

研究論文

爆発金属円筒の変形と分裂形態に関する研究

廣江哲幸*, 藤原和人*, 宮崎慶介*, 安部尊之**, 吉田正典**

本論文では、爆薬の特異な起爆技術を用いて平滑な金属円筒(炭素鋼, SUS304 ステンレス鋼: $D_o \times t \times L / 34 \times 3 \times 100 \text{ mm}$)を超高速で膨張させている。すなわち金属円筒内部にPETN爆薬を同軸円柱状(完全充填または空気層設置)に装填し、中心軸に設置した銅細線をコンデンサーからの衝撃電流で一斉爆発・起爆させて円筒状発散爆轟波を生成した。高速度カメラの流し写真とコマ撮り写真から円筒は軸対称、軸方向一様に高速膨張(円筒壁速度: $3-7 \times 10^2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)し、周方向の平均ひずみ速度は 10^4 s^{-1} に達すること、SUS304鋼における早期の分裂破壊などが分かった。また表面剥離計測やエネルギーの釣合いに基づく変形速度についても検討した。変形観測結果は流体解析コードによる数値解析結果と比較し、高速域での構成式や破壊則(限界応力・ひずみ)について考察した。さらに円筒の破壊挙動や破断ひずみについて検討するために緩衝材を充填した鋼鉄チャンバーをピット内に設置し、その中心部で同様の爆発実験を行った。その結果84-99%の回収率で破片回収ができ、各条件下における金属円筒の分裂形態について把握することができた。本報では主要な短冊状破片に着目し周方向破断間隔を表すGradyの分裂モデルを用いた検討を行った。

1. 緒言

高速輸送機械の衝突や高エネルギー機器の爆発などに対する防災・安全性の評価においては、構造部材や素材の超高速負荷に対する応答特性の研究が不可欠である。また最近では爆発性廃棄物の安全処理や近傍構造物への被害予測に関係して最終的な破片飛散状況の把握も重要な課題となっている。このような衝撃的超高速負荷においては材料中に 10^4 s^{-1} を超すひずみ速度が発生しており、通常の機械的負荷装置を用いての再現実験は困難である。筆者らはこれまで衝撃感度の高い粉末状PETN(pentaerythritol tetranitrate)爆薬に接する銅細線やその線列をコンデンサーからの衝撃大電流で一斉爆発させることでPETN中に平面爆轟波¹⁾、円筒状収束爆轟

波¹⁾および円筒状発散爆轟波²⁾を発生させる技術を開発してきた。そしてこれらの制御された爆轟波は各々、平板の剥離破壊(スポール)、材料の円筒状爆縮、円筒の一様膨張などに利用できることが分かった。本報告ではこの内、円筒状発散爆轟波を発生させて金属円筒の高速膨張変形と破壊挙動の研究に適用した結果について報告する。

本研究に類似の実験としては銅メッシュ爆発を利用して薄肉円筒状PETNを内面から一斉起爆させて金属円筒を一様膨張させたForrestalらの例³⁾があるが、 10^3 s^{-1} オーダーのひずみ速度であり変形のみで破壊には達していない。またGradyらによる金属円筒の爆発・分裂実験⁴⁾は円筒一端からの雷管起爆による破裂実験であり、軸対称一様膨張変形による円筒破壊ではない。本研究では、線爆発技術の適用によりほぼ完全な円筒状発散爆轟波を生成²⁾させており、また一次元性を保った高速変形挙動から最終的な分裂形態までを対象としている。実験は高速度カメラによる変形計測と破片回収を実施し、Hydro codeによる数値解析や分裂モデルを交えた考察を行っている。供試材は加工硬化特性の異なる2材料を用い、また爆発衝撃波による表面剥

2002年6月25日受付

2002年10月1日受理

*熊本大学工学部知能生産システム工学科
〒860-8555 熊本県熊本市黒髪2-丁目39-1
TEL・FAX 096-342-3690

e-mail hiroe@gpo.kumamoto-u.ac.jp

**産業技術総合研究所爆発安全研究センター
爆発衝撃研究チーム
〒305-8565 茨城県つくば市東1-1-1 中央第5
TEL 0298-61-4790 FAX 0298-61-4783
e-mail t-abe@aist.go.jp

離、簡易エネルギー評価による膨張速度⁵⁾についても検討した。

2. 実験方法

実験は熊本大学衝撃・極限環境研究センターの爆発実験設備を用いて実施した。本研究で開発した円筒の一様高速膨張実験装置をFig. 1に示す。円筒状発散爆轟波は、3本に束ねた銅細線

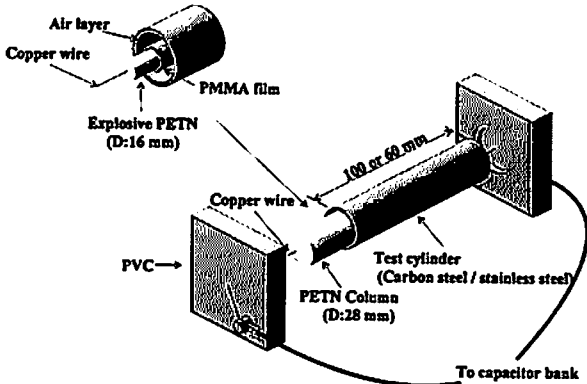


Fig. 1 Schematics of test assembly for uniform expansion of metal cylinders.

