



お天気の見方・楽しみ方 (5)

2003年7月3～4日静岡豪雨と梅雨前線小低気圧の世代交代

小倉 義光*

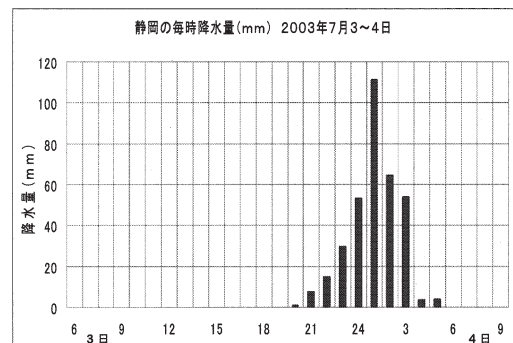
1. 記録的な不意打ち静岡豪雨

わが国では、集中豪雨が頻発する。梅雨期に九州や西日本で多いが、そのほかの地域や季節でも起こる。そして、多くの集中豪雨の場合には、数時間のリードタイムを持って予測するのは、現在でも困難である。

そうした不意打ち集中豪雨の1例が、2003年7月3日から4日にかけて、静岡市を中心とする地域を襲った豪雨である。静岡地方気象台では、4日00時14分から01時14分までの1時間に113 mmの猛烈な雨を観測し、1時間降水量としては、同気象台が観測を開始した1940年以来最大の値となった(東京管区気象台ホームページ)。第1図が毎正時の値による1時間降水量の推移である。ほぼ3日20時ころから雨が降り出し、4日01時頃に降水強度のピークに達し、降雨は05時頃に終わっている。結局、この豪雨による静岡市の3日と4日の合計降水量は344.5 mmとなった。このため、静岡市では床上・床下浸水が1551所帯、山・崖崩れ25箇所が発生し、交通機関にも影響が出た。

また、静岡市に豪雨を降らせた雨雲は、引き続き駿河湾から伊豆半島に進み、4日03時までの1時間にアメダス「土肥町」で129 mm、04時までの1時間にアメダス「中伊豆町天城山」で101 mmの雨を観測し、いずれも極値を更新している(アメダス地点の位置は第13図参照)。

そして、豪雨を起こす気象環境を調べてみると、今回の豪雨は梅雨前線に伴ったものであった。梅雨前線に沿っては、直径が2000 km程度(いわゆるメソ α スケール)の小さい低気圧がよく発生し、それがしばしば



第1図 静岡市における2003年7月3～4日の毎時降水量(mm)(静岡地方気象台)。

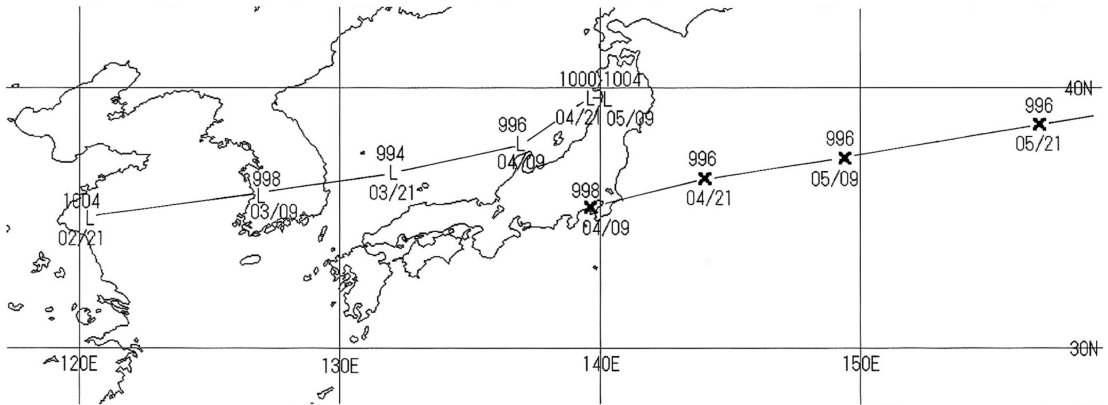
ば豪雨を引き起こすことはよく知られている。しかし、一般的には、その多くは九州や西日本で起こり、静岡県で起こることはまれである。しかも、今回の小低気圧は梅雨前線上で発生したものの、東進して日本海南部に入るところから梅雨前線とは切り離されて勢力を失ってしまった。一方、梅雨前線は新たに本州南岸沿いに延びて、その先端で静岡豪雨が起こった。そして、その地域で小低気圧が発生したので、梅雨前線上の小低気圧の世代交代という現象が起こったように見られた。今回は、この小低気圧の世代交代と豪雨との関係についてお話をしたい。

