

## クラシック気象学

## —大気力学の発展に見る温故知新—

廣田 勇\*

## 1. はじめに

2年前、第30期の学会理事長に就任の際、理事長の最大の責務は単に学会の運営業務に留まらず気象学の発展のための学問的方向性を指し示すことである、との信念から、就任時の秋季大会で学術講演を行うことの慣例化をお約束した。この解説は、その第2回目として昨秋の京都学会で行った第31期理事長講演の要約である。

さて、表題の「クラシック気象学」とは私の造語である。その趣旨は、すでにこれまであちこちで述べてきたように、「古典は古色蒼然とは違う。Classicとは文字どおりクラスワン、すなわち第一級作品という意味である」、との理念に基づき、過去の優れた仕事を改めて評価し今後の発展の糧にしようとするのである。

この事情は音楽・美術・文学等の芸術の世界における考え方と軌を一にしている。自然科学の世界では、ニュートン以来の古典物理学、あるいは微分積分学のような古典数学などがまさにクラシックの名に値するものと言えよう。現在では20世紀初頭の相対論や量子論さえもこの範疇に属すると考えてよい。

気象学に関してもこの事情は変わらない。現在の多様な発展を支えている基盤として、過去に多くの優れた先達の仕事があったことを忘れてはなるまい。数年前に、本誌の「気象談話室」の欄に、「優れた論文とは何か」(廣田, 1996)の題で、過去20~30年にも溯って参考文献引用が行われていることの意味を論じたが、それもまたクラシックな論文から学ぶ「温故知新」の大切さを強調したものであった。

言い換えれば、本論の意図するところは決して回顧

趣味や訓古学ではない。開拓者の偉大さと、後の時代にその意義を正しく受け止めて新しい発展につなげた後継者たちの見識を再確認することである。この趣旨は、もちろん、大気力学に限るものではなく、気象学の他分野にもそのまま適用できるはずである。

以下本文では大気力学における歴史的発展の好例として、ノルウェー学派の総観気象学と傾圧不安定理論、Ertelの渦位保存則と成層圏物質輸送、Eliassen-Palm理論とWave action, Walker循環とTeleconnection, の4つを取り上げてみよう。ただし、大気力学の詳細を講義することが目的ではないので、数式や図の内容説明は極力省略し話は研究進展の大筋に留める。

## 2. 総観気象学と傾圧不安定理論

日々の地上天気図に見られるような移動性高低気圧の動態を、南北温度差とそれに対応する中緯度偏西風の中に発達する傾圧不安定波動として捉え、それを基盤として対流圏大循環の解釈や数値天気予報を行うことが、20世紀前半のノルウェー学派による「総観気象学」に端を発していることは良く知られている。

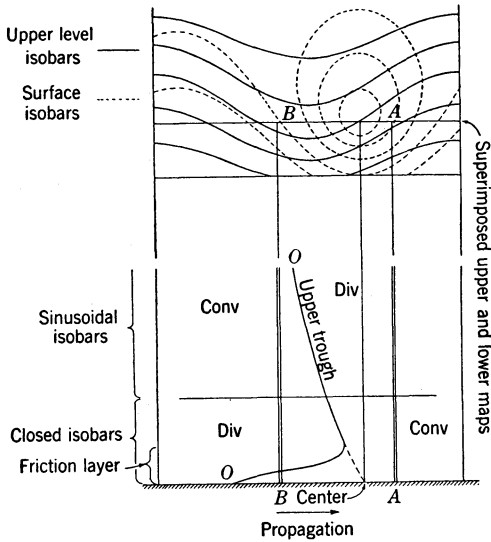
就中、Bjerknes(1919)による前線の発見、Bjerknes and Solberg (1922)によるCycloneの概念図提起などを踏まえたBjerknes and Holmboe (1944)の低気圧立体構造の模式図(第1図)が、1940年代末のCharney (1947)とEady (1949)の傾圧不安定理論の強い動機となったことは高く評価されるべきである。

このことは、渦度方程式・熱力学方程式等に立脚したCharney・Eady理論の不安定固有解(第2図)の正当性が、実測に基づく第1図の低気圧構造によって保証されていることから明らかである。事実、Charneyは彼の晩年の回顧録の中で、UCLAにおけるHolmboeの講義に触発されて気象力学理論の世界に足を踏み入れたことを語っている。彼の1947年の論文では、方程式に基づく理論演算に先立って、導入部で4ペー

