

流木の横拡散と移流拡散に関する実験 — 複数流木の衝突確率 —

松富英夫¹・田名部 惇²

水理実験に基づき、先ず定常流中に静かに投入された流木が定常状態に達するまでの移動加速距離を論じ、移動加速距離は流木長の 20 倍以下であることを示している。次に複数流木の同時衝突確率などを論じるため、定常流中に静かに投入された流木の流れ横断方向の拡散（横拡散）と漂流到達時間変動から見た流れ方向の移流拡散（縦分散）の諸特性を論じている。これらの結果を踏まえて、移動加速距離と横拡散の関連や 2 本の流木が同時衝突する最も高い確率などを論じている。

1. はじめに

津波時の漂流物による二次災害が指摘されて久しい。2004 年インド洋津波においても、北スマトラの Banda Aceh における約 2,500 トンの漂流発電船やグレートモスク前の漂流物を伴った氾濫流の例のように、漂流物災害が大きな話題となった（Matsutomi ら, 2006）。これらを受けて、日本では釧路港、気仙沼港、仙台港、高松港などで漂流物災害の防止・軽減策の検討が始まった。

松富（1998, 1999）は津波などの氾濫流に伴う流木を対象として、流木 1 本が剛な構造物に衝突するときの衝突力評価式を提案した。実際は複数流木の同時衝突や 1 本が衝突している最中（衝突力作用中）に別の 1 本が衝突する場合が考えられ、その確率やそのときの衝突力の評価は津波の防災・減災対策などを考える上で重要である。

そこで、本研究は水理実験に基づき、任意漂流距離における流木の流れ横断方向への拡散（以下、横拡散と呼ぶ）、流れ方向の漂流到達時間変動から見た移流拡散（以下、縦分散と呼ぶ）、横拡散や縦分散に関係すると考えられる定常流中に静かに投入された流木が定常状態に達するまでの移動加速距離を検討し、複数流木の同時衝突確率などを論じる。

2. 実 験

実験は流木の「移動加速距離」と「横拡散・縦分散」に関する 2 実験からなる。「移動加速距離」の実験を行う理由は、加速中と準定常状態の流木では横拡散や縦分散が異なると考えたからである。

（1）移動加速距離

実験の概要を図-1 に示す。実験水路には長さ 5.85 m、幅 0.18 m、高さ 0.21 m の可変勾配循環水路を用いた。水路が短いため、流れは不等流となる（図-2）。流木は長軸を流れ方向に向けて、水面近傍から水路中心に投入

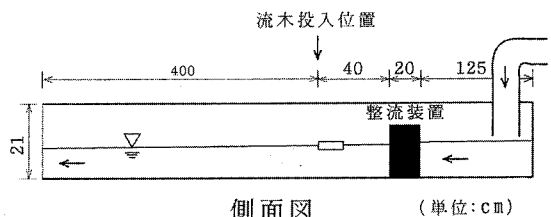


図-1 実験の概要（移動加速距離実験）

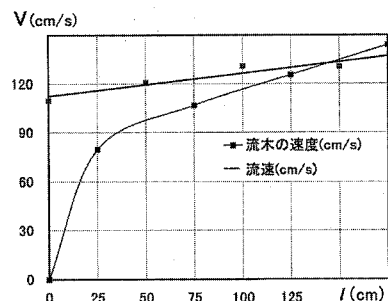


図-2 移動加速距離の評価法

表-1 実験条件（移動加速距離実験）

D(cm)	L/D	v (cm/s)	S	$I(\times 10^{-3})$	$I_B(\times 10^{-3})$
1.0	8,12,15	59~126	0.70~0.86	4.2~26.1	1.0~20.0
1.5	8,12,15	59~126	0.70~0.78	4.2~26.1	1.0~20.0
1.8	8,12,15	59~126	0.64~0.85	4.2~26.1	1.0~20.0

