

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

平成 30 年度 修士論文

## 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

2019 年 1 月 23 日 提出

指導教員

山口 一 教授

04-166630 高橋 祐人



## 目次

<b>第1章 序論</b> .....	<b>1</b>
1.1. 日本の南極観測と砕氷航行.....	1
1.2. 砕氷航行の課題.....	3
<b>第2章 基礎情報の整理</b> .....	<b>9</b>
2.1. 船体挙動データ.....	9
2.2. ラミングのプロセスと特徴量.....	10
2.3. ラミングの抽出.....	14
2.4. ラミング航法.....	16
2.5. 氷況データ.....	21
2.6. 散水装置.....	27
<b>第3章 ラミング旋回</b> .....	<b>30</b>
3.1. 水中旋回について.....	30
3.2. しらせの旋回.....	30
3.3. 対象データ.....	31
3.4. 解析-1 ラミング旋回の特徴研究.....	32
3.5. 解析-2 旋回所要時間の短縮.....	39
3.6. 結論.....	48
<b>第4章 氷厚データを用いた航行時間の予測</b> .....	<b>50</b>
4.1. 不確かな航行時間.....	50
4.2. 氷厚情報に基づくラミング回数の予測.....	51
4.3. 使用する氷厚データ.....	51
4.4. 全氷厚データのラミングデータへの組み込み.....	53
4.5. 実質進出距離の計算.....	58

4.6.	全氷厚と実質進出距離の関係 .....	63
4.7.	航行シミュレーション .....	69
4.8.	結果 .....	71
4.9.	結論 .....	74
第5章	まとめと将来課題 .....	74
5.1.	本研究の成果と課題 .....	74
5.2.	今後の研究への提案 .....	76
付録1	JARE59 連続砕氷試験結果 (散水による速度変化と燃料消費) .....	78
付録2	JARE59 ラミング試験結果 (ラミング航法分類への活用を意図したデータセット) .....	81
謝辞	.....	83
参考文献	.....	85

# 第1章 序論

## 1.1. 日本の南極観測と砕氷航行

南極地域は、科学観測において重要な役割を担っている。例えば、近年最も大きな社会的関心の的として地球温暖化問題が挙げられるが、これに関する研究においても南極観測は重要である。南極はグローバルな変動が増幅して現れること、人間活動による影響を大きく受けていない環境が残っていること、太古の気候・環境情報を知る手がかりを保存していることなどから、「地球環境」の研究に最適な場所であると考えられている[1]。具体的な観測としては、氷床深部のアイスコア掘削による古環境情報の取得[2]や、CTD 観測等による海水の棚氷融解効果の調査[3][4]などが近年実施されている。

こうした重要な研究観測を実施するための拠点として、日本はリュツォ・ホルム湾内の東オングル島に昭和基地を設置しており、これが最も主要な観測拠点である。この昭和基地や周辺の基地に、ほぼ毎年、日本南極地域観測隊(Japanese Antarctic Research Expedition, 以降 JARE)が派遣されている。近年の観測隊員は毎年 70 名程度(同行者を除く)であり、その隊員のうち数名は航空機によって南極入りするが、残りのほとんどは砕氷船に乗って輸送物資とともに昭和基地へ向かう。現在この砕氷船には「しらせ(2代目)」が就航しており(図 1)、約1100tの物資を輸送する能力を持っている。



図 1 昭和基地付近に停泊するしらせ

昭和基地の位置するリュツォ・ホルム湾は、基本的に厚い定着氷(fast ice と呼ばれる、海岸に固着して動かない海水)が張っている。定着氷ないしは海水についての一般的な性質は[5][6]に詳しい。リュツォ・ホルム湾の定着氷は、一年氷(first-year ice と呼ばれる、生成して1年目の氷)では氷厚1-2m程度であるが、多年氷(multi-year ice と呼ばれる、生成して2年目以上の氷)では少なくとも2-4m 程度まで成長することが確認されている(2000年と2002年実績、[6])。さらには年によっては氷がもっと厚くなることもあり、6m程度まで成長した氷も観測されている([25])。これは基地を設置する湾としては非常に厳しい氷況であり、基地設置の計画段階では米海軍から「到達不能点」とも評されていたという([7])。

観測隊の行程の例として、JARE59(第59次日本南極地域観測隊、以降JAREに続く番号は隊次を表す)の行程を図2に示す。観測隊はオーストラリアのフリマントルを出港し、途中海洋観測等を実施しながら10,000km程度の旅程を2週間ほどかけてリュツォ・ホルム湾定着氷縁に到着する。残った定着氷縁から昭和基地までの距離は高々100km程度であり、ここを次節で説明する「砕氷航行」をしながら進むことになるが、この区間で場合によっては3週間ほどの時間を

費やすこともある。それほどにこの定着氷域の航行は厳しく、観測隊の安定的な任務遂行を目指す上で重要な行程である。

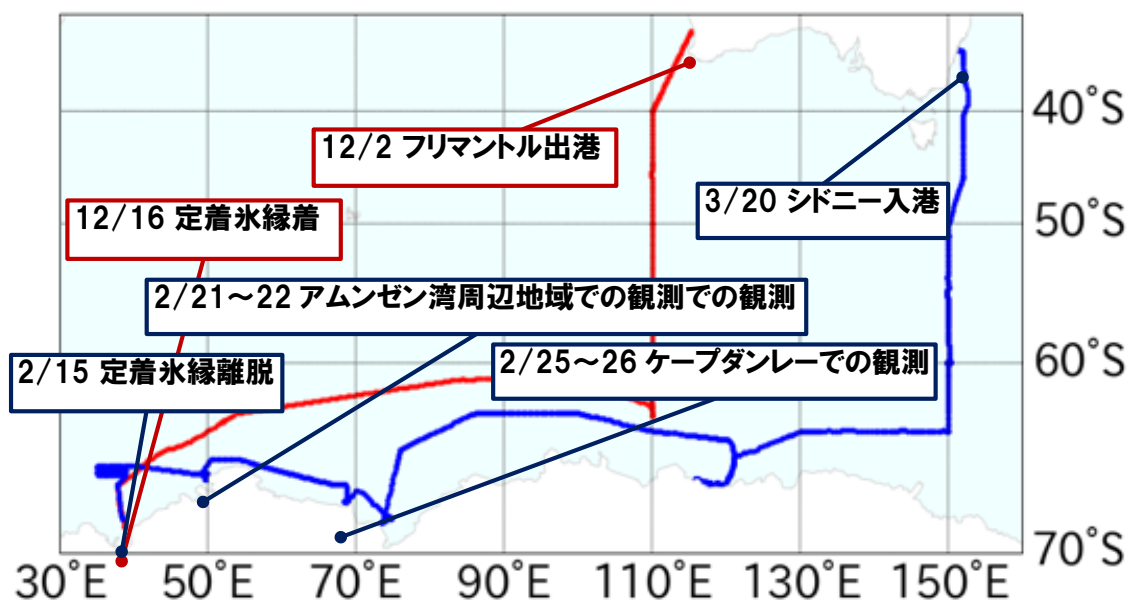


図 2 JARE59 のルートと行程 (赤が往路、青が復路を示す)

## 1.2. 砕氷航行の課題

一般に砕氷船は、薄い氷であれば「連続砕氷」というモードで航行が可能である。特定の範囲の船速(しらせの場合は数 knot から 10knot 程度)を維持しつつ、連続的に氷に乗り上げて自重で砕氷しながら進む。しかしながら、氷が厚く抵抗が大きくなると、船が止まってしまい連続砕氷はできなくなる。その場合、砕氷船は後進→助走→砕氷→船体停止を繰り返しながら進む。このオペレーションは「ラミング」と呼ばれる。

以降、しらせの場合について述べる。しらせの連続砕氷能力(3knot で連続砕氷航行して砕氷可能な氷厚)は 1.5m であり[9]、上述の通り 2m を超えるリュツォ・ホルム湾の多年氷は基本的に連続砕氷航行が不可能である。

1 回のラミングには 7 分程度の時間がかかり、1 回のラミングで進める距離はおよそ数十 m のオーダーである(氷厚により数 m や 100m といった距離にもなる)。ラミングは連続砕氷と比べ、その進行効率の悪さから、多大な時間と燃料を消費することになる。例えば、一年氷では 10knot(約 5m/s)で連続砕氷できることもあるが、多年氷をラミング一回あたり 7 分・20m 進出で航行した場合、平均速

度は約 0.05m/s と、一年氷の場合の 100 分の 1 にまで低下する。この間船の推進器も常に正転・逆転を繰り返しながら稼働しているため、必然的に燃料消費量も大きく増加する。

年によっては、しらせはリュツォ・ホルム湾内において数千回にもわたるラミングを実施することもある。図 3 に JARE07 ~JARE59 までのラミング回数を示す。この間にはふじ・しらせ(初代)・しらせ(2代目)の合計3代の砕氷船が就航している(2008年はオーストラリアの砕氷船 Aurora Australis による観測行動を行った年で、この年のみラミング回数の記録が欠損している)。これら3代の砕氷船の諸元を表 1 に示す。以降特に断りがない場合、しらせと表記した場合は2代目を指す。

表 1 1965 年以降の日本の南極観測船 3 代の主要諸元 ([12]より作成)

船名	ふじ	しらせ(初代)	しらせ(2代目)
従事隊次	JARE07~24	JARE25~49	JARE51~
全長	100.0 m	134.0 m	138.0 m
最大幅	22.0 m	28.0 m	28.0 m
深さ	11.8 m	14.5 m	15.9 m
喫水	8.3 m	9.2 m	9.2 m
満載排水量	9,120 t	18,990 t	20,000 t
輸送物資	約 400 t	約 1,000 t	約 1,100 t
推進方式	ディーゼル電気推進	ディーゼル電気推進	ディーゼル電気推進
軸出力	12,000 PS	30,000 PS	30,000 PS
推進軸数	2	3	2
プロペラ	固定ピッチ×2	固定ピッチ×3	固定ピッチ×2
舵枚数	1	1	2
最大速力	17.2 knot	19.0 knot	19.5 knot
乗員数	182 名	174 名	179 名
隊員数	35 名	60 名	80 名
連続砕氷能力(3kt 時)	0.8m (3knot 時)	1.5 m (3knot 時)	1.5 m (3knot 時)
船首散水装置	なし	なし	あり



図 3 から、砕氷船の性能が向上している近年でさえも、3000 回にも上るラミングを実施していることがわかる。さらには、時間や燃料の制約を受け、昭和基地に接岸することができなかった年もある(図 3 中斜線で表した)。接岸とは昭和基地から燃料輸送パイプラインが届く範囲にしらせが到着することを指し、接岸をしないと燃料のパイプライン輸送ができないことになる。基本的にしらせから昭和に輸送する物資の半分程度が燃料である(例として 2012 年の JARE54 の積荷内訳を図 4 に示した)が、接岸失敗時にはこれを氷上輸送やヘリコプターによる空輸によって輸送しなければならない。これには多大な労力がかかるため、本来計画されていたしらせから基地への物資輸送、昭和基地備品の持ち帰りが満足にできなくなってしまう。これは観測活動にも大きな影響を与えるため、接岸ができるかどうかは JARE にとって非常に重要なポイントになる。

ふじ就航時には接岸を断念している年が多いが、しらせ(初代)に代わって以降多くの年で接岸に成功している。これは表 1 から読み取れる砕氷船の大幅な砕氷能力向上によるものと考えられる。なお、少ないラミング回数時点で接岸断念している年があるのは、ラミングの進捗具合から早期に見切りをつけて空輸の時間を長く取ることを優先したものと考えられる(例えば 1993 年の JARE35, [10])

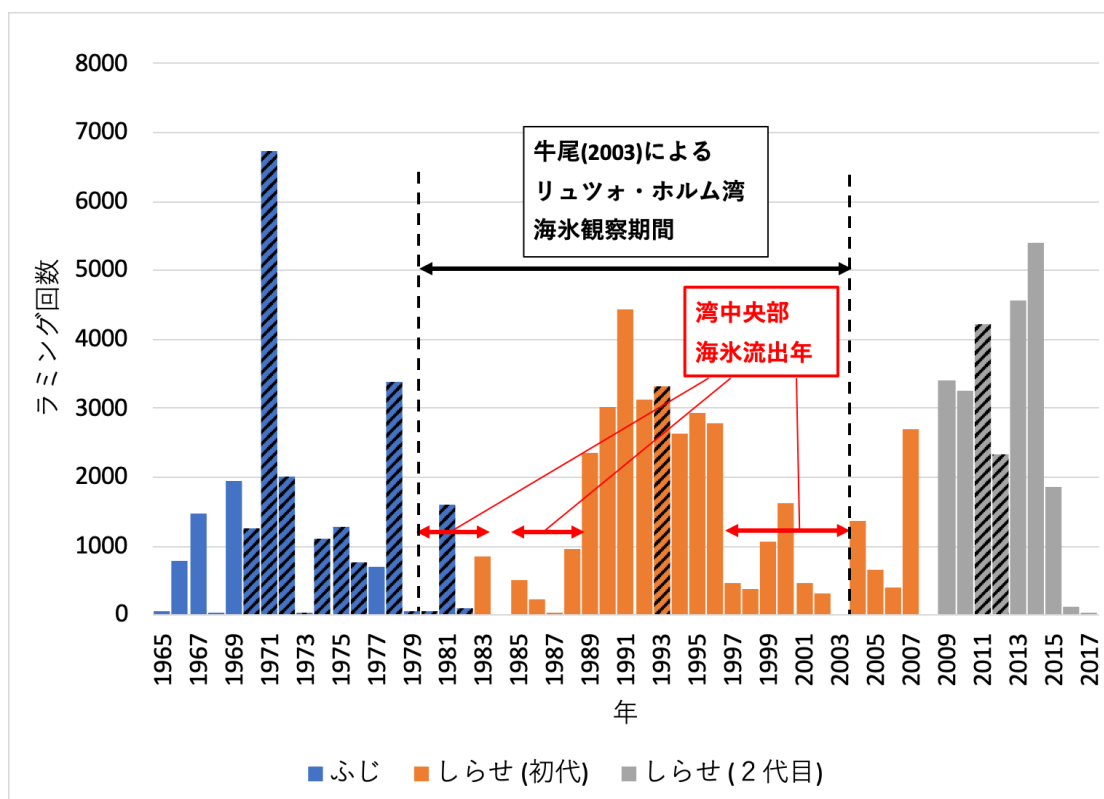


図 3 JARE におけるラミング回数の推移 ([11], [14]より作成)  
斜線は接岸に失敗した年

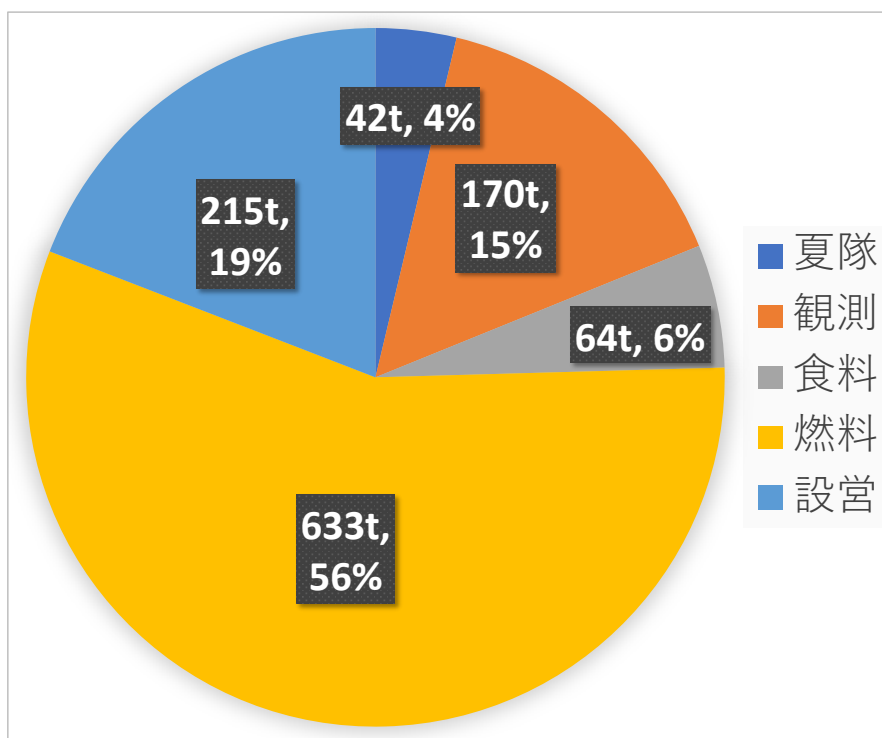


図 4 JARE54 における観測隊の輸送物資内訳([12]より作成)

以上のように多大な回数のラミング実施や接岸断念をした年がある一方で、少ないラミング回数で接岸できている年も散見される。直近においても 2016 年の JARE58 と 2017 年の JARE59 の総ラミング回数はそれぞれ 114 回と 27 回であり、非常に少なくなっている。これは主に、頻発するリュツォ・ホルム湾内定着氷の流出に起因する。定着氷の流出を捉えた衛星画像(Terra/MODIS, 可視光・赤外センサー)の例を図 5 に示す。左の画像は 2013 年 12 月(JARE55 往路時)のもので、定着氷が大きく張り出しており、この年の合計ラミング回数は 4000 回を超えた。これに対し中央の画像は 2017 年 2 月(JARE58 復路時)のもので、定着氷が湾奥から大きく剥がれていることがわかる。さらに 2017 年 12 月(JARE59 往路時)には氷縁側で大きく剥離が起きている。なお剥離のメカニズムとしては、少雪年の継続や暖冬による氷強度の低下、強い北東風という要素により定着氷にクラックが入り、その後南風が吹くことによって湾外に流出する、と考えられている[14][15]。こうした条件はエルニーニョの時期に起きやすく、エルニーニョの発生とリュツォ・ホルム湾の定着氷縁の位置に高い相関がある、という先行研究もある[15]。

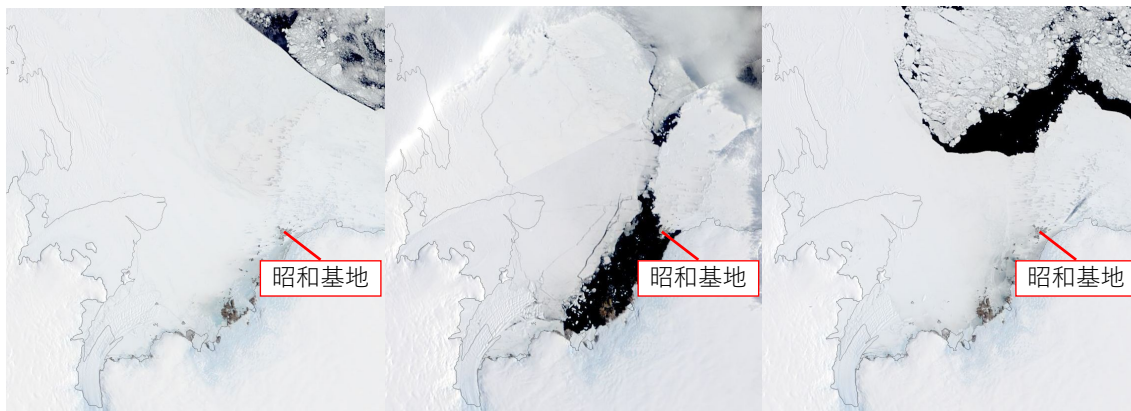


図 5 リュツォ・ホルム湾の定着氷の衛星画像 ([13]より取得し加工)

牛尾は 1980 年～2003 年の期間を対象とし、衛星画像を用いてリュツォ・ホルム湾を観察し、湾内の定着氷流出の発生時期についてまとめた[14]。その結果を図 3 にラミング回数の推移と重ねて示す。湾中央部の流出が起きていた 1980 年～1988 年にかけてはあまりラミング回数が多い年がないが、流出が起きなくなった 1989 年～1996 年においては毎年のラミング回数が 2000 回を超えている。さらに 1997 年に再び海氷の流出が起これると、ラミング回数は大きく減少し、

その後も 2003 年まで比較的少ないラミング回数で推移している。

このことから、ラミング回数はその年の氷況を概ね反映するものと考えられる。近年はラミング回数が少ないが、氷況の緩い時期にあたるためであり、今後も年によっては数千回にわたるラミングの実施が避けられないと思われる。しかしながら、ラミング回数が完全に氷況によって決まる、とは言い切れない。ラミング航行を効率的に行うことで、その回数を減らせる可能性がある。例えば航路選択をうまく行うことによってラミング回数を減らすことができるかもしれない。また、ラミングにも細かく分ければ複数の航法や操船方法があり、これらを比較検討することで効率的なラミング航法が見出される可能性もある。こうした観点で「なるべく短い航行時間または少ない燃料消費量となる効率的なラミング航行」を目指すことが、研究によるしらせ航行支援の 1 つの重要なテーマである。上述の通りラミング航行時間が非常に長いため、少しの効率化でも大きな効果が望める。

もう 1 つの可能な航行支援手法として、情報提供による航行計画の支援が挙げられる。例えばいつ船を止めてヘリコプターオペレーションを行うか、いつまで接岸を諦めずに進むか、といった判断を行う場合、航行時間の予測が立っていれば良い判断材料となりうる。本論ではこの「航行時間の予測」という面にも焦点を当てる。

まず 1 つ目の研究テーマとして、時に往路上においても実施される「ラミングによる旋回」の特徴を調べ、そこから旋回の所要時間を予測することを目指した。加えて、ラミングの助走距離を変化させることによって旋回の所要時間を短縮できないか検討した。2 つ目の研究テーマとして、氷況とそこで得られるラミング進出の関係を定量化し、氷況から航行時間を予測する手法を模索した。

## 第2章 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年から少なくとも2019年現在まで毎年データを蓄積している。本システムの概要を図6に、記録項目を表2に示す。舵角、推進器軸回転数、GPSによる船位(精度10m以上)などの重要な項目が記録されている。これが本研究で用いる最も主要なデータである。サンプリング周波数は基本的に4Hzであり、一部10Hzで計測されているものもあるが、今回は4Hzに統一して解析に使用した。

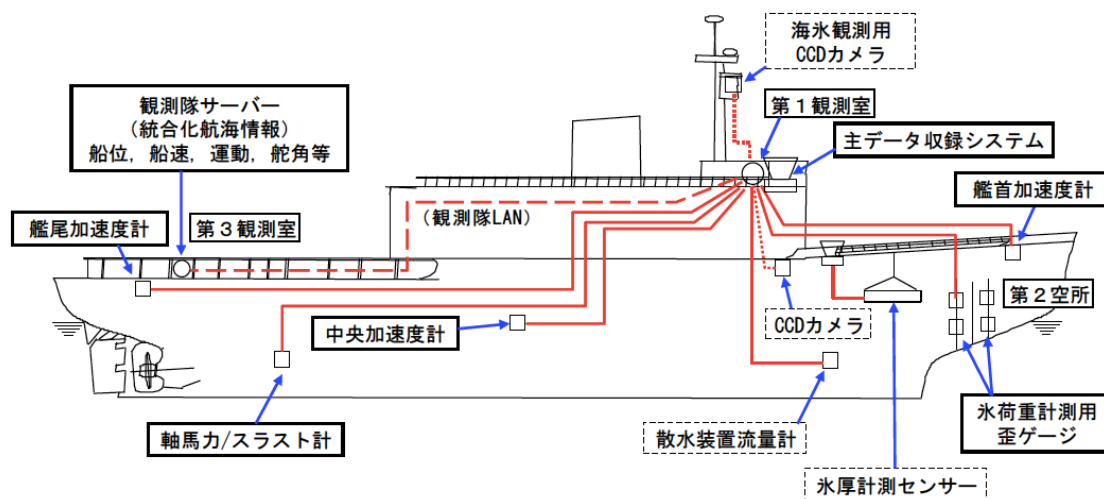


図6 氷海モニタリングシステムの概要

表2 氷海モニタリングシステム記録項目

観測項目	備考	観測項目	備考
時刻	GPS 時刻、UTC	相対風速	
船位	緯度、経度	速力	対地、GPS に基づく、本解析に使用
速力	対水、氷海では計測されない、本解析に使用しない	外板フレーム応力	10 フレーム 20 点

観測項目	備考	観測項目	備考
船首方位		天井板応力	3点
ピッチ		船首部加速度	3軸
ロール		船体中央部加速度	3軸
ヨーレート		船尾部加速度	3軸
ピッチレート		軸回転数	左右
ロールレート		軸トルク	左右
舵角	左右	軸馬力	左右
速力指令	左右	軸スラスト	左右
相対風向		計測ノッチ	

## 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。

### 1. 後進

まずは助走距離を確保するため、一度船体が通って砕氷してできた水路上を後進する。このとき、舵を切っていると氷に衝突して損傷するリスクがあるため、舵中央を保ったまま左右の推進器の軸回転数に差をつけることで進行方向を調整する。船速も十分に低速を保つ(しらせの場合、1.5cm/s程度以下。これを維持するため、軸回転数は120rpm程度以下で調整される)。

助走距離は、船長の2.5-3.0倍程度取れば十分で、それ以上取っても得られる最高速度はほとんど増加しないとされている[16]。しらせの場合船長が138mで、助走距離は350~400m以下とすることが効率的である。JARE59の航行指針としては、基本的にラミング時の助走距離は300mとされていた。

後進時、船尾側の水路には砕氷船が自ら砕氷して生成したブラッシュアイス(小さくぼろぼろになった氷片)が入っている(図7)。特に氷が厚いかつ砕氷幅が狭い場合には、ブラッシュアイスが水路に高密度で詰まり、船の後進を大きく妨げる。そうすると後進に時間がかかり、十分な助走距離が確保できないこともある。

しらせには複数の後方カメラが設置されており、艦橋でその映像を見ながら後進を行っている。両側の氷板縁に船尾が衝突しないように注意するほか、時には水路内に大きな氷片が浮いていることもあり、可能な限りこれを回避する。



図 7 船尾側に溜まったブラッシュアイス

## 2. 助走

水路内にあったブラッシュアイスは、船体によって船尾方向に押し出される。したがって確保された助走区間にはブラッシュアイスは少なく、開放水面に近い状態となる。この砕氷抵抗のない区間において、砕氷船は高い推進器出力をもって加速する。しらせの場合助走時の出力は原則 137rpm である。特殊な航法を除けば、助走時は砕氷されず残っている海水との接触を避けるように舵を調整して進行し、前回の砕氷跡上をなぞって氷に衝突する。しらせが航行指針通りに助走距離 300m でラミングを行なった場合、衝突するときの速度は 5m/s 程度である。

## 3. 貫入

船が氷に貫入すると、氷の圧縮破壊や摩擦損失、氷への乗り上げによる船の位置エネルギー増加などによって、助走で蓄えた運動エネルギーを消費しながら進む。この間も推進器は出力を続ける。舵については、水中の抵抗を減らすため、舵中央もしくは小さい舵角にまで戻されることが多い。氷が載荷可能な限界を船の位置エネルギーが上回ると、自重を使って氷を破碎する[32]。しかし位置エネルギーが不十分な状態で運動エネルギーを使い切ってしまった場合には、船が海水から抜けなくなってしまい、行動不能となる恐れがある。この事態を防ぐ

ために貫入速度は大きくとりすぎないように制限されている。

これらのプロセスを図 8 に図示する。また、例として氷海モニタリングシステムのデータより抽出した典型的なラミング時の速度(観測時に GPS データから算出して記録)・軸回転数・舵角の推移を図 9 に示す。

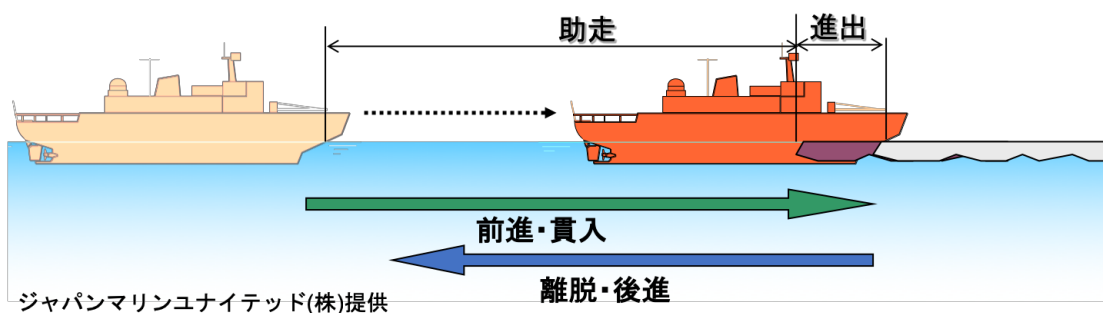


図 8 ラミング航行の模式図 (ジャパンマリユナイテッド株式会社提供)

