

イギリスにおける「前線」研究の動向*

——英国気象学会「前線」シンポジウムから——

木村 竜 治**

1985年11月20日、ロンドンのインペリアル・カレッジの講堂で「前線」に関する講演会が開催された。英国気象学会では、春と秋にそれぞれ3回づつの半日のシンポジウムを企画するそうで、この他に、「イギリスにおける海洋のモデリング」(10月16日)、「核戦争が気候に与える影響」(12月18日)がある。「気象とスポーツ」、「庭作りと気象」なども過去のシンポジウムのテーマになったそうである。

「前線」シンポジウムには300人程度が集まり、階段教室のような講堂が満員になって、階段状の通路に腰かけて聞いている人もいた。座長は Dr. Browning (カット) で、プログラムは次の通り。

- 1) Prof. R.J. Reed (米国ワシントン大): 前線観測のレビュー
- 2) Prof. B.J. Hoskins (レディング大): 前線形成理論
- 3) Dr. H. Böttger (ヨーロッパ中期予報センター (ECMWF)): ECMWF 現業モデルによる前線の構造と予報
- 4) Dr. M.A. Shapiro (NOAA): 上層前線の観測(講演中止) (Shapiro, 1981がある)。
- 5) Dr. A.J. Thorpe (レディング大): フロントにおける湿潤過程の力学 (例えば Thorpe, 1984; Thorpe and Nash, 1984; Thorpe and Emanuel, 1985)。
- 6) Dr. J. Testud (CNET/CPRE, パリ): ドップラーレーダーによる前線観測 (例えば Testud *et al.*, 1980)。
- 7) Dr. M.J.P. Cullen (気象局): fine mesh および mesoscale モデルによる前線の予報 (Cullen, 1983;



Cullen and Purser, 1984)

- 8) Dr. K.A. Browning (気象局): “mesoscale frontal dynamics project” について (Browning and Monk, 1982等がある)

Reed は, Bjerknes のモデルから現在に至るまでの「前線」概念の変遷を要領よくまとめて紹介した。Bjerknes の時代には、極前線(寒帯気団と熱帯気団の境界)と温帯低気圧に伴う前線が区別されず、前線の存在が温帯低気圧の発達の原因と考えられたこと(例えば、Bjerknes and Solberg, 1921)。1950年代に、傾圧不安定論(Charney, 1947; Eady, 1949等)や Phillips (1956) の数値実験を通じて、前線は温帯低気圧の発達に伴って形成されること(frontogenesis)が認識され、Newton (1954)、Reed によって変形場(deformation field)による運動学的な前線形成のモデルが作られたこと。1950年代の中期には Sawyer (1958) などによって前線の上層観測が行われ、温帯低気圧の発達に伴って上層にも前線が形成されるこ

* Report of the meeting on Atmospheric Fronts by Royal Meteorological Society, at London, November 1985.

** Ryuji Kimura, 東大海洋研究所(文部省長期在外研究員として在ケンブリッジ)。

第1表 1985年6月～9月の前線予報の適中率(英国気象局現業モデル) (%)

適中率		6	7	8	9
よ	い	24	28	15	24
ま	あ	31	39	42.5	38
は	ず	45	33	42.5	38

とがわかったこと。前線面を横切る鉛直断面内の循環(非地衡風の循環)のモデルが作られたこと。1970年代には、成層圏の空気が前線面に沿って対流圏内に吸い込まれることがわかったこと(オゾンも同時に吸いこまれる)(Shapiro, 1974)。最近では、前線帯の微細構造の観測が可能になり、前線に沿った強い上昇気流(前線面上で2~3 cm/s, 前線上で6 m/s)の存在が検出されるようになったこと、などの指摘があった。

