HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	開水面に於ける急速氷晶生産に関する実験
Author(s)	牛尾, 収輝; 小野, 延雄; 若土, 正曉
Citation	低温科學. 物理篇, 46, 163-170
Issue Date	1988-03-10
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/18556
Type	bulletin (article)
File Information	46_p163-170.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Shuki USHIO, Nobuo ONO and Masaaki WAKATSUCHI 1987 Experiments on Rapid Frazil Ice Production in a Wind-generated Open Water. *Low Temperature Science, Ser. A, 46.* (With English Summary p. 169)

開水面に於ける急速氷晶生産に関する実験*

牛 尾 収 輝
(北海道大学大学院理学研究科)

小 野 延 雄・若 土 正 暁
(低 温 科 学 研 究 所)

(昭和62年10月受理)

I. はじめに

海氷域には厳冬期でさえ，氷で覆われていない開水面が頻繁に現われる。この寒気にさらされた開水面では新しい海氷が大きな成長速度をもって形成されていく。しかし，開水面上に絶えず強風が吹き続けると，海面は板状の海氷で覆われることなく，フラジルアイス (frazil ice：氷晶) という微細な針状，円板状の氷結晶が生産されては吹き流され，風下の氷野の端に次々と蓄積されていく[1,2]。この繰り返しにより，氷を急速に，しかも大量に生産しながらも，常に開水面が寒気にさらされる。

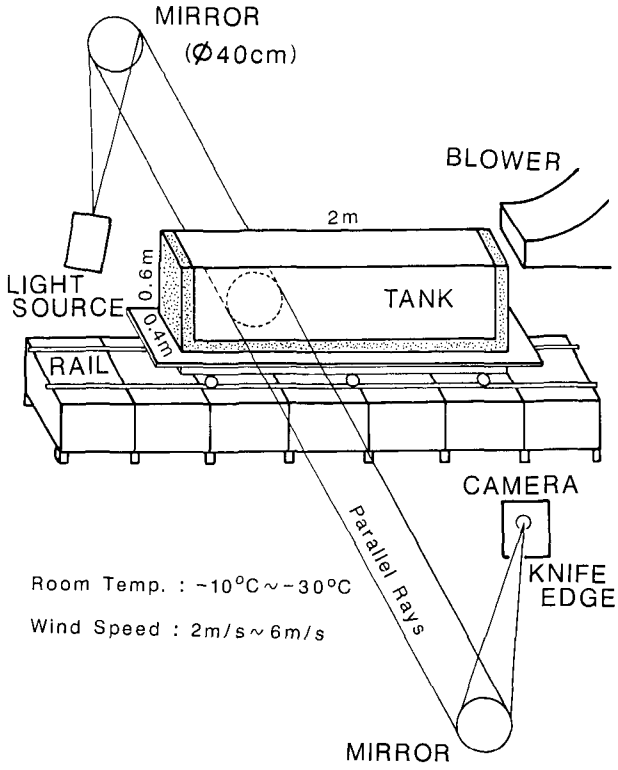
また，海氷生成時にブライン (低温高塩分水) の姿で海水中に排出される塩の量は海氷の生産速度の上昇とともに増すことが知られている[3]。従って，急速な海氷生産域である開水面は単位時間当たりの塩排出量が多く，海洋混合層内の対流を活発にし，南極では底層水の形成にも大きく寄与すると考えられる。このように厳冬期に強風で維持された氷野内開水面では急速な海氷生産を通して，大気へは熱，海洋へは塩が一枚板の海氷成長の場合より，はるかに多く放出されることになる。

本研究の目的は大気と海洋に大きな影響を及ぼす，極域厳冬期の急速海氷生産過程を定量的に解明することにある。これまで野外観測は極めて困難なため，現場での実測例はほとんどない。そこで，先ず低温室内実験を行なった。本論文では，海氷生産過程の中でも最も重要な量としての海氷の生産速度を中心に述べ，それに伴う熱放出やブライン排出の様子について報告する。

II. 実 験 方 法

低温室に設置した実験装置の概略を第1図に示す。水槽は 40×200×60 cm，厚さ 1.5 cm の透明アクリル製のものを用い，中には塩分 32‰ の塩水を満たした。塩水全体が結氷温度に達した後，送風機を用いて，一方から風を水面上に吹かせ続けた。すると，水面付近でフラジルアイスが生成しては吹き流され，風下に蓄積していった。水槽の側面や底は厚さ 10 cm の断熱材で覆い，表面からのみ冷却した。但し，測定時は必要に応じて，断熱材を一時的にとり外した。

