

Bjerknes と Walker 循環

都 田 菊 郎*

1. はじめに

私は今、米国プリンストンの GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory: 地球流体力学研究所) を引退し、イタリアのボローニャに住んでいる。この研究所 (CNR) で研究する他に、イタリアの食事を楽しみ、壮大なポルティコの下を散策し、若い女性がすらりと伸びた脚をモーターバイクに乗せて走るのを見るのが、ここでの私の生活である。

最近、このボローニャ大学で講義をすることになった。この大学はご存知のように世界最古で、設立はほぼ紀元1000年。ピザの斜塔より100年以上も古い。S. Tibaldi 教授とは、彼の ECMWF (ヨーロッパ中期予報センター) 時代からの知り合いで、この人が私にエル・ニーニョの講義をしてみてもどうかと持ちかけてきた。これは面白い提案である。何故かという、ヨーロッパは ENSO (エル・ニーニョ南方振動) の観点から言えば世界の最果てに当る。それでも、ENSO の影響を無視できるとは限らないし、ひょっとしてこの現象を天気予報にうまく利用できるかもしれないと考えたのであろう。

そこで、この講義をどこから始めるべきか考えてみた。思案の末、Monthly Weather Review 誌に掲載された J. Bjerknes (1969) の論文を出発点にすることにした。エル・ニーニョの実際の予報で一躍有名になった米国コロンビア大学の M. Cane がよく引用するのがこの論文である。Cane によれば、エル・ニーニョの物理過程のほとんど大部分がこの論文で言い尽くされているという (Cane and Zebiak, 1985)。この Bjerknes

の論文は随分前に読んだことがあるが、私には大層読みづらい論文であった。

これは私の個人的な憶測であるが、Bjerknes にはかなりの影響を受けたように思うし、またそうでないような気もする。影響を受けるには、与える側と受け取る側の相性というか、波長というか、そんなものがうまく合うことが肝要ではなかろうか。

2. J. Bjerknes との出会い

話は遡って1967年、私は GFDL の Smagorinsky に従って、スウェーデンのストックホルムに行くことになった。それは GARP (Global Atmospheric Research Program) 発足の会に出席するためであった。ご存知のように、GARP はその後世界的な気象の研究活動組織として画期的な役割を果たすことになるのだが、その時にはそういうことは少しも判らなかった。私としては、アメリカから初めて国外に旅行することで緊張していた。

GFDL はその頃ワシントンに在り、ダレス空港からストックホルムに渡航するというので、少々はしゃいだ気持ちで出発を待った。一緒に空港で勢ぞろいした一同は、人工衛星の Johnson, Wark, Fritz と、他に Smagorinsky, Hollgren であった。Hollgren はその頃、IBM 社から ESSA (米国環境科学庁、NOAA 海洋大気庁の前身) に移ったばかりで、全く無名であった。しかし、この無名の男が、間もなく GARP の存在を大々的に、しかも有効に報道したおかげで GARP の活動も盛んになり、同時に彼も名をあげた。さすがである。彼はその後 Cressman を引継いで気象局の長官になり、今や気象学会の最高の書記である。

ストックホルムの空港では、Bolin が我々を迎えてくれた。もちろん、私を迎えにきたわけではなく、Smagorinsky に会いに来たのである。Bolin は、その

* イタリア国立研究所、地球環境研究施設(現：米国バージニア州ジョージメーソン大学)。

—1997年6月16日受領—

—1997年12月25日受理—

後有名になった JOC (Joint Organizing Committee) の委員長で、委員の Smagorinsky と会の運営について話し合うためであった。

GARP (1967) の会は、ストックホルムから15km離れたバルチック海の中にあるシェパーホルメンという島で催された。その島に多人数を収容する施設があり、そこに50人ばかりが缶詰になって、毎日議論をしたのである。その時、スウェーデンは夏の真盛りなので、太陽は空に昇りきりであった。初日のかなり初めの話題提供に私が指名された。多分、前日の Bolin と Smagorinsky との話し合いでそう決まったのであろう。私のテーマは「2週間の予報」であった (Miyakoda *et al.*, 1969)。その他、Charney, Smagorinsky, Charnock, Ooyama, Yanai, Lilly, Möler, Bjerknes らが話したように記憶している。山本義一先生も日本の代表として参加されていた。先生は歩く距離を自動的に記録するメーターをズボンのポケットに入れて、会の合間に歩く運動をしておられた。

GARP の目的は、大気循環の理解を深め、延長予報の方法に関する物理的・数学的基礎を発展させること、となっている。その中の、第1グループは目的の1つを「Predictability (予報可能性)」においた。その目標を10日とするか、2週間とするかが議論的になり、ご存知のように結局「10日」に決定した。この決定は後からみて正しいものであった。その頃英国王立気象会会長の Robinson は2日の予報限界を、Lorenz は5日を、Charney は彼の「Predictability」の論文で3つの GCM (大循環モデル) の結果に基づき10日を (Charney *et al.*, 1966)、それぞれ主張していたからである。ただし、この「Predictability」の議論は GARP のレポートには記録されていない。

