

前線に関する最近の概念*

(昭和35年11月18日 気象学会秋季大会における特別講演)

Arnt Eliassen**

荒川博士ならびに皆さん、私は日本気象学会からの講演ご依頼に対し謝意を表したいと思います。多数の立派な気象学者が会員となっている当学会でお話することは私にとって大変名誉なことです。私はまた、私の日本滞在が非常に楽しくかつ興味深いものであったこと、更に多くの日本の同僚にお会いできてうれしかったことを申し上げたい。私は日本の人々の親切と歓待を決して忘れることはないでしょう。

前線という概念は43年前 J. Bjerknes によって、その有名な論文***「移動性低気圧の構造について (On the structure of moving cyclones)」の中で始めて導入されましたが、以後この概念は気象学の中で基本的な役割を演じて来ました。総観気象家にとっては、それは非常に役に立つもので、風、気圧、気温、雲、降水などの場を解析して合理的な分布図を得るための鍵となっております。地上の前線解析はまた、前線性低気圧がどのような発達段階にあるかを示し、どこに新しい低気圧が発生するかを明らかにすることにより、天気予報に手がかりを与えるものでもあります。

前線がどのような理由でどのように形成されるかを最初に取扱ったのは、1928年の Bergeron の有名な論文** **であります。Bergeron は3次元の風速の場が気流の変形を生じやすいこと、特に3次元流線場の双曲点でそれが起りやすいことを指摘しました。もし各実質部分の温位が保存されるならば、温位傾度の変形場の収縮軸に対してどのような方向をとるかによって傾度は強まったり弱まったりするでしょう。こうして、気温傾度はある

特定地域で増大し、結局、前線が形成されることになります。

Bergeron はその論文の中で、水平変形場の前線形成作用を強調しました。彼は水平の風の平均場が、ある地域で強い変形を示すことを指摘し、この事実から主要前線帯の位置を導き出すことに成功しました。それは Bergeron の論文からとった第1図が模型的に示すとおり

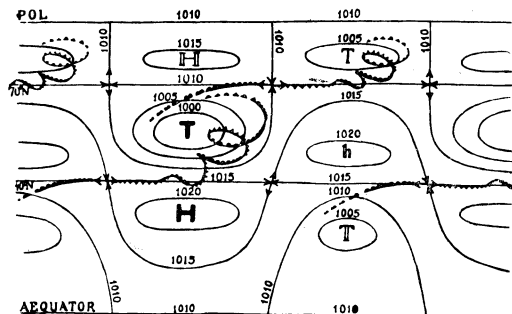


Fig. 24 Vorläufiges frontogenetisches Horizontalschema für die N-Halbkugel im Herbst und Winter

第1図 北半球の秋と冬における前線形成過程の模型平面図

です。この学説は一般に認められるようになり、大抵の気象の教科書に掲載されています。

しかし注意すべきは、水平変形場が前線帯の気温のコントラストの発生を説明することはできるが、風のシャアの発生を、更にまた前線の鉛直構造、前線性の雲や降水を説明できないということです。前線における風のシャアの発生は温度の鉛直成分の形成を意味するものですが、それは水平収斂と鉛直運動が起ることによって始めて可能となります。また前線に付随する雲や降水も、鉛直運動の結果に違いありません。従ってわれわれは、鉛直循環が前線構造の本質的部分を形成していると結論せ

* Current Concept of Fronts.

** オスロー大学

*** Geofysiske Publikasjoner, Vol. 1.

**** Geofysiske Publikasjoner, Vol. 1.

ざるを得ないのであります。

Bergeron はこの事実を確認し、3次元変形場の重要性を強調しました、第2図は鉛直循環の前線形成効果に関する Bergeron の考えをよく示しております。このような場合は、気温のコントラストを生ずるだけでなく、水平収収の結果として低気圧性の風のシャーを発生させることにもなるでしょう。

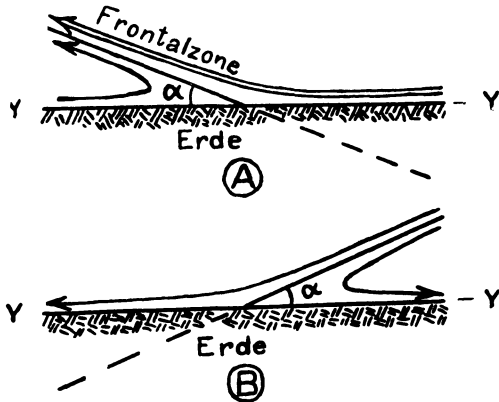


Fig. 18. Das schiefwinklige Deformationsfeld.

- (A) einer gewöhnlichen Frontogenese.
(B) einer Frontolyse.