Hoskins は、①前線形成理論の歴史、②2次元および3次元モデルの紹介、③未解決の問題の3つについて話題提供を行った。

前線の理論は Margules (1906) から始まる。彼は温度風の考え方から二層モデルをもちいて前線面の傾き角 α が、

$$\tan \alpha = f\theta_o/g(V_w - V_c)/(\theta_w - \theta_c)$$

で与えられることを示した。ただし、 f =コリオリパラメーター、 θ_o =代表的温位、 V_w , θ_w , V_c , θ_c =暖気側(W)と寒気側(C)の風速(V)と温位(θ)。このモデルはその後 Ball (1960), Welander (1963), Manton (1981), Baines (1981) によって発展させられた。Welander (1955) はラグランジュ的な考えを導入して、前線帯で空気が引き伸ばされることを示した。Hoskins は Welander の考え方の重要性を強調していた。Bergeon (1928) は変形場のモデルを提案した。鉛直面内の非地衡風の循環のモデルは Sawyer (1956), Eliassen (1959, 1962), Stone (1966) によって提案された。

前線のモデルは2次元のものと3次元のものに分類される。2次元のものでは、上下に壁をおいて、初期のポテンシャル渦度をゼロとするものとししないものが考えられる。Cullen (1983) は前者である。上面の壁を考えると、前線の発達と共に成層圏の空気が下に吸い込まれる現象(Reed 1955)が表現できる(例えば Hoskins, 1971; Hoskins, 1972; Hoskins and Bretherton, 1972等)。3次元のモデルは、ポテンシャル渦度の保存を前提とし

た半地衡風モデル(semi-geostrophic model (Hoskins, 1975; Hoskins and West, 1979; Heckley and Hoskins, 1982等)とプリミティブ方程式によるモデル(Mudrick, 1974; Shapiro, 1975等)がある。

未解決な問題として以下のようなものが考えられる。

1) 前線の大規模場へのフィード・バック, 2) 3次元的な場との関連, 3) 前線波動と温帯低気圧との関連, 4) 平衡状態の破綻, 5) 乱流, レインバンド, 対流などの小規模現象との関連, 6) 前線の移動。

Böttger は、1985年10月24日を例にとって、3日目の予報結果が前線の構造をよく再現していることを示した(ECMWFのモデルは16層、地形に沿う座標系で水平方向には波数106まで分解するが、実質的な水平分解能は200 kmである)。この現業モデルは10日先まで計算し、前線付近の構造は常に実際と似ているが、位置の予報ができるのはせいぜい5日先までで、それ以後の予報精度は悪いとのことである。

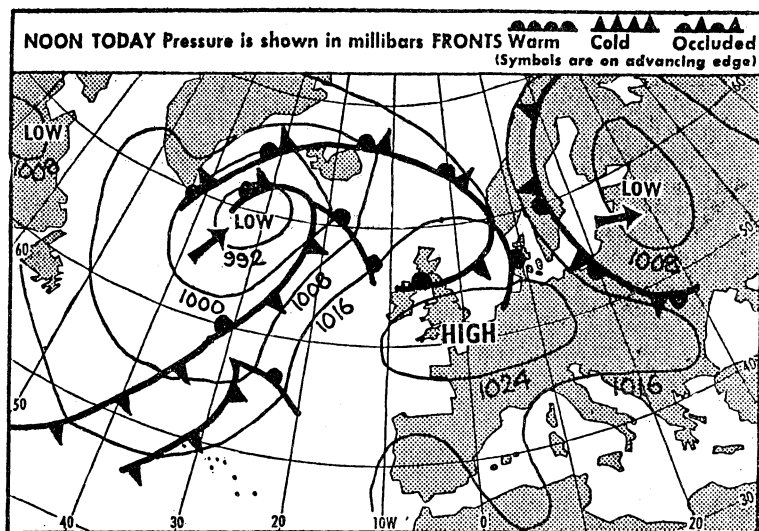
Thorpe は、前線に関する湿潤過程を総括し、特に、前線面に沿った moist slantwise convection の重要性を強調した。

