *et al.*, 1975; Angell・Korshover (1978)], その結果

は Mitchell のものと概略、一致していた。

空間平均値を求めてその変動を確める研究において、2つの問題点がある。第1は、Leith (1973) が時系列データに対して看過出来ないとした気候ノイズと同様に、空間平均を求める際の算定誤差である。時系列データが一般に等時間間隔の1次元であるのに対して、空間平均を求める際に利用出来るのは、不規則に配置された2次元データである。それ故、Leith (1973) の取扱いをそのまま適用出来ない。筆者と星合 (1979) は、数値予報で初期値設定のために採用される事がある最適内挿法 (Gandin, 1963) を気候データのネットワークに適用した。この方法によって、空間平均操作における誤差の算定が出来た。

第2の問題は、半球ないし全球平均という空間平均値がどのような意義を持つかという事である。冷夏や暖冬など、われわれの生活に直接関係する気候 (異常天候) は、半球規模ではなく局地的ないし地域的なスケールで発現しているのだから、この種の問題に対しては、半球平均気候値を取り上げるのは不適當である。一方、時間平均操作における誤差 (気候ノイズ) が、たとえば、京都の5年平均気温に対して 0.6°C 以上であるのに対して、北半球平均気温に対して 0.07°C である (山元, 1981)。このように、半球平均値の気候ノイズが著しく小さい事は、太陽活動・火山大噴火・大気中の二酸化炭素の増加など全球規模の変化の、気候に対する影響 (シグナル) を検出するのに、極めて有利である。

世界気象機関 (WMO) と国際学術連合会議 (ICSU) とが協同して推進している気候変動研究計画 (WCRP) (世界気候小委員会, 1982) における「気候診断」では、この章で述べた統計的有意性に留意した研究が行なわれるものと期待される。

5. 物理気候学の発展

気候要素のうち気温・降水量は、人類の生存に直接関係するので、古くから大きい関心が持たれて来た。これらの分布の維持・変化は、たとえば運動方程式や定式化された熱力学第1法則の移流項で表現される非線型過程を包含した物理過程によって起っている。このような非線型過程の取扱いは一般に容易ではないので、気候学の物理的・力学的研究は20世紀の後半に入ってから始まったといえよう。例外的に、大気境界層の気候については、非線型項、Reynolds stress のパラメタリゼーションにより、かなり古くから物理的アプローチが行なわれて来

たといえる (Sutton, 1953)。

第2次世界大戦後、世界的に高層気象観測網が充実して来たので、カリフォルニア大学 (UCLA) およびマサチューセッツ工科大学 (MIT) において、それぞれ Bjerknnes と Starr の指導の下に、大気大循環の研究が本格的に開始された。観測データを用いて、支配方程式の各項を、非線型を含めて評価する事が行なわれ、広域の気候の物理的アプローチが始まった。そして非線型項の重要性が実測データにより示された (Bjerknnes, 1951; Starr, 1968)。低緯度の平均子午面循環 (Hadley 循環) の役割の重要性について、両者の間に若干の相違が見られたのが、筆者の印象に残っている。この研究計画に着手するまで主に理論的研究を行なって来た MIT の Starr は、大循環の観測的研究に献身し、その没後は、共同研究者の Newwells *et al.* (1972, 1974) や Oort *et al.* (1971, 1977) によって引き継がれた。

1950年代なかば、Phillips [1956] が大気大循環の数値実験に成功して、気候の数値実験的研究の開始のベルが鳴らされた。大気の大規模運動に関する基礎的研究の進展と電子計算機の発達に伴って、主に米国の大学・研究所での大気大循環の数値モデルの開発が進んだ。UCLA の Mintz [1965] は、荒川昭夫らの協力の下に、数値実験によりいくつかの新しい知見を得た。たとえば、ヒマラヤ山脈がなかったら、大気大循環が著しく変りシベリア高気圧が形成されないなどの結果を得た。MIT からプリンストン大学に移って、地球流体力学研究所 (GFDL) を創立した Smagorinsky (1969) は、都田菊郎・真鍋淑郎らの協力の下に、非常に精巧な数値モデルを開発した。又、コロラド州ボルダーにある国立大気科学センター (NCAR) では、笠原 彰 (1967) が中心となって独自の数値モデルを作り上げた。このような大気大循環の数値モデルは、気候モデルの種々の階層のうち、パラメタリゼーションの程度が最も低い、最も精巧なものである。

