利根川上流域における降雨パターンに着目した 洪水流出解析とダムの治水効果の評価

RAINFALL-RUNOFF ANALYSIS FOCUSED ON RAINFALL PATTERN AND ASSESSMENT OF DAM EFFECTS ON FLOOD CONTROL IN TONE UPPER RIVER BASIN

吉見和紘¹・山田正²

Kazuhiro YOSHIMI and Tadashi YAMADA

¹学生会員 中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

²フェロー会員 工博 中央大学教授 理工学部都市環境学科 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

To clarify the effects of difference from rainfall pattern on runoff phenomenon contributes to the further development of the flood control measures commencing with dam control. Elucidating those effects is very useful to examine flood control plan. In this study, authors made pseudo rainfall patterns based on Typhoon Kathleen in September 1947 in Tone upper river basin and examined the effects of difference from rainfall pattern we created on runoff phenomenon. Moreover, authors verified the flood-control ability of Yanba dam in Agatsuma basin. In consequence, it was indicated that peak discharge at Yattajima point of observation was up 15 percentage point from peak discharge in Typhoon Kathleen depending on rainfall pattern. Furthermore, it was indicated that Yanba dam is 4 percent effective in decreasing water level at Yattajima point.

Key Words: *difference from rainfall pattern, Tone upper river basin, runoff, peak discharge, dam effects on flood control*

1. はじめに

気候変動に伴い降雨形態の変化が予測される中、降雨パターンの違いが流出現象に与える影響を解明する事は、従来から行われてきた多様な治水手法の組み合わせによる総合的な治水対策の更なる発展に寄与し、治水計画を検証する上で非常に有益である。

我が国はアジアモンスーン地域に位置し、梅雨期や台風期に数時間程度の短時間に集中した大雨が降るという降雨特性を有している。また、かつての洪水常襲地域における宅地開発、流域の土地利用形態の変化、平坦地が少なく全国土の10%に過ぎない洪水氾濫域に高密度な社会経済活動が展開されている点など、治水上非常に厳しい環境にある。そこで、我が国では堤防嵩上げや河床掘削、引堤、放水路、遊水地、ダムなどによる多様な治水手法の組み合わせによる治水対策が施されてきた。

また近年、地球温暖化による降雨形態の変化などの問

題が指摘され、様々な機関から近年の異常気象や長期的な気候変動に関して報告書が発行されている。例えば、IPCC第4次報告書¹⁾に示されるように、地球温暖化による降雨形態の変化が予測されている。IPCC第4次報告書では、20世紀後半、北半球中・高緯度域においては、大雨の発現頻度が2~4%増加した可能性が高いと述べられるとともに、自然現象の極端化、例えば、将来の温暖化した気候において、夏季はより乾燥し渇水の危険性が高まり、冬季はより湿潤となり強い降水や洪水の危険性が増大すると指摘されている。実際、日本においても、平成23年7月の新潟・福島豪雨、同年台風12号による被害、平成24年7月の九州北部豪雨など、記録的な豪雨により河川が氾濫もしくは決壊するような甚大な被害が発生している。

以上より、降雨パターンの違いや降雨強度の増大による流出現象への影響を明らかにする事は、我が国における総合的な治水対策の確立のためにも重要であると考えられる。本論文では、利根川上流域を対象として、降雨パ

ターンの違い及び降雨強度の増大がピーク流量に与える影響について検証した。また、治水対策において重要な役割を果たすダム群の操作手法の確立を将来的な目的とし、利根川上流の吾妻川流域を対象に、ハツ場ダムの有無によるピーク流出量の違いについて検証した。

2. 単一斜面における降雨流出の基礎式の概要

山田ら²⁾は、従来から単一斜面における一般化した降雨流出の基礎式を提案している。以下にその理論の概要を記す。単一斜面に対して幅広矩形断面を想定するとともに、様々な流出形態に対応するため運動則を式(1)に示すよう、断面平均流速は水深のべき乗に比例するという形式で表現する。一般的なKinematic Wave理論における式(1)の表現は、著者らの記述方法とは異なり、単位幅流量 q が水深のべき乗に比例する形式で記述する事が多いので幂数 m の値に注意されたい。連続式に関しては式(2)で表現される。(2)式と(1)式より単位幅流量 q についての(3)式を得る。

