

マイクロバブル豆乳泡沫の起泡力と排液率に影響する諸因子

Factors Affecting the Foaming Power and Drainage Ratio of Soy Milk Foam Composed of Microbubbles

柘植光代*^s 高橋智子** 岩崎裕子* 大越ひろ*

Mitsuyo Tsuge

Tomoko Takahashi

Yuko Iwasaki

Hiro Ogoshi

Microbubble (MB) and bamix (ba) foam samples were obtained from plain soy milk with an added thickening agent. The relationships among the foaming power (Fp), drainage ratio (β), textural properties and the factors of bubble diameter (d), bubble number (N), and foam film thickness (l) were investigated.

MB foams obtained by longer blowing time had higher hardness, adhesiveness and cohesiveness. The MB foams increased Fp and decreased β in increasing adhesiveness. N was fewer, the kinetic constants of N decrease were lower, d was larger and l for the MB foams was thinner than these parameters for the ba foams. Thinner l for the MB foams caused higher Fp and lower β . Fp and β were related to l and d with both the MB and ba foams, and the elastic modulus and adhesiveness were related to d , N and l by a multiple regression analysis. The values predicted by the analysis correlated well with the measured values. The equations for Fp and β are presented with respect to the soy milk viscosity and blowing time.

キーワード：マイクロバブル microbubble；起泡力 foaming power；排液率 drainage ratio；テクスチャー特性 textural property；気泡数 bubble number；泡膜厚 foam film thickness

緒言

起泡操作は従来から調理や食品製造に用いられ、通常は食品を軽くするために使用されるが、さらに外観の均一化、フレーバーの分散、テクスチャーの改変にも利用される。起泡操作は消費者の選択とニーズに合った新しい製品を開拓し、しかも空気はコストがかからない材料である¹⁾。多くの食品の成分として欠かせない泡沫は、一定のレベルの起泡力と安定性が得られることが必要であり、起泡力と安定性を決定する因子を検討することは食品への応用にとって重要である^{2,3)}。タンパク質からなる泡沫も、起泡力と安定性の2つの因子で特徴付けられ、起泡力は泡沫体積の増加の測定によって、安定性は泡沫からの排液の速度あるいは、経時的な泡沫体積の減少速度によって決められる⁴⁾。

泡沫の特性に関与する因子について、Princen ら⁵⁾は、泡沫の降伏応力を表面張力、気体体積、気泡径を用いて推定した。Luck ら²⁾及びPernell ら⁶⁾は一般的なモデルとして降伏応力と気体体積の三乗根は直線関係にあると推定し、卵白タンパク質とホエータンパク質の両泡沫に対して、このモデルの適合性を確認した。Townsend ら⁷⁾はタンパク質からなる泡沫の起泡性、安定性に及ぼすタンパク質の疎水性、試料溶液粘性率の影響を重回帰分析を用いて検討

した。Van der Ven ら⁸⁾はホエー及びカゼイン加水分解物による起泡実験の結果から、起泡力、泡沫安定性と加水分解物の分子量からなる重回帰モデルを作成した。Yang ら⁹⁾は卵白タンパク質とホエータンパク質から調製した泡沫の微細構造（気泡の大きさ、気泡総数の動的变化）が巨視的スケールでみられる物理特性（オーバーラン、安定性、降伏応力）をどのように変えるかについて報告した。

Xu ら¹⁰⁾は、マイクロスケールの気泡は大きな気泡と比べて異なる特性を持ち、広く応用できる可能性があると報告した。この中で、オゾンマイクロバブルを使った浄水・廃水処理、酸素供給を目的とする水産養殖、水耕栽培、好気性発酵が特に興味を持たれているが、マイクロバブルの発生と特性に関する因子の影響については情報が少ない、と述べた。久木崎¹¹⁾は多孔質ガラス膜を使用してマイクロ・ナノバブルを発生させ、これをクリームに注入して作成したホイップクリームについて報告した。

これまで筆者らはマイクロバブル (MB) を用いた食品の調理・加工法を開発する基礎として、粘性率の異なる豆乳を試料として MB を用いた泡沫について起泡力、排液率、動的粘弾性、気泡径を測定して、電動ハンディー・フードプロセッサーであるバーミックス (ba) により得られた泡沫と比較検討を行った^{12,13)}。この中で筆者らは、MB 泡沫は ba 泡沫に比べて貯蔵弾性率 G' が高く、起泡時間を延長すると G' が上昇して、起泡力上昇と排液率低下に寄与することを報告した¹³⁾。さらに、MB 泡沫は ba 泡沫に比べて、起泡直後の気泡径は大きい気泡径のばらつきが小さく、また気泡径の拡大速度が遅いことを明らかにした¹³⁾。

今回は MB 泡沫と ba 泡沫のテクスチャー特性値および

* 日本女子大学
(Japan Women's University)

** 神奈川工科大学
(Kanagawa Institute of Technology)

^s 連絡先 日本女子大学家政学部
〒112-8681 東京都文京区目白台 2-8-1
TEL 03(5981)3434 FAX 03(5981)3434

気泡数、泡膜の厚さ（泡膜厚）を求め、気泡径、気泡数、泡膜厚などの泡沫の諸因子と起泡力、排液率、テクスチャー特性値の関連性を明らかにすることを目的に研究を行った。さらに泡沫の起泡力、排液率と試料の粘性率、起泡時間などの起泡条件の関係についても検討して、一定の知見を得たので報告する。

実験方法

1. 試料の調製方法

試料及び試料の調製方法は前報に準じた^{12,13)}。市販豆乳の「無調整豆乳」((株)フードケミファ製造)を2 l トールビーカー中に秤量し、20.0℃の恒温槽中に30分間静置した後、トロミ調整食品のトロミアップA(販売者:日清オイリオグループ(株), 原材料名:デキストリン, でん粉, 増粘多糖類)を0.00, 0.10, 0.25 wt% 添加し、手動攪拌してから20.0℃の恒温槽中で1時間静置して1,200 gの試料を調製した。添加濃度が少ない方から試料A, B, Cとした。前報で述べたように¹³⁾, トロミ調整食品の添加濃度0.50%の豆乳試料はMB起泡およびba起泡ともに十分な起泡が行われなかったため、今回は試料A, B, Cの3試料について報告する。なお調製した試料のずり速度1 [s⁻¹]におけるみかけの粘性率(以下、粘性率とする)は、コーンプレート型回転粘度計R型(東機産業製)を用いて測定し、試料A, B, Cの順に2.82, 6.08, 16.7 mPa・sであった¹²⁾。