\* 京都大学大学院理学研究科地球物理学教室。

—2000年8月3日受領—

—2000年9月8日受理—



第1図 Bjerknnes and Holmboe (1944) による低気圧構造の模式図。上層下層の等圧線分布および収束発散，トラフ軸の西傾などが表現されている。

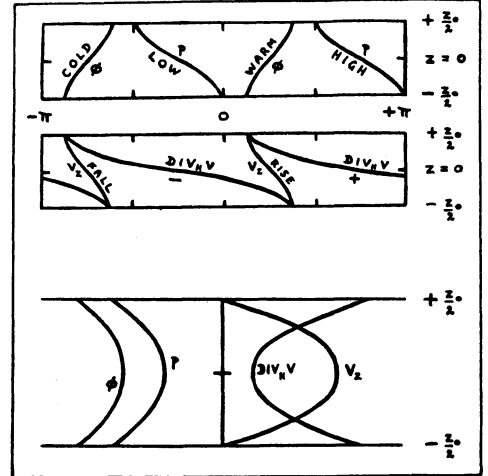
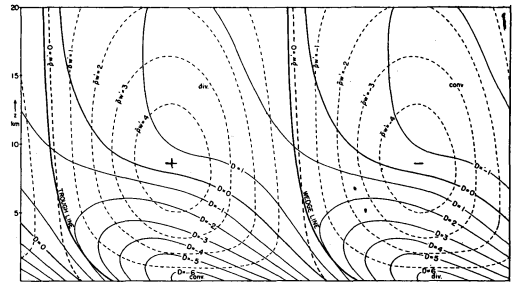
ジにもわたりノルウェー学派の一連の総観解析の結果を詳しく記述している。

同様に、Eady の論文では、参考論文リストはないが、最後の謝辞に当たる部分で、Bjerknnes と Godske に招かれベルゲンの地球物理研究所で行ったコロキウムに基づくものであることを述べている。

このような歴史的事実から考えると、傾圧不安定理論の基礎を築いたのはまさにノルウェー学派のクラシックな研究であったと言って良いであろう。観測の充実した現代の目から見れば、20世紀前半の総観気象学は一見素朴で不完全なものに映るかも知れないが、限られた観測データに、傾向方程式、渦度保存則、傾度風などの基本的概念を適用することによって、低気圧波動の力学特性を誤らず抽出して見せた彼等の解析は見事というほかはない。

このような状況から生まれた50年前の低気圧発達理論は境界条件の簡略化、摂動の線形化等、それ自体今や古典的な第一近似ではあるが、その後の半世紀にわたる観測の充実と数値実験技術の進歩による種々の非線形波動理論を支えているものは、やはり総観気象学を背景とした Charney・Eady 以来の波動力学であったことを忘れてはなるまい。

たとえば、現代感覚で近年の低気圧理論をレビューした Hoskins (1990) では、新しい概念の殆どが1950



第2図 (上) Charney (1947) と(下) Eady (1949) の傾圧不安定理論による波の鉛直構造。第1図に対応する特徴が良く表現されている。

年以前の総観気象学の言葉を出発点として語られ、それに対応した Synoptic Chart が新しい観測データを用いて示されている。このことはまた、現在この分野の研究の世界的リーダーの一人である Hoskins 氏自身が、クラシック気象学の意義を正しく評価している優れた研究者であることを意味しているのである。

### 3. ポテンシャル渦度とその応用

回転場における大規模大気運動を、第一近似として水平2次元面で考えるときの基本が、ケルビンの循環定理やヘルムホルツの渦定理のような、19世紀以来の古典(流体)物理学の法則にあることは言うまでもない。これを出発点として、気象力学では、回転球面の効果を考慮した「絶対渦度保存則」から所謂ロスビー波公式が導かれた。

さらに、熱力学法則(具体的には温位  $\theta$  の保存則)と組み合わせて大気の3次元運動・構造の議論に発展

させる過程で生まれてきたのが渦位（ポテンシャル渦度）の概念である。

1942年にウィーン気象学研究所の Ertel が発表した理論は、その論文題目 “Ein neuer hydrodynamischer Wirbelsatz”（ひとつの新しい流体力学的渦定理）の示すように、純粋に物理法則演算から導き出されたものである。前節の傾圧不安定理論が現実大気現象論に強く裏打ちされていたのとは対照的に、この論文には実測の解析図などは1枚も示されていない。しかし、発表された雑誌が Meteor. Zeitschrift であることからみて、この理論的研究の動機はやはり大気現象にあったものと想像できよう。

