

二爆薬の爆ごうから発生する超高圧の数値解析

中村雄一*, 村田健司**, 加藤幸夫**, 伊東 繁***

高性能爆薬の定常爆ごうによって発生する爆ごう圧力は爆薬の特性値であるため、爆薬を使用する金属加工法において目的の圧力に不足する場合が多く発生する。本研究では、高爆速・低爆速の二種類の爆薬を使用することによって低爆速爆薬中に過剰爆ごう (Overdriven detonation) を発生させ、C-J爆ごう圧力以上の圧力を発生させるモデルについて数値解析を行い、以下の結果を得た。

- (1) 低爆速爆薬の爆ごう速度は高爆速爆薬の爆ごうによって増加し、C-J爆ごう速度以上の爆ごう速度で爆ごうした。
- (2) 低爆速爆薬中に爆ごう波の反射が確認され、Mach disk 後方に使用した低爆速爆薬のC-J爆ごう圧力よりも高い圧力が発生することが確認された。
- (3) 低爆速爆薬の密度の増加に比例して爆ごう圧力は増加するが、ある密度でピークが存在する事が推定できた。ピークを過ぎた後は高爆速爆薬に密度に近づくにつれ高爆速爆薬のC-J爆ごう圧力に収束する。

1. はじめに

高性能爆薬の爆ごうは、C-J(Chapman-Jouguet)状態で行進することが知られている。C-J状態下では、爆ごう波は一定の爆ごう圧力(P_{CJ})と爆ごう速度(D_{CJ})で行進する。 P_{CJ} 、 D_{CJ} は爆薬の特性値として表される事が多い。筆者らは爆薬を使用した金属加工に関する研究を行っており¹⁾、それらの特徴は爆薬が発生する高圧力、高エネルギーを利用することが挙げられる。金属加工に必要な圧力に応じて使用する爆薬の種類を選択するが、爆薬から発生する爆ごう圧力は一定値であるため、加工に必要な圧力に到達しない場合もみられる。このような場合には、より高性能な爆薬を使用するか、もしくは発生する衝撃波の収束を利用

して圧力値を増加させる手法がとられている²⁾。また過剰爆ごう (Overdriven detonation) を利用してC-J状態以上の爆ごう圧力を得る研究も行われている。過剰爆ごうを発生させる方法として、爆薬に金属飛翔板を衝突させる手法がある。この方法では飛翔板が衝突した付近のみ過剰爆ごう状態が発生し、その後定常爆ごう現象状態に移行することが観測された³⁾。しかしながら過剰爆ごうが生じる範囲は比較的小さく、現実的な金属加工へは適しにくいと考えられる。

筆者らはより簡易に過剰爆ごうを得る方法として、二種類の爆薬を組み合わせる方法に着目した。Fig. 1はSellamら⁴⁾によって行われた実験結果である。実験ではNitromethaneが過剰爆ごうし、C-J爆ごう圧力

2001年12月6日受付
 2002年1月15日受理
 *熊本大学大学院 自然科学研究科 博士後期課程
 〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1
 TEL 096-342-3290(307)
 FAX 096-342-3299
 E-mail yuu@shock.smrc.kumamoto-u.ac.jp
 **日本油脂株式会社
 〒470-2398 愛知県知多郡武豊町宇北小松谷61-1
 TEL 0569-72-0921
 FAX 0569-73-7376
 E-mail nofrdfx@gld.mmtr.or.jp
 ***熊本大学 衝撃・極限環境研究センター
 〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1
 TEL 096-342-3299
 FAX 096-342-3299
 E-mail itoh@mech.kumamoto-u.ac.jp

