

船体着氷の成長指標と着氷対策の検討

尾関俊浩¹、志賀俊成²、安達聖³、澤村淳司⁴、山口一²

¹ 北海道教育大学札幌校

² 東京大学大学院新領域創成科学研究科

³ 防災科学技術研究所雪氷防災研究センター

⁴ 大阪大学大学院工学研究科

Study of Sea Spray Characteristics, Predictor and Anti-icing Method of Sea Spray Icing on Vessel

Toshihiro Ozeki¹, Toshinari Shiga², Satoru Adachi³, Junji Sawamura⁴ and Hajime Yamaguchi²

¹Sapporo Campus, Hokkaido University of Education

²Graduate School of Frontier Sciences, the University of Tokyo

³Snow and Ice Research Center, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

⁴Graduate School of Engineering, Osaka University

北極海や北海道の沿岸など寒冷海域では、しばしば船舶や構造物に着氷が大きく発達し、除氷の問題が発生する。この着氷の主因は海面からの飛沫である。樹氷のような大気着氷は過冷却水滴が物体に衝突し着氷するので、飛来する雲水量は現在、気象データから WRF などのメソ気象モデルを用いて与えることが可能となってきた。しかし、船体着氷では飛沫の発生が波浪と船との相互作用によるので、船首形状の影響や甲板での二次飛沫の発生など現象はたいへん複雑である。一般に、開放水面では、飛沫発生は風速と波高に関連づけられる (Jones and Andreas, 2009)。また、船舶における飛沫の鉛直分布は、高度とともに指数関数的に減少する経験則 (Lozowski *et al.*, 2000) が用いられているが、その発生量、飛沫の空間分布についてはいまだに十分に理解されていない。今後、様々な船種が寒冷海域を航行することが想定されるため、飛沫の発生と飛来について様々な船種でデータ収集を行う必要がある。海水飛沫の計測は今まで様々な方法が用いられてきた。本研究では飛雪粒子カウンターを改良した「SPC型しぶき計」と、船舶用雨量計を改良した「雨量計型しぶき計」を開発した。SPC型しぶき計は50~1000 μmの粒径計測範囲を32分割し、粒子の粒径とその個数を1秒毎に記録できる。雨量計型しぶき計は船舶用雨量計にしぶき捕捉部を取り付けた構成である。両しぶき計とも海水飛沫の連続観測が可能である。

観測は大型砕氷船である「しらせ」（基準排水量約12,650[t]）の開放水面航行期間に2航海（JARE-55、JARE-56）実施した。SPC型しぶき計は最上層甲板（06甲板）中央に、雨量計型しぶき計は暴露貫通甲板（01甲板）左・右舷に1台ずつ設置した。海水飛沫の飛来量（しぶき量）と粒径分布の計測データは、しらせで計測されている気象データ、航行データを用いて解析した。風速、風向、船速、船首方向、うねり、風浪のデータとしぶき量との相関分析を実施した結果、1時間当りのしぶき量と相対風速の間に最も強い相関が見られた。Figure 1に06甲板でSPCが捉えたしぶき量と相対風速の関係を示す。両者の相関係数は0.82であった。また、JARE-55における雨量計型しぶき計と相対風速の相関係数は左舷が0.84、右舷が0.88でありいずれも強い相関があった。以上の結果より、各船種におけるしぶき量観測データを蓄積することにより、1時間当りの大型船舶への海水飛沫のしぶき量を風向、風速と、船速、船首方向から推定できる可能性が示された。また、SPCが多く粒子（5秒間に1000個以上）を捉えた期間で、平均粒径と風速、風向、船速、船首方向のデータを用いた相関分析の結果、船首から船尾方向の風速成分と平均粒径の間で正の相関があることが分かった。

海水飛沫着氷は現象が複雑で、コンピュータシミュレーションは単純2次元形状への着氷速度を計算した例（例えば Horjen, 2013）があるものの、実際の船舶に適用するには至っていない。世界的には着氷の度合いを示す着氷指標 *PR* を次式から求め、用いることが多い (Overland, 1990)。

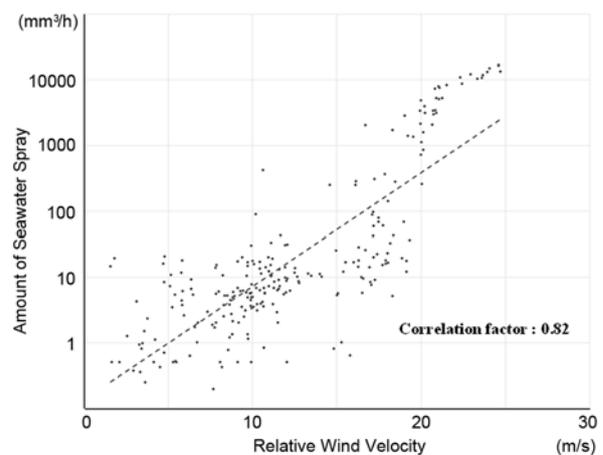


Figure 1 Correlation diagram of the amount of seawater spray measured by the SPC and relative wind velocity.

