



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	船体着氷に関する研究 Ⅰ
Author(s)	田畑, 忠司; TABATA, Tadashi; 岩田, 秀一 他
Citation	低温科学. 物理篇, 21, 173-221
Issue Date	1963-03-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18003
Type	departmental bulletin paper
File Information	21_p173-221.pdf



船体着氷に関する研究 I*

田畑忠司

(低温科学研究所 海洋学部門)

岩田秀一

(海上保安庁 船舶技術部)

小野延雄

(低温科学研究所 海洋学部門)

(昭和 37 年 10 月受理)

I. ま え が き

冬期、北洋を航行する船舶では海水の飛沫などが船体に凍着して、所謂、「着氷」現象がおこる。そのため船上の諸作業に障害を生ずるばかりでなく、その復原性能が著るしく損われ時には転覆に到る場合があることが、これまでしばしば報告されている。

船体に対する着氷の原因としては次の三つの因子が考えられる。

- 1) 降雪による着氷
- 2) 過冷却した霧粒や雨滴などの凍着による着氷
- 3) 海水の飛沫の凍着による着氷

この中で雪は風で吹き飛ばされることが多く、しかも密度も小さい。またわが国の周辺の北洋では過冷却水滴による霧の発生頻度が少ないであろうと云われている。実際に巡視船の着氷報告を検討しても、冬季間に霧が発生した資料はないし、実船による着氷試験のときにも霧は発生しなかった。

それゆえ、雪や霧は船体の着氷上あまり重要視する必要がないと考えられる。したがって海水の飛沫が船体に凍着して生ずる氷が船体に危害を与える最も重要な因子となる。

着氷は今に始まったものではないことは勿論であるが、わが国においてはほとんどこの問題について調査も研究も進められず今日に到ったことは、四面に海を繞らし、自ら海運、漁業造船国の誇りを持つわが国としては、むしろ不思議なくらいである。

北海道の近海でも、確かに着氷のために安定性を失って転覆したと推定される漁船が、この数年間に幾隻もある。外国においても、トロール漁船^{1),2)}や海軍の小型艇³⁾がこの犠牲となった例が見受けられる。それにも拘わらず今までには自然の状態で起こった船体の着氷につい

* 北海道大学低温科学研究所業績 第 640 号

て、着氷を生ずる諸条件および着氷量とその分布、着氷と船体の安定性能の関係などについて詳しく研究された例はなかった。わずかに、模型船に着氷せしめる一連の実験⁴⁾が行なわれているにすぎない。

この恐ろしい現象を経験した船員は古米沢山あったに違いない。しかし限られた水域に限られた季節におこる現象なので、船に与える影響としては、風、波あるいは操舵等の外力に比べて遙かに一般性に乏しいことが今日までその研究、調査が取り残されていた理由かも知れない。また、たとえ着氷のために船が転覆しても生存者の残らないのが普通で、事故の顛末が不詳に終り、原因不明の、あるいは行方不明の海難として葬り去られたに違いない。

着氷が船舶に及ぼす影響としては、操縦性や推進性の変化および艤装上いろいろな不都合を来すこと等が考えられるが、もっとも重要なものは復原性能の劣化であろうと考えられる。

筆者等は例を巡視船にとって、古いソビエト船級協会の着氷基準⁵⁾や、1960年ロンドンで開催された「海上における人命の安全のための国際条約」の改正会議にソ連の提案した着氷の基準に拠り、着氷が船体の復原力に与える影響の検討を試みた。また巡視船の着氷報告中、多量の着氷をみたものについて、その報告を基にして復原力の着氷による変化を試算⁶⁾したり、いろいろ検討を試みた。その結果着氷が復原力に与える影響は看過出来ないものがあると思惟されるに至った。

そこで、1960、1961、1962年の1~2月に巡視船と漁船を用いて着氷の実態調査を行なった⁷⁾。

この研究の目的は、船体着氷の実態を明らかにすることにある。更にその結果にもとづいて着氷を考慮に入れた復原性能の基準を確立し、一方その防除対策も検討して、船舶の設計・運用上の参考に供し、冬期北洋における船舶の海難防止と乗員の除氷作業を軽減することにある。

また、着氷現象を生ずるときの気象、海象の諸条件を明らかにするために、数年前から巡視船が行動中に経験した着氷の報告を蒐集して来たが、昨年度から一定の様式を定めてこの報告の蒐集整理に努めることにした⁸⁾。

この間に北海道大学低温科学研究所において、塗料及び他の方法による着氷防除効果に関する基礎研究が行なわれ、その一部は実船による着氷試験の際に試用された⁹⁾。

本報告は、これらのうち、これまで行なって来た実船による着氷試験の結果とそれに基づいて得られた巡視船の着氷基準について述べたものである。

II. 試験船による着氷の観測の概要

実船による着氷試験を、第1表に示したように、1960、1961、1962年の冬季に毎年同型の海上保安庁の巡視船(350総屯)を用いて行なった⁷⁾。1961年の試験では、船種、船型の違いによる着氷の相違もしらべるために、350屯型巡視船のほかに巡視船つがる(811総屯)および漁

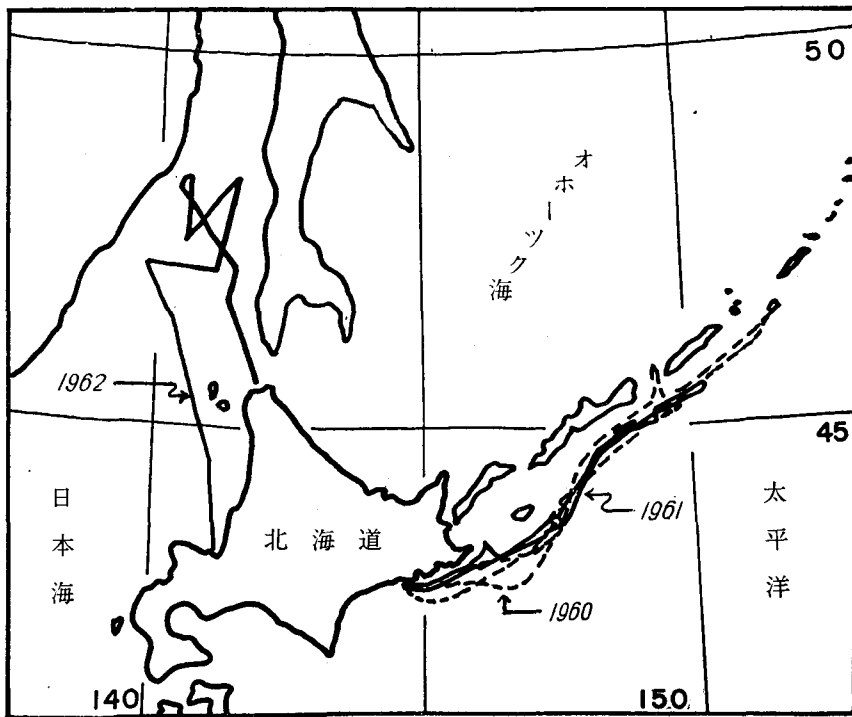
船第六弥彦丸 (74 総吨) も用いた。これらの3年間にわたる試験海面は第1図に示したとおりである。

各試験船は第1図に示した海面を3~5日間行動し、適当な量だけ着氷したのちなるべく氷を落さないようにして港に帰った。航海中は毎正時毎に気温・水温その他の気象・海象状

第1表 試験船の要目・試験期日

船名	用途	そらち 巡視船 鋼	つがる 巡視船 鋼	ゆうばり 巡視船 鋼	第六弥彦丸 漁船 木(甲板室は鋼)	ちとせ 巡視船 鋼
長さ	(m)	Lpp 45.00	Lpp 72.50	Lpp 45.00	24.94	Lpp 45.00
幅	(m)	7.30	9.10	7.30	5.03	7.30
深さ	(m)	4.10	5.34	4.10	2.49	4.10
総吨数		326.17	811.49	326.92	73.84	316.13
1/3消費排水量		421.44	986.84	420.56	139.33*	407.20
ディーゼル主機	(IP)	700×2	2100×2	700×2	270×1	700×2
試験期日		1960.1月29日 ~2月8日	1961.1月20日 ~29日	同 左	同 左	1962.1月15日 ~19日

* 冬期満載出港状態



第1図 着氷試験船の行動海面

況の観測を行なった。着氷がはじまってからは4時間毎に船体各部の着氷状況を写真撮影した。1961年に「ゆうばり」、1962年に「ちとせ」で毎4時間毎に凍着した氷の上に紙、ビニールテープなどを凍着せしめて1時間あたりの着氷量を求めた。

また、1962年に「ちとせ」で着氷の成長速度、しぶきの量と着氷量との比、着氷の塩分などを測定するために特に設置した円形断面の着氷計による観測も行なった。

帰港後には、船体各部分の着氷の厚さ、氷の密度の計測を行なった。着氷の重量と重心を求めるためには、1960年の「そらち」と1961年の「ゆうばり」、「第六弥彦丸」では着氷時および除氷後の重心試験、船体の固有横揺れ周期の測定を行なった。この測定にあたっては船内の水・油その他の装備を出港時の状態に復したことは云うまでもない。しかし、冬期のこととて港内にはいくらかの波があり、しかも薄い蓮葉状の海水があったりして、船体の吃水および固有横揺れ周期などの精密測定を行なうのは極めて困難であった。そのために「ゆうばり」、「第六弥彦丸」および「ちとせ」では着氷の重量の実測を行なった。すなわち、凍着した氷を船体の各部分毎に小区分し、氷を船体から除去しながらその重量を実測すると共に、除氷した氷の位置と重量から上下および前後の氷の重心も求めた。着氷の防除乃至は着氷除去を容易にするための塗料などの試験も「ゆうばり」、「ちとせ」で行なった。

試験中に船体各部に凍着した着氷の写真を論文末尾の図版に示した。また1961、1962年の試験の際の気象・海象状況については論文末尾の第2図(a),(b)に示してある。

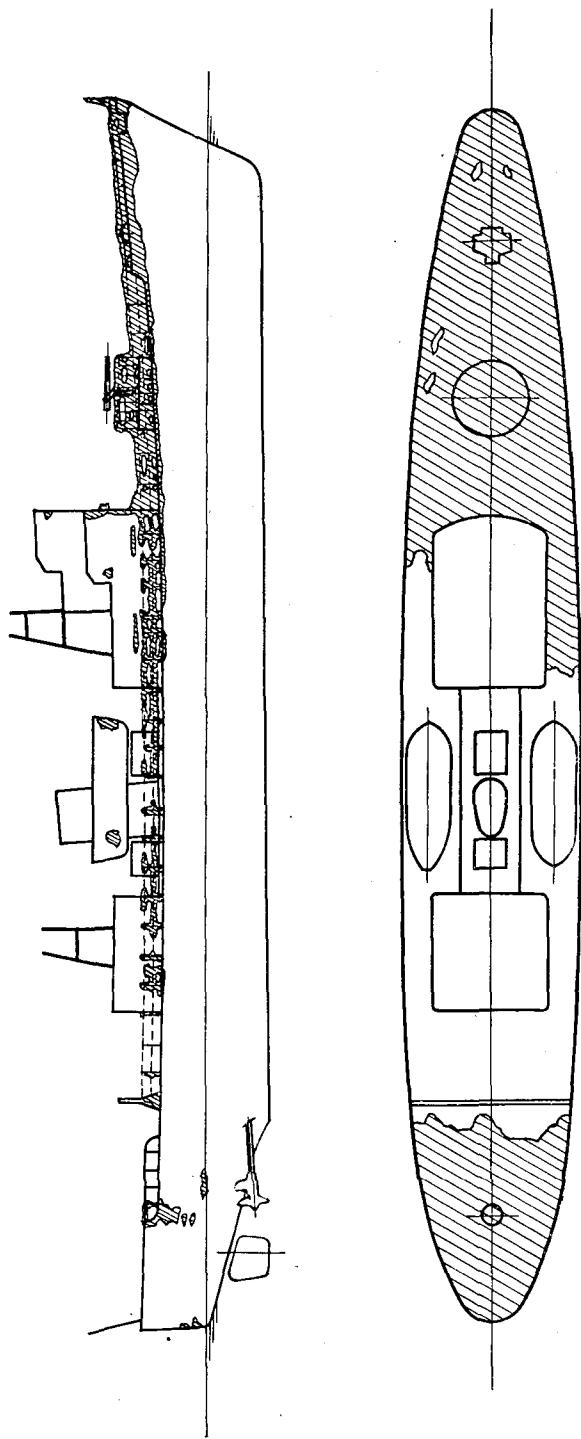
III. 着氷の分布と氷の厚さ

船体に凍着する氷は船体の各部分に一樣に分布するものではない。航海時の波やうねりの方向と高さ、波長、気温、風向、風速およびそれらに対する船首方位と船速の関係によることとなる。また船体の形状、大きさ、各種艤装品、上部構造によってもちがう。しかし、一般には船体の波または風の方向に面している部分に多く着氷する。

この試験においては、同型の船を用い、しかもできるだけ着氷しやすいようにして航海した。よく知られているように、他の条件が同じならば、風または波に逆って航海しているときに着氷がおこりやすく、しかも氷は船体の前半部につきやすい。そのために本試験では船体の前半分に着いた氷が多く、船首吃水が増加した。

1961年の試験の際に「ゆうばり」に凍着した氷の分布範囲を第3図に示した。すでに述べたように、着氷時の航海の方法と船型がほとんど同じであったために「そらち」、「ちとせ」の着氷分布も第3図とほぼ似たものであった。1961年の「第六弥彦丸」の着氷分布は第4図に示してある。

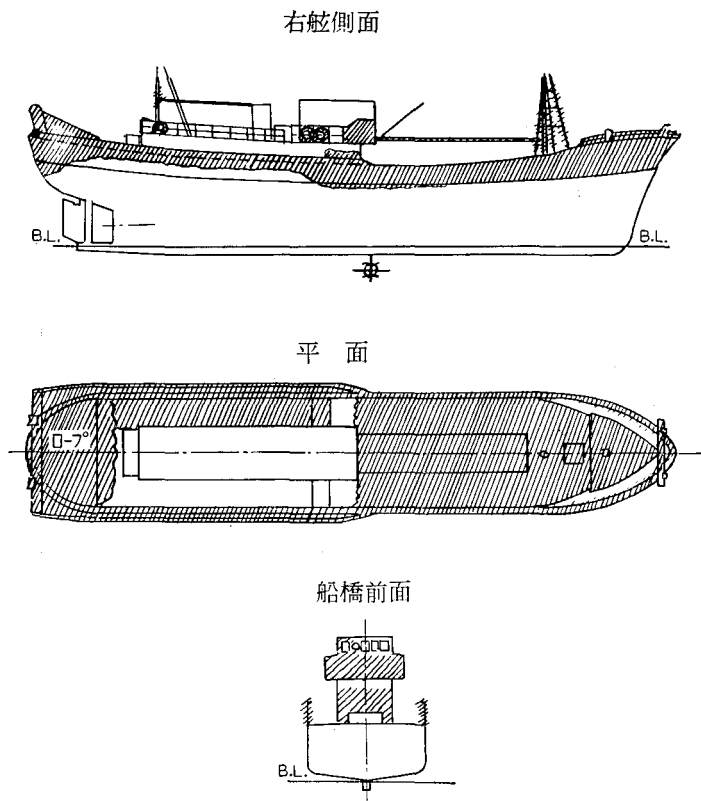
「つがる」ではハンドレールと船首樓甲板および中央部上甲板上の艤装品に僅かに着氷ただけで、その量も「ゆうばり」の着氷量の僅か1/10にすぎなかった。ただしこの船は試験の途中で海難船の救助のために船列を離れてしまった。そのため、「ゆうばり」、「第六弥彦丸」



第3図 巡視船「ゆうばり」の着氷範囲 (1961)

と同時海面における同時行動とは見做されず、着氷量も他の試験船とこのままの値で比較することはできないが、たとえ同じ海域を航海したとしても「ゆうばり」に較べて着氷量が著しく少ないであろう。

「ちとせ」および「ゆうばり」のハンドレールその他の部分の着氷の厚さは、「ちとせ」級の巡視船では上甲板には8~12 cmの厚さ、上甲板上の種々の器物には5~20 cmの厚さに着氷した。またハンドレールおよび上甲板に張り渡したロープなどには直径15~35 cmの太さに着氷した。これらの着氷のために船体の風圧を受ける側面積が増加したが、その点についてはのちに述べる。



第4図 第六弥彦丸の着氷範囲(1961).

