

# 船体着氷を知る 船体着氷はどのように発生する？ その対策は？

尾関俊浩

北海道教育大学

# 船体着氷を知る

通常の「着氷」：過冷却水滴が物体に衝突

樹氷

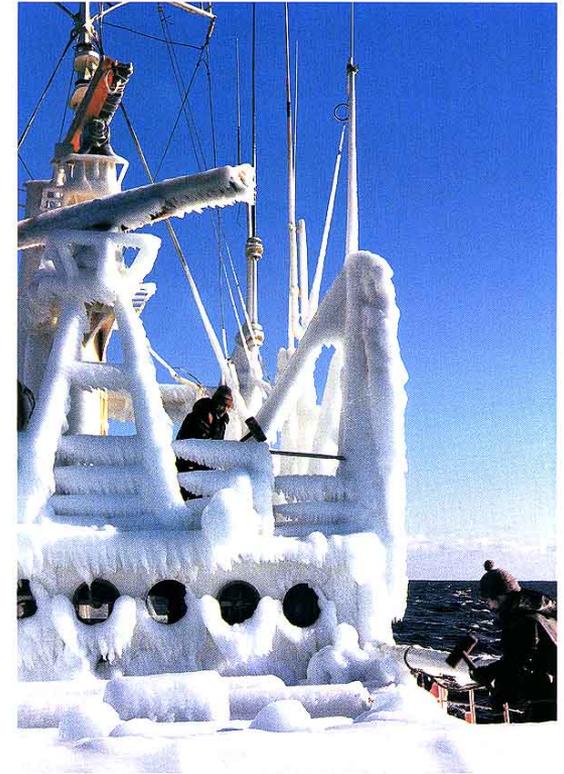
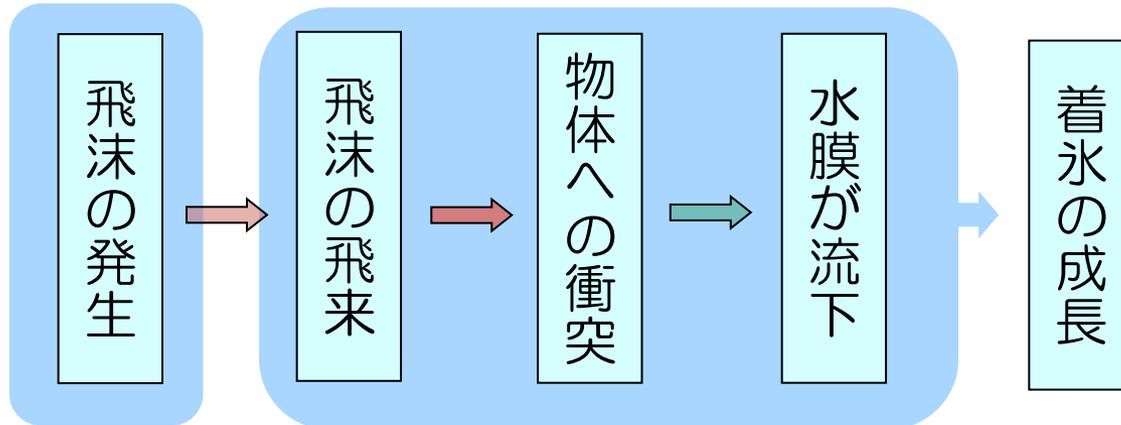
粗氷

雨氷

樹霜

大気着氷

「船体着氷」はしぶき着氷がその主要因



激しい着氷にみまわれた船橋付近

シップアンドオーシャン財団出版物より



GRENE-Arctic

# 海水飛沫着氷サンプルの採取と観察



船首ブルワークから1日後に採取した海水飛沫着氷. (写真は2013年のサンプル)

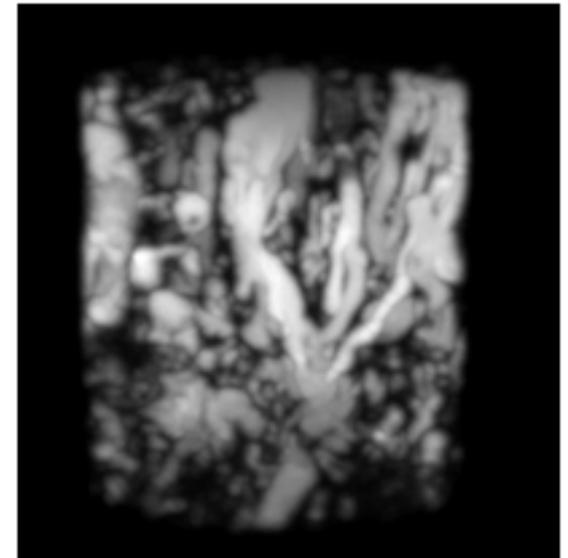
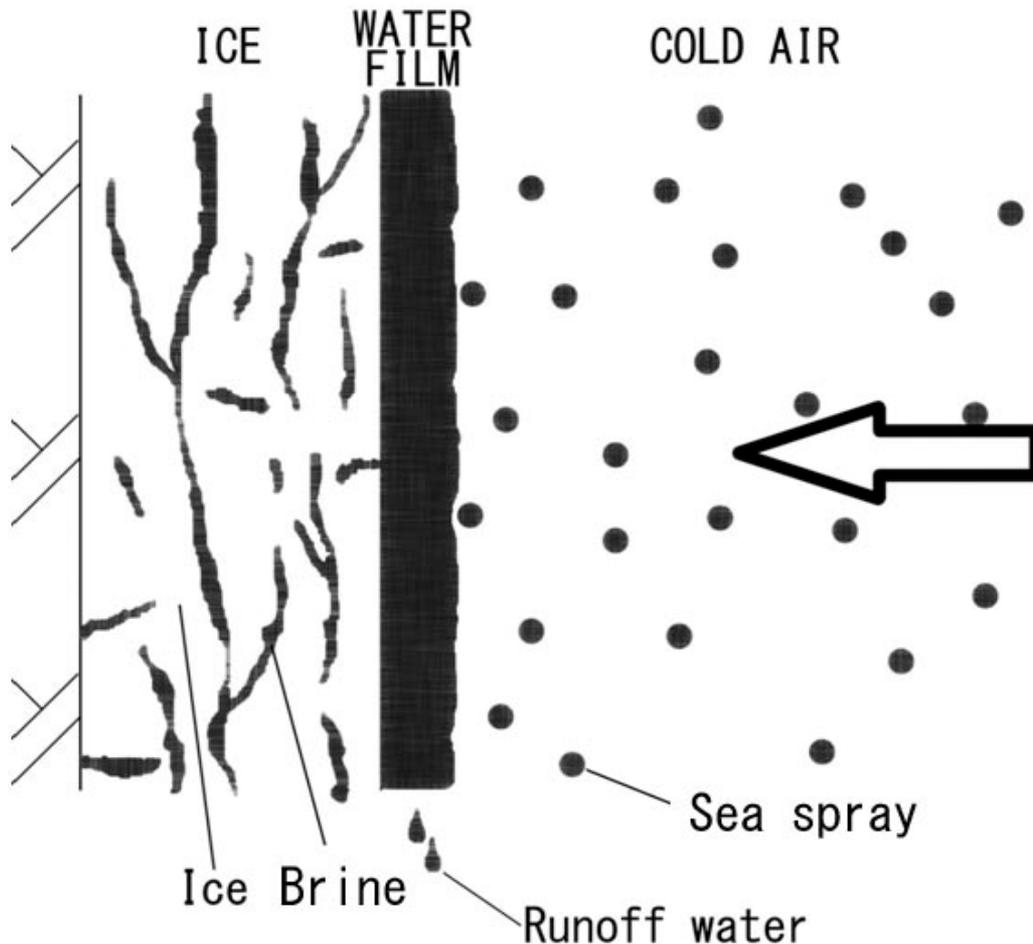
GRENE-Arctic



実験用防波堤灯台から採取した海水飛沫着氷の厚片. 層構造が見える.