した。測点は流木投入地点を原点に $l=0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ m の 5 地点とした。流木の樹種はラワン、初速は零で、実験は同一条件のものを 10 回繰り返した。よって、本実験の実験値は 10 回の平均である。

実験条件を表-1 に示す。表中、 D は流木径、 L は流木長、 v は断面平均流速（11 種類）、 S は流木比重、 I は水面勾配（11 種類）、 I_B は水路床勾配（7 種類）である。

断面平均流速は四角堰による流量と流木投入地点から 0.50 m 毎の水深を測定することで求めた。流木漂流速度の計測・解析にはビデオとモーショントラッキング・アナライザを用いた。ただし、ビデオカメラは水路上流側の高所に

1 正会員 秋田大学 工学資源学部土木環境工学科

2 (株)吉田産業

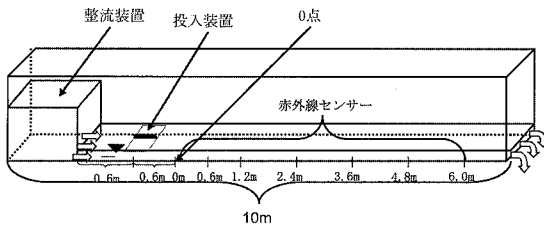


図-3 実験の概要（横拡散・縦分散実験）

表-2 実験条件（横拡散・縦分散実験）

	L/D	Q(l/s)	h(cm)	v(cm/s)	F,数	回数(本)
Case 1	12	3.60	3.48	34.4	0.59	300/388
Case 2	12	4.99	4.29	38.9	0.60	300/370
Case 3	16	3.59	3.45	34.7	0.60	300/436
Case 4	16	4.99	4.21	40.0	0.62	300/391
Case 5	12	6.35	4.70	45.0	0.66	261/300
Case 6	12	8.54	5.80	49.0	0.65	257/300
Case 7	16	6.35	4.70	45.0	0.66	247/300
Case 8	16	8.54	5.80	49.0	0.65	290/300

設置し、撮影区間は流木投入地点からその下流の2.0 m 区間とした。撮影区間が短いためか、漂流速度 $\geq$ 断面平均流速とならない場合があった。このような場合の移動加速距離は各測点の断面平均流速を直線近似、漂流速度を直線外挿し、それらの交点位置を求めることで評価した。漂流速度 $>$ 断面平均流速となった場合の移動加速距離は、図-2に示すように、各測点の断面平均流速を直線近似、漂流速度を曲線（表計算ソフト“Excel”の自由曲線）近似し、それらの交点位置を求めることで評価した。

（2）横拡散と縦分散

実験の概要を図-3に示す。実験水路には長さ10.0 m、幅0.30 m、高さ0.50 mの可変勾配循環水路を用いた。測点は整流装置下端から0.6 m 下流に位置する流木投入装置の下流0.6 m 地点を原点に $X=0, 0.6, 1.2, 2.4, 3.6, 4.8, 6.0$ mの7地点とした。各測点の上方にビデオカメラ、水面よりやや上に5 cm 間隔のメッシュ（横拡散評価のため、水路横断方向は1 cm 間隔のメッシュ）、ガラス製水路側壁外側かつ水面よりやや上に赤外線センサーを配置した。ビデオカメラで各測点における流木中心の水路横断方向位置 Y （原点は水路中心）、赤外線センサーで流木先端の漂流到達時間を読み取った。

流木は水面近傍に設置した自作の投入装置を用い、長軸を流れ方向に向けて水路中心に投入した。計測機器の所有台数の制約から $X=0\sim0.6\sim2.4\sim4.8$ mと $0\sim1.2\sim3.6\sim6.0$ mの2パターンで計測機器を配置し、表-2に示す8条件の実験を行った。表の回数欄の分母は全流木投入回数、分子は有効投入回数、つまり流木が