Schneider・Dickinson (1975) が述べているように、気候数値モデルの中には、全球平均の地表面でのエネルギー収支をモデル化した零次元のもの、水平方向に平均した鉛直1次元モデル (Manabe・Wetherald, 1967)、南北方向の変化を考えに入れて地表面でのエネルギー収支を定式化したもの (Budyko, 1969; Sellers, 1969) など比較的単純なものもある。このような単純なモデルは、計算量が少なく経済的であるが、それに取り入れられているパラメタリゼーションによって結果が大きく変

る懸念があるので、パラメタリゼーションに対して慎重である必要がある。しかし、非線型過程としての気候の本質を、比較的簡単に浮きぼりに出来る可能性がある (Robock, 1978)。大気・雪氷圏のフィードバック過程の安定性・複数解は、Budyko-Sellers 型モデルで論じられて来た (たとえば、Oerlemans・Van der Dool, 1978)。

大気大循環モデルに気候を支配する過程を全て explicit に取り入れる事は無理であって、小規模現象のパラメタリゼーション (たとえば Arakawa・Schubert, 1974) が改善されつつある。そして、この種のモデルが、気候の研究に対して最も重要な武器となるだろう事を信じている向きが多い。事実、気候を支配する外的要因の変化に対する sensitivity の研究が、この種のモデルを用いて行なわれて来た。太陽定数の変化 (Wetherald・Manabe, 1975)、海面水温の変化 (Rowntree, 1976)、陸地のアルビードの変化 (Charney・Stone・Onirk, 1975)、そして大気中の二酸化炭素の増加 (Manabe・Wetherald, 1980)、火山噴火 (Hunt, 1977) についての研究が行なわれて来た。これらの研究に用いられたモデルは、完全な大気-海洋結合モデルに拡張したり雲の分布を予め与えないで計算によって求めるようにするなど、将来の改善が期待される。

しかし、気候に関するこの種のアプローチに対して、重要な問題が Lorenz (1976) によって提起されている。それは、大気圏・水圏・雪氷圏などから成る気候学の物理的性質を固定した場合、太陽定数など外的要因が不変ならば、ユニークな気候を決める事が出来る、という仮定に対する疑問である。長期の時間積分による漸近的方法で Sensitivity を研究する際、初期条件が極く僅か違うだけでも、結果が著しく異なる事、すなわち第2種の Predictability が有限である事を、Lorenz は注目している。しかし、数値モデルを用いて気候を研究している人の多くは、この問題から目をそむけているかのように見える。Lorenz の意見は非線型力学過程に関する研究結果に基づいたものであるので、非常に高度の非線型性を有する気候の物理的研究を進める際、彼の提起した問題は避けて通れない重要なものである。

6. 結語

気象学の中でも、他の学問分野との接点が最も多い気候学は、応用面でも一般社会からの要請も強い。本文では、応用面をはじめ気候学の多くの面——局地気候・都

市気候・古気候などに触れる事が出来なかった。また、筆者が日頃関心を有している面を強調し過ぎた憾みがあるが、一気象学者の気候学レビューとして参考になれば幸いである。

