大分工業高等専門学校紀要　第 50 号　（平成 25 年 11 月）

分布型洪水流出モデルのための土地利用を用いた最大貯水能力及び最終浸透能の推定法の性能評価

平岡　透[1]・佐藤　龍治[2]・久保田　健太[2]・幸　弘美[3]・陸　旻皎[4]

[1]情報工学科，[2]制御情報工学科，[3]東京建設コンサルタント，[4]長岡技術科学大学

本稿で用いる分布型洪水流出モデルはパラメータの数が多く，その設定には熟練した技術者と多くの時間が必要である．もし予めある流域で推定したパラメータを別流域で再利用できれば，作業の効率化に寄与できるという利点が生じるが，流出計算の精度が十分なものである必要がある．そこで，本稿では，各種パラメータの中で最大貯水能力と最終浸透能に注目し，羽越荒川流域で得られた土地利用の比率による重回帰式を梯川流域の最大貯水能力と最終浸透能の設定に適用して，流出計算の精度を検証する．

キーワード：分布型洪水流出モデル，最大貯水能力，最終浸透能，土地利用

１．はじめに

現在，全国に26基のCバンドレーダ雨量計が配置され，降雨の面的な分布の情報が得られるようになったことから，分布型洪水流出モデルを用いた洪水予測が直轄河川を中心に試行されている．分布型洪水モデルは，現在多くの河川で活用されている貯留関数法などの集中型洪水流出モデルと比較すると，流域の降雨や地形，土地利用，土壌特性などの面的な分布を考慮でき，落水線による擬河道網に沿った雨水の流れを追跡できるという利点がある．しかし，分布型洪水モデルでは多くのパラメータがあるため，これらのパラメータの設定には熟練した技術者と多くの時間が必要になる．

筆者らはこれまでに，分布型洪水モデルの各種パラメータの中で最大貯水能力と最終浸透能に注目し，メッシュ毎の土地利用の比率を用いた重回帰式から最大貯水能力と最終浸透能を設定する方法を提案し，羽越荒川流域で実験を行い，その有効性を確認した[1)]．別の流域でもこの重回帰式によって最大貯水能力と最終浸透能を設定し，良好な流出計算が行えれば，最大貯水能力と最終浸透能の設定の作業を効率化することができる．

そこで，本稿では，羽越荒川流域で求められた重回帰式を梯川流域に適用することで最大貯水能力と最終浸透能を設定して，流出計算の精度を検証し，パラメータ設定の効率化の可能性について報告する．参考のため，羽越荒川流域と梯川流域の位置を**図-1**[2)]に示す．また，羽越荒川流域と梯川流域の特性として，流域面積と幹線流路延長，土地利用率，表層地質（岩石区分）を**表-1**に示す．貯水能力は水文学的にアクティブな土層のもので，その値は100mm程度であり，土層の厚さに換算すれば数十cmであることから，土地利用や表層地質，気象条件が最大貯水能力と最終浸透能の主な要因であると考えられる．本稿では最大貯水能力と最終浸透能の設定で土地利用の情報のみを用いているが，表層地質の情報も用いた方が良いと考えられる．羽越荒川流域と梯川流域では表層地質（岩石区分）が異なるが，本稿では土地利用の情報のみを用いても良好な流出計算が行えることを示す．