船体着氷と防波堤灯台の着氷は同種である

# 海水飛沫着氷の成長機構



MRIによる着氷内の  
投影画像. 白がブライ  
ンの抜けた空隙を表  
す. つらら状の着氷.

- 未凍結の海水(ブライン)

# 着氷量推定に必要な情報

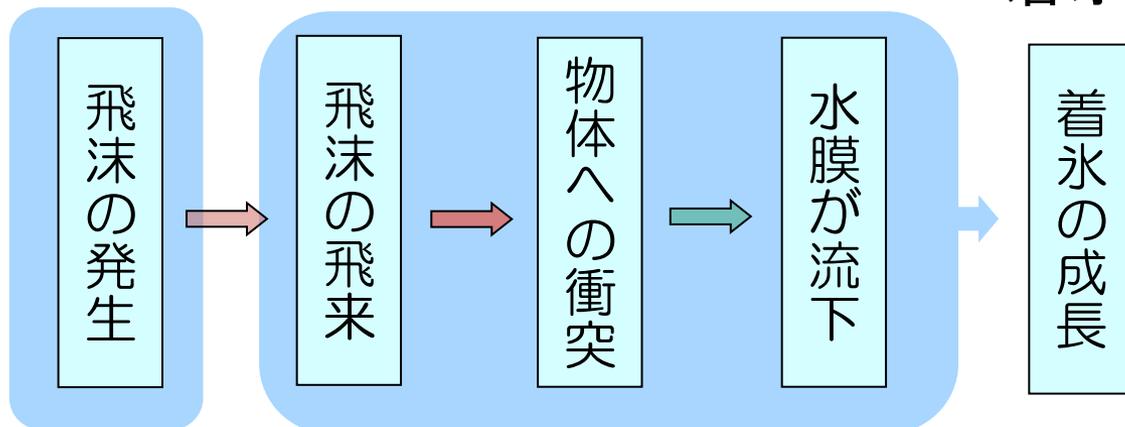
## 「大気着氷」

樹氷

粗氷

雨氷

樹霜



マッコネンモデル(後述)

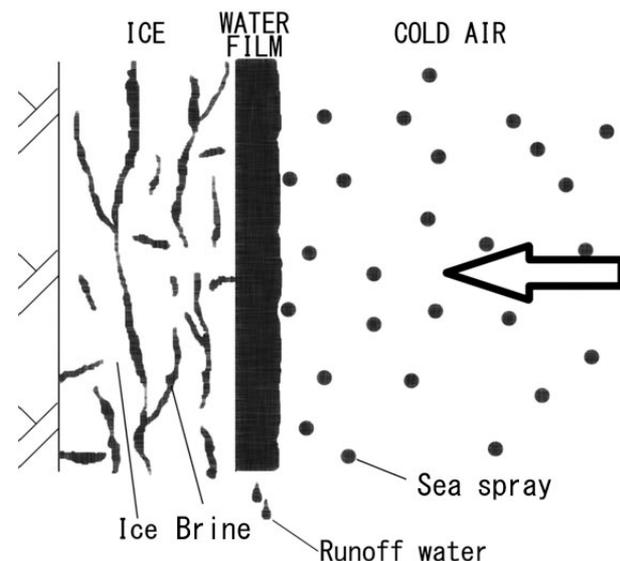
## 「船体着氷」

・しぶき量 ・ブラインの割合 ・降雪の影響

着氷量の見積もりが大きく変わってしまう要素

## 大気着氷について

メソスケール気象  
インプット = モデル(WRFなど)  
マッコネンモデル  
着氷成長速度の計算



# 海水着氷研究は至難の課題

影響因子が多くかつ複雑:多数の計測データの集積・分析が必須

着氷海域では、周辺条件が異なる累積結果を取得:因子分析は困難  
分析には同一船舶での無着氷期間での海水打ち込み計測が必要

自由な運航が許される**研究船の自由な利用**が不可欠

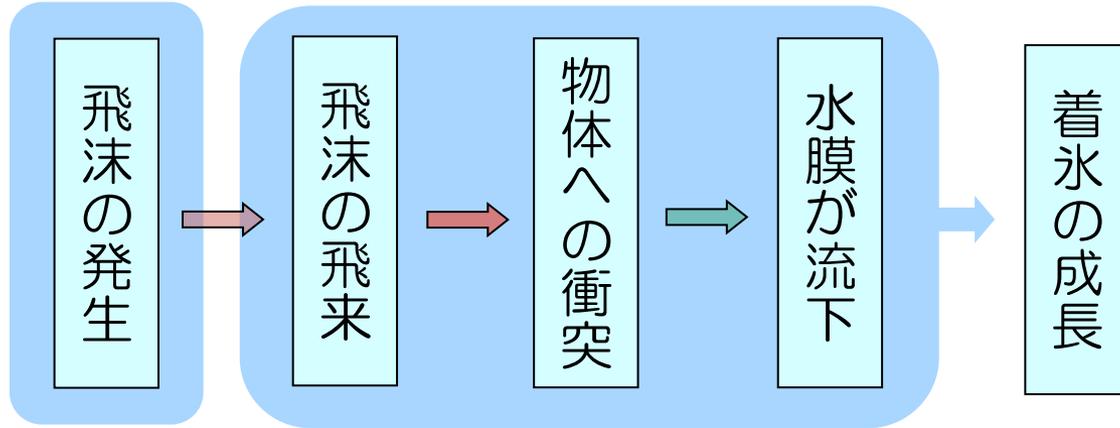
- 理論研究:単純形状物体の2次元問題
- 数値計算:比較的単純な形状物体に対する簡易化した境界条件での計算
- 模型実験研究:実験施設の制約とスケールの効果が問題

