

◆ 特集 土砂災害を防ぐ ◆

融雪に起因する土石流発生場の特性に関する検討

石田孝司* 南 哲行** 山田 孝*** 石田哲也****

1. 研究目的

平成 8 年 12 月 6 日午前 10 時 40 分頃に長野県と新潟県の県境を流下する姫川左支川蒲原沢（流域面積約 3.7km²、主流路延長約 4.2km、平均河床勾配約 1/10）において死者 14 名にのぼる甚大な土石流災害が発生した。土石流発生源は標高 1,300m 付近の右岸側斜面で発生した約 39,000m³規模の崩壊であることが明らかになっている¹⁾（写真-1）。この土石流は、平成 7 年 7 月 11 日に既に発生していた崩壊斜面上部がさらに「拡大崩壊」したことによりもたらされたもので、その拡大は崩壊地が侵食前線である「不安定化した急勾配斜面」であったこと、地質条件として脆弱な安山岩質溶岩類と堅固な砂岩層の境界であったという素因が大きく影響していると考えられている²⁾。蒲原沢周辺では平成 8 年 12 月 1 日から 2 日にかけて襲来した寒波の影響によるまとまった降積雪（気象庁地域気象観測所（白馬）で積雪深 35cm を記録）があり、その後の降雨と融雪とが土石流の誘因になったと考えられている²⁾。この間に出現した降雨強度、総雨量、融雪水量（計算値）は非積雪・融雪期に見られた降雨量と比較しても大きな値とは言えず（総供給水量 100～150mm¹⁾）：



写真-1 平成 8 年 12 月 6 日土石流の発生源
(撮影日: 平成 8 年 12 月 7 日)

Characteristics of Occurrence Spot of Snowmelt-induced Debris Flow

以降、[供給水量]=[融雪水量]+[降雨量] と定義する）、それが何故発生したのかという疑問は残っているものの、従来考慮していた降雨量に融雪水量を加味した予知・予測手法開発の必要性が指摘されている^{1),2)}。

筆者らは積雪・融雪期の土石流発生機構の解明および融雪水を考慮した土石流警戒・避難基準設定手法の確立を最終目標とした調査研究を平成 9 年 12 月より開始した。本報告では、調査研究の全体計画と取り組み、積雪・融雪期の山地流域における気象・融雪特性および斜面表土層の水分変動実態に関して現段階までに得られた知見を紹介する。

2. 調査研究の全体の流れ

本調査研究の流れを図-1 に示す。現在運用している土石流警戒・避難基準³⁾へ融雪水量を組み込むためにはまず融雪水量を推算する必要がある。融雪水量推算手法に関してはこれまでに様々な手法が提案されている。(A) これらを元にして

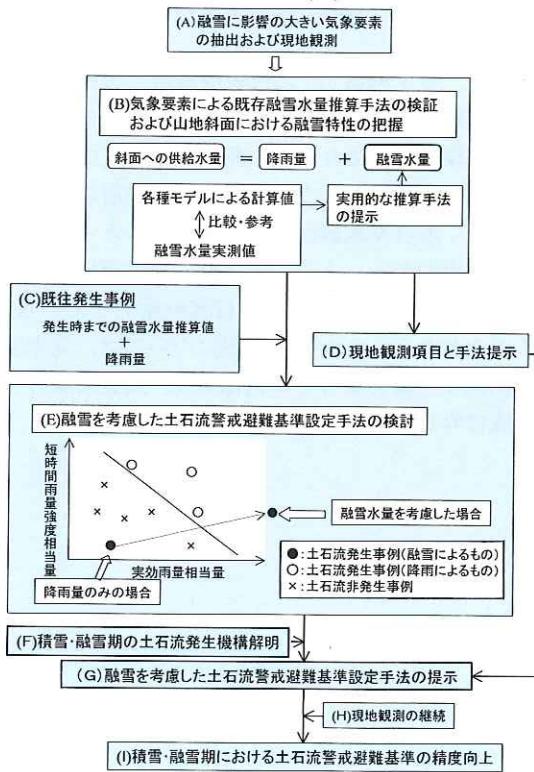


図-1 融雪を考慮した土石流に関する研究 全体計画フロー

融雪水量推算に必要となる観測項目を抽出し、現地観測を行う。(B) 現地観測結果を使用し、各種融雪水量推算手法の検証を踏まえ、観測項目が少なく簡易かつ警戒避難基準への適用レベル

