

(昭和 46 年 5 月日本造船学会春季講演会において講演)

船舶の着氷について (その1)

正員 岩 田 秀 一*

Ice Accumulation on Ships (The First Report)

by Shuichi Iwata, *Member*

Summary

In winter sometimes the icing of ships sailing in northern seas results from mostly the freezing of sea spray blown over them, which has led frequently to cases of capsizing due to extreme loss of stability.

The author tries to make clear the icing mechanism and develop the estimating method of the ice rate of growth on ships to be duly considered referring to the meteorological and sea conditions around our country.

This first report describes theoretical and experimental studies on the icing of cylinders.

1 緒 言

冬期、北洋を航行する船舶では、主に海水の飛沫が船体に凍着し、その結果復原性能が著しく損われ、ときには転覆に到る場合がある。

この現象は今に始まったものではないが、この問題については、外国においては勿論、わが国においてもあまり調査や研究が行なわれていなかつたようである。

この研究の目的は、船舶の着氷の機構を解明し、わが国周辺の北洋における冬期の気象と海象に照らして考慮すべき着氷量の推定法を確立することにあり、得られた結果が船舶の計画や設計上のご参考になれば著者にとつて望外の喜びである。

この現象を解明して船舶の着氷量を推定するためには大別して次の2点を明らかにする必要がある。

- (1) 波浪の中にある船舶が、単位時間あたりどのような飛沫をどのように浴びるかを解明すること。
- (2) 船舶が捕捉した水量の中、単位時間あたりどれだけの水量が凍着しうるかを求めること。

この論文は、これら2つの問題点の中(2)の凍着しうる水量を求めることに主眼を置いてある。

ある気温のもとで、水滴を含む気流の中に物体が置かれ、これに水滴が凍着する場合、着氷の寸法、形状、重量等は、物体が捕捉する水滴の温度と水量ならびにこの水量が氷結するときの潜熱がどれだけ奪われ、そしてこの状態がどのくらい継続するかによつて決まると考えられる。

もしこの潜熱の量が奪われる熱量より少ない場合は捕捉水量が全部凍着し、捕捉水量が次第に増加して双方の熱量が丁度等しくなつたとき着氷量は一般には最大に達する。捕捉水量がさらに増加すると、その一部は氷となりきれずに、ある水量は風のため再び大気中に吹き飛ばされるか、あるいは物体を伝わつて滴下する。このように氷となりきれない水量がある場合は、その過冷却分がさらに着氷の成長に寄与するはずである。

実際の着氷現象では、物体の形状と寸法が多種多様で、しかも着氷の成長につれて変化し、このため捕捉水量と奪われる熱量も刻々変化するので、この現象を時間の推移につれて正確に把握することはすこぶる複雑な問題となる。さらにこの現象を洋上の船舶に敷えんすると、風によつて発達した波浪中における船体の運動によつて生ずる飛沫の量を主に考慮しなければならない。したがつて大気中の水滴の分布は船体周辺の場所によつて著しく異なり、しかも短時間の間にまた変化するため、この現象の究明は一層難解な問題となる。

本文では、主に円柱の着氷量の推定法について述べるが、これらの因子をすべて含めて理論的に取り扱うこと

* 日本海事協会横浜支部

は不可能なので、現象を単純化して着氷量を求める方法をとっている。

先づ、水滴が物体に捕捉されて氷結するときの潜熱は、熱伝達によつて大氣中に、熱伝導によつて物体内に、蒸発と昇華によつて大氣中にそれぞれ奪われるが、氷の熱伝導率は小さいため、長時間にわたる氷の成長を扱う場合、熱伝導によつて奪われる熱量は無視することができると思われる。また、船舶の着氷のように 0°C 以下の気温のもとでしかも水面近くで起こる現象では、飽和水蒸気張力が小さいため着氷表面からの蒸発と昇華は起りにくく、もし蒸発が起こりうるとすれば海面から十分に蒸発が起こつて飽和状態に近いと考えられるので、蒸発熱は潜熱よりはるかに大きい、蒸発と昇華によつて奪われる熱量も無視して差支えないと思われる。そこで潜熱は熱伝達によつてのみ奪われ、一方気流の中には気温まで過冷却された十分な水滴が常に等分布していると仮定する。

以上の仮定を設け、気流に直角に置かれた円柱について風速、気温、円柱の径に応じて円柱表面の熱伝達率を求め、その結果を用いて着氷量を求めてある。そしてこの理論値と室内および実船実験で得られた結果とを比較検討し、別に室内実験で得られた着氷の形を3つの型に分類し、これらの型は大氣中の含水量に関係があることを述べ、この関係は実船実験で得られた結果にもおおむね当嵌ることも説明してある。

2 捕捉水量

水滴を含む気流の中に円柱が流れと直角に置かれているとき、もし水滴の粒子の運動が物体の存在によつて影響を受けないならば、単位時間あたりの捕捉水量は、流体の速度を u_0 、円柱の直径と長さをそれぞれ D_c 、 l 、気流中の含水量を ω とすれば、 $\omega D_c l u_0$ となるはずである。

しかし、粒子に働く流体抵抗によつて粒子は流線に沿つて運動しようとする傾向をもつから、実際の捕捉水量は $\omega D_c l u_0$ より小となる。この場合、粒子の抵抗が慣性に比べて充分大きければ、粒子はほとんど流線に乗つて運動するから捕捉水量は零に近く、逆に慣性が抵抗に比べて極めて大ならば、粒子はほぼ直線的に円柱に衝突するから、捕捉水量は $\omega D_c l u_0$ に近くなる。実際の捕捉水量と $\omega D_c l u_0$ との比を取り、これを捕捉率と呼んでいるが、この値は0と1の間にある数である。

いま、捕捉率を α で表わし、水滴からの蒸発はないと仮定すれば、 t 時間中における円柱の捕捉水量は次の式で表わされる。

$$W_\omega = \int_0^t \alpha \omega D_c l u_0 dt \quad (1.1)$$

一般には着氷のため円柱の寸法は変化し、これにつれて α も変化する。

円柱の捕捉率は、今井¹⁾が、流体として二次元のポテンシャル流れを、粒子に働く流体抵抗として Stokes の抵抗を、粒子は球形であるとそれぞれ仮定し、粒子に働く重力を無視して理論的に求めている。他に Albrecht の結果もあるが、両方を比較してみるとあまり差がないので、今後の計算には今井の結果を用いることにする。捕捉率については、次の機会にもう少し詳しく述べる。

3 円柱表面の熱伝達

1個の水滴が物体に捕捉されて氷結する過程を模型的に考えると次のようであろう。ただし対象とする水は、とくに断らない限り問題を簡単にするため真水とする。

気温 T_a の中にある物体に、質量 m 、温度 T_w なる1個の過冷却水滴が衝突したとすれば、 $-\frac{T_w \cdot m}{80}$ の水量は衝突した瞬間に氷結し、残りの水量 $\frac{(80+T_w)m}{80}$ の温度は 0°C に上昇する。この水量が熱伝達のみによつて熱を奪われて氷結すると仮定する。

一般に、ある位置 x の局所 Nusselt 数を Nu_x 、Reynolds 数を Re_x 、Prandtl 数を Pr で表わせば、これらの数の間には次元解析の結果次の関係が成り立つ。

$$Nu_x = f(Re_x, Pr) \quad (1.2)$$

とくに境界層が層流で、流れ方向の熱伝導が無視できる場合は

$$Nu_x = \sqrt{Re_x} \cdot f(Pr) \quad (1.3)$$

となる。

なおこの場合、水滴が空気中に分布していることによつて、Nusselt 数、Reynolds 数および Prandtl 数は影

響を受けないと仮定する。

3.1 円柱前面の平均熱伝達率

直径 D_c なる円柱が、一様な速度 u_0 の流れの中に直角に置かれ、岐点附近が層流境界層で覆われているとき、岐点附近の局所熱伝達率を h_x 、空気の熱伝導率と動粘性係数をそれぞれ λ_a, ν とすれば、理論的に次の式²⁾が成り立つ。

$$\frac{h_x D_c}{\lambda_a} = 1.14 \sqrt{\frac{u_0 D_c}{\nu}} Pr^{0.4} \tag{1.4}$$

また実測によると、 ϕ° を岐点からの中心角、 ϕ° の点の局所熱伝達率を h_ϕ で表わせば、 h_ϕ は次の式³⁾から求めることができる。

$$\frac{h_\phi D_c}{\lambda_a} = 1.14 \sqrt{\frac{u_0 D_c}{\nu}} Pr^{0.4} \left[1 - \left(\frac{\phi^\circ}{90} \right)^3 \right] \tag{1.5}$$

この式は $\phi^\circ < 80^\circ$ の範囲で成り立つとされているので、 $0^\circ \leq \phi^\circ \leq 80^\circ$ の範囲で成り立ち、 $80^\circ < \phi^\circ \leq 90^\circ$ の範囲では h_ϕ が一定で h_{80} と仮定して円柱前半面の平均熱伝達率 h_m を求めると次のとおりとなり、この式を用いることにする。

$$h_m = 0.767 \sqrt{\frac{u_0 D_c}{\nu}} \frac{\lambda_a}{D_c} \tag{1.6}$$

ただし Pr の値を 0.721 とした。

気温 -5°C の場合について、種々の風速における種々の直径について h_m の値を求めその結果を第 1.1 図に破線で示してある。この結果は、次元解析からも云えることではあるが、普通着氷で問題となる気温 $0 \sim -15^\circ\text{C}$ の範囲内で充分使用することができる。

実船で着氷現象を観察してみると、手摺やロープ類の比較的小さい径の円柱ではその全周に氷が成長するのが普通である。そこで、次に円柱全表面の平均熱伝達率を求め、これを主に使用することにする。

