

流出計算で考慮すべき降水空間分布 スケールに関する基礎的検討

INVESTIGATION ON THE SCALE OF RAINFALL SPATIAL VARIABILITY TO BE CONSIDERED IN RUNOFF SIMULATION

市川 温¹・立川 康人²・堀 智晴³・宝 馨⁴・椎葉 充晴⁵
Yutaka ICHIKAWA, Yasuto TACHIKAWA, Tomoharu HORI,
Kaoru TAKARA and Michiharu SHIIBA

¹正会員 工修 京都大学 工学研究科 助手 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

²正会員 工博 京都大学 防災研究所 助教授 (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

³正会員 工博 京都大学大学院 工学研究科 助教授 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁴正会員 工博 京都大学 防災研究所 教授 (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

⁵正会員 工博 京都大学大学院 工学研究科 教授 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

A rainfall spatial variation scale to be considered in a runoff simulation will be investigated using mesh-type rainfall data and a distributed runoff model. At first, a runoff simulation is conducted by using a mesh-type rainfall data as it is, and the result is regarded as a standard result. As the next step, the rainfall data is averaged in some area and a runoff simulation is conducted by using this averaged rainfall data. If we have little difference between the standard result and the result obtained by using the averaged data, we do not have to explicitly consider the rainfall spatial variability in the area where the data is averaged, and we have only to use the average rainfall data as an input data of the simulation. Conversely, if the difference is large, we have to consider the rainfall variability in the averaging area when conducting a runoff simulation. These numerical experiments indicate that it is important to find out the rainfall spatial variability which affects the results of runoff simulations and the scale changes with basin size.

Key Words : Rainfall field, Spatial variability, Scale, Runoff simulation, Distributed runoff model

1. はじめに

国土交通省や気象庁が全国的に雨量計網を整備・拡充するとともに、最近では地方自治体でも独自に地点雨量計やレーダー雨量計を備えるところが増えている。このように、雨量に関する情報は格段に充実して来ているが、ある流域における流量時系列を流出モデルで再現するためには、降水の空間分布をどの程度考慮する必要があるのだろうか。たとえば、1000 km²の流域の流量時系列を再現するためには、どの程度の空間分解能のレーダー雨量データが必要なのだろうか。試験地流域での流量時系列を再現するためには何メートル間隔で雨量計を設置する必要があるのだろうか。これらの問に対する明確な答えはいまだ見つかっていない。

また、筆者ら^{1),2),3)}は、流域斜面系における貯留量と流出量の関係を導出する手法を開発しているが、この手法は、降水が空間的に一様とみなせる範囲を一つの単位として適用する必要がある。したがって、その範囲を恣意的にではなく、定量的かつ合理的に決定する枠組みを構築しなければならない。

以上のことから、本研究では、メッシュ型の雨量データと、降水の空間的な分布を考慮することのできる流出モデルを用いて、流出計算で考慮すべき降水空間分布スケールについて基礎的な調査検討を行なう。

2. 検討方法

(1) 基本的な考え方

先にも述べたように本研究では、メッシュ型の雨量データと分布型流出モデルを用いる。まず、基準となるメッシュ型の雨量データをそのまま用いて流出計算を行なう。次に、メッシュ型の雨量データをある領域ごとに平均化し、流出計算を行なう。この計算結果と基準となる計算結果を比較して、その差が小さければ、平均化を施した領域のスケール（以下、これを平均化スケールとよぶ）においては、降水の空間分布を陽に考慮する必要はなく、平均的な雨量強度をモデルの入力値として使えばよいことになる。逆に計算結果の差が大きければ、平均化スケールより小さなスケールの降水の空間変動を考慮したうえで流出計算を行なわな

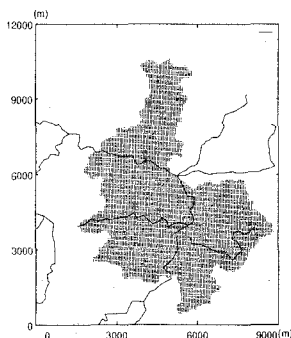


図-1 対象領域

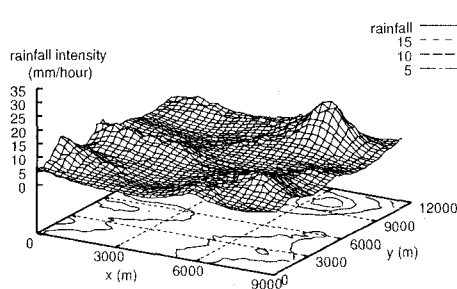


図-2 雨量データの例 ($\mu = 5.0$, $\delta = 0.5$, $\alpha = 1500.0$)

