波動場におけるパンケーキアイス生成過程に関する数値シミュレーション

岩手大学　学生会員　○古坂　梢，正会員　小笠原敏記，堺　茂樹

1. はじめに

極域で見られるフラジル/グリースアイスは，波浪条件や温度の影響を受けながら，多様な大きさのパンケーキアイスに成長する．その成長過程において，波浪の影響を強く受けると言われているが，波浪条件とパンケーキアイスの大きさとの関係は未解明なままである．Kitadate・Sakai (2008) は，フラジルアイスが波の運動に従うと仮定し，フラジルアイス間の固着力に液架橋力を与えたパンケーキアイス生成過程のモデル化を提案している．

本研究は，過冷却状態の海水を仮定した計算領域を設定して，波動運動による波力の影響を受けながらパンケーキアイスに成長する過程のモデル化を構築する．さらに，モデルの問題点を改善し，実現象に適用可能な数値シミュレーションの開発を行う．

2. 計算手法

フラジルアイスは，波動運動に追随すると仮定し，線形の波動理論を用いると，着目するフラジルアイス（着目粒子）と近傍に存在するフラジルアイス（近傍粒子）間の相対距離 L は，次式で表すことができる．

$$L = \Delta x\sqrt{1 + k^2a^2 - 2ka\sin\left(kx_{0n} - \omega t\right)} \qquad \cdots(1)$$

ここで，Δx は着目粒子と近傍粒子の水平方向の距離，k は波数，a は振幅，x_{0n} は着目粒子 n の x 座標，ω は角周波数，t は時間である．さらに，フラジルアイス（粒子）に作用する波力 F_w は，相対距離 L を用いると次のように表すことができる．

$$F_w = m\frac{d^2L}{dt^2} \qquad \cdots(2)$$

ここで，m はフラジルアイスの質量である．なお，着目粒子と近傍粒子の水平距離が $\Delta x > 5.0$cm のとき，$F_w = 0$ とし，着目粒子は波動運動に従うものとする．

縦 0.1m×横 2.0m の計算領域に，乱数を用いて直径 4mm のフラジルアイス（粒子）をランダムに 100 個配置した．境界条件は，左右・上下共に流出境界とした．波高 4cm かつ周期 1.4 秒の波浪条件下で，時間間隔 Δt=1.0 秒で 1 時間の計算を行った．

3. 計算結果

図-1 は，フラジル粒子の移動に関する時間変化を示す．図中の Case1 は初期の粒子間距離が 0.7cm，Case2 は 4.7cm である．初期の粒子間距離の違いに関わらず，両ケースとも波力 F_w の力を受けて，粒子同士が接近し，ほぼ一致するようになる．本計算では，この状態をパンケーキアイスと見なすため，**図-2** に示すような氷況の場合分けを行う．着目粒子 f_i と近傍粒子 f_j の重心間距離 r_{ij} と各粒子の半径 $r_{i\,\mathrm{or}\,j}$ の和が $r_i + r_j > r_{ij}$ の条件（接触条件）を満たしたとき，2 つの粒子が接触したと見なす．計算過程において，着目粒子の氷況は，フラジル粒子 f_i からパンケーキアイス p_i，近傍粒子 f_j は，着目粒子 p_i に付随したパンケーキアイス pp_j と変換される．