2. 小低気圧の生涯

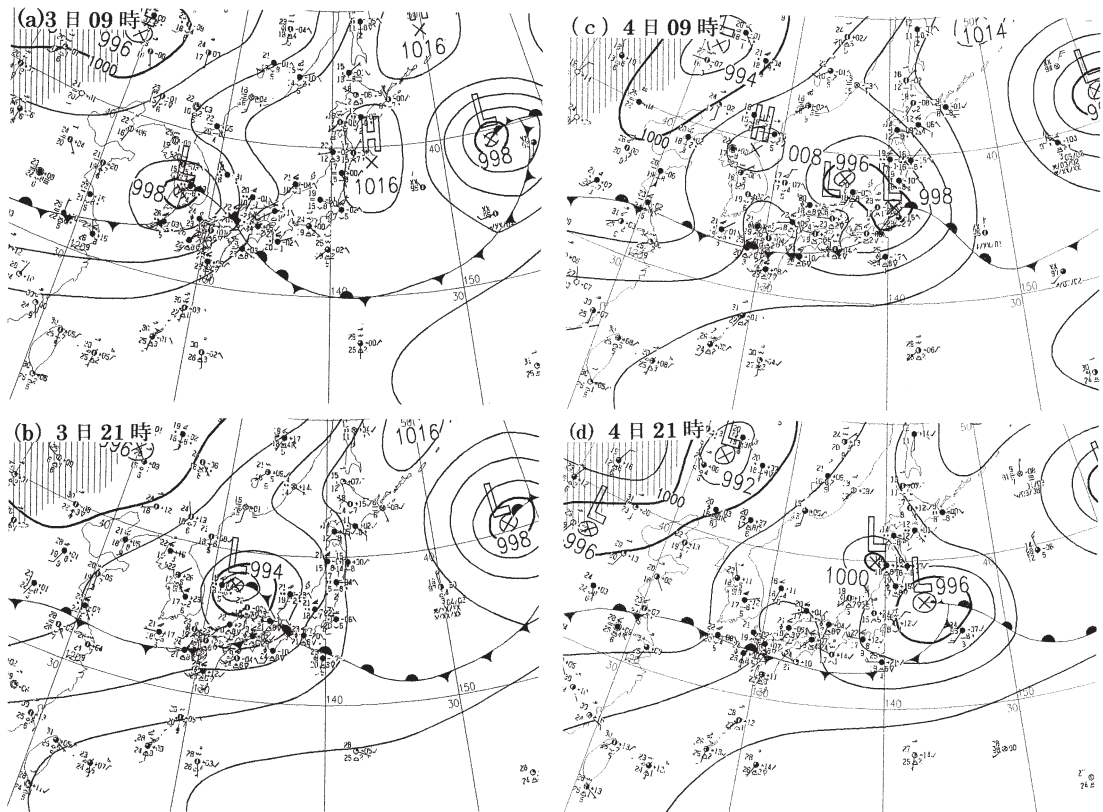
第2図は今回議論する小低気圧について、12時間毎の中心位置と中心気圧を示す。6時間毎の地上天気図によれば、低気圧は7月2日15時に黄河下流域に中心気圧1004 hPaを持って誕生した。それから東進して3

* Yoshimitsu OGURA, 東京大学海洋研究所。

© 2006 日本気象学会



第2図 2003年7月2日21時から5日21時まで、初代低気圧(記号L)と次世代低気圧(記号クロス)の中心位置と中心気圧、12時間毎。



第3図 12時間毎の地上天気図。(a) 2003年7月3日09時、(b) 3日21時、(c) 4日09時、(d) 4日21時(気象庁)。

日09時には朝鮮半島南部の海岸近くに位置している。このときの地上天気図が第3図aである。小低気圧に

は温暖前線や寒冷前線も備わっている。ちなみに、この気圧と前線の配置は北九州にとって集中豪雨の起こ

りやすい状況である。これまでの北九州で最も死傷者の数が多かった1957年7月25日の諫早豪雨（死者行方不明者739名）や1982年7月23～24日の長崎豪雨（299名）は、第3図aよりも少し南に下がった低気圧に伴う温暖前線上で起こった。今回は被害を起こすほどのこともなく東進し、3日21時に朝鮮半島東方洋上に到達したときには、既に静岡では豪雨が始まっている。この時刻、第3図bの地上天気図はなかなか微妙で、低気圧中心から閉塞前線が南東に延び、若狭湾付近にある閉塞点から温暖前線と寒冷前線が解析されている。それから12時間後の4日09時に低気圧が能登半島付近に達したところには、静岡豪雨はとっくに終わっており、関東地方南部に新たな低気圧が発生して、温暖前線も寒冷前線もこの新たな低気圧に伴うように解析されている（第3図c）。その後、初代の低気圧は東北地方日本海沿岸付近で停滞し、やがて消滅する。代わって次世代の低気圧が東進し、梅雨前線を後に引きながら、第3図dに示すように、典型的な梅雨期の低気圧の顔をして存在している。

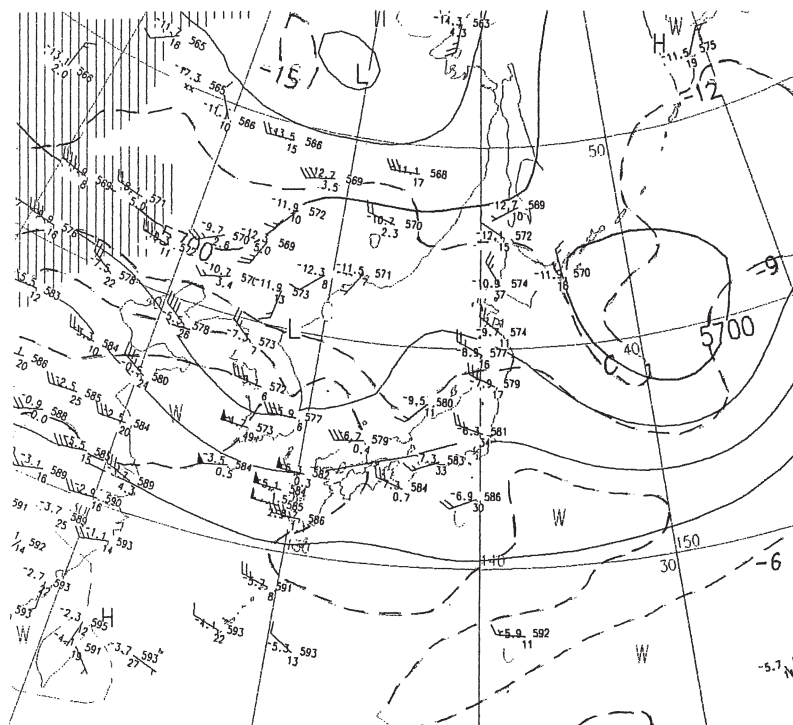
ちなみに、今回の低気圧は上層の擾乱を伴っており、対流圏全体にわたる構造を持っている。第4図に3日

