

活発な積雲対流を伴った小低気圧の解析*

中井公太** 横山博***

要旨

1978年8月6日から8日にかけて、日本海西部海域で、水平スケール1000 km以下の小低気圧が発達した。この小低気圧の特徴は次のとおりである。(1) 温度の水平傾度の小さいところで発達している。(2) 小低気圧に伴う積雲対流活動は活発で、らせん状のレーダーエコーが観測された。(3) 小低気圧の中心付近の温度場の構造は、下層で低温、中・上層で高温である。中・上層の高温は対流昇温によるものと推察される。(4) 熱収支解析の結果、小低気圧の上昇流域では積雲対流による大きな加熱があることがわかり、この効果が小低気圧の発達に寄与した可能性がある。

1. まえがき

日本付近を通過する低気圧には、傾圧不安定波として理解される総観規模低気圧の他にも、いろいろのスケールの低気圧があることはよく知られている。その中で、波長1000 km程度のスケールのじょう乱は中間規模じょう乱と呼ばれ、梅雨前線帯で発生・発達する低気圧、東シナ海低気圧、土佐沖低気圧、日本海低気圧などがその範ちゅうに入る。これらの低気圧については近年詳細な解析がなされるようになり、その実体がだんだんと明らかになってきている。Matsumoto *et al.* (1970), Ninomiya and Akiyama (1971), Yoshizumi (1977)は、梅雨前線帯で発生・発達する中間規模低気圧について詳細な解析を行ない、その構造は多くの点で傾圧不安定波と異なる点があることを明らかにしている。また、それらの低気圧は活発な積雲対流活動を伴っていることが多く、その活動が低気圧の生成・維持になんらかの関係があるものと推察している。Tokioka (1973)は、中間規模じょう乱の発達におよぼす対流活動による加熱と運動量混合作用の効果を理論モデルによって調べ、それらの効果によって、傾圧不安定波とは異なる特徴をもつ不安定波が存在することを示している。

本論文では、1978年8月6日から8日にかけて、日本

海西部海域で発達した中間規模の低気圧について報告する。梅雨期以外でも小低気圧の発達することは少なくないが、それについての詳しい解析は少ないように思われる。本論文では、小低気圧が発達した時の大規模場の状況や、小低気圧の構造について述べる。また、小低気圧に伴う積雲対流による加熱率を計算し、対流活動が小低気圧の発達に寄与した可能性について述べる。

2. 小低気圧の特徴

2.1. 総観場の状況

第1図は1978年8月6～8日の天気図である。8月6日09時の時点で、700 mbにはトラフは認められないが、地上では朝鮮東岸に弱い低気圧が発生している。また、500 mbでは5日21時ごろから朝鮮半島の北西部に弱いトラフがみられる。このトラフは7日09時にはかなり深まり、日本海の西部から九州、四国にかけては広く気圧の谷となっている。この時刻700 mbでも日本海の西部にトラフが解析される。地上でも1008 mbの閉じた等圧線を持つ小低気圧として解析できる。8日09時にはこの小低気圧はさらに発達しながら能登半島近くまで進み、その後弱まりながら東進した。

第2図は輪島の地上気象要素の時間変化図である。地上気圧は7日21時ごろから低下しはじめ、8日13時15分に最低気圧1004.5 mbを記録しており、このころ低気圧の中心が付近を通過したものと思われる。

次に小低気圧付近の温度場をみる。6日09時には、700 mbで九州付近に9°C以下の小さな低温域と日本海中部に12°C以上の高温域があり、日本海西部海域は

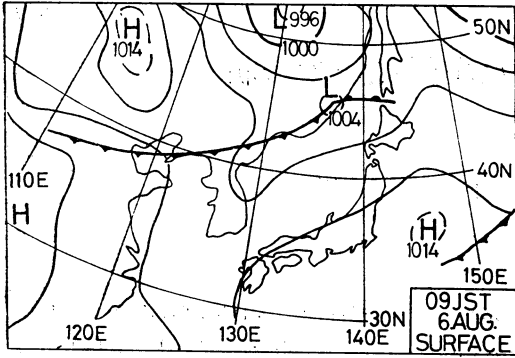
* An analysis of a small-scale depression with active cumulus convections.

** Kohta Nakai, 東京管区気象台.

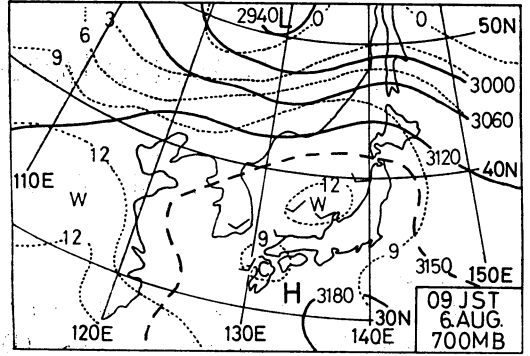
*** Hiroshi Yokoyama, 気象研究所.

