

対流性降水の初期レーダー・エコーについて*

岸 田 恭 允**

要旨：1964年および1965年の夏季の間に、熊本県人吉市に設置されている自動演算レーダー雨量計によって、対流性降水の観測を行ない、レーダー・エコーが初めに生じる高度、ならびに、その後のエコーの成長と沈降について解析した。

その結果、初めに生じるエコーはいずれも 0°C 以上の暖い温度層で発生しており、九州地方の対流性降水の降り始めにおいては、いわゆる暖かい雨の役割が重要であることを示している。また、エコーが初めに発生してから成長することなしに沈降し、衰弱に向う例が多くみられた。

1. はし が き

降水の生成機構を議論する際に重要な雲の性質として、雲底の温度、雲の厚さ、および雲頂の温度がある。雲底の温度は雲水量を大きく支配するもので、雲の厚さと関連して併合過程で降雨を生じることが決めるものであり、雲頂の温度は言うまでもなく氷晶が存在するかどうかの決めてになる。九州地方における夏季の対流性降水についての観測は、はじめ武田(1963)によって行なわれており、その結果、雲厚が 2300m 程度以上になれば雲頂が凍結高度に達していなくても降雨が起こり得ることを示した。その後も暖かい雨を裏付ける観測結果が報告されており(松田, 1964)、同地方の夏季の積雲からの降水は容易に暖かい雨によって始まると考えられている。

さて、生成過程の研究には、これらの対流雲から最初に生じる降水の高度および温度を調査することもまた重要である。最初の降水が凍結高度より低い高度で発生していれば、暖かい雨の有力な証拠となる。勿論、必要に応じて雲頂高度の観測を同時に行なわなければならない。また、対流雲から最初に生じる降水の高度は降雨開始の物理過程を論じる際の良い手がかりになるであろう。

従来この種の調査は、いわゆる「初期エコーの発生高度」の観測として Reynolds and Braham (1952), Battan (1953), Braham (1958) および Clark (1960) によって行なわれてきたが、これらの結果として対流性降水の発生はそれぞれの地域において異なった高度と温度の条件下で始まっており、地域毎になお多くの調査が

必要であることを示している。ここでは九州地方における夏季の対流性降水について調査した結果を報告するものである。

この観測に使用されたレーダー雨量計は、波長 3.2 cm, ビーム巾 1° で PPI, RHI 指示方式を持つ気象用レーダー本体の他に、減衰補正回路を持つ等雨量演算装置と点雨量計算装置等を備えており、観測所から半径 100 km 以内の降水エコーの観測と半径 60 km 以内の降水エコーの等雨量強度線表示を行なうことができるものである。

熊本県人吉市は球磨盆地の中央からやや西南西に寄った位置にあり、半径 100 km の円でかこまれる範囲には九州中南部のほとんど全ての地域が含まれる。

2. 資 料

1964年7月の5日間、および1965年7月—8月の10日間に、孤立した対流性降水エコーの初期の状態を探知するために、PPI スコープによる注意深いレーダー観測を行なった。

(1) 1964年の資料。我々は、積雲から最初に発生したエコーは積雲の発達とともに次第に鉛直方向にも水平方向にも拡がるであろうという観点にたつて、PPI によってできるだけ小さな点エコーを選び、仰角を変えてエコー頂部の仰角と斜距離を測定し、エコー頂部高度の成長と衰弱の状態を観測した。これらのエコーのうちで、初めての頂部高度測定の後、更に成長したエコーだけを選び出して、その最初のエコーを初期エコーとした。その結果、観測された69例のうち、26例が選り出された。

(2) 1965年の資料。前年が主としてレーダーだけによる観測であったのに対して、この年は目視および写真による孤立した積雲の観測と、その積雲からのレーダー・エコーの観測とを同時に行なうことによって、積雲中に生じたエコーを早期に発見するように努めた。その

* The Initial Radar Echo from Convective Precipitation.

