

平成15年台風10号による北海道日高 豪雨災害の概要について

AN OUTLINE OF HEAVY RAINFALL DISASTERS IN HIDAKA REGION,
HOKKAIDO, BY TYPHOON NO. 10, 2003

長谷川和義¹・新谷融²・小川長宏³・菊池俊一⁴・黒木幹男⁵・小松利光⁶・
嵯峨浩⁷・清水康行¹・清水収⁸・鈴木洋之⁹・鈴木優一³・田中岳¹・
田中仁¹⁰・藤間聡¹¹・中津川誠¹²・八田茂実¹³・村上泰啓¹²・山下俊彦¹・
山田孝¹⁴・渡邊康玄³・渡部靖憲¹・藤田睦博⁵

Kazuyoshi HASEGAWA, Tohru ARAYAE, Takehiro OGAWA, Shunichi KIKUCHI,
Mikio KUROKI, Toshimitsu KOMATSU, Hiroshi SAGA, Osamu SHIMIZU, Hiroyuki SUZUKI,
Yuichi SUZUKI, Gaku TANAKA, Hitoshi TANAKA, Satoshi TOHMA,
Makoto NAKATSUGAWA, Shigemi HATTA, Yasuhiro MURAKAMI, Toshiko YAMASHITA,
Takashi YAMADA, Yasuharu WATANABE, Yasunori WATANABE, Mutsuhiro FUJITA

¹正会員 北海道大学 大学院工学研究科(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

²非会員 北海道大学名誉教授 大学院農学研究科(〒060-8589 札幌市北区北9条西9丁目)

³正会員 北海道開発土木研究所 河川研究室(〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

⁴非会員 北海道大学 大学院農学研究科(〒060-8589 札幌市北区北9条西9丁目)

⁵フェロー 北海道大学 大学院工学研究科(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

⁶フェロー 九州大学 大学院工学研究科(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

⁷正会員 北海学園大学 工学部土木工学科(〒064-0926 札幌市中央区南26条西11丁目)

⁸非会員 宮崎大学 農学部生物環境科学科(〒889-2192 宮崎市学園木花台西1-1)

⁹正会員 石川工業高等専門学校 環境都市工学科(〒929-0392 石川県河北郡津幡町北中条)

¹⁰正会員 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06)

¹¹フェロー 室蘭工業大学 建設システム工学科(〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

¹²正会員 北海道開発土木研究所 環境研究室(〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

¹³正会員 苫小牧工業高等専門学校 環境都市工学科(〒059-1275 苫小牧市字錦岡443)

¹⁴正会員 北海道大学 大学院農学研究科(〒060-8589 札幌市北区北9条西9丁目)

The typhoon No. 10 hit the Pacific coast in Hokkaido on August 9 in 2003. The casualties were 10 killed and 3 wounded. The missing person has not been found yet. This typhoon gave the biggest damage by flood to Hokkaido in the last twenty years. In Saru River basin and Appetu River basin in Hidaka region, serious damages, such as flooded house, house failure and bridge fall, occurred by this typhoon. Farmland and flood plain were covered for the large sediment.

In this paper, we will report an outline of heavy rainfall disasters of Hidaka region in Hokkaido by the typhoon No. 10. We hope that the result of this investigation helps to clarify the mechanisms of the heavy rainfall disasters with hydrologic and hydraulic knowledge.

Key Words: disaster reports, flood, slope failure, sediment transport, driftwood

1. はじめに

平成15年8月7日から10日にかけて、前線と台風10号の影響により北海道の全域に大雨がもたらされ大きな災害が発生した。特に道南の日高地方は有史以来の豪雨に襲われ、十勝地方を合わせ死者10名、行方不明1名、直接被害額約821億円という深刻な被害が生じた。国土交通省北海道開発局は土木学会に対し、本豪雨災害に関する中立的・学術的な立場からの災害調査を依頼した。

本論文は、土木学会水工学委員会「平成15年台風10号北海道豪雨災害調査団」が、沙流川水系と厚別川水系(図-1)を対象を絞り、主に加害の原因となった事項(降雨、流出、斜面崩壊、土砂生産、流木発生、溢水・破堤、護岸破壊・河岸浸食、土砂堆積、沿岸土砂堆積、ダム機能など)の特性と相互の関連を明らかにすることを主目的として取り組んだ調査報告書¹⁾を取りまとめたものである。

