

グロースベッター

第 29 巻 第 1 号

● 論 文

季節内変動はどこまで理解されてきたか？	隈 健 一	1
類似 / 反類似法	小 泉 耕	23
類似による長期予報の新しい展開？		
北半球積雪被覆面積の年々変動	岩 崎 友 彦	29
太陽活動の変動と火山・地震活動，気象の変動	高 橋 浩一郎	38

レビュー・報告

WCRP と今後の展望	住 明 正	50
10 日 - 90 日の時間平均場の数値的長期予報に関する		
ワークショップ	杉 正 人	59

1990 年 9 月

L. F. グ ル ー プ

季節内変動はどこまで理解されてきたか？

モデラーの眼から

隈 健 一 *

はじめに

1980年代後半の季節内変動研究ブームもほぼ終わりにかけた感がある。ブームが終了する要因として、一般的には(1)現象が解明されつくした、(2)研究者が飽きてきた、の二種類が考えられるが、このブームに関してはどうであろうか。そこで、このブームを通じて何が解明され、何が今後の課題として残っているかを、ブームに参加した一員としてまとめておくことの必要性を感じ、筆を取った次第である。また、グロスベッターが長期予報に関する研究誌であり、筆者が数値モデルの開発担当者という見地から、季節内変動の工学的応用の可能性についても論じておきたい。基礎的研究が一段落ついたこれからが、応用技術の開発期となるからである。

1. ブーム以前の季節内変動の研究

季節内変動を初めて世に示した論文は、Madden and Julian (1971) (以下 MJ と呼ぶ) ということになっている。実は、全く独立に季節内変動を示した論文が、イギリスで提出されているのはそれ程知られていない。Parker (1973) の Equatorial Kelvin waves at 100 millibars というのがそれである。その題からもわかるように、圏界面付近の振動を論じ、それが Kelvin 波であると推測している。その後の理論家達の飯の種になった鉛直波長と東進位相速度とのパラドックスも提起されているのは注目すべきである。最近筆者が試みた成層圏の準二年振動との関連も調べられている。一方 MJ (1971, 1972) の偉大さは、季節内変動の三次元的構造を、有名な概念図により示したことにあろう (図 1)。当時の乏しいデータから推測された概念図が、ブーム開始後の OLR や FGGE などを駆使した解析によってもほとんど受け入れられていることを忘れてはならない。ちなみに熱帯の季節内変動は Madden and Julian Oscillation と呼ばれることもある。

ところが当時は、QBO の発生機構に関連した成層圏波動がブームであったせいか、対流圏の季節内変動の反響は、少なくとも論文の形では少なかったようである。正面からこの問題に取り組んだ初めての論文は、C.P.Chang (1977) であろう。この論文によって、位相速度と鉛直波長との矛盾に対する第一の仮説が提出された。彼は、赤道 Kelvin 波を記述する赤道 β 面近似方程式において、波動型の熱源に対して線形解を求めている。それによると、2つのタイプの解が存在し、“regular

* 気象庁数値予報課

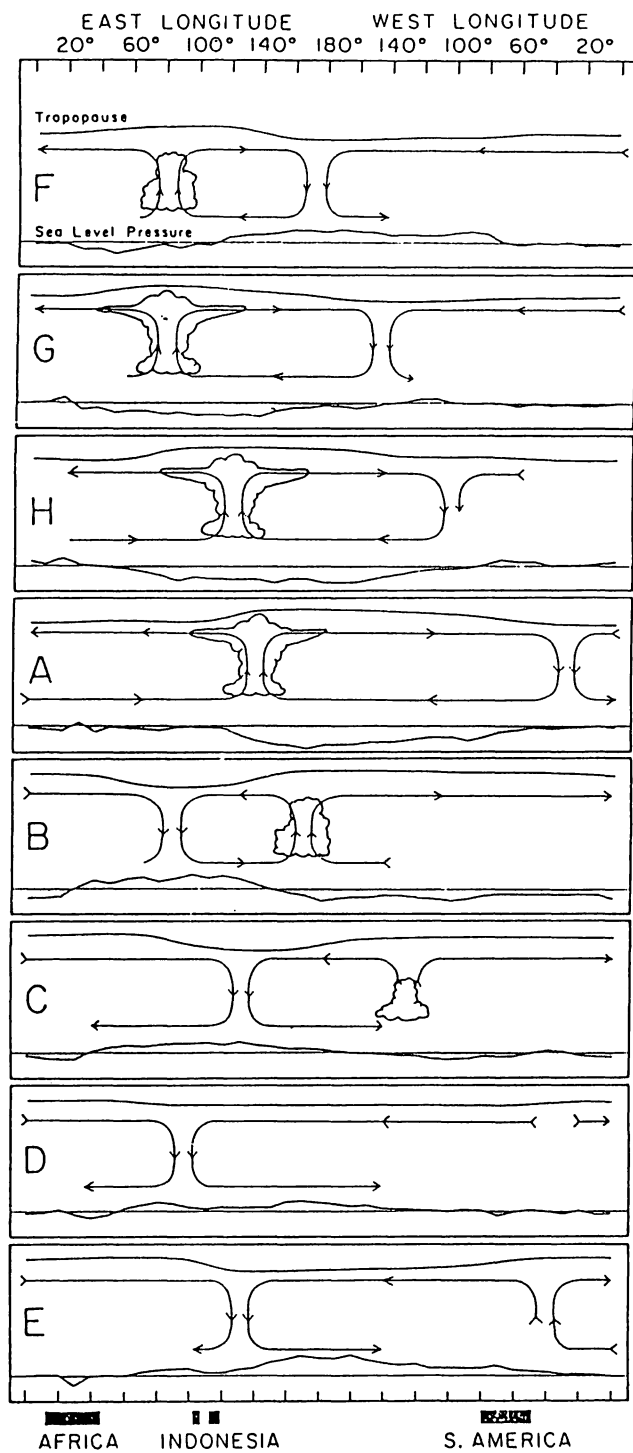


図1 Madden and Julian (1972) による熱帯の季節内変動に対する概念図

mode”では東進位相速度の減少と共に、鉛直波長が減少するが、“viscous mode”では、逆に鉛直波長が増大する。すなわち“viscous mode”によって、遅い位相速度と大きな鉛直波長で特徴づけられる季節内変動を説明しようというものである。名前が示すとおり、“viscous mode”では摩擦が重要な役割を果たしている。例えば、熱力学方程式においては、“regular mode”で

$$\frac{\partial T}{\partial t} \approx \frac{Q}{C_p} - w\Gamma \tag{1-1}$$

(Γは安定度)

すなわち(Tの局所変化=非断熱加熱+断熱冷却)というバランスが成り立っているのに対し、“friction mode”では、

$$\frac{Q}{C_p} - w\Gamma = -DT \tag{1-2}$$

すなわち(非断熱加熱+断熱冷却=ニュートン冷却)というバランスが成り立っている。内部Kelvin波の東進が、鉛直流による断熱加熱によって、温度場が変化してもたらされることは図2によって、直観的に理解できると思う。したがって、“friction mode”のように上昇流や下降流によって温度変化がもたらされない場合には、この東進のメカニズムが働かないので、深い鉛直構造を持ちながらも、東進速度が遅い解が得られる。

では、この数日という短いタイムスケールを持つ摩擦の実体は何であろうか。積雲対流による鉛直混合や放射冷却がその候補であるが、特に積雲対流による運動量摩擦についてはよくわかっておらず、またそれを下降流域にも適応することはあきらかに問題であろう。またこの論文では、非断熱加熱を運動場に対して、独立に与えていることも注意されたい。対流圏に熱を与えて、成層圏の運動場のレスポンスを見るのならばこれでもよいかも知れないが、非断熱加熱と運動が切り離せな

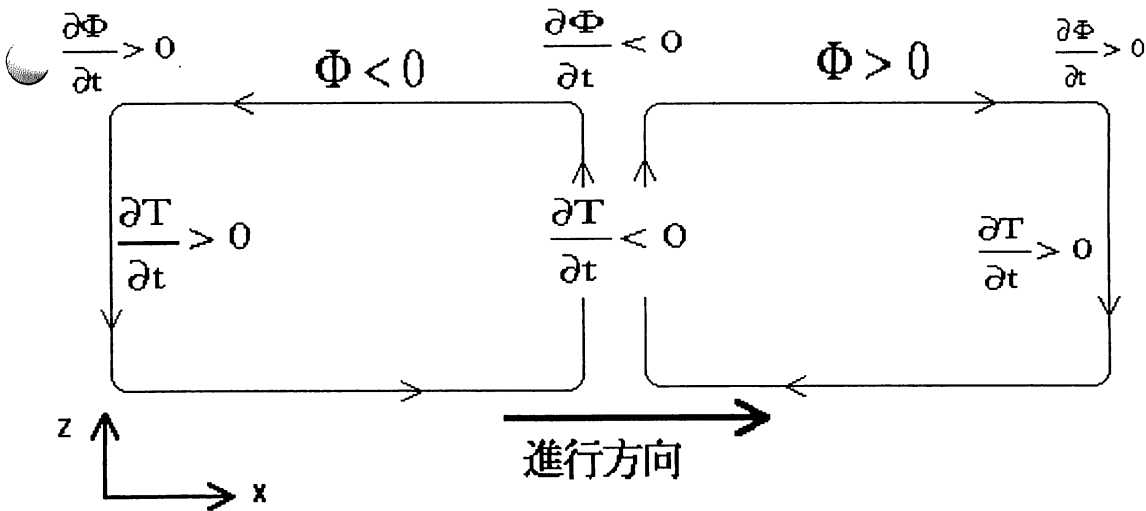


図2 内部 Kelvin 波に対する模式図

い関係にある熱帯対流圏での議論ではかなり厳しいものがある。とはいっても、Free Kelvin 波よりゆっくり東進する対流圏での季節内変動を初めて理論的に説明しようとした試みは高く評価できよう。

2. ブーム期の季節内変動研究

1980 年代になって、赤道域で東進する波数 1 – 2 の 30 日から 60 日の周期を持つ現象と捉えられていた季節的変動の新しい側面が見いだされ、多くの研究者の注目を浴びるようになった。その第一がインドモンスーンとの関係である。Sikka and Gadgil (1980), Yasunari (1980)によって、インド付近でモンスーン季に、赤道からヒマラヤに向かって周期 30 – 60 日で北進する雲域が発見されたのである。村上多喜雄 (1980)によれば、この発見が季節内変動ブームをもたらしたとされている。この北進のメカニズムについては、Webster (1983)が、Moist convection と地面からの顕熱潜熱フラックスとの相互作用により、15 日周期の北進が得られることを単純化したモデルで示している。地面の熱収支において重要な放射量の変動については、雲量の変化を考慮せずに、地中水分によって変化するアルベドと地面温度との間で弱い相互作用を持つに過ぎないことに注意して欲しい。15 日より長い周期を得るためには、雲と放射という強い相互作用が必要になってくるかも知れない。私と FSU で一緒に仕事をしていた Guerey は、インドにおける季節内変動が、Webster (1983) の構造に類似していることを、FGGE 3B の解析と衛星による大気上端での放射観測、降水量解析、それに放射境界層 1 次元モデルを用いて示している。筆者も雲と放射の相互作用をいれた FSU 全球スペクトルモデルで、インドでの 40 日程度の北進モードを得ることができたので、後ほど紹介したい。一方 Murakami et al. (1984)の研究では、北進は西太平洋でも見られるので、大気地面相互作用だけが北進にきいているわけではないということも指摘しておく必要がある。この点については、Murakami and Nakazawa (1985)は、東進モードの水平構造が赤道から北西に延びる形になっているため、東進と同時に北進も見られるという報告をしている。では、何故そのような軸の傾きがあるかという、直観的には、赤道熱源の北西側にロスビーモードに伴う渦が励起されることと関係していると考えられる。この渦から、しばしば台風がつくられて、西北西進するということも軸の傾きと関係していそうであるが、きちんとは調べていない。

一方、大気の絶対角運動量も、季節内変動のタイムスケールで変動していることが Langley et al. (1981)によって発表された。このことは、大気固体地球系の絶対角運動量保存則によって、固体地球の角運動量もこのタイムスケールで変動していることも意味している。実際、50 日程度のタイムスケールで、両者の時系列の相関は極めてよい (図 3)。“1 日の長さ (the length of day)”が季節内変動しているという概念は、1980 年代になって初めて生まれたのである。これは、実用的にも重要で、アメリカでは NASA を中心にして研究が進められている。今後 21 世紀にかけて、深惑星探査が進められていく中で、1 日の長さの正確な予報が、ロケットの惑星到達の軌道計算において非

常に重要になっていくという話である。気象予測が船舶や航空機の航路予測に大きな比重を占めていることは、良く知られていると思うが、宇宙飛行にまでかかわってくる時代になってきたのである。

もう一つ、1980年代に新しく得られた知見は、中高緯度にも季節内変動が存在するということがあろう。Krishnamurti and Gadgil (1985) は、中高緯度の偏西風が季節内変動の周期帯で大きく変化していることを示した。さらに、Lau and Philips (1986) は、熱帯での季節内変動と中高緯度の季節内変動と互いに相互作用している様子を示している。Tsuyuki (1990) によって最近明らかにされた中高緯度の力学的一か月予報の精度と、熱帯の季節内変動の強弱との関連も、この相互作用を強く物語っている。しかしながら、30 – 60 日という周期が、熱帯の力学によって決定されているのか、中高緯度のそれによっているのか、両方とも30 – 60 日周期の“ノーマルモード”を持っているのか、あるいは相互作用の結果初めて30 – 60 日という周期が生まれるのか、決定的な結論はまだない。中高緯度の“ノーマルモード”の可能性としては、Simmons et al. (1983) による順圧不安定がいまのところ知られている。このモードと夏の東アジアの循環場との関連については、Tsuyuki and Kurihara (1989) で論じられている。

以上がブームで明らかになった主な新しい観測的事実である。なお、もう一つの大きな発見としてスーパークラウドクラスターがあるが、これは季節内変動そのものではないので後で述べることにする。一方、数値モデルによる研究も1980年代の大きな流れであり、章を改めて解説していきたい。

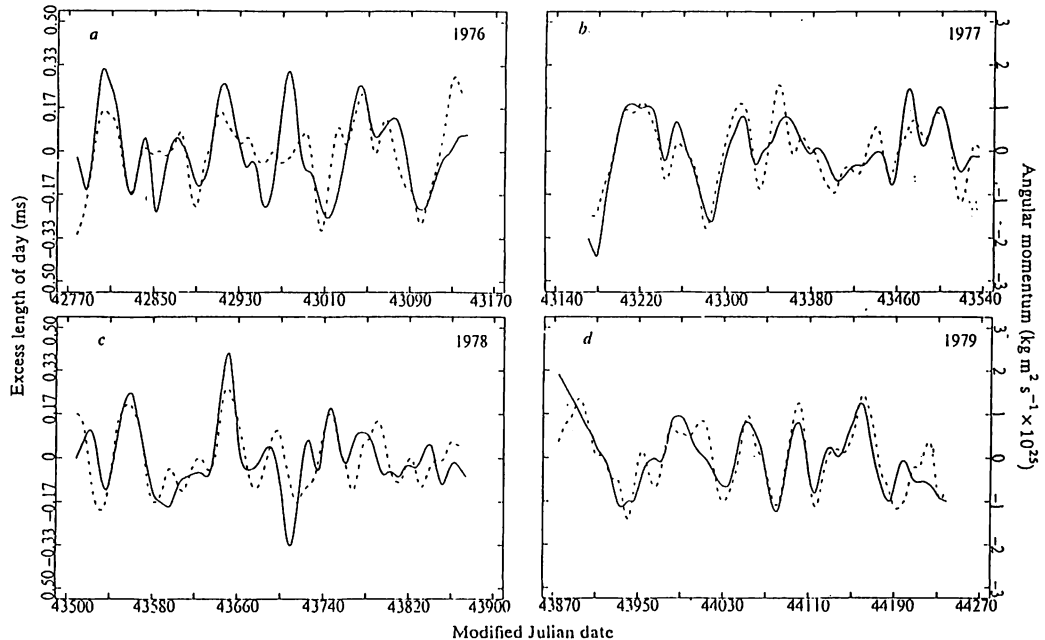


図3 月面を利用したレーザ光測定 (LLR) による1日の長さの変動 (実線) とNMC (アメリカ気象センター) の全球解析による大気角運動量の変動 (波線)。時系列からは長周期変動が取り除かれている。Langley et al. (1981) から引用。

3. 大循環モデルによる Simulation

これらの現象が大気大循環モデルに現われているかは、大変興味深い。もし現われていれば、乏しい熱帯の観測データを用いる代わりにモデルの出力を用いて、そのメカニズムを探ることも可能である。ということから、1980年代の後半には、モデルを用いた研究が盛んになってきた。

まず、1986年に、Y.Hayashi and Golderによって、GFDLモデルにおける45日振動の解析結果が示された。その後数多くのGCMにおいて、季節内変動に関する解析結果が発表されたが、周期の妥当性、および北上モードの存在という点で、このモデルの結果がもっとも現実的である。一方、同じ年に、Y.Y.Hayashi and Sumiによって、数値予報課のモデルを単純化した水惑星モデルにおける30日振動というユニークな結果が発表された。この論文で生まれた新しい概念は、1,500 – 3,000 kmの水平スケールを持つスーパークラウドクラスターの存在である。このスーパークラウドクラスター(SCC)は、波数1の季節内変動と同じ位相速度で東進しており、モデルの30日振動を維持するうえで、重要な役割を果たしているというものであった。

一方、Neelin et al.(1987)は、GCM実験と単純なモデルの考察から、蒸発と風速に関するフィードバックの効果を強調している。熱帯の海面近くは、偏東風が卓越しているという前提のもとに、湿潤対流を伴う上昇流域を考える。この上昇流によって、海面付近では西側で西風、東側で東風が誘起される。これらの風と、一般流である東風を重ね合わせると、東側では強い東風、西側では弱い西風(時には弱い東風)が見られるはずである。一般に、地表や海面からの乱流フラックスは風速と共に増大する。特に海上ではいくら蒸発しても水がなくなるということは事実上ないし、地表面では普通存在する(正味放射=乱流熱フラックス)という制約が少なくとも短いタイムスケールでは弱い。さらに、風速の増加と共に、波がたって、粗度が増加するという効果もあって、蒸発量の風速に対する依存性は特に海上で強い。このため、上昇流の東側でより多くの蒸発が起こり、その水蒸気が湿潤対流に使われるため、上昇流域は東側に動こうとする。ただ、Neelin達の実験では、蒸発の風速依存性をなくしても、弱いながらも東進がみられており、そのほかのメカニズムも考えなければならない。モデラーの立場からいうと、海上での乱流フラックスの風速依存性にはわからないことも多く、数値予報モデルでもその取り扱いに苦労している段階である。この素過程に対する理解を深めていかなければ、結局パラメタリゼーション次第という結論しか得られないであろう。

そのほかの数値モデルにおける季節内変動について、筆者の知るかぎりをまとめてみよう。イギリス気象局のGCMでは、Swinbank et al.(1987)が、水惑星モデルを用いて波数1の東進を得ているが、周期は22.5日と短い。世界一の数値予報精度を誇るECMWFでは、少なくとも1989年に積雲対流のパラメタリゼーションをKuo SchemeからMass Flux schemeに変更するまでは、モデルでは季節内変動は見られなかった(Palmer私信)。気象研究所の時岡モデルにおいては、従来の荒川シューベルトの積雲対流スキームをつかったモデルでは、10日周期のFree Kelvinに近いモー

ドが出現し、30 – 60 日周期の振動は見られなかった。そこで、Tokioka et al.(1988)は, entrainment rate の最小値を導入することによって、背の高い積雲対流を押さえ、非断熱加熱最大の高度も下げることによって、30 日ないし 45 日周期の振動を得ることができた。加熱の鉛直分布が低くなると、周期が長くなるというのは、“Kelvin CISK”の解析的な結果と一致するため、“Kelvin CISK”の理論をサポートする結果と考えられた。その後の報告によると、水惑星ならば 30 ないし 45 日の周期が得られるが、海陸を取り入れた GCM では周期は 20 日程度ということである(1990 年気象学会春季大会予稿集 14 ページ)。

Kelvin CISK という言葉が登場したところで、その説明に入りたい。この理論は、もともと 10 日周期くらいの成層圏 Kelvin 波の励起機構を説明するために生まれた理論である。下層収束による非断熱加熱と、Kelvin 波が相互作用することによって、不安定モードが生ずるというものであった。昔は 10 日周期であったのが、なぜ 40 日周期に結論が変わったのが不思議であるが、多くの理論家が季節内変動の説明に用いている。位相速度が遅くなる理由は、例えばもっともシンプルなモデルを用いた Takahashi (1987) は次のように説明している。内部 Kelvin 波は、下層の収束、上層の発散に伴う上昇流により、断熱冷却が起こり、これが高度場を下げて東進していく。これは図 2 を用いて、第 1 章でも説明した。ところがこの上昇流域で非断熱加熱を与えると、そこでの冷却率が小さくなり、高度場の変化率も小さくなって、東進速度も遅くなる。これが Kelvin CISK によって、東進位相速度が小さくなる理由である。もちろん CISK であるから、成長率を持つ不安定モードであることも示される。

もっとすっきりした説明を試みよう。赤道 Kelvin 波の鉛直構造方程式は、 m を鉛直波数とすると、

$$m^2 = \frac{N^2}{gh} - \frac{1}{4H^2} \quad (3-1)$$

(g : 重力, N : プラントバイサラ振動数, h : equivalent depth
 H : スケールハイト)

一方 C_p を東進位相速度とすると、分散関係は、

$$C_p = \sqrt{gh} \quad (3-2)$$

となり、以上の 2 式から h を消去すると、

$$m^2 = \frac{N^2}{C_p^2} - \frac{1}{4H^2} \quad (3-3)$$

この式が、鉛直波長と位相速度との重要な関係式である。

$N^2 \approx 10^{-4} \text{s}^{-2}$, $H \approx 10^4 \text{m}$, $C_p \approx 10 \sim 30 \text{m/s}$ の代表的な値を考えると、

$$\frac{N^2}{C_p^2} \gg \frac{1}{4H^2}$$

であるから、鉛直波長 $\lambda_z = \frac{2\pi}{m} \approx \frac{2\pi C_p}{N}$ が得られる。成層圏では

$$N \approx 2 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$$

で、観測される Kelvin 波の位相速度 30 m/s を代入すると、 $\lambda_z \sim 10 \text{ km}$ となり、観測結果と一致している。ところが対流圏では、 $N \sim 10^{-2} \text{s}^{-1}$ を代入すると、 $\lambda_z \sim 6 \text{ km}$ となり、観測される季節内変動の鉛直波長 20 km に比べてかなり小さい。逆に鉛直波長 20 km を与えると、 $C_p = 30 \text{ m/s}$ が得られ、観測される 10 m/s に比べると相当速い位相速度が得られる。ところが、上昇流（下降流）域での非断熱加熱（冷却）によって、実質的な安定度 N^2 が減少することを考えると、お好みの C_p を得ることも可能になってくる。例えば熱力学方程式 1-2 で w に比例する非断熱加熱 Q を与えれば、安定度を小さくしたのと同じ効果をもたらすことを理解できると思う。そもそも Kelvin 波が重力復元力を基本とする重力波の一種であることから、安定度が悪くなることによって、長周期化することは容易に理解できよう。

以上の説明では、位相速度が遅くなることは理解できるが、非断熱加熱が重力復元力を打ち消すことによって、波動が次第に減衰するという問題が残る。しかし、鉛直方向に自由度を持つ simple な Kelvin CISK モデルでも東進波の不安定解が実際に得られている。そこで Lau and Peng (1987) と Chang and Lim (1988) では 2 つの鉛直モードが下層の鉛直流に比例する加熱によって、カップルして不安定解が生じていることを示している。