** Yasumitsu Kishida, 九州大学農学部
—1966年9月10日受理, 1967年2月20日改稿受理—

ためにレーダーは目視されている積雲の雲頂を仰ぐ角度より以下の各仰角で運転された。これらのエコーのうちで目視されている雲には、それまでレーダー・エコーがなく、初めてエコーを生じた場合、その最初のエコーを初期エコーとした。その結果、21例の標本が得られた。

さて、兩年を通じてレーダー・アンテナの方位走査速度は 10 rpm であり、エコーを認めた後に仰角を変えてエコー頂部を測定するために必要な時間は、熟練すれば 1 分間位で可能であった。エコー頂部の高度は PPI によってエコーが認められなくなるときの仰角と直距離から三角法によって求めた。これは Bent その他 (1950) による標準大気屈折を考慮した式を用いた場合よりも過少に評価していることになるが、資料は最も遠いもので 40 km であったのでその差は高々 100m 以下である。またレーダー・ビームの拡がりによる影響を考慮して、エコー頂部から半ビーム幅 (こゝでは 0.5°) を差し引いた。

1965年3月9日、レーダーによる測定高度の検定のためにレーウィン・ゾンデにコーナー・リフレクターを付けて放球し、高層観測とレーダー観測とを同時に行なって高度を比較する機会を得た。この際レーダーは RHI により垂直に走査しながら気球を追跡して、リフレクターからのエコーの中心の仰角と距離から高度を求めたのでビームの拡がりによって生じる測定上の誤差は除去されている。その結果、エコー高度の方がゾンデによる計算高度より高い値を示し、その差は高度 1000 m で 300 m、高度 7000 m で 500 m 程度で高さとともに増加する傾向がみられた。また別の機会 (1966. 2. 24.) に飛行機が距離 15—20 km の間を高度 2750 m で水平飛行する間に、そのエコー高度を測定したときは 250m 程高い値を示した。これらのことから、エコー高度は過大評価されていると思われ、こゝではゾンデによる検定結果を用いて較正した。

また、エコー底部の測定も行なったが、レーダー・アンテナは盆地内にあるために地形によるシャドーが多く、底部についての資料はあまり多くは得られていない。

1965年には等雨量演算装置によって各雨量強度レベル毎の頂部、底部の測定も試みた。この観測では、レーダーによる雨量強度を定量化するために、地上の貯水型自記雨量計 (球磨郡免田町球磨農業高校に設置) に対応する位置にレーダーの点雨量計算装置の指標を設定して、しゅう雨性降雨の同一観測時間における雨量の対比からレーダー雨量の検定を行なった。また点雨量計算装置と等雨量演算装置とは正しく較正されていることが確かめ

られた。

なお、各高度における温度は当日 09 時 (JMT) の鹿児島地方気象台の高層資料から求めた。レーダー観測所は鹿児島島の北方約 75 km にあるが、更に北に約 2 倍の距離にある福岡と鹿児島との凍結高度を全観測日について比較するとその差は平均 100 m 程度で、この期間、同地方は同じ気団内にあつて南寄りの風が卓越することが多かったので、高層の気象にあまり大きな差はないと思われる。

3. 結果

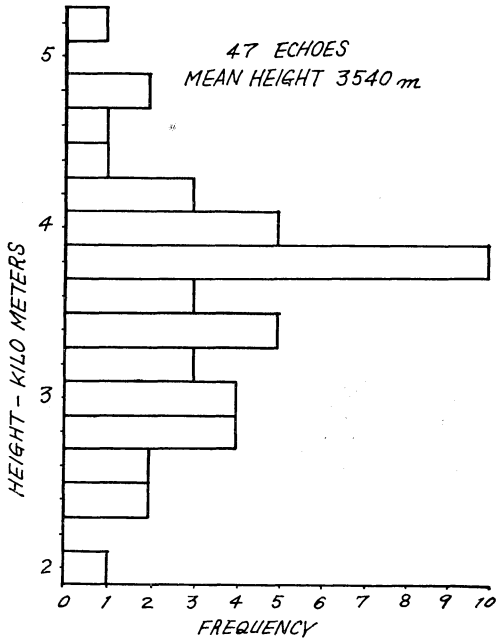
(1) 初期エコーについて、対流性降水の初期レーダー・エコー頂部の高度と温度について得られた結果は、第 1 表に示されている。

第 1 表 初期エコー頂部の高度と温度

DATE	DALY MEAN VALUES		SAMPLE SIZE
	TOP HEIGHT (m-MSL)	TEMPERATURE ($^\circ\text{C}$)	
11 JUL. 1964	3800	+ 7.4	11
12 JUL. 1964	3750	+ 6.7	4
13 JUL. 1964	2500	+15.6	4
21 JUL. 1964	3710	+ 6.1	1
23 JUL. 1964	3140	+11.8	6
25 JUL. 1965	4780	+ 2.4	1
27 JUL. 1965	4410	+ 5.0	2
28 JUL. 1965	3060	+13.1	2
29 JUL. 1965	3580	+ 8.6	2
30 JUL. 1965	3170	+11.3	3
31 JUL. 1965	3810	+ 6.5	2
25 AUG. 1965	3790	+ 5.7	3
26 AUG. 1965	3910	+ 7.3	2
27 AUG. 1965	3300	+10.0	3
28 AUG. 1965	4040	+ 4.1	1
AVERAGE	3540	+ 8.7	TOTAL 47
TEXAS 1958, 1959 (CLARK)	4970	- 1.1	247
ARIZONA (BRAHAM) 1955	5940	- 7.2	157
OHIO (BATTAN) 1947		+ 0.4	123