IV. 着氷の重量と重心

試験船に凍着した着氷の重量と重心は次の諸方法で求めた。

§1 重心試験による測定

着氷時と除氷時に重心試験を行なって、船の吃水すなわち排水量の差から氷の重量を求め船の上下の重心の差から氷の上下の重心を、トリムの差から前後の重心を求める方法である。

この方法は、一般に不明重量とその重心を求める方法と全く同一で、高い精度で重心試験が施行できれば問題はない。

しかし、何分厳冬の試験のこととて、成功するか否かは一つに港の状況と気象海象の如何によるし、着氷量の少ない場合はややもすると氷の重心査定に大きい誤差を伴う危険がある。その他にも、除氷前後のトリムの変化や、吃水計測の精度にも問題がある。

「そらち」と「ゆうばり」についてはこの方法を用い、その結果は第3表に示してあるが充分な精度は得られなかった。

§2 動揺周期の変化から求めた着氷の重心

「そらち」では重心試験によって着氷量とその重心を求めたのであるが、その精度を別の角度から検討するため、着氷時と除氷時の横揺周期の変化から氷の重心を求める方法も試みた。ただし、この場合氷の横方向の重心が不明なので、三つの場合を仮定して求めた。

いま、 W : 除氷時の船の排水量 (吨),

G_0 : 除氷時の船の重心,

w : 着氷の重量 (吨),

h : G_0 と着氷の重心との垂直距離 (m),

b : 着氷が船体の中心面に関して対称に氷着していると見做したときの片舷についた氷の重心と船の中心面の水平距離,

G : 着氷時の船の重心,

l : 着氷の重心と G との距離 (m),

k_0 : 除氷時の船の環動半径 (m),

k : 着氷時の船の環動半径 (m),

α : 着氷に原因する吃水変化による船の慣性モーメントの変化量 (吨・m²)

とすれば

$$\left. \begin{aligned} (W+w)k^2 &= Wk_0^2 + W \cdot \overline{GG_0} + wl^2 + \alpha, \\ G_0G &= hw/W+w, \\ l^2 &= (h - \overline{G_0G})^2 + b^2 = \left(h - \frac{hw}{W+w} \right)^2 + b^2 = \left(\frac{Wh}{W+w} \right)^2 + b^2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

であるから

$$h^2 = \{(W+w)k^2 - Wk_0^2 - wb^2 - \alpha\} \frac{W+w}{Ww} \quad (2)$$

が得られる。

一方、 T_0 、 T をそれぞれ除氷、着氷時の横揺周期、 G_0M 、 GM をそれぞれ除氷、着氷時のメタセンターの高さ、 K を船の基線とすれば

$$\left. \begin{aligned} k_0^2 &= \frac{T_0^2}{2.01^2} G_0 M, & k^2 &= \frac{T^2}{2.01^2} GM, \\ GM &= KM - KG = KM - KG_0 - \frac{hw}{W + w} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

であるから(3)式を(2)式に代入すれば

$$h^2 = \left[\frac{(W+w)T^2}{2.01^2} \left(KM - KG_0 - \frac{hw}{W+w} \right) - \frac{T_0^2 \cdot G_0 M \cdot W}{2.01^2} - w b^2 - \alpha \right] \frac{W+w}{Ww} \quad (4)$$

となる。

(4)式より除氷時の船の重心と着氷の重心の垂直距離 h が求まる。

ところで、この式中の各項は実測により、「そらち」では、 $W = 476$ 屯、 $w = 25.5$ 屯、 $T = 6.86$ sec、 $KM = 3.40$ m (着氷時)、 $KG_0 = 2.567$ m、 $T_0 = 6.10$ sec、 $G_0 M = 0.853$ m、 $\alpha = 134$ 屯 \cdot m 2 、 $B = 7.30$ m であるから、片舷の着氷の重心と船体中心面の距離 b がわかれば、着氷の重心と除氷時の船の重心の鉛直距離 h を求めることができる。 b は不明なので $b = 0, B/4, B/2$ と仮定して h を算出し第2表のような結果が得られた。

第2表 着氷前後の動揺周期の変化から求めた着氷の重心(「そらち」1960)

	b	0	$B/4$	$B/2$
h (m)		2.78	2.58	1.94
除氷時の船の重心の高さ KG_0		2.57	2.57	2.57
氷の重心 $KG_0 + h$		5.35	5.15	4.51
着氷による船の重心変化 $G_0 G$		0.14	0.13	0.10
着氷時の船の重心の高さ KG		2.71	2.70	2.67

一方、第3表に示したように重心試験によると着氷の重心の高さ $KG' = KG_0 + h = 4.59$ m である。したがって第2表より、 b が $B/4$ と $B/2$ (B は船の幅) の間にあることがわかる。

すなわち、「そらち」の重心試験は十分な精度で行なわれたとは云えないが、横揺周期の変化から氷の重心を求めてみても、片舷分の氷の重心が船の中心面から船の幅の $1/4 \sim 1/2$ のところにあることになり、実際の着氷の場合と良く一致すると見做すことができる。従って重心試験の結果は相当信頼できるものと考えられる。

§3 秤による実測

重心試験の方法の欠点を反省し、1961年の試験から確実な方法として、氷を小部分に分割して秤で実測する方法を追加した。

この方法は、計測中一部の氷を海中に落すようなことはあったが、気象・海象にほとんど煩わされない確実な方法であった。ただ除氷前後の周期の変化から船の環動半径の変化の求まらないのが欠点と云える。

「ゆうばり」, 「ちとせ」 および 「第六弥彦丸」 についてはこの方法を用いた。

§4 着氷の重量とその重心

以上の2方法で求めた着氷の重量とその重心とを第3表(a), (b), (c)に示した。全着氷重量は巡視船では約12~26吨, 第六弥彦丸では約6吨である。着氷前の排水量に対する比は「そらち」, 「ゆうばり」, 「ちとせ」 および 「第六弥彦丸」 でそれぞれ, 5.3, 3.1, 4.9, 4.2%である。「ゆうばり」の着氷量は重心試験と秤による実測で求められているが, すでに述べたように, 重心試験が悪条件のもとで行なわれたことを考えると両者による値は割合に良く一致していると思ふことができる。着氷の重心は巡視船では着氷していないときの船の長さの中央の前方8~15mで, 船の基線上4.5~5mのところにあることがわかる。これらの着氷のために船体の重心が変化したのであるが, その点についてはのちに述べることにする。

第3表 着氷の重量測定結果及びその重心(a)

項 目 着 氷 部	船 名 ゆうばり				ちとせ			
	氷の重量		氷の重心		氷の重量		氷の重心	
	重量 (吨)	全重量に 対する割 合 (%)	基線上の 高さ KG'(m)	KG'/D	重量 (吨)	全重量に 対する割 合 (%)	基線上の 高さ KG'(m)	KG'/D
上 甲 板	5.238	39.1	4.71	1.15	8.788	44.0	4.60	1.12
ブルワーク及びハンドレール	4.279	32.0	5.33	1.30	3.919	19.0	5.34	1.30
船 橋	0.385	2.9	5.66	1.38	2.109	10.5	6.67	1.63
機 関 室 ケーシング	—	—	—	—	0.036	0.2	4.56	1.11
ボート及びボートダビット	0.137	1.0	6.50	1.59	0.643	3.2	5.26	1.28
機 銃 及 び 座	1.666	12.4	5.51	1.34	2.187	10.9	5.31	1.30
船 首 旗 竿	0.056	0.4	6.96	1.70	0.176	0.9	7.00	1.71
上 甲 板 上 艙 装 品	1.627	12.2	4.88	1.19	2.132	10.7	4.98	1.21
合 計	13.388	100.0	5.09	1.24	19.990	100.0	5.12	1.25

(b) (第六弥彦丸)

項 目 着 氷 部	氷 の 重 量		氷 の 重 心	
	M 重量 (吨)	全重量に 対する割 合 (%)	基線上の高 さ KG'(m)	KG'/D
上 甲 板	1.739	29.7	2.88	1.16
甲 板 室	0.460	7.9	4.12	1.65
ブルワーク外面	2.058	35.2	3.54	1.42
ブルワーク内面	0.320	5.5	3.29	1.32
ブルワーク上面	0.573	9.8	4.00	1.61
艙 口	0.556	9.5	3.12	1.25
マ ス ト ブ ーム	0.138	2.4	4.65	1.87
合 計	5.844	100.0	3.41	1.37

(c)

船名	状態	算出方法	着氷				
			重量 (屯)	$\Delta G'$ (m)	KG' (m)	KG'/D	
そらち	—	重心試験	25.52	— 10.41	4.59	1.12	
ゆうばり	—	重心試験	12.82	— 16.04	5.41	1.32	
		秤による実測	13.39	— 13.07	5.09	1.24	
第六弥彦丸	—	秤による実測	5.84	— 2.99	3.41	1.37	
	—	ソ連の 基準 {	A	4.73	—	3.49	1.40
	B		2.87	—	3.49	1.40	
ちとせ	—	秤による実測	19.99	— 7.52	5.12	1.25	
	1/3消費状態	ソ連の 基準 {	A	12.57	—	4.48	1.07
			B	6.29	—	4.48	1.07
	補填軽荷状態	基準 {	A	12.76	—	4.44	1.06
			B	6.38	—	4.44	1.06

ソ連の基準中の A は66°30'N 以北および 60°S 以南, B はそれ以外の冬季帯に適用する。

巡視船ではもっとも多く着氷したのは上甲板上で、全着氷量の 40% 前後を占め、ブルワークおよびハンドレールが 20~30% でこれについて多い。機銃および座が 10% 以上を占めているのは注目に値する。

漁船で一番多量に着氷したのはブルワークで全着氷量の 50% を占めている。このことは巡視船の場合と大きく違う点で、理由は張出しを有する構造でブルワーク全体の面積が広いことと、乾舷の高さが低いことも影響するのであろう。上甲板が 30% でこれについて多い。これに艙口の約 10% を合わせると、艙口の極めて少ない巡視船の上甲板上の氷の比率とはほぼ一致するのは面白い対称である。

なお、以上に述べた氷の重量と重心についてももう少し説明を加える。「そらち」では試験のために航海したがあまり着氷しなかったので再び出港し着氷させたもので、着氷量はその 2 回の航海の合計量である。重心試験時には、船橋前面の氷が一部剝離したり、前部上板上の氷の一部が、ホース・パイプからピッチングのときに逆流する海水に洗い流され、船橋前の上甲板上に堆高くなっていた。一方、後部上甲板上の氷は入港後強い日射を受けたうえ多数の人々に踏まれて一部融解した。従って着氷自然の姿では、その重量はもう少し多く、重心はもっと高くそして船の前方にあったと考えられる。

「ゆうばり」では、着氷時の重心試験中晴天のため氷が融解したり、後部上甲板上の氷は、入港翌夜から襲った猛吹雪のために積った雪を払うときに誤って一緒に払われてしまった。

「第六弥彦丸」では、入港翌日中に全試験を終了し、「ゆうばり」のように吹雪で邪魔されることもなく、自然の着氷に近い姿で諸計測が行なわれたと考えられる。

「ちとせ」では、小樽港内の状態が悪いため、重心試験を断念し、秤による実測法のみを用い、入港後直ぐ諸計測を始めた。それで機関室囲壁附近の氷が船内の熱のため少し融けてしまったほかは、計測中天候は曇で気温も低く、自然に融解したり、氷の形が毀れたものはなく3冬にわたる試験のうちでもっとも自然のままの姿で諸測定が終了した。

ただし、いずれの方法で測定したとしても、一部の氷が海中に落下したり、氷中の塩分が時間の経過につれて滴下するため、密度が見掛上小さくなることを考えると、着氷水域での全着氷量は第3表の計測値より幾分多かったと考えられる。

V. 着氷の増加速度

船体に凍着する氷の増加速度がどれぐらいの値であるかは着氷するような条件におかれた船舶にとっては重要な問題である。英国の資料によると1時間あたり約2屯²⁾の割合で着氷し、このときには鎖の周囲の氷が1時間あたり38 mmの割合で成長した例が報告されている。着氷の増加の速度は、気象、海象条件、船舶の航法、船の大きさや型などによってことなることは容易に理解されるが、上に示した値は船舶の安定性を考える上で非常な恐怖を与える量である。北海道近海では着氷の増加がどの位の割合でおこるかを知らるために、前項で述べたように1961年と1962年に、着氷の増加速度の測定を試みた。

§1 紙凍着法による着氷の増加過程の測定

船体に対する着氷の増加過程を測定するために、着氷がはじまってから船体の同一場所で4時間毎に着氷の上に吸水性の紙を凍着せしめた。すなわち、破れにくく、しかも吸水性の紙を氷の上に押えつけておきながら微水滴を霧吹きで紙の上から吹きつける。紙は水を吸って軟くなり氷の表面の凹凸に添って凍着してしまう。この操作を4時間毎に行なうと、氷の中に4時間毎の目印が入るわけである。入港後にこの紙を含む氷の断面を作り、紙を目印にして4時間毎の着氷量を求めるのである。

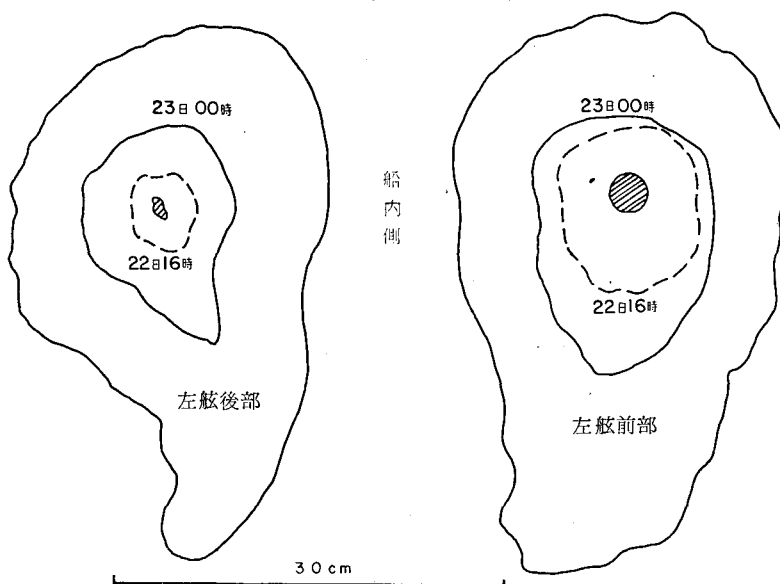
この方法は1961年の実船試験の際には試験的に用いらただけであるが、1962年には船体の7カ所に対して用い船体に凍着した氷の増加過程を知ることができた。

1 1961年の結果

この年には「ゆうばり」でこの方法を採用した。ただし、用いた紙があまり適当でなかったため一部は紙の代りにビニールテープを用いた。その際の氷の断面の例を第5図に示した。図の氷の断面には22日16時と23日の0時の目印が入っている。

第5図の各断面から求められる着氷の成長比の平均は第4表のようになる。「ゆうばり」では紙凍着法を両舷のハンドレールの着氷についてのみ利用したのであるが、ハンドレール上の着氷の成長速度が全着氷の成長速度に比例すると見做し、実測された全着氷量を用いて求めた各時刻における着氷量および1時間あたりの平均の着氷増加量も第4表に示してある。

この表から、着氷はほぼ平均した速さで増加しておりその量は毎時約0.5~0.7屯であることがわかる。



第5図 ハンドレールの着氷の断面(「ゆうばり」1961)。

第4表 着氷成長速度(「ゆうばり」, 1961年1月)

		着氷量の比	着氷量 (屯)	着氷増加度 (屯/時)	気温 (°C)	水温 (°C)	風力
21日	16時	0.035	0.47	0.47	-2.5	-0.5	5
23日	0時	0.23	3.07	0.65	-5.2	0	5
24日	6時	1.0	13.39	0.69	-6.3	-1.0	4~5

註 着氷は主として、21日 21~22時、22日 20時~23日 6時、23日 13時~22時のあいだで成長した。気温・水温・風力はそれらの期間の平均である。

2 1962年の結果

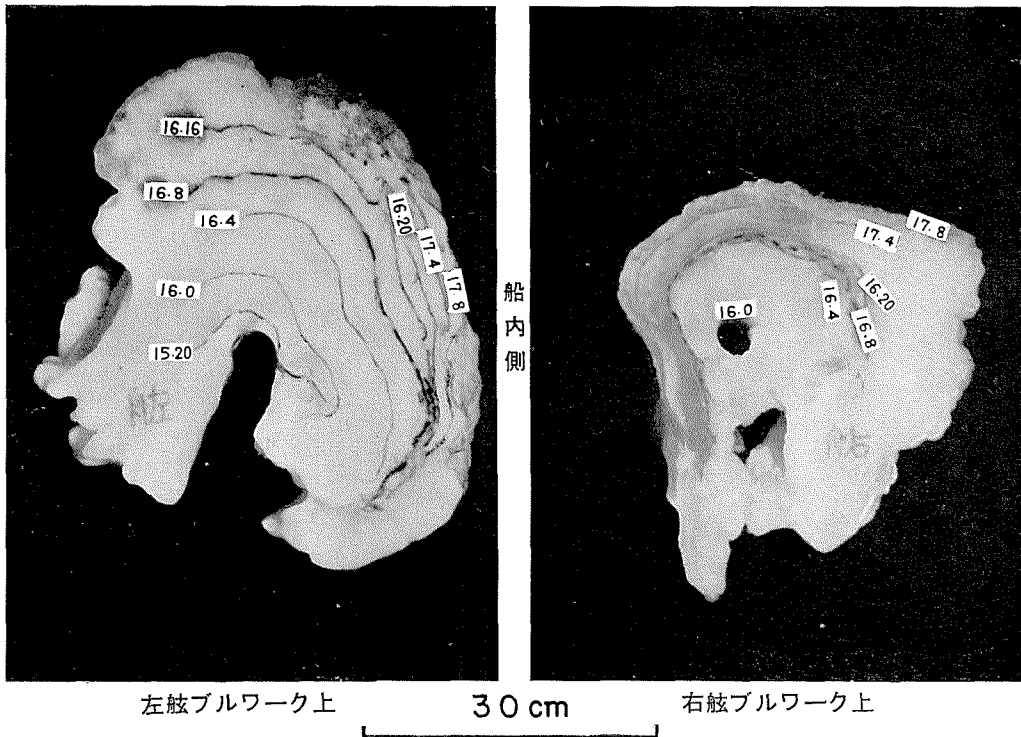
1962年の「ちとせ」による試験では、稚内を15日12時に出港し、着氷が始まったのが13時45分であることが乗員によって確かめられており、翌16日7時2分に流水域に突入するまで着氷が続いた。その後、船が南下しているあいだは追風で着氷は殆んどおこらなかった。同日14時に北東に進路を転じてから再び着氷がおこり、18時に流水原に出会うまで続いた。ここで再び南下したが、その間は前の南下のときと同じく着氷は殆んどおこらず、17日2時に進路を西に転じてから三度目の着氷が始まった。実験の目標とした量の氷が凍着したと認められたので7時10分に進路を南東に転じ、その後は全然着氷しなかった。すなわち、実際に着氷が継続していた期間は次のとおりであった。