私の話題はかなりの反響を呼んだと思う。と言うのも、2〜3日後に私の部屋に数人の来客があったからである。その中に、UCLA (カリフォルニア大学) の Mintz がおり、同僚の J. Bjerknes を紹介した。これが Bjerknes との最初の出会であった。早口でまくしたてたのが Mintz で、Bjerknes は付き添いの格好であった。それでも Bjerknes が「1つ提案がある。」と、とつとつとしゃべり始めた。「GFDL のモデルは精度が良いようだから、これを使って赤道から中緯度にかけての遠隔作用 (teleconnection) を調べる数値実験をしてはどうか？」その際、彼は自分の論文 (Bjerknes, 1966) を示し、その根拠として1969年の論文の話をした。その論文は当時まだ印刷されていなかった。

「Walker 循環」という言葉をその時初めて耳にした。この論文で彼は「エル・ニーニョ」について言及しているが、当時「エル・ニーニョ」と言えばまだペルー沖の局地的現象のことであり、ENSO やラ・ニーニャも気象・海洋学の語彙にはまだなっていない時代である。しかし、彼はその時既に、エル・ニーニョを赤道太平洋全域に拡がる現象として捉えていた。

その頃、私は Namias や Sadler に影響されて、海面水温が大気と与える効果を研究していた。Namias のいる長期予報課から水温のデータをもらってきて、それをモデルに与え、予報精度が向上するかどうか調べるのである。その研究で水温効果が20日後に初めて効いてくることを知った。つまり、Bjerknes の水温効果は10日予報には現われて来ないのだ。言い換えると、Bjerknes の提案を受け入れれば1か月の積分を必要とし、私共の平常の計算持ち時間などいっぺんに吹っ飛んでしまうのである。

丁度その時、英国ダンステーブルの気象局から、Rowntree が GFDL に派遣されてきた。そこで、私は彼に、この問題に関連した簡単な実験をしてみてもどうかともちかけてみた。彼は案の定渋って、「ダンステーブルに伺ってみななければならない。」と言った。間もなく、ダンステーブルから公式の返答が戻ってきた。曰く、「Bjerknes の実験をやってみよう。」そこで Rowntree は、1967年から翌年にかけてこの数値実験を続けたのである。Bjerknes も、この間一度ならずとワシントンにあった GFDL を訪れ、進捗状況を見にきた。ところで、後で判ったことだが、ダンステーブルから研究の許可を与えたのは、あの頭脳明晰な Sawyer であった。2年後の1969年に GFDL のプリンストン移転祝賀会があり、Sawyer も招かれてやってきた。その時、「Rowntree に大層立派な仕事を与えてくれてありがたい。」と感謝していた。実は、これは Bjerknes の提案なのである。Sawyer はその後、歴史上重要な研究として、Rowntree (1972) の仕事を挙げている。

ともあれ、J. Bjerknes の推測は本当に正しかったということである。1969年の論文で Bjerknes はこう述べている。「私の推察を検証するには、十分に信頼のおける力学モデルを用いて海洋・大気の相互作用を規定し、数値実験をすることである。この論文では、そのことについては触れない。しかし、モデルはここに述べた経験的事実を十分に再現するものでなければならない。」これは驚くべき洞察で、素晴らしい先見の明であり、彼がシェパーホルメンで私を説得したことと一致

する。ついでのことであるが、この Bjerknes のシェパーホルメンでの経緯を23年後(1990年頃)、Mintz に昔の思い出として話したところが、彼は一切覚えていないと言うのである。そして Mintz はその後間もなく癌で亡くなった。

その当時 Namias は、Rowntree の仕事に感心しながらも、その結論には不満で、「水温は2日予報にも効くし、中緯度の水温も重要だ。」と主張していた。そこで1974年フロリダでの GATE (GARP Atlantic Tropical Experiment) の会合で、私は「Bjerknes か、あるいは Namias か？」と題した論文を発表した。つまり、大気の流れには赤道付近の水温が重要か (Bjerknes)、それとも中緯度の水温が重要か (Namias) という問題提起である。私の結論は「両方とも重要である。しかし両方とも20日後にしか効かない。」というものであった。つまりどちらも重要だという折衷案である。ご存知のように、正解は20年後の Lau and Nath (1994) の研究まで持ち越すことになる。

