

# 水中収束衝撃波の塑性加工への応用

2004 年

兵庫教育大学大学院  
連合学校教育学研究科  
教科教育実践学専攻  
配属大学（岡山大学）  
胡 習之

## 目次

|       |                                     |    |
|-------|-------------------------------------|----|
| 第1章   | 緒論                                  | 5  |
|       | 参考文献                                | 10 |
| 第2章   | 衝撃液圧収束用反射板レンズの収束性能<br>に関する実験的検討     | 13 |
| 第2.1節 | 衝撃液圧発生装置                            | 13 |
| 2.1.1 | 全体的構成                               | 13 |
| 2.1.2 | 火薬銃                                 | 14 |
| 2.1.3 | ガス溜め室                               | 16 |
| 2.1.4 | 真空観測室                               | 16 |
| 2.1.5 | 弾丸（飛翔体）                             | 16 |
| 2.1.6 | 円筒形水槽                               | 20 |
| 2.1.7 | 水槽中心軸と弾道を一致させる方法                    | 20 |
| 第2.2節 | 弾丸速度の測定                             | 21 |
| 2.2.1 | 弾丸速度測定法                             | 21 |
| 2.2.2 | 測定結果                                | 21 |
| 第2.3節 | 収束用反射板レンズについて                       | 21 |
| 第2.4節 | 圧力測定フィルムによる反射板レンズの<br>収束性能の検討       | 25 |
| 2.4.1 | 圧力測定フィルムによる衝撃液圧の測定原理                | 25 |
| 2.4.2 | 圧力測定フィルムと圧力測定法                      | 25 |
| 2.4.3 | 圧力測定フィルムによる衝撃液圧の同定法                 | 26 |
| 2.4.4 | 実験結果と考察                             | 26 |
| 第2.5節 | 金属薄板の打ち抜き実験による収束用<br>反射板レンズの収束性能の検討 | 28 |
| 2.5.1 | 金属薄板の打ち抜き実験による衝撃圧力の測定原理             | 28 |
| 2.5.2 | 測定法                                 | 31 |
| 2.5.3 | 実験結果と考察                             | 32 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 第2.6節 | 鉛板の圧印実験による反射板レンズの収束性能に関する<br>検討         | 33 |
| 第2.7節 | 結論                                      | 34 |
|       | 参考文献                                    | 35 |
| 第3章   | LS-DYNAによる収束反射板レンズの収束性能<br>の数値解析的検討     | 36 |
| 第3.1節 | 数値解析的手法について                             | 36 |
| 3.1.1 | LS-DYNAについて                             | 36 |
| 3.1.2 | ひずみ速度依存弾塑性モデルについて                       | 37 |
| 3.1.3 | 衝撃塑性の構成式                                | 39 |
| 第3.2節 | 数値解析精度の確認のための実験（固体の高速変形）                | 41 |
| 3.2.1 | 純アルミニウム製弾丸の剛壁への衝突実験<br>（固体の高速変形）        | 41 |
| 第3.3節 | 固体の高速変形の実験結果と<br>数値解析結果の比較              | 42 |
| 3.3.1 | 固体の高速変形の数値解析                            | 42 |
| 3.3.2 | 数値解析結果と実験結果に基づく考察                       | 43 |
| 第3.4節 | 数値解析精度確認のための実験（衝撃水圧の発生と<br>伝播）          | 44 |
| 3.4.1 | 水晶圧電ピックアップによる衝撃圧力の計測                    | 44 |
| 3.4.2 | 衝撃液圧の測定方法と測定結果                          | 45 |
| 3.4.3 | 水中の圧力波の発生と伝播についての数値解析<br>（流体と構造物との連成問題） | 48 |
| 3.4.4 | 水に対するモデルの設定                             | 49 |
| 3.4.5 | 数値解析結果と実験結果に基づく考察                       | 51 |
| 第3.5節 | レンズの収束性能に関する<br>数値解析結果                  | 51 |
| 3.5.1 | 反射板レンズの形状が収束性能に及ぼす影響                    | 51 |
| 3.5.2 | 反射板レンズの入り口と出口の面積比                       |    |

|       |                                       |    |
|-------|---------------------------------------|----|
|       | が収束性能に及ぼす影響                           | 55 |
| 3.5.3 | 弾丸材料，形状および衝突速度が圧力波に<br>及ぼす影響          | 55 |
| 第3.6節 | 結論                                    | 57 |
|       | 参考文献                                  | 58 |
| 第4章   | 高速成形加工に関する実験および理論的検討                  | 60 |
| 第4.1節 | はじめに                                  | 60 |
| 第4.2節 | 円錐形水槽の収束性能について                        | 60 |
| 4.2.1 | 円錐形水槽の開発                              | 60 |
| 4.2.2 | 円錐形水槽の収束性能の数値解析                       | 61 |
| 4.2.3 | 金属薄板の自由張り出し成形実験に<br>よる収束性能の確認         | 61 |
| 第4.3節 | 収束圧力波による小型製品の成形加工に関する<br>実験および数値解析的検討 | 63 |
| 4.3.1 | 成形実験                                  | 63 |
| 4.3.2 | 金型の肩部半径についての検討                        | 64 |
| 4.3.3 | 成形加工に対する数値解析                          | 65 |
| 4.3.4 | 成形実験結果と数値解析結果との比較および考察                | 65 |
| 第4.4節 | 被成形材に作用する圧力について                       | 70 |
| 第4.5節 | 結論                                    | 73 |
|       | 参考文献                                  | 73 |
| 第5章   | 総括                                    | 75 |
|       | 謝辞                                    | 79 |
|       | 付録                                    | 80 |

## 第一章 緒論

金属材料の主な加工法である塑性加工法の中に、高エネルギー速度加工法と分類される加工法がある。この加工法は、例えば、爆薬が爆発するとき短時間に放出する多量のエネルギーを被成形材に与えて行うような加工法の総称で、加工に必要なエネルギー与える速度が高いので上記のような名称が加工法に付けられている<sup>1-1)</sup>。

本研究の目的は、衝撃液圧を負荷して行う上記高エネルギー速度加工法について、小型製品を成形加工する場合、小さな圧力負荷面へ、液中を伝播する衝撃圧力波を如何に収束させて負荷するか、また、収束して高圧になった衝撃液圧を負荷された被成形材がどのような変形過程を経て金型形状に成形されて行くかを明らかにし、この加工法の発展へ資することにある<sup>1-2)</sup>。

高エネルギー速度加工法には、上述のように爆薬の化学エネルギーを瞬時に気中あるいは液中で開放し、それによりそれぞれの媒質中に発生し伝播する衝撃圧力波を被加工物へ負荷して行う爆発成形法<sup>1-3)</sup>、コンデンサへ蓄えた電気エネルギーを液中で爆発的に放電開放して行う液中放電成形法<sup>1-4)</sup>やコイルへ通電開放して瞬間磁場を発生させて行う電磁成形法、高速ハンマを被成形材へ衝突させて行う高速プレス加工法、シリンダ内の液体へ高速ピストンを突入させて行う水撃成形法、(ハイドロパンチ成形法)高速弾丸の液中への突入により発生する衝撃液圧を用いて行う銃成形法<sup>1-5)</sup>などがある。

上記高エネルギー速度加工法の内、最後の一つを除いて全て1950年から1960年代に盛んに研究開発され、実用化が進んだものであり、最後の一つは1970年代の後半に開発されたものである。また、水撃成形法と銃成形法の二つは日本で開発された加工法である。上記爆発成形法と銃成形法については、設備はほとんど不要で、爆薬または銃と水槽だけあれば成形に必要な衝撃液圧が得られ、そのため加工設備の費用を低く抑えることができる。水槽がない場合には、川、池を利用することもできる。

爆発成形法をはじめとするこれら高エネルギー速度加工法のほとんどの加工法は、エネルギー源からのエネルギーを一旦液体中を伝播する圧力波のエネルギーに変換して用いるものが多い。また、エネルギーの負荷速度が高いため、エネルギーを与えられた被成形材は一般に高速に加速される。その結果、高いひずみ速度で成形が進行し、成形用金型に高速で衝突しながら成形が完了して行く。

上述のように、高エネルギー速度加工法は、衝撃液圧を用い、高速度で成形が進行するなどの特徴を持っているため、以下のような特長を有することになる。

- 1 成形用金型としては、液体がその一方の役目を果たすので、実際には一方の型のみを用意すれば良く、型合わせの必要がない。また、金型材料として金属以外に石膏やコンクリートや樹脂などが使用できることも多く、金型の製作費用と時間を非常に軽減でき、多種少量生産にとっては好適な成形法である。
- 2 被加工材が成型用金型と高速で衝突するとき、被加工材中に高い圧縮応力が生じて、成形時のスプリングバックが小さく、金型に非常に忠実な高精度の成形ができる。
- 3 通常の成形法では難しい拡張成形が非常に容易に行なえることなどもあり、複雑な形状の成形も簡単にできる。
- 4 高ひずみ速度下の変形なので、材料によっては、大ひずみの成形が可能である。
- 5 静的な液圧に比べて、圧力シールが非常に簡単である。

このような特長を有する高エネルギー速度加工法は、前述のように1950年代から1960年代にわたり、原子炉、飛行機、ロケットの部品などの製造への利用に触発されて発展した。特に、爆発成形法は、主に大型製品の製造に用いられ、半径1 m～数mの半球殻成形加工例が報告されている<sup>1-6)</sup>。また、比較的小型製品の成形加工、すなわち金属管の拡張<sup>1-7)</sup>、ライニング及び穴あける加工などへの適用も行われた<sup>1-8)</sup>。それ以外の高エネルギー速度加工法は、主に、中型製品の成形に用いられた。上述の特長で述べたように、加工品の数が少ない場

合、極端には1個または数個しか加工しない多種少量生産の場合には金型の製作が簡単で、成形精度の高いこの高エネルギー速度加工法は威力を発揮する。そのため、しばしば、1個しか必要なく、高い成形精度を要求される義歯用金属床の製造へ適用され、成功を収めてきた(1-9)。

最近の機械部品の小型化、多種少量生産の要求、新しい加工分野の開発などへの対応として、従来の高エネルギー速度加工法を改めて見直して見る必要がある。本研究はその見直し的一端として行ったもので、特に小型部品製造へ衝撃液圧（水圧）を用いる高エネルギー速度加工法を適用するための基礎研究として行った。寸法が数 mm 程度の部品成形への適用の試みは、従来は皆無である。小型製品を成形する場合、負荷面積が狭いので高圧力の負荷が必要になる。頑強な高圧設備を用いなくて高圧力を得る方法として、反射板を用いた衝撃圧力波の収束が考えられる。どのような形状をした反射板（レンズ）を用いれば効率良く収束できるか。まず、反射板レンズを開発する必要があるが、反射板レンズに関する系統的な先行研究は皆無であり、この問題について実験、理論の両面から検討した。

次に、収束した衝撃高液圧を負荷した被成形材がどのような変形過程を経て金型通りの形状に成形されていくかを明らかにし、所要の形状に成形するために必要な圧力を見積もる方法を見出す必要がある。この問題についても、系統的に行われた先行研究は皆無に等しい。それは、この問題を的確に取り扱うためには、圧力媒体である液体と被成形材の運動を連成して取り扱わねばならないという理論的<sup>1-10)</sup>な難しさにある。しかし、この問題は、最近、衝撃問題を取り扱うことのできる市販のソフトが開発され、身近で使用できるようになったことで解決可能になってきた。従来、衝撃問題を取り扱うソフトは存在したが、大型計算機が必要であり、そのソフトは一研究室の予算で購入できるようなものではなかった。最近のパソコンの発達と連動してソフトの改良も進み、一研究室での予算でこの種の問題が取り扱えるソフトの導入が可能になってきた。とは言え、ソフトの導入によりすぐ

計算できるというものではない。この種のソフトが使えるようになるには、計算法および取り扱う問題に通暁していても最低1年あるいは1年半はかかると言われている。

上述の液中衝撃圧力波の収束については、凹面に向かった衝撃波が反射後収束して、局部的に高い圧力を生じさせる現象として知られており、医学治療や工学的分野に利用されている。特に医学治療では、腎臓・尿管結石の治療への臨床応用に関係して、興味深い研究がなされている<sup>1-11)</sup>。例えば、平成2年度衝撃波シンポジウムで、東北大学医学部の庵谷らが報告した<sup>1-13)</sup>衝撃波によるキャビテーション発生についての研究、平成3年のSHOCK WAVES国際会議で、東北大学の川原らが報告した<sup>1-14)</sup>水中の回転楕円面の二つの焦点のうち、一方で生じた衝撃波をもう一方の焦点へ収束させる方法での焦点位置の衝撃圧力についての研究などがある。一方、工学的分野においては、通常、難焼結性粉末として知られているセラミック粉末や、アモルファス粉末などの先端材料粉末のユニークな固化方法への応用として<sup>1-14)</sup>平成4年第33回高圧討論会で、熊本大学の千葉らが報告している<sup>1-15)</sup>。すなわち、圧力媒体に水を用いて収束した衝撃圧力波を粉末に均一に負荷して圧縮し欠陥のない金属やセラミックス粉末を固体する方法である。

前者の医学治療に関連した衝撃圧力波の収束問題は、非常に低い圧力波を取り扱ったものであり、数百気圧以上の圧力波の場合に同様に取り扱えるか疑問である。一方、後者の工業的応用については一種類の収束レンズのみを用いた実験であり、レンズに関する一般的な情報を得ることはできない。

一方、高エネルギー速度加工法の中で、衝撃液圧を負荷して行う金属板の高速成形の理論的取り扱いについてみると、最近、計算機の進歩に伴って衝撃応答問題の理論的解析が試みられるようになってきた。1950年代後半から1970年前半までM.L.Wilkins等が開発したHEMPコード<sup>1-16)</sup>やTENSOR<sup>1-17)</sup>, TOODY<sup>1-18)</sup>, PISCES<sup>1-19)</sup>,



STEALTH<sup>1-20)</sup>等のコードがある。これらのコードは弾塑性固体の大変形や圧縮性流体との相互作用が取り扱え、応力波伝播、貫入、貫通計算等を行うことができる。1974年、S.W.Keyが運動方程式の時間積分に陽的スキームを導入したHONDOコードを開発したことにより、塑性加工の大変形問題を高効率に取り扱うことができるようになった。さらに、1976年にLawrence Livermore National LaboratoryのJ.O.Hallquistを中心とするグループにより、HONDO流の考え方を進め、材料の非線形性を状態方程式と偏差応力モデルに分解するHydrodynamicコードの手法を取り入れ、1点立体積分要素のみを用いて表現する一般連続体の衝撃計算有限要素法コードDYNA3D<sup>1-21)</sup>が開発された。本研究で用いたLS-DYNA<sup>1-22)</sup>計算コードはDYNA3Dを1995年にLivermore Software Technology Corporation(LSTC)が改良して発表したものである。このSoftware(Ver.960)<sup>1-23)</sup>は材料特性に対して、非常に多くのモデルを内蔵している。弾性体、直交異方性弾性体、土、線形粘弾性体、ゴム、高性能爆薬、弾塑性流動体、温度依存弾塑性体、等方/移動硬化弾塑性体、多直線近似弾塑性体等数十種類があり、使用者が別種の構成モデルを改良して使用することも可能である。このSoftwareは、本研究で数値解析を必要とする水中衝撃波の収束問題、衝撃液圧を負荷された材料の高速塑性変形の問題を圧力媒体と被成形体の運動を連成して取り扱うことができる<sup>1-24)~1-28)</sup>。

本研究は、以下のように進めた。

まず水中平面衝撃圧力波を、火薬銃で加速した高速弾丸を円筒状の水槽へ打ち込んで発生させ、それがほぼ平面波になった水槽の底面で、反射板レンズにより収束させ、その収束性能について実験的に調べた。どのような形状のレンズが最も効率よく収束できるかを明らかにするため、本研究では三角形ロート形状(ロート形レンズ)、回転放物面形状(放物面レンズ)及び回転Exponential曲線形状(Exp.レンズ)の3種類のレンズについて調べた。これらの実験結果に基づき、実験的検討に加えLS-DYNAによる数値解析も併用し実験、理論の両面より収束レンズの収束

性能の解明を試みた。

次に、上での研究結果に基づき、収束効率の良い、すなわちレンズと水槽とが一体になった円錐形水槽を開発・試作し、その新水槽を用いて収束させた衝撃圧力波により成形実験を行うと共に LS-DYNA による理論的検討も行い、衝撃液圧の負荷を受けた被成形材の高速変形過程を明らかにした。さらに、被成形材と圧力媒体両者の運動を連成して取り扱い高速変形中に被成形材に負荷される真の圧力を明らかにした。

本論文の構成は、以下の通りである。

本論文は五つの章と付録とで構成されている。

第 1 章では、緒言として研究の目的、研究の背景、先行研究、本研究の進め方などに述べる。

第 2 章では、主として回転放物面レンズの収束性能についての実験的検討について述べる。

第 3 章では、本研究のために導入した衝撃問題解析用ソフト LS-DYNA の解析精度を固体の高速変形と水中衝撃波の発生・伝播について実験と数値解析の両面より検討した結果、および 3 種類の反射板レンズの収束性能について行った数値解析の検討結果等について述べる。

第 4 章では、前章の結論に基づき行った衝撃液圧発生用水槽の開発・試作及びその水槽を用いて行った金属薄板の高速成型実験およびその数値解析結果について述べる。

第 5 章では、各章で得られた結果をまとめ総括する。

付録では、本研究で行った LS-DYNA による数値解析の初期設定データファイルを添付する。（このデータファイルは、本論文の成果と共に他の研究者にとっても LS-DYNA を利用する場合、非常に価値のあるものと思われる。）

#### 参考文献

1-1) 日本塑性加工学会：高エネルギー速度加工，コロナ社，11-11，

- 1990.
- 1-2) 守谷和幸；修論：水中収束衝撃波に関する研究，岡山大学大学院教育学研究科，21（1998）
  - 1-3) 山田敏郎，可児弘毅；高速弾丸の水中へ突入により発生する衝撃液圧を用いた高速塑性加工，塑性と加工，Vol. 18, No. 192, 35（1977-1）
  - 1-4) 可児弘毅；衝撃的液圧を用いた塑性加工，圧力技術，Vol. 13No. 4, 199-210,（1975）
  - 1-5) 林 卓夫，田中吉之助；衝撃工学，315-328，日刊工業新聞社，1988，
  - 1-6) Chaussy et al Extracorporeal shock wave lithotripsy. 2<sup>nd</sup> ed (1986) Kager Munchen
  - 1-7) 伊東ら，平成4年度第33回高圧討論会講演要旨集 PP. 416～417.（1992）
  - 1-8) Prat, F., Chapelon, J.Y., Ponchon, T., Abou, E.F.F., Theilliere, G., Pansu, D., Berger, F. & Cathignol, D.: Shock Waves, Proceedings of the 18th International Symposium on Shock Waves, (1991), 1163-1176.
  - 1-9) 山田敏郎，可児弘毅；衝撃高液圧による金属義歯床の成形，日本複合材料学会誌，Vol. 4, NO. 3, 93（1978）
  - 1-10) Cole, R.H., Underwater Explosion, Dover Publication Inc., New York 402～407, Princeton Univ. Press. (1965)
  - 1-11) M. Kuwahara, et. al., Proceedings of 18<sup>th</sup> Int. Symp. Shock Waves. PP. 41～48（1991）
  - 1-12) J.S. Rinehart & J. Pearson, Explosive Working of Metals, Pergamon Press, London (1963)
  - 1-13) 石井，金属材料の高速加工，日本鉄鋼協会技術講座テキスト（1969）
  - 1-14) 精密機械，「高エネルギー速度加工」特集号，31, 7（1965）  
など

- 1-15) Chiba,A., Nishida,M., Morizono,Y. & Imamura,K.:  
 Fundamental Issues and Applications of Shock-Wave and  
 High-Strain-Rate Phenomena, (2001),275-281,Elsevier.
- 1-16) Heyan F.J., ASME, J.Basic Engineering. 400(1968)
- 1-17) S.T.S.Al-Hassani et al,Int.J.Mech.Sci.,**12**, 371(1970)
- 1-18) Y. Aoki & M. Kosaka, Shimadzu Review, 26 2(1969)
- 1-19) J.A.Charest and C.S.Lynch EFFECTS of Lathral on Pvf2stress  
 Gaugas
- 1-20) Mcqueen R.G, et al “High-Velocity Impact Phenomene”(ed R.  
 Kinslow) Academic Press 294(1970)
- 1-21) シーメンスメデイカルシステムズ(株)Lithostar , PP. 1~9
- 1-22)KuwaharaM., et al “Shock Waves” (Ed K. Takahama) Springer  
 -verlag. 41(1992)
- 1-23) 福田, 黒岩, 栖原, 九大応力研報告, 41, 57 (1974)
- 1-24) 丸中ら, 日本機械学会論文集 A67-664, 1948-1954 (2001)
- 1-25) 丸中ら, 日本機械学会論文集 A68-666, 343-348 (2002)
- 1-26) 吉川ら, 関西造船協会論文集 第 236 号 211-219 (2001)
- 1-27) 山田ら, 日本機械学会論文集 (A) , 48-432, 975-980 (1982)
- 1-28) <http://www.engineering-eye.com/products/lsdyna/>

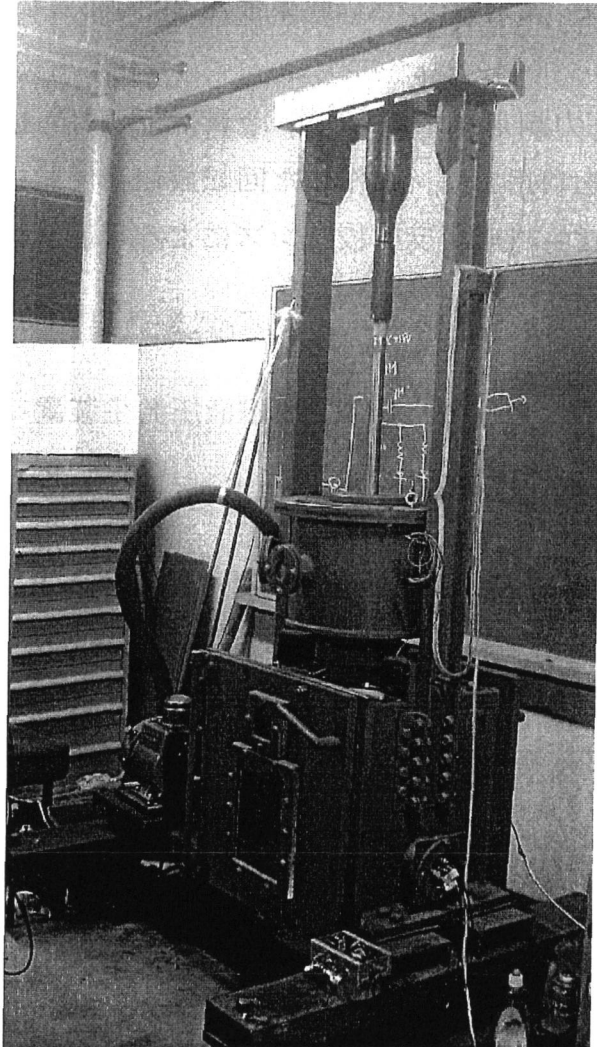


Fig.2-2 実験装置の外観

### 2. 1. 2 火薬銃<sup>2-3)</sup>

銃身はクロムモリブデン鋼製で Fig. 2-3 に示すように長さ 1.3m, 内径 15.6mm, 肉厚さ 10mm のもので, 上端は火薬室に接続され, その内部には無煙火薬を 20g まで装填できる薬夾が収納される. また下端は O リングを介してガス溜め室に接続されている. 火薬は Fig. 2-4 に示す回路で起爆された電気式雷管により点火される. 火薬の燃焼ガスにより, 起動圧用の金属製ダイヤフラムが破断され, それに接して装填されている弾丸が加速される<sup>2-4)</sup>. この火薬銃の火薬量と純アルミニウム製弾丸の発射速度の関係を Fig.2-5 に示す.