第2図 傾斜した変形場

- (A): 通常の前線形成
(B): 前線解消

前線帯における鉛直循環の重要性は、Bergeron が1928年に彼の論文を書いてから約20年間も、ほとんど忘れられてしまったようです。もちろん、前線性の雲や降水を説明するために鉛直の「滑昇」運動(“upgliding” motion)が必要であることは認められていましたが、この滑昇運動は単に仮定されていただけで、それを前線の力学や運動学と関係づけることは全く試みられませんでした。

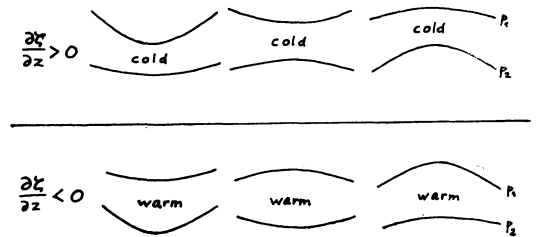
前線に関連した鉛直循環は、J. Bjerknes により、その Compendium of Meteorology 所載の論文(1951)で取扱われ、その後 Newton* 等によって論ぜられました。これらの研究者は前線帯内の鉛直循環を、観測された変化傾向にもとづいて研究しています。日本では前線形成と前線の鉛直循環の問題は毛利博士により研究されました。

さて私の講演の中心課題にはいりましょう。第2次世

* J. Meteor. 11, p. 449, 1954.

界大戦後に発展した大気運動の準地衡風理論によれば、水平の風の場合と気温分布がわかっているときは大規模な鉛直循環を計算することができます。準地衡風理論、特に現在数値予報の研究に使われている形の理論が非常に正確であるとはおそらく言えないことは事実です。しかしながら、たとえ準地衡風理論がある程度の修正を要するものであるにしても、われわれはそれによって鉛直循環の主な性質を説明できるのに対して、戦前はこの種の循環については全く何も知られていませんでした。私はこれが、戦後における気象力学の最大の成果であると思っています。

運動が完全に水平(または等圧的)であるとすれば、水平発散は起らず、この結果として渦度と気温は水平移流だけで変化するでしょう。しかし傾圧領域では、このような移流は、風と気圧との間、あるいは鉛直方向の風のシャーと気温との間に近似的に成立っている地衡風平衡を破壊するでしょう。従って準地衡風理論によれば、純粋に水平な運動は不可能で、地衡風平衡の維持に必要なとされる渦度変化及び気温変化を起すために丁度十分な程度の鉛直運動がなければなりません。この原則にもとづいて、どのようにして鉛直循環を決定するかという問題の詳細にはここでは立入らないことにして、ただ鉛直運動を決定する主な作用を示すだけにしましょう。



第3図 上段: 寒気内では低気圧は高さとともに強まり、高気圧は弱まる。下段: 暖気内では低気圧は高さとともに弱まり高気圧は強まる。

第3図は、気象学者なら誰でも良く知っている事実、すなわち、冷たい低気圧は高さとともに強まり、冷たい高気圧は高さとともに弱まるかまたは低気圧に移り変るという事実を示すものです。言い換えれば、周囲より寒冷な領域では(地衡風)渦度は高度とともに増大し、同様に周囲より温暖な領域では、渦度は高度とともに減少するでしょう。

水平運動では、次式が示すように渦度が近似的に保存されるものと考えましょう。

$$\frac{D\zeta}{Dt} \approx \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \zeta \approx 0 \quad (1)$$

(1)を高度 z について微分すれば,

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial \zeta}{\partial z} + \mathbf{V} \cdot \nabla \frac{\partial \zeta}{\partial z} + \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial z} \cdot \nabla \zeta \approx 0 \quad (2)$$

$$\frac{D}{Dt} \frac{\partial \zeta}{\partial z} \approx - \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial z} \cdot \nabla \zeta \quad (3)$$

となり、(3)からわかるように、 $\frac{\partial \zeta}{\partial z}$ の実質的増大率は近似的に $-\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial z} \cdot \nabla \zeta$ 、すなわち温度風による渦度の移流に等しくなります。しかるに $\frac{\partial \zeta}{\partial z}$ は周囲に比べての気温の低さを表わす尺度ですから、 $\frac{D}{Dt} \frac{\partial \zeta}{\partial z}$ は鉛直速度 w と大体比例関係になればなりません。なぜかという、もし熱源が存在しないとすれば、上昇運動は実質部分の気温が下降するための唯一の方法だからです。従って w は、 $-\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial z} \cdot \nabla \zeta$ すなわち温度風による渦度の移流に比例することになるでしょう。

