

分布型水文情報に対応する流出モデルの開発

A RAINFALL-RUNOFF MODEL USING DISTRIBUTED DATA OF RADAR RAIN AND ALTITUDE

陸 旻 皎*・小池 俊雄**・早川 典生***

By Minjiao LU, Tosio KOIKE and Norio HAYAKAWA

Distributed rainfall-runoff model was developed using radar rain as input. It consists of two submodels: one for direct runoff and other for baseflow. The direct runoff submodel is a distributed model which routes direct runoff in discretized element basin through a channel network to outlet using the kinematic wave model. In this submodel, watershed is represented by meshed square element basins connected by a channel network which is derived from altitudes at their central points by using newly developed algorithm for channel network computation. The baseflow submodel is a lumped storage-drainage model. This model makes it possible to take the effect of areal and temporal distribution of storm into account. Some experimental calculations are given to show this effect. Also sample calculations with respect to Uono River basin resulted in a good correspondence between predicted and observed hydrographs.

Keywords: rainfall-runoff model, kinematic wave model, channel network, radar rain, digital map

1. はじめに

流出解析において、流出場である流域斜面特性の空間分布の重要性は従来より指摘されてきたが、近年、入力である降雨の時空間分布についても、Takahashi *et al.*¹⁾、Surkan²⁾、宝³⁾、小池⁴⁾、陸⁵⁾らが観測やシミュレーションによってその流出形態への影響を示している。一方、気象庁の気象レーダーとアメダスの合成や、建設省や河川情報センターのレーダー雨量計システムにより、降雨の時空間分布がとらえられるようになってきており、また、流出場に関しても、国土数値情報の整備に伴い、地形、地質、土壌と植生などのメッシュデータが整備されているとともに、流出系の状態変数にあたる土壌水分量についても、衛星リモートセンシングによる観測の可能性が検討されるようになった。このように、流出現象の入力と生起場に関する情報がメッシュベースで整備されつつあり、これらの情報を用いた、多様な洪水形態に対応し得るメッシュベースの流出モデルの開発が望まれる。

ところで、降雨の流域内の時空間分布を考慮し、流出素過程を総合化した最近の研究として、SHEモデル^{6),7)}と川谷ら⁸⁾のモデルがある。しかしながら、SHEモデルの実流域への適用には、流域特性のデータベースの構築と計算機能力の制約などの課題を残している。また、川谷らのモデルも実用性という意味で課題を残している。

本研究ではこれらの研究を発展させるものとして、実用的で、さまざまな水文素過程を取り入れ得る拡張性を有するモデルの開発を試みる。すなわち、レーダー雨量を入力とし、国土数値情報標高データを用いた分布型洪水流出モデルを開発し、その実用性の検討を目的とするものである。

2. 対象流域と水文資料

本研究の対象流域は Fig. 1 に示す信濃川支川魚野川の六日町上流域で、集水面積が 355 km² である。夏期には雷雨がよく発生し、しばしば短時間・小領域の集中豪雨が発生する。本研究では、1988年8月下旬に毎日のように同流域で発生した雷雨を起源とする3洪水を対象とした。用いた雨量データは昭和63年にほぼ全国に整備されたレーダーアメダス合成値の時間雨量で、メッシュサイズは緯度方向 3.00' × 経度方向 3.75' (約 6 km メッ

* 学生会員 工修 長岡技術科学大学大学院
(〒940-21 長岡市上富岡町 1603-1)

** 正会員 工博 長岡技術科学大学助教授 建設系 (同上)

*** 正会員 Ph. D. 長岡技術科学大学教授 建設系 (同上)

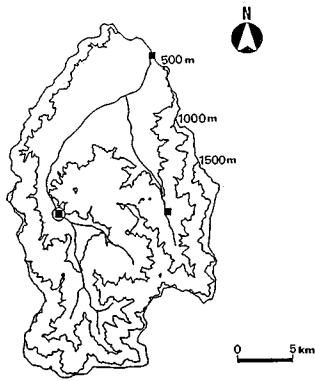


Fig. 1 Upper Uono river basin.

