
 解 説

温帯低気圧の概念モデルにおける閉塞前線の構造とその形成過程の一般化

北島 尚子¹

要 旨

温帯低気圧に伴う前線の閉塞について、20 世紀半ばまでのベルゲン学派の研究者らによる古典的な概念モデルと、Shapiro-Keyser (1990) により提案された構造 (SK モデル) やその変化の過程の特徴等について、最近指摘された事項をまとめた。SK モデルで強調された特徴は、ベルゲン学派の研究者らの解析に既に現れていたが、その成果として 20 世紀後半以降に伝えられた古典的低気圧モデルには表現されず、忘れられていたものがあつた。閉塞は、温暖前線への寒冷前線の追いつき (catch-up) よりも、寒気による低気圧中心の包み込み (wrap-up) と考えたほうが、前線の構造変化の理解に役立ち、そしてそれにはコンベヤーベルトによる考え方が有効である。前線パターンの多様性には大規模な流れや安定度の分布が影響する。さらに、閉塞前線に伴う雲・降水の分布や、閉塞段階の低気圧に伴う寒気に関連する強風に関して、最近の知見にも触れる。

1. はじめに

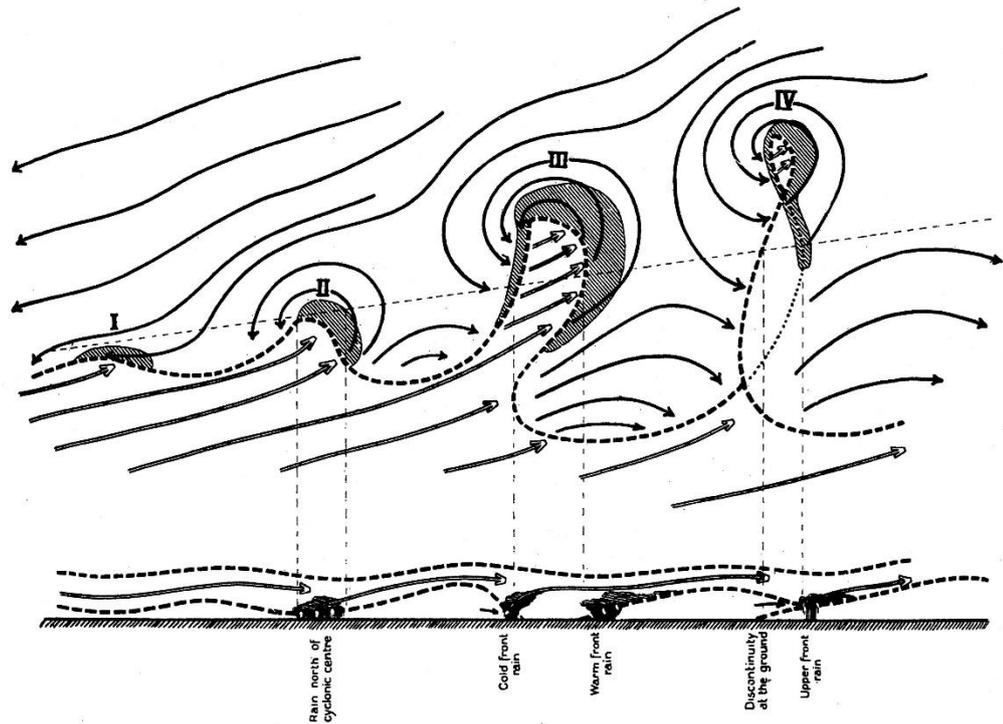
温帯低気圧とは一般に、中緯度で前線を伴った総観規模の低気圧を指す。その典型的な構造や時間変化の説明には、20 世紀初めに Jacob と Vilhelm の Bjerknes 親子などノルウェーのベルゲンに集った研究者らを中心に考え出されたとされる概念モデルが長年使われてきた。それは当初は第 1 図のように時間変化するとされ、20 世紀半ば過ぎには第 2 図のように示されるようになった。同様の考え方による構造と変化は、現代の日本でも中学校の理科で教えられるなどして、広く知られている。この古典的な概念モデルは、欧米ではベルゲン学派 (Bergen school) によるノルウェー型前線

性低気圧モデル (Norwegian frontal cyclone model) と呼ばれている (Norwegian school ではないので「ノルウェー学派」とは呼ばない)。ここでは便宜的に第 2 図を N モデルと呼ぶことにする。この特徴は以下の点が挙げられていた。

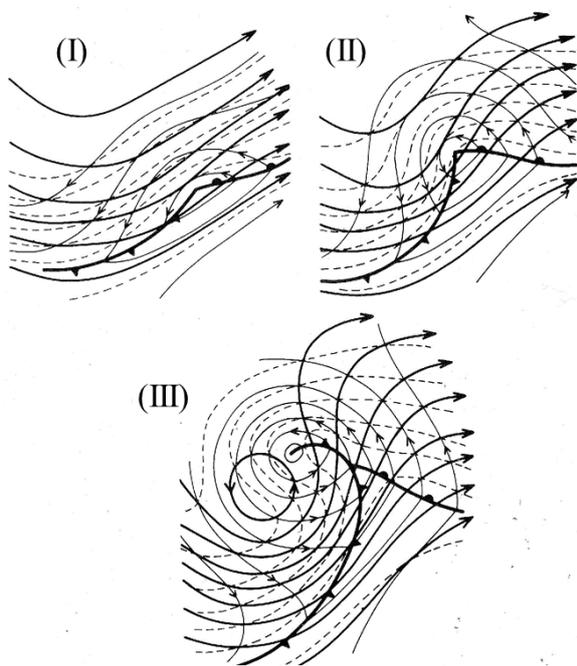
- I: 傾圧帯に、温暖前線と寒冷前線を伴った低気圧が発生する。
- II: 低気圧が発達するにつれて、温暖前線と寒冷前線の間をいよめる暖域が狭くなる。
- III: さらに暖域が狭まり、低気圧付近では寒冷前線が温暖前線に追いついて、閉塞前線が形成され、低気圧中心は暖域から離れて寒気側へ進む。

¹ 気象大学校

(令和 5 年 4 月 19 日発行)



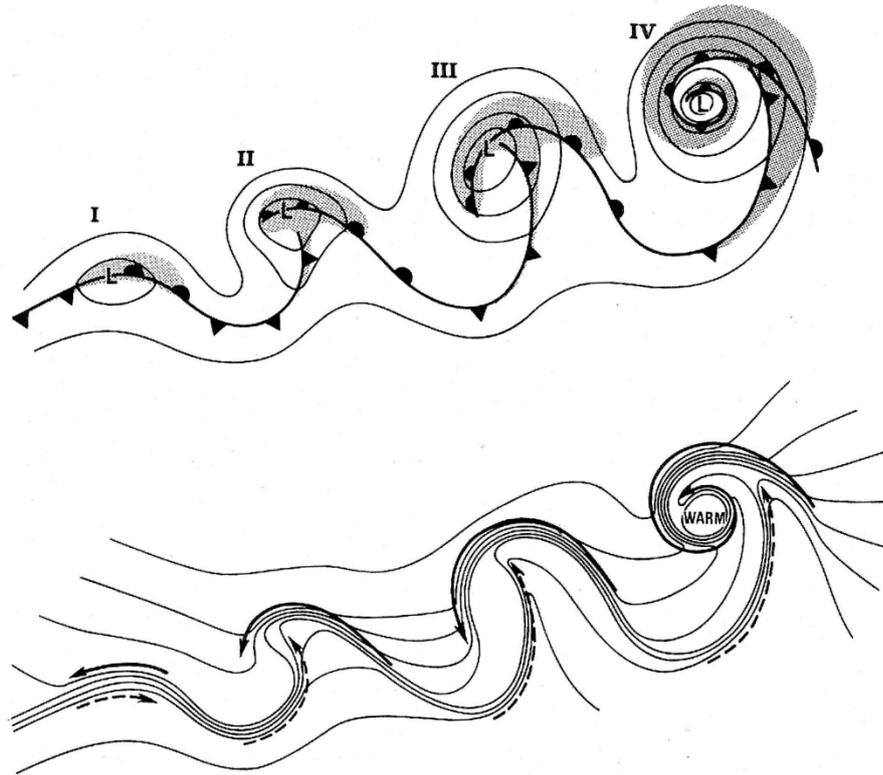
第 1 図 Bjerknes (1921) や Bjerknes and Solberg (1922) に基づくノルウェー型前線性低気圧モデル (Neiman *et al.*, 1993 より引用).



第 2 図 Palmén and Newton (1969) による古典的
低気圧・前線の時間発展モデル (本稿では N モデルと呼ぶ). 細実線と太実線はそれぞれ
1000 hPa と 500 hPa のジオポテンシャル高度, 破線は 1000-500 hPa の層厚の等値線.

これに対して, 1990 年には異なる特徴を持つ温帯低気圧の概念モデルとして, Shapiro and Keyser (1990) (以後 SK90 とする. 邦訳は北畠ほか 1995b) が第 3 図のモデルを発表し, 日本では小倉 (1992) や中村・高藪 (1997) 等で紹介された. これをここでは SK モデルと呼ぶことにする. そこでの特徴はいくつかの点で N モデル (第 2 図) と異なり, 特に以下の点が強調される.

- I: 傾圧帯に温暖前線と寒冷前線を伴った低気圧が発生する. この段階は N モデルと同様.
- II: 寒冷前線と温暖前線がほぼ直角をなし (T ボーン構造), 寒冷前線の低気圧に近い部分が温暖前線との交点付近で弱まる (前線断裂または前線切断) とともに, 低気圧の西側にベントバック前線が生じる.
- III: II の特徴がさらに強まる. 寒冷前線は温暖前線とほぼ直交しており, 閉塞は生じない.
- IV: ベントバック前線が低気圧中心を取り囲み, 暖気核隔離が生じる.



