

1-2. 温帯低気圧と前線の構造と時間発展

—概念モデルにおける表現—

北 畠 尚 子*

1. はじめに

温帯低気圧の時間発展に関する概念モデルとしては、Bjerknes and Solberg (1922) によって最初に提案されたもの (第1図 a) が「ノルウェー学派の低気圧・前線モデル」の代表例として広く知られている。これは、前線を伴った低気圧が発達するにつれて温暖前線と寒冷前線の間が狭まって閉塞前線が形成され、低気圧中心は寒気内に取り込まれるというものであった。当時、前線は「不連続線」と定義され、また概念モデルは地上観測と雲の目視観測に依存し「地表付近の流れが上空の状態 (鉛直運動・雲分布等) を支配する」という考えに基づくものであった。その後、ノルウェー学派では閉塞前線が低気圧中心を通り後方へ伸びる「折れ曲がり (back-bent)」や低気圧中心への「巻き込み (roll-up)」も表現した第1図 b のモデルなども提案された。

1930年代には前線の定義は「前線帯の暖気側の端」に変わった (北畠, 2005も参照)。また「上空の流れ (ジェット気流・トラフ等) が地表付近の状態 (低気圧・前線等) を支配する」考え方に基づいて発展したその時代の諸理論との整合も考慮されるようになって、20世紀半ばには第1図 c のような低気圧と前線の模式図が示されるようになった。ここでは第1図 b にあった前線帯内のメソスケール現象は省略されている。これも基本的な考え方はノルウェー学派がもとになっているのでノルウェー学派モデルと呼ばれることが少なくないが、本稿では初期のものと区別するために、同時代以降最近まで認められていた考え方 (例えば後出の第3図) と共に「古典的モデル」と呼ぶことにする。

これに対して Shapiro and Keyser (1990) は第1図 d (以後「SK モデル」とする；中村・高藪 (1997) も

参照) を提案し、最も初期のモデルである第1図 a と比較して以下の相違点を強調した。すなわち (1) 最盛期には低気圧中心付近に暖気核が生じる、(2) 寒冷前線が温暖前線との交点で弱まっている (前線断裂) ために閉塞点や閉塞前線は生じない、(3) 顕著な温暖前線と、ほぼ直交する寒冷前線を伴う (T ボーン構造)、そして (4) 低気圧中心から後方にも背の低い温暖前線が伸びる (ベントバック温暖前線)、の4点である。

この SK モデルの提案に対する反響は大きく、様々な議論が行われてきた。その中には、SK モデルでは過去に指摘された多様な前線パターンのうち一種類のみを強調しており、また従来と異なる用語等を用いたことで新しさが過度に強調されているとして強い批判もあった (例えば Reed *et al.*, 1994)。Shapiro 自身は SK モデルについて、ノルウェー学派のモデルで既に指摘されていたことを異なる観点で見直したものだとしている (Bleck *et al.*, 1993, p. 1371; Shapiro *et al.*, 1999, p. 141)。もし SK モデルの特徴が本当に従来から知られていたものであったなら、それなりの一般性が認められていても良いはずだが、最近でも代表的な模式図としては第1図 c と同様のものだけが紹介されることも少なくない (例えば Hakim, 2003; Holton, 2004)。

現実の現象は極めて多様なのだが、これらのモデルのどの部分が温帯低気圧の一般的な特徴を現すと考えられているのか、またその理由は何か。本稿の限られた紙面では、上で SK モデルの特徴とされている (1) ~ (4) の点に関して主に古典的モデルの特徴と対比させる形でその性質と一般性について議論し、前線を伴った低気圧の構造とその時間発展について再検討したい。

