

雨域追跡法による短時間降雨予測の精度

A Study on the evaluation of short-term rainfall forecasting
accuracy using rain echo tracing method

建設省土木研究所 正員 吉野 文雄

“ 正員 水野 雅光

佛建設技術研究所 正員 兪 朝夫

1. はじめに

適正な河川管理、ダム管理を行うにあたって洪水時の出水予測の重要性は言うまでもない。その出水予測の最も支配的な入力条件は、現時刻から数時間先までの降雨量である。これまで河川管理の現場において実際に降雨予測を行う際のあい路となっていたのは、現時刻までの広域的な降雨情報を即時に入手できなかったことである。しかし近年レーダ雨量計の実用化が図られ、洪水時に迅速に降雨情報を収集することが可能となった。現在建設省では11基のレーダ雨量計を設置済であるが、さらに設置を進め全国的なレーダ雨量計網を構築する予定である。これらレーダ雨量計網による広域的な降雨情報が提供されれば、降雨予測の適用範囲および有効性はさらに増大すると考えられる。英国における報告でもレーダ雨量計による便益の多くは適切な降雨予測を介在してもたらされるとしている。¹⁾このような状況のもと現在まで多くの降雨予測モデルが提案されている。しかしながらそのモデルによる予測の特性や精度が評価された例は極めて少ない。

本研究は建設省土木研究所で開発した雨域追跡法による短時間降雨予測モデルを多くの降雨例に適用し、その予測特性と予測精度について論じたものである。これによって今後の降雨予測モデルの改良に資することおよび予測現場での降雨予測モデルの適用限界を把握することを目的としている。

2. 関連係数を用いた雨域追跡法による短時間降雨予測手法

現在まで提案されている短時間降雨予測モデルは、ほとんど運動学的手法に基づくものである。運動学的手法による降雨予測の基本は、雨域の移動ベクトルを現時刻までの雨量分布情報に基づき設定し、この移動ベクトルにより現時刻のエコー図（レーダ雨量計によって得られた広域の雨量分布図をこう呼ぶことにする。）を時間的に外挿するものである。

建設省では実用的な観点から数時間先の予測を目途としており、ライフスケールが数時間以上の現象を対象とする必要がある。スケールが大きくなる程、現象の寿命は長くなるが、10kmのオーダではそれは数10分程度であり²⁾³⁾運動学的手法の基本条件となる予測時間内の現象の持続性という条件が満足されないことになる。従って気象現象のスケールとその継続時間の関係を考えると、短時間降雨予測は中規模現象（メソスケール、100kmのオーダ）を対象とすべきであり、個々のエコーの追跡は必ずしも必要でない。従ってレーダ観測範囲を考慮すると、全体の雨域の平均的な移動方向を予測すれば良いことになる。このような観点から筆者らは関連係数を用いた雨域追跡法による予測モデルを採用した。この方法を簡単に述べれば次のようである。なお詳細は文献4)を参照されたい。

- 1) エコー図においてある降雨強度（閾値と呼ぶ）以上の降雨強度を示すメッシュを1、それ以下のメッシュを0とし、全メッシュを2値化する。
- 2) この2値化した $T - \Delta t$ 時刻のエコー図を Δx 、 Δy だけ移動させて T 時刻の2値化したエコー図と重ね合わせ、関連係数の最大値を示す方向、距離を移動ベクトルとする。
- 3) この設定した移動ベクトルを用いて $T - \Delta t$ 時刻のエコーを移流させて、 T 時刻のエコー図と重ね合わせることにより、 $E(T) - E(T - \Delta t)$ を求め、 Δt 間の発達・衰弱量とする。
- 4) 2) で求めた移動ベクトルで T 時刻のエコーを5分間隔で移流するとともに、3) で求めた発達・衰弱量も定値外挿して、各時刻のエコー図を予測する。予測雨量はこれらエコー図から降雨強度を5分間

の降雨量に変換し累加して求める。

このように本予測モデルではみかけの発達・衰弱に惑わされることなく、中規模の降水現象に着目して移動ベクトルを求めている。そのうえエコー図を2値化して関連係数を算出しているため、相互相関関数法に比べ計算も比較的容易で演算時間も短縮される。

