



Title	海水噴霧による低温気流中におかれた円柱まわりの着氷挙動
Author(s)	堀部, 明彦; Horibe, Akihiko; 福迫, 尚一郎 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 154, 31-41
Issue Date	1991-01-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/42271
Type	departmental bulletin paper
File Information	154_31-42.pdf



海水噴霧による低温気流中におかれた円柱まわりの着氷挙動

堀部 明彦 福迫尚一郎

(平成2年10月24日受理)

Ice-Accretion Characteristics in a Cold Air Stream with Spraying Seawater

Akihiko HORIBE and Shoichiro FUKUSAKO

(Received October 24 1990)

Abstract

An experimental study was performed to investigate the characteristics of marine icing on a horizontal circular cylinder immersed in a cold air stream with spraying sea-water droplets. The experiments were carried out under a variety of conditions encompassing air velocity, air temperature, droplet diameter, droplet temperature, and liquid content. The formation of the ice layer formed on the cylinder were extensively observed. It was found that the morphology of the ice accretion depended mainly on both the air velocity and droplet diameter, while the surface features of the ice layer varied markedly with both the droplet diameter and the droplet temperature. The salt-content distribution and crystal system within the ice layer formed on the cylinder were qualitatively determined.

1. ま え が き

冬期間、北洋海域を航行する船舶では、荒天時に海水のしぶきが船体に凍り付く、いわゆる船体着氷が発生する。船体への着氷量の増加と共に重心が変化し、船の復元性能が低下すること、および風圧を受ける面積が増加することにより多少の突風によっても転覆しやすくなり、ときとして重大な海難事故に至る。これに対して着氷防除の試み^{(1),(2)}は幾つかなされているが、現在のところ十分に効果を発揮しているとはいえない。従来、船体着氷に関する研究は、実船による観測を中心とした気象学的立場から研究^{(1),(2)}がなされているが、伝熱工学的に各因子が着氷に及ぼす効果について検討したもの⁽³⁾⁻⁽⁵⁾は少ない。船体着氷は、しぶき発生の原因となる海面状況、船速、気温、海水温度、および風速などの因子に影響され生ずる複雑な現象であり、未だ不明な点が多いのが現状である。さらに、塩分を含んでいる海水などの水溶液が凍結する場合、氷層内部にブライン(不凍液体)を含み、水が凍結する場合とは異なることが知られている^{(6),(7)}が、このために船体着氷挙動はさらに複雑なものになることが推定できる。

本研究は、着氷のメカニズムを知り、着氷防除のための基礎的資料を得ることを目的とし、海水噴霧を伴う低温気流中に水平円柱を設置し着氷実験を行なったものである。着氷の因子である気流速度、気流温度、液滴温度、液滴径、および液滴流量を変化させた場合の効果について観察

し、各々の着氷形状、表面性状、および着氷量について検討した。さらに、円柱まわりの塩分濃度を測定し、氷組織を観察することにより、純氷とは異なるブラインを含む着氷の挙動について検討を加えた。

記号

A : 気流と直角方向の着氷投影面積 m^2	θ : 温度 $^{\circ}C$
C_p : 比熱 $kJ/(kg \cdot K)$	ϕ : よどみ点からの角度 $deg.$
d : 液滴径 μm	S_{te} : ステファン数 ($=C_{p0}\theta / L_f$)
G : 理論着氷量 ($=\int_0^t Q \cdot A(t) dt$) kg	W^* : 着氷率 ($=W/G$)
L_f : 凍結潜熱 kJ/kg	
Q : 液滴流量 $kg/(m^2h)$	添字
S : 塩分濃度 kg/kg	a : 気流
t : 時間 $min.$	d : 円柱衝突時
U : 速度 m/s	f : 結氷
W : 着氷量 kg	0 : 液滴ノズル出口

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

本研究で用いた実験装置の系統図を図1に示す。実験装置は低温風洞、海水噴霧装置、および風洞内に取り付けられた試験部より構成されている。低温風洞内には送風機、ダンパ、冷凍機の蒸発管、およびヒーターが設置されている。気流は送風機、ダンパにより所定の速度に設定され、整流部および絞り比9の縮流部を通り上方より試験部に流入する。気流温度は、冷凍機（冷媒R22-11.3kW）およびヒーター（最大8.25kW）を併用することにより所定の温度に保った。海水はタンク内にて所定の温度まで冷却した後、ポンプにより加圧し試験部上方に取り付けてあるノズルから噴霧した。液滴温度はノズル出口において $\phi 0.3mm$ のクロメル・アルメル熱電対によって測定し、液滴径は噴霧ノズルを交換することにより変化させた。各ノズルの液滴径はあらかじめプレート上のオイルに採り、顕微鏡写真を撮影して計測し平均値（ザウダ平均直径）を求めた。液滴流量は噴霧ノズルの数およびコントロールバルブを調整することにより制御し、供試円柱上部において液滴捕捉装置にて測定を行なった。

