

平成22年11月22日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007～2009

課題番号：19310119

研究課題名（和文）高機能性素材を用いた航行安全設備の着氷防止対策の研究

研究課題名（英文）Investigations of Sea Spray Icing on Lighthouses and Ice Adhesion Tests on Hydrophilic and Hydrophobic Pliable Polymer Sheets for Protection against Sea Spray Icing

研究代表者

尾関 俊浩（OZEKI TOSHIHIRO）

北海道教育大学・教育学部・准教授

研究者番号：20301947

研究成果の概要（和文）：本研究は海水飛沫着氷内のブラインに着目し、海水飛沫の難着氷と着氷の簡便な除氷方法の開発が目的である。3年の研究により、以下の成果があった。(1)低温室用ポータブルMRIシステムの磁場のゆがみを補正するソフトの開発。(2)海水飛沫着氷のブライン排水路の構造の可視化と形態計測システムによる解析。(3)浜益港北防波堤の灯台に着氷が発達する気象条件の解明。(4)撥水性膜材料と親水性膜材料の着氷力の温度、塩分濃度依存性の評価。(5)ツリーイングの登攀技術を応用した着氷軽減対策の提案。実地試験の結果、この懸垂方法により難着氷シートが冬期の波浪の打ち込みに対しても十分耐えられることが実証された。

研究成果の概要（英文）：Heavy sea spray icing on lighthouses severely affects their maintenance in the northern harbors that face the Sea of Japan. We tested hydrophilic and hydrophobic pliable sheets that can be used to wrap small lighthouses.

We investigated the wet growth of spray ice through a cold experiment conducted using an ice model basin. Experiments were conducted to reveal the sea spray icing characteristics of hydrophobic and hydrophilic surfaces. Deicing was easy for the both pliable sheets due to the low adhesion strength of saline ice and the exfoliation. Field observation was carried out using two dummy lighthouses built on the breakwater. We developed a method employing static ropes in order to withstand the fluttering and green water through one entire winter. The effect of the high hydrophilic sheet was verified using growth rate of sea spray icing. In the case of sea spray ice, the high hydrophilic surface worked effectively because of the low adhesion strength of saline ice.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2008年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2009年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
年度			
年度			
総計	14,200,000	4,260,000	18,460,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・自然災害科学(B)

キーワード：海洋物理・陸水学，自然災害，着氷，可視化，構造・機能材料

1. 研究開始当初の背景

日本海北部は世界でも有数の着氷海域であり，航行船舶や防波堤灯台に波浪飛沫が激しく着氷することが知られている．北海道西海岸においても，シベリア寒気団からの季節風によって波浪飛沫が励起され，防波堤灯台に激しく着氷することがある（図1）．近年はエレクトロニクス技術の進歩により航行援助システムも光灯台から電波灯台，GPS へと発展しているが，その反面として省力化による除氷作業の人手不足や，FRP 及び鋼製の小型灯塔が着氷ゾーンで普及してきたことにより，着氷軽減対策は以前にも増して急務の課題となっている．

一方，今後サハリンや北極海でのエネルギー資源の生産が本格化し，寒冷海域における海上交通の重要性は増すと考えられる．今後はタンカー，LNG船，砕氷船など今まで想定していなかった船種への着氷対策を検討する必要がある．現在は船の航行保全が電子航海計器に依存しており，着氷による航海計器障害を防止・除去することは従来にまして重要な課題となる．



図1 灯塔への波浪着氷

2. 研究の目的

航行安全設備への着氷雪防止対策を検討する上で，着氷成長のどの段階で対策を施すかを設定することが肝要である．海水飛沫着氷は海水飛沫の発生，海水飛沫の対象物への飛来，海水飛沫の対象物への衝突と凍結の各段階を経て成長をする．したがってそのどこかを断ち切ることにより着氷の成長を抑制

することが可能となる．また対象物への着氷を許した場合には着氷が大きく成長しないよう制御する，成長した着氷を簡便に除氷することが着氷雪防止対策となる．本研究は既存の航行安全設備の着氷軽減対策を主題として，海水飛沫着氷特有の性質「ブラインの存在」に着目し，海水飛沫の難着氷，飛沫着氷の成長制御，飛沫着氷の簡便な除氷方法の開発を目的とする．

現在の着氷雪対策技術で万全のものはない．本研究ではブラインが析出する場合に， -10°C を下回るような環境でも超親水性素材が難着氷効果を発揮すると予見されることから撥水性材料のみならず親水性材料を用いた実験を行なうこと，膜構造で装置や灯台を覆ってその変形によって着氷を剥落させることなどいくつかの対策を組み合わせることで着氷軽減効果を検証する．

