

1-13 レーダ雨量計の精度評価に関する研究

研究予算 : 運営費交付金 (治水勘定)
研究機関 : 平成 12~平成 14
担当チーム : 水理水文チーム
研究担当者 : 吉谷 純一、深見 和彦、松浦 直

【要旨】

国土交通省や気象庁により、全国を網羅したレーダ雨量観測が行われ、降水情報や予測情報が提供されているが、洪水予測やダム管理等、その利用に用いるレーダ雨量の精度が十分に評価されていないために、その利用は定性的なものにとどまっているのが現状である。本研究では、各利用目的に対するレーダ雨量の精度評価手法を提案するとともに、実際の降雨を用いて、現在配信されているレーダ雨量データの精度評価を試みた。同様に、現在提供されている降雨予測情報についても精度を検証した。

キーワード : レーダ雨量計、観測精度、面積雨量、地上雨量計

1. はじめに

レーダ雨量計の観測精度はどれくらいか？将来的な精度向上見込みはどれくらいあるのか？レーダによる降水観測の概念が生まれてから 50 年以上、日本で本格的な研究・運用が始まってから 30 年以上が経つ現在においても、このシンプルかつ究極の問いに的確に答えることは簡単ではない。答えられない根本の原因は、レーダで観測した雨量の精度を検証するための真値が得られないことにある。通常、我々は地上雨量計により計測した降雨量を雨量として定義する。しかしながら、地上雨量計により得られるのは、直径僅か 20cm 程度の雨量計の上に降り注ぐ雨の量であり、レーダで観測している上空の面的な降雨量を測ることはできない。つまり、比較すべき真値を知ることができない。従って、レーダの精度評価にはいつも仮定・推測が伴うし、比較条件や事例によってバラツキも大きいことから、観測精度の定量的な評価を下すことは難しかった。これがレーダ雨量情報の定量的な利用につながらない大きなひとつの原因である。

このような状況に対して、著者らは、レーダ雨量計の降水量観測精度を適切に評価することを試みた。すなわち、洪水予測や土砂災害避難警戒、道路・ダム管理など、利用目的によってレーダ観測に求められる性能、精度は異なるので、実際に使えるかの判断は、それぞれの要求精度・性能を満足しているか否かを、それぞれの立場に立って評価することが妥当と考えた。最初に著者らは利用目的別に観測精度の適切な評価手法・評価基準を抽出することを試みた。次に、その評価手法に従って、流出解析や洪水予測、ダム管理利用に対するレーダ雨量の精度評価を行った。

2. 研究方法

2.1 適切な精度評価手法の抽出と提案

既往の文献や論文^{1)~19)}を調査することにより、レーダの精度を評価する様々な手法について調査した。あわせて降雨分布特性に関する気象学的分析を行い、防災利用目的別のレーダ雨量の最適な精度評価手法抽出を試み、流出解析や洪水予測、ダム管理等に利用する際の適切な精度評価手法を提案した。

2.2 レーダの時空間分解能が精度に及ぼす影響

2.1 で提案した評価手法を適用する前に、元となるレーダ雨量計の時空間分解能が計算された雨量値の精度に及ぼす影響を評価した。モデル流域として庄内川流域($A=766.8\text{km}^2$ (新川流域を除く))を選定し、1996~2000 年の主要 8 降雨を対象に、国土交通省レーダにより観測・配信されたメッシュ雨量データ(最小 2.5km メッシュ、最短 5 分雨量)の面積平均スケールと時間平均スケールを模擬的に変化させて与え、流出モデル(貯留関数法)により計算された流出量の変化、感度を分析した。面積平均ケースは、1 メッシュ×1 メッシュ($A=6.25\text{km}^2$)から 2×2 メッシュ、3×3 メッシュ、4 メッシュ×4 メッシュ($A=100.0\text{km}^2$)までの 4 ケース、時間平均ケースは、5、10、15、30、60 分の 5 ケースとした。

2.3 レーダ雨量計の精度評価

2.1 で示した精度評価手法に従い、レーダの適切な精度評価を試みた。検討対象流域は庄内川流域($A=1,010\text{km}^2$; 図-1)と木津川流域($A=1,643\text{km}^2$; 図-2)とした。選定理由は、①平地部と山地部を含む流域であること、②該当レーダ雨量計の観測条件が良い

