

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 28 年度

修士論文

船舶における海水飛沫発生・飛来に関する研究
-船体着氷の予測方法確立を目指して-

平成 29 年 1 月 23 日

指導教員
山口 一 教授

戸田 真
(学生番号 47-156640)

目次

第1章	背景	1
第2章	目的	4
第3章	観測	
3.1	第57次南極地域観測隊について	5
3.2	飛沫観測について	9
3.3	観測実施経過	11
3.4	各センサーについて	
3.4.1	雨量計について	12
3.4.2	Snow Particle Counter(SPC)について	17
3.5	SPC の記録したデータについて	21
3.6	雨量計のトラブルについて	
3.6.1	雨量計の転落について	23
3.6.2	雨量計の測定データについて	25
第4章	解析	
4.1	相対風速との関係	27
4.2	相対風速が大きい時の飛沫量との関係	30
4.3	各数値と飛沫量の時間推移	31
4.4	各数値と飛沫量との関係	39
4.5	動揺との関係	43
4.5.1	理論	45
4.5.1	出会周期の計算および飛沫量との関係の検証	48
第5章	結論	54
第6章	今後の展望	55
	参考文献	56
	謝辞	59
	付録	60

図表目次

Fig.1.1 砕氷艦「しらせ」において発生した着氷の様子、艦首側	2
Fig.1.2 砕氷艦「しらせ」に付着した氷の様子	2
Fig.1.3 砕氷艦「しらせ」に付着した氷の様子	3
Fig.1.4 砕氷巡視船「そうや」で発生したより大規模な船体着氷の様子 [7]	3
Fig.2.1 砕氷艦「しらせ」	6
Fig.2.2 第 57 次南極地域観測隊における砕氷艦「しらせ」航行予定 (変更前)[14]	7
Fig.2.3 第 57 次南極地域観測隊における砕氷艦「しらせ」航行予定 (変更後)[14]	7
Fig.3.3.1 各センサーの設置位置と設置状況[16]	9
Fig.3.3.2 「しらせ」艦上の各センサー設置位置[17]	10
Fig.3.3.3 雨量計と SPC の設置の様子	10
Fig.3.4.1.1 雨量計に傘状の部品を取り付ける模式図	13
Fig.3.4.1.2 傘を取り付けた雨量計型飛沫計と傘の模式図および寸法 [12]	14
Fig.3.4.1.3 雨量計型飛沫計(06 甲板)	14
Fig.3.4.1.4 雨量計型飛沫計(右舷)	15
Fig.3.4.1.5 雨量計型飛沫計(左舷)	15
Fig.3.4.1.6 雨量計データロガー	16
Fig.3.3.1.7 雨量計型飛沫計データ処理・記録装置配置の様子	16
Fig.3.4.2.1 SPC 全体の模式図[19]	17
Fig.3.4.2.2 計測領域の模式図[19]	18
Fig.3.4.2.3 SPC センサーと記録装置の模式図[12]	18
Fig.3.4.2.4 SPC 型飛沫計	19
Fig.3.4.2.5 SPC データ処理装置	20
Fig.3.4.2.6 SPC データ処理装置と記録用 PC を観測室に配置した様子	20
Fig.3.4.2.7 SPC の洗浄の様子	21
Fig.3.5.1 SPC が記録した元の状態のデータ	22

Fig.3.6.1.1 3月に発生した雨量計転落の様子	24
Fig. 3.6.2.1 往路雨量計データ(12月9日～12月16日)	25
Fig.3.6.2.2 復路雨量計データ(2月24日～3月2日)	26
Fig.4.1.1 相対風速と飛沫量の関係[16]	28
Fig.4.1.2 JARE57における相対風速と飛沫量の対数値との関係	29
Fig.4.2.1 JARE55、56における19m/s以上の相対風速の領域における飛沫量との関係[16]	30
Fig.4.2.2 JARE57における19m/s以上の相対風速の領域における相対風速と飛沫量の関係	31
Fig.4.3.1 波高と飛沫量の時間推移 往路	33
Fig.4.3.2 波高と飛沫量の時間推移 復路	34
Fig.4.3.3 相対波向と相対風向、相対波向の時間推移 往路	35
Fig.4.3.4 相対波向と相対風向、相対波向の時間推移 復路	36
Fig.4.3.5 飛沫量と風速の時間推移 往路	37
Fig.4.3.6 飛沫量と風速の時間推移 復路	38
Fig.4.4.7 ハワイ大学の波浪データに基づく、有義波高と飛沫量の関係	39
Fig.4.4.8 気象庁の波浪データに基づく、有義波高と飛沫量の関係	39
Fig.4.4.9 自衛隊の波浪記録に基づく、有義波高と飛沫量の関係	40
Fig.4.4.10 相対風速と飛沫量の関係	41
Fig.4.4.11 相対風向と飛沫量の関係	41
Fig.4.5.1 JARE57の航行中、「しらせ」艦首において発生した飛沫の様子	44
Fig.4.5.2 飛沫の体積の時間推移(2月18日11時25分から11時30分)	44
Fig.4.5.1.1 出会周期の定義に関する模式図[29]	46
Fig.4.5.1.2 強制モーメント係数と船長波長比(λ/L)の関係[29]	47
Fig.4.5.1.3 強制モーメント係数と出会周期の関係[29]	47
Fig.4.5.2.1 出会周期と飛沫量の関係	53
Fig.9.1 2月21日の飛沫量の時間推移	60
Fig.9.2 2月22日の飛沫量の時間推移	60
Fig.9.3 2月23日の飛沫量の時間推移	60
Fig.9.4 2月21日19時～20時の飛沫量、ピッチ角、相対風速、船速の時間推移	61

Fig.9.5	2月21日19時~20時の飛沫量、ピッチ角、相対風速、船速の時間推移	62
Fig.9.6	2月18日の飛沫量、粒子数、飛沫量/粒子数の推移	63
Fig.9.7	2月18日0時から6時の飛沫量、粒子数、飛沫量/粒子数の時間推移	64
Fig.9.8	2月18日1時から2時の飛沫量、粒子数、飛沫量/粒子数の時間推移	65

Table2.1	第 57 次南極地域観測隊の行動[13]	8
Table.3.3.1	海水飛沫計測の実施経過のまとめ[18]	11
Table.4.5.2.1	解析に使用する時間帯	49
Table.4.5.2.2	解析に使用する時間帯の波周期	50
Table.4.5.2.3	各時間帯の平均出会周期	52

第1章 背景

船体着氷とは、寒冷な地域を船舶が航行する際にしばしば発生する、船体に氷が付着する現象である。砕氷艦「しらせ」において発生した着氷の様子を Fig.1.1-1.3 に示す。艦首を撮影した写真であるが、壁面やねじの周辺に氷が付着しており、場所によっては厚さ 1cm の氷が付着していることが確認できる。砕氷巡視船「そうや」で発生したより大規模な着氷の様子を Fig.1.4 に示す。船体が透けて見えなくなるほど分厚い氷が付着しており、乗船者が氷の除去を行っていることが確認できる。この現象が発生すると、レーダー、クレーンなど、船上に存在する可動部分が凍りつくことにより動かなくなってしまうといった影響から、最悪の場合は小型の漁船などであれば重心の上昇に伴い復原力を失い転覆してしまう可能性があるなど、様々な悪影響がある。実際に、過去に着氷が原因だと考えられている漁船の遭難事故が存在する。[1-2]

船体着氷の要因としては、過冷却状態になった霧の凍着、降雪による着雪などがあるが、特に注目すべき要因の一つとして、海水飛沫があげられる。[3-5] これは、船体動揺に伴い船の周りから舞い上がった海水飛沫が風に煽られたり、船体が移動したりすることにより船体に衝突し、それが凍結、付着、蓄積することである。

現在、地球温暖化に伴う極域の氷の減少により、北極海を船舶の航行ルートとして利用する計画が各国で進められている。このルートを北極海航路と呼ぶ。ユーラシア大陸の北方を通してアジア・ヨーロッパ間を移動することができれば、現在使われている大陸の南側を通るルートより距離は格段に短くなり、また接する国も少ないことからより安全な航行の実現が期待されることから、物流面をはじめとした利用を目指し開発が進んでいる。[6]

今後北極海航路の開発の激化に伴い、着氷が起こりうる寒冷な海域を航行する船舶が増加することが予想され、着氷の危険性も高まる可能性がある。



Fig.1.1 砕氷艦「しらせ」において発生した着氷の様子、艦首側



Fig.1.2 砕氷艦「しらせ」に付着した氷の様子

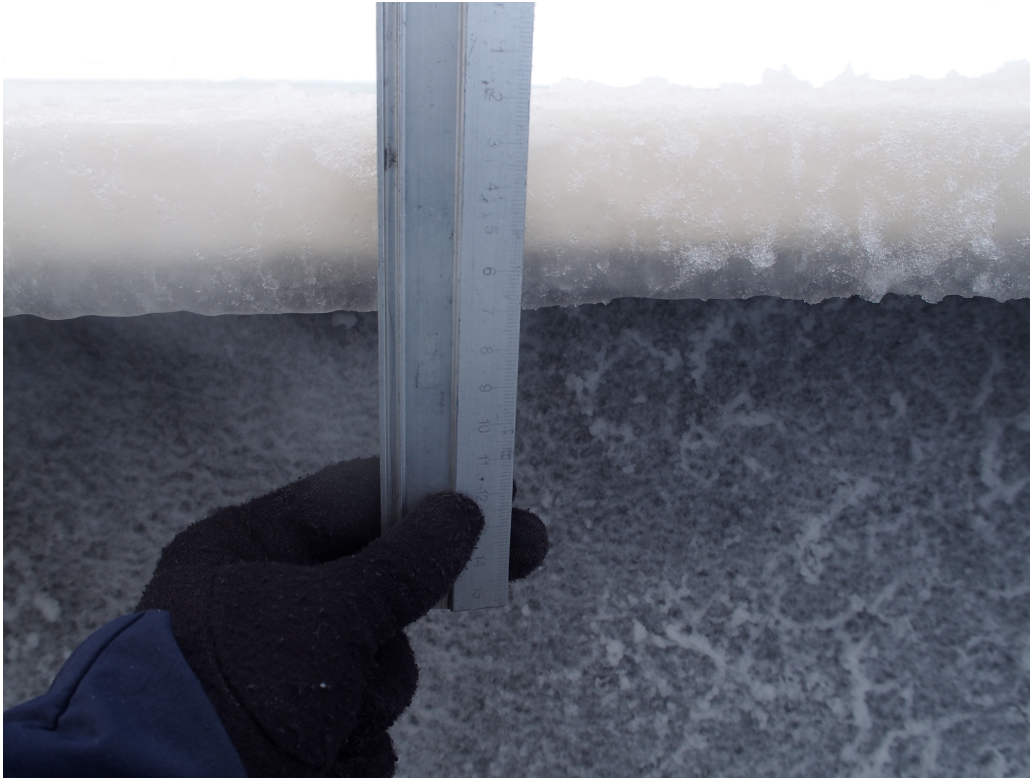


Fig.1.3 砕氷艦「しらせ」に付着した氷の様子



Fig.1.4 砕氷巡視船「そうや」で発生したより大規模な船体着氷の様子[7]

第2章 目的

現在、着氷が発生した場合の確実な対処方法は、着氷が発生した時にハンマー等で氷を剥がし海に捨てるという場当たりの方法しか存在しない。現在でも船橋の窓など、着氷が起こると安全に直結する重要な部位に関してはヒーターを用いて着氷が発生しないようにする手段も用いられており、着氷を防ぐ塗料、着氷を防ぐ機能性繊維を用いたカバーといった研究も進んではいるが、船舶全体に用いるにはコストがかかりすぎる。[8-10]

どのような状況で飛沫が発生するかを知ることは、今後北極海航路の活用などにより、着氷の発生の可能性のある寒冷な海域の航行が増えることが予想される状況下では重要である。

着氷の予測が可能になっても、起こることを回避する方法は現在のところ確立されていない。

飛沫の発生条件だけでなく、それを避ける現実的な方法が分かれば、着氷の発生を回避し、燃料、目的地までの所用時間などの経済的要因に影響を与えることなく安全な航行の実現につなげる事ができることが期待される。本研究の目的は、船の制御により操作が可能な領域における、飛沫の発生との関係を見つけ出すことである。

第3章 観測

3.1 第57次南極地域観測隊について

海水飛沫の観測は、これまで巡視船「ちとせ」をはじめとした複数の船舶で行われてきた。その際飛沫を観測するには、甲板上に設置した筒状の容器によって飛沫を捕集する、容器に入れた紙に飛沫を吸水させる、といった手法が用いられてきた。[3,11-12]

本研究においては、海水飛沫を観測するために、第57次南極地域観測隊(略称 JARE57)に同行者として参加し、観測を行った。しらせにおける飛沫測定は、第55次南極地域観測隊より行われている。

南極地域観測隊(略称 JARE)は、南極の各種調査、観測のために結成されている調査隊である。第57次南極地域観測隊は、砕氷艦「しらせ」に乗艦し、12月6日にオーストラリア、フリーマントルを出港、昭和基地に向かった。その後、年が明けて2016年1月5日に接岸、3月25日にオーストラリア、シドニーに帰還した。第57次南極地域観測隊においては、復路にてオーストラリア隊の救助など予定外の事態が複数発生したことにより、大幅な航行計画の変更があった。砕氷艦「しらせ」を Fig.2.1 に、航行ルートと日程について当初の航行予定と変更後の航行予定を Fig.2.2-2.3 に、最終的な行動を Table2.1 に示す。



Fig.2.1 砕氷艦「しらせ」

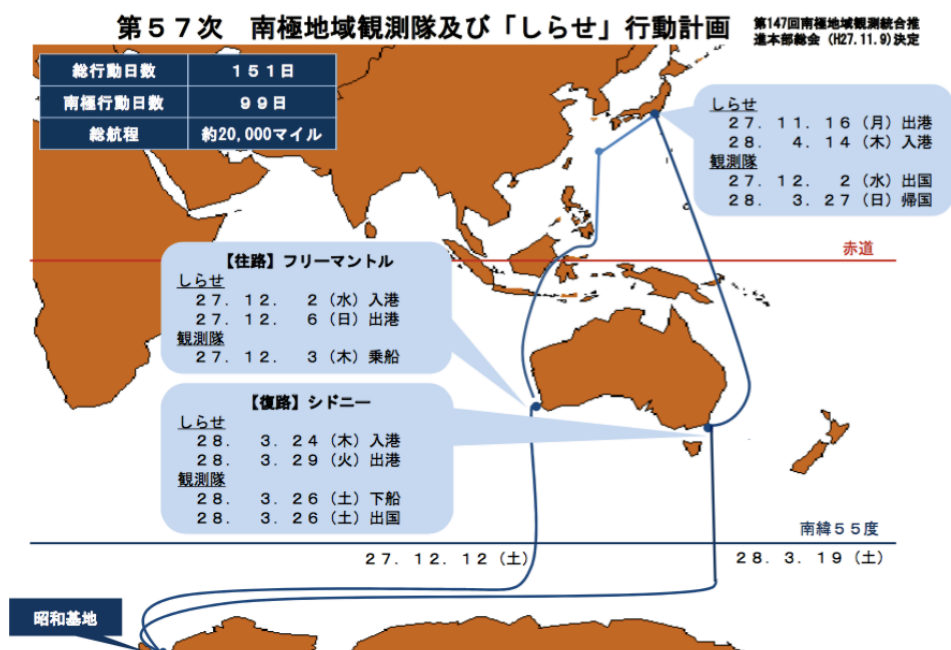


Fig.2.2 第57次南極地域観測隊における砕氷艦「しらせ」航行予定(変更前)[14]

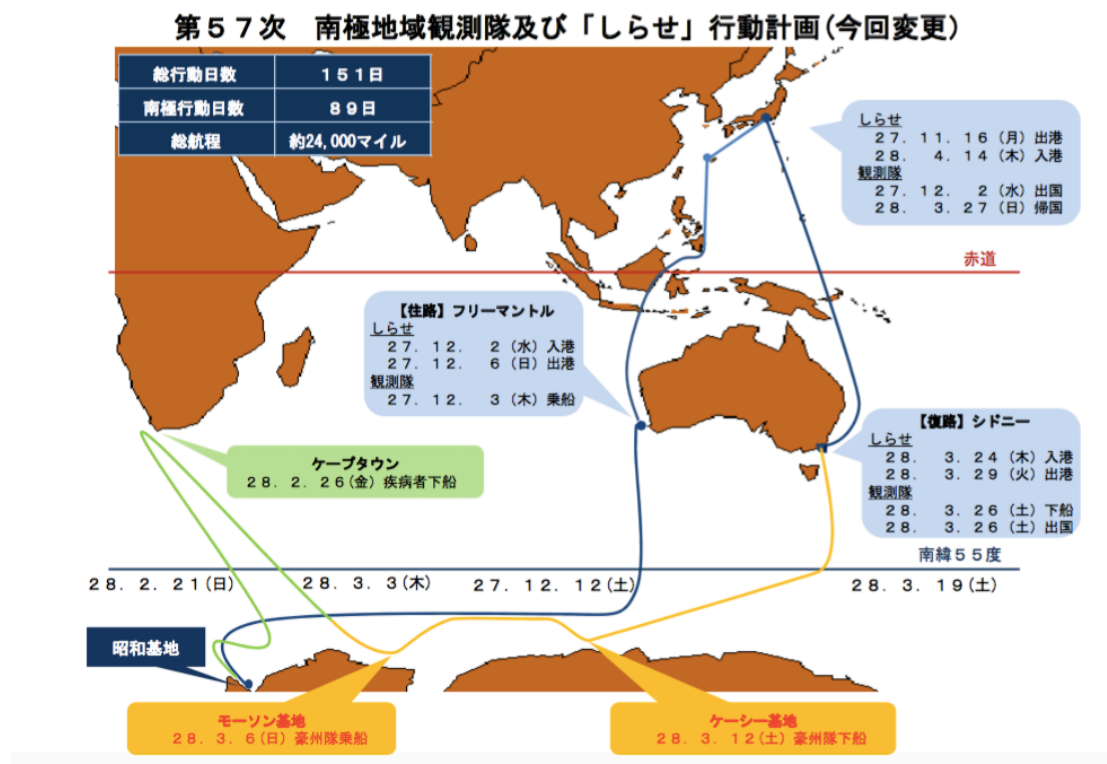


Fig.2.3 第57次南極地域観測隊における砕氷艦「しらせ」航行予定(変更後)[15]

Table2.1 第 57 次南極地域観測隊の行動[13]

往路	
日付	行動
2015 年 12 月 4 日	オーストラリア、フリーマントルにて観測隊乗船
2015 年 12 月 6 日	フリーマントル出航
2016 年 1 月 5 日	接岸
復路	
2016 年 2 月 14 日	最終便、北上開始
2016 年 2 月 26 日	ケープタウン寄港(疾病者下船)、南下開始(Fig.2.3)
2016 年 3 月 6 日	モーソン基地(オーストラリア南極観測基地)に停泊、オーストラリア隊収容(Fig.2.3)
2016 年 3 月 12 日	ケーシー基地(オーストラリア南極観測基地)に停泊、オーストラリア隊下船
2016 年 3 月 24 日	シドニー入港
2016 年 3 月 26 日	オーストラリア、シドニーにて観測隊下船

