

氷盤に突当てたり、乗り上げたりして氷盤を破壊するが、その際、チャージング砕氷の場合は、水量が多いときであり、船体のもつ慣性力は氷盤へ前後方向に衝突する力の他、船首を氷盤に乗り上げつつすべる即ち上下方向への力も相当配分される。一方、連続砕氷での状態では、船首が氷盤に衝突したとき、氷厚が薄い場合は船首の自重のみで氷盤を破壊して前進するが、氷厚が多少厚くなると船首の自重では氷盤を破壊できず、船首を氷盤に乗り上げるか、附近の海面に氷盤を追しのけるかして航行する。結局、連続砕氷において船首が氷盤に衝突して氷盤が破壊しない時は、海面に浮遊した氷盤の逃げが遅いため衝突力は時々大きな値（衝撃力）となって生じたものと推定される。いずれにしても氷盤への衝突力は、氷厚、積雪量、水量などの氷状や、船体の操縦により相当異なるであろう。

一般に砕氷は前述のように推進力で船首を氷盤に乗り上げ、船首の自重で氷盤を破壊しつつ前進するが、この時の船首の上下傾斜をジャイロ式傾斜計から計測値の最大値を表-9に示した。船首の上下の傾斜は、氷盤に乗り上げたとき及び氷盤を破壊して船首が水面に入ったときそれぞれ最大で $+0.57^\circ$ 、 -1.57° が計測された。この傾斜における船首の喫水線に対する変動量は、氷盤への乗り上げ時で 0.5m、氷盤破壊時で水面下に 1.37m 程度である。船首の上下は、定着氷や最密群氷（水量 10/10）における砕氷時より、水量

7/10~8/10 程度の連続砕氷時に大きいようである。ちなみに本船は、トリミングタンクを備えているが、作動に所要時間を多く要するためほとんど使用されなかった。ヒーリングは、船体が氷盤に挟まれた時使用され、チャージングの前進時に作動させながら氷盤に突当たると砕氷効率は向上するといわれている。しかし常時作動させることはほとんどなかった。

4-3-4 チャージングによる砕氷

表-10は、第16次南極観測で実施されたチャージングの1日ごとの進出距離についてまとめたもので、氷状は1日の平均的状态を示している。チャージングは、1,116回繰返えされ、約98kmの航程に対し147時間を要した。従ってチャージング1回当たりの平均進出距離は87m、1時間当たりの砕氷進出距離は663mで、1回の所要時間は約8分であった。

チャージングによる進出距離は、定着氷より流氷海域の方が水量が少ないため大きい。しかし2.5m以上の多年氷やハンモック氷になると流氷海域でも進出距離は著して低下し、2月13日には1回当たり2m、1時間当たり18mの進出距離となっている。

図-29は、チャージング砕氷による1日平均の海水の氷厚と1日ごと、1回当たりの平均進出距離の関係をプロットしたもので、第16次（表-10）で実施されたチャージング及び第13次（チャージング回数7,623回）でのそれを合わせてプロットした。ここで氷厚が1.5mを越える海水は、ハンモック氷も含めて2年氷

