

日本付近で発達した Shapiro タイプの温帯低気圧

—前線形成の視点から見た事例解析—

津村 知彦*・山崎 孝治*

要 旨

これまで温帯低気圧やそれに伴う前線の一生は、ノルウェー学派の古典的低気圧モデルによって説明されてきた。これに対し、近年、米国東岸等で実施された特別気象観測の結果などを基に Shapiro らが新しい低気圧モデルを提案した。本研究では、2000年2月7日から3月10日の間に日本付近を通過した8つの低気圧について、特に前線形成過程に注目して解析を行った。そのうち、2月7日から8日にかけて日本の東海上で発達した低気圧が前線断裂、後屈温暖前線、前線のTボーン模様、温暖核隔離といった Shapiro らのモデルに非常に類似した特徴を持っていた。一方、この低気圧には古典的低気圧モデルにおける閉塞前線は見られなかった。この低気圧では、温暖前線は発達過程全体を通して強化される傾向が見られた。また、後屈温暖前線は上述の強化された温暖前線部の温度傾度が後方に移流されてくることで維持、延伸されていた。この低気圧の発達期における大規模場の流れの南北シアーは弱く、これまでの研究で Shapiro タイプの低気圧が出現し易くなるとされている場と一致していた。

1. はじめに

1.1 温帯低気圧の Life Cycle

温帯低気圧及びそれに伴う前線の構造とそれらの時間変化、すなわち Life Cycle を記述するモデルは、ノルウェー学派により1922年に初めて提案された (Bjerknes and Solberg, 1922)。これは、下層の前線上に発生した波動擾乱 (低気圧) が東に進むにしたがって発達し、その過程で寒冷前線が動きが遅い温暖前線に追い付いて閉塞前線が形成されるというもので、その閉塞前線が形成される段階が低気圧の最盛期であり、その後は衰退に向かうとされている。このノルウェー学派の低気圧モデル (以下本論文では N モデルと称する) は今日では古典的となっているが、今なお天気図解析の基礎とされており、教科書等では温帯低気圧の構造についてこれを基に説明されている。

しかしながら、この N モデルは20世紀初頭の限られた上層データを基に構築されたものであるため、後に高層観測網が発達し、気象衛星の雲画像などで低気圧

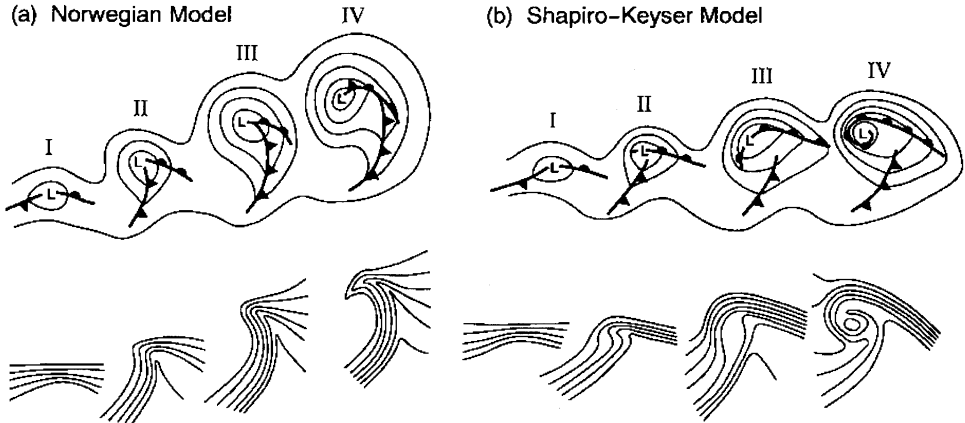
の全体像が捉えられるようになると、特に閉塞前線及びその形成過程について、現実との矛盾点が次第に指摘されるようになった。ただ、今日まで N モデルに対し修正の必要性を決定づける観測事実が見出されないまま、観測された現象や数値実験の結果等を既存の枠組の中で解釈せざるを得なかったのも事実である。

そうした中、1980年代後半にアメリカを中心として、例えば1988/89年冬の ERICA (Experiment on Rapidly Intensifying Cyclones over the Atlantic) などのいくつかの大規模な特別気象観測が実施された。これらで得られた豊富な観測結果を踏まえ、N モデルに大幅な修正を加えた新しい低気圧・前線モデルが Shapiro らによって提案された (Shapiro and Keyser, 1990; Neiman and Shapiro, 1993; Neiman *et al.*, 1993)。この Shapiro らのモデルについては中村・高藪 (1997)、または小倉 (2000) で詳しく説明されているので、ここでは簡単な説明に留めるが、このモデルによると、低気圧の発達には以下のように4段階に分けられる。(I) 幅広い連続した前線 (傾圧帯) が存在し、その上に低気圧が発生する。(II) 低気圧の発達に伴い、連続していた前線が低気圧中心付近で断裂する (前線断裂; frontal fracture)。(III) 温暖前線が低気圧の

* 北海道大学大学院地球環境科学研究科。

—2004年4月5日受領

—2004年11月10日受理



第1図 下層の温位分布の観点で対比した (a) Nモデルと (b) Sモデル (Schultz *et al.*, 1998). 上図は対流圏下層の模式的天気図, 下図はそれに対応する温位場を表す.

中心を通過して南西方向に延び(後屈温暖前線; bent-back warm front), この後屈温暖前線及び温暖前線がそれらと直角に赤道方向に延びる寒冷前線とともに特徴的な T 字型を成す(前線の T ボーン模様; frontal T-bone). (IV) 低気圧の最盛期であり, 中心付近では後屈温暖前線の西側が強く巻き込んで, そこに暖域から隔離された比較的温度的の高い核が形成される(温暖核隔離; warm-core seclusion). なお, Nモデルと Sモデルの模式図を第1図に示した. この図は後述する Schultz *et al.* (1998) が両モデルを下層の温位場の特徴で分類したものである.

この新しい Shapiro のモデル(以下本論文では Sモデルと称する)と従来の Nモデルとの最も大きな違いは, Sモデルには閉塞前線が無いことである. それに対応するものが上述の後屈温暖前線であるが, もしこれが Nモデルの閉塞前線であるならば, この前線を横切る鉛直断面上では, 温暖前線と寒冷前線が上空で交差しているはずである. しかし, Shapiro らはそれが事実でないことを観測により示した (Shapiro and Keyser, 1990).

1.2 関連研究

この Sモデルの登場によって, 温帯低気圧の多様な Life Cycle の存在が目ざされるきっかけとなり, その後も特に欧米において, Sモデルを考慮した温帯低気圧の構造及び Life Cycle に関して様々な議論がなされている. 例えば Hines and Mechoso (1993) は, 地表面摩擦の違いが低気圧の構造にどんな影響を及ぼすのかについて数値実験を行い, 海上のように地表面摩擦が弱いところでは Sモデルの特徴が明瞭であるこ

とを示した.

近年では, 低気圧の構造の多様性は低気圧よりもさらにスケールの大きな流れの違いに起因するという研究がなされている. Schultz *et al.* (1998) は, 低気圧の背景風が分流型の場合には Nモデルの特徴が, 合流型の場合には Sモデルの特徴がそれぞれ見られたと主張した.

また, Shapiro *et al.* (1999) は大規模場の流れの南北方向のシアアのの違いによって, 異なった低気圧が出現することを示した. 彼らによると, まず大規模場の流れの南北シアアが無い場合には, Sモデルの特徴を持つ低気圧が現れた. 次に, 大規模場の流れに高度に依らず 2000 km につき 40 ms⁻¹ の低気圧性南北シアアがある場合には, Nモデルに似た特徴を持つ低気圧が見られた. 最後に, 同程度の強さで反対に高気圧性シアアがある場合には閉塞前線が無く寒冷前線は長く明瞭で, 温暖前線は短く弱いという特徴を持った低気圧が現れた. さらに彼らは, この結果を基にジェット(亜熱帯及び寒帯)の位置と上述の低気圧との関係を模式図に示した.

