

砕氷型巡視船「てしお」の氷中航行性能について

(その2) プロペラと氷の干渉に関する実船試験

正員 田 村 兼 吉^{*1} 正員 泉 山 耕^{*1}
 正員 宇 都 正太郎^{*1} 下 田 春 人^{*1}
 正員 岸 進^{*2}

Performance of the Patrol Icebreaker "TESHIO" in Ice-Covered Waters

(Part 2) Full-scale Test Results of Interaction between Propeller and Ice Blocks

by Kenkichi Tamura, *Member* Koh Izumiyama, *Member*
 Shotaro Uto, *Member* Haruhito Shimoda
 Susumu Kishi, *Member*

Summary

The problem of propeller-ice interaction is very important for ice going vessels, and this phenomenon is not cleared yet. Since the classical works of Jagodkin in 1963, some calculation models have been presented, but none of them can be widely accepted. One of this reason is that quite a few full-scale measurement data used to verify a model can be seen. Besides, the nozzle propeller has been used for propulsion system of icebreaker recently because of its excellent features, but full-scale measurement data of the nozzle propeller are rare.

This paper describes the results of full-scale data of nozzle propeller concerning propeller-ice interaction. These data were obtained in the full-scale trials of the patrol icebreaker "TESHIO", which were conducted in the sea of Okhotsk in February 1996. Some strain gauges were attached on the port side shaft, so the regular component and the fluctuations component of shaft thrust, shaft torque and shaft revolution were measured while the ship was going in ice sea. The maximum fluctuations component of shaft horsepower (SHP) was almost as same as the regular component of SHP. The interval of interaction was also proportional to the regular component of SHP. The comparison on the interval of interaction between full scale data and model test data were also shown. It shows the same tendency that the interval of interaction was shorter as the ice thickness become thicker.

1. 緒 言

氷海用プロペラに関する課題の一つとして、氷片とプロペラの干渉問題がある。氷海域を航行する船舶では、船首部で砕氷した氷片がプロペラに衝突する現象は頻繁に発生し、効率の低下のほか、時としてプロペラ翼の破損や機関への障害などを引き起こす。氷片とプロペラの干渉は、プ

ロペラ設計時に翼の強度や翼厚を決定する重要な要素であり、氷中抵抗と並んで、氷中推進性能の中でも特に重要な問題となっている。

氷片とプロペラの干渉問題への理論面での取り組みとしては、Jagodkin¹⁾が干渉によって誘起される軸トルクの上昇成分についての最初のモデルを提案して以来、様々なモデルが発表されている。これらのモデルは、Jagodkin, Ignatjev²⁾らの研究に端を発する、ミリング状態での翼による氷の切削過程をシミュレートする方法と、Wind³⁾, Laskow⁴⁾らの提案した衝撃荷重を考慮する方法に大別される。しかし、干渉過程自身がまだ十分に解明されていない。つまり、流体力学的な力を考慮したモデルは少なく、決定的なものはまだ存在しないのが現状である。

これらモデル検証の元データとなる、実船での氷片とプ

^{*1} 運輸省船舶技術研究所氷海技術部

^{*2} 日本鋼管(株)エンジニアリング研究所津研究センター船舶・構造研究室

原稿受理 平成8年7月10日

秋季講演会において講演 平成8年11月14, 15日

ロペラの干渉データは、わが国の南極観測船「ふじ」での南極航海中の軸トルク計測⁵⁾、米国沿岸警備艇“Polar Star”での翼面に歪ゲージを貼り付けての計測⁶⁾、干渉によるスラスト減少について議論したカナダ沿岸警備艇 “Pierre Radison” での計測などが知られているが⁷⁾、公開されたものが少なく、その値もばらつきが大きい。

一方、最近、氷海用プロペラの形式として、ノズルプロペラが採用される機会が多くなっている。その理由は、ノズルプロペラは氷海用プロペラとして、種々の利点を持つことにある。例えば、ノズルによる整流効果のため浅水海域で高推力が得られる点で有利である。また、ノズルによりプロペラが保護される点、チップクリアランスを必要としないため、船尾変動圧力（サーフェース・フォース）の問題でも有利である等が挙げられる。しかし、氷片によってノズル閉塞が起きる可能性がある点、また氷との干渉についての研究が、オープンプロペラに比べて、さらに少なく、干渉のメカニズムが複雑であるという課題が残されている。ノズルプロペラの詳細な実船データとしては、“Robert LeMeur” でのカナダ運輸省の一連の報告書⁸⁾と、フィンランドの砕氷船“Karhu”での計測が散見されるのみである⁹⁾。

そこで、本論文は海上保安庁の砕氷型巡視船「てしお」の氷海中実船試験時に行われた、ノズルプロペラと氷片との干渉データの計測結果についてまとめた。この計測は、砕氷船用のプロペラ、軸系、エンジンキャパシティ等の設計のための基礎資料を集めることを目的の一つとしている。また、本計測で用いた実船での軸馬力の変動成分の計測方法について述べるとともに、後半では、氷片との干渉頻度について、氷海水槽での模型実験結果との比較を行った。

2. 実船試験概要

2.1 試験条件

氷海中航行試験は、流水シーズンとなった平成8年2月22日から2月29日にかけて実施され、「てしお」を含む3隻の砕氷型と耐氷型の巡視船の比較性能データを取得した。「てしお」でのノズルプロペラと氷の干渉データの収集は、この試験の機会を捉えて実施されたもので、平坦水中直進航行試験、平坦水中旋回試験、協調砕氷航行試験の3種類の試験項目において行われた。「てしお」の主要目、一般配置図、および試験概要については、他の文献を参照していただきたい^{10,11,12)}。

Table 1 は、試験条件の一覧で、計測は全部で16ケースを行った。平坦水中直進航行試験（Continuous Test）では、主機最大出力の1/4、2/4、3/4、4/4と、主機出力を4種類変化させて計測を行った。なお、最大主機出力は1軸で1800 PSである。出力調整は、平水中でのパワーカーブに従い、翼角と回転数を調整して行っており、4/4出力以外では