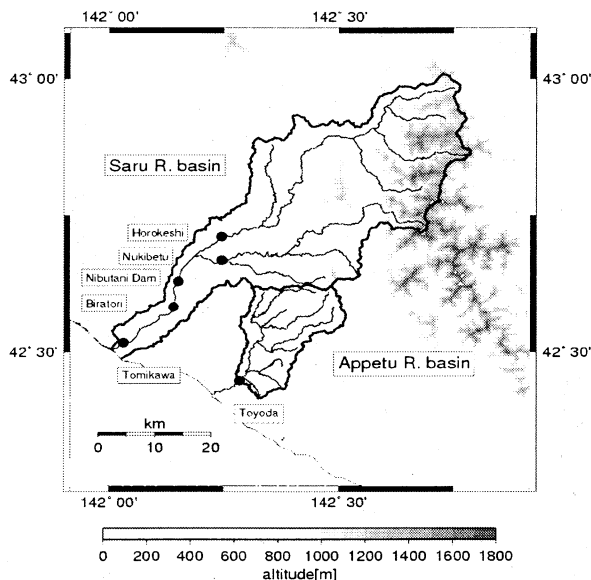


図-1 沙流川, 厚別川の概要

2. 災害の概要

北海道がまとめた全道の被害状況によれば、人的被害は死者10名、行方不明1名、負傷者3名であり、住宅被害は全壊18棟18世帯、半壊13棟13世帯、一部破損20棟20世帯、床上浸水129棟133世帯、床下浸水438棟482世帯、避難者は8,315人にのぼった(図-2)。このうち、死亡の多くが車で移動により起きている。その1件は、上士幌町居辺川にかかる橋梁の橋台部裏の浸食により道路が陥没、車両の転落を招いたものである。もう1件は、厚別川赤無橋の手前で停車した車両が越流する流れにより川に転落したものである。避難勧告は3,058世帯7,304人にのぼり、自主避難は266世帯1,011人であった。避難者数の最も多かった門別町富川地区(2,412世帯5,583名)では、沙流川に対する危険水位の警報に基づいて避難が計られた。直接的経済被害は、住宅被害2.1億円、農業被害177.3億円、林業被害103.5億円、土木工事523.8億円、商工業関係5.4億円、水道・病院・廃棄物処理施設6.6億円、学校・教育施設1.8億円などにのぼっている(平成15年9月25日)。農業被害では水稲が最も大きく、ついで野菜、牧草となっているほか、畜舎や軽種馬の被害も大きかった(図-3)。公共土木関連の被害は、河川690箇所423.4億円、砂防・地すべり3箇所0.42億円、道路389箇所81.1億円、橋梁43箇所16.3億円、公園3箇所0.71億円、港湾・漁港6箇所0.74億円などであり、合わせて523.8億円と見積もられている(9月22日現在)(図-4)。このほか、北海道旅客鉄道、および北海道ちほく高原鉄道において、土砂流入86箇所、築堤・盛土崩壊19箇所、路盤流出8箇所、橋脚流出1箇所などが発生しており、計306本が運休となった。道路通行止めは、国道18路線30区間、道道50路線60区間におよんでいる。ライフライン関連の被害は、停電最大時1,419戸、電話不通最大時357回線、断水最大時796戸(2,162人)であった。このうち、断水被害の原因は配水管の破損によるものが最も多く、ほかに取水施設



図-2 沙流川上流部(貫気別川コタン橋付近)



図-3 厚別川下流における馬小屋の被災状況



図-4 貫気別川河岸浸食による道道の被災(北海道提供)

への土砂流入、ポンプトラブル、水源(井戸)の消失などがあつた。

3. 調査結果

3.1 降雨特性

停滞前線と、それが台風10号に刺激される形で北海道南部・東部が大雨に見舞われた。これによる本格的な雨は、8月9日4時から8月10日4時のほぼ24時間にあり、特に、9日14時から10日1時の12時間に日高地方を中心に強