基礎研究と具体的な着氷防除対策とのギャップが極めて大きな課題

- 着氷防止対象物毎の対策研究
- 既存研究成果を組み込んでの船種毎の着氷危険指標の作成

# 着氷防止対象物毎の対策研究

## 「船体着氷」



着氷が  
発達しやすいのか  
船のどこに成長？

対策  
難着氷シート  
透明発熱体

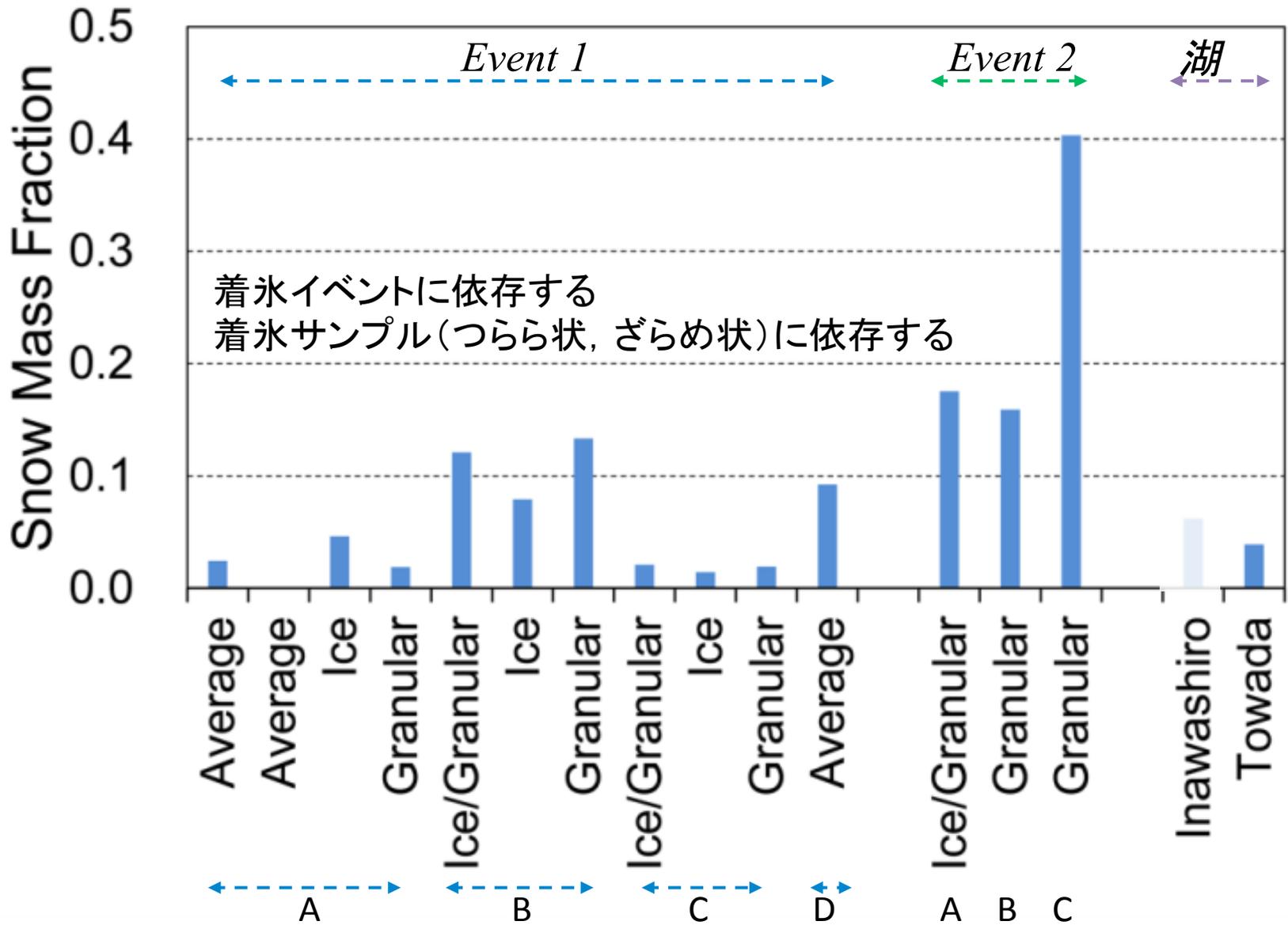
・しぶき量    ・ブラインの割合    ・降雪の影響

鉛直分布  
粒径分布

着氷サンプル  
雪氷用MRI

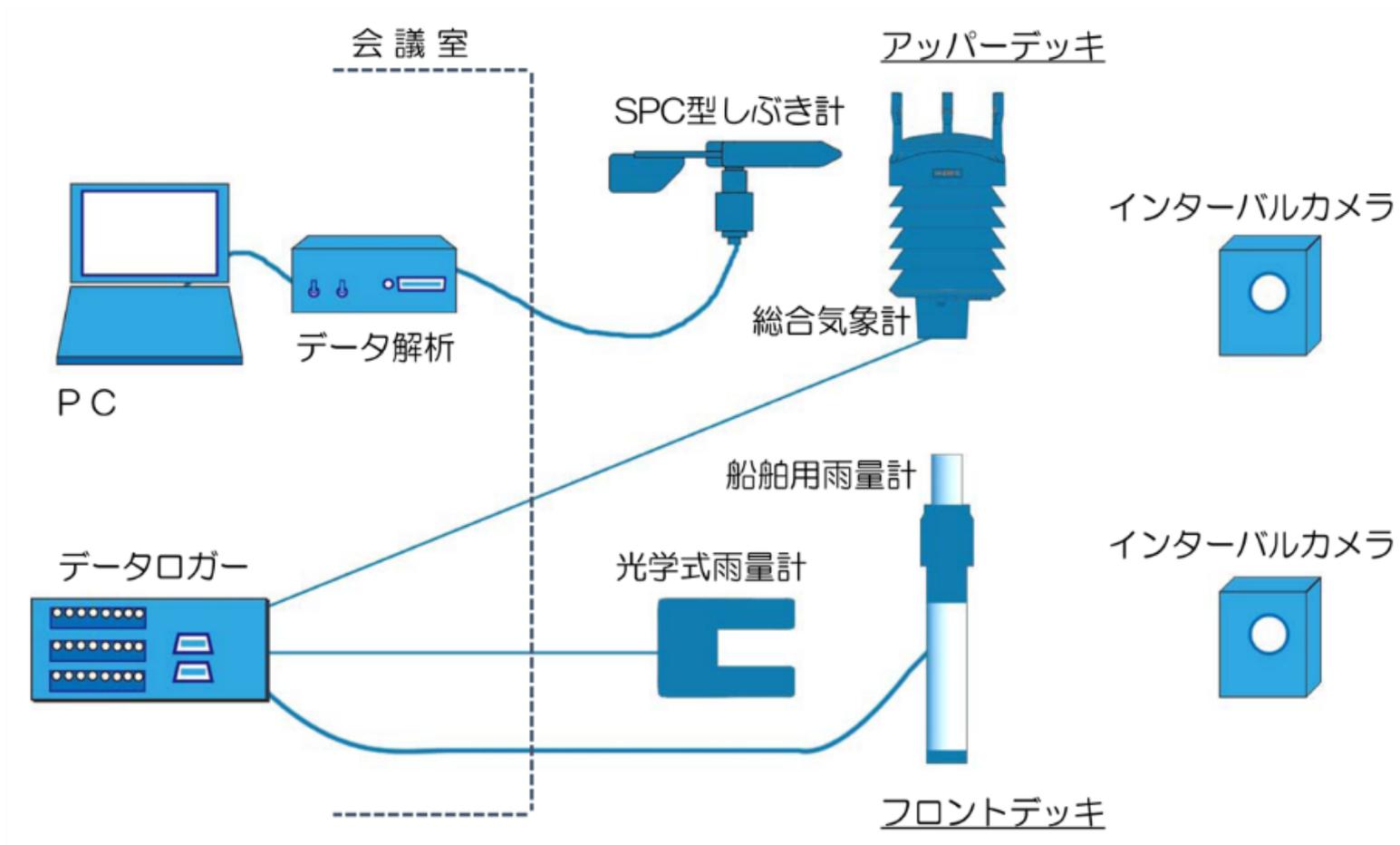
