

フロントに関する最近の研究

朝 倉 正*

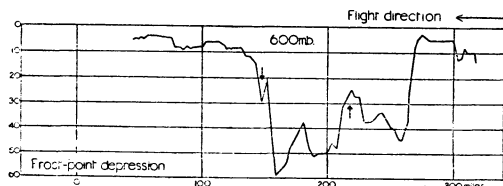
1955年3月21日、イギリスの気象学会が Potheary の司会でフロントについての討論会を主催している。その概要は Meteorological Magazine に紹介されているが、本文はこれをさらに纏めたものである。

まず討論が交わされる前に、最近の研究や、問題点が講師によって提供されている。その内容を整理すると、一つはフロントの運動、他の一つはフロントの構造に関するものに分けられる。

Matthewman によると温暖前線の進行速度は陸上だと地衡風速の $\frac{2}{3}$ であるといわれているが、Hinkel と Saunders の最近の研究によると、海上では地衡風の $\frac{5}{6}$ である。Corby は温暖前線にともなう雨の予報について研究し、一つの気象要素だけに頼る予報法は何れも実用に役立たないが、気圧とフロントの強さを用いた回帰方程式を用いると、イギリスの雨量の変動を60%ぐらいまで予報できることを確かめた。

1950年から52年にかけて23のフロントが飛行機によって観測され、その結果は現在 Sawyer によって解析されている。それによると、フロントはバロクリニックな場でその強さは上層ほどよい。温度傾度は平均するとやく600哩について15°Fで、そのうち9°Fは130哩の内に集中している。フロントの傾斜は1/30ないし1/250であるが、どんなフロントでも、高度が違くと傾斜も変っている。

飛行機観測を用いてできる断面図とゾンデ観測による断面図を比較すると、温度場については両者は互によく似た分布を示しているが、湿度分布は複雑でかなりしも一致していない。とくにフロントの近傍には湿度が5%以下になる異常乾燥域があるらしい。たとえば温暖前線を600mb面にそって飛行機観測すると第1図に示す



第1図

ように、フロントの近くはかなり乾燥した区域があつて下層の方向に伸びている。この乾燥空気の源を追跡すると24時間前はジェットを横切って15mb沈降し、12時間前はジェットの入口で加速され、高気圧性循環のため

に500mbさらに沈降させられて乾燥した空気になったものらしい。

雲はしばしばフロントルゾーンから離れて暖気団の中に生ずるのが普通である。寒気団中に雲がないのは、ジェット流の北側に乾燥空気があるためと考えられている。clear air turbulenceは雲のない寒気団の上層で、適当なWind shearがあると発生する。

以上の話題がイギリスにおけるフロントの最近の進歩の概要であるらしい。これらを中心にして総合討論がなされているが、その要旨はつぎのようなものである。

Sawyer: 理論的な面から考えると、フロントの特性は強い温度傾度域に2つの水平気流が合流することによって強められ、維持されている。このことは天気図解析によって支持されている事実のように思う。フロントに附随する雨や雲は2つの気団の温度差だけでなく、温度傾度を増すような流れの場と関係があり、そこでは一般に暖気団は上昇し、寒気団は下降するような垂直循環がある。Solbergによると、湿球位面にそう風の水平シヤーが高気圧性でコリオリ力よりも大きくなると、フロント近くの垂直循環は発達するので、水平シヤーはフロント活動に重要な影響をおよぼす。

Sutcliffe: フロントルゾーンの近くに乾燥空気があるという解析事実は新しくかつ興味のある結果で、フロントは教科書モデルよりかなり複雑であることを示している。

Durbin: フロント観測を飛行機で40回試みた経験があるが、そのうちわずかに2度だけ飛行場の天気が悪くて進路を変える必要があり、ひどいicingに見舞われた。経験によると温度差だけでフロントをきめる現在の方法には改良の余地が多分にあり、これがなされると飛行時間はかなり短縮される。また悪天のときの飛行機観測結果からみると、15,000フィート以上に雲が拡がることはまれで、強い雨でも普通この高度以下の雲で降っている。

Bannon: 500mb面以上の上部対流圏内の温度の不連続が本当に気団の境界を示すかどうか疑問である。何故なら、そこにはかなりの沈降が見られるので、沈降面では温度傾度が大きくなり、本当の不連続面は別なところにある可能性がある。またSutcliffeの発達項(文末参照)と雨との相関はかなり小さいが、これは発達項の

* 気象研究所予報研究部第2研究室

計算には誤差が大きく含まれる為であろうか。

Corby: Sawyer は前に発達項と降雨と相関が大きいことを示しているが、天気図から発達項を求めると、往々にして値が変動する。

Stagg: フロントの移動は実用上重要な問題である。Goldie は天気図でフロントを追跡しないで、雨域を追跡して速度を出している。しかし、温暖前線の雨は早朝、寒冷前線の雨は午後が多く、これは、大陸、海洋上の気温日変化のためと考えられている。フロントの移動は海水温の不規則性に影響されないか。

