

大気ブロッキング現象の観測的研究の一レビュー*

佐藤 康雄**

1. はじめに

通常、春・秋の中・高緯度の天候は西から東に移動する高・低気圧によって特徴づけられる。また、冬はシベリア高気圧・アリューシャン低気圧・アイスランド低気圧等の通常の高・低気圧よりもスケールの大きな準定常的な気圧パターンが支配的である。冬期、本来なら、このような低圧部が卓越するはずのアリューシャンないしアラスカ上空、あるいはまたアイスランド上空に準定常的な高気圧が形成され、それが時として2週間以上~1ヶ月位にわたってほぼ同じ位置に持続することがある。この高気圧がいわゆる“ブロッキング高気圧”であり、このような循環の場全体をさしてブロッキング現象ということが多い。

この現象に注目したのは Garriot (1904) だそうであるが、初めて詳細に研究したのは、R.D. Elliott・T.B. Smith (1949), Berggren *et al.* (1949), Rossby (1950), Rex (1950 a, b) 等である。少し遅れて Sumner (1954) は Rex 等の定義には明白に述べられていない切離高気圧の形に注目した定義を用いて統計を行った。この後、どういふ訳か、対流圏の顕著な現象であるブロッキングの発生・維持の機構を探ろうという研究はどちらかというとな下火になっていた。この期間、学会誌上で、ブロッキングの研究を発表したのは日本では Kikuchi (1969, 1970) があるのみである。週間予報や長期予報の現場では日常的にブロッキングの発生・消滅の予測と対面させられ、多くの経験的事実を積み上げてきている(たとえば、朝倉, 1982) が、その事実を抽象し、力学的モデルを提示するまでには至っていなかった。

このような状況を一変させ、ブロッキング研究に活を入れたのは何といっても Charney・Devore (1979) の研究である。それに引き続く Charney・Straus (1980), Yoden (1983 a, b) の研究や Tung・Lindzen (1979 a, b), Plumb (1981) 少し前の Egger (1978) の研究な

ど、最近のブロッキングないしそれとの関連における強制波動励起の研究の活発化は10年前とは様変わりである。また一方では、数値予報モデルを使って、中期予報モデルの中でブロッキングをシミュレートしようとしている研究 (Bengtsson, 1981) もある。

このような研究の活発化とは別に、ブロッキング現象というものの定義について、一定の混乱も生じてきている(あるいは筆者がそう感じるだけかも知れないが)。週間予報や長期予報の現場と研究者との間だけではなく、気象力学者の間でも、Charney・Devore 流の“lowindex”流をブロッキング状態と考える立場と、対流圏における強制ロスビー波の異常増幅をブロッキングと考える立場とは必ずしも同じではない。まして“ Ω ”型とか局所的ブロッキング高気圧と二重ジェットが存在をブロッキングと考える立場とも異なる。ロスビー波増幅の考え方はまた、成層圏突然昇温現象の前駆現象としてブロッキングを考える立場でもある。それ故、ブロッキングの定義によっては、その頻度、起こりやすい季節・場所などが異なってくるのは当然である。私見では、余り細部の定義にこだわるよりは、力学モデルの仮説を提出し、そのモデルを実際にデータ解析あるいは数値実験で検証するという方法が生産的であると考えている。もちろん、ブロッキングについて、何らかの統計的研究を行う場合には、何らかの定義をせざるを得ないが……。

少しくどくなつたが、最近のブロッキング研究の昂揚の中で、いくぶんの交通整理をやってみたいというのが筆者の立場である。筆者自身、Kikuchi の数値実験、Charney・Devore, Tung・Lindzen, Plumb 等を念頭におきながら、FGGE データを使って解析を始めたばかりの所であるので、いわゆる総合報告として公平なレビューにはなり得ないので、その点お断りしておきたい。しかし、当たりさわりのないことを述べるよりは、筆者の考えを主張した点もあるので、批判的に読んでいただくとともに、納得できない読者は、そのままにしないで、是非原論文に当たってみたいいただきたい。

第2章でまず観測事実について述べ、第3章でKikuchi

* A review of observational studies of atmospheric blocking phenomena.

** Yasuo Sato, 気象大学校.

(1969, 1971) の数値実験的研究について述べる。第4章で最近の理論的研究の論文だけを挙げる。

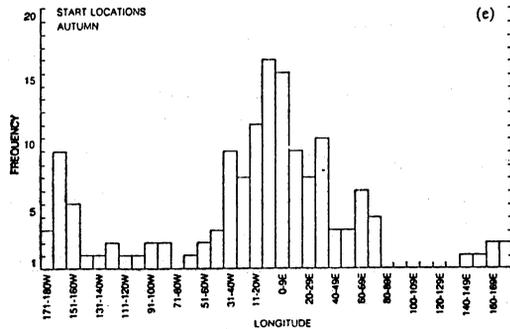
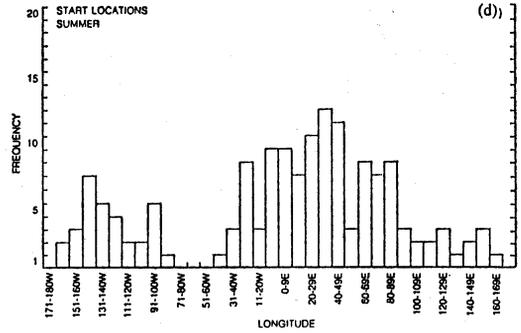
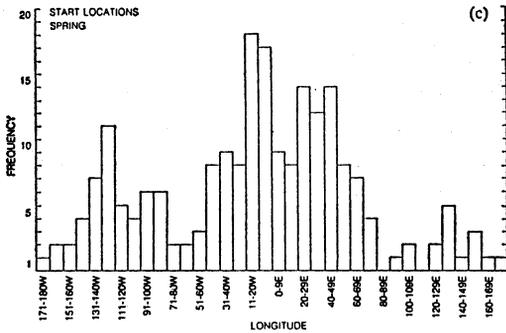
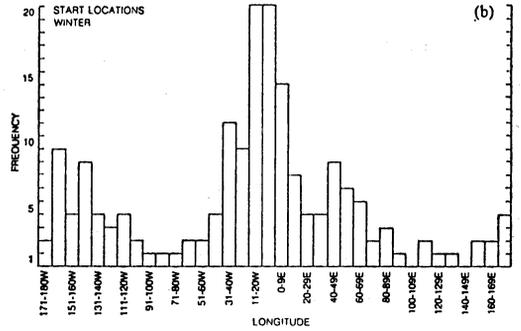
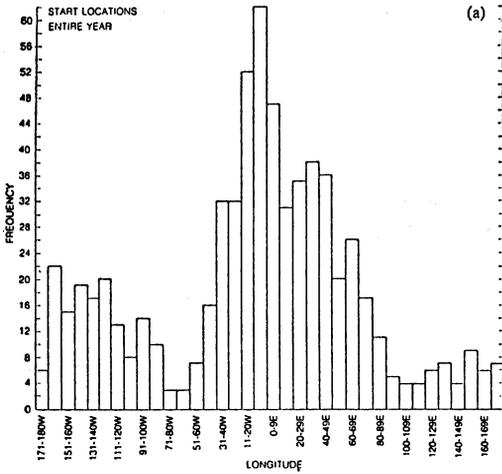
2. ブロッキングについての観測的事実