3.2 飛沫観測について

第 57 次南極地域観測隊において、船体着氷の要因である飛沫の定量的な観測を行うために、砕氷艦「しらせ」艦上において、観測を行った。飛沫の観測は、古くは、筒状の容器を船上に設置し、溜まった液体の量を調べるといった手法が使われてきたが、今回の観測では、海水飛沫を量的に把握するための飛沫計(センサー)を 2 種類使用した。一つは、雨量計型飛沫計(別称 MRS)で、もう一つは飛沫の粒径と数を測定することができる Snow Particle Counter(スノーパーティクルカウンター、略称 SPC、別称吹雪計)という装置である。雨量計は、往路では 06 甲板艦首側に 1 台、01 甲板右舷左舷に 1 つずつの計 3 台、SPC は 06 甲板(01 甲板との高低差約 12.45m)艦首側に 1 台を使用した。SPC、雨量計共に第 1 観測室に設置したデータ処理装置を介して専用の PC によってデータを取得した。このような機器を用いるメリットは、リアルタイムで飛沫が飛来する様子を把握することができる点にある。設置位置について Fig.3.3.1-3.3.2 に、実際に設置した観測機器の様子を Fig.3.3.3 に示す。

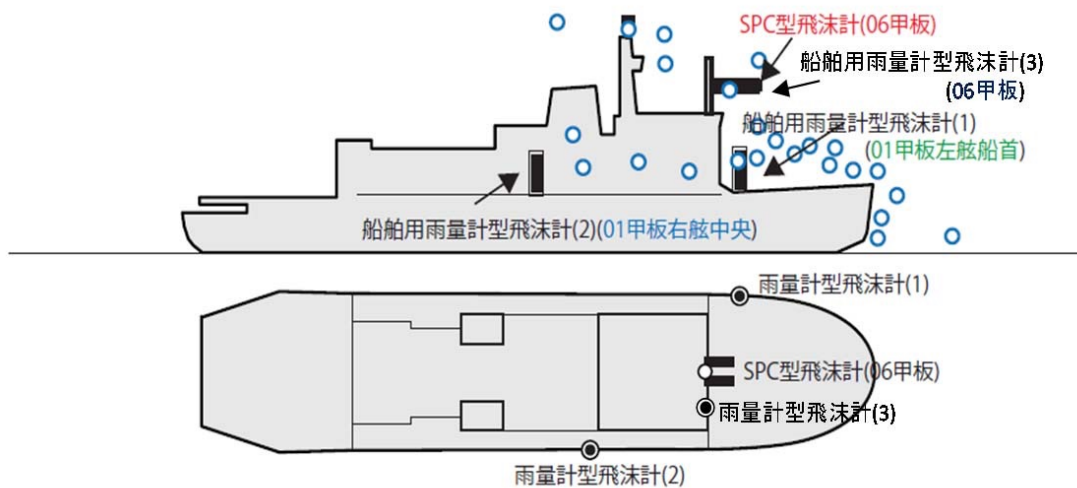


Fig.3.3.1 各センサーの設置位置と設置状況[16]

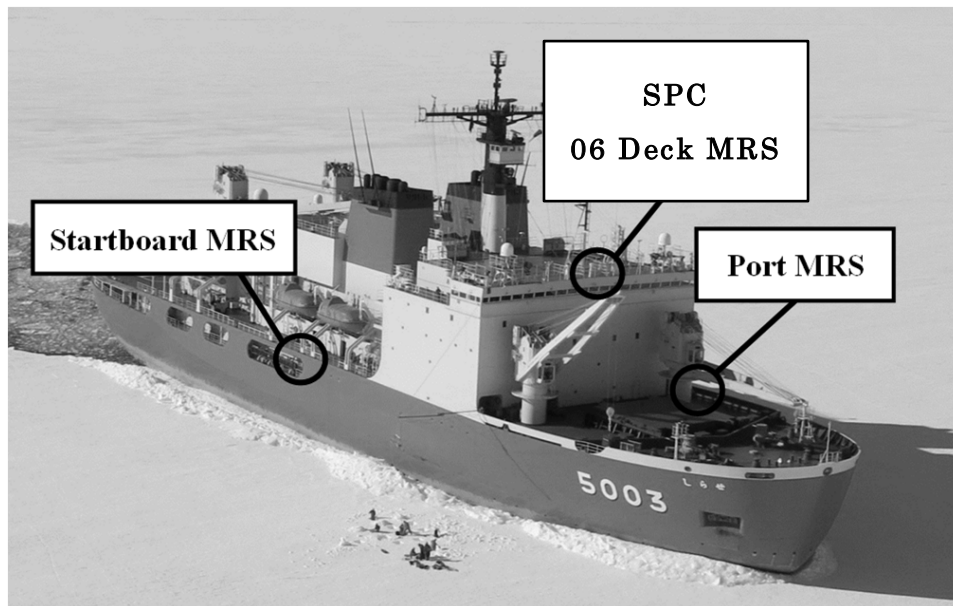


Fig.3.3.2 「しらせ」艦上の各センサー設置位置[17]



Fig.3.3.3 雨量計と SPC の設置の様子

3.3 観測実施経過

フリーマントル停泊中にセンサーの設置、配線を行い、出港後計測を開始した。12月18日、01甲板右舷に設置した雨量計が固定具から外れ、海に転落、紛失した。この出来事を受け、06甲板の雨量計を取り外し、01甲板右舷に再設置した上で測定を再開し、12月18日まで測定を行った。氷海域突入後、測定を終了し、センサーを撤収した。復路では01甲板右舷左舷に1つずつの計2台を設置した。往路でのアクシデントを受け、センサーに転落防止措置を施した上で2月15日に測定を再開し、暴風域においては測定を中断し、センサーを撤収するという対処を行った。中断を挟みつつ測定を行い、シドニー入港後、センサー、ケーブルを撤収した[18]。観測の日程をTable. 3. 3. 1に示す。

Table. 3. 3. 1 海水飛沫計測の実施経過のまとめ[18]

日付	行動
2015/12/05	SPC 設置, 動作試験 雨量計設置, 動作試験
2015/12/06	SPC 測定開始 雨量計測定開始
2015/12/07	雨量計メンテナンス, 測定再開
2015/12/09	雨量計動作確認, 測定再開
2015/12/18	右舷雨量計転落・紛失を確認, 緊急メンテナンス 残りの雨量計の確認, 測定再開
2015/12/19	SPC 洗淨, 保存ファイル作成
2015/12/20	雨量計, SPC 停止, 撤去
2016/01/04	雨量計データ吸い出し
2016/02/14	雨量計, SPC 設置 (06 甲板の雨量計を右舷に付け替え) 動作試験, 検定
2016/02/15	雨量計計測開始
2016/02/16	SPC 測定開始

2016/03/02	雨量計転落，測定中断，撤去
2016/03/08	雨量計設置，測定再開
2016/03/18	雨量計測定終了，撤去
2016/03/21	SPC 観測終了，撤収
2016/03/25	配線，治具など完全撤収

3.4 各センサーについて

3.4.1 雨量計について

雨量計型飛沫計は、船舶用雨量計(YOUNG 製)を飛沫の測定用に改造したものである。船舶用雨量計上部の液体の入り口に飛沫を受けるための傘状の部品を取り付けることにより、鉛直方向から飛来する液体は防ぎ、一方で横から飛来する飛沫を受け止め、雨量計内に落下させるようになっている。雨量計内部には液体をためられるようになっており、内部に 500mL 液体がたまるとサイフォンによって全て排出される仕組みになっている。センサー内にたまっている液体の量によって出力電圧が変化し、その出力電圧をデータロガーにより記録する。測定間隔は 30 秒であり、30 秒ごとの出力電圧の変化量とその間に飛来した飛沫の量に対応している。傘を取り付けた雨量計の模式図を Fig.3.4.1.1-3.4.1.2 に、艦上に取り付けたセンサーの様子を Fig.3.4.1.3-3.4.1.5 に、記録装置の様子を Fig.3.4.1.6-3.4.1.7 に示す。Fig.3.4.1.3-3.4.1.5 に示されている、雨量計上部の銀色の筒状の部分が傘である。

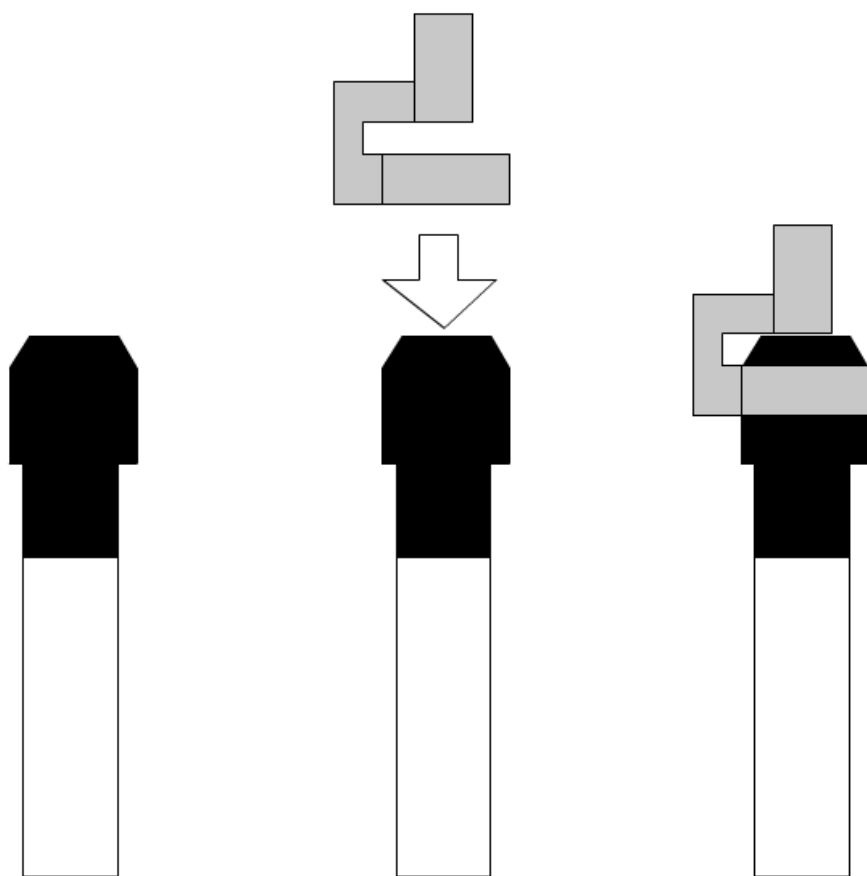


Fig.3.4.1.1 雨量計に傘状の部品を取り付ける模式図

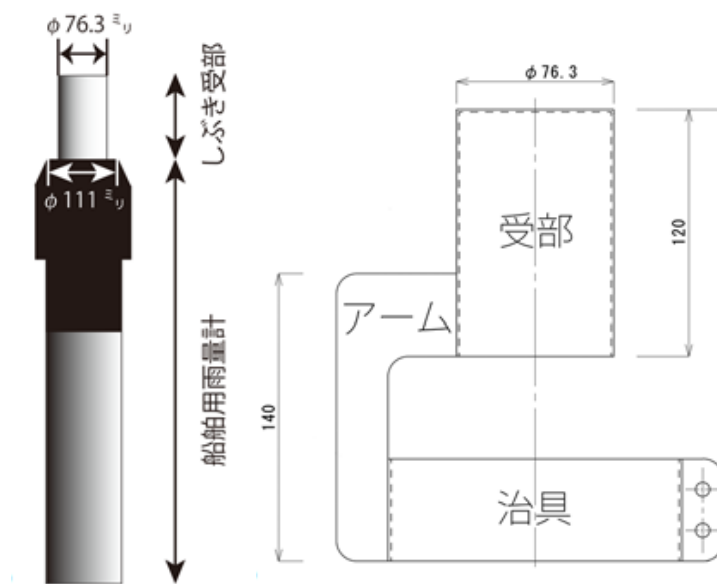


Fig.3.4.1.2 傘を取り付けた雨量計型飛沫計と傘の模式図および寸法[12]



Fig.3.4.1.3 雨量計型飛沫計(06 甲板)



Fig.3.4.1.4 雨量計型飛沫計(右舷)



Fig.3.4.1.5 雨量計型飛沫計(左舷)

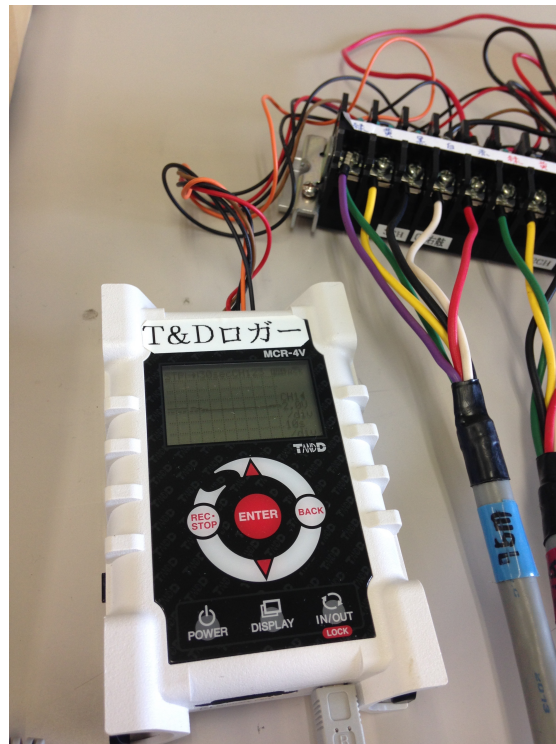


Fig.3.4.1.6 雨量計データロガー

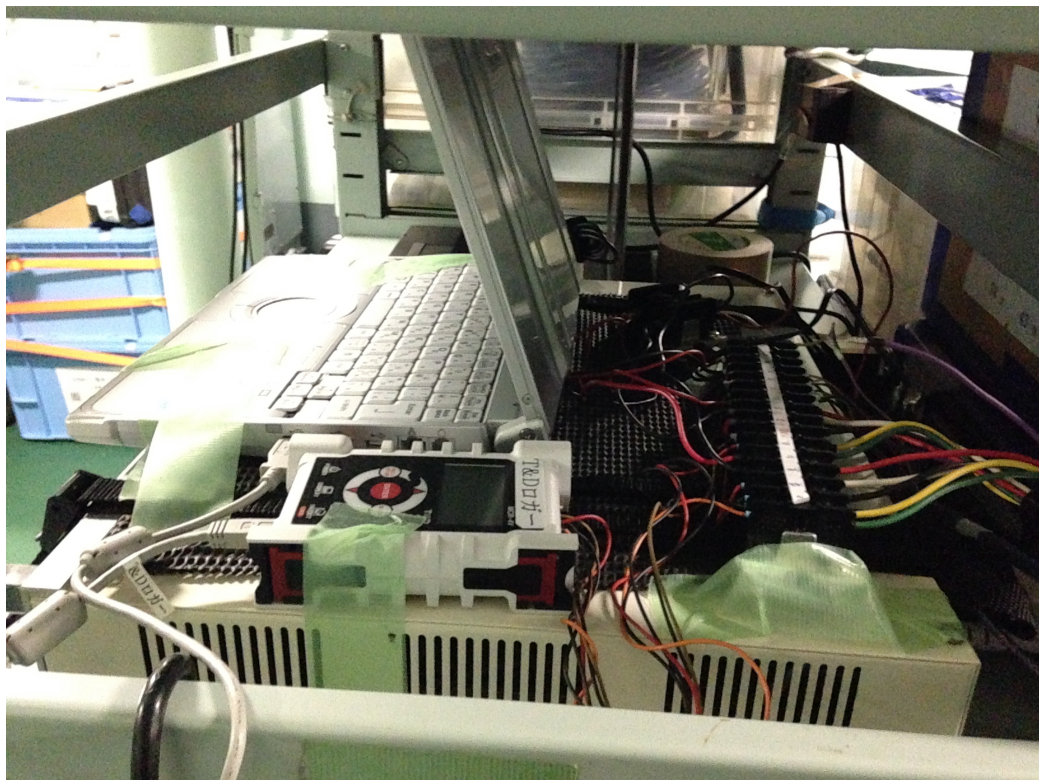


Fig.3.3.1.7 雨量計型飛沫計データ処理・記録装置配置の様子

3.4.2 Snow Particle Counter(SPC)について

南極地域観測隊においては、JARE55(2013年12月～2014年3月)からSnow Particle Counter(略称SPC、別称吹雪計)を用いた飛沫計測を実施しており、第57次での観測が3回目である。SPCは、測定領域を通過した粒子の個数を記録する、新潟電機製の観測装置である。[13]本来は雪を測定する装置であるが、飛沫を測定するために仕様を変更している。測定間隔は1秒である。センサーの模式図をFig.3.4.2.1に、測定領域を拡大した模式図をFig.3.4.2.2に、センサーと記録装置の模式図を3.4.2.3に示す。

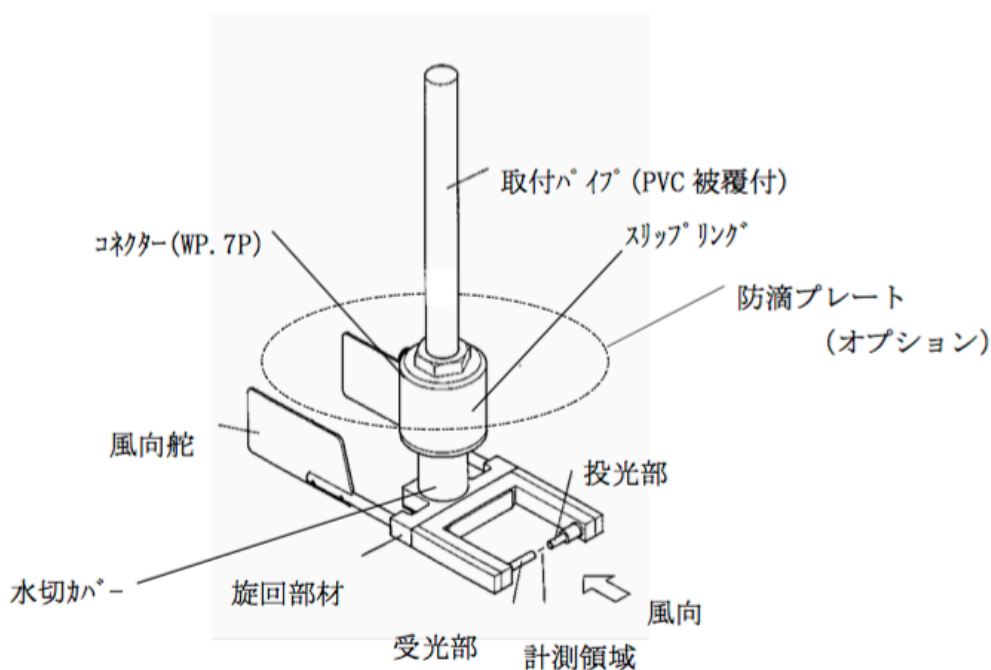


Fig.3.4.2.1 SPC 全体の模式図[19]