Sawyer (1949, 1956) は相当温位(θ_e)に着目した不安定論を考え、実際には中立状態が卓越するとの結果を得た。Kleinschmidt (1957), Eliassen (1959) は前線形成に関する凝結過程と地表面摩擦の影響を考察した。Browning と Harrold (1969), Hobbs (1970) はレインバンドについて考察した。Hoskins (1974), Bennetts と Hoskins (1979) は条件対称不安定を提案した(レインバンドのレビューとして Parsons and Hobbs (1983) がある)。

slantwise convection は前線面に沿った不安定で、 $M \equiv f_x + v$ (x は前線に直角方向の距離、 v は前線に沿う風速)の等値線の傾きより、飽和相当温位の等値線の傾きが小さい(等値線がより立っている)ときに生じる Emanuel, 1983 a, b, 1985; Thorpe and Emanuel, 1985等)。

Testud はフランスからのゲストで、パリ郊外におけるドップラーレーダーの観測結果(1台)を報告した。彼は観測された鉛直循環を Bennetts と Hoskins (1979) の対称不安定の理論と比較していたが、結果はあまり似ているとは思えなかった。

Cullen の研究目的は、fine mesh モデルを用いれば、前線の予報精度が改善されるかということである。その前提として、彼は、現業モデルの適中率のアセスメント



第1図 前線の描かれることが多い西ヨーロッパの新聞天気図 (1985年9月10日正午).

を(主観的な方法で)行った。その結果を第1表に示す。水平分解能 37.5 km, および 75 km の fine mesh モデルで24時間予報を行い、現業モデルと適中率を比較した結果、10例はよくなり、11例は同程度、5例は悪くなった。彼は、水平分解能 3.6 km, および 15 km でイギリス全体をおおむね範囲のメソスケールモデル(地形も考慮されている)の計算例も紹介した。しかし、上昇流の分布が乱流のように細かく分かれ、うまく現実を再現しているようには思えなかった。

最後に、座長の Browning が、英国とフランスが共同で計画している“Mesoscale Frontal Dynamics Project”の説明を行った。それによれば、1987年10月から12月まで、南西イングランドから北西フランスにかけて、大規模な前線の観測を行うそうである。また、これと並行して、1985~1987の期間、1) 下層ジェット、2) 線状に並ぶ対流、3) Slantwise convectionの研究を強化する。特に、解決すべき問題として、彼は次の研究課題を指摘した。1) 強さが 25 m/s を越える程の下層ジェットのメカニズム、2) 境界層の役割、3) 重力流と線状エコーとの関係、4) 線状エコーの力学、5) slantwise convection、6) 成層圏からの乾いた空気の慣入、7) 前線の3次元的な側面。

毎日の新聞天気図を見ていると、西ヨーロッパの天気は1年中温帯低気圧の通過に支配されており、前線もたくさん描かれることが多い。第1図はその1例で、1985

年9月10日正午の予想天気図である。前線からの雨の降り方は日本と非常に異なるから、これらの研究がすぐに日本の前線に応用できるとも思えないが、共通する性質も多いと思う。ユーラシア大陸の西と東の前線の性質の比較を行うのも興味ある「前線」研究のテーマではないだろうか。

文献

- Ball, F.K., 1960: A theory of fronts in relation to surface stress, *Quart. J.R. Met. Soc.*, 86, 51-66.
- Bennetts, D.A. and B.J. Hoskins, 1979: Conditional symmetric instability—a possible explanation for frontal rainbands, *Quart. J.R. Met. Soc.*, 105, 945-962.
- Bergeron, T., 1928: Über die dreidimensional verknüpfende Wetter analyse I. *Geofys. Publ.* 5, No 6, 1-111.
- Bjerknes, J. and H. Solberg, 1921: Meteorological conditions for the formation of rain, *Geofys. Publ.*, 2, No. 3, 60 pp.
- , and H. Solberg, 1922: Life cycle of cyclons and polar front theory of atmospheric circulation, *Geofys. Publ.*, 3, No 1.
- Browning, K.A. and T.W. Harrold, 1969: Air motion and precipitation growth in a wave depression, *Quart. J.R. Met. Soc.*, 95, 288-309.
- , and G.A. Monk, 1982: A simple model for the synoptic analysis of cold fronts, *Quart.*