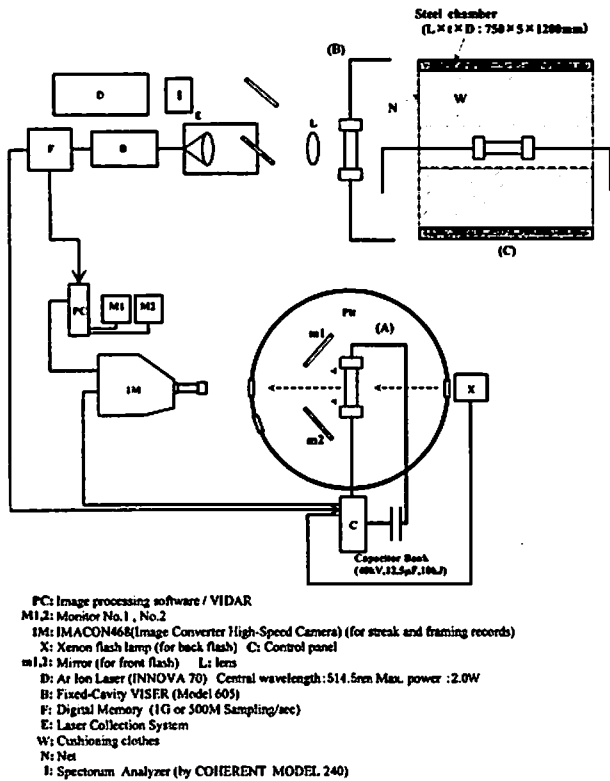


Fig. 2 Experimental block diagrams provided in this study.

- (A) Streak and framing record assembly for expanding metal cylinders
- (B) VISAR system for time-histories of surface velocity.
- (C) Test chamber for recovery of fractured cylinders

(径: 175 μ m)を中心軸としてその周囲にPETN爆薬を円柱状に均一に装填(密度: 0.90-0.95g \cdot cm⁻³)し、コンデンサー(40kV/12.5 μ Fまたは20kV/40 μ F)からの衝撃大電流により銅細線を爆発・気化させ、その衝撃でPETNを中心軸から一斉起爆することで生成される。これまでの予備的実験²⁾から爆薬径3-4mm以上、爆薬長240-290mm以内であれば爆轟波の表面到達誤差 \pm 0.3-0.4 μ s以内の発散爆轟波が生成されることを確認している。供試体の平滑金属円筒(外径: 34mm, 肉厚: 3mm, 軸長: 100mmまたは60mm)はPETN円柱の外側に同軸設置するが、本研究では内径28mmの金属供試円筒にPETNを完全充填させた場合とPETN径を16mmにして供試体との間に6mmの空気層を設ける場合の2ケースについて試験した。また円筒金属材料としては炭素含有量0.10~0.18%の配管用炭素鋼(JIS SGP-E-G/25A/95, 静的降伏応力: 190MPa)とオーステナイト系ステンレス鋼SUS 304鋼(静的耐力: 200MPa)の2種類を用いた。Fig.2は本研究で用いた3種類の実験・計測装置(A): 円筒膨張変形の計測実験装置, (B): 表面速度の時間履歴計測装置, (C): 円筒膨張・破壊実験の破片回収装置(実験中はいずれも爆発ピット内に設置)を示す。(A)では高速度カメラIMACON468または790(CCD付)を用い、キセノンフラッシュを背光源とする円筒の外形変化をストリーク撮影し、さらに円筒両端からの爆轟波の自発光を鏡で反射させ円筒前面に照射させることで破壊発生時における円筒表面のコマ撮り撮影を行った。(B)ではVISAR(ATA/model 605)を用いてレーザー干渉による円筒外表面速度の時間履歴を計測し、初期衝撃波の表面反射による剥離破壊(スポール)発生の有無を確認した。また(C)では緩衝材(布ウエス)を充填した鋼鉄チャンバー(外径: 1200mm, 肉厚: 5mm, 軸長: 750mm)を準備し、その中心部で円筒の爆発実験を行って破片の完全回収を図った。回収チャンバーの端面は破片の飛散方向ではないため鉄線(直径: 2mm)のネットを用いて緩衝材を保持し、爆轟ガスが発散しやすいようにした。以上の実験条件はTable 1のようにまとめられる。

3. 変形挙動計測結果と数値シミュレーション

Fig.3に(a) SUS304鋼円筒と(b) 炭素鋼円筒中央部の代表的なストリーク写真例(いずれもPETN径: 28mm)を示す。これから円筒は対称性を保つ

Table 1 Experiments and test conditions

Cylinder sizes	Length (mm)×outer diameter (mm)×wall thickness (mm)			
	100 (or 60)×34×3			
Cylinder materials ^{a)}	Stainless steel (JIS SUS304) 0.14% carbon steel (JIS SGP-E-G/CS1006)			
Explosive PETN ^{b)} diameter (mm)	16	28	16	28
Inside air layer thickness (mm)	6	0	6	0
(A) Observation of expansion (deformation and fracture)	1. Streak records (back flash) by Image converter camera 2. Framing records (back flash) by Image converter camera 3. Framing records (front flash) by Image converter camera			
(B) Measurement of initial surface velocity	VISAR records (Time histories of outer surface velocity)			
(C) Measurements of fragments	Recovery tests inside the chamber filled with cushioning and size records of recovered fragments			

a) Density ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$): 7.90×10^3 (SUS304), 7.84×10^3 (carbon steel)

b) Filling density ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$): 0.90~0.95

