



# MATERIALS and PROCESSING

NO. 32

日本機械学会 機械材料・材料加工部門ニューズレター



巻頭言

特集：  
衝撃工学の最前線

東京大学  
航空宇宙工学専攻  
塩谷 義

機械材料にとって、「衝撃」はその変形や破壊など力学的応答に影響を与える重要な因子であり、また、材料加工にとっても、衝撃を応用した工程や衝撃に影響される事象も多い。しかし、「衝撃」は理論的にも現象的にも複雑な問題であるため、材料・加工を扱う技術者・研究者は、衝撃にひとまず目を瞑り、この影響を無視した静的手法からの「概算」、「近似」などでお茶をにごすことも一般的である。本特集では、あえてこの難しい問題に正面から取り組んでいる最前線の研究を紹介するものである。

「衝撃」を和英辞典で調べると、“Shock”と“Impact”の2語が示されている。“Impact”は「衝突」の訳語にも対応しており、物体が「高速」で飛行して他の物体と衝突することによる事象であるのに対し、“Shock”は熱衝撃、衝撃波などの語からもわかるように、「高速」は物体の移動速度である必要はなく、波の伝播速度、温度変化速度など、より幅広い概念を示すように思われる。しかし議論の発散を避けるためにも、ここでは「衝撃」の範囲は、「時間的に変化の大きい力学的負荷」とするのが適当であろう。

衝撃における、「時間的に変化」は、理論的には(a)変形(ひずみ)速度が大きい場合と、(b)慣性力が重要な役割を担う場合とに分けて考える必要がある。別の言葉で表現すれば、(a)「時間の1階微分」と(b)「時間の2階微分」の概念である。このトピックスでも解説される衝撃棒法(Hopkinson棒法など)は、実験手法としては、衝突による応力波を用いる「時間の2階微分」であるが、測定する対

象は、主に材料の変形のひずみ速度特性を調べるので「時間の1階微分」である。(a)の材料の変形速度の大きい事象は、材料の構成方程式(応力-ひずみ関係)の速度依存性が対象であり、すなわち、各種材料の力学特性の問題である。一方、(b)の慣性力の影響は、材料の構成方程式にかかわらず、部材各部の運動の加速度により、変形場、応力場が動的に変化する場合で、高速衝突、高速亀裂伝播などの問題が例である。基本的には、材料の問題というよりは、動的変形場を力学的に解くことに主眼があるが、現実の事象は(a)の場合と組合わさることが一般的である。本特集の各テーマもそれぞれの観点からの研究紹介となる。

## ◆ 特集「衝撃工学の最前線」

- 1 衝撃変形と降伏現象  
小川 欽也(元京都大学,  
スペース・ダイナミックス研究所)
- 2 ひずみ速度  $10^4$ /sec 台における速度急変試験  
崎野 清憲(法政大学)
- 3 日本刀におけるアセンブリー技術  
臺丸谷 政志(室蘭工業大学)
- 4 テニスボールの衝撃特性  
中川 紀壽(広島大学)
- 5 二段式軽ガス銃による耐宇宙ごみ防衛構造の開発  
—超高速衝突—  
赤星 保浩(九州工業大学)
- 6 衝撃問題における数値解析  
榎田 努(大阪府立大学大学院)
- 7 高速引張試験方法 ISO 化の動き  
板橋 正章(諏訪東京理科大学)
- 8 自動車用樹脂成形部品の衝撃破壊シミュレーション  
前 博行((株)本田技術研究所)

## ■特集 “衝撃工学の最前線”

### □ 特集 1 衝撃変形と降伏現象 □

元京都大学

(現：スペース・ダイナミクス研究所)

小川 欽也

降伏現象は塑性変形開始を判定する一つの基準としてだけでなく、構造不安定を惹き起こす局所変形の発生を判定する基準ともなるため、その原因を明確にする必要がある。準静的な変形速度域での降伏現象は試験機剛性にも影響されるものではあるが、主として温度やひずみ速度に依存し、本質的に材料特性に起因することが明らかにされてきた。しかし、衝撃変形において観測される降伏現象は材料特性に起因するだけでなく、試験片中の塑性波伝播や、測定系での応力波伝播にも起因するため、その解釈には十分な注意が必要である。ここでは最も信頼性があるとして多用されている図1に示すSHPB（スプリット・ホプキンソン圧力棒）法<sup>1)</sup>による衝撃変形試験、特に衝撃引張り試験で現れる降伏現象についてその原因を考察してみる。

図2には、準静的変形では降伏現象が生じないアルミニウム合金A7075、IF鋼、高強度单相および複合組織鋼の衝撃引張り試験で観測された降伏現象を示す。IF鋼の場合には、次のような事実から、材料特性によって降伏現象が現れたと考えられる。すなわちIF鋼は室温での準静的変形試験では降伏現象を生じないが、温度の低下とともに降伏現象が現れる。そこで、変形が熱活性化過程に支配されるとして、温度とひずみ速度の逆等価性を考慮すると、室温でひずみ速度 $10^3/s$ の衝撃変形での挙動は、温度195K、ひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 8 \times 10^1/s$ の準静的変形での挙動に対応し、そのような低温では降伏現象が観察されることから、衝撃変形試験での降伏現象が主として材料特性に起因すると判断できる<sup>2)</sup>。一方、アルミニウム合金や高強度鋼の場合には、低温での準静的変形においても降伏現象は観察されないため、衝撃変形での現象は材料特性とは考えにくく、他の要因に基づくと考えられる。例えば、ワンバー法で現れる顕著な降伏現象はインパクトブロックを適切に選定することや、応力棒の横振動を制限することで大幅に抑えられることから、大部分が試験方法によることが示された<sup>3,4)</sup>。また、SHPB棒法においても、試験片と応力棒の締結が緩いと、顕著な降伏現象が発生しやすいたことがFEM解析により示された<sup>5)</sup>。図2の場合には、試験片の応力棒への締結は十分に行われているため、まず前者の要因について検討してみた。入、出力棒の試験片に接した端部を滑らかに支持しながら、横方向変位を拘束した衝撃試験を行い、得られた応力-ひずみ関係<sup>6)</sup>を図3に示した。アルミニウム合金については、入力棒の端部を拘束した場合と、出力棒の端部を拘束した場合を示し、单相および複合組織鋼については、

拘束しない場合と、出力棒の端部のみを拘束した場合を示す。加工硬化率の大きい複合組織鋼の場合には明瞭ではないが、単相組織鋼の場合には、横方向変位を拘束すると明らかに降伏現象が低減している。このことから、何らかの横方向の負荷が衝撃中に生じると、降伏現象を増幅することは明らかであるが、それだけでは降伏現象の発生自体を説明することはできない。過去に多く行われた衝撃圧縮試験においても時として降伏現象が観測されることがあり、その主たる原因は応力波の分散効果であるとされた。そこで、FEM解析によって応力波の伝播状況を検討してみる。図4には、出力棒の試験片側からそれぞれ離れた位置で得られた透過応力波を示す<sup>7)</sup>。試験片端から離れるにつれて分散効果によって波頭での振動が顕著になるが、試験片端から僅か25mm離れた位置でも、この振動波形が明瞭に認められ、降伏現象が応力波の分散効果のみによって生じたものではなく、さらに詳しく試験片から応力棒への応力波の伝播を調べる必要があることが分かる。図5には、試験片のフィレット部が直角な場合(a)と円弧状の場合(b)について、試験片に接した出力棒の端部近傍での応力分布の時間的な変化を示す<sup>7)</sup>。どちらの場合も試験片を透過した応力波は半径方向への変位を伴いながら三次元的に伝播し、出力棒表面に到達すると、棒表面を半径方向に急激に変位させる。その結果、半径方向の振動が惹き起こされ、応力波頭での振動現象を伴いながら軸方向に伝播する。出力棒表面に到達した応力波の一部は出力棒の端面に向かって逆行し、自由表面で反射して三次元的な応力波と干渉するため、これも振動現象に影響を及ぼす。このようにして、三次元的な応力波の伝播が降伏現象を生じている主な原因であることが分かる。試験片と応力棒の断面積比の大きい場合にはこのような効果は大きくなるから<sup>8)</sup>、引張り試験では降伏現象が惹起されやすくなることが理解できる。したがって、SHPB法による衝撃引張り試験では、試験片に応じて細い応力棒を用いることが三次元的な応力波伝播に起因する降伏現象の抑制に有効である。このことは、SHPB法を用いて構造物の衝撃応答を求める場合においても注意を払うべき点である。

#### 参考文献

[1]小川, 実験力学, 2巻, 2号, pp.89-96(2002)

[2]K.Ogawa, T.Kobayashi, F.Sugiyama and K.Horikawa, JSME Inter.Journ.Ser.A, vol.48, No.4, pp.228-233(2005)

- [3] 平成 13 年度 NEDO 研究受託成果報告書, (財)ニューマテリアルセンター (2002)
- [4] 板橋, 実験力学, 2 巻, 2 号, pp.27-32(2002)
- [5] 平成 12 年度 NEDO 研究受託成果報告書, (財)ニューマテリアルセンター (2001)
- [6] 小川・杉山, 材料, 53 巻, 5 号, pp.560-565(2004)
- [7] 小川・杉山, 材料, 55 巻, 9 号, pp.819-823(2006)

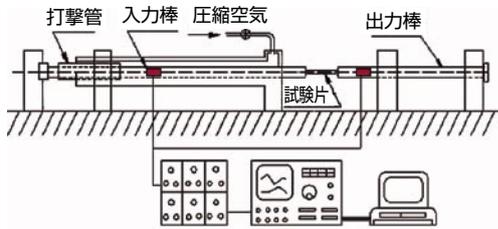


図 1

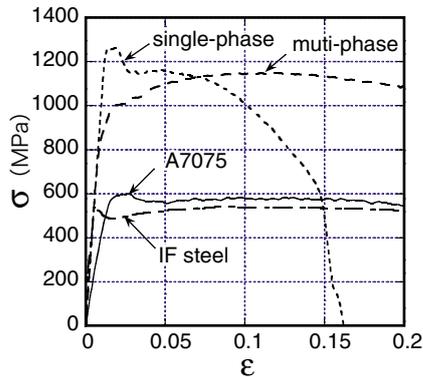


図 2

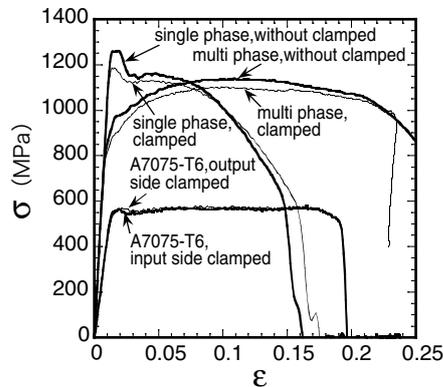


図 3

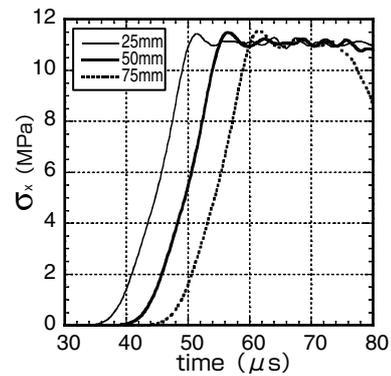


図 4

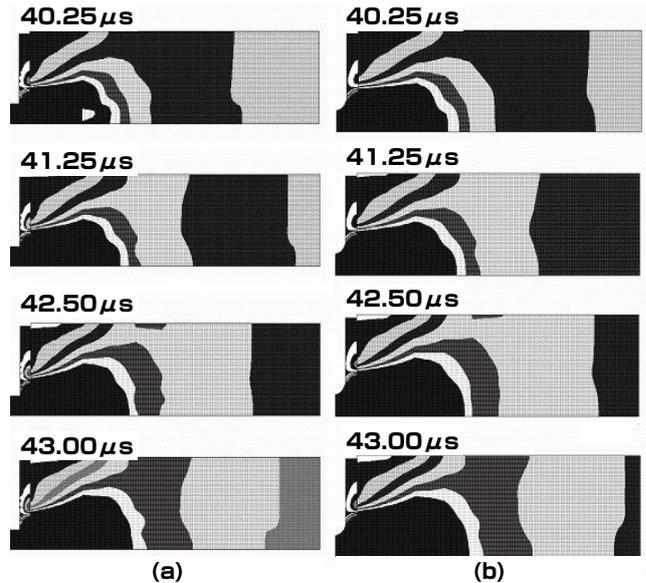


図 5

□ 特集 2 ひずみ速度  $10^4/\text{sec}$  台における速度急変試験 □

法政大学  
工学部機械工学科  
崎野 清憲

1. はじめに

材料の高ひずみ速度域における変形応力の測定に最も広く用いられているのがスプリット・ホプキンソン棒(SHPB)法である。最近の解説論文<sup>1)</sup>にも見られるように, SHPB法が開発されてからおよそ半世紀が経過し, この間, このシステムについての問題点の指摘とともにその測定方法について多くの改良が成されてきた。しかし, 現在ひずみ