Table 1 Experimental Conditions of Full Scale Tests

Date	Exp. number	Test Species	Ship Speed (knot)	Blade Angle (deg)	Engine Rev. (rpm)	Ice Thick. (cm)	Ice Level
2/24	2402	2/4 Continuous	6.7	25	710	28	10/10
	2404	3/4 Continuous	6.7	29	710	34	10/10
	2406	4/4 Continuous	8.1	30	750	35	10/10
	2408	1/4 Continuous	3.4	18	710	34	10/10
	2409	3/4 Continuous	9.7	29	710	25	10/10
2/25	2501	1/4 S.S. Turning	—	18	710	31	10/10
	2502	1/4 P.S. Turning	—	18	710	38	10/10
	2503	1/4 Continuous	1.9	18	710	36	10/10
	2504	2/4 Continuous	5.7	25	710	36	10/10
	2505	3/4 Continuous	6.9	29	710	40	10/10
2/27	2701	2/4 Continuous	5.7	25	710	36	10/10
	2702	2/4 Dual Line-IB	6.5	25	710	37	10/10
	2703	2/4 Dual Line-IB	6.0	25	710	47	10/10
	2704	3/4 Continuous	3.8	29	710	46	10/10
	2706	2/4 S.S. Turning	—	25	710	30	10/10
	2707	4/4 Continuous	4.3	30	750	53	10/10

主機回転数を710 rpmとし、翼角のみを調整した。4/4出力では、翼角を30度とするとともに、回転数を750 rpmとした。翼角、回転数は1ケースの試験中で左右で常に同一となるよう、調整された。平坦水中旋回試験（Turning Test）は、出力1/4で左右の旋回を、2/4で右旋回を行った。協調砕氷航行試験（Dual Line Ice Breaking Test）では、先行する砕氷型巡視船「そうや」の右斜め後方を「てしお」が出力2/4で直進航行し、氷況及び2船の航路間隔を変えて2ケースの計測を行った。表中のIce Levelは氷密接度であり、10/10は海面が氷で全て覆われていたことを示す。

2.2 プロペラ

現在我が国には砕氷を目的として設計された船舶が5隻存在する。これをプロペラ別に分類すると、ノズルプロペラを採用しているのは「てしお」（2軸）の他、流氷観光砕氷船「おーろら」（1軸）、「おーろら2」（1軸）の計3隻である。一方、砕氷巡視船「そうや」が2軸の、南極観測船「しらせ」が3軸のオープンプロペラを採用している。「しらせ」以外の砕氷船では、すべて可変ピッチプロペラを採用している。

Table 2 に「てしお」のプロペラ・ノズル主要目表を示す。4翼の可変ピッチプロペラであり、翼荷重が大きい、ボス比と翼厚がやや大きい特徴がある。

3. 計測方法

今回の計測では、氷との干渉による軸馬力の変動成分の計測を主眼としているため、応答性と信頼性から、プロペラ軸に歪みゲージを貼り、軸の歪を直接計測し、その出力をテレメータで取り出す方法を採用した。右舷軸には空間的な余裕がなかったため、計測は左舷軸のみであり、計測用のゲージ及び軸回転数計測機器は左舷軸の給油軸表面に取り付けた。Fig. 1 に軸トルク・スラスト・回転数の計測システムに使用した機器のシステム図を示す。

3.1 軸トルク及びプロペラスラスト計測方法

ゲージはトルク計測用として4ゲージタイプのものを1枚、スラスト計測用として2ゲージタイプのものを2枚使

Table 2 Particulars of Propeller and Nozzle

Propeller		
Type	CPP (2-shaft)	
Diameter	1950.00	(mm)
Boss Diameter	680.00	(mm)
Number of Blades	4	
Tip Thickness	19.00	(mm)
Angle of Rake	0°	
Nozzle		
Inside Diameter	1980.00	(mm)
Outside Diameter	2411.30	(mm)
Tip Clearance	15.00	(mm)

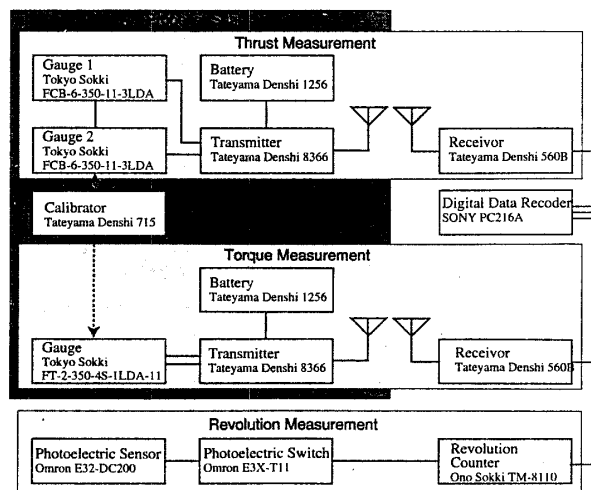


Fig. 1 Measuring System of Ship

用した。実船における歪ゲージを用いたスラスト計測については、鈴木らが8ゲージとダミープレートを用いたHylarides型を使用して精度の高い計測を行っているが¹³⁾、今回の計測では将来計画しているスラスト変動成分の本格的計測の予備実験として、従来型の計測方法を採用した。

ゲージ貼り付け位置の条件として応力集中がなく、平行部が30 cm以上あることが望ましいが、給油軸は平行部が1.5 m以上あり、この基準を満たしている。ゲージは、接着面の塗料を落とし、周方向のケガキ線にあわせて接着した。プロペラスラスト計測用の2枚のゲージは、互いに180度離して貼り付けた。ゲージからのリード線は、配線およびキャリブレーションを容易にするためのターミナルを介して、テレメータのトランスミッターへとつないだ。トラン

