鋼球によるアルミニウム合金製液体容器壁の貫通挙動*

西田 政弘^{*1}, 田中 皓一^{*1}An Experimental Study on the Perforation
of Thin Aluminum Plate of Empty and Water-Filled
Vessels Impacted by Steel SpheresMasahiro NISHIDA^{*2} and Koichi TANAKA^{*2} Department of Mechanical Engineering, Nagoya Institute of Technology,
Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 466-8555 Japan

The dynamic behavior of thin A 2017-T 3 aluminum circular plates of an empty vessel and a water-filled vessel subjected to spherical projectile impact was investigated experimentally. Their out-of-plate plastic deformation and crack development were observed in the velocity range from 50 m/s to 200 m/s near their ballistic limit. Also, the pressure change of water in the vessel, diameter and mass of the plug, and diameter of the perforation hole were measured. It was found that the filling of water in the vessel significantly affects the plugging process and out-of-plate plastic deformation of the plates. The diameter and mass of plugs in the case of a water-filled vessel were larger than those in the case of an empty vessel. For water-filled vessels, the out-of-plate plastic deformation of target plates was more localized and was smaller than that of empty vessels. In addition, the out-of-plane plastic deformation of plate could be approximated by the combination of an exponential function and a linear function empirically.

Key Words: Impact Strength, Nonferrous Metal, Pressure Wave, Penetration, Perforation, Aluminum Plate, Projectile, Liquid-Filled Vessel

1. 緒 言

気密性と安全性が要求される圧力容器, 燃料容器, 飛行機や宇宙ステーションなどでは, 飛しょう体の貫入・貫通破壊に対して十分な耐衝撃性を持つことが必要である. そこで, 薄板の貫通および貫入挙動を予測し, 飛しょう体衝撃に対する構造の設計指針を得ることが必要とされている.

これまで, 飛しょう体衝撃に対する平板やパイプの変形, 破壊および貫通に関して, 古くから非常に多くの実験解析, 数値計算および理論解析^{(1)~(19)}が行われ, 既に多くの知見が得られている. しかし, 実際の容器では, 封入物質の有無や種類に影響を受け, 飛しょう体の貫通挙動が変化することが報告されている. そこで, 平板やパイプ単体の衝撃特性を考察するだけでなく, 実際に物質が封入された状態での衝撃挙動が調べられつつあり, 封入物質が液体^{(20)~(28)}もしくは加圧気体^{(21) (29)~(32)}の場合や気体と液体が同時に封入されている場合⁽³³⁾について報告されている. しかし, Corbett ら⁽³⁴⁾が指摘しているように, 水が封入された

鋼管に飛しょう体が衝突する場合でも, Ma らの貫通限界速度が上昇するという報告⁽²⁰⁾や Neilson らの貫通限界速度が減少するという報告⁽²¹⁾があるなど, 逆の傾向が報告され, 未解明な点が残っている.

また, これまで容器の材料として鉄鋼材料が主に使われ, 薄板の変形, 破壊および貫通の研究においても鉄鋼材料が主な対象とされてきた. しかし軽量化が必要な用途ではアルミニウム合金や高分子材料などについての研究が行われつつある^{(18) (19)}. アルミニウム合金や高分子材料は密度および剛性が低いため, 液体容器として用いた場合, 鉄鋼材料以上に封入物質の影響を大きく受けると予想される.

そこで本研究では, 飛しょう体速度が 50 m/s~200 m/s の領域において, 容器内の水で支えられたアルミニウム合金 (A2017-T3) 薄板に鋼球が衝突する場合の薄板の挙動に与える水の影響を調べた. 衝撃後の薄板およびプラグの変形状態を詳細に調べ, 水中の圧力変動の測定を行い, 薄板の貫通メカニズムおよび衝撃後の薄板の面外塑性変形の実験式を提案した.

* 原稿受付 2001 年 10 月 18 日.

^{*1} 正員, 名古屋工業大学工学部 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町).