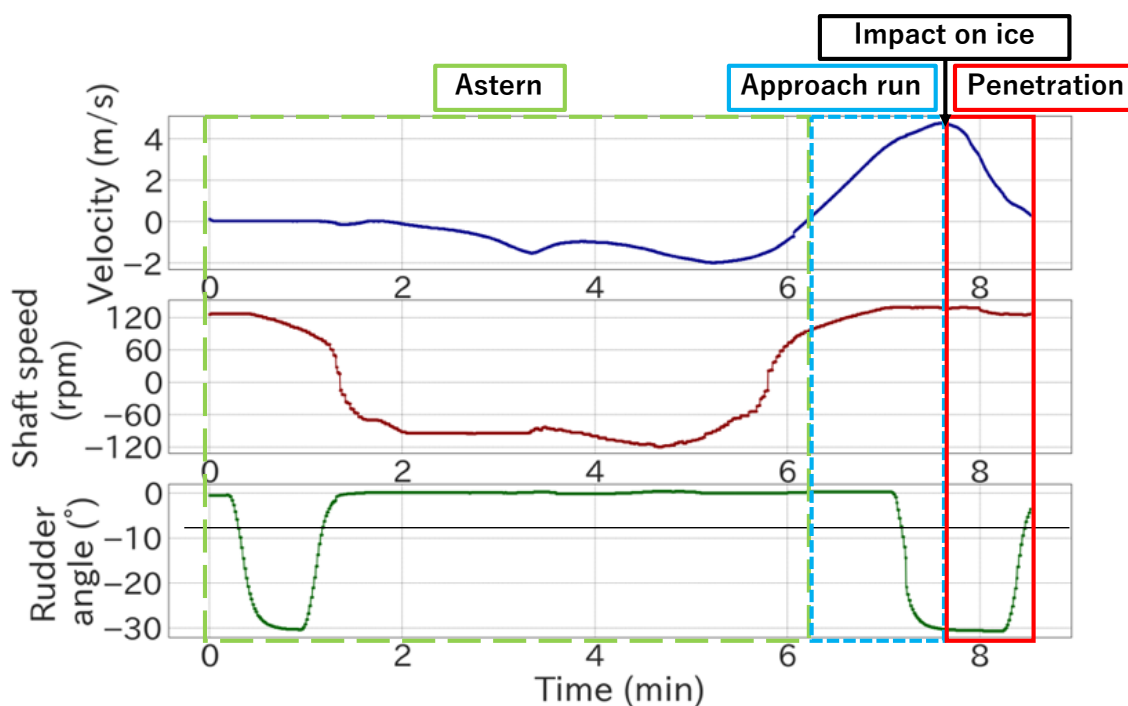


図 9 典型的なラミング時の船速・軸回転数・舵角の一例



このデータから、いくつかの特徴量を定義する。

まず、加速によって到達した最大速度は、砕氷に使われるエネルギーに対応する重要な物理量である。本研究では、概ね氷に衝突する瞬間に最大速度となると仮定し、最大速度を「衝突速度」として定義した。

次に、どれだけ砕氷して進むことができたかを表す指標として「貫入距離」を用いる。衝突速度の場合と同様に最大速度になった地点で氷に貫入を開始したと仮定し、貫入地点から船体が停止した地点までの距離として貫入距離を定義した。

類似の指標として、「簡易進出距離」を定義する。これは前回のラミング後停止地点とその回のラミング後停止地点の間の距離として計算した。単純にまっすぐ進んでいくラミングをイメージするとこの指標は1回のラミングでの進出の度合いを最も良く表しそうだが、実際には左右方向の振れに起因する誤差が大きく含まれるという問題がある。これについては4.5節で詳しく述べる。2回分のラミング後停止位置を記録して距離を求めるだけなので計算が簡単であり、現場でも計測してラミング進出の指標として用いられている。

「助走距離」は、前回のラミング後停止地点からその回の助走開始地点までの距離として定義した。「ラミング位置」は氷中貫入後に停止した位置として用いた。以上の特徴量を表3にまとめる。これらのうち簡易進出距離など一部の変数は、過去の南極観測隊員と同行者が野帳に記録し、主に砕氷航行実験結果の分析に用いられてきた([17]-[21])。しかしながら、膨大に蓄えられている氷海モニタリングシステムのデータ全体からラミングの分析を行う試みは行われてこなかった。

表3 解析に使用する主なラミングの特徴量

名称	計算上の定義	説明	記号
ラミング位置	氷貫入後停止時点での位置	GPSによる緯度経度	
衝突速度	前進中の最大速度	氷に衝突した瞬間の速度と仮定	V
貫入距離	最大速度地点から氷貫入後停止地点までの距離	どれだけ砕氷できたかを表す	D

名称	計算上の定義	説明	記号
簡易進出距離	前回ラミング位置から今回ラミング位置間の距離	船の進捗具合を簡単な計算により定量化する	$D_s$
助走距離	前回ラミング位置から前進加速開始点までの距離	ラミングの加速のために後進した距離	L

本研究では、氷海モニタリングシステムのデータからラミング区間を抽出して分析を行った。何千回というラミングについて調べるためには、自動化が不可欠である。まずはそのラミング自動抽出手法について述べる。

### 2.3. ラミングの抽出

ラミング航行を実施している期間は、当然氷海航行中に限られるため、過去の南極観測隊の報告書に記載の氷海航行期間を参考にして概ね絞り込むことができる。

氷海モニタリングシステムのデータには、GPS から計算された速度が、方向を考慮しない正の値として記録されている。この時系列速度データを用いて、以下のようなアルゴリズムでラミングを抽出し、各ラミングの特徴量を計算する：

#### ① 高速航行データを抽出

4.5knot (= 2.315m/s) 以上のデータを抽出する。このデータは連続砕氷航行中もしくはラミングの助走～貫入時のいずれかに該当する。後進時は先述の通り 1.5m/s 程度以下であるため、後進はここでは抽出されない。

#### ② そこから最も近い両端の停止データを抽出

完全な船体停止として、5 秒間以上 0.3knot (=0.154333m/s)以下が連続したデータを抽出する。その中で最も①に近いものを、直前と直後それぞれで選択し、その間のデータをラミング前進区間として抽出する。探査する区間は①の時刻から最大で 80 分程度以内で、この範囲に停止データが見つからなければ①は連続砕氷航行であったとみなして除外する。

#### ③ 後進を抽出

前回ラミングの停止から今回抽出したラミングの助走開始までの期間を後進区間として抽出する。

#### ④ 特徴量の計算

以上の方法によって抽出された各ラミングに対して、表 3 の特徴量を計算する。

このアルゴリズムを JARE54, 55, 57, 59 のデータに適用し、概ね正しくラミングを抽出することができた。そのわかりやすい根拠として、実際に公式記録として報告されているラミング回数と、今回のアルゴリズムによって抽出されたラミング数を比較したものを表 4 に示す。その回数の誤差は 3%未満であり、手法の妥当性を支持している。

表 4 公式記録のラミング回数とアルゴリズムによる抽出ラミング数の比較

	JARE54	JARE55	JARE57
公式記録ラミング回数	2323	4563	1852
アルゴリズムによる抽出本数	2385	4583	1816
誤差 (%)	2.60	0.44	-1.98

公式のラミング記録におけるラミングの定義は公表されていないため、本アルゴリズムが正確にこれに対応している保証はない。例えば、何 m 以上進んだ場合に連続碎氷とみなすかを定めていないため、ラミングと呼ぶには長すぎるものも含めて抽出している。今回の手法で抽出されたラミングを利用する場合には、逐一それぞれのラミングにおける船体挙動を見て妥当性を確認する必要がある。また、今回の手法では抽出できないラミング(例えば最高速度が 4.5knot を下回る細かいラミング)が存在する場合もあり、この点も場合によっては確認が必要であることに留意しておかなければならない。

このようにやや懸念点はあるものの、数千回にわたるラミングが自動で抽出できるようになったことは大きな一歩である。前述の通り、これまでの研究はほとんどが観測隊員の記録した野帳データの分析にとどまっており、GPS から計算できる情報しかない、観測精度が低い、サンプル数が少ないなどの大きな制約があった。今回の手法によって、舵角や推進器出力等詳細な船体データ項目を含み、かつ 10 年分にもわたって蓄積されている大量のデータから、容易にラミングの解析を行うことができるようになった。

## 2.4. ラミング航法

これまで研究されてきたラミングは基本的に、現場で一本突きと呼ばれるタイプの航法である。この航法では、毎回直線的に同じ場所を突いて砕氷する。この場合の砕氷幅はほぼ船幅 1 つ分と狭くなり、厳しい氷況においては前述のようにブラッシュアイスが詰まりやすくなるという問題が発生する。ブラッシュアイスが詰まると助走距離が取りにくくなってラミングの効率が低下するだけでなく、最終的に身動きが取れない「ビセット」と呼ばれる状態になるリスクもある。

これを防ぐため、しらせの実際のラミング航行においては砕氷幅の拡大をしながら進行する操船が行われていることは以前から知られていた(例えば、[21])。これらは現場では二本突きや三本突きと呼ばれているもので、その技術は現場の操船担当者間で年々引き継がれてきた。しかしながら今までこの詳細について研究の観点から論じられたことはなかったため、まずここで情報の整理を行う。

今回は主要なラミング航法として 4 種類を定義した。その模式図を図 10 に、概要説明を表 5 に示す。なお、これは 59 次観測隊において操船を担った自衛隊からの提供資料や、自衛隊の方々に対するインタビューをもとに著者が作成したものであり、公式に定められた航法ではない。呼称も今回新たに命名したもので、現場では使われていない。実際の現場においては、砕氷幅が船幅何個分となったかという観点から分類して「一/二/三本突き」と呼び分けられているが、今回の分類は氷への貫入方法などといった砕氷幅ができる前のプロセスに注目して分類を行なっている。また実際の操船現場においては氷況を見ながら微妙に操船を変えるため、今回の定義に乗らないラミングを行う場合もありうる。

実際に行われた一本突き・二本突き・三本突きの助走・貫入時軌跡の例を X-Y 平面上に投影(経度を X、緯度を Y に取って m 単位に換算)して図 11~図 14 に、各航法で形成される砕氷跡の様子を図 15~図 17 に示す。

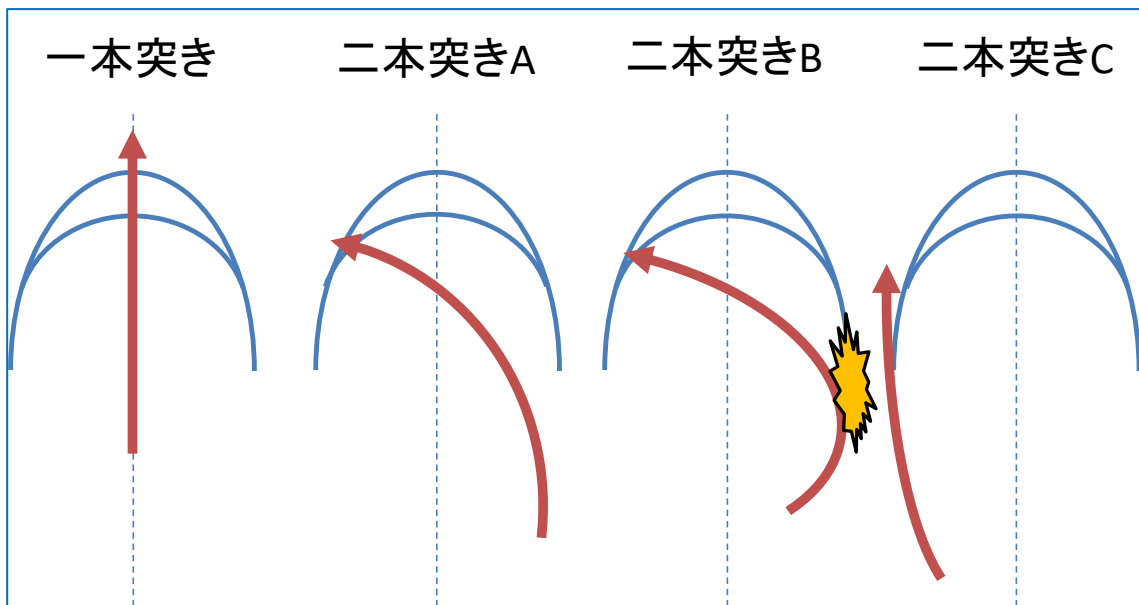


図 10 ラミング航法の模式図

表 5 分類されたラミング航法の概要

航法名	詳細
一本突き	前回砕氷跡の中央部分に貫入するラミング 氷況が比較的緩く進出距離が十分大きいときに用いられる
二本突き A	助走時に突く方向と逆側に寄って加速し、最後に突く方向に舵を切って前回砕氷跡の肩部分に貫入するラミング 氷況がやや厳しく一本突きが難しい氷況で用いられる
二本突き B	浅い角度で突く方向と逆側の氷板縁に船体を当て、跳ね返りを利用して大きく変針し前回砕氷跡の肩部分に貫入するラミング リッジ回避や旋回など、別の向きに進行したいときに用いられる
二本突き C	その回に前進することを諦め、助走部分から片側を削りながら直進することで航路幅を広げるラミング 氷況が厳しいときに用いられ、連続で使用すると三本突きになる

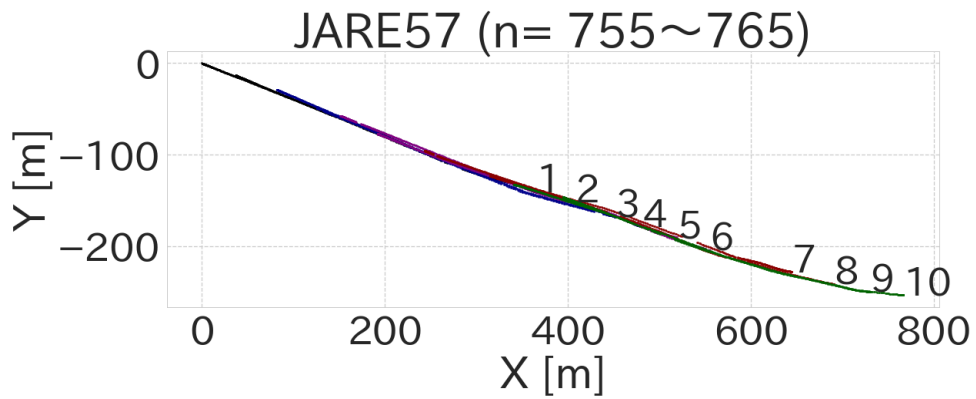


図 11 一本突き航行中の軌跡 (前進時のみ)

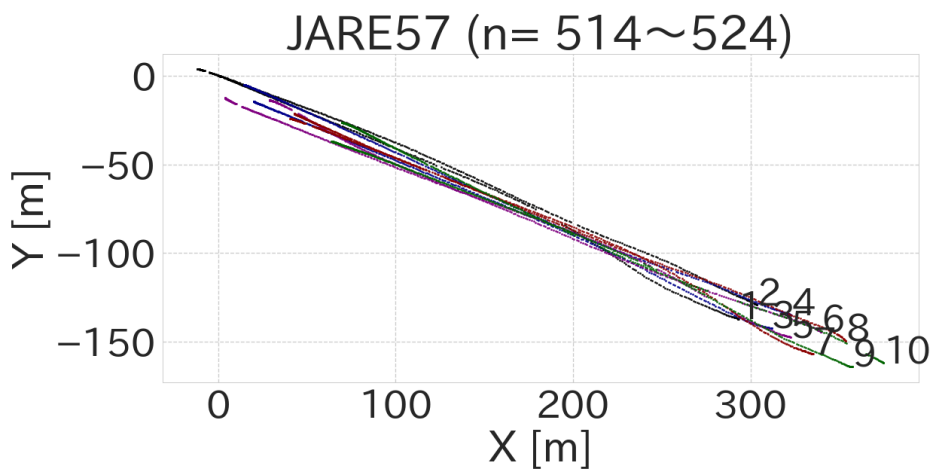


図 12 二本突き航行中の軌跡 (前進時のみ)

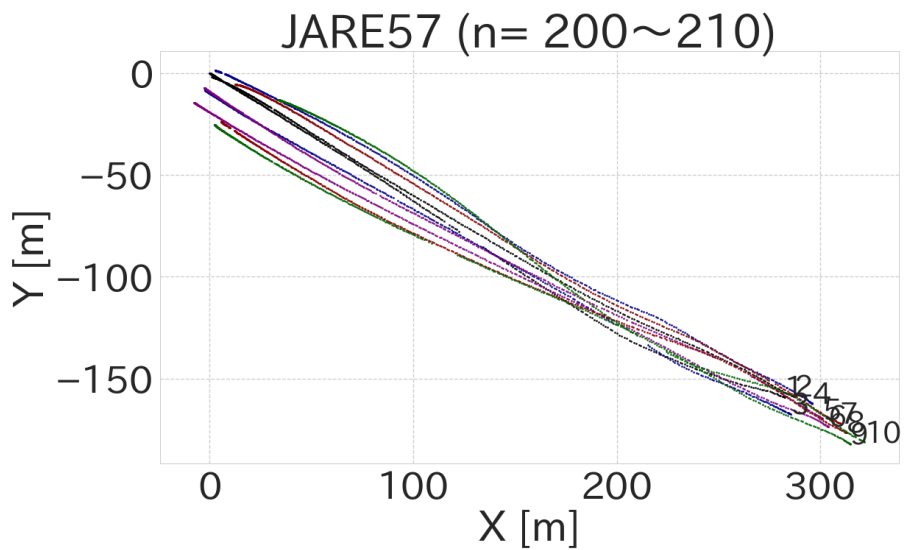


図 13 三本突き航行中の軌跡 (前進時のみ)

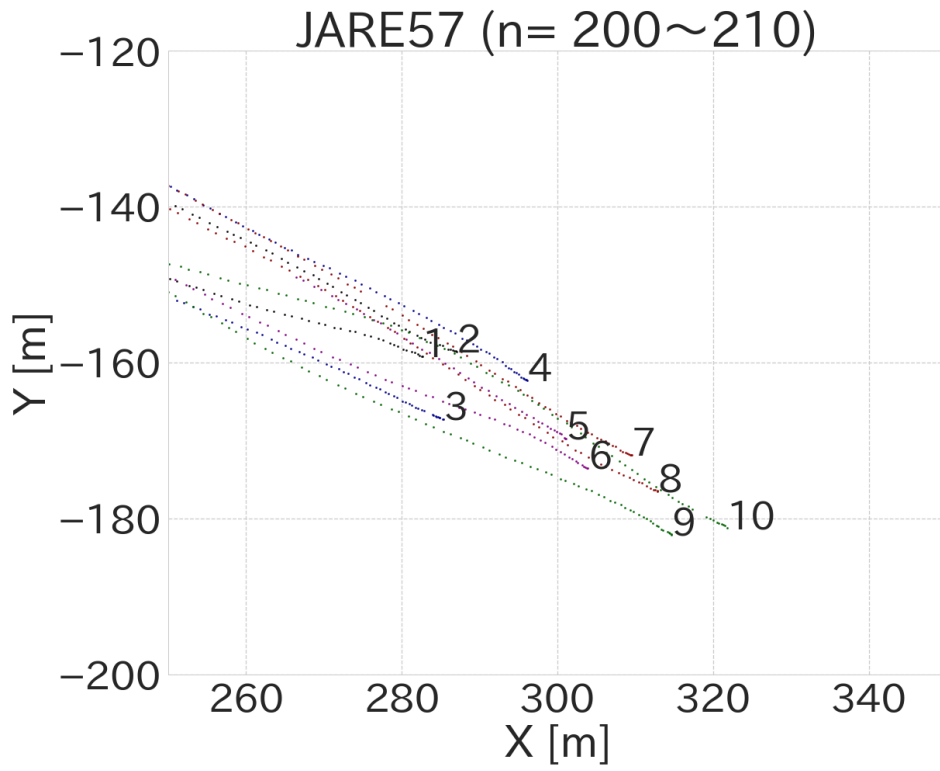


図 14 三本突き航行中の軌跡 (前進時のみ), 停止点周辺を拡大



図 15 一本突きの典型的な砕氷跡 (JARE59 時)



図 16 二本突きの典型的な砕氷跡 (JARE59 時)



図 17 三本突きの典型的な砕氷跡 (JARE59 時)



一本突きは最もスタンダードに前回と同じ位置をつくらミングで、左右へのロスがないため、一本突きで進行できるならば一本突きで進むのが最も効率的だと考えられる。ギリギリ連続砕氷ができないような氷厚の場合においてはこの方法が用いられる。

氷厚が増すにつれてブラッシュアイスの後方詰まりが起きやすくなるため、代わりに二本突き A または C が用いられるようになる。二本突き A を左右交互に繰り返して進むことができると、常に 2 つの砕氷跡が左右に並んで見える状態で航行することになり、二本突きという名前通りの航法になる。それでも後方ブラッシュアイスが詰まるような場合には、さらに砕氷幅を広げる必要がある。その場合、二本突き A のサイクルに二本突き C を加えたり、二本突き A で大きく左右に振ってさらにその中間を突いたりすることで砕氷幅を広げる。このように概ね三つの砕氷跡が横に並ぶ状態で進むらミング航行は三本突きと呼ばれている。

二本突き B は、特に大きく左右方向へ偏角を得たいときに用いられる。このような向きたい方向と逆側に船首を衝突させるらミングは、JARE11 で既に実施した記録がある [10]。跳ね返りによって船首方位が変わっていることは乗船していると体感できるが、それが二本突き A 以上に大きく得られ効果的であるのかどうかの検証はされていない。またぶつけた氷板縁が脆くぶつけると崩れてしまうような場合、二本突き B の効果は得られなくなったように体感された。

二本突き A と B は、貫入する位置は同じである。図 10 に示したらミング砕氷跡の線で囲まれた中央部分は船首の形に合わせて残されている。しらせの椀状の船首が貫入すると、その形に氷が削り取られ、海氷にはスロープ状の削り跡が残る。経験上そこを再び突いても滑り台を上るようにしてエネルギーを失い止まってしまうのだという。これを避けるため、スロープの横の付け根あたりを狙う、という方法が効果的ならミングのテクニックとして自衛隊内で継承されている。

今回解析対象としたらミング航行は、大部分が一本突きではない。したがってこれらの実海域におけるらミングの操船方法を踏まえた上で解析を行う必要がある。

## 2.5. 氷況データ

氷海モニタリングシステムには氷況の観測が含まれていない。衛星画像によっ

て特定領域の海氷の有無は容易に確認できるが、その厚さまでは現在の技術では正確な推定ができず、現状氷厚値は現場観測によってのみ知ることができる。ここでしらせ航行時の氷厚データとして利用可能なものを整理する。

## 1. 視覚的手法

古典的で手軽な方法である。船が砕氷し割られた氷の一部は、横向きになり側面を上方に向けて浮かぶ。これをタイミングよく見ることによって「見かけの氷厚」を得る。さらに、観測者または観測装置から海氷までの距離を考慮し、相似則から「見かけの氷厚」を「実際の氷厚」に変換する。このとき完全に側面が鉛直上方向を向かず傾いているとその分薄く見えてしまうこと、砕氷の際に一部が剥がれ落ちてしまうケースがあることなどから、ある程度の誤差は見込む必要がある。また、基本的に人手を使った観測になるため、観測頻度も高くない。これまでこの原理を用いて3種類の観測が行われてきた。

- ・ 肉眼目視観測

肉眼で対象の氷を捉えてその氷の氷厚を推定する。海氷までの距離は観測甲板の水面からの高さに等しいと仮定するため、正確な推定のためには真下方向の氷を観測することが必要である。観測場所の海氷からの高さを考慮し、予め実際の氷厚値を指すように変換された目盛り付きの定規を作成しておく。これを図 18 のように用いて氷厚を測る。この観測に関しては、大島ら[22]に詳しい。



図 18 目視観測の様子 ([23]より引用)

- ・ モニタリングビデオカメラ  
甲板にビデオカメラを下向きに設置し、航行期間を通して録画する。帰国後に映像を見ながら海氷が側面を見せた瞬間を手作業で抽出し、そのピクセル数から見かけの氷厚を得る。カメラが常に真下方向を向いて固定されているため、海氷までの距離はほぼ一定であるとみなすことができ、別途計測した1ピクセルあたりの距離から実際の氷厚を計算する。

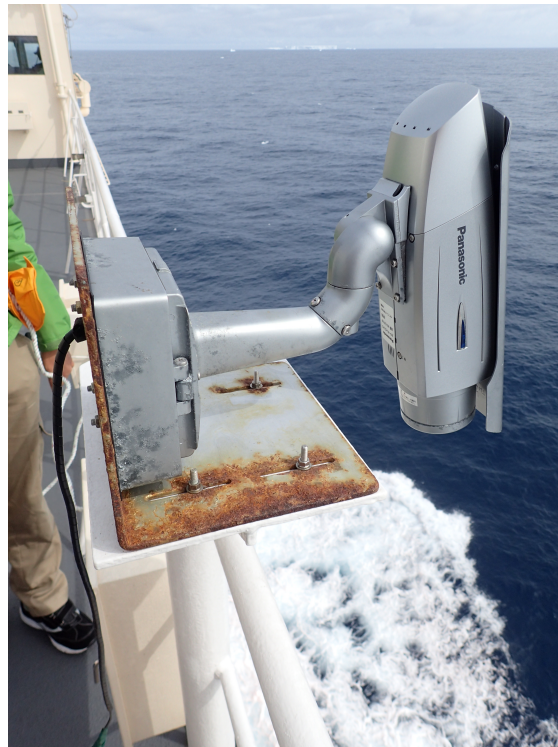


図 19 しらせに設置したモニタリングビデオカメラ

- コンパクトカメラ  
コンパクトカメラとレーザー距離計を結合し(図 20)、見かけの氷厚を撮影すると同時に氷との距離を正確に測る。これにより、真下方向の氷以外も観測が可能である。モニタリングカメラと同様に画像のピクセル数からみかけの氷厚値を得る。この観測手法について検証した文献 [20][37]によると、一年氷では概ね確からしい測定結果が得られていて、多年氷進入による大きな氷厚変化も捉えているものの、JARE57 では多年氷帯での観測値はばらつきが非常に大きくなっていた。砕氷により崩れた氷を計測してしまうことで過小評価された値が混ざっていると考えられ、未だその精度の低さは解決されていない。本研究では参考程度に利用するに留める。



図 20 コンパクトカメラとレーザー距離計による観測装置

## 2. EM センサー

電磁誘導を利用して氷の底面位置を、レーザー距離計を利用して氷の上面位置を捉えることによって厚みを計算する。観測原理を図 21 に示す。

空気と海氷の電気伝導度は海水のそれと比べて無視できるほど小さい。センサー内にある送信コイルから発生した磁場(一次磁場)は、空気と海氷を透過し、電気伝導度の大きい海水の表面で強い誘導電流を形成する。これによって二次磁場が発生し、これをセンサー内の受信コイルで検知する。その強さによって海水面までの距離を測ることができる。さらにセンサーと同じ高さに設置されたレーザー距離計は、氷(あれば積雪)表面までの距離を測ることができる。この差分が氷厚と積雪深を足し合わせた値となる。

これまで用いてきた「氷厚」という表現は、厳密には氷部分だけの厚さを指す。実際にはこの上に積雪が乗り、これも砕氷航行時に抵抗として影響する。積雪は圧密によるクッション効果でエネルギーを吸収したり、氷より高い摩擦係数で摩擦抵抗を大きくしたりと言った点で特に砕氷抵抗を増大させる[24]。したがって、本来は氷厚・積雪深の和だけでなく、その比率についても考慮すべきである。本センサーの観測データからはこれを知ることはできない。

一方で、リュツォ・ホルム湾の氷厚と積雪深の間には、ばらつきは大きいものの正の相関関係が認められることが報告されている[25]。これと解析の便宜性を考慮し、本解析においては氷厚・積雪深比率がほぼ一定と仮定してその変化を無視する(理想的には視覚的手法による観測データなどから積雪深比率も考慮に

入れることが望ましい)。EM センサーによって観測された氷厚と積雪深の合計値を「全氷厚」と定義し、第 4 章の解析でこの値を用いる。

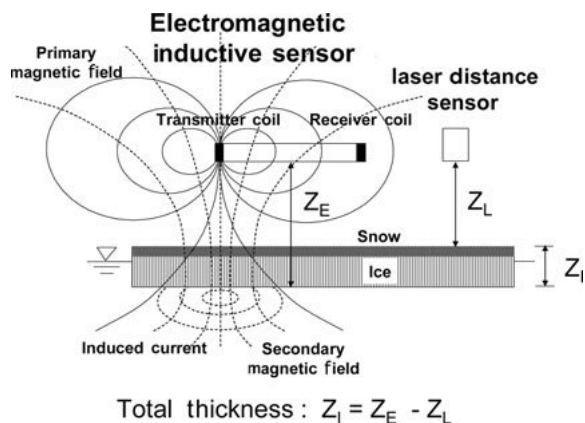


図 21 EM センサーの計測原理、[27]より引用

この原理を用いた観測のうち、しらせ航行支援の研究に役立ち得るのは以下の 2 つである。

- ・ 船上 EM

Shipboard EM などとも呼ばれる。しらせからアームを張り出して EM センサーを吊り下げ(図 22)、氷からの高さ数メートル程度の位置で観測する。氷海航行区間を通して観測を行う。航行時の船体挙動や砕氷の影響を受け、特にラミング時に観測値が不安定になりやすい。



