

令和元年 7 月 修士論文要旨

(東京大学大学院 新領域創成科学研究科 海洋技術環境学専攻)

南極地域観測隊実航行データにおける砕氷船「しらせ」散水効果の評価

Evaluation of water flushing effect in icebreaker “Shirase” by analysis of Japanese Antarctic Research Expedition voyage data

学籍番号 47-176653 吉野 正剛

指導教員 山口 一 教授

(令和元年 7 月 26 日 発表予定)

Keywords: 砕氷船, ラミング, 連続砕氷, 散水装置

Keywords: Icebreaker, Ramming, continuous icebreaking, water flushing system

1. 序論

1.1 「しらせ」と砕氷航行

砕氷船「しらせ」(以下, 「しらせ」) は, 南極観測隊の輸送・研究任務のために建造された南極観測船である. 第 60 次日本南極地域観測隊(Japanese Antarctic Research Expedition 60th, JARE60)では, 「しらせ」によって往路 77 名, 復路 80 名の観測隊人員輸送と往路約 1,000 トン, 復路約 400 トン(持ち帰り物資)の物資輸送が行われた. リュツォ・ホルム湾に位置している昭和基地への燃料等の物資輸送は生命線であり, 砕氷船を用いた大容量の輸送は観測に必要不可欠である.

水中航行中は, 海氷から受ける大きな抵抗により, 開放水面に比べて非常に多くの燃料を消費してしまう. JARE60 の記録では, 定着氷での砕氷航行は距離あたりで通常の 10 倍以上, 復路の乱氷帯でのラミング航行では約 550 倍の燃料を消費した. 「しらせ」が昭和基地へとたどり着くためには, リュツォ・ホルム湾の厳しい定着氷を突破する必要がある, 砕氷航行の効率化は JARE にとって非常に重要である.

1.2 散水装置(Water flushing system)

砕氷性能を向上させるための工夫として, 現「しらせ」から新しく「融雪散水装置」と呼ばれる装置が搭載されている(Fig.1). 大容量のポンプで船底から汲み上げた海水を艦首部にある直径 250 mm, 20 本の散水ノズルから船の前方へ散水し, 積雪を湿らせることで船体と積雪間の摩擦抵抗を小さくし, 砕氷効率を向上させる狙いがある. 船体と海氷, 乾いた雪, 湿った雪の摩擦係数を Table 1 に示す. 散水装置の効果は, 模型による氷海水槽実験においてラミング進出距離が約 10% 増加, 連続砕氷抵抗が 5~10% 減少すると示されている.

1.3 課題と目的

実航行データを用いた解析は, 現「しらせ」が就航し氷海航行試験が開始された JARE51 からなされているが, JARE57 までの航海で得られた水中航行データは, 厳しい氷況でのラミング砕氷航行のデータに偏ってしまっている. また, 氷況が厳しい場合は連続砕氷区間が非常に短くなってしまったため試験データが十分でなく, 連続砕氷における散水効果の検証は現在まで行うことが出来ていない.

JARE58 以降の年は海氷が緩い傾向にあり, この比較的緩い氷況における実航行データ解析を行うことが求められている. 今後の「しらせ」の航行指針のみならず, 将来の極域船設計においても, 実航海においてラミングと連続砕氷の両航法において散水効果が現れるかどうかという知見は重要である.

このことから本研究では, 主に筆者が JARE60 に参加した際に実施したラミング・連続砕氷散水試験によって得られた実航行データを用いて解析を行い, 砕氷船「しらせ」における散水装置の効果を評価することを目指した.



Fig. 1 Water flushing system[1]

Table 1 friction coefficient between steel, sea ice, and snow[2]

海氷	乾いた雪	湿った雪
0.04~0.06	0.21~0.28	0.09~0.22

2. 試験データ

2.1 船体挙動データ

「しらせ」には「氷海モニタリングシステム」と呼ばれる観測システムが、その建造時から装備されており、JARE51の航海から毎年データを蓄積している。記録項目はGPS船位、船速、加速度、船首方位、揺れ、舵角、軸回転数、軸スラスト等があり、4 Hz以上の間隔で記録されている。本研究では主にこの氷海モニタリングシステムで得たデータを使用して解析を行なった。

