

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 8 日現在

機関番号：11201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24710001

研究課題名(和文) 氷海 - 波浪水槽装置を用いた大気 - 海水間の熱交換メカニズムの解明

研究課題名(英文) Investigation of heat exchange mechanism between air and sea in a sea-wave tank

研究代表者

小笠原 敏記 (OGASAWARA, Toshinori)

岩手大学・工学部・准教授

研究者番号：60374865

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円、(間接経費) 1,080,000円

研究成果の概要(和文)：地球温暖化による海水温の上昇および海水の融解による塩分濃度の低下が進行すれば、深層循環に影響を及ぼし、地球の気候に大きな変化を及ぼすことが懸念される。そこで、氷海 - 波浪水槽を用いた実験を行い、海水生成過程における海水温度、塩分濃度および氷厚の時間変化の特性を明確にする。その結果、水温 2.2 が氷厚や塩分濃度の劇的な変化を引き起こす臨界温度と推察される。さらに、グリースアイスでは、大気からの冷却作用が氷層下に及び、海水温の低下によるフラジルアイスの生成を促し、氷厚および塩分濃度の増加を生む。一方、パンケーキアイスでは、冷却が氷盤に作用し、その影響が氷厚の成長よりも面積の拡大に及ぶと考察される。

研究成果の概要(英文)：The presence of sea ice in the polar regions plays an important role in the world's climate system, and it is therefore important to understand the process influencing the formation and deformation of ice fields. The objective of our research was to investigate characteristics of the thermodynamics of frazil and grease-pancake ice in a wave field. We used a wave tank installed in a cold room to generate grease-pancake ice. The surface temperature was measured by using an infrared thermography. We concluded that the water temperature and wave period are an important factor to determine the growing and evolving of frazil ice. Furthermore, the temperature of pancake periphery became higher than that of its center, which indicates that the heat of solidification is caused when the frazil ice froze to its periphery.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

キーワード：地球温暖化 海水熱交換

1. 研究開始当初の背景

北極海は気候変動の影響が顕著であり、地球上の他地域に比べて急速な温暖化の傾向が現れやすく、地球温暖化の“加速器”と呼ばれている。Comiso ら (2008) によると、一年氷および多年氷の面積の減少率がこの 10 年で 2.5% から 10% 以上も増加したことが報告されている。この結果、多年氷のニラスと呼ばれる壊れにくいシート状の氷からパンケーキアイスと呼ばれる円盤状の氷へと氷況が変化し、日本の面積の約 3 倍もの海面が露出されるようになった。その変化は、海水の移動を容易にさせるだけでなく、太平洋から北極海へと輸送される暖流を増加させ、海水の減少を更に加速させるため、海水の生成が得難い循環を生み出している。Seymour ら (2003) は、北極海の平均氷厚の変化と夏季の融解量の間に強い相関があり、その影響が気候変動に起因していることを示唆している。さらに、アメリカ国立大気研究センター (NCAR) の数値シミュレーションによると、北極海の夏季における海水は、2040 年までにほぼ消滅することを予測している。極域の海水端は、複雑な動力学システムであり、上述したように海水条件が気候変動に重大な影響を及ぼしているため、海水端の力学的・熱力学的特性を解明し、気候変動予測モデルに正確な海水生成・発達メカニズムを取り込むことの緊急性が増している。海水の多くは、乱れによって成長する。その過程は、(1) 風と波による乱れによってフラジルアイスを生じ、(2) フラジル・グリースアイスの氷層を形成、(3) 波動場ではフラジルの結氷によりパンケーキアイスを生じ、のような段階に分けられる。これまでも波動場におけるフラジル・グリースアイスの生成・発達過程に関する力学的な研究は、数多く行われて来た (例えば、Martin and Kauffman, 1981)。一方、パンケーキアイス生成過程での熱力学的特性に関する研究は、Rosa ら (2011) によってパンケーキアイス中の塩分濃度および表面温度の実験を行っているが、海面温度分布やその熱量並びに塩分濃度との関係を定量的に評価した研究は希有と言える。

