

融雪期の土砂災害に関連する 土壌水分の定量評価

QUANTITATIVE EVALUATION OF SOIL MOISTURE ASSOCIATED WITH LANDSLIDE DISASTERS DURING SNOWMELT PERIOD

臼谷友秀¹・中津川誠²・松岡直基³

Tomohide USUTANI, Makoto NAKATSUGAWA and Naoki MATSUOKA

¹ 正会員 一般財団法人 日本気象協会 北海道支社 (〒064-8555 札幌中央区北 4 条西 23 丁目)

² 正会員 博士 (工学) 室蘭工業大学大学院工学研究科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

³ 非会員 一般財団法人 日本気象協会 北海道支社 (〒064-8555 札幌中央区北 4 条西 23 丁目)

Due to rainfall during the snowmelt season in May 2012, landslides occurred at Nakayama Pass, which is on the main route between Sapporo and Southern Hokkaido, and all lanes there were temporarily closed for the first time since the route opened in 1969. Quantitative evaluation for the risk of landslide such as that at Nakayama Pass during the snowmelt season has remained an issue. In this study, we proposed a method for quantifying the soil moisture of potential landslide sites by comprehensively estimating the long-term water cycle of the watershed. As the result of applying the proposed method to the Nakayama Pass landslide site, it was clarified that the soil moisture of the landslide site at the time of the May 2012 disaster was the highest in the previous 33 years. This proposal was considered effective for quantitative evaluation of the soil moisture associated with landslide during the snowmelt season.

Key Words : landslide, soil moisture, amount of snowmelt, long-term water cycle, tank model

1. はじめに

2012 年 5 月 3 日～6 日にかけて、本州の南岸沿いに東進した低気圧が東北地方を北上し、北海道を縦断した。この低気圧に伴って、北海道の太平洋側を中心に大雨となった(図-1)。5 月 4 日に観測された日雨量は、日本海側南部や太平洋側の 30 か所のアメダスにおいて観測史上最大となる記録的な降雨であった。この降雨によって、国道や道道においては土砂崩れや法面決壊などによる通行止め、住宅では浸水など多くの被害が発生した。

札幌市と道南方面を結ぶ国道 230 号中山峠では、この大雨時に土砂崩れと地すべりが発生し、1969 年の開通以来、初めてとなる長期全面通行止めに至った。災害の原因として、地形条件と降雨に加え融雪が挙げられているものの、融雪量やそれを含む災害発生危険度に関しては定量的な評価には至っていない¹⁾。この事例の他、2012 年 4 月は国内各地で土砂災害が発生した。

土砂災害の危険度を評価する手法に関しては多くの報告例²⁾³⁾⁴⁾があり、実効雨量による手法や土壌水分量をタンクモデルによって考慮した土壌雨量指数を用いる手法が提案されている。土壌雨量指数は、気象庁と都道府県

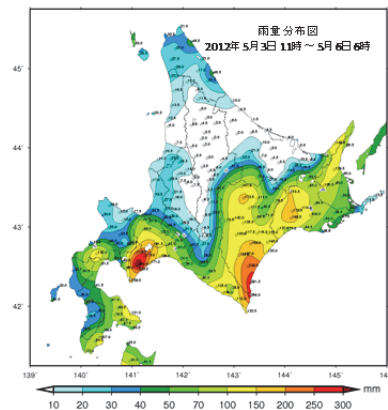


図-1 2012 年 5 月 3 日～6 日の雨量分布。

が共同で発表する「土砂災害警戒情報」⁵⁾として運用されているものの、対象とする土砂災害は大雨によるものであり、融雪を含む災害は含まれない。また、融雪を伴う土砂災害の危険度評価に関しては報告例が少なく⁶⁾、融雪を考慮した評価方法の確立が課題となっている。

そこで本研究では、2012 年 5 月 4 日に発生した中山峠の災害を取り上げ、融雪を含む場合の土壌水分の推定をとおり、災害発生危険度の定量的な評価を試みた。具体的には、以下の検討を行った。