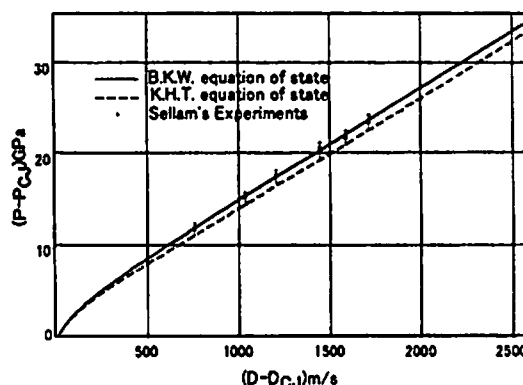


Fig. 1 After Sellam's experiments for the overdriven detonation of nitro methane

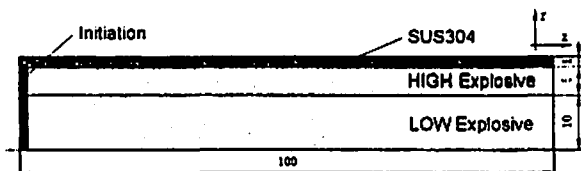


Fig. 2 Illustration of numerical simulation models

以上の高い圧力が得られている。本論文では二種類の異なる密度の爆薬によって発生する過剰爆ごう圧力の変化について数値解析を用いて検討した。以下に、その数値解析方法と結果および考察を記述する。

2. 数値解析

2.1 数値解析モデル

二爆薬を使用した数値解析モデルを Fig. 2 に示す。図中のモデルは円筒形状であり中心軸上方のみを表している。二種類の高性能爆薬と SUS304 製の爆薬容器中に高い爆ごう速度を有する爆薬(高爆速爆薬)と低い爆ごう速度を有する爆薬(低爆速爆薬)が充填されている。本解析では高爆速爆薬として初期密度 $\rho_0 = 1800 \text{ kg m}^{-3}$ の RDX を使用した。低爆速爆薬として密度が異なる五種類の RDX (初期密度 $\rho_0 = 1800 \text{ kg m}^{-3}$, 1600 kg m^{-3} , 1400 kg m^{-3} , 1200 kg m^{-3} , 1000 kg m^{-3}) を使用した。これらの RDX の組み合わせによって RDX 低爆速爆薬中に発生する過剰爆ごう現象の変化について調べた。低爆速爆薬に 1800 kg m^{-3} を使用する場合は、全体として単一の爆薬が充填されていることになるが、通常の C-J 爆ごうとの比較をする目的で設定した。Table 1 に各密度の RDX 爆薬の特性値を示す。起爆条件として平面爆ごう波を与えるために、起爆条件として図中の左端に爆ごう状態時のセルを設定した。また格子間隔は r, z 方向とも 0.25 mm とし、時間刻みは 0.05 ns とした。

2.2 数値解析方法

本数値解析では計算モデルが円筒形状であるため、軸対称問題として扱った。計算に使用したコードは

SALE 法⁵⁾をもとにしたラグランジュ座標を用いた有限差分法により計算した。この手法は計算場に複数の媒質がある場合に非常に有効であり、本数値解析に適していると考えられる。また使用した基礎方程式は、質量、運動量、エネルギー保存の各運動方程式で以下に示す。

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho u}{\partial r} + \frac{\partial \rho v}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho u^2}{\partial r} + \frac{\partial \rho uv}{\partial z} = -\frac{\partial (P+q)}{\partial r} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho uv}{\partial r} + \frac{\partial \rho v^2}{\partial z} = -\frac{\partial (P+q)}{\partial z} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \frac{\partial \rho uev}{\partial r} + \frac{\partial \rho ev}{\partial z} = -\nabla \cdot U(P+q) \quad (4)$$

ここで u, v はそれぞれ r, z 方向の各速度成分、 ρ は密度、 P は圧力、 q は人工粘性圧力、 e は比内部エネルギーである。また $\nabla \cdot U$ は速度発散であり次式で与えられる。

$$\nabla \cdot U = \frac{1}{r} \frac{\partial ru}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \quad (5)$$

上記の運動方程式に爆薬と SUS304 の状態方程式を組み合わせて解析を行った。一般的に爆薬の状態方程式は BKW (Becker-Kistiakowsky-Wilson)⁶⁾, KHT (木原-疋田-田中)⁷⁾, JWLL (Jones-Wilkins-Lee)⁸⁾ 状態式等が広く使用されている。JWL 状態方程式は、爆ごう生成ガスの組成が不明瞭な産業用爆薬に関する使用、解析計算量の減少などの利点があるが、C-J 点までの領域を対象としている。本解析では過剰爆ごう現象の解析を目的としているため、JWL 状態方程式は不適切であると考えた。そのため、化学平衡計算に基づいて係数を算出する BKW, KHT 状態方程式を使用した。Fig. 1 に示した Sellam らの実験結果より両状態方程式の精度は比較的良好と思われる。 $\rho_0 = 1800 \text{ kg m}^{-3}$ の RDX については、BKW 状態方程式を使用した。その他の RDX については KHT 状態