3.2 円柱全表面の平均熱伝達率

円柱全表面の平均熱伝達率は、これまで多くの人々によつて実測され、その結果は次の式⁴⁾にまとめられている。

$$\frac{h_m D_c}{\lambda_a} = c Re^n \tag{1.7}$$

この場合 c と n は Reynolds 数 Re によつて決まり、その間には第 1.1 表のような関係がある。

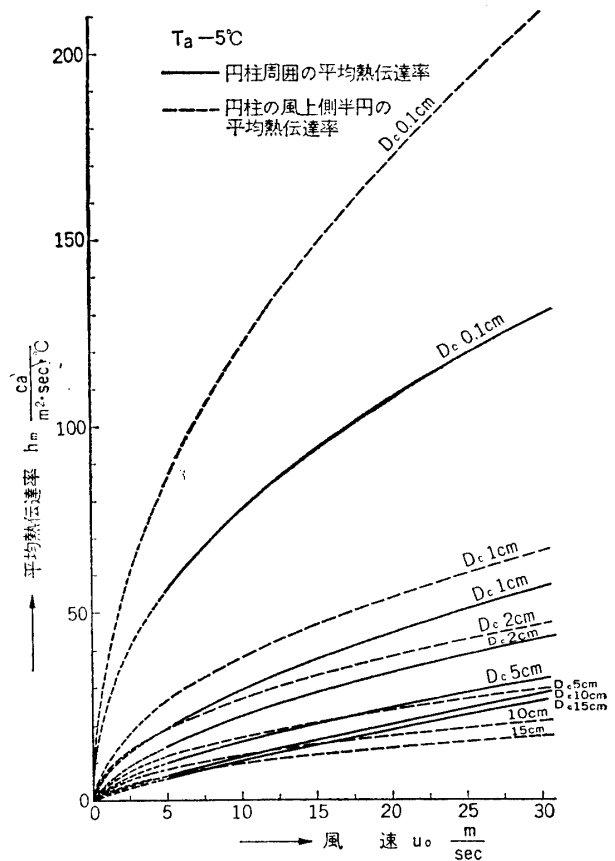
なお、Reynolds 数が 1,000~100,000 の範囲では次の形⁵⁾にも表わすことができるので、この範囲の Reynolds 数に対しては (1.8) 式を、この範囲外の Reynolds 数に対しては (1.7) 式を用いることにする。

$$\frac{h_m D_c}{\lambda_a} = 0.24 Re^{0.6} \tag{1.8}$$

気温 -5°C の場合について、(1.7) と (1.8) 式を用い、種々の風速における種々の直径について h_m の値を求めその結果を第 1.1 図に実線で示してある。

4 限界水量, 最大着氷量および余剰水効果

直径 D_c 、長さ l の円柱の単位時間あたりの捕捉水量を $W_w = \alpha \omega D_c l u_0$ 、水滴の温度を T_w とし、捕捉水



第 1.1 図 気温 -5°C における円柱の平均熱伝達率と直径および風速の関係

第 1.1 表 (1.7) 式の常数の値

Re	c	n
1~ 4	0.891	0.330
4~ 40	0.821	0.385
40~ 4,000	0.615	0.466
4,000~ 40,000	0.174	0.618
40,000~ 400,000	0.024	0.805

量からの蒸発が起らないと仮定すれば、全捕捉水量が氷結するために奪われなければならない熱量 Q は次の式で表わされる。

$$Q = \alpha \omega D_c l u_0 (80 + T_w) \quad (1.9)$$

この熱量が強制対流熱伝達によつてのみ奪い去られるとすれば次の式が成り立つ。

$$-\frac{h_m \pi D_c l T_a}{2} = \alpha \omega D_c l u_0 (80 + T_w) \quad (1.10)$$

この場合、円柱の表面は氷が成長しつつあるものとして 0°C としてある。

(1.10) 式の ω の値は、ある気温、水滴の温度、風速のもとで、ある直径と長さの円柱の全捕捉水量が単位時間に凍着しうる大気中の含水量の限界値を与えるもので、これを限界水量と呼び ω_c で表わせば、 ω_c は次の式から求めることができる。

$$\omega_c = -\frac{\pi h_m T_a}{2 \alpha u_0 (80 + T_w)} \quad (1.11)$$

ω_c の値が求まれば、単位時間における単位長さあたりの氷結し得る捕捉水量 W_i は次のとおりとなる。

$$W_i = -\frac{\pi h_m T_a D_c}{2(80 + T_w)} \quad (1.12)$$

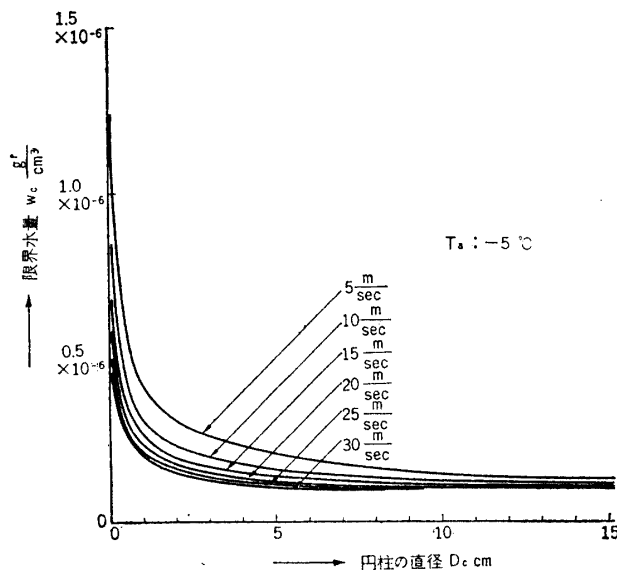
(1.11) と (1.12) 式から次のことがわかる。

(1) 捕捉率は限界水量には影響するが、氷結し得る水量には無関係である。

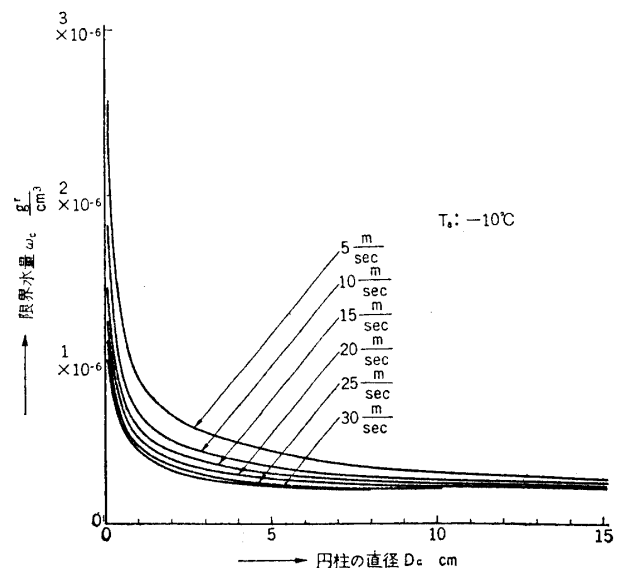
(2) 氷結し得る捕捉水量は、水滴が気温まで過冷却されているとき最大となるので、この量を最大着水量と呼べば、この量は気温、風速および円柱の寸法が与えられれば決まり、含水量、捕捉率には無関係である。

さて、捕捉水量が、最大着水量より少ない場合は全部凍着するが、逆に多い場合に問題が残る。いま、 $W_w > W_i$ 、 $W_w - W_i = W_r$ とすれば、 W_r は余剰水で一般には氷となりきれない。しかしながら、水滴が 0°C 以下に過冷却されている場合は、 $-W_r T_w / 80$ だけは潜熱を奪われることなしに凍着し得るはずで、どうしても氷りきれない水量は $(W_w - W_i)(80 + T_w) / 80$ となるべきである。このように余剰水の過冷却が着氷の成長に寄与する効果を余剰水効果と呼ぶことにする。この効果を考えると、捕捉水量が多ければ多いほど着氷量も多くなる。しかし捕捉水量は一般には不定量なので、余剰水効果もまた不定となる。着氷現象において、この効果がどのように現れるかは今後の重要な研究問題と考えるが、この効果を考慮に入れなければ説明のつかない実験例があり、後に具体例について説明することにする。

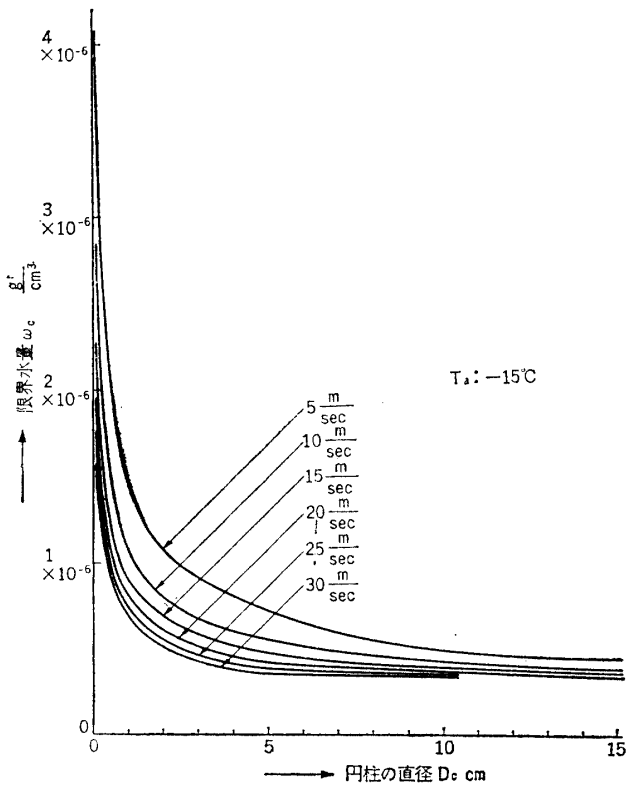
以上のことを総合し、最大着水量とは、ある気温と風速のもとで、大気中に十分な水滴が存在している場合に少なくとも凍着し得る水の量という意味であつて、これを越えて凍着することのない水の量の意味ではないことをことわつておく。