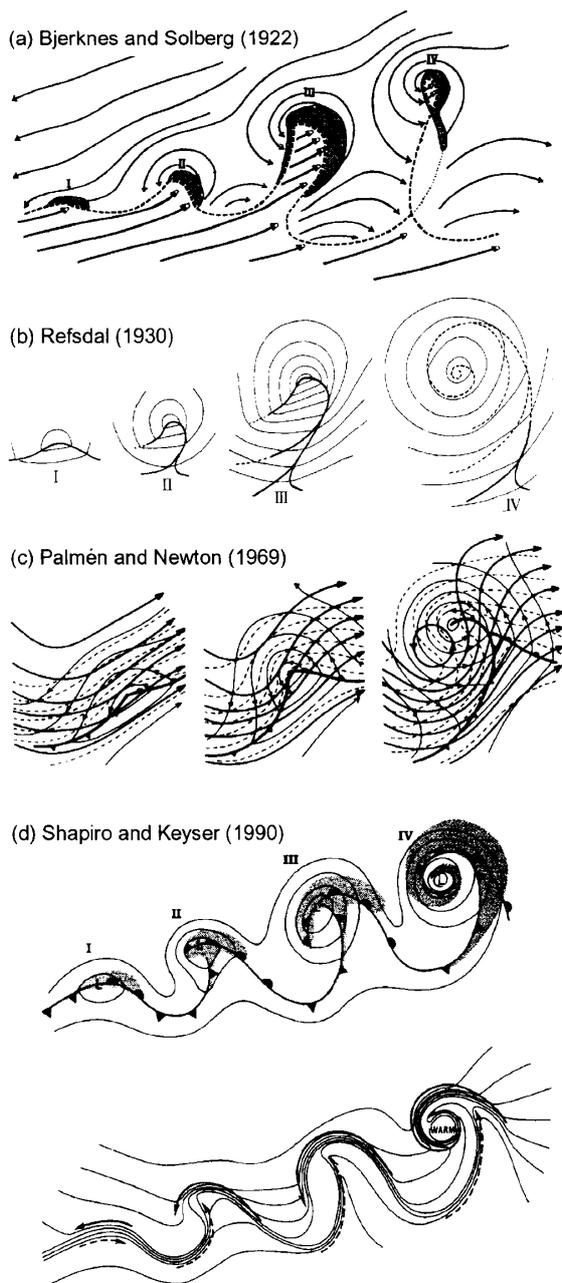
2. 前線性低気圧の温度構造と下層前線のパターン

2.1 寒気核か、暖気核か？

古典的モデルでは温帯低気圧は寒気核構造と考えら

* 気象研究所台風研究部, nkitabat@mri-jma.go.jp

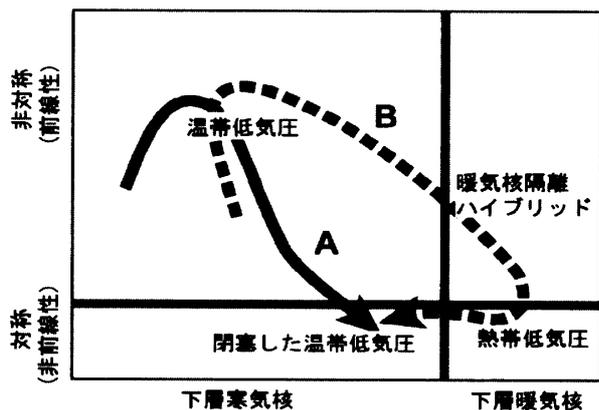
© 2005 日本気象学会



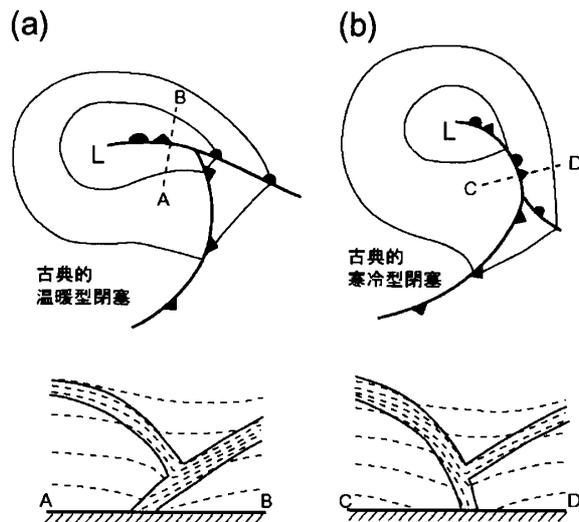
第1図 温帯低気圧と前線の構造とその時間発展。(a) Bjerknæs and Solberg (1922) のモデル。(b) Refsdal (1930) の「強い低気圧」モデル。細実線は地上等圧線。(c) Palmén and Newton (1969) のモデル(本稿では古典的モデルと称する)。太実線と細実線はそれぞれ500 hPa と1000 hPa 面のジオポテンシャル高度、破線は1000-500 hPa の層厚。(d) Shapiro and Keyser (1990) のモデル(SK モデル)。上段：前線、海面気圧(細実線)、雲域(陰影)。下段：温位(実線)、寒気/暖気の流れ(実線/破線の矢印)。

れていたのに対して、SK モデルでは最盛期には低気圧中心付近に直径数100 km、深さ数100 hPa の下層暖気核が生じるとされる(暖気核隔離; warm seclusion) のが大きな特徴である。この構造では、中心気圧が大きく低下すると同時に中心付近で下層の強風が見られることになり、むしろ熱帯低気圧に類似する。このような低気圧としては1978年9月の *QE II* storm (Gyakum, 1983) や1982年2月の *Ocean Ranger* storm (Kuo *et al.*, 1992) がよく知られている。これらについては構造上の特徴だけでなく、「爆弾低気圧(bomb)」(Sanders and Gyakum, 1980) と呼ばれるように発達が急激であることから、傾圧性に加えて別の要素、特に潜熱解放の重要性が指摘されてきた。潜熱解放の寄与は、爆弾低気圧の基準に達する低気圧が大陸上ではまれである(例えば Yoshida and Asuma, 2004) ことも含め熱帯低気圧との類似から容易に推測される。Shapiro and Keyser (1990) が示した暖気核の観測事例も海上で急発達した低気圧であった。ただし彼らは Schär (1989) による断熱の Eady 波のシミュレーションに暖気核が現れるとしてそれが一般的な温帯低気圧の構造だと説明していた。ところがその後、Schär and Wernli (1993) が東西方向の周期的境界条件の悪影響がないような条件下で行った断熱のシミュレーションでは暖気核隔離が生じず、また Grønås (1995) が行った現実の急発達した低気圧のシミュレーションでも暖気核隔離の完成には潜熱解放が必要と結論づけられた。それで、暖気核を強調する SK モデルは急発達する低気圧の説明に使われる(例えば Schultz, 1996)。なお、Grønås (1995) のシミュレーションでは低気圧が暖気核隔離の構造となった後に閉塞の構造が生じたとされており、暖気核隔離が発達期の一時的な構造である可能性が示唆されていた。

Hart (2003) は低気圧に関して、(1) 対称(非前線性)/非対称(前線性)、(2) 下層暖気核/寒気核、(3) 上層暖気核/寒気核、を表現する3つのパラメータを定義し、全球客観解析及び予報データを用いてそのライフサイクルをダイヤグラム上で診断する手法を開発した。ここでいう下層とは900~600 hPa、上層は600~300 hPa である。彼は熱帯低気圧なども含むすべての低気圧について診断を行った結果も示した。それによると、一般的な温帯低気圧はそのライフサイクルを通して下層寒気核のまま、第2図のAのように発達期の非対称(前線性)から成熟期(閉塞段階)の対称(非前線性)構造へと変化した。これに対して海上



第2図 Hart (2003) による低気圧の位相ダイアグラム。原論文では3つのパラメータによる三次元分布で示されるが、ここでは上層暖気核/寒気核に関するパラメータを省略し、二次元で表している。AはSchultz and Mass (1993) が古典的閉塞として論じた事例 (1987年12月), BはKuo *et al.* (1992) が論じた *Ocean Ranger* storm (1982年2月) の構造変化。