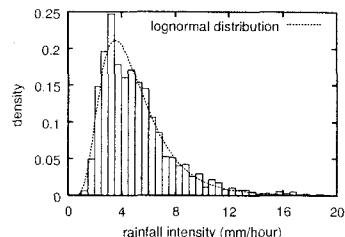


図-3 降水強度のヒストグラム

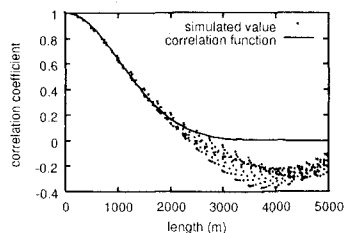


図-4 雨量データの空間相関係数

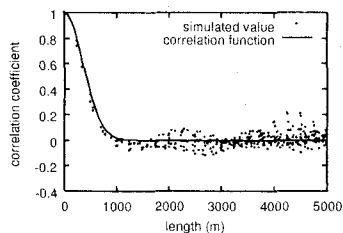


図-5 $\alpha = 500$ の場合

表-1 雨量データ生成に用いたパラメタの値

case	μ (mm/hour)	δ	α (m)
1	5.0	1.0	500.0
2	5.0	1.0	1500.0
3	5.0	0.5	500.0
4	5.0	0.5	1500.0
5	10.0	1.0	500.0
6	10.0	1.0	1500.0
7	10.0	0.5	500.0
8	10.0	0.5	1500.0

ければならないことになる。

メッシュ型の雨量データとして最初に考えられるのは、レーダー雨量データであるが、本研究では、まずはじめに、仮想的な雨量データを用いて予備的な調査を行ない、そのあとで、実際に観測されたレーダー雨量データを用いて調査・解析を行なう。

(2) 流出計算方法

本研究で用いる流出モデルの計算方法は以下のようなものである。まず、山腹斜面を矩形の小斜面（以下ではこれを斜面素片とよぶことにする）の集合体として表現する⁴⁾。つぎに、各斜面素片に表面流・中間流統合型 kinematic wave モデルを適用することによって、流域地形に即して上流側の斜面素片から下流側の斜面素片へと順に流出計算を行う⁵⁾。降水データはメッシュ状に与えられる。各メッシュと斜面素片の対応関係をあらかじめ調べておき、各斜面素片において流出計算を行なう際には、対応するメッシュの雨量値を使用する。

3. 仮想的な雨量データによる解析

(1) 概説

計算機プログラムを用いて、空間的に分布する仮想的な雨量データを作成し、それを様々なスケールで平均化して流出モデルに与えて、平均化スケール・降水場の分布特性（降水強度 μ 、変動係数 δ 、相関長さ α ）・流出計算誤差の三者の関係を調査する。

(2) 空間的に分布する雨量データの生成

対象とする領域を図-1に示す。この領域は滋賀県の大戸川流域の一部であり、その面積は約 33 km² であ

る。この領域を覆う 9000 m × 12000 m の区画内に、対数正規分布に従い、かつ空間的にも Gauss 共分散関数型の相関構造を有する、メッシュ型の仮想的な雨量データを生成した。データの生成には、立川ら⁶⁾の確率場生成プログラムを用いた。雨量データのメッシュサイズは 250 m 四方とした。

