

海水飛沫観測データ解析による
船舶の大規模な海水飛沫発生条件に関する研究
A study on condition of large amount of sea spray generation
on a vessel by full-scale sea spray data analysis

学籍番号 47-176647 伏見修一
指導教員 山口 一 教授

(令和元年 7 月 26 日発表予定)

Keywords: 北極海航路, 船体着氷, 海水飛沫, 船体動揺,

Keywords: Northern sea route, Vessel icing, Sea spray, Ship motion

1. 序論

近年、北極海における海水量が減少していることが報告されている。海氷減少の影響で先住民の生活基盤や生態系への不可逆な影響、海面上昇などが深刻視される一方で、利用可能海域の拡大や北極海における航路の確立による経済的可能性に全世界から注目が集まっている。しかしながら、北極海は寒冷であるがゆえに通常の海域では見られない、海水や船体着氷といった問題が存在する。

海氷に関しては衛星観測やモデル予測、最適航路探索などにより様々なリスク評価がなされているが、特に大型船に対する船体着氷に関しては十分なリスク評価がなされているとは言い難い。現在広く使われている着氷予報指標として、風速 V 、結氷温度 T_f 、気温 T_a 、海水面温度 SST を用いて(1)式で定義される Icing Index $PR[1]$ があげられる。

$$PR = \frac{V(T_f - T_a)}{1 + 0.3(SST - T_f)} \quad (1)$$

しかしながら、この式は船体の形状・大きさや海水飛沫の量、船体動揺による海水飛沫の発生などを十分に考慮できておらず、今後北極海の航行が増加すると予想される大型船には当てはまりが悪い。船体着氷の主な要因は Zakrzewski (1987) ら[2]の調査によると、少なくとも 5 割、多い場合は 9 割以上が海水飛沫であることが知られている。一方で、船体動揺などにより生じる激しい海水飛沫の発生の予測手法は確立されていない。

以上の観点から本研究の目的は、北極航海 2018 期間中、海洋地球研究船「みらい」上で取得された海水飛沫観測データを解析することにより、海水飛沫が起きやすい気象・海象の特徴を抽出することで、海水飛沫発生に関する知見を増やすことを目的とする。

2. 利用データ

2.1 海洋地球研究船「みらい」

「みらい」には観測のため、総合気象海象計、マイクロ波式波高計、船体動揺計(Pitch, Roll, Yaw)など様々なセンサーが取り付けられている。解析においてはこれらのデータを利用した。なお、動揺の振幅および振動周期を求めるために、ヒルベルト変換および自己相関関数を用いている。また、「みらい」の RAO は海洋研究開発機構より提供いただいた離散的な値を線形補間することにより利用している。

2.2 海水飛沫観測

今回の観測においては、海水飛沫を定量的な観測を行うために、光学式センサーである Spray Particle Counter(SPC)と、静電容量式センサーである Marine Rain gauge type Spray gauge(MRS)の 2 種類のセンサーを利用して行った。MRS は Bridge Deck の両舷に 1 台ずつ計 2 台、SPC は Compass Deck 船首側中央に 1 台設置して行った(Fig. 1)。これらのセンサーによって観測されたデータには海水飛沫以外に、降水の影響が含まれていることには注意を要する。また、元データを検証した結果、右舷 MRS については、ノイズなどでは説明しきれない大きな出力変動が多数見られたため、本研究においては考察対象外とする。

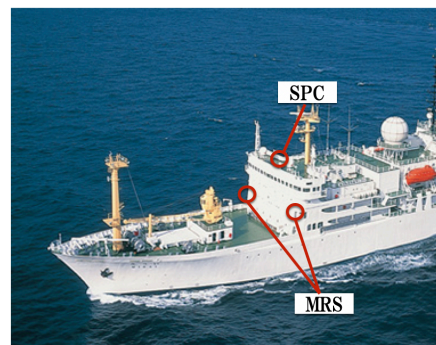


Fig. 1 Location of the spray sensors on R/V MIRAI.

