

## 赤城山レーダーにより観測された強雨域の特性

Characteristics of High Intensity Storm Regions Observed by Mt. Akagi Radar

山梨大学工学部 正会員 竹内 邦 良  
同 学生会員 田 辺 勲

### 1 はじめに

単純補外の原則の下に降雨の短時間予測を行なう試みはすでに数多く報告されているが、単純補外に加えて強雨域の移動・盛衰特性を組み込むことができれば、予測の信頼性はさらに増すこととなる。このため本報ではまず強雨域の時空間的および量的特性を検討した。

用いた資料は建設省の赤城山レーダー雨量計により観測された1977年、78年の降雨記録のうち、表1に示す22ケースである。気象原因別には熱雷と熱界雷がそれぞれ7ケースずつ、停滞前線が5ケース、低気圧性が3ケースある。<sup>注)</sup>

赤城山のレーダー雨量計は1971年以来デジタル記録をとっているが、蓄積された膨大なデータから、背後にある自然現象の特徴をさぐり出すことは容易なことではない。例えばデジタル化され磁気テープに収められた雨量データを、ラインプリンターで打ち出し、どこにどれだけの強度の雨が降っているか目で見えるようにしたとしよう。データは5分間の平均で5分毎に記録されているので、1日続いた雨では300枚近い図が打ち出される。このような雨を20ケース調べるということになれば、6000枚もの雨量分布図を相手に作業しなくてはならない。しかも、ある時刻の雨量分布図には複数の雨域が含まれているから、それを一つ一つ追跡するためには、図を何度もひっくりかえしたり、並べたりしなくてはならないし、離合集散があれば、整理方法の考案すらむずかしい。筆者等はまずこのような手作業から整理を始めたが、複雑すぎると判断し、強雨域（一般には雨域、あるいは降雨セル）の追跡を自動化する作業に取りかかった。

本報はこの自動追跡プログラムを用いて、完全に自動的に強雨域の移動を追跡し、その特性を整理したものである。この方法によってはじめて、大量の降雨記録が、容易かつ短時間で整理できるようになった。次節にまずその自動追跡手法を紹介するが、その前に赤城山レーダー諸元と記録の内容を説明する。

赤城山レーダー雨量計は、赤城山山頂1674mプラス鉄塔18mの位置より、仰角 $1^{\circ}$ （100km先で約1750m高くなる）、波長5.7cm（Cバンド）、空中線回転数10.0rpmで送信し、半径102km以内は $360^{\circ}/128$ の放射線、以遠は $360^{\circ}/256$ の放射線と、3km毎の同心円で囲まれる扇形内部の5分間平均降雨量を記録している。本報で用いた資料は、このような放射状の $r-\theta$ 座標系での記録を204km四方の正方形の領域について、東西100列、南北60行、したがって1マス2.04km $\times$ 3.4kmの $x-y$ 座標系の記録に変換したものをを用いている。このことから、1つのデータの代表面積は約7km<sup>2</sup>となり、降雨セルの細部にわたる構造を、この資料から調べることは不可能である。したがって、本報の扱う対象は、降雨セルではなく、強雨域である。この点、写真等から解析した降雨セルの特性とは区別して考えなくてはならない。なおPPI映像上の輝度をもとに、降雨セルの自動追跡をした例としてはCrane（1979）があり、また写真をも<sup>注)</sup> この分類は日本気象協会前橋支部羽生田氏によるものである。天気図から判断したもので、メゾスケールの前線・低気圧等は考慮してない。概略次のような規準が用いられた。

熱雷：天気図、すなわち総観場の気象状況としては高気圧におおわれていて、低気圧や前線のないところに発生した雷雨。

熱界雷：天気図上に低気圧と移動性の前線があり、その前線（主として寒冷前線）の通過に伴って発生したと見られる雷雨。したがって界雷とすべきものならびに熱雷との区別が出来ないものを一括している。