第 3 図 Shapiro and Keyser (1990) による低気圧・前線の時間発展モデル。本稿では SK モデルと呼ぶ。上図は地上天気図の等圧線と前線、陰影は降水域。下図は下層等温位線。

この 2 種類のモデルに相違がある理由はいくつか挙げられており、一つには、N モデルが 20 世紀前半の粗い地上観測網の観測の主観的解析に基づいていたのに対して、SK90 は海上の航空機特別観測や高解像度数値モデルシミュレーションに基づいている点が事実としてある。ただし、SK モデルが根拠としていた航空機特別観測データを用いた作図（例えば後出の第 8 図）は主観解析であったことには注意が必要である。いずれにしても、N モデルで「見逃されていた」特徴が SK モデルで「新発見」されたと見なされたこともあったのだが、一方で、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 1 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の批判もあった（例えば Reed *et al.*, 1994, p.2690）。Shapiro 自身は SK モデルについて、ベルゲン学派に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.140）。もし SK モデルの特徴が従

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、SK モデルの提案から 30 年以上たった今でも、教科書には通常は N モデルが掲載され、各国気象機関の発行する天気図での低気圧・前線の表現も寒冷前線が断裂せず閉塞前線がある N モデルに沿っているように見える。

このことに関して、David Schultz（本稿の執筆時点では英国マンチェスター大学教授で、アメリカ気象学会の論文誌の一つ *Monthly Weather Review* の編集委員長）により、考え方の一般化を目指した調査・記述が行われてきた。本稿では主にそれらの記述に沿って温帯低気圧の考え方を説明する。

本節に続く第 2 節ではまず、主に Schultz and Keyser (2021) を参考にしながら、ベルゲン学派の解析や当時の概念モデルをいくつか紹介しつつ、SK モデルで新たに特徴とされた点が過去にベルゲン学派ではどのように見られていたのかを再確認する。このことを踏まえたうえで第 3 節

では、両モデルの閉塞過程をどのように考えると一般化できるか、また雲分布等も含めた一般的な特徴はどのように記述できるかを、Schultz *et al.* (1998) や Schultz and Vaughan (2011) などを参照しながら説明する。

2. SK モデルの特徴とベルゲン学派の文献

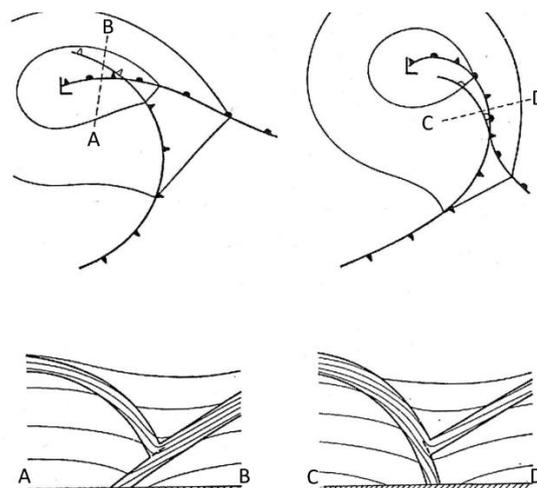
SK90 で強調された N モデルとは異なる特徴は、以下の 4 つが挙げられる。

- (1) T ボーン構造 (T-bone structure)
- (2) 前線断裂 (frontal fracture)
- (3) ベントバック前線 (bent-back front)
- (4) 暖気核隔離 (warm-core seclusion)

これらの特徴それぞれについて、ベルゲン学派の文献によってどのように記述されていたか、以後の各小節で具体的に説明する。

2.1 T ボーン構造

T ボーン構造は、SK モデルでは温暖前線と寒冷前線がほぼ直交となり T 字型になると表現したもので、N モデルで温暖前線と寒冷前線の間が狭まってくる (すなわちそれらのなす角が鋭角になる) とされていたことと対比される。Schultz and Keyser (2021) によれば、T ボーン構造に関してはベルゲン学派の文献には特段の記載が見当たらなかったとされるが、これが従来から温暖型閉塞とされていた構造と類似しているとの指摘があった (例えば Reed *et al.*, 1994, p.2690)。従来は閉塞には第 4 図に示すように温暖型と寒冷型の 2 種類があると説明されていた (例えば Saucier, 1955)。そこでは閉塞過程を、温暖前線に寒冷前線が追いつく (catch-up) と定義したうえで、温暖前線前面の寒気と寒冷前線後面の寒気との相対的な温度差により気団の 3 次元配置が決まると考え、前者が低温の場合 (第 4 図左) は閉塞前線が温暖前線の性質を持つ温暖型閉塞、逆の場合 (第 4 図右) は寒冷型閉塞と定義したものである。すると前者の場合は地上前線の水平分布は温暖前線の顕著な「入」型または「λ」型、後者は地上前線の水平分布は寒冷前線の顕著な「人」型になると説

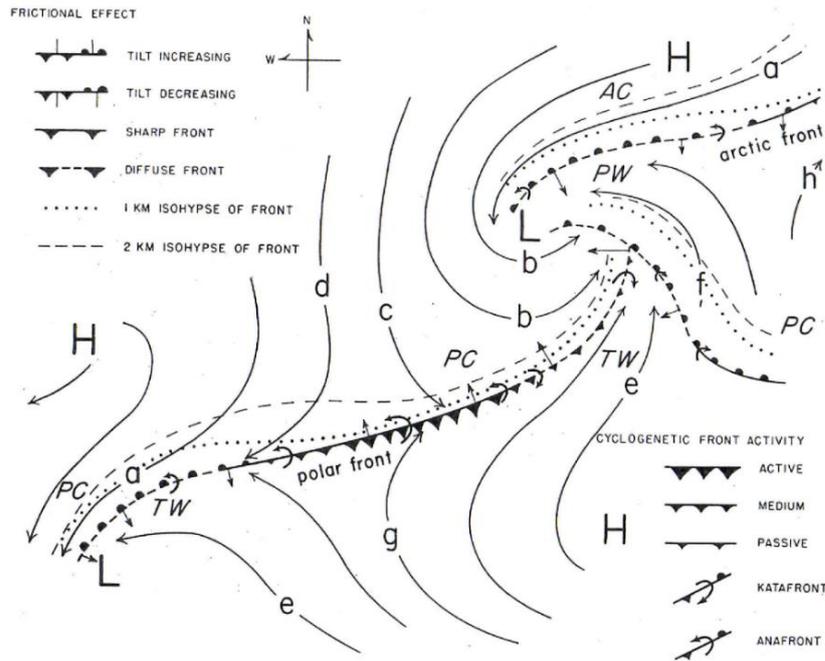


第 4 図 古典的低気圧モデルにおける温暖型閉塞 (左) と寒冷型閉塞 (右) (Saucier, 1955)。上図は前線 (白抜きは上空の前線) と等圧線。下図はそれぞれ上図の A-B または C-D に沿った鉛直断面図で細線は温位, 太線は前線層。

明されてきた (例えば気象庁予報部, 2018)。このうちの温暖型閉塞に T ボーン構造が似ているという指摘である。ただし、温暖型閉塞と寒冷型閉塞の考え方自体も見直しが行われており、最近の考え方は第 3.2 節で改めて述べる。

2.2 前線断裂

SK モデルでは低気圧の発達期に、寒冷前線が低気圧中心に近い部分で衰弱し、寒冷前線が途切れたように表現される (第 3 図 II, III)。Schultz and Keyser (2021) によれば、ベルゲン学派の研究者は、1924 年の時点ですでにこのことを認識していた。一例として Godske *et al.* (1957) の p.740 に掲載されている模式図を第 5 図に示す。そこでは閉塞前線に相当するものは温暖前線記号で表現されており、閉塞点に相当する位置 (温暖前線と寒冷前線の接点) の付近では寒冷前線だけでなく温暖前線も弱いとして描画されている。しかし 20 世紀半ば以降は、一般的な概念モデルとしては第 2 図のように、前線の弱い部分があることは表現されなくなった。前線を描画するか否かを厳密に論じるには、前線の定量的な定義が必要だが、前線



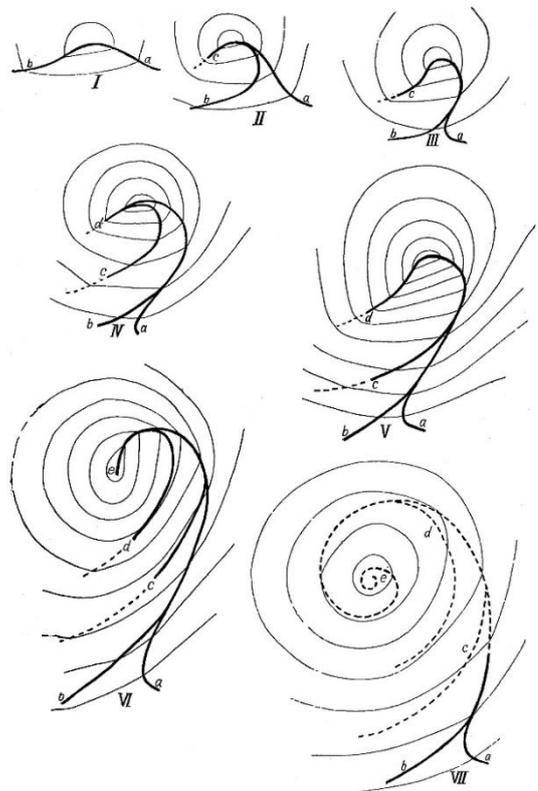
第 5 図 Godske *et al.* (1957) p.740 の前線の模式図. 前線記号の大きさなどの使い分けにより前線の活動度などを表現しており (詳細は略), この図では閉塞点付近で前線が弱まっていることを表している.

を定義する物理量としては水平温度 (温位, あるいは相当温位) 傾度の大きさが重要なのか, 前線強化 (すなわち温度傾度の時間変化) が重要なのか, 統一的な定義がなく, その量的なしきい値も決められていないので, 解析者が何を強調したいかに依存することになる.

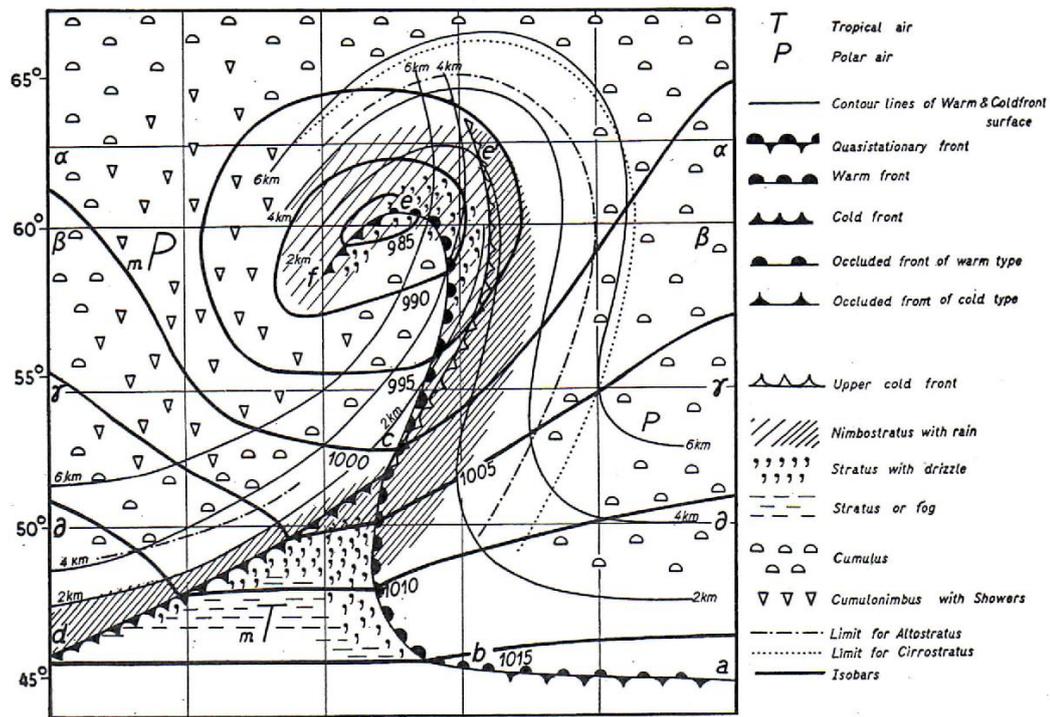
SK90 で寒冷前線の断裂が取り入れられたのは, Schär (1989) の理想状態でのシミュレーションで低気圧に近い側の寒冷前線の衰弱が示されたことも根拠とされているが, その後は, 先に発表されていた Takayabu (1986) のシミュレーション結果の論文が裏付けの一つとして強調されるようになっていく.

