

PV inversion を用いた診断的解析

～ 1999 年 10 月 27 日に関東地方に大雨をもたらした低気圧 ～

金井秀元*・新野 宏 (東大海洋研)

1. はじめに

1999 年 10 月 27 日、本州南岸を通過した低気圧に伴い、関東地方では所により数時間で 300 ミリ前後の大雨となった。中でも千葉県佐原市では 19 時から 1 時間にアメダス観測史上 1 位タイとなる 153 ミリの時間雨量を記録した。これまでの研究(金井,2002)では、主に大雨をもたらした原因についてメソ・総観スケールの解析から明らかにした。今回は、この大雨をもたらした低気圧の発達メカニズムに焦点を当てて解析を行った。

2. 現象の概況

この大雨をもたらした低気圧は 1999 年 10 月 26 日 21 時頃に東シナ海で発生し、発達しながら本州南岸を進んだ(図 1)。この低気圧は 26 日 21 時から 24 時間で中心気圧が 18hPa 深まるという、爆弾低気圧(Sanders and Gyakum,1980)に匹敵する急発達を遂げた。最近の研究では急発達を遂げる低気圧と上層の高渦位擾乱との関係が強調されている(例えば、Uccellini,1990)。図 2 は、上層 250hPa と下層 850hPa の渦位(PV)の時間変化を示したものである。高緯度側にある高渦位空気先端が時間とともに南に向かって張り出し、地上低気圧に接近している。この高渦位擾乱の接近と低気圧の発達期はよく一致していた。一方、対流圏下層にも成層圏起源のものとは異なる高渦位が低気圧中心付近で時間とともに生成されている様子が見られる。これは、中心付近での激しい降水に伴う潜熱解放によって生成されたものである。こ

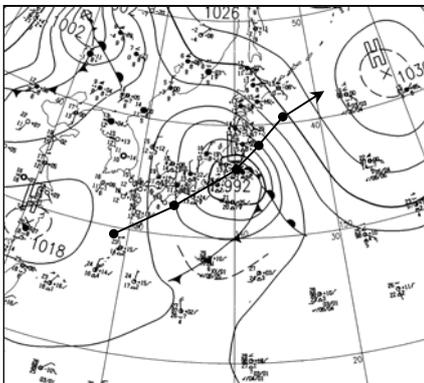


図 0: 1999 年 10 月 27 日 21 時の地上天気図と低気圧の移動経路

のように、今回の低気圧では、上層と下層の擾乱のカップリングが低気圧を急発達させた可能性が推測される。そこで、今回は PV inversion を用いてこの低気圧の発達メカニズムについて解析を行った。

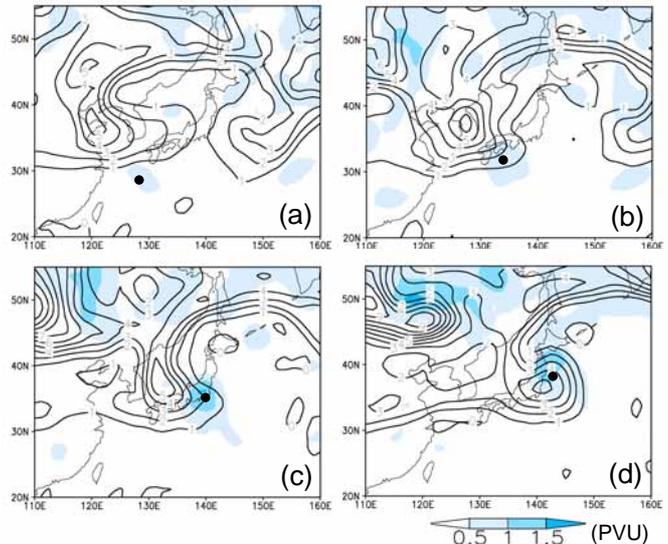


図 2: 250hPa(contour)と 850hPa(shade)の渦位。(a)26 日 21 時 (b)27 日 09 時(c)27 日 21 時(d)28 日 09 時。 は地上の低気圧中心。