図-3 は，**図-1** と同様な条件で氷況の場合分けを考慮した結果である．近傍粒子が着目粒子に接近し，接触条件を満足することによって，1 つの粒子の移動

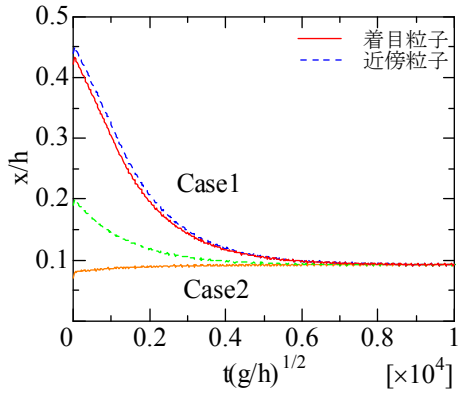

図-1　着目粒子と近傍粒子の水平位置 x_i の時間変化

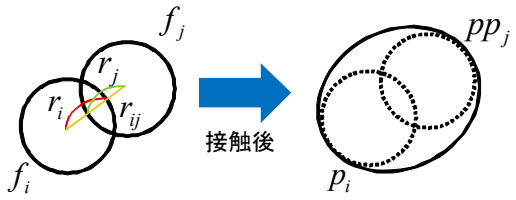

図-2　接触粒子の氷況変換

キーワード　フラジルアイス，パンケーキアイス，数値シミュレーション

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・019-652-6048

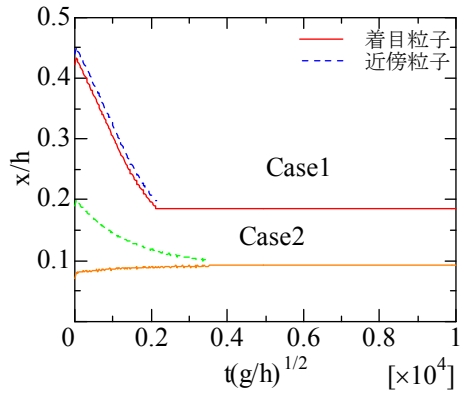

図-3　氷況の場合分けを考慮したときの着目粒子と近傍粒子の水平位置 x_i の時間変化

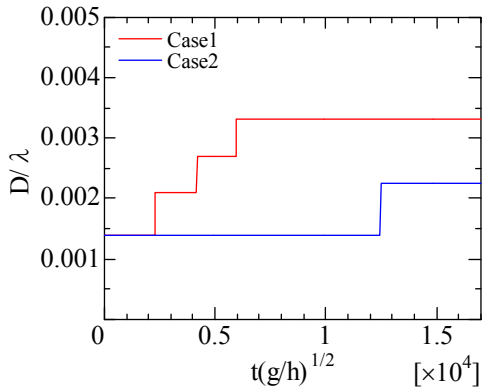

図-4　着目粒子径 D_i の時間変化

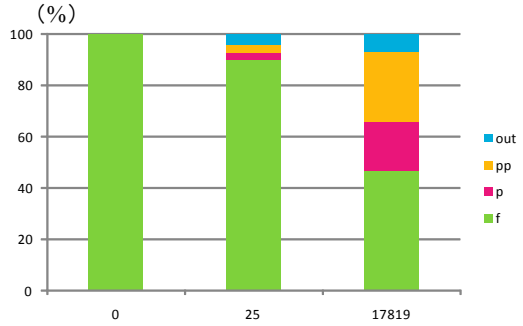

図-5　初期場から計算終了後までの各粒子径の氷況分布

に変化するようになる．**図-4** は，着目粒子の直径 D_i の時間変化を示す．粒子の密集度により，成長過程に違いが生じるが，時間経過に伴い，D_i の値が徐々に大きくなり，成長することがわかる．**図-5** は初期場（$t\sqrt{g/h}$ =0），計算途中（25）および終了後（17,819）の各粒子の氷況を示す．フラジル粒子 f の数が減少し，パンケーキアイス p および p に接触した粒子 pp の数が増加する．また，流出粒子も加えると，総粒子数（100 個）が一定に保たれていることがわかる．

次に，フラジル・パンケーキアイス自体が冷却効果により成長する過程を考慮するために，オホーツ

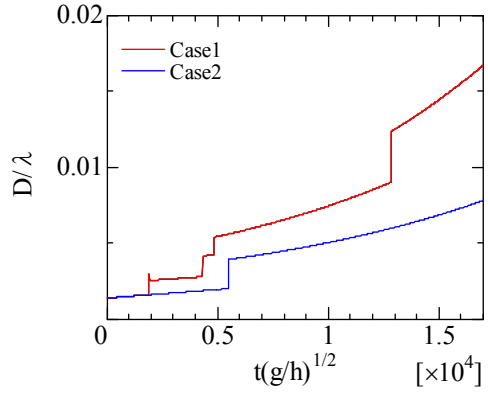

図-6　成長速度を考慮したときの着目粒子径 D_i の時間変化

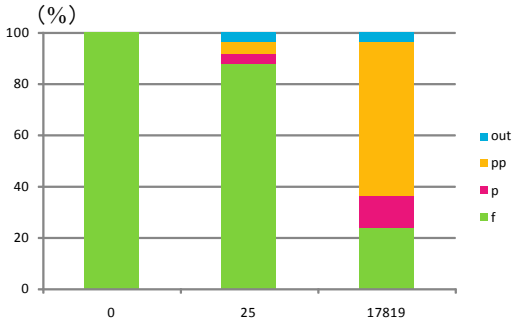

図-7　初期場から計算終了後までの各粒子径の氷況分布（成長速度あり）

ク海における氷の成長速度を参考にして，

$$\vec{v}_i = (1+\alpha)\vec{v}_i \qquad \cdots(3)$$

と与える．なお，α=1/2500 とした．

図-6 は，式(3)による成長速度を考慮した粒子径 D_i の時間変化を示す．**図-4** と比較すると，成長の過程が異なり，近傍粒子と接触する間も D_i の値が徐々に大きくなることがわかる．さらに，**図-7** に示すように各粒子の氷況の割合も計算終了後では異なることがわかる．各粒子が成長することによって，着目粒子に対する近傍粒子と判断される粒子数が増加し，フラジルアイスの数が減少するようになる．この結果は，パンケーキアイスの成長過程において，妥当なプロセスと見なして良いと言える．しかしながら，フラジルアイス同士の接触から固着するための力を本計算では考慮していない．より正確な成長過程を再現するためには，その固着力のモデル化が課題と考えられる．

参考文献

S. Kitadate and S. Sakai: Fundamental study about the formation process of the initial pancake ice, the 19th IAHR, vol.1, pp.109-116, 2008.