表-1 積雪・融雪期に土砂災害を来たした主な土砂移動現象(平成10年4月建設省砂防課調べ)

発生場所	河川名	発生年月日	形態	移動土量(m ³)
新潟県妙高高原町妙高山	関川支流白田切川	1978年5月18日	地すべり・土石流	280,000
石川県鶴木町朝日町平等寺川	犀川支流	1981年4月2日	土石流	不明
石川県吉野谷村木滑	手取川支流三粒谷川	1984年4月20日	土石流	不明
静岡県富士宮市	富士山大沢川	1991年11月28日	土石流	200,000
長野県小谷村稗田山	姫川支流浦川	1992年4月6日	崩壊・土石流	700,000~800,000
山形県立川町	立谷沢川支流濁沢	1993年6月4日	崩壊(地すべり)	4,780,000
長野県小谷村中上清水山	姫川支流中谷川	1994年4月14日	地すべり	5,000,000
長野県飯山市富倉	長沢川支流の脇沢川	1995年4月4日	地すべり	400,000
山梨県鳴沢村	富士山4~5合目	1996年3月30日	崩壊	1,000
福島県三島町朝岐字大清水	大谷川支流入山沢	1996年5月12日	崩壊・土石流	150,000
長野県小谷村・新潟県糸魚川市県境	姫川支流蒲原沢	1996年12月6日	崩壊・土石流	39,000
長野県鬼無里村	裾花川支流濁沢	1997年5月9日	地すべり	5,400,000
秋田県鹿角市八幡平	態沢川支流赤川	1997年5月11日	地すべり	2,000,000
秋田県田沢湖町田沢	玉川支流先立川	1997年5月14日	崩壊	300

を満たす融雪水量推算手法を提示する。同時に山地流域における融雪水供給特性の把握を行う。(C)建設省砂防課が調査した積雪・融雪期の斜面崩壊・土石流(表-1)のうちデータが比較的揃っている事例を抽出し、検証を行った融雪水量推算手法等を利用して発生までの気象・積雪深変化等から融雪水量を算出する。(D)融雪水量推算手法検証結果を踏まえ、対象とする現地流域での観測項目と手法を提示する。(E)算出した融雪水量を降雨量に加えて現行土石流警戒・避難基準へ適用し、積雪・融雪期における基準設定手法に関する検討を加える。(F)一方で、融雪水の斜面への浸透現象を踏まえた物理的な面からの斜面崩壊・土石流発生機構を把握することが警戒・避難基準設定手法の意味づけを行う上で重要なことから、積雪・融雪期の土石流発生場の特性把握のために、斜面表土層中の土壤水分状態を把握する。(G)これらにより融雪水を考慮した警戒・避難基準設定手法の提示を目標とする。さらに(H)現地での各種観測を数年間継続することにより、(I)基準雨量の考え方等における問題点を整理しながら基準の精度向上を図るものとする。

本報告では(B)の一部および(E)、(F)について、現地観測結果の紹介を行うとともにこれを踏まえた若干の考察と今後の課題を論ずる。なお、(B)については別報⁴⁾にて報告している。

3. 観測対象地と観測手法

観測対象地は、近年に融雪水に起因した土石流の発生事例⁵⁾があること、既存の水文・地質等基礎資料が整理されていることなどの条件により、姫川左支川である浦川流域（流域面積約22km²、流路延長約12km）とその周辺を選定した。浦川は風吹岳（1,880m）、フスブリ山（1,944m）、乗鞍岳

(2,436m)、稗田山(1,443m)に囲まれた比高差約2,000mの荒廃渓流であり、中流部において唐松沢と金山沢が合流し流下している。近年土石流が頻発しているのは金山沢側であるが、金山沢は明治44年の稗田山大崩落により形成された平坦面を侵食して形成されたと考えられる。このため過去の崩壊の影響範囲内ではもとの地層構造が大きく乱され、浸透流解析により地下水動態を精度良く再現できるようなモデルの作成は、地質の不均一さから困難となる可能性が大きい。一方、唐松沢は地質的に見て中生層(砂岩・頁岩からなる米馬層群)の上部を安山岩質溶岩(第四紀火山噴出物)が覆い、そこに崩壊斜面が存在するという、蒲原沢崩壊斜面の状況に近いと考え、水文観測斜面として唐松沢側を選定した。気象等観測地点と併せて図-2に示す。