2.3 気象・海象データセット：ERA5

本研究においては、ヨーロッパ中期予報センター(ECMWF)が公開している再解析・予報データである ERA5 も利用している。ERA5 データは MARS type dataserver より空間解像度 0.125° 、時間解像度 1 時間で取得している。ERA5 のデータは、指定した時空間グリッド上で統計処理を施した値であり、地形・植生・建築物・マイクロなタイムスケール等の考慮ができていない点は注意を要する。

3. 飛沫観測センサーの検証実験

これまでに、尾関ら(2015)[3]による無風下での検証実験が行われており、MRS,SPC 双方とも同程度の飛沫流量が検出されるとしている。しかしながら、実海域においては、海水飛沫センサーは非常に大きな風速下で、激しく揺れ動く船舶上で利用されている。そのため、風により飛沫捕縛率が変動するかどうかを調べるために、国立研究開発法人防災科学技術研究所雪氷防災研究センター新庄雪氷環境実験所雪氷防災実験棟(CES)にある低温風洞を用いて、飛沫センサーの検証実験を行った。

3.1 実験条件

風洞の測定部分の寸法は $1\text{m} \times 1\text{m} \times 14\text{m}$ 、風速は 0m から 25m 、温度は -30°C から 25°C の間で調整可能である。実験においては、Fig.2 のようにセンサーや飛沫発生装置を設置し、風速は 5m から 20m で 5m 刻み、温度は 4°C で固定し、計測時間 15 分とし、流量の計算には間の 10 分間を用いた。また、飛沫発生装置には粒径の異なる 4 種類のスプレーノズルを順番に用いた。スプレーノズルから発生するおおよその粒径は括弧内をノズル名として小さい方から順に $45\text{-}60\ \mu\text{m}$ (KB063), $130\text{-}200\ \mu\text{m}$ (KD042), $200\text{-}260\ \mu\text{m}$ (KD084), $310\text{-}420\ \mu\text{m}$ (KD224) である。要旨においては、KD042 の結果を一例として紹介する。

3.2 結果と考察

Fig.3 に KD042 実験結果を記す。風速が 5m/s の時は十分に飛沫がセンサーに到達していないことが考えられるため、考察対象としない。KD042 のグラフにおいては、風速が大きくなるにつれ、MRS の観測した飛沫量が SPC に比べ相対的に下がっている傾向が明確に見て取れた。これは風速が大きくなるにつれ、粒子が MRS の飛沫捕縛部を避けるように振る舞うこと、また飛沫捕縛部に付着した飛沫が一部剥離していることなどが原因として考えられる。

3.2 結論

今回の風洞実験の結果より、MRS は風の影響で飛沫捕縛量に変化することが示唆された。しかしながら、観測においては、海水飛沫が粒子としてではなく、水塊としてくることもあること、船体動揺によりセンサー自体も動くことなどから、一律の補正は困難であり、今回の解析においては、このような傾向に留意しながら行う必要があると述べるに留める。

4. 「みらい」で取得されたデータによる飛沫解析

4.1 解析データの抽出

本章においては、「みらい」で取得されたデータから飛沫の起こりやすい条件を考察する。観測された飛沫データには降雨が含まれるため、本研究においては、すべて 1 分間にリサンプリングしたのちに ERA5 の total precipitation の 0.01mm 閾値として、それ以上を降雨ありとして全て除外した。なおこの降水量は先にも述べたとおり、グリッド内での降水がグリッド内全てに広がった場合の降水の深さとなるため、局所的な降水が除外できていない場合があることに注意しなければならない。また、明らかに穏やかな有義波高 0.5m 以下の場合、および飛沫観測センサーに飛沫が届かないと考えられる船首

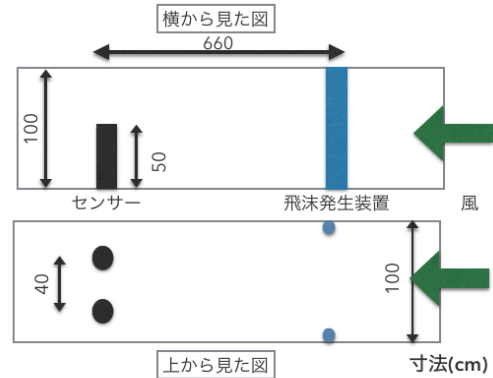


Fig. 2 Location of the spray sensors and spray generation system in the wind tunnel

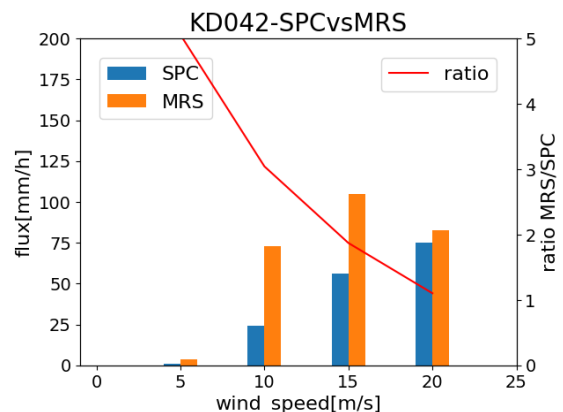


Fig. 3 Result of validation experiment of spray sensor (KD042)