ここでは、Chang and Lim (1988) の説明を紹介していきたい。複数の鉛直モードを取り扱うので、(3-1)、(3-2) 式で、異なる equivalent depth h を持つモードが共存している。浅い h を持つモードほど、鉛直波長が短く、位相速度が遅いことは両式から明らかである。CISK モデルにおいては加熱は、境界層上端の鉛直速度に比例するように仮定されている。境界層の厚さは、対流圏の深さに比べて小さいため、境界層の上端での鉛直速度は、鉛直スケールが小さいモード、すなわち浅い h を持つ高次のモードとかかわりが深い。このことは、加熱が浅い h を持つモードにたいして敏感であることを意味している。実際の大気でも、水蒸気が下層に集中しているので、凝結熱の強さが下層の鉛直流に敏感であると考えられる。一方、深い h を持つモードは浅い h を持つモードに比べ位相速度が早いため、先行し始める。すなわち、非断熱加熱の強いところより前面（東側）で深い h を持つモードの上昇流が強くなる。この位相差によって、このモードが非断熱加熱によって減衰せずにむしろ強められる可能性がある。この不安定がもっとも強くなるところで 2 つのモードの位相差および振幅比が固定され、東進し増幅する 1 つの CISK モードとなる。このモードは浅いモードより早く、深いモードより遅く東に進み、前面（東側）に深い構造、後面（西側）に浅い構

造を持つという特徴を持つ。

この論文の最大の問題は、水平スケールの選択則を議論していないことである。一般に Kelvin wave CISKは短い波長ほど成長率が大いのに、季節内変動では、波数 1 スケールが卓越しているのはなぜであろうか。Hayashi and Sumi (1986) では、水平スケールの小ささには限界があると考えた。即ち、Ekman 収束の効率という制約から、赤道変形半径で小ささの限界が押さえられるというものであった。一方 Nakazawa (1988) はそのスケールで東進する SCC を GMS の OLR データのなかに発見した。その SCC は西進する短命な(せいぜい数日) クラウドクラスターの集まりによって構成されるというのが、興味深い事実であった。彼は、波数 1 の季節内変動、SCC、クラウドクラスターと 3 つのスケールからなる階層構造を提唱したのである。この階層構造が、Kelvin CISK の水平スケールの問題にたいしてどう答えようとしているのか、筆者にはまだ理解できていない。

季節内変動には必ず SCC が伴うのかという疑問もまだ残っている。ケーススタディだけでなく、統計的に調べてみる必要がありそうである。また、GCM でも Hayashi and Sumi (1986) 以外のモデルでは東進する SCC の存在は余りはっきりしない(例えば Hayashi and Golder, 1986)。図 4 は、筆者が FSU のモデルを水惑星化して長期間積分した結果から、降水量について赤道上で時間経度断面図を作ったものである。降水域は、東進というよりは定常、あるいは西進さえしばしばみられる。このモデルでも 200 mb の東西風を調べると、水平スケールは波数 2 ではあるが、40 日周期の東進成分がはっきり見られる。

このようなモデル間の差をもたらす原因について考察してみよう。Hayashi and Sumi (1986) が用いたモデルの放射スキームで、長波冷却が実際の 70 % 程度しか得られないという指摘がある (Sugi et al. 1989)。FSU のモデルでは現在の気象庁モデルとはほぼ同じ放射スキームを用いており、特に熱帯では強いダイマーによる冷却が得られる。そこで、放射スキームで与えられる冷却率を半分にしてモデルを走らせると、図 5 のように東進する SCC のようなものが現われる。長波放射の大きさは、大気の安定度や降水の絶対量に大きく影響するし、下降流域を強く冷やし、上昇流域を雲の影響で弱く冷やし、時には短波の吸収により暖めることさえありうる。すなわち、放射による加熱差が、鉛直流による断熱加熱差を打ち消すセンスで働くのである。

雲の放射に対する影響には、長波に対する温室効果と、短波にたいするアルベド効果が知られているが、海面水温を固定された水惑星モデルでは、アルベド効果は小さく、むしろ、雲の上部付近で、短波が暖める効果が強い。総合的には、雲は明らかに大気を暖める方向に働く。実際の大気では、アルベド効果により、海面水温が変化するため、雲による冷却効果もある程度あるはずだが、30 - 60 日のタイムスケールでこの効果がどの程度重要かはわかっていない。いずれにしても、陸面上では、アルベド効果と温室効果とどちらがまさっているか議論の多いところだが、海面上では温室効果が少なくとも季節内変動のタイムスケールではまさっていると考えてよさそうである。もっとも、上昇流域では凝結熱も多く放出されるので、そこでは放射の効果はそれほど重要ではないか

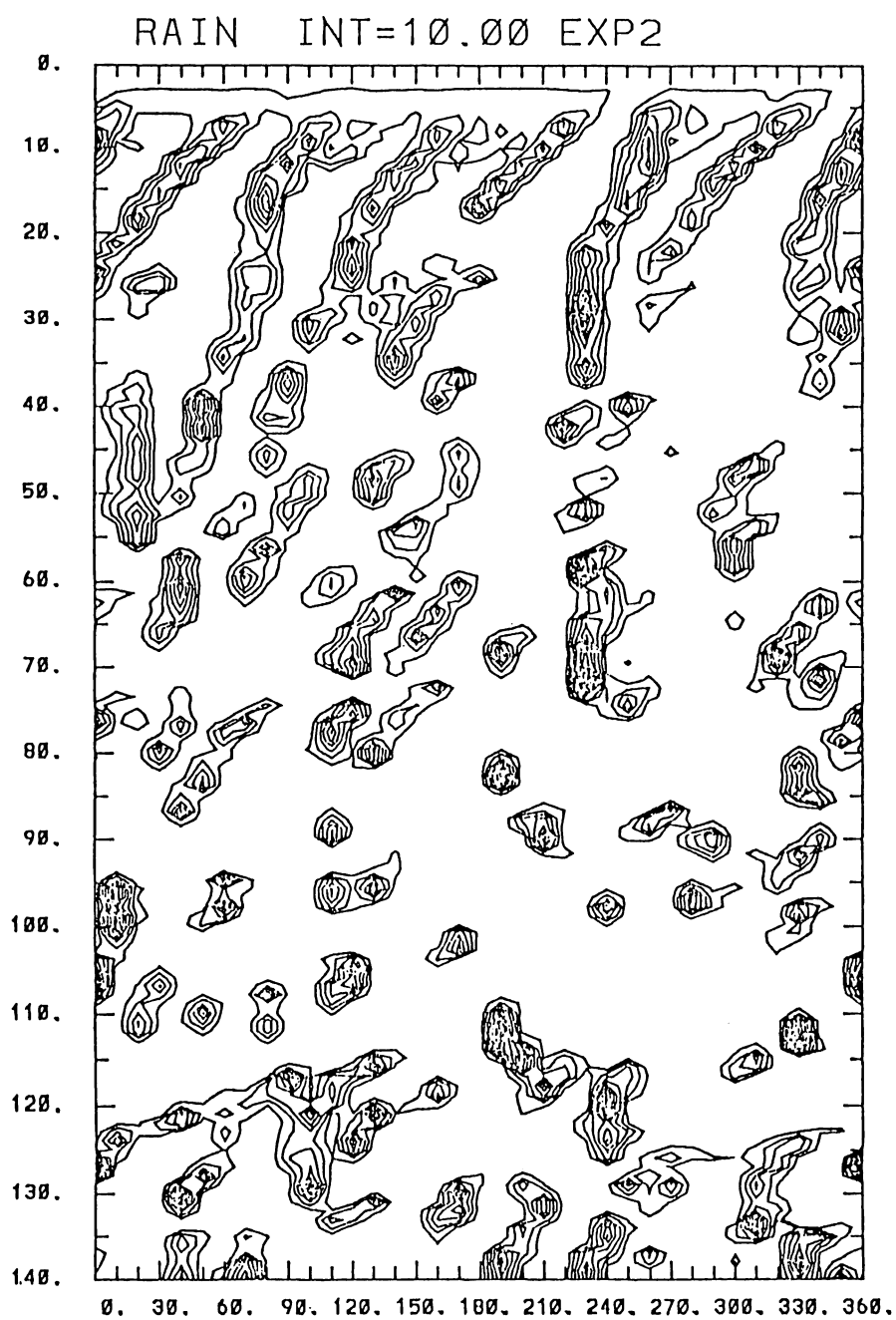


図4 FSUGCM水惑星版による赤道上の降水の経度時間断面図。コンター間隔は10 mm/day。

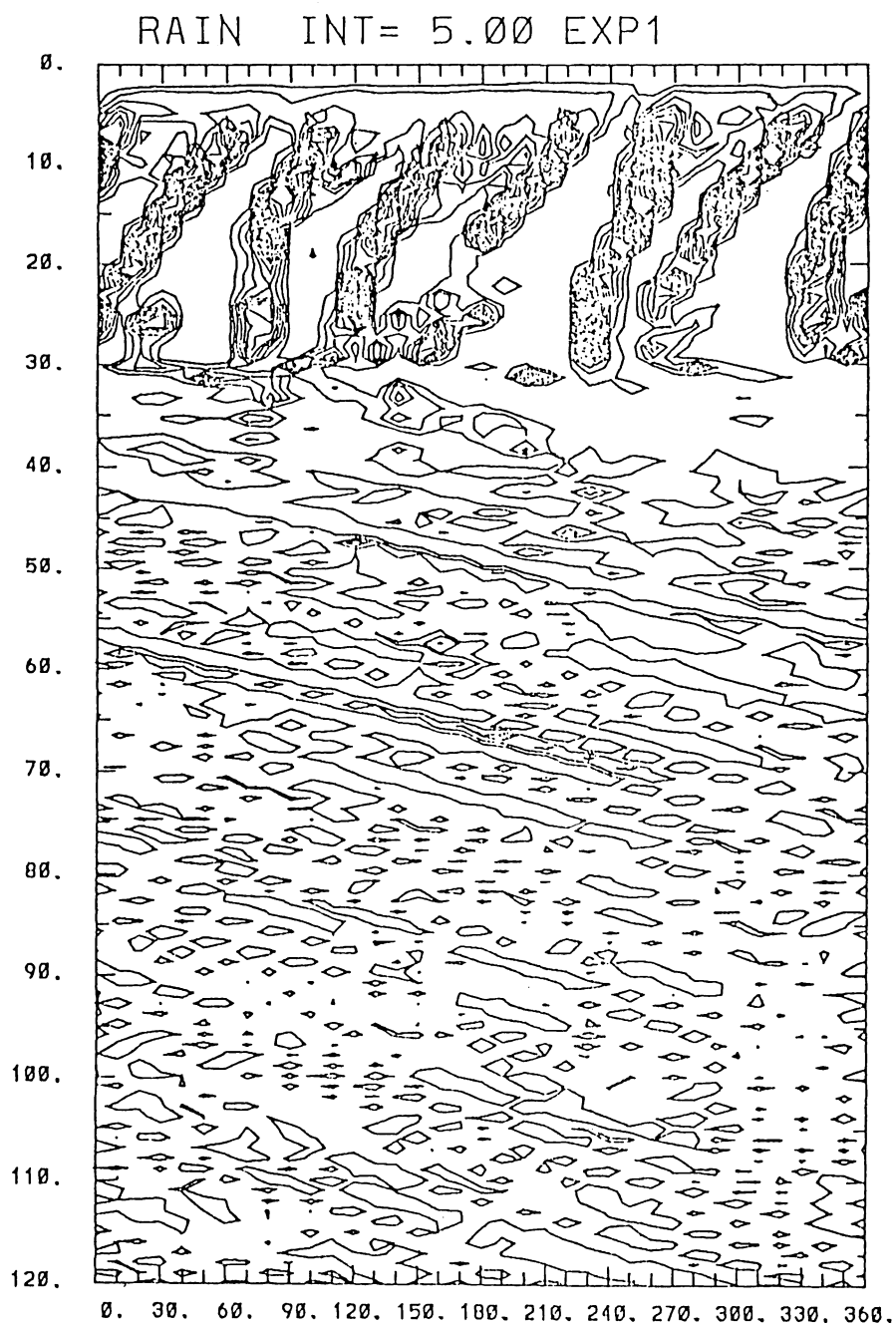


図5 図4の実験で30日目に長波放射の冷却率を50%にして、放射過程の中での雲を取り除いた場合の赤道上降水の経度時間断面図。コンター間隔は5 mm/day。

も知れない。しかし、下降流域で、放射によってどれだけ冷やすかは、下降流が長続きするかしないかに大きくかわってくる。そこで余り冷やさなければ、断熱昇温によって暖まり始め、下降流は存在できなくなるであろう。あるいは、Kelvin 波の形で下降流域が東進していくかも知れない。Kelvin CISK モデルにおいても加熱の与えかたには、鉛直流に比例した熱を与えるものと（この場合、下降流域では冷却が得られる）、上昇流域にのみ加熱する方法がある。Lau and Peng (1987) では、後者の方法をとって、“positive heating only” の非線形性から、波数 1 というスケールが選択されるメカニズムを提唱している。しかし放射過程を考慮すれば、“positive only” の仮定も行き過ぎで、下降流域でも冷却を与えるべきであろう。

ほかにも CISK 加熱において問題となるパラメータはいくつかある。まず第一に加熱の鉛直プロフィールで、10 m/s 程度の遅い東進速度を得るためには、500 mb より下に加熱のピークがないといけないといわれる。遅い位相速度に対応する浅い h を持つモードを効果的に励起するためと考えられる。ところが、Yanai et al. (1973) を初めとする熱帯域での熱収支解析によれば、500 mb よりやや上部に加熱のピークが存在する。これらの解析結果に合わせて、モデルの積雲対流のパラメタリゼーションが開発されてきたことから、GCM ではやはり加熱のピークは 500 mb よりやや上部に加熱のピークが存在している。Kelvin CISK らしき降水域の東進が見られているモデルにおける季節内変動の周期がせいぜい 30 日と短いのはそこに原因があると考えられる。もっとも、GCM における季節内変動の周期の短さに対して、大気海洋相互作用に原因を求める考え方もあることを付け加えておこう。その中で、Hayashi and Sumi (1986) の周期が 30 日ともっとも長かった理由は、当時の JMA モデルにおける Kuo スキームが雲底を第 4 層 (890 mb 付近) より上とする仮定をおいていたからかも知れない。境界層内の相当温位は一般に海面から上に行くほど小さくなっていくので、雲底を上げると、雲層内の相当温位が下がり、雲頂の高さも大きく下がる。この結果、加熱の鉛直スケールが小さく、しかも加熱のピークが比較的低い高度にあり、遅い位相速度に対応する浅い equivalent depth モードを励起しやすかったといえよう。雲底の決めかたが加熱の鉛直プロフィールにどう影響するかについては、数値予報別冊報告第 34 号の第 3 章で筆者が説明している。この方式は、予報モデルとしては雨のスピナップがよくない（予報初期に蒸発量に比べて降水量が少ない）という問題があって、現在の JMA モデルでは使われていない。このスピナップの問題は、アメリカの NMC やヨーロッパの ECMWF でも重視されてきた。Kasahara and Tamiya (1989) によれば、Kuo スキーム改良後の JMA モデルでは雨の降り出しに関しては、ほとんど問題がなく、NCAR から調査に来た笠原教授も驚いたようである。新しい JMA モデルにおける季節内変動の解析結果については、後で述べる。なお、FSU モデルでも Kuo スキームの雲底については、新しい JMA モデルと同様に、持ち上げ凝結高度 (LCL) を用いているため、加熱は比較的高い層で見られる。Kelvin CISK の研究で知られる、Chane and Lim (1988) の Lim が San Diego (California) で開かれた熱帯気象学会で筆者の発表を見て、この加熱分布では Kelvin CISK は働かないですねとコ

メントしていただくくらいであるから、FSUモデルでは、Kelvin CISK 抜きで季節内変動を作り出していたといえよう。

Kelvin CISK モデルにおけるパラメーターの中でもう一つ重要なのは、加熱の大きさそのものを決めるパラメーターである。注意して、Kelvin CISK モデルの論文を読んでもと、加熱量が上昇流による断熱冷却より小さいことがわかる。何度も繰り返して述べてきたように、Kelvin 波は、鉛直流による断熱加熱（冷却）を弾性力として存在する重力波であることから理解できよう。図6は、図4と同じ実験で、赤道上の400 mbにおいて鉛直流による断熱加熱と非断熱加熱との関係をプロットしたものである。上昇流域での非断熱加熱は、断熱冷却と同じくらいか、あるいはまさっているくらいあった。降水域が東進しなかった理由の一つと考えられる。上昇流があれば、渦のストレッチングによってロスビー波は励起されると考えられるので、西進は時々見られている。面白いのは下降流域で、2 K/day 程度までは下降流による断熱加熱を放射によって冷やすことはできるが、それを超過する断熱加熱は打ち消されずに温度の局所変化として残ってしまう。とくに雲のない領域での放射冷却には大きさの限度があるからである。この領域では、Kelvin 波のような重力波が東進する可能性があり、しかも放射冷却によって、断熱加熱量の一部が打ち消されているので、遅い位相速度で伝播するであろう。もっともこれは波動の減衰につながるもので、なぜ振動が生まれるのかという説明にはなっていない。遅い東進速度を説明できるという点で面白いと思う。

単純な Kelvin CISK モデルや水惑星モデルに対する最後のコメントを述べよう。これらはあくまでも架空の大気系に対するモデルであって、現実の大気との比較の参考にはできるかもしれないが、すべてをこのモデルで説明しようとするこ

は、時に危険である。例えば、季節内変動は波数1の水平スケールを持つ変動として知られているが、水惑星モデルでも波数1である必要はないであろう。海陸分布、海面水温分布のいずれをとってみても、熱帯は東西一様とはとても言いかねる。特に積雲活動の活発な地域はインド洋から西太平洋にかけての地域に限られており、波数2くらいのスケールでその地域で積雲活動の偏りがあれば、全球的には波数1に見える可能性がある。実際、FSU水惑星モデルでは波数2が卓越したが、海陸分布などを組み込んで、GCMとして積分していくと波数1が卓越した。

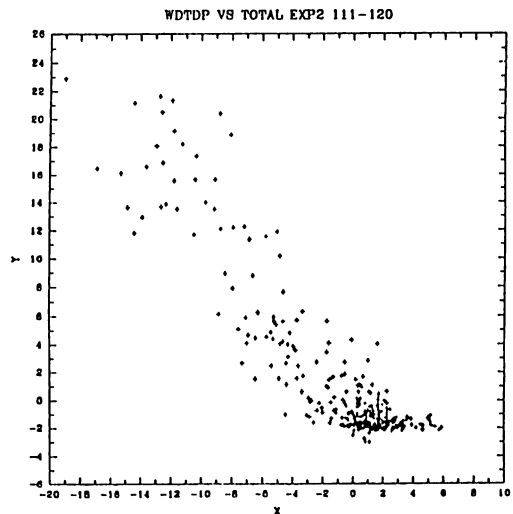


図6 図4の実験で赤道の各ガウス格子点の400mbにおける上昇流による断熱加熱（横軸）と非断熱（縦軸）との関係。単位は K/day。

ここで、FSUモデルでのインドモンスーンの季節内変動について触れておきたい。モンスーン活動に季節内変動が見られるか、またインド付近の降水域が季節内変動のタイムスケールで北進するかがポイントである。陸面上の水収支過程は、いわゆる強制復元法を用いて、ある程度ゆっくりしたタイムスケールでの地面の湿りや温度変化を取り扱えるようにしている。図7はインド付近の経度帯で平均した降水量の緯度時間断面図である。赤道付近からゆっくり北進する雨域がはっきり認められる。これにともなう、インド洋の上層で見られる東風ジェットやアラビア海下層での西風なども季節内変動のタイムスケールで変動し、インドモンスーンシステムそのものが季節内変動していることもわかった。またインドの地表面からの潜熱フラックスは、顕熱フラックスと位相を反対に保ちながら、やはり季節内変動のタイムスケールで変動していた。これは、降水量の変化にともなう、地面の湿りも季節内変動していたことを示している。地面大気相互作用がこのタイムスケールで重要であるかどうかは証明できないが、少なくとも可能性は大きいと考えられる。もしこの相互作用がモンスーンの季節内変動をもたらしているとするれば、その予測のためには、インド大陸やチベット高原などでの地面や植物の成育状況などの情報を用いることが必要になってくると思われる。これらの量は大気に比べて長いメモリーを持つと考えられるので、deterministicな手法での長期予報にとっては明るい材料であろう。

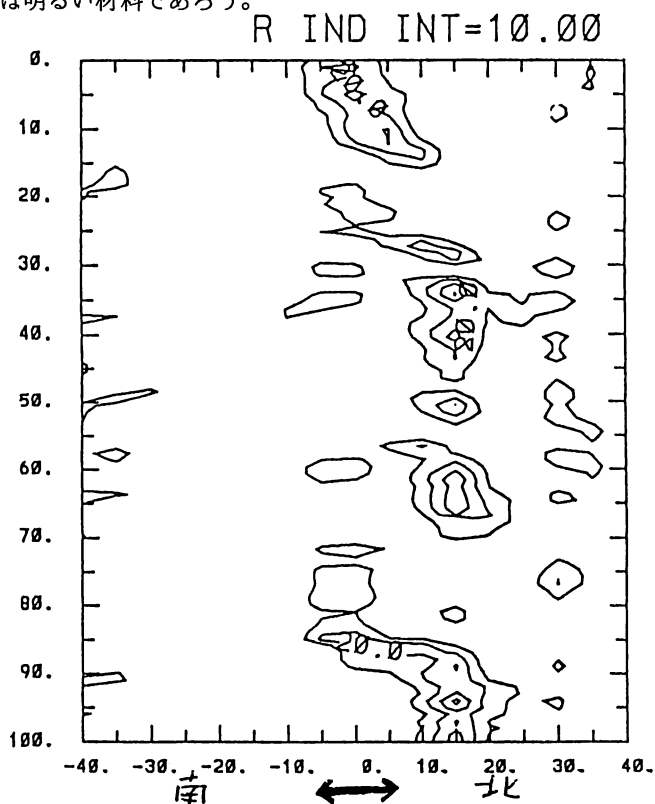


図7 東経60度から100度の間で平均した降水量の緯度時間断面図。コンター間隔は10 mm/day。初期値は1979年6月1日12Zである。

4. 季節内変動の予測

いつも季節内変動が規則的に現われていれば、熱帯地域での長期予報は極めて簡単なわけであるが、そう自然は甘くはない。季節内変動は季節によっても年によっても大きくその出方が違うことが知られている（例えば Kuma, 1990）。初期値問題としてこれらの変動を数値予報モデルで予測することができれば、降水に大きく依存する熱帯域の生活や産業に大きく貢献するであろう。中高緯度にとっても熱帯域の積雲活動の影響は大きいので、長期予報の精度の向上につながるものが予想される。特に日本付近では梅雨から盛夏にかけて、熱帯西太平洋での積雲活動やインドモンスーン活動とのつながりも大きいので、期待は大きい。さらに、台風の発生も季節内変動に伴うような大きなスケールの流れの場にコントロールされているようなので（例えば, Heta, 1990), 台風発生の長期予報も可能であろう。

GCMにおける季節内変動を調べた研究は、前にも述べたように数多くあるが、初期値問題としてこの問題に正面から取り組んだ論文は少ない。ECMWF の Ferranti et al.(1990) は、モデルの熱帯を客観解析に近づくように外力を与えながら積分していくと、中高緯度、とくに大平洋上の予報が著しく改善されることを示している。この実験は、季節内変動が盛んな時期における 20 日予報で調べられている。従って、熱帯を客観解析に近づけたということは、熱帯域における季節内変動をうまく予報できたということと対応している。もちろん、熱帯域で大きい系統誤差の問題と混同しないために、熱帯を初期の解析値に近づける比較実験もあり、その場合はうまく予報されていない。この研究の結論は、もし熱帯の季節内変動がうまく予報されたとすると、中高緯度の 20 日予報にもよい影響を与えますよ、というものである。前にも述べたとおり、この研究当時の ECMWF モデルでは季節内変動が現われなかったので、季節内変動そのものは予報されなかった。その点で、気象庁モデルを用いた Tsuyuki (1990) の研究は一步先を進んでいる。