E-mail: nishida@wave.mech.nitech.ac.jp

Fig. 1 Experimental setup for projectile impact on the thin wall of a vessel

2. 実験装置

実験装置の概略図を図1に示す。試験片として、板厚 t が 1 mm のアルミニウム合金 (A2017-T3) 薄板を用い、内径 150 mm、外径 202 mm、板厚 7 mm の環状鋼板で液体容器に円形周辺固定支持した。試験片と液体容器の間にはシール材として O リングを配し、衝撃時も固定部からの水漏れは無いようにした。飛しょう体は 2 種類のベアリング用鋼球を用い、それぞれ直径 d が 8 mm、質量 2.1 g および直径 10 mm、質量 4.1 g である。本研究では直径 8 mm の飛しょう体を主に用い、その実験結果を確かめるため、直径 10 mm の飛しょう体により幾つか実験を行った。また、試験片の直径は、Levy らの結果⁽⁹⁾ (先端が半球の円筒飛しょう体の直径が 12.7 mm の場合、試験片 (板厚 1.27 mm) の直径が 120 mm を超えると、実験後の試験片の面外塑性変形量が変化しない) を参考に 150 mm とした。その結果、本研究で用いた試験片の板厚は飛しょう体直径の 0.125 倍となり、試験片の直径は飛しょう体の直径の 15 倍以上となっている。なお、本実験で用いたアルミニウム合金 (A2017-T3) の基本的な物性値は、縦弾性係数 74 GPa、引張強さ 384 MPa、耐力 287 MPa、伸び 15.2 % である。また、容器内に封入された液体は常温常圧の水道水で、封入の際に気泡が入らないように注意し、容器内に充填した。

飛しょう体は直径 29.8 mm、長さ 50 mm のサボの先端に装填され、サボとともに内径 30 mm の加速管を有する単段式ガス銃で加速され、加速管出口に配置されたサボストップに衝突することによりサボと分離される。加速管、サボストップ、液体容器および試験片は一直線上に配置し、飛しょう体が試験片中央に垂直に衝突するようにした。飛しょう体の速度は、試験片直前に 40 mm 間隔で配置された二組のフォトセンサ (サンクス (株): FX-10) を遮る時間間隔により求めた。飛しょう体の衝突速度は、本実験で用いた単段式ガス

Fig. 2 Configuration of aluminum plate of empty vessel after impact; $t = 1$, $d = 8$

Fig. 3 Configuration of aluminum plate of water-filled vessel after impact; $t = 1$, $d = 8$

銃の窒素ガスの圧力を 0.3 MPa ~ 1.5 MPa とすることにより、50 m/s ~ 200 m/s を得ることができた。また、サボの材質は低速衝撃 (100 m/s 以下) に対してはポリアセタール樹脂 (サボ質量 46 g) を、高速衝撃 (100 m/s 以上) に対してはポリエチレン樹脂 (サボ質量 30 g) をそれぞれ使い分けた。

3. 実験結果

3.1 実験後の試験片の観察 本実験では、飛しょう体衝撃を受けた試験片の変形および破損は衝撃点付近のみで生じ、衝撃時の水漏れは衝撃点付近のき裂部分以外からは生じなかった。そこで、まず試験片の衝撃点付近の貫入・貫通状態を観察した。容器内に水が封入されていない場合 (以下、水の無い場合と略す) の結果を図2(a)-(e)に示す。図2(a)は、貫通限界速度以下の衝撃速度における結果である。この衝撃速度領域では、試験片にくぼみが生じ、そのくぼみは衝撃速

Fig. 4 Penetration and perforation of plates, circle: penetration, cross: perforation; $t = 1$, $d = 8$

度が増加するにつれて深く、そして広がった。衝撃速度が 75 m/s を超えると、図 2(b)(c) に見られるように試験片にき裂が入るようになった。半径方向き裂より先に周方向き裂が入り、プラグが形成され始めていることがわかる。また、貫通限界速度以下では飛しょう体は試験片により必ず跳ね返り、試験片に埋め込まれることはなかった。さらに衝撃速度が大きくなると、図 2(e)(f) に見られるように飛しょう体は試験片を貫通し、プラグが生成された。その結果、貫通限界速度は約 110 m/s であった。また、飛しょう体が試験片を貫通せずに跳ね返っているにも関わらずプラグが生成している場合があり、貫通限界速度よりわずかに小さい衝撃速度でプラグが生成すると考えられる。なお、貫通限界速度をわずかに超えた速度領域では、図 2(d) に示すように、周方向き裂が正常に進展せず、飛しょう体が試験片を貫通しているにも関わらず、プラグと思われる部分が試験片から完全に分離していない場合が数例観察された。