2.3 ベントバック前線

低気圧中心から後方にのびるベントバック前線は, Bergeron (1928) や Refsdal (1930) (第 6 図), Bjerknes (1930) などに二次的寒冷前線またはベントバック閉塞前線として現れている. 第 7 図に示した Godske *et al.* (1957) p.532 の図にもベントバック寒冷前線 (二次的寒冷前線) として解析されている. これらの後, 20 世紀後半には概念モデル



第 6 図 Refsdal (1930) による低気圧・前線の時間発展モデル. このころはまだ温暖前線・寒冷前線等の記号はない.



第 7 図 Godske *et al.* (1957) p.532 による閉塞した低気圧の前線解析と雲・天気分布. 閉塞前線記号はなく, 地上温暖前線を上空の寒冷前線(白抜きの寒冷前線記号)が追い越している. また二次的(ベントバック)寒冷前線を伴っている.

としては第 2 図のようなベントバック前線のないものが一般的に描かれるようになった. Schultz and Keyser (2021) は, Jacob Bjerknes がベントバック前線を表現することを好まなかったために解析されなくなったと指摘している.

過去の解析におけるベントバック前線は第 7 図のように寒冷前線または閉塞前線として解析されることが一般的だったが, SK90 ではベントバック前線を温暖前線として表現した(第 3 図). これはそのときの解析者の前線の考え方によると考えられる.

SK モデル(第 3 図)ではその最終段階(IV)ではらせん状の温暖前線を解析している. 同様のらせん状の前線は Refsdal (1930) にも見られる(第 6 図). Grønås (1995) はこれは過去に巻き込み閉塞(roll-up occlusion)と呼ばれたものに対応しておりベントバック閉塞とは区別すべきだとしている(p.737).

2.4 暖気核隔離

第 2.1 節で述べたように, ベルゲン学派では, 閉塞(occlusion)は温暖前線に寒冷前線が追いつくとされ, その過程で 2 つの前線に暖域の暖気が挟まれることを隔離(seclusion)と呼んでいた(例えば Bjerknes and Solberg, 1922, p.4). これは第 1 図の IV のように低気圧中心の南側の前線付近で生じることが考えられる. これに対して SK90 では, 海上の低気圧の航空機観測とその解析により, 成熟期の低気圧の中心付近が水平スケール数百 km の暖気核構造であることを示し(第 3 図の IV), 暖気核隔離(warm-core seclusion)と称した. このような小さいスケールの現象は, 20 世紀前半の観測網での把握は容易でないと思われるが, Schultz and Keyser (2021) は 20 世紀前半のベルゲン学派の解析で低気圧中心の南側でベントバック前線により囲まれた領域が相対的な暖気になっている事例があることを指摘して, SK モデルと同様の暖気核隔離が当時から知られていた可能性があるとして述べている. Refsdal (1930) の示したモデ

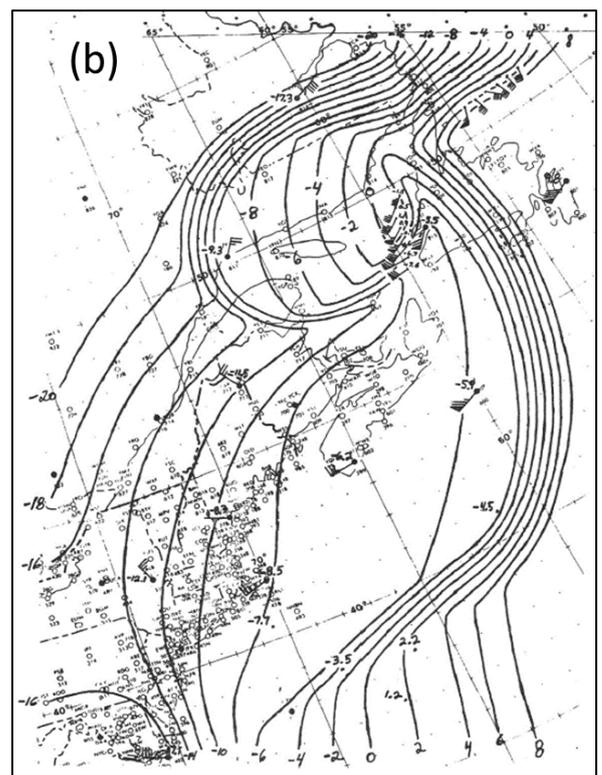
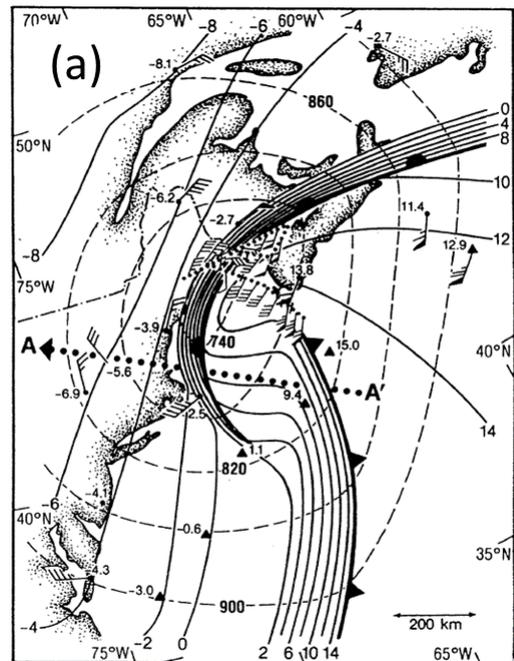
ル(第6図)の最終段階は、SKモデル(第3図)のIVと同様に低気圧中心の周囲を寒気を取り囲んでいる。SK90では特に急発達した低気圧で観測された100 km程度のメソスケールの暖気核を強調しており、これは熱帯低気圧に類似した潜熱加熱の寄与の可能性がある。

2.5 概念モデルと現実の低気圧の解析

ここまで述べたように、SKモデルで新発見のように受け取られた特徴の多くは、20世紀半ばまでにベルゲン学派の研究者に認識されていたが、概念モデルの代表的な特徴とはされていなかった。低気圧や前線について広く知られている概念モデルがあると、天気図のユーザーはそれを前提として天気図を見ることになるので、解析者もユーザーが解釈しやすいように概念モデルに合わせた描画を行うことになる。逆に、概念モデルに取り込まれていない特徴は天気図に表現されにくくなる。

第8図aはSK90で航空機観測の解析によりベントバック温暖前線の存在を示したものとされる図(920 hPa等圧面)だが、観測地点はごく限定的で、観測のない領域は解析者の主観に基づいていることに注意が必要である。これは解析者がベントバック前線を自分自身の概念モデルに取り入れ、それに基づいて解析を行ったことを示す。第8図bはその12時間後の850 hPaの観測・解析だが、ただし1988年に発表されたものである。第8図bにプロットされた観測データは、もしSK90で示された暖気核隔離の考え方を持っていれば、等温線解析で暖気核が表現されても不思議はない分布だが、1988年時点ではShapiroらはベントバック(温暖)前線・寒冷前線断裂や暖気核隔離の考え方をあまり強く持っていなかったようだ。そのために、現代の眼で見て暖気核のありそうな気温分布でも一様な水平温度傾度で解析し、逆にNモデルで寒冷前線がありそうな海域は大きな水平温度傾度で解析したことが推測される(Schultz and Keyser, 2021も参照)。

日本では、低気圧の最盛期・閉塞期にはその前線システムが観測データの少ない海上にあるこ



第8図 (a) SK90による1988年1月27日12 UTCごろの920 hPa面気温(実線, °C)と高度(破線, hPa)の解析。航空機観測データの矢羽と気温が示されている。(b) (a)の約12時間後の航空機観測による850 hPa面の気温解析(実線, °C)(Schultz and Keyser, 2021より引用, ただし原図が発表されたのは1988年)。

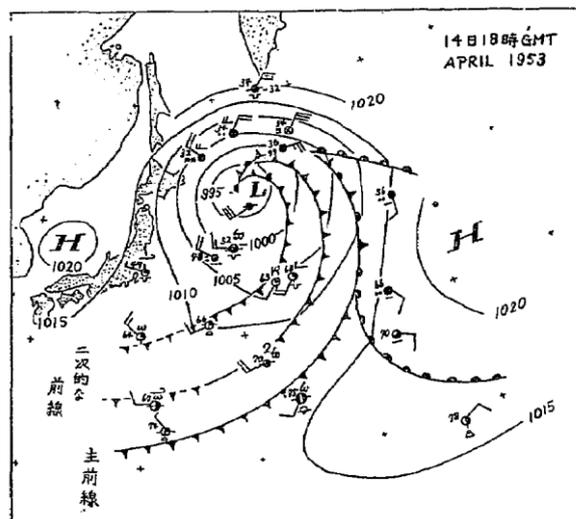
とが多いため、日本近海の解析事例を示しての説明は少なく、主にベルゲン学派のモデルを適用して説明するにとどまっていたようである。澤田 (1955) は p.181-183 に、Refsdal (1930) を引用するとともに、多数の二次寒冷前線を伴った低気圧の図を例として掲載している(第9図)。その本文には「二次的な前線をどの程度まで「前線」として天気図上に記録するかは…個人々々の立場と目的によって異なるであろう」(p.182, 原文のまま)と述べている。

