

# レーダーで見た対流性降雨雲の垂直構造\*

武田 京一\*\* 塩月 善晴\*\*\*

## 要旨

著者らは数年来、熊本県人吉市において、梅雨末期の降水についてレーダー観測を実施している。1969年7月の観測では、寒冷前線通過後レーダー観測所に向かって移動してくるセル・エコーのRHI連続観測、更にこのエコーよりもたらされた雨滴のろ紙観測を行なうことができたが、解析の結果、これ迄報告してきた“背の高いエコーの風下に強雨エコー域がある”ことを水滴の併合成長により説明できることがわかった。

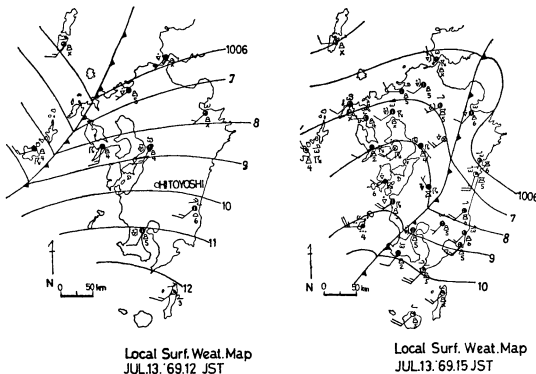
## 1. まえがき

豪雨、豪雪災害をもたらすような降水現象の原因追求のためにこれらの降水機構を明らかにすることは最も重要なことであり、これ迄各分野でその努力がなされているが、(集中豪雨シンポジウム, 1967, 降雨機構とその応用シンポジウム, 1969) 著者らも数年来熊本県人吉市にある、現在九大農学部所管の3.2cm波気象レーダーによって、主に梅雨末期の降水エコーについて観測を行なっている。このレーダーは、PPI, RHI 両方の観測が可能であり、最大レンジは100kmであるが、60km迄は演算装置によって雨量強度を見ることができる。1969年7月の観測では、偶然レーダー観測所に向かって移動し

てくる対流性エコーのRHI連続観測を実施する機会に恵まれたが、更に頭上を通過したこれらのエコーからの雨滴を water-blue ろ紙により観測することができた。以下これらの資料ならびに別に行なっていた雲の写真観測の資料などを使用して、移動する対流性降雨の雲物理的性質を調べる。

## 2. エコー特性と気象状況

第1, 2図は1969年7月13日午後寒冷前線の通過に伴って人吉方向に移動してくる対流性エコーのRHI観測を行なった際のメソ天気図ならびにPPI写真を示す。この地上天気図を見ると12時には玄海灘から佐世保、五島にのびた寒冷前線は15時には大分から鹿児島にかけての九州山脈に移動し、前線通過に伴って九州西部では発雷が続いている。この時のPPI写真を見ると、12時には人吉上空を南西から北東にかけて線状エコーがあり、これは等雨量線 ISO 5 でも残るかなり強いものであり、しかも寒冷前線に伴うエコーが進行してこれと合体する迄停滞していた。寒冷前線の降水エコーはやはりバンド状に南南西から北北東への向きをもっているが、12時には西北西 60km の長崎県千々石湾にその前面が現われており、12時30分は西北西 50km, 13時~13時25分は北西 30km のところにやや停滞し、14時には北西 20km~15km に達して停滞性の線状エコーと合体している。これらの雨量強度は ISO 5~ISO 6 であって、前線の移動速度は天気図では 50km/h に対して、13時頃九州西岸で停滞したためバンドエコーの速度は 20km/h となっている。合体した前線エコーは14時30分には人吉上空に達し、14時50分以後はRHI観測に切替えた。初めは70°方向で切って遠ざかって行く背の高いエコーを追跡したが、15時15分からは248°方向から人吉に向かっ