15日 13時45分~16日7時

16日 14時~18時10分

17日 2時～7時10分。

「ちとせ」による試験ではこれらの時刻には無関係に15日の16時から毎4時間毎に、紙を両舷舷牆上ハンドレールおよび両舷ハンドレール、船橋前壁(両舷側2カ所)および前部上甲板、上艙口蓋上面などの着氷に凍着せしめた。その結果得られた氷の断面の例を第6図に示した。第6図には凍着させた紙の切り口とその時刻を記入してある。これらの図の断面および上記諸点の紙を含む氷の断面から求めた各点における着氷量の比の時間的変化を示したのが第7図である。図には同時に、のちに述べる着氷棒の着氷量の増加の割合および船首方位と波の方向を記入してある。なお第7, 8図はすでに述べた実際に着氷が起った期間を考慮して画いてある。



第6図 ハンドレールの着氷の断面写真(「ちとせ」1962)

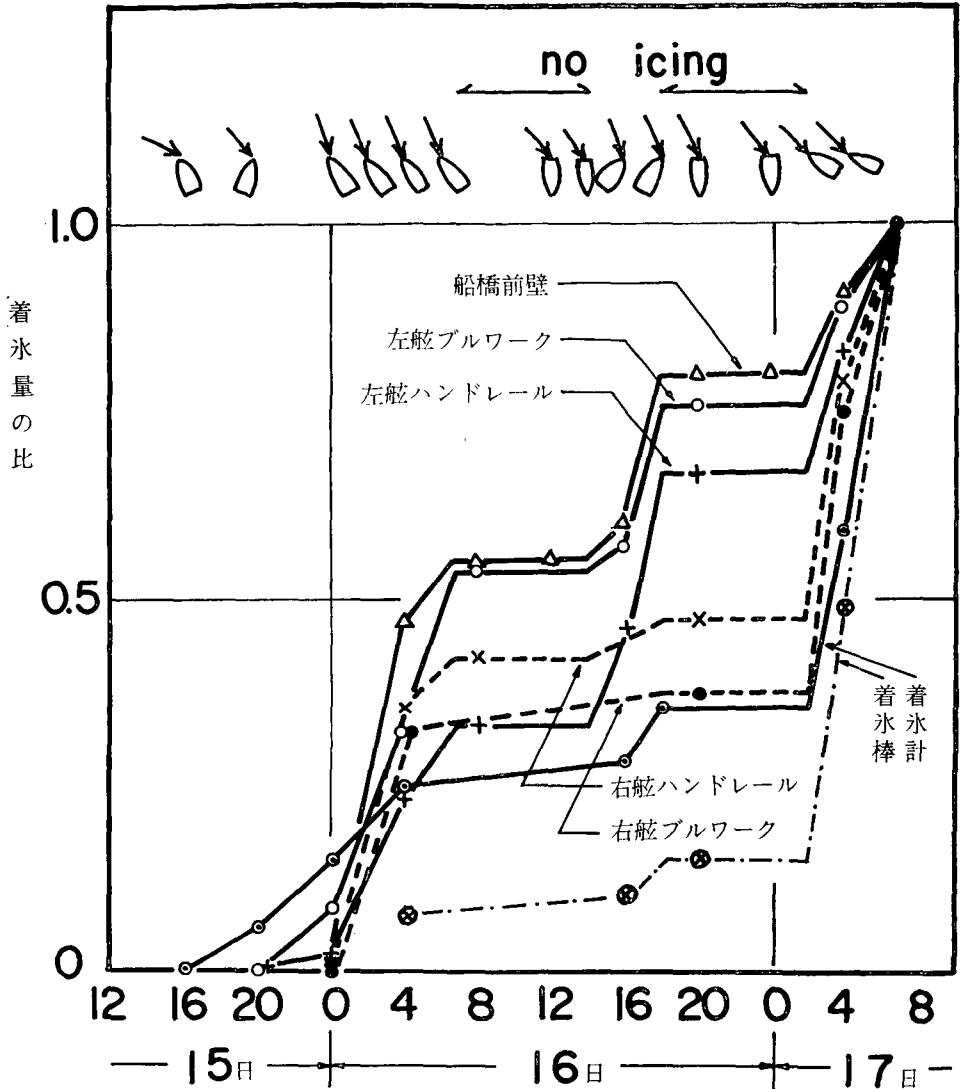
第7図から次のことがわかる。

(i) 船体に対する着氷は16日の0時から4時のあいだ、および17日の2時から7時のあいだで特に盛におこった。

(ii) 船体上の位置によって着氷の増加の割合がことなる。

特にハンドレールについてみると、右舷と左舷では着氷の増加の割合が可成りちがう。ただし片舷だけに注目すると船首からの距離に関係なく着氷の増加はほぼ同一の傾向を示している。

(iii) 左右両舷のどちら側のハンドレールにより多く着氷するかは船首方位と波の方向の



第 7 図 船体各部の着氷量の比の時間的变化 (「ちとせ」1962)

関係が大きく影響するようである。すなわち、17日の2時から7時までのあいだでは波の方向が僅かに右舷側に傾いていたので右舷側の着氷増加が多く、16日の16時から20時のあいだでは波が左舷側につかつたために左舷側の成長が大きい。

着氷は15日16時に開始したのであるが、着氷量が少ないためにこの図にはあらわれていない。また、16日の0時頃に右舷側から多量の海水を直接かぶった。そのためにその時までには右舷側に着いた着氷の一部が洗い流されてしまった。

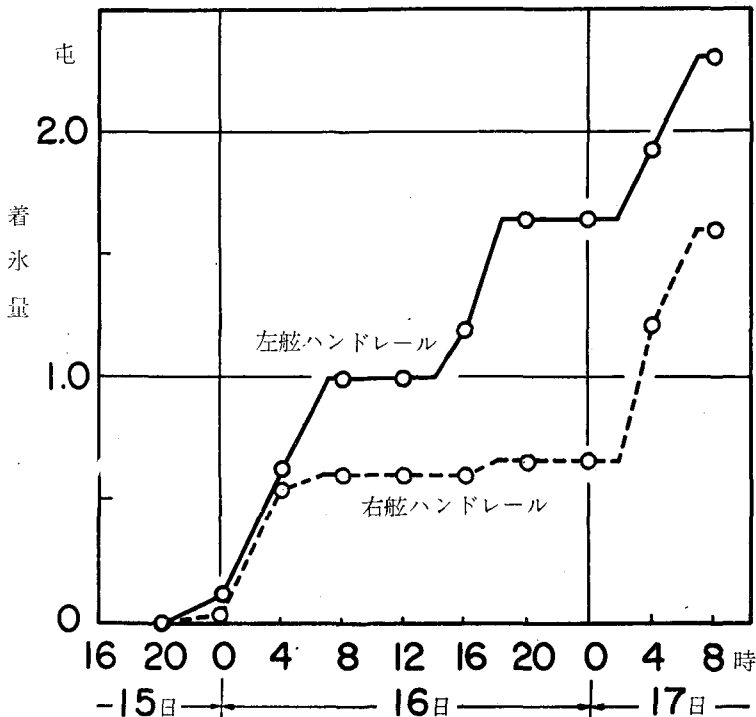
船体前部のハンドレールおよび舷牆上ハンドレールの着氷量の合計は実測によると、右舷

側が1.59 屯, 左舷側が2.30 屯であった。第7 図に示した右舷側のハンドレールと右舷舷牆上ハンドレールの着氷量の増加の割合の平均値を用いて, 右舷側のハンドレール及び右舷舷牆上ハンドレールに凍着した氷の重量の時間的変化を求めることができる。左舷側についても全く同様である。第8 図はこのようにして求めた両舷ハンドレールおよび舷牆上ハンドレールの着氷量の増加の様子を示したものである。この図の場合には着氷量の増加がもっとも著しいのは右舷側の17 日2 時~4 時のあいだで0.28 屯/時に達している。

紙凍着法による目印は両舷ハンドレールのほかに, 船橋前壁の両舷側に各一カ所づつと前部上甲板上に突出している艙口蓋上面にも付けておいた。それで, 実測された着氷量と紙凍着法による目印を利用して, 船橋および上甲板上の艙装品上の着氷量(それぞれ2.11 および2.13 屯)の増加の割合も容易に求めることができる。船体の他の部分には紙を凍着させる操作を行なわなかったが, 次のようなきわめて自然な想定を導入することによって船体各部ひいては船体に対する全着氷量の増加の様子を知ることができる。

(a) 上甲板上(着氷量6.0 屯)銃座および船首旗竿(着氷量2.36 屯)ではしぶきが左右舷のどちら側からかかっても着氷が起こるから, 着氷量は両舷ハンドレールの着氷量の和が増加する傾向と一致してふえる。

(b) 残りの部分(後部上甲板, ボートその他)の着氷量(3.47 屯)は上述した各部分の着氷量



第8 図 両舷ハンドレール上の着氷の成長過程 (「ちとせ」1962)

の和がふえる傾向に比例して増加する。

以上のようにして求めた試験船「ちとせ」の全着氷量の増加の様子を第5表に示した。表には同時に1時間あたりの船体の全着氷量も示してある。

第5表 着氷量の増加過程及び1時間あたりの着氷量(「ちとせ」1962年1月)(単位: 屯)

観測日時	着氷位置								全着氷量	着氷継続時間(時間)	1時間当たりの着氷量
	前部上甲板	銃座船首旗竿	船橋	前部上甲板機装品	右舷前部ブルワーク	左舷前部ブルワーク	残りの分				
15日16時	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0.01
20	0.01	0.005	0	0	0	0.009	0.005	0.03	0.03	4	0.18
16日0	0.18	0.07	0	0.25	0.003	0.12	0.13	0.75	0.75	4	1.46
4	1.87	0.74	1.00	0.66	0.54	0.63	1.14	6.58	6.58	3	0.58
8	2.47	0.97	1.16	0.66	0.61	1.00	1.44	8.31	8.31	0	0
12	2.47	0.97	1.16	0.66	0.61	1.00	1.44	8.31	8.31	2	0.51
16	2.77	1.09	1.29	0.80	0.61	1.19	1.59	9.33	9.33	2.17	1.18
20	3.55	1.40	1.68	0.89	0.67	1.64	2.06	11.88	11.88	0	0
17日0	3.55	1.40	1.68	0.89	0.67	1.64	2.06	11.88	11.88	2	1.99
4	4.94	1.95	1.92	1.10	1.22	1.98	2.75	15.86	15.86	3.17	1.31
8	6.03	2.36	2.11	2.13	1.59	2.30	3.47	19.99	19.99		

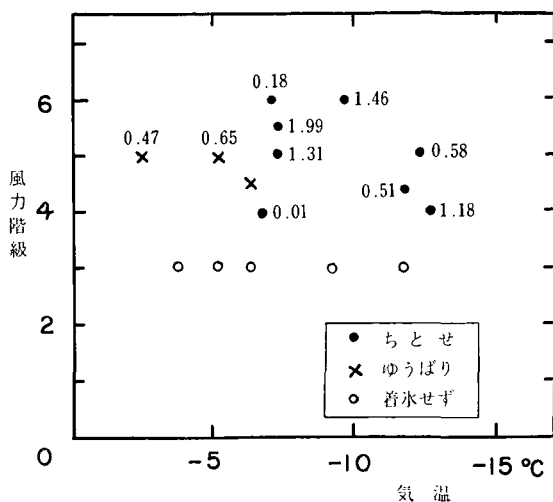
註 着氷は15日13時45分~16日7時, 16日14時~18時10分, 17日2時~7時10分のあいだで生じた。

1時間あたりの着氷量は観測時刻間の平均値ではなく, 実際に着氷が継続していた時間中の平均値を示す。

1962年の試験では, 1時間あたりの着氷量の最大は約2屯で, 17日の2時~4時のあいだに起こっている。また16日の0時から4時までのあいだでも約1.5屯/時の着氷が起こっている。この試験に用いた巡視船「ちとせ」の排水量は407屯である。前述した¹⁾英国での2屯/時を越す着氷量は総屯数約700屯(排水量約1,200屯²⁾)の船に対するものである。船の大きさを考えに入れて比較するとこのたびの試験中の着氷量の増加速度は極めて大きな値であるといわざるを得ない。最大の着氷増加が起こったときには気温は-6~-8°C, 風速はたかだか11 m/secで, 水温は結氷温度よりも少し高く, 冬の北の海としては悪天候というよりはむしろありふれた天候である。それにも拘わらず, 毎時間約2屯の氷が凍着したことは注目に値すると云えよう。

「ゆうばり」及び「ちとせ」で紙凍着法を利用して得られた着氷量の増加速度と当時の気温・風速との関係を示したのが第9図である。

図中に記入してある数字は着氷の増加速度(屯/時)である。この図では, 気温・風速と着氷量のあいだの量的な関係はあまりはっきりしないが, 次のようなことがわかる。すなわち, 風力が3以下であると着氷は起こらない。着氷しなかったときでも気温は-10°C以下であったからしぶきがかかると着氷する筈であるから, 試験に用いた「ゆうばり」, 「ちとせ」などの巡視



第9図 着氷の増加速度と気温及び風速との関係。図中の数字は1時間あたりの着氷量(吨)

船では風力3ぐらいではほとんどしぶきをかぶらないことをあらわしている。しかし風力がそれ以上になると急に着氷するようになり、気温がわずか -2.5°C でも可成りの着氷がおこっている。気温が -7°C 、風力が6でも着氷増加量が少ない例があるが水温が海水の結氷温度より高い場合には大量の青い水をかぶると逆に氷が洗い流されてしまうことをあらわしているものとおもわれる。また、模型船に着氷させた実験⁹⁾では、気温が -17°C 以下になるとしぶきは船体に衝突する以前に凍結してしまうために逆に着氷増加速度が減少することが知られたが、筆者等の場合にはそのような低い気温に遭遇することはなかった。

§2 着氷計による観測

前節で述べたように紙凍着法によって船体の着氷の増加過程を知ることができるが、上甲板上に円形断面の棒を設置し、それに凍着する氷の量を計測して着氷の増加過程を知る方法を「ちとせ」で試みた。

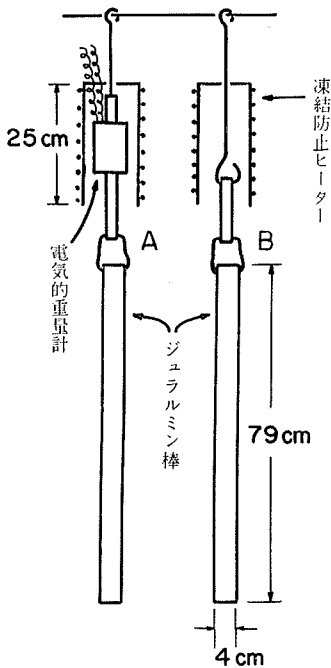
1 着氷棒による方法

第10, 11図に示した2本のジュラルミン棒を船橋の前面に設置した。このうち着氷棒Aには電気的重量計測器が連結してある。Aの棒は試験期間中放置しておいて着氷させ、4時間毎にその重量の増加を測定した。他の棒Bは4時間毎にとり外して着氷の重量を測定し、そのたびに氷の着いていない棒をとりかえた。着氷棒に着氷した氷の重量の時間的变化は第7図に示してある。

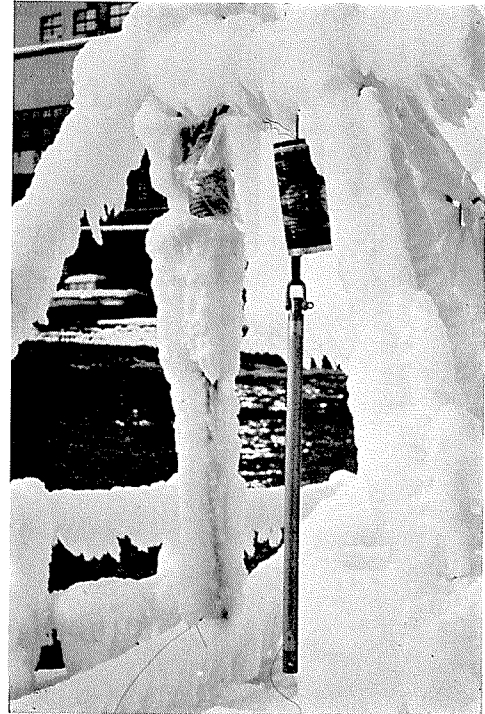
2 着氷計による方法

前項1の装置では氷から流下したブラインを捕捉することが出来ないで、氷およびブラインの量を同時に測定するために第12図に示した着氷計を用いた。

この装置では低圧法ポリエチレン(ハイゼックス)の棒Aに捕えられたしぶきの一部はA



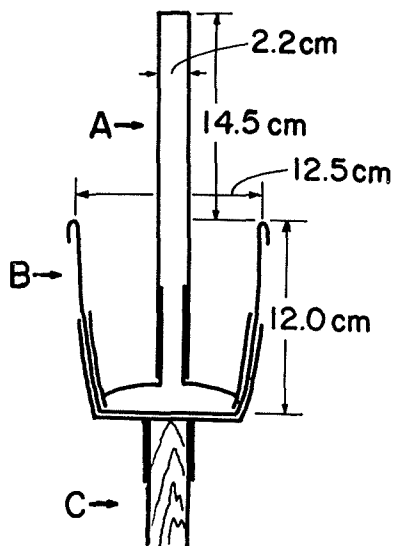
第10図 着氷棒



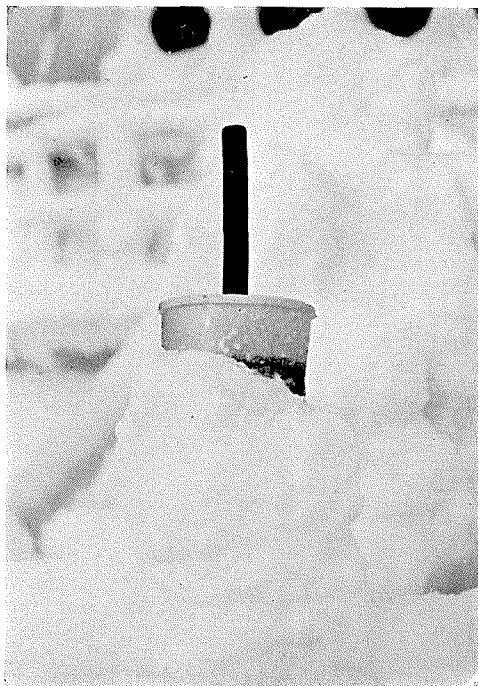
第11図 上甲板上船橋前に設置した着氷棒に凍着した氷

に凍着し、他の部分はブラインとなって流れおちて下の容器 B に溜る。両者の量を測定して、それらの和として棒 A が捕えたしぶきの量を求めることができる。この装置全体の支持棒を「ちとせ」の前部上甲板のほぼ中央、機銃座を囲むハンドレールの支柱につけて固定した。第13図がその写真で、着氷計は上甲板上約 1.8 m の高さにある。