雨量データ生成の際に設定するパラメタは、(1) 降水強度の平均値 μ [mm/hour]、(2) 降水強度の変動係数 δ 、(3) 相関長さ α [m] である。ここで、相関長さとは空間相関係数の値が $1/e$ (e : 自然対数の底) となる距離のことである。図-2は、 $\mu = 5.0$, $\delta = 0.5$, $\alpha = 1500.0$ として生成した雨量データである。図-3はそのときの降水強度のヒストグラムであり、雨量データが対数正規分布に従っていることがわかる。図-4は空間相関係数である。距離が 2500 m を越えたあたりから、理論値（図中の実線）と計算値（図中の点）のずれが見られるが、これは、データのばらつき具合（分散）を保ったまま空間的な相関が比較的強いデータを生成するのが難しいことを意味する。実際、 μ , δ の値はそのまま、 α を 500.0 と小さくすると、空間相関係数は図-5のようになり、理論値と計算値の一致度は高くなる。以降の解析では、図-4のように、理論的な空間相関構造に厳密に従っていないデータもそのまま用いている。

表-1は、雨量データの生成に用いたパラメタの値である。 μ , δ , α のそれぞれに、[5.0, 1.0], [0.5, 1.0], [500.0, 1500.0] の二種類の値を与え、計 8 ケースを考えることにする。さらに、偶然性を排除するため、各ケースについて 5 個の雨量データを生成する。すなわち全部で 40 個のデータを作成する。ここで生成した雨量データのことをレベル 1 の降水場と呼ぶことにする。