Tsuyuki (1990) は、初期値問題として季節内変動をうまく予報し、その予報がうまく行っているときは、中高緯度の予報スキルも高いことを示した。この予報の成功は、解析システムを含めた気象庁モデルのレヴェルの高さも物語っていると考えてよいであろう。GCM でモデルなりに季節内変動を示すのとは一味違うのである。モデルの持つ季節内変動モードと解析で捕まえられた季節内変動に関する情報との整合性がある初めて、初期値問題として季節内変動が予測されるのである。例えば、前にも述べた雨のスピンアップがうまく行かないでしょう。その場合、せっかく客観解析で収束発散場がうまく表現されていても、凝結熱の不足により、これらが急速に崩れさってしまうのである。実際 1988 年以前の JMA モデルでは、予報開始と共に熱帯域の東西波数 1 の構造が急速に崩れさってしまうことが多かった。Kuma (1988) はそのモデルの性質を逆に利用して、凝結熱の効果を調べたものである。一方、客観解析においても、Baba (1987) で紹介されているように、静止衛星による TBB データを水蒸気情報に変換するといった JMA 独自の技術によって、熱帯の水

蒸気場や発散場の解析がすぐれているといった点を忘れてはならない。

数値予報課では 1989 年 11 月より生物圏の過程を取り入れた新しいモデルを T106 の高分解能でルーチン化した。この新しいモデルの検証と数値予報モデルの気候モデルとしてのパフォーマンスを調べるために 14 か月の長期間積分を行なって、解析を進めているところである。ただし、コンピュータの制約もあって T63 の分解能で積分されている。とは言え、巷の気候モデルに比べると T63 の分解能の高さは光っている。前に述べた、スーパークラウドクラスターの階層構造や、ブロッキングにおけるシノプティックな擾乱の役割などを考えてみてもわかるように、非線形の強い大気力学においては、小さなスケールの現象だからと言っても馬鹿にならない。したがって、たとえ気候モデルといえども、高分解能モデルを用いることの必要性が叫ばれてきている。第 3 章で紹介した FSU モデルはアメリカの大学における計算機事情もあって、T21 という低分解能で、大声でその結果を宣伝するには恥ずかしいほどであったが、この T63 モデルは少しは自信をもって人に発表できるモデルだと考える。実際、亜熱帯高気圧の張り出し方やモンスーンや梅雨などがうまく表現されている。その結果については、まもなくまとめられる予定である。ここでは、季節内変動に関係した図をいくつか紹介しておく。

図 8 は赤道における降水量の経度時間断面図である。縦軸の単位は day で上端の 31 は初期値から 31 日たった 12 月 1 日を意味している。1,000 km 位の水平スケールで西進する擾乱と、陸上で日変化しながら停滞する降水が目につく、いわゆる東進する SCC は見られない。西進するクラウドクラスターの活発な領域が東に動くように見えないこともないが、そのスケールは 6,000 km と大きい。Lau et al. (1989) も単純化されたモデルで似たような降水の振る舞いを示し、Wave CISK だと言っているが、彼らの結果でも、観測される SCC に比べてスケールがかなり大きい。同じ期間で 30 日から 60 日の周期でタイムフィルターした 200 mb 速度ポテンシャルの赤道での経度断面図を図 9 で見てみよう。周期 35 日程度の波数 1 で東進する成分がはっきり見られる。推論的な言い方で申し訳ないが、図 8 と図 9 から、積雲活動の振る舞いによって、波数 1 の東進モードを作っているというよりは、波数 1 程度の東進するモードがあって、それに合わせて積雲活動が活発になるというほうが、適当な気がする。いずれにしても、Hayashi and Sumi (1986) に較べると、運動場と積雲活動とのカップリングが弱いことは確かであろう。

では、モンスーン域での降水域の北進はどうであろうか、図 10 はインドモンスーン領域で 4 月 2 日から 9 月 26 日までの降水の南北時間断面図である。残念ながら季節内変動に対応する 1 日 1 度程度の降水域の北進ははっきりしない。北に向かう降水域の移動自体はあって、その周期は約 2 週間である。この程度の周期のモンスーン変動については、季節内変動より古くから知られていた。雲域の北進についても、Sikka and Gadgil (1980) の 5 年間の衛星観測の解析によると、40 日周期ばかりでなく、はやい周期の北進も見られ、平均的には 15 日程度の変動が卓越していた。また、275 日目辺りで赤道で活発になった降水については、比較的ゆっくり北上し、1 日 1 度位の速度と

XT DIAGRAM FROM DAY 31 TO DAY211
ON RAIN(MM/12H) NO TIME FILTER

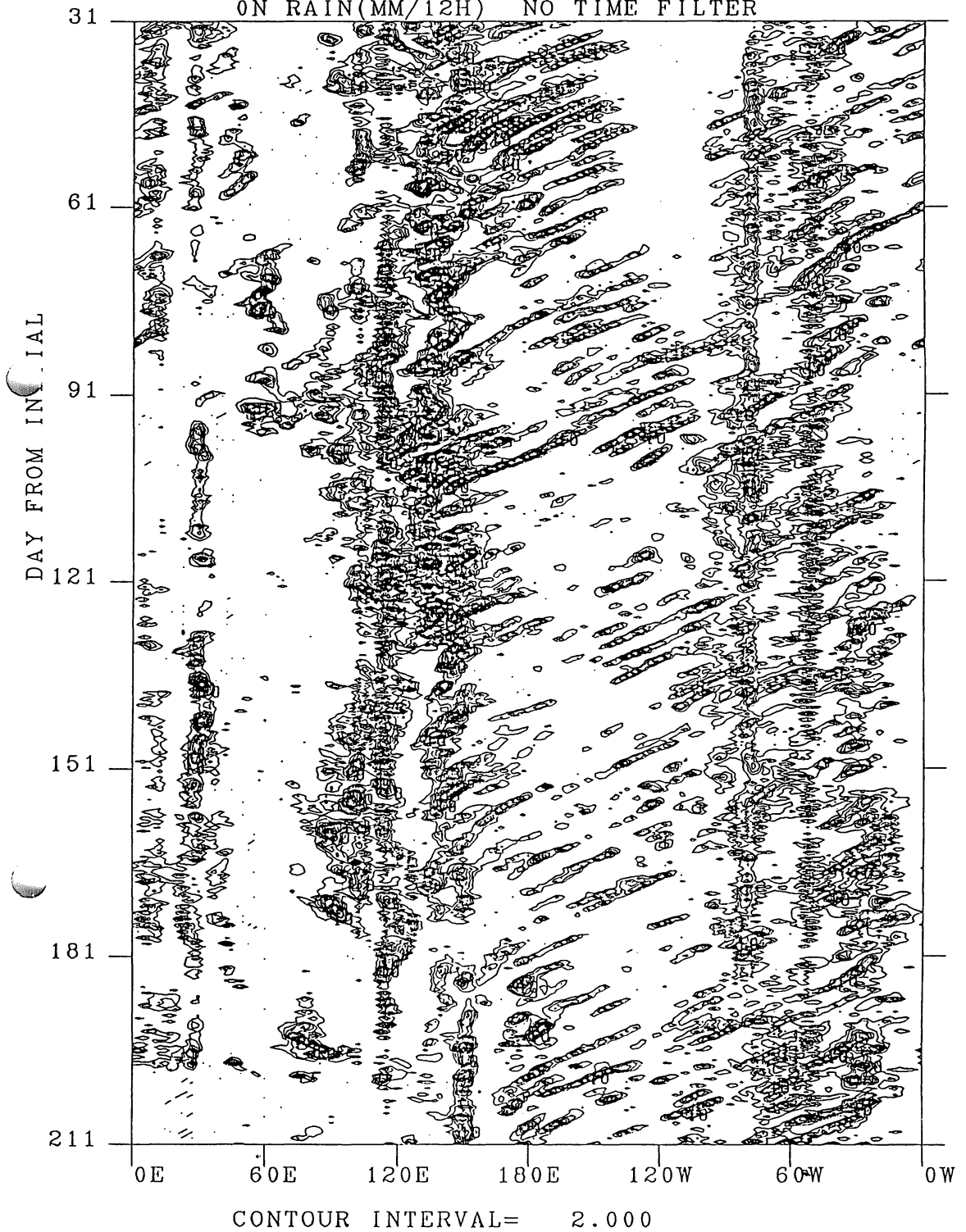


図8 気象庁全球モデルにおける赤道上の降水の経度時間断面図。サンプリングは12時間おきでコンター間隔は2 mm/12 hour である。

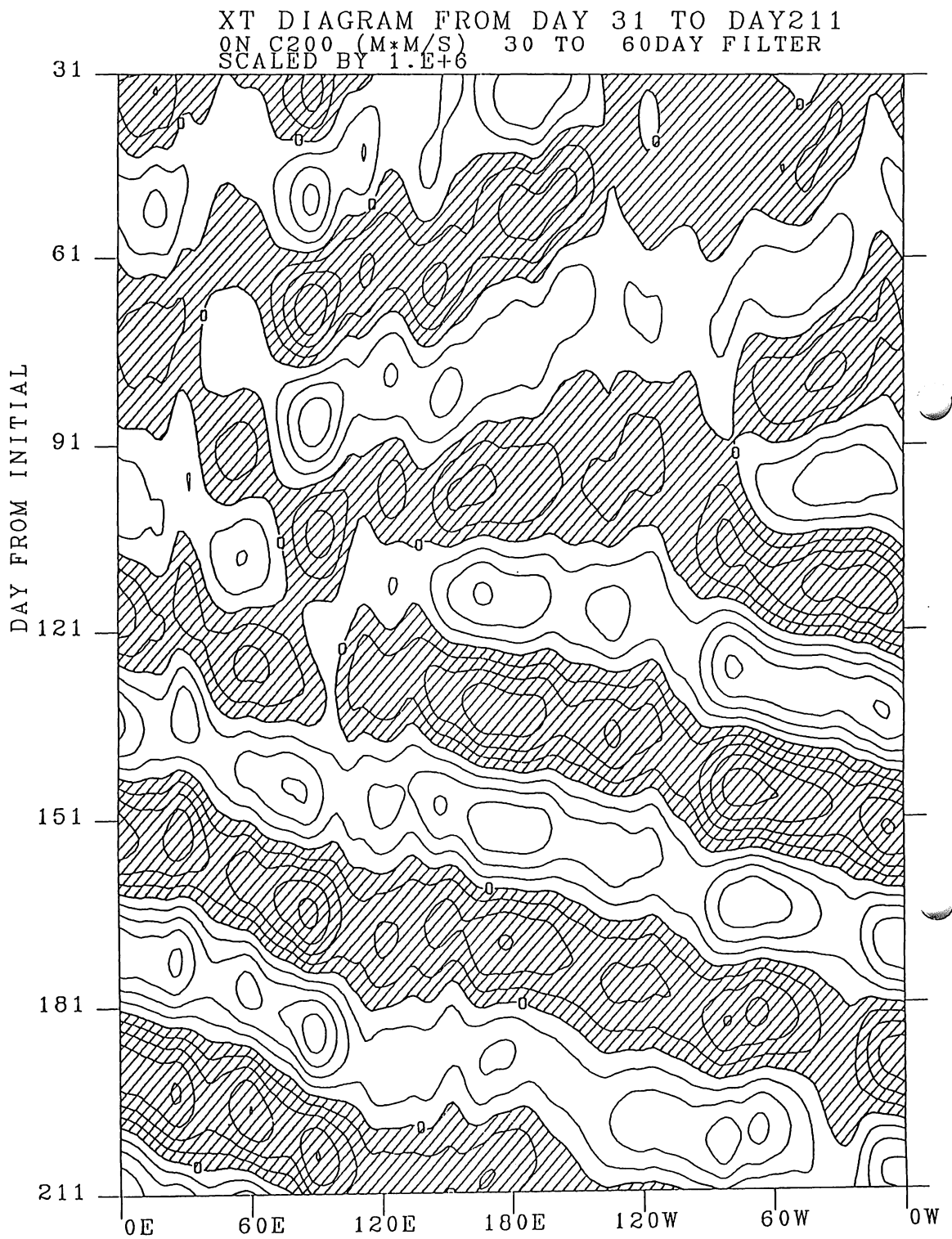


図9 気象庁全球モデルにおける30日から60日の周期でフィルターされた200 mb面での速度ポテンシャルの赤道経度時間断面図。コンター間隔は 10^6 (m^2/sec)

XT DIAGRAM FROM DAY150 TO DAY329
80E TO 90E RAIN(MM/DAY) NO TIME FILTER

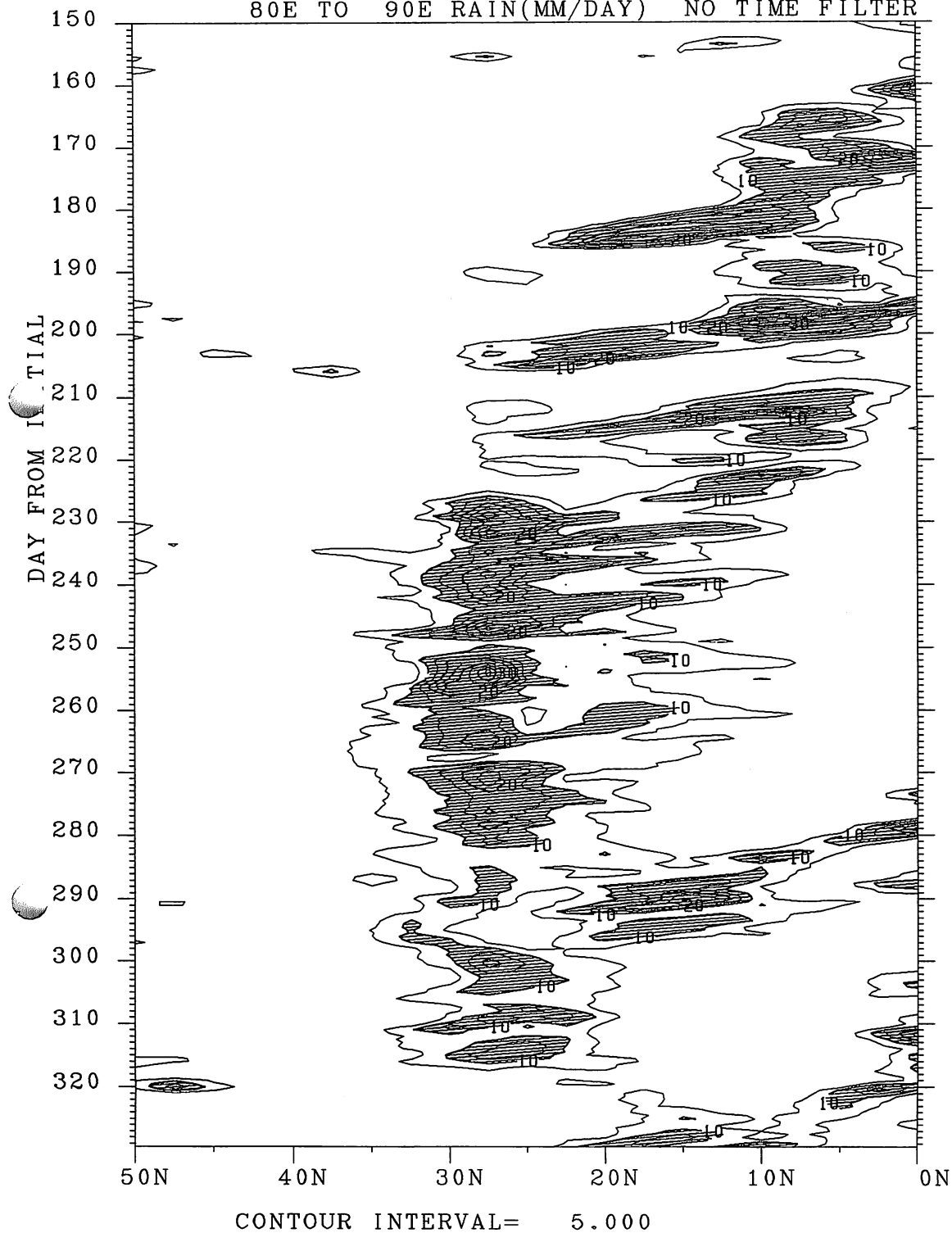


図10 気象庁全球モデルにおける東経80度から東経90度で平均した降水量の緯度時間断面図。
サンプリングは24時間おきでコンター間隔は5 mm/day。斜影部は10 mm/day以上の領域。

見ることもできそうである。いずれにしても、モンスーン領域では、15日から40日のタイムスケールで北上する降水領域があるということではできると思う。

おわりに

以上でモデラーの目から見た季節内変動についてのレビューを終わりにしたい。どうもこのブームについては、現象が知り尽くされたから終わりかけているとはいえそうもないようである。Kelvin CISKではどうも説明できそうもなさそうだ、と言う考えは、決して筆者だけの持つものでなく、例えば、Hsu et al.(1990)の解析では、Kelvin waveの存在が見られず、亜熱帯での Rossby waveの波列が見られ、Simmons et al.(1983)のバロトロピックな不安定モードが赤道域での対流を励起しているという見方を提出している。FSU GCMやJMA GCMにおける季節内変動においても中緯度の果たす役割が大きいことを示唆する材料がいくつかあるので、これからもモデルの季節内変動の解析を進めて、そのメカニズムの解明につなげたい。またモンスーンの変動については、15日周期を含めて、その予測を実用化する方向で開発を進めていきたいと考えている。梅雨や台風発生予測と我が国の気象業務にとっても重要な技術に発展する可能性もおおいにある。

できるかぎり論理的に記述することを心掛けたが、筆者の理解が浅い部分については、あいまいさや推論が混じったようである。ご了承ください。

参考文献

- Baba, A. 1987. Improvement of the estimation method of moisture data from satellite cloud soundings. *JMA/NPD Technical Report* 16
- Chang, C. P. 1977. Viscous Internal Gravity Waves and Low-Frequency Oscillations in the Tropics. *J. Atmos. Sci.* 34: 901–910.
- Chang, C. P. and Lim, H. 1988. Kelvin Wave-CISK: A Possible Mechanism for the 30–60 Day Oscillations. *J. Atmos. Sci.* 45: 1709–1720.
- Ferranti, L., Palmer, T., Molteni, F., and Klinker, E. 1990. Tropical-extratropical interaction associated with the 30–60 day oscillation and its impact on medium and extended range predictability. *J. Atmos. Sci.* (submitted)
- Hayashi, Y. and Golder, D. G. 1986. Tropical Intraseasonal Oscillations Appearing in a GFDL General Circulation Model and FGGE Data. Part 1: Phase Propagation. *J. Atmos. Sci.* 43: 3058–3067.
- Hayashi, Y. Y. and Sumi, A. 1986. The 30–40 day oscillations simulated in an “Aqua-Planet” model. *J. Meteor. Soc. Japan* 64: 451–467.
- Heta, Y. 1990. An Analysis of Tropical Wind Fields in Relation to Typhoon Formation over

- t the Western Pacific. *J. Meteor. Soc. Japan* 68 : 65–77 .
- Hsu, H.-H., Hoskins, B. J., Jin, F.-F. 1990. The 1985/86 Intraseasonal Oscillation and the Role of the Extratropics. *J. Atmos. Sci.* 47 : 823–839 .
- Krishnamurti, T. N. and Gadgil, S. 1985. On the structure of the 30 to 50 day mode over the globe during FGGE. *Tellus* 37 A : 336–360 .
- Kuma, K. 1988. The role of the equatorial heat sources in the western Pacific Ocean on the onset of the Asian summer monsoons of 1986 .
J. Meteor. Soc. Japan 66 : 399–417 .
- Kuma, K. 1990. A Quasi-Biennial Oscillation in the Intensity of the Intra-Seasonal Oscillation. *International J. of Climatology* 10 : 263–278 .
- Langley, R. B., King, R. W., Shapiro, I. I., Rosen, R. D., and Salstein, D. A., 1981. Atmosphere angular momentum and the length of day : a common fluctuation with a period near 50 days. *Nature* 294 : 730–732 .
- Lau, K.-M., Peng, L., Sui, C. H., and Nakazawa, T. 1989. Dynamics of Super Cloud Clusters, Westerly Wind Bursts, 30–60 day Oscillations and ENSO : An Unified View. *J. Meteor. Soc. Japan* 67 : 205–219
- Lau, K. M. and Peng, L. 1987. Origin of Low-Frequency (Intraseasonal) Oscillations in the Tropical Atmosphere. Part 1 : Basic Theory. *J. Atmos. Sci.* 44 : 950–972 .
- Lau, N. C., Held, I. M. and Neelin, J. D. 1988. The Madden-Julian Oscillation in an Idealized General Circulation Model. *J. Atmos.* 45 : 3810–3832 .
- Madden, R. A. and Julian, P. R. 1971. Description of a 40–50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J. Atmos. Sci.* 28 : 702–708 .
- Madden, R. A. and Julian, P. R. 1972. Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40–50 day period. *J. Atmos. Sci.* 29 : 1109–1123 .
- Neelin, J. D., Held, I. M. and Cook, K. H. 1987. Evaporation-Wind Feedback and Low-Frequency Variability in the Tropical Atmosphere. *J. Atmos. Sci.* 44 : 2341–2348 .
- Simmons, A. J., Wallace, J. M. and Branstator, G. W. 1983. Barotropic Wave Propagation and Instability, and Atmospheric Teleconnection Patterns. *J. Atmos. Sci.* 40 : 1363–1391.
- Sugi, M., Kuma, Tada, K., Tamiya, K., Hasegawa, N., Iwasaki, T., Yamada, S., and Kitade, T. 1989. Description and Performance of the New JMA Operational Global Spectral Model (JMA-GSM88). *JMA Technical report* 27
- Sui, H. S. and Lau, K. M. 1989. Origin of Low-Frequency (Intraseasonal) Oscillations in the Tropical Atmosphere. Part II : Structure and Propagation of Mobile Wave CISK

- and Their Modification by Lower Boundary Forcings. *J. Atmos. Sci.* 46 : 37–56.
- Swinbank, R., Palmer, T. N., and Davey, M. K. 1988. Numerical Simulations of the Madden and Julian Oscillation. *J. Atmos. Sci.* 45 : 774–788.
- Takahashi, M. 1987. A Theory of the Slow Phase Speed of the Intraseasonal Oscillation using the Wave-CISK. *J. Met. Soc. Japan* 65 : 43–49.
- Tsuyuki, T. 1990. Prediction of the 30–60 Day Oscillation with the JMA Global Model and Its Impact on Extended-range Forecasts. *J. Met. Soc. Japan* 68 : 183–201.
- Webster, P. J. 1983. Mechanisms of monsoon low-frequency variability : surface hydrological effects. *J. Atmos. Sci.* 40 : 2110–2124.

類似／反類似法――類似による長期予報の新しい展開？

小 泉 耕*

1. 類似法とは何か？

1 カ月から数カ月先の天候を予想しようとするときに、過去の年の中から今年によく似た年を選んで来てその年の経過を参考にしようというのはごく自然な発想と言える。類似法とは、現在の状況が過去のある年に似ているなら将来もその年と同じ経過をたどるであろうという考え方で、端的に言えば「歴史は繰り返す」ということになる。

この考え方は、単純であること、無前提であること（例えば 500 mb 高度と地上気温との関係が線形であるなどといった前提が不要であること）という特徴を持っている。しかし、いかに似ているといっても全く同一の状態が再現されているわけではないから初期値の段階でかなりの誤差が含まれており、それによる予測可能性の限界も無視できない（Lorenz, 1969）。このような長所短所を持つ類似法を応用して、Livezey and Barnston (1988)（以下では LB とする）は複数要素複数類似選択型類似／反類似法（Multi-field Multiple Analog / Anti-analog method）という手法で 3 か月平均気温の予想を行いそれなりの成績を挙げている。以下ではこの論文とその続報である Barnston and Livezey (1989) の内容を紹介しながら類似法の可能性を探ってみたい。

2. 何が似ているのか？－気候状態ベクトルの概念

類似法の考え方で予想を行おうとする場合、最初に問題となるのは何を規準に類似の度合を測るかということである。例えば大気の状態を 500 mb 高度で代表させるとして、ある年のある月の 500 mb 高度場が他の年の 500 mb 高度場とどのくらい似ているのかを測りたい場合、最も単純には各格子点ごとに 500 mb 高度の差をとってその 2 乗和が小さいものほど似ていると考えればよい。しかし緯度経度 10 度ごとに格子点をとっても北半球だけで 300 以上の点があるので、例えば極付近が似ている年と低緯度が似ている年とが同じように評価されてしまうといった不都合がある。また予想のためには 500 mb 高度だけでなく海面水温などの情報も取り込むことが望ましいので多くの要素を同時に扱える方法が必要になる。

こうした問題を解決するために Barnett and Preisendorfer (1978) は類似を測るために使えそうな要素をあらかじめ選んでおき、それらを用いて気候状態ベクトル (Climate State Vector, 以下では CSV と呼ぶ) を構成するというアイディアを提示した。類似度を測るためには、そのベクトル間

* 気象庁長期予報課

第1表 気候状態ベクトルの構成に使われた要素

Type	Coverage	Period	Source	Processing	Range*
700-mbar height	northern hemisphere extratropics	Oct. 1949–Nov. 1984	CAC	time average and rotated principle component analysis	0–7
700- to 1000 mbar thickness	same as height	same as height	same as height	same as height	0–6
SST	tropics and northern hemisphere extratropics	Oct. 1949–Feb. 1985	before 1980, COADS; after 1980, CAC	time and area averaging	0–5
Surface temperature	United States	Oct. 1949–Feb. 1985	CAC	time averaging and rotated principal component analysis	0–5
E + R index	Easter and Rapa Islands	Oct. 1949–Nov. 1984	CAC	time averaging	0–1

CAC indicates Climate Analysis Center; SST, sea surface temperature.

