海水域におけるフラジル・パンケーキアイスの成長特性に関する実験

Experimental Study on Characteristic of Growth of Frazil and Pancake Ice

小笠原敏記¹・古坂 梢²・小松 和³・堺 茂樹⁴

Toshinori OGASAWARA, Kozue KOSAKA, Nagomu KOMATSU and Shigeki SAKAI

We conducted laboratory experiments to monitor frazil/pancake ice growth from open water condition in an indoor wave tank cooled at -8 degree. Salt water with concentration of 35psu was used similar to ocean conditions. In the growth of frazil ice, the deposition thickness and the rise velocity were measured and in that of pancake ice, the size was recorded at 2 hours interval during about 16 hours, respectively. As a result, when whole sea water in the tank supercooled, the frazil ice is actively generated not only on surface but also in the deeper water. The maximum deposition thickness becomes about 6 mm per an hour. Finally, the sizes of pancake could be estimated by probability density function based on logarithmic normal distribution.

1. 緒言

北極海のような極域では、地球温暖化の影響により、ニラスと呼ばれる外殻の固い平板状の水から、フラジル/グリーンアイスの結氷によって生成されるパンケーキアイスと呼ばれる比較的柔らかな円盤状の水に氷況が変化している。また、グリーンランド海やオホーツク海において定期的に表れるようになって来た（Toyotaら、2004）。

フラジリアイスは、純粋な樹木状の単結晶からなり、直径200mm、厚さ約3mmに成長すると言われている（Jeffriesら、1993）。それらは、海水直下の過冷却水中を自由に浮遊するが、その堆積厚や成長速度は、氷況変化を支配する重要な因子となるだけでなく、波浪特性にも強い影響を及ぼす。さらに、パンケーキアイスは、波動運動によるフラジリアイスの衝突・接触を繰り返すことによって生成される。その大きさは、波の振幅の増加に伴い小さくなり、波長の増加と共に大きくなると言われている（Shen, 2001）。しかしながら、風や波、気温のような環境条件に依存することから、この依存性を明らかにするための系統的な現地観測を実行することは難しい。

そこで本研究では、環境条件を制御することが可能な氷海－波浪水槽を用いた室内実験を行い、フラジリアイスの堆積厚や成長速度などを求め、フラジルの成長特性を明らかにする。さらに、パンケーキアイスの大きさの分布と波浪条件との関係を明確にすると共に、確率密度

関数による統計処理により、その大きさを評価できる確率分布の定式化を試みる。

2. 実験概要

(1) 実験装置および設定条件

実験は、図-1に示すような岩手大学所有の冷凍室内に設置された長さ17m、高さ1.2mおよび幅0.5mのプランジャー式造波水槽（榎丸東製作所）を用いて行った。水深は80cmの一定とし、塩分濃度は塩分濃度屈折計を用いて約3.5psuとした。水温は、静水状態で過冷却状態（約-2℃）になるまで冷却し、造波開始と同時に室温を一定の-8℃に設定した。周期 $T=0.8\sim1.8$ 秒の範囲で規則波を発生させ、造波板から4mの距離で超音波センサー（サンプリング周波数：100Hz）を用いて水面変位を計測した。表-1は、造波開始から氷の生成されない開水状態における1分間の平均波高 H を示す。

図-1 氷海－波浪水槽装置の概要

表-1 各周期の平均波高およびパンケーキ径の計測個数

T [s]	H [cm]	N_f [個]
0.8	3.36	No data
1.2	3.80	702
1.4	3.62	673
1.5	3.43	359
1.6	3.00	346
1.8	4.27	770

1 正会員	博(工)	岩手大学准教授工学部社会環境工学科
2 学生会員		岩手大学大学院工学研究科社会環境工学専攻
3 学生会員		福島大学大学院共生システム理工学類環境システムマネジメント
4 正会員	工博	岩手大学教授工学部社会環境工学科