* 北海道大学低温科学研究所業績 第3102号



第1図 実験装置の概略図

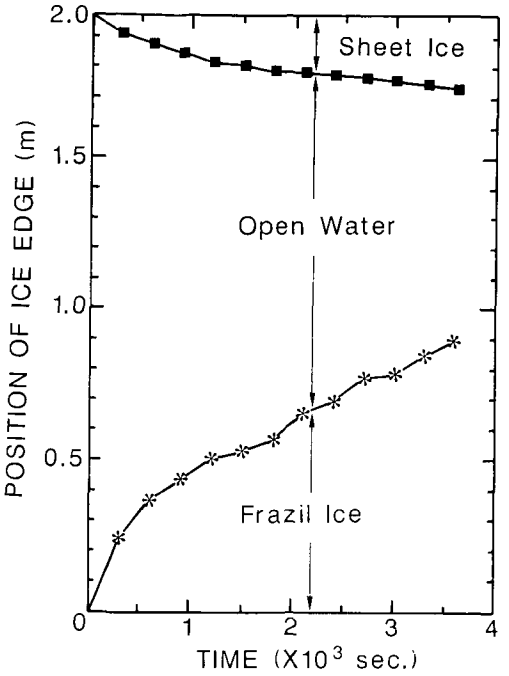
実験は室温（−10°C～−30°C）と風速（水槽の風上側から50 cm，水面上2 cmにおいて2 m/s～6 m/s）を変えて行ない，水温，氷温，水の塩分，蓄積したフラジルアイス層の体積・塩分などを測定した。また，水面下の排出ブラインの挙動をシュリーレン法で観察した。シュリーレン法とは2台の凹面鏡の間につくられた平行光線内で生じる密度差を屈折率の違いとしてとらえ，光の明暗で可視化する方法である。なお，水槽内の全領域を観察できるように，水槽をレール上に載せて，ゆっくりと左右に移動させた。

III. 実験結果

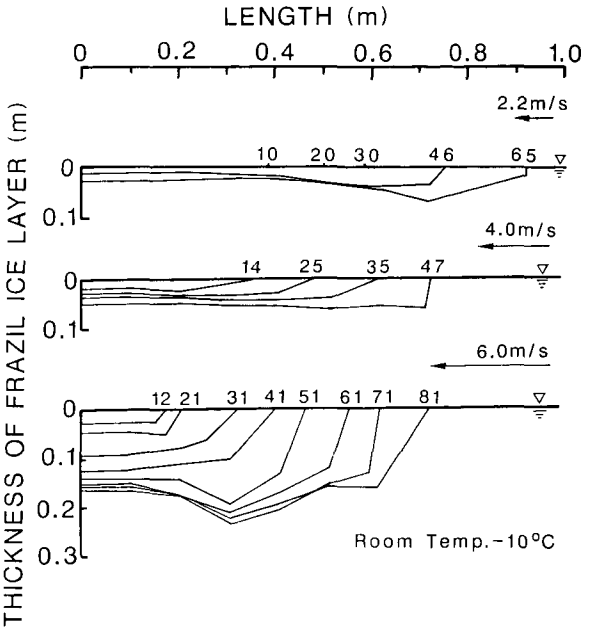
1. フラジルアイスの生産過程

寒気にさらされた開水面ではフラジルアイスの生産と風による吹き流しが繰り返される。風下に蓄積したフラジルアイス層の縁は時間とともに風上側へ前進していく。その縁付近では風で運ばれてきたフラジルアイスの一部が層の下に潜り込んだり，条件によっては，水中でもフラジルアイスが生成・浮上して，層厚が増していった。一方，水槽の風上側には，僅かではあるが，薄い一枚板の氷が形成され，水平（風下）方向にゆっくりと成長していく。従って，風下からのフラジルアイス層と風上からの薄氷との間の開水面領域は時間経過とともに減少していった。この様子の一例を第2図に示す。