私とエル・ニーニョとの関わりはそれからしばらく跡絶えた。というのは、私は既に1975年から10年間は「1か月予報」の研究をする決心をしていたからである。しかし、1974年、オーストラリアの Bowen が GFDL を訪れ、私にエル・ニーニョの重要性を説得した。Bowen はその昔、宇宙塵が地球と遭遇すると降雨が多くなることを唱えて、センセーションを巻き起こした人である。そして今度は、エル・ニーニョがオーストラリアにとって如何に大問題であるかを私に鼓吹したのである。話が終わって私はすっかり感心し、これが長期予報の問題であると理解した。

3. J. Bjerknes という人

J. Bjerknes という人は飾らない素朴な人柄で、学問的には徹底して物理的推考でゆく科学者である。私には自然を深く観察するスカンジナビアの伝統的な気象学者に見える。北欧人の1つの特徴は、物事に執拗に食い下がつてゆくことのように思う。つまりしつこいタイプで、殊にイタリアから北方を眺めると、イタリア人とは全く対照的に見える。Bjerknes と Holmboe (1944) は、アメリカ気象誌 (Journal of Meteorology) の第1巻・第1号に低気圧の理論を発表した。内容は、偏西風の下で波がどのように東に動いてゆくかという問題を、順圧・傾圧の条件下で論じたものである。殊に、「気圧の傾向方程式 (tendency equation)」を用いて、波動の東進を臨界値の上と下の場合に分けて細か

く解説している。Holmboe も北欧人であった。議論は大層込み入っており、丁度、空を飛ぶ弾丸を空中でさし停めて、弾丸の前進する仕組みを論じているようなものである。それから3年後に同誌に載った Charney (1947) の傾圧不安定の理論の方が、現在では圧倒的に気象界で受け入れられている。このような流体力学的に込み入った問題は、流体力学的手法の方が受け入れられ易いし、それで十分ではなかろうかと私は思う。勿論、北欧人はそうは思わないに違いない。

Bjerknes と Holmboe は、Charney にとっては UCLA 時代の先生にあたる。岸保氏、正野先生、Garcia らから聞いた話では、Holmboe はある種の北欧人タイプで、数値予報が嫌いでプリンストン (高級研究所) の方針に強く反発していたそうである。つまり、数値予報は工学的技術であって、物理学ではないというのである。その点、Bjerknes はどうでもよかったようで、すんなりと数値モデルを認めていたように思える。

Jacob (Jack) Bjerknes は、その父親が気象力学の元祖の1人 Vilhelm Bjerknes である。こういう人を親に持つ息子はさぞかし大変であろう。Eliassen (1994) や中村・高藪 (1997) によると、最初の「前線波動モデル (frontal cyclone model)」は Jack によって提案され (Bjerknes *et al.*, 1919)、その後「低気圧の一生」の論文 (Bjerknes *et al.*, 1922) に発展したとされている。だが、もう少し立ち入ってみると (Friedman, 1989)、それより前の1910年に父 Vilhelm が「収れん線 (confluence line)」の論文を発表している。1913年、Jack は父に連れられ、ドイツのライプツィヒに移った。父が新設された地球物理研究所の所長になったのである。その時、Jack は20歳。地上天気図を毎日一生懸命描いていた。間もなく第1次世界大戦が勃発し、彼等の生活もかなり苦しくなった。1917年、遂に Vilhelm は息子連れてノルウェーのベルゲンに引き上げた。Vilhelm は、息子とその同僚である Solberg や Berggeron らの共同研究を指導し、それが「低気圧の生涯」を描いた論文に結実した (Eliassen, 1994)。

このような次第で、その方面では一生親に頭が上がらないと、“すんなり”と思ったのではないだろうか。Jack は親に反抗する性格ではないから、同じ気象学を父とは違った物理的推理と帰納で“すんなり”といくことになる。ついでのことに、Vilhelm は強い性格で、その父 Anton とは、ある種の物理学上の問題で、はっきりと異なった立場をとったことがよく知られている (Friedman, 1989)。ずっと後年になって、私は Jack の

息子をワシントンの気象局気候課で見かけたことがある。その時、“3代目”はさぞかし大変であろうと同情したものである。今から考えると、あの息子は4代目であったことになる。

その昔、J. Bjerknes の仕事の1つに、対流に関する“slice method”がある。GARP が発足した頃、Charney が議長で私は一委員として参加していた。その席上、Charney は J. Bjerknes を加えてはどうかと提案した。Bjerknes は積雲対流のパラメタリゼーションには関心がないのではないかと私が言うと、Charney は Bjerknes (1938) の論文を指摘した。私は“slice method”を大学で教わったが、彼の発案とは知らなかった。J. Bjerknes は、1971年マイアミでの GATE の会に招かれて、あるセッションの議長を務めた。その時、会議の合間に私は Bjerknes と雑談していて、話がたまたま赤道成層圏の準二年振動に及んだ。彼曰く、「この現象には海洋の水温が関係しているのではないか？」私が「既に Holton and Lindzen (1972) の波動成分間の相互作用の理論があるが…」と言うと、Bjerknes は「これは別の考え方だ。」と返事をした。さすがスカンジナビアの素朴な自然観であり、北欧人の執拗さがこの例にもみられる。これは最近、安成氏らが提案する対流圏の準二年周期変動であって (Yasunari, 1989)、成層圏のそれとは直接の関係はないであろう。