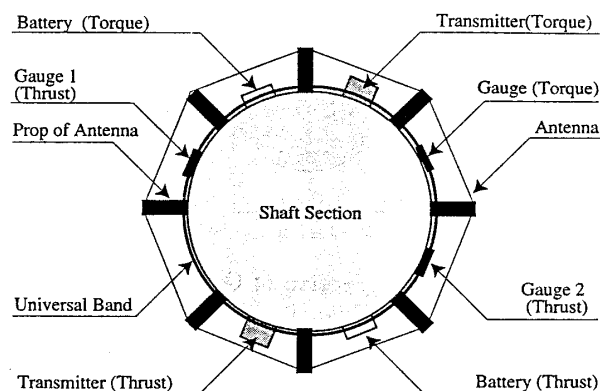


Fig. 2 Arrangement of Torque and Thrust Measuring System

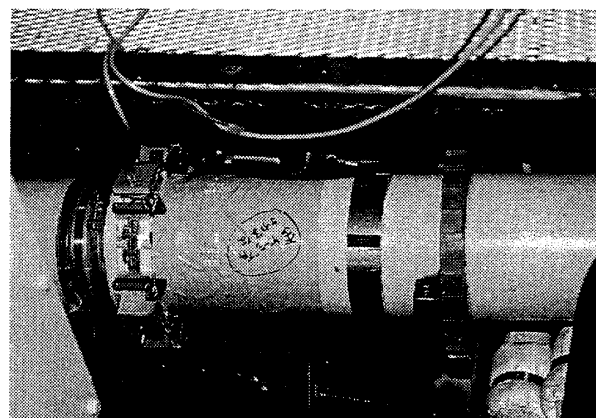


Fig. 3 Arrangement of Measuring System

スミッターからの出力はアンテナ線に繋がれており、アンテナは支柱により、軸から持ち上げられ、軸の回りに張られている。Fig. 2に軸トルク・スラスト計測器配置図を示す。トランスミッター、電源供給用のバッテリー及びアンテナ支柱は、すべてユニバーサルバンドを用いて軸に固定されており、軸とともに回転する。受信側アンテナは送信側のアンテナの横に配置し、レシーバーで電圧信号に変換した後、DAT型のデータレコーダで信号を記録した。毎日、計測開始時と終了時にゲージのキャリブレーションを用いた調整、左右方向への軸のターニングによるゼロ点計測、軸温度の計測を行った。軸温度の変動は非常に小さく、各計測日とも開始時と終了時の差は0.2℃以内であった。氷海域という低温環境のため、機関、摩擦等による発熱と外部への放熱が釣り合っていたものと思われる。Fig. 3に示した写真は配線終了時の左舷給油軸のものである。

歪からトルクへの変換にあたっては、給油軸の断面形状がFig. 4 Aのように、軸対称でないため、Fig. 4 B, Cのような断面を考え、極断面係数 Z_p を計算し、実際の Z_p はこの間にあるとした。極断面係数 Z_p は、断面B, Cでそれぞれ

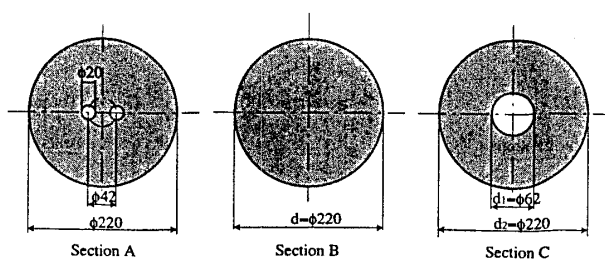


Fig. 4 Section of Oil Shaft

$$Z_p = \frac{\pi d^3}{16} = 2.091 \times 10^{-3} \quad \text{m}^{-3} \quad (1)$$

$$Z_p = \frac{\pi}{16} \left(\frac{d_2^4 - d_1^4}{d_2} \right) = 2.078 \times 10^{-3} \quad \text{m}^{-3} \quad (2)$$

であることから、 $Z_p = 2.08 \times 10^{-3} \text{m}^{-3}$ とした。トルク Q と歪 ϵ_0 との関係は、縦弾性係数を E 、ポアソン比を ν とすると、4 ゲージ方式を用いたため、

$$Q = \frac{\epsilon_0 / 4 \cdot E \cdot Z_p}{1 + \nu} \quad (3)$$

となる。この時の回転数を $N \text{ rpm}$ とすると、軸馬力 P は

$$P = \frac{2\pi Q}{75} \frac{N}{60} \quad (4)$$

によって求めることができる。給油軸の材質は炭素鋼鍛鋼の SF 60 であったため、 $E = 2.06 \times 10^{11} \text{Pa}$ (21000 kgf/mm^2)、 $\nu = 0.3$ とした。

歪からスラストへの変換には、断面形状 Fig. 4 A を、縦弾性係数及びポアソン比の値はトルクと同じものを使用した。ノズルプロペラのスラストは、ノズルスラスト成分とプロペラスラスト成分の和によって定義されるが、ここではノズルスラストを計測していないため、プロペラスラストのみが得られた。

3.2 軸回転数計測方法

軸回転数の計測は、軸上に1回転につき12パルスを出力するよう、白黒のストライプとなった反射テープを巻き付け、その反射光を光ファイバ型の光電スイッチによってピックアップして電気信号に変えて計測した。Fig. 5 に軸回転数計測機器配置図を示す。このシステムにより、細かな軸回転数の変動を計測することが可能となった。

3.3 燃料消費量からの馬力計測

ゲージによる軸馬力計測と比較するために、燃料消費率からの馬力計測を行った。各試験時に5分間の主機の燃料油消費量を機関室内の燃料流量計で計測員がその都度計測した。計測により算定された燃料消費率をショップテストの燃料油に換算し、ショップテストの燃料消費率-馬力曲線より、平均所要主機馬力 BHP を求めた。

