

処理方法がマイクロバブル生成特性およびオゾンガス溶解速度に及ぼす影響

誌名	日本食品保蔵科学会誌
ISSN	13441213
著者名	中村,宣貴 梅原,仁美 松山,成江 川崎,保美 大原,浩樹 松本,均 Thammawong,M. 許,晴怡 椎名,武夫
発行元	日本食品保蔵科学会
巻/号	38巻5号
掲載ページ	p. 293-299
発行年月	2012年9月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



処理方法がマイクロバブル生成特性 およびオゾンガス溶解速度に及ぼす影響

中村 宣貴^{*1}・梅原 仁美^{*1}・松山 成江^{*1}
川崎 保美^{*2}・大原 浩樹^{*2}・松本 均^{*3}
タンマウォン マナスイカン^{*1}・許 晴怡^{*1}・椎名 武夫^{*1§}

* 1 独立行政法人農業食品産業技術総合研究機構食品総合研究所

* 2 ㈱明治食機能科学研究所

* 3 ㈱明治海外菓子事業部

The Effect of Microbubble (MB)-treatment Conditions on MB Characteristics and Ozone Dissolution Rate

NAKAMURA Nobutaka^{*1}, UMEHARA Hitomi^{*1}, MATSUYAMA Masae^{*1},
KAWASAKI Tomomi^{*2}, OHARA Hiroki^{*2}, MATSUMOTO Hitoshi^{*3},
THAMMAWONG Manasikan^{*1}, XU Qingyi^{*1} and SHIINA Takeo^{*1§}

* 1 National Food Research Institute, NARO, 2-1-12, Kannondai, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8642

* 2 Meiji Co., Ltd., 540 Narita, Odawara-shi, Kanagawa 250-0862

* 3 Meiji Co., Ltd., 1-2-10 Shinsuna., Koto-ku, Tokyo 136-8908

The effect of microbubble (MB)-generation and treatment conditions on the characteristics of MB and MB containing water was evaluated. For MB generation, a MB generator based on the pressurizing dissolution method (operated at 0~0.5MPa) was used, and the high discharge pressure likely resulted in small bubbles and highly turbid (which indicates the MB density) MB containing water. The most effective discharge pressure for the preparation of ozonized water was 0.2 MPa. However, this pressure was different from the optimal pressure for MB generation. The MB treatment (mechanical agitation) increased the ozone dissolution rate. Moreover, the ozone dissolution rate and equilibrium concentration of dissolved ozone varied with the addition of particular substances. For example, when NaCl or a surfactant (L-150A) were added, the ozone dissolution rate and equilibrium concentration of dissolved ozone were higher and lower, respectively, than the rate and concentration of control condition (RO water). Moreover, the addition of citric acid resulted in an ozone dissolution rate and equilibrium concentration of dissolved ozone that were similar to and higher than, respectively, the rate and concentration of control. Finally, considering the results for the discharge pressure and ozone dissolution rate, it can be concluded that the MB-generation method and MB-treatment conditions should be selected in strict accordance with the intended use of MBs.

(Received Aug. 3, 2011 ; Accepted Feb. 20, 2012)

Key words : Micro bubble, Mechanical agitation, pressurizing dissolution, dissolved ozone concentration
マイクロバブル, 機械攪拌, 加圧溶解, 溶存オゾン濃度

近年, マイクロもしくはナノメートルオーダーの気泡
がもつ特異な機能が注目されている。食品分野において
は, 水環境の改善, 対象物の洗浄・殺菌, 生理活性・成

長促進作用, 物性変化など多岐にわたる効果が期待され
ている^{1)~3)}。筆者らのグループでは, 界面活性剤を用い
たマイクロバブル (以下, MB) 水について, 発生方法

