

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

令和元年度  
修士論文

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

2019年7月19日 提出

指導教員 山口 一 教授

吉野 正剛

## 目次

<b>1. 序論</b> .....	<b>7</b>
<b>1.1. 背景</b> .....	<b>7</b>
1.1.1. 日本南極地域観測隊 .....	7
1.1.2. しらせ .....	9
1.1.3. 氷中航行 .....	11
1.1.4. ラミング航行 .....	14
1.1.5. 船首部散水装置(Water flushing system) .....	16
1.1.6. 氷海航行性能試験 .....	17
<b>1.2. 課題と目的</b> .....	<b>18</b>
<b>2. 試験データ</b> .....	<b>20</b>
<b>2.1. 60次南極地域観測隊行動概要</b> .....	<b>20</b>
<b>2.2. 航路</b> .....	<b>22</b>
<b>2.3. 取得データ</b> .....	<b>24</b>
2.3.1. 船体挙動データ .....	24
2.3.1. ビデオカメラによる船首周辺の映像・船橋での音声の記録 .....	26
2.3.1. 氷厚・積雪深(デジタルカメラ+レーザー距離計による観測) .....	28
2.3.2. 燃料消費量 .....	30
2.3.3. 船首部散水装置稼働状況(散水開始・終了時刻) .....	31
<b>2.4. 観測</b> .....	<b>32</b>
2.4.1. 試験実施日程 .....	32
2.4.2. 試験海域 .....	33
<b>2.5. 散水試験</b> .....	<b>34</b>
<b>3. ラミング航行</b> .....	<b>42</b>
<b>3.1. ラミングデータの抽出</b> .....	<b>42</b>
<b>3.2. 散水効果の評価</b> .....	<b>44</b>
3.2.1. 散水試験区間中のラミング進出距離 .....	44
3.2.2. 貫入直後の速度変化 .....	46

4. 連続砕氷航行 .....	48
4.1. 連続砕氷散水試験区間 .....	48
4.2. 解析データの抽出 .....	49
4.3. 砕氷抵抗の算出 .....	51
4.4. 統計学的評価 .....	60
4.5. JARE59 散水試験データの解析 .....	62
4.6. 外れ値の除去 .....	72
5. 考察 .....	74
5.1. 船首部散水装置燃料消費 .....	74
5.2. 砕氷抵抗平均区間の妥当性 .....	76
5.3. 考察 .....	77
6. 結論 .....	81
6.1. 本研究の成果 .....	81
6.2. 今後の課題 .....	82
謝辞 .....	83
付録 .....	84
氷海航行試験実施計画書 .....	85
参考文献 .....	110

## 図表目次

Fig. 1-1	世界各国の越冬基地(2015年) [2] .....	8
Fig. 1-2	砕氷船「しらせ」 .....	9
Fig. 1-3	昭和基地周辺の衛星画像 [12].....	11
Fig. 1-4	氷況別での燃費 .....	12
Fig. 1-5	ラミング航行の模式図(ジャパンマリンユナイテッド株式会社提供).....	15
Fig. 1-6	「しらせ」の散水装置稼働中の様子 ([3]より引用).....	17
Fig. 1-7	「しらせ」ラミング回数の変遷.....	18
Fig. 2-1	第60次南極地域観測隊の航路(広域) .....	22
Fig. 2-2	第60次南極地域観測隊の航路(往路) .....	23
Fig. 2-3	第60次南極地域観測隊の航路(復路) .....	23
Fig. 2-4	1月3日の衛星画像.....	23
Fig. 2-5	氷海モニタリングシステム計測項目 .....	25
Fig. 2-6	氷海モニタリングシステム概要.....	26
Fig. 2-7	船橋での記録の様子 .....	27
Fig. 2-8	ビデオカメラによる記録の例 .....	27
Fig. 2-9	第一甲板から撮影した海氷1 .....	29
Fig. 2-10	第一甲板から撮影した海氷2 .....	29
Fig. 2-11	燃料消費量表示画面 .....	30
Fig. 2-12	船橋における散水装置の運転確認ランプ .....	31
Fig. 2-13	氷海航行性能試験実施海域 .....	33
Fig. 2-14	軸回転数と速度(2/3 12:00-13:00) .....	34
Fig. 2-15	軸回転数と速度(2/3 13:00-14:00) .....	35
Fig. 2-16	軸回転数と速度(2/3 14:00-15:00) .....	35
Fig. 2-17	軸回転数と速度(2/3 15:00-16:00) .....	36
Fig. 2-18	軸回転数と速度(2/3 16:00-17:00) .....	36
Fig. 2-19	軸回転数と速度(2/3 17:00-18:00) .....	37
Fig. 2-20	軸回転数と速度(2/4 06:00-07:00) .....	37
Fig. 2-21	軸回転数と速度(2/4 07:00-08:00) .....	38
Fig. 2-22	軸回転数と速度(2/4 08:00-09:00) .....	38
Fig. 2-23	軸回転数と速度(2/4 09:00-10:00) .....	39

Fig. 2-24	軸回転数と速度(2/4 13:00-14:00)	39
Fig. 2-25	軸回転数と速度(2/4 14:00-15:00)	40
Fig. 2-26	軸回転数と速度(2/4 15:00-16:00)	40
Fig. 2-27	軸回転数と速度(2/4 16:00-17:00)	41
Fig. 3-1	プログラムで抽出したラミング進出距離	43
Fig. 3-2	ラミング進出距離と全氷厚(デジタルカメラ計測もしくは目視観測)の関係	45
Fig. 3-3	ラミングの加速度変化(区間 1)	47
Fig. 3-4	ラミングの加速度(区間 2)	47
Fig. 4-1	式 4-1 の概要図	51
Fig. 4-2	散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.1)	51
Fig. 4-3	散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.2)	52
Fig. 4-4	散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.3)	52
Fig. 4-5	散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.4)	52
Fig. 4-6	散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.5)	52
Fig. 4-7	散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.6)	53
Fig. 4-8	散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.7)	53
Fig. 4-9	散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.8)	53
Fig. 4-10	散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.9)	53
Fig. 4-11	散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.10)	54
Fig. 4-12	散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.11)	54
Fig. 4-13	散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.12)	54
Fig. 4-14	散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.13)	54
Fig. 4-15	散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.14)	55
Fig. 4-16	散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.15)	55
Fig. 4-17	散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.16)	55
Fig. 4-18	散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.17)	55
Fig. 4-19	散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.18)	56
Fig. 4-20	散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.19)	56
Fig. 4-21	散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.20)	56
Fig. 4-22	散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.21)	56
Fig. 4-23	散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.22)	57

Fig. 4-24	散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.23) .....	57
Fig. 4-25	散水前後の碎氷抵抗 .....	59
Fig. 4-26	碎氷抵抗値の移動平均 .....	61
Fig. 4-27	散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.1) .....	62
Fig. 4-28	散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.2) .....	62
Fig. 4-29	散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.3) .....	63
Fig. 4-30	散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.4) .....	63
Fig. 4-31	散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.5) .....	63
Fig. 4-32	散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.6) .....	63
Fig. 4-33	散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.7) .....	64
Fig. 4-34	散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.8) .....	64
Fig. 4-35	散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.9) .....	64
Fig. 4-36	散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.10) .....	64
Fig. 4-37	散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.11) .....	65
Fig. 4-38	散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.12) .....	65
Fig. 4-39	散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.13) .....	65
Fig. 4-40	散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.14) .....	65
Fig. 4-41	散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.15) .....	66
Fig. 4-42	散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.16) .....	66
Fig. 4-43	散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.17) .....	66
Fig. 4-44	散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.18) .....	66
Fig. 4-45	散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.19) .....	67
Fig. 4-46	散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.20) .....	67
Fig. 4-47	散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.21) .....	67
Fig. 4-48	散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.22) .....	67
Fig. 4-49	散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.23) .....	68
Fig. 4-50	散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.24) .....	68
Fig. 4-51	散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.25) .....	68
Fig. 4-52	散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.26) .....	68
Fig. 4-53	散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.27) .....	69
Fig. 4-54	散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.28) .....	69
Fig. 4-55	散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.29) .....	69

Fig. 4-56	散水前後の砕氷抵抗 (JARE59) .....	71
Fig. 4-57	砕氷抵抗値の移動平均 (JARE59).....	71
Fig. 4-58	全 29 回の砕氷抵抗変化と閾値(No.1~14).....	72
Fig. 4-59	全 29 回の砕氷抵抗変化と閾値(No.15~29).....	72
Fig. 5-1	散水前後の船速変化(JARE60) .....	78
Fig. 5-2	散水前後の軸スラスト変化(JARE60) .....	78
Fig. 5-3	散水前後の船速変化(JARE59) .....	79
Fig. 5-4	散水前後の軸スラスト変化(JARE59) .....	79
Table 1-1	南極観測船主要諸元 [7] .....	10
Table 1-2	氷況別での燃費(表).....	12
Table 1-3	船体と海氷、積雪との摩擦係数[6] .....	17
Table 2-1	第 60 次南極地域観測隊の主な行程 .....	20
Table 2-2	氷海航行性能試験に関する日程.....	32
Table 2-3	散水試験実施区間.....	33
Table 3-1	ラミング砕氷における散水効果(散水時の進出距離/散水なし時の進出距離).....	44
Table 3-2	散水試験区間のラミング進出距離 .....	45
Table 3-3	ラミング解析対象区間.....	46
Table 3-4	解析対象区間の氷況 .....	46
Table 4-1	連続砕氷散水試験区間.....	48
Table 4-2	散水開始・終了日時と散水時間.....	49
Table 4-3	各散水前後の砕氷抵抗値.....	58
Table 4-4	砕氷抵抗(JARE59).....	69
Table 4-5	各閾値における除去対象散水番号 .....	73
Table 4-6	各閾値における砕氷抵抗変化.....	73
Table 5-1	連続砕氷中の散水装置による燃料消費変化.....	74
Table 5-2	散水前後の速度変化平均.....	77
Table 5-3	散水前後の軸スラスト変化平均.....	77
Table 5-4	JARE59 と JARE60 における散水結果 .....	79

# 1. 序論

## 1.1. 背景

### 1.1.1. 日本南極地域観測隊

南極域は、巨大な氷床を有しており、地球の気候システムの形成に大きな役割を果たしている。極域での環境変動は大気・海洋循環を通して全球の環境変化へ影響を及ぼしていると考えられており、地球温暖化等の環境問題を考える上で極域での観測は非常に重要である。

我が国の南極地域観測事業は、1957/58年の国際地球観測年(IGY)を機に始まった。南極域では多くの研究観測が行われており、それらの観測から得られた成果にはオゾンホールが発見、南極氷床深層掘削、隕石の収集など国際的にも高い評価を受けたものも多くある。[1]

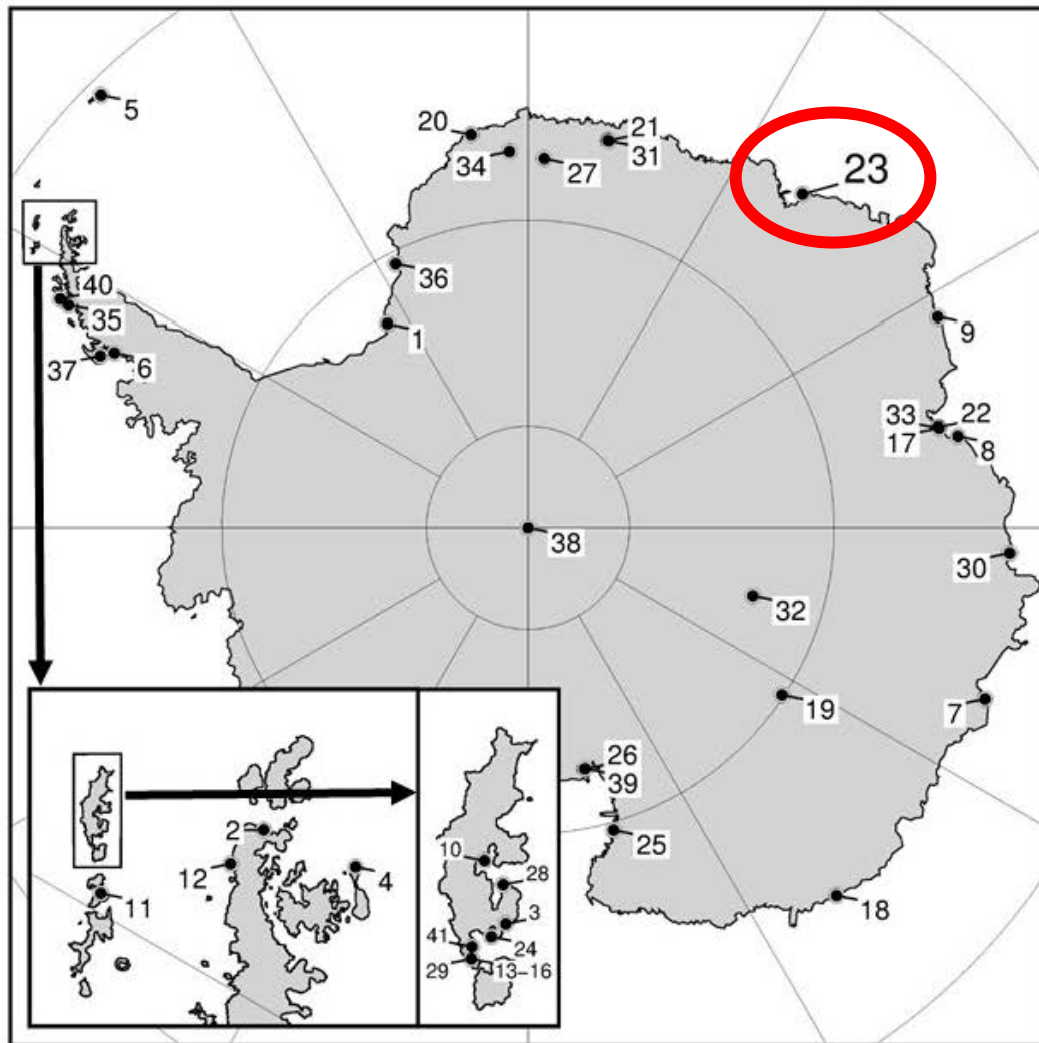
本研究で対象とする第60次南極地域観測隊(以下60次隊、JARE60)は、南極地域観測第IX期6か年計画の3年目にあたる。

こうした南極観測隊の活動の拠点として、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持っている。南極にある世界各国の基地を Fig. 1-1 に示す。

[2]

昭和基地での観測活動を継続するために、日本南極地域観測隊(Japanese Antarctic Research Expedition、JARE)はほぼ毎年派遣されている。





- |   |   |
|---|---|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. ベルグラノーII 基地(アルゼンチン)</li> <li>2. エスペランサ基地(アルゼンチン)</li> <li>3. カルリニ基地(アルゼンチン)</li> <li>4. マランビオ基地(アルゼンチン)</li> <li>5. オルカダス基地(アルゼンチン)</li> <li>6. サン・マルティン基地(アルゼンチン)</li> <li>7. ケイシー基地(オーストラリア)</li> <li>8. デイビス基地(オーストラリア)</li> <li>9. モーソン基地(オーストラリア)</li> <li>10. コマンダンテ・フェラス基地(ブラジル)</li> <li>11. アルツロ・ブラット基地(チリ)</li> <li>12. ベルナルド・オヒギンズ・リケルメ基地(チリ)</li> <li>13. エドアルド・フレイ・モンタルバ基地(チリ)</li> <li>14. ルーテルナント・ロドルフォ・マーシュ M. エアロドローム基地(チリ)</li> <li>15. フリオ・エスクデロ基地(チリ)</li> <li>16. 長城基地(中国)</li> <li>17. 中山基地(中国)</li> <li>18. デュモン・デュビル基地(フランス)</li> <li>19. コンコルディア基地(フランス、イタリア)</li> <li>20. ノイマイヤIII基地(ドイツ)</li> <li>21. マイトリ基地(インド)</li> <li>22. バーラティ基地(インド)</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>23. 昭和基地(日本)</li> <li>24. 世宗基地(韓国)</li> <li>25. 張 保阜基地(韓国)</li> <li>26. スコット基地(ニュージーランド)</li> <li>27. トロール基地(ノルウェー)</li> <li>28. アルトゥスキイ基地(ポーランド)</li> <li>29. ベリングスハウゼン基地(ロシア)</li> <li>30. ミールヌイ基地(ロシア)</li> <li>31. ノボザレフスカヤ基地(ロシア)</li> <li>32. ポストーク基地(ロシア)</li> <li>33. プログレス基地(ロシア)</li> <li>34. サナエIV基地(南アフリカ)</li> <li>35. ベルナツキー基地(ウクライナ)</li> <li>36. ハリー基地(イギリス)</li> <li>37. ロゼラ基地(イギリス)</li> <li>38. アムンゼン・スコット基地(アメリカ)</li> <li>39. マクマード基地(アメリカ)</li> <li>40. パーマー基地(アメリカ)</li> <li>41. アルティガス基地(ウルグアイ)</li> </ol> |
|---|---|

Fig. 1-1 世界各国の越冬基地(2015年) [2]

### 1.1.2. しらせ

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。「しらせ」の外観を Fig. 1-2 に示す。「しらせ」の主な役割は観測隊員と観測に必要な物資を、日本の南極観測拠点である昭和基地へと輸送することである。60 次隊では、「しらせ」によって往路 77 名、復路 80 名の観測隊員輸送と往路約 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。南極観測隊では、一部の隊員・物資の輸送に南極航空ネットワークである DROMLAN(Droning Maud Land Air Network)が利用されているが、DROMLAN で輸送できる人員・物資の量は非常に少量であり、南極観測行動を継続していくためには、砕氷船を用いた大容量の輸送を行うことが必要不可欠である。

「しらせ」の運用は海上自衛隊によって行われており、現在の「しらせ」は南極観測船としては初代の「宗谷」(1956-1962 年)、2 代目の「ふじ」(1965-1983 年)、3 代目の「(旧)しらせ」(1983-2008 年)に次ぐ 4 代目である。現在の「しらせ」は先代の南極観測船と同名であるので、本研究では以降 3 代目を旧「しらせ」、4 代目を「しらせ」と表記する。

2 代目の「ふじ」以降の 3 隻の南極観測船の主要諸元を Table 1-1 に示す。[1] 厳しい海水域をより素早く安全に突破するため、船体の大型化・砕氷能力の向上が図られていることがわかる。



Fig. 1-2 砕氷船「しらせ」

Table 1-1 南極観測船主要諸元 [7]

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	11,900 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 (3 kt 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

### 1.1.3. 氷中航行

「しらせ」は昭和基地へ向かう際、主にオングル諸島のあるリュツォ・ホルム湾において氷中航行を行う。「しらせ」が昭和基地に接近している 2018 年 12 月 18 日のリュツォ・ホルム湾における海氷の様子の可視光衛星画像を Fig. 1-3 に示す。リュツォ・ホルム湾周辺の海氷は他国の基地周辺と比較しても非常に厳しいものである。「しらせ」が氷中航行を行うのは毎年 12 月～2 月の間、南半球では夏の期間で海氷は薄く少なくなるが、それでも尚厳しい定着氷・流氷は広く存在し、それらを砕氷しながら進んでいく必要がある。

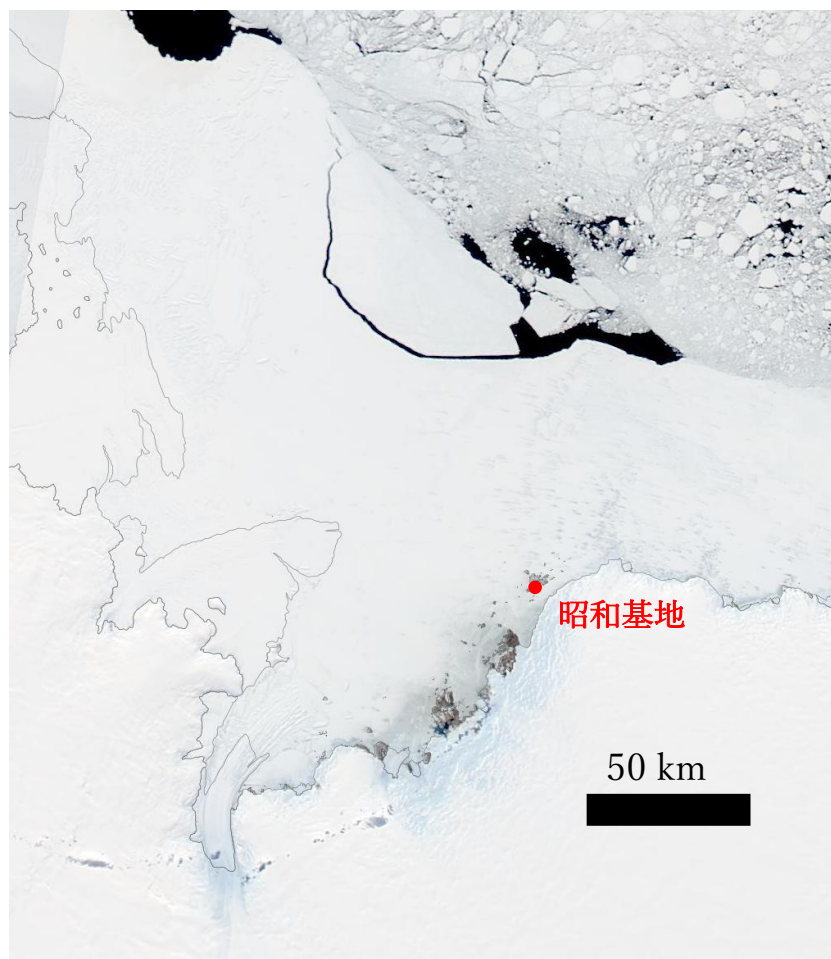


Fig. 1-3 昭和基地周辺の衛星画像 [12]

水中航行中は、海水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。Table 1-2、Fig. 1-4 に 60 次航海の記録から計算した「しらせ」の燃料消費量を示す。開放水面は 12 月 1 日から 12 月 6 日、往路流氷帯は 12 月 15 日、往路定着氷は 12 月 20 日から 12 月 21 日、復路定着氷は 2 月 3 日から 2 月 4 日、乱氷帯は 2 月 13 日から 2 月 17 日のしらせの航海記録を使用して計算した。

定着氷海域の砕氷航行では通常の 10 倍以上、ラミングを多用した乱氷帯航行では距離あたり約 550 倍の燃料を必要としていた。

Table 1-2 氷況別での燃費(表)

海域	開放水面	往路流氷帯	往路定着氷	復路定着氷	乱氷帯
燃費 [km/kL]	8.980	4.131	0.2808	0.6944	0.01618

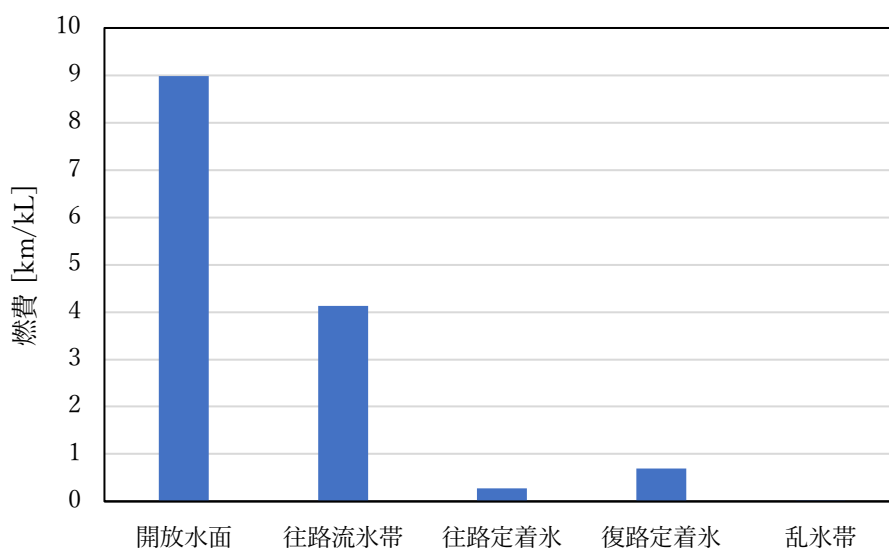


Fig. 1-4 氷況別での燃費

また、水中航行では船速も大きく低下してしまう。

一般に砕氷船は、薄い海水であれば連続砕氷というモードで航行することが可能である。特定の範囲の船速を維持しつつ連続的に海水を押し下げ、自重で海水を曲げ割りながら進む。しかし氷が分厚くなり抵抗が大きくなると、連続で砕氷する事が出来なくなる。その場合、砕氷船は後進して助走をつけ、体当たりを行

って砕氷を行う。このオペレーションをラミングと呼ぶ。このラミング一回に7～10分の時間がかかり、進出距離は多くの場合10～150mである。ラミング航行が必要になってしまうと、大きく船速が低下し、昭和基地に到達するまでの時間が増加してしまう。南極観測隊では南極域に在ることが出来る期間が予め決定されているため、昭和基地到達の遅れはそのまま観測・設営の時間削減へとつながる。

しらせが昭和基地沖へ接岸出来なかった場合には、燃料をはじめとする物資の輸送が不十分となり、観測・設営計画の縮小・中止・遅延が生じてしまう。

53次隊と54次隊では多年氷があまりにも厳しく、4500回以上のラミングを行なってもなお接岸を断念している。これによって第Ⅷ期6カ年計画後半では計画の見直しを余儀なくされた。特に燃料は昭和基地において越冬観測をする上で不可欠なものであり、厳しい氷況によって接岸断念が続くことがあれば、越冬観測自体が不可能になってしまうことも考えられる。

#### 1.1.4. ラミング航行

ラミング(Ramming)とは、過酷な氷海域を突破する砕氷オペレーションで、チャージング(Charging)とも言う。厚い氷や大きなリッジ等に遭遇し、連続砕氷航行を行うことが出来ない場合、「しらせ」はラミング航行を行なって砕氷する。ラミング航行は、大きく分けて後進、助走、貫入の三つのフェーズに分けて考えることが出来る。

##### ・後進

まず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。この時、舵と海水が衝突して舵が損傷するリスクを回避するため、速力は3kt以下で、舵は切らずに左右の推進器の軸回転数に差をつける事で進行方向を調整する。「しらせ」航行指針として、助走距離はおよそ300mとされている。しらせには複数の後方カメラが設置されており、船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。

##### ・助走

後進によってブラッシュアイスは左右もしくは後方へと押しのけられ、前方には開水面に近い助走路が確保される。この抵抗が少ない砕氷跡を、しらせは137rpm(第二強速)の出力で前進をかける。通常の助走時はできるだけ左右の海水に接触しないように舵を取り、速度を上げて進行方向の海水に衝突する。ラミングの最高速度は多くの場合で8~10ノットである。この速度を超えてしまうと、貫入の際に船体が海水の上に乗ってしまい、行動不能になってしまう恐れがある。

非常に氷が厚く、前方の助走路にブラッシュアイスが多く存在してしまう場合は、助走の段階で左右の海水にあたり、助走路の幅を広げる場合もある。

##### ・貫入

船体が海水に貫入すると、氷の圧縮破壊や摩擦損失、乗り上げによる船の位置エネルギー増加等によって、助走による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ている。

貫入の際は、船首が氷にぶつかり接触すると、その圧力により放射状にヒビが入り、局所的な破壊を起こす圧縮破壊と、船体が海水に乗り上げた時の荷重による

曲げ破壊の二種類の破壊が起こる。

ラミングのプロセスを Fig. 1-5 に示す。

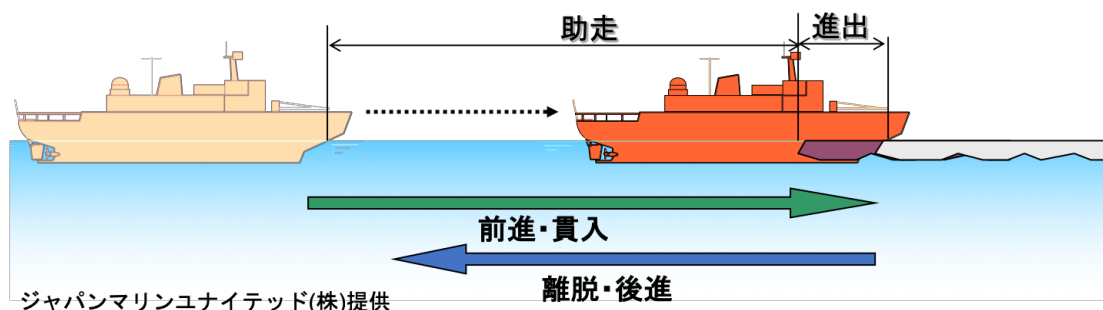


Fig. 1-5 ラミング航行の模式図(ジャパンマリンユナイテッド株式会社提供)

砕氷船が氷中で停止してしまうと、海氷の運動によって船が圧迫され、ビセットという船が身動き出来なくなってしまう危険な状態となる。「しらせ」はこのような状態にならないよう、タンク内部の燃料を移動させて船体を揺らし、周囲の海氷を剥がすヒーリング装置が装備されている。60次航海においても、復路の乱氷帯を航行する際に二度、貫入後に後進ができなくなり、ヒーリング装置を使用して海氷から脱出する場面があった。



### 1.1.5. 船首部散水装置(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」から新しく散水装置が搭載されている。

大容量のポンプで船底から汲み上げた海水を船首部にある直径 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 1-3 に示す。

昭和基地周辺は積雪が多い海域であり、散水によって「しらせ」砕氷性能が向上することが期待されている。

散水装置の効果は氷海水槽実験においてラミング進出距離が 10~15%増加し、連続砕氷抵抗が 5~10%減少すると示されている。[8]

「しらせ」では、「融雪散水装置」という名称で呼ばれているが、散水の目的は摩擦の低減であり、装置に海水を温めるような機構は付いていないため、散水によって積雪および海氷が融ける事はない。

スウェーデンの砕氷支援船「Oden」には「Hull Wash System」と呼ばれる、「しらせ」散水装置と同様の機構が装備されている。Hull Wash System は、船首部に計 12 個および旋回時に使用するリーマの近傍に左右舷計 4 個の孔を設け、船底のシーチェストからポンプで吸い込んだ海水を 18,000 m<sup>3</sup>/h の流量で散水する。厚さ 75 cm のレベルアイス中での実船試験によると、Hull Wash System の使用により同一船速での馬力が約 25%減少すると報告されている。[10]

また、「しらせ」の散水装置の計画散水量は 15,600 m<sup>3</sup>/h である。



Fig. 1-6 「しらせ」の散水装置稼働中の様子（[3]より引用）

Table 1-3 船体と海氷、積雪との摩擦係数[6]

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

#### 1.1.6. 氷海航行性能試験

氷海航行性能試験は、

- ① 基礎データの取得と解析による「しらせ」航行指針への貢献
- ② 氷況と船体挙動の対応付けによる「氷況センサとしてのしらせ」の実現
- ③ 将来の高性能極域船設計・建造・運用のための基礎データ取得

