



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	つららの研究 II : つららの波模様、つららのこぶ、曲ったつらら
Author(s)	前野, 紀一; MAENO, Norikazu; 高橋, 庸哉 他
Citation	低温科学. 物理篇, 43, 139-147
Issue Date	1985-03-18
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18507
Type	departmental bulletin paper
File Information	43_p139-147.pdf



つ ら ら の 研 究 II*

—波模様・つららのとげ・曲ったつらら—

前 野 紀 一

(低温科学研究所)

高 橋 庸 哉

(札幌市青少年科学館)

(昭和59年11月受理)

I. はじめに

つららの構造と成長の一般的特徴については、「つららの研究 I」¹⁾で報告した。本稿では、つららの特徴的な外形、特に波模様、つららのとげ、および曲ったつららについて述べる。

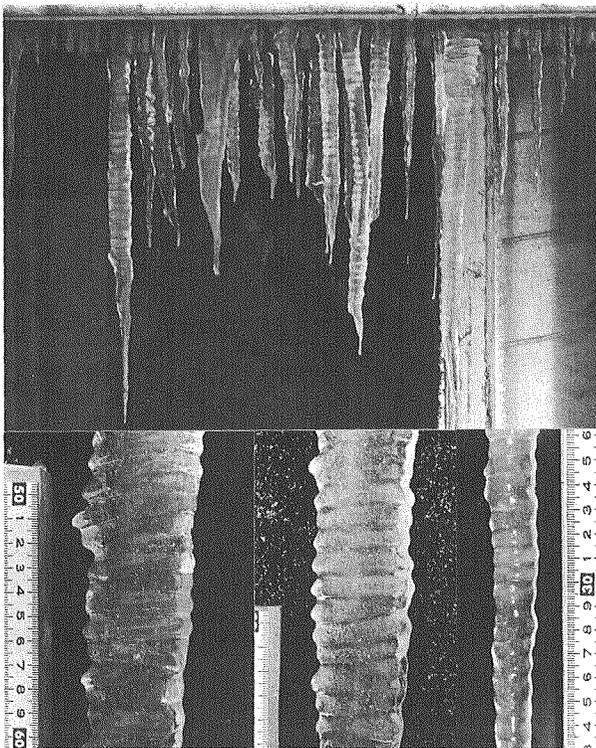
II. つららの波模様

多くのつららには、第1図に示すような、輪を積み重ねたような、あるいは串だんごのような波模様が形成されている。つららの波模様は多くの人に気付かれていたはずであるが、その構造や成因について調べた研究は極めて少ない。筆者等の調査によれば、内外の研究論文の中でこの問題を取り扱ったのは、Hatakeyama and Nemoto²⁾の論文のみである。彼等の論文では、波模様の平均波長が9~12 mmの範囲にあることが示され、それが懸垂水滴の上下方向の長さに対応して決まると述べられている。しかし、筆者等が前報¹⁾で明らかにした、つらら先端の複雑な成長機構を考慮するならば、この結論には更に詳しい検討を加える必要がある。

天然のつららの波模様に関して、波長の測定結果を第2図に示した。三本のつららの平均波長は、それぞれ8.0 mm, 8.7 mm, 9.5 mmで、一本ずつ異なる。しかし、第3図に示したように多数のつららの測定結果を合わせると、頻度分布は鋭いピークを持つ正規分布型となる。平均波長は9.0 mmで、全体の70%が±2 mmの範囲(7.0~11.0 mm)に入る。ただし、個々の波長は、3 mmから20 mmまで分布している。

第2, 3図は、特定の日時と場所(1984年2~3月, 札幌市内)で採取されたつららの結果であるから、得られた平均波長(9.0 mm)が他の場所や条件で成長したつららにも適用できるかどうかはわからない。しかし、先に述べたサハリン(旧豊原), 札幌, 十日町におけるHatakeyama and Nemoto²⁾の観測結果も9 mm近辺であることを考え合わせると、今回得られた9 mmという波長はつらら波模様の形成機構を特徴つける長さなのかも知れない。ただし、そう結論するためには、もっと気象条件の異なる多くの地域のつららや人工つららについて測定