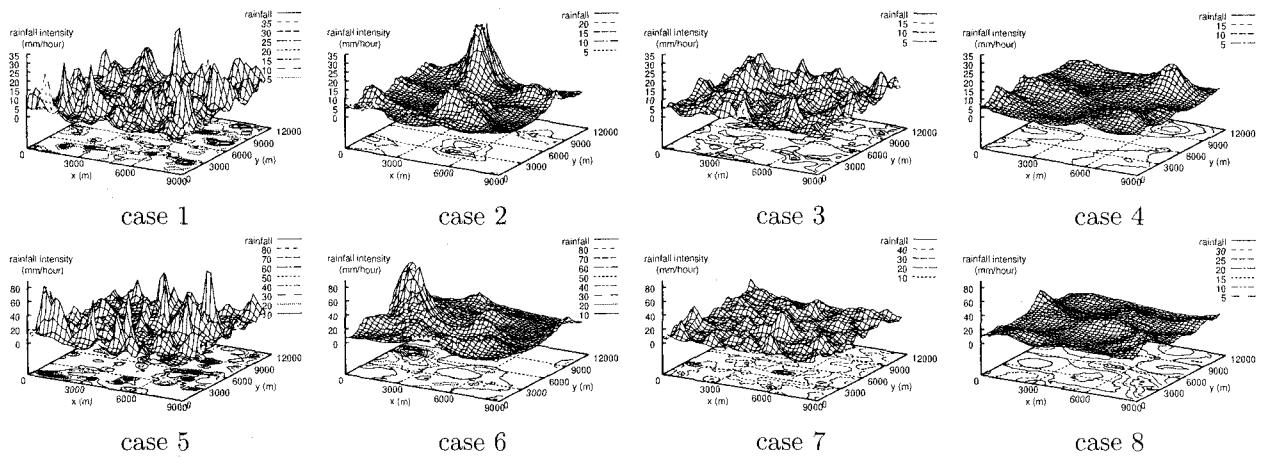


図-6 各ケースにおけるレベル 1 の降水場の一例

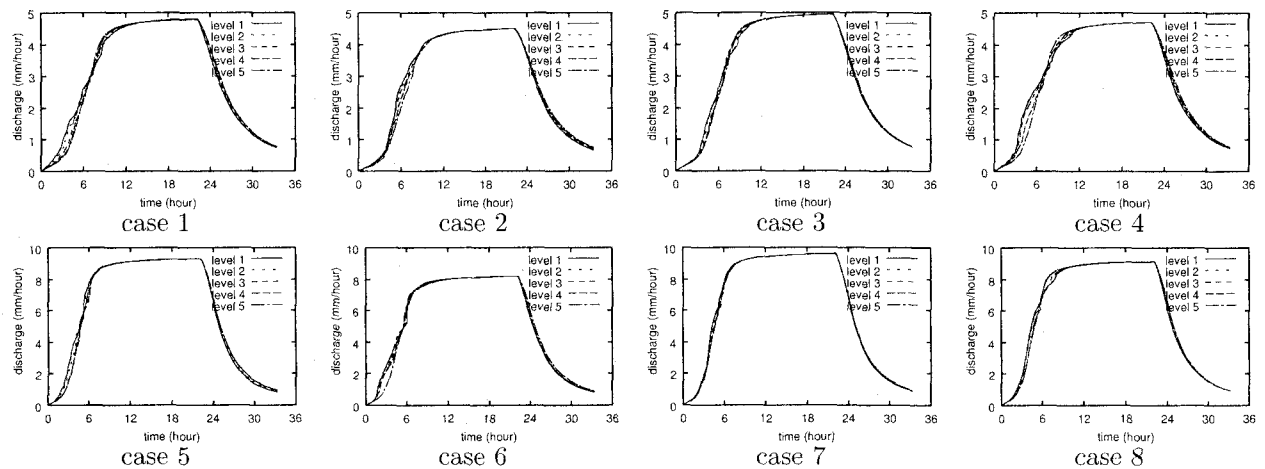


図-7 各ケースにおける流出計算結果

(3) 降水場の平均化

(2) で作成したレベル 1 の降水場に対して、

- レベル 2 … 750m × 750m
- レベル 3 … 1500m × 1500m
- レベル 4 … 3000m × 3000m
- レベル 5 … 9000m × 12000m

の 4 段階の空間的平均化を施す。さらに、各レベルの流域平均降水強度がレベル 1 での流域平均降水強度と等しくなるように定数倍する。

(4) 流出計算

(2), (3) で作成した雨量データを入力として流出計算を行なう。

表-1 で示した各ケースについて、まずレベル 1 の降水場を用いて流出計算を行なう。各ケースにつき雨量データは 5 個あるので、5 回流出計算をすることになる。この計算結果が降水の空間的平均化による誤差を評価するための基準値となる。次にレベル 2 の降水場を用いて流出計算する。ここでも各ケースにつきデータは 5 個あるので 5 回流出計算する。同様にしてレベル 3, 4, 5 についても流出計算する。降水は、80000 秒

間一定で継続するとし、その後は雨量値を 0 とした。

(5) 計算結果の誤差評価

レベル 1 の降水場を入力とした場合の流出計算結果を基準値として各レベルの計算誤差 ϵ_r を評価する。誤差評価には次式を用いる。

$$\epsilon_r = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \left\{ \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{N^i} (Q_{1,j}^i - Q_{k,j}^i)^2}{N^i}} / R_m^i \right\} \quad (1)$$

ここで、 i は各ケースの 5 個の雨量データおよび計算結果を示す添字、 j は計算時刻を示す添字、 R_m^i は i 番目の雨量データの流域平均降水強度 [mm/hour]、 N^i は i 個目の計算結果のデータ総数、 $Q_{1,j}^i$ はレベル 1 における i 番目の計算結果の時刻 j での流出高 [mm/hour]、 $Q_{k,j}^i$ はレベル k における i 番目の計算結果の時刻 j での流出高 [mm/hour] を表す。

(6) シミュレーション結果および考察

図-6 は、各ケースにおけるレベル 1 の降水場の一例を示したものの、図-7 は各ケースの流出計算結果を示したものである。

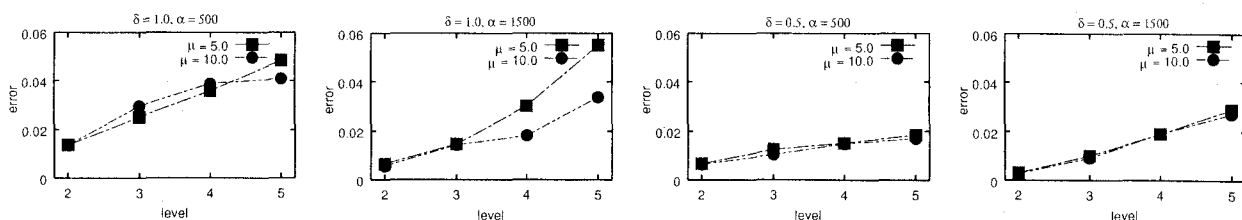


図-8 μ の違いによる ϵ_r の違い (左から $\delta = 1.0, \alpha = 500$; $\delta = 1.0, \alpha = 1500$; $\delta = 0.5, \alpha = 500$; $\delta = 0.5, \alpha = 1500$)