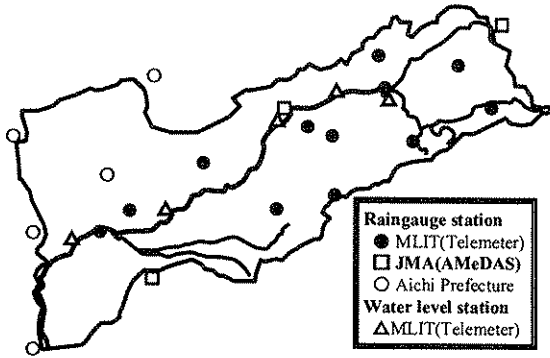


図-1 庄内川流域 (≒1,010km²)



図-2 木津川流域 (≒1,643km²)

こと、③山地部における地上雨量計の設置密度が比較的高いこと、である。解析に使用した地上雨量データは流域内および流域に近接する国土交通省、気象庁、自治体(庄内川のみ)のデータで、各機関のデータは全て同等のデータとして取り扱った。レーダ雨量データは、dynamic window 法により、地上テレメータ雨量データでキャリブレーションされた国土交通省レーダ雨量データを用いた。評価対象洪水は、1996~2000年の主要8降雨(庄内川流域)、1995~2002年の主要10降雨(木津川流域)である。また、庄内川流域においては、国土交通省レーダ情報に基づく河川情報センターの雨域移動解析データの予測精度の評価も行った。

地上雨量データから面積雨量を算定する方法としては、ティーセン法と Kriging 法を比較し、ティーセン分割法により求めた、すなわち各地上雨量計の支配区域および支配面積を計算し、該当雨量計データを加重平均することにより求めた。また、レーダ雨量計による面積雨量は、地上雨量計の支配区域に含まれるレーダメッシュと、含まれる割合を求めて、同区域のレーダ雨量を、含まれる割合により加重平均して平均雨量を算出した。次に、各時刻の地上雨量データによる面

表-1 観測所組み合わせケース(庄内川)

ケース 観測所	山 地				平 地		
	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6	Case7
論 橋	●	●	●	●			
山 岡	●	●	●	●			
日 吉		●	●	●			
端 浪		●	●	●			
大 川		●	●	●			
多治見 (7/27)			●	●			
多治見			●	●			
妻 木			●	●			
三國山			●	●			
高蔵寺				●			
瀬 戸				●			
春日井							●
名古屋					●	●	●
名古屋 (7/27)						●	●
面 積 (km ²)	102.6	238.6	400.5	610.4	136.3	226.1	394.4

積雨量と、該当メッシュのレーダ雨量による面積雨量を比較することにより、レーダ雨量計の面積雨量観測精度を検証した。その際、比較する地上雨量計の数を変化させることにより評価面積を変化させ、各面積ケースにおける観測精度の評価を行った(表-1; 庄内川流域の例)。また、雨量データの積算時間を変化させた検討も行い、これにより、山地および平地におけるレーダ雨量の面積雨量および累加雨量に関する観測精度の評価を実施した。

3. 調査結果

3.1 適切な精度評価手法の抽出と提案

レーダの防災利用目的としては、主に流出解析、洪水予測、土砂災害避難警戒への利用、道路・ダム管理への利用が挙げられる。それぞれの利用目的から見た場合、観測雨量に求められる要件の違いは、土砂災害避難警戒、道路管理に対してはある狭い地域での正確な地点雨量が、流出解析、洪水予測、ダム管理に対しては、流域内でのある広がりを持った地域での正確な面積平均雨量が重要となる点が挙げられる。そこで著者らは、利用目的別の観測精度の評価手法として、地点雨量観測精度と面積雨量観測精度の2つを抽出し、本研究で対象とする流出解析、洪水予測、ダム管理予測への利用に対しては、洪水到達時間内の面積雨量観測精度で評価する手法を適切な手法として提案した。

3.2 レーダの時空間分解能が精度に及ぼす影響

3.2.1 平均化面積が流出計算結果へ与える影響

基準となるレーダ雨量(1メッシュ×1メッシュ)を与えた場合の流出量を Q_s 、2×2メッシュ、3×3メ

ッシュ、4×4メッシュ各ケースのレーダ雨量を与えた場合の流出量を Q として、下記に示す計算流出量の誤差 e を算出し表-2に整理した。

表-2 平均化面積の違いによる計算流出量の誤差

観測所	ケース			
	2メッシュ ×2メッシュ	3メッシュ ×3メッシュ	4メッシュ ×4メッシュ	4メッシュ ×4メッシュ
瑞浪(198.7km ²)	0.014	0.034	0.033	
土岐(291.9km ²)	0.011	0.029	0.038	
多治見(366.2km ²)	0.032	0.055	0.064	
志段味(514.9km ²)	0.070	0.171	0.185	
枇杷島(733.1km ²)	0.030	0.058	0.152	