* 北海道大学低温科学研究所業績 第2690号



第1図 つららの波模様 スケールの最小目盛は1mmである

例を増やす必要がある。

つららの波模様の成因の一つとして、側面を流れる水膜の波立ち (ripple) が考えられる。Grimley³⁾によれば、鉛直壁に沿って流れる粘性液体流の状態は、Reynolds数 (Re) によって次のようにかわる：

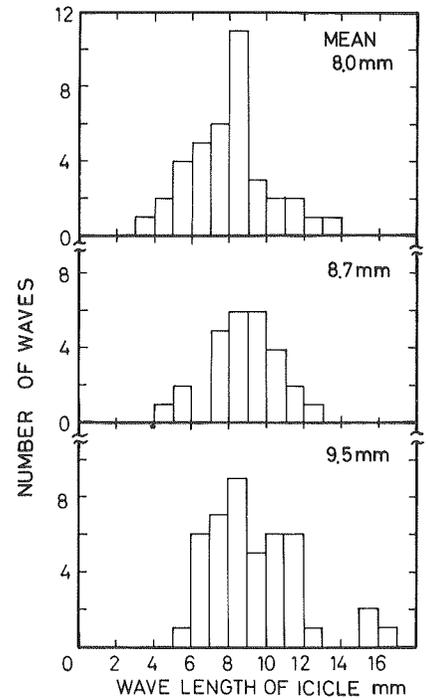
$Re < 25$ のとき、波立たない層流

$25 < Re < 1000$ のとき、波立った層流

$Re < 1000$ のとき、乱流

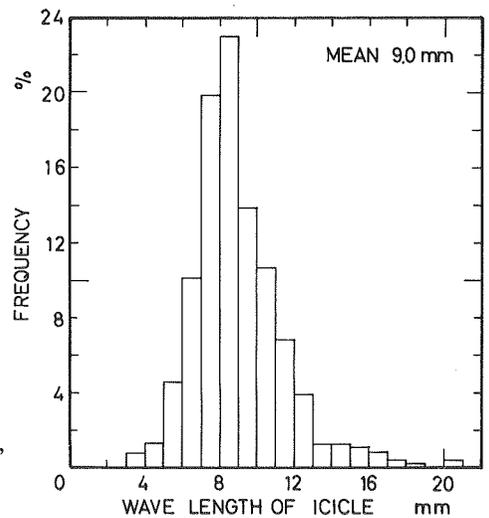
「つららの研究Ⅰ」¹⁾で述べたように、人工つららの実験は $0.15 < Re < 3.6$ の範囲にあり、また天然つららの成長においても、 Re が25を超えることは稀にしか起こらないであろう。したがって、水膜の波立ちとつららの波模様との間に直接的な因果関係はないと考えられる。

第4図は、波模様を持つつららの鉛直断面の薄片写真である。含まれている気泡は、水膜に溶解していた空気が凍結の際気泡となって氷に捕り



第2図 つららの波長の頻度分布

各々の頻度分布は、1本のつらら毎の結果である。1本のつららには30~40個の波が分離して測定された。つらら採取場所は札幌市の民家、時期は1984年2月



第3図 多数のつららの波長の頻度分布

測定は合計19本のつらら、波の数562個について行なわれた。つららの採取場所は札幌市の民家、時期は1984年2~3月

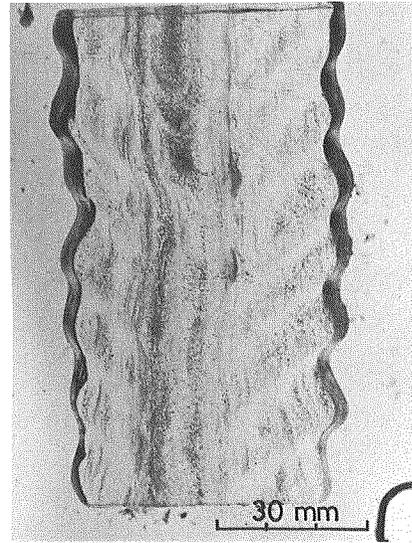
こまれたものである。外形の波模様と比較すると、細かな気泡は群をなしており、それぞれの気泡群は波模様と同じ波長で並んでいることに気が付く。また、各々の気泡群の位置は、つらが太くなるとともに上方へ移動していること、および気泡群がつらら表面の凸部上方（つまり上流の凹から凸に移る領域）で氷に捕りこまれていることが明瞭である。偏光顕微鏡の観察によると、この部分の結晶粒は、他の部分に比べて細かい。

