

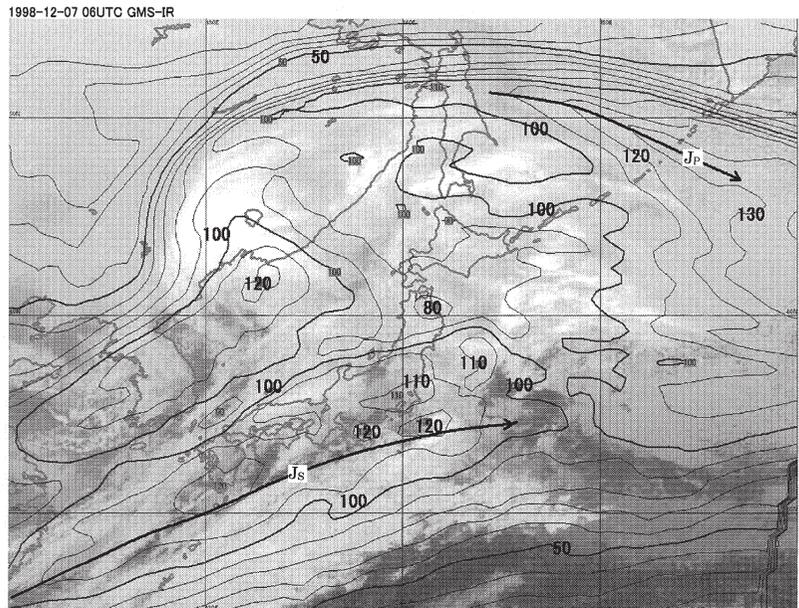
お天気の見方・楽しみ方 (7)

二つ玉低気圧 (その2)

小倉 義光*・西村 修司**・隈部 良司***

4. 雲域 C_sの進化と構造

次に、雲域 C_sについて考える。まず、初期の段階(第5図a(「天気」53巻第11号893頁))では、主に停滞前線に伴う中・下層雲から成っている。しかし、時間と共に上層雲で覆われるようになる。ここで重要なことは、この上層雲は亜熱帯ジェット気流の軸に平行に、その低緯度側に位置していることである。このことは、第7図に示した7日06 UTC段階で、300 hPaの最大風速が120ノットのときでもそうだったし、第8図に示した8日00 UTCで、180ノットに達したときもそうである。ことに、雲域 C_sの高緯度側の端は比較的シャープで、ジェット軸と一致している。ジェット軸の北側は上・中層雲は無く、第8図では、寒気の吹き出しの際に特徴的な、日本海上の筋状の雲が見える。一般的に、ジェット軸に沿って出現する巻雲をジェット巻雲と呼んでいるが、ジェット巻雲はジェット軸の低緯度側に出現することが多い。



第7図 7日06 UTC, 赤外雲画像に重ねた300 hPaにおける等風速線 (10ノット毎).

ここで、第8図の段階では、一見一様に見える雲も複雑な構造を呈することを示したい。まず第9図に、第8図と同時刻の8日00 UTCにおいて、地上気圧と925 hPaの風と温位の分布を示す。図の地上前線系は気象庁の地上天気図から写したものである。図の温位と風の分布を見ても、どこに前線を解析するかはなかなか微妙で、人によって違った前線解析結果が出るかもしれない。それはともかく、このケースの主役は低気圧Lであって、その中心に向かって吹く強い南風に乗って、熱帯の暖湿な空気が殺到している様子がよく