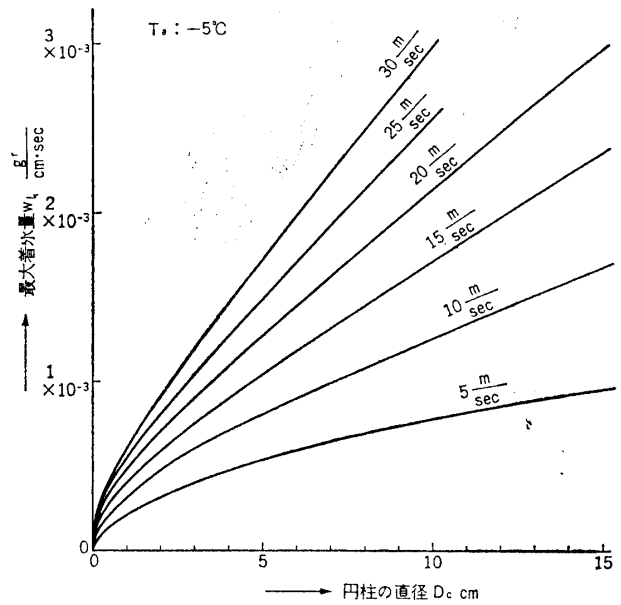
第1.2図 気温 -5°C における限界水量と風速および円柱の直径の関係



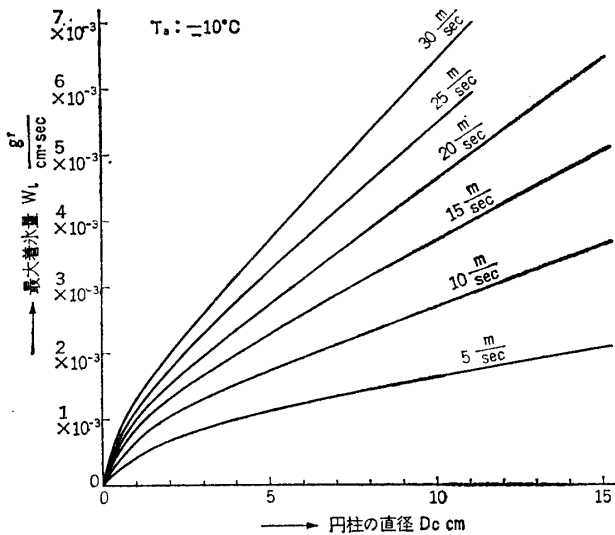
第1.3図 気温 -10°C における限界水量と風速および円柱の直径の関係



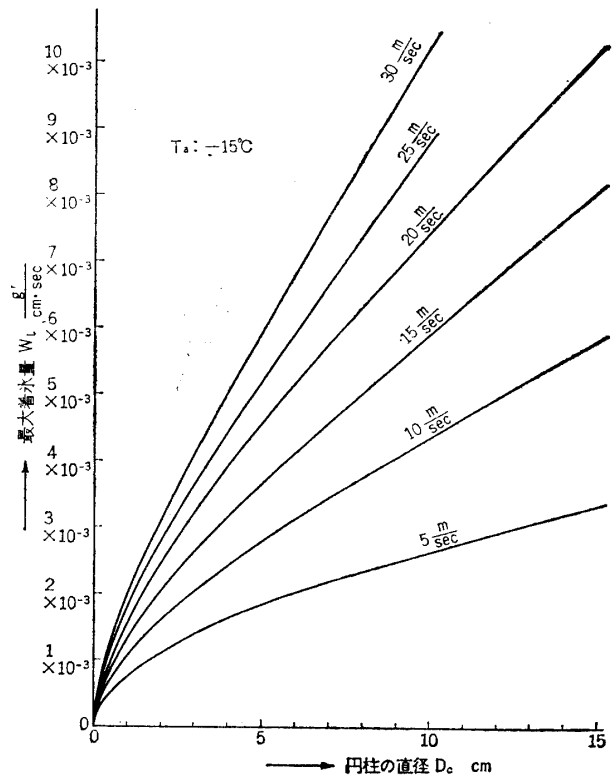
第 1.4 図 気温 -15°C における限界水量と風速および円柱の直径の関係



第 1.5 図 気温 -5°C における単位長さおよび単位時間あたりの最大着氷量と風速および円柱の直径の関係



第 1.6 図 気温 -10°C における単位長さおよび単位時間あたりの最大着氷量と風速および円柱の直径の関係



第 1.7 図 気温 -15°C における単位長さおよび単位時間あたりの最大着氷量と風速および円柱の直径の関係

余剰水効果は一般には求めることができないのでこれを除き、限界水量と最大着氷量を求めることにする。

最大着氷量は捕捉率と関係がないので、議論を簡単にするため捕捉率を 1 とし、水滴は気温まで過冷却し氷の表面温度は 0°C とし (1.7), (1.8), (1.11), (1.12) 式を用い、気温が -5°C , -10°C , -15°C の場合につき風速と円柱の直径および限界水量ならびに最大着氷量の関係を求め、第 1.2~1.7 図に示してある。

5 着氷の成長

第 1.5~1.7 図を用いて着氷の成長, すなわち着氷による円柱の径と全着氷量の時間的変化を求めてみる。

氷の密度を ρ_i とし, 着氷は円柱の風上側半円周に円柱と同心円状に成長すると仮定する。半径 r の円柱は短い時間 dt の間に $W_i dt$ だけの水量が凍着し, この着氷によつて円柱の半径が dr だけ変化したとすれば次の式が成り立つ。

$$W_i dt = \pi \rho_i r dr$$

$$\int_0^t dt = \int_{r_0}^r \frac{\pi \rho_i r dr}{W_i} \tag{1.13}$$

第 1.5~1.7 図でグラフの曲線部を $W_i = ar^n$ とおき, 残りの直線部を $W_i = ar + b$ とおいてこれを (1.13) 式に代入して解けば次の式が得られる。

(1) 曲線部

$$\int_0^{t_1} dt = \int_{r_0}^{r_1} \frac{\pi \rho_i r dr}{ar^n} = \frac{\pi \rho_i}{a(2-n)} [r_1^{2-n} - r_0^{2-n}] \tag{1.14}$$

(2) 直線部

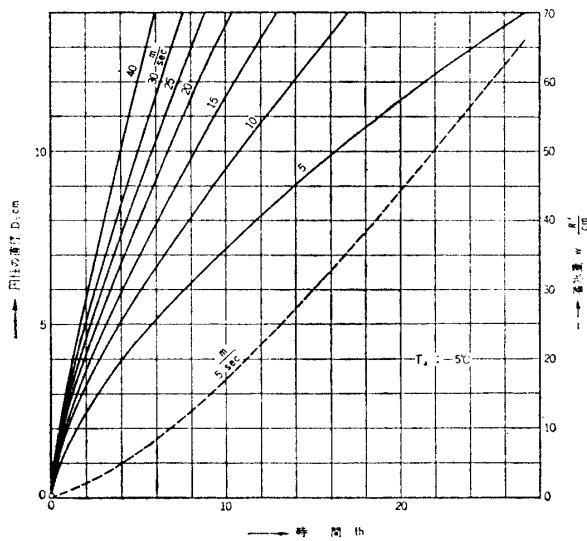
$$\int_0^{t_2} dt = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\pi \rho_i r dr}{ar + b}$$

この式で $a/\pi\rho_i = a, b/\pi\rho_i = b$ とおけば

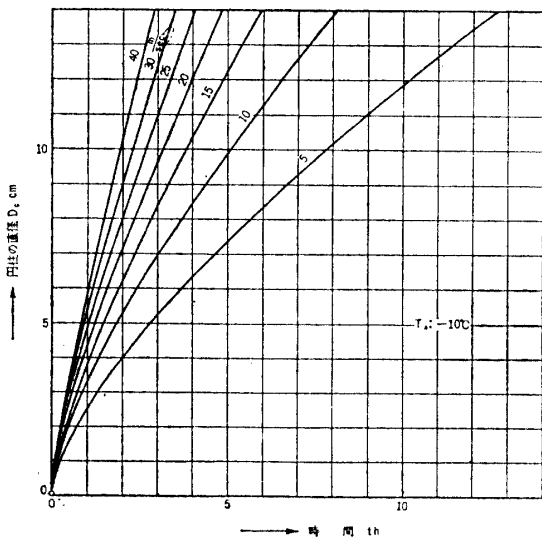
$$\int_0^{t_2} dt = \frac{1}{a^2} \left[a(r_2 - r_1) - b \ln \frac{ar_2 + b}{ar_1 + b} \right] \tag{1.15}$$

となる。

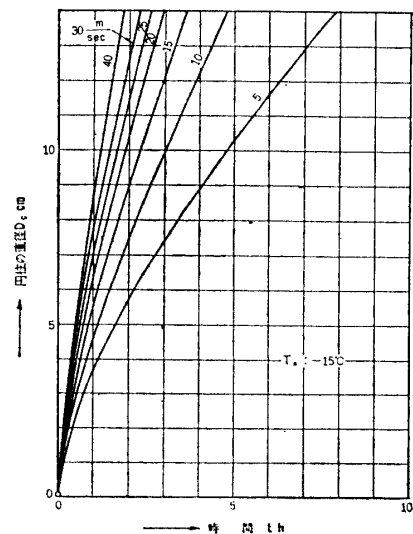
(1.14) と (1.15) 式を用い, 気温が $-5^\circ\text{C}, -10^\circ\text{C}, -15^\circ\text{C}$ の場合について, 直径が 0.1cm の円柱から着氷が始まつたと仮定し, その後の着氷の成長状況, すなわち円柱の直径の時間的変化を求めて第 1.8, 1.9 および 1.10 図に示す。ただし $\rho_i = 0.85\text{g/cm}^3$ と仮定した。もつとも着氷の密度は, その生成条件によつて異なるといわれ, また水滴が凍着してからの経過時間によつて変化することも知られているが, 巡視船の実船実験で得られた結果を参考としてこの値を採用し