を目的として、第51次南極地域観測隊より継続的に実施されている試験である。

## 1.2. 課題と目的

現「しらせ」が南極観測船に就航した 51 次からの、南極観測に要した往復のラミング回数を Fig. 1-7 に示す。

前述の通り、氷海航行試験は「しらせ」の砕中航行データを蓄積し、解析することを目的として行っている。氷海航行試験が実施された年度には、データ解析の結果として報告書が作成されているが、解析を行うためには、出来る限り多くの氷況での航行データを得る事が望ましい[15-18]。しかしながら現「しらせ」の過去の観測データは、非常に厳しい氷況におけるラミング航行データに偏ってしまっているため、緩い氷況における散水効果の検証は行われていない。また、ラミング航行における散水効果に関しては、進出距離による比較しか行われていない。また、進出距離による散水効果の比較は、進出距離が短い場合は差が大きく出ないため評価が難しいという課題がある。

「しらせ」における散水効果は、水槽実験では 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。過去の実航海データを用いた解析では、砕氷航行試験報告書において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、統計的有意を証明するにはサンプル数が不十分であるとされている。

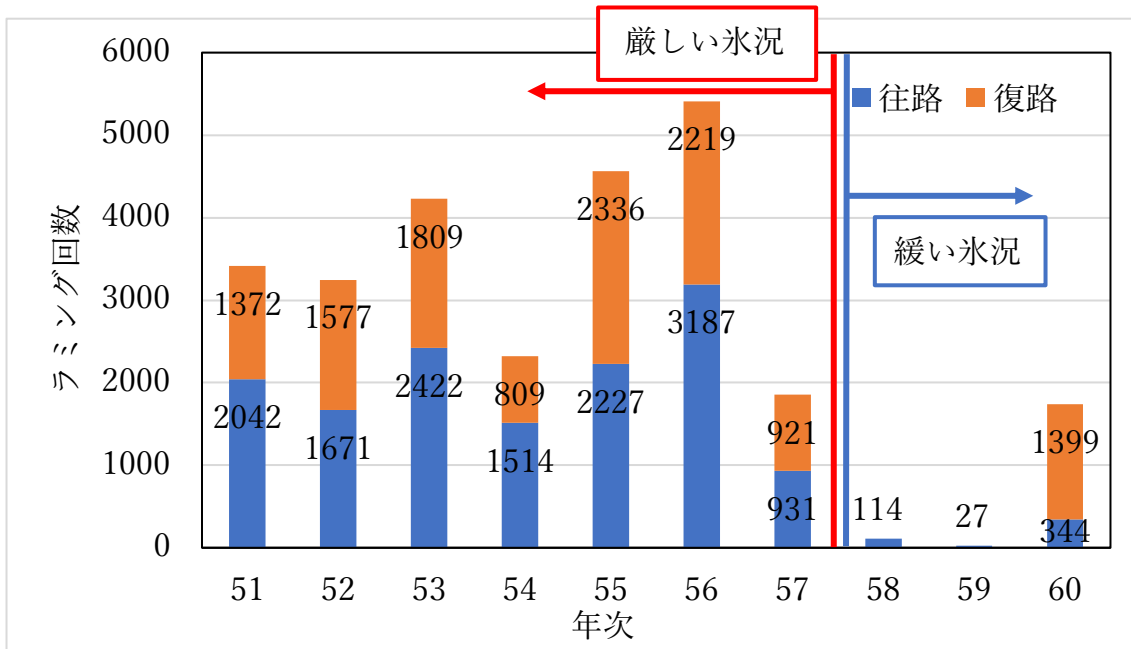


Fig. 1-7 「しらせ」ラミング回数の変遷

その一方で、連続砕氷における散水効果の検証は、現在まで行われていない。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方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は、砕氷船「しらせ」における散水効果を、JARE60の実航行データを用いて評価することを目的とする。

## 2. 試験データ

### 2.1. 60 次南極地域観測隊行動概要

第 60 次南極観測隊は、Table 2-1 のような日程で活動を行なった。60 次では前年に比べ氷況が厳しくなっており、しらせ砕氷航行の遅れが観測隊全体のスケジュールに大きな影響を及ぼした。

60 次隊での特徴として、以下が挙げられる。

#### ① 積雪の多さ

主に往路航海では、「しらせ」の砕氷直前に低気圧が通過した為に積雪が多く、100~150cm の積雪がある海域もあり、例年と比較して積雪深が深い傾向があった。

#### ② 復路乱氷帯

復路の定着氷を離脱直前にブリザードが吹き、定着氷縁以北に広がっていた流氷帯が定着氷側に押し付けられ、非常に厳しい乱氷帯を形成した。「しらせ」はこの乱氷帯を離脱するために 12 日間、1301 回ものラミングを要した。60 次行動のラミングの 7 割以上を復路の乱氷帯で実施したことになる。なお、全体のラミング数については、2.4.1 に示す。

Table 2-1 第 60 次南極地域観測隊の主な行程

11 月 25 日	観測隊成田空港出発
11 月 30 日	フリーマントル出航
12 月 13 日	気象長と氷海航行試験打ち合わせ
12 月 15 日	リュツォ・ホルム湾定着氷縁着
12 月 19 日	氷状偵察・砕氷航行再開
12 月 22 日	空輸第一便

12月25日	昭和基地沖接岸（燃料輸送点、往路ラミング344回）
12月28日	雪上輸送の為、停留点移動
1月20日	アイスオペレーション実施点へ停留点移動
1月24日	海洋観測開始、ROV観測実施
2月3日	昭和基地離岸
2月11日	空路最終便
2月23日	乱氷帯離脱
3月18日	シドニー入港
3月21日	観測隊成田空港到着

## 2.2. 航路

JARE60 における「しらせ」の航跡は Fig. 2-1 の通りである。往路を青(太線)、復路を赤(細線)でプロットした。Fig. 2-2、Fig. 2-3 には、昭和基地付近での航跡を図示した。また、1月3日時点での昭和基地付近の ALOS2 衛星画像を Fig. 2-4 に示す。

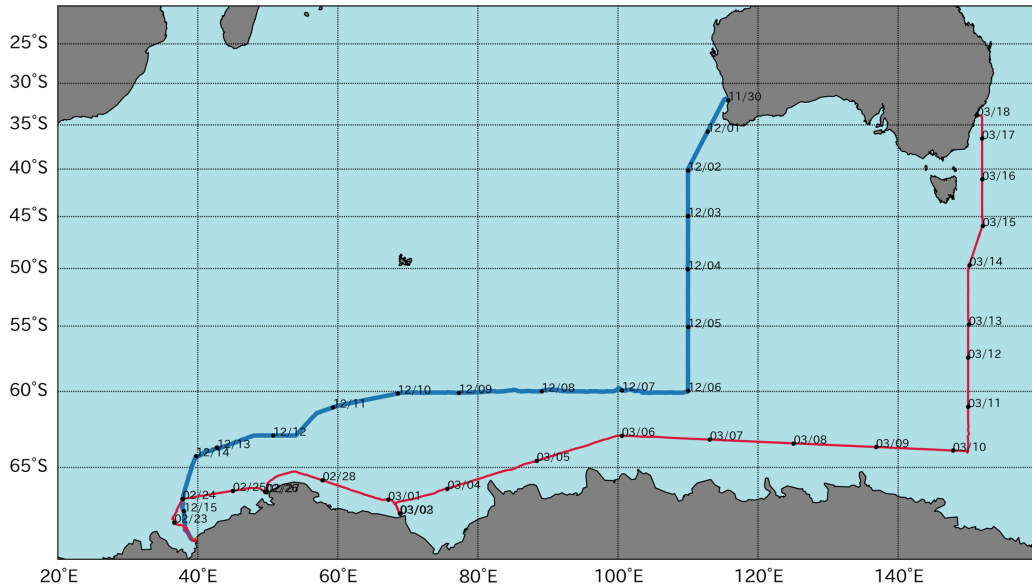


Fig. 2-1 第 60 次南極地域観測隊の航路 (広域)

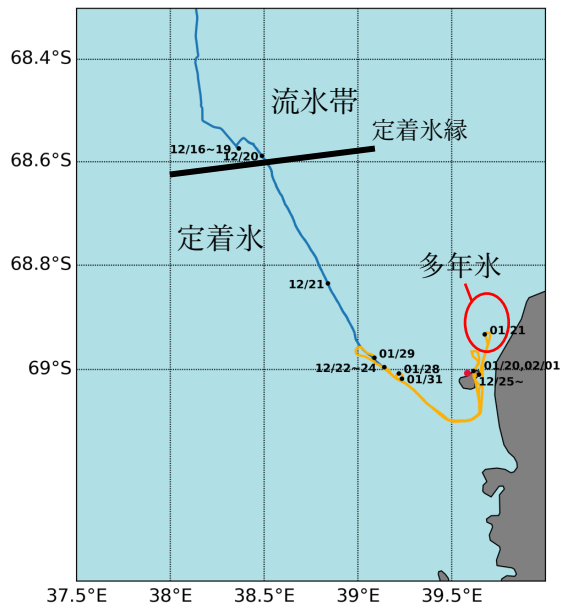


Fig. 2-2 第60次南極地域観測隊の航路（往路）

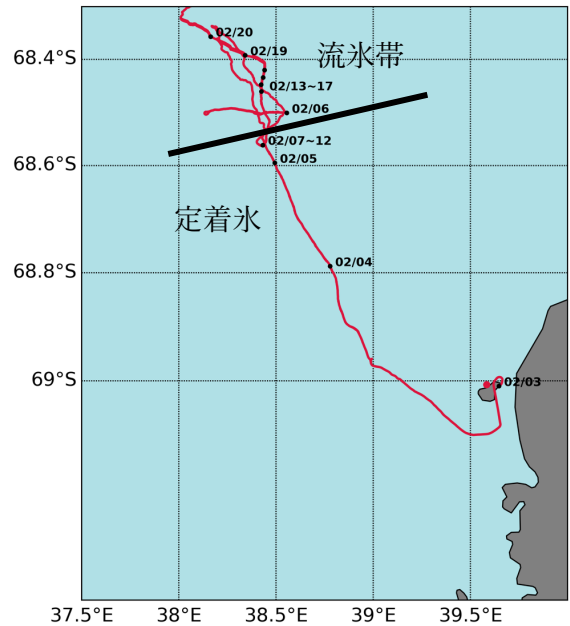


Fig. 2-3 第60次南極地域観測隊の航路（復路）

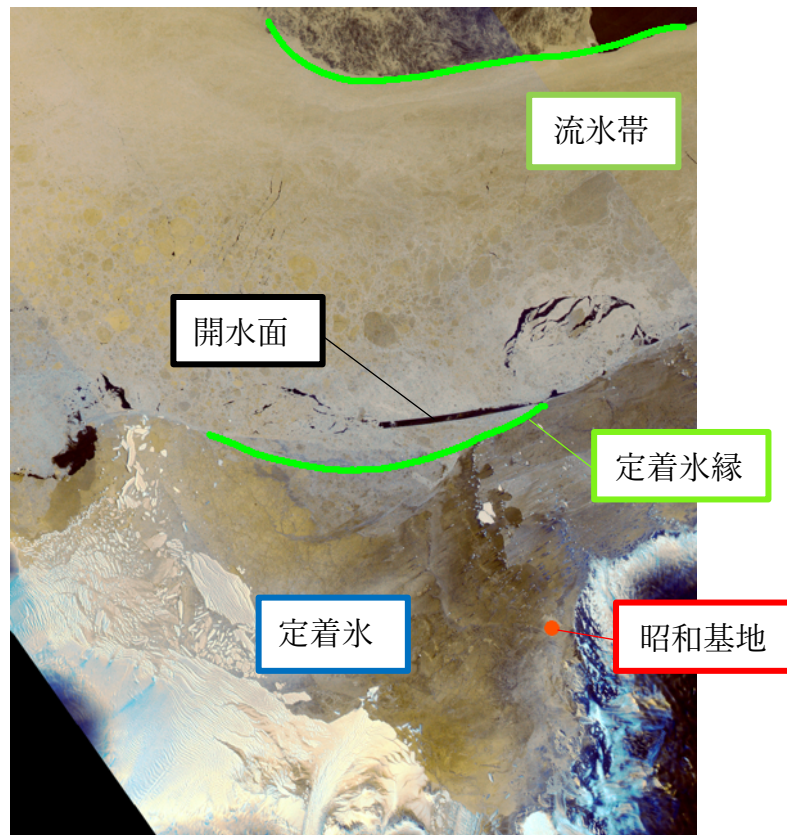


Fig. 2-4 1月3日の衛星画像



## 2.3. 取得データ

JARE60 の氷海航行試験では、数多くのデータを取得した。試験で取得した各データについて説明する。

### 2.3.1. 船体挙動データ

「しらせ」の船速やピッチ、ロール等の船体動揺、推進器の軸トルク等の船体挙動データは、「氷海モニタリングシステム」と呼ばれる観測システムによって記録される。全記録項目を Fig. 2-5 に示す。速力(対水)は、氷海では記録することが出来ないため、本研究では GPS 船位から計算された速力(対地)を、船速として使用している。

記録は大井埠頭出港から入港までの全航行区間を通して行われる。氷海モニタリングシステムのセンサ等の配置図を Fig. 2-6 に示す。データの記録間隔は 0.01 秒であるが、表に記載されている統合化航海情報 LAN を経由するデータは 0.25 秒間隔で更新されている。本研究で主として使用する船体挙動データの更新間隔は 0.25 秒であったため、本研究では全てのデータを 4 Hz にリサンプリングして解析に使用した。氷海モニタリングシステムはしらせ建造時に設置されたもので、51 次から今年の 60 次までの 10 年分のデータが蓄積されている。

No.	計測項目	計測機器等	備考
SL-1	UTC 時刻	艦 GPS →統合化航海情報 LAN	SL-1～15 は観測隊 LAN に流れる航海情報を第 1 観測室に設置する収録システムで収録。
SL-2	船位	艦 GPS →統合化航海情報 LAN	
SL-3	速力 (対水)	艦電磁ログ→統合化航海情報 LAN	
SL-4	船首方位	艦ジャイロ→統合化航海情報 LAN	
SL-5	ピッチ	艦ジャイロ→統合化航海情報 LAN	
SL-6	ロール	艦ジャイロ→統合化航海情報 LAN	
SL-7	ヨーレート	艦ジャイロ→統合化航海情報 LAN	
SL-8	ピッチレート	艦ジャイロ→統合化航海情報 LAN	
SL-9	ロールレート	艦ジャイロ→統合化航海情報 LAN	
SL-10	舵角 (左右)	→統合化航海情報 LAN	
SL-11	速力区分 (左右)	→統合化航海情報 LAN	運転指令情報
SL-12	回転数調整	→統合化航海情報 LAN	運転指令情報
SL-13	相対風向	→統合化航海情報 LAN	
SL-14	相対風速	→統合化航海情報 LAN	
SL-15	速力 (対地)	艦 GPS →統合化航海情報 LAN	
SS-1	外板フレーム応力 (10 フレーム 20 点)	歪計測装置	第 2 空所フレームで計測される剪断歪信号 (電圧) を第 1 観測室に設置する収録システムで収録。
SS-2	天井板応力 (参考) (3 点)	歪計測装置	3 箇所の天井板の歪信号 (電圧) を第 1 観測室に設置する収録システムで収録。
SA-1	船首部加速度	3 軸加速度計	3 箇所で計測される加速度信号 (電流) を第 1 観測室に設置する収録システムで収録。
SA-2	船体中央部加速度	3 軸加速度計	
SA-3	船尾部加速度	3 軸加速度計	
SM-1	軸回転数 (左右)	軸馬力/スラスト計	軸馬力/スラスト計の信号 (電流) を第 1 観測室に設置する収録システムで収録。
SM-2	軸トルク (左右)	軸馬力/スラスト計	
SM-3	軸馬力 (左右)	軸馬力/スラスト計	
SM-4	軸スラスト (左右)	軸馬力/スラスト計	
SN-1	計測ノッチ		必要に応じて利用

Fig. 2-5 氷海モニタリングシステム計測項目

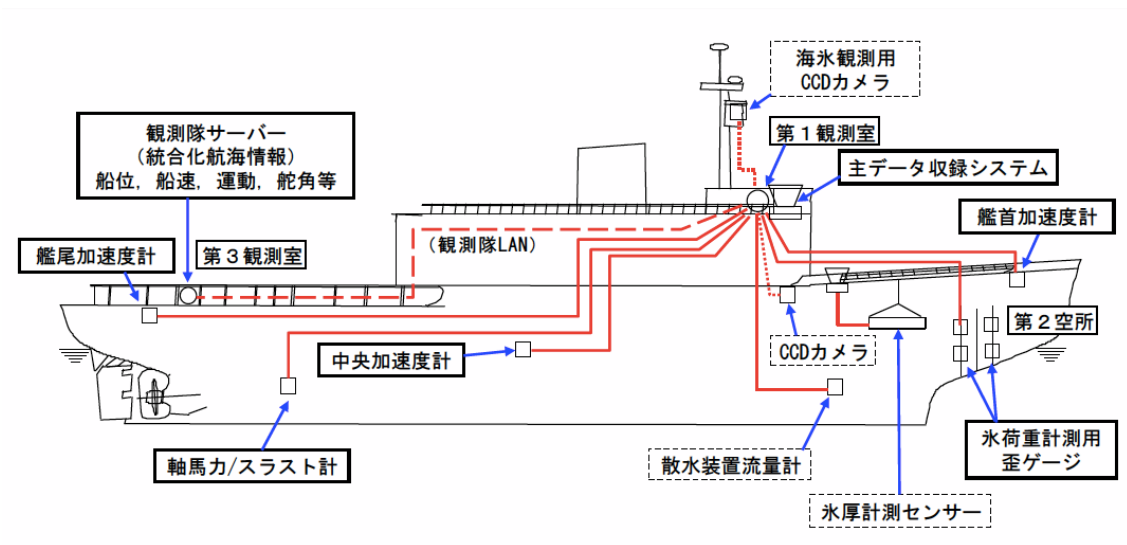


Fig. 2-6 氷海モニタリングシステム概要

### 2.3.1. ビデオカメラによる船首周辺の映像・船橋での音声の記録

復路および氷海航行試験中、船橋に GoPro カメラを設置し、しらせ前方の映像をタイムラプス機能で撮影し、15 倍速の動画として記録した。カメラの設置状況を Fig. 2-7 に示す。写真右に写っているのがカメラである。吸盤型のマウントを使用して、船橋の窓ガラスに固定した。撮影した動画の例を Fig. 2-8 に示す。



Fig. 2-7 船橋での記録の様子



Fig. 2-8 ビデオカメラによる記録の例

### 2.3.1. 氷厚・積雪深 (デジタルカメラ+レーザー距離計による観測)

定着氷砕氷航行中、第一甲板右舷もしくは左舷においてデジタルカメラとレーザー距離計を用いた氷厚・積雪深の記録を実施した。

舷側にて側面が鉛直上方向に向いた海水を撮影し、それと同時にレーザー距離計でカメラと海水の距離を測定する。撮影した画像における海水厚のピクセル数  $n$  と、実際の海水厚  $h$  は、相似則を利用して以下の式で表せる。

$$h = n \times 0.3061 \times d \quad (2-1)$$

ここで、 $d$  はカメラと海水の距離[m]であり、0.3061 は事前に得られているカメラに固有な定数である。

この計測は、船橋での測定と同時に行う必要があったため、筆者だけでは実施できず、南極観測隊の非常に多くの隊員・同行者の方々にご協力いただいた。この観測で撮影された海水の画像を Fig. 2-9、Fig. 2-10 に示す。Fig. 2-9 のように、海水が砕氷された後に綺麗に側面を鉛直上向きにする場合は、レーザー距離計の値を用いて正確に氷厚を求めることができるが、Fig. 2-10 のような、砕氷された海水が粉々に砕けてしまっている場合は、画像のどの部分が氷厚に当たるか不明なため、氷厚を求めることが出来ない。また、海水が傾いてしまう場合には実際の氷厚よりも薄く見積もってしまうという問題点もある。断面が鉛直上向きに向いている場合でも、厚い海水の場合は回転の段階で低層部ば剥離していることがあり、過小評価してしまう可能性もある。

また、レーザー距離計を使用した計測においては、カメラと海水の距離を正確に計測することが重要である。日中の観測ではレーザー距離計がポイントしている地点が非常に目視しにくく、計測した距離が実際に測定したい海水との距離を測っているか、という点に関しては疑問が残る。



Fig. 2-9 第一甲板から撮影した海氷 1



Fig. 2-10 第一甲板から撮影した海氷 2

### 2.3.2. 燃料消費量

しらせの発電に使用される燃料消費量は、操縦室のコンソール画面に「主機運転状態」としてリアルタイムで出力されている。これは「しらせ」側の LAN に接続しているパソコンで表示することができるため、船橋でこの画面を表示していただき、カメラのタイムラプス機能で 1 分毎の燃料消費量を記録した。撮影した画面の写真を Fig. 2-11 に示す。この手法は 57 次報告書で提案された方法に倣ったものである。操縦室でこの撮影をした 59 次と異なり、本年度は船橋でこの記録を行なったが、船橋では時間帯によって太陽光が強く入り込み、画面がうまく撮影できていないことがあった。今後の記録では、直接画面のキャプチャができるよう、事前に「しらせ」側と調整するのが望ましい。



Fig. 2-11 燃料消費量表示画面

### 2.3.3. 船首部散水装置稼働状況（散水開始・終了時刻）

氷海モニタリングシステムで記録される散水装置の流量計は51次から故障しており、散水装置の稼働状況がわかるデータは自動では記録されない。また、海氷にむかって散水される様子は、船橋から直接見ることは難しい。散水装置の起動・停止の切り替えは第二甲板の操縦室で操作され、船橋では Fig. 2-12 に示すランプでのみその運転状態を確認することができる。しらせ砕氷航行中、常時船橋に観測者を設置し、このランプの点灯を目視で確認し、記録を行った。本年度は、散水試験中だけでなく通常の定着氷ラミング時にもこの散水装置の起動・停止時刻を記録した。



Fig. 2-12 船橋における散水装置の運転確認ランプ



## 2.4. 観測

### 2.4.1. 試験実施日程

氷海航行性能試験に関する日程を Table 2-2 にまとめた。

JARE60 において、ラミング回数は往路 344 回、復路 1399 回の合計 1743 回であった。

過去の氷海航行性能試験では、例年実施している海底地形測量等のリュツォ・ホルム湾を広範囲に渡って砕氷航行する観測と合わせて氷海航行性能試験を実施していた。しかしながら本年度の観測隊海洋観測ではこれらの観測がなく、スケジュールの関係から、当初計画していたフィールド選定計測を実施する事は出来なかったため、本務航路上での性能試験計測を実施した。本論文の付録として、試験の計画書を添付する。

Table 2-2 氷海航行性能試験に関する日程

11月28日	簡易船体動揺計の設置
11月30日	フリーマントル出航
12月13日	気象長と氷海航行試験打ち合わせ
12月14,15日	流水域砕氷航行(ラミング68回)
12月19~22日	定着氷砕氷航行(定着氷縁~空輪停留点、ラミング275回)
12月25日	定着氷砕氷航行(停留点~昭和基地、ラミング1回)
1月27~31日	定着氷砕氷航行(リュツォ・ホルム湾海洋観測)
2月3日	連続砕氷・ラミング散水試験
2月4日	連続砕氷・ラミング散水試験
2月5日	定着氷縁到着
2月12~23日	復路乱氷帯

### 2.4.2. 試験海域

本年度の氷海航行性能試験は、本務行動中常実施した通常航行時計測に加えて、Fig. 2-13 に示す海域で散水試験を行なった。前節でも述べたとおり、本年度の観測隊海洋観測では海底地形測量等のリュツォ・ホルム湾を広域に航行する観測がなく、また、往路の氷況によって観測隊のスケジュール全体が圧縮されたため、当初計画していたフィールド選定計測を実施する事は出来なかった。そのため、性能試験計測として復路の本務航路上にて散水試験を行なった。散水試験は2日間に渡り実施した。詳細な時刻と緯度経度は Table 2-3 に示す通りである。試験海域は Fig. 2-13 の緑円で示した海域である。散水試験に関しては、次項で詳しく記述する。

Table 2-3 散水試験実施区間

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

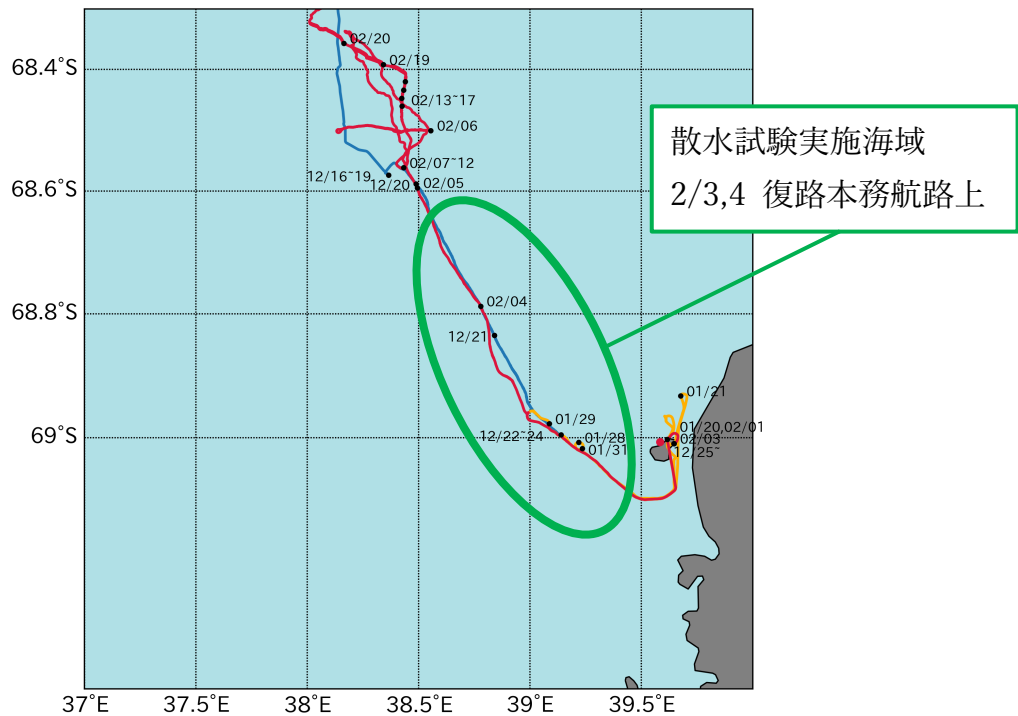


Fig. 2-13 氷海航行性能試験実施海域

## 2.5. 散水試験

散水試験として、「しらせ」の砕氷航行中に散水装置の起動・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氷域を選定し、直進・一定速度で散水の切り替えを行うべきであるが、前述した通り、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・無しのラミングを繰り返した。

散水試験実施期間でのしらせの軸回転数と、船速をプロットしたものを Fig.2-13 から Fig.2-26 に示す。赤色の部分が、散水装置が稼働している区間、青色の部分が稼働していない区間、黒色の線が軸回転数である。

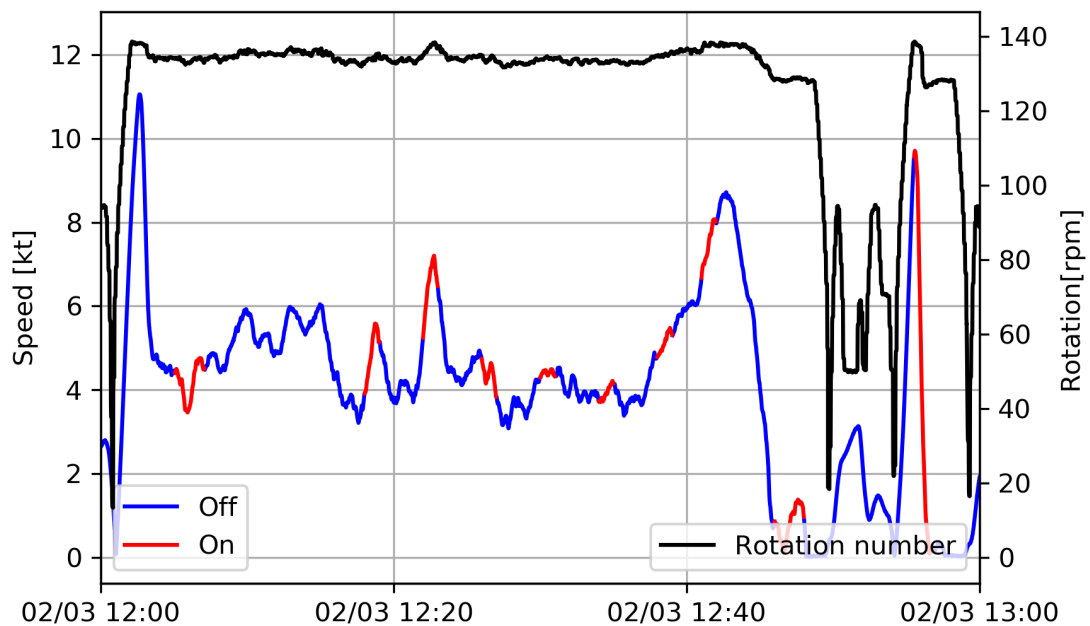


Fig. 2-14 軸回転数と速度(2/3 12:00-13:00)

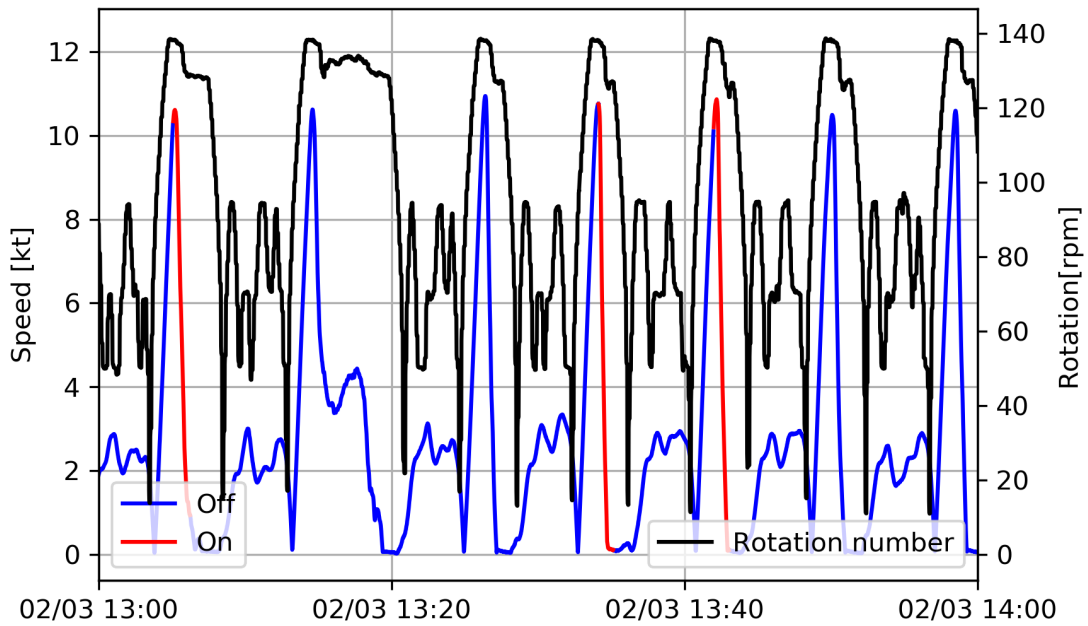


Fig. 2-15 軸回転数と速度(2/3 13:00-14:00)

