

収束された水中衝撃波を利用した粉末衝撃固化装置の特性*

(第1報, 超高圧の発生と容器の形状効果)

伊東 繁^{*1}, 久保田 士郎^{*2}, 長野 司郎^{*1}
外本 和幸^{*3}, 藤田 昌大^{*1}, 千葉 昂^{*3}

Characteristics of Shock Compaction Assembly Using Converged Underwater Shock Waves

(1st Report, Generation of Ultra-High Pressure and Effects of Pressure Vessel)

Shigeru ITOH, Shiro KUBOTA, Shiro NAGANO,
Kazuyuki HOKAMOTO, Masahiro FUJITA and Akira CHIBA

A new shock consolidation technique applying converged underwater shock waves was proposed and tested for difficult-to-consolidate powders such as ceramics and cBN powders. We obtained bulks with fewer cracks than those obtained by other shock consolidating techniques such as the double-tube method. We present here the numerical simulations of the convergence of underwater shock waves to obtain ultra-high pressure of over 17 GPa using this technique. The behaviors of the underwater shock waves very near the explosives were clarified. The effects of the deformations of the pressure vessel in this technique are also mentioned. The velocity of the underwater shock wave is so high that the effects of deformation of the pressure vessel are quite remarkable.

Key Words: Numerical Analysis, Shock Wave, Molding Methods, Shock Consolidation, Detonating Gas

1. はじめに

爆薬の爆ごうによって生じる高圧力を利用して各種の粉末を固化しようとする、いわゆる衝撃固化法の大きな特徴は、HIP等では固化が極めて難しい超精密セラミックス、ダイヤモンド粉末およびcBN粉末等の硬度が極めて高い高難度焼結性粉末の固化が可能であることである⁽¹⁾。このうち代表的な方法である円筒圧縮法は開発されて久しく、多くの研究者によって種々の粉末の衝撃固化に応用されてきた⁽²⁾。この方法は薄肉円筒内に試料粉末を充てんし、その外側に爆薬を配し、この爆薬を爆ごうさせることによって、爆薬内に発生した爆ごう波を利用するものであり、この爆ごう波が円筒外側を伝ばするにつれて円筒の粉末内部に衝撃波を発生させ、この衝撃波で粉末を固化させようとするものである。この方法は比較的簡単に爆薬を利用できる長所があるが、欠点として(1)試料粉末の中心に衝撃波のマッハ反射によるマッハステムによる孔の発生や、(2)円周部と中心部とに圧力差により生ずる

応力分布の不均一のため試料内にき裂を発生したり、(3)高温の爆ごうガスが膨張過程で急速に冷却され、試料固体の冷却の過程で表面と内部に温度差を生ずる。この温度差により発生した熱応力が試料固体中に数多くき裂を発生させることなどが挙げられており、その除去対策が大きな問題でもある。

著者らは爆薬を容器内で爆ごうさせ、爆ごう波を水中に入射することにより発生した水中衝撃波を収束させ、高圧力を得、これを利用した粉末の衝撃固化法を提案した⁽³⁾。この方法では試料に直接作用するのは爆ごう波ではなく、水中衝撃波であるため円筒法に比べて試料内の温度上昇が小さく、発生する残留熱応力も小さいため固化した試料内にき裂が発生しにくいとされており、実際固化された試料にはき裂が非常に少ないことが確認された。さらに試料内には、円筒法で問題となったマッハステムにより発生する孔が見られなかった⁽⁴⁾。

ところでこの装置では水中衝撃波をいかに有効に利用するかが、極めて重要な問題である。そのためには、水中衝撃波の反射や回折あるいは屈折のような物理現象を理解し有効に組合せる必要がある。水中衝撃波に関する基礎的な研究は爆薬の水中爆ごう現象や、それを利用した水中爆発成型法の研究の一環として行われ

* 1994年8月18日 第71期全国大会において講演、原稿受付1994年12月20日。

*¹ 正員、熊本大学工学部 (☎862 熊本市黒髪2-39-1)。

*² 正員、熊本大学大学院。

*³ 熊本大学工学部。

てきた⁽⁶⁾。これらは爆源から離れた場所(1.0 m 以上)における圧力測定や、水中衝撃波通過後のバブル圧の測定等がおもで、著者らが提案した衝撃固化装置の場合に見られるような、爆源の比較的近傍に発生した水中衝撃波に関する本格的な研究はまだまだ十分なされていないようである。