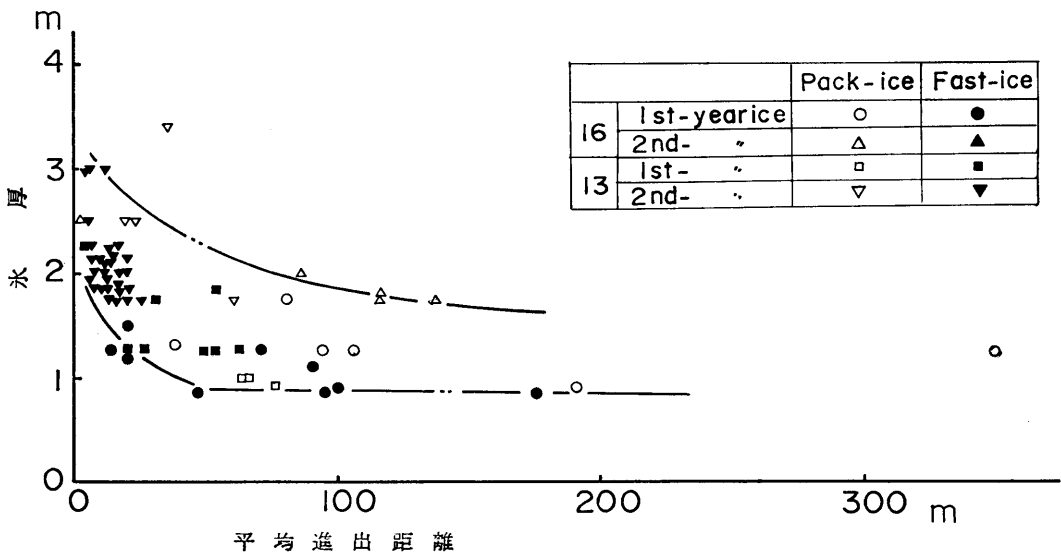


図-29 氷厚と平均進出距離の関係（1日平均）

表-10 チャージングにおける進出距離と氷状

月/日	チャージング		航程 km	進出距離		平均 気温 °C	氷 状 等						
	時間 h:m	回数		各回平均 m	1時間 当平均 m		氷の 種類	氷量	氷厚 m	積雪量 m	氷形	氷盤直径 m	そ の 他
12/29	3:33	4	1.3	325	366	-1.3	流水	8/10~10/10	1 ~1.5	—	平坦氷	10~50	
12/30	20:40	155	16.3	105	789	-1.0	"	8/10~10/10	1 ~1.5	0.5~0.8	"	10~200	氷盤の輪郭部ハンモック状、砕氷浮遊
12/31	19:04	126	12.1	96	635	1.3	"	9/10~10/10	1 ~1.5	0.2~0.4	"	50~80	"
1/ 1	11:32	95	7.6	80	659	1.0	"	9/10~10/10	1.5~2	0.5	"	10~200 (200以上)	多少ハンモック氷あり、パドル少しあり
1/ 2	13:53	69	13.1	190	944	0.1	"	4/10~ 8/10	0.8~1	0.1~0.2	"	50~200	砕氷、パドルあり
1/ 3	11:51	112	9.6	86	810	-0.5	"	10/10	1.5~2.5	0.7	"		2年氷少しあり
1/ 4	3:02	26	1.0	38	330	-1.8	"	7/10~ 8/10	0.8~1.8	0.3~0.8	"	10~200	
1/ 4	4:36	46	4.1	89	891	-1.8	定着氷	10/10	0.7~1.5	0.1~0.5			1年氷
1/ 5	15:49	121	8.6	71	544	-1.3	"	"	1 ~1.5	0.1~0.3			"
1/ 6	2:10	19	0.9	47	416	-0.0	"	"	0.7~1.0	0.2~0.4			"
1/ 7	3:55	35	0.5	14	128	-1.9	"	"	1 ~1.5	0.2~0.7			"
1/ 8	5:43	50	1.0	20	175	-3.2	"	"	0.8~1.5	0.5~0.7			"
1/20	3:17	27	0.5	19	152	2.3	"	"	1.4~1.6	0.4~0.6			"
2/ 4	2:53	22	2.2	100	763	1.2	"	"	0.88	0.12			"
2/11	2:02	19	1.8	95	885	-3.9	"	"	0.7~1.0	0.1~0.15			"
2/12	4:19	23	4.0	174	927	-4.2	"	"	0.6~1.0	0.1~0.3			" パドルあり、 進入路に沿って砕氷
2/12	6:09	57	6.6	116	1,073	-4.2	流水	9/10~10/10	1.5~2	0.3~0.7	ハンモック氷	10~200	
2/13	5:33	61	0.1	2	18	-3.4	"	10/10	2.5以上	0.6	ハンモック氷 平坦氷	10~200	
2/19	2:37	19	2.2	116	840	-4.5	"	8/10~10/10	1.5~2	0.5	同上		
2/20	4:30	30	4.1	137	911	-5.2	"	7/10~ 8/10	1.5~2	0.5	同上	10以下 (10~200)	
合 計	147:08	1,116	97.6	87	663								

として分類した。氷厚が 2~3m の 2 年氷の定着氷では 1 回当たりの平均進出距離は、20m 以下と極端に小さい。流氷海域での進出距離は、氷量との関係で氷厚 2m でも 100m 進出し、1 年氷と 2 年氷の差はあまり大きくない。

図-30 は、積雪量と、1 日ごとのチャージングにお

ける 1 回当たりの平均進出距離との関係を 図-29 と同様を示したものである。積雪量に対する進出距離は、氷厚の相違による影響が著しいため、特に目立った相関がない。