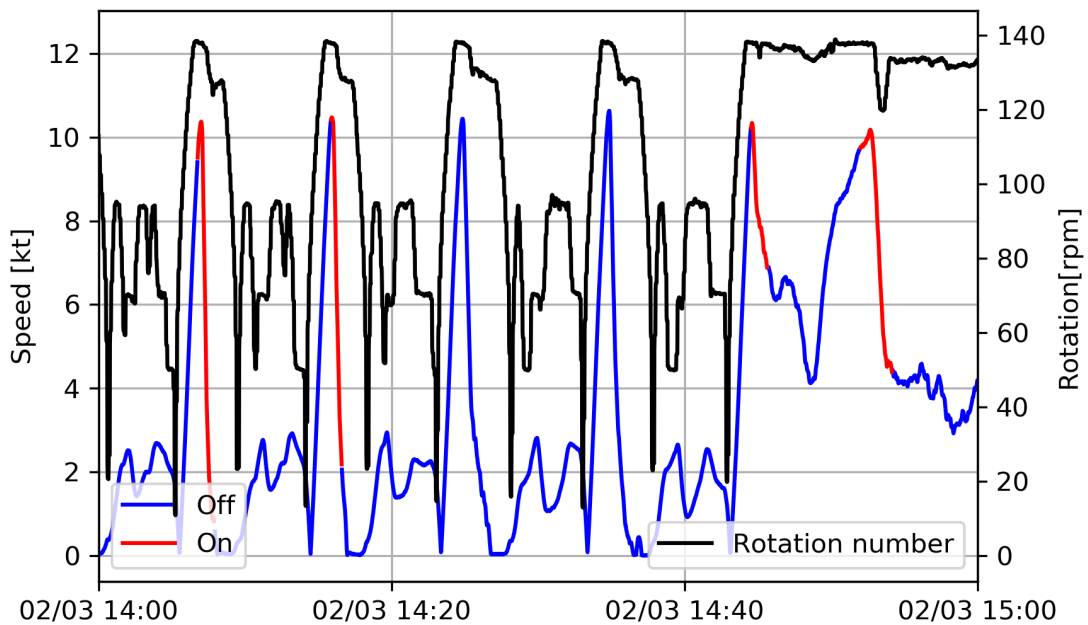


Fig. 2-16 軸回転数と速度(2/3 14:00-15:00)

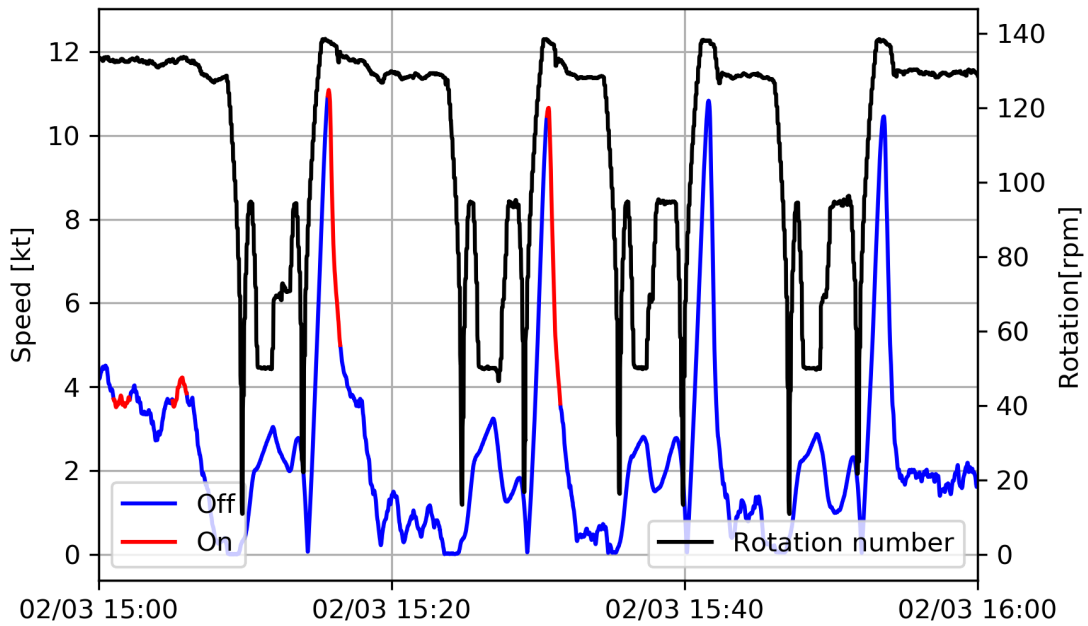


Fig. 2-17 軸回転数と速度(2/3 15:00-16:00)

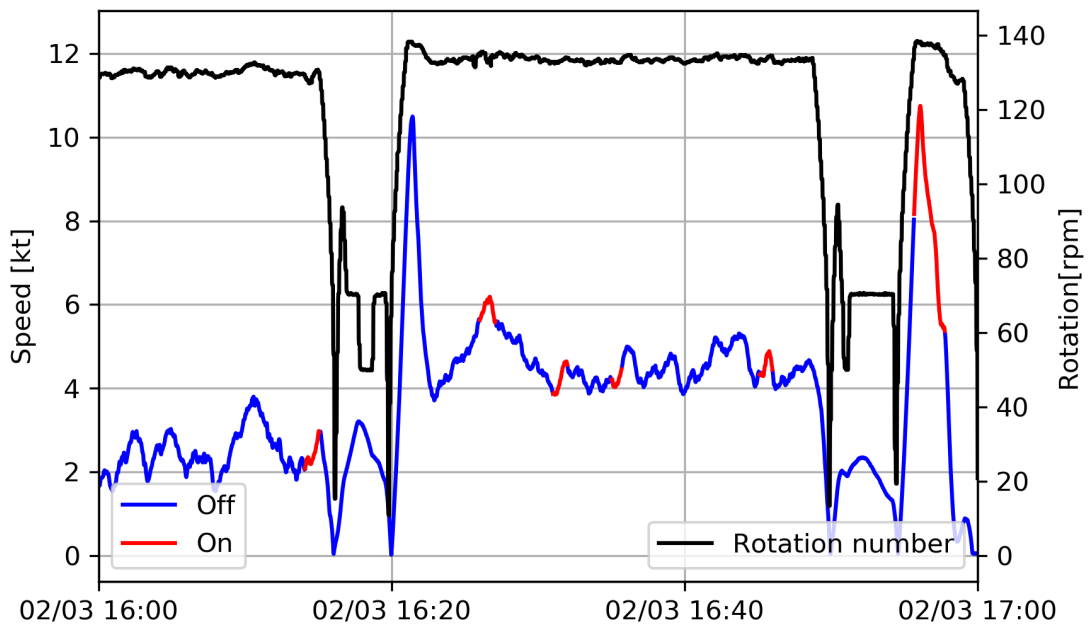


Fig. 2-18 軸回転数と速度(2/3 16:00-17:00)

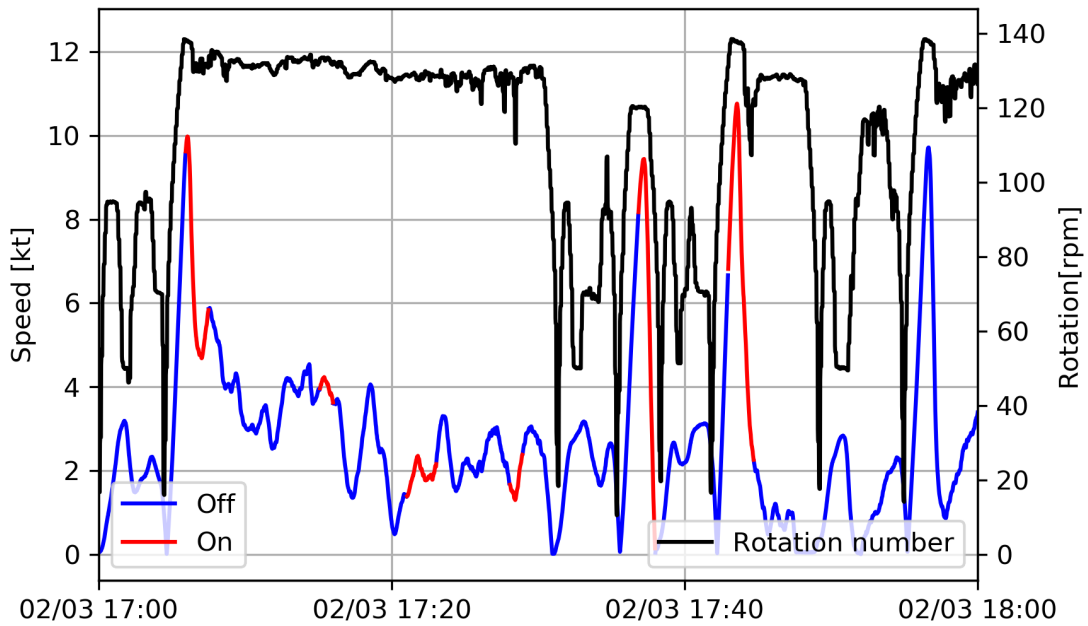


Fig. 2-19 軸回転数と速度(2/3 17:00-18:00)

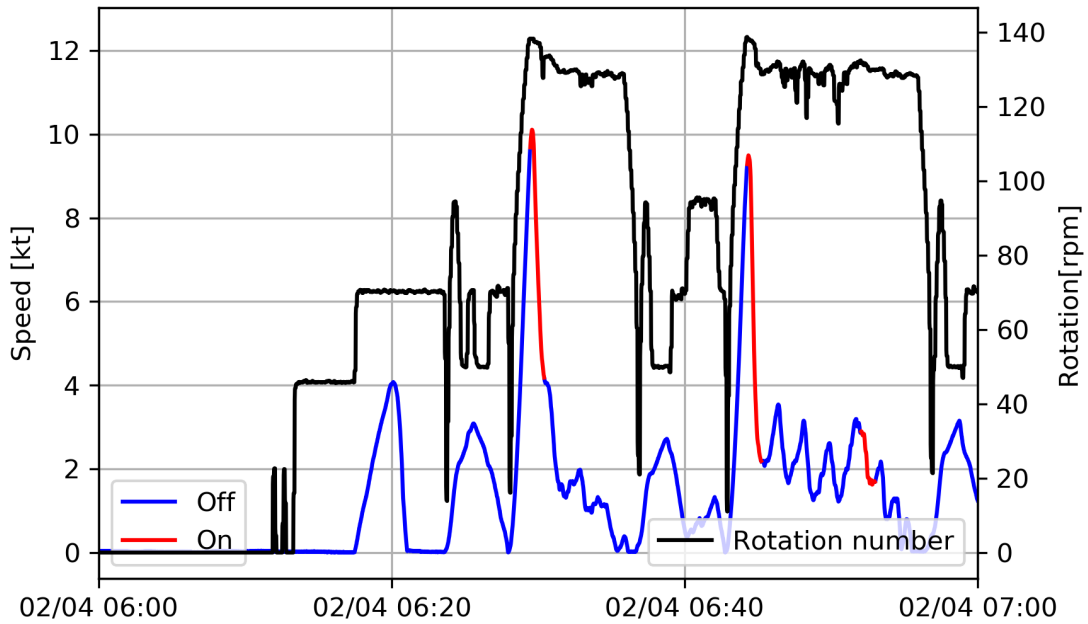


Fig. 2-20 軸回転数と速度(2/4 06:00-07:00)

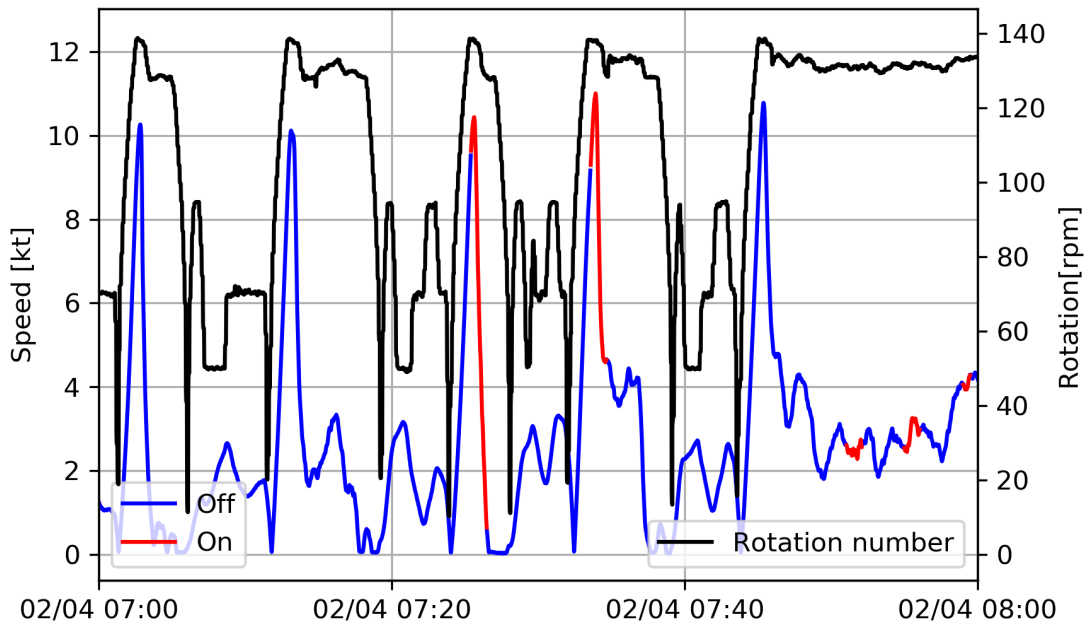


Fig. 2-21 軸回転数と速度(2/4 07:00-08:00)

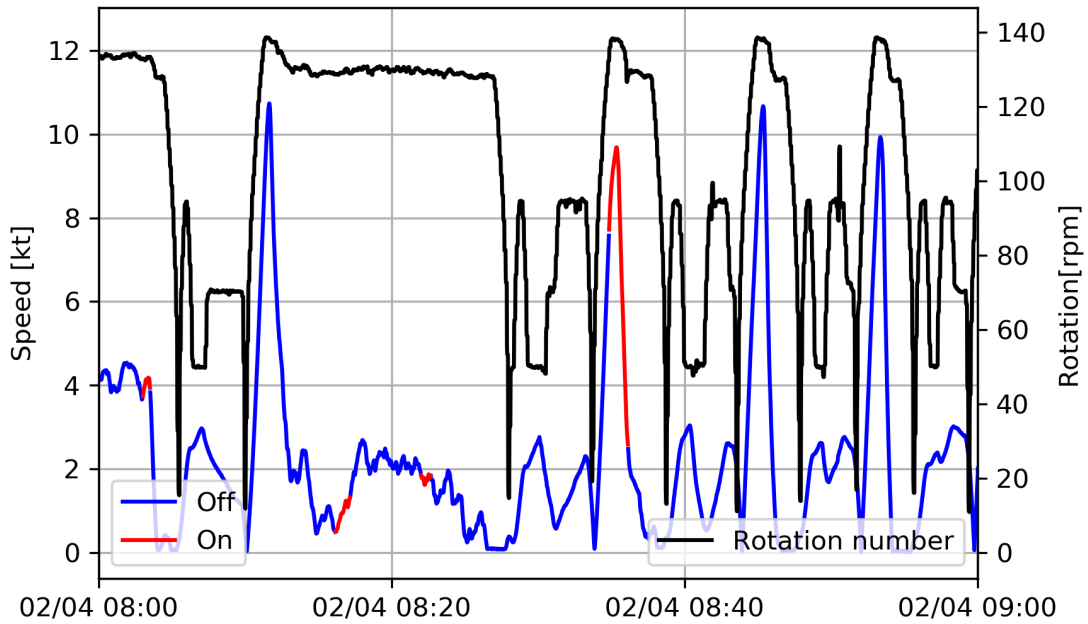


Fig. 2-22 軸回転数と速度(2/4 08:00-09:00)

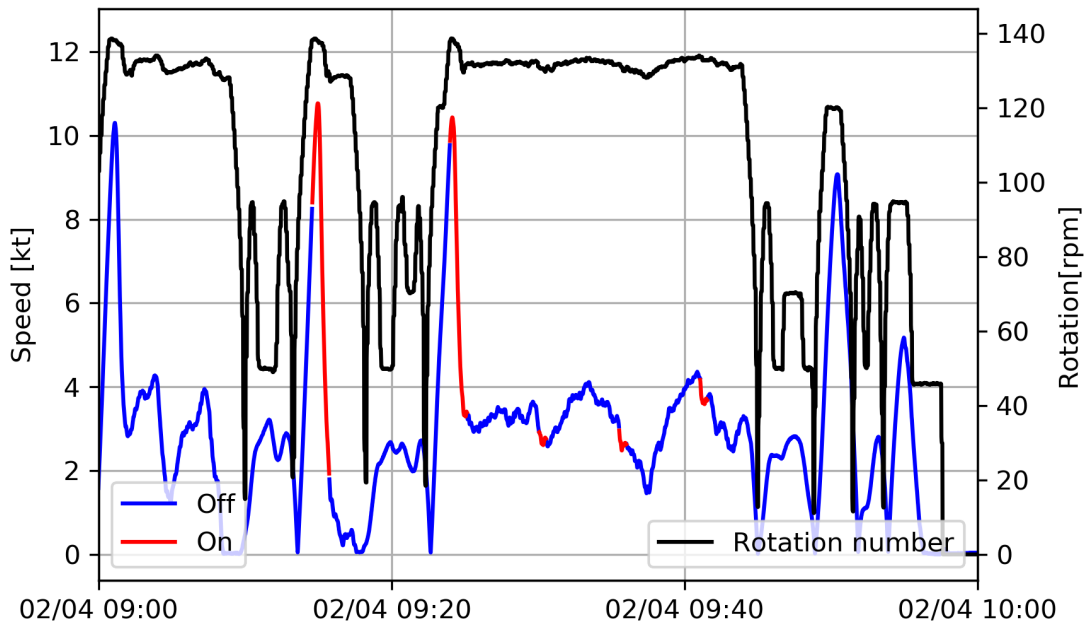


Fig. 2-23 軸回転数と速度(2/4 09:00-10:00)

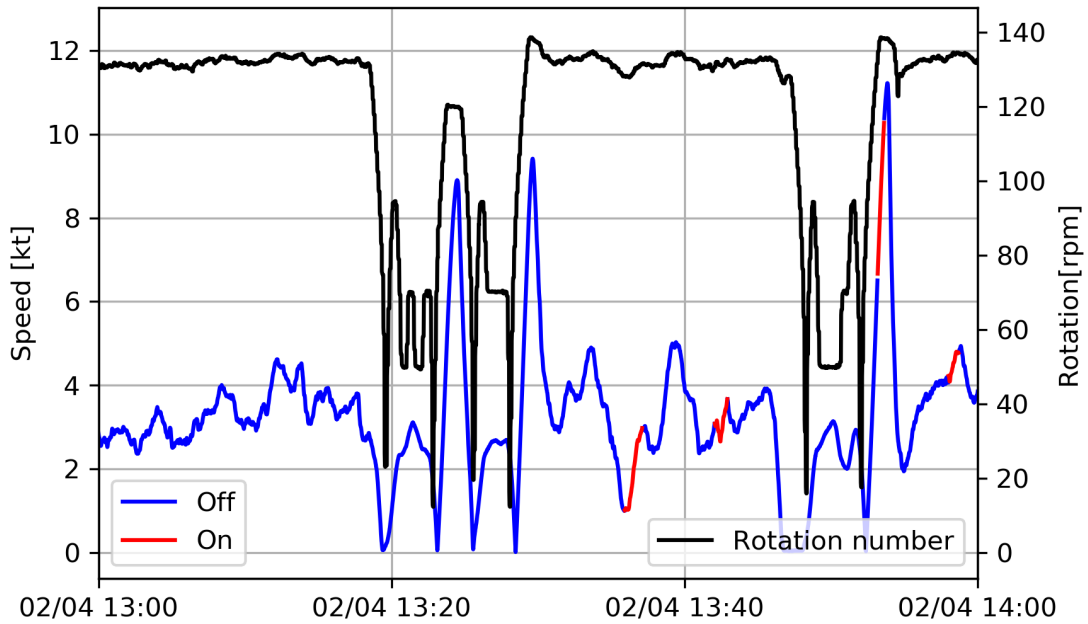


Fig. 2-24 軸回転数と速度(2/4 13:00-14:00)



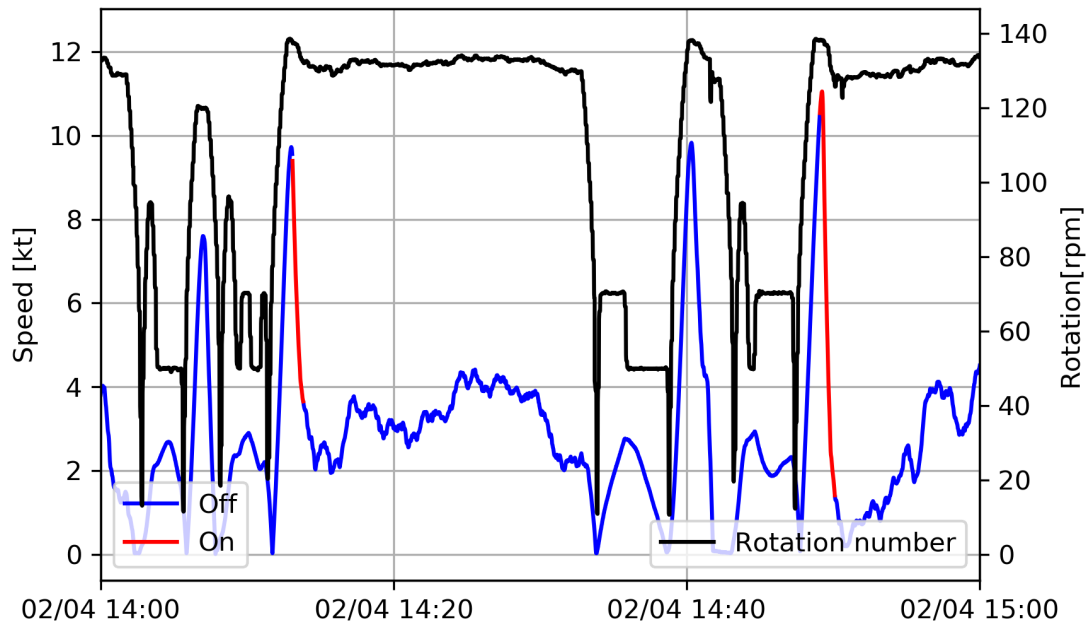


Fig. 2-25 軸回転数と速度(2/4 14:00-15:00)

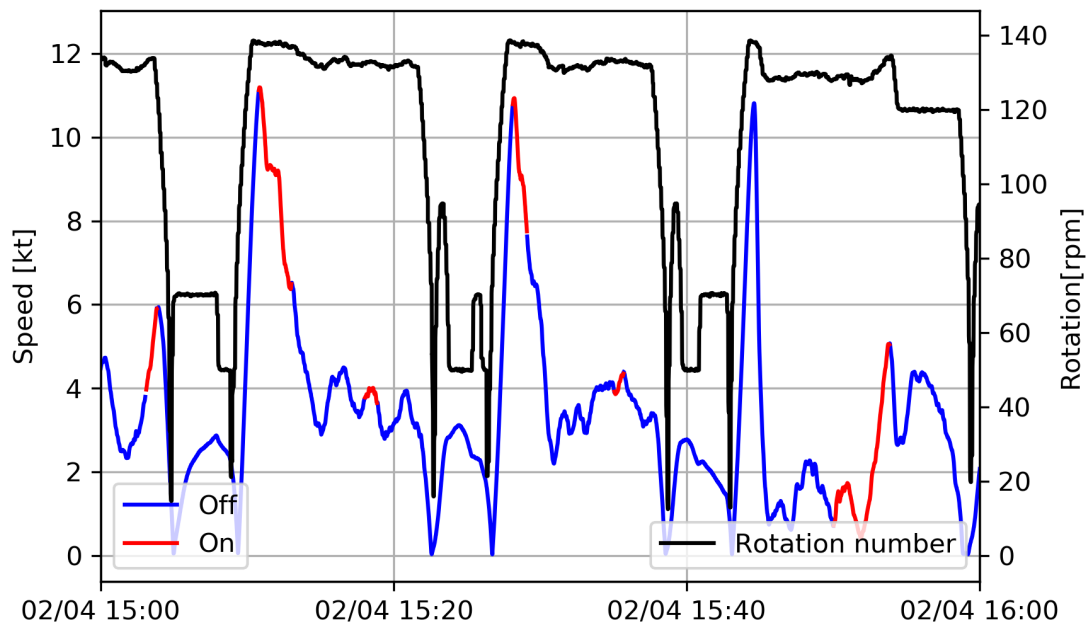


Fig. 2-26 軸回転数と速度(2/4 15:00-16:00)

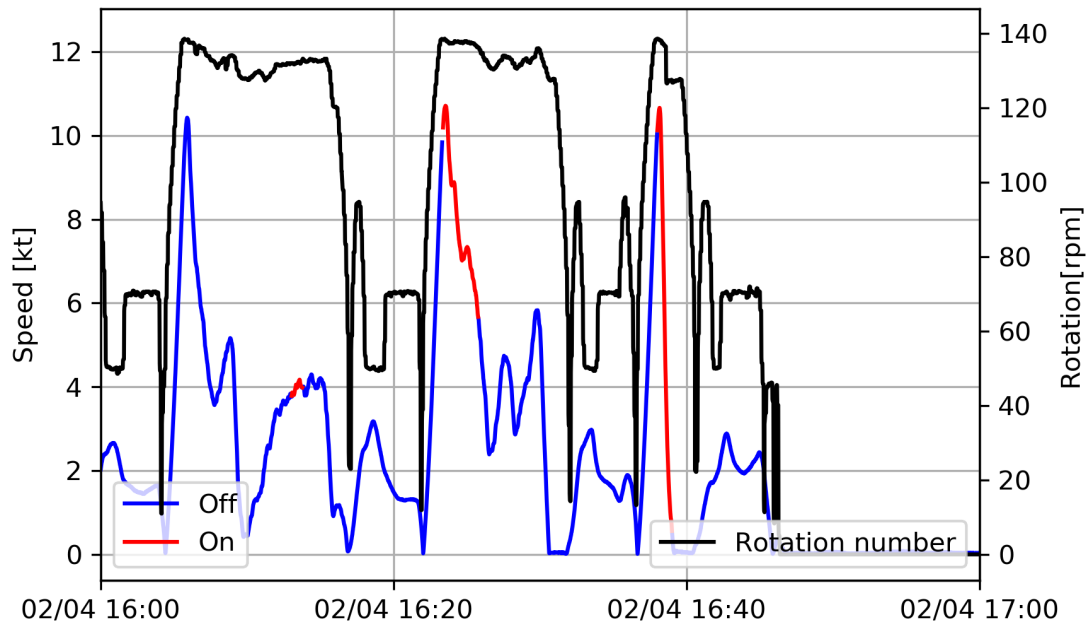


Fig. 2-27 軸回転数と速度(2/4 16:00-17:00)

## 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には、GPS から計算された速度  $V$  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(高橋 2019)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

$V > 4.5\text{knot}$  ( $= 2.315\text{m/s}$ )となるデータを抽出する。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  $1.5\text{ m/s}$  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  $V < 0.3\text{knot}$  ( $=0.154333\text{m/s}$ )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、進出距離・貫入速度・緯度経度等の各特徴量を計算する。

このアルゴリズムは、高橋の修士論文で提案されたものである。本研究で使用するラミングのデータは、このアルゴリズムを使用した python プログラムを用い

で抽出した。Fig. 3-1 に、JARE60 で得た氷海モニタリングシステムから、プログラムを用いて抽出したラミングの進出距離を示す。

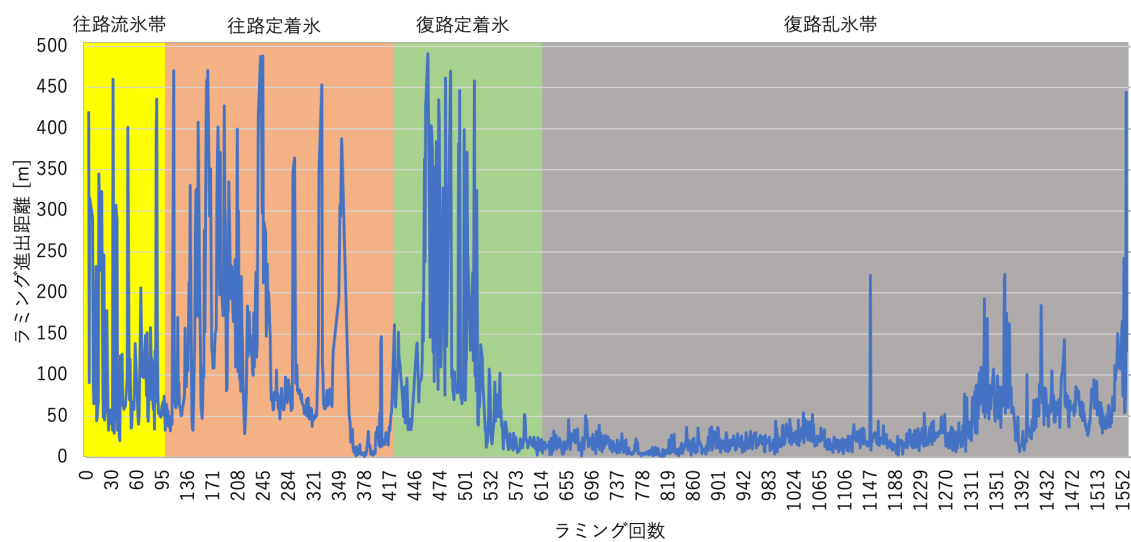


Fig. 3-1 プログラムで抽出したラミング進出距離

## 3.2. 散水効果の評価

### 3.2.1. 散水試験区間中のラミング進出距離

2.5 で示した散水試験区間中で実施したラミングの進出距離と、全氷厚の関係をプロットしたグラフと、散水ありのラミングと散水無しのラミングの進出距離平均を Fig. 3-2、Table 3-2 に示す。散水試験区間中で行なったラミングは計 28 回であった。全氷厚は氷厚と積雪深を合わせた厚さで、主にデジタルカメラ+レーザー距離計の計測によって得られた値を用い、デジタルカメラ計測による氷厚が得られなかったラミングに関しては、目視観測による氷厚・積雪深を用い、四角のマーカ―を使用して示した。

今年度の散水試験において、散水装置の稼働によってラミング進出距離が約 13%伸びていた。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。JARE51 の報告書では、ラミング散水の散水効果は、Table 3-1 の通りであると報告されている。今回の散水試験海域は氷厚 1~1.7m、積雪深 0.1~0.3m であったことを踏まえると、今回の試験結果は 51 次の報告よりも進出距離延長効果が小さい。海氷は、定着氷であっても年を跨ぐと大きく様子を変える。複数年に跨ってラミングデータの解析を進めるには、氷厚と積雪深だけではなく、クラックの入り方や気温など他のパラメータの影響も含めて考えるべきだと思われる。

Table 3-1 ラミング砕氷における散水効果(散水時の進出距離/散水なし時の進出距離)

	氷厚 3m 未満	氷厚 3m 以上
積雪 0.3m 未満	1.31	-
積雪 0.3~1.0m	1.54	1.16
積雪 1.0m 以上	0.92(~1)	1.08