図 22 しらせ右舷側に張り出されて計測中の船上 EM センサー

- EM-Bird

Helicopter-borne EM などとも呼ばれる。ヘリコプターに EM センサーを吊り下げ(図 23)、氷からの高さ 15m 程度の位置で観測する。1 時間程度のフライトを行い、飛行経路上を計測する。一定高度・一定速度で飛行することにより安定したデータが得られる。



図 23 ヘリコプターに吊り下げられて計測中の EM-Bird ([26]より引用)

これらの観測で得られたデータは、第 4 章で使用する。その際により細かい特性に注目した使い分けを行うため、ここでは一旦詳しい説明を保留して次に進む。

### 3. 掘削

最も確実な方法であるが、氷上に掘削機材を持って降り立ち、深さ数メートルの穴を開ける必要があるため、非常にコストのかかる方法でありサンプル数も少ない。本研究では掘削データは利用しない。

#### 2.6. 散水装置

しらせ(2 代目のみ)には、散水装置、water lubrication system、bow wash system

などと呼ばれる、積雪による抵抗を軽減させるシステムが搭載されている。乾いた雪は摩擦係数が大きく、航行の際に船体に大きな摩擦抵抗を与える。山内(2013)[28]によると、実験により得られた海水・乾いた雪・湿った雪それぞれの塗装鋼板との摩擦係数は表 6 のようであった。散水装置はこの特性を利用し、雪を濡らすことで摩擦係数を低減させ、摩擦抵抗を減らす効果を狙ったものである。なおしらせでは「融雪散水装置」と呼ばれることが多いが、雪を融かしているわけではないためこれは厳密には誤りである。



図 24 しらせの散水装置稼働中の様子 ([29]より引用)

表 6 船体と海水、雪との摩擦係数 [28]

	海水	乾いた雪	湿った雪
塗装鋼板	0.04~0.06	0.21~0.28	0.09~0.22

散水装置は連続砕氷航行時に使用することを意図して開発されたもので、スウェーデンの砕氷船 Oden などに装備され、連続砕氷時の有効性が実船実験によって確認されている([32])。



しらせにおける散水効果は、実験室系では 10~15%程度進出距離が伸びる結果となり有効性が示されている([30])ものの、実海域航行実績からその効果を統計有意に証明するには未だサンプル数が不十分である。しらせの実海域データから散水効果を示した研究は山内ら(2011)[31]によるものがあり、水槽実験の結果と同じくその有効性を支持するものであったが、一部サンプル数が不十分であることにも言及している。砕氷航行実験の内部報告書においても散水効果を支持する結果が報告されているが([17][19])、やはりサンプル数がそれぞれ 10 回、15 回と少ない。こうした不確定要素が残っていることが原因であるかは定かではないが、艦側も散水装置を十分信頼できていない部分があった。実際に過去の燃料逼迫時には、貴重な燃料を使用する散水装置の使用に踏み切れない場合があったという。さらに著者が乗船した JARE59 では、ラミングで進出があまり得られない場合にのみ使用を検討し、連続航行時には散水装置を使用していなかった。

さらなる研究によってしらせ散水装置の実海域での有効性や効果的な使い時を提示できれば、散水装置の利用を促進でき、砕氷航行効率の向上が期待できる。したがって今後も実験と解析が必要なテーマである。しかし本研究ではこのテーマは追究しない。著者は JARE59 で散水装置の稼働による速度と燃料消費量の変化を計測しているが、この結果は付録に掲載する。

## 第3章 ラミング旋回

### 3.1. 氷中旋回について

連続砕氷航行における旋回においては一般に、氷厚が大きくなると旋回半径が増加することがよく知られている([32][33][34]など)。また、船速の増減による旋回半径の変化は一概には言えない。これは船速の増加に伴い舵にかかる圧力の増加が旋回モーメントを増加させる一方で、船の横側からの抵抗力も増加するためだとされている([34])。その他のパラメーターが連続砕氷旋回径に与える影響についても、これまで研究が行われてきており、[34]に詳しくまとめられている。

### 3.2. しらせの旋回

しらせの連続砕氷における旋回性能は、JARE51 で旋回試験を実施して調べられている。その旋回試験の結果を表 7 に示す。推定された旋回半径は 561m と 761m であった。この試験結果では氷厚が大きいときに旋回径が小さくなっているが、これは船速や舵角の一部が異なることが原因と考えられる。

表 7 JARE51 (2010) における連続砕氷旋回試験の結果

条件	試験① (12月20日)	試験② (2月3日)
氷況	定着氷縁一年平坦氷	ラングホブデ沖一年薄氷、パドル帯
氷厚/積雪	0.7~1.0m / 0.3m	0.3~0.5m / 0m
船速	8~9knot	4~8knot
機械出力	第二強速	原速
散水装置	ON	OFF
舵角	30度 (一部 15度)	30度
推定旋回半径	561m	761m

これに対し、ラミングにおける旋回性能はこれまで研究されてこなかった。その理由として、こうしたオペレーションの頻度の低さが挙げられる。ラミング旋回は非常に時間がかかり、場合によっては 180 度の旋回に丸 1 日近くを要することもある。そのため氷中で旋回が必要になった場合は、まずラミングが必要な厳しい氷況を抜け、連続砕氷可能な場所で行うことが鉄則である。したがってラミ

ング旋回の実績データは少なく、またその研究を行うインセンティブも低い。しかししらせがリュツォ・ホルム湾内を氷況の厳しい年に航行する場合、途中で連続砕氷が可能なエリアを見つけることは難しく、旋回をする場合にはラミング旋回が必要になる。実際にラミング旋回はこれまで何度か行われており、今後も氷況が厳しい時期に入れば再びラミング旋回が実施される可能性が高い。本研究では、過去のラミング旋回データから、まずラミング旋回の特徴について調べることを最初の目的とする。その上で、旋回を効率化することを目指した検討を行う。具体的には、仮想的に助走距離を変化させた場合に旋回にかかる総時間がどう変化するかを調べ、「短いラミングを細かく多く突いて旋回する」方法と「長いラミングを少なく突いて旋回する」方法のどちらが効率的であると見込まれるかを検討した。

### 3.3. 対象データ

今回の解析対象としては、JARE51~59 (2010~2018) の 9 年間の氷海モニタリングシステムのデータを確認し、その中から明瞭なラミング旋回として確認できたものを 4 つ抽出した。抽出された旋回を図 25 に、各旋回の概要をまとめたものを表 8 に示す。斜線で区切って示した氷厚値は各観測サンプルである。旋回のうち 2 つは JARE54(緑線)における旋回で、この年は接岸に失敗している。往路ではじめ南東方向へ向かっていたものの、氷況が厳しいと判断して北東方向へ変針することとなり、その際に 1 回目の旋回(Turn 1)を実施した。その後オングル島の北部を回り込むルートを目指して進行するも、氷況の厳しい状況が続き、時間的制約もあったことから接岸を断念した。2 回目の旋回は接岸断念地点において復路につくために実施された(Turn 2)。残りの 2 つは JARE59(青線)の海洋観測期間中に行われたもので、いずれも西端の海洋観測地点まで行って戻る必要があった際のものである(Turn 3, 4)。この年は定着氷流出の影響で氷況が緩く、往路復路の合計ラミング回数は高々 27 回であった。そのため比較的自由にリュツォ・ホルム湾内を航行することができたが、それでも南西部ではやや氷に厚みがあったりリッジが多かったりした影響でラミングが必要になった。Turn 3 はこうした湾南西部海域でのラミング旋回であり、また Turn 4 は乱氷帯上であった(定着氷と流水の境界付近では、動きのある流水が動かない定着氷とが衝突を繰り返して厚さを増し、ラミングが必要となるような厳しい氷況となる。これが乱氷帯と呼ばれる)。なお、公式記録のラミング回数にはこうし

た往路復路以外の行程で実施されたラミングは含まれない。

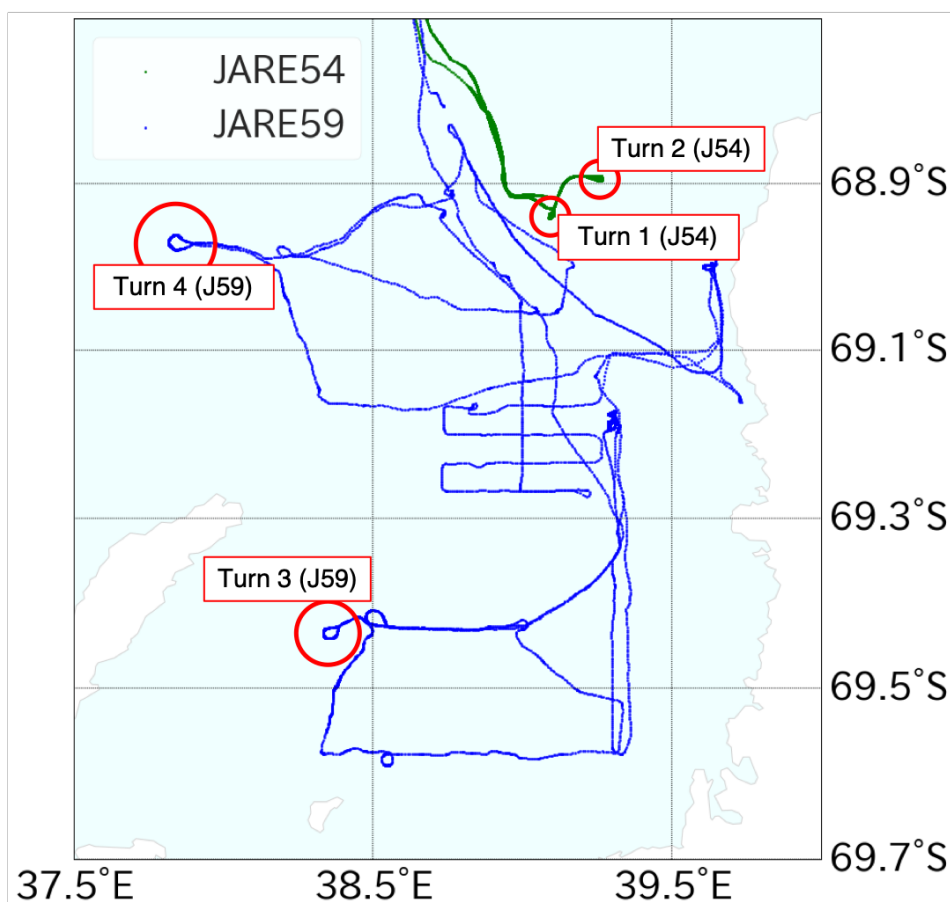


図 25 JARE54 と 59 の航跡と抽出したラミング旋回

表 8 各旋回の実施概要

	時期	旋回場所	氷厚 (m)
Turn 1	2013 年 1 月 (JARE54)	平坦定着氷	2.6 / 4.0
Turn 2	2013 年 2 月 (JARE54)	平坦定着氷	4.2 / 4.4 / 5.2
Turn 3	2018 年 1 月 (JARE59)	平坦定着氷	1.7 / 2.1
Turn 4	2018 年 2 月 (JARE59)	氷縁付近乱氷帯	2.1 / 2.2

### 3.4. 解析-1 ラミング旋回の特性研究

まずはラミングデータのうち旋回に該当する部分を抽出した。また、Turn 4 において冒頭で説明したアルゴリズムでは抽出できない最大速度 4.5knot 以下の

ラミングがあったため、この区間に対しては抽出条件の「速度 4.5knot 以上」の代わりに「前進第二強速(137rpm)」を用いるようプログラムを変更し、ラミング抽出処理を行った。他の3つの旋回も含めてラミング抽出に漏れや誤抽出がないことを確認した。

まずラミング旋回の特徴を調べるため、以下の基本的な特徴量を計算した:

### 1. 旋回半径の推定

経度方向を X 軸、緯度方向を Y 軸にとり、その旋回場所での単位経度・単位緯度あたり長さを用いて m 単位に直し、平面上に投影した(以降、これを X-Y 平面上に投影と呼ぶ)。これらの点が円周上に乗ると仮定し、その円を最小二乗法によって推定した。

### 2. その他の旋回特徴量を計算

各旋回について特徴量を計算し、表 9 にまとめた。 $N$  は各旋回のラミング回数、 $r$  は旋回半径である。 $V_{av}$ ,  $D_{av}$ ,  $L_{av}$  はラミングの衝突速度、貫入距離、助走距離をそれぞれの旋回について平均したものである。 $\Theta$  は合計船首方位変化で、初回ラミングの船首方位と最終回ラミングの船首方位の差分として計算した。 $\theta$  は  $\Theta$  を  $N$  で割ったもので、ラミング 1 回あたりに得られる旋回角を表す。 $h$  は氷厚で、JARE54 の旋回はコンパクトカメラによる観測([18])、JARE59 の旋回は肉眼目視による観測データ(北海道大学 伊藤氏提供)を参照した。斜線で区切って書いた値は各サンプルを表す。コンパクトカメラによる観測は 2.5 節で言及したとおり、過小評価値の混入によるばらつきが大きい。したがって氷厚値に対する旋回挙動を定量的に議論するには信頼性が足りないと判断し、氷況の目安データとして扱うに止める。

表 9 各旋回の特徴量

	$N$	$r$ (m)	$V_{av}$ (m/s)	$D_{av}$ (m)	$L_{av}$ (m)	$\Theta$ (deg)	$\theta$ (deg)	$h$ (m)
Turn 1	15	165	7.3	104	264	52	3.4	2.6 / 4.0
Turn 2	143	257	6.6	52	158	158	1.1	4.2 / 4.4 / 5.2
Turn 3	39	698	9.0	118	292	142	3.6	1.7 / 2.1
Turn 4	35	1012	6.6	143	201	179	5.1	2.1 / 2.2

次に、推定された4つの旋回円が同心円状になるように、4つの旋回を重ね合わせてプロットし、図 26 に示した。旋回によって明らかに半径が異なっていることが読み取れる。

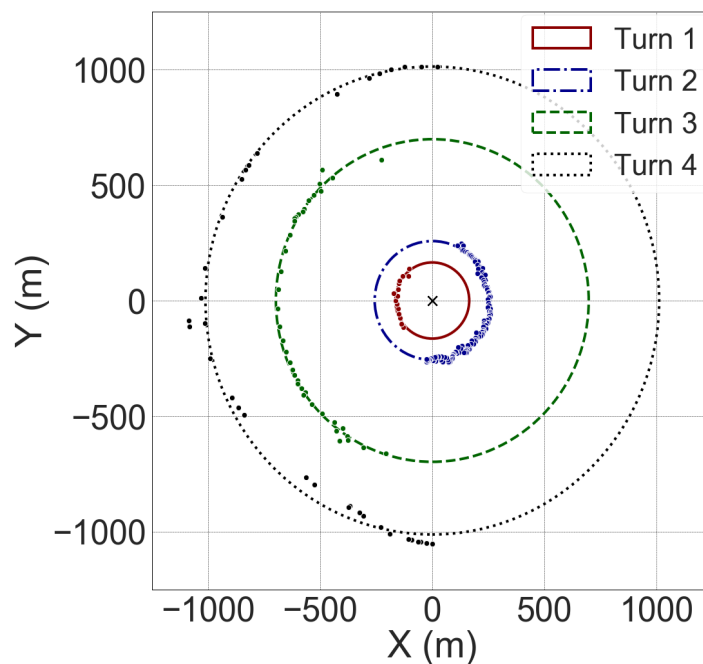


図 26 同心円状にプロットした4回のラミング旋回とその推定円

より定量的な傾向を調べるために、横軸に旋回ごとの平均貫入距離  $D_{av}$ 、縦軸に各旋回半径  $r$  をとってその関係を図 27 に示した。また、直線回帰を行なってその回帰式と相関係数も図中に示した。

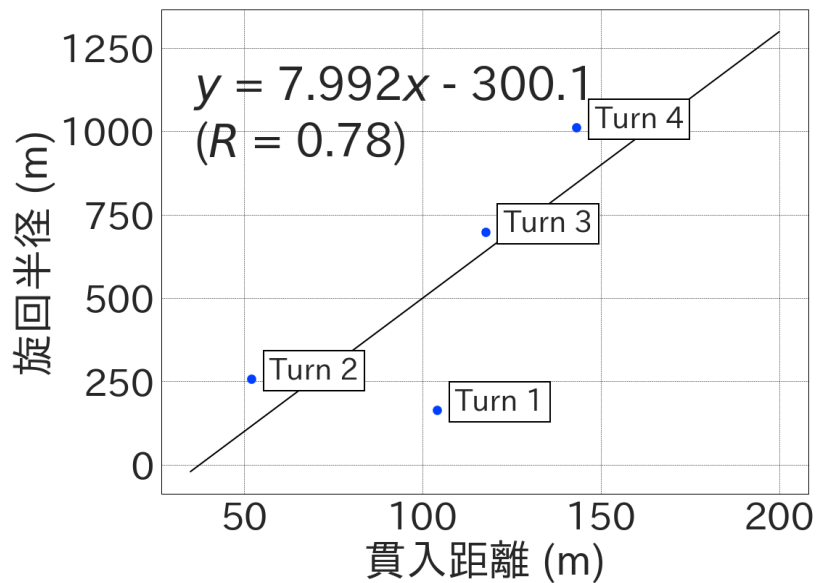


図 27 貫入距離 D と旋回半径 r の関係

この関係から、貫入距離が長いほど旋回半径が大きい、大回りの旋回になっていることが読み取れる。その旋回半径は 150m~1000m 程度で、連続砕氷の旋回半径よりも小さいものもある。また、氷厚が大きい Turn1, 2 の方が小さい旋回円となっている。

3.1 節で述べた通り、連続砕氷の場合は氷厚が大きいほど旋回径が拡大することが知られており、今回の結果はこれとは逆の傾向を示している。単純に連続砕氷旋回の研究で得られた知見をラミング旋回に適用することはできないと言える。そこで、連続砕氷旋回と異なる特性を示す原因を考察する。

例として Turn 2, 3 を取り上げ、その貫入時のみの軌跡をプロットしたものを図 28 に示した。さらに拡大して見るために、それぞれ 20 本/10 本のラミングを抽出し、図 29 に示した。これらの軌跡はそれぞれがほぼ直線のように見え、貫入中はあまり旋回角の獲得にあまり寄与していないように思われる。Turn 3 の一部では少し曲がっているようにも見えるが、明らかではない。旋回角の主要な部分はむしろ、貫入位置と貫入方向をずらすことによって得られていると思われる。貫入までの助走区間は開放水面に近い状況であり、水中と比べて変針しやすいためであると説明できる。

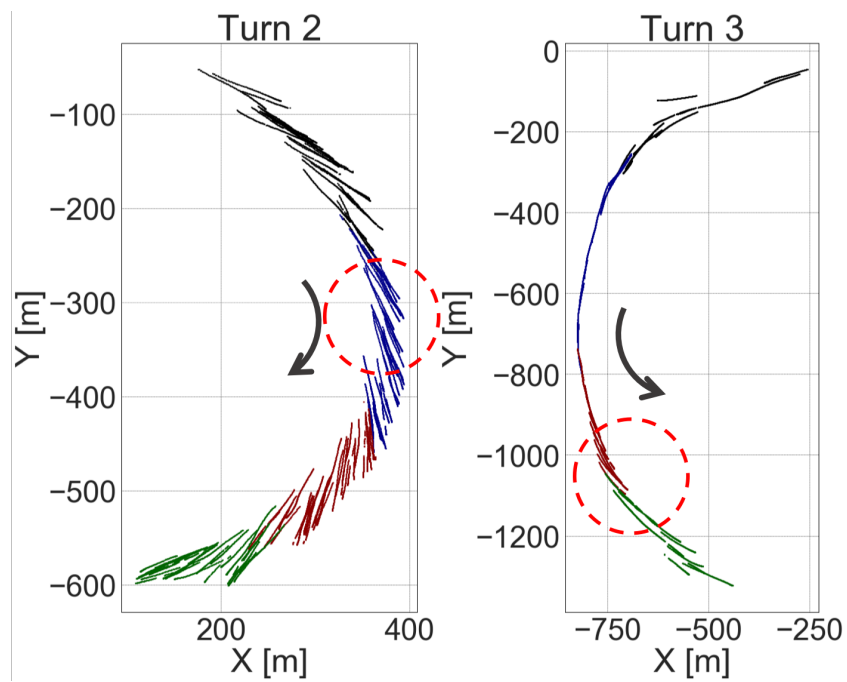


図 28 貫入中の軌跡 (赤円で囲んだ部分を図 29 に拡大)

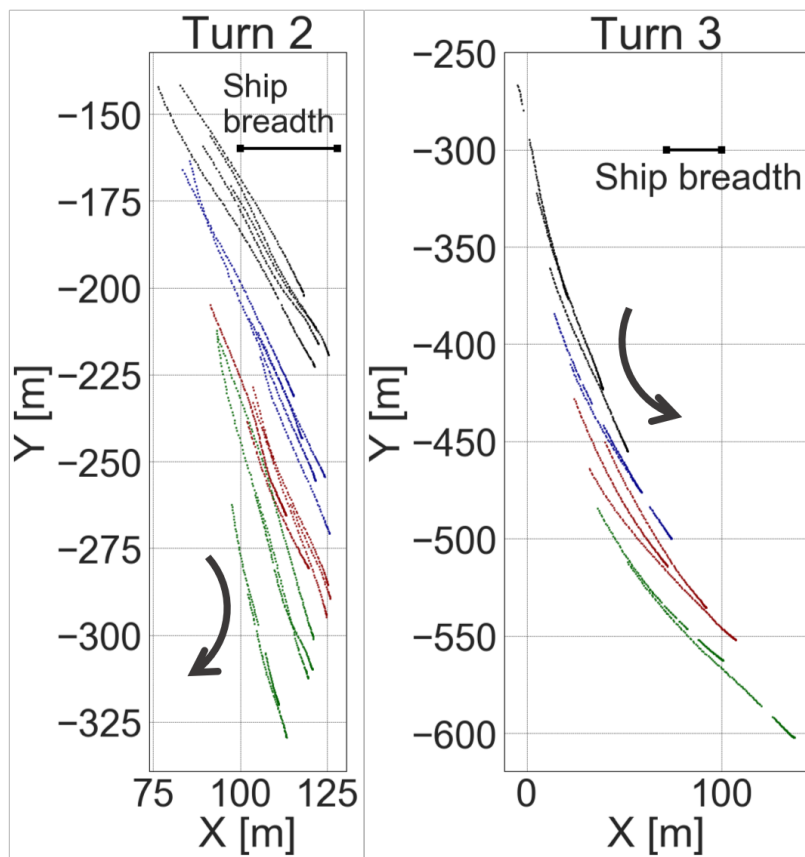


図 29 貫入中の軌跡 (図 28 赤円部分の各 20・10 本のランニングを拡大)



貫入中に得られる旋回角が貫入前に得られる旋回角に対して小さいならば、貫入距離が長いほど旋回半径が大きくなることが説明できる。図 30 は貫入距離の短い場合(赤)と長い場合(青)を想定し、ラミング貫入軌跡に見立てた直線の矢印を  $12^\circ$  ずつ変化させて描画したもので、最終的な船首方位は同じでも赤の方が小回りになる。

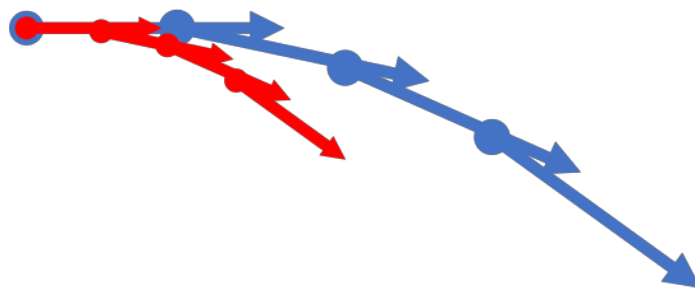


図 30 貫入距離の長短による旋回半径変化の例

ここで、効率的な旋回を行うことを考える場合、貫入中に少しでも旋回角が得られているかどうかが重要になる。もし貫入中には旋回角が得られないのであれば、長く貫入することは考えず、助走距離の短い細かいラミングを実施した方が時間の節約になる。

これを検討するための情報として、各旋回のヨーレートの時間変化を図 31 に示した。それぞれの旋回に含まれるラミングに対し、貫入時を時刻 0 として揃え、ヨーレートを平均化した。ヨーレートは旋回する方向を正にとっている。参考に船速も同様の方法で平均化して下段に示した。

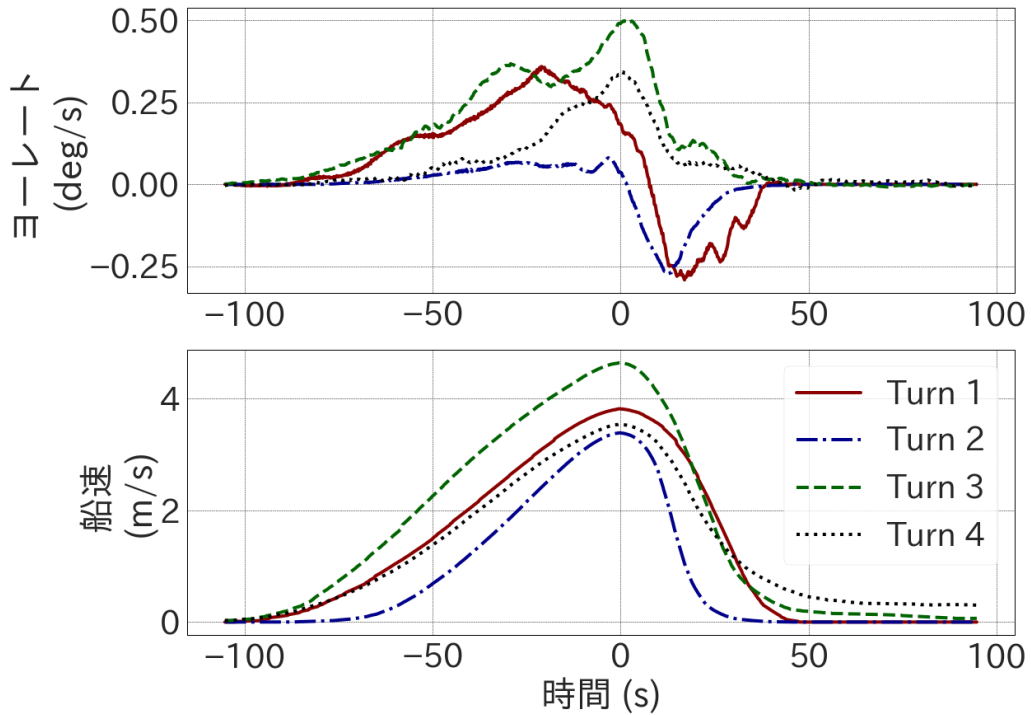


図 31 貫入前後のヨーレートの推移 (旋回ごとのラミング平均)

いずれも氷に衝突したタイミングで、氷板縁に跳ね返された反力によりヨーレートが大きく低下している。貫入距離が大きい Turn 3 と 4 においては、貫入後も正のヨーレートを保って航行している。ヨー角は船の進行方向とは必ずしも一致しないものの、この結果はラミングの氷中貫入時にも連続砕氷旋回のように旋回角を獲得している可能性を示唆している。