Ertel が導いた新しい渦定理とは、絶対渦度と静力学的安定度の積で定義される渦位  $Q = (\zeta + f) \frac{1}{\rho} \frac{\partial \theta}{\partial z}$  が断熱大気中の保存量となることである。

この量  $Q$  はまた、その2年前に Rossby (1940) が浅水系における渦管伸縮の立場から導いたもうひとつの渦位表現である  $q = (\zeta + f)/h$  とその意味上対等なものである。（ただし、その後日本語で書かれた多くのテキストや気象辞典の類でこの両者の関係をその物理的意味に立ち戻って明記したものが殆どないのは残念である）。

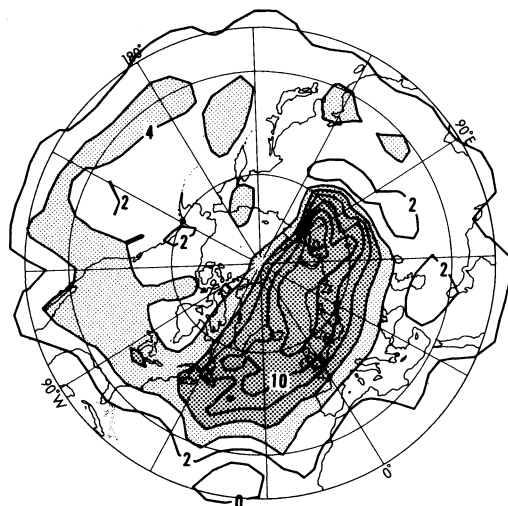
それはともかくとして、エルテルの渦位保存則はその後1950年代に対流圏擾乱の解析等に应用されたが、当時の不十分な観測データから  $Q$  を精度良く求めることが困難だったこともあり、一方、数値予報方程式系では  $Q$  を陽に扱う必要がなかったため、その後しばらく忘れ去られた状況にあった。

1980年代に入って、地球規模衛星観測の充実を背景に、英国の McIntyre and Palmer (1983) はエルテルの渦位保存則を成層圏循環解析に適用することを試みた。

すなわち彼等は、渦位保存則から等温面が（その面を貫く流れがない）物質面であり、その上に等渦位線を引けばそれもまたラグランジュ保存のため物質の流跡線となることを利用して、 $\theta$  座標面上の  $Q$  の分布図（いわゆる Q-Map）を描いた。

第3図は人工衛星 TIROS-N の SSU データを用いて描かれた Q-Map の一例で、 $\theta = 850$  K（ほぼ10mb、高度にして約30 km）の中部成層圏における渦位の分布が示されている。

これを見ると、通常の等圧面高度図で良く知られている冬季成層圏循環の特徴であるグリーンランド Low に対応する高い  $Q$  の値があり、それがアリュー



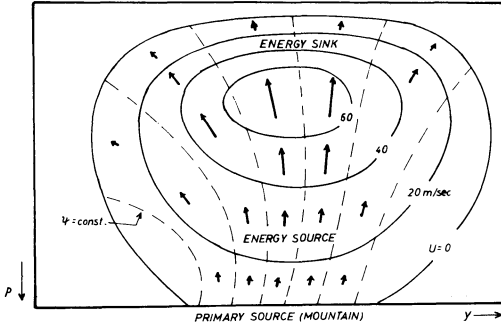
第3図 850 K の等温面（高度約30 km）における渦位  $Q$  の分布図。1979年1月27日の例。（McIntyre and Palmer, 1983）。

シャン High を取り巻くように太平洋域にまで伸び、その先で千切れたような形となっていることがわかる。この形態の特徴と時間的な変化から彼等はこの現象を「プラネタリー波の breaking（砕波）」と名づけた。その含意は、次節で述べる波の非線型効果による平均場への作用である。

この論文の最も重要な意義は、1980年代後半の極域オゾンホール問題が提出される以前の段階であるにも拘わらず、この wave breaking が成層圏における半球規模の物質輸送をもたらす鍵となる物理過程であることを指摘している点である。

現在では、衛星分光観測に基づく各種大気組成の分布や輸送過程を等温面上の Q-Map で表現することが完全に常識化されているが、その議論の嚆矢となったのがこの論文であり、そこに McIntyre 氏の洞察力の深さを見ることが出来る。これこそまさに、エルテルの渦位というクラシックな概念を正しく受け止めて、それに現代的息吹を与えた「温故知新」の好例であると言える。