図-31 は、定着氷におけるチャージングについて計測した前後加速度、プロペラ軸トルクの記録の一例を

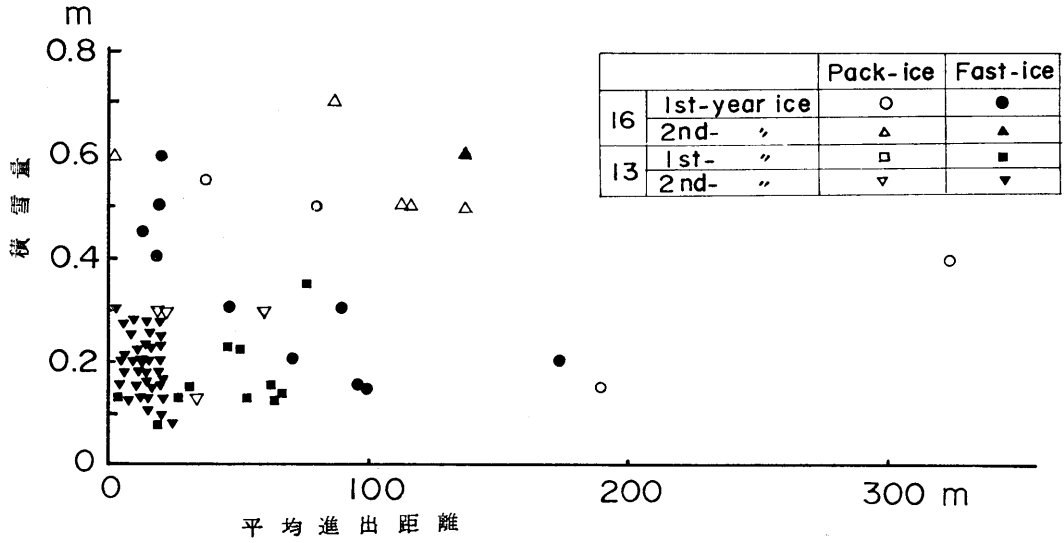


図-30 積雪量と平均進出距離の関係 (1 日平均)

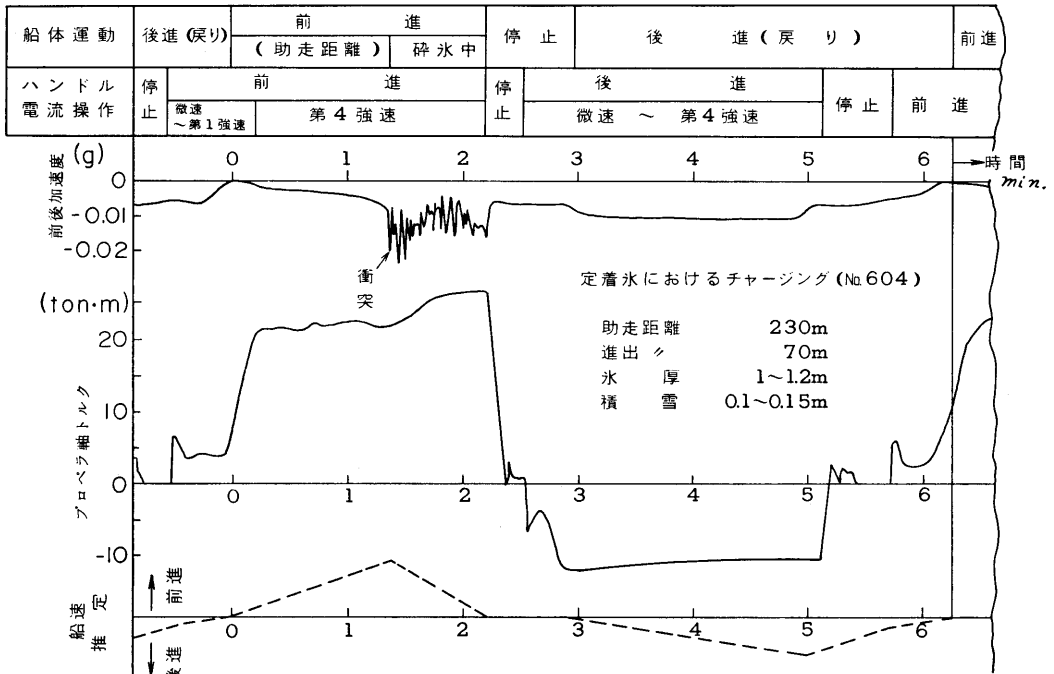


図-31 定着氷のチャージングにおける船体運動の一例

示したものであり、電動機のハンドル電流操作と船体運動を合わせて示した。この例は、助走距離を 230m とした時で、チャージング1回の所要時間6分に対し、砕氷している時間は1分、助走前進時間1.5分、後進が4分である。船速は氷海航行中は不明なので船体運動と電流操作から推定した。

定着氷におけるチャージングは、氷状も連続して一様なため、加速度や後に述べるプロペラ軸トルクは一定の周期で繰返えされている。これはまた、助走距離として船体の長さの2~3倍即ち200~300m戻り、5~7ktの船速で船首を氷盤に突当てることを目安にして操船しているところからくるものでもある。表-11は、表-10のチャージング記録のうち定着氷におけるチャージングについてのみ、氷厚及び積雪量の相違に対して分類し、それぞれの平均進出距離、平均助走距離をまとめたものである。定着氷での全平均1回当たり助走距離260mに対し、平均進出距離は71mであり、進出距離は助走距離の27%にあたる。表-11から、氷厚及び積雪量に対する1回当たりの平均進出距離をプロットするとそれぞれ図-32及び図-33となる。これらの図において積雪量 H_s については0.5mを、氷厚 H_i については1.5mを基準に記号を変えて示した。図-32で氷厚1.5mにおけるチャージングでの進出距離は、氷厚の相違に対して一概に定め難いが、氷厚が薄くなるにつれて多少伸びている。しかし、この程度の氷厚に積雪がある場合には、図-33にみられるように積雪量によって進出距離にかなりの相違がみられる。積雪量0.2m以下では進出距離にあまり影響なく、0.2mを越えると進出距離は著しく低下