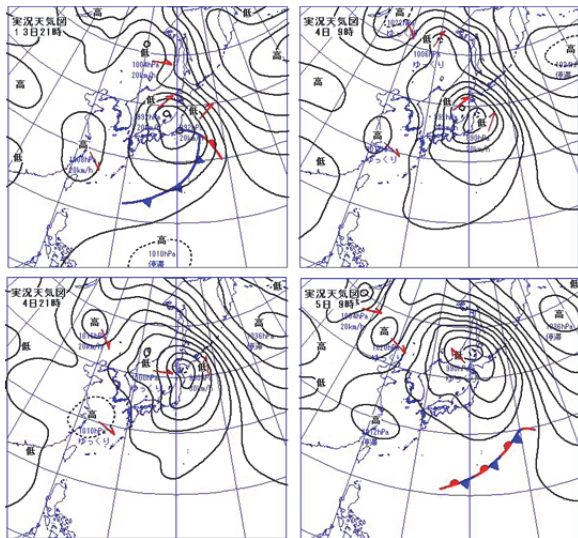


図-2 2012 年 5 月 3 日～5 日の地上天気図。上段左：3 日 21 時，上段右：4 日 9 時，下段左：4 日 21 時，下段右：5 日 9 時。



図-3 2012 年 5 月 3 日～5 日に発生した災害等の発生箇所。

- 1) 気象水文データを分析し、2012 年 5 月 4 日に発生した土砂災害の特異性を考察した。その結果、降雨規模、災害地点を含む流域の流出規模において、過去を超える規模にはなかった。
- 2) 水文諸量を包括的に推定し得る手法を用い、流域の水循環に着目した土壌水分の評価方法を提案した。評価方法の妥当性は、災害地点を含むダム流域の流入量をもって確認した。
- 3) この手法を用い、災害現場の貯留量を推定した。その結果、2012 年 5 月 4 日の貯留量は、1980 年以降で最大になることが推算された。災害発生日までの融雪が貯留量を増大させ、そこに降った雨によって最大の貯留量に達したものと考察された。

以上から、本論文の手法によって推定される貯留量は、融雪を含む土砂災害の発生危険度を評価する上で有効な情報であると考えられた。

2. 災害事例の概要と気象状況の特異性

(1) 災害事例の概要

降雨に見舞われた 2012 年 5 月 3 日～5 日の地上天気図を図-2 に示す。この大雨の原因は、図の中央に位置する低気圧である。図によると、この低気圧は、東方に



図-4 災害発生場所と周辺の気象観測所。

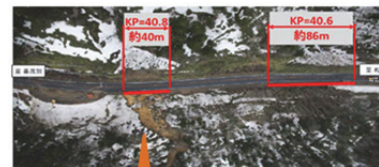


図-5 国道 230 号中山峠の被災状況¹⁾⁸⁾。

ある優勢な高気圧に進路を阻まれ、進行速度が遅くなっていることがわかる。また、低気圧が北海道の西海上を北上したため、湿った暖かい空気が南東の海上から北海道に流入している様子が、この天気図から読み取れる。以上のように、低気圧の進路と進行速度が遅かったことが相俟って、道内に大雨をもたらしたものと考えられる。

この大雨によって発生した災害箇所を図-3 に示す。図に示すように、北海道の太平洋側の地域を中心に、広い範囲で、土砂崩れ、法面崩壊、冠水といった災害が発生した。また、美利河ダムでは、竣工された 1991 年以降で最大の流入量が生じ、異常洪水時防災操作が実施されていた⁷⁾。

多数の土砂災害が発生した中で、札幌市と道南方面を結ぶ国道 230 号中山峠では、1969 年に開通して以来、初めてとなる全面通行止めに至った (図-4)。図-5 は被災現場の写真であるが、この災害において、KP40.6 地点では、道路幅約 10 m、道路延長約 86 m の範囲で地すべりが発生し、KP40.8 地点においては、盛土法面が幅 (道路延長) 約 40 m、横断幅約 110 m の範囲で、約 13,000 m³ の土砂が崩落した¹⁾⁸⁾。災害発生後、片側交互通行が開始されるまでに 20 日間を要し、大型連休中の観光や物流に影響が見られた。

