603 水と極低温液体の直接接触熱交換による氷生成

Ice Formation by Direct Contact Heat Exchange
between Water and Extremely Low Temperature Liquid正 稲葉 英男 (岡大院)
正 春木 直人 (岡大工)正 堀部 明彦 (岡大院)
○学 進 輝明 (岡大院)Hideo INABA, Okayama University Akihiko HORIBE, Okayama University
Naoto HARUKI, Okayama University Teruaki SHIN, Okayama University

1. 緒言

冷凍食品は、食品の長期保存が可能である利点を有するが、その反面品質が低下するという欠点も存在している。この品質低下の解決手段の一つとして、液体窒素などの極低温液体を用いた急速冷凍により、食品内部の氷結晶粒子径を小さくそろえる方法⁽¹⁾がある。しかし、この方法は沸騰(ライデンフロスト現象⁽²⁾)と凝固が同時に起こる複雑な系をなすことから定量的検討が非常に困難である。そこで本研究では、その基礎段階として水と液滴の形で滴下させた液体窒素との液液間沸騰伝熱⁽³⁾について界面の凍結様相や氷生成に関する検討を行った。

記号

c_p : 定圧比熱[J/(kg·K)], D : ノズル直径[mm], d_{m32} : 液滴群のザウター粒子径, d_n : 液滴の測定値[mm], G : 体積流量[m³/s], H : ノズル先端から試験部界面までの距離[m], h : 潜熱量[J/kg], S : 界面の面積[m²], t : 測定時間[s], M : 質量[kg], M_{loss} : タンクからの損失量[kg], m : 単位時間あたりの質量[kg/s], q_{loss} : 滴下の際の損失量, ρ : 密度[kg/m³], Φ : 熱効率[%]

添字

n : 液体窒素, w : 水

2. 実験装置及び方法

図.1 は実験で用いた装置概略図を示している。本実験装置は、主に試験部と液体窒素タンクにより構成されている。試験部はアクリル製縦 60mm 横×60mm×高さ 60mm の矩形容器を作成し、高さ 30mm まで水を充填した。試験部から周囲環境への熱損失を防ぐため、試験部の下部および底部を断熱材により覆った。また、試

図.1 Schematic diagram of experimental apparatus

験部周囲空気温度を安定させるためアクリル製矩形容器に断熱材を取り付けてあり、窒素の排出口を下部に設けている。試験流体である液体窒素は、試験部上部のタンクに溜められ、高さヘッドにより試験部に滴下される。なお、試験流体の流量は低温用ニードルバルブの開閉により調節される。

実験方法としては、まずタンクに液体窒素を充填し、タンクからの液体窒素の損失量が一定になるまでその状態を保持する。次に、恒温槽内温度を液体窒素により 0℃ に調整する。同時に、試料を冷凍庫により実験開始初期温度 1℃ まで冷却しておく。その後、試験部を所定の位置に配置し液体窒素の滴下を行い液体窒素の変化量と氷の生成量のデータ採集を行った。また、界面における液滴の挙動や凍結様相の観察も併せて行った。なお、液体窒素噴射流量については、測定終了後液体窒素の変化量から以下の式により算出した。

$$G_n = \frac{M_n - M_{nloss}}{\rho_n \times t} \quad (1)$$

また、実験条件を以下に示す。

液体窒素ノズル出口噴射流量: $G_n = 8.0 \times 10^{-8} \sim 16 \times 10^{-6}$ m³/s, 滴下高さ: $H = 0.04, 0.09, 0.14, 0.19$ m, 液体窒素噴射温度: $\theta_n = -196^\circ\text{C}$, 試料温度: $\theta_w = 1^\circ\text{C}$, 周囲空気温度: $\theta_{\text{around}} = 0^\circ\text{C}$, ノズル径: $D = 2$ mm, 試料界面の面積: $S = 3.6 \times 10^{-3}$ m², 測定時間: $t = 60$ s, 液体窒素の密度: $\rho_n = 8.3 \times 10^2$ kg/m³

3. 測定結果ならびに考察

初めに、噴射流量と滴下様相の測定を行った。なお、測定値は高速ビデオカメラを用いノズル出口の液滴群を撮影しその解析画像から求めた。各流量における代表液滴径は測定値から以下に示すザウター粒子径を用いて算出し、その結果を図.2 に示した。