気泡群の存在と配列の仕方および細かな結晶粒の存在から、つらら波模様の凸部上方では氷の成長が他より速いと考えられる。この部分の成長速度が大きいのは、次の三つの原因による。第一の原因は、流れが凹部から凸部へ到達すると、水膜の厚さが薄くなり、過冷却度が増加する効果である。水の供給量と流速が一定ならば、水膜の厚さはつららの直径に反比例してかわる。ただし、一般に、かなり顕著に発達した波模様でも、その振幅はつららの直径の約10%以下であるから、水膜の厚さの変化も10%を超えることはない。第二の原因は凸部が冷却しやすい点である。凸部は開口角が広いので熱が逃げやすく、また曲率による飽和蒸気圧の増加のために蒸発による冷却も起きやすい。

第三の原因は、波模様に沿う水流の特性に関係している。第一および第二の原因で冷却した水が凸部を乗り越えて流れるとき、次の凸部を登る部分では流れがいくらか淀むと考えられる。特に、この場合の水は0℃以下に冷えているから、流れている河の水や海水のフラジール・アイス (frazil ice) のように、無数の微小氷結晶を含む粘性の高い水の可能性がある。そのような水は、より淀みやすく、凍りやすい。

結局、成長中のつららの表面になんらかの原因で小さな起伏が生じると、それは、上に述べた三つの理由により、次第に成長してゆくことになる。しかし、つらら表面の個々の波は、それぞれが一個の輪を構成しているのであり、いくつかが連結してらせんを構成しているのではない。それでは、最初の起伏はどのような機構でつららを一周するのであろうか、またそのような輪が一定周期で形成される機構はなにか。つららの波模様に関しては、まだ多くの未解決の問題が残されている。

なお、人工つららの実験では、波模様は比較的発生しにくい。これは、実験室では種々の条件が極めて定常に保たれるためと考えられる。その証拠に、例えば、人工つらら装置を囲むビニールシートの覆いや木箱（「つららの研究 I」¹⁾第6図参照）を取り除くと、気流や気温の乱れのために、波模様が発生しやすくなる。このことから予想されるように、波模様の発生の引金は、水の供給量と気温の微妙な変動にありそうである。これは波模様が、つららの先端に近い部分ほど現れにくいという観測結果とも矛盾しない。



第4図 波模様を持つつららの鉛直断面写真の上下方向と実際のつららの上下方向は一致している。つらら内部の気泡は帯状の群をなしており、各々の気泡群は、つららの太さの増加とともに、上方に移動している。つらら表面で、気泡群は波模様の凸部上方に一致している

II. つららのとげ——スパイク

つららには、しばしば「とげ」の生えていることがある(第5図)。典型的なとげは、太さ約1 mm、長さ5~20 mmの細い針状氷であるが、もっとずんぐりした形のものもある。1本のつららに数本のとげの生えている場合もあるし、1本も生えていない場合もある。とげの生える位置は特に決っていない。しかし、比較的つららの先端近くに生えることが多い。とげの生える方向にも規則性はなく、上向きにも下向きにも水平方向にも成長する。

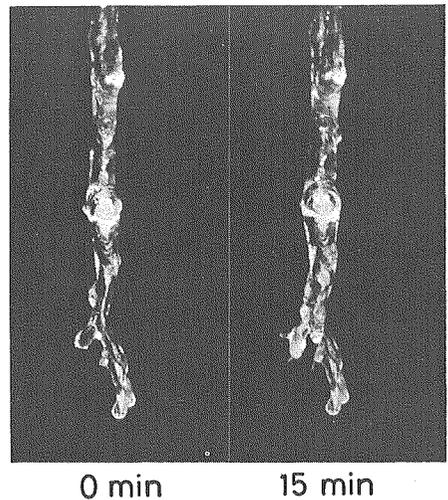


第5図 つららのとげ スケールの最小目盛は1 mm

つららのとげの存在は筆者の一人(N. M.)が1979年2月北海道大雪山勇駒別で初めて気付いた。しかし、その後の調査により、各地のつららにも、しばしばとげが生えていることが確かめられた。そして、人工つららの実験においても、とげを成長させることができるようになった(第6図)。