測定にあたっては 2 組の着氷計を 4 時間ごとに交互にとりかえて、その 4 時間で棒 A に着いた氷の量と容器 B に溜ったブラインの量を測った。氷とブラインは保存しておいて氷の形状の観察や塩素量の測定を行なった。それらの測定結果を第 6 表に示す。また、前章で述べた実際に着氷が起こった期間中の 1 時間当りの平均の着氷量、ブライン量、およびそれらの和である捕捉しぶき量も表に示した。この捕捉しぶき量と着氷量の比をとったのが着氷率である。棒に凍着した氷の形状は同じでなく、棒の前面にだけ着く場合と、棒の径より拡がって、上から見て翼状になる場合とが観察された。第 14 図は夫々の例の写真であり、右側の翼状の着氷は 17 日の 4~7 時に凍着したものである。また第 6 表には、各測定期間における着氷の形状を、真上から見た形の略図で示してある。氷とブラインの重量および塩素量の測定結果から、しぶきの塩素量を求めてみると、表に示したように、ブライン量の非常に少ない場合を除き、ほぼ海水の塩素量に近い値となり、着氷が海水飛沫で起っていることがわかる。



第12図 着氷計

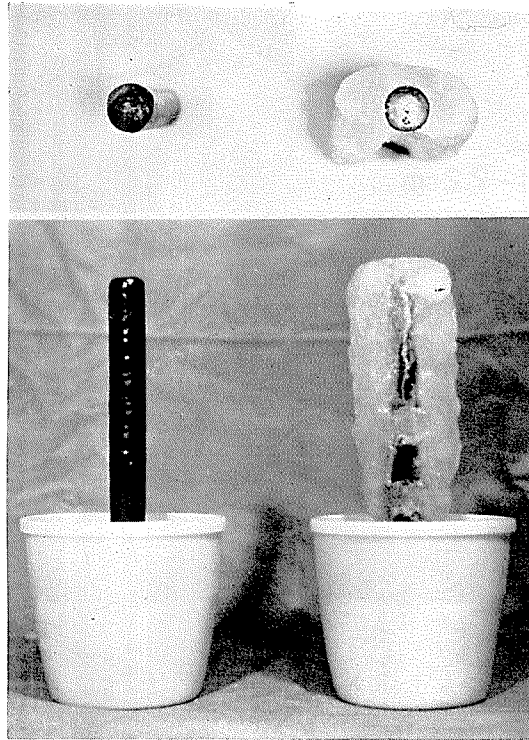


第13図 上甲板機銃座ハンドレールのスタクションに固定した着氷計

着氷計が捕えたしぶきの量を、船上で観測される相対風速および真の風速と比較すると第15図に示したようになる。着氷計が前部上甲板におかれているために、船が風に逆って進み相対風速が真の風速より大きくなり、しかも数 m/sec 以上に達するとしぶきの捕捉が起こって

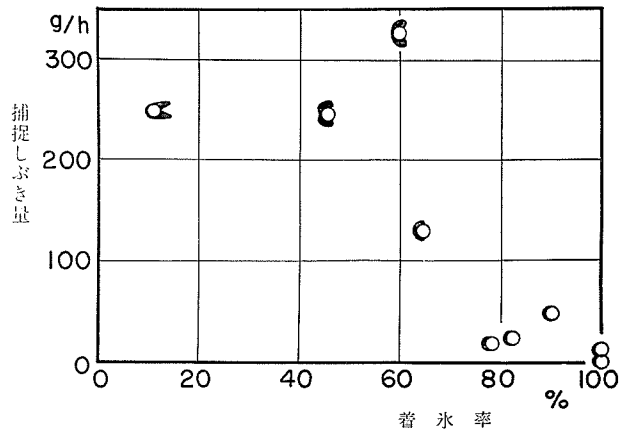
第6表 着氷計による測定結果

測定日時	氷		ブライン		着氷継続時間	着氷量 (g/時)	ブライン量 (g/時)	しぶき量 (g/時)	しぶきの塩素量 (%)	着氷率 (%)	着氷型
	重量 (g)	塩素量 (%)	重量 (g)	塩素量 (%)							
15日16時	35	—	10	—	2.25	15.6	4.5	20.1	—	78	○
20	90	15.1	20	32.0	4	22.5	5.0	27.5	18.2	82	○
16日 0	105	13.2	890	19.6	4	26.3	222.5	248.8	19.0	11	○
4	340	14.5	190	29.0	4	85.0	47.5	132.5	19.7	64	○
8	5	—	0	—	3	1.7	0	1.7	—	100	○
12	0	—	0	—	0	—	—	—	—	—	—
16	30	16.7	0	—	2	15.0	0	15.0	16.7	100	○
20	95	16.0	10	36.4	2.17	43.8	4.6	48.4	18.0	90	○
17日 0	0	—	0	—	0	—	—	—	—	—	—
4	390	—	270	—	2	195.0	135.0	330.0	—	59	○
8	335	—	410	26.0	3.17	105.8	129.5	235.3	—	45	○

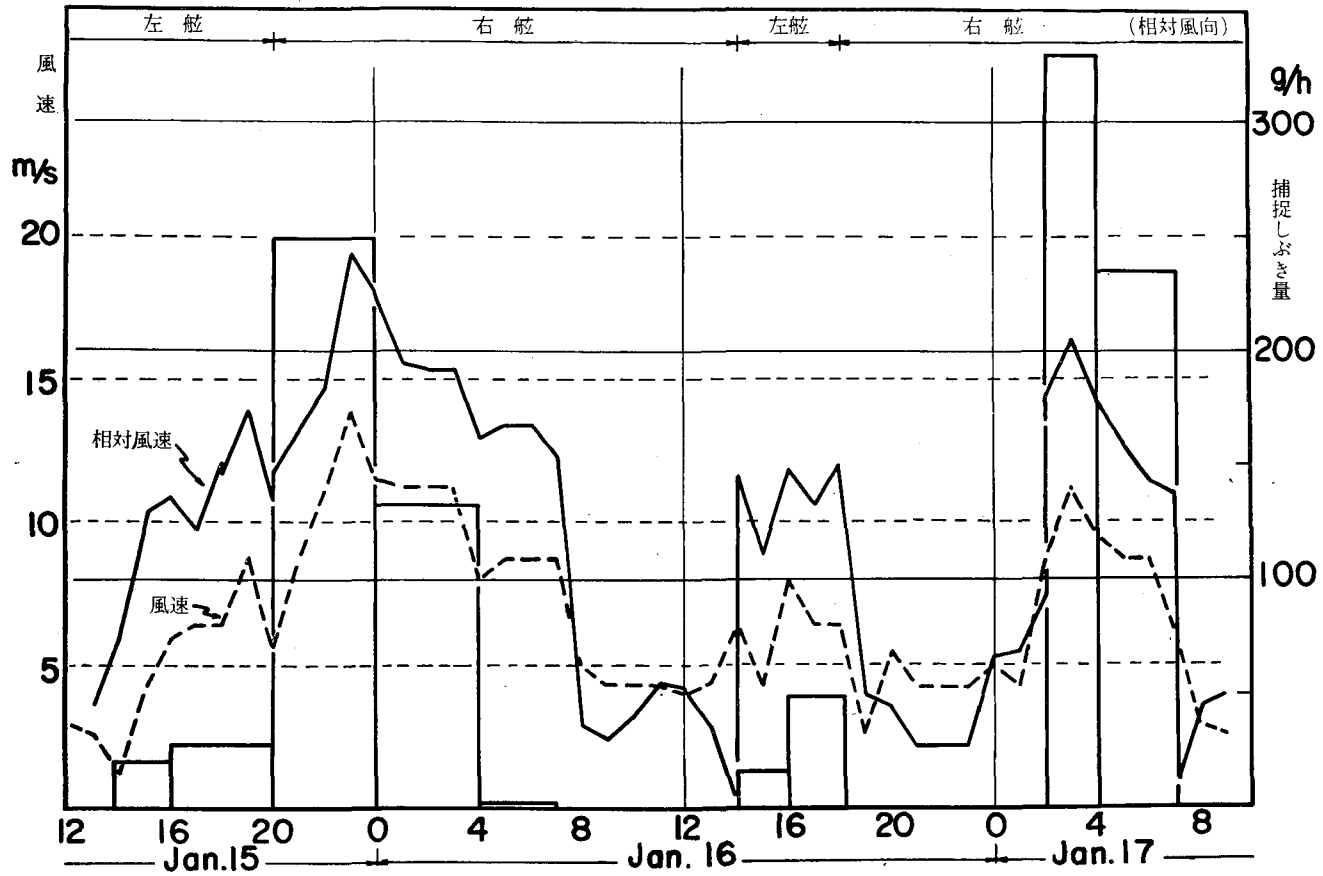


第14図 着氷計に凍着した氷の形状

ることがわかる。しかしこのような条件にありながら、16日の4~7時のあいだのように、船体のある部分では明らかに着氷がおこっているにもかかわらず(第7図)、着氷計のところにはわずかの量のしぶきしか飛んでこなかった場合もある。また図の上部には、相対風の方向を船首からの角度で示してある。紙を凍着させて調べた第7,8図の両舷の着氷状況とこの相対風向



第16図 しぶき量と着氷率および着氷の形状の関係



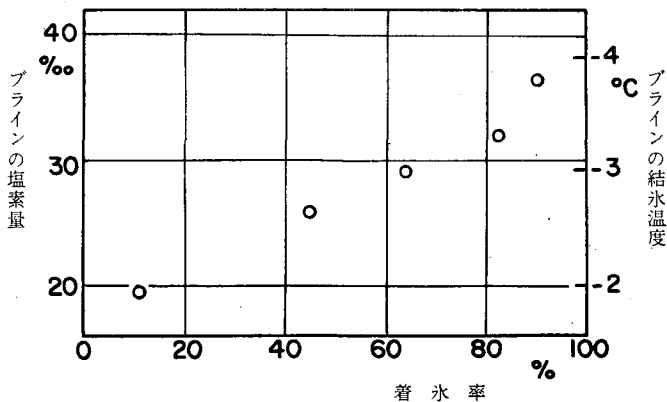
第 15 図 着氷計に捕えられたしぶきの量と風速の関係

(波の方向)の対応についてはすでに述べた。

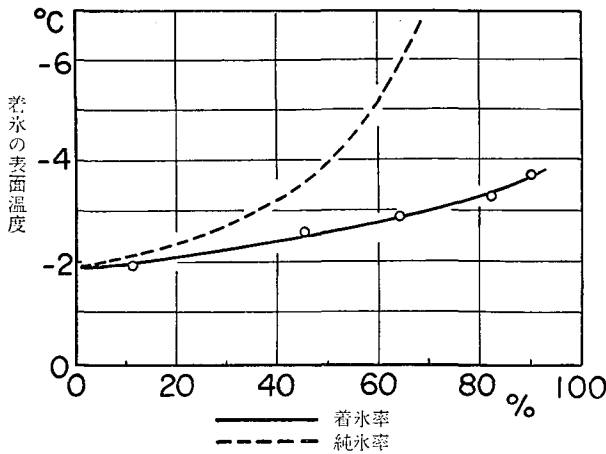
第6表の測定結果から、捕捉しぶき量と着氷率との関係を求め、その各点を着氷の形状の略図で示したのが第16図である。図から、しぶきの量が少ないと棒の前面にだけ凍りついて着氷率が大きくなり、しぶきの量が多くなると翼状に拡がって凍るようになり、氷量としては多くなるが着氷率は小さくなることがわかる。この現象の定性的な説明として次のように考えられる。

しぶきの量が少ないときは、個々の水滴の径も小さいと考えられるので、水滴は飛んでくるあいだにかなり冷やされ、過冷却か結氷温度に近い状態で着氷計に捕えられるとおもわれる。このような状態で捕えられた微小水滴は、次の水滴が飛んで来るまでに、濃縮されたブラインを自分の中に閉じこめながら凍りきってしまう。したがって水滴はあまり流動することなく棒の前面にだけ凍りつき、着氷率が高い値を示すようになる。しぶきの量が少し多くなると、水滴が凍りきらないうちに次の水滴が飛んでくるようになる。すると水滴はその衝突した場所で全部は凍らないで、一部の水滴は着氷の表面を伝わって下の容器に流れ落ちはじめ。ところが風が強いと流下しながら風によって氷の横および後のほうに吹き流されて行き、そのうちによく凍る。そのため氷の形状が次第に横にうしろに拡がっていくものと思われる。更にしぶきの量が増すと、水滴の径も次第に大きくなると考えられるので、飛んでいるあいだの温度低下が少なく、海水の温度に近い状態で捕えられるようになる。また水滴の径が大きいと慣性も大きくなるので、この比較的温度の高い水滴は棒の前面に多く衝突するようになり、凍結はその水が吹き流された側面で主に行なわれるようになる。その結果、しぶき量の少ない場合とは逆に、前面での氷の成長はあまり進まず、氷は横にうしろに大きく拡がって、第14図の右側の写真のような翼状の氷ができると考えられる。

また、下の容器に溜ったブラインは、着氷の表面を結氷しながら流れおちていたと考えると、ブラインの塩分濃度と結氷温度は一義的な関係にあるので、下に溜ったブラインの塩素量



第17図 着氷率(着水量/しぶき量)と下の容器に溜ったブラインの塩素量および着氷の温度との関係



第18図 着氷率および純氷率 [(水中の純水量)/(しぶき量)] と着氷の温度との関係

からブラインが流れおちたときの着氷の平均的な表面温度を推定することができる。着氷率と下の容器に溜ったブラインの塩素量とを、第6表からとり出して較べてみると、第17図のようになり、よい対応を示すことがわかる。

塩素量 $Cl\%$ のブラインの結氷温度 T_f を与える Nelson, Thompson の式¹⁰⁾

$$\left. \begin{aligned} T_f &= -0.0966 Cl - 0.0000052 Cl^3 & Cl < 50\% \\ T_f &= -0.0966 Cl - 0.0000035 Cl^3 & 50\% < Cl < 140\% \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

を用いて結氷温度を計算し、図の右側の縦軸に示した。この図から、表面を伝わって流れおちるブラインが、 $-2 \sim -4^\circ\text{C}$ という比較的高い温度であること、すなわち成長中の着氷の温度は、比較的高いことが確かめられた。

着氷の中のブラインも閉じこめられるときには下に溜ったブラインと同じ温度と塩素量を持つと考えられる。着氷の塩素量が測定されているので、着氷中の氷だけの量を表面温度の関数として計算することができる。塩素量 19.36% の海水のしぶき M 瓦が m 瓦の純氷を折出したとき、残溜ブラインの結氷温度 T_f と純氷率 m/M とのあいだには、 T_f を(5)式で計算すると、第18図の点線のような関係がある。図には、第17図の着氷率の関係も実線で記入してある。 T_f が一定のときのこの2つの曲線の差は、着氷率と純氷率との差、すなわち、着氷中に含まれるブライン量のしぶき量に対する重量比である。着氷率が純氷率のほぼ2倍の値を示していることから、着氷の形状はいろいろ異なるが、着氷が成長しつつあるときには氷の温度は $-2 \sim -4^\circ\text{C}$ ぐらいでブラインは常に着氷重量の約半分を占めていることがわかる。

VI. 着氷の結晶構造と密度

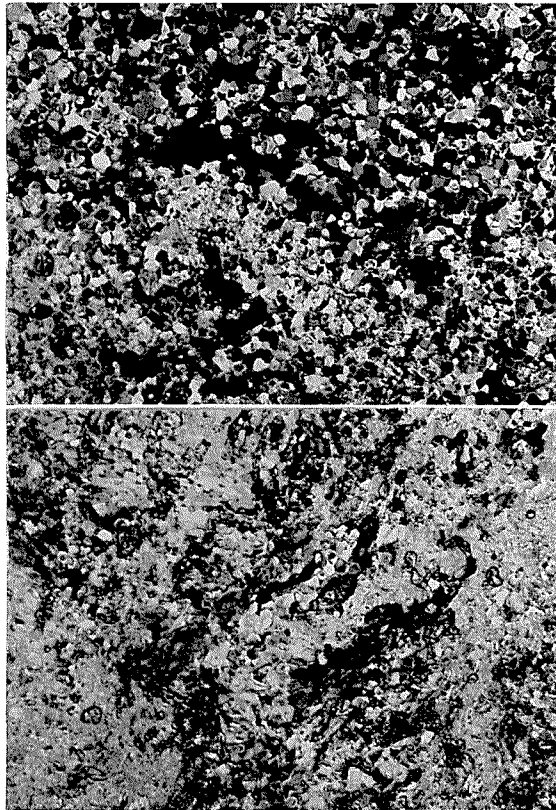
海水滴が船体にぶつかって凍り、着氷となるが、水滴が完全に凍結し切ってしまうことはない。海水滴が凍ったときに折出する氷には塩分が含まれていない。そのため残りの不凍結の