*Range of number of time series retained (over seasons).

第2表 気候状態ベクトルの構成のために各要素にかけられた重み

Series	Description	Mode Number	Weight	(Weight) ² = Variance
1	Sept.–Oct.–Nov. 700-mbar height mode	1	$0.4577/\sqrt{5}$	0.21/5
2		3	$0.4233/\sqrt{5}$	0.18/5
3		4	$0.4134/\sqrt{5}$	0.17/5
4		5	$0.3881/\sqrt{5}$	0.15/5
5		6	$0.3853/\sqrt{5}$	0.15/5
6		7	$0.3760/\sqrt{5}$	0.14/5
7	Oct.–Nov. 700- to 1000-mbar thickness mode	3	$0.4234/\sqrt{5}$	0.18/5
8		4	$0.4210/\sqrt{5}$	0.18/5
9		6	$0.4114/\sqrt{5}$	0.17/5
10		8	$0.4017/\sqrt{5}$	0.16/5
11		9	$0.3969/\sqrt{5}$	0.16/5
12		10	$0.3942/\sqrt{5}$	0.15/5
13	Oct.–Nov. western extratropical Pacific SST		$0.4472/\sqrt{5}$	0.20/5
14	Oct.–Nov. California SST		$0.4472/\sqrt{5}$	0.20/5
15	Oct.–Nov. Caribbean SST		$0.4472/\sqrt{5}$	0.20/5
16	Oct.–Nov. western tropical Pacific SST		$0.4472/\sqrt{5}$	0.20/5
17	Oct.–Nov. eastern tropical Pacific SST		$0.4472/\sqrt{5}$	0.20/5
18	Sept.–Oct.–Nov. E + R SLP		$1.000/\sqrt{5}$	1.00/5
19	Nov. surface temperature mode	1	$0.5394/\sqrt{5}$	0.29/5
20		2	$0.4960/\sqrt{5}$	0.24/5
21		3	$0.4550/\sqrt{5}$	0.21/5
22		4	$0.4336/\sqrt{5}$	0.19/5
23		5	$0.2608/\sqrt{5}$	0.07/5
Total				1.00

Series 1–6, series 7–12, series 13–17, series 18, and series 19–23 each constitute one fifth of the total weight. SST, sea surface temperature, SLP, sea level pressure.

の距離を測ればよい。CSVを作るのは多岐にわたる気候状態の情報をできるだけ少数の値で表現するためであり、そのためにはいくつかの方法が考えられるが、LBでは次のようにしてCSVを構成している。

① CSV構成のために、それまでに積み重ねられてきた解析的研究の成果に基づき、データを選び出す（第1表）。高度と層厚については Rotated PCA をほどこしてデータの自由度を減らした上で天候に関係のありそうな主成分のみを使っている。また海面水温のデータとしては15の監視海域を定めてその領域平均値を用いている。E + R index は ENSO の指標として採用されている。

② 前項で選ばれた23の要素に対して第2表に示すような重みをかけた上で主成分分析を行う。重みは高度・層厚・海面水温・地上気温・E + R index のそれぞれの分散が全体の分散の1/5になるように与えられている。

③ 主成分分析で得られた主成分の主成分得点を並べたものが CSV となる。幾つの主成分を並べるかは任意性があるので、予報成績の検証によって最適な数を決める。

3. 似てないものも役に立つー反類似年の概念

CSV ができてしまえば、あとは CSV 同士の距離を計算して距離の近い年を選び出せば良い。こうして選び出された年が類似年である。しかし、類似法に限らず統計的な予測法を用いようとする場合に、常に問題になるのはサンプル数が少ないということである。ここでも、利用できるデータは高々数十年であるから、その数十個のサンプルの中から似ている年を選び出さなければいけないということになる。大気の状態の多様性を考えるとサンプル数は多ければ多いほど良いので、LB では反類似年を使ってサンプル数を増やすことを試みている。

ある年の CSV の符号を逆にすると今年の CSV に近くなるような場合には、この年を反類似年と呼び、反類似年の経過は符号を変えて今年に現れると考える。例えば CSV が 500 mb 高度のみで構成されているとすると、反類似年とは「500 mb 高度の平年偏差の符号を逆にすると今年に似ている」というような年のことである。このとき反類似年のその後の気温が「高い」になったとすれば今年「低い」になると考えるのである。反類似年を用いれば個々の年は通常の CSV と逆符号の CSV という2つのサンプルとして扱うことができるので、サンプル数を2倍にすることができるのである。

4. 最も似ているものが最も役に立つか？ー類似年数による成績の違い

さていよいよ予測を行うわけだが、直感的に考えると最も距離の近い年、即ち最も似ている年を選び出すことができれば、その年のその後の経過を似て今年の予測とすれば良いということになる。ところが LB ではこの直感に頼らず、次のようにして客観的に予測を行っている。なお、ここでの予測は気温が「高い」「並」「低い」のどの階級に入るかについて行う。

①距離の短い順にいくつかの年を選ぶ。

②選んだ年の被予測期間の気温がどの階級に最も多く入るかを調べてその階級を予測階級とする。

当然ながら①でいくつの年を選ぶかによって予測結果は変わってくる。もし上の直感が正しいとすれば、選ぶ年の数が1の時に最も精度の良い予測がなされているはずである。第1図は選ぶ年の数を変えたときの予測のスキルスコアの変化を表したものであるが、これを見ると予測の精度が高いのは選んだ年の数が10前後の時であることがわかる。つまり、最も似ている年だけを使った予測が最も良いわけではない。(更にこの図から反類似年の採用がスキルの向上に大きく貢献していることも分かる。)

5. 季節によるスキルスコアの違い

第2図はこの方法による予報のスキルスコアを月別に示したものである。季節によってCSVの構成要素を取捨選択したり、CSVの次元数を変えるなどの調節が行われている。冬と夏にスコアが高く、春と秋に低いというスコアの季節変化は、気温における気候ノイズの季節変化に対応している(Madden, 1981)。

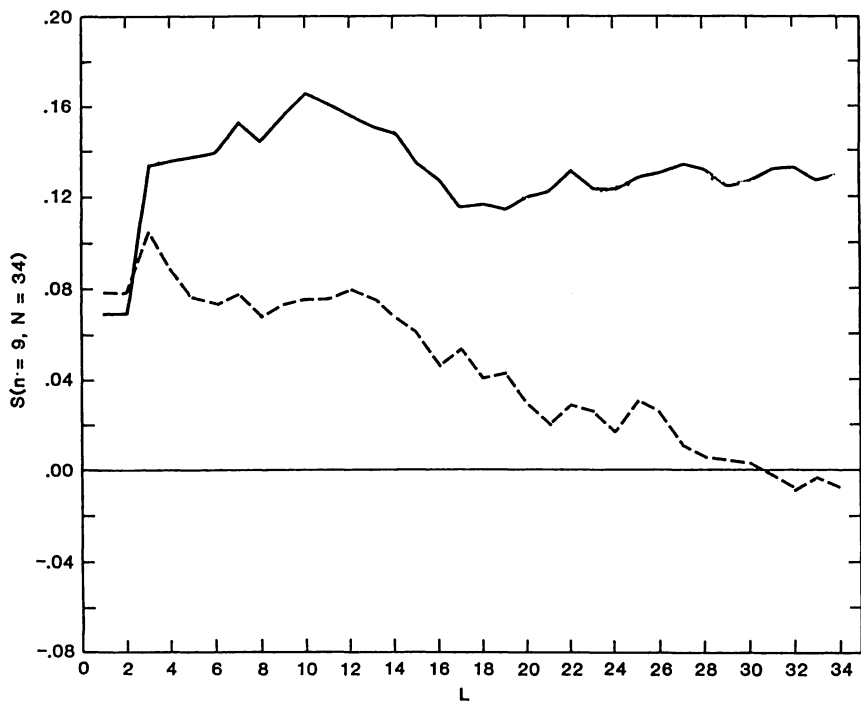
6. 考 察

日本においても類似年は長期予報の手法のひとつとして使われてきた。しかし、従来の使われ方は主として最も似ている年を絞り込んで参考にするといったものであった。類似年を複数選択した方が成績が良くなるというこの論文の結果が日本の場合にも当てはまるとすれば、複数選択の手法を取り入れることによってスキルの向上が期待できる。また反類似の概念もサンプル数の増加という点で有用であると思われる。

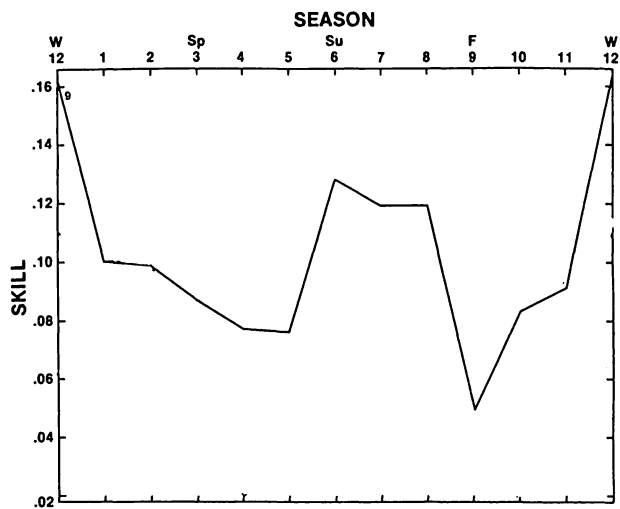
一方で、CSVの構成がこの手法を使うに当たっての最も重要なポイントであることは間違いない。LBではCSVの構成のためにそれまでの解析的な研究の成果を大いに取り入れており、日本でこの手法を用いるとすれば、CSVの構成にこれまで積み重ねられてきた解析的研究の成果を反映させていくことが重要である。

現在長期予報課では、月平均の500 mb高度のみを用いたCSVによる月平均気温予想の実験を行っており、ある程度の成果が得られている(小泉・前田, 1990)。

LBでは、季節によってCSVの構成要素・CSVの次元数・類似年数など最適な組合せにするために、かなりの労力を費やしたものと推察されるが、我々も今後、それだけの労力を費やすことによって、従来さほどの重きを置かれていなかった類似法を重要な予測手法のひとつとして利用できるようになるのではないだろうか。



第1図 用いる類似年の数による冬（12，1，2月の3カ月平均気温の予報）のスキルスコアの変化。実線は類似年と反類似年を用いた場合，破線は類似年のみを用いた場合。



第2図 月ごとのスキルスコアの変化。横軸に示されている月から始まる3カ月平均気温の予測のスキル。

参考文献

- Barnett, T. P. and R. W. Preisendorfer, 1978 : Multifield Analog Prediction of Short-term Climate Fluctuations Using a Climate State Vector, *Journal of Atmospheric Science* 35, 1771–1787
- Barnston, A. G. and R. E. Livezey, 1989 : An Operational Multifield Analog / Anti-Analog Prediction System for United States Seasonal Temperatures. Part II: Spring, Summer, Fall, and Intermediate 3-Month Period Experiments, *Journal of Climate* 2, 513–541
- 小泉 耕・前田 修平, 1990 : 類似 / 反類似法による月平均気温予想と長期予報の確率表現, 日本気象学会平成 2 年度春季大会予稿集
- Livezey, R. E. and A. G. Barnston, 1988 : An Operational Multifield Analog / Anti-Analog Prediction System for United States Seasonal Temperatures Part I. System Design and Winter Experiments, *Journal of Geophysical Research* 93, 10953–10974
- Lorenz, E. N., 1969 : Atmospheric Predictability as Revealed by Naturally Occurring Analogs, *Journal of Atmospheric Science* 26, 636–646
- Madden, R. A., 1981 : A Quantitative Approach to Long-Range Prediction, *Journal of Geophysical Research* 86, 9817–9825

北半球積雪被覆面積の年々変動

— NOAA/NESDIS data の解析 —

岩 崎 友 彦*

<要 旨>

この研究の目的は、気象衛星データを用いて北半球積雪被覆面積の年々変動を調べることである。積雪被覆データに主成分分析を行なうと、まず第一主成分(40%)としてユーラシアと北米における同時降雪パターンを得た。このスコアは北半球の多雪年時系列と一致する。また第二主成分(20%)ではユーラシア・北米における大陸東西での降雪の逆相関パターンを得た。これは空間スケールが大陸より小さな積雪変動の重要性を示唆する。さらに主成分分析で得た積雪の主変動領域について時系列を精査して、ユーラシア・北米両大陸の積雪年々変動を代表する領域をそれぞれ特定した。これら2領域の時系列はユーラシアと北米における多雪年の1年ラグを明瞭に示している。

1. 序と目的

気候システムにおける長周期変動現象を考える上では長期記憶装置が重要である。一般認識として、長期記憶は海洋・雪氷と思われており、今回はその両者を検討する。

積雪はアルベド・顕熱移流・融雪水の蒸発という過程で、海洋は SST を通して伴に大気に対する正・負の熱源や水蒸気源として働く。この研究では、大気―地表面相互作用理解の第一歩として、あまり知られていない積雪変動を中心にその実態を調べる。

2. 戦 略

積雪を扱った従来の研究では、一挙にユーラシア平均をとって相関を考えたり(図1, Hahn and Shukla, 1976)ということが多い。これらは“予報”という立場からは非常に有効な面もあるが、現象の解釈は困難である。やはり北半球規模の積雪の振る舞いは大気大

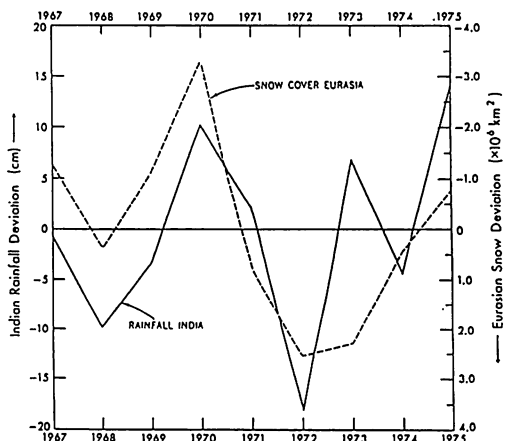


図1：ユーラシア大陸(52°N以南)の積雪(点線)とインド全域でのモンスーン降雨(実線) (Hahn and Shukla, 1976)

* 京都大学・理学部

循環との関連が密であろうから、ユーラシアのように広大な地域では積雪変動に地域的特性が予想される。そこで、まず客観的に北半球の積雪変動を素朴な目で見る。次に積雪面積の特徴的な年々変動を他の気象データ（大気・海洋）と照合する。

3. 解析資料

積雪：NOAA/NESDISの月平均積雪被覆。北半球中・高緯度を89×89メッシュに分け雪の有・無を“1”・“0”で与えてある。

1967/Jan.～'87/Dec.

なお、ヒマラヤ域のデータは信頼性に問題があるので用いていない。

大気：NMC.北半球(20°N～90°N)月平均の高度・温度場。5°×5°grid, 1000, 850, ……………, 50, 10 mb (14 level).

1967/Jan.～'82/Dec.

海洋：NOAAの月平均全球海水面温度。

2°×2°grid, 1970/Jan.～'84/Dec.

4. 解析結果

4-1：北半球積雪変動

Climatologyとしての雪の振る舞いは、10月に全域的に降雪期に入り積雪面積は1月下旬～2月にピークを迎える。3月には融雪期に入り6月になると雪は高緯度・大山岳域(高地)・グリーンランドにしか残っていない。この間、平原部では積雪域の前進・後退がスムーズに行なわれる。まず(図2)は1月についてデータ期間中(21年間)に各gridが何年間雪に覆われたかを2年ステップで示したも

SNOW FREQUENCY, MONTH= 1

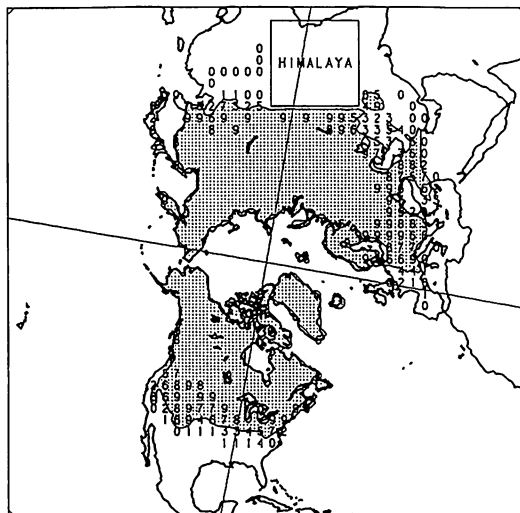


図2：1月の積雪頻度、実線は平均雪境界線

SIMILARITY INDEX : MONTH= 1
KEY GRID ; KJ=60, KL=69

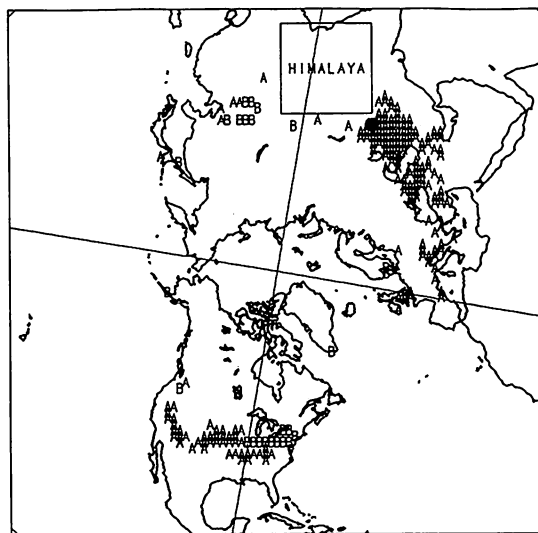


図3：積雪年々変動時系列の相似度、Key grid（黒点）の時系列にたいして正相関のgridをA・負相関のgridをBとした。

のでコンターは平均雪境界を表わす。ついで、平均雪境界＝雪変動大地点を Key gridとして積雪年々変動の相似度を多くの Key grid について調べた。その代表的な特徴は(図3)のような、ユーラシアの東西・北米の東西で雪の年々変動が逆相関の sense となっていることである。なお、図中の記号について“ A ”は雪の有・無が13年以上 Key grid の積雪時系列と一致する grid (正相関)を、“ B ”は8年以下しか一致しない grid (負相関)を示す。

さらに、この特徴を客観視するために主成分分析 (EOF) を行ない、冬期に見られる特徴を2つのパターンに分類した。(図4)は1月の第1主成分 (40%) で基本的にユーラシアと北米での同時降雪パターンを示す。また、この成分のスコアは北半球平均の積雪時系列と同 sense である。さらに、Hahn and Shukla (1976), Dickson (1984) によると北半球多雪年の時系列と翌夏のイン

EOF 1 (43.3%) ; MONTH= 1, ND= 8, CV

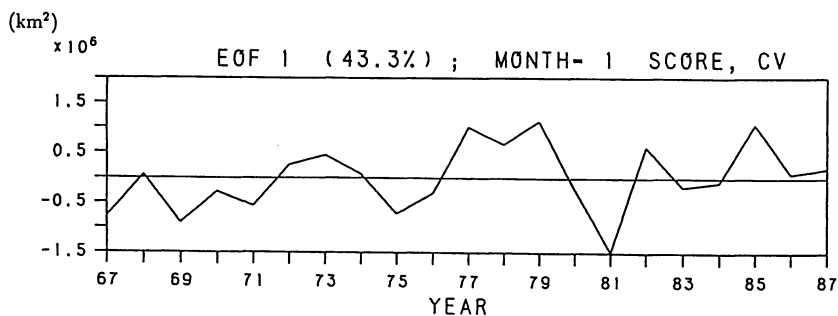
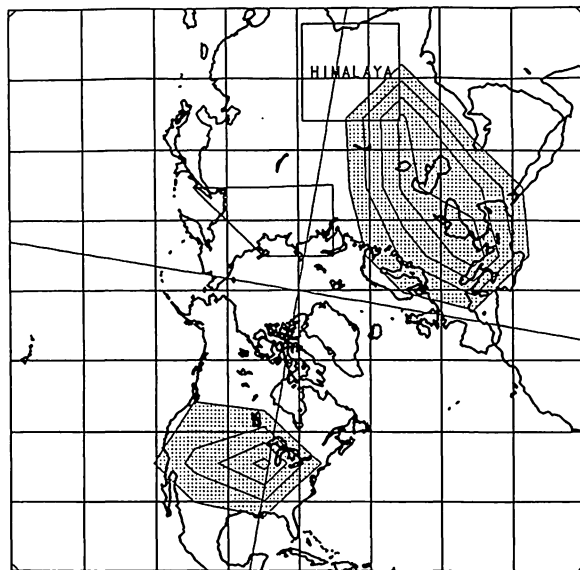


図4：1月の第1主成分と時系列

EOF 2 (19.5%) ; MONTH= 1, ND= 8, CV

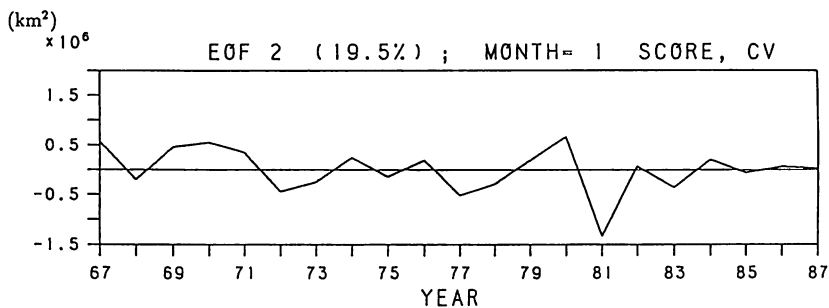
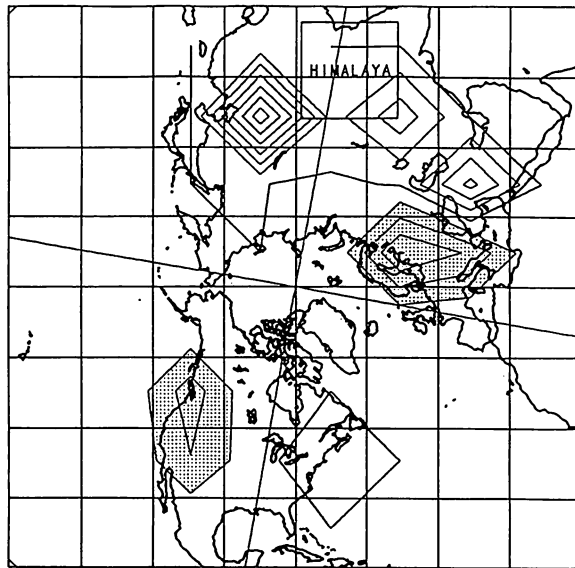


