

平成28年台風第10号による二級河川小本川での 洪水流量形成における先行降雨の影響

THE INFLUENCE OF ANTECEDENT RAINFALL TO FLASHED FLOOD
AT OMOTO RIVER CAUSED BY THE 10th TYPHOON IN 2016

高橋 範仁¹・風間 聡²
Norihito TAKAHASHI, So KAZAMA

¹正会員 株式会社 建設技術研究所 東北支社 (〒980-0811 仙台市青葉区一番町4-1-25)

²正会員 博(工) 東北大学大学院 工学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

The 10th typhoon in 2016 that caused a massive flood disaster at Omoto river had several antecedent rainfalls. The river basin will be considerably saturated, which has led to exacerbating the flood disaster. Therefore, we should discuss the flood disaster occurred related to not only a short-time rainfall but also an antecedent rainfall. This paper describes the influence of antecedent rainfall on a flash flood in a mountainous river using a physical-based rainfall-runoff model that employed a fully-coupling simulation with surface-water flow and ground-water flow. The result of the simulation indicated that due to the infiltration of antecedent rainfall, a pressure rise has occurred across the basin, except the area directly under the river channel where the pressure has decreased. The groundwater flows toward the area of lower pressure head, which causes the ground water from all the basin to gather under the river channel. This clearly shows that antecedent rainfalls make ground-water easy to be pushed out to the surface and increase the flood-flow.

Key Words : Flood-disaster, mountainous-river, Antecedent-Rainfall, coupling simulation, Surface-water flow, Ground-water flow, Pressure-Head distribution

1. はじめに

平成28年台風第10号は、岩手県大船渡市付近に上陸し、東北地方を北西に横断して日本海に抜けるという特異な経路をたどった。台風が東北地方の太平洋側に上陸したのは、気象庁が1951年に統計を開始して以来初めてであった。

この平成28年台風第10号により、北海道および東北地方で、住宅被害が全壊・半壊・床上浸水等、約3000棟に上るとともに、22名の死者と5名の行方不明者が発生した¹⁾。死者、行方不明者のうち、20名以上が、岩手県岩泉町に集中している。これは、岩手県岩泉町を流れる二級河川小本川で、大規模な洪水が発生したことに起因している。特に、被害が甚大であった岩泉町乙茂地区では、洪水氾濫により居住地一帯が浸水し、9人が犠牲となっている。図-1に、小本川流域の位置図を示す。

この洪水では、岩泉町乙茂地区の下流5kmに位置する赤鹿水位観測所で急激な水位上昇が観測されており、水位は約6時間で5m以上上昇した。この間の水位上昇量

は、最大で約2m/時間であった。筆者らの既報告²⁾では、平面2次元流況解析により、岩泉町乙茂地区における氾濫流況の再現シミュレーションを実施している。この結果、洪水氾濫の流体力が非常に大きいことから、歩いて避難することが困難であったことを示しており、早期避難の重要性を指摘している。