2. 研究の目的

海水が減少する極域における海水の生成・成長過程の海面温度分布について、任意の気象・海象場を設定可能な氷海 - 波浪水槽を用いた実験を行い、高解像赤外線サーモグラフィから得られる連続画像データを基に、フラジル・グリースアイスおよびパンケーキアイスの各氷況下における温度分布特性を明らかにする。さらに、海水生成過程における熱交換メカニズムを解明し、その熱量を算出することによって、実海水域の熱交換量の推定を行う。特に、次の 3 項目を主な目的とする。
 (1) パンケーキアイス成長時における表面温度分布の特性：フラジル・グリースアイス

状態からパンケーキアイスが形成され、その成長過程における表面温度を高解像度赤外線サーモグラフィによる連続撮影によって詳細な変化の様子を捕らえる。特に、これまでにパンケーキアイスの中心部よりも周縁部で温度が高くなる事実が、一時的な現象なのか、あるいは連続的な現象なのかを明らかにし、その分布特性を知る。

(2) パンケーキアイスの成長過程における熱交換メカニズムの解明：パンケーキアイスは、周縁部が捲れ上がり、その部分で大気との熱交換が盛んに行われていると推察されるが、その周縁部の熱量を正確に捕らえるため、サーモグラフィデータよりパンケーキアイスの重心から同心円状に均等な面積になるように分割し、どの程度の熱量が大気中に放出されているのかを定量的に求め、その熱交換メカニズムを明らかにする。

(3) 大気 - 海水間の熱交換量の推定：実験で得られた気温、水温、堆積厚 (氷厚) および海面温度の各データを基に熱量を算出する。熱量は熱の移動を意味することから、その値が正の場合、大気から海水面に熱を吸収し (吸熱)、負の場合、海表面から大気に熱を放出している (発熱) と見なすことができ、その算出量から実海水域における大気 - 海水間の熱交換量の推定および将来予測を試みる。

3. 研究の方法

(1) 氷海 - 波浪水槽装置：実験は、図 1 に示すような氷海 - 波浪水槽装置を用いて行われた。その装置は、冷凍室 ($L=19 \times H=2.5 \times W=2.8\text{m}$) 内にプランジャー式造波装置付き風洞水槽 ($L=17 \times H=1.2 \times W=0.5\text{m}$) を設置し、冷凍室内の温度を常温 -20 、風速を $0 \sim 20\text{m/s}$ 、波形諸量を最大波高 20cm 周期 $0.5 \sim 4.0$ 秒の規則波、およびスペクトラム選択による不規則波に設定することが可能である。

(2) 実験条件：実験条件は、冷凍室内の温度を -8 、水深を 80cm、塩分濃度を約 35psu

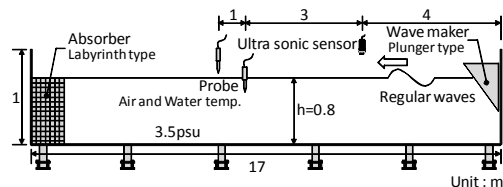


図 1 氷海 - 波浪水槽装置の概要

表 1 各周期の波高・気温および水温

T [s]	H [cm]	T _a []	T _{sw} []
1.2	3.61	-7.64	-2.14
1.4	3.41	-8.08	-2.13
1.6	3.55	-8.33	-2.13
1.8	4.27	-8.36	-2.08

の様に設定し、周期 $T=1.2, 1.4, 1.6$ および 1.8 秒の 4 種類の規則波を造波させた。表 1 には、各周期における波高を示す。なお、波高は造波板 ($x=0\text{m}$) から 4m の位置で超音波水位センサーによって水面変位を計測し、造波開始から 2 分後の安定状態における 1 分間の平均値とした。