停滞前線性・低気圧性等：天気図から判断して、明らかに停滞前線、低気圧等によるとみられる雨。

とに強雨域の細部の特性を整理した例には坂上ほか(1979)がある。

## 2 強雨域の自動追跡法

5分毎に $100 \times 60$ メッシュ毎の雨量が与えられている。強雨域をあるレベル以上(本報では $16 \text{ mm/hr}$ 以上)の強度の雨域と定義すれば、ふつう強雨域は $100 \times 60$ 個内に複数のブロック状に散らばる。ある時刻の強雨域ブロック図と5分後の強雨域ブロック図を重ねてみると、強雨域の変形・移動が観察される。そこで強雨域の発生、連続、消滅を見分ける為に次のようなルールを設けた。5分を隔てた2枚のブロック図を重ねたとき、

1. 雨域が重なるか接していれば、その雨域は連続したものとみなす。
2. 重なりも接しもしていないものは別個のものとみなす。したがって5分前の雨域でその後のどの雨域とも連続しない場合には、この雨域は消滅したものとみなし、逆に5分前のどの雨域と重なりも接もしない位置に雨域が生じていれば、これは新たに発生したとみなす。
3. 5分後の雨域が、前時点の2つ以上の雨域と重なるか接している場合には、次の順序で
  - 1) より多く重なっているもの
  - 2) 5分前までにより長く継続して来たものからの連続であり、その他はここで合流したとみなす。
4. 5分前の一つの雨域の上に、次の時点で複数の雨域が重なるか接している場合には、次の順序で
  - 1) より多く重なっているもの
  - 2) より大きな雨域を占めているもの
  - 3) より強度の強いものへの連続であり、その他はこの系列から分岐したものとみなす。
5. 複数個の雨域どうしが絡み合って重なったり接したりしている場合にも、3、4のルールに従って主系列、合流、分岐を定める。

このルールは、5分毎の記録として与えられた磁気テープをもとにして作った $16 \text{ mm/hr}$ 以上の強雨ブロック図のプリント・アウトを見ながら、目視による追跡結果と自動追跡結果が同じになるように工夫して定めたものであるから、その限りでは著るしく不都合な追跡結果は生じないようになっている。しかしながら原理的には、次のような不備な点もある。例えば

1. 現実には連続した雨域であっても、5分間で重なるか接する距離以上に移動した場合には、そこで消滅し別な雨域が発生したと判定してしまう。
  2. 現実の連続を把えず、違った雨域が交錯してつながったものと判定してしまうこともある。
- しかしながら以下の解析はこのような不備の生じる可能性には目をつぶって、機械的に追跡した結果にもとづくものである。

## 3 強雨域の自動追跡結果

強雨域としては5分間の平均降雨強度が $16 \text{ mm/hr}$ 以上の強度をもつ雨域と定義し、この強雨域の移動、変形追跡を行った。 $16 \text{ mm/hr}$ を閾値として選んだのに根拠はない。但し、 $10 \sim 20 \text{ mm/hr}$ 程度の降雨強度というのは経験的には“地面に水たまりができ、雨の音で話もよく聞こえない。この程度の雨が長く続くときには警戒が必要になる。”(斎藤, 1973)とされている。したがって、集中豪雨をもたらす強雨域の特性を知る上では、ある程度妥当なものと判断される。なお坂上ら(1979)も、 $16 \text{ mm/hr}$ を閾値に選んでいるので、その結果と対比することもできる。

解析結果の第1は表1の右側2列に示した、強雨域の発生頻度と、 $204 \text{ km}$ 四方内の空間密度である。こ

れによると、発生頻度は1時間に7～30個といったようにならばついているが、特別多いのは熱雷ないしは熱界雷である。空間密度は発生頻度より安定しているようで、熱雷、熱界雷で6個その他で3個位になっている。

図1～3のaは、自動追跡された強雨域の重心(降雨強度で加重平均して求めたもの)の軌跡を描いたものである。発生地点は小さい黒点で示してある。この点より発生し、実線に添って移動し、実線の切れているところで消滅したことを表わしている。また○はこの地点で発生したが、5分後の記録に継続していないもの、すなわち寿命が5分以内と考えられる強雨域の発生地点を示している。b図はこの降雨についての各強雨域の生存時間と、その強雨域のもたらした総降雨量の関係を、またc図は強雨域の面積とその平均降雨強度の関係を示している。