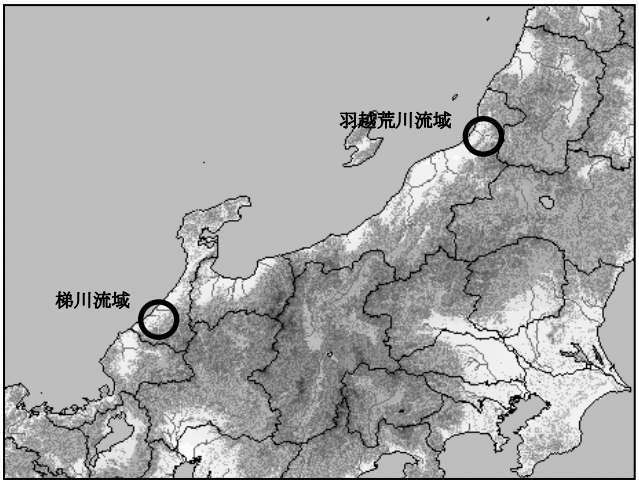

図-1　羽越荒川流域と梯川流域の位置図

表-1　羽越荒川流域と梯川流域の特性

		羽越荒川流域	梯川流域
流域面積 [km^2]		1,150	271
幹線流路延長 [km]		73	42
土地利用率 [%]	水田	6.4	5.1
	森林	85.0	89.6
	建物用地	1.2	1.7
	その他	7.4	3.6
表層地質（岩石区分）	下流域	未固結堆積物	火山性岩石
	中流域	半固結 - 固結堆積物・深成岩類	
	上流域	半固結－固結堆積物・火山性岩石・深成岩類	

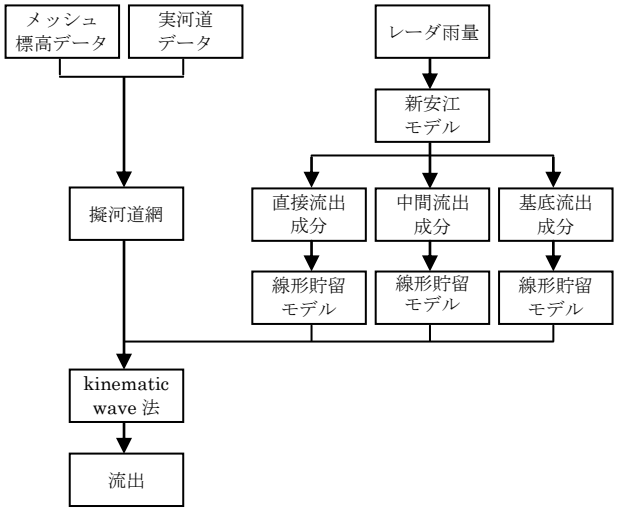

図-2　分布型洪水予測モデルのフローチャート

２．方法

本章では，本稿で用いる分布型洪水流出モデル（以下，本分布型洪水流出モデル）[3)4)5)]と重回帰式を用いた最大貯水能力と最終浸透能の設定方法[1)]を概説する．また，羽越荒川流域で求められた最大貯水能力と最終浸透能の重回帰式の偏回帰係数の値も示しておく．

(1) 分布型洪水流出モデル

本分布型洪水流出モデルのフローチャートを**図-2**に示す．本分布型洪水流出モデルは，まず流域をメッシュに分割し，そのメッシュとレーダ雨量のメッシュを対応付け，各メッシュの雨量を得る．その後，雨量を新安江モデル[3)]によって表面流出, 中間流出, 基底流出の3成分に分離し，これらの流出を簡易な線形貯留モデルで表現し, 擬河道網に沿ってKinematic Wave法[6)]よって雨水の流れを追跡する．

線形貯留モデルでは，式(1)と式(2)に示す線形貯水池理論から導出される．

$$\frac{dS_s}{dt} = r_s(t) - q_s(t) \tag{1}$$

$$q_s = \alpha_s S_s \tag{2}$$

ここで，t は時間，r_s は表面流出率，S_s は表面流出貯水量，q_s は表面流出による流量，α_s は表面流出係数である．この微分方程式の解は，

$$S_s = \exp(-\alpha_s t)\left\{\int r_s(t)\exp(\alpha_s t)dt + C\right\} \tag{3}$$

となる．式(2)と式(3)より，

$$q_s(t) = \alpha_s \exp(-\alpha_s t)\left\{\int r_s(t)\exp(\alpha_s t)dt + C\right\} \tag{4}$$

が得られる．$t-\Delta t$ から t までの表面流出率 $r_s(t)$ が一定であり, 新安江モデルによって得られた表面流出量を R_s とすると，

$$q_s(t) = R_s + C\alpha_s \exp(-\alpha_s t) \tag{5}$$

が得られえる．時間 $t-\Delta t$ のときに表面流出による流量が $q_s(t-\Delta t)$ であるためには，

$$C = \frac{(q_s(t-\Delta t) - R_s)\exp(\alpha_s(t-\Delta t))}{\alpha_s} \tag{6}$$