次に，生産されたフラジルアイスが風下に蓄積していく様子を第3図に示す。風速が大き



第2図　水槽表面状態の変化
室温－10℃，風速 2.2 m/s の場合，縦軸は水槽風下側からの距離



第3図　風下に蓄積していくフラジルアイス層の断面
室温－10℃，風は右から吹いている。図中の数字は実験開始後の経過時間（分）

いほど，層は厚くなっている。特に，実験開始後，約 40 分から厚さが急激に増しているのは，フラジルアイスが表面だけでなく，水中でも大量に生産され始めたためである。この図からも，風が強いほど，氷生産速度は大きくなることが予測される。

蓄積したフラジルアイス層は多量の塩水を含んだグリース状になっている。そこで，層内に占めるフラジルアイスのみの質量を以下のようにして算出した。

フラジルアイス層において

質量保存の式：
$$\rho V = \rho_i V_i + \rho_w V_w \tag{1}$$

塩保存の式　：
$$\rho V S = \rho_w V_w S_w \tag{2}$$

が成り立つ。ここで ρ は密度，V は体積，S は塩分で，添え字の i は氷，w は塩水，添え字なしは層全体を示す。このとき，質量に関する純氷率 a は $a=\rho_i V_i/\rho V$，体積に関する純氷率 c は $c=V_i/V$ で表される。よって，

$$\rho = \frac{c}{a}\rho_i \tag{3}$$

a を用いると，(1) 式は次のようになり，

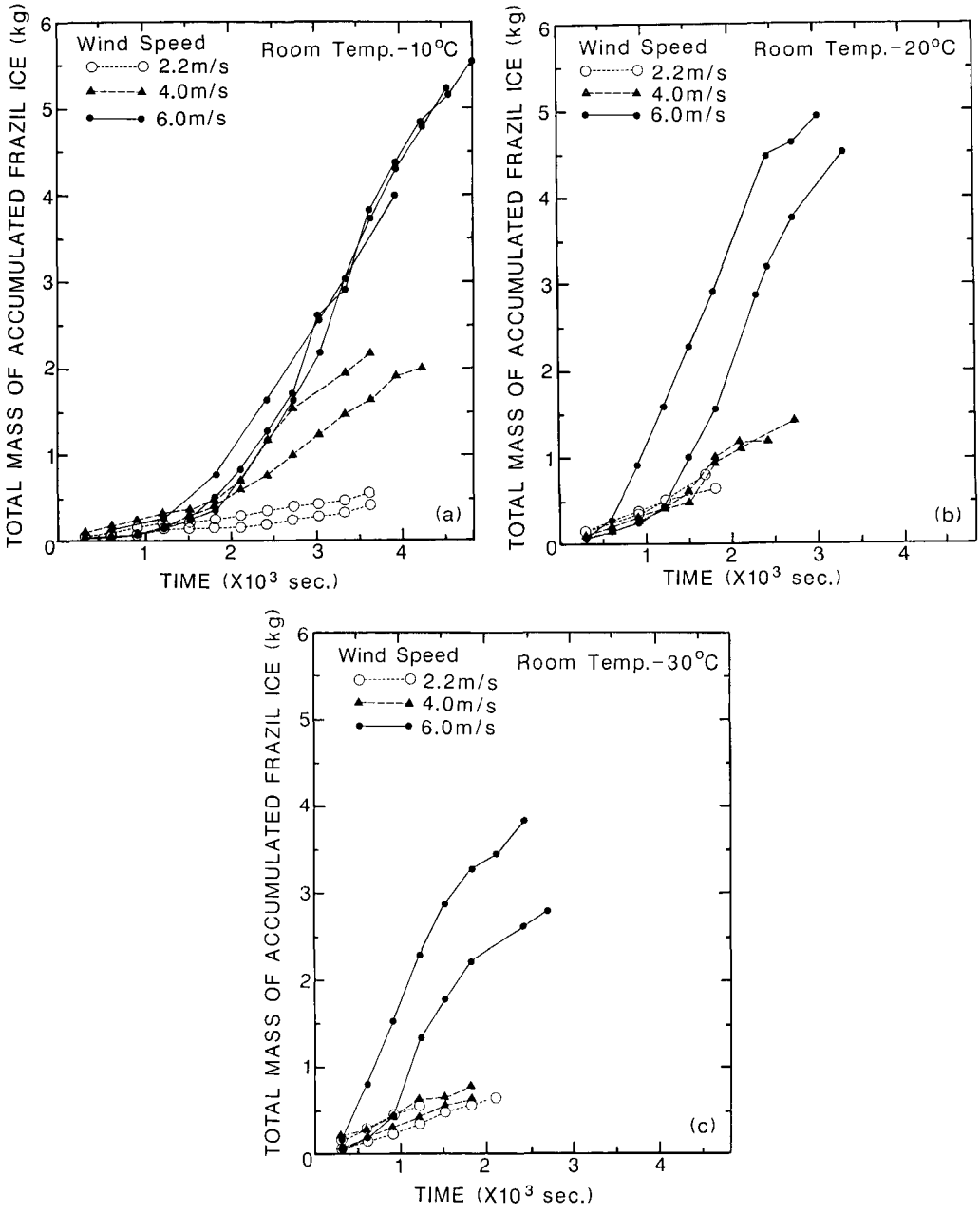
$$V_w = \frac{(1-a)\rho V}{\rho_w} \tag{4}$$

