

## 日本気象学会1997年度春季大会特別招待講演

## 「雲過程と陸面過程—21世紀への展望—」より

## 1. 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

キース・ブラウニング\*

## 1. はじめに

通常、低気圧の構造を考える時真っ先に頭に浮かぶのは、湿った空気の上昇と雲とであろう。しかしそれでは、物事の半分しか見ていない。本講演では、乾燥貫入 (dry intrusion)、すなわち低気圧近傍の下層に下降してくる極めて乾燥した空気に焦点を当てることとする。この乾燥空気は3次元の等温位面内を下降する空気の軌跡によって第1図のように可視化される (Danielson, 1964)。この乾燥空気は、「圏界面の折り込み」が起こっている場所付近に起源を持ち、寒冷前線の後方を地表に向かって広がりながら下降している。Wernli (1995) は、この乾燥空気の起源の一部は成層圏にあるが、大部分は圏界面で折り込まれた対流圏側の空気であるという解析結果を得た。

厳密に言えば、乾燥空気の動きはケース毎に異なる。例えば Thorncroft *et al.* (1993) は、周囲の場の帯状風のシア (zonal shear) が低気圧性か高気圧性かによって、乾燥空気の動きも左右されると述べている。成層圏起源の空気は大きな渦位 (渦位2 PVU 以上) (訳者註: 1 PVU は  $10^{-6} \text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{Kkg}^{-1}$  であり、対流圏ではおおむね2 PVU 以下であり、成層圏では2 PVU 以上になる) を持つが、5節で示すようにこれは乾燥貫入の極く一部を構成するのみである。乾燥貫入の極めて重要な特性は、湿球温位 ( $\theta_w$ ) が低いことである。この特性が対流不安定及び対流の発生と密接に関連して

いることについては4節と6節で述べる。

乾燥貫入は低気圧の発達に伴って極めて特徴的な変化を示し、低気圧が発生した後ならば、水蒸気画像 (WV)、赤外画像 (IR)、そして時には可視画像 (VIS) でも乾燥した細長い溝状の領域 (ドライスロット) として見る事ができる (第2図参照)。ドライスロットが発達する以前には、赤外画像や可視画像では乾燥貫入を見ることはできないが、水蒸気画像ではドライスロットが出現する1日前から、暗域 (dark zone) が次第に広がっていく様子を追跡できる (Smigielski and Ellrod, 1985; Young *et al.*, 1987; Weldon and Holmes, 1991)。第2図に示したように、ドライスロットは、寒帯前線 (polar front) 上の雲頂高度の高い雲バンドと、寒域側に存在する「雲域の頭部」 (cloud head) として知られている若干背の低い雲との間に挟まれている。乾燥貫入とこれらの雲域内の気流との関係については2節で詳しく述べる。

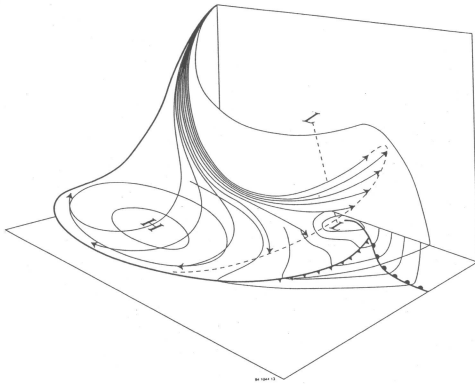
## 2. 乾燥貫入と上昇する湿った空気との関係

乾燥貫入は、第3図に示したように、第0次近似では低気圧中心に対して対称的な2つの循環のうちの一方として描くことができる。乾燥貫入は下降しながら地上寒冷前線の後方で扇状に広がる。他方、滑昇する湿った空気は対流圏中層から上層で、外側にふくらんだ「雲域の頭部」の端に向かって扇状に広がる。これらの2つの流れは低気圧の中心 (L) で交叉し、そこでは乾燥貫入の一部 (低い  $\theta_w$ ) が、湿った空気 (高い  $\theta_w$ ) の上を這い昇る。この這い昇った乾燥貫入の先端部は、上空の寒冷前線 (upper cold front: UCF) と言われ