## 第2章 反射板レンズの収束性能に関する実験的検討

本章では、圧力測定フィルム<sup>2-1)</sup>、金属薄板の打ち抜きおよび軟質金属板の圧印等を利用して、試作した回転放物面反射板レンズおよび回転 Exponential 曲線形状反射板レンズによる平面衝撃液圧の収束性能の解明を試みた。

### 第 2 . 1 節 衝撃液圧発生装置

#### 2. 1. 1 全体的構成

Fig.2-1 のように、弾丸を高速で発射するための火薬銃が銃口を鉛直下方に向けて固定され、銃口前方にはガス溜室、真空観測室が接続されている。真空観測室の内部には、中心軸を弾道と一致させて衝撃液圧発生及び収束用水槽が設置できるようになっている<sup>2-2)</sup>。外観を Fig.2-2 に示す。

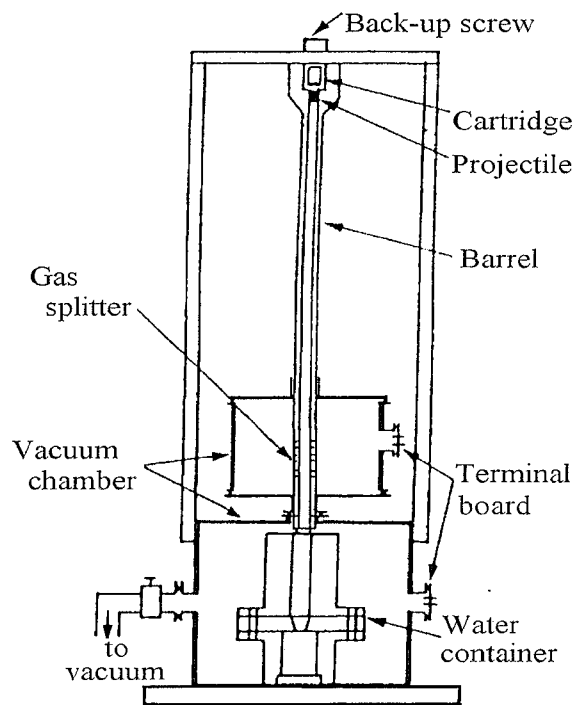


Fig.2-1 衝撃液圧発生装置概略図

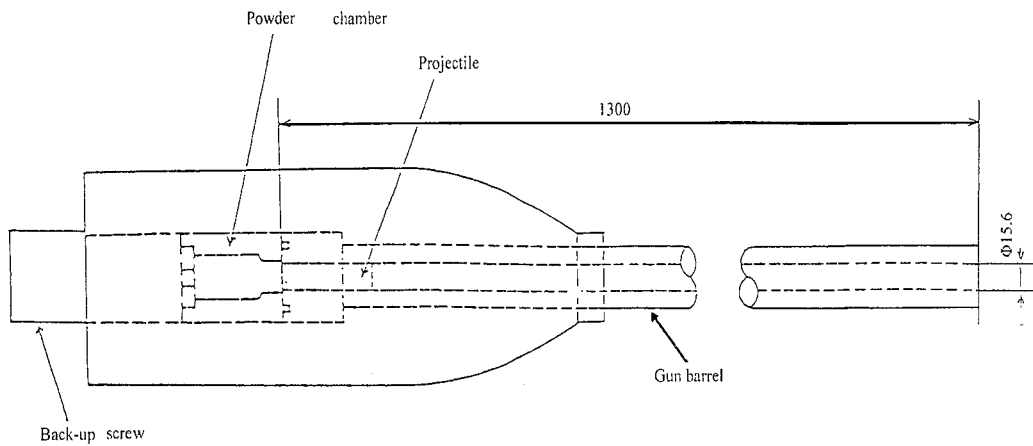


Fig. 2-3 火薬銃身 2-5)

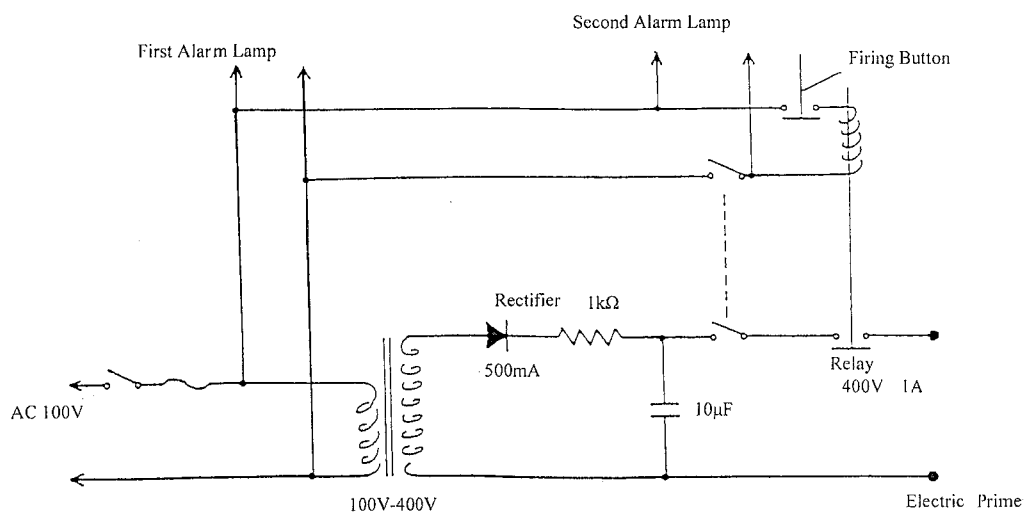


Fig. 2-4 電気雷管の点火回路 2-5)

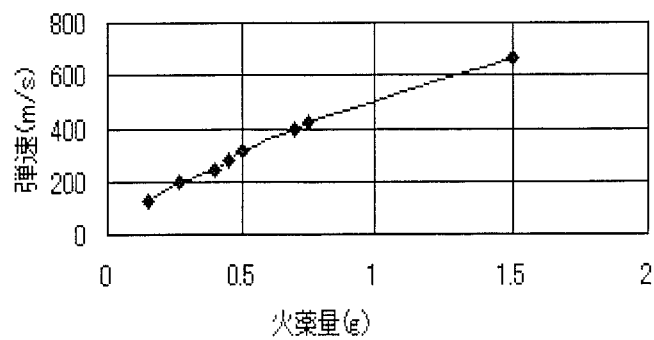


Fig.2-5 火薬銃の火薬量と純アルミニウム製弾丸発射速度の関係

### 2. 1. 3 ガス溜め室

これは、圧力配管用鋼管を基にして製作され、内径約 400mm、容積約 38 リットルのものであり、火薬の燃焼ガスはこのタンク内に溜まるようになっている。また、下端は真空観測室に接続されている。

### 2. 1. 4 真空観測室

本体は、厚さ 21mm の SS41 鋼板を熔接して製作した箱形のものである。真空観測室の前面、裏面には、透明なアクリル板の窓を設けた扉が設けられている。また、扉の取り付けられていない側面の一方には、真空ポンプに通じるパイプが付いている。実験時には真空ポンプにより、銃腔内、ガス溜め室内部及び真空観測室内部をほぼ水の蒸気圧程度まで排気することができる。そのため弾丸の速度損失が防がれ、火薬の爆発音が低減される。真空観測室の内部へ水槽を設置するため Fig.2-6 に示すように、L 形鋼製レールと手製ネジジャッキを設けた。

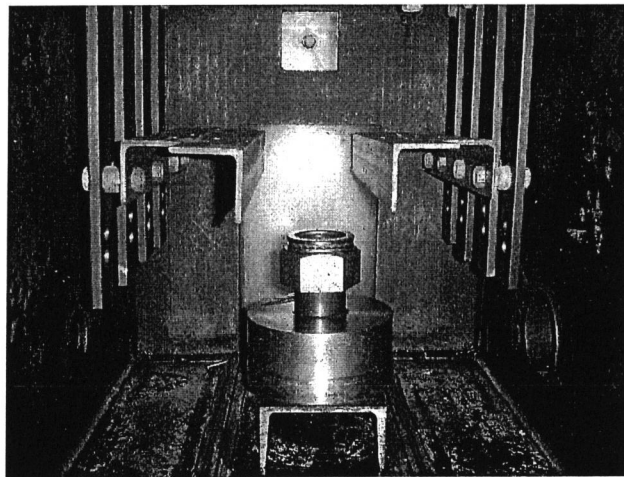


Fig.2-6 真空観測室の内部様子

### 2. 1. 5 弾丸（飛翔体）

使用した弾丸(飛翔体)の写真を Fig.2-7 に示す。これらは直径 15.6 mm、長さ 20mm の純アルミニウム製（材質：A1070BD-F、焼鈍：300℃、1 時間、炉冷）およびポリカーボネイト製円柱である。弾丸(飛



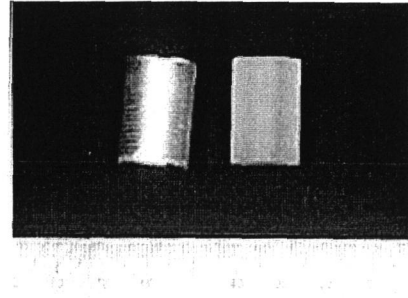
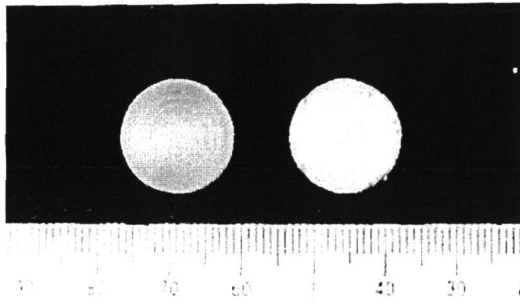


Fig. 2-7 弹丸 (飞行体)

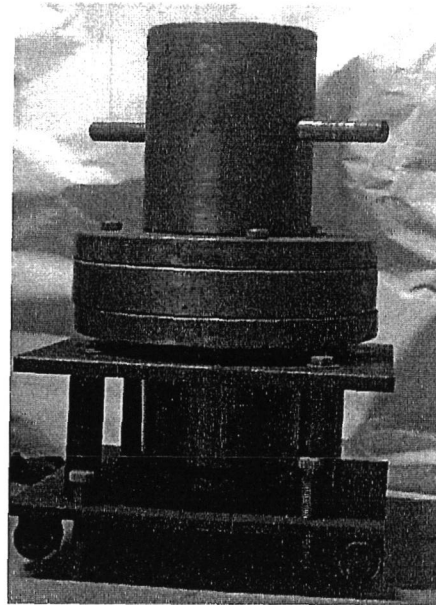
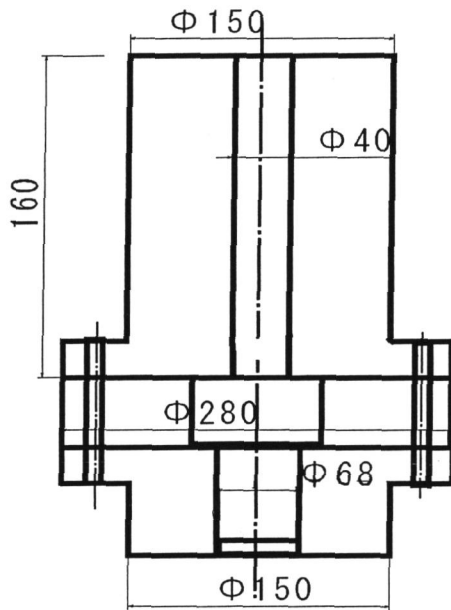


Fig. 2-8 旧型水槽

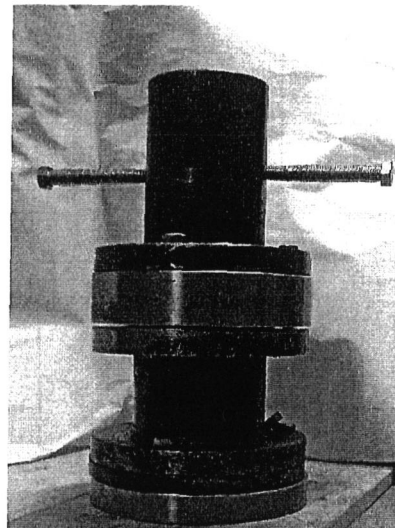
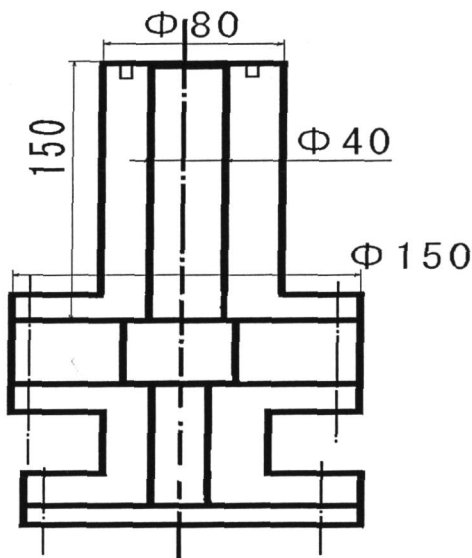


Fig. 2-9 改造水槽

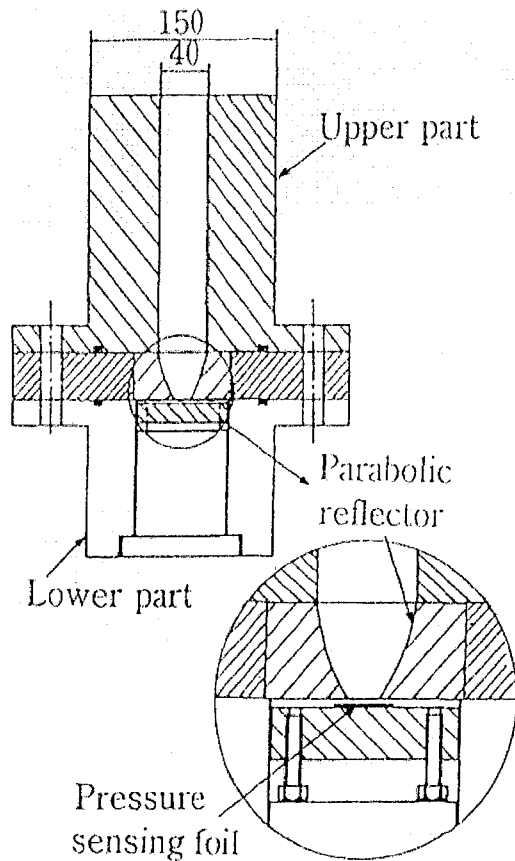


Fig. 2-10 水槽各部分の概略図<sup>2-6)</sup>

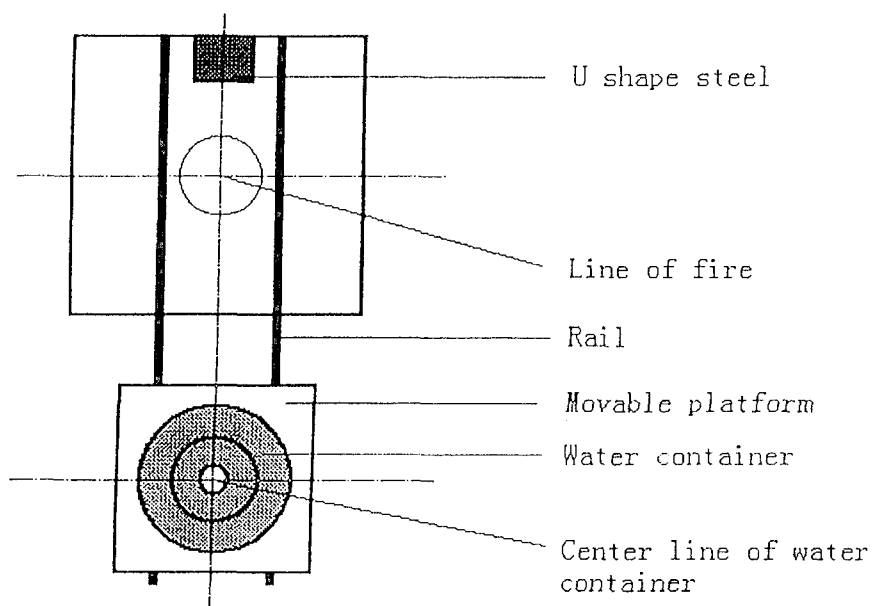


Fig. 2-11 (a) 旧型水槽を真空観測室内の定位置へ設置する説明図<sup>2-5)</sup>

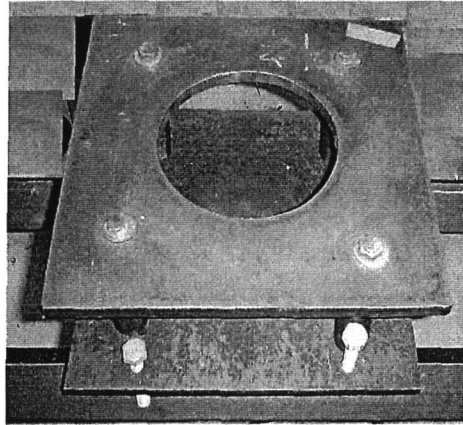


Fig.2-11(b) 旧型水槽用台車

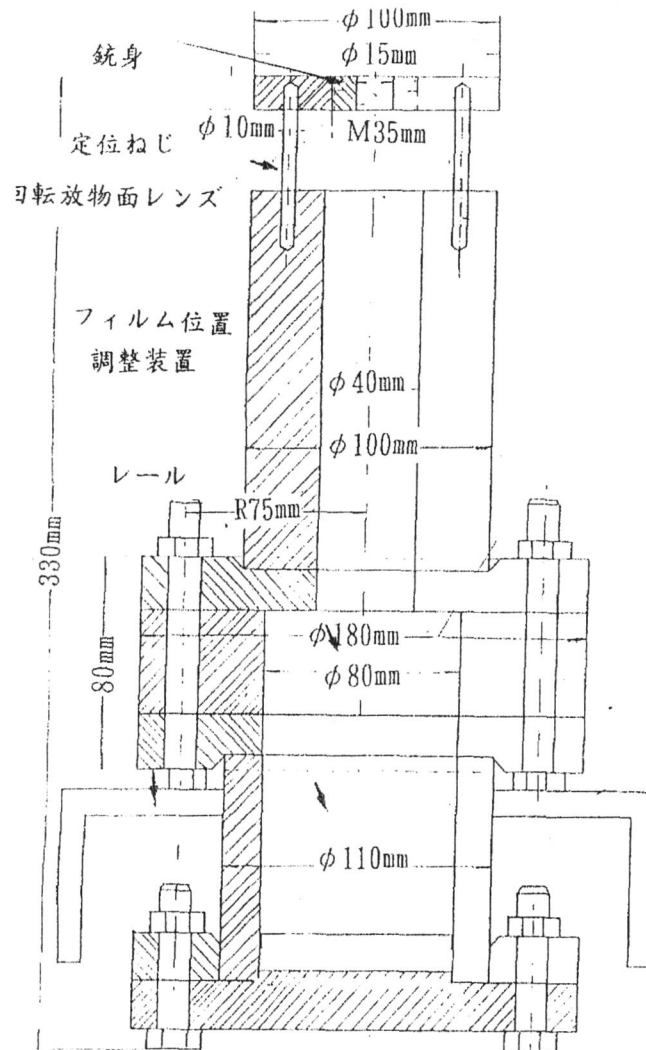


Fig. 2-12 改造水槽の中心軸と弾道を一致させる方法<sup>2-7)</sup>

翔体)の総質量はそれぞれ 10.3 g と 4.3 g である。

#### 2.1.6 円筒形水槽

本研究で最初に使用した水槽の概略図と外観を **Fig.2-8** に示す。S15C 鋼製の外径  $D=150\text{mm}$ 、内径  $d=40\text{mm}$ 、高さ  $H=160\text{mm}$  の円筒で、その下部に接して反射板レンズの装填部（外径  $280\text{mm}$ 、内径  $80\text{mm}$ 、高さ  $36.5\text{mm}$  の円板形）があり、さらにその下部に、水槽下部（外径  $D_1=150\text{mm}$ 、内径  $d_1=68\text{mm}$ 、高さ  $H_1=135\text{mm}$ ）がある。3つの部分はフランジ部でボルトにより締め付け、固定されている。水槽、レンズおよび圧力測定フィルムとの空間的位置関係を **Fig.2-10** に示す。（以下、旧型水槽と呼ぶ）

#### 2.1.7 水槽中心軸と弾道を一致させる方法

先行実験で使用した旧型水槽の中心軸と火薬銃の弾道を一致させることが難しいため、水槽を改造した。**Fig.2-9** に示すように、S10C 鋼製で、外径  $D=80\text{mm}$ 、内径  $d=40\text{mm}$ 、高さ  $H=150\text{mm}$  の円筒である。それに接して衝撃波収束用反射板レンズを装填する部分が、さらにそれに水槽下部が接している。また衝撃液圧を測定する場合には、圧力ピックアップを取り付けた厚さ  $15\text{mm}$  の鋼板を円筒水槽下端に、反射板レンズの代わりに取り付けることができる。また、水槽下部には成形金型と被成形金属素板を収納できる。（以下、改造水槽と呼ぶ。）

旧型水槽の場合、**Fig.2-11(a)** に示すように、真空観測室内にレールを敷き、レール上を水槽を載せた台車で動かすようにして左右の位置決めを行い U 字鋼を真空観測室の奥面と水槽との間に設置することで、機械的に水槽中心線と弾道を一致させるようにした。水槽を載せるために台車を **Fig.2-11(b)** に示した。

改造水槽<sup>2-7)</sup>の場合、**Fig.2-12** に示すように、銃身と水槽の中心軸は、銃身の出口端面に設けたピンと水槽上端面に設けたピン穴により機械的に一致させるようになっている。前述のように、真空観測室内にレール設け、その上に水槽を載せて、ストッパーの位置まで押し込め

ば水槽と銃身の中心軸をほぼ一致させることができる。水槽の高さ調整については、真空観測室内の所定の位置まで水槽を押し込んだ後、手製ネジジャッキで水槽を持ち上げ、銃身出口端面のピンが水槽の位置決め穴に入るようにする。

## 第 2. 2 節 弾丸速度の測定

### 2. 2. 1 弾丸速度測定の方法

弾丸速度測定装置を **Fig.2-13** に、外観を **Fig.2-14** に示す、この装置は、図に示すように火薬銃銃身の下端に高さ 70mm、直径  $\phi$  25mm のビニルパイプを取り付けたものである。このビニルパイプに 40mm 間隔で 2 本の銅線 (直径 0.2mm) を弾道と直交するように張り渡し、弾丸がそれらを切断する時間間隔を計測することにより弾丸速度を求める。この時、銅線が切断された信号は **Fig.2-15** に示す回路により発生させ、オシロスコープで測定する。

### 2. 2. 2 測定結果

測定結果の一例を **Fig.2-16** に示す。この場合、弾丸は 40mm の距離を  $110 \mu \text{sec}$  で飛ぶことになるので、速度を  $V_f$ 、飛翔距離を  $S$ 、飛翔時間  $t$  とおくと

$$V_f = S/t \quad (2-1)$$

より、速度は 364m/s と計算できる。但し、これは火薬 1.0g、0.1mm のステンレススチール製ダイヤフラムと純アルミニウム製弾丸を用いたときの結果である。

## 第 2. 3 節 収束用反射板レンズについて

本研究で検討した反射板レンズ (外観は **Fig.2-17** に示す) は **Fig.2-18**

に示す 3 種類で, (a)ロート形レンズ, (b)放物面レンズ及び(c)Exp. レンズである. それらは, いずれも高さ  $h = 36.5\text{mm}$ , 外径  $DD = 80\text{mm}$  の鋼製円柱をくりぬいて製作したものである. レンズ入り口の直径は水槽内径と同じ  $D = 40\text{mm}$ , 出口直径は  $d = 10\text{mm}$  である.