ところで、近年の計算機の発達によって爆薬の爆ごうを含むような流れの場をシミュレーションし、非定常性の強い爆ごう現象や、爆ごうによって媒質中に発生した衝撃波の諸現象を解明することが可能になってきた。

これらの数値解析では、現象が極めて高速であるので、一般的には有限差分法がよく利用される。有限差分法では流れを支配する質量、運動量、エネルギーの保存則を離散化し、計算するわけであるが、解析する際、対象となる物質のおおのに対して状態方程式が必要となる。著者らが対象としている高性能爆薬 SEP [成分：ペンスリット 65%、パラフィン 35%：初期充てん密度 1310 kg/m^3 、旭化成工業(株)製の可塑性爆薬]の爆ごうガスについては、銅管膨張試験で実験的に求めた JWL (Jones-Wilkins-Lee) 状態方程式⁽⁶⁾を用いた。この状態方程式を用いて、一次元での水中爆ごう過程を数値解析し、その結果と実験結果とを比較検討し、実験で得た JWL パラメータが数値解析に十分有効であることを示した⁽⁷⁾。

本報では、SEP を水中で爆発させ、それによって発生した水中衝撃波が収束部の壁と干渉することによって生ずるマッハ反射について光学的写真観察実験を行い、それから得られた実験結果と数値解析結果を比較検討し、数値解析結果の妥当性を確かめた。さらに実験に用いられた衝撃固化装置の収束部の形状ならびにその変形過程が装置特性にどのような影響を与えるかを数値解析して調べた。

これらの実験および数値解析結果より、衝撃波の工学的応用としての高難度焼結性粉末の衝撃固化に必要な条件を明らかにする。

2. 衝撃固化実験装置の概要

粉末の衝撃固化実験に採用され、今回の計算の対象となった压力容器を図1に示す。この容器は爆薬部と、水中衝撃波が発生し、壁との干渉によりその強さを収束させていく収束部と粉末充てん部の3部分から成り立っている。粉末充てん部に粉末を充てんし爆薬部に SEP を装てんした後、電気雷管を起爆させる。起爆によって発生した爆ごう波が収束部との界面(爆薬部と水との境界)に到達すると直ちに水中衝撃波が発生し、

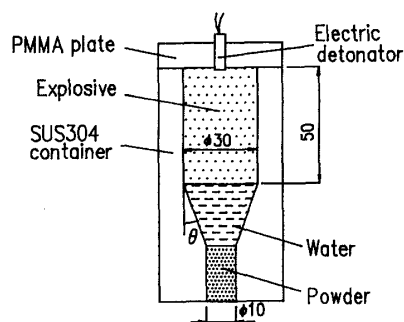


図1 衝撃固化実験装置

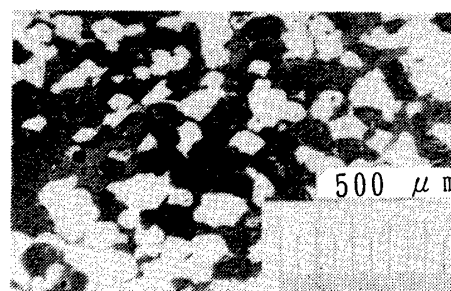


図2 衝撃固化された Ti-Al 粉末の顕微鏡写真

図1中下方向に伝ばする。この伝ばする水中衝撃波は収束部の壁で反射し、収束しながらその形状および強さを変化させる。粉末の衝撃固化の場合、この収束角 θ が極めて重要な役割を果たす。 θ が大きすぎると粉末が吹き上げられ衝撃固化がうまく行えない結果が報告されている。また収束部の長さが長くなった場合は圧力不足により有効に粉末が固化されない結果も得られている⁽⁸⁾。これらは発生した水中衝撃波の強さ、ならびにその収束特性によるものと考えられる。図2は本装置で得られた粉末の衝撃固化実験結果の組織写真の一例である。供試粉末は Ti-Al 粉末である。写真中に大きく塑性変形し、扇形になった粉末粒子が確認でき、有効な固化が得られたことがわかる。