文献

- Angell, J.K., and J. Korshover, 1977: Estimate of the global change in temperature, surface to 100 mb between 1958 and 1975, *Mon. Wea. Rev.*, 105, 375-385.
- Arakawa, A., and W.H. Schubert, 1974: Interaction of cumulus cloud ensemble with the large scale environment, Part I, *J. Atmos. Sci.*, 31, 674-701.
- Baumgartner, A. and E. Reichel, 1975: The world water balance, R Oldenbourg, München.
- Bergeron, T., 1930: Richtlinien einer dynamischen Klimatologie, *Met. Zeit.*, 47, 246-262.
- Bjerknes, J., 1951: The maintenance of the zonal circulation in the atmosphere, Presidential Address, IUGG, Bruxell.
- , 1959: The recent warming of the north Atlantic, *The Rossby Memorial Volume*, Rockefeller Inst. Press, New York, 65-73.
- , 1969: Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific, *Mon. Wea. Rev.*, 97, 163-172.
- , L.J. Allison, E.R. Kreina, F.A. Godshall and G. Warnecke, 1969: Satellite mapping of the Pacific tropical cloudiness, *Bull. Amer. Met. Soc.*, 50, 313-322.
- Brooks, C.E.P., 1950: *Climate through the ages*, Ernest Benn, London.
- , and N. Carruthers, 1953: *Handbook of statistical methods in meteorology*, Her Maj. Stat. Office, London.
- Budyko, M.I., 1969: The effects of solar radiation variation on the climate of the earth, *Tellus*, 21, 611-619.
- , 1972: The future climate, *Trans. Amer. Geophys. Union (EOS)*, 53, 868-874.
- Charney, J.G., P.H. Stone and W.J. Quirk, 1975: Drought in the Sahara: A biogeophysical feedback mechanism, *Science*, 187, 434-435.
- Chelton, D.B., K.J. Hussey, and M.E. Parke, 1981: Global satellite measurements of water vapour, wind speed and wave height, *Nature*, 294, 529-532.
- Chester, T.J., 1981: Sea surface temperature measurements from SEASAT, *Trans. Amer. Geophys. Union (EOS)*, 62, 2.
- Clapp, P.F., 1964: Global cloud cover for seasons using TIROS nephelometry, *Mon. Wea. Rev.*,