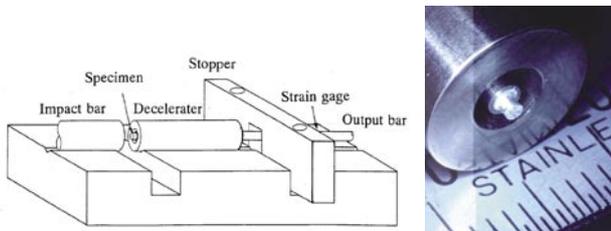
速度  $10^4/\text{sec}$  以上を達成できる高速変形装置は多くはなく, Cliftonら<sup>2)</sup>の特殊な装置をのぞけば圧縮型のSHPB装置が最も有望である。圧縮型のSHPB法には, 棒中における弾性波の分散の問題や試験片の慣性力などの問題がある。これらの問題を克服し, 高速域で圧縮試験を行うにはきわめて小さな試験片とそれに対応する小さな径のホプキンソン棒が必要となる。それらを用いた装置の製作が可能となれ

ば、 $10^3/\text{sec}$ 以上の高ひずみ速度域で問題となっている変形応力の急上昇についても明確な結論が得られる筈である。

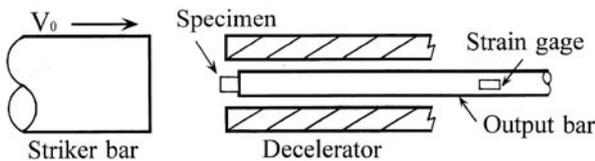
そこで、本報では直径2mmの出力棒ならびに直径および長さが1mmの試験片を用いたひずみ速度 $10^4/\text{sec}$ 台における速度急変試験について紹介する。

2. 速度急変試験装置

高ひずみ速度域における変形応力のひずみ速度依存性を評価するには、速度急変試験が有効である。従来のスプリット型のシステムでは、入力棒中における弾性波の分散の影響により、高ひずみ速度域で高い時間分解能を持つ速度急変試験をおこなうのはきわめて困難であった。ここでは、上記の問題を克服するために、打撃棒が試験片を直接圧縮変形するシステム(図1(a),(b),(c))を用いると共に、出力棒には直径2mmで長さ300mmのタングステン製丸棒を使用した。試験片の変形抵抗は出力棒に接着されたひずみゲージにより測定される。通常、径の小さな出力棒にひずみゲージを接着するのは容易でないが、ここでは直径2mmの出力棒表面に絶縁被膜を作成し、ゲージ長さが1mmで幅0.25mmの無ベースの半導体ひずみゲージ(図1(d))を軸対称に2枚貼り付けた(図1(e))。速度急変は、試験片を圧縮変形している打撃棒を変形途中で減速用の中空丸棒に衝突させることにより行った。本試験で用いた直径10mmの打撃棒(Ti合金製)と外径10mmで内径が4.6mmの減速棒(Ni合金製)との組合せによる速度降下率は58.6%である。試験片の出力棒端面への取り付けはグリースの粘着力を利用している。



(a)速度急変試験装置の外観 (b)減速棒ならびに出力棒先端の試験片



(c)打撃棒、減速棒、出力棒ならびに試験片の配置



(d)半導体ひずみゲージ (e)出力棒に接着されたゲージ

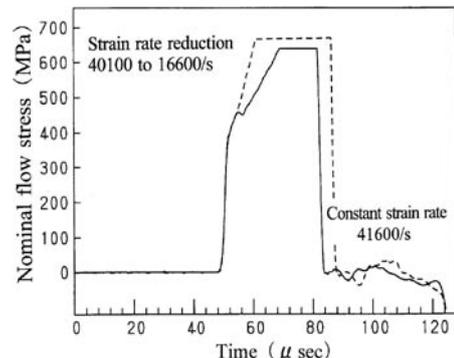
図1 速度急変試験装置

3. 6061-T6 に対する速度急変試験<sup>3)</sup>

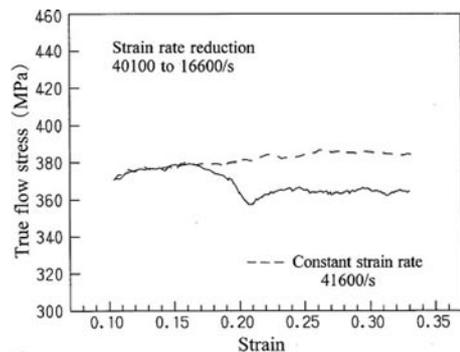
本報で紹介した速度急変試験装置を用いて、6061-T6アルミニウム合金に対しひずみ速度 $1 \times 10^4/\text{sec}$ 以上の領域で速度急変試験を行った。用いた6061-T6(大同軽金属工業)は535℃(1.5h)で溶体化処理した後、水焼入れを行い、170℃(8h)で焼戻し処理されている。試験片は直径6mmの丸棒を直径および長さがそれぞれ1.0mmの円柱形に機械加工して用いた。

図2は、ひずみ18%付近でひずみ速度を $4.01 \times 10^4/\text{sec}$ から $1.66 \times 10^4/\text{sec}$ に急速に降下させた場合である。図中の(a)は公称応力-時間線図であり、(b)は速度急変箇所を拡大表示した真応力-ひずみ線図である。また、図中には速度急変による変形応力の降下量を求めるため、速度急変前のひずみ速度に対応した一定ひずみ速度における真応力-ひずみ線図(破線)を描いてある。速度急変後の両者の比較から、速度急変による変形応力の降下量はおおよそ22 MPaとなる。

図3に、ひずみ速度 $1 \times 10^4/\text{sec}$ から $4 \times 10^4/\text{sec}$ の領域でおこなった速度急変試験の結果をまとめて示した。縦軸は速度急変による変形応力の降下量であり、横軸はひずみ速度を対数座標で表している。図に見られるように、ひずみ速度おおよそ $2 \times 10^4/\text{sec}$ 付近から変形応力が急上昇しているのが分かる。このように、ひずみ速度 $1 \times 10^4/\text{sec}$ 以下では現れない変形応力の急上昇を評価できるのは、本試験装置の成果といえる。また、速度急変試験から求められる変形応力の降下量は、ひずみ速度に対する応力の瞬間応答成分であるため、上記現象の解析には瞬間ひずみ速度依存型のモデルを用いることが可能である。



(a)公称応力-時間線図



(b)速度急変箇所の真応力-ひずみ線図

図2 ひずみ速度を $4.01 \times 10^4/\text{sec}$ から $1.66 \times 10^4/\text{sec}$ へ急速に降下させた場合の速度急変試験結果

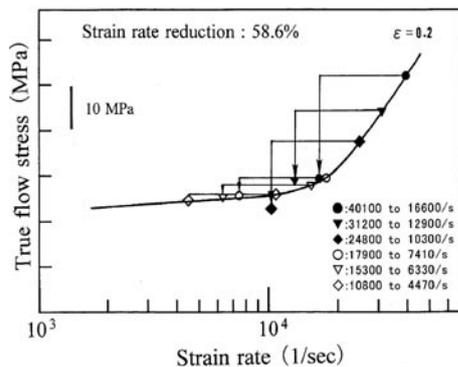


図3 ひずみ速度  $1 \times 10^4$ /sec 以上の領域で行われた速度急変試験から得られた変形応力のひずみ速度依存性

#### 4. おわりに

従来から用いられてきたスプリット型のホプキンソン棒システムでは、装置の制約上ひずみ速度  $1 \times 10^4$ /sec 以上の領域で信頼できるデータを得るのは困難であった。しかし、極めて細いホプキンソン棒と微小試験片を使用し、本報で示したような連続的な差動試験を行えば、ひずみ速度  $1 \times 10^4$ /sec 以上における変形応力のひずみ速度依存性ならびにその変形機構の評価は可能と考える。

#### 参考文献

- 1) 小川欽也, 実験力学, Vol.2, pp.89 (2002).
- 2) R. J. Clifton, W. Tong, J. Mech. Phys. Solids, Vol. 40, pp.1251 (1992).
- 3) 崎野清憲, 材料, Vol.55, pp.1021 (2006).

## □ 特集3 日本刀におけるアセンブリー技術 □

室蘭工業大学  
 機械システム工学科  
 臺丸谷 政志

### 1. まえがき

日本刀は、太刀、刀、脇差、短刀、薙刀、剣、槍等の総称であり、刀の代名詞にもなっている。日本刀の出現は平安中期と云われ、その製作技術は一千年に及ぶ長い伝統をもち、鑄造り(しのぎづくり)の彎刀に代表されるように独自の形態と機能を備えた我が国特有の武器である。その機能美は武器としての機能を極限まで追求した極致であり、高い技術に基づく我が国における最も優れた美術工芸品の一つである。

工業製品の要素、部品を一体化して集合体として機能を発揮させるためのアセンブリー技術の観点から日本刀を見れば、まず、性質の異なる和鉄を組み合わせ圧接(鍛接)する「造り込み」があげられる。「四方詰」による造り込みでは、折り返し鍛練した皮鉄、心鉄、刃鉄、棟鉄が組み合わされて「沸かし延べ」され刀形に延べられ、「火づくり」によってほぼ刀の原型が造られる<sup>1,2)</sup>。

作刀技術に関しては専門書に譲り、ここでは、造られた刀身と柄との接合に関して、衝撃工学的に検討した結果を紹介する。Fig.1に刀として実際に使用される打刀拵(こしらえ)を分解した写真を示す。茎(なかご)が柄に挿入され竹目釘一本によって刀身は柄に接合される。すなわち刀は目釘一本を抜くことにより写真のようにバラバラに分解することができる。また「はばき」は刀身と鞘との接合金具であり、鞘から刀が不用意に抜け落ちないようにするための留金である。

刀が武器として用いられる場合は当然激しい打ち合いも想定されるが、刀身と柄の接合は前述のように目釘と呼ばれる竹釘一本によってなされているだけである。一般にわ

ずかにテーパが付いた直径数ミリメートル程度の目釘竹を刀身と柄にそれぞれ空けられた目釘穴に通すことによって接合されている。これで激しい打ち合いに耐えられるとすれば、これは接合技術の観点からも改めて注目すべき伝統的技術であると言えるかも知れない。

ここでは、刀が激しい打ち合いにおいても何故竹の目釘一本で刀身が柄に留められ得るのかまた破損しないのか、打刀を模擬した彎刀モデルを用いて衝撃実験および数値シミュレーションによって検討した結果について述べる<sup>3,4)</sup>。

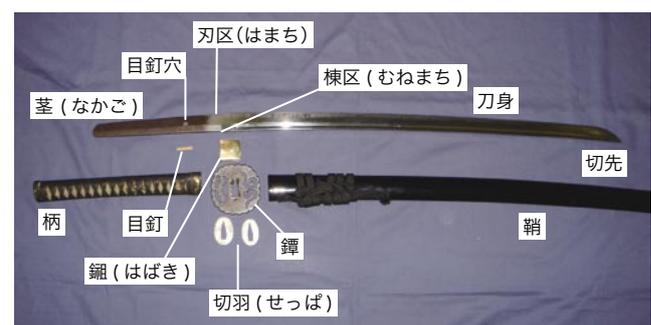


Fig. 1 Parts of the Japanese sword.