—1981年1月14日受領—

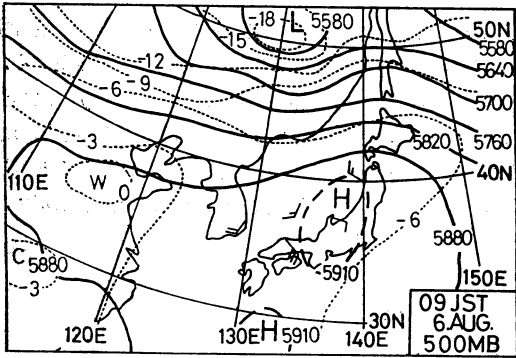
—1981年6月23日受理—



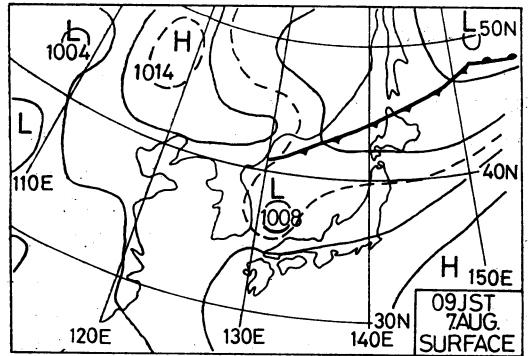
第1図(1)



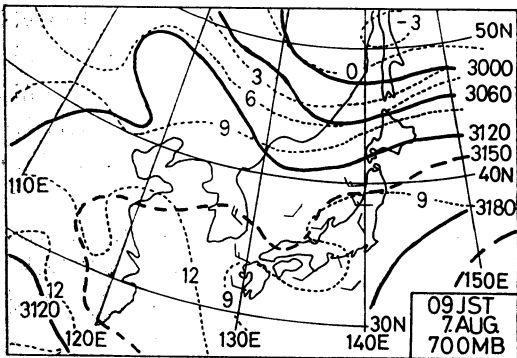
第1図(2)



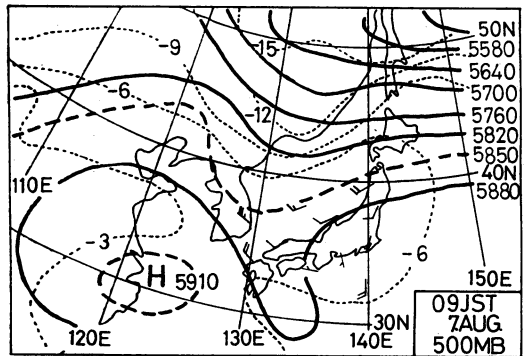
第1図(3)



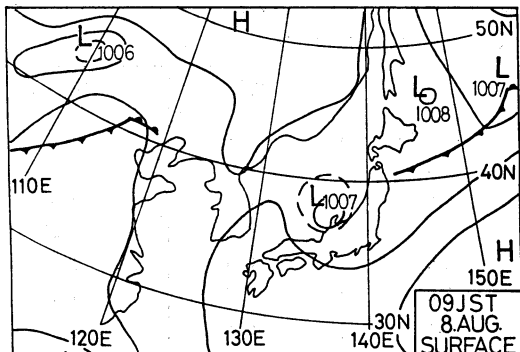
第1図(4)



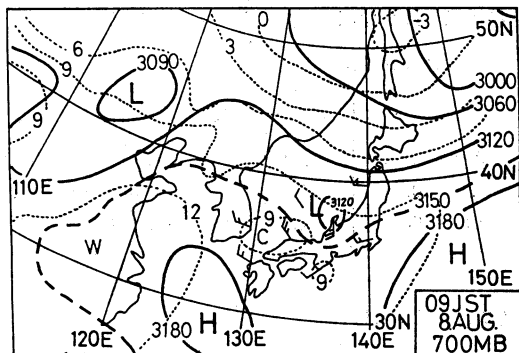
第1図(5)



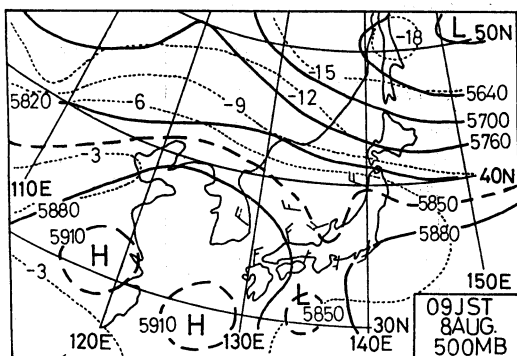
第1図(6)



第1図(7)



第1図(8)

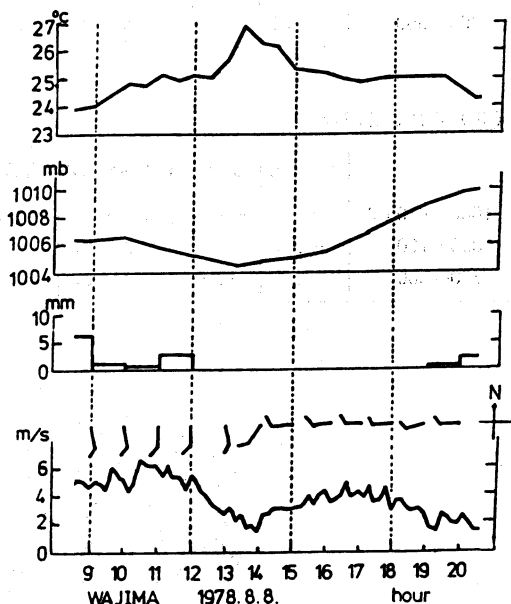


第1図(9)

第1図 1978年8月6日～8月8日の地上、700 mb, 500 mb の天気図。地上の実線は等圧線 (mb), 700 mb, 500 mb の実線は等高度線 (g.p.m.), 破線は等温線。