気象庁の解析を規定する公式な資料としては、天気予報指針基礎編(気象庁予報部, 1973) p.61 に二次(寒冷)前線の発生についての記載があるが、そこにはどう解析すべきかの記載はなかった。気象庁予報部(2018)は「気象庁では、ベルゲン学派の低気圧モデルを基本に、傾圧不安定波の理論から低気圧が発生・発達・衰弱のどのステージにあるのかを考慮して、実況資料と立体的な整合を図りながら、低気圧及びそれに伴う前線の解析を行っている。」(p.89)とし、SKモデルの特徴である前線断裂やベントバック前線は「詳細な観測データや検討が必要であるため気象庁のアジア太平洋地上天気図等では採用していない。」(p.90)としている。実際、前線断裂やベントバック前線はスケールが小さいので、総観規模現象の表現を主目的としたアジア太平洋天気図に解析するのは無理がある場合もあるだろう。

概念モデルは、解析者が自身の考えた構造をユーザーに伝えるためには非常に有用であるが、時には第8図の解析のように解析者の持つイメージが強く表現され、場合によっては真の分布が覆い隠されることもありうることに注意が必要であろう。

3. 閉塞過程と閉塞前線のより妥当な一般化

SK90により提案されたSKモデルの特徴のうち少なくともいくつかは、ベルゲン学派の研究者らが気づいていたが忘れられていたことだった。それらに再び光を当てたことは、温帯低気圧の特に閉塞過程に関する議論を呼び起こした。以下では、閉塞に関連する従来の考え方と、そこから変



第9図 澤田(1955)による日本の東海上の低気圧の前線解析。

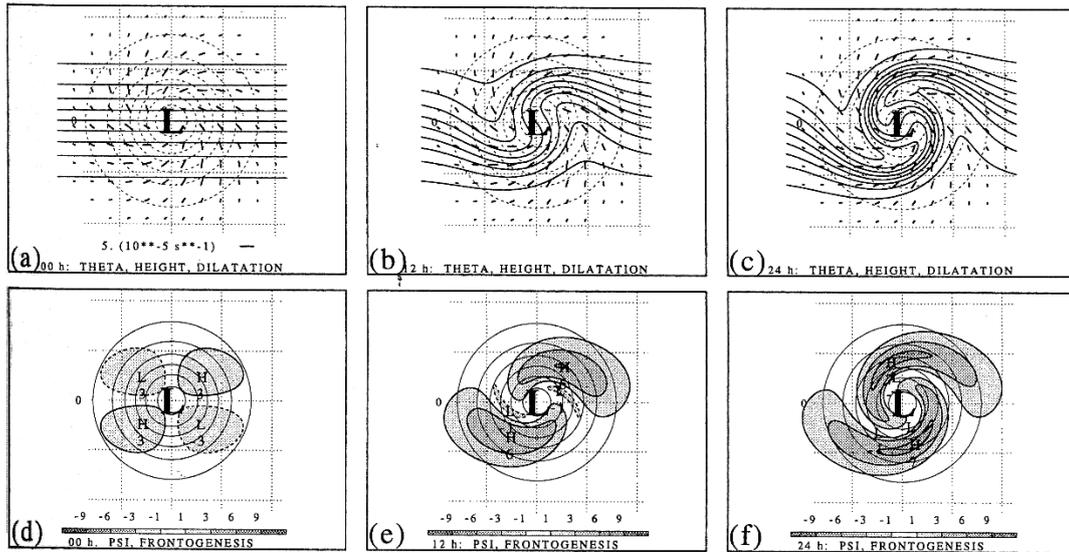
化している最近の見方について述べる。

3.1 閉塞前線はどのように形成されるのか

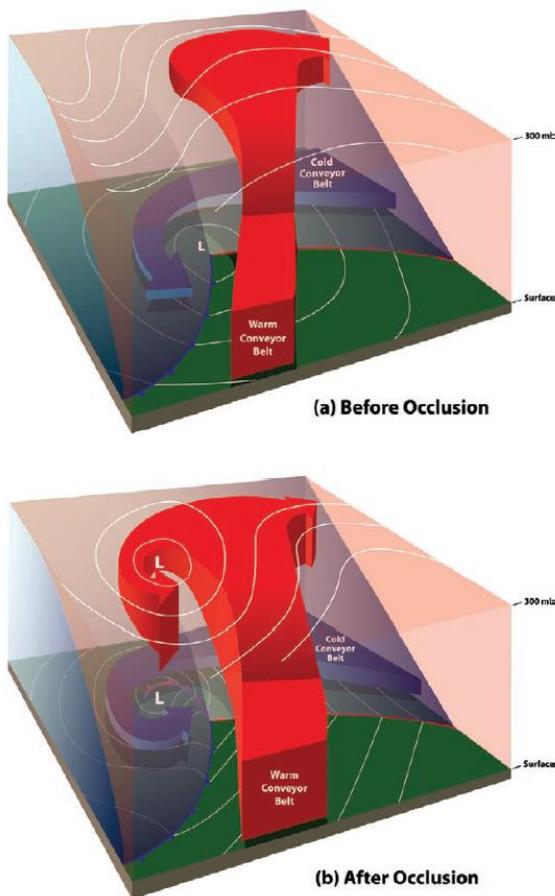
従来、閉塞前線は、動きの遅い温暖前線に動きの速い寒冷前線が追いつくことにより形成されると説明されていた(第2.1節)。これに対してSKモデルでは該当する部分の前線が温暖前線として表現されていたが、理由は明確でない。さらに、SKモデルや第6図に示したRefsdal(1930)のモデルの最終段階で見られるようならせん状の長い前線は単なる寒冷前線の追いつきでは説明できないという問題もあった。

このことに関して、Schultz *et al.* (1998)は傾圧帯の中に渦を置いた理想実験を行い(第10図)、渦による移流での温度場の変形では、温暖前線に相当する部分と寒冷前線相当部分の移動速度が同じなので、前者に後者が追いつくというより、温度場の波動の巻き込みが起こると表現した。これによりSchultz and Vaughan (2011)は、閉塞過程を、サーマルリッジとサーマルトラフの巻き込みにより低気圧中心が暖域の空気から分離されると定義した。そしてそこで幅の狭くなったサーマルリッジが閉塞前線と見なされることになる。

低気圧周辺の流れは3次的にはコンベヤーベルトの概念(例えばBrowning, 1990, 邦訳は北島ほか, 1995a)を用いて説明される(第11図)。そ



第 10 図 まっすぐな流れにおける円形の渦の時間変化 (Schultz *et al.*, 1998). (a) (d) は初期時刻, (b) (e) は 12 時間後, (c) (f) は 24 時間後. 上段: 温位 (太線実線), 流線関数 (細破線), 変形拡大軸 (短線). 下段: ジオポテンシャル高度 (細実線), 水平風による前線強化 (陰影, 実線/破線は正/負の領域).

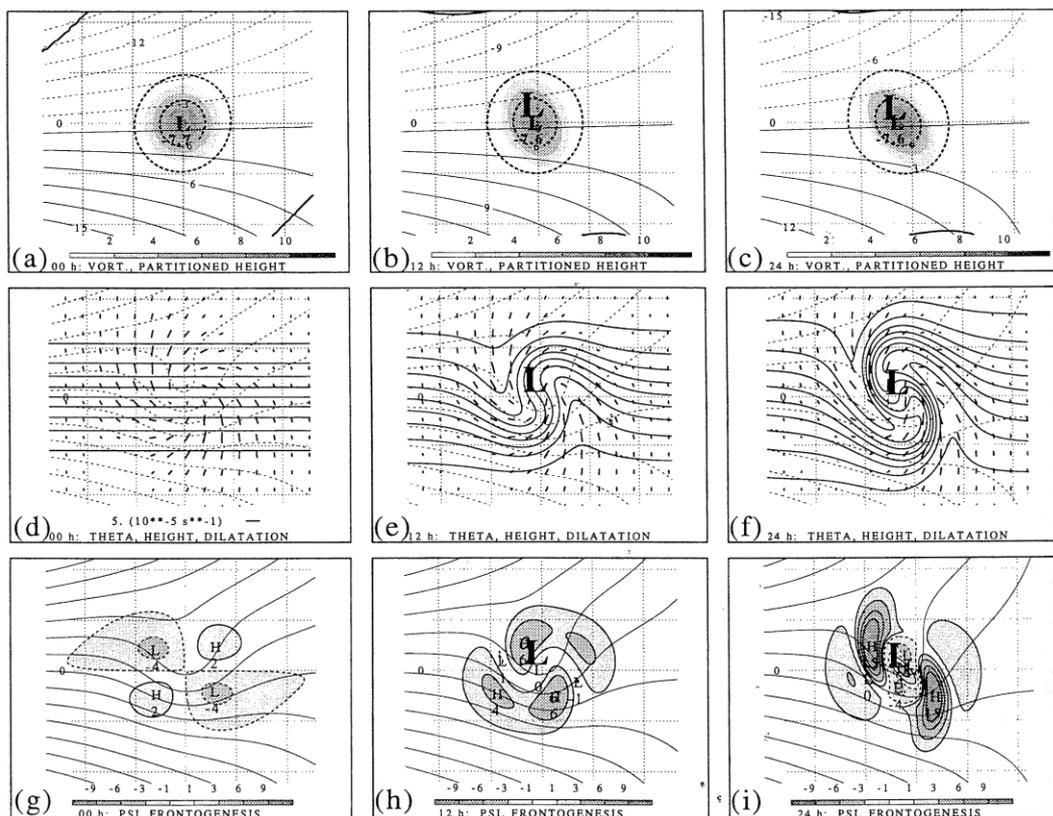


第 11 図 Schultz and Vaughan (2011) による (a) 閉塞前と (b) 閉塞後の温暖/寒冷コンベヤーベルト (赤/青) の模式図.

ここでは, 低気圧に伴う主要な雲域は暖域から温暖前線面に沿って極方向に向かって斜向上昇する温暖コンベヤーベルト (warm conveyor belt: WCB, 第 11 図で赤で示された気流) に関連して生じる. それとは別に, 温暖前線面の下・寒気側を東から西向きに低気圧側へと流れる寒冷コンベヤーベルト (cold conveyor belt: CCB, 第 11 図で青で示された気流) があり, これが閉塞が進んだ段階 (第 11 図 b) では低気圧中心を包み込む (wrap-up) と考えることができる. それによって, らせん状になった長い閉塞前線の説明が可能になる. またそれに先立つベントバック前線の形成や, その後の SK モデルの暖気核隔離の形成も, CCB による相対的暖気の包み込みで説明できる.