### 2. 彎刀モデルによる衝撃実験と数値解析

刀は造り込みによって複雑な内部構造を持ち、姿形は優美な反りを有しかつ軸線に沿って断面積が変化している。問題を簡単にするため鋼板より作製した反りを有する2次元彎刀モデルに関して、衝撃応答実験と解析コードLS-DYNAを用いて衝撃応答シミュレーションを実施した。

鋼板(磨き鋼材SS400相当)から切出し作製した彎刀モデルをFig.2に示す。刃長2尺3寸(700mm),反り8分(24mm)の打刀を模擬した一様な厚さ6mmの彎刀モデルである。

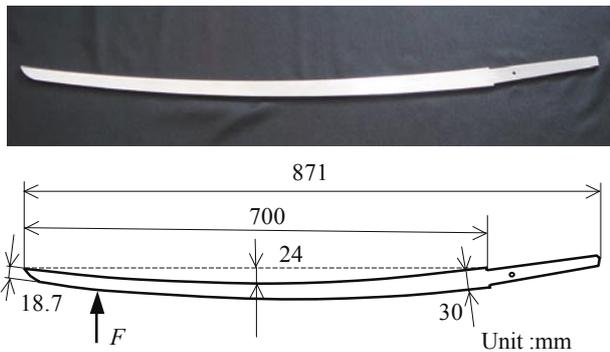


Fig. 2 Katana model with sori used in impact experiment and numerical simulation.

刀が実際に受ける衝撃力はその大きさや持続時間だけではなく、どの位置にどの角度から受けるか、あらゆる状況が考えられる。本実験では、衝撃棒 (SS400 鋼棒、長さ 100 cm、直径 10mm) を切先から 10cm の物打ち位置 (Fig.2 の ↑ F) および刃長中央の 35cm の位置にそれぞれ衝突させて、刀身モデルに入射する衝撃力の時間変動および刀身モデル各位置における応力変動を計測した。刀身切先から 10cm および 35cm の位置に衝撃棒を衝突させて得られた衝撃力波形を Fig.3 に示す。衝撃棒に貼付したひずみゲージより計測された衝撃応力波形に基づいて 2 点ゲージ法によって算定した刀身モデルへ入射する衝撃力の時間変動である。衝撃位置によって衝撃力波形が異なることがわかる。

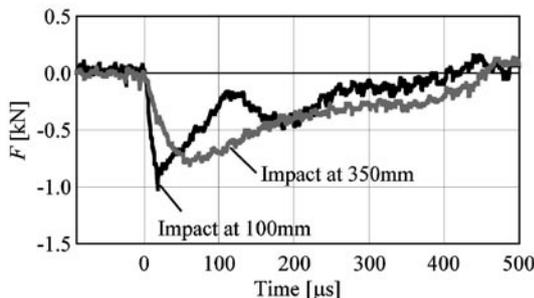


Fig 3 Incident force into a sword model at each location by impact of a striking bar.

この入射衝撃力に基づいて彎刀モデルの衝撃応答の数値シミュレーションを行った。数値計算において、刀身材料の機械的性質は、縦弾性係数  $E=206$  GPa、質量密度  $\rho = 7.85 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>、ポアソン比  $\nu = 0.29$  とした。刀身は拵 (こしらえ) でも白鞘でも茎を柄に差し込み目釘竹で留められる。柄は朴 (ほお) の木で作られ、鮫皮が着せられ柄糸が巻かれている。和鋼である茎の剛性と柄木の剛性との間には一桁以上の差、比率で 20 : 1 程度の差があると考えられる。これらの状況を勘案して、数値計算において刀身は衝撃負荷以外の外力および拘束は受けないと仮定した。

数値解析例を以下に示す。切先より物打ち 10cm の位置に衝撃を受ける場合の各部位 (切先、目釘穴および茎尻) における刀身軸と垂直方向の振動振幅の時間的変動を Fig.4 に示す。高周波成分が重畳しているがほぼ周期的な変動を示しており、切先と茎尻で大きな振幅となっているが区 (まち) および目釘穴位置の振幅は比較的小さくなっている。また、このときの変位の時間的変動より得られた刀身各位

置における振幅の最大幅を Fig.5 に示す。切先や茎尻で大きな振幅となっており、また中央付近でも比較的大きな振幅となっている。一方、目釘穴の位置および区の付近で振幅が相対的に小さくなっていることがわかる。紙面の制約上、図面は省略するが、衝撃棒を刀身中央 35cm の位置に衝突させた場合の刀身各位置における振幅の最大幅も Fig.5 とほぼ同じ振幅分布となり、衝撃力を受ける刀身位置および衝撃力波形が多少異なっても刀身各部位で同様な振幅分布となる結果が得られている。

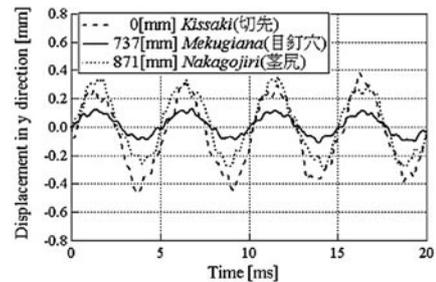


Fig 4 Variation of displacement with time at each position. (at impact point of 100mm from kissaki)

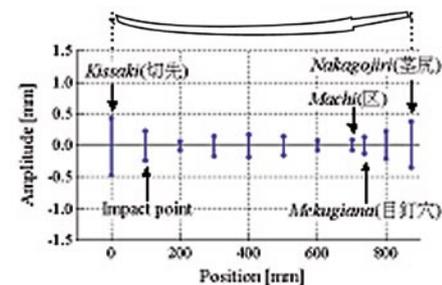


Fig. 5 Amplitude at each position along toshin. (impact of 100mm from kissaki)

### 3. おわりに

本稿では、日本刀が激しい討ち合いにおいても何故目釘竹一本で柄に留められ得るのかを調べるため、打刀を模擬した彎刀モデルについて衝撃実験と数値シミュレーションを行った結果を紹介した。衝撃を受ける刀身位置および衝撃力波形が異なっても、刀身各部位で振幅の最大幅の分布はほぼ同じとなり、目釘穴から区付近における振幅は他の部位に比べて相対的に小さくなることを示した。この結果より直ちに竹目釘の破損の有無を論ずることはできないが、歴史的に実用に供されてきたことを勘案すれば、刀匠の掟に従う目釘穴位置においては、目釘竹の変形強度を超えるような大きな負荷は作用しない可能性があると推定される。

### 参考文献

- (1) 柴田光男, 刀剣ハンドブック (1993), 光芸出版.
- (2) 鈴木卓夫, 作刀の伝統技法, (1997), 理工学社
- (3) 臺丸谷政志, 検査技術, 11-5, pp.12-16 (2006).
- (4) 臺丸谷政志, 他 2 名, M&M2006 材料力学カンファレンス No.06-4, pp.449-450 (2006)

## □ 特集 4 テニスボールの衝撃特性 □

広島大学  
機械システム工学専攻  
中川 紀壽

## 1. はじめに

テニスは現在、試合での勝利からレクリエーションや健康維持を目的とする人まで幅広い人に親しまれているスポーツであり、性能のよいラケットを多くのプレイヤーが要求するようになってきている。しかし、ラケットの性能評価は主に使用者の目的と主観によるため、どれがよいラケットかを一概に決める事はできない。例えば、初心者は上級者に比べて、広いエリアで反発のよいラケットが必要となる。さらに、同じ技量同士の場合でもプレイスタイルによって要求する性能は異なってくる。その結果、様々なラケットを短期間で開発することが必要不可欠となってきている。また、その開発においては、要求される特性を満たすラケットを数値シミュレーションにより設計するような、工学的手法の重要性がますます大きくなっている。<sup>1)</sup>しかし、その際必要となる、テニスラケットのストリングス(またはガット)とボールの衝突現象を連続的に観察し、詳しく考察したものはこれまでほとんどない<sup>2)</sup>と思われる。

一般に、ラケットに求められる基本的な性能は、パワー、コントロール性、および、打球感といわれている。これらすべての性能が満足されるようなテニスラケットの最適設計の手法はまだ確立していないようである<sup>3)</sup>が、使用者のプレイスタイルに適した性能を高めることにより、その人にとって最適なラケットとすることは可能であると思われる。

そこで、ここでは基礎的な研究として、実際にテニスボールをラケットのストリングスに衝突させ、高速度カメラによるボールの連続的な挙動解析、および、ストリングス面エリアの違いによるボールの衝撃特性について、FEM解析によるシミュレーション結果と併せて紹介する。

## 2. 実験

実験装置の概略図を Fig.1 に示す。テニスラケットはフレームを地面に対して垂直に、高速度カメラに対してトップ部(先端部)が正面にくるように横向きに固定する。ラケットの前方にボール発射装置を設置し、ストリングス面に対して、角度  $\theta = 20^\circ$  としてストリングス面の中央部にボールを衝突させ、衝突現象を撮影する。

フラッシュの発光時間を 11ms、撮影速度を 3000fps(frame per second)、撮影間隔を 0.33ms とした。

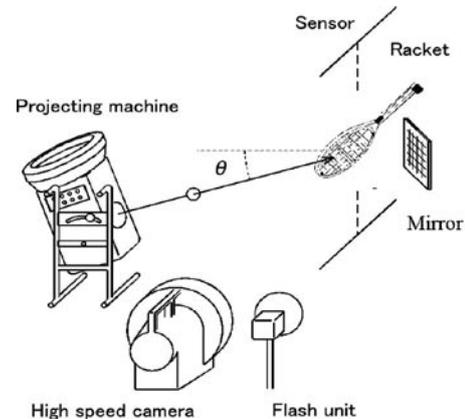


Fig.1 Experimental system

実験で使用したラケット[DUNLOP製:RIMBREED Tour-S:全長700(mm)]を Fig.2 に示す。フレームの先端部分を一部切り取り、その部分を長さ120(mm)、幅20(mm)、厚さ3(mm)の弓状のスチールプレートで作り変えることで、100(mm)間の撮影可能範囲を確保した。ラケット全体の重量は395(g)である。衝突中のボールがフレームに隠れることなく撮影することができ、また、フレーム加工位置がトップ部にあることで、グラウンドストロークでのインパクトに近い状態での撮影が可能となっている。一方、ラケット後方にはストリングス面に対して $45^\circ$ の角度に鏡を設置し、ラケット後方から見たボールの挙動も同時に撮影する。Fig.3において、左図はラケットとボールを側方から見たものであり、右図は鏡に写っているラケット後方から見た画面を示す。

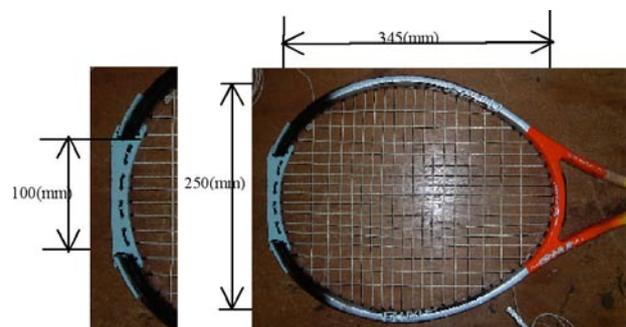


Fig. 2 Modified racket for experiment

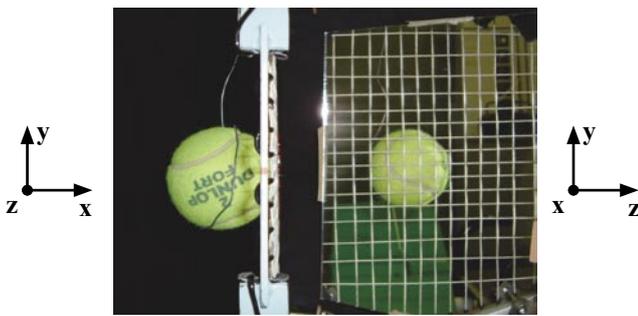


Fig.3 Photograph of high speed camera

また、FEM解析用ソフトのANSYSを使って、実験と同じ条件で有限要素モデルを作成し数値シミュレーションを行った。

ストリングス面のエリアの違いによるボールの衝撃反発特性と回転特性を調べるため、Fig.4に示す、ボールを衝突させるエリアを変えた実験を行う。各エリアそれぞれに無回転、トップスピン、およびバックスピンの3種類のボールを当て、合計12回の撮影を行う。