シュ)である。流量データは公式な報告がないので、過去の水位と流量資料から $H-Q$ 関係を類推し、水位データから流量を算出した。

3. 分布型流出モデル

Fig. 2は本研究で開発したモデルのフローチャートである。本モデルでは、まず、流域にメッシュを掛け、そのメッシュとレーダー・メッシュとの対応付けを行い、レーダーアメダス合成値から、メッシュ点の雨量を得る。そして、雨量に流出率 α_r を乗じ、流出量を算出し、さらに、直接流出配分率 α_s によって、直接流出成分と基底流出成分を分離する。後者は集中型である貯留関数法によって流出高に変換され、前者は擬河道網を介して、流域の出口まで Kinematic Wave 法で追跡計算される。両者の和がハイドログラフとなる。ここで、擬河道網はメッシュ点標高からなるデジタルマップと、位置と流れ

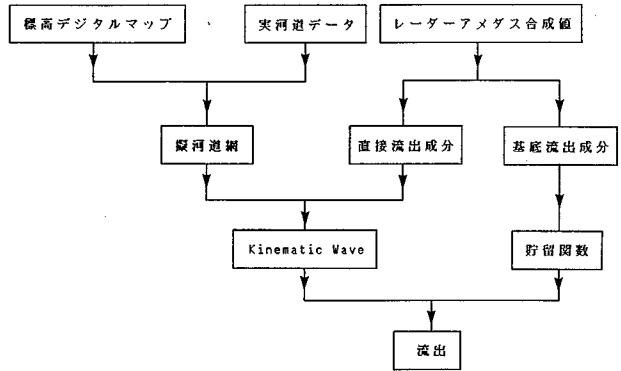


Fig. 2 Distributed rainfall-runoff model.

方向からなる主要実河道網データとを用いて算出したものである。以下、擬河道網の算出手法と洪水追跡の計算方法について述べる。

(1) 擬河道網の算出

擬河道網は流出場の地形情報を表わす重要な役割を演じており、その算出方法は、宝⁹⁾、嶋田¹⁰⁾、陸^{5),11)}らにより検討されてきた。本論文では、著者らの提案した、任意のメッシュ・サイズの標高デジタルマップとそれに対応する主要な実河道網データから擬河道網を自動的に算出する方法について説明する。Fig. 3はそのフローチャートである。

a) 入力データの整備：本方法では、デジタルマップの整備には、国土数値情報¹²⁾を用いる方法と地形図から標高を読み取る方法を採用した。ここで、国土数値情報については、その1/4メッシュ(約250mメッシュ、

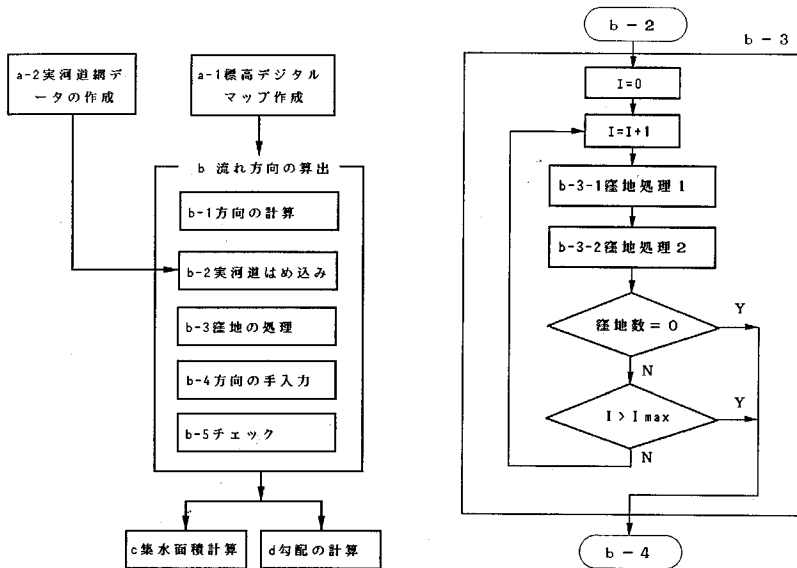


Fig. 3 Flowchart of channel network computation (left : main process, right : sub-process b-3).