試験部は、長さ800mm、幅150mm、奥行150mmであり、側面は透明なアクリル樹脂製板で作製した。試験部上方より600mmの位置に供試物体として直径30mmの塩化ビニール製の水平円柱を固定した。円柱の上方にはピトー管、および $\phi 0.1mm$ のクロメル・アルメル熱電対をトラバースできるように設置し、気流速度および気流温度を測定した。なお、本実験では海水として塩分濃度3.3%の塩水を用いた。

2.2 実験方法

所定の速度および温度にした気流中に、所定の液滴径、液滴温度、および液滴流量を有する海水をノズルより噴霧し水平円柱に着氷させ、着氷開始より一定の時間において着氷形状、および表面性状の写真を撮影した。着氷実験終了後に、円柱まわりの各部位の水を分割採取し、偏光顕

微鏡を用いて氷組織を写真撮影し観察を行なった。その後、氷を融解し各部位ごとの塩分濃度を濃度計（東亜電波工業製 SA-10KB）にて測定した。なお、本実験は気流速度 $6\sim 20\text{m/s}$ 、気流温度 $-5\sim -20^\circ\text{C}$ 、液滴径 $200\sim 1600\mu\text{m}$ 、液滴温度 $4\sim -1.4^\circ\text{C}$ 、および液滴流量 $80\sim 320\text{kg}/(\text{m}^2\text{h})$ の範囲で行なった。

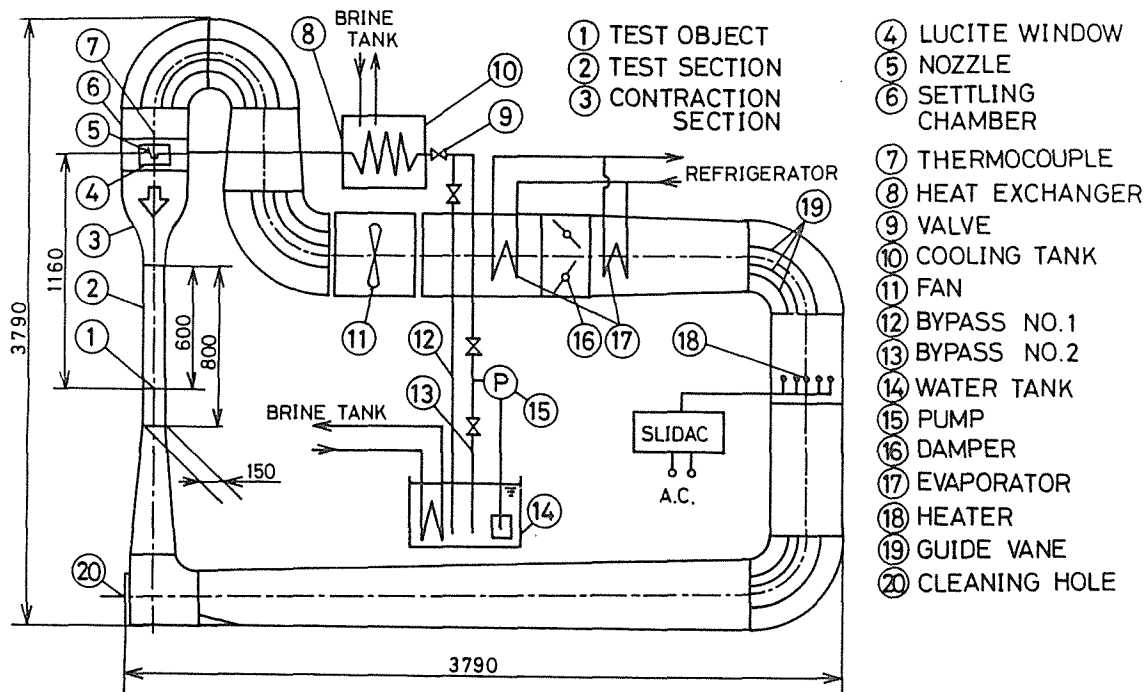


図1 実験装置系統図

3. 実験結果および考察

3.1 気流温度の影響

図2は着氷形状に気流温度 θ_a が及ぼす効果について示したものである。図は供試円柱を軸方向から観察したもので、中央の黒い円の部分が円柱で、まわりの白い部分が氷層である。氷層はいずれも乳白色で、内部にブラインおよび空気泡を含む柔らかな氷である。図に示されるように、気流温度が低い場合は上部氷層は厚く成長しているが、 $\theta_a = -5^\circ\text{C}$ では全体的に氷層は薄く円柱下部につらら状の氷が認められる。液滴が凍結するのは潜熱を気流に奪われた結果であるが、その熱交換の過程は二種類に分けて考えることができる。まず液滴が気流中を飛行している間に冷却され、気流温度および液滴径によっては過冷却状態となって円柱に衝突する。その瞬間に潜熱は放出され、液の一部は凍結し、残りの部分は円柱に沿って下部に流れ、この間に気流により冷却され凍結していく。図2の場合、液滴噴霧ノズル出口の温度 $\theta_0 = -1.4^\circ\text{C}$ であり結氷温度 θ_i （塩分濃度3.3%の場合 $\theta_i = -1.8^\circ\text{C}$ 、一般に海水の結氷温度は $\theta_i = -0.5346S$ が成り立つ。 θ_i ：結氷温度、 S ：塩分濃度）近傍のため液滴は過冷却状態であると考えられるが、気流温度が低いほど過冷却度が大きくなることにより、円柱上部氷層が厚く成長したものと考えられる。