第1図 1969年7月13日12時, 15時のメソ天気図

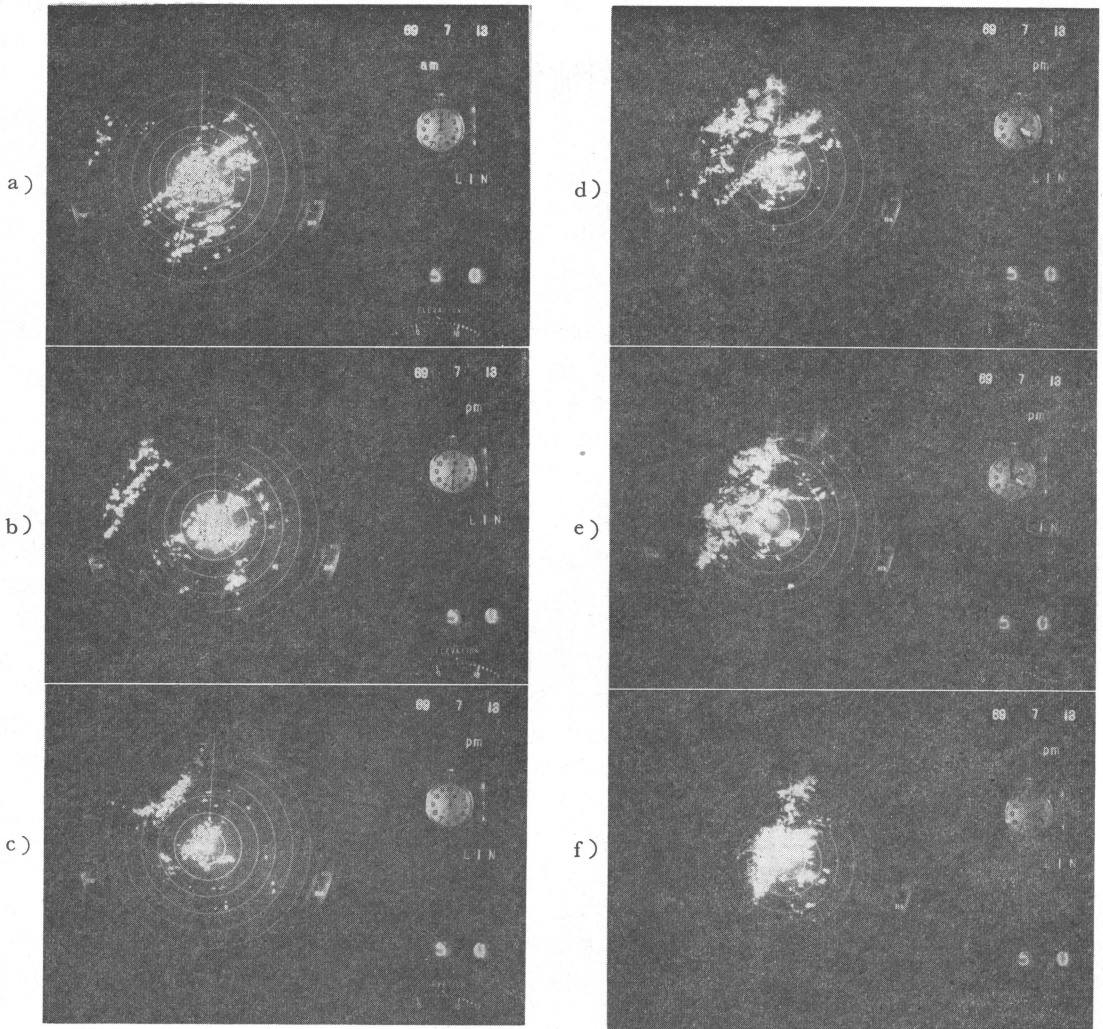
\* Vertical Structure of the Convective Precipitation Echo Observed by PPI and RHI Radar