次に、容器に水が封入されている場合（以下、水の有る場合と略す）の結果を図 3(a)-(e) に示す。水の有る場合の貫通・貫入挙動は、水の無い場合とほぼ同じであった。また図 4 に示すように貫通限界速度は共に約 110 m/s であり、貫通限界速度に与える封入物質の影響は小さいことがわかった。なお、試験片が鋼管の場合、Ma らは、封入された水によって、長さ 250 mm、外径 51 mm、厚さ 1.2, 2.1 および 3.3 mm の鋼管の剛性が増し、貫通限界速度が大きくなると報告しているが⁽²⁰⁾、実験に用いた試験片の形状、材質および封入物質の量の違いにより、貫通限界速度に与える封入物質の影響が異なると考えられる。この点に関しては今後さらに詳細に検討する必要がある。

3.2 水中の圧力履歴 飛しょう体衝撃により生じた水中の圧力変化を、図 5 に示す衝撃点から約 30.8 mm 離れた位置の圧力センサ (PCB Piezotronics Inc., HM102A03) で測定した。結果の一例として、図 6 に

Fig. 5 Measurement position of pressures in water-filled vessel

Fig. 6 Pressure history in water at the velocity of 138 m/s; $t = 1$, $d = 8$

直径 8 mm の飛しょう体で衝撃速度 138 m/s の場合の圧力履歴を示す。小さな振幅で高周波の振動が重畳しているものの、最大値 0.85 MPa、持続時間 150 μ s の圧力波が測定された。衝撃速度を変えた数度の実験においてもほぼ同様の結果が得られた。このように、水の有る場合、飛しょう体の運動エネルギーの一部が水中の波動エネルギーとなっているので、貫通に使うことのできるエネルギーが減少して、Ma らの報告⁽²⁰⁾のように貫通限界速度が上昇すると予想したが、本実験の条件下では貫通限界速度は水の有無により大きな差が生じなかった。

3.3 貫通孔直径とプラグの重さと直径 図 7、図 8 に、実験後に回収したプラグの直径および質量の測定結果を示す。プラグ直径はそれぞれの実験で用いた飛しょう体の直径で規格化し、Calder ら⁽⁴⁾の結果との比較も行った。なお、ここで、プラグの直径は図 9(a) に示す長さである。衝撃速度が増加するにつれ、プラグの直径および質量は、水の有る場合と無い場合ともに増加し、プラグの直径は漸近的に飛しょう体の直径に近づいていく。この傾向は、Calder ら⁽⁴⁾のアルミニウム合金 (2024-O) 薄板への鋼球衝撃の結果と、実験で用いた試験片の板厚および飛しょう体形状が異なっているにも関わらず、一致しており、水の有る場合も水の無い場合と同様に、プラグの直径および質量が速度とともに増加することがわかった。また水の有る場合のプラグの直径は水の無い場合に比べ約 20 %大きく、質量は約 40 %大きくなった。さらに直径 10 mm の飛しょう体を用いた場合も、直径 8 mm の結果とほぼ同

Fig. 7 Normalized diameters of plugs of aluminum plates; $t = 1$, $d = 8$

Fig. 8 Masses of plugs of aluminum plate; $t = 1$, $d = 8$

Fig. 9 Photographs of cross section of plug; $t = 1$, $d = 8$

じ傾向が得られ、例えば、水の有る場合、規格化直径が 0.63、質量が 75 mg (150 m/s) に対し、水の無い場合、それぞれ 0.52, 50 mg (146 m/s) であった。

ところで、Ma ら⁽²⁰⁾はプラグの厚さを測定することにより、試験片の面内伸びおよびプラグの生成メカニズムについて議論している。生成されたプラグは中心が最も厚く、中心から離れるにつれ徐々に薄くなり、その原因を面内伸びと関係づけている。しかし本研究においては、プラグの厚さの変化は、図 9 に示すように Ma ら⁽²⁰⁾の結果より小さく、本研究の条件下では試験片の面内伸びは小さいと考えられる。

