

# 長続きする降水セルの数値実験による研究\*

——日本気象学会賞受賞記念講演——

武 田 喬 男\*\*

## 1. まえがき

降水セルのふるまいは複雑である。cumulus stage, mature stage, dissipating stage の各 stage を経て約1時間以内に発達、消滅していく降水セルもあり、multi-cell として、あるいは supercell として長時間存続するセルもある。ある領域内の殆んど全てのセルが大体似たふるまいをする時もあるし、特別ないくつかのセルだけが他と全く異なるふるまい(動き・存続時間等)を示す時もある。これら複雑な降水セルのふるまいは、当然大気の大規模な場と降水セルの相互作用の結果であろうが、より具体的には、垂直シアアをもつ一般風、さまざまな収束場と対流雲との相互作用の結果であり、更にそこには降水現象が複雑にからみあっている。降水は決して対流現象の結果にすぎないのではなく、蒸発冷却、降水粒子の重さを通じて空気の運動に影響を与えるものである。むしろ、空気とは異なった運動をする降水粒子の効果を考えることなしには、降水セルのふるまいは説明がつかないであろう。

降水セルのふるまいの問題点及び降水セルに関係した数値実験については、筆者(1971)が先に天氣に述べている。ここでは、長続きする降水セルの形成機構について数値実験を通して明らかにされたことの要約を行なった後、数値実験の具体例により降水セルの微細構造と垂直シアアを含む一般風との関係を考えてみたい。

## 2. 長続きする降水セルの形成機構

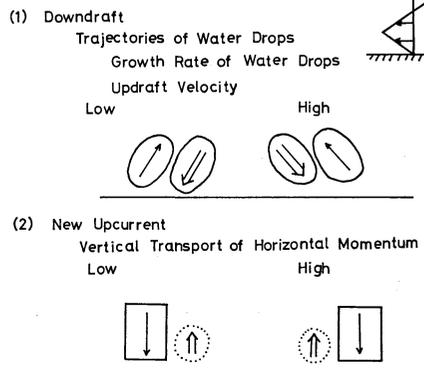
2次元モデルの数値実験(Takeda, 1971)により、降水セルのふるまいについて次のような結論が得られている。大気他の条件が全く同じであっても、一般風の垂直プロファイルにより降水セルは3つのタイプ(タイプ1:まわりに新しい降水セルを形成する、タイプ2:新

しい降水セルをつくることなく約1時間で消滅する、タイプ3:長続きする)に分れる。2次元モデルで考える限り、長続きする降水セルが形成されるためには下層に“ジェット”が存在し、ジェットの下の層の一般風垂直シアアの向きがその上の垂直シアアの向きの逆になることが必要である。ここでの“ジェット”とは一般風の垂直分布における極値を意味し、その高さで垂直シアアが向きを変える。例えば、全層西から東に風が吹いている場合その最大風である。もしも地面まきつの効果が少なければ、全ての高度で一定の風が加わった場合でもセルのふるまいには変りはない(移動速度は変るが)。つまり、ある高度に最大の西風が吹いている場合と、最小の東風がその高さにある場合とは結果は同じである。

下層の適当な高さに“ジェット”が存在するとどのようにして長続きする降水セルが形成されるのか。ジェットが存在しない場合、ジェットが存在しても高すぎるか低すぎる場合は何故長続きする降水セルが生じないのか。それは次のように説明される(第1図参照)。

空気塊の軌跡からの水滴の軌跡のずれのため、一般風の垂直シアアの向きが高さと共に変わらないか、ジェット

Height of a "Jet" and a "Long-lasting" Cloud

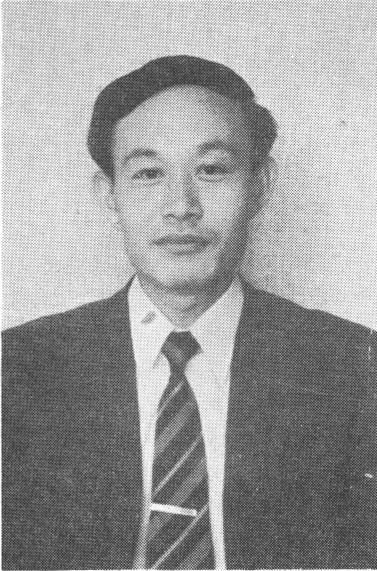


第1図 長続きする降水セルの形成と一般風の垂直プロファイル

\* Numerical Experiment on a "Long-Lasting" Precipitating Convective Cloud.