(2) フラジリアイスの堆積厚および上昇速度の求め方

対流混合層全体が一様に結氷温度に達した後、海面の極薄い層が過冷却して結晶核が生まれ、それを基にしてフラジリアイス（氷晶）が生成される。その堆積厚を計測するために、造波板から8mの位置で1時間毎に写真-1 (a) に示すような直径3.4cmのアクリル製の円筒を深さ約20cmまで挿入し、採取口をゴム栓で閉じて海面に浮遊するフラジリアイスを採取した。そして、写真-1 (b) に示すようなサンプル容器にろ過器を通して分離し、その質量を計測した。採取されたフラジリアイスの質量 M_i を基に、次式よりその堆積厚 h_i を求める。

$$h_i = \frac{M_i}{\rho_w A} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 A は円筒の断面積、 ρ_w は水の密度である。

また、水中のフラジリアイス上昇速度は、ガラス面の側壁から水深約10cmのフラジリアイスに着目し、そのフラジルが水面に到達するまでの時間を計測して算出した。

(a) 採取 (b) 分離
写真-1 フラジリアイスの採取および分離の様子

(a) パンケーキアイス

(b) Silver dollar と呼ばれる氷盤
写真-2 水槽内のパンケーキアイスおよび氷盤の断面

(3) パンケーキアイスの直径の計測方法

波の上下運動によりグリースアイスが寄せ集められぶつかり合うことによって、写真-2 (a) に示すような縁が捲れあがった円板状の氷盤が生成される。その形状からパンケーキアイス（蓮葉氷）と呼ばれている。波の進行方向におけるパンケーキアイスの直径 D_i を造波板より5～13mの範囲で2時間毎に計測した。各周期の観測は約16時間行われ、その間に計測された氷盤個数 N_i は、表-1に示すように346～770個であった。また、Shenら(2004)の実験によると、短周期かつ高波高でパンケーキアイスが生成され難いと言われているが、周期0.8秒では、短周期かつ高波高条件に相当したものと考えられ、パンケーキアイスは生成されず、グリースアイス状態が実験の間継続されたと推察される。なお、写真-2 (b) はフラジリアイスの結氷によって成長した氷盤であり、silver dollarと呼ばれるが、パンケーキアイスとの明確な区別が確立されていないため、本研究では、パンケーキアイスと見なすことにした。

3. フラジル/パンケーキアイスの成長特性

ここでは、フラジリアイスおよびパンケーキアイスの生成から発達過程における基礎データを基にして、それらの成長特性を明らかにする。

(1) フラジリアイスの成長特性

図-2は、式(1)より求めた各周期におけるフラジリアイスの堆積厚 h_i の時間変化を示す。堆積厚は、周期に関わらず、時間の経過とともに増加する。ただし、その成長の開始時間は、周期 $T = 1.6$ sのみ早くなる傾向を示す。この原因として、既に造波開始時に水槽全体の水温が結氷温度に達しており、すぐに結晶核を生成させることが可能な状態になっていたものと考えられる。

次に、図-3は、周期0.8、1.2および1.5秒におけるフラジリアイス堆積厚の単位時間あたりの増加量を示す。なお、増加量の値は2時間毎の堆積厚 h_i の変化量から求めた。実験開始から8時間を経過するとフラジル堆積厚の

図-2 各周期におけるフラジリアイス堆積厚 h_i の時間変化

増加量が急激に増加し、単位時間あたりで最大約6mmの厚さを堆積させることがわかる。つまり、水槽全体の水温が過冷却になり、水面だけでなく、水中でもフラジルアイスが活発に生成されるようになったと推察される。

そこで、周期1.6秒における水中のフラジルアイスの上昇速度および比較のために静水状態の結果を図-4に示す。フラジルの上昇速度は、密度差による浮力の作用だけでなく波動運動の影響も加わることによって、静水状態に比べて波動場の方が2倍程度速くなる。しかし、同じ波動場であっても上昇速度にバラツキが見られる。これはフラジルの大きさに依存するものと考えられるため、McGuinnessら(2009)によって提案された次式の上昇速度を用いて、フラジルの半径を求める。

$$W_r = \begin{cases} 6.229r^{1.621}, & r \leq 0.635 \text{ mm} \\ -0.412r^2 + 8.138r - 2.024, & r > 0.635 \text{ mm} \end{cases} \quad \dots (2)$$