- ブロッキングの観測的研究を大別すれば、1. 統計、
- 2. 総観解析、3. 半球規模大気大循環のエネルギー解析

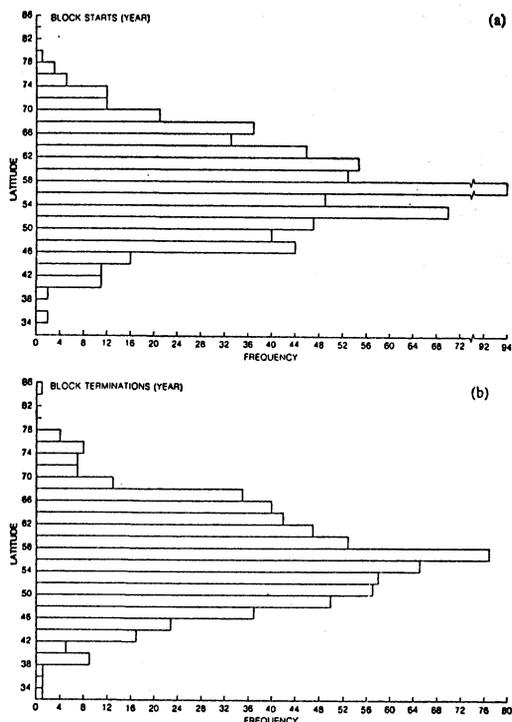
と波数解析となろう。少し古くなったが、Miyakoda (1963), Kikuchi (1969, 1970), 片山 (1969) 等には要領のよいまとめが見られる。以下、上記の順番になるべく最新の研究を中心にしてレビューしていこう。

2.1. ブロッキング現象の統計的研究

ブロッキングの統計では桜井・片山 (1969) によるも



第1図 ブロッキング開始の経度分布。(a) 全年、(b) 冬(1, 2, 3月)、(c) 春(4, 5, 6月)、(d) 夏(7, 8, 9月)、(e) 秋(10, 11, 12月)。(Treidl et al., 1981)。



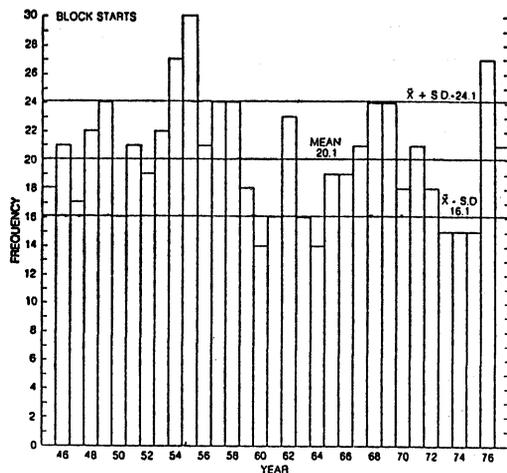
第2図 ブロッキング高気圧の緯度分布 (全年), (a)出現, (b)終了. (Treidl *et al.*, 1981).

のがあるが、ここでは Treidl ら (1981) の最新の統計をとりあげる。彼らは1945~1977年にわたって北半球で観測された 664 個のブロッキングについて詳細な統計を行っている。彼らの用いたブロッキング高気圧の定義は以下の様なものである。

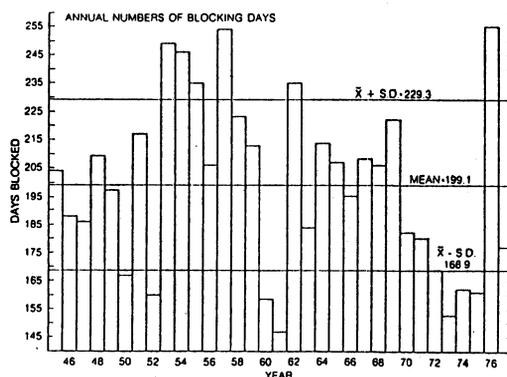
- 1) 地上と 500 mb 天気図上で閉じた等圧線が同時に存在し、500 mb で西風が分流していること。
- 2) 30°N よりも北側まで伸びている 高気圧であること (これは、ブロッキング高気圧を亜熱帯高気圧から区別するためと思われる)。
- 3) その高気圧の持続期間は 5 日以上であること。

これまでの種々の統計的研究における定義では 1) の西風の分流をさらに強調して “二重ジェット の存在” をあげている人もいる。3) の持続期間は研究の目的・立場によって色々である。Sumner は持続期間は定義に入れていないが、Rex は10日、Elliot・Smith や Geb (1966) は3日をとっている。

さて、Treidl らの結果の中から第1図はブロッキング発生 の経度分布である。なお、彼らは上記の定義のもとで、ブロッキングの発生については時間・空間でかなり

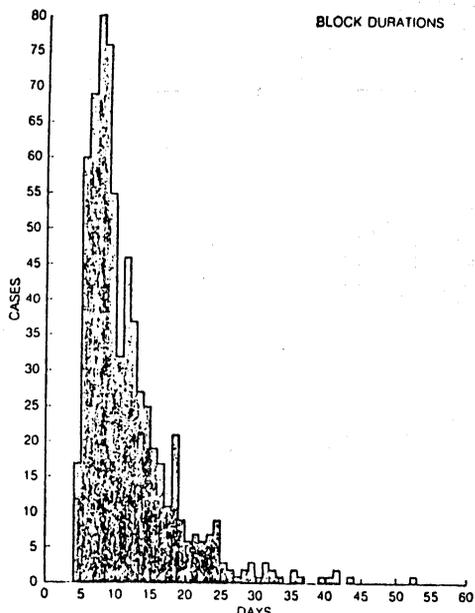


第3図 ブロッキング高気圧の年間個数の年々変化, 1945~1977. (Treidl *et al.*, 1981).



第4図 ブロッキング出現日数の年々変化, 1945~1977. (Treidl *et al.*, 1981).

正確に決定できたが、消滅を決定するのは中々難しかったと述べている。この図から1年を通して20°W~10°Eの北大西洋上に発生 のピークがあり、20°E~50°Eのヨーロッパ大陸上に第2のピークがある。第3のピークは130°W~170°Wの北太平洋上である。冬(彼らの定義では1, 2, 3月)に限れば北太平洋上のブロッキングが第2のピークになる。前出の桜井・片山(1969)の統計では北太平洋のブロッキングの発生がもう少し強調されて北大西洋のものとはほぼ同等であるが、これは日本付近の小規模のブロッキングも拾うために、1) 多少にかかわらず分流が存在する。2) この状態が3日以上持続する。という具合に Rex の定義を緩和したからである。



第5図 ブロッキングの持続期間の頻度分布。
(Treidl et al., 1981).