\*\* T. Takeda: 名古屋大学 理学部 水質科学研究施設

——1973年7月11日受理——



武田 喬男氏

の高さが低い場合は、水滴は上昇流域の右側にたまる傾向にある。その結果として、水滴の重さ、蒸発冷却により下降気流は上昇気流の右側に形成される。ジェットが高いところに存在する時は水滴は主に上昇流域の左側にずれ、下降気流は上昇気流の左側に形成される。このように、ジェットの高さにはある臨界値が存在していて、それにより下降気流が初めの上昇気流のどちら側につくられるかが決定される。この臨界値は、上昇気流の強さ（大気の安定度）と凝結水の主部を占める水滴の成長速度により変る。

ジェットの高さにはもう一つの臨界値が存在していて、それにより新しい上昇気流が下降気流のどちら側にできるかがきめられる。ジェットの高さが低い時、下降気流による上層水平運動量の下方への輸送は下降気流の右側に強い収束域をつくる。そのため、新しい上昇気流が下降気流の右側に形成される。ジェットが高いところに存在する場合は、下層の収束域は下降気流の左側にできるため新しい上昇気流は下降気流の左側に形成される。

もしもジェットがこれら2つの臨界高度の間に存在すれば、新しい上昇気流が初めの上昇気流と同じ位置に存在することになり、初めの上昇気流の維持に非常に好都合となる。いいかえると、平均的垂直シアの風上側に下降気流、風下側に上昇気流と組織化された循環ができあがり、エネルギーは連続的に補給され長続きする降水

セルが形成される。このほかの条件の時は、新しい上昇気流の位置が初めの上昇気流の位置と一致しないこと及び一般風と対流雲との相互作用により新しい上昇気流域の垂直シアが強まること等のために、降水セルは短寿命のまま終わってしまう。

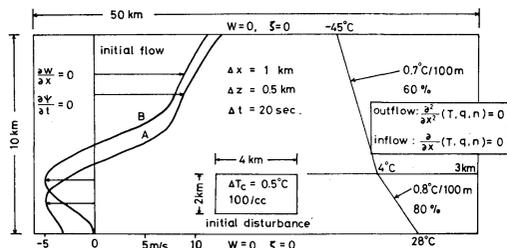
ここで注意すべきことは、今扱われている降水セルは、山とか固定された熱源とかいった“root”をもっていない孤立した対流雲であり、それが一般風との相互作用を通じてどのようにふるまうかを考えていることである。ジェットがなくとも、垂直シアが存在すれば、山を root として発達している降水セルは上記の長続きする降水セルと同じような循環をもつことができる。また、いろいろの発達段階の降水セルが適当な配列で並んだ場合、あるセルの下降気流が他のセルに影響を及ぼして最終的に似たような循環が形成され得る。ただし、このような循環をもった降水セルがそれ自体として（山から離れた後、あるいは他のセルが消滅した後）ジェットの無い一般風の吹くなかでどの程度維持されるかは現在のところ不明である。定性的には維持される可能性をもってはいるものの (Newton, 1967), 2次元数値モデル (Takeda, 1966) で考える限りやはり発達は抑えられる傾向にあるようである。この点については定量的に調べられなければならないであろう。

氷晶過程を伴う降水セルについても、下から上昇していく粒子が成長して降水粒子となることが降水形成機構の主な過程である場合は、長続きするかどうかは同じように考えることが可能である。ただし、上層で氷晶核活性化等のためつくられた氷晶が下方に運ばれながら成長することが主な過程である場合は、上記の議論は適用できないであろう。

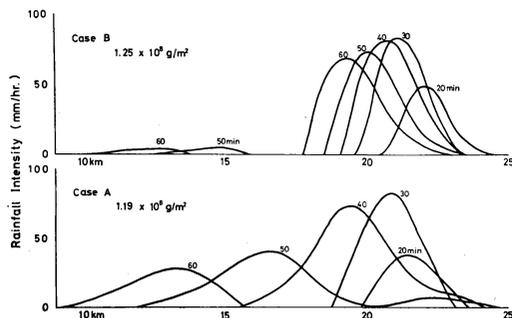
### 3. 降水セルの微細構造と一般風の垂直プロファイル

次に数値実験の具体例により、降水セルの微細構造、特に水滴の空間分布が一般風の垂直プロファイルによってどのように変るかを述べることにする。数値モデルは模式的に第2図に示されているが、方程式等の詳細はここでは省略する。