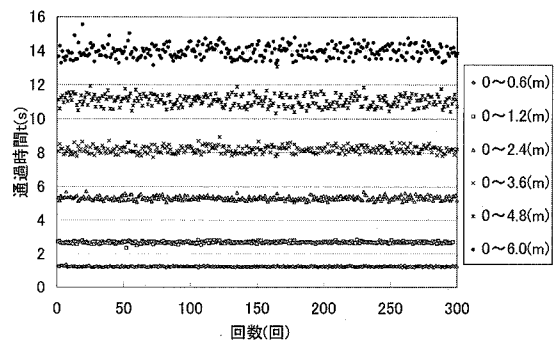


図-4 各実験回数における流木漂流到達時間例（Case 3）

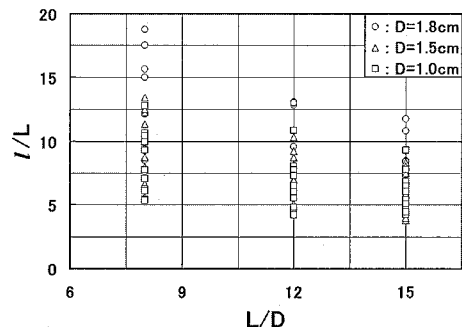


図-5 無次元移動加速距離の細長比と流木径への依存性

側壁に触れなかった回数を示す。流木には $D=1$ cm、 $L=12$ cmと16 cm、実験開始前に30分間水に浸した比重 $S=0.9$ のラワン材を用いた。 $X=0$ 通過時を時間 $t=0$ としたときの流木の漂流到達時間例（Case 3）を図-4に示す。図から、流木の漂流距離が増加するにつれて、漂流到達時間の変動が大きくなることが判る。

3. 結果と考察

（1）移動加速距離

流木の無次元移動加速距離 I/L と細長比 L/D の関係を図-5に示す。図から、細長比が大きくなるにつれて、無次元移動加速距離は単調減少することが判る。ただし、これは移動加速距離そのものの減少を意味しないことに注意を要する。定常流下の流木の移動加速距離は流木長の20倍以下であることも判る。さらに、細長比が同じ場合、流木径が大きいほど移動加速距離が長くなることも判る。これは、細長比が同じ場合、流木径が大きくなると流木は長くなり、流木の重量ひいては慣性の増加効果が流木に働く抗力や摩擦力の増加効果より大きくなるためと考えられる。

移動加速距離の断面平均流速、流木比重、水面勾配、Reynolds 数などへの依存性については松本・松富（1998）と田中・松富（1999）の論文に詳しい。

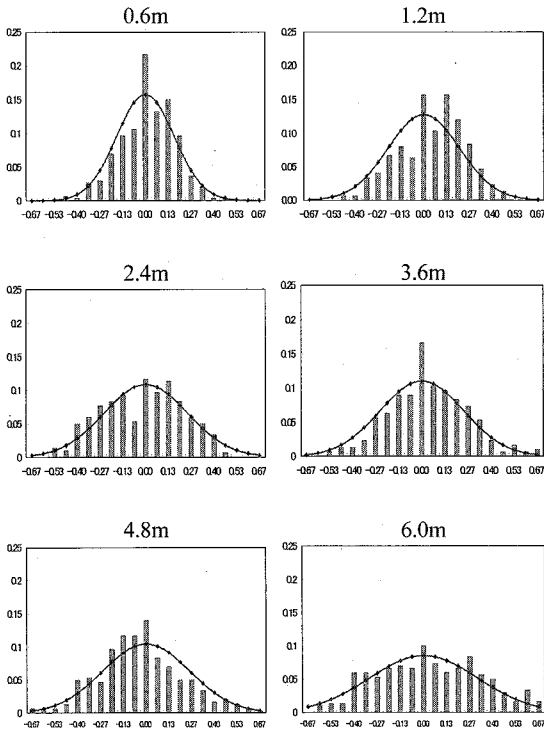


図-6 水路横断方向各位置の流木通過確率例 (Case 3)