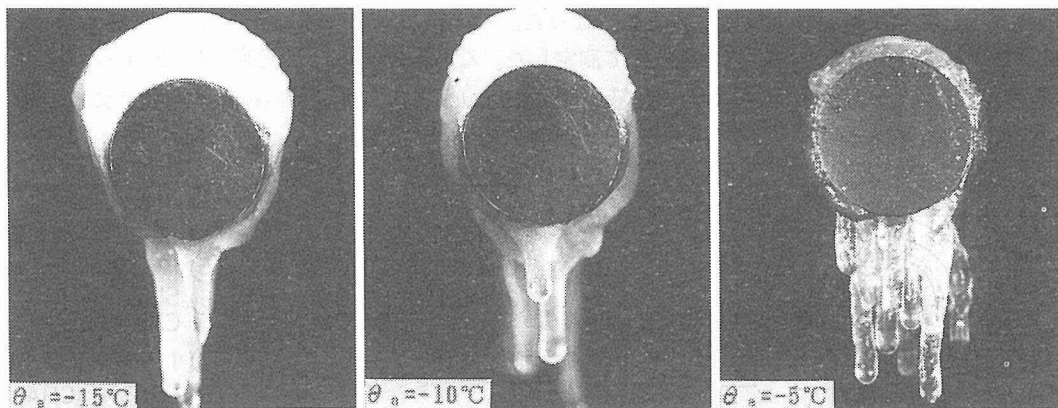


図2 気流温度の影響

$U_a = 6\text{m/s}$, $\theta_0 = -1.4^\circ\text{C}$, $Q = 80\text{kg}/(\text{m}^2\text{h})$, $d = 200\mu\text{m}$, 20min. elapsed

3.2 気流速度の影響

図3は気流速度 U_a の影響を示したものである。各速度を比較すると $U_a = 6\text{m/s}$ の場合と $U_a = 10\text{m/s}$ 以上の場合では着氷形状に大きな違いがあるのがわかる。 $U_a = 6\text{m/s}$ では上部氷層はまるく着氷し、下部にはつららが形成されているが、気流速度が大きくなると上部氷層は平になり全体としては逆三角形になっている。これは、気流中および氷層表面での液滴の挙動と気流との潜熱移動が関係していると考えられる。まず、円柱近傍での液滴の飛行軌跡の変化があげられる。気流速度が速くなるにしたがい液滴は円柱を避けて通るようなトラジェクトリを持つことが知られている。したがって、円柱全面に均等に衝突するのではなく、よどみ点より下流の位置に衝突しやすくなる。次に、円柱表面での液滴の挙動に及ぼす影響があげられる。気流速度が速くなると

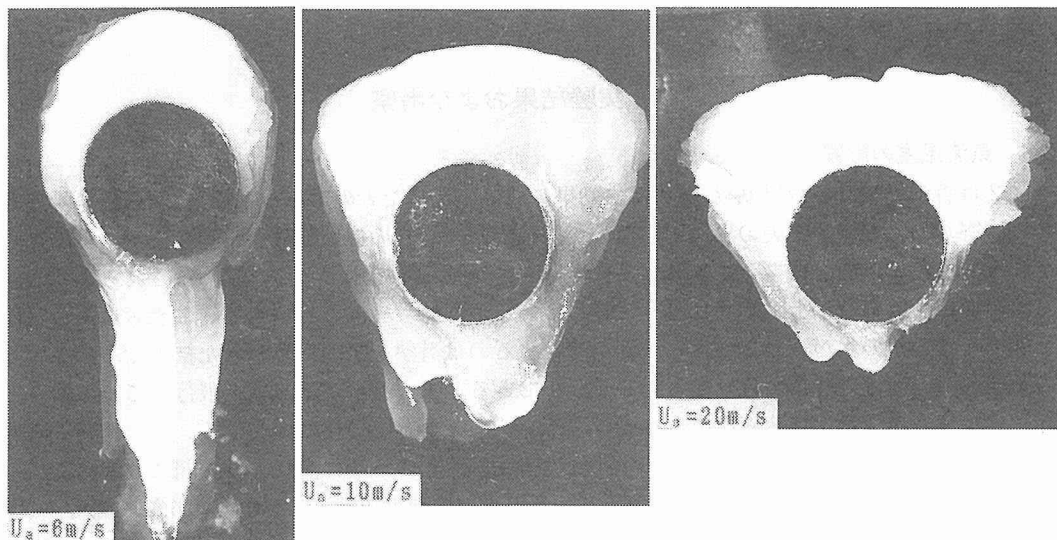


図3 気流速度の影響

$\theta_a = -15^\circ\text{C}$, $\theta_0 = -1.4^\circ\text{C}$, $Q = 240\text{kg}/(\text{m}^2\text{h})$, $d = 200\mu\text{m}$, 20min. elapsed