より定量的な考察をするため、ラミング一回あたりに得られる旋回角  $\theta$  を、貫入距離を横軸にとってプロットした(図 32)。

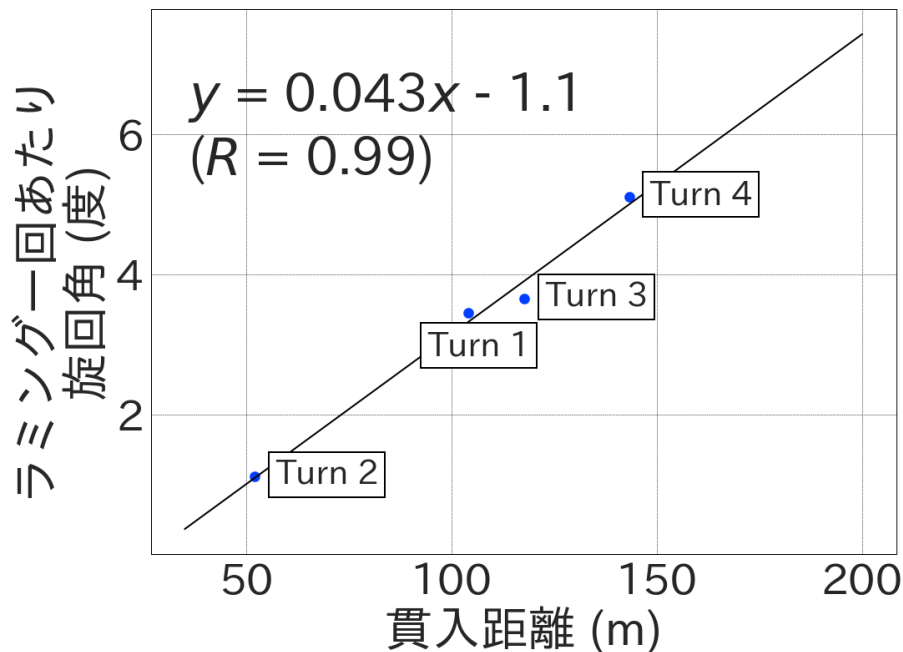


図 32 貫入距離 D とラミング一回あたり旋回角  $\theta$  の関係

図 32 より、貫入距離が長いほどラミング一回あたりに得られる旋回角が大きい傾向が読み取れる。図 31 についての考察を踏まえると、この結果は貫入中に得られる旋回角も有意に効いているためだと考えられる。

ここで、ある氷域でラミング航行中に旋回をすることを検討する場合を考える。図 32 の経験式を用いれば、直近のラミングの貫入距離からラミング 1 回あたりの旋回角を計算できる。さらに回りたい角度に応じて必要なラミング回数、ひいてはおよその所要時間も見積もれることが期待される。

### 3.5. 解析-2 旋回所要時間の短縮

先の解析で得られたラミング旋回の特徴を踏まえて、ラミング旋回にかかる時間を短縮する方法を検証した。上述のように、氷貫入中も旋回角が得られると考えられるため、助走距離を長く取って貫入距離を伸ばすことは無駄ではないことがわかった。一方で、そこで得られる旋回角は貫入前に得られる旋回角と比べて小さいことを鑑みると、助走距離を短く取った短時間のラミングを多くこなした方が全体の所要時間が短くなる可能性もある。

そこで、助走距離を変化させた場合にラミング旋回の総所要時間がどう変化するかを計算した。計算の概念図を図 33 に示す。

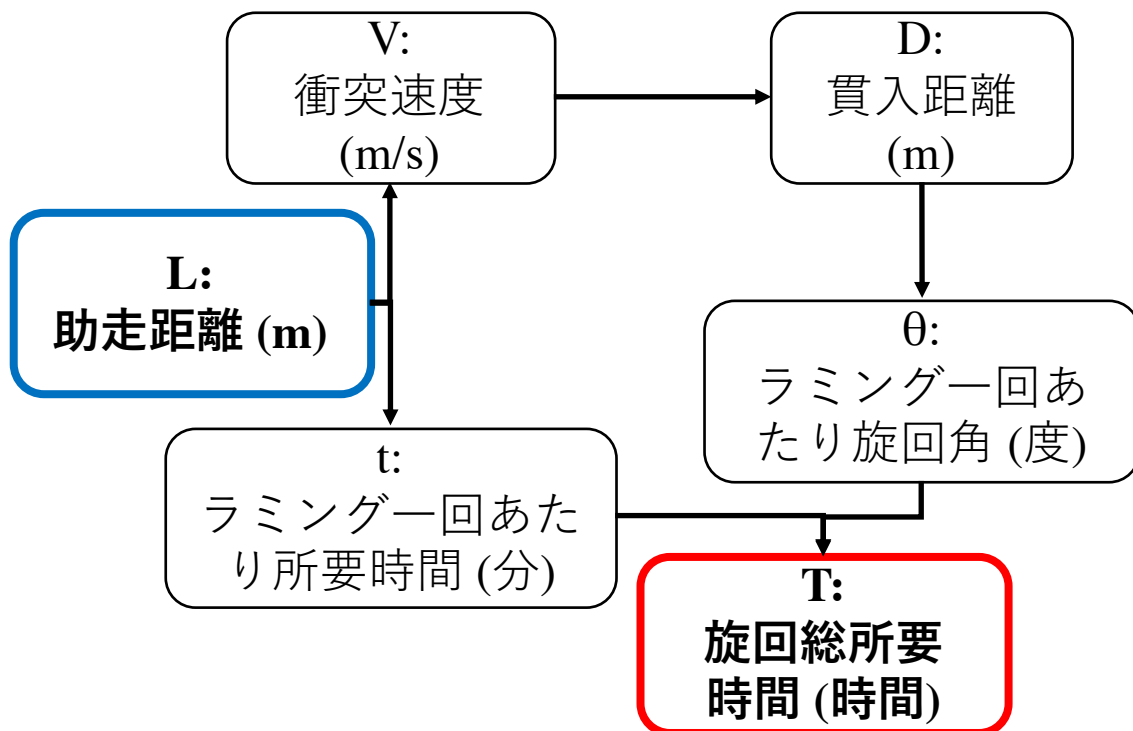


図 33 旋回総所要時間計算の概念図

旋回総所要時間  $T$  は、旋回ラミング回数  $N$  とラミング一回あたり所要時間  $t$  の積で表される。ここで、ラミング一回あたりの所要時間は主に助走距離に依存するため、 $t$  は  $L$  の関数として表される。一方で、旋回ラミング回数  $N$  は合計旋回角  $\Theta$  をラミング一回あたり旋回角  $\theta$  で割って求められる。また  $\theta$  は、図 32 の関係式を用いれば貫入距離  $D$  の関数として表せる。 $D$  は衝突速度  $V$  の関数であり、 $V$  は助走距離  $L$  の関数である。これらをまとめると、旋回総所要時間  $T$  は助走距離  $L$  のみで表せることになる。

$L-t$ ,  $L-V$ ,  $V-D$  関係式は、それぞれの旋回に対して直線回帰によって求めた。元データの散布図と求められた回帰直線を、相関係数  $R$  とともに図 34～図 36 にまとめた。

これらを式に表すと以下のようなになる。

$$T = N \times t \quad (1)$$

$$t = a_t \cdot L + b_t \quad (2)$$

$$N = \Theta / \theta \quad (3)$$

$$\theta = a_{\theta} \cdot D + b_{\theta} \quad (4)$$

$$D = a_D \cdot V + b_D \quad (5)$$

$$V = a_V \cdot L + b_V \quad (6)$$

これらの式をまとめて  $T$  を  $L$  のみの関数で表し、次式を得る。

$$T = \frac{\theta \cdot (a_t \cdot L + b_t)}{a_{\theta} \cdot (a_D \cdot (a_V \cdot L + b_V) + b_D) + b_{\theta}} \quad (7)$$

なお、この回帰分析を行うにあたって、以下の例外的なラミングを合計 4 回分除去している:

1. 長い貫入距離のラミング

Turn 3 において、特に大きくない衝突速度にも関わらず貫入距離が 200m を超えるラミングが 2 回あったため、これらを外れ値として除去した。原因としては部分的に氷が薄かった可能性が考えられるが、正確なところは明らかではない。

2. 低い軸回転数で加速したラミング

加速時には基本的に 137rpm が用いられるが、2 回のラミングにおいてはそれより小さい軸回転数で加速していた(その理由は記録されているデータからでは推察できなかった)。これらも解析から除外した。

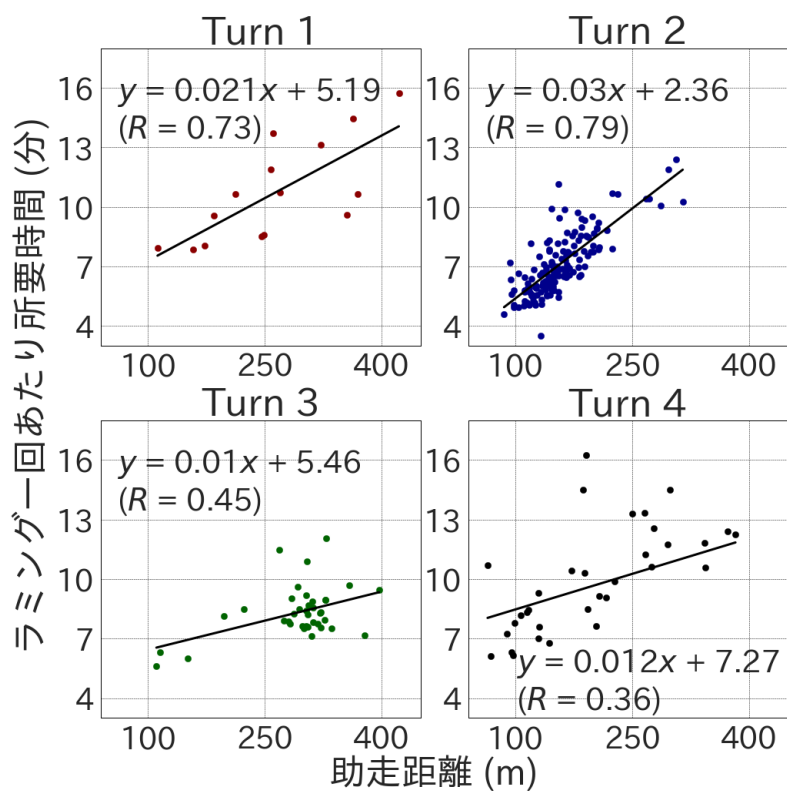


図 34 助走距離 L とラミング一回あたり所要時間 t の関係

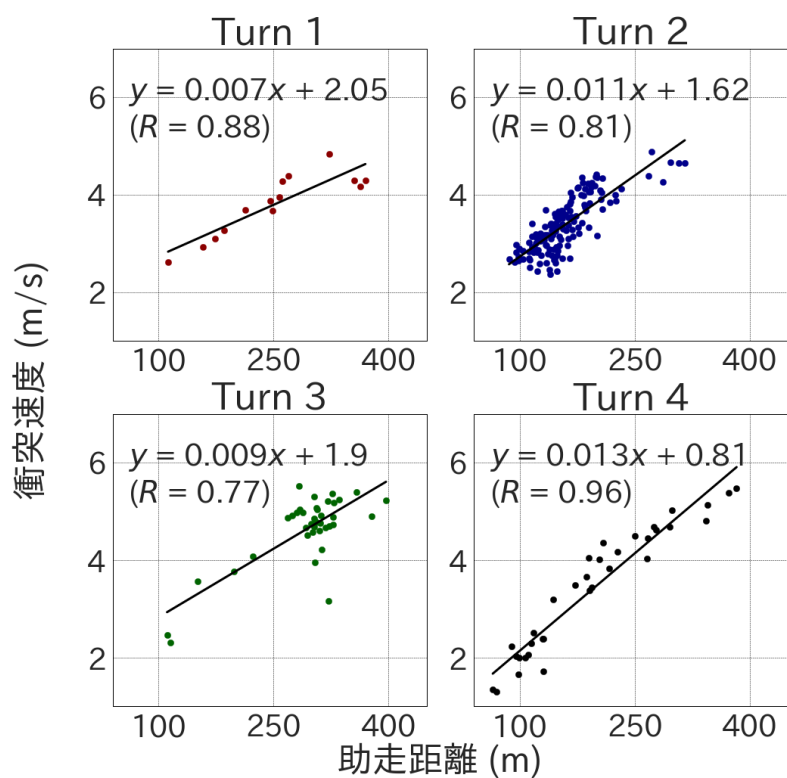


図 35 助走距離 L と衝突速度 V の関係

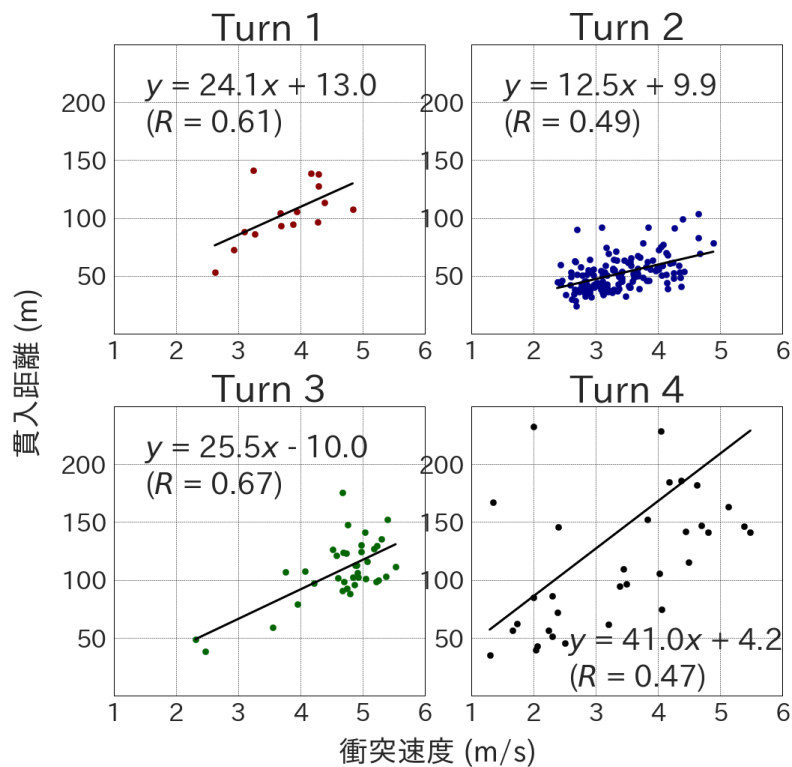


図 36 衝突速度 V と貫入距離 D の関係

L-t 関係(図 34)は、旋回によってその直線の傾きが異なっている。その原因として考えられるのが、後進時に水路の船尾側に溜まるブラッシュアイスである。ラミング時には 2.2 節で述べたようにブラッシュアイスに後方の水空きを塞がれないよう砕氷幅に注意しながら航行を行うが、それでもブラッシュアイスが抵抗になって後進距離が得にくいことは珍しくない。氷況が厳しい場合には生成されるブラッシュアイスの量も多く、後方に溜まって抵抗となりやすい。

図 34 では氷況の厳しかった旋回で特に直線の傾きが急であり、長い進出距離を確保するのに多くの時間を要したことがわかる。このことからブラッシュアイスが原因である可能性が高い。

L-V 関係(図 35)については、基本的に直線回帰に対する当てはまりがよく、また旋回ごとの差異も大きくない。先述の通り加速時には前方がほぼ水空き状態となっているため、氷況に影響されることがないためだと考えられる。

JARE52 で行った砕氷試験では、助走距離を 200m, 300m, 400m と変化させた場合に衝突速度がどう変わるかを調べられている(試験結果はこれまで公表され

ていない)。この試験のデータを用いて助走距離と衝突速度の関係を図 37 に示した(データは船のログブックから転載したものである)。この結果からも氷況によらない線型的な関係が示されており、今回の解析結果と合致する。

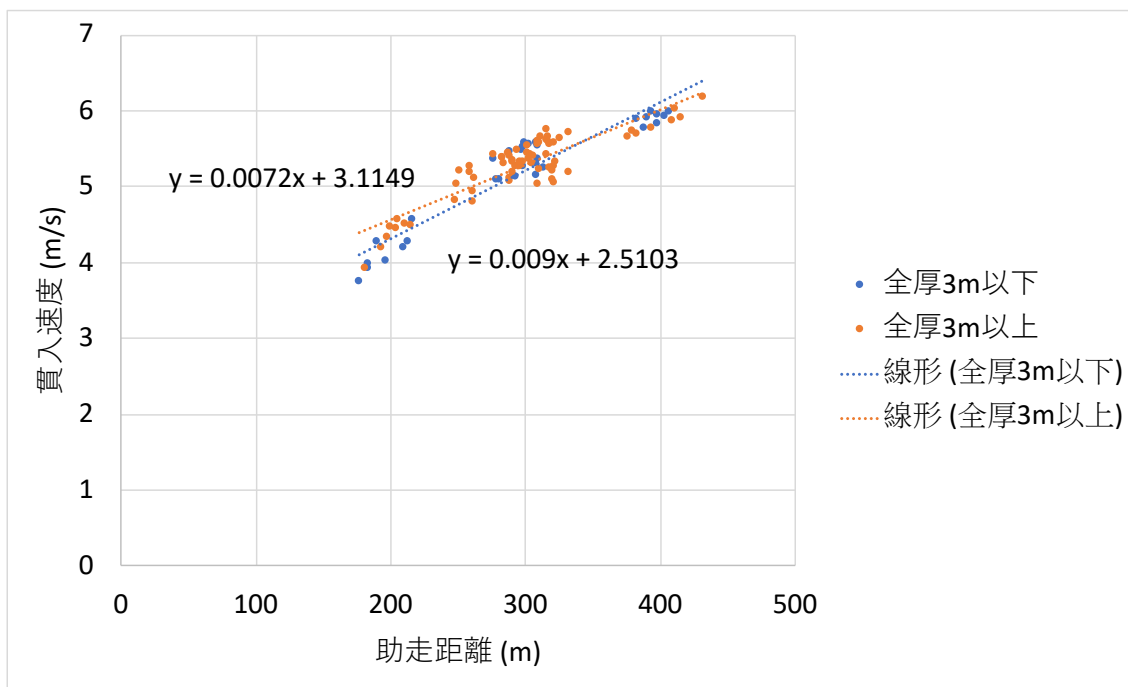


図 37 JARE52 で実施したラミング実験の結果

$V$ - $D$ 関係(図 36)は、旋回ごとに大きな違いがある。氷況が異なれば同じ運動エネルギーで衝突しても砕氷貫入できる距離に違いが出るのは当然である。

$D$ - $\theta$  関係は図 32 の回帰直線を用いることにした。しかし、厳密にはこの関係式を直接用いることはできず、氷況変化の影響も考慮しなければならない。3.4 節の考察で貫入中に旋回角を獲得していることが示唆されたが、これに加えて氷況の変化も  $\theta$  に影響している可能性もある。具体的な説明として、次式のように  $\theta$  を助走時に獲得する旋回角  $\theta_A$  と貫入中に獲得する旋回角  $\theta_P$  に分解する。

$$\theta = \theta_A + D \frac{d\theta_P}{dD} \quad (8)$$

助走中はほぼ開放水面中の航行のため、 $\theta_A$  は氷況の違いによる影響を受けにくいと思われるが、単位貫入距離あたりの獲得旋回角  $d\theta_P/dD$  は氷況によって変



化すると考えられる。図 32 の関係は氷況変化による影響を含んでいるため、同じ氷況で衝突速度を変化させた場合にもこの関係が成り立つとは限らない。本来は同一の氷況における  $D-\theta$  関係を導出し、それを使用すべきである。解析対象となるサンプル数が少ないことから、今回は氷況変化の影響は貫入距離変化の影響と比べて小さいと仮定し、同一の氷況においても  $D-\theta$  の関係が成り立つとした。この点の検証については今後の課題の1つである。また、この不確定性を考慮し、 $D-\theta$  関係をやや変化させた複数のシナリオも検証の対象とした。シナリオとしては元の回帰直線、直線の傾きの20%の増減、直線の上下10%の平行移動、 $\theta$  値の一律20%の増減の合計7通りを用意して検証を行った。これらのシナリオを図 38 に示す。

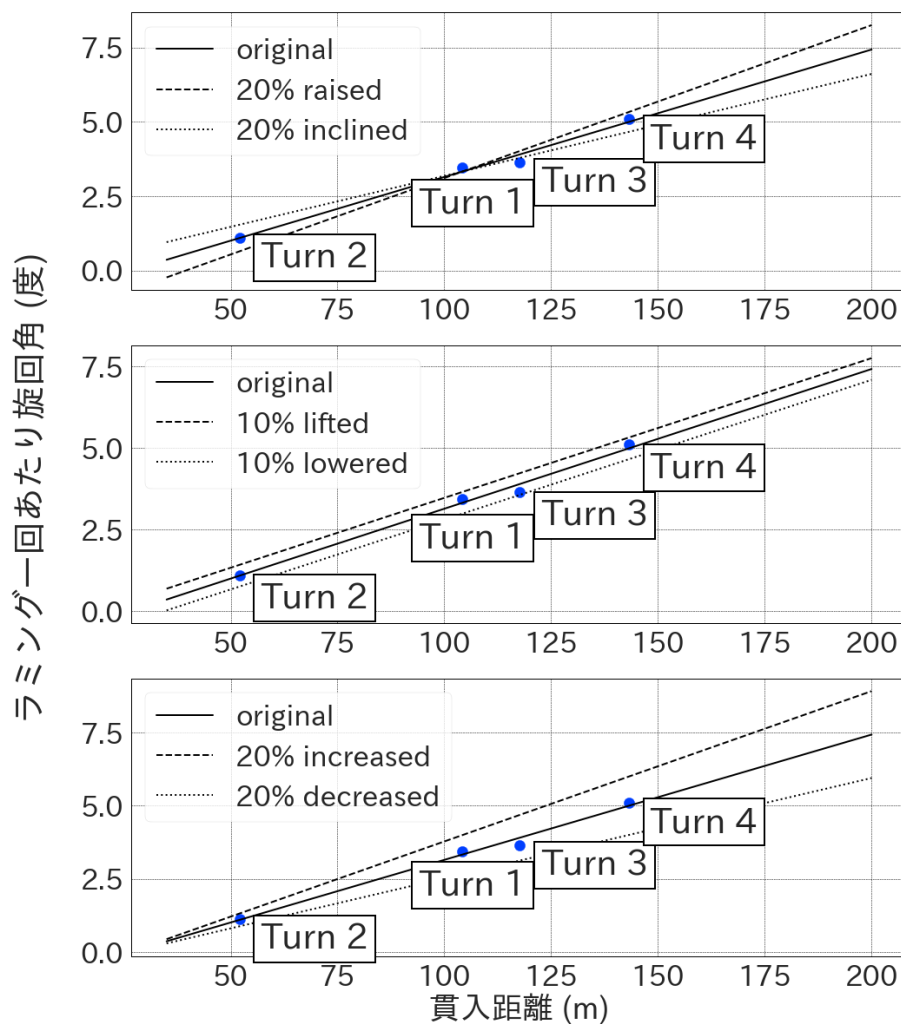


図 38 7シナリオにおける貫入距離  $D$  とラミング一回あたり旋回角  $\theta$  の関係

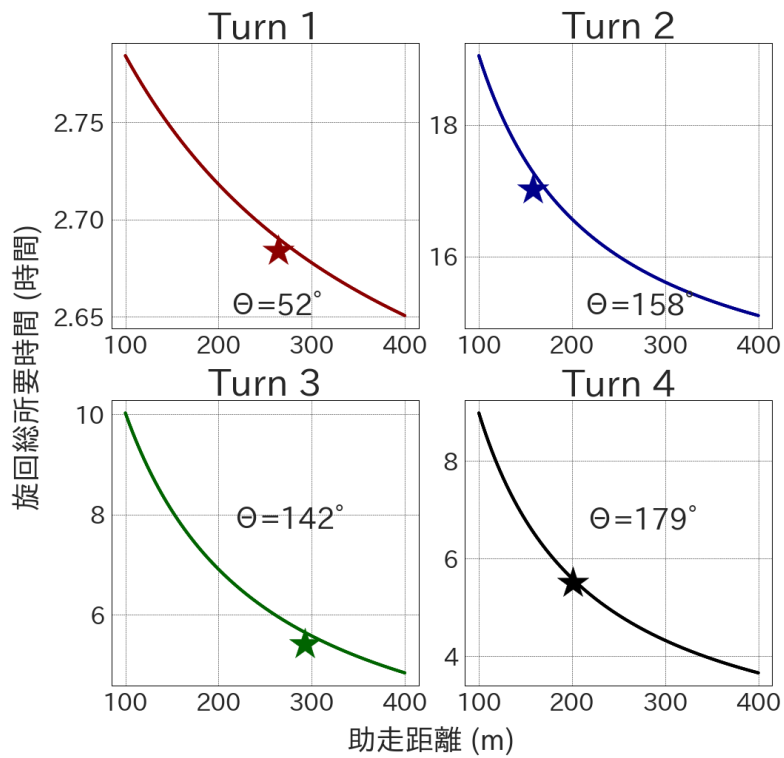


図 39 推定された旋回総所要時間とその助走距離依存性(実績値を星で示した)

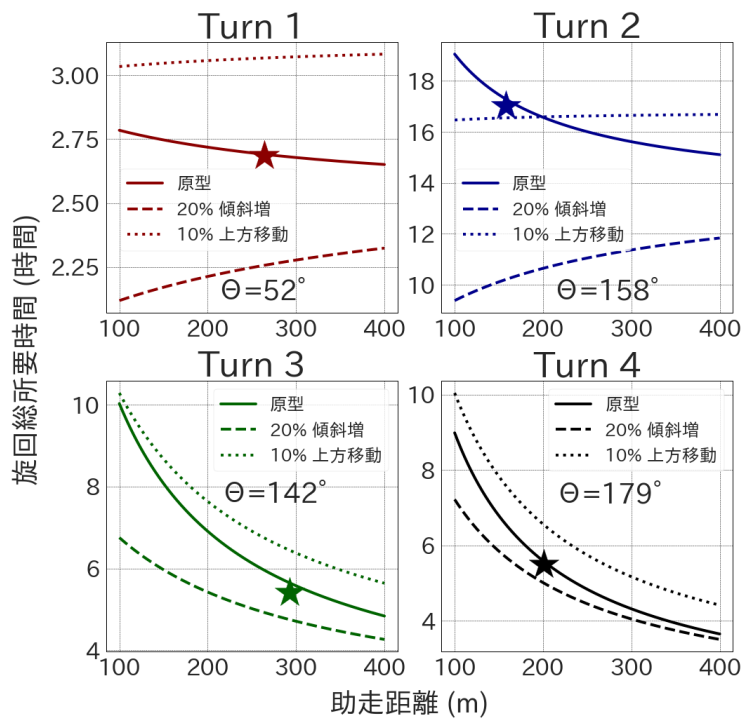


図 40 推定された旋回総所要時間とその助走距離依存性 (曲線形が変化したシナリオ)

まず、 $D-\theta$  関係に元の回帰直線を用いて  $L-T$  関係を計算した推定曲線を図 39 に示す。星で示したものは実績値であり、その旋回での助走距離平均と実際にかかった時間からプロットした。まずは実績値が推定曲線上に乗っていることが確認できる。

また、いずれの推定曲線も減少関数となっている。つまり、助走距離を長く取って 1 回ずつの旋回角を増やした方が、助走距離の短く細かいラミングを多く実施するよりも時間効率的であることを意味する。

しかしながら、 $D-\theta$  関係における複数のシナリオを試したところ、一部の曲線では増加関数となった。増加関数となった結果と元の曲線を併せてプロットし図 40 に示す。Turn 1 と 2 においてのみ増加関数となる結果が得られており、Turn 3 と 4 においてはいずれのシナリオにおいても減少関数であった。

これについての理解を深めるため、次のような考察を行なった。

まず、推定曲線が減少関数である条件は次のように表される：

$$\frac{dT}{dL} \leq 0 \quad (9)$$

これに式(7)を代入することによって次式を得る：

$$-a_D a_V a_\theta b_t + a_t b_\theta + a_D a_t a_\theta b_V + a_t a_\theta b_D \leq 0 \quad (10)$$

この左辺を  $X_{(a_D, a_V, a_\theta, a_t, b_D, a_V, b_\theta, b_t)}$  とおくと、 $X$  が大きく増加するほど、(9)の条件が破られやすくなる。ここで、経験的に起こりやすい範囲で各係数を変化させ、どの係数が最も条件(9)を破りやすいかを計算する。まず各係数をまとめて

$\mathbf{A} = (a_D, a_V, a_\theta, a_t, b_D, a_V, b_\theta, b_t)$  とおき、このうちの各成分  $A_i$  に対する感受性  $S_i$  を次のように計算する：

$$S_i = X_{(A+\Delta A)} - X_{(A)} \quad \text{where } \Delta A_j = \delta_{ij} \Delta A_j \quad (11)$$

$\delta_{ij}$  はクロネッカーのデルタである。この計算では、係数  $A_i$  以外は回帰式で得られた値をそのまま代入し、係数  $A_i$  のみ  $\Delta A_i$  だけ変化させた値を代入して、もとの値からの差分を取っている。 $\Delta A_i$  は各 4 つの旋回で得られた値から計算した標準偏差を用いた。したがって  $S_i$  は、「係数  $A_i$  のみが 4 回の旋回で実際に生じたばら

