

砕氷船の実航行データ解析によるラミング航行特性の究明と航行支援への活用

Investigation of ramming navigation characteristics

by actual navigation data analysis of icebreaker and its application to navigation support

学籍番号 47-166630 高橋 祐人

指導教員 山口 一 教授

(平成 31 年 1 月 30 日発表予定)

Keywords: 砕氷船, ラミング, 多年氷, 旋回, 航行支援, EM センサー,

Keywords: Icebreaker, Ramming, Multi-year ice, Turning, Navigation support, EM sensor

1. 序論

日本の南極観測において主要な拠点である昭和基地は、リュツォ・ホルム湾奥に位置している。この湾は多くの場合非常に厚い海氷に覆われている。日本南極観測隊(Japanese Antarctic Research Expedition: JARE)を乗せた砕氷船「しらせ」は、後進・助走・海氷への突進を繰り返す「ラミング」という航法で海氷を砕氷しながらこの湾を突破する。ラミングは年によっては数千回にも及び、高々100km 足らずの区間に 2~3 週間を費やすこともある。さらに年によっては時間が不足し、昭和基地まで辿り着けなかった年もある。

したがって、ラミング航行を効率的に実施することは JARE にとって非常に重要である。本研究ではこのラミング航行に関する研究を行なった。

まずはこれまで研究例のないラミングによる旋回について、実航行データを用いてその特性の研究を行なった。さらに明らかになった特性を用いて、より短時間で旋回するための航法を考察した。

次に海氷データから航行時間を予測する方法を模索した。まず本研究が初めての試みとして、海氷厚さとラミング航行の実質的な進出の関係を実海域データから定量化した。さらにこの関係を用いて仮想的なラミング航行シミュレーションを行い、予測されるラミング回数を計算し、実績データと照合して検証した。

2. 基礎情報の整理

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、2009 年の処女航海から毎年データを蓄積している。記録項目には GPS 船位、速度、加速度、揺れ、舵角、軸回転数などがあり、4Hz 以上の間隔で記録されている。本研究ではこのデータを利用した。

2.2 ラミングのプロセスと特徴量

ラミングのプロセスは、以下の 3 つのフェーズに分けて考えることができる。数値はしらせの場合のものを用いる。模式図を Fig. 1 に示した。

1. 後進

助走のため 300m 程度後進する(以降、後進した距離を助走距離と呼ぶ)。

2. 助走

ほぼ氷のない前方の水路を高出力で加速する。

3. 貫入

氷に衝突するときの速度を衝突速度と呼ぶ。海氷を圧壊しつつ乗り上げ、さらに自重を使って大きく砕氷する。衝突位置から停止位置までの距離を貫入距離と呼ぶ。

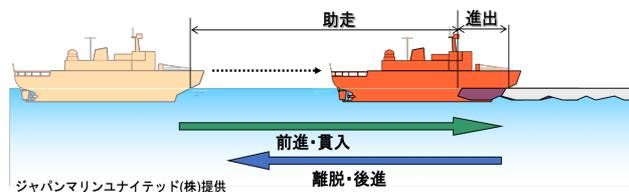


Fig. 1 Schematic diagram of ramming
(image offered by Japan Marine United Co.)

2.3 ラミングの抽出

下記のアлゴリズムに従い、時系列船速データから各ラミングのデータを自動的に抽出した。

1. 高速航行(約 2.3m/s 以上)の区間を抽出する。

2. そこから直前と直後の停止データを探索し、十分近傍に存在すれば、その間を助走+貫入区間とする。

3. 前回ラミングの停止から今回ラミングの助走開始までの区間を後進区間とする。

4. 各種特徴量を計算する.

本アルゴリズムによる抽出ラミング本数と公式記録ラミング数(自衛隊独自の定義による)の比較を行ったところ, JARE54, JARE55, JARE57(数字は隊次を表す)の各数千回のラミングに対して誤差は3%以内であった. 概ね抽出に成功していると思われ, 本解析にはこのようにして抽出したラミングデータを用いた.