Table 1 Property of RDX explosives

Initial density $\rho_0 (\text{kg m}^{-3})$	C-J detonation velocity $D_{CJ} (\text{m s}^{-1})$	C-J detonation pressure $P_{CJ} (\text{GPa})$
1800	8753	34.6
1600	8053	25.8
1400	7382	19.9
1200	6746	15.1
1000	6140	10.5

方程式を使用した。また SUS304 については Mie-Grüneisen 状態方程式を使用した。圧力、比内部エネルギー、比体積、密度、初期密度をそれぞれ P , e , V , ρ , ρ_0 とすると、各状態方程式は以下のように表される。

BKW 状態方程式

$$P_g = \left(\frac{1}{\beta V_g} \right) (e_g - e_i) + P_i \quad (6)$$

ここで $-(1/\beta) = R + 2S \ln V_g + 3T (\ln V_g)^2 + 4U (\ln V_g)^3$ である。

KHT 状態方程式

$$P_g = P_i + (\gamma - 1) \frac{(e_g - e_i)}{V} \quad (7)$$

ここで $\gamma = -\frac{d(\ln P_i)}{d(\ln V)}$ である。

なお両式とも圧力とエネルギーに関しては、以下に示

す多項式を用いている。

$$\begin{aligned} \ln P_i &= A + B \ln V_g + C (\ln V_g)^2 + D (\ln V_g)^3 + E (\ln V_g)^4 \\ \ln(e_i + \text{const}) &= K + L \ln P_i + M (\ln P_i)^2 \\ &\quad + N (\ln P_i)^3 + O (\ln P_i)^4 \\ \text{const} &= 0.1 \text{ Mbar cm}^3/\text{g} \end{aligned}$$

$A-O$ は BKW パラメータ、もしくは KHT パラメータである。下文字の g と i はそれぞれ爆ごう状態時と等エントロピ状態時を意味する。

Mie-Grüneisen 状態方程式は以下のように示される。

$$P = \frac{\rho_0 c_0^2 \eta}{(1 - s\eta)^2} \left[1 - \frac{\Gamma_0 \eta}{2} \right] + \Gamma_0 \rho_0 e \quad (8)$$

ここで、 $\eta = 1 - \rho_0/\rho$, c_0 , s は材料定数であり、 Γ_0 は Grüneisen パラメータである。本数値解析で使用した RDX の BKW パラメータ、KHT パラメータ、SUS 304 の材料定数をそれぞれ Table 2, Table 3, Table 4 に示す。

Table 2 BKW parameter of RDX ($\rho_0 = 1800 \text{ kg m}^{-3}$)

A	-3.49299	K	-3.37834	R	-4.90903×10^{-1}
B	-2.54812	L	-2.49635	S	$+3.75390 \times 10^{-2}$
C	$+2.56289 \times 10^{-1}$	M	$+2.73422 \times 10^{-1}$	T	$+2.85209 \times 10^{-2}$
D	$+9.77935 \times 10^{-3}$	N	$+1.77466 \times 10^{-2}$	U	-9.97193×10^{-3}
E	-9.37093×10^{-3}	O	-8.09508×10^{-3}		

Table 3 KHT parameter of RDX ($\rho_0 = 1600, 1400, 1200, 1000 \text{ kg m}^{-3}$)