(3) 気温・水温・海水の観測：気温および水温は、外付けプラチナ式プローブによる温度モニタリングシステムを用いて 10 分間隔の連続計測を行った。気温の計測位置は $x=8\text{m}$ の地点で水面上約 20cm 、水温は同水平地点の水深約 10cm で行われた。各周期の観測時間は、 $14\sim 16$ 時間であり、観測中の気温および水温の平均値を表 1 に示す。海面温度は、 $x=7\text{m}$ の位置で赤外線サーモグラフィを用いて、1 時間毎に $20\text{cm}\times 35\text{cm}$ の面的な計測を行った。同時に、ガラス張りの水槽側面から氷厚を計測した。また、周期 1.2 秒および 1.8 秒において、パンケーキアイスの表面温度も同カメラを用いて、パンケーキアイス発生後から 1 時間毎に撮影した。なお、解像度はそれぞれ 0.135 および $0.156[\text{cm}/\text{pixel}]$ であった。

4. 研究成果

(1) 気温・水温および海面温度：図 2 は、各周期におけるフラジルアイスおよびグリースアイスの氷況が観測された時間を示す。周期 1.8 秒では、造波開始時の水温が約 -1.6 と他の周期より 0.3 ほど高く、この初期水温がフラジルの状態を長く継続させた要因と考えられる。一方、グリースアイスの状態は、周期 1.2 秒を除けば、7 時間ほどその状態を持続した後、パンケーキアイスの生成が始まる。また、周期 1.2 秒の場合、グリース状態が 5 時間と他の周期より短いことがわかる。この要因として、グリースアイスは、シャーベット状のドロドロとしたフラジルアイスの集合と見なすことができる。つまり、振動回数が多くなる短周期ほど水面の乱れによって、フラジルアイスが活発に生成されるため、液相から固相に相転移する時に凝固熱として熱を放出させる。その結果、この温度上昇を生み出し、パンケーキアイス生成過程への移行を早めたものと推測される。

(2) 氷況と水温・氷厚の関係：図 3 は、各氷況の継続時間中の平均水温 T_{sw} と周期 T の関係を示す。平均水温は周期に依らず、フラジル(F)、グリース(G)、グリース・パンケーキアイス(G-F)の順に氷況が変化すると連れて低下する。開水域にフラジルアイスが点在しているような海面状態の場合(水温 -2 以上)、フラジルアイスは海面のみで生成されるが、グリースアイスおよびグリース・パンケーキアイスになると、水中からフラジルアイスが生成されることを目視により確認している。したがって、 -2 付近が水中からフラジルアイスの発生するための境界温度と予想され、水温がフラジルの鉛直方向の生成