となる．式(6)を式(5)に代入すると，

$$q_s(t) = R_s + (q_s(t-\Delta t) - R_s)\exp(-\alpha_s \Delta t) \tag{7}$$

が得られる．$\exp(-\alpha_s \Delta t)$ を C_s（表面流出減衰係数）とすると，式(7)が

$$q_s(t) = q_s(t-\Delta t)C_s + R_s(1-C_s) \tag{8}$$

となる．式(8)を用いて表面流出による流量を計算する．同様に，中間流出による流量 q_n，基底流出する流量 q_g を求めることができる．

$$q_n(t) = q_n(t-\Delta t)C_n + R_n(1-C_n) \tag{9}$$

$$q_g(t) = q_g(t-\Delta t)C_g + R_g(1-C_g) \tag{10}$$

ここで，R_n と R_g はそれぞれ新安江モデルによって得られた中間流出量と基底流出量であり，C_m と C_g はそれぞれ中間流出減衰係数と基底流出減衰係数である．

Kinematic Wave法は，式(11)と式(12)で求める．式(11)は連続式に相当し，式(12)は斜面上の流れに対する抵抗を表わす式である．

$$r = \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} \tag{11}$$

$$q = \alpha h^m \tag{12}$$

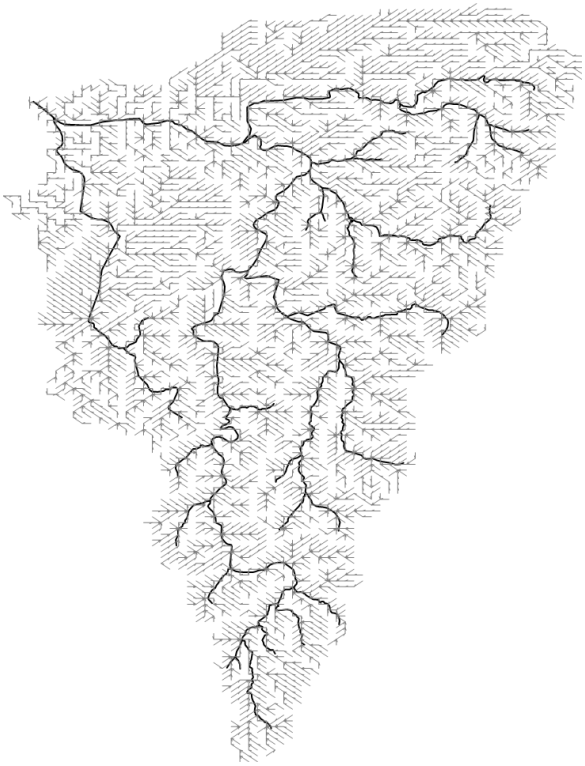

図-3　梯川流域の擬河道と実河道

ここで，hは水深，tは時間，qは単位幅当りの流量，xは空間座標，rは降雨強度である．式(12)がマニングの平均流速の式に相当するとした場合，斜面勾配をi，粗度係数をnとすると，αは式(13)のように表される．また，mは5/3となる．

$$\alpha = \frac{\sqrt{i}}{n} \tag{13}$$

流出高は，表面流出成分，中間流出成分，基底流出成分の和で求める．擬河道網は，メッシュ標高データと実河道データを用いて作成する[3]．梯川流域の擬河道網と実河道網を**図-3**に示す．**図-3**の灰色の線が擬河道網で，黒色の線が実河道である．

(2) 最大貯水能力と最終浸透能の設定方法

まず，流量観測データのある小流域に対して，試行錯誤によって最適な最大貯水能力と最終浸透能をそれぞれ設定する．このとき，実績流量にできるだけ一致するように流出の再現計算の結果を調整する．参考のため，羽越荒川流域のメッシュと小流域を**図-4**に示す．**図-4**は，17,540個のメッシュと5つの小流域を表現している．最大貯水能力は，水文学的にアクティブな土層に貯めることのできる最大の水の量であり，ここでは貯水量が最大貯水能力を超えるまで流出は起こらないものとしている．最終浸透能は，土壌の貯水能力が満たされた後の水の浸透する速度である．