とげが成長するのは、何かの原因でつららの成長速度と水の供給量の均衡が崩れ、つららの成長が停止するときである。つららの先端から水滴が落下しなくなると、懸垂水滴はそのままの状態凍結を始める。また、側面では先端まで流下できなかった水膜が溜った状態で凍結を始める。「つららの研究 I」¹⁾で明らかにしたように、懸垂水滴は、直径約5 mm、長さ数 cmの円柱状の未凍結水につながっている。したがって、懸垂水滴の表面にまず氷殻が形成され、残りの水の凍結が進行すると、内部の圧力は急激に増加する。その結果、氷殻か側面の力学的に弱い部分あるいは小さなクラック等から水が浸み出して凍結する。これが、つららのとげであり、形は、水の浸み出し方と凍結速度によって、細い針のようなとげにも、盛り上ったこぶのようにもなりうる。つららの側面に溜った水膜の凍結によっても、同様にとげが成長する。この場合は、閉じこめられる水の量が少ないから、細い針状のとげの成長することが多い。

とげの成長は、何かの原因でつららの成長が停止するとき進行すると上で述べた。第6図の人工つ



第6図 人工つららのとげの発生 ($\theta = -19.0^{\circ}\text{C}$)

水の供給量が減少したために、つらら側面の水の流れは不均一となり、つららの成長が停止した。このとき幾つかの部分に溜った水が最終的に凍結する際、細い氷のとげが成長した

ららのとげも、そのようなつらら成長の停止時期に発生した。そのような条件は、たとえば夕方発生する。日中つららが順調に成長していたとしよう。しかし、日没とともに、雪氷の融解が止ると、水の供給は減少し、遂には停止する。同時に気温が下がるから、つららの成長速度が増加し、したがって必要な水の供給量が増加する。このような二つの理由により、つららの成長は停止する。このとき種々の形のとげが成長する。

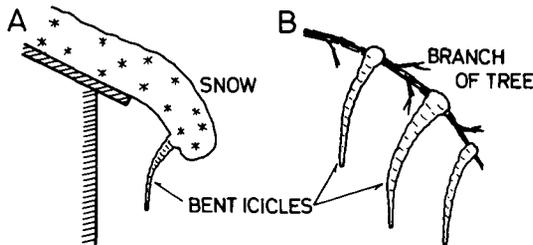
この考察によれば、つららのとげの発生は珍しい現象ではなく、自然現象としてはむしろ非常に頻繁に起っているはずである。それにもかかわらず、とげの記述が過去の文献にまったく見当たらないのは、たとえ生じたとしても、とげは一般に微小な氷結晶であるため、また一晩のうちに昇華蒸発してしまったり、次の日の水の供給で融解してしまうため、あまり人目に付かないためと考えられる。

III. 曲ったつらら

通常のつららは、鉛直方向に細長く伸びるが、曲ったつららもしばしば見られる。ある種の成長条件が時間的に変化する場合、つららは曲って成長する。

1. つららの根元が傾く場合

軒先に張り出した屋根雪から成長するつららの場合、氷の成長はいつも鉛直方向に進行するにもかかわらず、屋根雪の張り出しとともにつららの根元の向きが家屋側に傾くため、成長したつららは家屋から遠ざかる方向に曲った形となる（第7図A）。