3. PV inversion

この節では、PV inversion について簡単に説明する。PV(渦位)は(1)のように表される保存量で、その大きな特徴として invertibility principle(転換可能性の原則)がある。これは、渦位を求めるときには速度場と温度場の二つから決めるため、渦位の分布を与えただけでは両者を同時に決めることはできないが、速度場と温度場を結びつける方程式があれば、渦位の分布を与えただけで両者を同時に決めることができるというものである。ここでは、Davis and Emanuel(1991)にならって、速度場と温度場を関係付ける式として(2)で表される Nonlinear balance equation を用いる。いずれも、ポアソン方程式なので、適当な境界条件を与えて解くことができる。これが PV inversion である。

この PV の特性を使ったさらに有益な手法が、piecewise inversion である。これは、全 PV から平均場の PV を引くことで定義される PV アノマリを複数のパートに分離して inversion を行うことによ

て、各 PV アノマリ間の相互作用や各 PV アノマリの低気圧発達への相対的な寄与などを知ることができるというものである。

$$q = \frac{g\kappa\pi}{p} \left[(f + \nabla^2\Psi) \frac{\partial^2\Phi}{\partial\pi^2} - \frac{1}{a^4 \cos^2\phi} \frac{\partial^2\Psi}{\partial\pi\partial\lambda} \frac{\partial^2\Phi}{\partial\pi\partial\lambda} - \frac{1}{a^4} \frac{\partial^2\Psi}{\partial\pi\partial\phi} \frac{\partial^2\Phi}{\partial\pi\partial\phi} \right] \quad (1)$$

$$\nabla^2\Phi = \nabla \cdot \nabla\Psi + \frac{2}{a^4 \cos^2\phi} \left[\frac{\partial^2\Psi}{\partial\lambda^2} \frac{\partial^2\Psi}{\partial\phi^2} - \left(\frac{\partial^2\Psi}{\partial\pi\partial\lambda} \right)^2 \right] \quad (2)$$

Ψ : 非発散の流線関数 Φ : ジオポテンシャル

4. 低気圧発達のメカニズム

図3は、低気圧発達のメカニズムの一例を模式的に表したものである。a は東西に伸びる傾圧帯の上空に正の PV アノマリが接近してきた様子を示している。この正の PV アノマリが誘起した循環が黒の矢印で示されており、対流圏全層にわたる循環を誘起している。このうち対流圏下層の循環は下層の温位を移流させ上層の PV アノマリの東側に正の温度偏差を形成する。それから時間が経過した b では、この下層の温度偏差も同様に対流圏全層にわたる低気圧性循環を誘起し、上層のアノマリを強化している。このように、低気圧発達の一つのシナリオとして上層と下層のロスビー波の相互作用としての低気圧発達が考えられる。今回のケースでは、このほかに下層に非断熱加熱によって生成された PV アノマリが存在しており、この PV アノマリに伴う循環も上層と下層のアノマリと相互作用すると考えられる。

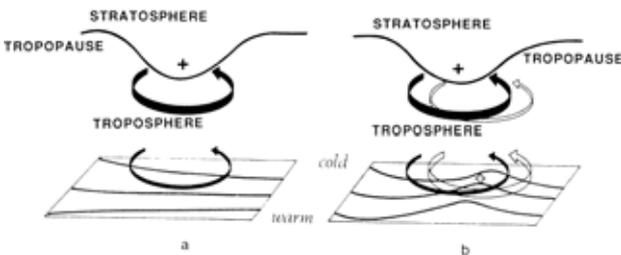


図3: 上空の PV アノマリの下層の傾圧帯上への接近に伴う低気圧発達の模式図。+ は PV アノマリを示している。黒塗りと白抜きの記号はそれぞれ上層と下層に伴うものを示している。(Hoskins et. al.,1985)

5. 設定

今回使用したデータは気象庁全球客観解析データで、最下層は 1000hPa、最上層は 100hPa とした。平均場は 25 日 00UTC から 5 日間の時間平均で定義した。全 PV から平均場の PV を引いて得られる PV アノマリを今回は 4 つのパートに分離した。

上層の PV アノマリ、100 ~ 500hPa の PV アノマリ(湿潤域の正の PV アノマリは除く)で Qupper とする。非断熱加熱による対流圏下層の PV アノマリ、500 ~ 925hPa の相対湿度が 70%以上の領域内の正の PV アノマリで Qsat とした。下部境界の温度偏差、925 ~ 1000hPa の PV アノマリ(湿潤域の正の PV アノマリは除く)で eff とした。残差で Qr と定義した。