い雨域が停滞した。記録された雨量は、最も多かったAMeDAS旭地点で最大日雨量358mm、最大時間雨量76mmとなっており既往最大の規模であった。本豪雨は8月9日未明から8月10日朝まで3波をなして降り、特に3波目の9日20時頃から10日1時頃にかけての雨が強かった。3日間総雨量は300mmを超えたが、大部分が8月9日の1日に集中し、しかも夜の5から6時間でその5割前後を占めた。今回の降雨パターンの最大の特徴である。最大時間雨量のピーク域は、厚別川と流域界を接する額平川南西部の旭地区付近に現れ、流域内でも特に局地的、短時間に降雨が集中している場所となっていた。最大時間雨量の空間分布からみた強雨域は、雨域の進行方向にある日高山脈南西斜面に带状にみられ、降雨の強化に地形が影響していることが推察できる。

沙流川流域の降雨を対象に、1962年から2003年の本事例を含む年最大48時間雨量を標本(42サンプル)として確率評価を行うと、100年確率雨量が320mmから350mm、今回の降雨(306.2mm)の再現期間が60年から70年となった。一方、1962年から1998年の標本(37サンプル)で確率評価を行うと、100年確率雨量が250mmから270mmと今回の降雨はそれを上回り、再現期間も210年から320年と100年を超える。実際、150mm超の降雨が1998年以前の37年間で6回生起しているのに対し、以後の5年間に3回発生しているなど、この5年の平均年最大降雨量は明らかに大きくなっている。

3.2 流出特性

降雨の特徴を反映して、どの地点でも洪水の立ち上がりが見え速かったことが流出の特徴になっている。幌毛志の例では9日午後3時(200m³/s程度)から10日午前1時30分のピーク時(約4000m³/s)までわずかに10時間ほどであり、平均の流量増加率は3600m³/s/hに達した。また、洪水の伝播時間が非常に短く、水位のピーク時刻が各地域であまり変わらない状況が生じた。沙流川の例では、平取から富川まで13km区間の流量ピークの伝播時間が1時間と見られている(平取での修正値を用いた場合)。

厚別川豊田では欠測時流量を小さく見積もっても流出率がほぼ1になり、既往洪水資料でも同地点の流出率がピーク流量の大きな場合に1を上回ることが認められた。これらは、厚別川の出水が浸透性の悪い地盤上の流出に近いものであることを示している。同地点におけるハイドログラフの推定が、①隣接河川額平川の出水データを用いて集中型流出モデルを適用する方法、②250m国土数値情報により流域を擬河道と斜面に分離しKinematic Waveモデルを適用する方法、および③斜面にKinematic Wave法、河道の洪水流にDynamic Wave法を適用する方法によって行われた。それぞれピーク流量の推定値は、2,000から2,200m³/s、2,600m³/s前後、および2,680m³/sとなった。

3.3 斜面崩壊・土砂生産・流木発生

沙流川上流支川額平川流域は、1955年から1993年まで

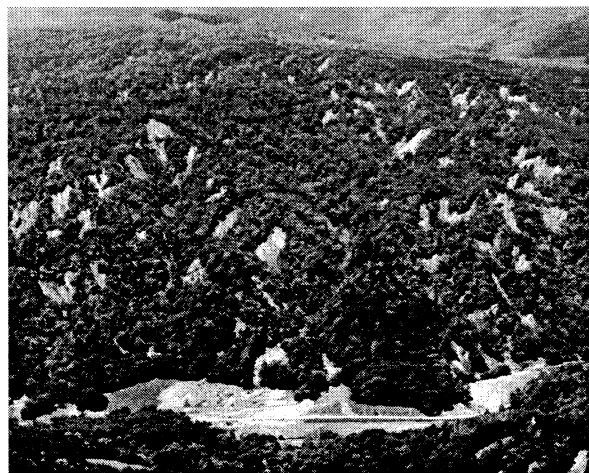


図-5 厚別川流域の崩壊地状況

の崩壊地面積率が0.4%未満であったが、8月台風災害後の航空写真読み取り結果では1.5%(約3.6倍)に急増した。沙流川中流区間の小支川ルベシュベナイ川と下流区間のパラダイ川での実地調査の結果、大量の溪床土砂堆積が発生しており、その量は大雨が記録されている1992年時の量に比べてルベシュベナイ川で1.5倍、パラダイ川で1.8倍になっている。厚別川でも崩壊地面積率が0.9%に達しており、賀張山地域1998年航空写真による崩壊地面積との比較で約3倍になっている。