これらの研究については, 例えば, 小倉 (2000) に詳しく説明されているので, そちらを参照されたい.

1.3 研究目的

Sモデルを取り扱った研究については, 前節で紹介したものをはじめ, 大部分が米大陸東岸の低気圧を題材にしたものである. もちろん, Sモデル自体が米大陸東岸の低気圧の観測を基に作られたものであるのが当然といえば当然であるが, 日本周辺(北西太平洋)についても, 大陸の東岸に位置することや大規模な暖流

の存在(黒潮), ストームトラックの入口などの点で米大陸東岸と条件はよく似ており, 同様の低気圧が観測されても不思議ではない. Sモデルが確立する前に, Nakamura *et al.* (1986) は1979年冬の北半球の低気圧に伴う前線を TFP (後述) を用いて解析を行い, 日本東岸と北米東岸では温暖前線が寒冷前線に比べて短いことを指摘し, Nモデル以外の低気圧モデルの必要性を指摘している. しかしながら, 日本周辺の温帯低気圧の研究で Sモデルが考慮されているものは, 事例解析が多少あるものの(例えば, Takano, 2002; 北島, 2000など), 体系的に Sモデルを取り扱ったものは少ない.

そこで本研究では, 後述する高解像度の ECMWF 客観解析データ (2000年2月7日~3月10日) を用い, まず日本周辺で Sモデルのような発達をする低気圧があるのかどうかを調べた. この期間中の8つの低気圧の中で, 2月7日から8日にかけて日本の東海上で発達した低気圧が典型的な Sモデルの特徴を持っていたので, この低気圧に伴う前線に関して前線形成関数の計算を行い, Sモデル型低気圧の前線形成の特徴を調べた. また, この低気圧と大規模場との関連についても少し述べる.

2. 使用データ及び解析手法

2.1 使用データ

本研究では高解像度の ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 客観解析データを使用した. このデータの期間は2000年2月7日から同年3月10日までの33日間, 時間間隔は6時間毎で00 UTC (Universal Time Coordinated: 協定世界時), 06 UTC, 12 UTC, 18 UTC の1日4回である. また, データの範囲は, 東西方向が99°E から180°Eまで, 南北方向が19.125°N から60.75°Nまでで, 水平解像度は $0.5625^\circ \times 0.5625^\circ$ である.

2.2 解析手法

2.2.1 TFP

一般に天気図上の前線は予報官の主観解析によって決定されるが, これを客観的に決定するための指標として, 本研究では TFP (Thermal front parameter) (Renard and Clarke, 1965) (ただし, Renard and Clarke (1965) 中では $GG\theta$: *the directional derivative of the gradient of θ along its gradient* と表記) を用いた.

$$TFP = -\nabla_h |\nabla_h \theta| \cdot \frac{\nabla_h \theta}{|\nabla_h \theta|} \quad (1)$$

ここで, θ は温位, $\nabla_h = i\partial/\partial x + j\partial/\partial y$ である. ただし, i は東向き, j は北向きの単位ベクトルを, それぞれ表す.

2.2.2 前線形成関数

前線の強化を量的に表す物理量としては, 一般に温位の水平傾度の時間微分をとったものが知られ, これは前線形成関数 (frontogenetical function) (例えば小倉, 2000) と呼ばれている. 本研究ではこれを使用した.

$$F \equiv \frac{d}{dt} |\nabla_h \theta| \quad (2)$$

前線の強化及び弱화가どのような要素によって生じているかを調べるため, 式 (2) を以下のように分解する.

$$F = \text{合流項} + \text{水平シア一項} + \text{傾斜項} + \text{非断熱項} \quad (3)$$

ここで,

$$\text{合流項} = -\frac{1}{|\nabla_h \theta|} \left\{ \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 \frac{\partial u}{\partial x} + \left(\frac{\partial \theta}{\partial y} \right)^2 \frac{\partial v}{\partial y} \right\}$$

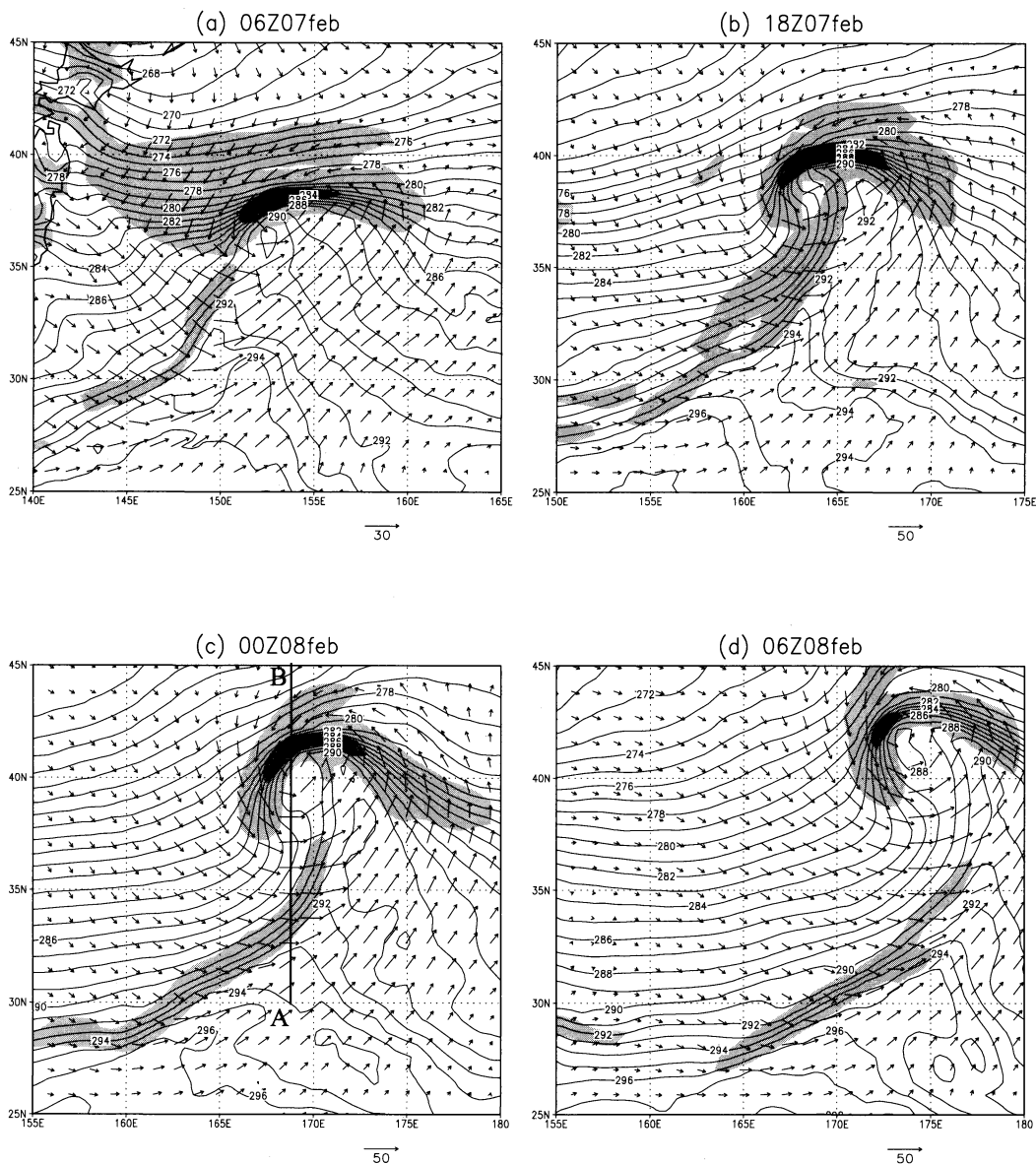
$$\text{水平シア一項} = -\frac{1}{|\nabla_h \theta|} \frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial y} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

$$\text{傾斜項} = -\frac{1}{|\nabla_h \theta|} \left(\frac{\partial \theta}{\partial p} \right) \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{\partial \theta}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial y} \right)$$

$$\text{非断熱項} = \frac{1}{|\nabla_h \theta|} \left\{ \frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{d\theta}{dt} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial y} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{d\theta}{dt} \right) \right\}$$