3.2 閉塞には温暖型と寒冷型の 2 種類があるのか

第 2.1 節で述べたように, 従来は閉塞には温暖型と寒冷型の 2 種類があると説明されていた. しかし実際に Schultz and Mass (1993) がそれ以前の文献等で報告された「閉塞前線」事例を再調査すると, 水平面の前線分布にかかわらず, 鉛直断面では大部分が温暖型の構造 (すなわち, 下層の温暖前線に寒冷前線が乗り上げている構造) であっ



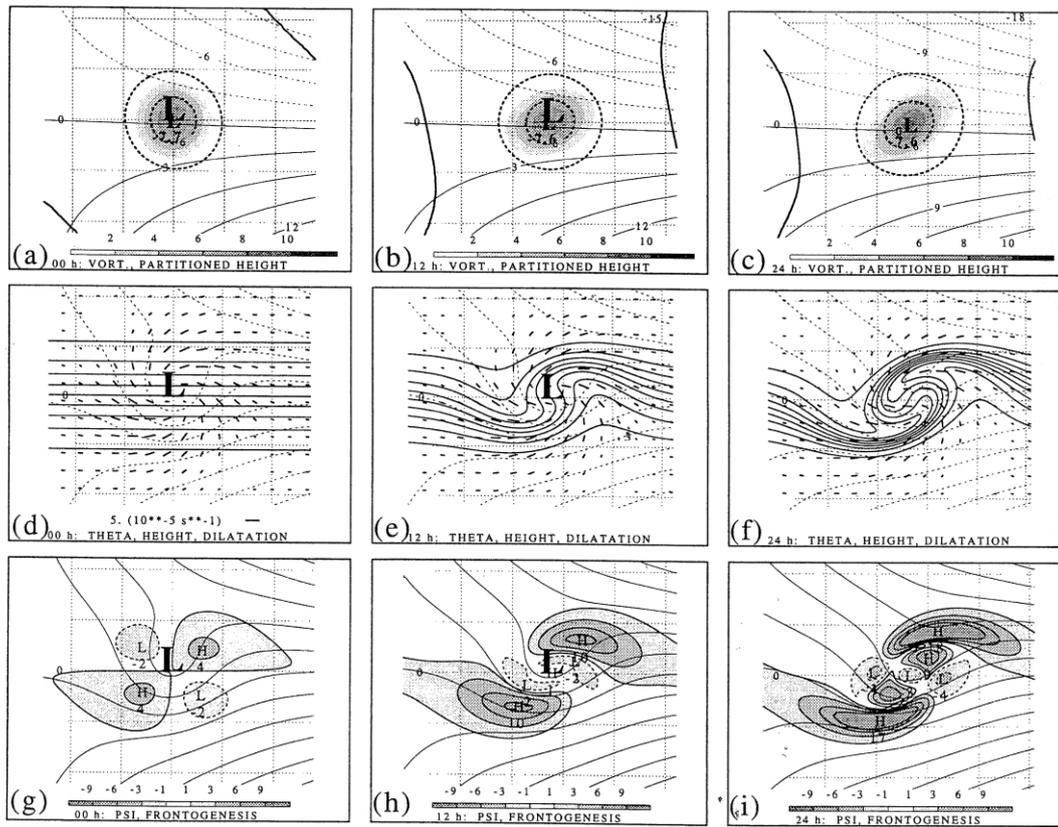
第 12 図 分流場における円形の渦の時間変化 (Schultz *et al.*, 1998). (a) (d) (g) は初期時刻, (b) (e) (h) は 12 時間後, (c) (f) (i) は 24 時間後. 上段: ジオポテンシャル高度の背景流成分 (細実線/細破線が正及び 0/負の値を表す) と渦の成分 (太実線/太破線が正/負の値を表す), 相対渦度 (陰影). 中段: 温位 (太線実線), ジオポテンシャル高度 (細破線), 変形拡大軸 (短線). 下段: 流線関数 (細実線), 水平風による前線強化 (陰影, 実線/破線は正/負の領域を表す).

た. それ以前の文献に掲載された研究は, 粗い水平解像度のゾンデ観測の解析によるものや, 現代ほどの精度ではない数値シミュレーションによるものであったことには注意が必要である. そのようなことを考慮しても, 実際に観測・解析される構造が古典的な温暖型・寒冷型閉塞の考え方で説明できないことは明らかである. ここでは水平面で見られる構造と鉛直断面に見られる構造を分けて考える.

(1) 閉塞期の前線の水平分布

閉塞期の低気圧に伴う前線の水平構造の差異に関しては, Schultz *et al.* (1998) は第 10 図と同様の傾圧帯の中に渦を置いた理想実験を, 基本場の流れが分流の場合 (第 12 図) と合流の場合 (第 13 図) について行った. 第 12 図では分流及び減速によって, 場が南北にのび東西には縮むように

変形する (これは第 12 図中段の図中の短線で表された変形拡大軸が南北走向を持つことで表現されている). それに伴って温位分布 (第 12 図中段) は暖域が幅の狭いサーマルリッジとなって南北にのび, 低気圧中心の東から南にのびる顕著な寒冷前線と北東側の弱い温暖前線に相当する構造が得られた. これは前線強化 (第 12 図下段) の顕著な領域が低気圧中心の南東側と北西側で南北方向にのびるように生じたことの反映である. これに対して第 13 図の基本場の流れが合流・加速する場合は, 場が東西方向にのび南北に収縮するように変形する (第 13 図中段の図中の短線で表された変形拡大軸が東西走向を持つことで表現されている) のに伴い, 前線強化域 (第 13 図下段) も低気圧北東側と南西側で東西にのびるように強まって, それを反映して温暖前線・寒冷前線



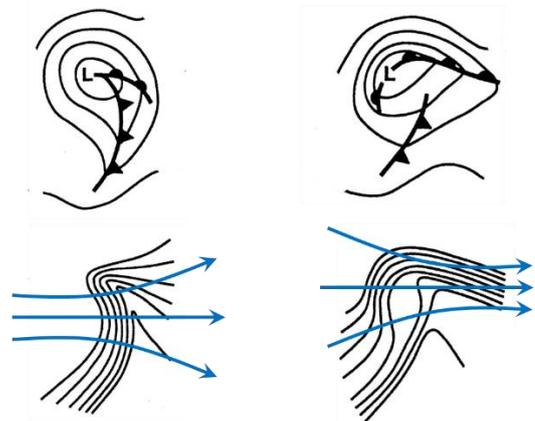
第 13 図 第 12 図と同じ，ただし合流場 (Schultz *et al.*, 1998).

とも東西にのびて強まるが暖域の幅は狭くならない (第 13 図中段) ことが示された。

これらを現実大気と対応させると，第 14 図のように，分流場であるジェットストリークの出口での閉塞の場合は，暖域が狭くなるとともに，傾圧性が西側で強く東側で弱いことを反映して，寒冷前線が顕著で温暖前線が比較的弱い古典的寒冷型閉塞に似た構造となる．逆に，合流場であるジェットストリークの入り口での閉塞の場合は，暖域が狭くならず，また傾圧性が西で弱く東で強いことを反映して，温暖前線が顕著で寒冷前線が弱い古典的温暖型閉塞に類似する傾向となる．後者の極端な場合が SK モデルの T ボーン構造 (第 2.1 節) に対応し，また寒冷前線が弱いことから前線断裂 (第 2.2 節) が生じやすくなることが考えられる。

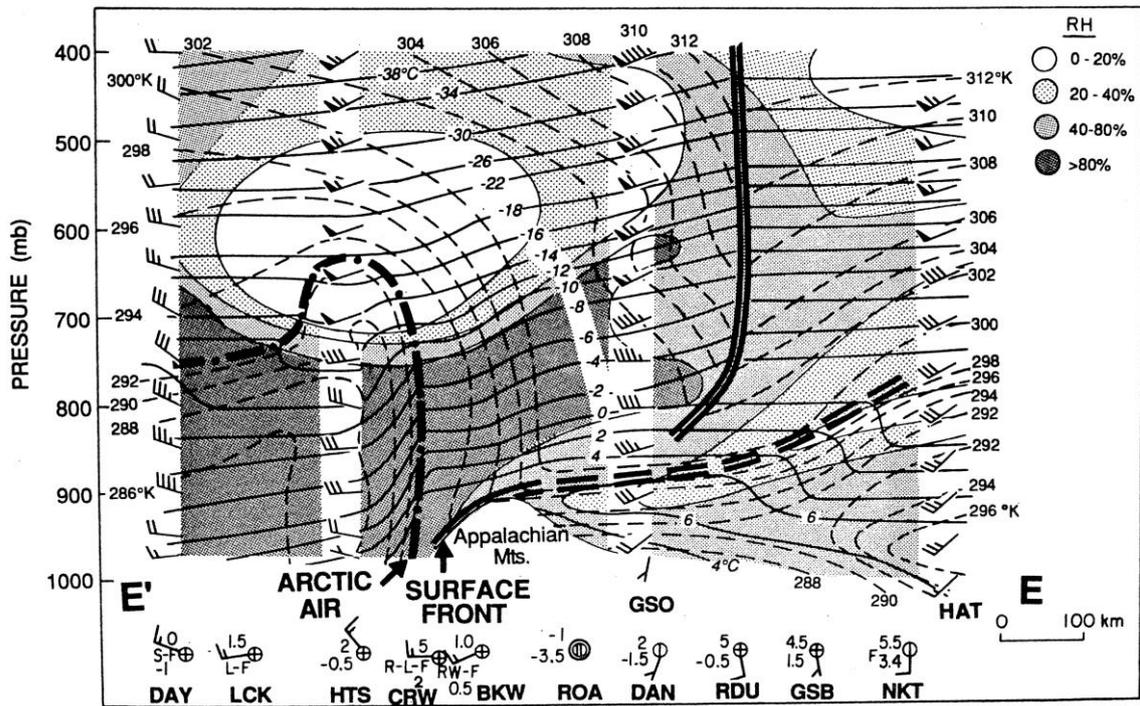
(2) 鉛直断面における閉塞前線の構造

上述のように Schultz and Mass (1993) は鉛直断面では寒冷型閉塞として解析される事例がほとんどないことを示したが，それに先立ち，Locatelli



第 14 図 Schultz *et al.* (1998) による N モデル (左) と SK モデル (右) の，等圧線と前線 (上段) 及び等温位線 (下段) の模式図。下段の青矢印は上空の背景流 (左は分流場，右は合流場) を表す。

et al. (1989) は北米大陸上で下層の温暖前線の上に寒冷前線が乗り上げた温暖型閉塞の構造を示した (第 15 図)。Locatelli らはこれを，寒冷前線がロッキー山脈を越えたために生じたと説明し