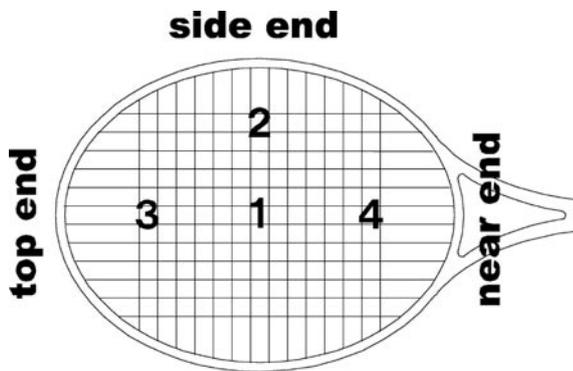


Fig.4 Areas of string plane

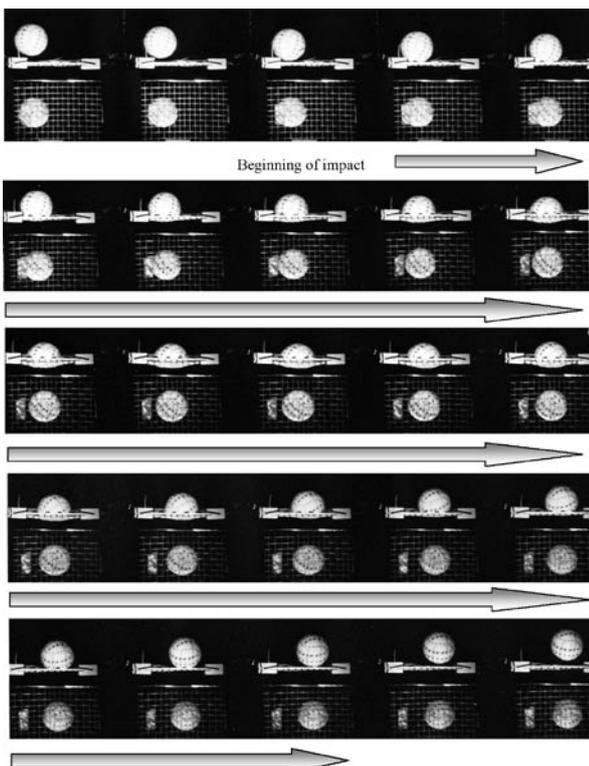


Fig.5 High speed photograph in case of impact to the racket  
( $V = 12.8\text{m/s}$ ,  $\theta = 20^\circ$ ,  $\omega = \pm 0\text{rps}$ , Area 1)

なお、入射時のボールの回転方向は、Fig.3のz軸を中心としたx-y平面に対して時計回り(+の回転)をトップスピン、反時計回り(-の回転)をバックスピンとする。

3. 衝撃特性

スピンがある場合および、無い場合について、ボールがラケットの各エリアに衝突している時の変形を高速カメラで撮影した。例として、スピン無しで、エリア1に衝突させた場合の衝突連続写真をFig.5に示す。ラケットの一部を薄くすることにより、これまで撮影出来なかった衝突時のボールとストリングスの時間的な変形挙動の変化が観察される。

Fig.4の各エリア1, 2, 3, 4に対して、それぞれに無回転、トップスピン、および、バックスピンのボールを衝突させた場合の衝撃特性として、回転数と速度の解析を行った。反射前のボールの速度・回転数はそれぞれ、無回転のとき12.8(m/s)・0(rps), トップスピンのとき12.8(m/s)・30(rps), バックスピンのとき12.8(m/s)・-30(rps)である。実験より求めた反射後のボールの回転数、速度をFig.6(1), Fig.7に示す。また、FEMの解析結果の例として、反射後のボールの回転数をFig.6(2)に示す。実験結果とよく一致していることが分かる。

Fig.6とFig.7より、ストリングスのセンター(エリア1)では、どの回転のボールに対しても、ほぼ一定の回転数・速度で反発していることが分かる。また、サイドエンド(エリア2)とトップエンド(エリア3)では、衝突後のボールの回転数は、衝突前の回転数に大きく影響を受けていることが分かる。ただし、反発後の速度については、トップエンド(エリア3)の方が全ての回転において大きくなっており、反発後の回転数は、サイドエンド(エリア2)の方が大きくなっている。さらに、エリア1, 4に比べ、衝突後の速度はエリア2, 3の方が大きくなっている。

ニアエンド(エリア4)では、無回転のボールに対して、衝突後に大きく回転数が上がっていることが分かる。また、ボールの速度はどの回転のボールに対してもほぼ一定の速度で反発している。

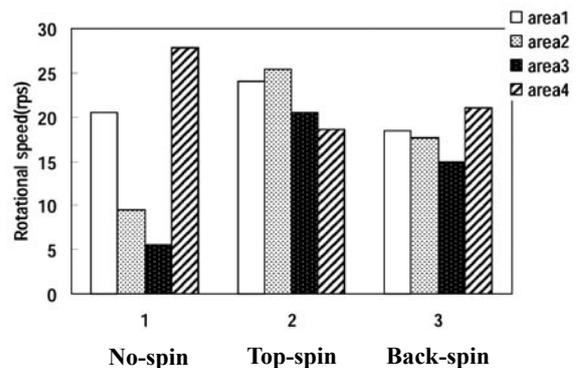


Fig.6 (1) Rotational speed of ball after impact by experiments

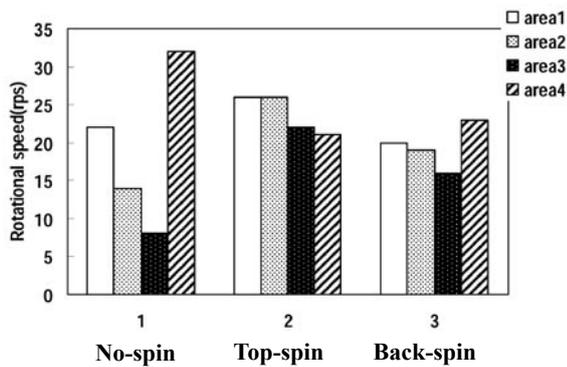


Fig.6 (2) Rotational speed of ball after Impact by FEM

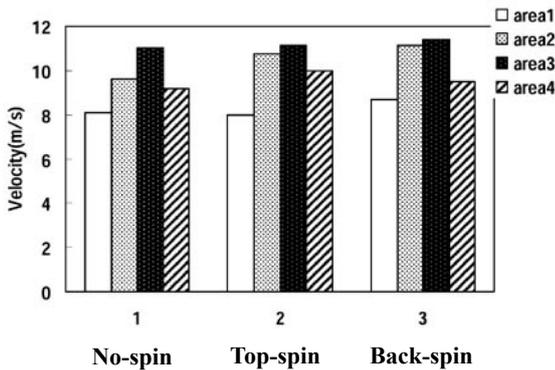


Fig.7 Velocity of ball after impact by experiments

## 4. おわりに

テニスにおけるボールとラケットの衝突変形および衝撃特性を求めるため、ボールに種々のスピンを与えてラケットに衝突させ、衝突過程におけるボールの挙動を実験的、数値シミュレーション的に解析した結果を紹介した。

ラケットのフレーム先端部を薄くすることにより、テニスボールとストリングスの衝突時における変形を高速カメラで撮影し、それぞれの衝撃変形挙動を解析することが可能となった。衝突前後のボールの回転解析より、ストリングスのセンターおよびニアエンドでは、どのような回転のボールに対しても打ち返し易い特徴をもつといえる。また、ニアエンドでは、スピンをよりかけ易いことが分かる。ボールのさらに詳細な挙動や打球感などについての検討には、ラケットのフレームをも含めた解析が必要である。

## 参考文献

- 1) N. Nakagawa, Y. Sekiguchi and N. Okada, Symposium on Sports Engineering and Symposium on Human Dynamics, pp. 49-53 (2000) JSME.
- 2) N. Nakagawa, Y. Sekiguchi and H. Bai, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.55, No.9, pp.807-812 (2006).
- 3) H. Brody, Physics Today, pp20-31(1995).

## □ 特集5 二段式軽ガス銃による耐宇宙ごみ防御構造の開発 —超高速衝突— □

九州工業大学

工学部 機械知能工学科 宇宙工学講座

宇宙工学講座 赤星 保浩

## 1. はじめに

日本のH-IIAロケットで静止軌道に人工衛星を打ち上げる場合、一段目のロケットは速度増分が第一宇宙速度(秒速7.9km)に満たないため、分離後海上にすぐ落下する。一方、二段目のロケット以降は軌道速度を獲得しており、地上にすぐには落下してこない。静止軌道に投入された人工衛星は通常5~10年運用されるので、その間は運用中人工衛星に分類される。しかし、二段目のロケットは人工衛星を切り離れた後は直ちに不要になり、宇宙ごみに分類される。また、運用中の人工衛星もやがては姿勢制御用の燃料切れなどが原因で運用停止となり、宇宙ごみとなる。このように一回の打ち上げで多少の時間差はあるものの、少なくとも二個の宇宙ごみが発生することになる。実際にはロケット内の残留燃料や人工衛星内のバッテリー等が何らかの原因で爆発することで、多数の破片(微小宇宙ごみ)が軌道上にばらまかれる。

1957年10月4日、旧ソ連のチュラタム基地からスプートニク1号機が打上げられて以来、地球近傍宇宙空間には宇宙ごみが蓄積され、太陽活動の極大期の一時的な減少はあるものの10年以上のスパンで見ると明らかに増加傾向にあ

る。現在北米航空宇宙防衛司令部NORAD(North America Aerospace Defence Command)<sup>[2]</sup>などの観測施設により観測され、軌道要素が決定できている軌道上人工物体は1万個弱であるが、その大半は宇宙ごみである。この観測可能な人工物体は直径換算で10cm以上であり、それよりも小さいものは大まかな分布は把握されているものの、特定時刻における存在位置を把握することは換えていない。1998年から建設が始まった国際宇宙ステーション<sup>[3]</sup>では直径換算で1cm程度までの宇宙ごみとの衝突には耐えられるような防御構造(Stuffed Whipple Bumper)が搭載されているが、1cmから10cmの間の宇宙ごみに対しては防御することも衝突を回避することもできない。打上げ重量の制限を考慮すると、軽量化された防御構造の開発が必要であり、本報ではこのような開発を下支えしている超高速衝突研究について、加速装置の一つである二段式軽ガス銃を中心に述べる。