弱い寒気移流場となっている。850 mb でも同様のパターンである(図略)。500 mb では温度の水平傾度は小さく、顕著な温度移流はみられない。7日09時では500 mb, 700 mb, 850 mb とも温度の水平傾度は小さい。8日09時は、700 mb でトラフの後面と潮岬付近に9°C以下の小さな低温域があるが、温度移流はそれほど大きくないと思われる。このように、この小低気圧付近では、大規模低気圧に見られるような、温度傾度の集中は認められず、したがって風の鉛直シアもそれほど大きくない。また、トラフの前後面での顕著な温度移流は認められない(第1表)。

この小低気圧の水平スケールは、高度場や後述する雲域からみて、1000 km 以下であり、中間規模じょう乱の一種として分類されるだろう。



第2図 1978年8月8日09時～20時の輪島における地上気象要素の時間変化図。上段から順に、気温、地上気圧、降水量、風向・風速をあらわす。

2.2. 小低気圧の鉛直構造

次にこの小低気圧の鉛直構造をみる。第3図(a)は、輪島における気温偏差と相対湿度の鉛直時間断面図である。気温偏差は、深いトラフが北海道の東海上にぬけた後の8月5日09時から、注目する小低気圧が衰弱した8月9日21時までの5日間の平均値からの偏差である。また、日変化量の補正を Ninomiya and Akiyama (1971)の方法によって行なっている(第2表(1))。

第1表 風の鉛直シア $-\frac{\partial V}{\partial p}$ ($m \cdot sec^{-1}/100mb$).

(1) 8月6日09時

	Pohang	福岡	米子	啓風丸	輪島
1000~850 mb	-2.0	-6.0	-1.3	0.0	-3.3
850~700	1.3	1.3	0.7	4.0	2.7
700~500	-2.0	1.5	-6.5	-2.5	0.0

(2) 8月7日09時

	Pohang	福岡	米子	啓風丸	輪島
1000~850 mb	0.7	-3.3	-4.0	-1.3	-4.0
850~700	0.0	-0.7	0.0	2.0	-2.0
700~500	1.0	0.5	-1.0	-2.0	3.0

(3) 8月8日09時

	Pohang	福岡	米子	啓風丸	輪島
1000~850 mb	-4.0	-7.3	-3.3	-3.3	-2.0
850~700	-0.7	1.3	1.3	0.0	2.7
700~500	-1.0	-0.5	2.5	0.0	-1.5

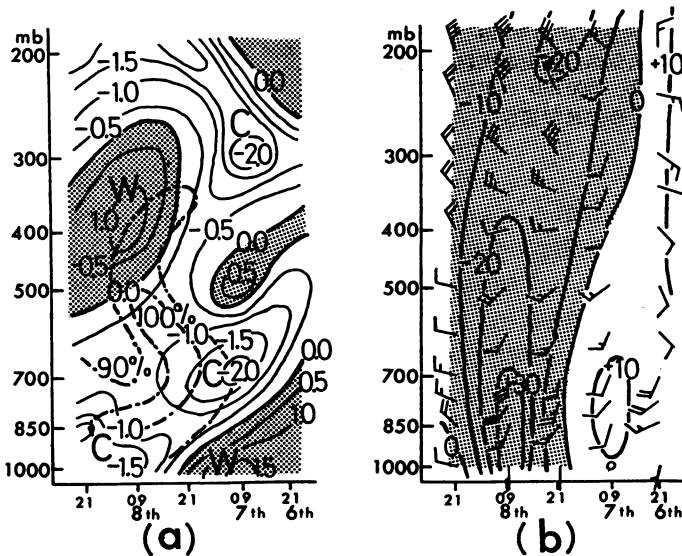
第2表

(1) 気温の日変化量 ($^{\circ}C$).

	09時	21時
1000 mb	0.2	-0.2
850	-0.1	0.1
700	-0.0	0.0
500	-0.2	0.2
400	0.1	-0.1
300	0.4	-0.4
200	0.6	-0.6

(2) 等圧面高度の日変化量 (g.p.m.).

	09時	21時
1000 mb	2	-2
850	1	-1
700	0	0
500	-3	3
400	-2	2
300	0	0
200	7	-7



第3図(a) 輪島における気温偏差および相対湿度の鉛直時間断面図.

(b) 輪島における等圧面高度偏差および高層風の鉛直時間断面図.