方向からの風 0m/s 以下を除外している。このようにして残ったデータを解析データと呼ぶこととする。なお、解析データは全体の約 2.74% となった。

4.2 結果

解析データに関して、船速がおおよそ 10knot 以上、相対風向が 0-60 度に大きく偏っていた。それらを踏まえた上で解析を行っていくと、まずピッチ振幅・有義波高に関し特に左舷 MRS に関して閾値が見られた。また、出会い周期・ピッチ周期に明確なピークが見られた。一例として出会い周期の 2 次元ヒストグラムを Fig.4 に示す。

4.3 考察

出会い周期のピークに関する考察を行う。一般に縦揺れ角と最大波傾斜の比は相対波向、船長波長比を一定に保てばほぼ縦揺れの固有周期のところできちんと大きくなるということが知られている [4]。縦揺れ角と最大波傾斜の比が大きくなるほど、海面に大きな力が加わりやすく、海水飛沫が発生しやすくなると考えられる。したがって出会い周期のピークは「みらい」の固有周期におおよそ等しいという仮説が立てられる。そこで Fig.5 にピッチ揺れの固有周期を求めるため、出会い周期とピッチの RAO のグラフを記載した。固有周期は RAO のピークとおおよそ一致することが知られている。Fig.5 からピークはおおよそ 10 秒であることが見て取れる。北極航海 2018 においては長期間の海氷域での航海であるため食料・燃料等の積載量が通常より大きいと考えられる。そのため、船舶の重心が下がり、固有周期が通常より小さくなっているものと推定される。したがって、出会い周期のピークと概ね一致すると考えられる。以上から、出会い周期が固有周期となることを避けるよう航行することで大規模な海水飛沫の発生を抑制することが可能であると言える。また固有周期を考えるにあたり、相対波向が重要なパラメータとなってくる。しかしながら、現在「みらい」において、相対波向を推定する方法がないため、これは、他のデータから補う必要が出てくる。

有義波高の閾値に関しては、現在のところ物体衝突による飛沫発生条件に関しては十分にわかっておらず、今後の課題とする。

5. ERA5 データセットからの飛沫予測可能性

ERA5 から取得した波浪データを用いることで、「みらい」で取得されたデータのみでは十分に考察しきれなかった、相対波向や波長などとの関連を見ることとする。まず、Fig.6 に飛沫量と相対波向との関係を示した 2 次元ヒストグラムを示す。この図から向かい波の時に飛沫が発生しやすい傾向が見て取れる。また、Fig.7 に船長波長比率と飛沫量の関係を表す 2 次元ヒストグラムを示す。Fig.7 から左舷 MRS において船体波長比率が大きい時、飛沫が発生しやすい傾向が見て取れた。これは船長波長比率が大きい時に強制モーメント係数が大きく

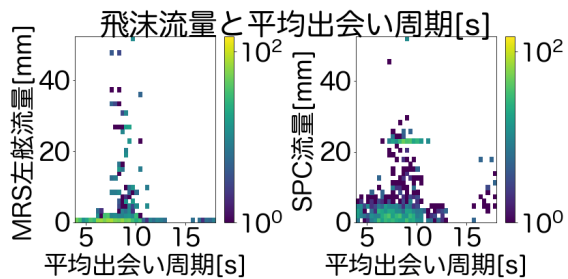


Fig.4 Relation between average encounter wave period and spray flux

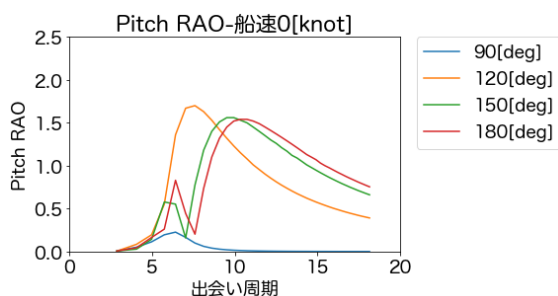


Fig.5 Natural period from RAO

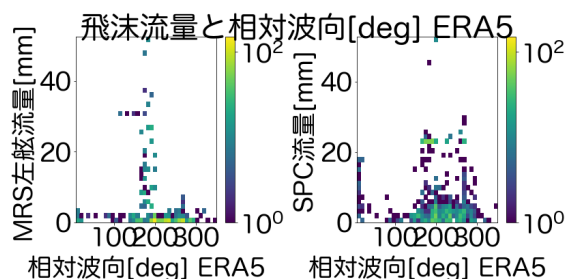


Fig.6 Relation between relative wave direction from ERA5 and spray flux

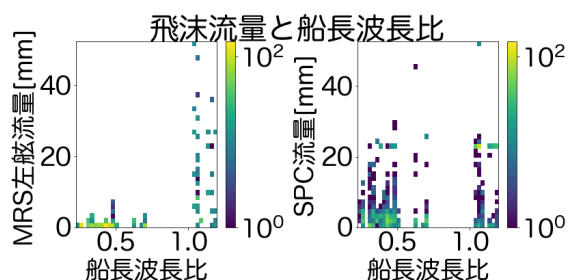


Fig.7 Relation between ship wave length ratio from ERA5 and spray flux

なること[4]が関係していると考えられる。また、ERA5 における有義波高と飛沫量の関係を見ると、「みらい」での観測値と同様おおよそ 2m 程度で閾値が見られた。