表-11 定着氷におけるチャージング

分類	チャージング回数	氷厚 H_i (m)	積雪量 H_s (m)	平均助走距離 L_2 (m)	平均進出距離 L_1 (m)	進出度 $R=L_1/L_2$	全厚さ H_i+H_s (m)
1		50.85	0.4	233	103	0.442	1.25
2		31.0	0.15	241	110	0.456	1.15
3		261.2	0.15	241	84	0.349	1.35
4		111.5	0.2	219	92	0.420	1.7
5		151.5	0.2	234	88	0.376	1.7
6		341.0	0.15	270	79	0.293	1.15
7		181.0	0.5	307	39	0.127	1.5
8		51.0	0.2	344	53	0.154	1.2
9		491.0	0.3	283	77	0.272	1.3
10		191.0	0.4	268	49	0.183	1.4
11		51.3	0.4	362	18	0.050	1.7
12		51.2	0.6	360	9	0.025	1.8
13		201.5	0.7	323	13	0.040	2.2
14		81.0	0.5	310	21	0.068	1.5
15		341.2	0.7	293	19	0.065	1.9
16		101.5	0.5	319	17	0.053	2.0
17		31.5	0.3	320	14	0.044	1.8
18		271.4	0.4	232	19	0.082	1.8
19		170.9	0.1	147	76	0.517	1.0
20		50.6	0.1	158	616	3.898	0.7
21		60.9	0.15	168	113	0.673	1.05
22		130.45	0.05	126	88	0.698	0.5
23		71.0	—	231	20	0.087	1.0
24		71.2	0.2	224	165	0.737	1.4
25		81.0	0.2	256	304	1.188	1.2
	360			*260	*71	*0.273	