## 2. 二段式軽ガス銃の現状

火薬の燃焼圧だけで加速させる装置は一段銃または火薬銃と称しており、秒速3km程度まで加速可能と言われている。

る。しかし、火薬の燃焼生成ガスでは音速が小さいため、加速された飛翔体に燃焼生成ガスが追いつかなくなり、秒速3kmがほぼ頭打ち状態になる。燃焼生成ガスの大半が水素となるような火薬が開発されれば、一段銃でも秒速3kmを越えるような加速が可能となるが、現状はそのような火薬が存在しないため、別の手段を考える必要がある。1948年米国ニューメキシコ大学において、二段式軽ガス銃が考案された。その動作原理は図1に示されるように、一段目に火薬燃焼室を配置し、火薬燃焼圧によりポリエチレン製ピストンを駆動させる。このピストンにより圧縮管内の軽ガス(水素またはヘリウム)を瞬時に高圧状態(数千気圧)にし、この高圧軽ガスにより飛翔体を超高速状態までに加速するというものである。当初は二段式軽ガスを利用して衝突により瞬間的100万気圧状態を作り出し、地殻物質の物性を測る研究がなされた。この二段式軽ガス銃に米軍やNASAが着目し兵器開発<sup>[4]</sup>や宇宙開発へ応用したことにより、1960年代から70年代に掛けて二段式軽ガス銃が飛躍的に発展した。1980年代に入ると国際宇宙ステーション計画における宇宙ごみ対策として、防御構造開発<sup>[5,6]</sup>に二段式軽ガス銃が利用されるようになり、今日に至る。特に米国では1980年代のSDI計画がこの開発の勢いを後押しした。また、ヨーロッパではドイツのエレンストマッハ研究所<sup>[6]</sup>、イタリアのパドバ大学などで運用されている。一方、日本においては京都大学がいち早く二段式軽ガス銃の開発に取り組み、それがやがて東京工業大学<sup>[7]</sup>、東北大学<sup>[8]</sup>へと波及していった。現在、二段式軽ガス銃が稼働している主な大学は、東北大学、東京工業大学、名古屋工業大学、九州工業大学<sup>[9,12]</sup>、防衛大学<sup>[13]</sup>であり、その他、JAXA宇宙科学研究所<sup>[14]</sup>、三菱重工相模原製作所<sup>[15]</sup>、産業技術総合研究所<sup>[16]</sup>などにも二段式軽ガス銃が設置されている。

### 3. 超高速衝突研究の一例

超高速衝突研究の分野では秒速1kmから10kmの速さを超高速としている。このような衝突速度での防御対策は低速衝突とは全く異なる方法が採用されている。前述の国際宇宙ステーションの予圧壁の防御にはWhipple Bumper(図2)が採用されており、二重壁構造が基本である。一枚目のバンパーに宇宙ごみが衝突すると、細かく破碎され飛散する。この飛散した破片群が二枚目のバンパーに衝突するが、飛散により単位面積当りの衝突エネルギーが低下しているため、一壁構造で防御できないような大きさの宇宙ごみでもある程度の大きさまでは防御することができる。防御できるかどうかの限界は衝突速度に大きく依存しており、この貫通限界曲線の一例を図3に示す。この曲線より下の宇宙ごみ直径ならびに衝突速度であれば、そのWhipple Bumperで防御することができることを意味している。アルミ合金を主体とした防御構造では、秒速2.5km前後で極小となり、秒速7km前後で極大となる。一般的に衝突速度が速くなるほどより小さい宇宙ごみで防御壁を貫通することができるが、この極小と極大との間において逆転領域と

なり、衝突速度が速くなってもより大きな宇宙ごみを防御することができる。この逆転領域はWhipple Bumperの特徴であり、天文学者のWhippleがアポロ計画時に提案したものである。この貫通限界曲線と宇宙ごみ環境モデル(宇宙ごみの分布状態)とを組合せることで、システム全体の非貫通確率を計算することができ、日本のモジュールである「きぼう」の場合、非貫通確率は10年間で97%を達成している。この非貫通確率は必ずしも十分な値ではなく、より100%に近い値を達成することが望まれるが、現状のまま達成しようとする、バンパーの重量が大きくなり、打上げ重量の制約を大きく受ける。防御性能の高いバンパーを開発する上で、一枚目のバンパーでの破碎メカニズムの解明が重要であり、その基礎データとして、各破片の質量(できれば形状も)と速度(運動エネルギー)を計測する必要がある。破片の速度計測には高速度カメラ、パルスレーザ、フラッシュX線などが用いられるが、飛翔中の破片の質量を計測できる可能性が高いのはフラッシュX線(特に軟X線)である。フラッシュX線による撮影例ならびに破片の速度分布例を図4に示す。衝突速度、衝突角度、バンパーの厚さや材質などを変化させた実験を系統的に行い、それらから出る破片群の質量分布、速度分布をデータベース化することで、より高性能のバンパー構造の設計に役立てることができる。系統的な実験を行うためには複数の実験施設間で連携して取り組む必要があるだろう。

### 4. おわりに

二段式軽ガス銃は考案されてから半世紀を過ぎており、技術的には完成されつつあるが、国内でこの製造技術、運用技術の維持が厳しい状況にある。欧米の核兵器保有国は二段式軽ガス銃による超高速衝突技術を重要視しており、安定した維持運用がなされている。また、中国では有人宇宙開発を近年積極的に行っており、超高速衝突技術の高度化に努めている。一方、日本は非核兵器保有国であり、独自の有人宇宙開発プログラムを有していないため、超高速衝突技術は学術的な観点を除くとあまり重要視されていない。特に、衝撃圧縮下における物性測定であれば、二段式軽ガス銃を用いなくてもパルスレーザを使うことで測定できるようになってきており、同一実験条件の再現性の良さ、運用のスマートさなどにより、パルスレーザによる研究へ大きく移行しつつある。今後日本における二段式軽ガス銃技術を次世代に引き継ぐのかどうか、今大きな岐路に立たされている。

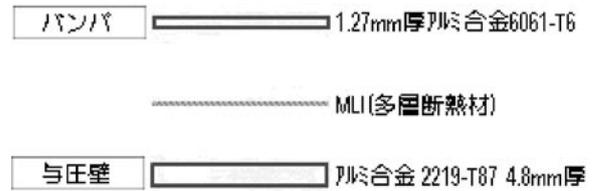
### 参考文献

- [1] 八坂哲雄, 「宇宙のゴミ問題」, 裳華房, 1997年
- [2] 北米航空宇宙防衛司令部, <http://www.norad.mil/>
- [3] きぼう,  
[http://www.jaxa.jp/missions/projects/iss\\_human/jem/index\\_j.html](http://www.jaxa.jp/missions/projects/iss_human/jem/index_j.html)
- [4] ハンツビル大学,  
<http://www.uah.edu/research/resrev96/Res/Aerophysics.html>

- [5] 米国国家航空宇宙局,  
http://www.orbitaldebris.jsc.nasa.gov/
- [6] エルンストマッハ研究所,  
http://www.emi.fraunhofer.de/EN/ResearchFieldsAndContacts/  
TechnicalEquipment/Two-stageAccelerationFacilities.asp
- [7] 東京工業大学,  
http://www.knlab.msl.titech.ac.jp/cgi-bin/bloxom.cgi/apparatus/
- [8] 東北大学,  
http://www.ifs.tohoku.ac.jp/divisions/jp/21coe\_iswrc.html
- [9] 九州工業大学,  
http://www.ise.kyutech.ac.jp/kenkyushitsu/akahoshi.html
- [10] 超高速衝突実験室,  
http://www.kyutech.ac.jp/page/shosai.asp?id=23&mode=b
- [11] 宇宙環境技術研究センター,  
http://laseine.ele.kyutech.ac.jp/about.html
- [12] 九州工業大学, 九工大世界トップ技術, 西日本新聞社,  
2006
- [13] 防衛大学,  
http://www.nda.ac.jp/cc/users/kqando/  
tamura%20debris.html
- [14] JAXA宇宙科学研究所,  
http://www.ted.isas.jaxa.jp/spf/gasgun.htm
- [15] 三菱重工業相模原製作所,  
http://iss.sfo.jaxa.jp/iss/kibo/develop\_status\_09.html
- [16] 産業技術総合研究所,  
http://www.aist.go.jp/NIMC/publication/news96/20-1.html
- [17] Whipple Bumper,  
http://iss.sfo.jaxa.jp/iss/kibo/develop/thumbs/aut\_4196.jpg



(a) Whipple Bumper の例



b) 日本モジュール「きぼう」の Whipple Bumper 構成図

図 2 Whipple Bumper の基本構造<sup>[17]</sup>

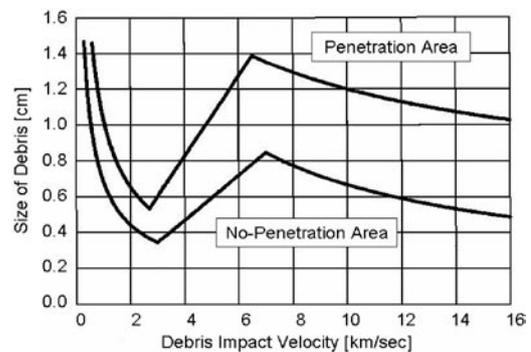
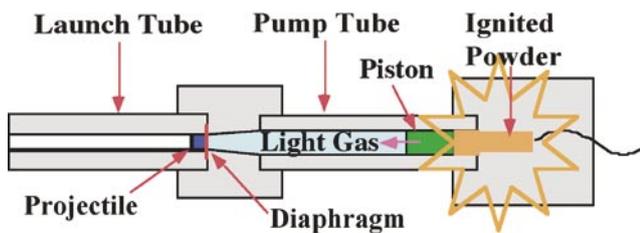
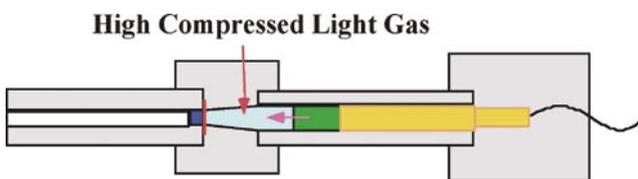


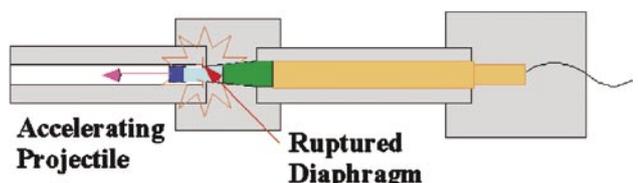
図 3 貫通限界曲線の一つ例(出典: JAXA)



(a) 火薬部の点火

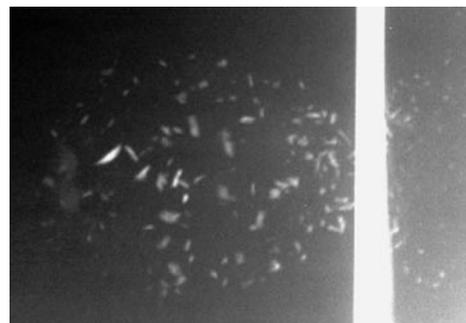


(b) ピストンによる軽ガスの圧縮

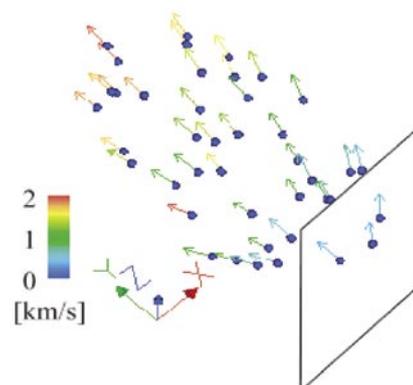


(c) 高圧軽ガスによる飛翔体加速

図 1 二段式軽ガス銃の動作原理



(a) フラッシュ X線による撮影像



(b) 二方向から撮影した画像から 3 次元化した破片群

図 4 破片群(二次デブリ雲)の撮影

□ 特集 6 衝撃問題における数値解析 □

大阪府立大学大学院  
工学研究科機械系専攻機械工学分野  
煤田 努

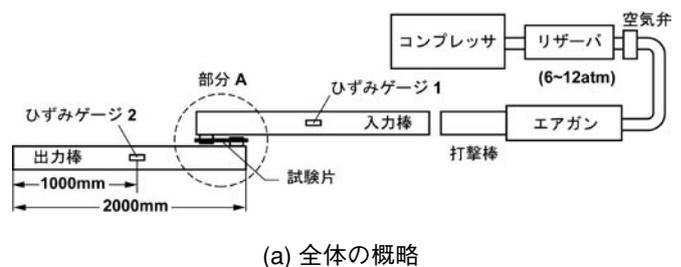
1. はじめに

衝撃問題と一口に言っても、自由落下する物体やハンマーによる衝撃から、自動車の高速衝突やスペースデブリの超高速衝突まで、非常に広範囲および多岐にわたる。少し前までは、研究者にとってあまり身近なテーマではなかったように思うが、最近では、自動車、ノートPC、携帯電話等のメーカーの材料費削減や環境への配慮から強度面の最適化が進み、衝撃強度の評価手法も様変わりした。この分野でも数値解析手法が重要になってきたが、この分野では陽解法動的有限要素法が中心となっている。本稿では、その広範なテーマのごく一部であり、まだ少し距離感のある内容ではあるが、高速材料試験法に関する検討を中心に、著者自身が関わってきた数値解析手法を用いたテーマについてご紹介する。注意していただきたいのは、我々の研究グループでは、著者が一員となる以前から、後述するHopkinson棒法<sup>1)</sup>や、独自に発展させてきた検力ブロック式試験法による材料の高速圧縮/引張試験を実施しており、そのことが力強いバックボーンになっていることである。また、以下のテーマでは数値解析にLS-DYNA(日本総研ソリューションズ)を使用している。