4. 計測結果及び考察

4.1 計測波形と氷片かみこみ

Fig. 6 及び Fig. 7 は左舷プロペラ軸でのトルク、スラスト、

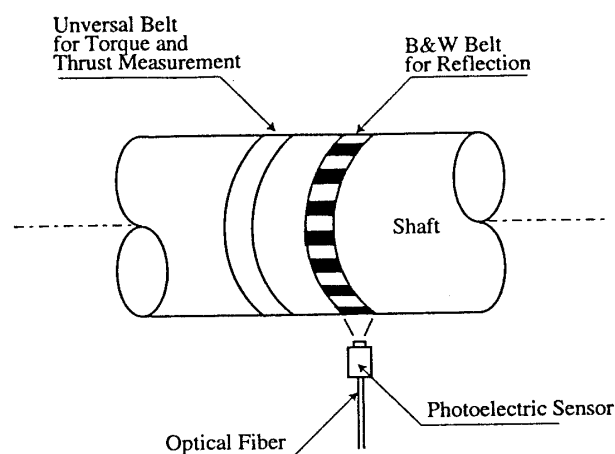


Fig. 5 Arrangement of Shaft Revolution Measuring System

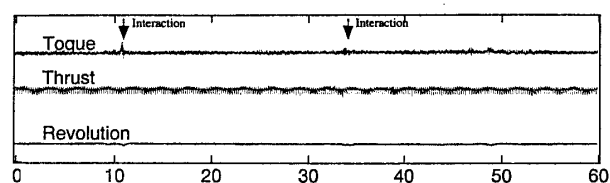


Fig. 6 Torque, Thrust and Revolution (Port Side Shaft)

(1/4 Continuous Icebreaking Test: 1996.2.24 14:23-)

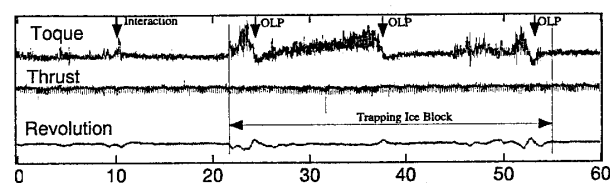


Fig. 7 Torque, Thrust and Revolution (Port Side Shaft)

(2/4 Dual Line-Icebreaking Test: 1996.2.27 9:48-)

ト、回転数の計測波形の例である。Fig. 6 は、1/4 直進航行試験時のもので、比較的干渉頻度が低い試験条件の波形である。トルクと回転数の波形には強い相関が見られ、トルクが鋭い正のピークを持つとき、回転数は負のピークを持つ。トルクと回転数の波形に見られる変動時点が、氷片とプロペラ翼との干渉を表している。図中、矢印で干渉現象を示す。干渉による回転数の変動は、時として20%におよび、軸系、機関や流体力学的特性に与える影響は無視できない。スラスト波形は比較的安定しており、氷片との干渉時にやや減少する波形も見られた。

Fig. 7 は、2/4 協調砕氷試験時のもので、干渉頻度が高い試験条件である。このトルク波形では、いったん大きく上昇した後、急速に下降するパターンを何度か繰り返す現象

が確認できる。「てしお」はプロペラ及び軸系保護のために、プロペラに過大な荷重がかかった場合に翼角を減少させる過負荷制限装置 (Over Load Protector: OLP) を装備している。この様な波形パターン時には、干渉により荷重が増加したため、OLP が作動して翼角が減少し、いったんトルクが OLP 作動限界以下に下がったが、OLP が作動停止して指定翼角に復帰したところ、荷重上昇原因は解消しておらず、また OLP が作動するという状態を繰り返したものと考えられる。実際、この時、OLP が作動し、翼角が減少することが機関室内翼角指示計により確認された。

ノズルプロペラにおけるこうした比較的長い時間の干渉現象としては、従来から、ノズルの閉塞が指摘されてきたが、船舶技術研究所水海船舶試験水槽で実施したプロペラ単独氷片流し込み実験では、氷片のかみこみもその原因となることがわかってきた。Fig. 8 に「ノズル閉塞」と「氷片のかみこみ」の概念図を示す。

ノズル閉塞は比較的大きな氷片が流れてきた場合、氷片によってノズル前面が塞がれたり、ノズル上部や支柱と船底との間に氷片が挟まることによって生じ、その伴流などにより流体力学的な荷重をプロペラに与える。「てしお」の模型船による実験では、砕氷片浮上速度に比べて模型船の前進速度が大きい場合には、ノズル上部と船底との間に砕氷片が挟まる現象が確認されている。この場合、ノズル自体のスラスト成分を減少させるために、スラスト全体への影響は大きいものの、ノズル内の流場への影響は小さく、トルク成分への影響は小さい。

一方、氷片かみこみとは氷片がプロペラの翼と翼の間、または翼とノズルの間に挟まって、翼とともに回転する現象である。模型プロペラを用いた氷片流し込み実験では、ノズル直径より氷片が小さい場合にはノズル閉塞が起きることはないが、氷片のかみこみは頻繁に起きることが確認されている。特に氷強度が大きい場合や翼角が大きい場合は、翼での氷片切断が起きにくく、かみこみの発生確率が高くなった。実船においては、船の後流に浮き上がった氷片の観察ではノズル前面の閉塞が起きるほどの大きな砕氷片が視認できなかったこと、流体力学的な力により大きなトルク上昇が連続的に起きていること、機関室内での判断ではある程度の質量が翼とともに連れ回りしている音がすることなどから、総合的に判断して氷片かみこみがトルク上昇の原因であると判断した。

ラミング砕氷時に、氷片によるノズル閉塞や氷片かみこみ現象が最も頻繁に観察された。これは砕氷船が大きな推力を必要とする時であり、氷片との接触による荷重増加成分を正確に把握し、プロペラ、軸系の強度との関係からの確な OLP の感度を設定することがスムーズな操船に重要であることがわかる。