第7図 曲ったつらら

- A : 屋根から張り出した雪（あるいは氷）が下に垂れ下る場合
 B : 樹木の枝がたわむ場合

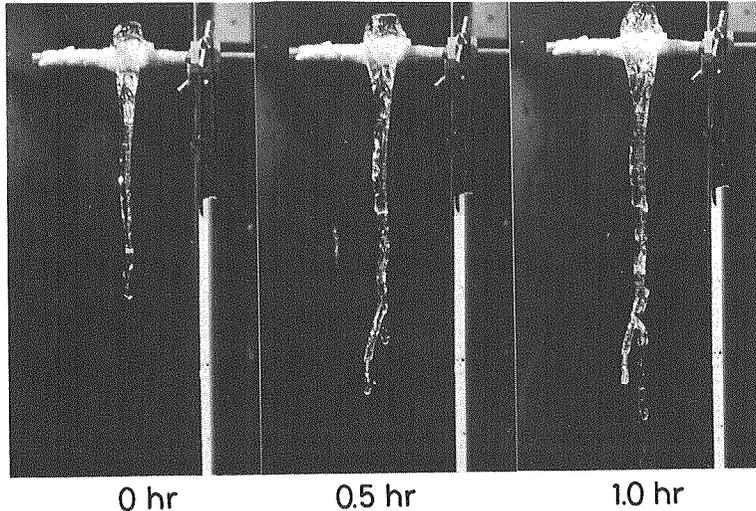
湖や河のしぶきが樹木の枝にかかって成長するつららにも、この種の曲ったつららが多い。この場合は、つららが成長するに従って重みで枝がたわみ、その結果、つららの根元の向きが傾いて、曲ったつららとなる（第7図B）。

2. 水の供給が片寄る場合

水の供給が極端に減少したり、あるいは、水の供給源が変化したために、つららの片面にしか水が流れなくなった場合、氷の成長は片面のみで進行するから、結果として曲ったつららが形成される。天然のつららの場合、水は毎日異なった気象条件で生成されるのであるから、水の供給の片寄りも頻繁に起る。しかし、この原因による曲りは通常あまり大きくないから、

つららが太く成長するうちに識別できなくなることが多い。

一本のつららが、途中で枝分かれている場合がある。これも水の供給の片寄りが原因である。ただし、この場合は、水の供給の片寄りで曲った後、本来の方向でも再び氷の成長が進行しなければならない。第8図は、人工つららの例である。水の供給量が少ないために流れが片寄り、曲ったあと、二股となっている。



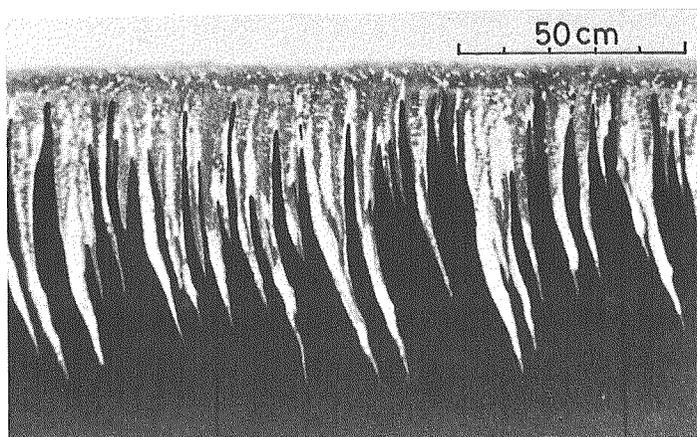
第8図 水の供給の片寄りのためのつららの曲りと二股の形成 (温度 -15.0°C)

3. 風で曲る場合

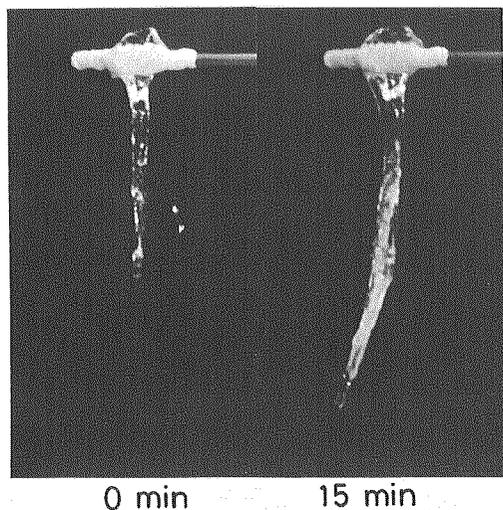
第9図は、民家の軒に成長した曲ったつららの写真である。屋根雪の張り出し (第1の場合) で曲ったのではないことは、曲る方向が 90° 違うことから明らかである。また、隣接したほとんどすべてのつららが同じ方向に曲っていることから、水の供給の片寄り (第2の場合) が原因と考えることもできない。この場合の曲りの原因は、風である。風は写真の左側から右側へ吹き、つららの成長を右側に曲げたものと考えられる。