\*\* K. Takeda 九大農学部

\*\*\* Y. Shiotsuki 九大農学部

—1970年3月25日受理—

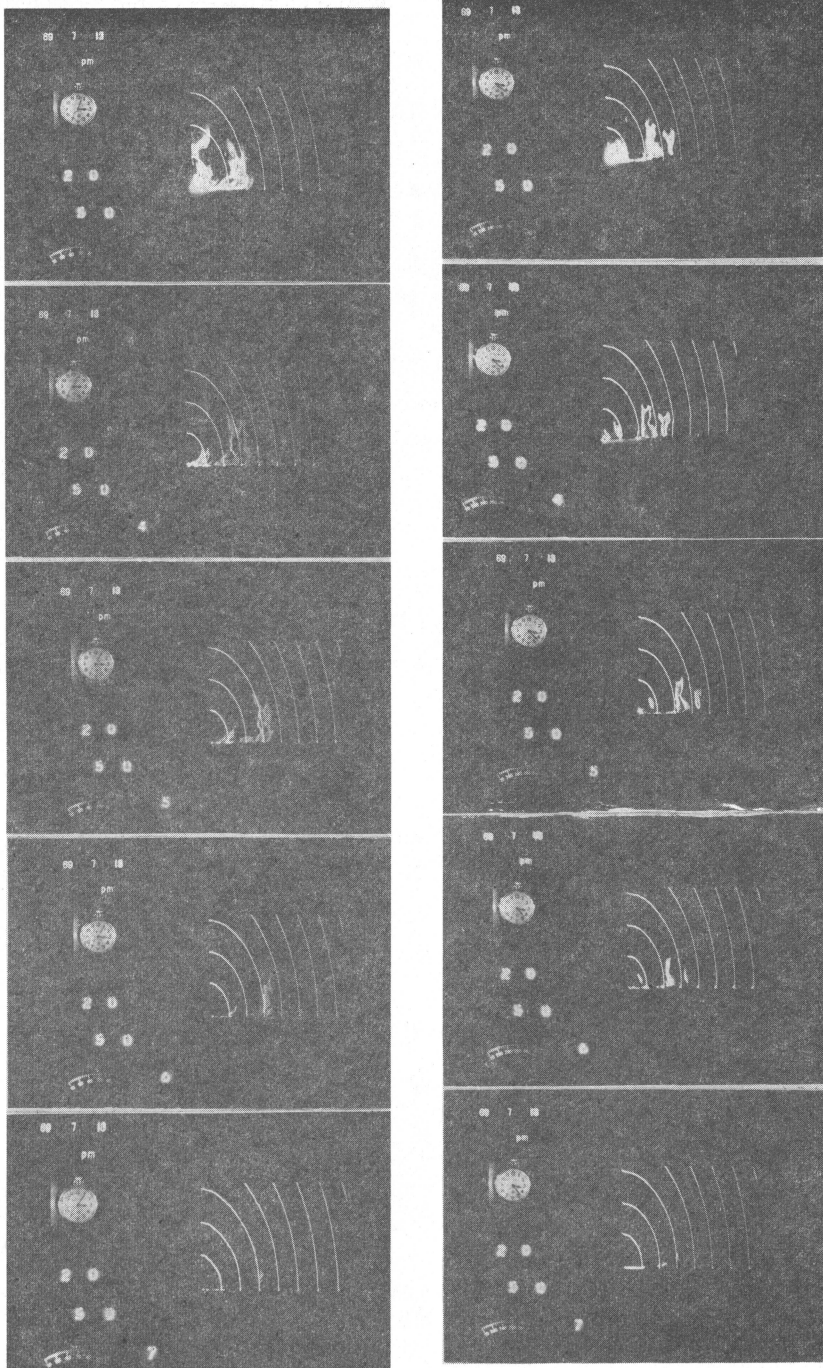
—1970年5月7日改稿受理—



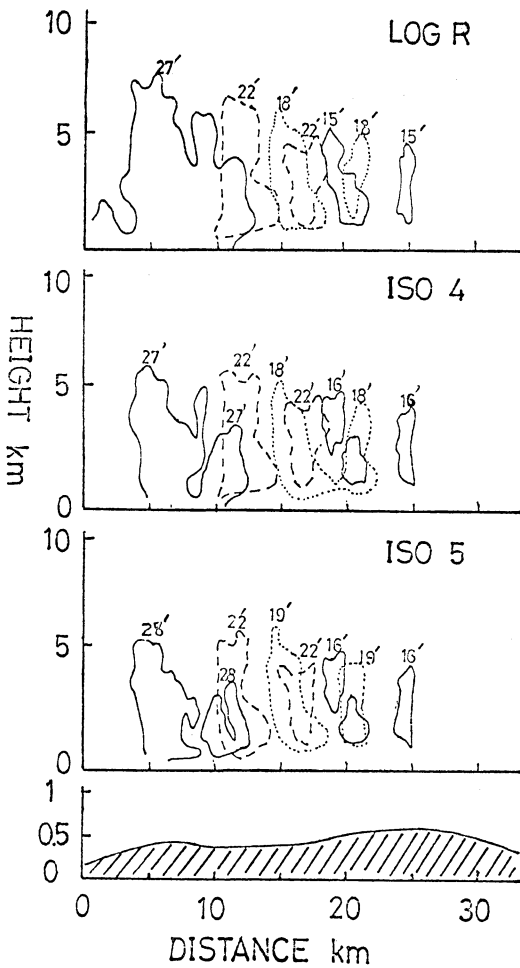
第2図 1969年7月13日 12時～14時20分の人吉レーダーの PPI 写真, a, b, c, d, e, f それぞれ12時, 12時30分, 13時, 13時25分, 14時, 14時20分観測のもの 同心円の間隔は10km.

てくる比較的背の低いエコーを見た。第3図はこれら二つの方向の RHI 写真であるが、 $70^\circ$  方向では人吉上空には高度 10km を超す背の高いエコーがあり、前線が発雷を伴っていたことをよく示す。又 12km の所には高度 7～8 km のエコーがあって、雨量強度では距離 16 km のところに ISO 7 の強いエコーが残り、著者ら(武田, 1967)(武田・塩月, 1968)の報告した背の高いエコーの風下に強エコーがあることがここでも現われている。又、反対に風上から進行してくる  $248^\circ$  方向のエコーは高度 6～7 km では、連続観測の結果エコーの発達状況がよく判り、更にこのエコーが人吉上空に達して降水をもたらした時の雨滴のろ紙観測を実施できたので、今回の報