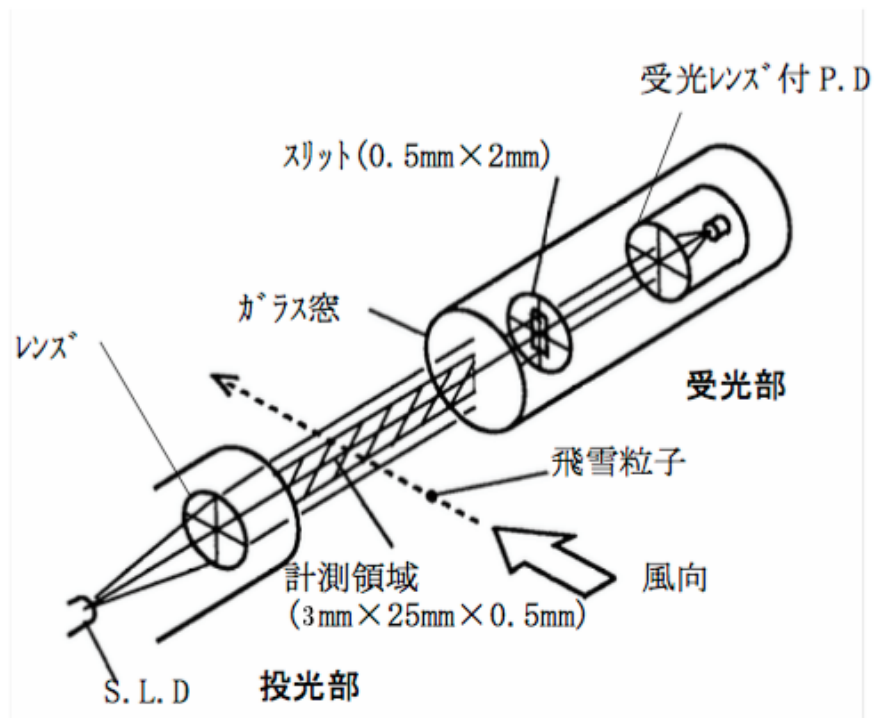


Fig.3.4.2.2 計測領域の模式図[19]

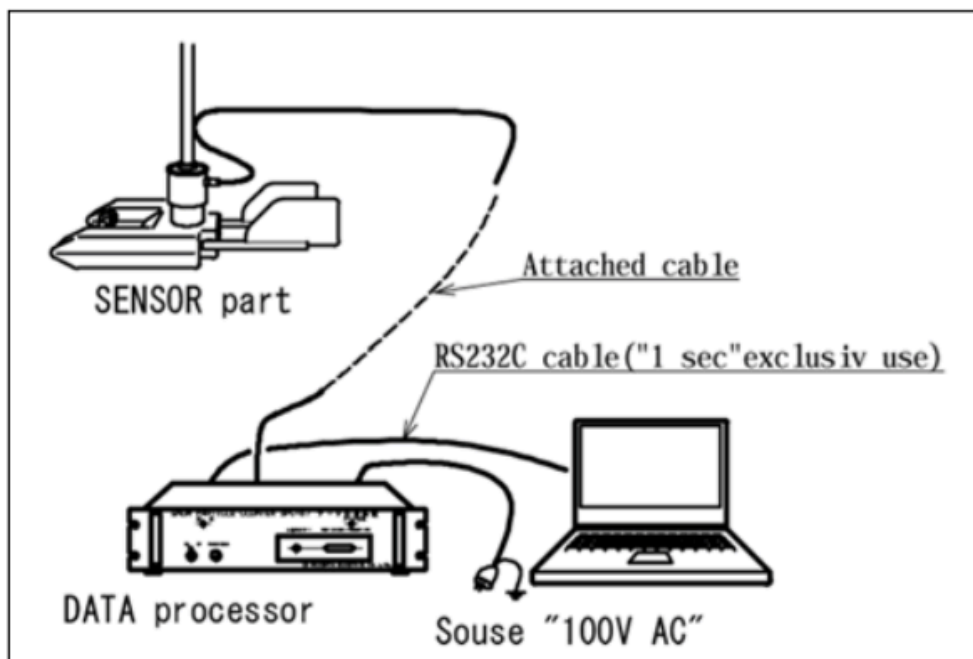


Fig.3.4.2.3 SPC センサーと記録装置の模式図[12]

Fig.3.4.2.2 に示すように、投光部から発された赤外線が受光部で受け取られ、その間を粒子が通過すると受光部が感知する光の量が減少する。この光の減衰量から、通過した粒子の個数と粒径を 32 段階の大きさに判断し、データロガーを介してコンピュータに記録している。
設置したセンサー、記録装置の様子を Fig.3.4.2.4-3.4.2.6 に示す。

観測においては、目安として 1 日 1 回にセンサー部を水で洗浄する必要がある。洗浄の様子を Fig.3.4.2.7 に示す。



Fig.3.4.2.4 SPC 型飛沫計



Fig.3.4.2.5 SPC データ処理装置



Fig.3.4.2.6 SPC データ処理装置と記録用 PC を観測室に配置した様子



Fig.3.4.2.7 SPC の洗浄の様子

3.5 SPC の記録したデータについて

SPC により得たデータは、 $50\sim 1000\mu\text{m}$ の粒径計測範囲を 32 分割し、特定の時間に直径いくらの飛沫がいくつ通過したか、という形式になっている。SPC が出力した 1 秒間の飛沫のデータを Fig.3.5.1 に示す。

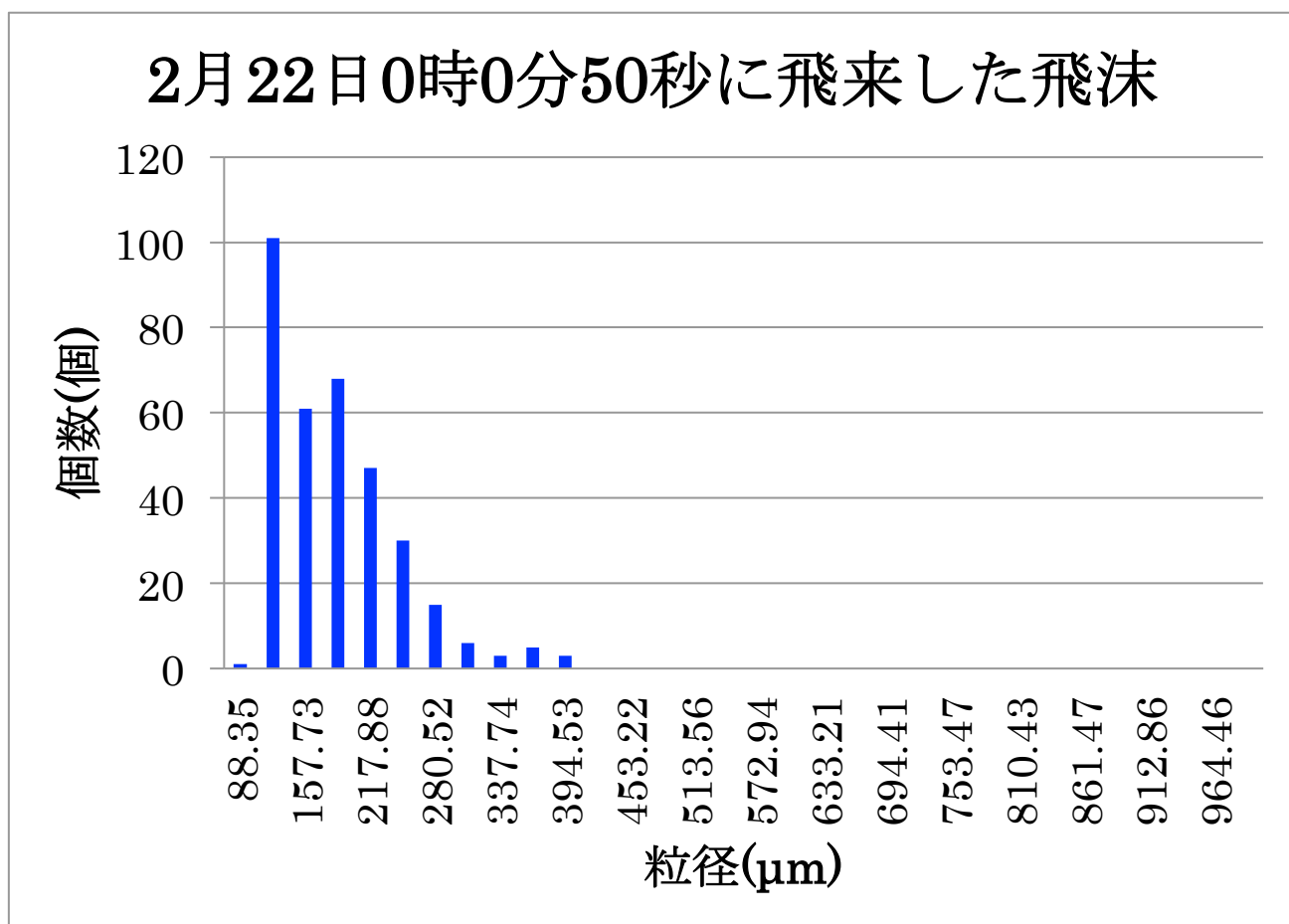


Fig.3.5.1 SPC が記録した元の状態のデータ

この記録を元に、粒子を球とみなし、粒径から球の体積を求める式を用いて 1 秒間に飛来した飛沫の体積の合計を求める。重力場において水滴は直径 5mm まで形を保つことができるが、直径 2mm を超えると空気抵抗の影響により形がたわみ始める。今回の観測に仕様した SPC の測定範囲は最大 1000 μm であることから、測定する飛沫は球体とみなすことができる[20]。求めた合計の値を、1 秒間に飛来した飛沫量(単位 mm^3)とする。その値を測定領域の面積 75 mm^2 で除すことにより、気象庁の定義による雨量と同等の値である飛沫量(単位 mm)を求めることができる。また、気象庁の定義による時間雨量に従い、1 時間に飛来した飛沫の総和も算出する。単位は mm/h とする。

3.6 雨量計のトラブルについて

今回の観測において、雨量計による観測はトラブルにより正確な数値を得ることが困難であった。

3.6.1 雨量計の転落について

雨量計型飛沫計は、当初 06 甲板に 1 台、01 甲板右舷に 1 台、左舷に 1 台の計 3 台設置していた。しかし、2015 年 12 月 18 日、01 甲板右舷に取り付けていた飛沫計が固定していた部品から外れ、海に転落、紛失した。

この出来事を受け、06 甲板に設置していた雨量計を取り外し、01 甲板右舷に取り付けて観測を再開した。

復路においては往路でのアクシデントを受け、ロープの一端を雨量計にくくりつけ、もう一端をしらせの柵にくくりつける転落防止措置を施した。

結果、2016 年 3 月 2 日にも右舷に取り付けていた雨量計が固定具から外れる事態が発生したが、転落防止措置を施していたため海への転落は免れた。

以降、暴風域においては測定を中断し、SPC のみを用いて観測を行った。転落直後の様子を Fig.3.6.1.1 に示す。

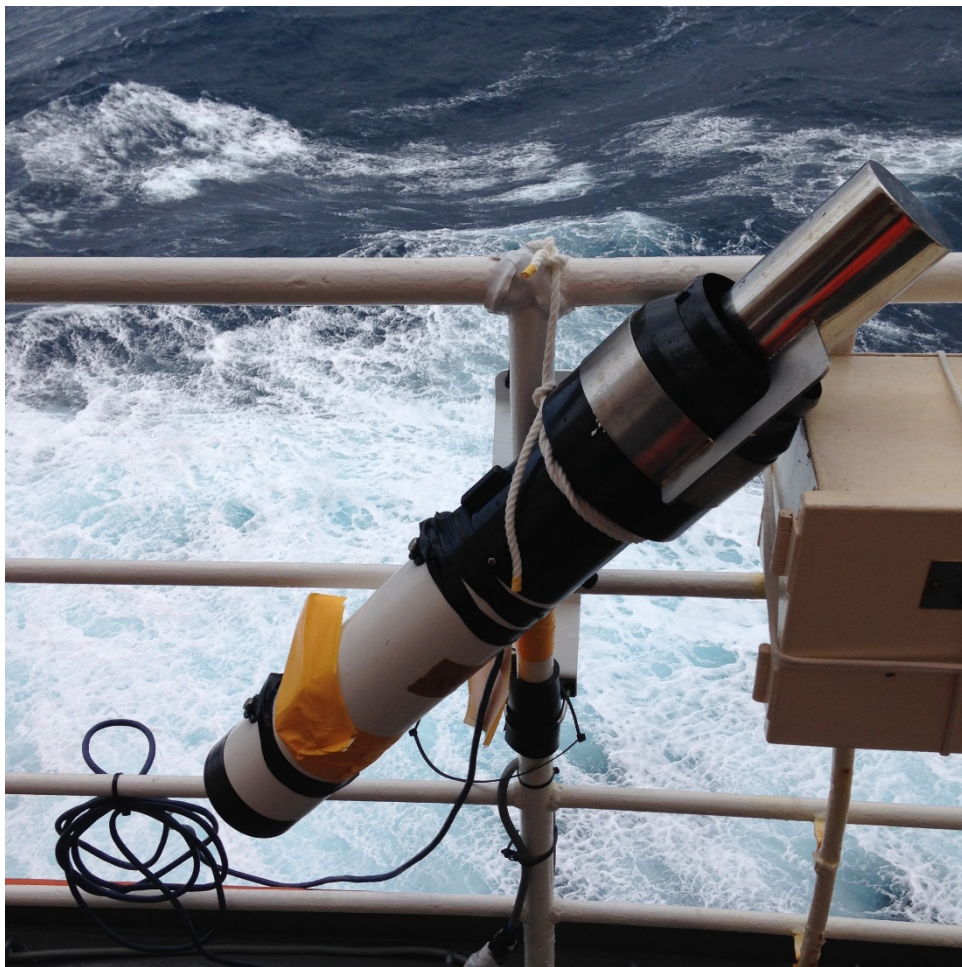


Fig.3.6.1.1 3月に発生した雨量計転落の様子

3.6.2 雨量計の測定データについて

観測後、データを確認すると、雨量計の測定データに問題点が存在した。雨量計の一次データの一部を Fig.3.6.2.1-3.6.2.2 に示す。

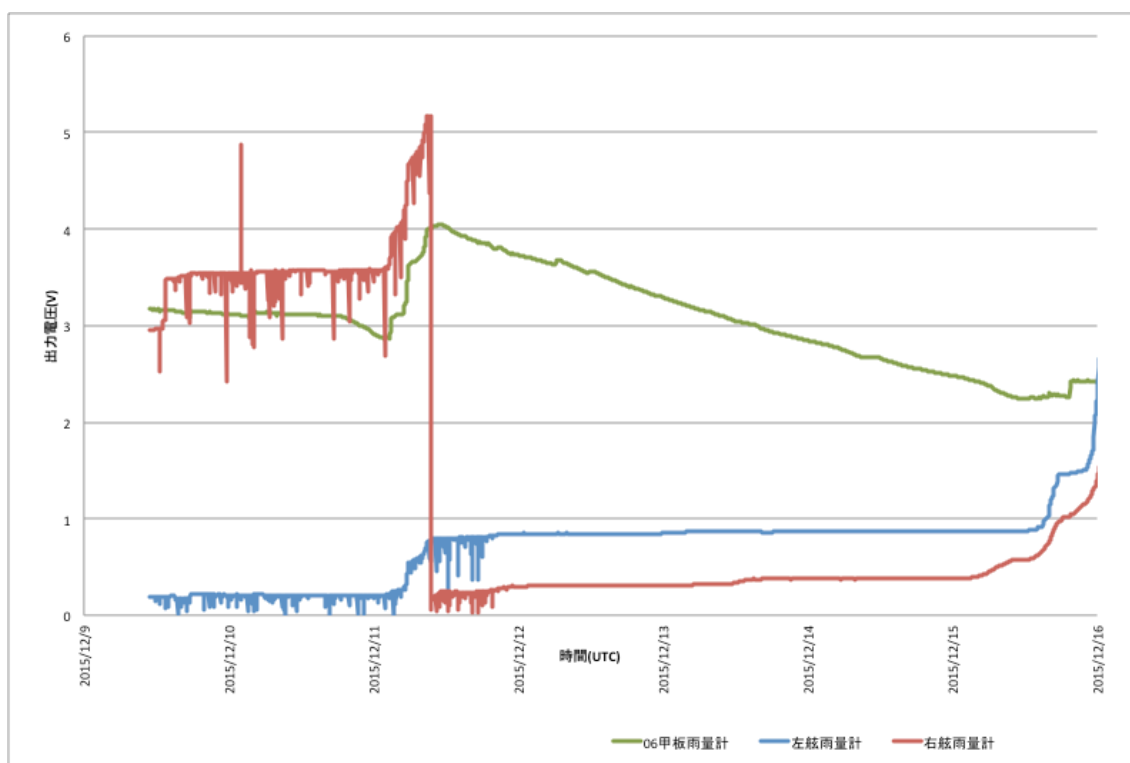


Fig. 3.6.2.1 往路雨量計データ (12 月 9 日～12 月 16 日)

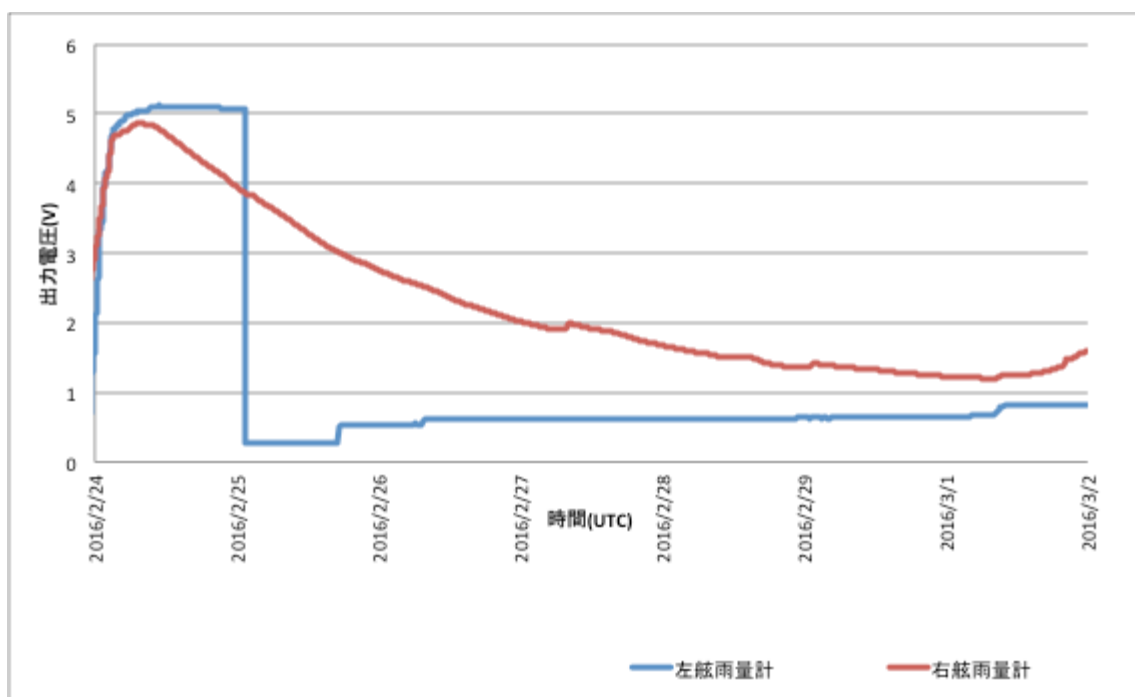


Fig.3.6.2.2 復路雨量計データ(2月24日～3月2日)