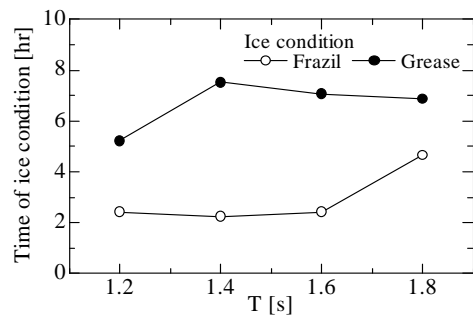


図2 フラジルおよびグリースアイスの氷況観測時間と周期の関係

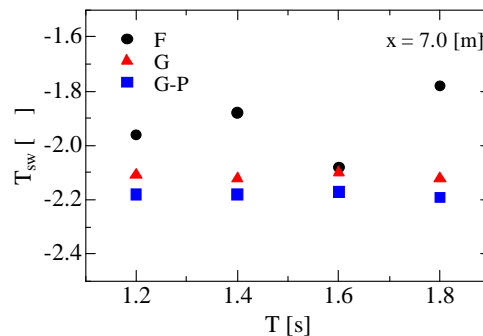


図3 各氷況における平均水温 T_{sw} と周期 T との関係

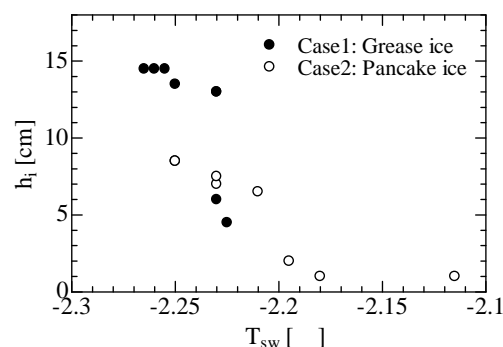


図4 水温 T_{sw} と氷厚(堆積厚) h_i の関係

領域に強い影響を及ぼすものと推察される。次に、水温 T_{sw} と氷厚(堆積厚) h_i の関係を図 4 に示す。両ケース共に水温が -2.2 を下回ると h_i の値が急激に増加する。特に、Case1 のグリースアイスでは、水温 -2.25 で 15cm 程度の堆積厚となり、Case2 のパンケーキアイスに比べて、2 倍程度厚くなる。グリースアイスは、フラジルアイスが集積して海面にスープ状の層をなすため、大気の冷熱がフラジルアイス間の海水を媒介として、グリースアイスよりも下方の水中にまで伝達し易いと考えられる。その結果、海中でフラジルアイスが大量に生成されるため、堆積厚が増加する。一方、パンケーキアイスは、円盤状の氷塊となることから、海面が氷の板で覆われた状態となるため、大気の冷熱がパンケーキアイスよりも下方に伝達し難く、パンケーキアイスの面的な成長および強度の増加に費やされると推測される。

(3) 海水面の熱量：海面温度 T_{sf} を用いて、単位時間・単位面積あたりの熱量 Q_i を $Q_i = c\rho_i h_i dT_{sf}/dt$ と表す。ここで、 c ($= 0.487 \text{ cal/g}\cdot\text{K}$) は氷の比熱、 ρ_i ($= 0.917 \text{ g/cm}^3$) は氷の密度および t は計測時間である。また、 Q_i の値が正の場合、大気から海水面に熱を吸収し(吸熱)、 Q_i の値が負の場合、海表面から大気に熱を放出している(発熱)と見なすことができる。そこで、各氷況における発熱および吸熱の熱量を算出し、周期との関係を示したものが図 5 である。フラジルアイスの氷況では、周期に依らず発熱および吸熱共に非常に小さくなる。一方、グリーン・パンケーキアイスの氷況では、長周期になるほど大きくなり、周期 1.8 秒ではフラジル時の 15 倍の熱交換が行われるようになると考えられる。また、Shen ら (2001) の実験結果によると、パンケーキアイスの大きさは、低波高かつ長周期になるほど大きくなると報告されていることから、その大きさと熱量に正の相関があることが容易に理解できる。

(4) パンケーキアイスの熱力学的特性：図 6 は、赤外線サーモグラフィによって撮影された周期 1.2 秒および 1.8 秒におけるパンケーキアイスの表面温度分布を示す。なお、パンケーキアイス生成から 5 時間後の温度分布