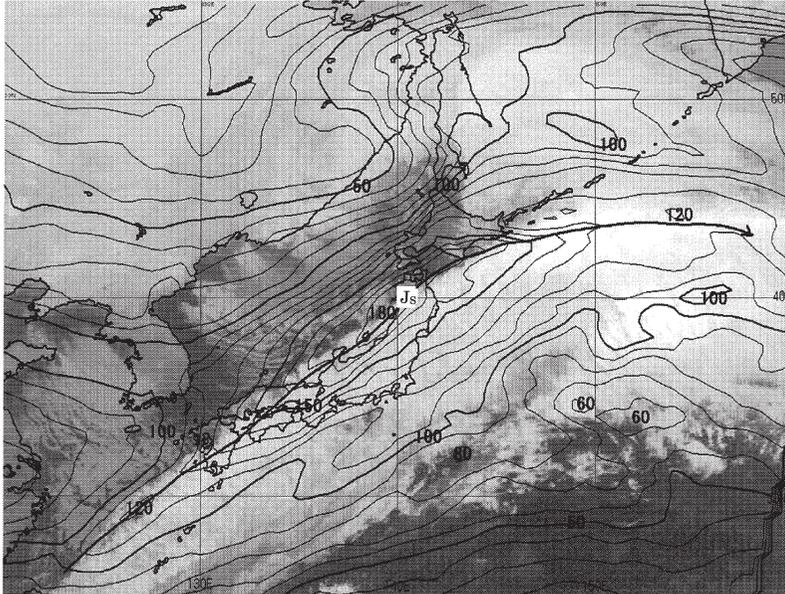
* Yoshimitsu OGURA, 東京大学海洋研究所.

** Syuji NISHIMURA, 気象衛星センター.

*** Ryoji KUMABE, 函館海洋気象台.

© 2006 日本気象学会

1998-12-08 00UTC GMS-IR



第8図 第7図に同じ、ただし8日00 UTC.

分かる。

雲からいえば、主役は雲域 C_s である。その複雑な構造を記述するために、第9図の雲域 C_s を4部分に分ける。まず雲域 C_s の先端部 (C_{s1} と記号) は、すでに第5図c (「天気」53巻第11号893頁) において輝度が増大したと述べた領域である。こうなった理由は、第10図に示したショワルター安定度指数 (SSI) の分布図を見ると分かる。すなわち、地上寒冷前線のすぐ東側に SSI が -2 以下という極めて不安定な成層をした領域があり、しかも第9図によれば、その領域では相当温位は高く、強い南よりの風が吹いている。ここが低気圧 C の温暖コンベヤー・ベルト内の強い降雨域である。輝度温度から推定した雲頂高度は約 250 hPa である。