図1、2、3はそれぞれ熱雷、熱界雷、停滞前線の強雨域の代表例として選んだものである。しかしながら各降雨をもたらした気象原因は必ずしも一つではなく、各種要因が影響し合っているのが普通であるから、以下に述べる気象原因別特徴も図にあらわれた現象と細かい点でも一致するとはかぎらない。

図1は熱雷、すなわち真夏等に強い日射により地面が熱せられて強い上昇気流を生じ、積乱雲となってもたらされる雨の代表例である。この種の雨の特徴は強雨域の移動が小さいものが多いということである。図2、3と比べてみると実線部分が著しく少ないことからこの特徴がよくわかる。移動が少ないのは生存時間が短いものが多いからかという、そうではなく図1bからわかるように、中には3時間以上も続いているものもある。そのような長時間に亘って、同一地域上に強雨域が居座ることがあることを意味している。但し、強雨域は降雨セルとは一致しないから、強雨域が居座るといっても、降雨セル、すなわち一つの積乱雲がそのように長期に亘って強雨をもたすのではなく、複数の積乱雲が入れ替り立ち替り種になって強雨をもたすということである。これは最小の雨域として7kmをとっているから必然的に由来する結果といえる。

図2は熱界雷、すなわち主として寒冷前線によりひきおこされた強い上昇気流による雨の例として掲げたものである。この例の特徴は、継続時間のわりには移動距離の長いものが多いということである。図1b、2bを比較してもわかるように、強雨域生存時間長は決して長いものが多いわけではないのに、長い実線が目立つ。これは寒冷前線の移動に伴って動いているというより、むしろ上層流に流されて移動することに対応すると考えられる。

図3は南岸停滞前線、すなわち梅雨前線による雨の例である。この種の降雨の特徴は、 $16\text{mm/hr}$ 以上の強雨域はあまり多くなく、したがって強雨域としては短時間に消滅するものが多いが、その割には実線部分が目立つことからわかるように、移動速度のかなり早いものが多いということである。停滞前線は停滞しているのだからその中の強雨域の移動速度が早いというのは、停滞前線を構成する雲全体の位置は変わらないが、その中の擾乱自体ははげしく移動、交替しているらしいことを示している。

図1は全体として南東方向への移動を示しているが、これはこの地域の降雨としては22ケース中の3つに相当する極めてめずらしい例で、残りの19ケースはすべて図2、3のような東から北東の方向である。山岳地帯の影響は、この図からは必ずしもはっきりわからないが、図1の例では三国山地、帝釈山地を中心とした強雨域の発生が目立つ。図2の例では山脈に沿うような移動様式と見える。また図3では甲府盆地をすぎて秩父山地にぶつかった附近と、日本海側から来た大気が三国山地、越後山地に近づく附近で集中的に発生している様子がわかる。

図3bの勾配は1b、2bに比べてかなり低くなっているが、これは、強雨域が長く生存しても、それ程総雨量は多くはならないことを意味している。これは停滞前線の場合の強雨域の強度が、雷雨に比べると低いことに相当している。その経緯はc図を見ればさらに明確である。図1cの熱雷では、強雨域の面積は小さいものが多いが、降雨強度は $16\text{mm/hr}$ 程度以上 $60\sim 80\text{mm/hr}$ のものが多く含まれている。2cの熱界雷では面積はかなり大きいものもあるが、降雨強度からいうと $40\text{mm/hr}$ までのものが多い。さらに図3cの停滞前線になると面積としては $400\sim 600\text{km}^2$ におよぶ強雨域もあるが、小さいものでも高強度のもの