この中山峠の災害を取り上げ、本災害の特異性を、この災害と過去における気象状況の比較をとおして考察する。

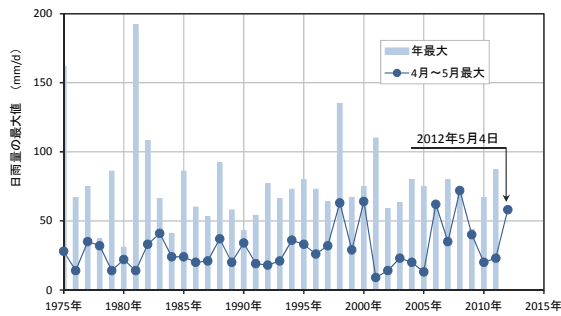


図-6 最大日雨量の推移（豊平峡ダム管理所）.

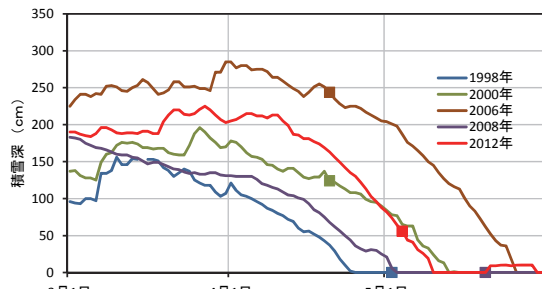


図-7 積雪深の経過（大二股）. ■は大雨発生日を表す.

(2) 気象状況の特性

分析には、災害発生場所に近い、豊平峡ダム管理所と大二股で取得された気象水文データを用いた（図-4）。豊平峡ダム管理所は災害現場の北側約 5 km に位置し、そこで観測されている気温、降水量、ダム流入量データを用いた。積雪深は大二股のデータを用いた。

図-6 は豊平峡ダム管理所における日雨量の最大値の推移である。図中の水色の棒グラフは年最大日雨量、●印は融雪期にあたる 4 月～5 月の最大日雨量である。この図によると、年最大日雨量の既往最大は 1981 年であり、災害の発生した 2012 年 5 月 4 日の日雨量を超える大雨は幾度も発生していたことがわかる。また、融雪期に限定しても、本災害時の日雨量は既往最大ではなく、雨量規模においては本災害の特異性は見られない。

4 月～5 月において土壌に供給される水としては融雪水も考慮する必要がある。そこで、融雪水の発生源となる積雪状況を整理した。ここでは、図-6 において 4 月～5 月の降雨規模の大きい 5 年（1998 年、2000 年、2006 年、2008 年、2012 年）を比較した。この 5 年の積雪深が図-7 である。図中の■印は、4 月～5 月の最大日雨量の起日を表している。

この図によると、2000 年・2006 年・2012 年の大雨時には積雪があり、1998 年・2008 年は大雨が発生する前に既に消雪していたことがわかる。2008 年は、1975 年以降で 4 月～5 月として最大の日雨量が観測されていたものの融雪水は供給されていなかったといえる。1998 年も同様の状況にあった。

一方、2000 年・2006 年は、大雨発生日においても積雪があり、積雪状況は 2012 年と同様である。これら 3 年の大雨事例について、大雨発生までの 7 日間の日平均

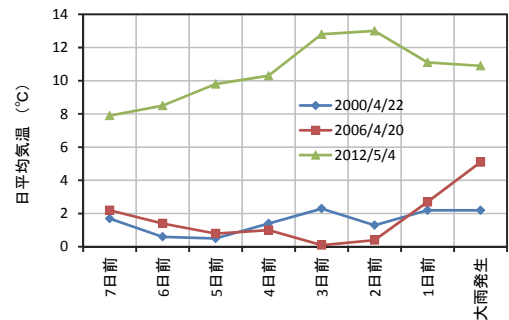


図-8 大雨発生までの気温の経過.

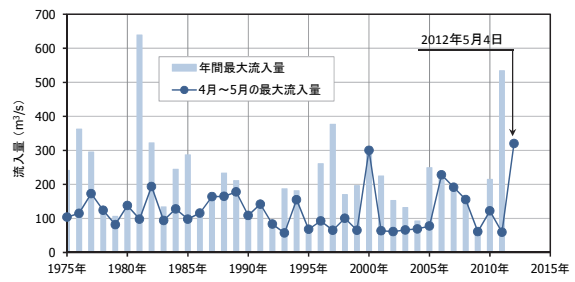


図-9 豊平峡ダムの年間および 4 月～5 月の最大流入量.

