

閉空間内における水中衝撃波の挙動に関する研究

福岡 寛, 関 悠介*

Study on Behavior of Underwater Shock Wave in Enclosed Vessel

Hiroshi FUKUOKA, Yusuke SEKI

We are developing a food processing system by using the underwater shock wave. The effect of a underwater shock wave on the pressure in the vessel is the important factor for the food processing system. The purpose of this study is to research the behavior of the underwater shock wave in the enclosed vessel to investigate the influence of the contour and volume of the vessel. Moreover, we reserch the effect of silicone tube set in the vessel on the pressure generated by underwater shock wave. In this research, we used the elliptical shape for the vessel and the explosive was used to generate the shock wave. Numerical calculations were carried out by using LS-DYNA. To investigate the effect of the contour of the elliptical vessel, the ratio of the length of the major axis to minor axis of the elliptical and elliptical volume were changed. And we make the numerical calculation model that have a silicone tube to investigated the effect of the silicone tube on the underwater shock wave. As a result, the underwater shock wave generated at the first focal point of the elliptical vessel was converged at the second focal point. At the same time, the pressure was increased by the converged underwater shock wave at the focal point in the all elliptical vessels. The peak of the pressure at the focal point was determined by the contour and the volume of the elliptical vessel and thickness of the silicone tube.

1. 緒言

日本における米の消費量は1962年から2010年にかけて半減しており、現在も減少し続けている⁽¹⁾。これは食の多様化によりパンや麺などの小麦粉製品の需要が高まったことが大きく影響していると考えられる。このような状況で、米の需要を高めるために、米粉を利用する動きがある⁽²⁾。米粉とは米粒を粉末状にしたものである。米粉は小麦粉製品を製造する際に、小麦粉の代替となることができる。したがって、小麦粉を米粉で代替することで米の消費量は増加すると考えられる。また米粉を用いることにより食感のよい製品が製造できると報告されており、今後、米粉の需要は高まっていくと考えられる⁽³⁾。しかし、従来の米粉製造方法には2つの問題点がある。第1に、米粉の製造方法は浸水工程、米粒の粉砕および乾燥工程など様々な工程が必要であることが挙げられる⁽⁴⁾。これにより、米粉を作るために、大規模な装置および時間が必要となる。したがって米粉を製造するために必要な費用は高くなると考えられている。第2に、従来の米粉製造方法では米粒を粉末状にする際に摩擦による熱が発生することが挙げられる⁽⁵⁾。これにより、米粉の品質は低下すると考えられている。

伊東らによって従来の米粉製造方法の問題点を改善した新しい米粉製造法が提案されている⁽⁴⁾。この手法は、水で満たされた楕円体容器内で発生させた衝撃波を米粒に作用させ、粉砕する手法である。図1にこの手法で用いる米粉製造装置を示す。米粉製造装置は給水タンク、排水タンク、楕円体容器、電極およびシリコンチューブにより構成されている。電極は水で満たされた楕円体容器内において衝撃波を発生させるために用いられており、米粒はシリコンチューブ内に充填されている。電極およびシリコンチューブはそれぞれ楕円体容器の第1焦点および第2焦点を通過するように取り付けられている。また、水中で発生させた衝撃波を特に水中衝撃波と呼ぶ。この手法は従来の米粉製造方法に比べ、製造工程数が少ない。さらに、米粒は水中衝撃波によるスポーリング破壊によって一瞬で粉砕されるので、摩擦による熱の影響なしに、粉砕することが可能である。したがって、低予算で高品質な米粉を製造することができると考えられている。

水中衝撃波の収束に関して、様々な研究がなされている。高山らは楕円体容器内で発生させた水中衝撃波の収束現象について報告している⁽⁶⁾。これによると、楕円体容器の焦点で発生させられた水中衝撃波は楕円体容器の他方の焦点で収束する。そして、その水中衝撃波が収束することによって、瞬間的な圧力上昇が焦点において発生することが報告されている。