Fig.3.6.2.1 後半、Fig.3.6.2.2 で示した通り、06 甲板及び右舷にて使用していた雨量計は徐々に出力電圧が低下している。雨量計はセンサー内にたまっている液体の量が増加すると出力電圧が増加する仕組みになっており、出力電圧が減少することは雨量計が破損し、内部から液体が少しずつ漏れ出していることを示している。

Fig.3.6.2.1 に示したように、一部区間で原因不明のノイズが発生しており、補正も極めて困難な状態であった。

以上の理由から、雨量計の観測データからは大まかな飛沫発生のタイミングはわかるが、データをもとに正確な値を求めるのは困難な状態であった。

本研究においては雨量計による観測データは使用せず、SPC の観測データのみを用いることにした。

第 4 章 解析

3.6 にて記した通り、本研究においては、雨量計によって得たデータは使用せず、SPC のデータのみを用いた。

4.1 相対風速との関係

Fig.4.1.1 に示すように、JARE55、JARE56 における観測では、1 時間平均の風速と 1 時間に飛来した飛沫量の対数値に相関があるという結果が見られた。このグラフにおいては、飛沫量の単位を mm^3/h としている。 [16-17,21]

Fig.4.1.2 は、Fig.4.1.1 で得られた結果との比較のため、SPC のデータをもとに算出した 1 時間ごとの飛沫量、および「しらせ」艦上で 1 時間おきに記録された相対風速の値から、気象状況が雨、雪といった、飛沫以外のものがセンサーに飛来し測定される可能性が高い期間を削除した上で作成した。Fig.4.1.1 と単位を合わせるため、単位は mm^3/h としている。1 時間ごとの飛沫量を算出するにあたって、SPC のメンテナンスなどにより測定を停止した時間や、SPC の洗浄をしたため洗浄に使用した水が測定されたため削除した時間があるため、1 時間すべての飛沫を記録できていない時間帯が存在するが、そのような時間帯は、有効な期間の飛沫量の総和を 1 時間あたりに補正(飛沫の体積の総和を有効な測定時間の秒数で除した後、3600 をかける)している。

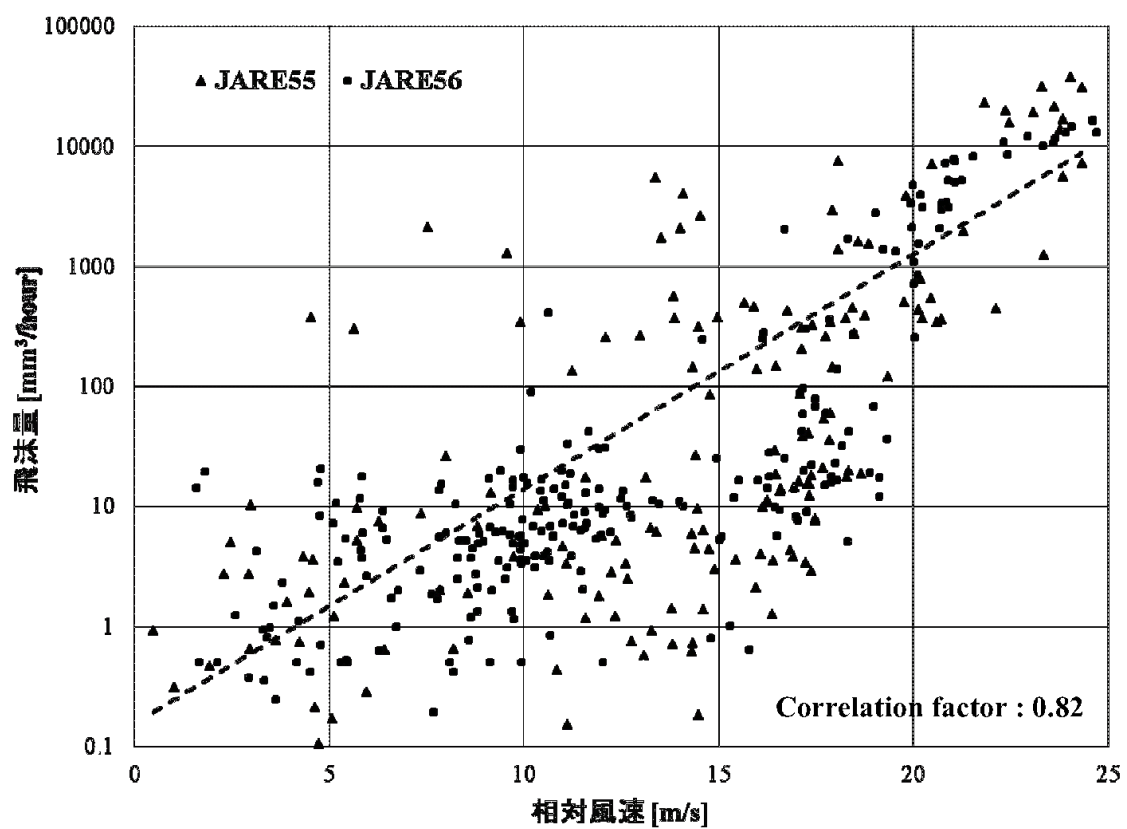


Fig.4.1.1 相対風速と飛沫量の関係[16]

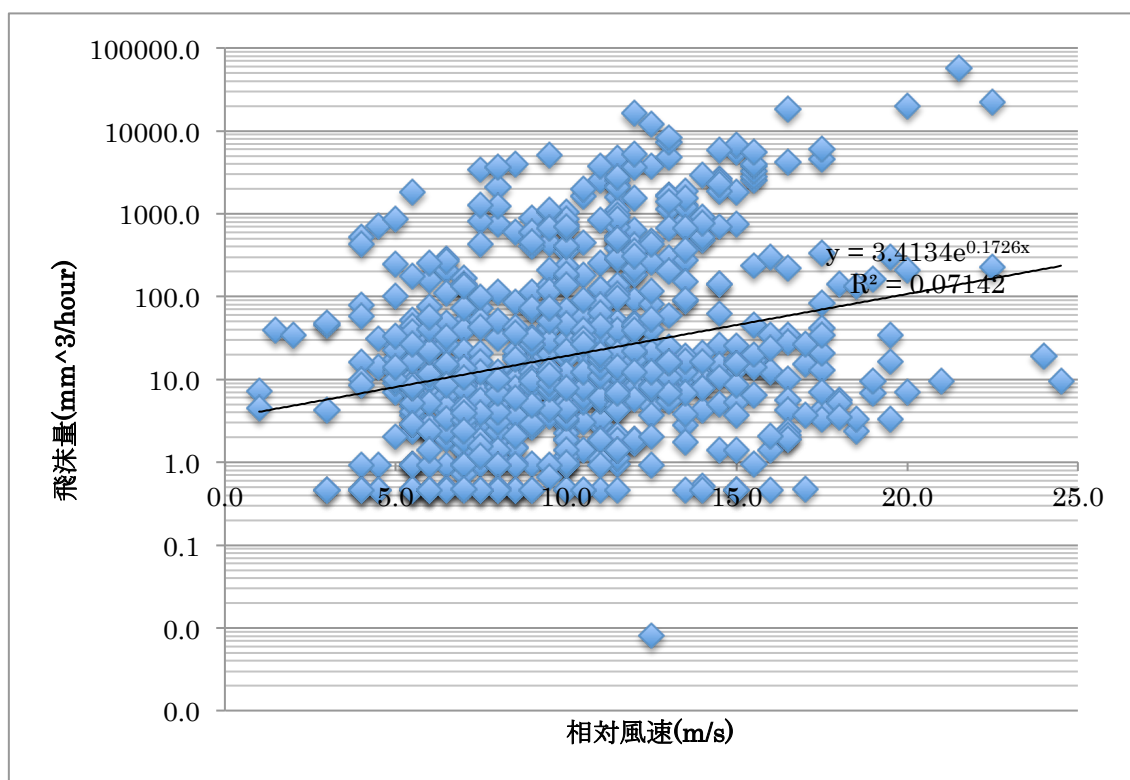


Fig.4.1.2 JARE57 における相対風速と飛沫量の対数値との関係

この結果から、今回の観測においては相対風速と飛沫量の間には大きな相関は見られないことが分かった。

4.2 相対風速が大きいときの飛沫量との関係

また、Fig.4.2.1 に示すように、JARE55、56 の研究においては相対風速が 19m/s 以上の区間では 1 時間ごとの飛沫量と相対風速の間に相関が見られるという結果が得られている。JARE57 における相対風速と飛沫量の関係を Fig.4.2.2 に示す。このグラフにおいては飛沫量の単位を mm^3/h と定義している。

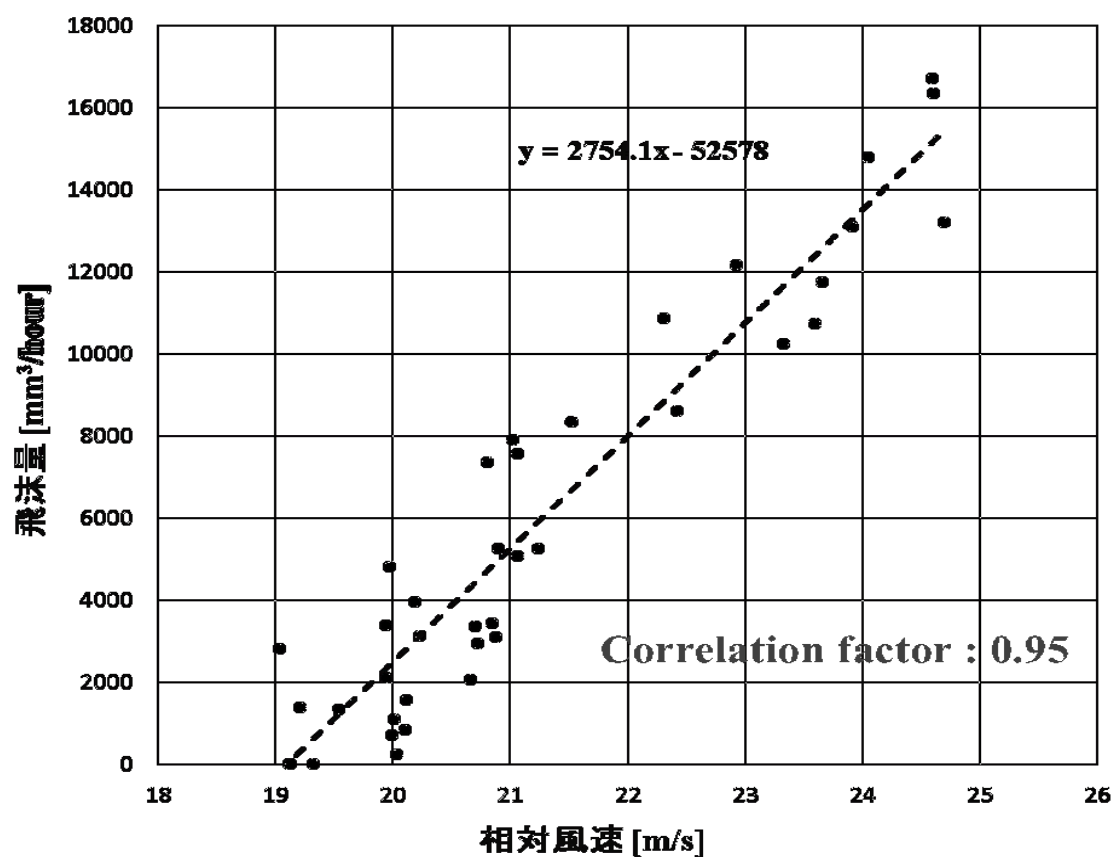


Fig.4.2.1 JARE55、56 における 19m/s 以上の相対風速の領域における飛沫量との関係[16]

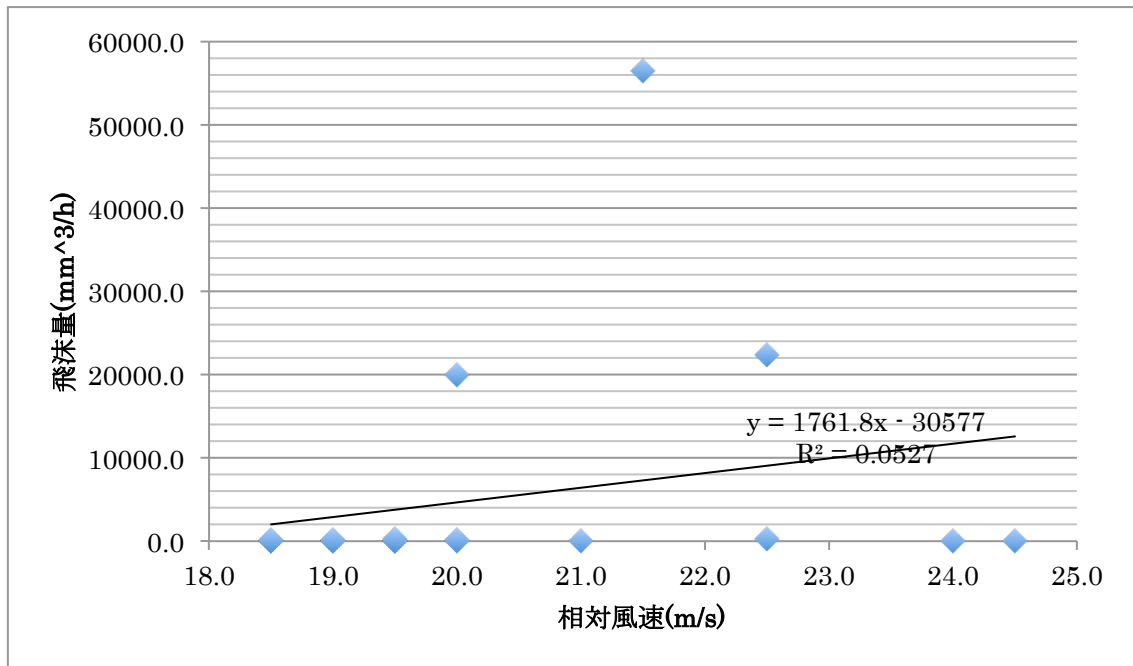


Fig.4.2.2 JARE57 における 19m/s 以上の相対風速の領域における相対風速と飛沫量の関係

JARE57 では、相対風速が 19m/s 以上であってもほとんど飛沫が発生していない状態が存在することが確認できた。

4.3 各数値と飛沫量の時間推移

前項を受けて、飛沫量を決定する要因は、複数の要因であると考えた。乗艦時の飛沫が発生し飛来する様子の観察から、要因は、

- ・ 相対波向
- ・ 相対風向
- ・ 有義波高（以下、波高と表現した場合は全て有義波高をさす）[22-26]

といった要素であると予想した。そこで、時間ごとの飛沫量と各数値の推移をグラフにまとめた。

有義波高を知るための波浪データについては、次の3種類のデータを用いた。

- ・気象庁所有のデータ[27]

モデル名：全休数値予報モデル

単位時間：6時間(1日4回)

取得方法：MATLABにより読み取り

- ・ハワイ大学所有のデータ[28]

モデル名：Wave watch 3

単位時間：1時間

取得方法：PacIOOS ホームページより読み取り

一部期間で大規模なデータの欠落が発生しており、往路の波浪データは存在しない。

- ・自衛隊による記録

形式：目視記録(艦橋から)