気温を示したものが図-8 である。この図によると 2000 年と 2006 年は大雨発生日までの数日間の気温は 0℃～2℃の間を推移しているものの、2012 年の事例は大雨発生日の 4 日前から日平均気温が 10℃を超えていた。2012 年は、連日の高い気温により融雪が進み、土壌が融雪水で満たされ、このような中で大雨に見舞われていたことが伺える。

融雪や降雨は、土壌をとおり河川に到達する。すなわち、土壌に供給された水量の多さは河川流量に現れる。そこで、災害現場を流域内に包含する豊平峡ダムにおける流出状況を調べた（図-9）。この図は、1 時間毎の流入量データから、1 年間の最大値と 4 月～5 月の最大値を抽出し図化した。図中、水色の棒グラフは 1 年間の最大値、青色の●印は 4 月～5 月の最大値である。

図によると、流入量の最大は、日雨量の最大が観測された 1981 年、次いで 2011 年の順である。2012 年 5 月 4 日は、出水規模としては上位にランクされるものの最大の洪水ではなかった。本災害時において土壌に供給されていた水量は、過去に発生したことのある規模であったと考えられる。

以上から、2012 年 5 月 4 日の災害は融雪水が大きく関与していたものと考えられるが、観測データからは明瞭な特異性は見られなかった。

そこで、融雪量と土壌が貯留していた水量（以下、貯留量と呼ぶ）を定量化し、貯留量に注目して本災害と過去の大雨時における状況を比較する。

3. 貯留量の推定手法と検証結果

(1) 推定手法

貯留量は、土壌水分計等によって観測されるが、観測

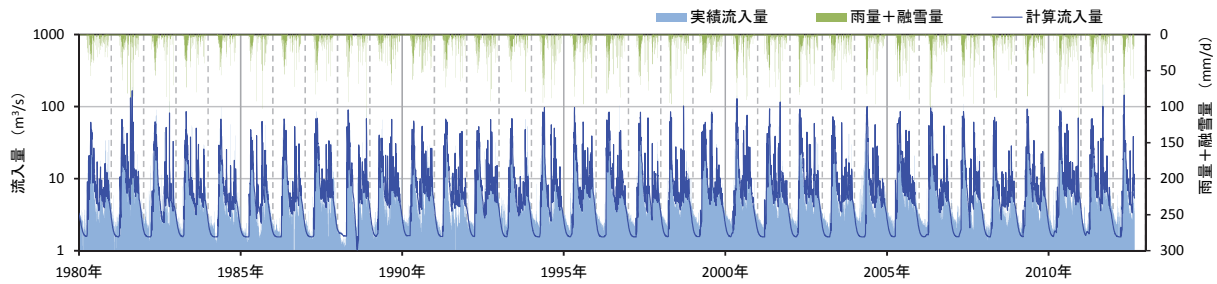


図-11 流入量の再現結果. 豊平峡ダム, 1980年～2012年.

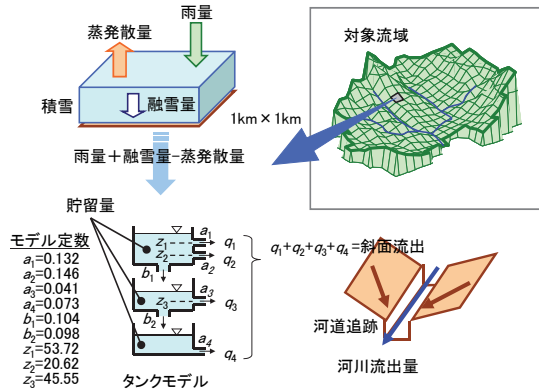


図-10 水循環計算の模式図.