$$e = \frac{\sum |Q_s - Q|}{\sum Q} \quad (\text{累加は時間方向})$$

既往研究と同様、平均化面積が大きくなるほど、 e も大きくなるが、対象とした全てのデータを用いた場合に流域面積が大きくなるほど e が小さくなる傾向は顕著ではなかった。これは、降雨の平面分布に境界線のようなものがある場合、その境界線をまたぐ領域で平均化することによる誤差が大きいためと考えられる。庄内川の場合、多治見や志段味地点から上流の山地領域と下流の平地領域で降雨特性が異なるものと考えられる。また、降雨規模が小さく降雨範囲が狭い場合には地形条件に基づく境界線とは別の降雨の有無による境界があり、同様の傾向が見られることが考えられる。

多治見上流域のデータを対象として同様の整理を行った結果では、流域面積が大きくなるほど e が小さくなる傾向が見られ、概ね、2メッシュ×2メッシュ(25km²)の場合で $A=550\text{km}^2$ 、3メッシュ×3メッシュ(56.25km²)の場合で $A=800\text{km}^2$ 、4メッシュ×4メッシュ(100km²)の場合で $A=1,000\text{km}^2$ 程度以上の流域に対して、 e が0.05を下回る結果になった。

3. 2. 2 平均化時間が流出計算結果へ与える影響

前項と同様に平均化時間に対して誤差 e を算出し表-3に整理した。ここで、基準となる流出量は5分雨量の場合である。平均化時間が大きくなる程 e も大きくなり流域面積が大きくなる程 e は小さくなる傾向は見られるが、 e の値は概して小さく、平均化時間の影響は平均化面積の影響と比べて小さい。これは、平均化面積を大きくすることにより降雨量のボリュームが変わってしまう場合があるのに対し、平均化時間を変えてもボリュームそのものは変化しないことによると

表-3 平均化時間の違いによる計算流出量の誤差

観測所	ケース			
	10分 雨量	15分 雨量	30分 雨量	60分 雨量
瑞浪(198.7km ²)	0.0012	0.0025	0.0044	0.0094
土岐(291.9km ²)	0.0007	0.0017	0.0016	0.0027
多治見(366.2km ²)	0.0007	0.0016	0.0014	0.0016
志段味(514.9km ²)	0.0007	0.0013	0.0012	0.0029
枇杷島(733.1km ²)	0.0009	0.0009	0.0010	0.0025

考えられる。ただし、平均化時間が30分を越え60分になると e が急激に大きくなり0.05を越えるようになる。平均化時間を60分とする場合に、 e を0.05以下とする流域面積は300km²程度以上必要となる。

3. 3 レーダ雨量計の精度評価

3. 3. 1 地上面積雨量の算定

本研究はレーダの観測精度を正當に評価することを目的としている。そこで最初に、比較対象となる地上雨量計による流域平均雨量の算定精度に関する検討を行った。地上雨量計の観測値から流域平均降雨量を求める方法としては、算術平均法や Thiessen 法、等雨量線法などがあり、また最近では、地球統計学の分野で理論が確立された Kriging 法があげられる。Kriging 法は、複数のサンプル値を用いて特定の点または領域の値を、統計的に最も誤差が小さくなるように推定する方法であり、流域平均雨量の算定に適用すれば、観測所の無い地点での雨量も確率論的に評価できることから、観測所支配面積内の雨量を一定として扱う Thiessen 法などと比較して、高精度での降雨量推定ができると考えられる。そこで本研究では、Kriging 法と日本実河川において多く使用されている Thiessen 法を比較することにより、地上平均雨量の算定手法に関する検討を実施した。

Kriging 法による地上平均雨量の算定のために、はじめに、variogram 関数の同定を行う。Variogram は、観測点間の統計量の分散を表し、(1)式で定義される。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E \{ [Z(x+h) - Z(x)]^2 \} \quad (1)$$

ここに、 $Z(x)$ は地点 x における統計量、 h は地点間の距離を表す。

図-3は、東海豪雨において1時間毎に算定した variogram と距離の関係および、variogram の計算に用いた地上雨量計のサンプル組数(雨量観測所間距離20×20地点=全400サンプル)と距離の関係を示した