4. Bjerknes の Walker 循環

Bjerknes は1969年の論文で「Walker 循環」を提唱した (Bjerknes, 1969)。この循環の特徴は赤道にトラップされていることである。論文にはどこにも「トラップ」と言う言葉は出てこないのだが、「もし経度方向に延びる壁がなければ、この赤道循環はその絶対角運動量を隣接する北と南の大気と交換する。そして赤道にあることになる。」と述べている。そうではあるが、これを聞いている人は頭がグラグラするであろう。実際に、彼が南方振動ではなく、赤道トラップのヒントを得たのは、次の2つの事実からではなかろうか。1つはその10年前に発見された海洋の赤道潜流 (equatorial undercurrent; 但し、彼は counter-current と記している。誤植か?) であろう。もう1つは衛星写真において、インドネシア付近を除いて赤道には雲が全くないことである。これも、力学的手法ならば、それ以前に松野氏が示したように (Matsuno, 1966)、赤道ケルビン波の効果で簡単に説明できるのではなかろうか？ こういうところが Bjerknes の論文の難解な点

なのであろう。

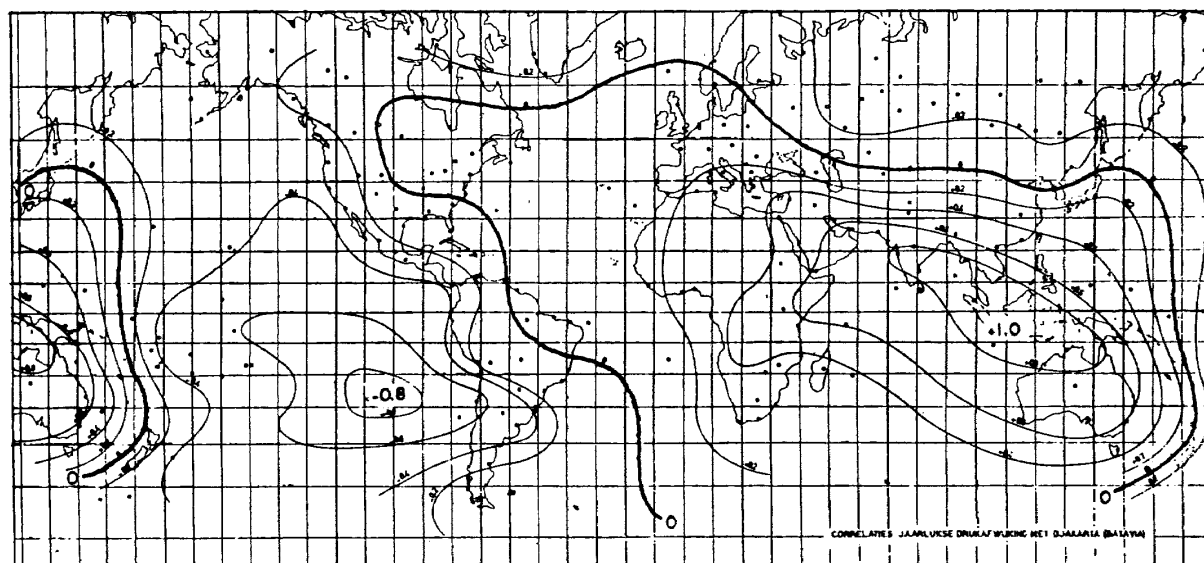
Cane の指摘する Bjerknes (1969) の決定的な箇所は次の記述である。「赤道の偏西風が弱まるにつれて海洋の湧昇流を弱め、それに因って太平洋の東側が高温になり、大気に熱を与える。その結果、Walker 循環に伴う東西温度差が減少して循環が弱まる (これがエル・ニーニョである)。このように赤道帯には大気・海洋の相互作用によって、エル・ニーニョとアンチ=エル・ニーニョ (ラ・ニーニャ) が繰り返される。このような現象が果てしなく続く根拠は十分にある。ただ、どのようにして反転が起きるかはまだ判らない。……要は、海洋力学をもっと発展させることが肝要である。」全くその通りであり、実際に海洋・気象学の歴史は、深海層の密度循環の問題は別にして、その後そのように発展していった。

