

## 河道狭窄部がアイスジャム発生現象に与える影響

Influence of river width to ice jams phenomenon

北見工業大学 ○学生員 北島 笙子(Shoko Kitajima)  
 北見工業大学 正員 吉川 泰弘(Yasuhiro Yoshikawa)  
 寒地土木研究所 正員 黒田 保孝(Yasutaka Kuroda)

## 1. はじめに

寒冷地の河川では、気温の低下に伴い河水が形成され、気温の上昇により河水は解氷し流下する。河水が河道内で堆積するとアイスジャムが発生する。アイスジャムが発生すると、水位は急激に上昇し、災害が発生する可能性がある。

アイスジャム対策を実施するうえで、アイスジャムの発生時期、発生場所、発生条件に関する知見は重要である。既往研究では、北海道天塩川の恩根内水位観測所を対象にしたアイスジャム発生時の要因となる解氷時期の研究<sup>1)</sup>や、橋脚箇所のアーチ形成によるアイスジャムの研究<sup>2)</sup>により、発生時期や発生場所について有益な知見が得られている。一方で、河道形状を考慮したアイスジャム現象に関する研究は、十分には実施されていない。既往研究<sup>3)</sup>では渚滑川を対象として、川幅が狭い河道、水深が浅い河道、勾配が緩い河道におけるアイスジャム発生条件の研究が実施されている。しかし、急激に川幅の狭くなる狭窄部を有する河道に関する研究は十分には実施されていない。具体的には、川幅  $B_1$  の河道が川幅  $B_2$  となる河道において、川幅縮小比  $B_2/B_1$  がアイスジャム発生に対してどのような影響を与えているかについては、明らかとなっていない。

本研究は、河道狭窄部におけるアイスジャム発生条件を明らかにすることを目的とし、渚滑川で発生したアイスジャム現象を対象としたアイスジャム水理実験を実施した。河道形状として川幅と河床勾配に着目し、氷板サイズ、氷板量、河川流量を水理条件として実験を実施した。なお、実験結果の考察については、狭窄部以外の実験条件が同じである既往研究<sup>3)</sup>との比較を加えている。

## 2. アイスジャム水理実験

## 2.1 実験水路、実験条件、測定項目

2010年2月に渚滑川で発生したアイスジャムを対象として、既往研究<sup>4)5)</sup>で得られた値を参考に、実験水路形状、氷板サイズ、氷板量、河川流量を決定した。実験水路の平面図と側面図を図-1に示す。

実験水路形状の設定方法について述べる。実河川のアイスジャム発生前の流量  $14\text{m}^3/\text{s}$  およびアイスジャム発生区間 KP11 から KP20 の横断データを用いた不等流計算結果から、水面幅の最小  $21.3\text{m}$ 、平均  $40.8\text{m}$ 、最大  $82.0\text{m}$ 、河床勾配の最小  $-1/769$ 、最大  $1/125$  の値を得た。水理実験の簡便性を考慮して模型縮尺を  $1/100$  とし、水路幅は、最小水路幅  $20\text{cm}$ 、平均水路幅  $40\text{cm}$ 、最大水路幅  $80\text{cm}$ 、勾配は、最小勾配 LEVEL、最大勾配  $1/120$  を