崩壊の形態は、急勾配(30から40度程度)の流盤の上に存在する厚さ数10から50cm程度の森林土壌が滑落した表層崩壊タイプが大部分を占める。しかし、地質や降雨経歴の違いに対応して異なるタイプが認められた。額平川流域における崩壊地発生の要因は、時間雨量が最も強く関連しており、次いで地質、斜面方向、斜面傾斜、総雨量の順であることが把握された。

額平川流域の単位面積あたり崩壊地面積・箇所数と植生分類の対応を見ると、広葉樹林、針広混交林で大きい値を示す。額平川流域、厚別川流域での崩壊地発生は天然林で約75%を占め、人工林で特に多い傾向は見られない。また、両流域とも天然林と人工林の崩壊地面積割合は同様の傾向を示している。

崩壊土砂量、河道到達土砂量、河道流出土砂量として以下の推定値が得られた。額平川流域では約800万m³(見かけ体積)の崩壊土砂量が発生し、うち河道に到達した崩壊地土砂量は約250万m³(見かけ体積)であり、このうちの48万m³(実質体積)が貫気別地点からSSとして流出(表面採水によるSS濃度計測値から計算)したものと推定された。額平川合流点より上流の沙流川本川流域における崩壊土砂量、河道到達土砂量は未調査で不明であるが、河道流出土砂量は幌毛志地点の表面採水によるSS濃度計測から74万m³(実質体積)であったものと推定された。

二風谷ダム地点ならびに下流数地点におけるSS濃度と流量観測値から、本洪水による貯水池の堆砂量が実質体積で74万m³程と推定された。この値は深浅測量による堆砂量の推定結果にほぼ等しく、平常年の年堆砂量の約2年分に相当する。

一方、厚別川流域の主要崩壊地は、本川上流域、支川里平川上流域、里平川支川ウェンテシカン川上流域、比宇川上流域などに分布しており、流域全体の崩壊土砂量は約180万から190万 m^3 (見かけ体積)と推測された(図-5)。崩壊土砂量の多い里平川本川上流域、比宇川上流域、ウェンテシカン川上流域から支川河道に流入した土砂量の計は約42万5千 m^3 、それら以外の10流域での支川河道・本川河道への流入土砂量の計は約1万4千 m^3 と見積もられた。また、崩壊地近傍地山の粒度分布試験結果をもとに、厚別川流域全体のウォッシュロードの流出量を推定した結果は約36万から72万 m^3 であった。

額平川の崩壊地からの発生流木量は、実質体積で8万1千 m^3 と見積もられ、このうち、河道に到達した流木量は約2万6千 m^3 であり、さらに下流に流出(河岸や貯水池に堆積したものを含む)したものの割合は約20%と推定された。また、額平川流域と厚別川流域の単位面積あたり流木発生量は、ほぼ同様(211から248 m^3/km^2)の傾向であると判断された。流域発生流木量と河道末端(海域もしくはダム貯水池)に流出した流木量の流出率を推定した結果、平成4年の沙流川の結果と、今回の額平川の結果はほぼ同じオーダー(約1割)であった。

3.4 洪水流特性

沙流川は、平取観測所において計画高水位(27.55m)を最大74cm超過したのをはじめ、富川観測所においても計画高水位(7.06m)を最大60cm超過するなど、最高水位を更新した。二風谷ダム下流のほぼ全区間にわたり、洪水時水位が計画高水位を越える非常に高い水位となった。一方、二風谷ダム上流に位置する額平川の洪水痕跡結果では、堤防天橋まで痕跡水位が達し、左岸側で5箇所、右岸側で2箇所において越流が生じ、外水氾濫が生じた。