部分の塩分濃度が高くなる。この液はブラインと呼ばれる。ブラインの塩分濃度が高くなるとその結氷温度は低くなり、両者のあいだには(5)式で示したような一義的な関係がある。船体の着氷はこのようなブラインと純水の混り合ったものである。着氷の温度は、それが成長しつつあるときには融解の潜熱を放出しているからあまり低い温度ではないと考えられるが、前章で述べたように、果してほぼ $-2\sim-4^{\circ}\text{C}$ であることが知られた。また、その時にブラインの占める割合は重量比ではほぼ $1/2$ に近いことがわかった。

これらの不凍結のブラインは時間が経つにつれて流下するものもあり、水中にブライン細胞として閉ぢこめられているものもある。また、着氷の中には、樹氷の生成の際に見られるように多くの気泡も含まれている。そのために、船体に凍着した着氷は外見上は白色を呈した可成り多孔質の氷である。

§1 結晶構造

着氷してできた氷のように水滴が次々に凍りつきながら成長する氷は、微少な結晶粒子からなる結晶構造をなしているのがふつうである。第19図に「ちとせ」の着氷の薄片の偏光写真を示した。これはハンドレールに凍着し氷を厚さ約 1 mm に削って交叉偏光板の間に挿入して



第19図 着氷の薄片の偏光写真(×1)

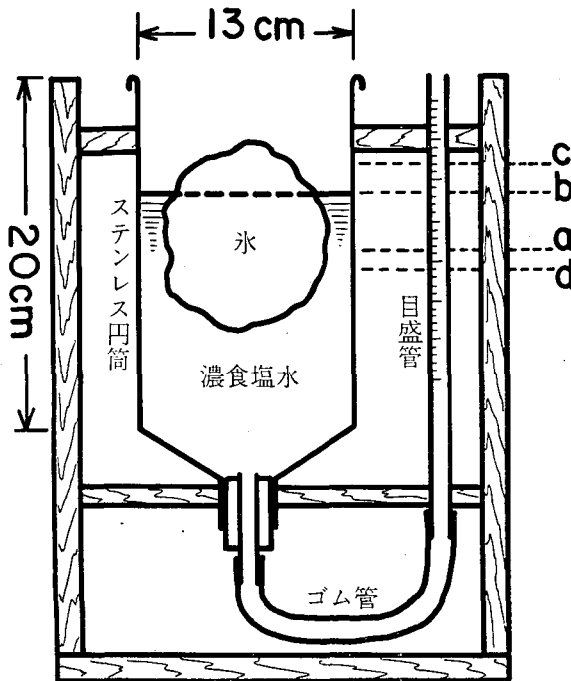
写したものである。(その方法は田畑・小野¹³⁾の論文に詳しく記載されている。)写真で模様のように見えるのはひとつひとつの結晶粒子であり、粒子の大きさはほぼ直径 0.5 mm できわめて小さい。また、個々の結晶粒子の結晶軸方向は、第 19 図からわかるように、規則性は見受けられない。

§2 密 度

上甲板附近、もしくは海面からあまり高くない所にできる氷は比較的大粒の水滴の凍結、もしくは大量の水をかぶった結果として生ずる。海面より比較的高い部分、たとえば、船橋などに凍着した氷は主として微小水滴の場合によっては過冷却した水滴の凍結によって生ずる。したがって、凍着している位置のちがいで氷の構造乃至は密度が異なる可能性が考えられる。また厚く凍りついた氷では、下層の部分の氷の密度は、その上にあとから凍り着いた氷から流下するブラインが氷の空隙に入るために、いくらか大きくなることあるであろう。これらのことを確かめるために、以下に述べる方法を用いて、入港後に船上で着氷の密度を測定した。

1 着氷の密度測定方法

測定に用いた装置は第 20 図に示した。ステンレス・スチール製の円筒(直径 13 cm, 長さ 20 cm)と目盛付ガラス管(内径 9.5 mm) および連結用ゴム管と支持棒からできている。円筒には濃食塩水を適量だけ充たしておく。測定に先立って 0°C 以下の気温のところ



第 20 図 密度測定装置

て、液と装置を充分冷却しておいた。

測定にあたっては、まず水位 a を読みとる。次に測定しようとする氷を投入してその時の水位 b を読みとる。更に細い針金の棒を使って氷を液中に没せしめてそのときの水位 c を読みとる。 a, b, c の読み取りを終わったのちに、あらかじめ円筒の底に沈めておいた金網を用いて氷を捨てて、次の測定を行なう。

円筒の断面積を A 、液と氷の密度とそれぞれ ρ_w, ρ_i とすると、氷の密度 ρ_i は

$$\rho_i = \frac{b-a}{c-a} \rho_w \quad (6)$$

から求められる。

液の密度 ρ_w は、密度が既知の浮子をあらかじめ用意しておき、氷の代わりにこの浮子を用いて上述した測定を行なうことによって (6) 式を使って求められる。

測定に用いた氷の試料の体積は $300 \sim 600 \text{ cm}^3$ で、液の密度の測定用の浮子には飽和食塩水を封入したガラス製の浮子(密度 0.841 、体積約 600 cm^3)を用いた。

(6) 式は測定される氷に液が浸入しないか、もしくは、浸入したとしてもその量が無視できる程小さい時のみ用いられる。船体に凍着した氷の大部分は、すでに述べたように、極めて多孔質である。そのため氷を液中に投入すると可成りの量の液が氷中の隙間に浸入する。上に述べた手順で測定を行なったのちに氷を液中から引き上げると、液の水位 d は第 18 図に示したように、はじめの水位 a より幾分低い位置になるのが普通である。すなわち $(a-d) A$ cc の液が氷に浸入したまま取去られるわけである。しかもその量は無視できない。したがって、(6) 式をそのまま用いて密度を求めることはできない。

多孔質の氷を液中に沈めたときに、氷のみかけの単位体積あたり $\alpha \text{ cm}^3$ の液が浸入するものとする。試料の氷の全体積を $I \text{ cm}^3$ 、第 20 図に示したように氷を液に浮かせたときに液中にある部分の体積を $I_w \text{ cm}^3$ とする(このときには液中の隙間にはすでに液が浸入しているのであるがその体積も含めて考える)と次の関係がある。

$$A(c-a) = (1-\alpha) I. \quad (7)$$

$$A(b-a) = (1-\alpha) I_w. \quad (8)$$

また、氷に浸入した液体は全部が測定後に氷を捨てるときに氷に浸入したままで捨てられるものと考え、

$$A(a-d) = \alpha I \quad (9)$$

となる。

また第 20 図に示したように、氷が液に浮んでいる場合の釣合の条件から次の式が成り立つ。

$$I \rho_i = (1-\alpha) I_w \rho_w. \quad (10)$$

(3)~(7)式から求める氷の密度 ρ_i は

$$\rho_i = \frac{b-a}{c-d} \rho_w \tag{11}$$

であらわされる。すなわち、多孔質の水の密度を第20図の装置で測定して、測定前の水位 a よりも測定後の水位 d が低いときには、(6)式の代りに(11)式を用いて密度を求める必要がある。

実際に密度を測定した結果では、ほとんどすべての場合に測定前の水位 a よりも測定後に試料を捨てた後の水位 d が低かった。したがって密度の算出には(11)式を用いた。

水中の間隙に浸入して氷とともに捨てられる液のほかに、氷の表面に附着したままで捨てられる液のためにも液面の低下が起り得る。しかし空隙の無い氷で試した結果ではその量はこの装置では測定できないほど少なかった。

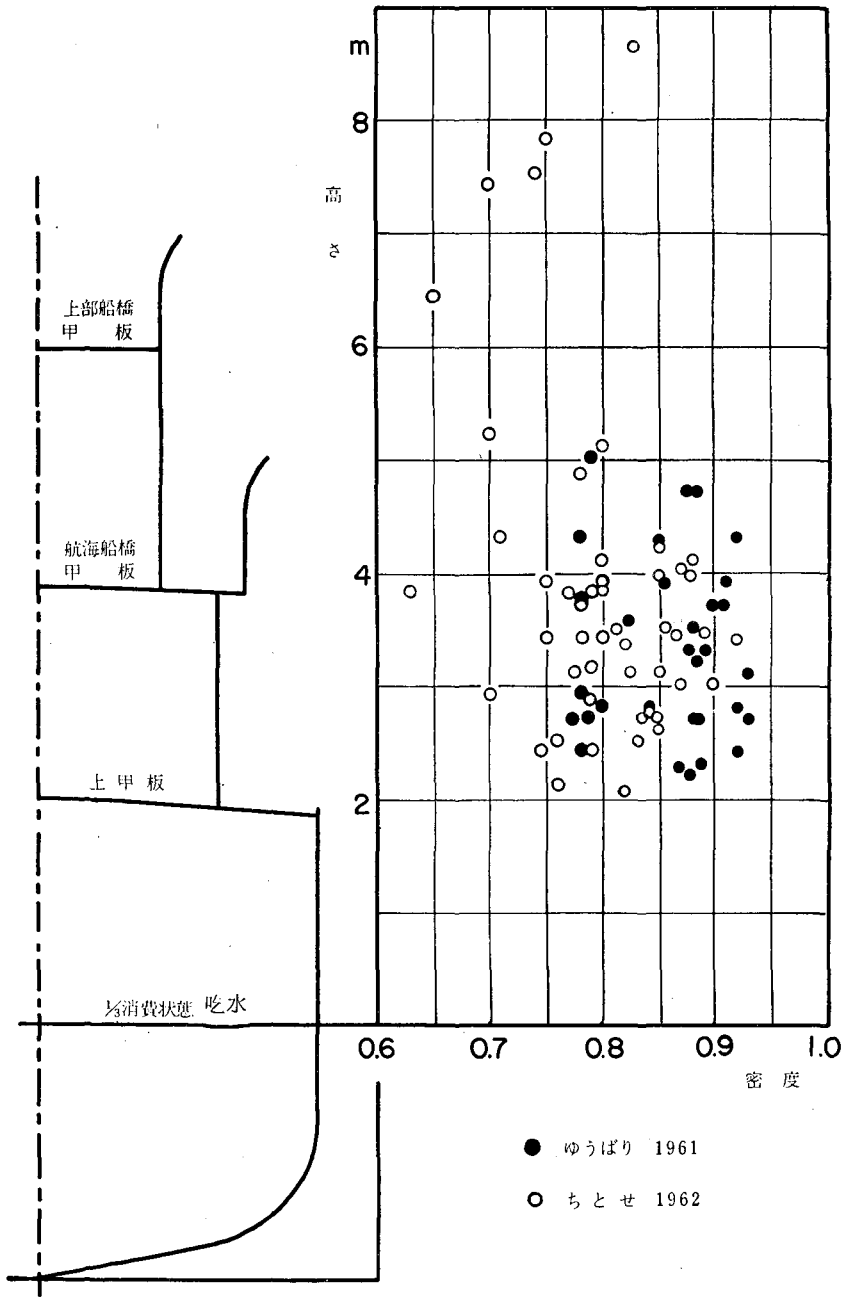
2 密度の測定結果

密度の測定は入港後に船上で行なった。測定試料は船体の各部から切り取ったものを用い体積はほぼ 300~600 cm³ で液の密度は 1.11~1.15 gr/cm³ であった。液の密度は数個の氷の密度の測定を終る度毎に、すでに述べた方法で検定した。

測定の結果は第21図および第7表に示した。図および表からわかるように、着氷後1乃至数日経った氷の密度は 0.65~0.90 という広い範囲に変動している。1961年の「つがる」の着

第7表 着氷の密度の測定結果 (「つがる」, 「第六弥彦丸」, 1961)

つ が る				第六弥彦丸	
試料採取位置	密度	試料採取位置	密度	試料採取位置	密度
左舷手摺 船首より 1m	0.77	右舷手摺 船首より 1m	0.79	左舷舷壁	0.82
” 3	0.80	” 3	0.77	中央部デリック上	0.86
” 5	0.83	” 5	0.85	左舷舷側	0.91
” 9	0.73	” 9	0.83	”	0.89
” 15	0.83	” 15	0.69	左舷船橋壁	0.78
” 18	0.78	” 18	0.79	前部艙口上 前	0.80
” 22	0.77	” 22	0.68	” 後	0.87
船首甲板左舷ボラード	0.84	船首甲板右舷	0.88	左舷甲板	0.83
左舷大錨下部甲板	0.79	右舷前部救命浮器	0.83	甲板室右舷パイプ下のつらら	0.90
左舷7.5m救命艇ダビット	0.85	右舷7.5m救命艇ダビット	0.70	右舷舷壁	0.88
船橋下部左舷側面	0.69	同上ダビット間の甲板	0.89	” 外舷	0.85
左舷船橋階段下支柱上部	0.67	右舷20mm機銃座下の壁	0.71	右舷舷側	0.87
” 下部	0.71	砲座上	0.84	繩梯子	0.74
” 下部	0.70	” 上	0.84	右舷船橋壁	0.78
左舷揚錨機	0.90	3吋砲身の下部	0.83	” 下部	0.86
船橋上部前面壁	0.78	右舷放球孔横甲板	0.83	右舷甲板 前	0.90
				” 後	0.90
				船橋右側甲板	0.85



第21図 着氷の密度の測定結果(「ゆうばり」,「ちとせ」)

氷の密度は0.67~0.90(32個), 漁船では0.74~0.91(18個), 1960年の「そらち」の氷は0.80~0.94(23個), 1962年の「ちとせ」の氷は0.65~0.92(48個)であった。着氷の密度はどの年のものでも可成りバラついた値をもっていたが, 漁船および「そらち」の着氷の密度は他のものよ

りいくらか大きい。

第 21 図からわかるように期待されたような凍着している高さ・密度の相違のあいだには意味のあるような関係は認められなかった。

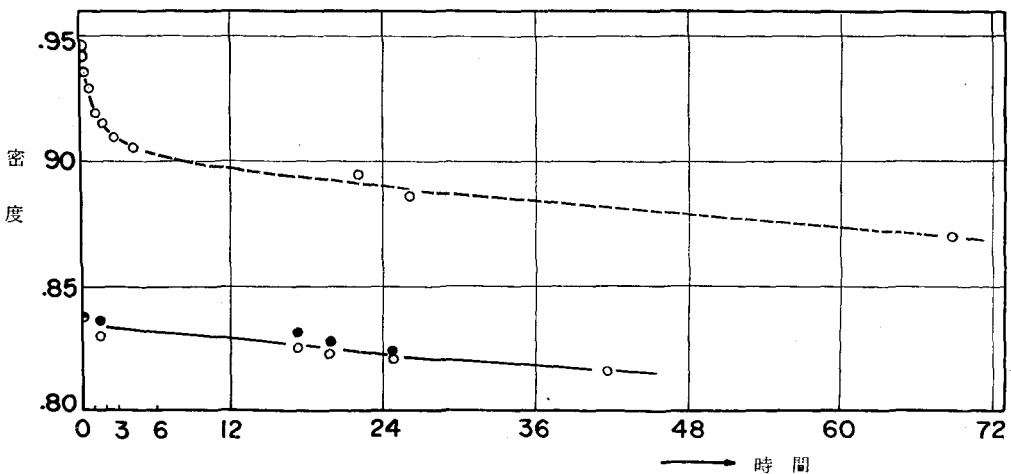
以上に述べた密度の測定はいずれも氷が氷着してから 1 乃至数日後に行なわれたものである。したがって、その間に水中のブラインの流下と氷の昇華のために氷の密度が変化する可能性がある。この点を確かめてみるために、人工的に作った着氷の密度の時間的変化を測定してみた。

3 着氷の密度の時間的変化の測定

船体に凍着する氷は海面から可成り高い部分では小さな水滴が次々に凍着してでき、船首または海面近くの部分の氷は波などで大量の海水が直接かかってくるものと見做すことができる。このことを考慮して、次のように 2 つの方法で人工着氷をつくり、それらの密度の時間的変化を測定した。

-15°C の低温実験室内に鉄板 (7 cm × 15 cm) を吊し、扇風機ではぼ 5 m/sec の風を吹きつけた。その鉄板に結氷温度の海水 (塩分: 32%) を霧吹きで吹きつける。すると、吹きつけられた水滴の一部分は鉄板上に凍着し、ブラインは鉄板の下部から流下する。吹きつける水滴の量が多ければ鉄板の下部から流下するブラインが多くなるので、吹きつける水量は適当に加減した。氷が適当な厚さに達したときに水滴の吹きつけを中止する。このようにしてつくった氷を -10°C および -6°C の低温室内に吊しておき、2~4 日間にわたって密度変化を測定した。その結果を第 22 図に実線で示した。

図から明らかなように、水滴の吹きつけを終った直後でも氷の密度は 0.84 で思ったよりも小さく、その後は時間が経っても密度は極めて僅かしか減少していない。すなわち、微小海水滴が次々に凍着してできる氷では、その密度は氷が成長している途中でも絶えず減少し続けて



第 22 図 着氷の密度の時間的変化の測定結果

おり、しかもその減少の割合は極めて速やかであると考えられる。そのために着氷の成長が止んだときには氷の密度は0.84という意外に低い値になり、大幅の密度の減少は着氷の成長が止まるときに殆んど終わってしまうようである。

次に、 -10°C の低温室内で充分冷却した鉄板を結氷温度の海水（塩分：32%）に短時間浸して引き上げ、ほぼ5 m/secの風を当てながら凍結させる。この操作をくり返して氷をつくと、大量の海水をかぶる場所のできる着氷のできかたに近似していると考えられる。この氷を -10°C の低温室中に吊しておいて密度変化を測定した結果が第20図に点線で記入してある。図から、この氷はその成長が止まった直後には密度が0.95近くであったが、数時間で0.91に減少し、その後の密度の減少は非常にゆっくりしていることがわかる。

微小水滴が凍着してできた氷では凍着すると同時にブラインの流下のために密度の急激な減少がはじまり、氷の成長が止まったのちの密度の減少はきわめて少ない。また、多量の海水をかぶってできた氷の密度は着氷終了後の数時間のあいだは急激に減少するが、その後はあまり変化しないということができよう。