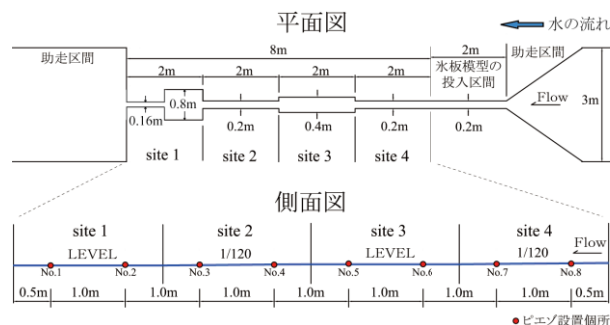


図-1 実験水路の平面図と側面図

設定した。この設定値を基に、水路幅と河川勾配を任意に組み合わせて実験水路形状を決定した。狭窄部の設定は、 $8\text{cm} \times 8\text{cm}$  の氷板模型大の2倍の水路幅として、狭窄部水路幅  $16\text{cm}$  を設定し、厚さ  $0.6\text{cm}$  の透明アクリルで site1 の下流端から  $1\text{m}$  を狭窄部とした。実験水路は、下流から site1(水路幅  $80\text{cm}$ 、狭窄部区間  $1\text{m}$ 、狭窄部水路幅  $16\text{cm}$ 、勾配 LEVEL)、site2(水路幅  $20\text{cm}$ 、勾配  $1/120$ )、site3(水路幅  $40\text{cm}$ 、勾配 LEVEL)、site4(水路幅  $20\text{cm}$ 、勾配  $1/120$ )、1区間  $2\text{m}$  として4区間を設定した。水路下流端は  $11.5\text{cm}$  の高さの段落ちを設けた。

氷板サイズの設定は、アイスジャム発生後に河道に堆積していた氷板の最大の氷板サイズ  $4\text{m}$ 、厚さ  $0.6\text{m}$  の値から、模型縮尺を  $1/100$  であるため、氷板サイズを  $4\text{cm} \times 4\text{cm}$ 、 $8\text{cm} \times 8\text{cm}$  の計2ケースを設定し、厚さ  $0.6\text{cm}$  は同一とした。氷板模型は、実河川の氷板と同等の比重であるポリプロピレンを用いた。また、氷板模型速度を判読しやすいように、氷板模型の両面において、 $4\text{cm}$  氷板模型は直径  $2\text{cm}$ 、 $8\text{cm}$  氷板模型は直径  $4\text{cm}$  の円形の赤色スタンプで着色した。

氷板模型の投入方法は、氷板模型投入区間において、アクリル製投入用ホッパーを設置し、水面への影響が小さくなるように投入角度  $20$  度で氷板模型を投入した。氷板模型投入終了時刻は、氷板模型投入区間で氷板模型が堆積し、氷板模型が流下しないことを確認した時刻とした。

河川流量の設定は、アイスジャム発生時の最大流量  $286\text{m}^3/\text{s}$  より、実験流量  $2.8\text{L}/\text{s}$  を基準として、 $3.5\text{L}/\text{s}$ 、 $4.2\text{L}/\text{s}$  の計3ケースを設定した。予備実験として、 $0.7\text{L}/\text{s}$ 、 $1.4\text{L}/\text{s}$ 、 $1.8\text{L}/\text{s}$  を実施したが、どのケースも氷板模型投入箇所でも堆積し実験が継続できなかった。氷板量の設定は、アイスジャム発生前の氷板量  $60\text{m}^3/\text{s}$  より、 $0.6\text{L}/\text{s}$ 、 $0.3\text{L}/\text{s}$  の2ケースを設定した。

表-1 各ケースの実験条件とアイスジャム発生の有無

ケース	氷板サイズ cm	氷板投入量 L/s	流量 L/s	アイスジャム
1	4×4	0.3	2.8	発生(site1狭窄部上流)
2	4×4	0.3	3.5	非発生
3	4×4	0.3	4.2	非発生
4	4×4	0.6	2.8	発生(site1狭窄部上流)
5	4×4	0.6	3.5	発生(site1狭窄部上流)
6	4×4	0.6	4.2	発生(site1狭窄部上流)
7	8×8	0.3	2.8	発生(site1狭窄部上流)
8	8×8	0.3	3.5	非発生
9	8×8	0.3	4.2	非発生
10	8×8	0.6	2.8	発生(site3下流)
11	8×8	0.6	3.5	発生(site3下流)
12	8×8	0.6	4.2	発生(site3下流)

実験は上記の2×3×2の計12ケースを実施した。図-1のNo.1からNo.8の箇所において、水位測定のためにピエゾを水路底に8台設置した。平面および側面より動画撮影を実施した。実験条件およびアイスジャム発生の有無を表-1に示す。

表-1より、既往研究<sup>3)</sup>では、アイスジャム発生条件は、氷板サイズが大きい、氷板量が多い、流量が少ないという条件である。既往研究<sup>3)</sup>の狭窄部の存在しない水路の場合と比較して、本実験では、新たにアイスジャムが3ケース(ケース1、5、6)発生した。本実験より、狭窄部があることによって、氷板サイズが小さくてもアイスジャムが発生することが分かった。