	1600 (kg m^{-3})	1400 (kg m^{-3})	1200 (kg m^{-3})	1000 (kg m^{-3})
A	-3.37834	-3.28897	-3.18876	-3.08033
B	-2.49635	-2.47051	-2.43778	-2.40882
C	$+2.73422 \times 10^{-1}$	$+2.70081 \times 10^{-1}$	$+2.77770 \times 10^{-1}$	$+3.10054 \times 10^{-1}$
D	$+1.77466 \times 10^{-2}$	$+1.26752 \times 10^{-2}$	$+1.59863 \times 10^{-4}$	-2.10966×10^{-2}
E	-8.09508×10^{-3}	-6.84949×10^{-3}	-4.55117×10^{-3}	-1.54046×10^{-3}
K	-1.55079	-1.46025	-1.33385	-1.20226
L	$+5.15552 \times 10^{-1}$	$+5.43328 \times 10^{-1}$	$+6.02938 \times 10^{-1}$	$+6.61485 \times 10^{-1}$
M	$+8.55186 \times 10^{-2}$	$+9.31951 \times 10^{-2}$	$+1.12316 \times 10^{-1}$	$+1.32923 \times 10^{-2}$
N	$+7.27637 \times 10^{-3}$	$+8.18446 \times 10^{-3}$	$+1.06907 \times 10^{-2}$	$+1.35774 \times 10^{-2}$
O	$+2.37770 \times 10^{-4}$	$+2.74773 \times 10^{-4}$	$+3.87029 \times 10^{-4}$	$+5.21822 \times 10^{-4}$

Table 4 Mie-Grüneisen parameter of SUS304

ρ_0 (kg m^{-3})	C_0 (m s^{-1})	S	Γ_0
7900	4570	1.49	2.17

爆薬の反応率の算出には C-J Volume burn⁹⁾ を使用した。 V_0 , V_{CJ} をそれぞれ爆薬の初期比体積, C-J 状態時の比体積とすると次式より爆薬の反応率 W が算出される。

$$W = 1 - \frac{V_0 - V}{V_0 - V_{CJ}} \quad (9)$$

算出された W を用いて, 格子内の圧力 P が次式より求まる。

$$P = (1 - W)P_c \quad (10)$$

ここで P_c は BKW 状態方程式および KHT 状態方程式によって求められた爆ごう圧力である。

3. 数値解析結果および考察

数値解析によって得られた密度分布図, 圧力分布図の例をそれぞれ Fig. 3, Fig. 4 に示す。高爆速爆薬, 低爆速爆薬として RDX ($\rho_0 = 1800 \text{ kg m}^{-3}$), RDX ($\rho_0 = 1600 \text{ kg m}^{-3}$) を使用した場合の $t = 9.0 \mu\text{s}$ における密度分布図である。両爆薬は同時に起爆されるが, 爆ごう速度が異なるため爆ごう波の伝播に差が生じる。高爆速爆薬の爆ごう波によって低爆速爆薬の爆ごうが促され, 低爆速爆薬中に斜め爆ごう波が発生する。

爆ごうが進行するにつれ, 中心軸付近の爆ごう波は中心軸に対して垂直な波形へ変化する。この波形は衝撃波の反射状態でいわれるマッハ反射 (Mach reflection) をおこしている。また中心軸近傍の垂直な爆ごう波形部分を Mach disk と称する。 $\rho_0 = 1000 \text{ kg m}^{-3}$, 1200 kg m^{-3} , 1400 kg m^{-3} の RDX を使用した場合にも, 同様に Mach disk が発生することが認めら



Fig. 3 Calculated density contour ($\rho_0 = 1600 \text{ kg m}^{-3}$, $t = 9.0 \mu\text{s}$)



Fig. 4 Calculated pressure contour ($\rho_0 = 1600 \text{ kg m}^{-3}$, $t = 9.0 \mu\text{s}$)

れた。 Mach disk が形成されている爆ごう波後方で各 RDX の C-J 圧力以上の高い圧力が発生していることが圧力分布図より分かる。

Fig. 5 に各低爆速爆薬を使用した場合の, $t = 9.0 \mu\text{s}$ における Mach disk の成長半径を示す。 Mach disk の成長半径は, 密度の増加につれて大きくなる傾向があることがわかる。低爆速爆薬と高爆速爆薬に同一の RDX ($\rho_0 = 1800 \text{ kg m}^{-3}$) を用いれば, 当然のことであるが Mach 反射は発生せず, Mach disk の成長半径は 0 となる。