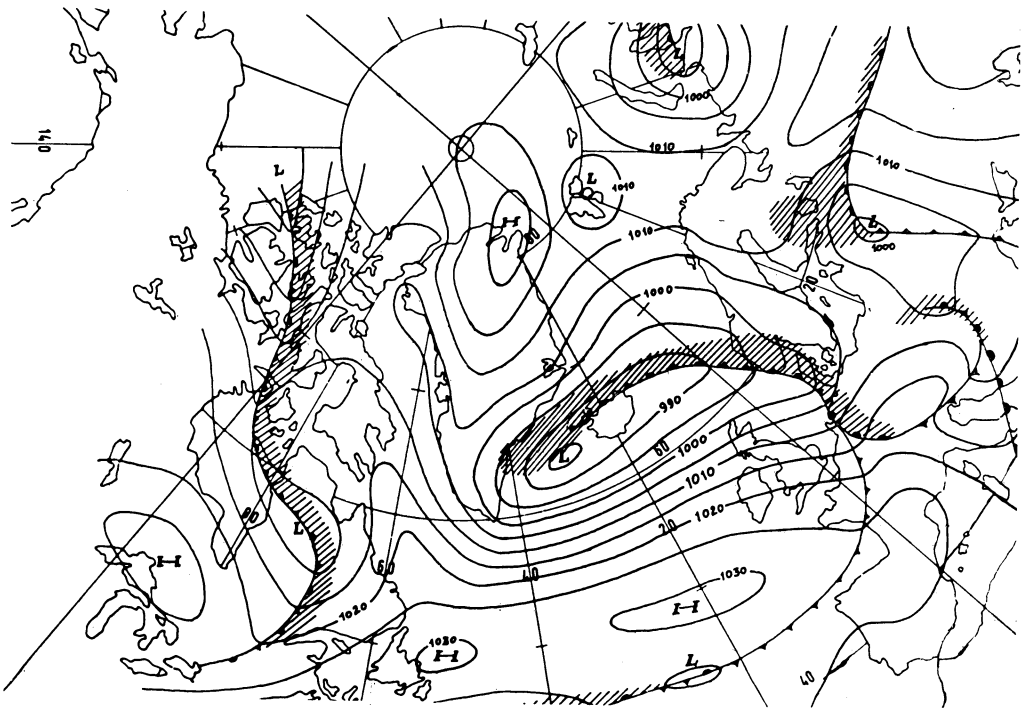
$$w \sim - \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial z} \cdot \nabla \zeta \quad (4)$$

