



お天気の見方・楽しみ方 (1)

序章

小倉 義光*

1. お天気学

日本気象協会発行の「気象」という雑誌に、1990年ころから「やさしい気象」というシリーズを連載した。身近な気象や世界で話題となっている気象を、初めて気象を学ぶ人のために解説したものである。数年経って、それをまとめ加筆したのが「お天気の科学—気象災害から身を守るために」(小倉、1994)である。その10年前に書いた「一般気象学(初版)」(小倉、1984)は、気象学にとって最も基本的な物理学的法則や概念を、できるだけ丁寧に説明することを目的としたので、日常接するお天気の変化が、そのような基礎的な法則とどう関連するのか、十分に説明する余裕がなかった。それで、「一般気象学」の副読本となるように、「お天気の科学」では気象災害を起こす天気を主題としつつ、日々のお天気の変化をもたらす高・低気圧や前線などの総観気象や、集中豪雨・竜巻・ダウンバースト・フェーンなどのメソ気象を解説した。こうしたわけで、爆弾低気圧や新しいシャピロの低気圧モデルの話などは「お天気の科学」のほうに出てくる。

幸い「天気」には「天気教室」という欄があるので、そこに投稿して、今度は「一般気象学」や「お天気の科学」を卒業された方、あるいは気象予報士を対象として、再びお天気を見る喜び、楽しさを語りたいと思う。ある時刻のお天気とその変化は、いろいろの気象要素がいろいろの水平スケールを持って出現し、相互に複雑に、しかし有機的に作用し合って進化している複合体である。例えば、温帯低気圧1つを取り上げてみても、そこには温暖前線や寒冷前線が組み込まれており、それぞれに雲が発生し降水がある。降水と

いっても、雨・雪・雹など、形態も違うし降る量も違う。雲についても、対流圏界面に達するような深い対流雲もあれば、逆転層に頭を抑えられた浅い対流雲もある。時には深い対流が組織化されてメソ対流系が形成されることもある。空一面を覆う層状の雲もある。こうして、前線や暖域にいろいろのメソ気象が出現する。これまででも、メソ気象を議論するときには、メソ気象の構造と進化はそれよりもスケールの大きい環境に支配されるということで、必ず総観気象に注意が払われてきた。しかし、時が流れるままに、空気が流れて、温度が変わり気圧が変わり、風が変わって、その環境の中で最適のメソ気象が出現し、やがて消滅する。最後には、低気圧も消え去っていく。このように、温帯低気圧は、内部に多くのサブシステムを包含した1つの天気システム(weather system)だ。そして、天気システムを学ぶ学問がお天気学である。だから、お天気学には総観気象学、メソ気象学、雲微物理学などがブレンドされている。

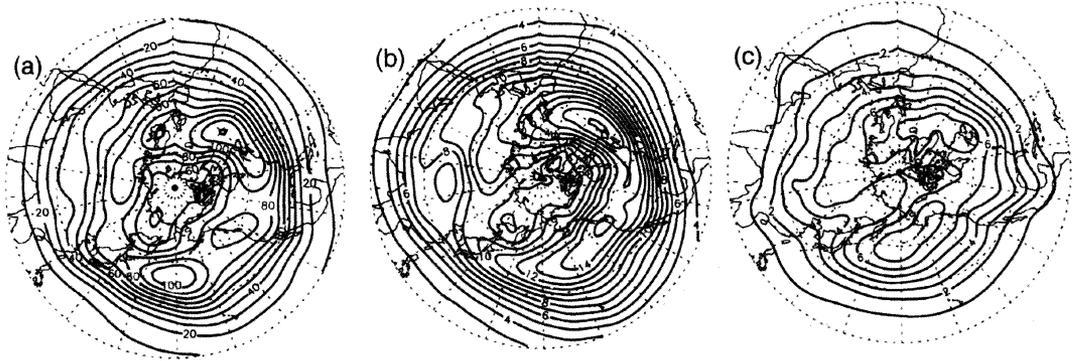
2. 日本付近の天気システムの多様性

わが国は、いろいろな気象災害も起こるが、お天気を楽しむのには実によい国だ。いろいろな天気システムが絶えず頭上で発生し通過していくからだ。このことは毎日の新聞やテレビ、あるいは気象庁・民間気象会社のホームページの天気図や衛星雲画像などからすぐ実感できる。

衛星雲画像は天気システムを知る最も重要な情報源の1つだ。1つ1つの衛星雲画像を天気図解析や数値予報モデルからの出力と比べ合わせ、雲画像から天気システムの構造と進化について、できるだけ多くの情報を得ようという努力の結果がBader *et al.* (1995)の本である。この本については以前に紹介したことが

* Yoshimitsu OGURA, 東京大学海洋研究所.

