

3次元レーダー雨量計情報の利用に関する基礎的研究

中北 英一・筒井 雅行
池淵 周一・高棹 琢馬

FUNDAMENTAL STUDY FOR MAKING BETTER USE OF A THREE-Dimensionally SCANNING RADAR RAINGAUGE

By Eiichi NAKAKITA, Masayuki TSUTSUI, Shuichi Ikebuchi
and Takuma TAKASAO

Synopsis

We developed several colour graphic screens which can visually represent both the distribution of echo intensity and shape of three dimensionally spread precipitation field, in order to investigate how fine resolution the radar information has.

By the use of VCAPPI (Various Constant Altitude Plan Positions Indicator), which we developed from CAPPI, we can visually investigate the three dimensional characteristics of precipitation phenomena in meso- β scale. Furthermore, by the use of RRHI (Range-RHI), which is in the form of the arrangement of fifteen RHIs, we can visually investigate in meso- γ scale.

In the case of very heavy rainfall which arose along Baiu front on the 21 July in 1986, from RRHI we can find a convective echo consists of several echo cells in various life stages. This means that the convective echo is from a multi-cell storm. This fact can be also verified from RHTI (Range Height Time Indicator), which can visually represent the time series of echo pattern in arbitrary vertical section, by setting the vertical section along the storm moving direction.

On the other hand, we found that characteristics of the three dimensionally spread echo pattern were relatively well explained by the combination of the meteorological data from routine observation networks and the configuration of the ground.

1. 序 論

近年、建設省によりデジタルレーダー雨量計が実用化され、それに伴ってレーダー雨量計を用いた種々の実時間降雨予測手法が提案されてきた^{1),2),3),4)}。しかし、現在までに提案されている手法はすべて、2次元平面内の降雨パターンの変化傾向を時間的に外挿するといった気象学的根拠のうすいものである。

とくに、2次元平面内のデータの利用だけでは、利用できる降雨情報は3次元的に広がる降雨場のほんの一部分に過ぎず、他の気象データや気象学的知識とあわせて議論する際に必要な、降雨域の鉛直方向の広がり具合や強度分布等の情報は得られない。しかも2次元平面の情報とはいうものの、それはレーダービームの仰角を一定値に固定して得られる情報であるので、観測される現象の高度がレーダーサイトからの距離によって異なるという点にも問題がある。したがって、仰角固定観測による情報だけでは、外挿という手段をとるにしてもデータ不足と言わざるを得ず、さらに予測精度を向上させるためには、3次元レーダー雨量計(仰角可変レーダー雨量計)情報を利用した気象学的根拠のある降雨予測手法の開発が不可欠となる。

さて、3次元レーダー雨量計情報の利用を考えるにあたって、まず第一にレーダー雨量計データの分解能、つまりレーダーデータがどの程度降水構造やその変動特性を表現し得るかを前もって把握しておく必要がある。ところが、3次元空間内のレーダーエコーの強度分布を直観的に把握することは容易ではない。なぜならば、一般に3次元的なエコーの強度分布を2次元平面内に表現しようとするとき、3次元的なエコー域の形態をわかりやすく表現しようとするればその中の強度分布の表現が難しくなるし、反対に強度分布の表現に重点をおけば立体的なエコー域の形態が直観的にはわかりにくいものとなるからである。

一方、3次元レーダー雨量計情報を利用した気象学的根拠のある降雨予測手法の開発にあたっては、少なくともルーチン観測による気象データとの結合をはかる必要がある。そういった意味で、3次元レーダー雨量計によって観測されたエコー強度分布の特性がどの程度ルーチン観測による気象データによって説明づけられ得るものなのかも調べておく必要がある。

こういった点を考慮し、本研究ではカラーグラフィックスを用いて、3次元的なエコーの強度分布を直観的に表現するための画像の開発を行うとともに、それらの画像を用いてレーダー雨量計データの分解能を調べることを目的とする。さらに、エコー強度分布、高層観測データやアメダスによる地上風等の入手の容易な気象データ、および地形との関係を定性的に考察する。

なお用いたデータは、昭和61年7月に京都府南部に生じた集中豪雨時に建設省深山レーダー雨量計システムにより観測されたものである。

2. 3次元レーダー雨量計システム

本章では、3次元レーダー雨量計システムの概要を建設省深山レーダー雨量計システムを例にとって説明するとともに、放射状メッシュ単位に得られる受信電力値から3次元直線交座標系内に設定した格子点上の値への変換方針についても述べる。

2.1 深山レーダー雨量計システムの概要

深山レーダー雨量計システムの特徴は、ビームの仰角を固定した仰角固定観測ばかりでなく、他の建設省のレーダー雨量計とは異なり仰角可変観測も行えるところにある。

観測手順としては Fig. 1 に示すように、ビームの最低仰角 (0.8°) とした仰角固定観測を1分間と、仰角が 22.5° から 1° までの仰角可変観測を4分間の、合計5分を1サイクルとして連続観測を行う。ビームの回転速度は1分間あたり5回転である。

仰角固定観測時の受信電力値は、レーダーサイトを中心とする半径 120 km 以内を方位方向に 128 等分、120 km から 198 km までを 256 等分して、さらにビーム方向を 3 km ごとに等分して得られるメッシュ単位

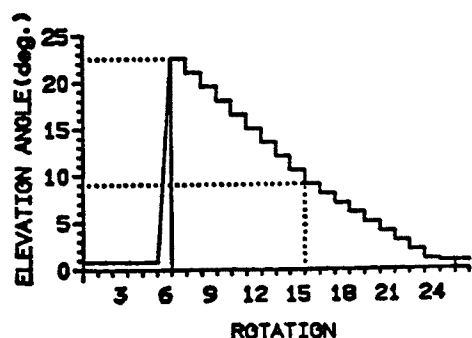


Fig. 1 Beam scanning procedure of the Miyama Radar Rain Gauge System.

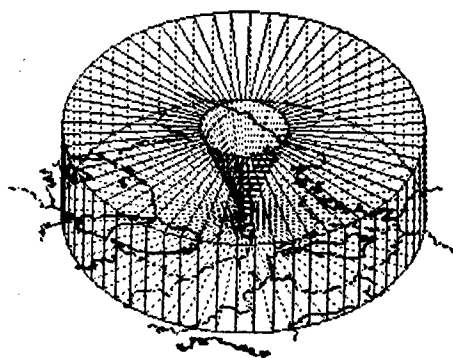


Fig. 2 Observation domain of the Miyama Radar Rain Gauge System.

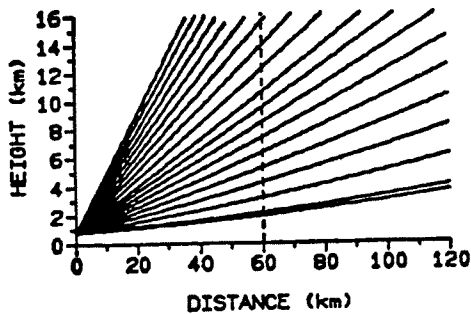


Fig. 3 Vertical section of the observation range represented by radar lines of sight.

で与えられる。半径 120 km 以内が定量観測範囲、それ以外が定性観測範囲とよばれている。これは、ブライトバンドの高さがおよそ 4 km と想定すると、仰角固定観測時のビームがこの高さを越えない範囲が 120 km 以内となるためである。

仰角可変観測範囲は、地表面を平面とすれば Fig. 2 の通りである。半径 120 km の円筒を、地表から約 15 km の高さで地表面に平行な平面で切った立体にほぼ等しい。ただしビーム仰角が最大 22.5° という制限があるので、中心部には逆円錐状のデータのない領域がある。また底面も、ビームの最低仰角が 0° ではないのでレーダーサイトを頂点とした逆円錐状をしている。この観測範囲の鉛直断面をビーム走行線で表したのが Fig. 3 である。鉛直断面を観測する際に通常用いられる気象レーダーとは異なり、深山レーダーはビーム仰角が離散的に設定されており、ビームが方位方向に一周する間、仰角は一定値に保たれる。図中、最低仰角のビーム走行線は仰角固定観測時のものである。各仰角に対する観測範囲をビーム方向の距離で表したのが Table 1 である。受信電力値は仰角固定観測時の定量観測範囲と同様、方位方向を 128 等分、ビーム方向を 3 km ごとに等分して得られるメッシュ単位で与えられる。

Table 1 Observation range for each elevation angle

No.	elevation angle(deg.)	observation range along radar lines of sight(km)
1*	0.8	120
2	1.0	120
3	2.0	120
4	3.0	120
5	4.0	120
6	5.0	120
7	6.0	120
8	7.0	120
9	8.0	108
10	9.0	96
11	10.5	84
12	12.0	72
13	13.5	63
14	15.0	57
15	16.5	51
16	18.0	48
17	19.5	45
18	21.0	42
19	22.5	39

*: for the observation with fixed elevation angle

2.2 直交座標系内に設定した格子点上のデータ値への変換

2.1 で述べたように、レーダーの受信電力値は、方位方向と距離方向の極座標系で表現される放射状メッシュ単位で得られる。しかし、降水の強度分布の 3 次元画像を作成したり各種の解析を行うにあたり、データの空間的配置は直交座標系で表されている方が都合がよい。したがって本研究では、Fig. 4 に示す単位放射状メッシュごとに得られる値を、3 次元直線直交座標系（以下では単に直交座標系とよぶ）における格子点上の値に変換する。図中、1.35° はアンテナの垂直ビーム幅である。具体的には、各格子点がどの単位放射状メッシュに含まれるかを判断し、その単位放射状メッシュ内の平均受信電力値をもって、格子点上の値とする。