また，$V_i=a\rho V/\rho_i$ であるから，(4) 式を使って

$$c=\frac{V_{\mathrm{i}}}{V}=\frac{V_{\mathrm{i}}}{V_{\mathrm{i}}+V_{\mathrm{w}}}$$

$$=\frac{a\rho_{\mathrm{w}}}{a\rho_{\mathrm{w}}+(1-a)\rho_{\mathrm{i}}} \tag{5}$$

(5)式を(3)式に代入して



第4図 フラジルアイスの蓄積量

(a) 室温 −10°C, (b) 室温 −20°C, (c) 室温 −30°C

$$\rho = \frac{\rho_i \rho_w}{a\rho_w + (1-a)\rho_i} \tag{6}$$

(1), (2) 式より，$\rho_w V_w$ を消去して

$$a = 1 - \frac{S}{S_w} \tag{7}$$

ここで，$\rho_i = 9.2 \times 10^2\ \mathrm{kg/m^3}$，また，Zubov (1945) により，$\rho_w = (1 + 0.0008 S_w) \times 10^3\ \mathrm{kg/m^3}$ を用いる[4]。従って，S と S_w を測定することにより，(6), (7) 式を用いて ρ が求まり，$\rho V a$ がフラジルアイス層内に占める氷のみの質量である。

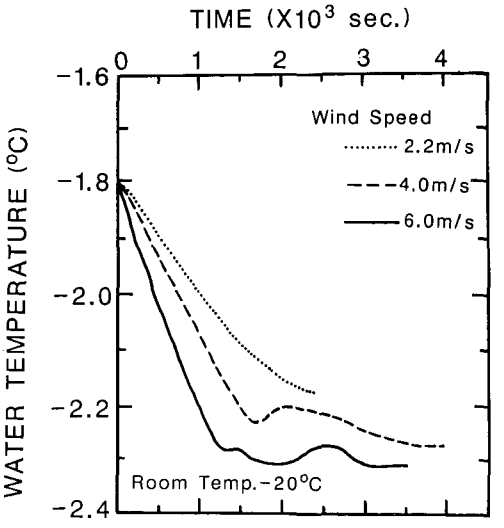
以上のようにして，風下に蓄積した氷の質量を算出し，その時間変化を第4図に示した。図の曲線の傾きに相当する，単位時間当たりの氷生産量は風が強いほど多く，また，室温が低いほど，短時間で大きな氷生産速度に達している。このようにフラジルアイスの生産速度は風速，室温に依存し，特に風の効果が顕著に現われ，水中における氷生産が大きく寄与していることがわかった。これは結氷温度の水よりも高密度の過冷却水を吹送流が下層へ輸送し，水を効率良く冷却することにより，表面以外でも氷生産を引き起こすためであると考えられる。一例として，実験開始からの水温低下を第5図に示す。水温は風下に蓄積するフラジルアイス層の下，約30 cm において熱電対を用いて測定した。この実験では氷生成時のブライン排出による下の水の塩分増大は結氷温度をそれほど下げることはなく，大きく見積もっても 0.1～0.2 deg くらいの低下であった。従って，時間とともに過冷却度は増していき，水温低下の度合が小さくなる20分後ぐらいに，水中でもフラジルアイスが生産され始めたが，過冷却状態を解消することなく，氷が大量生産されていた。このように風が吹き続ける開水面では，表面近くで薄い氷が生成されては吹き流されるというより，むしろ水面下のある厚さをもった水の層が過冷却し，フラジルアイスを急速，且つ大量に生産し得る状態にあるといえる。