である. 記号は慣習に従い, ω は鉛直 p 速度である. ただし, 非断熱項における非断熱加熱 $d\theta/dt (= \dot{Q})$ はデータから直接求めることはできないため, $\partial\theta/\partial t + \mathbf{v} \cdot \nabla\theta = d\theta/dt (= \dot{Q})$ を計算することで見積もっている. ここで, \mathbf{v} は3次元の速度である. この計算において $\partial\theta/\partial t$ は, その求めたい時刻の前後の時間のデータを用いた中央差分で計算し, $\mathbf{v} \cdot \nabla\theta$ は, その値を求めたい時刻を t とすると, $(\mathbf{v} \cdot \nabla\theta)_{t-1} : (\mathbf{v} \cdot \nabla\theta)_t : (\mathbf{v} \cdot \nabla\theta)_{t+1} = 1 : 2 : 1$ の加重平均をとって計算しているが, 前述したように使用データの時間間隔が6時間であるため, 多少見積もりが粗くなっている点はあらかじめお断りしておく. なお, 上に示した前線形成関数の各項の物理的説明については, 小倉 (2000) を参照されたい.

また, $|\nabla_h \theta|$ の移流による前線の発展を見るため, $\mathbf{v} \cdot \nabla |\nabla_h \theta|$ を計算した. さらにこの移流の効果と前線形成



第2図 本低気圧の925 hPaにおける $|\nabla_h \theta|$ ・温位・水平風の場合。いずれも実線は温位（コンター間隔は1 [K]）、薄い陰影は $|\nabla_h \theta|$ が2 [K/100 km]以上の部分、濃い陰影は同じく6 [K/100 km]以上の部分、ベクトルは水平風（単位はm/s）を表す。(a)は2月7日06 UTC、(b)は2月7日18 UTC、(c)は2月8日00 UTC、(d)は2月8日06 UTCのもの。ただし、図示される経度帯が時刻に依り異なることに注意。

関数との和を計算し、局所的な前線発展を調べた(式(4))。

$$\frac{\partial}{\partial t} |\nabla_h \theta| = \frac{d}{dt} |\nabla_h \theta| - \mathbf{v} \cdot \nabla |\nabla_h \theta| \quad (4)$$

なお、式(4)左辺はデータから直接 $|\nabla_h \theta|$ の時間差分を計算することで求めることもできるが、上に述べた

ように、データの時間間隔が6時間であるので見積りが粗くなる。一方で、式(4)右辺の2項は、本小節の通りその大部分が求めたい時刻のデータをそのまま用いて計算できるため、より正確な見積りが可能である。よって本研究では $\partial |\nabla_h \theta| / \partial t$ について式(4)による計算を行った。

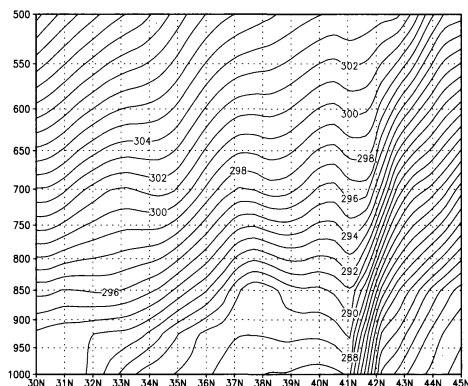
3. 結果

本研究で使用したデータの期間中に日本付近を通過した低気圧のうち、ある程度発達したものは8つであった(ただし、その判断基準は主観による)。その中にSモデルの特徴をはっきり示した低気圧が存在したので、本論文では、この低気圧に関して解析を行った結果を詳しく説明する。

また、本論文では前線を表す用語について、「前線」、「前線帯」、「前線面」の3つを明確に使い分けることとする。この3用語のうち「前線帯」と「前線面」は本来の意味で用いる。「前線帯」は暖気と寒気の境界部にある水平方向の温度傾度がある程度以上大きい部分であり、「前線面」は前線帯の特に暖気側の境界面のことを指す。なお、2.2節で説明したように、前線面はTFPで表現される。一方、「前線」については便宜上、多少厳密な定義から離れた意味で使用する。前線の厳密な定義は前線面と地表面が交差する場所に引く線であるが、本論文では広義の前線の意味、つまり上述の前線帯と前線面をまとめて表現する場合に用いることとする。

第2図は、本論文で注目する低気圧の925hPa面における $|\nabla_n \theta|$ 及び温位、風の場合を低気圧の発達初期、発達中期1、発達中期2、最盛期の順に並べたものである。ただし、データ範囲の都合上、発達初期と最盛期は必ずしもその通りになっているわけではない。第2図をSモデルと比較すると、この低気圧では寒冷前線の温度傾度が弱いため、(b)においては低気圧中心付近で温度傾度が弱まるという本来の意味での前線断裂ではないが、連続であった温暖前線と寒冷前線が寒冷前線が東にずれる形で断裂しており、Sモデルの前線断裂に似た現象が見られたと言ってよい。また後述する通り、温暖前線と寒冷前線の交点より西の前線は閉塞前線とは異なっており、後屈温暖前線である。この後屈温暖前線の形成により、この時刻から前線のTポーン模様が見られるようになっていく。(c)においては温暖前線及び前述の後屈温暖前線と寒冷前線によりさらに顕著なTポーン模様が見られ、Sモデルの発達中期に見られるような低気圧中心付近で寒冷前線の温度傾度が弱まる現象も認められる。(d)は完全には最盛期とは言いがたいため顕著ではないが、低気圧中心付近の等温線が閉じており、温暖核の存在が認められる。