### 2.2 アイスジャム発生箇所

表-1より、アイスジャムの発生箇所はsite1狭窄部上流とsite3下流であり、この箇所を起点として上流方向に氷板模型が堆積した。狭窄部のない既往研究<sup>3)</sup>では、site3下流部にアイスジャムが発生したケースが多かったが、本実験ではsite1の狭窄部上流でアイスジャムが発生するケースが多かった。

氷板サイズの小さいケース1、4、5、6は狭窄部より上流の水路幅が広いsite1上流部において、氷板模型がアーチ状に堆積しアイスジャムが発生した。その後アイスジャムは解消されて、氷板模型は流下した。

氷板サイズの大きいケース7、10、11、12では、site2の水路幅急縮部より上流の水路幅が広いsite3下流部において氷板模型が堆積しアイスジャムが発生した。その後、アイスジャムはどのケースも、30分以上解消されず維持したため実験を終了した。

ケース6とケース12のアイスジャム発生時の状況を図-2、図-3に示す。図-2のケース6ではsite1狭窄部上流部でアイスジャムが発生していることが分かる。図-3のケース12ではsite1の狭窄部上流部にも少数の氷板模型が堆積しているが、site3下流部でアイスジャムが発生していることが分かる。当初、氷板サイズに対して水路幅が極端に狭い狭窄部において、アイスジャムの起点となると考えていたが、今回の実験条件ではsite1狭窄部はアイスジャムの起点とはならなかった。

### 3. アイスジャム発生条件

アイスジャム現象は、上流から流下する氷板が、アイスジャム発生起点において減速し、その箇所では堆積およ

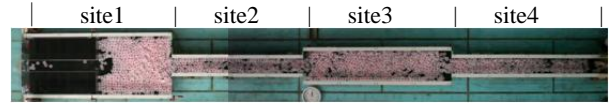


図-2 アイスジャム発生時の状況  
(実験ケース：6、時間：80秒後)



図-3 アイスジャム発生時の状況  
(実験ケース：12、時間：55秒後)

び河道を閉鎖させて流積を狭める。本研究では、氷板の堆積量と氷板速度に着目して検討を行った。

### 3.1 氷板枚数と氷板速度

アイスジャム発生の起点における現象を解明するために、アイスジャムが発生したケースにおいて、site1狭窄部上流にアイスジャムが発生したケースはsite1狭窄部上流端から上流50cmの範囲、site3下流にアイスジャムが発生したケースはsite3下流端から上流50cmの範囲を対象として、平面および側面の映像を基に氷板模型の枚数を計測し、平面動画を基にPTV解析から平均氷板模型速度を求めた。

氷板模型枚数の算出方法は、氷板模型が鉛直方向に重なっていない場合は平面画像から枚数を計測した。氷板が重なっている場合は側面画像から水路側壁に接している氷板模型の枚数を計測し、氷板模型の1枚の側面面積を乗じて、側面における氷板模型の全面積を求め、この値に水路幅を乗じて氷板模型の全体積を算出し、氷板模型1枚の体積で割り戻し、枚数を求めた。

氷板模型速度の算出方法は、CanonMark2一眼レフデジタルカメラ、24mm単焦点レンズを用いて撮影した平面動画を基に、市販のソフトウェア(カトウ光研株式会社製FlowExpert)を用いてPTV解析を実施して求めた。

アイスジャム発生時の氷板枚数と氷板速度をケース毎に図-4から図-11に示す。どのケースにおいても、氷板模型枚数が増加すると氷板模型速度が減速していることが分かる。

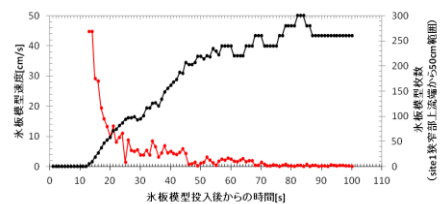


図-4 氷板枚数と氷板速度 (実験ケース1)

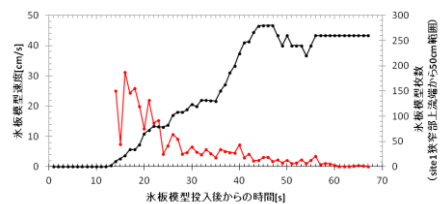


図-5 氷板枚数と氷板速度 (実験ケース4)

