

令和 6 年 6 月 27 日現在

機関番号：32415

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2023

課題番号：18K02261

研究課題名(和文) ガス注入法による泡沫食品の易摂食・誤嚥防止食としての適用性に関する体系的研究

研究課題名(英文) A systematic study on the applicability of foam foods as an easy-feeding / aspiration-preventing meal by gas injection method

研究代表者

森高 初恵 (Moritaka, Hatsue)

十文字学園女子大学・国際栄養食文化健康研究所・客員研究員

研究者番号：40220074

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：サイフォン法による豆乳泡沫(エスプーマ)の気泡径は小さく、気泡数は多かった。エスプーマでは、ずり速度 1s^{-1} でのみかけの粘性率と降伏応力、角周波数 1rad/s の貯蔵弾性率、大変形測定による初期弾性率と付着性は高まり、気泡はマトリックス中で活性フィラーとして機能し、構造を強化することが示唆された。咽頭部の泡沫の最大移動速度は豆乳液体>ミキサー泡沫>エスプーマであり、エスプーマでは嚥下時の安全性が他より高いことが判明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

嚥下困難者用食品の嚥下時の安全性を高め、増粘剤の使用量を減らして栄養素の消化吸収を高めるために、サイフォン法により生成される泡沫(エスプーマ)を用いた食品が嚥下困難者用食品として適正であるかについて検討した。その結果、豆乳を用いたエスプーマでは気泡が活性フィラーとして機能し、増粘剤を豆乳に添加するだけでは得られない構造の強化が図られ、咽頭部における泡沫食塊の最大移動速度が顕著に低下して、嚥下時の安全性が高まることが明らかとなった。従って、サイフォン法により生成されるエスプーマを用いた食品は、嚥下困難者の食品の選択の幅を広げ、健康の維持・増進に寄与できると考えられる。

研究成果の概要(英文)：The soy milk foam (espuma) produced by the siphon method had a smaller bubble diameter and a larger number of bubbles. The apparent viscosity at a shear rate of 1s^{-1} and yield stress, the storage modulus at an angular frequency of 1rad/s , and the initial modulus and adhesion measured at large deformation increased, suggesting that the nitrogen dioxide gas bubbles act as active fillers in the matrix and strengthen the structure. The maximum movement speed of the foam bolus in the pharynx was unfoamed soy milk liquid > mixer foam > espuma, indicating that espuma is safer than the others when swallowed.

研究分野：食品物性学

キーワード：サイフォン法 エスプーマ 食塊の移動速度 豆乳 泡沫 力学特性 気泡数 気泡径

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

日本では超高齢社会となり、高齢者の割合は上昇していた。加齢に伴い舌運動の低下や嚥下反射の低下などにより、致死率の高い誤嚥性肺炎の発症割合は高まっていた。摂食・嚥下を良好に行うためには食品のテクスチャーが重要な役割を果たし、テクスチャーを変化させることで摂食・嚥下は改善される。現在、テクスチャーを変化させるために、トロミ剤と呼ばれるテクスチャーモディファイが利用されているが、トロミ剤の多くは難消化性で、混合すると食品成分を三次元網目構造の中に取り込み、栄養成分の消化吸收を阻害する。一方、摂食・嚥下機能低下者は低栄養に陥りやすいために、栄養価が高く、消化吸收率の高い食品が求められる。スペインで開発されたサイフォン法は亜酸化窒素ガスなどを高圧で強制的に食品に送り込んで、瞬時に食品を泡沫状に変えることが可能である。海外では重度の嚥下障害者用食品として利用されている。日本では 2005 年に亜酸化窒素が食品添加物として許可された。しかし、研究開始当初において、日本や海外で亜酸化窒素ガスを用いたサイフォン法による嚥下困難者用泡沫食品の研究は皆無であった。

2. 研究の目的

安全に嚥下でき、栄養価の高い嚥下機能低下者用泡沫食品のレオロジー的特性を解明して、利用可能な食品の選択の幅を広げ、嚥下機能低下者の健康の維持・増進に寄与することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 試料

食材として無調整豆乳とトロミ調整食品（以後、TAF とする）を用いた。TAF 添加濃度と泡沫生成処理時間（振盪時間、攪拌時間）を変化させて、サイフォン法により亜酸化窒素ガスを強制注入した泡沫（以後、エスプーマする）と、電動泡だて器による泡沫（以後、ミキサー泡沫とする）を試料として調製した。