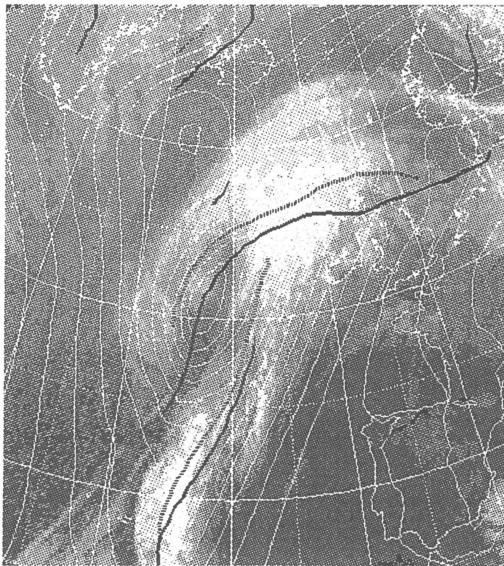
\* レディング大学、イギリス。

—1998年5月15日受領—

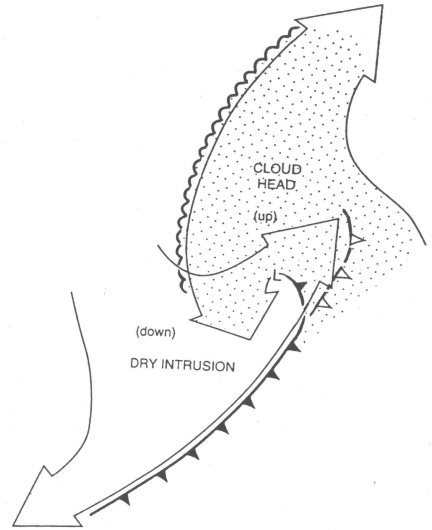
—1998年11月12日受理—



第1図 乾燥貫入の流れの3次元の図。矢印は圏界面近くの小領域を出発した気流の軌跡を表している。等温位面上を降りてきたこれらの気塊は図の左側の方では地面近くに達しているが、右側では地上の前線上を這い上っている (Danielsen 1964より)。



第2図 メテオサットによる赤外雲画像。寒帯前線の雲バンドと雲域の頭部に囲まれたドライスロットが見えている。重ねて描かれているのは英国気象局の局地モデル (例えば Hewson 1997を参照のこと) の3時間予報値で、白い等値線は海面気圧、黒い線は客観的に解析された前線である。このうち実線は地上前線で、破線は600 hPaでの前線の位置である。これを見ると雲の中の前線の傾きがわかる。

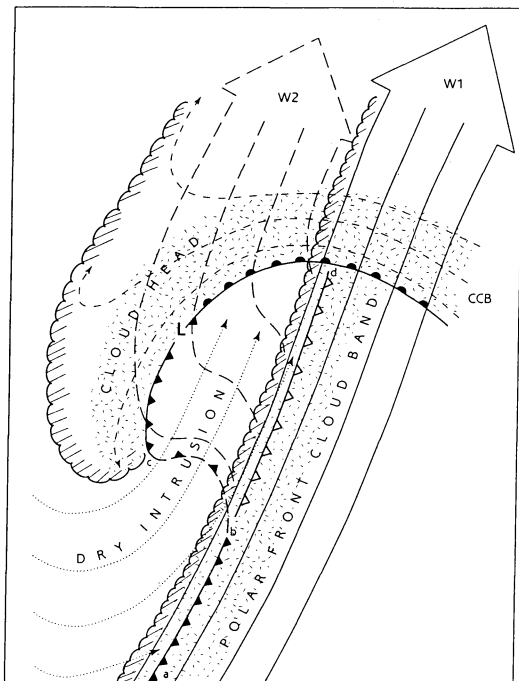


第3図 低気圧中心をめぐる対称的な2つの流れの模式図。乾燥貫入(白抜きの流れ)と、雲域の頭部に関連した湿った気流(陰をつけた流れ)。乾燥貫入の先端はそのほとんどの部分が地上寒冷前線に沿っている。またその一部は湿った流れに乗り上げており、上空の寒冷前線(白抜きの寒冷前線の記号)を形成している。