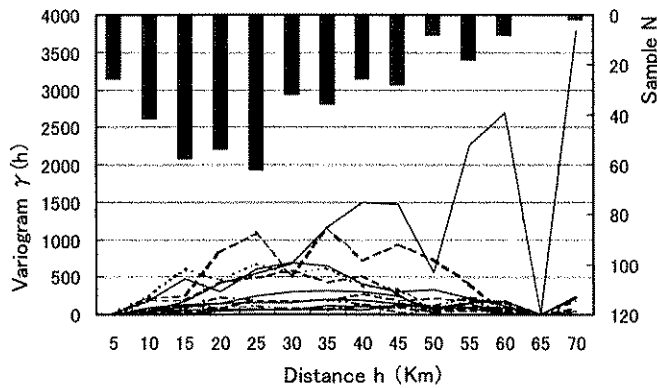


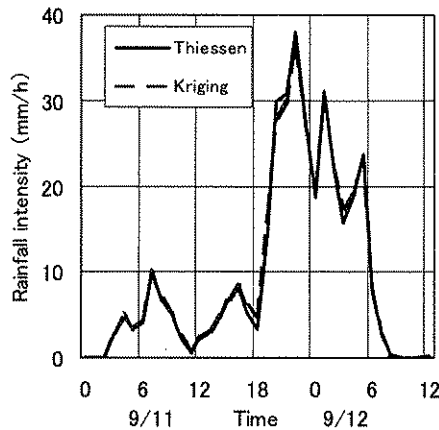
図-3 バリオグラムと距離の関係

ものである。図中のサンプル数と距離の関係から、観測所間の距離 h が 45km を超えるとサンプル数が減少し、算定される variogram の信頼性が低下することが推測されることから、 $h \leq 45\text{km}$ における variogram と距離の関係に着目することにした。その結果、 $h \leq 45\text{km}$ においては、距離とともに variogram も大きく

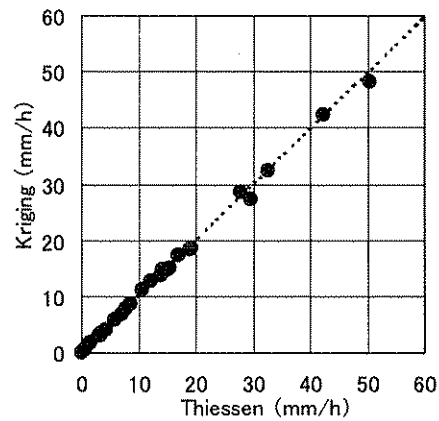
なる傾向が見てとれた。次に、 $h \leq 45\text{km}$ のデータに関して真数、対数の各関数形をあてはめて、variogram 関数 $\gamma(h)$ の同定を行った。相関解析の結果、variogram を対数として扱う場合の相関係数が高いことがわかり、最小自乗法を用いて variogram 関数は(2)式の様に同定された。

$$\gamma(h) = 2.046 \cdot h^{1.339} \quad (2)$$

得られたバリオグラム関数から、各観測所における重み係数を算出し、Kriging 法による庄内川流域平均雨量を算定し、同じ地上雨量データから Thiessen 法により求めた流域平均雨量と比較した。図-4(a)に面積平均ケース 4(表-1; 山地域)の場合のハイトグラフ比較結果を、図-4(b)に case7(平地域)の場合の散佈図比較結果を示す。両図からわかるように、東海豪雨における本ケースにおいては、Kriging 法により推定される流域平均雨量と Thiessen 法によ

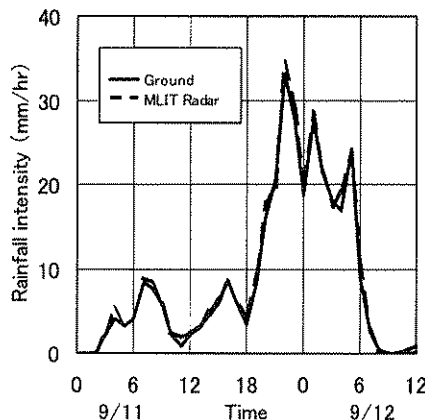


(a) Case4 (山地地域)

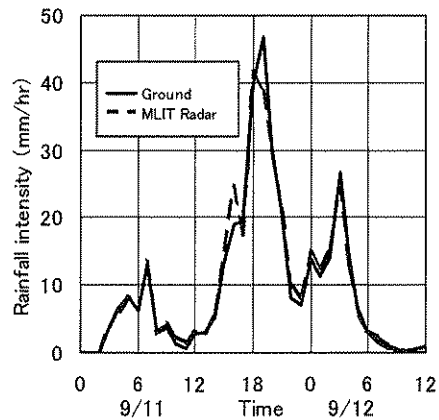


(b) Case 7 (平地地域)