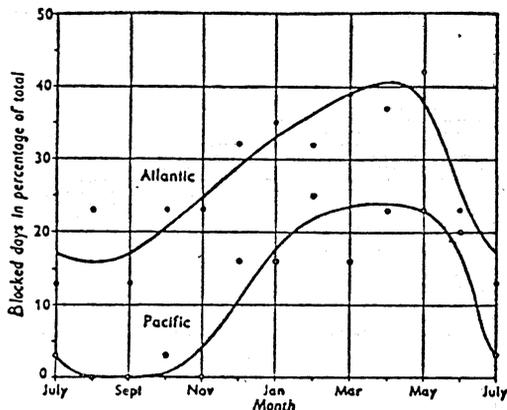
この異同から大規模で持続性の強いブロッキングは大西洋上が第1のピークであることがわかる。

第2図はブロッキング発生緯度分布である。56~58°Nの発生数が圧倒的に多く46~68°Nまでの緯度帯に大部分のブロッキングが発生している。桜井・片山(1969)の統計ではもう少し高緯度の発生が強調されている。

第3図はブロッキング発生年間個数の年々変化である。年平均20個で標準偏差は4個である。

第4図は別の場所で同時に発生しているブロッキングを1個のブロッキングとして、1年間におけるブロッキング日数を調べたものである。それによると年間199日はどこかでブロッキング現象が起こっていることになる。標準偏差は30日で年々の変動がかなり大きいことがわかる。Treidlらの様な定義では、年の中半年以上の日にわたって半球上どこかでブロッキングが起こっていることになり、成層圏突然昇温と関連する対流圏強制ロスビー波の異常増幅などはメカニズムが別かあるいは定義を違える必要があるかのどちらかであろう。一つの要因は、Treidlらの定義には水平スケールの制限がないためである。

第5図はブロッキング持続期間のスペクトル分布である。全体の平均は12日、ピーク値は8日である。この8



第6図 ブロッキングの活動度の季節変化 (Rex, 1950).

日という値は Sumner の統計でも同じである。

季節ごとの発生個数は春、冬が多く夏、秋の順で、この傾向は Rex の統計も同じである (第6図)。

ブロッキング出現の季節変化についての統計では White・Clark (1975) の研究が目される。彼らは対象を北太平洋上のブロッキングにしぼって1950~1970年までの21年間にわたる北半球月平均の地上気圧と500mb高度のデータを調査し、Rex (1950) の結論とは異なって北太平洋のブロッキングの頻度は冬期(10~3月)、特に1月が最大で春から夏にかけて最小であると結論した。White と Clark は春(特に5月)に最大であるという Rex との不一致をロッキー山脈上のブロッキング(このブロッキングは主として春から夏にかけて発現することを彼らが見出した。)を含めていたからであると結論した。Austin (1980) も11年間(1966~1976)の地上気圧と500mb高度のデータを用いて波数1~4のプラネタリー波の増幅と相互の位相関係がブロッキングの発生・消滅に密接に関係していることを示している。

多くの研究者が何らかの主観的定義を用いている中で、客観的基準に基づいてブロッキングの統計を実行したのが Dole (1978) である。Dole によれば500mb高度についてその気候平均値からの正の偏差が標準偏差かそれ以上、1つの格子点で少なくとも10日以上持続するときはいつでもブロッキングが存在するという。具体的には持続期間は10日、正偏差量は100mが選ばれた。上記の方法で冬の500mb高度を14年間にわたって調べた結果、彼は持続的偏差のよく出現する地域が三つあることを指摘した。それは北太平洋、北大西洋、北ロシア

(ウラル山脈の西)の3ヶ所である。Shukla・Mo(1983)はさらに、冬だけでなく、1年を通してそうであることを指摘している。

Charney・Shukla・Mo(1981)はCharney・Devore(1979)のブロッキングに関する順圧理論をチェックする目的でDoleの手法で解析を行ったが持続期間は10日とせず、解析した結果1~3日と7日とそれ以上の所のピークがはっきりと分離できた。彼らは、1~3日の方は傾圧不安定波の活動であり、7日以上はピークがブロッキングの出現に対応するとした。これはRex, Sumnerの8日という数字と対応している。

2.2. ブロッキングについての総観的研究

第1章でも述べたようにRex(1950 a, b), Sumner(1954)以来、特に長期予報に携ってきた人々によって数多くの総観的研究があるが、筆者の不勉強で目を通しきれていないので、この節ではRexの研究と日本における研究のまとめとして朝倉(1982)のレビュー中のブロッキングに関する所を引用する。

Rex(1950 a)は $150^{\circ}\text{W}-90^{\circ}\text{E}$ の地上と500mbの風と温度のデータを用いて、1949年6~7月にかけて東大西洋上に発現したブロッキングの解析をした。彼はブロッキング域上流($30^{\circ}\text{W}-120^{\circ}\text{W}$)とブロッキング域($30^{\circ}\text{W}-30^{\circ}\text{E}$)を分けて扱い、ブロッキング域では発達とともに南北の温度傾度が減少していることを見だし、大規模擾乱の渦輸送の効果を示唆している。一方、上流側では、ブロッキング期間、緯度について一様に弱い昇温が見られるが、これについては下降流に伴う断熱昇温を示唆している。

一方、西風については、ブロッキング域では西風の二重極大(ジェット)が出現するのが特徴である。しかし、高緯度側の西風加速は上流域にも明瞭に認められる。この点は後の研究で半球を対象にして“帯状平均”西風を計算してもブロッキング期間二重ジェットが現れることと辻つまが合っている。

朝倉(1982)は長期予報の現場でのブロッキングについての認識の到達点を以下の如くまとめている。彼が日本気象学会100周年記念レビューの中の1つとして著した“長期予報の発展”の中の文章を少し長くなるがそのまま引用しよう。“長期予報は異常天候を予報することが主目的であるから、常にブロッキングができそうかどうか気を配っている。長年の経験でいくつかの前兆がわかった。たとえば、中緯度における熱輸送が著しく大きくなったらそれが前兆で、その後急減した時ブロッ

ク高気圧が形成される。同時に波数2の偏西風擾乱が発達して西進を始めたら、まずブロッキング高気圧が形成されると見てよい。通常は低緯度にあるべき温暖な高気圧が高緯度にあり、高緯度にあるべき寒冷な低気圧が中緯度にある。このようなパターン自体に見られる変則に対応して天候にも異常性が生ずるのだが、別な見方をすると大規模な熱交換をしているのである。このような熱交換は超長波(とくに波数1および2)によって行われる”(下線は筆者、熱輸送を担っているのが外力によって起こされたロスビー波なら熱輸送がそのまま直接には南北の熱交換には結びつかない。また、基本場の温度傾度が南北逆になっていても、熱を北に輸送する)。