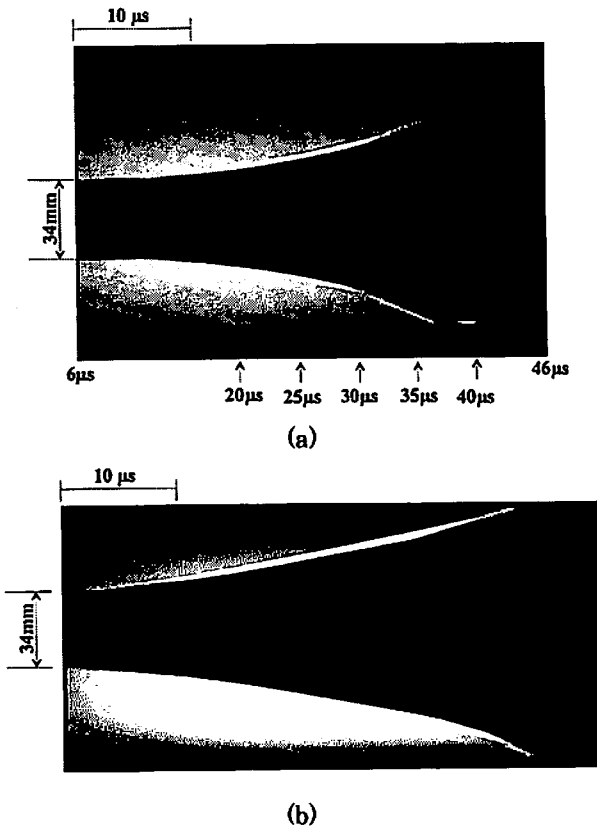


Fig. 3 Typical streak records showing the symmetrical expansion at the mid-length of (a) a SUS304 cylinder (PETN dia.: 28mm) and (b) a carbon steel cylinder (PETN dia.: 28mm).

て膨張している事が分かる。ただし、一様変形が長時間継続するように見える炭素鋼円筒の場合と異なり、SUS304円筒では途中で変形が急加速する特徴が認められる。そこでSUS304鋼円筒

については変形の急加速時間域を中心にコマ撮り写真撮影(背光または前面照射)をいった。Fig. 4にその例(PETN径:28mm)を示す。(a)のキセノン背光撮影では軸方向に変形せず一様に周方向膨張する円筒から30 μs (時間は放電開始時からの値)で明らかな爆轟ガスの噴出が見られ、円筒軸方向の分裂がそれ以前に発生したことが分かる。また(b)では強力な線爆自発光を手前の鏡で反射させて円筒表面に照射し、(a)のようなシルエットでなく直接に爆轟ガスが噴出する様子を撮影している。24 μs ですでに円筒軸方向の割れに沿ってのガス噴出が周方向数箇所を観察され、この直前に分裂破壊が発生したと考えられる。

円筒の爆発膨張挙動を数値シミュレーションするために1次元(Wondy III a⁶⁾)および2次元(AutoDyn-2D)の解析コードを用いた。1次元解析では別途特性曲線法によって求めた爆轟データを組込んで計算し、材料の応力・ひずみ関係式はひずみ速度効果を考慮した文献データ⁷⁾を基に計測ひずみ速度での関係を外挿推定して用いた。2次元解析では炭素鋼は組込み材料データ1006 SteelのJohnson-Cookモデル⁸⁾を、SUS304鋼にはSteinbergモデル⁹⁾を使用した。これらの応力・ひずみ曲線は2次元解析が温度効果を導入していることを除けばほぼ合致していた。Fig.5は膨張変形する円筒中央部外半径の時間履歴について計測結果と数値解析結果を比較している。変形初期ではいずれも良く合致しているが、SUS304鋼では外半径が26-32mm: R_e /外表面の