(a) 斜面における積雪・融雪期の土壤水分状態の変動を把握するため、唐松沢左岸側の崩壊斜面上部(標高約1,200m)を選定し、縦断方向2箇所に土壤水分計を設置した。設置場所周辺の概略を図-3に示す。土壤水分計は感圧水分センサおよび

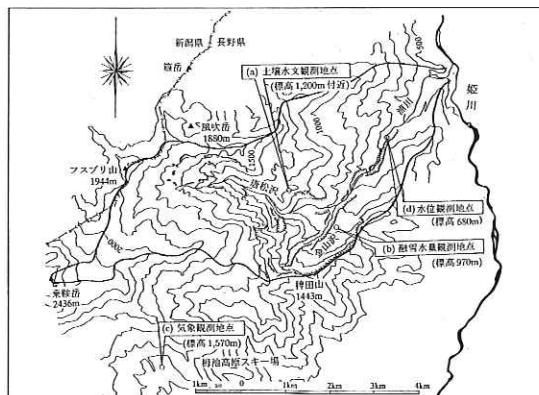


図-2 調査対象流域

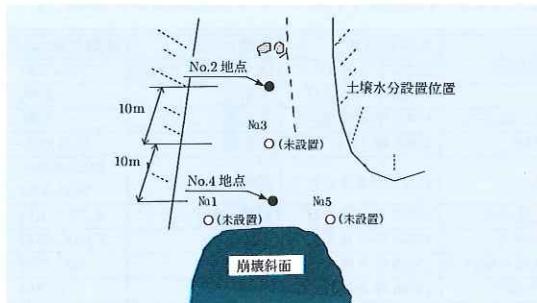


図-3 土壤水分計設置箇所概略図

計測部から成り、センサ設置深度は 20、50、100、150、200cm の 5 深度とした。用いたセンサは正圧・負圧兼用型であり、間隙水圧の測定も可能である。記録間隔は毎正時の瞬間値を自記記録した。

(b) 土壤水分変動計測斜面への供給水量を把握するため、近傍の平地（標高 970m）においてライシメータ 4 基を隣接して設置し、これの実測を行った。ライシメータは 100cm 四方の集水容器（受け皿）を地表面に設置し、積雪底面から流下する水を 200ml の転倒ますにより転倒回数の積算値として毎正時に自記記録した。なお、伊藤⁶⁾は集水器の大きさは 2m × 2m のものとそれ以上大きいものとでは大差ない結果が得られるとしているため、本観測では合計 4m² となるよう集水器を設置した。ライシメータの構造および設置位置周辺の概略を図-4 に示す。

(c) 流域中・上流部の気象・積雪状況の把握および融雪水量推算手法の検討に資するため、気象観測装置を設置した。観測装置は対象流域中標高別に数カ所設けることが理想的ではあるが、冬期間中の保守管理なしでの精度の高い観測は困難であることから、隣接流域である梅池高原（標高 1,570m 地点）において気象観測を行った。観測項目は気温、相対湿度、日射量（下向き・上向き）、放射収支量、風速、雪面温度、地温（深度 -20cm、-100cm）であり、これらを毎正時に自記記録した。積雪深、気圧データはスキー場より提供頂いた。温度湿度計および風速計については月 1 回程度、雪面から約 1.5m 程度の高さとなるよう調整を行った。また、平成 9 年 12 月より気象観測場所周辺においてもライシメータによる供給水量の実測を行っている。

(d) 対象流域全体での水収支を把握するため、浦川下流域にある浦川第 8 号砂防ダム（スリット式）のスリット部を利用して水圧式水位計を設置し、毎正時の水位を自記記録した。