る中層から上層の寒冷  $\theta_w$  前線(湿度前線)を形成する。これら2つの扇状に広がる流れは、ストレッチング変形の大きさ次第で寒冷前線に沿ってのびたり縮んだりする。

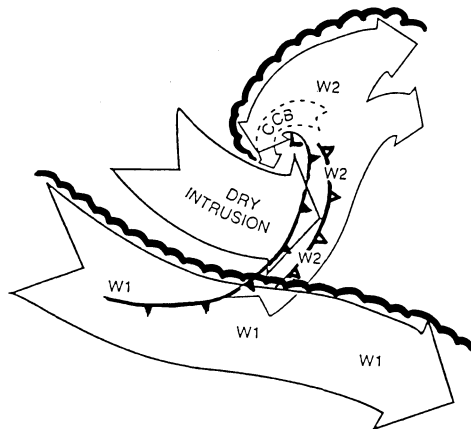
Browning and Roberts (1994), Bader *et al.* (1995) は、第3図のモデルを、いわゆるコンベヤーベルトと呼ばれる流れを用いて記述することによって改良した。第4図は、第3図に示した「雲域の頭部」の流れが、地表の温暖前線の前方に起源をもつ寒冷コンベヤーベルト (cold conveyor belt: CCB) から構成されていることを示したものである。さらに、暖域に起源を持つ流れ、即ち温暖コンベヤーベルト (warm conveyor belt) の支流 (W2) は、この流れの上を這い昇っている。先の低い  $\theta_w$  を持つ乾燥貫入は、実はこの高い  $\theta_w$  を持つ W2の上を這い昇っていて、対流を引き起こす原因となる対流不安定を生み出している (4節参照)。

第4図には、W1で示した高い  $\theta_w$  を持つ流れ、すなわち寒帯前線上の雲バンドを形成する温暖コンベヤーベ



第4図 合流型の気圧の谷で発達する温帯低気圧の構造。低気圧の進行方向は図の右上の方角である。ベントバック前線(図のc-d)と寒冷前線(図のa-b)はともに寒冷前線の記号で描かれている。この2つの前線の間(図のb-c)には衰弱中の寒冷前線がありここでは点線で描かれている。白抜きの寒冷前線の記号は上空の寒冷前線であり、これは乾燥貫入の先端に対応している。システムに相対的な空気の流れとしては温暖コンベヤーベルトの主流(W1)と支流(W2)、寒冷コンベヤーベルトと乾燥貫入の4本が描かれている。雲域の寒気側の境界は波線で表されている。寒帯前線の雲バンドはW1に対応しており、雲域の頭部はW2と寒冷コンベヤーベルトの影響下にある。図中陰をつけた部分は雨域であるが、これはW1の左側の寒冷前線近傍にあり、また、温暖前線の上方にのびている。また、別の雨域がベントバック前線の左側の雲域の頭部内にある。これらの2つの主たる降水域は、ドライスロットで分離されている。このドライスロット領域では、背の低いW2の流れの上を乾燥貫入が覆っている。一般にドライスロットでは雲頂の低い雲が散在することで特徴づけられる。

ルトの本流(WCB)も示してある(第3図では省略されている)。この流れは温暖前線に近づくにつれて厚さ



第5図 分流型の気圧の谷で発達する温帯低気圧の、システムに相対的な流れの模式図。W1とW2は温暖コンベヤーベルトの主流と支流を示す。CCBと記された破線の流れは寒冷コンベヤーベルトを表す。乾燥貫入は広い領域でW2に乗り上げておりその先端は上空の寒冷前線を作っている(Young, 1994)。