放物面レンズについては, 焦点位置が中心軸上で, 放物線の方程式

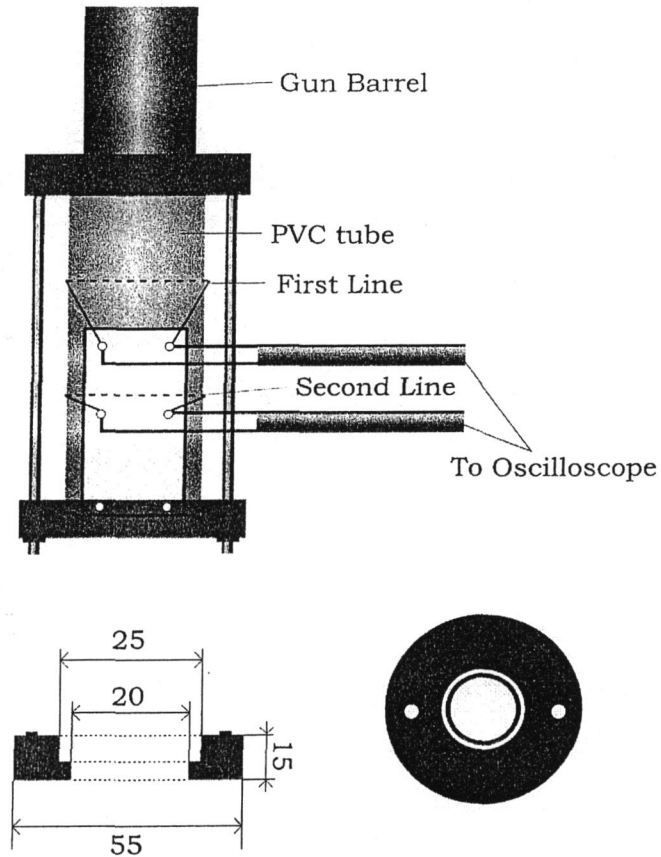


Fig.2-13 速度測定装置概略図 2-6)

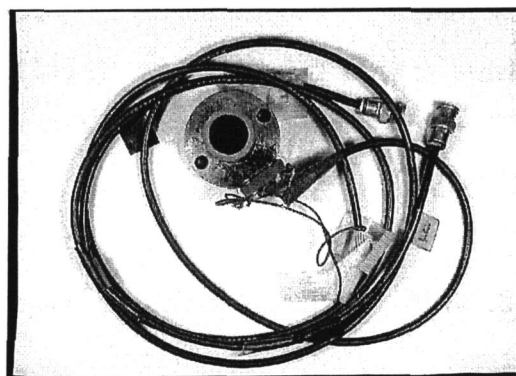


Fig. 2-14 速度測定装置外観

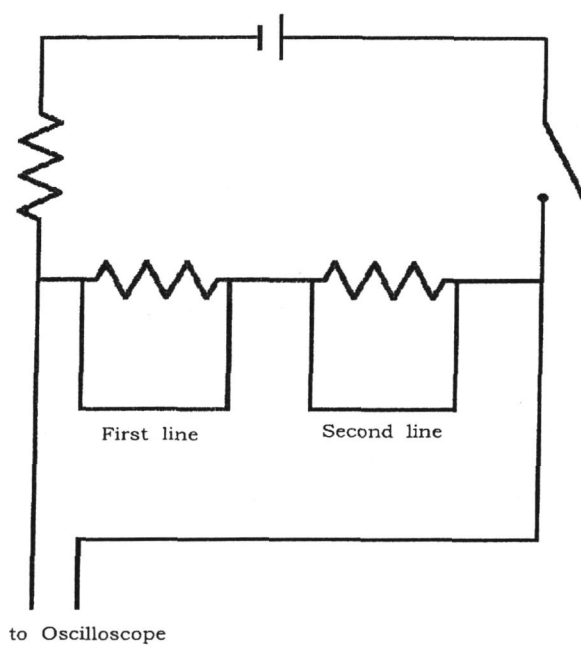
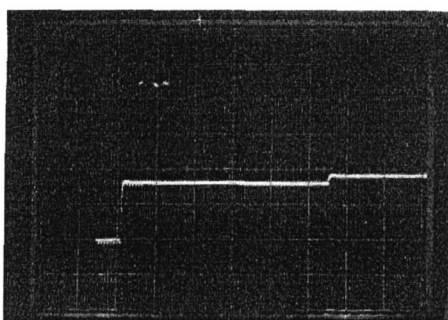


Fig. 2-15 速度測定装置の信号取り出し回路 2-5)



20 $\mu$  s /Div.

Fig.2-16 速度測定結果一例

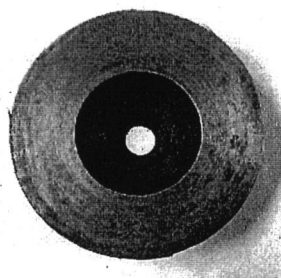
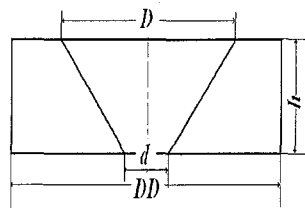


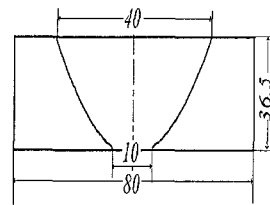
Fig.2-17 回転放物面反射板レンズの外観

$$Y^2 = 4px \quad (2-2)$$

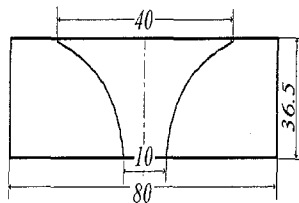
より,  $(x, y)$  をそれぞれ  $(a, 5)$ ,  $(a+36.5, 20)$  とおいて代入すると  $a=2.434$ ,  $p=2.568$  が得られる. すなわちこの放物線における焦点の座標は,  $(2.568, 0)$  になる. このことから, 試作した回転放物面反射板レンズの焦点位置はレンズ出口面より約  $0.134\text{mm}$  上った位置であり, ほぼ出口面位置と同一であることが分かる.



(a) Cone lens



(b) Paraboloid lens



(c) Exp. lens

$DD=80\text{ mm}$

$D=40\text{ mm}$

$h=36.5\text{ mm}$

$d=10\text{ mm}$

Fig. 2-18 本研究で検討した 3 種類の反射板レンズ

また, 超音波の収束レンズのアナロジーにより, 回転 Exp. レンズを試作した.

この場合, 中心軸を X 軸, 半径方向を Y 軸, レンズ出口中心を原点として Exponential 曲線の方程式を次のようにおくと

$$Y = a + e^{qx} \quad (2-3)$$

$a=4\text{ mm}$ ,  $q=0.076/\text{ mm}$  が得られる. 三角形ロート状レンズについては, 上記二つのレンズと同じ入り口直径, 出口直径とした.



## 第 2.4 節 圧力測定フィルムによる反射板レンズの収束性能の検討

### 2.4.1 圧力測定フィルムによる衝撃液圧の測定原理

今回の実験で使用したものは富士フィルム社製高圧用フィルムである。このフィルムの基本原理は、PET の支持体に顕色剤を塗布し、その上にマイクロカプセル化した無色染料を付着させたものである。フィルム内の発色剤層のマイクロカプセルが圧力によって破られて、その中の無色染料が顕色剤に付着して化学反応により色が顕われる。負荷圧力高さによって破壊されるマイクロカプセルの数が増加して発色の濃度が変わるために、その圧痕濃度を検定用標準濃度チャートと比較することによって、圧力値、圧力分布を推定することができる。

### モノシートタイプ

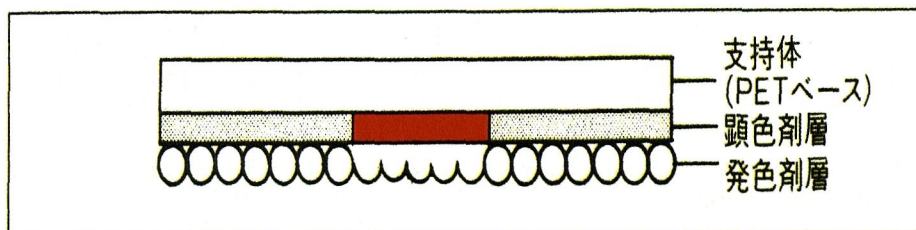


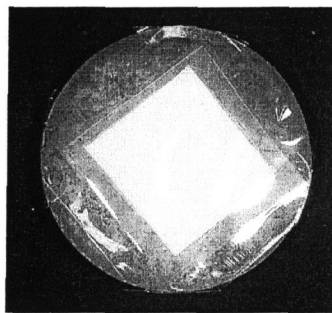
Fig.2-19 圧力測定フィルムの構造<sup>2-8)</sup>

### 2. 4. 2 圧力測定フィルムと圧力測定法

Fig. 2-19 に上述の高圧用圧力測定フィルムの構造を模式的に示す。今回使用した圧力測定フィルムの圧力測定範囲は 0.049~0.13GPa である。また使用湿度範囲が 20%RH~90%RH であるため、フィルムを Fig.2-20 に示すように辺長 25mm 四方形に切り、ビニルシートで両面を覆い封入圧着するパウチ加工し、圧力測定フィルムが水に直接触れないようにした。これを厚さ 10mm のステンレススチール板上に置き、ビニルテープで貼り固定した。

圧力測定フィルムの中心を Fig.2-10, Fig.2-21 に示すように回転放

物面レンズの中心軸と一致させ、且つ圧力測定フィルム面は水槽中心軸に垂直になるようにし、スペーサーあるいは載台を用いて、圧力測定フィルムの上面が放物面レンズ反射板の焦点から決められた位置になるように設置した。水槽、圧力測定フィルムなどをすべて設置したのち衝撃液圧発生用水槽上端まで水を満たした。水槽中心軸と弾道を一致させて、観測室を真空にしたのちに、ポリカーボネイト製弾丸を水槽中心に撃ちこんで衝撃圧力波を発生させ、反射板レンズを用いて収束された平面衝撃圧力波を圧力測定フィルムへ負荷した。



**Fig.2-20** パウチ加工した圧力測定フィルムの設置法

#### 2.4.3 圧力測定フィルムによる衝撃液圧の同定法

負荷圧力は測定フィルムの圧痕の赤色濃度と負荷圧標準チャートの目視比較で同定することができ、また圧力を加えた時の温度条件および加圧条件により選択した PD 特性曲線から、より精度良く圧力値を同定することができる。PD 特性曲線は **Fig. 2-22** に示すようなものである。

#### 2.4.4 実験結果と考察

旧型水槽を用いて、収束衝撃波の負荷実験を突入弾速約 500～1200m/s で行った。負荷実験で得られた圧力測定フィルムの写真を **Fig. 2-23(a), (b), (c), (d), (e)** および **(f)** に示す。(a), (b), (c), (d) および (e) はそれぞれ焦点位置, 焦点から上 1mm, 下 2.5mm, 下 1.5mm および下 1.0mm 位置にフィルムを設置して得られたもの, (f) は焦点

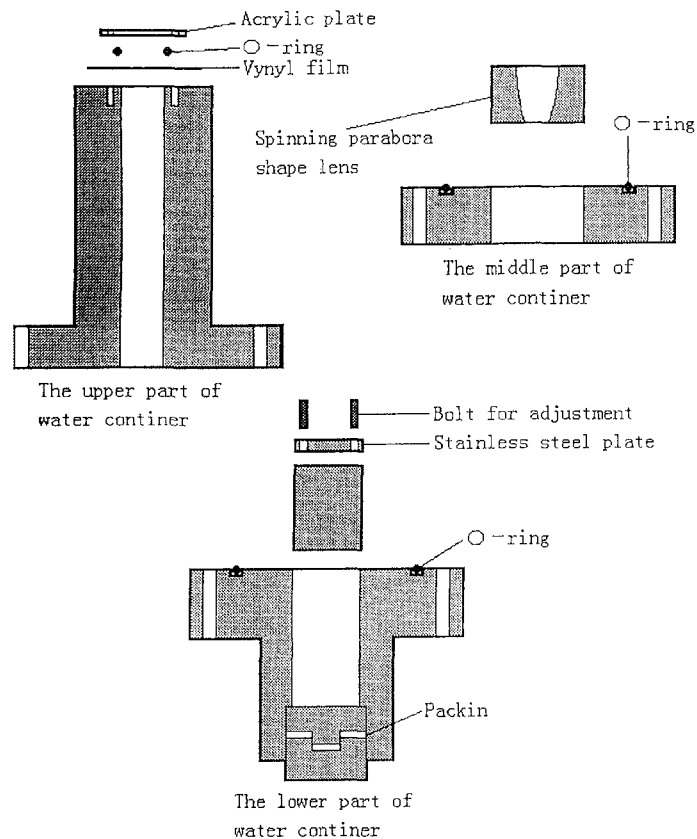


Fig. 2-21 圧力測定フィルムの水槽へのセット方法 2-6)

と同じ位置で，放物面レンズ無しで得られたものである．この実験により，若干のずれがあるものの，放物面レンズ焦点付近に高い圧力が生じることが確認できた．特に(a)，(e)では圧力測定フィルムの中心部分に赤色反応が強いく表われ，その中心部は破れてしまうほどであった．(a)には強い収束効果が表われなかったが，収束レンズを用いていない(f)と比較すると，焦点部分に高い圧力が負荷されたことが分かる．Fig.2-24(a)，(b)，(c)，(d)，(e)および(f)は改造水槽を用いて，前述の実験と同じ弾速で，負荷実験を行い得られた圧力測定フィルムの比較を示したものである．また，Fig.2-25(a)，(b)，(c)および(d)は改造水槽を用い，前述の実験と同様な弾速で，放物面レンズと対応の測定位置で，Exp. 反射板レンズを用い，負荷実験を行い得られた圧力測定フィルムの写真である．旧型水槽の場合，弾丸が水槽の中心に突入する保証が無かったが，改造水槽では，弾道と水槽中心軸とを機械的

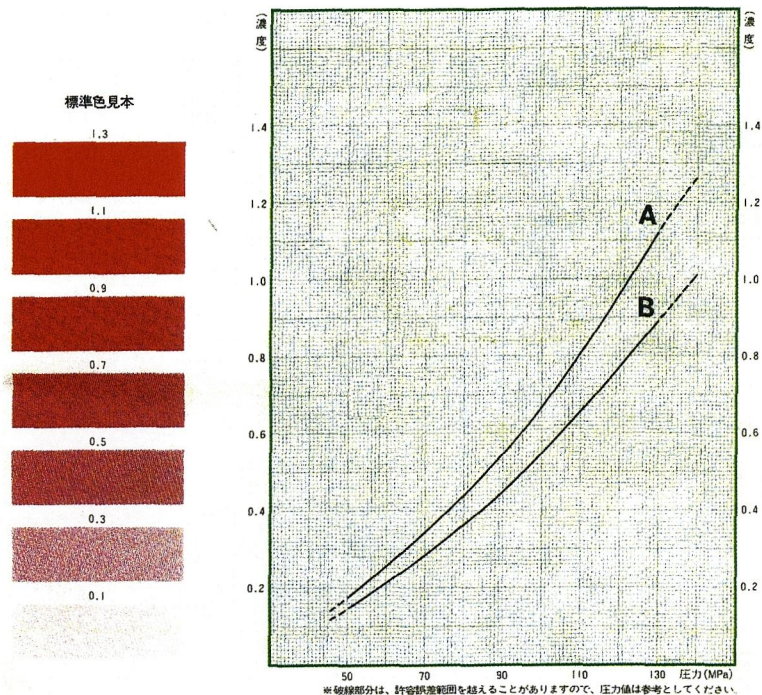


Fig. 2-22 圧力測定フィルムの圧力 PD 特性曲線<sup>2-8)</sup>

機械的に一致させようとしたので、図より、改造水槽の場合、レンズの中心点へ高圧部分が現れていることが分かる。また、Fig.2-25 より、Exp. レンズも収束性能を有することが分かった。しかし、この実験によって、反射板レンズの入り口圧力と出口圧力を比較して収束倍率を求めることができなかった。

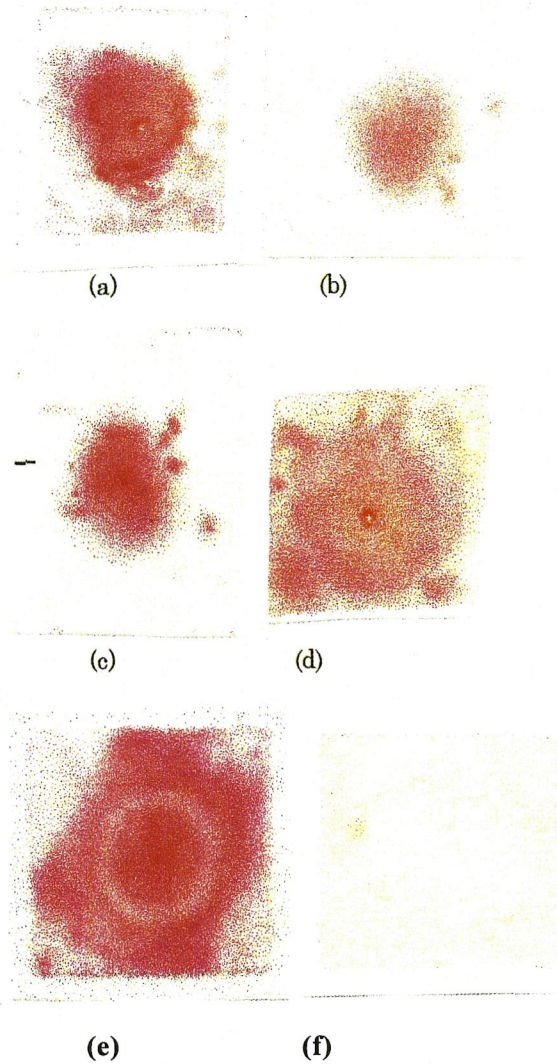
また、本章の実験では、ロート形レンズについての実験は行っていない。

## 第 2.5 節 金属薄板の打ち抜き実験による収束用 反射板レンズの収束性能の検討

### 2.5.1 金属薄板の打ち抜き実験による衝撃圧力の測定原理

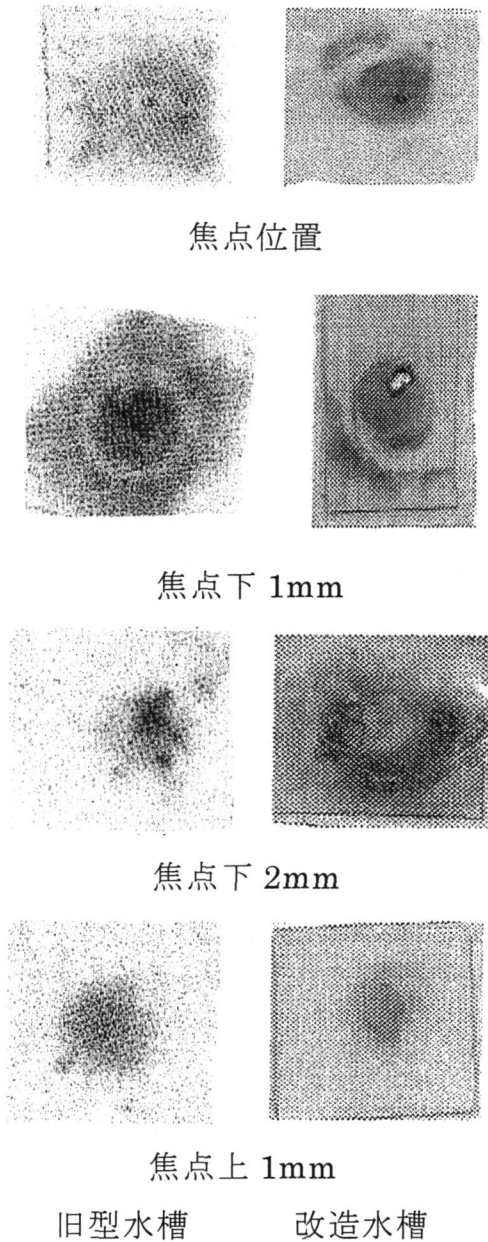
前述の圧力測定フィルムを用いた実験により、反射板レンズの収束性能を検討するには、精度が良くないこと、レンズによって収束された衝撃圧力が圧力測定フィルムの測定範囲を超える可能性があるこ

とおよびフィルムを覆っているビニルシートが破れるなどの理由に



- (a): On focus
- (b): Distance from focus-1. 0mm
- (c): Distance from focus+2. 5mm
- (d): Distance from focus+1. 5mm
- (e): Distance from focus+1. 0mm
- (f): On focus without lens

**Fig.2-23** 圧力測定フィルムによる圧力の測定結果  
(放物面レンズ)

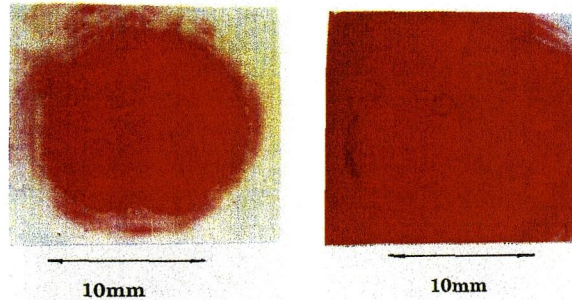


**Fig. 2-24** 旧型水槽と改造水槽を用いた実験結果の比較  
(放物面レンズ)

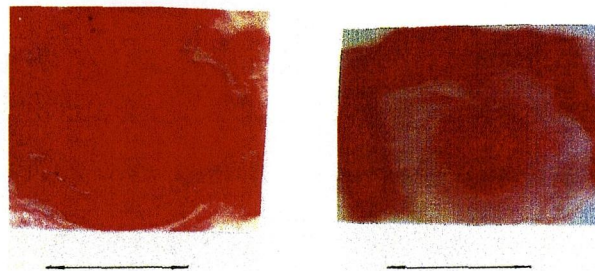
とおよびフィルムを覆っているビニルシートが破れるなどの理由により、この方法は必ずしも優れた方法でないことが判明した。そこで、次に金属薄板の打ち抜き実験による圧力測定を試みた。金属薄板へ丸穴を打ち抜く場合、板厚( $h$ )と穴直径( $d$ )および金属試片のせん断破壊応力 ( $\tau$ ) と負荷圧力 ( $P$ ) との間には次の関係がある。

$$P = 4 h \tau / d$$

(2-4)



(a)放物面レンズの焦点の位置 (b)焦点下 1mm



(c)焦点下 2mm (d)焦点上 1mm

Fig.2-25 圧力分布測定結果 (Exp. レンズ)

### 2.5.2 測定法

本実験に使用した装置は圧力測定フィルムの実験と同じである。Fig. 2-25(a)に示す直径 1.0mm の穴が 2mm の間隔で十文字に並んだ鋼製ダイス(材質は S45C, 焼入れ, 950℃, 1.5 時間, 水冷, 表面は研削加工)の上に辺長 25mm 厚さ 0.1mm の正方形ステンレス板をビニルテープで固定した。穴列の交点が回転放物面反射板レンズの中心軸と一致し, 試片上面が弾道と垂直になるようにして, 圧力測定フィルム実験の場合と同様, 圧力測定位置へ固定した。水槽と試片などを全て設置したのち水槽上端まで水を満たした。水槽中心軸と弾道を一致させ, 観測室を排気にしたのちに, ポリカーボネイト製弾丸を水槽中心に打ち込んで衝撃液圧を発生させ, 放物面レンズによって収束した衝撃圧力波を試片へ負荷した。

### 2.5.3 実験結果と考察

金属薄板の打ち抜き実験で弾丸突入速度が  $500\sim 600\text{m/s}$  の場合、負荷圧力は  $0.25\text{GPa}$  程度と推算された。レンズの焦点位置で実験を行ったものでは、レンズ出口中心付近に高い圧力が負荷され変形しているのが確認できるが、穴を打ち抜くには至らなかった。旧型水槽の場合の実験結果を **Fig.2-26(a), (b)** および **(c)** 示す。それぞれ焦点位置と焦点から  $1.0\text{mm}$  および  $2.5\text{mm}$  下方へ離れた位置で得られたものである。**Fig.2-27(d)** は反射板レンズ無しの場合のものである。

(a) ではレンズ出口面中心付近に収束圧力波によって4つの穴が打ち抜かれている。改造水槽の場合について圧力波の収束状況を詳しく調べるために、直径  $1\text{mm}$ 、間隔  $2\text{mm}$  米文字の丸穴ダイスを試作して (**Fig.2-25(b)**) に示す、材質は S45C、焼入れ、 $950^\circ\text{C}$ 、1.5 時間、水冷、表面は研削加工)、旧型水槽と同じ条件で行った実験結果を **Fig.2-27(a),(b)** (焦点と焦点下  $1.0\text{mm}$ ) に示す。これらの実験によって、レンズ無しの場合、圧力波が収束していないため、穴は打ち抜けず負荷圧力が低いことが明らかになり、一方、穴が打ち抜けた回転放物面反射板レンズには収束性能が有ることが明らかになった。しかし、この方法によっても、収束倍率について数値的に検討することはできなかった。

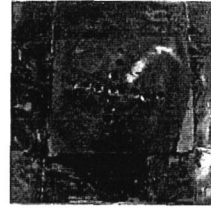
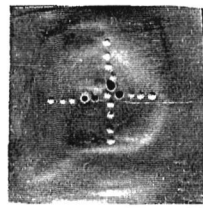