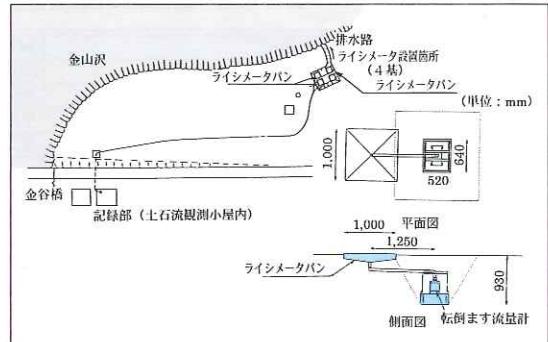


図-4 ライシメータ設置箇所概略図

4. 観測・調査結果

4.1 気象等観測結果

観測を開始してから 5 月中旬までの気象観測結果を、ライシメータによる供給水量実測値、気象庁地域気象観測所（小谷）の降水量および浦川の水位と併せて図-5 に示す。気象測器の調整・管理の不足により湿度、日射量、放射収支量、風速、雪面温度の各項目は観測を開始した平成 9 年 12 月 18 日から平成 10 年 4 月 7 日まで欠測が続いたが、その後は雪面温度を除いてデータを得ることができた。浦川の水位計は 4 月 20 日の出水時に破壊され、その後欠測となった。また、ライシメータは 4 基設置したが、内 1 基は 4 月 20 日まで欠測となつたため、残り 3 基の平均値をとった。特筆すべき点は、融雪最盛期となった 4 月 7 日から 22 日にかけての間には連日供給水量は 30mm/日を越え、この間に積雪底面から地表面へ供給された総水量は実測値で約 1,000mm/16 日、熱収支法による計算値で約 600mm/16 日といった規模のものであったことである。これはある 1 地点での観測結果であり、斜面への供給水量やそのピーク時期は標高や斜面の向き、積雪深や降雨量により異なるとは言え、量的には非積雪・融雪期の降雨イベントと比較しても大きな値であると言える。

なお、本報告中の融雪水量に関する計算時には、降水量を降雨と降雪に分離して検討を行った。降雨と降雪の分離については降水形態と気温の関係についての記述がある太田⁷⁾の報告を参考とし、降水量のうち降雨が占める割合を気温 (T) を用いて $T < 0^{\circ}\text{C}$: 0%、 $0^{\circ}\text{C} \leq T < 1^{\circ}\text{C}$: 25%、 $1^{\circ}\text{C} \leq T < 2^{\circ}\text{C}$: 50%、 $2^{\circ}\text{C} \leq T < 3^{\circ}\text{C}$: 75%、 $T \geq 3^{\circ}\text{C}$: 100% として計算した。

4.2 融雪特性

気象観測データを得ることができた 4 月 8 日以

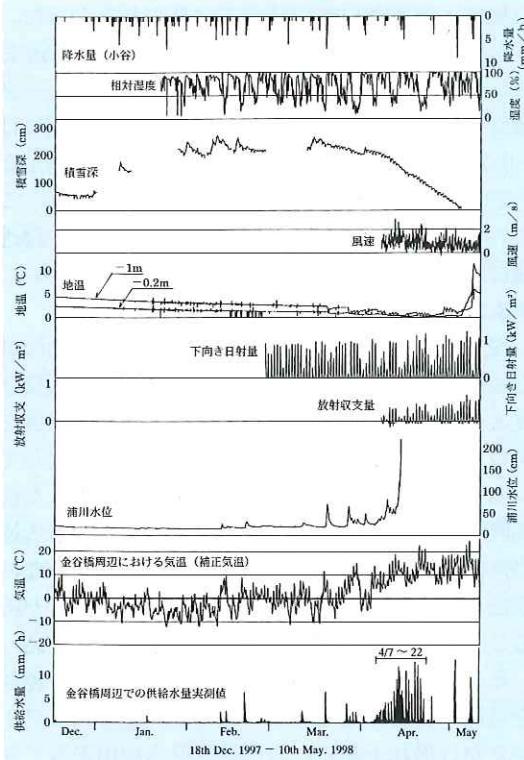


図-5 積雪・融雪期の気象等観測結果

降、消雪したと考えられる4月22日までの供給水量について、ライシメータ実測値と熱収支法⁸⁾を用いた計算値とを比較したものを図-6に示す。なお熱収支法においては、放射吸収量(Q_R)、大気と雪面の温度差に基づく顯熱交換量(Q_A)、雪の蒸発または大気中の水蒸気の雪面への凝結による潜熱交換量(Q_E)、雨が雪に与える熱量(Q_r)を考え、それぞれ(1)~(3)式により積雪表面への供給熱量を求めた後に氷の融解潜熱で除することにより融雪水量に換算し、これに降水量を加えて供給水量とした。

