

プロペラスラスト成分の和として定義されるが、今回の計測ではノズルスラストを計測していないため、プロペラスラスト成分のみが得られた。

3.5.2.2 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。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。

3.5.2.3 燃料消費量からの馬力計測

歪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。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。

3.5.3 計測結果及び考察

3.5.3.1 計測波形と氷片かみこみ

図3-5-2に計測波形の一例を示す。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。トルク波形は、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。「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の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、後述する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。図3-5-3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る。一方、氷片

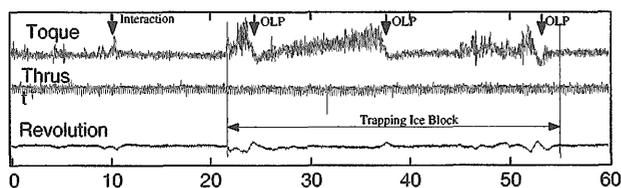


図3-5-2 計測波形例 (2/4DualLine-IcebreakingTest)

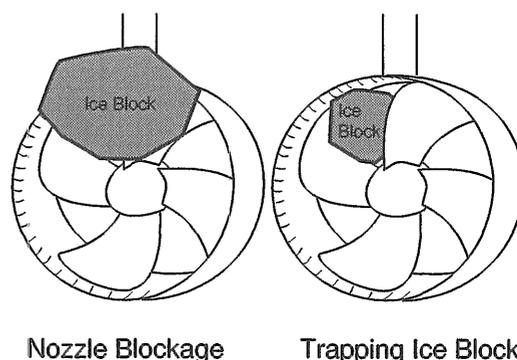


図3-5-3 「ノズル閉塞」と「氷片のかみこみ」

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。模型実験では、この様なかみこみが頻繁に起きることが確認されており、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、発生確率が高くなった。実船では、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っている音がすることなどを、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考えられる。

3.5.3.2 軸馬力の定常成分

図3-5-4は歪ゲージと燃料消費率の2種類の計測方法より求めた馬力を比較したものである。歪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、機械損失等による馬力増加を3%と仮定して主機馬力に換算した。両者は非常に良い一致を示している。燃料消費率による計測では、5分間の平

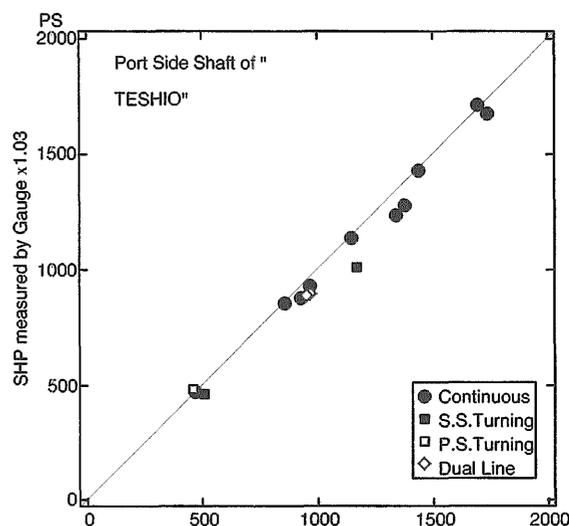


図3-5-4 軸馬力のゲージ計測と燃料消費量推定との比較

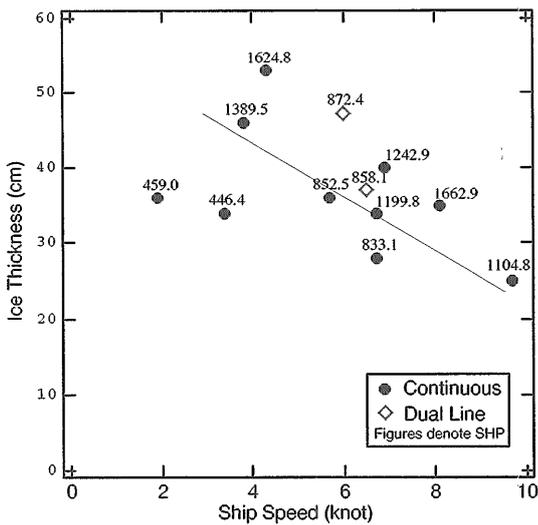


図3-5-5 左舷軸馬力の定常成分

均を取っているため変動成分が加算されており、右旋回試験と協調碎氷試験といった干渉頻度が比較的高い試験では若干高い値を示す。この図から歪ゲージによるトルク計測は、実用上十分な精度を持つことが確認できた。