* 1 〒305-8642 茨城県つくば市観音台 2-1-12

§ Corresponding author, E-mail: shiina@affrc.go.jp

* 2 〒250-0862 神奈川県小田原市成田540

* 3 〒136-8908 東京都江東区新砂 1-2-10

の違いがMBの特性に及ぼす影響⁴⁾、塩の添加によるMBの物性の向上⁵⁾、大豆油由来の新規界面活性剤を用いて作製したMBの特性⁶⁾について報告してきた。

MBは、通常の気泡と比較して、浮上速度が小さい(ストークスの式で表される)ため水中に長時間滞在する。また、MBは、内圧が高い(ヤングラプラスの式で表される)ためにガスの溶解速度が大きい(ヘンリーの法則により示される)。これらの理由により、MB処理はガスを効果的に溶解させるのに有効であるとされている⁷⁾。MBを用いた水中への気体の溶解の効率化については、酸素⁸⁾、オゾン⁹⁾について検討されており、いずれの研究においてもMB処理によりガス溶解が効率化できると報告されている。しかし、MB水を実際の洗浄や水環境改善に用いる際には、様々な物質が浮遊・溶解した溶液を対象とすることが想定されるが、溶質の存在がMB処理を利用したガスの溶解に及ぼす影響については十分な検討がなされていない。

本研究では、MBもしくはMB水を利用した洗浄の基礎的な知見を得ることを目的として、青果物の洗浄において利用が検討されているオゾンガスを用いたMB^{1)~3)}に着目し、MB処理によるオゾンガスの溶解特性について検討を行った。まず、加圧溶解式のMB作製装置を用いて、様々な環境下で作製したMBの粒度分布について調査を行った。加えて、オゾン含有ガスを用いたMB処理によるオゾン水の作製に対して、溶質(NaCl, クエン酸および界面活性剤)が及ぼす影響について検討した。

材料および方法

1. MB水の作製

Table 1 に、本研究で用いた装置の呼称および詳細を示す。MB水の作製方法がオゾンガスの溶解特性に及ぼす影響について検討を行うため、2種類の方法(加圧溶解式、機械攪拌式)を用いた。加圧溶解式では、加圧タンク中で気体を水中に溶解し、急激に大気圧まで減圧することで過飽和となった気体がMBとして放出される⁷⁾。機械攪拌式では、高速回転する刃が導入された気泡を剪

断することでMBが生じる⁴⁾。本研究の装置構成では、加圧溶解式では大容量、機械攪拌式では小容量のMB処理が可能であるため、処理水の容量を、前者では40ℓ、後者では1ℓとした。

加圧溶解式のMB作製装置(㈱ニクニ製、マイクロバブルジェネレータ、MBG20ND07ZE 1 CG005)は、混合ノズル部、ポンプ部、溶解タンク、分離タンク、ボール弁、圧力計、ガス流量計、制御板等で構成されている(Fig. 1)。基本的な運転条件は、流量 $17.6 \text{ ℓ} \cdot \text{min}^{-1}$ 、吸込圧力 -0.022 MPa (大気圧基準)、吐出圧力 0.4 MPa (大気圧基準)、ガス流量 $0.4 \text{ ℓ} \cdot \text{min}^{-1}$ (大気圧基準)として、実験内容により各項目を調整した。そして、本装置に大気もしくはオゾン含有ガスを導入しながら外部に設けた容器内の液体を循環させることで、MB処理を行った。

機械攪拌式でのMB処理には、ホモジナイザ(マイクロテック・ニチオン社製、ヒスコトロン: ドライブユニットNS-51, ジェネレーターシャフトNS-20CG, 回転数10,000rpm, 処理可能量5-2000ml)を用いた。そして、散気管(東京光信理化学製作所製、円筒型ガス噴射管、直径25mm×長さ20mm)を用いてガスを液中に導入(ガス

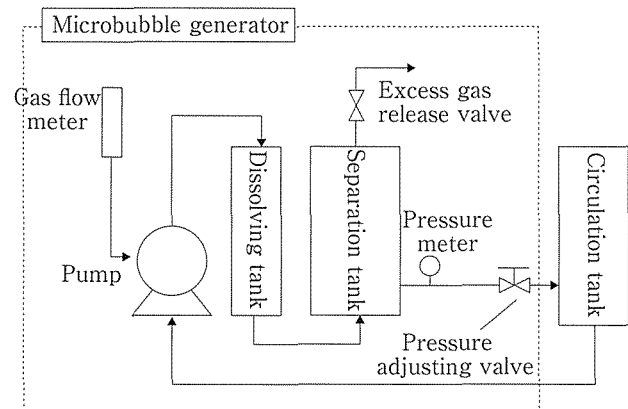


Fig. 1 Schematic of the microbubble-generator system (based on pressurizing dissolution method) used in this study