2. 試料の起泡方法

2 l トールビーカー中に1,200 g 調製した試料A, B, Cを20.0℃の恒温槽中に静置し、試料液中に機械攪拌式マイクロバブル発生機構内蔵のナノスター(富貴製作所製)を用いて、無負荷時の回転数は12,048 rpm, 空気吸い込み口からの空気吸い込み流量は毎分1 mlの条件で駆動させて、MB泡沫を得た。ba泡沫は電動ハンディー・フードプロセッサー(バーミックスM250; スイス・ESGE社製)を試料液中で12,000 rpmの条件で回転させて泡沫を得た。起泡時間は両起泡法ともに3, 5, 10, 15分間とした^{12,13)}。

3. 測定方法

1) テクスチャー特性

起泡時間3, 5, 10, 15分のMB泡沫およびba泡沫を起泡直後にステンレス製円形測定容器(直径50 mm, 高さ15 mm)に充填して表面をすり切り、測定用試料とした。テクスチャー特性(硬さ, 付着性, 凝集性)はレオナー((株)山電, RE2-3305)を用いて測定した。測定には直径30 mmの円柱型プランジャーを用い、クリアランス5 mm, 圧縮速度5 mm/sで定速2回圧縮運動、測定温度20℃の条件で行い、テクスチャー記録曲線を得た。記録および解析は自動解析装置((株)山電, TAS-3305(W))を用いた。

2) 起泡力と気体体積率

起泡させて得た泡沫を重量既知の測定容器(直径

55 mm, 高さ19 mm)に充填し、泡沫試料の重量を測定した。泡沫中の液体体積に対する気体体積の割合[%]を起泡力 F_p として算出した^{12,13)}。また泡沫全体積に対する気体体積の割合を気体体積率 ϕ として算出した。

3) 気泡径, 気泡数, 泡膜厚

起泡時間3, 5, 15分の泡沫を起泡直後にプラスチック製円形測定容器(直径45 mm, 高さ19 mm)に充填して撮影用試料とした。撮影用試料を実体顕微鏡(OLYMPUS SZX9)で観察し、画像は3 CCD-Digital Color Cameraで撮影した後、汎用画像処理・計測ソフトWin Roof V5.8.1を用いて解析し、気泡径、気泡数を測定した。顕微鏡撮影は同一泡沫について0分後(起泡直後)~60分後に行い、気泡径、気泡数の経時変化を観察した。なお気泡数は単位面積($1 \times 10^4 \mu\text{m}^2$)あたりの気泡の個数として算出した。

さらに気泡数減少速度を以下のように求めた。起泡0分後(起泡直後)の気泡数 N_0 から t 分経過後の気泡数 N_t を引くと、 t 分間に減少した気泡数 $N_0 - N_t$ が得られる。 $N_0 - N_t$ を N_0 で除した気泡数減少速度が経過時間 t [min]に比例すると仮定すると(1)式が得られる。

$$(N_0 - N_t)/N_0 = k_N t \quad (1)$$

(1)式を変形すると(2)式が得られる。

$$N_t/N_0 = 1 - k_N t \quad (2)$$

ここで k_N は気泡数減少速度定数[1/min]である。

泡沫は球形の気泡から構成されると考えると、気泡のまわりは球体の液体泡膜によって隔てられる。泡膜の厚さ(泡膜厚)を l [μm]、泡膜を含む泡沫気泡の直径を d [μm]とすると、泡沫中の気体部分の体積(気体体積) V_B は

$$V_B = (\pi/6)(d - 2l)^3 \quad (3)$$

となる。一方、泡膜の体積(液体体積) V_L は

$$V_L = (\pi/6)d^3 - V_B \quad (4)$$

である。前述のように気体体積率 ϕ は泡沫全体積($V_B + V_L$)に対する気体体積 V_B の割合と定義したので、

$$\phi = V_B/(V_B + V_L) \quad (5)$$

となる。すなわち

$$\phi = (\pi/6)(d - 2l)^3/(\pi/6)d^3 = (1 - 2l/d)^3 \quad (6)$$

$$\phi^{1/3} = 1 - 2l/d \quad (7)$$

これより泡膜厚 l を求める(8)式が得られる。

$$l = (d/2)(1 - \phi^{1/3}) \quad (8)$$

4) 排液率

起泡直後の泡沫 5.0 ± 0.5 gまたは 10.0 ± 0.5 gを角度付きロートに秤量し、ロート表面にラップフィルムをかけて100 mlのメスシリンダー上に置いた。20.0℃の条件下で経過時間2~60分後にメスシリンダー中に落下した排液重量を測定し、経過時間 t [min]における排液率 β を(排液重量)/(泡沫の初期重量)から求めた¹²⁾。また経過5分後の排液率を β_5 として求めた。

4. 統計解析

測定は3回以上繰り返し、結果は統計解析ソフト(Excel

統計 2008, SPSS Statistics 17.0) を用いて t 検定, 一元配置分散分析, クラスカル・ウォリス検定, 相関分析, 重回帰分析を行い, $p < 0.05$ を有意とした。

結果および考察

1) テクスチャー特性と起泡力, 排液率との関連性

起泡直後の泡沫試料における硬さ, 付着性, 凝集性を測定し, 起泡時間 3 分と 15 分の結果を Fig. 1 に示した。

硬さは Fig. 1(1) に示すように, MB 泡沫は試料 B の起泡 15 分と試料 C の起泡 3 分, 15 分において ba 泡沫より高値であった。起泡時間の延長は MB 泡沫では試料 A, B で硬さが上昇したが, ba 泡沫では起泡時間の影響はみられなかった。