この急速な氷生産速度を一枚板の海氷の場合と比べてみたものが第1表である。一枚板の海氷成長（薄氷成長）の場合，これまで野外や実験室で測定された成長速度[5]の中でも，特に大きいものを取り上げ，それらを純氷の密度を用いて氷生産速度に換算した。従ってこれらの値には海氷中のブラインや気泡

第1表　氷生産速度の比較

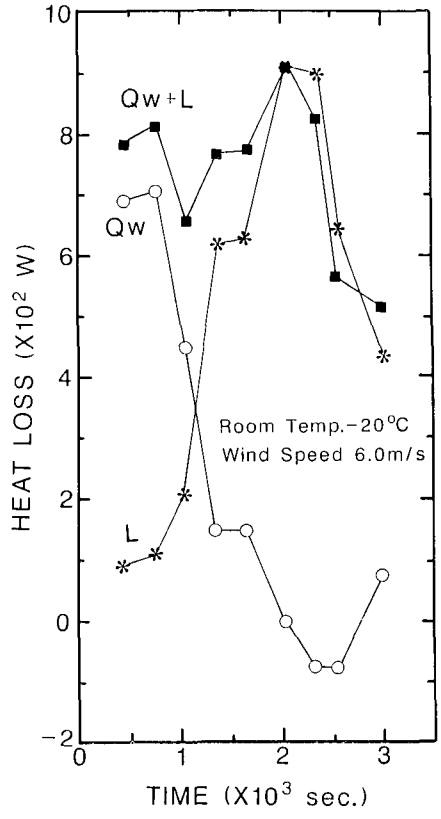
($\times 10^{-3}\ \mathrm{kg/m^2 \cdot s}$)

薄氷成長[5]		氷晶生産
北極海沿岸	1.20	—
南極昭和基地付近	1.26	—
北海道サロマ湖	0.56	—
室内実験	1.31	5～6



第5図　水温の時間変化（フラジルアイス層の下，約30 cm）室温 −20°C の場合

も海氷の体積に算入されているため，やや過大評価となっている。しかも急速に成長するのは氷が薄い，成長初期に限られる。一方，本研究（氷晶生産）の場合，見積もった氷生産速度はその時に存在する開水面の単位面積当たりで求めたもので，水中で生産されても，まだフラジルアイス層に蓄積していない氷は算入されていないため，過小評価となっている。その上，開水面が維持されている間，急速生産し続け得ると考えられる。両者を比較すると，フラジルアイスの生産速度は一枚板の氷よりも約4～5倍，大きいという結果が得られた。



第6図　水から放出した熱量
Q_w：水の冷却に要した熱
L　：氷生成による潜熱
室温 −20°C，風速 6.0 m/s の場合

2. 氷生産に伴う熱放出

前述したように，急速な海氷生産が生じているのは風によって水を効果的に冷却し，氷生産しながらも，ある過冷却度を維持していることに大きな要因がある。この水温低下（第5図）から水の冷却に使われた熱 Q_w を，また，先に算出した氷生産速度からは氷生成による潜熱 L をそれぞれ求めて，第6図に示した。これらの熱は水槽の表面全域から単位時間に放出された量として表している。初めは水を冷却するために多くの熱が使われ，大量の過冷却水を水槽内部に蓄積していくことが氷の急速生産にとって重要な過程であるといえる。

3. ブライン排出の特徴

シュリーレン法によってブラインの挙動を観察した。水槽の風上側で成長しつつある板状の薄氷の下ではブラインが糸状になって，ゆっくりとほぼ真下に流下していた。しかし開水面ではフラジルアイスが絶えず生産され，周囲にブラインを排出しているにもかかわらず，その場では流下せず，吹送流によって表面を風下へ運ばれていった。そしてフラジルアイスが蓄積している層の縁付近で，運ばれてきた多くの糸状のブラインは周囲の水と混合しながら急激に流下していた。また，フラジルアイス層の下では層内の無数のフラジルアイスの結晶を稠密化させながら，氷と氷の間を占める水が流下していく様子も認められた。この水は下の水よりもやや高塩分（32.0～33.0‰）で層内で新たに氷が生成された時に排出されたブラインだけでなく，層の縁で流下しなかったブラインが層内に一旦，閉じ込められ，その後，流下したものと考えられる。このように開水面が維持されていると氷生産速度が大きいために単位時間当たりに排出される塩の量も多くなり[3]，蓄積したフラジルアイス層においても固く凍結するまで，層内の高塩分水を流下させている。その結果，下の水は効果的に混合・高塩化されることが予測される。