$$v = ch^m, \quad q = vh = ch^{m+1} \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r(t) \quad (2)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + aq^\beta \frac{\partial q}{\partial x} = aq^\beta r(t) \quad (3)$$

$$a = (m+1)\alpha^\beta \quad (4), \quad \beta = \frac{m}{m+1} \quad (5)$$

ここに、 v ：断面平均流速[mm/h]、 h ：湛水深[mm]、 q ：単位幅流量[mm²/h]、 $r(t)$ ：降雨強度[mm/h]、 α 、 m は流域特性を表すパラメータである。直接流出は流出寄与域（河道及び河道近傍の湿潤領域）のみからの流出と考えると、斜面長は実地形上の斜面長より十分短いものと考えられ、(6)式に示す変数分離形の近似式が仮定できる。

$$q(x, t) \cong xq_*(t) \quad (6)$$

ここに、 q_* ：流出高[mm/h]である。また、斜面長 L の末端で考え $x=L$ として(6)式を用いると、偏微分方程式である(3)式は(7)式に示すように流出高に関する常微分方程式に変形できる。

$$\frac{dq_*}{dt} = a_0 q_*^\beta (r(t) - q_*) \quad (7)$$

ただし、
$$a_0 = aL^{\beta-1} = (m+1)\left(\frac{\alpha}{L}\right)^{\frac{1}{1+m}} \quad (8)$$

ここに、 L ：流出寄与域斜面長である。(7)式が一般化された単一斜面からの降雨流出の基礎式となる。

土壌・地形特性を示す流出パラメータ α と m の値に関して志村ら³⁾は、鈴木⁴⁾、⁵⁾、窪田ら⁶⁾の不飽和浸透理論と

Kinematic Wave法の式展開を比較する事により式(9)、(10)で示されるよう、土壌・地形特性から決定できる事を示している。

$$\alpha = \frac{k_s i}{D^{\gamma-1} w^\gamma} \quad (9), \quad m = \gamma - 1 \quad (10)$$

ここに、 i ：斜面勾配、 D ：表層土層厚[mm]、 γ ：土壌の透水性を表す無次元パラメータ、 k_s ：飽和透水係数[mm/h]、 w ：有効空隙率であり、 $w = \theta_s - \theta_r$ (θ_s ：飽和含水率、 θ_r ：残留含水率)で定義される。これにより、斜面流下方流れに関して飽和・不飽和側方流を対象とする場合、土壌・地形特性から流出パラメータを決定し降雨流出計算を行う事が可能である。また、呉ら⁷⁾は、式(11)に示す表面流、鉛直浸透流、飽和・不飽和側方流に関する多層流れを考慮した降雨流出計算手法を提案し、土壌・地形特性と降雨強度の関係から表面流の発生が表現可能であることを示している。

$$\begin{cases} \frac{dq_s}{dt} = a_s q_s^\beta (r(t) - q_0 - q_s) & \dots \text{表面流} \\ \frac{dq_*}{dt} = a_0 q_*^\beta (q_0 - q_*) & \dots \text{中間流} \\ \frac{dq_0}{dt} = (r(t) - q_0) \frac{q_0 - k_s}{h + h_k} - \frac{q_0}{(\theta_s - \theta_r) k_s (h + h_k)} \frac{(q_0 - k_s)^2}{h + h_k} & \dots \text{鉛直浸透流} \\ \frac{dh_s}{dt} = r(t) - q_0 - q_s & \dots \text{湛水深} \\ q_T = q_s + q_* & \dots \text{全流出高} \end{cases} \quad (11)$$

ここに、 q_* ：飽和・不飽和側方流に関する流出高[mm/h]、 q_s ：表面流に関する流出高[mm/h]、 q_T ：全流出高[mm/h]、 q_0 ：鉛直浸透流[mm/h]、 h_s ：湛水深[mm]、 h_k ：湿潤線での毛管負圧[mm]である。表面流はManning則をとり、抵抗則 $m_s=2/3$ 、 $\alpha_s = i^{1/2}/n$ で表され、表面流に関する流出パラメータ α_s および β_s が求まる。ここで、 n は斜面表層におけるManningの粗度係数である。

また、(11)式中の降雨強度 $r(t)$ は有効降雨強度であり、本論文では、山田らが提案している保水能の理論により決定している。詳細は参考文献⁷⁾を参照されたい。