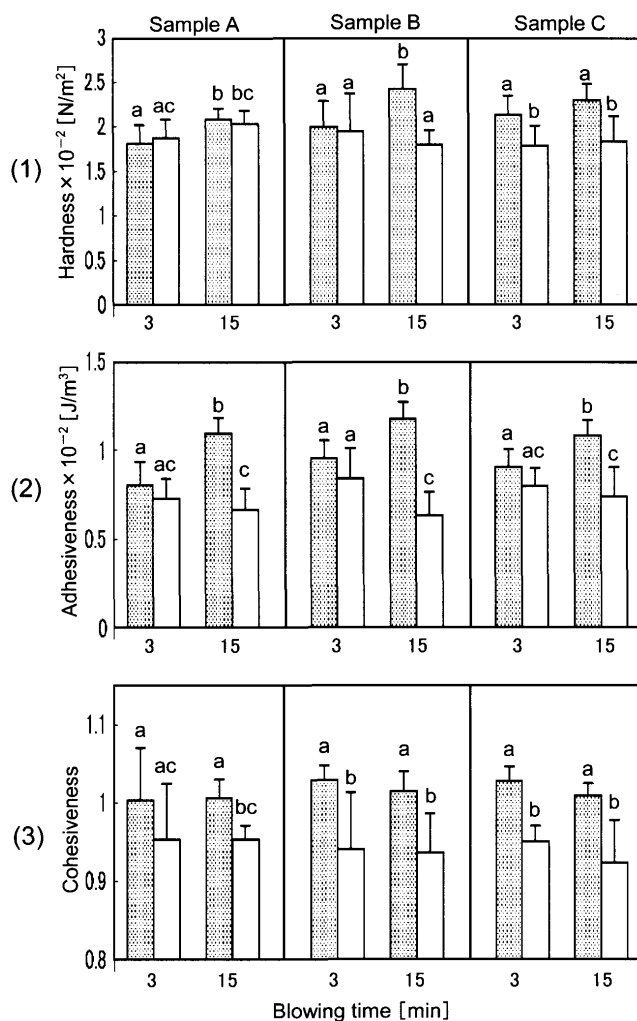


Fig. 1. Mechanical properties of texture of soy milk foams with various apparatuses, blowing time and samples ($n \geq 3$). Thickening agents were added to soy milk. Added concentrations were 0.00 (Sample A), 0.10 (Sample B) and 0.25 wt% (Sample C). ■: MB foams blown with NANOSTAR (microbubble generator by mechanical agitation method) □: ba foams blown with bamix (electric handy-food processor) Different letters (abc) show significant difference among same samples at $p < 0.05$.

付着性は Fig. 1(2) に示すように, すべての試料において MB 泡沫の起泡 15 分は ba 泡沫より高値であり, MB 泡沫は起泡時間延長により付着性が上昇した。ba 泡沫の付着性は試料 B では起泡 3 分が 15 分より高値であったが, それ以外は起泡時間の影響はなかった。

凝集性は Fig. 1(3) に示すように, 試料 B, C では MB 泡沫が ba 泡沫より高値で, また全試料の MB 泡沫, ba 泡沫ともに起泡 3 分と 15 分の間には有意な差は認められなかった。以上の結果から, 試料 B, C では起泡時間 15 分の MB 泡沫は ba 泡沫よりテクスチャー特性値の硬さ, 付着性, 凝集性は高いことが明らかになった。

泡沫の起泡力とテクスチャー特性の関係を検討するために, 起泡力と硬さ, 付着性, 凝集性について相関分析を行い, MB 泡沫および ba 泡沫ともに相関係数が最も高かった起泡力と付着性の関連性を Fig. 2 に示した。試料 A, B, C において, MB 泡沫と ba 泡沫は付着性が増加すると起泡力が上昇した。一方, 起泡時間が最も長い 15 分では, MB 泡沫は起泡力と付着性が高いが ba 泡沫は両値が低い傾向を示し, 起泡時間の影響は両泡沫間で異なった。

泡沫の安定性を評価するために, 筆者らはこれまで 5 分後の排液率を指標として, 起泡方法と起泡時間の影響について報告した¹³⁾。そこで排液率とテクスチャー特性の関係を検討するために, 5 分後排液率と硬さ, 付着性, 凝集性について相関分析を行い, MB 泡沫および ba 泡沫ともに相関係数が最も高かった 5 分後排液率と付着性の関連性を

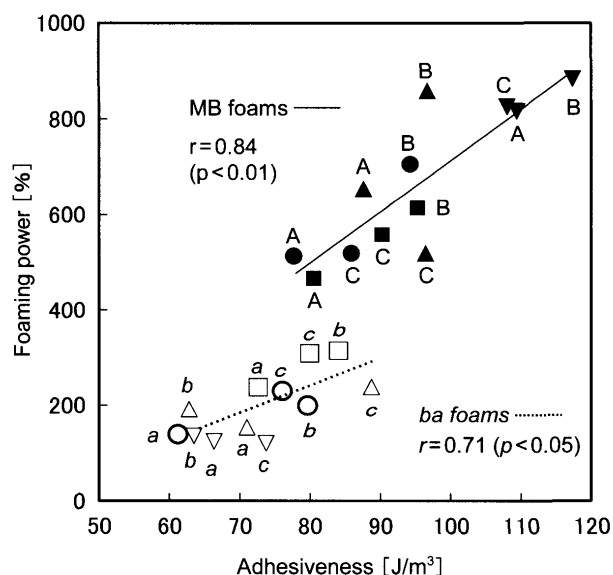


Fig. 2. Relationships between foaming power and adhesiveness in soy milk foams ($n \geq 3$).

Foaming power [%] = $100 \times [\text{volume of gas phase in foam} / \text{volume of liquid phase in foam}]$

■ MB 3 min ● MB 5 min ▲ MB 10 min ▼ MB 15 min □ ba 3 min ○ ba 5 min △ ba 10 min ▽ ba 15 min

The letters A, B, C show the samples of MB foams and the letters a, b, c show the samples of ba foams.

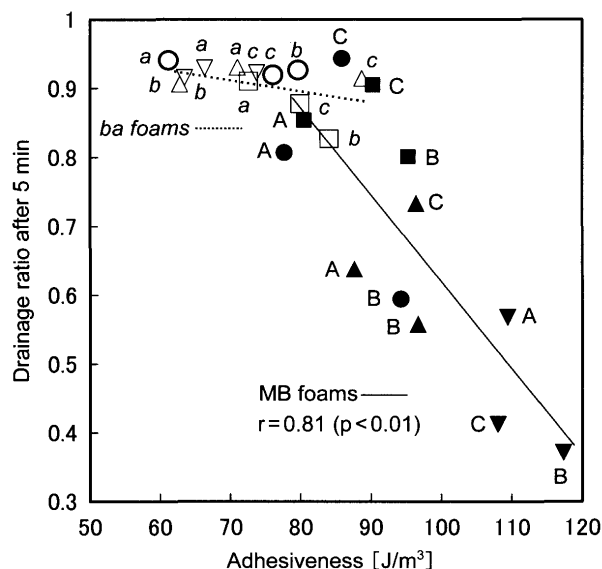


Fig. 3. Relationships between drainage ratio after 5 min and adhesiveness in soy milk foams ($n \geq 3$).

Drainage ratio after 5 min = [drainage weight after 5 min/foam weight at the beginning]

■ MB 3 min ● MB 5 min ▲ MB 10 min ▼ MB 15 min
□ ba 3 min ○ ba 5 min △ ba 10 min ▽ ba 15 min
The letters A, B, C show the samples of MB foams and the letters a, b, c show the samples of ba foams.