ここで、 W_r (mm/s) は上昇速度および r (mm) は半径である。図-5は、式(2)より求めたフラジルの上昇速度とその半径との関係を示す。なお、図中の実線および破線は式(2)を表し、白丸および黒丸はGosink・Osterkamp(1983)による観測値およびWuebben(1984)による実験値であり、それぞれ河川中でのフラジル上昇速度を意味する。彼らの結果を見ると、傾向に大きな違いがあるだけでなく、フラジル径と上昇速度においても一様な関係を見るができない。しかしながら、既存

の研究によると、河川中の代表的なフラジルの大きさは約2mmであり、このときの上昇速度が約10mm/sと言われている(Gosink・Osterkamp, 1983)。本実験では、0.4～0.6mmの範囲となり、比較的小さなフラジルが生成されたことになる。ただし、波浪条件や塩分濃度の影響がフラジルの大きさに依存する可能性が考えられるため、更に詳細な検討が必要である。

(2) パンケーキアイスの成長特性

図-6は、各周期におけるパンケーキアイスの直径 D_i を5cm間隔で分けて表わした頻度分布を示す。いずれの周期においても D_i の値が6～10cmに占める割合が最も大きくなり、それより大きくなるとその割合が極端に小さくなる傾向を示す。 D_i の値が40cmを越えるようなパンケーキアイスも存在するが、その割合は非常に小さく、10cm以下が全体の5割を占めていることがわかる。

次に、4時間毎のパンケーキアイスの平均直径が波長に対してどの程度の割合を占めているのかを明らかにする。図-7は、各周期におけるその割合の時間変化を示す。短周期になるほど、時間の経過とともにパンケーキの占める割合が大きくなり、成長速度が速いことがわかる。これは、周期が短くなれば、一定の時間内における氷同士の衝突回数が増えるため、結氷の可能性がより高くなることに依るものと予測される。さらに、Shenら(2004)

図-3 各周期における堆積厚 h_i の単位時間あたりの増加量

図-4 静水場および波動場でのフラジルアイス上昇速度

図-5 フラジルの半径と上昇速度の関係

図-6 各周期におけるパンケーキアイス径 D_i の頻度分布

のU.S. Army Cold Regions Res. and Eng. Lab. (CRREL) およびHamburg Ship Model Basin (HSVA) の実験結果によると、パンケーキアイスの直径が波長に正比例することを踏まえ、本実験結果との比較検証を行う。図-8は直径 D_i と波長 L の関係を示す。なお、図中の A は波の振幅を意味する。本実験による D_i の値は、平均値および最小・最大値においても波長の増加に依らず概ね一様な値となり、Shenら(2004)の結果で見られるような比例関係に従わないことがわかる。この原因として、観測時間の差異および水槽規模の影響など様々な要因が考えられる。

4. パンケーキアイスの大きさの確率特性

ここでは、パンケーキアイスの大きさを統計的に扱うため、標準および対数正規分布にパンケーキ径を適用させ、更に確率密度関数を用いたパンケーキの分布特性を明らかにし、その定式化を試みる。

表-2は、標準および対数正規分布によるそれぞれの分散および標準偏差を示す。標準正規分布の分散は、対数正規分布のそれに比べて明らかにバラつきが大きく、標準偏差においても同様な傾向である。そこで、対数正規分布による次式の確率密度関数 $f(D_i)$ を用いてパンケーキの分布を表すことにする。

$$f(D_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta D_i} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln D_i - \lambda}{\zeta}\right)^2\right] \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $\lambda = E(\ln D_i)$ 、 $\zeta = \sqrt{\text{Var}(\ln D_i)}$ であり、それぞれ $\ln D_i$ の平均値と標準偏差である。図-9は、造波開始から4

表-2 標準および対数正規分布による分散および標準偏差

T [s]	Normal distr.		Log-normal distr.	
	Variance	Standard dev.	Variance	Standard dev.
1.2	34.19	5.85	0.30	0.55
1.4	34.75	5.90	0.22	0.47
1.5	56.65	7.53	0.36	0.60
1.6	59.89	7.74	0.33	0.58
1.8	24.25	4.92	0.21	0.46