3. ラミング旋回

3.1 氷中旋回について

連続砕氷による旋回については, ①氷厚が大きいほど旋回半径が増加する, ②船速の増減による旋回半径の変化は一概には言えない, などの特性が知られている[1]. これに対し, ラミングによる旋回はこれまで研究されてこなかった. これはその実施頻度の低さから注目を浴びなかったためと考えられるが, しらせはこれまでに複数回ラミング旋回を実施している. 今回はこの希少なデータを解析し, ラミング旋回の基本的な特性を調べた.

3.2 対象データ

今回解析対象とした4回のラミング旋回の概要を Table 1 に示す. Turn 1 と 2 における海氷の方が厚い傾向にある.

	時期	旋回場所	氷厚 (m)
Turn 1	2013 年 1 月	平坦定着氷	2.6 / 4.0
Turn 2	2013 年 2 月	平坦定着氷	4.2 / 4.4 / 5.2
Turn 3	2018 年 1 月	平坦定着氷	1.7 / 2.1
Turn 4	2018 年 2 月	氷縁付近乱氷帯	2.1 / 2.2

Table 1 General descriptions of analyzed turns

3.3 ラミング旋回の特性

最小二乗法を用いて推定した旋回円を Fig. 2 に示す. 4 つの旋回で半径が異なることがわかる. さらに貫入距離(旋回平均)と旋回半径の間には正の相関関係が認められる(Fig. 3). また, 貫入距離と旋回半径の間にも正の相関関係が認められる(Fig. 4).

3.4 旋回所要時間の短縮

以上の特性を踏まえた上で, 旋回時間を短縮する方法を検討する. 今回は助走距離を変化させ, 「細かく回数の多いラミング」と「一回ずつが長く回数の少ないラミング」のどちらの方が旋回総所要時間を短くするのかを推定する. 計算の概念図を Fig. 5 に示す. 助走距離 L がラミング一回あたり所要時間 t と衝突速度 V を決定する. V は貫入距離 D を決定し, D はラミング一回あたり旋回角 θ を決定する. t と θ を用いると, 特定の旋回角に対する旋回総所要時間 T が得られる. これらの変数間の関係は, 全て各旋回の実績データを直線回帰して求めた.