最近、伊藤(1983)はプラネタリー波の異常増幅機構を冬期10年間のデータを用いて詳細に研究し、同じプラネタリー波といっても波数によって増幅の機構が異なっていることを明らかに示した。一言でいえば、波数3の異常増幅には異なった波数間の非線型相互作用が関係し、一方波数2の発達には長周期の西進順圧モードが停滞モードに近づくと、生じるというものである。また波数1の発達は、エネルギー解析の点からは波数3に似ているが、他の機構もからんでいることを示唆している。

波数3の増幅に関係する波数間の非線型相互作用をもう少し詳細に述べれば以下の如くである。多くの場合、まず始めに、波数3の東西風成分の運動方程式における、波数 n の北風と波数 $n-3$ の東風による非線型項が、波数3の東風と位相を一致させるような経度で、波数 n の傾圧波が発達し、さらに、 $50\sim 55^{\circ}\text{N}$ (波数3の大振幅波が形成される緯度)で、帯状平均流の南北シアアが大きくないという条件が満足されるときである。

さらに、彼はこの中で波数2の増幅の機構は種々の点でPlumb(1981)の理論によく対応していると指摘している。

2.3. 半球規模大気大循環のエネルギー解析と波数解析

1960年代、主として日本の研究者によって半球規模の大気大循環のエネルギー解析と波数解析が精力的に実行された。それらを片山(1959)や伊藤(1974)をも参考にして第1表に簡単にまとめておこう。

ブロッキング時におけるエネルギーの平均的な流れを見るために、まずMurakami・Tomatsu(1965)を見てみると、ブロッキングの起こった1963年1~2月には $A_E \rightarrow A_E$ の交換(すなわち熱の北向き渦輸送)が非常に大きくなり、それに伴って $A_E \rightarrow K_E$ の変換も大きく

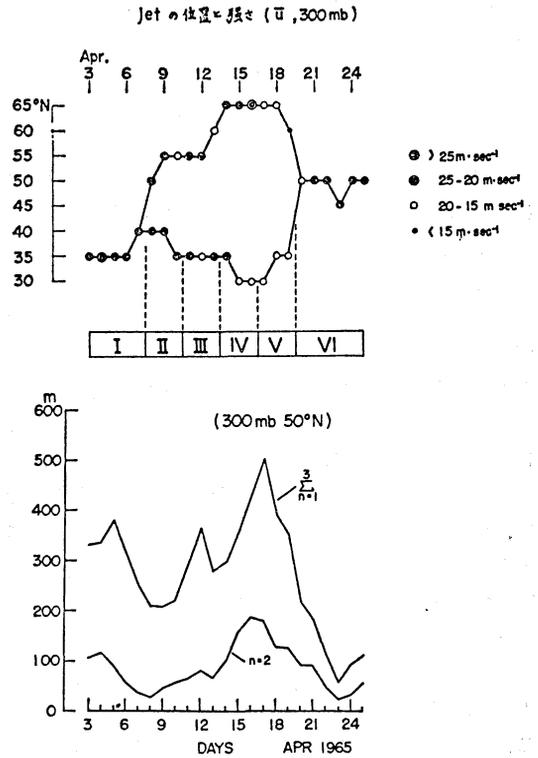
第1表 エネルギー収支解析による主な研究.

著 者(発表年)	対 象 年 月	平均期間	層	緯 度
Miyakoda (1963)	1958年1月	3 日 毎	25~1,000 mb(9層)	20°N以北
Murakami・Tomatsu (1965)	1963年1~2月	月 平 均	500, 1,000 mb	20°N以北
渡 辺 (1966)	1964年2~3月	半旬平均	500, 1,000 mb	20°N以北
森 (1968)	1968年5~8月	半旬平均及び 5半旬平均	500, 1,000 mb	赤道以北
戸 松 (1973)	1965年4月	毎 日	10~1,000 mb(10層)	15°N以北
伊 藤 (1974)	1971年1月16~31日	毎 日	100~1,000 mb(7層)	20°N以北

なっている。同時に運動エネルギーの流れも普通の年の状態とは異なって $K_Z \rightarrow K_E$ へと大きく流れている。これを波数別にみても、波数2~3の役割が圧倒的に大きく、うち波数3については $A_Z \rightarrow A_E(3)$ は特に大きい。このうち約半分は $A_E(3) \rightarrow A_E(n \neq 3)$ に使われ、約1/4が $A_E(3) \rightarrow K_E(3)$ に変換され、また $K_E(3)$ には、 K_Z や $K_E(n \neq 3)$ からの交換も存在し、結局 $K_E(3)$ には $A_E(3)$, K_Z , $K_E(n \neq 3)$ のすべてからエネルギーが供給されるようになっている。しかしこのうちの約80%は $\bar{p}'w'$ の形で500 mb 面を通して上層へ運ばれ、残りが主として $K_E(3)$ の増加分である。

以上は、ブロッキング現象の卓越した1ヶ月の平均的なエネルギーの流れであるが、Miyakoda (1963) は3日毎に、渡辺 (1966) は半旬平均で計算した。Miyakoda (1963) によると、ブロッキングの初期には、それ以前 $K_E \rightarrow K_Z$ だったものが $K_Z \rightarrow K_E$ と逆転し、 $A_Z \rightarrow A_E$ も急激に増すが、 $A_E \rightarrow K_E$ は0に近くなる。その後、初期段階を過ぎると $K_E \rightarrow K_Z$ と、もとに戻り $A_E \rightarrow K_E$ の変換は増大する。 $A_Z \rightarrow A_E$ は減少し終末期には極小となる。

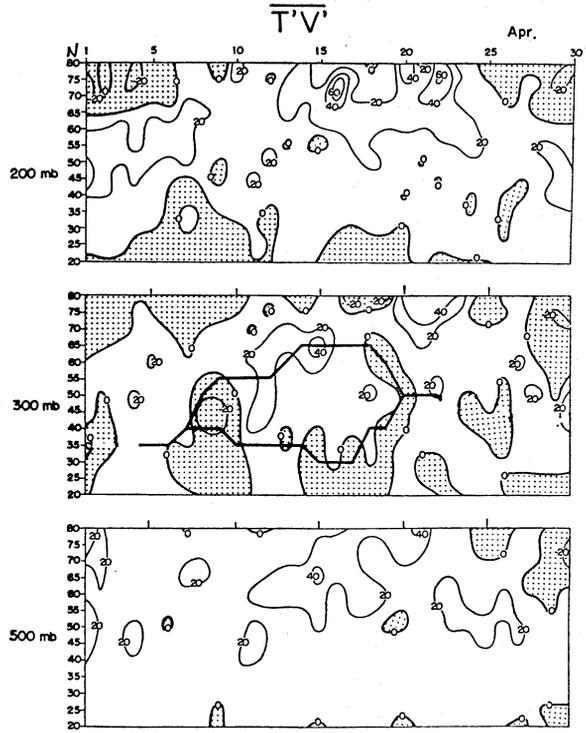
渡辺 (1966) によると、 $K_E \rightarrow K_Z$ の流れが $K_Z \rightarrow K_E$ になるのは、ブロッキングの終末期のみであり、またブロッキングの時に限って、 $A_Z \rightarrow K_Z$ の流れが $K_Z \rightarrow A_Z$ となっており、Miyakoda (1963) の結果と一致しない。しかし $A_Z \rightarrow A_E$, $A_E \rightarrow K_E$ の増大は一致している。 $K_Z \rightarrow A_Z$ の流れは、いわゆる「間接循環」に対応する。従って渡辺 (1966) の場合には、高緯度にフェレルセルの他にもう一つの間接循環セルができて半球平均でみると間接循環の方が勝って $K_Z \rightarrow A_Z$ となったのであろう。Miyakoda (1963) の場合にも $A_Z \rightarrow A_E$ の増大はあるのだから、おそらく高緯度の間接循環は形成されていると思われる。しかし、半球平均では、直接循環の方が勝っていると思われる。いずれにせよ、 $A_Z \rightarrow K_Z$ の符号の不一致