* 機械制御工学専攻2年

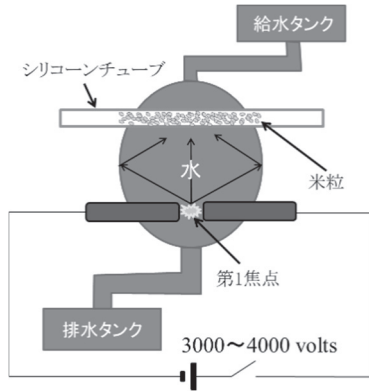


Fig.1 Manufacturing equipment of rice powder

比嘉らの研究では、米粉製造に用いる楕円体容器内における水中衝撃波の挙動を実験により観測している⁽⁷⁾。その結果、水中衝撃波の速度を算出することに成功している。しかしながら、楕円体容器の形状、体積および楕円体容器内に設置されているシリコンチューブが水中衝撃波の挙動および収束に与える影響はいまだ調べられていない。この影響を調べることは米粉製造法のさらなる改善において非常に重要であると考えられるが、楕円体容器の形状および体積を実験的に変更することは非常に困難である。

本研究の目的は実験的に変更が困難な楕円体容器の形状、体積および楕円体容器に設置されているシリコンチューブが、水中衝撃波の挙動および収束に与える影響について数値解析を用いて米粉製造装置作成における設計指針を得ることである。

2. 数値解析法

2.1 状態方程式

本研究では流体構造連成シミュレーションソフト LS-DYNA を用いて数値解析をおこなった。また計算方法にオイラー法を用いた。本解析では爆薬の爆発を用いて水中衝撃波を発生させた。爆薬には旭化成ケミカルズ(株)製の SEP を適用した。水および SEP にはそれぞれ Mie-Grüneisen 状態方程式および Jones-Wilkins-Lee (JWL) 状態方程式を適用した。Mie-Grüneisen 状態方程式を式 (1) に示す。

$$P = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\Gamma_0}{2} \right) \mu \right]}{[1 - (S-1)\mu]^2} + \Gamma_0 \rho_0 e \quad (1)$$

ただし

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \quad (2)$$

式 (1) および (2) 中の e , ρ_0 , C , Γ_0 および S はそれぞれ比内部エネルギー、密度、音速、Grüneisen 係数および U_s - μ_p 曲線の係数である。また、 ρ_0 , C , Γ_0 および S は材料

定数である。本数値解析で Mie-Grüneisen 状態方程式が適用された水に対する各定数を表 1 に示す⁽⁸⁾。

Table1 Parameters of Mie-Grüneisen equation of state for water

ρ_0 [kg/m ³]	C [m/s]	S	Γ_0
1000	1490	1.79	1.65

JWL 状態方程式を式 (3) に示す。

$$P = A \left[1 - \frac{\omega}{VR_1} \right] \exp(-R_1 V) + B \left[1 - \frac{\omega}{VR_2} \right] \exp(-R_2 V) + \frac{\omega E}{V} \quad (3)$$

ただし

$$V = \frac{\rho_e}{\rho_0} \quad (4)$$

式 (3) および (4) 中の ρ_0 , ρ_e および A , B , R_1 , R_2 , ω はそれぞれ爆薬の初期密度、爆ごうガスの密度および JWL パラメータと呼ばれる定数である。本数値解析で JWL 状態方程式が適用された SEP に対する各定数を表 2 に示す⁽⁹⁾。

Table2 Parameters of JWL equation of state for SEP

ρ_0 [kg/m ³]	A [GPa]	B [GPa]	R_1	R_2	ω
1310	365	2.31	4.3	1.0	0.28

2.2 楕円体の形状および体積の変更

図 2 に楕円体の形状および体積が水中衝撃波の挙動および収束に与える影響を調べるためにシリコンチューブを除いた楕円体容器の数値解析モデルを示す。解析モデルの境界条件として楕円体容器の壁面および中心軸にそれぞれ壁条件および軸対称条件を適用した。図 2 中の L は式 (5) によって算出される楕円体容器の第 1 焦点と原点間の距離である。式 (5) 中の D_l および D_s はそれぞれ楕円体容器の長径および短径の長さである。楕円体容器の形状は D_l および D_s によって決定される。楕円体容器の形状が水中衝撃波の挙動および収束に与える影響を調べるために、長径と短径の比 D_l/D_s を体積 $V_1 = 1.61 \times 10^6 \text{ mm}^3$ 一定の下で 1.05, 1.14, 1.25, 1.37, 1.47, 1.59 および 1.82 に変更し、7 種類の楕円体容器で解析をおこなった。また、楕円体容器の体積が水中衝撃波の収束に与える影響を調べるために、 V/V_1 を 1.00, 2.00, 3.00 に変更して解析をおこなった。ここで、 V および V_1 はそれぞれ変更後の楕円体容器の体積および基準楕円体容器の体積である。また、基準楕円体容器の D_l および D_s はそれぞれ 83.85 mm および 80.0 mm である。全ての解析において、爆薬の大きさおよび要素密度 N_E はそれぞれ 5 mm x 5 mm および 2.15 element/mm² とした。