単位時間:1時間

取得方法:気象記録から読み取り

これらの記録から得た有義波高と飛沫量の時間変化を Fig.4.3.1-4.3.2 に示す。

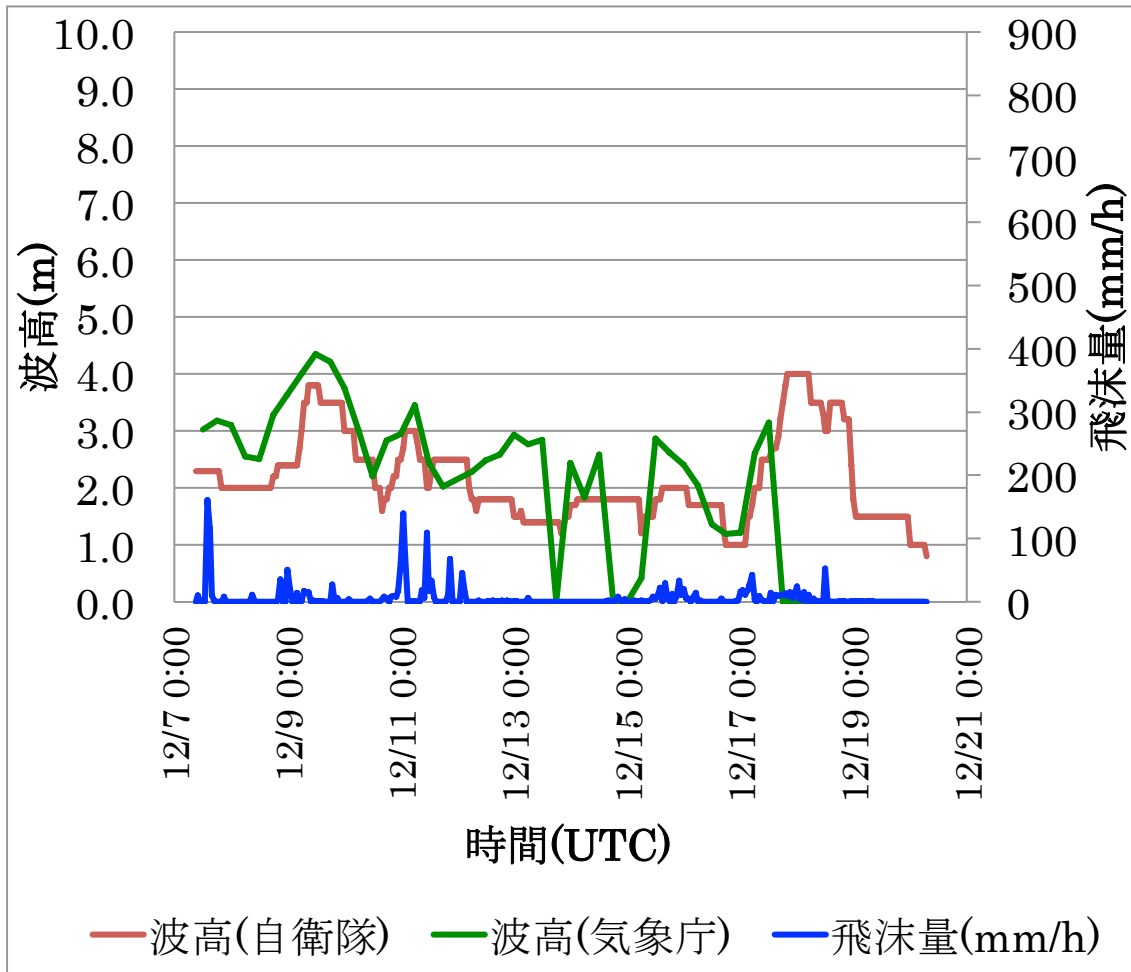


Fig.4.3.1 波高と飛沫量の時間推移 往路

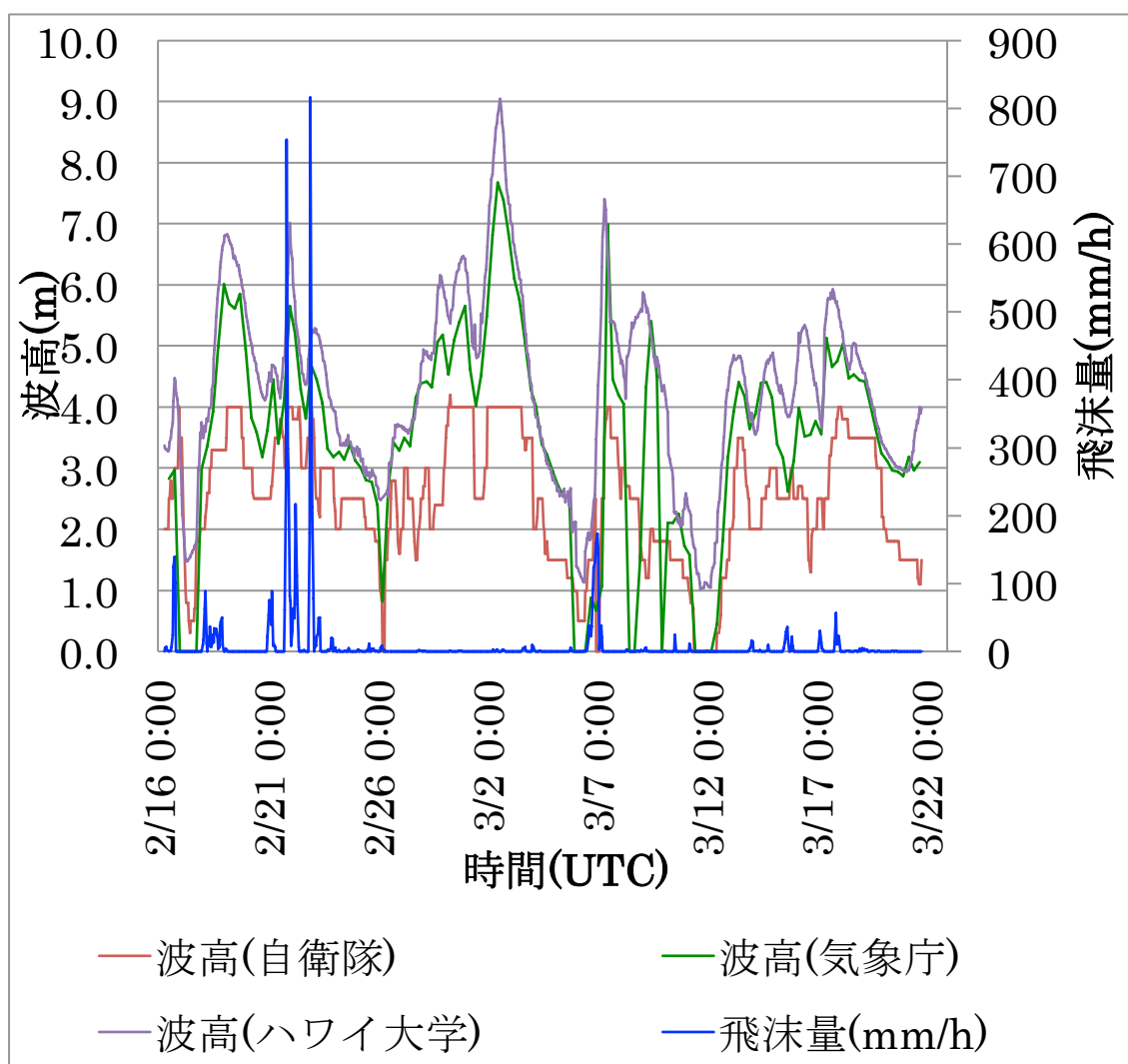


Fig.4.3.2 波高と飛沫量の時間推移 復路

Fig.4.3.1-4.3.2 に示された結果から、波高の推移は記録ごとに異なるものの、時間経過に伴う波高の上昇、下降の傾向は一致していることが分かった。また、飛沫量が上昇する際に波高も上昇していることが分かったが、一方で波高が大幅に上昇していても飛沫量の上昇が小さい時が存在することが確認できた。

同様に、相対風向、相対波向と飛沫量の時間変化を Fig.4.3.3-4.3.4 に示す。風速、風向、波向はいずれも砕氷艦「しらせ」において1時間ごとになされている記録を使用した。

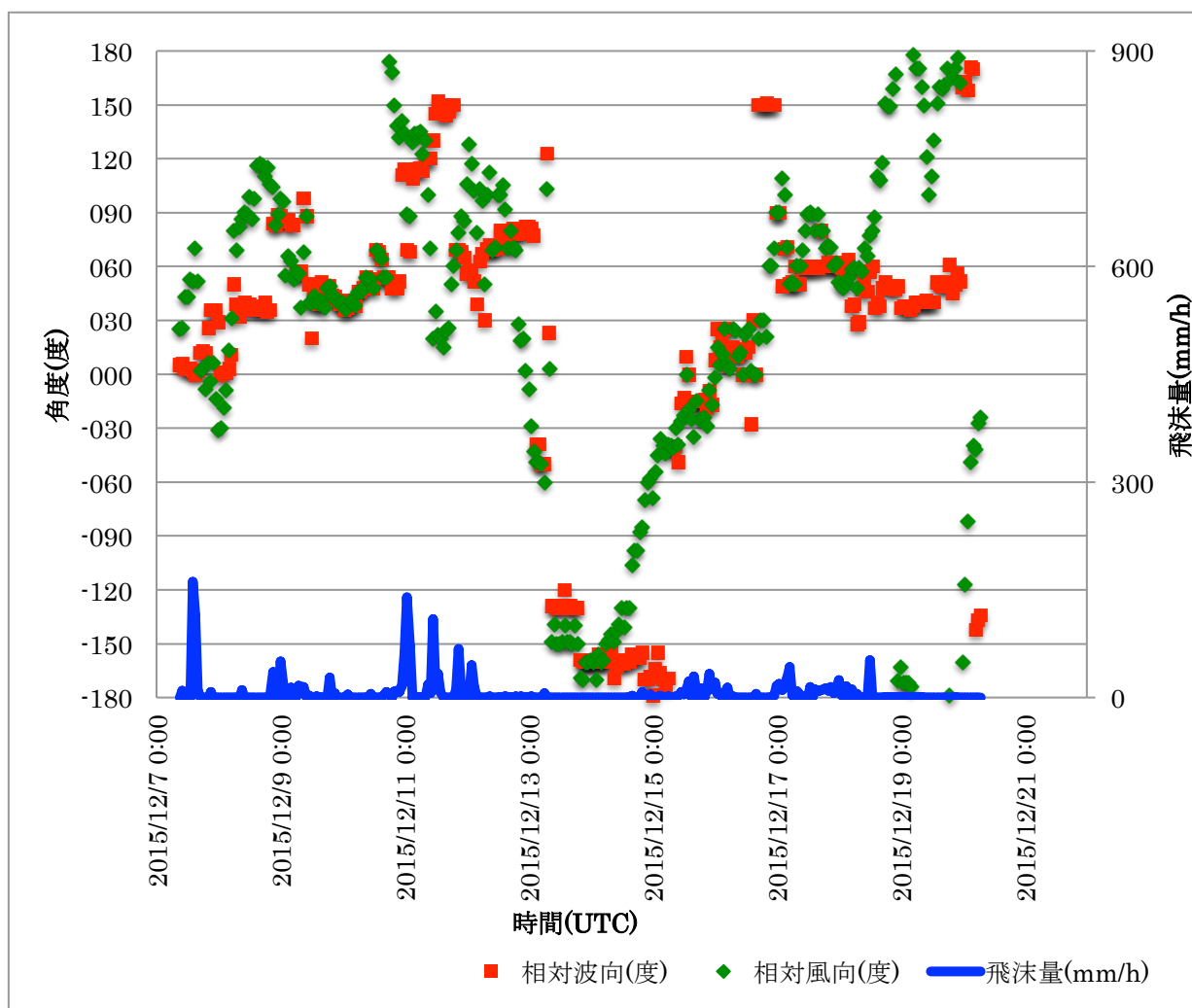


Fig.4.3.3 相对波向と相对風向、相对波向の時間推移 往路

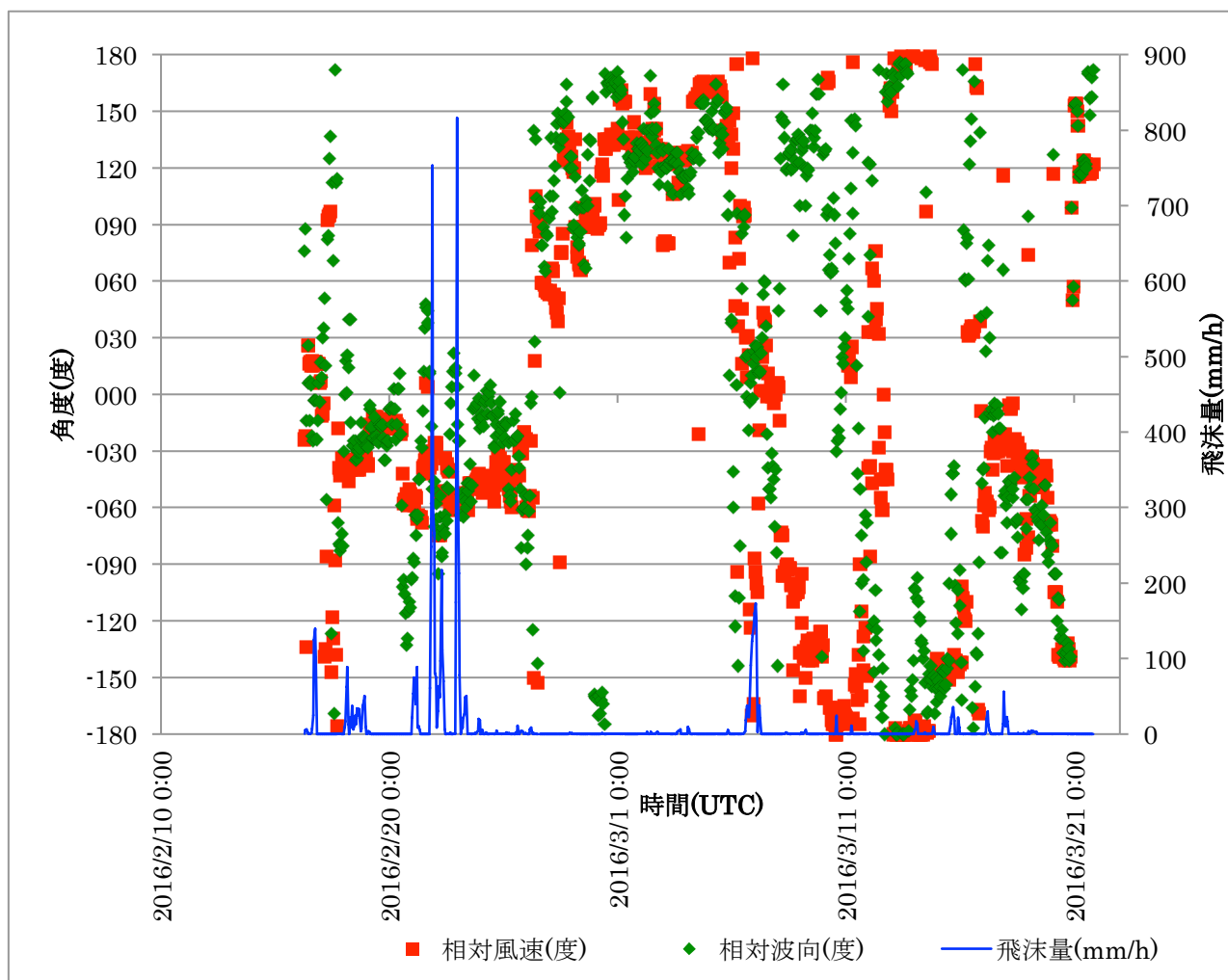


Fig.4.3.4 相对波向と相对風向、相对波向の時間推移 復路

Fig.4.3.3-4.3.4 のグラフから、飛沫が大量に発生する時には風速、波向ともに 0 度に近くなっている傾向が確認できた。

次に、風速と飛沫量の時間変化を Fig.4.3.5-4.3.6 に示す。

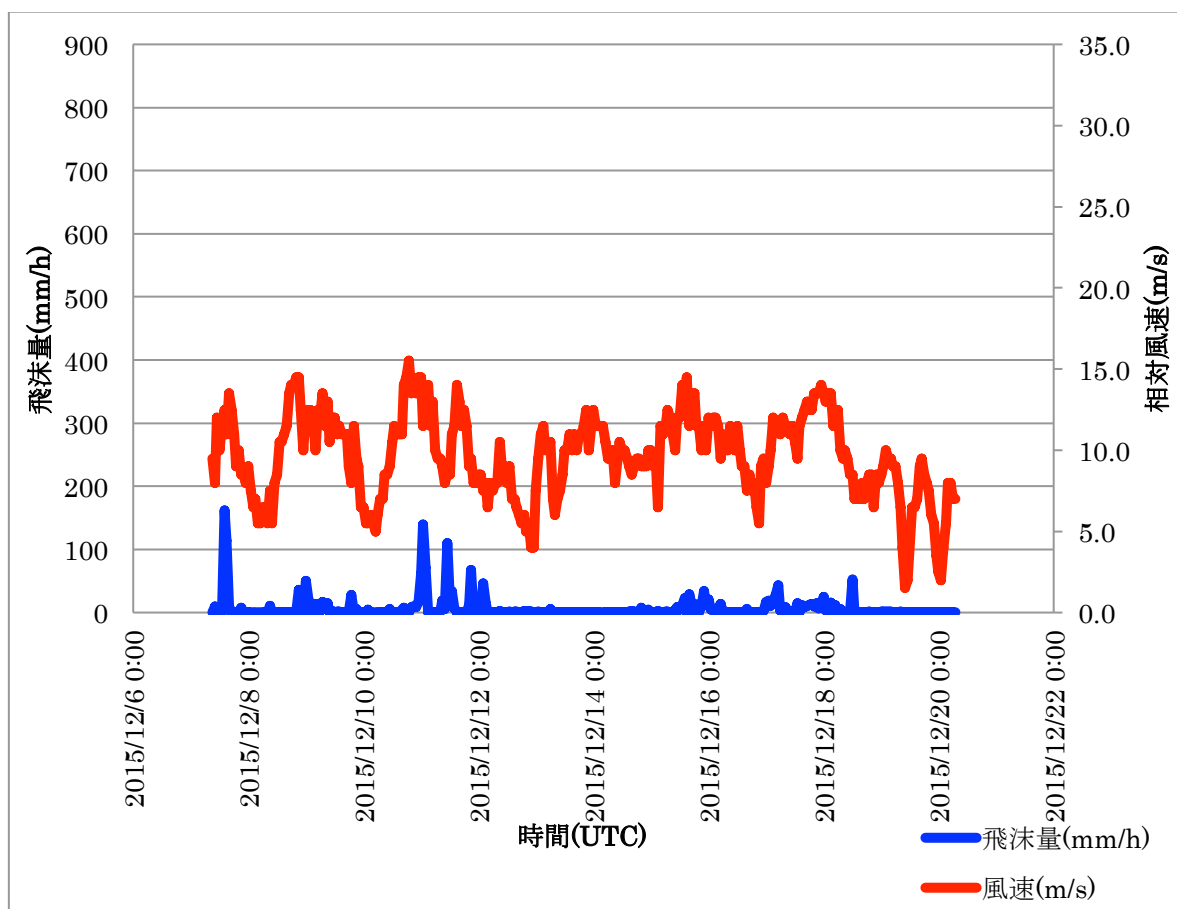


Fig.4.3.5 飛沫量と風速の時間推移 往路

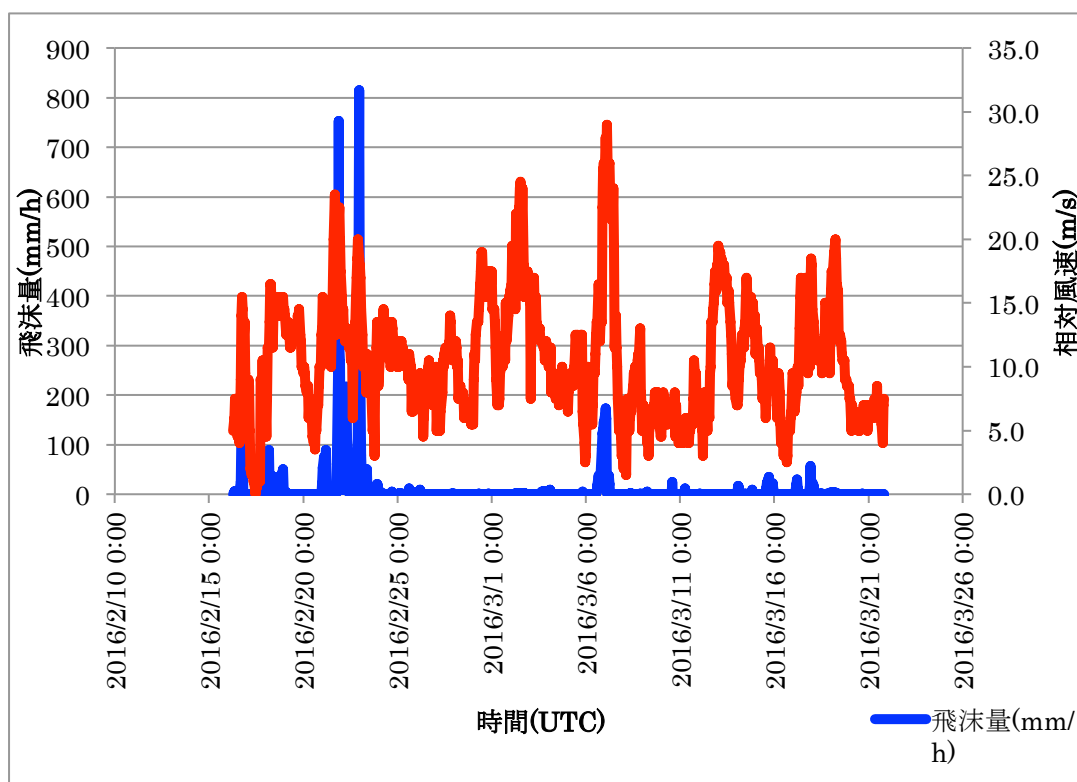


Fig.4.3.6 飛沫量と風速の時間推移 復路

Fig.4.3.5-4.3.6 のグラフに示された通り、飛沫が大量に飛来している時に相対風速は高くなっているが、飛沫が飛来していない時でも風速が高くなっている時間があることが確認できた。