つき分程度変化した場合に、どれだけ  $L$ - $T$  推定曲線の傾きに影響するかを定量化したもの」とみなすことができる。

$S_i$  の計算結果を表 10 に示す。

表 10 各係数に対する感受性  $S$  の計算結果

$a_t$	$b_t$	$a_v$	$b_v$	$a_D$	$b_D$	$a_\theta$	$b_\theta$
0.01	-11.36	0.00	-0.28	-0.13	0.21	0.00	-0.02

$b_t$  の値が際立って大きいことが読み取れる。ここで  $b_t$  は  $L$ - $t$  直線の切片であるが、単に助走距離に無関係な一定の所要時間を意味するものとは限らず、回帰分析の過程で  $a_t$  に依存して変化することに留意が必要である。これは  $L$  が小さい領域においては今回仮定した線型性が成立しないことに起因する。理論的には  $L=0$  における  $t$  は氷況によらず一定になるはずである。

少なくとも、 $L$ - $t$  関係の変化が他の 2 変数関係と比べ、 $L$ - $T$  推定曲線の傾きに対して最も大きな影響を与えていたことがわかった。この結果に対しては以下のように考察した。

$L$ - $T$  推定曲線が増加関数になっている Turn1, 2 においては、 $L$ - $t$  直線の切片が小さく、また傾きが大きくなっている(図 34)。その原因は 3.4 節の考察の通り、船尾側に溜まったブラッシュアイスの抵抗によるものであると推察される。このことから、ブラッシュアイスに後進が大きく阻害されるような状況においては、後進コストが長い貫入距離によって得られる恩恵に対して大きくなり、助走距離を長く取るべきとは言えなくなると考えられる。逆に後方水空きに余裕があって後進がスムーズに行えるような状況においては、助走距離は長く取る方が効率的である可能性が高い。

### 3.6. 結論

本解析にて、次のような結果が得られた。

- ・ ラミング旋回半径は、貫入距離の増加に伴って増加する。
- ・ ラミング一回あたりに得られる旋回角は、貫入距離の増加に伴って増加する。

- ・ 助走距離 100m-400m の範囲において、旋回にかかる総所要時間は、助走距離を長く取った方が短くなる。ただし、船尾のブラッシュアイスなどの影響で後進に通常より時間がかかる場合はその限りではない。

これらの結果より、実船航海において次のような応用可能性が示唆される。

- ・ ラミング貫入距離からおよその旋回半径を見積もることができる。
- ・ ラミング貫入距離からおよその旋回時間を見積もることができる。
- ・ 後部水空きが十分の場合は長く助走距離を取り、後進が阻害されてきた場合には助走距離を調整することで、総旋回時間を短縮することができる。

以上のように、本解析によって現時点で得られるデータからいくつかの示唆を得た。しかしサンプル数が不十分であり未だ信頼度は低いと思われる。また、 $D$ - $\theta$  関係での氷況の影響が小さいとしたこと、変数間の関係が全て線形近似できるとしたことなど、検証が不十分な仮定を置いていることも問題として残っている。実用的な航行指針の作成を目指すには、今後さらに過去データの収集や実海域実験の実施によってサンプル数を増やし、より信頼度の高い検証を行う必要があると考える。

## 第4章 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に接岸するまでの時間は、特に氷況が厳しい年において予測が困難である。

図 41 に、近年の往路ラミング回数と定着氷航行日数の推移を示す。定着氷航行日数は、定着氷到着日から昭和基地に接岸(または接岸断念)した日までの日数として算出しており、それぞれ空輸等のための途中停泊を数日程度含んでいる。図中赤で示した年は接岸に失敗したことを表す。氷況の緩かった JARE58, 59 では 7 日間であるのに対し、氷況が厳しかった年は最短 11 日から最長 27 日と、2 週間以上もの大きな開きがある。これほどに所要日数が不確かだと航行計画を立てにくい。

54 次を除けば、概ねラミング回数と定着氷航行日数は相関している。定着氷の通過に必要なラミング回数が予測できれば、およそ航行時間も予測できると考えられる。

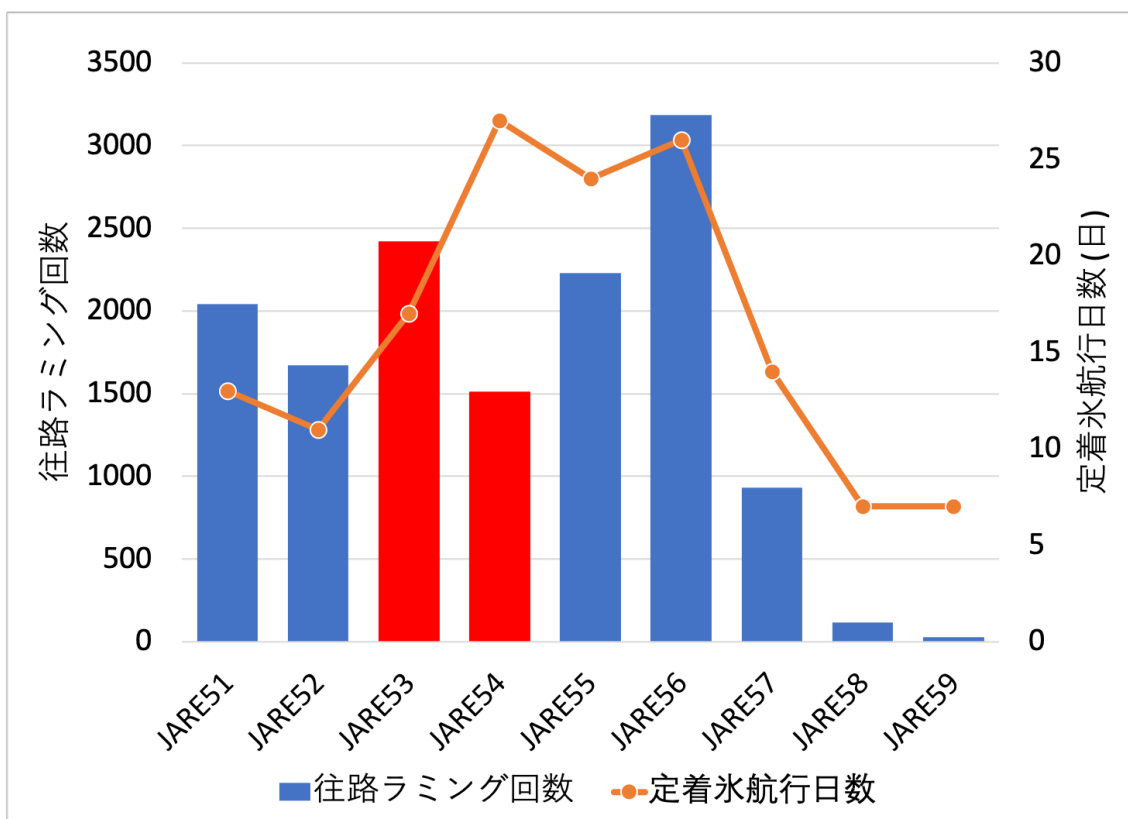


図 41 近年のラミング回数と定着氷航行日数([35]より作成)

## 4.2. 氷厚情報に基づくラミング回数の予測

ここで、将来的に事前に定着氷縁から昭和基地までの経路の氷厚分布が得られたと仮定する。現状では、氷厚分布がわかってもそこを航行するのにどれくらいの時間がかかるのかが判断できない。そこで、過去に観測された氷厚とラミングのデータを用いて、各氷厚値とそれに対して得られるラミング進出の関係を調べ、その関係を用いて総所要時間を予測する手法を開発する。概念図を図 42 に示す。経路上で仮想的にしらせを航行させ、現在地の氷厚に応じた進出距離を獲得しながらラミングを繰り返し、目標地点まで移動する。この計算によって、目標地点までにかかるラミング回数を予測することを目指す。

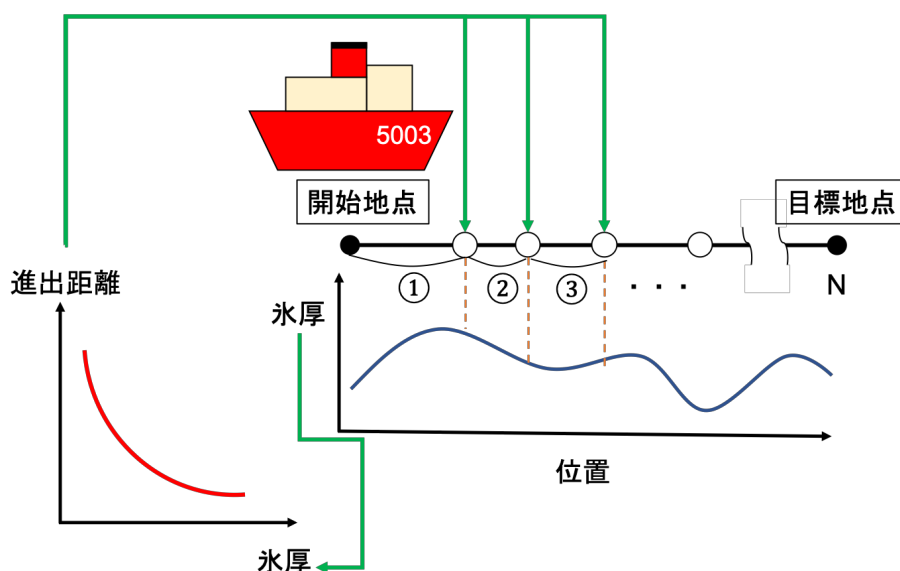


図 42 航行時間予測計算の概念図

## 4.3. 使用する氷厚データ

本解析においては、2.5 節で紹介した EM センサーによる観測データを利用する。

まず船上 EM については、JARE54, 55 往路の観測生データを解析し全氷厚値を計算したものを、北見工業大学の館山先生からご提供いただいた。今回はこの 2 年の往路航行分のみを解析に利用する。他にも JARE52, JARE57, JARE59 の観測生データもご提供いただいたが、ずれている時刻の補正や全氷厚の算出のためのキャリブレーション式の係数推定などのやや煩雑な処理が必要となるため、今回は利用しなかった。今後の解析には活用されることが望ましい。

次に EM-Bird については、過去にしらせのラミング航跡に沿った観測が JARE57 での 1 回のみ行われており、このデータを利用する。データは国立極地研究所の牛尾先生にご提供いただいた。

これら 2 つの観測方法をより詳細に比較し、表 11 に示した。今回の解析に利用するという観点からすると、船上 EM は航跡直上の全氷厚データを膨大に記録しているため、全氷厚とラミング進出の関係を調べるのに適している。これに対し、EM-Bird は航行前から観測を行なって事前にデータを取得できることから、今回は航行時間を予測したいルート of 全氷厚データとして利用することにした。実際に EM-Bird が航行したいルートの氷況探査目的で利用されたことはないが、JARE60 ではしらせ離着艦の EM-Bird 観測が予定されており、そうした利用も将来的には実現する可能性がある。

表 11 EM センサーによる観測方法 2 種の比較

	EM-Bird	船上 EM
観測方法	ヘリコプター搭載	船搭載
観測領域	自由	航跡上のみ
観測特性	観測のためのフライトを実施する必要があり、また燃料や時間の制約から多くのデータは入手できない	船に設置すれば航行区間を通して観測されるため、多くのデータが蓄積できる
データ特性	安定している	ラミング時は船の動揺や砕氷等の影響を大きく受け、不安定になる
データの蓄積状況	近年増えているが、まだ少ない	多い。これまでの蓄積データに、少なくともラミングが 8000 回分以上含まれる
データが取得できるタイミング	自由（ただし少なくとも現場付近までは着いてから）	航行後
備考	航行前に本観測を実施すれば事前に氷況が把握でき、航行計画への活用が可能	常に航跡上の記録となるため、船の研究としては解析の価値が高い



#### 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、2.3節で作成したラミングデータと一緒に解析するにはデータの対応づけを行う必要がある。

まず EM-Bird については、先に述べたように航跡沿いのルートを観測したものをを用いる。なお、本解析では観測された生データに 10 データ移動平均をかけたデータを使用した(図 43)。EM-Bird 観測のフットプリントは 50m 程度(観測高度にもよる)であり([36])、観測間隔は 4m 程度であった。移動平均処理によりおよそフットプリント幅より細かい値の変動は平均化されている。図 44 に EM-Bird の観測点とラミング位置を併せて示す。観測された全氷厚値はカラーマップで示した。南緯 69.06° 付近で全氷厚値に急激な変化があり、ここに一年氷と多年氷の境界がある。ラミング位置もこれに対応し、ほとんどが多年氷帯内で行われていることがわかる。

航跡と EM-Bird の観測線は完全に一致はしないものの、十分近傍を観測できていると考えられる。これを踏まえ、各ラミング位置に対して最も近い観測点の全氷厚値をそのラミング時の全氷厚値として組み込みを行なった。

対象区間としては多年氷帯のみを選択した。なお区間中 39.48° E 付近に非常に大きい全氷厚値が観測されているが、これは冰山による影響であることが確認されている([37])。今回はこの部分を除外し、それより西側で多年氷帯端までの部分を区間 1、東側で軌跡が曲がるまでの部分を区間 2 として解析に利用した。抽出区間の EM-Bird 観測点とラミング位置の座標を図 45、図 46 に示す。

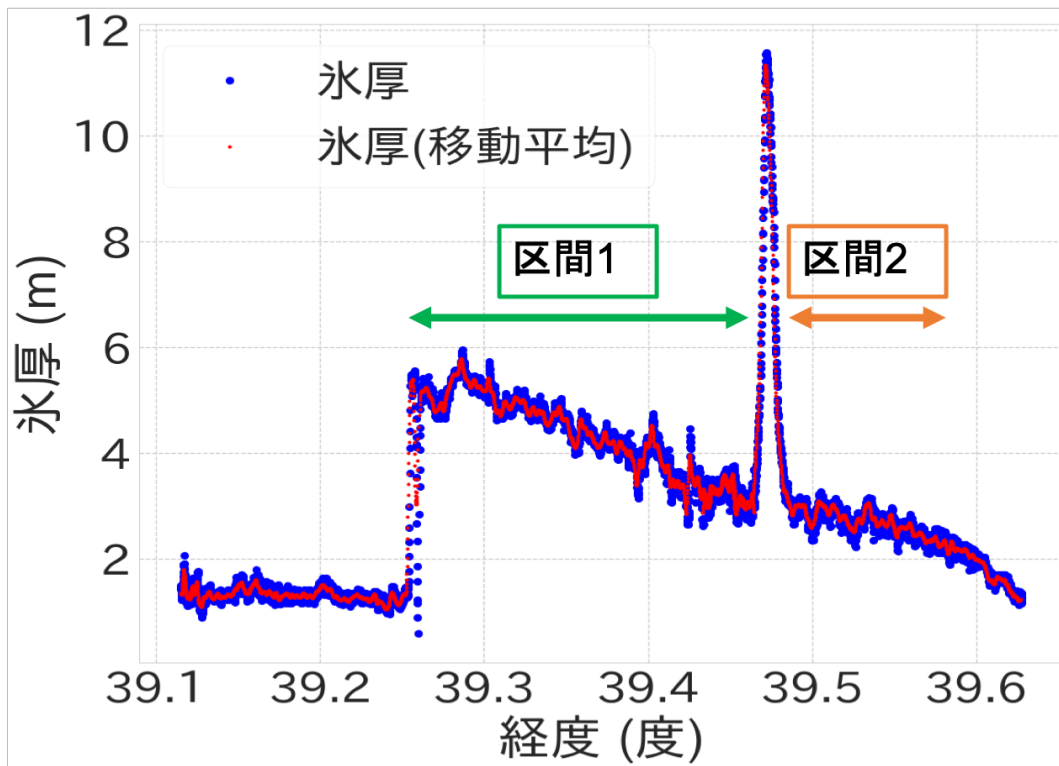


図 43 EM-Bird 観測値

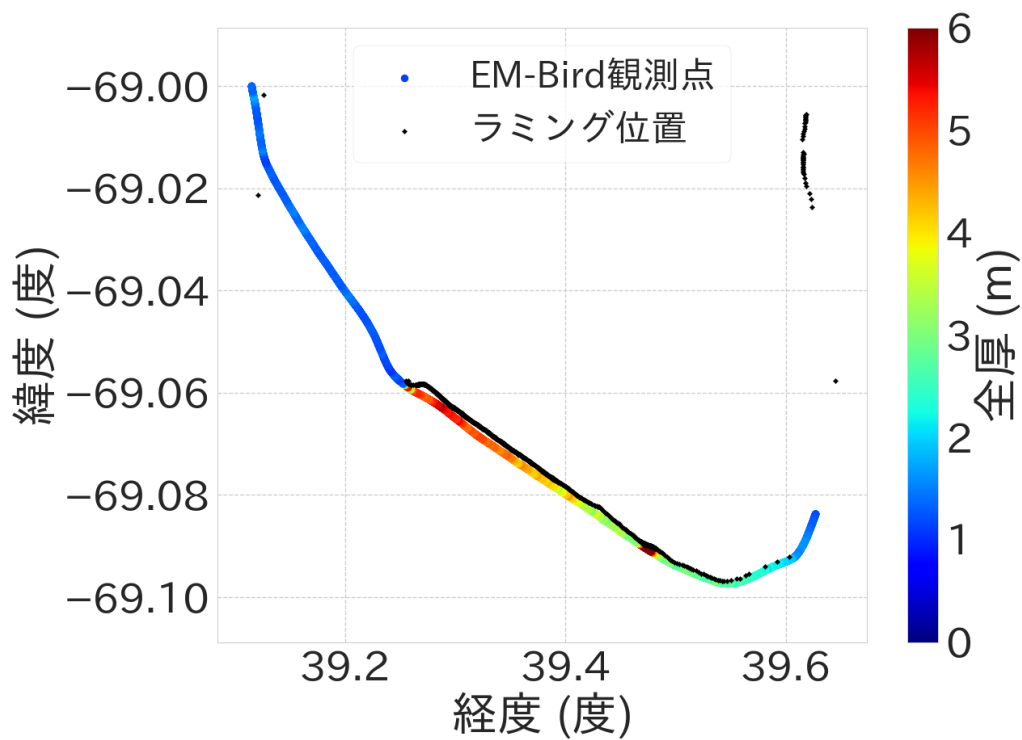


図 44 EM-Bird の観測点とラミング位置の座標比較

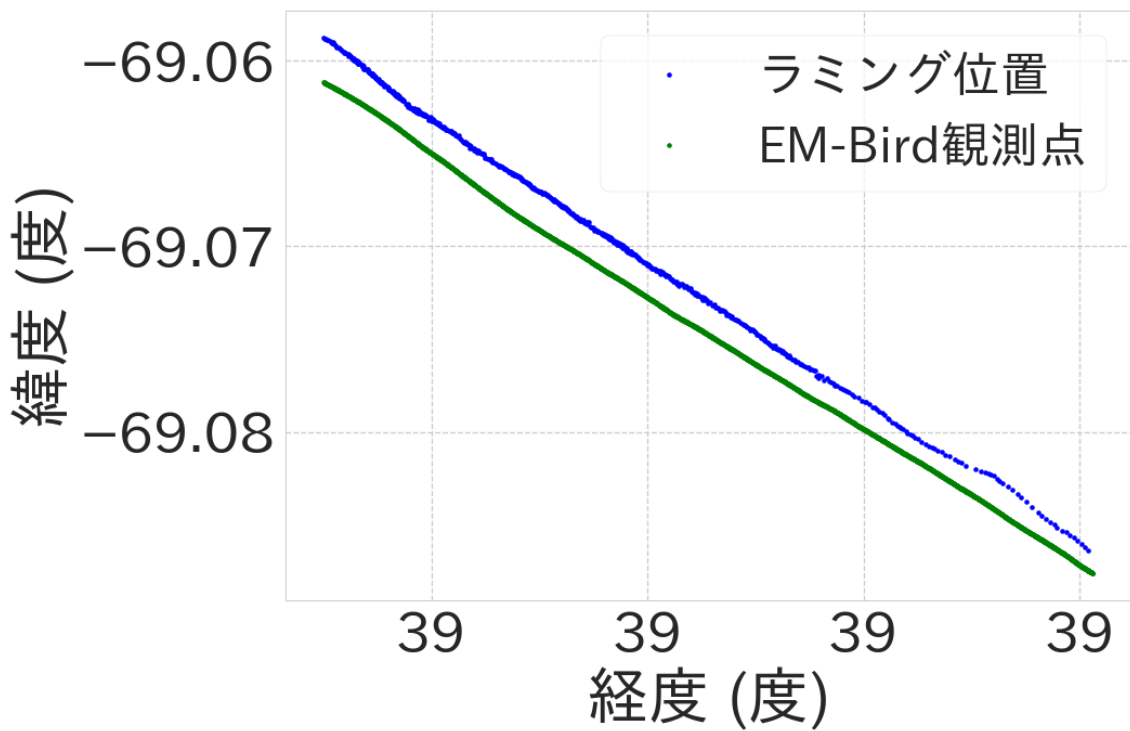


図 45 EM-Bird の観測点とラミング位置の座標比較 (区間 1)

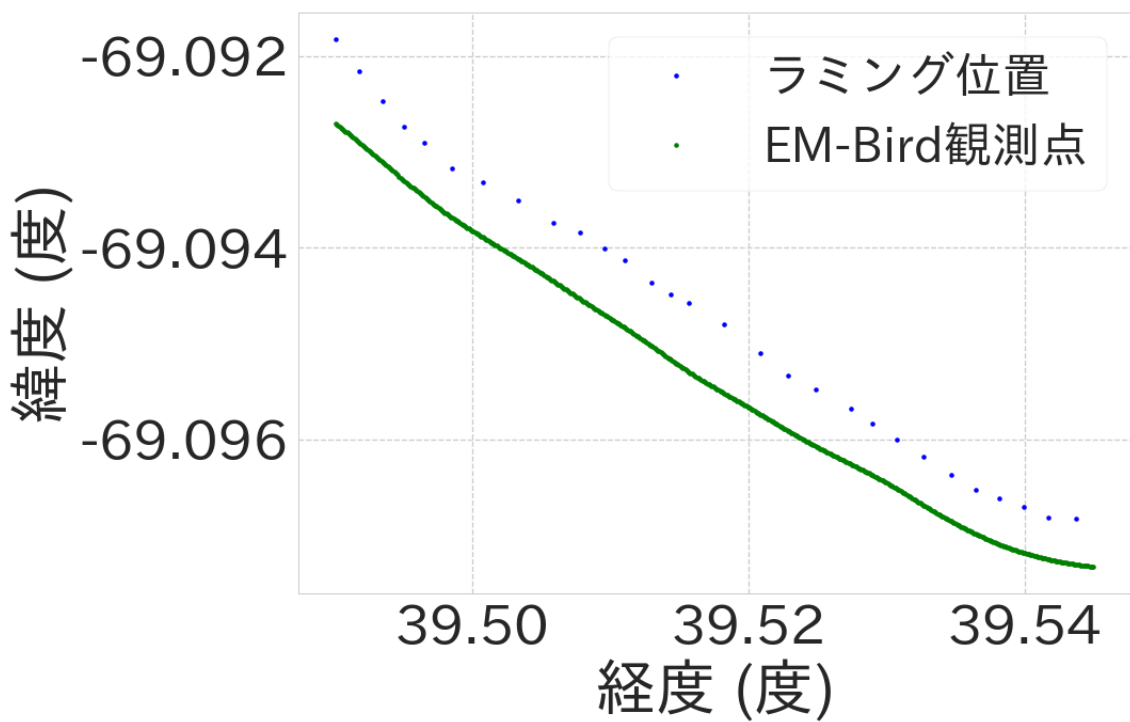


図 46 EM-Bird の観測点とラミング位置の座標比較 (区間 2)

これに対し船上 EM は、特にラミング航行時において船の動揺に由来するセンサーの揺れ、また同じ場所を複数通ることから一度砕氷された場所を計測してしまうなどの原因で計測値が不安定になりやすい。そのためこれまでの船上 EM データの利用は連続砕氷時が中心であった(例えば[38][39]などに利用実績がある)。

ラミング時の船上 EM 観測値の処理については、北見工業大学の星野らが注目し研究していた。星野ら(2016)[40]は、ラミング航行区間の全氷厚値として5分間ごとの最頻値を用いることを提案している。

ここで、ラミング前後の船上 EM 観測値の推移例を図 47 に示す。横軸はラミング停止時を 0 とした時刻であり、時刻 0 以降のみで船速がプロットされている(正の値となっているが、後進である)。ラミング停止後に比較的安定した値を指していることが読み取れる。砕氷が終わるとセンサーの揺れが収まること、ラミング後は基本的にセンサーが砕氷されていない場所を計測することから、最も正しく計測が行われていると考えられる。一方で、後進して停止した位置など、他の一部の行程でも全氷厚値は安定しうる。しかしこちらで計測されている値は、場合によってはバージンアイス(未砕氷の氷)でない氷や開放水面の影響を受けている。従って、単純に最頻値を取る方法では依然誤った観測値で安定したものを含む可能性がある。

これらを踏まえ、各ラミング時の全氷厚値を船上 EM 観測時系列データから抽出するアルゴリズムを考案した。その手順は以下の通りである。

1. ラミング停止時刻から 2 分間の船上 EM データを抽出する

ラミング後に船体が停止してから後進が始まるまでには、高い回転数で正転していた推進器の逆転を行うため時間がかかる。この停止時間が 2 分程度以下であり、その期間のデータを抽出する。

2. 抽出した 2 分間の中から安定した計測値のみを抽出し、有効計測値とする  
ラミング停止後も場合によってはそれらしい計測値が得られないことがある。不適切な値を取得してしまうことを防ぐため、最頻値の代わりに「一定回数以上計測された値」を全て取得し、安定して計測された有効計測値と判断した。今回は観測値を小数第 2 位で四捨五入した上で、1Hz で 120 秒間の合計 120 データ中に 10 回以上観測された値を有効計測値とした。

3. 有効計測値の中央値をラミング時全氷厚とする

有効計測値が複数ある場合は、その中央値を実際の全氷厚値とみなした。

この方法で選択された値を図 47 に赤線で示す。

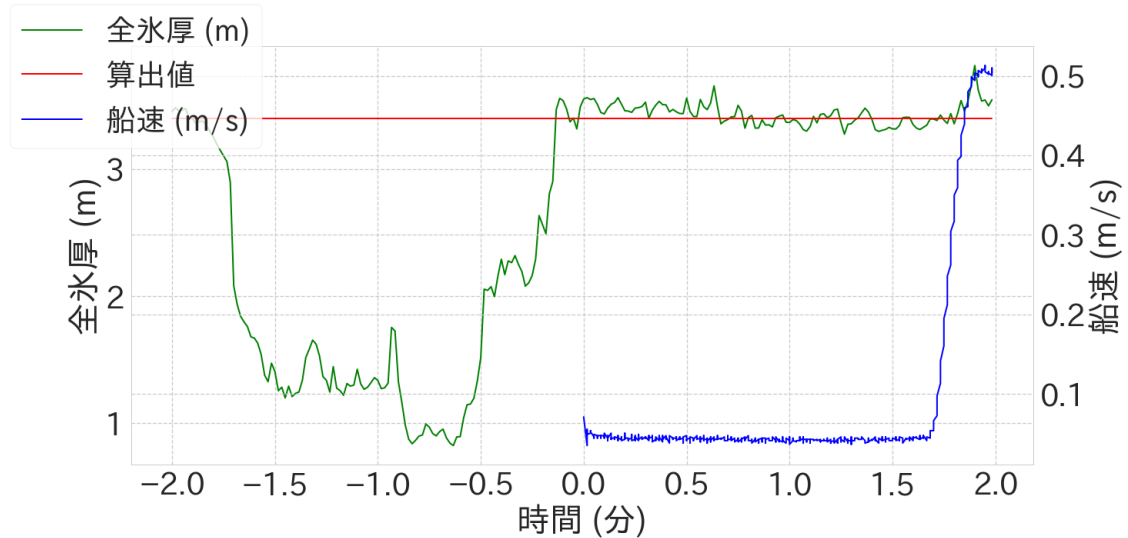


図 47 ラミング前後の船上 EM 観測値の典型例

以上のアルゴリズムにより、船上 EM の全氷厚データをラミングに組み込んだ。妥当性を確認するため、各ラミング回における全氷厚と貫入距離の推移を図 48 に、全氷厚-貫入距離の 2 次元頻度分布を図 49 に示す。JARE54 と 55 は船上 EM、JARE57 は EM-Bird のデータを用いている。JARE54 では EM のデータが一部欠損していたため、除外されている区間がある。またいずれも乱氷帯におけるラミングは除外されている([35]の情報から乱氷帯航行期間を特定し、該当するラミングを除外した)。