図3-5-5は、横軸に船速、縦軸に氷厚をとり、歪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、直進航行試験時の1000PSの等軸馬力を示す曲線を書き加えた。

3.5.3.3 氷片干渉による変動成分

図3-5-6は軸馬力の定常成分と変動成分の比較である。変動成分はピーク値の平均値として示した。定常成分が1600PS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は実際より小さく表示されている。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。定常成分が

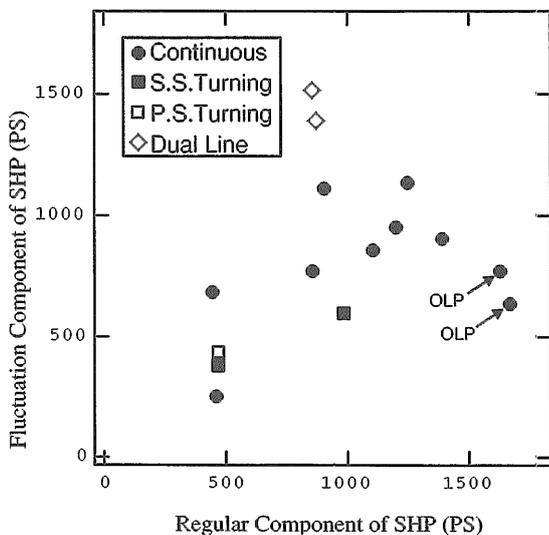


図3-5-6 軸馬力の定常成分と変動成分

大きい時には氷厚が大きく、氷片の径や質量も増加するため、干渉による変動成分も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倍の力がかかることがわかる。

協調碎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。協調碎氷航行時には、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。また先行船による碎氷片も加わるため、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。

図3-5-7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。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し、一定時間カウントした。さらに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 N_{LPP} に換算した。 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。この理由として、一船長分前進する際の碎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、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。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。また、軸馬力の定常成分が大きいほど翼角は大きく、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

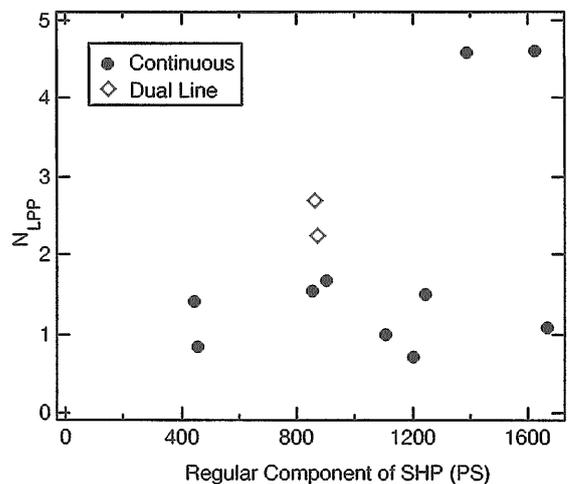


図3-5-7 実船での干渉頻度

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。

3.5.4 実船試験と模型実験との比較

3.5.4.1 干渉頻度

当所の氷海船舶試験水槽で行っ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。模型実験の条件は表3-5-3に示す通りで、縮尺は1/10.889である。実験では荷重度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をモニターしながらプロペラ回転数nを段階的に調整する。曳航速度を一定として、F=0となる自航点を求めた。なお軸回転数は、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。

この模型実験による軸トルク計測結果を基に、「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。模型実験の左舷側プロペラのトルクデータから、定常成分の平均値より標準偏差の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、模型と実船での干渉頻度を実船船速ベースで比較した結果を図3-5-8に示す。図中の添字は氷厚 (cm) を示し、模型での氷厚は縮尺比を用いて実船ベースに換算されている。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加し、氷厚が厚いほど干渉頻度が高くなる。一方、実船実験結果はばらつきが大きいものの、船速6knot以下のデータは模型実験結果と同様の傾向を示した。干渉の頻度は模型実験の方が2倍程度大きい。