前節で述べたように、この表のうちで 1964 年と 1965 年の観測方法は若干異なる。しかし、初期エコー頂部高度に関する 1964 年の平均値 3430 m と 1965 年の平均値 3670 m とに重要な差は認められない。

第 1 表に示されている 47 例の初期エコー頂部高度と頂部温度の頻度分布をそれぞれ第 1 図と第 2 図に示す。



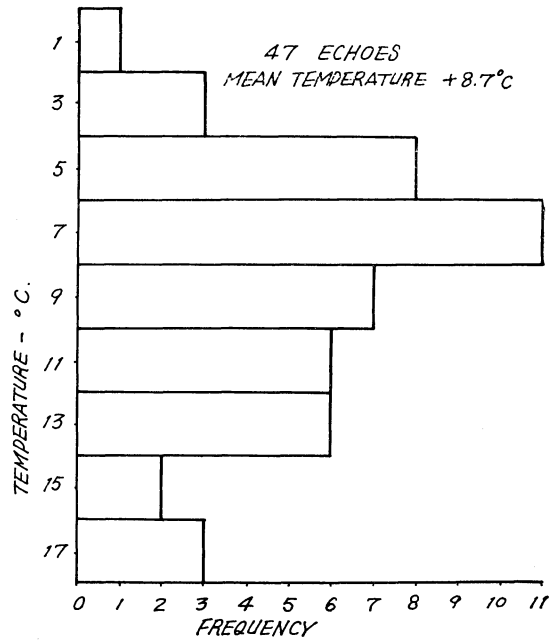
第1図 初期エコー頂部高度の頻度分布

これらの結果で最も注目すべきことは全ての初期エコーがいずれも 0°C 以上の暖かい温度層の中で発生しているということである。

従来、外国における研究で対流性降水の初期エコーは第1表に付記したように、比較的低い温度層で発生している。これらの結果から Battan (1953) はオハイオにおいて、また Clark (1960) は中部テキサスにおいて対流性降水の降り始めはしばしば暖かい雨によって起こっているとし、また Braham (1958) はアリゾナにおいてもときどき起こっていると述べているのに対して、我々の観測した範囲ではいずれも雨の降り始めは暖かい雨によると思われるものばかりであった。

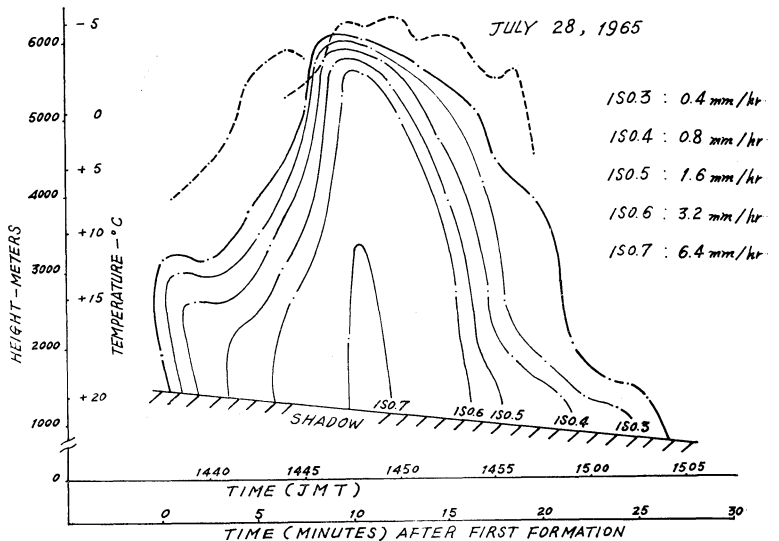
(2) エコーの成長について。エコーの発生から消滅までの全生涯について観測された16例について、その成長と衰弱の様子が明らかにされた。第3図および第4図はその例で、エコーが発生して後の鉛直方向への時間的変化を示している。