第3図 古典的温暖型閉塞 (a) と古典的寒冷型閉塞 (b) の模式図。上：地上天気図における表現。下：上のA-B, C-Dに沿った鉛直断面の温位 (破線) と前線層の boundary (太実線)。

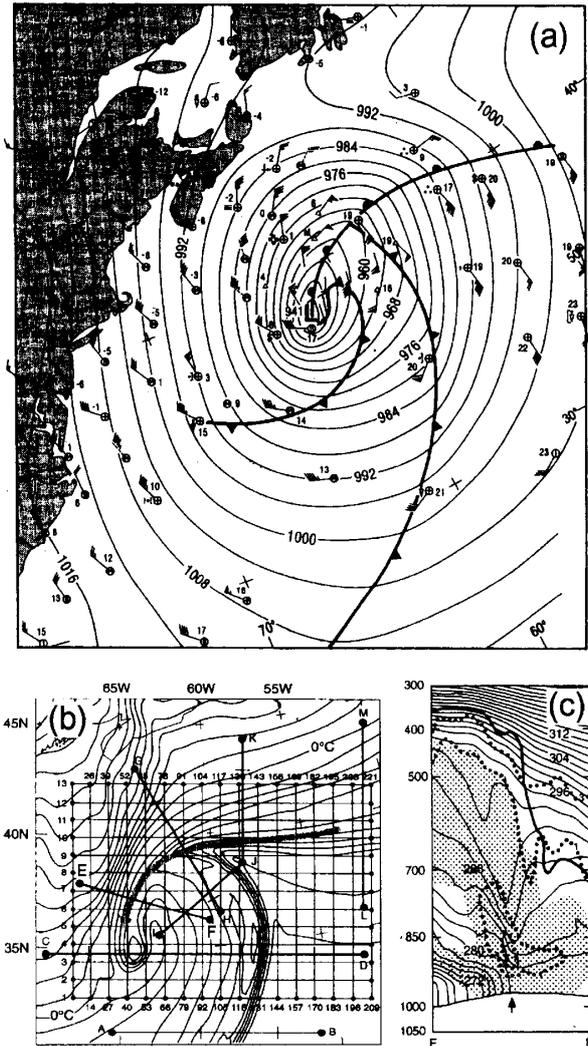
で急発達したもの (B) は下層寒気核・非対称から下層暖気核・非対称へと変化し、さらに衰弱期には閉塞段階の低気圧と同様の下層寒気核・対称へと変化した。これらのことは、下層暖気核・非対称というSKモデルの暖気核隔離に相当する構造が、通常の温帯低気圧には生じず、海上で急発達するものだけにしかも一時的に形成されることを示している。なお、熱帯低気圧が温帯低気圧化する際には第2図の空間ではしばしばBと逆の変化を生じ、その過程で暖気核隔離に似た構造が見られる (Hart, 2003; 北畠, 2003) が、その場合は熱帯低気圧として扱われることが少なくない。

従来、低気圧の分類を構造の観点から行う場合には、温帯低気圧 (extratropical cyclone) は寒気核・前線性、熱帯低気圧 (tropical cyclone) は暖気核・非前線性と、不連続に考えられてきた。しかし上述の暖気核隔離を伴う低気圧のように、温帯低気圧と熱帯低気圧の間の遷移領域に位置すると見なされる擾乱も多数存在しており、専門家の間ではそれらは漠然と「ハイブリッド低気圧 (hybrid cyclone)」と呼ばれてきた。そのような考え方に従うならば、本稿で問題にしている擾乱は純粋な温帯低気圧に限定されないことになるので、「前線性低気圧 (frontal cyclone)」と呼んだ方が適切かもしれない。以後特に説明なく低気圧という場合は、上の意味での前線性低気圧を指すことにする。なお、ハイブリッド低気圧には下層暖気核・上層寒気

核構造の亜熱帯低気圧 (subtropical cyclone) など含まれるが、ここではさらなる多様性については議論しない。

2.2 閉塞前線は存在するか、それとも温暖前線か？

古典的モデルでは、低気圧の成熟期には第3図のような温暖型閉塞または寒冷型閉塞の構造をとるとされていた (例えば Saucier, 1955)。しかし詳細な解析例は多くなかったので、これらの模式図には以前から疑問の声があった。そこへSKモデルが初めて閉塞前線を全く用いない冒険を行ったので議論が活発化した。Neiman and Shapiro (1993) は北米東海上で急発達した低気圧の解析を行い、SKモデルと同様に閉塞前線の代わりに温暖前線が存在したとした (第4図 a)。[ただし、そこでは寒冷前線断裂はなく明確な閉塞点が解析されるなど、むしろ従来の解析に近い。この図については第2.4節も参照。]同じ事例について、Reed *et al.* (1994) はシミュレーションにより、急発達がほぼ終了した時刻における前線を横切る断面 (第4図 c) では古典的温暖型閉塞 (第3図 a 下) と同様の温位分布が見られたことや、流跡線解析ではもともと低気圧後面の寒気内にあった空気塊が低気圧前面の寒気の上を上昇していることを示し、少なくともその研究では温暖型閉塞と結論付けられるとした。温暖型閉塞の下層のみを見るならば温暖前線と同様の構造に見えることも指摘している。



第4図 1989年1月4日に北米東海上で急発達した低気圧の解析. (a) Neiman and Shapiro (1993) による1800 UTCの地上解析. ただし風矢羽根には高度350 mの航空機観測に基づくものも含む. (b) Reed *et al.* (1994) のシミュレーションによる2100 UTCの地上等温線 (2°Cごと). (c) (b)のE-Fに沿った鉛直断面. 等温位線 (細実線), 30%等湿度線 (太実線), 相対湿度80%以上の領域 (陰影), 渦位1.0 PVUと3.0 PVUの等値線 (太破線).