次に、後屈温暖前線が最も顕著であった時刻における後屈温暖前線を横切る鉛直断面の温位を示したもの



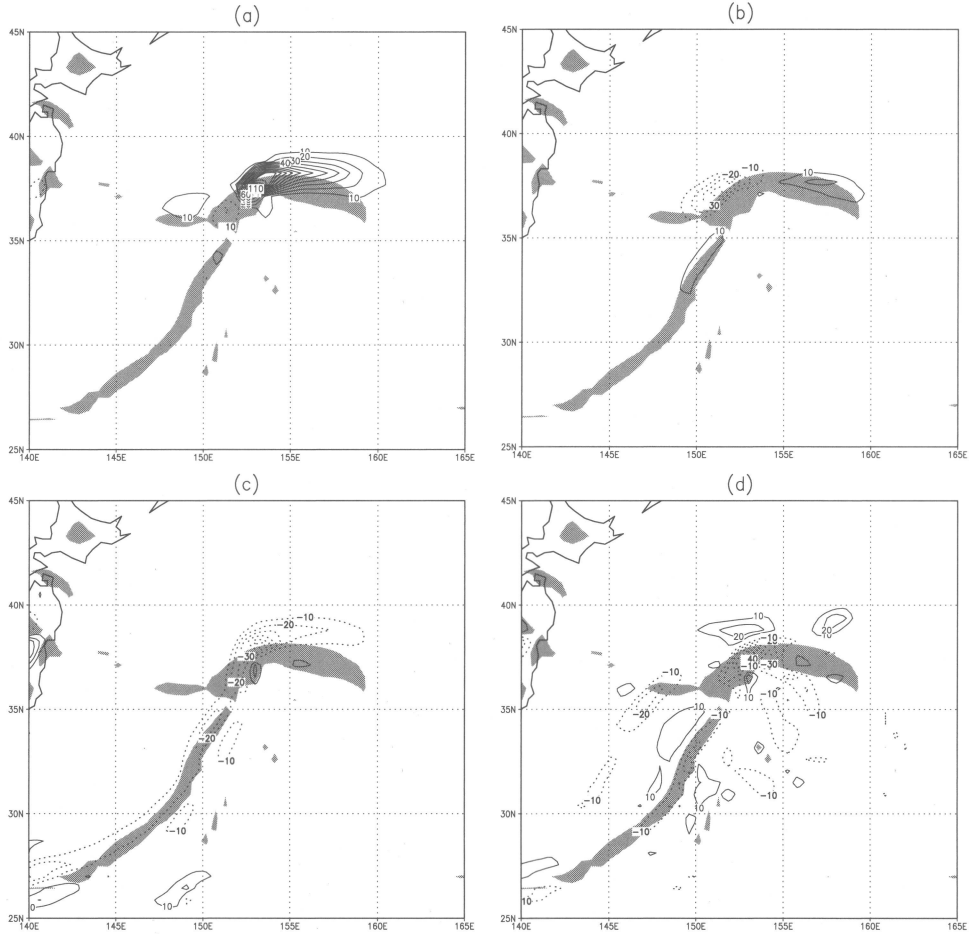
第3図 後屈温暖前線を横切る鉛直断面図。実線は温位(単位はK)を表す。縦軸は高度(単位はhPa)。断面は第2図(c)中のA-Bに対応する。

が第3図である。この図における41-42°N付近の温位傾度が大きい部分が後屈温暖前線であり、Nモデルで説明されるような閉塞前線の構造は見られない。すなわち、この低気圧の温暖前線と寒冷前線との交点より西側の前線は閉塞前線ではなく、後屈温暖前線である。

以上から、この低気圧はSモデル型の低気圧であると言える。本研究で使用したデータの期間中においてこの低気圧以上にSモデルの特徴を示した低気圧はなかった。そこで本論文ではこの低気圧をSモデル型低気圧の典型例と考え、925 hPa面における、2.2節で説明した前線形成関数の各項の大きさと $|\nabla_n \theta|$ の移流を見ることにより前線の発展を調べた。

3.1 発達初期(2月7日06 UTC)

まず温暖前線において合流項の値が大きく出ている(第4図a)。一方低気圧中心付近で水平シア一項の負の値が見られ(第4図b)、傾斜項は全体的に前線弱화에働いている(第4図c)。非断熱項は低気圧中心付近に比較的大きな値(正負とも)が見られる他は目立った特徴は見られない(第4図d)。これらを合計すると(第5図)温暖前線の前方(東側)は強化され、中心付近は弱化されていることがわかる。一方、寒冷前線には目立った特徴はない。次に、第6図aと第2図aから、温暖前線では前方の温度傾度が低気圧中心から後方にかけて移流され、寒冷前線では前線帯に対応する温度傾度がそのまま前方(東方)へ移流されていることがわかる。ここで注意していただきたいのは、図の陰影で示しているTFPは、前述したように前線面を表しているということである。特に寒冷前線について、例えば第6図aではTFPと同じ場所に移流の値が出



第4図 2000年2月7日06 UTCの925 hPa面における前線形成関数の各項の値。実線は前線強化、点線は前線弱化（いずれも等値線間隔は $10[10^{-1}K/100 km \cdot 3 時間]$ ）を、陰影はTFP ($2 [K/(100 km)^2]$ 以上)を表す。(a)は合流項、(b)は水平シア項、(c)は傾斜項、(d)は非断熱項。

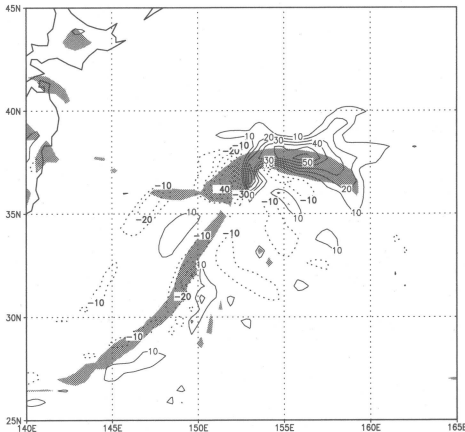
ており、一見前方へ移流されているようには見えないが、寒冷前線帯はTFPの値が出ているすぐ後方に存在しているため、上述の前線帯が前方に移流されていると言える。

これらをまとめると(第6図b)、前線形成関数で見れば温暖前線の前方は強化、低気圧中心部から寒冷前線との交点にかけては弱化されているが、低気圧の風によって前方の強い温度傾度が、前線弱化が起こっている部分に移流されてくることで前線が維持されているものと思われる。一方で寒冷前線はあまり強化あるいは弱化されずに前方に移流されていることがわかる。また第2図aでは、低気圧中心付近で温度傾度が多少ながら弱まっており、温暖前線と寒冷前線が分か

れつつあるように見える。これは前線形成関数がこの部分で弱化を示していることが関係していると考えられる。

3.2 発達中期1 (2月7日18 UTC)

この時刻になると温暖前線と寒冷前線は連続ではなくなっており、前線断裂に近い形となっている。前線形成関数は、合流項が温暖前線及び後屈温暖前線の前側で非常に大きな正の値を示しており(第7図a)、この部分の前線強化に大きく寄与していることがわかる。一方で後屈温暖前線後部では、逆に比較的大きな負の値を示している。また、水平シア項では(第7図b)温暖前線部に正の分布が見られ、寒冷前線との交点付近に負の分布が見られる。前者は前線形成に寄与



第5図 2000年2月7日06 UTCの925 hPa面における前線形成関数. 実線及び点線は第4図に同じ.

していると思われるが、後者は同じ位置の合流項の値が非常に大きいので合計すると打ち消される。また、寒冷前線については前線面 (TFP) 付近の合流項及び水平シア項の正の値が傾斜項及び非断熱項の負の値で打ち消され、寒冷前線帯の非断熱項の正の値が傾斜項の負の値で打ち消される格好となり、前線形成関数全体で見るとさほど強化あるいは弱化されていない。以上を合計したこの時刻の前線形成は(第8図)、温暖前線及び後屈温暖前線の低気圧中心部より前方(東側)で大きく強化され、後屈温暖前線の後部で大きく弱化されるという特徴が顕著に現れている。 $|\nabla_h \theta|$ の移流では(第9図a)、温暖前線については前線形成関数とほ