告ではこれらのエコーについて解析したものを述べる。第4図は $248^\circ$ 方向から人吉に向かってくるセル・エコーの RHI 連続写真から作図した垂直エコーの発達状況を示す。図中の斜線部は格子間隔 6 km で平均化した $248^\circ$ 方向の地形の断面である。図中の数字は時刻を示すが、セルの動きを判断しやすい ISO 5 のエコー変化を見ると、15時16分には20km と25km にそれぞれ高度 4 km の2つの対流性エコーがあるが、これらは地形の一番高い25km あたりを過ぎて次第に発達し、先行のエコーは27分に5 km にあって、その高度は Log R では高度 7～8 km に達しており、これに対して後方のエコーは高度は余り変化していないが、横の方には成長しており、27



第3図 人吉上空を寒冷前線が通過した時の PHI 写真 (LOG R~ISO7).  
左; 70°方向, 右; 248°方向. 距離線は5 Km間隔.



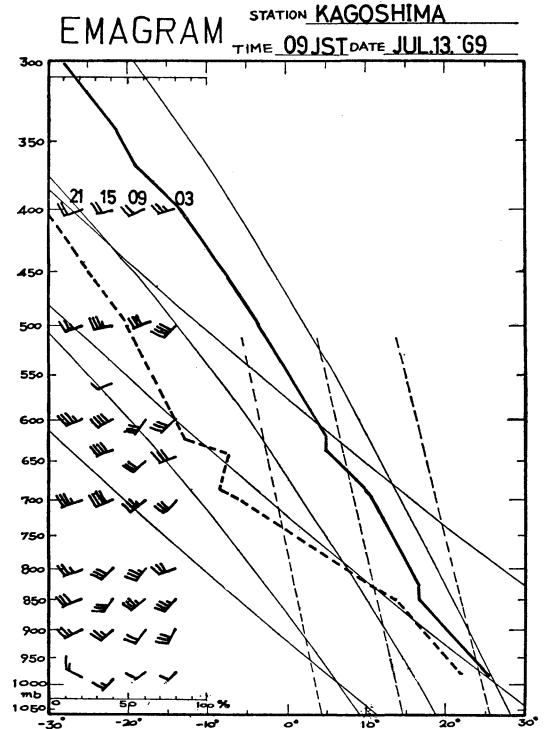
第4図 人吉から248°方向の RHI の連続観測から求めたセル・エコーの発達状況. 数字は時刻 (15時～分) を示す.

分には先行のエコーの後面に接している. 32分にはエコーの先端はレーダー観測所上空に達して34分に降雨はそれ迄地雨性の弱いものから急激に雨量強度が増大した. これらのエコーの移動速度は約60km/hであり, 先に述べた寒冷前線並びにそれに伴うバンドエコーの速度に較べると天気図上の寒冷前線の速度 50km/h に近いことが判る. 又, 上層の風と比較すると, 第5図は鹿児島島の13日の上層の状態を示すが, 前線通過の15時頃に西南西40ノットの強風域が700~600mbに現われており, セルの移動方向はこの高度の風向と同じで, 移動速度は下層の850~800mbの30ノットに近い. 従来の報告 (立平・深津 1963) でもセル・エコーの移動速度は700mbの風に対

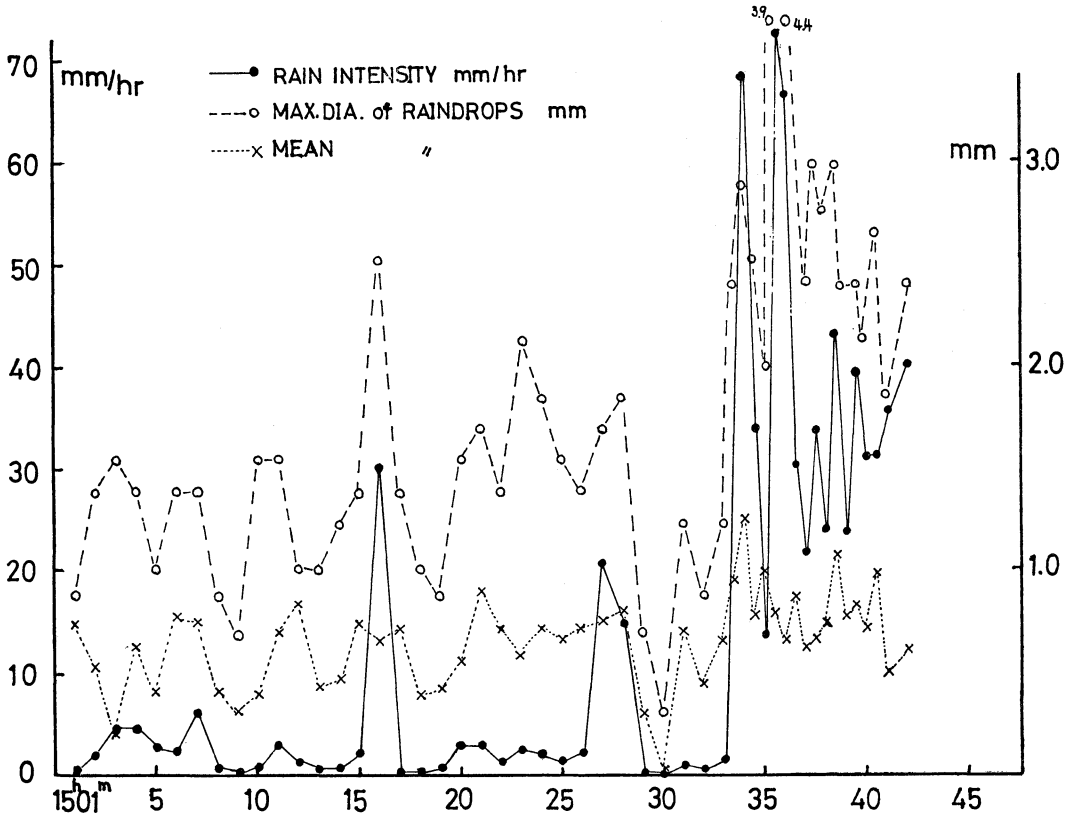
応がいいと云われているので, 今回の248°方向からくるセル・エコーはほぼ直つすぐに人吉に向かってくと断定してよいと思われる.