図 48 を見ると、例えば JARE54 の 500 回目前後の全氷厚変動や 1400 回目付近の全氷厚増加、JARE55 の 2000 回目付近の全氷厚現象、JARE57 の 600~800 回目付近などにおいて、全氷厚の増加・減少とともに貫入距離が減少・増加している傾向が読み取れる。2D ヒストグラムからも同様の関係が認められ、さらに年次ごとに比較すると接岸に失敗した JARE54 の全氷厚は比較的薄かったことが読み取れる。この年は図 41 から見ても例外的に航行時間に対してラミング回数が少ない。この年次の接岸失敗については定着氷の氷厚以外の原因があったことが示唆され、さらなる考察が必要である。また、JARE57 では 150 回目付近まで著しく貫入距離が短くなっている。これは助走距離が短く衝突速度の小さいラミングが行われているためである。これが意図的なものなのか、それともブ

ラッシュアイスの詰まりなどの理由でやむを得なかったのかは定かでない。

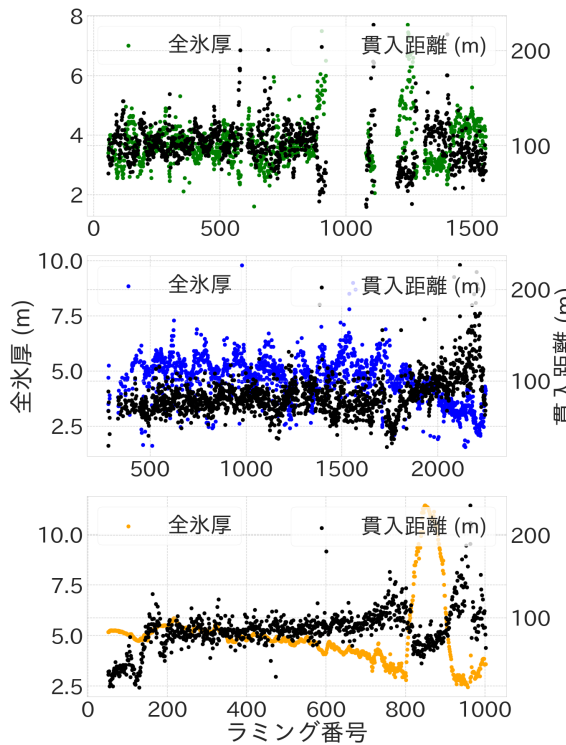


図 48 ラミング貫入距離と全氷厚の推移

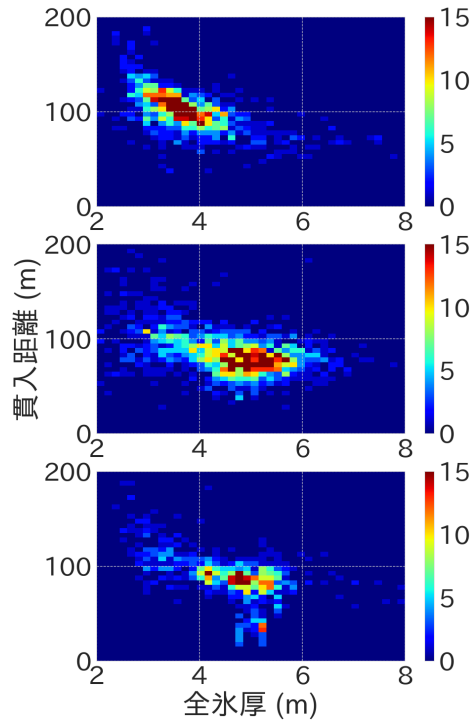


図 49 全氷厚と貫入距離の頻度分布

#### 4.5. 実質進出距離の計算

前節では物理的な意味合いを重視し、貫入距離と全氷厚との関係を調べた。しかしながら今回の目的のためには、ある全氷厚の場合にラミング 1 回あたりで実質的にどの程度船が進行できるかを知る必要がある。2.2 節で定義したラミング距離に関する指標は貫入距離と簡易進出距離の 2 つがあった。貫入距離は 1 回ずつラミングの物理現象を考察するには適切な指標であるが、ラミング 1 サイクルでの進出量を表す指標としても相応しいとは限らない。これに対し簡易進出距離は、2 回のラミングの位置変化として定義されている。その定義からラミング 1 サイクルでの進出量に近いと考えられるが、ここでこれが実質的な進出を表す指標となりうるかどうかを考察する。

2.4 節で説明したように、氷況が厳しい場合ラミング航行は左右に航路幅を広げながら進行する。簡易進出距離はこの左右方向の成分も計上してしまうため、実質的な進出距離よりも長く算出される。例えば、典型的な二本突きラミング航行中のラミング位置の推移を X-Y 平面上に投影し、図 50 に示す。黒の矢印が進

行方向である。青線で示した部分が簡易進出距離にあたり、実質的な進出は赤線で示した進行方向成分である。その差が一概には無視できない大きさであることが読み取れる。

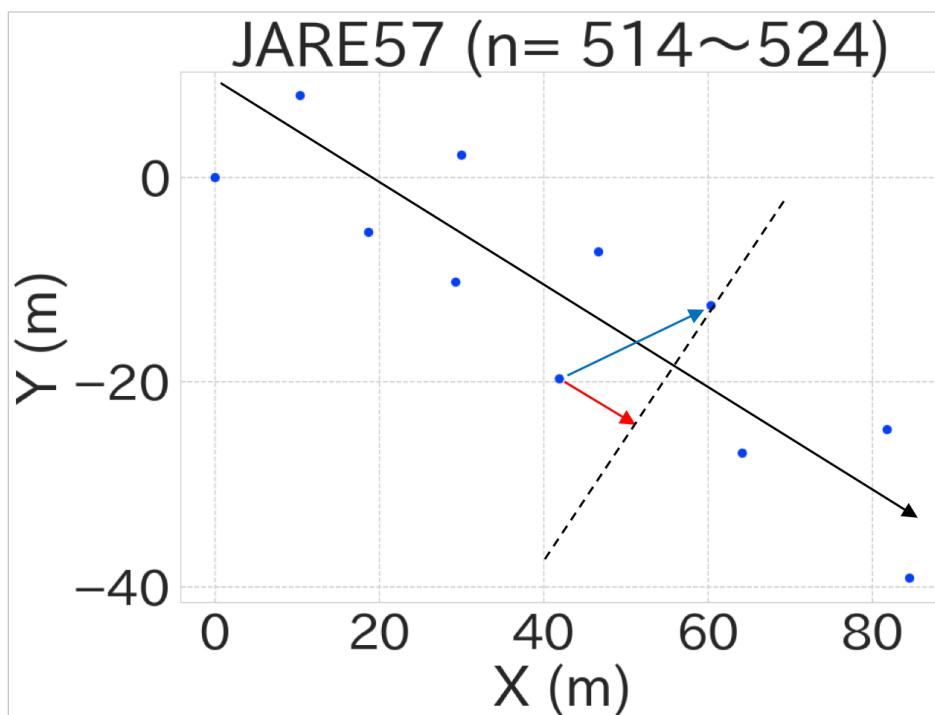


図 50 典型的な二本突きのラミング位置の推移

図 50 のような典型的な二本突きに限らずラミング航行時は砕氷幅を拡張しながら進むことが多いのは 2.4 節で述べた通りであり、一本突きを除くほとんどのラミングで簡易進出距離は進出を過大評価してしまうことになる。

この問題を解決するため、新しい指標として「実質進出距離」を定義する。これは簡易進出ベクトルの助走方向成分として計算する。

図 11～図 13 から、1 回のラミング位置変化に対して助走距離が十分に長く、概ね助走方向を進行方向とみなすことができることがわかる。これを用いて実質進出距離を計算する。ラミング助走開始点からラミング後停止点へのベクトルを助走ベクトル(厳密には助走と貫入を含めたベクトル)とし、助走ベクトルの単位ベクトルを助走方向ベクトルとする。また、前回ラミング位置から今回ラミング位置への位置変化を簡易進出ベクトルとする。簡易進出ベクトルと助走方向ベクトルの内積を取ることによって、実質進出距離が計算できる(図 51)。

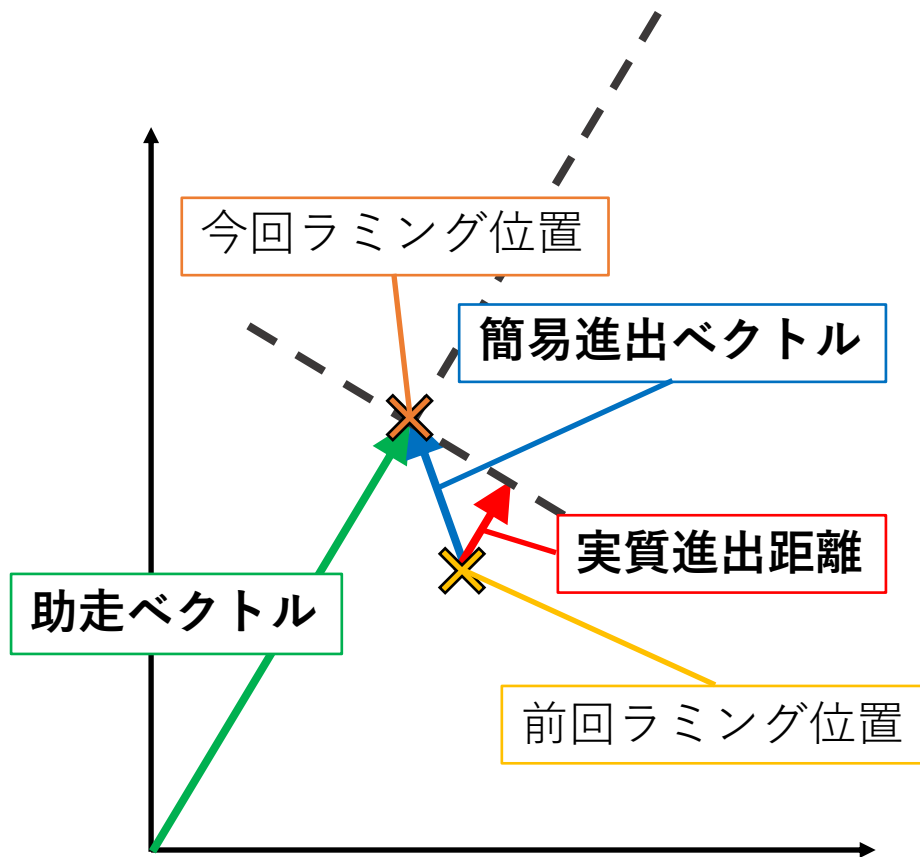


図 51 実質進出距離の模式図

このように計算した実質進出距離には、負の値が含まれる。例えば、図 52 に示した 10 回のラミングの助走+貫入中の軌跡を見ると、4 回目と 6 回目のラミングにおいて負の実質進出距離となることが読み取れる。この操船の原因は明らかではないが、砕氷幅の拡張を狙ったものであると推測される。今回はこのような実質進出距離 $<0$ として計算されたラミングは、後退を意味するものではなく、かつその回での進出は得られないがその後の進出に生きる必要なラミングであるとし、実質進出距離=0 と置換の上で除外することなく解析対象データに含めた。



## JARE54 (n= 1135~1145)

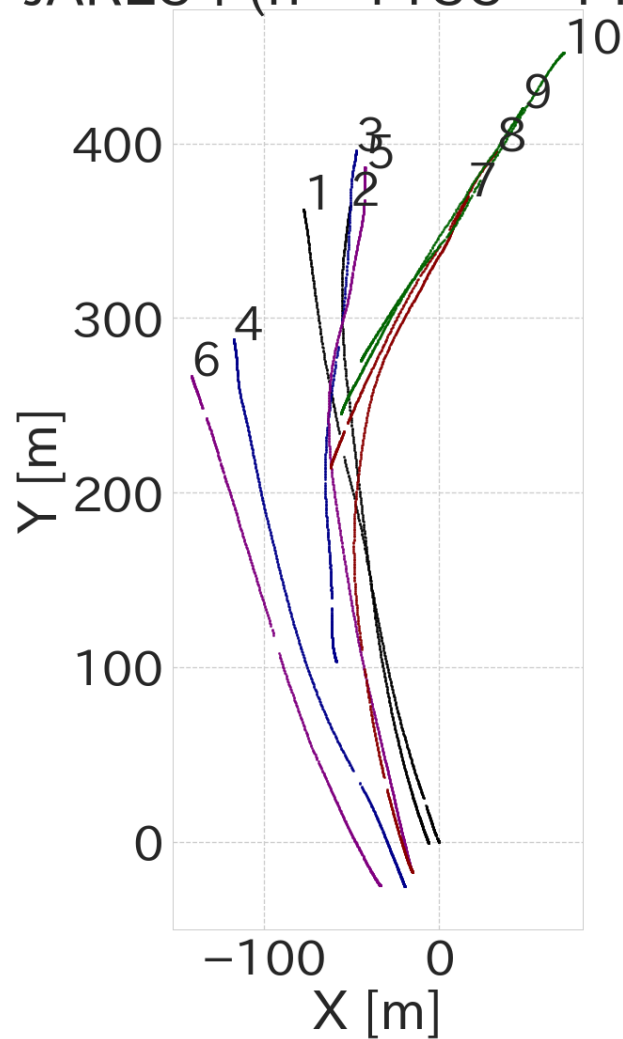


図 52 実質進出距離が負となるラミングの例

この計算方法の妥当性を確認するために、区間 1 と 2 において、

- ・ 各ラミングまでの累計簡易進出距離
- ・ 各ラミングまでの累計実質進出距離
- ・ 各ラミング位置の 1 回目のラミング位置(=始点)からの距離

をプロットし比較した(図 53, 図 54)。

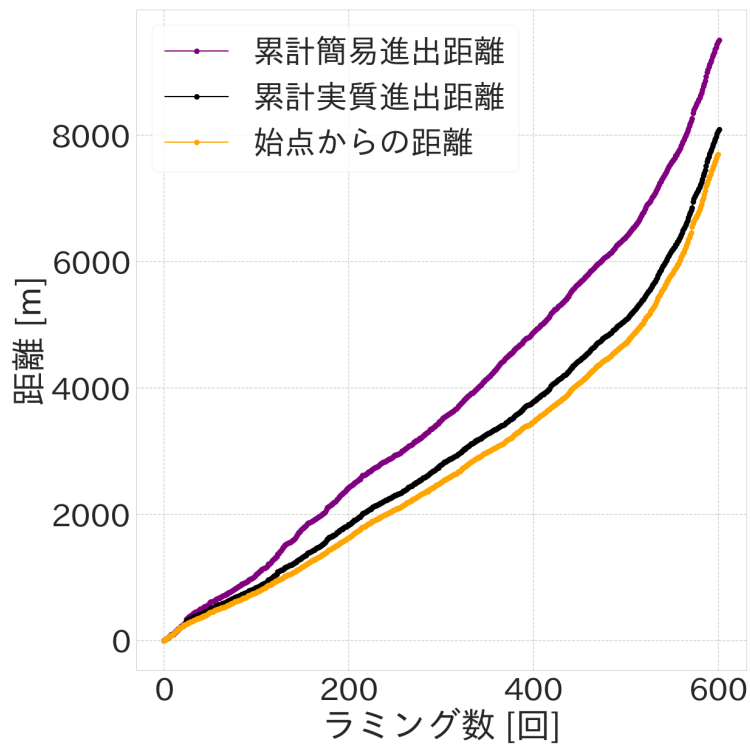


図 53 区間 1 における 3 種類の計算距離の推移

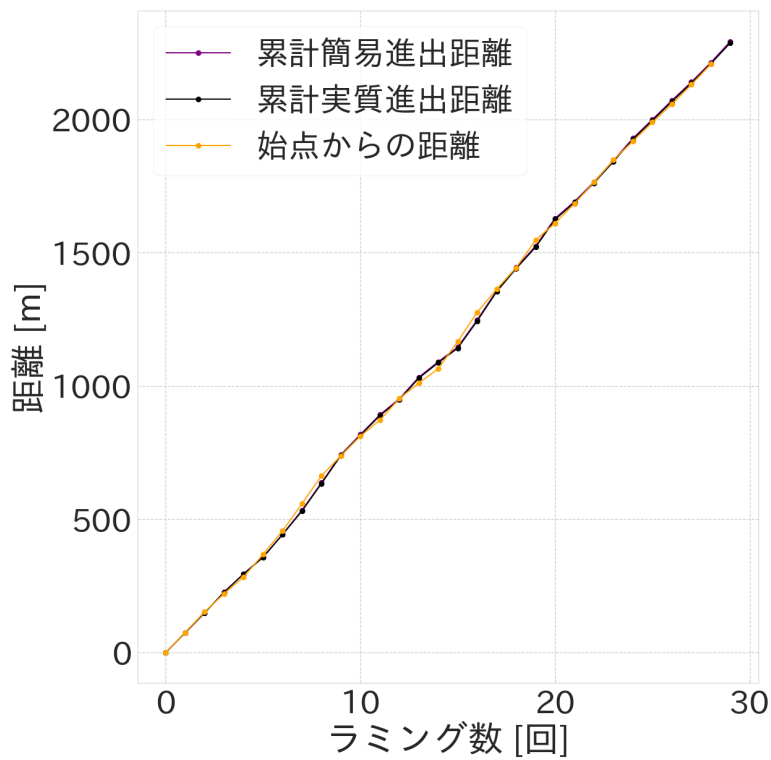


図 54 区間 1 における 3 種類の計算距離の推移

図 45, 図 46 から、この航跡は大きく見れば直線的であるため、始点からの直線距離がそれまでの各ラミングの実質的な進出の合計とほぼ等しくなるはずである。区間 1 においては氷が厚く、二本突きなどのラミングが行われている(例えば、図 12~図 14 のラミングを含む)。区間 2 においては比較的氷が薄く、一本突きで進んでいることが図 46 からわかる。

これを踏まえて図 53 と図 54 の結果を考察する。まず図 54 においては簡易進出距離、実質進出距離、始点からの距離がほぼ一致する。これは一本突きで進行していることから納得できる。これに対して、図 53 では累計簡易進出距離が始点からの距離とやや離れた値で推移している。これは二本突きによって生じた左右方向成分を計上した効果であると考えられる。今回計算した実質進出距離を用いると、この差は大きく縮まっている。簡易進出距離から砕氷幅拡張の為の左右方向成分を正しく取り除くことができたためと考えられる。依然として若干過大評価側の計算結果となっているのは、航跡が全体として完全な直線でないことを踏まえると理に適っている。

これを踏まえ、本解析ではこの実質進出距離を、正しく進出度合いを示す指標として用いることとした。JARE57 の 2 区間だけでなく、JARE54, 55 を含めた全てのラミングについて実質進出距離を計算した。

#### 4.6. 全氷厚と実質進出距離の関係

以上により、ラミング時の全氷厚と実質的な進出を表す指標が算出され、対応づけられた。ここで、全氷厚と実質進出距離の関係を定式化することを目指す。まず 4.4 と同様に、各ラミング回における全氷厚と実質進出距離の推移を図 55 に、全氷厚-実質進出距離の 2 次元頻度分布を図 56 に示す。

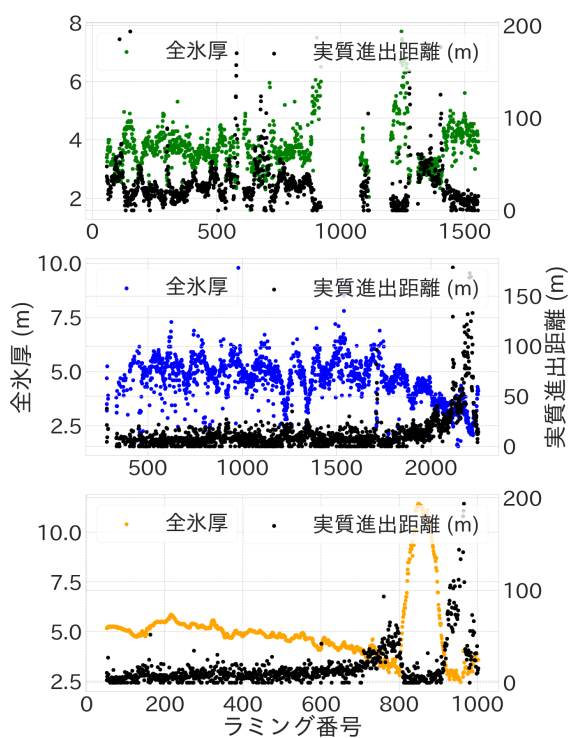


図 55 ラミング実質進出距離と全氷厚の推移

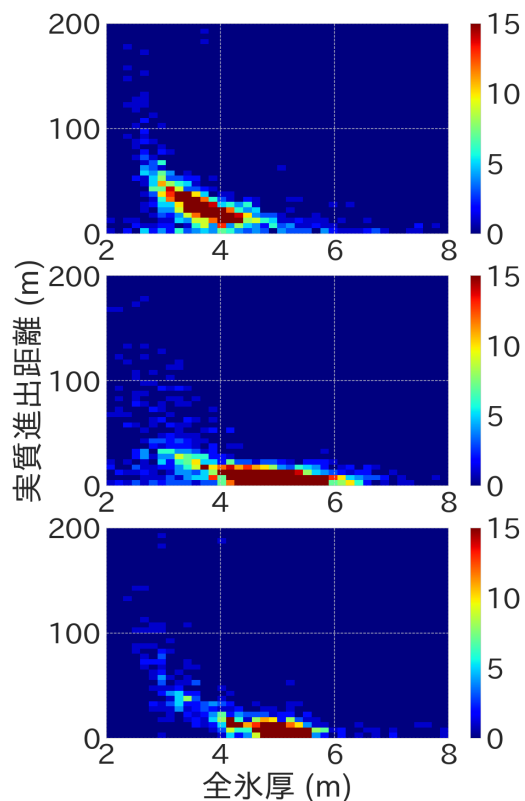


図 56 全氷厚と実質進出距離の頻度分布

次に、この2変数の関係を定式化することを目指す。

まず貫入距離の定式化に関しては、岸ら(1996)によって考察されている([41])。この中で岸らは単純なエネルギー収支モデルを用い、ラミングの貫入距離が砕氷抵抗の-1乗に比例するとした。また平坦水中の砕氷抵抗としては、模型線および実船によるデータからVanceやLewisらにより経験式が得られており[32]、いずれも砕氷抵抗は氷厚の2乗に比例するとされている。これらより、貫入距離は氷厚の-2乗に比例すると考えられる。

これに対し今回使用する実質進出距離は、物理的な解釈が難しい。まず2回のラミングの位置変化である簡易進出距離は、どの位置を砕氷するかという多様な操船パターンの影響を受けている。さらにその進行方向成分のみを取り出す処理によって実質進出距離を算出しているため、複数の複雑な要素の影響を受けており、物理的な考察に基づいて数式モデルを構築するのは困難である。

これを踏まえ、今回は乱暴ではあるが、貫入距離だけでなく実質進出距離も全氷厚の-2乗に比例すると仮定して回帰分析を行なった。それぞれの海氷に対する

散布図と回帰分析の結果、さらに各全氷厚値に対する小区間平均(全氷厚を 0.3m ごとに区切って各区間に含まれるサンプルの貫入距離または実質進出距離を平均したもの)を合わせて図 57～図 62 に示す。なおこの解析においては、4.4 節で述べた JARE57 の 150 回目付近までの助走距離が短いラミングは除外した。

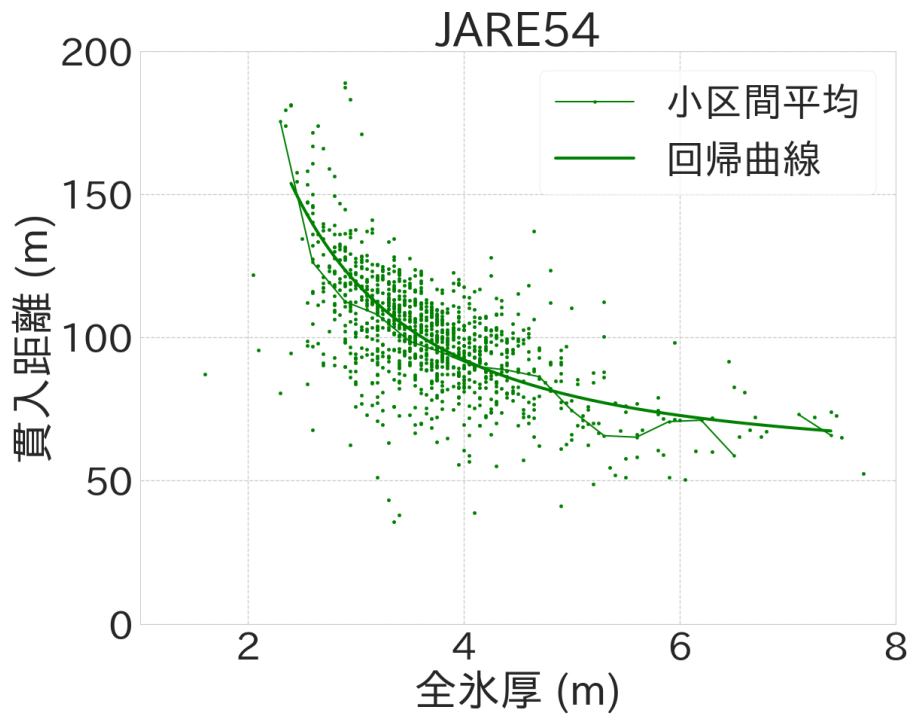


図 57 全氷厚と貫入距離の関係 (JARE54, 船上 EM)

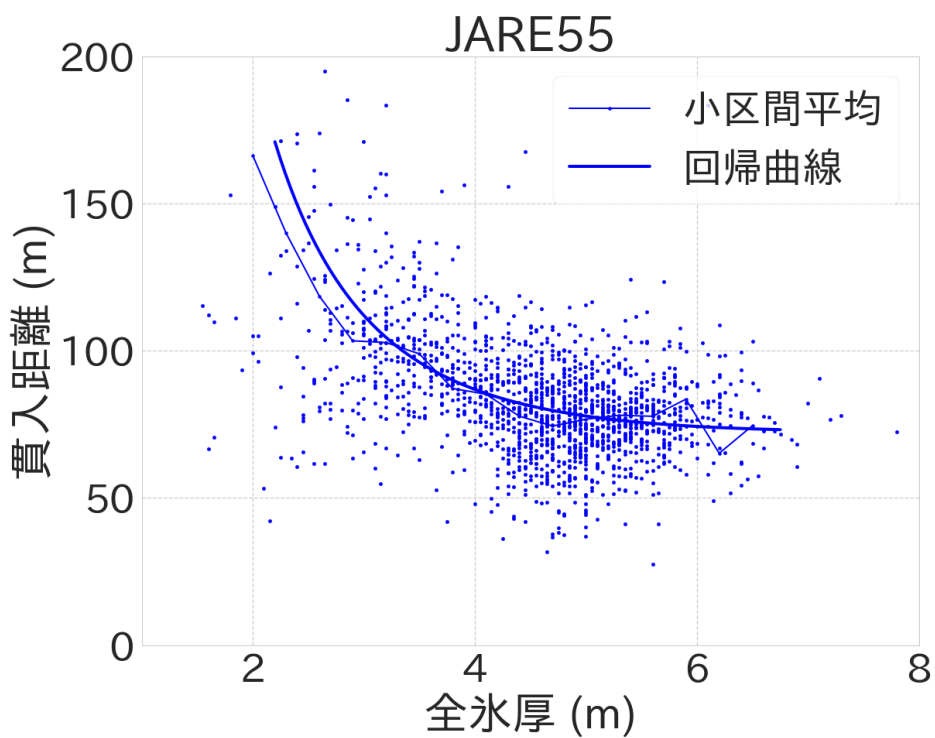


図 58 全氷厚と貫入距離の関係 (JARE55, 船上 EM)

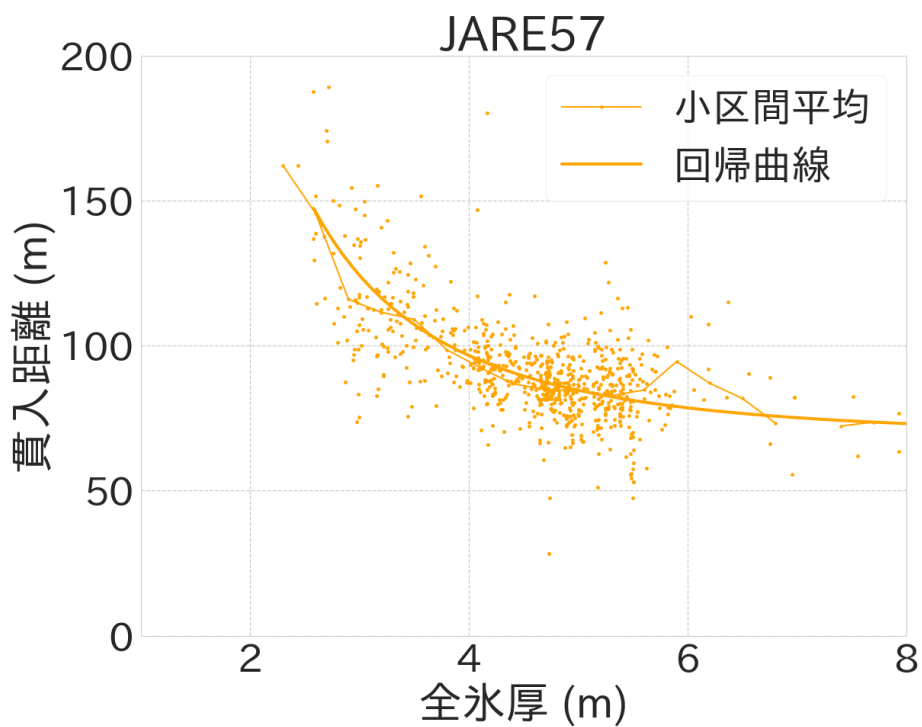


図 59 全氷厚と貫入距離の関係 (JARE57, EM-Bird)