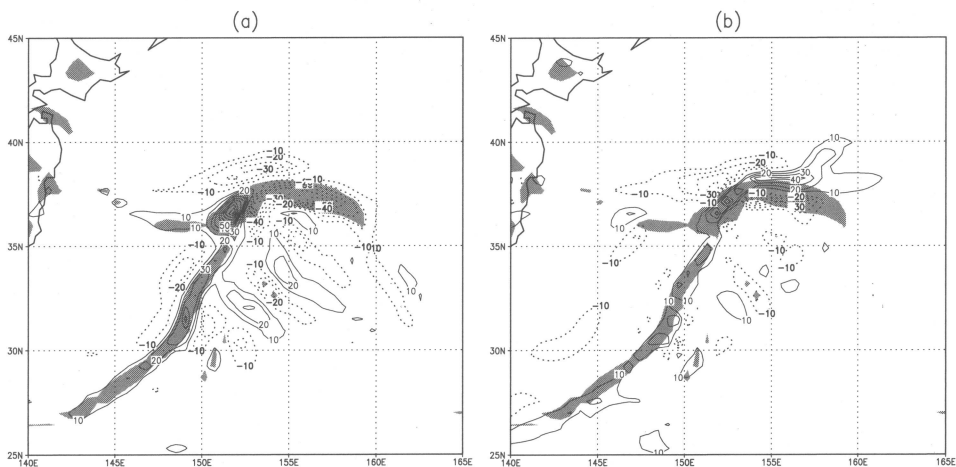
ぼ正負逆の分布となっており、風の分布から温暖前線及び後屈温暖前線前部の温度傾度が後部に移流していることがわかる。一方寒冷前線では前の時刻(06 UTC)と同様に前線が前方に移流していることがわかる。

これらを合計すると(第9図b)、温暖前線及び後屈温暖前線の前部は強化され、後屈温暖前線の後部は弱化されるが、温暖前線及び後屈温暖前線の前部から温度傾度が移流されてくる効果が大きいため、後屈温暖前線自体は維持、延伸されることがわかる。寒冷前線については、目立った強化あるいは弱化はなく前方に移流されているという06 UTCと同じ特徴が見られる。また、寒冷前線と温暖・後屈温暖前線との交点付近で負の値が分布しており、これは前線断裂傾向が見えているものと思われる。

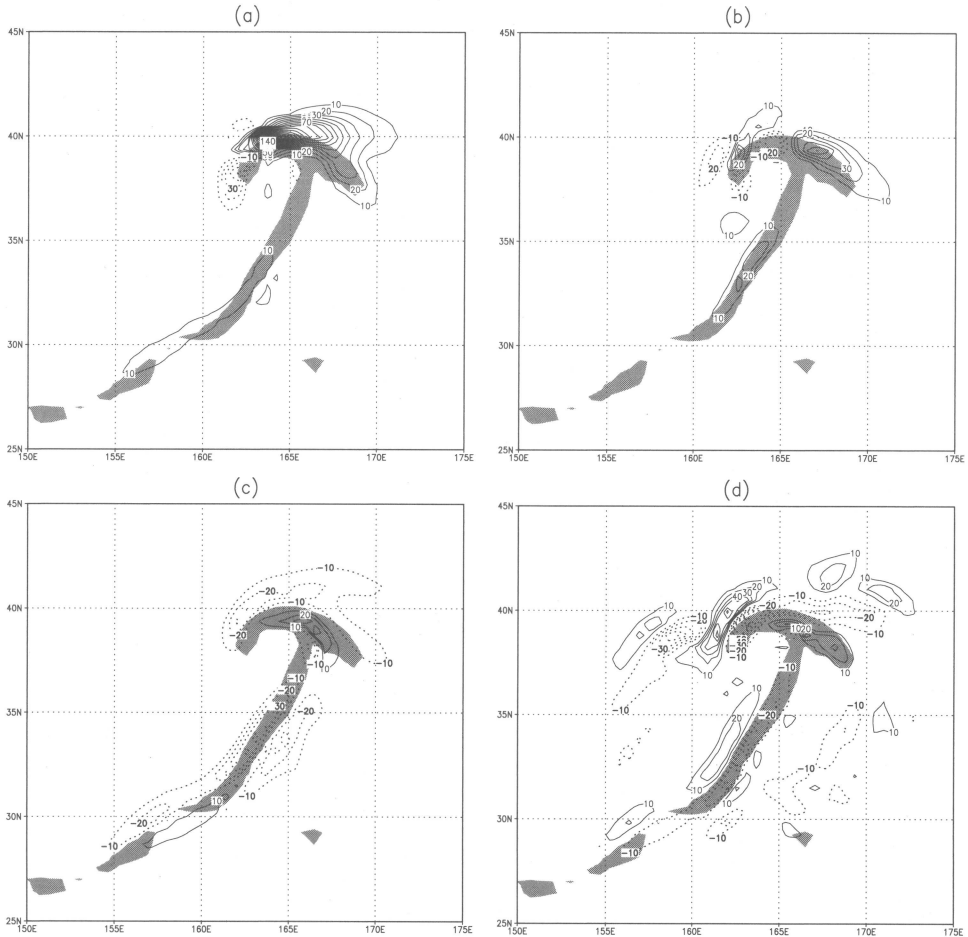
3.3 発達中期2 (2月8日00 UTC)

前の時刻よりも後屈温暖前線が延びており、前線のTポーン模様が顕著になっている(第2図c)。また、寒冷前線は相対的に東に進んでおり、前時刻に比べ温暖前線に近い部分の温度傾度が弱くなっている。なお、この時刻における低気圧周辺の衛星写真を第10図に示す。この衛星写真でも第2図(c)の前線帯に対応した雲域が見られている。これにより、ECMWFの客観解析データが現実在即していることが分かる。

前線形成については、この時刻における図は省略するが、温暖前線及び後屈温暖前線の前側が強化、後屈温暖前線の後側は弱化されており、寒冷前線においては4項の効果が互いに打ち消し合い、一部を除いて目



第6図 2000年2月7日06 UTCの925 hPa面における (a) $|\nabla_h \theta|$ の移流及び (b) $|\nabla_h \theta|$ の移流と前線形成関数の和. 実線及び点線は第4図に同じ.



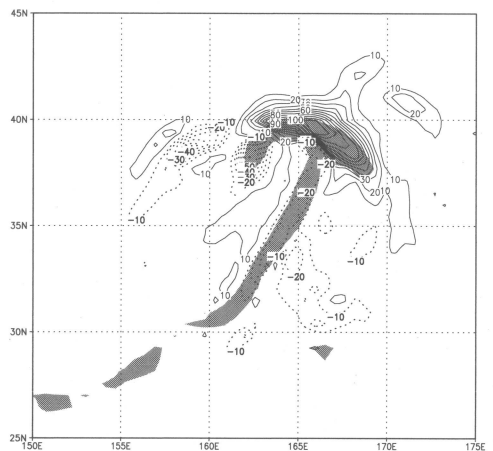
第7図 2000年2月7日18 UTC の925 hPa 面における前線形成関数の各項の値。第4図に同じ。

立った強化、弱化はないという前時刻（2月7日18 UTC）とほぼ同様の特徴を示していた。

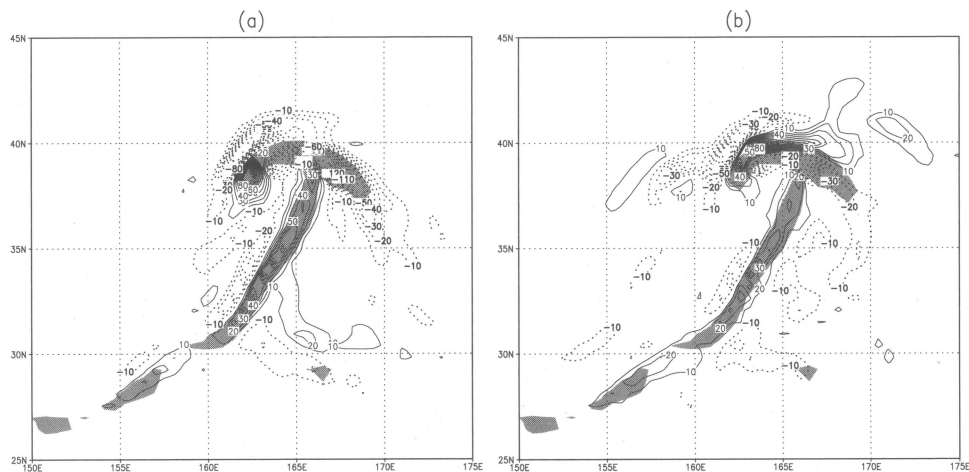
$|\nabla_h \theta|$ の移流についても前時刻と特徴は同じであるため詳しい説明は省略するが、この時刻においても温暖前線と後屈温暖前線の前部は強化され、その強化された温度傾度が弱化されている後屈温暖前線後部に移流してくることにより後屈温暖前線が維持、延伸しており、この点がSモデル発達期の特徴であると考えられる。