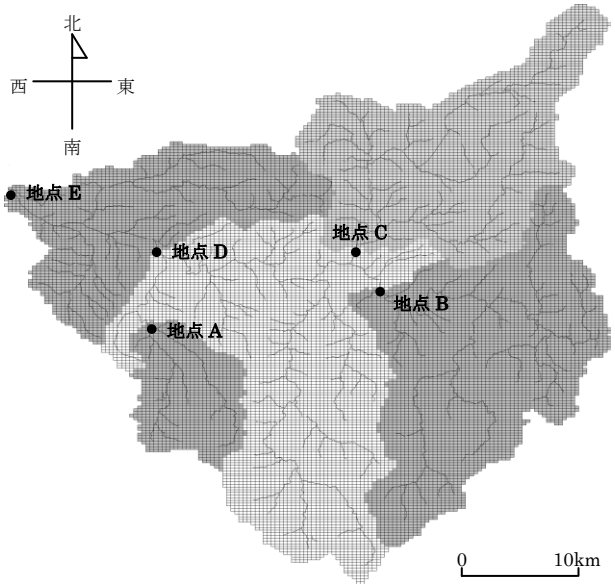

図-4　羽越荒川流域のメッシュと小流域

次に，各メッシュの土地利用の比率を用いた重回帰式によって，最大貯水能力と最終浸透能を設定するための偏回帰係数を求める．流域にM個のメッシュがあり，各メッシュの土地利用の項目iの比率を$L_{i,m}$ $(m=1,2,\cdots,M;\ \sum_{i=1}^{I} L_{i,m}=1(I:\text{項目数}))$，再現計算で得られた各メッシュの最大貯水能力と最終浸透能をそれぞれ$W_m(m=1,2,\cdots,M)$と$F_m(m=1,2,\cdots,M)$とする．ここで，土地利用の比率$L_{i,m}$は，以下の実験では国土数値情報（1/10細分メッシュ土地利用（100mメッシュ））を用い，土地利用の項目iにおいて，1を水田，2を森林，3を建物用地，4をその他の4項目とした．また，最大貯水能力W_mと最終浸透能F_mは再現計算で得られた値であり，小流域毎で同一の値である．

$$\hat{W}_m = \sum_{i=1}^{4} p_{W,i} L_{i,m} \tag{14}$$

ここで，$p_{W,i}$は土地利用の項目iの最大貯水能力$\hat{W}_m$を設定するための偏回帰係数であり，式(2)が成り立つように最小自乗法で求める．

$$\min_{p_{W,i}} \sum_{m=1}^{M} \left(W_m - \sum_{i=1}^{4} p_{W,i} L_{i,m} \right)^2 \tag{15}$$

同様に，推定する各メッシュの最終浸透能$\hat{F}_m(m=1,\ 2,\cdots,M)$は，式(16)で求める．

$$\hat{F}_m = \sum_{i=1}^{4} p_{F,i} L_{i,m} \tag{16}$$

ここで，$p_{F,i}$は土地利用の項目iの最終浸透能$\hat{F}_m$を設定するための偏回帰係数であり，式(17)が成り立つように最小自乗法で求める．

表-2　羽越荒川流域での最大貯水能力[mm]の偏回帰係数 $p_{W,i}$

水田 $p_{W,1}$	森林 $p_{W,2}$	建物用地 $p_{W,3}$	その他 $p_{W,4}$
74.1	136.0	92.9	150.6

表-3　羽越荒川流域での最終浸透能[mm/day]の偏回帰係数 $p_{F,i}$

水田 $p_{F,1}$	森林 $p_{F,2}$	建物用地 $p_{F,3}$	その他 $p_{F,4}$
76.7	133.9	85.0	144.6

$$\min_{p_{F,i}} \sum_{m=1}^{M} \left(F_m - \sum_{i=1}^{4} p_{F,i} L_{i,m} \right)^2 \tag{17}$$