(a). 十字ダイス

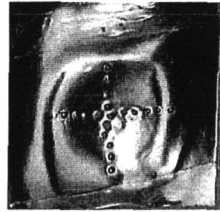
(b)米文字ダイス

**Fig.2-25** 金属薄板打ち抜き実験用ダイス



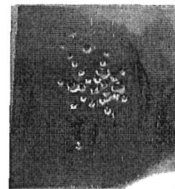
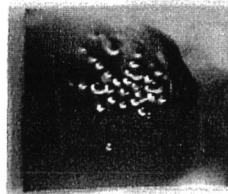


(a) 焦点位置 (b) 焦点下 1.0mm



(c)焦点下 2.5mm (d)焦点位置 (レンズ無し)

Fig.2-26 十字ダイスによる金属薄板打ち抜き実験結果



(a) 焦点 (b) 焦点下 1.0mm

Fig.2-27 米文字ダイスによる金属薄板打ち抜き実験結果

## 第2. 6節 鉛板の圧印実験による反射板レンズの収束性能に関する検討

前二者の実験的検討に加え、軟金属の圧縮変形量から圧力分布を推定する試みを行った。

今回軟金属として鉛板を用いた。(鉛板は常温下で焼鈍されるので、焼鈍の必要は無い) 辺長 25mm 厚さは 2mm の正方形の試片を放物面レンズの焦点位置に置いた鋼製台上にビニルテープで固定した。鉛板試片の中心が回転放物面反射板レンズの中心軸と一致するようにし、試片上面は弾道と垂直になるようにした。水槽と試片などを全て設置したのち水槽上端まで水を満たした。水槽中心軸と弾道を一致させ、

観測室を排気したのちに，ポリカーボネイト製弾丸を水槽中心に撃ち込んで衝撃液圧を発生させ，放物面レンズによって収束した衝撃圧力波を試片へ負荷した．

鉛板圧印実験は改造水槽を用いて行い，弾速約 500m/s 得られた結果を Fig.2-28 に示す．Fig.2-29 は同じ条件で反射板レンズを用いない場合の実験結果である．この実験によっても，放物面レンズは衝撃液圧を収束できることが分かった．



Fig.2-28 鉛板圧印実験（放物面レンズを使用，焦点面）



Fig. 2-29 鉛板圧印実験（放物面レンズ無し）

## 第2. 7節 結 論

以上，圧力測定フィルムと金属薄板の打ち抜きおよび鉛板圧印実験によって，放物面レンズおよび Exp. レンズは火薬銃で加速した弾丸の水中への突入により発生させた衝撃液圧に対して収束性能を持っていることが分かった．しかし，これらいずれの実験方法によっても，レンズの収束性能の詳細を明らかにすることができないことが分かった．また，できたとしてもこれらの実験方法で明らかにできるのは，

経時的な圧力波の収束性能ではなく，時間積分的な収束性能である．レンズにより収束された水中平面衝撃波の経時的な圧力分布を知ることは現存の実験技術では不可能に近い．以上，これらの実験的検討の結果，本研究の遂行のためには理論解析的手法を導入せざるを得ないことが明らかになった．測定フィルムの場合収束した負荷圧力の範囲を明確にすることができず，また，収束倍率の解明はできなかった．

#### 参考文献

- 2-1)小川欽也，材料 47-1，20-25 (1998)
- 2-2)山田敏郎，可児弘毅；高速弾丸の水中へ突入により発生する衝撃液圧を用いた高速塑性加工，塑性と加工，Vol. 18，No. 192，35 (1977-1)
- 2-3)文献 2-2) と同じ
- 2-4)山田敏郎，可児弘毅；衝撃高液圧による金属義歯床の成形，日本複合材料学会誌，Vol. 4，NO. 3，93 (1978)
- 2-5)守谷和幸；水中収束衝撃波に関する研究，岡山大学大学院教育学研究課修論，21 (1998)
- 2-6) 胡習之・守谷和幸・岡田貴宏・可児弘毅:49 回塑加連講論，(1998)，433-434.
- 2-7) 胡習之・可児弘毅:50 回塑加連講論， (1999)，245-246.
- 2-8) 富士写真フィルム株式会社：説明書「圧力測定フィルム使い方」

## 第3章 LS-DYNAによる収束反射板レンズの収束性能の数値解析的 検討

### 第3.1節 数値解析的手法について

前章での実験的検討の結果、反射板レンズに収束効果のあることは明らかになったが、収束性能の詳細について知ることは不可能に近いことが分かった。その結果、本研究遂行のためには、数値解析的手法を導入せざるを得ないことも分かった。そこで、本研究ではパソコンでも使用可能な衝撃現象解析用市販ソフト LS-DYNA<sup>3-1)</sup>を導入することにした。しかし、この種のソフトは、導入して直ぐに実用できるわけではなく、解析結果と実験結果を比較しながら、計算の精度を上げるため、ソフトに含まれる各種設定の適切化をはからなければならない。本研究の主題について、検討する前に、この解析プログラムにおいて、モデルの設定、諸条件の設定が適切に行なわれ、計算が適切に行われているかどうかを確認するため、まず水中へ突入する弾丸の水との衝突による高速変形の解析精度を確認した。そのため、高純度アルミ製弾丸を剛壁へ衝突させた時の変形形状について、実験の結果と数値解析結果を比較した。円柱状弾丸が剛壁へ高速衝突した時の弾丸の衝突後の形状を求め、計算法の適切化をはかった。次に、弾丸の突入により水中に発生する衝撃波の伝播について圧力測定を行い、解析結果と比較することにより計算精度の向上をはかった。以上の検討後、本研究の主題、すなわちレンズ形状が収束性能に及ぼす効果、弾丸形状、弾丸の材質、弾丸の突入速度などが発生圧力に及ぼす効果を検討した。

#### 3.1.1 LS-DYNA について

LS-DYNA は非線形有限要素法衝撃問題解析用計算コードである。式(3-1)は、有限要素法による衝撃問題の数値解析に用いられるマトリックス表示の運動方程式である。

$$[M] \{\ddot{\mu}\} + [C] \{\dot{\mu}\} + [K] \{\mu\} = \{f\} \quad (3-1)^{3-2)}$$

ここで[M]は質量マトリックス，[C]は減衰マトリックス，[K]は剛性マトリックス， $\{\mu\}$ は節点変位ベクトル， $\{\dot{\mu}\}$ は節点速度ベクトル， $\{\ddot{\mu}\}$ は節点加速度ベクトル， $\{f\}$ は外力ベクトルである。

この方程式を解く方法には中心差分法<sup>3-3),3-4)</sup>，Wilson  $\theta$  法及び Newmark  $\beta$  法等がある．陽解法では中心差分法を用いる．陰解法では Wilson  $\theta$  法及び Newmark  $\beta$  法を用いる．LS-DYNA は非線形解析手法として，動的陽解法と言われる収束計算を行わない方法を採用している．すなわち質量マトリックスが対角化されていて，連立方程式を解く必要がないため，運動方程式は時間増分形式で扱うようになっている．各増分毎に収束計算は行わず，増分の幅は極めて細かくなり，計算の回数は膨大になるが，計算時間はさほど増えない<sup>3-5)</sup>．また，パソコンの CPU 計算時間を予測できるし，プログラム内で十分計算精度が保たれるように自動ストップコントロールを行っている．計算量は以前のソフトに比べて，非常に少なくなっている．計算における時間ステップ  $\Delta t$  は次式で定義される<sup>3-6),3-7)</sup>．

$$\Delta t \leq \alpha l_{\min} / c \quad (3-2)$$

ここで  $l_{\min}$  は節点間最小距離（メッシュサイズ）， $c$  は 3 次元体の応力伝播速度， $\alpha$  は減衰係数に関する定数である．減衰無しの場合 1 に設定する．

### 3.1.2 ひずみ速度依存弾塑性モデル<sup>3-1) 3-5)</sup>

高速飛翔物体の衝突，衝撃力を受けた物体の高速変形解析など高速で変形する金属材料に関しては材料のひずみ速度依存性を考慮する必要があるが，自動車衝突解析のような比較的低いひずみ速度（1～10s<sup>-1</sup>）の場合であってもひずみ速度の影響が無視できない場合がある．代表的なひずみ速度依存モデルとしては Cowper-Symonds モデルが

ある。これは弾塑性材料において、ひずみ速度  $\dot{\epsilon}$  の関数として降伏応力をスケールリングする係数を

$$1 + (\dot{\epsilon}/c)^{1/p} \quad (3-3)$$

と置くものである。パラメータ  $C$  と  $p$  は高速引っ張り試験により測定する。このひずみ速度依存係数の定義は単独の物性モデルとしてではなく、既存の弾塑性モデルにひずみ速度依存性をもたせるために組み込まれている。また LS-DYNA にはひずみ依存性をパラメータとして表すのではなく、ひずみ速度ごとに複数の応力-ひずみ曲線を入力する形式も用意されている。

さらにより高速なひずみ速度域には Johnson-Cook ひずみ依存モデルが用意されている。Johnson-Cook モデルは Von Mises の流動応力（降伏応力）を次式により定義している。

$$\sigma_Y = (A + B \bar{\epsilon}^n) (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - T^{*m}) \quad (3-4)$$

ここでは相当塑性ひずみ、 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $m$  および  $n$  は入力パラメータである。また

$$\dot{\epsilon}^* = \bar{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0 \quad (3-5)$$

は無次元の塑性ひずみ速度であり

$$\dot{\epsilon}_0 = 1.0 \text{ s}^{-1} \quad (3-6)$$

である。又このモデルは高速変形にともなう材料の温度変化を考慮することができ、材料の熔融温度  $T_{\text{melt}}$  および温室  $T_{\text{room}}$  により正規化された材料温度は次式で定義される。

$$T^* = (T - T_{\text{room}}) / (T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}) \quad (3-7)$$

温度変化は材料の変形にともなうひずみエネルギー  $e$  より

$$T = T_{\text{room}} + e / c_p \quad (3-8)$$

により計算される。ここで  $C_p$  は比熱である。

### 3.1.3 衝撃塑性の構成式<sup>3-8) 3-9)</sup>

よく知られているように、金属材料の応力-ひずみ曲線は高ひずみ速度になるほど同一ひずみに対して応力が高い側にずれる。ただし、弾性領域には速度依存性がないとするのが通説である。静的な塑性理論と同様に弾性ひずみと塑性ひずみの加算性を仮定すると、単軸応力状態に対し

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}^e + \dot{\epsilon}^p = \sigma / E + \dot{\epsilon}^p \quad (3-9)$$

と表わせる。

衝撃的な負荷（目安として  $\dot{\epsilon} \doteq 10^2 \sim 10^4 \text{s}^{-1}$  程度）を受けたとき、このひずみ速度の塑性成分  $\dot{\epsilon}^p$  と応力、ひずみおよび応力速度を関係付けることが本項の課題である。

速度依存の構成式として、Cristescu<sup>3-10)</sup>によるつぎの表示が一般的である。

$$\dot{\epsilon}^p = \varphi(\sigma, \epsilon) \delta + \psi(\sigma, \epsilon) \quad (3-10)$$

式(3-10)において、右辺第1項は瞬間的塑性応答の成分を表しているが、関数  $\varphi$  についての具体的な提案が皆無に等しく、通常は無視される。これまでの研究は、第2項の非瞬間的塑性応答を検討することに集中している。

非瞬間的塑性応答関数  $\psi$  を陽に表示しようとするとき、単純にマクロな物体の粘塑性として扱うことが可能であるし、塑性変形の本質が転位の移動であるから転位の動力学に基づくアプローチも可能である。転位の動力学に基づいて提案された式は、多軸応力状態への拡張が困難あるいは繁雑になりがちである。以下では、多軸応力状態に対して提案され変形解析によく用いられる Perzyna 形の構成式 (3-11) について説明しておく。

単軸状態に対する Malvern-Sokolovskii の構成式から出発し、適当な速度で変形してひずみが  $\varepsilon$  に達した瞬間の塑性ひずみ速度をつぎのように記述する。

$$\dot{\varepsilon}^p = \gamma_M \{ \sigma - f(\varepsilon) \} / E \quad (3-11)$$

ここで、 $\gamma_M$  は材料定数、 $\sigma$  は実際に発生している応力、 $f(\varepsilon)$  は静的な応力-ひずみ曲線上の  $\varepsilon$  に対応する応力である。したがって、括弧内の  $\sigma - f(\varepsilon)$  は過応力 (overstress) と言われる。

Perzyna は、過応力の考えに基づく式(3-11)を、Mises 理論と組み合わせた形でつぎのように多軸応力状態に拡張した。ただし、以下では偏差成分のみを表示する。

$$\text{降伏条件:} \quad \sqrt{J_2} - k \geq 0 \quad (3-12)$$

$$\text{ただし,} \quad J_2 = (1/2)\sigma_{ij}'\sigma_{ij}' = (1/3)\bar{\sigma}^2 \quad (3-13)$$

$$\text{流れ則:} \quad e_{ij} = \frac{\sigma_{ij}'}{2G} + \gamma_p \langle \Phi(F) \rangle \frac{\sigma_{ij}'}{\sqrt{J_2}} \quad (3-14)$$

$$\text{ただし,} \quad \langle \Phi(F) \rangle = \begin{cases} \Phi(F) & F \geq 0 \\ 0 & F < 0 \end{cases} \quad (3-15)$$

$$F = \frac{\sqrt{J_2}}{k} - 1 \quad (3-16)$$



式 (3-16) の  $F$  が過応力を表している。また、関数  $\Phi(F)$  の具体例には、単純に  $\Phi = F$  とおくもののほか、転位の活性化エネルギーと結び付けた次式が提案されている。

$$\Phi(F) = \text{Exp}(\alpha F) - 1 \quad (3-17)$$

### 第3. 2節 数値解析精度確認ための実験 (固体の高速変形)

#### 3.2.1 純アルミニウム製弾丸の剛壁への衝突実験

##### (固体の高速変形)

実験は前述した火薬銃<sup>3-11),3-12)</sup>を用いて、衝突面にグリースを塗布した純アルミニウム製弾丸 (直径: 15.6mm, 長さ: 20mm, 材質: A1070BD-F<sup>3-13)</sup>, 焼き鈍し: 300°Cで1時間, 炉冷,) を S45C の直径 100mm, 厚さ 15mm の鋼板 (Fig.3-1 に示す) へ垂直に衝突させた。弾丸の形は 2.1.5 に述べた円柱形であり, 衝突後の形状計測に便利のために, 円柱表面に 1mm 間隔で細線をけがいた。弾丸の衝突速度は装填火薬量により調整し, 火薬量はポリカーボネイト製弾丸の場合より多くて, 0.2 から 0.5 g とした<sup>3-14)~3-18)</sup>。これに対し, 衝突速度は 200~666m/s であった。衝突後の弾丸の変形形状はマイクロメータを用いて測定した。Fig.3-2(a), (b), (c)および(d)はそれぞれ衝突弾速 200, 300, 450 および 666m/s の場合弾丸衝突後の形状である。

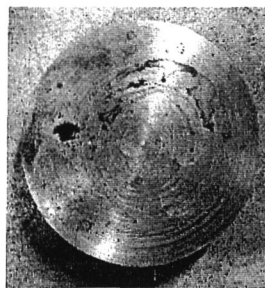


Fig. 3-1 弾丸の標的鋼板

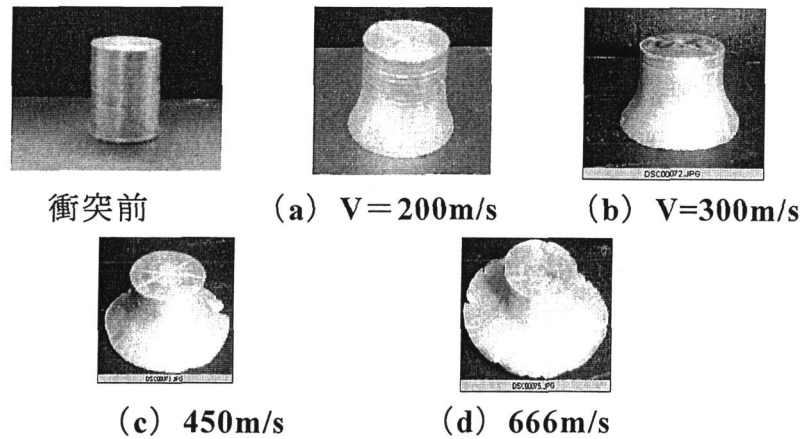


Fig. 3-2 衝突前と衝突後の弾丸形状

### 第 3. 3 節 固体の高速変形の実験結果と数値解析結果の比較

#### 3. 3. 1 固体の高速変形の数値解析

前述したように、ここでの数値解析では、先ずこの解析プログラムを使用するにあたって、本研究で行ったモデルの設定、諸条件の設定が適切であり、計算が適切に行われているかどうかを確認するため、純アルミニウム製弾丸を剛壁へ衝突させた時の変形形状について、実験結果と数値解析結果を比較した。円柱状弾丸が剛壁へ高速衝突した時の弾丸の衝突後の形状を求め比較した。

解析では、内蔵のモデル設定用プレプロセッサ **FEMB** を利用して<sup>3-19)~3-22)</sup>、弾丸と剛壁に見立てた鋼板を 2つのパートとし、それらを 3次元要素の 12線 8節点ソリッド要素に分割した。(Fig.3-3 に示す) 材料特性として、純アルミニウムに対しては、ひずみ速度の影響を考慮した多直線近似弾塑性体とし、剛壁に見立てた焼入れした鋼板は変形が小さいので剛体と近似した。ひずみ速度の影響を考慮した応力-ひずみ関係は、純アルミニウム(A1060-0)、(A1100-0)の高ひずみ速度下の文献データを参考にして求めた<sup>3-25)~3-28)</sup>。

弾丸の要素は 8点積分要素(精密)で、剛体板の要素は 1点積分要素を選んだ。弾丸と剛体板間の摩擦係数は 0 に近似して 0.001 と設定し

た．アルミニウムについては，密度  $2.69 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  ，ヤング率  $70.3\text{GPa}$  ，ポアソン比  $0.345$  とし，焼入れ S45C 鋼の剛体板については，密度  $7.80 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  ，ヤング率  $208\text{GPa}$  ，ポアソン比  $0.30$  を設定した<sup>3-13)</sup>．弾丸の衝突速度は，実験に合わせて設定した．

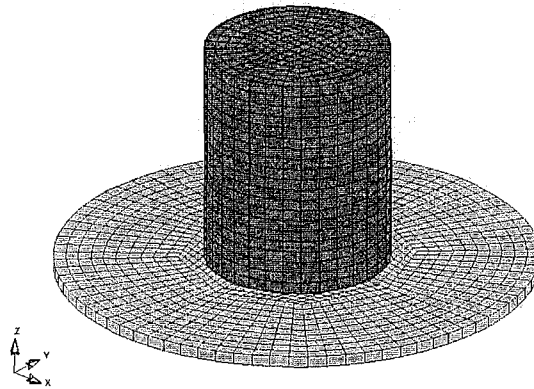


Fig. 3-3 弾丸ソリット要素の分割

### 3. 3. 2 解析結果と実験結果に基づく考察

Fig.3-4 に弾丸衝突速度  $200, 300, 450$  及び  $666\text{m/s}$  の衝突後の弾丸形状について数値解析結果とマイクロメータで測定された実験結果の比較を示す．図中，細い実線は解析結果で，●印は測定結果であり，▲印はひずみ速度の影響を考慮しない応力-ひずみの関係を用いて解析した結果である．図より，低速度衝突の場合，解析結果と実験結果はよく一致していることが分かる．高速度衝突の場合，材料特性にひずみ速度の影響を考慮しない応力-ひずみの関係を用いて解析した結果は，実験結果と良く合わないが，ひずみ速度(衝突速度  $666\text{m/s}$  場合  $100/\text{sec}$  程度)の影響を考慮すると実験結果と非常に良い一致を示すことが分かる．

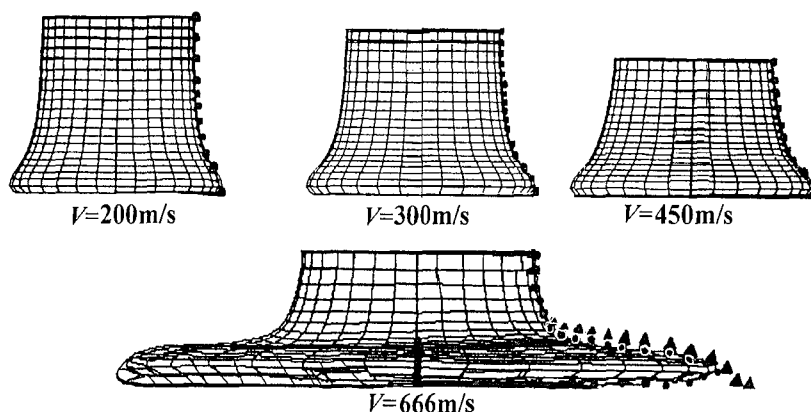
低速度衝突の場合，最大変形部分で誤差は  $5\%$  程度であり，高速度衝突でひずみ速度の影響を考慮しない場合，誤差は  $10\sim 20\%$  程度となるが，考慮すると  $10\%$  以内に減少する．

純アルミニウムの高速変形においては，応力-ひずみの関係にひず

み速度の考慮が必要なことが分かる。今回の実験で用いた純アルミニウム材料では，最大変形部分のひずみ速度は解析では  $100 \text{ s}^{-1}$  程度になり，それを考慮すると降伏応力は 150%程度，引張り強度は 50%程度，静的な場合に比較して上昇することになり，これを用いて良い数値解析結果が得られた。

一方，もし解析方法が確立されれば，材料の変形形状の解析結果と実験結果を比較することにより逆にひずみ速度を考慮した応力-ひずみ曲線を推定できる可能性も考えられる。

以上の結果より，固体の高速変形の解析において，材料の応力-ひずみ関係の適切なものを用いれば，本数値解析法で，かなりの高精度で実験結果を予測することができることが明らかになった。



Solid line : analytical results

●: experimental results

▲: analytical results without consideration of strain rate effects in stress-strain relation

**Fig.3-4** 剛壁へ衝突した弾丸形状の実験結果と数値解析結果の比較

### 第 3. 4 節 数値解析精度確認のための実験 (衝撃水圧の発生と伝播)

### 3.4.1 水晶圧電ピックアップによる衝撃液圧の計測

液中における圧力波の発生と伝播の数値解析精度を確認するために Sandia 研究所の Jones ら (1962)<sup>3-23)</sup>, Graham ら (1965)<sup>3-24)</sup> が開発した水晶圧電ピックアップを用いて衝撃圧力波を測定した。ここで使用した水晶圧電ピックアップの測定原理について簡単に説明する, ステンレス鋼の受圧ダイヤフラムは変換器本体のステンレス鋼製円筒先端に溶接されている。それに接して圧電効果を有する水晶素子を取り付けられている (縦方向効果)。測定圧力波はダイヤフラムを通じて水晶圧電素子に伝わる。つまり圧力  $P$  を電荷  $Q$  に変換する。温度の影響が非常に少なくなるように特殊な構造になっている。

### 3.4.2 衝撃液圧の測定方法と測定結果

上述のピックアップはキスラー社製の受圧面直径 5.5mm のもので, その圧力測定範囲は 100MPa まで, 固有振動数は約 150kHz である。Fig.3-5 に示すように圧力ピックアップは円筒水槽下端にレンズの代わりに厚さ 15mm の鋼板を底板として取り付け, その鋼板に圧力ピックアップと水槽の中心軸が一致し, ピックアップ受圧表面が底板表面と一致するよう固定設置した。取り付ける方法は Fig.3-6 に示した。圧力変換器の電荷信号はキスラー社製チャージアンプで電荷に比例した出力電圧に増巾変換される。