3.4 最盛期（2月8日06 UTC）

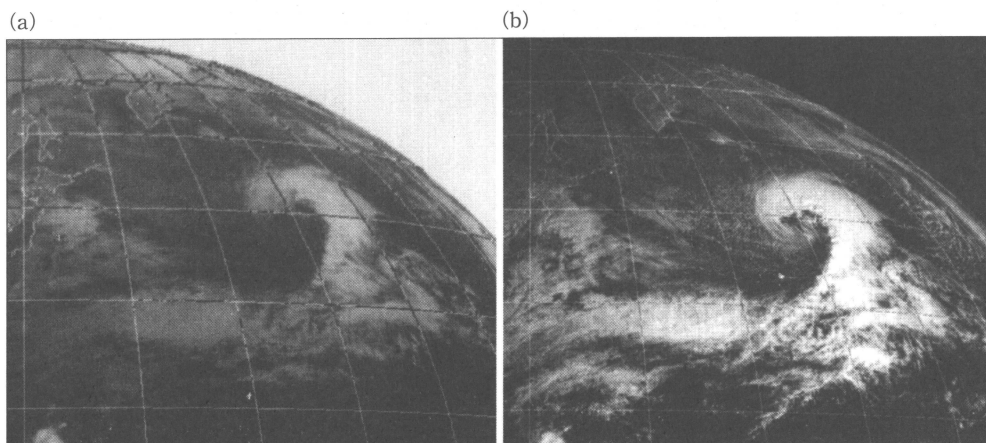
寒冷前線が前時刻に比べさらに（低気圧系に対し）東進し、後屈温暖前線は低気圧中心を囲むように延びている（第2図 d）。低気圧中心付近で等温線が閉じており、温暖核形成の兆候が見られる。ただし、データ範囲が180°E までであるため、温暖前線の一部が途



第8図 2000年2月7日18 UTC の925 hPa 面における前線形成関数。実線及び点線は第4図に同じ。



第9図 2000年2月7日18 UTCの925 hPa面における (a) $|\nabla_h\theta|$ の移流及び (b) $|\nabla_h\theta|$ の移流と前線形成関数の和。実線及び点線は第4図に同じ。



第10図 2月8日00 UTCにおける低気圧周辺の衛星画像。(a) 赤外画像, (b) 可視画像 (気象庁提供)。

切れてしまっている。

温暖前線及び後屈温暖前線の前線形成関数は、前時刻に比べ値が正負ともに多少小さくなっているものの特徴は同じである(図略)。寒冷前線では各項の大きさは正負とも前時刻よりも若干大きな値を示しているが、合計するとやはり打ち消され、これまで同様目立った特徴は見られない。 $|\nabla_h\theta|$ の移流の効果や、前線形成関数との合計についても基本的な特徴は前時刻と変わらないが、低気圧後部に延びた後屈温暖前線帯が低気圧中心を巻き込むように移流している様子が見られる(図略)。

3.5 まとめ

本節初めでも説明した通り、この低気圧は発達過程全体を通してSモデルの特徴(前線断裂、後屈温暖前線、前線のTボーン模様、温暖核)を持っていた。ただし、寒冷前線の温度傾度が弱かったことや、そのためにはっきりとした前線断裂は見られなかったことなど、Sモデルとの多少の差異が見られた。しかしながら、このことはTakano (2002)のSモデルに類似する特徴を持った低気圧でも認められ、またSchultz *et al.* (1998)がNモデルとSモデルを温位場で特徴付けた図(第1図)にも対応していることから、実際に現れるSモデル型の低気圧は本論文で取り上げた低気

圧のようなものの方が多いのかも知れない。

前線の発展については、発達初期においては温暖前線の前方で大きく強化され、それは特に合流による効果が大きいことがわかった。逆に温暖前線と寒冷前線が接するあたりで前線弱화가起きているが、この部分に前方の強い温度傾度が移流してくるにより前線が維持されていた。一方で寒冷前線は温暖前線に比べ、さほど強化あるいは弱体化はされずに前方に移流されているようであった。この時刻の $|\nabla_h \theta|$ と風の分布からもすでに温暖前線と寒冷前線がほぼ別の系となっている様子が見られ、これが前線断裂の兆候であったと考えられる。

後屈温暖前線の形成後はどの時刻でも前線発展の特徴は基本的に同じであった。温暖前線及び後屈温暖前線前部は大きく強化され、これも合流の効果が大きかった。逆に、後屈温暖前線の後部は弱体化されていた。しかし、この部分に前方から強化された温度傾度が移流してくるため、後屈温暖前線が維持、延伸されていたことがわかった。また、この温度傾度の移流に関して、当低気圧では水平移流の効果が鉛直移流のそれに比べ、桁違いに大きい値であった(図略)。寒冷前線については全ての時間で目立った強化、弱体化は無く、移流によって前進していることがわかった。このことと温暖前線部が特に合流の効果によって強化されていることはこの低気圧の Life Cycle を通しての共通事項であった。

なお、詳しい結果は省略するが、同様の解析を上層(850 hPa 面, 700 hPa 面)の前線に関しても行った。850 hPa 面については、これまでに述べてきた925 hPa 面での解析結果とほぼ同じ特徴であった。700 hPa 面では、前線が特定しづらいこともあり、前線形成関数の分布は多少複雑であったが、基本的な傾向は925 hPa 面と同じであった。ただ、合流項、水平シア一項といった水平流による前線形成への寄与は非常に小さく、傾斜項や非断熱項による寄与が大きいことが特徴的であった。

また、大規模場の流れとの関係を見るため、300 hPa と1000 hPa のジオポテンシャル高度を比較した(第11図)。ここで300 hPa 面のジオポテンシャル高度については、大規模場の流れを明確にするため東西方向、南北方向ともに35グリッド(0.5625°×35≒20°)のハミングウィンドウをとり、空間的に平滑化している。(ハミングウィンドウについては、例えば、萩原・糸田, 2001)。一方、1000 hPa 面のジオポテンシャル高度について