(2) 気泡力と密度、気泡数と気泡径

試料泡沫の重量を測定して、気泡力と密度を算出した。形状解析レーザ顕微鏡を用いて気泡数および気泡径を測定し、併せて気泡数減少速度定数および気泡径拡大速度定数を求めた。

(3) 力学的特性

粘性率、貯蔵弾性率、損失弾性率および損失正接はレオメータを用いて、半径 25mm の平行プレートにより測定した。テクスチャーアナライザーを用いて、3 回圧縮して時間-重量曲線を測定した。ベースラインより上方向にできた第 1 ピーク (P1) と第 3 ピーク (P3) の最大応力、P1 と P3 の間にできたベースラインより下方向の第 2 ピーク (P2) の最大応力を求めた。P1 の面積に対する P3 の面積の比 (P3/P1) と、P2 の面積を算出し、P1 の立ち上がりの曲線の接線の傾きを求めた。

(4) 咽頭部における食塊の最大移動速度

超音波画像診断装置を用いて、咽頭部における食塊の最大移動速度を求めた。実施前に被験者に実験の内容を十分に説明して、各被験者より承諾を得た。本研究はヘルシンキ宣言に基づき、昭和女子大学の倫理委員会の承諾を得て行った。

(5) 統計処理

SPSS 23.0 J を用いて、Mauchly の球面性の検定により有意差を判定した。試料間の多重比較には Bonferroni 法を用い、有意水準 5% 未満で有意と判定した。

4. 研究成果

(1) 起泡力および密度

TAF の添加により、起泡力はサイフォン法とミキサー法で共に大きく増加した後、TAF 濃度の増加とともにサイフォン法ではわずかに増加し、ミキサー法では大きく減少した。泡沫生成処理時間が増すと、起泡力はサイフォン法およびミキサー法で共に一定時間増加し、その後プラトーとなった。密度は、サイフォン法・ミキサー法で共に起泡力と反対の傾向を示した。豆乳中で気体の占める割合はエスプーマでは高く、ミキサー泡沫では低かった。

(2) 気泡数と気泡径

気泡数はミキサー泡沫よりもエスプーマで多く、TAF 濃度が増すと両種類の泡沫の気泡数は共に減少した。気泡数の減少の程度はエスプーマで大きかった。気泡径はミキサー泡沫で大きく、エスプーマでは極めて小さく、その分布も小さかった。柘植 は取り扱う分野により対象とするマイクロバブルの大きさは異なり、生理活性分野では 10-40 μm 、流体物理分野では数 100 μm 以下とされていると報告している。本研究におけるエスプーマの気泡径は、生理活性分野でのマイクロバブルよりもやや大きく、55 μm 前後であった。泡沫生成処理時間に対して、エスプーマの気泡数は気泡力と同様の傾向を示し、気泡径に大きな変化は認められなかった。ミキサー泡沫では気泡径は大きく減少した。

(3) みかけの粘性率

ずり速度 1s^{-1} におけるエスプーマのみかけの粘性率は、TAF 濃度が増加すると顕著に増加した。マトリックスの粘稠度が増したために、気/液界面膜の流動性が低下し、強制注入された亜酸化窒素ガスの保持力が高まるためと考えられる。ミキサー泡沫において、みかけの粘性率は 0.25%TAF 添加では高かったが、0.5%TAF 添加で一旦低下し、その後 TAF 濃度が増加すると上昇した。

ずり速度 1s^{-1} における相対粘度は、0.5-0.9%TAF 添加において泡沫を含まない豆乳とエスプーマでは、別々の平行した直線上にあり、0.25%TAF 以下では各々これらの直線から下方へ大きく外れた。このことは、各々の気泡あるいは固体の遠達力が 0.5%以上の TAF 濃度では、濃度の増加に従い比例的に変化することを示していた。ミキサー泡沫の相対粘度は、0.25%TAF 添加で最も大きく、その後減少した後に、TAF 濃度の増加とともに僅かに増加した。

降伏応力は、エスプーマでは TAF の濃度増加に伴い顕著に増加した。この増加は、泡沫を含まない TAF 添加豆乳と比較すると極めて大きかった。ミキサー泡沫の降伏応力は 0.25%TAF 添加で最も大きく、その後低下した。