図-4 Kriging 法と Thiessen 法による地上流域平均雨量の比較



(a) Case3 (山地地域)



(b) Case 6 (平地地域)

図-5 レーダ雨量と地上雨量の流域平均雨量による比較

り推定される流域平均雨量は、ほとんど差が無いことがわかった。

以上の結果より、以下、本研究においては、簡便のため地上流域平均雨量の算定には Thiessen 法を用いることとし、地上面積平均雨量は、各地上雨量計の支配区域および支配面積を計算し、該当雨量計データを加重平均することにより計算した。

3. 3. 2 庄内川におけるレーダ雨量精度検証結果

図-5(a)に、山地部の 10 カ所の地上雨量計データを用いた場合(case3)の、東海豪雨時のレーダと地上雨量計による面積雨量の比較結果を示す。この図からわかるように、レーダと地上雨量による面積平均雨量は、極めて良く一致していることがわかる。同様に図-5(b)は、平地部のデータ(case6)を比較した結果である。山地部同様、良く一致していることがわかる。

表-4 は、両ケースを含めた各面積ケースについて、地上雨量による面積雨量を真値と仮定した場合のレーダ雨量の精度指標値を算出したものである。この表より、山地部、平地部のどの面積ケースにおいてもレーダ雨量の観測精度は高く、山地部においては平均面積

表-4 レーダ雨量計の面積雨量観測精度

	Case	Area (km ²)	Correlation coefficient	Ration of total amount of rainfall	Root mean square error (mm/hr)
Mountainous area	1	102.6	0.95	1.06	2.48
	2	238.6	0.99	1.06	1.23
	3	400.5	0.99	1.03	0.83
	4	610.4	0.99	1.00	1.78
Flat area	5	165.3	0.99	1.04	2.14
	6	335.0	0.99	1.00	1.89
	7	435.9	0.99	0.96	2.11

が大きくなるにつれて相関係数がより高くなることがわかる。また、山地部の観測結果に関しては、面積の増大とともに総雨量比も 1.0 に近づく結果となった。

3. 3. 3 レーダ雨量と流量波形の比較結果

計算により求められた、地上平均雨量とレーダ面積雨量の信頼性を確認するため、流出データとの応答を調べた。用いた流量データは、庄内川本川の国土交通省水位観測所 5 地点のデータである。それぞれの水位観測所で観測された流出高を、それぞれの観測所の上流域に最も近い平均化面積ケースにおいて求めた面積雨量の時系列と比較した。図-6 に、5 地点のうち上下流端に該当する 2 観測所(瑞浪、枇杷島)における比較結果を示す。この図より、それぞれの面積ケースにおける降雨-流出関係は適応性がとれていることがわかる。また、他の 3 地点のデータからも、降雨-流出の応答性は高く、降雨量と流出高の関係も概ね妥当な

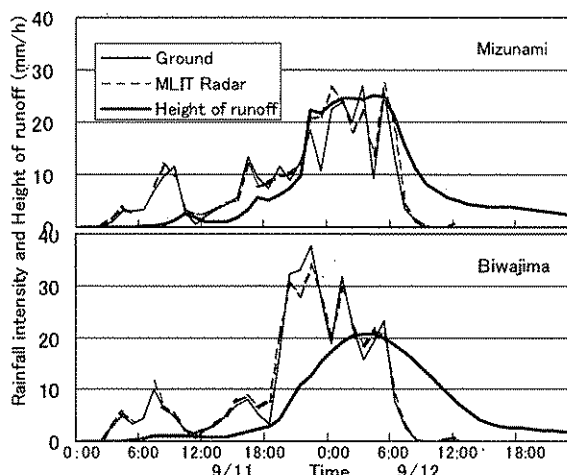


図-6 流域平均雨量と流出高の関係

ものであることが確認された。これらのことから、前項で計算された地上及びレーダ雨量計による面積平均雨量の信頼性は高いものと考えられる。

3. 3. 4 予測値の比較結果

図-7 は、東海豪雨時の降雨予測値(Frics 雨域移動解析)を、地上実況雨量と比較したものである(case7)。この図より、降雨が強くなるときに、実況よりも大きく予測してしまうことがあるが、1 時間先の予測値に関しては、比較的精度が高いと言える。表-5 は、同ケース及び山地部ケース(case4)において、Frics の予測値を精度指標値で評価したものである。1 時間先の予測値の相関係数はそれぞれ全て 0.85 以上となり、また、総雨量比も 0.94 および 0.87 となった。しかしながら、2 時間先以降の予測値に関しては、相関係数が低下する結果となった。