© 2005 日本気象学会



第1図 周期が約2.5～6日の範囲内で変動する成分の標準偏差値の北半球分布図。(a) 250 hPa面の高度(等値線の間隔は10 m), (b) 300 hPa面での南北風速(間隔は2 ms⁻¹), (c) 地上気圧(間隔は1 hPa). (Chang *et al.*, 2002).

ある(小倉, 2000)。大判500ページの名著であるが、それでも日本付近で毎日見る雲画像とはかなり違う部分がある。その理由の1つはBaderの本は主に欧州での天気システムを題材にしているからだ。日本と欧州ではストーム・トラックにおける相対的な位置が違う。普通、ストーム・トラックは顕著な低気圧の移動経路の意味で使われるが、1970年代の終わりころからは、高・低気圧など、総観規模の時間スケール(数日程度)を持つ擾乱の活動度が高い区域の意味で使われている。そうなった理由は、上層観測網の整備や客観解析の技術などに進歩により、グローバルに、また一定の時間間隔で、格子点上の気象データが得られるようになった結果、高・低気圧の統計的な性質が研究できるようになったからである。

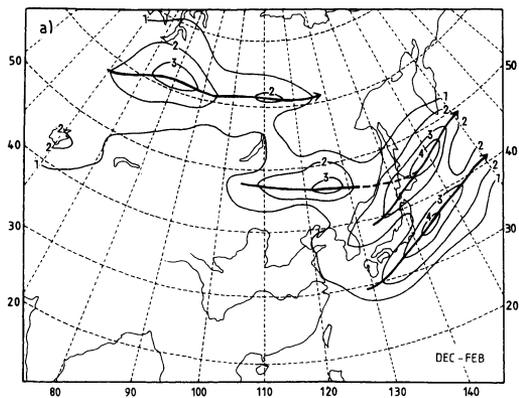
長期間にわたって観測すれば、高・低気圧の通過に伴って、ある格子点、ある等圧面(例えば300 hPa面)の高度(ジオポテンシャル)は変動するから、この高度の変動の激しさを、例えば標準偏差という統計量で表して、それを高・低気圧の活動度の目安とすることができる。第1図がそうした図の一例である(Chang *et al.*, 2002)。250 hPa面の高度、300 hPa面の南北風成分、地表面気圧など、いろいろな気象要素の変動成分の標準偏差を示している。この値が大きいくほど、活動度が強いと思えばよい。

そうしてみると、ストーム・トラックは太平洋と大西洋に一つずつあり、日本は太平洋のストーム・トラックの入り口(西の端)に位置しているのに、欧州は大西洋のストーム・トラックの出口に位置していることが分かる。つまり、日本付近は誕生したばかりの温帯低気圧が通過することが多いのに、欧州では、成熟し

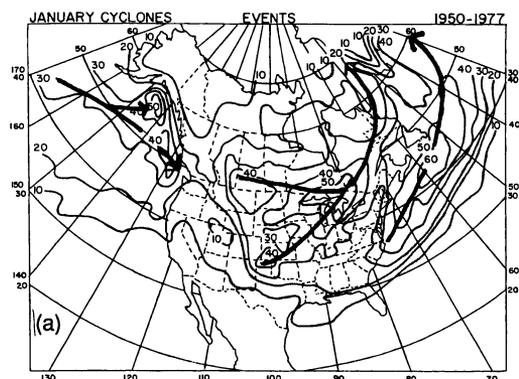
た低気圧にお目にかかる機会が多いわけだ。

普通、地上低気圧の発生は、地上天気図で4 hPa(あるいは2 hPa)おきに描いた等圧線が最初に閉じたときと定義する。次回から数回にわたって、日本を含めた東アジアにおける低気圧の発生のお話をする予定であるが、その大部分のケースでは、低気圧が発生したときには、等圧線が丸く描いてあるだけで、温暖前線も寒冷前線も描いてない。もちろん、前線の描き方は人によって違うであろうが、低気圧が発生してから数時間後あるいは十数時間後になって、やっと描かれることが多い。仮に、かの有名なビヤークネスがノルウェーでなく東アジアで生まれたら、果たして温帯低気圧の寒帯前線波動説を提唱しただろうか。