(4) 貯蔵弾性率と損失正接

角周波数 1rad/s のエスプーマの貯蔵弾性率 (G') は、TAF 濃度が増すと増加した。ミキサー泡沫の G' は、TAF の添加濃度が増加すると減少した。起泡性モデル食品を用いた起泡実験において、 G' が高い泡沫は密度が低い、すなわち起泡力が高いことが報告されている。本研究においても、エスプーマの G' と気泡力の間と同様の関係が認められた。角周波数 1rad/s の損失正接 ($\tan \delta$) は、TAF 濃度が増すとエスプーマでは低下して固体的な性質であることが示された。

(5) 大変形の力学特性

TAF 濃度に対して、P1 の頂点の応力は、0.25%TAF 添加ミキサー泡沫を除いて、TAF の添加濃度が増すと増加し、両泡沫間に有意差はなかった。P3 の頂点の応力は、ミキサー泡沫 > エスプーマの関係となり、P1 の頂点の応力とは異なった。エスプーマでは気泡の内圧が高いために、測定過程での加圧や除圧などにより破泡がより多く生じたためと考えられる。P1 の立ち上がりの傾きは、エスプーマでは TAF 濃度が増すと増加し、ミキサー泡沫では減少した。エスプーマの P1 の傾きの TAF 濃度に対する変化は、ずり速度 1s^{-1} でのみかけの粘性率や角周波数 1rad/s での G' の変化と同じ傾向であった。その一因として、高 TAF 濃度のエスプーマでは気泡間の結合力が増し、亜酸化窒素ガスの保持力が高まることがあげられる。P2 の面積は、エスプーマでは TAF 濃度が増すと増加した。この結果は、高濃度 TAF では気泡同士の結着性および連続性が高まることを示唆している。

泡沫生成処理時間に対して、P1 の傾きはエスプーマではミキサー泡沫よりも大きかった。エスプーマでは気泡内圧が高いことが一因となっているのであろう。両種類の泡沫の P3/P1 の面積比は、短い泡沫生成処理時間 > 長い泡沫生成処理時間の関係にあり、短い処理時間では液体的性質が強かった。P1 の頂点の応力は両泡沫間に有意差はなかったが、P3 頂点の応力はミキサー泡沫ではエスプーマよりも大きく、TAF の濃度変化に対する場合と同様の結果であった。泡沫生成処理時間に対しては、TAF 濃度と比較して両種類の泡沫間や対象となる因子の変化に対して有意差の認められる大変形の特値は少なかった。

(6) 気泡数減少速度定数および気泡径増加速度定数

TAF 濃度に対する泡沫および泡沫生成処理時間に対する泡沫について、気泡数減少速度定数はミキサー泡沫よりもエスプーマで大きかった。TAF 濃度では、両泡沫共に気泡数減少速度定数は時間の経過に伴って減少し、気泡数の変化速度は緩慢になった。泡沫生成処理時間では、時間の経過に伴う気泡数減少速度定数はエスプーマでは増加し、ミキサー泡沫では極めて小さく安定であった。気泡数の変化は、泡沫生成処理時間に対するよりも TAF 濃度でより大きく、エスプーマではミキサー泡沫よりも大きかった。

気泡径増加速度定数は、TAF 濃度に対してはエスプーマで大きく、泡沫生成処理時間では両泡沫でほぼ同程度であった。TAF 濃度に対して両泡沫共に気泡径増加速度定数は、時間の経過に伴ってピークを示した後、減少した。泡沫生成処理時間に対しては、時間の経過に従って両種類の泡沫共に気泡径増加速度定数は増加した。

従って、泡沫生成処理時間の気泡径を除いて、エスプーマではミキサー泡沫よりも時間の経過に伴う気泡数の減少と気泡径の増加は、速い速度で進行することが認められた。

(7) 咽頭部での泡沫食塊の最大移動速度

泡沫を含んでいない豆乳食塊の咽頭部における最大移動速度は、TAF 添加により有意に低下した。最大移動速度は、ミキサー泡沫では TAF 添加濃度間で有意差は認められず、エスプーマでは 0.9%TAF 添加で最も遅かった。全 TAF 濃度における咽頭部の最大移動速度は、泡沫なし豆乳液体 > ミキサー泡沫 > エスプーマの関係であった。