図5：1月の第2主成分と時系列

ドモンストーン指数とは負相関にあるという。Yasunari (1987) はエルニーニョ現象を引き起こす陸面－海洋過程のコネクターとしての重要性を夏のインドモンスーンに求めている。いずれにせよ、積雪の年々変動は、ENSO－サイクルのなかで有意な役割を担っていると考えられる。

(図5) は第2主成分 (20%) で、ここには (図3) で見たユーラシア東西・北米東西での大陸東西逆相関パターンが現われる。なお、このパターンは11～4月の間ずっと主成分上位に出てくる。

次に、これら特徴的な2つの主成分について、雪変動の季節内持続性を調べるためパターンを構成している代表地域内の領域平均積雪時系列を月を追って精査した。紙面の都合で全ては挙げられないが、ここでは大陸東西逆相関パターンについて示す。(図6) はユーラシアの代表地域における11～4月の領域平均積雪時系列で図中の矢印は2月から3月にかけての融雪量を示す。尚、点線

は12月・実線は2月・一点鎖線は3月の時系列である。

各年とも12～2月にかけて積雪は増大し3月から融雪が始まる。矢印に注目すると12～2月に多雪であった年は2～3月にかけての融雪量が他の年と比較して非常に大きいことが分る(東ユーラシア)。これは、いわゆる多雪・少雪という年々の特徴は12～2月の間だけ維持され3月には年々の特徴は不明瞭になることを意味する。また、西ユーラシアでは年々変動の特徴は東ユーラシアほど際立

BOX AREA

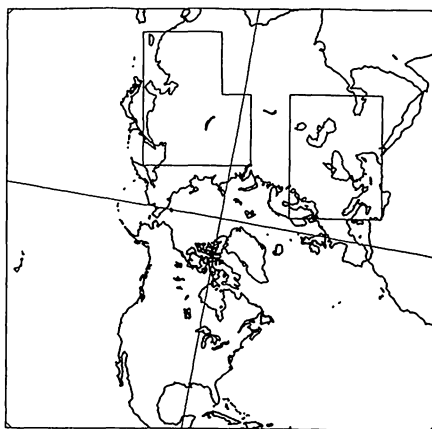


図6：ユーラシアの代表地域

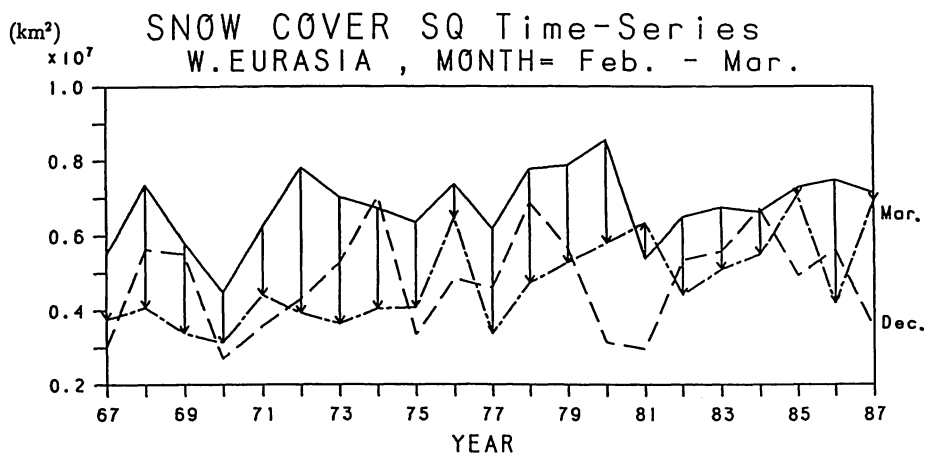
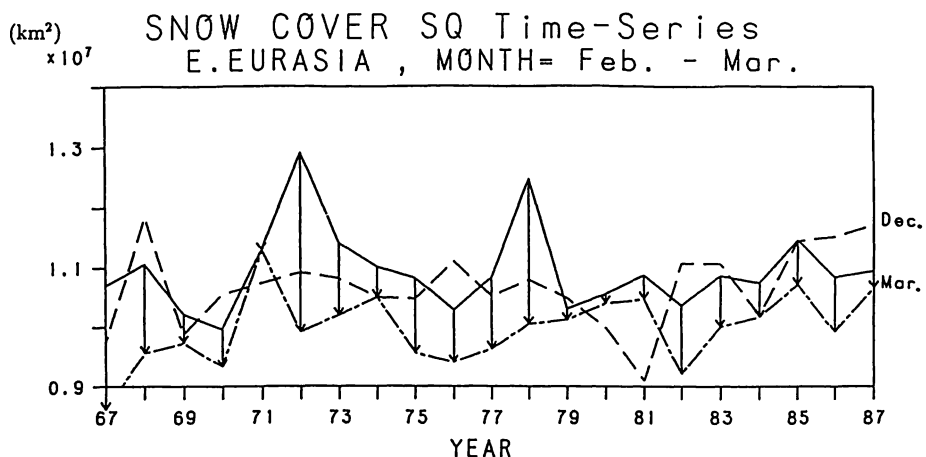


図7：代表領域平均の積雪時系列, 12月(点線)・2月(実線)・3月(一点鎖線)
矢印は2月から3月にかけての融雪量を示す。

たない。

以上のように代表地域内の年々変動時系列の季節内持続性を検討した結果、北半球の2大陸における積雪変動を代表する地域を特定することができた。ユーラシア大陸ではバイカル湖を中心とする東部地域、北米大陸では東西逆パターンのシグナルが弱く、しかも殆ど中西部の雪変動が支配的なので、ここでは特に領域特定はせず全北米大陸を代表域(図8参照)とした。

また、気候変動を考える上では大規模に雪が多い・少ないという事が重要なので climatological に降雪のピークとなる12～2月の積算雪面積を雪のIndexとして上述の2地域について時系列を作った。すると(図9)に

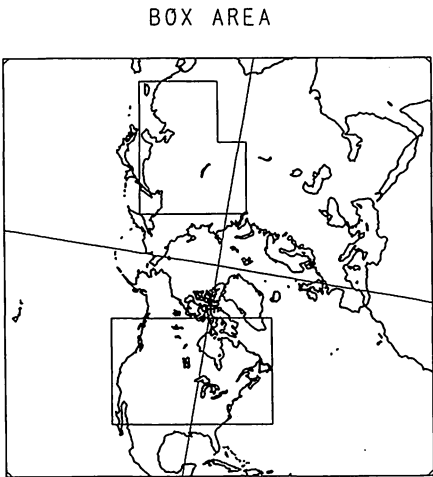


図8：大陸規模の積雪年々変動を代表する地域。

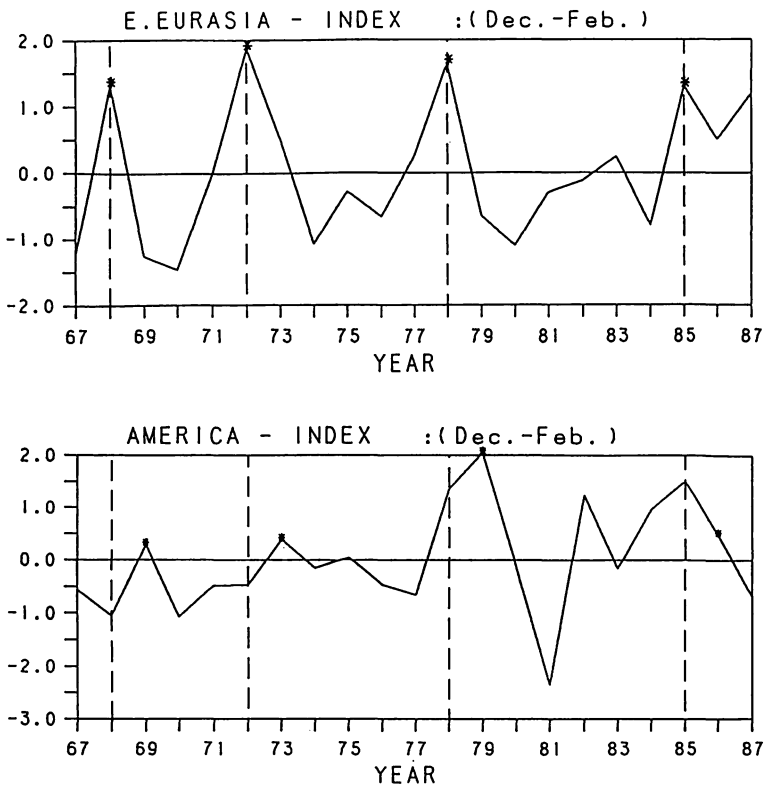


図9：2大陸の代表領域平均の積雪時系列
点線はユーラシア大陸の多雪年を示す。

あるように、データ期間中の全ての北米多雪年がユーラシア多雪年より1年遅れていることが明らかになった。(ラグ相関係数=0.52) この事実は従来の研究のように大陸平均という粗い見積りでは見えなかったものである。この多雪年の大陸間1年ラグは、この研究の重要な発見の一つである。そして次なる問題は「多雪年の大陸間1年ラグをもたらす夏期間の記憶は何か?」ということになる。

4-2: 雪をもたらす大気循環

「夏の記憶は何か?」を考える前に、ユーラシア・北米に多雪をもたらす大気循環の特徴を押える。(図10)はユーラシア多雪の'72年12月・500mb高度場の波成分である。ユーラシア東部はオホーツクのtrough・シベリアのridgeに挟まれ、極域からの水蒸気補給による降雪が予想される。(図11)は北米多雪の翌'73年であるが、今度は北米が水蒸気補給を受けやすい気圧配置となっている。このように高度場は各大陸の多雪年に対応して矛盾のない形態となっている。

このような高度場の特徴について、いわゆる“多雪年”というEpisodic yearはO.K.として、その他の年も含めて「何か高度場の雪に対するIndexはないか?」と考えた。そして雪の時系列と高度場の各gridとで相関をとってみると、波数3型のパターンが現われた。(図12)は60°Nに沿う波数3の振幅とユーラシアの雪Indexとの相関である。これより波数3の振幅の大・小とユーラシアの雪の多・少とは強い線型関係であることが分かる。(相関係数=0.63)これは、積雪の1年ラグという事実が南方振動(SO)とも関連があることを示唆する。(Iwasaki and Hirota, 1988)

Z-WAVE (500mb) ; KY-72, KM-12

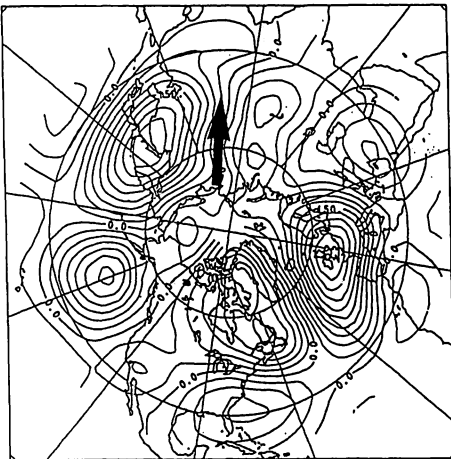


図10: 1972年12月(ユーラシア多雪年)
500mb高度場の波成分

Z-WAVE (500mb) ; KY-73, KM-12

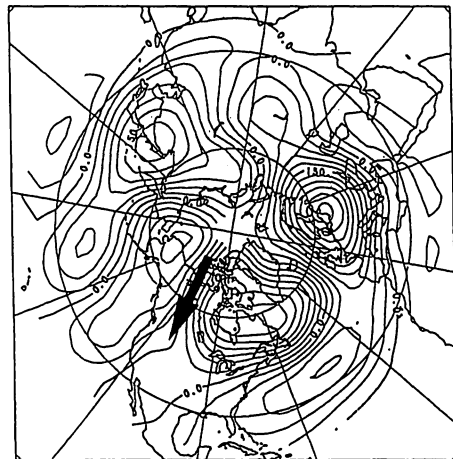


図11: 1973年12月(北米多雪年) 500mb
高度場の波成分

4-3：夏の記憶は海洋か？

6月になると北半球の積雪は殆ど消えるにもかかわらずユーラシア多雪の翌年は、ちゃんと北米多雪となる。これは夏期間に“前の冬ユーラシアは多雪であった”という履歴を陸雪以外の場所に保存していることを意味する。ここで登場するのが長期記憶装置の他方の雄・海洋である。(図13)はユーラシアの積雪 Index と海面温度 (SST) の各 grid との相関図である。月毎に、12ヶ月先までラグ相関をとったがパターンに連続性があるので間引いて載せる。注目すべきは赤道中・東部太平洋に伸びる高相関域(ユーラシア多雪のときは SST 高温域に対応)である。

月を追って順に見る。1月は中部太平洋から東部へ赤道に沿って細長く伸びている。3月の高温域は東部に移動し少し増強される。

8月になると東部を中心に強まった高温域はアメリカ大陸に沿って南北に伸展拡大し11月にかけて成熟する。これは前冬のユーラシア雪 Index に呼応した明瞭な1年ラグの海洋シグナルである。もちろん、この結果のみから『大陸間積雪1年ラグを媒介する夏期記憶装置は海洋である』とは速断できないが、今後の極めて有力なヒントとなることは間違いなからう。

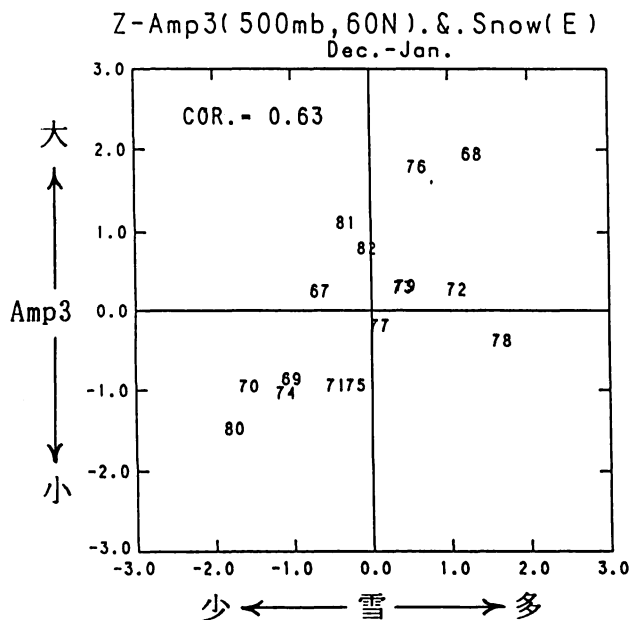


図 12：波数 3 の振幅 Index (500 mb, 60°N) とユーラシア積雪 Index との相関

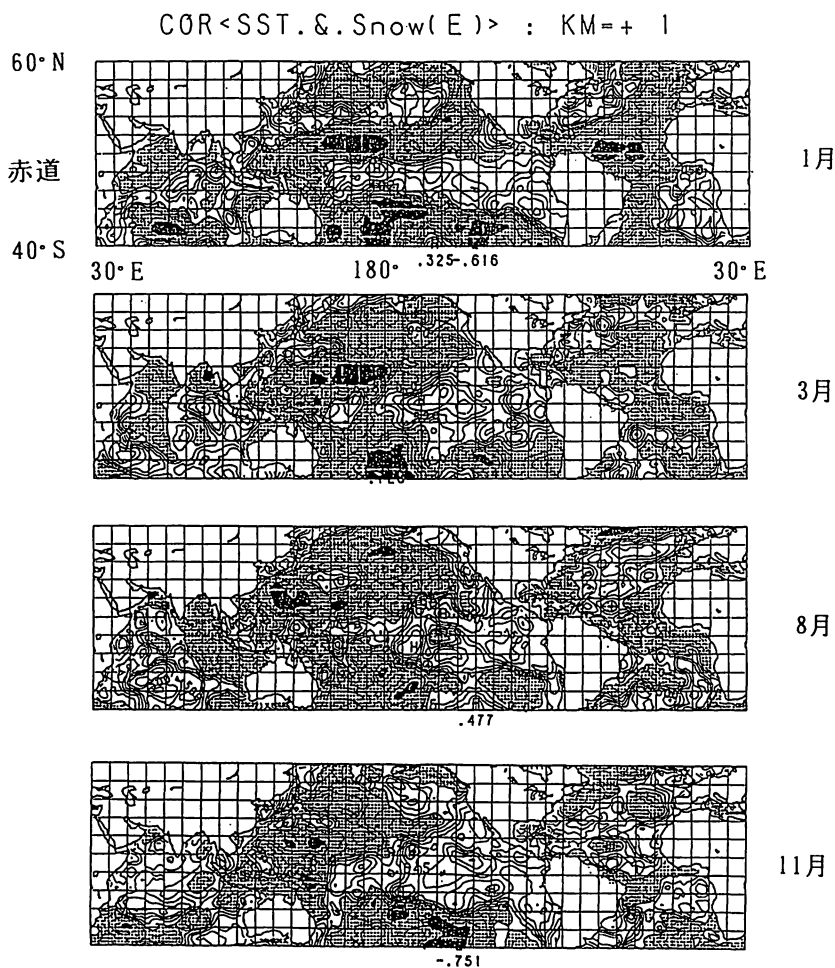


図 13 : ユーラシア積雪 Index と月毎の海面水温との相関係数分布

Reference

- Dickson, R. R., 1984 : Eurasian snow cover vs. Indian monsoon rainfall — an extension of Hahn-Shukla results. *J. Climate Appl. Meteor.*, 23, 171–173.
- Hahn, D. G., and J. Shukla, 1976 : An apparent Relationship between Eurasian Snow cover and Indian Monsoon Rainfall. *J. Atmos. Sci.*, 33, 2461–2462.
- Iwasaki, T., and I. Hirota, 1988 : The influence of the Southern Oscillation on extratropical circulations during the Northern Hemisphere winter. *J. Meteor. Soc. Japan*, 66, 419–432.
- Yasunari, T., 1987 : Global structure of the El Niño /Southern Oscillation. Part II. Time evolution. *J. Meteor. Soc. Japan*, 65, 81–102.

太陽活動の変動と火山・地震活動，気象の変動

高 橋 浩一郎*

1. はじめに

太陽活動の変動と地球上のいろいろの現象との関連は，古くて新しい課題である。とくに気象との関連については前世紀から多くの人により研究されており，統計的には関連があるとみられるが，複雑であり，その物理的過程となると，よくわかっていない。もちろん，気象の変動が太陽からくるエネルギーで生じていることは疑う余地はないが，それが変動するかどうかは必ずしも明らかではなく，近年の研究でも 0.3 % 以下の変動であろうとされている。まして，火山，地震活動となると地殻内部の現象であり，それに太陽活動の変動が影響することは，常識的には考えづらいことである。

しかしながら，かつて T. A. Jagger はハワイの火山活動が黒点の少ない頃に盛んになることを発見し，鈴木栄一（1955 年）がこれを統計的に再吟味し，黒点の少ない時期に火山活動が盛んになる傾向があるという結果をえている。また，筆者（1986 年）が統計的に調べてみても，同じような結果になる。そこで，もしそうならば地震についても似た結果がえられるのではないかと考え，日本付近の大地震の記録をもとに，太陽黒点数との相関を調べたところ，火山活動ほどはっきりしないが，火山の場合とは反対に，黒点の多い頃に地震活動が盛んになる傾向が統計的にみられた。

現在，このような関連が生ずる物理的な過程はわかっていない。しかし，太陽からくる微粒子流が超高層の大気に侵入し，オーロラなどの電磁現象を起こすことは明らかである。そこで，それとともに磁気嵐などによって生ずる地中の誘導電流が火山活動や地震活動に刺激となる可能性はありうるように思える。そこで，その刺激がどの程度になるかを見積ってみたところ，ある程度の可能性はあるという結果となった。つぎにこれらの結果について報告したい。

* 元気象庁長官

2. 太陽活動の変動が火山・地震活動、気象に及ぼす影響のキイ・イヤー・アナリシス

太陽活動が地球上の現象に及ぼす影響を検出するため、黒点数が非常に多い年、反対に非常に少ない年をキイ年とし、顕著な噴火や大地震のあった年を指標とし、キイ・イヤー・アナリシス*を行った。また、顕著なエル・ニーニョ、日本の大凶作年、大風水害の起きた年、また、イギリスの年平均気温についても行ってみた。その結果が表1である。

なお、分析の期間はおおむね1700年より1987年であり、標本数は27ぐらいである。また、黒点の多い年とは、その数が100以上の場合、少ない場合とは10以下の場合である。また、太陽活動には長周期変化があるので、この条件でえらぶと、ある期間3年も4年もつづくことがある。そこで、なるべくいろいろの期間の重みを一樣にするため、連続した2年でもとめた。また、大噴火とはVEIが4以上のもの、大地震とはマグニチュード7以上の日本およびその付近のもの、大震災とは死者1万人以上のもの、日本の大凶作年とは作物が90%以下と思われる年、大風水害年とは、室戸台風、伊勢湾台風級の被害のあった年、エル・ニーニョはとくに顕著なものがあった年、イギリスの気温はManleyが調べた結果であり、0.01℃単位の偏差値で示してある。

これを見るとわかるように、世界の火山の大噴火は、黒点の少ない年、あるいは翌年に起こりやすいことが、統計的に高い信頼度で出ており、鈴木などの結論を裏付けている。これに対し、日本の大地震、世界の大震災では、火山噴火ほど明瞭ではないが、黒点の多い年の2年後位に多くなる傾向がみられ、火山噴火とは逆である。しかし、日本の大地震の場合も、世界の大震災の場合も傾向は同じであり、これからみて、太陽活動の変動の影響があることは統計的にはかなり確かのようなのである。そして、同じ地殻内の現象ではあるが、その影響が反対なのは、現象の起こる地域の深さが違うためではなからうか。すなわち、火山活動は地表に近いところで起こり、地震活動は深いところで起こるからである。

つぎに、海流異変、エル・ニーニョを見ると、黒点の多い年、あるいは少しおくらせて起こりやすい傾向が見られる。そして、日本の大凶作年は黒点の多い年の2年くらい前、少い年の2年後くらいあとに多い傾向が見られる。このことは、いままでにも気付かれていたことである。つぎに風水害を見ると、黒点の多い年から2年くらいおくらせて多くなる傾向がみられる。すなわち、いずれに

* キイ・イヤー・アナリシスというのは、かつてR. A. Craig (1952年) などが、地磁気の変動と気象との関連を調べるのに用いた方法である。すなわち、2つの時系列につき、一方の時系列から、ある特徴のある現象の起きた時点を多くえらび出し、他の時系列につき、この時点を原点として、平均的な時間変化を調べるという方法である。もし、2つの時系列が統計的に相関がなければ、平均した値は、原点からの時間が変わっても、分析の誤差の範囲で一定になるはずであり、それより大きな違いが生ずれば、この時系列の間には統計的な相関があることを物語る。そして、平均された値の時間変化から、両者の間の関連を探るという方法である。

表1 太陽活動による火山大噴火，大地震，気象などの
キイ・イヤー・アナリシス

要素	年差 黒点	-4	-3	-2	-1	当年	1	2	3	4	5	6	7	誤差	平均
火山噴火	多	9	10	10	9	8	7	7	6	10	15	12	10	2.9	8.6
	少	7	12	12	10	14	12	7	4	7	8	6	5	2.9	
	差	2	-2	-2	-1	-6	-5	0	2	3	7	6	5	4.2	
日本大地震	多	7	4	8	10	7	9	10	13	12	11	12	8	3.0	9.3
	少	11	8	10	12	10	5	9	9	8	14	14	16	3.2	
	差	-4	-6	-2	-2	-3	4	1	4	4	-3	-2	-8	4.4	
世界大震災	多	6	8	9	7	8	10	10	9	8	8	8	5	2.8	8.0
	少	5	6	4	5	6	7	5	6	14	13	8	3	2.6	
	差	1	2	5	2	2	3	5	3	-6	-5	0	2	3.8	
エル・ニーニョ	多	0	1	1	1	5	3	2	6	4	0	1	2	1.5	2.2
	少	1	1	3	3	1	0	1	3	3	3	3	2	1.4	
	差	-1	0	-2	-2	4	3	1	3	1	-3	-2	0	2.0	
日本凶作	多	5	5	6	5	3	3	1	2	3	1	0	2	1.7	2.9
	少	1	1	0	2	1	3	4	3	2	4	1	2	1.4	
	差	4	4	6	3	2	0	-3	-1	1	-3	-1	0	2.2	
日本風水害	多	6	5	3	3	4	3	3	7	7	2	1	3	2.0	3.9
	少	3	3	3	3	5	4	3	3	2	6	4	5	1.8	
	差	3	2	0	0	-1	-1	0	4	5	-4	-3	-2	2.8	
中国干ばつ	多	1	4	6	4	0	0	1	2	0	1	2	1	1.4	1.8
	少	1	1	1	1	4	5	3	2	2	0	0	1	1.4	
	差	0	3	5	3	-4	-5	-2	0	-2	1	2	0	1.9	
イギリス気温	多	37	40	36	39	46	42	27	22	21	22	18	10	14	25
	少	20	10	7	22	7	9	16	25	21	26	20	-3	14	
	差	17	30	29	17	39	33	11	-3	0	-4	-2	13	20	