データの無い状況においては、推定した貯留量の妥当性を評価することが難しい。そこで本研究では、貯留量を流域水循環の一つの過程として捉え、流域水循環を構成する水文諸量（雨量、融雪量、蒸発散量、流出量）を包括的に推定し、河川流量をもって貯留量の妥当性を検証することにした。

貯留量の推定に当たっては、長期的な水収支が担保されることが重要と考える。その際、雪に関するプロセスを考慮することが不可欠となる。さらに、水文諸量には空間的な偏りがあることから、メッシュ単位での計算が必要と考える。以上の点に留意し、貯留量の推定を目的とした流域水循環モデルを構築した（図-10）

計算は、まず、積雪や融雪、蒸発散量といった水文諸量を、中津川らが提案する手法^{9),10)}を用いて、メッシュ単位で推定した。この手法は、近藤ら¹¹⁾の提案する2層モデルを基本に積雪・融雪過程を考慮したモデルである。これによって、地上気象データ（日単位）から約1 km四方のメッシュ毎に水文諸量（降雨、降雪、積雪、融雪、蒸発散量）を推定した。ここでは、基礎データとしてダム管理用に取得されているルーチンデータ（気温、湿度、降水量、風速、積雪深、日射量、気圧）を使用した。また、地形や地被に関するデータは、石狩川ランドスケープ情報¹²⁾を用いた。

以上で算出された雨量、融雪量、蒸発散量をタンクモデルで構成した流出モデル¹⁰⁾に入力し、流出量を算定した。メッシュの斜面流出量はタンクモデルで算出し、kinematic wave式を用いてダム地点まで河道追跡を行った。以上の計算によって得られる各タンクの貯留高を貯留量とみなした。タンクモデルの係数は、ダム流入量を

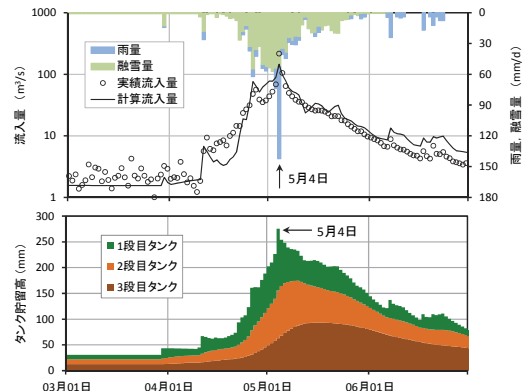


図-12 2012年の流入量と貯留高の推定結果. 上段：流入量の再現結果, 下段：タンク貯留高.

再現し得るよう試行錯誤によって決定し、図-10に示す値を採用した。

なお、貯留量を得るには河道追跡は必要ない。しかしながら、貯留量の観測データが無いことから、値の妥当性が評価できない。そこで、推定した貯留量の妥当性を検証する目的から、河道追跡によってダム地点の流量を算出した。

(2) 検証結果

前節で述べた手法により、災害地点を包含する豊平峡ダムにおける日単位の流入量を再現し、実績流入量と比較した。対象期間は、最大の日雨量が観測された1981年を含むように、1980年～2012年とした。

流入量の再現結果を図-11に示す。図中、水色の面は実績流入量、青色の実線は計算流入量、緑色の棒グラフは雨量と融雪量の合計値である。この図によると、計算流入量は季節・年々な流量変動を概ね再現しており、このことからモデルにおいて流域の水収支および貯留量の変動も妥当に表現されているものと推察される。

図-12は、2012年の流入量、貯留量を詳細に示したものである。図の上段には流入量・雨量・融雪量、下段にはタンク貯留高を示した。タンク貯留高はメッシュ毎に算出される値の流域平均値である。この図によると、4月中旬から融雪量が増えたことによって貯留量が増大し、貯留量のピーク付近で約90 mmの降雨に見舞われていたことがわかる。5月4日までの数日間は、1日当たり60 mmもの融雪水が土壌に供給されていたものと推算された。