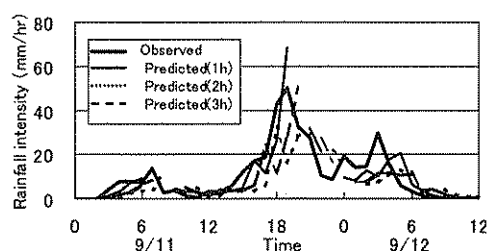
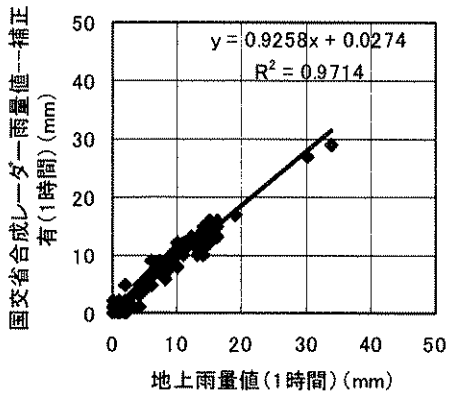


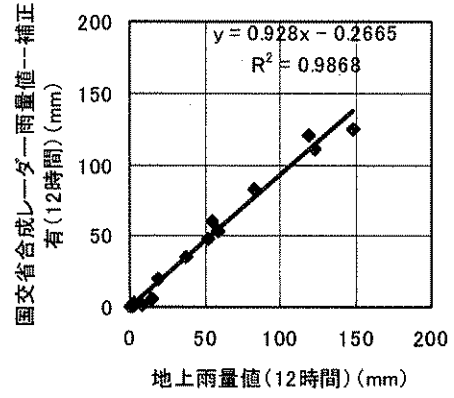
図-7 レーダ予測雨量と地上実況雨量の

表-5 レーダ雨量に基づく降雨予測

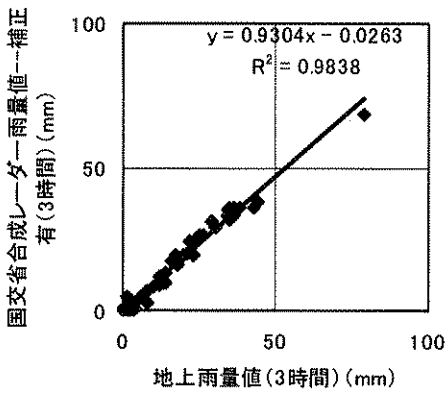
	Prediction time	Correlation coefficient	Ration of total amount of rainfall	Root mean square error (mm/hr)
Mountainous area (Case4) 610.4 km ²	1h	0.91	0.87	4.69
	2h	0.85	0.94	6.51
	3h	0.70	0.92	8.93
Flat area (Case7) 435.9 km ²	1h	0.85	0.94	7.19
	2h	0.66	0.84	9.79
	3h	0.70	0.79	9.94



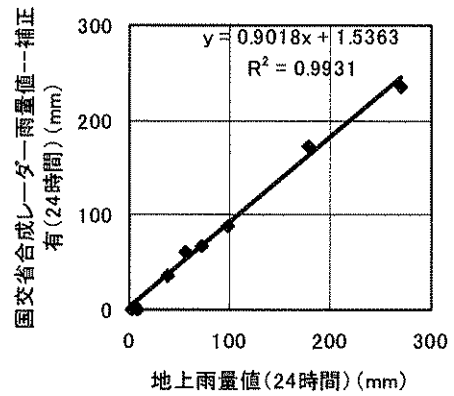
1時間雨量



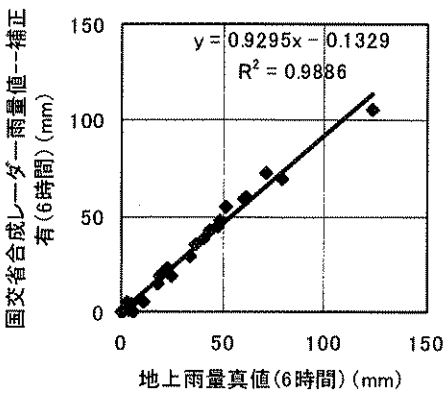
12時間雨量



3時間雨量



24時間雨量



6時間雨量

図-8 国土交通省レーダー雨量と地上雨量値の面積雨量による比較 (青蓮寺ダム流域)