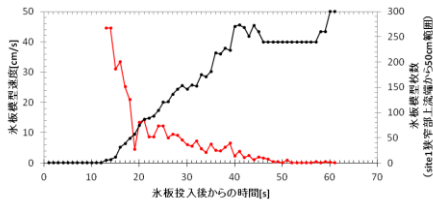


図-6：氷板枚数と氷板速度（実験ケース 5）

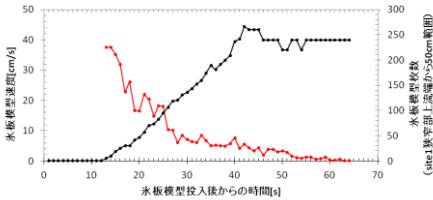


図-7 氷板枚数と氷板速度（実験ケース 6）

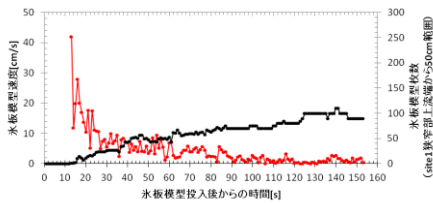


図-8 氷板枚数と氷板速度（実験ケース 7）

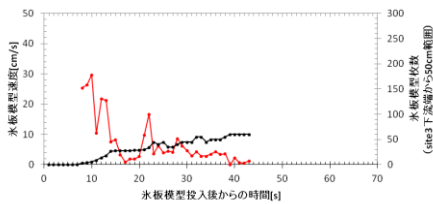


図-9 氷板枚数と氷板速度（実験ケース 10）

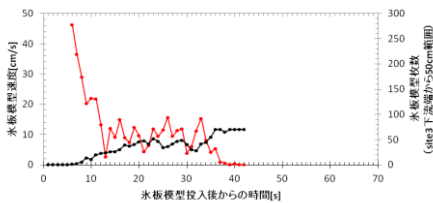


図-10 氷板枚数と氷板速度（実験ケース 11）

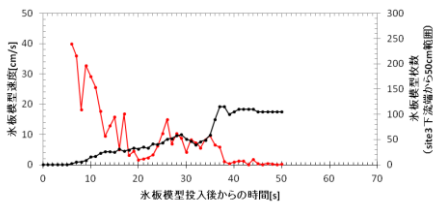


図-11 氷板枚数と氷板速度（実験ケース 12）

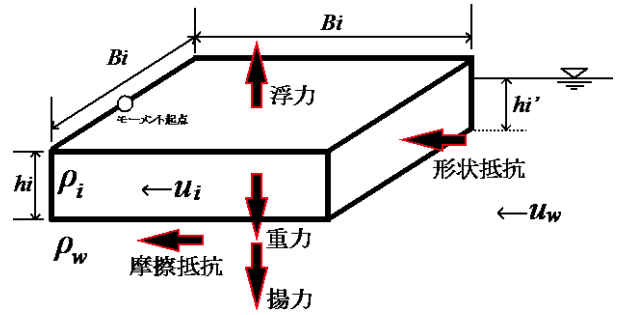


図-12 流下する氷板に働く力の概念図

### 3.2 氷板速度の減衰割合

アイスジャムによる氷板速度の減速について、既往研究<sup>6)</sup>では減衰割合  $\lambda$  を用いて式(1)で評価している。

$$\dot{u}_i = \lambda u_i \quad (1)$$

$\dot{u}_i (\frac{m}{s})$ ：アイスジャム発生直後の氷板速度、 $u_i (\frac{m}{s})$ ：アイスジャム発生直前の氷板速度、 $\lambda$ (無次元)：氷板速度の減衰割合。また既往研究<sup>3)</sup>において、流下する氷板に働く力を図-12のように考え、図-12の氷板表面下流側の白丸の点を基準として、氷板に働く力のモーメントのつり合いを考えると式(2)となる。

$$\begin{aligned} & \rho_i g B_i^2 h_i \frac{B_i}{2} - \rho_w g B_i^2 h_i' \frac{B_i}{2} \\ & + \frac{1}{2} \rho_w C_D B_i h_i' \left( h_i - \frac{h_i'}{2} \right) (u_w - u_i)^2 \\ & + \frac{1}{2} \rho_w C_f B_i^2 h_i (u_w - u_i)^2 \\ & + \frac{1}{2} \rho_w C_L B_i^2 \frac{B_i}{2} (u_w - u_i)^2 = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$C_D$ (無次元)：形状抵抗係数、 $C_f$ (無次元)：摩擦抵抗係数、 $C_L$ (無次元)：揚力係数である。