09時の500 hPaの高層天気図を示す。朝鮮半島上空に短波のトラフがある。しかし、このトラフの温度は周りよりもむしろ高い。また、第3図aと比較してわかるように、トラフの軸の鉛直方向の軸の傾きは殆どない。従って、傾圧波として、今後発達して下層の低気圧の発達に寄与することはない。しかし、上層のトラフに伴う中層の乾燥した層は、豪雨を起こすCb群の発達に欠かせないものであった（後述）。また、トラフの南端で九州地方に見られる強い西風は水蒸気を輸送し、湿舌を静岡にまで伸ばすのに寄与した。

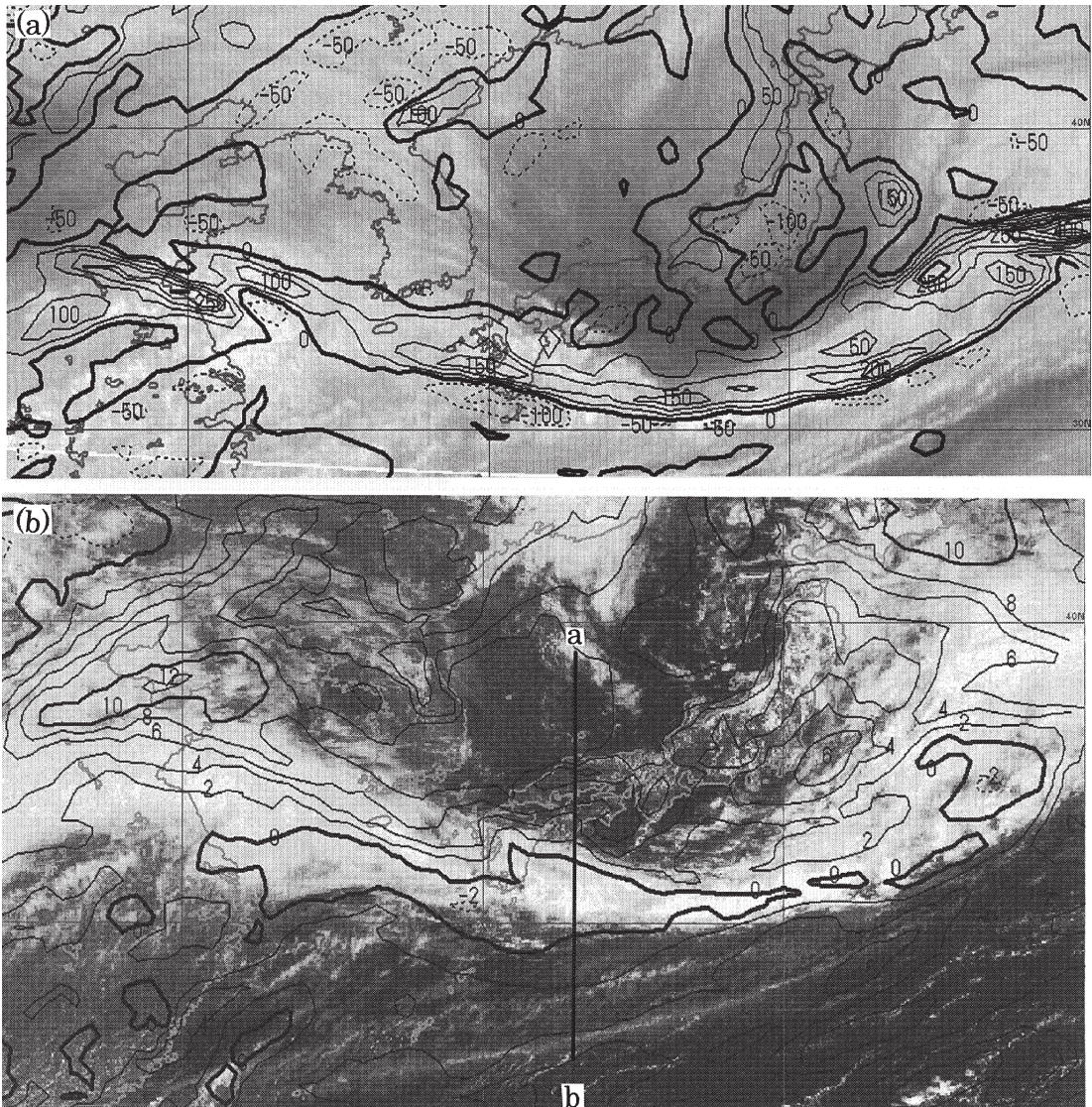
3. 小低気圧の発生・発達

一般的に梅雨前線については、① 135°E以西では主として比湿（あるいは相当温位）の南北勾配、それ以东では温位の南北勾配によって形成される。② 梅雨前線に沿って下層では、比湿の大きな領域が南西から舌状に延びる湿舌が見られる。③ 梅雨前線南側に沿って下層700 hPaに中心を持つ下層ジェットが観測される。④ 梅雨前線への水蒸気輸送にはインドモンスーンによる南西風系と太平洋高気圧の縁を流れる風系が重要である。⑤ 中緯度を通過する擾乱と比較して梅雨前線付近での傾圧性は弱いなどの特性が指摘されている（Matsumoto *et al.*, 1971など）。