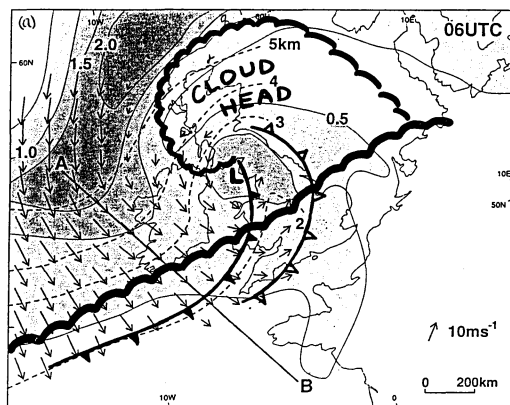
を増し、やがて温暖前線の上を滑昇する。この温暖コンベヤーベルトの左端では乾燥貫入がその下側をえぐりつついるため、雲の境界は切ったように明瞭である。

第4図の構造は、Shapiro and Keyser (1990)の温帯低気圧モデルの「前線断裂期」に対応している。この図に示した構造は、それを取り巻くより大きな場の流れに依存する(Bader *et al.*, 1995)。ここでは、Young (1994)によって見出された主要な2つの型、すなわち、合流型の気圧の谷(confluent trough)に伴って発生する型(第4図の型)と分流型の気圧の谷(diffluent trough)に伴って発生する型の両者の違いについてのみ述べる。第5図に示した後者の型では、温暖コンベヤーベルトの支流(W2)は温暖コンベヤーベルトの本流(W1)からはるか遠く離れた場所まで流れていき、「雲域の頭部」で上昇する。

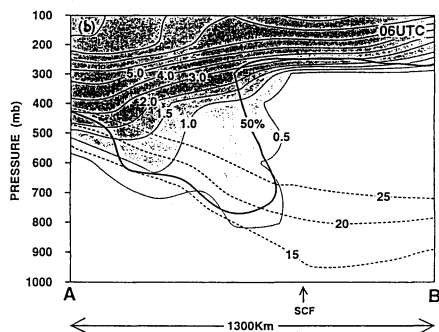
### 3. 乾燥貫入と寒冷前線の構造との関係

第6図は、分流型の気圧の谷タイプの乾燥貫入(第5図)が発生したときのケースを局地モデルでシミュレートした結果である。「雲域の頭部」はこの解析時刻の9時間前に寒帯前線の雲バンドの下から現れてきたものである。第6図は、乾燥貫入が生じている高度範囲のほぼ真ん中に相当する20°Cの等温面上でのシ

(a)



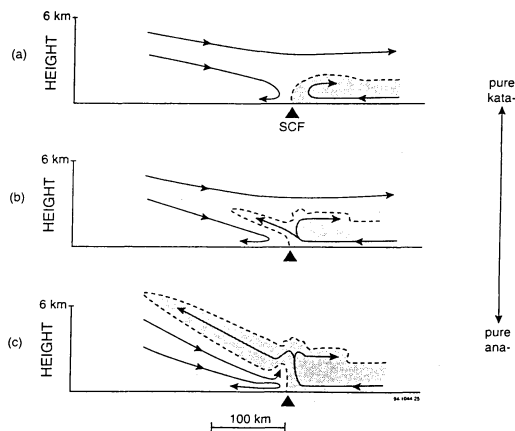
(b)



第6図 英国気象局の局地モデルの6時間積分の結果(初期:1994年12月8日00 UTC)。(a):  $\theta = 20^\circ\text{C}$ の等温位面上の渦とシステム相対の流れ。等温位面の高度も破線で示している。寒冷前線と雲域も示されている。(b): (a)図のABに沿った鉛直断面図。高渦位の空気が同時に低湿度であることが、相対湿度50%の等値線と0.5 PVUの等値線からわかる。破線は等温位線(ただし $15^\circ\text{C}$ ,  $20^\circ\text{C}$ ,  $25^\circ\text{C}$ のみ)である。