Schultz and Mass (1993) は北米大陸上の低気圧の事例解析を行い, 古典的温暖型閉塞の構造であったことを示した. ただし, 彼らは古典的閉塞が大陸上のみで現れると主張しているわけではなく, その appendix において過去に研究された閉塞前線の鉛直断面を見直し, 大陸上・海上にかかわらず, 解析された前線面の傾きの点では再調査した事例のすべてが温暖型閉塞

(第3図 a 下) であったとしている. Stoelinga *et al.* (2002) は前線面の傾きを静的安定度分布で定義することを提案し再調査したが, 結果は同じであった. これも閉塞前線が下層では温暖前線に見えることと関係するかもしれない.

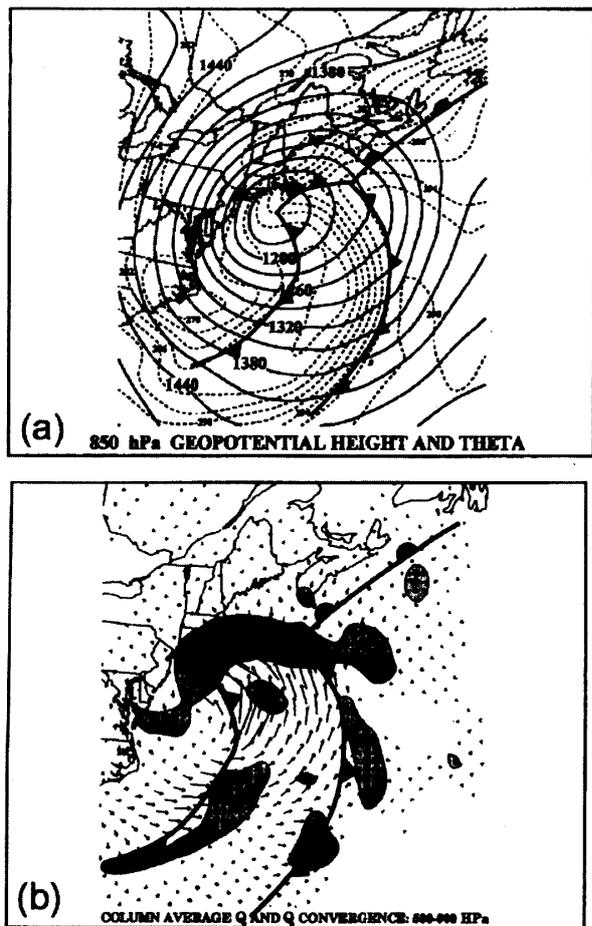
これらの議論は, 前線の三次元構造について論じたものであった. 実際には温暖前線などに関しては, たとえ前線面の傾斜などの三次元構造が古典的モデルと一致しなくても, 特定の高度 (等圧面) のみにおける水平温度傾度や水平温度移流, 前線形成関数のようなパラメータを用いて前線の強弱を論じることがしばしばあり, 今では前線面が暖気側に傾く寒冷前線の存在も認められている (例えば Stoelinga *et al.*, 2002). しかし総観規模の前線の中でも閉塞前線だけは同じパラメータでの定量的な議論が不可能で, 気団の三次元分布の主観的判定に強く依存しており, 研究者をいらだたせてきた. 例えば Hines and Mechoso (1993) は地表面摩擦の異なるシミュレーションを行って下層の前線形成関数を比較し, 大陸上よりも海上の方がSKモデルのパターンが生じやすいと主張したが, 閉塞の有無については何も述べていない. [ベントバック前線の強さに対する境界層過程の重要性は Thompson (1995) も指摘したが, 彼は温位分布から閉塞が存在するとしてSKモデルを批判した.]

通常の frontogenesis では閉塞前線の強さを論じられないのに対して, Martin (1999) は閉塞前線に伴う上昇運動を vector frontogenesis で説明した. 多くの参考書に採用されている形の \mathbf{Q} ベクトルと地衡風 frontogenesis F_g には次の関係がある.

$$\mathbf{Q} \equiv f_0 \gamma \frac{d_g}{dt} \nabla_p \theta, \text{ ただし } \gamma = \frac{R}{f_0 p_0} \left(\frac{p_0}{p} \right)^{c_v/c_p}$$

$$F_g \equiv \frac{d_g}{dt} |\nabla_p \theta| = \frac{1}{f_0 \gamma} \mathbf{Q} \cdot \mathbf{n}, \text{ ただし } \mathbf{n} = \frac{\nabla_p \theta}{|\nabla_p \theta|}$$

ここから, \mathbf{Q} を等温位線に垂直な成分 $\mathbf{Q}_n = (\mathbf{Q} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n}$ と等温位線に沿った成分 $\mathbf{Q}_s = [\mathbf{Q} \cdot (\mathbf{k} \times \mathbf{n})] (\mathbf{k} \times \mathbf{n})$ に分解すると, F_g は \mathbf{Q}_n にのみ関連付けられる. 一方, \mathbf{Q} ベクトルの取束は準地衡風オメガ方程式の強制項として上昇運動の励起に関連付けられる (例えば二宮, 2000; 小倉, 2000). frontogenetic な場 ($F_g > 0$) の場合は前線帯で \mathbf{Q}_n が暖気側を向くため, \mathbf{Q} ベクトルの取束は前線帯の暖気側で生じ, そこで上昇流が励起される. これは Sawyer-Eliassen の鉛直循環の代表的パター



第5図 (a) 1997年4月1日0600 UTCの850 hPa ジオポテンシャル高度(実線)と温位(破線)。(b) (a)と同時刻のQベクトルとその収束(500-900 hPaの層の平均)。後者の等値線は $5 \times 10^{-16} \text{ m kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$ から $10^{-15} \text{ m kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ごと。Martin (1999) の図に、(a)の温位分布から主観的に判断した前線を記入した。