4.2 軸馬力のゲージ計測と燃料消費量推定との比較

Fig. 9 は、ゲージと燃料消費率の2種類の計測方法より

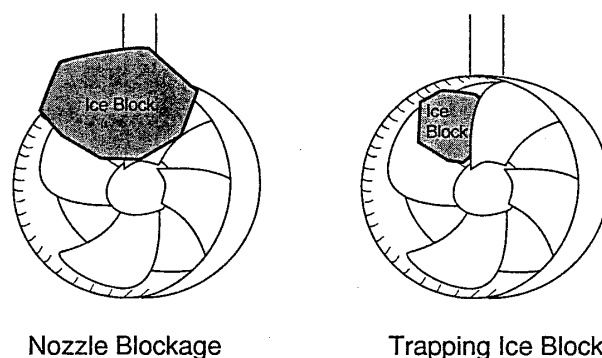


Fig. 8 General View of Nozzle Blockage and Trapping Ice Block

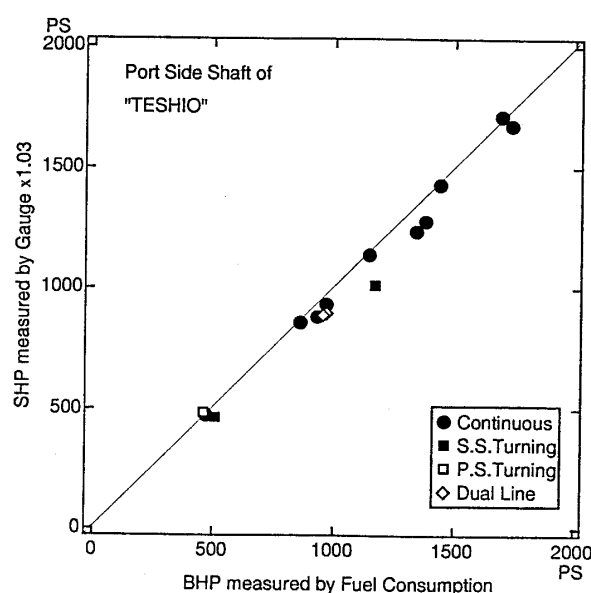


Fig. 9 BHP Comparison between measured by Fuel Consumption and measured by Gauge

求めた馬力を比較したものである。ゲージ計測による馬力は、干渉がない部分でのトルク計測値の平均から、軸馬力 SHP の定常成分値を求め、機械効率等による馬力増加を3%と仮定し、主機馬力に換算した。燃料消費率から求めた馬力の方が2/4出力付近で若干高めとなったものの、両者は非常に良い一致を示した。燃料消費率による計測では、5分間の平均を取っているため、変動成分が加算されており、干渉頻度が比較的高い、右旋回試験及び、協調砕氷試験時には馬力がやや高く計算されることが認められる。この図からゲージによるトルク計測は、実用上十分の精度を持つことが確認できた。

4.3 軸馬力及びプロペラスラストの定常成分

Fig. 10 は、横軸に船速、縦軸に氷厚をとったグラフで、ゲージで計測した左舷軸馬力の定常成分をパラメータとして表したもので、直進航行試験の1000 PSの等軸馬力曲線を書き加えてある。等軸馬力曲線の傾きから、馬力に対しては船速より氷厚の影響が顕著であることがわかる。

Fig. 11 に、前進係数 J に対するプロペラスラストの定常成分から求めた K_{TP} のグラフを示す。図中の白丸は翼角 22.257° での水中模型試験での K_{TP} である。実船での K_{TP} の計測値は、氷厚の影響を考慮しても模型試験での値よりかなり高めの数値となっているが、各翼角では右下がり、翼角が増加するにつれ K_{TP} も大きくなるという傾向は正しく現れている。歪ゲージによるスラスト計測は、軸トルクに比べて歪量が小さいため難しいとされているが、歪ゲージの貼り付け角度のずれに注意し、現場での検定を精密に行い、トルクとのクロス成分を適切に見積もれば十分計測可能であることが示された。