図 10 に飛しょう体直径が 8 mm の場合の実験後の試験片の貫通孔径の測定結果を示す。ここで全ての貫通孔径は飛しょう体の直径により規格化した。規格化した貫通孔径は衝撃速度に関らず一定で、弾性変形の回復により飛しょう体直径よりわずかに小さい値を示している。3.1 節で述べたように飛しょう体が試験片を貫通していないにも関わらずプラグが生成される場

Fig. 10 Normalized diameters of perforation holes of aluminum plate; $t = 1$, $d = 8$

合があることやプラグの直径が貫通孔径よりも小さいことを考え合わせると、まず始めにプラグ生成により試験片に小さな穴があき、その後飛しょう体が穴の周辺を曲げるように穴を押し広げ、飛しょう体が試験片を通りぬけたと考えられる。

3.4 実験後の試験片の面外塑性変形 飛しょう体が直径 8 mm の場合の衝撃後の試験片の面外塑性変形を、き裂発生速度以下、き裂発生速度および貫通限界速度以上の衝撃速度について、図 11 に示す（ここで、縦軸と横軸のスケールが異なっていることに注意されたい）。試験片の面外塑性変形は水の有無により異なっており、水の無い場合は固定端から衝撃点に向かって変位が徐々に増加しているのに対し、水の有る場合は衝撃点近傍の局所領域のみが変形していることがわかる。この結果は、Reid らの結果⁽²⁷⁾（水面に配置したアルミニウム合金および鉄鋼製の梁の中心へ飛しょう体が衝突した時の梁の変形挙動）と傾向が一致している。さらに図 12 に飛しょう体が直径 10 mm の場合の結果を示す。この場合も同様の結果が得られており、試験片の面外塑性変形挙動に与える水の影響は大きいと考えられる。

次に、直径 8 mm および直径 10 mm の飛しょう体について、水の無い場合の試験片の面外塑性変形を図 13(a) に示す。ただし、縦軸の塑性変形量をそれぞれの最大値で規格化し、横軸の衝撃点からの距離を飛しょう体の半径で規格化して、比較した。規格化した面外塑性変形量は 2 種の飛しょう体直径についてほぼ一致することがわかったので、この面外塑性変形に曲線適合することを試みた。規格化した衝撃点からの距離を r とすると、規格化した面外塑性変形量 $q(r)$ は、次式のように直線と指数関数の組み合わせで表わすことができた。

$$q(r) = \begin{cases} 0.27 - 1.7 \times 10^{-2} r & r \geq 4 \\ (e^{-1.5(r-1)} + 0.24) / 1.24 & r < 4 \end{cases} \quad (1)$$

すなわち、この結果は Calder ら⁽⁴⁾の示した単一の式

(a) below the velocity of crack initiation

(b) at the velocity of crack initiation

(c) over the perforation velocity

Fig. 11 Out-of-plane plastic deformation of aluminum plates after impact; $t = 1$, $d = 8$ Fig. 12 Out-of-plane plastic deformation of plates after impact, over perforation velocity; $t = 1$, $d = 10$

e^{-R} (Calder らの論文では衝撃点からの距離 R をインチで表示) よりも全域の変形を正確に表現できる。この違いは、試験片の直径、材質および飛しょう体の形状の違いによると考えられる。なお、Calder らは、

(a) empty vessel

(b) water-filled vessel

Fig. 13 Normalized out-of-plane plastic deformation of plates, over perforation velocity

Fig. 14 Maximum out-of-plane plastic deformation of aluminum plate; $t = 1$, $d = 8$

飛しょう体として直径 0.5 inch の鋼球を、試験片として固定端直径 14.5 inch、板厚 0.050 inch のアルミニウム合金 (2027-O) 薄板 (耐力 約 12900 psi) を用いている⁽⁴⁾。

さらに、水の有る場合についても面外塑性変形量を比較し、曲線適合を試みた。図 13(b) に示すように、規格化した面外塑性変形量はほぼ一致し、またその面外塑性変形量は、

$$q(r) = e^{-1.5(r-1)} \quad (2)$$

のように一種類の指数関数で表わすことができた。ただし、式 (1) および式 (2) の数値定数の意味については材料物性やエネルギー収支などから今後の検討が必要

Fig. 15 Photograph of the cross section of plate after impact at the crack initiation velocity; $t = 1, d = 8$