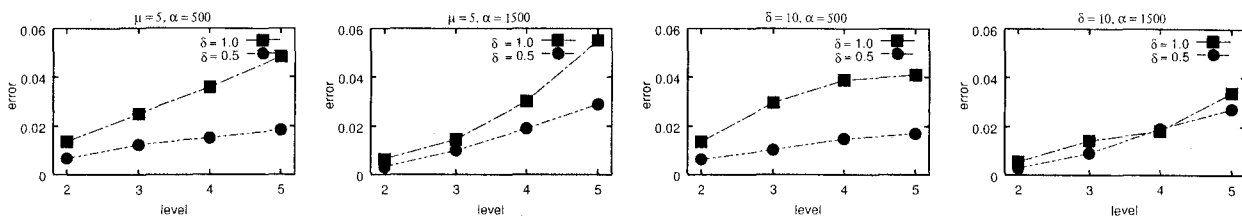


図-9 δ の違いによる ϵ_r の違い (左から $\mu = 5, \alpha = 500$; $\mu = 5, \alpha = 1500$; $\mu = 10, \alpha = 500$; $\mu = 10, \alpha = 1500$)

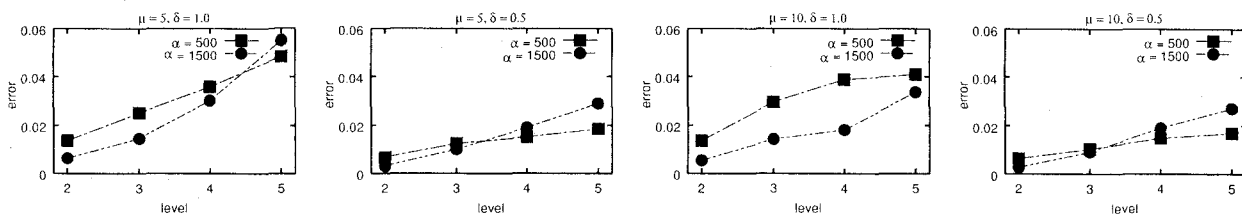


図-10 α の違いによる ϵ_r の違い (左から $\mu = 5, \delta = 1.0$; $\mu = 5, \delta = 0.5$; $\mu = 10, \delta = 1.0$; $\mu = 10, \delta = 0.5$)

a) 平均降水強度 μ が異なる場合

図-8 は、変動係数 δ 、相関長さ α が同じで平均降水強度 μ のみが異なる 2 つのケースの計算誤差を比較したものである。グラフの縦軸は計算誤差、横軸は降水の空間的平均化レベルである。

いずれの場合も、降水を平均化する領域が大きくなるにつれて計算誤差は大きくなっている。また比較する 2 ケース間で ϵ_r の大きさはほぼ同程度となっている。 ϵ_r は、計算結果の違いをそのときの降水強度で除して正規化した指標であるから、計算結果の違いそのもの（差の絶対的な大きさ）は降水強度にほぼ比例していることになる。

b) 変動係数 δ が異なる場合

図-9 は、平均降水強度 μ 、相関長さ α が同じで変動係数 δ のみが異なる 2 つのケースの計算誤差を比較したものである。平均降水強度 μ 、相関長さ α が同じであれば、変動係数 δ が大きいほど降水の空間的平均化による流出計算の誤差が大きくなっている。

c) 相関長さ α が異なる場合

図-10 は、平均降水強度 μ 、変動係数 δ が同じで相関長さ α のみが異なる 2 つのケースの計算誤差を比較したものである。平均化スケールが小さい場合（レベル 2, 3）には、相関長さが大きいケース（ $\alpha = 1500$ m）の方が誤差は小さいが、平均化スケールが 1500 m を超えると（レベル 4, 5）、誤差が増大し、 $\alpha = 500$ m の

ケースよりも誤差が大きくなる例が見られる。

$\alpha = 500$ の場合は、対象とする領域の大きさに比べて変動スケールが小さいため、平均化スケールを大きくしていく過程で平均化の影響が均等に現れる。一方、 $\alpha = 1500$ の場合は、対象領域の大きさと比較して変動スケールがある程度大きいいため、変動スケールを超えて平均化するところでその影響が強く現れていると考えられる。すなわち、この領域においては、降水の 500 m 程度の変動成分よりは 1500 m 程度の変動成分のほうが流出計算に大きな影響を与えているといえる。このことから、流出計算を行なうにあたっては、対象とする領域において支配的と考えられる降水の空間変動スケールを見出し、その程度の空間分解能で降水の分布を把握することが必要であると考えられる。