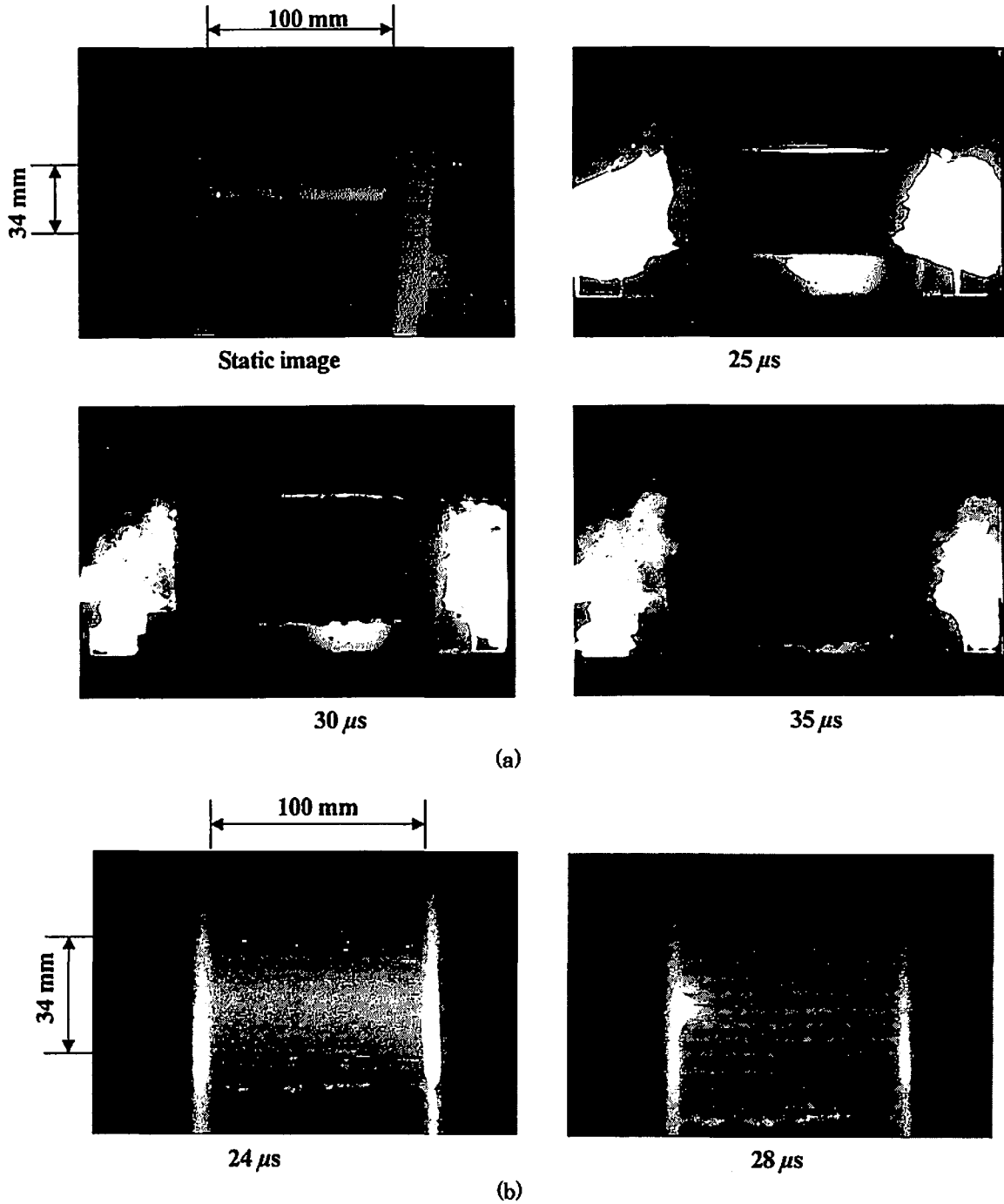


Fig. 4 Typical framing records showing the uniform expansion at the early stages and blowout of gas ((a): back flash) and the circumferential spacing of fractures ((b): front flash) at the final burst stage for SUS304 cylinders (PETN dia.: 28mm).

周方向対数ひずみ値 $\ln(R_f/R_0)$: 42-63%, R_0 : 17 mm)に増加した辺りで大ききずれが見られる。これはコマ撮り写真Fig.4で確認したように SUS304円筒の場合は破壊発生によるものであるが、炭素鋼についてはこの変形域(50-85%)まで変形解析とのずれとしての破壊はまだ観測されていない。2種類の数値解析法で、変形が大きくなると相違が見られるのは主として用いた応

力・ひずみ曲線の加工硬化の違いと考えられ、2次元解析の方が実験に近い。また材料の応力・ひずみ曲線の動的効果も少しではあるが解析結果に影響を与えていた。Table 2に、Fig.5の計測データから求めた破壊前の外半径 R の平均的な速度 \dot{R} (\cdot : 時間微分) と周方向対数ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ を示しているが、ひずみ速度値はいずれも $10^4 s^{-1}$ を超えている。表中には簡単なエネルギーバラン

Table 2 Observed results of cylinder expansion and analytical results based on energy balance

Test conditions		Observed results of cylinder expansion (Obtained from streak records)		Analytical results ^{c)}
Cylinder materials	Explosive diameter (mm)	Average wall velocity ^{a)} \dot{R} (m·s ⁻¹)	Average strain rate ^{b)} \dot{R}/R (s ⁻¹)	Average wall velocity ^{a)} \dot{R} (m·s ⁻¹)
SUS304	16	288	12900	876
	28	752	31700	1737
Carbon steel	16	337	15300	883
	28	698	25200	1750

a) R : outer radius of the cylinder, b) Circumferential strain rate
c) Calculated from Gurney equation based on energy balance.

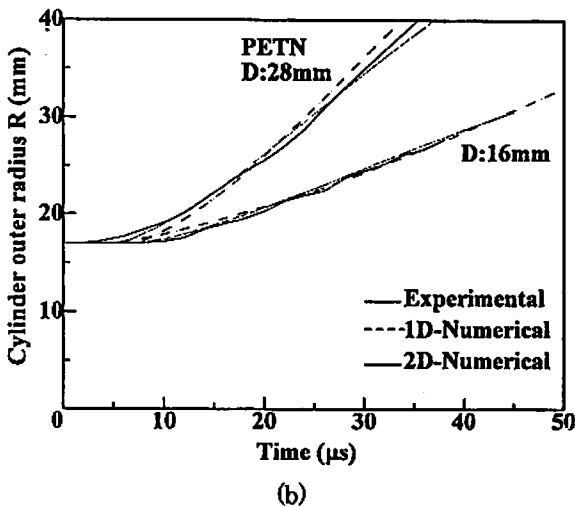
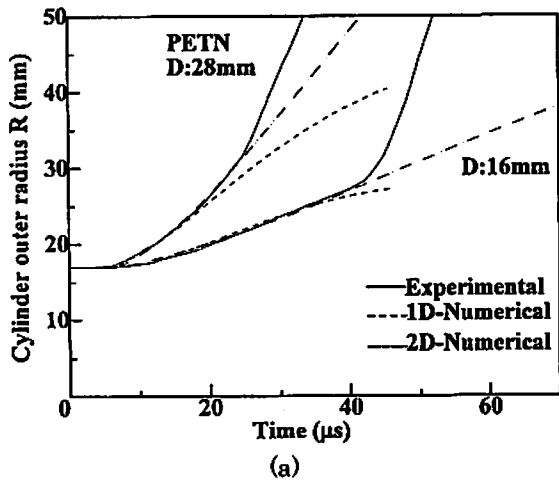


Fig. 5 Experimental and numerical time histories of expanding outer wall radii at mid-length of tested cylinders ; (a) stainless steel, (b) carbon steel. Time starts here when detonation deigns.

