

パンケーキアイスの生成過程に関する基礎的研究

岩手大学 学生会員 ○北館 咲
岩手大学 正会員 堺 茂樹
岩手大学 笹本 誠
小笠原敏記

1. はじめに

海洋では北大西洋グリーンランド沖と南極近くのウェッデル海で表層水が深層まで沈降するという現象が見られる。沈降した海水は深層にある海水を押しわけながら全海洋の深層を巡りつつ表層へと上昇し、太平洋やインド洋の表層に運ばれ、再び深層水の形成領域へと戻ってくる。これを「海洋深層大循環」といい、地球の気候に影響を与えていると考えられている。この海洋深層大循環の原動力となっているのが高緯度域で冷却され重くなった表層水の沈降である。高緯度域ではフラジルアイス（氷晶）が、波の作用によって起こるフラジルアイス間の衝突による圧力および気象などの影響を受けパンケーキアイス（氷盤）へと生成され、氷海を形成している。図1はパンケーキアイスの写真であり、縁がめくれあがった形状が特徴で、日本では蓮の葉に似ていることから「蓮葉氷」と呼ばれている。パンケーキアイスはその周縁部で熱交換をし、塩分を排斥しながら成長していくため、周縁部での塩分濃度の増加により重くなることで深層へと沈降する原因の1つと考えられている。塩分濃度の増加が周縁部のみで発生することから、その海域全体での塩分増加量はパンケーキアイスの総円周長に依存する。しかし、パンケーキアイスがどの程度の大きさにまで成長するのかは今だ知られておらず、その過程や生成条件も未知である。そこで、本研究ではフラジルアイスからパンケーキアイスへと成長する過程に注目し、フラジルアイスが互いの衝突によってのみ成長すると仮定して、パンケーキアイスの大きさに関わる特性を明らかにすることを目的とした。



図1. パンケーキアイス
(出典:村井俊幸氏のホームページより)

2. 計算手法および計算条件

ポリプロピレン粒子をフラジルアイスに見立て、水槽に浮かべて簡単な水理実験を行い、波動場での粒子の運動を観察したところ、波の峰で密、谷で疎の状態となることを視覚的に捉えることができた。そこで、この様子を以下の手順で理論的に数値解析する。

フラジルアイスは流体運動に完全に追従すると仮定し、波動の線形理論を用いてフラジルアイス（以下、粒子と記す）の運動の軌跡を追うこととする。x軸上に等間隔(Δx)で計算点を配置し(x_{0n} , $n=1\sim 500$)、この点を中心として運動する粒子の軌跡を(1)式で求めると、図2のような円軌道を描く。

$$x_n = \frac{H}{2} \cos(kx_{0n} - \omega t) + x_{0n} \quad \dots (1)$$
$$z_n = \frac{H}{2} \sin(kx_{0n} - \omega t)$$

ここで、 x_n : n番目の粒子のx座標、 z_n : n番目の粒子のz座標、 H : 波高、 k : 波数、 ω : 角振動数、 t : 時間を表す。

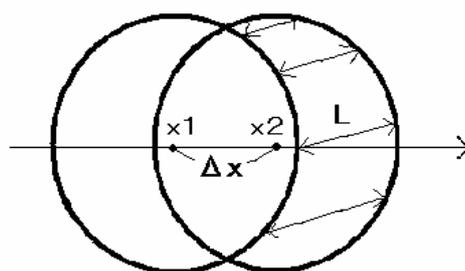


図2. 円軌道

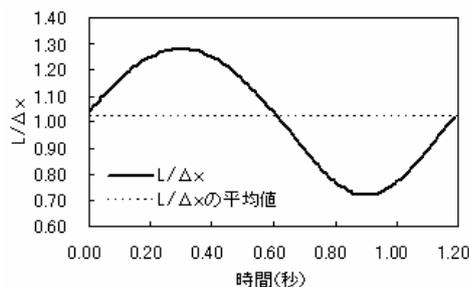


図3. 時間に対するL/Δxの変化とその平均値

隣り合った2つの粒子間の距離を L とすると、 Δx に対する比率は(2)式になる。

$$\frac{L}{\Delta x} = \sqrt{1 + \frac{(kH)^2}{4} - kH \sin(kx_{0n} - \omega t)} \quad \dots (2)$$