Fig. 3 に示した。MB 泡沫では試料 A, B, C ともに付着性が増すと排水率が低下し、すなわち安定性が増し、特に起泡時間が長い泡沫は付着性と安定性が高かった。一方、ba 泡沫では付着性が増すと排水率が低下する傾向はみられたが、起泡時間の影響は明確ではなかった。

2) 気泡数, 気泡数減少速度定数

試料 A, B, C の起泡時間 3, 5, 15 分の泡沫について、起泡直後(起泡 0 分後)から 60 分後の単位面積 ($1 \times 10^4 \mu\text{m}^2$) あたりの気泡数の経時変化を Fig. 4 に示した。起泡直後の気泡数は、試料 A, B では ba 泡沫の起泡 15 分が最も多く、試料 C ではすべての ba 泡沫は MB 泡沫より有意に多かった。試料 A, B においては経過 5 分以降も ba 泡沫の気泡数は MB 泡沫より多い傾向にあったが、30 分以降は差が少なくなった。試料 C は経過 5 分以降は MB 泡沫と ba 泡沫の気泡数の差が少なかった。MB 泡沫, ba 泡沫の全泡沫において時間が経過すると気泡数が減少した結果から、泡沫が時間とともに合一、崩壊したことが推察される。

MB 泡沫と ba 泡沫の気泡数の減少速度を比較するために、起泡時間 3 分と 15 分の泡沫の気泡数減少速度定数 k_N [/min] を (2) 式から求めて、試料別、起泡時間別に比較した (Table 1)。定数 k_N の値が大きいくほど気泡数の減少速度が速く、泡沫が不安定であることを示す。経過時間 5 分から 60 分までの k_N の平均値は MB 泡沫が $1.28 \times 10^{-2} \sim 3.83 \times 10^{-2}$ [/min], ba 泡沫が $1.48 \times 10^{-2} \sim 10.76 \times 10^{-2}$ [/min] であり、MB 泡沫は気泡数減少速度定数 k_N が ba

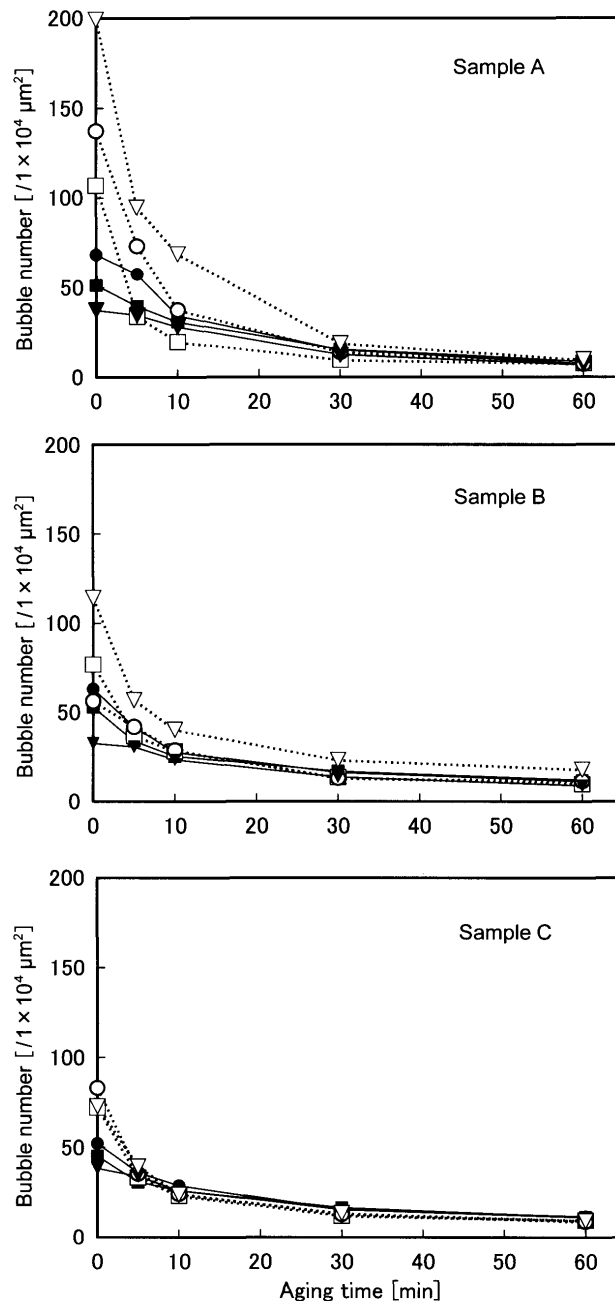


Fig. 4. Changes of bubble number in soy milk foams ($n \geq 3$). Bubble number [$1/10^4 \mu\text{m}^2$] was measured by microscopic observation and image analysis.

■ MB 3 min ● MB 5 min ▼ MB 15 min
□ ba 3 min ○ ba 5 min ▽ ba 15 min

泡沫より小さく、安定であることが示された。また MB 泡沫は経過時間ごとの k_N 値の差は小さかった。これに対して、ba 泡沫は経過時間ごとの k_N 値の差が大きく、特に経過 5 分と 10 分における k_N 値が 10.76×10^{-2} [/min] と 6.84×10^{-2} [/min] と大きく、初期段階の泡沫は不安定であることが示唆された。前報¹³⁾ で述べたように、MB 泡沫は ba 泡沫に比べて気泡径の拡大速度が遅く、MB 泡沫は気泡数、気泡径ともに経時的な変化が少なく、これら 2

マイクロバブル豆乳泡沫の起泡力と排液率に影響する諸因子

Table 1. Kinetic constant of bubble number decrease $k_N \times 10^2$ [/min] in soy milk foams: effects of aging time, blowing time, apparatuses and samples.

aging time	blowing time (min)	MB			ba		
		Sample			Sample		
		A	B	C	A	B	C
5	3	4.53	7.07	6.38	13.66	10.37	10.79
	15	1.44	1.22	2.33	10.52	10.01	9.22
	k_N average		3.83			10.76	
10	3	3.98	5.20	4.24	8.15	6.31	6.81
	15	2.47	2.81	3.25	6.56	6.47	6.74
	k_N average		3.66			6.84	
30	3	2.31	2.25	2.13	3.03	2.74	2.78
	15	2.22	1.93	2.00	3.02	2.65	2.72
	k_N average		2.14			2.83	
60	3	1.38	1.29	1.25	1.55	1.45	1.45
	15	1.35	1.22	1.19	1.59	1.40	1.46
	k_N average		1.28			1.48	

Kinetic constants of bubble number decrease k_N [/min] were obtained by Eq. (2).