$\Delta \epsilon = (\rho_w - \rho_i) / \rho_w$  および  $h_i' \approx h_i$  とすると、式(2)は式(3)となる。氷板のフルード数  $Fr$  は式(4)となる。

$$\frac{u_i}{u_w} = \frac{1}{1 + \frac{1}{Fr \sqrt{\frac{C_D}{2} \left( \frac{h_i}{B_i} \right)^2 + C_f \left( \frac{h_i}{B_i} \right) + \frac{C_L}{2}}}} \approx \lambda \quad (3)$$

$$Fr = \frac{u_i}{\sqrt{\Delta \epsilon g h_i}} \quad (4)$$

式(3)の左辺、 $u_i$  はアイスジャム発生直後の氷板速度  $\dot{u}_i$  と等しく、 $u_w$  はアイスジャム発生直前の氷板速度  $\dot{u}_i$  と等しいと仮定すると、式(3)の左辺は  $u_i / u_w \approx \lambda$  となる。以上より、 $Fr$  と  $\lambda$  の関係が予測できる。今回、 $\lambda$  算出に用いる流速  $u_w$  は、氷板模型を流す前 120 秒間の平均流速とした。

実験で得た氷板のフルード数  $Fr$  と氷板速度の減衰割合  $\lambda$  の関係を、狭窄部がある場合とない場合の二つを図-13に示す。実験値から求めた対数関数も図示した。

式(3)において  $h_i$  は、アイスジャム発生時は水深の分だけ氷板が堆積すると考えて、各ケースにおけるアイスジャム発生箇所の氷板投入前の平均水深 4cm を与え、 $B_i$  は平均氷板サイズ 6cm を与え、各係数は既往研究<sup>6),7)</sup>を参考にした値を与え、この時の理論値を図-13に示し

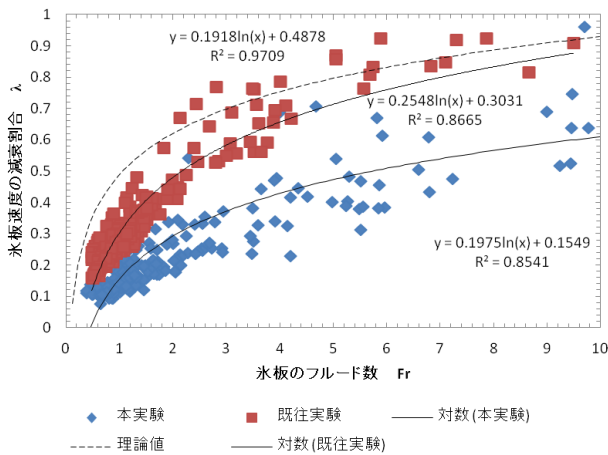


図-13 氷板のフルード数  $Fr$  と氷板速度の減衰割合  $\lambda$   
 ---- : 理論値  
 (Cd=0.4、Cf=1、Cl=0.4、hi=0.04、Bi=0.06)

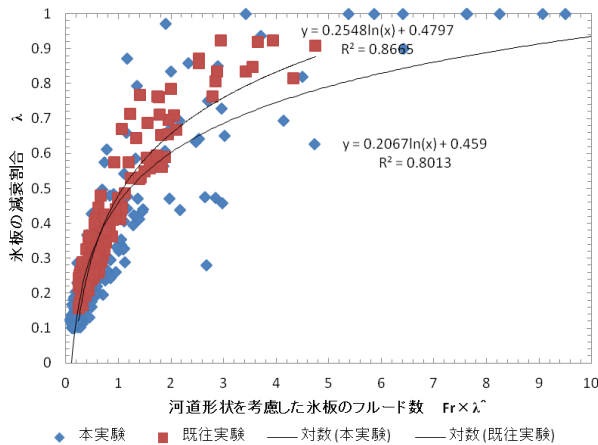


図-14 河道形状を考慮した氷板のフルード数  $Fr \times \lambda^2$  と氷板速度の減衰割合  $\lambda$

た。図-13 より、氷板のフルード数が小さいほど氷板速度は減速することが分かる。また、河道狭窄部の有無で比較すると、河道狭窄部を有する河道は、より氷板速度が減速することが分かる。