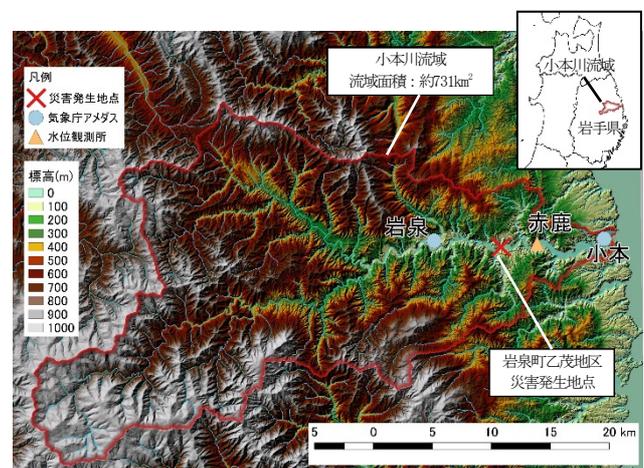


図-1 小本川流域

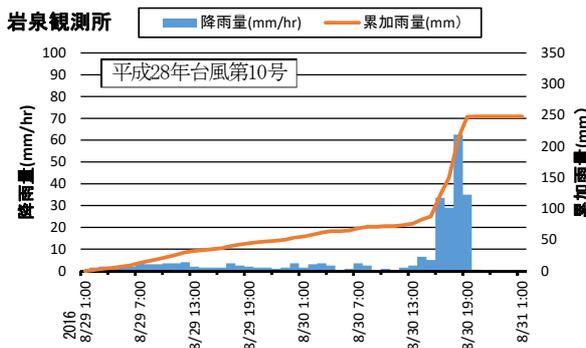


図-2 気象庁アメダス（岩泉観測所）の時間雨量

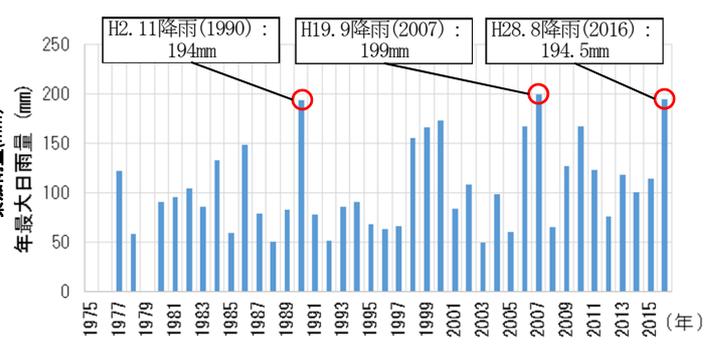


図-3 気象庁アメダス（岩泉観測所）の年最大日雨量

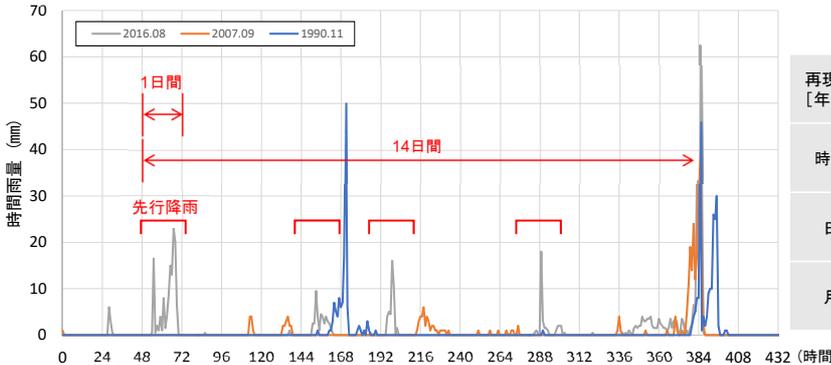


図-4 3降雨のピーク雨量を起点とした降雨波形の重ね図

表-1 3降雨の再現期間

再現期間 [年] (mm)	H2.11降雨 (1990)	H19.9降雨 (2007)	H28.8降雨 (2016)
時間雨量	[15年] (46mm)	[17年] (47mm)	[138年] (70.5mm)
日雨量	[20年] (194mm)	[23年] (199mm)	[20年] (194.5mm)
月雨量	[3年] (277mm)	[19年] (465mm)	[70年] (586.5mm)

2. 目的

小本川などの山間河川に見られる特徴として、居住地が川に近く、洪水時の水位上昇が非常に早い。このため、避難のリードタイムが非常に短いことが挙げられる³⁾。このようなことから、洪水時には早期避難が必要となり、避難判断の目安となる洪水予測を精度良く行うことは、非常に重要である。

一方、筆者らの既報告²⁾では、平成28年台風第10号により、小本川で大規模な洪水が発生した際、小本川流域では、それ以前にも台風等による降雨が続いたことから、流域が湿潤状態にあり、流出率が高かったことが大きな災害を引き起こした一要因である可能性を示唆している。このため、洪水予測精度を向上するためには、短時間雨量と洪水の関係だけでなく、先行降雨と洪水の関係についても明らかにすることが重要である。

そこで、本研究では、小本川流域を対象として、地表流と地下水流を一体解法により強連成した物理水文モデルを用いた数値解析により、洪水流量形成における先行降雨の影響を検討することを目的とする。

3. 方法

初めに、先行降雨の影響を定性的に評価するため、気象庁アメダス観測所（岩泉）の既往観測データを用い、平成28年台風第10号による災害発生時の降雨を含む年最大日雨量を整理し、過去の大雨を3つ抽出した。これら