小低気圧の中心は8日09時に輪島を通過しているが、この時刻の500~250 mbに明瞭な高温域が見出される。他方500 mb以下の下層では低温域となっている。

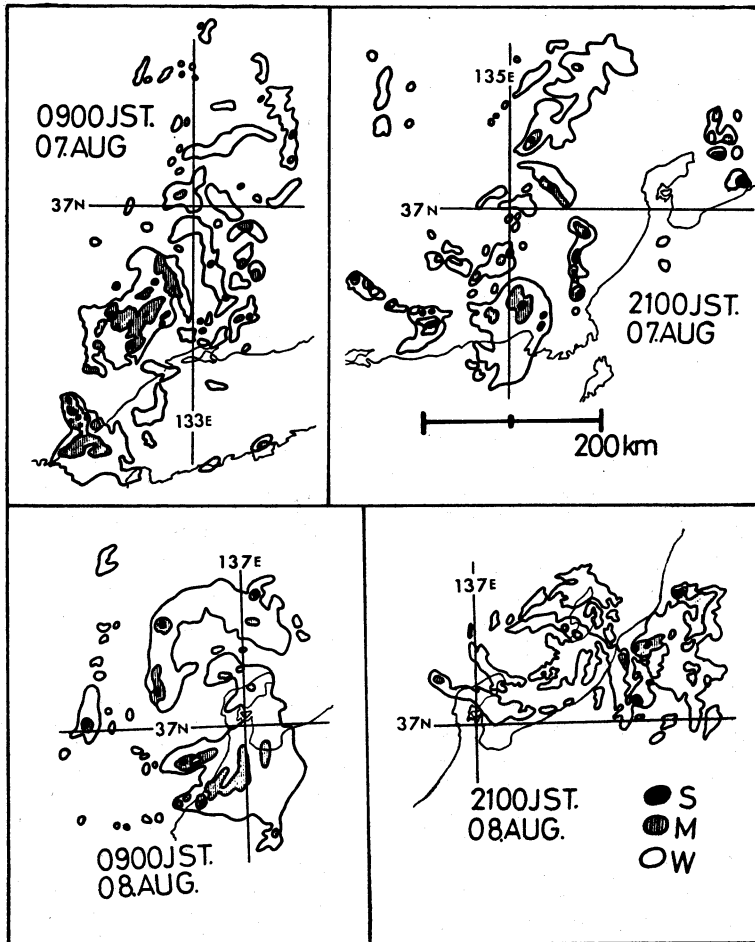
この対流圏上・中層で高温、下層で低温という特徴は、Matsumoto *et al.* (1970), Ninomiya and Akiyama (1971), Yoshizumi (1977) が解析した梅雨前線帯の中間規模じょう乱の温度場の特徴と似ている。Ninomiya and Akiyama (1971) によれば、対流圏中・上層の高温域は、潜熱の放出や熱の鉛直輸送による対流昇温で説明される。今回の小低気圧についても、後述するレーダーエコー分布や雲分布から、活発な対流活動の存在が知られ、その活動を通しての昇温が示唆される。

第3図(b)は、輪島における等圧面高度偏差と風の鉛

直時間断面図である。高度偏差は09時と21時の高層観測時系列データの5項移動平均からの偏差である。気温と同様に日変化量を補正している(第2表(2))。ここで、5項移動平均からの偏差を求めたのには大きな理由はない。5日平均からの偏差でも以下の特徴は変わらない。

400 mb以下の下層では、負の偏差域の中心が8日09時に通過している。観測時間間隔が12時間であるために、鉛直軸の傾きについてはよくわからない。また400 mbよりも上の層でも東傾した負の偏差域がみられるが、これと小低気圧の関係についてははっきりしない。

小低気圧の構造をより実体的につかむためには、南北方向の鉛直構造や、発達過程による変化等を明らかにする必要があるが、今回は観測データの不足により解析さ



第4図 合成レーダーエコー図。松江、福井、名古屋、新潟、啓風丸の各エコースケッチ図を合成したもの。

れていない。

2.3. レーダーエコー分布

小低気圧の発達過程は、レーダーエコー分布からも観測される。第4図は松江、福井、名古屋、新潟、啓風丸の各レーダーのエコースケッチ図を合成したものである。啓風丸は8月1日から9日まで北緯34度、東経138度付近で特別観測を行っており、その資料を用いた。

7日09時は、山陰西部より北の海上へのびる南北に細長い領域にエコーが分布している。強いエコーは松江の北約100kmの海上にあり、強度はS、高度は10.8kmである。その後7日21時には、金沢の西方約100kmのところ強い弧状のエコーがあらわれる。この弧状のエコーは一旦不明瞭になるが、8日04時30分ころから再び発達し、前よりは幅の広いらせん状のエコーがあらわれる(図略)。その強度はVS、高度は11.5kmと活発なものである。8日09時には、らせん状の構造はより明確となる。能登半島をはさんで、北と南に2本のらせん状エコーがみられる。この時刻、個々のエコーセルは低気圧性の循環をしている。その後らせん状構造は次第にくずれてくる。8日21時には、エコー系の中心は佐渡島付近に移動するが、強度、高度とともに衰弱傾向である。

このように、低気圧の発達とともにレーダーエコーも発達し、最盛期にはらせん状構造を示している。

2.4. 雲分布

写真1～6は気象衛星「ひまわり」による雲画像の時

間変化を示すものである。

小低気圧が顕在化する前の5日15時には、鹿児島島の西南西400kmの海上に、弱い小さな渦状の雲域が認められる。この渦状の雲域の生因についてはよくわからないが、熱帯洋上で発生したものが北上とともに衰弱したのかも知れない。この渦状の雲域の水平スケールは100km程度であるが、低気圧性循環がはっきりとわかる。この雲域の北西と南西にも、まとまった雲域がある。これらの雲域は北東進し、6日09時には渦状の雲域は朝鮮半島の南西端まで移動する。水平スケールはかなり大きくなり、渦状のパターンも顕著になっているが、雲頂高度はまだそれほど高くないと思われる。むしろ、この時刻では渦状雲域の南東側の雲域の方が活発である。この2つの雲域の発達は、朝鮮半島の北西部にある500mbの弱いトラフに関係していると考えられる。その後、渦状の雲域は発達しながら東進する。7日09時には島根県沖に達し、6日09時に九州北部にあった活発な雲域と合流し、南北に長い分布をしている。他方、大陸の東岸には寒冷前線に伴う帯状の雲域もみられる。7日15時には、この帯状の雲の一部をまき込むように低気圧性循環が強化されているのがわかる。小低気圧が最も発達した8日09時には渦状はより顕著になり、12時と15時には雲域の中心に、小型の台風を思わせるような眼(すき間)がみられる。その後、この雲域は東へ移動するが、次第に渦状パターンは不明瞭となる。