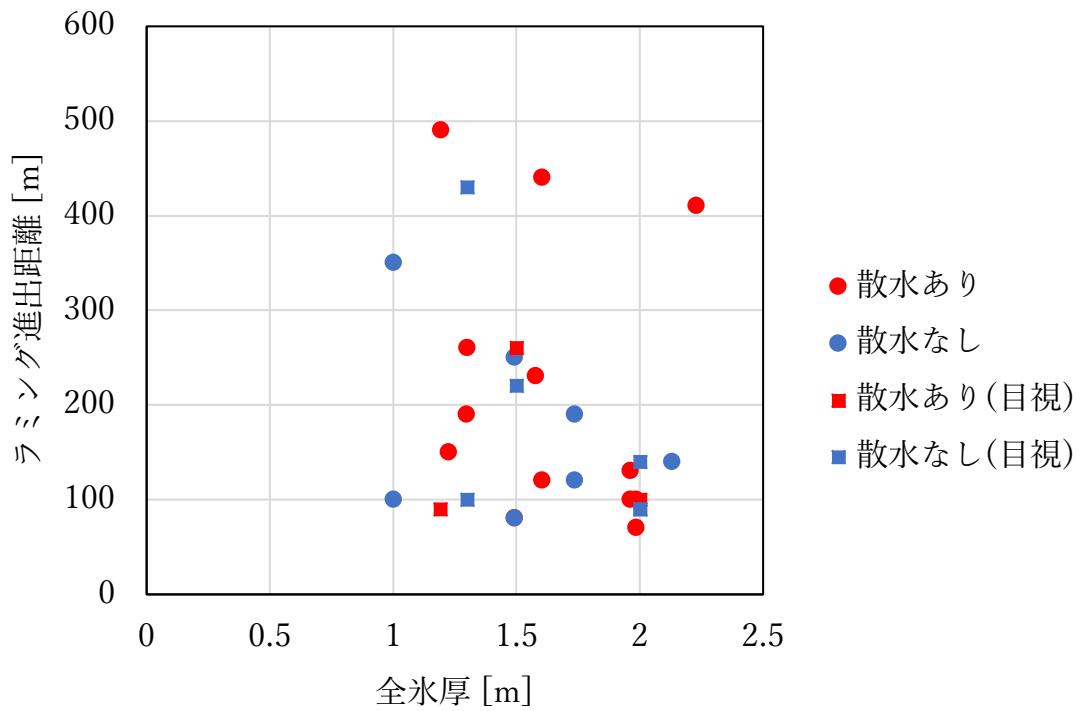


Fig. 3-2 ラミング進出距離と全氷厚(デジタルカメラ計測もしくは目視観測)の関係

Table 3-2 散水試験区間のラミング進出距離

	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

### 3.2.2. 貫入直後の速度変化

ラミングにおける散水装置の効果を評価するため、貫入直後の速度変化に注目した。

ラミング時、散水によってしらせ前方の積雪が海水を含み、摩擦係数の減少およびダンパー効果の軽減が起こる。この影響は、しらせ貫入時に砕氷抵抗によって起こる船速の低下速度の軽減として現れると考えられ、貫入直後の船速変化を評価することで、ラミングにおける散水効果を評価することが出来ると考えられる。

まず、氷海モニタリングシステムで得られた船体運動データから、JARE60でのラミング時の船速変化を 3.1 に示したアルゴリズムのプログラムを使用して抽出した。次に各ラミングデータの 1 秒間の速度変化[kt/s]を、速度最大の点（貫入開始の瞬間）から 60 秒間求めた。

最後に、JARE60 で得られたラミングデータから、氷況の変化が無く且つ散水の切り替えを行なっているラミング区間を抽出した。今回の解析では、以下の Table 3-3 に示す区間を解析対象とした。

Table 3-3 ラミング解析対象区間

区間	日付	UTC 時刻	緯度	経度
1	2018/12/20	07:02~10:27	-68.8983 ~ -68.9345	38.9383~38.9845
2	2019/02/03	13:32~14:23	-68.9056 ~ -68.9025	38.9126~38.9003

各区間での氷況とラミング回数は、以下の Table 3-4 に示す通りである。

Table 3-4 解析対象区間の氷況

区間	氷厚[m]	積雪深[cm]	散水 ON 回数	散水 OFF 回数
1	1.5	100	12	5
2	1.7	30	4	4

各区間でのしらせ貫入後の加速度変化を、Fig. 3-3、Fig. 3-4 に示す。赤線が散水装置を稼働させた場合、青線が稼働させていない場合である。各ラミングの平均を太線で表した。氷況の変化が非常に少ないと考えられる短い区間のラミングでも、各ラミングの加速度変化は様々であり、加速度変化を利用して散水効果

を評価する事は難しいと思われた。

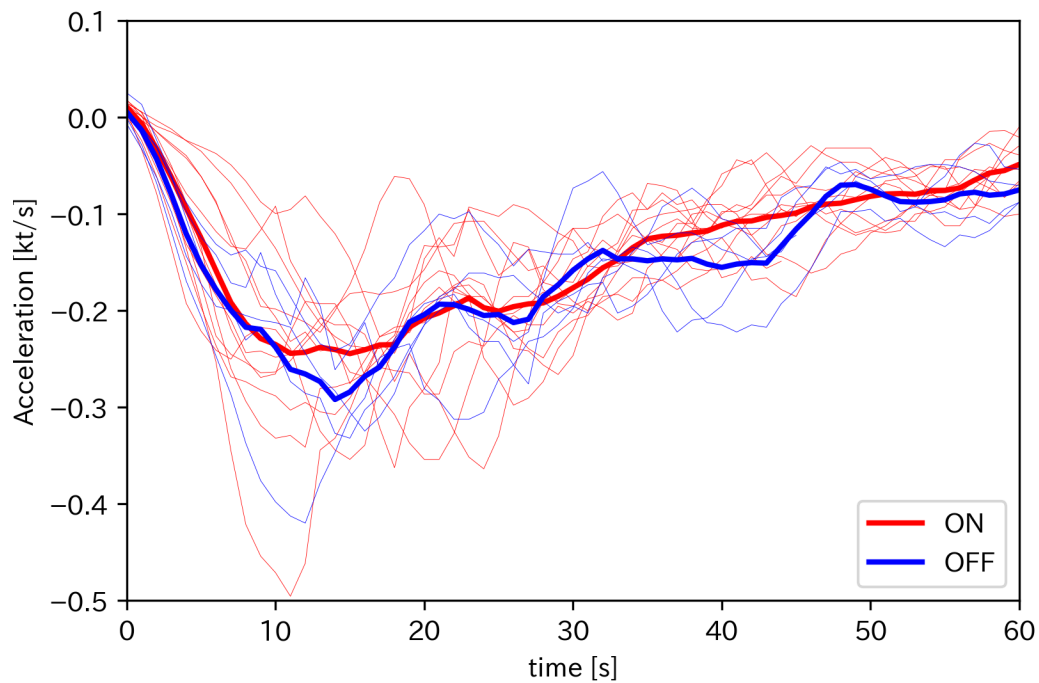


Fig. 3-3 ラミングの加速度変化(区間 1)

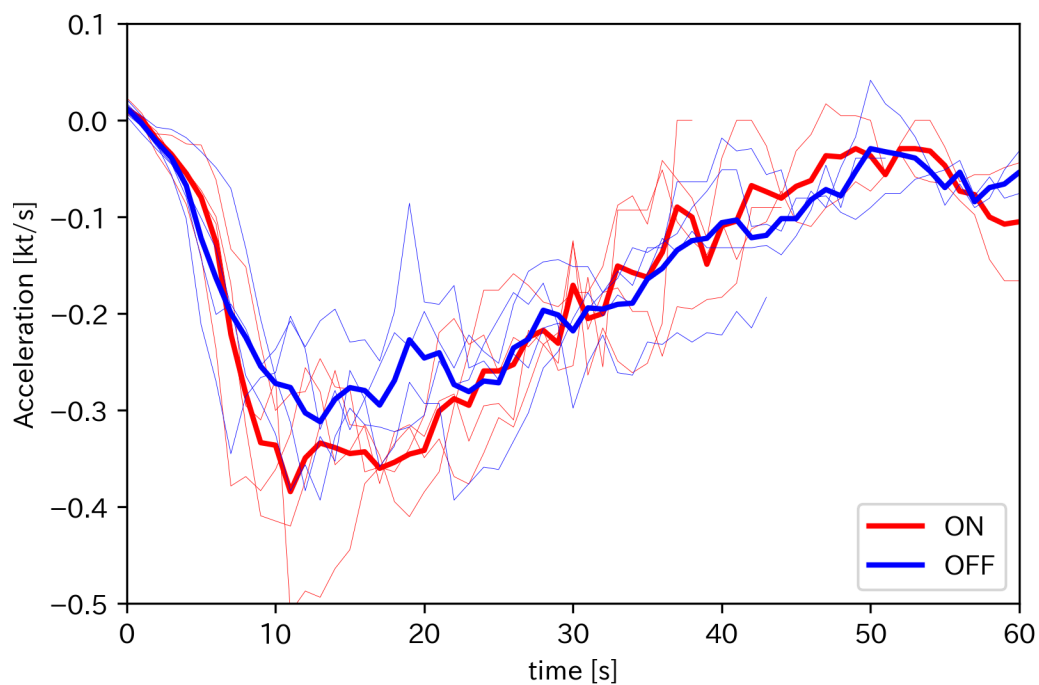


Fig. 3-4 ラミングの加速度(区間 2)



## 4. 連続砕氷航行

### 4.1. 連続砕氷散水試験区間

散水試験を行った期間のうち、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することができたのは、以下の Table 4-1 に示す区間で、散水回数は 23 回だった。

この区間での氷況は、氷厚 0.8~1.2m、積雪深 10~30cm であった。

Table 4-1 連続砕氷散水試験区間

日付	時間(UTC)	緯度[° ]	経度[° ]
2月3日	12:05~12:40	-68.9599 ~ -68.9177	38.9821 ~ 38.9329
	14:54~15:05	-68.8875 ~ -68.8757	38.8523 ~ 38.8413
	16:25~16:45	-68.8466 ~ -68.8194	38.8185 ~ 38.8122
	17:10~17:30	-68.8060 ~ -68.7924	38.8025 ~ 38.7833
2月4日	7:50~8:03	-68.7657 ~ -68.7562	38.7358 ~ 38.7157
	9:25~9:43	-68.7393 ~ -68.7252	38.6851 ~ 38.6602
	13:40~13:45	-68.6892 ~ -68.6841	38.5991 ~ 38.5955
	14:20~14:30	-68.6687 ~ -68.6592	38.5816 ~ 38.5715
合計	2時間12分		

## 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。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 4 kt (2.06 m/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きるものとした。全散水の散水開始・終了日時とその散水時間を Table 4-2 に示す。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、以下のアルゴリズムを用いた。

1. 外れ値を除外したい解析データの標準偏差  $\sigma$  を求める
2. 全データの中から、平均値から  $3\sigma$  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

Table 4-2 散水開始・終了日時と散水時間

散水番号	散水開始時刻(UTC)	散水終了時刻(UTC)	散水時間
No.1	2019/02/03 12:05:04	2019/02/03 12:07:05	2 分 01 秒
No.2	2019/02/03 12:18:00	2019/02/03 12:19:01	1 分 01 秒
No.3	2019/02/03 12:22:00	2019/02/03 12:23:01	1 分 01 秒
No.4	2019/02/03 12:26:00	2019/02/03 12:27:00	1 分 00 秒
No.5	2019/02/03 12:30:00	2019/02/03 12:30:59	1 分 00 秒
No.6	2019/02/03 12:34:00	2019/02/03 12:35:00	1 分 00 秒
No.7	2019/02/03 12:37:59	2019/02/03 12:39:01	1 分 02 秒
No.8	2019/02/03 15:01:00	2019/02/03 15:02:06	1 分 06 秒
No.9	2019/02/03 16:26:00	2019/02/03 16:27:04	1 分 04 秒
No.10	2019/02/03 16:31:01	2019/02/03 16:32:00	0 分 59 秒

<b>No.11</b>	2019/02/03 16:35:00	2019/02/03 16:35:42	0分42秒
<b>No.12</b>	2019/02/03 17:15:06	2019/02/03 17:16:00	0分54秒
<b>No.13</b>	2019/02/03 17:21:03	2019/02/03 17:23:03	2分00秒
<b>No.14</b>	2019/02/03 17:28:02	2019/02/03 17:28:55	0分53秒
<b>No.15</b>	2019/02/03 16:26:00	2019/02/03 16:27:04	1分04秒
<b>No.16</b>	2019/02/04 07:51:02	2019/02/04 07:52:06	1分03秒
<b>No.17</b>	2019/02/04 07:55:00	2019/02/04 07:56:02	1分03秒
<b>No.18</b>	2019/02/04 07:59:00	2019/02/04 07:59:29	0分30秒
<b>No.19</b>	2019/02/04 08:03:00	2019/02/04 08:03:30	0分30秒
<b>No.20</b>	2019/02/04 09:30:04	2019/02/04 09:30:32	0分28秒
<b>No.21</b>	2019/02/04 09:35:32	2019/02/04 09:36:02	0分30秒
<b>No.22</b>	2019/02/04 09:41:03	2019/02/04 09:41:32	0分29秒
<b>No.23</b>	2019/02/04 13:42:03	2019/02/04 13:42:55	0分52秒

### 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。

$$R_{total} = (T_r + T_l)(1 - t_p) - Ma \times 10^{-3} \quad (4-1)$$

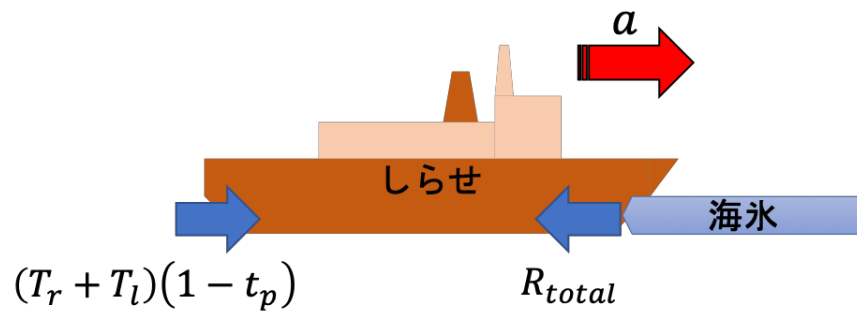


Fig. 4-1 式 4-1 の概要図

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。本研究では、ジャパンマリンユナイテッド株式会社から式の提供を受けた。 $a$  はしらせの加速度 [ $m/s^2$ ] 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。 $M$  はしらせの排水量で、海上自衛隊から提供を受けた記録から、 $17760 \times 10^3$  [kg] とした。散水開始の前後 60 秒ずつの船速・抵抗・スラスト値の時間変化の様子を Fig. 4-2 から Fig. 4-24 に示す。時刻が負の領域(青色)が散水前、正の領域(赤色)が散水後であり、散水開始時刻を 0 秒としている。

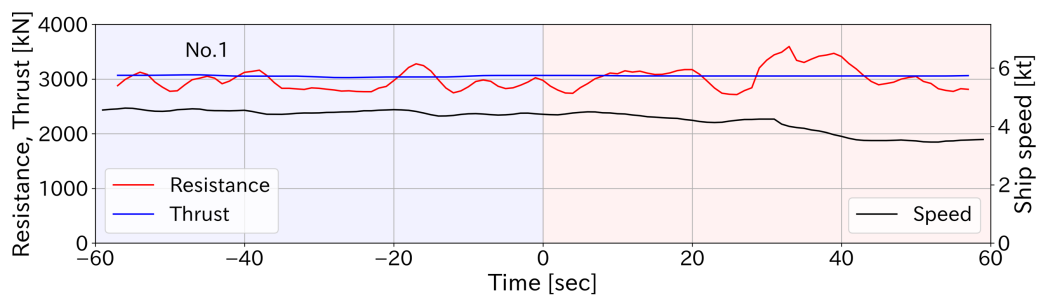


Fig. 4-2 散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.1)

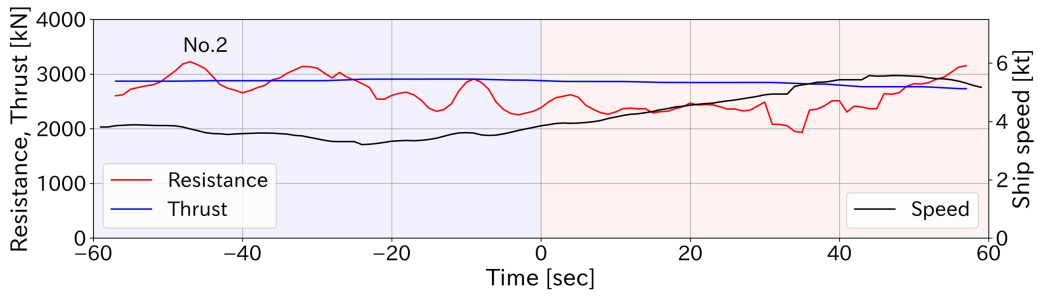


Fig. 4-3 散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.2)

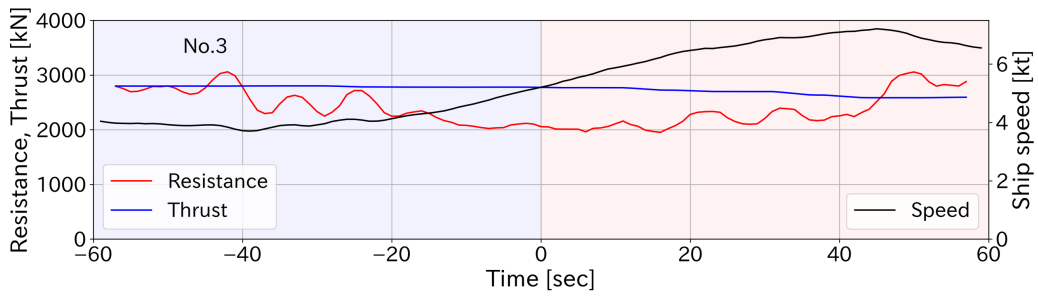


Fig. 4-4 散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.3)

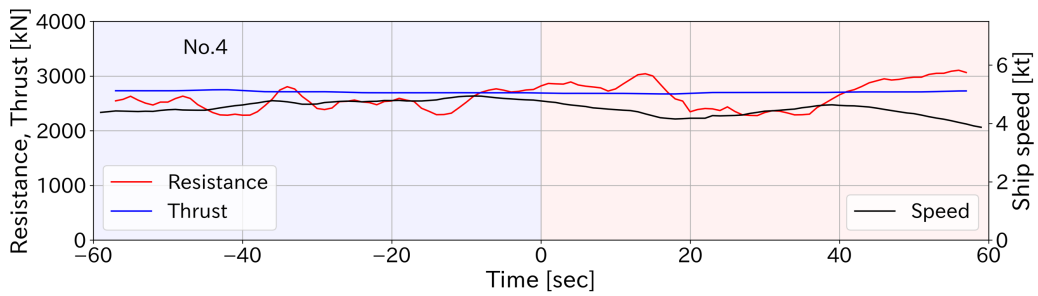


Fig. 4-5 散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.4)

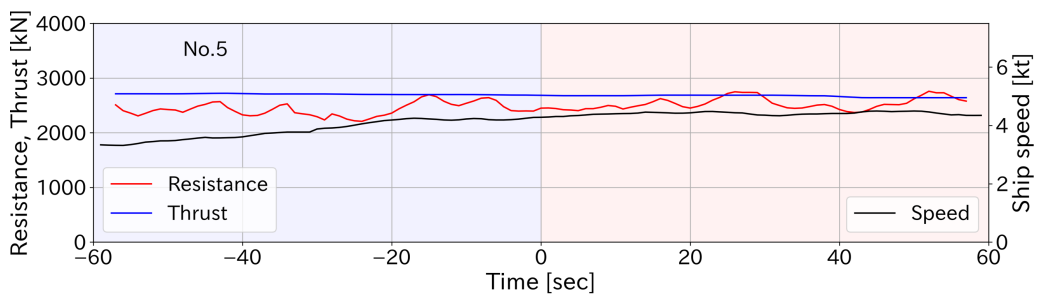


Fig. 4-6 散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.5)

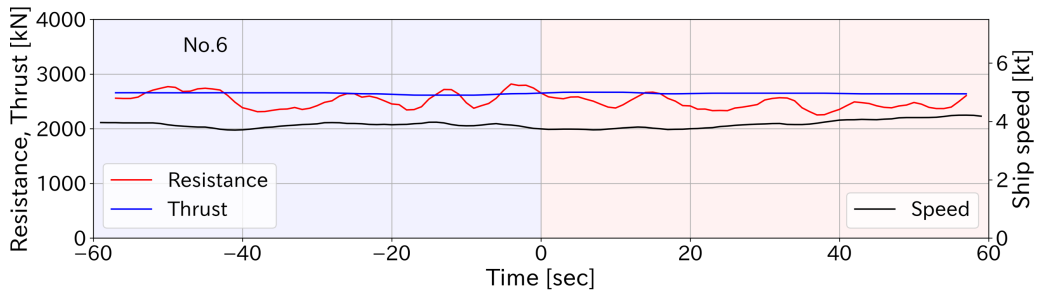


Fig. 4-7 散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.6)

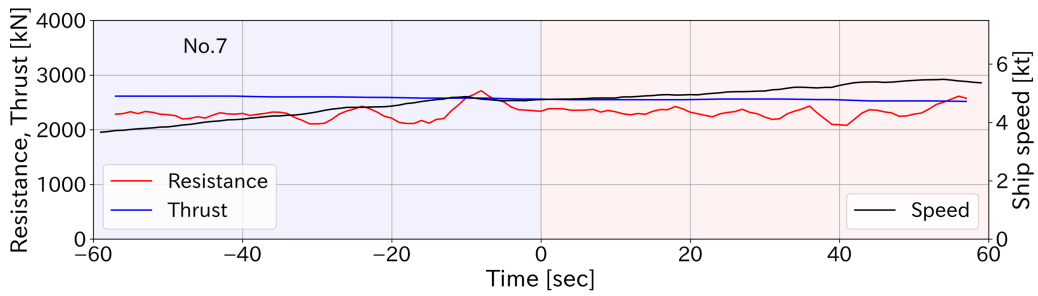


Fig. 4-8 散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.7)

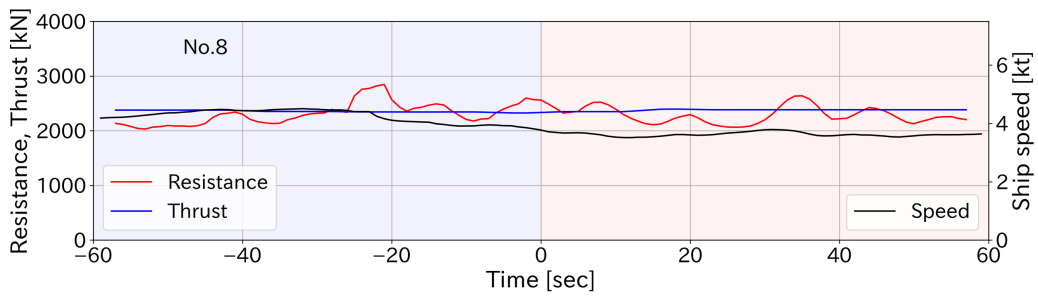


Fig. 4-9 散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.8)

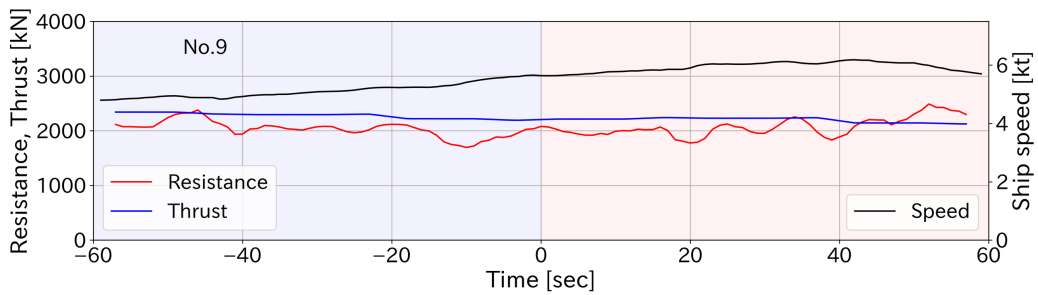


Fig. 4-10 散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.9)

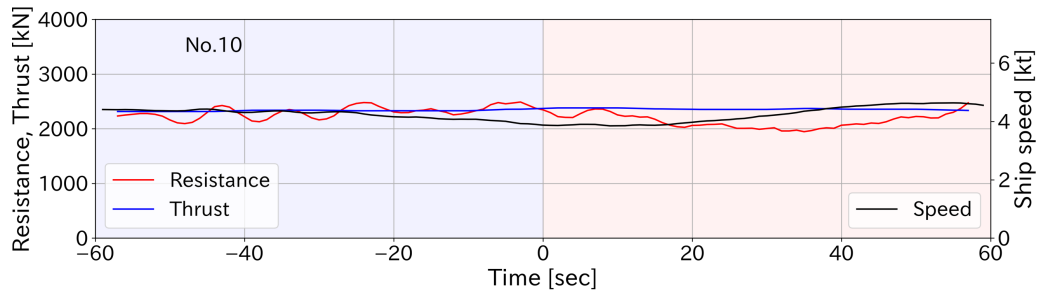


Fig. 4-11 散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.10)

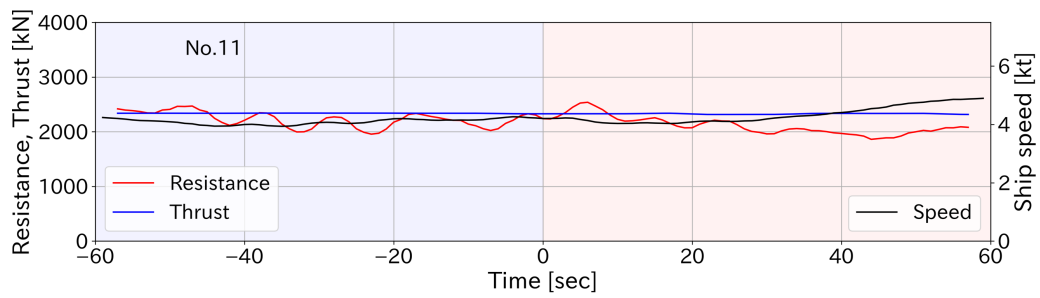


Fig. 4-12 散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.11)

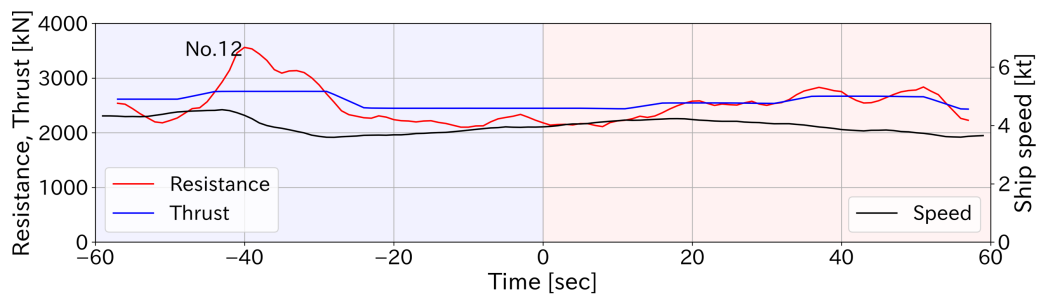


Fig. 4-13 散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.12)

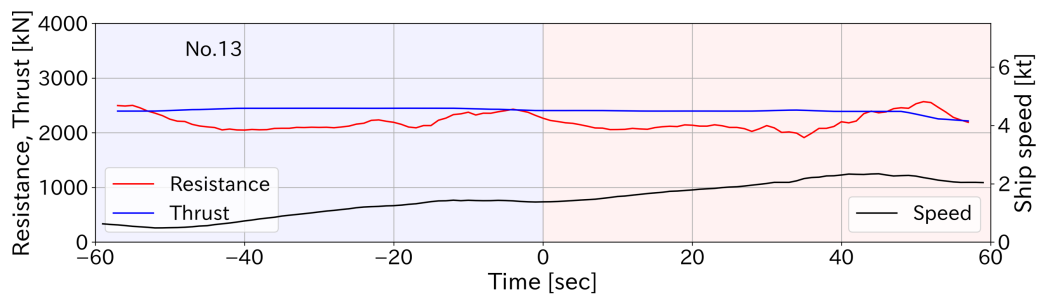


Fig. 4-14 散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.13)

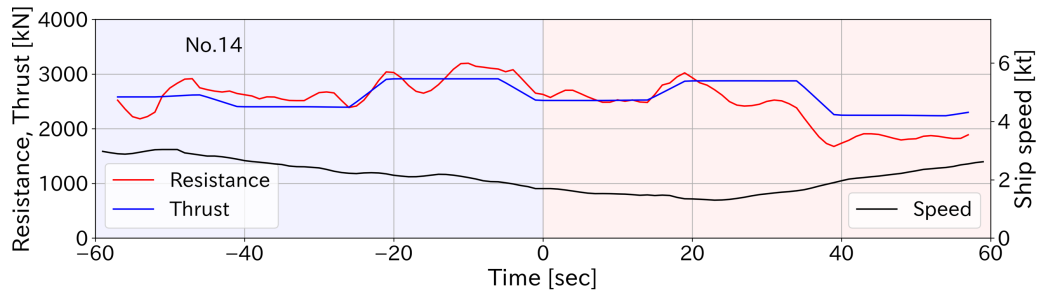


Fig. 4-15 散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.14)

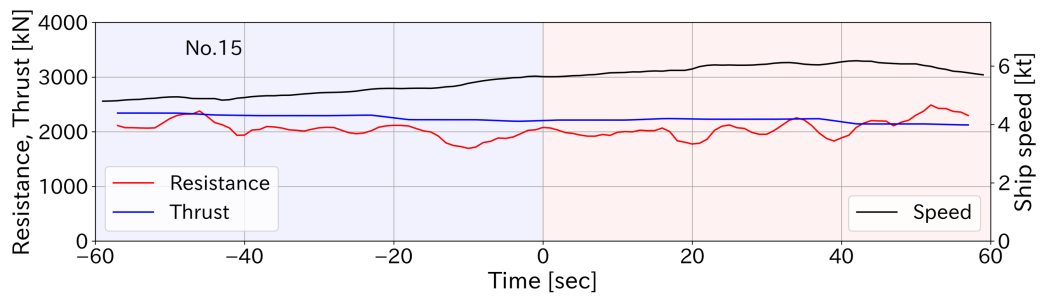


Fig. 4-16 散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.15)

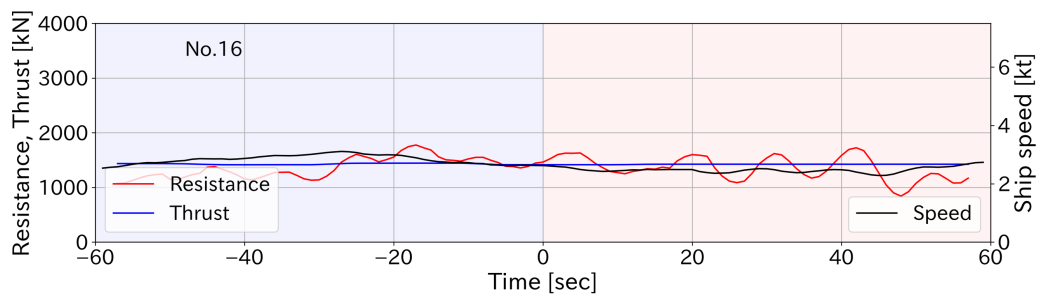


Fig. 4-17 散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.16)