因子から見ても安定であることが明らかになった。

3) 気泡径, 泡膜厚

起泡直後の泡沫の気泡径ならびに泡膜厚と起泡時間の関係を Fig. 5 に示した。気泡径は起泡時間にかかわらず全試料で MB 泡沫が ba 泡沫より高値であった。MB 泡沫の気泡径は試料間には有意な差は認められないが、起泡時間 3 分、5 分よりも 15 分は大きくなる傾向を示し、一方、ba 泡沫の気泡径は試料 A の泡沫より試料 C の方が大きい、起泡時間による有意な差は認められなかった。

泡膜厚についてみると、試料 A の起泡時間 3 分の MB 泡沫は ba 泡沫より厚くなっているが、それ以外の泡沫では MB 泡沫が ba 泡沫より全てにおいて薄いことが認められた。ba 泡沫の泡膜厚は起泡 3 分より起泡 5 分、15 分のほうが厚いが、MB 泡沫では起泡時間による差はみられなかった。また MB 泡沫、ba 泡沫ともに試料間には有意な差は認められなかった。

4) 起泡力, 排液率と気泡径, 気泡数, 泡膜厚との関連性

泡沫の起泡力、排液率と気泡径、気泡数、泡膜厚との関連性を検討した。起泡力と気泡径、気泡数、泡膜厚について相関分析を行い、MB 泡沫および ba 泡沫ともに相関係数が最も高かった起泡力と泡膜厚との関連性を Fig. 6 に示した。MB 泡沫、ba 泡沫ともに泡膜厚が薄くなると起泡力が上昇した。起泡時間 15 分の泡沫は、MB 泡沫では泡膜が薄く起泡力が高いが、ba 泡沫では泡膜が厚く起泡力が低く、MB 泡沫とは逆の関係がみられた。

次に 5 分後の排液率と気泡径、気泡数、泡膜厚との相関分析を行い、MB 泡沫および ba 泡沫ともに相関係数が最も高かった泡膜厚と排液率との関連性を Fig. 7 に示した。MB 泡沫では泡膜厚が減少すると排液率が低下し、特に試料 A、B、C の起泡時間 15 分の泡沫は泡膜厚が薄く、排液

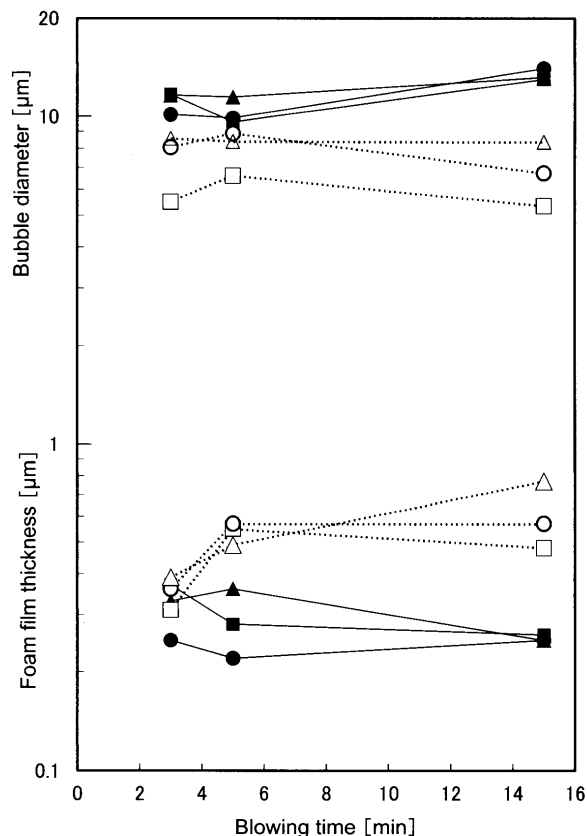


Fig. 5. Bubble diameter and foam film thickness of soy milk foams ($n \geq 3$).

Bubble diameter was measured by microscopic observation and image analysis. Foam film thickness was obtained by Eq.(8).

■ A-MB ● B-MB ▲ C-MB
□ A-ba ○ B-ba △ C-ba

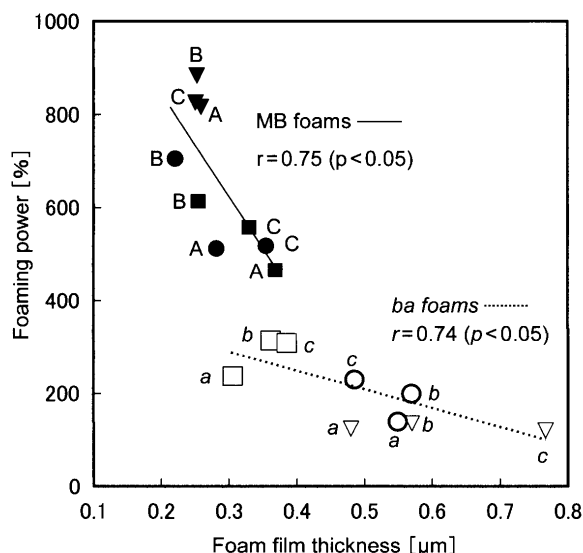


Fig. 6. Relationships between foaming power and foam film thickness in soy milk foams ($n \geq 3$).

■ MB 3 min ● MB 5 min ▼ MB 15 min
□ ba 3 min ○ ba 5 min ▽ ba 15 min
The letters A, B, C show the samples of MB foams and the letters a, b, c show the samples of ba foams.

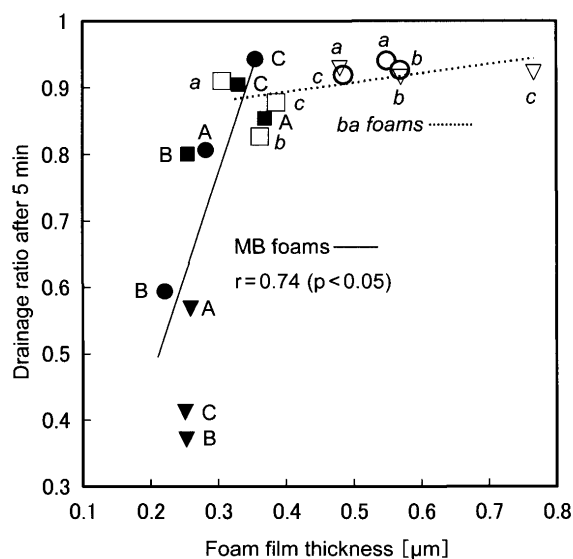


Fig. 7. Relationships between drainage ratio after 5 min and foam film thickness in soy milk foams ($n \geq 3$).