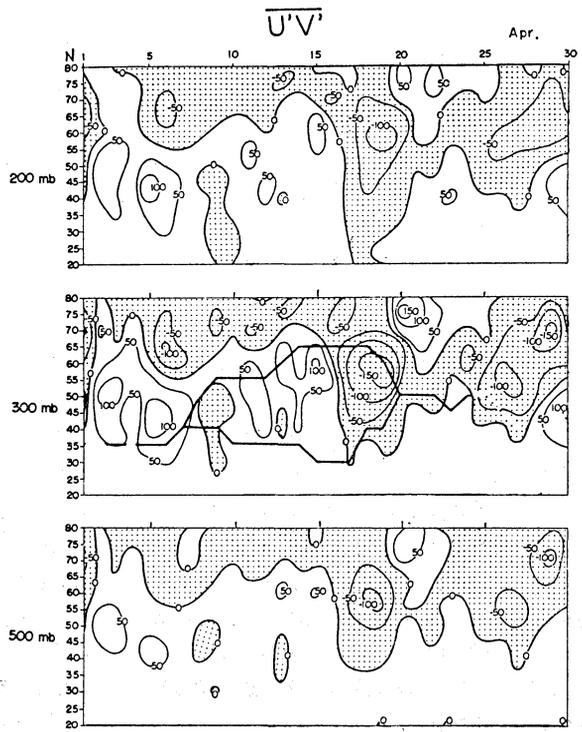
第7図 (上) ジェット流の変動, (下) 300 mb, 50°Nにおける超長波の振幅の変動 (戸松, 1973).

はそれほど重大とは思えない。

エネルギー解析の最後に Tomatsu (1973) の研究をとりあげる。彼は、1965年4月のブロッキングについて二重ジェットとの関連で形成前、形成初期、形成強化、最盛、衰弱、再生初期に分類して扱っている(第7図)。形成初期には $A_E \rightarrow A_Z$ の変換があり、形成初期の終わりに A_E の最小、 A_Z の最大になる。また形成初期に K_E および $A_E \rightarrow K_E$ の変換量共に最小となり、都田がブ



第8図 顕熱南北輸送 ($\overline{T'v'}$) の緯度分布の変動, 単位: $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}\cdot\text{sec}^{-1}$ (戸松, 1973).



第9図 運動量南北輸送 ($\overline{u'v'}$) の緯度分布の変動, 単位: $\text{m}^2\cdot\text{sec}^{-2}$ (戸松, 1974).

ロッキングの発生原因と考えた順圧的エネルギー変換は 300 mb より上層で出現しているが弱い。ブロッキングの形成強化期に顕著な北向きの顕熱輸送により、 A_Z は減少、 A_E は急増する(第8図)。著しい傾圧効果、すなわち、 $A_Z \rightarrow A_E \rightarrow K_E$ の変換を通じて擾乱の運動エネルギー K_E が供給される。また、形成強化期から最盛期にかけて、高緯度で波数2による運動量の北向き輸送によって二重ジェットの内側枝流を強めた(第9図)。ブロッキングの卓越期間には高緯度で間接循環が現れ平均子午面循環は4細胞を形成する。最盛期に入ると $A_Z \rightarrow A_E \rightarrow K_E$ の傾圧効果は弱まるが、波同志の非線型相互作用が卓越し、波数2を主とする擾乱の運動エネルギーはそれによって維持される。衰弱期には高緯度の顕熱および運動量輸送は南向き輸送に変わる。運動量の顕著な発散により 300 mb において、北の枝流のジェットを弱め、二重ジェットの消滅に導く。また、衰弱期の特徴として対流圏全層で強い順圧過程を生じ、 K_E の維持に寄与した。再生初期、対流圏全層にわたり A_Z から K_Z への強い異常な流れがある。以上の解析のまとめとして、戸松は、“ブロッキングの形成に傾圧効果の役割を指摘した菊池の数値実験の結果をある程度実測によって検証した”と述べる一方で、都田その他の解析結果との相違に留意しながら、半球的平均量であるエネルギーを基にした大循環の立場からの検討は、ともすれば、ブロッキングの実体とかけ離れた調査結果を導き出すことの危惧をも指摘している。

伊藤(1974)は1971年1月のブロッキングについて主として帯状平均運動量と帯状平均温度場の収支解析を実行している。この解析の結果として彼は、顕熱輸送のブロッキング発生直前における特異なパターンから季節平均に近い状態への移行と、中緯度での北向き運動量輸送の増大が、重要であることを指摘している。また、この場合にも、3細胞平均子午面循環からブロッキングに特有な二重ジェット、4細胞平均子午面循環の形成を解析している。平均帯状流の変化は中緯度での弱化、高緯度での強化、北のジェットの生成へと進んだが、その変化は主として平均南北流に働くコリオリ力の効果であった。この南北流は熱輸送のたまりによって誘起された子午面循環と考えれば辻つまはあう。また、彼はブロッキングの維持に山岳の効果の影響を指摘している。波数毎の役割をいえば、波数2のブロッキング発生時における重要性と、波数1、3による高緯度での運動量、顕熱輸送に果たす役割が解析された。

2.4. 観測的研究のまとめ

それでは、何がわかったのか? エネルギー解析では、多くの研究者の結論が必ずしも一致していない。特にブロッキングの発生、発達、最盛期、減衰期の各フェイズについて顕熱輸送、運動量輸送の役割、エネルギー変換項の向きが必ずしも一致していない。

しかし、多くの解析の結果を概観すると、いくつかの統一的な像が描けるように思う。この場合にもブロッキングの定義を明確にしておかなければ、話が進まないが、先に述べた Treidl らの定義に東西方向のスケールとして 45° 以上という Rex の定義を加味したものを便宜上の定義として、今までの研究から何がいえるかをまとめてみよう。