第 1.8 図 直径 1 mm の円柱に気温 -5°C において着氷が成長した場合, 円柱の直径の変化と風速および時間の関係, ならびに気温 -5°C , 風速 5 m/sec における単位長さあたりの着氷量と時間の関係



第 1.9 図 直径 1 mm の円柱に気温 -10°C において着氷が成長した場合, 円柱の直径の変化と風速および時間の関係



第 1.10 図 直径 1 mm の円柱に気温 -15°C において着氷が成長した場合, 円柱の直径の変化と風速および時間の関係

たものである。これらの点についてはあとの機会に述べることにする。

気温が -5°C 、風速が 5 m/sec の場合について、円柱の単位長さあたりの全着氷の時間に対する変化を求めて第 1.8 図に破線で示してある。

第 1.1 表によると、(1.7)式は Reynolds 数が 4×10^5 まで用いることができるが、それ以上の Reynolds 数に対してどのようなようになるかは不明である。しかしながら、第 1.5, 1.6 および 1.7 図をみると、 W_i の D_c に対する変化は、ある程度以上着氷が成長するとほぼ直線となるので、 4×10^5 以上の Reynolds 数に対してもこれらの直線をそのまま延長して着氷量を推定して差支えないと思われる。

6 水滴の過冷却

大気中の水滴が風に飛ばされて物体に捕捉されるまでどのくらい過冷却されているかは着氷の消長に影響し、一般にこの水滴が気温まで過冷却されているとき着氷量は最も多く、水滴の温度が気温より高くなるにつれ着氷量は少なくなり、水滴の温度が着氷の表面温度より高いときは、逆に着氷の融解を促すことになる。一方余剰水効果も無視できない。このように考えると、水滴の過冷却は着氷現象に重要な意味をもつことがわかる。そこで、水面から飛び出した水滴の温度が、時間の経過につれてどのように変化するかを調べておく必要がある。

海水の氷点は塩分の含有量によつて決まり、わが国周辺の北洋では約 -1.8°C であるといわれている。したがって、水滴が海面から飛び出す瞬間の温度は少なくとも -1.8°C 以上であり、これが船体に捕捉されるまでどのくらい過冷却されるかは、水滴の大きさ、水温、水滴が大気中に存在している時間、気温および相対風速によつて決まる。

いま問題を簡単にするため真水について、次の仮定を設けて解いてみる。

(1) 水滴は球形とする。

(2) 水滴には蒸発も対流も起こらない、すなわち固体と同じであるとする。

どこでも一様な一定温度に保たれた媒質内における物体内の温度変化を考えるにあたり、もし物体内の熱伝導率と物体表面の熱伝達率が温度によつて変化しないものとすれば、外界温度を基準にして、それを 0°C になるように温度目盛をずらして考えて差支えない。いま、熱伝導によつて熱が流れつつある球に球座標を用い、内部の位置 r の、任意の時刻 t における温度が $\theta(r, t)$ で表わされ、球の内部や表面に発熱源がないものとすれば次の式が成り立つ。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{k^2}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) \quad (1.16)$$

この場合 $k^2 = \lambda/c\rho$ で温度伝導率、 λ , c , ρ はそれぞれ球の熱伝導率、比熱、密度である。

次に、球の表面の微小部分 s において、球の内部から外界へ向けて流れ出す熱量を考え、 n を s に垂直で、球の内部から外界へ向く座標、 $[\partial\theta/\partial n]_s$ はその方向の温度勾配の表面における値、球の表面部分の温度を $[\theta]_s$ 、外界の温度を 0°C とすれば次の式が成り立つ。

$$\left[\frac{\partial \theta}{\partial n} + h_r \theta \right]_s = 0 \quad (1.17)$$

この場合 $h_r = h/\lambda$ で相対熱伝達率、 h は球の表面の熱伝達率である。

また特定の時刻を時間の原点と考え、そのときの球の温度分布を $\Psi(r)$ とすれば

$$[\theta]_{t=0} = \Psi(r) \quad (1.18)$$

となる。

したがって水滴の温度変化は、(1.16)、(1.17)および(1.18)式の解として求めることができる。この場合2つの相対熱伝達率について水滴の温度変化を求めてみる。

(1) $h_r = \infty$ のとき

$h_r = \infty$ のときは熱伝達率が非常によく、水滴の表面の温度は外界温度に等しいとみられる場合で、水滴内の温度変化 θ は次の式で求めることができる。

$$\theta = \frac{2}{Rr} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{(kn\pi)^2 t}{R^2}} \sin \frac{n\pi r}{R} \int_0^R \Psi(r') \sin \frac{n\pi r'}{R} r' \alpha r' \quad (1.19)$$

この場合 R は水滴の半径である。

水滴が水面から飛び出す瞬間を時間の原点にとれば、 $[\theta]_{t=0} = \Psi(r) = \Psi_0 = \text{一定}$ として差支えなく、(1.19)式

は次のとおりとなる。

$$\theta = \psi_0 \frac{2R}{\pi r} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} e^{-\frac{(kn\pi)^2 t}{R^2}} \sin \frac{n\pi r}{R} \quad (1.20)$$

水滴の平均温度を $\bar{\theta}$ とすれば、 $\bar{\theta}$ は次の式で求めることができる。

$$\bar{\theta} = \frac{3}{4\pi R^3} \int_0^R 4\pi r^2 \theta dr \quad (1.21)$$

(1.20)式を(1.21)式に代入して $\bar{\theta}$ を求めれば

$$\bar{\theta} = \psi_0 \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-\frac{(kn\pi)^2 t}{R^2}} \quad (1.22)$$

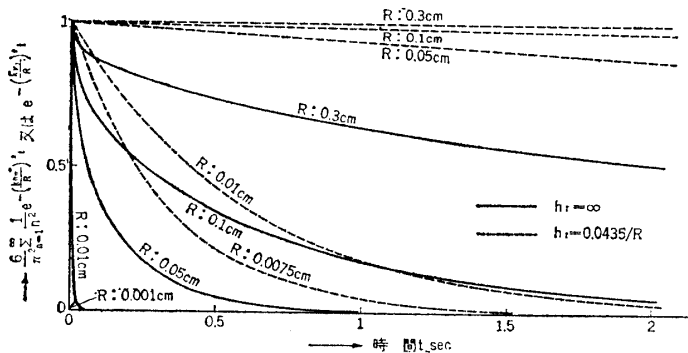
となる。

第1.2表 大気中における水滴の過冷却の計算に用いた水滴の大きさ

水滴の半径 cm	比重量	備考
0.001	1	霧粒の粒子の大きさ
0.01	1×10^3	
0.05	125×10^3	実船実験で実測した水滴の大きさの1例
0.1	1×10^6	
0.3	27×10^6	水滴が球形として存在できるほぼ最大の大きさ

さて、霧粒の粒径は数 $\mu \sim 100 \mu$ であるといわれている。また、田畑等⁶⁾が350トン型巡視船を用いて上甲板上で捕捉した飛沫の粒径は0.4~1.0mmぐらゐであり、霧粒の粒径に比べるとほぼ1桁大きい。一方水滴はある程度以上大きくなると球形としては存在できなくなり、その限度は直径約5mmといわれている。

以上のような観点から第1.2表に掲げた直径の水滴を選び、その温度の時間的変化を求めて第1.11図に実線で示してある。この場合 0°C の値を考へて $k^2 = 1.31 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$ とした。



第1.11図 水滴の過冷却、半径および相対熱伝達率ならびに大気中に存在している時間の関係

$$\theta = \frac{2}{Rr} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-k^2 p_n^2 t} \frac{R p_n^2 + (R h_r - 1)^2}{R^2 p_n^2 + R h_r (R h_r - 1)} \sin p_n r \int_0^R \Psi(r') \sin p_n r' \cdot r' dr' \quad (1.23)$$

ここで p_n は、 $R p \cot R p + (R h_r - 1) = 0$ の n 番目の正根である。 $h_r = \infty$ の場合と同様に時間の原点をとれば、(1.23)式は次のとおりとなる。

$$\theta = \psi_0 \frac{2 h_r}{r} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-k^2 p_n^2 t} \frac{R p_n^2 + (R h_r - 1)^2}{p_n^2 [R^2 p_n^2 + R h_r (R h_r - 1)]} \sin p_n R \cdot \sin p_n r \quad (1.24)$$

また水滴の平均温度 $\bar{\theta}$ も $h_r = \infty$ の場合と同様にして次の式から求めることができる。

$$\bar{\theta} = \psi_0 \frac{6 h_r}{R^3} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-k^2 p_n^2 t} \frac{R^2 p_n^2 + (R h_r - 1)^2}{p_n^4 [R^2 p_n^2 + R h_r (R h_r - 1)]} \sin p_n R (\sin p_n R - p_n R \cos p_n R) \quad (1.25)$$

なお h_r は次の式から求めることができる。

$$h_r = \frac{\lambda_a}{R \cdot \lambda_w}$$

この場合、 λ_a と λ_w はそれぞれ空気と水滴の熱伝導率で、 0°C における値をとれば $h_r = 0.0435/R$ となる。

もつとも、水滴が無風状態の空間に静止しているとしても、水滴と空気との間に温度差があれば自然対流が起り、水滴の相対熱伝達率のもつと大きくなるはずであるが、その量はきわめて僅かであると考えられるので、これを無視することにする。