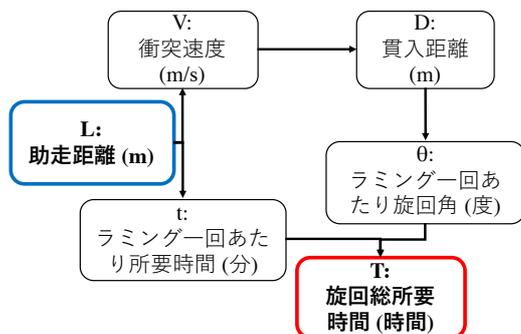


Fig. 5 Conceptual diagram of total turning time estimation

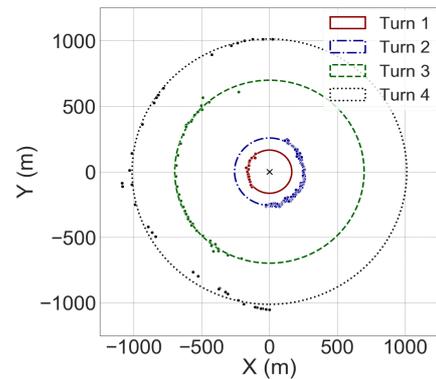


Fig. 2 Concentric plot of ramming endpoints and fitted circles for four turns

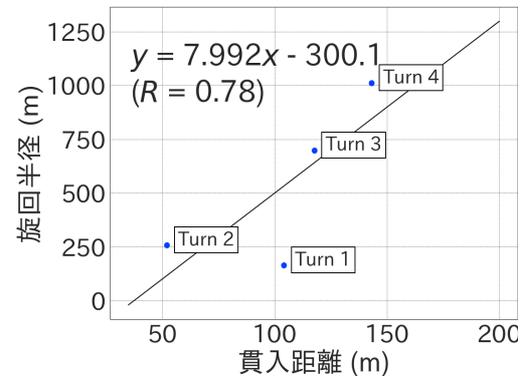


Fig. 3 Relation between penetration distance D and turning radius r

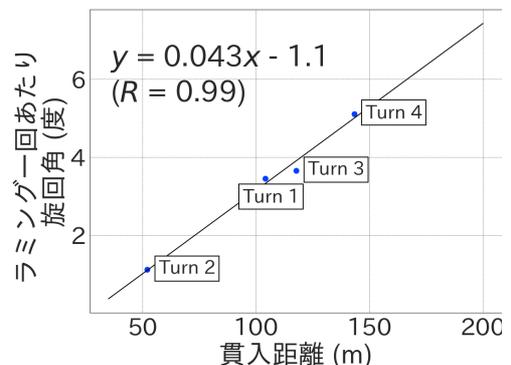


Fig. 4 Relation between penetration distance D and turning angle per ramming procedure θ

求められた $L-T$ 推定曲線を Fig. 6 の実線に示す。星で示したものは実績値である。いずれの旋回においても、助走距離を長く取った方が、旋回総所要時間が短くなった。次に、Fig. 4 の $D-\theta$ 関係式を若干変化させた場合に、 $L-T$ 推定曲線が変化するかどうかを調べた。追加で 6 つのシナリオ (元の回帰直線から傾き 20%増/減, 上/下 10%の平行移動, θ 値の一律 20%増/減)を試したところ、2 つのシナリオで一部の推定曲線が増加関数に転じた(Fig. 6 点線と破線)。これらの原因を考察したところ、自らの砕氷で生成したブラッシュアイスの詰まり等により後進が妨げられ、長い助走距離をとるのに時間がかかる場合に、曲線の傾きが正に転じやすいことが示唆された。

4. 氷厚データを用いた航行時間の予測

4.1 不確かな航行時間

しらせが定着氷縁に到着してから昭和基地まで多年氷帯を航行する日数は大きく変動する。本解析においては、将来的に氷況データが事前に得られたと仮定した場合に、航行日数を予測する手法を模索する。

4.2 氷厚情報に基づくラミング回数の予測

計算の概念図を Fig. 7 に示す。まず、ある氷厚に対するラミング進出がどの程度なのかを予め調べておく。この関係を用いて氷厚分布既知の区間を仮想的に航行することで、その区間の突破に必要なラミング回数を予測する。

4.3 使用する氷厚データ

氷厚の計測手法はいくつかあるが、今回は EM センサーによる 2 計測のデータを用いる。

4.4 全氷厚データのラミングデータへの組み込み

2 種類の EM センサーは、いずれも氷海モニタリングシステムとは別に観測されたものであるため、まずはラミングデータへの組み込みを行う。

EM-Bird については、観測点の緯度経度データから各ラミング位置に対応する全氷厚値を取得する方法で組み込みを行なった。

船上 EM については、船の揺れの影響を受けたり一度砕氷した氷を観測したりといった原因により計測値が不安定になる。このデータから正しい計測値を抽出するため、次のような方法を考案した。

1. ラミング氷貫入後停止時刻から 2 分間の船上 EM データを抽出する。
 2. 抽出した 120 データ(記録間隔が 1Hz のため)をそれぞれ小数第 2 桁で四捨五入する。これらから 10 回以上カウントされた値を抽出する。抽出された値を安定して計測された「有効計測値」とする。
 3. 有効計測値の中央値を実際の全氷厚値とみなし、ラミングデータに組み込む
- 以上により、揺れが少ないかつ未砕氷の氷を計測している値を抽出する。