- 92, 493-507.
- Critchfield, H.J., 1974: *General Climatology*, Third Ed. Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- Dobson, G.M.B., and D.N. Harrison, 1926: Measurements of the amount of ozone in the earth's atmosphere and its relation to other geophysical conditions, *Proc. Roy. Soc. London, A* 110, 660-693.
- Durst, C.S., 1951: *Climate—the synthesis of weather*, *Compendium of Meteorology*, ed. by T.F. Malone, 967-975.
- Ebdon, R.A., and R.G. Veryard, 1961: Fluctuations in equatorial stratospheric winds, *Nature*, 189, 791-793.
- 藤井光昭, 1974: 時系列解析, 現代応用数学講座第3巻, コロナ社.
- 福井英一郎, 1971: 気候学50年のあゆみ, 天気, 18, 386-394.
- Gandin, L.S., 1963: Objective analysis of meteorological fields, *Israel Programme for Scientific Translation*, Jerusalem.
- Goody, R.M., 1980: Polar process and world climate, *Mon. Wea. Rev.*, 108, 1935-1942.
- Herman, J.R., and R.A. Goldberg, 1978: *Sun, Weather and Climate*, NASA, SP, 426, Washington, D.C.
- 廣田 勇, 1972: 気象衛星赤外分光計観測資料に基づく成層圏循環解析の最近の話題, 天気, 19, 283-292.
- , 1978: 動き出した MAP (中層大気国際観測計画), 天気, 25, 709-714.
- Horel, J.D., and J.M. Wallace, 1981: Planetary-scale atmospheric phenomena associated with the southern oscillation, *Mon. Wea. Rev.*, 109, 813-829.
- Hunt, B.G., 1977: A simulation of the possible consequences of a volcanic eruption on the general circulation of the atmosphere, *Mon. Wea. Rev.*, 105, 247-260.
- Huntington, E.S.S. Visher, 1922: *Climatic changes, their nature and cause*, New Haven.
- Joint Organizing Committee, GARP, 1975: *The physical basis of climate and climate modelling*, GARP Publ. Ser., No. 16.
- Kasahara, A., and W.M. Washington, 1967: NCAR global general circulation model of the atmosphere, *Mon. Wea. Rev.*, 95, 389-402.
- Köppen, W., 1914: Lufttemperaturen, Sonnenflecken und Vulkanausbrüche, *Met. Zeit.*, 31, 305-328.
- Kukla, G.J., 1978: Recent changes in snow and ice, *Climatic change*, ed. by J. Gribbin, Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- , and H.J. Kukla, 1974: Increased surface albedo in the northern hemisphere, *Science* 183, 709-714.
- Lamb, H.H., 1969: The new look of climatology, *Nature*, 223, 1209-1215.
- Labitzke, K., 1972: Climatology of the stratosphere in the northern hemisphere, *Met Abhandl.*, 100, No. 4.
- Leith, C.E., 1973: The standard error of time-averaged estimate of climate means, *J. Appl. Met.*, 12, 1066-1069.
- London, J., and J. Kelley, 1974: Global trends in total atmospheric ozone, *Science*, 184, 987-989.
- Lorenz, E.N., 1976: Nondeterministic theories of climatic change, *Quat. Res* 6, 495-506.
- Madden, R.A., and V. Ramanathan, 1980: Detecting climate change due to increasing carbon dioxide, *Science*, 209, 763-768.
- Manabe, S. and R.T. Wetherald, 1967: Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity, *J. Atmos. Sci.*, 25, 241-259.
- , 1980: On the distribution of climatic change resulting from an increase in CO₂ content of the atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, 37, 99-118.
- Matthew, W.H., W.W. Kellogg and G.D. Robinson, 1971: *Man's impact on the climate*, The MIT Press, Cambridge.
- Mintz, Y., 1965: Very long integration of the primitive equations of atmospheric motions. WMO-IUGG Symp. Res. and Develop. Aspect of Long-range Forecast., WMO Tech. Note, No. 66, 141-155.
- Mitchell, J.M. Jr., 1961: Recent secular changes of global temperature. *Ann. New York Acad. Sci.*, 95, 235-250.
- , 1975: A reassessment of atmospheric pollution as a cause of long-term changes of global temperature, *The Changing Global Environ*, ed. by S.F. Singer, D. Reidel, Dordrecht.
- Newell, R.E., J.W. Kidson, D.G. Vincent and G.J. Boer, 1972 and 1974: *The General Circulation of the Tropical Atmosphere and Interaction with Extratropical Latitudes*. 2 Vols. The MIT Press, Cambridge.
- Oerlemans, J. and H.M. Van den Dool, 1978: Energy balance models: Stability experiments with a refined albedo and updated coefficients for infrared emission, *J. Atmos. Sci.*, 35, 371-381.
- Oort, A.H., 1977: The interannual variability of atmospheric circulation statistics, NOAA Professional Paper, No. 8.
- , and E.M. Rasmusson, 1971: Atmos-