このような渦位の概念の現代的解釈は、成層圏循環への应用到に留まらず、たとえば Hoskins *et al.* (1985) のレビューに見られるように、対流圏波動力学（特に不安定論）の物理的理解に対しても新しい視点を与えることに成功している。



第4図 Eliassen and Palm (1961) によるロスビー波エネルギー伝播の概念図(子午面断面)。実線は平均東西風速, 矢印はエネルギーフラックスの向きと大きさを表す。

#### 4. Eliassen-Palm 理論とその発展

古典的力学理論の例をもうひとつ示そう。

40年前に北欧の雑誌 *Geofysiske Publikasjoner* に掲載された Eliassen and Palm (1961) の論文は, 現代の目から見てふたつの重要な側面をもった珠玉の作品である。

そのひとつは, この論文の書かれた1960年頃という時代がまさに国際地球観測年 (IGY: 1957-58) の直後であり, 成層圏以高の定量的な観測統計がまだ不十分であった状況の下で, その領域における大気運動(平均風系と擾乱)の本質に関し, 波動エネルギー伝播の見地から深い理論的洞察を与えていることである。その根拠となっているのが, 1940年代からのいわゆる「山越え気流」によって作られる山岳波(重力波)と Charney and Eliassen (1949) に端を発する「地形性強制ロスビー波」である。ただし, その時点では, ハイネズによる電離層擾乱の議論を別にすれば, この2種類の波(重力波とロスビー波)とも観測事実としてはあくまでも対流圏の現象であった。

そのため, Eliassen-Palm の論文は, 第1章の重力波と第2章のロスビー波を(問題意識は共通であるにせよ) 数式表現の上からも全く別々に扱っている。具体的に言えば, 前者は当然  $z$  (高度) 座標系であるが, ロスビー波の記述は  $p$  (気圧) 座標系で行われている。従って第2章のロスビー波伝播を示す概念図(第4図)に対応する水平・鉛直方向のエネルギーフラックスは,  $p$ -系で, 波動による運動量と熱の輸送量の関数として

$$\overline{\phi v} = -\overline{Uw},$$

$$\overline{\phi \omega} = -\overline{UfR/\sigma p \cdot Tv}$$

と表現されている。

ここではこれ以上の詳しい説明は省くが, この図には, 大気下層での波動生成, シアー流中の水平・鉛直伝播, critical line の効果, 波動エネルギーの収斂発散, 等々の基本的物理過程が総て見事に表現されている。

この理論の当時における意義は, あくまでも「波動エネルギー伝播」という「概念提起」であり, 実測に基づく具体的な成層圏現象の説明やデータ解析のための手法開発ではなかったことに注意すべきであろう。それからの十数年間にわたり, この理論は, たとえば Dickinson (1968) の定常ロスビー波伝播論や Uryu (1974, 1975) の「波に伴う運動量」などの仕事の概念基盤を与える指導原理として評価されてきた。

その後, 衛星観測の充実とも呼応して1970年代後半に, 中層大気大循環(力学)の理論的研究が急速に進展した。その代表的な仕事のひとつが, 英国ケンブリッジのグループによる「E-P フラックスの定式化」と TEM 方程式 (Transformed Eulerian-Mean Equation) の提示である (Andrews and McIntyre, 1976)。

これは1961年の Eliassen-Palm の仕事(および同年の Charney and Drazin, 1961) の正しい評価から生まれたものであり, 中層大気力学における波動伝播とそれに伴う Wave Action, さらに非加速定理(とその破れ), 残差循環(ラグランジュの子午面循環), 等々の概念整備とその記述体系構築をもたらすものであった。