4.5 実質進出距離の計算

Fig. 7 の計算のためには、各全氷厚値におけるラミング一回あたりの「進行方向への実質的な進出距離」を計算する必要がある。実際の厳しい氷況におけるラミング航行を考える場合、この定量化にはやや工夫が必要である。なぜならば、各ラミングにおいて進行方向の進出のみを常に狙うわけではなく、ある程度砕氷幅を広げるために左右に振ったラミングを実施するためである。今回はこの左右方向成分を取り除いて実質的な進出を評価するため、新たに「実質進出距離」を定義し、これを用いた。

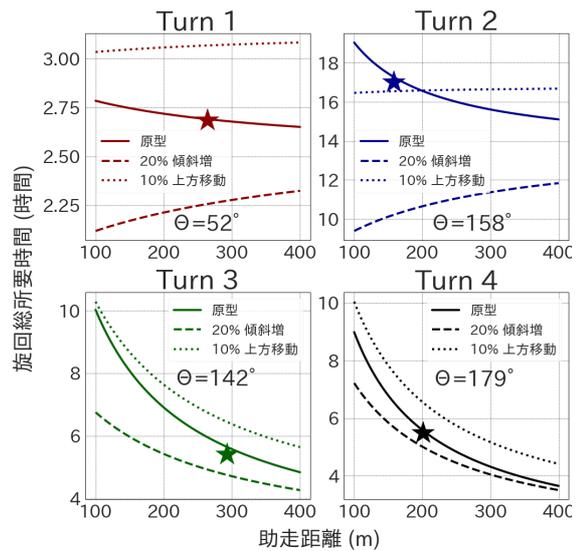


Fig. 6 Estimated total required time (T) and its dependency on approach run length (L) – scenarios of 20% inclined/10% lifted (parallel upward shift) from the original $D-\theta$ equation. Actual $L-T$ values are indicated using stars.

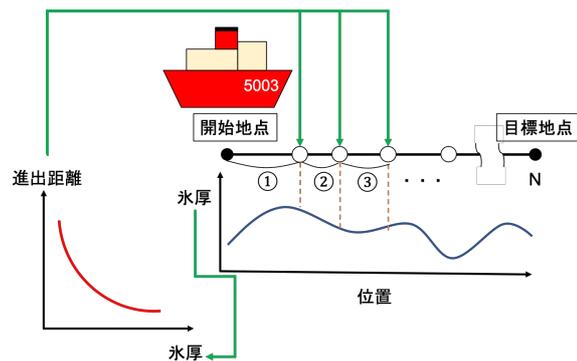


Fig. 7 Conceptual diagram of prediction method of number of ramming

4.6 全氷厚と進出距離の関係

船上 EM から取り込んだ全氷厚値と実質進出距離の関係を Fig. 8 に示す. 実質進出距離については物理的な考察が難しいが, 貫入距離については先行研究から全氷厚の-2 乗に比例すると考えられる[2, 3]. これを参考に, 実質進出距離も全氷厚の-2 乗に比例すると仮定し, 回帰曲線を作成した.

4.7 航行シミュレーション

Fig. 8 の関係を用いて, Fig. 7 の要領で JARE57 の EM-Bird 計測区間上を仮想的に航行するシミュレーションを行なった. 2 つの進出モデルによる計算値(青, 水色)と実績値(黒, 黄色)の比較を Fig. 9 に示す. 氷厚によって過小評価・過大評価している部分があり, 一部では推定回数と実績値の間に 56%もの誤差が生じていた. この区間は全氷厚 6m 程度と厚く, Fig. 8 からこの領域で回帰曲線が過小評価していることが読み取れる. 精度の良い予測のためにはまずこの予測曲線の改善が必要である.

5. まとめと将来課題

本研究の成果と今後の課題を以下にまとめる.