4.4 各数値と飛沫量との関係

次に、波浪データごとの有義波高と飛沫量との関係を Fig.4.4.7-4.4.9 に示す。

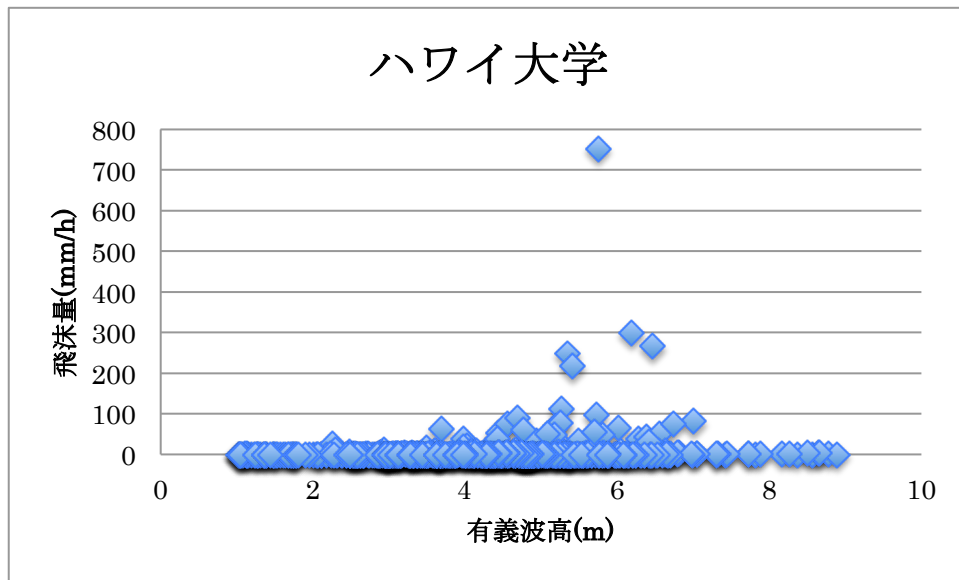


Fig.4.4.7 ハワイ大学の波浪データに基づく、有義波高と飛沫量の関係

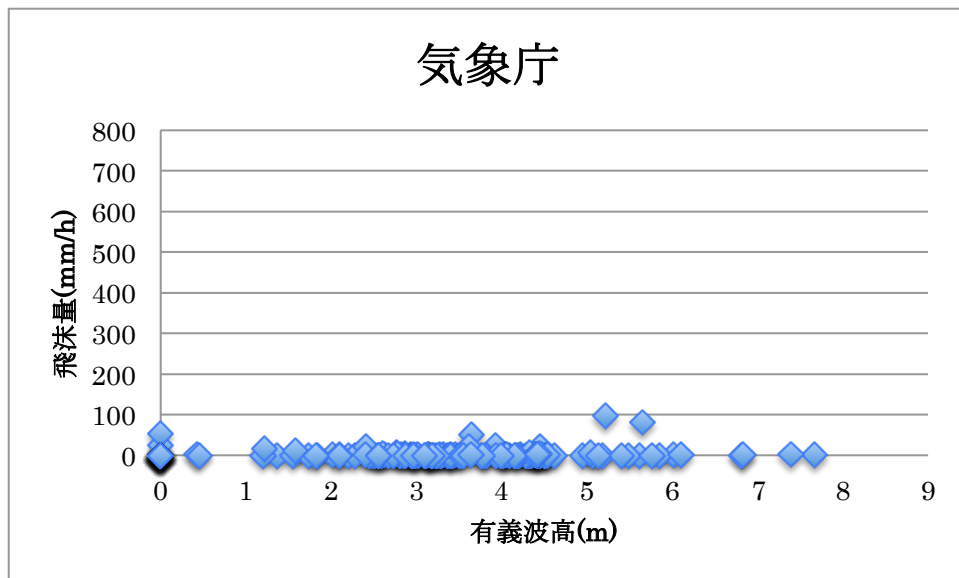


Fig.4.4.8 気象庁の波浪データに基づく、有義波高と飛沫量の関係

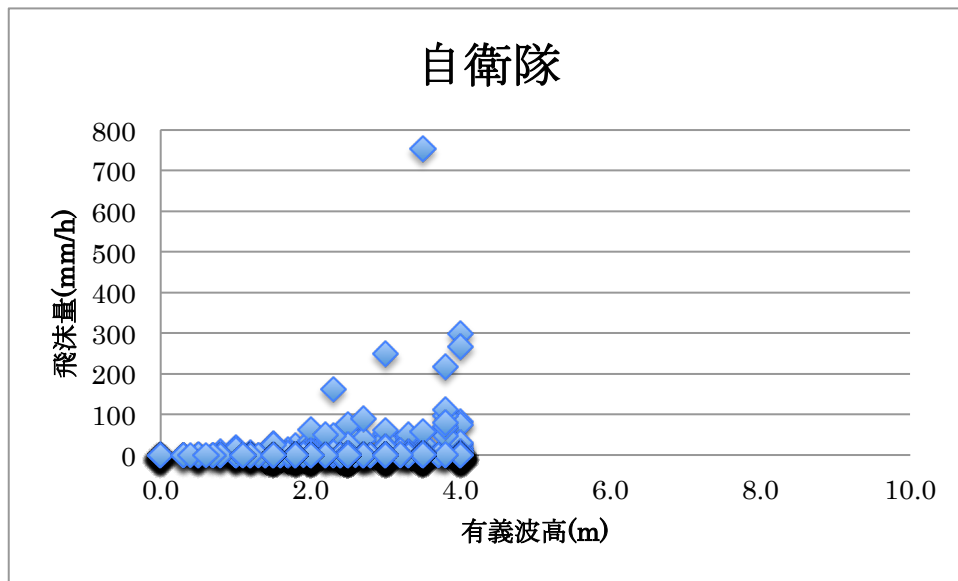


Fig.4.4.9 自衛隊の波浪記録に基づく、有義波高と飛沫量の関係

気象庁の波浪データで飛沫量が多い時間帯が少ないのは、波浪データの頻度が1日4回、6時間おきであり、飛沫が大量に飛来していた期間の波浪データが存在しないためである。これらのグラフから、ハワイ大学の波高データでは5m、自衛隊の波高データでは2m以上の波高を記録している時に飛来する飛沫量が大幅に上昇していることを確認できた。一方で、同じ高さの波が来ても、飛沫が大量に発生する時と、全く発生しない時があることも確認できた。

次に、気象記録において雨、雪と記録されている、飛沫以外のものがセンサーに飛来し測定される可能性が高い期間を削除した上で、相対波向と飛沫量の関係を Fig.4.4.10 に示す。

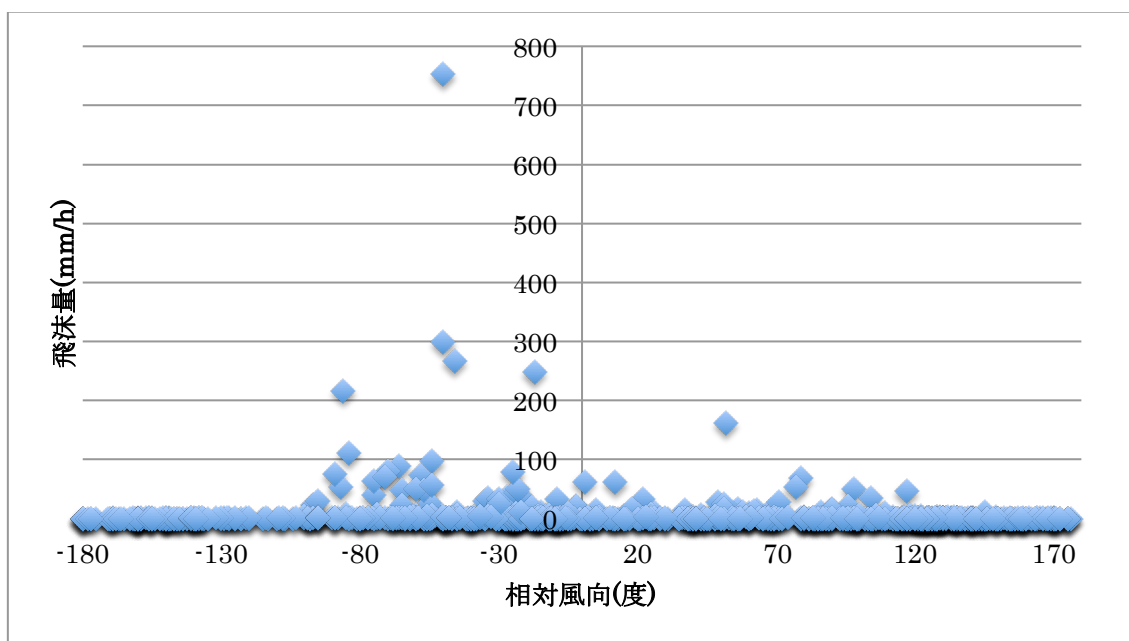


Fig.4.4.10 相対風速と飛沫量の関係

この結果から、飛沫量が著しく高い時に波は前方から来ていることが確認できた。

次に、相対波向と飛沫量の関係を Fig.4.4.11 に示す。

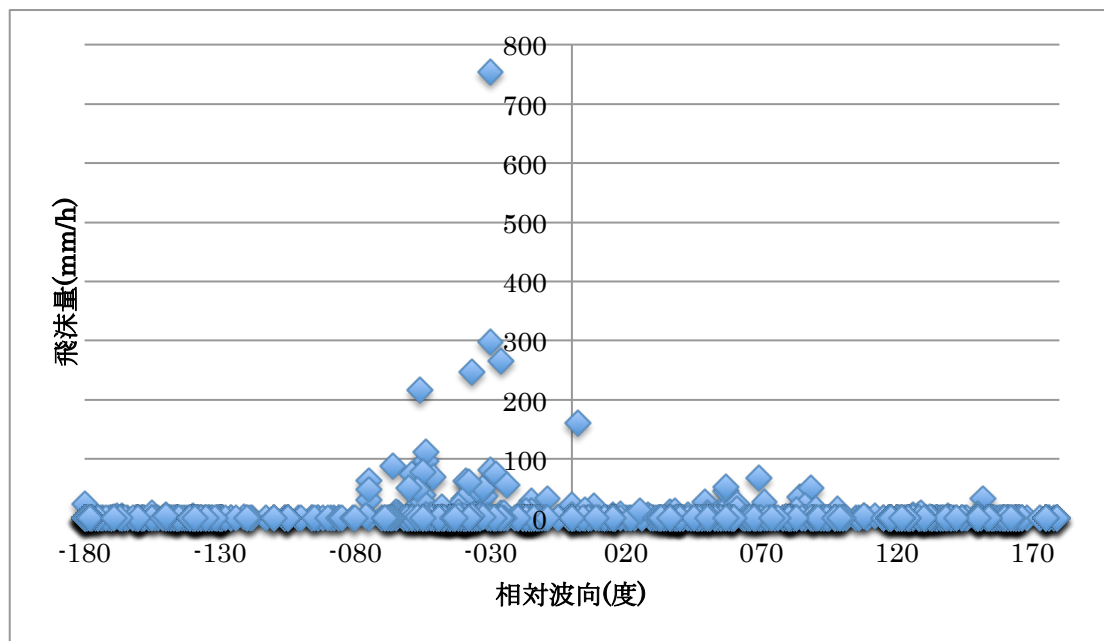


Fig.4.4.11 相対風向と飛沫量の関係

Fig.4.4.10-4.4.11 の結果から、波向、風向ともに前方から来ているときに飛沫量が大幅に増加していることが確認できた。

以上の比較から、飛沫が多く発生する時は「有義波高が一定以上」「波浪が前方から来ている」「風が前方から来ている」「風速が一定以上」といった条件を満たしていることが分かったが、一方でこれらの条件を満たしていても飛沫が大量に発生する時と全く発生していない時がある。この事実から、飛沫が発生するにはさらに別の条件が必要であると予想した。また、ここまでは飛沫量を1時間の合計や平均で見ているが、飛来する飛沫の時間推移を見ると1秒ごとに大幅な上昇下降が見られることから、飛沫の予測にはより短いスパンでの観察が必要であると考えた。

4.5 動揺との関係

大量の飛沫の発生条件は何かと考えたところ、実際に「しらせ」乗艦していた時の外の様子から、波との出会い方にあると予想した。波が高い時に外の様子を見ていると、船体はピッチングを繰り返しており、船首が下がった時に飛沫が舞い上がっていることが確認できた。飛沫の発生の様子を Fig.4.5.1 に示す。





Fig.4.5.1 JARE57 の航行中、「しらせ」艦首において発生した飛沫の様子

動揺が激しいときは Fig.5.5.1 に示すように飛沫が発生しており、また、その発生の様子は SPC の記録からも確認できた。飛沫発生 の 1 秒ごとの推移を以下に示す。

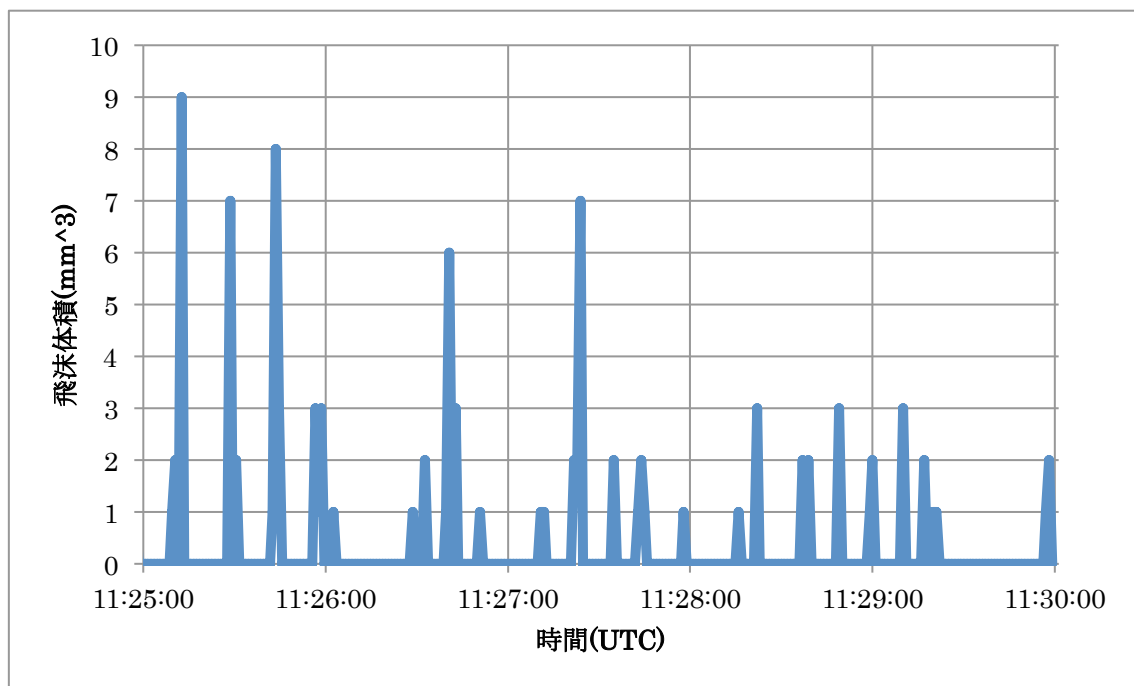


Fig.4.5.2 飛沫の体積の時間推移(2 月 18 日 11 時 25 分から 11 時 30 分)

このように、記録によると飛沫は数秒おきに上昇し、その後しばらく飛来しない、という形になっており、実際に乗艦して艦首を観察した際の飛沫発生の様子と一致している。しかし、船首が下がった際に舞い上がる飛沫の量にはばらつきがあった。飛沫量の差に影響を与えているのが何かと考えたところ、波との出会い方であると予想した。

4.5.1 理論

海水飛沫の中でもピッチングによる飛沫は、船首が沈み込んだ際に押しのけた水が舞い上がったものであると考えられる。その舞い上がる飛沫の量は、船体動揺の状況によって決定されると予想した。

出会周期は、移動している船体と波とが出会う現象の相対的な周期である。波は一定の周期を持っているが、船体が移動しているため、ドップラー効果により船から見て遭遇する相対的な波の周期は絶対的な波の周期とは異なる。[29] 出会周期の定義に関する図を Fig.4.5.1.1 に示す。船と波がなす角を χ 、波と同じ方向に船が進んでいる時を0度とする。

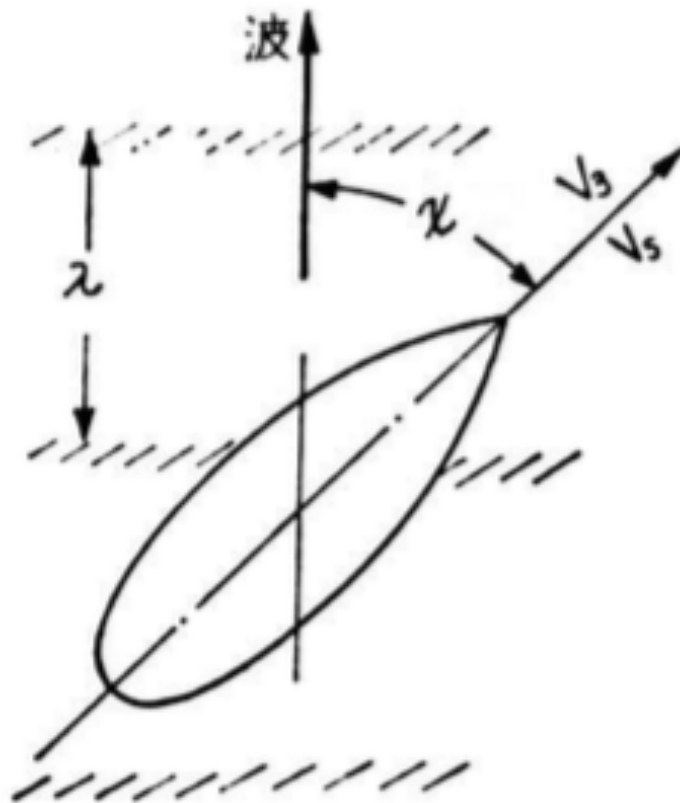


Fig.4.5.1.1 出会周期の定義に関する模式図[29]

船体動揺の大きさは、海洋波の状態と船舶により固有の性質により決定されることが分かっている。[29-31] 船体動揺の発生条件に関するグラフを Fig.4.5.1.2-4.5.1.3 に示す。強制モーメント係数が大きい時と、動揺が激しくなる。

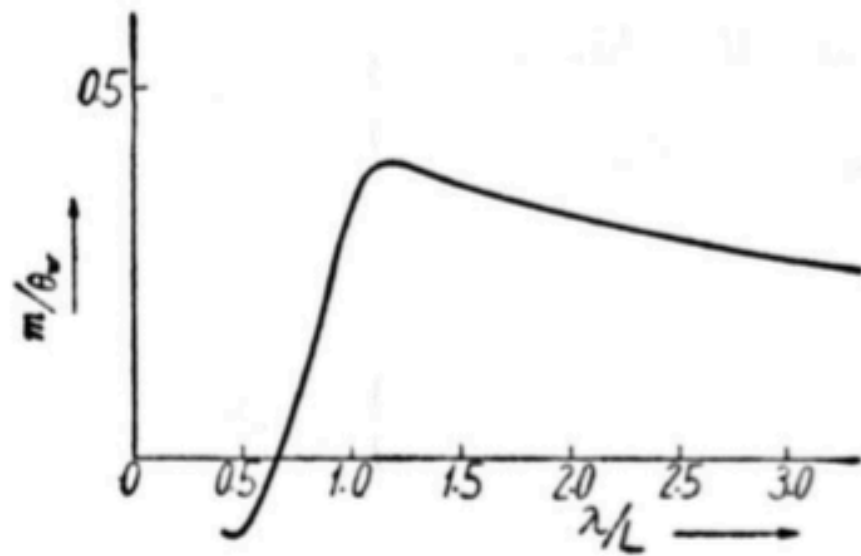


Fig.4.5.1.2 強制モーメント係数と船長波長比(λ/L)の関係[29]