Table 1 Equipment used for MB treatment or ozonization in this study

Method (title in this paper)	Manufacturer	Model	Volume (ℓ)	MB treatment	Ozone dissolution test
Pressurizing dissolution method (加圧溶解式)	Nikuni Co., Ltd.	Microbubble generator: MBG20ND07ZE 1 CG005	40	○	○
Mechanical agitation method (機械攪拌式)	Microtech Niton Co., Ltd.	Homogenizer: Hiscotron Shaft: NS-20CG	1	○	○ (in conjunction with air diffusion method)
Air diffusion method (散気管式)	Koshin Rikagaku Seisakusho Co. Ltd.	Ceramic filter: Type-B, $\phi 20 \times 15$	1	-	○

流量 $0.4 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$)しながら機械的に攪拌することでMB処理を行った。

いずれの試験区も水にはRO水(ミリポア社製, Elix 10)を用い, 水温を 25°C に調整して実験を行った(以下同様)。

2. MBの粒度分布測定

MBの粒度分布測定には, レーザ回折式粒度分布測定装置(榊島津製作所製, SALD2000)を用いた。循環型のセルを用い, セルの出口側からMB水をペリスタルティックポンプ(ヤマト科学製, 7524-40)で引いて循環させ, 粒度分布を測定した。また, 粒度分布測定時の屈折率は $1.00-0.01i$ とし, 流量は $0.4 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ とした。流量が粒度分布測定に及ぼす影響については, $0.1, 0.2, 0.4$ および $0.8 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ について事前に検討を行い, 安定的な測定が可能である $0.4 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ を選択した。なお, 流量が小さいと, 測定結果にばらつきが多く, 平均粒径が若干大きくなる傾向がみられた(データ省略)。これは, 送液に時間がかかることで配管中の気泡の粒径およびその分布が変化^{6), 10), 11)}することが原因と推察された。

また, 光学顕微鏡による観察も行い, レーザ回折式粒度分布測定装置の測定結果と比較した。光学顕微鏡観察は, デジタルマイクロスコープ(榊キーエンス製, VHX-900)を用いて, 外部容器からスポイトで採取したサンプルをスライドガラスに乗せ, カバーガラスを被せて行った。

3. 濁度測定

MBは, 作製条件によって気泡の数密度(以下, 気泡密度)が異なると考えられる。そこで, 溶液の濁度を測定し, 気泡密度の指標とした。測定には, 濁度チェッカー(オプテックス(株)製, TC-3000)を用いた。本装置は, センサ表面にワイパー機能を備えており, 気泡のセンサ表面への付着が測定に及ぼす影響を低減できる。

4. オゾン含有ガスの作製

オゾン含有ガスの作製には, 無声放電式のオゾンガス発生装置(榊荏原製作所製, OZSD-3000A)を用いた。なお, 本装置によるオゾン生成時に窒素が混入すると, NO_x の発生が懸念される¹²⁾ため, 本研究では, オゾン含有ガスの材料として酸素の純ガスを用いた。また, オゾン含有ガスは, ガス流量 $0.4 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$, オゾン濃度約 5% (発生装置の出力最大時の濃度)とした。なお, オゾンガス発生装置と散気管および加圧溶解式MB作製装置との接続には, 漏れの発生による誤差要因の排除と実験時の安全確保のため, 耐オゾン性の高いポリテトラフルオロエチレン製のチューブを用いた。

5. 溶存オゾン濃度の測定

溶存オゾン濃度の測定には, ヨウ素滴定法¹³⁾を用いた。過剰なヨウ化カリウムと測定対象の溶液 200ml を反応させた後, 酸化生成物からヨウ素を遊離させるために, pH 4以下に調整した。そして, 0.1 規定のチオ硫酸ナトリ