図.2 Relationship between G_n and d_{m32}

$$d_{nm32} = \frac{\sum d_n^3}{\sum d_n^2} \quad (2)$$

また、液体窒素液滴群の発生形態にはノズル先端で液滴が生成と離脱を繰り返す領域Ⅰとノズル先端に液柱が形成され先端が細かく分離しスプレー状に広範囲に滴下する領域に分類され、図中にそれぞれ○と△印で分布を示した。

この液滴径や滴下様相の違いは、界面における伝熱特性に影響を及ぼすことが推察される。そこで、氷生成量から算出した熱効率を用いその違いについて検討する。図.3 は、水槽界面に到達した液体窒素液滴が有する冷熱量と実際に氷生成に使用された冷熱量の割合を示す冷却効率について表している。

図.3 Relationship between G_n and Φ

なお効率については、以下の式のように定義した。

$$\Phi = \frac{M_w \times (h_w + \int_0^t c_{pw} \cdot dt)}{\frac{G_n}{\rho_n} \times (h_n + \int_{-196}^0 c_{pn} \cdot dt - q_{nloss})} \quad (3)$$

図 3 より、領域Ⅰにおいて $H=0.04, 0.09\text{m}$ の場合は噴射流量の小さいところで熱効率が高く噴射流量の増加に伴い熱効率が減少傾向にあるが、 $H=0.14, 0.19\text{m}$ の場合は噴射流量の小さいところで熱効率が低く噴射流量の増加に伴い熱効率が増加する傾向にあることが分かる。また、領域Ⅱでは熱効率が安定化する傾向が得られた。さらに、測定終了後における界面の凍結様相の観察も行った。図.4 は、測定終了後界面を上部から写真撮影したものである。

図.4 Photograph of phase boundary

図に示すように、領域Ⅰの $H=0.04, 0.09\text{m}$ の場合は界面の中心から凍結が進行するパターン A になり、 $H=0.14, 0.19\text{m}$ の場合は界面の周囲から凍結が進行するパターン B になり、領域Ⅱでは滴下高さに関係なく界面から層状に凍結が進行するパターン C になることが確認された。図.3, 4 より、パターン A では滴下高さが小さいため液滴の持つ運動エネルギーが小さいことから液滴が界面上をあまり動き回ることなく、滴下直下部の中心から凍結が進行していると考えられる。また、噴射流量の小さい領域で高い値を示す熱効率が減少傾向にあるのは、噴射流量の増加に伴い界面上の中心で液滴どうしの合体が生じたため液滴の単位体積当りの接触面積が減少したためだと考えられる。パターン B では滴下高さの増加に伴い運動エネルギーが増大され、液滴が界面上を激しく運動するライデンフロスト状態が維持されるため液体窒素の熱損失が促進される原因となる。しかし、噴射流量の増加に伴い界面上の液滴の数が増大するため合体や静止が生じるようになり、安定した熱交換が行われるようになるため熱効率が増加するものと推察される。パターン C では、液滴が滴下の際に分散しているため界面上に液体窒素膜が形成される状態となり、熱効率も安定化するものと考えられる。

図.5 は、噴射流量と単位時間あたり氷生成量の関係を示している。上述のように各々の滴下高さにおける界面での熱交換挙動の差異により氷生成量に違いがみられるが、全体としては噴射流量の増加により界面に到達する液体窒素の量が増加するため氷生成量が増加していることが分かる。

図.5 Relationship between G_n and m_w

4. 結言

本稿では、水に液体窒素液滴を滴下した液液間沸騰伝熱実験を行い以下の結論を得た。

- ・液体窒素の噴射流量と滴下高さにより、凍結様相と熱効率は3種類に分類される。
- ・熱効率は、噴射流量と滴下高さが小さいほど高い。

参考文献

- (1) 稲葉英男, 福迫尚一郎: 低温環境下の伝熱現象とその応用, pp.398-400, 養賢堂 (株), (1996)
- (2) 飯田嘉宏, 佐藤武雄: 高温液体面上の液滴の蒸発, 第14回日本伝熱シンポジウム講演論文集, pp.187-189, (1977)
- (3) 秋山守: ライデンフロスト温度に関する考察, 第17回日本伝熱シンポジウム講演論文集, pp.217-219, (1980)