2.2 散水試験

散水装置の効果を確かめるための試験として、散水試験を行なった。散水試験を実施した日時と、緯度経度をTable 2に示す。散水試験では「しらせ」の砕氷航行中に融雪散水装置の起動・停止を一定間隔で切り替える操作を行った。理想的には、無限に広い平坦な海域を選定し、直進・一定速度で散水の切り替えを行うべきであるが、本年度の南極観測隊では往路から観測計画に遅れが生じており、海域を移動しての散水試験を実施する事が出来なかった。そこで本年度の散水試験では「しらせ」の航行に合わせて散水の切り替えを行った。「しらせ」が連続砕氷をしている区間では3~5分間隔で散水装置の起動・停止を繰り返した。ラミング航行の区間では、ラミング2回毎に散水あり・無しを繰り返した。

Table 2 Water flushing test area

日付	UTC時刻	緯度[°]	経度[°]
2月3日	12:05 ~ 18:03	-68.9599 ~ -68.7857	38.9821 ~ 38.7761
2月4日	06:28 ~ 16:40	-68.7873 ~ -68.5926	38.7774 ~ 38.4903

3. ラミング航行

3.1 ラミングデータの抽出

氷海モニタリングシステムのデータから、以下のようなアルゴリズムでラミングを抽出した。

1. 4.5 kt以上のデータを抽出する
2. そこから最も近い両端の停止データを抽出
3. 前回ラミングの停止から今回の助走開始までの期間を後進として抽出
4. 進出距離、貫入速度、緯度経度等の各特徴量を計算

このアルゴリズムは、高橋の修士論文[3]で提案されたものである。抽出されたラミングの進出距離をFig.2に示す。

3.2 進出距離の比較

散水試験で実施したラミングは計28回であった。散水ありのラミングと散水なしのラミングの進出距離の平均をTable 3に示す。氷況は氷厚1~1.7m、積雪深0.1~0.3mであった。今年度のラミング航行の進出距離平均は、散水によって約13%伸びていることがわかった。このラミング進出距離の平均値についてWelchのt検定を行なったところ、 $t(26)=0.4631$, $p=0.6471>0.1$ で統計的有意差はないという結果になった。

4. 連続砕氷航行

4.1 連続砕氷散水試験区間

散水試験を行なった区間のうち、軸回転数が安定かつ散水装置のON/OFF切り替えを連続砕氷で行うことが出来たのは、計23回で、この区間での氷況は、氷厚0.8~1.2m、積雪深10~30cmであった。

4.2 解析データの抽出

4.1で示した区間の氷海モニタリングシステムデータから、解析に使用するデータを抽出した。まず、氷況の変化による影響を出来るだけ少なくするため、散水開始時刻の前後60秒間の船速、軸回転数、軸スラストを抜き出した。次に計23個の抽出区画にNo.1~No.23までの番号を振り分けた。連続砕氷中の速度は約4kt(2.06m/s)であったため、1区画(2分間)での「しらせ」の移動距離は約250メートルである。1区画内での散水試験中に大きく氷況が変化することは無く、氷況変化の影響は無視で

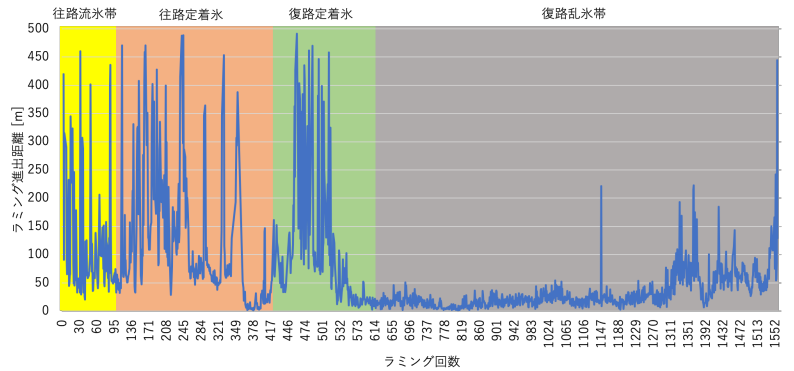


Fig. 2 Ramming penetration distance in JARE60

Table 3 Average penetration distance in water flushing test

	散水あり	散水なし
ラミング実施回数	15回	13回
進出距離平均	199.33 m	176.92 m

きるものとした。氷海モニタリングにおける船速の値は、船の GPS 位置情報から算出されているため、GPS 誤差による外れ値が存在する。この外れ値を除去するため、以下の操作をした。

- 1.外れ値を除外したい解析データの標準偏差 σ を求める
- 2.全データの中から、平均値から 3σ 以上差があるデータを検出し、外れ値とする
- 3.外れ値を、前後3個ずつの値の平均値で置き換える