酸素同位体比で  
海水・降雪起源

しぶき量計測  
システムの開発



酸素同位体比の解析の結果, 着氷の成長への降雪の寄与が大きい場合があることが示された。

# 船体着氷およびしぶき計測の計測機器（巡視船そうやの例）

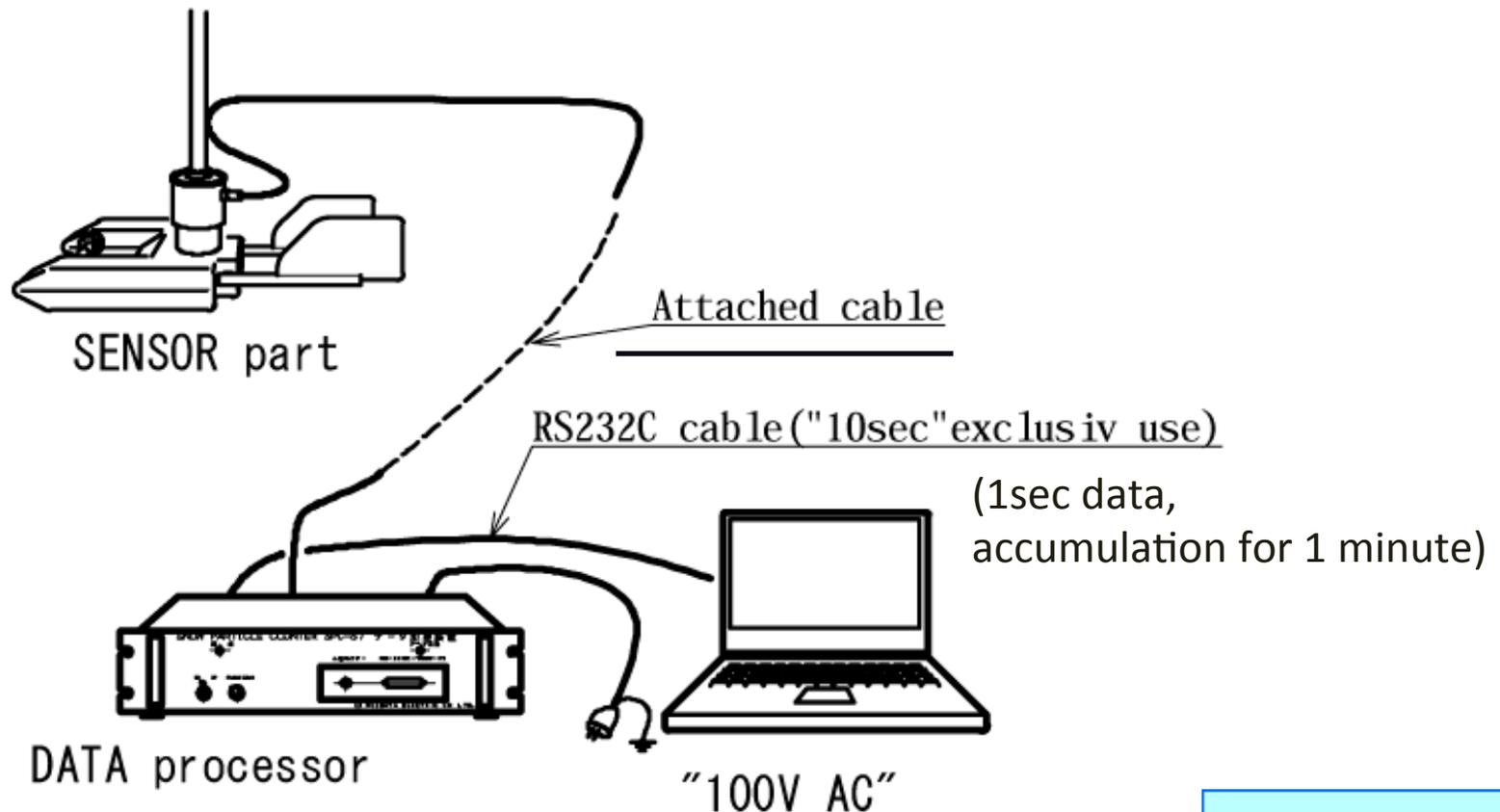


＋簡易動揺計測システム

# 船体への打ち込み海水飛沫の計測方法開発

## 飛雪計(雪の粒径と量の計測)の応用

### 計測システムの概要 (SPC-S7S)



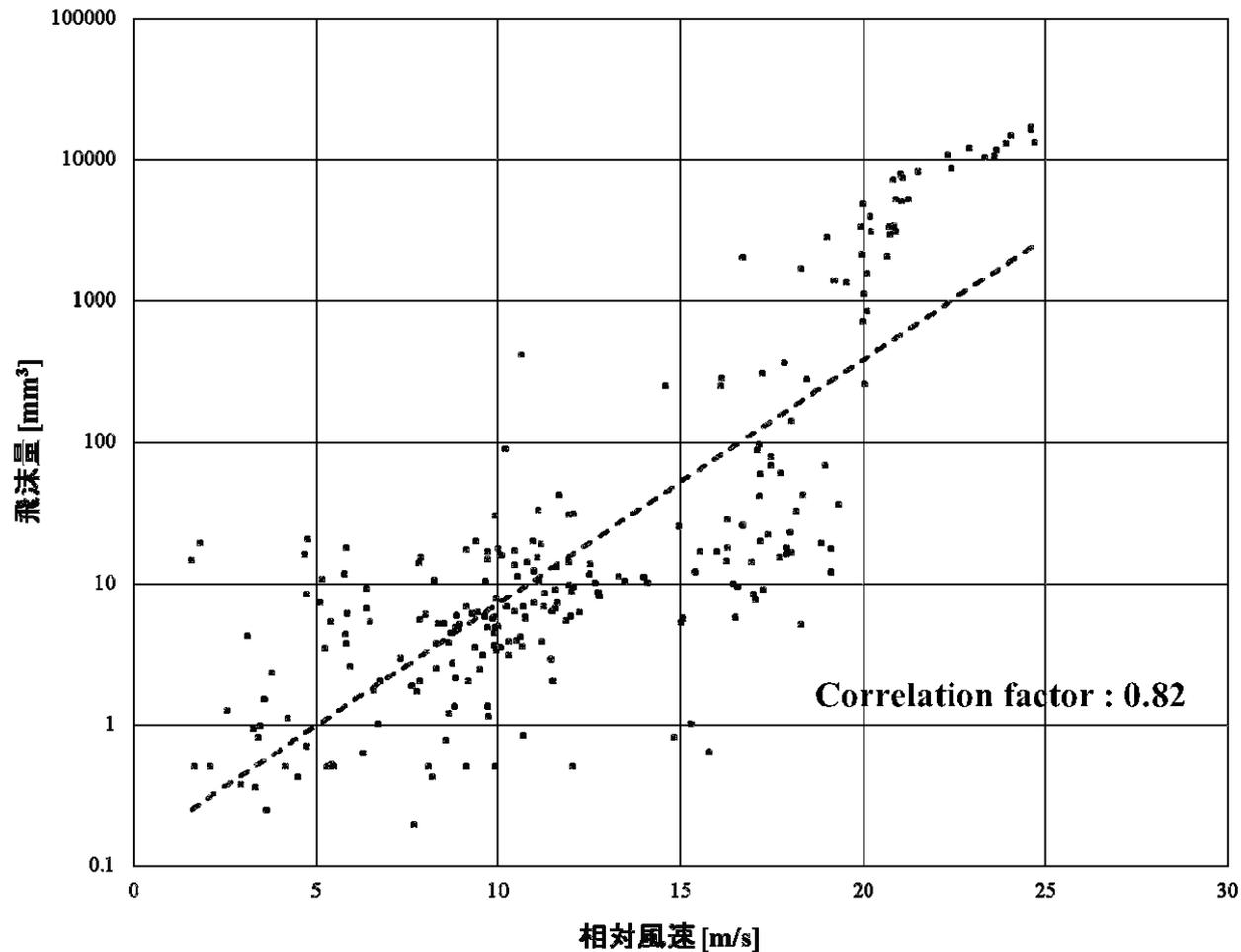