- pheric circulation statistics, NOAA Professional Paper, No. 5.
- Phillips, N.A., 1956: The general circulation of the atmosphere: A numerical experiment. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 82, 123-164.
- Rao, M.S.V., and J.S. Theon, 1977: New features of global climatology revealed by satellite-derived oceanic rainfall maps. *Bull. Amer. Met. Soc.*, 58, 1285-1288.
- Reed, R.J., W.J. Campbell, L.A. Rasmussen, and D.G. Rogers, 1961: Evidence of a downward propagating annual wind reversal in the equatorial stratosphere. *J. Geophys. Res.*, 66, 813-818.
- Reynolds, G., 1978: Two statistical heresies, *Weather*, 33, 74-76.
- Robock, A., 1978: Internally and externally caused climatic change. *J. Atmos. Sci.*, 35, 1111-1122.
- Rowntree, P.R., 1976: Tropical forcing of atmospheric motions in a numerical model. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 102, 583-605.
- Scherhag, R., 1952: Die explosionsartigen stratosphärener Wärmungen des Spätwinters, 1951-1952. *Ber. Deutsch. Wetterd.*, 6, 51-63.
- Schneider, S.H., and R.E. Dickinson, 1975: Climate modelling methodology, *The Physical Basis of Climate and Climate Modelling*. GARP Publ. Ser., No. 16, 142-147.
- 世界気候小委員会, 1982; わが国の気候変動研究計画 (WCRP) 1, *天気*, 29, 35-41.
- Sellers, W.D., 1969: A global climatic model based on the energy balance of the earth-atmosphere system. *J. Appl. Met.*, 8, 392-400.
- Shaw, N., 1926: *Manual of Meteorology*, Vol. 1, Cambridge Univ. Press.
- Smagorinsky, J., S. Manabe and J.L. Holloway, 1965: Numerical results from a nine-level general circulation model of the atmosphere. *Mon. Wea. Rev.*, 93, 727-768.
- Staff Members, Department of Meteorology, University of Chicago, 1947: On the general circulation of the atmosphere in middle latitudes. *Bull. Amer. Met. Soc.*, 28, 255-280.
- Starr, V.P., 1968: *Physics of Negative Viscosity Phenomena*, McGraw-Hill, New York.
- Stringer, E.T., 1972: *Foundations of Climatology*, Freeman and Co., San Francisco.
- Sutton, O.G., 1953: *Micrometeorology*, McGraw-Hill, New York.
- Tabata, S., and J.F. Gower, 1980: A comparison of ship and satellite measurement of sea surface temperature of the Pacific coast of Canada. *J. Geophys. Res.*, 85, 6636-6648.
- 高橋浩一郎, 1955; 動気候学, 岩波書店.
- Trewartha, G.T., and L.H. Horn, 1980: *An Introduction to Climate*, 5th Ed., McGraw-Hill.
- Troup, A.J., 1962: A secular change in the relation between the sunspot cycle and temperature in the tropics. *Geophys. Pura Appl.*, 51, 184-198.
- Tucker, G.B., 1961: Precipitation over the North Atlantic. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 87, 147-158.
- Walker, G.T., 1910: On the meteorological evidence for supposed changes of climate in India. *Indian Met. Memo.*, 21, 1-21.
- , 1923: Correlation in seasonal variations of weather, VIII, *Mem. Indian Met. Dept.*, 24, 75-131.
- Walsh, J.E., 1977: The incorporation of ice station data into a study of recent arctic temperature fluctuations. *Mon. Wea. Rev.*, 105, 1527-1535.
- Weaver, R., 1982: *Ice Atlas, Canadian Arctic Waterways*, Canadian Governm. Publ. Cnter.
- Wetherald, R.T., and S. Manabe, 1975: The effects of changing solar constant on the climate of a general circulation model. *J. Atmos. Sci.*, 32, 2044-2059.
- White, R.M., 1979: Climate at the millennium. *Proc. World Climate Conf. WMO, Geneva*.
- Willett, H.C., 1950: Temperature trends of the past century. *Centenary Proc. Roy. Met. Soc.*, 195-206.
- Yamamoto, R., T. Iwashima and M. Hoshiai, 1975: Change of the surface air temperature averaged over the northern hemisphere and large volcanic eruptions during the years 1951-1972. *J. Met. Soc. Japan*, 53, 482-486.
- Yamamoto, R., and M. Hoshiai, 1979: Recent change of the northern hemisphere mean surface air temperature estimated by optimum interpolation. *Mon. Wea. Rev.*, 107, 1239-1244.
- 山元龍三郎, 1981: 気候ノイズ. 日本気象学会関西支部例会講演要旨集, 第19号, 22-26.
- 吉野正敏, 1976; 気候学——その日本の100年, 気象研究ノート, 第128号. 156-163.