■ MB 3 min ● MB 5 min ▼ MB 15 min
□ ba 3 min ○ ba 5 min ▽ ba 15 min
The letters A, B, C show the samples of MB foams and the letters a, b, c show the samples of ba foams.

率が低くて安定であった。一方、ba 泡沫では泡膜厚と排水率の関係に及ぼす起泡時間の影響は明らかではなかった。

5) 重回帰分析による起泡力、排水率と気泡径、気泡数、泡膜厚との関連性の検討

起泡力あるいは5分後の排水率と気泡径、気泡数、泡膜厚などの諸因子がどのような関係にあるかを検討するために、重回帰分析を行った。起泡力または排水率を目的変数 z として、気泡径、気泡数、泡膜厚を説明変数とする重回帰分析を行い、得られた結果から (9) 式で示すような関係が得られた。

$$z = ax^by^c \quad (9)$$

ただし a は定数項、 x, y は説明変数、 b, c は係数である。

これら重回帰式の定数項、説明変数、係数を Table 2 に示した。

起泡力については、MB 泡沫と ba 泡沫ともに x を泡膜厚、 y を気泡径とする重回帰式が得られ、この式に基づいて起泡力の推定値を算出して測定値との適合性を検討した。その結果、MB 泡沫については Fig. 8(1) で示すように適合性は良好であった ($r=0.99$)。ba 泡沫についても適合性は良好であった ($r=0.99, p<0.01$)。

排水率については、MB 泡沫と ba 泡沫ともに x を泡膜厚、 y を気泡径とする重回帰式が得られ、式から得られた排水率の推定値と測定値の適合性は、MB 泡沫では Fig. 8(2) で示すように良好であり ($r=0.94$)、ba 泡沫ではやや

Table 2. Results of multiple regression analysis for foaming power, drainage ratio, elastic modulus and adhesiveness in soy milk foams.

The multiple regression equation: $z = ax^by^c$ (9)

z (dependent variable)	Blowing apparatus	a	x	b	y	c	R^2	r
Foaming power	MB	10.86	l	-1.06	d	1.12	0.99	0.99
	ba	4.99	l	-1.33	d	1.34	0.99	0.99
Drainage ratio	MB	246.70	l	1.38	d	-1.71	0.90	0.94
	ba	1.21	l	0.10	d	-0.11	0.57	0.75
Elastic modulus	MB	3.29	l	-0.50	d	0.57	0.87	0.93
	ba	0.37	N	0.86			0.78	0.94
Adhesiveness	MB	315.37	N	-0.45	l	-0.42	0.98	0.99
	ba	185.23	N	-0.23	l	-0.16	0.79	0.90

R^2 ; coefficient determination in multiple regression

r ; correlation coefficient between predicted value and measured value

l ; foam film thickness [μm], d ; bubble diameter [μm], N ; bubble number [$1 \times 10^4 \mu\text{m}^2$]

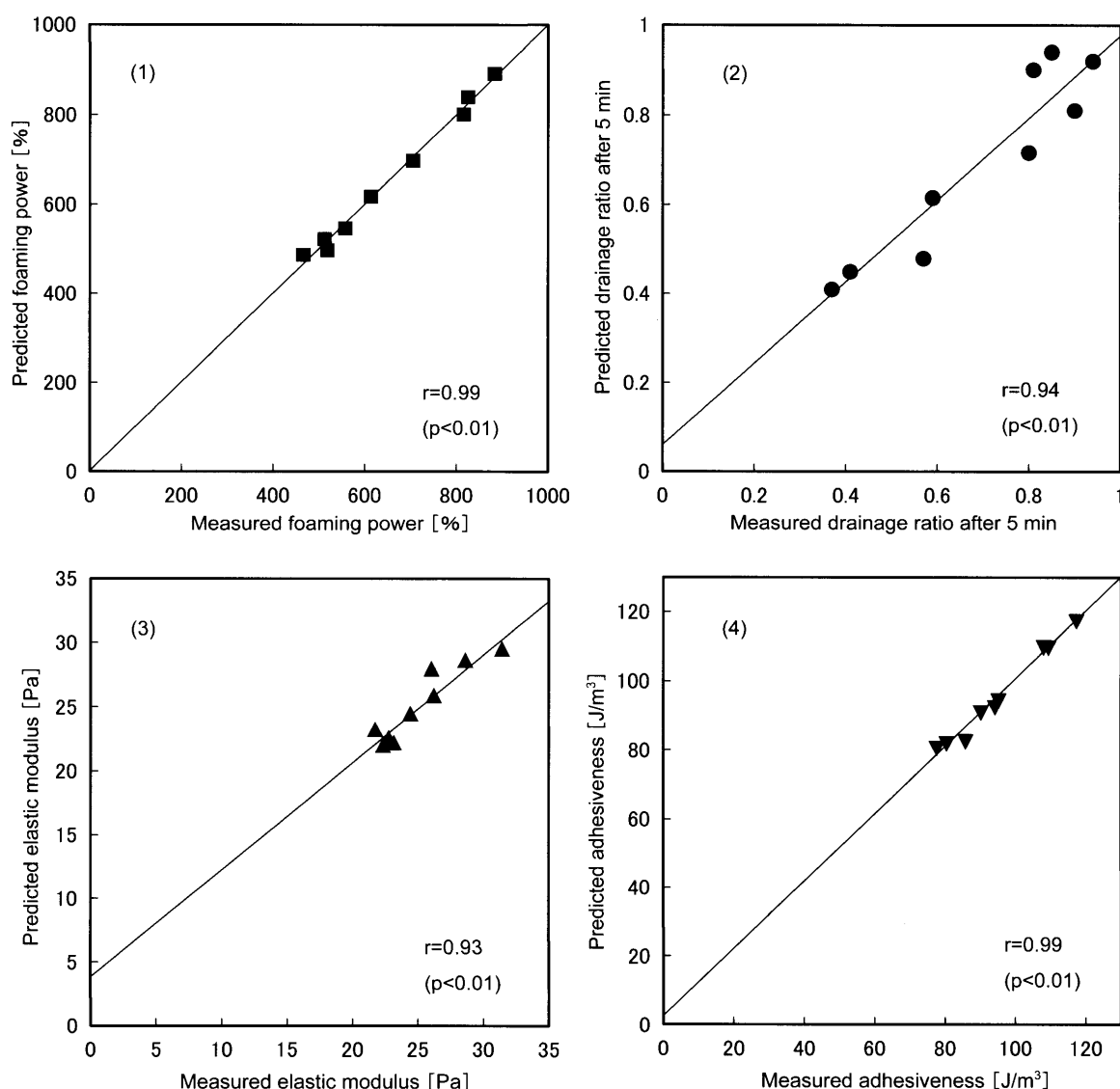


Fig. 8. Correlation between predicted and measured values in MB foams ($n \geq 3$).

