

流木の比重に着目した土砂流と流木の混合物流れの実験的研究(その1)

日本工営株式会社 ○小川和彦, 西村茂樹, 倉岡千郎, (株)エル・コーエイ 伊藤隆郭

1. 緒論: 清水流や土石流と共に流動する流木の挙動については、水路・水理模型実験によって検討がされている¹⁾。最近では、数値解析手法の検討が進み、流木個別の動きを模擬するようなものもある¹⁾が、流木群の全体の挙動を解析するには至っていないようである。さて、山地域、斜面および渓床堆積物からの流木の生産を想定すると、林分・林相の現状や今後の変遷を考慮し、針葉樹や広葉樹といった樹種、樹冠、太根といった形状の違いを検討する必要がある。ここでは、樹種の異なる生木状態の流木を含む清水流、土砂流の定常流れを対象として、流木を比重の異なる材料として捉え、流況、流木群のパターンおよび下流端での流木の流出率といった量を評価し、定性的な情報を提供する。なお、ここでは、流木・土砂の侵食が顕著となるような現象を対象としていない。

2. 想定する条件: 既往災害報告²⁾⁻⁴⁾を参考にして、流木の発生・流下が調査された渓流を幾つか示す。図-1は、流木災害のあった渓流、もしくは、その付近における代表的な渓流の河床縦断分布である。既往の調査報告によれば、扇状地の扇頂部での勾配は5°程度(約1/11)と言われている。流路長が小さい渓流ではその傾向が見られるが、流路長が大きい渓流では、一概にその傾向は見られないようである。例えば、石屋川は、昭和13年の阪神水害の際に石礫の堆積がみられた所であり、下流域の河床勾配が約2~3°(=1/20)である。

勾配の小さい区間では、上流域で地形の影響を受け、流下が想定される流木数が少ない可能性もあり、このような区間で、川幅Bが10m程度の渓流における流水や土砂流による流木群の流下を想定した。

これは、土砂流と樹種の異なる流木の混合物の流れが形成され、それぞれの相互作用や流動形態が複雑になり、急な勾配での土石流や川幅の大きい河川の流れで生じる現象とは異なる流れが形成させる可能性があるためである。流木は、豪雨時に立木斜面や渓床から生産される針葉樹(conifer)と広葉樹(broad-leaf tree)を想定し、それらの違いを比重に着目して表現した。針葉樹は水に浮く、広葉樹は水に沈む物体として扱い、比重の小さい順に、針葉樹、水、広葉樹、土砂となる。

なお、本検討においては、急な勾配を流下する土石流によって流木群が石礫と混合する流れ⁵⁾、天然ダム・鉄砲水により急な勾配を流下する流木群⁶⁾、および、川幅の大きい流路内における流砂・流木や流木群の挙動把握と橋脚等による河道閉塞⁷⁾⁻¹³⁾を対象としたものではない。また、流木については、針葉樹と広葉樹の生木状態¹⁵⁾⁻¹⁹⁾の樹種の違い¹⁴⁾が流れに及ぼす影響を検討するものであって、流木は胸高直径を有する表面の滑らかな円柱として近似し、流木形状(樹冠¹¹⁾、太根など)や流木比重の時間経過に伴う比重変化・沈降に関する現象も対象としない。

3. 水路実験: 使用した水路は、長さ10m、幅20cmの右岸片側が透明アクリル製の固定床の矩形断面開水路であり、水路勾配は2.58°(=1/22)に設定した。河床には、約5mmの砂礫を貼り付けて粗度とした。清水流量は、水山ら²⁰⁾が設定した条件と同様に、原型値で、流域面積:1.0km²、清水ピーク流量:25m³/sを想定し、模型縮尺 $\lambda_L=1/50$ とした。土砂量は想定する量は設定せず、勾配に対して平衡に土砂流が流下可能な輸送濃度($c_f=0.012$)を与えた。このとき、移動床流れに限りなく近い固定床流れとなる。給水・給砂時間は、原型値で約6min(模型:50sec.)とした。土砂の粒径は、災害資料^{4), 20)}を参考にし、原型値 $d_{60}=85$ mmとした。また、生木状態の樹木の比重は、文献¹⁵⁾⁻¹⁹⁾を参考にして設定し、樹種の混合割合は、針葉樹のみ、広葉樹のみ、針葉樹と広葉樹が1対1に混合したもの3ケースとした。給木量は、勾配の小さい渓流の土砂流を対象と

表1 水理条件の一例(清水・模型値)

n (清水)	B (cm)	Q (l/s)	c_f	c	h_0 (cm)	h_0/d	h_0/d_d	τ_*	Fr	Re
0.0176	20.0	1.42	0.012	0.049	1.47	8.12	2.41	0.224	1.85	7070