数値実験は図のような領域についての2次元モデルにより行なわれ、降水形成機構としては凝結・蒸発・併合・分裂・落下が含まれている。水滴の粒度分布は7段階の不連続な半径 1, 5, 20, 100, 200, 1000, 3000  $\mu$  により表現される。case A と case B は図のように一般風の垂直プロファイルが異なるが他の条件は全く同じである。両 case とも左向きのジェットが含まれているが、case B の



第2図 数値モデルに採用された条件

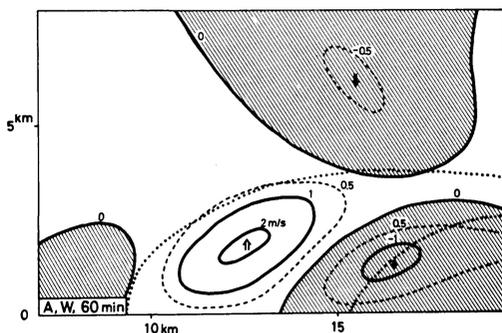
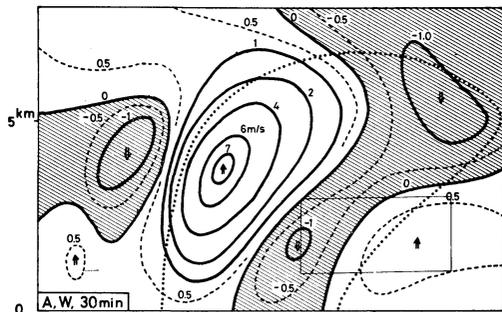


第3図 地上雨量強度の時間変化

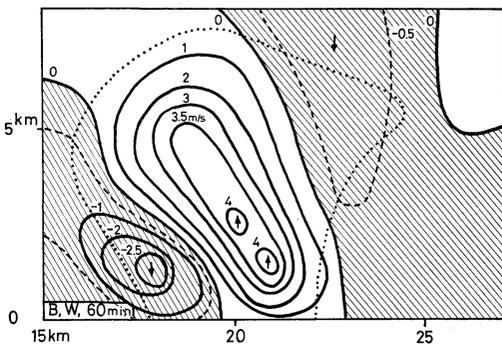
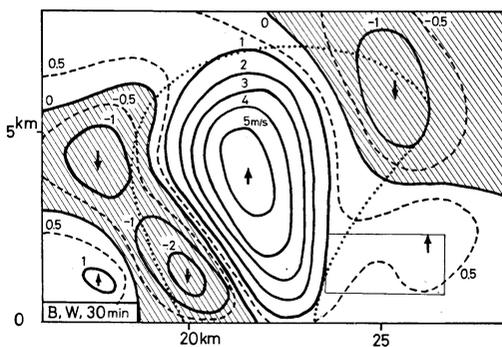
ジェットは長続きする降水セル形成のための前述の条件をみたく高度にあるのに対し、case A のジェットの高度は低い。ただし、両 case 共 cloud layer の平均的な垂直シアは左から右である。

第3図に示すように、両 case とも雨域は時間と共に左に移動している(初期じょう乱は 25 km を中心に与えられた)。両ケースの顕著な違いは、case A は case B に比べて移動が速いだけでなく雨量強度の減衰が早いことである。case B では、雨の強さは時間と共に弱まってはいるものかなり一定の値を保ち続けており、長続きする降水セルが形成されていることを示している。60 min までの総降雨量は幅 1m<sup>2</sup> の帯状域について case A で 1.19×10<sup>8</sup> g, case B で 1.25×10<sup>8</sup> g であり、case B については当然増し続ける。case B の方が各時間の降雨域が狭いのも特徴である。