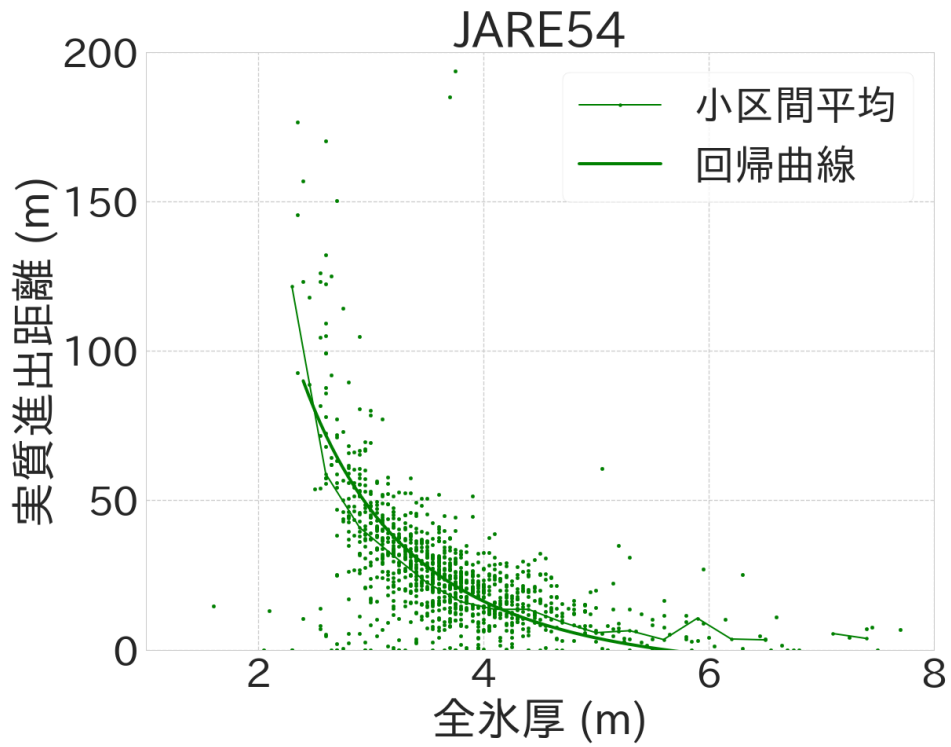


図 60 全氷厚と実質進出距離の関係 (JARE54, 船上 EM)

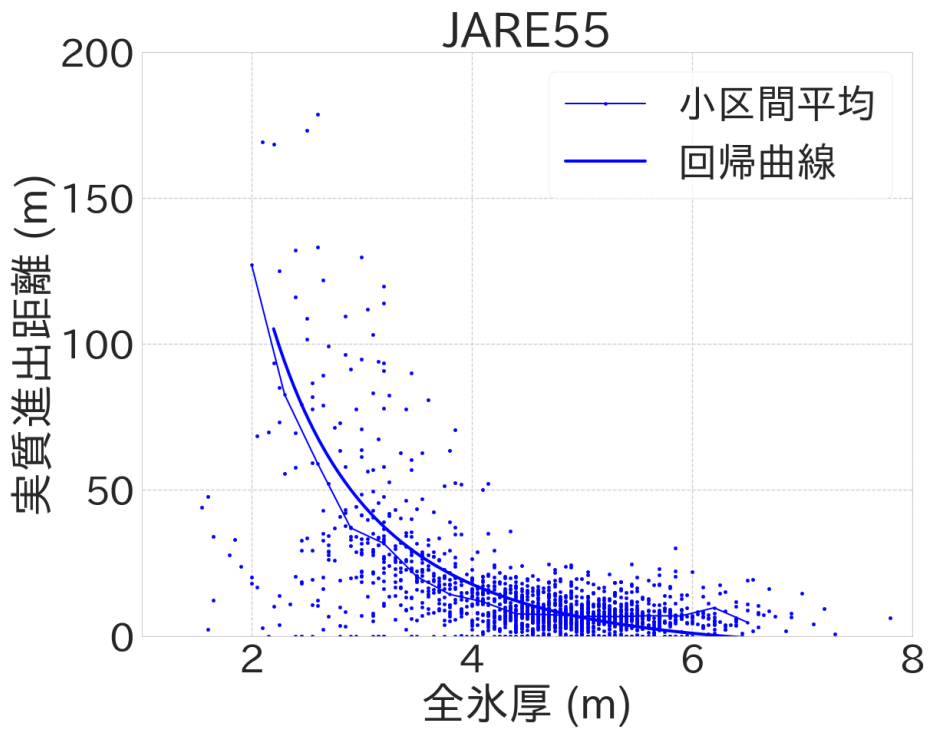


図 61 全氷厚と実質進出距離の関係 (JARE55, 船上 EM)

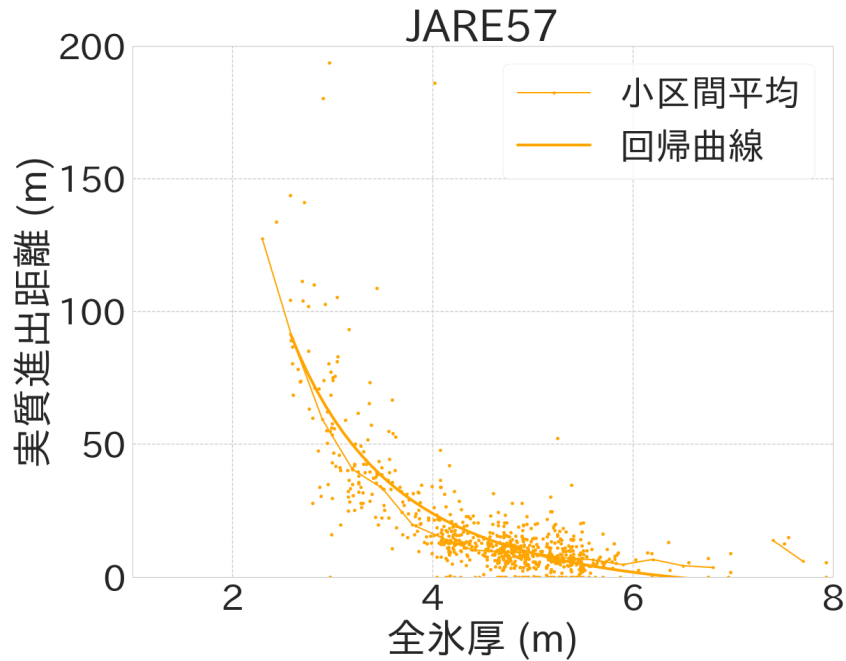


図 62 全氷厚と実質進出距離の関係 (JARE57, EM-Bird)

まず図 57～図 59 において、小区間平均と回帰曲線が概ね一致しており、物理的な考察に近い結果となった。分布のばらつきが大きいのは、貫入速度や貫入角の違いを考慮していないことが原因として考えられる。同様に図 60～図 62 においても、小区間平均と回帰曲線は一致しないものの大きく外れてはいないとみなし、今回はこの回帰モデルを用いて計算を進めることにする。まず JARE54 と 55 の船上 EM を用いたデータのみを結合し、これらから回帰曲線を作成した (図 63)。この回帰式を用いて JARE57 の EM-Bird 観測線区間のラミング回数を予測する。



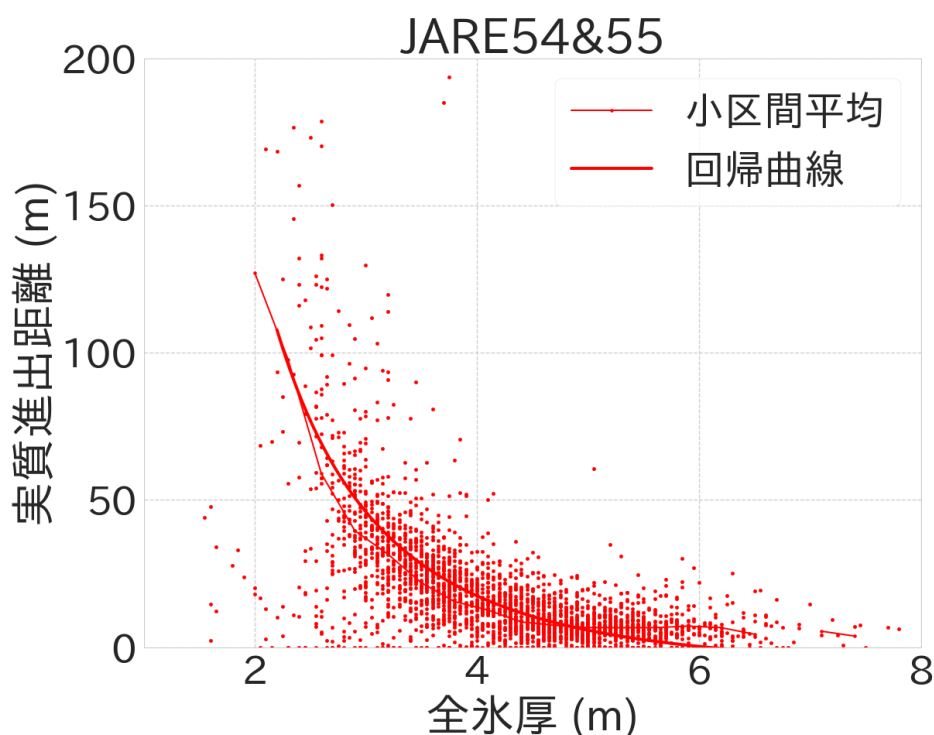


図 63 全氷厚と実質進出距離の関係 (JARE54 と 55, 船上 EM)

#### 4.7. 航行シミュレーション

4.6 節で得られた関係を用いて、ある全氷厚分布がわかっている観測線上を仮想的に航行し、そのラミング回数を予測する。このとき、最も簡単な進出モデルとして次のものを用いる。

- ・ モデル 1

- ① 現在地をスタート地点とする。ラミングのカウント回数を 0 とする。
- ② 現在地の全氷厚値を取得し、対応する進出距離を図 63 の関係から取得する。
- ③ その距離分進行し、新しい現在地とする。ラミングのカウント回数を 1 増やす。
- ④ 終点にたどり着いていれば、計算を終了する。たどり着いていなければ、②に戻る。

このモデルの欠点として、局所的な全氷厚変化に弱いことが考えられる。例えば局所的に全氷厚値の小さい地点で停止した場合に、次の進出距離が大きく得られてしまう。また、1 回のラミングの途中で局所的に厚い氷があってもその全氷

厚は考慮されず、そのまま通過してしまう。こうした問題を解決するため、エネルギー消費の考え方をを用いて経路上の全氷厚値全体を考慮するモデルも用意した。

ラミングをエネルギー的に取り扱う方法は以前からよく取り入れられており(例えば[32][40])、今回は貫入時の運動エネルギーが全て砕氷抵抗に使われて停止するという考え方に基づいた。氷貫入中に推進器によって得られるエネルギーを考慮するなどいくつかのラミングモデルが考案されているが、今回は単純化のためこうした要素は無視した。この下で、以下のモデルにしたがってシミュレーションを行った。

・ モデル2

- ① 現在地をスタート地点とする。ラミングのカウント回数を0とする。
- ② ラミングで貫入を始めたとし、持っている運動エネルギーをEとする。
- ③ 現在地の全氷厚値を取得し、対応する単位距離進出あたりに失うエネルギー $\varepsilon$ を図63の関係を用いて計算する(後述)。
- ④ 次の全氷厚観測点まで進行(4m程度)し、新しい現在地とする。進行した距離と単位距離進出あたりに失うエネルギー $\varepsilon$ から、消費したエネルギーを計算する。
- ⑤ 持っている運動エネルギーから消費したエネルギーを差し引く。持っている運動エネルギーが0以下になった場合、船体停止とし、ラミングのカウント回数を1増やす。運動エネルギーが残っていれば、③に戻る。
- ⑥ 終点にたどり着いていれば、計算を終了する。たどり着いていなければ、②に戻る。

ここで用いる単位距離進出あたりに失うエネルギーは、全氷厚一定の場合の関係式 $E = \varepsilon \times D_r(h)$ を変形して $\varepsilon = E/D_r(h)$ となり、全氷厚の関数として表せる。 $D_r(h)$ は図63で求めた実質進出距離である。なお、今回は各ラミングの衝突速度の違いを考慮していないため、各ラミング時における運動エネルギーは全て等しくなり、 $E=1$ とおくことができる。すると単位距離進出あたりに失うエネルギーは $1/D_r(h)$ となり、図63の関係から得た $D_r(h)$ の逆数を取ることで得られる。

これらの2つのモデルを用いてシミュレートした航行と実際の航行を比較した。

#### 4.8. 結果

表 12 に実際のラミング回数と計算されたラミング回数を、図 64, 図 65 にラミング回数と各種進行距離の推移を示す。図 64, 図 65 では図 53, 図 54 で示した実績値に加えて2つのモデルで計算された累積進行距離をプロットし、実績値と計算値の推移を比較した。

表 12 ラミング回数の実績値と計算値の比較

	実際のラミング回数	モデル 1 計算結果	モデル 2 計算結果
区間 1	601	592	592
区間 2	29	32	32

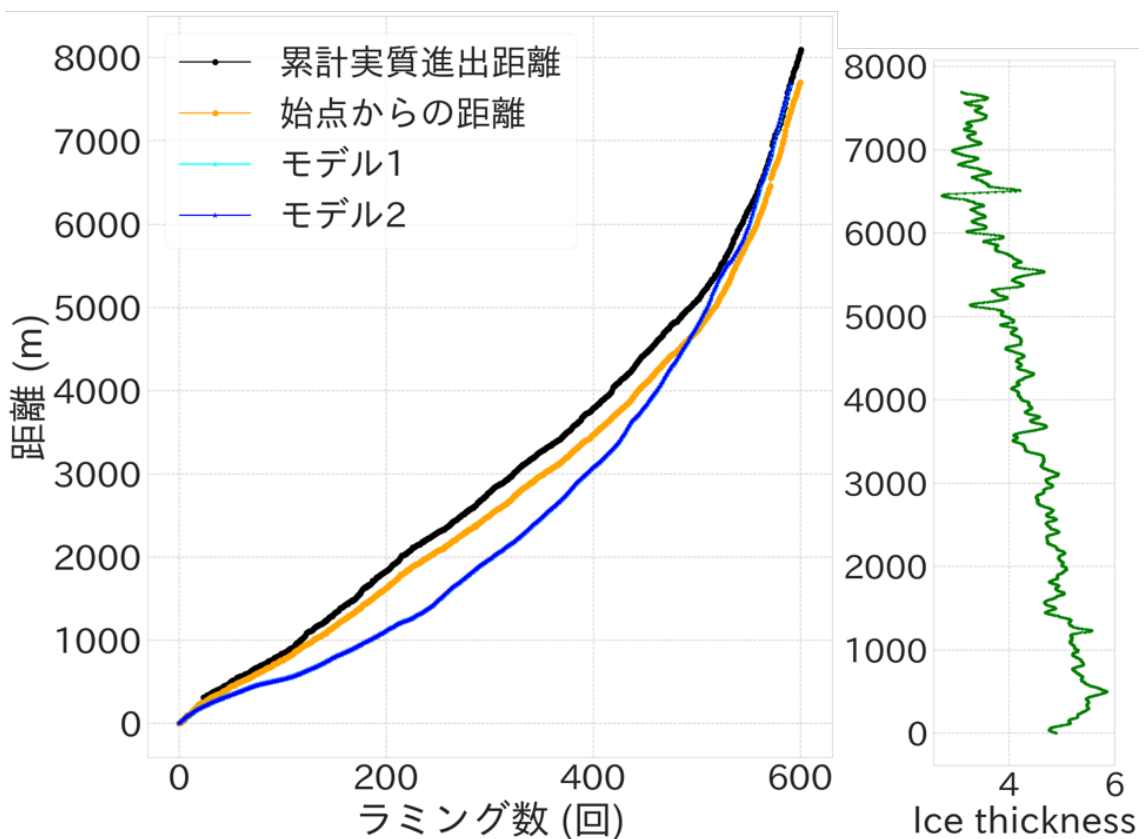


図 64 ラミング回数に対する進行距離の比較 (区間 1)

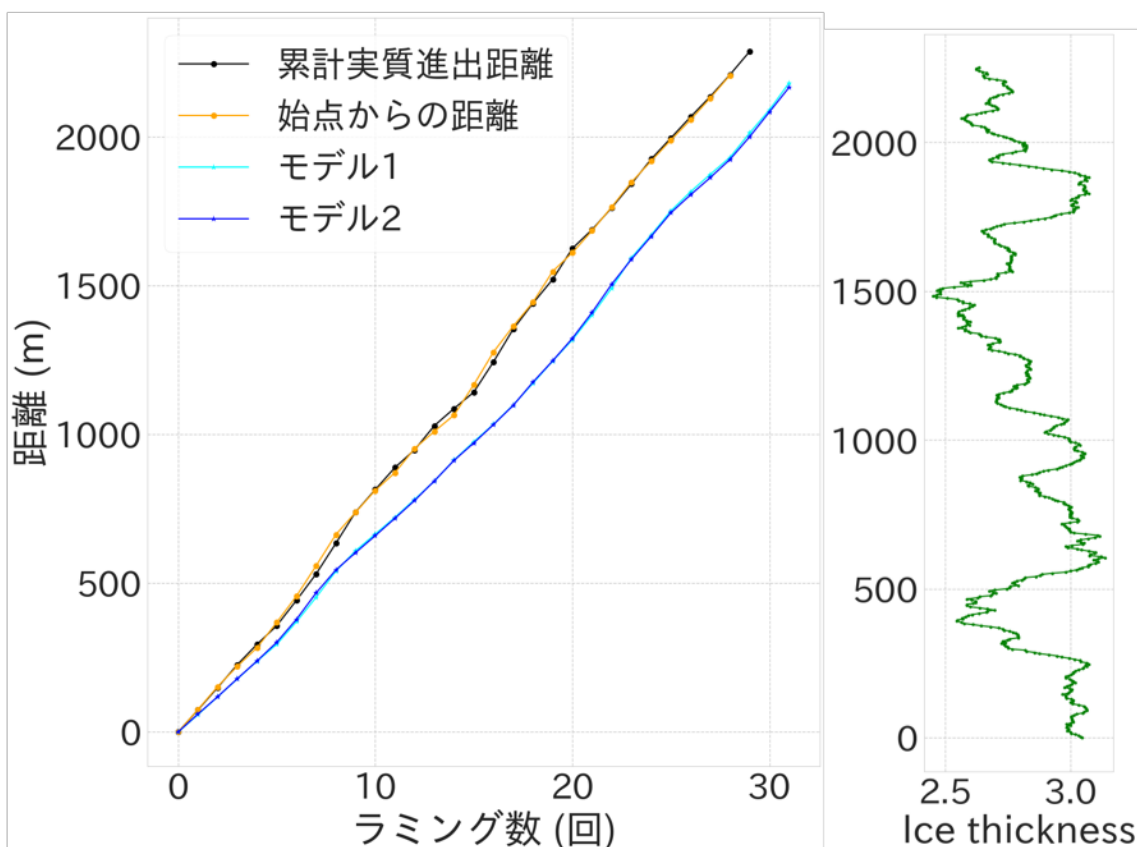


図 65 ラミング回数に対する進行距離の比較 (区間 2)

まず表 12 からは良い精度で所要ラミング回数が計算されているように思われ、図 64, 図 65 においても概ね実際の航行の傾向を表しているように見える。しかし図 64 を詳しく見ると、実際には区間 1 においてシミュレーションにおける船の進行が実績よりも遅れたのち、最終的に追いついて帳尻が合っているだけであることがわかる。推定ラミング回数の誤差は 600m 地点付近、実績値で 75 回目のラミング付近で最大となり、56%にも上った。この付近では全氷厚が 6m 近い大きな値を取っており、こうした氷況では回帰分析による予測進出距離が過小評価されていると思われる。逆に全氷厚 4m 以下程度になるとやや予測進出距離が過大評価される傾向にあり、実績値を追いつき、さらに追い抜いてしまっている。加えて全氷厚 3m 以下である区間 2 においては予測進出距離が過小評価される傾向にあった。誤差は 800m 地点付近で 33%をとった。

4.1 節で述べたように、近年氷況が厳しかった年の氷海航行日数の変動は最短 11 日から最長 27 日であった。これをより精度よく見積もることを目指すには、今回の 56%, 33%の誤差は大きい。この大きな誤差を生んだ全氷厚 6m 程度の海域

に対しては、進出距離の予測精度を改善する必要がある。実際に図 63 からも 6m 付近の大きな全氷厚と 2.5m 付近の小さな全氷厚において予測曲線が過小評価であることが読み取れるため、妥当な結果であると思われる。航行時間予測の精度向上のためには予測曲線を改善する必要がある。

そのために取り組むべき問題点として、以下の 2 つを挙げる。まず 1 つ目に、船上 EM 観測に失敗値が含まれており、これが有意な影響を与えていることが考えられる。図 63 には、全氷厚 2m 付近かつ進出距離が小さい群が見受けられる。図 66 にこの付近に分布するラミングの番号を図示した。色で塗りつぶしたラミングについて EM 値の変化と船の軌跡を調べたところ、灰色で示した 6 回はおよそ前後回のラミングと同じ氷厚で、実際に進出距離が短くなっていた。この原因は特定できていない。これに対し、計 10 回の赤で示した回におけるラミング停止後 2 分間の EM 観測値の時系列変化は、前後回のラミングのそれと比べて明らかに小さい値で安定していた。さらにこれらの航跡を確認すると、これら 10 回全てが二本突きまたは三本突きで左側を突くものであった。EM センサーが船首右舷側に設置されていることを鑑みると、砕氷後の水路を一部捉えてしまい、観測氷厚値が低下した状態で安定計測となった可能性が非常に高い。今回の船上 EM 観測値抽出アルゴリズムでは「安定計測した値」の抽出には成功したが、こうした「安定計測でも誤りのある観測値」の除外も必要であり、その手法は今後の課題である。

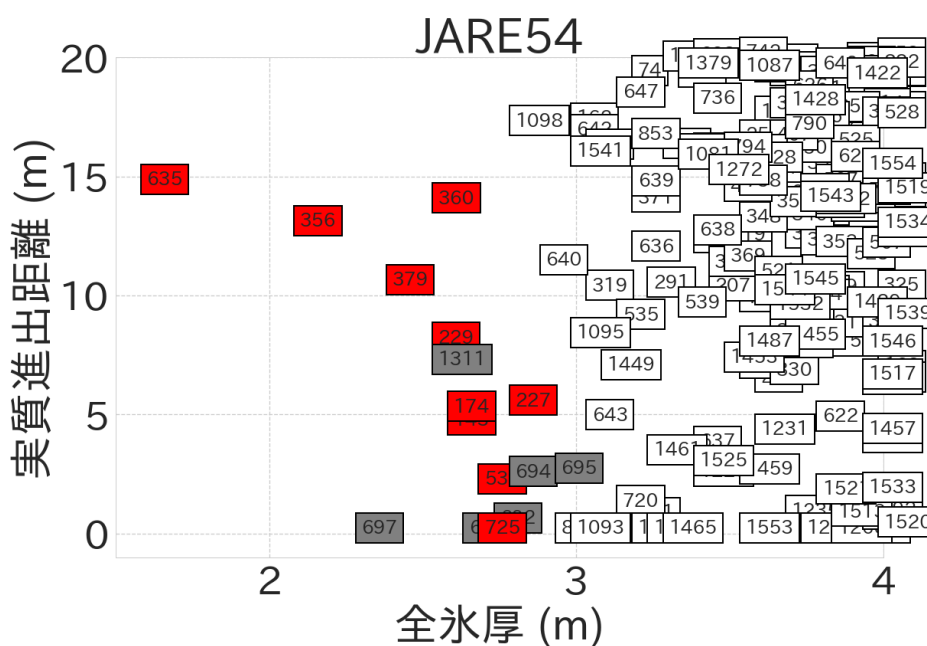


図 66 各ラミング番号における全氷厚と実質進出距離 (一部)

2つ目に、回帰モデルの問題が挙げられる。4.6節で述べたように、実質進出距離は操船方法など複雑な要素の影響を受けており、全氷厚の $-2$ 乗値を用いて定式化できると仮定した今回の単純化が不適切である可能性がある。

また、今回の平坦氷区間においてはラミング進出モデル 2 を用いてもモデル 1 の計算結果とほとんど変化がなかった(全氷厚変化が十分緩やかであった)。将来的にリッジが存在する区間に対しても航行時間予測を行うためにはモデル 2 のような計算が必要になると考えられるが、まずはより単純な平坦氷区間での予測精度を改善することが先に取り組むべき課題であり、この場合は単純なモデル 1 を使用しても十分である。

#### 4.9. 結論

本解析により、次のような結果が得られた。

- ・ 船上 EM のデータは、ラミング航行中においても活用できそうである。しかしながら EM の誤計測値を除外できていない問題などが残っており、その信頼性や精度は未だ明らかでない。
- ・ ラミングの実質的な進出を表す指標として、ラミング 2 回の位置変化のうち助走方向成分を抽出したものをを用いることができる。
- ・ ラミングの実質進出距離が全氷厚の $-2$ 乗に比例すると仮定してモデルを作成し、航行シミュレーションを実施した。事前に得られる情報のみから予測を行う道筋が立ったが、現在の計算では最大で 56%の誤差を生じてしまった。実用的な予測のためには予測曲線の改善が必要である。

## 第5章 まとめと将来課題

### 5.1. 本研究の成果と課題

本研究での成果と今後の課題をまとめると以下のようなになる。

- ・ 2.3 節において、船体挙動データからラミング区間を自動で抽出するアルゴリズムを考案し、プログラムを作成した。ラミングの定義によっては抽出しきれないものや、誤ってラミングとみなしてしまうものもあるが、基本的な解析を進めるには十分な精度で抽出を行うことができた。これにより今後は自動抽出したラミングデータから研究を行うことができ、解析の幅が広がった。本データを駆使したさらなる研究の発展が

望まれる。

- 2.4 節において、これまで研究対象とされてこなかったラミング航法についての情報を整理した。これらの情報は、実質進出距離の計算や船上 EM データの観測失敗状況などを考察する上で有用であった。今後しらせ実海域航行データを分析する際にも基礎知識として役立つと考えられる。また、今回は現場の現状や知見をまとめるにとどまったが、将来的には実データと照らし合わせ各航法の航行効率等について研究を進めることが望まれる。
- 3.4 節において、頻度が少なく貴重なデータである実海域ラミング旋回について解析を行った。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ることがわかった。現段階ではサンプル数が 4 と非常に少ないため、今後の実海域データも合わせて検証し、信頼性を高めることが望ましい。
- 3.5 節において、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を検証した。結果として、後進時に後方に十分な水空きがある場合は助走距離を長く取ることが望ましいと思われる。しかしながら、後方にブラッシュアイスが多く溜まるなどで後進が阻害されるような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。
- 4.4 節において、船上 EM のデータは、ラミング航行中においても活用できそうであることが示された。ラミング時の船上 EM のデータから確からしい全氷厚を抽出するアルゴリズムを考案し、プログラムを作成した。ラミング貫入距離との対応から、概ね正しく算出できていると考えられる。しかしながら、EM センサーが誤った全氷厚値を計測して安定する場合もあることが示唆され、これを除外する手法も検討が必要である。この問題を含め、本手法によるラミング時全氷厚値の信頼性や精度は明らかでないため、他の氷厚観測データを用いて確認することが必要である。例えば JARE57 の船上 EM データを解析して使用し、航跡沿いの EM-Bird 観測データと比較するなどの方法が挙げられる。
- 4.5 節において、ラミングの実質的な進出距離を表す指標を考案した。ラミング 2 回の位置変化のうち助走方向成分を抽出することで算出できる。この指標が実際の進出を精度よく表していることを、直線的な 2