そしてまた, 上記のオリジナルな式に対応する新しい E-P フラックス表現

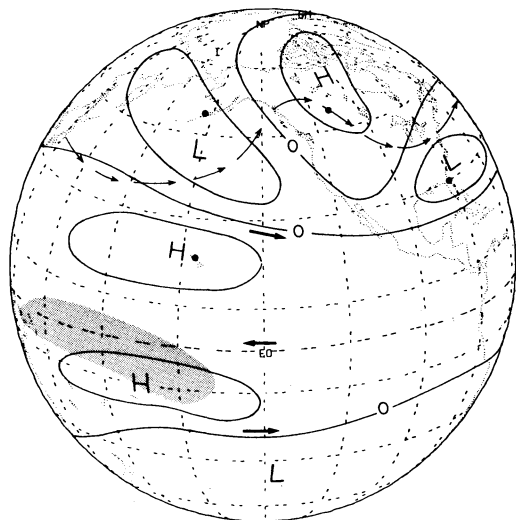
$$F = (F(\theta), F(z))$$

$$F(\theta) = -\rho_0(z) a \cos\theta \overline{u'v'}$$

$$F(z) = +\rho_0(z) a \cos\theta (f/N^2) \overline{v'\Phi'_z}$$

は, 1980年代以降の衛星観測データの活用の際して, たとえば突然昇温などの具体的現象を定量的に研究する解析手段として一般的に広く用いられるようになった。

この例においてもまた, 開拓期におけるクラシックな論文の価値と, 後年その意義を正しく評価して新しい発展に結び付け, 大気力学に豊かな実りをもたらした後継者達の見識を賞め称えるべきであろう。



第5図 太平洋熱帯域の擾乱が北米大陸に伝播していること (PNA パターン) を表す模式図。陰影部はエルニーニョに伴う対流活動の活発な領域。矢印は上層の風系を表す。(Horel and Wallace, 1981).

## 5. Walker 循環と Teleconnection

力学理論の話が3つ続いたので、最後に地球規模の観測解析に基づく現象論の好例をひとつ述べよう。

現在「Walker 循環」或いは「南方振動 (Southern Oscillation ; SO)」の名で良く知られている赤道域の大気現象に明確な光を当てたのが Bjerknes (1969) である。彼は、Walker and Bliss (1932) などの古い文献の意義を正しく読み取り、その後のエルニーニョの議論につながる新しい道を拓いた。この間の事情は都田菊郎氏の最近の解説 (1998) に詳しく述べられているとおりでである。

Bjerknes はさらに、赤道域に留まらず、この南方振動現象の影響が北太平洋中高緯度地域にまで及んでいることを初めて明らかにした。これは今日ひろく「テレコネクション」、特に北太平洋域に関しては PNA (Pacific/North America) パターンと呼ばれている現象である (Wallace and Gutzler, 1981 ; Horel and Wallace, 1981, 第5図)。

Wallace らは北半球全域にわたる500mb 等圧面高場場の相関解析からこの PNA をはじめ北大西洋振動 (NAO) など、低緯度と中高緯度に見られる循環場の相互関係を定量的に記述することに成功した。しかし、後日に筆者が Wallace 氏本人の口から直接聞いたところによると、彼はその統計解析を始める時点では

Bjerknes の1969年の仕事の存在を知らなかったとのことである。もちろん彼は、その後自分達の解析結果と本質的に同じ内容が既に Bjerknes により示されていたことを知り、1981年の彼等の論文ではそのことが正しく評価されている。そもそも「テレコネクション」という言葉自体、Bjerknes の論文題目に謳われているものである。

その意味では、Wallace と Bjerknes の関係は、出発点において直接的なつながりを持つ「温故知新」とは異なっていたのかも知れないが、後からとはいえ、先人の仕事の意義を正しく受け止めていることには間違いがない。古典を学ぶということは、決して単に従前の仕事の真似をすることなのではない。Wallace らの解析の価値は、その後、北半球中高緯度で卓越する極渦の変動、いわゆる北極振動 (AO : Arctic Oscillation) の議論に発展し (Thompson and Wallace, 1998), さらに対流圏大循環論における NAO と AO との統一的解釈や、南半球極渦の変動 (南極振動, AAO) をも含めた「環状 (Annular) モード」の議論 (Wallace, 2000) にまで広がっていることから明らかであろう。この議論には依然として未解決の問題が多々含まれてはいるが、このような新しい概念提起こそが将来の発展へつながる道を拓くのである。

## 6. おわりに

以上、4つのクラシックな研究を例にとり、先達の優れた仕事を後の世に正しく評価することが新しい発展を生み出す原動力であることを強調してきた。もちろん、ここに例示したもの以外にもクラシック気象学の名にふさわしい作品は数多くある。突然昇温や赤道風準2年周期振動 (QBO) の発見のような現象論、ロレンツカオスに代表されるような非線形流体力学の基礎理論、等々枚挙にいとまがない。

また、国外のみならず我が国におけるこのような実例も幾つかあろう。筆者の専門外の大気放射・雲物理・大気化学等に関しても事情は全く同じであろうと思われる。その意味で、新しい世紀の気象学の発展を担う若い人々が、これを機にクラシック気象学の意義と価値を再認識してくれたならば本望である。