最も外側の実線はエコー頂部の変

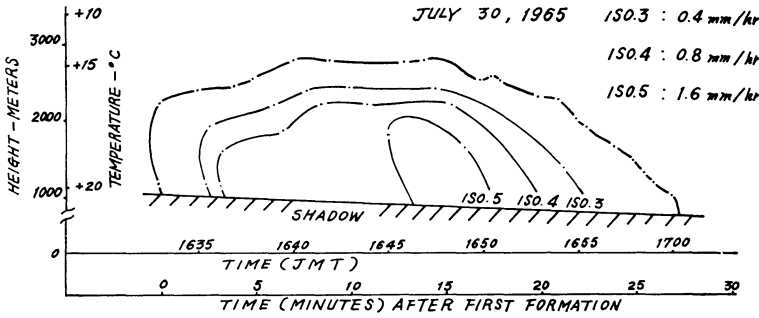


第2図 初期エコー頂部温度の頻度分布

化を示しており、エコー底部の下方への成長はかなり急速で、短時間に観測所周辺の山岳によるシャドーまで到達しているためにあまり明瞭でない。等雨量強度線 (Iso 表示) の各レベルは Iso. 3 (0.4mm/hr), Iso. 4 (0.8mm/hr), Iso. 5 (1.6mm/hr), Iso. 6 (3.2mm/hr), Iso. 7 (6.4mm/hr) を示す。第3図の破線は雲頂の変化を示し、14時44分にこれまで発達した雲の塔に代って新



第3図 初期エコー発生後のエコー頂部の変化

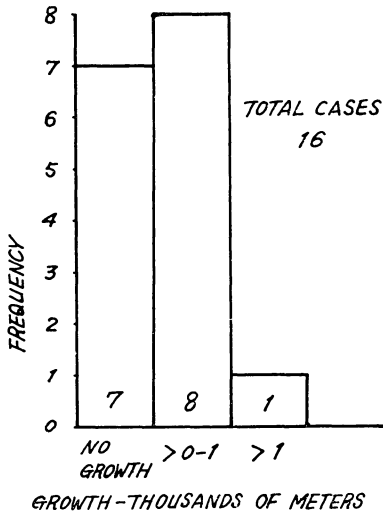


第4図 前図と同じ

しい塔が発達しているが、レーダーでははっきり区別されなかつたので滑らかな曲線で結んである。雲頂は最盛期を過ぎると変動がはげしいが、これは雲頂の輪郭が不明瞭になったり、また雲頂が雲の本体から離れて移動するため、雲頂高度の信頼性は低いと思われる。

さて、一般に積雲から最初にエコーが発生すると、その頂部は積雲の発達にともなって次第に鉛直上方に成長すると考えがちであるが、1965年の観測によると初期エコーが探知された後にその頂部が上方に成長することなく下降する例が多くみられた。第5図は初期エコーが探知されてから消滅するまでの間の最大エコー頂部高度と初期エコー頂部高度の差をとり、エコーの成長量として頻度分布を示したものである。

こゝでは、16例のうち7例のエコーは発生後にまったく成長せずに衰弱に向っている。このように数多くの初



第5図 初期エコー発生後のエコー成長量(最大エコー頂部と初期エコー頂部の差)の頻度分布

期エコーが成長することなく衰弱に向うことは、これまでも報告されているが(例えば Clark, 1960), それらの測定時間々隔が2—6分程度で比較的長いために、その間の変化が観測されない場合があるとも考えられた。しかし、今回のようなほぼ1分毎の観測でさえ同様な結果を得たことは、多くの積雲では、滴がレーダーで探知される大きさに達すると、そのエコーは最大エコー頂部高

度に到達している、ということを示すものである。

1964年の観測で、初めての頂部高度測定の後更に成長したものを初期エコーとしたが、成長しなかつた43例のなかにも初期エコーと考えられるものが数多く含まれていたと思われる。