4.4 氷片干渉による変動成分

Fig. 12 は軸馬力の定常成分と変動成分の比較である。変

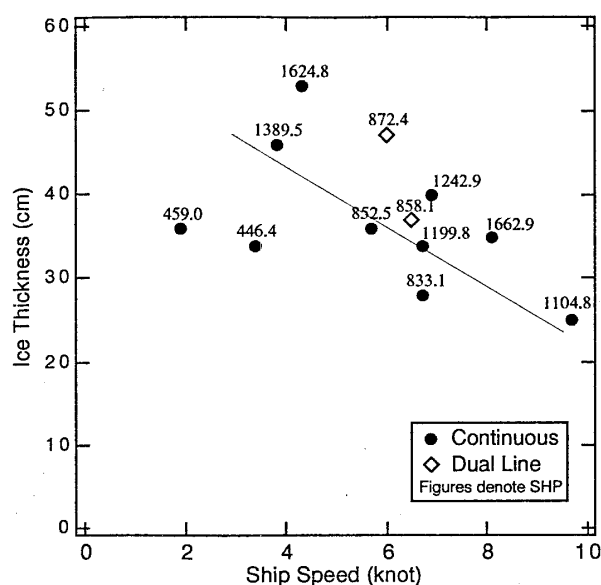


Fig. 10 Ship Speed vs. Ice Thickness

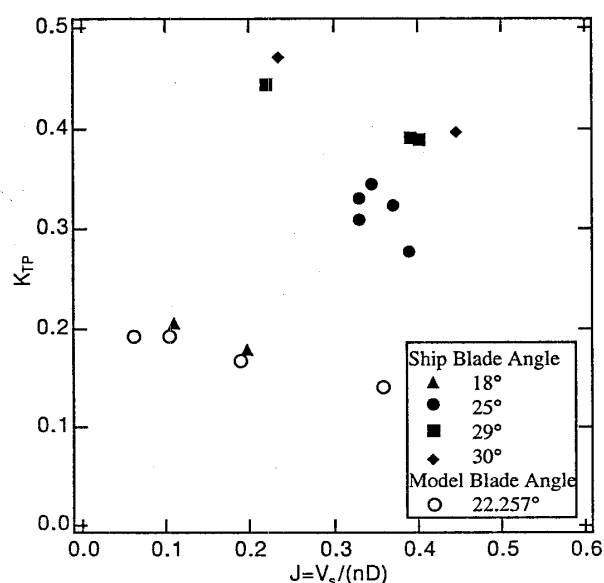


Fig. 11 Propeller Thrust Coefficient vs. Advance Coefficient

動成分はピーク値の平均値として示してある。定常成分が 1600 PS を超えた 2 点は 4/4 直進航行試験時の値で、OLP が頻繁に作動したために変動成分が小さく表示される傾向がある。ばらつきは大きいものの、軸馬力の定常成分が増加すると変動成分も増加する傾向が見られる。Fig. 10 によると、軸馬力は船速より氷厚の影響を大きく受けるから、定常成分の増加時には氷厚が増加する。氷厚増加により、氷片の径や質量も増加するため、干渉による変動成分が大きくなると考えられる。プロペラに流入する氷片の大きさは直接的に計測できなかったものの、船尾部のビデオによって後流に浮き上がってきた氷片の径を観察したところ、4/4 直進航行試験時（実験番号 2707）のように氷厚が大きい場合には、氷片の径もやや大きくなるという傾向は確認できた。氷との干渉によるトルク変動成分の大きさは、その最大値で定常成分と同程度であり、プロペラには氷との干渉時には瞬間的に定常分の約 2 倍の力が掛かることがわかる。

協調砕氷航行試験においては、軸馬力の変動成分が非常に大きい。これは Fig. 10 からわかるように、協調砕氷航行試験時には、同一軸馬力の直進航行試験時よりもかなり大きな船速、氷厚で航行したことによる。また協調砕氷航行試験時には、先行船による砕氷片も加わるため、かみこみ現象等も多く観察されており、これが変動成分をさらに大きくしたと考えられる。

Fig. 13 は、横軸が軸馬力の定常成分、縦軸が干渉頻度の大きさを表している。Fig. 6, Fig. 7 に示すような軸トルクの波形が、定常成分から大きくはずれてプラス方向へピークを持った場合を干渉と認定し、一定時間これをカウントした。これから、模型船や他船型との比較のために、1 船長 L_{PP} の距離を船が前進する間の干渉回数を、 N_{LPP} として定

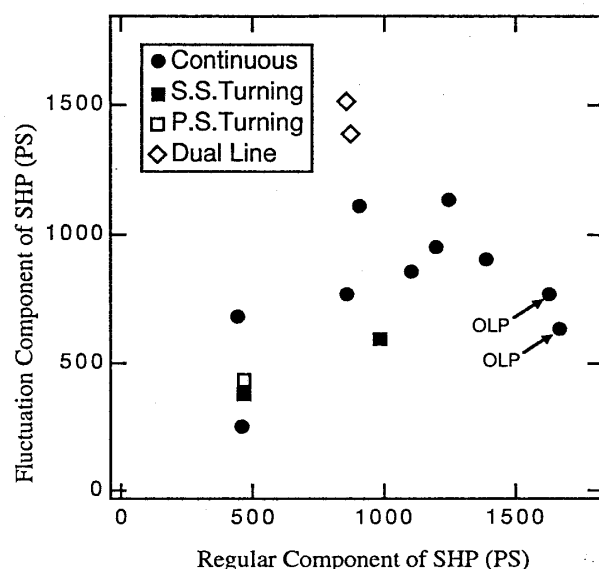


Fig. 12 Fluctuation Component of SHP vs. Regular Component of SHP

義した。 N_{LPP} は L_{PP} を長さの単位として(長さ) $^{-1}$ のディメンションを持つ。ばらつきは大きいものの、軸馬力の定常成分が大きいほど干渉頻度は高くなる傾向が見られる。こうした現象の第一の理由として、船長分航行する際の砕氷体積は、氷厚に比例するため、定常成分が大きいほど氷片の体積は増加して、氷片のプロペラに流れ込む頻度も高くなることが考えられる。Fig. 13 のグラフの右上に突出した2点が、他点に比べて氷厚が大きいデータであることから、このことが裏付けられる。第二の理由として、軸馬力の定常成分が大きいほど翼角は大きくなり、かみこみ現象等も多くなることが考えられる。かみこみ現象が起きると、カウントされる干渉回数は飛躍的に増加する。これら種々の要因の複合として、軸馬力の定常成分、変動成分、干渉頻度の関係はある程度説明できるが、詳細な検討については干渉過程についてのさらに詳しい分析が必要である。

5. 模型実験との比較

運輸省船舶技術研究所の氷海船舶試験水槽で行われた平坦水中自航試験の結果から、氷片とプロペラとの干渉頻度について考察する¹²⁾。模型実験の条件を Table 3 に示す。この実験では荷重量変更式試験法を採用しており、抵抗動力計を介して模型船を一定船速で曳航し、曳航力 F をモニタ

Table 3 Experimental Conditions of Model Tests

Exp. number	Ship Speed (m/s)	Ppropeller Revolution (rps)	Blade Angle (degree)	Ice Thickness (mm)
204	0.312	8.98	22.26	27.4
210	0.156	14.03	22.26	48.8
213	0.779	12.03	22.26	26.6
216	0.312	16.50	22.26	49.4