表-1 予測計算対象降雨

3. 雨域移動ベクトルの設定法

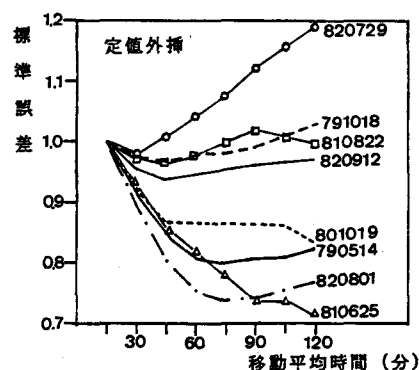
3. 1 使用データ

レーダ雨量データは建設省赤城山レーダのものをを用いた。また計算対象とした降雨は、表-1に示すような1979年～1982年の間に生じた比較的規模の大きい8降雨であり、低気圧、台風、前線という3つの降雨成因を含むように配慮した。雷雨性降雨については継続時間が短いうえ、雨域も小さく予測精度を十分評価することができないため対象降雨から除外した。

No.	降雨名	降雨成因	計算対象期間
1	19790514	低気圧	14日 5時～15日 4時
2	19791018	台風20号	18日 2時～19日 17時
3	19801019	前線	18日 19時～20日 15時
4	19810625	前線	25日 12時～26日 9時
5	19810822	台風15号	22日 0時～23日 1時
6	19820729	前線	29日 15時～30日 8時
7	19820801	台風10号	31日 15時～1日 19時
8	19820912	台風18号	11日 11時～13日 0時

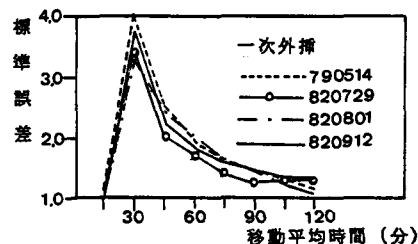
3. 2 移動ベクトルの時系列分析

表-1に示した降雨を対象に移動ベクトルの時系列データを作成し、移動平均法による時系列分析を行った。この際 Δt は15分に固定している。外挿方法は定値および一次外挿の2方法とし、移動平均期間は15分～2時間、予測期間は15分～3時間とした。図-1は予測期間1時間の場合の分析結果を示したものである。ただし、縦軸の標準誤差は移動平均期間15分の時の値を基準にし無次元化している。図-1より移動ベクトルの一次外挿はかえって誤差の増大をもたらすこと、従って定値外挿で十分であることがわかる。また定値外挿では移動平均期間は45分程度が望ましいことがわかる。



3. 3 単純移流モデルの予測精度

発達・衰弱を考慮せず、移動ベクトルでエコーを移流させるだけで行う予測方法を「単純移流モデル」と呼ぶ。3.2で明らかにしたように移動ベクトルは定値外挿が望ましいので、 Δt を15分として移動ベクトルを求め、予測期間中同一の移動ベクトルを適用した。表-2、3に単純移流モデルの予測結果を示す。なお本論文での予測精度の評価方法は下記のようなものである。



① 予測値と比較する実測値はレーダ雨量値とし地上雨量は用いない。

② 評価対象面積は $15\text{km} \times 15\text{km} = 225\text{km}^2$ の正方形メッシュとする。 (計算は $3\text{km} \times 3\text{km} = 9\text{km}^2$ のメッシュを最小単位としている。)

③ 1時間予測とは予測時点から1時間後の1時間雨量を、2時間予測とは予測時点の1時間後から2時間後までの1時間雨量を予測しているものとする。3時間予測も全く同じである。

表-2、3から明かなように1時間予測では相関係数0.6～0.9と安定した予測精度が得られており、実用性の高いことがわかる。一方2時間、3時間予測では1時間予測に比べ急激に精度が低下し、相関係数は0.2～0.6にとどまっている。各予測ステップでの予測精度をつぶさにみても、1時間予測ではほぼ安定

した予測精度が持続しているのに対し、2、3時間予測では予測精度は大きく変動しており、極端な場合は負の相関係数を示した例もある。なお表-3において3時間予測の方が2時間予測より相関係数の大きい場合がみられるが、これは2時間、3時間予測では比較するサンプルの数が異なることおよびエコーの偶然的重なりによるものである。

表-2 単純移流モデルによる予測結果の精度 (カテゴリー表)
(1時間予測)

予測 実測	～2 mm	2～ 5mm	5～ 10mm	10～ 20mm	20～ 30mm	30～ 40mm	40～ 50mm	50mm ～	計
～2mm	19174	1757	12						20943
2～5	1608	7277	699	41	2	1			9628
5～10		31	497	96	13				1314
10～20		10	25	59	12	8	1		171
20～30		1	3	5	10			2	25
30～40		1	3	2	3			2	11
40～50									
50mm～			1						1
計	20825	9563	1454	204	31	9	1	6	32093