4. 考察

観測された最も近いエコーも雲の最大探知距離を越えているので、これらのエコーは降水粒子か、或いは比較的短時間に降水粒子になる雲滴であることを意味する。我々の場合、半径50 μ の滴はほぼ20 kmの距離で探知される大きさに相当する。滴がこの大きになれば、あとは併合によって容易に雨滴に成長するであろう。対流性降雨の場合、一旦降雨が始まるとエコーの反射強度は急速に増大してレーダーの最大距離でも探知される程度になるので、初期エコー頂部高度の距離による差異はほとんどないと言われている(Braham, 1958)。本観測における初期エコー頂部高度は距離とともに幾分高くなる傾向がみられたが、これは25 km以遠の多くの象限で仰角4°40'以下がシャドーになるために、遠距離では低いエコーが観測され難いためであると考えられるべきであろう。また、シャドーはエコーの成長量の解析の際にも障害になるが、ここに使用した資料は比較的近距离のものが多く、この影響はあまり考慮する程のものではなかった。

これまで、主として初期エコーの頂部高度について述べてきたが、雲滴が初めてレーダーに探知される大きさに達する高度は、それより幾分低い高度であると考えられる。初期エコーの厚さについて観測された最も薄いものは550 mで、大多数は1000 m以上か、或いは既にシャドーまで達して測定できなかった。Battan(1963)は、エコーを初めて探知して15秒を経た場合には、初期エコーは既に600—1200 mの厚さがあり、その後も底部

は、かなり急速に下降すると述べている。

さて、エコーが凍結高度以下の高度で発生することについて、East (1957) は雲滴の凝結と併合の過程で説明し、初期エコーの発生高度に対するパラメーターとして、気塊が雲底から上昇する際の飽和混合比の減少、すなわち液状混合比の増加が重要であることを指摘した。そして、初期エコーの発生高度は、上昇気流の大きさによるが、通常は液状混合比が4—7 gr/kg程度になる高度であると述べている。

エコーを観測した個々の雲の雲底高度と温度を正確に知ることは容易なことではないので、我々の場合、九州中部山岳地帯における平均的な雲底高度を880 mb、雲底温度を+20°Cであるとすると、観測された初期エコー頂部の高度は液状混合比が5.7 gr/kgとなる高度に相当する。若し、雲底の条件が適当であれば、この高度でエコーが発生することは妥当であると考えられる。すなわち、同地方の対流雲から生じる初期エコーが比較的低い高度で発生していることは、雲底の温度が充分に高いために雲底から初期エコー発生高度までの距離が小さいこと、更に雲底自体も低い高度にあるということの説明することができよう。

5. む す び

九州地方における夏季の対流雲からの初期レーダー・エコーを観測した結果、これまで中緯度地方で観測されている例に比較して、かなり低い高度で発生している多くの事例を見いだした。このことは同地方の積雲の雲底の温度条件が高いことと、雲底高度が低いことによって説明することができると思われる。

この観測に使用された気象レーダーは、日本人工降雨研究協会が科学技術庁の委託を受けて人吉に設置したものである。

終りにあたり、この研究に対して御指導頂いた九州大学農学部武田京一教授、坂上務助教授および観測その他で御協力頂いた農業気象学教室の各位と九州電力総合研究所の方々に感謝します。

参 考 文 献

- 1) Battan, L.J., 1953: Observation on the Formation and Spread of Precipitation in Convective Clouds. *J. Meteor.*, 10, 311~324.
- 2) Battan, L.J., 1963: Relationship Between Cloud Base and Initial Radar Echo. *J. Applied Meteor.*, 2, 333~336.
- 3) Bent, A.E., Austin, P.M. and Stone, M.L., 1950: Beam Width and Pulse Length in Radar Weather Detection. Tech. Rep. No. 12, Mass. Inst. Tech., Cambridge, Massachusetts.
- 4) Braham, R.R., 1958: Cumulus Cloud Precipitation as revealed by Radar, Arizona, 1955. *J. Meteor.*, 15, 75~83.
- 5) Clark, R.A., 1960: A Study of Convective Precipitation as revealed by Radar Observation, Texas, 1958~59. *J. Meteor.*, 17, 415~425.
- 6) East, T.W.R., 1957: An Inherent Precipitation Mechanism in Cumulus Clouds. *Quart. J.R. Meteor. Soc.*, 83, 61~76.
- 7) 松田昭美, 1964秋: 積雲の発達と降水エコーについて. 日本気象学会講演予稿集, 6, 160.
- 8) Reynolds, S.E. and Braham, R.R., 1952: Significance of the Initial Radar Echo. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 33, 123.
- 9) Saunder, P.M. and Ronne, F.C., 1962: A Comparison between the Height of Cumulus and the Height of Radar Echoes Received from Them. *J. Applied Meteor.*, 1, 296~302.
- 10) 武田京一, 1963春: 暖かい雲からの雨. 日本気象学会講演予稿集, 3, 189~190.