3. 実験方法および数値計算法

3.1 光学的観察実験 収束部に発生した水中衝撃波の挙動を知るためにシャドウグラフ撮影による光学的観察実験を行った。実験装置を図3に示す。収束部の収束角 θ は 20° である。同装置では爆薬部で平面爆ごう波を得るために2種類の高性能爆薬 HABW (充てん密度 2200 kg/m^3 、爆速 5000 m/s) と SEP でつくられた爆薬レンズを、図3に見られるように主爆薬部の上部に配した。爆薬の爆ごう後に発生した水中衝撃波の伝ば過程は、イメージコンバータカメラ(最高 20000000コマ/s 、流し速度、最高 1 ns/mm)を用いたストリーク写真、ならびにコマ撮り写真で観測し

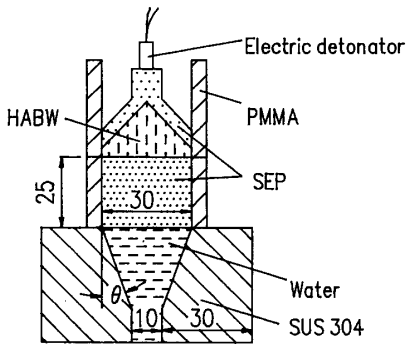


図3 光学的観察実験に用いた圧力容器

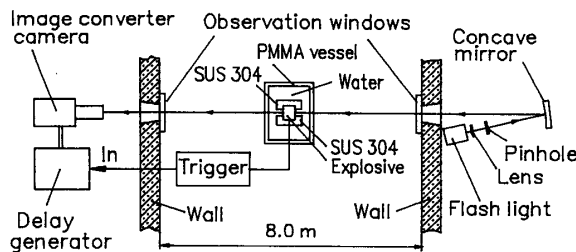


図4 光学系

た。光源にはせん光時間が 50 μs のキセノンフラッシュランプを採用した。実験で採用した光学系を図4に示す。

3・2 数値解析方法 本研究の対象となるような爆薬の水中爆ごう現象では、爆薬中を爆ごう波が伝ばするにつれ、その後方の爆ごうガスが膨張しそれに接する水、容器の界面も移動する。このように界面が移動するような場を数値解析する場合、一般に任意の流体粒子に着目してその速度や加速度などの時々刻々の変化を観測する Lagrange の方法を用いるのが有効である。しかしながら、水中爆ごう現象では考えている計算格子が大きく変形するため上述の方法では解が破壊することがしばしば見られる。そこでこの方法と速度や圧力などの変化を空間内の点の位置と時間の関数として取扱う Euler の方法を組合せた Arbitrary Lagrangian Eulerian Method (ALE 法⁽⁶⁾) を用いて数値解析した。この方法の特徴は、異なった媒質が存在しているような物理場も比較的容易に解析できるところにある。さらに陰解法が容易に適用でき、解の安定性の条件が陽解法に比べて大きく緩和され計算時間が短縮できるという利点もある。計算は質量、運動量、エネルギーの保存則に状態方程式を組合せて行った。水および SUS 304 については次式の Mie-Grüneisen の状態方程式を用いた。

$$P = \frac{\rho_0 c^2 \eta}{(1 - s\eta)^2} \left(1 - \frac{\gamma\eta}{2\rho_0} \right) + \gamma E \dots\dots\dots (1)$$

表1 Mie-Grüneisen 状態方程式のパラメータ (ρ₀: Initial density, c: Sound velocity, s: Constant, γ: Grüneisen gamma)

Material	SUS 304	PMMA	Water
ρ ₀ (kg/m ³)	7896.0	1181.0	1000.0
c(m/s)	4569.0	2260.0	1489.0
s	1.49	1.816	1.786
γ	2.17	0.75	1.65

表2 SEP の JWL パラメータ

A(GPa)	B(GPa)	C(GPa)	Pc _j (GPa)
364.99	2.3097	0.0928	15.910
R ₁	R ₂	ω	E ₀ (J/kg)
4.30	1.00	0.28	1.099×10 ⁶

ここで ρ₀ は初期密度, c は音速, η は 1 - ρ₀/ρ, E は内部エネルギー, γ は Mie-Grüneisen 定数, s は物質による定数である。水, SUS 304, PMMA の場合の各定数を表1⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾に示す。また爆ごうガスの状態方程式は次式で表される JWL 状態方程式を用いた。

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) \exp(-R_1 V) + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) \exp(-R_2 V) + \frac{\omega \rho_0 e}{V} \dots\dots\dots (2)$$

ここで, A, B, R₁, R₂, ω は実験的に求められる定数 (JWL パラメータ) であり, V は未爆ごう爆薬と爆ごうガスの密度比 (ρ₀/ρ) である。e は単位質量あたりの内部エネルギーである。JWL パラメータを表2に示す。