も時間的なずれはあるが、太陽活動の変動の影響があることを示している。

つぎに、中国の大干ばつ年、正確には揚子江河口付近の干ばつ年は、黒点の少ない年の頃多く、黒点が多い年には少ない傾向がみられる。また、イギリスの気温を見ると、黒点の多い年の頃は高く、少ない年の頃は低い傾向がみられる。このように、太陽活動の影響があることは統計的に確からしいが、その物理的な過程はこの分析だけではわからない。おそらく大気大循環が変動をし、それが各地の気象や水象に現われるものであろう。そして、地象については、別の過程を考える必要があるように思われる。

3. 太陽活動約 11 年周期の微細構造

太陽活動の約 11 年の周期の原因としては、木星の公転周期が 11.862 年でかなり近い。そこで、木星の引力や潮汐力によるものではないかと考えられたこともあったが、それでは説明が難しい。太陽放射のエネルギーは、太陽内部の核融合反応で生じ、それが太陽内部の熱対流などで表面に出てくる。この熱対流に、地球上の間欠温泉と類似の現象が起き、それによって生ずると見るのが自然ではなかろうか。すなわち、太陽内部に直接の原因があるように思われる。

しかし、このことは木星などの引力や潮汐力の影響が全くないことを意味するものではない。もちろん、その影響はごくわずかではあるが検出できる。

太陽活動の指標、すなわち、黒点数の長い時系列については、Clayton, Dauglus など多くの研究者により、今世紀の前半、調和解析が行われており、8.8 年、10 年、11.24 年、13.4 年などの周期の振幅が大きいとされている。

そこで、これを近年までの観測値を入れて吟味してみた。その方法としては、調和解析に準ずるペリオドグラム・アナリシス*を用いた。この場合、分解能をあげるためには、なるべく長い観測値の時系列を用いることが望まれる。黒点数については、1700 年以降の値が知られているが、黒点の極大年や極小年については、Shove が多くの研究者の結果を整理し紀元前まで推定している。そこでこれを指標にとることにした。もっとも、古いところでは精度が落ちると思われるので、西暦

* ペリオドグラム・アナリシスは古く、Schuster (Conrad 1950 年) が提唱した方法であり、隠れた周期を見出す方法である。ある現象の標識の時系列について、いろいろな周期を想定し、その時間ごとに折り返してならべ、平均の時間変化を見るという方法である。もし、仮定した周期が存在しなければ、分析の誤差の範囲内で一定になるはずであり、それより大きな変動が生ずれば、その周期の存在を物語る。この方法は潮汐の分析などによく用いられ、安定した周期がある場合には、非常に振幅が小さい周期でも検出できるという利点がある。ただ、周期の位相がずれるような場合には、振幅が大きくとも消えてしまう。この場合には、自己相関、進んだ方法ではパワー・スペクトルを用いる方がよい。

560 年から 1987 年までの資料を用いることにした。

表 2 は、周期として 10 年、10.5 年、11.05 年の安定した周期があると仮定し、ペリオドグラム・アナリシスを行った結果である。表中の数字は極大年数の平均数からの偏差値を示したものである。なお、周期の数値の端数、たとえば 11.05 年の 0.05 年は、分析期間をいくつかの 220 年の期間にわけ、そこでペリオドグラム・アナリシスにより 11 年の平均の波を求め、各期間の位相のずれから確定したものである。

表 2 年平均太陽黒点数極大年時系列の 10 年
10.5 年および 11.05 年のペリオドグラム・アナリシス

対応年 周 期	1980	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90年	誤差	平均	標本数
10.00 年	-2.5	-4.5	-1.5	-5.5	-2.5	-0.5	-2.5	3.5	12.5	6.5	-	3.5	14.0	140
10.50	4.9	0.9	-4.1	-2.1	4.9	-3.1	-0.1	-8.1	-0.1	-0.1	8.9	3.2	10.1	120
11.05	11.5	-2.5	-1.5	1.5	-4.5	-8.5	-5.5	-6.5	4.5	-2.5	8.5	3.2	10.4	115

なお、1700 年以降は年々の黒点数が求められており、前述の期間よりは短いですが、それでもかなりの期間になるので、それについてペリオドグラム・アナリシスを行ってみると、表 3 のようになる。

表 3 年平均黒点数の、10 年、10.5 年、11.05 年のペリオドグラム・アナリシス

周期対応年	1980	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90年	誤差	平均	標本数
10.0 年	5	-5	-14	-21	-21	-13	15	20	23	-3	-1	7	49	28
10.5	20	5	-6	-11	-15	-18	-17	-6	11	21	20	7	48	27
11.05	32	30	14	4	-8	-21	-27	-27	-4	-6	13	7	50	25

これを見ると、いずれも分析の誤差にくらべ、数倍もの偏差値があり、このような周期性が存在することを示している。そして、この 3 つは長さが近いが、観測資料の長さからみて、それぞれ別のものであるといえる。

このように接近した周期性があることは、光のスペクトルの微細構造の類推から考えると、一つの基本の周期があって、それに他の長周期の力が加わり、スペクトルがわかれるように思われる。そして、この場合、10.5 年が基本の周期であり、それに 215 年の周期的な力が加わると仮定すると、この 2 つの周期の和と差の周期が生じ、それぞれ 10.01 年および 11.04 年の周期があらわれることとなる。この値は表の値とほぼ一致し、また、黒点の長周期にはこの程度のものも認められるようである。そして、振幅でみると、11.05 年あるいは 10.0 年周期が大きく、10.5 年は一番小さい。

4. 太陽活動に及ぼす木星引力の影響の分析

さて、太陽には惑星の引力が働いており、公転や会合による引力の変化が太陽活動に影響し、それらの周期が太陽活動の指標にも現われる可能性はある。もちろん、それはごくわずかであり、通常は認められないが、長年の観測資料があれば、ペリオドグラム・アナリシスなどによって検出できる可能性がある。

まず、いろいろな惑星が太陽面に及ぼす引力あるいは潮汐力を理論的に計算してみると、木星が一番大きい。そして、木星の公転軌道が楕円であるため、太陽と木星の距離が公転周期 11.864 年で変化し、それによる引力あるいは潮汐力の変化が一番大きい。そこで、まず、木星の公転周期 11.862 年周期を仮定し、年平均黒点数、太陽活動の一つの指数である地磁気の変動度 Ci 指数および黒点の極大年についてペリオドグラム・アナリシスを行ってみると表 4 の如くなる。

表 4 木星公転周期 11.862 年によるペリオドグラム・アナリシス

対応年 要素	1970	71	72	73	74	75	<u>76</u>	77	78	79	80	81年	誤差	平均	標本 数
黒点数	1	-5	-11	-14	-11	-5	3	4	13	13	8	3	8	4.8	24
Ci 指数	-0.05	-5	-5	-3	6	6	2	4	1	-1	1	-1	0.04	0.65	8
極大年	0.6	<u>7.6</u>	-2.4	-1.4	-4.4	1.6	-1.3	-2.4	<u>4.5</u>	1.5	-1.4	-2.4	2.1	4.4	49

これを見ると、黒点極大年の場合には、誤差の 3 倍以上も大きな偏差値が出ており、木星公転周期の存在は統計的にきわめて信頼性が高い。また、黒点数、Ci 指数についても、誤差の 1.5 倍以上の偏差値が出ており、この周期の存在している確率はかなり大きい。ただ、位相による変化を見ると、黒点数と Ci 指数では 2, 3 年の差はあるが、波の形がよく似ている。そして、表中アンダーラインをつけた 1976 年頃に対応する位相は木星の近日点に当たる時期であり、この頃、太陽活動が盛んになることを示している。これに対し、黒点の極大年を見ると、1971 年に対応する位相のところ、および 1978 年のところで多くなっている。後者は黒点数の多い時期と一致するが前者はほぼ逆位相に当たり、木星の遠日点の頃に当たる。このように、太陽活動の指標によって位相が変わるが、とにかくこのことは木星の影響があることを物語るものであろう。

なお、太陽活動には 11 年周期があり、それに木星の引力が周期的に働くとすれば、相互作用で別の周期の変動が出てくることが予想される。そして、この 2 つの周期は近いので、唸りの現象が生じ、短い約 11 年の周期と、振幅の長周期変化とが現われることが考えられる。

正確には、黒点の 11 年周期には、10.0 年、10.5 年、11.05 年の周期にわかれるので、それに 11.862 年の周期が加わった場合の和の周期と差の周期を計算してみると、表 5 のようになる。和の周期は差が小さいので、それを区別して出すのには、長い観測資料が必要である。そこで、黒点数の極大年を指標とし、それらの周期のペリオドグラム・アナリシスを行ってみた。表 6 がその結果である。

表5 黒点周期と木星公転周期の相互作用で予想される周期

太陽活動の周期	和の周期	差の周期
10.00 年	11.85 年	127 年
10.50	11.14	180
11.05	11.442	323

この結果を見ると、11.14 年の場合には、その存在の信頼性がきわめて高いが、他の 2 つの周期はこれほど明瞭ではない。この周期の基になる周期は 10.5 年であり、おそらくこれが 11 年周期の基本周期であろう。また、和の周期 183 年のハーモニックスの 90 年周期は、太陽活動にもしばしば見られる周期であり、これは唸りの周期と見れば理解出来る。

表6 黒点周期と木星公転周期の相互作用による短周期変動の
ペリオドグラム・アナリシス

黒点 周期	対応年 対応 周期	年											誤差	平均	標本 数
		1980	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90			
10.0年	10.85	-4.1	1.9	1.9	-1.1	0.9	-5.1	1.9	-3.1	1.9	1.9	1.9	2.7	7.1	80
10.5	11.14	<u>-6.3</u>	2.7	1.7	5.7	<u>8.7</u>	0.7	-2.5	0.3	4.5	-5.3	-1.3	2.7	7.3	80
11.05	11.44	3.5	-0.5	-0.5	0.5	-1.5	1.5	4.5	-2.5	-0.5	-5.5	1.5	2.7	7.5	80

5. 地球物理現象における太陽活動約 11 年周期の検出

太陽活動の影響が地球上の現象に影響を与えるとすれば、地球上の現象にも、10 年、10.5 年、11.05 年の周期が現われることが予想される。そして、いままでに 10 年、11 年周期については、いくつかの気象要素について検出されている。そこで火山の大噴火のあった年、日本付近で大地震の起きた年、世界で大震災の起きた年、顕著なエル・ニーニョの起きた年、南米チリで大雨のあった年、インドのボンベイでの雨の少なかった年、日本の風水害指数、中国揚子江下流域の干ばつ年、日本の米の凶作年、イギリスの年平均気温の高かった年、イタリアのローマの降水量の多かった年、リガ港の開港日が例年よりいちじるしく早かった年（暖冬の目安）について、10 年、10.5 年、11.05 年のペリオドグラム・アナリシスを行ってみた。表 7 a, b, c がその結果である。

これらの要素をとったのは、1700 年頃からの長い観測資料があり、割合信頼おける値と思われるからである。また、表中の数字は、分析期間中の出現年数の平均からの偏差値であり、また、アンダーラインをつけてある数字は、分析の誤差の約 2 倍以上の偏差をもった値であり、統計的に信頼度が非常に高い値である。

これを見ると、多くの要素に 10 年周期がある。たとえば、黒点の多い年あるいは一年おくれ、エ

ル・ニーニョが発生しやすく、チリでは大雨が降りやすい。また、有意性は高くないが、ボンベイでは干ばつが起こりやすい。また、少しおくれるが、黒点が少ないと火山噴火が多くなる。これらは、直接黒点数との関連を調べた場合と一致し、このことも太陽活動とこれらの要素の間に関連があることを示す一つの根拠となろう。

つぎには10.5年のペリオドグラム・アナリシスを行ってみよう。その結果は表7bに示してある。この場合にも、統計的に有意なこの周期の存在を示す要素がいくつか出ている。そして、大地震の場合には太陽黒点より少しおくれ気味で平行して変化しており、前の一般的な分析結果と一致している。しかし、火山の大噴火はの場合地震の変化とはほぼ一致し、一般的な分析結果とは逆になっている。

また、エル・ニーニョは黒点より少しおくれて正の相関があり、10.5年の周期があることを示しており、ボンベイの干ばつ年もこれを裏付けている。また、ローマの大雨年は黒点の変化と似て、やはり有意の10.5年周期があることを示している。

つぎには11.05年のペリオドグラム・アナリシスを行ってみよう。表7cがその結果である。

表7a 10年ペリオドグラム・アナリシス

対 応 年 要 素	1980	81	82	83	84	85	86	87	88	年 89	誤 差	標本数
黒 点	-2.5	-4.5	-1.5	-5.5	-2.5	-0.5	-2.5	3.5	<u>12.5</u>	6.5	3.7	140
火 山 噴 火	<u>-6.5</u>	-1.5	<u>6.5</u>	4.5	-1.5	0.5	-0.5	-0.5	-1.5	0.5	3.1	29
日 本 大 地 震	-5	3	1	<u>7</u>	4	-4	-3	-2	3	-3	3.2	29
世 界 大 震 災	0.6	-3.4	0.6	2.6	-4.4	0.6	-0.4	1.6	1.6	0.9	2.9	29
エル・ニーニョ	-1.5	1.5	-0.5	0.5	1.5	-0.5	-1.5	-0.5	<u>2.5</u>	-1.5	1.6	27
チ リ 大 雨	0.9	-0.1	-0.2	-4.1	-0.1	-1.1	-0.1	-2.1	2.9	<u>4.9</u>	2.5	38
ボンベイ干ばつ	-0.2	-0.2	-2.2	-0.2	0.8	0.8	-0.2	-1.2	1.8	0.8	1.8	15
風 水 害	-1.3	0.7	2.7	-0.3	1.7	-0.3	<u>-4.3</u>	-0.7	0.3	0.7	2.1	29
中 国 干 ば つ	-1.4	-1.4	<u>2.6</u>	0.6	-0.4	0.6	0.6	-0.4	0.4	-1.5	1.5	29
凶 作	-1.4	-2.4	-0.4	-0.4	0.6	2.6	-0.4	1.6	-1.4	-1.4	1.8	29
イギリス高温	-1	1	-1	0	0	-1	3	0	1	0	2	30
ロ ー マ 大 雨	-2.6	-0.6	-0.6	-0.6	0.4	2.4	3.4	0.4	-0.4	0.4	2.4	20
リガ港開港日 (暖 冬)	-1.2	-0.2	0.8	1.8	3.8	-0.2	-0.2	-1.2	<u>4.2</u>	0.8	2.5	28

この場合にも多くの要素で11.05年周期が、統計的に有意に出ており、予想を裏付けている。そして、黒点と火山噴火では、逆の位相の傾向が見られ、前の分析結果と一致している。また、日本の大地震ではそれほど明瞭ではないが、世界の大震災では多少の時間的おくれはあるが、黒点の多い時期に大震災が発生しやすくなっており、これも前の分析結果と平行する。

黒点とエル・ニーニョとの関連を見ると、黒点の多い頃に多く発生するようであるが、統計的な信頼度は低い。気象では、中緯度辺りの要素に割合信頼度の高い関連が見られる。たとえば、黒点の多い時期、あるいは少し早目に中国の干ばつ、日本の凶作が起こりやすく、暖冬を目安であるリガ港の開港日は早くなる。

このように周期により、有意性のある要素が変わり、また、黒点数の変化の位相と必ずしも同じではないのは、太陽活動の影響が各要素に表われる物理過程が複雑で、いろいろの変形を受けるからであろう。

表7b 10.5年ペリオドグラム・アナリシス

対応年 要 素	1980	81	82	83	84	85	86	87	88	89	年 90	誤 差	標本数
黒 点	4.9	0.9	-4.1	-2.1	4.9	-3.1	-0.1	<u>-8.1</u>	-0.1	-0.9	<u>8.9</u>	3.2	120
火 山 噴 火	-5.1	9.9	-2.1	0.9	0.9	3.9	-0.1	-0.2	-3.1	-2.1	0.9	3.0	28
日 本 大 地 震	0.2	<u>9.3</u>	1.2	5.2	-3.8	-1.8	<u>-5.8</u>	<u>-5.8</u>	2.2	-2.8	2.2	3.1	28
世 界 大 震 災	-2	-3	2	-2.0	-3	-3.0	0	1	2	3	<u>5</u>	2.6	28
エル・ニーニョ	0.5	-0.2	2.5	<u>3.5</u>	-0.5	-1.5	-0.5	-1.5	-1.5	0.5	-0.5	1.6	25
チ リ 大 雨	-2.7	-1.7	0.3	2.3	-1.7	1.3	3.3	-0.7	-1.7	1.3	0.3	2.4	36
ボンベイ干ばつ	-2.9	<u>5.1</u>	-0.9	2.1	-0.9	-0.9	0.1	0.1	0.1	-0.9	0.1	1.7	16
風 水 害	3	-3	<u>4</u>	-3	2	2	1	-2	1	-2	-3	2	28
中 国 干 ば つ	-1.4	-0.4	2.6	0.6	-0.4	-0.4	-0.4	0.6	0.4	1.6	-2.4	1.8	28
凶 作	-0.8	1.2	0.2	0.2	0.2	-0.8	1.2	-0.8	-1.8	2.2	-0.8	1.7	28
イギリス高温	1	-3	1	0	-1	-2	0	-1	-2	3	1	2	28
ローマ大雨	1.8	-1.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-1.2	-2.2	-0.2	0.8	<u>3.8</u>	2.3	19
リガ港開港日 (暖冬)	3.4	-2.6	0.4	-0.5	-1.6	-0.6	2.4	-1.6	1.4	3.4	-0.6	2.4	27

表7c 11.05年ベリオドグラム・アナリシス

対応年 要素	1980	81	82	83	84	85	86	87	88	89	年 90	誤差	標本数
黒点	<u>11.5</u>	-2.5	-1.5	1.1	-4.1	<u>-8.5</u>	-5.5	-6.5	-1.5	-2.5	<u>8.5</u>	3.2	115
火山噴火	-0.7	-4.7	0.3	-0.7	-0.7	0.3	-1.7	<u>5.3</u>	3.3	-2.7	2.3	3.0	26
日本大地震	-2.4	-1.4	3.6	1.6	3.6	-3.2	2.6	-1.3	-3.4	-1.4	1.6	3.1	26
世界大震災	3.3	0.3	4.3	0.3	0.3	0.3	-1.7	2.3	<u>-5.7</u>	3.3	-3.7	2.8	26
エル・ニーニョ	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	-0.4	<u>-2.4</u>	-0.4	0.6	-2.4	1.6	1.5	24
チリ大雨	-0.5	-1.4	1.5	2.5	-2.5	0.5	1.5	-0.5	0.5	-0.5	1.5	2.3	34
ボンベイ干ばつ	0.1	1.1	-0.9	-0.9	-0.9	0.1	0.1	0.1	1.1	1.1	-0.9	1.9	13
風水害	-1	0	0	2	-1	-2	-1	0	1	2	0	2	28
中国干ばつ	0.8	-2.2	-2.2	-0.2	0.8	-2.2	2.8	-1.2	-1.2	2.8	1.8	1.5	26
凶作	0.2	1.2	-0.8	-1.8	-2.8	1.2	-0.8	0.2	-1.8	2.2	<u>3.2</u>	1.7	26
イギリス高温	0.1	0.1	1.1	1.1	-0.9	-1.9	0.1	1.1	-0.9	2.1	-1.9	2.0	29
ローマ大雨	0.8	-0.2	-1.2	<u>4.8</u>	-0.2	-0.2	-1.2	-0.2	2.8	-2.2	-2.2	2.3	19
リガ港開港日 (暖冬)	3.4	-3.4	1.6	-1.6	-2.6	-3.6	-3.6	-1.6	-0.6	<u>7.4</u>	<u>5.4</u>	2.4	24

6. 太陽活動の変動と火山・地震活動の関連に関する一つの憶説

以上の調査で、統計的には太陽活動の変動と火山、地震活動の変動の間には、関連があることは非常に確からしいことがわかったが、それはどのような物理的過程で結びついているものだろうか。太陽活動の変動とくに黒点数の変動にともなって、微粒子流や紫外線の強さが変動し、それが超高層の大気に影響を与え、オーロラやデリンジャー現象を起こすことはよく知られているが、そのエネルギーはごく小さく、したがって気象、まして火山、地震のように地殻内部の現象にまでその影響が及ぶことには疑問視する人も多い。

それにもかかわらず、関連が統計的に見出されることは、何かの物理的過程があるはずであり、いろいろ考えた後、一つの憶説に行きついた。

まず、黒点の変動により、微粒子流や紫外線の強さの変動が起こり、それによって地磁気の変動、磁気嵐が起こることは確かである。そして、磁気嵐が起こると、地殻内に誘導電流が生ずる。この誘導電流、すなわち地電流は、地殻の電気抵抗で熱に変わり、地殻を暖める役をするはずである。地殻の中には、この他放射性物質があり、その原子核崩壊で熱を出し、地殻が暖められる。そして、

それらの熱は定常的な地殻熱量，あるいは地震活動や火山活動により，地表から宇宙に逃げる。あるいは，そのエネルギーが火山活動や地震活動のエネルギーとなるとみてよいであろう。

もちろん，このエネルギーの流れはごく微弱であり，定常的な地殻熱流が圧倒的に大きい。地球全体では 8×10^{27} erg/年の桁であり，火山や地震のエネルギーは，それぞれ，その 2000 分の 1 程度とされている。

一方，太陽放射で地球に入ってくるエネルギーは， 5.6×10^{31} erg/年であり，地殻熱量はその 7000 分の 1 の桁にすぎない。しかし，太陽放射のエネルギーは大部分可視光線の中にあり，一部は雲で反射され，また地表を暖めるが，それは熱放射となって宇宙に戻る。そして，地殻の熱伝導はきわめて悪いので，地殻の中にはほとんど進入しない。これに対し，磁気嵐による誘導電流は地殻内に侵入し，地殻を暖める。これは，太陽放射のエネルギーより大きくなるだろう。

しかし，問題は，そのエネルギーの程度がどの程度だろうかということである。たとえば，原子核崩壊によって地殻内に発生するエネルギーと比較し，きわめて小さければそれが原因で火山活動や地震活動に影響を与えることは考えにくい。そこで，その桁を見積ってみた。

これは大変難かしいが，チャップマン (Chapman) などの見積によると 2×10^{18} erg/s の桁である。これは，太陽からくるエネルギーの 2×10^{24} erg/s の 100 万分の 1 程度である。そして，地表の単位面積当りでは 0.4 erg/s となる。

これとは別に，磁気嵐で生じる地表近くの地電流の電位差は 100 m につき 5 ミリボルトの程度のものである。そして，地表から 400 km くらいの深さの地殻では電気抵抗が大きく，1 m につき 125 オームの見当のものである。そこで，この数値を用い，誘導電流によるジュール熱を計算してみると，0.8 erg/s $\cdot$ cm² となる。

つぎに，これとは別に地球に入ってくる微粒子流のエネルギーを見積ってみよう。地球付近の微粒子の密度は 1 cm³ につき数個であり，その速度は 1000 km/s の見当である。微粒子をプロトンとするとその質量は 1.67×10^{-24} g である。したがって，1 cm² に 1 sec の間に入ってくるエネルギーは 3.3 erg となる。一方，地球上の単位面積に入ってくる太陽放射のエネルギーは，erg で表わすと， 3.5×10^5 erg/s である。そこで，微粒子流のエネルギーは，その約 10 万分の 1 となる。このエネルギーがすべて地震流となり，地殻で熱になるとは思われず，その 4 分の 1 程度とすると，0.8 erg/s $\cdot$ cm² となる。

このように，いろいろの方法で見積った結果は，ほぼ桁は合い，0.8 erg/s $\cdot$ cm² となる。これは，世界中で一年間に出ていく量に換算してみると， 1.3×10^{26} erg/年となる。したがって，定常的に出て行く地殻熱量 8×10^{27} erg/年の，約 1.6 % となる。

この値をどのように評価するかは，人により違うであろう。小さいといえば小さいが，火山活動や地震活動で年間に放出されるエネルギーはそれぞれ 4×10^{24} erg/年と見積られており，その 30 倍も大きい。したがって，この影響が及ぶ可能性は大きいように思われる。

なお、気象に及ぼす太陽活動の影響の一つの過程としては、火山活動を介在することも考えられ、定性的には観測と整合することが多い。しかし、それだけでは不十分であり、別の過程、たとえば上層の気流に影響し、大循環を変えるためかもしれないが、はっきり実証するまでには至っていない。

文献，資料

- (1) Conrad, V. & Pollak, L.W ; Methods in Climatology, Harvard University Press, 1950 年.
- (2) 鈴木栄一；太陽黒点の変動と火山活動との関係について，自然科学と博物館，22，10～12 号，1955 年.
- (3) Shove, D.J. ; The Sunspot Cycle 649 B.C. to A.D. 2000, Jour.Geophys.Res.. 60, 127－146 , 1955 年.
- (4) 前田憲一，永田武，畑中武夫編；宇宙空間の科学，白桃社，1960 年.
- (5) Lamb, H.H. ; Climate, present, past and future Vol. 2, Methuen, Barnes & Noble, 1977 年.
- (6) Smithsonian Institution ; Volcanos in the world, Huthchinsoe press Company, 1981 年.
- (7) 中央気象局気象科学研究所主編；中国近 500 年旱澇分布図集，地図出版社，1981 年.
- (8) 桜井邦明；太陽の謎，ダイヤモンド社，1982 年.
- (9) 高橋浩一郎；火山活動の気候に及ぼす影響の統計的分析，天気，33，615－620，1986 年.
- (10) 宇津徳治その他編；地震の事典，朝倉書店，1987 年.
- (11) 国立天文台編；理科年表，丸善，1989 年.