すなわち、試験船による試験に際して入港後に測定した着氷の密度は、着氷終了時もしくはその数時間後の着氷の密度にはほぼ近いものであるということが出来る。ただし、上に述べた簡単な実験からもわかるように、着氷はそのできかたによって密度が非常にちがうことがわかる。船体の着氷の密度が第22図および第7表に示したように広い範囲にわたって変動しているのは着氷の生成の際の気温・水滴の温度、水滴の大きさその飛来強度などの相違によって生じたものであって、着氷してから測定された時までの時間が各試料によって異なることによって生じたものでないことは疑いない。

VII. 着氷が復原力に与える影響

着氷現象が、船舶の復原力におよぼす影響として、次の三点が考えられる。

- 1) 船舶の重量重心の変化
- 2) 船舶の風圧側面積と風圧モーメントの変化
- 3) 船舶の環動半径の変化

この他、着氷により船のトリムが変化し、その復原力に何等かの影響を与えることも予想されるが、重要度においては二次的なものと考えられる。

§1 船の復原力

船は一部または全部を水中に没して運動するため、真空中または空気中の運動とは違った面があるが、その一つに見掛質量効果がある。

これは、水上または水中で物体が運動するとき、あたかも物体の質量が増加したかのような効果を生ずることである。

すなわち、質量 m の物体をある力 f で加速する場合に空気中なら

$$\alpha = f/m$$

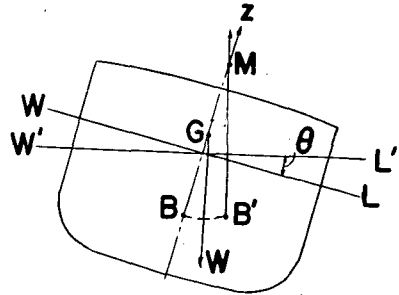
で与えられるような加速度を生ずるはずであるが、水中では同じ力で得られる加速度は小さい。それでその原因を質量が見掛上増加したためと考えて

$$\alpha' = f(m+m')$$

とすると、この m' が見掛質量である。

回転についても同様で、慣性モーメントが見掛上増加する。

船が静かにある角 θ だけ傾くと、重心 G に作用する重力 W と、新しい浮力の中心に作用する浮力とは一つのモーメントを形成する。このモーメントを復原モーメントあるいは復原力と云う。いま第23図において、はじめに船は水線 WL で直立状態で浮んでいるものとし、重心を G 、浮力の中心を B とする。



第23図 船に作用する重力および浮力

この状態では重力と浮力は一直線上にあって釣合っている。

次に船が排水量を変化することなく θ だけ傾いて

$W'L'$ なる水線になったとすると、重心には新しい鉛直線の方向に下向きに W なる重力が働き、浮心は新しい没水部の体積中心に移って B' となり、 B' に浮力 W が働く。この二つの力はモーメントを形成する。その大きさは G から浮力の作用線に下した垂線の長さを GZ とすれば

$$\text{復原モーメント} = W \cdot GZ \tag{12}$$

となる。このモーメントの向きが傾斜角を増大する方向であるならば、船はますます傾斜して遂に転覆するに至り、逆ならば直立状態に復帰する。

傾斜角がごく小さい間(約 10° くらいまで)では浮力の作用線と船体中心線との交点 M (メタセンターと云う)は、ほぼ一定点となる。いま θ は小さいから

$$\text{復原モーメント} = W \cdot GZ = W \cdot GM \cdot \sin \theta \cong W \cdot GM \cdot \theta \tag{13}$$

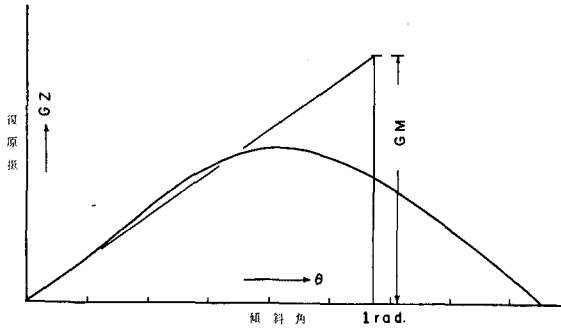
で表わされ、この範囲を初期復原力という。

いま M が G より上にある時に $GM > 0$ とすれば、船が復帰力を有するか否かは、 GM の正負で左右される。すなわち

$$\left. \begin{array}{l} GM > 0 \text{ で安定} \\ GM < 0 \text{ で不安定} \\ GM = 0 \text{ で中性} \end{array} \right\}$$

である。

傾斜がさらに大きくなると、 M はもはや一定点でなくなり、復原モーメントは θ に比例しなくなる。通常その形は正弦曲線に似ており、第24図の如くなる。



第24図 船の傾斜角と復原矩の関係

角度に達すると極大となる。このときの復原矩の値を最大復原矩 GZ_{\max} という。さらに θ が増加すると GZ は減少を始めて、遂に零になる。すなわちその角度まで傾くと復原力を喪失するわけで、この角度を復原性限界角という。

この復原矩曲線は船型、排水量や重心の高さによって変化する。

着氷のために船の重心が上昇すると、 GM と GZ は減少する。すなわち、同じ傾斜角に対する復原矩が減少することになる。

つぎに船の横揺れの最も簡単な場合として、抵抗も強制外力もない場合を考える。ただし加速度に比例する抵抗すなわち見掛質量効果は考慮する。

船が静水中を動揺しているときの回転の中心は厳密には求められていないが、船の重心に極めて近いことが知られている。したがって、重心を座標の原点として、船の対称面内において水平な線を x 軸、それに直角で水平な線を y 軸、鉛直な線を z 軸とする。

船が小角度で横揺れ、すなわち x 軸のまわりに廻転している時には、 $GZ = GM \cdot \theta$ で表わされる。また、運動の方程式は

$$(I_x + J_x) \ddot{\theta} + W \cdot GM \cdot \theta = 0 \quad (14)$$

となる。ただし、 I_x は船の x 軸のまわりの慣性モーメントで J_x は同じ x 軸のまわりの見掛質量の慣性モーメントである。

いま $I_x + J_x = I/g$ とおくと、

$$(I/g) \ddot{\theta} + W \cdot GM \cdot \theta = 0$$

となり、更に $\lambda^2 = W \cdot GM \cdot g / I$ とおくと

$$\ddot{\theta} + \lambda^2 \theta = 0 \quad (15)$$

となる。

すなわち、船体は単振動をなし、その周期 T は、

$$T = 2\pi/\lambda = 2\pi \sqrt{\frac{I}{GM \cdot W \cdot g}} = 2\pi K / \sqrt{GM \cdot g} \quad (16)$$

第24図は横軸に傾斜角 θ を取り、縦軸に復原モーメント $W \cdot GZ$ 、または W は角度に無関係なので省略して、 GZ をとる。前者を復原力曲線、後者を復原矩曲線という。

復原矩は傾斜が小さいときには、前に述べたように傾斜角 θ に比例するから、曲線は原点を通り GM を切線とする直線と切するが、 θ が増加するにつれて、この直線より外れ始め、ある

であることがわかる。

$K = \sqrt{I/W}$ は見掛質量を含む環動半径である。

T が船が小角度で横揺れしているときの周期で、抵抗があってもほとんど変化せず、また相当大角度の揺れでなければ、ほとんど一定であるから、この値が船の基本の動揺周期として用いられる。

環動半径 K と最も密接な関係のあるのは船幅 B である。そのため K のかわりに $C = K/B$ を用いることが多い。 C は船の種類によってある範囲にあることが知られており、実船試験に用いた巡視船および漁船ではともに 0.4 前後である。

§2 復原力判定の基準

船舶の安全確保の見地から、船舶の復原性に対して適当な基準を設ける必要があることは従来から痛感されており、わが国では数年前に旅客船に対する基準が法制化され今日に至っている。

一方外国においても、こうした基準を既に設けている国がいくつかあり、特にソ連、ポーランド、ドイツは着氷の影響を考慮した基準を適用している。

現行法規では、船舶の航行区域は、遠洋、近海、沿海 (I, II) 及び平水区域に分類している。

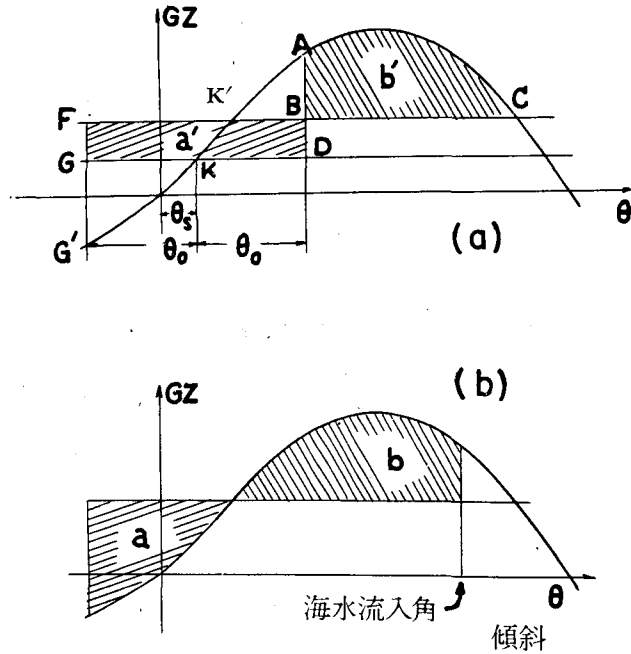
船舶はその航行状態により、すなわち旅客、貨物、水、油等の搭載量、搭載法などにより、復原性能に大きな差を生ずるが、すべての使用状態において定められた復原性の基準を満足すべきであることを要求している。更に復原力曲線の浮力範囲には、船樓およびこれに準ずる上部構造物で有効と認められるものを算入する。これに算入した船体の部分に開口があるときはその開口までの傾斜角(海水流入角と呼んでいる)を越える部分の浮力は有効と見做さない。また、復原性に影響する外力としては、旅客の移動、風、波、操舵、船内重量物の移動、海水の打込み等を考えている。ところがこれ等の影響をすべて直接算入して一つの基準を設けることは不可能なので、三つの基準(便宜上甲、乙、丙基準と呼んでいる)を設けて船舶の安全を確保しようとしている。

これらの三つの基準のうちで、乙基準は外力として風と波を考え、船の転覆を考慮した基準で、沿海以上の船舶に適用され最も重要なものと考えられる。

乙基準は外力の組合せが風と波であるので、あらゆる用途の船舶にあてはまる一般性を有しており、しかも転覆を考慮した基準であるため、着氷による復原性の劣化の問題も主としてこの基準に結び付けて検討するのが適当である。

乙基準の内容は次のとおりである。先ず船舶が標準の定常風(近海以上 26 m/s, 沿海・I: 19 m/s, 沿海・II: 15 m/s)を横方向から受け、この風力で十分に発達した横波によって横揺れしている場合を考える。この定常風による風圧偶力矩を D_w とすると、 D_w によって船は風下側に θ_0 だけ傾き、この点を中心として横揺れ角 θ_0 で動揺しているわけである。そうして風上にもっとも傾斜したときに突風(風圧偶力矩を $1.5 D_w$ とする)を受けても転覆しないということである。

すなわち第 25 図 (a) の復原曲線図について云うと、



第25図 乙基準による復原力の図式表示

$$b' = \text{面積 } ABC > a' = \text{面積 } BFGD$$

でなければならないということである。ところでこの条件は、

$$\text{面積 } AKD \doteq \text{面積 } GG'K$$

であるから、

$$a = a' + \text{面積 } AB'K \doteq \text{面積 } FK'G'$$

$$b = b' + \text{面積 } ABK' = \text{面積 } AK'C$$

なる面積 a, b を考え、これに海水流入角を考慮して b を定めると(第25図(b)),

$$C = b/a > 1 \tag{17}$$

であらわすことができる。 C を普通安全示数と呼んでいる。 $C > 1$ という条件は、これまでの経験から、すなわち荒天中で安全であった船や転覆した船の資料を蒐集解析して得られたものである。

なお、風圧偶力矩 D_w の算出には次式が採用されている。

$$D_w = 0.76 \times 10^{-4} V^2 Ah/W. \tag{18}$$

ただし、 V は標準風速 (m/s)、 A は船舶の喫水線上の投影側面積 (m^2)、 h は A の面積中心から喫水線下の投影側面積の中心までの距離 (m)、 W は船舶の排水量 (t) であり、 D_w は船舶の傾斜角に対して不変とし、突風の変動率を $\sqrt{1.5}$ としている。

風と波との関係は Sverdrup-Munk の波浪予報理論を採用し、ある標準風速以下の風によって生ずる波と標準風とは共存するとしている。

船舶の横揺れ角 θ_0 としては、標準波を真横に受けて同調した時の強制横揺れ角

$$\theta_{同調} = \sqrt{\pi r \theta_w / 2N} \quad (19)$$

を採用している。この式中の有効波傾斜係数 r としては、近似式

$$r = 0.73 + 0.60 OG/d \quad (20)$$

を用いる。OG は重心の水線上の高さで、 d は吃水である。N は Bertin の表現による静水中の横揺れ抵抗係数である。

θ_w は最大波傾斜で

$$\theta_w = 180 \delta, \quad (21)$$

ただし δ は波の粗度 (波高/波長) であり、船舶の横揺れ周期に応じ Sverdrup-Munk の曲線から求める。また、Bertin の横揺れ減衰係数 N は一般の船舶では 0.02 とし、大洋波の不規則性を考えて横揺れ角の軽減度を 0.7 とする。したがって横揺れ角 $\theta_0 = \sqrt{138 r \delta / N}$ で求めることにしている。

§3 着氷が復原力に与える影響

1 着氷による重心の変化

着氷の重量および重心についてはすでに第2表に示した。これらの着氷によって船体の重心の位置が着氷前より上昇したが、その結果を第8表に示した。

表から明らかなように、巡視船では 13~25 屯の着氷のために重心がほぼ 10 cm 上昇した。また GM は 10~14 cm 減少した。漁船では約 6 屯の着氷によって重心は 4 cm 上昇し、GM は 4 cm 減少した。これらの結果、のちに述べるように、復原挺が減少し、復原性が劣化した。

第8表 着氷による試験船の重心位置の変化

	そらち (着氷量: 25.52 屯)			ゆうばり (着氷量: 13.39 屯)		
	着氷前	着氷後	差	着氷前	着氷後	差
KG (m)	2.57	2.67	+ 0.10	2.67	2.75	+ 0.08
OG (m)	0.02	0.03	+ 0.01	0.34	0.37	+ 0.03
GM (m)	0.85	0.73	- 0.12	0.81	0.72	- 0.09
	ちとせ (着氷量: 19.99 屯)			第六弥彦丸 (着氷量: 5.84 屯)		
	着氷前	着氷後	差	着氷前	着氷後	差
KG (m)	2.68	2.79	+ 0.11	2.02	2.06	+ 0.04
OG (m)	0.40	0.43	+ 0.03	- 0.08	- 0.09	- 0.01
GM (m)	0.82	0.68	- 0.14	0.37	0.33	- 0.04

註 「そらち」「ゆうばり」「ちとせ」は 1/3 消費状態、第六弥彦丸は冬季漁場発の状態。

2 風圧側面積の増加とその重心

船体に着氷し、吃水が不変と仮定すれば、風圧側面積は増加する。しかし排水量も増加するため吃水が増し風圧側面積の一部は減少し、従って風圧側面積はその差だけ増加あるいは減少することになるのであるが、実験によると一般には増加することが知られている。従って風圧による傾斜モーメントが増加する。

凍着した氷の寸法を細かく計測し、その寸法を船の側面図に書き込み、その面積と基線上の重心の高さを図上で求めたものから得られた風圧側面積を第9表に示した。表中には同時に風圧モーメントの増加量も記入してある。また参考までに、のちに述べるソ連の着氷基準で求めた値を併記してある。この値についてはソ連の基準が複雑なため、わが国の規則に準じて求めた概算値である。

第9表 着氷による風圧側面積および風圧モーメントの増加

船名	状態	算出方法		風圧側面積の増加		増加した部分の面積の中心		風圧モーメントの増加	
				m ²	%	水線上 OG''m	基線上 KG''m	m ³	%
そらち	1/3消費状態	実測		14.68	8.58	3.09	5.64	45.4	11.64
ゆうばり	1/3消費状態	実測		11.17	6.02	3.35	5.68	37.42	8.75
第六 弥彦丸	—	実測		3.04	4.10	2.87	4.97	8.71	7.2
		ソ連の 基準	A	7.45	10.00	3.25	5.35	24.22	20.00
			B	5.59	7.55	3.25	5.35	18.16	15.00
ちとせ	1/3消費状態	実測		14.46	7.80	3.41	5.69	49.31	11.46
		ソ連の 基準	A	18.54	10.00	4.64	6.92	86.03	20.00
			B	13.91	7.50	4.64	6.92	64.52	15.00
	補填軽荷状態	実測		14.46	7.59	3.52	5.69	50.90	11.32
		ソ連の 基準	A	19.05	10.00	4.72	6.89	89.92	20.00
			B	14.29	7.50	4.72	6.89	67.44	15.00

註：着氷によって吃水は不変とする。

ソ連基準のAは66°30'N以北及び60°S以南、Bはそれ以外の冬期帯に適用する。

第9表からわかるように着氷によって、吃水不変と仮定すれば風圧側面積が巡視船では約6~9%、漁船では約4%増加し、その結果、風圧モーメントが前者では9~12%、後者では約7%増加したことになる。このために風圧偶力矩が増大し、風下への船の傾きが増す。

3 環動半径の変化

船舶が着氷すれば、凍着した氷のため、船の重心が変化し、それに見掛け質量が変化するため環動半径が変化する。

従って横揺周期や横揺減減係数等が変化し横揺れ角が変化する。

第 10 表 着氷および除氷時の環動半径 (K/B)