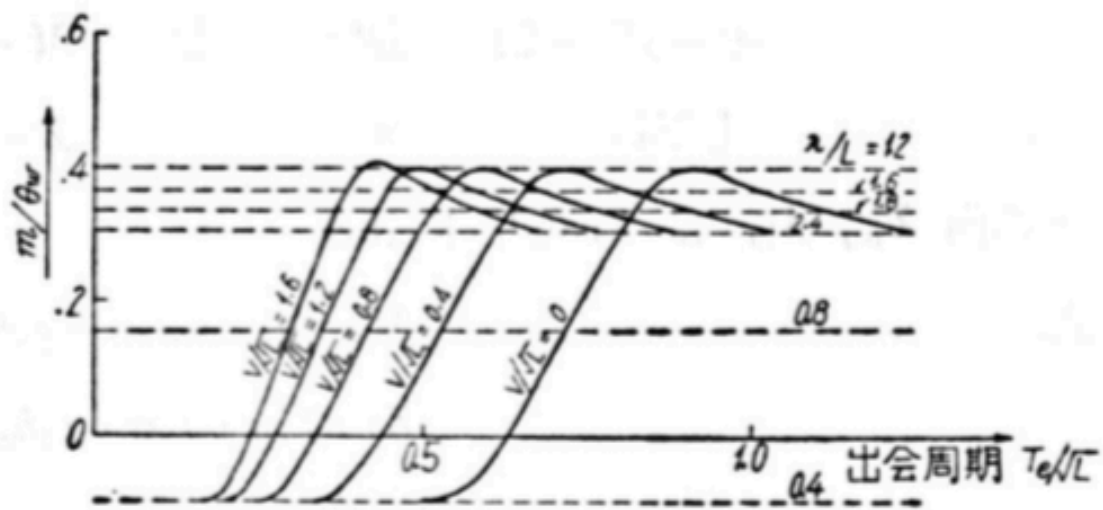


Fig.4.5.1.3 強制モーメント係数と出会周期の関係[29]

Fig.4.5.1.2-4.5.1.3 からわかるように、船舶においては船長波長比が一定の値の時に、強制モーメント係数は大幅な数値の上昇を見せている、つまり、動揺が激しくなっており、それ以外の値では低くなっている。

船体縦運動と波傾斜が逆位相になるとき、船首と船首部水面の相対速度が大きくなる時に 06 甲板にまで到達するほどの飛沫が舞い上がると考えられる。

この予想から、飛沫の発生と、その時の波の出会い周期との関係を検証し、限られた出会い周期の時だけ数値の上昇が起きているかを確認した。

4.5.2 出会い周期の計算および飛沫量との関係の検証

検証を行うために使用したデータは次の通りである。

- ・ハワイ大学が保管している、wave watch 3 の波浪データ
- ・JARE57 の飛沫データ
- ・JARE57 の船体の情報(艦首方位、相対風速、船速)

これらのデータを用いて解析を行う。

次のような手順を用いた。

1:使用可能なデータの抽出

まず、全期間の1時間ごとの飛沫量の合計データから、使用可能なデータの抽出を行った。

Fig.4.3.1-4.3.6 のグラフをもとに、各種数値が明らかに異常な値を示している時間帯を除外した上で、以下の条件を満たしたデータを抽出した。

- ・ 相対波向が-90 から 90 度
- ・ 相対風向が-90 から 90 度
- ・ 相対風速が 15m/s 以上
- ・ 雨、雪でない
- ・ 波高が 4m 以上

気象庁の波浪データは数が少なく、自衛隊の波浪データは目視であり参考値としてしか扱えないため、ハワイ大学の波浪データを用いた。ハワイ大学の波浪データでは往路のデータが欠落しているが、往路には記録上大量に飛沫が発生している期間は復路と比べて少なく、風速、風向、波向、天候の条件で絞り込んだ時点で往路のデータは全て除外されてしまう状態であったため問題ないと判断した。

抽出の結果、使用することになった時間帯のデータを Table4.5.2.1 に示す。

Table.4.5.2.1 解析に使用する時間帯

日付(UTC)	飛沫量(mm/h)	相対波向(度)	船速(m/s)	有義波高(m)
2016/2/18 20:00	37.60022895	-032	5.7	6.2799997
2016/2/18 21:00	43.69618676	-034	5.2	6.3799996
2016/2/18 22:00	50.38793367	-033	5.0	6.56
2016/2/21 20:00	247.7231142	-037	4.5	5.35

2016/2/21 21:00	753.2415191	-030	4.6	5.75
2016/2/21 22:00	298.5630933	-030	4.5	6.19
2016/2/21 23:00	266.1188373	-026	4.7	6.47
2016/2/22 0:00	80.62525078	-030	6.0	7.0099998
2016/2/22 1:00	74.91896624	-028	6.1	6.74
2016/3/17 11:00	0.028054006	-031	4.9	5.43
2016/3/17 12:00	0.02554894	-025	4.6	5.5299997
2016/3/17 15:00	0.460634785	-026	5.1	5.79
2016/3/17 16:00	0.05031798	-030	5.4	5.77
2016/3/17 17:00	0.027826309	-028	6.0	5.87
2016/3/17 22:00	56.36164249	-024	5.8	5.7
2016/3/17 23:00	11.62382593	-021	5.7	5.73
2016/3/18 0:00	10.63737119	-029	6.4	5.65

2:有義波周期を求める

抽出した条件を満たす時間帯における波との出会周期を算出するために、波浪データの中から、波周期(swell peak wave period、以下 T_w と表す)を取得した。結果を Table.4.5.2.2 に示す。なお、一部時間帯は波浪データが欠落していたため、除外した。

Table.4.5.2.2 解析に使用する時間帯の波周期

日付(UTC)	飛沫量(mm/h)	波周期(s)	相対波向 (度)	平均船 速(m/s)	有義波高(m)
2016/2/18 20:00	37.60022895	12.36	-032	5.7	6.2799997
2016/2/18 21:00	43.69618676	12.21	-034	5.2	6.3799996
2016/2/18 22:00	50.38793367	12.33	-033	5.0	6.56
2016/2/21 20:00	247.7231142	14.12	-037	4.5	5.35
2016/2/21 21:00	753.2415191	16.64	-030	4.6	5.75
2016/2/21 22:00	298.5630933	16.71	-030	4.5	6.19
2016/2/21 23:00	266.1188373	16.789999	-026	4.7	6.47
2016/2/22 0:00	80.62525078	18.44	-030	6.0	7.0099998

2016/2/22 1:00	74.91896624	18.46	-028	6.1	6.74
2016/3/17 11:00	0.028054006	11.94	-031	4.9	5.43
2016/3/17 12:00	0.02554894	11.95	-025	4.6	5.5299997
2016/3/17 15:00	0.460634785	—	-026	5.1	5.79
2016/3/17 16:00	0.05031798	—	-030	5.4	5.77
2016/3/17 17:00	0.027826309	—	-028	6.0	5.87
2016/3/17 22:00	56.36164249	10.86	-024	5.8	5.7
2016/3/17 23:00	11.62382593	11.63	-021	5.7	5.73
2016/3/18 0:00	10.63737119	11.79	-029	6.4	5.65

3: 出会周期を求める。

出会周期(以下 T_e)を求める式は次の通り。

$$T_e = \frac{\lambda}{\frac{\lambda}{T_w} - V_s \cos \chi} \quad (1)$$

T_e : 出会周期 λ : 海洋波の波長 T_w : 波周期(手順 2 により既知)

V_s : 船速 χ : 相対船向

また、波の速度 V_w :には次のような関係がある

$$V_w = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} \quad (2)$$

g : 重力加速度 π : 円周率

また、一般的な波の周期、波長、速度の関係は次の通りである。

$$\lambda = TV \quad (3)$$

これらの式より、波長 λ は次のように表される。

$$\lambda = \frac{gT_w^2}{2\pi} \quad (4)$$

この式を出会周期を求める式に代入することにより、既知の数値のみを用いて出会周期 T_e を求めることができる。

$$T_e = \frac{\frac{gT_w^2}{2\pi}}{\frac{gT_w}{2\pi} - V_s \cos \chi} \quad (5)$$

手順 2 で取得した波周期と、しらせの航行記録による波の相対的な向き、船速を式に代入し、出会周期 T_e を算出した。結果を Table.4.5.2.3 に示す。なお、第 5 章で相対波向を求めた際、船の進行方向に対し正面から波が来ている時を 0 度とし、船首から見て時計周り(右側)を正、反時計回りを負としていたが、出会周期を求める式では船の進行方向と波の進行方向が同じである時を 0 度としているため、(5)の式を修正した。修正後の式は次の通り。

$$T_e = \frac{\frac{gT_w^2}{2\pi}}{\frac{gT_w}{2\pi} + V_s \cos \chi} \quad (6)$$

この式を用いて出会周期を求めた式を以下に示す。

Table.4.5.2.3 各時間帯の平均出会周期

日付(UTC)	飛沫量(mm/h)	Tw(s)	Te (s)
2016/2/18 20:00	37.60022895	12.36	9.899526573
2016/2/18 21:00	43.69618676	12.21	9.956225714
2016/2/18 22:00	50.38793367	12.33	10.12275372
2016/2/21 20:00	247.7231142	14.12	12.13908367
2016/2/21 21:00	753.2415191	16.64	14.42574698
2016/2/21 22:00	298.5630933	16.71	14.53640989
2016/2/21 23:00	266.1188373	16.789999	14.47920616
2016/2/22 0:00	80.62525078	18.44	15.63825413
2016/2/22 1:00	74.91896624	18.46	15.55099177
2016/3/17 11:00	0.028054006	11.94	9.742695396
2016/3/17 12:00	0.02554894	11.95	9.765656746
2016/3/17 22:00	56.36164249	10.86	8.289352253
2016/3/17 23:00	11.62382593	11.63	8.992083697
2016/3/18 0:00	10.63737119	11.79	9.055173654

4:グラフ作成

得られた数値をもとに、出会周期と飛沫量の間をグラフにした。結果を Fig.4.5.2.4 に示す。

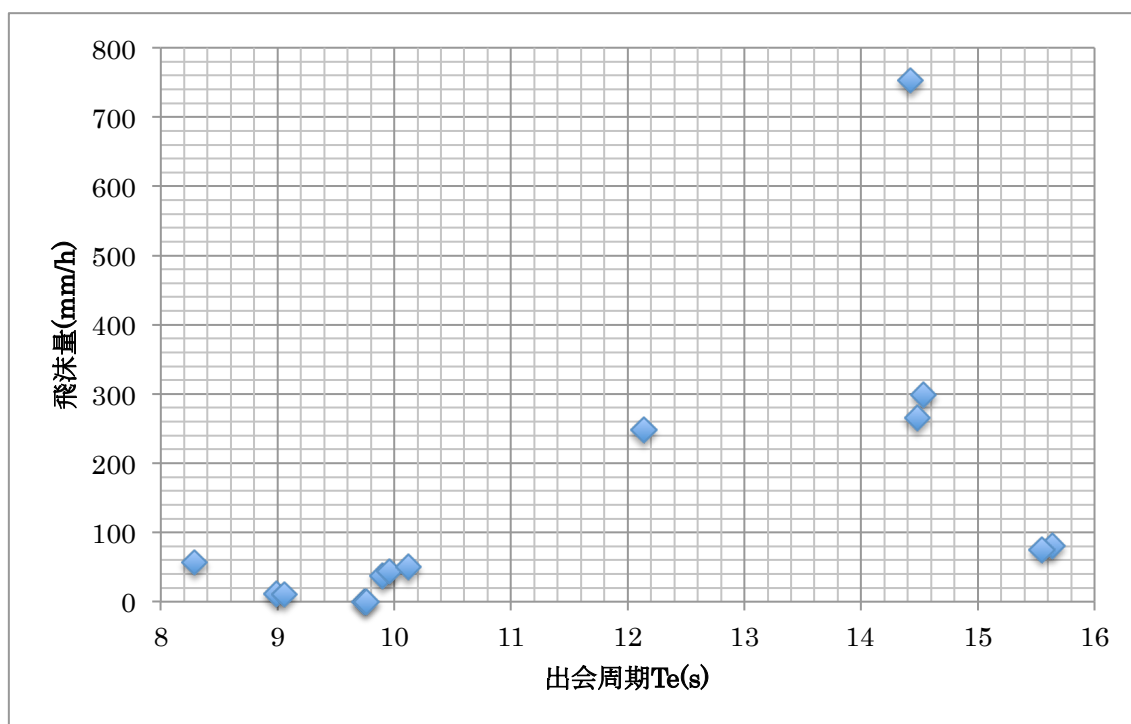


Fig.4.5.2.1 出会周期と飛沫量の間

グラフから、出会周期が 14 秒程度の値に近づくと数値の上昇が起きていることが確認できた。

このグラフから、波が原因で発生する船体の縦揺れに伴う飛沫の発生を示すことができ、出会周期、船体動揺が飛沫量に与える影響を示すことができた。

また、出会周期を決定する要素には船速、船首方位という、人間の手により変えることが可能な要素が含まれていることから、大量の飛沫の発生が限定的な出会周期の時のみ発生するのであれば、船向、船速のわずかな調整により飛沫の発生を抑えることができる。この結果により、飛沫の能動的な回避の実現への道筋を立てることができた。

第 5 章 結論

本研究においては、着氷の発生条件の解明を目指し、着氷の要因の一つである飛沫が発生する条件、およびそれを用いた飛沫発生の予測、回避についての研究を行った。第 57 次南極地域観測隊に参加し、飛沫を定量的に測定できるセンサーである雨量計と Snow Particle Counter(SPC)を砕氷艦「しらせ」艦上に設置し、航行中に発生する飛沫の観測を行った。SPC によって得たデータを用いて、船向、風向などを考慮した飛沫量の検証を行った結果、波高、風向、波向が飛沫の発生に影響を与えていることが確認できたが、それらの条件を満たしていても飛沫が発生しない時間帯があったことから、さらに別の要素が飛沫の発生に影響を与えていると予想した。波との出会い方に注目し、飛沫のデータ、自衛隊による砕氷艦「しらせ」の各種航行記録、波浪データといったデータを用いて、波との出会周期が飛沫の発生に関係しているかを確認した。結果、一定の出会い周期の時に飛沫量が増加していることを確認できた。これにより、波との出会い方が飛沫の発生に影響を与えることを示し、飛沫の発生を抑えることを実現する道筋を立てることができた。

第6章 今後の展望

今後、砕氷艦「しらせ」においてより多くの期間のデータを収集し、飛沫が大量に発生する時の出会周期が同じ値であるか検証する必要がある。
他の船舶でも同じ観測を行い、飛沫量の上昇が見られる時の出会周期が船舶ごとに一定であるかを検証する必要がある。

また、雨、雪などにより正確に飛沫を測定できない時の補正方法も確立する必要がある。

出会周期と発生する飛沫量の関係を確立することができれば、波浪に関する数値予報はすでに存在することから、波周期の予報と航行の状況から飛沫の発生を予想することができ、わずかに加速、減速する、わずかに船首方位を変更する、といった航行に大きな影響を与えない変更で出会周期を変化させることにより飛沫の発生を抑えることが可能なため、能動的かつ低コストな飛沫の対策、回避が可能になることも期待できる。

参考文献

- [1] 田畑忠司，岩田秀一，小野延雄：船体着氷に関する研究 1：低温科学.物理篇 21(1963)173-174
- [2] 岩田秀一：船舶の着氷について その 1：日本造船学会論文集 (129)(1971)287-288
- [3] 田畑忠司：船体着氷の研究 3：低温科学.物理篇 27(1970)173-174
- [4] 岩田秀一：船舶の着氷について その 3：日本造船学会論文集(1972)137
- [5] 志賀俊成，尾関俊浩，澤村淳司，山口一：砕氷艦「しらせ」における飛沫の発生と飛来に関する研究 その 2：第 30 回寒地技術シンポジウム(2014)7
- [6] 公益社団法人 日本海難防止協会，「北極海航路ハンドブック」，(1)
- [7] http://www.nipr.ac.jp/grene/20151106seminar/PDF/07_Ozeki.pdf
- [8] 社団法人 日本船用工業会 「日本財団助成事業 着氷防止塗料に関する技術開発 報告書」，(157-160)
- [9] 山本頼門，尾関俊浩：高分子素材に関する着氷力について：日本雪氷学会全国大会講演予稿集(2005) B2-5
- [10] 尾関俊浩，下田春人，津田将史：氷海水槽における海水飛沫着氷の実験 その 2 親水性と撥水性のシート材料：雪氷研究大会講演要旨集(2012)C3-3
- [11] 小野延雄：船体着氷に関する研究 2：低温科学.物理篇 22(1964)172-175
- [12] 尾関俊浩，八代裕平，安達聖：SPC 型しぶき計と船舶用雨量計型しぶき計による飛沫量の比較計測：第 31 回寒地技術シンポジウム(2015)134-135

[13] <http://www.nipr.ac.jp/jare/jare57/topics/topics13.pdf>

[14]

http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/27/11/__icsFiles/afieldfile/2015/11/09/1364233_02.pdf

[15]

http://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/nankyoku/detail/__icsFiles/afieldfile/2016/03/04/1367899_01_1.pdf

[16] 藤原亮 , 須山聡大 : 第 56 次南極地域観測 報告 「しらせ」 氷中航行試験(AAD03) 「しらせ」 海水飛沫計測(AAD04) : 東京大学(2016)13

[17] Toshihiro Ozeki , Toshinari Shiga , Junju Sawamura, Yuhei Yashiro : Development of sea spray meters and an analysis of sea spray characteristics in large vessels : The 26th International Ocean and Polar Engineering Conference, 26 June-2 July, Rhodes, Greece (2016) 1338

[18] 永川圭介, 戸田真: 第 57 次南極地域観測 報告 「しらせ」 氷中航行試験 AAD-02 「しらせ」 海水飛沫計測 AAD-03 : 東京大学(2016)11

[19] 新潟電機株式会社 , 「飛雪粒子計数装置 SPC-S7 取扱説明書」 , (4)

[20] 小倉義光 「一般気象学」 ,(87-90)

[21] 尾関俊浩 , 志賀俊成 , 安達聖 , 澤村淳司 , 山口一 : 船体着氷の成長指標と着氷対策の検討 : GRENE 北極気候変動研究事業 研究成果発表会 (2016)P7-102

[22] <http://www.jma-net.go.jp/kanazawa/mame/nami/nami.html>

- [23] <http://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/wave/comment/elmknwl.html>
- [24] 酒井哲郎「海洋工学入門」,(27-36)
- [25] http://www.geocities.jp/t_shimizu2003/
- [26] 合田良実：不規則波の研究の流れと展望：1992 年度水工学に関する夏季研修会講義集，(1992) B-5
- [27] <http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/gpv-original.html>
- [28] http://oos.soest.hawaii.edu/erddap/griddap/NWW3_Global_Best.html
- [29] 元良誠三「船体運動力学 電子訂正版」,(97, 106-112)
- [30] Hamid Sadat-Hosseini, Serge Toxopeus, Yasuyuki Toda et.al. : Experiments and Computations for KCS Added Resistance for Variable Heading : 5th World Maritime Technology Conference (2014)7-13
- [31] 田宮真：船の不規則な動揺：生産研究 第1巻 11号(1954)271-274

謝辞

本研究を行うにあたって、指導教員の山口一先生、副指導教員の高木健先生、北海道教育大学の尾関俊浩先生、北見工業大学の館山一孝先生、山口研究室の木村詞明先生から多大なるご支援、ご指導をいただきました。

南極観測においては、第57次南極地域観測隊において共に東京大学から参加した永川圭介さん、東京大学から第56次、55次南極地域観測隊に参加した志賀俊成さん、藤原亮さん、須山聡大さんをはじめ、第57次、56次南極地域観測隊の皆様、国立極地研究所の皆様から多大なる支援をいただきました。