- J.R. Met. Soc., 108, 435-452.
- Charney J.G., 1947: The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current, *J. Met.*, 4, 135-163.
- Cullen, M.J.P., 1983: Solution to a model of a front forced by deformation, *Quart. J.R. Met. Soc.*, 109, 565-573.
- , and R.J. Purser, 1984: An extended lagrangian theory of semi-geostrophic frontogenesis, *J. Atmos. Sci.*, 41, 1477-1497.
- Eady, E.T., 1949: Long waves and cyclone waves, *Tellus*, 1, 33-52.
- Eliassen, A., 1959: On the formation of fronts in the atmosphere: The atmosphere and the sea in motion, New York, Rockefeller Institute Press, 277-287.
- Eliassen, A., 1962: On the vertical circulation in frontal zones, *Geofysike Publikationer, Bjerknes memorial volume*, 147-160.
- Emanuel, K.A., 1983 a: On assessing local conditional symmetric instability from atmospheric soundings, *Mon. Wea. Rev.*, 111, 2016-2033.
- , 1983 b: The Lagrangian parcel dynamics of moist symmetric instability, *J. Atmos. Sci.*, 40, 2368-2376.
- , 1985: Frontal circulations in the presence of small moist symmetric stability, *J. Atmos. Sci.*, 42, 1062-1071.
- Heckley, W.A. and B.J. Hoskins, 1982: Baroclinic waves and frontogenesis in a non-uniform potential vorticity semi-geostrophic model, *J. Atmos. Sci.*, 39, 1999-2016.
- Hoskins, B.J., 1971: Atmospheric frontogenesis: some solutions, *Quart. J.R. Met. Soc.*, 97, 139-153.
- , 1972: Non-Boussinesq effects and further development in a model of upper level frontogenesis, *Quart. J.R. Met. Soc.*, 98, 532-541.
- , 1974: The role of potential vorticity in symmetric stability [and instability], *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 100, 480-482.
- , 1975: The geostrophic momentum approximation and the semi-geostrophic equations, *J. Atmos. Sci.*, 32, 233-242.
- , 1982: The mathematical theory of frontogenesis, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 14, 131-151.
- , 1983: Dynamical processes in the atmosphere and the use of models, *Quart. J.R. Met. Soc.*, 109, 1-21.
- , and F.P. Bretherton, 1972: Atmospheric frontogenesis models: Mathematical formulation and solution, *J. Atmos. Sci.*, 29, 11-37.
- , and N.V. West, 1979: Baroclinic waves and frontogenesis, Part II: Uniform potential vorticity jet flows.—Cold and warm fronts, *J. Atmos. Sci.*, 36, 1663-1680.
- Kleinschmidt, E. 1957: In 'Dynamic meteorology' by Eliassen, A. and Kleinschmidt, E., *Handbuch der Physik*, 48, 1-154.
- Manton, M.J., 1981: On the propagation of cold fronts, *Quart. J.R. Met. Soc.*, 107, 875-882.
- Margules, M., 1906: Zur Stürmtheorie, *Meteor. Ztschr.*, 23, 381-497.
- Mudrick, S.E., 1974: A numerical study of frontogenesis, *J. Atmos. Sci.*, 31, 869-892.
- Newton, C.W., 1954: Frontogenesis and frontolysis as a three dimensional process, *J. Met.*, 6, 330-336.
- Parsons, D.B. and P.V. Hobbs, 1983: The meso-scale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones, XI: Comparisons between observational and theoretical aspects of rainbands, *J. Atmos. Sci.*, 40, 2377-2397.
- Phillips, N.A., 1956: The general circulation of the atmosphere: numerical experiment, *Quart. J.R. Met. Soc.*, 82: 123-164.
- Reed, R.J., 1955: A study of a characteristic type of upper level frontogenesis, *J. Met.*, 12, 226-237.
- Sawyer, J.S., 1949: Recent research at central forecasting office, Dunstable, *Quart. J.R. Met. Soc.*, 75, 185-188.
- , 1956: The vertical circulation of meteorological fronts and its relation to frontogenesis, *Proc. Roy. Soc. London*, A234, 346-362.
- , 1958: Temperature, humidity and cloud near fronts in the middle and upper troposphere, *Quart. J.R. Met. Soc.*, 84, 375-388.
- Shapiro, M.A., 1974: A multiple-structured frontal zone-jet stream as revealed by meteorologically instrumented aircraft, *Mon. Wea. Rev.*, 102, 244-253.
- , 1975: Simulation of upper level frontogenesis with a 20-level isentropic coordinate primitive equation model, *Mon. Wea. Rev.*, 103, 591-604.
- , 1981: Frontogenesis and geostrophically forced secondary circulations in the vicinity of jet stream frontal zone systems, *J. Atmos. Sci.*, 38, 954-973.
- Stone, P.H. 1966: Frontogenesis by horizontal wind deformation fields, *J. Atmos. Sci.*, 23, 455-465.
- Testud, J., G. Breger, P. Amayenc, M. Chong, B. Nutten and A. Sauvaget, 1980: A Doppler radar observation of a cold front: Three-dimensional air circulation, related precipitation sys-