の大雨について、水文頻度解析から再現期間を評価すると共に、水害統計資料から災害規模を調査した。また、降雨による地下水位の変動状況を把握するため、小本川の中流域にある洞穴である龍泉洞で観測された洞内水位を整理した。

次に、先行降雨の影響を物理的に評価するため、水文モデルを用いた数値解析により、小本川流域における地下水流の流況や圧力水頭の変化を分析し、先行降雨が洪水流量形成に与える影響を検討した。

4. 降雨状況による先行降雨の影響評価

(1) 降雨状況

図-2は、平成28年台風第10号における小本川流域の中央付近にある気象庁アメダス（岩泉観測所）の時間雨量と29日0時からの累加雨量である。岩泉観測所では、総雨量約250mmの降雨の大部分が、台風通過前後の4時間程度に集中し、1時間雨量から6時間雨量までが観測史上最大であった。

図-3は、気象庁アメダス（岩泉観測所）の既往観測データにおける年最大日雨量である。当該観測所における観測開始以来のデータを整理した。平成28年（2016年）の年最大日雨量は、平成28年台風第10号による災害発生時の降雨（以降、H28.8降雨と略記）であった。これを見ると、甚大な災害を引き起こしたH28.8降雨と概ね同規模の降雨が、過去2回観測されている（以降、それぞれH2.11降雨、H19.9降雨と略記）。



図-5 龍泉洞の洞内水位の観測状況（百間廊下）

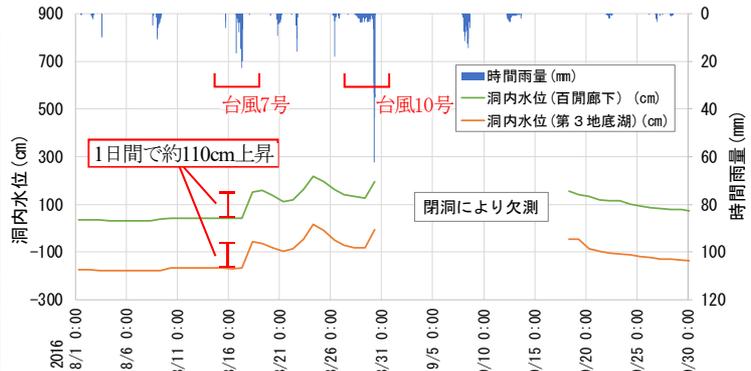


図-6 気象庁アメダス（岩泉観測所）の降水量と洞内水位の重ね図

(2) 既往降雨の再現期間

気象庁アメダス（岩泉観測所）の既往観測データから、3降雨について、再現期間を算定した（表-1）。なお、再現期間は、水文統計ユーティリティを用い算定しており、各種確率分布のうち、SLSCが他に比べて小さく適合度が高い岩井法を用いている。

これを見ると、3降雨とも、日雨量の再現期間は概ね同程度である。一方、H28.8降雨は、H2.11降雨およびH19.9降雨と比較して、時間雨量だけでなく、月雨量の再現期間も非常に大きい。また、図-4は、3降雨のピーク雨量を起点した降雨波形の重ね図であるが、H28.8降雨は他の2降雨と比較して、先行降雨が大きいことが分かる。

(3) 既往降雨における災害発生状況

図-3に示す3降雨について、災害発生状況を調査した。国交省河川局の水害統計⁴⁾（以降、水害統計と略記）によると、H2.11降雨は内水氾濫による床上浸水が10棟、H19.9降雨は土石流による床上浸水が1棟となっている。どちらの降雨においても、溢水、越水、破堤等の外水氾濫は発生していない。

小本川水系河川整備基本方針⁵⁾（以降、基本方針と略記）の本文でも水害についても言及されている。H2.11降雨は、水害統計と同一の内容であった。H19.9降雨の被害については、記載がないことから、内水・外水ともに被害は発生していないものと考えられる。H28.8降雨の被害は、全壊66棟、半壊92棟、床上浸水537棟、床下浸水115棟となっている。