# 実船計測例

## CCGS Louis S. St-Laurentの例

### SPC・カメラ・加速度計配置図

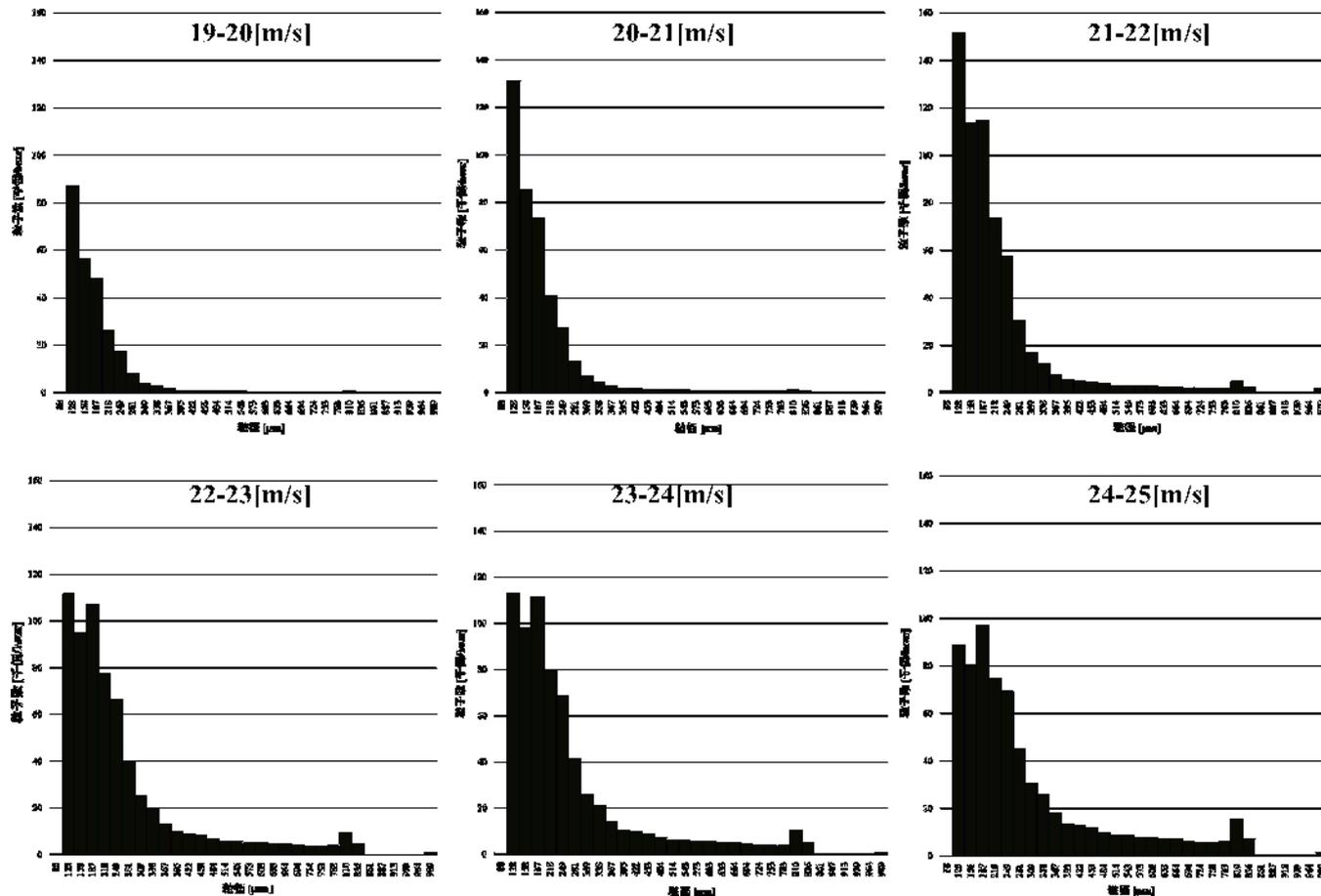


# しらせSPC JARE-55, JARE-56について解析



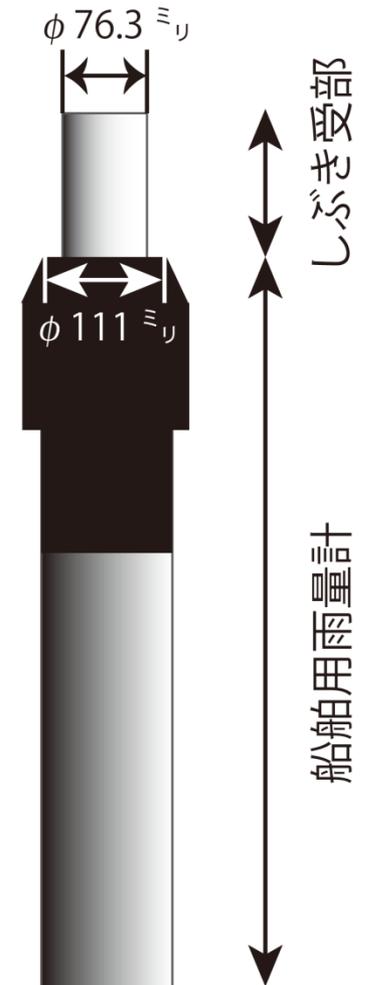
- 06甲板で観測された海水飛沫量と相対風速の相関図

# 相対風速毎の1時間当たりの平均粒径分布



- 風速が上がると粒径が大きくなる

SPC型しぶき計(左)と雨量計型しぶき計(右). 南極観測船しらせに取り付けた様子.