スに基づく Gurney¹⁾の近似式で求めた半径速度も示している。計測速度値は計算値の33-44%であり、爆薬エネルギーの大部分が変形抵抗や振動その他に費やされていることを表している。

次に、膨張変形中に円筒の肉厚内に発生する周方向応力 σ_θ について、2次元解析結果と使用した応力・ひずみ曲線を Fig. 6 に示す。(a) は SUS304 鋼円筒の中央部肉厚断面の内面(No. 1)と外面(No. 4)に発生する応力の時間履歴である。PETN 径: 16mm と 28mm の場合いずれも初期の応力反射後は膨張変形の進行に伴って応力が漸増するが、爆轟波からの直接強い衝撃圧を受ける PETN 径: 28mm 径の方が加工硬化の影響が大きく急速に応力増加が起こっていることが分かる。(肉厚断面 No. 2, No. 3 の応力はほぼ No. 1 と No. 4 の間で振動する。)そして4点の応力とも 1 GPa に達している時間 (PETN 径 16mm : 約 40μs, 28mm : 約 20μs) が、Fig. 5 で破壊発生と考えられた時間とほぼ対応していることから、SUS304 鋼円筒の破壊はひずみ限界以外に主応力基準でも評価できると考えられる。なお半径方向応力は初期に断面内で衝撃応力の反転を繰り返した後、直ちに減衰した。一方、炭素鋼円筒 (PETN 径: 16mm) の周方向応力は (b) に示すように膨張変形がある程度進行した後では応力の増加が極めて少なくなる。(PETN 径: 16mm でも同じで、薬径による差異はほとんど無い。)これは (c) に示す動的応力・ひずみ曲線の特徴から推測されることであり、炭素鋼円筒の場合は限界ひずみ則の適用が妥当と思われる。

爆発衝撃によって円筒外表面に剥離破壊が発生しているかどうかを調べるためにレーザ干渉速度計測器 VISAR を用いて円筒表面速度の時間履歴を計測したが、速度の波形ピッチが板厚と対応しており、スポール破壊は発生していないと判断された。

4. 破壊形態計測と分裂モデルの検討

爆発後の金属破片にある程度の規則性がある

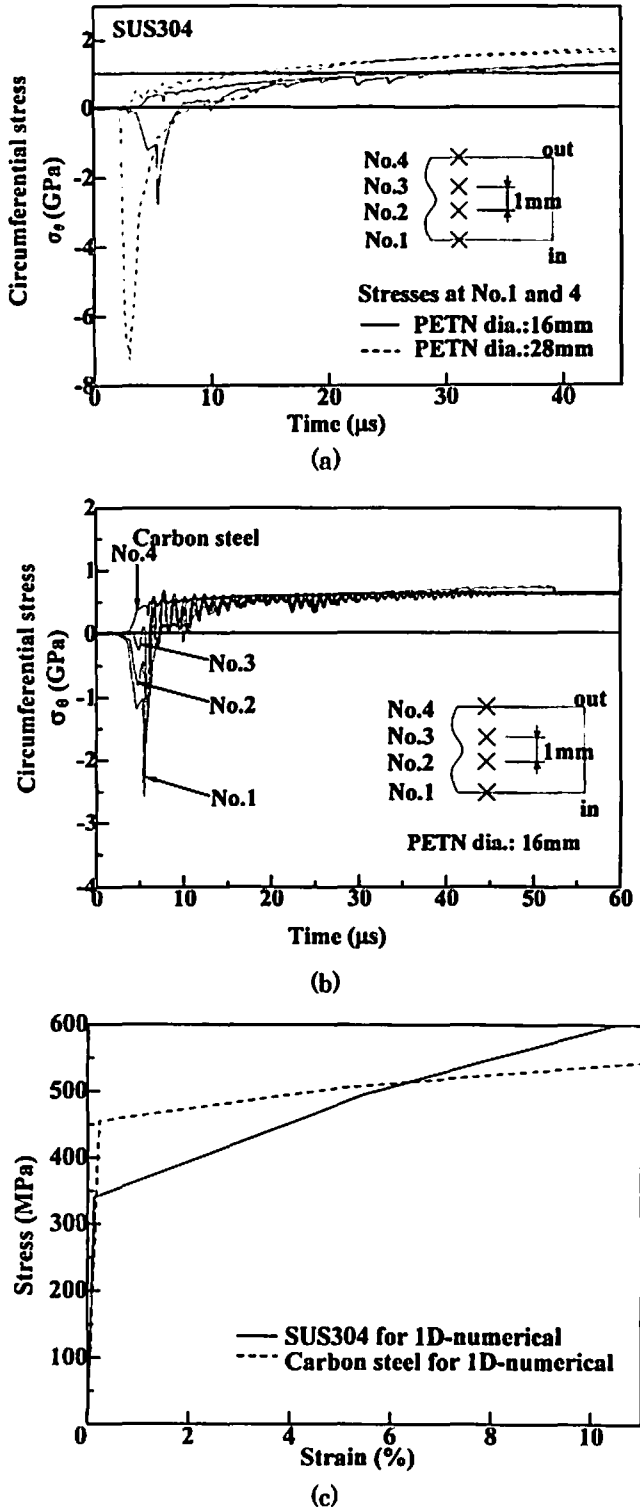
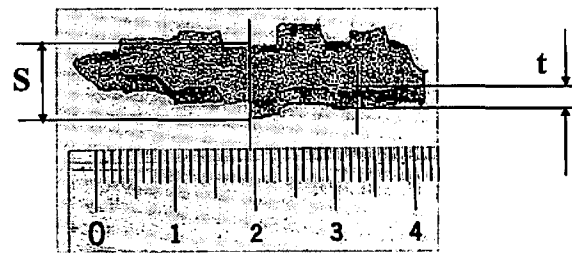