(1) エネルギー解析において A_Z にある限界値があるらしいことから、気温の南北傾度がある限度を超すとプラネタリー波が励起され、それに伴って顕熱の北向き渦輸送は急激に増大する。いわゆるブロッキング現象はそれに引き続いておこる。

このことに関連して、今まではよく南北温度傾度を解消するために、プラネタリー波が励起されるといういい方がされてきたが、別の言い方も可能である。すなわち、 A_Z が大すなわち平均場の南北温度傾度が大きいことは温度風平衡の関係から西風の鉛直シアーが大、すなわち地表、正確にはエクマン層上端の西風の強さを仮にはぼ0と考えると、下部・中部対流圏の西風が強いということになり、大規模な山岳や東西方向の冷熱源分布のような、いわば大気にとっての外力によって波が強制的に励起されるとも言える。この際、正の鉛直シアーであっても高緯度下部対流圏においてそうであるように平均風が東風の場合には波は励起されないのは重要な点だと思われる。さて、下層外力によって励起されたロスビー波はその時の基本場の状況(主として西風の分布)に応じて子午面内を伝播していく。そのとき準地衡風バランスにある波は $\overline{T'v'} > 0$ になっている。すなわち、南北の温度傾度を解消するために $\overline{T'v'} > 0$ なのではなく、下層で起こされた地衡風のな波が上層に伝わっている状態では $\overline{T'v'} > 0$ になるということである。

(2) ブロッキングそれ自身は顕熱の南北輸送を弱める効果をもつ。特に片山(1969)がこういっことを主張している。森(1968)、Miyakoda(1963)、渡辺(1966)もブロッキング中、北向き熱輸送量は小さくなることを示している。

(3) ブロッキングには起こりやすい場所と季節があ

る。水平スケールが大きく、持続期間の長い(10日以上)のブロッキング発現の頻度の高い地域は北大西洋(アイスランド、グリーンランド、スカンジナビア半島に囲まれた地域)、北太平洋(ベーリング海、アラスカ・アリューシャン上空)、ウラル山脈の西(カスピ海北部地域)の三ヶ所である。いずれも山岳(脈)西側であることは注目される。また、季節は冬(特に1月)である。Rexは春4・5月を主張しているが、ここではWhite・Clarkの研究を参照して冬(特に1月)とする。この点はブロッキングにおける強制ロスビー波の活動度との関連もあって重要である。

Austin (1981), Dole (1978) が言っているように、顕著なブロッキング高気圧は、500mbにおける平年のパターンの峰と異なった位置にあるわけではなく、ほぼ平年の位置でその振幅が非常に大きくなることである点は重要な点であろうと思われる。但し北太平洋のブロッキングの場合には、同時に低圧部が平年の位置から30°位西側に移動していることが注目される。すなわち、北太平洋のブロッキングの場合には、ブロッキング高気圧と対して西シベリア上の“ブロッキング低気圧”とでも言うべきものをも力学的に説明する必要があると思われる。一方、大西洋のブロッキングの時には、70°W付近の低圧部は平年の位置と余り変わらないようである。

(4) ブロッキング時には東西波数1~3、時には4のプラネタリー波の振幅が増大する。特に波数2の振幅増大が関連している場合が多い。そしてまた、それらによる熱・角運動量従ってエネルギー変換量も顕著に増大する。エネルギー解析の結果が著者によって必ずしも一致していない原因は扱った期間、解析手法の異同の他に、エネルギー解析それ自体にも含まれていると思われる。一つは戸松(1973)も指摘しているように、比較的局所的なスケールのブロッキング現象を半球の平均量であるエネルギーを基にした大循環の立場から扱っている点である。もう一つは、外力の効果によって波が強制的に励起され伝播している状態と傾圧あるいは順圧不安定等の流体内部の不安定の場合とでは、エネルギー変換項の解釈は少し異なったものにならざるを得ない。すなわち、

$$C(A_Z \rightarrow A_E) \propto \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} \overline{v'T'}$$

$$C(K_Z \rightarrow K_E) \propto \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} \overline{w'v'}$$

であるが、そこに介入する過程が不安定現象であるならば、基本場の傾度は一方向きで渦輸送はその基本場の傾

度を緩和する向きになされる。しかし、そこに介入する過程が外力による強制波動の励起・伝播であるなら、渦輸送の向きは、基本場の傾度と直接の関係はない。極端な場合には逆であっても一向に構わない。

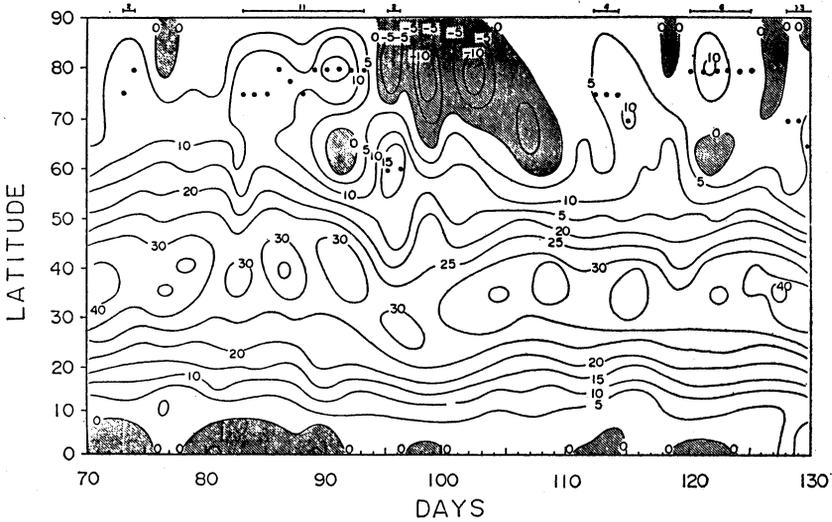
推論を混じえて少し独断的に言わせてもらえば、Miyakoda, Murakami・Tomatsu, ……等の解析にいう順圧的エネルギー変換とか傾圧効果等というのは高緯度下部対流圏でプラネタリー波が山岳や海陸分布の熱的效果で強制的に励起・伝播している事別の表現ではなからうか。準地衡風の波動が上方に伝播しているなら、 $\overline{T'v'} > 0$ であるべきであるし、北向きに伝わっているなら $\overline{w'v'} < 0$ であるべきである。そのような鉛直、水平の位相構造を持つ筈である。戸松(1973)の解析において、ブロッキング衰弱期には高緯度の顕熱および運動量輸送が南向き輸送に変わるなどという結果をみると、益々その感を深くする。また、本論では述べる間がなかったが、戸松(1973)、伊藤(1974)の解析やKikuchi(1969)の数値実験で指摘されているブロッキング時の4細胞平均子午面循環ということも、60~65°Nの比較的高緯度を中心にして強制ロスビー波が励起されれば、それに伴う熱輸送が平均子午面循環を誘起するという事で、4細胞平均子午面循環も強制ロスビー波の励起・伝播とはほぼ1対1の事柄であろう。