以上の方法で求めた羽越荒川流域の最大貯水能力と最終浸透能の偏回帰係数 $p_{W,i}$ と $p_{F,i}$ の値をそれぞれ**表-2**と**表-3**に示しておく．このとき，5洪水を用いて5つの小流域毎の最大貯水能力と最終浸透能を試行錯誤によって設定した．式(15)と式(17)の偏回帰係数 $p_{W,i}$ と $p_{F,i}$ を求める際，小流域の数が5であり，統計的に十分とは言いきれないが，平岡らの文献[1)]では流出の再現計算の結果は比較的良好なものであった．また，流域を分割したメッシュ間隔は国土地理院発行の数値地図標高250mメッシュを用いて250mとし，レーダ雨量として国土交通省河川局の全国合成レーダ雨量（1kmメッシュ）を用いた．**表-2**の最大貯水能力の偏回帰係数 $p_{W,i}$ において，例えば，水田の偏回帰係数 $p_{W,1}$ は，森林と建物用地，その他の影響を取り除いた最大貯水能力への水田の影響の程度を表わしている．洪水が問題となる夏季から秋季では，水田は水が張られているため，水が張られていない冬季から春季と比較すると，浸透能が小さく，貯水能力も低下する．なお，水田の表層は，土壌改良により粘土層に変えられているので，地域によりほぼ一定の浸透能や貯水能力が期待できる．このため，水田の最大貯水能力は浸透能や貯水能力が大きい森林よりも小さくなると考えられる．実際，**表-2**の水田の偏回帰係数 $p_{W,1}$ の方が森林の偏回帰係数 $p_{w,2}$ よりも小さい値となっており，最大貯水能力への影響の程度は水田の方が森林よりも小さいことが分かる．森林は人工林と天然林で浸透能や貯水能力が著しく異なるが，今回は人工林と天然林を一つの森林として扱っているため，今後の課題としてこれらを分けて重回帰式を求めた方が良いと考えられる．建物用地の浸透能や貯水能力は地面がアスファルトなどのように浸透能が小さいため，建物用地は森林よりも最大貯水能力が小さくなると考えられるように，**表-2**の建物用地の偏回帰係数 $p_{w,2}$ の方が森林の偏回帰係数 $p_{w,2}$ よりも小さい値となっており，最大貯水能力への影響の程度は建物用地の方が森林よりも小さいことが分かる．**表-3**より，最終浸透能を推定する際の影響の程度を表わしている最終浸透能の偏回帰係数 $p_{F,i}$ において，水田の偏回帰係数 $p_{F,1}$ と建物用地の偏回帰係数 $p_{F,3}$ の方が森林の偏回帰係数 $p_{F,2}$ よりも小さくなっており，一般的な知見と一致することが分かる．

３．実験

羽越荒川流域で求めた最大貯水能力と最終浸透能の偏回帰係数 $p_{W,i}$ と $p_{F,i}$ を用いて，別の梯川流域（1つの流域）の5洪水に対して再現計算の実験を行った．このとき，メッシュ間隔とレーダ雨量は羽越荒川流域と同一の仕様である．

流出の再現計算のハイドログラフを**図-5**に示す．**図-5**は，上部に流域平均雨量を棒グラフで，下部に実績流出高を点で，流出の再現計算の結果を折れ線で表現している．**図-5**より，良好な流出の再現計算が行われていることが分かる．

次に，流出の再現計算を定量的に検証するために，以下の3つの誤差指標[7)8)]を用いた．

① 流出波形の誤差

$$E_Q = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} \left(\frac{Q_O(j) - Q_C(j)}{Q_{OP}} \right)^2 \tag{18}$$

② 流出ボリュームの誤差

$$E_V = \frac{\sum_{j=1}^{n} Q_O(j) - \sum_{j=1}^{n} Q_C(j)}{\sum_{j=1}^{n} Q_O(j)} \tag{19}$$