ここに、 n : 粗度係数[m-s系]、 B : 川幅、 Q : 清水流量、 c_f : 輸送濃度、 c : 断面平均濃度、 h_0 : 清水等流水深、 h_0/d : 相対水深、 τ_* : 無次元掃流力、 Fr : フルード数、 Re : レイノルズ数であり、粒径には d_{60} を用いた。

表2 実験ケースと流木捕捉・流木の速度に関する実験結果(模型値)

feeding speed of driftwoods	Clear water ($u_* = 74.3$ cm/s)			Sediment water mixture flow ($u_* = 79.5$ cm/s)		
	Conifer	Broadleaf	Mix (C : B = 1 : 1)	Conifer	Broadleaf	Mix (C : B = 1 : 1)
1 (logs/s) (total: 50 logs)	Run 1 (67.6cm/s) 4 (0.08) 0 (0) 0 (0)	Run 4 (34.4cm/s) 2 (0.04) 7 (0.14) 4 (0.08)		Run 9 (75.7cm/s) 0 (0) 0 (0) 0 (0)	Run 12 (41.3cm/s) 0 (0) 31* (0.62) 19* (0.38)	
6 (logs/s) (total: 300 logs)	Run 2 (66.7cm/s) 177* (0.59) 1 (0.00333) 1 (0.00333)	Run 5 (38.9cm/s) 130* (0.433) 4 (0.0133) 16 (0.0533)	Run 7 (C: 69.9cm/s, B: 39.3cm/s) C: 0 (0), B: 6 (0.02)/ total: 6 (0.02) C: 12* (0.08), B: 27* (0.18)/ total: 39 (0.13) C: 0 (0), B: 6 (0.02)/ total: 6 (0.02)	Run 10 (72.3cm/s) 1* (0.00333) 144* (0.48) 9 (0.03)	Run 13 (38.6cm/s) 0 (0) 2 (0.00667) 205* (0.683)	Run 15 (C: 75.3cm/s, B: 41.5cm/s) C: 14** (0.0940), B: 38** (0.26)/ total: 52 (0.177) C: 0 (0), B: 1 (0.00333)/ total: 1 (0.00333) C: 40* (0.267), B: 21* (0.140)/ total: 61 (0.203)
10 (logs/s) (total: 500 logs)	Run 3 (59.2cm/s) 323* (0.646) 223* (0.446) 190* (0.380)	Run 6 (34.3cm/s) 351* (0.702) 351* (0.702) 227* (0.454)	Run 8 (C: 59.6cm/s, B: 32.5cm/s) C: 101* (0.404), B: 113* (0.452)/ total: 214 (0.428) C: 99* (0.396), B: 142* (0.572)/ total: 242 (0.484) C: 139* (0.556), B: 132* (0.540)/ total: 274 (0.548)	Run 11 (67.0cm/s) 291** (0.582) 381** (0.762) 362** (0.724)	Run 14 (38.5cm/s) 114* (0.772) 27* (0.054) 1 (0.002)	Run 16 (C: 65.8cm/s, B: 35.4cm/s) C: 110** (0.440), B: 149** (0.596)/ total: 259 (0.518) C: 93** (0.372), B: 122** (0.488)/ total: 215 (0.430) C: 43* (0.172), B: 59* (0.236)/ total: 102 (0.204)

Brackets, (): Trap rate for driftwoods in a flume (C: Conifer, B: Broadleaf), Star, *: Formation of dams (*: 1 dam, **: 2 dams)

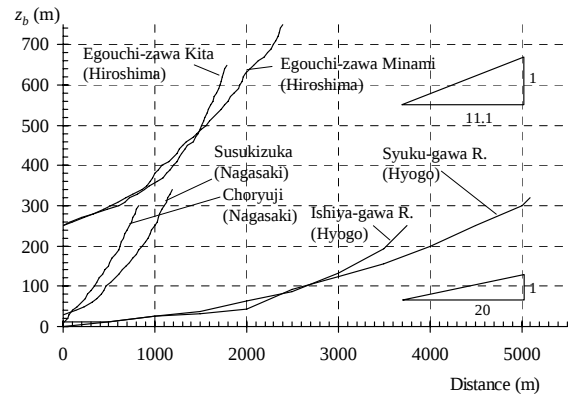


図1 河床縦断分布

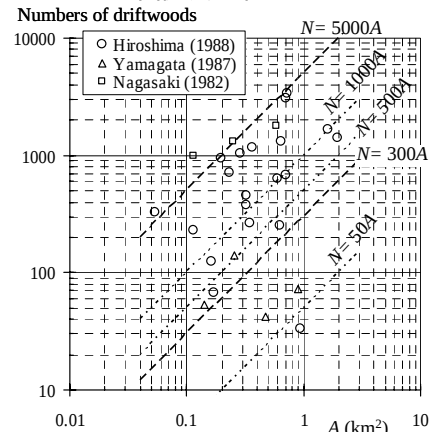


図2 流域面積と発生流木数

立木の既往災害調査資料^{3),4)}を参考にして流木長を10 m(原型値)とし、流木直径は、模型実験で使用可能な値(たわみ等が小さい等)に設定した。その結果、川幅 B と流木長 l_d の比は、1となる。