WCRP と今後の展望

住 明 正 *

1. はじめに

WCRP（気候研究国際共同研究）は、ICSUとWMOで1979年に合意して、共同提案した気候研究にかかわる国際的な研究プロジェクトである。気候研究の重要性からしても、それには期限はついていない。いわば、WCRPは、90年代から21世紀にかけて、世界の気象界の研究の旗印というわけである。

WCRPは、その中に、3つの時間スケールで代表される目標を持っている。即ち、

- (1) 1か月程度の長期予報の力学的基礎、
- (2) 季節内振動以上から数年程度の時間スケールの変動、
- (3) 数十年程度の時間スケールの変動、

である。これらの目標に対応して、様々の国際プロジェクト、例えば、(2)に対応してTOGAが、(3)に対応して、WOCEが計画・実行に移された。

しかしながら、80年代になってのオゾンホール の出現、温暖な冬の続出などが、地球温暖化に代表される地球環境問題を大きくクローズアップしたが、一方、気候研究もそれによって大きな影響を受けることになった。気候の問題が世間の興味を集めるにつれ、金銭的には豊かになっては来たが、しかし、このような地球環境問題の政治問題化は、気候変動の研究の前途にとって、良かったか悪かったかは、別の問題であろう。それは、科学者が長い間暖めて来た掌中の珠を、野暮な世間が奪い取り、世俗の手垢で汚してしまうと表現した人もいる。域いは、問題にならなければ、それなりに権威を保てたのに、重要な場面にでくわしたばかりに、実力が分かってしまい信用をなくす結果となる危険性を指摘する人もいる。

とに角、外圧の嵐の中で、気象学者が右往左往しているという感がある。特に、人為的影響の気候に対する影響の問題がクローズアップされ、自然の、地球システムの力学の理解などといった基礎的な事が忘れ去られてゆく傾向があることは残念である。

さて、このような状況を受けて、様々な動きが始まっている。

CO₂規制に関連して、IPCC (Intergovernmental Panel for Climate Change)の結果は、気候学の重要性と共に、現在の気候モデルの不十分さもうかび上がらせた。又、このような環境問題への興味は、オゾンに代表される微量成分の動向や、生物圏との相互作用など、新しい分野の研究の必要性がいわれるようになった。それ故に、ICSUは、1990年から10年間のIGBPを提唱するに至ったのである。

* 東京大学理学部

同じ様に、JSC は、1995 年からの中心的課題として、GEWEX を中心に取り上げようとしている。これは、気候の本質である水とエネルギーの流れに着目したものである。

又、アメリカでは、この様な地球環境問題の進展を眺めながら、NASA が EOS (Earth Observing System) を、NOAA が Global Change というプログラムを提唱している。

この様に、問題が多様化、複雑化して来ると、日本の気象界の層の薄さが目立って来る。日本の大学の気象学の講座が少ないことにもよるが、良くも悪くも、戦後の気象界は、気象庁の予報業務の確立を軸に、一点集中的に歩んで来た感が強い。それは、日本の気象界の中で、気象庁の重みが飛躍的に大きいことによっている。気象庁が、1950 年代に持っていた（地球物理的な）多様な人材は、この間の過程で整理され、特定の分野へ人材の集中投資が行われて来たと言って良い。それはそれで、気象衛星の打ち上げや、数値予報業務の整備など、成果を上げて来た。ただ、他の独自の活動を行う部分が非常に少ないので、こまるのである。そこで突然、予想外の事態として、これからは「グローバルは微量成分の観測をしなければならない」、「生物過程の気候変化に及ぼす影響を調べなければならない」と云われた時に、即対応出来ないのが正直なところであろう。

2. 日本の状況

日本でも、これらの国際的な動向に対応して、研究計画の策定が行われた。例えば WCRP については、1983 年に、日本学術会議の勧告を受け、測地学審議会で、1986 年建議がだされた。それに基づき、1987 年から 4 年間、日本の WCRP が動き出した。その内容は、表 1 に示す通りである。

日本の WCRP は、課題 1 から課題 6 までの 6 課題であり、そのなかでは、課題 2 と課題 4 が中心であると云って良い。尚、課題 5 は、南極事業の一環として行われているものである。又、年 1 回の WCRP NEWS、WCRP シンポジウムで成果が発表されている。

この間の出来事の中で、特異的なことは、科学的のもつ振興調整費で、初めて、自然の観測のプログラムである JAPACS が始まったことである。JAPACS は、1987 年から、第 I 期として 3 年間の観測プログラムが生まれ、熱帯域の観測については、多くの成果が得られた。その成果については、科技厅より JAPACS の成果報告が毎年出版されており、又、1989 年には、JAPACS の国際シンポジウムが筑波にておこなわれた。その時の Proceedings も、科技厅から発行されている。これに引き続き、JAPACS の第 II 期が、1990 年から 3 年間（1992 / 1993 年に計画されている、国際的な TOGA-COARE に参加するために、熱帯域の計画のみ、3 年に延長された）行われる予定であり、又、WOCE も、振興調整費の中で、1990 年から、第 I 期 3 年の計画が始まった。

更に、この様な動きと関連して、地球科学特別推進費（科技厅）、地球環境研究総合推進費（環境庁）が作られたことも、特筆すべきことであろう。又、これに関連して、各省庁の研究所は改組・改編が相次ぎ、環境庁公害研究所が、地球環境研究所に、そして、地球環境研究センターの新設、科技厅防災センターの防災科学技術研究所への改組など、それぞれ、地球環境問題に、取り組

WCRP実施計画

表1 WCRP実施計画研究内容とその担当機関

研究課題Ⅰ．気候変動予測とそのモデル

研 究 項 目	担 当 機 関
1 気候システムの変動機構の基本的特性	
(1) 成層圏と対流圏の結合とその変動	京都大学理学部 九州大学理学部 名古屋大学水圏科学研究所
(2) コミュニティ大気大循環モデルによる 気候変動の基本的性質の解明	東京大学理学部 京都大学理学部
(3) コミュニティ海洋大循環モデルによる 気候変動の基本的性質の解明	東京大学理学部
(4) 海洋中規模渦の力学	京都大学理学部
(5) モデルによる海洋熱輸送量	筑波大学生物科学系
(6) 大気・海洋境界層の相互作用	東京大学海洋研究所
2 気候変動予測	
(1) 長期予報モデルの開発及び予測実験	気 象 庁
(2) 気候モデルの開発及び予測実験	気 象 庁
(3) 大気－地表面相互作用過程の解明とモデル化	気 象 庁

研究課題Ⅱ．雲の分布とその気候への影響

研 究 項 目	担 当 機 関
1 雲の分布と放射の基本的特性	
(1) 雲の放射 性に対する雲の形状と水粒子の影響	北海道大学理学部
(2) 層状雲の鉛直構造	北海道大学低温科学研究所
(3) 雲の基本的放射特性	東北大学理学部
(4) 海上の層状雲の分布	東京大学海洋研究所
(5) 雲の放射特性に対する雲粒の影響	名古屋大学水圏科学研究所
(6) 広域の雲水量の分布	名古屋大学水圏科学研究所
(7) 層状雲下の大気の熱収支	京都大学防災研究所
2 雲の放射過程の実験観測及びモデル化	気象庁気象研究所
3 気候災害と層状雲の変動に関する研究	科学技術庁防災科学技術センター

研究課題Ⅲ．大気大循環に及ぼす熱帯海洋の影響

研 究 項 目	担 当 機 関
1 ENSO・モンスーンの力学	東京大学理学部 筑波大学地球科学系
2 熱帯海洋・大気結合系の基本的性質	九州大学応用力学研究所 北海道大学理学部
3 熱帯における海況変動の解析	気 象 庁
4 熱帯における大規模大気変動の解析	気 象 庁
5 熱帯海洋－大気のテレコネクションの数値シミュレーション	気 象 庁

表 1 (続き)

研究課題Ⅳ. 海洋混合層の実験観測

研 究 項 目	担 当 機 関
1 混合層 1 次元モデルにおける乱流特性	北海道大学理学部
2 混合層の 3 次元過程の定量化	東北大学理学部
3 上層海洋構造の変動特性	東京大学理学部
4 海面熱収支・表面水温・混合層の変動	東京大学海洋研究所
5 気象擾乱に伴う混合層の変化	東京水産大学水産学部
6 係留系による混合層水温の時空間相関	九州大学応用力学研究所
7 黒潮流域表層混合層の貯熱量の変動機構	鹿児島大学 水産学部及び工学部
8 上層海洋の微細構造の観測	海上保安庁水路部 気 象 庁

研究課題Ⅴ. 南極域の大気と海水の年々変動

研 究 項 目	担 当 機 関
1 南極大気状態の年々変動の観測	国立極地研究所 気 象 庁
2 海氷・大気の相互作用	国立極地研究所
3 氷床コア分析による古気候の復元	国立極地研究所

研究課題Ⅵ. 気候に対する自然的要因および人為的要因の影響

研 究 項 目	担 当 機 関
1 航空機・船舶による微量気体成分の広域観測	東北大学理学部
(1) 二酸化炭素の全地球的分布とその変動特性	東北大学理学部 東京大学海洋研究所
(2) クロロフルオロカーボン及びメタンの広域分布と経年変化	東京大学理学部
2 成層圏エアロゾル気象衛星観測データの検証	名古屋大学水圏科学研究所 九州大学理学部
3 人間活動の気候への影響の検出	京都大学理学部
4 古気候の復元とその変動	筑波大学地球科学系
5 気候変動要因のアセスメント	気 象 庁

表2 平成2年度の各省庁の地球環境対策費の抜粋

地球環境研究総合推進費（環境庁）	1,200 百万円
WCRP（文部省）	222
雲と放射（気研）	19
アジア・モンスーン（科技厅）	125
新プログラム（文部省）	311
JAPACS（科技厅）	～ 300
気候変動対策業務（気象庁）	8
温暖化情報センター（気象庁）	42

むようになったのも、記憶すべきことである。

只、現在の地球環境に対する取り組みは、いわば、ムード的なものであり、地に足がついた堅実なものとなっていない。今後は、着実なものとして、根づかせてゆく必要がある。

参考までに、平成2年度の各省庁の地球環境問題に関連した予算額を挙げておく。（表2）

3. 1990 年以後

地球環境問題に対する関心の高まりのなかで、日本としても、これらの課題に答えるべく積極的な対応をしようと準備している。今後、予想される各プログラムと、その展開を簡単に紹介しておきたい。（表3）

一言、現在の状況をまとめると、それは、「科学の大衆化」であり、「プロジェクトの大衆化」である。このようなことは、必ず起きて来る。どこの分野にも、才のある人はいるし、「気象業界が、国際プロジェクトで、甘い汁を吸っているのなら、俺達も」と思うわけである。科学者個人の主導権争いもある。日本は、幸か不幸か、国際的には、一種のフィルターが入っているので、直接、このような波は受けない。しかし、それでも、この傾向は、新しい秩序が形成されるまでは続くであろうから、この混乱期に、指導をとる人は、よく注意をして、「目標をどこにおくか」、「何を結果として得るか」を冷静に考えておく必要がある。

3-1 TOGA-COARE

これは、1992/93年の冬に西太平洋赤道域で行われる特別集中観測を中心に、西太平洋の暖水域（Warm Water Pool）の形成維持過程を研究しようとするものである。

この研究計画の科学的興味は、現在の地球の気候の中で、何故に、海面水温の最大値が、29℃～30℃であり、それ以上でも、それ以下でもないかを、大気・海洋相互作用を重ねた理解することにある。（図1）

この計画に対し、大学側を中心とする部分では、新しく設立された文部省の「新プログラム」の

表 3 各プロジェクトの対応表

	1985 昭 60	1986 昭 61	1987 昭 62	1988 昭 63	1989 昭 64	1990 平 2	1991 平 3	1992 平 4	1993 平 5	1994 平 6	1995 平 7	1996 平 8	1997 平 9	1998 平 10	1999 平 11
国際的なプロジェクト	WCRP TOGA ↓					↓		TOGA-COARE ↔		↑	↑				
	WOCE					↓					↓				
	GEWEX														
	IGBR					↓									
	TRMM											↓			
国内	WCRP		↓	↓	WCRP		↓	↓	STEP	↓					
新プロジェクト						↓									
気候センター												10年時限			
JAPACS			↓	↓	↓	↓	II	↓	↓	↓					
STA-WOCE						↓	↓	↓	↓	II	↓				
ASIA MONSOON					↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		↓	↓	
HEIFE				↓											

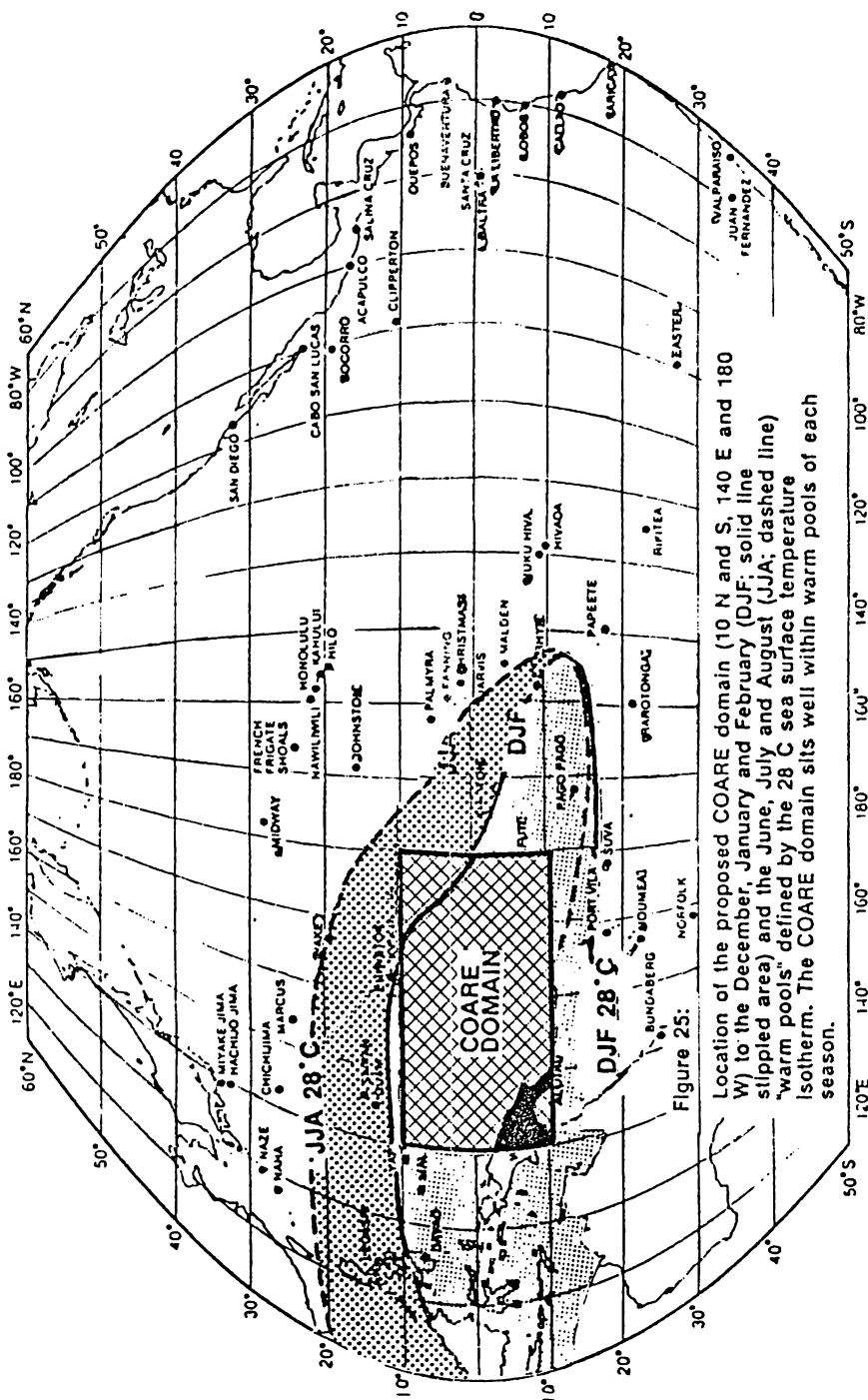


Figure 25:
Location of the proposed COARE domain (10°N and S, 140°E and 180°W) to the December, January and February (DJF; solid line stippled area) and the June, July and August (JJA; dashed line) "warm pools" defined by the 28°C sea surface temperature isotherm. The COARE domain sits well within warm pools of each season.

図1 提案されているCOAREの領域 (10°N-10°S, 140°E-180°W)

図中には夏 (JJA) と冬 (DJF) の 28°C の海面水温の線が記してある。

COARE領域は、年を通して 28°C 以上の海水が存在していることになる。

枠内で参加する予定であり、又、各省庁の研究所は、科技庁振興調整費の JAPACS-Ⅱで対応する予定である。

本研究は、大気の研究という面では、メソスケールの研究者と、気候の研究者が本当に接点を持って計画に参加しているという点で、画期的なものと思われる。勿論、新しい枠組みを作るためのきしみは大きく、払っている犠牲は莫大なものがあるが、新しいフレームを作り上げる時、既存の学問秩序を再編しようとする時には、この程度の産みの苦しみは、仕方がなかろう。

3-2 WOCE & JGOFs

CO₂による地球温暖化が重要な政治的テーマとなり、又、現実の温暖化が、モデルの予測通りでないことから、海洋の重要性がますます増加することとなった。

問題は、二つある。一つは、温暖化の非定常なふるまいである。つまり、いままでの基本的な温暖化の理屈は正しいのであるが、海の中に熱が逃がされてゆくので、なかなか、暖まらない。つまり、海の循環、特に、熱の深層への逃げ具合が問題であるとするのである。この様なものを研究するプロジェクトとして、WOCE があり、振興調整費の中で、官庁系の研究者が、科究費の中で、大学の研究者が取り組んでいる。

もう一つは、炭素循環の問題である。化石燃料の燃焼で排出された CO₂の 60%程度しか、大気中に残留しておらず、依然として、missing sink の問題は解消されていない。このために、海洋中の物質循環を精力的に研究しようとする計画が、JGOFs である。物質循環という問題意識は非常に重要であり、化学や生物の人達との協同研究が非常に重要になってくる。そのため、この問題は、後で出て来る IGBP の重要課題となっている。只、考え方の異なる人達が集まるわけであるから、その文化摩擦は、非常に大きいものがある。

21世紀の地球科学は、20世紀の学問の枠組にとらわれない新しい展開をとげてゆくことと思われるが、その準備をするのが、20世紀最後の10年間なのであろう。そのためには、既存の学問の枠をとり去り、新しい秩序をつくらなければならない。世紀末の混乱とは良く言ったもので、各分野で、この世紀末の混乱が起きている。21世紀には、新しいパラダイムで物事が展開していくはずである。おそらく、21世紀の科学は、バイオや認知科学を中心に、展開していくであろうが、地球科学も、新しいパラダイムの下に21世紀に大きく飛躍することを願っている。

3-3 IGBP

そんなわけで、21世紀につながるプロジェクトとして、IGBPなるものが提案されて来た。これは、本年に、学会会議から勧告がだされ、文部省では、これに対し、7月末に開かれる学会会議で建議を出した。

この計画は、一方から見れば、「壮大で、野心的なもの」であるが、他方から見れば、「思いつきの、全体的なアイデアのないもの」ということになる。事実、G（地球科学）とB（生物学）とは、時間、空間スケールも異なり、発想法も異なるので、どの様にして、共通の考え方が出来るのか大

問題となっている。

しかし、地球上に、生物圏という圏があるのは事実であり、Bの持つ機能（地球科学的機能）を、積極的に取り込んでゆく必要があるのは間違いがない。但し、それが、B固有の方法論とどのように相互作用するかが、興味のもたれるところである。

3-4 EOS-衛星関係

グローバルな地球環境問題の展開に、人工衛星による観測の果たした役割は非常に大きい。事実、地球環境を呼びかけるポスターに、ことごとく、衛星から撮った地球の写真が使われている。さて、この人工衛星による観測を軸に、地球そのものを観測してゆこうというのが、NASAのEarth Observing Systemというわけである。勿論、衛星を打ち上げる役所として、「地球環境問題で、自分のところのなわばりを広げよう」という意図は見え見えであるが、それは、役所としては当然であって、結果として、役に立てば、意図は利己的なものであっても良い、とすべきであろう。

この様な世界的な衛星打ち上げ機関の研究重視の流れの中で、日本の宇宙開発事業団も、徐々に研究重視に、重点を移しつつある。1995年に打ち上げ予定のADEOSに、NSCAT（散乱計）をのせ、1996年打ち上げ予定のTRMMにも参加し、更に、1998年以後のJPOPでは、LAWSものせようか、という話になって来ているのは、昔から見ると様変わりの感がする。この日本の衛星関係の10年が、21世紀の新しい幕開けの準備となるのか、世紀末の仇花か、結果が楽しみである。

3-5 国際赤道域研究所

最後に、筆者が、個人的に関与しているプロジェクトである、国際赤道域研究所構想について、少々触れておく、これは、当初は、京大MUのグループの赤道レーダー計画であったのが、今日の地球環境問題のたかまりと、インドネシアの地球環境に占める位置ということを考えて、赤道域での、大気・海洋などのふるまいを総合的に調べる、アジアに根をおろした研究所構想に発展したものである。

これを受けて、日本の国内には、極地研に対応するものとして、赤道研を作り、日本での熱帯域の研究の拠点としようというのが、筆者の構想である。ともあれ、戦後40年、様々な組織が作られて来たが、この世紀末の10年は、おそらく、その組みかえの時であろう。いつまでも、大学、気象庁、水路部、水産庁ではないだろう。地球環境省、もしくは、地球環境研究構講などの新しい枠組みが心要であろう。