ウムで滴定し, 滴定量からオゾン濃度を算出した。

6. 実験条件

(1) MBの粒度分布・濁度特性評価 加圧溶解式における吐出圧力, 溶質の種類が作製されるMBの特性に及ぼす影響を明らかにするために, 運転開始から 5 min 経過時点における粒度分布および濁度について検討を行った。なお, 機械攪拌式のMB水は, 界面活性剤を用いた試験区(L-150A区)以外では気泡密度が低く, 粒度分布を測定することはできなかったため, 粒度分布および濁度の測定は行わなかった。吐出圧力は $0 \sim 0.5 \text{ MPa}$ として, RO水, 0.85% のNaCl溶液, pH 3のクエン酸溶液および 0.01% の界面活性剤, L-150A(シヨ糖ラウリン酸エステル 38% を含有, 第一工業製薬(株)製)溶液について検討を行った。なお, 吐出圧力は, 本実験条件において装置からの漏れなどを生じず, 安定的に動作する圧力として 0.5 MPa を上限とした。NaCl濃度は, 青果物洗浄時に浸透圧による影響が小さいと考えられる生理食塩水と同等の濃度(0.85%)として, pHは, オゾン分解が抑制される強酸性域(pH 3)¹⁴⁾としてそれぞれ条件を設定した。界面活性剤L-150A濃度は, 予備実験の結果から, 過剰なフォームを形成しない濃度として 0.01% を選択した。

(2) オゾンを用いたMB処理条件が作製されるオゾン水特性に及ぼす影響 MB処理の方法の違いがオゾン水作製に及ぼす影響を明らかにするため, オゾン含有ガスを用いたMB処理条件が, 溶存オゾン濃度に及ぼす影響について検討を行った。まず, 機械攪拌式および加圧溶解式のそれぞれの標準的な運転条件において, 溶液の種類が処理後のオゾン濃度に及ぼす影響について評価した。溶液には, 前述の(1)と同様に, RO水, 0.85% のNaCl溶液, pH 3のクエン酸溶液および 0.01% のL-150A溶液を用いた。処理時間は, 機械攪拌式で 3 min および 20 min , 加圧溶解式で 60 min とした。機械攪拌式については, 機械攪拌式に用いたものと同じ散気管によるバブリング処理区(以下, 散気管区)と比較検討した。加圧溶解式については, RO水を対象に, 吐出圧力($0 \sim 0.5 \text{ MPa}$)と処理後の溶存オゾン濃度との関係を調査した。

さらに, 加圧溶解式のMB処理において, 作製される気泡が, 加圧下で過剰に溶存したガスのみによるものかどうかを確認するため, ガスを供給せずに装置を運転し, その時の濁度および溶存酸素濃度の変動を調査した。

結果および考察

1. MBの粒度分布・濁度測定

Table 2に, レーザ回折式粒度分布測定装置により測定した加圧溶解式のMB水の平均気泡径, および濁度の測定結果を示す。吐出圧力 $0 \sim 0.5 \text{ MPa}$ におけるRO水のMB処理区では, 測定された平均粒径は $30 \sim 60 \mu\text{m}$ 程度であり, 吐出圧力が大きいほど平均粒径が小さく, 濁度が

Table 2 Effect of discharge pressure and dissolved substances (NaCl, citric acid, and L-150 A on the average bubble diameter and turbidity after 5 min of MB treatment (pressurizing dissolution method) at 25 °C

Dissolved substance	Discharge		Turbidity (NTU*)
	pressure (MPa)	Average diameter (μm)	
RO water	0	74.2±9.5	96.7± 11.5
	0.1	58.6±3.0	861.7± 40.1
	0.2	64.3±1.6	1,313.3± 20.8
	0.3	60.0±2.3	1,488.3± 54.8
	0.4	45.8±2.6	1,965.0±173.0
	0.5	53.6±1.4	2,711.7±191.1
NaCl (0.85%)		55.8±3.6	785.3± 24.2
Citric acid (pH: 3)	0.4	60.8±2.8	600.4± 41.5
L-150A (0.01%)		0.4±0.1**	>3,000

*Nephelometric Turbidity Units. Indicator for MB concentration in this study.

**This value is considered an error caused by light scattering due to high turbidity.

Each value is mean±S.D. (N=3).

高くなる傾向がみられた。また、光学顕微鏡による観察においても、同様の傾向が確認された。

一方、0.4MPaにおけるNaCl、クエン酸区の粒度分布は、RO水区と同等であったが、濁度は非常に小さい値を示した。この濁度の測定結果は、目視による判断と同様であった。また、NaClおよびクエン酸区の気泡密度は小さく、光学顕微鏡を用いての観察は困難であった。界面活性剤存在下では、塩の添加により気泡の安定性は向上すると報告されているが⁹⁾、界面活性剤のない条件では、塩添加による気泡の安定化効果が得られないものと推察される。また、0.4MPaにおけるL-150A区の平均粒径の測定値は1μm以下であったが、光学顕微鏡では数十μm程度の気泡が多数観察された。このとき、濁度の測定値は検出限界以上であり、測定セル内の気泡密度が大きすぎたため多重散乱を起こし、測定に悪影響を及ぼしたものと推察された。MBの測定においては、気泡の密度や測定機器の利用方法などに留意する必要がある。