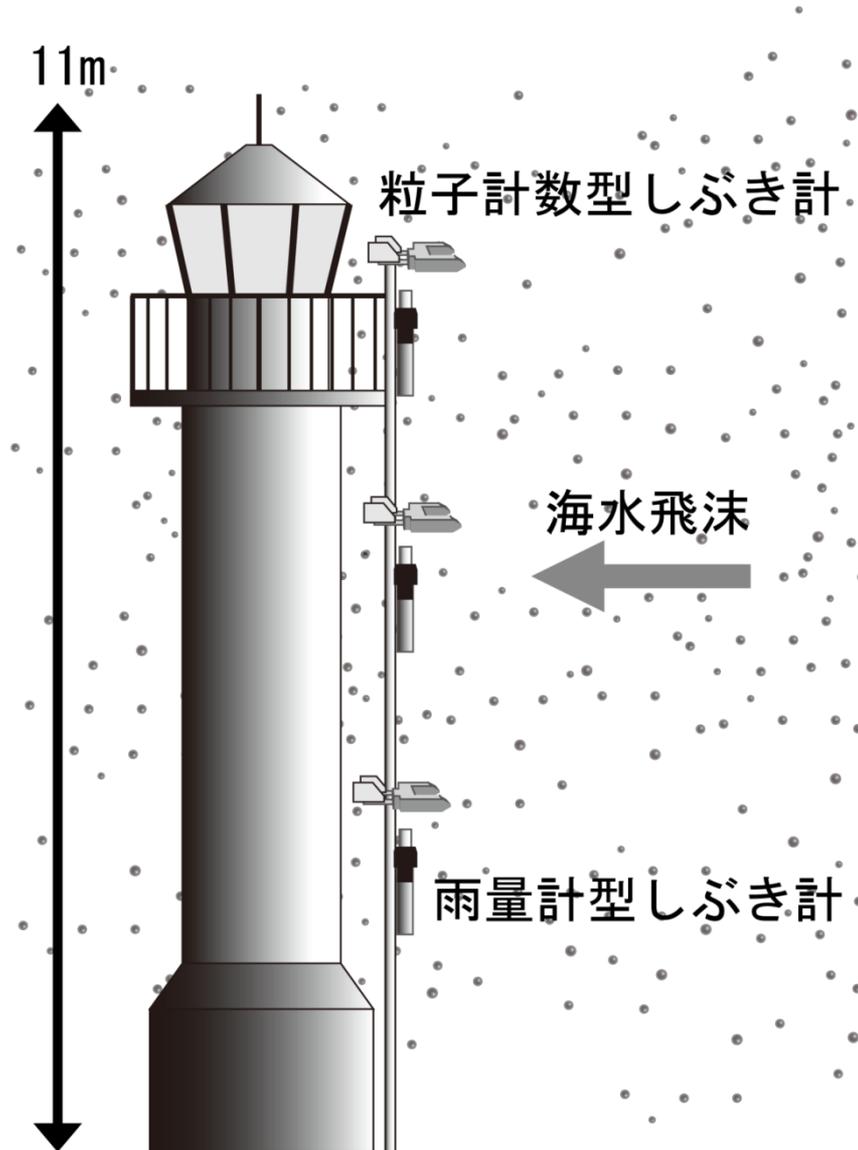


雨量計型しぶき計は, 船舶用雨量計にしぶき受部を取り付けた構成.

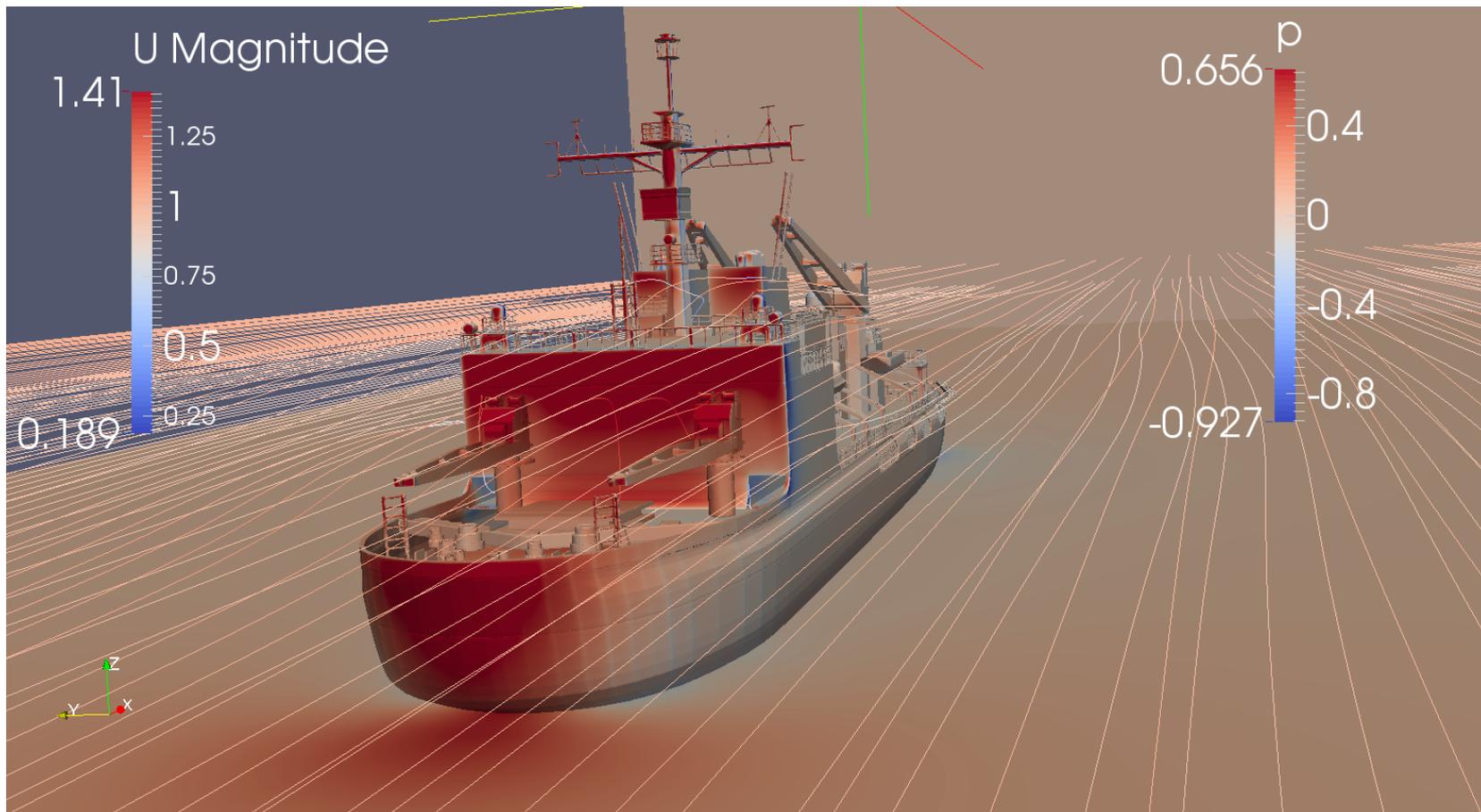
SPC型しぶき計は高時間分解能. 雨量計型はSPC型しぶき計よりも波の打ち込みにも強く, また安価であることから, SPC型しぶき計と組み合わせて海水飛沫の鉛直分布観測への応用が期待される.