第5図は低気圧発生3時間前の2日12時、図(a)では水蒸気画像に850 hPaの渦度分布を、図(b)では可視画像にショワルター安定度指数 (SSI) の分布を重ねたものである。32°N前後の東西に延びる雲帯が梅雨前線を表す。この雲帯に沿って、低気圧性の渦度が大きい。黄河下流域の海上で特に雲が白く見える地域で、渦度は $250 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ と大きい。ここでは既に下層に渦巻きがあり、これがやがて地上の低気圧として解析される。さらに、梅雨前線の雲帯に平行して、そのやや南側に、ショワルター安定



第4図 2003年7月3日09時における500 hPaの高層天気図（気象庁）。



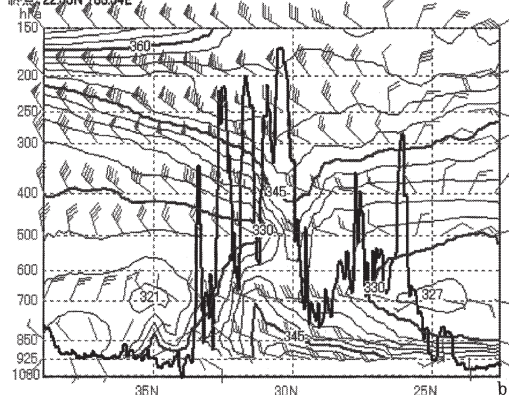
第5図 2003年7月2日12時。(a) 水蒸気雲画像に重ねた850 hPaの渦度($50 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$ 毎), (b) 可視雲画像に重ねたショワルター安定度指数(2°C 毎)。いずれも破線は負の値。図(b)の線分a-bは第6図の鉛直断面の位置を示す。

度指数 (SSI) が負という不安定領域が带状に存在している。すなわち、①～⑤の特性に加えて、梅雨前線は下層で低気圧性の渦度が大きく、SSIが負の値を持つ不安定成層をした带状の領域としても性格づけることが出来る。

第6図は同時刻、第5図bの線分a-bに沿った南北断面図で、梅雨前線帯の鉛直構造を示す。第5図の雲画像では明瞭ではなかったが、成層が不安定なため、

梅雨前線帯で対流圏界面に達するようなCbが発達していることが認められる。これに伴う上昇流により、下層では梅雨前線の南側にある高い相当温位の空気が上に持ち上げられている。また上層でも、例えば相当温位345 Kの線が下に垂れ下がっているのは、Cbの影響を受け梅雨前線上空で湿度が上昇したためである。風については、今回も(あまり顕著ではないが)700 hPaを中心として約 20 ms^{-1} の下層ジェットがある。ま

== 断面表示 ==

2003-07-02 02:37UTC
始点: 39.00N 133.08E
終点: 22.55N 133.34E

第6図 第5図と同時刻、第5図の線分a-bに沿った鉛直断面内の相当温位(5 K 毎)と風(短い矢羽が 2.5 ms^{-1} , 長い矢羽が 5 ms^{-1} , ペナントが 25 ms^{-1})。太い実線は輝度温度から推定した雲頂高度。

たその上空、やや高緯度よりの250 hPa あたりには約 45 ms^{-1} の亜熱帯ジェットがある。

第7図が3日09時における状況である。最も特徴的なことは低気圧の中心付近には雲が全くないことである。雲域は低気圧中心の東側だけに存在し、そこでは南よりの風に乗って、暖気が温暖前線に乗り上げるような形態をしている。700 hPa における鉛直 p 速度

(ω)の分布を見ても、低気圧の中心からずれた東側に集中している(図省略)。これは梅雨期の多くの低気圧に共通した特徴であって、それなりの理由があるのだが、それについては話が長くなるので、別の機会に話したい。