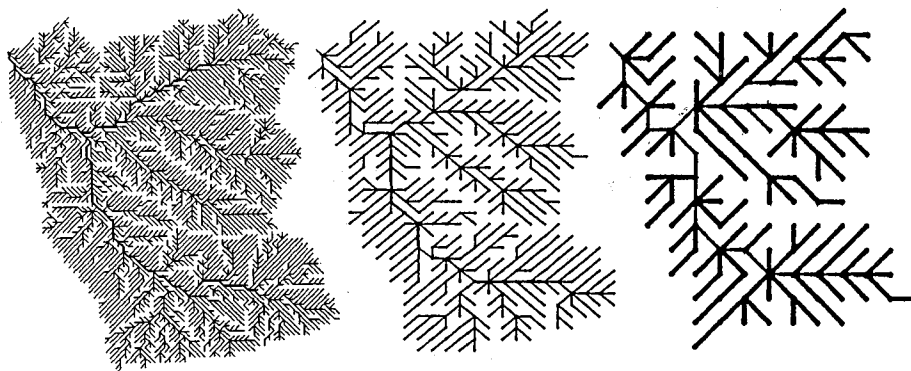


Fig. 4 Computed channel network of upper Uono river basin with different mesh size, l (left : $l=100$ m, center : $l=250$ m, right : $l=500$ m).

以下 250 m とする) 標高ファイル KS-100 から切り出した対象流域を含む領域の標高データを並べ変えることによってデジタルマップを作成する。一方、実河道網データは 1/200 000 地形図からデジタイザーで読み取った河道を最寄りのメッシュ点を通るように変換することによって得られる。流域範囲を特定するための流域界データも実河道網データと同じように得られる。

b) メッシュ点における最急勾配方向の算出：本方法では、各メッシュ点において、勾配の一番急な方向に水が全部流れると考え、 3×3 メッシュの中心点の水流の方向は周囲 8 点との間に勾配が一番大きい点を指すものとした。ただし、8 方向の勾配がすべて負である点は窪地であり、その方向も自分自身を指すようになる。このような窪地が多数存在すると、擬河道網の作成が困難になる。そこで、以下の手順で計算を行うことにした。

b-1. 最急勾配の計算：各点の最急勾配方向を計算する。

b-2. 実河道データのはめ込み：実河道である点に対し、実河道網データの方向を取り入れる。

b-3. 窪地の処理：本方法では、複雑な処理を避けるために、 3×3 メッシュを基本として、すべての処理を行うことにした。Fig. 3 の右の図に示すように一次処理と二次処理を繰り返し施すことによって、自動的に処理する。ここで、一次処理は窪地に対し、その点のまわりの点の平均標高をその標高とする処理で、二次処理は窪地に対し、いくつかの経路が考えられる場合に、実河道に最短距離でたどりつくような方向を与える処理である。

b-4. キーボードによる入力：b-3 で処理しきれない点の方向を手入力で与えるもので、使われることはほとんどない。

b-5. 最終チェック：以上の計算で、すべての点の流下方向が確定できたが、合理的な擬河道網を作成するに

は、次のようなチェックを行う必要がある。

I. 交差しているかどうかをチェックする。

II. 向い合わせになる点の存在をチェックする。

III. すべての点が流域の出口にたどりつくかどうかをチェックする。

c) 各点の集水面積の計算：ある点の集水面積はそれに流れ込むメッシュ数によって決められる。本計算では、すべての点から追跡を行い、通過するたびに、通過点のカウンターに 1 を加えることによって、各点の集水面積を計算することができる。得られた方向と集水面積データを用いて、ある集水面積以上のメッシュ点からなる擬河道網を作成し、実河道網と比較することができる。

d) 勾配の計算：メッシュ点を結ぶ仮想流路の勾配の計算は方向データと生の標高データを用いて計算することができる。勾配が負である点に対して、平均勾配が正になるまで下流へ追跡し、この平均勾配をその点の勾配とする。また、出口付近では、平均勾配が正にならない点がある。これらの点に対しては、標高読み取り単位の関係で読めない勾配の最大値を与える。

本研究では、パソコン上で、擬河道網を作成するプログラムを開発した。Fig. 4 は対象流域上流部の 100 m, 250 m, 500 m メッシュの擬河道網である。