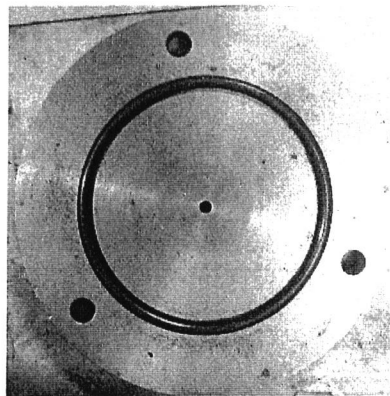


Fig.3-5 圧力ピックアップの取り付け板

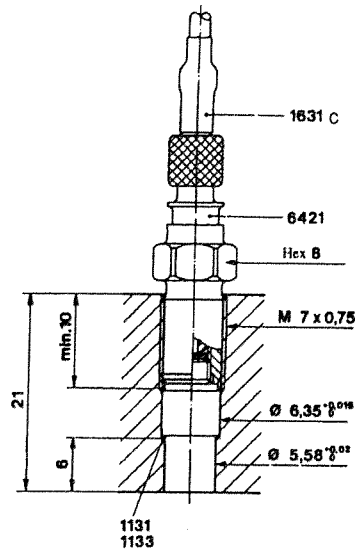
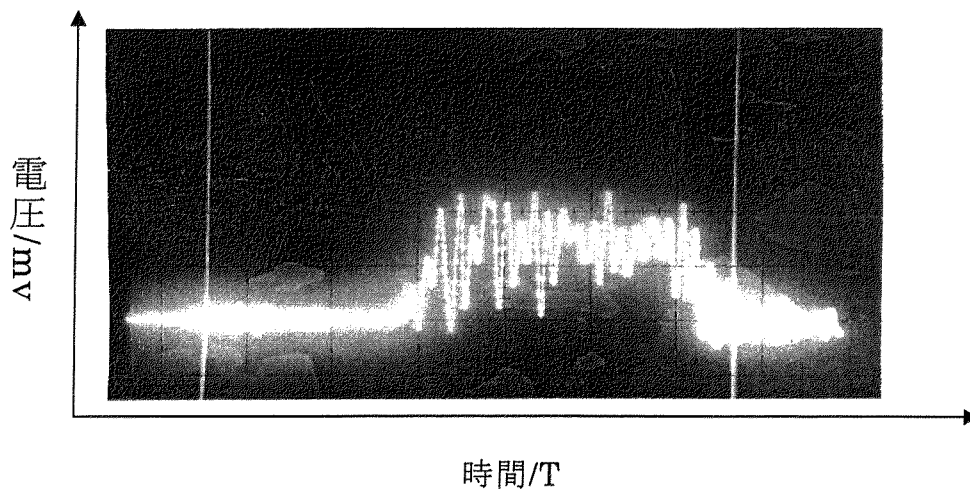


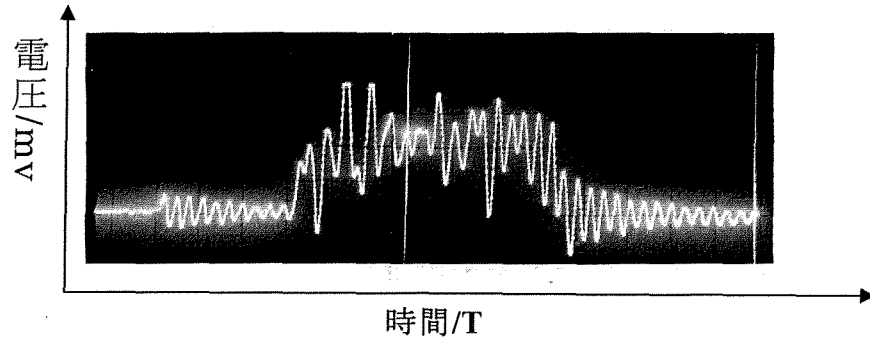
Fig.3-6 圧力ピックアップの取り付け方<sup>3-23)</sup>

水中の圧力波の測定実験は前述と同じ材質 (A1070BD-F) の純アルミニウム製弾丸を用いて、圧力ピックアップの圧力測定範囲は 100MPa までなので、火薬量を 0.1~0.5 g とし、低い突入弾速により行った。Fig. 3-7(a), (b), (c), (d) および (e) はそれぞれ弾丸突入速度 130, 150, 200, 230 および 360m/s の時の水槽底面中心点の圧力波形である。横軸は時間 ( $\mu s$ ) 縦軸は電圧 (mV)

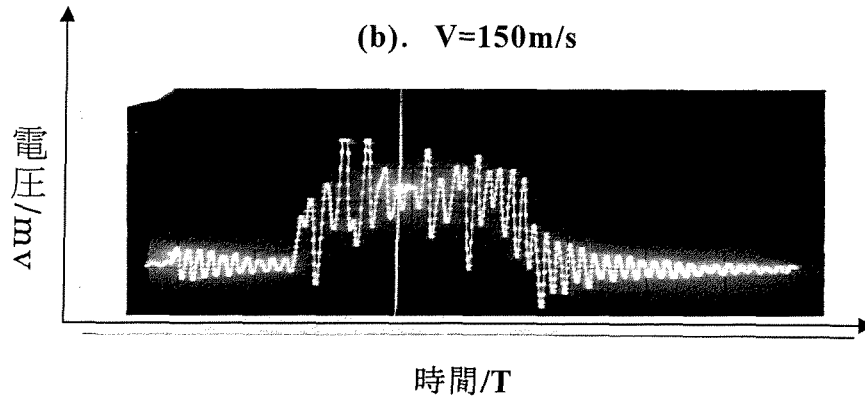


(a).  $V=130m/s$

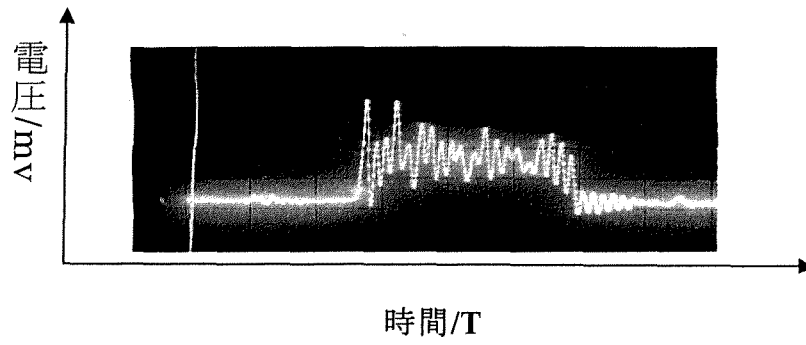
Fig.3-7 圧力波の測定結果 (次のページ続く)



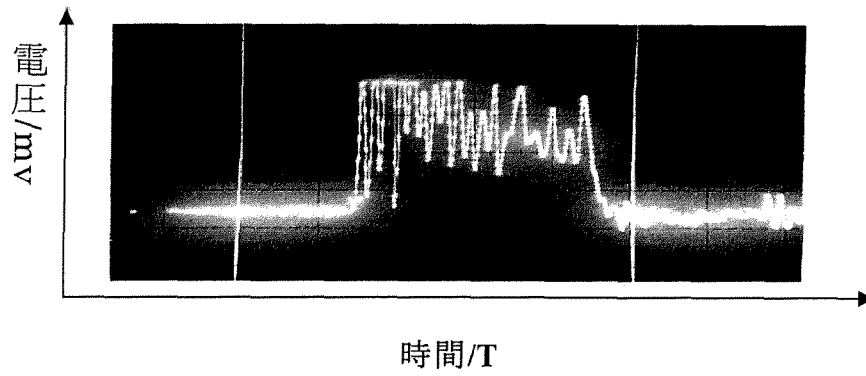
(b).  $V=150\text{m/s}$



(c).  $V=200\text{m/s}$



(d).  $V=230\text{m/s}$



(e).  $V=360\text{m/s}$

Fig.3-7 圧力波の測定結果

図に示す圧力波形に重畳している高振動の波形は、圧力ピックアップの固有振動に起因するもので、振動数は、圧力ピックアップの特性データとよく一致し、約 150kHz である。また、圧力波の立ち上がり前に基線上に現れている小振幅の振動は、弾丸が水槽水面に突入した時発生した圧力波が水槽壁面中を伝播し、水中を伝播する圧力波に先がけて圧力ピックアップへ到達したものと考えられる。圧力波の立ち上がり時刻と基線上の小振動の開始時刻との差は、圧力波が水中と鋼中を伝播する時間差とよく一致することが分かった。

### 3.4.3 水中の圧力波の発生と伝播についての数値解析

(流体と構造物との連成問題<sup>3-1)</sup>)

流体と構造物との連成問題は工学的に重要な課題のひとつであり様々なアプローチがとられているが、その中の代表的な手法は Lagrange 要素と Euler 要素とのカップリングがあげられる。カップリングの方法については幾つかのバリエーションが考えられるが、そのうちのひとつは構造物を表わす Lagrange 要素を流体を表わす Euler 要素に埋め込む方法である。Fig. 3-8 に概念図を示す。これは流体要素の中にシェル要素を埋め込んだ場合を示す。格子状の Euler 要素の中にシェル要素 (図はシェル要素の断面を示す) が埋め込まれている。連成のアルゴリズムを簡単に記すと以下のようなになる。

- 1) シェル要素の節点を含む Euler 要素を選び出す。
- 2) シェル要素の節点 (図の●) のもつ物理量 (運動量, 節点力等) を形状関数を用いて Euler 要素の節点に振り分ける。
- 3) Euler 要素の更新を行なう。
- 4) Euler 要素の圧力をシェル要素に負荷する。
- 5) シェル要素の変位・応力を求める。
- 6) 次のステップに進む。

この機能により、燃料備蓄タンクのスロッシング、配管のウォータ一ハンマ現象などの流体・構造物連成問題の解析が可能となる。



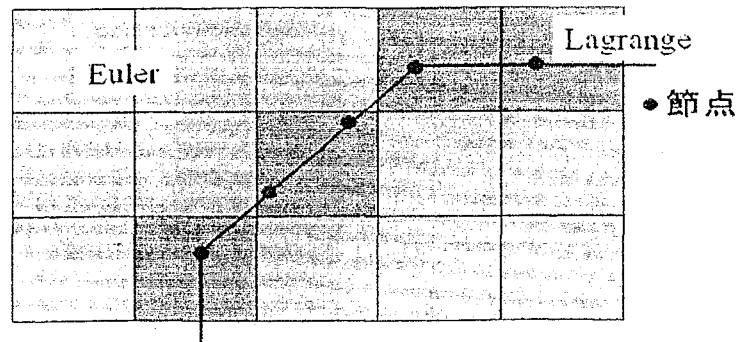


Fig.3-8 流体・構造連成解析の概念図 <sup>3-1)</sup>

#### 3.4.4 水に対するモデルの設定

水に対するモデルの設定としては、水と水槽、弾丸の接触条件等の設定が適切に行われ、計算が適切に行われていることを確認するため、純アルミニウム製弾丸を水槽へ突入させ、水中に発生した衝撃波の圧力について、実験結果と数値解析結果を比較した。前述したように、円柱状アルミニウム製弾丸を水を満たした円筒状水槽へ突入させ、発生した衝撃波の圧力を小型圧電式圧力ピックアップを用いて測定した。数値解析では、前述の FEMB を利用して、弾丸と水槽、水と Void<sup>3-5)</sup> (計算の必要上、要素に分割した空の空間) を 4 つのパートとし、(Fig.3-9 に示す) それらを 3 次元要素の 12 線 8 節点ソリッド要素に分割した。純アルミニウム製弾丸の材料特性は前述のものと同じで、ひずみ速度の影響を考慮した多直線近似弾塑性体と設定した。水槽は水に比べ剛性が非常に大きく、変形が無視できるので剛性材料とした。水に対しては衝撃圧縮に対する状態方程式 (LS-DYNA では EOS 方程式と分類される状態方程式) を用いたオイラー流体要素を設定した。したがって、弾丸、水、水槽の要素について、EOS 方程式を使うため、すべて 1 点積分要素とした。弾丸突入速度( $V$ )は実験に合わせて 130, 150, 200, 230 及び 360m/s に設定した。

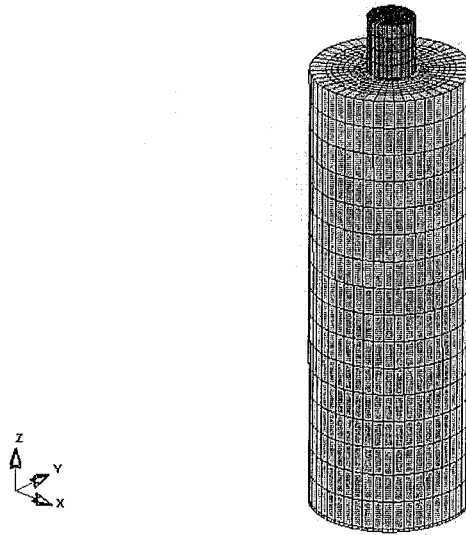


Fig.3-9 水中衝撃波伝播問題解析用要素分割

上述した計算の適切性を確認した後、収束用反射板レンズの収束性能を数値解析により究明した。数値解析では、同じ内蔵のプレプロセッサ-FEMB を用いて、弾丸、水槽、水及び void、収束レンズなどを5つのパートとし、3次元要素の12線8節点ソリッド要素に分割した。弾丸と水の干渉の設定はラグランジュ要素とオイラー要素との相互干渉を設定した。水と水槽、水と各収束レンズとの干渉についても同様な設定とした。弾丸の材料特性の設定は前述のものと同じで、水槽と収束レンズは剛体と設定した。水の材料特性としては衝撃圧縮に対する状態方程式を参考にし<sup>3-27)~3-29)</sup>、式3-18、3-19の多項式の状態方程式に近似して用いた。

$$P=C_1\mu+C_2\mu^2+C_3\mu^3 \quad (3-18)$$

$$\mu = \rho/\rho_0 - 1 \quad (3-19)$$

ここで、 $P$ は圧力、 $\rho$ は密度であり、 $C_1=3.11\text{GPa}$ 、 $C_2=-4.43\text{GPa}$ 、 $C_3=50.6\text{GPa}$ 、 $\rho_0=1.0\times 10^3\text{kg/m}^3$ である。

すべての数値解析は弾丸が標的に衝突した瞬間から始まる。

#### 3.4.5 数値解析結果と実験結果に基づく考察

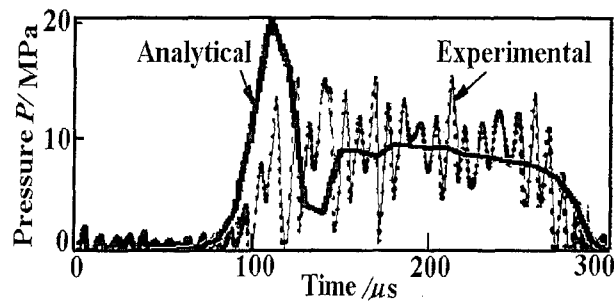
**Fig.3-10** の(a), (b), (c), (d)及び(e)に弾丸突入速度( $V$ )がそれぞれ 130, 150, 200, 230 及び 360m/s の場合の圧力測定結果と解析結果の比較を示す。図中の太線が解析結果で、振動しているものが測定結果である。圧力波形に重畳している高振動の波形は、前述したように、圧力ピックアップの固有振動に起因するもので、振動数は、圧力ピックアップの特性データとよく一致し、約 150kHz である。また、同様に圧力波の立ち上り前に基線上に現れている小振幅の振動は、弾丸が水槽水面に突入した時発生した圧力波が水槽壁面中を伝播し、水中を伝播する圧力波に先がけて圧力ピックアップへ到達したものと考えられるものである。これらの結果より、測定結果と解析結果とは弾丸の突入速度の広い範囲でよく一致していることが分かる。このことより、水中の圧力波伝播についてもモデル、材料特性等の設定が適切に行われ、LS-DYNA により高精度で数値解析結果を得ることができる。

### 第 3. 5 節 反射板レンズの収束性能に関する数値解析結果

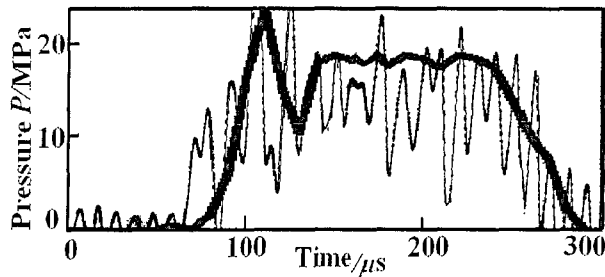
#### 3.5.1 反射板レンズの形状が収束性能に及ぼす影響

先ず反射板レンズの形状が収束性能に及ぼす影響を究明した。ここで検討の対象にする反射板レンズの形状は第 2.3 節で述べた **Fig. 2-18** に示したものである。**Fig.3-11(a)**, (b)及び(c)に、解析の一例としてそれぞれロート形レンズ、放物面レンズ及び Exp. レンズを用い、純アルミニウム製弾丸の突入速度  $V=250\text{m/s}$  の場合について、レンズ入り口と出口の中心点の圧力波形を示した。図中、細い線は入り口、太い線は出口の圧力波形である。**Fig.3-12**, **Fig.3-13** においても太線、細線の意味は同じである。また、**Fig.3-12** は放物面レンズ入り口及び出口面上の圧力分布を示したものである。図中、◆印は出口の圧力分布

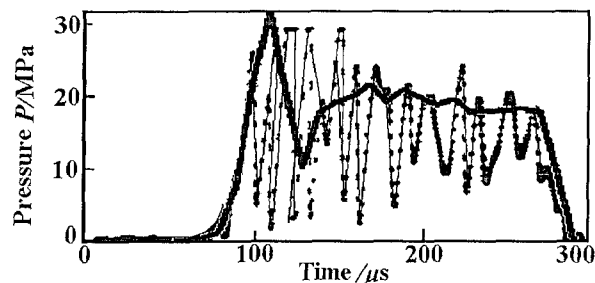
で●印は入り口の圧力分布である．これらの図より，今回検討した程度の形状の違いでは，レンズ出口での波形及び圧力値はほぼ同一であり，反射面の形状は収束性能にほとんど影響を与えないことが分かる．また，**Fig.3-12**より，レンズ出口面ではほぼ均一な圧力分布となっていることが分かり，放物面レンズにおいても，光線のように，焦点に集中するような圧力分布とならないことが明らかになった．



(a)  $V=130\text{m/s}$

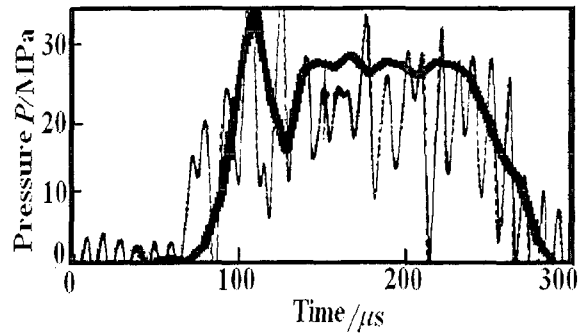


(b)  $V=150\text{m/s}$

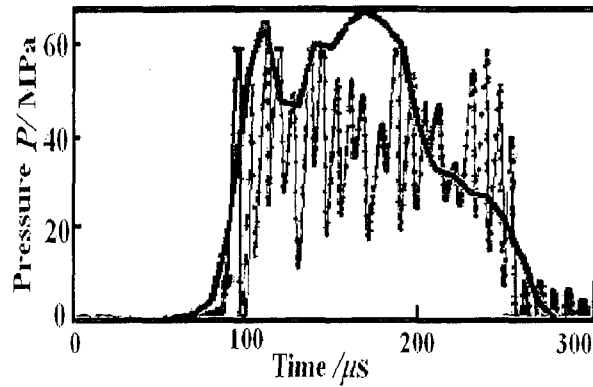


(c)  $V=200\text{m/s}$

**Fig.3-10** 水槽底面中心における圧力波形の測定結果と数値解析結果の比較（次のページ続く）

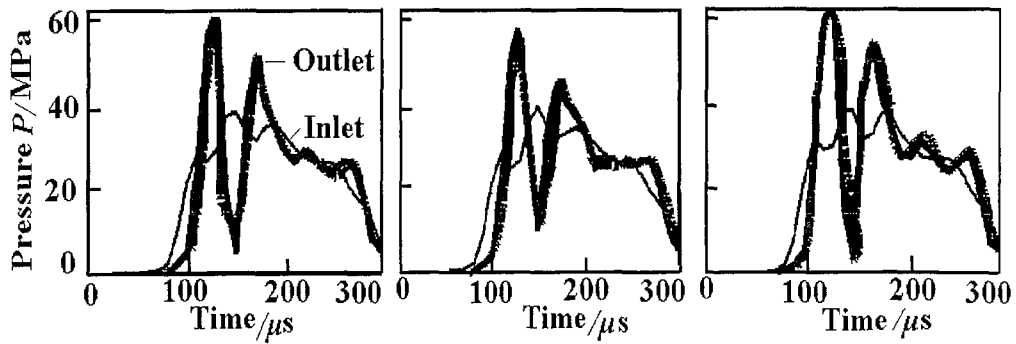


(d)  $V=230\text{m/s}$



(e)  $V=360\text{m/s}$

Fig.3-10 水槽底面中心における圧力波形の測定結果と  
数値解析結果の比較



(a) Cone lens (b) Paraboloid lens (c) Exp. lens

$V=250\text{m/s}$

Fig.3-11 反射板レンズ形状と収束衝撃圧力波形の関係

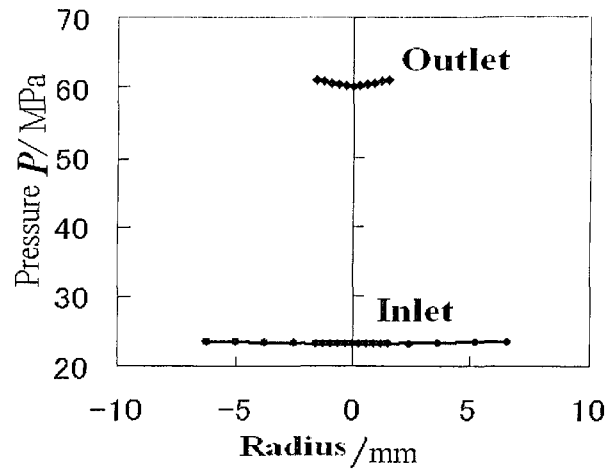
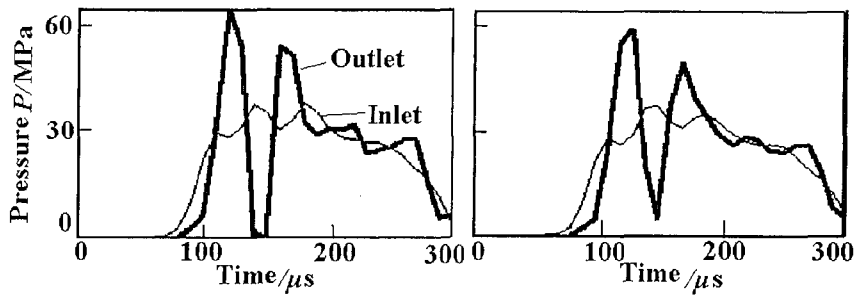
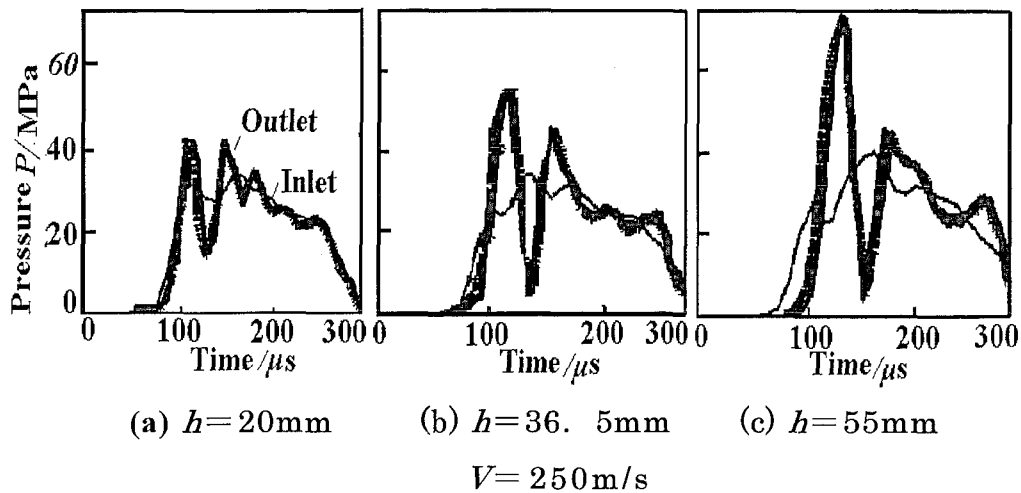


Fig.3-12 反射板レンズの出口と入り口面圧力分布  
(放物面レンズ)



(a)  $h=36.5\text{mm}$   $d=5\text{mm}$  (b)  $h=36.5\text{mm}$   $d=10\text{mm}$   
Area ratio: 64 Area ratio: 16  
 $V=250\text{m/s}$

Fig.3-13 反射板レンズの入り口と出口の面積比と収束性能の関係  
(ロート形レンズ)