厚別川の洪水流量は赤無橋地点で2,000 m^3/s を越え、現況河道の流下能力(赤無橋地点で1,000 m^3/s 程度)をはるかに上まわって河口から里平川合流点まで全区間で氾濫した。下流既改修区間では、越水や破堤による氾濫水が堤内地をあたかも河道のように流れた(図-6, 7)。上・中流の未改修区間でも洪水流があふれ、山すそから山すそまでの谷部(平地部)がすべて氾濫原となった。比宇川の合流点付近では河道が屈曲し、氾濫流は複雑な流れとなり本川、支川とも広範囲に氾濫した。2次元浅水流モデルを基本とした数値解析の結果からは、氾濫原が冠水時に巨大複列砂州の性質を発揮したことが示された。

3.5 土砂輸送と河道変動の特性

沙流川流域では、二風谷ダム放流地点での流出流砂量が106万 m^3 、河口に近い沙流川橋での流出総量は101万 m^3 とされており、ダム下流の河道中に5万 m^3 ほどの堆積が生じたことになる。また、標識埋設を行った調査地点で、一度大きく侵食されその後上流土砂によって埋め戻されたことを示す箇所が多数見つかった。これらのことから本洪水では、水位の上昇期に河岸が侵食されて高濃度のSSが生じ、水位下降時に堆積による埋め戻しが起こった

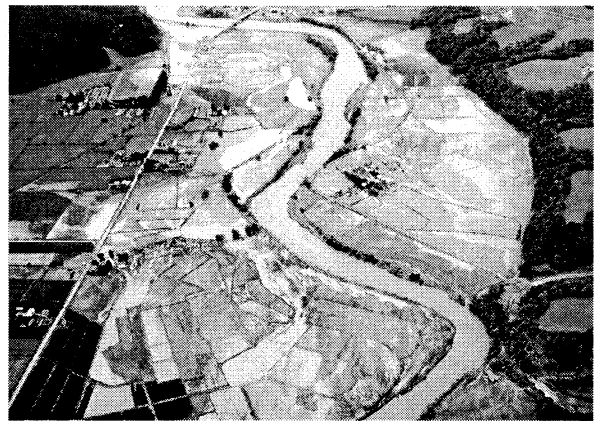


図-6 赤無橋下流(厚別川)の被災状況(北海道提供)



図-7 破堤箇所(東川大橋上流)の状況(北海道提供)

ものと推定された。上流宿主別川の治山ダムでは、出水後ダム下流に顕著な土砂堆積が生じている。また、額平川3号ダムでも土砂が堆積し、出水前に約5mあった落差が出水後に1.3mほどに縮小している。

厚別川流域では、崩壊・土石流により約180万 m^3 (見かけ体積)にのぼる大量の土砂が生産されたと想定される。しかし、支川中・下流域、本川での河床上昇は均してみると数10cm程度であった。ただし、河道自体には大きな変動が生じている。大規模氾濫は、瓢箪状に連なる氾濫原を最大2m以上の水深で覆っており、これらは基本的に大規模複列砂州流れの性質を示した。この結果、砂州前縁部に相当する氾濫原の左右端において新水路の出現を含む大きな河道変動が生じた。また、複列砂州の腹部に相当する氾濫原の中央では、粘性土からシルトおよび砂からなる土砂が比較的厚く堆積した。複列の河道が合流収束し再び分岐する節の部分(大規模砂州の先端部、8の字流の交点)では、低水路と堤防の浸食・決壊が集中して起こっている(図-8)。この場所の上流側は複列砂州上の流れと2つの主流が集まる場所であり、堤防および低水路河岸の決壊は堤内側からの流入流れによってもたらされている。下流側では収束した流れが再び砂州上に乗る場所であり、乗り上げ部の河岸および堤防が堤外側から破壊されている。両者とも、低水路法線または堤防法線が谷軸に対してなす角度の大きい場所で広い範囲にわたり破壊されている。