Model Scale=1/10.889

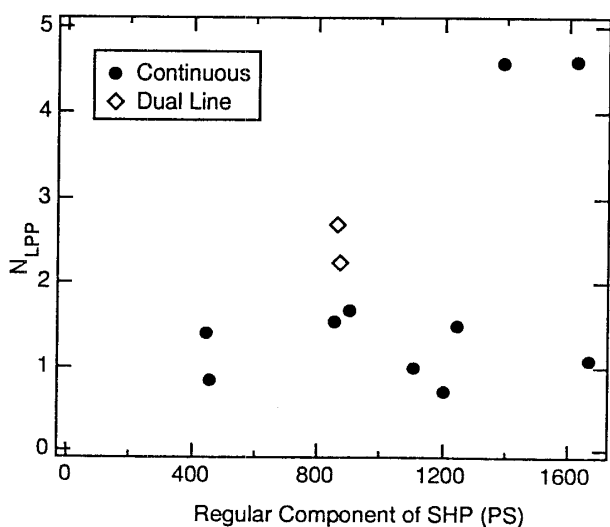


Fig. 13 SHP vs. Propeller-Ice Interaction Interval

ーしながらプロペラ回転数 n を段階的に調整する。実験では曳航速度を一定として、 $F=0$ となる自航点を求めた。なお回転数は、はじめに平坦水中抵抗試験結果を基にして、自航試験時の抵抗を推定し、この推定値から平水中抵抗を減じた値が、同一船速で実施した平水中過負荷試験時の曳航力に一致するように設定している。

この模型実験で得られた左軸のスラスト、トルクの変化の一例を Fig. 14 に示す。この左軸トルクの変化から、変動成分のピーク値を求めることは実験機器の固有周期等の周波数特性から適切でない。そこで、本節では模型実験及び実船実験による軸トルク計測結果を基にして「てしお」の模型と実船でのプロペラと氷の干渉頻度の比較を試みた。模型実験からは平坦水中自航試験時の左舷側プロペラのトルクデータを以下の手法により解析して干渉頻度を求めた。すなわちトルクの定常成分の平均値から標準偏差の3倍以上はずれたものを、氷片との干渉イベントとしてカウントし、これから前章の実船実験に倣い、一船長当たりのイベント数 N_{LPP} として干渉頻度を定義した。ただし解析には平坦水中直進航行試験結果のみを用いた。両者の解析結果を実船船速ベースで比較した結果を Fig. 15 に示す。ただし図中の添字は氷厚 (cm) を示し、模型実験値は縮尺比を用いて実船値に換算されている。

模型実験結果では干渉頻度は船速に対してほぼ線形に増

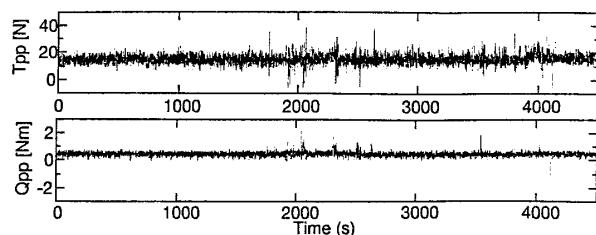


Fig. 14 Propeller Torque and Thrust and Revolution of Model Test (Port Side Shaft)
($V_s=0.312$ m/s, $n=8.98$ rps, $h=27.4$ cm)

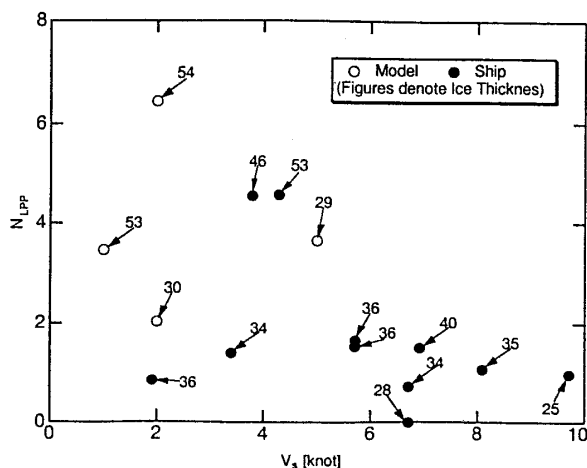


Fig. 15 Comparison of Event Rate of Propeller-Ice Interaction between Model and Ship Trials

加し、氷厚が厚いほど干渉頻度が高くなる傾向を示す。一方実船実験結果はばらつきが大きいものの船速 6 knot 以下のデータは模型実験結果と同様の傾向を示した。ただし干渉の頻度は模型実験の方が 2 倍程度大きい。

一般に水中模型実験ではプロペラと氷片の干渉の影響を過大に評価する傾向が指摘されている。これは主として模型氷では水槽水に対する比重が実海水の海水に対する比重に比べて大きいことによる。このため船首部で下向き荷重を受けて押し下げられた氷片の浮き上がりが相対的に模型実験の場合に遅くなり、プロペラ面に流入する氷片量が多くなる。今回の模型実験に用いた模型氷の場合、密度 $\rho_{im}=0.94$ であり、水槽水の密度は $\rho_{wm}=1.00$ である。一方、実海水の密度はばらつきが大きいものの $\rho_{is}=0.90$ 程度であると言われており、海水の密度は $\rho_{ws}=1.025$ である。氷片に作用する浮力は密度差によって規定されるから、

$$\frac{\Delta\rho_s}{\Delta\rho_m} = \frac{\rho_{ws}-\rho_{is}}{\rho_{wm}-\rho_{im}} \approx 2.08 \quad (5)$$

実海水では模型氷に比べて約 2 倍の浮力が作用する。Jones ら¹⁴⁾ は気泡混入によって模型氷の密度を変化させて船体まわりの氷片の挙動を観察した。これと同時に氷片の浮上速度の計測を行い、水槽水との密度差に対してほぼ線形的に浮上が速くなること、及び氷片体積が大きくなるほど浮上が遅くなることを示した。