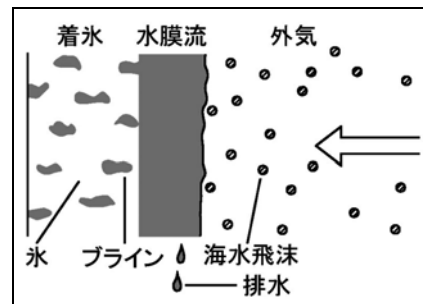


図2 従来の海水飛沫着氷のモデル（湿潤着氷）

海水飛沫の着氷は，気象着氷と異なり成長の過程でブライン（未凍結の海水）を含有するのが特徴である．ブラインが含まれる着氷の成長は Makkonen(1987)が塩分濃度と成長速度の関係を求めており，湿潤成長のモデルも提唱されている（図2）．近年は核磁気共鳴映像法（MRI）を使った研究により海水飛沫着氷のブライン排水路の構造がわかるようになってきた（図3）．撥水性素材は真水の着氷力が小さいことから従来は超撥水性の塗料や材料が着氷対策に用いられてきたが，ごく少量の塩分濃度でも親水性素材上の着氷力が激減することが分かってきた．これは塩水の着氷と着氷体の間に水膜が存在することが原因であろうと予測されるが，結論を得るには非破壊による着氷内部のブラインの観察が有効であろう．

本研究では現地調査により航行安全設備における波浪加重，氷加重の調査・検討を行

ない、設置環境条件を明らかにしたのち、その条件に最適な構造および素材、被覆、塗膜等表面材料の調査・検討を行なう。高分子系の高機能素材は日進月歩で、とくに超親水性素材は用途が拡大しているため、幅広い調査が必要となる。さらに着氷界面の撥水性・親水性が着氷の剥離に与える効果について塩分濃度とブラインの有無を主体とした実験・検討を行なう。上記の調査結果を基に着氷防止または軽減が見込まれる対策を検討し現地試験を行なう。本研究では、着氷量軽減効果のある布で灯台を覆うことによって着氷を容易に剥落させる方法の実用性を探るとともに、航行安全設備の着氷防止策を提言する。

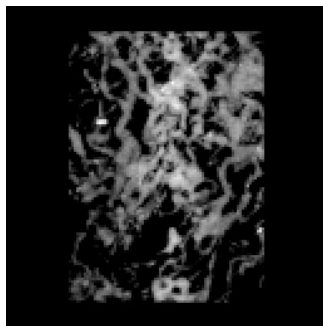


図3 MRIによるブライン排水路ネットワークの可視化

3. 研究の方法

(1)研究は3年計画で行った。2007年度は着氷防止対策に用いる高機能素材の調査・検討と着氷成長時のブライン分布の研究に主眼を置いた。北海道教育大学にある低温室用コンパクトMRI装置により海水飛沫着氷内のブライン3次元分布が可視化できるようになった。そこで低温実験室で塩水による着氷を成長させ、逐次MRI装置で測定し着氷内のブライン排水路の発達、分布状態を可視化する手法を開発しMRI計測した。着氷防止対策の試験体が実際にさらされる自然環境を調査し、試験体が1シーズンを通して機能を発揮できる条件を抽出した。主に以下の6つの研究を行った。

- ①低温実験室で2007年度は塩水を用いて湿潤着氷を作成し、着氷初生、成長、着氷力に着目した着氷試験を行なった。さらにMRI装置で着氷内のブライン排水路を可視化し、計測する手法を開発した。
- ②日本海に面した浜益港北防波堤の実験灯台において着氷防止対策の試験体が実際にさらされる自然環境を調査し、着氷の発達する気象、海象条件を観測した。
- ③着氷防止機器の取り付け方法および着氷試料の採取方法について検討し、試行を行なった。

④低温室に設置した永久磁石MRIシステムを改良し信号対雑音比を向上させた。

⑤海水飛沫着氷の実サンプルを採取し、低温室用ポータブルMRI装置で3D高分解能データを取得した。

⑥航行安全設備の着氷防止対策に利用可能な材料、表面処理剤の調査を行なった。

この調査で現行の超親水性材料はシーズンを通してフラッタリングによる除氷を行った場合、構造特性上耐久性に難があることが予想された。したがって次年度に利用可能な材料および除氷方法を再調査・検討することとした。

(2)2008年度は、着氷防止対策に用いる高機能性材料の現地着氷試験と天然のサンプルと低温室での再現サンプルを用いた着氷内のブライン分布の研究に主眼を置き、主に以下の6つの研究を行った。