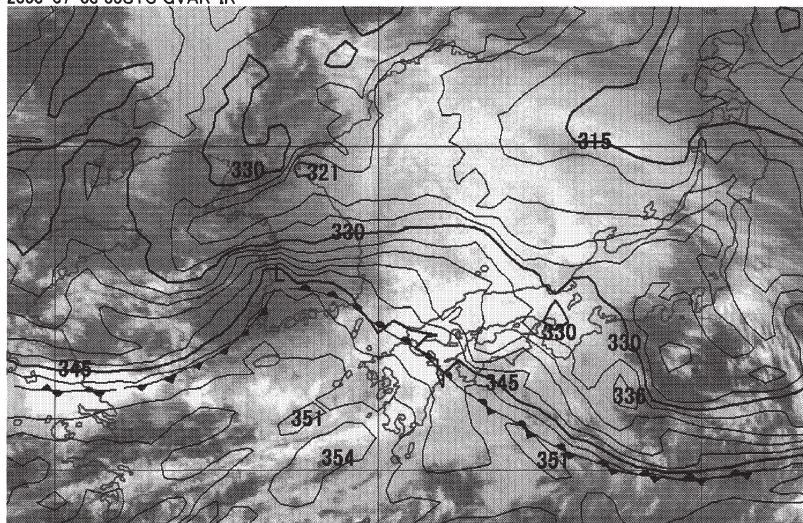
4. 豪雨を取り巻く気象環境

次に、静岡地方に豪雨が降っているとき、豪雨を取り巻く周囲の気象環境はどう変化していったか調べよう。第7図の3日09時から12時間あるいは18時間経つ間に大きな変化があった。第8図は3日21時における850 hPa における鉛直 p 速度(ω)の分布図である。依然として低気圧中心付近には雲はないが、これまでは低気圧中心の東側で ω が負(上昇流)の領域が連続的に広がっていたが、この時刻までに ω が正(下降流)の領域が割り込んできて(最大で 80 hPa h^{-1})、上昇流域は2つに分断される。南の部分では ω の正・負の領域が150~200 kmの間隔で東西方向に並ぶという構造を持つ。一般的に、梅雨前線に沿って、雲のクラスターがこの程度の波長を持って整然と並んで出現するという雲画像をときどき見るが、第8図もそうしたケースの1つなのであろう。それ自身気象学としては興味ある現象であるし、未解決の問題であるが、本題とは関係ないので先を急ぐことにする。

第9図は静岡豪雨がピークを過ぎた4日03時における925 hPa の風と相当温位の分布を赤外雲画像に重ね

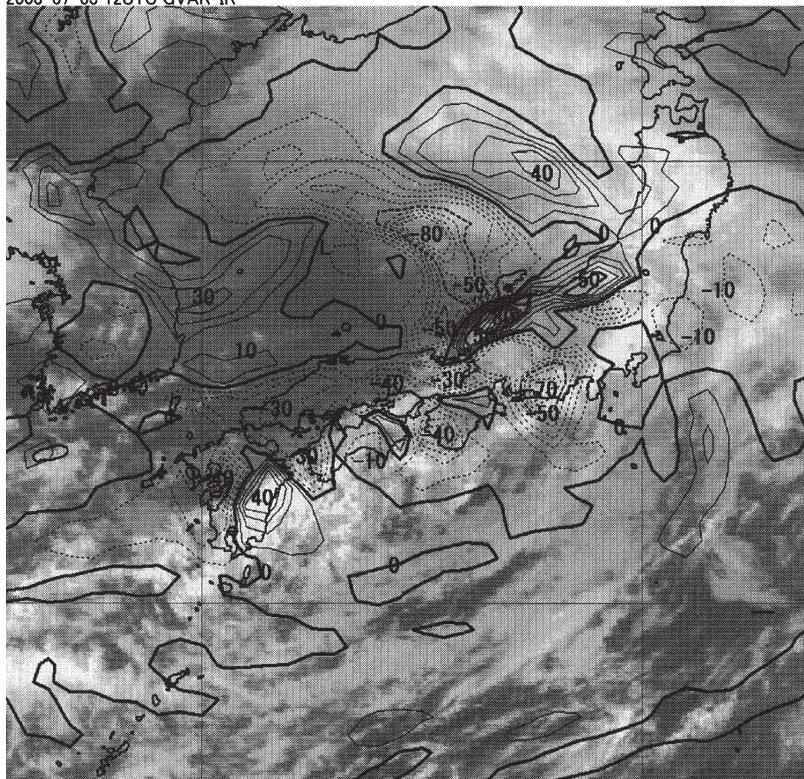
たものである。まず、静岡市、駿河湾、伊豆半島にかけて、発達したCb群が認められる。第7図でもそうであるが、第9図でも温暖前線と寒冷前線は、相当温位の傾度が大きい帯の低緯度側として描いている。温暖前線の高緯度側では南風が関東平野全域に吹き込んでいるので、ここに前線があることには疑問はない。この温暖・寒冷両前線の南側、普通の低気圧の暖域に対応する領域に、相当温位 $\geq 345 \text{ K}$ の湿舌が西から延びているわけであるが、ここで重要なのは、18時間

2003-07-03 00UTC GVAR-IR



第7図 7月3日09時、赤外雲画像に重ねた925 hPa における相当温位(3 K 毎)。

2003-07-03 12UTC GVAR-IR



第8図 7月3日21時、赤外雲画像に重ねた850 hPaの鉛直 ω 速度(ω , 10 hPa h^{-1} 毎)。破線は負の値。Lは地上低気圧中心の位置。

前の第7図の段階では、相当温位が345 Kの線は低気圧の中心を通っていたのに、第9図では低気圧中心を通るのは336 Kの線である。345 Kの線は遠く300 kmも離れている。すなわち、低気圧は湿舌という水蒸気の供給源から切り離されてしまったのだ。それで、この時刻以降は次第に衰弱していく(第2図)。反対に、新たな温暖前線上で、静岡豪雨というCb群が発達したのである。

第10図は同時刻において、水蒸気雲画像にレーダーエコー図とSSiの分布を重ねたものである。東北地方にかかっている強い雨雲は、第8図に示したように、分断された上昇気流流域の北半分に対応する雲である。エコー分布から見ると、低気圧本体の雲域から寒冷前線に対応する雲帯が南西に延びて、それなりの低気圧の形態を保持している。この地域のSSiは2~6の程度であり、大部分は層状性の雲と思われるが、32 mm h^{-1} 以上の強いエコーもある。理屈からいえばSSiは負の値を示すときが成層不安定なわけであるが、田