円柱に液滴が衝突したときに跳ね、飛散する可能性が大きくなる。さらに衝突付着した液滴は気流による抗力と重力の影響を受けるが、気流による抗力が大きくなりよどみ点下流に流されやすくなる。これらの液滴の挙動と、気流速度が大きくなるにしたがって氷層との熱伝達が増加することにより、気流垂直方向に氷層が成長するものと考えられる。このタイプでは垂直方向の氷層成長に伴い、液滴を受けとめる面積も増えるため加速的に着氷量が増加することが観察された。

3.3 液滴径の影響

図4は液滴径 d が氷層の表面性状に及ぼす影響を示している。液滴径が小さい $d=200\mu\text{m}$ では表面はほとんど平滑であるが、 $d=900\mu\text{m}$ では液滴の衝突の衝撃のために凹凸が生じている。また、 $d=1600\mu\text{m}$ では円柱上部に衝突した液滴の一部分は凍結するが、次の液滴の衝突によって側部に流されるという現象がみられ、その結果として図のように上部にほとんど氷層が成長していない。また、液滴径が大きくなると全体の着氷量も少なくなっている。液滴径が大きくなるほど気流中で冷却され難いこと、および液滴の持つ運動エネルギーが増加するため衝突時の衝撃が大きくなることが表面性状および着氷量に影響を及ぼしていると考えられる。

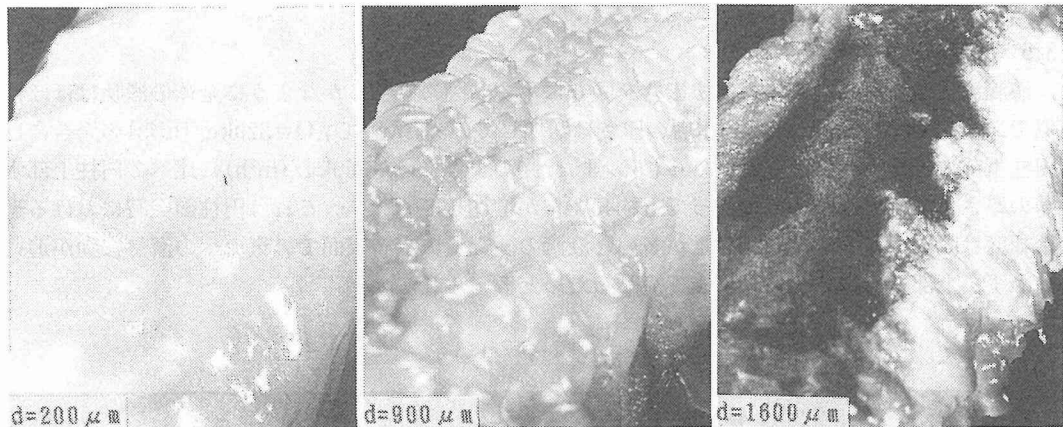


図4 液滴径の影響

$U_a=6\text{m/s}$, $\theta_a=-15^\circ\text{C}$, $\theta_0=-1.4^\circ\text{C}$, $Q=240\text{kg}/(\text{m}^2\text{h})$, 20min. elapsed

3.4 液滴温度の影響

気流中の液滴温度は独立した因子ではなく、気流温度、気流速度、および液滴径の影響を受けるものであり、前述した各因子の影響の中にも液滴温度は大きく関与している。図5は他の条件を同一にし、ノズル出口における液滴温度 θ_0 を変化させたときの氷層表面の性状を示したものである。液滴温度が低いときには表面は滑らかであるが、温度が高くなると凹凸が多くなり液膜の流れるすじが認められる。これは、液滴の過冷却度が関与していると考えられる。ここで、ノズル出口における液滴温度 θ_0 を用いて、熱伝達率にRanz-Marshall⁽⁸⁾の式を使用し、液滴内温度一定の仮定にて簡単な解析を行なうと、円柱衝突時における液滴温度は本実験条件下では、 $\theta_0=-1.4^\circ\text{C}$ の場合 $\theta_d=-7.8^\circ\text{C}$ 、 $\theta_0=-0.2^\circ\text{C}$ では $\theta_d=-6.1^\circ\text{C}$ 、および $\theta_0=4.0^\circ\text{C}$ では $\theta_d=-4.4^\circ\text{C}$ と推算される。このことから、液滴の温度（過冷却度）が着氷性状に影響していることがわかる。