Sawyer: フロント解析の不確実性のために、フロント近くの前線の統計結果をどのように解釈するかはむずかしい。フロント性の雨が止むと、むしろそのフロントはよく解析からはずされる。

Absalom: すべてのフロントに乾燥域があるのだろうか。また乾燥の度合と雨とは関係しているか。

Pothecary: 1ないし2つのよわいフロントには、はっきりとした乾燥域は見当らなかったが、他のすべてのフロントには存在していた。乾燥の度合と雨とはあまり関係はない。

Illsley: 飛行機観測はあまり利用できないが、ゾンデから雲のくわしい状態を推論することはむずかしい。実際の経験によると露点が乾球温度から4°F以内にあると雲があるようだ。またフロントの速度は陸上で地衡風の2/3とした方がよい。現業の予報者はこのような統計法則よりも、天気図上で外捜することに重点をおいている。

Reed: 飛行機にサービスする予報者はフロントによるicingの重要性を認識する必要がある。飛行機はしばしばフロントにそってとばねばならず、長い間icingにさらされることがある。予報者はicingの危険性に対して正確に予報を出してくれるものと期待されている。

Pepper: マルグレスの公式と実際のフロントの傾斜と一致するか

Pothecary: 定量的に当てはまらないが、定性的にはよく合っている。

Wallington: フロントは天気状態を記述するためや、力学的状態を解釈し、気団の移動を記すためにも用いられる。前の2つの条件は天気図解析とthickness chartによって求められるが、最後の条件は800mb面ぐらいで何か保存性のよい物理量に頼る必要があるのではなからうか。

以上で討論を終っているが、一読して分るようにフロントに関する研究はおき忘られたように遅々たる状態である。しかし構造の面では、乾燥空気があることや、Jetのまわりの垂直循環の強さとフロントとの関係がしだいに明確化されて来ていることは喜ばしい。一方フロントの移動は数値予報の進歩にもかかわらず、昔のままであることは検討を要する問題である。

附記 Sutcliffe の発達項とは

低気圧が発達するという事は、中心示度が深くなること、または発散があることによって定義されることが多い。このことを連続方程式と渦度方程式を組合わせてもう少し具体的に考えて見よう。

等圧面座標を用いると連続方程式は

$$\frac{\partial}{\partial p} \frac{dp}{dt} = -\nabla_p \cdot \mathbf{V} \quad (1)$$

となる。問題は地表面における低気圧が発達するかどうかという点にあるから、大気全体を考える必要がある。そこで(1)式を気圧について積分すると

$$\frac{db_0}{dt} = - \int_0^{p_0} \nabla_p \cdot \mathbf{V} dp \quad (2)$$

となる。これが development Index と呼ばれるもので、中心示度が深くなることと発散があることは見方によっては同じことを表わしている。したがって問題は発散 $\nabla_p \cdot \mathbf{V}$ の垂直分布とその意味を考える必要がある。発散があるとは適当な領域をとったとき、その境界を横切って入ってくる量よりも出てゆく量の方が多いことを意味する。しかしこのような定義では、これ以上考えを拡げることにはできない。それは出てゆく量が入ってくる量よりも何故多いかが分からないからである。そのためにわれわれはまず運動を支配する法則を導入する必要がある。この法則をかりに等圧面座標をとった渦度方程式に求めてみよう。

$$\left(\frac{d}{dt}\right)_p (f+\zeta) + (f+\zeta) \nabla_p \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (3)$$

記号はいずれも一般に用いられている慣例に従っている。上式に仮定として、一般に地球渦度は相対渦度より大きく、かつ低気圧程度の規模の現象に対しては地衡風近似が成立つとしよう。そうすると(3)式は

$$f \nabla_p \cdot \mathbf{V} = -(\mathbf{V} \cdot \nabla_p)(f+\zeta) - \frac{g}{f} \left(\frac{\partial}{\partial t}\right)_p \nabla_p^2 h \quad (4)$$

となる。(4)式の左辺は発散、右辺第1項はある等圧面上における渦度輸送、第2項は渦度の局所的時間変化をあらわしている。どの等圧面をとっても渦度輸送と、渦度の傾向 $-\frac{g}{f} \left(\frac{\partial}{\partial t}\right)_p \nabla_p^2 h$ とが釣合っていると、発散も、収斂もしないので、低気圧は発達も衰弱もしないが、渦度が異常に多く輸送されて渦度傾向と釣合わなくなると発散し、低気圧が発達することを示している。