ストーム・トラックの入り口に位置するという点では、米国東岸は日本付近とよく似ている。黒潮とメキシコ湾流という暖流が岸を洗っているという点でも似ている。しかし、細かく見ると、違いがある。第2図は東アジアにおける冬季の温帯低気圧の出現頻度分布図である。この図では、出現頻度の極大を結んだ線を低気圧の平均的な通過経路としている。主な通過経路が4つある。1つは東シナ海を発生地として本州南方海上を通過して太平洋に抜けるもので、東シナ海低気圧という。東シナ海を発生地としなくても、本州南岸に沿って進行するものは南岸低気圧という。もう1つは、ボツカイ湾や黄海を発生地として日本海を通過するもので、日本海低気圧と総称する。もう1つは、東・西サヤン山脈を含む山塊の風下側(東側)を発生地とし(いわゆる風下低気圧, lee cyclone)、東に向かうもの。最後はウラル山脈を源として、約60°Nに沿って東進するもので、これは日本には直接関係しないし、数



第2図 冬季(12月-2月), 東アジアにおける温帯低気圧の出現頻度分布図。図の範囲を経度・緯度2.5°のマス目に細分し, 中心がそのマス目に入った低気圧の数を数えたもの。図中の数字は出現数を10倍してある。1958-1987年の統計 (Chen *et al.*, 1991)。



第3図 1月, 北米大陸及びその周辺海域における温帯低気圧の出現頻度分布図。28年間の総数 (Zishka and Smith, 1980)。

も少ない。

一方, 第3図は北米大陸とその近海における冬季の低気圧の出現数と平均的な通過経路である。主な発生地は北部ロッキー山脈の風下側 (カナダのサスカチュワン州や米国のモンタナ州など) と南部ロッキー山脈の風下側 (テキサス州やオクラホマ州など) である。こうした低気圧は北米大陸を斜めに横断して五大湖付近を通過する。観測データが豊富な陸上を通過するので, 貴重な低気圧である。第4節でそうした低気圧の話をする。もう1つの発生地は大陸東岸・大西洋西部で, シャピロ・カイザーが新しい低気圧のモデルを

作ったのも, この地域の低気圧の航空機観測に基づいている。暖かいメキシコ湾沿岸でも少数ながら発生する。

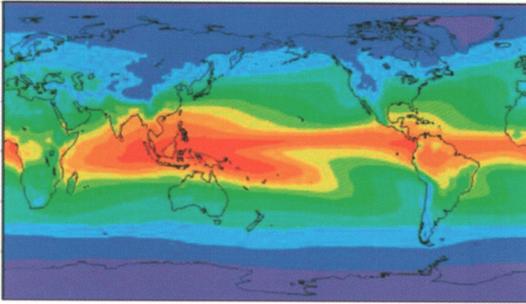
しかし, 日本付近は東アジアのモンスーン域に位置しているという点で, 米国東岸とは決定的に違う。だから日本付近には, 気団と前線帯から見て, 四季でなく, 冬・春・梅雨・盛夏・秋雨・晩秋という六季があるという高原・松本 (2003) の提案には説得力がある。そして, それぞれの季節に特有の天気システムが出現する。日本付近の天気システムに多様性があるのも不思議ではない。

3. 低気圧の発生における水蒸気的重要性

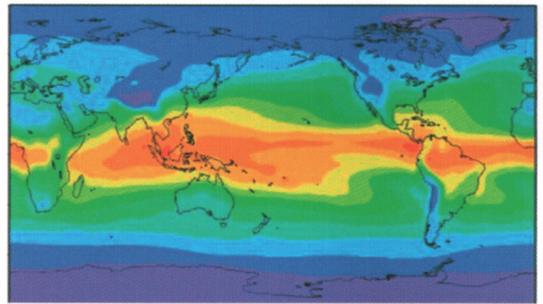
日本と欧州の天気システムの違いを起こす原因としては, 大気中の水蒸気量の違いもあると思う。これまで不思議にグローバルな水蒸気量の分布図を見たことがなかったが, この原稿執筆中に第4図に出会った。これは可降水量 (単位断面積をもち地上から大気の上端までの気柱に含まれる水蒸気が, すべて凝結し落下したと仮定したときの降水量 (mm)) の長年の平均分布を示す。第4図aは米国航空宇宙局 (NASA) が作成したもので, 第4図bは米国環境予測センター (NCEP) と米国大気研究センター (NCAR) の再解析データに基づいたものである。広い海上の可降水量をゾンデなどで直接測定することは実際上困難なので, 衛星などで得られたデータをいろいろ加工して, 可降水量を推定することになるが, 使用するデータや処理の仕方の違いなどから, 第4図の両者には量的に多少の違いは見られる。それはともかく, 日本付近は緯度が高いノルウェーや英国に比べれば2倍か3倍くらいの可降水量があることが分かる。大西洋西部に比べて, 太平洋西部では高い可降水量の区域が広がっているのは, インドネシアを中心とした海洋大陸の海面温度は, 世界でも最も高いことが影響しているからであろう。