3. Water-Blue ろ紙による雨滴観測

これらの対流性エコーがレーダー観測所上空を通過する前後, 降ってくる雨滴のろ紙観測を行っていたが, 第6図はこれらの結果を示すもので, 読み取り面積 5cm × 5cm 中の雨滴の平均直径, 最大直径, 又その中の雨滴の大きさとその落下速度と雨滴数から決定した雨量強度の15時20分から42分迄の時間変化を表わしている. ろ紙の露出時間は雨量強度に応じ 1 sec ~ 5 sec で, 観測は 1分~30sec おきに行なった. これを見ると寒冷前線通過後の15時頃から15時33分迄は地雨性の弱い雨が続いたが, 前記の対流性エコーが頭上に来た34分から雨量強度, 平均直径, 最大直径ともに急速に増大し, 36分から次第に減少しはじめる. このことは第3図の垂直エコーの等エコー線図から判るように対流性エコーの前面に強いエコーがあることと対応する. 又, 第6図から明らかのように雨量強度は平均直径よりむしろ最大直径とよく対応しており, 雨量強度と最大直径の関係を見たのが第



第5図 1969年7月13日9時の鹿児島島のエマグラムと上層風.



第6図 レーダー観測所上空に達したセル・エコーからの雨滴の時間変化。

第1表

ISO	Log R	4	5	6	7
雨量強度 mm/hr	0.5	4.0	8.0	16.0	32.0
雨滴最大直 径 mm	1.0~1.7	1.7~2.0	2.0~2.2	2.2~2.5	2.5 以上

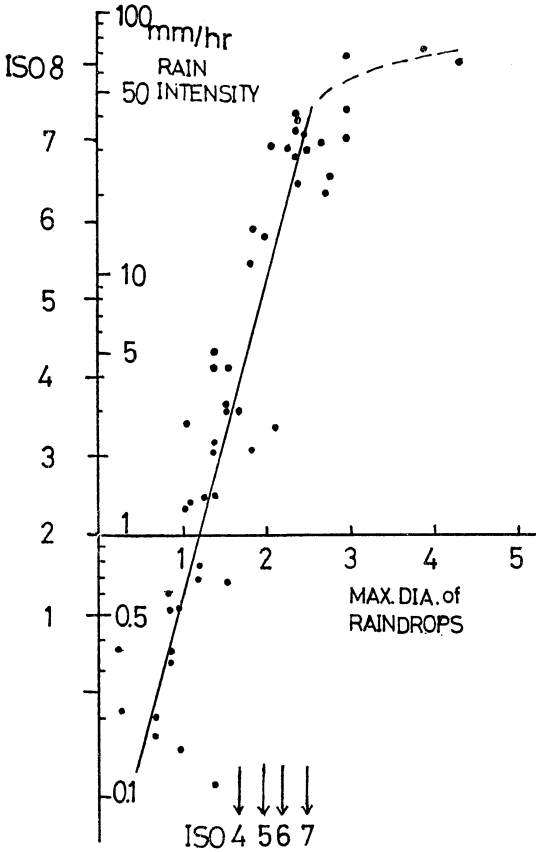
第2表

高 度 km	RHI エコー強度分布から求めた上昇速度 m/sec	雲写真観測から求めた垂直速度 m/sec
3.0~3.5	2.2	1.0
3.5~4.0	3.5	3.4
4.0~4.5	4.5	
4.5~5.0	2.4	
5.0~5.5	2.0	
5.5~6.0	1.3	