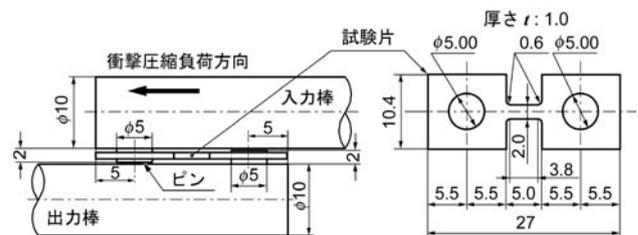
2. 高速材料試験法の精度検討

Hopkinson棒法<sup>1)</sup>は60年近くの歴史を有するものの、自動車、鉄鋼業界を中心に代表的な高速材料試験法の1つとして認知されるようになったのは最近になってからだと思われる。応力棒とも呼ばれる2本の棒(入・出力棒)の間に試験片を挟み、一方から加えた衝撃圧縮負荷により高ひずみ速度域( $10^2 \sim 10^3 s^{-1}$ )での応力-ひずみ関係を得る方法として始まり、研究者のアイデア次第で引張り、引張り-ねじりなどの拡張がなされてきた。我々の研究グループでは、応力棒を互い違いにすることで高速引張りを実現する方法(図1)を提案し、それに基づく研究を重ねてきた。図1の例では入・出力棒に貼付したひずみゲージからの出力により、試験片平行部での応力、ひずみ履歴を得ることができる<sup>2)</sup>。この非共軸な試験法では曲げの問題がよく言及されるが、例えば図1では応力棒の断面積が試験片平行部の約40倍もあるため、気を付ける必要はあるが、ほとんど問題とならない。むしろ断面積の違いから、いわゆるインピーダンス・マッチングの問題が生じ、反射応力波が透過応力波に比べて極端に大きくなって、反射応力波における擾乱を避けないと測定精度が悪くなる。この問題は平板試験片以外にポリマーのように特性インピーダンスの大きく異なる材料の試験片でも問題となる。我々は透過応力波だけで応力履歴を評価し、この問題を回避している。図2に

有限要素モデル<sup>2)</sup>(要素数31,556, 節点数45,306, 応力棒-ピン間: 固着, ピン-試験片間: 摩擦有り)の試験片付近を示す。計算コストを抑えるため、精度に影響の小さい入力棒のメッシュを出力棒に比べて粗く分割している。これは、入力棒で計算誤差に起因する応力波の擾乱が多少生じても、試験片平行部が降伏することで、そこを通過する際にはほぼカットされることによる。図3は実験と数値解析による応力-ひずみ関係を比較しており、(a)慣性力の影響が大きい条件、(b)その試験片を接着剤で固着し改善した場合の結果である。よく一致しているが、接着剤の剥離等により、実験で図3(b)のような結果を得られる再現性が低いため、現在、その改善方法を検討している。



(a) 全体の概略



(b) 試験周辺の詳細(部分A, 単位: mm)

図1 非共軸 Hopkinson 棒法試験機の構成例<sup>2)</sup>

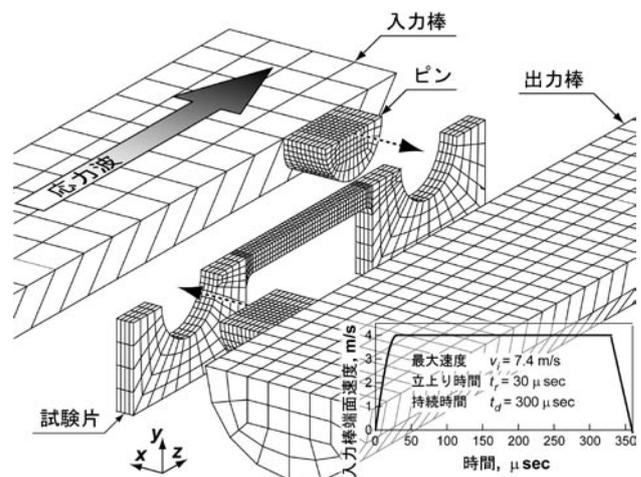
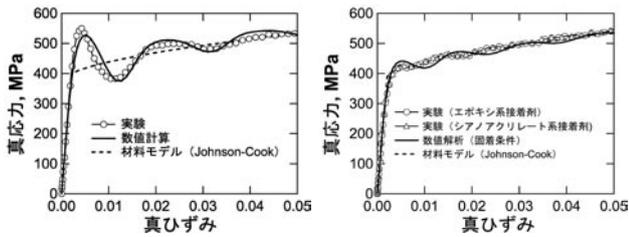


図2 非共軸 Hopkinson 棒法試験機の FEM モデル例<sup>2)</sup>

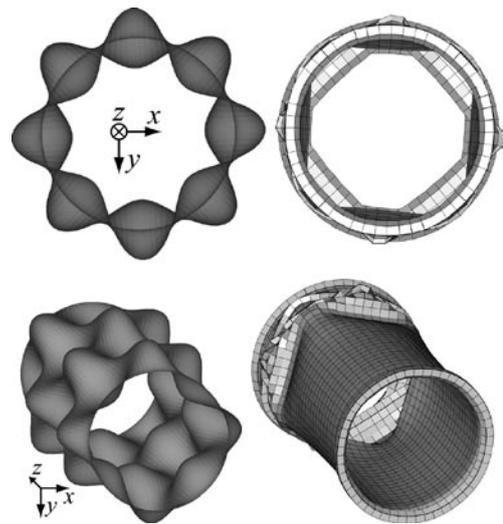


(a) 立上りの振動大 (b) 接着剤による改善

図3 実験と数値解析の比較例 (ひずみ速度約  $1500s^{-1}$ )<sup>2)</sup>

3. 衝撃吸収部材の動的挙動評価

数値解析で実験を模擬する「数値実験」は、実験のコストが発生せず、また、現実には様々な形で存在する初期不整がない(あるいは数値化できる)ため、非線形性が強く複雑な問題でも明らかにできる可能性がある。ここでは、基本的なエネルギー吸収部材である薄肉円管を対象に行った検討例<sup>3)</sup>を示す。薄肉円管は軸圧潰す際に連続塑性座屈と呼ばれる、軸対称あるいは非軸対称(ダイヤモンド型)座屈を生じる。軸対称モードに誘導できれば、非軸対称の場合より最大約20%単位体積当りの吸収エネルギーを増加させられる。この分岐座屈が生じる機構については、準静的な場合はTimoshenkoやFlüggeらがエネルギー法により明らかにした。動的な場合は慣性力の影響が加わるため、発現モードが一層ばらつく一方、それが固有モードと対応しないことが議論を難しくしていた。ただし、実験でのばらつきがおもに初期不整に起因することはよく知られており、発現モードが制限されることも準静的な場合は都井<sup>4)</sup>により示されていた。したがって、動的な場合はこれらの要因を整理して明快に示せればよかったと言える。行った検討の中から、座屈モードを誘導できた例を図4に示す。圧潰速度履歴に実験で観察される範囲の固有周期の高次振動を重ねさせた結果、理論的な周方向波数の限界値以下で対応する座屈モードが現れた。



(a) 固有値解析 (b) 衝撃圧潰解析

図4 薄肉円管の非軸対称座屈(四角形モード)<sup>3)</sup>

4. さいごに

我々の研究グループでは実験を中心に基礎的研究を多く扱っているが、実用的なテーマも実施している。図5にウレタン樹脂製防護用構造体への自動車衝突解析の結果例を示す。グラフにはコンクリート製の場合との比較が示されており、ウレタン樹脂の緩衝効果が有効な時間内でヘッドレスト位置に生じる加速度が大幅に軽減されている。このような大規模解析もかなり身近になってきたが、自動車の有限要素モデルが無償公開されている<sup>5)</sup>ことが大きい。ひずみ速度依存性を含む材料モデルの構築など、重要な部分が抜け落ちてしまったが、扱っている数値解析関連の研究テーマを駆け足でご紹介させていただいた。

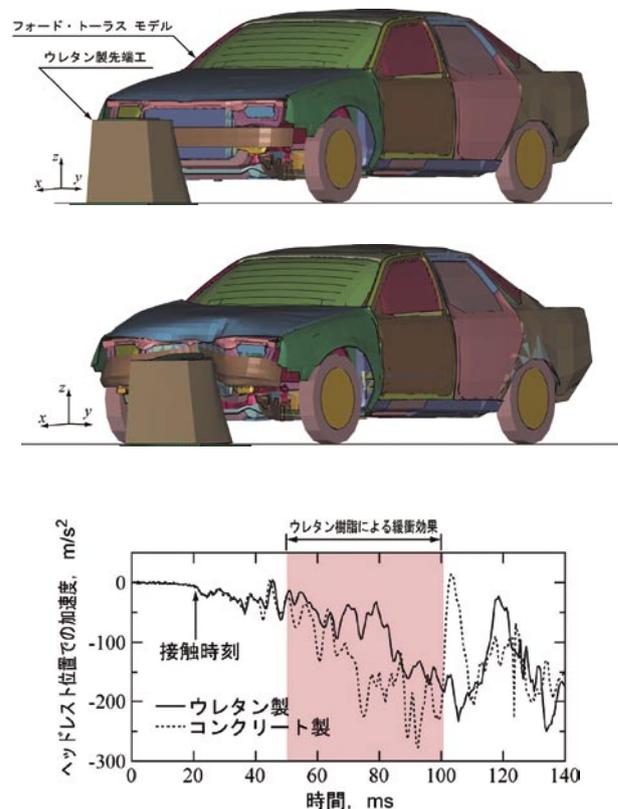


図5 ウレタン製防護用構造体への自動車衝突解析 (衝突速度 40km/h)

引用文献(主要なもの)

1) H. Kolsky, Proceedings of the Physical Society of London, Vol.62B (1949), pp.676-700.

2) T. Umeda, H. Umeki and K. Mimura, JSME International Journal, Vol.48, No.4, Ser.A (2005), pp.215-221.  
 3) 榎田努・三村耕司・梅寄祐樹, 材料, 55巻9号 (2006), pp.799-806.  
 4) 都井裕, 鋼構造の離散化極限解析, pp.101-113 (1990), 培風館.  
 5) 米国 NCAC ホームページ (<http://www.ncac.gwu.edu/>).