2. MB処理によるオゾン水の作製

(1) 溶質の影響 Fig. 2に、オゾン含有ガスを用いた散気管式のバブリング処理、もしくは機械攪拌式のMB処理により作製されたオゾン水の溶存オゾン濃度を示す(処理液量1ℓ, 処理時間3minおよび20min)。処理時間3minでは、溶存オゾン濃度は機械攪拌式のMB処理区において散気管処理区より高かったが、処理時間20minでは、処理方法の違いによる明確な差はみられなかった。また、溶存オゾン濃度は、処理時間10minと20minとの間には顕著な差はみられず、処理時間10min未満で平衡濃度に達していたと思われる。以上の結果より、本実験条件においては、MB処理はオゾンの効率的な溶解に寄与するが、平衡濃度には影響しないことが示された。

次いで、溶質の種類が溶存オゾンの平衡濃度に及ぼす

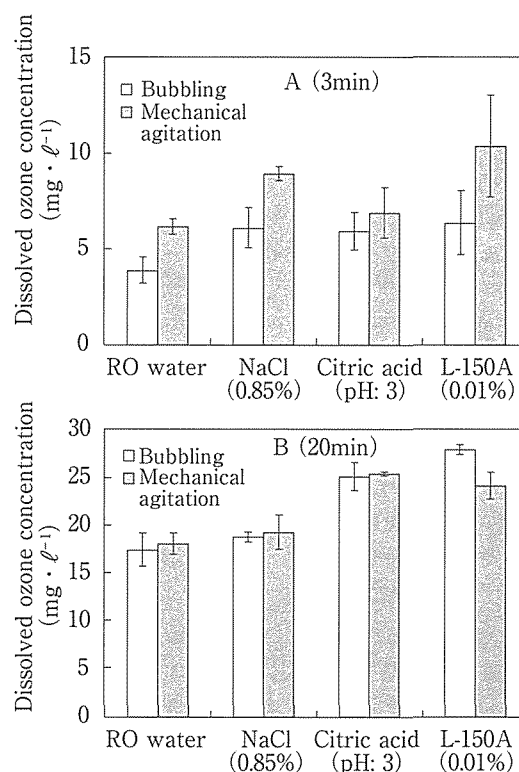


Fig. 2 Effect of dissolved substances (NaCl, citric acid, and L-150A) on dissolved ozone concentration during MB treatment (mechanical agitation) using ozone gas

Each solution (1ℓ) is ozonized at 25°C with 5% ozone gas (0.4ℓ · min⁻¹) by bubbling or bubbling accompanied by mechanical agitation (10,000rpm).

Each value is mean±S.D. (N=3).

影響について検討を行った。平衡オゾン濃度は、機械攪拌式によるMB処理(処理液量1ℓ, 処理時間20min)では、クエン酸、L-150A区>RO水区, NaCl区であった(Fig. 2)が、加圧溶解式(処理液量40ℓ, 処理時間60

min) では、クエン酸区>RO水区 \geq L-150A区>NaCl区であった (Fig. 3)。

ところで、溶存オゾン濃度変動は、オゾンガスの溶解と水中におけるオゾンの分解により説明できる。そこで、水中におけるオゾン分解に関する知見を得るために、各水溶液を用いてオゾン水を作製し、オゾン含有ガス供給停止後の溶液中のオゾン濃度変動を調査した。その結果、オゾン供給停止から30min後のオゾン残留割合は、RO水、NaCl、クエン酸、L-150Aの各試験区においてそれぞれ57, 24, 85, 41%であり (Fig. 4), 溶質の存在によりオゾン分解速度が異なることが認められた。オゾンは、共存塩のイオン強度の上昇によりオゾン自己分解の反応速度定数が上昇すること¹⁵⁾、pHの低下により分解速度が低下すること¹⁴⁾が知られており、本研究の結果はこれと符合する。界面活性剤添加によるオゾン分解特性につ