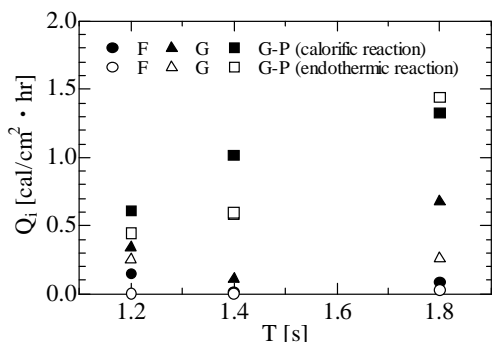


図 5 発熱・吸熱の熱量 Q_i と周期 T の関係

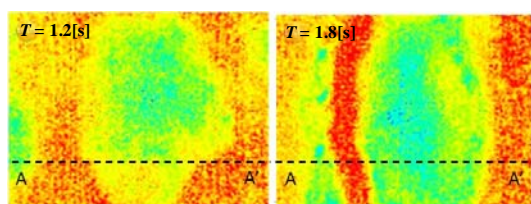


図 6 周期 1.2 秒および 1.8 秒におけるパンケーキアイスの各表面温度分布

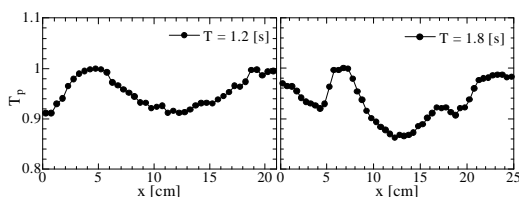


図 7 図 6 に示した A-A' 断面の最高温度で無次元化した温度分布の空間変化

であり、寒色系(青色)から暖色系(赤色)に従って温度が高くなることを表している。緑色が多く分布している部分がパンケーキアイスに相当し、赤色の部分が開水面に相当する。開水面は当然ながら氷部分に比べて温度が高く、パンケーキアイスの表面温度と大きな温度差がある。また、パンケーキアイスの表面温度は、その周縁部分で温度が高く、中心部になるに連れて低くなることわかる。そこで、図 6 に示した A-A' 断面の温度 T_p の空間変化を図 7 に示す。なお、 T_p の値は各周期の A-A' 断面の最高温度で無次元化して求めたものである。フラジルアイスが堆積するパンケーキアイス周縁部付近の T_p の値は、中心部分よりも高くなり、周期 1.8 秒では、その傾向が顕著に表れており、中心部に比べて 1 割強高くなることわかる。

(5) パンケーキアイスの温度分布の特性：図 8 は、温度分布画像の面積に占めるパンケーキアイスの面積率 R_p の時間変化を示す。 R_p の値は時間の経過と共に増加するが、40% を越えるようになると、その傾きに変化が見られるようになり、 R_p が 40% より小さいときに比べて、その傾きが大きくなる。つまり、パンケーキアイスの面的な成長速度が速くなったと言える。そして、造波開始から 30 時間後には、 R_p の値は 90% を越えており、海面がパンケーキアイスに覆われたことを示す。次に、パンケーキアイスの面積率 R_p と海面温度 T_{sf} の関係を図 9 に示す。 R_p の値が増加するに連れて、海面温度が緩やかに減少し、 $R_p=40\%$ の海面温度に比べて、海面が大部分覆われた $R_p=80\%$ の海面温度は 2 程度低くなる。これは、図 10 に示す海面温度分布を見ると、パンケーキアイス周縁部分に比べて中心部分の温度が低くなっているため、パンケーキアイスが成長し、周縁部分の熱交換が弱まったと言える。つまり、個々のパンケーキアイスの成長およびパンケーキアイス同士の結氷が進行し、パンケーキアイスからシート状の氷へと成長して、周縁部分と大気との熱交換が小さくなったためと推察される。

(6) まとめ：海水域における気温、水温および海面温度など各種温度計測の実験に関する主要な結果は、以下の通りである。

短周期の波動場では、フラジルアイスの生成が早く、液相から固相への相転移時に凝固熱として熱を放出させて海面温度の上昇を引き起こし、パンケーキアイス生成過程への遷移を早めることがわかった。

水温と周期がフラジルアイスの生成・成長を決定付ける主要な因子であることを示唆した。

グリーンアイスでは、大気からの冷却作用が氷の下の海水に及び、海水中の水温低下によってフラジルアイスの生成を促進し、グリーンアイスの堆積厚および塩分濃度の増加に結び付くことが明らかになった。