Q_R : 放射吸支計による実測値を使用

$$Q_A = 0.43T_{1.5}u_{1.5} \text{ (cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}\text{)}^8) \quad (1)$$

$T_{1.5}$: 雪面上 1.5m の気温,

$u_{1.5}$: 雪面上 1.5m の風速

$$Q_E = LE \text{ (cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hr}) \quad (2)$$

L : 水の蒸発凝結時の潜熱(596.7cal·g⁻¹),

E (大気中水蒸気の凝結量):

$$1.12 \times 10^{-3}(e_{1.5} - e_0)u_{1.5}(\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1})^8) \quad (3)$$

$e_{1.5}$: 雪面上 1.5m の蒸気圧, e_0 : 雪面蒸気圧

$$e = \{6.1078 \times 10^{7.5T} / (237.3 + T)\} \times \text{湿度}$$

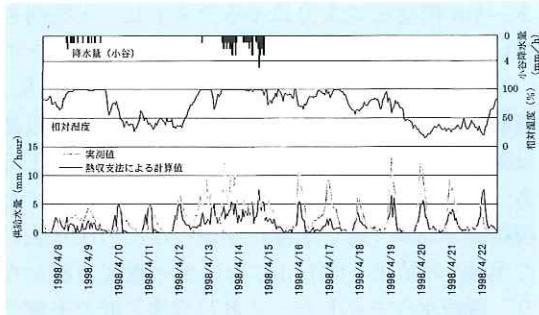


図-6 供給水量実測値と計算値比較図

$$Q_r = rT/10 \text{ (cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}) \quad (3)$$

r : 降雨量 (mm·hr⁻¹), T : 気温

なお、気温については樅池高原および気象庁地域気象観測所(白馬)のデータを用い、式(4)より時間単位で気温減率を算出して補正を行った。

気温減率 (°C/100m)

$$= -\{(T_T - T_H) / (1,570 - 703)\} \times 100 \quad (4)$$

T_T : 樅池高原での気温, T_H : 白馬観測所での気温

実測値と熱収支法による計算値とを比較すると実測値が計算値を上回り、日単位にすると多い日で約70mmの開きがあった。融雪水量の測定法としてライシメータを用いる方法では、積雪層中を移動する水の側方からの流入(もしくは側方への流出)の影響を受け、さらにこれは周辺微地形の影響を大きく受けていることが考えられる。このことについては、パンの面積を大きくする、或いはパンの数量を増やすことにより上述の影響誤差をある程度減ずることは可能である。また、消雪後の5~6月で比較すると、ライシメータ記録値は小谷での日降水量の約1.9倍を示していることから、ライシメータ設置場所においては小谷観測所での記録値よりも多い量の降水があったことが考えられる。このため今後、観測地における雨雪量計の設置等の対応を検討している。

別報⁴⁾では熱収支法による計算値を元として他の融雪水量推算手法を比較検討し、小池ら¹⁰⁾により提案された放射吸支、気温、降水量の3要素による手法でも実用上問題がないと考えられる誤差の範囲で融雪水量の推算が可能であることを示唆した。

4.3 土壤水分特性

4.3.1 計器設置斜面表土層の特性

土壤水分計設置斜面の地質・土質特性を把握するため、土壤水分計に影響のない場所において深

さ-1m程度まで人力によるテストピット掘削を行い、さらにその下層についてコアカッターを用いた-3m程度までの削孔を行った。その結果、表層から0.3~0.5mは暗褐色の表土であり、以深は淡褐色の火碎流堆積物起源の岩塊混じり粘土であった。コアカッターによる孔を利用して行った現場透水試験(地下水位がなかったため注水法にて実施)の結果、 9.0×10^{-6} cm/sec程度の値となり、難透水性を示した。これは岩塊の間を充填する粘土の透水性を反映するものである。

4.3.2 土壤水分変動特性

積雪・融雪期の表土層中土壤水分状態を非積雪・融雪期と比較するため、平成9年12月から平成10年11月にかけて通年行ってきた深度別観測のうちNo.2の箇所での結果を、日単位供給水量と併せて図-7に示す。供給水量の値は、4月まではライシメータ実測値を、また5月以後は気象庁小谷観測所の値を示した。土壤水分センサ埋設深度2mおよび1mは飽和帯を形成しやすい深度となっている。

