

# アイスジャム形成過程における 浮氷盤の安定に関する実験的研究

## EXPERIMENTAL STUDY ON THE STABILITY OF ICE FLOES IN THE ICE JAM PROCESS

蒔田俊輔<sup>1</sup>・原文宏<sup>2</sup>・佐伯浩<sup>3</sup>

Shunsuke MAKITA, Fumihito HARA and Hiroshi SAEKI

<sup>1</sup> 学生会員 工修 博士課程 北海道大学工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

<sup>2</sup> 正会員 工博 北海道開発技術センター(社) (〒060-0051 札幌市中央区南1条東2丁目11番地)

<sup>3</sup> 正会員 工博 工学研究科教授 北海道大学工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

Many rivers flowing through the cold region are ice-covered in winter. At these rivers, the phenomenon that a group of ice floes accumulates in the river section, during the process of ice-cover and break-up, occurs. And this phenomenon called ice jam. The ice jam makes the decrease of section product of the river, and cause a flood. Moreover, when ice jam is made at the front of the river structures, it acts the ice force and produces localized scour of river bottom and causes collapse of structures. This phenomenon is indispensable condition for the design of river structures constructed at cold region. When the ice floes arrive at floating obstacle, the ice floes will either submerge under the obstacle or remain at the edge of the obstacle. The submerged ice floes form the ice jam. This paper reports the study on the stability of ice floes at the edge of the obstacle that have important meaning in the process of ice jamming.

*Key Words: Ice jam process, under-turning of ice floes, stability, and angle of inclination*

### 1. 研究目的

流下水盤が定着氷盤、水理構造物などの障害物により流下を妨げられたとき、氷盤には作用する流体力の影響により回転モーメントが発生し、回転モーメントが氷盤の浮力による抗力を上回った場合、氷盤は障害物端部において回転を伴い障害物下面に潜り込む。この現象はアンダーターニングと呼ばれる。アンダーターニングにより障害物下面に潜り込んだ氷盤は、その輸送される過程において、浮力の作用により障害物下に停滞することがあり、継続的な氷盤の堆積により、アイスジャムが形成される。アイスジャムは構造物に対し形成された場合には、その複雑な下面形状により増加した流体力を氷力として作用させるとともに、構造物近傍の局所洗掘を引き起こし、水理構造物の倒壊等が発生させる。このため寒冷地域に建設される水理構造物を設計する際に

は、この現象を無視することはできない。しかしアイスジャム等の結氷水域特有の現象は、非常に複雑で、年毎にも異なった特性を示すため、その発生の予測や防止、緩和策の確立が困難である。

したがって、本研究ではアイスジャムの発生過程において重要となる、浮氷盤の挙動を明らかにするものである。

### 2. 実験方法

幅 2m、長さ 10m の回流水路に厚さ 1cm の模型定着氷盤を設置し上流から模型浮氷盤を流下、定着氷盤にトラップ撮影、浮氷盤の傾斜角  $\alpha$  を測定する。模型定着氷盤は幅 2m、長さ 1m、厚さ 1cm のポリプロピレン盤をワイヤーにより水面に緩く吊り、水位の変化に対応し上下移動を可能とした。図-1 に実験装置を模式的に表す。

模型浮氷盤は厚さ  $h=1\text{cm}$  で一定とし、辺長は  $L=13\text{cm}$ 、 $10\text{cm}$ 、 $7\text{cm}$  の3種類の正方形ポリプロピレン盤を用いた。流速は河合等のアイスジャムの発生条件に関する実験的研究<sup>1)</sup>により求めたアンダーターニング限界において  $h/L$  により求められた最大流速を基準とし、以下回流水路の周波数により減少させ実験毎に記録した。なお、模型氷盤の比重は実験前にあらかじめ測定し、比重  $0.912$  を得た。これは、実際の氷盤の比重  $0.91$  とほぼ同じ事を確認している。