爆薬の爆ごう条件の数値シミュレーションは、次のような仮定で行った。(1)爆薬は均質である。(2)爆薬は完全に定常的爆ごうを行う。(3)爆ごう波が到達した爆薬部は直ちに爆ごうガスに変換される。(4)爆ごう波のすぐ後方は Chapman-Jouget の圧力、密度、エネルギーを有する。(5)爆ごうガスは JWL の状態方程式に従って膨張する⁽⁷⁾。計算場は一辺を 0.25 mm の格子に分割し、格子数は爆薬と垂直方向(X方向)に 70、爆ごう方向(Y方向)に 300 とした。なお計算は DECpc LPv 466 d 2 で行った。代表的な計算では 1 回あたりの計算時間は、およそ 5 h であった。

4. 結果および考察

4・1 水中衝撃波の収束過程 光学的観察実験で得られた水中衝撃波のシャドウグラフのこま撮り写真を図5(a), (b)に示す。またそれぞれの時刻において

数値計算で得られた圧力分布図を図5(c), (d)に示す。圧力分布図で密度の濃い所が衝撃波の先頭に対応している。図5は2 μ sおきに得られた結果である。図5(c), (d)中の実線は、その時刻でのSUS 304とPMMAの変形後の形状および、爆ごうガスと水との界面を示している。図5(d)では水中衝撃波が容器の壁と干渉してマッハ反射しているのがわかる。図5の

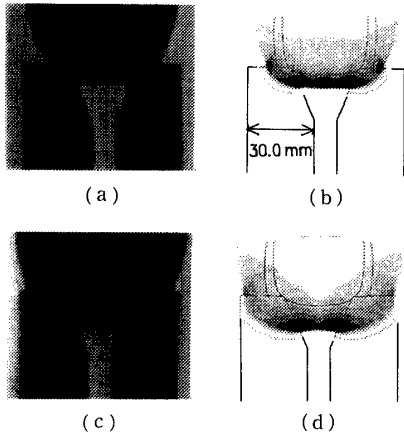


図5 水中衝撃波のこま撮り写真と解析結果

こま撮り写真と数値計算結果との比較により、両者がよく一致することが定性的にわかる。

図6は圧力容器の中心に、軸方向にスリットを切って得られたストリーク写真である。図6中白く見える所(DW)は爆薬の自発光により得られた爆ごう波のストリーク写真であり、写真観測よりその速度は7000 \pm 20 m/sと確認された。これはイオンギャップ法で測定した速度(6970 m/s)と極めてよく一致する。自発光の終了点が爆ごう波が水に衝突した瞬間である。その後、水中衝撃波の移動距離は写真のように湾曲していることがわかる。なお、点Kについては後述する。

図7は同ストリーク写真から得られた波動線図である。図7中のプロット点(○印)は写真から得られた実験値を示し、実太線が数値計算によって得られた結果である。水中衝撃波の距離-時間波動線は点Kでその傾きが大きくなっている。これは水中衝撃波が壁面と干渉し、その際に生じたマッハ反射によって発生したマッハシステムが成長して容器の中心に到達したためで