表1 解析対象降雨一覧

| No. | 日 付                        | 気 象 原 因 | 強雨時間合計(hr)<br>全継続時間(hr) | シリーズ発生頻度<br>(個/hr) | 強雨域空間密度<br>(個/4万km <sup>2</sup> ) |
|-----|----------------------------|---------|-------------------------|--------------------|-----------------------------------|
| 1   | 1977 6/5 16:00~6/6 8:00    | 熱 雷     | 8.6/16                  | 13.2               | 4.6                               |
| 2   | 1977 7/7 12:00~7/8 10:00   | "       | 12.0/22                 | 16.8               | 5.1                               |
| 3   | 1977 7/26 12:00~7/27 2:00  | " 図1    | 9.0/14                  | 24.0               | 9.5                               |
| 4   | 1978 7/8 12:00~7/9 1:00    | "       | 9.7/13                  | 32.3               | 12.4                              |
| 5   | 1978 8/9 13:00~8/10 4:00   | "       | 9.4/15                  | 7.2                | 3.1                               |
| 6   | 1978 8/10 13:00~8/11 6:00  | "       | 8.9/17                  | 14.4               | 5.8                               |
| 7   | 1978 8/12 15:00~8/12 23:00 | "       | 7.9/8                   | 9.6                | 5.1                               |
| 8   | 1977 7/2 2:00~7/3 10:00    | 熱 界 雷   | 5.2/32                  | 13.1               | 4.9                               |
| 9   | 1977 7/11 9:00~7/12 5:00   | "       | 13.3/20                 | 26.5               | 5.0                               |
| 10  | 1977 9/12 12:00~9/13 0:00  | "       | 7.7/12                  | 19.1               | 8.1                               |
| 11  | 1978 6/13 16:00~6/14 17:00 | "       | 8.8/25                  | 11.9               | 6.0                               |
| 12  | 1978 6/19 12:00~6/20 0:00  | " 図2    | 5.6/12                  | 16.8               | 5.7                               |
| 13  | 1978 7/4 15:00~7/5 3:00    | "       | 7.8/12                  | 10.7               | 4.8                               |
| 14  | 1978 8/31 13:00~9/2 0:00   | "       | 14.7/35                 | 19.2               | 5.8                               |
| 15  | 1977 6/16 14:00~6/20 13:00 | 南岸停滞前線  | 26.8/95                 | 12.0               | 2.5                               |
| 16  | 1977 6/23 13:00~6/25 15:00 | " 図3    | 14.8/50                 | 18.0               | 3.1                               |
| 17  | 1977 6/29 16:00~6/30 19:00 | "       | 8.4/27                  | 10.8               | 3.0                               |
| 18  | 1977 8/13 2:00~8/15 14:00  | 本州上停滞前線 | 13.4/60                 | 12.0               | 2.0                               |
| 19  | 1978 9/3 14:00~9/6 0:00    | "       | 21.7/58                 | 14.4               | 3.4                               |
| 20  | 1977 8/8 1:00~8/9 10:00    | 日本海低気圧  | 9.7/33                  | 19.1               | 3.3                               |
| 21  | 1978 7/1 1:00~7/2 0:00     | "       | 3.3/23                  | 10.6               | 2.6                               |
| 22  | 1978 5/18 7:00~5/19 13:00  | 2つ玉低気圧  | 2.4/30                  | 7.3                | 1.7                               |