一方発散の積分をするには、発散の垂直分布が分らなければならない。一般に下層で収斂すると上層で発散して互に補償し、そのわずかな差引が低気圧発達を支配している。そこで大気全体を積分しないで下層の収斂をみるために1000mb、上層の発散をみるために500mbの等圧面をとって(2)式すなわち(4)式を積分すると、

$$f(\nabla_p \cdot \mathbf{V} - \nabla_p \cdot \mathbf{V}_0) = -(\mathbf{V} \cdot \nabla_p)(f+\zeta)$$

$$+(\mathbf{V}_0 \cdot \nabla_p)(f + \zeta_0) - \frac{g}{f} \left(\frac{\partial}{\partial t} \right)_p \nabla_p^2 (h - h_0) \quad (5)$$

となる。ただし添字 0 は 1000mb 面における高度である。

このように低気圧発達を一層だけできめないで、積分して二層で考えるところが sutcliffe の方法の特徴で、同時に Thickness をとり得ることによって、力学だけでなく熱力学を導入しうる途を拓いている。ここでさらに仮定として、Thickness の時間変化は Thickness 内の平均風による移流によってきまるとし、かつ発散は渦度に比し省略できる（ここは議論の多いところである）とすると Thickness の時間変化は

$$-\frac{g}{f} \left(\frac{\partial}{\partial t} \right)_p \nabla_p^2 (h - h_0) = (\mathbf{V}_0 \cdot \nabla_p) \zeta - (\mathbf{V} \cdot \nabla_p) \zeta_0 \quad (6)$$

となる。(6)式を(5)式に代入すると

$$f(\nabla_p \cdot \mathbf{V} - \nabla_p \cdot \mathbf{V}_0) = -V' \frac{\partial}{\partial S} (f + \zeta + \zeta_0) \quad (7)$$

となる。これが sutcliffe の発達項で、 V' は二層間の風速差つまり温度風、 S は温度風の吹く方向である。右辺第一項は南寄りの温度風は高気圧の発達と沈降、北寄りの温度風は低気圧発達と上昇気流のあることを示す。第2、第3項はそれぞれ 500, 1000mb の渦度が温度風で流される効果を示している。したがって温度風の方向に渦度がへるような場に低気圧が来ると発達することになる。

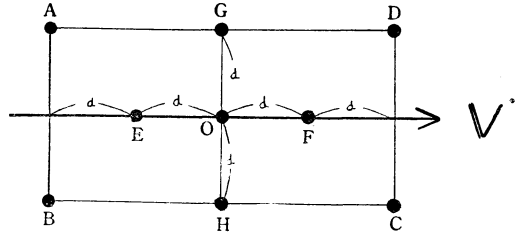
この方法はおもにイギリスで利用されているが、わが国でも佐々木(良)、齊藤(直)などによって現業化され、予報に役立つことが立証されている。(7)式の実際的な方法は Sawyer, Matthewman あるいは佐々木(良)などによって考えられている。つきにその手順をのべる。

(1) 上層(たとえば500mb)と下層(たとえば850mb)の等圧面高度を加えた天気図を作る。これから $\zeta + \zeta_0$ が計算できる。

(2) 上層と下層の高度差分布(Thickness Chart のこと)を作る。これから温度風 V' が計算できる。

(3) (1)の天気図を青線、(2)の天気図を赤線にして同一の天気図上に重ねてかく。

(4) 第2図の格子を計算しようとする地点の上におき、矢印を赤線の方向に合わせる。



第2図 Sawyer, Matthewman の格子。

d は格子の距離

(5) 0が原点でA, B, C, D, E, F, は青線の値, G, Hは赤線の値を内捜して読み取り次式に代入する。

$$-V' \cdot \nabla (\zeta + \zeta_0) = -\frac{g^2 m^2}{8 f^2 d^2} \times (C + D + 4E - B - A - 4F) \times (H - G)$$

d はとった点の間隔で格子(mesh)とも呼ばれている。

m は地球を地図に投影した時の縮尺である。またコリーの緯度変化は小さいとして無視してある。

アメリカにおける気象用レーダーの最近の動き

最近アメリカではレーダーによるストームの観測、特に高出力のレーダーを使った観測の必要性を認めて、強力なレーダー観測網の整備を急いでいるようで、1956年10月発行のエレクトロニクス誌によると、約400万ドルを投じて39台を新たに製作設置すると報じている。

このレーダーはレイセオン会社によって製作され、39台のうち8台は軍に、残り31台を気象台へ1958年までに引渡しを完了することになっており、それぞれ1日23時間運転することを計画しているようである。

装置の内容を見ると、周波数は9,300~9,500MC(3

cm帯)、5,600~5,650MC(5cm帯)、2,700~2,900(10cm帯)の3つを備えていて、尖頭出力は3cm及び5cm帯で250, 10cm帯で500kwということである。

これによる有効探知範囲は半径250マイルとなっているが、指示機の距離範囲は1, 5, 25, 100, 400マイルの5段階に切換可能のようである。

従来アメリカでは軍の払下げである低出力の古いレーダーを気象用としていたようで、しかも波長は3cmと10cm帯のものばかりであったが、今回の計画で日本と同様5cm帯が加えられたことが注目される。

(気象庁観測部測器課 下島省吾)