岩泉町地域防災計画⁶⁾の災害記録では、水害統計や基本方針と災害発生状況に相違が見られるが、洪水災害の関連被害も含んでいるものと考えられる。H2.11降雨は、住宅家屋浸水142棟、その他含め被害額約13億円となっている。H19.9降雨は記載がないことから災害は発生していないものと考えられる。H28.8降雨は、建物被害1,914棟、その他含め被害額約438億円となっている。

このように、災害発生状況を見ると、H28.8降雨は、H2.11降雨およびH19.9降雨に比べて、災害規模は非常に大きい。これは、H28.8降雨は、時間雨量と月雨量の再

現期間が大きいことが影響しているものと考えられる。

(4) H28.8降雨による洞内水位の変動状況

H28.8降雨による地下水位の変動状況を把握するため、龍泉洞で観測された洞内水位を整理した。龍泉洞は、小本川の中流域で合流する支川清水川の右岸側に開口する洞穴で、日本三大鍾乳洞の一つである。この龍泉洞では、1日1回午前8時に、洞内の2箇所（百間廊下、第3地底湖）で、水位が観測されている。なお、水位は量水標の読み値である（図-5）。

図-6は、気象庁アメダス（岩泉観測所）のH28.8降雨の降水量と洞内水位の重ね図である。大規模な洪水災害を引き起こした平成28年台風第10号の先行降雨である台風第7号の降雨により、洞内の水位は、8月17日から8月18日の1日間で、約110cm上昇している。洞内水位は、その後の降雨も影響し、高いまま維持されている。台風第10号の降雨では、洞内水位は再度上昇し、最終的には、洞穴の開口部から地下水がオーバーフローすることで、閉洞するに至った。

このことから、H28.8降雨による大規模な洪水は、1週間～2週間程度の比較的長期的な先行降雨の影響を受け、小本川流域は湿潤状態にあり、流出率が高くなっていったものと推測される。

5. 水文モデルによる先行降雨の影響評価

(1) 水文モデルの選定

水文モデルは、降雨流出過程のモデル化から分類すると、概念モデルと物理モデルに大別される。概念モデルは、合理式、貯留関数モデル、タンクモデルなどが挙げられる。わが国では、河川整備等の治水計画立案に広く用いられており、降雨流出の再現において十分な精度を有していることは明らかである。しかし、貯留関数モデルの流域定数K、Pなどの流出パラメーターは、物理的の意味が曖昧である。呉ら⁷⁾によれば、これら流出パラメーターは、斜面流下方向流れを対象とすることで、流域の土壌と地形の特性と見なせるとしているが、地下層

への浸透よりも斜面流下方向流れが卓越するという条件を仮定している。すなわち、この状況は降雨により流域が十分に湿潤している洪水時と考えることができる。このため、地下層へ浸透が卓越する先行降雨時においては不適である。

物理モデルは、様々な手法が提案されているが、これらのひとつとして、分布型モデルが挙げられる。当該モデルは、対象流域を1km程度のメッシュ状に分割し、それぞれのメッシュに粗度や透水性のパラメーターを与え、地形勾配を基に設定した落水線で一次的に降雨流出を追跡する方法である。わが国では、リアルタイム洪水予測システムにおいて、広く用いられている。一方、佐山ら⁸⁾は、流域内で浸水が生じた場合には流下方向が変化するため、従来の落水線を用いて一次的に降雨流出を追跡する分布型流出モデルは再現性に問題があるとしている。この改良として、2次元で降雨流出と洪水氾濫を解析する手法（以降、RRIモデルと略記する）を提案し、多くの成果を上げている。

江頭ら⁹⁾は、RRIモデルを用いて、平成28年台風第10号による災害発生時の小本川における洪水流量の推定を行っている。当該モデルは、立川ら¹⁰⁾の地中の飽和・不飽和流れを考慮しており、洪水流量の推定では、このパラメーターとして、土層厚 $da : 0.13\text{m}$ 、不飽和の土層厚 $dm : 0.04\text{m}$ を用いている。 da が地中の飽和・不飽和流れの最大水深であり、 dm より地中の水深が大きくなることで、飽和流れに移行する。このため、洪水流量は、地表から約15cm程度の極浅い部分における地中の飽和・不飽和流れによって再現したことになる。立川ら¹⁰⁾の検討においても、 da が0.5m程度であるため、当該モデルは、概念モデルと同様に、斜面流下方向流れを前提としているものと推測される。このようなことから、先行降雨時における当該解析モデルの適用性は不明である。