上の推論を確かめるために、人工つららの実験を行なった。実験の主な方法は「つららの研究 I」¹⁾の場合と同様である。風は電動扇風機によって発生させ、実験は平均風速 $0 \sim 6 \text{ m/s}$ の範囲で行なわれた。第10図は実験結果の一例である。温度 $\theta = -10.3^{\circ}\text{C}$ 、水の供給量 $w = 4.0 \text{ mg/s}$ 、風速 2.0 m/s である。成長中のつららに直角に右側から風を当て始めて15分後には、つららの曲りが明確に現われている。鉛直線からの曲りの角度は 14.7° である。この間につららは 9.2 cm 伸びたから、長さの成長速度は平均 36.8 cm/hr ($102.2 \mu\text{m/s}$) である。この値は、無風時の長さの成長速度¹⁾に比べると約3倍大きい。成長速度の増加は、風による熱伝達の増加のためである。

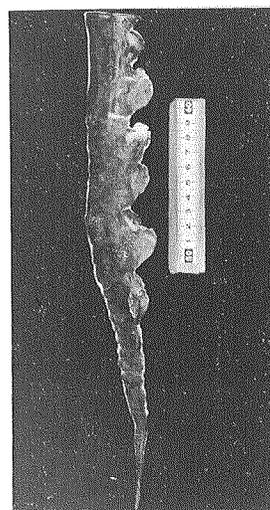
風は、成長中のつららに主に二つの効果を与える。一つは、上述した熱交換の促進による成長速度の増加である。われわれの実験では、この効果は風速がおよそ 0.5 m/s 以上で常に観



第9図 風で曲ったつらら



第10図 風でつららを曲げる実験
 温度 $\theta = -10.3^{\circ}\text{C}$, 水の供給量 $w = 4.0 \text{ mg/s}$, 風速 $U = 2.0 \text{ m/s}$ 。風は右から左へ吹いている。15分間に成長した長さ 9.2 cm , 傾き角 $\phi = 14.7^{\circ}$



第11図 風によるつららの変形の例
 強い風が左から右へ吹いたために、つららは右へ曲ると同時に、つらら側面の水膜が風下側（右側）へ吹き寄せられ、複雑な形の氷塊となっている

測された。

風のもう一つの効果は、風下側への水の輸送である。つらら側面を流下する水膜は、風上側で強く冷やされ、裏側（風下側）へ押し流されて凍結する。このため、つららの風下側の表面では氷の成長速度が大きく、その結果、つららの水平断面は細長い流線形となる。このような成長機構が存在することは、風下側の氷の結晶粒が一般に細かく、また内部に細かい気泡の捕りこまれることが多いことから明らかである。第11図はその極端な場合の例である。

一方、風による水の輸送は、つらら先端の懸垂水滴にも重要な効果を及ぼす。そして、こ

れが風によるつららの曲りの主な原因である。上述したように、風の影響を受けながら強く冷却された水膜は、最終的にはつららの風下側で懸垂水滴に流れ込む。したがって、その部分の過冷却度が増加するから、デンドライト氷¹⁾の成長は風下側で優勢となる。この傾向は懸垂水滴が風下側へ吹き寄せられて傾くこととあいまって、つららの成長方向を風下側に向ける。

つらら先端の懸垂水滴（半径 r ）が、速度 U の水平風に吹かれて鉛直軸から角度 ϕ 傾いて平衡しているとき、 ϕ は力の釣合から近似的に、

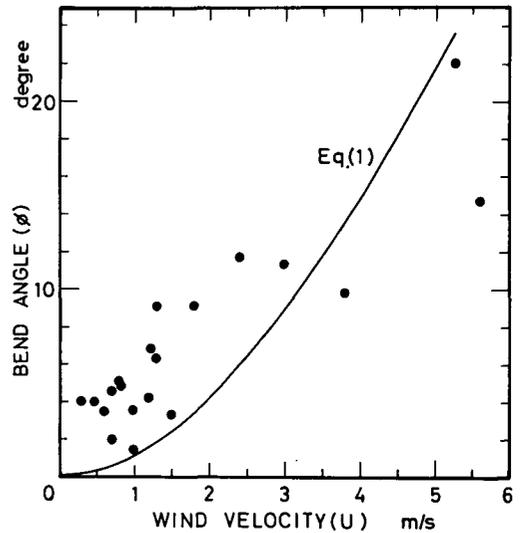
$$\tan \phi = \frac{3 \rho_a C_D U^2}{4 \rho_w g r} \quad (1)$$