以上はごく大ざっぱな推論ですが、それでも、準地衡風理論によれば鉛直運動を支配する作用がどのような性

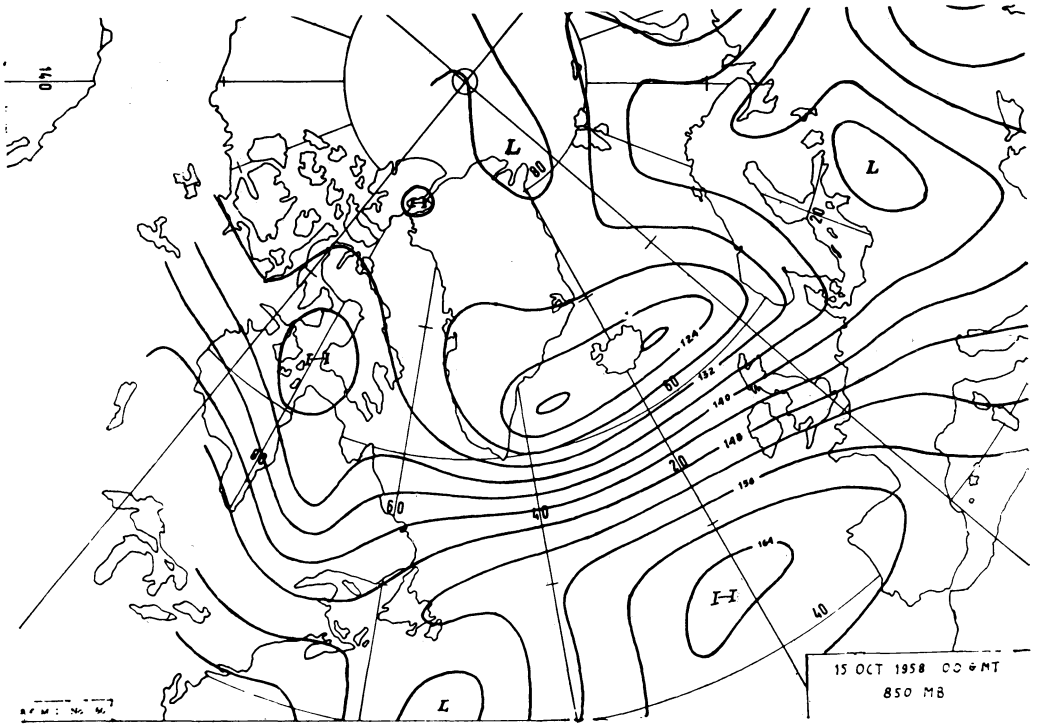
質のものであるかを教えてください。

この作用を明らかにするために、ひとつの例をお目にかけましょう。第4図は北太平洋域の地上天気図、第5図はこれに対応する 850mb の天気図です。この図から私は、5点法用のスケールを使って地衡風渦度を計算しました。その結果は第6図の細線のとおりです。また同じ図上には、1000mb から 700mb までのシックネスが太い実線で示してあります。さて、温度風による渦度の移流はこの図から直接読取ることができます。すなわち、これら2種の曲線の交点の密度が移流を表現しています。第7図はこの交点を黒丸と白丸で表わしたもので、黒丸は温度風が渦度の大きい所から小さい所へ吹くことを意味していますが、これは理論によれば上昇流に対応すべきものです。一方、白丸は渦度の小さい所から大きい所へ温度風が吹くことを意味していますが、これは下降流に対応します。斜線を施した部分は降水域の解析結果を示すものですが、これからもわかるとおり、それは明らかに黒丸の多い領域に対応し、特にデーターの多い所ではこの対応が良くなっています。

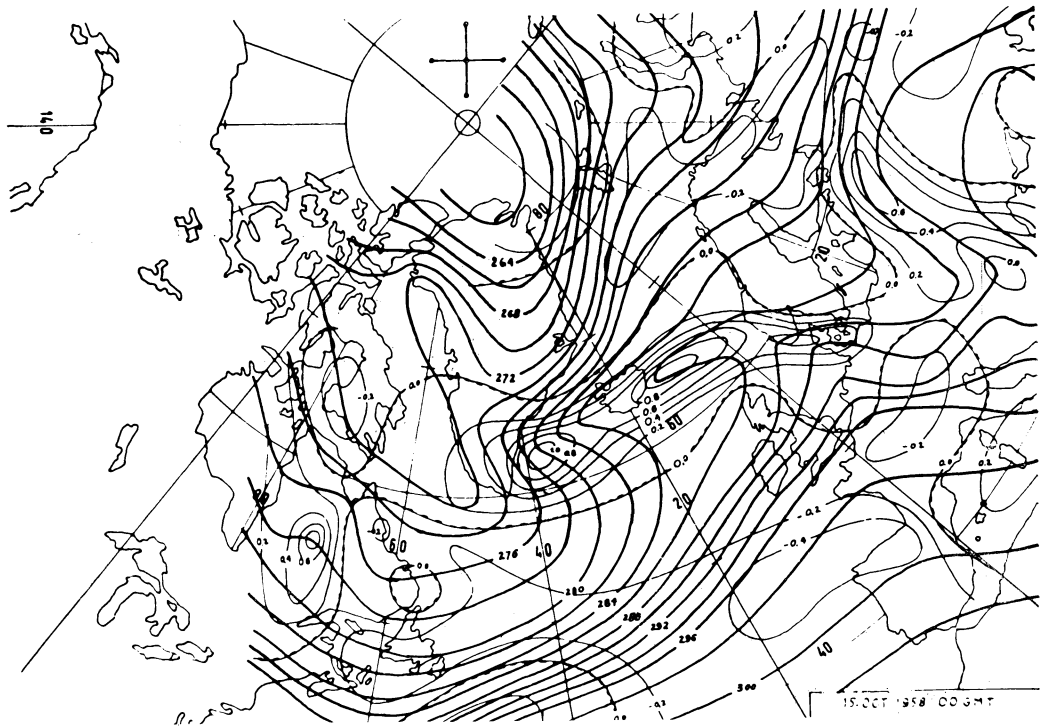
注意すべきは、準地衡風理論によれば、顕著な鉛直運動は $\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial z}$ が0でない所、言い換えれば傾圧領域に限っ