ただし、本研究では 3 次元的な観測域全体を単位放射状メッシュで分割構成できるようにするために、単位放射状メッシュの上下端は、Table 1 の No. n に対する仰角を $\alpha(n)$ 、この仰角に対する単位放射状メッシュ上面の仰角を $\alpha_u(n)$ 、下面の仰角を $\alpha_l(n)$ 、として

$$\begin{aligned}\alpha_u(n) &= \{\alpha(n+1) + \alpha(n)\} / 2 \\ \alpha_l(n) &= \{\alpha(n) + \alpha(n-1)\} / 2\end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

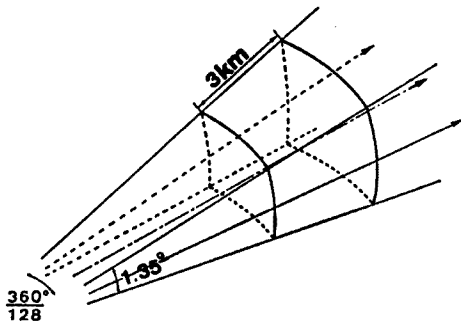


Fig. 4 Illustration of a unit mesh. The electronic power intensity averaged within this unit domain is recorded.

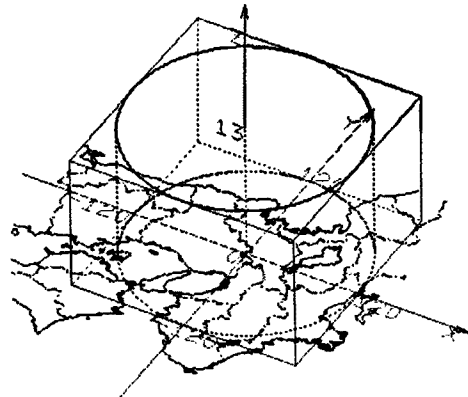


Fig. 5 Orthogonal coordinates system set over the Kinki District.

のように定めることにする。ただし、

$$\alpha_i(1)=0.2^\circ, \alpha_u(19)=23.0^\circ \dots\dots\dots(2)$$

とする。なお、アンテナの垂直ビーム幅は 1.35° であるので、仰角が 9° 以上になると単位放射状メッシュ内にビームの走行しない領域が若干存在することになるが、これは無視する。

直交座標系および格子点は以下のようにして定める。

Fig. 5 に示すように、円筒形をしている観測範囲を含むような $240\text{km} \times 240\text{km} \times 13\text{km}$ の直方体を、レーダーサイトを中心に東西方向を x 軸、南北方向を y 軸、鉛直方向を z 軸とした直交座標系に設定する。直方体の高さを 13km としたのは、対流圏界面のおよその高度と、計算機の記憶領域の節約とを考慮したためである。

次に、設定した直方体を x 軸、 y 軸方向にそれぞれ 80 等分、 z 軸方向に 13 等分して得られる $3\text{km} \times 3\text{km} \times 1\text{km}$ のメッシュで構成し、このメッシュの中心点を格子点とする。ただし、高度 0.5km の格子点はすべて観測範囲には含まれまい。ここで格子点の z 軸方向の間隔を 1km としたのは、レーダー観測範囲の鉛直方向の平均的な分解能が 1km であることによる。つ

まり **Fig. 3** で示したように、仰角可変時の観測範囲半径 120km の中間点、すなわち 60km 地点におけるレーダービームの鉛直方向の分解能が約 1km であることによる。

ところで、厳密には地表は平面ではない。そこで、レーダーサイトを中心とした正距方位図上に直交座標系を設定するものとする。そうすれば、地図上の地点 (x, y) はレーダーサイトから方位 $\theta (= \arctan(y/x))$ 方向に地表に沿って距離 $r (= (x^2 + y^2)^{1/2})$ だけ進んだ地点を正確に表現していることになる。

さて、格子点の地表面に沿った距離 r 、高さ z が定まると、レーダーサイトからみた格子点の仰角 α 、距離 d (**Fig. 6** 参照) を

$$\alpha = \arctan \left\{ \cot \phi - \frac{(R+z_0)/(R+z)}{\sin \phi} \right\} \dots\dots\dots(3)$$

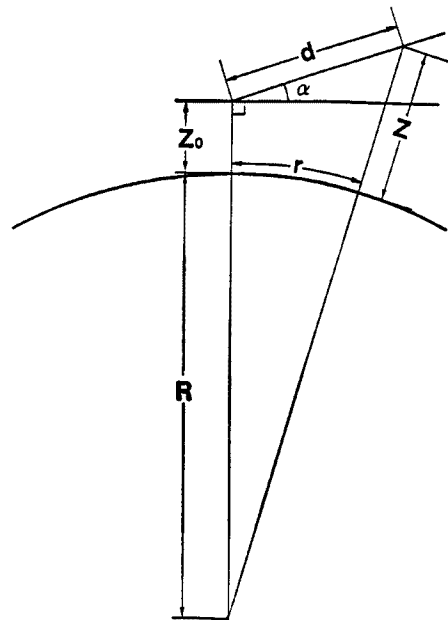


Fig. 6 Explanation of the relation among the elevation angle α , the distance from the grid point to the radar site d and the height of the grid point Z .

$$d = (R + z_0) \sin \phi / \cos(\phi + \alpha) \dots\dots\dots (4)$$

$$\phi = r/R \dots\dots\dots (5)$$

に従って求める。ただし R は地球の半径, z_0 はレーダーサイトの標高である。

このようにして, θ , α , d が定まれば, 格子点を含む単位放射状メッシュが決定できるので, この単位放射状メッシュの平均受信電力値を格子点上の受信電力値とすれば変換が完了する。

3. 3次元レーダー雨量計情報の可視化

本章では, 3次元的なエコーの広がりおよび強度分布を表現しようとして, カラーグラフィックスを用いて作成した種々の画像を紹介する。なお, ここでは白黒で表現しなければならないという制約から, 濃淡のみで表現してあるので, カラーで表現した画像に比して直観的なわかりやすさという点においては多少劣っていることを断わっておく。

3.1 3次元的なエコー域形態の表現画像

Fig. 7 は等価レーダー反射因子強度 (以下, 単に反射因子強度あるいはエコー強度とよぶ) が 20 dBZ 以上の格子点を含む, 3km×3kmの正方形メッシュを高度ごとに色分けして塗りつぶすことによって, エコー

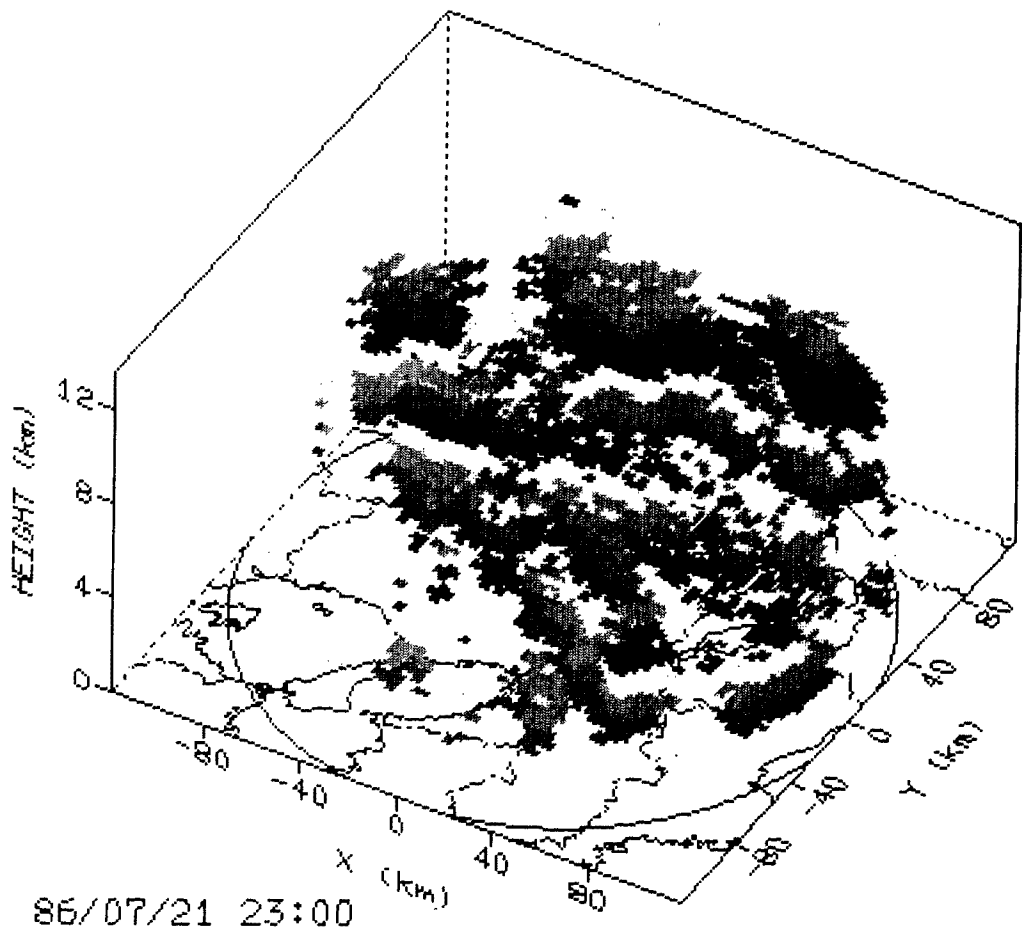


Fig. 7 Three dimensional screen which represents the shape of three dimensionally spread precipitation field.