$$L = \sqrt{D_l^2 - D_s^2} \quad (5)$$

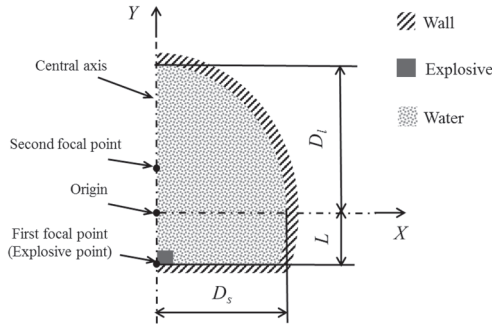


Fig.2 Numerical calculation model

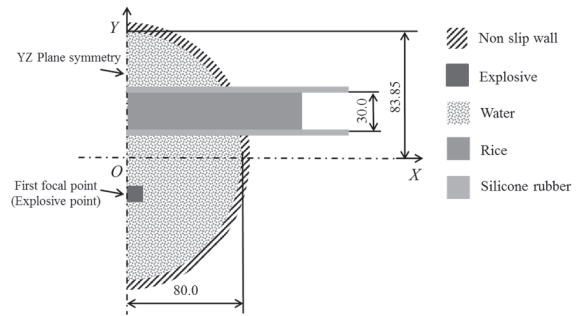


Fig.3 Numerical calculation model

2.3 シリコンチューブの厚みを考慮した場合

シリコンチューブの厚みが水中衝撃波の挙動および収束に与える影響を調べるために、楕円体容器の第2焦点に米が充填されたシリコンチューブを設置した数値解析モデルを図3に示す。解析モデルは2次元モデルとした。境界条件として中心面および楕円体容器の壁面に面対称条件および壁条件を適用した。本研究の解析モデルでは、米粒を1粒ずつ再現することは困難であるため、米粒が隙間なくシリコンチューブに充填されているものとした。また、シリコンチューブの厚みを2,3,4および5mmに変更し、チューブ内に発生する最高圧力の変化を調べた。本研究で使用した米およびシリコンチューブの材料定数を表3に示す^{(10),(11)}。表3中の E 、 ν および ρ はそれぞれ縦弾性係数、ポアソン比および密度である。

Table3 Parameters for silicone tube and rice

	E [MPa]	ν	ρ [kg/m ³]
Silicone tube	4.960	0.4500	1230
Rice	123.8	0.3900	1558

3. 結果および考察

3.1 楕円体の形状が水中衝撃波の挙動および収束に与える影響

図4(a)~(f)に $D_1/D_2=1.05$ の楕円体容器内における水中衝撃波の挙動を示す。図4は水中衝撃波の挙動を圧力分布によって示している。また図4中の矢印および赤点はそれぞれ水中衝撃波が伝播する方向および楕円体容器の第2焦点を示している。時間 t は爆薬が爆発する瞬間を $t=0$ としている。図4(a)は爆薬の爆発によって球状の水中衝撃波が発生していることを示している。図4(b)においては、球状の水中衝撃波が左右の壁面で反射していることが確認できる。図4(c)では、水中衝撃波が楕円体容器の上端に到達していることが確認できる。同時に、壁面で反射した水中衝撃波が焦点に向けて伝播していることが確認できる。図4(d)は、壁面で反射した水中衝撃波が楕円体容器の第2焦点付近で収束する直前を示している。そして図4(e)では、水中衝撃波が楕円体容器の第2焦点付近に収束していることが確認できる。その後図4(f)のように第