模型水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から、氷片の浮き上がりが相対的に遅くなり、プロペラ面に流入する氷片量が多くなる。このため、一般に水中模型実験では干渉の影響を過大に評価する傾向が指摘されている。今回の模型水の場合、浮力の作用は実海水の約半分である。氷片の浮上速度は水槽水との密度差に対してほぼ線形的に変化し、氷片体積が大きくなるほど浮上が遅くなるという研究結果 [30] を用いて、氷片の浮力、船速、氷厚を変数としてパイ数πの導出を試みた。浮力は氷片密度 ρ_i を水槽水との密度差 Δρ で、船速 V_s はフルード数にならって 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線形的であると仮定した。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、パラメーターπは次式のように表すことができる。

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

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図3-5-9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。

3.5.4.2 トルクの変動成分

干渉実験と同じ「てしお」模型プロペラをプロペラ単独

表3-5-3 模型実験の条件

Exp. No.	Ship Speed (m/s)	Pprop. Rev. (rps)	Blade Angle (deg)	Ice Thick. (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

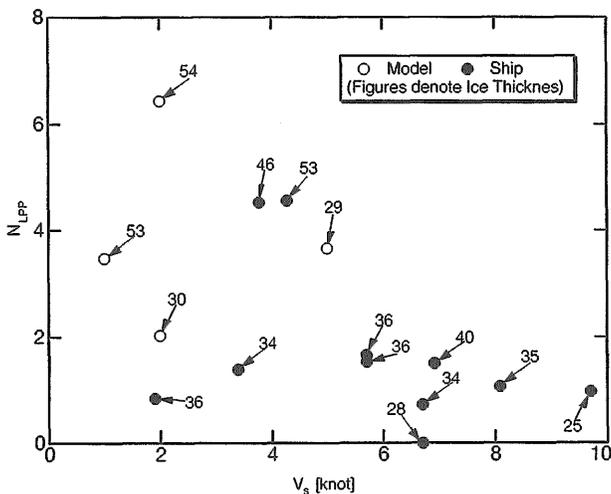


図3-5-8 模型と実船の干渉頻度

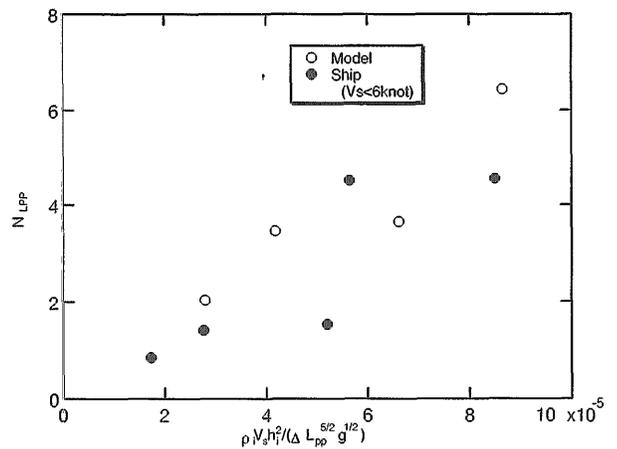


図3-5-9 π数による干渉頻度の比較

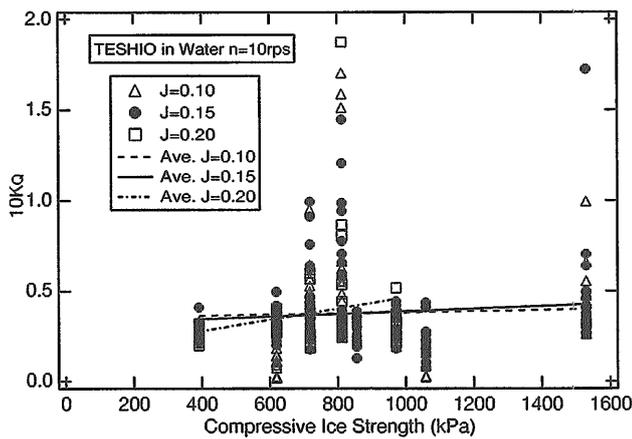


図3-5-10 氷圧縮強度によるトルク変動成分の変化

試験用動力計に取り付け、ここに模型氷を流し込んで、氷片干渉によるトルクの変動成分を計測した。プロペラ回転数は10rps、翼角は22.26°で、模型氷の寸法は厚さ1.5cm、縦横10cmの正方形とした。氷片の強度やプロペラ流入速度の影響を調べるために、圧縮強度を変え、前進係数Jも0.1, 0.15, 0.2の3種類行った。氷片は1個ずつ流し込み、これがプロペラに接触した瞬間のトルクの上昇分を計測、記録した。