* は加重平均

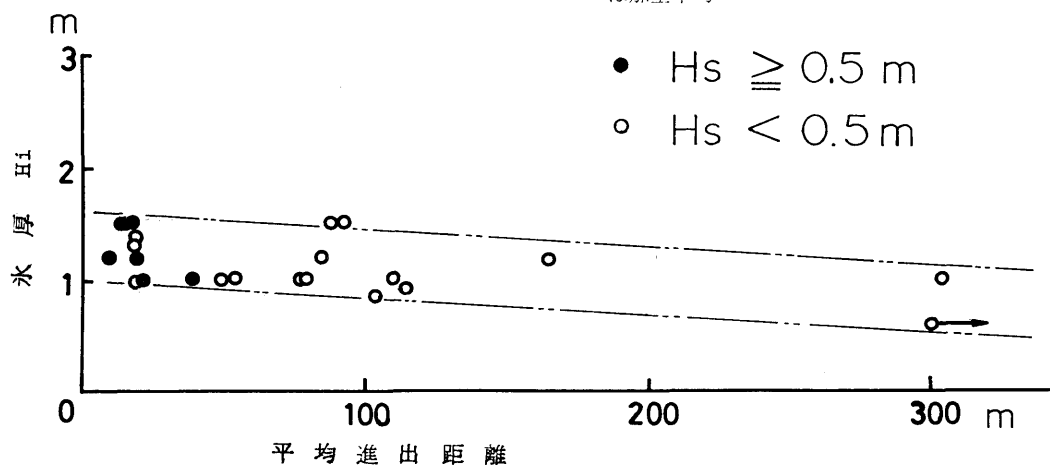


図-32 定着氷のチャージングにおける氷厚と平均進出距離の関係

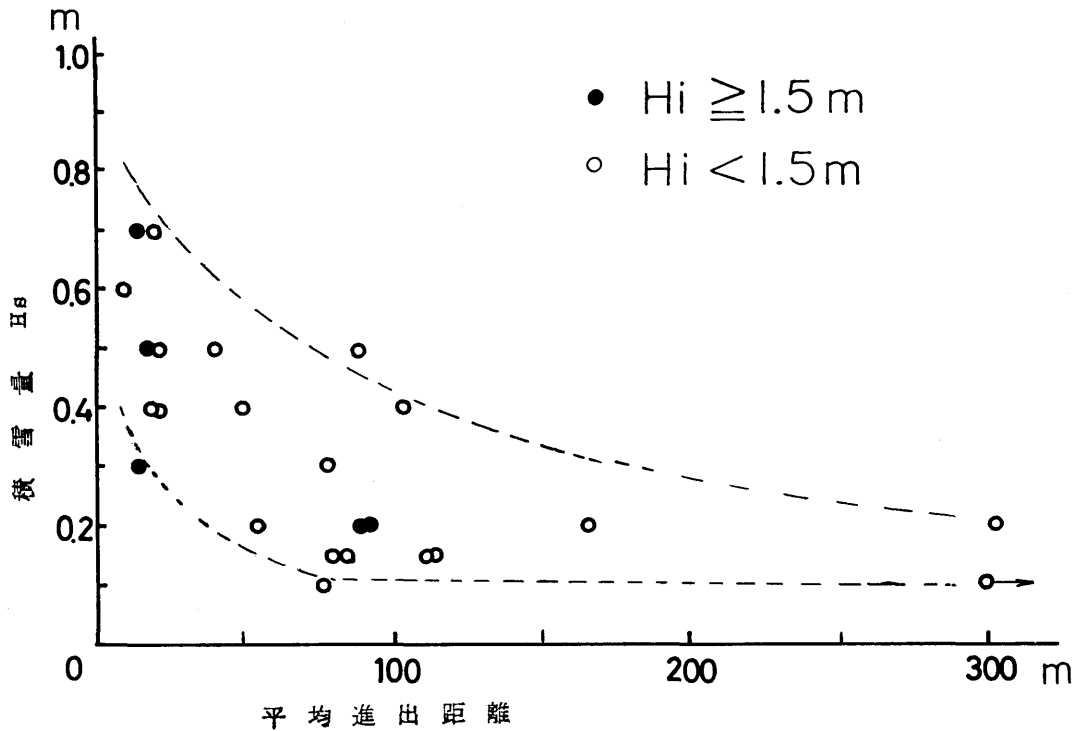


図-33 定着水のチャージングにおける積雪量と平均進出距離の関係

し、ひいては積雪による運動エネルギーの吸収が大きいことを示している。

4-3-5 砕氷能力

今回の体験によると、砕氷能力は概ね海水が一樣に張りつめた氷海では、氷厚 60~80 cm 位まではプロペラ推力のみで連続して砕氷できるが、それ以上の氷厚ではチャージングにたよらざるを得ない。しかし、水量の少ない流水海域や、パドルの発生した融解過程にある流水に対しては 1.5 m 程度の比較的厚い海水でも断続的に連続砕氷ができる。

砕氷 (brash ice) や積雪は砕氷能力を著しく低下させる。また夜間など気温とともに海水温度が低下しても海水の強度が上昇して砕氷能力は落ちる。

前述の定着水におけるチャージング (表-11) について、進出距離 L_1 と助走距離 L_2 との比を進出度 $R = L_1/L_2$ と定義し、 R と L_2 についてプロットすると図-34 のようになる。両者の間にはほぼ直線関係が成立し、

$$R = C - 0.0033L_2$$

となる。助走距離 $100 \text{ m} < L_2 < 360 \text{ m}$ の範囲で定数 C は 1.06~1.25 である。この関係は、 L_2 に対する L_1

の割合が一定しておらず、 L_2 を大にしても R が小さくなっている即ち進出距離は小さい。これは図-35 に見られるように、 R が小さい時は氷厚と積雪量の和が大きい時で、砕氷の限界を示していると考えられる。従って定着水では図-34 から L_2 が 300~360 m で R を 0.04 とすると、図-35 の氷厚と積雪量の和が 1.6~1.7 となり、これ以上の厚い氷盤に対しては砕氷能力はほとんどないことになる。

砕氷船の氷に対する抵抗は、1) 砕氷そのものの抵抗、2) 破壊した氷塊を動かしたり水中に沈めたりする抵抗、3) 砕氷した氷の中を航行するための抵抗、4) 水の摩擦や造波抵抗などの和として推論している文献⁹⁾ もみられる。南極海における「ふじ」の砕氷航行では、氷を破壊するエネルギーと、砕氷した小さな氷塊や砕氷 (brash ice) を排除するに要するエネルギーが大きく、これらをプロペラ推力と船体の慣性力で補っていると考えられる。厚い氷盤を砕くためには、爆破も有力な手段であるが、作業に相当な時間を要するので、船首や船側附近の氷盤を短時間に砕く補助的砕氷手段を開発し、プロペラ推力や慣性力と併用すれば、軸馬力を増大しなくてもさらに砕氷能力や砕氷効