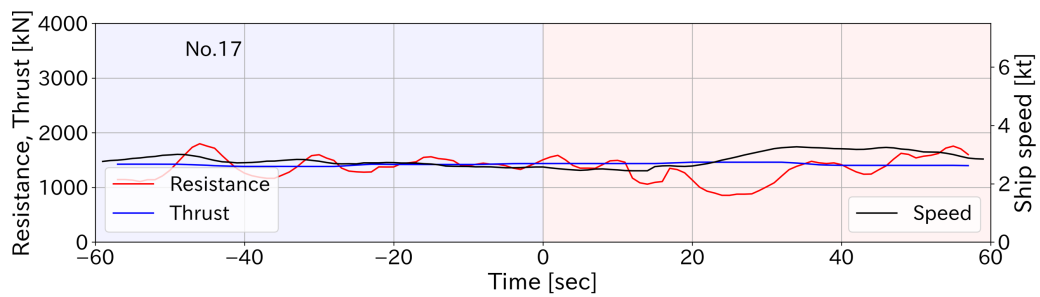


Fig. 4-18 散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.17)



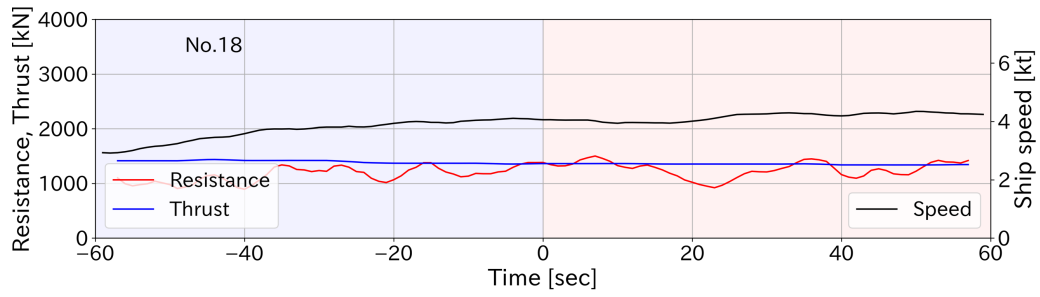


Fig. 4-19 散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.18)

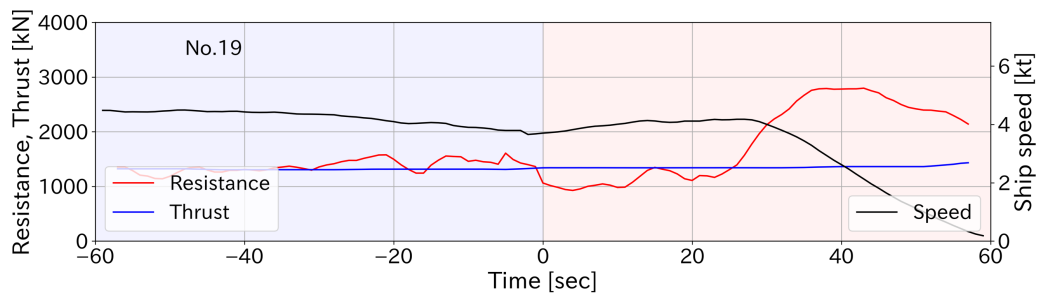


Fig. 4-20 散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.19)

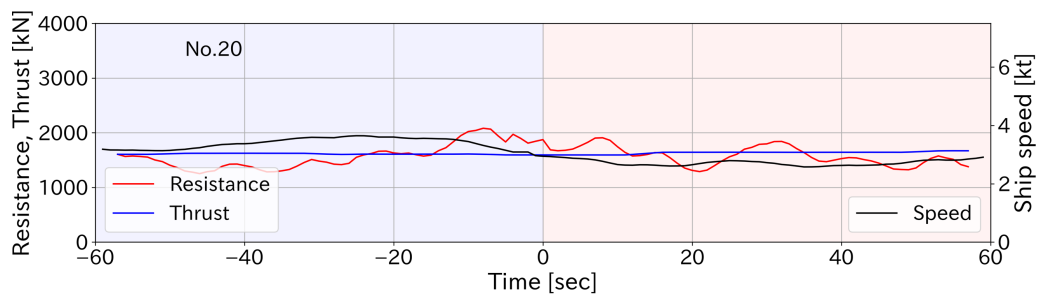


Fig. 4-21 散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.20)

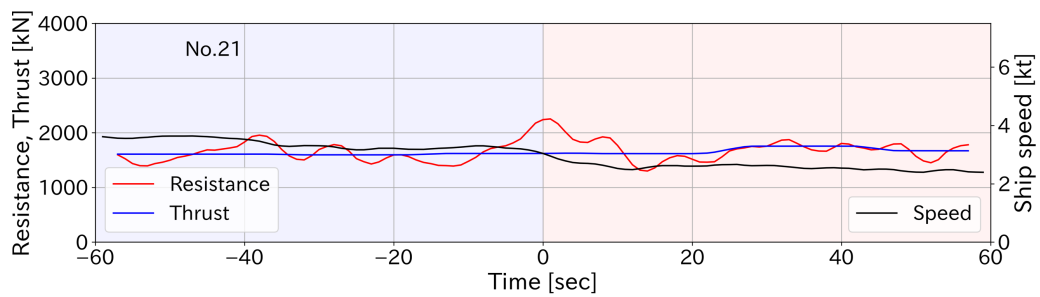


Fig. 4-22 散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.21)

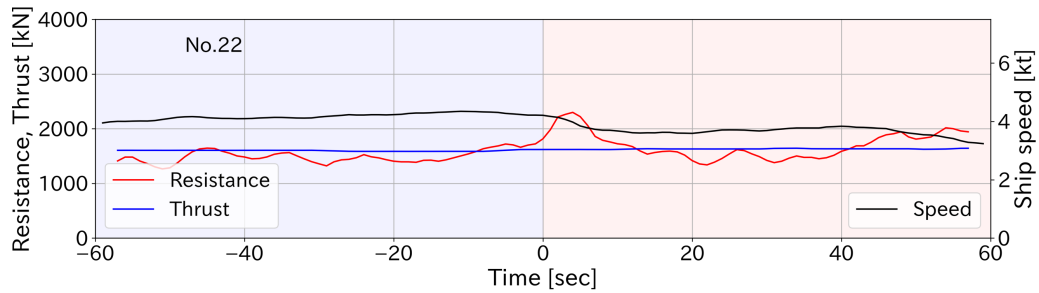


Fig. 4-23 散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.22)

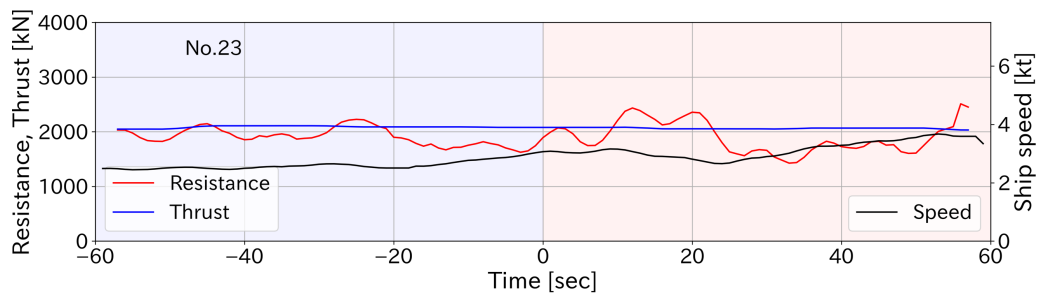


Fig. 4-24 散水前後の船速・抵抗・スラスト (No.23)

「しらせ」の散水装置には、連続して稼働していると海水を吸い込むシーチェストがブラッシュアイスや雪で閉塞し、流量が低下してしまうという問題がある。散水試験を実施している際にもこの問題が発生し、一回の散水時間は30秒から2分間であった。

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秒後の碎氷抵抗値を平均し、散水前後で抵抗値を比較した。計算した平均の碎氷抵抗値をTable 4-3に示す。

全23回のうち15回の散水で碎氷抵抗値の減少が認められ、全体の平均でも約78.4 [kN]の抵抗が減少していた。

Table 4-3 各散水前後の砕氷抵抗値

	散水前抵抗 [kN]	散水後抵抗 [kN]	変化量 [kN]	変化量 [%]
No.1	2917.96	2993.49	75.53	2.59
No.2	2627.79	2371.03	-256.76	-9.77
No.3	2254.13	2143.52	-110.61	-4.91
No.4	2543.78	2578.39	34.61	1.36
No.5	2451.31	2585.36	134.05	5.47
No.6	2567.26	2454.75	-112.51	-4.38
No.7	2330.41	2306.83	-23.58	-1.01
No.8	2459.85	2160.62	-299.23	-12.16
No.9	1965.13	1972.47	7.34	0.37
No.10	2358.18	2092.49	-265.69	-11.27
No.11	2186.90	2136.46	-50.45	-2.31
No.12	2275.34	2449.67	174.33	7.66
No.13	2242.73	2090.96	-151.77	-6.77
No.14	2842.75	2636.26	-206.49	-7.26
No.15	1965.13	1972.47	7.34	0.37
No.16	1498.82	1346.40	-152.42	-10.17
No.17	1425.44	1072.70	-352.74	-24.75
No.18	1233.47	1145.60	-87.87	-7.12
No.19	1438.68	1323.13	-115.55	-8.03
No.20	1726.15	1545.74	-180.41	-10.45
No.21	1642.24	1543.01	-99.23	-6.04
No.22	1512.62	1537.16	24.54	1.62
No.23	1868.09	2073.16	205.07	10.98
平均	<b>2101.48</b>	<b>2023.12</b>	<b>-78.37</b>	<b>-3.73</b>

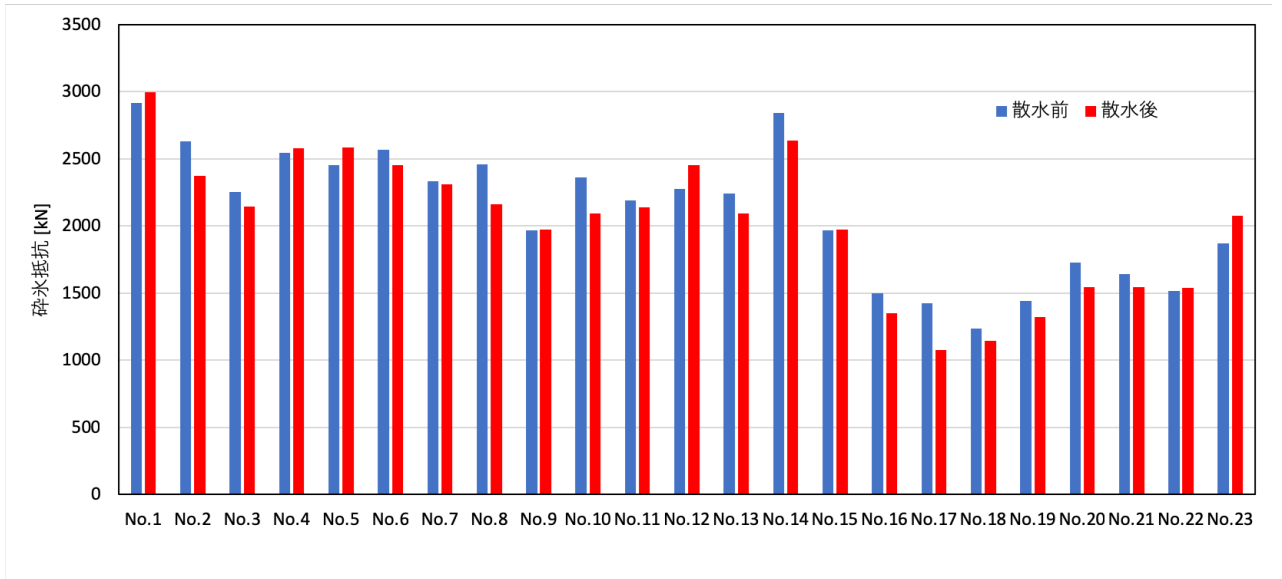


Fig. 4-25 散水前後の碎氷抵抗

## 4.4. 統計学的評価

4.3 の計算により、連続砕氷中の散水によって砕氷抵抗が減少していたことがわかった。この試験結果に統計的有意差があるかどうかを t 検定によって検証した。

### 1. 正規性検定

求めた砕氷抵抗値が、正規分布に従っているかどうかを、シャピロ-ウィルク検定(Shapiro-Wilk 検定)によって検定する。

帰無仮説は「標本は正規母集団からサンプリングされたものである」とする。

検定統計量  $W$  は、

$$W = \frac{\left(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)}\right)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4-2)$$

ここで、 $x_{(i)}$  は  $i$  番目の順序統計量、 $\bar{x}$  は標本平均である。 $a_i$  は、以下の式で与えられる。

$$(a_1, a_2, \dots, a_n) = \frac{m^T V^{-1}}{(m^T V^{-1} V^{-1} m)^{1/2}} \quad (4-3)$$

ただし、 $m = (m_1, \dots, m_n)^T$  で、 $m_1, \dots, m_n$  は標準正規分布からサンプリングされた独立同分布の確率変数の順序統計量の期待値で、 $V$  は分散共分散行列である。

本研究では Shapiro-Wilk 検定の計算は python の SciPy パッケージを使用した。

散水前の砕氷抵抗値の  $p = 0.3909 > 0.1$ 、散水後の砕氷抵抗値の  $p$  値は  $0.3622 > 0.1$  となり帰無仮説を棄却できないので、砕氷抵抗値が正規分布では無いとは言えない。よって砕氷抵抗値の検定には t 検定を用いた。

### 2. t 検定

各区間中の氷況の影響を無視できるとして、散水前後の砕氷抵抗値で対応のある t 検定を行う。

t 値を、以下の式で求める。

$$t = \frac{\bar{X}_D - \mu_0}{s_D / \sqrt{n}} \quad (4-4)$$

ここで、N 回目の散水前、散水後抵抗を  $B_N, A_N$ 、両者の差を  $d_N = A_N - B_N$  とし、 $d_N$  の平均を  $\bar{X}_D$  とする。 $s_D$  は  $d_N$  の標準偏差である。

今回の検定の帰無仮説は 2 群のデータに差がないこととするので  $\mu_0 = 0$ 、 $n=23$  で、自由度は 22 である。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。散水前後の碎氷抵抗値には、統計的有意差があると言える。

散水開始後の碎氷抵抗変化の 20 秒ごとの移動平均をとり、Fig. 4-26 に示した。散水から時間が経つほどに碎氷抵抗値が大きくなっていることが分かる。これには、シーチェストの閉塞によって散水流量が減少している影響が表れていると考えられる。

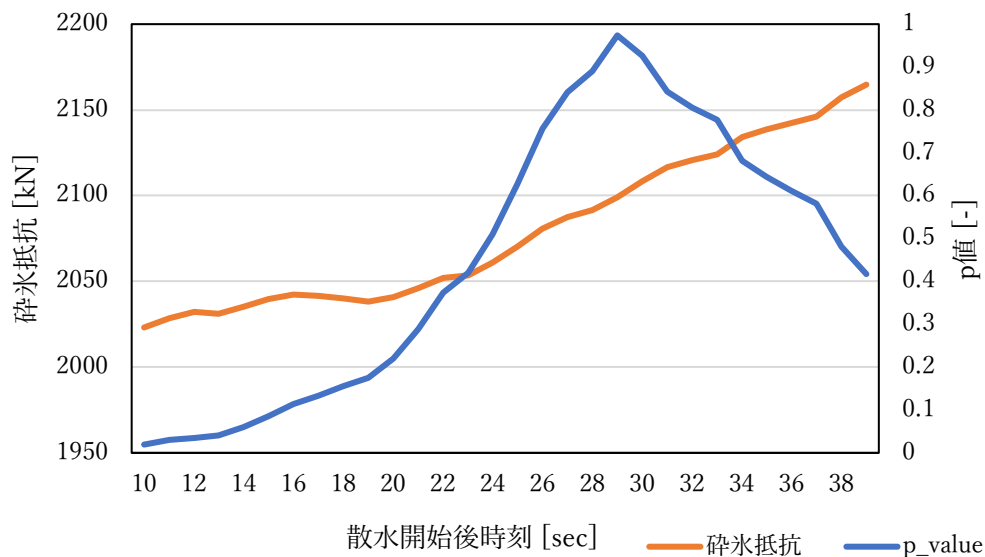


Fig. 4-26 碎氷抵抗値の移動平均

#### 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 で実施された散水試験のデータで行なった。過去の氷海航行試験データの中で、安定した定着氷で散水試験を行う事ができたのは JARE59 のみである。

JARE59 での散水試験は、2月14日に行われた。氷況は、氷厚 0.6~0.8 m、積雪深 10~15 cm であった。

船速、スラスト、砕氷抵抗をグラフにしたものを、Fig. 4-27 から Fig. 4-55 に示す。

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 153.61614 kN の抵抗が減少している。この抵抗値に関して、4.4 と同様の、対応のある t 検定を行った。その結果、 $t(28) = 641.0$ 、 $p = 0.0006233 < 0.05$  となり、5%水準で統計的な有意差が認められた。

各散水における、抵抗値と変化量を Table 4-4、Fig. 4-56 に示す。

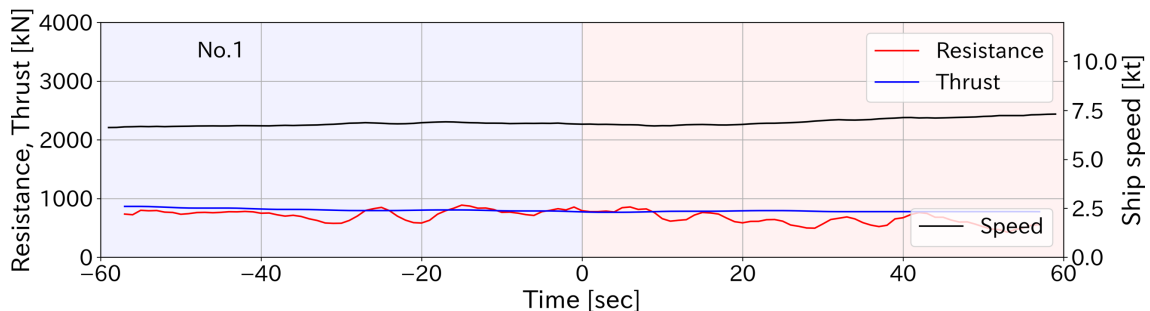


Fig. 4-27 散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.1)

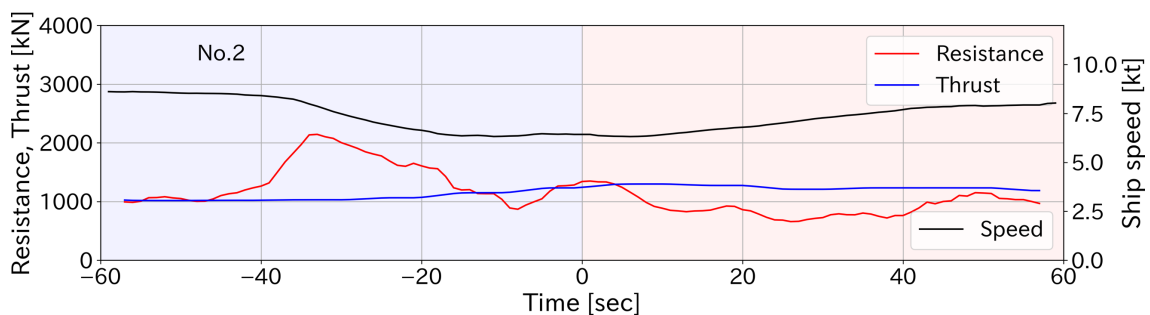


Fig. 4-28 散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.2)

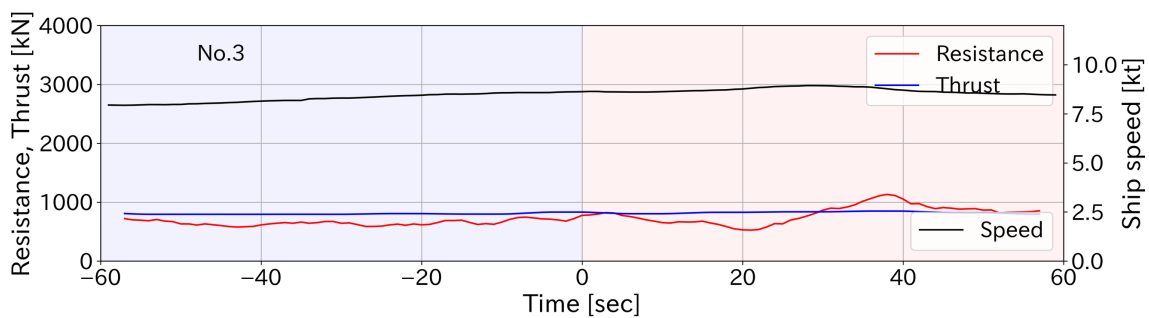


Fig. 4-29 散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.3)

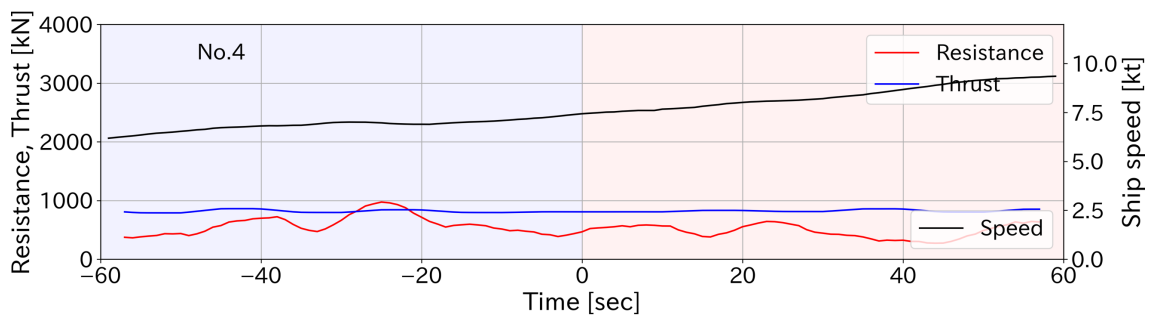


Fig. 4-30 散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.4)

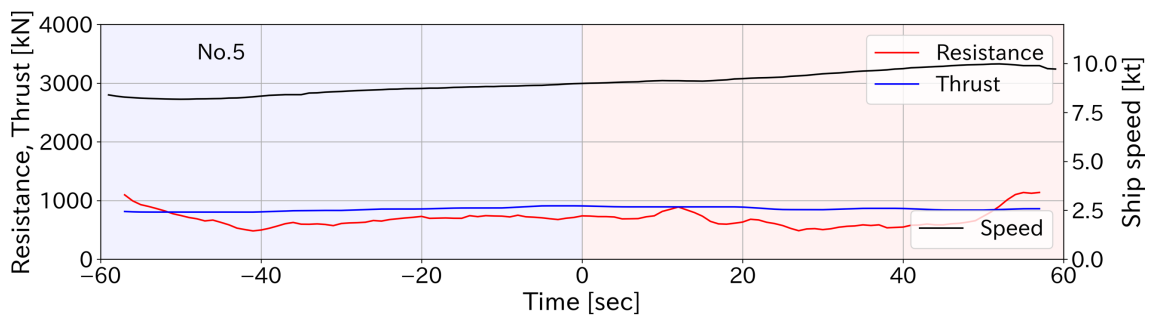


Fig. 4-31 散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.5)

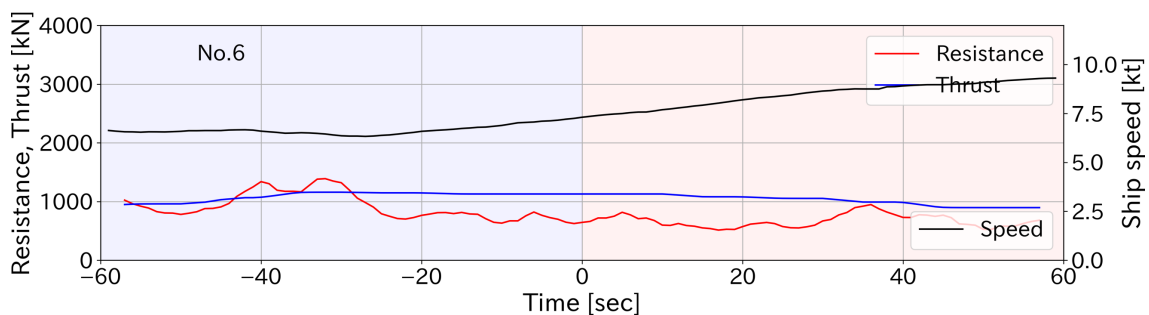


Fig. 4-32 散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.6)



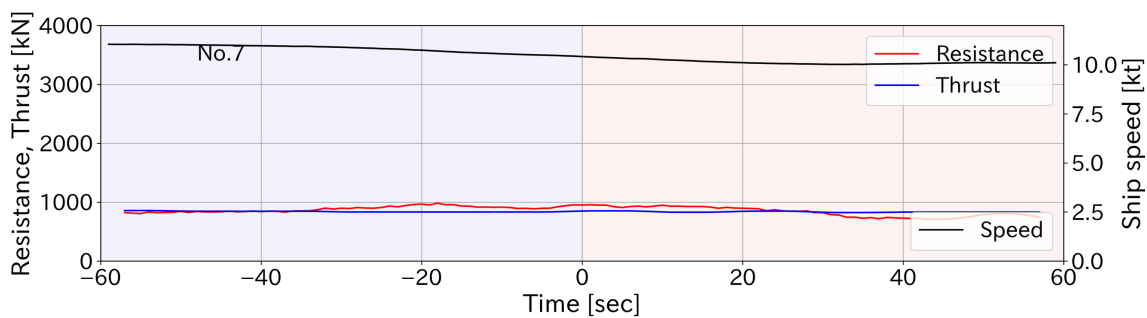


Fig. 4-33 散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.7)

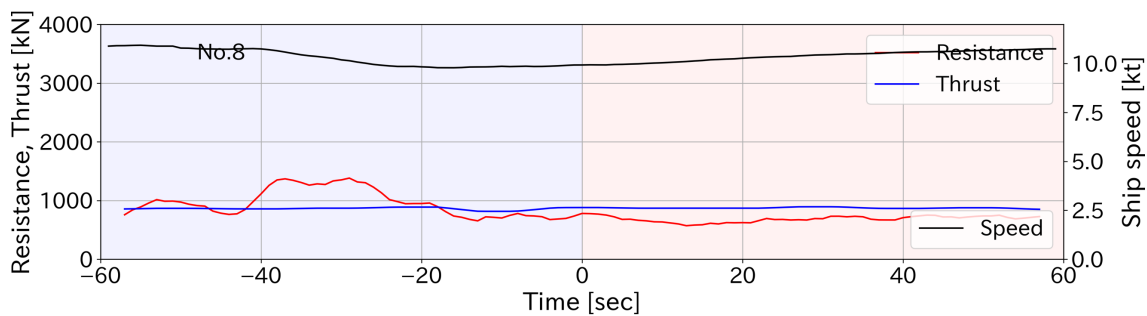


Fig. 4-34 散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.8)

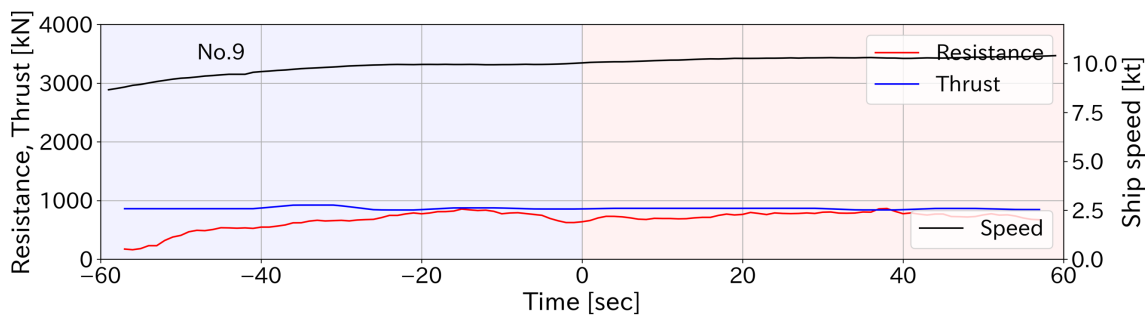


Fig. 4-35 散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.9)

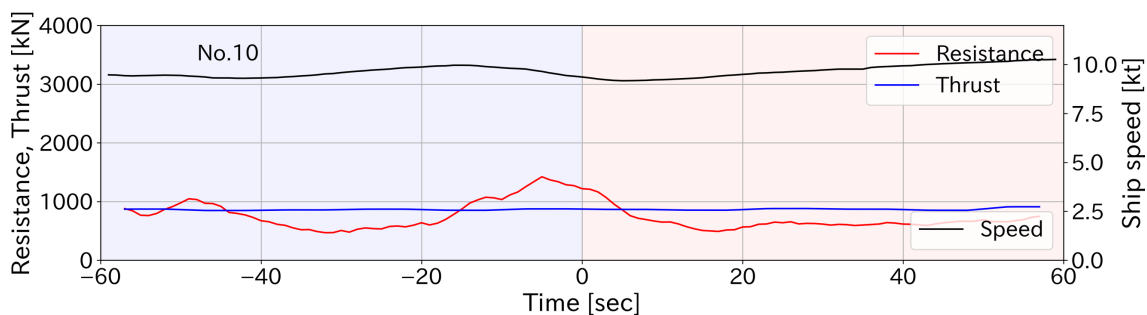


Fig. 4-36 散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.10)

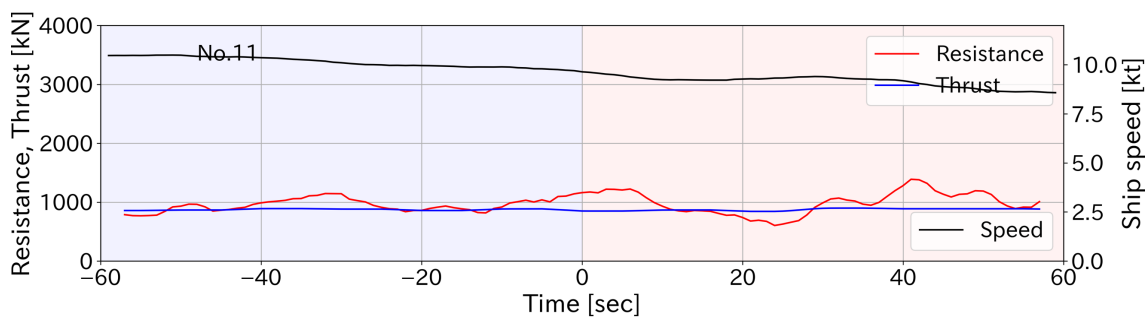


Fig. 4-37 散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.11)