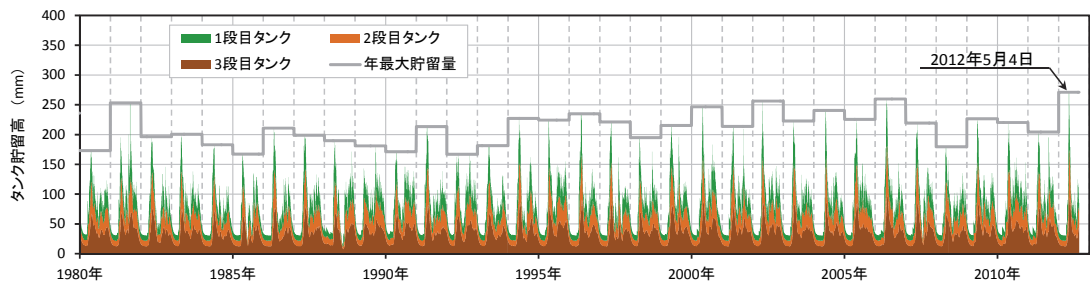


図-13 災害現場の土壌貯留量の推定結果 (1980 年～2012 年)。

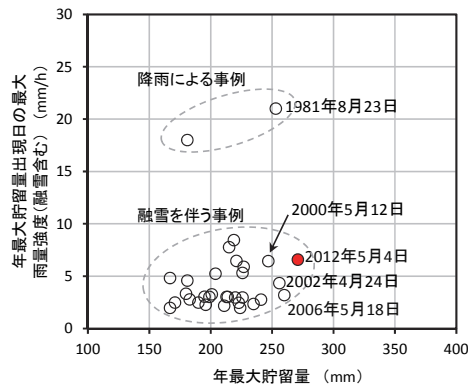


図-14 年最大貯留量と雨量強度 (融雪含む) の関係。

4. 災害現場における貯留量の推定結果

図-13 は災害現場における貯留量を推定した結果である。なお、災害現場は周辺の4メッシュの隅に位置していることから、4メッシュの平均貯留量を当該地点の貯留量とした。図中の緑色、オレンジ色、茶色は、それぞれ、1段目タンク、2段目タンク、3段目タンクの貯留高を表す。また、灰色の実線は、それぞれの年における最大貯留量を表している。

この図によると、災害現場の貯留量は150 mm～250 mmの範囲を推移しているものの、1981年・2002年・2006年・2012年は250 mmを超えている。貯留量の最大は2012年5月4日の271 mmであり、災害の発生したこの事例が、1980年以降の最大と推算された。

土砂災害の危険度判定には、半減期の異なる実効雨量が用いられることが多い。これを参考に、本手法で算出された貯留量と融雪を含む雨量強度から、本災害の特徴を調べた(図-14)。図の横軸は年最大貯留量、縦軸は最大貯留量出現日の最大雨量強度(融雪を含む)である。時間雨量には、長期データが入手できる豊平峡ダム管理所のデータを用いた。時間融雪量は、豊平峡ダム管理所の気温を災害現場とダム管理所の標高差で補正し、それを基に積算暖度法によって算出した¹³⁾。この図によると、2012年5月4日の貯留量は既往最大となっていることがわかる。一方、雨量強度(融雪を含む)は、降雨による事例が極端に大きいなど、本事例を超える例が数多く見られる。以上から、本事例は、短時間の雨量強度より、長期的な貯留量が大きく関与していたものと考えられる。

表-1 年最大貯留量事例における雨量、融雪量。

年	最大貯留量 出現日	雨量	融雪量	雨量+融雪量	最大貯留量出現日 雨量	融雪量	雨量+融雪量
1980	05月14日	15	142	157	0	35	35
1981	08月23日	271	0	271	228	0	228
1982	05月06日	34	195	229	3	45	47
1983	04月27日	32	204	236	11	38	49
1984	05月23日	0	154	154	0	35	35
1985	04月25日	37	162	198	4	37	41
1986	05月08日	22	228	250	3	48	50
1987	05月10日	3	159	162	3	39	42
1988	05月01日	26	212	238	3	54	56
1989	09月04日	175	0	175	53	0	53
1990	05月12日	6	147	153	6	23	29
1991	05月10日	24	244	268	4	44	47
1992	05月14日	20	112	132	20	18	38
1993	05月25日	30	110	140	26	24	50
1994	05月10日	48	223	271	14	42	57
1995	05月01日	43	306	349	0	76	76
1996	05月22日	13	269	282	3	53	55
1997	05月17日	41	160	201	18	39	57
1998	04月22日	3	243	246	0	39	39
1999	05月05日	43	177	220	35	23	58
2000	05月12日	71	275	347	64	46	110
2001	05月15日	10	205	215	0	43	43
2002	04月24日	6	289	295	6	53	60
2003	05月03日	22	286	308	0	61	61
2004	05月20日	21	339	359	0	61	61
2005	05月19日	37	200	238	17	52	69
2006	05月18日	7	338	345	0	60	60
2007	05月17日	50	119	169	43	28	70
2008	04月24日	11	184	195	11	28	39
2009	05月07日	0	334	334	0	61	61
2010	05月07日	17	282	299	11	62	72
2011	05月07日	35	117	153	20	41	61
2012	05月04日	94	343	437	70	30	100