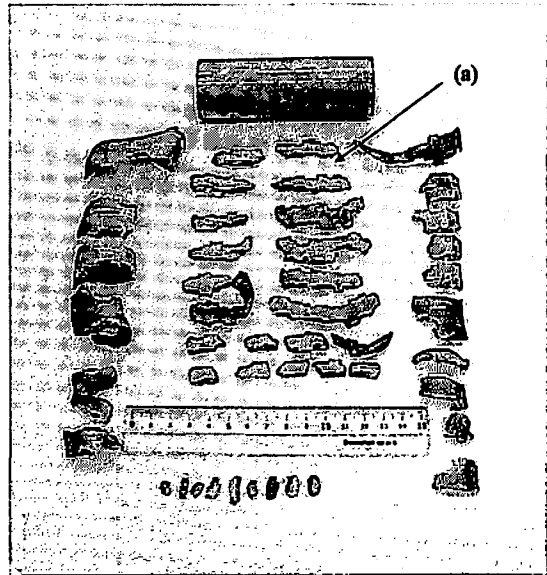
Fig. 6 Numerical time histories of (a) circumferential stresses σ_θ on the wall surfaces at the mid-length of SUS304 cylinders (PETN dia: 16mm, 28mm) and (b) those in the wall cross-section at the mid-length of a carbon steel cylinder (PETN dia.: 16mm), and (c) dynamic stress-strain models for metals used in the numerical simulations (1D calculation).

ことに着目し、Fig.2(c)の回収チャンバー内で金属円筒の爆発膨張・破壊実験を実施した。回収重量率は88.4-99.8%であった。破片回収後は各々の破片について破片の幅・厚さを計測し収集されたデータから、金属円筒の高速破壊形態の評価・検討を行った。Fig.7に回収した破片の代表的な写真を示す。緩衝材の効果で二次的な損傷はほとんど受けていない。(b)はSUS304円筒(PETN径:16mm)の全回収破片であり、(a)はその中の代表的な破片を示す。形状は様々であるが基本的には短冊状とし、(a)のように中央部の周方向幅 s と厚さ t を代表寸法とした。区別の容易な端部の破片と微細な破片は調査対象から除いた。(c)はPETN径:28mmの場合の回収破片であり、破片が細くなっている。また炭素鋼円筒(PETN:16mm)では(d)に示すように幅広の破片が多いことが分かる。SUS304鋼円筒の評価対象破片全数について破片幅と厚さをヒストグラムで整理するとFig.8のように表される。ばらつきはあるが、破片幅は薬径が大きいほど細く、破片厚さは薬径に依らず同等であることなどの傾向が認められる。炭素鋼円筒の破片についても、傾向は同じであるが測定値のばらつきが大きかった。

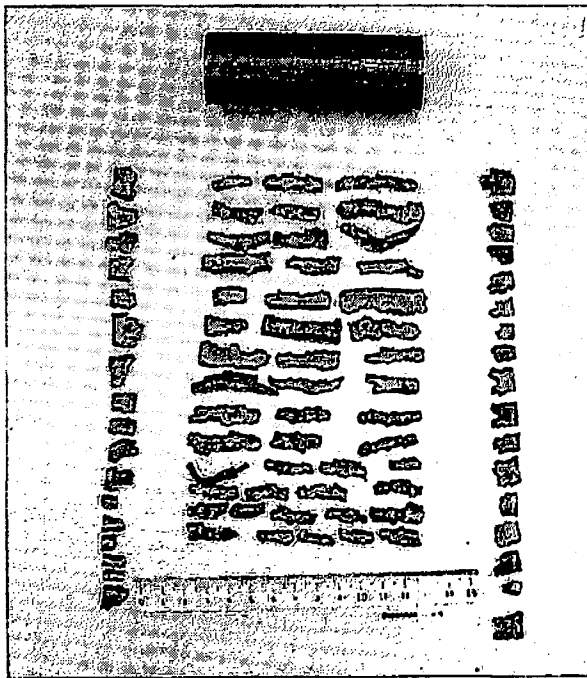
破片厚さ t (mm)からは、変形中の円筒体積一定と弾性ひずみを無視すれば周方向の破断ひずみ ϵ_r が推定できる。また周方向の破片幅 s (mm)からはGradyら¹¹⁾のモデル式： $\Gamma = \rho \dot{\epsilon}^2 s^3 / 24$ (分裂エネルギー： Γ 、密度： ρ 、ひずみ速度： $\dot{\epsilon}$ 、周方向幅： s)を用いれば材料の分裂エネルギー Γ (kJ \cdot m⁻²)が算出される。破片代表寸法の各平均値を用いればTable 3のように円筒膨張破壊の4ケース各々について限界ひずみ ϵ_r と分裂エネルギー Γ が得られる。SUS304鋼の限界ひずみは前節の変形計測や表面観測結果にほぼ対応しているが、炭素鋼は全般にばらつきが大きく、特に分裂エネルギーはSUS304に比べ信頼度が低い。これは炭素鋼の場合、円筒径に比べ破片幅が比較的大きかったので評価対象の破片数が少なくなりこのような結果になったと考えられる。このことは分裂エネルギー Γ をヒストグラムで表したFig.9(a)、(b)からも明らかである。本モデルは、円筒分裂部のエネルギー吸収限界まで塑性緩和域が拡大されその到達幅を破片幅としているが、単純な剛塑性に基づく運動量の釣り合いから導出したもので今後改良の余地があると考えている。