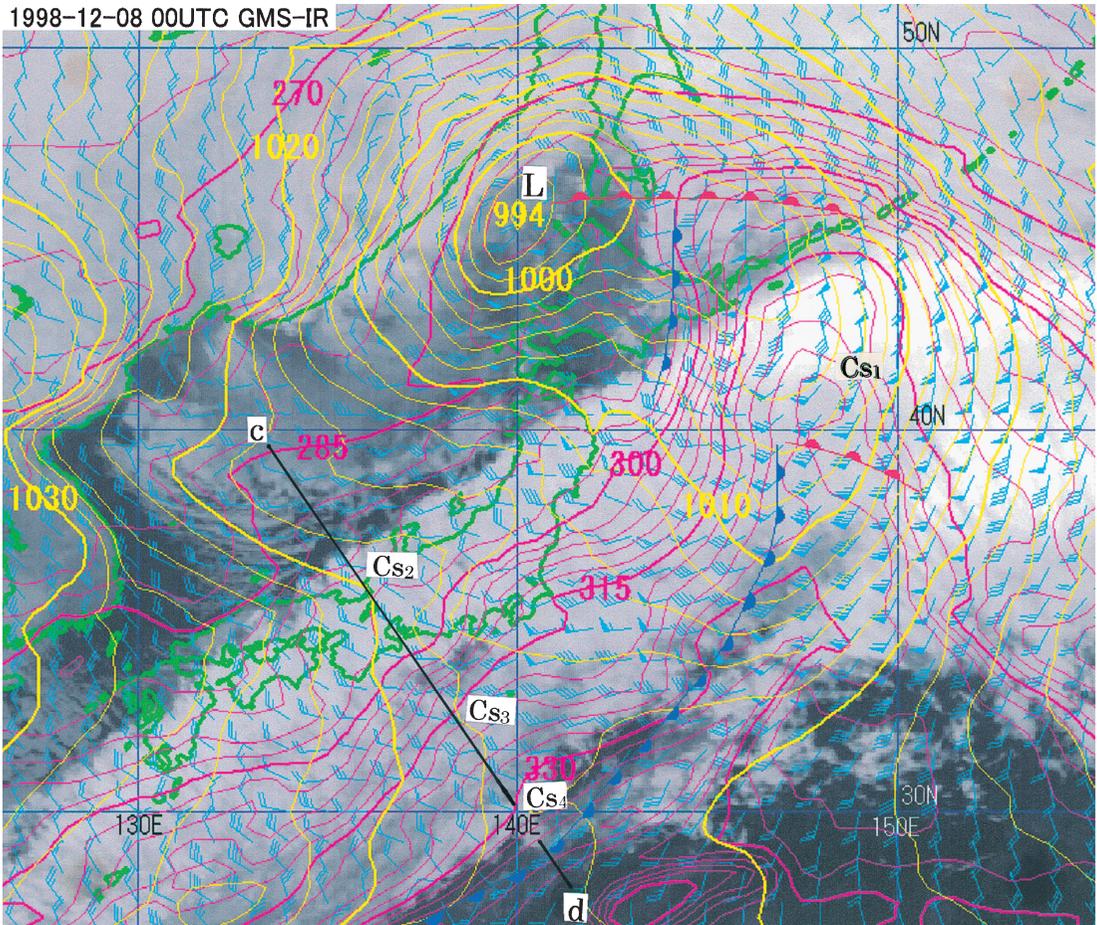
次に、雲域 C_s に直交する方向に、第9図の c-d 線に沿った鉛直断面上の風と相対湿度の分布を描いたのが第11図である。明らかに、北西側 (高緯度側) に雲頂高度が高い領域があり、そこでは中層には乾燥貫入を示す乾燥空気が侵入している。従ってこの部分の雲は低緯度で発生したジェット巻雲と思われる (C_{s2} と記号)。一方、雲域 C_s の南東側 (低緯度側) の雲は雲頂高度もやや低く、寒冷前線面に沿った雲と思われる (C_{s3} と呼ぶ)。さらに、第9図では明確には見えないが、地上前線付近には対流性の雲の発達もある (C_{s4} と呼ぶ)。寒冷前線に沿った細い対流性の雲列については、

Hobbs and Persson (1982) の詳しい研究が有名である。さらに付け加えると、この時刻には (8日00 UTC)、雲域 C_s の西側の部分は日本列島にかかっているため、地上観測による雲の観測記録が利用できる。それによれば、雲域 C_{s2} が覆っている地域の観測点からは巻積雲などの上層雲が報告されている。それに加えて、北陸沿岸に位置する観測点からは積雲の報告があるのは、寒気の吹きだしに伴う日本海上の筋雲の存在を示していると思われる。そして、雲域 C_{s3} の下の観測点からは高層雲、高積雲、層積雲などが、そして

前線付近では雄大積雲などが報告されている。こうして、最上部のジェット巻雲を除けば、この前線は Browning (1990) が事例解析で描いたアナ寒冷前線の模式図とよく似た構造をもつ (第12図)。

話がそれるが、最近一読者からお手紙をいただいた。気象予報士受験の勉強をしているが、最近の実技試験でアナ前線についての問題が出た。アナ前線については「一般気象学」に書いてないので、これについて書いた本があれば教えてほしいという内容だった。早速お返事したが、第13図にアナ前線とカタ前線の模式図を示しておいた。寒冷前線の周りの鉛直流によって、寒冷前線をこのように分類したのは、ノルウェー学派のベルジェロンで、もう70年も前の1937年のことである。寒冷前線面に沿って比較的暖かい空気が上昇するのが純粹なアナ前線であり、下降するのがカタ前線である。アナとカタは、それぞれ up と down を表すギリシャ語の接頭語である。現実には、下層ではアナ型であるが、上層ではカタ型という中間型もある。地上の寒冷前線は、アナ型の場合のほうがシャープである。