# 海水飛沫の計測機器

基本的には灯台も船舶も同様



# 船体まわりの気流



CADデータがない場合  
上部構造物が重要，内部情報入らない=多数の写真

10ノット

# 着氷量の推定について

前述のような不確定要素がある

日本  
着氷注意報  
海上着氷警報

北米  
着氷指標  $PR$

$$PR = w_s \rho_s (T_f - T_a) / (1 + 0.4(T_w - T_f))$$

$w_s$ : 相対風速  
 $T_f$ : 結氷温度  
 $T_a$ : 気温  
 $T_w$ : 海水温

$$PR \approx w_s \rho_s (T_f - T_a)$$

# 海水飛沫着氷の成長速度

マッコネン モデル

$$\frac{dM}{dt} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 w A v$$

$dM/dt$ : 着氷増加量 ( $M$ : 質量)

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ : 衝突率, 捕捉率, 凍結率

$w$ : 雲水量 (この場合しぶき量)

$A$ : 投影面積,  $v$ : 粒子速度

熱収支 (主に)

$$Q_F = Q_C + Q_E + Q_R + Q_S$$

$Q_F$ : freezing,  $Q_C$ : convective heat,  $Q_E$ : evaporative heat,

$Q_R$ : radiative heat,  $Q_S$ : sensible heat

$$Q_C = h(T_F - T_a)$$

$$h = N u k_a / L \quad (Nu = 3.0 Re^{0.50} \quad \text{円筒形に対して})$$

$T_F$ : 結氷温度,  $T_a$ : 気温

本研究: 着氷断面積の増加量

Parameter:  $W_S(T_F - T_a)$ , 風速, 結氷温度, 気温

GRENE-Arctic

# 防波堤灯台(実験塔)の着氷画像を解析



原画像



抽出

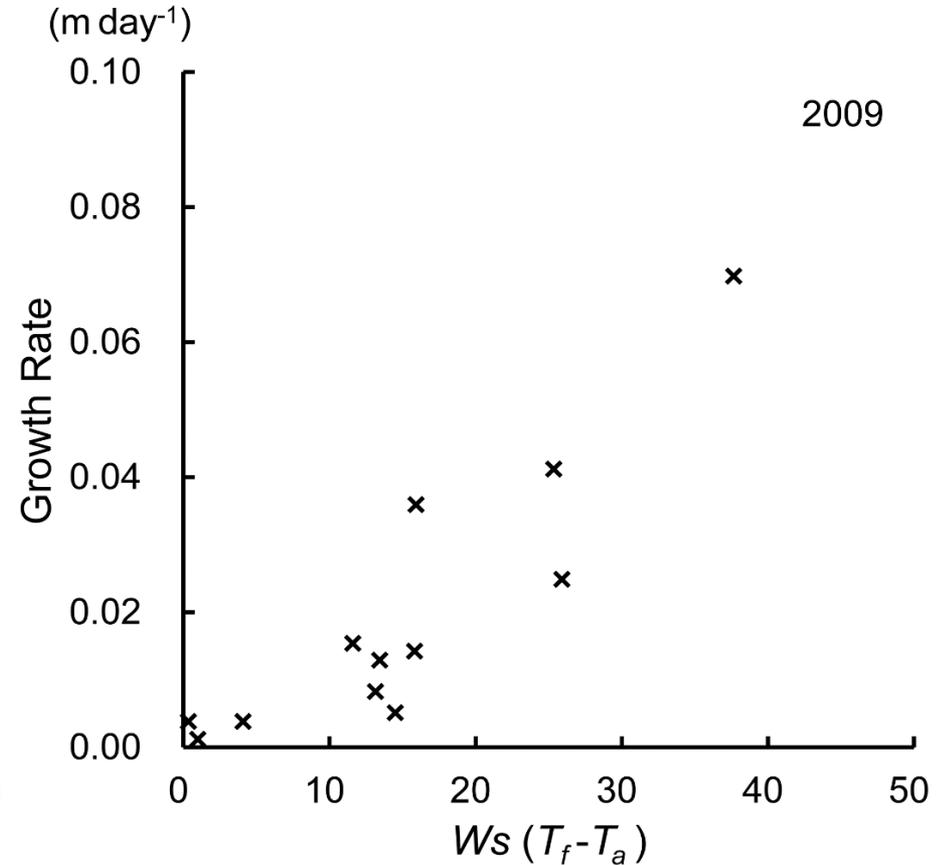
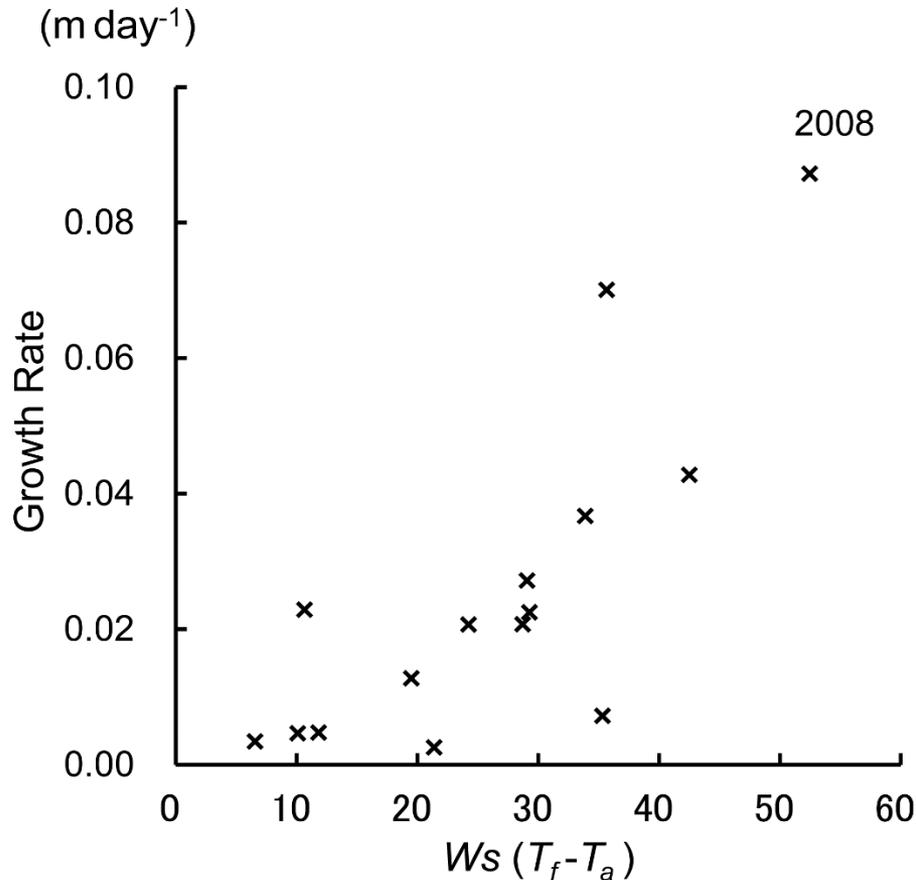


無着氷時との  
差分



着氷断面積

## 着氷指標と着氷断面面積増加量の比較



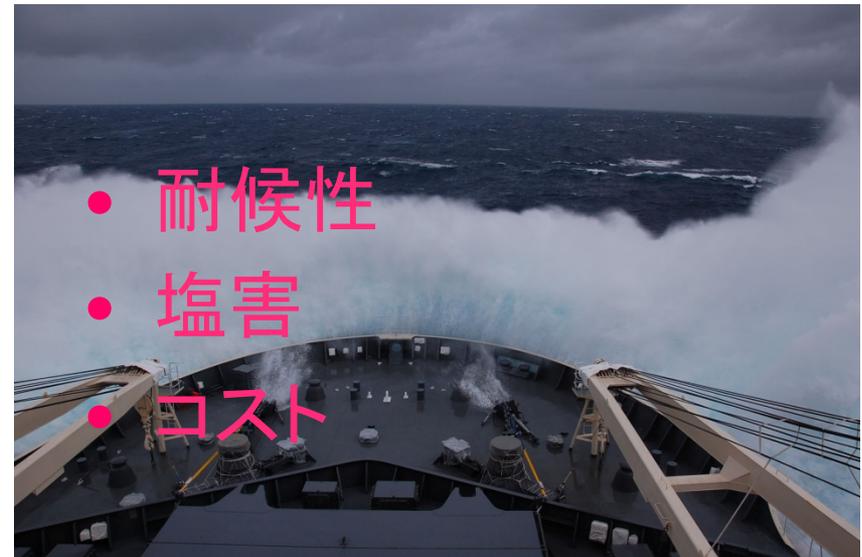
ただし春に近づくと外れてくる傾向. 着氷の絶対量は対象に依存する.