3. 4 移動ベクトルの設定方法の総合評価

表-2、3は Δt を15分として2枚のエコー図から求めた移動ベクトルで予測した結果を示したものである。これに加えて次のような方法で移動ベクトルを設定し予測を試みた。

① 複数移動ベクトルモデル

エコー図を時間的に連続して見ると、強雨域は雨域全体の動きとやや異なった動きを示す場合がある。これを予測モデルに反映させるため複数の閾値を設定し、それぞれについて移動ベクトルを求めた。すなわち強雨域と雨域全体をそれぞれ別個の移動ベクトルで移流させることになる。

② 移動平均単純移流モデル

3. 2の時系列分析の結果を受けて45分間の移動平均移動ベクトルを用いて予測を行った。

上記3つの予測モデルの予測精度を表-4にまとめて示す。1時間予測では複数移動ベクトルモデル、移動平均単純移流モデルは単純移流モデルに比べ若干精度が上昇しているが、その差はわずかである。すなわち移動ベクトルの設定方法を変化させても予測精度の大幅な向上は望めないことがわかる。また2、3時間予測ではいずれのモデルが優れているのかは明瞭ではない。これは2、3時間予測の場合、予測精度はかなり偶然的要因に支配され、移動ベクトルをいかに設定しようとあまり意味を持った変動傾向を示さないためと考えられる。逆に言えば単純移流モデルでは1時間程度の予測が限界と言えよう。

4. 発達・衰弱に関する考察

4. 1 発達・衰弱の特性

本論文における発達・衰弱量 Q は $T-\Delta t$ 時刻のエコー $E(T-\Delta t)$ を移動ベクトルで移流させ T 時刻のエコー $E(T)$ と重ね合わせた後の差 $Q = E(T) - E(T-\Delta t)$ で定義する。移動ベクトルと同様に Δt を15分として発達・衰弱量の時系列データを作成した。

任意に抽出した3つのメッシュ(6km×6km)について時系列的な発達・衰弱量の変化例を示したのが、図-2である。赤城山レーダの観測域では西南から北東へ雨域の移動することが多いが、その際Aメッシュ

表-3 単純移流モデルによる予測結果の精度 (相関係数など)

降雨名	1時間予測		2時間予測		3時間予測	
	サンプル数	相関係数	サンプル数	相関係数	サンプル数	相関係数
19790514	2088	0.72	1624	0.37	1289	0.28
19791018	5448	0.86	4238	0.63	3489	0.39
19801019	4662	0.86	2835	0.53	1502	0.34
19810625	2620	0.82	1522	0.57	1069	0.61
19810822	4042	0.76	3011	0.42	2119	0.43
19820729	2676	0.63	2132	0.32	1642	0.24
19820801	4151	0.64	3322	0.44	2659	0.23
19820912	5241	0.82	3865	0.55	3099	0.41
1) 適中率	84.7		75.1		71.5	
2) C.S.I.	73.5		58.1		49.6	
3) 表現率	85.2		74.1		66.5	
4) 一致率	84.3		72.9		66.1	

1) 適中率 ランカー一致サンプル数を全サンプル数で除したもの×100
2) C.S.I. Critical Success Index = $X/(X+Y+Z) \times 100$
3) 表現率 $X/(X+Z) \times 100$
4) 一致率 $X/(X+Y) \times 100$

なお上記4指標は全降雨のデータによる。

実測 2mm	W	Y
	Z	X

表-4 単純移流モデルの精度比較 (相関係数)

降雨名	1時間予測			2時間予測			3時間予測		
	単純移流	複数ベクトル	移動平均	単純移流	複数ベクトル	移動平均	単純移流	複数ベクトル	移動平均
19790514	0.72	—	0.72	0.37	—	0.20	0.28	—	0.05
19791018	0.86	—	0.86	0.63	—	0.61	0.39	—	0.39
19801019	0.86	—	0.86	0.53	—	0.52	0.34	—	0.22
19810625	0.82	—	0.82	0.57	—	0.58	0.61	—	0.55
19810822	0.76	0.78	0.77	0.42	0.43	0.41	0.43	0.44	0.39
19820729	0.63	0.63	0.65	0.32	0.32	0.34	0.24	0.22	0.27
19820801	0.64	0.64	0.67	0.44	0.29	0.32	0.23	0.20	0.20
19820912	0.82	0.83	0.83	0.55	0.58	0.57	0.41	0.45	0.48