(7) まとめ

模擬的に生成した雨量データを用いて流出計算を行ない、降水の空間的平均化スケールと流出計算誤差の関係を調査した結果、以下のことが明らかとなった。

- 流出計算誤差は流域平均降水強度にほぼ比例する。
- 平均降水強度、相関長さが等しければ、変動係数が大きい場の方が平均化による誤差が大きくなる。
- 対象とする領域において支配的と考えられる降水の空間的変動スケールを見出し、その程度の空間分解能で降水の分布を把握することが必要である。

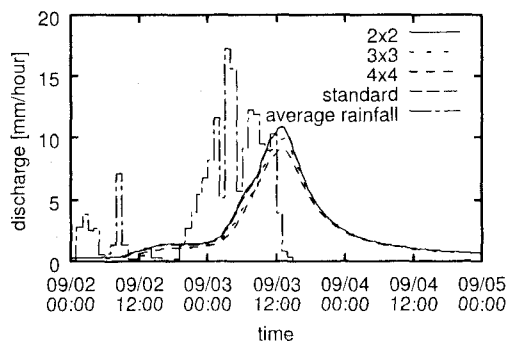


図-11 集水面積 74.5 km² 地点

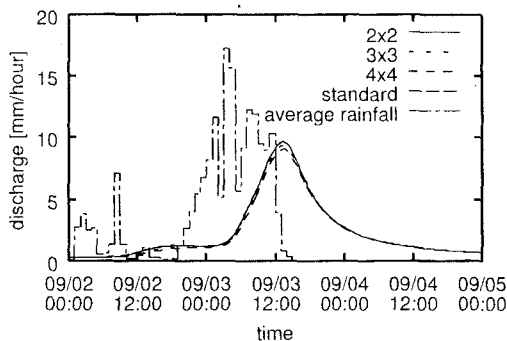


図-12 集水面積 278.4 km² 地点

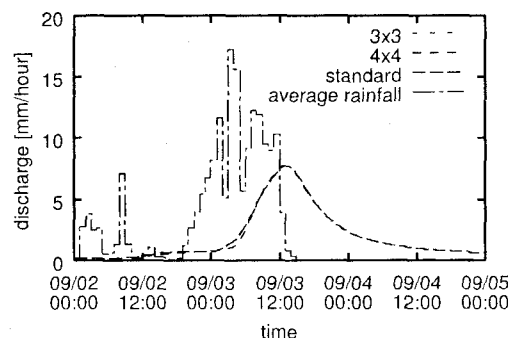


図-13 集水面積 582.0 km² 地点

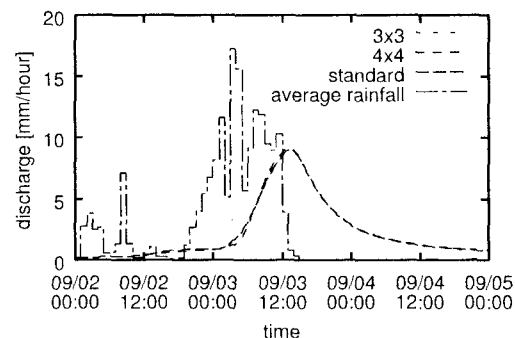


図-14 集水面積 710.2 km² 地点

4. レーダー雨量データによる解析

(1) 概説

前章では、模擬的に生成した雨量データを用いて、降水の平均化スケール・降水場の分布特性・流出計算誤差の関係を調査したが、ここでは、レーダー雨量計で実際に観測されたデータを用いて同様の解析を行なう。まず、観測されたレーダー雨量データをそのまま用いて流出計算を行ない、この結果を基準値とする。次に、レーダー雨量データがある領域ごとに平均化し、流出計算を行なう。最後に、この計算結果と基準となる計算結果を比較し、降水の平均化スケール・集水面積・計算誤差の関係について考察する。