ステム相対風を示したものである。ここで使用したモデルの解像度の範囲内であっても、乾燥貫入は、「圏界面の折り込み」領域(0.5-1.5 PVU)から下降する比較的大きなPVを持つ空気によって特徴づけられている。定常性を仮定してはいるが、第6図aから、乾燥貫入内の空気が組織的に地上寒冷前線(SCF)に向かって下降していることが分かる。

乾燥貫入は、地上寒冷前線に到達すると、その前方にある高い $\theta_w$ を持つ温暖コンベヤーベルトとの間で相異なる2つの前線を形成する。Browning and Roberts (1996)は、第6図aに示した直線ABを境に



第7図 寒冷前線の模式図。(a)純粋なカタ型寒冷前線、(c)純粋なアナ型寒冷前線、(b)両者の中間の型。矢線は前線に相対的な気流であり、破線で囲まれた領域は境界層起源の空気塊を表す。

して前線の型が異なっていることを詳細な解析によって示した。即ち、Bergeron (1937)とSansom (1951)の分類に従うと、直線ABの北東側ではカタ型前線、南西側ではアナ型前線である。

第7図aとc図はそれぞれ、典型的なカタ型寒冷前線とアナ型寒冷前線の、地上寒冷前線に直交する面内での鉛直構造を模式的に示したものである。アナ型寒冷前線(第7図c)では、乾燥貫入内の空気のほとんどは、押し出されるWCBの下方をえぐり取っている。このWCBは、前線に直交する方向のよく発達した鉛直循環の一部を構成し、幅の広いレインバンドを生じさせている。他方カタ型寒冷前線(第7図a)では、乾燥貫入した空気は、温暖コンベヤーベルトの上を数10~200 kmにわたって這い昇り、その先端部はUCFとなる。これはBrowning and Monk (1982)が提唱した分離型寒冷前線(split cold front)に対応する。分離した上空及び地表の寒冷前線は、第6図aのカタ型前線領域に別々に書き込んである。詳細な解析によると、アナ型、カタ型は前線の構造の幅広いスペクトルの両極端を表しているものである。第7図bはカタ型寒冷前線とアナ型寒冷前線の中間で、アナ型寒冷前線からカタ型寒冷前線に変化していく初期段階を表している(訳者註:この文章は、解説文の流れから、訳者の責任で意識している)。

#### 4. 乾燥貫入に伴う対流不安定の発達

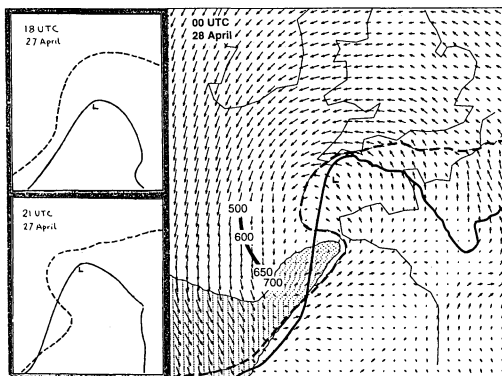
カタ型寒冷前線で、乾燥貫入内の低い $\theta_w$ を持つ空気が温暖コンベヤーベルトの上を這い昇ると、大気の成層は潜在不安定となる。この対流不安定は、十分に空気が持ち上げられ、やがて対流が発生して解消される。対流不安定領域が発達する様子、そしてカタ型寒冷前線自身が形成されていく様子は、乾燥貫入した空気が這い昇っていく間の $\theta_w$ パターンの変化を追うことによって可視化される(第8図)。

第8図は、L地点で地表の低気圧が深まっていく間の $\theta_w$ パターンの変動をシミュレートしたメソスケールモデルの出力結果を、時間を追って示したものである。図の右に示したより広い範囲の解析から分かるように、回転場に伴って地表風が時間と共に巻き込んでいる。右側の図には、回転が最大であった700 hPa高度でのシステム相対風を示した。低い高度では等 $\theta_w$ 線の回り込みは小さくなるが、この構造は差分回転(differential rotation: 高度により回転の速度が異なっている)か、地表により近い場所での非断熱加熱のいずれかによって形成されたものと考えられ、いずれにせよ、高度に依存したこの種の(見かけの)差分回転はよく観測されるものであり、この現象のために乾燥貫入は限られた場所を這い上がる。第8図は、這い昇りの最も強い場所が乾燥貫入の先端部と一致していることを示している。