である。

次に、直径 8 mm の飛しょう体を用いた場合について、試験片の面外最大塑性変形量を図 14 に示す。ここで、面外最大塑性変形量は図 11(c) 中の H で示した試験片の面外塑性変形量の衝撃点付近における最大値を意味している。面外最大塑性変形量は、水の有無に関らず、貫通限界速度以下では徐々に増加し、貫通限界速度以上では徐々に減少している。その結果、貫通限界速度付近で最大値を示した。この最大値に関する傾向は、アルミニウム合金 (2024-O) 薄板に対する鋼球の貫入・貫通現象を調べた Levy らの結果⁽⁹⁾と一致しており、水の有る場合も水の無い場合と同様に、貫通限界速度付近で面外最大塑性変形量が最大値を示すことがわかった。また、貫通限界速度以下では、水の有る場合の面外最大塑性変形量は水の無い場合に比べてやや大きいと同程度であるのに対し、貫通限界速度以上では水の有無による違いが顕著で、水の有る場合の面外最大塑性変形量は水の無い場合の 75 %~90 % になっていることがわかる。

ここで、貫通限界速度が水の有無により大きな変化が見られなかった原因について考える。プラグ生成および試験片の塑性変形に必要な仕事量について、これまで様々な理論式および経験式が提案されている⁽³⁴⁾。一般に、プラグ直径が大きくなるほどプラグ生成に必要な仕事量は増え、塑性変形量が大きくなるほど試験片の塑性変形に必要な仕事量は増える。本研究の結果は、水の有る場合は水の無い場合に比べ、プラグ直径は大きいものの、試験片の塑性変形量は小さくなった。そのため、水が有る場合、プラグ生成に必要な仕事量は大きいものの、試験片の変形に必要な仕事量は小さい。したがって、仕事量の大小の相殺から、本研究の条件下では、水の有無により貫通限界速度に大きな変化は見られなかったと考えられる。

empty vessel, 131 m/s

Fig. 16 Photograph of the cross section of plug; $t = 1, d = 8$

Fig. 17 Schematic of plugging mechanism of plates produced by a spherical steel projectile

3.5 プラグ生成のメカニズム 図 15 に試験片の断面写真を示し、き裂の形状を比較する。図 15(a)(b) のように、水の有る場合および水の無い場合ともに、ほとんどのき裂は直線状であったが、水の無い場合には図 15(c) のようにき裂が V 字形になる場合もあった。それに対応し、図 16 に示すように、水の無い場合のプラグの断面形状は 3.3 節で示した図 9(b) と少し異なるプラグが生成される場合があった。また、水の有る場合はほとんど板厚の変化はみられないのに対し、水の無い場合はき裂近傍で板厚が少し減少している。

以上のことから水の影響を受ける薄板のプラグ生成のメカニズムについて推量し、その模式図を図 17 に示す。これまでの研究により、薄板単体の貫通およびプラグ生成メカニズムは既知である。一般に、飛しょう体衝撃の際、まず始めに面内伸びにより板厚が減少する。その後、飛しょう体と試験片の接触領域周辺で、局所的な板厚の減少とともにせん断が大きくなり、初期き裂が接触領域周辺で生じ、プラグが生成する。つまり、面内伸びとせん断破壊の複合によりプラグが生成される。一方、水の有る場合は、図 11 および図 12 に示したように薄板は面内伸びが抑制される。その結果、本研究の条件下では、水の有る場合および水の無い場合ともに、プラグの生成においてせん断破壊が支配的であるものの、水の有る場合はプラグ生成メカニズムに占める面内伸びの割合が減少し、せん断破壊の占める割合がより一層多くなったと考えられる。この推量を確かなものにするために、今後、飛しょう体衝撃時の試験片の応力分布やひずみ分布を詳細に調べる必要がある。