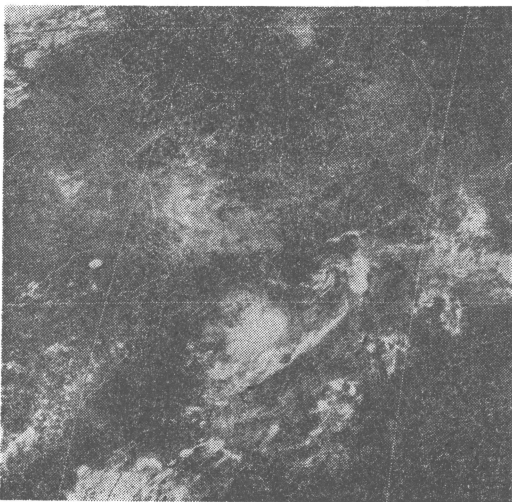


写真1 1978年8月5日15時、可視画像。鹿児島島の西南西約400kmに小さな渦状の雲域がみられる。

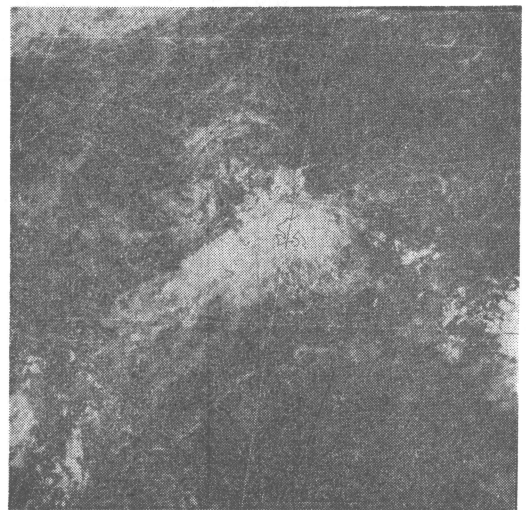


写真2 1978年8月6日09時、可視画像。

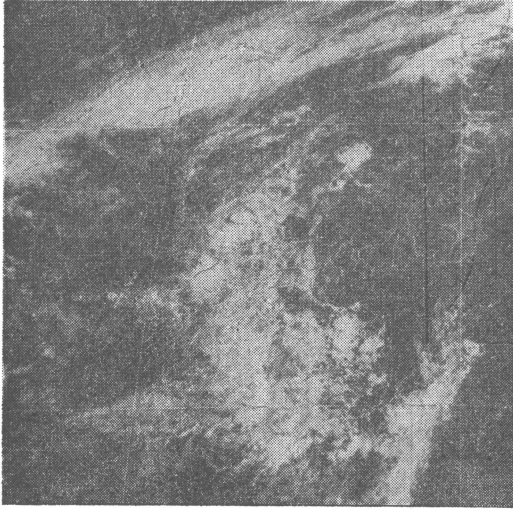


写真3 1978年8月7日09時. 可視画像.

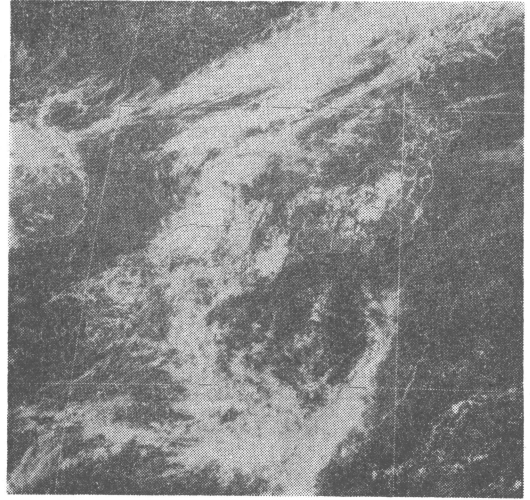


写真4 1978年8月7日15時. 可視画像.

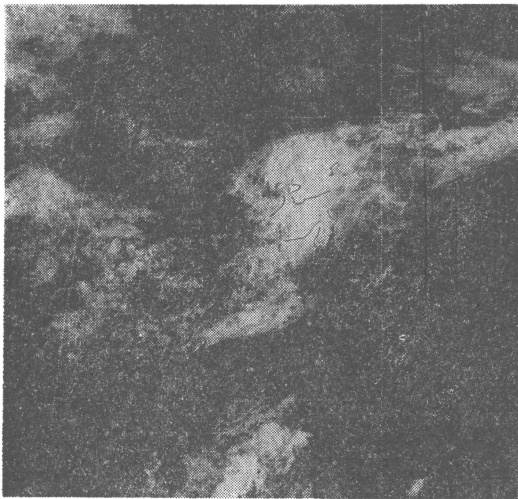


写真5 1978年8月8日09時. 可視画像.