り、500 ~ 925hPa の相対湿度が 70%以上の領域内の正の PV アノマリで Qsat とした。下部境界の温度偏差、925 ~ 1000hPa の PV アノマリ(湿潤域の正の PV アノマリは除く)で eff とした。残差で Qr と定義した。

6. 各 PV アノマリの下層低気圧性循環への寄与

図4は、925hPa における渦度を、その時刻の低気圧中心に最も近い格子点を中心とした 10° × 10° の領域内の格子点で平均したものである。図4には、トータル PV アノマリによる渦度と、その内訳が示されている。まず、トータル PV アノマリによる渦度は、時間とともに線形的に増加している。Qsat による渦度は発生初期からすべての時間において最も寄与が大きく、27 日 21 時には 70%近い寄与率を持っている。一方、Qupper による寄与は全時間を通して非常に小さい。このような結果は、非断熱加熱を除くと低気圧がほとんど発達しないという感度実験の結果とも整合的である。

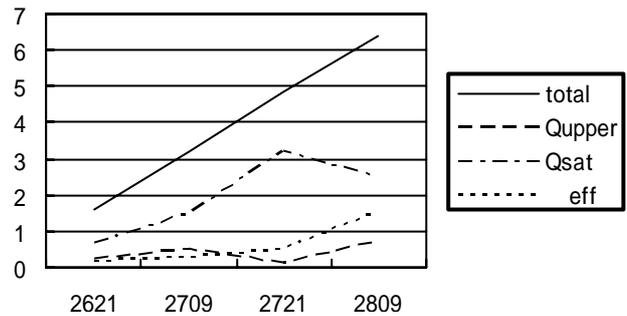


図4: 各PVアノマリによる下層 925hPaの渦度(10⁻⁵/s)への寄与

7. 各 PV アノマリ間の相互作用

次に、各 PV アノマリ間の相互作用について見ていく。図5aは、図3aに対応する Qupper による下層の温位移流を示したものである。トラフとリッジによる流れが合流し、低気圧中心付近で正の温位移流となっており、上層の PV アノマリに伴う循環が下層の温度偏差を強めていることがわかる。さらにこの図から、低気圧中心に向かう水蒸気輸送も推測され、低気圧中心の対流を通して下層の PV 生成にも寄与していると考えられる。こうして低気圧中心付近に生成された下層の PV アノマリは温暖(寒冷)前線上で正(負)の温度移流をもたらし、下層の温度擾乱を増幅するように働いていた(図5b)。図5cは図3bの白抜きの循環に対応する下層の PV アノマリによる上空の渦位の移流の様子を示したものである。今回のケースでは、非断熱加熱によって生成された PV アノマリも温度偏差と