①低温実験室で海水飛沫着氷の模擬実験を行い、着氷初生と成長過程の研究を行なった。さらにMRI装置で着氷内のブライン排水路を可視化した。

②初年度に行った海水飛沫着氷の観察記録および海水飛沫着氷の様態観察より、防波堤灯台に着氷の発達する気象、海象データを解析し、成長条件を明らかにした。

③航行安全設備の着氷防止対策に利用可能な材料、表面処理剤の調査を行なった。さらに、膜構造など自然エネルギーによる変形によって着氷を剥落させるシステムを考案した。

④登攀の技術を応用した着氷防止機器の取り付け方法を考案し、浜益港北防波堤にある実験灯台に取り付け、耐波浪、耐候試験を行なった。試験には高機能性材料である高親水性膜材を用いた。この結果、スタティックロープを使った懸垂方法により冬期の波浪の打ち込みに対しても十分な耐波浪効果が得られることが予想された。

⑤低温室に設置した永久磁石MRIシステムの温度特性を調査し、温度低下に伴う静磁場のゆがみを明らかにした。さらに磁場のゆがみを補正するソフトの開発に取り組んだ。

⑥海水飛沫着氷の実サンプルを採取し、低温室用ポータブルMRI装置で3D高分解能データを取得した。また起源を推定する $\delta^{18}O$ 解析用のサンプルを採取した。

(3)2009年度は、低温室での海水飛沫着氷再現試験と冬期現地実験で得られたデータの解析及び、難着氷素材の着氷試験により得られた知見を元に除氷方法を提案した。主に以下の8つの研究を行った。

①大型低温室で着氷軽減シートに強風としぶきを当てる実験を行い、その難着氷特性を実験的に調査した。この着氷試験により着氷初生、成長、剥落の様態、除氷難易度に関する知見が得られた。

- ②低温室において液膜流下による塩水着氷の成長実験を行い、気温、風速、塩水供給量などを変えた実験より海水飛沫着氷の成長過程の熱収支条件を調べた。
- ③試験材料の引張り強度、柔軟性、表面粗度の試験を行った。
- ④撥水性膜材料と親水性膜材料の着氷力試験を行い、着氷力の温度、塩分濃度依存性の評価を行なった。
- ⑤低温室用ポータブルMRIシステムを用いて、海水飛沫着氷内部のブライン排水路3次元ネットワークデータを取得した。磁場のゆがみを補正するソフトを開発し、画像の改善を図った。
- ⑥天然の海水飛沫着氷と低温室で作成した塩水着氷のブライン排水路の構造を骨梁構造の形態計測システムを用いて解析した。その結果、ブライン排水路のネットワーク構造が着氷の成長速度に依存して変化することがわかった。
- ⑦海水飛沫着氷の観察記録と気象・海象データより、浜益港で着氷が発達する気象条件を明らかにした。
- ⑧以上の結果をふまえてツリーイングの技術を応用した着氷軽減対策を提案し、浜益港の実験灯塔において実地試験を行った。

4. 研究成果

本研究は海水飛沫着氷特有の性質であるブラインに着目し、海水飛沫の難着氷、飛沫着氷の成長制御、飛沫着氷の簡便な除氷方法の開発を目的とした。3年計画で研究を行い、以下の5つの成果があった。(1)低温室用ポータブルMRIシステムを用いて、海水飛沫着氷内部のブライン排水路を3次元データを取得した。磁場のゆがみを補正するソフトを開発し、画像の改善を図った。(2)天然の海水飛沫着氷と低温室で作成した塩水着氷のブライン排水路の構造を骨梁構造の形態計測システムを用いて解析した。その結果、ブライン排水路のネットワーク構造が着氷の成長速度に依存して変化することがわかった。(3)海水飛沫着氷の観察記録および状態観察と、気象・海象データを比較することにより、浜益港北防波堤の灯台に着氷が発達する気象条件を明らかにした。(4)試験膜材料の着氷力試験を行い、実験用の撥水性膜材料と親水性膜材料の着氷力の温度、塩分濃度依存性の評価を行なった。(5)以上の結果をふまえてツリーイングの登攀技術を応用した着氷軽減対策を提案し、浜益港北防波堤にある実験灯塔において実地試験を行った。この結果、スタティックロープを使った懸垂方法により冬期の波浪の打ち込みに対しても十分な耐波浪効果が得られることが実証された。