③ ピーク流量の誤差

$$E_P = \frac{Q_{OP} - Q_{CP}}{Q_{OP}} \tag{20}$$

ここで，n：洪水立ち上がりから減水部までのデータ数

$Q_O(j)$：j 時刻における実績流量

$Q_C(j)$：j 時刻における計算流量

Q_{OP}：実績ピーク流量

Q_{CP}：計算ピーク流量

である．

一般に，各誤差指標が以下の条件（以下，誤差基準）を満たしている場合，流出の再現精度が良好とされる[7)]．しかし，ここでは，流出ボリュームの誤差とピーク流量の誤差はマイナスの値を持つ場合もあるため，各誤差指標の絶対値が誤差基準内であれば，流出の再現精度が良好として評価する．

① 流出波形の誤差 E_Q　：0.03以下

② 流出ボリュームの誤差 E_V　：0.20以下

③ ピーク流量の誤差 E_P　：0.20以下

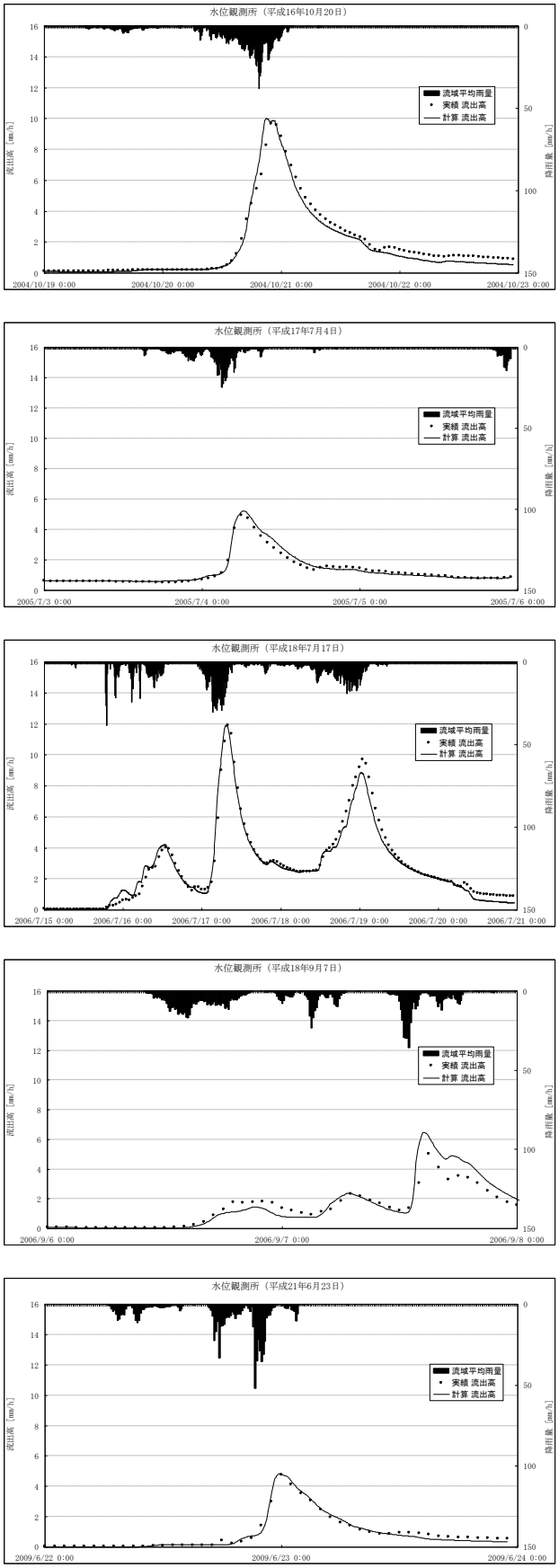

図-5　ハイドログラフ

表-4　流出の再現計算の誤差

誤差の種類	洪水期間				
	平成 16 年 10 月 20 日	平成 17 年 7 月 4 日	平成 18 年 7 月 17 日	平成 18 年 9 月 7 日	平成 21 年 6 月 23 日
①	0.004	0.002	0.002	0.016	0.002
②	0.046	-0.052	0.015	-0.083	-0.014
③	-0.036	-0.055	-0.002	<u>-0.287</u>	-0.013