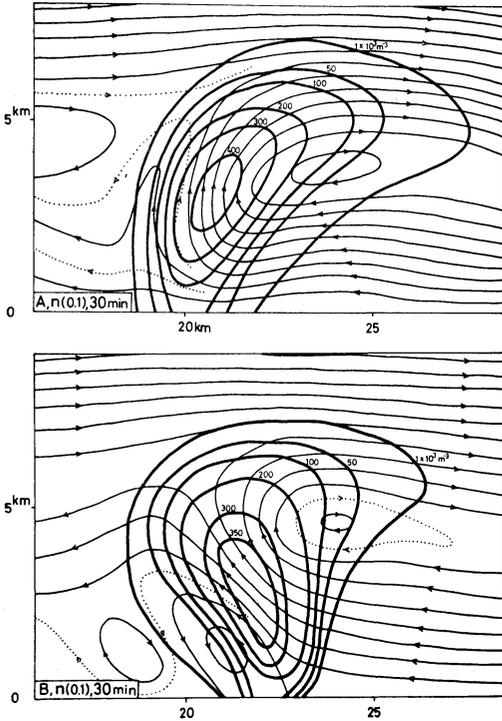
30 min, 60 min の両ケースの力学的構造(垂直速度の分布)は第4図、第5図に示されている。case A の雲は右に(平均垂直シアの風下側)傾き続ける。下降気流は降水セルの右部、傾いた上昇流域の下部に形成されている。30 min には下降気流の更に右側に新しい弱い上昇気流が現われているが、この領域は降水セル内の気流の一般流への変換によって垂直シアが強まっており、発達を抑えられる。降水セルは 60 min には著しく



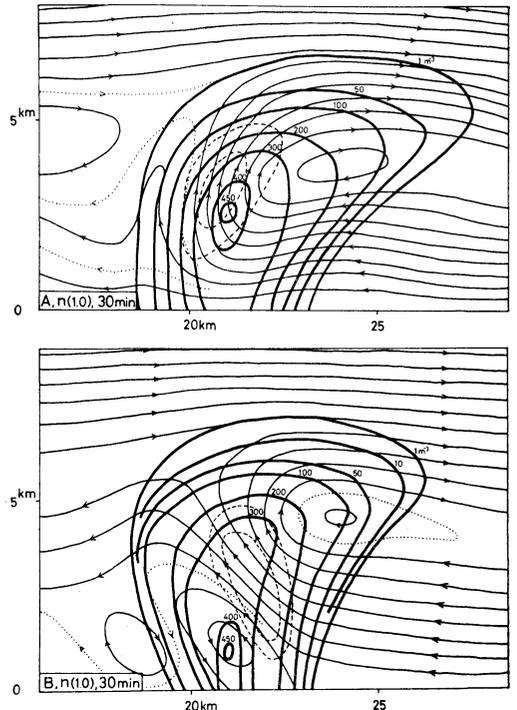
第4図 垂直速度の空間分布 (case A) 点線は含水量 0.1g/m<sup>3</sup> の等値線



第5図 垂直速度の空間分布



第6図 半径 0.1 mm の水滴の空間分布 (単位  $m^{-3}$ ) と流線.



第7図 半径 1.0 mm の水滴の空間分布と流線, 点線は半径 0.1 mm の水滴の分布を示す

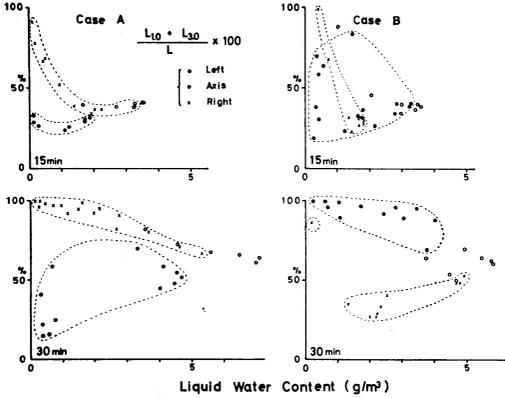
衰弱してしまい、この case での降水セルは1時間でその生涯の殆んどを終えている。

第5図に示された case B の力学的構造は case A とは全く異なった構造を示している。30 min 上昇流域は左に傾き、下降気流は降水セルの左部に形成されている。これらの構造は case A の全く逆である。この case の顕著な特徴は、30 min の構造が 60 min でも (恐らくより長く) 大きな変化なしに保たれていることである。降水セルは構造的に、またふるまいとしても定常状態に達し、前に述べた長続きする降水セルとなっている。また、雲が case A とちがって垂直シアがあるにもかかわらず殆んど直立しているのも興味深い。このような循環をもった降水セルが、第2図に示された一般風の中に形成されると、下層右方からの温い湿った空気の補給、その潜熱の解放、中層左方からの乾いた冷たい空気の混入、その中で水滴の蒸発、下降気流の形成等が全て組織的に効率よく行なわれている。この降水セル内では上昇気流と下降気流がならんで存在しているため補償流によるエネルギーの消費もなくてすむことになる。なお、当然のことだが、case B の一般風に全ての高度で右向き