## 謝辞

本文の草稿に対し、天気解説担当委員として、また大循環研究の専門家の立場から、適切なコメントを寄せてくれた中村尚氏に厚くお礼を申し上げます。

## 参 考 文 献

- Andrews, D. G. and M. E. McIntyre, 1976 : Planetary waves in horizontal and vertical shear : the generalized Eliassen-Palm relation and the mean zonal acceleration, *J. Atmos. Sci.*, **33**, 2031-2048.
- Bjerknes, J., 1919 : On the structure of moving cyclones, *Geofys. Publ.* **1**, No. 2, 1-8.
- Bjerknes, J., 1969 : Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific, *Mon. Wea. Rev.*, **97**, 163-172.
- Bjerknes, J. and H. Solberg, 1922 : Life cycle of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation, *Geofys. Publ.*, **3**, No. 1, 1-62.
- Bjerknes, J. and J. Holmboe, 1944 : On the theory of cyclones, *J. Meteor.*, **1**, 1-22.
- Charney, J. G., 1947 : The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current, *J. Meteor.*, **4**, 135-162.
- Charney, J. G. and A. Eliassen, 1949 : A numerical method for predicting the perturbations of the middle latitude westerlies, *Tellus*, **1**, 38-54.
- Charney, J. G. and P. G. Drazin, 1961 : Propagation of planetary-scale disturbances from the lower into the upper atmosphere, *J. Geophys. Res.*, **66**, 83-109.
- Dickinson, R. E., 1968 : Planetary Rossby waves propagating vertically through weak westerly wind wave guide, *J. Atmos. Sci.*, **25**, 984-1002.
- Eady, E. T., 1949 : Long waves and cyclone waves, *Tellus*, **1**, 33-52.
- Eliassen, A. and E. Palm, 1961 : On the transfer of energy in stationary mountain waves. *Geofys. Publ.*, **22**, 1-23.
- Ertel, H., 1942 : Ein neuer hydrodynamischer Wirbelsatz, *Meteor. Zeitschrift*, **59**, 277-281.
- 廣田勇, 1996 : 優れた論文とは何か. *天気*, **43**, 577-581.
- Horel, J. D. and J. M. Wallace, 1981 : Planetary-scale atmospheric phenomena associated with the southern oscillation, *Mon. Wea. Rev.*, **109**, 813-829.
- Hoskins, B. J., 1990 : Theory of extratropical cyclones. *Extratropical Cyclones* (Ed. C. W. Newton and E. O. Holopainen), *Amer. Meteor. Soc.*, 64-80.
- Hoskins, B. J., M. E. McIntyre and R. A. Robertson, 1985 : On the use and significance of isentropic potential vorticity maps, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **111**, 877-946.
- McIntyre, M. E. and T. N. Palmer, 1983 : Breaking planetary waves in the stratosphere, *Nature*, **305**, 593-600.
- 都田菊郎, 1998 : Bjerknes と Walker 循環, *天気*, **45**, 341-348.
- Rossby, C. G., 1940 : Planetary flow pattern in the atmosphere. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **66**, suppl. 68-87.
- Thompson, D. W. J. and J. M. Wallace, 1998 : The Arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophys. Res. Letter*, **25**, 1297-1300.
- Uryu, M., 1974 : Mean zonal flows induced by a vertically propagating Rossby wave packet, *J. Meteor. Soc. Japan*, **52**, 481-490.
- Uryu, M., 1975 : On the mean motions induced around a planetary wave packet on a rotating sphere, *J. Meteor. Soc. Japan*, **53**, 45-54.
- Walker, G. T. and E. W. Bliss, 1932 : World Weather IV, *Memories of Roy. Meteor. Soc.* **4**, No. 36, 53-84.
- Wallace, J. M., 2000 : North Atlantic oscillation/annular mode : Two paradigms-one phenomenon. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **126**, 791-805.
- Wallace, J. M. and D. S. Gutzler, 1981 : Teleconnections in the geopotential height field during the northern hemisphere winter, *Mon. Wea. Rev.*, **109**, 784-812.

## Classic Meteorology

—An historical review of the atmospheric dynamics—

Isamu Hirota

*Dept. of Geophysics, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan.*

(Received 3 August 2000 ; Accepted 8 September 2000)