図-13 の実験値の与え方を記す。式(4)の  $h_i$  は、site3 下流でアイスジャムが発生した場合は site3 下流端から上流 50cm の範囲における平均氷板厚、site1 狭窄部上流でアイスジャムが発生した場合は site1 狭窄部上流端から上流 50cm の範囲における平均氷板厚として、実験で得たこの範囲における氷板模型の全体積を水路平面積（縦断距離 50cm×水路幅 40cm もしくは 80cm）で割り求めた。式(4)の  $u_i$  は、site3 下流端から上流 50cm、もしくは site1 狭窄部上流端から上流 50cm の範囲における PTV 解析から得た平均氷板模型速度を与えた。 $\lambda$  の  $u_i$  は上記の平均氷板模型速度を与え、 $\tilde{u}_i$  はアイスジャム発生前の初期の氷板模型速度を与えた。

### 3.3 河道形状の影響の考慮

図-13 より、既往研究<sup>3)</sup>による実験結果と本実験結果では、 $Fr$  と  $\lambda$  の関係が異なることが分かった。両者の

実験条件の違いは、図-2 で示した site1 における狭窄部の有無である。本研究では、川幅狭窄部の影響を評価するために、上流側の川幅を  $B_1$ 、下流側の川幅を  $B_2$  として、 $B_2/B_1 = \hat{\lambda}$  で評価する。 $B_2 = B_1$  の場合、 $\hat{\lambda} = 1$  となる。

$B_2/B_1 = \hat{\lambda}$  とした理由を記す。死水域は  $B_1-B_2$  となり、この区間の減衰率  $\lambda_0$  は 0 となる。一方で、流水域は  $B_2$  であり、この区間の減衰率  $\lambda_1$  は 1 となる。よって川幅狭窄部の  $\hat{\lambda}$  は、次式で表した。

$$\hat{\lambda} = \frac{\lambda_1 \cdot B_2 + \lambda_0 (B_1 - B_2)}{B_1} = \frac{B_2}{B_1} \quad (5)$$

上記の式が氷板のフルード数に影響を与えていると仮定し、 $Fr \times \hat{\lambda}$  を横軸にとり実験結果を整理すると、図-14 となる。図-14 より既往研究<sup>3)</sup>の実験結果と本実験結果は良く一致しているのが分かる。

### 4. 終わりに

本実験において、氷板のフルード数により、アイスジャム発生の可能性を評価できることがわかった。

河道狭窄部による影響を川幅縮小比を用いることで評価できることが分かった。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費基盤研究(B)24360197、JSPS 科研費若手研究(B)26870023 の助成を受けました。記して謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 伊藤丹, 黒田保孝, 吉川泰弘, 結城憲明: 天塩川における結氷初期と解氷期に関する現地観測, 寒地土木研究所月報, No.723, pp.2-10, 2013.
- 2) 榎国夫, 国松靖, 佐伯浩: 橋脚による氷盤の arch 形成条件に関する実験的研究, 土木学会, 水工学論文集, 第 36 巻, pp.299-304, 1992.
- 3) 吉川泰弘, 黒田保孝, 伊藤丹, 渡邊康玄: 結氷河川における河道形状を考慮したアイスジャム発生条件に関する研究, 土木学会, 河川技術論文集, 第 20 巻, 2014.
- 4) 吉川泰弘, 渡邊康玄, 早川博, 平井康幸: 2010 年 2 月に渚滑川で発生したアイスジャムに関する研究, 土木学会, 河川技術論文集, 第 17 巻, 2011.
- 5) 吉川泰弘, 渡邊康玄, 早川博, 平井康幸: 河川解氷時の河氷の破壊と流下に関する研究, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.67, No.4, pp.I\_1075-I\_1080, 2011.
- 6) 吉川泰弘, 阿部孝章, 渡邊康玄, 伊藤丹: 1 次元混合氷径河水変動計算モデルの開発とアイスジャムの再現計算, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.70, No.4, pp.I\_679-I\_684, 2014.
- 7) 田村正秀, 木下正暢, 浜口憲一郎, 阿部康紀: 護岸ブロックの形状と抗力・揚力特性について, 流体力の評価とその応用に関するシンポジウム, 第 2 回, pp.1-8, 2003.