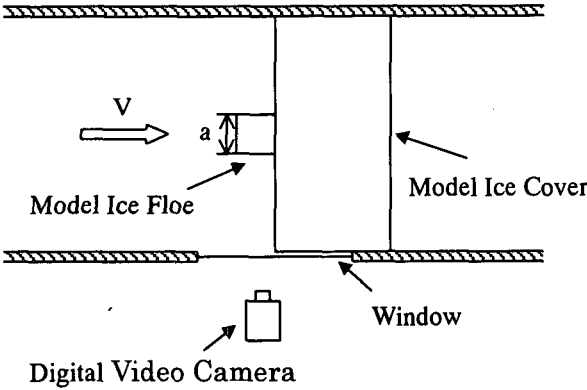


図-1 実験装置

### 3. 実験結果及び考察

デジタルビデオにより録画した映像を解析し、浮氷盤の傾斜角を計測するとともにそのときの水面状態を記録し、流速との関係において整理した。流れは定着氷盤により妨げられ、堰き上げられる。流下水盤前部は堰き上げられた水面に沿って傾斜するものと考えられる (図-2)。

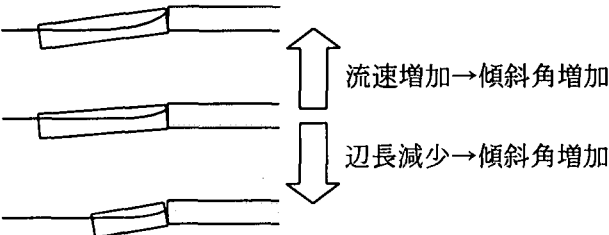


図-2 堰き上げによる氷盤の傾斜

流速が早くなるほど、堰き上げ高さは増加するため、氷盤の傾斜角は増加している。堰き上げ高 ( $d$ ) と流速の関係を図-3に示す。この時、浮氷盤は作用する力のモーメントの釣合いによって、安定した傾斜を保つ。氷盤の傾斜角と流速の関係を図-4に示す。氷盤の安定時の傾斜角は、ほぼ流速の2乗に

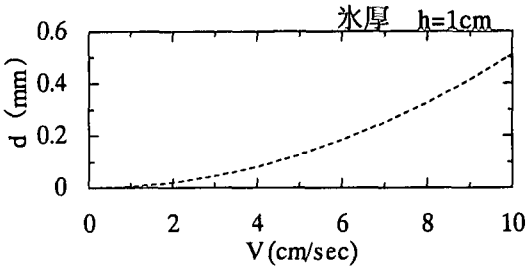


図-3 流速と堰き上げ高の関係

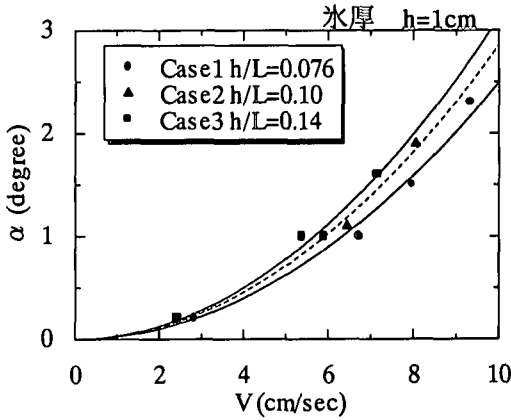


図-4 氷盤の傾斜角と流速の関係

比例して増加している。これは、河合等のアイスジャムの発生条件に関する実験的研究によれば、定着氷盤氷縁部に達した浮氷盤に作用する力は、形状抵抗  $F_D$ 、剪断抵抗  $F_S$ 、揚力  $F_L$ 、浮力  $F_B$ 、重力  $F_g$  であり、浮力と重力以外の外力が流速の2乗に比例しているためと思われる。傾斜角を流速の近似した2次式の係数を求め図-5に示す。