第9図は、激しい雷雲が発生したケースをメソスケールモデルで計算した結果を基に、這い昇り領域の鉛直断面を示したものである。第9図aでは、高い渦位を持つ乾燥貫入が相対湿度が高く雲であると判断される領域の中へと入り込んでいる様子が見てとれる。第9図bを見ると、この領域では、境界層内で、高い $\theta_w$ を持つ空気の上を低い $\theta_w$ を持つ空気が這い昇っている。激しい雷雨は乾燥貫入の先端で発生し、モデルでは対流パラメタリゼーションによって対流不安定が解消されたことを示す\*印が縦に並んでいる。

#### 5. 乾燥貫入内での渦位の微細構造

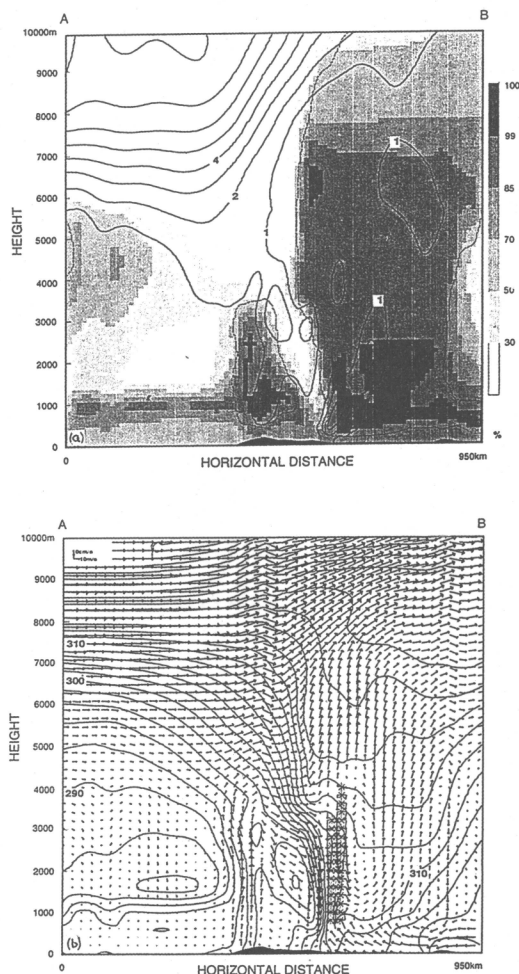
ほとんどの低気圧では、成層圏の空気は少しは下降するが、対流圏下層にまで侵入することは無い。しかしながら時には、第9図に示したように侵入することもある。第9図aでは、乾燥貫入の一部としてもたらされた渦位2 PVU(成層圏起源の空気塊)の領域がかなり下層にまでポケット状に入り込んでいる。ここで、ポケット状の領域は、潜熱の放出によって形成された



第8図 英国気象局のメソスケールモデルの出力(1992年4月27日～28日)。湿球温位 $\theta_w = 9^\circ\text{C}$ 面での低気圧性回転による巻き込みが見えている。(3枚の図すべてについて): 27日18 UTC(モデル初期)から28日00 UTC(6時間予報値)までの3時間ごとの出力が700 hPa(破線)と950 hPa(実線)の $\theta_w = 9^\circ\text{C}$ の等値線で示されている。(右側の図のみ): 28日00 UTCの700 hPaでの空気の流れと相対湿度30%以下の領域(陰影)が示されている。図中500～700の数字は、圈界面折れ込みの軸の500 hPaから700 hPaでの位置を示すものである。3枚の図のスケールは同じである。