図3-5-10は、その結果で、横軸は氷の圧縮強度、縦軸は上昇分を無次元化した。J=0.1~0.2付近でのプロペラ単独特性では、10KQは0.28程度であることから、変動成分はその倍以上と、実船と同様かなり大きいことがわかる。また、右上がりの平均値から、ばらつきは大きいものの氷強度が増すと変動成分も大きくなる傾向が見られる。

一方縦軸をK_Qとしたために、前進係数が大きくなるとK_Qは小さくなるが、トルクの絶対値としては大きくなっている。干渉過程を幾何学的に考えれば、前進係数の上昇はプロペラ回転数上昇と同様の効果があり、このときにトルク変動成分が上昇するのは実船実験結果とも矛盾しない。トルク上昇分の絶対値の実船-模型比較方法は、今後の重要課題である [31]。

3.5.5 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。得られた結論は以下の通りである。

- (1)歪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。
- (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持ち、干渉の頻度は軸馬力に対して比例の関係が認められる。
- (3)干渉の頻度に関する実船-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。相関パラメータ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。

- (4)トルク変動成分の模型実験では、氷強度、前進係数で実船と同様の傾向は見られたものの、絶対値の比較は今後の課題である。

4. むすび

船舶技術研究所の氷海船舶の性能の研究は、氷海船舶試験水槽における模型試験をベースに進められている。模型試験の技術は言うまでもなく実船への応用があって初めて活かされるものである。その意味から模型試験の結果と実船試験の結果の対応が満足のいくものであることは重要である。しかしながら、氷海域に恵まれないわが国にあっては、実氷海域における実船の性能データがわれわれ研究者の手元へ提供される機会は極めて少ない。今回、著者らが実氷海域における実船試験に参画できたことは極めて有意義なことであった。本文中に見るとおり、模型試験からの推定値と実船試験結果の対応を定量的に把握できたことは大きな成果と考えている。

勿論、模型・実船対応がこれで十分と言うことでは決していない。本文中随所に見られる通り、様々の問題点が浮かび上がって来、あるものは解決され、あるものは課題として残された。この前進が本研究の成果と考える。

具体例をあげるならば、水中推進性能試験法の枠組みが確立された事は重要な成果である。この試験法では、荷重量変更試験を採用する。これにより良質の自航要素値が得られる。この試験は氷中のみならず、平水中（氷の無い状態）においても行う。両試験の比較から推進効率の成分の中のアイス影響係数の値を決定する。これにより、合理的に水中推進効率表示式が求められる。アイス影響係数の内容については、氷とプロペラの干渉の研究を展開し理解を深めたが、実船馬力推定に活かすには更に研究が必要である。また氷中抵抗特性に関しては、基礎的な検討を行ったが、推進性能解析法の中に活かすまでには至らなかった。これも残された課題である。

また、実海域氷況データ等実船試験データを中心として得られた資料は砕氷型巡視船の氷海中運航に供する重要な基礎資料となった。これらは研究論文の形に表れない部分が多いが、重要な成果である。

本文中でも述べたように、このような研究は我々船舶技術研究所の研究者のみで遂行することは不可能である。共同研究者として御協力頂いた海上保安庁、日本鋼管（株）の関係各位に厚く御礼申し上げます。また、本研究のスタートにあたり御尽力下さった船舶技術研究所北川弘光元所長、上田隆康元部長、野村雅宣前部長に深く感謝致します。

参考文献 (本研究の成果発表論文)

