〔解説〕

104:105(乾燥貫入;温带低気圧;前線)

# 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 風のシアー (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<sup>-6</sup>m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>Kkg<sup>-1</sup>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

\* 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—

© 1999 日本気象学会

1999年2月

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 して見ることができる(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



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.



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 θ<sub>w</sub>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 conveyer 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 conveyer 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 θ<sub>w</sub>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

"天気" 46. 2.

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



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 cd)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



99

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 りとっているため、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℃の等温位面上でのシ

1999年2月

100





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): θ=20°Cの等温位面上の渦位とシ 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°C,20°C,25°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 者の責任で意訳している).

"天気"46.2.

#### 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 θw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 気が持ち上がれば,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 θw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 θ<sub>w</sub>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 θω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としか考えられない。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 &、を持つ空気の上を低い &、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 θ<sub>w</sub>= 9°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 $\theta_w = 9^\circ C O$ 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、圏界面折れ込みの軸 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 るのであろうか.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 た圏界面」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 面の下方への膨らみ (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

1999年2月

102



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こっ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 いう警報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薮が訳したもの 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した.

#### 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 abd 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.

103

- 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 Palmen 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 dee pening 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)