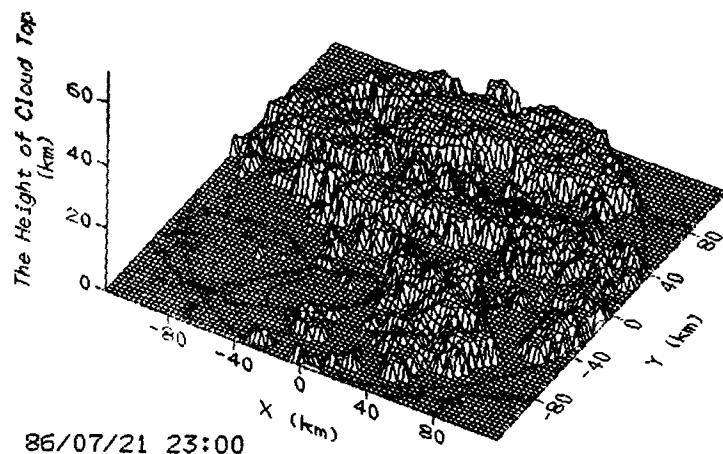


Fig. 8 Distribution of the height of the top grid point at which the echo greater than 10dBZ can be detected.

域の立体的な姿を可視化したものである。高度ごとに異なった色を用いることにより、各高度のエコー域の重なり具合を表現している。前述したように、白黒という制約上ここでは4種類の濃淡で表現したので、同じ濃さの部分が4kmの高さごとに現れて多少見にくくなっている。しかし、カラー表現の場合はすべての高度に異なった色を割り当てることができるので、現場においても3次元的形態を即座に判断するのに十分な画像である。なお、図中の半径120kmの円は、この円内がレーダ

ーの観測範囲であることを表す。

一方、**Fig. 8**は反射因子強度が10 dBZ以上のエコー域の最高高度の分布を3次元的に表現して、エコー域の3次元的形態を表そうとしたものである。エコー域を雲に例えれば、雲頂高度の分布図といえる。必ずしもすべての場合とはいえないが、エコー域の下にはやはりエコーが存在するとすれば、この図は3次元的なエコー域の形をほぼ表現していることになる。白黒で表現した場合は**Fig. 7**よりもむしろこの図の方が直観的にわかりやすい。

これらの画像は任意の閾値を選ぶことによって任意の強度以上のエコー域の形態を表現することができる。

3.2 3次元エコー強度分布図 (VCAPPI, RRHI)

エコー域の3次元輪郭と強度分布とを同時に画像に表現すること、つまりエコー域の空間的な全体像を生かしつつ内部の強度分布もわかるようにすることは、3次元エコー強度分布を取り扱うにあたって理想とすべきことである。本研究では、強度分布を描いた平面を3次元空間に並べて表示することによって、これを実現しようとした。

強度分布を平面に描いたものとしてまず、CAPPI (Constant Altitude Plan Position Indicator) が挙げられる。これは、レーダービーム走行面の強度分布を表示するPPI (Plan Position Indicator) と異なり、一定高度面のエコーの強度分布を表示するものである。

そこで、各高度のCAPPIを3次元空間に並べて表示したのが**Fig. 9**である。これは、エコー域を高度ごとに色分けして3次元形態を表現した**Fig. 7**を改良し、各々の高度のエコー域を一色で塗りつぶすのではなく、エコーの強度によって色分けしたものともいえる。ただし、以下に示す強度分布図とは違い、この図だけは煩雑になるのを避けるために3段階の濃度で表してある。兵庫県中央部あたりに高高度まで伸びる強エコー域が存在するのが読み取れる。ただしこの白黒画像では輪郭がわかりにくいので、**Fig. 7**よりも3次元形態はわかりにくい。しかし、カラー表示の画像では、エコー域の重なり具合がわかるように**Fig. 7**のカラー画像で平面を塗りつぶしたのと同じ色の輪郭線を設けてあるので、エコー域の3次元的な輪郭も直観的に読み取ることができる。前述したようにこの画像は各高度のCAPPIを重ね合わせた図であるので、これをVarious CAPPI, すなわちVCAPPIとよぶことにする。

次に、鉛直断面内の強度分布を表示する画像としてRHI (Range Height Indicator) がある。本来のRHIとは、レーダーサイトから一定方位方向に沿った距離を横軸に、高度を縦軸にとることによって、レ

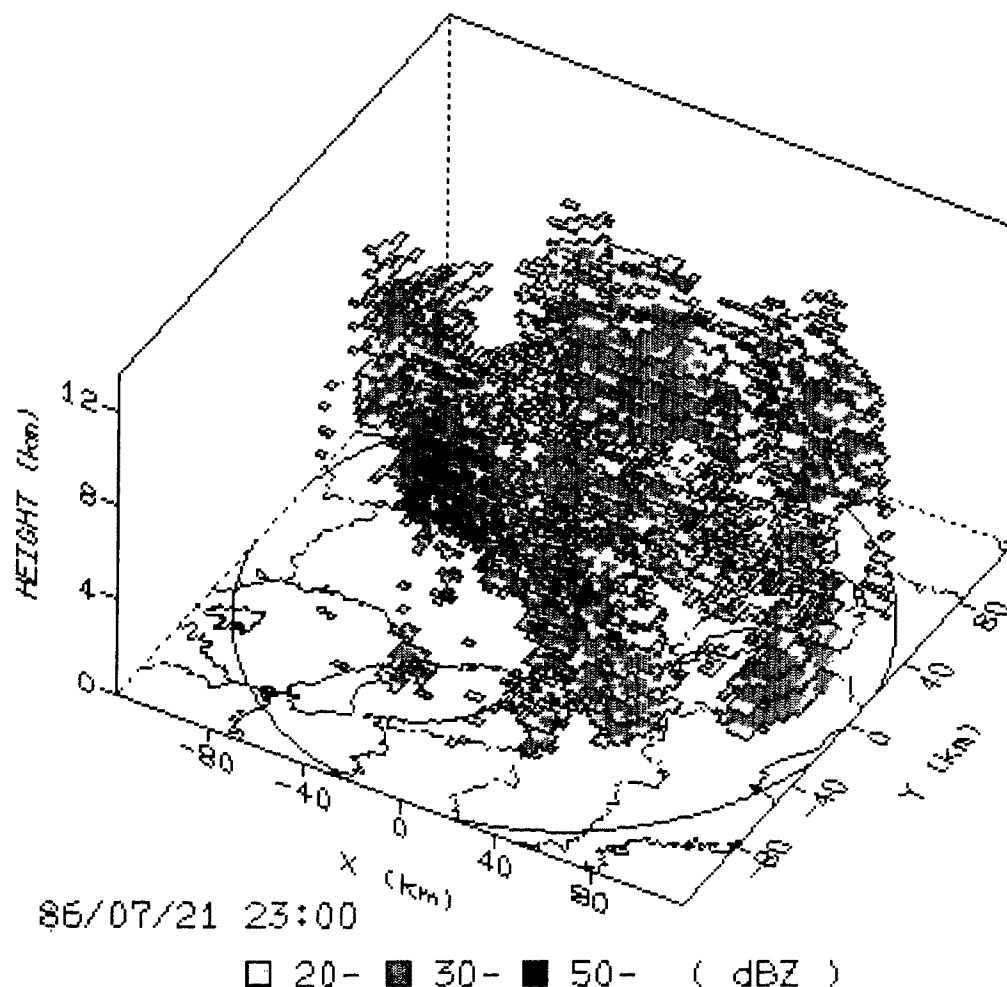


Fig. 9 VCAPPI (Various Constant Altitude Plan Positions Indicator).