(2) 追跡計算

各メッシュにおける直接流出成分は擬河道網を介して、以下の仮定のもとで Kinematic Wave 法で流域出口まで追跡計算される。

a) 流れ方向は擬河道網で定められた最急勾配方向であり、メッシュ点間は広幅矩形断面の仮想流路で結ばれている。

b) 流路への入力メッシュ点のみで考え、そのメッシュでの直接流出成分と上流からの流入からなる。

c) 仮想流路での伝播は Kinematic Wave である。

Kinematic Wave 法では、抵抗則に Manning 則を用

いることによって、仮想流路での伝播に関し次式が成り立つ。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$V = h^{2/3} I^{1/2} / N \dots\dots\dots (2)$$

$$Q = BhV \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 B, h, A はそれぞれ流路幅、水深と通水面積で、 N, I はそれぞれ等価粗度、流路勾配で、 V, Q は流速、流量である。なお、等価粗度 N と流路幅 B は流量に強く依存し、言い換えれば集水面積に依存する（たとえば、文献13）ともいわれているが、現時点では、その的確な推定法が知られていないため、本研究ではそれらを流域内一定とした。この方程式により、

$$\frac{dQ}{dt} = 0 \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{5 I^{0.3} Q^{0.4}}{3 N^{0.6} B^{0.4}} \dots\dots\dots (5)$$

が得られる。メッシュ点間の伝達時間は上流端の流量を用いて計算でき、したがって下流端への到達時間も簡単に求められる。各流路の下流端で時間配分を行って、下流流路への流入量時系列となる。この場合、後続流量が大きければ次のメッシュ点にたどりつく前に先行する流量を追い越すことがある。そこで、特性曲線が直線であることを利用し、特性曲線の交点を求め、その時点で流量を合併させて、追跡を続行した。ここで、複数回の追越し処理も可能とした。

計算上、メッシュ点が多いため、すべてのメッシュ点において、流量時系列を記憶させることはメモリの制限上困難であり、大流域での計算や長時間の計算は不可能に近い。本研究では、実行順番を決め、一時記憶領域（以下バッファという）を介して、計算を行うことにした。メッシュ点の実行順番と入出力バッファ番号およびバッ

ファサイズは得られた擬河道網を用いて、計算機で算出する。

一方、基底流出成分に対し、分数減水式¹⁴⁾にあたる次の貯留関数を用いた。

$$\frac{dS_g}{dt} = \alpha_r * (1 - \alpha_s) * P - Q_g \dots\dots\dots (6)$$

$$S_g = Q_g^{0.5} / A_u \dots\dots\dots (7)$$

ただし、 S_g, Q_g, P はそれぞれ貯留量、基底流量、流域平均雨量で、 A_u は分数減水定数であり、ハイドログラフの減水部を用いて、 $A_u = 0.0018$ と定めた。

4. モデルの適用性に関する検討

(1) メッシュサイズの検討

本研究では、1) 250 m メッシュ、2) 100 m メッシュ、3) 100 m メッシュを 45° 回転して得られた 141 m メッシュ、4) 500 m メッシュの各メッシュサイズの擬河道網を算出し、メッシュサイズによる擬河道網の幾何学的な相違と流出モデルの応答特性の相違について以下に検討した。

a) 幾何学的な相違

まず、100 m、141 m、500 m メッシュの擬河道網を用いて、異なるメッシュサイズの擬河道網において、同一点の最下流端までの流路の水平長さについての比較を行った。なお、250 m メッシュについては、座標系の違いにより、同一点がないので、このような比較はできない。Fig. 5 は 100 m メッシュと 141 m メッシュでの結果と、100 m メッシュと 500 m メッシュとでの結果であり、両方とも、100 m メッシュの方がやや大きいのが、かなりよい一致を示している。また、45° 線と大きく離れた点はずかであり、いずれも山越えによるもので、流路の最上流端付近に位置しており、流出に大きな影響はないと考えられる。

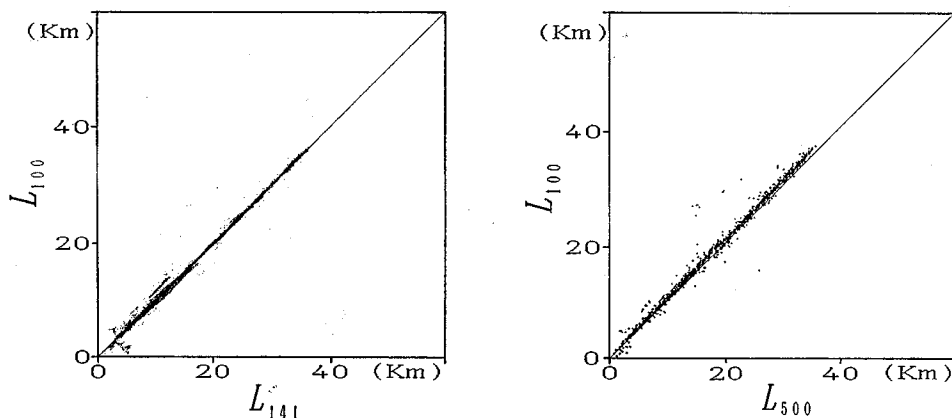


Fig. 5 Correlation of channel lengths to outlet for networks with different mesh size (left : 100 m vs 141 m, right : 100 m vs 500 m).