口ほか(2002)や河野ほか(2004)が関東地方の雷雨の発生を調べた結果によると、この程度の正のSSiの値でも雷雨が発生したケースが少なからずあった。

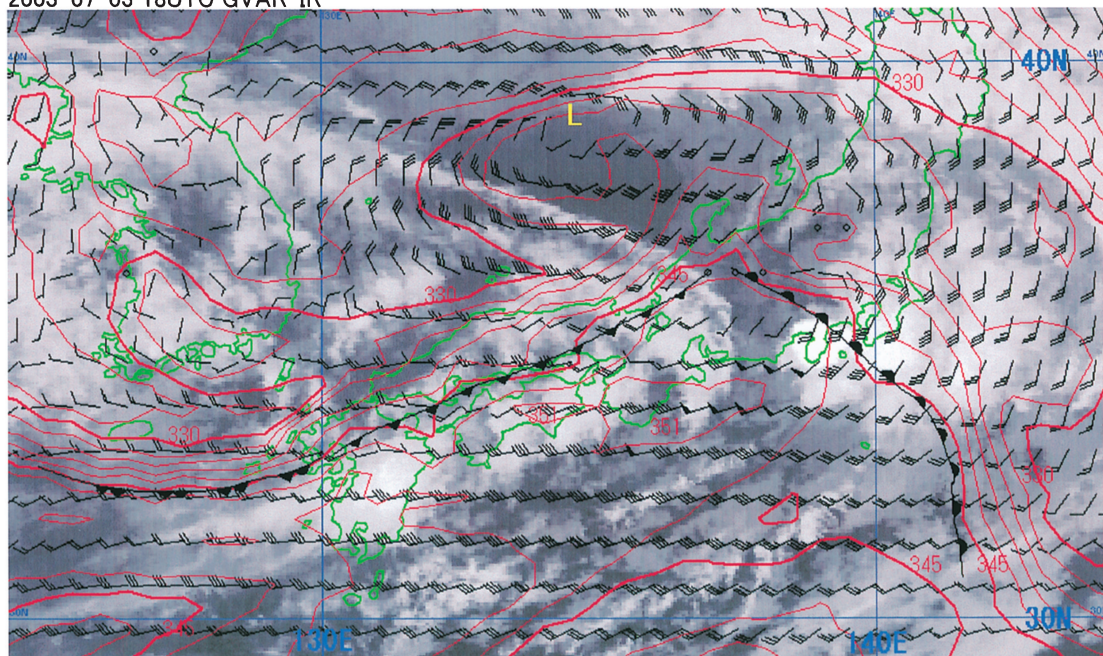
一方、今問題としている静岡豪雨の雨雲は、ピークを過ぎて駿河湾に移動しつつあるものの、依然として、その位置はSSiが負の値を持つ領域とよく対応している。どうしてこの位置でSSiが負の値をとるのか調べるために、第11図は同時刻、水蒸気雲画像に500 hPaの相対湿度の分布を重ねたものである。静岡豪雨はちょうど相対湿度の水平勾配が強い線上にある。

実は、このケースは気象衛星センター(2004)編集の「雲解析事例集」に、「7月3日梅雨前線による静岡県の大雨」と題して収録されている(但し、7月3日

09時から4日09時までの24時間分だけ)。第11図の雲画像はそこから引用したもので、気象衛星センターは水蒸気画像で暗域と明域の境界を見やすくするために、細い白の点線を記入して、これを「バウンダリー」と呼んでいる(白の点線は細く、見にくいかもしれないのでA-B-Cの符号を付けた)。しかし現在の場合、点線B-Cの部分の「バウンダリー」が、現象を理解するのにどれだけ意味があるのか不明である。なぜなら、この線の西方に広がっている雲は、偏西風帯上流の上層トラフに伴って発生した上層雲であり(後の第12図b参照)、その下に広がっている乾燥域を覆い隠してしまっているからである。乾燥域の境界を示す役割をしているのは点線のA-Bの部分だけである。

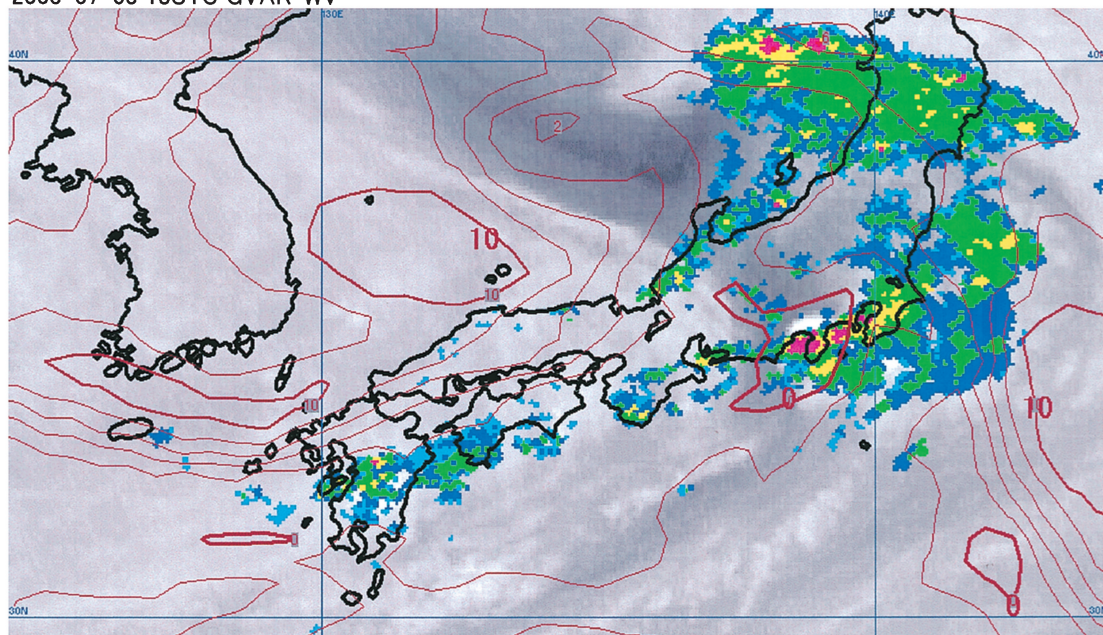
点線A-Bの重要性を見るために、第12図aは点線A-Bにはほぼ直交する方向(線分c-d)の鉛直断面において、輝度温度から推定した雲頂高度と相当温位の分布を示す。静岡豪雨を起こしている雲頂高度の高い雲は、中層で北西方向から侵入してきた低相当温位の