- [1] 下田春人他「巡視船「そうや」によるオホーツク海航行実験 (第2報)」第62回船研研究発表会、1993.11
- [2] 下田春人他「巡視船「そうや」によるオホーツク海流水観測」第9回寒地技術シンポジウム、1993.12
- [3] 小山鴻一他「単純船首模型を用いた実験による砕氷抵抗に関する考察」第64回船研研究発表会、1994.12
- [4] 宇都正太郎他「巡視船「そうや」によるオホーツク海航行実験 (第3報)」第64回船研研究発表会、1994.12
- [5] 小山鴻一他「小型砕氷巡視船の模型実験—水中推進性能について」第66回船研研究発表会、1995.11
- [6] 下田春人他「船上観測による北海道沿岸オホーツク海域の水況について—氷厚分布の計測—」第11回北方圏国際シンポジウム「オホーツク海&流水」、1996.2
- [7] 宇都正太郎「巡視船「てしお」によるオホーツク海水況観測結果について」オホーツク海水ワークショップ、1996.05.14
- [8] 下田春人他「巡視船による1996年2月のオホーツク海水況観測結果について」第19回極域気水圏シンポジウム、1996.07.11
- [9] 岸進他「砕氷型巡視船「てしお」の水中航行性能について (その1) 水中推進性能に関する実船実験と模型実験結果の比較」日本造船学会論文集1996.11.
- [10] 田村兼吉他「砕氷型巡視船「てしお」の水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実験」日本造船学会論文集1996.11.
- [11] 小山鴻一他「砕氷型巡視船「てしお」の氷海域実船試験その1概要」第68回船研研究発表会、1996.12
- [12] 宇都正太郎他「砕氷型巡視船「てしお」の氷海域実船試験その2水中航行性能」第68回船研研究発表会、1996.12
- [13] 田村兼吉他「砕氷型巡視船「てしお」の氷海域実船試験その3プロペラと氷の干渉」第68回船研研究発表会、1996.12
- [14] 下田春人他「砕氷型巡視船「てしお」の氷海域実船試験その4実験海域の水況について」第68回船研研究発表会、1996.12
- [15] Koichi Koyama, Shotaro Uto, and Mitsuo Yoshida, "Ice Effect Factor of Propulsive Performance of a Ship in Ice - Covered Waters," The 12th International Symposium on Okhotsk Sea and Sea Ice, 2 - 5 February 1997, Mombetsu, Hokkaido, Japan
- [16] S. Uto, H. Shimoda, and K. Izumiya, "Model - Ship Comparison of Propulsive Performance of Icebreaker

"PMTESHIO" in Continuous Ice breaking Mode," OMAE/POAC April 1997, Yokohama

- [17] H. Shimoda, S. Uto, M. Yoshida, and K. Koyama, "Measurement of Sea Ice Conditions and Manoeuvrability of Icebreaker "PLHSOYA" at the Sea of Okhotsk," OMAE/POAC April 1997, Yokohama
- [18] 海上保安庁装備技術部：平成5年度開発技報、1994
- [19] 海上保安庁装備技術部：平成6年度開発技報、1995
- [20] 海上保安庁装備技術部船舶課、氷海中実船試験結果報告書 (速報)、1996.3.25
- [21] 海上保安庁装備技術部：平成7年度開発技報、1996.10

参考文献 (本文中で参照した論文)

- [22] 小山鴻一他「船舶の水中性能について (第7報) —抵抗成分の解析—」第54回船研研究発表会、1989.11.
- [23] 野沢和男「砕氷工学」船舶技術協会
- [24] Wadhams P. et. al. : "An Analysis of Ice Profiles Obtained by Submarine Sonar in the Beaufort Sea". J. of Glaciology, Vol.25, No.93 (1980)
- [25] Prinsenberg S. J. et. al. : "Using an Air - borne Electromagnetic Ice Thickness Sensor to validate Remotely Sensed Marginal Ice Zone Properties", POAC93 (1993)
- [26] Wakabayashi H. : "Sea Ice Observation Using SAR Data in the Okhotsk Sea", 第10回オホーツクシンポジウム (1995)
- [27] 気象庁：海水観測資料第9～12号 (1991～1994)
- [28] 小野：レーダーブイによる流水の動きの観測、低温科学 物理編第35号 (1977)
- [29] Toshio Suzukiet. al. , "Thrust Measurement Technique in Sea Trial Conditions : Assessment and New Development", PRADS90, (1990), pp.403 - 418.
- [30] 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.
- [31] 田村兼吉他「氷片とプロペラの干渉に関する模型実験第2報」第68回船研研究発表会講演集1996.12.