次に、擬河道網の形状の違いを定量的に検討するために、主要実河道に対し、1)~4)の擬河道網を用いて、主要河道上における最下流端からの距離に対する集水面積分布の違いをメッシュサイズごとに調べた。Fig. 6は魚野川本川と主要支川登川の最下流端からの距離と集水面積の分布で、メッシュサイズの間には顕著な差がなく、よく一致している。

以上により、魚野川のような地形条件に対し、100 m ~ 500 m の範囲では、流域の集水面積分布特性と流路水平長さに対するメッシュサイズの影響が小さいことと、南北・東西の直交座標系を用いても、斜面向きによる集水面積分布特性と流路水平長さへの影響が小さいことが明らかになった。

b) 応答特性の相違

メッシュサイズによる流出モデルの応答特性の相違を検討するために、250 m, 100 m, 500 m メッシュに対応する分布型モデルを構成し、そのパラメーターを $B=50\text{ m}$, $N=0.20$ とし、 1.0 mm/min と 0.2 mm/min の直接流出量を1時間与えた場合のハイドログラフを $\Delta t=10\text{ min}$ で算出した。Fig. 7はその結果で、メッシュサイズが100 m, 250 m の場合には計算結果に大きな差がないが、500 m の場合にはある程度違いが生じている。

一般にメッシュサイズが大きくなれば、モデルのパラメーターを変える必要性が生じる。さらに、メッシュサイズが流域面積に対して相対的に大きくなるにつれ、流域の流出特性の表現が困難になることも予想される。その意味において、魚野川流域においては、250 m までのメッシュサイズに対し、500 m メッシュではモデルの応答特性が著しく変化し、パラメーターを大きく変える必要があることを示唆している。以上の検討により、250 m メッシュ対応のモデルを中心に、流域の流出特性の検討を進めていくことにする。

(2) 雨域の分布と移動に関する検討

250 m と 100 m メッシュ対応のモデルを用いて、対象流域に対して、上, 中, 下流部の3分の1の面積に降雨強度 1 mm/min の雨を1時間降らし、六日町の流量を求めた。また、降雨強度が同じく 1 mm/min で、南北方向に幅 30 km の雨域を北から南へまたは南から北へ 30 km/h の速度で移動させ、その流量をも求めた。Fig. 8はその結果である。この図から、宝³⁾、小池⁴⁾らと同じような結論が得られる。つまり、降雨が上, 中, 下流部に集中している場合には、ハイドログラフに時間遅れは認められるが、形状の大きな違いは認められず、ピーク流量にも大きな違いはないが、雨域が流路方向に

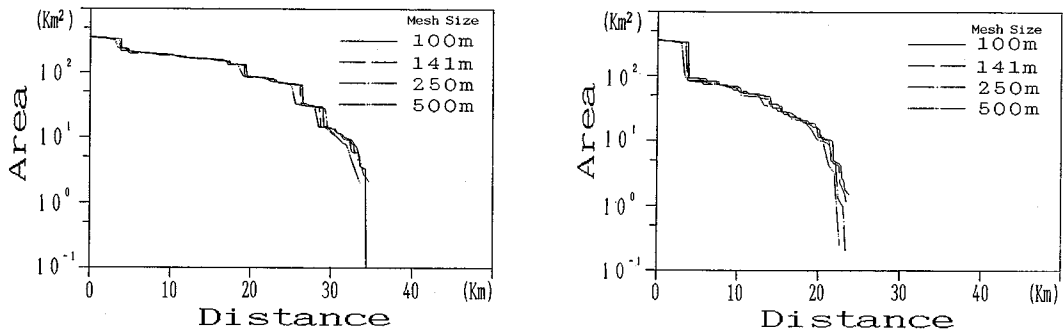


Fig. 6 Relation of channel length from outlet to drainage area (left : for Uono river, right : for Noboru river).