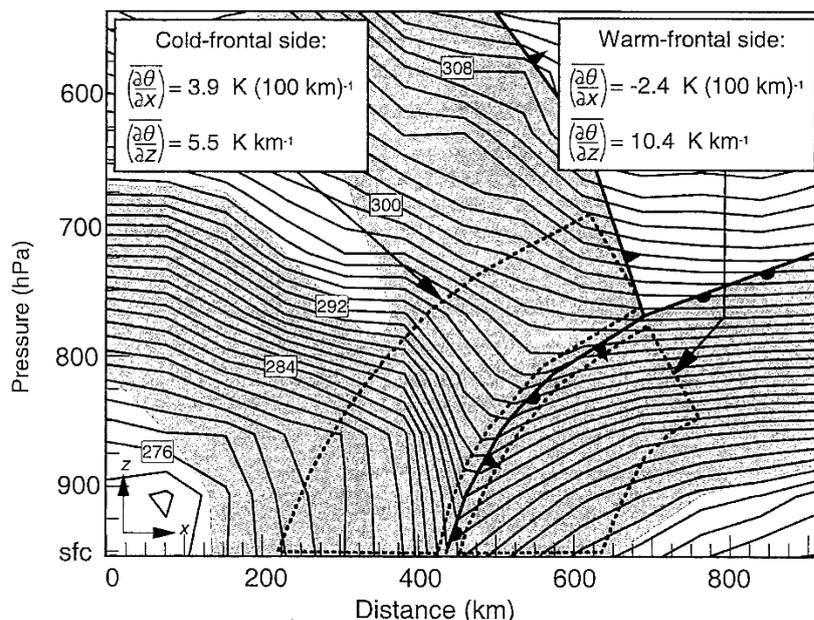


第 15 図 北米大陸で観測された前線の鉛直断面解析 (Locatelli *et al.*, 1989). 細実線は気温 (°C), 細破線は等相当温位線 (K), 陰影は相対湿度. 太二重破線は暖気移流域の寒気側 (すなわち温暖前線帯の寒気側), 太い一点鎖線は北極気団の先端, 太二重線は上層寒気移流域の先端 (すなわち上空の寒冷前線).

た (Locatelli *et al.*, 2002 など参照). しかし, 下層寒冷前線より上空の寒冷前線 (upper cold front : UCF) が先行するのは大規模山岳の影響のないイギリス等でもしばしば観測されスプリットフロントと呼ばれている (例えば Browning, 1990) ので, UCF の存在により温暖型閉塞のような構造として観測されるのは大規模山岳の影響なしにも起こりうると考えられる.

古典的な温暖型閉塞・寒冷型閉塞 (第 4 図) では, ごく下層の前線の傾きにも差異が生じるとされる. これは, 一般的な前線の傾きが, 過去には単純に 2 つの気団の温度差によって決まり, 前線面は寒気側へと傾くと考えられていて, 第 4 図もそれに基づいていたものである. しかし, 現実には前線面で気温が不連続になるわけではないので, 気温の不連続による前線面の傾きの考え方は使えない (例えば Stoelinga *et al.*, 2002, 邦訳は北島, 2003). 実際には, 一般に気団の境界付近で 2 つの気団の境界を特徴づけるのは温度差よりも温度傾度 (水平方向と鉛直方向両方) となる.

Stoelinga *et al.* (2002) は鉛直断面における前線 (気団の境界) の傾きを決めるのは静的安定度 (すなわち気温の鉛直傾度) であると説明した. 静的安定度の異なる気団が接したとき, 前線面は静的安定度の大きい方へ傾く性質があり, 一般に下層では寒冷前線後面の寒気の方が安定度が小さいので閉塞前線は温暖前線側へと傾くことになる. これは静的安定度の小さい空気の方が鉛直に変位しやすいことを考慮すれば納得しやすいだろう. 第 16 図の場合, 寒冷前線側 (図の左側) の方が水平温度傾度の絶対値が大きく, 地上前線から等距離では温暖前線側より寒冷前線側の方が低温になるので, その点では前線は寒冷前線側 (図の左側) に傾くことが期待されるが, 寒冷前線側の方が静的安定度が小さいことで, 前線は温暖前線側 (図の右側) へ傾き, 下層温暖前線に類似した構造になっている. 第 15 図でも, 太い二重破線で示された温暖前線層よりも暖気側 (下層及び図の右側) では気温の鉛直傾度が小さく静的安定度が大きく, 寒気側 (上層及び図の左側) では気温の鉛



第 16 図 Stoolinga *et al.* (2002) の数値モデルシミュレーションによる閉塞前線の鉛直断面．図中右が温暖前線側，左が寒冷前線側．実線は温位，点線は前線帯．

直傾度が大きく静的安定度が小さいことが読み取れ，温暖前線的な傾きを持つことと矛盾しない．

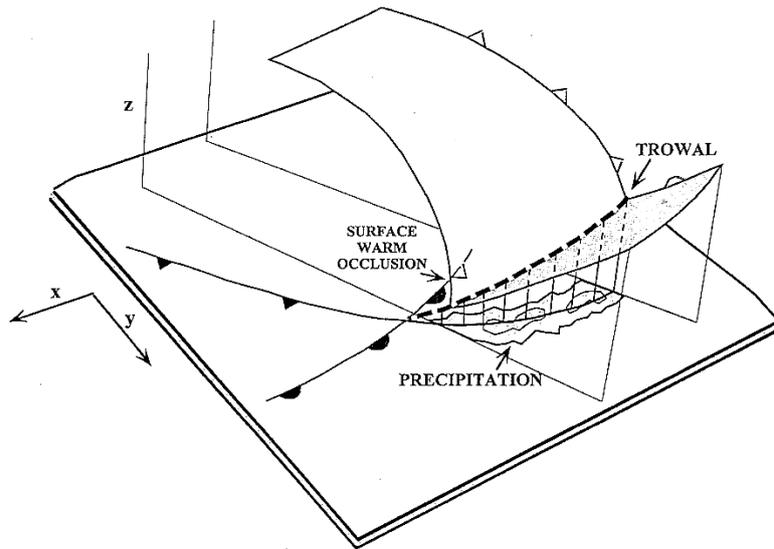
3.3 閉塞前線が形成されると低気圧の発達が終わるのか

従来は，低気圧が閉塞すると暖域から切り離されるために，有効位置エネルギーを運動エネルギーに変換することによる低気圧の発達ができなくなると説明されていた（例えば Bjerknes and Solberg, 1922）．しかし地上で閉塞して暖域から低気圧中心が寒気側へと離れ，下層では低気圧中心付近で水平温度移流が小さくなったように見えても低気圧が発達を続ける場合があることを，Schultz and Vaughan (2011) が指摘している．彼らは閉塞を CCB によるサーマルリッジの包み込みと考え（本稿の第 3.1 節参照），強い回転成分を持つ低気圧ほど包み込みが迅速かつ顕著に生じやすいため閉塞しやすく，逆に，弱い低気圧では閉塞が生じにくいと説明した．実際，弱い低気圧では閉塞しないまま発達を止め衰弱することも珍しくない．それを考慮すると，閉塞することが発達の終了を決めるのではなく，発達の結果として閉塞が生じると考えたほうが妥当と考えられる．

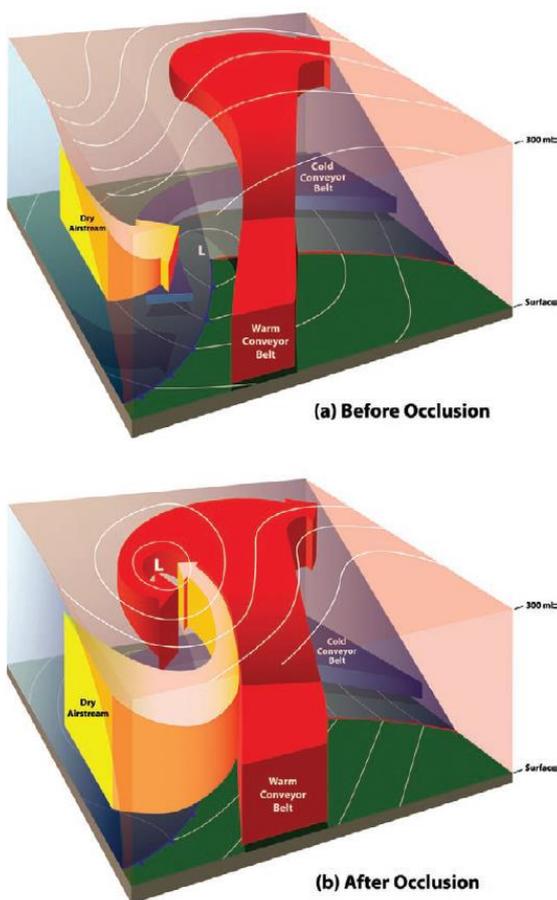
3.4 閉塞前線・ベントバック前線の位置，及び雲や天気分布の対応

第 3.1 節等で述べたように，地上・下層における閉塞前線の位置は，本来，サーマルリッジであることが期待され，そのためには地上・下層の温度場を見る必要がある．しかし Schultz and Vaughan (2011) では，地上閉塞前線の位置として，衛星で観測された雲バンドの後端に解析される傾向があるが，地上の閉塞前線の位置に対応しないことが少なくないことが指摘されている．

閉塞前線に関連する雲としては，ベルゲン学派の時代から，下層の温暖前線と寒冷前線それぞれに伴う寒気の上に位置する暖気内で生じると考えられてきた．そこは第 17 図で示されるように傾斜した 2 つの前線面の交わる線に沿い，暖気が相対的に低い高度に分布することから，上層暖気トラフ (trough of warm air aloft : TROWAL) と呼ばれる（鉛直断面では暖気のトラフだが水平面の気温分布ではサーマルリッジとなることに注意）．これは第 15 図では太二重線の位置に対応し，また第 11 図で赤で示された WCB が TROWAL に沿って斜向上昇する気流に対応する．これは主に安定成層のため層状雲・層状性降水を伴うと説明さ



第 17 図 傾斜した寒冷前線面と温暖前線面，それらの交わる傾斜した太破線（TROWAL）を 3 次元的に表した概念モデル (Martin, 1999). TROWAL の直下の地表面に示されている降水域 (PRECIPITATION) は，地上の温暖型閉塞前線 (SURFACE WARM OCCLUSION) の位置とは一致しない。



第 18 図 第 11 図のコンベヤーベルトモデルに乾燥気流(黄)を加えたもの (Schultz and Vaughan, 2011).