積雪・融雪期には1・2月の厳冬期であっても毎日1mm/日前後の水供給が観測され、気温が高くなる等の条件に応じて数mm~20mm/日程度に上昇する日も見られた。その後4月初旬からの気温の上昇と合わせるような形で供給水量も増加し始め、いわゆる融雪最盛期には連日20~30mm/日を越える量の水が10日間以上にわたり供給された。土壤水分は水の供給に敏感に反応しているが、特に4月8日から22日にかけての融雪最盛期には深度2mおよび1mの層では長期にわたり飽和帯が継続しており、このような状態は今回観測し

た積雪・融雪期以外の降雨では見られなかった。

なお、積雪・融雪期以外の降雨によっても-2mおよび-1mの深度では飽和状態を示し、そのピーク値は4月と同等であること、7月から9月の間には-0.5mや-0.2mの層において大きく乾燥状態となっていること等がその他特徴として見られるが、これらの解釈については、今後進める土質試験や浸透流に関する解析と併せて別途報告する予定である。

4.3.3 実効雨量

現行の土石流警戒避難基準雨量³⁾は、実効雨量と短時間降雨強度もしくは実効雨量と有効雨量強度との関係の中に過去の発生事例・非発生事例をプロットし、これらの判別により基準を設定している。実効雨量は基本的には半減期を考慮した前期降雨に24時間の無降雨期間の後に継続する一連の降雨を加えて算出される。積雪・融雪期にこの手法をそのまま適用した場合、連日の水供給があることにより実効雨量値は異常に大きな値となる。

そこで、一連の降雨の概念をなくし、減少係数を時間単位で乗じて積算する手法(集中して発生するがけ崩れ予測のために兵庫県六甲山系等で運用中)により実効雨量値を算出し、半減期別時系列的に図-7中に示した。なお、実効雨量値は式(5)により算出した。

$$R_r = r_T + (\alpha_1 \cdot r_{T-1} + \alpha_2 \cdot r_{T-2} + \dots + \alpha_x \cdot r_{T-x}) = r_T + \sum_{n=1}^x \alpha_n \cdot r_{T-n} \quad (5)$$

R_r : 実効雨量, α_n : 減少係数 $\alpha_n = 0.5^{T/t}$

r_T : 時刻 Tにおける時間雨量, t: 半減期

図において、圧力水頭が0付近以上(飽和もし

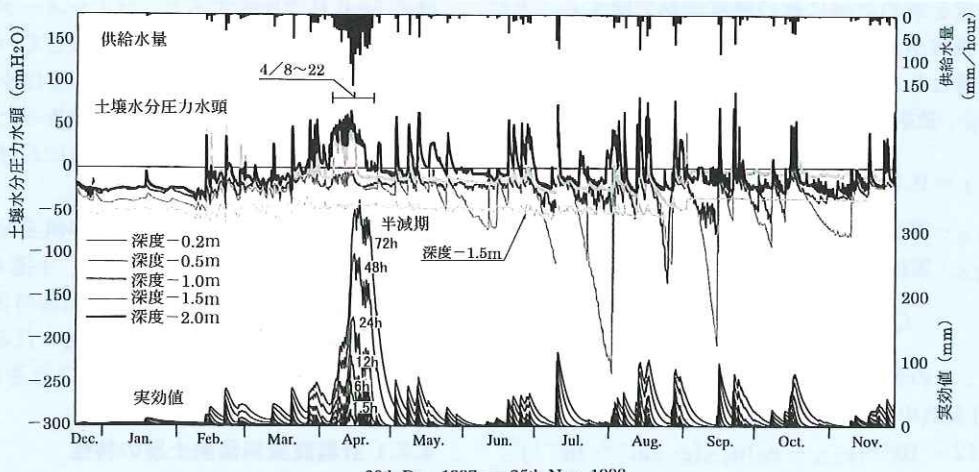


図-7 No.2 地点の土壤水分変動観測結果

くは飽和に近い湿润状態)を示す際の実効雨量値の変動形状は、半減期を大きくするにつれて深部の土壤水分変動の形状に近くなり、今回の観測対象斜面の深度 2m では半減期 12 時間程度とすることにより土壤水分状態を反映した実効雨量値となる。このことは、「深度が小である場合には半減期を短く、また深度が大である場合には半減期を長く」というように、対象とする崩壊面深度や規模、さらには土層中での水の浸透能に合わせて半減期を設定することにより、積雪・融雪期の長期にわたる水供給と浸透特性を反映した基準を作成することが可能であることを示唆している。