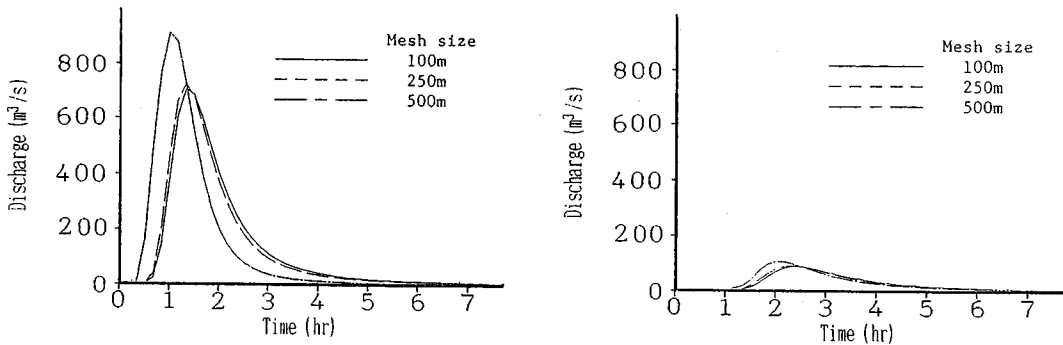


Fig. 7 Response characteristics of direct runoff submodel to different rainfall intensity, i (left : $i=1.0\text{ mm/min}$, right : $i=0.2\text{ mm/min}$).

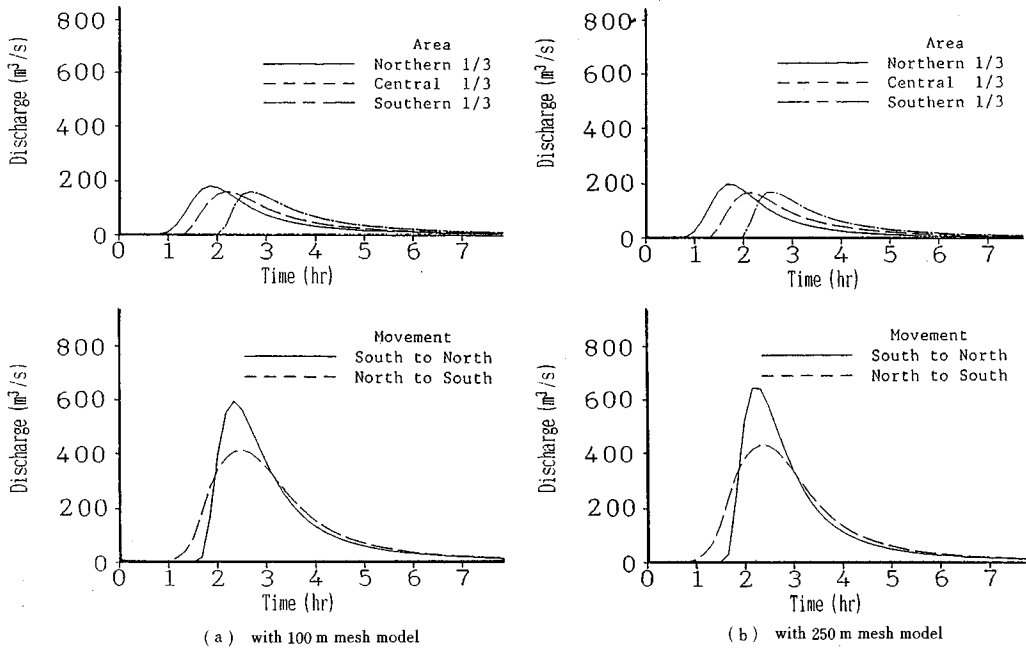


Fig. 8 Effect of areal and temporal distribution of storm (upper figures : areal distribution of storm, lower figures : movement of storm area).