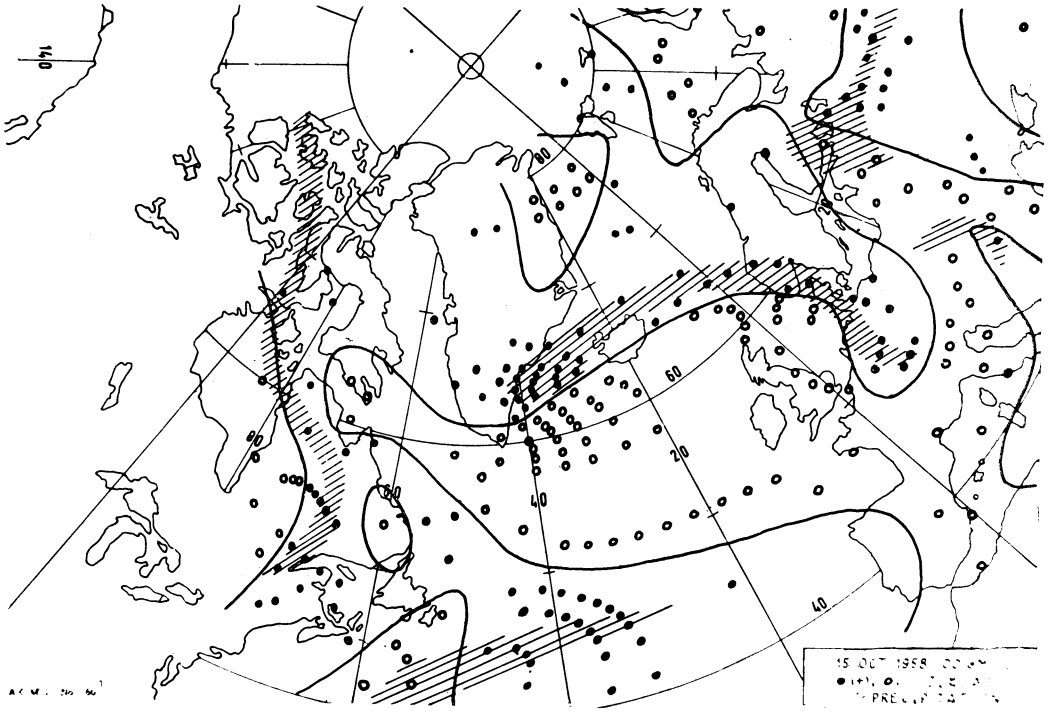
第4図 1958年10月15日 00 GMT の地上天気図



第5図 1958年10月15日 09 GMT の850mb 天気図



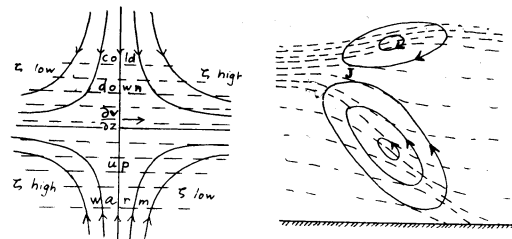
第6図 1000~700mb シックネス (太線) と 850mb 面地衡風温度 (細線)



第7図 温度風による渦度の移流，黒丸は正，白丸は負の移流を示す．斜線は降水域

て見られることで，特に前線帯では鉛直運動が強くなるでしょう。もし上述の法則を前線に適用すれば，前線に付随した鉛直運動は次のいくつかの作用いかんにかかっていることがわかるでしょう。

A. 最初に，第8図の左側に示すような，等温線の密集を起している典型的な水平変形場を考えましょう。温度風は等温線にそって吹きますから，伸張軸の北では対流圏内の温度風は渦度の小さい所から大きい所へ吹くことがわかります。これは下降流を示すものです。しかし



第8図 水平変形場の鉛直運動，平面図（左）と等温線に直角方向の断面図（右），破線は等温位線

伸張軸の南では，温度風は渦度の大きい所から小さい所に向って吹き，上昇流のあることを示します。従って等温線に直角にとった鉛直面内では，対流圏内の鉛直循環は図の右側に示したように直接循環を形成しなければなりません（破線は等温位線を表わす）。もっと注意して調べてみればわかることですが，鉛直循環の形は完全には鉛直ではなく，ここに示したように高さとともに寒気側に傾いています。温度場が逆になっている成層圏では循環も逆向きに起るでしょう。また圏界面の近くでは，空気粒子は等圧面を横切って北に進み速度を増すことになります（または次のようにも言えるでしょう，圏界面付近の循環細胞北側には水平収斂があり，ジェット・ストリームの北側に低気圧性渦度の増大を起す）。従ってこの高度では偏西風の速度は増大することになります。このことは寒帯前線ジェット・ストリーム (polar front jet stream) の発生と存続になんらかの関係をもっているかも知れません。ここに述べた機構は，Namias と Clapp* が1949年に合流説 (confluence theory) と名づけて提出した機構と非常に良く対応しています。

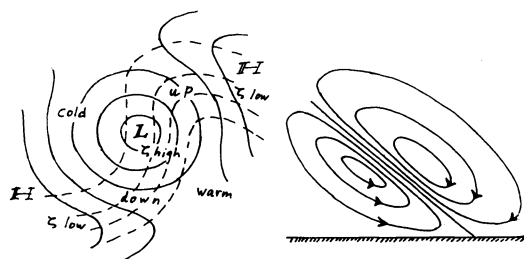
ジェット・ストリームの発生はともかくとして，直接循環細胞は，転移層 (frontal layer) の暖気側に下層の

* J. Meteor. 6, p. 330, 1949.