(2) 対象流域とレーダー雨量データ

解析の対象としたのは、淀川水系桂川流域 (710.2 km²) である。この流域には、1998 年に日吉ダムが建設されているが、次に述べるように、本解析の対象時期はダム完成前の 1989 年であるため、日吉ダムのモデルは流域全体系のモデルには組み込まれていない。

本解析には、旧建設省深山レーダー雨量計で観測された、1989 年 9 月 2 日 0 時から 9 月 5 日 0 時までのデータを用いた。この期間のうち、9 月 2 日 18 時 45 分から 9 月 3 日 1 時 5 分の間のデータが欠測となっているが、この年においては上記期間の降水量が最も多かったこと、他に適切なデータを入手できなかったこと、本研究の主たる目的が、過去の出水を正確に再現することではなく、降水の空間的な分布が流出現象に与える影響を感度分析的に検討することにあることなどから、

上記期間のデータを使用することとした。欠測部分については、その前後のデータから線形補間で内挿した。

レーダーの受信電力値を、B- β 法 (B: 80, β : 1.7) で降水強度に変換したところ、地上雨量の観測値よりかなり大きな値となった。そこで、地上雨量値から算出される流域平均雨量と、レーダー雨量値から算出される流域平均雨量が等しくなるように定数を乗じてレーダー雨量値を補正している。また、レーダー雨量データの空間分解能は 3 km である。

(3) シミュレーション結果と考察

図-11 から 図-14 に計算結果 (流出高ハイドログラフ) の一例を示す。図中、“standard” と書かれた線は基準となる計算結果、すなわち、観測されたレーダーデータをそのまま用いて計算した結果を示す。“2×2”, “3×3”, “4×4” と書かれた線はそれぞれ、(A) 2×2 メッシュ (6 km × 6 km), (B) 3×3 メッシュ (9 km × 9 km), (C) 4×4 メッシュ (12 km × 12 km) ごとに平均化したレーダーデータを用いて計算した結果である。図-13 と 図-14 には (A) の計算結果は示されていない。また、図-11 から 図-14 へと順に、対象地点の集水面積が大きくなっている。ここでは 4 地点での計算結果のみ載せているが、実際には 77 地点で同様のハイドログラフが得られている。

これらの結果から、次式を用いて降水場の平均化による流出計算誤差 ϵ を求めた。

$$\epsilon = \left\{ \int_{t_s}^{t_e} |Q(t) - Q_s(t)| dt \right\} / \left\{ \int_{t_s}^{t_e} Q_s(t) dt \right\} \quad (2)$$

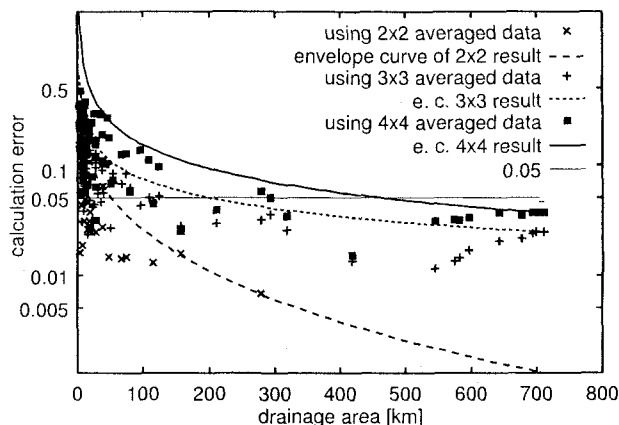


図-15 計算誤差と集水面積の関係

ここで、 t_s : シミュレーション開始時刻、 t_e : シミュレーション終了時刻、 $Q_s(t)$: 元のレーダー雨量データを用いて計算された流量値、 $Q(t)$: 平均化を施したレーダー雨量データを用いて計算された流量値、である。

図-15 は、縦軸に ϵ を、横軸に集水面積をとってプロットしたものである。集水面積が大きくなるにつれて ϵ は小さくなり、平均化を施す領域が大きくなるにつれて ϵ は大きくなっている。