2焦点付近で収束した水中衝撃波が再び広がり、楕円体容器内を伝播する様子が確認できる。図4より $D_1/D_2=1.05$ の楕円体容器内において、第1焦点から発生した水中衝撃波は楕円体容器の第2焦点付近で収束することがわかった。次に、楕円体容器の形状が水中衝撃波の挙動に与える影響を調べるために、図5(a)~(f)に $D_1/D_2=1.59$ の楕円体容器内における水中衝撃波の挙動を、圧力分布を用いて示す。図4と同様に、矢印および赤点はそれぞれ水中衝撃波が伝播する方向および楕円体容器の第2焦点を示している。図5(a)では球状の水中衝撃波が楕円体容器内において発生していることが確認できる。図5(b)では水中衝撃波が左右の壁面に到達し、反射していることが確認できる。図5(c)では壁面で反射した水中衝撃波が中心軸上で交わっていることが確認できる。また、図5(b)において壁面で反射した水中衝撃波が反対の壁面に向けて伝播している様子が確認できる。図5(d)では水中衝撃波が楕円体容器上端の壁面に到達し、左右の壁面で反射した水中衝撃波が楕円体容器の第2焦点付近に近づいている様子が確認できる。また、矢印のように、水中衝撃波の一部が焦点に向けて伝播していないことが確認できる。そして図5(e)で水中衝撃波は楕円体容器の第2焦点付近で収束していることがわかる。また矢印から、一部の水中衝撃波は焦点に収束していないことが確認できる。その後、図5(f)のように、収束した水中衝撃波は再び広がり、楕円体容器内を伝播していることが確認できる。

図4および図5より楕円体容器の形状によって、水中衝撃波の挙動に違いがあることがわかった。次に、楕円体容器の形状が水中衝撃波の挙動および収束に与える影響を定量的に調べるために、 $D_1/D_2=1.05$ および 1.59 のそれぞれの楕円体容器の第2焦点における圧力変動を図6に示す。図6中の黒線および赤線はそれぞれ $D_1/D_2=1.05$ および 1.59 の場合の結果である。 $D_1/D_2=1.05$ の場合において、2つの圧力上昇が確認できる。1つ目の圧力上昇は $t=24.6\mu s$ で発生している。これは水中衝撃波が第2焦点を通過した際に発生した圧力上昇である。2つ目の圧力上昇は $t=98.6\mu s$ で発生している。これは水中衝撃波が第2焦点付近で収束したために発生した圧力上昇である。同様に $D_1/D_2=1.59$ の場合において2つの圧力上昇が存在する。1つ目の圧力上昇は $t=92.6\mu s$ で発生している。これは、 $D_1/D_2=1.05$ の1つ目の圧力上昇と同様に水中衝撃波が第2焦点を通過することによって発生する圧力上昇である。2つ目の圧