1978年から私は Rosati と一緒に、大気海洋結合モデルを、プリンストンの Philander の指導のもとに作成することにした (Rosati and Miyakoda, 1978)。その後、私は1980年に初めてオーストラリアを訪れ、若い Nicholls と会い、再びエル・ニーニョの洗脳を受けたのである。考えてみれば、エル・ニーニョの研究はオーストラリアの Lockyer-Lockyer (1904) に始まり、インドの Walker (1923)、インドネシアの Berlage (1957)、オーストラリアの Troup (1965)、Nicholls (1981)、Webster (1981)、それに新顔の Hirst (1986)、更にはニュージーランドの Trenberth (1976) と、赤道・南太平洋の人達の活躍が目立つ。ある見方からすれば、これは植民地統治時代の宗主国の人達でもある。その点、スカンジナビアからの Bjerknes は (Palmén と共に) 異色の存在であった。

1981年頃から、私は、ワシントン (NMC: 気象センター) の Gilman と一緒に長期予報の提案をジュネーブ (WMO/ICSU: 世界気象機関) を通して始めた。その時の拠り所はオーストラリアでの経験である。長期予報はもはや夢物語や学問の1分野ではない。やがて1982年の大エル・ニーニョが発生した。その現象が世界の気象に与えた影響は圧倒的で、有無を言わせぬものがあつた。さぞかし地下の Bjerknes も舌を巻いたことではなかろうか。

5. Walker 循環と熱帯圏振動

現在私がイタリアで従事している研究は、「ENSO=モンスーン」という2つの振動系の結合の仕組みに関してである。これは安成氏 (1991) が唱える「ENSO・



第1図 Walkerの南方振動を示す。図は地平面気圧のインドネシアのジャカルタと世界各地との同時相関の分布。Berlage (1957) の原図を Bjerknes (1969) から転載。

モンスーン年」と、英国の Ward *et al.* (1994) が提案した「熱帯圏の振動 (TO: Tropical-wide Oscillation)」という2つの概念を受け継いだものである。その昔、「南方振動 (Southern Oscillation)」の概念が、インド気象局の Walker と Bliss (1932) によって提出された。彼等はインドのモンスーン降雨は南方振動と密接な関係があると推測した。というのは、1930年頃の地上気圧の観測値で、インドのモンスーンと南アメリカ (チリ) のサンチアゴとの間に高い相関があることが知られていた (第1図)。その後、オーストラリアの Troup (1965) が南方振動指数 (SOI) を提案し、ニュージーランド出身の Trenberth が南太平洋と北インド洋の間で気圧の規則的なシーソー運動があることを示した¹¹ (Trenberth and Shea, 1987)。1983年頃、そのような事実を基にして、赤道太平洋に展開するエル・ニーニョが、ラ・ニーニャ¹²も含めて ENSO (El Niño/Southern Oscillation) と命名された¹³。私共から見るとこれは命名の混乱である。しかし、ENSO という語彙は既に学会では定着した (一般には受け入れられていないが)。過去の経緯を認めるとすれば、現時点では「ENSO・モンスーン」という複合振動系をどう名付けるかが問題である。

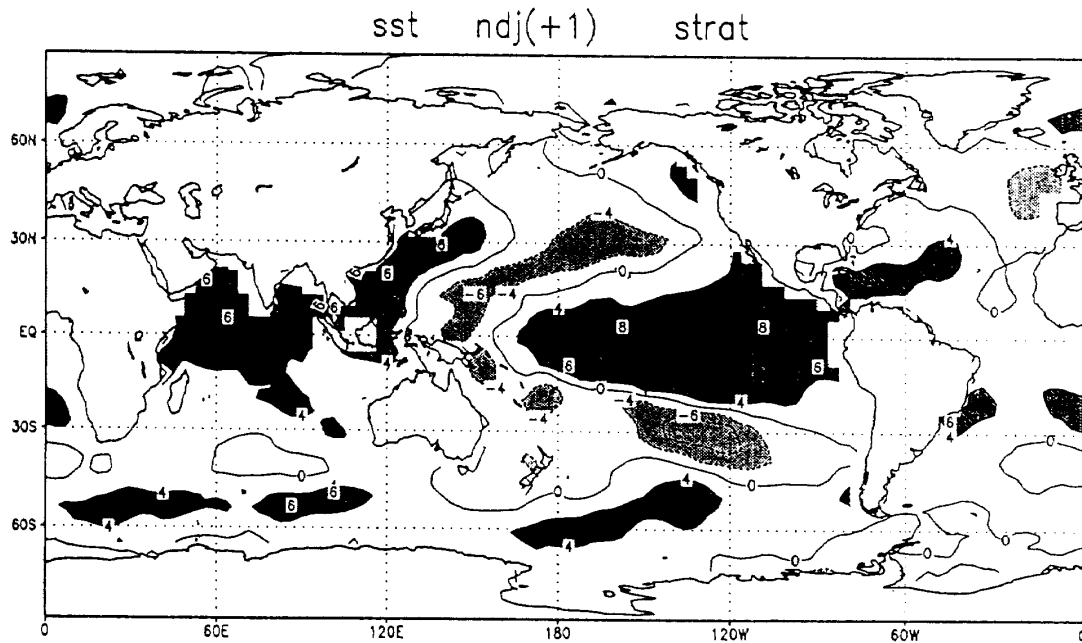
私共がイタリアで調べたところでは (Navarra *et al.*, 1997; Miyakoda *et al.*, 1997), 最も基本的な振動