ーダーサイトを通る任意方向の鉛直断面内のエコー強度分布を表示するものである。本研究ではレーダーサイトを通る鉛直断面だけでなく任意の鉛直断面内における強度分布図を RHI とよぶことにする。

この RHI を隠れた部分が生じないように 3 次元空間内に並べて、兵庫県中央部に存在した強エコー域の 3 次元的強度分布を表現したのが **Fig. 10** および **Fig. 11** である。**Fig. 10** は南北断面の RHI 15 枚を東西方向に並べたものである。表現されている領域は $42\text{km} \times 42\text{km}$ の正方形領域であり、 x 軸の正方向が東、 y 軸の正方向が北である。この図によれば、エコー域全体の形態や、その中の強エコー域の位置や形態もよくわかる。一方 **Fig. 11** は、同じ領域内の東西断面の RHI を 15 枚並べたものである。図の向きは、**Fig. 10** を反時計回りに 90 度回転させてある。したがって、底面の横軸が y 軸、縦軸が x 軸である。南北断面、東西断面のどちらの RHI を並べるかによって若干受ける感じが異なってくるが、どちらの方向のつながりに重きをおくかによって使い分けられよい。

Fig. 10, **Fig. 11** に示した画像は、エコー強度の 3 次元的な分布を直観的に把握できるという点において、これまでに示した画像の弱点を補う、いわば総括的な画像といえる。通常の RHI が Range Height Indicator であるのに対して、この画像は Height の代わりに Range Height を表現しているのので、以後 RRHI とよぶことにする。この RRHI を用いることによって、巨視的・微視的双方の観点からエコー域の発達・衰弱の様子を捉えることが可能となる。したがって、いくつもの対流セルを含むマルチセル型雷雨な

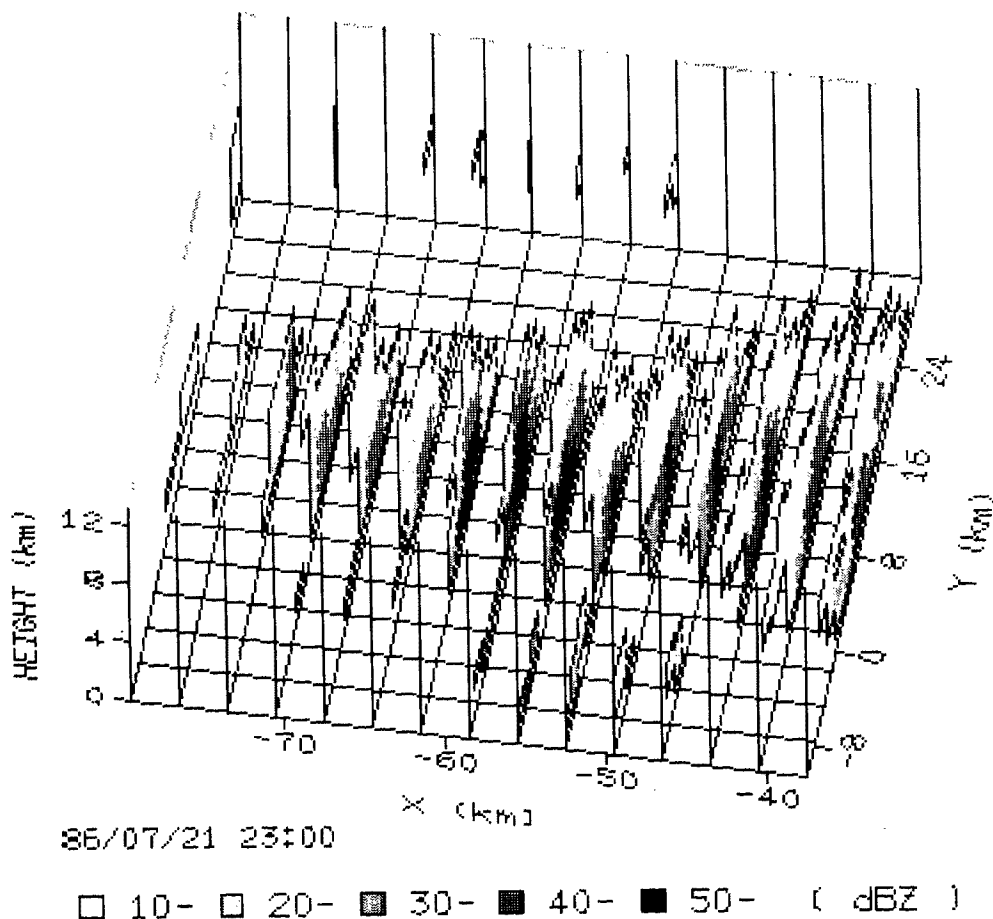


Fig. 10 RRHI in the use of north-south vertical sections.

ど、複雑な構造を持つ雷雨の解析等に非常に有効である。

3.3 エコー強度分布の時間推移の表現画像 (RHTI)

ここまでは、ある時刻におけるエコー域の表現画像を示してきた。強度分布の時間推移を知るためにはこれらの画像を時間ごとに並べてゆけばよい。しかし、時間推移をより直観的に把握するためには座標軸の1つに時間軸を取り入れた画像を用いた方がよい。

すでに時間軸を導入した画像として、横軸に時間、縦軸に高さをとって、ある地点の鉛直軸に沿った強度分布の時間変化を表した HTI (Height Time Indicator) がある。本研究ではこれを3次元表示画像に発展させ、鉛直軸方向の強度分布の代わりに RHI を用いた画像を作成し、これを Range Height Time Indicator, すなわち RHTI とよぶことにした。これは RRHI の x 軸, y 軸の何れかを時間軸にとって、エコー域の鉛直断面における強度の時間変化を表したものに相当する。

Fig.12 は、任意の地点から y 軸方向、つまり南北方向に 42km の幅をもつ鉛直断面を設定し、その断面内のエコー強度分布の5分ごとの時間推移を表したものである。設定した断面は左上の地図内に横線で示してある。時間軸に記してある数値は、Start time と記してある開始時刻から何分後であるかを意味する。この図の場合、たとえば時間軸で60の位置にある断面は、開始時刻の86年07月21日23時00分から60分後、すなわち22日00時00分における RHI である。同様に Fig.13 は任意の地点から x 軸方向、つまり東西方向42

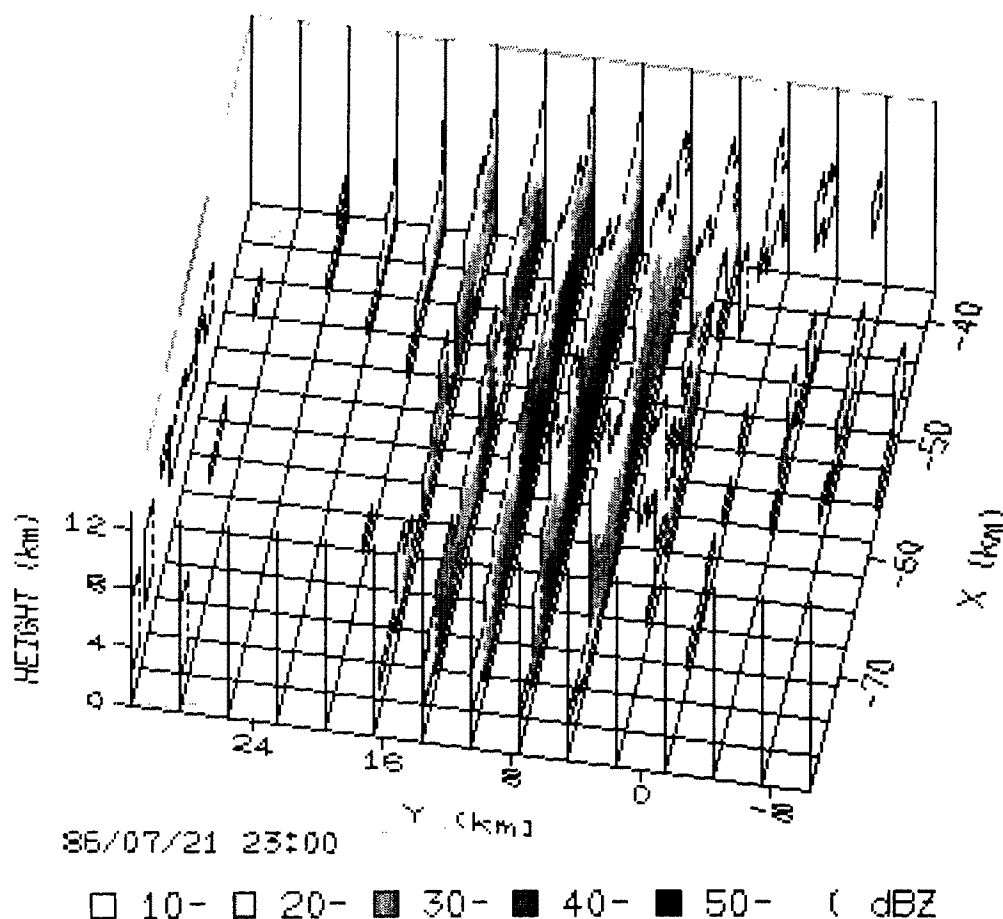


Fig. 11 RRHI in the use of east-west vertical sections.

km の鉛直断面内のエコー強度分布の時間推移を表す。なお、これらの図に表してある鉛直断面はそれぞれ Fig. 10, Fig. 11 で示した15枚の鉛直断面の一つである。

これら RHTI を用いると、エコー域の移動の様子もよくわかる。たとえば、Fig. 13 では時間が進むに従ってエコーが x 軸の正の方向、すなわち東方へ進んでいることがわかる。一方 Fig. 12 では、南北方向の移動はほとんど読み取ることができない。したがってこの2枚の画像から、エコーはほぼ真東に進んでいると考えることができる。しかし、これらの画像は対象とする鉛直断面が東西あるいは南北方向に限られているため、エコー域の構造の変化を正確には知ることができない。たとえば Fig. 13 において、50dBZ 以上の強エコー域の消滅してゆくのが、エコー自体の消滅によるものなのか、それとも単にエコーが断面を横切ることによって消滅したかのように見えるだけなのか、判断することはできない。なぜならば、一つの対流性エコーの直径が数 10km もないことから、たとえばほぼ真東に進んでいる場合でもある程度東方からずれているならば短時間で東西断面を横切ってしまうことになるからである。したがって、ある特定のエコー域を追跡してその内部構造の変化を調査する場合、設定する断面はエコー進行方向に沿ったものでなければならない。