また, $R\rho = \nu$, $Rh_r - 1 = c$ とおけば, $\nu \cot \nu + c = 0$ となり, $Rh_r = 0.0435$ とすれば $\nu_1 = 0.36$ となる。
したがって, (1.25)式で $n=1$ として $\bar{\theta}$ を求めると次のとおりとなる。

$$\bar{\theta} = \Psi_0 \times 0.963 e^{-k^2 \left(\frac{\nu_1}{R}\right)^2 t} \quad (1.27)$$

これをみると, $n=2$ 以下の各項を省略しても, それによつて生ずる誤差は僅かなので, (1.27)式を用い, 第 1.2 表に掲げた水滴について, 水滴の温度の時間的変化を求め第 1.11 図に破線で示してある。なお同図の縦軸 ν_1 は, (1.22)式の $\bar{\theta}/\Psi_0$, すなわち $6/\pi^2 \sum_{n=1}^{\infty} 1/n^2 e^{-\left(\frac{k n \pi}{R}\right)^2 t}$ と, (1.27)式の $\bar{\theta}/0.963 \Psi_0$, すなわち $e^{-k^2 \left(\frac{\nu_1}{R}\right)^2 t}$ をとつてある。この図から, 水滴の径が大きくなると水滴は急に過冷却されにくくなることわかる。

実船で水滴が船体に捕捉される場合は, おそらく水滴に相対風速が存在することも考えられるので, $0.0435/R < h_r < \infty$ となるであろう。

7 室内実験

これまで述べてきた理論的考察結果と室内における実験結果とを比較検討してみる。

(1) 実験の装置と種類

実験装置は, 北海道大学低温科学研究所の低温実験室内に設置されている風洞を用いたが, その概略を第 1.12 図に示す。

まず実験室内の気温を一定に保ち, (ホ)のプロペラを廻転して風を起こす。一方空気圧搾機からの圧搾空気と実験室内の水槽の水とを(イ)の噴霧器に導入し, これから水を風洞内に噴射して水滴を作り, これを風で吹き飛ばして(ロ)の試験片に凍着させた。(ロ)の位置に木製の枠を設置し, これに釘を打つて試験片を吊し, 釘の位置に A, B, C...と記号を付して試験片の取り付け位置を明らかにした。実験の後半に噴霧器と試験片の取り付け位置をそれぞれ(ハ), (ニ)に移動した。試験片として, 直径 10 mm, 長さ 250 mm の真鍮製中実丸棒 10 本を用い, これに 1 から 10 まで識別番号を付け, 試験用水として水道の水を用いた。

実験として, デッキガラスにツエダ油を塗布して水滴を捕捉し, これを顕微鏡写真にとつて水滴の大きさ, 数および重量ならびにその分布を求めた。

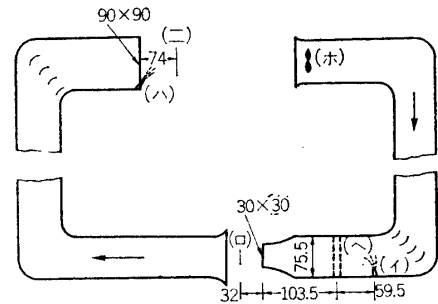
一方, 気温を -5°C から 5°C おきに -15°C まで, 風速を 5 m/sec から 5 m/sec おきに 20 m/sec まで変えて組合わせることを目標とし, 水滴をある程度まで凍着させ, 着氷の継続時間と着水量の関係を求め, 最後に着氷の形状を観察した。

(2) 実験結果とその検討

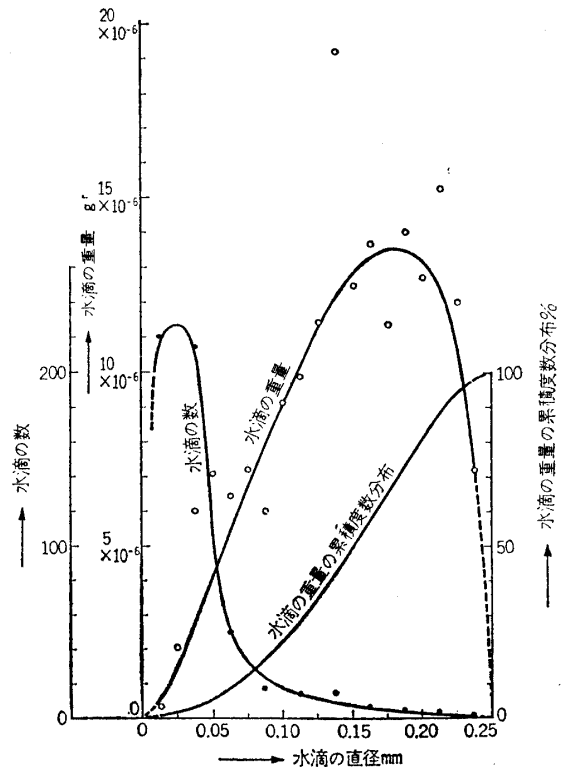
1) 水滴とその過冷却

捕捉した水滴の顕微鏡写真から, ある面積を任意に選び, その中に含まれている水滴の大きさと数を求め, その関係を図に示すと第 1.13 図のグラフ水滴の数のようになる。また, 水滴の大きさとその重量の関係を求めると, 同図のグラフ水滴の重量のようになる。この重量の累積度数分布を求めて水滴の平均直径を求めると 0.15 mm となる。

噴霧器に圧搾空気と水を導入して水滴を作るとき, 水



第 1.12 図 風洞の平面略図 (寸法単位 cm)
(イ) 噴霧器 (ロ) 試験片 (ハ) 噴霧器
(ニ) 試験片 (ホ) プロペラ (〜) 格子



第 1.13 図 水滴の大きさと数および重量の関係

槽からの水は噴霧器のノズルに達するまで自然に冷却され、噴射時に圧搾空気の断熱膨張のため熱を奪われてさらに温度が低下する。このため、ノズルの先にみるまに氷ができて水滴が出なくなることがある。そこで、気温に応じて水温を 3.4~9°C に保持し、一方ノズルの周囲にニクロム線を巻いてこれに電流を通して加熱し、この温度も調節してスムーズに水滴を発生させる必要があつた。したがって噴射された瞬間の水滴の温度は計測されていないが、一応 0°C と仮定する。一方、第 1.12 図に示してある噴霧器から試験片までの距離と実験時の風速、それに水滴の大きさとしていま求めた直径 0.15 mm を考え、前に述べた水滴の過冷却の理論を用いて水滴の温度変化を求めたり、J. R. Stallabrass と P. F. Hearty⁷⁾ が行なつた著者のような実験で、水温を 20°C および 40°C とした場合、着水量に差がないという結果を得ていることなどを参考にすると、水滴が試験片に捕捉されるときには気温まで過冷却されていたとして差支えないと考えられる。

2) 着氷の形

物体に凍着した着氷がどのような形に成長していくかは、着氷成長過程における瞬間瞬間の水滴の捕捉率、捕捉水量および熱伝達率に影響をおよぼし、ひいては全着水量を左右する重要な問題である。

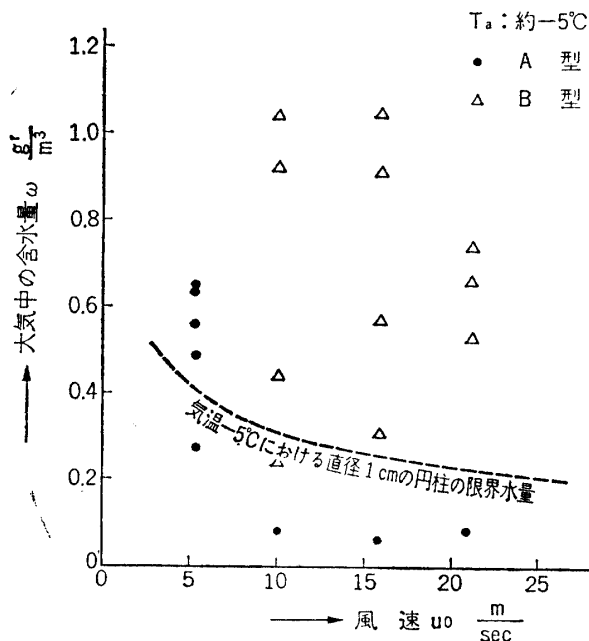
この実験結果を観ると、着氷にはいろいろの形があつて、その表面も比較的平滑であつたり、中には多くの凹凸が形成されることがあつたりして、仔細に観察すればいろいろの違いのあることに気が付くが、その横断面の形を大別するとおおよそ次の3つの型に分類することができる。

風上に向い三日月のような形に成長するもの、風上に向いベレー帽を被つたような形に成長するもの、それに風上に向い扇子を開いたような形に成長するもので、それぞれ A, B, C 型と名付け、その代表的な形を第 1.14 図に示す。

これらの形を決定する要素と根拠が何であるかはすこぶる難しい問題のようである。しかしながら、この実験で着氷の成長過程を観察している間に、捕捉された水滴が全部凍着する場合と、一部の水滴が凍着しきれない場合が認められた。とくに後者の場合で試験片を垂直に取り付けてあるときは、実験の途中から一部の水滴が試験片を伝わって落下しながら風下に吹き流されて凍着し、さらに一部の水滴は試験片から滴下したり、風で再び大気中に吹き飛ばされる場合があつた。また試験片を水平に取り付けてあるときは、やはり実験の途中から水滴の一部が試験片から少し垂れ下つて凍着する場合があつた。