3. 対象流域と計算手法

(1) 対象流域

図-1に示す通り、利根川上流域(5110km²)は、奥利根流域(1670km²)、吾妻川流域(1680km²)、鳥川流域(1320km²)、神流川流域(440km²)の4つの中流域で構成される。また、利根川上流域には複数のダムが存在する。奥利根流域の矢木沢ダム、奈良俣ダム、藤原ダム、相俣ダム、藺原ダムの5ダムは首都圏の洪水対策及び水資源確保に重要な役割を担っている。さらに、鳥川流域の下

図-1 利根川上流域及び二次河道網、主要7ダム及び吾妻川流域雨量観測所位置図、実測流量観測所地点(八斗島基準点:河口から181.45km)。

久保ダム、現在建設中のハッ場ダムを含めた利根川上流域ダム群での合理的な洪水対策、利水政策を考える必要がある。本論文の流出計算における懸案地点は、利根川河口から181.45km地点に位置する八斗島基準点である。

(2) 計算手法

本論文は表面流、鉛直浸透流、飽和・不飽和側方流に関する多層流れを考慮した降雨流出計算手法(式(11))により斜面流出計算を行い、その出力を受けて河道計算を行うことで一連の流出計算を行なっている。河道部の計算は一次元不定流計算であり、連続式(12)式と運動量保存式(13)式を用いて計算している。水位計算点と流量計算点を異なる格子点で定義し計算を行う6-point Abbott Scheme⁸⁾によって解いている。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (12)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{n^2 g Q |Q|}{AR^{4/3}} = 0 \quad (13)$$

ここに、 A :通水断面積[m²]、 Q :流量[m³/s]、 q :側方流入単位幅流量[m²/s]、 α (=1.0):エネルギー補正係数、 g :重力加速度[m/s²]、 n :Manningの粗度係数、 R :径深[m]である。

(3) 流出パラメータの空間分布

既往の研究⁹⁾により、利根川上流域程度の流域面積であれば、水文特性の空間分布が降雨流出に与える影響は小さく、流域平均値としての水文諸量を用いれば、流出

計算結果にほとんど差異が表れない事が示されている。本論においては、斜面長 $L=30$ [m]、表層土層厚 $D=20$ [cm]、有効空隙率 $w=0.42$ 、斜面勾配 $i=15^\circ$ 、抵抗則 $m=4$ を各中流域に様に与えた。これらの水文諸量は、利根川水系渡良瀬川流域を対象とした流出計算時に同定した値⁹⁾及び、中央大学が所有する春日試験地で実際に観測された値を参考に決定しており、現在考え得る最良のパラメータであるとして流域様に与えている。

また、河道計算では、河道位数の概念に基づいて全流域面積を河道長の比で重み付けし、142のサブ流域(奥利根流域:28分割、吾妻川流域:54分割、烏川流域:52分割、神流川流域:8分割)に分割している。

4. 吾妻川流域の降雨パターンの違いが八斗島地点のピーク流量に与える影響

治水計画を検討する上で、台風の経路は様でない事や温暖化による気象現象の極端化を考え、あらゆる降雨パターンを想定した流出計算が重要となる。本節では、利根川上流域の中でも従来から降雨量が少ないとされる吾妻川流域を対象に降雨強度を変化させた流出計算を行い、八斗島基準点のピーク流量に与える影響に関して検証した。

(1) 吾妻川流域の降雨分布

吾妻川上流域は雨が降りにくい地域と言われており、昭和22年9月洪水時の吾妻川上流域の総降雨量は他流域と比較すると少ないとされている。しかしながら、昭和22年9月洪水時に実存した雨量観測所は、三原雨量観測所及び中之条雨量観測所であり、現在と比較して雨量観測所の数が極めて少なく、一つの雨量観測所が支配する面積が大きい事などから、当時の詳細な雨量分布を知る事は不可能である。

そこで、吾妻川上流域の降雨量分布を調べるため、1951年から2011年までの降雨データを用いて、単一降雨イベントにおける標高と総降雨量の関係を検証した。

a) 点による比較(上流域と中・下流域で1点ずつ選定)

中・下流域代表地点として図-1に示す中之条雨量観測所(標高:351m)、上流域代表地点として田代雨量観測所(標高:1230m)を選定し、両雨量観測所における60年間の降雨量データから、標高と総降雨量の関係を検証した。本論文における吾妻川上流域、中流域、下流域の区分は図-1に示すとおりである。