ただ、第13図の模式図を見る場合に注意すべきこととしては、まるで風は寒冷前線に直角に吹きつけているように描いてあるが、実際には第9図に見るように、寒冷前線に対して風は斜めに、むしろ平行に近い方向から吹いている場合が多い。ベクトルの言葉で言えば、



第9図 8日00 UTC, 赤外画像に重ねた地上気圧 (黄色, 2 hPa 毎) と925 hPa における風と相当温位 (ピンク色, 2K 毎), 記号 L は低気圧 L の中心の位置。

風というベクトルを前線に平行な成分とそれに直交する成分に分けたとき, 直交する成分だけを模式図では示しているわけである。

5. ジェット巻雲の成因

さて, 最後に残ったのが, 第7図や第8図に示したように, 何故亜熱帯ジェット気流の低緯度側にジェット巻雲が発生することが多いかの問題である。これはいくつかのプロセスが考えられると思うが, その1つが第14図に模式的に示したものであろう。図のx軸は東西方向で, ここにジェット軸があるとする。y軸は南北方向にとってある。x軸の高緯度側にはトラフがあり, 低緯度側にはリッジがあるという状況である。風が地衡風だとすると, 図の原点で等高度線の間隔は最

も狭く, 風は最も強い。局所的にジェット気流が最速の領域をジェット・ストリーク (jet streak) というが, この模式図ではジェット・ストリークの中心が原点に位置している。ジェット・ストリークの中心より上流側 (西側) をジェット・ストリークの入り口, 下流側 (東側) を出口という。入り口では風は合流して (confluent flow), ジェット・ストリークの中心に吹きこんでいる。出口では風は分流している (diffluent flow)。

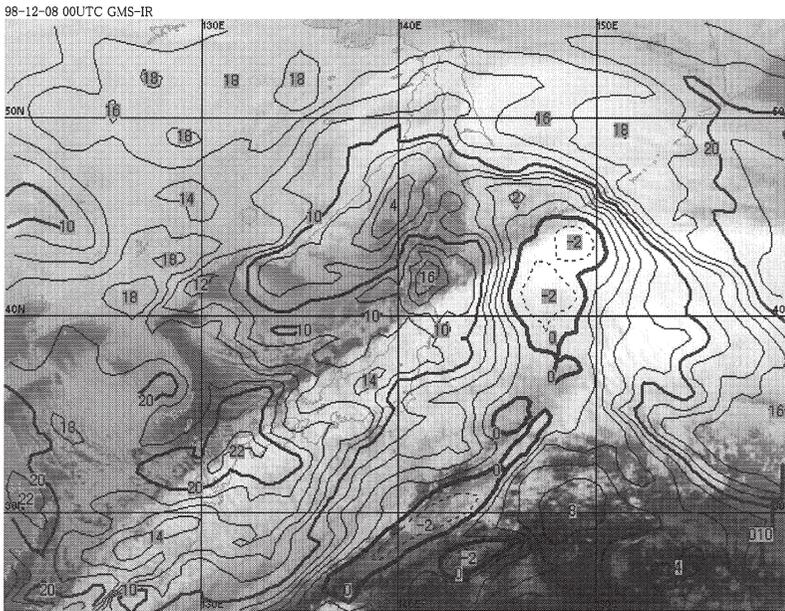
さらに, 第14図において等温位線は東西方向 (x軸方向) に平行しているとする。そうすると, 入り口の領域での流れと温位の相互位置は, 本シリーズ (3) の前線形成のプロセスを説明した第2図 (『天気』53巻第3号216頁) で, 合流効果 (a) の図の右半分に相当する。要するに, 南側には暖気移流, 北側には寒気移流があ

り、前線が形成あるいは強化されている状況である。話が長くなるので、その際は述べなかったが、こうした状況では暖気移流の地域では上昇流、寒気移流の地域では下降流を伴うということがある。そして、この上昇・下降気流をつないで、第14図に破線で示したような水平流があり、鉛直断面内での循環が完成する。このように、地衡風による温度移流に伴って生ずる(地