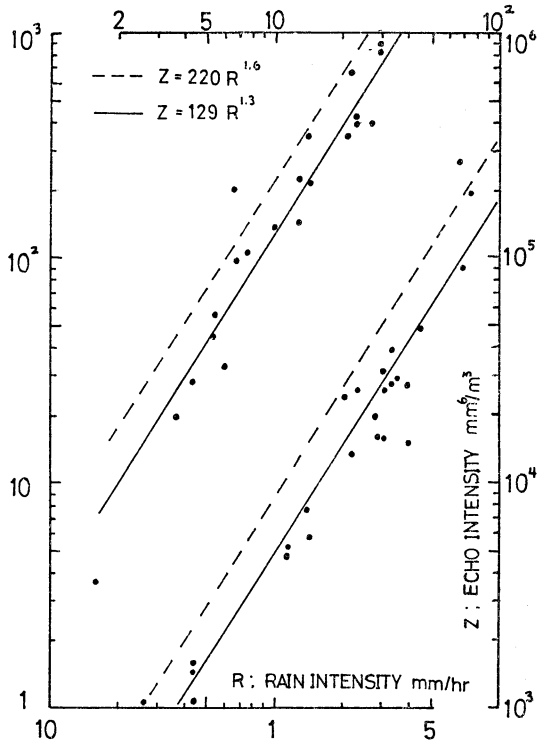
7図である。このことは後に雨滴成長式より求めた雲内の雨滴の大きさを逆に雨量強度になおしたものと実際のレーダーの雨量強度とを比較するのに基づき都合がよい。又この場合の雨量強度  $R$  は地上のろ紙観測にもとづいて決めたものであるが、この  $R$  と RHI に表われる雨量強度との関係を調べておく必要がある。観測中レーダーの雨量演算装置ではレーダー反射因子  $Z$  と  $R$  の関係は Marshall & Palmer (1948) にならって、 $Z=220R^{1.6}$  でセットされていたが、これに対して今回の13日15時から15時42分迄の  $Z$  と  $R$  の関係は  $Z=129R^{1.3}$  となり、今回の対流性エコーの雨量強度はレーダーに表われる ISO 表示の雨量強度の約2倍しておかぬべならないことが判った。以上の  $Z$  と  $R$  の関係を第8図に示す。これと第7図の雨滴の最大直径と雨量強度の関係から今回のレーダー ISO 表示と雨量強度と雨滴の最大直径の関係を第1表に示す。

4. 雨滴の成長の数値計算

降水論には種々の研究とモデルがあって非常に複雑で

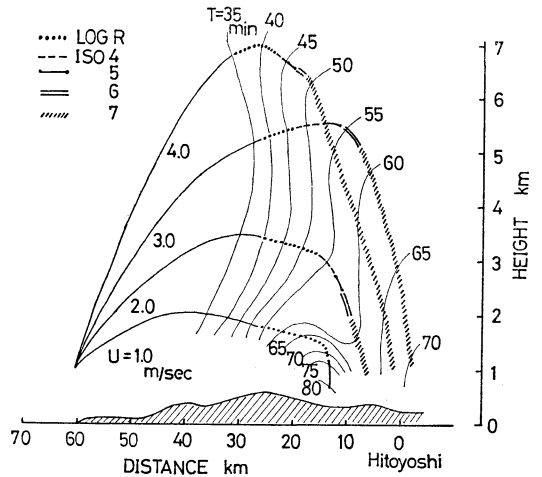


第7図 ろ紙観測によって求めた雨量強度と最大雨滴直径の関係。



第8図 ろ紙観測による Z-R 関係。

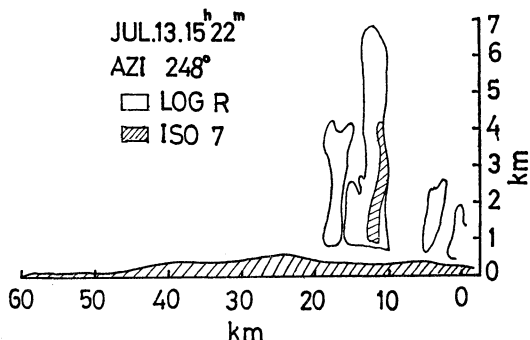
あるが、今回取り扱う対流性エコーの背の高さが最高7 kmぐらいい、エマグラムによると350mbあたりで $-20^{\circ}\text{C}$ であるが、ここでは一応この高さでも過冷却状態であると仮定して、簡単に水滴併合による雨滴の成長を考える。成長式は一般に(Mason, B.J. (1957))  $dr/dz \approx EwV/4\rho_L(U-V)$  で与えられ、 $r$  は成長する雨滴の半径、 $V$  はその落下速度で、併合される方の微小水滴の落下速度は無視してある、 $U$  は空気の上昇速度で、 $E$  は雨滴の捕捉率、 $w$  は雲水量、 $\rho_L$  は雨滴の密度である。今回の計算では寒冷前線通過後空気中には半径 $50\mu$ 程度の小水滴は充分残っていると考え、雲底高度を1 kmとして、併合される方の微小水滴の半径は常に $10\mu$ として行なった。雨滴の捕捉率、落下速度については教科書の図表(藤原, 1967)に従った。又、雲水量  $w$  はここでは $1\text{ g/m}^3$  で与え、垂直上昇速度  $U$  は RHI エコー強度から得られた降雨強度の垂直分布からと雲の写真観測から