**Fig.3-14** 反射板レンズのテーパー角度と収束性能の関係  
(ロート形レンズ)

### 3.5.2 反射板レンズの入り口と出口の面積比が収束性能に及ぼす影響

次に、反射板レンズの入り口と出口の面積比(area ratio)が収束性能に及ぼす影響をロート形レンズについて調べた。その場合ロート形レンズの出口の直径を変えて、他は同一とした。解析結果を **Fig. 3-13(a)** ( $h=36.5\text{mm}$ ,  $d=5\text{mm}$ ), **(b)** ( $h=36.5\text{mm}$ ,  $d=10\text{mm}$ )に示した。図中の area ratio はレンズの入口面積を出口面積で除した値である。これらの図よりレンズの収束性能は、レンズの入口と出口の面積比に大きくは依存しないことも明らかになった。

さらに、ロート形レンズについて  $D=40\text{mm}$ ,  $d=10\text{mm}$  とし、 $h$  を変え、レンズのテーパー角度が収束性能に及ぼす影響を調べた。解析結果を **Fig.3-14(a)** ( $h=20\text{mm}$ ), **(b)** ( $h=36.5\text{mm}$ ), **(c)** ( $h=55\text{mm}$ )に示した。これらの図より、レンズの収束性能は、テーパー角度に大きく影響され、角度が小さい方が良いことが分かる。

### 3.5.3 弾丸材料、形状および衝突速度が発生圧力波に及ぼす影響

弾丸材料として前述の純アルミニウム以外にポリカーボネート(PC), 鉄(Fe), 銅(Cu)を取り上げた。この場合、直径  $15\text{mm}$ , 高さ  $20\text{mm}$

の円柱状弾丸が、衝突速度 500m/s で前述の水槽へ突入し、水槽下端には放物面レンズが設置されている。この場合の解析結果をまとめて **Table 1** に示した。次に弾丸の突入速度の影響を調べた。突入速度は 250, 500 及び 1000m/s とした。この場合、弾丸材料は PC で、形状は上記のものと同じである。解析結果をまとめて **Table 2** に示した。さらに弾丸形状の影響について調べた。弾丸はすべて質量を等しくするよう、円柱の直径と長さを 10mm×45mm, 15mm×20mm, 30×5mm に変化させた。突入速度は 500m/s である。解析結果をまとめて **Table 3** に示した。これらの表より、弾丸の突入時の運動エネルギーが大きい場合発生圧力が高くなり、圧力波伝播速度も速くなることが分かる。また、弾丸と水の衝突面積が大きくなると圧力値が高く、平面波になる時間が短く、圧力波伝播速度も速くなることも分かる。

**Table 1** 弾丸材料が発生圧力波に及ぼす影響

|    | Propagation speed of shock wave | Magnitude of pressure | Time required for becoming plane |
|----|---------------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| PC | Low                             | Low                   | Long                             |
| Fe | High                            | High                  | Short                            |
| Cu | High                            | High                  | Short                            |



**Table 2** 弾丸の突入速度が発生圧力に及ぼす影響

|         | Propagation speed of shock wave | Magnitude of pressure | Time required for becoming plane |
|---------|---------------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| 250m/s  | Low                             | Low                   | Long                             |
| 500m/s  | Medium                          | Medium                | Medium                           |
| 1000m/s | High                            | High                  | Short                            |

**Table 3** 弾丸の形状が発生圧力に及ぼす影響

|      | Propagation speed of shock wave | Magnitude of pressure | Time required for becoming plane |
|------|---------------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| 10mm | Low                             | Low                   | Long                             |
| 15mm | Medium                          | Medium                | Medium                           |
| 30mm | High                            | High                  | Short                            |

### 第3.6 節 結論

高速弾丸の突入により，円筒水槽中に発生させた平面衝撃波を円筒の末端に設けた3種類(三角ロート形，回転放物面形，回転 Exp. 曲線形)の反射板レンズで収束する場合の各レンズの収束性能について数値解析により明らかにした．得られた結果は以下の通りである．

(1) 今回用いた衝撃問題解析用プログラム LS-DYNA は，弾丸の高速

- 変形，水中の衝撃波伝播について高精度の予測を与える．
- (2) 放物面レンズでも，光線のように，平面衝撃波をレンズ焦点に集中するような収束性能は持っていない．
  - (3) 三種類のレンズはほぼ同じ収束性能を示す．
  - (4) ロート形レンズの場合，レンズ入り口面積に比べ出口面積を小さくしても圧力の増幅効果は小さい．ロート形のテーパ角度が増幅性能に及ぼす影響は大きく，テーパ角度を小さくすれば増幅性能は向上する．

#### 参考文献

- 3-1) 今木敏雄，戸倉直：材料，Vol.51，No. 11，1284-1289，2002
- 3-2) <http://www.lstc.com>.
- 3-3) <http://www.arup.com/dyna>
- 3-4) <http://www.jri.co.jp/pro-eng/struct/ls-dyna>
- 3-5) <http://www.engineering-eye.com/products/lsdyna/>
- 3-6) 胡習之・可児弘毅：平 12 塑加春講論，（2000），75-76.
- 3-7) 胡習之・可児弘毅：51 回塑加連講論，（2000），7-8.
- 3-8) 林卓夫・田中吉之助：衝撃工学，(1988)，1-4，53-56，272-276，日刊工業新聞社.
- 3-9) 日本塑性加工学会：材料加工の計算力学，（1990），24-26，コロナ社.
- 3-10) Cristescu, N.: Dynamic Plasticity, (1967), North-Holland (日本語訳, 黒崎永治：衝撃塑性学, コロナ社)
- 3-11) 胡習之・守谷和幸・岡田貴宏・可児弘毅：49 回塑加連講論，(1998)，433-434.
- 3-12) 胡習之・可児弘毅：50 回塑加連講論，（1999），245-246
- 3-13) 日本規格協会：JIS ハンドブック 2 非鉄，1999，426-434.
- 3-14) 胡習之・可児弘毅：52 回塑加連講論，（2001），365-366.
- 3-15) 胡習之・可児弘毅：平 14 塑加春講論，（2002），467-468.
- 3-16) 胡習之・可児弘毅：53 回塑加連講論，（2002），75-76.

- 3-17) 胡習之・可児弘毅: 塑性と加工 Vol.44, No.514, 1110-1114, (2003)
- 3-18) 胡習之・可児弘毅: 平成 15 年塑性加工春講演会論文集, 159-160, (2003)
- 3-19) Hallquist, J.O.: LS-DYNA Theoretical Manual, (1998).
- 3-20) LSTC: LS-DYNA KEYWORD User's Manual V960, (2001).
- 3-21) KBS2 Inc: FEMB. User's Manual V27, (2001).
- 3-22) LSTC: Eta/Post GL User's Manual V1. 01, (2001).
- 3-23) Jones, O.E., ほか 2 名, J.Appl.Phys., 33-11 (1962) , 3224.
- 3-24) Graham, R.A. , ほか 2 名, J.Appl.Phys., 36-5 (1965) , 1775
- 3-25) 谷村真冶・三村耕司・榎田努: 材料, 50-3, (2001), 210-216.
- 3-26) Holt, D.L., Babcock, S.G., Green, S.J. & Maiden, C.J.: Trans.ASM, 60 (1967), 152-159.
- 3-27) 日本塑加学会: 高エネルギー速度加工, (1990) , 37, 42-46, コロナ社.
- 3-28) 山田敏郎・可児弘毅: 塑性と加工, 18-192 (1977) , 35-42.
- 3-29) Cole, R.H.: Underwater Explosion, (1948), 38-43, Princeton Univ. Press.

## 第4章 高速成形加工に関する実験および理論的検討

### 第4.1節 はじめに

前章の結果に基づき<sup>4-1)~4-11)</sup>、まずレンズ形状を水槽まで延長して、全体を円錐形状にした水槽を開発し、それによる衝撃波の収束性能を理論的に明らかにすると共に、金属板の自由張り出し実験を行い、間接的にそれを確認した。

次に、開発した円錐形水槽と小型製品成形用金型を用い、金属板の成形実験を行い、それを前章と同様市販の衝撃現象解析用プログラムLS-DYNA<sup>4-13)~4-16)</sup>を用いた数値解析結果と比較して、数値解析の解析精度を確認した。

さらに、衝撃液圧を用いて高速成形を行う場合の被成形体に作用する圧力について、圧力媒体と被成形体の運動を連成して取り扱う本章の理論的取り扱い結果について概略を述べる。

### 第4.2節 円錐形水槽の収束性能について

#### 4.2.1 円錐形水槽の開発

全体を円錐形にした水槽(**Fig.4-1**)は、前章で使用した円筒水槽およびそれに接続したレンズとの組み合わせによるものと比較するため、水槽上端の直径を円筒水槽のそれと同じく40mm、水槽下端の直径をレンズ出口のそれと同じ10mmとした。また、水槽の高さは、レンズを用いた時のレンズ出口圧力の分布がほぼ平面波状であったことから、LS-DYNAによる円錐形水槽内の圧力波伝播の解析を行い、水槽出口における圧力分布がほぼその様になる高さ140mmとした。この場合の円錐頂角は約12°(度)である。成形加工用ダイスおよび成形金型等を設置する水槽下部との接続方法は前章の円筒水槽の場合と同じである。水槽は低炭素鋼を用いて製作した。

#### 4.2.2 円錐形水槽の収束性能の数値解析

数値解析には、前章と同様 LS-DYNA を用い、内蔵の FEMB<sup>4-15)</sup>により、弾丸(純アルミニウム製、直径 15.6mm 高さ 20mm)、水とその上部に設定する Void(計算の必要上、要素に分割した空の空間)、円錐形水槽および水槽底板を5つのパートとして Solid 要素に分割した。数値解析に用いた材料特性と物理量および要素の性質等は前章<sup>4-12)</sup>、<sup>4-17)</sup>、<sup>4-18)</sup>と同様に設定した。

弾丸の突入速度( $V$ )は、前章の数値解析および実験結果と比較できるように 250m/s に設定した。数値解析は弾丸が標的の水面に衝突した瞬間から 300  $\mu$ s まで解析した。解析結果を Fig.4-2 に示す。図中の太い線は、円錐形水槽出口中心点要素の圧力履歴であり、細い線は、前章までの円筒水槽の下端に回転放物面レンズを接続した場合のレンズ出口中心点要素の圧力履歴である(前章で示したが、放物面レンズと三角形ロート形レンズの収束特性はほぼ同一なので、放物面レンズの結果を利用した)。

円錐形水槽の場合、最高圧力 136MPa であり、円筒水槽下端に放物面レンズを接続して収束した場合の最高圧力 68MPa に比べ約 2 倍の圧力が得られることが分かり、開発した水槽の優秀性が明らかになった。

#### 4.2.3 金属薄板の自由張り出し成形実験による収束性能の確認

確認実験は、円錐形水槽、円筒水槽に放物面レンズを接続したものおよび円筒水槽のみの3つの場合について、直径 40mm、厚さ( $t$ )=2mm の純アルミニウム板(A 1050 P、焼鈍: 300°C × 1 hr. 炉冷)の自由張り出し成形実験により行った。火薬銃など実験装置は前章と同じで、被成形素板は水槽底面(またはレンズ出口面)と円筒形ダイス(内径 10mm、肩半径 2mm、高さ 20mm)上面との間に挟み、滑り込みのない状態に締め付けて用いた。

弾丸の突入速度には、100m/s および 400m/s の2通りを採用した。低い弾丸突入速度(100m/s)の場合、円錐形水槽を用いた場合のみ張り

出し変形が認められたが、他の2つの場合には目視で認められる変形はなかった。

弾丸突入速度 400m/s の場合の結果を Fig.4-3 (a), (b)および(c)に示す。図は、張り出し変形の対称軸を含む面で切断した断面を示している。(a)は円錐形水槽を用いた場合、(b), (c)は、それぞれ円筒水槽に放物面レンズを接続した場合および円筒水槽のみの場合の結果である。円錐形水槽の場合、板はダイス肩部で破断し、ダイス形状に打ち抜かれてしまっている。

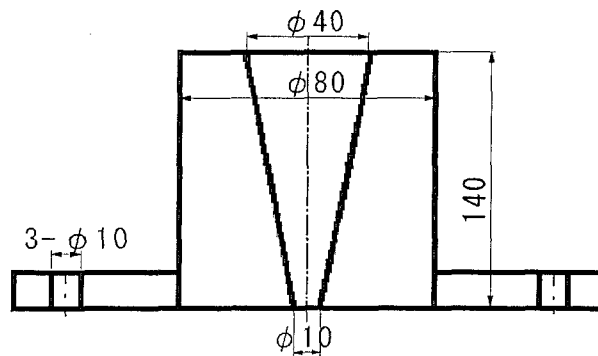


Fig.4-1 円錐形水槽 (上部)

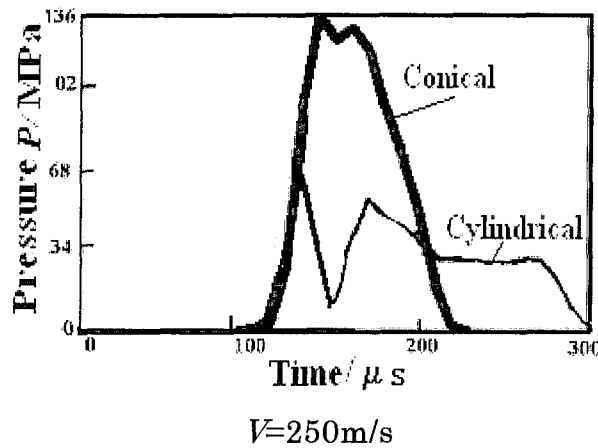
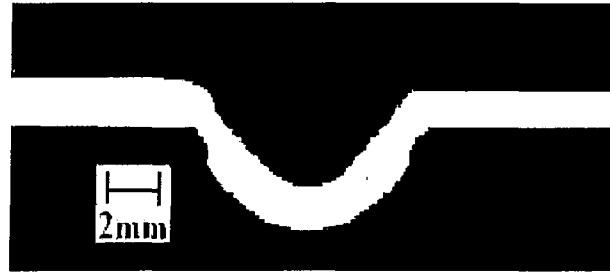


Fig.4-2 円錐形水槽の底面中心における圧力波形と円筒形水槽 (下端に放物面レンズを接続) のレンズ出口中心における圧力波形の比較



(a) Conical-shaped vessel



(b) Cylindrical vessel joined with paraboloidal lens



(c) Cylindrical vessel only

Fig. 4-3 純アルミニウム板の高速張り出し成形結果  
( $V=400\text{m/s}$ ,  $t=2\text{mm}$ )

円筒水槽に放物面レンズを接続した場合および円筒水槽のみの場合には、負荷圧力に応じた変形となっており、これらからも、円錐形水槽の収束性能が優れていることが分かる。

#### 第 4. 3 節 収束圧力波による小型製品の成形加工に関する実験 および数値解析的検討

##### 4. 3. 1 成形実験

小型製品の成形加工実験は、前述の 4. 2. 3 項の確認実験と同じ方法であるが、自由張り出し成型用ダイスの代わりに Fig.4-4(a), (b)に示

す成形金型を用いて行った。(a)の場合 2 段皿形状で、それぞれの寸法で 4 つを試作した。(b)の金型中心の細穴は金型空間の予備排気用である。金型の材質としては S45C、(熱処理方法:焼入れ, 950℃, 水冷,) 衝撃液圧の発生には円錐形水槽を用いた。

被成形用純アルミニウム板には、厚さ  $t=0.4\text{mm}$ 、 $0.5\text{mm}$  および  $2\text{mm}$  の 3 種で、直径  $40\text{mm}$  の円板を用いた(材質および熱処理は前章のものと同じ)。4.2.3 項と同様、板のすべり込みは無いよう、締め付けて用いた。純アルミニウム製弾丸(材質および熱処理は前章のものと同じ)の突入速度は、被成形板の厚さおよび成形の程度に応じて  $100\sim 250\text{ m/s}$  とした。

#### 4.3.2 金型の肩部半径についての検討

成形実験の予備実験として、円筒状水槽で反射板レンズを使わず半径  $40\text{mm}$  厚さ  $2\text{mm}$  および厚さ  $1\text{mm}$  の純アルミニウム板の皿形状金型成形および自由張り出し実験を試みた。皿形状金型(材質は前述と同じ)の深さはそれぞれ  $8\text{mm}$  と  $11\text{mm}$ 、肩半径(R)は  $15\text{mm}$  と  $10\text{mm}$  の 4 つ金型を試作した。また自由張り出しのダイスの R は  $15\text{mm}$  と  $10\text{mm}$  のものを試作した。

この実験結果によると浅い皿成形の場合、板厚さ  $2\text{mm}$  では、 $R=10\text{mm}$  でも  $15\text{mm}$  でも肩部分に傷を生じていない。深い金型で、 $R=15\text{mm}$  のものを用いた場合、肩部分に傷を生じないが、 $R=10\text{mm}$  場合、軽い傷を生じていた。

自由張り出しの場合、弾丸突入速度が低い( $200\text{m/s}$  以内)場合には、ダイス  $R=15\text{mm}$  でも  $10\text{mm}$  でも肩部に傷を生じていない。弾丸突入速度が高い場合、肩部半径  $15\text{mm}$  では肩部に傷を生じていなかったが、 $R=10\text{mm}$  場合、肩部に傷を生じた。自由張り出しの場合、弾丸突入速度が  $V=400\text{m/s}$  以上では、板が破れるため、成形できなかった。板厚さ  $1\text{mm}$  の場合、自由張り出し成形で、ダイス肩半径  $R=2\text{mm}$  の場合、弾丸突入速度が低くても、肩部は破断した。結果を Fig.4-5(a), (b), (c), (d)に示す。



円錐形水槽と、**Fig.4-4(a)**の金型を使って、小型の張り出し成形（純アルミニウム板，厚さ 0.5mm，直径 40mm）を試みた．この場合  $R = 2\text{ mm}$  で， $d=0.5\text{ mm}$  場合，成形でき，肩部分に傷を生じなかった． $d=2.1\text{ mm}$  場合，肩部分に傷を生じた，また破れることが分かった．二段皿で，浅い場合 ( $e=2.0\text{ mm}$ ) は成形できるが，深い場合 ( $e=5.0\text{ mm}$ ) には金型の通りに成形ができなかった．

#### 4.3.3 成形加工に対する数値解析

前述と同様，LS-DYNA に内蔵の FEMB を用いて，数値解析で取り扱う弾丸，円錐形水槽，水およびその上部に設定する Void，被成形板および成形金型を 6 つのパートとして Solid 要素に分割した．

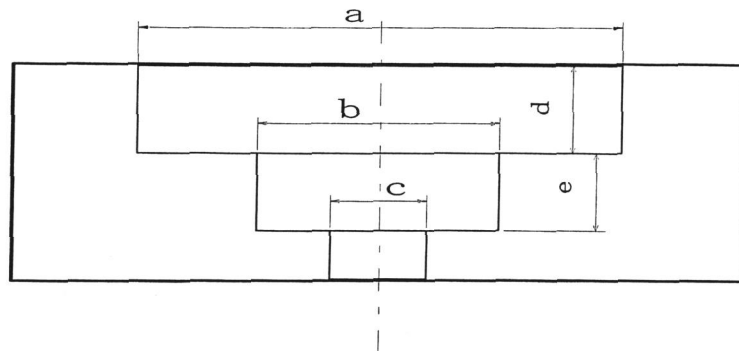
弾丸および被成形板は高速で変形するので，これらの材料に対する力学特性には前章と同じひずみ速度依存性を考慮した多直線近似弾塑性材料モデルを，また，水槽と成形金型には剛体材料モデルを設定した．被成形板の変形を詳細に見るため厚さ方向に 4 層の Solid 要素に分割した．

#### 4.3.4 成形実験結果と数値解析結果との比較および考察

最初に，板厚  $t=0.4\text{ mm}$ ，弾丸突入速度  $100\text{ m/s}$  の場合の変形過程について数値解析結果を **Fig.4-6** に示す．図は，変形の中心軸を含む面で切断した断面の内，板下面の位置を板に圧力波が到着した後の時間 ( $T$ ) 毎に示してある．図は変形の中心軸をはさんで半分しか示していない．この場合，板に作用するのはほぼ平面波であり，すなわち，板全面に一樣な衝撃圧力が作用する．この結果は，苧阪ら<sup>4-19)~4-23)</sup>の結果とも良く符合しており，解析の妥当性を示唆している．

多くの成形実験およびそれらに対応した数値解析を行ったが，その内の代表的なものを選んで以下に示す．

**Fig. 4-7(a)**および**(b)**は，板厚  $t=0.4\text{ mm}$  の板を，それぞれ弾丸突入速度  $100\text{ m/s}$  および  $150\text{ m/s}$  で成形した場合の最終形状を変形の中心軸を含む面で切断した断面形状で示したものである．**Fig.4-6** およ



- (1) a:10mm, b:5mm, c:1mm, d:5mm, e:5mm
- (2) a:10mm, b:5mm, c:1mm, d:2.1mm, e:2mm
- (3) a:10mm, b:5mm, c:0mm, d:5mm, e:5mm
- (4) a:10mm, b:5mm, c:0mm, d:2.1mm, e:2mm

Fig. 4-4(a) 2段金型概略图

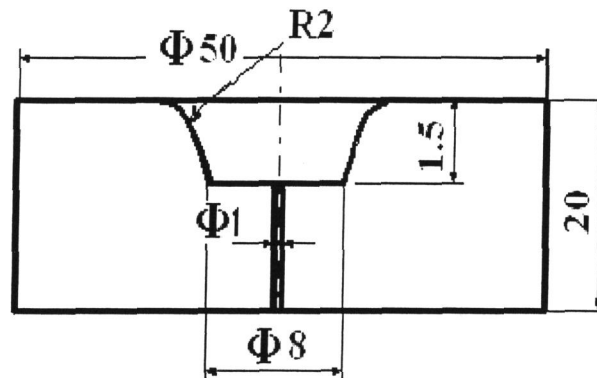


Fig. 4-4(b) 金型概略图

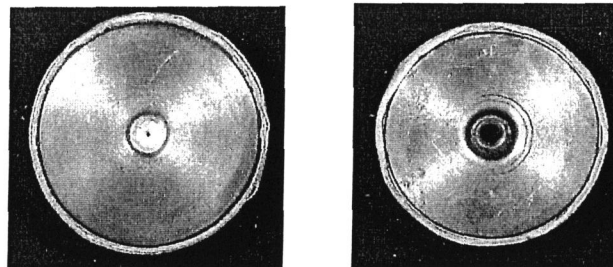
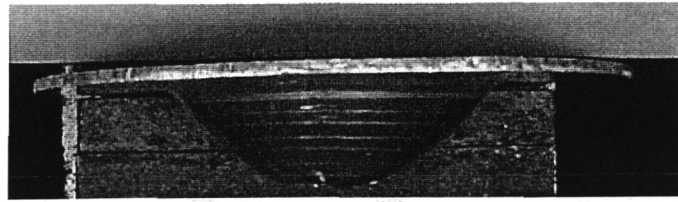
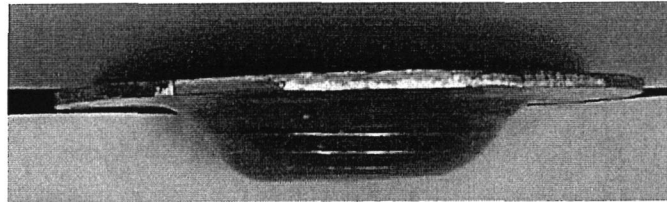


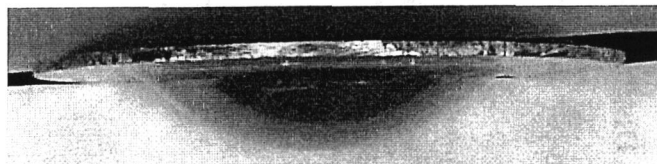
Fig. 4-4(c) 金型外觀



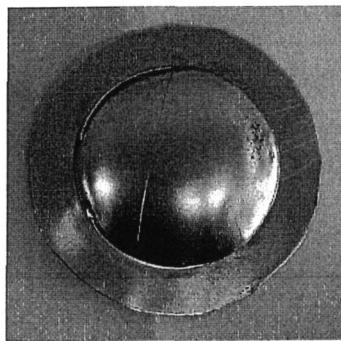
(a) 自由張り出し  $V=400\text{m/s}$   $R=10\text{mm}$