水蒸気量における東アジアの特異性は, 夏のモンスーン季に最も明確となる。第5図はNCEP/NCARの再解析データに基づいた6月の分布である。チベット・ミャンマー地方では65 mmを超えるという驚異的な値をもつし, 55 mmを越える地域も東南アジアに広がっている。これがマレーシア・華南からの南西風と, 北太平洋高気圧の西端を巡る風によって, 梅雨前線に殺到する。

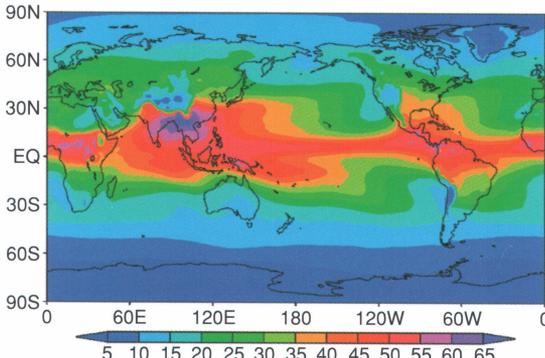
a) NVAP



b) Reanalysis-2



第4図 可降水量の分布図。12年間(1988—1999)の平均。(a) 米国航空宇宙局(NASA)の水蒸気プロジェクト(NVAP)が作成。空間解像度は $1^\circ(\text{経度}) \times 1^\circ(\text{緯度})$ 。(b) 米国環境予測センターと国立大気研究センターが再解析したデータに基づいて作成。空間解像度は $2.5^\circ(\text{経度}) \times 2.5^\circ(\text{緯度})$ 。(Amenu and Kumar, 2005)。



第5図 6月における可降水量の分布。米国環境予測センターと国立大気研究センターが再解析したデータに基づいて、田上浩孝が作成。1958—2001年の平均。

4. 低気圧の発達に及ぼす水蒸気凝結の影響

上記のように、可降水量にこだわるのは、可降水量が降水量に関係するからである。よく知られているように、熱帯低気圧や台風では、運動エネルギーの源は水蒸気が凝結する際に放出する凝結の潜熱である。一方、温帯低気圧の場合には、位置のエネルギーが運動のエネルギーに変換されて、低気圧は発達する(次回で話題にする)。ところが温帯低気圧でも、その発生・発達に降水量が大きな影響を持つことを示したのが Tracton(1973)である。彼のアプローチはこうである。まず前記の様に、気象データが豊富に得られるロッキー山脈より東の米国大陸上で、急速に発達した低気圧9例を選ぶ。特に、地上の降雨計のデータやレーダーなど、降雨の情報を丹念に収集する。9例について詳

細な事例解析を行う。その結果を、アメリカ合衆国国立気象センター(NMC)が出した現業の予報と比較する。その結果分かったことは、現実には低気圧は急速に発達しているのに、予報モデルがそれを予測できなかったケースというのは、現実には低気圧の中心付近で激しい降雨があったのに、モデルはそれを予測しなかった場合であった。特に、水蒸気を多く含むメキシコ湾沿岸を通過した低気圧についてはそうであった。またこうした低気圧では、予報された低気圧は現実の低気圧より遅れて発生する傾向があった。こうした結果から、彼は深い対流に伴う降雨が温帯低気圧の発達に大きな影響を及ぼすと結論したのである。この論文は彼の博士論文であり、卒業後、彼は国立気象センターに就職した。