前線を、寒気側に上層の前線を形成しやすいと考えるべきです。

等温線に沿う水平伸張によって前線帯の中にできる鉛直循環については、すでに1956年 Sawyer* によって考察されております。

B. 第9図はもうひとつの作用を示すものです。等温線の帯が低気圧を貫いて走っている場合には、温度風は一般に低気圧の背後で渦度の小さい所から大きい所に向かって吹き（下降流が起り）、低気圧中心の東では渦度の大きい所から小さい所に向かって吹き（上昇流が起り）ま

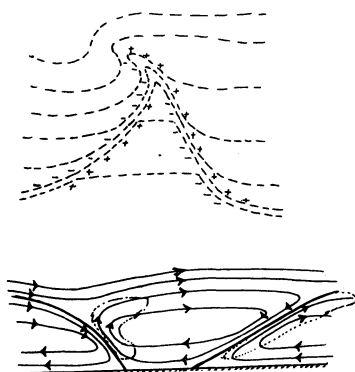


第9図 低気圧付近の渦度移流と鉛直運動

す。等温線に直交する鉛直面内の鉛直循環は、低気圧の東部では、定性的に図の右側に示すようになるはずで、この循環は下層で水平収収を生じ、この結果強い水平の気温コントラストと低気圧性の渦度を、いかにすれば前線形成作用 (frontogenesis) を起すでしょう。だから、それぞれの低気圧は、中心の東方で下層の温暖前線を形成し、かつこれを強める傾向があるともいえます。同様にして、低気圧背後の上層（上部対流圏）の寒冷前線の形成と持続は、同じ機構で説明されることがわかるでしょう。

C. 第3の作用として挙げるべきものは、等温線が一般に始めから終りまで前線帯と平行しているわけではないという事実です。更に前線の両側の気団内には、通常ある程度の傾圧性が存在しますから、等温線は第10図に示すように前線帯にはいたり出たりする傾向があります。前線帯には強い低気圧性渦度が付随していますから、このことは、温度風が前線域に吹き込む所（西側）では沈降が生じ、温度風が前線帯から吹き出す所（東側）では空気が上昇する、という作用をすることになるでし

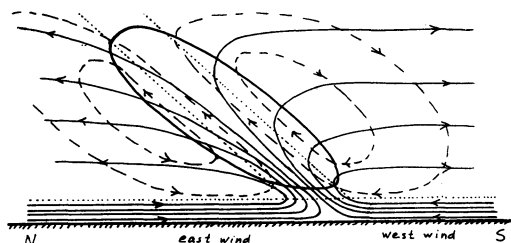
よう。このようにして一般に、寒冷前線では直接循環が、温暖前線では間接循環が得られます。この循環を温度風と組み合わせるときは、東西方向の断面図上に、図の下部に示したような鉛直循環形式が得られます。寒冷前線では暖気が上昇し寒気が沈降するのに対し、温暖前線



第10図 前線帯付近の等温線（上）と東西方向断面図上の鉛直循環（下）

では寒気が上昇し暖気が沈降します。これは通常の温暖前線の概念とは一致しないかも知れません。しかし、国際地球観測年の観測資料にもとづいて、Breistein 氏等** がオスローで解析した多くの温暖前線は暖気のいちじるしい乾燥を示しており、また同じような結果がイギリスの研究者*** からも報告されています。ただ、はっきりさせておくべきことは、鉛直運動がこの作用だけで起っているのではないということです。

D. 最後に私は、地面摩擦が熱源と一緒にあって前線帯内の鉛直循環に及ぼす効果についてお話することにして、Ekman の理論によれば、摩擦層内では等圧線を横切って気圧の低い方に向う質量流 (mass flux) が存在します。低圧部や気圧の谷、一般に言えば地衡風渦度が正であるような領域では、この質量流の収収が起ります。特に、前線帯の摩擦層内では質量収収が起る