(b). 金型成形  $V=367\text{m/s}$   $R=15\text{mm}$



(c). 自由張り出し  $V=300\text{m/s}$   $R=10\text{mm}$



(d). 自由張り出し,  $V=150\text{m/s}$ ,  $R=2\text{mm}$ , 板厚さ 1mm

Fig.4-5 純アルミニウム板の高速成形に及ぼす  
金型(ダイス)肩半径の影響

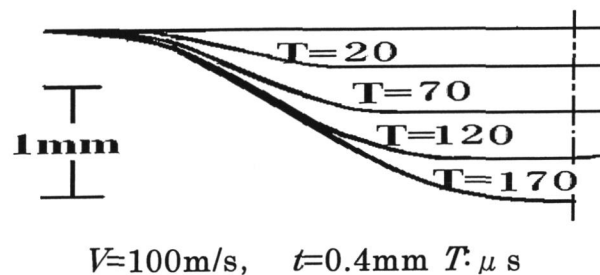
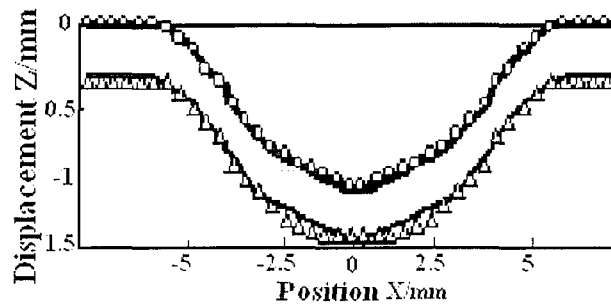
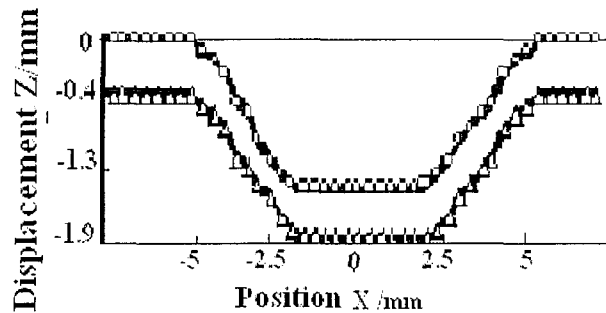


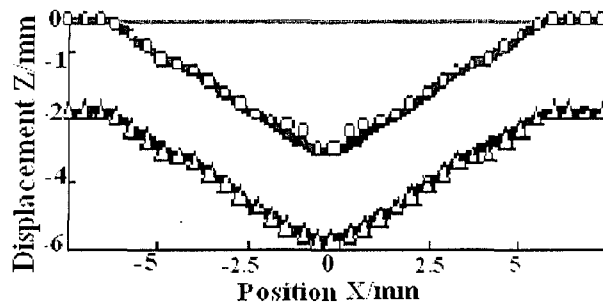
Fig.4-6 純アルミニウム板の自由張り出し変形過程



(a)  $V=100\text{m/s}$ ,  $t=0.4\text{mm}$



(b)  $V=150\text{m/s}$ ,  $t=0.4\text{mm}$



(c)  $V=150\text{m/s}$ ,  $t=2\text{mm}$

Fig.4-7 純アルミニウム板高速成形加工の実験結果  
と数値解析結果の比較

び Fig.4-8 の場合，解析結果によれば最終形状に至るまでの時間は  
圧力波が被成形板に到着した後，約  $170\mu\text{s}$  である．図中，○，△は  
それぞれ板の上面，下面位置の測定値を，実線は数値解析結果を示し  
ている．(a)は，負荷圧力が低く，最も大きく変形した部分が金型底に  
届くか届かない状態のものである．

一方，(b)は(a)に比べ負荷圧力が高く，変形部分の一部は金型底に

届き、金型通りに成形されているが、まだ負荷圧力が低く、全体が金型通りに成形されるまでには至っていない。金型の排気孔の圧痕はついていて、さらに高い速度(250m/s)で弾丸を打ち込んで負荷圧力を高め、金型通りの成形を得ることが出来たが、金型が「割り型」でないため成形品を金型から取り出すことが出来ず、解析結果と比較することが出来なかった。以下実験と数値解析の比較は成形品を金型から取り出せたものについて行った。この場合、数値計算では、弾丸突入速度を 200m/s 以上にすれば金型通りに成形できると予測することはできる。

**Fig.4-7(c)**は、板厚  $t=2\text{mm}$  の板を、弾丸突入速度 150m/s で成形した結果を示したものである。この場合も、負荷圧力が低く、金型に沿って成形できる所までには至っていないが、解析結果は実験結果を良く予測していることが分かる。この場合も弾丸突入速度を 450m/s 以上にすれば金型通りの成形が可能であると数値解析からは予測できる。

**Fig.4-8** は板厚  $t=2\text{mm}$ 、弾丸突入速度 400m/s で金型を用いて成形した場合の変形過程の数値解析結果を示したものである。図は、変形の中心軸を含む面で切断した断面の内、板下面の位置を板に圧力波が到着した後の時間 ( $T$ ) 毎に示してある。二点破線は金型の内壁輪郭である。

これらの図より、LS-DYNAにより、衝撃液圧を用いる高速成形加工の理論的予測が充分可能であることが分かる。これらの図において、解析結果と実験結果との最大の差は、実験結果の 7~10%以下である。実験の場合と弾丸突入速度を等しくして行った解析結果が、圧力の発生、伝播、円錐形水槽内の圧力波の収束までの問題を含みながら、この程度まで予測できるのは非常に高い解析精度を有すると言える。したがって、今後は、被成形材料の高ひずみ速度下の力学特性が分っておれば、予備実験を省略して、成形加工の条件などを検討することができるようになると思われる。

さらに、本章では金型の材料モデルを剛体と設定したが、金型材料

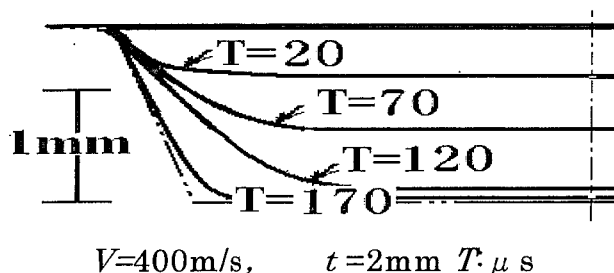
に対し適切な弾性材料モデルを設定すれば、金型内の応力分布を知ることができ、割れない金型の設計も可能になると考えられる。

#### 第4. 4節 被成形材に作用する圧力について

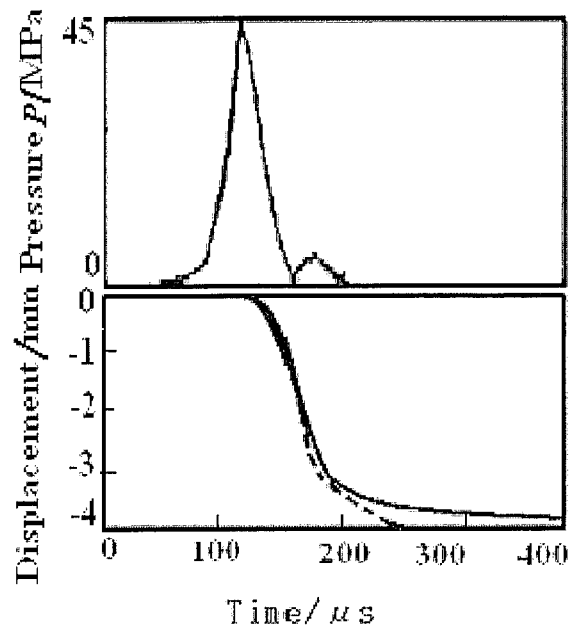
本章のはじめで述べたように、衝撃液圧による高速成形問題を考える場合、圧力媒体の液体の運動と被成形材の運動とを連成して取り扱わねばならないが、この問題を定量的に扱った例は非常に少ない<sup>4-12)</sup>。定性的にも、圧力伝播において、異なるショックインピーダンスを有する媒体の境界での圧力波の透過、反射を考えれば理解できる。本研究で用いた解析用 LS-DYNA ではこの問題が取り扱えるので、検討した結果の概要を以下に示す。

**Fig.4-9** および **Fig.4-10** は、2.3 項の自由張り出し成形に対する数値解析において、弾丸突入速度 250m/s は同一で、被成形材の板厚がそれぞれ  $t=0.5\text{mm}$  および  $t=2\text{mm}$  の場合の水槽下端中心点水要素の圧力履歴を示したものである。図中、下段にはその水要素(実線)およびそれに接する純アルミニウム被成形板の上端面中心要素(破線)の垂直方向の運動を示してある。

これらの図より、弾丸突入速度が同一で水槽中を同じ圧力波が伝播しても、被成形材に作用する圧力は異なり、厚い板、すなわち動き難い(変形しがたい)板の方が作用する圧力値が高く、持続時間も長くなり、圧力波を効率よく利用できることが分かる。

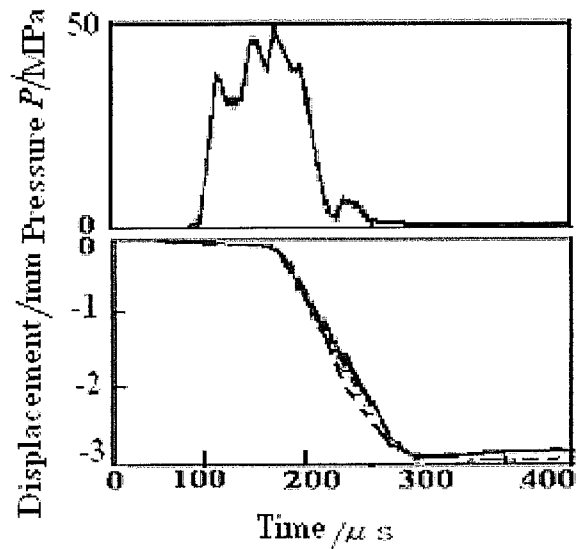


**Fig.4-8** 純アルミニウム板の金型を用いた高速成形加工の変形過程



$V=250\text{m/s}, \quad t=0.5\text{mm}$

Fig.4-9 薄い純アルミニウム板の自由張り出し成形における負荷圧力と板および圧力媒体（水）の運動との関係



$V=250\text{m/s}, \quad t=2\text{mm}$

Fig.4-10 厚い純アルミニウム板の自由張り出し成形における負荷圧力と板および圧力媒体（水）の運動との関係

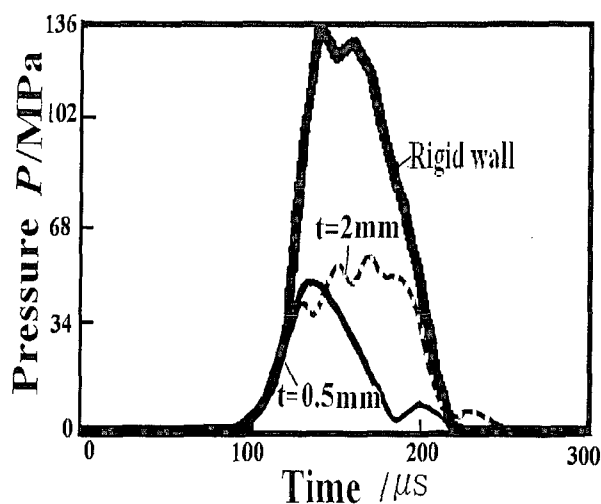


Fig.4-11 剛性体と弾塑性体の水槽底面の圧力波形比較  
(円錐形水槽を使用)

下段の図より、被成形材の粒子速度（板の分割要素の速度）が圧力媒体のそれよりも高くなり両者が分離し始めると作用する圧力はゼロになり、それは変形し易い板の方が早くゼロになる(Fig.4-9)。被成形板と圧力媒体の水とが分離し、板の近傍でキャビテーションが発生することは古くから知られていたことであるが<sup>4-12)</sup>、ここでもその可能性が再確認できた。一旦作用圧力がゼロになった後、低い圧力が再度作用しているのは、被成形板と水の間にできた空洞を満たすべく再度水粒子が加速され板に衝突した結果によると考えられる。

図より、圧力が負荷されるに伴い板は加速され、その後ほぼ一定の速度で運動していることが分かる。板に作用する圧力の力積を求めると、それは、一定速度で運動する板の運動量にほぼ等しくなる。すなわち、衝撃液圧による板の高速成形は、圧力の作用により高速に加速された板がその運動エネルギーを変形エネルギーに変換しながら進行すると言えよう。

Fig.4-11 は、Fig.4-9 および Fig.4-10 で示した圧力履歴をまとめ、さらにそれらを被成形板の位置に剛体的に設置した圧力ピックアップで測定される圧力と比較したものである。圧力ピックアップで測定



される圧力は、被成形板の代わりに剛体板を設定し数値解析により求めたもので代用した。この図より、圧力ピックアップで測定された圧力と実際に被成形板に作用する圧力とは異なり、測定された圧力値をそのまま被成形板に作用する圧力として取り扱おうと適正な成形予測ができないことが分かる。

#### 第 4. 5 節 結論

1. 新たに開発した円錐形水槽の収束性能は、円筒形水槽に回転放物面レンズを接続したもののそれよりも非常に優れている。

2. LS-DYNA は、衝撃液圧による小型製品の高速成形加工についても、高精度で成形予測を与えることが分かった。したがって、今後は、予備実験を省略して、数値解析により必要な成形条件を予測することが可能であろう。

3. LS-DYNA により、被成形板と圧力媒体の運動を連成して取り扱い、実際に被成形板に作用する圧力は、剛体的に設置した圧力ピックアップで測定された圧力とは異なることを定量的に明らかにした。

#### 参考文献

- 4-1) 林卓夫・田中吉之助：衝撃工学，(1988)，315-317，272-276，日刊工業新聞社。
- 4-2) 可児弘毅：圧力技術，13-4，(1975)，199-210
- 4-3) 胡習之・守谷和幸・岡田貴宏・可児弘毅：49 回塑加連講論，(1998)，433-434。
- 4-4) 胡習之・可児弘毅：50 回塑加連講論，(1999)，245-246。
- 4-5) 胡習之・可児弘毅：平 12 塑加春講論，(2000)，75-76。
- 4-6) 胡習之・可児弘毅：51 回塑加連講論，(2000)，7-8。
- 4-7) 胡習之・可児弘毅：52 回塑加連講論，(2001)，365-366。
- 4-8) 胡習之・可児弘毅：平 14 塑加春講論，(2002)，467-468。
- 4-9) 胡習之・可児弘毅：53 回塑加連講論，(2002)，75-76。

- 4-10) 胡習之・可児弘毅：平 15 塑加春講論，(2003)， 159-160.
- 4-11) 胡習之・可児弘毅：塑性と加工， 44-514(2003)， 1110-1114.
- 4-12) Cole, R. H. : Underwater Explosion, (1948), 38-43, 402-407,  
Princeton Univ. Press.
- 4-13) Hallquist, J. O. : LS-DYNA Theoretical Manual, (1998).
- 4-14) LSTC : LS-DYNA KEYWORD User's Manual V960, (2001).
- 4-15) KBS2 Inc : FEMB. User's Manual V26NT, (2001).
- 4-16) LSTC : Eta/Post GL User's Manual V1. 01, (1999).
- 4-17) 谷村真治・三村耕司・榎田努：材料， 50-3, (2001)， 210-216.
- 4-18) 日本塑加学会：高エネルギー速度加工，(1990)， 26-27, 42-46,  
コロナ社.
- 4-19) 苧阪浩男・藤田昌大・花崎紘一・藤中雄三：塑性と加工，  
27-303(1986)， 487-493.
- 4-20) 山田敏郎・可児弘毅：塑性と加工， 18-192 (1977) ， 35-42
- 4-21) 清田堅吉・藤田昌大・伊妻猛志：塑性と加工， 11-118 (1970)，  
831-837.
- 4-22) 苧阪浩男・藤田昌大・藤中雄三・花崎紘一：塑性と加工，  
27-301(1986)， 288-294.
- 4-23) 苧阪浩男・藤田昌大・済木弘行・長野司郎・馬場文章：塑性と加工，  
26-290(1985)， 316-322.

## 第5章 総括

本研究は、金属材料の主な加工法である塑性加工法の中の高エネルギー速度加工法に関するものであり、その中で、液中を伝播する衝撃圧力を被加工材に負荷して行う加工法の新たな応用分野を開拓するために明らかにしておかなければならない問題を採り上げ、解明したものである。すなわち、最近、機械部品の小型化、多種少量生産等への要求が強く求められているが、高エネルギー速度加工法は本来的に多種少量生産には好適な加工法であるため、小形製品加工への応用が可能になれば、この加工法の金属加工への貢献度を高めることができる。

衝撃液圧を負荷して行う高エネルギー速度加工法において、小型製品を成形加工する場合、小さな圧力負荷面へ、液中を伝播する衝撃圧力波を如何に収束させて負荷するか、また、収束して高圧になった衝撃液圧を負荷された被成形材がどのような変形過程を経て金型形状に成形されて行くかを明らかにし、成形に必要な負荷圧力を見積もる方法を見いだす必要がある。寸法が数mm程度の製品の成形への適用の試みは、従来皆無である。小型製品を成形する場合、負荷面積が狭いので高圧力の負荷が必要になる。本研究では、高強度の高圧設備を用いなくて高圧力を得る方法として、反射板（レンズ）を用いて衝撃圧力波を収束する方法の開発を試みた。どのような形状をした反射板（レンズ）を用いれば効率良く収束できるか。まず、この問題について実験、理論の両面から検討した。

次に、収束した衝撃高液圧を負荷した被成形材がどのような変形過程を経て金型通りの形状に成形されていくかの問題について検討した。この問題についても、系統的に行われた先行研究は皆無に等しい。それは、この問題を的確に取り扱うためには、圧力媒体である液体と被成形材の運動を連成して取り扱わねばならないという理論的な難しさにある。本研究では、この問題の解明を衝撃問題を取り扱えるソフトの導入により理論的に取り扱う方法で取り組んだ。従来、この問

題の取り扱いには大型計算機が必要で、かつ、計算ソフトの導入に莫大な研究予算が必要なため取り組めなかった。最近、小型計算機の発達とそれに伴うソフトの改良により可能になってきた。

以下、本研究により得られた成果を各章毎に要約する。

第一章では、緒言として研究の目的、研究の背景、先行研究、本研究の進め方などについて述べた。

第二章では、水中平面衝撃圧力波を、火薬銃で加速した高速弾丸を円筒状の水槽へ打ち込んで発生させ、それを2種類の反射板レンズ（回転放物面形状(放物面レンズ)および回転Exponential曲線形状(Exp.レンズ))により収束させ、その収束性能について、圧力測定フィルム、金属薄板の打ち抜きおよび軟質金属板の圧印等を利用して実験的に調べた。

いずれのレンズも収束性能を持っていることは分かったが、本章で採用したいずれの実験方法によっても、レンズの収束性能の詳細を明らかにすることができないことが分かった。そして、これらの実験的検討の結果、本研究の遂行のためには理論解析的手法を導入せざるを得ないことが明らかになった。

第三章では、前章での実験的検討の結果に基づき、実験と同時に、衝撃現象解析用市販ソフトLS-DYNAを導入し、理論的検討を行った。先ず導入ソフトの解析精度を上げるため、解析結果と実験結果を比較しながら、モデルの設定、諸条件の設定の適切化を図った。そのため、まず材料の高速変形についての解析精度を高速弾丸の剛壁への衝突実験により確認した。次に、弾丸の突入により水中に発生する衝撃波の伝播について圧力測定を行い、それとの比較により計算精度の向上をはかった。これらを行った上で、本研究の主題、すなわちレンズ形状（前章で採り上げた二種類のレンズに加え三角形ロート形状レンズ）が収束性能に及ぼす効果、弾丸形状、弾丸の材質、弾丸の突入速度などが発生圧力に及ぼす効果を理論的に検討した。

その結果、

(1) 導入した衝撃問題解析用プログラム LS-DYNA は、弾丸の高速変

- 形，水中衝撃波伝播について高精度の予測を与える。
- (2) 放物面レンズでも，光線のように，平面衝撃波をレンズ焦点に集中するような収束性能は持っていない。
  - (3) 三種類のレンズはほぼ同じ収束性能を示す。
  - (4) ロート形レンズの場合，レンズ入り口面積に比べ出口面積を小さくしても圧力の増幅効果は小さい。ロート形のテーパ角度が増幅性能に及ぼす影響は大きく，テーパ角度を小さくすれば増幅性能は向上する。

事などが明らかになった

第4章では，前章の結果に基づき，まずレンズ形状を水槽まで延長して，全体を円錐形状にした水槽を開発し，それによる衝撃波の収束性能を理論的に明らかにすると共に，金属板の自由張り出し実験を行い，間接的にそれを確認した。

次に，開発した円錐形水槽と小型製品成形用金型を用い，金属板の成形実験を行い，それを前章と同様市販の衝撃現象解析用プログラムLS-DYNAを用いた数値解析結果と比較して，金属薄板の金型成形における数値解析の解析精度を確認した。

さらに，衝撃液圧を用いて高速成形を行う場合の被成形体に作用する圧力について，圧力媒体と被成形体の運動を連成して取り扱った。

その結果以下の成果を得た。

1. 新たに開発した円錐形水槽の収束性能は，円筒形水槽に回転放物面レンズを接続したもののそれよりも非常に優れている。

2. LS-DYNA は，衝撃液圧による小型製品の高速成形加工についても，高精度で成形予測を与えることが分かった。したがって，今後は，予備実験を省略して，数値解析により必要な成形条件を予測することが可能であろう。

3. LS-DYNA により，被成形板と圧力媒体の運動を連成して取り扱い，実際に被成形板に作用する圧力は，剛体的に設置した圧力ピックアップで測定された圧力とは異なることを定量的に明らかにした。

以上，本研究の成果を総括したが，当初の研究目的は達成したよう

に思われる． 今後は，本研究で得られた成果を基に，実際に実用化に向けた小型製品の成形を試みたいと考えている． 具体的には，多種少量生産の最適例で，小型製品である歯科治療用のクラウンをチタン板を用いて成形したいと考えている．

## 謝 辞

本研究を行うにあたり，研究着手の示唆を与え，主指導教官として懇切丁寧にご指導，ご助言を賜りました岡山大学教育学部の可児弘毅教授，また副指導教官としてご指導頂きました兵庫教育大学学校教育学部の松浦正史教授，岡山大学教育学部の山本秀樹教授に衷心より深く感謝申し上げます。

さらに，論文をまとめるにあたって，数数の有益なご教示と温かいご指導を賜りました岡山大学教育学部の大橋和正教授，上越教育大学学校教育学部の川崎直哉教授，鳴門教育大学学校教育学部の菊地章教授に厚く御礼申し上げます。

また，本研究の大きな推進力となった数値解析のために適切なお助言と文献紹介などをご指導頂きました(株)CRC ソリューションズ西日本工学システム部津田徹氏に心よりの感謝を申し上げます。

さらに，研究を遂行するにあたり，当時岡山大学大学院教育研究科大学院生の守谷和幸氏，岡山大学教育学部生の岡田貴宏氏には貴重な実験データを頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

実験を行うにあたり，実験装置の製作においては，ご協力頂きました岡山大学工学部工作センターの福本博世技官には，終始温かいご協力を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

最後に，当時，岡山大学大学院教育研究科大学院生の白井和紀氏，赤堀博昭氏，長谷川正英氏，浅上徳彦氏および教育学部技術教育講座の日向洋平氏など諸氏には資料調べその他で度々ご協力を頂きましたここに深く感謝致します。

## 付録



## 付録の目録

### LS-DYNA による各種数値計算の初期条件設定

- 付録 1 : 純アルミニウム製弾丸の剛壁への衝突問題
- 付録 2 : 水中の圧力波伝播問題
- 付録 3 : 反射板レンズの収束性能問題
- 付録 4 : 弾丸材料, 形状, 衝撃速度が圧力波に及ぼす影響
- 付録 5 : 円錐形水槽の収束性能問題
- 付録 6 : 自由張り出し成形問題
- 付録 7 : 成形加工の数値解析

付録 1

\*KEYWORD

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$

\$ DYNA3D(936) DECK WAS WRITTEN BY: ETA/FEMB VERSION 26

\$ DATE : Dec 10, 2001 at 20:45:49

\$

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$

(1) TITLE CARD.

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*TITLE

ALMI300

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$

(2) CONTROL CARDS.