(a) 周期 1.2 秒

(b) 周期 1.5 秒

(c) 周期 1.8 秒

図-9 対数正規分布を基にした確率密度関数 $f(D_i)$ によるパンケーキアイスの分布に関する時間的変化

図-7 各周期における波長に占める4時間ごとのパンケーキアイス平均長さの時間変化

図-8 パンケーキアイスの直径 D_i と波長 L の関係

図-10 各周期における確率密度関数によるパンケーキ分布

図-11 氷況分布の確率密度関数と実験値との比較

時間毎に計測された D_i を基に、周期1.2, 1.5および1.8秒における上式で表した確率密度関数の時間変化を示す。周期1.2秒では、実験開始から8時間まで小規模な氷盤が多く分布するが、時間の経過に伴い40cm程度までの氷盤が分布し、様々な大きさの氷盤が分布している。一方、周期1.8秒では、時間的な変化が余りなく、比較的同じような大きさの氷盤が分布する。また周期1.5秒では、両周期の中間の氷盤分布となり、徐々に大きな氷盤が発達している。このように確率密度関数を用いることにより、時間的な氷盤の分布状態を評価することができる。また、時間的なパンケーキアイスの分布特性は、波浪条件に強く依存すると言える。

図-10は、表-1に示した各周期の N_i を基に算出したそれぞれの確率密度関数を示す。全周期において、 D_i の分布は比較的同様な傾向となり、5～10cmの範囲で極大値を持つような分布となることがわかる。つまり、時間的な氷況分布は波浪条件に依存するが、パンケーキ氷生成から発達過程までの全体を通して見ると、波浪条件に依らず同じような分布として評価することができると考えられる。そこで、各周期の確率密度関数を平均値にした確

率密度関数を表したものが図中の実線であり、次式のよう表すことができる。

$$f(D_i) = \frac{1}{1.16\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln D_i - 0.52}{2.23} \right)^2 \right] \quad \dots (4)$$

ここで、平均値 μ および標準偏差 σ の値は、それぞれ0.52および2.23である。図-11は、パンケーキアイスの分布を表す確率密度関数と式(4)に D_i を代入して求めた $f(D_i)$ の各周期の平均値を示す。対数正規分布を基にした確率密度関数は、実験値を非常に良く評価している。以上より、海水域におけるパンケーキアイスの分布を式(4)の確率密度関数によって統計的に評価することが可能となる。

5. 結語

氷海-波浪水槽装置を用いたフラジルおよびパンケーキアイスの生成・発達過程に関する実験を行った。その結果、フラジルアイスは、過冷却状態になると水面だけでなく、水中からも生成されるようになり、単位時間あたり最大約6mmの堆積量となることが明らかになった。さらに、フラジルおよびパンケーキアイスの大きさを支配する要因として、波浪条件が強い影響を及ぼすことがわかった。また、半日程度の時間を費やしたときのパンケーキアイスの大きさは、周期に依らず同様な分布傾向となることを示し、その分布を確率密度関数によって統計的に評価することができるようになった。

参 考 文 献

- Gosink, J.P. and T. E. Osterkamp (1983): Measurements and analyses of velocity profiles and frazil-ice crystal rise velocities during periods of frazil ice formation in rivers, *Annals of Glaciology*, Vol.4, pp.79-84.
- Jeffries, M.O., W. F. Weeks, R. Shaw and K. Morris (1993): Structural characteristics of congelation and platelet ice and their role in the development of Antarctic land-fast sea ice, *J. Glaciology*, Vol.39, pp.223-238.
- McGuinness, M. J., M. J. M. Williams, P. J. Langhorne, C. Purdie and J. Crook (2009): Frazil deposition under growing sea ice, *J. Geophys. Res.*, Vol.114, C07014.
- Shen, H. H., S. F. Ackley and M. A. Hopkins (2001): A conceptual model for pancake-ice collisions, *Annals of Glaciology*, Vol.15, pp.361-367.
- Shen, H. H., S. F. Ackley and Y. Yuan (2004): Limiting diameter of pancake ice, *J. Geophys. Res.*, Vol.109, C12035.
- Toyota, T., T. Kawamura and K. I. Ohshima (2004): Thickness distribution, texture and stratigraphy, and a simple probabilistic model for dynamical thickening of sea ice in the southern Sea of Okhotsk, *J. Geophys. Res.*, Vol.109, C06001.
- Wuebben, J. L. (1984): The rise pattern and velocity of frazil ice, in the proceedings of the Third Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers, Session F, pp.297-316.