そこで、エコー域の進行方向に沿った鉛直断面内の強度分布の時間推移を表したのが Fig. 14 である。地図上に描いてある線は、この線上の鉛直断面内の強度分布を描いてあることを意味する。また、距離方向の始点は地図上に丸印で示してある。ここで、エコー域の進行方向は、21日23時00分から22日00時00分までの

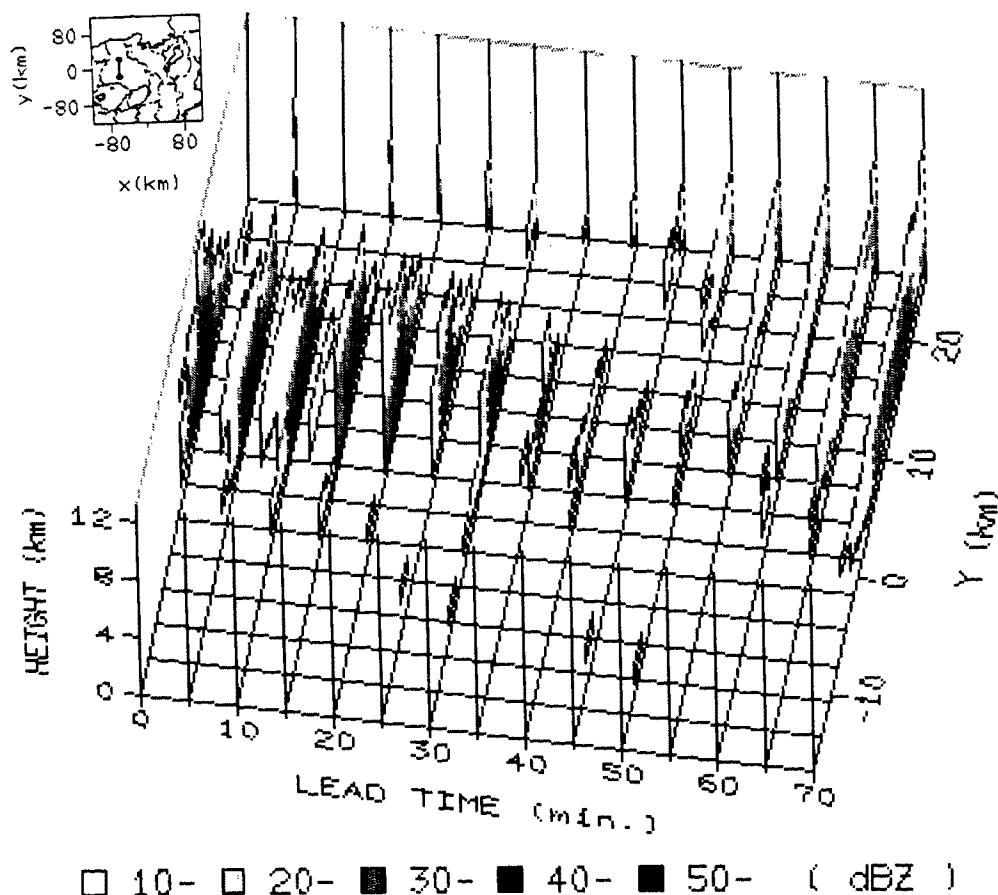


Fig. 12 RHTI in the use of anorth-south vertical section.
Start time is 23 JST on July 21, 1986.

5分ごとの仰角固定データから、移流モデル⁴⁾を用いた方法に従って平行移流ベクトルを求めて算出した。

この図では Fig. 13 と比べて、50dBZ 以上の強エコー域がほぼ全断面に現れているのが確認できる。これは、進行方向に沿ったものとして設定した鉛直断面をエコーセルがあまり横切って通過しなかったことによるものと考えられる。このようにエコー域の進行方向をも考慮した RHTI を用いることによって、エコー強度の時間変化や内部のセルの発達・衰弱の様子をより正確に調べることが可能となる。

3.4 3次元レーダー雨量計データの分解能

以上紹介した画像は次の3つに分類される。

- ①レーダー観測範囲内全体といった、やや大きなスケールでみたエコー域の3次元的な広がり具合を表現する画像 (Fig. 7, Fig. 8),
- ②もう少し小さな範囲内におけるエコー域の強度分布の3次元的な表現画像である RRHI とその時間推移の表現画像 RHTI (Fig. 10~Fig. 14),
- ③これらの中間的な意味合いをもつ VCAPPI (Fig. 9)。

ここで、スケールで分類すれば、①、③がメソ β スケール (20~200km の水平スケール⁵⁾)、②がメソ γ スケール (2~20km の水平スケール) でみた現象を表現していることになる。一方、強度分布も表現されているかどうかで分類すれば、①はエコー域の形態のみの、②、③は両者を兼ねた画像である。したがって上

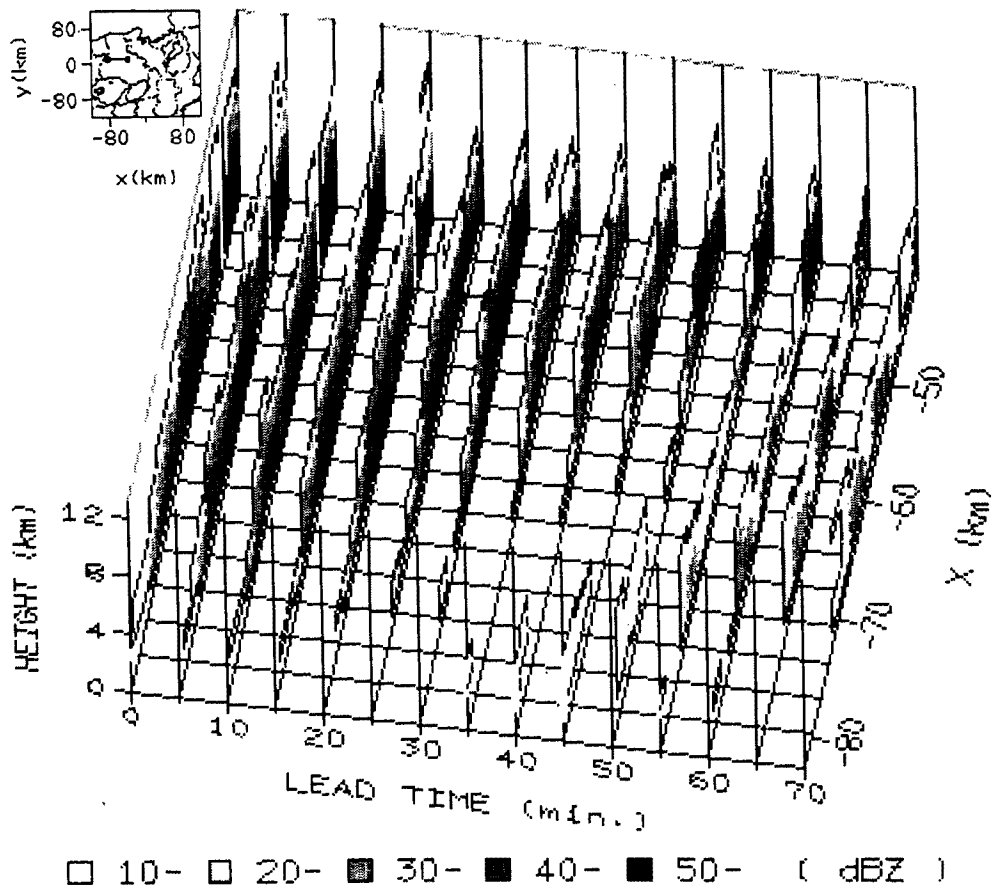


Fig. 13 RHTI in the use of a east-west vertical section. Start time is 23 JST on July 21, 1986.