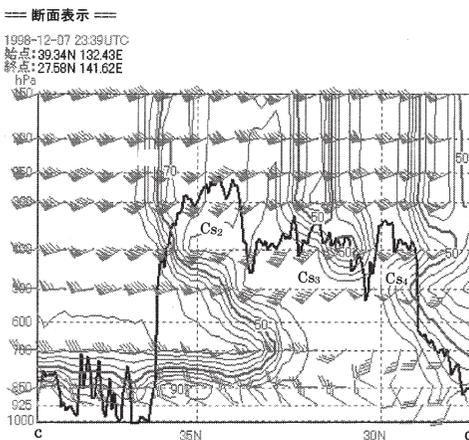
衡風でないという意味で)二次的な鉛直循環をソーヤ・エリアッセン(Sawyer・Eliassen)の循環という。上昇流の区域では雲が生じ雨が降る。下降気流の区域では雲が消えて晴れる。したがって、前線形成過程というのは、単に等温線の間隔が狭くなるというだけではなく、力学的にも鉛直運動を含んだ、極めて重要なプロセスなのである。今回の場合では、ジェット軸の

低緯度側でジェット巻雲を発生させ、高緯度側では雲がなく乾燥した地域が広がる。ジェット・ストリークの出口では逆向きの鉛直循環がある。

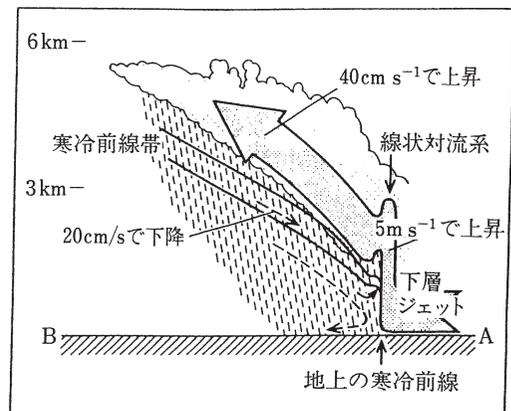
ここまでは第14図で仮想的な状況を考えたが、第15図が第14図に対応する現実の状況で、第8図と同時刻の8日00 UTCにおける500 hPaの高層天気図である。第14図を45°左に傾けると、この状況に近くなる。すなわち、本州の北西にトラフ、南東にリッジがあり、本州上空で合流する風がある。こうして、第7図や第8図で示した亜熱帯



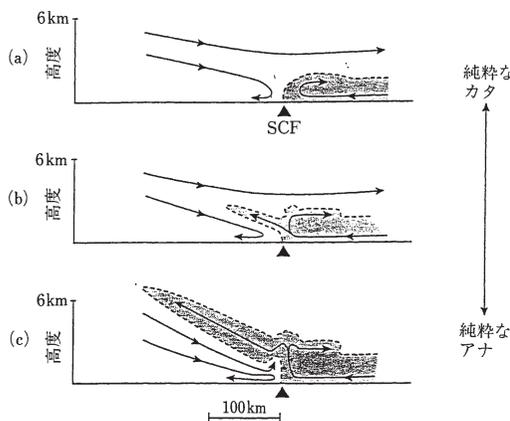
第10図 8日00 UTCにおけるショワルター安定度指数の分布。



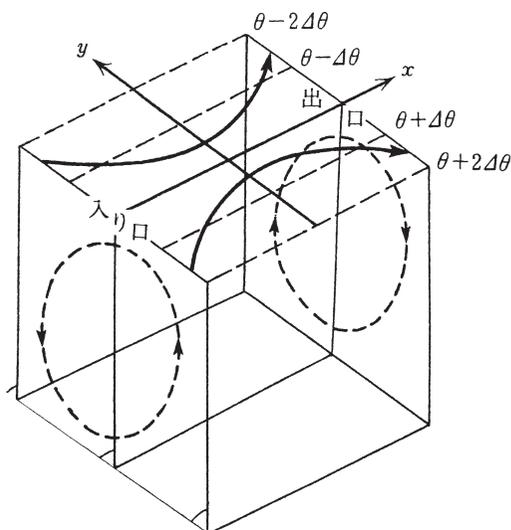
第11図 8日00 UTC, 第9図のc-d線に沿った鉛直断面上の相対湿度(10%毎)と風。太い実線は雲頂高度。雲の記号は本文参照。



