

# 球形粒子モデルを用いたパンケーキアイス形成条件に関する研究

岩手大学 学生会員 ○伊東孝徳, 正会員 堺茂樹, 正会員 松林由里子

## 1. はじめに

高緯度地域では多様な海氷が見られるが、パンケーキアイスの形成は、微小なフラジルアイス（粒子）同士の固結によるものだと考えられている。パンケーキアイスは波浪条件や温度の影響を受け成長する。その過程で塩分を排斥し、海洋大循環の原動力となりうるため、気候変動を考える上で重要な指標であるが、パンケーキアイスの生成条件と波浪条件の関係については未解明な点も多い。

本研究では、Kitadate ら（2008）の提案した立方体粒子モデル、伊東ら（2011）の円柱モデルを参考に、粒子形状を球形に変更し、実際の現象に適用可能なモデルを開発するとともに、パンケーキアイス生成条件と実験値の比較を行う。

## 2. パンケーキアイス生成条件

Kitadate ら（2008）、伊東ら（2011）と同様に、波浪場におけるフラジルアイス 2 粒子の固結条件をパンケーキアイス生成条件とし、波力と液架橋力の比較によって決定する。2 粒子の運動は、波浪場の水粒子運動に追従すると仮定して、運動方程式により、波力は式（1）のように表すことができる。

$$F_{wave} = m \frac{d^2 L}{dt^2} \quad \dots (1)$$

ここで、 $m$  はフラジルアイス粒子の質量、 $L$  は粒子間距離、 $t$  は時間である。質量  $m$  は一定とするため、波力は粒子間距離  $L$  の関数となる。粒子の間には図-1

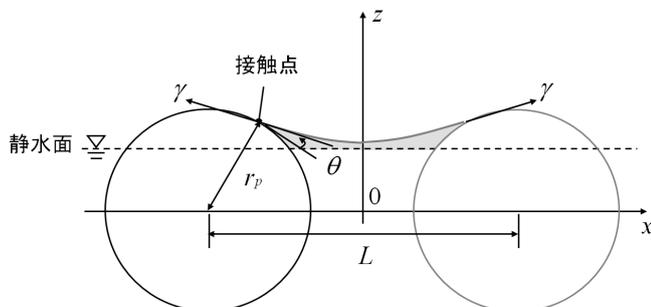


図-1 球形 2 粒子の断面

のように液架橋水面が形成され、粒子間引力である液架橋力が作用する。波峰において、2 粒子を引き離す波力より、2 粒子を引き付ける液架橋力が大きくなる波浪条件では、パンケーキアイスが生成されると考える。

## 3. 計算方法

本研究では、直径が等しい 2 粒子間の液架橋力を求めるために、まず Pozrikidis（2010）と同様の方法で液架橋水面の計算を行う。水表面では一般にヤング・ラプラスの式が成り立つ。静水面より上昇した水面高さを  $z=z(x,y)$  とすると、式（3）となる。

$$\gamma \kappa = \Delta \rho g z \quad \dots (3)$$

ここで、 $\gamma$  は表面張力、 $\kappa$  は曲率、 $\Delta \rho$  は空気と海水の密度差、 $g$  は重力加速度である。液架橋の計算を 3 次元場で行うため、 $z$  を用いて曲率  $\kappa$  を式（4）のように表す。

$$\kappa = \frac{\nabla^2 z + z_y^2 z_{xx} - 2z_x z_y z_{xy} + z_x^2 z_{yy}}{(1 + z_x^2 + z_y^2)^{3/2}} \quad \dots (4)$$

ここで、下付きの添字  $x, y$  は 1 階偏微分、 $xx, yy, xy$  は 2 階偏微分を表す。式（3）を支配方程式として、中心差分で離散化し、収束計算を行う。