以上のことから、本論では、先行降雨の地下層へ浸透の影響を物理的に評価するため、2次元地表流と3次元地下水流を連成した物理水文モデルを開発した。

(2) 物理水文モデルの概要

開発した物理水文モデルは以下の支配方程式から成る。地表流の運動方程式は、矩形断面を仮定したManning型のKinematic Waveに、斜面勾配項に水深を付加した拡散波近似である。地下水流の運動方程式は、水と空気との2相Darcy流れである。

$$\text{【質量保存則】 } \nabla \cdot (Q_{k,p}) - q_p = \frac{\partial}{\partial t} (\phi S_p) \quad (1)$$

$$S_w + S_a = 1 \quad (2)$$

$$\text{【地表流】 } Q_{sf,w} = -\frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} \frac{1}{|\frac{\partial z}{\partial x}|} \nabla(h+Z)A \quad (3)$$

$$= -\frac{1}{n} \frac{1}{|\frac{\partial z}{\partial x}|} \left(\frac{WH}{2HS_w + W} \right)^{\frac{2}{3}} S_w^{\frac{5}{3}} \nabla(H(0.5 - S_w) + Z)A \quad (4)$$

$$\text{【地下水流】 } Q_{gd,p} = -\frac{K_{kp}}{\mu_p} \nabla(P_p + \rho_p g z)A \quad (5)$$

$$P_w = P_a - P_c[S_w] \quad (6)$$

ここに、 $\nabla \cdot$: x-y-z方向の発散、 k : 流れの種別(地表流 sf 、地下水流 gd)、 p : 相(水 w 、空気 a)、 S_p : p 相の飽和度、 R : 流路の径深、 Z : 標高(m)、 h : 水深(m)、 A : 断面積(m^2)、 W : 流路の幅(m)、 H : 流路の高さ(m)、 K : 浸透率(m^2)、 k_p : p 相の相対浸透率(無次元)、 P_p : p 相の圧力(Pa)、 P_c : 毛細管圧力(Pa)、 μ_p : p 相の粘性係数($\text{Pa} \cdot \text{s}$)、 ρ_p : p 相の密度、 g (kg/m^3) : 重力加速度(m^2/s)

地下水流の2相Darcy流れでは、水と空気がそれぞれ干渉して流れることとなり、水の侵入は空気の排水、水の排水は空気の侵入というように、他方の相で置き換えが生じる。このため、地下水位の変動による地中の空気の放出・引込みや、豪雨時に降雨が急激に浸透する際は、地中の空気が閉塞され、降雨浸透が阻害される等の詳細な物理現象を捉えることが可能となる。

地表流と地下水流の連成手法は、運動方程式がそれぞれ異なるため、WEP model¹¹⁾等の水循環モデルでは、地表水の浸透と地下水の湧出を境界条件として、並列時差解法による弱連成が採用されている。この弱連成では、地表流と地下水流の計算が分離して行われるため、計算時間間隔 DT が大きくなると、水収支や地表水と地下水の相互作用の誤差が大きくなるという技術的な課題がある。これは浸透と湧出が、地表の水深や地中の水飽和度等によって相互に影響し決定されるためである。

そこで、本論では、登坂ら¹²⁾の方法を用いて、地表流と地下水流を一体解法により強連成手法を採用した。当該連成手法は、地表流の運動方程式を地下水流と同様の式形である式(4)に変形することで、地表流と地下水流をそれぞれの区別なく1つの方程式系に連立するため、浸透と湧出の境界条件は不要となる。

支配方程式の未知数は、解析の安定性と質量保存性から、圧力水頭と水飽和度を未知数にする手法¹³⁾を採用した。空間方向の離散化は、有限体積法で行い、時間方向は完全陰解法の1階差分とした。支配方程式は、非線形方程式であるため、残差方程式に変形し、テイラー展開で線形化し、Newton-Raphson法で解法する方法¹⁴⁾を取った。残差方程式を数値微分して得られる係数行列の解法はOrthomin法¹⁵⁾を採用した。また、全体行列を小行列に分割し、MPIを用いて並列化することで、行列解法の安定化と高速化を図った。