パンケーキアイス成長時では、パンケーキ相互の衝突に伴う周縁部のフラジルアイ

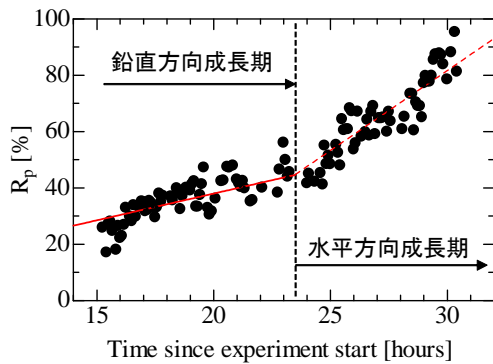


図8 温度分布画像の面積に占めるパンケーキアイスの面積率 R_p の時間変化

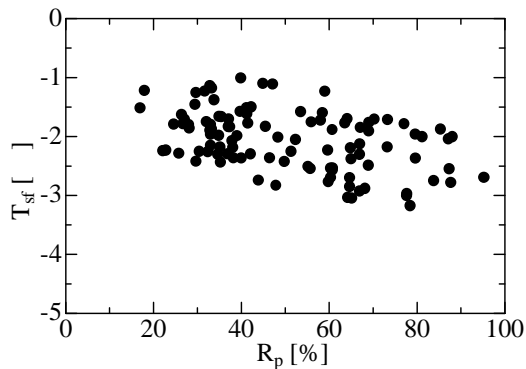


図9 パンケーキアイスの面積率 R_p と海面温度 T_{sf} の関係

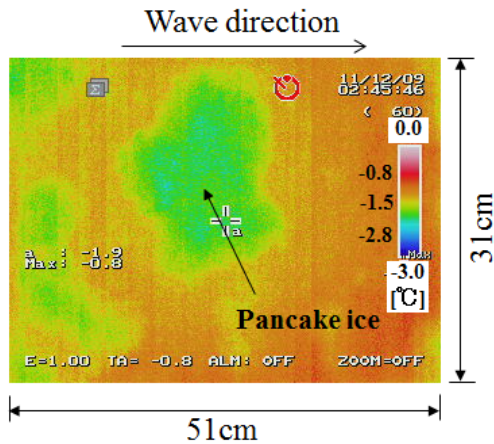


図10 赤外線ビデオカメラで撮影された温度分布画像

ス堆積部分で熱交換が盛んに行われ、その周縁部分の温度が高くなることを明確にした。

水温 -2.2 が海氷域の氷厚や塩分濃度の劇的な変化を引き起こす臨界温度と推察される。

パンケーキアイスでは、海域に占める氷盤の面積率が $40 \sim 60\%$ を越えるようになると、冷却作用が氷盤に影響し、氷厚の成長よりも面積の拡大および氷盤の強度を増すようになるものと考察される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

T. Ogasawara, A. Ogasawara and S. Sakai: Thermodynamics on Grease-Pancake Ice Growth in a Sea Ice-Wave Tank, ISO PE, pp.1247-1251, 2013, 査読有

田中和磨, 川口秀一, 小笠原敏記, 堺茂樹, 海氷の弾性特性および伝播する波の減衰率に関する実験性, 査読無, 東北支部技術発表会概要集, CD-ROM, 2013

小笠原敏記, 伊藤良太, 小笠原歩, 越田尚樹, 堺茂樹: 海氷生成過程における温度および塩分濃度の特性に関する実験, 査読有, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, pp.I_1261-I_1265, 2012

〔学会発表〕(計 3 件)

T. Ogasawara, A. Ogasawara and S. Sakai: Thermodynamics on Grease-Pancake Ice Growth in a Sea Ice-Wave Tank, Proceedings of the Twenty-third International Offshore and Polar Engineering, Anchorage, Alaska, 2013.7.4

田中和磨, 川口秀一, 小笠原敏記, 堺茂樹, 海氷の弾性特性および伝播する波の減衰率に関する実験性, 東北支部技術発表会, 仙台市, 東北大学, 2013.3.8

小笠原敏記, 伊藤良太, 小笠原歩, 越田尚樹, 堺茂樹: 海氷生成過程における温度および塩分濃度の特性に関する実験, 第 59 回海岸工学講演会, 広島市, 広島国際会議場, 2012.11.14

〔その他〕

岩手大学地域防災研究センター
<http://rcrdm.iwate-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小笠原 敏記 (OGASAWARA, Toshinori)
 岩手大学・工学部・准教授
 研究者番号: 60374865