(1) foaming power, (2) drainage ratio after 5 min, (3) elastic modulus, (4) adhesiveness

低い ($r=0.75$, $p<0.05$), 有意な関連性がみられた。

以上の結果から, MB 泡沫と ba 泡沫の起泡力および排水率は泡沫の泡膜厚と気泡径を用いて説明できることが示された。

6) 重回帰分析による貯蔵弾性率, 付着性と気泡径, 気泡数, 泡膜厚との関連性の検討

前報¹³⁾で, MB 泡沫は貯蔵弾性率 G' の増加とともに起泡力は上昇し, 排水率は低下して, 泡沫の弾性は起泡力と安定性に寄与していることを報告した。さらに Fig. 2, 3 で示したように, 付着性が増加すると起泡力は上昇し, 排水率は低下することが認められ, 付着性は起泡力と安定性に寄与していることを明らかにした。そこで, これら2つのレオロジー特性値と気泡径, 気泡数, 泡膜厚との関連性を重回帰分析を用いて検討した。なお, G' についてのデータは前報¹³⁾の測定結果を用いた。 G' あるいは付着性を

目的変数 z として, 気泡径, 気泡数, 泡膜厚を説明変数とする重回帰分析を行ったところ, (9)式で示した重回帰式が得られ, 定数項, 説明変数, 係数を Table 2 に示した。

G' を目的変数とした重回帰式は, MB 泡沫では x を泡膜厚, y を気泡径とする式が得られ, この式に基づいた G' の推定値と測定値の適合性を Fig. 8(3) に示した ($r=0.93$)。ba 泡沫では x は気泡数からなる単回帰式が得られ ($r=0.94$, $p<0.01$), MB 泡沫と ba 泡沫はともに推定値と測定値の適合性は良好であった。

付着性を目的変数とした重回帰式は, MB 泡沫と ba 泡沫ともに x を気泡数, y を泡膜厚とする重回帰式が得られた。重回帰式から得られた付着性の推定値と測定値の適合性は, MB 泡沫は Fig. 8(4) で示すように ($r=0.99$), ba 泡沫 ($r=0.90$, $p<0.01$) とともに良好であった。

以上の結果から, MB 泡沫と ba 泡沫のレオロジー特性

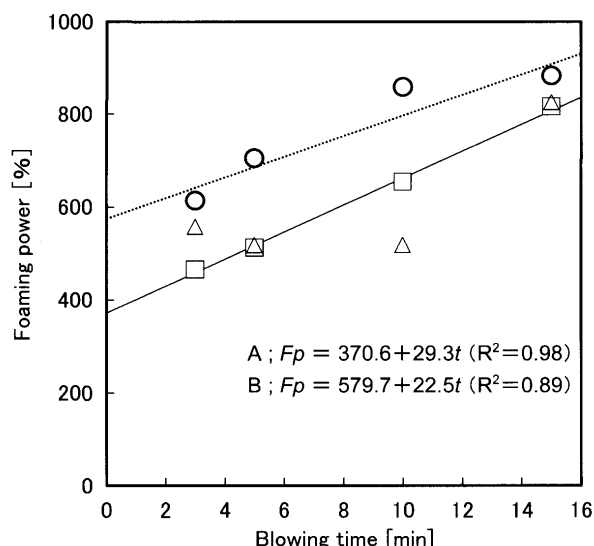


Fig. 9. Relationships between foaming power (Fp) and blowing time (t) in MB foams of sample A, B and C ($n \geq 3$).
—□— A —○— B —△— C

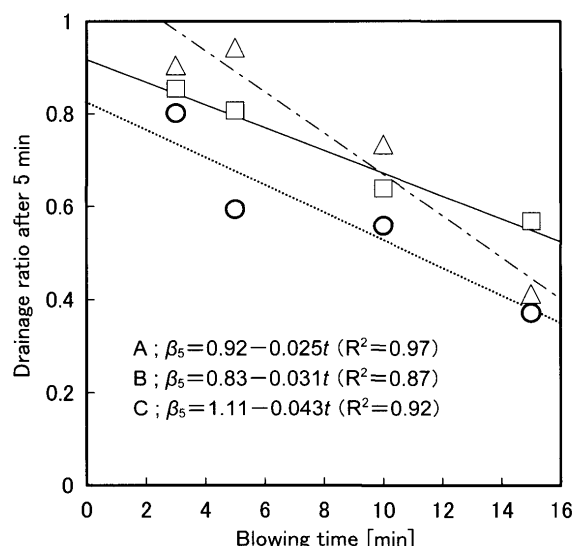


Fig. 10. Relationships between drainage ratio after 5 min (β_5) and blowing time (t) in MB foams of sample A, B and C ($n \geq 3$).
—□— A —○— B —△— C

である G' および付着性は泡沫の気泡径, 気泡数, 泡膜厚を用いて説明できることが示唆された。

7) 起泡力, 排水率と起泡条件の関係

MB 起泡によって豆乳泡沫を得る調理操作において, 試料豆乳の粘性率と起泡時間を設定すれば泡沫の起泡力あるいは排水率が求められる関係式が望まれる。これまでの結果に基づき, 試料 A, B, C を用いた場合の起泡力 (Fp) と起泡時間 (t) の関係を Fig. 9 に示した。図中に示した回帰直線から, 試料 A については (10) 式が, 試料 B については (11) 式が得られた。

$$Fp = 370.6 + 29.3t \quad (10)$$

$$Fp = 579.7 + 22.5t \quad (11)$$

ただし, 試料 C については有意な直線関係が得られなかった。試料 A と B を比較すると, いずれの起泡時間においても試料 B の起泡力が高く, MB 起泡法を調理操作に利用する場合に適する試料の粘性率は試料 B, すなわち 6 mPa·s 付近と推察した。