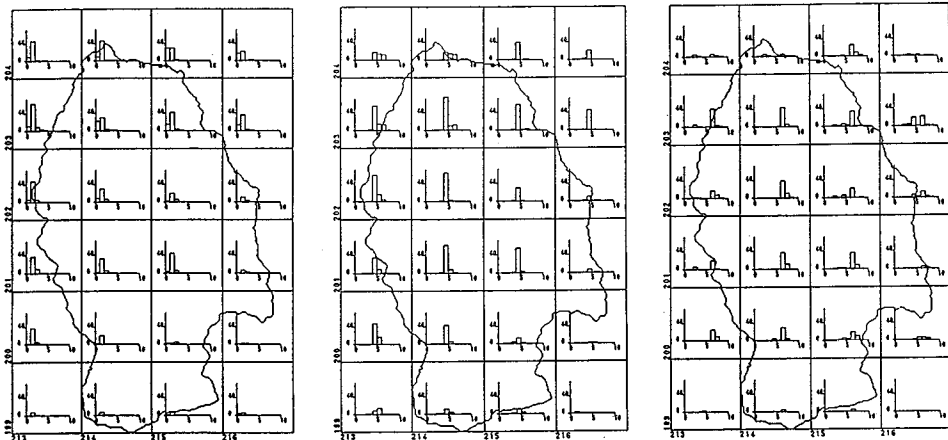


Fig. 9 Areal and temporal distribution of radar rain.

移動する場合には、降雨強度と雨域移動速度に応じてハイドログラフに大きな違いが生じる。本計算では、雨域が南から北へ（上流から下流へ）移動する場合には、北から南へ（下流から上流へ）移動する場合に比べて、ピーク流量が1.4倍ぐらい大きくなった。また、降雨強度分布をもつ雨域の場合については、小池⁴⁾の研究がある。

(3) 実降雨への適用

本研究では、さらに、250 m、100 m メッシュ対応のモデルを実降雨に適用した。解析の対象は2. で述べた3つの洪水である。雨の時空間分布は Fig. 9 に示す。この図において、中にハイトグラフの書いてある升目は

レーダーメッシュで、そのメッシュコードは下と左の数値で表わされ、曲線は流域境界である。Fig. 9 に示されるように、対象とした降雨はいずれも流域の中、下流部に集中している。本研究では、水収支から流出率 α_r と直接流出成分の配分率 α_s を求め、 $\Delta t = 10$ 分で計算を行った。ただし、10分間雨量はレーダーアメダスの時間雨量値を6で割って与えた。流路幅(B)、等価粗度(N)を同定することにより、流域の部分的な降雨入力に対応する流出量を再現し、Fig. 10 に示すハイドログラフが得られた。なお、図の上段は雨量、中段は100 m メッシュ対応モデルの結果、下段は250 m メッシュ対応モデル

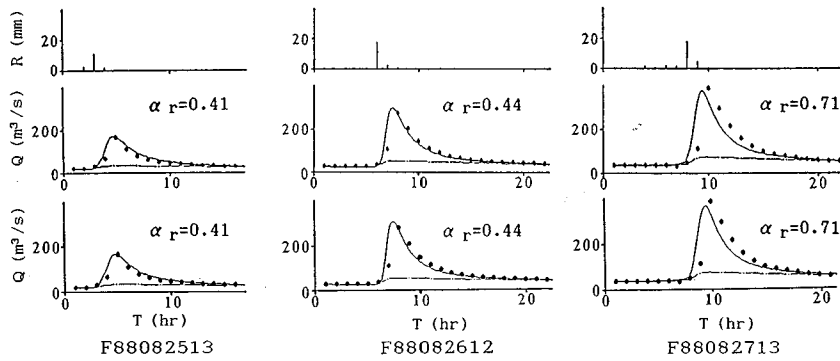


Fig. 10 Observed and predicted Hydrographs (top row : rainfall, central row : 100 m mesh model, bottom row : 250 m mesh model, dot : observed, solid line : predicted, chained line : base flow).