	K/B		
	着氷時	除氷時	着氷時の除氷時に対する比 × 100
そらち	0.399	0.384	103.8
第六弥彦丸	0.44	0.44	100.0
ゆうばり	0.402	0.393	102.0

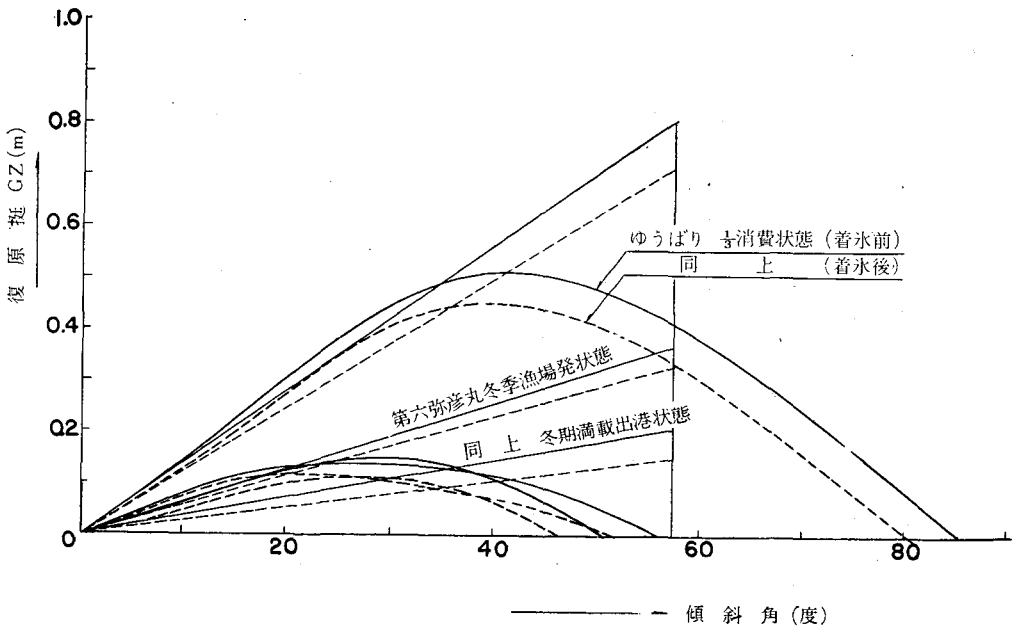
着氷前後の環動半径と船幅の比 K/B を、重心試験と動揺試験より求めて第 10 表に示してある。なお、「ちとせ」では重心試験および動揺試験を行なわなかったため、環動半径は求められていない。

4 着氷前後の復原性能

供試船について着氷前後の復原性能の変化を主として乙基準の見地から検討し、その結果を第 11 表に示してある。

巡視船については、現行規則の乙基準に巡視船の特質を加味して求めた値である。すなわち、環動半径の値は、1/3 消費状態に近い状態の実測値を用い、船の状態の変化によって不変としていることと、 N 係数は、岩田¹²⁾ が求めた任意の状態に応じた値を用いている点だけがすでに述べた乙基準による計算と異なるが、安全示数そのものは充分意味がある。

しかし漁船は、用途も船型も客船や巡視船と異なるので、安全示数の絶対値そのものは意味がなく、ただ比較の意味があるのみと思われる。また漁船については、従業制限からみれば、



第 26 図 着氷前後の復原挺曲線「ゆうばり」、「第六弥彦丸」1961。実線は着氷前、破線は着氷後

第 11 表 着 水 前 後 の

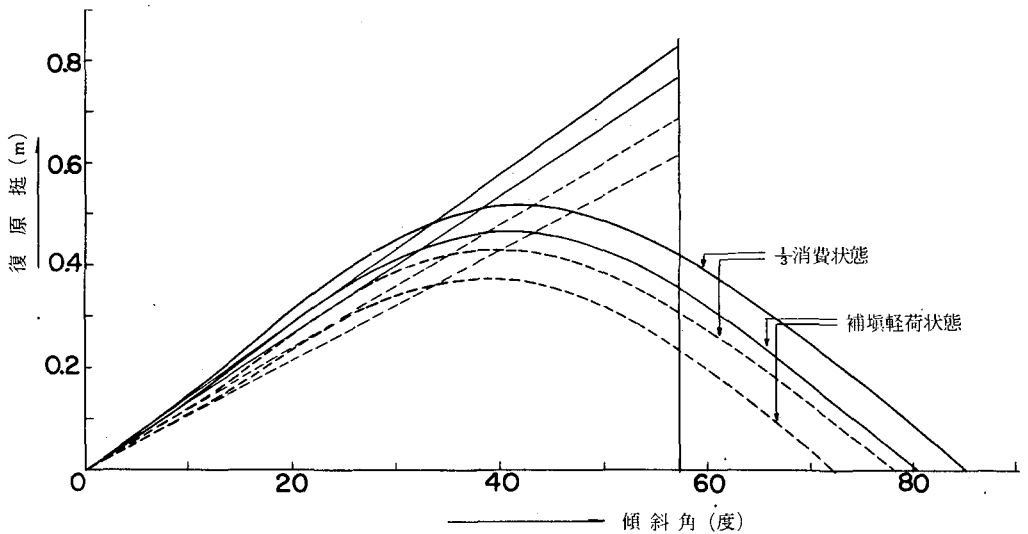
船 名		そ ら ち		ゆ う ば り		
		試 験 状 態		1/3 消 費		
項 目	状 態	着 水 前	着 水 後	着 水 前	着 水 後	
		航 行 区 域	近 海	近 海	近 海	近 海
排 水 量		屯	476.0	501.0	420.56	433.38
喫 水	相 当	m	2.55	2.64	2.33	2.38
	前 部	"	2.19	2.53	2.13	2.37
	後 部	"	2.86	2.69	2.53	2.43
	平 均	"	2.50	2.61	2.33	2.40
	「ト リ ム」	"	0.62	0.16	0.40	0.06
重 心 関 係	KG	"	2.57	2.67	2.67	2.75
	GM	"	0.85	0.73	0.81	0.72
	OG	"	0.02	0.03	0.34	0.37
復 原 性 能	最大復原挺 (GZ_{max})	"	0.54	0.46	0.51	0.45
	最大復原挺を生ずる傾斜角度	deg			41.5	40.0
	復原性範囲 (θ_R)	"	91.2	83.3	85.7	80.4
	海水流入角	"	54.9	53.2	58.8	57.8
	風圧側面積 (A)	m ²	170.99	181.15	185.8	194.5
	風圧偶力挺 (H)	m	3.56	3.63	3.41	3.47
	風圧による傾斜偶力挺 (D_W)	"	0.066	0.068	0.077	0.080
	有効波傾斜係数 (r)		0.74	0.74	0.82	0.82
	横揺周期 (T_S)	sec	6.10	6.86	6.54	7.13
	波の岨度 (S)		0.10	0.10	0.10	0.10
	横揺減減係数 (N)		0.021	0.019	0.022	0.022
	横揺角 (θ_0)	deg	22.1	23.0	22.6	23.0
	安全示数 (C)		3.37	2.54	3.04	2.59
	着水前の安全示数に対する 着水後の安全示数の割合	%	100	75.4	100.0	85.2

- 註： 1. 冬期漁場発の状態 (着水前) とは、第 1, 第 2, 第 3 魚艙 (容積 76.56 m³) に 47 t (12,530 貫) の魚を積み、重油 5,090 リットル、潤滑油 102 リットル、白灯油 115 リットル、マシン油 13 リットル、清水タンク 0.580 t、石炭 1 t (上甲板) を有する状態である。
2. 冬期満載出港状態 (着水前) とは夏期満載出港状態で魚艙内に入れる氷 5 t を含まず、石炭 1.5 t を上甲板上及び舷壁張出部に搭載しており、重油 11,090 リットル、白灯油 276 リットル、潤滑油 220 リットル、マシン油 90 リットル、清水 1.510 t を搭載している状態である。

復原性能の比較

ちとせ		第六弥彦丸							
1/3 消費		冬期 漁場 発				冬期 満載 出港			
着氷前	着氷後	着氷前		着氷後		着氷前		着氷後	
近海	近海	近海	沿海	近海	沿海	近海	沿海	近海	沿海
407.20	427.19	179.48		185.32		139.33		145.17	
2.28	2.36	2.45		2.50		2.08		2.14	
2.08	2.32	2.18		2.30		1.31		1.44	
2.48	2.44	2.68		2.67		2.79		2.78	
2.28	2.38	2.43		2.49		2.05		2.11	
0.40	0.12	0.50		0.37		1.48		1.34	
2.68	2.79	2.02		2.06		2.20		2.25	
0.82	0.68	0.37		0.33		0.21		0.15	
0.40	0.43	- 0.08		- 0.09		0.47		0.46	
0.51	0.43	0.14		0.11		0.15		0.11	
42.5	39.5	26.0		21.5		29.5		27.0	
85.2	78.1	56.2		51.7		50.5		46.4	
59.6	58.1	46.4		44.6		59.2		57.3	
185.4	195.9	74.5		76.3		83.5		85.0	
3.40	3.48	2.85		2.90		2.84		2.89	
0.080	0.082	0.061	0.032	0.061	0.033	0.087	0.047	0.087	0.046
0.84	0.84	0.71		0.71		0.89		0.88	
6.55	7.41	7.29		7.72		9.69		11.44	
0.10	0.098	0.099	0.080	0.095	0.076	0.081	0.056	0.069	0.039
0.019	0.018	0.01		0.01		0.01		0.01	
25.0	25.4	31.1	28.0	30.4	27.2	31.4	26.2	28.9	21.7
2.57	2.07	0.23	0.85	0.07	0.55	0.04	0.63	—	0.44
100.0	80.5	100.0	100.0	30.4	64.7	100.0	100.0	—	69.8

- 横揺減滅係数 (N) については、ビルヂキールを有する普通の船型の場合 $N=0.02$ とするが、本船はビルヂキールがなく、23 米の丸型巡視船の N が 0.01 であるので、これに倣い、使用状態の変化による N の変化は考えず $N=0.01$ に統一した。
- ちとせの横揺周期は実測しなかったので、着氷前の横揺周期は完成時横揺試験結果より求めた $K/B = 0.404$ を用いて計算した。着氷後の横揺周期は上記完成時の K/B をもとにし、「そらち」、「ゆうばり」の着氷による K/B の増加を参考にして $K/B = 0.417$ と推定して計算した。



第27図 着氷前後の復原挺曲線「ちとせ」1962. 実線は着氷前, 破線は着氷後

近海以上の基準を考えてよいと思われるが, 参考のために沿海・Iの基準についても求めてある。

第11表からわかるように, 試験船はいずれも着氷によって重心が上昇し, 最大復原挺, 復原性範囲, 海水流入角などが減じ, 風圧側面積, 風力偶力挺などが増し, 動揺周期も長くなり, 横揺れの抵抗が減少している。それらの結果, 安全示数が15~25%減少したことがわかる。しかし巡視船では安全示数が減少したとはいえ, 乙基準で定められた値に対しては十分な余裕がある。これに対して, 漁船では上記諸量の増減の傾向は巡視船と同様であるが, 安全示数の劣化は見過しにはできないほど大きい。

「ゆうばり」と「第六弥彦丸」および「ちとせ」について着氷前後の復原挺曲線を第26, 27図にそれぞれ示してある。船体の復原性にもっとも密接な関係のある復原挺と傾斜角の関係が着氷のために, 第11表に示したように, 劣化しているのが明らかである。

VIII. 船の設計にあたって考慮すべき基準着氷量

§1 着氷基準の算出

巡視船および漁船を用いて行なった実船試験の結果, 北海道の近海でおこる着氷は船体の安定性能にとって無視できない悪影響をおよぼすことがわかった。したがって, 着氷水域を航行することのある船舶に対してはあらかじめ着氷による安定性能の劣化を考慮に入れて設計建造することが望ましいことはいうまでもない。このためには, どの程度の量の氷がどこに凍着するかを想定する必要がある。すでにのべたように, 3年にわたる実船試験で着氷の実態がかなり明らかにされたといえ, それらの結果は主として350吨型巡視船に特定の海象・気象条件のもとで生じた着氷についてのものである。しかし, 以下に述べるように, それらの実船試験の結果とその他の巡視船の着氷報告に基づいて, 船の設計にあたって考慮すべき着氷基準, す

なわち基準となる着氷量とその分布、風圧側面積の増加、環動半径の変化などを想定することができる。

1 着氷量

船舶の復原性能を検討するため、何屯の氷が船の何処に凍着するかを想定するのが最も重要な問題である。そしてこの値は、既に述べたように、気象、海象、船舶のもっている特性と航行の方法および着氷水域航走時間の長短等に関係する。

しかし、着氷の発生する水域を船舶が何時までも航行し続け、気象、海象が不変で人為的除氷が行なわれないと仮定すれば、その船は遂には転覆乃至沈没するに至るであろう。一般には、気象や海象は変化するし、船が島蔭に退避したり、着氷水域外への避難、あるいは人為的除氷も行なわれるであろう。

要するに着氷量の想定とは、船が気象、海象状況に応じて単位時間あたり何屯位、船の何処に着氷するか、そしてそのまま何時間位航行し続けるかを仮定することにある。

そして、この量を多く仮定する程安定性能上安全な船になるのは勿論である。しかしながら、1年中のある限定された季節に、しかも限られた水域で発生する現象であるからあまり過大に評価することは適切でない。

一方これまで着氷現象を考慮せずに完成された巡視船が、幾度か着氷に遭遇しながら無事に任務を全うして来たことも忘れてはならない。と同時に1959年12月末に北千島附近で約62屯の着氷をみた「だいとう」(1/3消費状態排水量526屯)、全く同じ頃に中部千島沖で49屯着氷した「そらち」、1954年2月に38屯着氷した「とかち」(1/3消費状態排水量405屯)などの多量の着氷報告も考慮する必要がある。

すなわち、これまでの報告中最も着氷量の多い「だいとう」と「そらち」の結果をみると、排水量1屯あたりの着氷量はそれぞれ0.118屯と0.116屯で、ほとんど同じ値となる。

二隻の全く独立した巡視船の着氷比が符合しているのは興味深いことである。

「だいとう」の約60屯の着氷は、約24時間で凍着したと報じられている。とすれば2.5屯/時の平均着氷量があったことになる。

次に実船実験の成績について考えてみる。1962年2月「ちとせ」について初めて単位時間あたりの着氷量が求められたが、最大の着氷成長が起こったのは、1962年1月17日の2~4時の間で、1.99屯/時と云う値が得られた。当時の気温は、2時で -7.0°C 、4時で -7.5°C 水温は2時で $+0.3^{\circ}\text{C}$ 、4時で $+0.5^{\circ}\text{C}$ 、風速は2時で8.0 m/s、4時で11.5 m/s、波浪階級は2時で4、4時でも4で、厳冬期としてはありふれた条件であった。

乙基準では、既に述べたように近海以上の航行区域に対し26 m/sの定常風を考えている。巡視船の復原力判定にも同じ風速を採用しようとしている。

もしこの位の風が、気温、水温等が実船試験時と同じ条件のもとで吹送し、波浪が充分に発達していたとしたら、「ちとせ」では平均2屯/時位の着氷はめづらしくないと考えられる。

62屯も着氷したときの「だいとう」の船長の手記によれば、当時の気象、海象はこの位の

大きさの巡視船の行動の限界であると述べている。「だいとう」は「ちとせ」よりやや大きい巡視船である。それ故、「ちとせ」級の巡視船で2 屯/時の着氷量を想定することは決して低日の量ではないと考えられる。

次に着氷しながら、何時間位続航するかが問題である。

これまでの実船試験の経験から、着氷成長量の大きいのは主に夜中である。これは気温の低下と着氷量とを結び付ければ領けることである。もっとも -10°C 前後の気温が口中も続くとすれば、休みなしに大量の着氷が起こるかも知れない。

夜中に多く着氷することと、夜中の除氷作業の困難さを考えると、少なくとも一晩位除氷しないで続航できる位の余裕も考えておく必要がある。それを今10 時間と仮定すると、「ちとせ」級の巡視船で全着氷量は20 屯となる。

船速を10 節と仮定すると、この間100 哩の航行ができる。この間に島蔭退避か避難入港によって、それも不能の時は追風になるように針路を変えて除氷作業の余裕を見出せばよいし、またそれは可能であろう。

以上の観点から、「ちとせ」級の巡視船で約20 屯の着氷量を見込むことにする。

次に着氷の重心を、これまでの実験で得られた「ちとせ」の値と一致するとして、船体上の氷の分布を考えてみる。

これまでの実船試験で、上甲板下の外板は絶えず波浪に洗われてほとんど着氷しないということを経験しているので、凍着部は上甲板舷側線より上方の風圧を受ける部分、すなわち風圧側面積の算出に用いた部分であると考えることができる。

また、「ちとせ」の状態を1/3 消費状態と仮定すると、

吃 水：2.28 m

暴露甲板上暴露部の面積：230.6 m^2

同上の中心の基線からの高さ $KG_{(上甲板)}$ ：4.39 m

上甲板舷側線上の風圧側面積：81.7 m^2

風圧側面積中心の基線からの高さ $KG_{(側面積)}$ ：6.22 m

氷の重心の基線からの高さ：5.12 m

である。また

暴露甲板暴露部の着氷量： w_1 屯

風圧側面の着氷量(両舷で)： w_2 屯

全着氷量：20 屯

とすると、次の連立方程式を満足する w_1 , w_2 を求めればよい。

$$\left. \begin{array}{l} w_1 + w_2 = 20 \\ 4.39 w_1 + 6.22 w_2 = 5.12 \times 20 \end{array} \right\}$$