水理条件および実験条件の一部を表1と表2に示す。土砂および流木の材料特性は次のようである。①土砂(一様砂) 比重:2.63, 静止堆積濃度:0.535, 60%粒径 d_{60} :1.83 mm, 内部摩擦角:37.4 deg. ②針葉樹モデル(ポリエチレン丸棒) 比重:0.952, 直径 d_d :0.61cm, 長さ l_d :20.1 cm, 吃水深:0.556 cm, ③広葉樹モデル(アクリル樹脂黒色丸棒) 比重:1.20, 直径 d_d :0.61cm, 長さ l_d :20.1 cm。実験では、給木速度(給木量)の違い、および、清水流・土砂流と流木との相互作用を定性的に評価することに主眼をおいた。上流端から給水、給砂を行い定常・等流の土砂流、清水流を流下させ、給木は、下流から約6mの位置において、給木方向の影響が現れないように、給木方向がランダムとなるように行った。下流端では、流出した流木量を計測し、鉛直上方、給木位置付近と下流から1m上流側の側壁からビデオカメラを用いて流況を撮影した。流木の流向は撮影された映像から計測した。流木ダムが形成された時には、側壁から写真撮影を行った。

4. 流木の流下と捕捉状況: 表2は、実験結果の一部であり、同表には、流木の捕捉率(=水路内の残留流木数/給木数)、流木ダムの形成の有無、清水流・土砂流の表面流速 u_s および各ケースの流木の移動速度も記載した。流木の捕捉率は、水山ら²⁰⁾と同様に、水路内で捕捉される流木数と給木数の比によって算定した。図3は流木の流向の頻度分布、図4は、流木流出数の時間変化の一例、図5は流木の捕捉率を示したものである。これらの図によると、針葉樹の流向は広葉樹よりも広くばらつき、河道閉塞のトリガーになりやすいことを示している。また、土砂流と清水流の違いをみると、針葉樹の流れには大きい違いが見られないが、広葉樹では、土砂の粒子移動層の形成によって、流向が流れに平行になるものが多い。その結果、広葉樹の流出量が多くなるばかりか、針葉樹・広葉樹の混合物および土砂流と流木の混合物が下流へ流下しやすい可能性があることが予想される。流木の流向や比重が流木の捕捉に及ぼす影響が大きいことを指摘されている⁸⁾が、土砂流においても同様の結果が得られていると思われる。

5. 結論: 流木の比重の違いに着目して、清水流・土砂流と流木との流れについて実験データを用いて検討した。流れに及ぼす比重の影響は大きく、流木実験において、樹種による違いを考慮する必要があることが推察される。なお、流況の詳細な写真等のデータは、発表時に示す。今後、図6に示すような樹種の異なる移動層、静水層、土砂の粒子移動層²¹⁾からなる多層構造に着目して、河床勾配・川幅の違い、流木混入に伴う抵抗増加、流木ダム形成条件、水位・流速の縦断分布に関するデータを収集し、流木の時空間的な挙動の違いや抵抗則に関する検討を行う予定である。さらに、実験データが土石流の数値解析に反映可能なような抵抗則、流木閉塞条件、平面的な拡散、侵食・堆積に伴う連行項などに関する検討も行う予定である。