## □ 特集 7 高速引張試験方法 ISO 化の動き □

諏訪東京理科大学システム工学部  
機械システムデザイン工学科  
板橋 正章

金属材料の引張試験方法はJIS Z 2241:1998に規定されており、ISO 6892:1984とは完全な互換性はないものの相応の類似性を持たされている。したがって、新しい材料を開発したとき、この規格にしたがって引張試験を行い、その結果を示せば材料の製造・販売側はそれなりの技術的な説明責任を購入者に対して果たしたことになる。

しかしながら、上記の試験方法は準静的ひずみ速度での試験が実験条件となっている。つまり、ひずみ速度にして $10^3 \text{ s}^{-1}$ から $10^2 \text{ s}^{-1}$ までの変形を対象にしているのである。一般に、ひずみ速度が高くなるにつれて強度が高くなることが知られているが、精密に測定されていない場合にはどの程度強度が上がるのかわからないという問題がある。また、そもそも高ひずみ速度での変形を材料に与える衝撃負荷の大きさ自体が測定困難であるという問題も忘れてはならない。いちいち詳細に検討してられないことから、これまでは安全率を大きくとることでこれらの不明な問題をカバーしているのが現状である。衝撃負荷を受けることを想定した部材の設計において、動的な負荷の下で測定した応力-ひずみ曲線が手元があれば、より効率的な設計が実現できる可能性があるにも関わらず、そのような測定方法が規格として制定されていないがゆえに、(たぶん?)過剰設計のまま放置されてきているのである。

例えば、自動車の衝突時に部材に発生するひずみ速度は部分的に $10^2 \text{ s}^{-1}$ のオーダーに達しており、できれば $10^3 \text{ s}^{-1}$ 程度の応力-ひずみ関係が提示されていれば、衝突シミュレーションの解析精度を向上させることができると言われている。<sup>1)</sup>

このような産業界からのニーズの高まりと共に、日本材料学会衝撃部門委員会の中でも「そのうち高速引張・圧縮試験方法の規格を創りましょう。」という共通認識はあったものの、膨大な作業を前にして足踏みをしていたのが正直なところである。

それでも、国内で公的な資金を活用した非公開のデータベースの作成<sup>2,3)</sup>やラウンド・ロビン・テスト<sup>4,6)</sup>が平成8~13(1996~2001)年度にかけて実施されていた事実はあまりよく知られていない。(著者の知らない事業が他にもあるかもしれないが、ご容赦いただきたい。)

これらの活動で得られた成果の一部が論文等で発表されたことも刺激となり、国際鉄鋼協会(IISI)のCommittee on Automotive Applications (AutoCo)が世界各国の鉄鋼メーカーと研究機関の間で高速引張試験のラウンド・ロビン・テストを新たに実施して、その結果を公開している。<sup>7)</sup>これを踏まえて、世界で最も優れた高速引張試験技術を保有していると判断された日本に対して、ISOを制定する提案元

としての役割を果たすようにAutoCoより依頼された。

実際の作業を進めるのは(社)日本鉄鋼連盟標準化センター事務局であり、「高速引張試験方法ISO規格化専門委員会」が平成17年4月11日から発足した。ここで検討された規格原案は、平成17年11月3日付でISO/TC164(機械試験)/SC1(引張試験)の投票にてWorking Draft (WD)として承認された。これを受けてWG7が結成され、convenor(会議の招集者の意、実質的な議長)には日本鉄鋼連盟の八木隆義氏が就任している。この八木氏をバックアップするのが、(財)大阪科学技術センター附属ニューマテリアルセンター所長である日本大学教授木原諄二先生を委員長とする高速引張試験方法ISO規格化専門委員会の役目である。WDに対してコメントを求めたところ各国より多数の意見が提出され、その対策を済ませた修正WDを提出し、9月末に再度WG7の会議が開催されたようである。このまま大きな問題が無く作業が順調に進めば、平成21年末にはISOとして制定される予定である。

この規格が制定された場合、最も大きな恩恵を受けるのは日本の自動車メーカーであり、また、世界各国の自動車メーカーに高性能鋼板を納入している日本の鉄鋼メーカーである。すなわち、これらの各メーカーは規格の中に盛り込まれている実験方法やそれを活用して得られた実験データをすでに使いこなしているからである。

著者もこのISO規格化のお手伝いをさせていただいているが、これをきっかけに日本の産業界全体が活気づくことで、日本の大学生達が夢を持って機械工学を学ぶ環境が整うことを切に願う次第である。

## 参考文献

- 1) 自動車用材料の高速変形に関する研究会編、自動車用材料の高速変形に関する研究会成果報告書、日本鉄鋼協会、(2001)。
- 2) 超高速材料試験・評価方法調査委員会編、平成8年度超高速材料試験・評価方法に関する調査研究報告書、(財)大阪科学技術センター附属ニューマテリアルセンター、(1997)。
- 3) 研究委員会編、民間の機能を活用した知的基盤事業 非鉄金属の安全性確保に資するデータ整備、(社)日本アルミニウム協会、(2000)。
- 4) 高速引張・圧縮試験法分科会編、即効的知的基盤整備調査委託報告書「非鉄金属系材料の基礎物性等に係るデータベースの整備」、(財)大阪科学技術センター附属ニューマテリアルセンター、(2000)。
- 5) 金属材料高速変形特性評価法研究開発委員会編、知的基

盤創成・利用技術研究開発事業 金属材料の高速変形特性評価方法の研究報告書, (財)大阪科学技術センター 附属ニューマテリアルセンター, (2000, 2001, 2002).

6) 高速引張圧縮試験法分科会編, 即効的知的基盤整備調査委託報告書「非鉄金属系材料の基礎物性等に係るデータベースの整備」, (財)大阪科学技術センター附属ニューマテリアルセンター, (2001).

7) [http://www.worldautosteel.org/pdf\\_hsrt/RptRndRobResults.pdf](http://www.worldautosteel.org/pdf_hsrt/RptRndRobResults.pdf)

## □ 特集 8 自動車用樹脂成形部品の衝撃破壊シミュレーション □

株式会社本田技術研究所

四輪開発センター

第4技術開発室 第4ブロック 前 博行

### 1. はじめに

近年, 樹脂成形部品が自動車の内装・外装部品として使用される機会が多くなった。また, 開発効率向上の観点において, 試作部品数の削減や開発期間の短縮が求められている。よって, 樹脂成形部品のエネルギー吸収性能評価においても, 車体フレーム開発と同様に, シミュレーションの活用が重要になってきている。

一般に, 樹脂材料は鋼材と比較して, より顕著なひずみ速度依存性や温度依存性を持つことが知られており, 樹脂材料のエネルギー吸収性能を評価する際には, 粘塑性などの非弾性特性が支配パラメータとなる。ガラス状態の樹脂材料の非弾性特性としては, ミクロボイドとフィブリルからなるクレイズの生成と成長が挙げられる<sup>1)</sup>。この現象を予測可能とする材料構成則の研究は志澤らによっておこなわれ, クレイズとせん断帯の両現象を取り扱える材料構成則が提案されている<sup>2)</sup>。著者らはこれまで, クレイズに伴う最終破断挙動を巨視的に取り扱うため, クレイズ密度依存型軟化則を現象論モデルとして提案し, 志澤モデルを改良した<sup>3)</sup>。

本稿では, バンパーフェースやドアトリム部品において, 上述のクレイズを考慮した材料構成則(改良型志澤モデル)を用いた衝撃破壊シミュレーションと衝撃破壊実験の事例を紹介する。

### 2 樹脂成形部品における衝撃破壊シミュレーション

本事例紹介における有限要素シミュレーションは, 汎用陽解法ソルバー RADIOSS Ver.4.4においてユーザーサブルーチンとして材料則を組み込むことで, 計算をおこなっている。図1にバンパーフェース衝撃試験の有限要素モデルを示し, 図2にドアトリム衝撃試験の有限要素モデルを示す。なお, 両モデルはシェル要素を用いてモデル化されている。

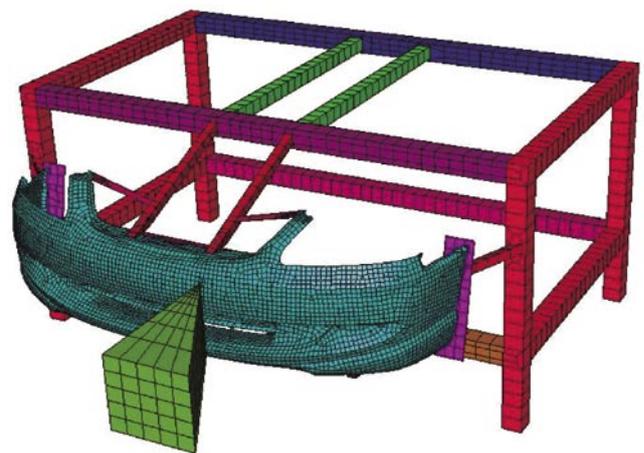


Fig.1 Finite Element Model of Bumper Face Impact Test



Fig.2 Finite Element Model of Door Trim Impact Test

3 衝撃破壊試験について

バンパーフェースの衝撃破壊試験は振り子試験装置を用いておこなわれた。本実験の概観写真を図3に示す。バンパーフェースは鉄製のジグに固定されており、三角柱形状のインパクトを2.8m/secでバンパーフェースの中心位置より約40%オフセットさせた位置に衝突させた。その際にインパクトの減速度を測定し、バンパーフェース裏側に設置した高速度カメラによって、クレイズ損傷ならびに破壊の進展状況を撮影した。また、ドアトリムの衝撃破壊試験は水平型射出試験装置を用いておこなわれた。図2に示されるように、ドアトリム部品を剛壁に固定して、剛なインパクトを5.0m/secで所定の位置に衝突させた。その際にインパクトの荷重変位関係を測定した。

4. 計算と実験結果の比較

図4にバンパーフェース衝撃実験における減速度の測定結果と計算結果を示す。高速度カメラの映像から20msecにてクレイズが発生し、30msecにてき裂が発生するのが観察された。従来のひずみによる破断判定による計算結果は、実験値よりも早い時間で破断を示し、減速度を低く示したのに対し、改良型志澤モデルでは、クレイズの発生およびき裂進展ともに実験結果と良い一致を示した。図5は50msecにおける変形図を実験写真と比較したものである。バンパーフェース全体の変形形態及びインパクト衝突位置近傍の局所的な変形形態が実験と同様の傾向を示しており、減速度と変形形態との両方において、本研究における解析手法の有用性が確認された。

図6にドアトリム衝撃破壊試験におけるインパクトの荷重変位関係を示す。バンパーフェースにおける衝撃破壊挙動と同様に、改良型志澤モデルにおけるシミュレーション結果は実験値と良好な一致を示した。図7には衝撃破壊試験後の破断したドアトリム部品とシミュレーションによる結果を示す。破断箇所においても概ね実験結果と良い一致を示した。



Fig.3 Photograph of Bumper Face Impact Test

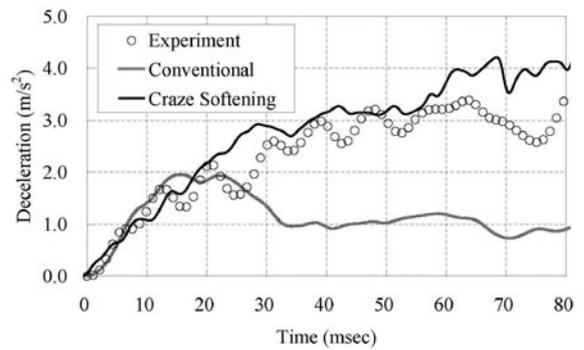


Fig.4 Deceleration Time Histories of Bumper Face Test



Craze Density

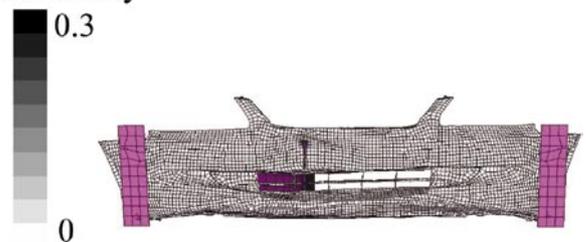


Fig.5 Simulated Deformation of Bumper Face at 50 msec

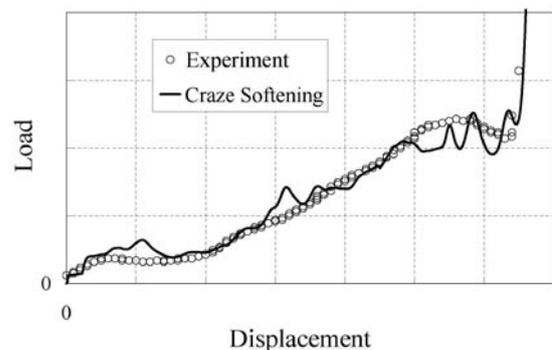


Fig.6 Load Displacement Histories of Door Trim Test

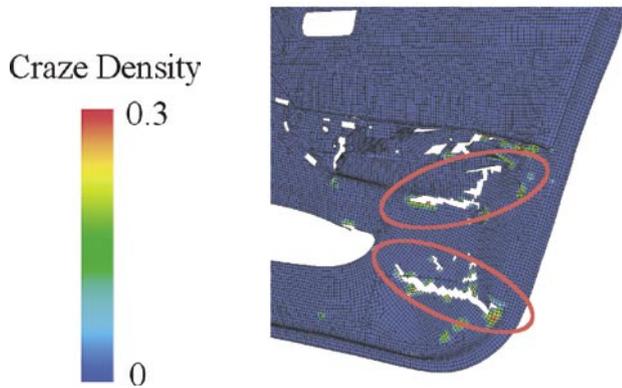


Fig.7 Simulated Fracture Locus of Door Trim Test

#### 5. おわりに

改良型志澤モデルを用いて、自動車用樹脂成形部品の衝撃荷重入力時の最終破断をシミュレートした。バンパーフェースとドアトリムとにおいて衝撃破壊実験をおこない、シミュレーションと比較した結果、インパクトの減速度履歴と荷重履歴、変形モードにおいて、実験結果と良い一致を示した。以上から、本研究における解析手法が樹脂成形部品での衝撃破壊挙動解析において有用であることが確認された。