ほか、山口研究室の皆様、海洋技術環境学専攻の皆様など、研究、論文の完成に関わってくださった全ての方に感謝の意を示します。

最後に、研究に関する面においても、生活においても多大なる支援、指導をいただいた父、母に心から感謝の意を示し、謝辞といたします。

付録

各種データを添付する。

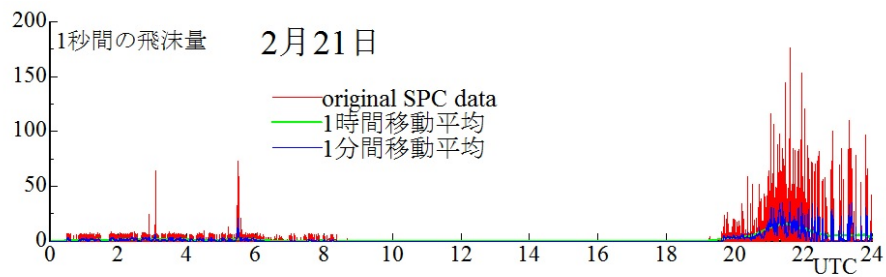


Fig.9.1 2月21日の飛沫量の時間推移

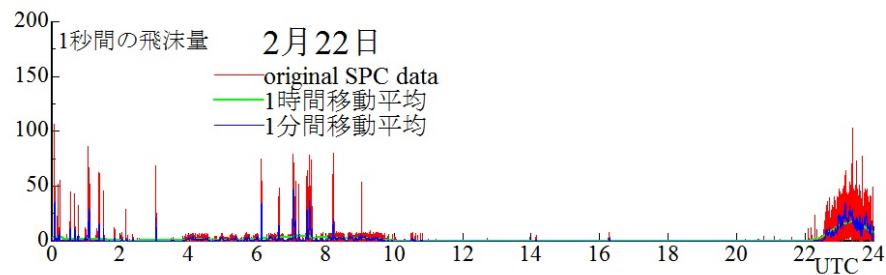


Fig.9.2 2月22日の飛沫量の時間推移

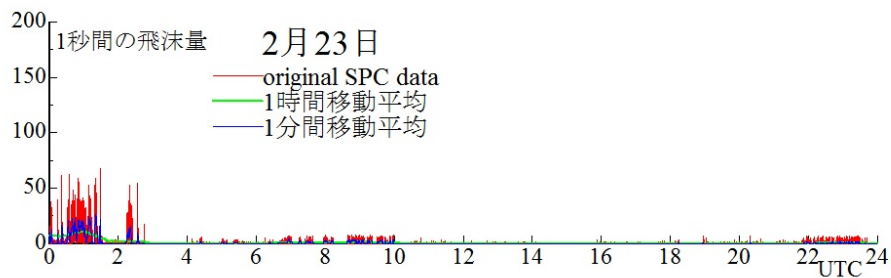


Fig.9.3 2月23日の飛沫量の時間推移

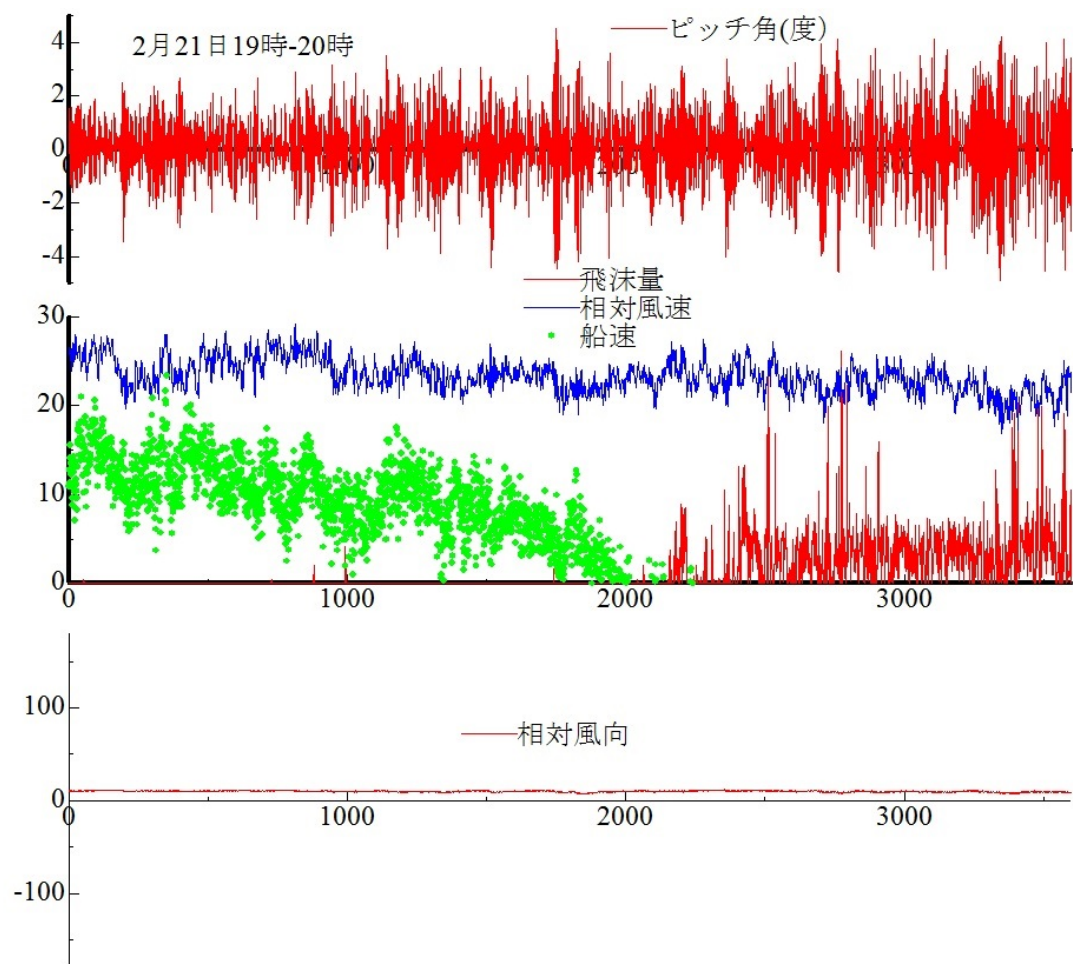


Fig.9.4 2月21日19時~20時の飛沫量、ピッチ角、相対風速、船速の時間推移

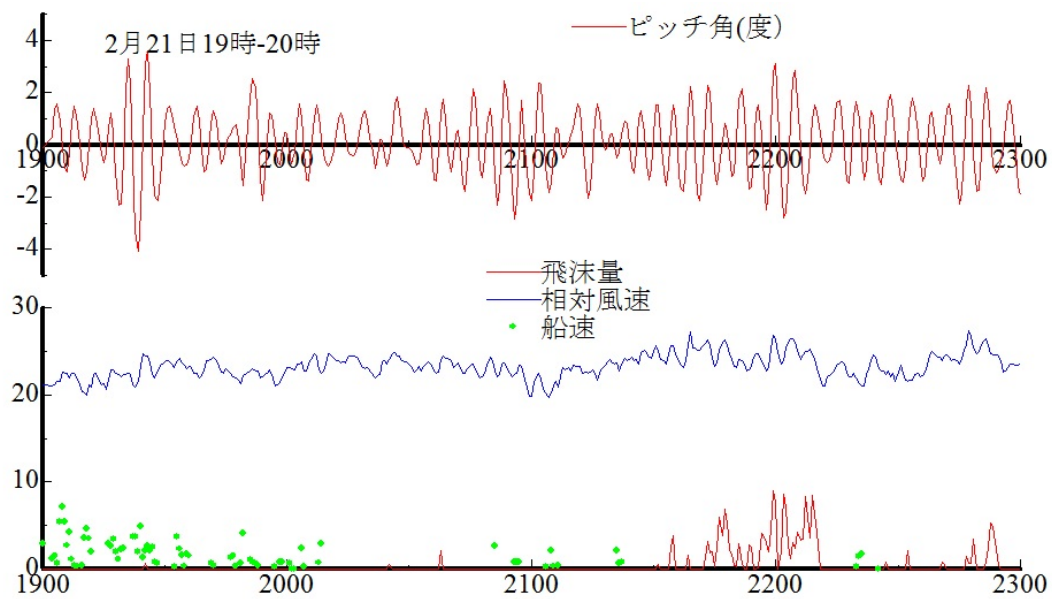


Fig.9.5 2月21日19時~20時の飛沫量、ピッチ角、相対風速、船速の時間推移

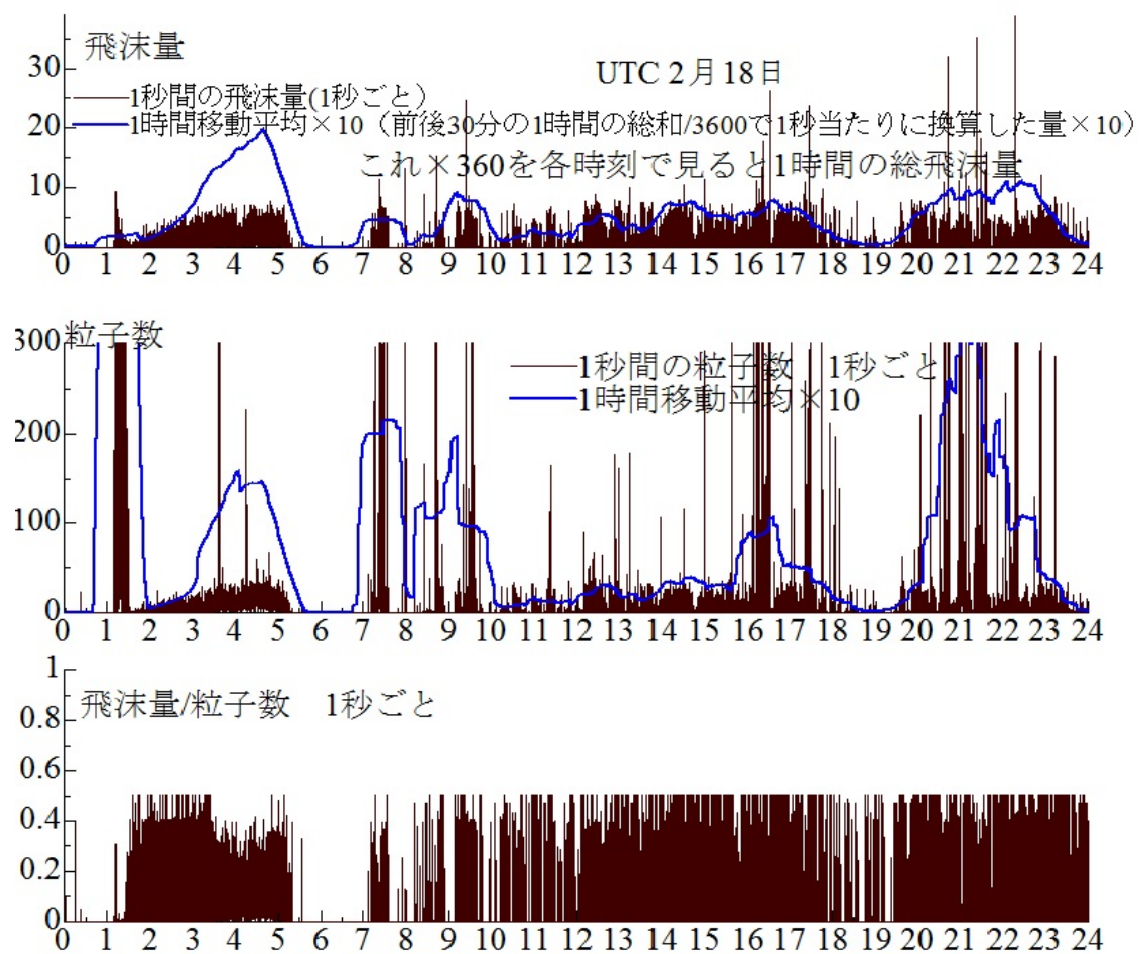


Fig.9.6 2月18日の飛沫量、粒子数、飛沫量/粒子数の推移

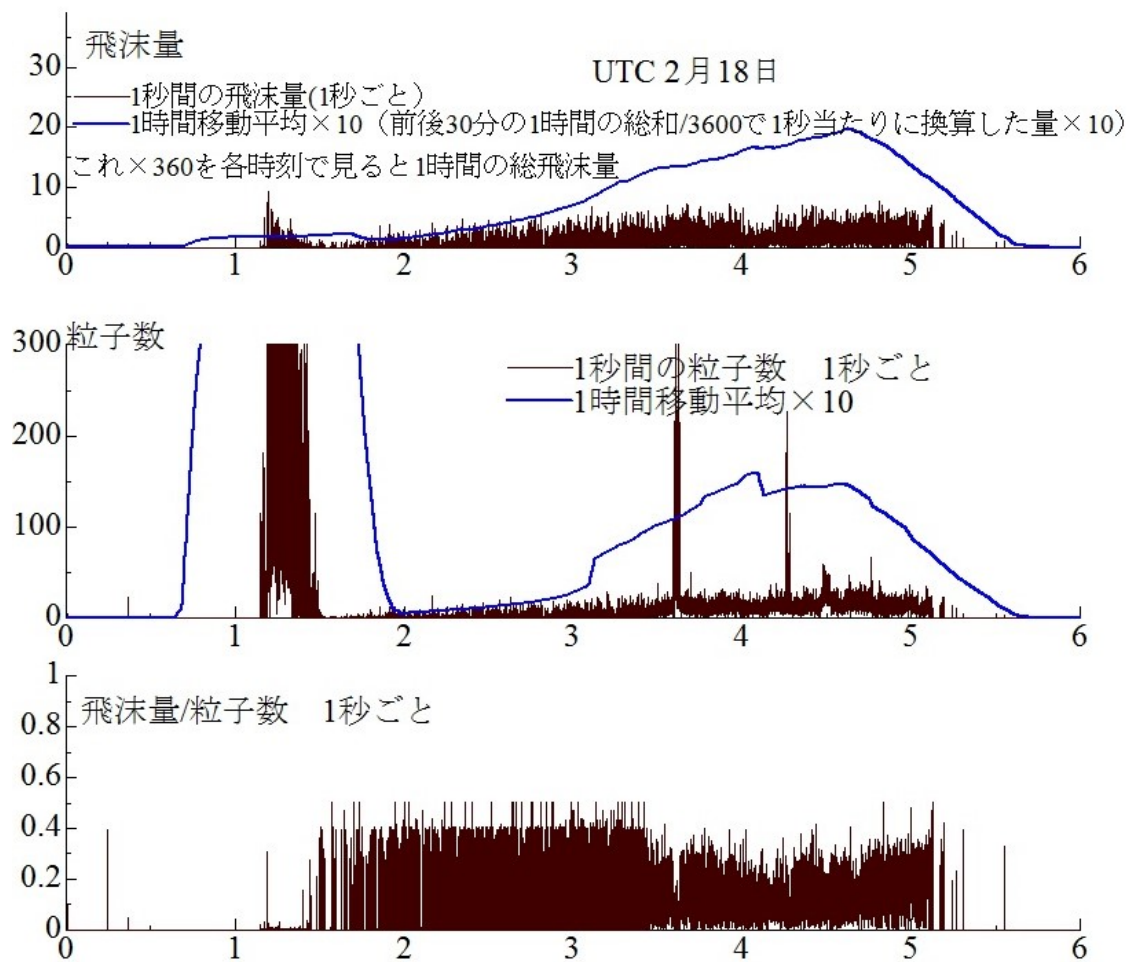


Fig.9.7 2月18日0時から6時の飛沫量、粒子数、飛沫量/粒子数の時間推移

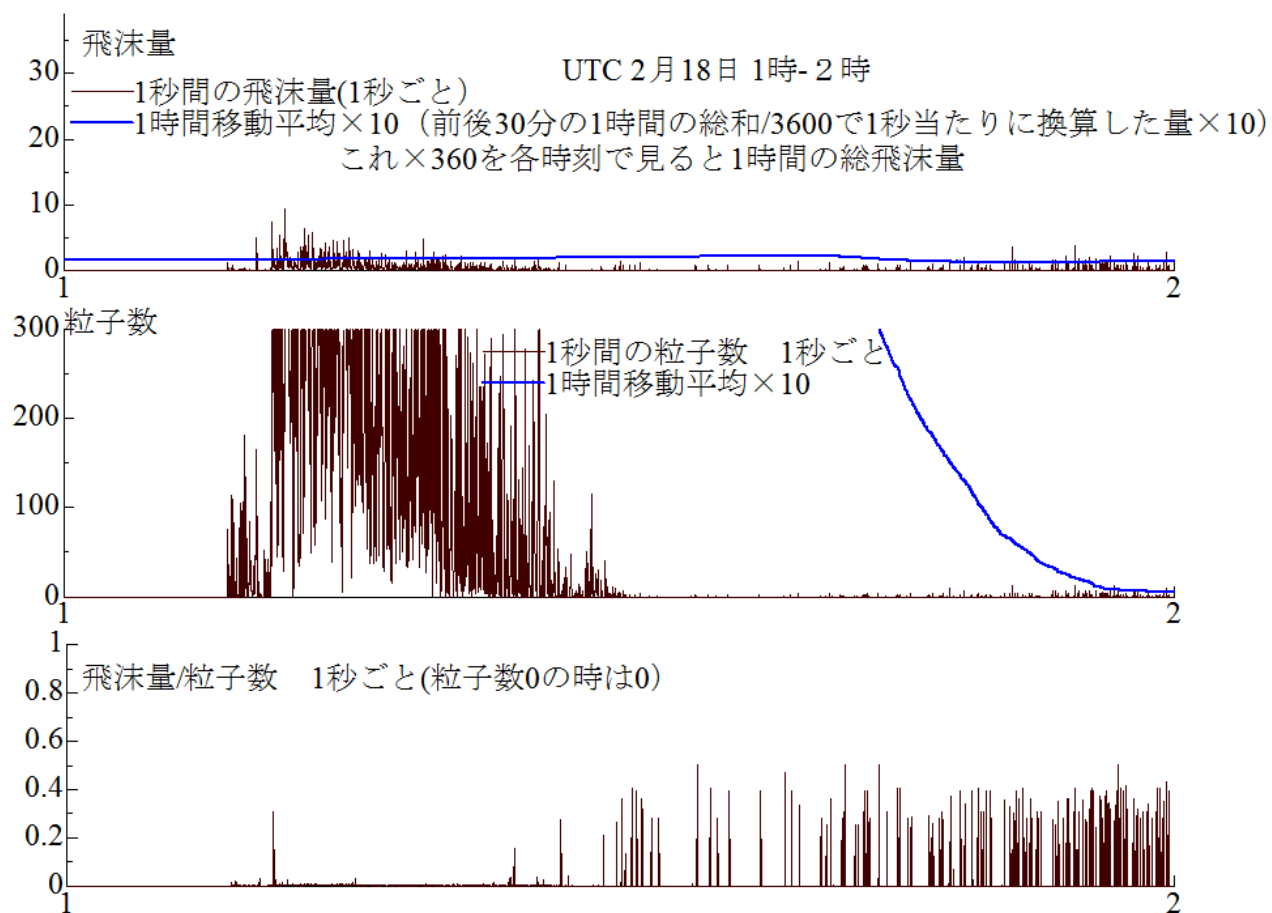


Fig.9.8 2月18日1時から2時の飛沫量、粒子数、飛沫量/粒子数の時間推移