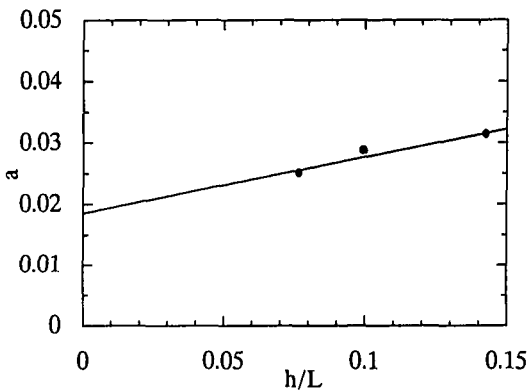


図-5 二次曲線の係数

氷盤の氷厚と辺長の比の値 $h/L$ が増加すると共に、氷盤の傾斜角 $\alpha$ も増加している。これは、同流速に対し氷縁部における堰き上げ高さは同一であるため、氷盤の辺長が減少するほど傾斜が大きくなる事による。浮氷盤のアンダーターニングの限界傾斜角度はほぼ $5.5^{\circ} \sim 6.5^{\circ}$  の範囲である（表-2）。

表-2 限界傾斜角

|                       | 限界傾斜角         |
|-----------------------|---------------|
| Case1 ( $h/L=0.076$ ) | $5.6^{\circ}$ |
| Case2 ( $h/L=0.10$ )  | $6.4^{\circ}$ |
| Case3 ( $h/L=0.14$ )  | $5.7^{\circ}$ |

今回の実験において観察された浮氷盤の傾斜角度は、アンダーターニング限界速度付近の流速では、大別して、4段階に分けられる。

- 1) 浮氷盤が、ある一定角度を保っている状態の安定状態の角度。
- 2) 浮氷盤が波、水位変動等の影響を受け安定した傾斜角よりも大きく傾斜した安定状態の角度とアンダーターニング直前の角度との中間の角度。この角度は、波、水位変動の規模によりに多少の差異がある。
- 3) アンダーターニング直前に平衡を保つ角度（図-6）。長ければ2～3秒間この角度を保つこともあり、その後、加速度的に角度を増しターニングする。
- 4) アンダーターニング途中、わずかにある角度で平衡を保つ事がある。ターニングの開始により氷盤が加速し抵抗力が発生したためであると思われる。この角度以降、氷盤の挙動は完全に回転するアンダーターニング、途中まで回転し潜り込むハーフアンダーターニング、回転せずに潜り込むスライディングの3種類に変化する（図-7）。

氷縁部にトラップされた浮氷盤に作用する力は、剪断力、形状抵抗力、揚力、重力、浮力である（図-8）。浮氷盤が安定を保つためには、これらの力のモーメントが釣り合っている事が必要である。それぞれの力を $F_{SW}$ 、 $F_{DW}$ 、 $F_L$ 、 $F_g$ 、 $F_B$ 、また、モーメントの中心からそれぞれの力の作用点までの長さを $R_{SW}$ 、 $R_{DW}$ 、 $R_L$ 、 $R_g$ 、 $R_B$ 、とすると、モーメントの釣り合い式は次の式(1a)によって表される。