図1 1977 7/26 13:25 ~ 22:30 熱 雷

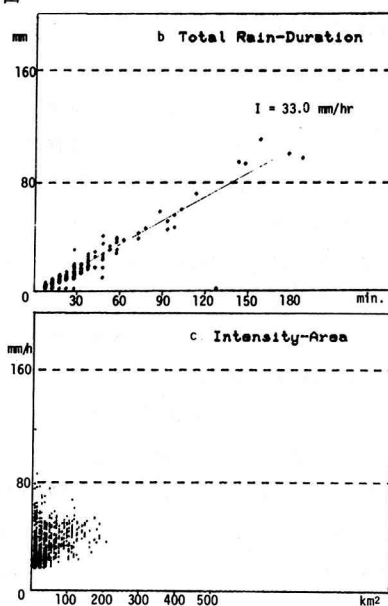
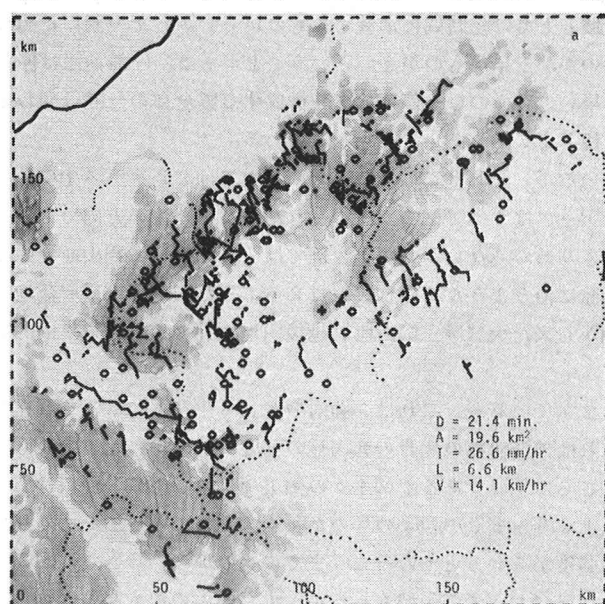