(注) —は計算を行っていない。

は上り斜面、Bメッシュは下り斜面となる。Cメッシュは平地である。図-2からわかるように発達・衰弱は時間的、空間的に大きく変動する。このことは椎葉ら⁵⁾も指摘している。また通常言われているエコーが斜面に沿って上昇する際、発達するという現象はこれらの図からは読み取れなかった。ただし全般的に平地に比べ山岳部の方が発達・衰弱いずれの現象も顕著であった。

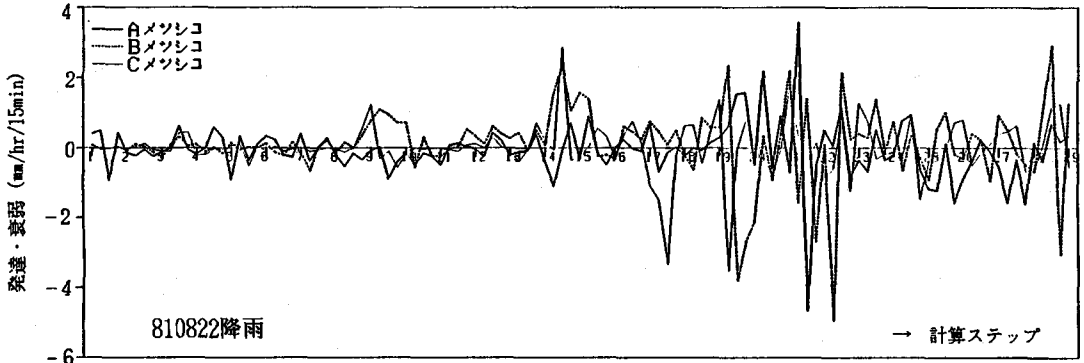


図-2 発達・衰弱の時系列変化例

4. 2 発達・衰弱量の時系列分析

発達・衰弱量についても移動ベクトルと同様の方法で時系列分析を行った。この結果の1例として予測期間を1時間とした時の移動平均期間と標準誤差の関係を図-3に示した。なお他の予測期間でも図-2とはほぼ同じ傾向の図が得られる。この図より発達・衰弱量の一次外挿は誤差を増大させるだけで全く意味がないこと、定値外挿では移動平均期間を長くするほど、標準誤差が減少することがわかる。これは発達・衰弱量の時系列データがランダムデータであることを意味しており外挿の困難さを示唆している。発達・衰弱量の時系列データがランダムデータであることを確認するため発達・衰弱量の自己相関解析を行ったが、この結果これら Δt 間離れた発達・衰弱量の間にほとんど相関関係のないことがわかった。これらの成果を総括すると今考えている36km程度の空間スケールでは発達・衰弱のライフスケールには15分より短いことになる。このことは自己相関係数が度々、負になったことから裏付けられる。従ってこのようにエコー図から発達・衰弱量を定義し外挿しても予測精度の上昇につながらないと結論される。本モデルでも実際に発達・衰弱量を外挿して予測を行ったが精度の上昇は全く見られなかった。なお同様の結果はTsonisら⁶⁾、椎葉ら⁵⁾も指摘している。

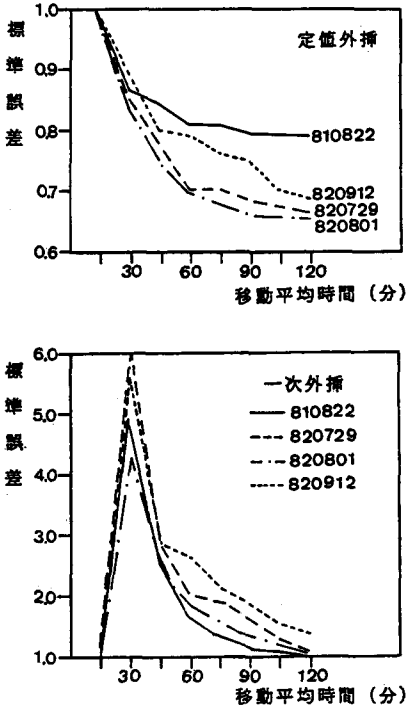


図-3 発達・衰弱の時系列分析結果

4. 3 発達・衰弱量と地形量、気象量の関係

前述したようにエコー図から求めた発達・衰弱量を外挿しても精度の上昇は得られない。よって地形量、気象量から発達・衰弱量が予測できるか否かを検討してみた。発達・衰弱量と地形量、気象量の関係は気象庁において精力的に研究されている。⁷⁾ これら既往の研究成果を概括すると次の通りである。