検証結果を図-2に示す。図-2より、上流域の地点において平野部の地点よりも最大で2倍近い降雨が発生している降雨イベントがある事がわかった。

b) 空間的な比較（地上雨量計とレーダ解析雨量を使用した比較）

a)の結果に加えて、図-2から局地的な降雨イベントが存在することがわかる。そこで、地上雨量計を用いた空間的な比較及びレーダ解析雨量を用いて上流域と中流域で同様の比較を行った。結果を図-3に示す。図-3に示す青い点は、中之条雨量観測所（標高：351m）の総降雨量とハッ場ダム建設地点に最も近い暮坂峠雨量観測所（標高：1110m）及びダムサイトより上流域に位置する野坂雨量観測所（標高：1490m）、応桑雨量観測所（標高：1100m）、田代雨量観測所（標高：1230m）のそれぞれの総降雨量を比較したものである（観測期間：1998-2008）。赤い点は、吾妻川中流域と上流域のレーダ解析雨量から得た総降雨量である（観測期間：1995-2008）。どちらの比較においても、単一降雨イベントにおいて1.5倍～2.0倍近い降雨量もしくはそれ以上の降雨量が上流域で降っているケースがある事がわかった。

吾妻川上流域は、従来から雨が降りにくい地域とされていたが、上述の通り、中・下流域で小降雨の際に上流域で豪雨が発生している降雨イベントがある事がわかった。

(2) 吾妻川流域の降雨パターンの違いが八斗島地点のピーク流量に与える影響

4. (1)の結果を踏まえ、昭和22年9月洪水時中之条雨量観測所（標高：351m）で得られた降雨データを用いて、降雨強度を引き伸ばした降雨を現在田代雨量観測所が存在する地点（標高：1230m）に与えて流出計算を行い、八斗島地点の流出量に関して、田代雨量観測所地点に降雨を与えない場合と比較した。ここで、田代雨量観測所に降雨を与えない場合とは、昭和22年9月洪水時の再現計算の事であり、利根川上流域の基本高水流量は、この昭和22年9月洪水を基に22000 m^3/s と定められている。本節の結果である図-4に詳細を示すが、再現計算で得られたピーク流量は22085 m^3/s であり、極めて良好と言える（以下、この再現計算を昭和22年9月洪水計算と呼ぶ）。

田代雨量観測所に与えた降雨は、中之条雨量観測所で得られた時間降雨データを各時間で1.5倍及び2倍に引き伸ばした降雨である。両ケースの降雨とともに、三原雨量観測所で観測された降雨データ、中之条雨量観測所で観測された降雨データ及び田代雨量観測所に与えた降雨データを用いて、ティーセン法によって流域平均降雨量を算出している。これらと、中之条雨量観測所と三原雨量観測所の降雨データを用いてティーセン法によって流域平均降雨量を算出し流出計算したものと比較している。

流出計算を行った結果を図-4に示す。昭和22年9月洪水計算と中之条雨量観測所で得られた降雨を1.5倍に引

図-2 中之条雨量観測所（351m）と田代雨量観測所（1230m）の降雨イベント毎の総降雨量の関係、地上雨量計のデータを使用（観測期間：1951-2011）。

図-3 吾妻川上流域と中流域の降雨イベント毎の総降雨量の関係、地上雨量計及びレーダ解析雨量のデータを使用（観測期間：1995-2008）。

き伸ばした降雨を田代雨量観測所に与えた計算結果（以下、類推1.5倍降雨計算と呼ぶ）を比較した場合、八斗島基準点におけるピーク流量の差は約1100 m^3/s となる事を示した。同様に昭和22年9月洪水計算と中之条雨量観測所で得られた降雨量の2倍の降雨を田代雨量観測所に与えた場合の計算結果（以下、類推2倍降雨計算と呼ぶ）を比較した場合、八斗島基準点におけるピーク流量の差は約3200 m^3/s となる事を示した。

以上の結果から、昭和22年9月洪水時に吾妻川上流域により多くの雨が降った場合、即ち、吾妻川流域の流域平均降雨量が100～200mm増加したと仮定した場合、八斗島基準点でのピーク流量が類推1.5倍降雨計算の結果約23000 m^3/s となり、類推2倍降雨計算の結果約25000 m^3/s