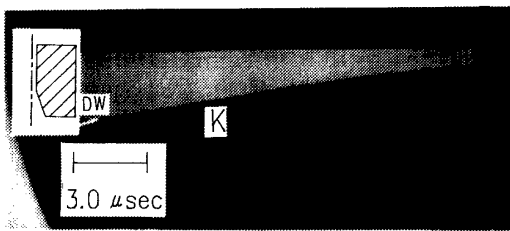


図6 水中衝撃波のストリーク写真

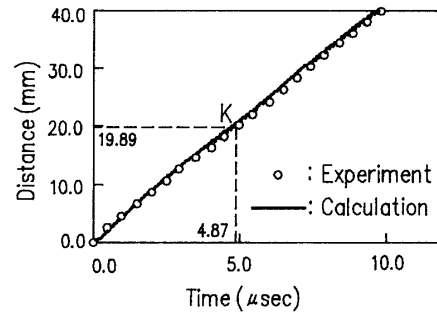


図7 距離-時間波動線図

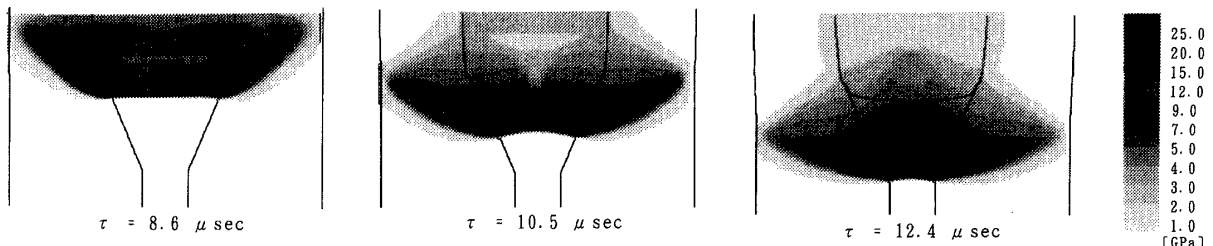


図8 衝撃固化装置内の等圧力分布($\theta=20^\circ$ の場合)

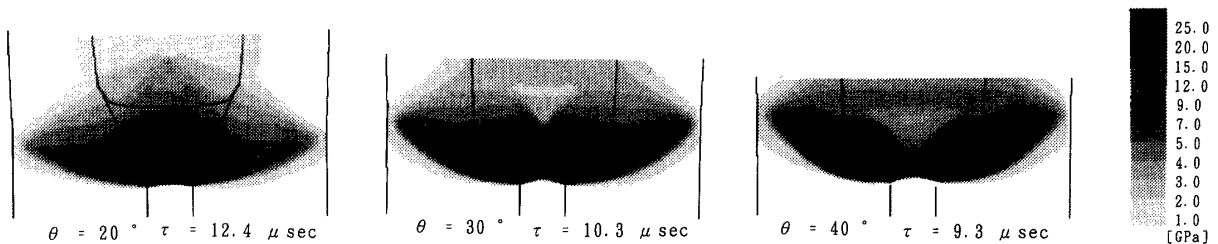


図9 水中衝撃波が粉末部入口に到達したときの等圧力分布

ある。計算から得られたマッハステムが中心に到達した時間は $4.87 \mu\text{s}$ であった。また図7から計算結果と実験結果が極めてよく一致していることがわかる。

4.2 圧力容器形状の効果 上述のように数値計算結果は極めて有効に水中衝撃波の挙動に関する知見を与えることがわかった。そこで衝撃固化装置の特性を得るために装置の変形も考慮し数値解析を行った。収束角 $\theta=20^\circ$ の場合に得られた衝撃固化装置内の等圧力分布を図8に示す。時間の初期に、水中衝撃波は壁と干渉しマッハ反射を起こしているのが確認できる。時間が進むにつれてマッハステムが収束部の中心まで到達し、その後伝ば方向にわずかに湾曲しながら粉末部入口に到達することが図8からわかる。

粉末部入口での水中衝撃波の形状に及ぼす収束角 θ の影響を図9に示す。収束角が大きくなるにつれて、

粉末部への入射衝撃波の湾曲が大きくなってくることが図9から明らかである。収束角が大きくなった場合 ($\theta \geq 30^\circ$) 粉末が固化されずに吹出された結果が実験的に得られたが、これはこのように入射衝撃波が大きく湾曲した結果と考えられる。

粉末部入口で得られた水中衝撃波の圧力の履歴を図10に示す。図10中 y は中心軸から半径方向にはかられた距離であり、太線は壁面、細線は中心部、破線はその中間部での圧力の履歴を示す。 θ が大きい場合には、図10(a)に見られるように、粉末部入口中心部と壁面部では衝撃波の到達時間、および圧力の強さに極めて大きな相違が見られるが、 θ が小さくなるにつれてその両者とも差異は減少することがわかる。このように角度が大きいほど、衝撃波の到達時間ならびに圧力差が大きくなることわかる。そこで粉末部入口の角に丸み R をつけ、この R の影響を調べた。 $\theta=30^\circ$ の場合に得られた圧力履歴の代表例を図11に示す。図11から R が大きくなるにつれて、半径方向の圧力差が小さくかつ時間差のない水中衝撃波が粉末部入口に入射していくことがわかる。この場合、 R が大きすぎると、爆薬と水との界面から粉末部入口までの距離が長くなるため到達圧力が低下することがわかる。このことは収束部の距離が長くなった場合に、粉末を十分固化させるのに必要な衝撃圧力が得られないことを示している。