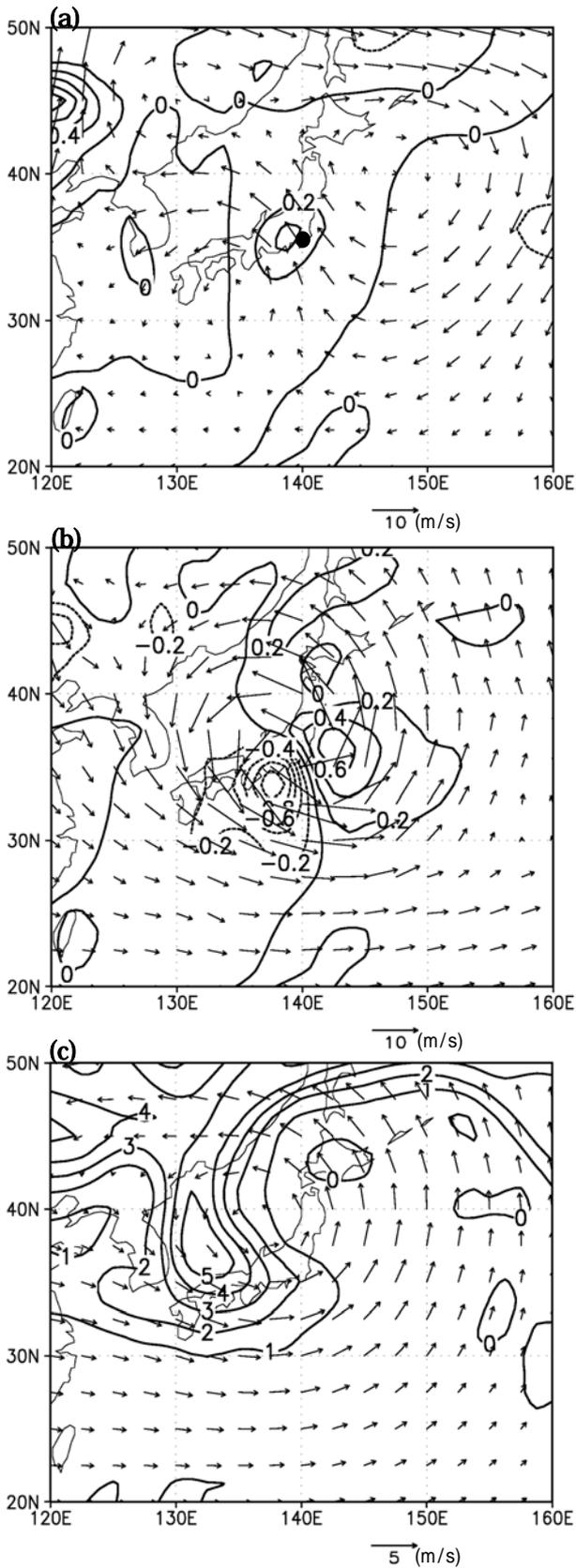


図5:1999年10月27日21時の(a)Qupperの循環による925hPaの温位移流(K/hour), (b)Qsatの循環による925hPaの温位移流(K/hour), (c)250hPaにおけるQsat + effによる循環と渦位(PVU)。は地上低気圧の中心,

同位相にあるため、この両者を合わせて下層のPV アノマリとした。リッジでは南風による負の渦位

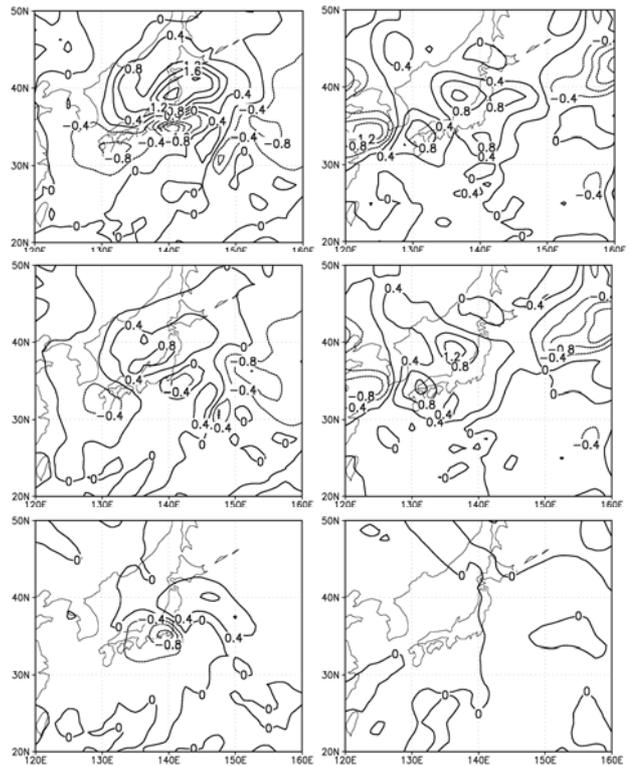


図6:1999年10月27日(左)と1997年11月17日(右)の500hPaの相当温位移流(K/hour)。(上段)トータル PV アノマリによる相当温位移流(K/hour)、(中段)Qupperによる相当温位移流(K/hour)、(下段)Qsat による相当温位移流(K/hour)。

移流があり、トラフでは北風による正の渦位移流となっており、下層の PV アノマリによる循環は上層の擾乱を増幅させるように働いていた。このように、今回のケースでは、上層と下層のロスビー波の相互作用に、非断熱加熱によって形成された PV アノマリによる循環が加わって、さらに発達を強めたと結論できる。

8. 乾燥貫入とスプリット前線

最後に、この低気圧では顕著な乾燥貫入とスプリット前線(Browning and Monk,1982)が見られた。このような中層への乾燥した低相当温位空気の侵入を PV アノマリに伴う循環によって説明を試みた。今回のケースと比較するために、寒冷前線に沿って顕著な積雲対流を伴うアナ前線(Bergeron,1937)が見られた1997年11月17日の事例と比較を行った。PV アノマリによる循環の他に、平均流による移流も存在するが、いずれもほぼ東西流で強さにもそれほど差はなく、その影響は小さいと考えられるためここでは考えない。図6は、トータルの PV アノマリによる500hPaの相当温位の移流とその内訳を示したものである。