は南方振動というよりは、赤道を挟んで対称的な馬蹄型の振動である。その振動を示すために、1961~94年までの34年間の全球の海面水温 (SST) を、先に述べた熱帯圏振動指数 (TOI: TO Index) を毎年7月から3か月平均した値に投影してみた。つまり、両者の相関をとったのが第2図である (付録1を参照)。特に、第2図には同時相関ではなく、SSTをTOIから4か月ずらし、毎年11月から3か月平均した値との相関を示している。この図に関する重要な点の1つは、この振動が時々 (34年に8回の割りで) 不規則になることである。もし不規則な年を除けば、その振動は準2年周期ではなく、きちんと2年周期になると私共は考えている。Ward *et al.* (1994) にならって、私共は規則的な年を Type-I と呼び、不規則的な年を Type-II と呼ぶ (付録2を参照)。第2図は Type-II の年を除いた結果である。この季節 (11月から翌年1月) の SST 時系列には全てのエル・ニーニョとラ・ニーニャが含まれている。第2図は同じ年の相関であるが、一方の時

¹³ 出典は Rasmusson and Wallace (1983)。エル・ニーニョの原意はペルー沖の地域的な現象であった。それに対し、今やエル・ニーニョはもっとも大きな現象であることが明らかとなった。しかも、暖かい相と冷たい相があり、それが1つの現象の正と負の両面であることがはっきりと判ってきた。その意味から、ENSO とした方が実情を正確に伝えるものとし、上記の論文でそのように名付けられたのであろう。

¹¹ その前に Berlage (1957) が示している (第1図参照)。

¹² この名前は Philander (1985) による。



第2図 遠隔作用を示す馬蹄型の振動図. 図は熱帯圏の振動指数 TOI (7~9月の3か月平均) と各地の海面水温 (11月~翌年1月の3か月平均) との相関係数の分布図. この相関図に現われる水温偏差は2年の周期で符号を変える.

系列を前後2年にわたってずらして相関を調べると、変動が2年の周期で繰り返すことが判る。つまり、馬蹄型振動が周期2年で符号を変えて現われる。これは海洋のロスビー波とケルビン波が基になり、それに大気との相互作用と大気の遠隔作用が加わってこのような模様が生ずるのであろう。前にも述べたように、ENSOもこの過程の重要な部分を形成する。この振動系の模様は、SST、大気の鉛直流、降水量にみられるもので、TOIに投影しなくても、ただSSTの時系列からType-IIの年を除き、周期2年の変動を通すバンドパスフィルターをかけると、これらの分布が現われる。更に、ENSOの顕著な年にも、SST偏差の分布図にこの模様がはっきりと現われる。他の付随的な量、例えば地上気圧は、南方振動的なシーソー運動を示すことが判った。

ところで、不規則な年(Type-II)はWalker循環が平年並の年である。つまり、2年周期を継続するにはWalker循環が平年からずれている必要がある。即ち、上昇域が東や西にずれている。このような仕組みは安成氏の「モンスーン年」のモデルで提案されている(Yasunari, 1990)。彼の言う“wash out”というのは、Type-IIの過程と同じではなかろうか？

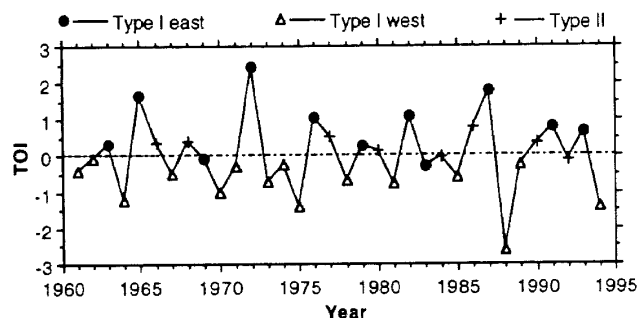
このような次第で、ENSO・モンスーンの関係はBjerknesの名付けたWalker循環が最も肝心の鍵を

握っているように考えられる。もう少し立ち入ると、この循環の上昇域に加えて、赤道のインドネシアの辺りから南東に延びる降雨帯、つまりSPCZ(南太平洋収束帯)、並びに北東に延びるもう1つの降雨帯、更にインドのモンスーン降雨域が、この現象の主役ではなかろうか？Bjerknesはこの赤道に沿った循環を強調しながら、これは南方振動の一部であるとし、Walkerの名前をその現象に付けている。