収束角を 20° から 40° まで 5° おきに変化させ、粉末部入口部に R をつけた場合に得られた水中衝撃波の粉末部入口中心部と容器壁面部における到達時間差ならびに圧力差をそれぞれ図12(a), (b)に示す。図12(a)より、 $R=20 \text{ mm}$ で $\theta=25, 30^\circ$ の場合と $R=30 \text{ mm}$ で $\theta=20^\circ$ の場合に到達時間の差がない衝撃波が得られている。また、それぞれの最高圧力は 16.8, 18.1, 14.4 GPa であった。これらのことより、本計算では角度が 30° で、 R が 20 mm の場合が有効な装置特性を示す。

ところで爆薬の有するエネルギーが極めて大きいため、本装置の場合容器も水中衝撃波伝ば過程において大きな圧力作用を受け変形する。その結果を図13に示

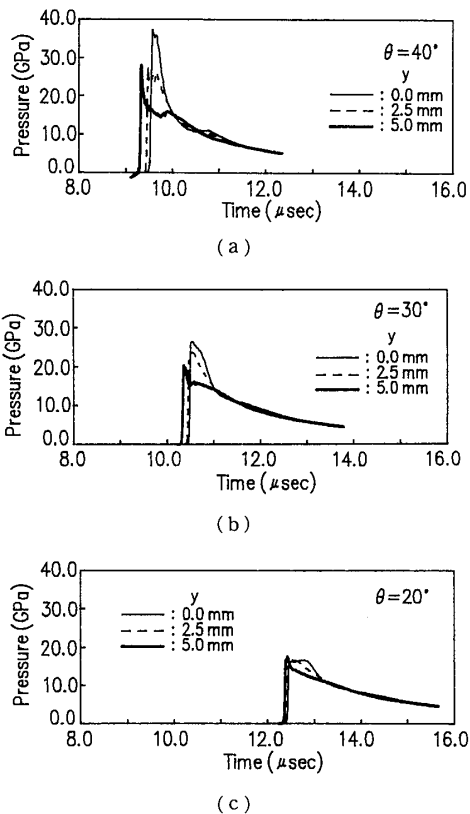


図10 粉末部入口における圧力の履歴

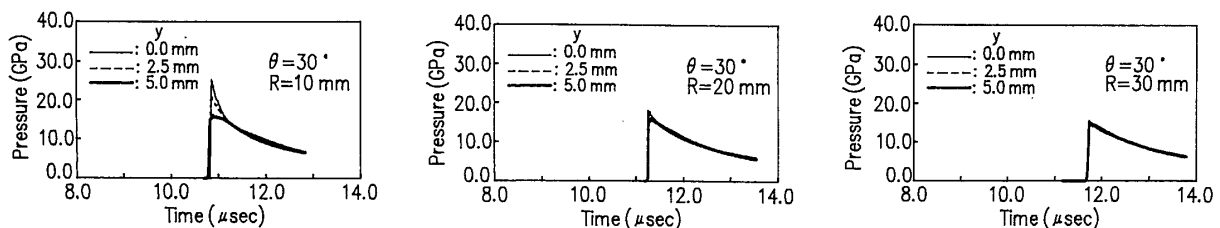


図11 R 付き容器の粉末部入口における圧力の履歴 ($\theta=30^\circ$ の場合)

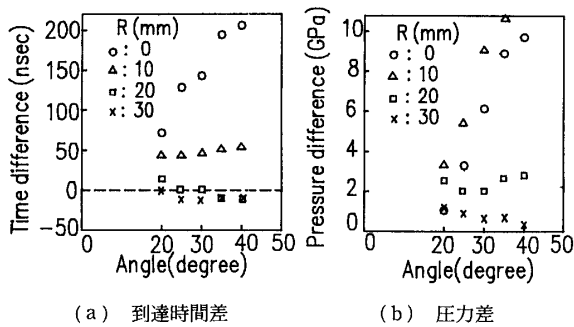


図 12 水中衝撃波の粉末部入口での中心部と容器壁面部における到達時間差および圧力差

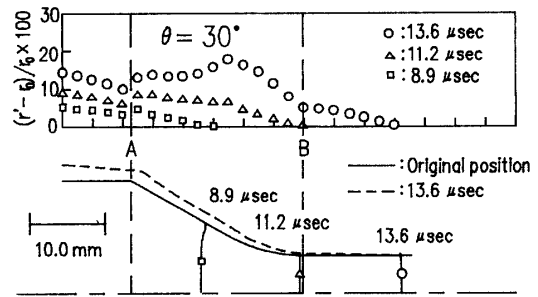


図 14 水圧容器内壁の変形過程
($\theta=30^\circ$, $R=20$ mm の場合)