図3は $L/\Delta x$ の時間的変化とその1周期の平均値を表している。時間とともに比率が変動していることがわかる。つまり、 x 軸上で Δx 離れた2点を中心として運動する2つの粒子は常に一定の距離を保ったまま運動するのではなく、その距離を伸縮させながら運動していることになり、それを模式図で表すと図4のように峰で密、谷で疎の状態となっている。解析では時々刻々の2粒子間の距離を求め、伸縮の比率で計算するが、初期条件として配置した時点での粒子間の距離はすでに伸縮しているため、初期の粒子間の距離を基準とすることはできない。そこで、(2)式の平均値(図3点線)を求めその値を基準として伸縮の比率を求めた。

2粒子間で伸縮の比率の最小値が一定の値(結合条件値)未達だったとき、その粒子は最小の比率を保ったまま結合すると仮定し、以下の手順で計算を行う。

- ①ある一点で結合が起こる。
- ②結合した粒子とその隣の自由に動く粒子との伸縮の比率が条件を満たした場合、自由に動いていた粒子を結合させる。
- ③②を繰り返し、最終的に条件を満たさない粒子が存在したところで計算を終え、結合した粒子間のすべての長さをパンケーキアイスの長さとする。

3. 計算結果

図5は周期 $T=1.2$ (秒) のときの、 $H=0.10$ (m)、 0.05 (m)、 0.02 (m) の各波高に対する伸縮の比率の違いを表している。この図から波高の高さによって変化の割合に違いがあることがわかる。そこで、各波高に任意の結合条件値を定め、結合条件値とパンケーキアイスの長さの関係を解析する。

図6~8は各波高における、結合条件値と波長に対する氷の割合の関係を表している。それぞれ氷はある大きさまで成長し、それ以上は大きくなれないという値を求めることができた。また、その大きさは周期、波高、結合条件値で違うことが明らかとなった。

4. まとめ

これまで未解明であったパンケーキアイスの発生過程およびその大きさに関して、線形理論による考察を行った。その結果、パンケーキアイスはフラジールアイスの互いの衝突によってできると仮定すると、その大きさには限界があり、その大きさは波浪条件および結合条件に依存することがわかった。結合条件はフラジールアイスの結晶形あるいは気象条件に依存すると考えられ、今後こうした点についても検討を進める予定である。

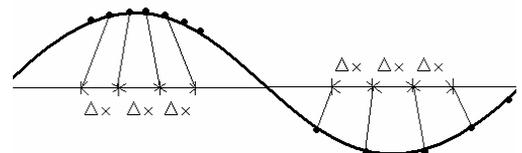


図4. 波形上の点と Δx の模式図

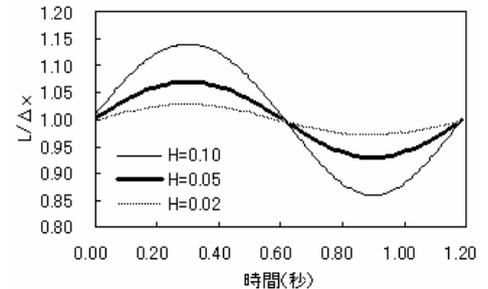


図5. 各波高に対する $L/\Delta x$ の違い

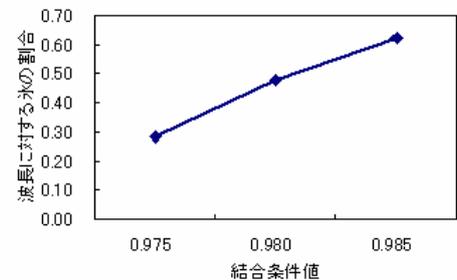


図6. 波長に対する氷の割合 ($H=0.02$)

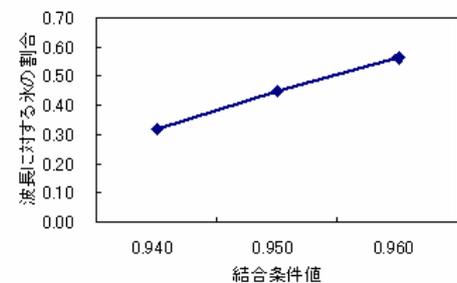


図7. 波長に対する氷の割合 ($H=0.05$)

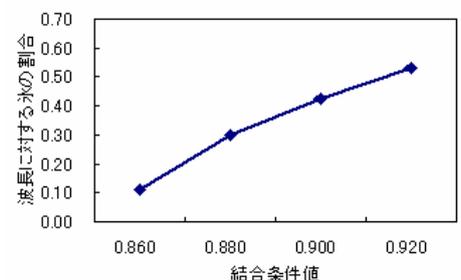


図8. 波長に対する氷の長さ ($H=0.10$)