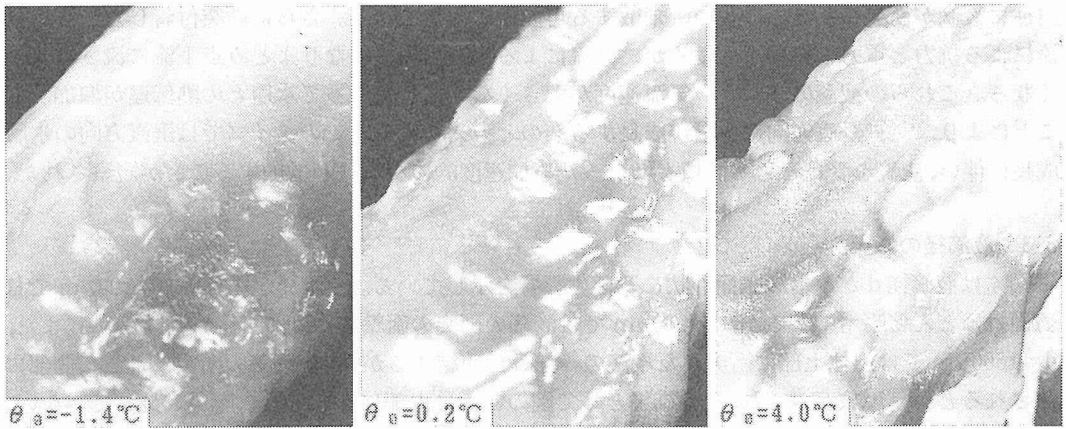


図5 液滴温度の影響

$U_a = 6\text{m/s}$, $\theta_a = -15^\circ\text{C}$, $Q = 80\text{kg}/(\text{m}^2\text{h})$, $d = 200\mu\text{m}$, 20min. elapsed

3.5 液滴流量の影響

液滴流量が着氷挙動におよぼす影響を図6に示す。図より明らかなように全体の形状はほぼ相似であり、流量の増加とともに氷層の厚さは増加している。ただし、 $Q = 320\text{kg}/(\text{m}^2\text{h})$ の場合には円柱下部に垂れ下がった氷層がみられる。また、図のように $Q = 160\text{kg}/(\text{m}^2\text{h})$ に比べて円柱上部氷層の厚さは液滴流量が2倍になっても約40%しか増加していない。これは円柱衝突時における過冷却度は同一であるが、液滴流量が多いと液滴の衝突量に氷層表面での気流への潜熱移動が追いつかず、上部で凍結せずに下部まで流れるためと考えられる。

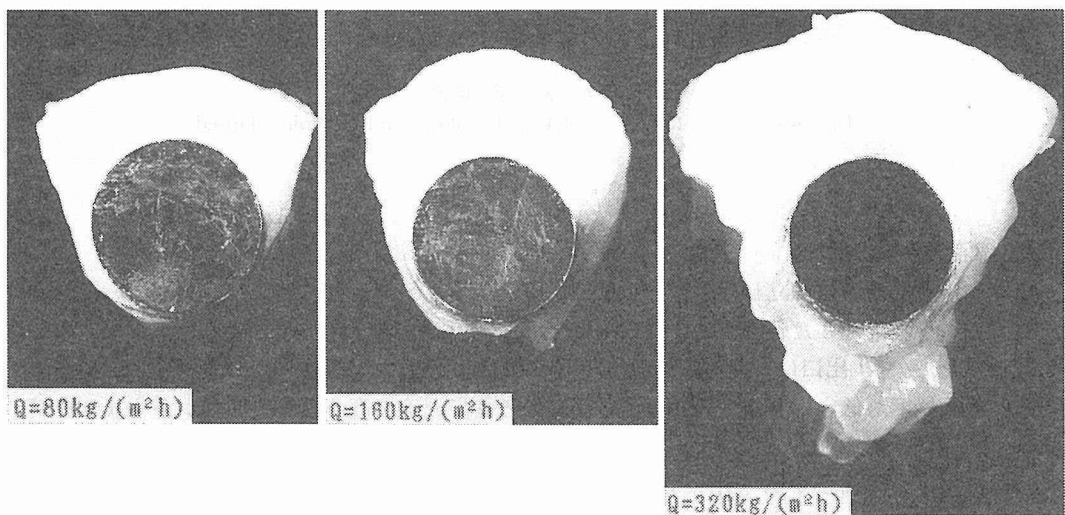


図6 液滴流量の影響

$U_a = 10\text{m/s}$, $\theta_a = -15^\circ\text{C}$, $\theta_0 = -1.4^\circ\text{C}$, $d = 200\mu\text{m}$, 20min. elapsed

3.6 着水量

図7は円柱まわり着氷重量 W の時間的変化を、気流温度をパラメーターに取り示してある。図よりいずれの気流温度においても、時間の経過にしたがい着氷量は単調に増加しているが、気流温度が低いほど増加割合は大きいことがわかる。これは、水層が気流と直角方向に成長し、液滴が衝突する流れ方向のみかけの投影面積が増加するためと考えられる。