図2 1978 6/19 12:00 ~ 17:40 熱 界 雷

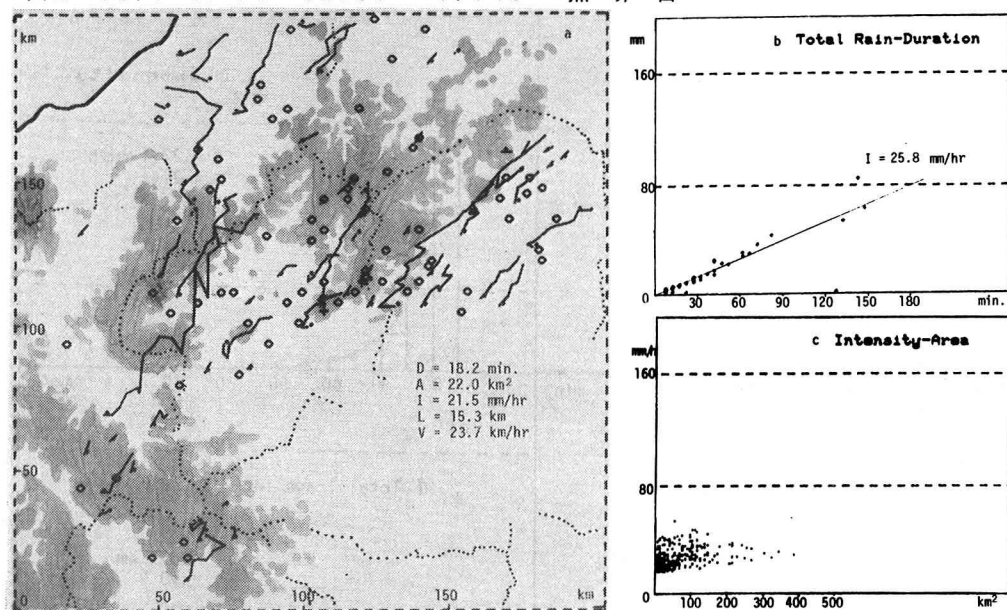


図3 1977 6/24 15:45 ~ 6/25 9:40

南岸停滞前線

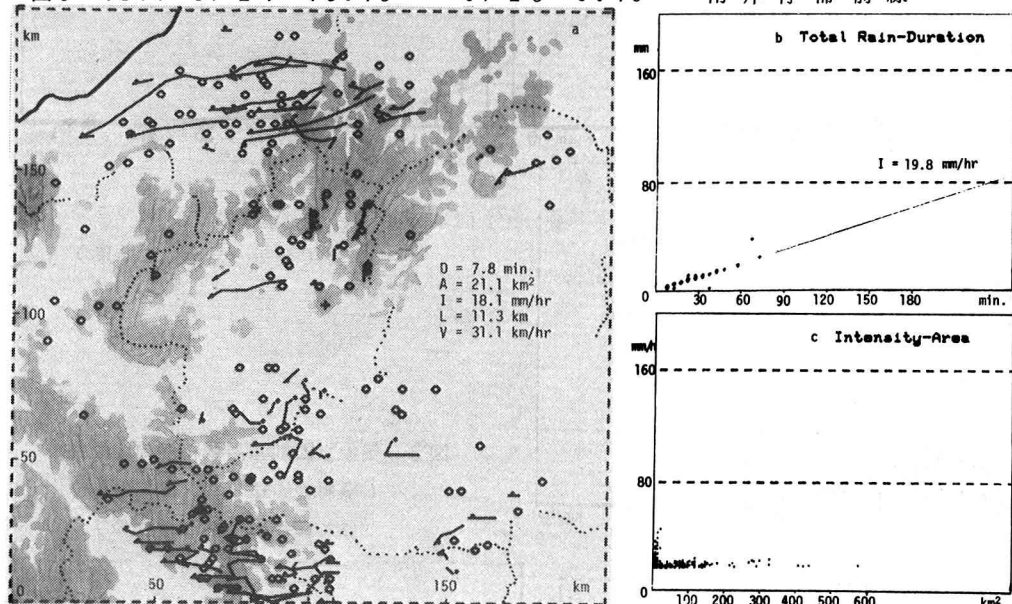


表2 強雨域の気象原因別平均特性(最上段の( )内はサンプル数)

| 1. 強雨域の  | 熱 雷 (7)              | 熱界雷 (7) | 停滞前線 (5)<br>(低気圧(3)を含む) | 全平均 (22) |
|----------|----------------------|---------|-------------------------|----------|
| 生存時間 (D) | 20.2 分               | 15.8    | 9.7 (9.5)               | 14.7     |
| 面 積 (A)  | 19.5 km <sup>2</sup> | 18.2    | 17.2 (17.8)             | 18.4     |
| 強 度 (I)  | 26.0 mm/hr           | 23.0    | 18.5 (18.4)             | 22.1     |
| 移動距離 (L) | 6.9 km               | 9.1     | 10.4 (10.4)             | 8.7      |
| 移動速度 (V) | 12.6 km/hr           | 17.6    | 26.1 (26.9)             | 18.8     |