※各項の最大値には灰色を入れた。

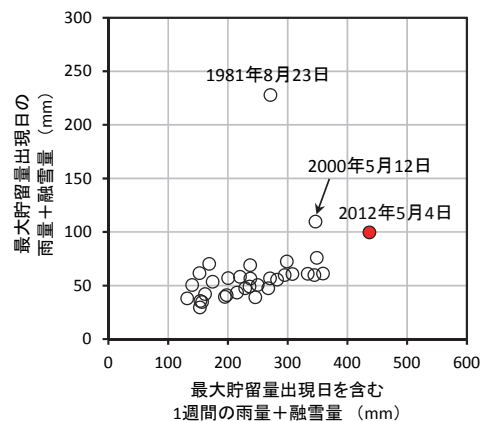


図-15 年最大貯留量出現日までの1週間、および、当日の雨量、融雪量。

表-1 は、貯留量が年最大となった日までの1週間の雨量・融雪量と、当日の雨量・融雪量を整理したものである。表では、各項の最大値の欄には灰色を入れた。この表を図に示したものが図-15である。これらの図表によると、2012年5月4日の事例は、最大貯留量が出現するまでの1週間の雨量と融雪量の合計は400 mmを超え、1980年以降で最大となる推定結果となった。日雨量の最大が観測された1981年8月や大規模な融雪洪水が発生した2000年5月12日は、当日の雨量・融雪量は大き

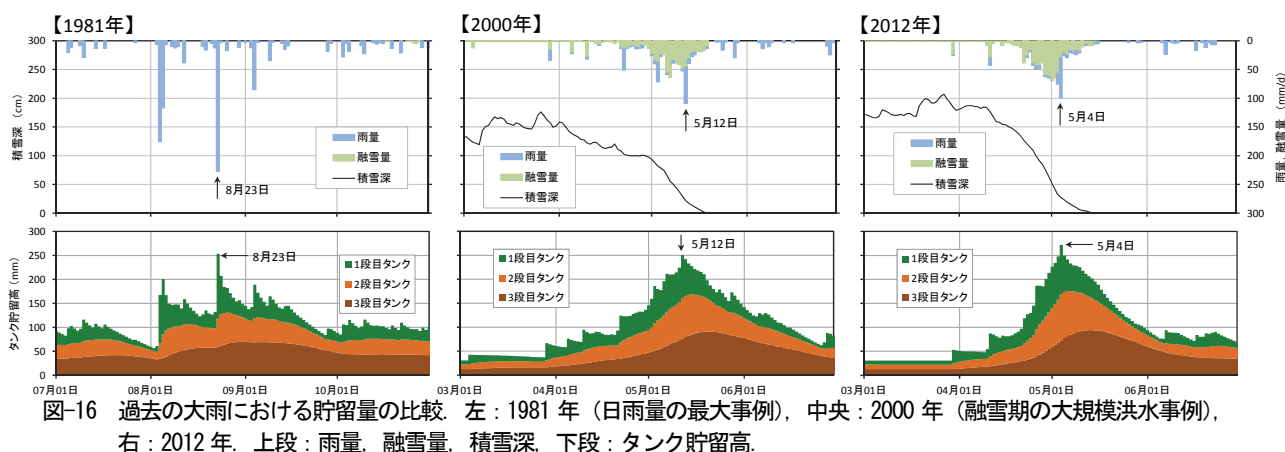


図-16 過去の大雨における貯留量の比較 左：1981年（日雨量の最大事例），中央：2000年（融雪期の大規模洪水事例），右：2012年。上段：雨量，融雪量，積雪深，下段：タンク貯留高。