# 着氷対策

Ex: 機能性繊維カバーの活用

## テスト材料に必要な特性

- 着氷力
- 可動性
- 引っ張り強度



# 実験に使用した膜材料

太陽工業製

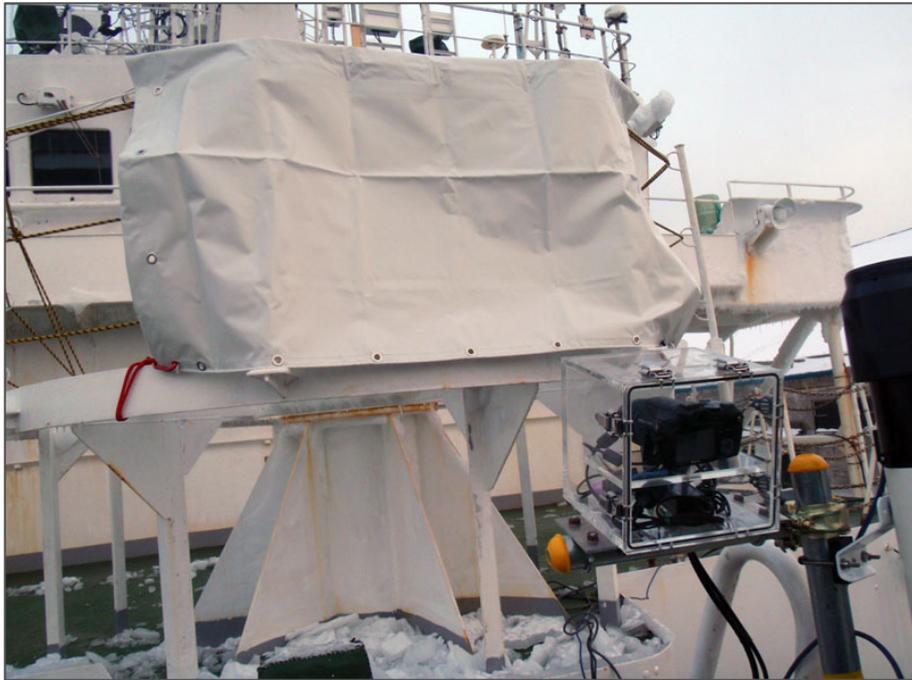


シート	厚さ (mm)	接触角	Ra ( $\mu\text{m}$ )
FGT (ハイブリット)	0.6	110~ 120°	4.1
SCC (酸化チタン)	0.7	< 30°	1.6
PVC 通常テント材	0.55	—	—

ハイブリット: PTFE+TiO<sub>2</sub>

- ・直径30 cm, 高さ2 mの塩ビパイプに固定
- ・着氷の初生, 成長と剥落の観察
- ・実験終了後, 氷を剥離させて重量, 厚さ, 塩分濃度の測定

# 巡視船「そらや」での機能性繊維カバー有効性検証実験



- 高さを変えて着氷試験を行う
- 布はルーズに張られており、フラッタリングを起こす

材料

TiO<sub>2</sub> coating

- 海水飛沫に対して低着氷力
- 柔軟性と強度を兼ね備える

GRENE-Arctic

## 実験例

同一の甲板で着氷がみられた例

24 to 25 February 2013 (Left: Front deck).



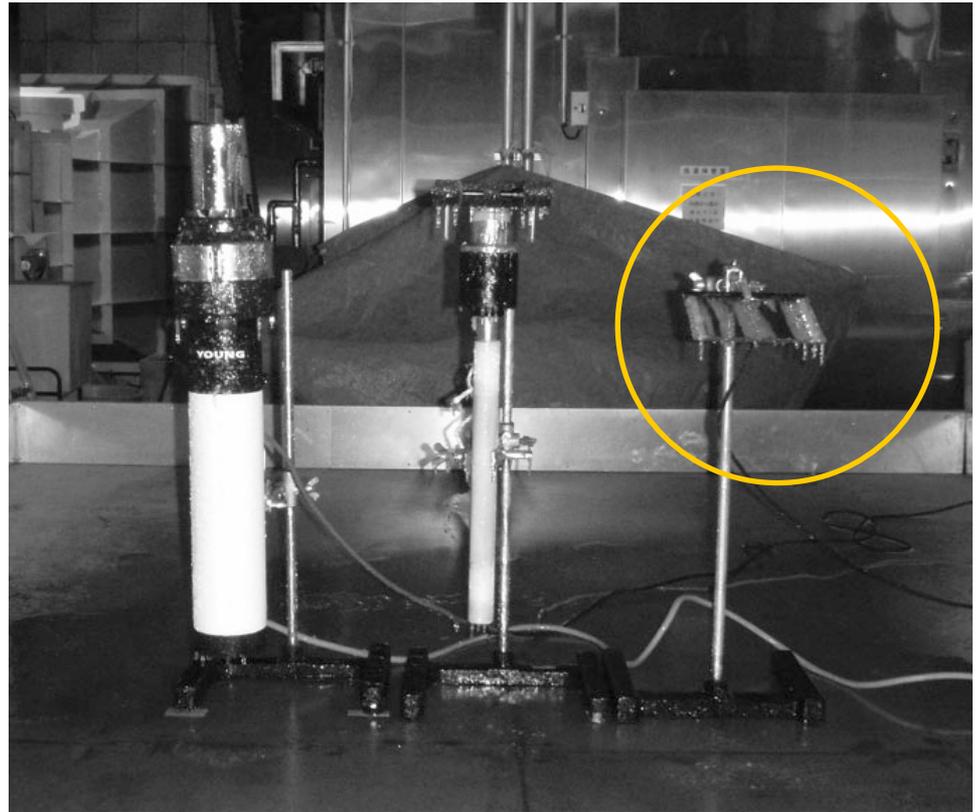
シートへの着氷はほとんどない  
難着氷性が期待される. また除氷が容易である

# ヒーティング機器

発熱で着氷を防止し続ける  
には電力が必要  
＝場所を限定して使用

ポリカーボネイトに  
透明発熱シート

形状への対応  
高強度  
発熱量調整  
透過性



## まとめ

- 着氷指標の活用

### 着氷雪防除

- 機能性繊維カバーの利用超撥水性膜, 吸収発熱膜
- 重要個所に用いるヒーティング機器の開発