湿潤空気内の高渦位領域のすぐ近くまで迫っている。

ところで、成層圏の空気はどのような力学的過程を経て、このような下層にまで下降してくることができるのだろうか。1つの答えは第8図にある。第8図中の太い実線は、500から700 hPaまでの「折り込まれた圈界面」の軸を結んだものである(厳密には渦位=2 PVUではなく1.5 PVUの軸である)。鉛直断面(省略)を見ると、侵入した成層圏の空気の幅は30から100 km程度で、第9図aに示されたようなフィラメント状である。第8図から明らかなように、フィラメント状の高渦位領域は回転の中心とは一致しない。フィラメントと回転中心とが一致しないのは、フィラメントがとても細い現象なので、第1次近似ではそれより大きなスケールのPV分布によって引き起こされた循環による乾燥貫入の中に引きずり込まれたためである。この細いPVフィラメントは、500 hPa面近くにある2 PVU面の方へ膨らみ(PVフィラメントより大きなスケールの)から下へのびている。そしてこの膨らみの方が、低気圧形成メカニズムが関係した上空の現象としては、力学的にフィラメントよりも重要である



第9図 英国気象局のメソスケールモデルで得られた乾燥貫入の断面図 (1991年11月12日 18 UTC). (a): 相対湿度 (陰をつけた部分), 雲の境界 (破線) と渦位 (実線, 1 PVU ごと). (b): 相対湿度 (等値線) とシステム相対の風 (矢線). 潜在不安定が解放されたところが (\*) で示されている.

ように思われる. 水蒸気画像はこれらの高度 (500 hPa) から上の空気の乾燥度を強く反映している (Weldon and Holmes, 1991). このことにより, 水蒸気画像が数値予報モデルによる PV の誤差を発見し修正するのに使えるという考え方 (Thorpe and Denmirtas, 1996) が裏付けられる.

## 6. 下層に目立った駆動力が無い時の乾燥貫入

乾燥貫入は, 上層に渦位の正偏差 (あるいは上層の

気圧の谷, または, ジェットストリークなど見方によって表現が異なる) が現れたときに, 低気圧を発生させる上層の駆動力のひとつの表われである. 低気圧を発生させる駆動力はまた, 下層の湿潤空気の中に生ずる渦位の正偏差によっても生み出される. 急激に発達する低気圧の場合には, 駆動力は通常上層と下層の両方で生じ, 両方の効果は結合しやすい. この場合, 上層の高渦位偏差の空気塊が移動してきて下層の傾圧帯の上を通りかかる時に結合が生じるのである (Hoskins *et al.*, 1985). しかしながら, 時には強い上層の駆動力は, 下層に目立った駆動力が無くても発生する. その結果, この様な場合地表では比較的弱い低気圧でも, 乾燥貫入はやはり下層傾圧帯を相当程度這い昇り, 対流性の悪天をもたらすものと思われる.

## 7. 天気予報への応用

乾燥貫入の有無を水蒸気画像から判断することは, 予報上 2通りの意味で有用である. 第一に, 予報官がメソスケール規模で何が起きているのかを理解し, ナウキャストを行っている間何が起きそうかについて思いを馳せることに役立つ. これは, 低気圧の急発達, 及び・或いは, 激しい対流による気象災害が起こるとい警告を出さなければならないような時に特に役立つ. 第二に, 数値予報モデルの検証と誤差を修正するのに役立つ. (一部の) 乾燥貫入と高渦位偏差とは関係しているため, 乾燥貫入を用いた修正は極めて有効である. 現在, この修正は主観的に行われている (Mansfield, 1994). JCMM (Joint Centre for Mesoscale Meteorology: メソ気象共同センター) ではこの操作を自動的に行うよう作業を進めているところである.

## 訳者註:

本原稿はブラウニング教授のシンポジウム予稿集原稿をコメンテーターであった藤吉と高藪が訳したものである. 「乾燥貫入」 (dry intrusion) その他いくつかの基本的な語彙の翻訳は小倉義光先生に相談しました. ありがとうございます.