第 1.14 図 着氷の型

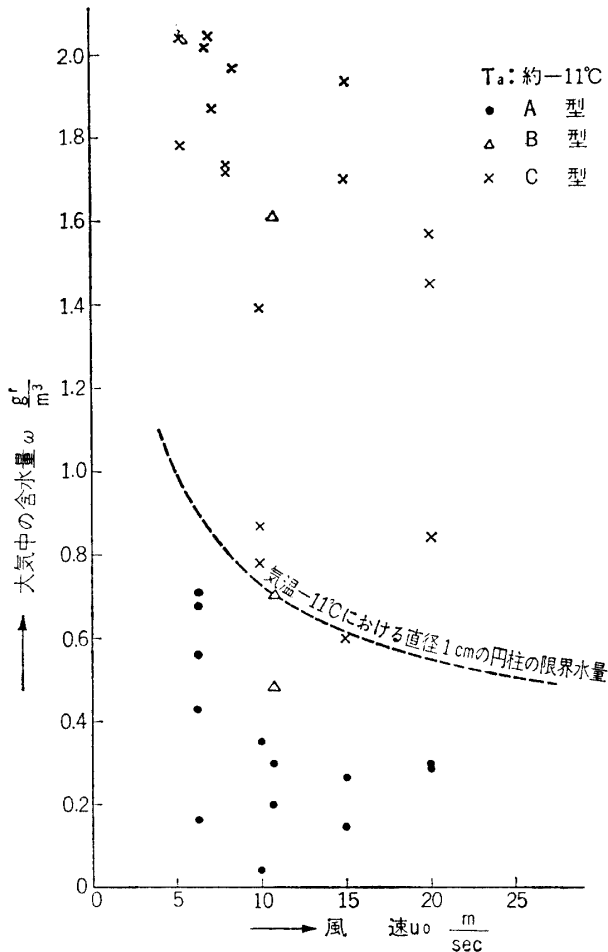


第 1.15 図 気温 -5°C 約における大気中の含水量、着氷の型および風速の関係

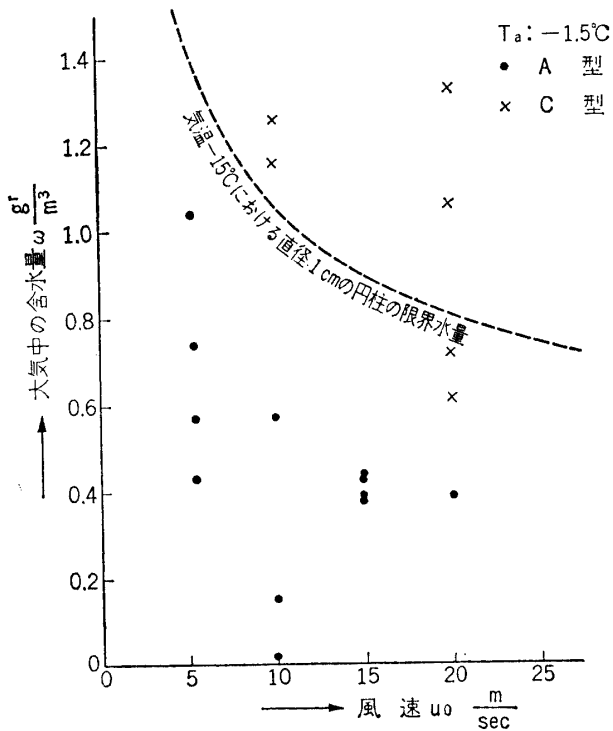
これらのことから、着氷の形の決定には限界水量と大気中の含水量の関係が影響していると思われる。そこで、実験を気温別に3つのグループに分け、着氷の型をそれぞれ試験時の風速と大気中の含水量に応じて描くと、第 1.15, 1.16, 1.17 図のようになる。図中の黒丸、三角および×印は、それぞれ、A, B, C 型を表わす。また破線で描いた曲線は、円柱の直径が 1 cm の場合について、第 1.15 図では -5°C, 第 1.16 図では -11°C, 第 1.17 図では -15°C の限界水量を示したものである。なお、この試験装置の欠点として、大気中の含水量を試験片の取り付け場所とは関係なく、全部一様に一定に調整することはできなかつた。そこで含水量は直接計測せずに、着氷が始まつてから 100 秒までは全捕捉水量が凍着し、その間捕捉率と円柱の直径は不変であると仮定して計算で求めた。

これらの図から、大気中の含水量が限界水量に満たない場合はおおむね A 型に、余剰水のある場合はおおむね B 型か C 型に着氷が成長することがわかる。しかし B 型と C 型の差が何によつて決まるかは、これだけの実験結果では判定することはできない。

このように限界水量曲線を境にして着氷の型がおお

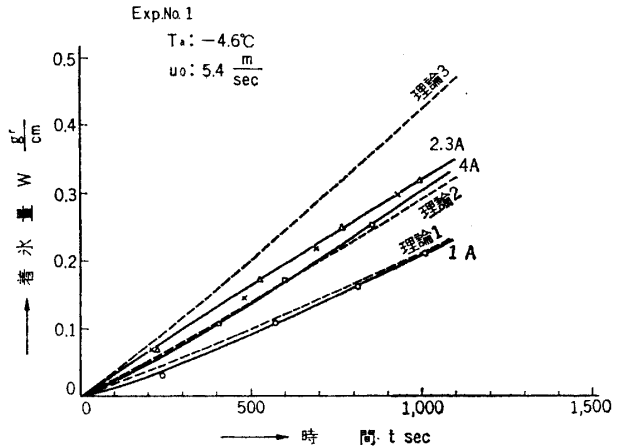


第 1.16 図 気温約 -11°C における大気中の含水量, 着氷の型および風速の関係

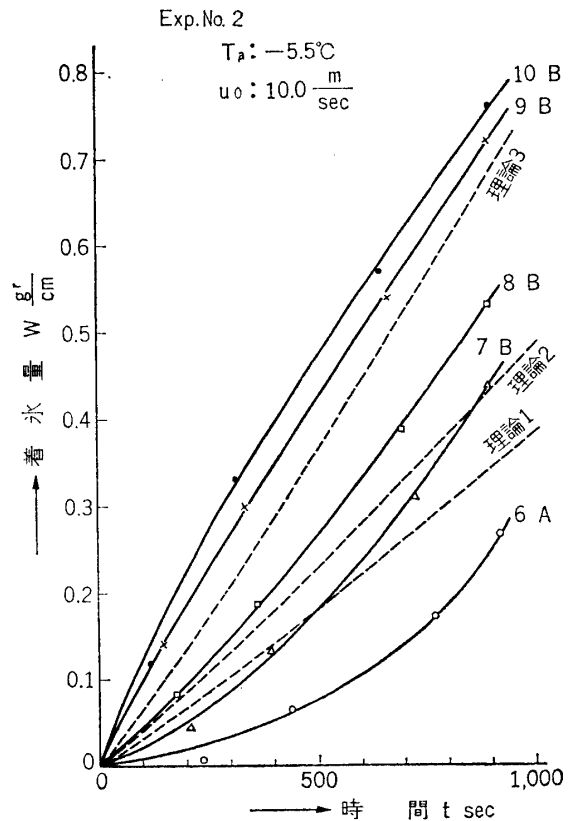


第 1.17 図 気温 -15°C における大気中の含水量, 着氷の型および風速の関係

よそ分類されるが, 中には順序が逆になっているものがみられるのは次のような点に原因があると思われる。すなわち, 実験時の気温が図の限界水量曲線の温度と必ずしも一致しなかつたこと, 直径 1cm 附近の円柱は非常に寸法効果が著しいこと, 着氷の成長は必ずしも同心円状ではないこと, それにこの限界水量曲線は円柱周囲の平均熱伝達率から求めたことなどである。



第 1.18 図 気温 -4.6°C , 風速 5.4 m/sec における直径 1cm の円柱の単位長さあたりの着氷量と時間の関係



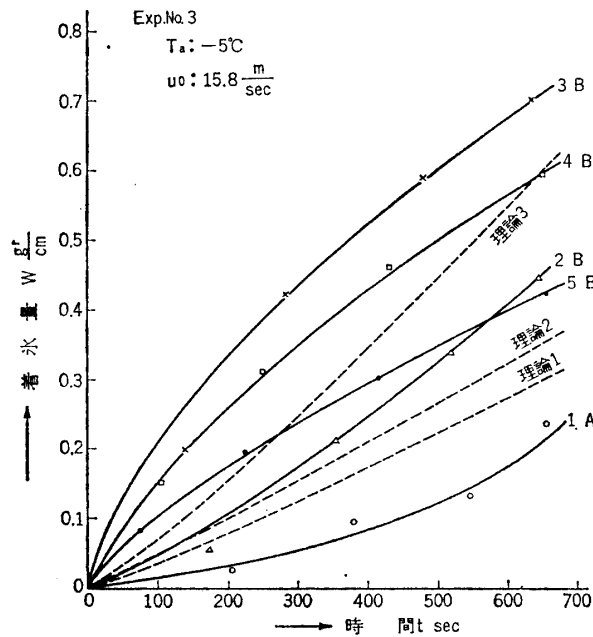
第 1.19 図 気温 -5.5°C , 風速 10.0 m/sec における直径 1cm の円柱の単位長さあたりの着氷量と時間の関係