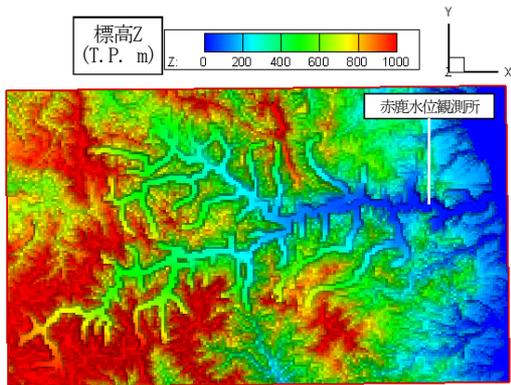


図-7 解析モデルの上面図

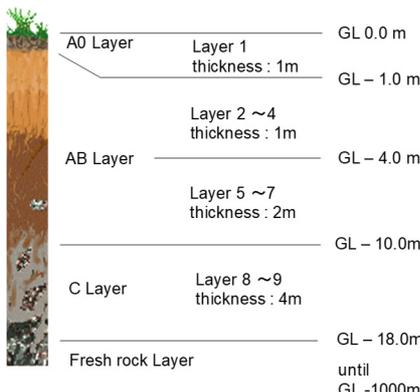


図-8 鉛直方向のグリッド分割



図-9 二升石地区の土層断面

(3) 計算条件

図-7は、解析モデルの地盤高である。国土地理院 基盤地図情報の5mおよび10mメッシュ標高データを用いた。解析グリッドの解像度は250mとし、国土数値情報5次メッシュデータと整合を図った。河道の河床は、勾配の逆転が生じないように、各250mメッシュの最低地盤を設定した。また、計算流量の再現性は、赤鹿水位観測所で確認した。図-8は、鉛直方向のグリッド分割である。深度が大きくなると、地下水流は緩慢になるため、深度によって分割幅を粗くした。

土壌・地質の分布は、国土数値情報を用いた。層厚は、逢坂ら¹⁶⁾の斜面勾配と土層厚の関係式および国土数値情報の風化深度から設定した。また、筆者らは、土層断面を把握するため、土砂災害が発生した岩泉町二升石で、現地調査を実施しており、AB層と見られる土層が10m以上堆積しているのを確認した(図-9)。当該地域周辺は、斜面勾配が10~20程度であったため、斜面勾配が15度以下のAB層は一律10mと設定した。これらは、風化して崩れた岩が、勾配が緩いところに堆積した崖錐堆積物と考えられる。なお、国土数値情報5次メッシュの平均斜面勾配では、小本川流域の約7割が20度以上であり、急峻な地形形状である。透水係数は、土壌・地質の地下水流量涵養に対する貢献度¹⁷⁾を基に、A0層 $1.0 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ 、AB層 $1.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 、C層 $1.0 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 程度と設定した。マニング粗度は、流域0.6、河道0.03とした。

計算期間は、2016年8月の大規模な洪水を引き起こした台風10号の降雨の先行降雨である台風7号の降雨を対象とした。降雨は、ティーセン分割で流域の8割程度を占める気象庁アメダス(岩泉観測所)の時間雨量データを用い、降雨分布は流域一様として検証した。初期の地下水位分布は、平成27年から前10年で平均した年平均雨量を用いて、約1年間の助走計算により推定した。

(4) 解析結果

図-10の下図は、赤鹿水位観測所の流量観測H-Q式を用いた換算流量と解析結果の重ね図である。流量観測H-Q式にバラつきが見られ、換算流量の精度が不明確であ

る。このバラつきは、出水時の流量観測データの少ないことに起因していると考えられる。平成27年から前10年で平均した年平均流量は、約 $20 \text{m}^3/\text{s}$ であるため、低水部分は、H-Q換算流量(H26)が実体に近いものと考えられる。ピーク流量は、H-Q換算流量(H25)とH-Q換算流量(H27)が概ね同規模であるため、これらが実体に近いものと考えた。この考えに基づき、解析モデルのパラメーター同定を行った。