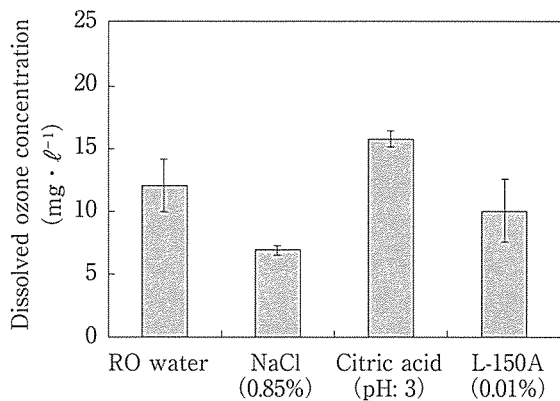


Fig. 3 Effect of dissolved substances (NaCl, citric acid, and L-150A) on dissolved ozone concentration during MB treatment (pressurizing dissolution method) using ozone gas

Each solution (40L) is ozonized for 60 min at 25°C with 5% ozone gas (0.4L·min⁻¹) by using MB equipment. Each value is mean \pm S.D. (N=3).

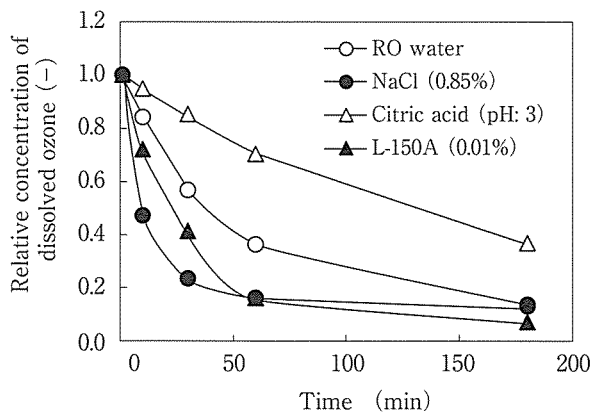


Fig. 4 Changes in dissolved ozone concentration for different solutions at 25°C after ozonation with 5% ozone gas (0.4 ℓ · min⁻¹)

The values are average of measured value (N=3).

いて論じた報告はみられないが、オゾンが界面活性剤と反応することにより、経時的に溶存オゾン濃度が低下したものと推察される。すなわち、水溶液をMB処理することで作製されるオゾン水の平衡濃度は、溶質の添加による溶解速度および分解速度の変化に影響を受けたものと考えられる。NaClおよびL-150A水溶液の溶存オゾン平衡濃度は、単位水量あたりのオゾン含有ガス供給量が相対的に大きい場合は、溶質の添加によるオゾン溶解速度向上により高くなり、逆に、単位水量あたりのオゾン含有ガス供給量が相対的に小さい場合は、溶質の添加によるオゾン分解速度増大により低くなったと考えられる。クエン酸水溶液については、オゾンガスの溶解速度はRO水と同等であるが、pHの低下による分解速度低下により、結果として平衡オゾン濃度が高くなると結論づけられた。

(2) 吐出圧力の影響 加圧溶解式のMB処理において、吐出圧力が溶存オゾン濃度に及ぼす影響を検討した結果を、Fig. 5に示す。MB密度が高い条件である吐出圧力0.4および0.5MPaより、0.2MPaにおいて溶存オゾン濃度が高かった。ヘンリーの法則から、オゾン溶解タンク中の溶存オゾン濃度は、タンク内が高圧であるほど高くなると考えられ、本研究の結果は一見矛盾する。

ここで、Fig. 6に、加圧溶解型のMB装置を、吐出圧力0および0.4MPaの条件下において、気体を供給せずに運転したときの、濁度および溶存酸素濃度の変化を測定した結果を示す。0.4MPaの条件下において、濁度の一時的な上昇および溶存酸素濃度の低下が観察された。この現象のメカニズムは明らかでないが、金属精錬法における、金属品質に悪影響を及ぼすガス(水素など)の除去方法が参考となる。この方法は、溶鋼中に気泡化した不活性ガスを導入し、溶存する有害ガスを気泡内に取込み、系外に排出するというプロセスである¹⁶⁾。気体供給なしの0.4MPaにおいて観察された溶存酸素濃度の低