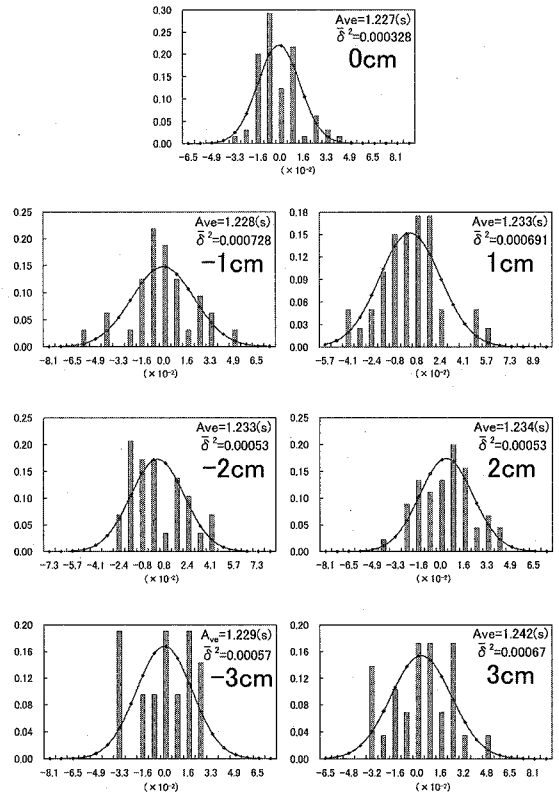


図-9 水路横断方向位置 Y を通過する流木の漂流到達時間差の確率例 (Case 3, X=0.6m)

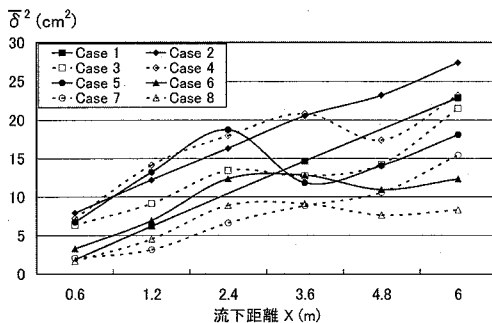


図-7 漂流距離による横拡散の分散の変化

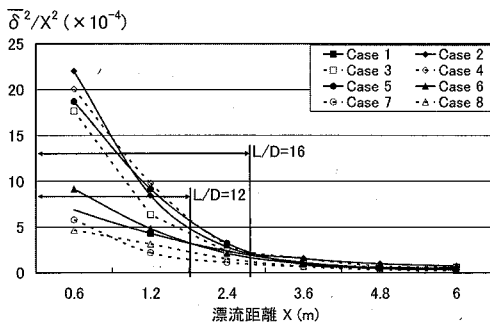


図-8 漂流距離による横拡散の無次元分散の変化

(2) 横 拡 散

漂流距離 X (測点) 毎の水路横断方向の各位置 Y を流木が通過する確率例を図-6 に示す。縦軸の確率は (通過本数 / 全流木投入回数) で評価している。横軸は水路半幅で無次元化している。図中の実線は正規分布曲線で、水路中心 $Y=0$ を横拡散の平均位置と仮定し、有効な実験値から求めている。よって、側壁に触れた実験ケースを考慮していない分、水路中心部を除いて、確率は小さめに評価されている。図から、流木は水路中心付近を通過する確率が高く、漂流するにつれて横方向に拡散するが、通過確率分布は正規分布を維持し続けることが判る。

漂流距離による横拡散の分散 ($\bar{\sigma}^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 / n$, $\bar{Y}=0$, n : 有効投入回数) の変化を図-7 と 8 に示す。図-8 は分散を漂流距離 X の 2 乗で無次元化したものである。