と書ける。 g は重力加速度、 ρ_w と ρ_a は、それぞれ水と空気の密度、 C_D は抵抗係数である。「つららの研究 I」¹⁾の結果から $r = 2.44 \text{ mm}$ と置くと、 $U = 1 \sim 6 \text{ m/s}$ のときの Reynolds 数 ($Re = 2 \rho_a r U / \eta$, η : 空気の粘性係数) は $Re = 340 \sim 2070$ の範囲にある。この領域における抵抗係数は、 $C_D = 0.42 \sim 0.65$ の範囲で Re の増加とともに減少する。数値は次の経験式で与えられる。⁴⁾

$$\left. \begin{aligned} C_D &= 98.33/Re - 2778/Re^2 + 0.3644 & 100 < Re < 1000 \\ C_D &= 148.62/Re - 4.75 \times 10^4/Re^2 + 0.357 & 1000 < Re < 5000 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

第12図に式(1)の計算結果と測定結果を示す。測定データは、温度 $\theta = 0 \sim -20^\circ\text{C}$ 、水の供給量 $w = 4 \sim 30 \text{ mg/s}$ のいろいろの場合を含んでいるが、一般的傾向として、曲りの角度は風速の増加とともに大きくなり、計算結果とおおよそ一致しているといえる。しかし、風によるつららの曲りは基本的に氷の成長方向変化の問題であるから、詳しい物理機構はもっと厳密な理論と実験で明らかにされるべきである。

最後に、北大低温科学研究所気象学部門の皆様には、本研究に関する野外測定、実験、議論のすべての面でお世話になった。厚くお礼申し上げます。



第12図 人工つららの曲り角 (ϕ) と風速 (U) との関係
温度 $\theta = 0 \sim -20^\circ\text{C}$ 、水の供給量 $w = 0 \sim 30 \text{ mg/s}$ の種々の条件での測定結果である。
曲線は式(1)の計算結果である

文 献

- 1) 前野紀一・高橋庸哉 1984 つららの研究. I. つららの構造と成長の一般的特徴. 低温科学, 物理篇, 43, 125-138.
- 2) Hatakeyama, H. and Nemoto, S. 1958 A note on the formation of horizontal stripes on icicles. 気象庁欧文彙報 (Geophys. Mag.), 28, 479-484.
- 3) Grimley, S.S. 1948 Liquid flow conditions in packed towers. *Trans. Inst. Chem. Engrs. (London)*, 23, 228-235.
- 4) Morsi, S.A. and Alexander, A.J. 1972 An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems. *J. Fluid Mech.* 55, 193-208.

Summary

Observations were made of wavy forms, spikes and bent icicles. The average wavelength was found to be 9.0mm for icicles collected in Sapporo in February and March, 1984 (Fig. 3). Any protrudent parts on a growing icicle wall may develop faster by the following three reasons: 1) The water film flowing at the protrudent part is thinner and the ice grows faster. 2) The opening angle of the protrudent part is wider so that heat transfer and evaporation are more active causing faster ice growth. 3) The flowing water is more viscous because of supercooling and containing possibly minute ice crystals; such water tends to be stagnant and freeze faster at the protrudent part. Fig. 4 shows that the protrudent part is faster in growth, which is demonstrated by each band of many minute air bubbles captured in an icicle.

Fine spikes of ice are often produced on an icicle surface (Fig. 5). Usually their sizes are 1mm in diameter and 5-20mm in length, and their growth directions are random. Spikes are formed when the balance of water supply and freezing rate is disrupted and the icicle stops growing; the remaining water freezes from its surface, which increases the internal pressure and pushes out water to form fine ice spikes through small holes or cracks.

There are three causes at least which may result in formation of bent icicles. The first is the gradual inclination of the root of an icicle, e.g. by the creep of ice or snow on the roof (Fig.7A) and bending of a tree branch (Fig.7B). The second is the one-sided supply of water due to a decrease in water supply rate (Fig.8), changes in water sources and so on. The third is the effect of the wind (Fig.9): it increases the heat exchange and consequently the growth rate of icicles as well as blowing leeward the water film and pendant drop. The angle of bend could be explained by the mechanical balance of a pendant drop under the gravity and drag force due to the wind (Fig.12).