厚別川氾濫洪水堆積土砂分布図（河口付近）

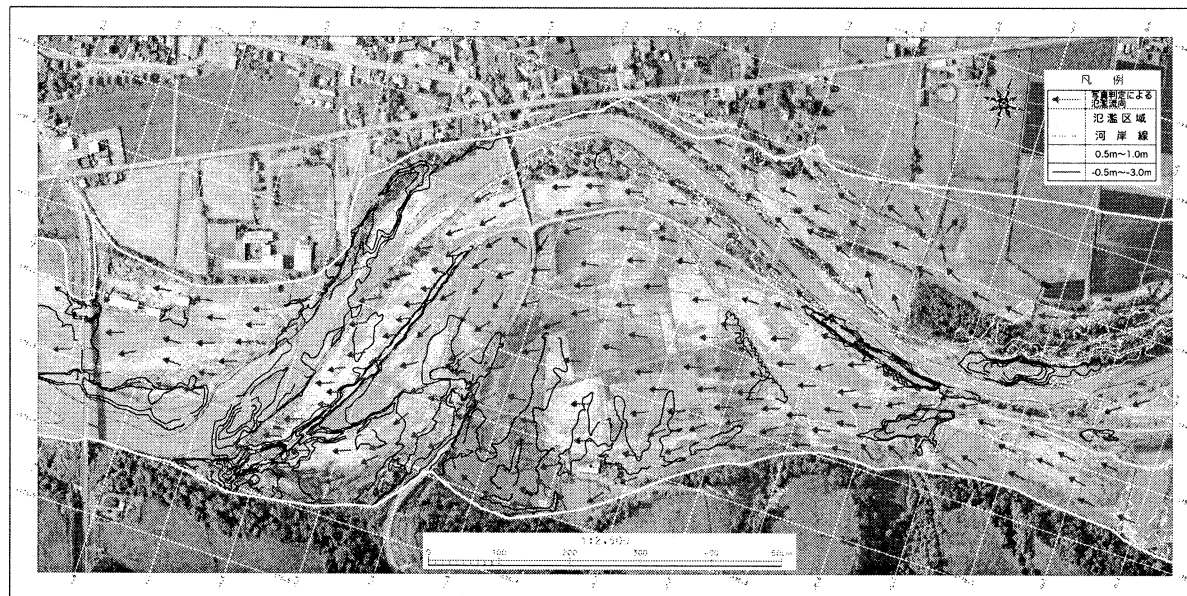


図-8 厚別川河口近傍における堆積高、浸食深コンターおよび氾濫流向（北海道提供）

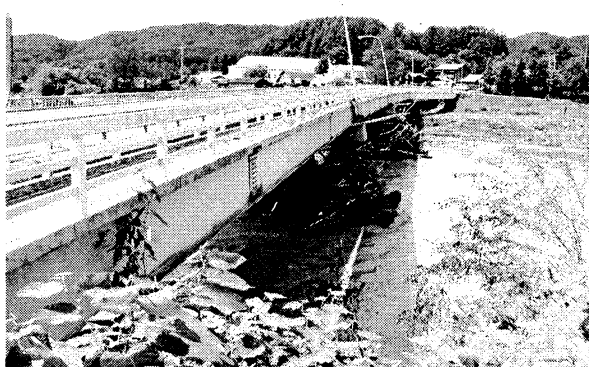


図-9 貫気別橋（歩道橋）の被災状況

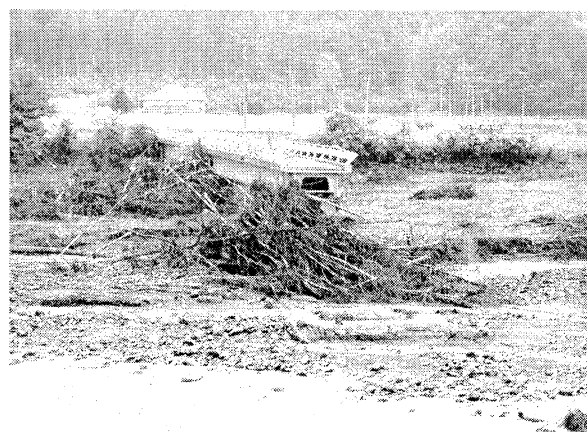


図-10 アブシトエナイ橋の被災状況

3.6 流木の挙動と影響

沙流川流域で広範囲な流木調査を行い、山地域からは樹齢数十年の針葉樹等が、高水敷からは樹齢15年程度のヤギノ類等280m³が流木として河道へ流出したことを確かめた。海域まで流出しなかった流木の内、約2万4千m³が二風谷ダム貯水池に滞留し、河道内には約8,600m³が堆積した。河道内に堆積した流木はその殆どが河畔林に堆積し、流木全体の約6割が新規性の流木であることが明らかとなった。また、河道内の河畔林の流木化を考察すると、河口から二風谷ダム間の流木堆積量約3,400m³に対し、河畔林の流出量は低水路沿い等から流出した8% (280m³) であり、同区間の全河畔林量のわずか5%であった。また、河口から二風谷ダム間での流木堆積量の85% (約2,900m³) が河畔林によって捕捉されている。

厚別川流域における堆積流木の実材積は、約4万6千m³と推定された。その約7割が里平川流域と本川上から中流域におけるもので、これらの約8割が山腹から流出している。また、樹種区分では広葉樹が9割を占め、施業が行われている人工林（針葉樹）由来の流木は少ないものと判断された。一方、谷幅一杯に洪水流が流下したため、河畔林の流出も顕著であった。河畔林の倒伏および流失