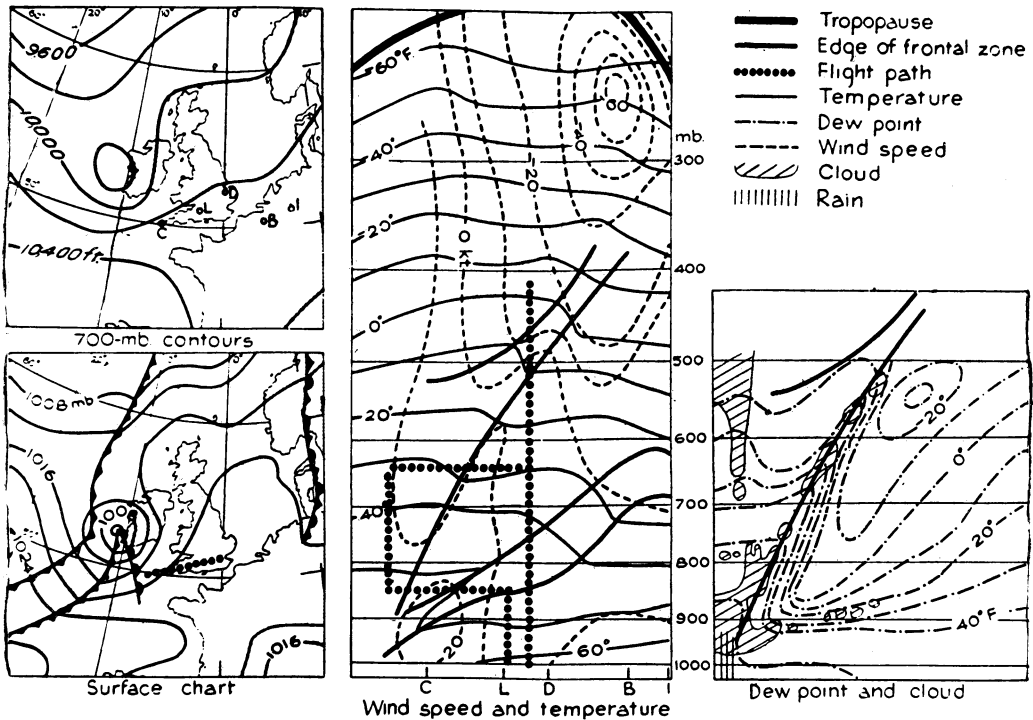


第11図 前線帯における地面摩擦による鉛直運動

* Proc. Roy. Soc. A, 234, p. 246, 1956.

** 2nd report of the IGY-group of the Norwegian meteorological Institute. (未刊行).

*** Sawyer, J.S.: Geophysics Memoir, 12, No. 96, 1955.



第12図 湿度分布断面図

でしょう。そうすれば、連続性からいって、第11図のように、前線帯の摩擦層の上限には摩擦に起因する上昇流が存在しなければなりません。上昇流は、簡単化のためのある種の仮定を置けば、少なくとも近似的には計算することができます。その結果によると、流線は鉛直には走らず、前線面にそって傾斜することになるでしょう。摩擦で起った鉛直運動は凝結と潜熱の放出を起すことになります。こうして生ずる熱源の位置は、図では卵型の線で表わしてあります。準地衡風理論によれば、この熱源がまた付加的な鉛直循環を発生させますが、それは図の破線が示すとおりです。この熱源をもった循環は下層において重要な前線形成の作用を行います。それは等温線の密集ならびに水平収斂を起し、水平収斂は前線のシャ-を増大させるでしょう。この結果、前線は強まり、摩擦で生じた上昇流は更に増大し、また降水量も多くなるでしょう。こうして、摩擦と凝結の潜熱から成り立つフィードバック機構 (feed-back mechanism) が行われることとなりますが、これは非可逆過程で、それがひとたび始まれば強い前線と前線性の雲のシステムとを維持す