#### 参考文献

- 1) Kambour, R.P.: J. Polym. Sci., Macromolecular Reviews, 7, pp.1-154 (1973)
- 2) 小林誠一ほか：クレイズの進展・消滅を考慮したポリマの破断予測モデルおよび大変形シミュレーション，日本機械学会論文集 A 編，70，No. 694, pp. 810-817 (2004)
- 3) Mae, H., et al.: Modeling and Simulation of Impact Failure Characteristic of Polypropylene by Elastoviscoplastic Constitutive Law, J. of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol.1, No.1, (2007) To be accepted.

## 機械材料・材料加工部門 「部門賞・一般表彰」公募のお知らせ

第3技術委員会(表彰関係)  
委員長 川田 宏之(早稲田大学)

機械材料・材料加工部門では、第83期部門賞および部門一般表彰候補を下記の要領で公募します。自薦他薦を問わず奮ってご応募ください。

- \* 公募締切：平成18年12月14日(木)厳守
- \* 推薦書類：日本機械学会・各賞推薦書に準じます。  
部門のホームページ(<http://www.jsme.or.jp/mpd/>)より入手下さい。
- \* 被推薦者資格：各賞とも日本機械学会会員であることが受賞資格となります。
- \* 書類提出先：日本機械学会 機械材料・材料加工部門  
(担当者 桑原武夫)  
160-0016 東京都新宿区信濃町 35 番地  
信濃町煉瓦館 5 階  
Fax：03-5390-3508  
Email：kuwabara@jsme.or.jp

推薦された候補者は第3技術委員会で審査され、部門運営委員会で決定します。結果は、今年度中に本人に連絡し、次期(平成18年度)のニュースレターに掲載します。また、受賞者は、M&P2006講演会時に表彰する予定です。

なお、本件に関するご質問・お問合せ等は、第3技術委員会委員長(川田宏之, Tel: 03-5286-3261, Email: kawada@waseda.jp)までお願いします。

### 各賞の概要

- (1)功績賞：機械材料・材料加工分野に関する学術、教育、出版など諸般の活動において、本部門の発展と進歩に積極的な貢献または顕著な業績のあった者に授与する。
- (2)業績賞：機械材料・材料加工分野に関する研究または技術開発において、顕著な業績のあった者に授与する。
- (3)国際賞(新規)：機械材料・材料加工分野における学術、教育、出版などに関する国際的な活動を通し、本部門の発展と進歩に積極的な貢献または顕著な業績のあった者に授与する。
- (4)部門表彰(優秀講演論文部門)：当該年度に開催された本部門企画、担当、主催または共催の講演会において発表された機械材料・材料加工分野の講演論文中、学術・技術の進歩発展に寄与し、特に優秀と認められる論文の著者を対象とする。
- (5)部門表彰(新技術開発部門)：機械材料・材料加工分野において本部門規格、担当、主催または共催の集会、出版物等において発表された新技術、新製品の開発者中、工業技術の進歩発展に特に貢献した者を対象とする。
- (6)部門表彰(優秀ポスター発表部門)(新規)：当該年度に開催された本部門企画、担当、主催または共催の講演会において発表された機械材料・材料加工分野のポスター発表中、学術・技術の進歩発展に寄与し、特に優秀と認められるポスター発表の著者を対象とする。会において発表された機械材料・材料加工分野のポスター発表中、学術・技術の進歩発展に寄与し、特に優秀と認められるポスター発表の著者を対象とする。

## 2006 年度日本機械学会年次大会が終了

年次大会実行委員会  
 里中 忍、峠 睦 (熊本大学)

2006年度年次大会は、2006年9月18日～22日までの5日間、熊本大学を主会場として開催されました。大会直前に台風が九州を通過して開催が危ぶまれる状況もありましたが、5日間の大会期間は天候にも恵まれ、参加者総数3604名に達するなど盛会でした。機械材料・材料加工部門では、皆様のご協力以下の企画を開催することができました。研究発表会場が狭いなど、ご不便をおかけしましたが、無事終了しましたことをご報告いたします。

## ●オーガナイズドセッション

- ① 複合材料の動向とその加工技術
- ② セラミックスおよびセラミックス系複合材料
- ③ アルミニウム合金およびマグネシウム合金の創製と加工技術
- ④ 半溶融・半凝固加工の最先端

- ⑤ 組成加工技術の動向とその展開
- ⑥ 表面改質とトライボロジー
- ⑦ 材料の超精密加工とマイクロ／ナノ加工の動向
- ⑧ 粉末成形とその評価
- ⑨ 溶接・接合の動向とその展開
- ⑩ 高エネルギー加工
- ⑪ 非破壊評価とモニタリング
- ⑫ コーティング材料の皮膜特性とその評価
- ⑬ 新機能多孔質材料の創製と評価
- ⑭ バイオマス由来材料の成形加工と特性評価
- ⑮ 知的材料・構造システム (材料力学部門, 機械力学・計測制御部門, 宇宙工学部門との共同企画)
- ⑯ 締結・接合の力学とプロセス (材料力学部門, 計算力学部門との共同企画)

## ●併設国際シンポジウム

International Symposium on Synergistic Effects of Materials and Processing (ISSEMP 2006)

## ●一般セッション

## 部門英文ジャーナルについて

## '論文投稿のお願い'

部門英文ジャーナル編集委員会委員長 森敏彦  
 第7技術委員会(Journal関係)委員長 藤本浩司

かねてより準備を進めてまいりました部門英文ジャーナルは、来年2007年2月頃を目処に発刊の運びとなりました。今年の5月に論文投稿の受付を開始して以来、すでに、数多くの質の高い論文をご投稿いただいておりますが、今後ともより積極的な論文投稿をお待ち申し上げます。

このジャーナルは、材料力学部門との連合のもとに電子ジャーナルの形態で発刊するもので、機械材料・材料加工、材料力学関係、即ち、材料の開発・製造・加工・特性評価・応用など、Engineering Materialsに関係する研究であれば何でも対象といたします。当ジャーナルの特長は以下の通りです。

1. ジャーナル名は当面、Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering (JSMME) とする。
2. 機械材料・材料加工部門および材料力学部門の活動に関連した研究分野の原著論文および展望・解説論文を募集対象とする。また、速報性のある Short Paper も募集対象とする。
3. 編集体制は Editor 制として、Editor が校閲者選定、校閲の催促、著者への照会等を行う。なお、編集委員会は機械材料・材料加工部門と材料力学部門にそれぞれ設ける。

4. 本電子ジャーナルは、JST (科学技術振興機構) の J-STAGE で公開 (閲覧無料) とする。 (<http://www.jstage.jst.go.jp/browse/-char/ja>)
5. オンライン投稿・校閲・出版システムの導入により、論文投稿から掲載までの処理を迅速に行う。投稿から掲載まで3箇月以内を目標とする。校閲が完了した論文は、論文単位で順次 J-STAGE にアップロードする。
6. 掲載料については、当面、学会で規定された額を徴収する。

なお、機械材料・材料加工部門の編集委員会、Advisory Board のメンバー構成は次の通りです。

Editor-in-chief: 森敏彦 (名古屋大学)

Editors: 浅沼博 (千葉大学), 鈴村暁男 (東京工業大学), 三浦秀士 (九州大学), 武藤睦治 (長岡技術科学大学), 藤本浩司 (東京大学)

Advisory Board: Minoru Taya (University of Washington, USA), Wojciech Z. Misiolek (Lehigh University, USA), Kornel F. Ehmann (Northwestern University, USA), Liangchi Zhang (The University of Sydney, Australia), Yong-Taek Im (KAIST, Korea)

皆様方の温かいご支援と積極的な論文投稿をお願いする次第です。

## 第15回機械材料・材料加工技術講演会 (M&P2007)開催のお知らせ

第2技術委員会(M&P関係)  
委員長 井原 郁夫(長岡技術科学大学)

来年度のM&P2007は長岡技術科学大学(新潟県長岡市)で開催いたします。会期は平成19年(2007年)11月17日(土)、18日(日)の予定です。本講演会では「ものづくり」の基礎、応用、先端技術についての活発な討論、情報交換の場をご提供できるよう、従来のオーガナイズドセッションに加えて斬新なセッションやワークショップ、技術フォーラムなどを企画させていただく予定です。皆様からのアイデアも期待いたしております。どうぞ奮ってご参加いただくようお願い申し上げます。講演会の詳細につきましては部門ホームページおよび次号にて御案内いたします。



M&P 2007 長岡技術科学大学

## 2007 年度年次大会

第1技術委員会(年次大会)  
委員長 羽賀 俊雄(大阪工業大学)

来年度の年次大会は下記の日程で開催されます。

- 開催日：2007年9月9日(日)～12日(水)
  - 9日 : 市民開放行事
  - 10日～12日：講演会

- 会場 : 関西大学 千里山キャンパス(吹田市)

大阪で学会の講演会が開催される回数は、東京、京都について多いのではないのでしょうか。しかし、機械学会の年次大会が開かれるのは、1982年以来25年ぶりと思われまます。M&Pも大阪では開かれておりません。年次大会では、“食い倒れの街”大阪を舌で堪能していただきながら、明日の日本を支える“ものづくり”について、基礎技術、応用技術、先端技術、萌芽的な研究にいたるまで活発な議論、情報交換をして頂きたいと思ひます。本部門に関しましては、部門単独企画のオーガナイズドセッション12件、他の部門と合同企画のオーガナイズドセッション2件が計画されています。奮ってご参加下さりますよう、お願い申し上げます。年次大会に関しましての情報は機械学会のホームページをご参照下さい。URL:<http://jsme.or.jp/2007am/>

## 編集後記

ニュースレター No.32をお届けします。特集“衝撃工学の最前線”はいかがだったでしょうか?強度設計から材料プロセッシングまで、衝撃が関わる問題は多岐に渡っており、今後ますます重要になる分野だと思ひます。なお、本号はNo.28,30に引き続き電子媒体のみで発行しています。皆様方に興味を持って読んでいただけるよう、今後とも努力を重ねてまいりたいと思ひます。ニュースレターに関するご意見やお問い合わせがございましたら、公報委員会(佐藤.csato@pi.titech.ac.jp)までご連絡ください。(C. S.)

発行	発行日 2006年11月30日
〒160-0016 東京都新宿区信濃町35信濃町煉瓦館	
(社)日本機械学会 機械材料・材料加工部門	
第84期部門長	三浦 秀士
広報委員会委員長	佐藤 千明
Tel. 03-5360-3500	Fax. 03-5360-3508