3. 3. 5 木津川流域における検証結果

木津川流域の小流域番号1~13番ごとに、精度評価単位時間を1時間から3時間、6時間、12時間、24時間雨量まで変化させた場合において、レーダと地上との流域平均降雨量を比較した。図-8より、どの時間単位においても地上雨量計とレーダ雨量計による流域平均雨量は非常に良く合っていることがわかる。また、時間単位による精度の大きな変化も見られていない。この傾向はどの小流域においてもほぼ同様であった。

3. 3. 6 地上雨量計配置数密度の検討

木津川流域には、気象庁 AMeDAS (11 地点) および 国交省テレメータ(28 地点)を合わせて 39 地点の地上雨量観測点がある。そこで、地上雨量計の設置密度と精度の関係を調べるために、使用する観測地点数を変化させて、流域平均雨量を算定し、それぞれの地点数密度での精度を比較した。

基準値としたのは、木津川流域全域における 39 観測地点での雨量値を全観測地点数(39)で割った平均値

である。この際13の各小流域で、観測点が比較的接近している観測点のうち、それ以外の近傍の地点からも近いと判断できる一方の地点を除外していく方法を取り、順次 35、29、24、21、17、12、9、6 地点の観測値の平均雨量をもとめて、基準値との誤差を評価した。図-9に、1km²あたりの観測地点数(個/km²)に対し、時間雨量での基準値との相関係数と雨量比を比較したものを示す。なお、降雨事例11は、2001年8月20~22日、事例12は2001年9月9日~11日、事例13は2002年7月9日~11日の大雨にあたる。これによれば、観測所数密度が0.015個/km²以上であれば総雨量比も0.95以上と雨量の欠損の影響は少なく、観測所数密度が0.015個/km²を下回ると、精度が急激に低下する傾向が見られる。従って、0.015個/km²以上、つまり約8km間隔(64km²)に1つの雨量計があれば、精度の高い地上雨量観測が可能と言えそうである。