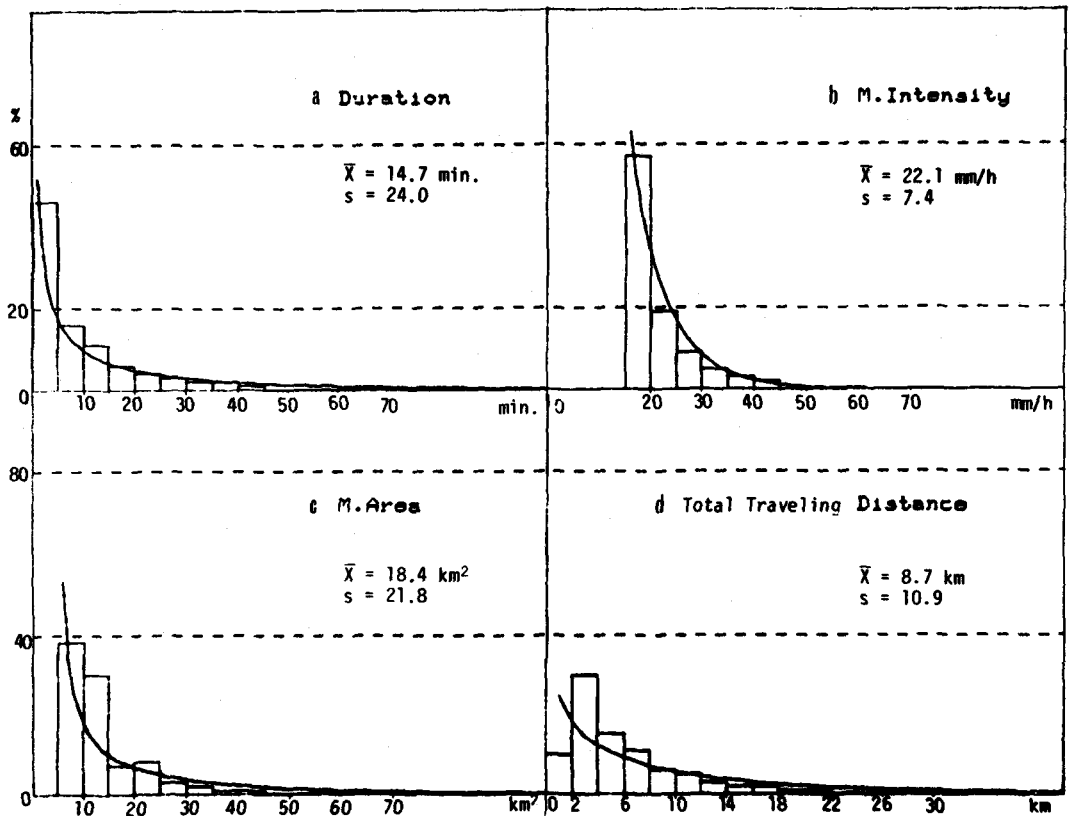


図4 強雨域特性の分布図  
 (全ケース総合の結果)

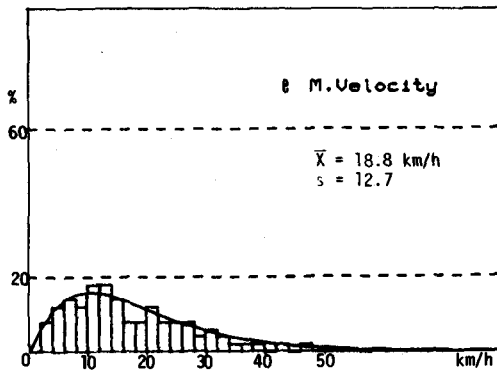
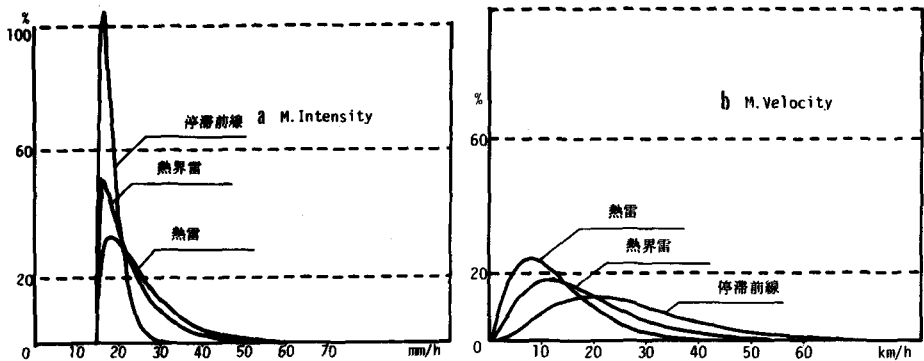


図5 気象原因別強雨域特性の比較例  
 (縦軸の%は、棒グラフの単位巾をかけて確率になおしたもの)



はほとんどなく、 $20\text{mm/hr}$  程度以下のものが多くなっている。b, c 図の傾向と気象原因とのこのような対応関係は、他の降雨についてもはっきりあらわれていて、強雨域の特性として興味深い。前線性、低気圧性などの降雨は降雨量が多く、災害をもたらすことも多いが、強雨ということからいうと、雷雨には及ばず、したがって  $16\text{mm/hr}$  以下の強度の雨の長期にわたる影響が大きいという傾向が強いといえよう。