以上がイタリアの同僚(Navarra, Ward)との共同研究の概要である。この仕事のキーワードは遠隔作用、Walker循環、及び2年周期で、全てBjerknesの強調した言葉である。私は最近、夜中に目が醒めて、仕事の目途に気付くことがある。少し前には、絶えてなかったことである。丁度、シェークスピアのハムレットが亡父の亡霊に対面するように、私はJ. Bjerknesの霊と接触しているのかもしれない。

付録1：TOI (熱帯圏の振動指数)

Ward *et al.* (1994) は熱帯圏の遠隔作用を示す指数を提案した。この趣旨に従い、Navarra *et al.* (1997) は、熱帯圏(40°N~20°S, 全経度)の降雨偏差の分布の3か月平均(7~9月)を正規化し、それに経験直交関数(EOF)解析を施し、最も卓越したモードを抽出した。その空間パターンは第2図に現われるものと良



第3図 TOIの時系列(横軸は年). TOの3種類の状態 (Type) を, ● (Ie), △ (Iw), 及び+ (II) で示す. 詳細は付録2を参照のこと.

く似ている. その主成分時系列の毎年の値からその10年移動平均値を差し引いたものを最終的な TOI として用いている.

第3図に1961~94年にわたる TOI の時系列を示した. これは, 英国の気候研究施設 (Climate Research Unit-Norwich) の蒐集した降水量の観測値 (Hulme, 1994) を基にして計算したものである. エル・ニーニョ年 (1965, 1972, 1976, 1982, 1987など) には正, ラ・ニーニャ年 (1975, 1988など) には負となる傾向が明瞭に見て取れる.

付録2: Type-I と Type-II

第3図では, TO が規則的に現われた年 (Type-I) とそうでない年 (Type-II) の区別も示した. これは, 太平洋・インド洋の赤道付近 ($0^{\circ}\sim 10^{\circ}\text{S}$, $45^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}\sim 82^{\circ}\text{W}$) の7~9月の平均 SST 偏差から求めた指数を基にして決めたものである. 勿論, この指数は TOI と高い相関を持つ.

Type-I の年は, 更に Ie と Iw の2種類に分類される. Ie (Type-I east の意) の年は指数が正で, エル・ニーニョ年を含む. 赤道太平洋の湧昇が弱まり, Walker 循環の上昇域 (つまり, 降雨域) が東偏する. 一方, Iw (Type-I west の意) の年は指数は負の年に対応し, ラ・ニーニャ年を含む. 赤道太平洋の湧昇は強まり, Walker 循環の上昇域は西偏する. Walker 循環の上昇域は Type-II の年にはほぼ平年の位置に戻り, 指数もほぼゼロになる. 本文にも記したように, この時「ENSO・モンスーン振り子系」はその振動を停止する.

謝 辞

この解説を書くにあたって, スtockホルム大学の Hilding Sundquist 教授に, Bjerknes とスウェーデン

に関する事柄について検討をお願いしたことを記し, 謝意を表す. また, 文の矯正と図の作成を手伝って頂いた都田豊子と Elizabetta Mossetti 女史に感謝する. 更に, 本稿の改訂に当り, 編集委員の中村尚氏と査読者より貴重なコメントを頂いたことにも感謝したい.

参 考 文 献

- Berlage, H. P., 1957: Fluctuations of the Atmospheric General circulation of more than one year: Their nature and Prognostic Value. Mededelingen en Verhandeligen, 69, Koninklijk Nederlands Meteorologisch Insititut, 152pp.
- Bjerknes, J., 1938: Saturated-adiabatic ascent of air through dry-adiabatically descending environment, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 64, 325-330.
- Bjerknes, J. and J. Holmboe, 1944: On the theory of cyclones, J. Meteor., 1, 1-22.
- Bjerknes, J. 1966: A possible response of the atmospheric Hadley Circulation to equatorial anomalies of ocean temperatures, Tellus, 18, 820-829.
- Bjerknes, J., 1969: Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific, Mon. Wea. Rev., 97, 163-172.
- Cane, M. A. and S. E. Zebiak, 1985: A theory for El Niño and the Southern Oscillation, Science, 228, 1085-1086.
- Charney, J. G., 1947: The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current, J. Meteor., 4, 135-162.
- Charney, J. G., R. G. Fleagle, V. F. Lally, H. Riehl and D. Q. Wark, 1966: The feasibility of a global observation and analysis experiment, Bull. Amer. Meteor. Soc., 47, 200-230.
- Elliassen, A., 1994: Vilhelm Bjerknes's early studies of atmospheric motions and their connection with the cyclone model of the Bergen School, Proc. of International Symposium, Geophys. Inst., U. of Bergen, 27 Jun-1 Jul., 3-12.
- Friedman, R. M., 1989: Appropriating the Weather, Cornell University Press, Ithaca and London, 251pp.
- GARP, 1967: The Global Atmospheric Research Programme. Rep. of the Study Conference, Held at Stockholm, 28 Jun-11 Jul. 1967. The ICSU/IUGG-Committee on Atmospheric Science and COSPAR, co-sponsored by World Meteor. Organiz. 144pp.
- Hirst, A. C., 1986: Unstable and damped equatorial modes in simple coupled ocean-atmosphere models,