3) 着水量

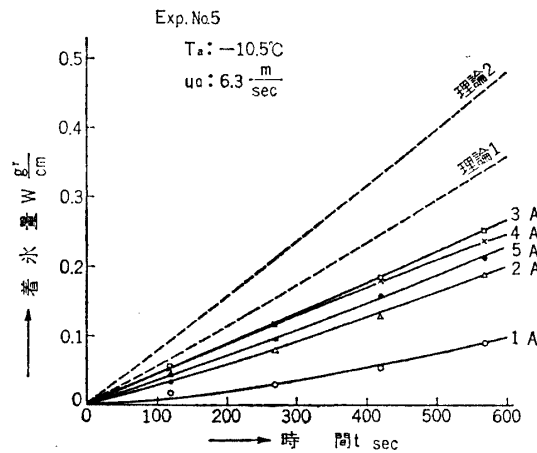
室内実験で得られた結果から、円柱の単位長さあたりの着水量の時間的変化の例を第 1.18~1.23 図に示す。これらの結果と前に説明した着氷の成長の理論計算結果とを対比して検討を進めてみる。

第 1.18~1.23 図の実線で描いたグラフは実験結果で、各グラフの番号は試験片の番号を、アルファベットは着氷の型を示したものである。また理論 1 のグラフは、円柱周囲の平均熱伝達率から、理論 2 のグラフは、円柱の風上側半円の平均熱伝達率から、理論 3 のグラフは、理論 1 の値を 2 倍にしてそれぞれ着水量を求めたものである。

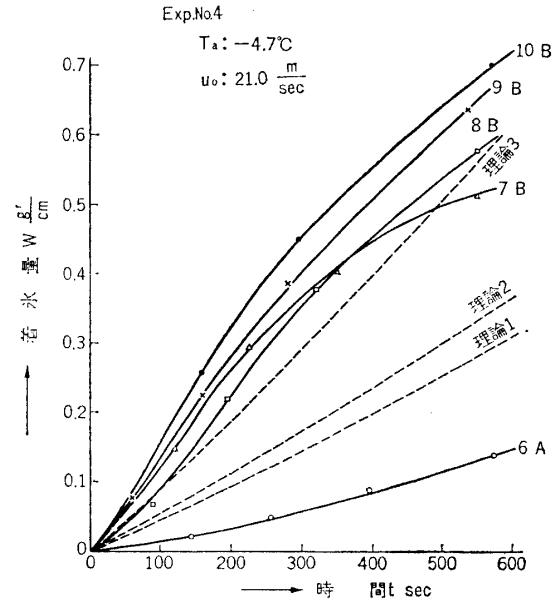
さきに述べたように、着氷の形には、円柱のほぼ風上側のみに成長する A および C 型と、風下側にまで成長する B 型とがあり、大気中の含水量が限界水量以下のときはおおむね A 型になった。一方第 1.1 図から推定されるように、円柱の直径が 1~2cm 附近では理論 2



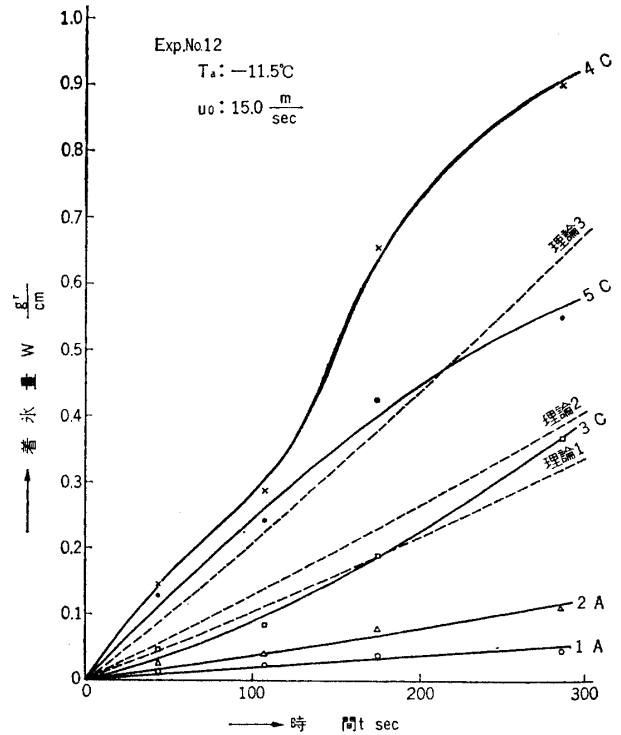
第 1.20 図 気温 -5.0°C 、風速 15.8 m/sec における直径 1 cm の円柱の単位長さあたりの着水量と時間の関係



第 1.22 図 気温 -10.5°C 、風速 6.3 m/sec における直径 1 cm の円柱の単位長さあたりの着水量と時間の関係



第 1.21 図 気温 -4.7°C 、風速 21.0 m/sec における直径 1 cm の円柱の単位長さあたりの着水量と時間の関係



第 1.23 図 気温 -11.5°C 、風速 15.0 m/sec における直径 1 cm の円柱の単位長さあたりの着水量と時間の関係

の方が理論1より大きい値となる。したがって、大気中の含水量が限界水量以下のときは、実験値は理論2より小さく、限界水量をこえているときは、実験値は理論2と3の間に入るはずである。しかし余剰水効果を考慮すれば、実験値が理論3より大きい値をとることも充分ありうるわけである。

以下個々の実験例について説明を加える。

実験番号 1: 第 1.18 図

着氷の形はすべてA型である。試験片1では大気中の含水量が限界水量より大分少なかったと考えられ、着氷量は理論2よりはるかに少ない。その他の試験片では、大気中の含水量はほぼ限界水量に近いが、やや多かったものと考えられ、着氷量は理論2と3の間にある。

そして着氷量の増加の傾向は、実験値と理論値とがよく一致している。

実験番号 2: 第 1.19 図

着氷の形は試験片6のみA型で、他はすべてB型である。試験片6では大気中の含水量が限界水量以下であったと考えられ、着氷量は理論1よりも少ない。他の試験片では大気中の含水量が限界水量をこえていたと考えられ、試験片8の着氷量は理論2と3の間にある。試験片9と10の着氷量は理論3よりやや多いが、この理由として余剰水効果を第一に挙げることができ、一部の余剰水は試験片の下端から垂れ下つて凍着した。別にこれはすべての実験番号についていえることであるが、着氷量の時間的変化を求めるため、試験の途中で4回試験片を取り外して重量を計測したが、その間に水滴は全く捕捉されず、試験片から滴下もしくは風で吹き飛ばされるべき一部の余剰水は主に熱伝達によつて熱を奪われ凍着してしまつたことにも多少原因がある。また、実験開始直後わずかの間は、気温まで冷却した試験片に水滴が捕捉されるため、試験片の内部にも熱伝導によつて一部の熱が奪われたことも挙げることができる。

実験番号 3: 第 1.20 図

着氷の形は試験片1のみA型で、他はすべてB型である。試験片1では大気中の含水量が限界水量以下であったと考えられ、着氷量は理論1よりも少ない。試験片2では、実験の初期には大気中の含水量が限界水量にほぼ近かつたものと思われ、着氷量は理論2に近い。それが着氷の成長のため円柱の径が大きくなるにつれ捕捉水量が増す一方、寸法効果のため平均熱伝達率が減じて余剰水が生じ、これが風のため試験片の風下側に流され、さらに重力のため試験片を伝わつて落下しながら凍着し、最終的には理論2と3の間の着氷量となつたものと説明されよう。

その他の試験片ではいずれも大気中の含水量が限界水量よりはるかに多かつたものと考えられ、中でも試験片3では、実験の途中から余剰水の一部が風のため再び大気中に吹き飛ばされる現象が観察された。この試験片の着氷量が理論3より大分多い第一の理由として余剰水効果を挙げることができる。

実験番号 4: 第 1.21 図

着氷の形は試験片6のみA型で、他はすべてB型である。試験片6では大気中の含水量が限界水量以下であったと考えられ、着氷量は理論1よりも少ない。その他の試験片ではいずれも大気中の含水量は限界水量をこえていたと考えられ、実験の途中から余剰水の一部が風のため再び大気中に吹き飛ばされるのが観察された。そして大部分の着氷量は理論より相当多く、その理由としてはやはり余剰水効果が考えられる。

実験番号 5: 第 1.22 図

着氷の形はすべてA型で、大気中の含水量はいずれも限界水量以下であつたと考えられ、着氷量は理論1よりも少ない。そして着氷量の増加の傾向は理論値とよく似ている。

実験番号 12: 第 1.23 図

着氷の形は、試験片1と2がA型で、他はすべてC型である。試験片1, 2, 3では大気中の含水量が限界水量以下であつたと考えられ、着氷量は理論2より少ない。試験片4では大気中の含水量が限界水量をこえていたと考えられ、着氷量は理論3よりはるかに多いが、おそらく余剰水効果の他に着氷の形も影響しているのかもしれない。試験片5の着氷量に比べ、形が同じC型でありながら、実験開始後120秒くらいから急に増加し始めた理由はよくわからないが、実験終了後の両試験片の横断面を比較すると第1.24図のとおりで、円柱の中心から扇形状に風上に向つて開く角度が、試験片4の方が5よりはるかに大きく、この角度が双方最初はほぼ等しかつたものが、何



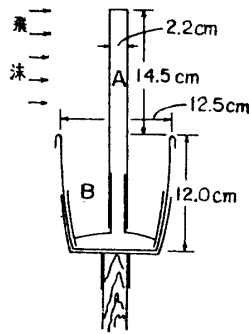
第 1.24 図 着氷の横断面の比較

等かの原因で実験開始後120秒ぐらいから余剰水が風で風下に流され始め、着氷量が急に増加したのではないだろうか。

以上、実験結果の数例を掲げたが、熱伝達の理論に限界水量と余剰水効果の概念をとり入れることにより、着氷量の時間的変化をかなりよく説明することができる。

8 実船実験

船舶に対する着氷の実態を調査するため、1960年から毎冬4回にわたり、巡視船などを用いて実船実験を行なった。この実験で小野⁹⁾は、1962年と1963年に350トン型巡視船に着氷計を取り付け、飛んで来る水滴を捕捉してこれを分析し、着氷量の大部分は海水の飛沫の凍着によるものであることを確かめ、一方着氷計に捕捉された水量の何パーセントが凍着したかを各実験時の平均気温、平均風速、平均水温それに着氷の形などと共に観測した結果を発表している。