参考文献 1) 河川環境管理財団: 流木災害軽減対策と河川樹木管理に関する総合的研究, 2008.11, 2) 水山ら: 土木研究所資料, 2580号, 1988, 3) 水山ら: 土木研究所資料, 2704号, 1989, 4) 瀬尾ら: 土木技術資料, 26-2, 69-73, 1984, 5) 長谷川ら: 砂防学会研究発表会概要集, 412-413, 2006, 6) 長谷川ら: 砂防学会研究発表会概要集, 416-417, 2008, 7) 足立ら: 京大防災研年報, 1, 41-49, 1957, 8) 水原ら: 新砂防, 113, 10-16, 1979, 9) 竹内ら: 山梨大学工学部研究報告, 36号, 88-96, 1985, 10) 中川ら: 京大防災研年報, 35B-2, 249-266, 1992, 11) 藤田ら: 京大防災研報, 36 B-2, 465-485, 1993, 12) Braudrick, C.A. et al.: Earth Sur. Proce. and Landfor., Vol. 22, 669-683, 1997, 13) Abbe, T. B. et al.: Geomorphology, 51, 81-107, 2003, 14) 国総研砂防研究室: 土石流・流木対策設計技術指針解説, 国総研資料, 365, 73p., 2007, 15) 矢沢: 日本林學會誌, 23(8), 457-459, 1941, 16) 矢沢: 日本林學會誌, 23(9), 481-490, 1941, 17) 矢沢: 日本林學會誌 33(1), 34-39, 1951, 18) 山岡: 山口大工学部学報, 2巻, 1号, 40-42, 1951, 19) 林業試験場編: 木材工業ハンドブック(第5版), 丸善, 1967, 20) 水山ら: 土木研究所報告, 183, 71-156, 1991, 21) 江頭ら: 水工学論文集, 41, 789-794, 1997.

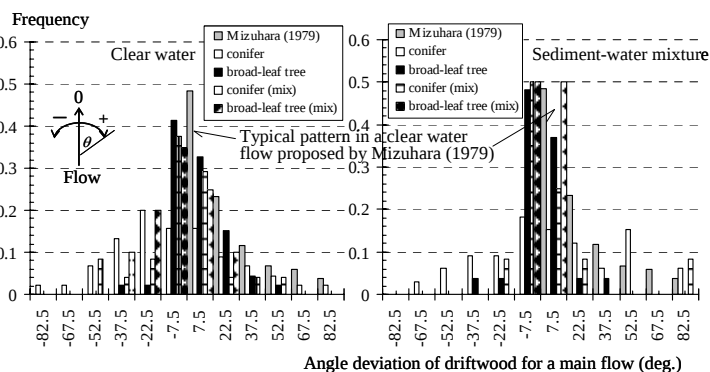


図3 流木群の偏角(流向)のヒストグラムの一例(Run3, Run 6, Run 8, Run 11, Run 14, Run 16)

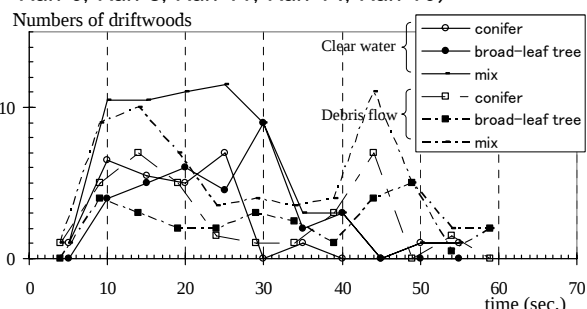


図4 流木流出数の時間変化(図3のケース)

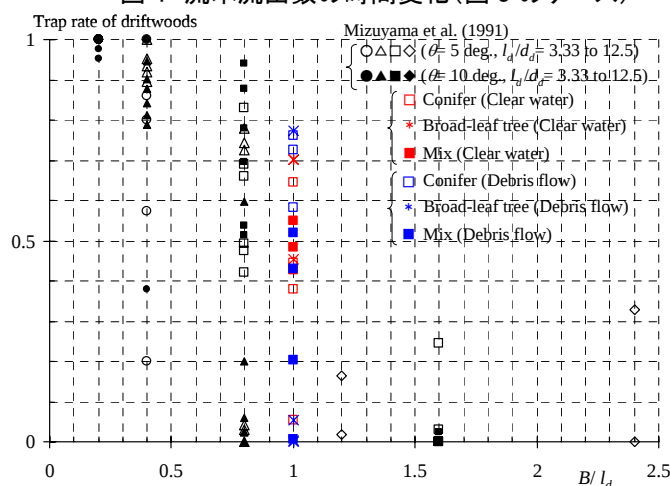
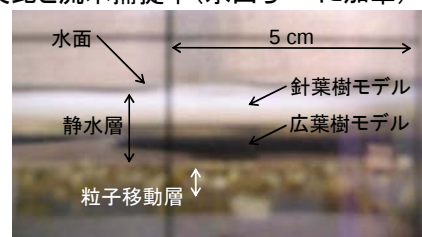


図5 川幅・流木長比と流木捕捉率(水山ら²⁰⁾に加筆)



水深:1.57cm, 粒子移動層厚:0.46-0.55cm, 速度(自由表面:79.5 cm/s, 針葉樹:65.8 cm/s, 広葉樹:35.4 cm/s)

図6 流況の一例(多層流)