※ 下線は，誤差の絶対値が誤差基準外の場合である．

表-5　流出の再現計算のピーク位置の時間のずれ［分］

平成 16 年 10 月 20 日	平成 17 年 7 月 4 日	平成 18 年 7 月 17 日	平成 18 年 9 月 7 日	平成 21 年 6 月 23 日
-60.0	20.0	-20.0	-30.0	-10.0

※ 再現計算のピークの時刻から実績のピークの時刻を引いた値である．

これらの誤差の結果を**表-4**に示す．**表-4**の下線は，誤差の絶対値が誤差基準外であることを示す．**表-4**より，誤差が平成18年9月7日のピーク流量の誤差を除いて誤差基準内であり，良好な流出の再現計算が行われていることが分かる．

更に，流出の再現計算を定量的に検証するために，波形のピーク位置の時間のずれについても調べた．この時間のずれの結果を**表-5**に示す．このとき，各洪水の中で最も高いピークを評価の対象とし，**表-5**の値は再現計算のピークの時刻から実績のピークの時刻を引いたものであり，良好な流出の再現計算が行われていることが分かる．

以上より，梯川流域において，羽越荒川流域で求めた重回帰式によって最大貯水能力と最終浸透能を設定し，良好な流出計算が行えたと判断する．

4．おわりに

羽越荒川流域の最大貯水能力と最終浸透能を設定するために得られた土地利用の比率による重回帰式を梯川流域の最大貯水能力と最終浸透能の設定に適用して，実験を通して流出計算の精度を検証し，良好な流出計算が行えることが分かった．つまり，これまで熟練した技術者と多くの時間が必要であった最大貯水能力と最終浸透能の設定を短時間で行える可能性があることが分かった．また，羽越荒川流域と梯川流域では，表層地質（岩石区分）が異なるが，土地利用の情報のみの重回帰式で良好な流出計算が行えることも分かった．

しかし，羽越荒川流域と梯川流域は同じような土地利用の形態であったが，土地利用の形態が大きく異なる流域についても検証する必要がある．また，今回，土地利用の項目として，水田，森林，建物用地，その他の4項目を取り

上げたが，より詳細な項目で検証することも今後の課題である．更に，得られた偏回帰係数と実データを照らし合わせて検証することや，土地利用の他に表層地質（岩石区分）の情報も考慮した重回帰式を構築することも考えている．

参考文献

1) 平岡透，幸弘美，陸旻皎：分布型洪水流出モデルのための土地利用からの最大貯水能力と最終浸透能の設定，土木学会論文集B1，Vol.68，No.2，pp.103-108，2012.
2) 国土交通省：地図からの観測所検索，国土交通省 水文水質データベース（2012/4/1 参照），http://www1.river.go.jp/cgi-bin/SelectMapSite.exe，2002.
3) 陸旻皎，小池俊雄，早川典生：分布型水文情報に対応する流出モデルの開発，土木学会論文集，411/Ⅱ-12，pp.135-142，1989.
4) 陸旻皎，小池俊雄，早川典生：アメダスデータと数値地理情報を用いた分布型融雪解析システムの開発，土木学会水工学論文集，42，pp. 121-126，1998.
5) 山本隆広，陸旻皎：分布型水文モデルによる長期流出計算とその河川計画への応用可能性，水文・水資源学会誌，Vol.22，No.3，pp.198-208，2009.
6) 川合茂，和田清，神田圭一，鈴木正人：河川工学，コロナ社，pp.53-55，2009.
7) 建設省河川局監修，社団法人日本河川協会編：改訂新版 建設省河川砂防技術基準（案）同解説 調査編，技術堂出版，pp.85-86，2008.
8) 財団法人国土開発技術センター：高水計画検討の手引き（案），pp. 117-121，2000.
9) 内田彰，平岡透，幸弘美，陸旻皎：土地利用による重回帰式を用い分布型洪水流出モデルのパラメータの設定，平成24年度電子情報通信学会九州支部第20回学生講演会，2012.（発表予定）

（2013.9.30受付）