ンとしてよく知られている。これに対して、閉塞前線の場合のように前線帯が折れ曲がる場合には、 Q_s 成分とそれによるQの収束が大きくなる。これをMartin (1999)は Q_n 成分による traditional frontogenesis と区別して rotational frontogenesis と呼んだ。〔前線帯の時間変化とQベクトル及び鉛直運動の励起の関係については北島(2005)も参照。〕第5図ではQベクトルの収束の極大は温暖前線に沿っているようにも見えるが、その大部分は Q_s 成分によるものである。それを考慮すると、ここで励起される上昇運動への寄与は traditional frontogenesis よりも rotational frontogenesis の方が大きいので、メカニズムの観点からは「温暖前線の循環に伴う上昇」というよりは「閉

塞前線に伴う上昇」と表現した方がより適切のように見える。もっとも、ここで見られる Q_n 成分と Q_s 成分の共存は、従来の温暖型閉塞の「温暖前線と閉塞前線の性質の共存」が力学面でも言えるということのようにも見える。これに対して低気圧後方の前線帯内のQベクトルは、大きさは大きいものの、収束が小さい。このことは、SKモデルの寒冷前線断裂と関連するかもしれない。

2.3 Tボーン構造すなわちλ型か、それとも人型か？

第3図の古典的温暖型閉塞・寒冷型閉塞は、下段の鉛直構造だけでなく、上段の地上前線パターンも形状が異なっている。ここではそれを便宜的にそれぞれλ(ラムダ)型・人(ヒト)型と呼ぶ。第2.2節で論じた閉塞前線か温暖前線かの違いはここでは問題にしない。第1図cは人型だが古典的モデルではλ型の存在も認識されていたのに対して、SKモデルはTボーン構造をその特徴としている点でλ型に限定される。

λ型は低気圧前面の寒気が、人型は低気圧後面の寒気が、それぞれ相対的に低温なので、他方の気団の下へ潜り込み、第3図のような前線パターンを形成すると模式的に考えられて来た。しかし第2.2節で述べたように、多くの事例を調べても閉塞前線面の傾きという点では寒冷型閉塞が見つからないことが指摘されており、一方で平面における前線パターンでは人型も頻繁に現れるので、今は第3図の上段と下段の対応は成り立たないと考えられるようになっている。

λ型・人型のパターンは温暖型閉塞・寒冷型閉塞とは呼ばなくなったが、その相違が大規模な温度場と関係することまでが否定されるわけではない。このような前線パターンの相違は昔から、前線形成関数のシヤー項でも説明されていた(例えばCarlson, 1991)。〔前線形成関数の数式や各項の詳細はここでは省略する。Carlson (1991)などを参照。〕前線は一般に低気圧性シヤーを伴うので、南北走向を持つ前線に関しては、南(赤道側)ほど高温である“通常の”水平温度傾度がある場合にシヤー項が正となる。それで寒冷前線は一般に南北走向を持つように強化される。一方、東西走向の前線に関しては、東側が相対的に低温の場合にはシヤー項が正となって前線強化に寄与するが、西側が相対的に低温の場合にはシヤー項は負となって前線を弱めるのに寄与する。これは、低気圧前面が相対的に低温の場合は東西走向の温暖前線が顕著なλ型になり、逆の場合は温暖前線の弱い人型になるとさ

れてきた古典的モデルの考え方と対応している。

上述の考え方では前線パターンを下層の主にシヤー項だけで説明していたが、多くの場合はシヤー項より合流項の方が大きく、またはじめに記したように、現在では前線パターンを地上だけでなく上空の流れにも関連付ける議論が好まれている。Schultz *et al.* (1998) は上層の西風が合流か分流かによって低気圧に伴う前線パターンがどのように変わるかをシミュレーションで調べ、上層の流れが合流の場合は東西方向に frontogenetic なので本稿でいう λ 型となり、逆に分流の場合は人型となることを示した。一方 Wernli *et al.* (1998) は、地上低気圧の上空の流れに高気圧性シヤーがある場合は open wave (閉塞していない前線波動)、シヤーがない場合は λ 形で寒冷前線断裂を伴う SK モデルに似たパターン (ただし暖気核隔離なし)、低気圧性シヤーの場合は閉塞パターン (ただし λ 型と人型の中間) になることを示した。これらは第 1 図 c で初期の open wave 低気圧が上空の強風軸の暖気側、また閉塞した低気圧が上空の強風軸の寒気側に位置していることと整合し、さらに SK モデルに似たパターンは低気圧の北上時に上空の強風軸の真下で特に生じやすくなることも暗示する。

ところで暖気核を持つ低気圧の場合は、それ自体の温度構造も周辺の frontogenesis に影響することが考えられる (Kitabatake, 2003)。前線形成関数のシヤー項は、低気圧の東側では相対的に東方が低温のため東西走向の前線の強化に寄与する。また低気圧の南側では通常とは逆に北ほど高温になるため南北走向の前線の衰弱に寄与することになる。このことは、暖気核が生じる場合は前線パターンは λ 型になる傾向があり、また寒冷前線断裂が生じやすくなる一方で、低気圧中心から西へ伸びるベントバック前線は強まりにくいはずであることも示唆する。