約30年前に比べれば、予報モデルは格段に進歩し、予報精度もはるかに良くなっている。気象庁が現在運用している気象予報モデルは世界最高峰の一つである。その予報精度は文句なしに世界のトップクラスである。しかし、それでも予報は外れる。時としては、大きく外れる。昨年6月26日朝日新聞夕刊に、「天気予報苦戦続く」という見出しの記事が載った。それによると、気象庁が昨年1年間の天気予報の検証をしてみると、大外れの日数は降雨では30日、最高気温が56日、最低気温が30日だった。ここで同庁が定めた大外れの基準は、前日の夕方に発表した予報内容に基づいて、降雨では「高い確率で降ると予想したにもかかわらず、ほとんどの地域で降らなかった日」、最高温度と最低温度では「予想より 3°C 以上も違った日」とのことである。

それならば、Tracton の例に倣い、大外れのあったケースを丹念に集めて詳細な事例解析を行い、何故大外れとなったかを調べることは、お天気の見方・楽しみ方の一つであろう。ここでいう楽しみ方は、勿論知的好奇心の満足である。そして、その結果は予報精度の向上に役立つであろう。

5. ストレッチ効果

それでは、低気圧の中心付近で多数の積乱雲や層状の雲が発生し、開放された凝結の潜熱が上昇流を強化したとして、どのようにそれが数千 km のスケールを持つ低気圧の発達に寄与するのか。それを説明するのが渦度の時間変化におけるストレッチ効果である。

この効果は総観気象を考える上で最も基本的な概念の1つなので、詳しく説明したい。第6図に示したように、気圧 p を持つ等圧面と、気圧 $p + \Delta p$ を持つ等圧面に挟まれた微小な円筒状の空気を考える。円筒の下面及び上面における鉛直 p 速度をそれぞれ ω と $\omega + \Delta\omega$ とする。 Δ は微小な量という記号である。気象予報士の実技試験には700 hPa 鉛直 p 速度図がよく登場するから、鉛直 p 速度はおなじみと思うが、そうでない読者は、 p と ω をそれぞれ高度 z と普通の鉛直速度 w に置き換えて読めばよい。ただし、 z と p では方向が違っているので、 ω と w の符合は逆になる。さて、総観規模の天気を考えているのだから、風は第1近似として、いつでもどこでも地衡風であるとする。話を簡単にするために、空気円筒は東西方向にのみ移動するとする。時刻 t において、この空気円筒のもつ渦度を ζ とす

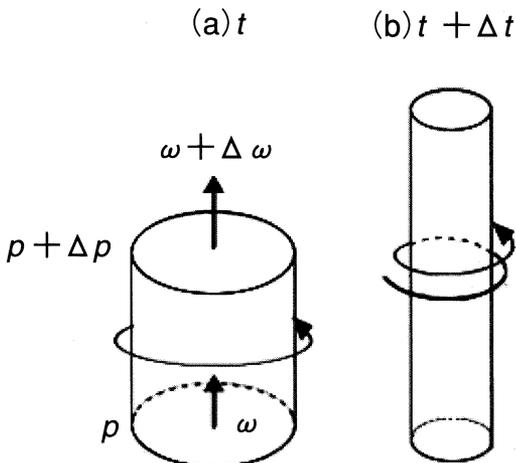
る。風に流されて東西方向に移動する空気円筒を追いかけて、微小時間 Δt だけ経った時刻における渦度の増加量を $\Delta\zeta$ とすると、それは $\Delta\omega/\Delta p$ に比例するという法則がある。式で書くと：

$$\Delta\zeta/\Delta t = f (\Delta\omega/\Delta p)$$

となる。ここで f はその空気円筒が位置している地点のコリオリ・パラメータである。気圧傾度を与えて地衡風速を計算する際には、 f の値が必要なので、コリオリ・パラメータはおなじみと思う。この式を渦度の時間変化を表す渦度方程式という。左辺は単位時間当たりの渦度の変化量、右辺がストレッチ効果を表す。ストレッチは激しい運動の準備として行うストレッチ体操のストレッチである。何故そう呼ぶかという、円筒の上・下面における ω の値の違いにより、第6図bに示したように、円筒の高さは $\Delta\omega\Delta t$ だけ伸びる。ところが、円筒の中の空気の質量は保存されなければならないから、円筒の底面積は小さくならなければいけない。すなわち円筒は鉛直方向に伸長したことになる。伸長したことによって渦度が増加したのであるから、これを伸長(ストレッチ)効果と呼ぶのである。もちろん、逆に、円筒の底面積が増え、円筒が平たくなれば、渦度は減少する。