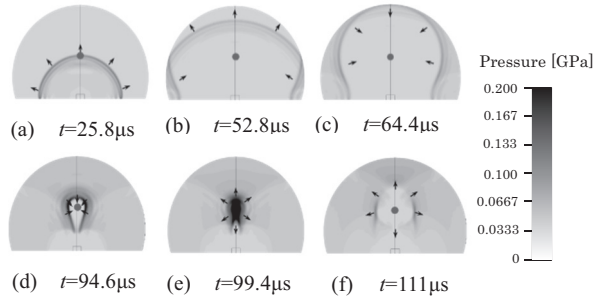


Fig.4 Pressure contours for $D_1/D_s = 1.05$

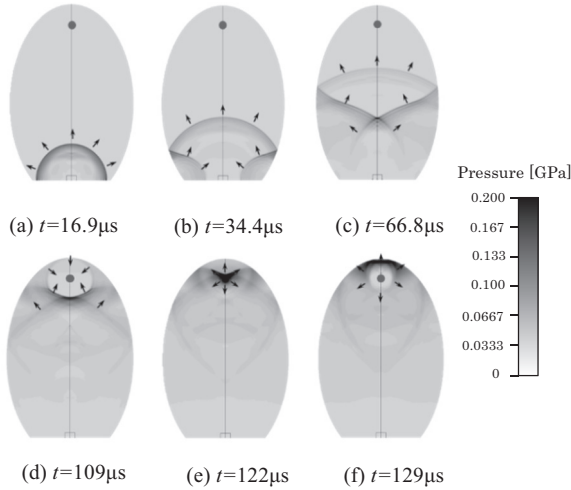


Fig.5 Pressure contours for $D_1/D_s = 1.59$

力上昇は $t=118\mu s$ で発生している。これは $D_1/D_s=1.05$ の2つ目の圧力上昇と同様に、水中衝撃波が第2焦点付近で収束したために発生した圧力上昇である。 $D_1/D_s=1.59$ の1つ目の圧力上昇は $D_1/D_s=1.05$ の場合より低かった。これは $D_1/D_s=1.05$ の場合に比べ、 $D_1/D_s=1.59$ の場合に、第2焦点に到達する水中衝撃波が減衰したためであると考えられる。水中衝撃波は伝播する距離が長くなるほど減衰する。そして、体積を一定とし、楕円体容器を細長くすると、楕円体容器の第1焦点と第2焦点間の距離は長くなる。よって、 D_1/D_s が大きくなることで、楕円体容器が細長くなり、水中衝撃波が楕円体容器の第2焦点に到達するまでの距離が長くなったため、 $D_1/D_s=1.59$ の楕円体容器における1つ目の圧力上昇は低くなったと考えられる。2つ目の圧力上昇は $D_1/D_s=1.05$ および 1.59 でそれぞれ 3.05GPa および 0.674GPa に到達し、 $D_1/D_s=1.59$ の圧力上昇の方が低くなった。これは楕円体容器が細長くなることにより、水中衝撃波が焦点に集まりにくくなったためであると考えられる。水中衝撃波は球状に伝播する。よって、真球の中心で発生した水中衝撃波は中心に収束すると考えられる。しかし D_1/D_s を大きくすると、楕円体は細長くなり、真球から遠ざかっていく。よって D_1/D_s を大きくすると楕円体内で反射する水中衝撃波の形状は、球状から遠ざかっていく。そして図5(c)および(d)のように、壁面で反射した水中衝撃波の一部が焦点に向けて伝播せず、反対方向の壁面に向けて伝播する。したがって、 D_1/D_s を大きくすると、壁面間を往復する水中衝撃波が増えるため、図5(e)のように、全ての水中衝撃波が同じ時間に第2焦点付近に収束し

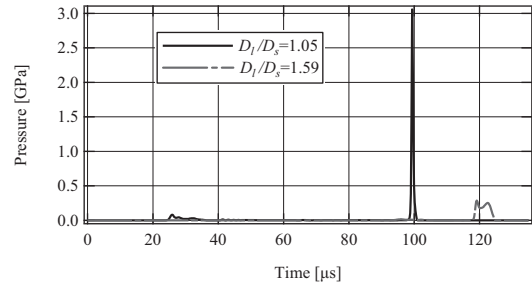


Fig.6 Pressure variations at each focal point for $D_1/D_s = 1.05$ and 1.59

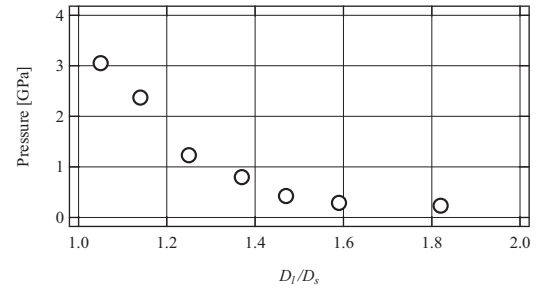


Fig.7 Relation between pressure and D_1/D_s at focal point

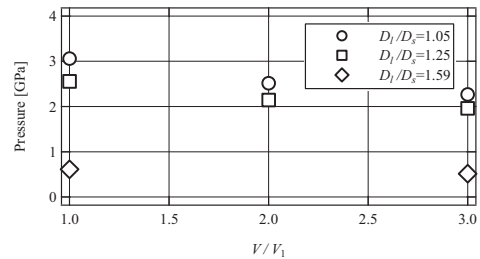


Fig.8 Relation between V/V_1 and Maximum pressure

なくなる。よって、第2焦点における圧力上昇は低くなったと考えられる。

詳細に楕円体容器の形状が水中衝撃波により発生する圧力に与える影響を調べるために、図7に D_1/D_s と各楕円体容器の第2焦点において収束水中衝撃波によって発生した圧力の関係を示す。図7より、 D_1/D_s が大きくなると収束水中衝撃波によって発生する圧力は低くなることが確認できる。これは上述のように、 D_1/D_s が大きくなり楕円体容器が細長くなると、全ての水中衝撃波が同じ時間に第2焦点付近に収束しなくなるためだと考えられる。

3.2 楕円体の体積が水中衝撃波の収束に与える影響

上述より、楕円体容器の形状が水中衝撃波の収束により発生する圧力に影響を与えることがわかった。次に楕円体容器の体積が水中衝撃波の収束により発生する圧力に与える影響を調べるために、楕円体容器の形状を一定とし、その体積を変更した。図8に水中衝撃波が収束することによって発生する圧力と V/V_1 の関係を示す。 V および V_1 はそれぞれ、変更後の楕円体容器の体積および基準楕円体容器の体積である。図8中の丸、四角形およびひし形の記号はそれぞれ、 $D_1/D_s=1.05$, 1.25 および 1.59 の楕円体容器の