次に試料 A, B, C を用いた場合の 5 分後排水率 (β_5) と起泡時間 (t) の関係を Fig. 10 に示し, 図中に示した回帰直線から, 試料 A は (12) 式, 試料 B は (13) 式, 試料 C は (14) 式が得られた。

$$\beta_5 = 0.92 - 0.025t \quad (12)$$

$$\beta_5 = 0.83 - 0.031t \quad (13)$$

$$\beta_5 = 1.11 - 0.043t \quad (14)$$

試料 A, B, C の排水率を比較すると, いずれの起泡時間においても試料 B の排水率が最も低く, MB 起泡法を調理操作に利用する場合に適する試料の粘性率は試料 B, すなわち 6 mPa·s 付近と推察した。

要 約

無調整豆乳にトロミ調整食品を添加した豆乳試料を MB 起泡あるいは ba 起泡した。得られた泡沫の起泡力, 排水率, テクスチャー特性値と気泡径, 気泡数, 泡膜厚などの諸因子の関連性を検討した。また豆乳泡沫を得る調理操作において, 豆乳の粘性率と起泡時間を設定すれば起泡力あるいは排水率が求められる関係式を求めた。

- 1) 豆乳試料 B, C では, 起泡時間が長い MB 泡沫は ba 泡沫より硬さ, 付着性, 凝集性は高いことが認められた。MB 泡沫は付着性が増すと起泡力が上昇し, 排水率が低下して安定性が増した。
- 2) 気泡数は ba 泡沫に比べて MB 泡沫は少なく, 両泡沫ともに時間が経過すると減少し, 気泡が合一, 崩壊したことが推察される。気泡数減少速度定数は ba 泡沫に比べて MB 泡沫は低かったことから, MB 泡沫は気泡数減少速度が遅く, 安定していると示唆された。
- 3) MB 泡沫の泡膜厚は ba 泡沫より薄く, 泡膜厚が薄いほど起泡力が高く, 排水率が低く, 特に起泡時間が長いとその傾向が強かった。
- 4) 起泡力または 5 分後の排水率を目的変数として, 気泡径, 気泡数, 泡膜厚を説明変数とする重回帰分析を行い, MB 泡沫と ba 泡沫の起泡性および排水率は泡沫の泡膜厚と気泡径を用いて説明できた。また両泡沫の G' および付着性は泡沫の気泡径, 気泡数, 泡膜厚を用いて説明できることが示された。これらの結果から求めた推定値と測定値の適合性は良好であった。
- 5) 試料豆乳の粘性率と起泡時間を設定すれば泡沫の起泡力あるいは排水率が求められる関係式を示した。また起

泡力あるいは排液率からみて、いずれの起泡時間においても MB 発生器による起泡が最も適する試料の粘性率は $6 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 付近と推察される。

文 献

- 1) Narchi, I., Vial, Ch. and Djelveh, G. (2009), Effect of protein-polysaccharide mixtures on the continuous manufacturing of foamed food products, *Food Hydrocolloids*, **23**, 188-201
- 2) Luck, P. J., Bray, N. and Foegeding, E. A. (2001), Factors determining yield stress and overrun of whey protein foams, *J. Food Sci.*, **67**, 1677-1681
- 3) Foegeding, E. A., Luck, P. J. and Davis, J. P. (2006), Factors determining the physical properties of protein foams, *Food Hydrocolloids*, **20**, 284-292
- 4) Raikos, V., Cambell, L. and Euston, S.R. (2007), Effects of sucrose and sodium chloride on foaming properties of egg white proteins, *Food Res Int.*, **40**, 347-355
- 5) Princen, H. M. and Kiss, A. D. (1989) Rheology of foams and highly concentrated emulsions. IV. An experimental study of the shear viscosity and yield stress of concentrated emulsions, *J. Colloid Interface Sci.*, **128**, 176-187
- 6) Pernell, C. W., Foegeding, E. A., Luck, P. J. and Davis, J. P. (2002), Properties of whey and egg white protein foams, *Colloids and Surf A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **204**, 9-21
- 7) Townsend, A. A. and Nakai, S. (1983), Relationships between hydrophobicity and foaming characteristics of food proteins, *J. Food Sci.*, **48**, 588-594
- 8) Van der Ven, C., Gruppen, H., De Bont, D. B. A. and Vorgen, A. G. J. (2002), Correlations between biochemical characteristics and foam-forming and -stabilizing ability of whey and casein hydrolysates, *J. Agric. Food Chem.*, **50**, 2938-2946
- 9) Yang, X., Berry, T. K. and Foegeding, E. A. (2009), Foams prepared from whey protein isolate and egg white protein: 1. physical, microstructural, and interfacial properties, *J. Food Sci.*, **74**, E 259-E 268
- 10) Xu, Q., Nakajima, M., Ichikawa, S., Nakamura, N., Roy, P., Okadome, H. and Shiina, T. (2009), Effects of surfactant and electrolyte concentrations on bubble formation and stabilization, *J. Colloid Interface Sci.*, **332**, 208-214
- 11) 久木崎雅人 (2009), 多孔質ガラス膜によるマイクロ／ナノバブルの生成技術, 「フードテクノロジー」, 中嶋光敏, 杉山滋監修, シーエムシー出版 (東京), pp 158-166
- 12) 柘植光代, 金親あつ美, 藤井恵子, 大越ひろ (2010), マイクロバブルを用いた豆乳泡沫の起泡と排液, 日調科誌, **43**, 10-16
- 13) 柘植光代, 大越ひろ (2011), 豆乳泡沫の特性からみたマイクロバブル起泡の特徴, 日調科誌, **44**, 39-48

(平成 22 年 12 月 12 日受付, 平成 23 年 5 月 2 日受理)

和文抄録

とろみ調整食品を添加した無調整豆乳を起泡して、マイクロバブル (MB) 泡沫とバーミックス (ba) 泡沫を得た。泡沫の起泡力、排液率、テクスチャー特性と気泡径、気泡数、泡膜厚などの諸因子の関連性を検討した。

起泡時間が長い MB 泡沫は ba 泡沫より硬さ、付着性、凝集性が高く、付着性が上昇すると起泡力が増加し、排液率が低下した。MB 泡沫は ba 泡沫より気泡数が少なく、気泡数減少速度定数は低値で、安定していた。MB 泡沫の気泡径は大きいが泡膜厚は薄く、泡膜厚が薄いほど起泡力が高く、排液率が低かった。重回帰分析の結果から、MB 泡沫と ba 泡沫の起泡力と排液率は泡沫の泡膜厚と気泡径により、貯蔵弾性率と付着性は気泡径、気泡数、泡膜厚により説明できた。これらの結果から求めた推定値は測定値との適合性が良好であった。さらに豆乳粘性率と起泡時間を設定すれば MB 泡沫の起泡力と排液率を求める関係式を得た。