第12図 事例解析に基づいたアナ前線における前線に相対的な流れの模式図(Browning, 1990)。



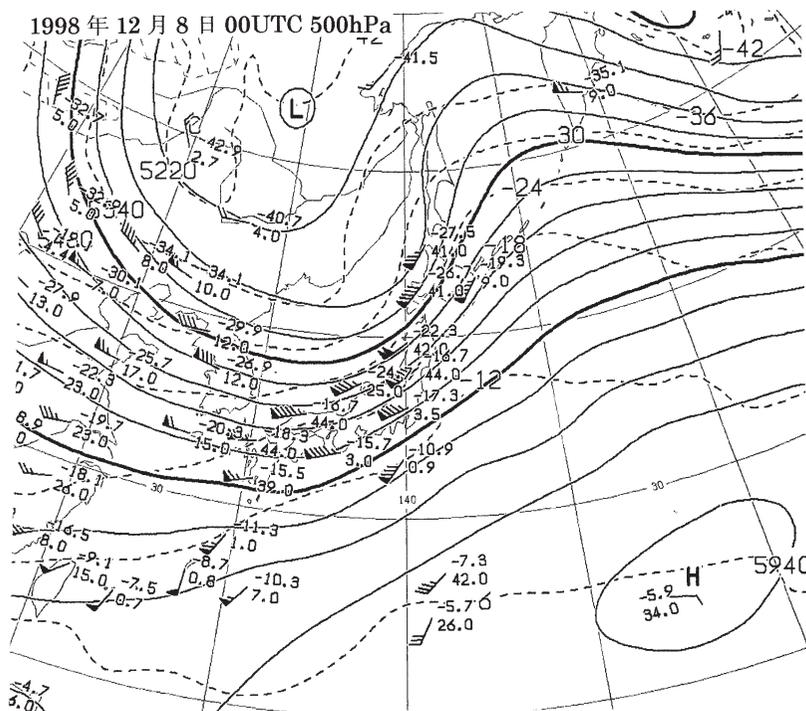
第13図 寒冷前線の鉛直断面内の構造の模式図 (Brownig, 1999)。純粋なカタ前線と純粋なアナ前線の中間に、いろいろな型があることを示す。矢印は前線に直角方向の前線に相対的な流れ。破線で囲まれた陰影の区域は境界層の空気、あるいは境界層から駆逐された空気を表す。SCFは地表の寒冷前線。



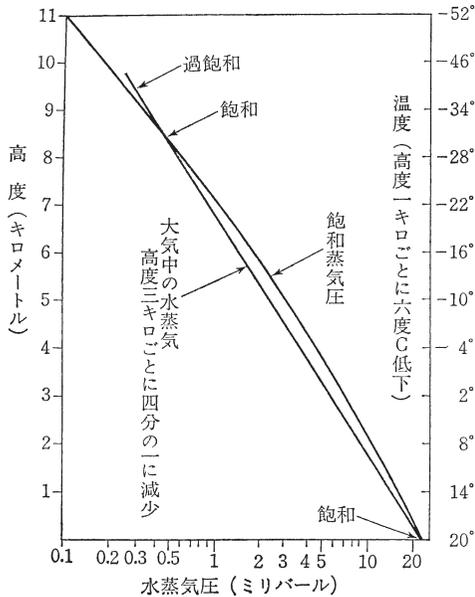
第14図 地衡風が合流してジェット・ストリークがある場合の3次元模式図。太い実線が等圧面上の地衡風を表し、それに伴う副次的な鉛直循環を短い破線で示す。長い破線はx軸に平行とした等温位線(小倉, 2000の解説文より)。