結果を表している。図8より、 V/V_1 を大きくすると水中衝撃波の収束によって発生する圧力は低くなっていることが確認できる。これは、楕円体容器の体積を増加させると、水中衝撃波が第2焦点付近に収束するまでに伝播する距離が増え、水中衝撃波が減衰したためであると考えられる。

3.3 シリコンチューブが水中衝撃波により発生する圧力に与える影響

3.1および3.2節より、楕円体容器の形状および体積が水中衝撃波の収束に影響を与えることが分かった。次に、楕円体容器内に設置されたシリコンチューブが水中衝撃波の挙動および収束に与える影響を調べるために楕円体容器に米を充填したシリコンチューブを設置した場合における水中衝撃波の挙動を調べた。図9に楕円体容器にシリコンチューブを設置した場合の水中衝撃波の挙動を示す。図9(a)より、爆発によって水中衝撃波が発生していることが確認できる。図9(b)では、シリコンチューブに到達した水中衝撃波が、シリコンチューブ内を伝播する透過波および反射波に分かれていることが確認できる。図9(c)では楕円体容器下端で水中衝撃波が反射している様子が確認できる。またシリコンチューブを透過した衝撃波が米部内を伝播している様子が確認できる。図9(d)では楕円体容器下端で反射した水中衝撃波が楕円体容器の焦点に向けて伝播している様子が確認できる。また、シリコンチューブ内を透過した衝撃波が、シリコンチューブを通過し、楕円体容器上端壁面へ向けて伝播している様子が確認できる。図9(e)では楕円体容器上端および楕円体容器下端の壁面で反射した水中衝撃波

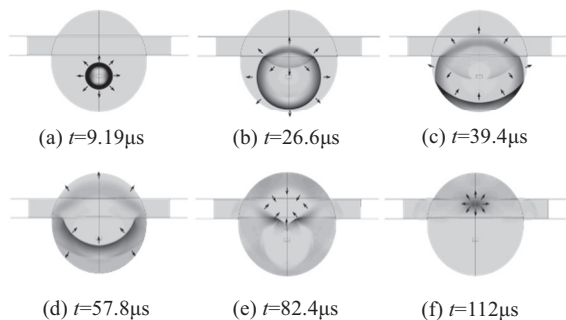


Fig.9 Pressure contours for model added silicone tube

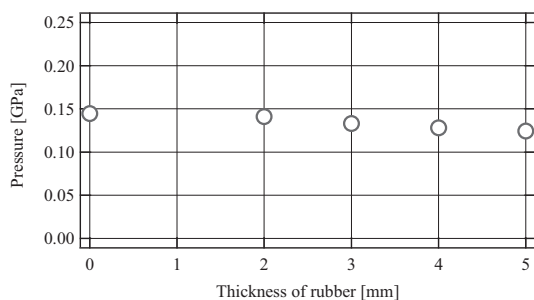


Fig.10 Relation between Thickness of rubber and Maximum pressure in the tube

がチューブ内に集まっている様子が確認できる。そして図9(f)のようにチューブ内において衝撃波が収束していることが確認できる。

図9より水中衝撃波は物質の境界面において物質を通過する透過波および反射波に分かれることがわかった。次にシリコンチューブの厚みが、衝撃波が収束することによって発生する圧力に与える影響を調べるために、図10に衝撃波が収束することによって発生する圧力とシリコンチューブの厚みの関係を示す。図10より、シリコンチューブの厚みが大きくなると、シリコンチューブ内における最高圧力は低くなることを確認できる。これは、シリコンチューブの厚みが大きくなることで、収束衝撃波が減衰するためであると考えられる。