第9図 雨滴の併合成長式による計算で求めたエコー分布図は各々の上昇速度をもった雨滴がその位置に達する迄の時間(分)を示す。

決めたものを参考にした。なお、降雨強度の垂直分布から上昇速度を出すことの説明は Bannon, J.K. (1948) に詳しく書かれているので、ここでは省略する。又、雲観測は2点観測に失敗したが、近傍の降水中の雲が PPI エコーに現われていたので、これと目視によって水平距離を決め、鹿児島の上層風によって補正して、一点の写真から雲の高さを決定した。これらの結果を第2表に示す。密雲のため雲写真は3 kmから4 km 迄しか追跡できなかったが、これを見ると大体垂直エコー内で1.0~4.0m/sの垂直速度があったと思われる。したがって数値計算ではある地点で小水滴を含むテルミックが上昇する時、1.0, 2.0, 3.0, 4.0m/s の速度をもったとして成長式に入れ、何分後にどれくらいの大きさになってどの位置にあるかを見たのが第9図である。

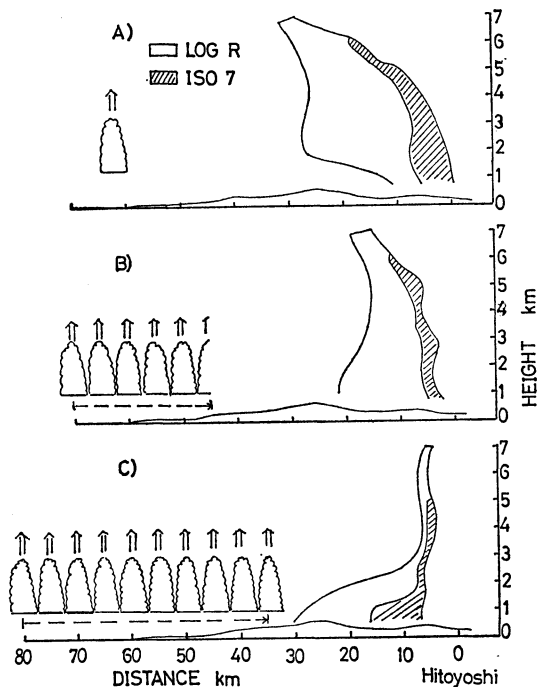
この際上空の風は鹿児島高層資料・セルの移動速度により地上から1 km 迄は8 m/s, 1 km~2 km では10m/s, 2 km 以上では15m/s で与えた。図では人吉から60kmの地点で発生したテルミックがそれぞれの上昇速度をもった時、このテルミック内での雨滴の航跡を示し、---、---



第11図 1969年7月13日 15時22分の人吉から248°方向の RHI エコー分布図。

-, —, ==, //// の部分はレーダーの等雨量線演算による ISO 表示で見た場合、それぞれ Log R, ISO 4, 5, 6であることを示す。雨滴の大きさを知るには第1表により換算すればよい。点線で示したTの等値線はテルミック発生点からその点に雨滴が運ばれる迄の時間(分)を示してある。テルミックの発生点が一点に固定されていて定常的な場合は、この図だけから RHI で見たエコー強度分布が判るが、発生点が例えば前線にあって移動する時は、発生点の移動距離だけこの図をずらさせて次々に合成すれば、ある時刻のエコー分布を求めることができる。第10図 a), b), c) はテルミック発生点の移動速度をそれぞれ0, 30, 60km/h で与えて、人吉から60km 地点で発生した(移動する場合は次々の移動点で連続発生したとする)テルミック内の雨滴が丁度1時間航跡した時刻で垂直エコー分布を推定したものである。それぞれ簡単のために Log R によって垂直エコー全体のプロファイルを示し、ISO 7によって強雨エコー域を示してある。これを見ると、テルミックの発生点の移動が速度が大きい程プロファイルはやせ型になるが、強雨エコー域は共通して移動方向前面に現われており、最大エコー高度とこの前面の強エコー域の距離間隔は移動速度 0 km/h, 即ち停滞性のもので30km, 30 km/h で15km, 60km/h で0 km となって、最大エコー高度の真下に強雨エコー域が現われており、著者らがこれ迄の観測で指摘した“背の高いエコーの風下に強エコー域がある”ことを説明している。