- ① 発達・衰弱量の算出方法は相互相関関数法やミニマムディファレンス法で雨域全体の移動ベクトルを算出した後、エコーを移流させて $T - \Delta t$ と T の2枚のエコー図を重ね合わせ差し引く方法であり、

本研究で用いた方法とほぼ同じである。

② 発達・衰弱量と地形及び風、温度場との関連が共通して指摘されている。

③ これらの関係はかなり定性的な記述に終始しており、これを直接予測に使うことは困難である。

よって本研究ではこのような成果を踏まえ、前述した発達・衰弱量の時系列データを用いて地形量、気象量との関係を検討し予測への適用可能性を考察した。検討方法としては統計的手法に基づくことにし発達・衰弱量を目的変数、各種地形量、気象量を説明変数とした重相関解析を行った。説明変数とする地形量、気象量としては既往の研究成果で発達・衰弱との関係を指摘されている次の諸量を採用した。

- I) 平均標高、II) 起伏量、III) 傾斜度 (以上地形量データ)
- IV) 発散・収束、V) 渦度、VI) 気温傾度、VII) 発散・収束の時間変化量、VIII) 渦度の時間変化量
- IX) 平均気温の時間変化量、X) 移動速度、XI) 前1時間の発達・衰弱量 (以上気象量データ)

このような条件で行った重相関解析の結果の1例を表-5に示す。表-5からここで設定した11種の説明変数では発達・衰弱量を十分説明できないことがわかる。実際、各降雨毎の重相関解析結果をつぶさに見てもある降雨において発達・衰弱量と有意な関係があると見られた説明変数が他の降雨では全く相関がなかったり、あるいは相関係数が正から負へ変動しているなどランダムな変化傾向を示しており、このような統計的方法では発達・衰弱の予測は困難であることがわかった。

表-5 重相関解析結果の例 (19790514降雨)

説明変数	単相関係数	偏回帰係数
平均標高	-0.356	-0.0058
起伏量	-0.261	0.0028
傾斜度	0.196	0.559
発散・収束	-0.026	-0.051
渦度	0.056	0.051
気温傾度	-0.222	-0.168
発散変化量	-0.071	-0.092
渦度変化量	-0.041	-0.128
気温変化量	0.408	6.789
移動速度	0.213	0.291
前1時間発達	0.079	0.019

サンプル数	204	重相関係数	0.569
-------	-----	-------	-------

5. 予測精度の評価

降雨予測の精度を直感的に把握するために予測雨量と実測雨量の散布図の一例を図-4に示した。予測精度は降雨によって大きく変動する。図-4に示した19820912降雨は比較的予測精度の良い例である。例えば19820801降雨では実測雨量が大きいところで予測雨量がかなり過小になる傾向がみられた。このような例がしばしば見られたことは表-2からもわかる。Elevander ⁹⁾ によると、C.S.I.で評価した予測精度は閾値が大きくなるとともに低下するとしている。

これは強雨域の予測の困難さを示すものであるが、この点は今後の大きな課題であると言えよう。なお降雨成因と予測精度との関連性は本研究では見られなかった。

予測精度を評価する統計的指標としては表-3に示した相関係数、適中率、C.S.I.、表現率など種々のものがある。現状で評価指標に関して統一された見解はないようである。本論文では予測精度を直感的に把握するため専ら相関係数をその評価指標として用いてきたが、強雨に的を絞って予測精度を判定するには