5. まとめと今後の課題

積雪・融雪期、特に融雪が盛んになる時期においては降雨に加え、多量の融雪水が連日斜面へ供給される。その供給のされ方は、積雪・融雪期以外にみられる雨の降り方とは異なっている。特に融雪最盛期に観測地点においては 15 日間にわたり連日 20mm 以上、この間の総供給水量約 600mm(熱収支法による計算値)といった規模の斜面への水供給が行われ、これに伴い土壤水分状態も比較的長期にわたり飽和帯を形成する層が見られ、斜面への水供給実態や土壤水分状態に関して、積雪・融雪期以外の間との相違点が定性的にではあるが確認できた。また、上記の積雪・融雪期における水供給特性を踏まえ、従来からの一連の降雨の概念をなくし、減少係数を時間単位で乗じて積算する実効雨量値と土壤水分状態との比較により、土層深度と半減期との関係を定性的に把握した。

今後は、過去に発生した積雪・融雪期の土石流発生事例を対象とし、発生までの融雪水量を降雨量に加味することにより、土石流発生基準線の設定手法に関する検討を加え、融雪を加味した土石流警戒・避難基準設定手法を確立させる予定である。また、融雪に起因する土石流発生機構解明の

ため、別途行っている土質試験、pF 試験等の結果を用い、降雨の浸透を再現するモデルを積雪・融雪期に適用し、表土層中の水の浸透と土壤水分特性の比較検討を進める予定である。

謝辞：本研究を進めるにあたり、現地観測計画作成や各種調査・観測に協力を賜りました丸井英明氏(新潟大学)、太田岳史氏(岩手大学)、窪田順平氏(東京農工大学)、松本砂防工事事務所調査課の各位に謝意を表します。また、各種気象観測に際して場所の提供を頂くと共に、一部気象観測データを快く提供頂きました(株)白馬観光開発の関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会蒲原沢土石流災害調査特別委員会：姫川支川蒲原沢土石流災害と危機管理に関する調査研究,p.70,1998.
- 2) 社団法人砂防学会：12.6 蒲原沢土石流災害調査報告書,p.70,1997.
- 3) 建設省河川局砂防部砂防課：土石流災害に関する警報の発令と避難の指示のための降雨量設定指針(案),1984.
- 4) 石田孝司、南 哲行、山田 孝、石田哲也、加藤信夫、吉川正徳：融雪を考慮した土石流警戒・避難基準設定手法の開発に向けての研究、砂防学会誌(新砂防)投稿中
- 5) 渡辺 昇、小林 宏、桜井 亘：姫川支川浦川に発生した大規模土石流について、砂防学会誌(新砂防)Vol.46,No.1,pp.41-44,1993.
- 6) 伊藤直次：融雪に関する実験的研究,1955~58 年奥利根地区水文気象調査総合報告、東京電力株式会社、東京管区気象台,pp.24-52,1959.
- 7) 太田岳史：気温および降水量による山地積雪量の経時変化の推定、雪水 51 卷 1 号,pp.37-48,1989.
- 8) 小島賢治：融雪機構と熱収支、気象研究ノート第 136 号,pp.1-38,1979.
- 9) 石井幸男：融雪の研究、積雪基礎調査、北海道電力株式会社、札幌管区気象台,1959.
- 10) 小池俊雄、高橋 裕、吉野昭一：融雪水量分布のモデル化に関する研究、土木学会論文集 第 363 号,II-4,pp.165-174,1985.

石田孝司*



建設省土木研究所
新潟試験所研究員
Koji ISHIDA

南 哲行**



建設省土木研究所砂防部
砂防研究室長
Noriyuki MINAMI

山田 孝***



同 砂防研究室
主任研究員、農博
Dr.Takashi YAMADA

石田哲也****



同 砂防研究室
Tetsuya ISHIDA