これらの結果を今回の観測結果と比較するため、第2図の13日15時22分の Log R と ISO 7 を合成したものを第11図に示す。これを見ると ISO 7 の強エコー域はエコーの移動方向の前面に現われ、最大エコー高度の2.5 km ほど風下側において第10図からの換算で云えば、こ



第10図 テルミック発生点の移動速度の違い(A: 停滞, B: 30km/h, C: 60km/h)による垂直エコー分布。エコー分布は人吉から60 km 地点のテルミック内の雨滴が1時間航跡した時点で合成されたものである。

の時のテルミック発生点の移動速度は55km/hぐらいになり、先述の観測されたセル・エコーの移動速度60km/h、にはほぼ一致することが判る。

したがって、今回の観測された RHI エコーは約 60 km/h で移動する収束場が次々とテルミックを発生させ、それらが重なってできたものであるが、この収束場はやはり寒冷前線に伴ったものであることが推定される。(但し前線そのものは人吉を15時頃既に通過している。)即ち、第10図c)ではテルミックの発生点の移動速度が60km/hの場合でエコー分布図は人吉西方85km~35kmの間で発生したテルミックの合成されたもので、これよりテルミック発生時刻は15時22分の85分~45分前、即ち14時~14時40分となつて、14時には寒冷前線は天気図、PPI 写真を見ると人吉西方50~60kmで熊本から阿久根にかけて延びており、確かにこれらの RHI エコーを形成した収束場が前線附近、或いは前線の後面にあったことが判る。

### 5. あとがき

以上のことから今回及びこれ迄の著者らが報告した背の高いエコーの風下に強雨エコーが出現することを雨滴の併合による成長で説明できることが判つた。今後は収束場の移動速度のみならず、上昇速度(下層収束場の強さ)とそれらの時間変化を考慮したもの、更に上層風など種々の気象条件における数値計算を行なつて、降水雲の背が高くなる以前に収束場の強さで強雨域の出現する時刻と場所を知ることに努力を向け、集中豪雨が何時、何処で起こるかの疑問について或る程度の目安を与えた

いと思う。又、今回でも見られたが、武田ら(武田・元田、1965)が報告した対流性エコーが風下斜面で更に大きく成長することを、今回の解析でテルミック発生点即ち収束場の移動速度が停滞気味になると降水エコーは太ってくることに对应させて、風上の地形的な影響で収束場の移動速度が鈍くなったためと推測されるが、これらのことも合わせて追求して見たいと思っている。

終りに本研究遂行にあたり、気象資料を提供して頂いた福岡管区气象台、ならびに観測、資料整理に多大の協力を頂いた九大農学部気象学教室大学院生早川誠而、職員杉谷俊一の各氏に厚くお礼申し上げる。

### 参考文献

- 1) 集中豪雨シンポジウム(1967): 天気, Vol. 6, 14, No. 9, 321-338.
- 2) 降雨機構とその応用(1967): 天気, Vol. 6, No. 9.
- 3) 武田京一(1967): 第4回災害科学シンポジウム総合講演会論文集 3-6.
- 4) 武田京一・塩月善晴(1968): 第5回災害科学シンポジウム総合講演会論文集 93-95.
- 5) 立平良三・深津 林(1963): 気象集誌, Vol. 41, 145-157.
- 6) Marshall, J.S & Palmer, W.M (1948): Jour. Met. Vol. 5, 665.
- 7) Mason, B.J. (1957): The Physics of Clouds
- 8) 藤原美幸(1967): 気象研究ノート, Vol. 60.
- 9) Bannon, J.K (1948): Q. J.R.M.S. Vol. 74, 57-66.
- 10) 武田京一・元田雄四郎(1965): 天気, Vol.12, No. 11, 371-376.

(ii ページのつづき)

偉人は気象学界に大きな空白を残した。我々仲間にとっては彼はそれ以上の物であり、その死は我々を淋しくする。我々は彼の意志を継ぎ、残された仕事を発展させることを誓う。彼はこの仕事を以て自ら記念碑をうち建てたのである。」(ハインツ・フーゴー、レオポルド・クラウザー)

シェアハク先生及びその仲間が21年間も、一つの目標に向って黙々と励んで来たことは驚異に値する。然しそれに付随して、先生が「1972年に定年になったら、自分

の仕事で第三の教科書にまとめた。」と度々話された事も忘れられない。先生がそれをなし遂げられずに世を去られた事は、さぞかし残念だったろうし、気象界のためにも悲しむべきことではないか。遙かに先生の御冥福をお祈りしたい。

(私がドイツで“シェルハグ”と発音したところ“シェアハク”が正しい発音とのことで、日本人にはなじみが少ない発音であるがあえて“シェアハク”とした)

(1970.10.1. 大井記)