の結果である。図中の洪水番号は計算開始の年月日時を表わし、その時間の0分から計算を行った。また、各洪水の流出計算に用いた流出率 α_r を図中に付記してある。その他に対象とした3洪水に共通して、 $\alpha_s=0.35$, $B=30$ m, $N=0.15$ とした。両モデルともハイドログラフをよく再現したといえる。洪水ピークが多少ずれてはいるが、いずれも1時間以内であり、雨量データが時間単位であることを考慮すれば、1時間内の雨の降り方によるものと考えられる。なお、3番目の洪水F88082713において、流出率が最大となることは前の2洪水による流出寄与域の拡大によるものと考えられる。

5. 主要な結論

(1) 降雨の空間分布を考慮した分布型流出モデルが構成された。

(2) 国土数値情報から擬河道網を算出する方法が確立され、擬河道網の算出と分布型流出モデルの構成が可能となった。

(3) 魚野川のような流域に対し、100 m, 141 m, 250 m, 500 m メッシュで流域の集水面積分布特性を反映し得ることと、メッシュサイズによる流路の水平長さの違いは小さいことが示された。また、斜面向きが擬河道網算出に大きな影響を与えないことが明らかになった。

(4) モデルを用いて行ったシミュレーションにより、魚野川において雨域の偏りや移動が流出へ与える影響が明らかにされた。

(5) 100 m メッシュでも、国土数値情報 250 m メッシュでも、モデルのパラメーターを同定することにより、3洪水を同程度に再現できることが示された。

謝 辞：本研究を進めるにあたり、貴重なデータを提供して頂いた気象庁と建設省信濃川工事事務所の関係

各位に心より感謝の意を表わす。この研究の一部は文部省科学研究費補助金重点領域研究(1)「気象解析とレーダー雨量計を補完的に組み合わせた豪雨災害の予測手法に関する研究」(代表：山田 正)の補助のもとに行われている。ここに記して謝意を表わす。

参考文献

- 1) Takahasi, Y., Musiake, K. and Hasimoto, T. : Effects of movement of precipitation area upon runoff phenomena, System Approach to Hydrology, Proc. the First Bilateral U.S.-Japan Seminar in Hydrology, pp. 279-293, 1971.
- 2) Surkan, A. J. : Simulation of storm velocity effects on flow from distributed channel networks, Water Resources Research, Vol. 10, No. 6, pp. 1149-1160, 1974.
- 3) 宝 馨：降雨特性が洪水流出に及ぼす影響に関する数値実験的検討，昭和61年度文部省科学研究費補助金(自然災害(1))研究成果報告書—豪雨域の強度，規模・移動方向洪水流出に及ぼす効果に関する研究(代表：小尻利治)，pp. 151-164, 1987.
- 4) 小池俊雄：洪水流出に及ぼす降雨分布の影響，昭和61年度文部省科学研究費補助金(自然災害)研究成果報告書—1986年台風10号による関東・東北地方の災害に関する調査(代表：高橋 裕)，pp. 136-142, 1987.
- 5) 陸 旻皎・小池俊雄・早川典生：レーダー雨量情報に対応する分布型流出モデルの検討，土木学会第33回水理講演会論文集，pp. 91-96, 1989.
- 6) Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E. and Rasmussen, J. : An introduction to the European Hydrological System—Systeme Hydrologique European, 'SHE', 1 : history and philosophy of a physically-based distributed modelling system, J. Hydrol., 87, pp. 45-59, 1986.
- 7) Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E. and Rasmussen, J. : An introduction to the European Hydrological System—Systeme Hydrologique European, 'SHE', 2 : structure of a physically-based distributed modelling system, J. Hydrol., 87, pp. 61-

- 77, 1986.
- 8) 川谷 健・中野啓真・菊田勝之：地表流出解析モデルへの地形要素の導入に関する研究，土木学会第 32 回水理講演会論文集，pp. 43~48, 1988.
 - 9) 宝 馨・高榊琢馬・溝淵伸一：水文地形解析の自動化の試み，土木学会第 32 回水理講演会論文集，pp. 25~30, 1988.
 - 10) 嶋田啓一・山田 正・藤田陸博・洪 廷芳：流域の地形特性が降雨流出に及ぼす影響について，土木学会第 32 回水理講演会論文集，pp. 43~48, 1988.
 - 11) 陸 旻皎・小池俊雄・早川典生：デジタルマップとレーダー雨量を用いた流出解析（1），土木学会第 44 回年次学術講演会，1989.
 - 12) 建設省国土地理院：国土数値情報利用の手引.
 - 13) Leopold, L. B. and Langbein, W. B. : The concept of entropy in landscape evolution, U.S. Geol. Surv., Prof. Pap. 500-A.
 - 14) 高橋 裕・安藤義久・伊藤 孝・伊藤和央：山地河川の低水流出特性に関する研究，土木学会論文集，No. 337, pp. 75~81, 1983.

(1989. 5. 15・受付)