れてきた。力学的には Martin (1999) は前線帯の折れ曲がり (rotational frontogenesis) により上昇運動が生じると説明した。これらは地表付近でなく上空の湿潤空気の上昇に関連するので，第 17 図のように，降水域は本来の考え方による地上閉塞前線の位置とは一致しない。

現実の閉塞前線付近では層状性降水だけでなく対流性降水も含まれる。これは斜向上昇する暖気が条件付き不安定成層であったことにより生じうる。また上空の寒冷前線 (第 3.2 節) で対流不安定成層が形成されることによって生じることもある。第 18 図は第 11 図に黄色で乾燥気流 (dry airstream) を加えたもので，これは寒気側の高高度から斜めに下降してきたために乾燥した気流となる。この場合，衛星観測で見られる雲頂高度の高い雲バンドの後端は乾燥空気の先端である上空の寒冷前線の位置となり，この場合も地上の閉塞前線の位置とは対応が良くないと考えられる。これはいわゆるスプリットフロント (例えば Browning, 1990, 邦訳は北島ほか, 1990a) の場合に、下層寒気の先端である地上の寒冷前線の位置が衛星で観測される雲バンドの位置 (中上層の寒気の先端) と合わないことと同様である。

閉塞期の低気圧では，低気圧中心の北西側でも

強い降水が生じることがあることが、米国東岸やヨーロッパで報告されている。これは第 11 図のように下層の CCB の上を、比較的安定度の低い成層の TROWAL の湿潤暖気が WCB として斜めに急上昇し、CCB の上空で CCB と共に低気圧性に運動して低気圧の北西象限に達してそこで降水をもたらすと説明されている。Novak *et al.* (2010) は傾斜して急上昇する流れについて、下層～中層の前線強化と上層トラフ（上層高渦位）の影響を指摘している（第 19 図）。

3.5 閉塞または前線断裂段階の低気圧に伴う強風

低気圧に伴う下層の強風は、暖域内の広域のものがしばしば着目され、その中でも特に寒冷前線前面の WCB に伴う下層ジェット（第 20 図中の WJ）が強調されることもあるが、寒気側の CCB も比較的狭い範囲の下層ジェットとなると指摘される。前節での第 11 図のように、WCB が CCB の上を斜めに上昇しながら降水をもたらすと、そこでの潜熱加熱により下層では渦位が増大し、CCB では低気圧性の下層ジェットとなる（例えば Schemm and Wernli, 2014）。第 20 図・第 21 図では寒気内のごく下層で低気圧中心を取り巻くように発達する CCB ジェットが描かれている（図中の CJ）。

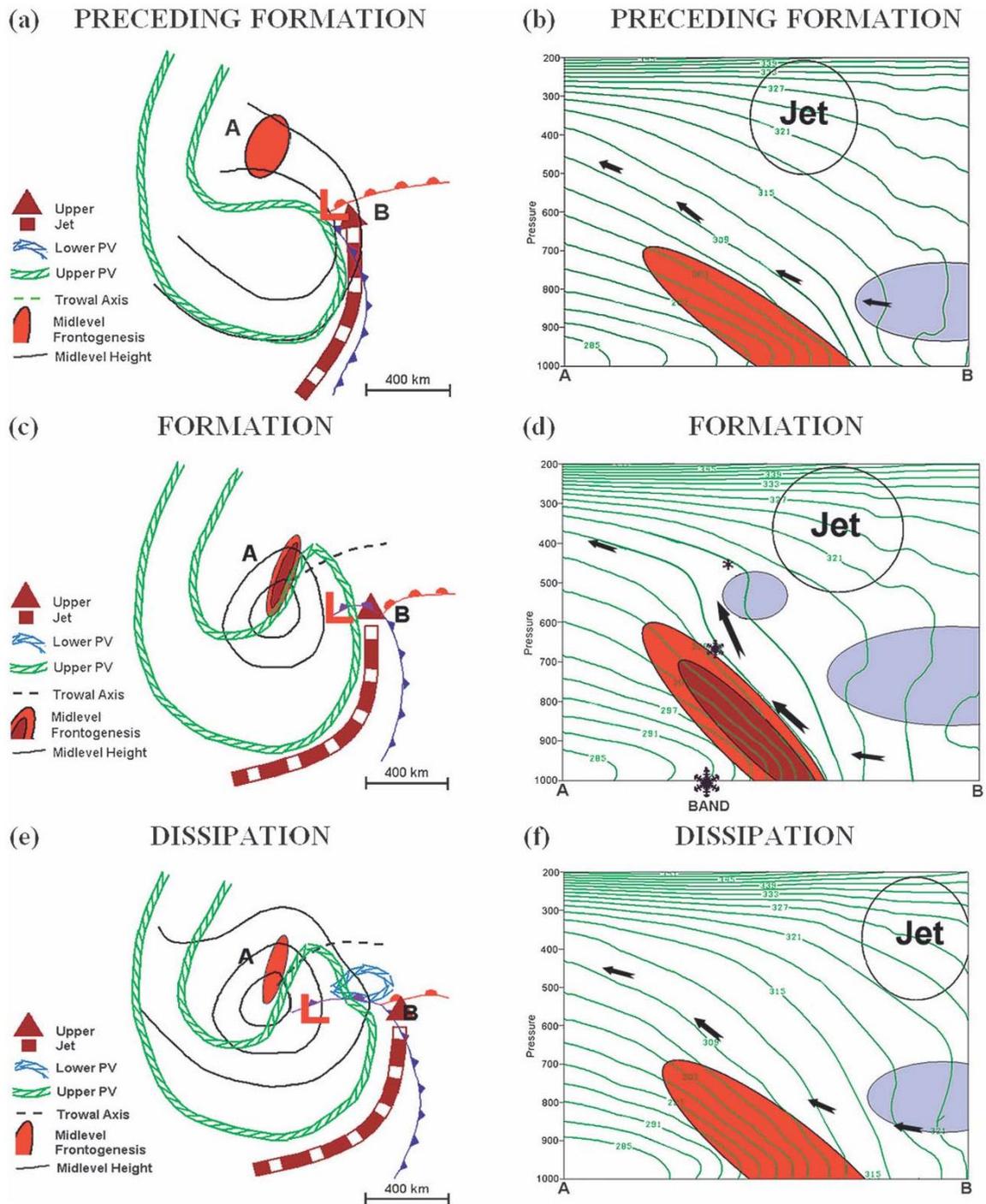
それとは発生機構やスケールの異なるタイプの強風として、sting jet が知られている（例えば Clark and Gray, 2018）。これは SK モデルのタイプの低気圧に伴うベントバック前線の先端で、狭い領域の強風（暴風）が生じることが、主にイギリスで報告されている（第 20 図・第 21 図の SJ）。この sting はハチなどが刺すことを意味し、sting jet はいわば「毒針ジェット」の意味となるが、ここでは sting jet としておく。発生メカニズムとしては、閉塞期の低気圧の雲ヘッド（cloud head）の中層で、降水粒子が蒸発し冷却された空気が前線帯を斜めに下降することで、地表面付近で暴風として観測されることが指摘されている。CCB ジェットが前線強化に伴うのに対して sting jet は前線弱体化（負の前線強化）の領域であり、それに関

連して励起される鉛直循環による斜向下降運動がまず考えられ、そのほか、条件付き対称不安定または湿潤対称不安定の寄与の可能性が指摘されている。CCB ジェットは凝結による潜熱加熱が関係しているので雲のある領域で生じるのに対して、sting jet は強い下降流に関連して生じるので、それが発生する領域では衛星観測で雲が消失している可能性が高い。これがイギリスで観測されるのは、暖流の海域で発達して閉塞期や前線断裂段階に達した低気圧が影響するためであり、その点では日本でも日本海で発達した低気圧が影響する北海道などでは同様の現象が影響している可能性がある。

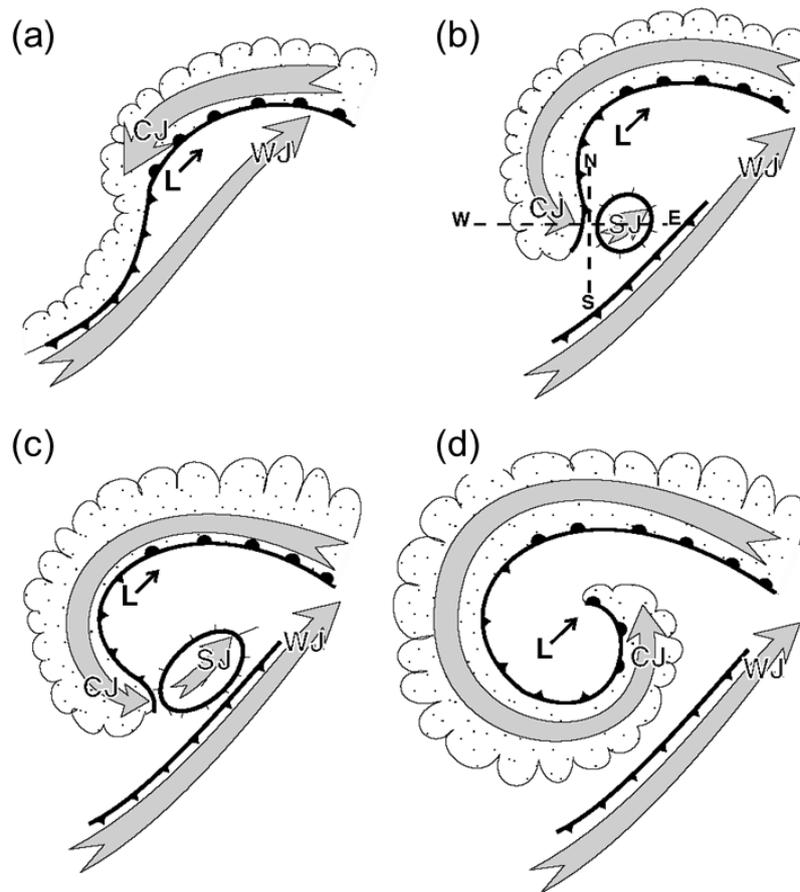
4. まとめ

温帯低気圧の閉塞について、20 世紀半ばまでの古典的な概念モデルと、1990 年に提案された SK モデルの構造の特徴を比較し、またその形成過程として考えられること、さらに閉塞過程に関連して生じる降水・強風の特徴も含めて、最近指摘された事項をまとめた。

- Shapiro and Keyser (1990) の低気圧モデルに示されていた特徴は、20 世紀前半のベルゲン学派の研究者らの解析に既に現れていたが、その成果として伝えられた古典的低気圧概念モデルには表現されず、忘れられていたものがあつた。
- 閉塞は、温暖前線への寒冷前線の追いつき（catch-up）よりも、寒気による低気圧中心の包み込み（wrap-up）と考えたほうが良い。それにより閉塞前線の巻き込みも説明できる。
- 閉塞時の前線の水平面での分布には、基本場の流れが影響し、流れが分流の場合（ジェットストリークの出口）は暖域が狭くなり、合流の場合（ジェットストリークの入り口）は暖域が狭くならない T ボーン構造のような分布になる。
- 古典的温暖型閉塞として示されていた、温暖前線に寒冷前線が乗り上げる構造は、下層の寒冷前線とは別の上空の寒冷前線によって



第 19 図 閉塞過程で寒気側に強い降水バンドを伴う低気圧の模式図 (Novak *et al.*, 2010). 上段: 降水域形成初期, 中段: 降水最盛期, 下段: 降水域衰弱期. 左列: 平面で, 上層ジェット (太破線矢印), 下層高渦位偏差域 (青), 上層高渦位偏差域 (緑), 中層 TROWAL 軸 (黒破線) 中層ジオポテンシャル高度等値線 (細い黒実線), 中層前線強化 (赤シェード), 及び地上前線と低気圧中心. 右列: 左列の平面図中の A と B に沿った鉛直断面. 前線強化域 (赤シェード), 飽和相当温位 (緑線), 条件付き不安定層 (グレーシェード), 上昇運動極大域の流れ (黒矢印).