面積は、それぞれ166haおよび32haであり、被害林の実材積は約7,800m³と推計されている。河畔林による流木捕捉量は約11,100m³と見積もられた。

流木による被害は橋梁において顕著であった。調査した貫気別橋（図-9）およびアブシトエナイ橋（図-10）では橋脚・橋桁に多くの流木が引っかかっており、貫気別橋では上流側の人道橋が流下方向に傾斜し、アブシトエナイ橋では4径間の橋桁のうち2つが流失する被害を受けた。両橋とも橋桁上部に泥が堆積しており、洪水時に冠水したことが想定された。特に、アブシトエナイ橋の直上下流の痕跡水位には水位差が存在し、橋梁による堰き上がりの痕跡が確認された。また、栄進橋（図-11）のように橋台背面の道路盛土が氾濫流により浸食を受ける形態の被害が発生している。同様の道路盛土の浸食は沙流川や厚別川流域以外でも多数発生している。

3.7 沿岸域での細粒土砂挙動

沙流川および鶴川の河口域における土砂堆積調査の結果、今回の洪水でそれぞれ290万t（実質体積109万m³）、190万t（同72万m³）の土砂が沿岸域に堆積したものと判

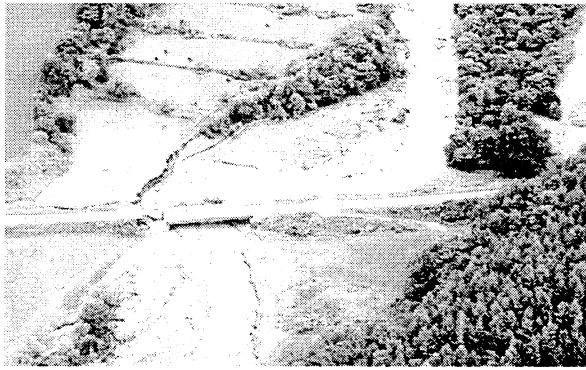


図-11 栄進橋の被災状況(シン技術コンサル提供)

断された。沙流川では、河口から10km以上、水深30m以上の広い海域に堆積し、堆積層厚は河口沿岸域で10から27cm程度であった。鵠川では、河口から約3km程度までの水深13m以浅の海域に堆積し、堆積層厚は河口沿岸域で10から20cm程度であった。

40日後、60日後の堆積調査では、鵠川河口域での堆積層厚の減少は、波・流れによる土砂移動が原因と考えられる。沙流川河口域で堆積層が大きく減少しなかった原因は、周辺海域から移動堆積する土砂が多かったこと、大洪水後も沙流川から細粒土砂の流出が続いたこと等が考えられるが、特定するまでに至らなかった。