最後に、ERA5 の風速との関連を見てみると、船首方向から風を受けている時に飛沫が観測されやすいことがわかった。これらの結果は船上で観測された風に関するデータと同一の傾向を示している。以上から、海象・気象・操船方法の 3 つを入力として、ある程度飛沫が発生しやすい状態の検出の見込みがあるものと考えられる。

6. 海水飛沫試験航行

北極航海 2018 においては、風向きを基準として船首方向を調整し、進行方向を調整することによる飛沫量の変化を確認することを目的とした海水飛沫試験航行を実施した。具体的には Fig.7 のように角度を変えた 2 種類の六角形を記述するイメージで航跡を調整し、様々な風向でのデータを取得した。一例として、Fig.8 に 2018/11/23 に実施した試験航行の航跡を左舷 MRS により取得された飛沫量で色付けした図を示す。Fig.8 から、船首方向を調整することによって、飛沫量が大きく変化していることが見て取れる。この傾向は全ての試験航海において確認された。したがって、似たような気象・海象条件においても、船首方向を調整することにより、海水飛沫発生量を抑えられる可能性が示唆された。これは、船体着氷を軽減させる航法の確立に繋がると考えられる。

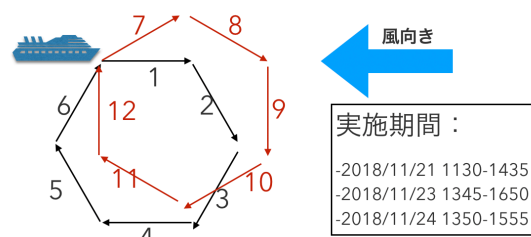


Fig.7 Relation between ship wave length ratio from ERA5 and spray flux

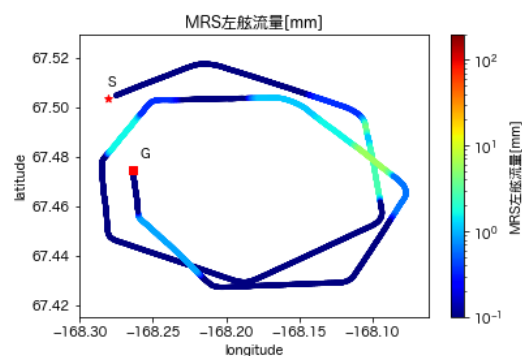


Fig.8 Relation between ship wave length ratio from ERA5 and spray flux

7. まとめ

本研究において出会い周期がおおよそ固有周期に等しくなる時に飛沫が発生しやすいことがわかった。相対波向・相対風速なども海水飛沫量に影響を与えることも明らかとなった。これらは、船速・船向を操作することによって調整可能なパラメータであり、海水飛沫を回避する指針として大いに役立つものである。

また、ERA5 データセットを用いることで船長波長比・有義波高に関しても海水飛沫量と関連がある程度明らかとなった。ERA5 の風速に関してもデータに偏りが有るものの、概ね船首から風を受けると飛沫が観測されやすいことがわかった。したがって、ERA5 のみで有る程度大規模な海水飛沫飛来の予測が可能であることが示唆された。そして、海水飛沫試験航行においては、船首方向を調整することにより、飛沫量が大きく変化する傾向が確認された。

以上から、着氷指標 PR が大きな値を取り、船長波長比が大きく、有義波高が一定以上を満たす海域を航行する際には、出会い周期・相対波向・相対風速などに十分注意しながら船首方向を調整しつつ航行することにより、船体着氷を軽減させられる可能性が示唆された。

参考文献

- [1] Overland J.E., Prediction of vessel icing for near-freezing sea temperatures, *Weather and Climate*, 5, 62-77.
- [2] W. P. Zakrzewski. Splashing a ship with collision-generated spray. *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 14, No. 1, pp. 65-83, 1987. ID: 271725.
- [3] Ozeki Toshihiro, YASHIRO Yuhei, and ADACHI Satou. 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, pp. 134-139, 2015.
- [4] 元良誠三. 船体運動力学 (電子改訂版). (株) 日本船舶海洋工学会, 2007.