Fig. 6 に低爆速爆薬として $\rho_0 = 1600 \text{ kg m}^{-3}$ の RDX を使用した場合の中心軸上各点の圧力履歴を示す。図中に実線で示されている各履歴は, 起爆面より 5 mm 間隔で設置した観測点上の圧力を記録した結果である。爆ごう開始後には C-J 爆ごう圧力を伴う定常爆ごう状態で爆ごうしている。しかしながら, RDX 中の爆ごう波が平面爆ごう波から斜め爆ごう波と変化する起爆面より 20 mm 付近の地点において急激に圧力が増加し, その後高い圧力を維持しながら爆ごうが進行している。 RDX ($\rho_0 = 1600 \text{ kg m}^{-3}$) の C-J 爆ごう圧

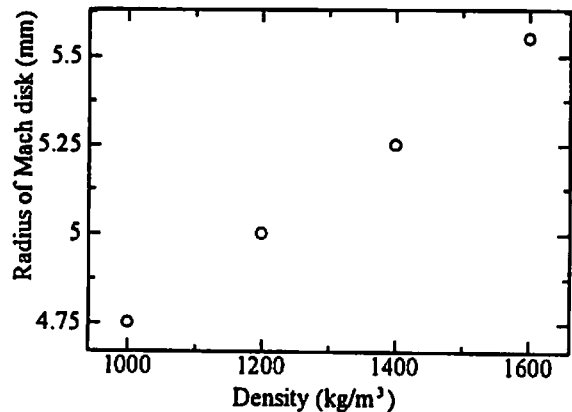


Fig. 5 Calculated radius of Mach disk in RDX. Circle signs are shown as the calculated results.

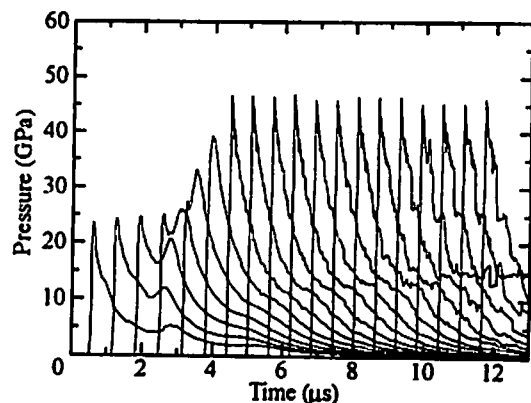


Fig. 6 Calculated pressure histories on the central axis in the case of $\rho_0 = 1600 \text{ kg m}^{-3}$

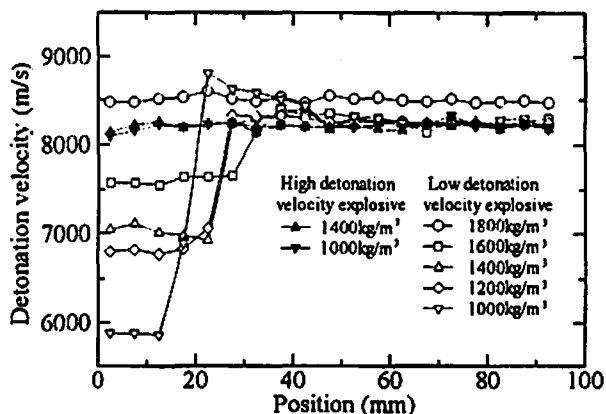


Fig. 7 Calculated detonation velocity on the central axis in the cases of using four RDX explosives as low detonation velocity explosive

力が 25.8 GPa であるのに対して、発生した爆ごう圧力は約 46 GPa であり、約 1.8 倍に増加していることがわかる。また高爆速爆薬として使用している RDX ($\rho_0 = 1800 \text{ kg m}^{-3}$) の C-J 爆ごう圧力 34.6 GPa と比較しても非常に高い圧力が発生している。