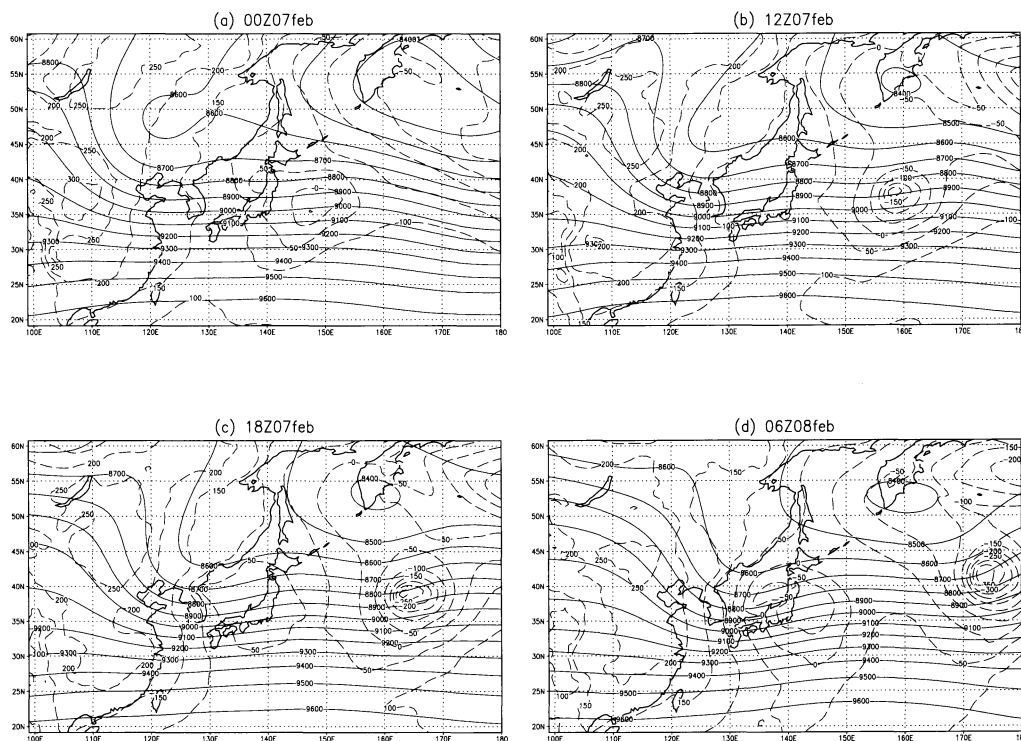
は、低気圧の位置を示すことが目的であるため、特に操作は行っていない。これを1.2節で紹介した Shapiro *et al.* (1999) の大規模場の流れの南北シアーという視点から見ると、最盛期(2月8日06 UTC)を除き、他の閉塞前線様の前線を伴っていた低気圧(後述)の場合に比べて大規模場の流れの南北シアーは弱く、Shapiro *et al.* (1999) の主張はこの低気圧に当てはまっていると言える。一方で、同じく1.2節で紹介した Schultz *et al.* (1998) の合流・分流の視点では、最盛期以外は低気圧直上の強い流れと、極側からの流れが合流する地点の入口付近に位置しているように見えなくはない。しかしながら合流域は低気圧のかかなり上流に位置しており、彼らの主張に関しては当低気圧にそれほど一致するものではなかった。

4. まとめと議論

本研究では、高解像度の ECMWF 客観解析データを用い、日本周辺で発達する温帯低気圧について、特に前線形成に注目した解析を行った。上記データの期間中にある程度以上発達した温帯低気圧は8つであったが、この内、2000年2月7日から8日にかけて日本の東海上で発達した低気圧がSモデルによく似た Life Cycle を示したので、本論文ではこの低気圧を紹介した。

この低気圧では、発達初期には連続であった温暖前線と寒冷前線が、発達の途中で寒冷前線が東にずれる形で断裂し、Sモデルの前線断裂と思われる現象が認められた。また、この段階における温暖前線と寒冷前線の交点以西の前線の鉛直断面は、閉塞前線の構造を示しておらず、Sモデルの後屈温暖前線に近い構造を示していた。発達中期には、温暖前線及び後屈温暖前線と寒冷前線により、顕著な前線 T ボーン模様が見られた。これらから、この低気圧は日本周辺における S モデル型低気圧の典型例と考えることができる。この低気圧について詳しく解析を行ったところ、以下のような特徴が見られた。

- 発達初期から温暖前線が明瞭で、その温度傾度も非常に強かった。
- 発達過程全体を通して温暖前線と後屈温暖前線の東側は大きく強化されていた(特に合流項の寄与が大きかった)。
- 後屈温暖前線の西側は弱体化されていた。
- 後屈温暖前線は東側で強化された温度傾度が西側に移流されることで維持・延伸されていた。



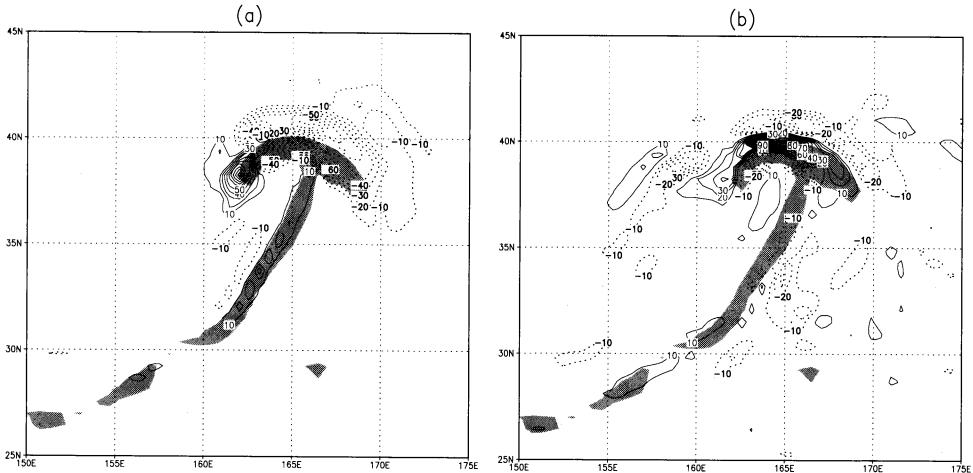
第11図 本低気圧の地上低気圧と大規模な流れの場との関係。実線は300 hPa 面、破線は1000 hPa 面のジオポテンシャル高度を表す。(a) は2月7日00 UTC, (b) は2月7日12 UTC, (c) は2月7日18 UTC, (d) は2月8日06 UTC。ただし、300 hPa 面については東西方向、南北方向ともに35グリッド ($0.5625^\circ \times 35 = 20^\circ$) のハミングウィンドウをとり、空間的に平滑化したもの。

- 寒冷前線の温度傾度は比較的弱かった。
- 寒冷前線は特に強化も弱化もされず移流によって東進していた。
- 大規模場の流れとの関係は Shapiro *et al.* (1999) の主張とほぼ一致して、大規模合流場で西風の南北シアーが弱い場にあったが、Schultz *et al.* (1998) との一致は完全ではなかった。

この中でも、後屈温暖前線の発達について、西側では前線形成の各要素は前線弱화에働いているにも関わらず、東側の強い温度傾度が流されてくることにより、前線が維持・延伸されるというメカニズムがわかったということは特筆すべき点である。また数値実験において、Takayabu (1986) が低気圧中心の北側に温暖前線、寒冷前線とは別の強い前線（後屈温暖前線と考えられる）が存在することを示唆し、その前線は前部で強化された温度傾度が後部に移流されて形成されることを示している。これに類似した現象がこの度、客観解析データではあるが、実際の低気圧でも確認できたといえる。なお、本研究では $|\nabla_n \theta|$ の移流について地上

に固定した座標系で計算したが、当低気圧は平均速度約21 m/s で東北東進していたので、低気圧に相対的な座標系で見ると立場もある（上に紹介した Takayabu (1986) ではこの座標系で議論している）。そのような立場で計算した $|\nabla_n \theta|$ の移流及びそれと前線形成関数との和を第12図に示す（時刻は2月7日18 UTC）。この座標系では、寒冷前線帯の移流が小さい点と、低気圧北西部に負の移流が見られない点が地上に固定した座標系での場合（第9図）と異なっていることが分かる。これらの違いの原因は、前者については、低気圧に相対的な座標系では西風が弱くなる為であり、後者については、地上に固定した座標系では低気圧西側で北風が等温位線を横切って吹き、北の温位傾度の小さい空気が移流されるが、一方、低気圧に相対的な座標系ではその場所で北東風となり、等温位線とほぼ平行に吹くので、温位傾度の移流が小さくなる為である。しかしながら、座標系の違いによる特徴の大きな差は見られず、本質的な違いはないものと考えられる。