第1.25図 着氷計

小野の用いた着氷計は大略第1.25図に示すとおりである。図中Aは飛沫を捕捉する丸棒で、熱容量を小さくするために低圧法ポリエチレン(ハイゼックス)で作られている。またBは流れ落ちたブラインを溜める容器である。棒Aについての着氷量と容器Bに溜ったブライン量との和を捕捉した飛沫量とし、これに対する着氷の重量の割合を着氷率と呼んでいる。なおこの着氷計は、上甲板上における船首から約10m後方の点で、甲板の上方約1.8mのところに取り付けてある。

この装置を用いて小野の計測した結果を第1.3表に掲げてある。この表の着氷率と着氷の形についてこれまで求めて来た理論と室内実験結果に基づいて検討してみることにする。

先づ、次の式から大気中の平均含水量を求めて第1.3表に掲げてある。

$$\omega = \frac{W_w}{\alpha l D_{cut}} \quad (1.28)$$

この場合水滴の径は求められていないので α は便宜上1と仮定し、 u は平均風速、 t は測定期間、 l は14.5cmとした。

さて、船首で飛沫が大気中に飛び出したとすれば、これが着氷計に達するまで約1秒前後を要したと思われる。そこで水滴は気温まで過冷却されていたと仮定し、第1.2, 1.3, 1.4図を用い、直径2.2cmの円柱に対す

第1.3表 実船実験と理論で求めた着氷率の比較

実験番号	測定期間	着氷量 g./h.	飛沫量 W _w g./h.	着氷率 %	着氷の形 および型	平均気温 °C	平均水温 °C	平均風速 u m/sec	大気中の 含水量 w g./m ³	限界水量 W _c g./m ³	w/w %	2w/w %	限界水量 W _c g./m ³	w _c /Aw %
1	15日 時 13.75~16	15.6	20.0	78	○ A	-5.8	+2.0	9.0	0.19	0.27	142	—	0.33	175
2	16 ~ 20	22.5	27.5	82	○ A	-6.6	+1.4	11.6	0.21	0.29	138	—	0.35	151
3	20 ~ 0	26.3	248.8	11	☉	-6.6	+0.1	15.6	1.39	0.25	18	36	0.29	21
4	16日 時 0 ~ 4	85.0	132.5	64	● B	-9.8	-0.9	15.5	0.75	0.40	53	106	0.46	62
5	4 ~ 7	1.7	1.7	100	○ A	-12.6	-1.3	13.1	0.01	0.56	5600	—	0.66	6610
6	14 ~ 16	15.0	15.0	100	○ A	-11.4	-0.8	10.3	0.13	0.56	432	—	0.67	517
7	16~18.17	43.8	48.4	90	○ A	-12.7	-1.0	11.3	0.37	0.60	162	—	0.71	193
8	17日 時 2 ~ 4	195.0	330.0	59	● B	-7.2	+0.5	15.4	1.87	0.28	15	30	0.32	17
9	4 ~ 7.17	105.7	235.0	45	● B	-6.9	+1.5	12.2	1.68	0.30	18	36	0.36	21
10	9日 時 15.4~22	7.5	124.6	6	○ B	-1.0	+1.5	10.5	1.03	0.03	3	6	0.04	4
11	22 ~ 0	26.2	132.3	20	○ B	-2.0	-0.4	9.7	1.19	0.08	7	14	0.10	8
12	10日 時 0 ~ 4	18.1	100.3	18	○ B	-2.0	-0.1	10.2	0.86	0.08	9	18	0.10	11
13	4 ~ 12	54.9	177.0	31	● B	-3.5	+2.4	12.0	1.29	0.14	11	22	0.17	13
14	12 ~ 16	89.1	247.6	36	● B	-5.7	+1.0	15.5	1.39	0.22	16	32	0.26	18

註 実験番号1~9は1962年の成績、実験番号10~14は1963年の成績である

る実験時の平均風速と平均気温における限界水量 ω_c を求めて第 1.3 表に掲げてある。一方第 1.1 図に示してある円柱の風上側半円だけの平均熱伝達率を用いて、各実験時の限界水量 ω_c' も求めて第 1.3 表に掲げてある。

この表から、 $\omega \leq \omega_c'$ のときは、着氷率は 100 パーセントで着氷の形は A 型となり、 $\omega > \omega_c'$ のときは、着氷率は $\omega_c'/\omega \times 100$ と $2\omega_c/\omega \times 100$ の間の値となり、着氷の形は B か C 型となることが考えられる。 $\omega_c'/\omega \times 100$ と $2\omega_c/\omega \times 100$ はいわば理論着氷率で、この値が 100 以上のものは勿論 100 と解すべきである。これらの値を $\omega_c/\omega \times 100$ の値と共に第 1.3 表に掲げてある。

次に小野の求めた着氷率と理論着氷率を比較検討し、あわせて着氷の形を観察してみる。

実験番号 1, 2, 5, 6, 7 では着氷率は 78~100 であるが、 $\omega_c'/\omega \times 100$ の値は 100 以上となつている。海水の飛沫には塩分が含まれているため、全捕捉水量が完全に凍りきることはない。しかるに実験番号 5 と 6 では着氷率が 100 で、一方 $\omega_c'/\omega \times 100$ の値も 100 をこえて相当大きいことから、捕捉水量は瞬時に凍結したものと考えられ、このような場合はおそらくブラインは純氷の中に閉じ込められて着氷率が 100 となつたものであろう。実験番号 1, 2, 7 で着氷率が 100 未満であるにもかかわらず $\omega_c'/\omega \times 100$ が 100 以上となつたのは、ブラインのためもあるが、平均風速や平均気温を用い、水滴が気温まで過冷却していたと仮定したほか、飛沫量が測定期間中平均して飛んで来たことと仮定し、さらに着氷によつて着氷計の丸棒の径が不変として限界水量を求めたことにあると思われる。

一般に、洋上で船舶の浴びる飛沫は断続的に飛んで来る場合が多いことを考えると、ある瞬間の飛沫量は限界水量をはるかにこえており、またある時は飛沫量が零で、着氷棒の余剰水はこれを伝わつてたれ落ちてくる途中で凍着することもあつたと考えられる。

以上のような種々の因子が積み重なつて計測値と理論値に差が生じたものと考えられる。このことは他の実験結果についてもいえることである。

なお、以上 5 個の着氷の形は、室内実験結果で分類した A 型に相当し、大気中の含水量が限界水量以下の場合には着氷が A 型に成長した室内実験結果とよく一致している。

つぎに、着氷率が $2\omega_c/\omega \times 100$ より大きい例として実験番号 8, 9, 11, 13, 14 を検討してみる。これらの実験では着氷棒の風下側にも水滴が凍着し、とくに実験番号 11 を除いては、ほぼ着氷棒の全周が氷に包まれている。

したがつて、着氷率は $\omega_c'/\omega \times 100$ と $2\omega_c/\omega \times 100$ の間に入るはずであるが、実際には $2\omega_c/\omega \times 100$ よりも大きい値となつている。この第一の理由として余剰水効果が考えられる。もつとも、室内実験の実験番号 3 と 4 で、実験の途中から風のため一部の余剰水が再び大気中に吹き飛ばされる現象が観察されたが、その時の気温と風速ならびに着氷の形を、実船実験のこれらの実験番号の場合と比較すると、後者の場合も一部の余剰水が風のため吹き飛ばされたこともありうると思われる。もしそうであつたとすれば、飛沫量をもつと多く、したがつて着氷率はもつと減少して理論値に近くなるはずである。しかし、前に述べたように着氷による寸法効果を見捨て理論値を求めているため、真の着氷率がこの表の値より必ずしも小さかつたと断定することはできない。

また、これらの着氷の形はすべて B 型で、余剰水があれば B か C 型に成長した室内実験結果とよく一致している。もつとも C 型は全く見られないが、その理由はよくわからない。

実験番号 10 と 12 の着氷率は理論値とよく一致しており、着氷の形も B 型である。

実験番号 3 の着氷率は理論値より小さく、しかも着氷の形が着氷棒の風下側に成長した翼型である。如何なる条件のとき着氷がこのような形に成長するか不詳である。

以上のとおりで、実船実験で求めた着氷率は、限界水量をもとにして求めた理論着氷率に余剰水効果を考慮することによつて比較的よく説明することができる。また着氷の形も、室内実験結果の場合と同様に、限界水量を境として A 型と B 型に分類されることがわかつた。

文 献

- 1) 今井一郎：物体による気流中の微粒子の捕捉（着氷の物理）気象集誌第 2 輯第 99 巻第 6 号（昭和 16 年）、p. 222
- 2) 甲藤好郎：伝熱概論第 2 版、株式会社養賢堂（1966）、p. 148
- 3) 甲藤好郎：伝熱概論第 2 版、株式会社養賢堂（1966）、p. 153
- 4), 5) M. Fishenden & O. A. Saunders An Introduction to Heat Transfer, Oxford (1961), p. 130

- 6) 海上保安庁船舶技術部：巡視船ちとせの着氷試験成績，附録 巡視船ゆうばりの着氷予備試験成績（昭和38年），p.43
 - 7) J. R. Stallabrass & P. F. Hearty : The Icing of Cylinders in Conditions of Simulated Freezing Sea Spray National Research Council of Canada (1967), p. 8
 - 8) 小野延雄：船体着氷に関する研究Ⅱ，着氷条件と着氷量について，低温科学物理篇 22（昭和39年）p. 172~174
-