4. 結 言

容器内の水で支えられたアルミニウム合金 (A2017-T3) 薄板に鋼球が衝突する場合の薄板の挙動に与える水の影響を調べた。明らかになったことを以下にまとめる。

1. 容器内の水は、実験後の試験片の面外塑性変形、面外最大塑性変形量およびプラグの直径、質量に大きな影響を与えることがわかった。水の有る場合は水の無い場合に比べ、試験片の面外塑性変形が局所的になり、その面外最大塑性変形量は小さくなった。また、本研究の条件下では、プラグの直径および質量は、水の有る場合の方が水の無い場合に比べ大きくなった。
2. 本研究の条件下では、試験片の貫通限界速度は水の有る場合と水の無い場合で大きな差が見られなかった。
3. 水中の圧力測定の結果、水中に圧力波が生じていることがわかり、飛しょう体の運動エネルギーの一部が水中の波動エネルギーに変換されていることを確かめた。
4. 本研究の条件下での貫通メカニズムは、まず始めにプラグ生成により試験片に小さな穴があき、その後飛しょう体が穴の周辺を曲げるように穴を押し広げ、飛しょう体が試験片を通りぬけることがわかった。
5. 衝撃後の試験片の面外塑性変形の実験式を提案し、水の有る場合は一種類の指数関数で、水の無い場合は、指数関数と直線の組み合わせで近似した。
6. 本研究の条件下では、プラグ生成メカニズムは水の有る場合および水の無い場合ともに、せん断破壊が支配的であるものの、水の有無によりメカニズムが若干変化し、水の有る場合には試験片の面内伸びの占める割合が減少し、せん断破壊がより支配的になると考えられる。

謝 辞

実験を行うに際し、名古屋工業大学 伊藤 雅君の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

文 献

- (1) 大井上博, 戦車工学, (1943), 海山堂.
- (2) Nishiwaki, J., Resistance to the Penetration of a Bullet through an Aluminum Plate, *J. Phys. Soc. Japan*, 6-5 (1951), 374-378.
- (3) Awerbuch, J., A Mechanics Approach to Projectile Penetration, *Israel J. Tech.*, 8-4 (1970), 375-383.
- (4) Calder, C.A. and Goldsmith, W., Plastic Deformation and Perforation of Thin Plates Resulting from Projectile Impact, *Int. J. Solids Structures*, 7 (1971), 863-881.
- (5) Goldsmith, W. and Finnegan, S.A., Penetration and Perforation Processes in Metal Targets at and above Ballistic Velocities, *Int. J. Mech. Sci.*, 13 (1971), 843-866.
- (6) Jonas, G.H. and Zukas, J.A., Mechanics of Penetration: Analysis and Experiment, *Int. J. Engng. Sci.*, 16 (1978), 879-903.
- (7) Backman, M.E. and Goldsmith, W., The Mechanics of Penetration of Projectiles into Target, *Int. J. Engng. Sci.*, 16-1 (1978), 1-99.
- (8) 千葉矩正・志田茂・大手敏・吉沢弘泰, 飛来物体に対する鋼板の耐衝撃性 (第1報, 鋼板の破損限界の板厚依存性), 機論, 47-422, A (1981), 1101-1109.
- (9) Levy, N. and Goldsmith, W., Normal Impact and Perforation of Thin Plates by Hemispherically-Tipped Projectiles-II. Experimental results, *Int. J. Impact Engng.*, 2-4 (1984), 299-324.
- (10) 田中吉之助・黒川知明・米田洋・安達圭一, 金属薄板の貫通破壊, 日本航空宇宙学会誌, 33-379, (1985), 476-483.
- (11) Neilson, A.J., Empirical Equations for the Perforation of Mild Steel Plates, *Int. J. Impact Engng.*, 3-2 (1985), 137-142.
- (12) 林卓夫・田中吉之助, 衝撃工学, (1988), 日刊工業新聞社.
- (13) Crouch, I.G., Baxter, B.J. and Woodward, R.L., Empirical Tests of a Model for Thin Plate Perforation, *Int. J. Impact Engng.*, 9-1 (1990), 19-33.
- (14) 上西研・種田元治・河野俊一, 田中伸治, 薄板の貫通破壊におけるき裂の発生と進展, 機論, 57-539, A (1991), 1495-1501.
- (15) Zukas, J., Nicholas, T., Swift, H.F., Greszczuk, L.B. and Curran, D.R., *Impact Dynamics*, (1992), Krieger publishing.
- (16) 浅田和雄, 飛翔体の貫通解析, 機論, 58-555, A (1992), 2212-2218.
- (17) Jones, N. and Kim, S.-B., A Study on the Large Ductile Deformations and Perforation of Mild Steel Plates Struck by a Mass, *Trans. ASME J. Pressure Vessel Technology*, 119-2 (1997), 178-184.
- (18) 小林昭・荻原慎二・山崎文朝・石榑智之, 高分子材料の衝撃貫通破壊について, 材料, 46-2, (1997), 152-156.
- (19) Gupta, N.K., R. Ansari and Gupta, S.K., Normal impact of ogive nosed projectiles on thin plates, *Int. J. Impact Engng.*, 25-7 (2001), 641-660.
- (20) Ma, X. and Stronge, W.J., Spherical Missile Impact and Perforation of Filled Steel Tubes, *Int. J. Impact Engng.*, 3-1 (1985), 1-16.
- (21) Neilson, A.J., Howa, W.D. and Garton, G.P., Impact Resistance of Mild Steel Pipes: an Experimental Study, *AEE Winfrith AEEW-R2125*, (1987).
- (22) Kimsey, K.D., Numerical Simulation of Hydrodynamic RAM, *Proc. 1980 Summer Computer Simulation Conference*, (1980), 299-301.
- (23) Colton, J.D., Sanai, M., Gefken, P.R. and Cooper, T., Explosive Simulation of Hypervelocity Impact on Fluid-Filled Tank, *ASME Pressure Vessels and Piping Conference*, (1989), 1-5.

