A113

マイクロバブル水凝固時の氷中への気泡の捕捉現象

Trapping phenomenon of bubbles in ice during solidification of micro-bubble water

○伝学 鮫島 功 (中大院 学)

機正 寺岡 喜和 (中大理工)

機正 松本 浩二 (中大理工)

伝学 福野 良 (中大院 学)

Kou Sameshima, Yoshikazu Teraoka, Kouji Matumoto, Ryou Fukuno

Dept. of Precision Mechanics, Chuo University, 1-13-27 kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551

In order to form the ozone ice, we used micro-bubbles of containing ozone gas. In this method, not only ozone dissolving in water but also that in micro-bubbles trapped in ice are available when the ice is melting. Therefore, in this paper, O_2 micro-bubbles were used as a preliminary experiment. The cooling plate inclined downward was set in the micro-bubbles water, and then ice including a lot of O_2 bubbles was generated on the cooling plate surface. The trapping phenomenon of the bubbles was clarified by observing the distribution of O_2 bubbles in ice.

Key Words: Ice including micro-bubble, Ice generation velocity, Ratio of bubbles in ice, Mass of ice

1. 緒論

近年,生鮮食品の鮮度保持において殺菌・脱臭作用のあるオゾンガスを水に溶解させたオゾン水が効果的であることが確認されその利用が拡大している。しかし,通常水中のオゾンの寿命は非常に短く,残存性がなく安全である反面,その効果の保持が困難である⁽¹⁾。そこで,オゾンの保持と冷蔵効果を目的としてオゾンを経水に気泡として封入させたオゾン氷が注目されている。

従来のオゾン氷生成方法には密閉加圧式があり,加圧することでオゾンを経水に溶解させ高濃度オゾン氷を生成する。そのため装置の耐圧化が必要であり,装置が大型となり,コスト削減が困難である。そこで,我々はオゾンを経水に気泡として封入させる方法として,気泡径が数十 μm 程度のマイクロバブル(MB)を用いた。気泡として捕捉されたオゾンガスと溶解したオゾンで高濃度のオゾン氷を生成できると予想される。

著者らのこれまでの研究により,冷却面を傾けることで大きい気泡が抜け,製氷量が増加すること明らかにし,さらに,氷の気泡含有率,製氷量を考慮した結果,冷却面角度 30° が最適であることを示した⁽²⁾。本研究では,オゾン MB 含有氷生成の予備実験として酸素 MB を発生させ,平板状の冷却面を 30° に傾けて酸素 MB 含有氷を生成する。そこで,それぞれの製氷時間で捕捉された気泡の状態を観察することによって,氷への捕捉現象を明らかにすることを目的とし検討する。

2. 実験装置・実験方法

2.1 実験装置

アクリル樹脂製の水槽(縦 35cm×横 30cm×高さ 25cm)の内壁に冷却ラインを流すステンレスチューブが巻かれており,スターラーで攪拌することで水槽内の純水の温度を保っている。MB 発生装置は加圧溶解式を用いて,MB の原料となるガスは酸素ボンベから一定量の酸素ガスを供給している。周壁がアクリル樹脂の製氷装置において,冷却面として無電解ニッケルメッキが施された銅平板(縦 8cm×横 8cm×厚さ 1cm)が使用された。製氷装置は,傾けることで冷却面を任意の角度に設定できる。アクリル樹脂で囲まれた中に冷却ラインを循環させることで冷却面を冷却し,平板状の氷を生成する。冷却面温度はラインの流入側と流出側の銅平板表面から垂直・下方向に 2mm の箇所を開けて,その中に熱電対を挿入して温度を測定した。測定された温度を冷却面温度として用いた。Fig.1 に実験装置を示す。

Fig.1 Experimental apparatus

2.2 酸素MB含有氷の生成方法

まず,製氷装置を取り付けた水槽内に 20L の純水を入れ,水槽の内壁の冷却ラインを循環させ冷却する。液温が $2^\circ C$ 近くになったら,酸素ガスを 0.45L/min で流し MB を発生させ,1 時間稼働させ定常状態にする。その後,製氷装置に冷却ラインを循環させ,冷却面を $-10^\circ C$ にして酸素 MB 含有氷を 20 分間生成する。なお,過冷却は自然解消のため,自然解消が生じて冷却面温度が上がった時から製氷開始と判断する。また,不規則に動く液中気泡を撮影するために水槽の側面に 2mm の隙間を作る。そこに MB 含有水を通して気泡の動きをある程度制限し撮影する。測定結果は,サンプル数を 485 個取り,平均気泡径が $76\mu m$ となった。