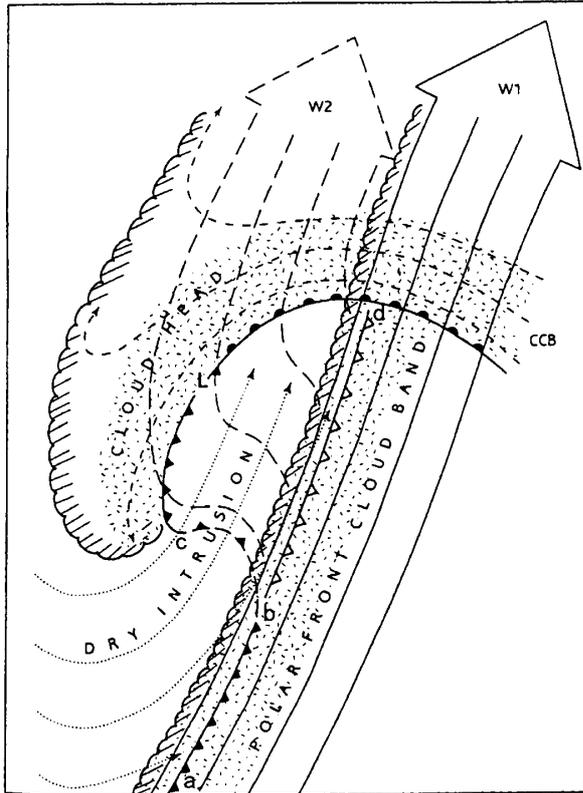
日本付近を通過する低気圧は、寒候期は人型、暖候期は λ 型になる傾向がある。これらは海陸分布によって生じた東西方向の温度傾度の寄与が考えられる。また寒候期にはシベリアの極渦南側のジェットストリーク出口 (分流域) にあたるなど、上空の流れも関係するかもしれない。温帯低気圧として発生したものから爆弾低気圧の基準に達するほどのものが生じるのは、経験的には10月から翌5月までである。梅雨期から初秋までは λ 型パターンがよく見られるが、急発達することはほとんどない。この時期には台風が温帯低気圧化した場合に λ 型パターンの発達した低気圧が見ら

れる。

2.4 ベントバック前線は存在するか、存在するとすれば温暖前線なのか？

SK モデルの特徴のひとつとされたベントバック前線については、ノルウェーの Grønås (1995) が過去のノルウェー学派の roll-up occlusion (巻き込み閉塞; 第 1 図 b の IV) に対応するとしている (p. 737) が、その他はどちらかという bent-back occlusion (折れ曲がり閉塞; 第 1 図 b の II, III) と同じものと見なすことが多い (例えば Schultz *et al.*, 1998, p. 1770)。bent-back occlusion (または back-bent occlusion) は主寒冷前線の後方からより低温の空気が流入するために寒気側に二次寒冷前線が次々に発生すると考えられ、日本でも1970年代ごろまで事典等に掲載され知られていた (例えば澤田, 1955; 黒沢, 1974)。〔日本ではノルウェー学派の bent-back front が「折れ曲がり前線」と訳されていたのに対して、近年、SK モデルの bent-back front が「後屈前線」と訳されることがあるが、上述のように両者は基本的に同じ現象と見なされているので、本稿では共に「ベントバック前線」と呼んでいる。〕

その後、衛星画像によって主寒冷前線後方でポーラーロウがしばしば発生していることが知られてくると、二次前線の多重構造の考え方はすたれたが、二次前線やベントバック前線の存在すべてが否定されたわけではなく、実際にヨーロッパではしばしば解析されていた。これに対して米国の研究者の間ではベントバック前線は Bergeron (1937) が解析した後はほとんど忘れられていたのだが、SK モデルに関連した再発見で注目を集めた。ただし SK モデルでは温暖前線とされたが、低気圧後方は寒気移流場なので、それ以後の研究では温暖前線と表現しないことが多い (例えば Schultz *et al.*, 1998, 脚注 2)。〔ただし、Grønås (1995) の指摘のように SK モデルが bent-back occlusion ではなく roll-up occlusion (第 1 図 b の IV) なのであれば、低気圧に巻き込む前線の周辺ではすべて暖気移流場となりうる。〕第 4 図 a の低気圧後方の前線については Neiman and Shapiro (1993) は二次寒冷前線と説明している (p. 2162)。また第 5 図 a では寒冷前線に対応する下層の傾圧帯はよく見ると 2 つに分かれている。このうち寒気側の二次前線は 700 hPa 面の温位分布では見られず下層に限定された現象であった (Martin, 1999) が、それでも第 5 図 b で Q ベクトルの収束を見る限りでは主前線より二次前線の方が線状によく



第6図 合流型の気圧の谷で発達する温帯低気圧の構造(ブラウニング, 1999より). 低気圧中心(L)は図の右上方向に進んでいる. ベントバック前線(図のc-d)の一部と主寒冷前線(図のa-b)は通常の寒冷前線記号で描かれている. これら2本の顕著な地上寒冷前線の間に弱い寒冷前線が存在しているのを破線の寒冷前線記号で表している(b-c). 白抜き寒冷前線記号(b-d)は上空の寒冷前線(UCF)で, dry intrusionの先端である. システムに相対的な気流の主要なものとして, 主温暖コンベヤーベルト(W1), 二次温暖コンベヤーベルト(W2), 寒冷コンベヤーベルト(CCB), dry intrusionを矢印で表した.

組織化されていると言える.

二次前線等の知識でかえって誤解析が生じることもあった. イギリスの Browning and Roberts (1994) は従来の解析と SK モデルの関係の一例をスプリットフロントで説明した(ブラウニング, 1999も参照). 第6図のように地上低気圧のすぐ後方に乾燥空気の下降(dry intrusion)があると, そこでは下層前線に伴う雲が消散傾向になり, さらにその前方で対流雲が発達するので, 雲分布からは図中b-dのUCFが地上寒冷前線でd-Lが閉塞前線, L-cが二次前線であるようにも見える. しかし地上前線は実際には閉塞していないの

で, このような場合に関する限りは古典的閉塞と見なすのは誤りで, 図中b-cを寒冷前線断裂とすればSKモデルがあてはまる. ただし本来の地上前線はこの後に閉塞する可能性があるので, 古典的モデルを否定する理由になるものではない. なお, 日本の気象庁の天気図ではここ数十年は二次前線と見なされるものは原則として省略されていた(永沢, 1992)ので, Browningらの指摘と同様の誤解釈により二次前線と見なされた本来の寒冷前線が省略されることも生じていた(北島・三井, 1998).