記したように、③は①、②の中間的な特徴をもった画像と言える。

さて序論でも述べたように、3次元レーダー雨量計情報を用いるにあたって、まずレーダーデータがどの程度小スケールの降水構造や変動特性を表現し得るかを把握しておく必要がある。そこで上記分類中②に属する画像を用いてレーダーデータの分解能を調べる。ただし、ルーチン観測による気象データや地形と合わせた議論は4.で行う。

まず Fig. 10, Fig. 11 で表されている領域には少なくとも2つの対流性エコーの存在することがわかる。領域中央に位置する対流性エコーのエコー頂高度は13km程度、50dBZ以上の部分に注目すればその直径は10kmを越え、かなり発達した対流性エコーであることがわかる。この対流性エコーの進行方向（東方向からやや南向き；Fig. 14 参照）に沿った鉛直断面の RHI が Fig. 15 である。エコーの進行方向は右側である。なお横軸に沿って塗りつぶしてある部分は山岳地形を表す。この図からこの対流性エコーはマルチセル型雷雨によるもので、中心部に存在する強エコー域では下降流が卓越しているものと考えられる。さらに頂上部分に確認される1つ1つの突起が、マルチセル型雷雨を構成している個々の対流セルに対応しているものと思われる。しかも、この図はしばしば引用されるマルチセル型雷雨の模式構造図⁹⁾によく対応しており、4.でも述べるが実際この時は、地上付近では南方風、上空では地上風にはほぼ鉛直方向であるエコーの進行方向と同じ風向の風となっており、マルチセル型雷雨が発生しやすい状況であった。

さらに、Fig. 15 と同じ断面内に強度分布の時間推移を表している Fig. 14 からマルチセル型雷雨の特徴が見いだせる。多少見にくいもののこの図によるエコー進行方向前方で新たに強エコー域が発生し、後方

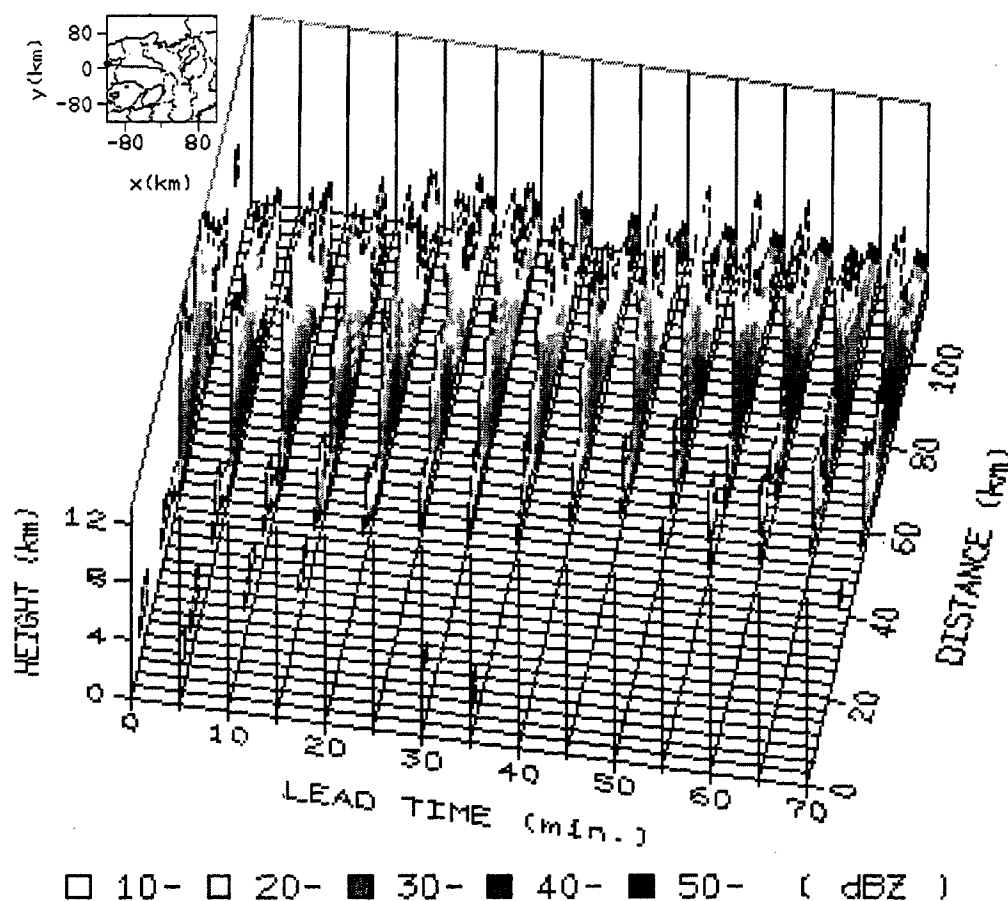
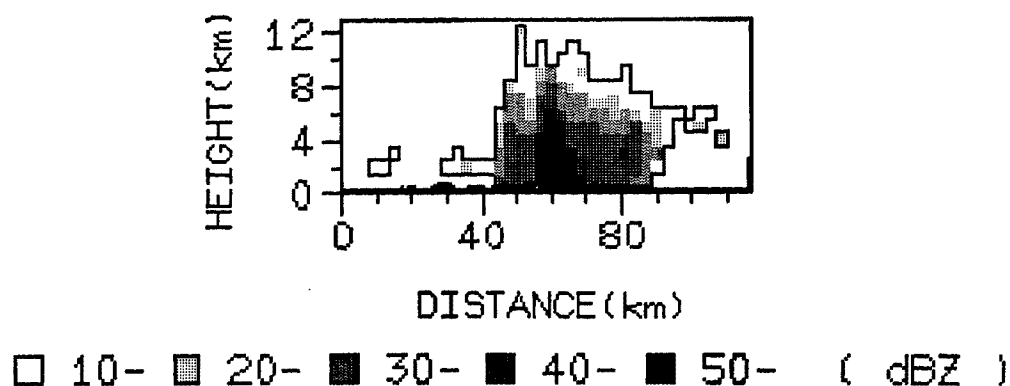


Fig. 14 RHTI in the use of the vertical section along the storm moving direction.
Start time is 23 JST on July 23, 1986.



86/07/21 23:00

Fig. 15 RHI along the storm moving direction.

では減衰してゆく様子を読み取ることができる。このことは東西断面を用いた RRHI を時間を追って見てゆくことでも確認される。

以上より、3次元レーダー雨量計データを用いることにより、いくつかの対流セルから成っている雷雨に関してはその内部構造やその変化の様子まで確認できることがわかる。さらに、レーダーのもともとの解像度から考えれば1つ1つの積雲に対応する対流セルの内部構造までは確認できないものの、対流セルの存在および発生・消滅はほぼ確認できることもわかる。

4. 気象データおよび地形とエコー強度分布との定性的関係

3. で明らかにした3次元レーダー雨量計データの時空間的分解能に比べれば、ルーチン観測によって得られる気象データの分解能は空間的にも時間的にも粗いと言わざるを得ない。しかし3次元レーダー雨量計情

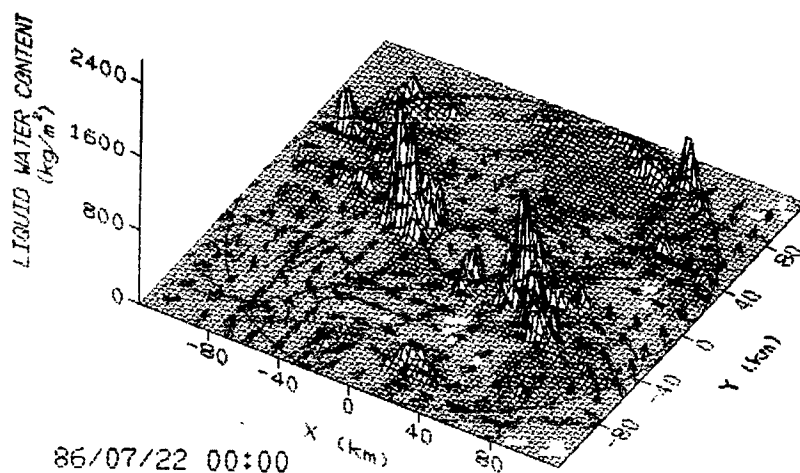
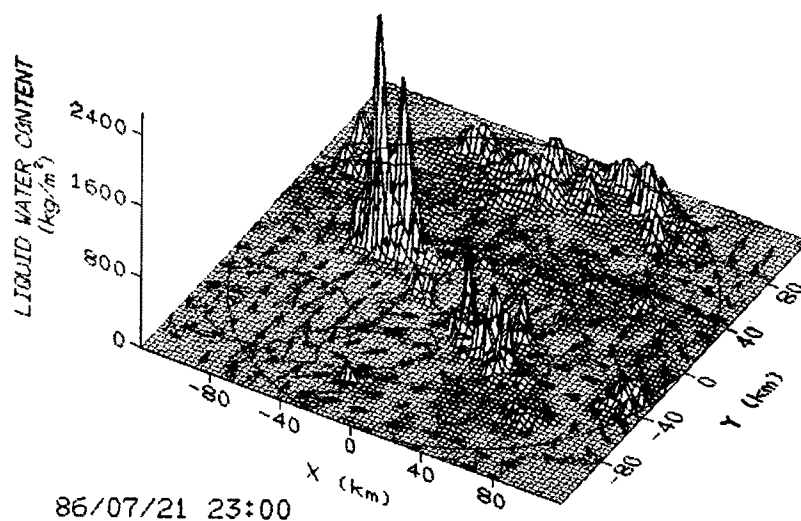


Fig. 16 Liquid water content included from 2km to 10km height above the ground and the vector field of the surface wind observed by AMeDAS.