図-4 吾妻川上流域の降雨量が増加した際の八斗島基準点における洪水ハイドログラフ。

となる事を示した。表-1に示す通り、八斗島上流域の4つの中流域の内、吾妻川流域の流域平均降雨量の増加率が約6%に対して、八斗島基準点のピーク流量の増加率が約15%である事は非常に興味深い。

流域平均降雨量の増加率に対してピーク流量の増加率が大きいのは、昭和22年9月洪水時の降雨ハイドログラフが短時間集中型である事が理由の1つであると考えられる。また、図-4に示す通り、先行降雨の影響により、土壌が飽和に近い状態で主要降雨イベントが発生したからであると考えられる。

5. 利根川上流域の降雨パターンの違いが八斗島

地点のピーク流量に与える影響

藤原ら¹⁰⁾、Kim et al.¹¹⁾は、利根川流域の年降水量は今後増加する可能性がある事を示している。地球温暖化に伴う降水現象の極端化、特に降雨量・強度の増加が指摘される中、あらゆる降雨パターンを想定した流出計算を行う事は治水計画を考える上で重要である。

前節では、利根川上流域のうち、吾妻川流域のみの降雨量が増加した場合に八斗島基準点のピーク流量にどのような影響が表れるかを検証した。本節では、利根川上流域における降雨パターンの違いが流出計算結果に与える影響を検証した。昭和22年9月洪水時の降雨イベント

表-1 吾妻川上流域の降雨量変化による流域平均降雨量とピーク流量の増加割合。

	吾妻川上流域の 流域平均降雨量の増加割合	八斗島基準点の ピーク流量の増加割合
昭和22年9月洪水計算	1.00 (352[mm])	1.00 (22085[m³/s])
類推1.5倍降雨計算	1.03	1.12
類推2.0倍降雨計算	1.06	1.15

を基に、利根川上流域内の4つの中流域の各ハイドログラフを入れ替え、降雨パターンを作成した。一般的に各降雨イベントは独立な事象であり、相関はないと考えられる。それらを入力降雨とする事で、相関なく独立で、かつ昭和22年9月洪水時と同等の降雨イベントにおける降雨パターンの違いと流出量の関係について検証することが可能である。

以下に示す降雨パターンは、4つの中流域のうち、上流側の2流域（奥利根、吾妻川流域）に400mm以上の雨が降った場合の擬似降雨である。下流側の2流域で多くの降雨量が降ったとされている昭和22年9月洪水時とは雨の降り方が大きく異なる場合である。

パターン1：奥利根流域と烏川流域の降雨量を入れ替え、吾妻川流域と神流川流域の降雨量を入れ替えた計算

パターン2：吾妻川流域と烏川流域の降雨量を入れ替え、奥利根流域と神流川流域の降雨量を入れ替えた計算

表-2に示す通り、昭和22年9月洪水時の流域平均降雨量を基準とした利根川上流域の流域平均降雨量の増加率はそれぞれ11%と20%であり、ピーク流量の増加率はそれぞれ10%と17%であった。昭和22年9月洪水時、奥利根流域及び吾妻川流域の流域平均降雨量は少なかったが、この2流域に大量の雨が降るような降雨パターンの場合、昭和22年9月洪水時を上回る規模の出水が生じていた可能性を示唆する。

6. ダムの持つ治水機能

4. (2)の結果を踏まえ、S22年9月洪水当時に、吾妻川流域にハッ場ダムが存在したと仮定した場合の流出解析の結果を示す。本節では、吾妻川流域にハッ場ダムが存在した場合、ダムの持つ洪水調節機能がどの程度であるかを定量的に評価する事を目的とする。

ダム操作手法は現在予定されている放流方式を参考に、一定量放流方式を採用した。本計算では、カット開始流入量を700m³/s～1500m³/sまで200m³/s刻みで変化させる事（全5ケース）により、ダムの持つ治水容量を最大限に活用できる貯留量を調べた。また、ダム制御がない場合とある場合に八斗島基準点における洪水制御効果を検

表-2 利根川上流域の降雨パターンの違いによる流域平均降雨量とピーク流量の増加割合。

	利根川上流域の 流域平均降雨量の増加割合	八斗島基準点の ピーク流量の増加割合
基準	1.00 (380[mm])	1.00 (22085[m³/s])
パターン1	1.11	1.10
パターン2	1.20	1.17