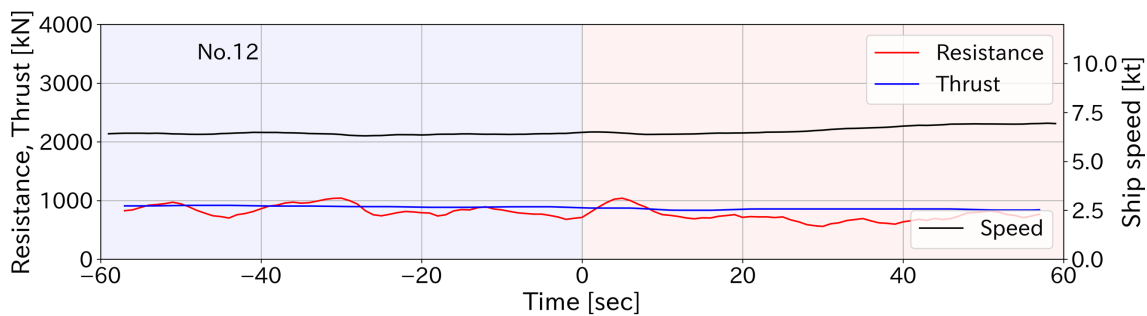


Fig. 4-38 散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.12)

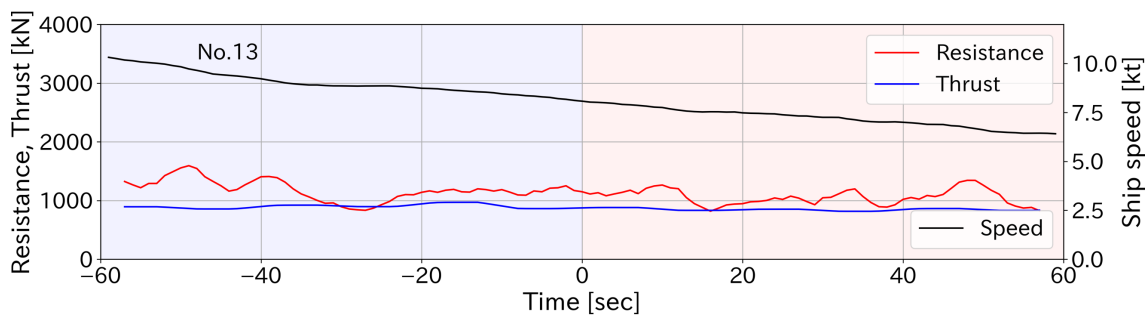


Fig. 4-39 散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.13)

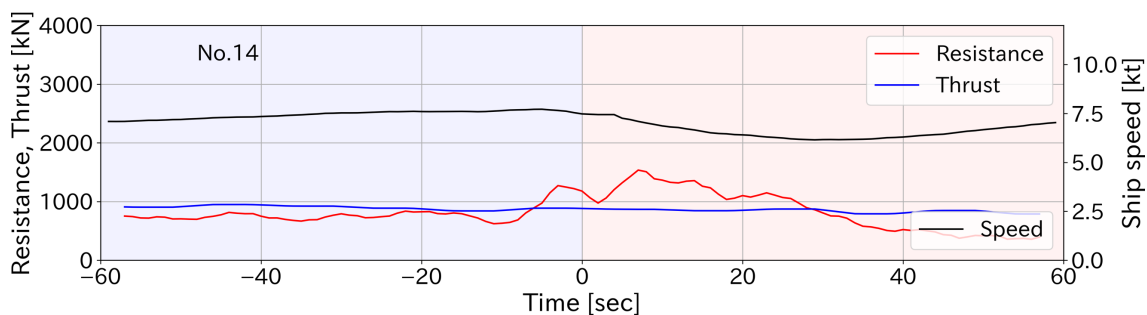


Fig. 4-40 散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.14)

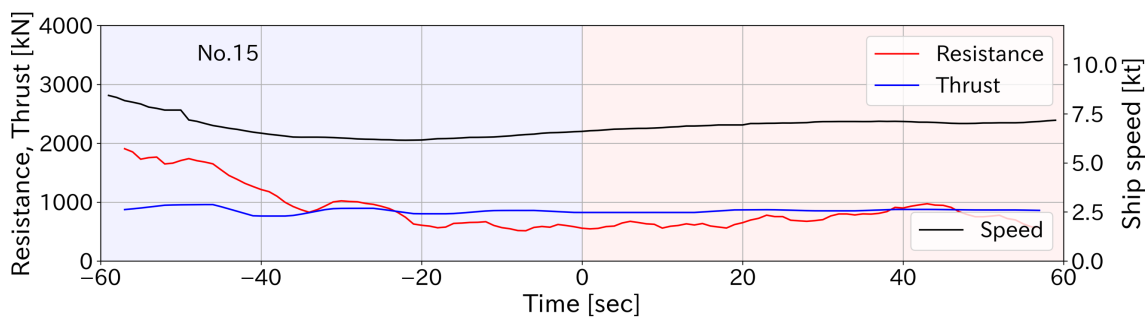


Fig. 4-41 散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.15)

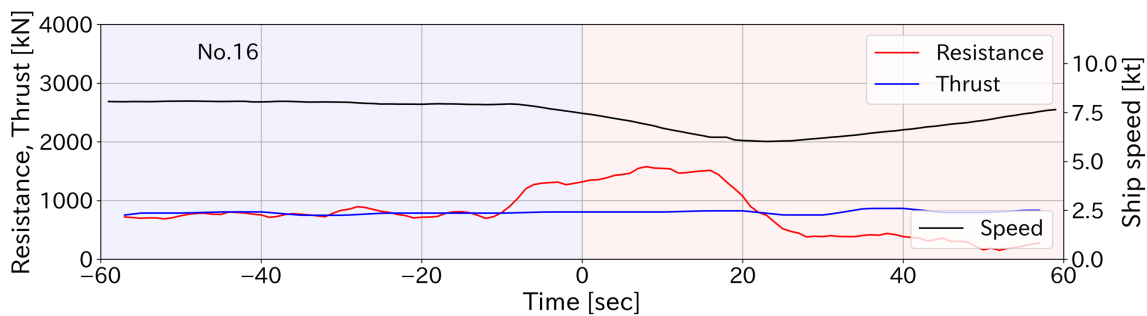


Fig. 4-42 散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.16)

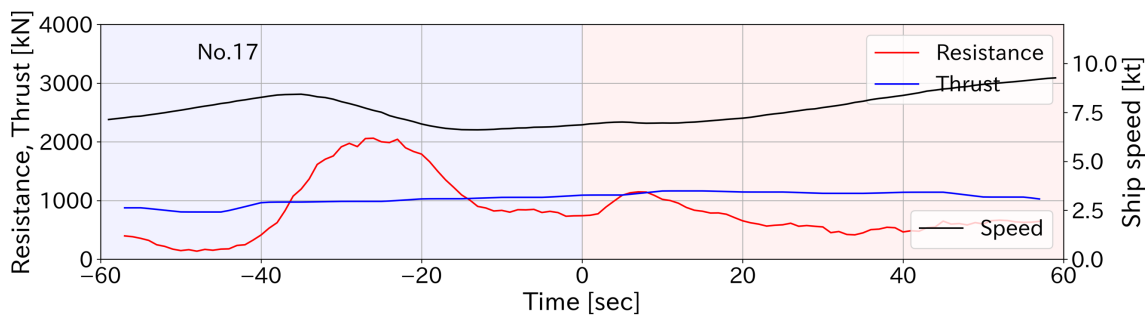


Fig. 4-43 散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.17)

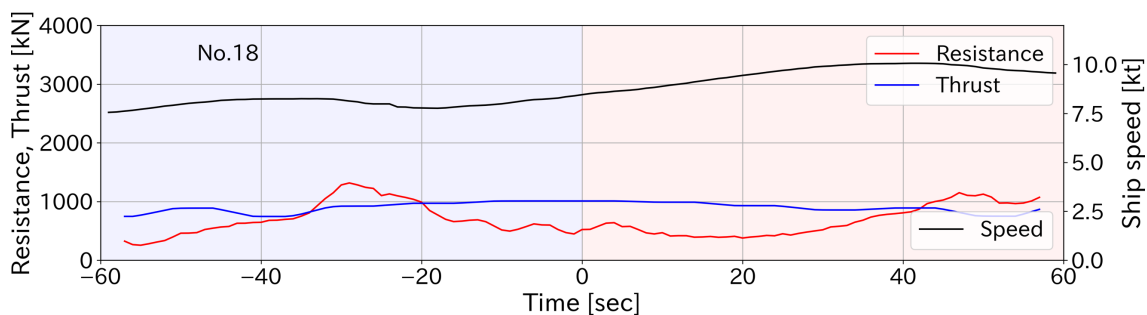


Fig. 4-44 散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.18)

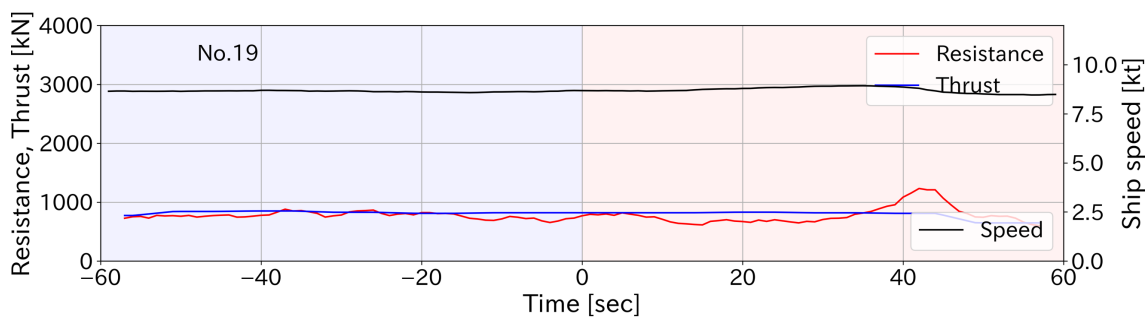


Fig. 4-45 散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.19)

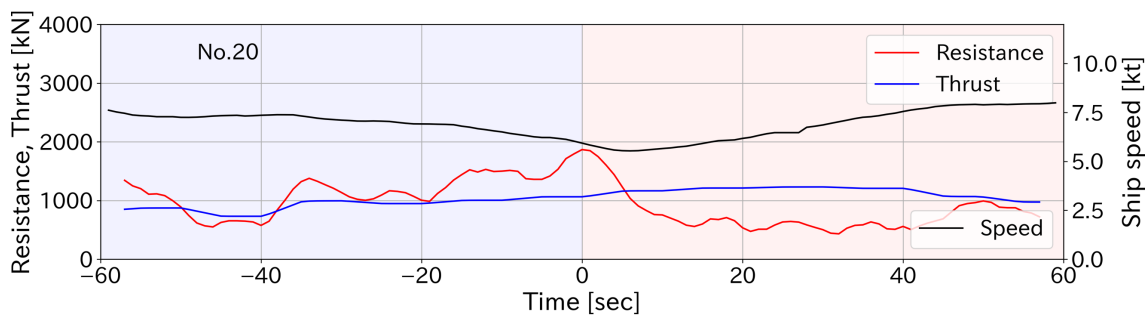


Fig. 4-46 散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.20)

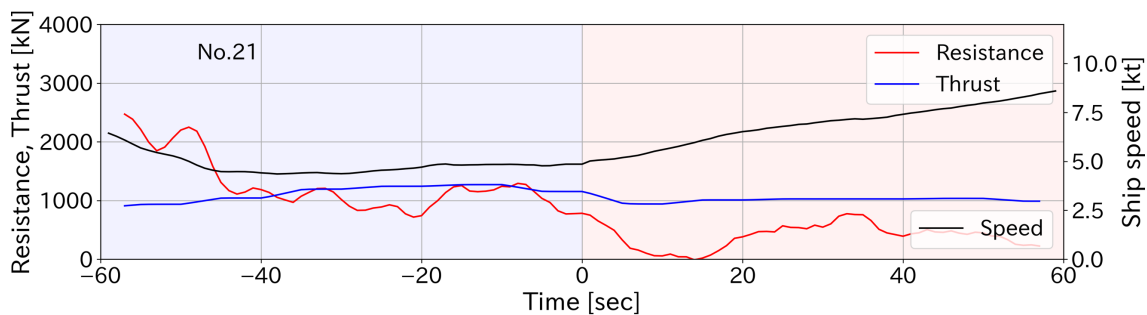


Fig. 4-47 散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.21)

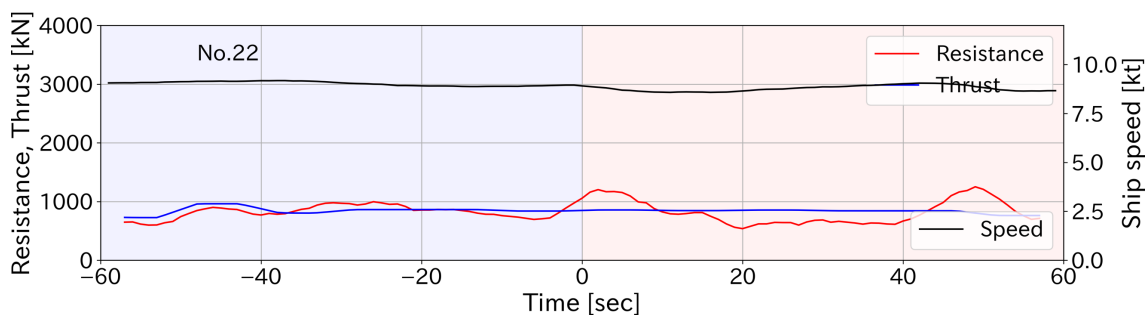


Fig. 4-48 散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.22)

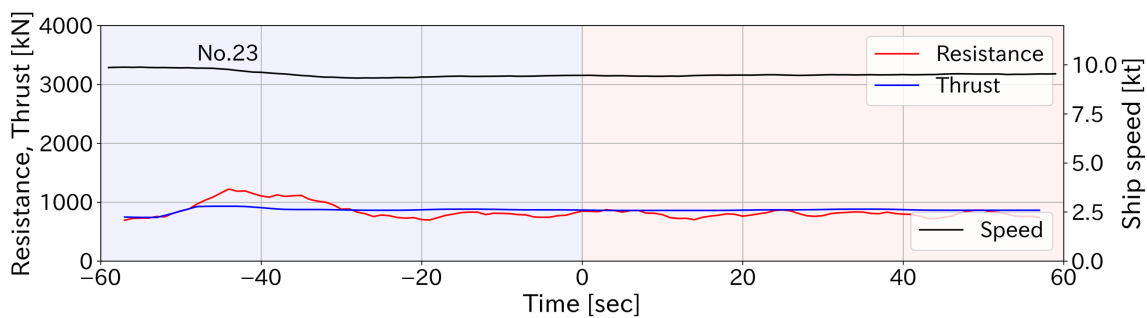


Fig. 4-49 散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.23)

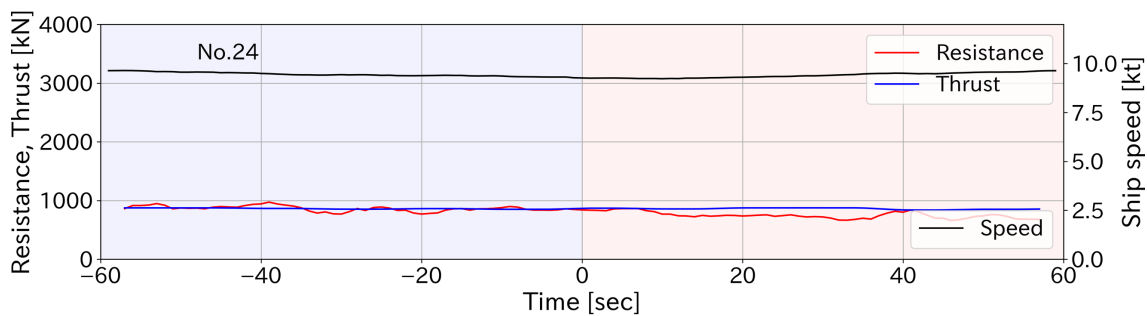


Fig. 4-50 散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.24)

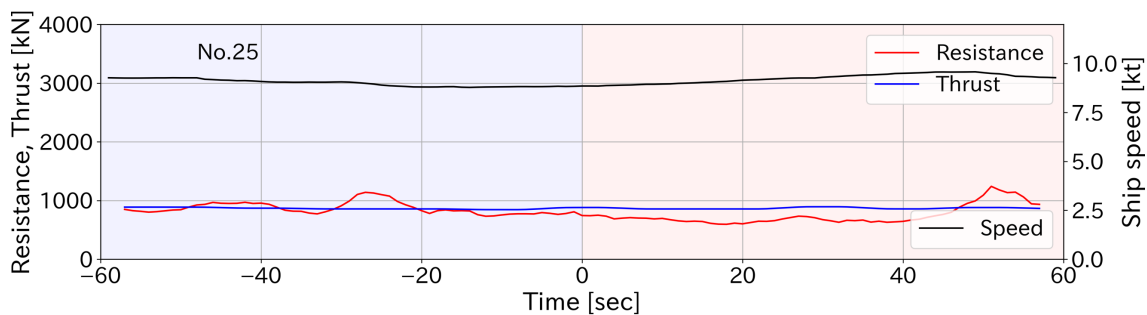


Fig. 4-51 散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.25)

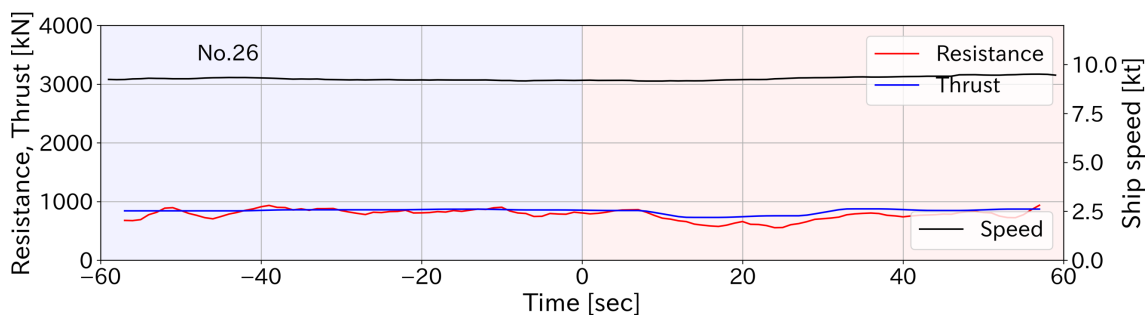


Fig. 4-52 散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.26)

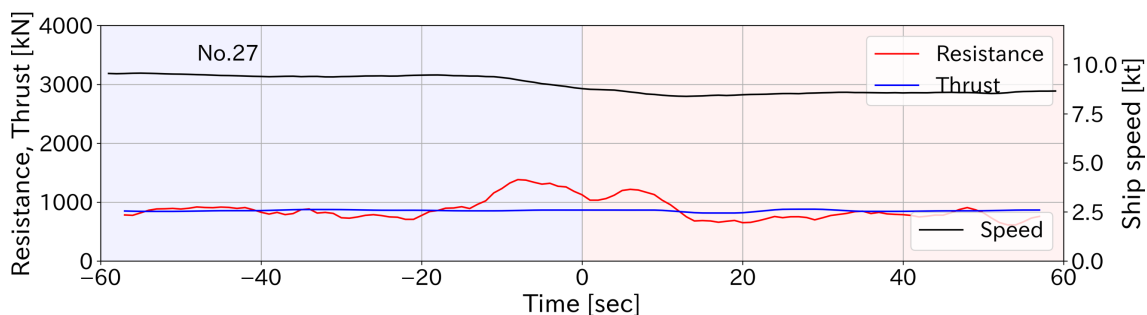


Fig. 4-53 散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.27)

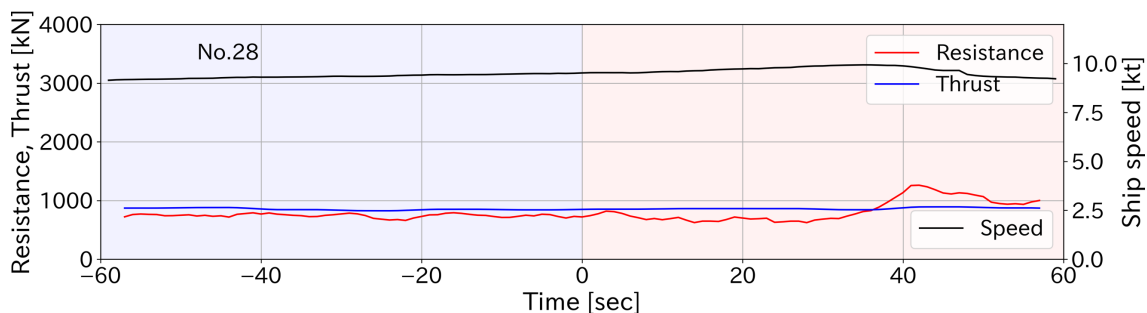


Fig. 4-54 散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.28)

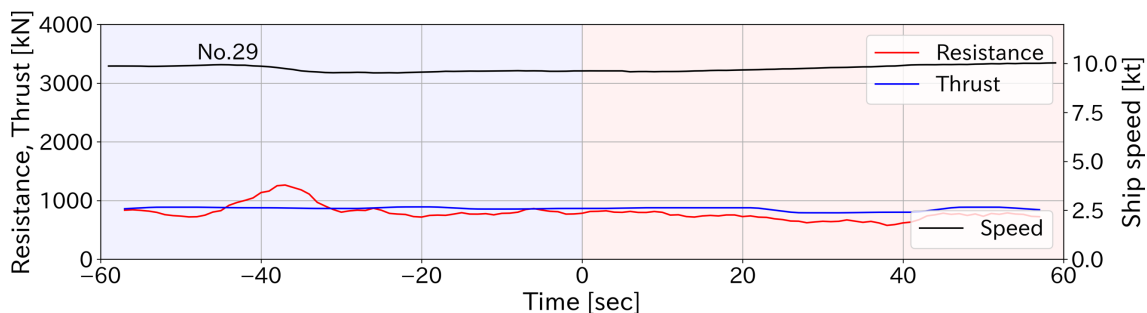


Fig. 4-55 散水前後の船速・抵抗・スラスト (JARE59, No.29)

Table 4-4 砕氷抵抗(JARE59)

	散水前抵抗 [kN]	散水後抵抗 [kN]	変化量 [kN]	変化量 [%]
No.1	743.50	607.75	-135.75	-18.26
No.2	1356.15	873.47	-482.68	-35.59
No.3	656.81	807.13	150.32	22.89
No.4	577.25	469.33	-107.92	-18.70

<b>No.5</b>	706.24	701.27	-4.97	-0.70
<b>No.6</b>	921.16	662.47	-258.69	-28.08
<b>No.7</b>	883.36	806.66	-76.70	-8.68
<b>No.8</b>	946.59	685.63	-260.96	-27.57
<b>No.9</b>	603.87	755.76	151.89	25.15
<b>No.10</b>	831.63	624.38	-207.26	-24.92
<b>No.11</b>	947.65	963.62	15.97	1.69
<b>No.12</b>	838.51	704.52	-133.98	-15.98
<b>No.13</b>	1193.87	1037.55	-156.32	-13.09
<b>No.14</b>	792.03	752.02	-40.01	-5.05
<b>No.15</b>	1047.94	734.10	-313.83	-29.95
<b>No.16</b>	836.58	604.51	-232.07	-27.74
<b>No.17</b>	943.03	628.4	-314.62	-33.36
<b>No.18</b>	689.12	707.90	18.79	2.73
<b>No.19</b>	769.78	771.91	2.13	0.28
<b>No.20</b>	1157.96	658.90	-499.06	-43.10
<b>No.21</b>	1301.02	395.27	-905.75	-69.62
<b>No.22</b>	822.78	767.58	-55.20	-6.71
<b>No.23</b>	868.70	787.42	-81.28	-9.36
<b>No.24</b>	863.00	728.78	-134.22	-15.55
<b>No.25</b>	867.90	759.12	-108.78	-12.53
<b>No.26</b>	817.60	727.67	-89.92	-11.00
<b>No.27</b>	928.33	760.61	-167.72	-18.07
<b>No.28</b>	740.32	861.86	121.55	16.42
<b>No.29</b>	854.18	706.37	-147.81	-17.30
<b>平均</b>	<b>879.55</b>	<b>725.93</b>	<b>-153.62</b>	<b>-17.47</b>

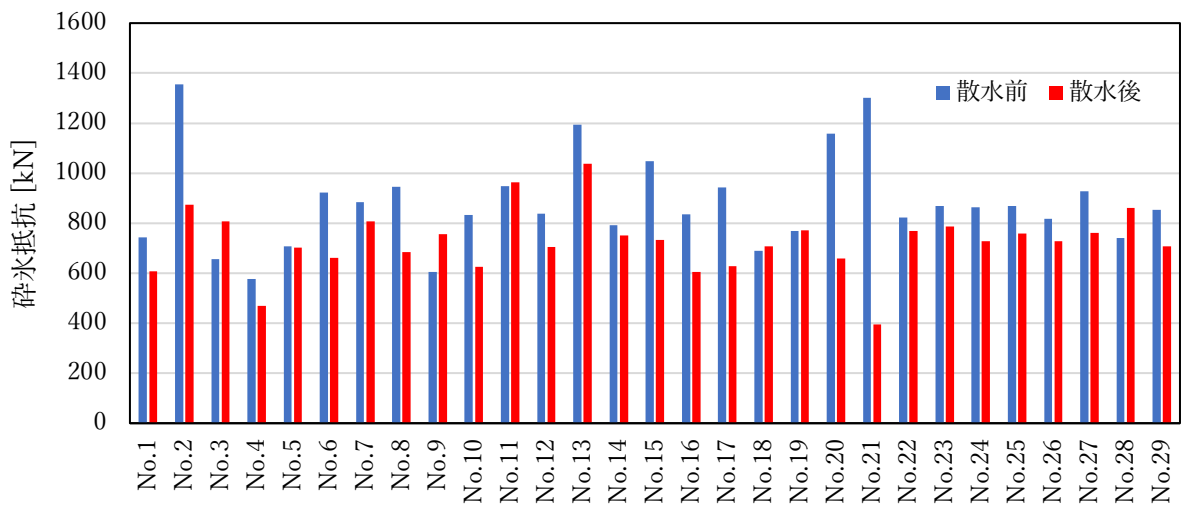


Fig. 4-56 散水前後の砕氷抵抗 (JARE59)

散水後の砕氷抵抗値について、20秒間の移動平均を取ると、Fig. 4-57に示す通りとなる。JARE59においても、散水開始から時間が経つと散水量が減少し、砕氷抵抗が増加していると考えられる。

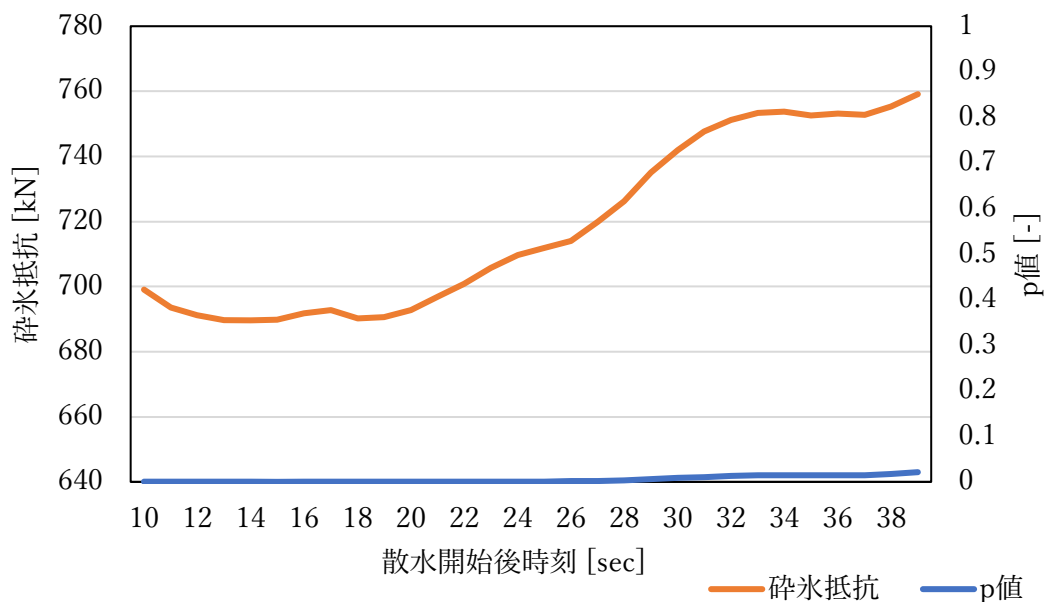


Fig. 4-57 砕氷抵抗値の移動平均 (JARE59)



#### 4.6. 外れ値の除去

Fig. 4-56 の棒グラフを見ると、No.2 や No.20 の散水において、他の散水に比べて砕氷抵抗が著しく減少していることがわかる。これらの顕著な抵抗の変化は、散水によるものではなく、リッジやクラックなどの氷況変化による外れ値であると考えられる。JARE60 の結果と比較しやすくするため、散水開始時点の砕氷抵抗値を基準として、著しく抵抗が変化することがあった散水番号のデータを外れ値として除き、砕氷抵抗値の平均を求めた。データ除去の閾値は、 $\pm 1000$ ,  $800$ ,  $600$  kN とし、 $120$  秒の間で一度でも閾値を超える散水のデータは除去対象とした。散水開始時点の砕氷抵抗値を  $0$  とした、各回の砕氷抵抗変化をプロットしたものを Fig. 4-58、Fig. 4-59 に示す。また、各閾値で除去の対象となった散水番号をまとめたものを Table 4-5 に示す。砕氷抵抗値の変化が大きい散水番号には偏りがあり、特に散水番号が  $15\sim 22$  の海域では抵抗変化が大きかったことがわかる。この海域は、氷況による砕氷抵抗の急激な変化が起こりやすい海域だったと考えられる。

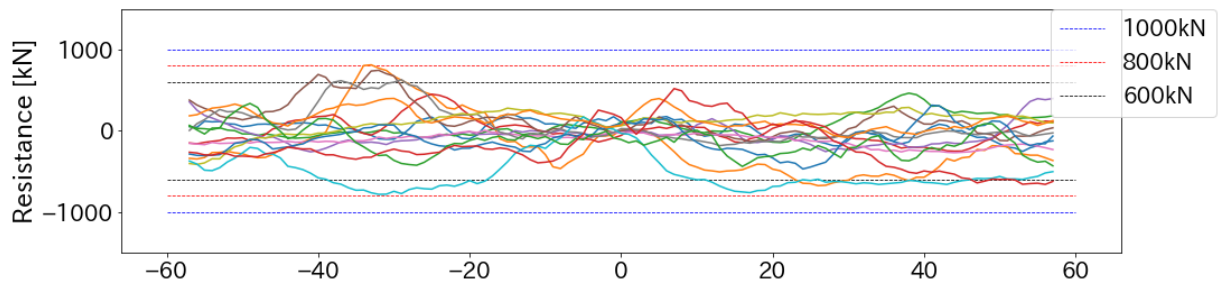


Fig. 4-58 全 29 回の砕氷抵抗変化と閾値(No.1~14)