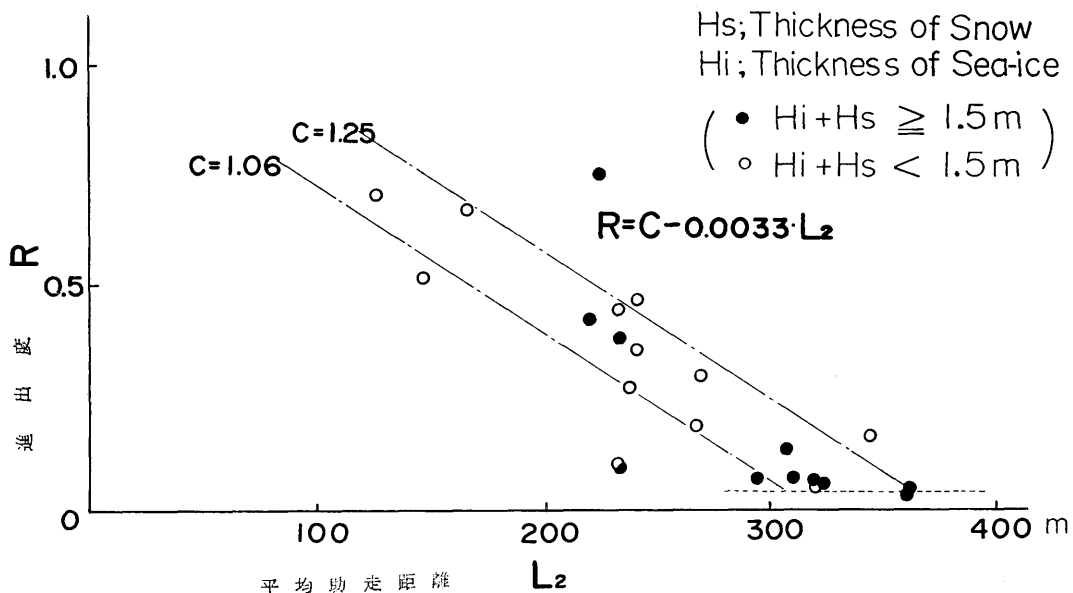


図-34 定着氷における進出度と平均助走距離の関係

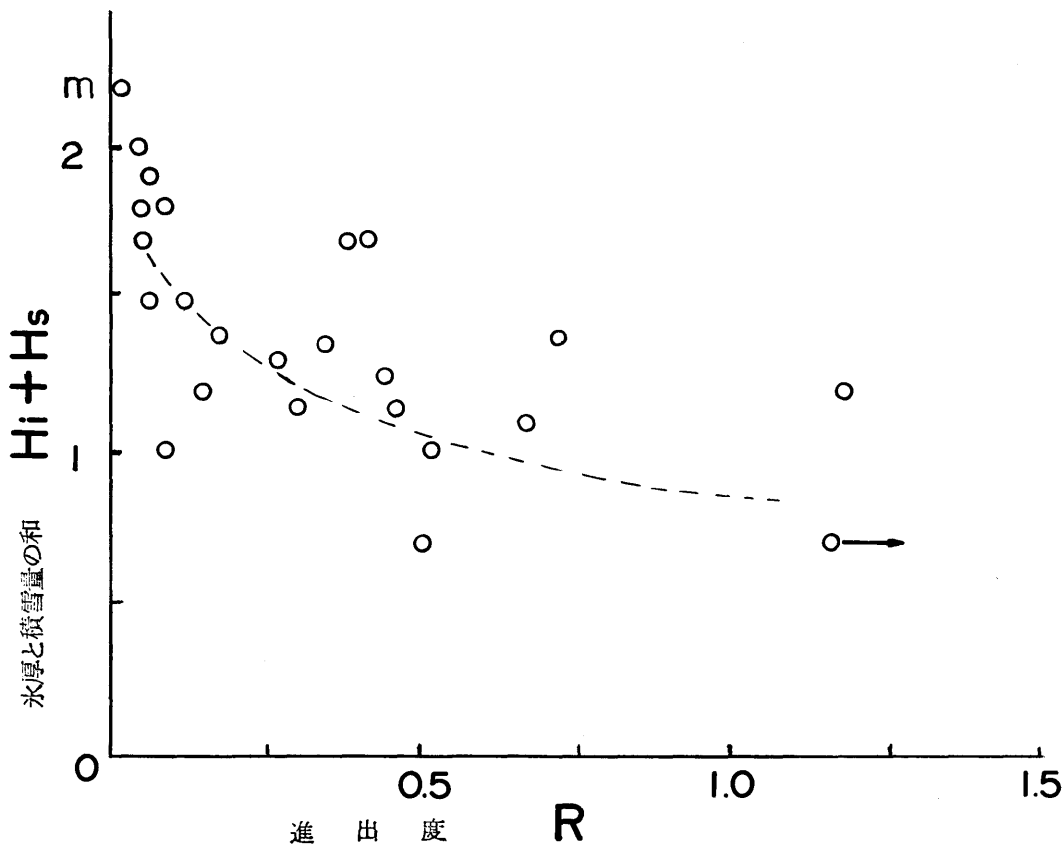


図-35 定着氷における氷厚と積雪量の和が進出度に及ぼす影響

率を向上することができるであろう。

4-4 プロペラ軸トルクの計測

4-4-1 推進機関

大洋航行中は4機の原動機のうち、2,3号機を主体に運転し、原速ないしは第1強速、速力12~13 ktで航行した。軸の平均回転数は110~115 rpm, 2機2軸運転で、電圧650~700V, 電流は1軸あたり2,000~2,400Aであった。

氷海航行では、4機2軸運転で電流制御により第1強速ないし第4強速で、電流値2,200A, 電圧580~650Vで航行した。チャージング時は、前進、後進が繰返えされそれぞれ微速、原速、第1, 第2, 第4強速の電流値の設定を確認しつつ運航された。