さらに、液架橋が球の周りに形成されることを考慮して図-2 で示すような双極座標系を導入している。分割メッシュ数は  $64 \times 64$  とする。

境界条件として、固体表面と液面の接触点に、本

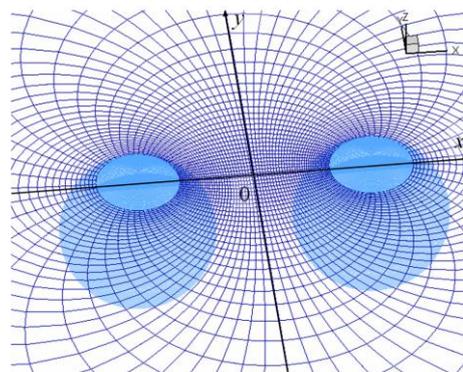


図-2 双極座標系

キーワード フラジルアイス、パンケーキアイス、液架橋力

岩手県盛岡市上田 4-3-5 岩手大学工学部社会環境工学科・019-621-6448

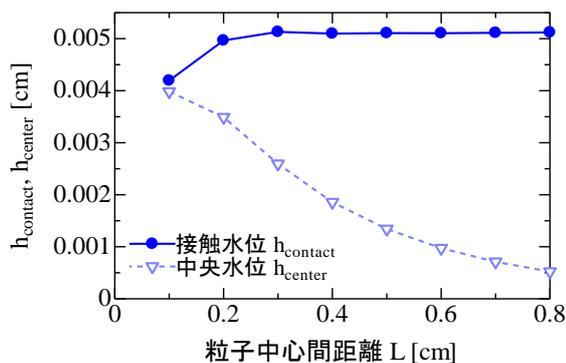


図-3 粒子間距離  $L$  による接触水位, 中央水位の変化

モデルでは, 接触角 ( $\theta=27.5^\circ$ ) および球の円周方向に一定の接触水位を与える. 近接した物体間の水面に生じる毛管現象について着目すると, 持ち上がった液架橋水の重さと表面張力の鉛直成分が釣り合うことになる. 計算の結果, 力の釣り合いを満たさない場合には接触水位を調整する.

収束計算により算出された水面高さ  $z$  を用いて, 式 (3) の水表面での圧力差  $\Delta\rho gz$  が求められる. 液架橋水面の曲率によって液架橋内の水圧は負圧となり, 2 粒子を引き付ける力として作用する. 任意点での負圧は, 静水圧分布によりその大きさを求める. 負圧は球面に対して法線方向に作用しているため, 各  $x$  成分の合計値を液架橋力として扱うことにする.

#### 4. 計算結果

氷の密度  $\rho_i=0.9[\text{g}/\text{cm}^3]$ , 粒子直径  $d=1.0[\text{mm}]$  のフラジルアイス粒子を想定し, 氷-水間の表面張力  $\gamma_{SL}=39.0[\text{dyn}/\text{cm}]$  として計算を行った.

図-3 は, 粒子間距離  $L$  による中央点 ( $x=0, y=0$ ) での水位  $h_{\text{center}}$  と境界条件である接触水位  $h_{\text{contact}}$  についての変化を示す. 距離  $L$  が大きくなると, 接触水位と比べて中央水位が減少している. これは, 2 粒子が近づくことによって生じる毛管現象の影響が小さくなるためである. 中心水位が 0 となる距離  $L$  は液架橋が形成される限界の距離であると考えられる.

また, 距離が小さくなると, 接触水位が減少してしまう. これは, 計算の便宜上, 接触水位を円周方向に一定としているため, 粒子同士が向かい合う面側の接触水位が, 反対の面側よりも高くなることが考慮されていないことが原因であると考えられる.

次に, 初期の粒子間距離 (粒子集中度)  $\Delta x = 0.20[\text{cm}]$ , 波浪条件として周期  $T=0.4\sim 2.0$  秒を 0.2

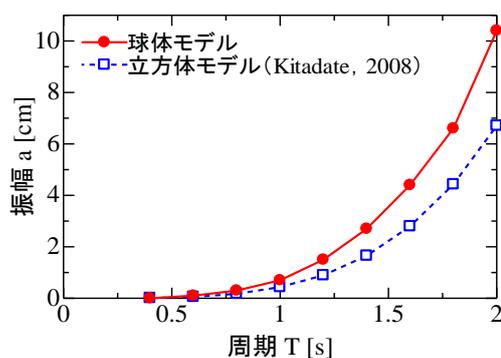


図-4 パンケーキアイス生成条件

秒刻みで, また, 振幅  $a$  を  $0.1\text{cm}$  刻みで変化させて計算を行った.

図-4 は, 波力と液架橋力から求めたパンケーキアイス生成条件を示す. Kitadate ら (2008) の立方体モデルでは, 液架橋力に補正係数  $0.008$  を, 伊東ら (2011) の円柱モデルでは液架橋力に補正係数  $0.025$  を掛けることで, 実験値と合うように調整していた. 本モデルの値は, 多少過大評価されているものの, 従来モデルのようなオーダーレベルの補正が必要ないことから, 改善したと言える.

以上の結果から, 従来モデルで必要となっていた補正係数については, 粒子形状の変更により改善可能であると考えられる. しかし, 本モデルでは接触水位を全て一定にしていたため, 接触水位に勾配を取り入れるなどの修正が必要である. また, 実際の海水域において, フラジルアイスの粒子径や集中度は一定ではない. 粒子形状も多様であるため, より実現現象に近づけるためには, 異なる粒子径のフラジルアイスを実定した解析が課題であると考えられる.

#### 参考文献

- 伊東孝徳, 塚茂樹, 松林由里子: 表面張力モデルを用いた初期パンケーキアイス形成条件に関する研究, 土木学会東北支部技術研究発表会, 2011
- S.Kitadate and S.Sakai: Fundamental Study about the Formation Process of the Initial pancake ice, the 19<sup>th</sup> IAHR, vol.1, pp.109-116, 2008.
- C.Pozrikidis: Computation of three-dimensional hydrostatic menisci, J.Appl.Math, vol.75, pp.418-438, 2010.