エスプーマの最大移動速度は、泡沫生成処理時間に対して有意差がなかった。ミキサー泡沫では、(最も短い泡沫生成処理時間の泡沫の最大速度) > (その他の泡沫生成処理時間の泡沫の最大速度) の関係が認められた。最も短い泡沫生成処理時間の泡沫についての最大移動速度は、同一条件のエスプーマよりもミキサー泡沫で有意に速い結果であった。

以上の結果より、咽頭における泡沫食塊の最大移動速度が、全種類の泡沫の中で最も遅かったのは、0.9%TAF 添加エスプーマであった。

50%の泡沫量がロートから落下するのに要した時間は、ミキサー泡沫ではエスプーマ泡沫よりも極めて短い時間であり、エスプーマでは TAF 濃度あるいは泡沫生成処理時間が増加すると落下に要する時間は大きく増加し、その差は広がった。これらの結果と咽頭部における泡沫食塊の最大移動速度を比較すると、咽頭部の最大移動速度ではエスプーマとミキサー泡沫との差は小さかった。これらの結果から、人体内では嚥下と呼吸の経路が交差する咽頭部において気管を保護し、食塊を安全性に通過させるために、泡沫食塊の移動に対して複雑な調整が行われていることが示唆された。

以上の結果から、エスプーマでは TAF を豆乳に添加するだけでは得られない構造の強化がミキサー泡沫よりも効果的に行われ、咽頭部における泡沫食塊の最大移動速度が顕著に低減することが明らかとなった。従って、豆乳をサイフォン法により液体から泡沫に変化させることは嚥下機能低下者用食品としての適正を高め、嚥下機能低下者の健康の維持・増進に寄与できるであろうことが示唆された。しかし、豆乳エスプーマの経時変化が速かったことから、その抑制については今後さらなる検討が必要であると考えられる。

<参考文献>

- 北畠直文、土井悦四郎、泡沫の物性、日本食品工学会誌、34 巻、1987、549 557
- 柘植光代、金親あつ美、藤井恵子、大越ひろ、日本調理科学会誌、マイクロバブルを用いた豆乳泡沫の起泡と排液、43 巻、2010、10 16
- 柘植光代、マイクロバブル豆乳泡沫の特性、日本調理科学会誌、45 巻、2012、171 1806
- 柘植秀樹、マイクロバブル・ナノバブルの基礎、日本海水学会誌、64 巻、2010、4 - 10
- Thakur, R. K., Vial, C. and Djelveh, G., Influence of operating conditions and impeller design on the continuous manufacturing of food foams, *Journal of Food Engineering*, 60, 2003, 9 20