ジェットは、中緯度の大きなトラフとその下流のリッジの境に位置している。これに加えて、現実の場合には、上層のトラフの西側には傾圧波に伴う下降気流と乾燥貫入という流れもある。

ジェット巻雲という上層雲が出来やすい理由としては、対流圏上層では気候学的に相対湿度が高いということもある。駒林(1963)に従って説明すると、対流圏内では、温度は1kmについて6°Cずつ、高度と共に直線的に低下する。ところが大気中の水蒸気の量は、高度と共に指数関数的に減少する。水蒸気圧で表現すると、1kmごとに1/4に減少する。従って第16図において、横軸の水蒸気圧



第15図 8日00 UTCにおける500 hPaの高層天気図(気象庁)。



第16図 対流圏内の水蒸気圧と、温度が $6^{\circ}\text{C}/\text{km}$ で降下すると仮定した場合の飽和水蒸気圧 (ミリバール=hPa) の高度分布 (駒林, 1963)。

を対数目盛りで採ると、大気中の水蒸気圧の高度分布は直線で表される。地表の空気は飽和していると仮定して、上記の温度分布に応じた飽和水蒸気圧の高度分布も第16図に記入されているが、2本の線は高度約8.3 kmで交差する。すなわち対流圏上部は飽和していることになる。2本の線が最も離れている高度は対流圏の中ほどである。もちろん、現実の対流圏内では、温度と水蒸気圧の高度分布は日々に変化しているから、ここで仮定した分布とは違いますが、対流圏上部では僅かな上昇流があれば、空気はすぐに飽和して氷晶ができる傾向がある。飛行機雲が出来るのも対流圏の上部や成層圏の下部である。一方、対流圏中央部の水蒸気はかなり上昇しないと凝結しない。いろいろな雲の写真集を見ても、最も魅力的、幻想的な写真は多様な巻雲の写真である。対流圏上層で起こっている様々な空気の動きが映し出されていて、見ている人を飽きさせな

い。加えて、氷晶の落下速度は小さいので、一度出来た氷晶はジェット気流により遠い下流まで運ばれるという事情もある。

謝 辞

有益なコメントをいただいた東京大学海洋研究所新野 宏教授、気象研究所の別所康太郎担当編集委員および査読者に感謝します。

参 考 文 献

- Bader, M. J., G. S. Forbes, J. R. Grant, R. B. E. Lilley and A. J. Waters, 1995: Images in Weather Forecasting, A practical guide for interpreting satellite and radar imagery, Cambridge Univ. Press, 499pp.
- Browning, A. K., 1990: Organization of clouds and precipitation in extratropical cyclones. In Extratropical Cyclones—The Eric Palmen Memorial Volume (C. M. Newton and E. O. Holopainen eds.), Amer. Meteor. Soc., 129-153 (研究時報, 第62巻, 1995, 第1号に北島尚子らによる邦訳あり).
- Browning, A. K., 1999: The dry intrusion and its effect on the frontal, cloud and precipitation structure of extratropical cyclones, 日本気象学会つくば大会特別招待講演, 邦訳は天気, 46, 97-103.
- Browning, K. A. and N. M. Roberts, 1994: Structure of a frontal cyclone, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 120, 1535-1557.
- Hobbs, P. V. and O. G. Persson, 1982: The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones, Part V: The structure of narrow cold-frontal rainbands, J. Atmos. Sci., 39, 280-295.
- 北島尚子, 三井 清, 1998: 晩秋に日本海で急発達した低気圧の構造, 天気, 45, 827-840.
- 駒林 誠, 1963: 気象の科学, NHK ブックス, 日本放送出版協会, 250pp.
- 宮崎保彦, 1999: 二つ玉低気圧, 気象, 44(2), 20-21.
- 小倉義光, 2000: 総観気象学入門, 東京大学出版会, 289 pp.
- 小倉義光, 2003: 「雲解析事例集」と秋雨前線に伴う小低気圧の事例, 天気, 50, 367-373.