図中の三本の曲線は、下から順にそれぞれ、(A)、(B)、(C) の ϵ に対する包絡線である。包絡線には次式を用いた。ただし、 x は集水面積、 a, b, c は定数である。

$$\epsilon = \exp(ax^c + b) \quad (3)$$

この式から、 ϵ が 0.05 となる集水面積を求めたところ、(A) では 52 km^2 、(B) では 202 km^2 、(C) では 465 km^2 となった。これは、たとえば (A) のケースで言うと、雨量データの空間分解能が 6 km メッシュの場合、あるいは、降水を 6 km メッシュで平均化した場合に、流出計算の精度をある程度保証できる最小の流域サイズは約 50 km^2 である、ということを意味している。別の言い方をすれば、約 50 km^2 の流域下端の流量を精度良く再現するためには、 6 km メッシュ程度の分解能で降水分布をとらえれば良い、ということになる。(B) と (C) についても同様である。

この解析結果は、一つの流域の一つの降雨イベントに基づくものであり、また、元データの空間分解能 (3 km メッシュ) で降水の空間分布が十分にとらえられていることを暗に仮定しているため、非常に限定的に考える必要があるが、こうした試みを、様々な流域、様々な降雨事象に対して行なうことで、流域サイズと降水の空間分布スケールとの関係を解明できる可能性がある。また、本研究では、流出計算結果に基づいて解析を行なったが、降水場の特性そのものを調査することで重要な情報が得られる可能性も高い。

5. おわりに

本研究では、メッシュ型の雨量データと、分布型の流出モデルを用いて、流出計算で考慮すべき降水空間分布スケールについて基礎的な調査検討を行なった。まずはじめに、仮想的な雨量データを用いて、平均化スケール・降水場の分布特性・流出計算誤差の関係に関する予備的な調査を行ない、流出計算誤差が流域平均降水強度にほぼ比例すること、降水場の変動係数が大きいと流出計算誤差が大きくなること、対象とする領域において支配的と考えられる降水の空間的変動スケールを見出し、その程度の空間分解能で降水の分布を把握する必要があることを明らかにした。つぎに、実際に観測されたレーダー雨量データを用いて同様の解析を行ない、雨量データの空間分解能が 6 km メッシュ、 9 km メッシュ、 12 km メッシュの場合に、流出計算の精度をある程度保証できる最小の流域サイズはそれぞれ、約 50 km^2 、約 200 km^2 、約 450 km^2 であることを明らかにした。現段階ではこの解析結果は限定的なものに過ぎないが、同様の解析を他の流域・降雨事象に対して行なうとともに、降水場の空間分布特性そのものの解析を行なうことによって、流域サイズと降水の空間分布スケールとの関係を明らかにしていきたいと考えている。

なお、本研究で用いたレーダー雨量データは、国土交通省近畿地方整備局淀川ダム統合管理事務所に御提供頂いた。また、レーダー雨量データの取り扱いに関しては、京都大学工学研究科中北英一先生、京都大学大学院生鈴木善晴氏に御指導頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 市川 温・小椋俊博・立川康人・椎葉充晴 (1999) : 数値地形情報と定常状態の仮定を用いた山腹斜面系流出モデルの集中化, 水工学論文集, 第 43 巻, pp. 43-48.
- 2) 市川 温・小椋俊博・立川康人・椎葉充晴・宝 馨 (2000) : 山腹斜面流出系における一般的な流量流積関係式の集中化, 水工学論文集, 第 44 巻, pp. 145-150.
- 3) 市川 温・村田康明・椎葉充晴 (2001) : 圃場容水量を考慮した流量流積関係式の集中化, 水文・水資源学会誌, 印刷中.
- 4) 椎葉充晴・市川 温・榊原哲由・立川康人 (1999) : 河川流域地形の新しい数理表現形式, 土木学会論文集, No. 621 / II-47, pp. 1-9.
- 5) 市川 温・村上将道・立川康人・椎葉充晴 : 流域地形の新たな数理表現形式に基づく流域流出系シミュレーションシステムの開発, 土木学会論文集, No. 691/II-57, pp. 43-52.
- 6) 立川康人・椎葉充晴 (2000) : 共分散行列の平方根分解をもとにした正規確率場および対数正規確率場の発生法, 土木学会論文集, No. 656/II-52, pp. 39-46.

(2001. 10. 1 受付)