2.3 氷の気泡含有率の測定

メスシリンダーに菜種油を入れ,冷却ラインに浸けて $-10^\circ C$ 程度に冷却しておき,メスシリンダーと油の質量及び油の体積を測定する。次に生成した酸素 MB 含有氷を油の中に沈め,メスシリンダー,油,酸素 MB 含有氷の総質量及び油と酸素 MB 含有氷の総体積を測定し,酸素 MB 含有氷の密度 ρ を算出する。氷の気泡含有率 ϕ は気体を含まない純水の密度($\rho_0=0.917g/cm^3$)⁽³⁾を用い, $\phi=(\rho_0-\rho)/\rho_0$ と定義する。

2.4 酸素 MB 含有氷中に捕捉された気泡の測定

生成した酸素 MB 含有氷に捕捉された気泡を氷の断面側から撮影し,気泡径の測定を行う。ただし,断面は生成した氷を Fig.2(d)の破線のように 3 等分したものの中央部を使用する。撮影は切断面の中心と中心から左右 20mm の 3 箇所,冷却板から垂直方向に高さを変化させて行う。

3. 実験結果・考察

冷却面角度 30° で製氷時間を 5min, 10min, 20min, 40min

と変えて生成した酸素 MB 含有氷の表面と断面をそれぞれ Fig.2(a)～(d)に示す. Fig.2 から, 製氷時間が短いと (a) のように大きい気泡も氷層に捕捉されるが表面に窪みとなって存在している. また, 製氷時間が長くなると (c) のように表面の窪みが減少していることがわかる. これは, 氷層が厚くなることで製氷面移動速度が低下し, 大きい気泡が氷層に捕捉されずに上方へ抜けるためであると考えられる.

酸素 MB 含有氷の厚さの経時変化を Fig.3 に示す. Fig.3 の曲線は製氷表面移動速度を算出するために用いた近似曲線である. これより, 時間経過に伴い製氷表面移動速度が低下していることがわかる. また, 製氷時間と気泡含有率, 製氷量の関係を Fig.4 に示す. Fig.4 から, 40min まで製氷を行なうと気泡含有率が低下していることがわかる. これより, 製氷表面移動速度の低下は気泡含有率の低下を引き起こすと考えられる. ここで, 5min よりも 10min の気泡含有率が高くなっているのは, 5min では肥大化した気泡が窪みとなって存在しているためであると考えられる.

水中に捕捉された気泡について切断面から撮影した画像を Fig.5①～④に示す. また, Fig.3 の近似曲線から算出した製氷表面移動速度と酸素 MB 含有氷中に捕捉された気泡径の範囲をエラーバーで示し, プロットを平均気泡径として Fig.6 に示す. Figs.5, 6 において, ①は冷却板から垂直方向に 1～2mm の高さ, ②は 2～3mm, ③は 4～5mm, ④は 6～7mm で捕捉された気泡である. Fig.6 から, 製氷表面移動速度の低下に伴い, 肥大化した気泡が抜けて捕捉される最大気泡径が低下していることがわかる.

4. 結言

製氷表面移動速度が低下していくにつれて, 肥大化した気泡が氷表面から除去されるため, 氷中の最大気泡径が低下していく. それに伴い, 気泡含有率も低下していくことがわかった.

5. 参考文献

- (1) 杉光英俊, オゾンの基礎と応用, 光琳, 東京(1996).
- (2) 清水芳郎, 寺岡喜和, 松本浩二, 日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, E-143, (2009).
- (3) 前野紀一, 氷の科学, 北海道大学図書刊行会, 36 (1981).

Fig.2 Surface and side-view of ice layer

Fig.3 Time dependency of ice layer thickness

Fig.4 Ratio of bubbles in ice layer and mass of ice

Fig.5 States of ice including bubbles

Fig.6 Relationship between ice generation surface velocity and bubble diameter