したがって、

$$w_1 \doteq 12 \text{ 吨}$$

$$w_2 \doteq 8 \text{ 吨}$$

となる。すなわち、暴露甲板暴露部および風圧側面の単位面積あたりの着氷量はそれぞれ 52 kg/m^2 , 49 kg/m^2 となる。これらの値から平均 50 kg/m^2 の着氷量とするのが妥当である。

この単位着氷量を用いて、全着氷量とその重心の高さを「ちとせ」について逆に求めると、それぞれ 19.70 吨, 5.16 m となり、重量は 20 吨より約 1.4% 減じ、重心は実測値より約 1% 上昇する。

2 風圧側面積の増加

着氷による風圧側面積の増加とその重心について、これまでの実験結果をまとめると、第 12 表のとおりとなる。

第 12 表 風圧側面積の増加とその重心

	上甲板舷側線 上の風圧側面 積 $A \text{ m}^2$	着氷により増 加した風圧側 面積 $\Delta A \text{ m}^2$	$\frac{\Delta A}{A} \times 10.0$	A の基線上 の高さ $KG_0 \text{ m}$	ΔA の基線 上の高さ $KG'' \text{ m}$	$\frac{KG''}{KG_0}$
そらち	81.7	14.68	18.0	6.22	5.64	0.907
ゆうぼり	81.7	11.17	13.7	6.22	5.68	0.914
ちとせ	81.7	14.46	17.7	6.22	5.69	0.915
平均			16.5			0.912

しかしながら、実験中の風速は何れも 26 m/s の標準風より低いものであった。従って 26 m/s 位の風速では、さらに風圧側面積の増加分 ΔA は増し、その重心も上昇するものと思われるので、一応次のとおりとすればよいであろう。

$$\left. \begin{aligned} \Delta A/A \times 100 &= 20 \\ KG''/KG_0 &= 1 \end{aligned} \right\}$$

3 環動半径の変化

着氷前後の環動半径の変化について、第 11 表を参考にし、着氷時の環動半径を着氷前の 4% 増しと考える。

以上のような考察にもとづいて、巡視船に対する着氷の基準として次のように定めるのがもっとも適切であると考えられる⁸⁾。

§2 巡視船の着氷基準

1 着氷量

着氷量は、暴露甲板の暴露部および上甲板舷側線上の投影側面積 1 m^2 につき 50 kg とする。この場合の投影側面積は両舷を考慮するものとする。

2 着氷による風圧側面積の増加とその上下の中心

着氷による風圧側面積の増加は、上甲板舷側線上の投影側面積の 20% とし、その上下の重心は後者のそれに一致するものとする。

この場合、着氷のため吃水が増加して変化する風圧側面積は、風圧側面積に算入しないものとする。

3 環動半径

着氷時の環動半径は着氷前の4%増とする。

4 着氷の浮力

着氷の浮力は船の浮力に算入しないものとする。

§3 ソ連の着氷基準との比較

前節で述べたように、ソ連は1948年に商船の復原力に関する暫定規則⁹⁾を設けたが、その中で着氷に関する基準を設けていた。

その後1960年の安全条約の改正会議に、船の復原性に関する膨大な基準案を提出した。この案は承認されなかったが、この中に1948年のものを修正した着氷に関する基準が含まれている。

これは1948年のものより、基準の形としては優れたものと考えられ、ソ連のこの方面の研究の成果を物語っている。

その内容の要約は次のとおりである。

北緯66°30'以北・南緯60°以南の冬期帯および主管庁が着氷の危険が特に大きいと認めた水域を航行する船舶には、着氷基準を次のとおりとする。

1 着氷量としては次の量を考える。

- (a) 暴露甲板の暴露部は30 kg/m²の着氷量。
- (b) 水線上の風圧側面には15 kg/m²の着氷量。
- (c) 66°30'N以北および60°S以南以外の冬期帯では(a)、(b)の1/2着氷量。

2 風圧側面積

- (a) 水線上の船体、船樓、および甲板室の側面積は、面積係数を1.0とする。
甲板上に別々に配置された丸い断面(管、煙突、マスト)を有するものは、流線係数を0.6とする。
- (b) 連続した面の全投影側面積は、ハンドレール、円材(マストを除く)、索具や他の不連続な面積を考慮して5%増し、静モーメントは10%増しとする。
- (c) 着氷時には、(b)の増加量をそれぞれ10%と20%増しとする。
但し66°30'N以北および60°S以南以外の冬期帯では、それぞれ7.5%と15%増しとする。
- (d) 風圧偶力矩は、水線から測り、風圧 $P(\text{kg/m}^2)$ は船の種類と、水線からの全投影側面積 $S(\text{m}^2)$ の中心までの距離 $Z(\text{m})$ に応じて第13表から求める。風圧による傾斜モーメントは次式による。

$$M_{\text{heel}} = 0.001 PSZ$$

第 13 表 風圧偶力矩を求める表 (ソ連の着氷基準による)

船の資格	Z													
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0 以上
航洋船	—	96	107	117	125	131	136	140	144	147	150	153	155	156
限定航洋船	—	54	61	66	71	74	77	80	82	84	86	87	88	89
沿岸船	24	27	30	33	35	37	38	39	40	41	42	43	43	44

以上のとおりであるが、この基準に基づいて計算した着氷重量とその重心位置は、着氷の重量と重心の項第 3 表に同時に記入してある。その表から明らかのように、ソ連の基準にしたがって求めた着氷量は筆者等の実船試験の際に凍着した量よりも著しく少ない。また氷の重心も非常に低い。もっともこうした基準で求めた重心と、実験で求めた重心とが必ずしもよく一致するとは思われないが、筆者等の実験結果とのちがいが大きすぎるように思われる。その理由としてはソ連が基準作成のために使用した資料が、巡視船に比較して乾舷が少ない船のものであったという可能性が考えられる。と云うのは、巡視船より乾舷が低い「第六弥彦丸」について計算された氷の重心の高さが実測された例と比較的よく一致するからである。

着氷量については、ソ連の基準による量は意外に少ない。周知のように多量の流氷が存在する海域の波やうねりは、流氷が存在しないかもしくは極めて少ない海のそれらとは比較にならぬほど小さい。したがって着氷量も少ないであろう。もしもソ連の着氷基準が北氷洋沿海のように流氷が極めて多い海域のことのみを考えているか、もしくは着氷防止について充分有効な方法を確立しているのであれば、この程度の着氷量を考えただけで充分であるかもしれない。しかし、少なくとも北大西洋、日本海北部もしくは北部千島沿海に対しては着氷量を過少に評価していると云うことができる。

風圧側面における着氷については、前項の基準では上甲板より上の部分のみを考えているが、ソ連の基準では水線上を考えている。このため第 9 表の値をそのまま比較することはできない。ソ連が水線上の側面全部に対して着氷の可能性を考えているということは、問題としている海域では波があまり大きくなく、しかも気温が非常に低いということを示していることになる。

環動半径に関しては、ソ連は基準を設けていないため比較はできない。

§4 現存船に対する着氷基準の適用結果

第一管区海上保安本部配属の、近海以上の航行区域を有する巡視船はすべて着氷の可能性がある。それらのうち最も着氷の機会の多い第 14 表に記載した巡視船について、この着氷基準を適用しその適否を調査した。

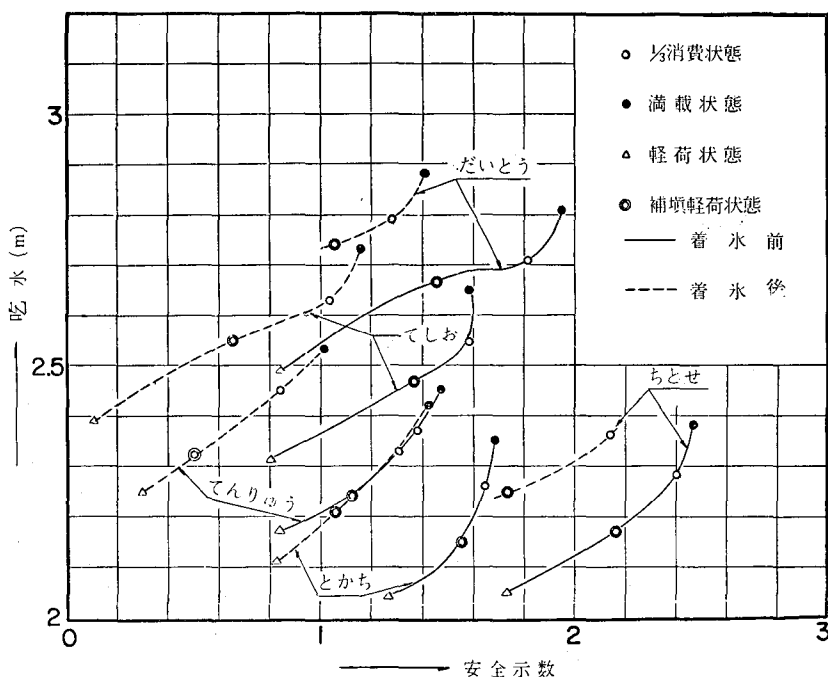
この計算の結果得られた安全示数 C を第 28 図に示した。これらのうち、「だいとう」、「ちとせ」、「とちかち」は何れの使用状態(軽荷状態は使用状態に含めない)でも $C > 1$ を満足しているが、「てしお」、「てんりゆう」は必ずしも満足しない。

そこで、この両船について使用状態中最悪状態と認められる補填軽荷状態について、風速

第14表 着氷の機会の多い巡視船の要目

配 属 地	船 名	船の長さ Lpp (m)	船の幅 B (m)	船の深さ D (m)	1/3 消費状態 排水量 (吨)
小 樽	て し お	45.60	7.00	4.20	434.2
稚 内	ち と せ	45.00	7.30	4.40	407.2
釧 路	だ い と う	51.50	7.77	4.50	526.2
”	と か ち	48.00	6.60	3.40	409.6
網 走	て ん り ゆ う	37.08	7.00	4.00	304.8

註 他に「ゆうばり」「そらち」「ほろない」(「ちとせ」と同型船), 「いしかり」(「てんりゆう」と同型船), 「れぶん」等がある。



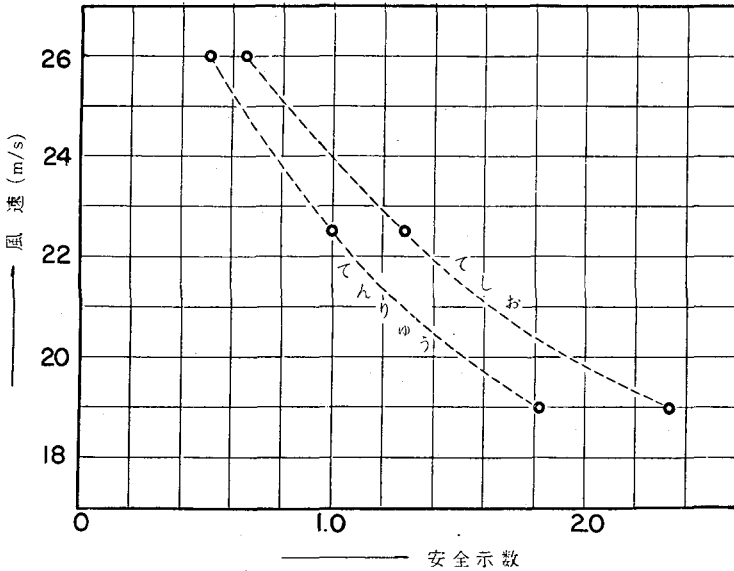
第28図 種々の使用状態における吃水と安全示数の関係 (風速 = 26 m/s)

を逡減した場合の吃水および風速と安全示数 C の関係を第29図に示してある。

この図から、「てしお」については、1/3 消費状態以上の吃水で使用することを制限するか、さもなければ着氷の危険のある時期だけ沿海以下の航行区域に行動を制限するか、あるいは着氷水域での使用を禁止する必要がある。

「てんりゆう」については、使用状態だけの制限では満足されないことは図より明らかであるから、着氷の危険のある時期だけ、「てしお」と同様に沿海以下に行動を制限するか、着氷水域での使用を禁止する必要がある。

以上のとおりで、この基準を用いることは一応差支えないと考えられる。



第29図 風速が弱くなったときの吃水，風速と安全示数の関係（「てしお」，「てんりゆう」）

あとがき

1960年から3年にわたって巡視船および漁船を用いて行なわれた着氷試験の概要およびその結果について述べた。また、それらの結果にもとづいて巡視船の着氷基準を定めた経過とその内容を説明し、現在の巡視船について適用した結果についても述べた。

実船試験によって船体の着氷について多くの知見を加えることができたが、残された問題はすこぶる多く、今後も実船試験と、また模型船による実験も行ないたいとおもっている。

巡視船および漁船による実船試験は当時の第一管区海上保安本部長猪口猛夫氏の指揮の下に第一管区海上保安部金子鉄義、小田原三郎、松岡昇三郎、石井朝也、浦井鎮吾、根本孝彦、田中藤平、芝山安久、小林猛、須藤真佐志、種村幸夫、西田浩児およびその他の方々、釧路海上保安部名取健男、中村尚および関係の方々、荻野亀代志、進藤市郎、吉田清三、河村次郎、柏木一男の各船長および乗員の方々、運輸省藤野淳、海上保安庁大久保正一、角尾光正、田坂鋭一、松本満次、徳永陽一郎、赤川英一、高浦芳一、塩野純作、更に、稚内、小樽両海上保安部の方々、第一管区海上保安本部船舶技術部関係の方々、海上保安庁水路部小野弘平氏など多くの方々の御協力と御援助によって行なわれたものである。ここに記して厚く感謝の意を表します。

船上の諸観測にあたっては、北海道大学低温科学研究所楠宏、藤野和夫、稚内地方気象台福島正久の諸氏の御協力を得たことを感謝いたします。観測の内容および資料の整理にあたっては北海道大学低温科学研究所雪氷グループの諸氏、東京大学元良誠三氏の適切な助言をいただいたことに心からお礼申し上げます。

文 献

- 1) Lee, A. 1958 Ice accumulation on trawlers in the Barents Sea. *The Marine Observer*, **XXVIII**, No. 181, 138-142.
- 2) Hay, R. F. M. 1956 Ice accumulation upon trawlers in Northern waters. *The Meteor. Mag.*, **85**, No. 100, 225-229.
- 3) Loss of Terns in Greenland Waters. *The Polar Record*, 1957, **8**, No. 57, 560.
- 4) The British Shipbuilding Research Association. 1957 Trawler icing research, B. S. R. A., Report No. 221, London, pp. 17.
- 5) 山根 彰 1955 ソビエト船級協会の復原力に関する規定. 造船協会誌, 第316号.
- 6) 海上保安庁船舶技術部 1959 350 吨型巡視船「とがち」及び 270 吨型巡視船「てんりゆう」の結氷時における復原性能について.
- 7) 海上保安庁船舶技術部 1960 「そらち」の着氷試験成績. pp. 28.
海上保安庁船舶技術部 1961 巡視船つがる, ゆうばり及び漁船第六弥彦丸の着氷試験成績 pp. 53.
海上保安庁船舶技術部 1962 巡視船ちとせの着氷試験成績. pp. 47.
- 8) 海上保安庁船舶技術部 1962 復原性能の見地からみた巡視船の着氷基準. pp. 47.
- 9) 未発表.
- 10) Nelson, K. H. and Thomson, T. G. 1954 Deposition of salts from sea water by frigid concentration. *J. Marine Research*, **13**, 166-182.
- 11) 田畑忠司・小野延雄 1962 種々の氷の結晶主軸方向の分布の測定. 低温科学, 物理篇, **20**, 199-214.
- 12) 岩田秀一 1960 巡視船の横揺減減係数について. 造船協会論文集, 第107号, 77-82.

Résumé

In northern seas of Japan, navigation of ship often becomes very difficult due to the accretion of ice formed from freezing spray blown over the vessel. The icing results in raising the centroid of the vessel, increase in the sail area to the wind, and finally the loss of stability. Not a few fishing boats are believed to have been lost because of the icing.

In January of 1960, 1961 and 1962, icing experiments were carried out in the offings of Hokkaido. Four patrol boats of the Maritime Safety Board and one fishing boat were used for this purpose (Plates I, III. Table I, Fig. 1). During the whole period of these experimental navigation, marine-meteorological conditions (Fig. 2), distribution and thickness of ice, and the rate of icing (1961 and 1962) were measured at every four hours. After arrival in port, distribution (Figs. 3 and 4), thickness, density (Fig. 21 and Table 7) and the total weight of ice were measured, and heights of centroids of ice accumulated on rigging and superstructures were determined (Table III). Total weight of ice deposited on vessels ranged between 13 and 26 tons and the increase in sail area was 7 to 8%.

The rate of icing was measured by sticking colored papers on the ice surface at every four hours (Table V and Figs. 5-8). The maximum rate of icing was 1.99 tons/hour; at this occasion the air temperature was -7°C and the wind speed was 5 by Beaufort scale. It was found that the icing occurred when the air temperature was below -2.5°C and the wind speed was more than 4 by Beaufort scale; however, the definite relationship between the rate of icing and marine-meteorological conditions was not established from these experiments (Fig. 9).

Small rods (Figs. 11-14) were installed on the open deck. The ice deposited on the rods and bled brine were weighed and subjected to the determination of chlorinity (Table VI). The surface temperature of accreting ice was estimated from the chlorinity of brine, being in a range of -2 to -4°C .

In 1960 and 1961, the total weight and the centroid of ice were determined by carrying out inclining experiments and by reading draughts. In 1961 and 1962, weight of ice was actually measured, removing the ice from various parts of the vessel. The changes in stability were thus determined (Table XI) and the static stability curves were calculated for the present experiments (Figs. 26 and 27).

It was proposed that the following conditional weight of icing should be taken into consideration for the design and navigation of ship: 50 kg/m^2 for open deck, 50 kg/m^2 for sail area. Applicability of this recommendation to the patrol boats was discussed (Figs. 28 and 29).