図-7 から、横拡散の分散は漂流距離が増加するにつれて基本的に単調増加することが判る。流木長の影響を見ると、 $L/D=12$ (実線) の方が分散は大きい傾向にあるが、 $L/D=16$ (点線) の方が水路側壁にぶつかったケースが多いことを考えると、両者の差は有意とは言い難い。

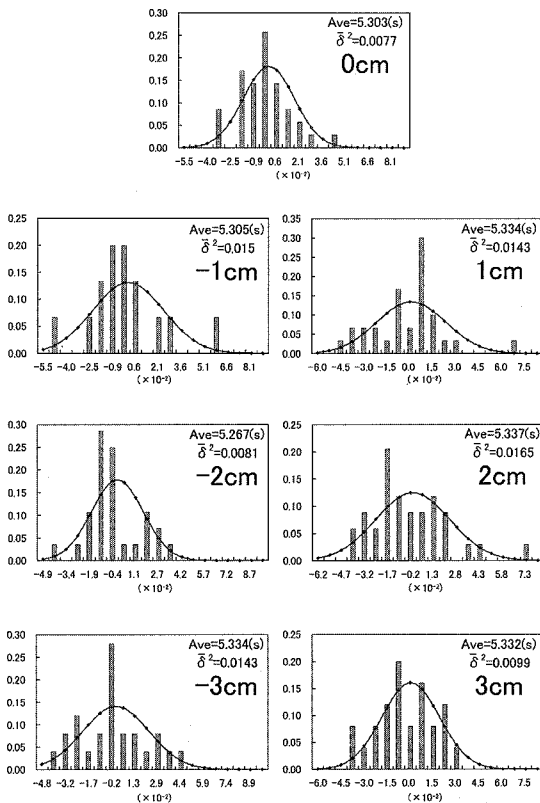


図-10 水路横断方向位置 Y を通過する流木の漂流到達時間差の確率例 (Case 3, $X=2.4\text{m}$)

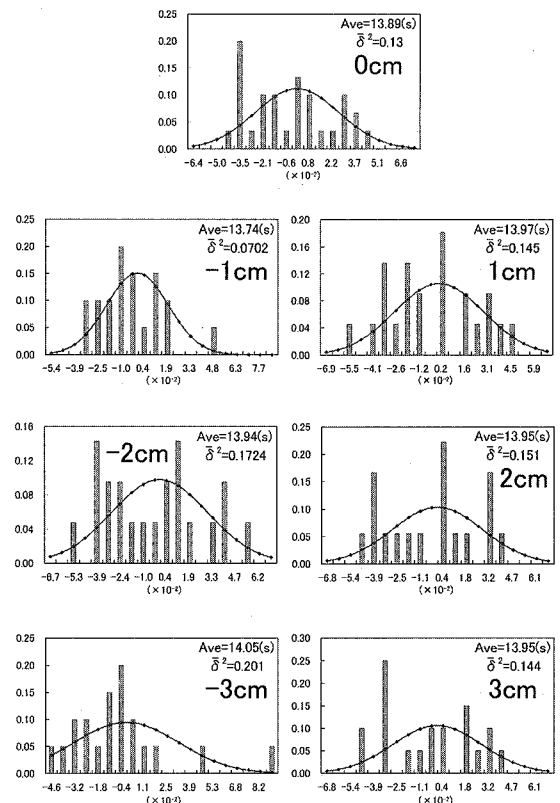


図-11 水路横断方向位置 Y を通過する流木の漂流到達時間差の確率例 (Case 3, $X=6.0\text{m}$)

図-8 から、無次元分散は $X=2.4\sim 3.6\text{m}$ 以降ではほぼ一定値になることが判る。これらの距離が $l/L=20$ としたときの移動加速距離 $l=2.4$ ($X=1.8$) ~ 3.2 ($X=2.6$) m にほぼ対応していることは興味深い。