- ・ラミングの自動抽出に成功し, 過去 2 万回以上にわたる大量のラミングデータの解析を可能にした.
- ・ラミング旋回の特徴を調べた. 旋回半径とラミング 1 回あたり旋回角は, いずれも貫入距離と正の相関があった. ただしサンプル数が少ないため, 他のデータも合わせて信頼性を向上する必要がある.
- ・助走距離の長短によって旋回にかかる時間がどう変化するか検証した. 後進が容易な場合は十分な助走距離を取る方が短時間で旋回できることが示唆された. ただしブラッシュアイス等により後進が阻害される状況においてはその限りではなく, この場合については本解析では結論を出せなかった.
- ・ラミング航行区間における船上 EM のデータから実際の氷厚値を抽出するアルゴリズムを考案し, データの利用可能性を示した. しかしながら一部センサーが誤った値を計測して安定した場合を除外できていないなど, 課題も残っている. 他の氷厚観測手法との照合による精度検証も必要である.
- ・ラミングの実質的な進出を表す指標を作成し, 二本突きのように砕氷幅を広げながら進行するラミングにおいても一括して進出距離を評価できるようになった.
- ・ラミング貫入距離が氷厚の-2 乗に比例するという物理モデルに対し, 実海域航行データが概ね似た傾向にあることを示した.

・実質進出距離が全氷厚の-2 乗に比例するというモデルの下で航行シミュレーションを行ったところ, 一部全氷厚 6m 程度の厳しい氷況で誤差が 50%を超えるなど大きくなった. 事前取得データのみによる予測可能性は示唆されたものの, 未だ実用的な水準にはなく, 誤差を小さくするためにはモデルの改善が必要である.

謝辞

南極観測隊に参加する機会をくださり, その後の研究においても熱くご指導くださった山口先生に感謝申し上げます. 59 次南極観測隊員やしらせ乗組員, JMU, 極地研, その他本研究をご支援くださった皆様にも感謝申し上げます.

参考文献

- [1] B. Quinton and M. Lau, Manoeuvring in Ice - Test/Trial Database. National Research Council Canada. Technical report SR-2005-13. 2005.
- [2] 野澤和夫, 氷海工学, (成山堂書店, 東京, 2006), Chapter 5.
- [3] 岸進, 宇都正太郎, 加納敏幸 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, 180, 99-111. 1996.

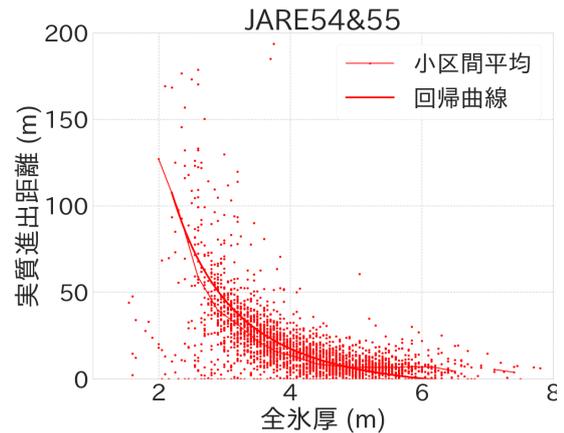


Fig. 8 Comparison of progress by number of ramming

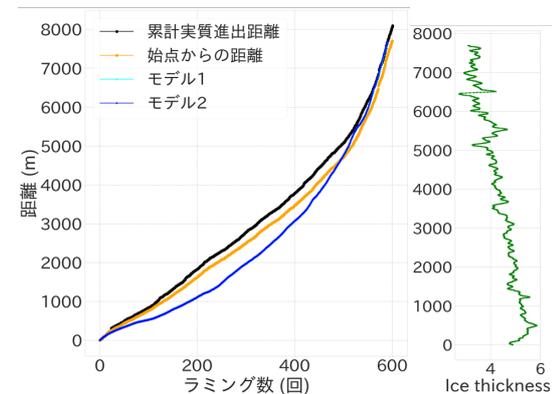


Fig. 9 Comparison of progress by number of ramming