機関のコントロールは、大洋航行では機関室で、回転数を設定し、氷海航行では艦橋の操縦卓で電流設定がなされた。

4-4-2 プロペラ氷塊接触回数

氷海では特にチャージング時に砕氷した氷塊が船底に潜ったり、水あきが少なく氷塊の逃げ場がないと、氷塊がプロペラ翼に接触する。この時はプロペラの翼や軸に過大の負荷を生じ、しばしば推進機器の損傷原因の一つとなっている。氷塊がプロペラに巻き込んだ時は電動機の電流値が規定電流値より1,000A以上も増加する。今回右翼への接触回数は220回(最大電流値4,000A), 左翼へ236回(最大電流値4,500A)あり、合計456回の接触があった。過去における氷塊の

翼への接触回数(15次が19回, 14次が2,501回, 13次が4,244回)と比較するとそれほど多くなく、13次での最大電流値は右軸で5,200A, 左軸で4,600Aに達している。

4-4-3 プロペラ軸トルクの計測

右軸の平行部(直径575mm)にストレインゲージを貼付し軸のねじり変動及び回転数を検出し計測した(図-36)。同時に船尾加速度計を冷房機室に設置し、

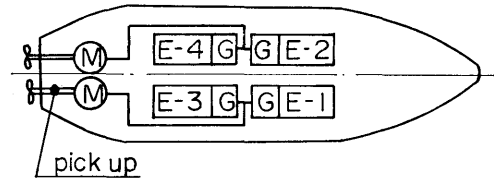


図-36 推進機関の配置と軸歪検出位置

大洋航行及び氷海航行時に随時20~30分間計測し4チャンネルのデータレコーダに記録した。機器の構成及び結線は図-26とほぼ同様である。大洋航行時のトルクは計測場所の環境も悪く満足できる計測ではなかった。また回転及び船尾加速度は全計測ともよく計測できなかった。表-12に計測したトルク値を砕氷モードに分類してまとめた。

暴風圏におけるトルク値は、ほぼ一定して記録されており、10.6 ton-mであった。

連続砕氷の場合、流水海域及び定着氷ともほぼ一定

表-12 氷海における推進軸トルクの計測結果

砕氷モード	トルク T ton-m	ねじり 応力 τ kg/mm ²	機 関					氷 状, 海 象 等			
			船速 kt	回転数 rpm	電 圧 V	電 流 A	その他	水量	氷厚 m	積雪 m	その他
暴 風 圏	10.6	0.28	13.2	原速 110	660	2,050	2機運転 3号機	波浪階級4, うねり階級6			
流 氷 連 続 砕 氷	13.0	0.35	(5)	第4 強速 115	700/680	2,000/2,100	4機運転 1号/3号 機	7/10 ~8/10	0.8~1	0.2	10m以下 の水盤
流 氷 チャ ージ ング	前進 25.2~27.4 後進 11~19.2 (32.9)	0.68~0.73 0.29~0.51 (0.88)	—	第4 強速 —	—	—	同 上	7/10 ~8/10	1~1.5	0.2	氷盤径 10~200m
定 着 氷 連 続 砕 氷	24.4	0.65	(5)	第4 強速 108	650/620	2,150/1,950	4機運転 1号/3号 機	10/10	0.6 ~0.8	薄	表面より 15cm下 にパドル あり
定着氷 チャ ージ ング	前進 23~26.7 後進 10.5~19.4	0.62~0.72 0.28~0.52	—	第4 強速 —	—	—	同 上	10/10	1~1.5	0.1 ~0.15	1 冬氷

のトルクで、氷厚 0.8~1m、氷量 7/10~8/10 の流水海域でのトルクは 13.0 ton-m で暴風圏の約 2 割増、氷厚 0.6~0.8 m の 1 年氷の定着氷では 24.4 ton-m であり、暴風圏の約 2.3 倍であった。

チャージング時のトルクは、図-31 にみられるように変動しており、前進、後進と繰返えされるパターンが明確に現われている。第 4 強速に電流が設定され船体が前進を開始する時点では、プロペラへの流入速度が小さいので、回転数が比較的小さく、トルク値は 23 ton-m と大きく、定着氷に衝突し、海氷に乗り上げて砕氷中はさらに大きくなり、トルクは 26.7 ton-m に達している。後進では、第 4 強速でも 11~19 ton-m と前進と比較して小さいが氷盤から下りる時に大きなトルクを生じている。チャージングにおいては、前進後進ともそれらの最初と最後が高い値となっている特徴がある。さらに流水海域でのチャージングにおける後進では 32.9 ton-m と高いトルクが瞬時に生じている記録もあり、この時電流をすぐゼロに戻していることから、おそらく氷塊がプロペラ翼に巻き込んだ時であると推定される。

軸のねじり歪から、プロペラ軸に働くねじり応力を計算すると、いずれの場合も 1 kg/mm^2 以下であり、チャージング時では暴風圏の 2.6 倍程度である。

5. 結 言

第 16 次南極地域観測における砕氷艦「ふじ」の航海を体験し、二、三の計測を行なった結果、まとめとして次の諸点をあげる。

(1) 甲板温度は最高 55.5°C 、最低 -6.4°C が記録され、両温度ともそれぞれその時点の気温より高くあるいは低く計測されている。

(2) 甲板温度は、南極海の氷縁附近の海上において最も低く、気温とほぼ同じである。

(3) 甲板温度の気温に対する 1 日の変化は、日中に大きく生じ、夕方から朝方にかけては小さく気温とほぼ同温度になる。

(4) 氷海における甲板温度は、日射、風速、湿度等に著しく影響され、気温が -0.7°C において日向では 33.3°C が記録され、日向と日影では気温との温度差に約 5 倍の開きがある。さらに甲板温度の 1 日の変動は氷海で 37°C 、熱帯で 20°C 生じ、氷海の温度変動の方が熱帯のそれより大きい。