次に選ばれた以上 3 ケース以外の、全 22 ケースの特性を表 2 にまとめた。この表によれば、前述の各気象原因別特性がより明確にわかる。まず熱雷は生存時間が長く降雨強度も強いが、移動速度は小さく、移動距離も短いのが特徴である。それに比べ停滞前線のもたらす強雨域は、生存時間が短く強度もかなり弱い、移動速度は早く、したがって移動距離も長いという逆の特徴をもっている。熱界雷、すなわち熱雷と前線との両方の性格を備えた降雨はこの中間の性質を示している。面積はどの場合でも大差ないのは興味深い。表 2 の最終コラムは全ケースの平均であるが、その分布を図 4 に掲げた。各気象原因毎にその形状は少しずつ違うが、生存時間分布、面積分布、移動距離分布はいずれも似通った形をしている。比較的顕著に分布形の違う例として降雨強度と移動速度の分布図を図 5 に示した。これは生データの棒グラフによる比較ではなく、それに当てはめた「分布の形状を比較したものである。前線性、熱界雷、熱雷の順に降雨強度は強いものが多くなり、逆に移動速度は遅くなるという特徴が表われている。

坂上ら(1979)による大雨を伴った前線および台風の場合の、 $16\text{mm/hr}$  以上の強度に相当する輝度を閾値として撮った写真からの測定によれば、生存時間長は平均 20.4 分、強雨域面積は  $6.4\text{km}^2$ 、移動速度は  $51.1\text{km/hr}$  となっている。平均強雨域面積が小さいのは、 $7\text{km}^2$  を単位としたマス目内の平均降雨強度を対象とした筆者らの解析とは違い、写真判定であるから小さい強雨域が多々観測されたものと考えられる。生存時間が比較的似通っている点および移動速度がかなり違う点については未検討である。

#### 4 降雨予測への示唆

2 節に示した強雨域の自動追跡手法を用いて、任意の閾値以上の強雨域について図 1～3 のような軌跡図を書くことが可能になった。こうして得られた全てのケースの図を見ると、どの図についても言えることがある。それは、一つ一つの強雨域は複雑な動きをする部分もあるが、全体としてはおおむね同一の方向に移動するという点である。204 km 四方というかなり広範囲にわたって、また 1 日以上長時間に及ぶ降雨継続時間全体を通じて終始一貫した移動方向を持つということは、極めて興味深い事実である。おそらくは 700 mb 面での風等、総観場(synoptic field)の大きな流れの直接の影響と考えられ、これをチェックすれば強雨域の移動の予測に総観場の風を用いることの妥当性を確認出来よう。またここに示した  $16\text{mm/hr}$  以上の強雨域の移動予測を行なうに当っては、曲線的な移動や、場所的に移動方向が異なるといった要因はあまり考える必要がないということになる。これは高層流等を用いた単純な平行移動による予測方式を支持する事実である。

しかしながら個々の強雨域の生存時間をみると、表 2 に示したように、あるいは図 4 a の分布にみるように 20 分以下程度の短いものが多い。したがって、ここで問題にしたような強雨域の移動予測ということでは、その程度の子測時間長しか期待できないということになる。これは非常に重要な事実である。強雨域の移動予測は、降雨セルの予測ではないが、現在降雨をもたらしつつある雨雲集団の移動予測という点では同一である。したがって、強雨域の予測は局地性の高い集中豪雨の予測には関連しているといえるが、洪水対策等で必要な流域規模の領域にもたらされる降雨量を予測するためには正鵠を得ているとはいえない。後者の目的に必要なのは、雨をもたらす場の移動盛衰予測である。本研究の結果は、この方向での研究推進の重要性を強く示唆しているといえよう。

#### 謝 辞

本研究に当っては、建設省関東地方建設局利根川ダム統合管理事務所より貴重なデータを提供していただ

いた。データの様式設定等については同事務所電通課の江田氏（現甲府工事々務所機械課勤務）にお世話になった。また資金面では文部省科学研究費補助金自然災害特別研究（課題番号：402023，代表者：京都大学高埴教授）の援助を得た。記して謝意を表する。

#### 参考文献

1. Crane, R.K., Automatic Cell Detection and Tracking, IEEE Trans. Geoscience Electronics, vol. GE-17, No. 4, Oct., 1979
2. 坂上・元田・林：豪雨の性格と洪水比流量，53年度文部省科学研究費補助金，試験研究報告（代表者：角屋 睦）「ダム・頭首工の安全設計資料としての洪水比流量に関する研究」
3. 斎藤・奥田・斉藤：集中豪雨，日本放送出版協会，1973