(5) 起こりやすい緯度は60°N付近である。この緯度は強制プラネタリー波増幅時の振幅極大の緯度であって傾圧不安定波の卓越する緯度45°N付近よりも若干北側であるのは注目されるべき事だと思われる。

3. 菊池によるブロッキングの数値シミュレーション

Kikuchi (1969, 1971) は今から既に10年以上も前に、非常に印象的な数値実験を行った。二層モデルであること、山岳や非断熱加熱の東西分布などの取り入れ方のかかなり簡単なモデルであるにもかかわらず、彼のモデルはブロッキングによく似た循環をシミュレートし、多くの点で観測と一致した結果を与えた。また、現時点で比較してみるとそれ以後になされたエネルギー解析などにおけるプラネタリー波の役割や4細胞平均子午面循環の形成などとの一致は驚くほどである。

すなわちKikuchiは200mbを上限にした2層線型バランスモデルを等温静止大気の初期条件のもとで130日間にわたって数値積分し、このモデル大気の状態が準平衡状態に達した後の71日目から130日目までの60日間について詳細な解析を行った。なお太陽は1月22日の状



第10図 带状流の緯度分布の時間変化 (Kikuchi, 1969).

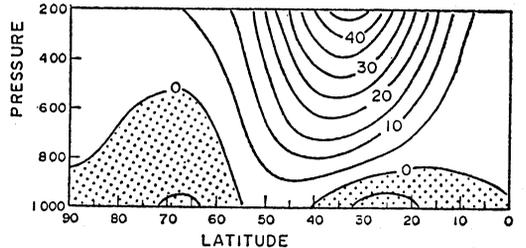
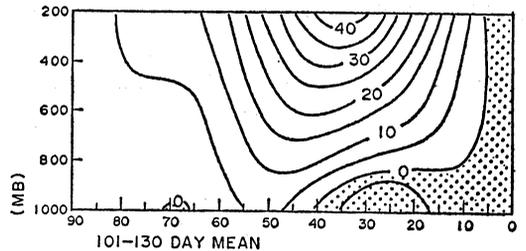
態に固定されているから、現実大気の状態が比較の対象になる。

第10図は彼によって計算されたモデル大気中の400mbにおける平均带状流の緯度分布の時間変化を示したものである。亜熱帯ジェット流の強さ・位置・その変動特性などは実際の気象で見られるものとよく対応していることがわかる。ここで、高緯度にしばしば風速の2番目の極大(図中黒丸で示されている)が現れているのが注目される。このような二重ジェット流は、ブロッキング現象が起こっているとき、平均带状流に見られる大きな特徴である。带状平均してもなおかつ二重ジェットが見えるというのは重要な点である。図上の枠外に、数字と横棒で二重ジェット流の存在期間が示されている。二重ジェットの期間が1対1にブロッキング期間に対応すると考えると、ここに現れているブロッキング期間は実際大気中に見られるものに比べて短いように思われる。

彼は、解析に選ばれた60日間を、二重ジェット構造の卓越した前半と比較的平年の状態に近い後半の30日間について、それぞれ平均をとり、前半期の状態を後半期の状態と比較することにより、ブロッキング現象の卓越期間の特徴を明らかにしようとした。

第11図は前半期(上)と後半期(下)における30日平均带状流の緯度・高度分布である。ブロッキング活動の盛んな前半期には、高緯度にジェット流の北の枝流が見られることと、高緯度の下層で西風が卓越していることが、後半期と大きく異なる所である。この点は最近の佐

ZONAL MEAN OF ZONAL CURRENT (M SEC⁻¹)
71-100 DAY MEAN



第11図 30日平均带状流の緯度・高度分析 (Kikuchi, 1969).

藤・井上(1983)の解析とそっくりである。

また、ここで図示はしないが、波数毎の顕熱・角運動量輸送、エネルギー変換量などの解析を行って、東西波数2の擾乱の発達が発達と維持に重要であるという結果を示している。さらに、この波数2の擾乱の発達には山岳と带状流が重要な役割を果たしていることを示唆している。

以上, Kikuchi の数値実験は 2 層モデルという制限や, 30 日平均での比較ということによってモデル大気のプロッキングそのものの性質が薄められている点を割り引いても, プロッキングの本質に迫る非常に優れた研究であると思われる. 多層モデルでの再実験, その中のプラネタリー波の構造, 30 日平均ではなく 1 つのプロッキングのライフサイクルを追いかけた物理過程の追及など, 実際の観測事実との詳細なつき合わせを含めて, やるべきことは多く残っていると思われる.

4. おわりに

最後に, Charney・Devore, Tung・Lindzen, Yoden, Plumb 等の理論を, 上記の解析結果とつき合わせて書いてみたかったが, 力不足と時間配分のまずさと締切に追われて果たせない.

筆者自身は, Charney・Devore (1979) の多重平衡理論や Tung・Lindzen (1979) のロスビー波の共鳴理論などに刺激されてプロッキングの具体的研究を始めたが, 安定平衡解間の遷移等の非常に魅惑的な内容とは裏腹に, “低示数状態=プロッキング状態”ということ(定義)に抵抗を感じて, 今までの解析的研究や数値実験ではどのような結論が出ているのかと考え, かなり古い文献をもあさることになった.

誤解をおそれず粗い議論をすれば, 高緯度における強制ロスビー波の励起・伝播とそれに付随する効果(たとえば Colucci *et al.*, 1981)ということで, プロッキング現象のかなりの部分が解釈できそうな気がする. だとすると, 問題は強制ロスビー波の発生機構, 異常増幅機構という点にしばられる. その意味で最近の Itoh (1983) の研究は注目される.

なお, Charney・Devore による多重平衡理論の傾圧モデルその他への拡張は Charney・Straus, Roads, Yoden, Malguzzi・Speranza (1981) 等によってなされているが, 順圧モデルの場合に存在した複数の安定平衡解ということにはなっていない(たとえば, 楠他(1983)をも参照). 理論は理論で低次モデルを多自由度にしたとき, 解の性質が変化しないかという問題を含むので, 直接プロッキングの観測結果と比較するのはまだ難しいようだ.

あとがき

普通, 「天気」の解説というものは, そのテーマについて長く研究してきたか, 重要な論文を提出した方が書くことになっているように思われる. 昔から興味は持っ

ていたが, 具体的な研究にとりかかったのはつい最近である筆者が, 「天気」編集委員会のすすめにのって何となく引き受けてしまったのには次のような自分にも判然としない理由があるように思われる.

その一つは, プロッキング現象という謎が何故わからないのだろうかという素朴な疑問である. 少なくとも大気データの現象の時空スケールを十分分解するほどの密度である. 1 週間位の予報モデルはほぼ実用の域に達している(プロッキングのシュミレーションに成功しないなら, 週間予報はできない筈である). 現象はほぼ準地衡風近似方程式系で十分扱える. 何が不足しているのだろう. きっとプロッキング現象を力学的理解が容易になる形で定義できていないのではないだろうか. ここで突然昇温をあざやかにモデル化してみた Matsuno (1971) の研究が思い起こされる.