横拡散係数については別の機会で言及する。その値は後藤ら (1982) と中川ら (1993) の値の間であった。

(3) 縦分散

縦分散は各測点 (X, Y) を通過する流木の平均漂流到達時間 $\bar{t}$ からの差で論じる。漂流距離 X ($=0.6, 2.4, 6.0\text{m}$) 毎の水路横断方向位置 Y ($=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3\text{cm}$) を通過する流木の漂流到達時間差の確率分布例を図-9～11 に示す。縦軸の確率は各位置の (各時間差の通過本数 / 全通過本数) で評価している。図中の実線は正規分布曲線で、実験値から求めている。図によると、実験値の確率分布が正規分布に近いものもあれば、そうでないものもある。漂流距離が増加するにつれて正規分布からずれる傾向もある。これらの理由の一つとして、実験回数がまだ少ないことが考えられる。

漂流距離による縦分散の分散 ($\bar{\sigma}^2 = \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2 / n$, n : 各位置の全通過本数) の水路横断方向平均値 ($-3\text{cm} \leq Y \leq 3\text{cm}$) の変化を図-12 と 13 に示す。図-13 は

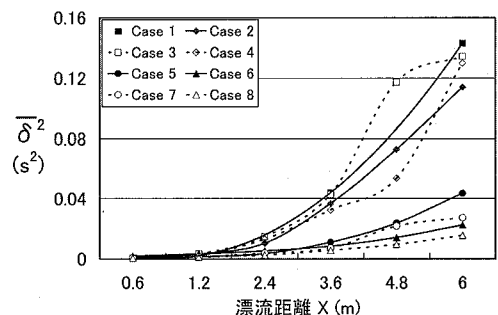


図-12 漂流距離による縦分散の水路横断方向平均分散の変化

水路横断方向平均分散を水路横断方向平均の平均漂流到達時間 $\bar{t}$ の 2 乗で無次元化したものである。図-12 と表-2 から、縦分散の水路横断方向平均分散は、①漂流距離が増加するにつれて単調増加すること、②流速が小さいほど大きい傾向にあること、③流木長の影響がほとんど認められないことが判る。図-13 から、縦分散の水路横断方向平均無次元分散は、Case 6 を除いて、ほぼ一定値であることが判る。

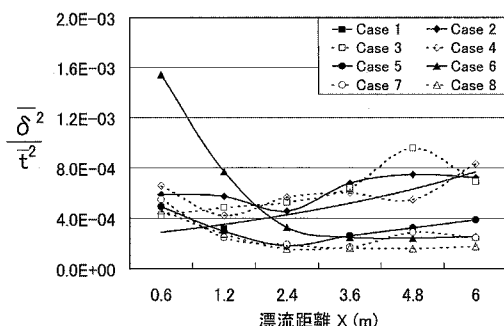


図-13 漂流距離による縦分散の水路横断方向平均無次元分散の変化

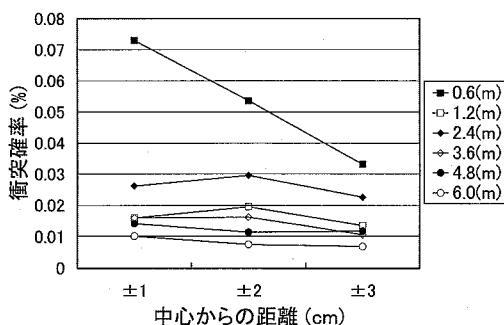


図-14 2本の流木の被衝突物への同時衝突確率例(Case 3)