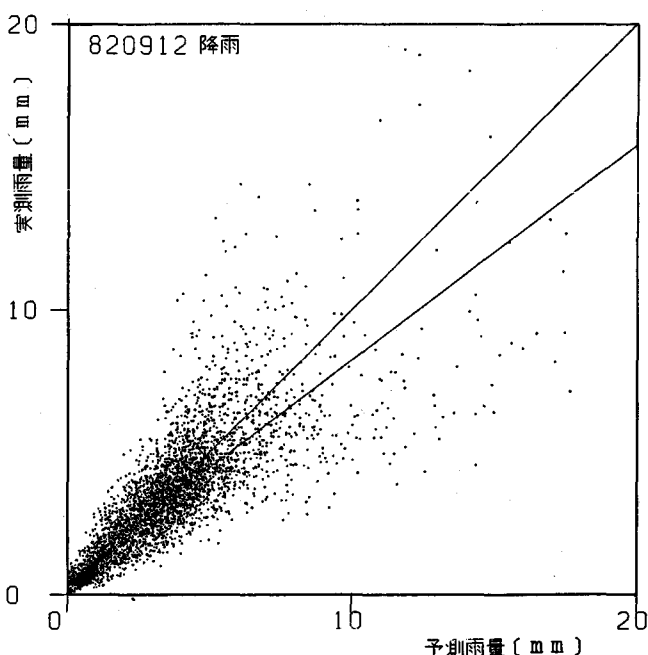


図-4 予測雨量と実測雨量の関係 (1時間予測)

C.S.I.や表現率などの指標が望ましいと思われる。また実際に降雨予測結果を利用する立場からは予測雨量の信頼性を知っておく必要がある。図-5は単純移流モデルの予測結果を統計的に処理し信頼限界を明らかにしたものである。ただし2時間予測は予測開始時刻から2時間後までの累加雨量であり、これまでの定義と異なることをことわっておく。図-5より、2時間予測は1時間予測に比べ精度の低いこと、予測雨量が実測雨量より大きい値を示す傾向があること、降雨強度が大きくなるほど信頼限界の巾が広がることがわかる。

6. 結論

本研究で得られた結論を列挙すれば次のとおりである。

- ① 移動ベクトルは定値外挿が望ましい。
- ② 単純移流モデルによる降雨予測は1時間程度の予測に用いられる。2～3時間予測では急激に精度が低下する。
- ③ 雨域追跡法では移動ベクトルをいかに正確に設定しようが精度の上昇には限界がある。このことは、Bellonら⁹⁾の指摘しているところである。
- ④ 強雨域を予想することは難しい。
- ⑤ 2～3時間先の予測には雨域の発達・衰弱特性を考慮する必要があるが、レーダエコー図からのみ発達・衰弱量を適切に見積り、外挿することは困難である。
- ⑥ これまで発達・衰弱量と関連があると指摘されている各種の地形量・気象量から、エコー図によって求めた発達・衰弱量を統計的に説明することはできなかった。

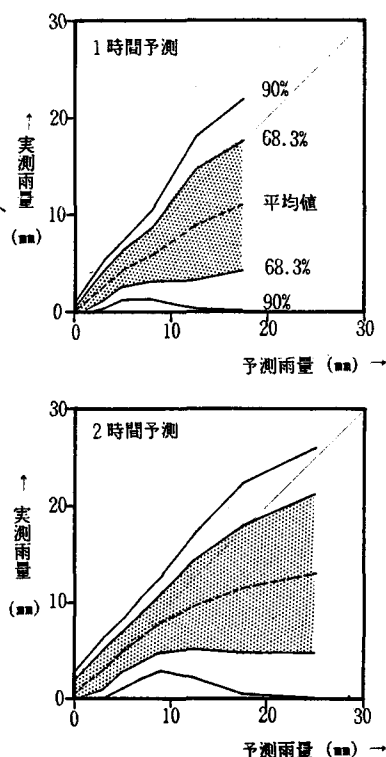


図-5 予測結果の信頼限界

(参考文献)

- 1) North West Weather Radar Project Consortium Report 1985
- 2) Smith, D.L. The Application of Manually Digitized Radar Data to Short-Range Precipitation Forecasting 16th Radar Met. Conf. 1976
- 3) Merritt, M.W. Use of Computer Vision Techniques in Estimating Echo Motion 20th Radar Met. Conf. 1981.
- 4) 大倉・石崎・中尾・森本 レーダ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 1983
- 5) 椎葉・高棹・中北 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 1984
- 6) Tsonis, A.A., Bellon, A. and G.L. Austin The Evaluation of Predictive Schemes for the Growth or Decay of Rain Areas 20th Radar Met. Conf. 1981
- 7) 例えば露木・武野 レーダ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 35巻 6 1983
- 8) Elevander, R.C. An Evaluation of the Relative Performance of Three Weather Radar Echo Forecasting Techniques 17th Radar Met. Conf. 1976
- 9) Bellon, A. and G.L. Austin The Evaluation of Two Years of Real-Time Operation of a Short-Term Precipitation Forecasting Procedure (SHARP) Jour. of Applied Met. Vol.17 1978