第 2 には, 最近 Charney・Devore, Tung・Lindzen 等を始めとして Rossby-Soliton 等, プロッキングを冠した理論が続々現れていて, プロッキングの研究も一時の低迷を脱したようである. しかし, このレビューでふれたように, 特に日本の研究者による長い研究の歴史がある. よしんばそれが最新の力学的概念を用いてまとめられていなくとも, 解析事実は事実として無言の重みがあると思われる. 新しい理論の検証に, そのような過去になされた丁寧な解析は十分耐えるものであると感じたからである.

後書きがまただらだらと長くなりすぎた. ごたくを並べている暇で自分で論文を書けばいいではないかという声が聞こえてきそうなので筆を置く. 修士論文を送っていただいた, 和歌山大学の伊藤久徳氏に感謝いたします. 締切を大幅に過ぎた原稿を気長に待っていただいた編集委員会の池田さん, 栗原さんに感謝します.

文 献

- 朝倉 正, 1982: 長期予報の発展, 天気, 29, 891-904.
 Austin, J.F., 1980: The blocking of middle latitude westerly winds by planetary waves, Quart. J. Roy. Met. Soc., 106, 327-350.
 Bengtsson, L., 1981: Numerical prediction of atmospheric blocking—A case study, Tellus, 33, 19-42.
 Berggren, R., B. Bolin and C.G. Rossby, 1949: An aerological study of zonal motion, its perturbations and break-down, Tellus, 1, 14-37.
 Charney, J.G. DeVore, 1979: Multiple flow equilibria in the atmosphere and blocking, J. Atmos.

- Sci., 36, 1205-1216.
- , and D.M. Straus, 1980: Form-drag instability, multiple equilibria and propagating planetary waves in baroclinic, orographically forced, planetary wave systems, *J. Atmos. Sci.*, 37, 1157-1176.
- , J. Shukla and K.C. Mo, 1981: Comparison of a barotropic blocking theory with observation, *J. Atmos. Sci.*, 38, 762-779.
- Colucci, S.J., A.Z. Loesch and L.F. Bosart, 1981: Spectral evolution of a blocking episode and comparison with wave interaction theory, *J. Atmos. Sci.*, 38, 2092-2111.
- Dole, R.M. 1978: The objective representation of blocking patterns, *The general circulation; theory, modeling and observation*, NCAR Colloquium Notes, Summer 1978, NCAR/CQ-6-1978-ASP, 404-426.
- Elliott, R.D. and T.B. Smith, 1949: A study of the effects of large blocking highs on the general circulation in the Northern-Hemisphere westerlies, *J. Met.*, 6, 67-85.
- Egger, J., 1978: Dynamics of blocking highs, *J. Atmos. Sci.*, 35, 1788-1801.
- Garriott, E.B., 1904: Long range forecasts, U.S. Weather Bureau Bulletin, No. 35.
- Geb, M., Synoptisch-statistische Untersuchungen zur Einleitung Blockierender Hochdrucklagen über dem Nordostatlantic und Europa, *Meteorol. Abh.*, 69-1, 89pp.
- 伊藤久徳, 1974: 大気のプロッキングに関する研究, 京都大学修士論文.
- Itoh, H., 1983: An observational study on the amplification of planetary waves in the troposphere, *J. Met. Soc. Japan*, 61, 568-589.
- 片山 昭, 1969: 大気大循環と熱. *グロスベッター*, 7, 1-64.
- , 1970: 北半球のプロッキングおよび顕熱の南北輸送, *グロスベッター*, 8, 1-28.
- Kikuchi, Y., 1969: Numerical simulation of the blocking process, *J. Met. Soc. Japan*, 47, 29-54.
- , 1971: Influence of mountains and land-sea distribution of blocking action, *J. Met. Soc. Japan*, 49, 564-572.
- 楠 昌司・余田成男・和方吉信・守田 治, 1983: 第3回地球流体夏のセミナー報告, 第3部プロッキング, *天気*, 30, 125-128.
- Malguzzi, P. and A. Speranza, 1981: Local multiple equilibria and regional atmospheric blocking, *J. Atmos. Sci.*, 38, 1939-1948.
- Matsuno, T., 1971: A dynamical model of the stratospheric sudden warming, *J. Atmos. Sci.*, 28, 1479-1494.
- Miyakoda, K., 1963: Some characteristic features of winter circulation in the troposphere and lower stratosphere, Technical Reports, No. 14, Dept. Geophys. Sci., Univ. Chicago. 93 pp.
- 森 信成, 1968: 春から夏にかけての大循環の変動について, 1968年全国長期予報技術検討会資料, 26 pp.
- Murakami, T. and K. Tomatsu, 1965: Energy cycle in the lower atmosphere, *J. Met. Soc. Japan*, 43, 73-89.
- Namias, J., 1951: The great Pacific anticyclone of winter 1949-1950; A case study in the study in the evolution of climatic anomalies, *J. Met.*, 8, 251-261.
- , 1964: Seasonal persistence and recurrence of European blocking during 1958-1960, *Tellus*, 394-407.
- Plumb, R.A., 1981: Forced waves in a baroclinic shear flow, Part 2; Damped and undamped response to weak near-resonant forcing, *J. Atmos. Sci.*, 38, 1856-1869.
- Rex, D.F., 1950a: Blocking action in the middle troposphere and its effect upon regional climate, I. An aerological study of blocking action, *Tellus*, 2, 196-211.
- , 1950b: Blocking action in the middle troposphere and its effect upon regional climate, II. The climatology of blocking action, *Tellus*, 2, 275-301.
- Roads, J.O., 1980: Stable near-resonant states forced by orography in a simple baroclinic model, *J. Atmos. Sci.*, 37, 2381-2395.
- 桜井 徹・片山 昭, 1969: 北半球プロッキングの統計(1), 日本気象学会昭和44年秋季大会予稿集, 佐藤康雄・井上長俊, 1983: 1979年2月高緯度プロッキング現象のエリアッセン・バームフラックスを用いた解析, 日本気象学会昭和58年度秋季大会予稿集,
- Shukla, J. and K.C. Mo, 1983: Seasonal and geographical variation of blocking, *Mon. Wea. Rev.*, 111, 388-402.
- Sumner, E.J., 1954: A study of blocking in the Atlantic-European sector of the Northern Hemisphere, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 80, 402-416.
- , 1959: Blocking anticyclones in the Atlantic-European sector of the Northern Hemisphere, *Met. Mag.*, 88, 306-311.
- 戸松喜一, 1973: 1965年4月, プロッキング現象のエネルギー解析, 昭和47年度全国長期予報技術検討会資料.
- Treidl, R.A., E.C. Birch and P. Sajecki, 1981: Blocking action in the Northern Hemisphere; A climatological study, *Atmosphere-Ocean*, 19, 1-23. (35頁に続く)