4. 結論

本研究の目的はLS-DYNAを用いて、米粉製造法の改善のために、楕円体容器の形状、体積および設置されたシリコンチューブが水中衝撃波の挙動および収束に与える影響を数値解析により調べることであった。本研究では、楕円体容器の形状が、水中衝撃波の挙動に与える影響を調べるために、楕円体容器の長径と短径の比 D_l/D_s を体積一定の下で1.05, 1.14, 1.25, 1.37, 1.47, 1.59および1.82に変更し解析をおこなった。また、楕円体容器の体積が水中衝撃波の収束に与える影響を調べるために、 $D_l/D_s=1.05, 1.25$ および1.59の楕円体容器の体積を2倍, 3倍に変更し、解析をおこなった。そして、楕円体容器に設置されたシリコンチューブが水中衝撃波により発生する圧力に与える影響を調べるために、シリコンチューブの厚さを2,3,4および5mmに変更し、解析をおこなった。本研究により得られた結論を以下に示す。

(1) $D_l/D_s=1.05, 1.14, 1.25, 1.37, 1.47, 1.59$ および1.82の楕円体容器において、第1焦点から発生した水中衝撃波は楕円体容器の第2焦点付近に収束することがわかった。

(2) $D_l/D_s=1.05\sim 1.82$ の範囲で楕円体容器の形状を細長くすると、水中衝撃波が収束することにより第2焦点において発生する圧力は低くなることがわかった。これは楕円体容器の形状を細長くすることで、全ての水中衝撃波が同じ時間に第2焦点に収束しないためである。

(3) $D_l/D_s=1.05, 1.25, 1.59$ の楕円体容器において、楕円体容器の体積を大きくすると、水中衝撃波が収束することによって発生する圧力は低くなることがわかった。これは、楕円体容器の体積を大きくすることで、水中衝撃波が第2焦点に収束するまでに伝播する距離が長くなるためである。

(4) $D_l/D_s=1.05$ の楕円体容器において、2~5mmの間でシリコンチューブの厚さを大きくすると、チューブ内に発生する圧力は小さくなることがわかった。

参考文献

- (1) 吉井洋一, 本間紀之, 赤石隆一郎, 新潟県における米粉・米粉麺への取り組み, 日本食品科学工学会誌,

- Vol.58, No.5, pp.187-195, 2011.
- (2) 新井映子, 米の消費拡大に向けた・米粉の新たな加工技術の動向, 日本食品学会誌, Vol.22, No.3, pp.207-212, 2011.
- (3) 伊藤聖子, 木川梨沙, 新井映子, 米粉パンの老化に及ぼすイモ類粉末の影響, 日本調理科学会誌, Vol.46, No.4, pp.254-261, 2013.
- (4) K. Naha, K. Shimojima, Y. Miyafuji, S. Itoh, Design and Development of Pressure Vessel for Improvement of Manufacturing rice-powder Efficiency using Underwater Shock wave, Proceeding of the ASME 2012 Pressure Vessels & Piping Conference, PVP2012-78461, 2012.
- (5) 庄子真樹, 羽生幸弘, 毛利哲, 畑中咲子, 池田正明, 富樫千之, 藤井智幸, 製粉方法の異なる米粉の粉体特性と給水特性の評価, 日本食品科学工学会誌, Vol.59, No.4, pp.192-198, 2012.
- (6) 高山和喜, 小原哲郎, 斉藤和男, 亀島望, 水中衝撃波のフォーカシング現象と高圧発生のメカニズム, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.56, No.526, pp.1579-1582, 1990.
- (7) O. Higa, R. Matsubara, K. Higa, Y. Miyafuji, T. Gushi, Y. Omine, K. Naha, K. Shimojima, H. Fukuoka, H. Maehara, S. Tanaka, T. Matsui, S. Itoh, Mechanical of the Shock Wave Generation and Energy Efficiency by Underwater Discharge, The International Journal of Multiphysics, 6, pp.89-98, 2012.
- (8) J. Kim, H. Shin, Application of the ALE technique for underwater explosion analysis of a submarine liquefied oxygen tank, Ocean Engineering, 35, pp.812-822, 2008.
- (9) Y. Kim, I. Tomoaki, S. Itoh, Microstructural, crystal structure and electrical characteristics of shock-consolidated Ga₂O₃ ZnO bulk, Power Technology, 208, pp.575-581, 2011.
- (10) X. Lizhang, L. Yaoming, M. Zheng, Zhao Zhan, W. Chenghong, Theoretical analysis and finite element simulation of a rice kernel obliquely impacted by a threshing tooth, Biosystem Engineering, 114, 2, pp.146-156, 2013.
- (11) 木村竜司, 内山孝憲, 前野隆司, 把持力制御のための曲面状ひずみ分布センサの開発, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.70, No.689, pp.83-88, 2011.