2003-07-03 18UTC GVAR-IR



第9図 7月4日03時，赤外雲画像に重ねた925 hPaにおける相当温位（3 K 毎）と風（記号は第6図と同じ）。L は地上低気圧中心の位置。

2003-07-03 18UTC GVAR-WV



第10図 7月4日03時，水蒸気画像に重ねたレーダーエコー図とショワルター安定度指数（2℃毎）。

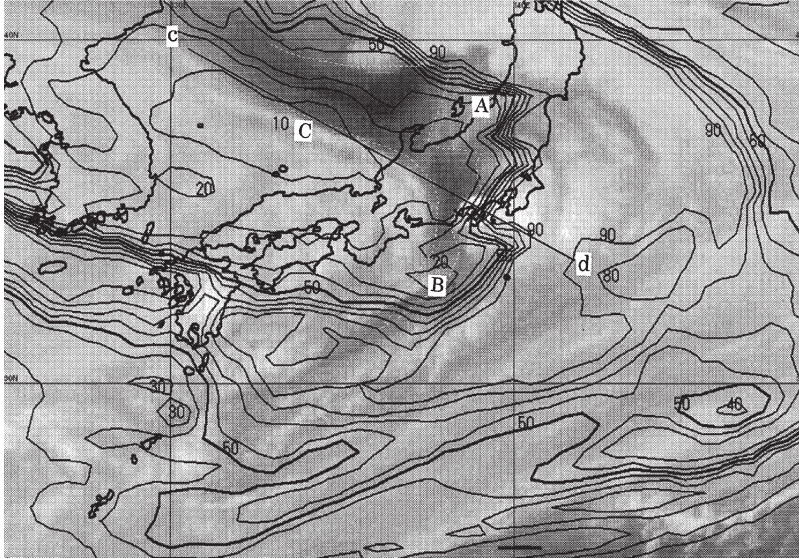
先端部分（これ以降は鼻と呼ぶ）の位置にある。この鼻から高緯度側の地域の下層では対流不安定な成層をしている。これは、第10図に示した SSI の負の値の地域と Cb 群の密接な関係を再確認するものである。次に、第12図 b は同じ鉛直断面上の相対湿度を表しているが、中層で相当温位が低い層は、空気が乾燥しているためであるということが分かる。ちなみに、第12図

b の高緯度側上層の高相対湿度の部分は、前に述べた上層雲に対応している。

こうして、今回の静岡豪雨で本質的に重要なことは、上層のトラフに伴う中層の乾燥空気の進入である。このことは、ここで始めて発見されたことではなく、古くは Watanabe and Ogura (1987) から、最近では Kato (2006) にいたるまで、多くの文献や報告書で指

摘されている。また本質的によく似たような現象は、梅雨のない他の国でも見出されている。例えば、以前に解説したことがあるのでここで繰り返さないが（小倉, 1999）、米国ロッキー山脈の東側で出現する上空寒冷前線（CFA）（Hobbs *et al.*, 1996）や、Browning and Monk (1982) が提唱したスプリット前線などがそれである。後者については、Browning 氏が1997年の日本気象学会大会に招かれ、講演をしたので、おなじみの方もいらっしゃるだろうと思う（Browning, 1997）。こうした事情なので、今後の記述の便宜上、今回述べ

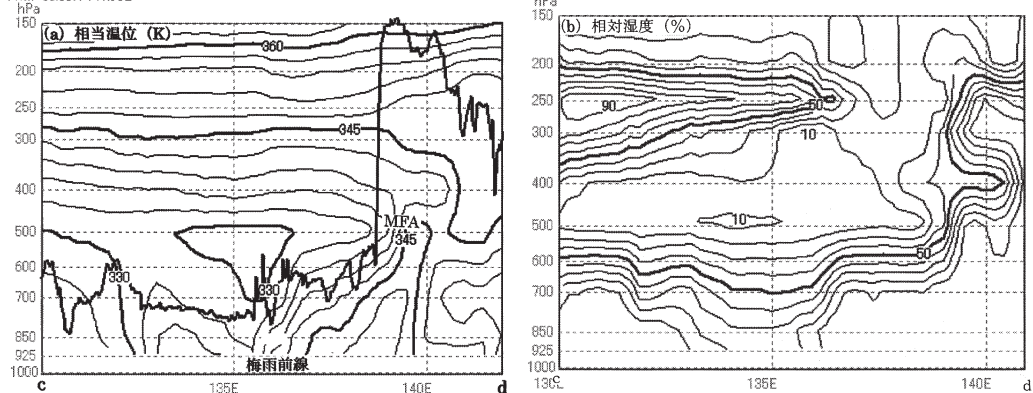
2003-07-03 18UTC GVAR-WV



第11図 7月4日03時、水蒸気雲画像に重ねた相対湿度（10%毎）。クロスは左から豪雨が降っている静岡市、土肥町、天城山を示す（拡大図は第13図参照）。線分 A-B-C は上空乾燥線（本文参照）。線分 c-d は第12図の鉛直断面の位置。