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 7件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Hatsue Moritaka, Ayako Itazu, Yoshiyuki Okamura, Masako Fuwa, Miki Ishihara, & Katsuyoshi Nishinari	4. 巻 139
2. 論文標題 Release of aroma components from agarose gels during human chewing: Effects of agarose molecular weight and chewing cycles	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Food Hydrocolloids	6. 最初と最後の頁 1085-1092
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.foodhyd.2023.108542	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 森高初恵	4. 巻 71
2. 論文標題 咀嚼・嚥下と食物の力学・幾何学特性との関係	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 高分子	6. 最初と最後の頁 563-565
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 森高初恵	4. 巻 71
2. 論文標題 食物の経口プロセスとレオロジー特性	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本家政学会誌	6. 最初と最後の頁 57-60
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11428/jhej.71.57	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Hatsue Moritaka, Kentaro Yamanaka, Naoki Kobayashi, Miki Ishihara, Katsuyoshi Nishinari	4. 巻 89
2. 論文標題 Effects of the gel size before ingestion and agarose molecular weight on the textural properties of a gel bolus	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Food Hydrocolloids	6. 最初と最後の頁 892-900
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.foodhyd.2018.11.043	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 西成勝好、森高初恵、他37名	4. 巻 5
2. 論文標題 食品ゲルの歴史	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Soft Matter	6. 最初と最後の頁 10-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Katsuyoshi Nishinari, Sayaka Ishihara, Makoto Nakamura, Takahiro Funami, Chengxin Zhu, Ke Zhang, Nan Yang, Chaiwut Gamonpilas, Yapeng Fang, Hatsue Moritaka, 他5名	4. 巻 150
2. 論文標題 Rheology of bolus as a wet granular matter - Influence of saliva on rheology of polysaccharide gel beads	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Food Hydrocolloids	6. 最初と最後の頁 109704
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/ j. foodhyd. 2023. 109704	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Katsuyoshi Nishinari, Marie-Agnes Peyron, Nan Yang, Hatsue Moritaka, 他22名	4. 巻 147
2. 論文標題 The role of texture in the palatability and food oral processing	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Food Hydrocolloids	6. 最初と最後の頁 109195
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.foodhyd.2023.109095	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Katsuyoshi Nishinari, Ke Zhang, Nan Yang, Zhiming Gao, Chaiwut Gamonpilas, Mihaela Turcanu, Yapeng Fang, Yoko Nitta, Xiaolin Yao, Meng Zhao, Hatsue Moritaka, 他13名	4. 巻 51
2. 論文標題 Rheology for safe swallowing 2	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nihon Rheology Gakkaishi (J. Soc. Rheol, Jpn.)	6. 最初と最後の頁 295-316
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1678/rheology.51.295	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Katsuyoshi Nishinari, Ke Zhang, Nan Yang, Zhiming Gao, Chaiwut Gamonpilas, Mihaela Turcanu, Yapeng Fang, Yoko Nitta, Xiaolin Yao, Meng Zhao, Hatsue Moritaka, 他13名	4. 巻 51
2. 論文標題 Rheology for safe swallowing 1	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nihon Reology Gakkaishi (J. Soc. Rheol, Jpn.)	6. 最初と最後の頁 219-248
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1678/rheology.51.219	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Katsuyoshi Nishinari, Ke Zhang, Nan Yang, Zhiming Gao, Chaiwut Gamonpilas, Mihaela Turcanu, Yapeng Fang, Yoko Nitta, Xiaolin Yao, Meng Zhao, Hatsue Moritaka, 他13名	4. 巻 52
2. 論文標題 Rheology for safe swallowing 3	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Nihon Reology Gakkaishi (J. Soc. Rheol, Jpn.)	6. 最初と最後の頁 37-64
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1678/rheology.52.37	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 西成勝好, Ke Zhang, Nan Yang, Zhiming Gao, Chaiwut Gamonpilas, Mihaela Turcanu, Yapeng Fang, 新田陽子, Xiaolin Yao, 森高初恵, 他24名	4. 巻 38
2. 論文標題 咀嚼・嚥下過程のバイオレオロジー	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 日本バイオレオロジー学会誌	6. 最初と最後の頁 2-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計2件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Masako Fuwa, Hatsue Moritaka
2. 発表標題 Effects of dietary fiber on the glycemc response after ingestion of cooked rice
3. 学会等名 Asian Congress of Nutrition 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森高初恵、不破眞佐子、大越ひろ
2. 発表標題 エスプーマによる豆乳泡沫の力学特性 軽度の嚥下障害食への利用可能性
3. 学会等名 日本食生活学会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 山野善正 監修、森高初恵 他48名	4. 発行年 2022年
2. 出版社 (株)エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 438
3. 書名 味以外のおいしさの科学	

1. 著者名 山野善正、森高初恵、吉村美紀、小谷久、次田隆志、高橋智子、大越ひろ	4. 発行年 2021年
2. 出版社 (株)エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 264
3. 書名 食品テクスチャーの測定と美味しさの評価	

1. 著者名 山野善正 監修、森高初恵	4. 発行年 2023年
2. 出版社 (株)エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 420
3. 書名 食品コロイド・ゲル構造・物性のおいさと科学	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	峯木 真知子 (Mineki Machiko) (30129283)	東京家政大学・大学院・客員教授 (32647)	
研究分担者	澤田 めぐみ (Sawada Megumi) (30291339)	東京家政大学・家政学部・教授 (32647)	
研究分担者	山中 健太郎 (Yamanaka Kentarou) (90359662)	昭和女子大学・生活機構研究科・教授 (32623)	
研究分担者	不破 眞佐子 (Fuwa Masako) (60320785)	昭和女子大学・食健康科学部・准教授 (32623)	
研究分担者	小林 三智子 (Kobayashi Miticho) (20153645)	十文字学園女子大学・人間生活学部・教授 (32415)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
中国	Hubei University of Technology			
ドイツ	Product and Process Engineering Center			
フランス	Universite Clermont Auvergne			
シンガポール	Singapore Institute of Technology			