ベントバック前線は, 相対的な暖気を寒気が取り囲むという点だけでなく, 前線に伴い励起される上昇運動が潜熱解放に寄与するという点でも, 暖気核隔離の形成に寄与すると考えられる(例えば Grønås, 1995). ところで bent-back は本来は「後方に折れ曲がる」ことを意味する. 例えば第6図についてはブラウニング(1999)は低気圧中心では曲がっていないが図中d点付近で折れ曲がった主温暖前線をベントバック前線と呼んでいる. 第2.2節の rotational frontogenesis を考慮すると, この「折れ曲がり」という性質は低気圧の発達に案外重要な意味を持つかもしれない. SK モデルでは T ポーン構造の一部として比較的まっすぐなベントバック前線を強調しているが, 観測例の多くはやはり低気圧中心付近で曲がっているようであり, 概念モデルとして何を強調するべきかという点についても再考の余地がありそうである.

3. まとめと問題点

第2節では低気圧のライフサイクルを時間経過とは関係なく特徴ごとに説明したので, ここではまとめとして時間経過も考慮し改めて構造変化を記述する.

低気圧に伴う温暖前線・寒冷前線は, 周囲の温度場や上層の流れによりλ型または人型のパターンになりつつ強化される. その後, 通常の発達をする低気圧は閉塞するが, λ型・人型にかかわらず, 閉塞前線面は低気圧の前方に傾く温暖型閉塞となる. 低気圧後方にベントバック前線が発生したように見えることもある. これらの特徴は基本的に古典的モデルの一部として従来から知られていたが, そのうちいくつかは最近になって再確認や修正が行われた. 閉塞前線に伴う上昇運動には前線の強化(frontogenesis)よりもその折れ曲がりに関する運動が重要な役割を果たしている.

これに対して海上で急発達する低気圧の場合, 前線を伴いつつも, 発達期～成熟期にある程度の深さを

持つ暖気核が形成される。そのため温暖前線が顕著となり、前線パターンは λ 型になりやすく、低気圧中心付近では寒冷前線断裂も起こりやすいと思われる。これらはSKモデルの特徴としてまとめられていたことである。ただし閉塞前線の存在は否定されたわけではなく、また衰弱期には暖気核が消滅して通常の低気圧と同様の過程をたどるかもしれない。古典的温暖型閉塞(warm occlusion)とSKモデルの暖気核隔離(warm seclusion)は言葉だけでなく共に λ 型の前線パターンになると考えられている点でも似ているが、寒気核か暖気核かという点では全く異なる構造といえる。

SKモデルは一般的な温帯低気圧のモデルというよりも海上で急発達する低気圧のモデルと見なされる。急発達する低気圧はそうでない低気圧よりも研究者の関心を引く傾向があり、また防災上も重要である。しかし急発達しない低気圧も、現実に出現頻度が高く日々の天気変化との関係が深い点で無視できない。そのため傾圧性発達をする擾乱の代表例として紹介する場合は、Holton (2004)のように、暖気核を持たない第1図cの方が適切と判断することになるのだろう。

ところで前線性低気圧の構造やその時間発展を議論する際には、本来はその前に前線の定義や解析基準を明確にすることが必要なはずである。たとえばSKモデルにある寒冷前線断裂を論じるならば、前線の有無について水平温度傾度など何らかの量的な基準が必要はなはずだが、Shapiro and Keyser (1990)でもその後の研究でもそのような議論は行われていない。第4図cの温位分布を温暖前線と見るか温暖型閉塞前線と見るかも、上空の寒冷前線を認めるか否かによるだろう。また第4図aで二次寒冷前線とされているものは第4図bの温位分布では前線とは言えないが、実際にそこは異なる雲分布の境界となっており、相当温位分布では前線に見える(Neiman *et al.*, 1993)。Cohen and Kreitzberg (1997)はそれについて airmass boundary というより airstream boundary だとして前線と区別している。つまり、初期の前線モデルでは airmass boundary と airstream boundary が同一視されていた(第1図a)が、再検討が必要であるようだ。このように低気圧・前線の概念モデルの基本となるべき前線の定義にはあいまいさや混乱があり、同じ概念モデルにあてはめていても実は異なる定義で解析を行っていることがある。議論がどのような考え方に基いて行われているのか、それぞれの場面で注意深く読み取る必要があるだろう。

参考文献

- Bergeron, T., 1937: On the physics of fronts, Bull. Amer. Meteor. Soc., **18**, 265-275.
- Bjerknes, J. and H. Solberg, 1922: Life cycle of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation, Geofys. Publ., **3** (1), 3-18.
- Bleck, R., H. Bluestein, L. Bosart, W. E. Bracken, T. Carlson, J. Chapman, M. Dickinson, J. R. Gyakum, G. Hakim, E. Hoffman, H. Iskenderian, D. Keyser, G. Lackmann, W. Nuss, P. Roebber, F. Sanders, D. Schultz, K. Tyle and P. Zwack, 1993: Eighth Cyclone Workshop scientific summary, Bull. Amer. Meteor. Soc., **74**, 1361-1373.
- ブラウニング, キース, 1999: 乾燥貫入(dry intrusion)とそれが温帯低気圧の前線, 雲, 降水の構造に及ぼす効果, 天気, **46**, 97-103.
- Browning, K. A. and N. M. Roberts, 1994: Structure of a frontal cyclone, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., **120**, 1535-1557.
- Carlson, T. N., 1991: Mid-latitude Weather Systems, Routledge, 507pp.
- Cohen, R. A. and C. W. Kreitzberg, 1997: Airstream boundaries in numerical weather simulations, Mon. Wea. Rev., **125**, 168-183.
- Grønås, S., 1995: The seclusion intensification of the New Year's day storm 1992, Tellus, **47A**, 733-746.
- Gyakum, J. R., 1983: On the evolution of the QE II storm. I: Synoptic aspects, Mon. Wea. Rev., **111**, 1137-1155.
- Hakim, J. G., 2003: "Cyclogenesis", Encyclopedia of Atmospheric Science, J. R. Holton, J. Pyle, and J. Curry, Eds., Academic Press, 589-594.
- Hart, R. E., 2003: A cyclone phase space derived from thermal wind and thermal asymmetry, Mon. Wea. Rev., **131**, 585-616.
- Hines, K. M. and C. R. Mechoso, 1993: Influence of surface drag on the evolution of fronts, Mon. Wea. Rev., **121**, 1152-1175.
- Holton, J. R., 2004: An Introduction to Dynamic Meteorology (4th ed.), Academic Press, 535pp.
- Kitabatake, N., 2003: Extratropical transition of tropical cyclones in the western North Pacific: Their frontal evolution, IUGG2003 Abstracts, B407.
- 北島尚子, 2003: 温帯低気圧化する台風とその周辺の総観規模前線の特徴, 日本気象学会2003年春季大会講演予稿集, P148.
- 北島尚子, 2005: 前線の考え方の過去と現在, 気象庁研究時報, 印刷中.
- 北島尚子, 三井 清, 1998: スプリットフロントを伴っ