IV. まとめ

絶えず強風が吹き続けている厳冬期の氷野内開水面を大型水槽で再現し，そこで生じる海氷生産過程を実験的に調べた。その結果，室温が低く，風速が大きいほど氷生産速度は大きくなった。ここで過冷却状態を維持しながら，水中でもフラジルアイスを急速，且つ大量に生産する過程において，開水面上を吹く風が大きな役割を果たしているといえる。また，単位時間当たりの塩排出量は一枚板の海氷成長の場合より多く，下の水の対流混合も活発になることがシュリーレン法による観察から示唆された。

なお，この研究は著者のひとり牛尾が北海道大学大学院理学研究科修士課程地球物理学専攻の修了研究として行なったものの一部である。

おわりに，本研究を進めるにあたって，低温科学研究所の滝沢隆俊，大島慶一郎両助手には有益な助言を頂いた。また，実験に際しては大井正行技官をはじめ，金属工作室，木材工作室，低温機関室の皆様に多大の御協力を頂いた。厚く感謝の意を表します。

文　献

1) Martin, S. 1981 Frazil ice in rivers and oceans. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **13**, 379–397.
2) Bauer, J. and Martin, S. 1983 A model of grease ice growth in small leads. *J. Geophys. Res.*, **88**, C 5, 2917–2925.
3) Wakatsuchi, M. and Ono, N. 1983 Measurements of salinity and volume of brine excluded from growing sea ice. *J. Geophys. Res.*, **88**, C 5, 2943–2951.
4) Zubov, N. N. 1945 L'dy Arktiki. (北氷洋の氷，低温科学研究所訳，第5章 海氷の物理的・化学的性質).
5) Wakatsuchi, M. 1983 Brine exclusion process from growing sea ice. *Contr. Inst. Low Temp. Sci.* A, **33**, 29–65.

Summary

Some stationary open water areas have often appeared within the winter sea ice cover. The continuous existence of the open water, or polynya, shows that two kinds of phenomena, namely vigorous frazil ice production and sweeping it away by strong winds simultaneously occur there. So it is considered that a wind-generated open water serves as an efficient ice factory much more than the sheet ice growth because a large quantity of heat is released to the atmosphere from the water surface, and consequently sea ice excludes brine to the ocean in large quantities. The purpose of this study is to clarify the atmosphere-ocean interaction through the processes of rapid frazil ice production in the wind-generated open water.

We carried out laboratory experiments to examine the processes of sea ice production as a function of air temperature (−10°C～−30°C) and wind speed (2 m/s～6 m/s). For this experiment a plexiglass test tank with dimensions of 0.4 m (width) ×2.0 m (length) ×0.6 m (depth) was filled with 32 per mill salt water and set in a cold room. The artificial wind was continuously blown over the water surface from one side; and a schlieren optical system was used to observe the resultant convection in the test tank.

As a result, numerous frazil ice crystals produced in the open water were transported downwind by the wind-driven current. They accumulated in a layer there and the edge of the layer advanced upwind as time progressed. The accumulation pattern of frazil ice is

such that the thickness of the frazil ice layer increased markedly with increasing wind speed. The rate of frazil ice production increased at a high wind speed and a low air temperature, in which the wind effect was much larger. At a higher wind speed, a significant amount of supercooled water formed on the open water surface was efficiently transported into the interior of the water tank through wind-driven circulation as well as instability in density, which resulted in the production of a large amount of frazil ice crystals under water. The state of supercooling did not disappear despite rapid frazil ice production. It is an important process that a large amount of supercooled water is stored in the water by the heat flux to the air.

Using the schlieren method it was found that excluded brine in the open water was dragged by the wind-driven current and fell remarkably as it was mixed with surrounding salt water near the edge of the frazil ice layer. This study suggested that the rate of salt exlusion as a result of the rapid frazil ice production would be larger than the sheet ice growth and so convective mixing of underlying water should be active.