ここで、気流による液滴の飛行軌跡の変化がないものとし、円柱の着氷投影面積に衝突するすべての液滴が凍着すると仮定した場合の理論着氷量を G とする。図8に着氷量 W 、および W と理論着氷量 G との比 W^* ($=W/G$, 仮りに着氷率と呼ぶ) と気流速度 U_a との関係を示す。本条件では、着氷量は気流速度とともに増加するが $U_a=15\text{m/s}$ 近傍で最大値を取り、それ以上では減少している。一方、着氷率は気流速度の増加とともに単調に減少している。このことは、気流速度の増加とともに液滴が飛散しやすくなること、および実際には液滴の飛行軌跡が円柱を避けるように変化することの二つの挙動を示唆していると考えられる。図9には、着氷量および着氷率に液滴流量がおよぼす効果を示している。液滴流量の増加とともに着氷量は増えているが、着氷率は逆に減少して

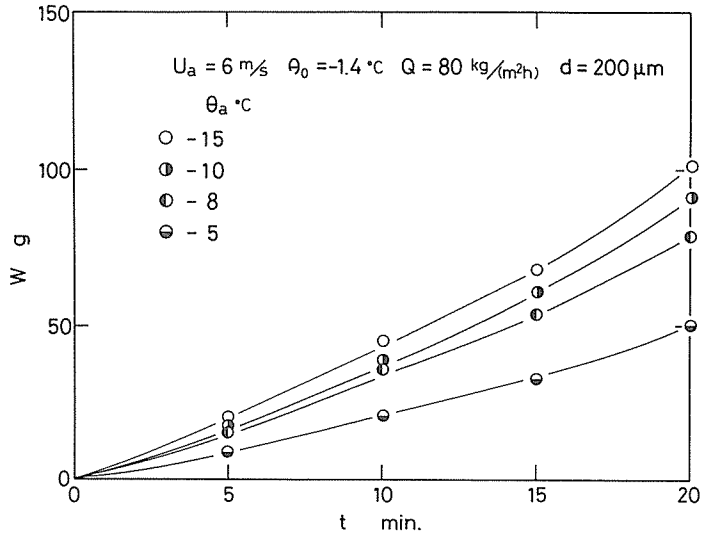


図7 着氷量の時間的変化

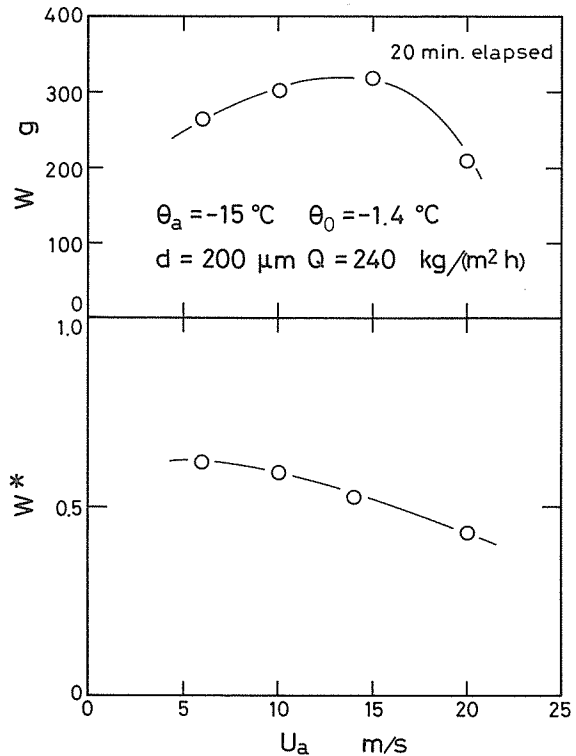


図8 気流速度と着氷量および着氷率の関係

いる。このことは、この条件下では、前述したように上部氷層での液滴と気流との凍結潜熱移動に限界があることを示していると考えられる。

3.7 氷層の塩分濃度

図10は氷層内の円柱まわり塩分濃度分布を示したものである。横軸はよどみ点からの角度である。横軸右端のP点はつらら状氷の先端を示している。いずれの気流速度においてもよどみ点から下部に行くにしたがい塩分濃度が大きくなっており、上部で凍結しなかったブラインが下部に流れる間に冷却され凍着する事がわかる。つらら状氷の先端では極端に塩分濃度が大きい、これはブラインが流れながら濃縮され凍結するためと考えられる。また、気流温度

が低いほど塩分濃度は大きくなっており、より多くのブラインを閉じこめて凍着していると考えられる。そこで液滴の過冷却度を示すステファン数を用いて、よどみ点における塩分濃度との関係を示したのが図11である。図より過冷却度が大きいほど単調に塩分濃度は増加し、氷層の塩分濃度には液滴の過冷却度が関与していることがわかる。

3.8 氷層結晶組織

着氷の成長の過程を知るために円柱まわりの氷結晶組織を偏光顕微鏡で写真撮影したものが図12である。 ϕ はよどみ点からの角度を示している。よどみ点近傍 ($\phi = 0$ deg.) では、微細な結晶粒子からなる構造をしている。粒子の大きさは約0.1mm~0.2mmと極めて小さい。それに比べて $\phi = 60$ deg., $\phi = 120$ deg. と下流に行くにしたがい、結晶粒子は大きくなっていることが認められる。写真の結晶のなかで灰色に色がついているものが閉じこめられたブラインと推定される。結晶粒子の大きさは一般に冷却速度にも影響されるが、円柱下流に行くほど粒子が大きくなるのは、上部で凍結しなかったブラインが、流れながら凍結することが関与していると考えられる。また、図のように円柱まわりの着氷層では、部位により結晶粒子の大きさが異なり、単位体積あたりの結晶組織の中に閉じこめられたブラインの量および濃度が変わるために図10に示された塩分濃度分布になると考えられる。