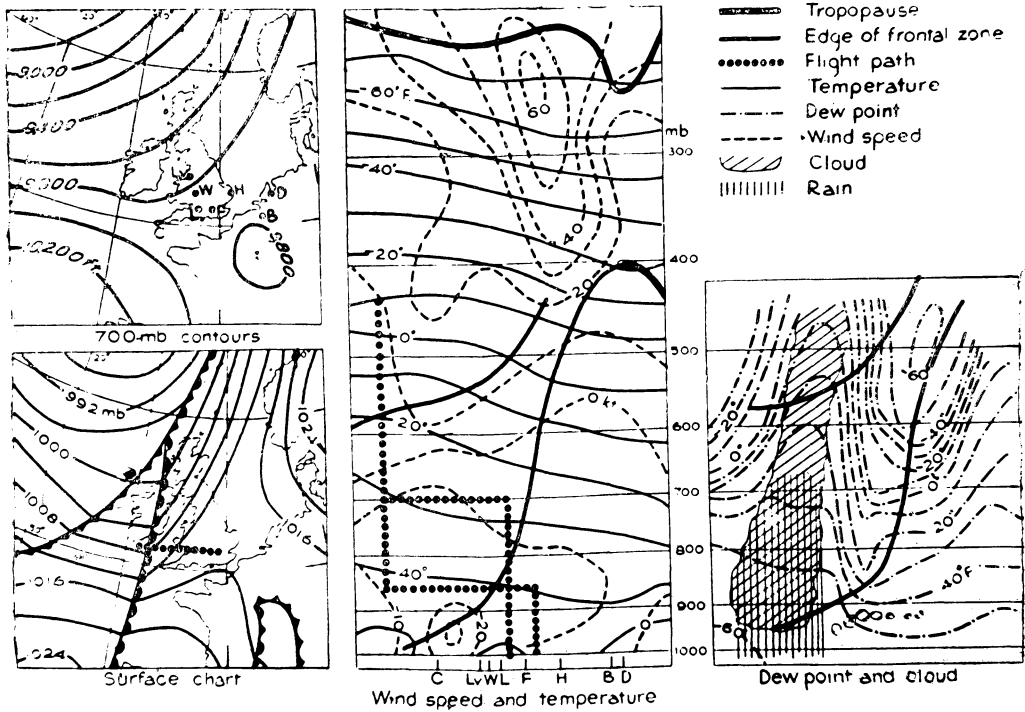
ることになるはずであります。私はこの過程を、「ロスビー記念論文集」(Rossby Memorial Volume) 中の論文でもっと詳しく取り扱いました。

しかし凝結熱の放出は摩擦による鉛直運動で起るだけではなく、また、この講演ですでに論じた他の力学的要因による上昇流によっても起ることは明らかです。凝結熱の主な効果は、鉛直循環を強め上昇気流分枝を密集させることにあるでしょう。

すでにお分かりのことと思いますが、前線帯の鉛直運動を決定する要因は複雑であって、以上述べたいろいろな作用は同時にはたらい、合成されたひとつの鉛直運動を生じうるものです。鉛直運動を決定する方程式は線型ですから、いろいろな作用は単に重なりあっているのでしょう。しかし前線帯の鉛直循環は、各種要因の相対的大きさがどうであるかにより、それぞれの場合でかなり異なることがあります。

説明のために Sawyer の論文* からとった2つの図(第12, 13図)をお目にかけましょう。これらは Brewster-Dobson の露点計による測定をもとにして作った湿度分布の断面図です。ここに見られる湿舌と乾舌

* Geophys. Memoir, No. 96, 1955.



第13図 湿度分布断面図

(moist and dry tongues) は顕著な鉛直循環を示しています。これらの場合には直接循環が卓越していたようですが、これは全く前線帯の水平伸長の結果生じたものでしょう。

大気中の前線は、天気の数値解析及び数値予報の技術にとっては難しい問題です。それは、前線が以上述べたようなスモール・スケールの現象だからです。前線帯の力学それ自体は数値的な方法で研究できるものと私は思いますが、それには非常に密な格子点が必要でしょう。私の信ずるところでは、前線の力学は台風の力学といろいろな点で似ています。しかし台風と前線は両方とも、間もなくその性質が理解され、予報できるように必ずなることでしょう。そして、この方面の研究の進歩において日本の気象学者が非常に重要な役割を演ずるだろうということを私は信じて疑いません。

訳者後記

本稿は数値予報シンポジウム参加のため来朝されたノールウェーのオスロー大学教授アルント・エリアッセン博士が気象学会の依頼により昭和35年11月18日気象学会秋季大会で行った講演の全訳である。始め教授はこの講演のための原稿を特に準備されてなかったが、講演内容をなるべく正確に伝えたいから是非原稿をいただきたい旨お願いしたところ、快く承諾せられ、十分の時間がなかったにもかかわらず講演会での通訳ができるよう大急ぎ

で作って下さった。(付図)その後、幾分手を加えた原稿をノールウェーから送っていただいたので、大会に参加されなかった会員のため訳出し掲載するしだいである。有益な講演をしていただいたことに対し、読者諸兄とともにエリアッセン教授に感謝したい。 須田 建

The concept of fronts was introduced by J. Bjerknes 43 years ago in his famous paper "On the structure of cyclones", and has since then played a fundamental role in meteorology. To the synoptician, the introduction of fronts was extremely helpful. It is the key to the by means of which the fields of wind, temperature, clouds and precipitation can be analyzed into a logical pattern. ~~Frontal analysis~~ Frontal analysis also gives a clue to weather forecasting by showing the stage of development of a cyclone, and revealing where new developments may take place.

The problem concerning why and how fronts are formed was first treated in a notable paper by S. S. Bjerknes in 1928. Bjerknes pointed out that the three dimensional velocity field would ~~be~~ being about a deformation of the air in particular.

1) Geophysical Publications, Vol. 3, p. 11.

付図 講演原稿の一部