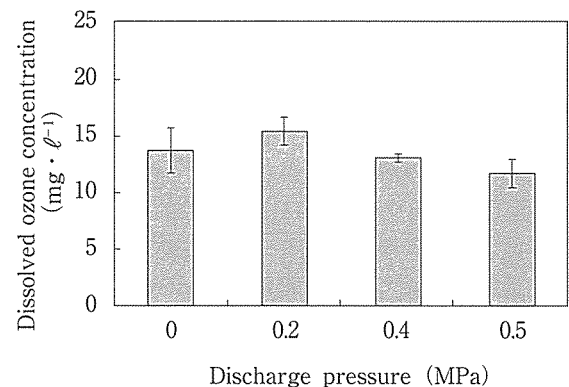


Fig. 5 Effect of discharge pressure on dissolved ozone concentration during MB treatment (pressurizing dissolution method) using ozone gas

Each solution (40L) is ozonized for 60 min at 25°C with 5% ozone gas (0.4 ℓ · min⁻¹) by using MB equipment. Each value is mean \pm S.D. (N=3).

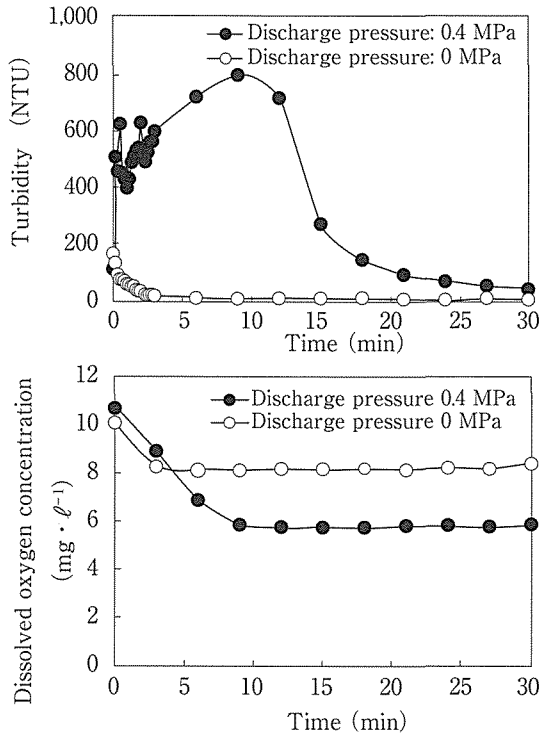


Fig. 6 Effect of discharge pressure on dissolved oxygen concentration at 25°C during MB treatment (pressurizing dissolution method) when no gas was supplied during measurements

The values are average of measured value (N=3).

下も同様に、吐出時の減圧によりMB化される過程で、発生した気泡中に溶存ガスが取り込まれた結果であると推察される。加圧溶解式によるオゾン水作製においても、最適なMB作製条件と溶存オゾン濃度を高める条件が一致しない原因は、MB発生時に溶存オゾンの一部が気泡内に取り込まれるためであると推察される。

なお、吐出圧力が高い条件においては、ポンプ部における温度上昇により溶存ガス濃度が低下することも考えられるが、検討した結果、ポンプ前後における温度差は0.34℃程度であり、オゾン濃度変動に及ぼす影響は小さいと考えられる。

以上の結果より、MB処理の条件により、粒度分布、気泡密度、ガスの溶解量は異なることが明らかとなった。MB技術を実用化する際には、利用目的に合致したMB作製方法および条件を用いることが重要である。また、過去の研究において、加圧溶解式のMB処理による水中へのガス供給効果について、気体の供給量の影響が大きく、吐出圧力の影響は小さい^{8),9)}と報告されている。しかし、本実験の結果から、加圧溶解式のMB発生装置を用いて溶存ガス濃度を制御する際には、供給ガス流量に加えて吐出圧力も制御因子に加える必要があることが明らかとなった。今後、MB処理により作製されたMB水および高濃度にガスが溶存する溶液を利用した、生鮮青果物を含む食品の品質管理技術開発について検討する予

定である。

要 約

マイクロバブル（以下、MB）の食品産業への応用に必要な基礎的な知見を得ることを目的として、MB処理条件と作製されるMB水の物性との関係およびオゾンガスのMB処理により作製されるオゾン水の特性について検討を行った。