洪水後の柱状土砂分布データから、新しく堆積した細粒成分以外の底質が細砂と砂礫からなっていることがわかった。両河川の河口沿岸域でも、洪水前には細砂以上の粗い粒径が多く、洪水によるウォッシュロードなどの細粒成分の堆積が表層底質粒径を大きく変化させたと言える。

3.8 二風谷ダム流入量の検討

ダムによる貯水効果を判定する上で、ダム貯水池への流入量推定の精度が求められる。北海道開発局二風谷ダム管理所では、2秒ごとの水位データを1分間にわたり平均した基本水位データから、ある時刻の水位とそれから10分前(洪水時に適する設定値)の水位についてそれぞれ容量換算を行い、その差を600秒で除した値に当該時刻の放流量を加え、推定流入量としている。この方法は、セイシュなどによる貯水池の水面変動が激しくない場合には良好な結果を得る。今回の基本水位データからは、ピーク近くで短い周期の変動が見られ、雑音成分の含まれている可能性が認められたため、固有のセイシュ振動をあらかじめ除去する方法による流入量推定も同時に試みた。ピーク流量の近傍では、ダム管理所のピーク流量推定値が約6350m³/s(最大流入量と最大放流量との差、660m³/s)、後者の方法では約6160m³/s(同850m³/s)と見積もられた。なお、二風谷ダムの計画最大流入量は4100m³/s、計画最大放流量は3850m³/sであってその差は250m³/sである。

3.9 災害意識調査

本災害後、災害時の情報共有のあり方に関する委員会

が設置され、住民アンケートが実施された(622名回答)。

「大雨警報」など崖崩れや河川氾濫の注意・警戒を呼びかける「気象情報」を知っていた住民は、75ないし80%にのぼっている。しかし、情報を得ていたにもかかわらず災害発生を予測した人は62%に留まり、残りは、近くで災害が起るとは思わなかったと回答している。また、結果的に予報を上回る350ミリという降雨が、「災害をもたらすような多い雨量だと」認識した人は半数に満たなかった。

4. まとめ

本論文は、平成15年台風10号北海道豪雨災害調査団による調査報告書を取りまとめたものである。以下に、本豪雨災害の特徴等を一部列挙し、本論文のまとめとする。

- ① 沙流川流域の降雨は、近年の標本値(年最大降雨)を包含すると、かつてより大きな標本値をもつ母集団となった。河川防災対策を検討する上で配慮すべき事柄である。
- ② 額平川流域では、約800万m³(見かけ体積)の崩壊土砂量が発生し、約250万m³(同)が河道に到達した。このうちの48万m³(実質体積)が貫気別地点から流出し、一部が河道内に堆積していると推定される。今後の土砂動態に対し引き続き注意を要する。
- ③ 沙流川では、二風谷ダム下流にてほぼ全区間、計画高水位を超過した高い水位となったが、ピーク流量時の二風谷ダムでは、計画上の貯水効果を超える機能を発揮し、堤防決壊などの甚大な被害が免れた。
- ④ 厚別川では、複列の河道が合流し分岐する節の部分にて、低水路と堤防の浸食、決壊が集中して起こった。低水路法線または堤防法線が谷軸に対してなす角度の大きい場所で広範囲にわたり破壊され、今後の河道計画において留意すべきである。
- ⑤ 流木が橋脚・橋桁に引っかかり流れを堰きあげ、橋面を乗り越す流れや橋台裏に回りこむ流れを引き起こし、橋台裏の浸食や橋桁の流失が生じた。一方で、流木の発生源となり得る河畔林が流木補足効果を有し、その存置について検討すべきである。
- ⑥ 沿岸域において、洪水によるウォッシュロード等の細粒成分の堆積が表層底質粒径を大きく変化させることがわかった。この変化は、海底に生息しているベントス等の生物にとっては重要な問題である。

謝辞：貴重な資料のご提供、調査・観測にご協力頂いた各関係機関、ならびにデータ解析にご協力頂いた関係諸氏に対して、この場を借りて深甚なる謝意を表したい。

参考文献

- 1) 長谷川和義、他21名：平成15年台風10号北海道豪雨災害調査団報告書、土木学会水工学委員会、pp. 1-181, 2004.

(2004. 9. 30 受付)