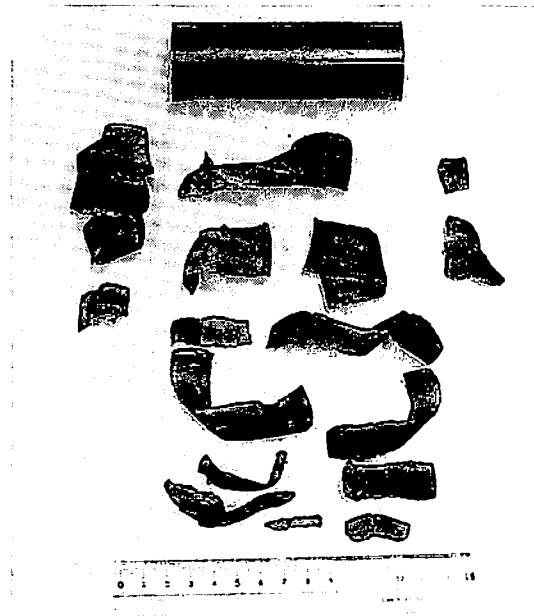
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 7 (a) A typical fragment and (b) all the recovered fragments of a SUS304 cylinder (PETN dia.: 16mm), (c) those of a SUS304 cylinder (PETN dia.: 28mm), and (d) those of a carbon steel cylinder (PETN dia.: 16mm)

5. 結 言

円筒状発散爆轟波生成技術を用いて平滑金属円筒(炭素鋼, SUS304鋼)を一様高速膨張させ, その変形・破壊挙動の計測・解析および破片の回収・解析を行った結果, 以下の結論を得た。

- (1) 金属円筒は初期の応力波反転の繰返し後, 爆轟ガス圧によりすべて 10^4 s⁻¹オーダーの周方向ひずみ速度で膨張後, 破壊に至り, 基本的には短冊形の破片形態になることが分

かった。また円筒軸方向には変形せず, 本供試体では表面剥離の発生はなかった。なお爆薬エネルギーの大半は円筒の変形・破壊などに使用されていた。

- (2) SUS304鋼円筒では周方向応力: 1GPa(またはひずみ42-62%)で軸方向にき裂が発生し, 周方向が分裂する破壊挙動が観測された。また分裂エネルギーは小さく破片幅は比較的小さかった。

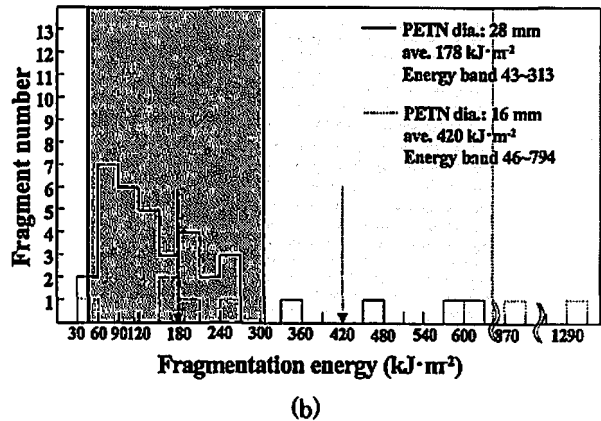
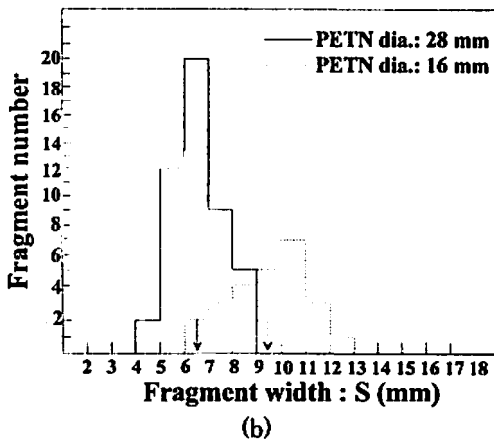
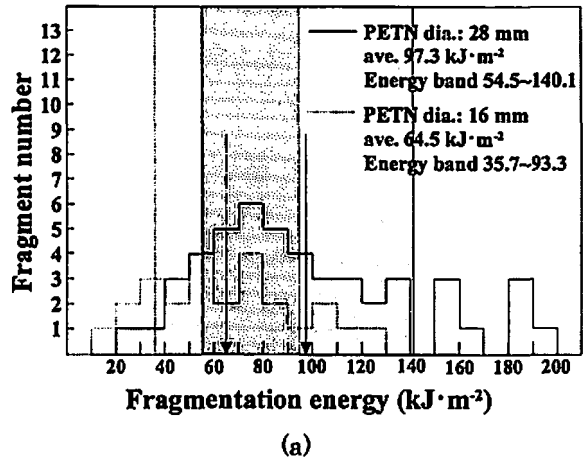
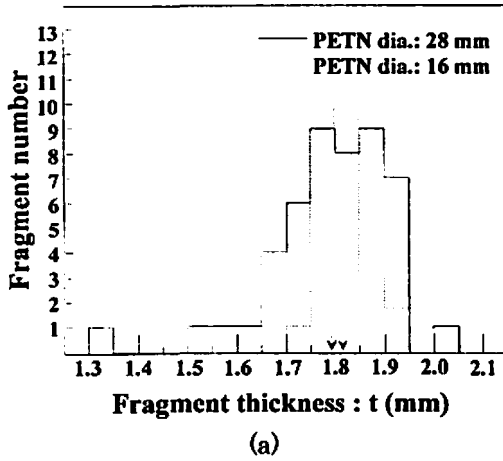


Fig. 8 Typical number histogram of (a) circumferential width s and (b) thickness t for recovered fragments exclusive of both edges and very small ones of SUS304 cylinders.nation deigns.