図-5 ハッ場ダムにおける一定量放流開始からの時間と治水容量に対する貯留割合の時間変化。

証した。

図-5に示す通り、S22年9月洪水時に流入量1500m³/sから一定量放流方式でダム制御を行った場合、治水容量の6割程度まで貯留する事が可能である。また、同洪水時に流入量700m³/s及び900m³/sから一定量放流を開始すると、両者とも一定量放流開始から約13時間後に、ハッ場ダムの治水容量6.5×10⁷m³を上回る事がわかる。よって、流入量1100m³/sから放流を開始した場合に治水容量に対して9割以上貯留する事が可能であり、ハッ場ダムの持つ治水能力を最大限に活かせる事がわかった。

各地点におけるダム制御がない場合とある場合の水深比は図-6に示す通りであり、八斗島基準点ではダム制御がない場合と比較して最大4%、水深にして0.4m近い低減効果が見込める事を示した。

7. まとめ

吾妻川流域の降雨量の増加及び利根川上流域の降雨パターンの違いが八斗島基準点のピーク流量に与える影響について検証した。また、S22年9月洪水時を対象として、吾妻川流域に現在建設中のハッ場ダムの有する治水効果を評価した結果、以下の結論を得た。

- 1) 吾妻川流域の流域平均降雨量が3～6%増加させた流出計算を行った場合、集水域を利根川上流域とする八斗島基準点において、ピーク流量が12～15%の上昇する。
- 2) 利根川上流域に異なる降雨パターンを与えた流出計算の結果、下流域に比べ上流域の降雨量が多い場合では、S22年9月洪水時の再現計算と比較すると、ピーク流量に10～17%の上昇が見られる。
- 3) 吾妻川流域に現在建設中のハッ場ダムは、S22年9月洪水時に1100 m³/sから一定量放流を開始する事で、治水容量を最大限に活用できる。
- 4) S22年9月洪水を対象として、ハッ場ダムの治水効果を検証した結果、八斗島基準点において、最大で4%の水位低減効果がある事がわかった。

図-6 ダム制御を行わない場合と一定量放流を行った場合の八斗島基準点における水深比。

謝辞：本研究は科研費挑戦的萌芽研究（代表者 山田正）からの支援を受けて実施されている。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) IPCC,2007: CLIMATE CHANGE 2007 -The Physical Science Basis-,IPCC FOURTH ASSESSMENT REPORT, Technical Summary, pp.19-92, 2007.
- 2) 山田正:山地流出の非線形性に関する研究, 土木学会水工学論文集, Vol.47,pp.259-264,2003.
- 3) 志村光一, 大原憲明, 松本浩志, 山田正:水理計算に基づく大規模河道網の洪水流出特性に関する研究, 水文・水資源学会誌, Vol.14,No.3,pp.217-228,2001.
- 4) 鈴木雅一:山地流域の基底流出逓減特性(Ⅰ), 日林誌, Vol.66,pp.174-182,1984.
- 5) 鈴木雅一:山地流域の基底流出逓減特性(Ⅱ), 日林誌, Vol.66,pp.211-218,1984.
- 6) 窪田順平, 福嶋義宏, 鈴木雅一:山腹斜面における土壌水分変動の観測とモデル化(Ⅱ)ー水収支および地下水発生域の検討ー, 日林誌, Vol.70,No.9,pp.381-389,1988.
- 7) 呉修一, 山田正, 吉川秀夫:表面流の発生機構を考慮した斜面多層降雨流出計算手法に関する研究, 水文・水資源学会誌, Vol.49,pp.169-174,2005.
- 8) Abbott M B, Ionescu F: On the numerical computation of nearly-horizontal flows, Journal of Hydraulic Research, 5(2), 97-117, 1976.
- 9) K Oda, S Kure, T Yamada, R Ebana, A Watanabe, N Watanabe: Effects of Special Distribution of Hydrological Characteristics to Runoff, World City Water Forum, CD-ROM, 2009.
- 10) 藤原洋一, 大出真理子, 小尻利治, 友杉邦雄, 入江洋樹:地球温暖化が利根川上流域の水資源に及ぼす影響評価, 水工学論文集, 第50巻, pp.367-372, 2006年2月.
- 11) S Kim, Y Tachikawa, K Takara, E Nakakita: Hydrologic Prediction under Global Warming at Tone and Yodo River Basins using the Output of Global 20-km Mesh GCM, Annuals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No.51 B, 2008.

(2012. 9. 30受付)