本事例のスプリット前線の場合には、南北に一对の正と負の移流が存在している(図6左上)のに対し、アナ前線のケースでは低気圧付近は一様に

正の移流となっている。どうしてこのような移流分布の差異が生じたのかその内訳を見ると、Qupperによる移流は両ケースとも低気圧付近では正の移流となっている。これは、上空のトラフとリッジによる循環が低気圧付近では南風となっており、南方から高相当温位の空気を移流しているためである。しかしながら、Qsat について見てみると、明らかに分布が異なっている。アナ前線のケースでは Qsat による移流はほとんどなく、Qupper による移流がトータル PV アノマリによる移流を説明している。一方、スプリット前線のケースでは、Qsat による一對の正と負の移流が見られ、これが、トータル PV アノマリによる移流を説明している。

このような結果がすべての事例についていえるかどうかはまだ明らかではないので、今後さらに他の事例との比較や他のメカニズムについても検討するとともに、数値シミュレーションも行ってスプリット前線のメカニズムについて解明していきたい。

9. まとめ

急発達した低気圧の発達メカニズムを調べるために、PV inversion を用いた解析を行った。その結果、今回の低気圧は上層と下層の擾乱の相互作用が重要であったことがわかった。下層の擾乱には下部境界の温度偏差のほかに、低気圧中心付近の降水に伴う非断熱加熱によって形成された下層の PV アノマリが存在しており、これが低気圧の発達に非常に重要な役割を果たしていたことが明らかになった。この下層の PV アノマリの下層低気圧性循環に対する寄与は解析の全期間を通して 50%以上と非常に大きな寄与率を持っていた。さらに、この下層の PV アノマリは上層の PV アノマリ、下層の温度偏差とも相互作用していた。上層の PV アノマリに伴う循環によって形成された下層の温度偏差に対しては、伝播を速めるように働いていた。また、上層の PV アノマリに対しては、下層の温度偏差に伴う循環と合わさって PV アノマリを強化するように働いていた。このように、今回の低気圧では、上層と下層のロスビー波の相互作用に、非断熱加熱によって形成された PV アノマリによる循環が加わって、さらに低気圧を発達させたと考えられる。

また、今回の低気圧では、顕著な中層への乾燥空気の侵入とスプリット前線が見られた。そこで、このような中層の乾燥した低相当温位空気の移流の擾乱に伴う循環による説明を試みた。トータル PV アノマリによる相当温位移流についてアナ前線のケースと比較を行ったところ、アナ前線の

場合には低気圧中心付近では一様に正の移流となっていたのに対し、スプリット前線のケースでは、低気圧中心付近に一對の正と負の移流が見られた。その内訳を見たところ、Qupper による移流は両ケースとも低気圧中心付近では正の移流となっていた。しかし、Qsat による移流を調べたところ、アナ前線の場合にはほとんど移流はなかったのに対し、スプリット前線の場合には、一對の正と負の移流が見られ、これがトータル PV アノマリによる移流を説明していた。この結果、今回の低気圧の中層の低相当温位空気の移流には Qsat に伴う循環が重要であったことがわかった。

参考文献

- 金井秀元, 2002: 集中豪雨をもたらす低気圧とそのメソスケール構造に関する研究. 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻修士論文, 73pp.
- Bergeron T., 1937: On the physics of fronts. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **18**, 265-275.
- Browning K.A. and G.A. Monk, 1982: A simple model for the synoptic analysis of cold front. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **108**, 435-452.
- Davis C.A. and K.A. Emanuel, 1991: Potential vorticity diagnostics of cyclogenesis. *Mon. Wea. Rev.*, **119**, 1929-1953.
- 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.
- Sandars, F. and J.R. Gyakum, 1980: Synoptic-dynamic climatology of the "bomb". *Mon. Wea. Rev.*, **108**, 1589-1606.
- Uccellini L.W., 1990: Processes contributing to the rapid development of extratropical cyclone. in *Extratropical cyclones. The Erik Palmén Memorial Volume*. Eds. C.W. Newton and E.O. Holopainen. Amer. Meteor. Soc., Boston, USA, pp.81-105