Fig. 7 圧力履歴より計算された高爆速・低爆速爆薬中の速度履歴を示す。図中の中空の記号は低爆速爆薬中の中心軸上の爆ごう速度を示し、黒塗りの記号は高爆速爆薬の爆ごう速度を示す。五種類の低爆速爆薬 RDX は爆ごう開始時にはそれぞれの C-J 爆ごう速度で定常爆ごうする。しかしながら $\rho_0 = 1800 \text{ kg m}^{-3}$ の場合を除いて、起爆面より $z = 20 \text{ mm}$ の地点付近において C-J 爆ごう速度以上の爆ごう速度が発生し、四種類の RDX を使用した場合とも約 8200 m s^{-1} とほぼ一定の爆ごう速度で爆ごうしている。ところで $\rho_0 = 1800 \text{ kg m}^{-3}$ の爆薬を高爆速・低爆速の両方に用いた場合の爆ごう速度は約 8500 m s^{-1} でほぼ C-J 爆ごう速度と同じであった。これは二爆薬系爆ごうの際の高爆速爆薬の量が少ないため、円筒外側から発生した膨張波の影響を受けて高爆速爆薬の爆ごう速度が低下したためである。

Fig. 8 に低爆速爆薬の密度と増加した圧力との関係を示す。低爆速爆薬 RDX ($\rho_0 = 1800 \text{ kg m}^{-3}$) に使用した場合は、高爆速爆薬にも同じ爆薬をしているので、単一の爆薬が充填されていることになる。したがって RDX ($\rho_0 = 1800 \text{ kg m}^{-3}$) の C-J 爆ごう圧力 34.6 GPa が発生する。他の四種類の低爆速爆薬を使用した場合は、過剰爆ごう現象によって RDX ($\rho = 1800 \text{ kg m}^{-3}$) の C-J 爆ごう圧力よりも高い圧力が発生していることがわかる。発生する圧力は密度の増加に比例しているが、 $\rho_0 = 1400 \text{ kg m}^{-3}$ と $\rho_0 = 1600 \text{ kg m}^{-3}$ の間にピークが存在すると推定される。そのピークを過ぎると減少

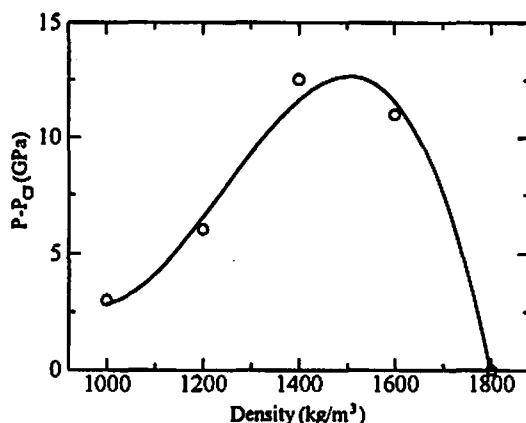


Fig. 8 Relation between a density of RDX explosives and an increase of detonation pressure. Circle signs are shown as calculated results, and the line is drawn by an approximate curve.

し、最終的には $\rho_0 = 1800 \text{ kg m}^{-3}$ の C-J 爆ごう圧力に到達する。

ピークの存在は、低速爆薬の密度と過剰爆ごう中の粒子速度が要因であると考えられる。圧力、初期密度、衝撃波速度、粒子速度をそれぞれ P , ρ_0 , U_s , U_p とすると次式の関係が衝撃波理論より成り立つ。

$$P = \rho_0 U_s U_p \quad (10)$$

中心軸上の起爆面からの距離 $z = 70 \text{ mm}$ の点における粒子速度の履歴から求められた最大粒子速度 U_p と平均衝撃波速度 U_s を用いて (10) 式より算出された圧力を Table 5 に示す。粒子速度は低爆速爆薬の密度に反比例して減少している。数値解析によって得られた圧力と (10) 式より算出された圧力を比較すると、ほぼ等しい結果が得られている。

4. おわりに

二種類の高性能爆薬から構成される二重円筒爆薬について数値解析を行った。高爆速爆薬に $\rho_0 = 1800 \text{ kg m}^{-3}$ の RDX、低爆速爆薬に $\rho_0 = 1800, 1600, 1400, 1200, 1000 \text{ kg m}^{-3}$ の RDX を使用した。

低爆速爆薬 RDX の中心軸近傍において C-J 状態以上の爆ごう圧力、爆ごう速度が発生し、過剰爆ごう現象が生じていることが認められた。また中心軸近傍での RDX の爆ごう波形は中心軸に対して垂直な形状であることより、Mach disk の形成が確認され Mach 反射の発生が認められた。

低爆速爆薬中の中心軸上における爆ごう速度は $\rho_0 = 1800 \text{ kg m}^{-3}$ の場合を除いて約 8200 m s^{-1} で爆ごうしていることが分かった。

密度が異なる四種類の RDX を使用して発生する

Table 5 Calculated maximum particle velocity at $z=70$ mm on the central axis and the comparison of the calculated detonation pressure and the detonation pressure for numerical simulation result.