報を利用した気象学的根拠のある降雨予測手法の開発にあたっては、少なくともルーチン観測による気象データとの結合をはかる必要がある。そういった意味で、3次元レーダー雨量計によって観測されたエコー強度分布の特性がどの程度ルーチン観測による気象データによって説明づけられ得るものなのかも調べておく必要がある。そこで本章では、観測されたエコー強度分布と、アメダス地上風や高層観測データ、および地形との間で認められる定性的な関係について述べる。

なお7月21日21時の地上天気図によれば、梅雨前線が近畿地方を西北西から東南東に横切っており、その南北で1～2度の温度差となっている。一方、700mb以上の高層観測によれば、ほぼ前線に沿った風速10m/s前後の西北西風が対流圏界面を越えたかなりの上空まで一定して吹いている。また潮岬上空4kmあたりまでの気温と露点温度の差は1～2度程度である。

4.1 メソβスケールでみた地上風、地形と強雨域との関係

まず、3次元レーダー情報を2次的に表現できかつ降水ポテンシャルの一つの指標となるものとして上空に含まれる水分量を選び、これと地上風との関係をレーダー観測域全体について見てみる。

Fig. 16 は高度2kmから10kmまでの上空に含まれる単位面積あたりのおおよその水分量を、レーダー観測範囲全体にわたって示したものである。ただし、水分量はレーダー反射因子強度 Z (mm^6/m^3) から半経験式⁷⁾

$$Z = 3.8 \times 10^2 M^{1.82} \dots\dots\dots (6)$$

を用いて単位体積あたりに含まれる降水粒子の質量 M (g/m^3) を算定し、これを高さ方向に積分して求めた。なお図に描かれている2つの円の内外、外側の円はこの円内がレーダー観測範囲であることを、内側の円はこの円より内側では最大仰角のレーダービームの走行線が高度10kmを越えるために水分量の算定ができない領域であることを表している。なおここではできるだけ水分量の算定できる範囲を広くするために、1kmおよび11, 12km高度の水分量は除外した。一方底面に近畿地方の地図とともに示してある矢印は、アメダス地上風を線形内挿して求めた地上風速場を表す。各矢印は矢先の地点の風速を表し、その長さは時速の2倍にしてある。

Fig. 17 の近畿地方の地形図とあわせて見るとわかるように、地形の谷間を通るように紀伊水道から流入した南方からの湿った空気は、淡路島付近で分岐し、一方は兵庫県中央部へ、もう一方は大阪湾を通して京都府南部へ流入して、北方風とぶつかる所で強雨をもたらしている。つまり、1つのレーダー観測域内においても地形の凹凸の影響を受けて南方風の流入は一様ではなく、その結果南北風の収束する場所は局地的と

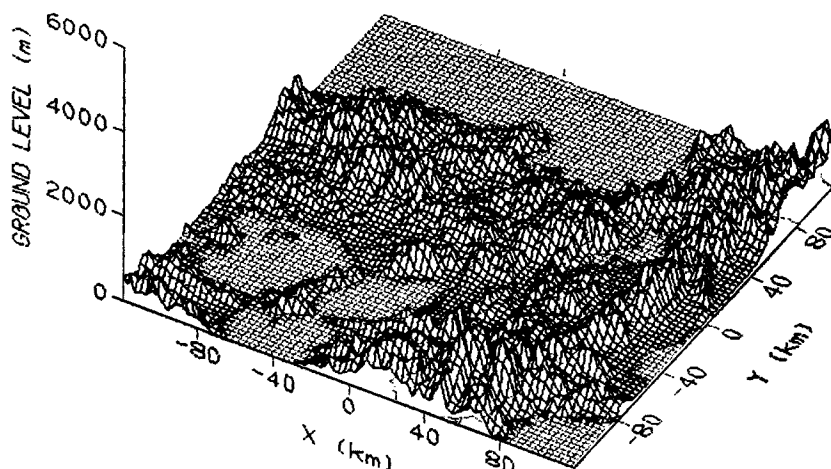


Fig. 17 Configuration of the ground around the Kinki District.

なる。したがって、複雑な地形を有する日本では、地形による強制上昇に起因する対流セルの発生という意味ばかりでなく、地形の凹凸が地上風の流入形態にも影響を及ぼすといった意味での、地形が降雨場に及ぼす影響も無視することはできない。

一方この図でみる限り、アメダスのようにメソ β スケールで捉えた地上の湿潤空気の収束域と強雨域とは、定性的によく対応していると言える。Ulanski ら⁹⁾はアメダス風の観測密度よりさらに密な、むしろメソ γ スケールでみた地上風の収束パターンとそこから生じる対流性降雨との間に有意な関係があることを報告しており、さらに露木ら⁹⁾はアメダス地上風を用いて、一般的には必ずしも有意な相関は見いだされないものの、顕著な降雨を伴うエコーの発達しやすい地域では、エコー強度はおもに1時間前の渦度または発散と有意な相関をもつ傾向があると報告している。したがって、単に地上の風速場だけでなく気温や湿度とを含めてさらに定量的に議論を進めて行く必要があるものの、ルーチン観測による気象データと合わせて3次元レーダー雨量計情報を有効に活用してゆける可能性があると言える。

4.2 メソ γ スケールでみた強雨域の特性

Fig. 18 は兵庫県中央部の強雨域の RHI である。この強雨域の3次元エコー強度分布はすでに Fig. 10, Fig. 11 に示してある。Fig. 18 中横軸に沿って黒く塗ってある部分は山岳地形を表す。(a) の南北断面(左側が南)で表現されている2つの降水域の内、ここで注目するのは図中左側の降水域である。(b) はこの降水域の東西断面(左側が西)を表している。この2つの図からまず気がつくことは、南北方向と東西方向の降水域の広がりの違いで、南北断面はひとつの対流性エコーから、東西断面は数個の対流性エコーから成り立っているのがわかる。これは以下のように定性的に説明できる。まず南北断面を見ると、上空にエコーが存在するのは南向き斜面あるいは頂上部付近であることがわかる。したがって、Fig. 16, Fig. 17 とあわせて判断すれば兵庫県南部の平野を通過して流入した湿潤空気が、県中央部の山岳斜面によってもともと潜在不安定な場の中で強制上昇させられて自由対流高度を越えたことが、このかなり成長した対流性エコーの発生あるいはこの位置での発達の一因であることは確かである。一方東西方向の広がり、発生した対流性エコーが上空の強い西北西風によって東方に流されたために生じたものと考えられる。これらのことは、地形と 2.5 km 高度のエコー強度分布の重ね合わせ図である Fig. 19 から確認される。ただし、図中強度分布は高度 0 の面内に描いてある。

一方、対流内で下降流が卓越していると考えられる 40dBZ 以上の強エコー域は高度 8km 以下に現れている。これは高度 8 km 付近の乾燥した大気(潮岬の高層観測では気温と露点温度との差がこの高度でピークとなる)の流入が原因と考えられる。

さて次に、大阪湾から京都府南部に流入する流れに沿って発生し発達しながら東進している対流性エコ

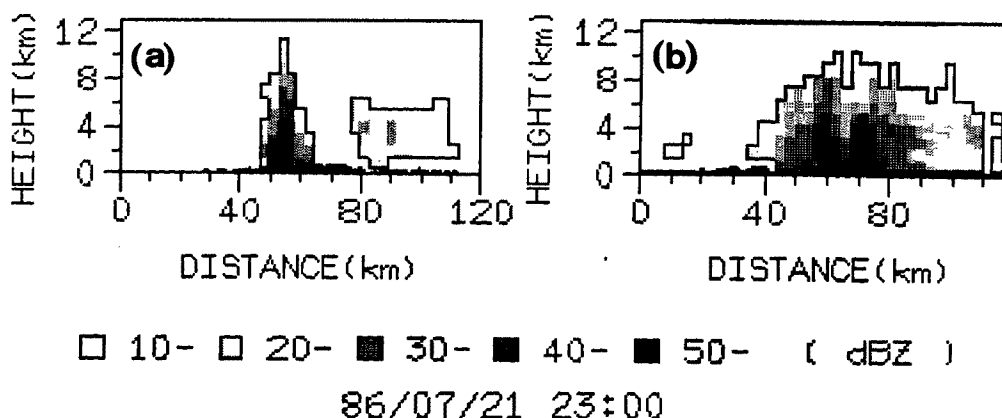


Fig. 18 RHI ((a) north-south cross section, (b) east-west cross section).

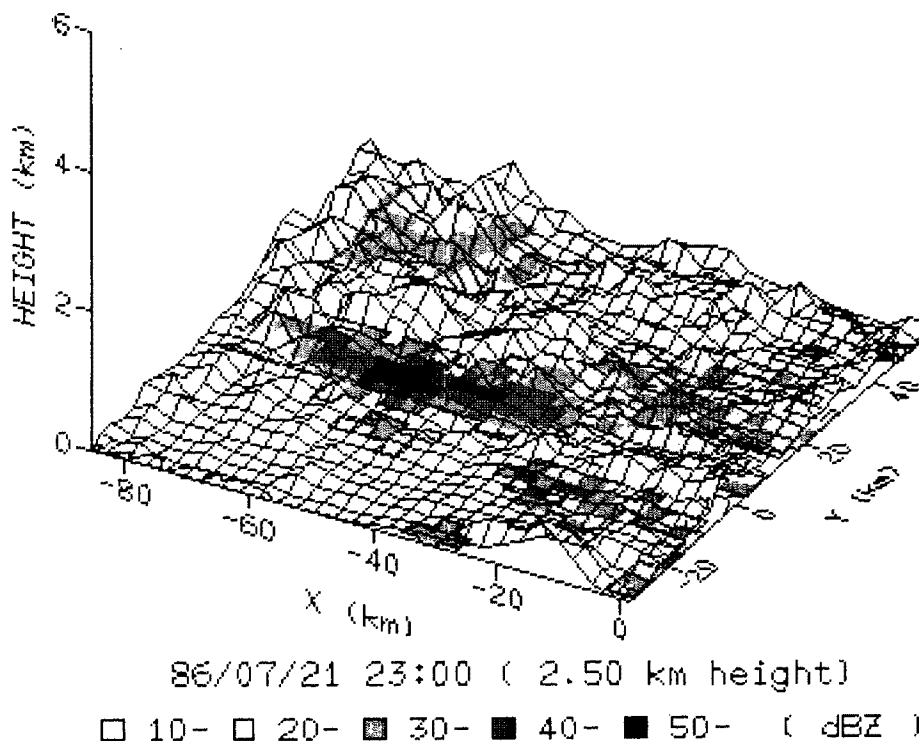


Fig. 19 Composition of the distribution of echo intensity at 2.5km height and the configuration of the ground.