- (24) Lundstram, E.A. and Anderson, T., Hydraulic Ram Model for High Explosive Ammunition, *ASME Pressure Vessels and Piping Conference*, (1989), 45–50.
- (25) Sareen, A.K. and Smith, M.R., Evaluation of an Analytical Design Tool for Ballistic Dynamics Simulation, *52nd Annual Forum Proceedings-American Helicopter Society*, 2, (1996), 1271–1282.
- (26) Anderson, C.E., Sharron, T.R., Walker, J.D. and Freitas, C.J., Simulation and Analysis of a 23-mm HEI Projectile Hydrodynamic Ram Experiment, *Int. J. Impact Engng.*, 22-9/10 (1999), 981–997.
- (27) Reid, S.R. and Hendry S.R., Response of Fluid-Backed Metal Beams to Central Impact, *Proceedings of International Conference on Structural Impact and Crashworthiness*, ed. Morton, J., 2 (1984), 411–426, Elsevier.
- (28) Krajcinovic, D., Dynamic Response of Circular Rigid-Plastic Plates Resting on Fluid, *Trans. ASME J. Appl. Mech.*, 43-1 (1976), 102–106.
- (29) Cour-Palais, B.G. and Crews, J.L., Hypervelocity Impact and Upper-Stage Breakup, Orbital Debris from Upper-Stage Breakup, *Progress in Astronautics and Aeronautics*, 121 (1989), 25–38.
- (30) Jones, N. and Birch, R.S., Influence of Internal Pressure on the Impact Behavior of Steel Pipelines, *Trans ASME J Pressure Vessel Tech.*, 118-4 (1996), 464–471.
- (31) Christiansen, E.L., Kerr, J.H. and Whitne, J.P., Debris Cloud Ablation in Gas-Filled Pressure Vessels., *Int. J. Impact Engng.*, 20-1 (1997), 173–184.
- (32) Lambert, M. and Schneider, E., Hypervelocity Impacts on Gas Filled Pressure Vessels, *Int. J. Impact Engng.*, 20-2 (1997), 491–498.
- (33) Poe, R.F. and Rucker, M.A., Evaluation of Pressurized Vessels Following Hypervelocity Particle Impact, *Proc. First European Conference on Space Debris*, (1993), 441–446.
- (34) Corbett, G.G., Reid, S.R. and Johnson, W., Impact Loading of Plates and Shells by Free-Flying Projectiles: a Review, *Int. J. Impact Engng.*, 18-2 (1996), 141–230.