4. まとめ

本研究では、各利用目的に対するレーダ雨量の正確

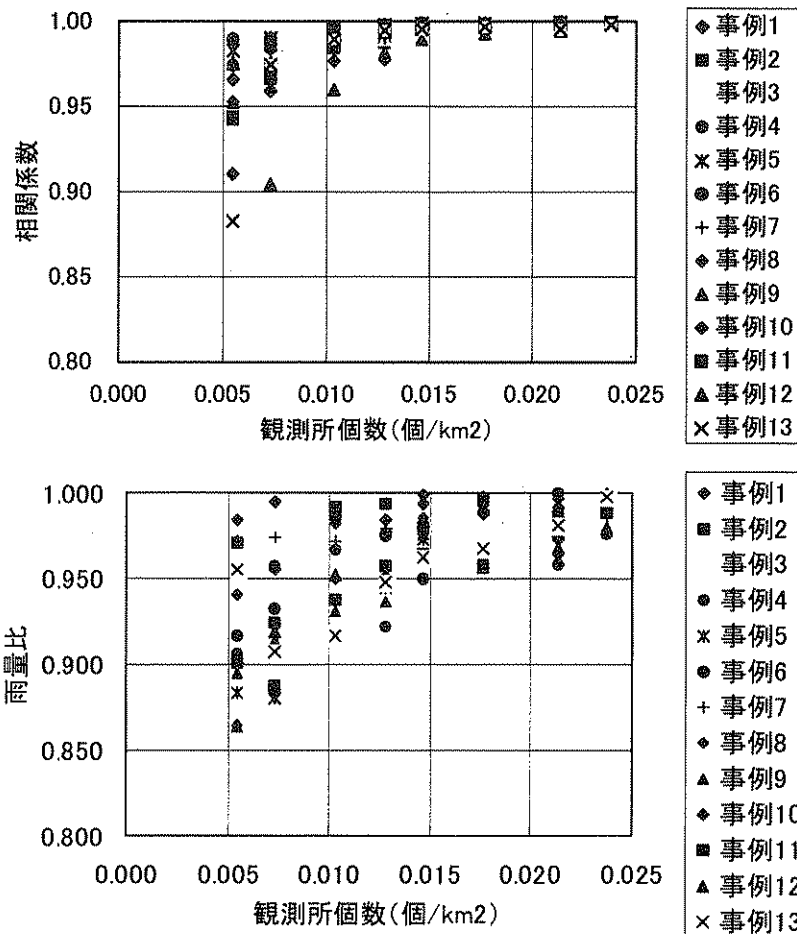


図-9 地上雨量計数密度と観測精度の関係

な精度評価手法を提案するとともに、実際の降雨事例に適用して、現在配信されている各種レーダ雨量計データの適切な精度評価を試みた。本研究の結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 状の仕様の国土交通省レーダ雨量計の空間分解能は、その時間分解能よりも流出量計算結果に及ぼす影響は大きいことがわかった。
- 2) 各面積ケースについて、Kriging 法と Thiessen 法により算定した地上流域平均雨量は、ほとんど差が無かった。
- 3) 国土交通省レーダ雨量計データより算出した面積雨量は、地上雨量計により算出した面積雨量と高い精度で一致した。
- 4) 国土交通省レーダに基づく面積雨量の予測値は、概ね精度が高く、特に1時間先予測値までは、高精度であった。
- 5) 木津川において地上雨量計の間引き法による検討を実施した結果、64km²に1基以上の雨量計数密度で高精度の観測が可能であることがわかった。

参考文献

- 1) Brandes, E. A. : "Optimizing rainfall estimates with the aid of radar", J. Appl. Met. 14, 1339-1345, 1975.
- 2) 橋本健、佐藤一郎：面積雨量の精度と雨量観測数、土木技術資料 16-12、35-41、1974.
- 3) 橋本健：標本計画法による面積雨量の精度および信頼度の評価に関する研究、土木研究所報告、149号、1977.
- 4) Hara, Y., Itou, A., Ono, H., Takagi, H., Tataru, H. & Yoshida, N. (2001) Applicability of every 10-minute short-term precipitation forecast (part3), Proc. of 2001 Annual Conf. of Erosion Control Engineering, 196-197 (in Japanese).
- 5) 石崎勝義、中尾宏臣、大倉博、吉野文雄、河関大祐：レーダ雨量計の降雨観測特性に関する研究、土木研究所報告、第167号、1986.
- 6) 気象庁予報部予報課：レーダー・アメダス解析雨量の解析手法と精度、測候時報、第62巻、第6号、1995.
- 7) Koschmieder, H. (1934) Method and results of definite rain measurements, Mon. Weath. Rev. 62, 5-7.
- 8) 川畑幸夫：水文気象学、他人書館、pp.35、1972.
- 9) Matsuura, T., Fukami, K., Kaneki, M. & Yoshitani, J. (2001) Accuracy evaluation of September 2000 Tokai storm radar observation by areal-averaging, Proc. Fifth International Symp. on Hydrol. Appl. of Weath. Radar, 39-44.
- 10) 建設省河川局砂防部：土砂災害に関する警報の発令と避難の指示のための降雨量設定指針(案)、1984.
- 11) 中尾忠彦：1998年8月豪雨における建設省高鈴山レーダ雨量計の観測状況、水文水資源学会研究発表会要旨集、194-195、1999.
- 12) Nakano, S., Nakao, T., Gosyu, H. & Ishikawa S. (2001) Accuracy verification of radar raingauge network system in MLIT of Japan, Proc. Fifth International Symp. on Hydrol. Appl. of Weath. Radar -Radar Hydrology-, 51-56.
- 13) Ninomiya, K., & Akiyama, T. (1978) Objective analysis of heavy rainfalls based on radar and gauge measurements, J. Met. Society of Japan 56, 206-210.
- 14) Watari, M., Yamakoshi, T. & Tsunakawa, H. (2002) Applicability of MOC every 10-minute short-term 1km mesh precipitation forecast for warning and evacuation system preparing for sediment disaster, Proceedings of 2002 Annual Conf. of Erosion Control Engineering, 294-295 (in Japanese).
- 15) 吉野文雄：レーダ水文学、森北出版、2002.
- 16) Yoshino, F., Mizuno, M. & Tamamoto, S. (1988) Application of kriging method to calibration of radar raingauge, Proceedings of 1988 Annual Conf., Japan Society of Hydrol. & Wat. Resour., 194-197 (in Japanese).
- 17) 山口高志、北川明、井良沢道也、杉浦幸彦、竹森史郎：レーダ雨量を用いた土砂災害予測、河川情報研究、No.1, pp.71-79、1993.
- 18) 山口高志、北川明、小野寺直、高水克也、孝弘美：レーダ雨量計の精度向上について、河川情報研究、No.1、河川情報センター、pp.91-104、1993.
- 19) 山越隆雄、山田孝、仲野公章、渡正昭：10分間更新短時間降雨予測の土砂災害警戒避難への適用、土木技術資料 43-11, pp.26-31、2001.