「新しい船には、新しい水夫がいる」とは、70年代の名文句である。21世紀の船に乗る水夫の活躍を期待している。

このような地球科学の中における気象学の再編の問題に対して、献身的に取り組んで来た九大教授瓜生道也氏が先日亡くなられた。「もののふ」の心映えではないが、「屍を乗り越えて」未来に向けて進む時であろう。あの世で、瓜生さんとうまい酒が飲めることを期待しつつ、合掌。

10 日－90 日の時間平均場の数値的長期予報に関するワークショップ

杉 正 人*

1. はじめに

標記のワークショップが、1990 年 6 月 4 日から 7 日までの 4 日間、米国コロラド州ボルダー市にある国立大気科学研究所 (NCAR) で開かれた。参加者は約 100 名で、そのうち米国以外の国からの参加者は 9 名であった。米国内の参加者では、NCAR と NMC からの参加者が 11 名ずつで最も多かった。NMC では、86 / 87 年の冬に 108 日間連続して、力学モデルによる 30 日予報の実験 (DERF 実験と呼ばれる) を行ない、その結果を詳しく解析している (Tracton et al. 1989)。今回のワークショップは、DERF 実験の成果をもとに次の戦略を練る NMC と、やはり 40 数例のモンテカルロ予報 (集団平均予報の一種) の実験を終えた NCAR の長期予報グループの共同作戦会議という見方でもできる。その他の参加者の大部分は、米国内の大学からである。ワークショップのねらいの一つに、力学的長期予報の分野にチャレンジしようという若い研究者を育てるということがあげられており、学生 (大学院生) の参加者も多かった。

ワークショップは、NCAR の Baumhefner と Blackmon の司会のもとで進められ、次の 6 つのセッションについて講演と活発な討論が行なわれた。

- 1) 予報スキル
- 2) 予報スキルの予報
- 3) 予報の感度
- 4) 予報スキルの解析
- 5) 長期変動の力学
- 6) 長期変動の予測可能性

2. 問題点のリスト

はじめに主催者代表の一人である NCAR の Blackmon が、ワークショップで討議すべき問題点のリストを提示した。

- 1) 力学的長期予報にスキルがあるか？
- 2) なぜスキルがあるか？ どの程度のスキルがあるか？
- 3) 初期条件の誤差の影響は？
- 4) 予測可能な長期変動力学の果たす役割は？

* 気象研究所

- 5) 予報スキルを前もって予測できるか？
- 6) 特定の長期変動モードの果たす役割は？
- 7) モデルの問題点
 - a) モデル気候値のドリフト
 - b) 20 - 40 日振動
 - c) 長期変動の変動度の不足

3. 流行語

余談になるが、ここで、ワークショップを通じてよく使われた3つのキーワード（というより流行語）を紹介しておく。

- ATLANTIC CITY
- CHEATING
- STATISTICAL SIGNIFICANCE

ATLANTIC CITYはアメリカ東海岸のカジノで有名な町で、集団平均予報法の一つであるモンテカルロ法に対して、それとは少し違う方法という意味で、都田さんが基調講演の中で用いてから人気語となった。CHEATINGはカンニングのことであるが、ワークショップでは、モデルの系統誤差の補正を意味した。予報実験で系統誤差の補正を行なう場合、大抵その誤差を実験の予報結果自身から計算する。つまり、あらかじめ答を知っていて修正するようなもので、ややフェアでないという意味を込めてCHEATINGという言葉が用いられた。最後のSTATISTICAL SIGNIFICANCEは、本来の意味で正しく使われていたが、NMC/CACのBob Livezeyが盛んにこれに関する質問やコメントを各講演者に対して行なったので流行語となった。

4. 基調講演

最初にGFDLの都田さんが基調講演を行なった。力学的長期予報一筋に数10年にわたって研究を続けて来られた都田さんの講演は、明快でわかり易く、ワークショップ全体のまとめと言ってもよい。話の要点は以下の通りである。力学的長期予報の現状は、現実的な要求に十分満足に答えられるものではない。最大の問題点は、スキルの良い場合と悪い場合のバラツキが大きいことである。どのような場合に予報のスコアがよく、どのような場合に悪いかを知り、あらかじめ予測し、悪い予報を除去していくことが重要である。予報スコアが悪いと予想されるケースでは、「今日は、予報が出せない」と言える勇気が必要である。少しずつ異なった初期値の集団から予報を行なうと、ある段階で集団がいくつかのグループに分かれて来る。予報スキルの悪いと考えられるグループを除去しながら時間積分を続けていくと、各グループがさらに枝分かれしていき、最終的に、いくつかのグループに分かれる。集団のサイズを十分大きくとればそれぞれのグループの起こる確率が計算

できて確率的に表現される予報を出すことができる。将来の力学的予報は、このような確率予報の方向へ進んでいくだろう。

都田さんは、講演の最後に、大気海洋結合モデルの現状について次のように話された。現在の大気・海洋結合モデルは、長い間時間積分を続けていくと、海面水温の値が実際の気候値からずれて行くということが起きる。これを克服するために、海面における熱や運動量のフラックスの補正値をあらかじめ計算しておき、予報の計算の途中で補正を行ないながら時間積分をして行くと、ほぼ正しい結果が得られる。場所によっては、そのような補正をしてもかなり大きなずれを生じる。それは、初期値が正しくないためで、データ同化作用によって正しい初期値を作るということが、大気・海洋結合モデルによる長期予報にとって重要な課題である。

5. 各国の力学的長期予報

初めのセッションで、ECMWFのMolteni、米国NMC/CACのTracton、英国UKMOのHarrison、フランスCNRMのRoyer、そしてNCARのBaumhefnerが各センタ・研究所での力学的長期予報の現状について報告した。その中でも最近とくに期待がかけられている集団平均予報(ensemble mean forecast)に関する実験をまとめると第1表ようになる。NCARの実験(モンテカルロ法)以外はすべてLAF法(初期値の時間を少しずつずらしたいくつかの予報の集団を用いる方法)である。NMC、UKMO、NCARでは既に相当多くのケースについて実験を行なっている。冬のケースについて実験を行なっている所が多いが、ECMWFとUKMOでは各季節について行なっている。集団平均予報のスコアは、平均としては、30日予報の前半では最新の初期値による単独の予報より悪いが、後半は少し良くなるというのが共通した結果である。フランスの実験では、45日予報を行ない16日目から45日目までの30日間の予報スコアを計算している。それにもかかわらず9例の

第1表 各国の集団平均予報

	例 数	予報時間	集 団 サイズ	初 期 時 刻 間 隔	分 解 能	文 献
ECMWF	16 *	30 日	9	6 時間	T 63	Brankovic 他 (1989)
アメリカ (NMC)	108 **	30 **	5	24	R 40	Tracton 他 (1989)
イギリス (UKMO)	65 *	30	9	6	1.875°	Harrison ? (1990)
フランス (CNRM)	9	30 ***	5	24	T 42	
アメリカ (NCAR)	42	30	10	モンテ カルロ	T 31	Baumhefner (1989)
日 本 (気象庁)	5	30	9	12	T 63	山田他 (1990)

* ECMWFとUKMOは各季節、他は冬のみ

** 集団平均予報としては25日平均, 104例

*** 45日予報の16日目から45日目の平均

うち2例では0.5以上のスコアがあり、ちょっと信じがたい結果だと言われていた。

Tractonは、前述のDERF実験の結果をもとに、力学モデルの予報スキルについてどちらかと言うと悲観的な見方を述べた。モデルの30日予報の後半はスキルが低く、集団平均予報によって少し良くなったとしても実際には役に立たない。30日予報を行なうのに、モデルの30日予報全部を用いるよりも、スキルの高い初めの7日ないし10日目ぐらいまでの予報の平均を30日予報として用いる方が平均的なスコアは高くなる、ということである。これに対して、ShuklaやBaumhefnerは、最近の新しいモデルでは、DERF実験の時よりもスコアが良くなっており、十分なスキルがあるという楽観的な見方を主張していた。Tractonは、自分は悲観的なのではなく現実的なだけだと言って反論していたが、これは多分にオペレーショナルな予報を出す責任を持つCACの立場を反映したものであると言える。つまり、スキルが不十分だという現実（モデルがいくら改良されても十分ということはない）を認めた上で、それを現業の予報にどう生かしていくか考えようという立場である。

6. 予報スキルの予報

都田さんの基調講演の中でも指摘されているように、予報スキルの予報ということが力学的長期予報の一つの大きな問題である。これまでに提案されている方法としては、予報スキルと予報の持続性、集団予報のバラツキ、天候レジームとの関係を用いて予報する方法などがある。MolteniはECMWFの実験では、予報のバラツキと予報スキルの間にあまり良い相関は無かったと述べた。フランスのRoyerは、予報の持続性と予報スキルの間に比較的よい関係があったと述べている。Palmer(1988)は、PNAパターンの時に予報のスキルが高くなる傾向があることを指摘しているが、DERF実験でも同様のことが確かめられている。コーネル大学のColucciは逆に、予報スキルの良い場合と悪い場合で流れのパターンにどのような違いがあるか調べた。その結果から、大西洋とヨーロッパでの東西指数のようなインデックスを定義してパターンを分類し、それを用いて予報スキルを予報することを試みた。

7. 30 - 60日振動

Blackmonが問題リストの中で指摘していた(20 - 40日振動と書いていたが)ように、現在の力学モデルの一つの大きな問題点は、熱帯の30 - 60日振動をきちんと予報できないことである。(気象庁のモデルでは、1988年の春はルーチンの15日予報でこの振動がよく予報されていた(Tsuyuki, 1990)が、予報期間が15日までと短いことと、その後1989年の場合は必ずしもよくない場合もあるということで、まだ十分とは言えない。)Molteniは、ECMWFで行われた30 - 60日振動の中高緯度への影響についての実験(Ferranti et al. 1989)について述べた。モデルで30 - 60日振動がよく予報できないので、熱帯の部分を30 - 60日振動を含む解析値で置き換えて(近づけ

て) 予報を行なうと、中高緯度のスコアがよくなることが示された。

Krishnamurti は、30 - 60 日振動は、それより高周波の波動成分と強い相互作用をしている。モデルで、30 - 60 日振動がうまく予報できないのは、実はこの高周波成分がうまく予報できないためであり、予報の初期値から時間フィルターにより高周波成分を除いてしまうと、30 - 60 日振動がよく予報できることを示した。

西ドイツの Max Planck 研究所の von Storch は、POP (EOF の拡張のようなもの) という方法を用いて、30 - 60 日振動の予報を改善する方法について述べた。この方法は、30 - 60 日振動そのものを改善するが、熱帯および中緯度大気の予報の改善にはつながらないのであまり意味がないのではないかという声もあった。

8. 水平分解能について

ECMWF の Molteni は、水平分解能が T 21, T 42, T 63, T 106 のモデルの 30 日予報を比較した結果、低分解能の T 21 のモデルはそのふるまいが他と大きく違っているが、他の 3 つは有意な差がなかった (Tibaldi et al. 1989) と述べた。NMC/CAC の Caplan は、T 80 と T 40 のモデルによる 30 日予報の比較を行なった結果、10 日目までは T 80 の方が良いが、それ以降はむしろ T 40 の方がスコアが良くなると述べた。これらの結果は、延長予報のためには、それほど高分解能のモデルは必要ないことを示しているようであるが、一方、分解能の高いモデルの方がブロッキングを良く予報できるという話もあり (後述)、必ずしも平均的なスコアだけで必要な分解能を決められないという気がする。

9. 系統誤差の補正

ワークショップで系統誤差の補正のことを CHEATING と呼んでいたことを前に述べたが、系統誤差の補正は予報スキルの向上にかなり効果がある。NMC の Saha は、少し異なった系統誤差の補正の方法について話した。それは、1 か月予報を行なう前の 1 か月間 (訓練期間と呼ぶ) の毎日の 24 時間予報の平均予報誤差を計算しておき、実際に 1 か月予報を行なう際に、その平均誤差を毎ステップ補正してやる。そうすると系統誤差が改善されるだけでなく、それによって移動波成分にも良い効果が出てくることが期待できるというものである。実際、予報スキルはかなり良くなっていた。この方法の問題点は、本来バランスしながら変化している大気の変数に、各々別々に補正を行なうので相互のバランスがきちんと保たれなくなってしまう (物理量の収支が合わなくなる) という点にある。

10. 水平拡散について

NMC の金光さんは、水平拡散がモデルのスピンアップに与える影響について話した。水平拡散

の強さをいろいろ変えた場合について境界層の運動エネルギーの収支の解析を行なった。水平拡散を弱くすると、その分鉛直拡散が強まり、そのことが地表面のフラックスにも大きな影響を与えること、とくにスピニアップに大きな影響があることを述べた。これまで水平拡散は、モデルの短波長のノイズを消すための数学的処理とみなされがちであったが、意外に大きな予報へのインパクトがあることが明らかになった。

11. 成層圏の影響

NCARのBovilleは、モデルの成層圏の扱い方によって、対流圏の予報に大きな差が出ることを示した。現業用のモデルでは、成層圏にあまり多くの層がなく、実質的な上端も10 mb程度と低い。このためプラネタリー波の上方伝ばんをきちんと表現できない。Bovilleは、10 mbに大気の上端を置いたモデルと、中間圏まで表現するモデルによる予報を比較し、両者の差が上から下へ伝わり、10～20日程度後には対流圏にもその影響が及んで来ること、その大きさは初期値の観測誤差の成長による誤差と同程度の大きさになることを示した。

12. ブロッキング

このワークショップで強調された力学的長期予報の大きな問題点の一つはブロッキングの予報である。予報スキルの悪い場合というのは、ブロッキングの発生・発達をうまく予報できていないというケースが多く、ブロッキングをきちんと予報できるかどうかということが予報スキルの鍵を握っているとも言える。Molteniは、ECMWFのルーチンの予報で、ブロッキングの出現頻度が実際よりも少なかったが、87/88年の冬はそれが増加し実際に近づいたことについて、自由大気中の鉛直拡散を除いたことが効いていると述べた。

DERF実験期間中大幅に予報スコアが低下した期間が2回あったが、いずれもブロッキングが起きている時期に対応している。NMC/CACのEbisuzakiは、このうち87年の1月のブロッキングのケースについて予報実験を行なった。その結果、現在のルーチンモデル(T80)では、DERF実験の時のモデル(R40)より大きく改善されることが示された。さらに、分解能の向上と物理過程改良のインパクトを別々に見てみると、それぞれ半分くらいずつ寄与していることがわかった。同じくNMC/CACのW.Chenは低分解能のモデルでは、シノプティックスケールの移動波成分の活動度が低いことが、ブロッキングの予報をうまくできない原因ではないかと考え、予報の初期値でそのような移動波成分を人工的に少し強調して予報を行なった。そうすると、低分解能(T40)のモデルでも、高分解能(T80)モデルの予報に近くなった。

13. 長期変動の解析・理論

長期予報の対象となる大気中のゆっくりとした時間変動の実体、成因、予測可能性についての解

析的、理論的な研究についての講演が主に大学の人たちからあった。筆者の勉強不足で十分理解できなかった話も多く詳しい紹介はできないが、いくつか印象に残った点について述べる。一つの論争点は、大気中の長期変動が外力の変化により強制されて起きるのか、それとも大気の力学の内部不安定によって生じるものかという点にある。今回のワークショップでは、内部的な要因が重要であるという見方が多かったように思う。イリノイ大学の Robinson は、準地衡風モデルで外力としては軸対称の放射のみを入れた時に、大気自身の力学的不安定により、ゆっくりとした時間変動が現れることを示した。ストックホルム大学の Reinhold は少ない波数で切断したスペクトルモデルの長時間積分で、一つの準定常状態がしばらく続き、短周期成分の卓越する遷移期をへてまた別の安定状態に移行する様子を示し、プラネタリー波とシノプティックスケールの移動成分との相互作用の重要性を強調した。NCAR の Branstator は、モデルの大気の長期変動を表わす EOF 成分のあるものでは、移動波成分の役割が重要なことを示唆する結果を示した。

14. 天候レジームについて

このワークショップでは、天候レジームという言葉もよく使われた。第4の流行語と言ってもよい。天候レジームとは、準定常的な流れのパターンで、しかも出現頻度の高いパターンのことである。昔から言われている天気図型とはほぼ同じである。その意味でこれは古くて新しい問題である。力学的長期予報のスキルがパターンによって異なるというようなことが明らかになるにつれて、力学的長期予報においても、天候レジームの問題が注目されるようになった。

現在 UCLA にいる気象庁の木本さんは、天候レジームを客観的に明確に定義する方法について話をした。その方法では、天候レジームは EOF 空間の確率密度の高い所として定義されるが、このように定義されたものは従来から定義されていたパターンとよく一致する。ECMWF や気象庁では、EOF 空間での類似度により集団予報の結果をパターン分類して解析していく方法が試みられており、将来の確率予報に向けて発展が期待されている。

エール大学の Sutera や CDC の Hansen 達は、もう少し単純に大気を二つのモードに分ける考え方について話した。これは、中緯度帯のプラネタリー波の振幅を見ていくと、それが大きい時と小さい時の二つに分類できる（二つのモードに分けられる）というもので、昔から行なわれているゾーナルインデックスによる分類とも似ている。

15. 2～3か月予報 — SST 実験

ワークショップの題は10日から90日の時間平均場の長期予報ということであったが、力学的長期予報の当面の課題が1か月予報であることから、2～3か月予報の方の議論はあまり多くなかった。Shukla は、熱帯の長期予報の予報可能性について、熱帯では初期条件に強く依存するじょう乱の予報可能期間は短い、長期変動は境界条件に強く影響されるので、むしろ1か月予報よ

りも2～3か月予報の方がうまくいく可能性があるという見解を主張していた。そして境界条件の影響をもっときちんと評価する必要がある、そのためには、観測値の境界条件（海面水温、土壌水分など）を用いた数値実験をもっと行なうべきであるということを強調していた。

一方、これに対して中高緯度では、海面水温の影響というのは、熱帯からの影響の伝ばんや、中高緯度の大気の力学を通して間接的に影響が現われるという点で、また海面水温以外の要因も大きく、S/N比が小さいという点で、海面水温の影響の評価がむずかしいと言える。NMC/CACのMoは、87、88、89年の3つの年の夏のケース（5月20日初期値）の1か月予報で、気候値の海面水温を用いたランと観測値（初期値に固定）の海面水温を用いたランの比較を行なった。その結果、北半球では88年は観測値を用いたランが、87年は気候値を用いたランがスコアが高かった。南半球では、はっきりした差が出なかった。ECMWFのMolteniも、同様の実験を86/87年の冬（エルニーニョ年）と88/89年の冬（ラ・ニーニャ年）についてT42のモデルで3か月間積分した結果について話した。最初の1か月は海面水温による差はほとんど無く、2か月目と3か月目では、88/89年のケースでは観測値を用いたランの方が、86/87年のケースでは気候値を用いたランの方がスコアが高かった。筆者も、88年の夏のケースについて気象研究所のモデルを用いた実験について話をしたが、海面水温の影響としては中高緯度の観測されたアノマリを説明できなかった。GFDLのSternも同様の実験を、88年初夏の北米の干ばつについて行なったが、モデルのアノマリと実際のアノマリはあまりよく合っていなかった。一方、NCARのTrenberthは、同じ北米の干ばつについて解析とバロトロピックモデルによる数値実験により、東太平洋のITCZがこの年は普通より数度北へずれていたことが北米の干ばつに大きく影響していたことを示した。

16. おわりに

今回のワークショップの第一印象は、日本は力学的長期予報に関して一步遅れをとってしまっているということであった。ワークショップのプログラムを見た時に、各国の力学的長期予報の現状についての報告が並んでいる中に日本からの報告がなかった。日本から参加していたのは筆者だけだったので、長期予報課で最近行なっている集団平均予報実験の結果を借りて、とび入りで発表を行なう準備をして行った。ところが、いくつかの講演を聴いているうちに、他の所ではすでに50例も100例ものケースについて実験を行ない統計的な結論を出しているのに、日本ではようやく5ケースを終えたばかりということで発表する意義がないように思えて来て発表をやめてしまった。後で少し冷静に考えてみると、少し遅れをとっているのは確かだけれども、後で始めた分だけモデルが良くなっているし、これまでの実験結果でもう結論が出つくしてしまったわけでもないのに、まだやるべきことは残っているという気がしてきた。また後で、日本ではどういうことをやっているのかという質問を何人かの人から受けた。というわけで、発表を中止して、せっかくのチャンスを逃してしまったことを大変残念に思いつつボールダーを後にした。

参考文献

- Baumhefner (1989) (投稿中? 多分 JAS か MWR)
- Brankovic 他(1989) ECMWF Tech. Memo. No. 153 (Quart. J に投稿中)
- Ferranti 他(1989) ECMWF Tech. Memo. No. 154 (JAS に投稿中)
- Harrison ?(1990) Meteor. Mag. に投稿中
- Palmer (1988) Quart. J. Roy. Met. Soc. 691-713
- Tibaldi 他(1989) ECMWF Tech. Memo. No. 152 (Quart J. に投稿中)
- Tracton 他(1989) Mon. Wea. Rev. 1604-1635.
- Tsuyuki (1990) J. Meteor. Soc. Japan 183-201
- 山田 他(1990) 1990 年春季大会予稿集 B 214

L. F. グループ平成元年度会計報告

平成元年 7 月 1 日～平成 2 年 6 月 30 日

収 入		支 出	
項 目	金 額	項 目	金 額
前 年 度 繰 越 金	626,843 円	印 刷 費	362,600 円
会 費	596,000 円	(vol. 28, No 1, No 2)	
バックナンバー販売	3,400 円	郵 送 ・ 通 信 費	50,822 円
利 子 利 息 等	5,274 円	月 例 会 会 議 費	7,436 円
		消 耗 品	5,059 円
		L F 関 西 補 助 金	35,800 円
収 入 計	1,231,517 円	支 出 計	461,717 円
総 計	1,231,517 - 461,717 = + 769,800 円		

残金 769,800 円は、次年度への繰越金とする。

編集後記

久しぶりに暑い夏となりあちこちで水不足や電力不足が叫ばれて、長期予報課でもそれなりに忙がしい夏となりました。

さて、今回の原稿は暑い盛りに締切、校正となりましたが、著者の皆様の頑張りで比較的順調に原稿が集まり話題も豊富になりました。今年1月にフロリダから帰国した数値予報課の隈さんには、季節内変動についての大作を書いていただき、長期予報課の小泉さんには、統計モデルの最先端の話題をわかりやすくということで、また、長期予報課の大先輩でもある高橋浩一郎氏には、最近のお仕事をまとめていただきました。京都大学の岩崎さんには、昨年度からの雪氷のシリーズの第2弾として、原稿をお寄せいただきました。東京大学の住さんには最近気象界の脚光を独占している気候問題について、WCRPを中心に国際協力の概要を解説していただきました。また、気象研究所の杉さんには、長期予報課として期待をよせる数値的長期予報のワークショップの報告をお願いしました。皆様、どうもありがとうございました。

グロスベッターは長期予報研究に関する同好会誌ですから査読ありませんし、ましてや英文など全く必要はありません。ご自分の研究や仕事の内容を、整理をかねて皆さんに知らせるくらいに考えていただいて、どしどし原稿をご応募ください。もちろん、論文紹介や長期予報にまつわるエッセイ、ご意見も大歓迎です。もし、ワープロ原稿でしたら、1行44文字で1ページ33行の形式で、図表を含めて6～7ページ以内にまとめてくださると編集に好都合です。また、載せてもらいたい話題などの要望もお待ちしております。

イラクのクウェート侵攻で石油危機の再来かということで、暖冬か寒冬かと今年の冬の長期予報は注目を集めそうです。この号がお手元に届くころ発表される寒候期予報はどうなっているでしょうか。

(林)

平成2年度グロスベッター役員

(筑波大学)	安成 哲三	(気象研究所)	佐藤 康雄
(長期予報課)	工藤 達也, 中村和信, 湯田 憲一, 河原 幹雄, 山田 真吾,		
	林 久美(庶務担当), 三浦 芳敬, 前田 修平(会計担当)		