本研究で得られた結果は、単に海水飛沫着氷のブライン構造の解明と着氷防止対策の

提言にとどまらず、海水のブラインその他の構造の解明にも応用が可能である。近年は、ニュージーランドで超電導磁石のかわりに地球磁場を用いたNMRシステムが海水のブライン構造の解明に適応された例や、氷海域での油流出を想定して海水への油の拡散にMRIシステムを使用した例が報告されている。今後サハリンでの石油、天然ガス開発が本格化し、オホーツク海域における経済活動と大型タンカーの運航が予想されるが、氷海域で油流出事故が発生した場合、海水下や海水内へ油が拡散することにより油の回収作業は困難であり、オホーツク沿岸に多大な環境汚染を与えることは想像に難くない。本研究で開発したポータブルMRIシステムの手法をさらに発展させることにより、今後は上記に述べた研究への応用も可能となるであろう。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計13件)

1. Ozeki, T., Adachi, S., Wako, D., Field Tests of Superhydrophilic Pliable Sheet for Protection Against Sea Spray Icing. Proceedings of the 20th International Offshore and Polar Engineering Conference, 2010-TPC-1193, 6pp, (2010). (査読有)
2. Ozeki, T., Tamate, Y., Adachi, S., Izumiyama, K., Tazawa, T., Field Observation of Sea Spray Icing on Lighthouses and Ice Adhesion Test of Superhydrophilic Pliable Sheet for Deicing. Proceedings of 13th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, 4pp, (2009). (概要査読有)
3. Adachi, S., Ozeki, T., Katsumi, K., (他4名, 2番目, 5番目), Development of a compact magnetic resonance imaging system for a cold room. Review of Scientific Instruments, 80, 054701, 4pp, (2009). (査読有)
4. Kawamura, T., Ozeki, T., Wakabayashi, H., Koarai, M., Unique lake ice phenomena observed in Lake Inawashiro, Japan: Spray ice and ice balls. J. Glaciol., 55, 939-942, (2009). (査読有)
5. Ozeki, T., Yamamoto, R., Adachi, S., Kose, K., NMR Imaging of Sea Spray Icing and Ice Adhesion. Proceedings of 12th International Workshop on Atmospheric

Icing of Structures, 6pp, (2007). (概要
査読有)

[学会発表] (計 27 件)

1. T.Ozeki, S.Adachi, D.Wako, Field Tests of Superhydrophilic Pliable Sheet for Protection Against Sea Spray Icing. 20th International Offshore and Polar Engineering Conference, China, June 20-26, (2010).

2. T.Ozeki, T.Sakamoto, S.Adachi, D.Wako, K.Izumiyama, Laboratory experiment of sea spray ice accretion on hydrophilic and hydrophobic pliable sheets. International Symposium on Snow, Ice and Humanity in a Changing Climate, Sapporo, June 21-26, (2010).

3. 尾関俊浩, 安達聖, 田澤辰典, 防波堤灯台に成長する海水飛沫着氷の観測と難着氷シートによる着氷軽減実験. 日本自然災害学会学術講演会, 岐阜, 9月16-17日, (2010).

4. 尾関俊浩, 坂本拓麻, 安達聖, 若生大輔, 氷海水槽における海水飛沫着氷の実験-親水性と撥水性シート材料-. 雪氷研究大会, 仙台, 9月26-29日, (2010).

5. T.Ozeki, Y.Tamate, S.Adachi, K.Izumiyama, T.Tazawa, Field Observation of Sea Spray Icing on Lighthouses and Ice Adhesion Test of Superhydrophilic Pliable Sheet for Deicing. 13th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Swiss, September 8-11, (2009).

6. T.Ozeki, S.Adachi, T.Haishi, K.Kose, S.Handa, Development of a Compact MRI System in -5°C Cold Room for Visualization of Sea-spray Icing. 9th International Conference of Magnetic Resonance Microscopy, Germany, September 3-7, (2007).

7. T.Ozeki, R.Yamamoto, S.Adachi, K.Kose, NMR Imaging of Sea Spray Icing and Ice Adhesion Tests of Pliable Polymer Sheets for Deicing. 12th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Yokohama, October 9-12, (2007).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

尾関 俊浩 (OZEKI TOSHIHIRO)
北海道教育大学・教育学部・准教授
研究者番号：20301947

(2) 研究分担者

巨瀬 勝美 (KOSE KATSUMI)
筑波大学・数理物質科学研究科・教授
研究者番号：60186690

泉山 耕 (IZUMIYAMA KOH)
独立行政法人海上技術安全研究所・流体
部門氷海技術研究グループ・グループ長
研究者番号：40358403

能條 歩 (NOUJOU AYUMU)
北海道教育大学・教育学部・准教授
研究者番号：20311524

(3) 連携研究者

()

研究者番号：