第 20 図 温帯低気圧周辺の地上付近の流れの概念モデル (Clark *et al.*, 2005). (a) 前線性低気圧の発達初期. (b) 寒冷前線断裂, sting jet 発生. (c) sting jet 最盛期. (d) sting jet 消滅. 図中 WJ, CJ, SJ はそれぞれ WCB ジェット, CCB ジェット, sting jet を表す. (b) の W-E と N-S に沿った鉛直断面を第 21 図に示す.

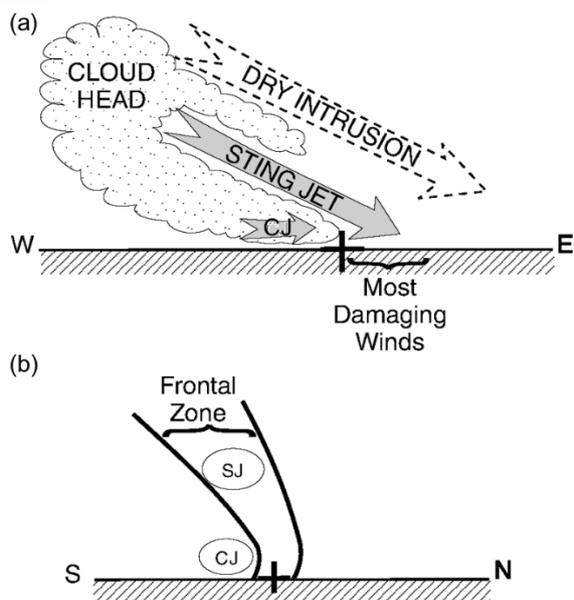
生じる場合がある. 一方, 下層の前線の傾きは, 気団の相対的な気温よりも, 静的安定度の差によって決まり, 閉塞前線では一般には寒冷前線側の寒気よりも温暖前線側の寒気のほうが静的安定度が高いため上空ほど東に傾斜する傾向がある. これらにより, 鉛直断面では古典的温暖型閉塞の構造として解析されやすい.

- ・ 閉塞は低気圧の発達 (中心気圧の深まり) の終了を意味しない. 強い低気圧は閉塞後も深まるが, 弱い低気圧は閉塞しないまま弱まる.
- ・ 閉塞前線に伴う雲は, 主に, 上空を斜向上昇する湿潤暖気に伴って生じるので, 雲や降水は地上の閉塞前線の位置に対応しない. 下層の CCB の上を安定度の低い成層の湿潤暖気

が上昇することにより, 低気圧の北西側で強い降水が生じることも指摘されている.

- ・ 閉塞期の低気圧では, 寒気側の下層に低気圧を取り巻くように CCB ジェットが発達する. さらに SK モデルの低気圧のように前線断裂が生じる場合は, そこに sting jet が発生する可能性がある.

本稿のタイトルにある「構造と形成過程」のうち「構造」は, 観測データに基づいて解析され, 解析者の考え方 (概念モデルに関する知識) や着目点に依存するが, 一応, 現実に基づいていると言えるだろう. これに対して「形成過程」の方は, 過去ではスナップショット的に解析された構造を時系列で比較して推測した結果であり, また近



第 21 図 第 20 図 (b) の W-E と S-N に沿った鉛直断面の概念モデル (Clark *et al.*, 2005). (a) CCB ジェット (CJ) はごく下層のみの流れであるのに対して, sting jet (SJ) は雲の中を中層から斜めに下降する流れが地表に達している. (b) CCB ジェットは寒気内の流れであるのに対して, sting jet は前線帯の内部の現象であることを表す.

年は数値シミュレーションで説明されることが多いが, これも必ずしも現実と同一ではなく, 「構造」に関する記述と比較すると信頼度が低く再検討の余地が多々あることには注意が必要である.

概念モデルは多くの事例に共通する特徴を抽出して表現するが, すべての事例に当てはまるものではない. 事例によっては異なる特徴が加わる場合もあり, また別の事例では一部の特徴の発現が顕著でない場合もある. 概念モデルを先入観として持つことによって, 解析結果がゆがめられることもありうる. 現実の事例の説明に概念モデルを使う場合にはこれらの点に注意する必要がある.

参考文献

Bjerknes, J. (1930) : Practical examples of polar-front analyses over the British Isles in 1925-6.

Geophys. Mem., **5** (10), 1-21 plus 28 pp. of figs.
 Bjerknes, J. and H. Solberg (1922) : Life cycle of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation. *Geophys. Publ.*, **3** (1), 3-18.
 Bjerknes, V. (1921) : On the dynamics of the circular vortex with applications to the atmosphere and atmospheric vortex and wave motions. *Geophys. Publ.*, **2** (4), 1-89.
 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 scientific summary. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **74**, 1361-1373.
 Browning, K. A. (1990) : Organization of clouds and precipitation in extratropical cyclones. *Extratropical Cyclones, The Erik Palmén Memorial Volume*. C. W. Newton and E. O. Holopainen, Eds., Amer. Meteor. Soc., 129-153.
 Clark, P. A., K. A. Browning, and C. Wang (2005) : The sting at the end of the tail: model diagnostics of the fine-scale three-dimensional structure of the cloud band. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 2263-2292.
 Clark, P. A., and S. L. Gray (2018) : Sting jets in extratropical cyclones: A review. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **144**, 943-969.
 Godske, C. L., T. Bergeron, J. Bjerknes, and R. C. Bundgaard (1957) : *Dynamic Meteorology and Weather Forecasting*. Amer. Meteor. Soc., 800 pp.
 Grønås, S. (1995) : The seclusion intensification of the New Year's day storm 1992. *Tellus*, **47A**, 733-746.
 気象庁予報部 (1973) : 天気予報指針 基礎編, 222pp.
 気象庁予報部 (2018) : 平成 29 年度予報技術研修テキスト, 103pp.

- 北島尚子, 金崎厚, 海老原智, 重岡博明, 緒方洋一, 出口一, 上清直隆, 牟田佳史, 鈴木和史 (1995a) : Browning : 温帯低気圧 — 温帯低気圧における雲と降水の構造 —. 測候時報, **62**, 1-31.
- 北島尚子, 金崎厚, 海老原智, 重岡博明, 緒方洋一, 出口一, 上清直隆, 牟田佳史, 鈴木和史 (1995b) : Shapiro : 前線・ジェット気流・圏界面. 測候時報, **62**, 151-187.
- 北島尚子 (2003) : 温暖型閉塞・寒冷型閉塞・前方傾斜型寒冷前線. 測候時報, **70**, 9-24.
- Locatelli, J. D., J. M. Sienkiewicz, and P. V. Hobbs (1989) : Organization and structure of clouds and precipitation on the mid-Atlantic coast of the United States. Part I: Synoptic evolution of a frontal system from the Rockies to the Atlantic Coast. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 1327-1348.
- Locatelli, J. D., J. M. Sienkiewicz, M. T. Stoelinga, and P. V. Hobbs (2002) : Norwegian-type and cold front aloft-type cyclones east of the Rocky Mountains. *Wea. Forecasting*, **17**, 66-82.
- Martin, J. E. (1999) : Quasigeostrophic forcing of ascent in the occluded sector of cyclones and the trowal airstream. *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 70-88.
- 中村尚, 高薮出 (1997) : Shapiro の新しい前線・低気圧モデル. *天気*, **46**, 453-459.
- 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.
- Novak, D. R., B. A. Colle, and A. R. Aiyyer (2010) : Evolution of mesoscale precipitation band environments within the comma head of northeast U.S. cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 2354-2374.
- 小倉義光 (1992) : 前線の T ボーン模様. *気象*, **36** (6), 36-39.
- Palmén, E. and C. W. Newton (1969) : Atmospheric Circulation Systems. Academic Press, 603 pp.
- Reed, R. J., Y. -H. Kuo and S. Low-Nam (1994) : An adiabatic simulation of the ERICA IOP4 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.
- 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 年に「気象研究ノート」に改称.)
- Schemm, S., and H. Wernli (2014) : The linkage between the warm and cold conveyor belts in an idealized extratropical cyclone. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 1443-1459.
- Schultz, D. M. (2001) : Reexamining the cold conveyor belt. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 2205-2225.
- Schultz, D. M., and D. Keyser (2021) : Antecedents for the Shapiro-Keyser cyclone model in the Bergen school literature. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **102**, E383-E393.
<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0078.1>
- 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.
- 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., and G. Vaughan (2011) : Occluded fronts and the occlusion process: A fresh look at conventional wisdom. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **92**, 443-466.
- Schär, C. J. (1989) : Dynamische Aspekte der aussertropischen Zyklogenese, Theorie und numerische Simulation im Limit der balancierten Strömungssysteme. Dissertation Nr. 8845 der Eidgenössischen Technischen Hochschule, Zurich, 241 pp.
- Stoelinga, M. T., J. D. Locatelli, and P. V. Hobbs (2002) : Warm occlusions, cold occlusions,

and forwardtilting cold fronts. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **83**, 709-721.

Shapiro, M. A., and D. Keyser (1990) : Fronts, jet streams and the tropopause. Extratropical Cyclones, The Erik Palmén Memorial Volume. C. W. Newton and E. O. Holopainen, Eds., Amer. Meteor. Soc., 167-191.

Shapiro, M. A., 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. The Life Cycles of Extratropical Cyclones. M. A. Shapiro and S. Grønås, Eds., Amer. Meteor. Soc., 139-185.

Takayabu, I. (1986) : Roles of the horizontal advection on the formation of surface fronts and on the occlusion of a cyclone developing in the baroclinic westerly jet. *J. Meteor. Soc. Japan*, **64**, 329-345.