== 断面表示 ==

2003-07-03 17:37 UTC
始点: 40.06N 130.05E
終点: 33.60N 141.93E



第12図 7月4日03時、第11図の線分 c-d に沿った鉛直断面。(a) 相当温位（3 K 毎）。太い実線は輝度温度から推定した雲頂高度。MFA（上空水蒸気前線）については本文参照。(b) 相対湿度（10%毎）。

た低相当温位の鼻の部分を上空水蒸気前線 (moisture front aloft, 略して MFA) と呼んだらどうであろうか。前線は本来温度について定義されたものであるが、ここでは水蒸気量について定義されている。

以上述べたプロセスの最後の段階として、静岡県で長く続いた大雨のために、既に神奈川県付近に存在していた渦巻き (第9図) が強化され、新しい小低気圧が誕生した。これが本稿で言う次世代の低気圧である。ただ第9図では渦巻きが明瞭に見えないので、第13図に4日03時におけるアメダスの風の分布を示した。ここの渦巻きは $100 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ を超える渦度を持つ。

ちなみに、こうした世代交代という現象がどれくらい頻繁に起こるものか、過去約10年の天気図をざっと調べたが、日本海を横断した小低気圧については、世代交代を起こしたものは1つもなかった。その点からも今回のケースはユニークである。ただし、最近、世代交代という用語は使っていないが、Shibagaki and Ninomiya (2005) と二宮 (2006) が似たような現象を多重スケールの相互作用の見地から議論している。彼らの1991年7月3～5日のケースでは、中国大陸で発生した低気圧が黄海に進入したところ、九州地方で新低気圧が発生した。

最後に、上で触れた「雲解析事例集」については、その2000年版を小倉 (2003) が紹介している。今回の2002・2003年版では、価格は2000年版の1万円の約半値となり、入手しやすくなったので、ご利用をお奨めしたい。本稿の第7～13図はすべてそれを材料として

作成したものである。ただし、「雲解析事例集」の主な目的は、題名のように、雲画像の解析と解釈の仕方であり、各事例の解説もその線に沿っている。一方、本シリーズの目的はお天気の見方・楽しみ方であるから、衛星雲画像だけでなく、GPV・天気図・ゾンデ・レーダー・アメダス・WPR など、いろいろなデータを利用している。そして、「雲解析事例集」にはこれらのデータが収録されている。ことに総観規模の気温・気圧・湿度・風・渦度・相当温位などは格子点で与えられているから、読者は例えば低気圧の発生・発達の様子を、こうした力学的熱力学的な量で見ることがができる。これは、ゾンデ観測のない海上などの地域で、気象衛星が見る雲の形の変化から、低気圧の発達を推定するという任務を負わされていた1970年代の衛星気象学とは大きな違いである。

謝 辞

7月3～4日のデータを提供してくださった函館海洋気象台の隈部良司氏と気象衛星センターの西村修司氏、静岡地方気象台のデータを提供してくださった斉藤三行台長、適切なコメントを頂いた編集担当委員別所康太郎氏と査読者に謝意を表します。

参 考 文 献

- Browning, A. K., 1997: 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, A. K. and G. A. Monk, 1982: A simple model for the synoptic analysis of cold fronts, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., **108**, 435-452.
- Hobbs, P. V., J. D. Locatelli and J. E. Martin, 1996: A new conceptual model for cyclones in the lee of the Rocky Mountains, Bull. Amer. Meteor. Soc., **77**, 1169-1178.
- Kato, T., 2006: Structure of the band-shaped precipitation system inducing the heavy rainfall observed over Northern Kyushu, Japan on 29 June 1999, J. Meteor. Soc. Japan, **84**, 129-153.
- 気象衛星センター, 2004: 雲解析事例集, 気象業務支援センター, CD-ROM.
- 河野耕平, 広川康孝, 大野久雄, 2004: ラジオゾンデデータによる気団性雷雨日の診断—太平洋高気圧下の夏の関東地方, 天気, **51**, 17-30.
- Matumoto, S., K. Ninomiya and S. Yoshizumi, 1971: Characteristic features of a cold front and the



第13図 7月4日03時, アメダスの風の分布。長い矢羽が 2 ms^{-1} 。クロスは左から静岡市, アメダス「土肥町」, アメダス「中伊豆町天城山」の位置を示す。

- relevant vertical circulation, J. Meteor. Soc. Japan, **48**, 267-281.
- 二宮洸三, 2006: 日本列島域の大規模および中規模循環系に関する研究〜特に多重スケール階層構造に注目して〜, 天気, **53**, 93-122.
- 小倉義光, 1999: メソ対流系の力学, 気象研究ノート, (196), 1-18.
- 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.
- Shibagaki, Y. and K. Ninomiya, 2005: Multi-scale interaction processes associated with a sub-synoptic-scale depression on the Meiyu-Baiu frontal zone, J. Meteor. Soc. Japan, **83**, 219-236.
- 田口晶彦, 奥山和彦, 小倉義光, 2002: SAFIR で観測した夏季の関東地方における雷雨と大気環境. II: 安定度指数による雷雨の予測, 天気, **49**, 649-659.
- Watanabe, H. and Y. Ogura, 1987: Effects of orographically forced upstream lifting on mesoscale heavy precipitation: A case study, J. Atmos. Sci., **44**, 661-675.
-