4.3 砕氷抵抗の算出

連続砕氷における散水効果を評価する指標として、連続砕氷中の砕氷抵抗を以下の式で算出した。

$$R_{total} = (T_r + T_l)(1 - t_p) - Ma \times 10^{-3} \quad (1)$$

ここで、 R_{total} は求める総砕氷抵抗 [kN]とする。 T_r は右軸スラスト [kN]、 T_l は左軸スラスト[kN]で、氷海モニタリングシステムデータから求められる。 t_p は有効推力を求めるための推力減少係数で、経験によって得られる式である。 a はしらせの加速度[m/s²]で、氷海モニタリングシステムの船速データから毎秒の値を求めた。 M はしらせの質量で、海上自衛隊から提供を受けた記録から、 17760×10^3 [kg]とした。例として計23回の連続砕氷のうち1区画分の、算出した砕氷抵抗と船速、軸スラストをプロットしたグラフを Fig.3 に示す。スラストと速度変化によって、砕氷抵抗が変動している様子を見ることができる。

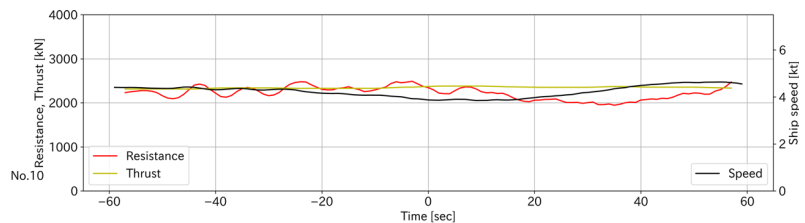


Fig. 3 Ship speed, thrust, and icebreaking resistance in continuous icebreaking

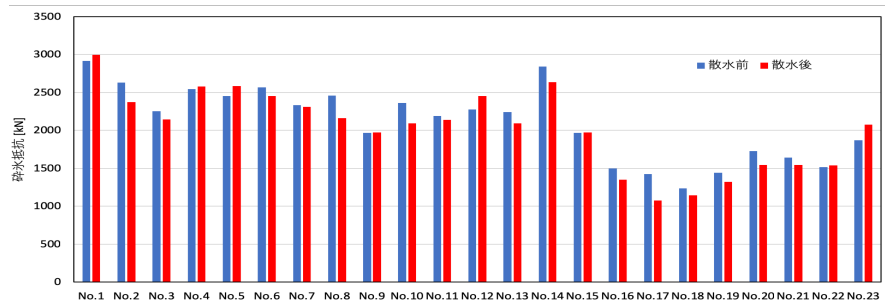


Fig. 4 Comparison of icebreaking resistance between with and without water flushing (JARE60)

散水装置が起動してから海水噴出口から海水が吐出され、湿った雪が船体に接触して効果を発揮するまでには時間がかかるため、散水開始10秒後からを散水効果が表れているとして、散水前は30秒前~0秒前、散水後は10秒後~30秒後の砕氷抵抗値を平均し比較した。計算した平均の砕氷抵抗値を Fig.4 に示す。全23回のうち15回の散水で砕氷抵抗値の減少が認められ、全体の平均でも約3.73%の抵抗減少が認められた。得られた散水前、散水後の砕氷抵抗値の平均値について、対応のあるt検定を行なった。t検定の計算にはpythonのSciPyパッケージを使用した。計算の結果、 $t(22)=2.524$ 、 $p = 0.0193 < 0.05$ となり、有意水準5%で帰無仮説を棄却できる。散水前後の砕氷抵抗値には、統計的有意差があると言える。

4.5 JARE59 散水試験データの解析

4.4 で出た結果と比較するため、同様の解析を JARE59 で実施された連続砕氷散水試験データで行なった。JARE59での散水試験は、2018年2月14日に行われたもので、氷況は氷厚0.6~0.8m、雪深10~15cmであった。散水前の抵抗値と散水後の抵抗値で、全29回の散水のうち23回の散水で抵抗が減少し、平均で18.47%の抵抗が減少していた。この抵抗値に関して4.4と同様の、対応のあるt検定を行なった。結果は $t(28)=641.0$ 、 $p = 0.0006233 < 0.05$ とな