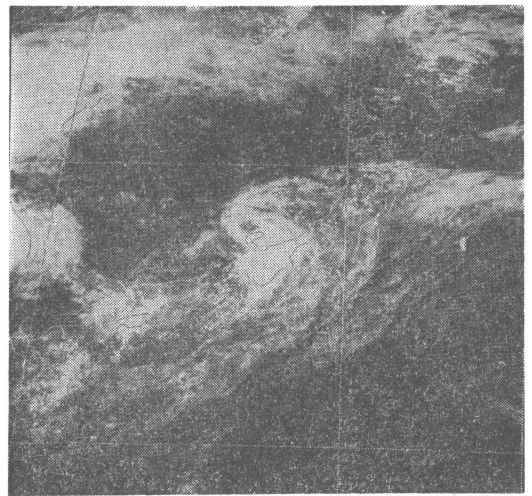


写真6 1978年8月8日15時. 可視画像.

3. 積雲対流による加熱

レーダーエコーや雲分布でわかるように、この小低気圧は常に活発な積雲対流活動を伴っている。また、第3図にみられるように、小低気圧の中心の中・上層には、対流昇温によると思われる高温域が存在する。ここでは、第5図に示す領域内の熱と水蒸気の収支を Ninomiya (1972) や Nitta (1972) の方法で計算し、積雲対流による加熱率を求める。

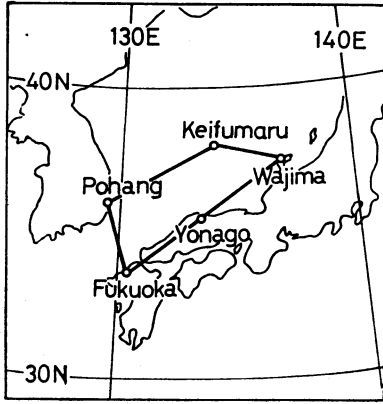
大気における連続の式、熱力学の式、水蒸気保存の式は次のように書ける。

$$\nabla \cdot \mathbf{V} + \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial p} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{C_p}{\left(\frac{p_0}{p}\right)^\kappa} \left(\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \nabla \cdot \theta \mathbf{V} + \frac{\partial \bar{\theta} \bar{\omega}}{\partial p} \right) = Q_R + L(c - e) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} + \nabla \cdot q \mathbf{V} + \frac{\partial q \bar{\omega}}{\partial p} = e - c \quad (3)$$

ただし、 θ は温位、 q は混合比、 Q_R は放射による加熱率、 c 、 e はそれぞれ単位質量あたりの凝結率、蒸発率である。またバー (—) は領域内の平均をあらわす。



第5図 熱・水蒸気収支解析を行う領域。

上の式(2), (3)は次のように書きなおすことができる。

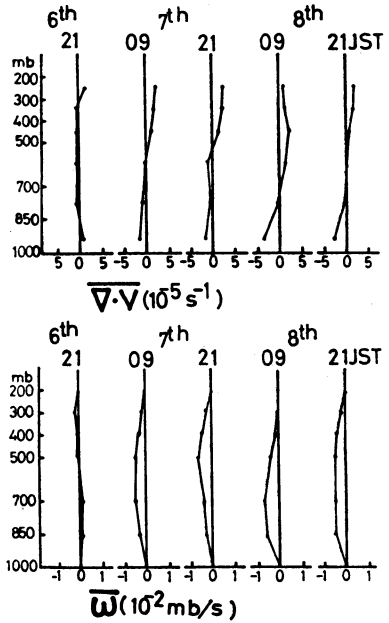
$$Q_1 \equiv \frac{C_p}{(p_0/p)^\kappa} \left(\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{\theta} \bar{\mathbf{V}} + \frac{\partial \bar{\theta} \bar{\omega}}{\partial p} \right) = Q_R + L(c-e) - \frac{C_p}{(p_0/p)^\kappa} \frac{\partial \bar{\theta}' \bar{\omega}'}{\partial p} \quad (4)$$

$$Q_2 \equiv -L \left(\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{q} \bar{\mathbf{V}} + \frac{\partial \bar{q} \bar{\omega}}{\partial p} \right) = L(c-e) + L \left(\frac{\partial \bar{q}' \bar{\omega}'}{\partial p} \right) \quad (5)$$

ただし、 C_p は定圧比熱、 $\kappa=R/C_p$ 、 L は凝結の潜熱である。ダッシュ(′)は領域内の平均からのずれをあらわす。 $\bar{\theta}' \bar{\omega}'$ 、 $\bar{q}' \bar{\omega}'$ は、それぞれ境界層での乱流混合や自由大気中の積雲対流による顕熱と水蒸気の鉛直輸送である。ここでは水平輸送は小さいとして無視する。

Q_1 は見かけの熱源 (apparent heat source) と呼ばれ、放射、凝結と蒸発、顕熱の鉛直収束という効果から与えられるが、第5図で示す観測点の高層観測データを用いて計算できる量である。 Q_2 は見かけの水蒸気の減少 (apparent moisture sink) と呼ばれ、 Q_1 と同様に計算できる。

(4), (5)式の中の $\bar{\omega}$ は(1)式を積分して求めるが、高層観測データの誤差や鉛直分解能の粗さのために、大気上端で必ずしも0に近づかない。ここでは、大気の上端 ($p=200$ mb) と下端 ($p=1000$ mb) で $\bar{\omega}=0$ を仮定し、O'Brien (1970) や Nitta (1972) の方法に準じて、 $\nabla \cdot \bar{\mathbf{V}}$ および $\bar{\omega}$ の補正をする。またそれに対応した風速の補正も行う。補正した $\bar{\omega}_{mod}$ 、 $(\nabla \cdot \bar{\mathbf{V}})_{mod}$ 、 $(\nabla \cdot \bar{\theta} \bar{\mathbf{V}})_{mod}$ 、 $(\nabla \cdot \bar{q} \bar{\mathbf{V}})_{mod}$ は次のように書ける。