- た温帯低気圧の総観解析, 天気, **45**, 455-465.
- Kuo, J.-H., R. J. Reed and S. Low-Nam, 1992 : Thermal structure and airflow in a model simulation of an occluded marine cyclone, *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 2280-2297.
- 黒沢真喜人, 1974 : 「ベントバック・オクルージョン」, 新版気象の事典, 和達清夫監修, 東京堂出版, 504.
- Martin, J. E., 1999 : Quasigeostrophic forcing of ascent in the occluded sector of cyclones and the trowal airstream, *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 70-88.
- 永沢義嗣, 1992 : ベントバック閉塞前線. 気象, **36**(3), 38-39.
- 中村 尚, 高薮 出, 1997 : Shapiro の新しい前線・低気圧モデル, 天気, **44**, 85-100.
- Neiman P. J. and M. A. Shapiro, 1993 : The life cycle of an extratropical marine cyclone. Part I : Frontal-cyclone evolution and thermodynamic air-sea interaction, *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 2153-2176.
- Neiman P. J., M. A. Shapiro and L. S. Fedor, 1993 : The life cycle of an extratropical marine cyclone. Part II : Mesoscale structure and diagnostics, *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 2177-2199.
- 二宮光三, 2000 : 気象がわかる数と式, オーム社, 303pp.
- 小倉義光, 2000 : 総観気象学入門, 東京大学出版会, 289 pp.
- Palmén, E and C. W. Newton, 1969 : Atmospheric Circulation Systems, Academic Press, 603pp.
- Reed, R. J., Y.-H. Kuo and S. Low-Nam, 1994 : An adiabatic simulation of the ERICA IOP 4 storm : An example of quasi-ideal frontal cyclone development, *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 2688-2708.
- Refsdal, A., 1930 : Zur Theorie der Zyklonen, *Meteor. Zeitschrift*, **47**, 294-305.
- Sanders, F. and J. R. Gyakum, 1980 : Synoptic-dynamic climatology of the "bomb," *Mon. Wea. Rev.*, **108**, 1589-1606.
- Saucier, W. J., 1955 : Principles of Meteorological Analysis, Univ. of Chicago Press, 438pp.
- 澤田龍吉, 1955 : 天気図解析の基礎, 予報研究ノート, **6**, 145-256. [誌名は1956年「気象研究ノート」に改称.]
- Schultz, D. M., 1996 : "Mid-latitude cyclones", *Encyclopedia of Climate and Weather*, S. H. Schneider, Ed., Oxford Univ. Press, 226-231.
- Schultz, D. M. and C. F. Mass, 1993 : The occlusion process in a midlatitude cyclone over land, *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 918-940.
- Schultz, D. M., D. Keyser and L. F. Bosart, 1998 : The effect of large-scale flow on low-level frontal structure and evolution in midlatitude cyclones, *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 1767-1791.
- Schär, C. J., 1989 : Dynamische Aspekte der Ausser-tropischen Zyklogeneese, Theorie und Numerische Simulation im Limit der Balancierten Stromungs Systeme, Dissertation Nr. 8845 der Eidgenossischen Technischen Hochschule, Zurich, 241pp.
- Schär, C. and H. Wernli, 1993 : Structure and evolution of an isolated semi-geostrophic cyclone, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **119**, 57-90.
- Shapiro, M. A. and D. Keyser, 1990 : Fronts, jet streams and the tropopause, *Extratropical Cyclones : The Eric Palmén Memorial Volume*, C. W. Newton and E. O. Holopainen, Eds., Amer. Meteor. Soc., 167-191. 邦訳は測候時報, **62**(1995), 151-187.
- Shapiro, M., H. Wernli, J.-W. Bao, J. Methven, X. Zou, J. Doyle, T. Holt, E. Donall-Grell and P. Neiman, 1999 : A planetary-scale to mesoscale perspective of the life cycles of extratropical cyclones : The bridge between theory and observations, *Life Cycles of Extratropical Cyclones*, M. A. Shapiro and S. Grønås, Eds., Amer. Meteor. Soc., 139-186.
- Stoelinga, M. T., J. D. Locatelli and P. V. Hobbs, 2002 : Warm occlusions, cold occlusions, and forward tilting cold fronts, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **83**, 709-721. 邦訳は測候時報, **70** (2003), 9-24.
- Thompson, W. T., 1995 : Numerical simulation of the life cycle of a baroclinic wave, *Tellus*, **47A**, 722-732.
- Wernli, H., R. Fehlmann and D. Luthi, 1998 : The effect of barotropic shear on upper-level induced cyclogenesis : Semigeostrophic and primitive equation numerical simulations, *J. Atmos. Sci.*, **55**, 2080-2094.
- Yoshida, A. and Y. Asuma, 2004 : Structures and environment of explosively developing extratropical cyclones in the northwestern Pacific region, *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 1121-1142.