また、誌面の都合上紹介することができなかったが、



第12図 $|\nabla_h \theta|$ の移流を低気圧に相対的な座標系で計算した以外は第9図に同じ。

他の低気圧では閉塞前線の構造に似た構造の前線を伴っていたものが多かった。しかしながら、発達初期には2つの前線系が存在し、一方の前線は後屈温暖前線の特徴を持っていた例や、発達初期あるいは閉塞前線形成後にSモデルの特徴を示した例など、典型的なNモデル型のLife Cycleを示した低気圧は皆無であった。また、大規模場との関連については、Schultz *et al.* (1998), Shapiro *et al.* (1999) の主張と大きく異なっていた。

閉塞前線の構造が確認された低気圧は、発達初期に2つの前線系が存在したり、二つ玉低気圧であったりと、その発達過程は様々であったが、初期の温暖前線の温度傾度が弱く、前線面が不明瞭であったという共通点を持っていた。このことは、Schultz *et al.* (1998) の分類図(第1図a)にも描かれているように、低気圧の気圧場を南北方向に長く変形させる。これにより寒冷前線が温暖前線に追い付くという流れが起きているものと考えることができる。反対に、本論文で議論した低気圧のように初期の温暖前線が強く明瞭であれば、第1図bのように気圧場が東西に長くなる。このため、後屈温暖前線を西に延ばし、かつ寒冷前線を(温暖前線に垂直に)東進させるという流れが起きていると考えることができる。

最後に、本研究で注目した期間は、使用データの期間の1か月である。この短い期間の解析結果のみから、日本周辺では典型的なNモデル型の低気圧は現れないと考えることは当然できない。1年を通して詳細な解析を行った上でどのような低気圧がどのような条件

で現れるのかを調べる必要があり、それは今後の課題である。ただ、Life Cycleの全体や一部でSモデルの特徴を持つ低気圧が日本周辺でも存在することは本研究で確認できたので、今後日本周辺の低気圧の研究においてSモデルを体系的に考慮した研究が増えることを期待したい。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、北海道大学大学院地球環境科学研究科の久保川 厚教授、渡部雅浩助教授、北海道大学低温科学研究所の藤吉康志教授には非常に有益なご助言をいただきました。ならびに、2人の査読者及び担当編集委員の中村 尚氏には多くの有益なコメントをいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- Bjerknes, J. and H. Solberg, 1922: Life cycle of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation, *Geophys. Publik.*, 3 (1), 1-18.
- 萩原幸男, 糸田千鶴, 2001: 地球システムのデータ解析, 朝倉書店, 154pp.
- Hines, K. M. and C. R. Mechoso, 1993: Influence of surface drag on the evolution of fronts, *Mon. Wea. Rev.*, 121, 1152-1175.
- 北島尚子, 2000: 日本海で閉塞した低気圧の構造と変化, *天気*, 47, 357-370.
- Nakamura, H., T. Toyota and M. Ohbayashi, 1986: Geographical distribution of the ratio of lengths of warm fronts to cold fronts in the northern hemi-

- sphere during 1978-1979 winter, *J. Meteor. Soc. Japan*, **64**, 519-529.
- 中村 尚, 高薮 出, 1997 : Shapiro の新しい前線・低気圧モデル, *天気*, **47**, 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.
- 小倉義光, 2000 : 総観気象学入門, 東京大学出版会, 289 pp.
- Renard, R. J. and L. C. Clarke, 1965 : Experiments in numerical objective frontal analysis, *Mon. Wea. Rev.*, **93**, 547-556.
- 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.
- 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, Bao, J.-W., J. Methven, X. Zou, J. Doyle, T. Holt, E. Donall-Grell and P. Neiman, 1999 : A planetary-scale to mesoscale perspective of the life cycle of extratropical cyclones : The bridge between theory and observations, *The Life Cycle of Extratropical Cyclones*, M. A. Shapiro and S. Grønås, Eds., *Amer. Meteor. Soc.*, 139-185.
- Takano, I., 2002 : Analysis of an intense winter extratropical cyclone that advanced along the south coast of Japan, *J. Meteor. Soc. Japan*, **80**, 669-695.
- 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.

A Case Study on a Shapiro-type Extratropical Cyclone Developed around Japan from a Viewpoint of Frontogenesis

Tomohiko TSUMURA* and Koji YAMAZAKI*

* *Graduate School of Environmental Earth Science, Hokkaido University, Sapporo, 060-0810 Japan.*

(Received 5 April 2004 ; Accepted 10 November 2004)

Abstract

A typical life cycle of an extratropical cyclone has been described by a classical cyclone model developed by the Bergen school. Recently, a new cyclone model was proposed by Shapiro and co-researchers based on special observation campaigns conducted off the east coast of the U. S. In this work, we analyze extratropical cyclones developed around Japan during the period from February 7, 2000 to March 10, 2000, focusing on their frontogenetical aspects. It is found that one of the 8 cyclones observed during the period exhibited characteristics typical for the Shapiro-type cyclone development including a frontal fracture, a bent-back warm front, frontal T-bone and warm-core seclusion. The particular cyclone had no occluded front that characterizes the classical cyclone model. The temperature gradient across the warm front of this cyclone was intensified throughout

the life cycle, while the cold front was simply advected eastward. The rear side of the bent-back warm front was maintained and extended backward by the advection of the intensified temperature gradient by an easterly wind along the warm front. The large-scale background flow for this cyclone development was characterized by a weak meridional shear of westerly wind, in accordance with a condition for the Shapiro-type cyclone development as pointed out by previous studies.

事務局だより

住所の変更届け等に関するお願い

1. 住所の変更届けは早めをお願いします。

春は異動の季節です。毎年4月初めは転勤・転居と「天気」の発送が交錯して差し戻しが数多く出ており、旧勤務地の方々には転送手続き等の迷惑を掛けることにもなっています。それらを防ぐために、事務局でも各支部を通じて異動状況を早めに把握するように努めています。各会員におかれても転勤等による住所の変更届けを早めに事務局まで連絡して頂くようお願いいたします。

特に、3月末から4月初めの異動の方には新勤務地(新住所)に「天気」をお届け出来るよう、できるだけ早く(3月20日頃迄)下記の事務局まで、「会員番号」、「氏名」、「旧勤務地(旧住所)」、「新勤務地(新住所、電話番号等)」をメール等で連絡頂くようお願いいたします。

なお、市町村の合併による住所の変更についてもご連絡いただくようお願いいたします。

2. 2005年の個人会費の納入はお済みでしょうか。

会費の納入方法が「郵便振込票」で、まだ2005年会費を納入されていない方へのお願いです。納入が遅れますと機関誌の発送が停止となりますので、まだの方は急ぎ納入いただくようお願いいたします。

3. その他

「気象研究ノート」等のバックナンバー(在庫数は第52巻1号に掲載)の購入申し入れにもメールをお気軽にご利用下さい。

日本気象学会事務局

tel: 03-3212-8341 (ext2546)

fax: 03-3216-4401

e-mail: metsoc-j@aurora.ocn.ne.jp

月例会「第49回山の気象シンポジウム」のお知らせ

日時: 2005年6月18日(土) 13時30分から
 場所: 品川区立総合区民会館(きゅりあん)
 5階第2講習室
 (東京都品川区東大井5-18-1)
 JR 京浜東北線大井町駅東口すぐ前

講習希望の方は演題に200字以内のアブストラクトをつけて4月末までに下記に郵送して下さい。

記

〒182-0036 東京都調布市飛田給2-26-25

小岩 清水気付 山の気象研究会