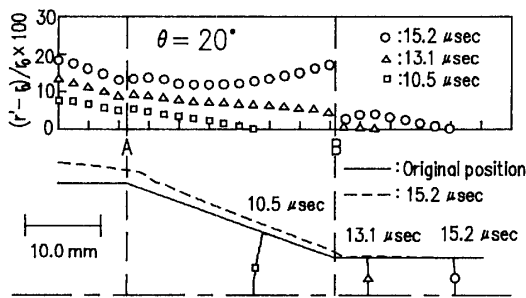


図 13 水圧容器内壁の変形過程
($\theta=20^\circ$ の場合)

す。図 13 縦軸は半径方向ひずみを示す。時間は爆薬が爆ごうしてから測られたものである。図 13 中 A, B はそれぞれ爆薬部終端, 粉末部入口を示す。B 部では水中衝撃波はそこから発生した膨張波と干渉し急激に強さを減衰させるため、それに対応して、半径ひずみも急激に低下することがわかる。収束部では、時間が進むにつれて、容器の変形が大きくなることがわかる。粉末部では、水中衝撃波が粉末部入口から直径の 2 倍の距離まで下流に到達したときの変形量は最大で 4.2% であり、そこでの変形はさほど大きくないことが明らかになった。図 14 に $\theta=30^\circ$, $R=20$ mm の場合に得られた同様な半径方向ひずみの変化を示す。丸みをつけた場合は粉末部の角から発生する膨張波の影響は小さく、その近傍での容器の半径方向ひずみは緩やかに減衰することが図 14 からわかる。また粉末部入口から直径の 2 倍の距離まで衝撃波が到達したときの粉末部でのひずみは、圧力が高いため、5.1% 程度と丸みなしの場合に比べてやや高かった。

5. ま と め

高性能爆薬の水中爆ごうによって発生した水中衝撃波を収束させ、超高压 (>17 GPa) を達成し、それを有効に利用した粉末衝撃固化装置の性能ならびに装置設

計に関する基礎的な資料を、光学観察実験および、数値解析で得た。収束角が粉末衝撃固化に極めて大きな影響を与え、角度が大きくなると粉末部に入射する水中衝撃波が大きく湾曲しそれが粉末が吹出す原因である可能性を示した。この対策として角度を小さくしたり、角部に丸みをもうける方法を提案し、これにより水中衝撃波の湾曲を小さくすることができることを明らかにした。また衝撃固化装置は水中衝撃波の伝ばに伴って超高压にさらされ、大きな変形を受け、特に収束部での変形が大きいことを数値計算により明らかにした。以上の結果より θ が 30° で R が 20 mm の場合に極めてよい装置特性を有することが明らかになった。また最終的な容器特性の評価としては粉末の衝撃固化過程の解析も必要である。この結果は次報で述べる予定である。

なお実験は熊本大学工学部付置衝撃エネルギー実験所で行われた。実験に際し実験所の石谷氏に負うところが大きい。ここに謝意を表す。

文 献

- (1) 友重・千葉・西田・今村・小玉・松下, 火薬学会誌, 55(1994), 166.
- (2) Meyers, M. A. and Wang, L., *Acta Metall.* 36(1988), 925-936.
- (3) Chiba, A., Itoh, S., Tomoshige, R., Miyazaki, K. and Fujita, M., *Proc. 2nd IDL, China*, (1992), 768-771.
- (4) 外本・伊東・藤田・千葉, 鉄と鋼, 80(1994), 125.
- (5) Cole, R. H., *Underwater Explosion*, (1948), 407, Princeton University Press.
- (6) Lee, E. L., Hornig, H. C. and Kury, J. W., *UCRL-50422*(1968).
- (7) 伊東・久保田・吉良・長野・藤田, 火薬学会誌, 55-5(1994), 202-208.
- (8) Amsden, A. A., Ruppel, H. M. and Hirt, C. W., *LA-8095, UC-32*(1980).
- (9) Marsh, S. P., *LASL Shock Hugoniot Data*, (1980), 212, University of California Press.
- (10) 高橋・村田・加藤, 工業火薬, 54(1993), 190.