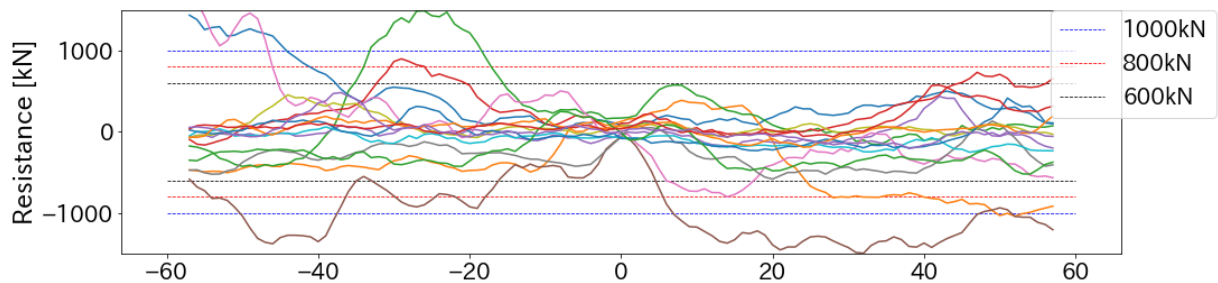


Fig. 4-59 全 29 回の砕氷抵抗変化と閾値(No.15~29)

Table 4-5 各閾値における除去対象散水番号

閾値 [kN]	対象散水番号(No.)
1000	15,17,18,20,21
800	2,6,10,14,15,16,17,18,20,21
600	2,5,6,8,10,14,15,16,17,18,19,20,21,22,25,27,28,29

外れ値を除外した試験データについて、再度砕氷抵抗値の平均を求めると、Table 4-6 のようになった。リッジ等の影響により、急激に砕氷抵抗が上昇した回の影響が除去され、閾値が小さくなるにつれて変化量が小さくなっている。閾値を±600 kN に設定した場合、p 値が 0.05 を上回るが、これは除外するデータが増加した結果サンプル数が少なくなってしまった結果だと考えられる。どの閾値の場合も、散水後によって砕氷抵抗が減少するという傾向は変化しなかった。

Table 4-6 各閾値における砕氷抵抗変化

閾値 [kN]	散水前[kN]	散水後[kN]	変化量[kN]	変化率[%]	p 値
1000	849.18	753.17	-96.01	-11.31	0.0035<.05
800	822.64	758.45	-64.19	-7.80	0.0226<.05
600	818.07	763.65	-54.42	-6.65	0.1040>.05

## 5. 考察

### 5.1. 船首部散水装置燃料消費

散水試験中にしらせの燃料消費量を 1 分毎に記録し、連続碎氷において散水装置を稼働させるのに必要な燃料消費量を見積もった。燃料消費量の記録は、2.3.2 のようにして行った。本年度の散水試験においては、散水装置の詰まりにより、稼働時間が 1 分に満たないものがあった。燃料消費量を 1 分毎に記録しているため、稼働時間が 1 分に満たない場合は燃料消費増加量を少なく見積もってしまう可能性があるため、その区間はデータから除いた。散水装置が OFF の時と ON の時の、燃料消費量は以下の Table 5-1 のようになった。

Table 5-1 連続碎氷中の散水装置による燃料消費変化

試験区間	散水なし[L/分]	散水あり[L/分]	燃料消費増加率[%]	散水回数
1	104.39	106.73	2.23	9
2	100.42	107.50	7.05	2
3	104.21	106.50	2.22	4
4	105.00	107.00	1.90	3
平均	103.51	106.93	3.30	18

散水装置を稼働させた場合、約 3.4 L/分の燃料消費が増加していたと推定できる。これは全体の燃料消費量のうち約 3.3%であり、59 次観測報告書で見積もられた値と同等である。

主機運転状態画面に表示される燃料流量は、散水装置と推進器に使用される燃料だけでなく、しらせ船内で生活に使用される電力分も含まれているが、本計測ではこの変動分はないものとして考えた。

3.3%の燃料消費量増加(時間あたり)は、非常時にも燃料の補給をする事が出来ない「しらせ」にとって、決して少なくないと考えられる。現在はシーチェスト

閉塞の問題から散水装置の連続使用はされていないが、砕氷抵抗を減少させるためには、砕氷航行中は常時使用する事が望ましい。燃料消費量と天秤にかけて散水装置稼働の判断材料とするため、砕氷抵抗の減少によってどれだけのシップタイムが削減できるかを推定する手法が今後求められる。

## 5.2. 砕氷抵抗平均区間の妥当性

本研究では、4.3において砕氷抵抗を求める際に、実施した散水試験ではシーチェスト閉塞の問題から散水時間が短かったことから、散水開始時刻を  $t=0$  として、 $t=10\sim 30$  の区間の砕氷抵抗値を平均し、散水後の砕氷抵抗値とした。JARE60の散水試験時に船速は約  $2\text{ m/s}$  であったことから、散水開始から  $10$  秒後には「しらせ」は約  $20\text{ m}$  進み、 $30$  秒後には  $60\text{ m}$  進んでいることになる。散水装置の流量が一定であるならば、「しらせ」の全長が  $138\text{ m}$  であることを考えると、船首部から散水された領域が「しらせ」の後部にまで達し、散水の効果が十分に発揮されるのは散水開始から約  $60$  秒後以降であると考えられる。このことから、散水装置の効果を正確に評価するためには、散水開始から  $60$  秒後以降の区間で抵抗値を平均することが理想的だと考えられる。

しかしながら、「しらせ」において積雪との接触が多く存在する部分は船体の前方  $1/4$  までの部分であり[8]、散水後  $10$  秒以降であればこの部分での散水は十分にされているため、本研究で設定した区間であっても、十分に散水の効果を評価することができると考えられる。

### 5.3. 考察

連続砕氷試験データに関して、散水前後で船速と軸スラストがそれぞれどのように変化しているかを検証した。散水前後の速度変化平均、軸スラスト平均を Table 5-2、Table 5-3 に、各散水での速度変化、軸スラスト変化を Fig. 5-1、Fig. 5-3、Fig. 5-2、Fig. 5-4 に示す。JARE59 での速度変化は+2%、スラスト変化は+0.28%、JARE60 での速度変化は+0.75%、スラスト変化は+0.024%であった。各パラメーターについて検定を行なったところ、どのパラメーターも平均値に統計的有意差は見られなかった。特に軸スラストに関しては、ほとんど変化していないにも関わらず砕氷抵抗値は有意に減少していることを考えると、砕氷抵抗値の変化量は加速度に大きく影響されていると考えられる。

Table 5-2 散水前後の速度変化平均

	散水前 [kt]	散水後 [kt]	変化量 [kt]	p
JARE59	8.39	8.57	0.18	0.3151>.05
JARE60	3.7888	3.8572	0.068	0.6063>.05

Table 5-3 散水前後の軸スラスト変化平均

	散水前 [kN]	散水後 [kN]	変化量 [kN]	p
JARE59	886.39	888.95	2.56	0.8467>.05
JARE60	2214.32	2214.86	0.54	0.9214>.05

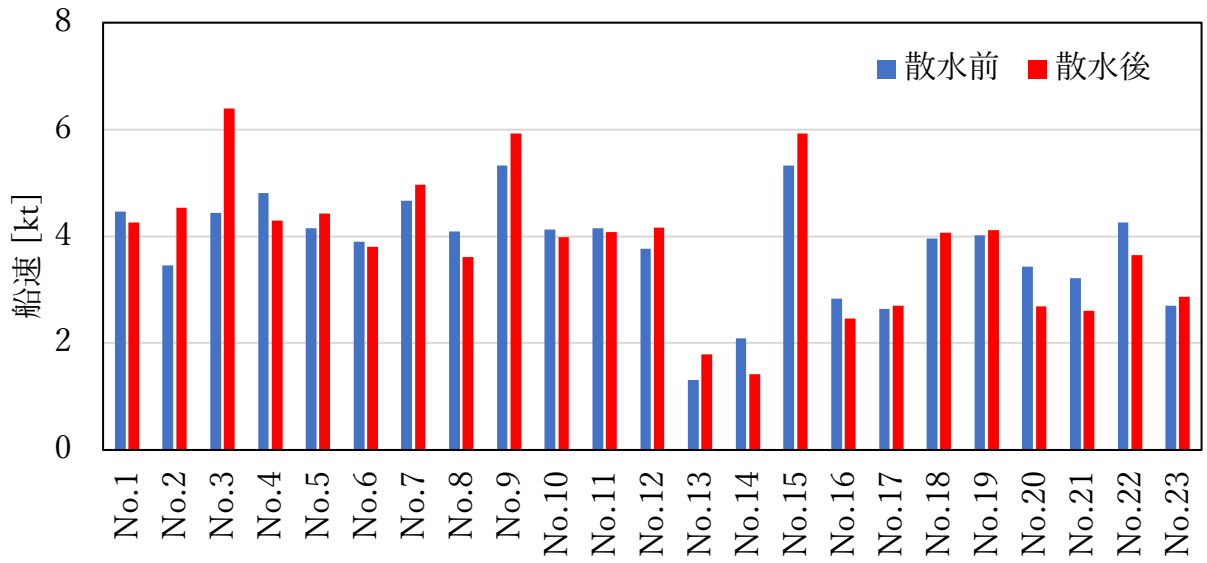


Fig. 5-1 散水前後の船速変化(JARE60)

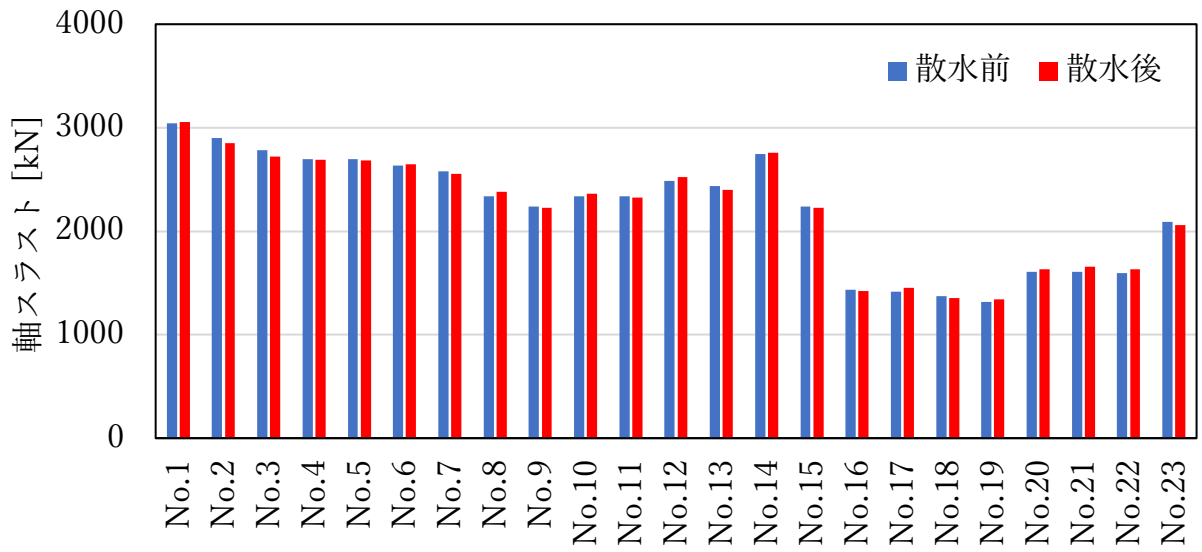


Fig. 5-2 散水前後の軸スラスト変化(JARE60)

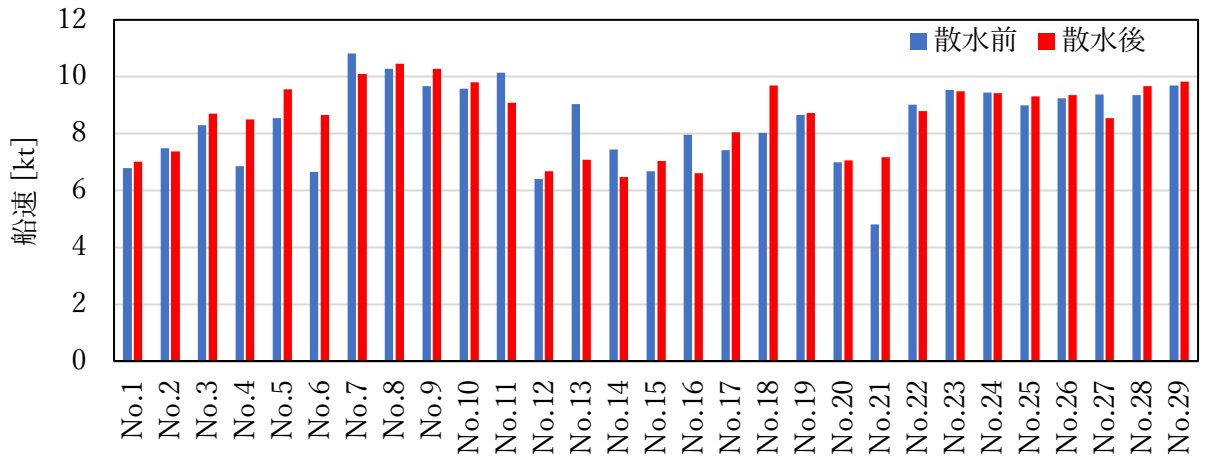


Fig. 5-3 散水前後の船速変化(JARE59)

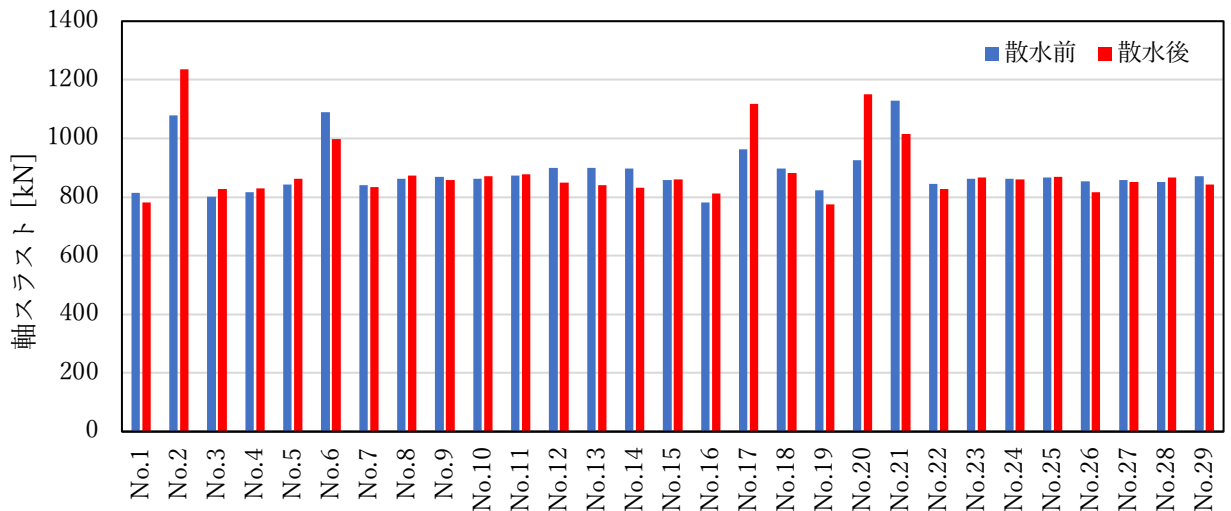


Fig. 5-4 散水前後の軸スラスト変化(JARE59)

JARE59 と JARE60 で実施された連続砕氷試験において、どちらの年次の試験においても散水によって砕氷抵抗が統計的優位に減少していた。結果を Table 5-4 に示す。

Table 5-4 JARE59 と JARE60 における散水結果

データ(閾値)	散水前抵抗 [kN]	散水後抵抗 [kN]	変化量[kN]	変化率[%]
JARE59	879.55	725.93	-153.62	-18.48
JARE59(1000)	849.18	753.17	-96.01	-11.31



<b>JARE59(800)</b>	822.64	758.45	-64.19	-7.80
<b>JARE59(600)</b>	818.07	763.65	-54.42	-6.65
<b>JARE60</b>	2101.48	2023.12	-78.37	-3.72

JARE59 のデータの方が JARE60 よりも砕氷抵抗の変化量が大きかった理由として、氷況の違いによる船速の差が考えられる。

JARE59 試験の氷況は氷厚 0.6~0.8m、積雪深 10~15 cm、JARE60 試験の氷況は氷厚 0.8~1.2m、積雪深 10~30cm であり、氷厚、積雪深共に 60 次試験データの方が厚かった。この氷況の違いは、試験時の船速と散水前抵抗値にも表れており、59 では船速 6~10kt なのに対し、60 では 1~5kt 程度であった。

本研究で砕氷抵抗値を計算する式は式(4-1)で示した通りであり、変化量は第 1 項の軸スラストの変化だけではなく、第 2 項の船速の加速度にも大きく影響されると考えられる。そのため平均船速の大きな 59 次試験データはリッジやクラック等の氷況による急激な加速度の変化が出やすく、結果平均の変化量が大きくなったと考えられる。

また、砕氷抵抗変化が大きなデータを外れ値として除いた結果を見ると、JARE59 と JARE60 で砕氷前後の全体の砕氷抵抗が大きく異なるのに対して、砕氷抵抗が変化している量は同等である。これは、砕氷抵抗のうち、船速に依存しない動摩擦による摩擦抵抗が減少しているためだと考えられる。これは船体と海水・積雪間の摩擦を減少させるという散水装置の目的とも一致する。

砕氷抵抗の減少量が積雪深や船速によってどう変化していくかという点については、船速一定で積雪深が違う等の条件下で連続砕氷試験を重ねていき、解析を行う必要があると考える。

## 6. 結論

### 6.1. 本研究の成果

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、船首部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、統計的有意差は示すことができなかったが、進出距離が 100 m を超える、緩い氷況におけるラミングにおいても散水によって進出距離が伸びる傾向を見ることができた。

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であることを示すことが出来た。

## 6.2. 今後の課題

本研究では、ラミング航行における散水効果を統計的有意差はないという結論になった。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、統計的有意差があるとは言えないに留まっている。進出距離だけではなく、新たな指標を用いて散水効果を評価する事が求められる。

連続砕氷においては、本研究で散水効果があることを示す事ができた。しかしながらどのような条件で抵抗が減少しやすいか、という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概算であり、必ずしも砕氷抵抗値のみを得ているとは言えない。連続砕氷のモデル化などを経て、より詳細な砕氷抵抗の計算式の考案が求められる。「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事が重要である。氷況や速度など、より多くのシチュエーションでの散水試験を実施し、その解析をする事で効果的な散水装置の使用が実現できると考えられる。

「しらせ」の観測装置では、散水装置の ON/OFF は確認する事ができるが、散水の流量は確認する事が出来ない。シーチェスト詰まりが頻繁に発生することを鑑みると、十分に散水がされているかという点の確認は非常に重要だと思われる。

# 謝辞

まずは 2 年半の間ご指導くださった山口先生へ感謝申し上げます。船の知識がほぼ無い状態でしらせの研究をしたいと言う私に、砕氷船についての知識と、南極観測隊へ参加し「しらせ」の砕氷航行を直に観測する機会を頂きました。しらせでの経験はまさに百聞は一見に如かずで、砕氷航行の様子は論文や動画で見てイメージしたものとは全く異なりました。データの解析には右往左往してばかりでしたが、最後に方針を立てられたのは、観測の経験があつてこそだと思えます。ありがとうございました。

南極観測では、指導教員となってくださった国立極地研究所の牛尾先生に大変お世話になりました。しらせとの調整窓口となって下さった木村様をはじめ、海洋観測チームの渡部様、中野様、塩崎様、柏瀬様、高橋様、丸尾様には観測は勿論のこと、日々の生活においても助けて頂きました。特に後輩の草川君には観測の手伝いを沢山してもらって、非常に助かりました。氷海航行試験の観測では、一日中観測を続けなければいけない場面もあり、海洋観測チーム以外の多くの観測隊の方々にお手伝いいただきました。ありがとうございました。

ジャパンマリンユナイテッド株式会社の山内様、水野様、安齋様には、59 次南極観測隊出発の前から何度も打ち合わせをさせて頂き、砕氷船に関して専門的な知識とアドバイスを頂きました。ありがとうございました。

山口研先輩の高橋さんには、1 年の時から南極観測について多くのことを教えて頂きました。高橋さんと一緒に観測の準備やデータ整理の作業をしていたおかげで、観測隊に参加してトラブルが起こった時にも冷静に対処する事が出来ました。ありがとうございました。矢口さんからは JARE59 の体験談を聞き、衛星画像の描き方や観測隊参加準備のアドバイスを頂きました。秘書の亀井さんには、事務手続きで何度もお世話になりました。同期の伏見君、岡田君を始め、木村さん、Waruna さん、初君、洪君、草川君、松井君、小野村君、松下君、日頃からお世話になった皆様に感謝します。ありがとうございました。

# 付録

氷海航行試験実施計画書

第 60 次南極地域観測隊  
氷海航行試験実施要領（案）

平成 30 年 8 月 6 日

# 1 試験概要

## 1.1 試験概要

砕氷艦「しらせ」（以下、しらせ）は第 60 次南極地域観測で、10 回目の南極地域観測支援航海を行う。氷海航行試験(課題 ID:AIB0901)は、本艦の安全な氷海航行に活用し得る氷海航行時の船体応答データの取得、及び氷況と船体応答の相関を求めていくための諸データを取得、蓄積することを目的として第 51 次南極地域観測支援航海から、第 58 次を除き、継続して氷海航行試験が行われてきた。

第 51 次から第 57 次までの航海では氷況が非常に厳しく、本試験により蓄積してきたデータは厚い氷での航行データに集中している。一方で昨年(第 59 次)航海においては氷況が緩く、100m 程度の長い進出距離のラミング航行データを取得することができた。しかしながらこのような過度に厳しくない氷況における連続砕氷航行及びラミング砕氷航行のデータの数は未だ十分とは言えず、今後の航海においても継続的にデータを蓄積していく必要がある。

本課題では、これまでと同様の航海データの蓄積に、しらせの氷海航海効率化に有用と思われる、散水ポンプ圧力の記録を加えた試験を実施する。

## 1.2 目的

本試験の目的は、

- ① 基礎データの取得と解析による「しらせ」航行指針への貢献
  - ② しらせの氷海航行時の氷況とそれに対する船体応答を調査し関係を明らかにすることで、しらせの船体応答から海氷の様子を知ることができる「氷況センサーとしてのしらせ」の実現
  - ③ 建造後 10 年を経た「しらせ」の砕氷能力の評価
  - ④ しらせ航海中に発生する海水飛沫・着氷を観測することで、寒冷域航行の際に問題となる船体着氷のメカニズム解明
  - ⑤ 将来の高性能極域船設計の基礎データ取得
- の 5 点である。

## 1.3 実施項目

本試験では、以下4つの試験・測定を実施する。

- ① 連続砕氷試験（散水試験含む）
- ② ラミング試験
- ③ 海水飛沫測定
- ④ 簡易船体動揺計による船体挙動測定

## 1.4 試験計測の形態

氷海航行試験は、通常航行時計測と性能試験計測の二種に区分して実施する。

### 1.4.1 通常航行時計測

本務行動中の、性能試験計測以外の航路、運転状態において、連続的な計測を行う。通常航行時計測では氷海モニタリングシステムによる船体動揺計測、船上EM・カメラによる海水記録、海水飛沫計測を行う。これらの計測はしらせ航行時には常に行うもので、しらせ本務行動に影響を与えない。

### 1.4.2 性能試験計測

性能試験計測は、特定の海域においてしらせの運転状態を変化させ、諸計測を行う。性能試験計測はフィールド選定計測と本務航路上計測の二つのパターンが考えられる。

#### ・ フィールド選定計測

フィールド選定計測は、昭和基地接岸後、定着氷において試験に適切なフィールドを決定し、本務行動の航路から試験フィールドに移動して計画的に実施する試験である。フィールド選定計測の試験を行うために時間を確保し、しらせを動かす必要がある。

#### ・ 本務航路上計測

本務航路上計測は、しらせ本務行動中の航路において、各試験項目に適切な氷況に遭遇した場合に、自衛隊の指揮の下、可能な範囲で本艦の運転状態を変化させ、諸計測を行う計測である。

氷況が緩いと予測される第60次行動においては、ラミング航行を行うことが出来る氷況が少ないと思われる。しらせのラミング航行データを出来る限



り多く取得するため、特にラミング航行を行う氷況に遭遇した場合は、本務行動中においても、出来る限り計測にご協力頂きたい。

## 1.5 計測システム

本試験で使用する計測システムの概要を図 1-1 に示す。

### ・船体応答データ

氷海モニタリングシステムにより、歪みゲージ・ジャイロセンサー・加速度計・舵角・軸トルクのデータを取得する。

それに加えて簡易船体動揺計(マリンステーション)を三箇所を設置し、加速度を計測する。

性能試験計測の際には、これに加えて燃料流量と散水ポンプ圧力を記録する。

### ・飛沫データ

01 甲板両舷前方に雨量計型、06 甲板に SPC 型の飛沫計を設置し、しらせに発生する海水飛沫を測定する。

### ・海氷データ

右舷前方に設置する船上 EM センサ及び側方カメラにより、氷厚及び積雪深や海氷の状態を測定、記録する。

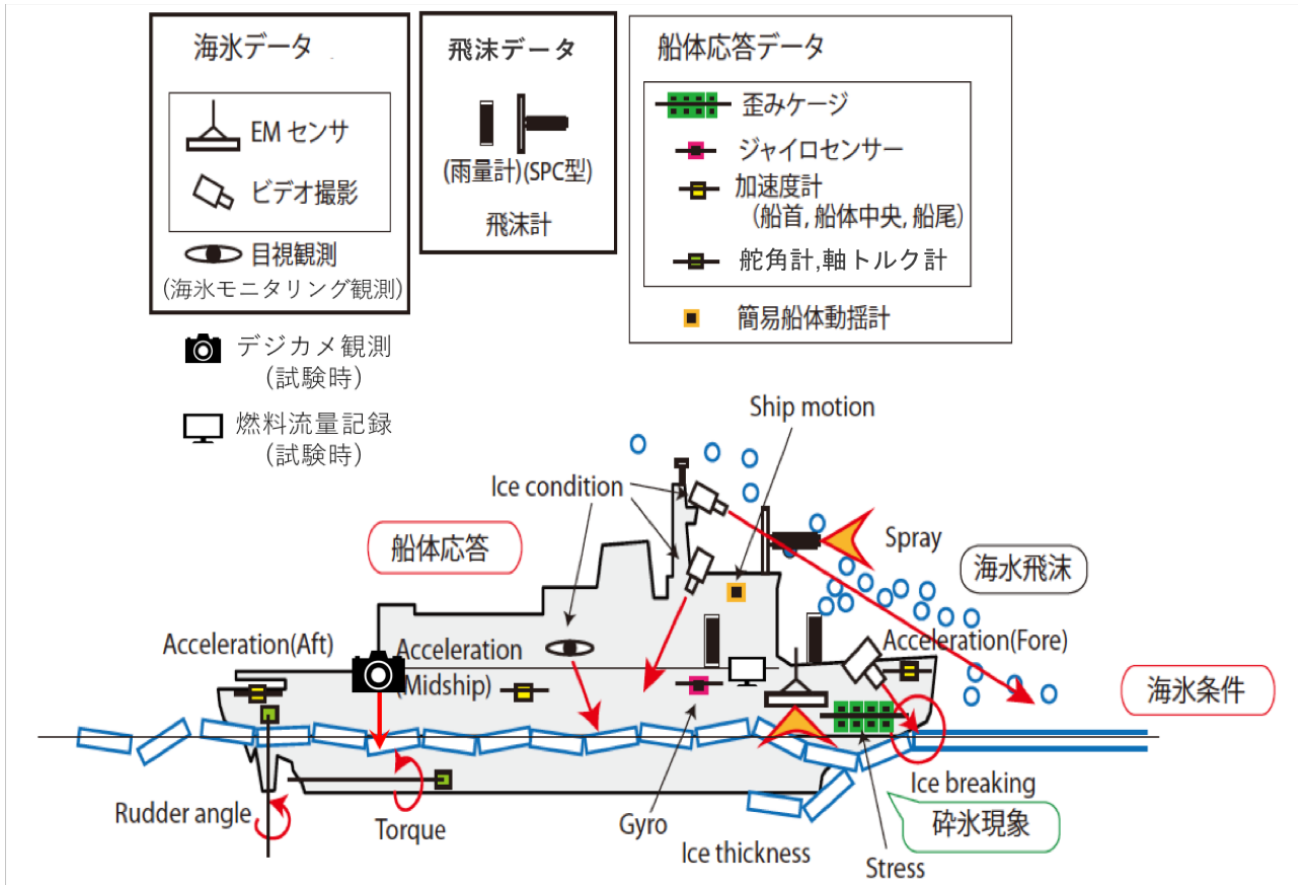


図 1-1 氷海航行試験の計測システム概要

## 2 実施体制

本試験は、以下の体制で実施する。

また、研究責任者の 2 名は、第 60 次南極地域観測航海には乗船しない。

船上観測統括	：	木村 亮	(日本海洋事業株式会社)
海氷観測統括	：	牛尾 収輝	(国立極地研究所准教授 研究教育系)
研究責任者(PI)	：	山口 一	(東京大学教授 非乗船)
		尾関 俊浩	(北海道教育大学教授 非乗船)
夏隊同行者	：	吉野 正剛	(東京大学)
		草川 亮	(東京大学)

## 3 計測項目

### 3.1 船体

氷海モニタリングシステムにおける船体計測項目及び計測機器を表 3-1 に示す。

表 3-1 計測項目及び計測機器(氷海モニタリングシステム)

No.	計測項目	計測機器等	備考
SL-1	UTC 時刻	艦 GPS →統合化航海情報 LAN	SL-1～15 は観測隊 LAN に流れる航海情報を第 1 観測室に設置する収録システムで収録。
SL-2	船位	艦 GPS →統合化航海情報 LAN	
SL-3	速力 (対水)	艦電磁ログ→統合化航海情報 LAN	
SL-4	船首方位	艦ジャイロ→統合化航海情報 LAN	
SL-5	ピッチ	艦ジャイロ→統合化航海情報 LAN	
SL-6	ロール	艦ジャイロ→統合化航海情報 LAN	
SL-7	ヨーレート	艦ジャイロ→統合化航海情報	

		LAN	
SL-8	ピッチレート	艦ジャイロ→統合化航海情報 LAN	
SL-9	ロールレート	艦ジャイロ→統合化航海情報 LAN	
SL-10	舵角（左右）	→統合化航海情報 LAN	
SL-11	速力区分（左右）	→統合化航海情報 LAN	運転指令情報
SL-12	回転数調整	→統合化航海情報 LAN	運転指令情報
SL-13	相対風向	→統合化航海情報 LAN	
SL-14	相対風速	→統合化航海情報 LAN	
SL-15	速力（対地）	艦 GPS →統合化航海情報 LAN	
SS-1	外板フレーム応力 (10 フレーム 20 点)	歪計測装置	第 2 空所フレームで計測される剪断歪信号（電圧）を第 1 観測室に設置する収録システムで収録。
SS-2	天井板応力（参考） (3 点)	歪計測装置	3 箇所の天井板の歪信号（電圧）を第 1 観測室に設置する収録システムで収録。
SA-1	船首部加速度	3 軸加速度計	3 箇所で計測される加速度信号（電流）を第 1 観測室に設置する収録システムで収録。
SA-2	船体中央部加速度	3 軸加速度計	
SA-3	船尾部加速度	3 軸加速度計	
SM-1	軸回転数（左右）	軸馬力／スラスト計	軸馬力／スラスト計の信号（電流）を第 1 観測室に設置する収録システムで収録。
SM-2	軸トルク（左右）	軸馬力／スラスト計	
SM-3	軸馬力（左右）	軸馬力／スラスト計	
SM-4	軸スラスト（左右）	軸馬力／スラスト計	
SN-1	計測ノッチ		