Density of RDX ρ_0 (kg m^{-3})	1800	1600	1400	1200	1000
Maximum particle velocity (m s^{-1})	2350	3420	3957	4261	4492
Shockwave velocity (m s^{-1})	8507	8277	8243	8209	8226
Calculated pressure $P=\rho_0 U_s U_p$ (GPa)	35.9	45.3	45.6	41.9	36.9
Numerical simulation result P (GPa)	34.5	46.0	47.5	41.0	38.0

圧力を比較すると、 $\rho_0=1400 \text{ kg m}^{-3}$ から $\rho_0=1600 \text{ kg m}^{-3}$ の間にピークが存在することが推定できた。

文 献

- 1) 藤田昌大, 爆発成型法で美術品を創る, メカライフ, pp. 33 (1993)
- 2) 千葉昂, 難成型性粉末の衝撃圧縮, 高温学会誌, 19-1, pp. 55-14 (1993)
- 3) S. Itoh and Z-Y. Liu, Calculation of flying speeds of metal plate subjected to population of overdriven products, 2nd European Conference on Computational Mechanics, pp. 532-535 (2001)
- 4) M. Sellam, H. N. Presles, C. Brochet and R. Cheret, CHARACTERIZATION OF STRONG DETONATION WAVES IN NITROMETHANE, Eighth Symposium on DETONATION, pp. 425-430 (1985)
- 5) A. A. Amsden, H. M. Ruppel and C. W. Hirt, SALE: A Simplified ALE computer program for fluid flow at all speeds, LA-8095, UC-32 (1980)
- 6) C. L. Mader, Detonation properties of equation of state of Becher-Kistiakowsky-Wilson, pp. 412-448 (1979)
- 7) K. Tanaka, Proc. 8th Symposium on Detonation, pp. 548-557
- 8) E. L. Lee, M. Finger and W. Collins, JWLEquation of state Coefficients for High Explosives, Lawrence Livermore Laboratory, UCID-16189 (1973)
- 9) Charles L. Mader and William R. Gage, FORTRAN SIN A One-Dimensional Hydrodynamic Code for Problem s-1-1 Which Include Chemical Reactions, Elastic-Plastic Flow, Spalling and Phase Transitions, LOS ALAMOS SCIENTIFIC LABORATORY Report LA-3720, (1967)
- 10) S. P. Marsh, LASL Shock Hugoniot Data, University of California Press (1980)

Numerical simulation of high pressure generated by the detonation of two explosives system

Yuichi NAKAMURA*, Kenji MURATA**, Yukio KATO**, Shigeru ITOH***

A C-J detonation pressure generated by a steady detonation of explosive is the characteristic value of an explosive. It is often shortage of generated pressure to some of metal processing.

In this study, we take notice a two combined explosives system that the lower velocity explosive is enrolled by the higher velocity explosive tube. The performance of this system has been investigated by numerical simulation. And the following results were obtained.

- (1) The detonation of the lower velocity explosive is increased by the effect of the high velocity explosive. Its final velocity is higher than the C-J detonation velocity.
- (2) Mach reflection of detonation wave occurred in the lower velocity explosive, it was clear that the higher pressure over the C-J detonation pressure of the used explosive happened behind the Mach disk.
- (3) Although the detonation pressure of lower velocity explosive increases as the density of the low detonation velocity explosive, a peak of its maximum pressure exists at a certain density. The maximum pressure converges on the C-J detonation pressure of the high detonation velocity explosive as density is approached at a higher velocity explosive after the peak.

(*Graduate School of Kumamoto University, 2-39-1 Kurokami, Kumamoto 860-8555, JAPAN

**NOF Corporation, Aichi Branch, Taketoyo, Aichi 470-2379, JAPAN

***Shockwave and Condensed matter Research Center, Kumamoto University, 2-39-1 Kurokami, Kumamoto 860-8555, JAPAN)