1. 緒言

液状食品の濃縮方法には蒸発濃縮法,膜濃縮法,凍結濃縮 法の3種類が挙げられる.本研究の対象となる凍結濃縮法 は,液中の水分を氷として析出させ,氷を取り除くことで濃 縮する方法である.濃縮時には、0℃以下という低温での操 作になるため、高品質な商品の製造が可能である いが、氷と 濃縮液との効率的な分離方法の検討が必要である.また,溶 液を冷却した場合、凝固点を下回っても氷が生成しない過冷 却と呼ばれる現象が生じる. 過冷却解放により, 過冷度が大 きいと多量の氷が発生し、小粒径の氷粒子が一様に生成され る²⁾. 氷粒子が小さいほど分離の際に濃縮液が氷粒子群に保 持されやすくなり、濃縮液の回収率低下の要因となる.

本研究では、過冷却状態にある溶液に超音波を照射し、効 率的な過冷却解放操作について検討した.

2 超音波分布計測実験

2.1 実験方法

実験装置概略を図1に示す.超音波発振器(本多電子(株), W-118TUS)に接続した超音波振動子(本多電子(株), W-338N) を水槽底に固定し、振動子の上面から120mmの深さまで水 を入れる. 最大出力(600W)で28kHz, 45kHz, 100kHz をソ ニックモニター(本多電子(株), HUS-3)を用いて, 超音波の強 さの分布についての計測を行った.水槽上面をアルファベッ ト A~L で30mm間隔, 1~7の数字に25mm間隔で格子状に 区切る.水槽に穴を開けたステンレス板を橋のように掛け、 穴にセンサー棒を挿入し、計測した. 振動子とセンサーの高 さ方向の距離を固定するために、センサー棒に軸継ぎ手(全 長34.5mm)を通し、穴を開けたステンレス板とセンサー棒の 持ち手部分との間に挟み込むことで高さを固定し、図2のよ うに軸継ぎ手 0~3 個の 4 パターン (h_0, h_1, h_2, h_3) で計測 を行った.



Fig.1 Schematic of ultrasonic measurement experiment



Fig.2 Schematic of height adjustment

システム工学群

ものづくり先端技術研究室 1190029 大西 啓介

3.2 実験結果及び考察

28kHzにおける計測結果を図3に示す. 各高さ共に振動子 中央付近に高い計測値が得られ、超音波強度の強弱が振動子 からの距離に対して変化する結果となった. 強弱に規則性が 見られたことから、定在波であると考えられる、定在波の波 長をλとすると、λ/2間隔で強度が最大となる位置が現れ、 λ/4ごとに強弱が現れる.強度が最大となるのは、水面から λ/4の奇数倍にある水深の位置となり、逆に最も弱くなるの は、λ/4の偶数倍にある位置となる³⁾.実験結果より、発振 周波数 28kHz のとき、振動子に近いh1よりh2のほうが高い 計測値が得られたことについて,計測位置とλ/4の比を見る と、 h_1 は $\lambda/4$ の約6倍、 h_2 は約3倍となっていたため、 $\lambda/4$ の 奇数倍の距離にあるh2の計測値が最も強く、h1は弱い傾向に 現れたのだと考えられる.

45kHz, 100kHz の各高さの計測結果を図 4,5 に示す. h₀ の結果を見ると、両周波数とも28kHzと異なり、中央に高い 計測値が現れるのではなく、局所的に高い値が得られた.局 所的に超音波の強さが見られたのは、超音波が可聴域の音波 と比較して、より指向性を有するためと考えられる. 振動素 子は超音波の発振源であり、振動子内に13 個存在し、その 振動素子のある位置付近で高い計測値が得られた. 指向性は 周波数が高いほど強く現れるため、今回のような実験結果と なったと考えられる.





3. 過冷却解放実験

3.1 実験方法

超音波発振器(本多電子(株), W-118TUS)に接続した超音波 振動子(本多電子(株), W-338N)を水槽底に固定し,振動子が 完全に浸漬するまで水を入れる.図6に示すように,エタノ ールと氷を入れたビーカーを振動子中央に置き,-6~-7℃ま で冷却したことを確認する.溶液を入れたアルミカップを, 溶液の水面が冷媒の水面より下になるよう浸漬させ,冷却を 開始する.T型熱電対を用いて溶液温度を計測し,溶液温度 を一様にするために小型攪拌機(アズワン(株),DX)で攪拌し ながら冷却を行った.本実験では,純水100ml,1wt%の NaCl水溶液100mlを用いて製氷を行い,28kHz,45kHz, 100kHzの超音波を照射した場合,及び照射していない場合 をそれぞれ3回ずつ行い比較した.



Fig.6 Schematic of ice making section

4.2 実験結果及び考察

実験結果を図 7,8 に示す. 超音波を照射していなかった 場合,純水,NaCl水溶液ともに 2~3℃の過冷度が見られ, 28kHz,45kHz では,ほとんど過冷却することなく製氷を行 うことできた.しかし,100kHz では 0.2~1℃の過冷度が見 られた.

水が氷になるためには、安定して成長できる大きさの水分 子が結合し集まった核と、その核を生成するためのエネルギ ーが必要である.容器壁面等を下地として核生成するとき、 核生成に必要なエネルギーを式(1)に示す.

$$\Delta G_{c}^{*} = \frac{16\pi\gamma_{LS}^{3}}{3(g_{L} - g_{S})^{2}} \cdot \frac{(1 - \cos\theta)^{2}(2 + \cos\theta)}{4}$$
(1)

 $\Delta G_c^*: 核生成の自由エネルギー$ $<math>\gamma_{LS}: 液相・固相の単位面積あたりの界面エネルギー$ $<math>g_L: 液相の単位体積あたりの自由エネルギー$ $<math>g_S: 固相の単位体積あたりの自由エネルギー$ $<math>\theta: 固相と容器との接触角$

式(1)の核生成に必要なエネルギーを超音波のエネルギーが 補ったため,超音波を照射することで過冷却が発生すること なく氷が生成されたと考えられる.

超音波振動により金属と液体との濡れ性が良くなり、接触

角のが低下するという報告がある⁴⁾. 超音波を製氷部に照射 することで,アルミカップ壁面と固相の接触角のが低下し, 式(1)より,核生成のエネルギーが小さくなったため核生成が 容易になり過冷却解放に至ったと考えられる.

100kHzは, 28kHz, 45kHzに比べ過冷度が大きかったのは, 超音波の減衰による影響だと考えられる.



Fig.8 The solution temperature at each frequency

4. 結論

投げ込み型の超音波振動子によって水槽内の超音波分布を 計測し、水中での定在波、及び指向性の特徴を明らかにした.

超音波を照射した場合と照射していない場合とで、過冷度 がどのように変化するのか実験を行い、超音波が過冷却解放 操作に有効的であることが確認された.しかし、高周波数で は減衰の影響により、過冷却解放に至りにくいことが考えら れる.

参考文献

- (1) 早川喜郎ほか, 日本食品工学会誌, Vol9, No.4, pp.215-220, 2008
- (2) 下山田真ほか, 日本食品科学工学会誌, Vol.44, No.1, pp59-61, 1997
- (3) 日本電子機械工業会,超音波工学, pp.239-240, 1999
- (4) 中西治通, 固液界面の濡れ性に及ぼす超音波加振の影響, 1993