(4) 複数流木の衝突確率

2本の流木が同時衝突する確率の評価例を以下に示す。横拡散と縦分散は正規分布するものと仮定して、確率が最も高くなる(危険な)場合を想定している。

図-6から、例えば $X=0.6$ m 地点の水路中心 $Y=0$ を流木が通過する確率は 0.158 であることが判る。図-9から、そこへの平均漂流到達時間 $\bar{t}$ は 1.227 s, その到達時間での流木通過確率は 0.215 であることが判る。さらに図-6から、水路中心から ± 1 cm での流木通過確率は 0.146 (<0.158), 平均漂流到達時間 1.227 s と同じ時間に通過する確率は 0.148 ($Y=1$ cm) と 0.147 ($Y=-1$ cm) であることが判る。よって、 $X=0.6$ m 地点の水路中心を通過する流木と ± 1 cm 離れた流木が同時に衝突する一番高い確率は $0.158 \times 0.215 \times 0.146 \times 0.148 \approx 0.00073 = 0.073\%$ となる。水路中心に流木が衝突したときから考えると、 $0.146 \times 0.148 \approx 0.022 = 2.2\%$ となる。同様な手順で ± 2 cm 離れた流木に対して確率を求めると 0.054%, ± 3 cm 離れた流木に対して求めると 0.033% であり、水路中心から離れるにつれて同時衝突確率は低くなる。

本評価法による各漂流距離での結果例を図-14に示す。図から、漂流距離が増加するにつれて、①衝突確率が小さくなる傾向にあること、② Y に関してほぼ一様とな

る傾向にあることが判る。水路中心から離れるにつれて同時衝突確率が増加しているものがあるが、他の実験条件ではほとんどが単調減少したことを断っておく。

流木が多数のときの同時衝突確率は上記の各評価値や他の衝突条件でのものなどの積分値で、もっと高いものとなる。また、実スケールの流木衝突実験によれば(松富, 1999), 流木の衝突力立ち上がり時間と衝突力作用時間は 0.009 s と 0.013 s 程度で、同時衝突でない場合をも考慮することになると、複数流木の衝突確率はさらに高いものとなる。

本実験結果は幅の狭い水路で得られたもので、水路幅の影響を受けている。水路中心部分での議論には問題がないと考えるが、今後幅の広い水路での検討が必要かもしれない。

4. おわりに

本研究で得られた主な結論は次の通りである。

①定常流中に静かに投入された流木が定常状態に達するまでの移動加速距離は流木長の 20 倍以下である。

②流木の流れ横断方向の通過確率分布はほぼ正規分布し、漂流距離が増加するにつれてその分散は増加する。

③流木の流れ方向の漂流到達時間変動から見た通過確率分布もほぼ正規分布し、漂流到達時間が増加するにつれてその分散は増加する。

④横拡散の無次元分散は、流木の移動速度が準定常になるとほぼ一定になる。一方、縦分散の無次元分散は常にほぼ一定の傾向にある。

⑤限られた実験条件の結果に基づくものであるが、複数流木の被衝突物への同時衝突確率を初めて例示した。

謝辞: 本実験を行うにあたり、秋田大学大学院博士後期課程 今井健太郎氏と秋田大学卒業研究生 舟木真智君、山口 健君、山本悠斗君の助力を得た。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 後藤智明・佐々木順次・首藤伸夫(1982): 津波による木材の流動, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 491-495.
- 田中優道・松富英夫(1999): 流木移動加速距離の流木比重への依存性, 土木学会東北支部講演概要, pp. 228-229.
- 中川 一・高橋 保・池口正晃(1993): 洪水氾濫に伴う流木群の拡散に関する研究, 水工学論文集, 第37巻, pp. 379-384.
- 松富英夫(1998): 陸上に氾濫した津波に伴う流木の衝突力, 月刊海洋, 海洋出版, 号外15号, pp. 153-158.
- 松富英夫(1999): 流木衝突力の実用的な評価式と変化特性, 土木学会論文集, No. 621/II-47, pp. 111-127.
- 松本光司・松富英夫(1998): 流木の移動加速距離に関する実験的研究, 土木学会東北支部講演概要, pp. 262-263.
- Matsutomi H., Sakakiyama T., Nugroho S. and M. Matsuyama (2006): Aspects of Inundated Flow due to the 2004 Indian Ocean Tsunami, CEJ, Vol.48, No.2, pp. 167-195.