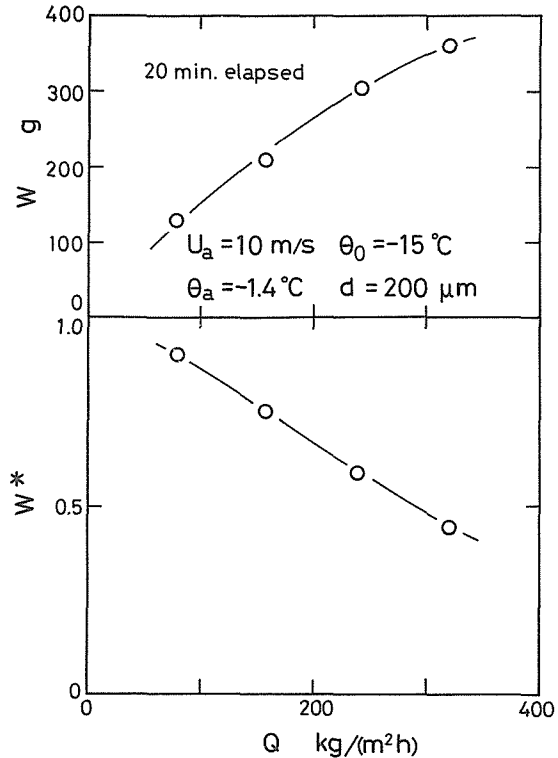


図9 液滴流量と着水量および着氷率の関係

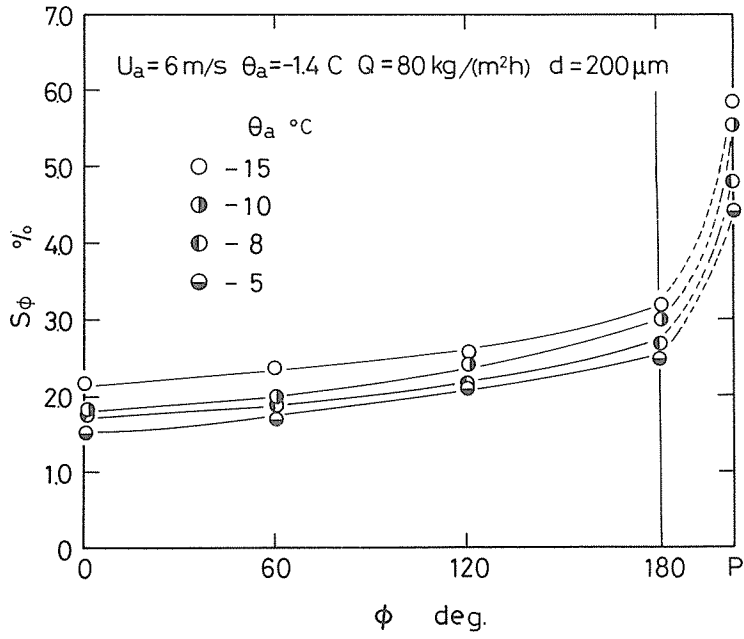


図10 水層内塩分濃度分布

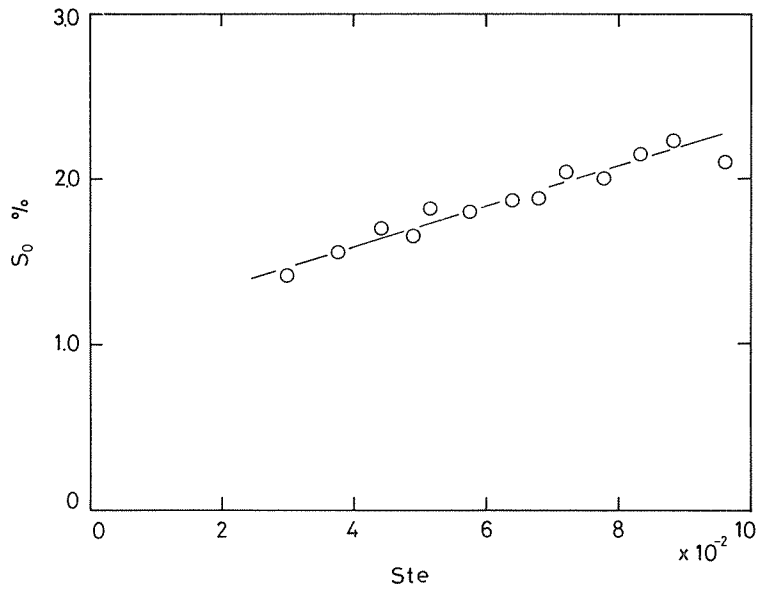


図11 液滴の過冷却度の影響

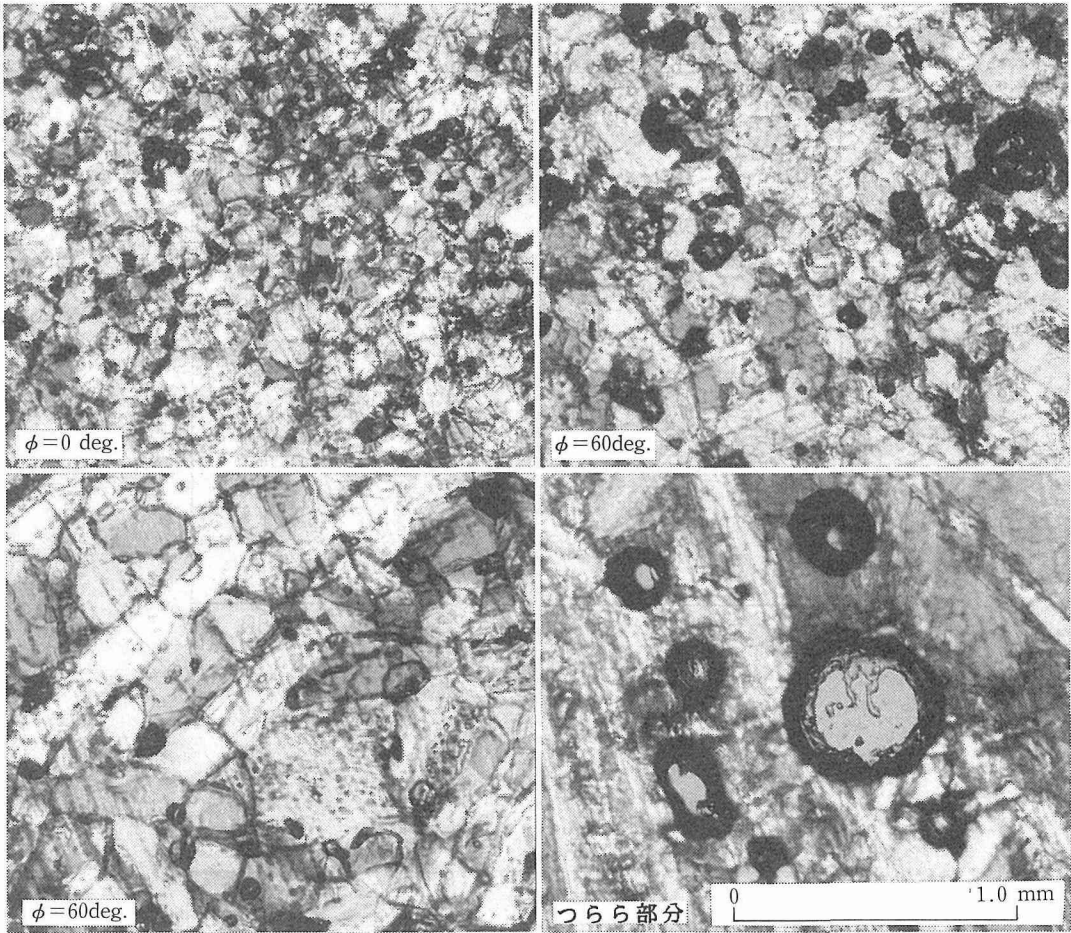


図12 氷層結晶組織

$U_a = 6\text{m/s}$, $\theta_a = -15^\circ\text{C}$, $\theta_0 = -1.4^\circ\text{C}$, $Q = 240\text{kg}/(\text{m}^2\text{h})$, $d = 200\mu\text{m}$, 20min. elapsed

4. あとがき

海水噴霧を伴う気流中におかれた水平円柱まわりの着氷実験を行ない、各々の因子が着氷挙動におよぼす効果について検討した結果、本実験の範囲内で以下のことが明らかになった。

- (1) 着氷形状はおもに気流速度および液滴径，その表面性状はおもに液滴径および液滴温度に影響される。
- (2) 着氷量は液滴流量の増加とともに増加するが，着氷率は減少する。
- (3) 氷層は内部にブラインおよび気泡を含んだ白色の氷で，円柱のよどみ点から下部にむかって塩分濃度が増加し，氷層組織も大きくなる。

参考文献

- (1) 岩田，日本造船学会論文集，129（昭46-6），p. 290.

- (2) 小野, 低温科学, 物理編, 1323 (昭46), p.235.
- (3) Look, G. S. H., North East Coast Inst. Engrs., 88 (1972), p.175.
- (4) 関・ほか3名, 日本機械学会論文集, 48 (昭57-4), p.749.
- (5) Fukusako, S., ほか2名, Experimental Thermal and Fluid Science, 2 (1989), p.81.
- (6) 林・ほか1名, 第17回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (昭55), p.523.
- (7) 山田雅彦, 北海道大学博士論文, (1989).
- (8) Ranz, W. E. and Marshall, W. R., Forsh. Geb. Ingenierwes, 12 (1941), p.65.