第6図 第5図で示す領域内の平均の発散(上段)と鉛直 p 速度(下段)。

$$(\nabla \cdot \bar{\mathbf{V}})_{mod} = \nabla \cdot \bar{\mathbf{V}} - \varepsilon \quad (6)$$

$$\varepsilon = \frac{\int_{p_0}^{p_T} \nabla \cdot \bar{\mathbf{V}} dp}{p_T - p_0} \quad (7)$$

$$\bar{\omega}_{mod} = - \int_{p_0}^{p_T} (\nabla \cdot \bar{\mathbf{V}})_{mod} dp \quad (8)$$

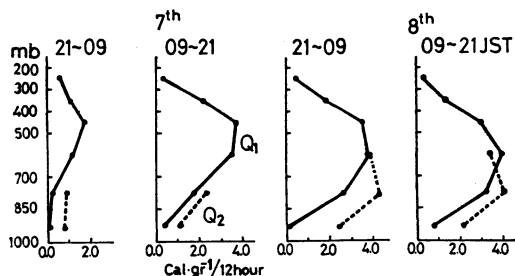
$$(\nabla \cdot \bar{\theta} \bar{\mathbf{V}})_{mod} = \left(1 - \frac{\varepsilon}{\nabla \cdot \bar{\mathbf{V}}} \right) \nabla \cdot \bar{\theta} \bar{\mathbf{V}} \quad (9)$$

$$(\nabla \cdot \bar{q} \bar{\mathbf{V}})_{mod} = \left(1 - \frac{\varepsilon}{\nabla \cdot \bar{\mathbf{V}}} \right) \nabla \cdot \bar{q} \bar{\mathbf{V}} \quad (10)$$

ただし、 p_T 、 p_0 はそれぞれ大気上端、下端の気圧を示す。

(4), (5)式の計算には、これらの補正した量を用いる。

計算の結果を第6図、第7図に示す。第6図は $\bar{\omega}$ と $\nabla \cdot \bar{\mathbf{V}}$ (補正したもの、以下 mod の添字は省略する)の鉛直分布を時刻順に並べたものである。8月6日21時までには下層で発散、上層で収束であるが、7日09時以降では下層収束、上層発散である。一方鉛直 p 速度 $\bar{\omega}$ は、7日09時以降は全層で上昇流である。特に8日09時には500 mb以下の下層で大きな上昇流となっている。小低気圧がこの領域で顕在化したのは7日09時ころからであり、



第7図 熱・水蒸気解析によって得られた Q_1 と Q_2 の鉛直分布図。実線は Q_1 、破線は Q_2 をあらわす。

その後の低気圧の発達とともに収束，上昇流が増大していることがわかる。

第7図は Q_1 、 Q_2 の鉛直分布である。6日21時以降は全層で正の熱源がある。 Q_1 のピークは 450 mb にあり、その値は $1.5 \text{ cal} \cdot \text{gr}^{-1}/12 \text{ hour}$ であるが、7日09時以降には Q_1 の値は2倍以上となり、そのピークは 600 mb 付近に移る。(4)式からわかるように、 Q_1 は自由大気中では放射冷却と積雲対流による加熱からなる。7日09時以降の大きな正の熱源は、放射冷却を大きく上まわるような積雲対流による加熱があったことを示している。このことは、第3図でみた小低気圧の中・上層の高温域が、対流昇温によるという推察を支持する。

また7日09時以降の Q_1 の鉛直分布は、第8図の熱帯大気の平均的な Q_1 の分布によく似ている。

Q_2 については、Pohang の上層の湿度の観測データがないので、下層の分布だけを示す。領域内に積雲対流活動が認められはじめた6日21時以降は正となっている。これは積雲の凝結による効果がかかなり卓越していることを示す。7日09時以降、その効果はさらに増大する。

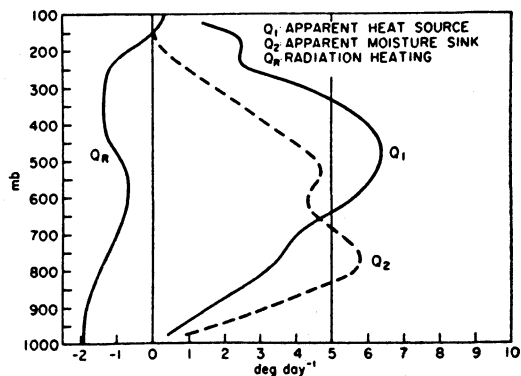
4. まとめ

この小低気圧の特徴をまとめると次のとおりである。

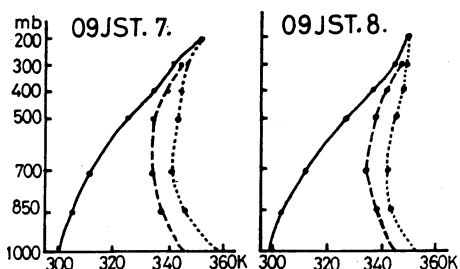
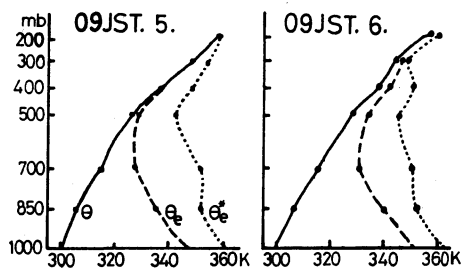
(1) 小低気圧が発達した時の日本海西部海域付近では、温度の水平傾度は小さい。したがって、風の鉛直シアも小さい。