(5) 海水に接している鋼板温度は、気温に関係なく海水温度よりほぼ 1°C 以内温度が高い。

(6) リュッツホルム湾における風力係数は、0.049 である。

(7) 暴風圏における船体動揺は大きく、ローリング角度は両振幅で 30° を越え、特に船側ないし斜め後部よりうねりを受ける場合に大きいようである。

(8) 氷海における砕氷時の前後加速度は小さく、氷盤への衝突力は 400 トン以下であり、チャージング時よりむしろ流水海域を断続的に連続砕氷して航行している場合に大きく生じている。

(9) 連続砕氷における砕氷能力は、定着氷で 0.6~0.8 m 程度であるが、流水海域では氷量、氷質によって相当異なるため連続砕氷の可能な氷厚は一概に決められない。

(10) 砕氷 (brash ice) や積雪は砕氷能力を著しく低下させる。

(11) 流水海域におけるチャージング砕氷の進出距離は、氷厚よりむしろ氷量に相当影響するので、1 年氷と 2 年氷との差はそれほどない。

(12) 定着氷におけるチャージング砕氷の進出距離は、氷厚が 1.5 m を越えると著しく低下し、氷厚 1.5 m 以下では、積雪量の影響を著しく受ける。進出度と助走距離には $R=C-0.0033L_2$ の関係が成立し、助走距離を 300 m 以上とっても進出距離は小さく、海水の厚さと積雪量の和が 1.6~1.7 m を越える定着氷に対しては砕氷能力がほとんどない。

(13) プロペラ軸の負荷トルク計測の一例では暴風圏で 10.6 ton-m、流水海域及び定着氷の連続砕氷でそれぞれ 13.0、24.4 ton-m、チャージング時では前進、後進に対してそれぞれ 25~27、11~19 ton-m である。

(14) プロペラ軸のねじり応力は、 1 kg/mm^2 以下である。

(15) その他、氷海航行に関して次の点を付記する。

氷海では氷量やその分布などについて艦橋ではほとんど判別できない。これについては「ふじ」が実施しているように、氷海の状態を把握するのに氷状偵察など上空より観察することが最適であり、ヘリコプターにより針路を誘導したり、snow mark を落下して目標地点を定めることも氷海航法において有力な手段である。

爆破の使用は、補助的砕氷手段として有力であるが、他の方法による氷盤の破壊方法を考案し、チャージングなどと併用できれば、一層砕氷能力は増加するであろう。

また、「ふじ」は氷海において位置決定は天測によっており、船速に至っては全く不明なので、この種の機器が必要と考えられる。

謝 辞

この実船試験は、当研究所の研究計画にもとづき行なわれたものであるが、体験航海及び計測にあたっては、南極観測を実施する文部省学術国際局ユネスコ国際部国際学術課、同省極地研究所、星合孝男第 16 次南極地域観測隊長、吉田栄夫同副隊長他観測隊員の皆さん、並びに防衛庁海上幕僚監部防衛部南極観測支援室、森田衛「ふじ」艦長他乗組員の多大の御協力を得た。ここに改めて厚く御礼申し上げる次第である。

また準備やとりまとめに際しては、当研究所運動性能部耐航性研究室、機関性能部動力伝達研究室、船体構造部などの当研究所実船試験関係各位の御協力を得たことを附記する。

参 考 文 献

- 1) 山川健郎; 南極観測船「ふじ」について, 造船協会誌, 第 438 号 (昭和 41 年 1 月)
- 2) 江守一郎, D. J. シューリング; 模型実験の理論と応用, 技報堂, p. 110
- 3) WMO; Sea-ice Nomenclature, (1970)
- 4) 村内必典, 吉田栄夫; 第 2 次南極観測に際して行った海水観測及び, それに関する 2, 3 の考察, 南極資料, No. 8, (1959)
- 5) 鳥居鉄也他編; 南極, 共立出版, (1973)
- 6) R. Naruse, Y. Endo, T. Ishida and Y. Ageta; Observations of Snow Accumulation and Sea Ice at Syowa Station, Antarctica, 南極資料, No. 40, (1971)
- 7) 小川陽弘 他; コンテナ船あめりか丸による北太平洋航海性能試験, 船舶技術研究所報告, 第 8 巻, 第 2 号 (1971)
- 8) J. W. Lewis and R. Y. Edwards; Methods for Predicting Icebreaking and Ice Resistance Characteristics of Icebreakers, SNAME, (1970)