の風を与えれば、降水セルは右に進む長続きするセルとなる。

両 case の降水セルの雲物理学的構造 (水滴の空間分布) は第6図以下に示されている。第6図、第7図には両 case 30 min 後の半径 0.1 mm (小雨滴)、1.0 mm (大雨滴) の空間分布が示されている。各図上部は case A、下部は case B (長続きする降水セル) に対応する。両 case とも 1.0 mm 雨滴の最多領域が 0.1 mm のそれからずれている。即ち、case A では大雨滴の多い領域が小雨滴の多い領域から下方右側にずれている。一方 case B では大雨滴は小雨滴の多い部分から下方左側にずれた領域に多く集まっている。これらの特徴は、大雨滴の雲内空間分布が小雨滴の空間分布と異なること、また、両分布の異なり方が降水セルのタイプ (一般風の垂直プロファイル) に依って異なることを意味している。

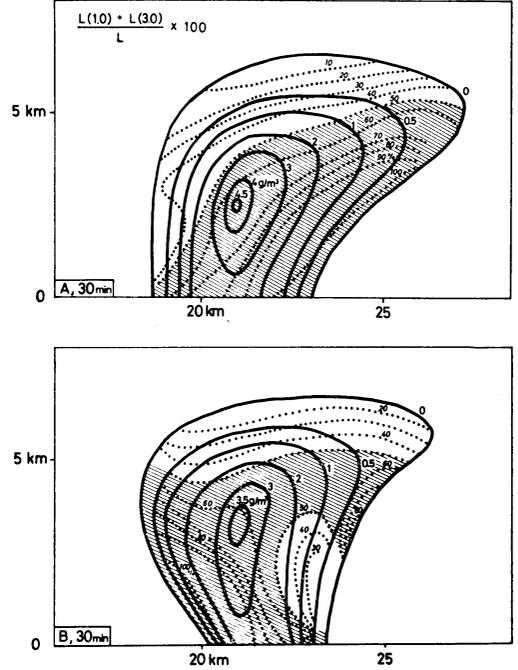
大雨滴の空間分布の特徴は第8図により明らかに示されている。横軸は小水滴から大水滴まで全部加えた全含水量、縦軸は半径 1.0 mm、3.0 mm の雨滴が含水量に占める割合を表わす。各点はセル内の各位置での関係を示し、各記号はセル内の点の位置を表わしている。case



第8図 大雨滴(半径1.0mm及び3.0mm)が含水量に占める割合. 各記号はその点の降水セル内での位置を表わす:○は含水量の分布のaxis——各高度での最大含水量の点を結んだもの——, ●はそのaxisの左側, ×はaxisの右側であることを意味する.

Aでは大雨滴は降水セルの右部で, case Bでは大雨滴はセルの左部で含水量に占める割合が多いことが明らかである. 30minでは両caseとも高密度領域では70%以上の貢献率を示している. 興味深いことは, 大雨滴の高密度領域と低密度領域(いいかえると小雨滴の高密度領域)の分離が, case Aではまだ下降気流が形成されていない15minに明瞭に現われていることである. この分離が, 第2図にみられるような一般風の垂直プロファイルのわずかな違いにより全く逆の傾向で行なわれたわけである. これらのことは, 降水セル内の水滴の粒度分布が, セル内の場所, セルの発達段階, セルのタイプ(あるいは一般風の垂直プロファイル)に依って異なり, 例えば Marshall-palmer 分布といった1つのタイプの粒度分布で表わすことができないことを意味している. 即ち, 通常, 降水セルの数値実験では Marshall-palmer 分布を仮定して降水形成機構のパラメタライゼーションを行なうが, 扱う問題によってはその仮定が既に1つのフィルターとして働き, 起るべき過程を除いてしまう危険性があることを暗示していると云えよう.

第9図には, これら雨滴の空間分布の特徴が要約されている. 大雨滴(半径1.0mm及び3.0mm)の占める割合が50%以上の領域は斜線がほどこされている. 両caseとも, 含水量が多い領域が決して大雨滴の占める割合が大きい領域ではないことを示している. 繰り返して述べるように case A と case B で大雨滴が含水量に大きく占める領域が全く正反対の場所に位置しているこ



第9図 大雨滴(半径1.0mm及び3.0mm)が含水量に占める割合の空間分布(単位%, 点線)と含水量の空間分布.