これらの結果から模型-実船関連パラメータの導出を試みた。変数としては、氷片の浮力、船速、氷厚の 3 つを考えた。浮力は氷片密度 ρ_i を $\Delta\rho$ で、船速 V_s はフルード数に倣って $g^{1/2}L_{pp}^{1/2}$ で、氷厚 h_i は L_{pp} で割って無次元化し、それぞれの無次元数の乗数について考察した。氷片と水槽水の密度差の干渉頻度への影響を Jones らの観察に基づいて線形的であると仮定する。また模型実験結果から干渉頻度は船速に比例し、かつ氷厚のほぼ 2 乗に比例することがわかる。これから、パラメータ π は次式ようになる。

$$\pi = \left(\frac{\rho_i}{\Delta\rho}\right)^1 \cdot \left(\frac{V_s}{\sqrt{gL_{pp}}}\right)^1 \cdot \left(\frac{h_i}{L_{pp}}\right)^2 = \frac{\rho_i V_s h_i^2}{\Delta\rho L_{pp}^{5/2} g^{1/2}} \quad (6)$$

この π 数を用いて模型と実船の干渉頻度を整理した結果を Fig. 16 に示す。実船と模型船で干渉のカウント方法が異なるものの、両者の結果はこの π 数を用いることによって良くまとまり、線形的な関係を満足することがわかる。

6. 結 言

本論文は、砕氷型巡視船「てしお」の実船試験により得ることのできた、ノズルプロペラと氷との干渉データの概要を示すとともに、その結果について模型試験からのデータも加え、考察した。本研究で得られた結論は以下の通りである。

(1) ゲージをプロペラ軸に直接貼り付ける方法により、プロペラと氷との干渉による軸馬力の変動成分を計測することができた。

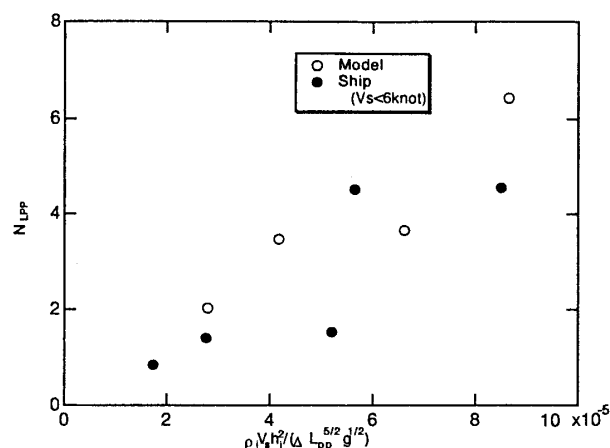


Fig. 16 Model-Ship Correlation of Event Rate of Propeller-Ice Interaction

(2) 氷との干渉による軸馬力の変動成分は、最大で定常成分と同程度の大きさをもつ。

(3) 干渉の頻度は軸馬力に対して比例の関係が認められる。

(4) 干渉の頻度に関する実船試験と模型実験との比較では、氷厚が大きいほど干渉頻度が高くなるという同一の傾向が確認できた。

(5) 模型-実船実験結果の比較から相関パラメータの導出を試み、これを用いて干渉頻度を整理した結果、模型-実船結果が線形的な関係を満足することを示した。

実船試験は海上保安庁装備技術部船舶課船体班及び機関班が実施し、海上保安庁第一管区海上保安部、海上保安試験研究センター、運輸省船舶技術研究所並びに日本鋼管(株)が協力して行われた。また、軸馬力計測システムに関して、日本海事協会技術研究所の馬場主任研究員、城戸口研究員に丁寧なご指導をいただいた。関係各位のご尽力に対して心より感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) Jagodkin, V. Ya.: Analytical Determination of the Resistance Moment of a Propeller During Its Interaction with Ice, (trans.), Problem of the Arctic and Antarctic, vol. 13 (1963), pp. 79-88.
- 2) Ignatjev, M. A.: Screw Propellers for Ships Navigating in Ice, (trans.), Sudostoroenie (1966).
- 3) Wind, J.: The Dimensioning of High Power Propeller System for Arctic Ice-breaking Vessels, Proc. of the 5th Lips Propeller Symposium, (1983).
- 4) Laskow, V. et al.: Engineering Analysis of Ice-Propeller Interaction Data, Summary Report, Transport Canada Publication TP 8449 E, (1986).
- 5) Sasaki, H. et al.: Ice-navigation and shafting strength oh ice-breaker "Fuji", Bulletin of the M. E. S. J. 7, 1, (1979), pp. 87-99.

- 6) Antonides, G. et al.: Full Scale Ice-breaking Stresses on the Propellers of Polar Star, Propeller 81 Symposium, SNAME, (1981), pp. 93-110.
- 7) Edwards, R. Y. et al.: Results of Full-Scale Trials in Ice CCG Pierre Radisson, Proc. of the STAR Symposium, (1981), pp. 291-310.
- 8) Duff, J. et al.: Measurement of Ice/Propeller Interaction Parameters, MV Robert Lemeur Main Report and Appendices, Report prepared for Transportation Development Centre, Canadian Marine Drilling Ltd. Report, (1985).
- 9) Kannari, P.: Full Scale and Model Test Performed with a Nozzle and an Open Propeller Simultaneously, Proc. of the 9th International Symposium on Ice, IAHR, (1988), Vol. 1, pp. 772-781.
- 10) 海上保安庁装備技術部船舶課 (船体班, 機関班): 氷海中実船実験結果報告書 (速報), (1996).
- 11) 海上保安庁装備技術部: 平成7年度開発技報, (1996).
- 12) 岸進他: 砕氷型巡視船「てしお」の氷中航行性能について (その1), 日本造船学会論文集. (1996).
- 13) Toshio Suzuki et al., "Thrust Measurement Technique in Sea Trial Conditions: Assessment and New Development", PRADS 90, (1990), pp. 403-418.
- 14) Jones S. J. et. al. "The Effect of Density on the Trajectory of Ice Pieces around a Ship's Hull", Proceedings of IAHR Ice Symposium (1990), pp. 661-673.