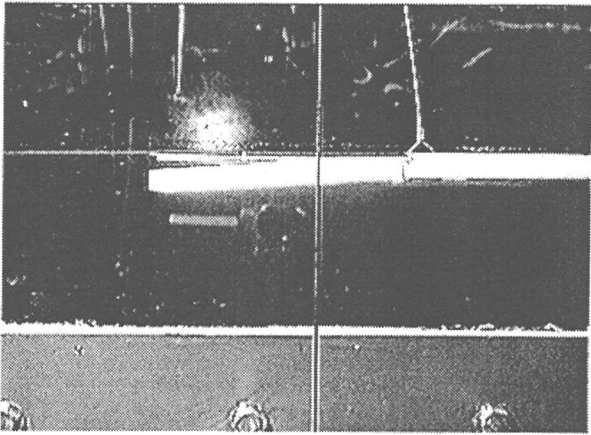


図-6 ターニング直前の傾斜角

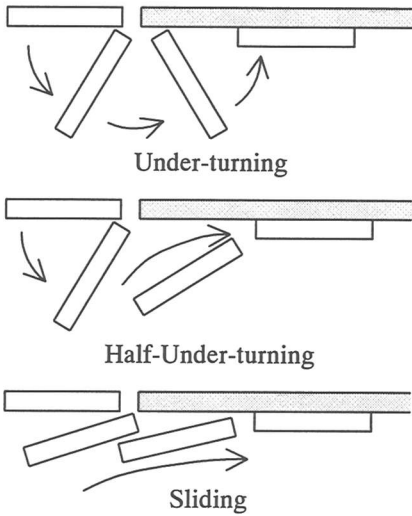


図-7 ターニング現象

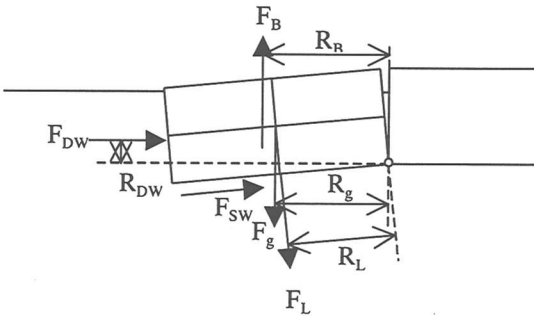


図-8 氷盤に作用する力の釣り合い

$$\begin{aligned}
 M &= F_{SW} \cdot R_{SW} + F_{DW} \cdot R_{DW} + F_L \cdot R_L + F_g \cdot R_g + F_B \cdot R_B \\
 &= 0
 \end{aligned}
 \tag{1a}$$

式 (1a) により、浮氷盤に作用する揚力の係数を求めた。揚力係数を図-8 に示す。揚力係数は流速が小さく角度が小さいときにはほぼ一定の値をとり、 $h/L$  が小さいほどその値は大きい。その後傾斜角が増加するに従い減少していく。今回の実験において減少の割合は、3 ケースともほぼ等しく傾斜角が 2 度以上においては、 $h/L$  の値に関係なくほぼ等しい値となった。

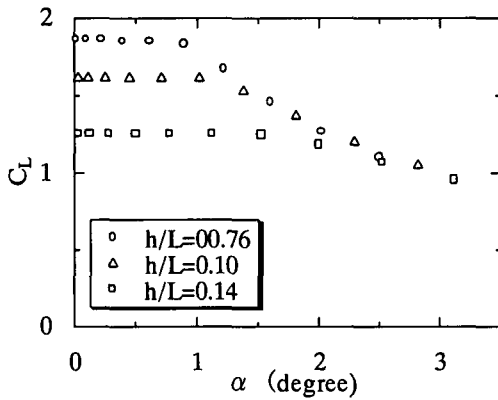


図-9 揚力係数

#### 4. 結論

- 1) 定着氷盤氷縁部における浮氷盤の傾斜角を求めた。ターニングの限界傾斜角はほぼ  $5.5^\circ \sim 6.5^\circ$  である。

- 2) 定着氷盤により流れが堰き上げられるため浮氷盤は傾斜する。その後、作用する力の釣合いによって安定した傾斜角を保つ。流速が増加すると堰き上げ高さも増加するため、傾斜角は増加し、また、等流速においては同じ堰き上げ高さであるので、辺長の短い氷盤の傾斜角がより大きくなる。
- 3) 安定時の氷盤の傾斜角は、流速の 2 乗に比例している。これは、氷盤に作用するが環境力が流速の 2 乗に比例しているためだと思われる。
- 4) 氷盤の傾斜角を、安定時の傾斜角、水位変動などによる大きな傾斜角、アンダーターニング直前の傾斜角、アンダーターニング直前の傾斜角の 4 段階に分類した。
- 5) 実験結果より浮氷盤に作用する揚力の揚力係数を求めた。揚力係数は傾斜角が小さい場合にはほぼ一定の値であり、 $h/L$  が小さいほどその値は大きい。その後、ある傾斜角以降、揚力係数は  $h/L$  に関係無くほぼ同じ割合で減少し始めるが、傾斜角が大きくなると同じ揚力係数を示すようになる。

#### 5. 参考文献

- 1) 河合孝治、原文宏、蒔田俊輔、正木智、佐伯浩：アイスジャムの発生条件に関する実験的研究、寒地技術シンポジウム論文集、Vol.13, pp.386-391, 1997.