とが良く分る. それらの場所はそれぞれ大体下降気流が形成されている場所にあたる. case Bの右側の白ぬきの領域は大きい水滴が強い上昇気流にさえぎられてこの領域内には落ちこみにくいことを意味し, レーダーの反射強度の弱い領域である. severe storm の研究でしばしば述べられている vault と形状及び機構が良く似ている.

このように降水セルの構造は, 力学的構造にしる雲物理学的構造にしる一般風の垂直プロファイルによって著しく異なってくるのが分る. そして, このような構造をもたらした力学的過程及び雲物理学的過程が互いに影響を及ぼし合い, 降水セルのふるまいをきめていき, 最終的には case A の場合は降水セルは短寿命で終り, case B の場合は長続きする降水セルが形成されたわけである.

4. あとがき

現在降水セルの数値実験は1つの分岐点に来ている. 一般風の効果を調べるためには3次元的な過程を考えざるを得ないし, 降水セル内の降水形成機構を調べるためにはモデルは複雑化していく傾向にある. 降水セルのふるまい及びその機構を明らかにしていくには確かにこれ

らの数値実験も必要であろう。しかし、今何よりも切望されることは実際の降水セルの構造（上に述べたような垂直速度の分布、水滴の分布等）に関する確実なデータの積み重ねであろう。即ち、ドップラーレーダー、各種波長のレーダーを組み合わせた観測が必要である。これらの観測と対応させながら数値実験が行われた時、降水セルの研究も一段と発展するものと期待される。

#### 文 献

1) Newton, C. W., 1967: Severe convective

storms. *Advances in Geophysics*, **12**, New York, Academic Press, 257-308.

2) Takeda, T., 1966: Effects of the prevailing wind with vertical shear on the convective cloud accompanied with heavy rainfall. *J. Meteor. Soc. Japan*, **44**, 129-144.

3) Takeda, T., 1971: Numerical simulation of a precipitating convective cloud: the formation of a "long-lasting" cloud. *J. Atmos. Sci.*, **28**, 350-376.

4) 武田 喬男, 1971: 降水セルの力学と数値実験. *天気*, **18**, 9-19.

## 【新刊紹介】

齋藤 鍊一・奥田 節夫・齋藤 亮平 著

### 集中豪雨—新しい災害と防災—

日本放送出版協会・刊 285p ¥ 580

近年の風水害の特徴として、集中豪雨による死者が多い、ということが、各方面で、いろいろな資料にもとづいて指摘されている。とくに昨年7月の梅雨前線豪雨（昭和47年7月豪雨）における死者441人の災害は、記憶に新しいところである。このように集中豪雨災害は大きいにもかかわらず、これまで気象事業においては、ややもすれば集中豪雨を現在の子報技術の可能限界外の現象とみなし、「予報できなくても仕方がない」という考え方が根強く残っていた。しかし、この2、3年は、集中豪雨予報対策が真剣に進められ、従来、一部に見られた消極的、逃避的態度を排し、積極的にこれと取組むという大方針が打出された。そのような積極的な集中豪雨予報対策の推進者が、本書の著者の一人である。前・気象庁予報部長齋藤鍊一博士であった。これまで台風についての本はいく冊も出版されているが「集中豪雨」という題名の本は、本書が最初である。その最初の本の著者として、齋藤鍊一博士は、まことにふさわしい人であっ

たといえよう。

本書は I 集中豪雨の記録（齋藤亮平） II 集中豪雨の正体（齋藤鍊一） III 集中豪雨の災害（奥田節夫） IV 集中豪雨災害と住民（齋藤亮平） V 討論の各章から成り立っている。I、IV章はNHK 科学産業部に務めていた齋藤亮平氏の筆により、災害の実態や住民とのかかわり合いがなまなましく描き出されており、思わず息をのむような描写がある。II章では集中豪雨の気象学的本質が、スケールの観点からわかりやすく記されている。従来、このように明快に記されたものは、少なかったのではないと思われる。III章は、防災地形学専攻の京都大学の奥田節夫教授の筆になり、ここの専門家は、斜面崩壊や土石流の実態についての気象貴重な新知識を得るであろう。

まことに時宜を得た好出版物といえる。

（倉嶋 厚）