Fig. 9 Fragmentation energy distributions of tested metals (a) SUS304 and (b) carbon steel, calculated using Grady's model. Band length shows standard deviation

Table 3 Recovered fragment data and calculated fragmentation energy

Cylinder materials		SUS304		Carbon steel	
Explosive diameter (mm)		16	28	16	28
Fragment data	Recovered rates of fragments (weight %)	97.7	84.0	99.8	84.4
	Average thickness t of examined fragments (mm)	1.81	1.79	1.85	1.59
	Average width s of examined fragments (mm)	9.47	6.50	16.2	9.02
Calculated average circumferential critical strain (%)		44.7	45.8	42.7	56.9
Calculated average fragmentation energy Γ (kJ·m ⁻²)		64.5	97.3	420	178

(3) 炭素鋼円筒では計測全域で数値解析に近い変形挙動が観測されたが、回収破片厚さ計測からひずみ限界による破壊に到達していると推測された。破片幅は大きく、分裂エネルギーは比較的大きいと考えられたが、

破片数が少なくばらつきが大きかった。爆轟自発光を利用した破壊観測、変形の数値解析、回収破片の解析・モデル化などから基本構造要素である円筒の超高速変形と破壊挙動をある程度明らかにすることができた。今後は、

円筒の材料・寸法などを変えて実験を継続し、現象解明と分裂モデルの精度向上を図ってゆく予定である。

謝 辞

本研究の一部は平成14年度日本学術振興会科学研究費補助金の助成を得た。また実験装置の製作、爆薬装填に関しては本学、宮田政信技官、秋丸進助手に協力頂き、実験計測では小松鉄平、永野貴彦、東窪謙史等の学生諸君の努力が大きい。ここに付記し、感謝の意を表す。

文 献

- 1) 廣江哲幸, 松尾日出男, 藤原和人, 吉田正典, 藤原修三, 宮田政信, 酒井伸二, 深野剛, 安部尊之, 火薬学会誌, 57, 49 (1996)
- 2) T. Hiroe, H. Matsuo, K. Fujiwara, T. Abe, and K. Kusumegi, Proc. Int. Conf. on Condensed Matter under High Pressures, pp.458-465 (1998), National Institute of Science Communication, New Delhi.
- 3) M. J. Forrestal, B. W. Duggin, and R. I. Butler, Trans. ASME J. of Applied Mechanics, 47-1, 17 (1980).
- 4) D. E. Grady and M. M. Hightower, "Shock-wave and high-strain-rate phenomena in materials", p.713 (1992), Marcel Dekker, Inc.
- 5) R. Gurney, The Initial Velocities of Fragments from Bombs, Shells and Grenades", Report. No. 405 (1943) Ballistic Research Laboratory.
- 6) R. J. Lawrence, "Wondy IIIa - A computer Program for One-dimensional Wave Propagation", DR No. 70-315 (1970) Sandia Laboratory.
- 7) 日本機械学会, 衝撃と破壊調査分科会報告, No.294 (1981)
- 8) G. R. Johnson, W. H. Cook, Proc. 7th Int. Symp. Ballistic, pp. 541-547 (1983) The Hague, The Netherlands.
- 9) D. J. Steinberg, S. G. Cochran and M. W. Guinan, J. Appl. Phys. 51, 1498 (1980).

Dynamic deformation and fragmentation of exploding metal cylinders

Tetsuyuki Hiroe*, Kazuhito Fujiwara*, Keisuke Miyazaki*,
Takayuki Abe**, and Masatake Yoshida**

In this paper, an explosive loading technique is applied to study the uniform expansion of smooth wall cylinder specimen (low-carbon steel and 304 stainless steel; Do·t·L: 34·3·100 mm) at high strain rate. A column of high explosive PETN is installed coaxially inside a cylinder specimen and initiated at the central axis by exploding fine copper wires using an impulsive discharge current from a capacitor bank. The streak and framing camera photos indicate radially symmetrical and axially almost uniform expansion of cylinders with the average strain rate of over 10^4 s^{-1} and the wall velocity of $3.7 \times 10^2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, representing rather earlier fracture for 304SS cylinders. The initial time-histories of surface velocity are measured to monitor the spall damage of cylinder wall, and the experimental average wall velocities are compared with those calculated using the simple equation on energy consumption. Hydro codes have been applied to simulate the experimental behavior of the cylinders, examining the constitutive equations and the fracture criteria. A steel chamber filled with wasted cloth-pieces for cushioning is provided inside the explosion pit, and 84·99% of the fragments of the exploded cylinder installed at the center are recovered successfully. The sizes of every fragment are measured, and in this study the circumferential fracture spacing is investigated using the Grady's fragmentation model.

(*Kumamoto University, Department of Mechanical Engineering and Materials Science,
2-39-1 Kurokami, Kumamoto 860-8555, JAPAN

**National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Research Center
for Explosion Safety, Central 5, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8565, JAPAN)