- ① 加圧溶解式のMB作製装置では、吐出圧力0～0.5 MPaの範囲において、吐出圧力が高いほど気泡密度の指標である濁度が高く、平均粒径の小さいMB水が作製される傾向がみられた。また、MB水の濁度は、NaClおよびクエン酸の添加により顕著に低下し、L-150A（界面活性剤）の添加により顕著に増大した。
- ② 機械攪拌式のMB処理を行うことで、オゾン溶解効率が向上した。また、RO水と比較して、NaCl区およびL-150A区では、オゾン溶解効率は高いが平衡濃度は低く、クエン酸区では、オゾン溶解効率は同程度であるが平衡濃度は高いことが確認された。
- ③ 加圧溶解式のMB装置を用いて、吐出圧力が溶存オゾン濃度に及ぼす影響について検討した結果、溶存オゾン濃度は、MB作製に最適な0.4MPaではなく、0.2MPaで最も高くなった。この現象は、MB作製に最適な条件下では、溶存オゾンの一部が気泡内に取り込まれ、系外に排出されるためと推察した。

謝 辞 本研究は、農林水産省委託プロジェクト研究「食品素材のナノスケール加工及び評価技術の開発」により実施されたものである。

文 献

- 1) 中村宣貴・椎名武夫：殺菌・洗浄，マイクロバブル・ナノバブルの最新技術（シーエムシー出版，東京），pp.197～203（2007）
- 2) 許 晴怡・中村宣貴・椎名武夫：マイクロ・ナノバブル水の製造と利用，フードナノテクノロジー（シーエムシー出版，東京），pp.150～157（2009）
- 3) 許 晴怡・中村宣貴・椎名武夫：マイクロ・ナノバブルの食品産業への応用，食品と開発，45，7～9（2010）
- 4) XU, Q., NAKAJIMA, M., ICHIKSWA, S., NAKAMURA, N. and SHINA, T. : A comparative study of microbubble generation by mechanical agitation and sonication, *Innov. Food Sci. Emerg.*, 9, 489～494（2008）
- 5) XU, Q., NAKAJIMA, M., ICHIKSWA, S., NAKAMURA, N., ROY, P., OKADOME, H. and SHINA, T.: Effects of surfactant and electrolyte concentrations on bubble formation and stabilization, *J. Colloid Interf.*

- Sci.*, 332, 208~214 (2009)
- 6) XU, Q., LIU, Z., NAKAJIMA, M., ICHIKAWA, S., NAKAMURA, N., ROY, P., OKADOME, H. and SHIINA, T.: Characterization of a soybean oil-based biosurfactant and evaluation of its ability to form microbubbles, *Bioresour. Technol.*, 101, 3711~3717 (2010)
- 7) 高橋正好: 微細気泡の最新技術 (株式会社エヌ・ティー・エス, 東京), pp.3~12 (2006)
- 8) 李 攀: 水処理におけるマイクロバブルの基礎研究, マイクロバブル・ナノバブルの最新技術 (シーエムシー出版, 東京), pp.126~132 (2007)
- 9) 山田哲史・吉見裕子・寺田隆史・大野健一・南川久人: 加圧溶解法により発生したマイクロバブルの水中への酸素供給効果に関する研究, *混流相*, 21, 84~90 (2007)
- 10) 米本幸弘・功刀賛彰: マルチスケール混相流体方程式に基づく微細気泡の合一・反発挙動に関する基礎的研究, *日本機械学会論文集 (B編)*, 75 (757), 1790~1797 (2009)
- 11) SEBBA, F.: *Foams and Biliquid Foams, Aphrons* (John. Wiley & Sons, New York), p.32 (1987)
- 12) 宮崎泰至・佐藤孝紀・伊藤秀範: パルス放電による水中の難分解性化学物質分解, *電気学会論文誌A (基礎・材料・共通部門誌)*, 128, 172~178 (2008)
- 13) 杉光英俊: オゾン滴定法, *オゾンハンドブック* (日本オゾン協会, 東京), pp.137~139 (2004)
- 14) SOTELO, J. L., BELTRAN, J., BENITEZ, F. J. and BELTRAN-HEREDIA, J.: Ozone Decomposition in Water: Kinetic Study, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 26, 39~43 (1987)
- 15) SOTELO, J. L., BELTRAN, F. J., BENITEZ, F. J. and BELTRAN-HEREDIA, J.: Henry's law constant for the ozone-water system, *Wat. Res.*, 23, 1239~1246 (1989)
- 16) 常川雅功: 精練用フラックスによるアルミニウム溶湯処理技術, *軽金属*, 54, 75~81 (2004)
(平成23年8月3日受付, 平成24年2月20日受理)