- tems and associated wave-like motions, *J. Atmos. Sci.*, 37, 78-98.
- Thorpe, A.J., 1984: Convective parameterization in a Quasi-Geostrophic Diagnostic Model of Fronts, *J. Atmos. Sci.*, 41, 691-694.
- , and C.A. Nash, 1984: Convective and boundary layer parameterizations in a diagnostic model of atmospheric fronts, *Quart. J. R. Met. Soc.*, 110, 443-466.
- , and K.A. Emanuel, 1985: Frontogenesis in the presence of small stability to slantwise convection, *J. Atmos. Sci.*, 42, 1809-1824.
- Welander P., 1955: Studies on the general development of motion in a two-dimensional ideal fluid, *Tellus*, 7, 141-156.
- , 1963: Steady plane fronts in a rotating fluid, *Tellus*, 15, 33-43.

日本気象学会誌 気象集誌

第II輯 第64巻 第1号 1986年2月

- B.G. Hunt : 中層大気大循環に対する重力波抵抗と日変化の影響
 中澤哲夫 : FGGE 年熱帯域における OLR の季節内変動
 S.E. Master・E.C. Kung : アジア冬期モンスーンにおける低気圧発達のエネルギー解析
 S.-J. Chen・L. Dell'Osso : 梅雨期中国東部の大雨をもたらすメソスケール循環系におよぼすチベット高原の影響
 太田幸雄・田中正之 : 放射霧の生成・消滅過程の数値実験
 荒生公雄・石坂 隆 : 大気混濁度による日本上空の黄砂の体積と質量の評価
 竹内義明 : 可視光散乱に与える雲の形状の影響
 武田喬男・堀口光章 : 上層及び中層の層状雲の微細構造に関するレーザ・レーダと 8.6mm レーダによる同時観測
 三角幸夫 : 変換したオイラー方程式系で見た太陽活動と気象の関係
 三角幸夫 : 惑星間空間磁場境界通過に対する地球大気の応答の外部強制

要報と質疑

- 丸山健人・新田 勅・常岡好枝 : 衛星観測の雲量から推算した熱帯域西太平洋の月平均雨量
 白木正規 : 関東平野における海陸風の反時計回り hodograph の分布について
 大滝英治 : 浅海上での二酸化炭素フラックスの測定