航行区間における検討により示した。今後の解析においても、ラミング進出効率の評価を試みる場合等で本指標が役に立つ可能性がある。

- ・ 4.6 節において、貫入距離が全氷厚の-2 乗に概ね比例することが示された。これは既往研究の理論に基づく考察と一致する。今回の解析は衝突速度のばらつきは考慮していないため、これを組み込んだ解析を行うことで、衝突速度を組み込んだ既存モデルの検証も行うことができると考えられる。
- ・ 4.8 節において、実質進出距離と全氷厚の関係の経験式を用い、特定の航行区間における所要ラミング回数の予測計算を試みた。事前に得られる情報のみからおよその予測が立てられたことは今後につながる一歩であったが、途中最大で 56%の誤差を生じ、実用的な水準には至らなかった。誤差の 1 つの明確な原因として、全氷厚 6m 程度以上と 3m 程度以下における予測実質進出距離の過小評価が挙げられる。この解決のためには、EM の誤計測値を除外する、回帰モデルを改善するなどが必要であると考えられる。

## 5.2. 今後の研究への提案

上述の本研究における課題に加え、以下のような研究を今後行うことを提案する。

### ・ 散水効果の検証

これまでしらせの散水効果の検証において、往復路で行われているラミングの膨大なデータは、氷況の変化による影響を取り除くことができなかつたため使用されてこなかった。代わりにある海域で散水 ON/OFF のラミングを一定回数ずつ実施することで行ってきた。こうした試験でサンプル数を増やそうとすると多大な時間がかかるため、これまでは限られたラミング回数からその散水効果を検証しようとしてきた。これに対して、今回船上 EM のデータをラミングに自動で組み込むことができるようになったため、散水効果の検証に往復路のラミングデータを活用できる可能性がある。

### ・ リッジ帯における航行時間予測

第 4 章で扱った航行時間の予測は、全氷厚が安定した平坦氷を想定している。一方で、JARE59 ではリュツォ・ホルム湾南西部のリッジの多い区間において EM-Bird 観測を実施しており、しらせも一度この周辺を航行している。こうし



たデータを活用し、リッジがある場合に予測精度にどのような影響が出るかも検証しておく必要がある。平坦氷での予測精度が十分に得られた後に取り組むべき課題である。

- ・ ラミング航法の分類

JARE59 では複数のラミング航法を実施する試験を行い、各航法に対する船体挙動データ等の取得を行なった(付録2)。こうしたデータから過去のラミング航法の分類が可能になれば、各航法に対する進出効率を比較できるようになると期待される。この点も将来課題である。

## 付録 1 JARE59 連続砕氷試験結果 (散水による速度変化と燃料消費)

2018年1月28日, 2月14-15日に連続砕氷試験を実施し、過去の砕氷試験と同様に散水による船速の変化を氷海モニタリングシステムによる記録から定量化することを目指した。同時に操縦室のコンソール画面に出力される燃料流量を記録し、散水による燃料消費量の変化を調べた。

速度については最も長くデータが取れて氷況も安定していた2月14日の結果を図67~図74に示す。速度を赤でプロットした区間が散水ON、青がOFFであり、黒は軸回転数である。散水以外の原因による速度変化が大きく、散水の有効性は示せなかった。これは時間の都合で主に海底地形測量と同時に試験を実施したため、軸回転数を一定に保てなかったことや、航路を自由に決められずリッジが途中に含まれたことなども影響している。20分あまりにわたり安定した氷況で軸回転数一定を保って散水ON/OFFを繰り返すことができた区間(図74)においては、散水により速度が増加しているように見えるが、有意に散水効果があると言い切るには信頼性が不十分である。

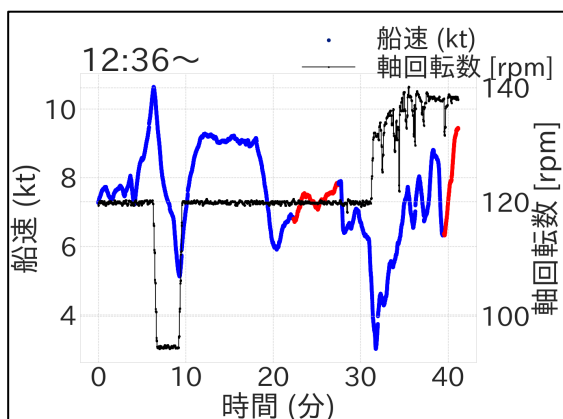


図 67 船速と軸回転数 (12:36~)

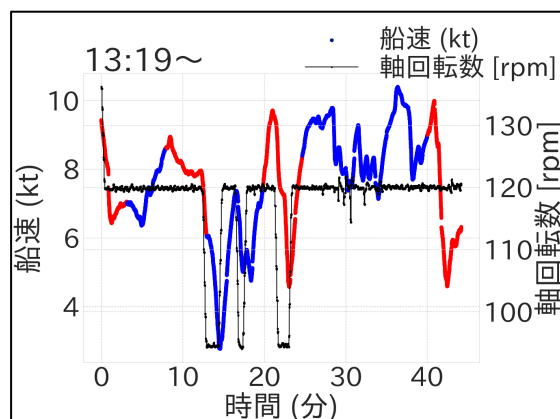


図 68 船速と軸回転数 (13:19~)

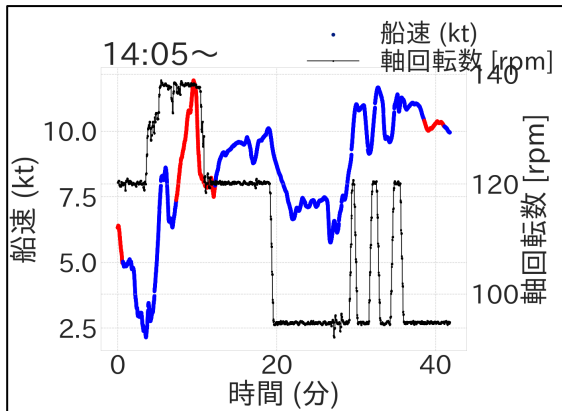


図 69 船速と軸回転数 (14:05~)

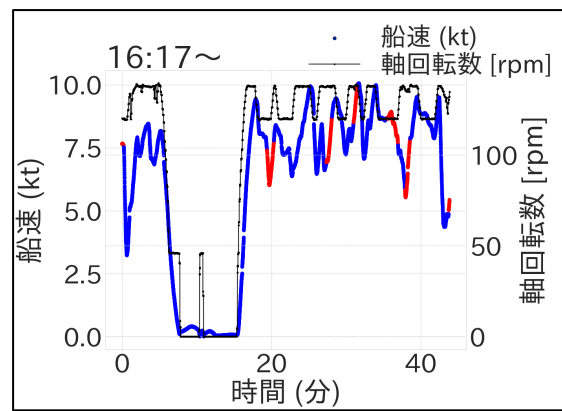


図 72 船速と軸回転数 (16:17~)

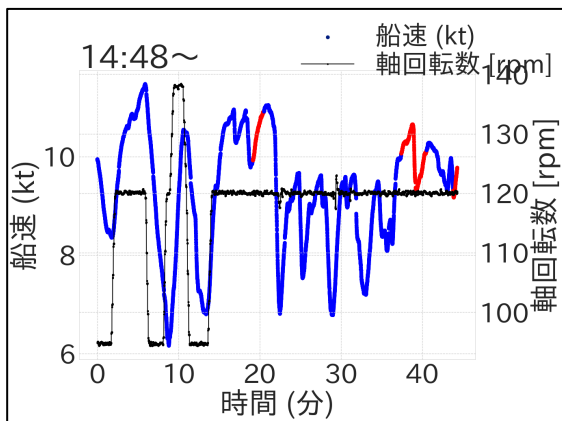


図 70 船速と軸回転数 (14:48~)

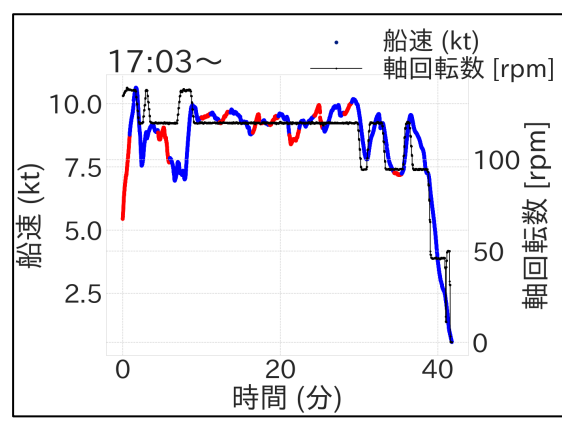


図 73 船速と軸回転数 (17:03~)

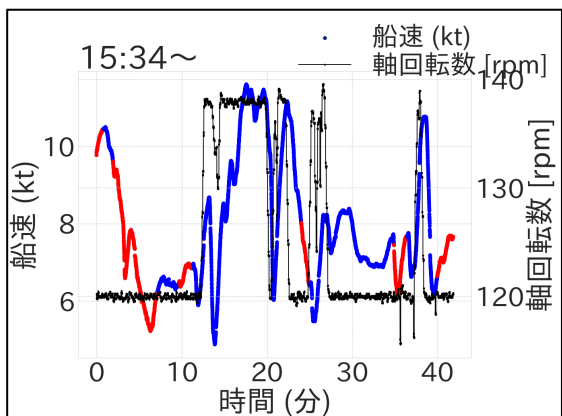


図 71 船速と軸回転数 (15:34~)

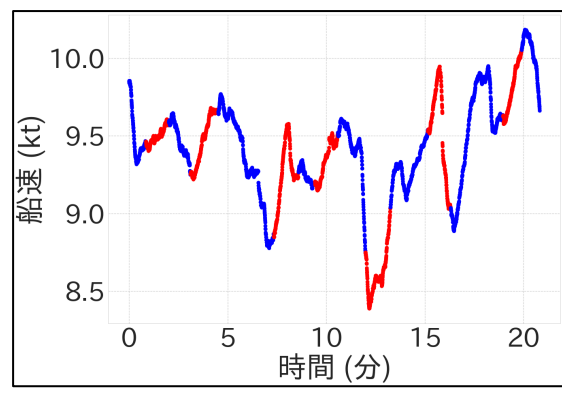


図 74 軸回転数一定での船速 (17:12~)

燃料流量については、1月28日に計測を行なって集計した。散水のON/OFF各5分間×4セットの各航行区間における平均燃料消費量を算出し、それらの差分

から散水に用いられた燃料量を推定した。その結果を表 13 に示す。ここで燃料消費は船で使われる全ての電力を賄うものであり、推進器の回転や生活に使用される分も含んでいる。

今回の結果では、散水の実施によって燃料消費量はおよそ 2.9L/分増加すると推定された。また、推進器停止時に計測した燃料流量 16.4L/分を散水 ON/OFF の燃料消費量から差し引くと、第二強速(137rpm)時の推進器燃料消費量に対する散水の燃料消費量の割合は 1.8%~4.4%、平均すると約 3.3%と推定された。この変動を考慮しても、しらせ連続砕氷航行時に散水によって 5%程度以上の速度上昇が得られるならば、散水によって時間効率のみならず燃料効率も上昇することになる(参考に他の砕氷船の例を挙げると、伝統的な船首形状のしらせとは形状が異なるが、Oden(Spoon bow [42])や Mudyug (Waas bow [42])では 10%以上の馬力低減効果が確認されている[30])。

表 13 散水 ON/OFF での燃料消費量の比較

	散水 ON (L/分)	散水 OFF (L/分)	散水による消費量 (L/分)	増加比率 (推進器比, %)
1 回目	104.6	100.9	3.7	4.4
2 回目	106.4	104.8	1.6	1.8
3 回目	106.7	103.8	2.9	3.3
4 回目	106.2	103.0	3.2	3.7
平均	106.0	103.1	2.9	3.3

## 付録 2 JARE59 ラミング試験結果 (ラミング航法分類への活用を意図したデータセット)

ラミング試験としては 2.6 節で述べたように、散水効果を確認する実験のサンプル数が、特に進出距離の長い氷域において不足している状況にある。これを踏まえ、一本突きで進出距離の長いラミングで散水の ON/OFF を切り替える実験をメインとして計画していた。しかしながら、隊のスケジュールに時間がなかったため、こうした氷域に長く留まってラミングを続ける試験を行うことはできなかった。代わりに移動がてら複数種類のラミング航法を試す試験を行い、以下のデータが記録されて残っている。

期間: 2018 年 1 月 29 日

総ラミング回数: 53 回 (うち、事前に計画した航法の実施: 12 回)

- ・ 野帳 (時刻、操舵者の狙った航法などの意図、散水 ON/OFF を記録)
- ・ 船体モニタリングシステムデータ (観測項目は表 2。2.3 節で述べた手法でラミングを切り出し、時刻情報から野帳の情報を対応させて組み込んだ)
- ・ 艦橋から GoPro カメラで撮影した前方映像 (時刻情報からラミングごとに切り出し済み)
- ・ 船上 EM 生データ (未処理)
- ・ コンパクトカメラによる海水観測 (氷厚/積雪比を記録)

この航行区間のうち、特徴的な軌跡を図 75 に示す。緯度経度上にラミング貫入時の軌跡をプロットした。緑円で囲まれた場所においては、ラミング航法の打ち合わせをせずに自由にラミングを実施している。これに対し赤円においては、別の操舵者が事前に航法を計画し、理想的な二本突き A を狙ってラミングを実施している。この場所は氷が薄かったためか、三本突きに近い緑円内の航法ではややロスが多いように思われ、赤円では最小限の砕氷幅で効率的に進行しているように見える(これが実際に進行効率を改善しているかは検証が必要である)。今回記録したデータは、狙った航法に対する船体挙動の特徴を照合することを目的としたものであり、今後の解析に役立つことを期待する。

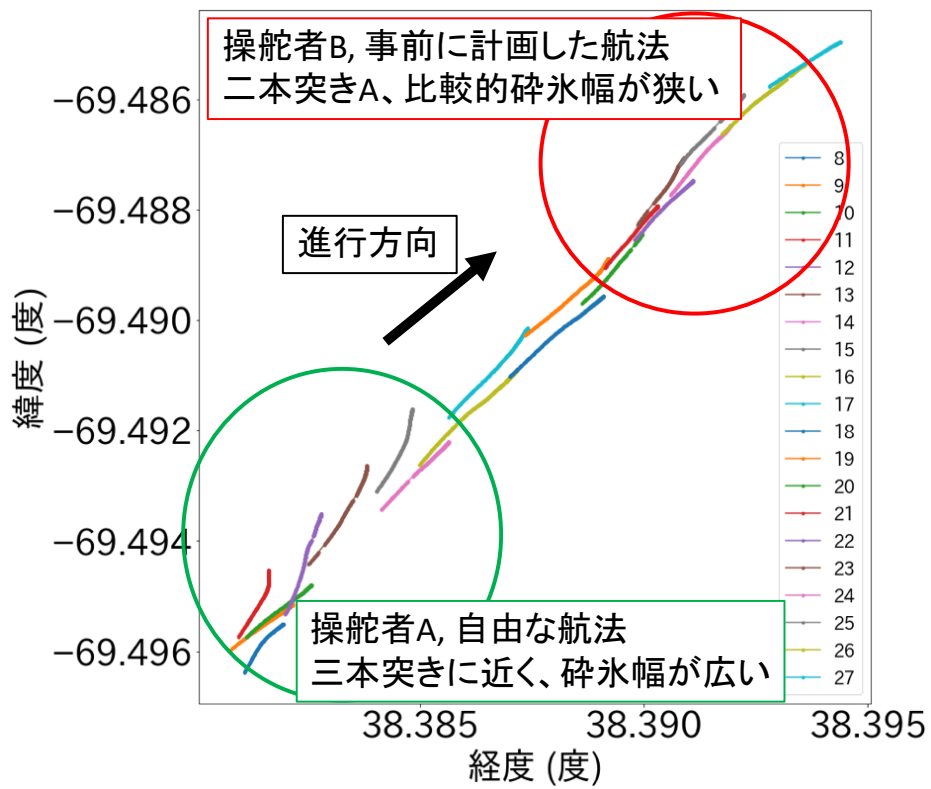


図 75 ラミング航法の変化と航跡の様子

## 謝辞

まずは3年間にわたりご指導くださった山口先生に深く感謝を申し上げます。ゼミでは解析手法のアイデアをくださったり、また私が看過してしまっていた重要な点を鋭くご指摘くださることも多く、とても勉強になりました。この研究を始めた頃はただ自分の関心の赴くままに、迷走している期間も長かったのですが、ここまで研究を続けてこられたのはそんな私に辛抱強く付き添ってご指導くださった山口先生のおかげです。ありがとうございました。

そもそもこの研究を始めるきっかけとなった南極観測隊への参加は、限られた観測隊の枠の中でも本テーマを研究する学生が参加できるよう、山口先生が長年にわたりご尽力くださったことでいただけた機会でした。

この経験は何にも代え難いものでした。自分の研究に関する知見を深められたことに限らず、最先端の研究観測を知れたこと、実船実験の現場責任者としてその実施に向けた計画から関係者との調整など多くの経験を積めたことなど、自己成長においても非常に大きな糧となりました。大変貴重な機会をくださったことについても、深く感謝申し上げます。

南極観測中においては、私の指導教員として実験の実施をサポートしてくださった北海道大学低温研究所の平野様、海洋観測の窓口として自衛隊の方々との調整にご尽力くださったマリワークジャパンの野口様、チームの仲間として観測のみならず日頃から支えてくださった海洋観測チームの木村様、渡邊様、伊藤様に感謝申し上げます。その他の観測チームからも観測においてお力添えをいただきました。ありがとうございました。

実験の実施においては、自衛隊の方々のご協力が不可欠でした。現場知識が皆無の状態に乗船した私に対しても快くご支援ください、誠にありがとうございました。艦全体としてこのようなご協力体制を整えてくださいました宮崎艦長と竹内副長、現場の知見を元に積極的なアドバイスやご意見をくださった古川航海長、観測の調整にご尽力くださった下田気象長、綿密な実験の打ち合わせやディスプレイにに応じてくださるなど非常に積極的にご支援くださった上野船務長、散水装置関係で好意的にご協力くださった上田機関長、他にも主に艦橋と操縦室にて多くの方々からご支援いただきました。ありがとうございました。

また、観測隊の参加にあたっては南極の現場に限らず多くの方々からご支援を

いただきました。国立極地研究所の牛尾様、田村様、清水様には、準備段階から観測のアドバイスや観測技術のご指導など、多くのご支援をいただきました。ありがとうございます。ジャパンマリンユナイテッドの山内様、水野様、安齋様には、観測計画・論文執筆にあたって砕氷船に関する豊富な知見からアドバイスをいただきました。また、観測機器の取扱い等においてもご指導いただきました。ありがとうございます。

さらに本研究にあたっては、北見工業大学の舘山様に船上 EM のデータをご提供いただきました。その際にデータの扱いや処理方法等について多くのアドバイスをいただきました。また、今回使用したデータは同じく北見工業大学の星野様が解析してくださったものを使用させていただきました。お二人には深く御礼申し上げます。

EM-Bird については国立極地研究所の牛尾様にデータをご提供いただきました。また、JARE59 の氷況目視データは北海道大学低温研究所の伊藤様にご提供いただきました。ありがとうございます。

学部時代から副指導教官を担当してくださった早稲田先生は、毎回非常に丁寧かつ熱心にご指導くださり、大変勉強になりました。いつもすぐに本質を見抜いてしまい、時には散らかった私の頭の中を整理してくださいました。ご指導ありがとうございました。

なんだかんだで共に困難を乗り越えてきて早 3 年の付き合いになる同期の矢口君、入学直後から 1 年先輩の私たちに勝る活躍をしてきた後輩の伏見君とは、一緒に南極観測隊に参加したばかりでなく、日本にいる間からずっと時間をともにし、何度も力を貸してもらいました。研究員の Waruna さんには、特にネットワークやデータ管理などで度々お世話になりました。木村さんには特に輪講や研究室ゼミで海氷についての豊富な知見をご教授いただきました。秘書の亀井様には事務面で何度もご支援いただきました。私と同じ研究テーマを選択した吉野君は、度々解析やデータ整理などを手伝ってくれました。さらに先輩の Yasara さん、永川さん、戸田さん、今井さん、後輩の岡田君、初君、洪君、草川君、松井君、日頃からお世話になった山口研究室の皆様にご礼申し上げます。

最後に、修士課程を通して支えてくださった友人と家族に感謝の意を表したいと思います。ありがとうございます。



## 参考文献

- [1] 国立極地研究所(2008): 新たな南極地域観測事業のあり方 –新観測船時代のビジョン–. Retrieved from: [https://www.nipr.ac.jp/jare-backnumber/topics/shinsedai\\_houkoku\\_ver20080626.pdf](https://www.nipr.ac.jp/jare-backnumber/topics/shinsedai_houkoku_ver20080626.pdf)
- [2] 国立極地研究所: <研究トピックス> 地球システム変動の解明を目指す南極古環境復元. Retrieved from: <https://www.nipr.ac.jp/jare/jare60/topics/topics04.pdf>
- [3] 国立極地研究所: <研究トピックス> 氷床・海水縁辺域の総合観測から迫る大気–氷床–海洋の相互作用. Retrieved from: <https://www.nipr.ac.jp/jare/jare60/topics/topics03.pdf>
- [4] 南極地域観測統合推進本部 (2015): 南極地域観測第IX期6か年計画. Retrieved from: [http://www.mext.go.jp/a\\_menu/shinkou/nankyoku/detail/\\_icsFiles/afieldfile/2016/01/07/1365762\\_01.pdf](http://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/nankyoku/detail/_icsFiles/afieldfile/2016/01/07/1365762_01.pdf)
- [5] Wadhams, P. (2002): *Ice in the Ocean*. Gordon and Breach Science Publishers. London, UK.
- [6] 日本雪氷学会: 海氷分類の用語集. Retrieved from: <http://www.seppyo.org/tmp/hokkaido/nomen/nomen-d.html>
- [7] 南極 OB 会編集委員会 (2013): *南極読本 隊員が語る寒冷自然と観測の日々*. 成山堂書店. 東京, 日本.
- [8] 宇都 正太郎, 下田 春人, 泉山 耕, 牛尾 収輝, 青木 茂, 橋田 元, 若林 裕之, 西尾 文彦 (2004): 船上観測データに基づく南極リュツォ・ホルム湾定着氷の夏季における氷厚及び積雪深分布特性について. *南極資料*. **48(3)**. 65-179.
- [9] 根津和彦 (2010): 新南極観測船「しらせ」. *日本マリンエンジニアリング学会誌*. **45 (2)**. 180-185.
- [10] 南極 OB 会・観測五十周年記念事業委員会 (2006): *南極観測隊 –南極に情熱を燃やした若者たちの記録–*. 日本極地研究振興会. 東京, 日本. 448-451, 456-459.
- [11] 防衛省 HP: 南極地域観測への参加及び南極地域観測統合推進本部の設置について. Retrieved from: <http://www.mod.go.jp/j/approach/hyouka/seisaku/results/20/sougou/sankou/08.pdf>

- [12] 国立極地研究所南極観測センター (2014): *南極観測隊のしごと 観測隊員の選考から暮らしまで*. 成山堂書店.
- [13] NASA HP: WorldView. Retrieved from: <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>
- [14] 牛尾収輝 (2003): 頻発する南極リュツォ・ホルム湾の海水流出 — 1980年～2003年の海水状況から —. *南極資料*. **47 (3)**. 338-348.
- [15] Aoki, S. (2017): Breakup of land-fast sea ice in Lützow-Holm Bay, East Antarctica, and its teleconnection to tropical Pacific sea surface temperatures. *Geophys. Res.Lett.* 44. 3219–3227.
- [16] Vance, G. P. (1980): Analysis of the performance of a 140-foot Great Lakes icebreaker USCGC KATMAI BAY (No. CRREL-80-8). Cold Regions Research and Engineering lab Hanover NH.
- [17] 金井誠 (2012): 第53次南極観測隊「しらせ」氷海域性能確認試験報告. 非公開資料.
- [18] 土屋 好寛, 榎本 一夫 (2013): 第54次南極地域観測隊参加報告 AAD-02 「しらせ」氷海性能試験. 非公開資料.
- [19] 澤村淳司, 志賀俊成 (2014): 第55次南極地域観測 報告. 非公開資料.
- [20] 藤原亮, 須山聡大 (2015): 第56次南極地域観測 報告. 非公開資料.
- [21] 須藤正信 (1984): 砕氷船しらせ: その処女航海航行. *航海*. 82. 62-70.
- [22] 大島慶一郎, 牛尾収輝, 大槻晃久 (2006): JARE における船上目視観測による海水モニタリングに向けて — 国際標準に基づく観測手順の簡略化とその活用例 —. *南極資料*. **50 (3)**. 304-316.
- [23] 星野聖太 (2015): 南極海における現場観測及び衛星観測による海水厚推定アルゴリズムの開発. 北見工業大学 社会環境工学専攻 修士論文.
- [24] 茂原清二 (2010): 砕氷艦の運用 -昭和基地沖の氷海における砕氷航行. *日本マリンエンジニアリング学会誌*. **45 (2)**. 38-43.
- [25] 牛尾 収輝, 宇都 正太郎, 泉山 耕, 下田 春人, 鮎川 勝 (2004): 「しらせ」砕氷航行データが示す南極リュツォ・ホルム湾定着氷の年々変化. *南極資料*. **48 (3)**. 180-190.
- [26] 国立極地研究所: <https://www.nipr.ac.jp/jare/jare60/topics/topics07.pdf>
- [27] 宇都 正太郎, 下田 春人, 泉山 耕, 舘山 一孝, 牛尾 収輝 (2004): 船

- 船に搭載した電磁誘導センサによる海氷厚の観測. 可視化情報. **24 (1)**. 423-426.
- [28] 山内 豊 (2013): 砕氷船の氷中性能向上技術. 混相流. **27 (1)**. 11-17.
- [29] 海上自衛隊 HP: 南極地域観測隊協力. Retrieved from: <http://www.mod.go.jp/msdf/formal/operation/nankyoku55.html>
- [30] Yamauchi, Y., Mizuno, S., and Tsukuda, H. (2009). Study On Improvement In Ramming Performance of Antarctic Icebreaker. International Society of Offshore and Polar Engineers.
- [31] Yamauchi, Y., Mizuno, S., and Tsukuda, H. (2011): The Icebreaking Performance of SHIRASE In the Maiden Antarctic Voyage. International Society of Offshore and Polar Engineers.
- [32] 野澤和男 (2006): 氷海工学. 成山堂書店.
- [33] Su, B., Riska, K. and Moan, T. (2010): A numerical method for the prediction of ship performance in level ice. Cold Regions Science and Technology. **60 (3)**. 177-188.
- [34] Quinton, B. and Lau, M. (2005): Manoeuvring in Ice - Test/Trial Database. National Research Council Canada. Technical report SR-2005-13.
- [35] 国立極地研究所: 日本南極地域観測隊報告 (第 51 次~58 次分). Retrieved from: <https://nipr.repo.nii.ac.jp/index.php>
- [36] Renner, A. H.H., Dumont, M., Beckers, J., Gerland, S. and Haas, C. (2013): Improved characterisation of sea ice using simultaneous aerial photography and sea ice thickness measurements. Cold Regions Science and Technology. **92**. 37-47.
- [37] 永川圭介 (2016): 砕氷船の多年氷帯航行支援の為の基礎研究. 東京大学大学院 新領域創成科学研究課 海洋技術環境学専攻 修士論文.
- [38] Haas, C. (1998): Evaluation of ship-based electromagnetic-inductive thickness measurements of summer sea-ice in the Bellingshausen and Amundsen Seas, Antarctica. Cold Regions Science and Technology. **27 (1)**. 1-16
- [39] Haas, C., Rupp, K.-H. and Uuskallio, A. (1999): Comparison of along track em ice thickness profiles with ship performance data. POAC'99, Proc. of the 15th Int. Conf. on Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions. Espoo, Finland. Helsinki Univ. of Techn., Ship Laboratory. 343-353.
- [40] 星野聖太, 舘山一孝, 田村岳史, 牛尾収輝 (2016): 南極における

AMSR2 データを使用した海氷厚推定アルゴリズムの開発とその検証. 第7回極域科学シンポジウム会議録. 東京, 日本.

[41] 岸進, 宇都正太郎, 加納敏幸, 上園政裕, 川島義伸, 泉山耕 (1996): 砕氷型巡視船「てしお」の氷中航行性能について : (その 1) 氷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.

[42] 岸進, 尾崎文夫 (1999): 氷海船舶. 関西造船協会 らん. **42**. 7-13.