- J. Atmos. Sci., **43**, 606-630.
- Holton, J. R. and R. Lindzen, 1972 : An updated theory of the quasi-biennial cycle of the tropical stratosphere, J. Atmos. Sci., **29**, 1076-1080.
- Hulme, M., 1994 : Validation of Large-Scale Precipitation Fields in General Circulation Models, Global Precipitation and Climate Change, M. Desbois and M. Desalmons, Eds., NATO ASI Series, Springer-Verlag, Berlin, 387-406.
- Lau, N.-C. and M. J. Nath, 1994 : A modeling study of the relative roles of tropical and extratropical SST anomalies in the variability of the global atmosphere-ocean system, J. Climate, **7**, 1184-1207.
- Lockyer, N. and W. J. S. Lockyer, 1904 : The behavior of the short-period atmospheric pressure variation over the earth's surface, Proc. Roy. Soc. London, **73**, 457-470.
- Matsuno, T., 1966 : Quasi-geostrophic motions in the equatorial area, J. Meteor. Soc. Japan, **44**, 25-42.
- Miyakoda, K., J. Smagorinsky, R. F. Strickler and G. D. Helmbree, 1969 : Experimental extended predictions with a nine-level hemispheric model, Mon. Wea. Rev., **97**, 1-76.
- Miyakoda, K., A. Navarra and M. N. Ward, 1997 : Tropical-wide teleconnection and oscillation, Part II. ENSO-monsoon system, submitted to Quart. J. Roy. Meteor. Soc.
- 中村 尚, 高数 出, 1997 : Shapiro の新しい前線・低気圧モデル, 天気, **44**, 85-100.
- Navarra, A., M. N. Ward and K. Miyakoda, 1997 : Tropical-wide teleconnection and oscillation, Part I. Teleconnection index and Type I/Type II states, submitted to Quart. J. Roy. Meteor. Soc.
- Nicholls, N., 1981 : Air-sea interaction and the possibility of long-range weather predictions in the Indonesian Archipelago, Mon. Wea. Rev., **109**, 2435-2443.
- Philander, S. G. H., 1985 : El Niño and La Niña, J. Atmos. Sci., **42**, 2652-2666.
- Rasmusson, E. M. and J. M. Wallace, 1983 : Meteorological aspects of El Niño/Southern Oscillation, Science, **222**, 1195-1202.
- Rosati, A. and K. Miyakoda, 1988 : A general circulation model for upper ocean circulation, J. Phys. Oceanogr., **18**, 1601-1626.
- Rowntree, P. R., 1972 : The influence of tropical east Pacific Ocean temperatures on the atmosphere, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., **98**, 290-321.
- Trenberth, K. E., 1976 : Spatial and temporal variations of the Southern Oscillation, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., **102**, 639-653.
- Trenberth, K. E. and D. J. Shea, 1987 : On the evolution of the Southern Oscillation, Mon. Wea. Rev., **112**, 326-332.
- Troup, A. J., 1965 : The 'southern oscillation', Quart. J. Roy. Meteor. Soc., **91**, 490-506.
- Walker, G. T. and E. W. Bliss, 1932 : World weather V. Mem. Roy. Meteor. Soc., **4**, 53-84.
- Ward, M. N., K. Maskell, C. K. Folland, D. R. Rowell and R. Washington, 1994 : A tropic wide oscillation of boreal summer rainfall and patterns of sea-surface temperature, CLIMATE Research Note, 48, Hadley Centre for Climate Prediction and Research, U. K., 16pp.
- Yasunari, T., 1989 : A possible link of the QBOs between the stratosphere and the sea surface temperature in the tropics, J. Meteor. Soc. Japan, **67**, 483-493.
- Yasunari, T., 1990 : Impact of Indian monsoon on the coupled atmosphere/ocean system in the tropical Pacific, Meteor. Atmos. Phys., **44**, 29-41.
- Yasunari, T., 1991 : The monsoon year-A new concept of the climate year in the tropics, Bull. Amer. Meteor. Soc., **72**, 1331-1338.

J. Bjerknes and the Walker Circulation

Kikuro Miyakoda*

* *IMGA-CNR, Bologna, Italy. (Present affiliation : Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies, George-Mason University, COLA, 4041 Powder Mill Rd., Suite 302, Calverton, MD 20705, U. S. A.)*

(Received 16 June 1997 ; Accepted 25 December 1997)