解析結果は、換算流量と比較すると、洪水の立ち上がりは早い、流量の増加傾向は緩慢である。ピーク流量は若干小さい傾向にある。流量ボリュームは、洪水波形の位相にズレはあるが、概ね同程度であると考えられる。この位相のズレの原因として、一般的な河道の粗度係数を用いることで、摩擦抵抗が過大になっていることが考えられる。これは、当該モデルの河道は、矩形断面を仮定しており、径深が解析グリッドの解像度に依存することに起因する。例えば、本検討では250m解像度であるため、最小川幅250mの河道を用いていることとなり、中上流域においては、水深が極端に浅くなるため、径深が小さくなり、摩擦抵抗が明らかに過大となる。表面流の運動方程式において、河道の断面特性を考慮する方法は、今後の課題とする。

図-10の上図は、解析モデルの各層の貯留量の変化で、降雨前の初期状態からの変化量で示した。これを見ると、深度がGL-10m程度までの層で、貯留量が大きく変化している傾向にあり、降雨浸透の影響が及んでいるのが明らかである。このため、本検討のような1日程度の短期流出においても、GL-10m程度の比較的深度の大きい層まで、洪水流量の形成に寄与していると考えられる。

次に、水および空気の流速、圧力水頭、水飽和度の空間的な分布状況を確認した。図-11は、深度GL-4mの水の流速分布である。これらの層の多くは不飽和帯であり、流域全体で地下に浸透する流れが卓越し、水と空気の置換が生じている。一方、河道直下では、河道に水が湧出する上昇流が生じている。また、更に深度が増して水飽和度が高くなると、地形勾配に沿うような側方の流れが卓越する傾向にあり、地下水が河道直下に集水する流況