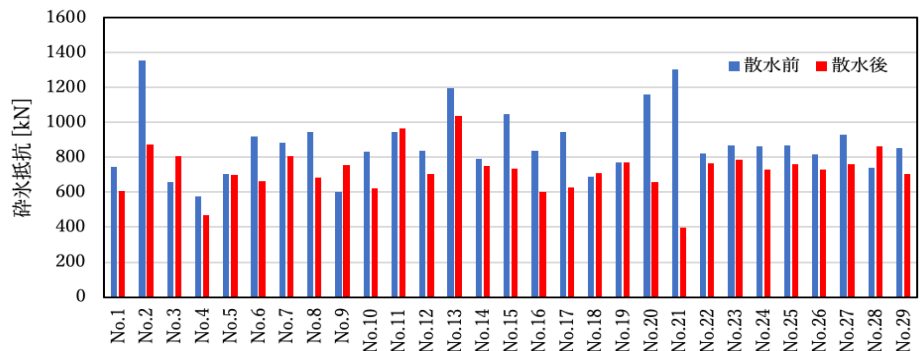


Fig.5 Comparison of icebreaking resistance between with and without water flushing (JARE60)

り、JARE59 のデータにおいても 5%水準で統計的な有意差が認められた。各回の砕氷抵抗値を棒グラフにしたものを Fig.5 に示す。

6. まとめと将来課題

本研究は、「しらせ」の南極観測隊実航海データを使用した解析によって、融雪散水装置の効果を検証することを目指した。

第 60 次南極観測隊に参加し、「しらせ」の実航海データ取得と、散水効果を評価するための散水試験を実施した。氷海モニタリングシステムのデータからプログラムを用いてラミングデータを抽出した。その中から氷況が安定していて、かつ散水切り替えを行っている区画を選定した。

ラミング進出距離を比較すると、平均して散水をした方が進出距離が伸びる事がわかったが、統計的有意差は確認できなかった。また、貫入後 60 秒間の加速度変化を確認したが、散水効果を評価することはできなかった。

氷海モニタリングシステムから得られる船速、スラスト値から、式(4-1)によって連続砕氷における抵抗を概算し、散水前後の砕氷抵抗値を比較し、散水後の砕氷抵抗値が減少していることがわかった。t 検定によって評価を行い、砕氷抵抗値の平均値に有意差があることがわかった。

本研究によって、これまで評価する事ができていなかった連続砕氷実航海データにおいて、散水効果が統計学的有意にあることを示すことが出来た。結果を Table 4 に示す。

Table 4 Average of icebreaking resistance with and without water flushing

	散水前抵抗[kN]	散水後抵抗[kN]	変化量[kN]	変化率[%]
JARE59	879.546635	725.93049	-153.61614	-18.4764
JARE60	2101.48466	2023.11536	-78.369301	-3.7229

本研究のラミング進出距離の解析では、ラミング航行における散水効果に統計的有意差は見られなかった。過去の氷海航行試験報告書においても、散水によってラミング進出距離が伸びると報告されているが、そのいずれにおいても統計的有意差は示すことが出来ていない。新たな指標を用いて散水効果を評価することが求められる。

連続砕氷においては、本研究で散水効果を示すことが出来たが、どのような条件下で抵抗が減少しやすいか、というような知見は得られていない。また、本研究で使用した砕氷抵抗値はスラストと船速のみで求めた概算であり、必ずしも砕氷抵抗値のみを得ているとは言い難い。連続砕氷のモデル化等により、より詳細な砕氷抵抗式への改善が求められる。「しらせ」の散水装置稼働の判断材料とするには、散水効果がより大きく得られる状況を知ることが重要である。氷況や速度など、より多くの状況で散水試験を実施し、その解析をする事で効果的な知見が得られると考えられる。

謝辞

南極観測隊に参加する機会をくださり、2年半にわたってご指導くださった山口先生に感謝申し上げます。本研究にあたり、「しらせ」及び氷況に関するデータは、ジャパンマリンユナイテッド株式会社の山内様、水野様、安齋様、しらせ乗組員の方々、南極観測隊員及び同行者の方々のご支援によって取得することが出来ました。心から感謝いたします。ありがとうございました。

参考文献

- [1] 海上自衛隊 HP:南極地域観測隊協力. <http://www.mod.go.jp/msdf/formal/operation/nankyoku55.html>
- [2] Y. Yamauchi, Japanese journal of multiphase flow, Vol.17(2010), Issue1, pp.11-17
- [3] 高橋祐人：修士論文，東京大学（2019年）。
- [4] 野澤和男，「氷海工学」，成山堂書店