$$PR = \frac{W_s(T_f - T_a)}{1 - 0.3(T_w - T_f)} \quad (1)$$

ここで、 W_s は風速、 T_a 、 T_f 、 T_w はそれぞれ気温、結氷温度、海水温である。しかし、(1)式分母では着氷速度がしぶき量によって一義的に決まるという仮定を用いて定数 0.3 を導いており、分子が気温に依存して増加することと矛盾するという指摘がある (Makkonen et al., 1991)。結氷温度に近い海水では、分母を 1 として扱っても差し支えないので、ここでは $W_s(T_f - T_a)$ の有効性を研究した。船体着氷と防波堤灯台に成長する海水飛沫着氷は同様の現象であるので、本研究では防波堤の設置した約 4 m の灯塔を望遠カメラでインターバル撮影した画像を用い、着氷の成長と気象の関係について調べた。気象データは浜益アメダス (気象庁) の気温、風速、風向を浜益防波堤の値に換算して用いた。また海象データとして海面水温 (気象庁) を参照した。海水の結氷温度は -1.9°C を用いた。Figure 2 に着氷断面積の増加量と $W_s(T_f - T_a)$ との関係を示した。 $W_s(T_f - T_a)$ の増加とともに着氷断面積は単調に増加する結果となった。飛沫着氷は、飛沫の発生、飛沫の飛来、灯台の捕捉率、着氷率 (熱収支など) が総合してその成長量を決めると考えられる。 $W_s(T_f - T_a)$ は着氷率を決める一つの要素である顕熱フラックスに関連するので、着氷には顕熱フラックスの影響が大きいことが推測された。

寒冷海域を航行する船舶にとって、海水飛沫着氷の実際的な課題は難着氷や除氷対策である。これまでも凍結防止剤、電熱や湯、赤外線等によるヒーティング、表面加工による難着氷、電氣的除氷、膨張や振動による除氷対策などが提案され (Ryerson, 2008)、窓の電熱線ヒーターや飛行機の翼前縁の膨張による除氷、飛行場での凍結防止剤散布など実用されているものもあるが、決定的な対策はない状況にある。本研究では広範囲の着氷には難着氷シート、窓などの透過性の必要な場所には面ヒータ付きポリカーボネイトを提案した。

塩水の場合は撥水性のみならず親水性の材料でも着氷力が著しく低下する (Ozeki et al., 2012)。したがって、2 種類のシート材料 FGT (PTFE と酸化チタンのハイブリットフィルム、高撥水性)、SCC (酸化チタンフィルム、高親水性) と汎用の防水シート (ポリ塩化ビニル、撥水性) を比較した。その結果、FGT と SCC は小さな刺激やシートの変形で着氷を剥がすことが容易であった。したがって、コーティングによる難着氷性に加えてシートの変形を用いることで除氷対策を行うことが有効であることが分かった。

一方、ヒーターは大きな発熱量を必要とするので広範囲に使用するのには現実的ではないが、窓などの重要な箇所だけに選択的に使うのは得策である。透明発熱シートを積層したポリカーボネイトは透過性が良いことに加え、高強度であり形状への対応も可能で、発熱量の調整も容易なことから、今後のヒーティング対策品として有効であることがわかった。

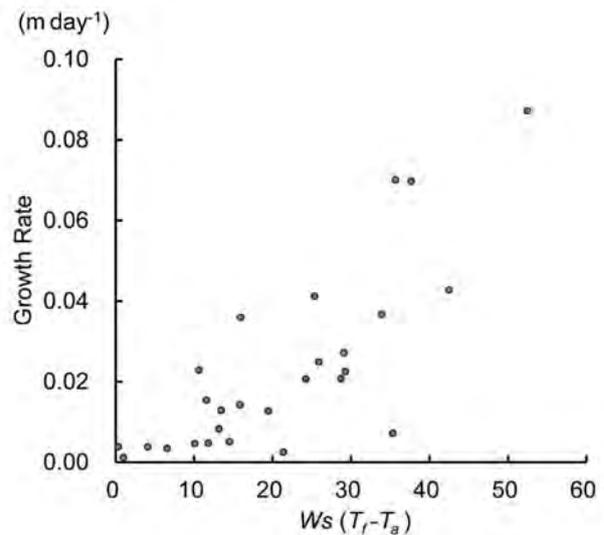


Figure 2 Relationship between predictor (product of air temperature and wind speed) and cross-sectional growth rate.

References

- 1) Jones, K. F. and Andreas, E. L., Sea spray icing of drilling and production platforms, ERDC/CRREL TR-09-3, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Hanover, 54pp, 2009.
- 2) Lozowski, E. P., Szilder, K. and Makkonen, L., Computer simulation of marine ice accretion. Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, 2811-2845, 2000.
- 3) Horjen, I., Numerical modeling of two-dimensional sea spray icing on vessel-mounted cylinders Cold Reg. Sci. Tech., 93, 20-35, 2013.
- 4) Overland, J. E., Prediction of vessel icing for near-freezing sea temperatures, Wea. Forecasting, 5, 62-77, 1990.
- 5) Makkonen, L., Brown, R. D. and Mitten, P. T., Comments on "Prediction of vessel icing for near-freezing sea temperatures", Wea. Forecasting, 6, 565-567, 1991.
- 6) Ryerson, C. C., Assessment of superstructure ice protection as applied to offshore oil operations safety, ERDC/CRREL TR-08-14, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Hanover, 156pp, 2008.
- 7) Ozeki, T., Yamamoto, R., Izumiyama, K. and Sakamoto, T., Ice adhesion tests on pliable polymer sheets for protection against sea spray icing, J. Adhesion Sci. Tech., 26, 651-663, 2012.