この効果で渦度がどれくらい増加するものなのか。例として、円筒の下面は $p=1000$ hPa 面にあり、そこでの $\omega=0$ とする。(あまり微小ではないが) $\Delta p=-300$ hPa として、 $p=700$ hPa における ω は $\omega=-50$ hPa h^{-1} とする。すなわち、大気下層に収束があり、700 hPa ではこれだけの上昇流がある状況を想定している。緯度 35° における f の値は約 $8.4 \times 10^{-5} s^{-1}$ であるから、上式によると、渦度は1時間当たり $1.4 \times 10^{-5} s^{-1}$ 増加する。このままの状況で渦度が増大を続けると、半日後には $1.6 \times 10^{-4} s^{-1}$ という大きな渦度を持つことになる。次回に爆発的に発達した南岸低気圧のお話をしますが、その低気圧の中心付近の渦度はこの桁の大きさである。こうして、激しい降雨の際に開放された凝結の潜熱は上昇流を強化し、その上昇流がストレッチ効果により低気圧の発達を助けているのである。

低気圧の発達はやはり低気圧中心の気圧の低下でないと実感できないという読者は、コップの中で回転している水を考えたらどうだろう。この水の表面は下にへこんでいる。従って、コップの底面においては、へこみの中心の圧力が周りより低い。水の回転速度が増



第6図 渦度の時間変化におけるストレッチ効果の説明図。

し、渦度が大きくなるにつれて、中心における圧力もますます低くなっていく。

謝 辞

この原稿について有益なコメントを下された東京大学海洋研究所新野 宏教授、編集委員、査読者、図の作成・提供をして下さった同所の平田理沙さんと大学院生の田上浩孝さんに感謝します。

参 考 文 献

- Amenu, G. G. and P. Kumar, 2005: NVAP and Reanalysis—2 Global Precipitable Water Product. Intercomparison and variability studies, Bull. Amer. Meteor. Soc., **86**, 245-256.
- 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.
- Chang, E. K. M., S. Lee and K. L. Swanson, 2002:

- Storm track dynamics, J. Climate, **15**, 2163-2183.
- Chen, S.-J., Y.-H. Kuo, P.-Z. Zhang and Q.-F. Bai, 1991: Synoptic climatology of cyclogenesis over East Asia, 1958-1987, Mon. Wea. Rev., **119**, 1407-1418.
- 小倉義光, 1984: 一般気象学, 東京大学出版会, 314pp.
- 小倉義光, 1994: お天気の科学—気象災害から身を守るために, 森北出版株式会社, 226pp.
- 小倉義光, 2000: 「Images in Weather Forecasting」の紹介, 天気, **47**, 227-228.
- 高原宏明, 松本淳, 2004: 東アジアにおける気団と前線帯の季節変化, 月刊海洋, **36**, 252-256.
- Tracton, M. S., 1973: The role of cumulus convection in the development of extratropical cyclones, Mon. Wea. Rev., **101**, 573-593.
- Zishka, K. M. and P. J. Smith, 1980: The climatology of cyclone activity and anticyclones over North America and surrounding ocean environments for January and July 1950-77, Mon. Wea. Rev., **108**, 387-401.



測候時報第72巻第1号及び気象庁研究時報第57巻第1号の内容案内

測候時報第72巻第1号(平成17年9月1日発行及び気象庁研究時報第57巻第1号(平成17年9月9日発行)が発行されましたので内容(表題:著者:ページ:要旨)についてお知らせいたします。

なお、測候時報・気象庁研究時報は気象業務支援センター(Tel:03-5281-0440, Fax:03-5281-0443, URL:http://www.jmbc.or.jp)から購入できます。

<測候時報第72巻第1号>

- ◇第67回気候問題懇談会報告:地球環境・海洋部:
P1-14
(要旨省略)
- ◇第68回気候問題懇談会報告:地球環境・海洋部:
P15-21
(要旨省略)

<気象庁研究時報第57巻第1号>

- ◇関東平野西部に発生した線状降水システムの解析
—2003年8月8日の事例—:牧野眞一:P1-13
(要旨省略)
- ◇2003年8月5日に北海道東部で発生した大雨の事例
解析:米川博志:P15-25
2003年8月5日昼前から宵のうちにかけ、北海道東部で活発な雨雲が発生、局地的な大雨となった。メソ顕著現象を実況監視するうえで有効な特徴を見出すため事例解析を行った。その結果、高層資料や数値予報モデルから自由対流高度や中立浮力高度などの指数を求め、アメダス10分値、地上発散、雲頂温度などの実況と比較することは、実況監視するための資料として有効であることがわかった。

(気象庁総務部企画課)