いものの、1週間の雨量と融雪量は2012年5月4日の量には達していない。2012年の災害は、他の事例に比べて、先行降雨（融雪を含む）が多かった点が特徴であったと考えられる。

1981年（日雨量の最大）、2000年（大規模融雪洪水）、2012年の貯留状況を比較したものが図-16である。この図によると、2012年5月4日の事例では、連日の融雪によって前日の貯留量が約250mmにまで増大している。このため、5月4日の雨量や融雪量が既往最大にはならずとも、貯留量は既往最大に達したのと考えられる。

5. まとめ

本報告において得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 2012年5月4日に土砂災害の発生した中山峠を対象にして、本災害における特異性を気象水文データから考察した。本災害の降雨規模、また、災害地点を含む流域の流出規模においても、過去を超える規模にはなかった。
- 2) 流域の水循環に着目した長期の水文諸量の推定と流出計算に基づき、土壌水分を定量的に評価する方法を提案した。
- 3) この評価方法の妥当性は、災害発生地点を含むダム流域の流入量をもって確認した。
- 4) 災害発生箇所の貯留量を推定した。その結果、2012年5月4日の貯留量は、1980年以降で最大となった。以上から、本災害の特異性は、連日の融雪によって増大していた貯留量にあると考えられた。

以上、流域水循環の視点から推定した貯留量は、土砂災害に関連する土壌水分を定量的に評価する上で有効な情報と考えられた。

謝辞：本研究の一部は学術研究助成基金助成基金基礎研究（C）（課題番号 23560602）の助成を受けた。また、本研究を進めるにあたり、札幌開発建設部 豊平川ダム統合管理事務所よりデータ提供等で協力いただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 北海道開発局：平成24年6月7日局長定例記者会見、＜<http://www.hkd.mlit.go.jp/kyokutyuu/h24/0607/kyokutyuu.html>＞（アクセス日：2012/6/15）。
- 2) 寺田秀樹，中谷洋明：土砂災害警戒避難基準の設定方法，国土技術総合研究所資料，第5号，2001。
- 3) 道上正規，小島英司：集中豪雨による崖崩れの発生予測に関する研究，鳥取大学工学部研究報告12（1），pp.167-178，1981。
- 4) 岡田憲治，牧原康隆，新保明彦，永田和彦，国次雅司，斉藤清：土壌雨量指数，天気48（5），pp.349-356，2001。
- 5) 気象庁：土壌雨量指数，＜<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/bosai/dojoshisu.html>＞（アクセス日：2012/8/20）。
- 6) 松浦純生：積算暖度法を用いた土砂災害危険度評価手法の開発，近畿建設協会研究助成発表会発表論文，2012。
- 7) 函館開発建設部 美利河ダム管理支所：平成24年5月3日～6日出水における「美利河ダムの防災操作効果について」，＜http://www.hk.hkd.mlit.go.jp/water/pirika/syussui_pdf/120503_06_syussui.pdf＞（アクセス日：2012/5/21）。
- 8) 札幌開発建設部：国道230号中山峠通行止めについて（第6報），＜<http://www.sp.hkd.mlit.go.jp/press/pdf/12050801.pdf>＞（アクセス日：2012/5/10）。
- 9) 口澤寿，中津川誠：熱・水収支を考慮した流域スケールの積雪と蒸発散量の推定，北海道開発土木研究所月報，No.588，pp.19-38，2002。
- 10) 臼谷友秀，工藤啓介，中津川誠：石狩川流域における水循環の定量化について，水工学論文集，第49巻，pp.229-234，2005。
- 11) 近藤純正：水環境の気象学，朝倉書店，337p.，1994。
- 12) （財）北海道河川防災研究センター：石狩川流域ランドスケープ情報，1998。
- 13) （財）北海道河川防災研究センター：水文情報の総合化による融雪期ダム流入量の推算，研究所紀要，XVII，pp.299-323，2006。

（2012.9.30 受付）