中緯度で観測される中間規模じょう乱は、梅雨前線帯のような温度傾度の集中する場で発生・発達することが多い (Nitta and Yamamoto, 1972) が、今回の場合は温度傾度の小さいところで発達している。

(2) 小低気圧に伴う積雲対流活動は、多くの中間規模じょう乱と同様に非常に活発である。小低気圧の発達時には、らせん状レーダーエコーも観測されている



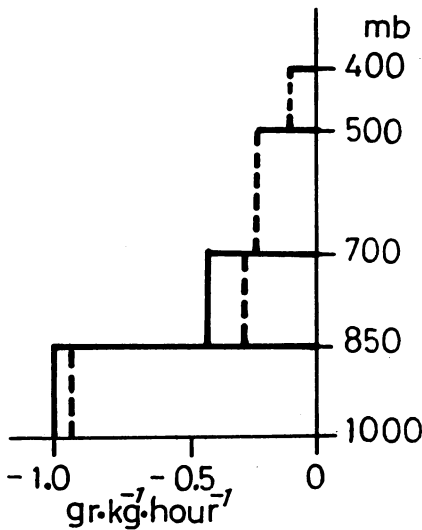
第8図 1956年4月15日～7月22日のマーシャル群島付近の平均的な Q_1 と Q_2 の分布 (Yanai et al., 1973)。



第9図 第5図で示す領域内の平均的な成層状態。実線は温位 (θ)、破線は相当温位 (θ_e)、点線は飽和していると仮定して求めた相当温位 (θ_e^*)。

第9図は第5図で示した領域内の平均的な成層状態を示すものである。8月5日09時ころから地表面付近の相当温位はかなり高く、700 mb くらいまでは対流不安定な成層をしている。第10図は8月7日の水蒸気流束の水平収束量 ($\nabla \cdot qV$) の鉛直分布である。下層で水蒸気流束の収束が大きい。これは湿潤空気の南からの流入によるものであろう。

このように、小低気圧の発達初期の日本海西部海域は、



第10図 第5図で示す領域内の水蒸気流束の水平収束量 ($\nabla \cdot q \bar{V}$)。実線は8月7日09時、破線は8月7日21時の値である。

積雲対流の生成・維持に好都合な場であったことがわかる。

(3) 小低気圧の中心付近の温度場の構造は、下層で低温、中・上層で高温である。この構造は梅雨前線帯の中間規模じょう乱の温度構造によく似ている。中・上層の高温は対流昇温によるものと考えられる。

(4) 熱収支解析の結果、小低気圧の上昇流域では積雲対流による大きな加熱が存在することがわかり、この効果が小低気圧の発達に寄与した可能性が考えられる。Tokioka (1973) は、連続傾圧モデルにおいて、積雲の加熱効果が傾圧不安定波の構造を変形させることを示しているが、今回の小低気圧は、この種の不安定波であるのかもしれない。しかし、小低気圧の発達の機構を論ずるためには、もっと詳しいじょう乱の構造の解析や、エネルギー収支解析が必要である。

謝 辞

この研究を行うにあたり、有益な助言をしていただいた東京管区気象台の磯野良徳氏と俣野誠氏に厚く御礼申し上げます。また的確なコメントをしていただいたレフリーの方々に感謝いたします。

この研究には、昭和55年度日本気象学会奨励金の一部を使用した。

文 献

- Matsumoto, S., S. Yoshizumi and M. Takeuchi, 1970: On the structure of the "Baiu front" and associated intermediate-scale disturbances in the lower atmosphere, *J. Met. Soc. Japan*, 48, 479-491.
- Ninomiya, K. and T. Akiyama, 1971: The development of the medium-scale disturbance in the Baiu front, *J. Met. Soc. Japan*, 49, 663-677.
- Ninomiya, K., 1972: Heat and water-vapor budget over the East China Sea in the winter season, *J. Met. Soc. Japan*, 50, 1-17.
- Nitta, Ta. and J. Yamamoto, 1972: A statistical survey on frequency of the cyclogenesis of the intermediate-scale disturbance near Japan, its vicinity and the Southeast Asia, *J. Met. Soc. Japan*, 50, 234-237.
- Nitta, Tsu., 1972: Energy budget of wave disturbances over the Marshall Islands during the years of 1956 and 1958, *J. Met. Soc. Japan*, 50, 71-84.
- O'Brien, J., 1970: Alternative solutions to the classical vertical velocity problem, *J. Appl. Met.*, 9, 197-203.
- Tokioka, T., 1973: A stability study of medium-scale disturbances with inclusion of convective effects, *J. Met. Soc. Japan*, 51, 1-10.
- Yanai, M., S. Esbensen and J.H. Chu, 1973: Determination of bulk properties of tropical clusters from large-scale heat and moisture budgets, *J. Atmos. Sci.*, 30, 611-627.
- Yoshizumi, S., 1977: On the structure of intermediate-scale disturbances on the Baiu front, *J. Met. Soc. Japan*, 55, 107-120.