## 3.2 海水

海水のデータは、船体計測の航行条件として不可欠であり、両者の情報が揃って初めて性能を評価することが出来る。

海水の測定項目は、下の表 3-2 に示す。

表 3-2 計測項目及び計測機器（海水観測）

No.	計測項目	計測機器等	備考
SI-1	氷厚+積雪	EM センサー	船首舷側より独立した計測システムによって、計測・収録される
SI-2	氷厚・積雪	ビデオ観測, レーザー計測, 目視観測	舷側より撮影
SI-3	海水状態 (密接度・分類)	目視観察	舷側より観察

### 3.3 海水飛沫

開放水面海域においては、船舶が航行することにより飛沫が発生し、船体着氷の原因となる。しぶきの主な発生源は船首近傍であるので、高さを変えて飛沫の飛来状況を計測する。この計測は水中では実施せず、開放水面域で連続的に実施する。本務行動中に継続して計測するものであり、本務行動には影響を与えない。

#### 3.3.1 計測項目及びセンサ

計測項目は表 3-3 に示す。

表 3-3 計測項目及び計測機器（海水飛沫）

No.	計測項目	計測機器等	備考
SP-1	飛沫数・飛沫粒子径	SPC 型しぶき計	01 甲板で計測される信号を第 1 観測室に設置する収録システムにより記録する。
SP-2	飛沫量	船舶用雨量計型しぶき計	独立した計測システムによって計測・収録される。01 甲板両舷前方に合計 2 箇所設置する。

飛沫粒子カウンター(SPC)は、図 3-1 のような外観の装置で、センサー部を通過した飛沫粒子の粒径と数を測定することが出来る。

雨量計型飛沫計(MRS)は、図 3-2 のような外観の装置で、飛沫計にかかった飛沫の総体積を測定することができる。これは船舶用雨量計を飛沫観測用に改造したものである。



図 3-1 SPC 外観



図 3-2 雨量計型飛沫計外観

### 3.3.2 取り付け場所

飛沫計「SP-1」のセンサー部は 06 甲板の中央前部の手すりに設置する。位置は第 52 次～第 59 次隊と同様である。設置方法は第 59 次隊での設置方法に準拠している。風の巻き込みが大きい場合は、センサーを上下逆さまに取り付けて対応する。データプロセッサーと PC は第 1 観測室に設置し、センサー部からデータプロセッサーまでケーブルで繋ぎ信号を送る。飛沫量は、発生場所から高度が高くなるにつれて指数関数的に減少することが予想される。飛沫計「PS-2」は、01 甲板前方 2 箇所計測する。詳細な設置場所は 4.8 にて示す。

また、第 59 次において 01 甲板右舷に設置した雨量計型飛沫計に破損が発生したが、この原因は飛沫計固定具の不備と考えられる。再発を防ぐため、本次航海では設置箇所を変更するとともに、固定方法も単管パイプを挟む方法へ変更する。

### 3.3.3 船体着氷

しらせ甲板にて船体着氷及び積雪が認められた場合、そのサンプリングを行う。第 59 次にて確認された着氷と積雪の例を図 3-3、図 3-4 に示す。



図 3-3 59 次で確認された着氷



図 3-4 59 次で確認された積雪



# 4 記録方法

## 4.1 航海情報

時刻・艦位・船速・運転指令・舵角・船体動揺のデータは、統合化航海情報として観測隊 LAN にも流される信号を、第 1 観測室のデータ収録装置で収録する。  
(氷海モニタリングシステム)

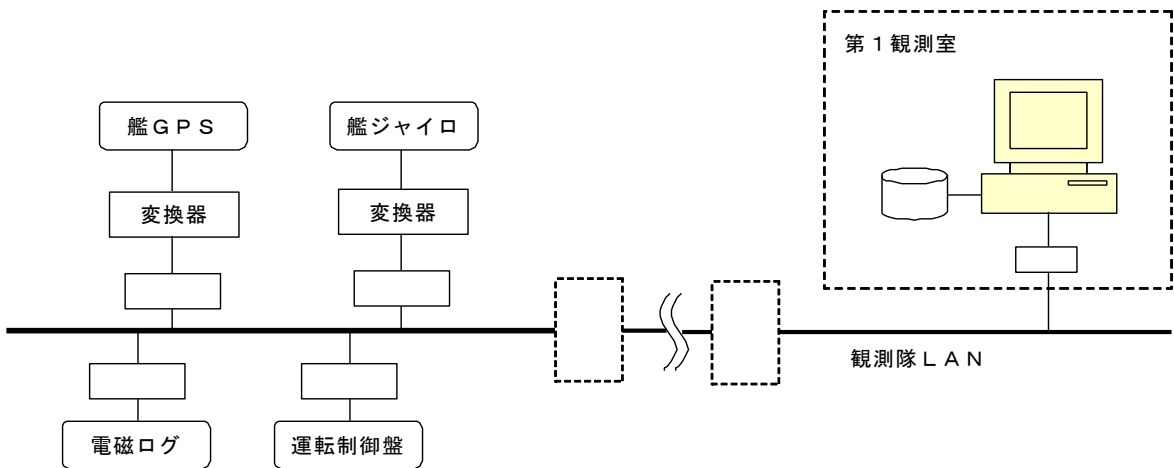


図 4-1 航海情報の計測ライン

## 4.2 船体加速度

艦首部、船体中央部、艦尾部の3箇所で計測し、それぞれの計測場所に、加速度計、アンプ、無停電装置で構成されるユニットが設置される。計測場所から第1観測室に繋がる計測用の固定ラインを利用して、4-20mAの電流信号でデータ収録装置に取り込む（氷海モニタリングシステム）。

また、船体加速度は第二観測室に1台及び艦橋に2台の計3台設置する簡易船体動揺計でも計測、記録を行う。簡易船体動揺計は加速度データを機器内記録装置に蓄えるため、定期的にUSBメモリ等を用いてデータを吸い出す必要がある。艦橋に設置する簡易船体動揺計については、動作確認用のランプが搭載されているため、布やテープ等で灯りが漏れないようにする。

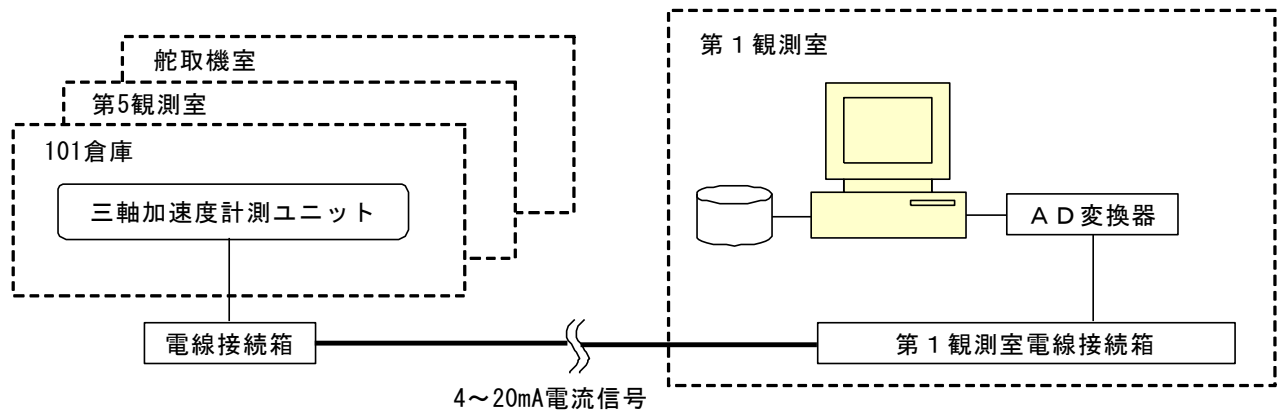


図 4-2 加速度の計測ライン

### 4.3 軸馬力、軸スラスト、軸トルク、回転数

しらせの軸馬力/スラスト計からは、左右軸それぞれについて回転数、軸トルク、軸スラスト、軸馬力の計 8 種の信号が船内の固定ラインを介して第 1 観測室に電流信号で送られ、この信号をデータ収録装置に取り込む（氷海モニタリングシステム）。

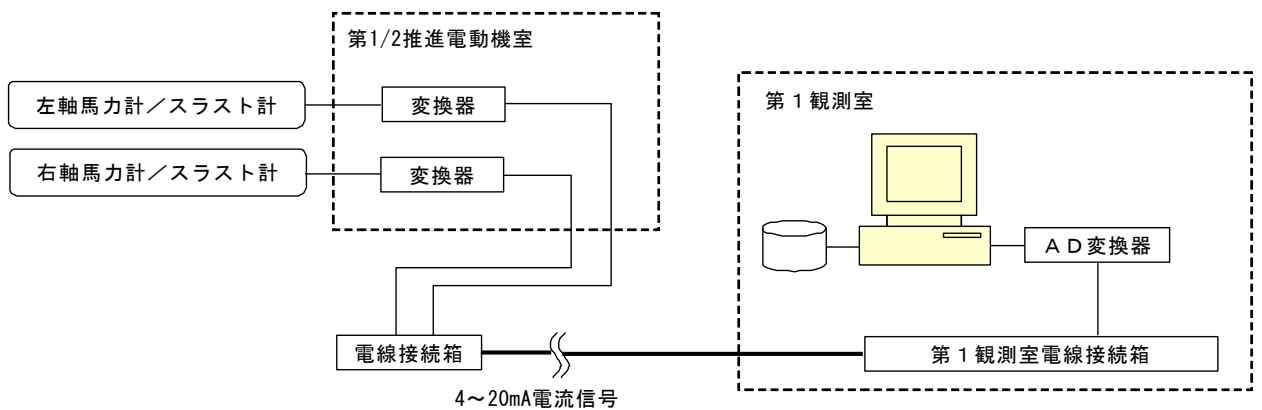


図 4-3 軸馬力等の計測ライン

### 4.4 外板フレーム及び天井の歪み計測

船体に作用する氷荷重推定用として、艦首部第二空所の 10 本のフレームで剪断歪を計測する。また、参考データとして、艦内数箇所の天井板の歪も計測される。それぞれの信号は固定ラインによって第 1 観測室に送られ、動歪アンプを介して電圧信号をデータ収録装置に取り込む（氷海モニタリングシステム）。

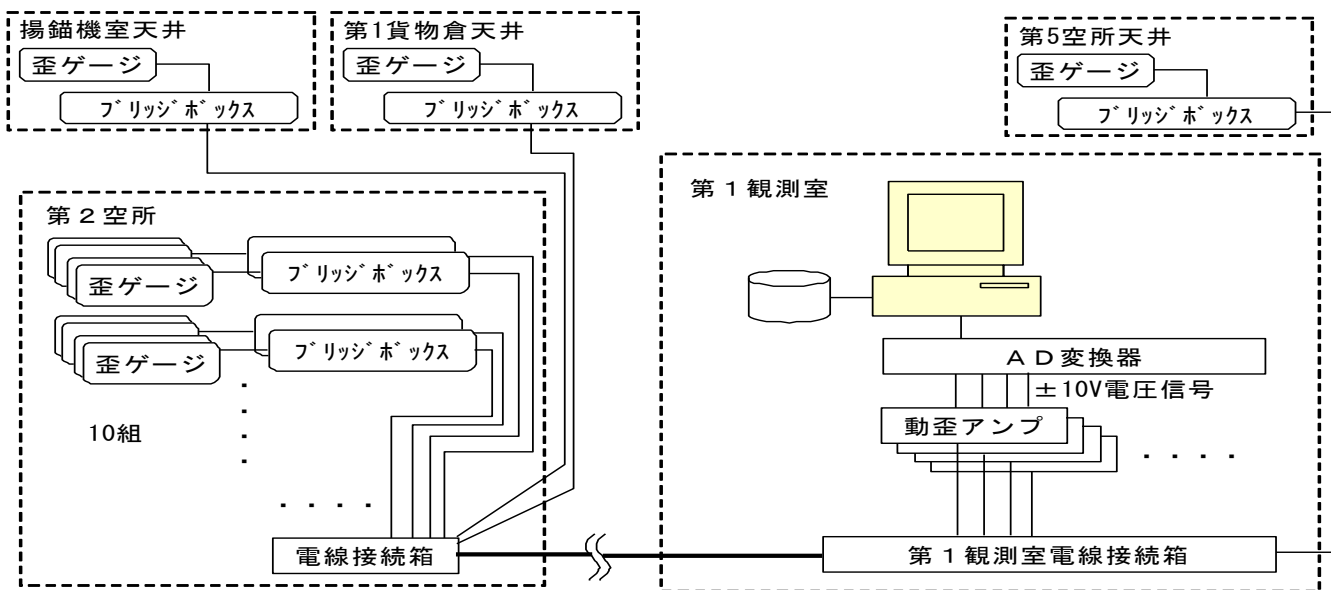


図 4-4 船体フレーム歪みの計測ライン



図 4-5 第1観測室歪計測アンプ

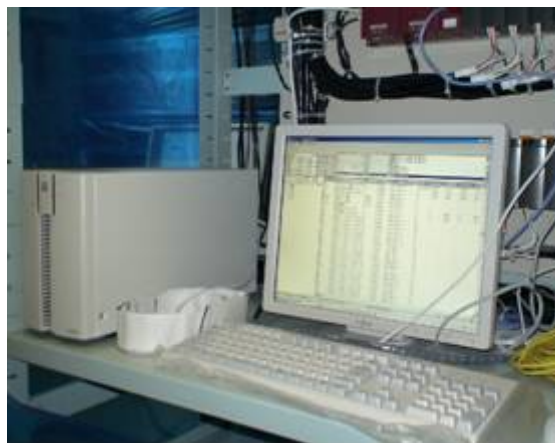


図 4-6 第1観測室データ収録装置



図 4-7 第 2 空所フレームせん断歪計測ゲージ



図 4-8 第 2 空所フレームせん断歪計測ゲージ



図 4-9 艦首 101 倉庫天井加速度計測ユニット  
外観



図 4-10 艦首 101 倉庫天井加速度計測ユニット  
ケース内部

#### 4.5 氷厚センサ（船上 EM）

性能試験時の氷厚、積雪の観測は、観測隊によって船上 EM(図 4-11)とカメラ観測及び目視観測で行う。

船上 EM は、送信コイルで発生させた 1 次電場により海水と海氷の境界に 2 次電場を発生させ、受信コイルでその 2 次電場の強度を観測し、その観測値から船上 EM から海水までの距離を算出する。同時に、船上 EM に搭載されているレーザー距離計により、船上 EM から海氷上面までの距離を測定することで、海氷下までの距離から海氷上部までの距離を差し引き、積雪深を含めた海氷の全厚を計測する。

EM センサの情報は、しらせ 01 甲板右舷のスカートに設置したデータロガー(図 4-12)により取得する。また、1 日に 1 回ローカルの専用 PC にバックアップされる。



図 4-11 船上 EM

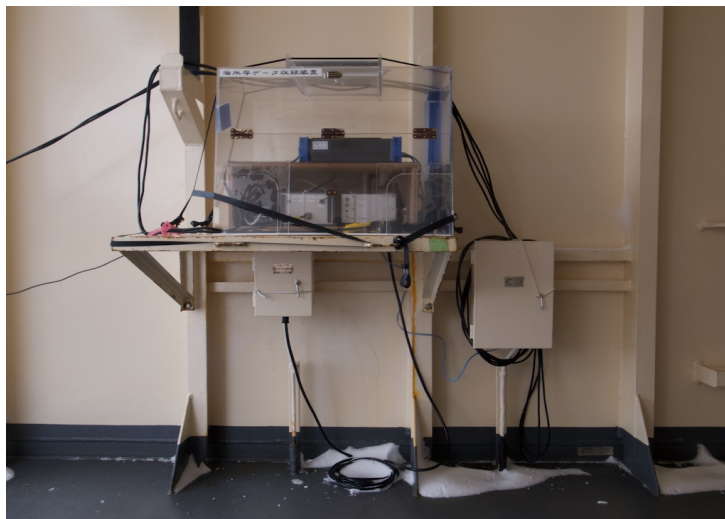


図 4-12 船上 EM 用データロガー

#### 4.6 燃料消費量

性能試験時、燃料消費量を記録する。燃料消費量のデータは、しらせの氷海航行の効率を考える上で非常に重要なパラメータとなる。

機関室にて PC 画面に表示される燃料消費量を、小型カメラにて一定時間毎に

撮影する。

この記録方法は、第 59 次で行われた記録と同様である。

#### 4.7 散水ポンプ圧力

しらせ散水におけるシーチェスト閉塞の問題を考慮するため、散水を行う性能試験時、散水ポンプの吸込/吐出のポンプ圧力を記録する。機関室の融雪用散水装置制御盤(図 4-13)にて表示されるポンプ圧力の変化を、設置したカメラにて撮影し記録する。

散水ポンプ圧力の記録は本年が初の試みであり、記録方法の実現可能性については訓練航海時に確認を行う。



図 4-13 散水装置制御盤

#### 4.8 海水飛沫

海水飛沫の情報は、SPC と雨量計型飛沫計(図 3-1、図 3-2)によって取得する。飛沫計の設置位置は図 4-14、図 4-15、図 4-16 に示す。これらによって取得したデータは、ケーブル、無線接続もしくは艦内 LAN を使って第 1 観測室へ送信し、記録する。

第 59 次では、01 甲板に設置した雨量計型飛沫計で取得したデータを無線+中継機を用いて第 1 観測室に送信したが、第 60 次では艦内 LAN を用いて接続する計画を立てている。接続方法については訓練航海時にテストを行い、最終的に決

定する。

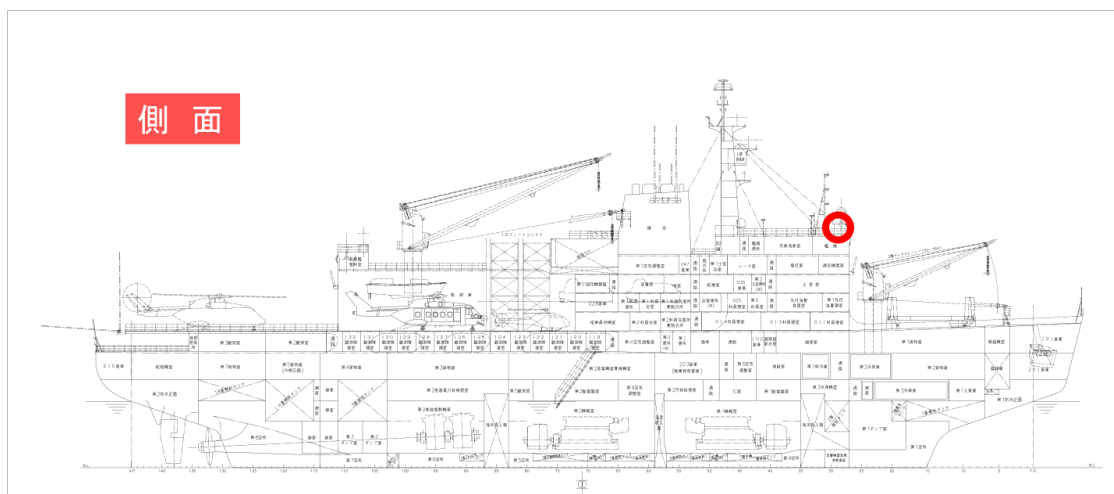


図 4-14 SPC 型飛沫計設置場所(画像赤マル)

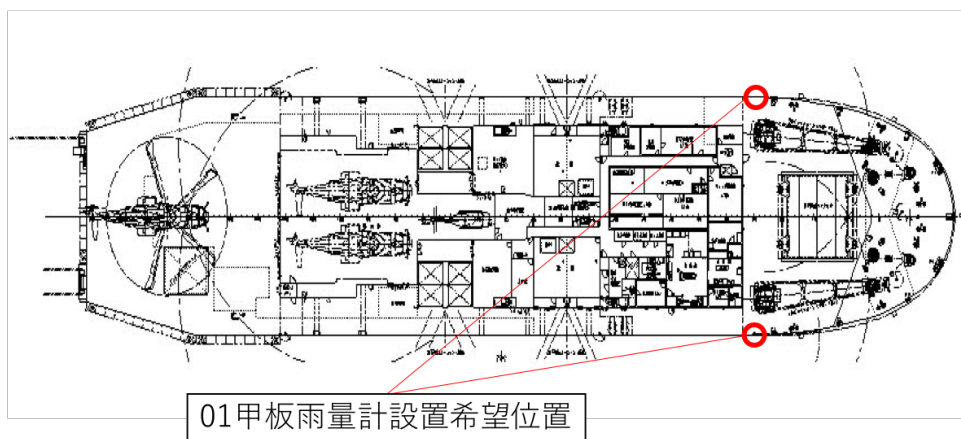


図 4-15 雨量計型飛沫計設置場所





図 4-16 右舷雨量計型飛沫計設置位置

## 5 実施要領

### 5.1 通常航行時計測

#### 5.1.1 概要

本務行動中の航路、運転状態において、本務行動に影響を与えることなく計測を行う。

#### 5.1.2 計測内容

氷海モニタリングシステム、簡易船体動揺計によりデータ収録を行う。  
二日毎に、USB メモリを用いて簡易船体動揺計からデータを取得する。  
定期的に海氷の様子（海氷厚及び海氷密接度）を観測し、カメラで記録する。  
船上 EM センサによる氷厚も併せて記録する。

### 5.2 連続砕氷試験

#### 5.2.1 概要

主にリュツォ・ホルム湾の1年氷の定着氷において、連続砕氷性能の確認、氷況

としらせ船体応答の関係及び連続砕氷時の散水効果を調査するための試験を実施する。連続砕氷試験は、一回の計測で必ずしも良好なデータが得られるとは限らず、また、氷厚や積雪、リッジ等による影響が非常に大きい。できるだけ平坦な一年氷において、多くの回数試験を行うことが望ましい。本試験では、氷厚の異なる2~3の海域で、それぞれ少なくとも計5セット(散水ON/OFFそれぞれ5回ずつ)の試験を目標とする。

### 5.2.2 運転状態

連続砕氷散水試験では、第1強速(119 rpm)かつ直進航行を行う。第1強速では連続砕氷ができない氷況の場合は、第2強速(137 rpm)で直進航行を行う。

### 5.2.3 操船

試験開始後、第1強速または第2強速で直進航行を行い、10分毎に散水装置のON/OFFを切り替える。安定した氷海域が狭い場合は必要に応じて途中で180度旋回を行い、同様に散水装置のON/OFFを切り替えながら第1強速で直進航行を行う。

散水中にポンプの詰まりが発生した場合は散水を中止し、一時後進等によって詰まりが解消され次第、10分間の散水を再開する。詰まりが頻繁に発生し、試験の実施に支障がある場合は、散水装置の切り替えまでの時間を短くして対処する。

旋回を行う位置及び回数は、散水試験を実施可能な時間及び氷況を考慮して決定する。

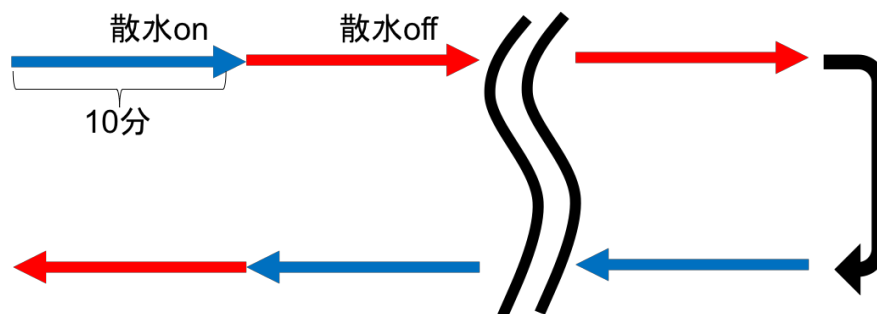


図 5-1 連続砕氷散水試験概要

## 5.2.4 計測手順

### ① 試験航路・内容決定

しらせ、観測隊、同行者の三者で試験内容と海域及び運転状況を協議し、試験海域、スケジュールを決定する。

### ② 要員配置

#### 【しらせ】

- ・試験開始/終了の発令 : 航海長
- ・一般状況（気象・海象）記録 : 気象員

#### 【観測隊】

- ・性能試験統括 : 艦橋
- ・海氷観測担当 : 05 甲板または舷側
- ・燃料消費量等記録 : 機関室

### ③ 試験実施

#### 【連絡系統】

- ・試験開始/終了 : 本艦 ⇄ 性能試験統括 → 海氷観測担当・機関室
- ・散水装置動作状況 : 本艦 → 性能試験統括

#### 【記録項目】

- ・散水装置 ON/OFF
- ・散水ポンプ圧力
- ・燃料消費量
- ・海氷カメラ画像

## 5.3 ラミング試験

### 5.3.1 概要

主に復路リュツオホルム湾定着氷の氷厚約 2m 以上の多年平坦氷において、しらせがラミング航行を行う時のラミング性能の確認、ラミング時の氷況としらせ諸性能の関係を調査するための試験を実施する。昨年氷況を鑑みるに、本年度も通常の航路においてラミングを実施する海域は非常に少ないと予想される。

SAR 画像等をもとに氷厚 2m 以上の海域へ赴き、ラミング試験を実施する。ラミング試験を行う海域は、昭和基地西方を考えている。

ラミング試験は、散水装置を作動させたラミングと作動させないラミングをラミング 2 回ずつ繰り返し直進航行する。少なくとも散水の ON/OFF それぞれ 10 回ずつの試験の実施を目標とする。

### 5.3.2 運転状態

ラミング試験の助走・貫入時は第 2 強速、助走距離は 300m とする。しらせの航行に危険がない範囲で、一本突きのラミングを行う。

### 5.3.3 操船

予め選定した海域において、一本突きのラミング航行で直進する。ラミング 2 回毎に散水装置の ON/OFF を切り替える。途中で氷況が変化し、ラミングが不可能になった場合(連続砕氷になってしまう場合)には、方向転換をしてラミング可能な海域へ移動し、ラミング試験を再開する。どうしても付近に厚い氷が無く、ラミング試験が続行不可能な場合、ラミング試験の時間を 5.2 の連続砕氷散水試験へと充てる。

### 5.3.4 計測手順

5.2.4 で行う計測に加えて、ラミングの航行情報や操船の意図(一本突き、二本突きで右に向けて衝突させる、助走が不足だった、など)を性能試験統括へ伝えて頂き、記録する。

#### ① 試験航路・内容決定

しらせ、観測隊、同行者の三者で試験内容と海域及び運転状況を協議し、試験海域、スケジュールを決定する。

#### ② 要員配置

【しらせ】

- ・試験開始/終了の発令 : 航海長
- ・一般状況（気象・海象）記録 : 気象員

**【観測隊】**

- ・性能試験統括 : 艦橋
- ・海氷観測担当 : 05 甲板または舷側
- ・燃料消費量等記録 : 機関室

**③ 試験実施**

**【連絡系統】**

- 試験開始/終了 : 本艦 ⇄ 性能試験統括 → 海氷観測担当・機関室
- ラミング航行情報の連絡 : 本艦 → 性能試験統括
- 散水装置動作状況 : 本艦 → 性能試験統括

**【記録項目】**

- ラミング航法(一本突き、二本突き等)
- 散水装置 ON/OFF
- 散水ポンプ圧力
- 燃料消費量
- 海氷カメラ画像

## 5.4 海水飛沫計測

### 5.4.1 概要

本務航路上かつ開放水面の海域において、海水飛沫の計測及びサンプリングを行う。

定期的に各飛沫計が正常に動作しているかどうかの確認を行う。海水飛沫計測がしらせの航行に影響を与えることはない。

### 5.4.2 サンプリング

しらせ船体に着氷が認められた時、その着氷のサンプルと、海水サンプルを表層水ポンプより採取する。また、積雪が認められた時、その積雪サンプルを採取する。

船上海洋観測バケツ採水と同時刻に、表層水ポンプから海水サンプルを採取する。

### 5.4.3 雨量計型飛沫計取り外し・設置

01 甲板右舷では、雨量計型飛沫計設置位置が船上 EM と重複するため、しらせが定着氷域に入る際に右舷の飛沫計の取り外し作業及び船上 EM の設置作業を実施する。

しらせ復路で定着氷域を出る際に、船上 EM の取り外し作業及び飛沫計設置作業を行い、海水飛沫計測を再開する。

## 参考文献

- [1] 南極地域観測統合推進本部 (2015): 南極地域観測第IX期 6 年計画  
[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)
- [2] 文部科学省(2019): 南極地域地図  
[http://www.mext.go.jp/a\\_menu/shinkou/nankyoku/detail/\\_\\_icsFiles/afieldfile/2016/01/07/1365762\\_04.pdf](http://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/nankyoku/detail/__icsFiles/afieldfile/2016/01/07/1365762_04.pdf)
- [3] 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>
- [4] 野澤 和男(2006) : 氷海工学. 成山堂書店.
- [5] Haas, C., Rupp, K. H. and Uuskallio, A. (1999): Comparison of along track EM ice thickness profiles with ship performance data, POAC '99: Proc 15th Int Conf on Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions, Vol.1 , pp. 343-353 .
- [6] Y. Yamauchi(2013): Improvement in Technology on Icebreaker's Performance, JAPANESE JOURNAL OF MULTIPHASE FLOW, 2013, Vol. 27, Issue 1, pp. 11-17
- [7] 根津 和彦 (2010): 新南極観測船「しらせ」. Journal of the JIME Vol.45, No.2, p.32-37.
- [8] S. Kishi, Y. Yamauchi, S. Mizuno(2007): The Study on Ramming Performance of Icebreakers. Proc. 22th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, pp 103-110
- [9] Y. Yamauchi, S. Mizuno, H. Tsukuda. (2011): The Icebreaking Performance of SHIRASE in the Maiden Antarctic Voyage. International Society of Offshore and Polar Engineers, pp. 1093-1099
- [10] Johansson B.M., Liliestrom G.C.(1989): Oden-Icebreaker Technology for the Year 2000, SNAME Transactions, Vol.97

- [11] 赤井 謙一(2010)”世界の砕氷船”. 成山堂書店
- [12] National Aeronautics and Space Administration: EOSDIS World-view, <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>
- [13] Wadhams, P. (2002): *Ice in the Ocean*. Gordon and Breach Science Publishers. London, UK.
- [14] 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>
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 藤原亮, 須山聡大 (2015): 第 56 次南極地域観測 報告. 非公開資料.
- [19] 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>
- [20] 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.
- [21] 高橋祐人 (2018): 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. 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.
- [22] 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.
- [23] Yan Huang, Siyang Huang. (2018): Experiments on navigating resistance of an icebreaker in snow covered level ice. *Cold Regions Science and Technology*, 152, pp.1-14
- [24] 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)**. 1-1
- [25] 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氷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.