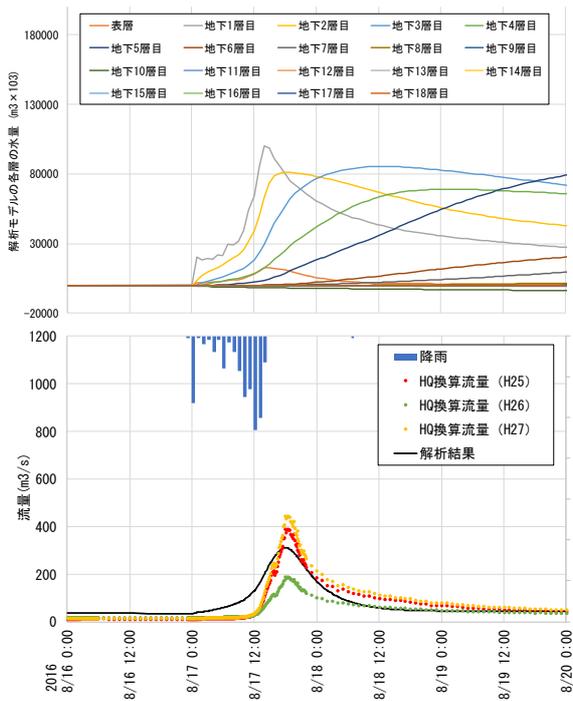


図-10 台風7号の流量再現と層の貯留量の変化

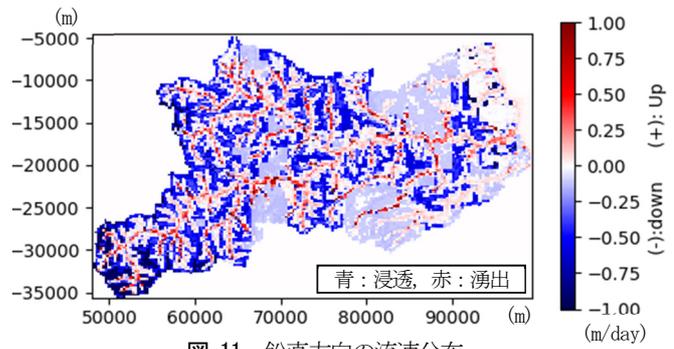


図-11 鉛直方向の流速分布

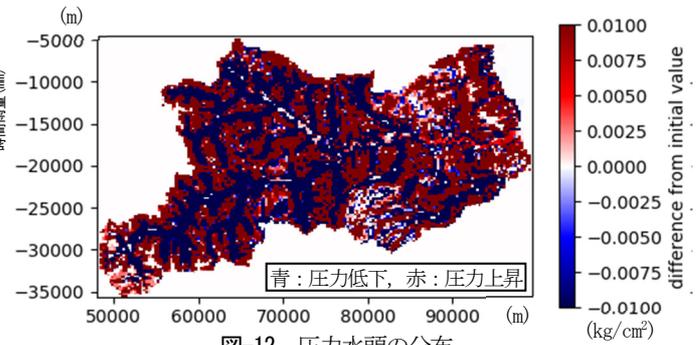


図-12 圧力水頭の分布

が見られる。深度GL-8m程度の深度になると、河道直下で地下河川のような流れが生じている。これは、地形勾配に沿って、河道直下に集水した地下水が、透水性の低い水理基盤の上を流れているものと考えられる。

図-12は、深度GL-12mでの圧力水頭の分布で、降雨前の初期状態からの変化量で示した。先行降雨の浸透により、流域全体で圧力上昇が生じるのに対し、河道直下では圧力低下が生じている。地下水流は、圧力水頭が小さくなる方向に流れるため、この圧力分布の変化により、流域全体から河道直下へ集水され、この集水された地下水は地表に押出される現象が生じていることとなる。

6. まとめ

本研究では、小本川流域を対象とし、地表流と地下水流を一体解法により強連成した物理水文モデルを用いて、平成28年台風第10号の先行降雨による地下水流の流況や圧力水頭の変化を分析した。この結果、先行降雨が浸透することにより、流域全体の圧力分布が変化し、河道直下では、流域全体からの集水と地表への湧水が増長される現象が確認された。このため、平成28年台風第10号による洪水災害は、先行降雨の影響により、洪水流量の形成が増長されていたものと考えられる。また、この圧力分布の変化は、山間河川において、急激に水位が上昇することに関係している可能性が考えられる。

謝辞：岩手県土整備部および龍泉洞事務所から、観測データの提供を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 総務省消防庁：平成28年台風第10号による被害状況等について(第30報)，平成28年9月，2016。
- 2) 風間 聡，峠嘉 哉，高橋範仁：平成28年台風第10号による二級河川小本川での洪水発生状況の考察，水工学論文集 JSCE，2017，61：I_1303-1308。
- 3) 高橋範仁，菊池祐二，風間 聡：平成27年9月関東・東北豪雨による北上川水系二次支川三迫川での災害発生状況の考察，河川技術論文集，第22巻，pp.291-296，2016。
- 4) 国土交通省河川局河川計画課：水害統計，2009.3。
- 5) 岩手県：小本川水系河川整備基本方針，平成30年1月，2018。
- 6) 岩泉町防災会議：岩泉町地域防災計画平成29年度修正版資料編，2017。
- 7) 呉 修一，山田正：既往概念流出モデルの理論的導出。水文・水資源学会誌，2009，22.5：386-400。
- 8) 佐山敬洋，et al：降雨流出氾濫モデルによるサイクロンルギス高潮氾濫シミュレーション，土木学会論文集 B1(水工学)，2011，67.4：I_529-I_534。
- 9) 江頭進治，et al：平成28年8月台風10号豪雨による岩手県小本川洪水災害調査報告，土木研究所資料第4348号，2016年11月，2016。
- 10) 立川康人，永谷 言，寶 馨：飽和・不飽和流れの機構を導入した流量流積関係式の開発，水工学論文集，2004，48：7-12。
- 11) Jiz, Yangwen. et al: Development of WEP model and its application to an urban watershed, Hydrological Processes, 15, 2175-2194, 2001.
- 12) 登坂博行，et al：地表流と地下水流を結合した3次元陸水シミュレーション手法の開発，地下水学会誌，1996，38.4：253-267。
- 13) 日比義彦，藤縄克之：多孔体中における空気—水—NAPL3相流の数値モデルの比較，土木学会論文集，2005，2005.797：797_81-797_94。
- 14) Ruess, Karsten. et al：TOUGH2 user's guide version 2, 1999。
- 15) Pettersen, Øystein：Basics of reservoir simulation with the eclipse reservoir simulator. Lecture Notes. University of Bergen, 2006, 114。
- 16) 逢坂興宏，塚本良則：自然斜面の土層の厚さについて，緑化工技術，1987，12.3：1-6。
- 17) 中野秀章：森林水文学 水文学講座13，1976。

(2019.4.2受付)