一に注目してみる。Fig. 16 の22日0時の画像で大阪府北東部に存在する水分量のピークは、23時頃に六甲山西方で発生し発達しながら移動してきたものである。これと同じ状況が21日21時頃から22日6時頃まで繰り返されていた。それらの中で、Fig. 20 は22日2時頃六甲山西端付近で発生して京都府南部へ流入する流れに沿って発達中のエコー進行方向断面内のエコー強度分布の RHTI である。図中左下から右上にかけて移動しているエコーがこれに対応する。ここで注目したいのはこの対流性エコーが進行先にある層状降雨のエコーより移動速度が大きいことである。これは対流性エコーがマルチセル型で、進行方向前面と後面でのセルの発生と消滅とによる伝播速度が加わるためと考えられる。このことは、次のことから確認される。リードタイムが60分から70分までの対流性エコー内部構造の変化に注目すると、上空にあった 50 dBZ 以上の部分が次第に地上近くまで下降してきているが、マルチセル型雷雨の一つのセルに相当するこの部分の移動速度は層状降雨とほぼ同じである。

5. 結 論

以上、3次元的なエコーの強度分布を直観的に表現するために作成した画像を紹介し、それらの画像を用いて3次元レーダー雨量計データによってどの程度の分解能で降雨強度分布特性やその変動特性を表現し得るかを明らかにするとともに、それらの特性とルーチン観測による気象データや地形との定性的な関係について述べた。

まず作成した画像およびレーダーデータの分解能について述べると、エコー域の3次元輪郭と強度分布とを同時に画像上に表現する RRHI の開発により、メソγスケールでみた3次元的なエコー強度分布を直観的に把握することができるようになった。マルチセル型雷雨を例にとりあげれば、それが発達段階の異なるいくつかのセルから成っていることが確認できる程度までの分解能があることがわかった。また RHTI

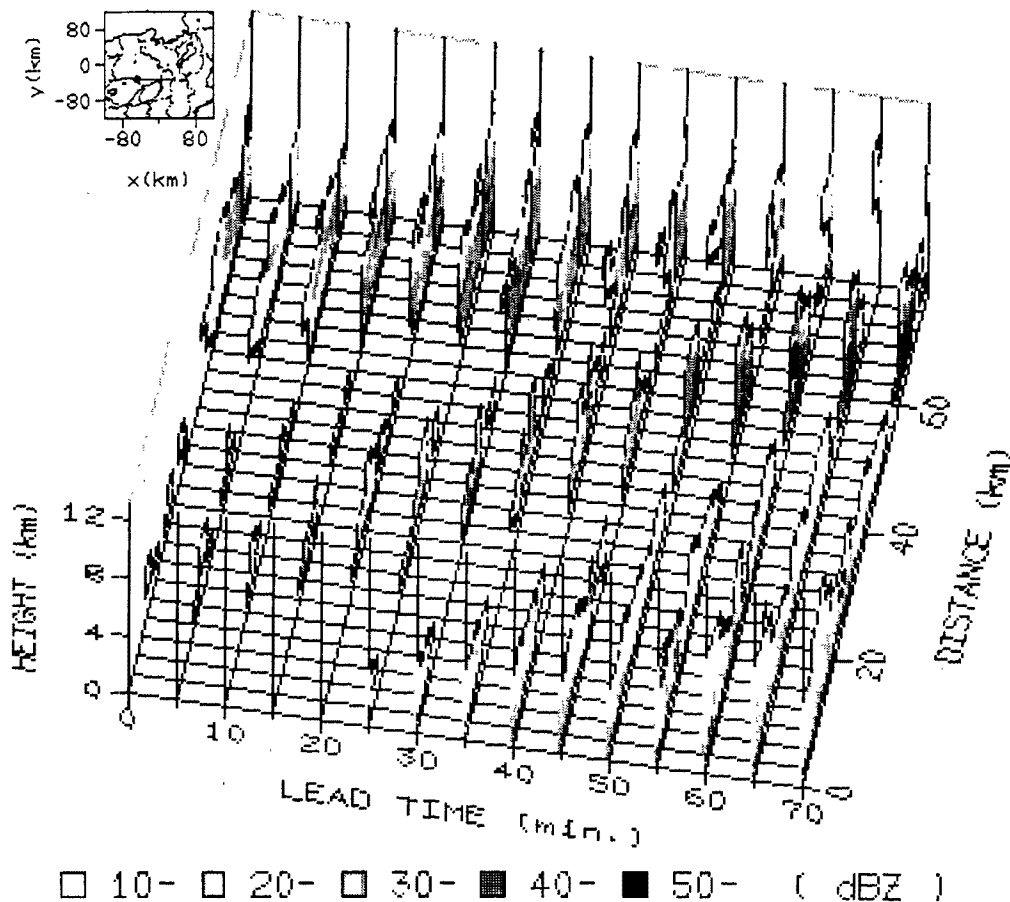


Fig. 20 RHTI in the use of the vertical section along the storm moving direction.
Start time is 02 JST on July 22, 1986.

の開発によって鉛直断面内のエコー強度の時間変化はもとより、エコー進行方向の鉛直断面を設定することで、たとえばマルチセル型雷雨についてはそれを構成している各セルの発生・衰弱の様子をも直観的に追跡調査できるようになった。

一方、エコー強度分布やその変動特性はルーチン観測による気象データや地形と関連させて定性的に説明づけられる部分の多いことも示した。まず強雨域は地上の南方風の収束域付近に存在し、さらに南方風の流入形態が地形の凹凸の影響を受けて様でないことから、その収束域は局地的となる。したがって複雑な地形を有する日本では、地上風の流入形態におよぼす地形の影響は無視することはできない。さらに、南方風が山岳斜面によってもともと潜在不安定な場の中で強制上昇せられる場所でかなり発達した対流性エコーの存在することや、上空からの乾燥空気の流入が対流内の下降流の発生・維持と関係していると考えられる部分のあることなどが確認された。

以上のことからすれば、ルーチン観測による気象データや地形データから3次元レーダー雨量計によって観測されるエコー強度分布をある程度再現できる可能性があると言える。したがって、ルーチン観測データから一体どの程度エコー強度分布の再現が可能なのか、さらにはルーチン観測データで不十分な情報を3次元レーダー情報から推定してゆくようなむしろ逆問題としての取扱いがどの程度可能なのかといったことを調べてゆく過程の中で、3次元レーダー情報を用いた気象学的根拠のある降雨予測手法を考えてゆく必要がある。

最後に、本研究で用いた深山レーダー雨量計データは建設省近畿地方建設局淀川ダム統合管理事務所から提供して頂いた。その際、広域水管理課と電気通信課の方々にはたいへんな御面倒におかけした。また、3次元グラフィック画像の作成にあたっては、京都大学工学部椎葉充晴助教授がソニーエレクトロニクス社のグラフィックソフト IGL を用いて作成されたサブルーチンパッケージを、応用しながら使わせて頂いた。さらに、当時京都大学工学部土木工学科4回生の小林 仁君には図表の作成等を手伝ってもらった。ここに、あわせて謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 立平良三・牧野義久 (1974) : デジタル化されたエコーパターンの予測への利用, 研究時報, Vol. 26, pp. 188-199.
- 2) Austin, G. L. and A. Bellon (1974) : The use of digital weather record for short-term precipitation forecasting, Quart. J. R. Met. Soc., Vol. 100, pp. 658-664.
- 3) 大倉 博・石崎勝義・中尾宏臣・森本陸世 (1983) : レーダー雨量計を用いた短時間降雨予測, 第27回水理講演会論文集, pp. 349-354.
- 4) 椎葉充晴・高棹琢馬・中北英一 (1984) : 移流モデルによる短時間降雨予測手法の検討, 第28回水理講演会論文集, pp. 423-428.
- 5) Orlanski, I. (1975) : A rational subdivision of scale for atmospheric process, Bull. Amer. Met. Soc., Vol. 56, pp. 527-530.
- 6) 小倉義光 (1984) : 一般気象学, 東京大学出版会
- 7) Brown, E. N. and R. R. Braham (1963) : Precipitation particle measurements in cumulus congestus, J. Atmos. Sci., Vol. 20, pp. 23-28.
- 8) Ulanski, S. L. and M. Garstang (1978) : The role of surface divergence and vorticity in the life cycle of convective rainfall. Part I, II, J. Atmos. Sci., Vol. 35, pp. 1047-1062, 1063-1069.
- 9) 露木 義・武野康弘 (1983) : レーダーエコーの発達しやすい地域におけるエコー強度とアメダスの風から求めた渦度・発散との関係について, 研究時報, Vol. 35, pp. 253-262.