## 参考文献

- Bader, M. J., G. S. Fordes, J. R. Grant, R. B. E. Lilley and A. J. Waters, 1995: Images in weather forecasting, Cambridge Univ. Press, 499 pp.
- Bergeron, T. 1937: On the physics of fronts, Bull. Amer. Meteor. Soc., 18, 265-275.

- Browning, K. A., S. P. Ballard, and C. S. A. Davitt, 1997 : High-resolution analysis of frontal fracture, *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 1212-1230.
- Browning, K. A., S. A. Clough, C. S. A. Davitt, N. M. Roberts, T. D. Hewson and P. G. W. Healey, 1995 : Observations of the mesoscale sub-structure in the cold air of a developing frontal cyclone, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **121**, 1229-1254.
- Browning, K. A. and B. W. Golding, 1995 : Mesoscale aspects of a dry intrusion within a vigorous cyclone, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **121**, 463-493.
- Browning, K. A. and G. A. Monk, 1982 : A simple model for the synoptic analysis of cold fronts, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **108**, 435-452.
- Browning, K. A. and N. M. Roberts, 1994 : Structure of a frontal cyclone, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **120**, 1535-1557.
- Browning, K. A. and N. M. Roberts, 1996 : Variation of frontal and precipitation structure along a cold front, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **122**, 1845-1872.
- Danielsen, E. F., 1964 : Project Springfield Report, Defense Atomic Support Agency, Washington D.C. 20301, DASA 1517 (NTIS # AD-607980), 97 pp.
- Hewson, T. D., 1997 : Objective identification of frontal fracture, *Meteor. Appl.*, **4**, 311-315.
- Hoskins, B. J., M. E. McIntyre and A. W. Robertson, 1985 : On the use and significance of isentropic potential vorticity maps, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **111**, 877-946.
- Mansfield, D., 1994 : The use of potential vorticity in forecasting cyclones : operational aspects. In the Life Cycles of Extratropical Cyclones. Vol III, Proc. International Symposium, 27 June-1 July 1994, Bergen, pp. 326-331.
- Sansom, H. W., 1951 : A study of cold fronts over the British Isles. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **77**, 96-120.
- Shapiro, M. A. and D. Keyser, 1990 : Fronts, jet streams and the tropopause. In *Extratropical Cyclones. The Erik Palmén Memorial Volume*. Amer. Meteor. Soc., pp. 167-191.
- Smigielski, F. J. and G. P. Ellrod, 1985 : Surface cyclogenesis as indicated by satellite imagery, In NOAA Tech. Memo. NESDIS 9, pp. 1-29.
- Thorncroft, C. D., B. J. Hoskins and M. E. McIntyre, 1993 : Two paradigms of baroclinic wave life-cycle behaviour, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **119**, 17-55.
- Thorpe, A. J. and M. Demitas, 1996 : Paper submitted to *Nature*.
- Weldon, R. B. and S. J. Holmes, 1991 : Water vapor imagery, interpretation and applications to weather analysis and forecasting, NOAA Tech. Report NESDIS 57. 213 pp.
- Wernli, J. M., 1995 : Lagrangian perspective of extratropical cyclogenesis, PhD Dissertation No 11016, Swiss Federal Inst. of Tech., Zurich, 157 pp.
- Young, M. V., 1994 : A classification scheme for cyclone life-cycles : applications in analysis and short-period forecasting. In *The Life Cycles of Extratropical Cyclones. Vol. III Proc. International Symposium*, 27 June-1 July 1994, Bergern, pp. 380-385.
- Young, M. V., G. A. Monk and K. A. Browning, 1987 : Interpretation of satellite imagery of a rapidly deepening cyclone, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **113**, 1089-1115.

## Dry Intrusions and the Mesoscale Frontal, Cloud and Precipitation Structure of Extratropical Cyclones

Keith A. Browning\*

\* Joint Centre for Mesoscale Meteorology, Department of Meteorology,  
University of Reading, PO Box 240. Reading, RG6 6FN, UK.

(Received 15 May 1998 ; Accepted 12 November 1998)