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*CONTROL\_TERMINATION

\$ ENDTIM ENDCYC DTMIN ENDNEG ENDMAS

.100E+00 0 .000 .000 .000

\*CONTROL\_TIMESTEP

\$ DTINIT SCFT ISDO TSLIMIT DTMS LCTM ERODE

MS1ST

.000 .900 0

\*CONTROL\_HOURLASS

\$ IHQ QH

1 .100

\*CONTROL\_BULK\_VISCOSITY

\$ Q2 Q1

1.500 .060

\*CONTROL\_SHELL

\$ WRPANG ITRIST IRNXX ISTUPD THEORY BWC MITER

20.000 2 -1 0 2 2 1

\*CONTROL\_CONTACT

\$ SLSFAC RWPNAL ISLCHK SHLTHK PENOPT THKCHG ORIEN

.100

\$ USRSTR USRFAC NSBCS INTERM XPENE

0 0 10 0 4.000

\*CONTROL\_ENERGY

\$ HGEN RWEN SLNTEN RYLEN

1 2 1 1

\*CONTROL\_DAMPING

\$ NRCYCK DRTOL DRFCTR DRTERM TSSFDR IRELAL EDTTL  
IDRFLG

250 .001 .995

\*CONTROL\_OUTPUT

\$ NPOPT NEECHO NREFUP IACCOP OPIFS IPNINT IKEDIT  
0 0 0 0 .000 0 100

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$ (3) DATABASE CONTROL CARDS - ASCII HISTORY FILE

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*DATABASE\_HISTORY\_OPTION

\$ ID1 ID2 ID3 ID4 ID5 ID6 ID7 ID8

\$

\$OPTION : BEAM BEAM\_SET NODE NODE\_SET

\$ SHELL SHELL\_SET SOLID SOLID\_SET

\$ TSHELL TSHELL\_SET

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$ (4) DATABASE CONTROL CARDS FOR ASCII FILE

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*DATABASE\_OPTION

\$ DT

\$

\$OPTION : SECFORC RWFORC NODOUT ELOUT GLSTAT

\$ DEFORC MATSUM NCFORC RCFORC DEFGE0

\$ SPCFORC SWFORC ABSTAT NODFOR BNDOUT

\$ RBDOUT GCEOUT SLEOUT MPGS SBTOUT

\$ JNTFORC AVSFLT MOVIE

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$ (5) DATABASE CONTROL CARDS FOR BINARY FILE

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*DATABASE\_BINARY\_D3PLOT

\$ DT/CYCL LCDT NOBEAM

.100E-02

\*DATABASE\_BINARY\_D3THDT

\$ DT/CYCL LCDT NOBEAM

.150E-01

\*DATABASE\_BINARY\_OPTION

\$ DT/CYCL LCDT NOBEAM

\$

\$OPTION : D3DRFL D3DUMP RUNRSF INTFOR

```

$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*DATABASE_EXTENT_BINARY
      0      0      3      0      1      1      1      1
      0      0      0      0      0      0

```

```

$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
      (6) DEFINE PARTS CARDS

```

```

$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*PART
$HEADING
PART PID =      2 PART NAME :TAMA
$  PID      SID      MID      EOSID      HGID      GRAV      ADPOPT      TMID
      2      2      2

```

```

*PART
$HEADING
PART PID =      4 PART NAME :ITA
$  PID      SID      MID      EOSID      HGID      GRAV      ADPOPT      TMID
      4      4      4

```

```

$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
      (7) MATERIAL CARDS
*MAT_piecewise_linear_plasticity
      2  2.690e-6 70.000000  0.34500
      1
$  EPS1      EPS2      EPS3      EPS4      EPS5      EPS6      EPS7      EPS8
$ 0.000E+00 5.000E-02 1.000E-01 1.500E-01 2.000E-01 3.000E-01 1.000E+00 1.500E+00

```

```

$  ES1      ES2      ES3      ES4      ES5      ES6      ES7      ES8
$ 0.040E+00 0.052E+00 0.070E+00 0.080E+00 0.084E+00 0.110E+00 0.130E+00 0.577E+00

```

```

*MAT_RIGID
$  MID      RO      E      PR      N      COUPLE      M      ALIAS
      4 7.830E-06 2.070E+02 2.800E-01 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
$  CMO      CON1      CON2
      1.0      7.0      7.0
$LCO or A1      A2      A3      V1      V2      V3

```

```

*define_table
      1
      0.0025
      0.025
      0.34  1

```

```

2.00
50.
1370
10000
*define_curve
11
0.0 0.020
0.02 0.050
0.04 0.060
0.06 0.065
0.08 0.070
0.10 0.100
0.12 0.105
0.14 0.110
*define_curve
12
0.0 0.020
0.02 0.052
0.04 0.057
0.06 0.063
0.08 0.070
0.10 0.100
0.12 0.110
0.14 0.116
*define_curve
13
0.0 0.035
0.02 0.056
0.04 0.064
0.06 0.065
0.08 0.068
0.10 0.100
0.12 0.112
0.14 0.120
*define_curve
14
0.0 0.040
0.02 0.050
0.04 0.060
0.06 0.070

```

|      |       |
|------|-------|
| 0.08 | 0.075 |
| 0.10 | 0.100 |
| 0.12 | 0.110 |
| 0.14 | 0.125 |

\*define\_curve

15

|      |       |
|------|-------|
| 0.0  | 0.040 |
| 0.02 | 0.058 |
| 0.04 | 0.068 |
| 0.06 | 0.078 |
| 0.08 | 0.088 |
| 0.10 | 0.110 |
| 0.12 | 0.125 |
| 0.14 | 0.140 |

\*define\_curve

16

|      |       |
|------|-------|
| 0.0  | 0.041 |
| 0.02 | 0.060 |
| 0.04 | 0.085 |
| 0.06 | 0.090 |
| 0.08 | 0.120 |
| 0.10 | 0.140 |
| 0.12 | 0.160 |
| 0.14 | 0.180 |

\*define\_curve

17

|      |       |
|------|-------|
| 0.0  | 0.045 |
| 0.02 | 0.080 |
| 0.04 | 0.100 |
| 0.06 | 0.120 |
| 0.08 | 0.140 |
| 0.10 | 0.180 |
| 0.12 | 0.200 |
| 0.14 | 0.260 |

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$ (7.1) SECTION CARDS

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*SECTION\_SOLID

\$ SID ELFORM

2 3

\*SECTION\_SOLID

\$     SID     ELFORM  
           4         3

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$                                 (8) NODAL POINT CARDS

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*NODE

| \$ | NODE | X              | Y               | Z              | TC | RC |
|----|------|----------------|-----------------|----------------|----|----|
|    | 1    | .400000000E+01 | -.148155700E-06 | .000000000E+00 |    |    |
|    | 2    | .375000000E+01 | .750000100E+00  | .000000000E+00 |    |    |
|    | 3    | .350000000E+01 | .150000000E+01  | .000000000E+00 |    |    |
|    | 4    | .325000000E+01 | .225000000E+01  | .000000000E+00 |    |    |
|    | 5    | .300000000E+01 | .300000000E+01  | .000000000E+00 |    |    |
|    | 6    | .300000000E+01 | -.111116700E-06 | .000000000E+00 |    |    |
|    | 7    | .281250000E+01 | .812500100E+00  | .000000000E+00 |    |    |
|    | 8    | .262500000E+01 | .162500000E+01  | .000000000E+00 |    |    |
|    | 9    | .243750000E+01 | .243750000E+01  | .000000000E+00 |    |    |
|    | 10   | .225000000E+01 | .325000000E+01  | .000000000E+00 |    |    |
|    | 11   | .200000000E+01 | -.740778300E-07 | .000000000E+00 |    |    |
|    | 12   | .187500000E+01 | .875000000E+00  | .000000000E+00 |    |    |
|    | 13   | .175000000E+01 | .175000000E+01  | .000000000E+00 |    |    |
|    | 14   | .162500000E+01 | .262500000E+01  | .000000000E+00 |    |    |
|    | 15   | .150000000E+01 | .350000000E+01  | .000000000E+00 |    |    |
|    | 16   | .100000000E+01 | -.370389200E-07 | .000000000E+00 |    |    |
|    | 17   | .937500000E+00 | .937500000E+00  | .000000000E+00 |    |    |
|    | 18   | .875000000E+00 | .187500000E+01  | .000000000E+00 |    |    |
|    | 19   | .812499900E+00 | .281250000E+01  | .000000000E+00 |    |    |
|    | 20   | .749999900E+00 | .375000000E+01  | .000000000E+00 |    |    |
|    | 21   | .000000000E+00 | .000000000E+00  | .000000000E+00 |    |    |
|    | 22   | .000000000E+00 | .100000000E+01  | .000000000E+00 |    |    |
|    | 23   | .000000000E+00 | .200000000E+01  | .000000000E+00 |    |    |
|    | 24   | .000000000E+00 | .300000000E+01  | .000000000E+00 |    |    |
|    | 25   | .000000000E+00 | .400000000E+01  | .000000000E+00 |    |    |

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$                                 (9) SOLID ELEMENT CARDS

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*ELEMENT\_SOLID

| \$ | EID | PID | N1 | N2 | N3 | N4 | N5 | N6 | N7 | N8 |
|----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|    | 49  | 2   | 76 | 79 | 78 | 77 | 1  | 2  | 7  | 6  |
|    | 50  | 2   | 79 | 81 | 80 | 78 | 2  | 3  | 8  | 7  |

|    |   |     |     |     |     |    |    |    |    |
|----|---|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|
| 51 | 2 | 81  | 83  | 82  | 80  | 3  | 4  | 9  | 8  |
| 52 | 2 | 83  | 85  | 84  | 82  | 4  | 5  | 10 | 9  |
| 53 | 2 | 77  | 78  | 87  | 86  | 6  | 7  | 12 | 11 |
| 54 | 2 | 78  | 80  | 88  | 87  | 7  | 8  | 13 | 12 |
| 55 | 2 | 80  | 82  | 89  | 88  | 8  | 9  | 14 | 13 |
| 56 | 2 | 82  | 84  | 90  | 89  | 9  | 10 | 15 | 14 |
| 57 | 2 | 86  | 87  | 92  | 91  | 11 | 12 | 17 | 16 |
| 58 | 2 | 87  | 88  | 93  | 92  | 12 | 13 | 18 | 17 |
| 59 | 2 | 88  | 89  | 94  | 93  | 13 | 14 | 19 | 18 |
| 60 | 2 | 89  | 90  | 95  | 94  | 14 | 15 | 20 | 19 |
| 61 | 2 | 91  | 92  | 97  | 96  | 16 | 17 | 22 | 21 |
| 62 | 2 | 92  | 93  | 98  | 97  | 17 | 18 | 23 | 22 |
| 63 | 2 | 93  | 94  | 99  | 98  | 18 | 19 | 24 | 23 |
| 64 | 2 | 94  | 95  | 100 | 99  | 19 | 20 | 25 | 24 |
| 65 | 2 | 101 | 104 | 103 | 102 | 26 | 27 | 32 | 31 |
| 66 | 2 | 104 | 106 | 105 | 103 | 27 | 28 | 33 | 32 |

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$ (10) BEAM ELEMENT CARDS

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*ELEMENT\_BEAM

\$ EID PID N1 N2 N3

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$ (11) SHELL ELEMENT CARDS

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*ELEMENT\_SHELL

\$ EID PID N1 N2 N3 N4

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$ (12) SPRING OR DAMPER ELEMENT CARDS

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*ELEMENT\_DISCRETE

\$ EID PID N1 N2 VID S PF

\*ELEMENT\_MASS

\$ EID NID MASS

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$ (14) HOURGLASS AND BULK PROPERTIES CARDS

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*HOURGLASS

\$ IHQ QH IBQ Q1 Q2

\$

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8



\$ (15) DEFINE SET CARDS  
 \$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$ (16) BOUNDARY CONDITION CARDS  
 \$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$ (17) LOCAL COORDINATE SYSTEM  
 \$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$ (18) NODAL CONSTRAINT CARDS  
 \$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$ (19) INITIAL CARDS  
 \$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

| \$ | NID | VX        | VY        | VZ         | VXR       | VYR       | VZR       |
|----|-----|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|
|    | 1   | 0.000E+00 | 0.000E+00 | -3.000E+02 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 |
|    | 2   | 0.000E+00 | 0.000E+00 | -3.000E+02 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 |
|    | 3   | 0.000E+00 | 0.000E+00 | -3.000E+02 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 |
|    | 4   | 0.000E+00 | 0.000E+00 | -3.000E+02 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 |
|    | 5   | 0.000E+00 | 0.000E+00 | -3.000E+02 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 |
|    | 6   | 0.000E+00 | 0.000E+00 | -3.000E+02 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 |
|    | 7   | 0.000E+00 | 0.000E+00 | -3.000E+02 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 |
|    | 8   | 0.000E+00 | 0.000E+00 | -3.000E+02 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 |
|    | 9   | 0.000E+00 | 0.000E+00 | -3.000E+02 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 |
|    | 10  | 0.000E+00 | 0.000E+00 | -3.000E+02 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 |
|    | 11  | 0.000E+00 | 0.000E+00 | -3.000E+02 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 |
|    | 12  | 0.000E+00 | 0.000E+00 | -3.000E+02 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 |
|    | 13  | 0.000E+00 | 0.000E+00 | -3.000E+02 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 |
|    | 14  | 0.000E+00 | 0.000E+00 | -3.000E+02 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 |
|    | 15  | 0.000E+00 | 0.000E+00 | -3.000E+02 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 |
|    | 16  | 0.000E+00 | 0.000E+00 | -3.000E+02 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 |
|    | 17  | 0.000E+00 | 0.000E+00 | -3.000E+02 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 |
|    | 18  | 0.000E+00 | 0.000E+00 | -3.000E+02 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 |
|    | 19  | 0.000E+00 | 0.000E+00 | -3.000E+02 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 |
|    | 20  | 0.000E+00 | 0.000E+00 | -3.000E+02 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 |
|    | 21  | 0.000E+00 | 0.000E+00 | -3.000E+02 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 |
|    | 22  | 0.000E+00 | 0.000E+00 | -3.000E+02 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 |
|    | 23  | 0.000E+00 | 0.000E+00 | -3.000E+02 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 |
|    | 24  | 0.000E+00 | 0.000E+00 | -3.000E+02 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 |

25 0.000E+00 0.000E+00-3.000E+02 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00  
 26 0.000E+00 0.000E+00-3.000E+02 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00  
 27 0.000E+00 0.000E+00-3.000E+02 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$ (22) DEFINE CONTACT SURFACE

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*CONTACT\_SURFACE\_TO\_SURFACE\_TITLE

\$ CID IF. NAME

1 IF01

\$ SSID MSID SSTYP MSTYP SBOXID MBOXID SPR

MPR

1 2 0 0 0 0 0

\$ FS FD DC V VDC PENCHK BT DT

1.000E-04 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0 0.000E+00 1.000E+20

\$ SFS SFM SST MST SFST SFMT FSF VSF

.100E+01 .100E+01 .100E+01 .100E+01 .100E+01 .100E+01

\*SET\_SEGMENT

\$ SID DA1 DA2 DA3 DA4

1

\$ N1 N2 N3 N4 A1 A2 A3 A4

1 2 7 6

2 3 8 7

3 4 9 8

4 5 10 9

6 7 12 11

7 8 13 12

8 9 14 13

9 10 15 14

11 12 17 16

12 13 18 17

13 14 19 18

14 15 20 19

16 17 22 21

17 18 23 22

18 19 24 23

19 20 25 24

101 104 27 26

26 27 32 31

104 106 28 27

27 28 33 32

|      |      |      |      |
|------|------|------|------|
| 106  | 108  | 29   | 28   |
| 28   | 29   | 34   | 33   |
| 108  | 110  | 30   | 29   |
| 29   | 30   | 35   | 34   |
| 31   | 32   | 37   | 36   |
| 7942 | 7481 | 3525 | 3966 |
| 7943 | 3967 | 3526 | 7482 |

\$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8

\$ (23) DEFINE RIGID WALL

\$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8

\$ (24) NODAL RIGID BODY CARDS

\$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8

\$ (25) JOINT CARDS

\$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8

\$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8

\$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8

\*END

付録 2

```
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$ LS-DYNA(950) DECK WRITTEN BY : eta/FEMB-PC version 27.0
$ ENGINEER :
$ PROJECT :
$   UNITS : MM, TON, SEC, N
$   TIME  : 03:44:59 PM
$   DATE  : Tuesday, September 17, 2002
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*KEYWORD
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*TITLE
280yalisheding
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
$                                     PART CARDS
$
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*CONTROL_TERMINATION
$  ENDTIM   ENDCYC   DTMIN   ENDNEG   ENDMAS
   .300E+00     0     .000     .000     .000
*CONTROL_TIMESTEP
$  DTINIT     SCFT     ISDO     TSLIMIT     DTMS     LCTM     ERODE
MS1ST
   .000     .900     0
*CONTROL_HOURLASS
$  IHQ     QH
     1     .100
*CONTROL_BULK_VISCOSITY
$  Q2     Q1
   1.500     .060
*CONTROL_SHELL
$  WRPANG   ITRIST   IRNXX   ISTUPD   THEORY   BWC   MITER
   20.000     2     -1     0     2     2     1
*CONTROL_CONTACT
$  SLSFAC   RWPNAL   ISLCHK   SHLTHK   PENOPT   THKCHG   ORIEN
   .100
$  USRSTR   USRFAC   NSBCS   INTERM   XPENE
     0     0     10     0     4.000
*CONTROL_ENERGY
```

```

$      HGEN      RWEN      SLNTEN      RYLEN
          1          2          1          1
*CONTROL_DAMPING
$      NRCYCK      DRTOL      DRFCTR      DRTERM      TSSFDR      IRELAL      EDTTL
IDRFLG
          250          .001          .995
*CONTROL_OUTPUT
$      NPOPT      NEECHO      NREFUP      IACCOP      OPIFS      IPNINT      IKEDIT
          0          0          0          0          .000          0          100
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
          (3) DATABASE CONTROL CARDS · ASCII HISTORY FILE
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$*DATABASE_HISTORY_OPTION
$      ID1      ID2      ID3      ID4      ID5      ID6      ID7      ID8
$
$OPTION : BEAM      BEAM_SET      NODE      NODE_SET
$      SHELL      SHELL_SET      SOLID      SOLID_SET
$      TSHELL      TSHELL_SET
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
          (4) DATABASE CONTROL CARDS FOR ASCII FILE
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$*DATABASE_OPTION
$      DT
$
$OPTION : SECFORC      RWFORC      NODOUT      ELOUT      GLSTAT
$      DEFORC      MATSUM      NCFORC      RCFORC      DEFCEO
$      SPCFORC      SWFORC      ABSTAT      NODFOR      BNDOUT
$      RBDOUT      GCEOUT      SLEOUT      MPGS      SBTOUT
$      JNTFORC      AVSFLT      MOVIE
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
          (5) DATABASE CONTROL CARDS FOR BINARY FILE
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
$      DT/CYCL      LCDT      NOBEAM
          .100E-01
*DATABASE_BINARY_D3THDT
$      DT/CYCL      LCDT      NOBEAM
          .150E-01
$*DATABASE_BINARY_OPTION

```

```

$ DT/CYCL      LCDT      NOBEAM
$
$OPTION : D3DRFL D3DUMP RUNRSF INTFOR
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*DATABASE_EXTENT_BINARY
      0      0      3      0      1      1      1      1
      0      0      0      0      0      0
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
      (6) DEFINE PARTS CARDS
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*CONTROL_ALE
      2      1      1  1.000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000
0.0000000 0.0000000 0.0000000 0
$
      (6) DEFINE PARTS CARDS
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*PART
$HEADING
PART PID =      2 PART NAME :TAMA
$  PID      SID      MID      EOSID      HGID      GRAV      ADOPT      TMID
      2      2      2
*PART
$HEADING
PART PID =      4 PART NAME :MIZU
$  PID      SID      MID      EOSID      HGID      GRAV      ADOPT      TMID
      4      4      4      2
*PART
$HEADING
PART PID =      8 PART NAME :ITA
$  PID      SID      MID      EOSID      HGID      GRAV      ADOPT      TMID
      8      8      6
*PART
$HEADING
PART PID =      6 PART NAME :SUISOU
$  PID      SID      MID      EOSID      HGID      GRAV      ADOPT      TMID
      6      6      6
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*MAT_piecewise_linear_plasticity
      2  2.690e-6 70.000000  0.34500
      1
$  EPS1      EPS2      EPS3      EPS4      EPS5      EPS6      EPS7      EPS8

```

\$ 0.000E+00 3.090E-02 4.090E-02 5.000E-02 1.510E-01 3.010E-01 7.010E-01 1.500E+00  
 \$ ES1 ES2 ES3 ES4 ES5 ES6 ES7 ES8

\$ 0.040E+00 0.075E+00 0.085E+00 0.095E+00 0.120E+00 0.150E+00 0.180E+00 1.257E+00

\*MAT\_NULL

4 1.000e-6 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000

\*EOS\_linear\_polynomial

2 0 3.109000 -4.433000 50.556000 0.0000000 0.0000000 0.0000000

0.00000000

\*MAT\_RIGID

\$ MID RO E PR N COUPLE M ALIAS

6 7.830E-06 2.070E+02 2.800E-01 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00

\$ CMO CON1 CON2

1.0 7.0 7.0

\$LCO or A1 A2 A3 V1 V2 V3

\*define\_table

1

0.0045

0.030

0.40

3.80

30.

800.

10000

\*define\_curve

11

0.0 0.020

0.02 0.060

0.04 0.078

0.06 0.085

0.08 0.095

0.10 0.105

0.12 0.110

0.14 0.115

0.50 0.150

1.00 0.180

1.50 0.500

\*define\_curve

12

|      |       |
|------|-------|
| 0.0  | 0.024 |
| 0.02 | 0.062 |
| 0.04 | 0.079 |
| 0.06 | 0.090 |
| 0.08 | 0.098 |
| 0.10 | 0.107 |
| 0.12 | 0.112 |
| 0.14 | 0.116 |
| 0.50 | 0.160 |
| 1.00 | 0.190 |
| 1.50 | 0.550 |

\*define\_curve

13

|      |       |
|------|-------|
| 0.0  | 0.030 |
| 0.02 | 0.065 |
| 0.04 | 0.082 |
| 0.06 | 0.092 |
| 0.08 | 0.105 |
| 0.10 | 0.110 |
| 0.12 | 0.112 |
| 0.14 | 0.116 |
| 0.50 | 0.170 |
| 1.00 | 0.200 |
| 1.50 | 0.560 |

\*define\_curve

14

|      |       |
|------|-------|
| 0.0  | 0.036 |
| 0.02 | 0.066 |
| 0.04 | 0.083 |
| 0.06 | 0.093 |
| 0.08 | 0.106 |
| 0.10 | 0.112 |
| 0.12 | 0.116 |
| 0.14 | 0.118 |
| 0.50 | 0.180 |
| 1.00 | 0.250 |
| 1.50 | 0.600 |

\*define\_curve



15

|      |       |
|------|-------|
| 0.0  | 0.040 |
| 0.02 | 0.068 |
| 0.04 | 0.088 |
| 0.06 | 0.100 |
| 0.08 | 0.110 |
| 0.10 | 0.120 |
| 0.12 | 0.125 |
| 0.14 | 0.130 |
| 0.50 | 0.200 |
| 1.00 | 0.400 |
| 1.50 | 0.660 |

\*define\_curve

16

|      |       |
|------|-------|
| 0.0  | 0.050 |
| 0.02 | 0.070 |
| 0.04 | 0.090 |
| 0.06 | 0.108 |
| 0.08 | 0.118 |
| 0.10 | 0.130 |
| 0.12 | 0.142 |
| 0.14 | 0.150 |
| 0.50 | 0.250 |
| 1.00 | 0.500 |
| 1.50 | 0.700 |

\*define\_curve

17

|      |       |
|------|-------|
| 0.0  | 0.045 |
| 0.02 | 0.080 |
| 0.04 | 0.100 |
| 0.06 | 0.120 |
| 0.08 | 0.140 |
| 0.10 | 0.180 |
| 0.12 | 0.200 |
| 0.14 | 0.260 |
| 0.50 | 0.300 |
| 1.00 | 0.800 |
| 1.50 | 1.000 |

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$ (7.1) SECTION CARDS

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*SECTION\_SOLID

\$ SID ELFORM AET  
2

\*SECTION\_SOLID\_ale

\$ SID ELFORM AET  
4 5

\*SECTION\_SOLID

\$ SID ELFORM AET  
6

\*SECTION\_SOLID

\$ SID ELFORM AET  
8

\*CONSTRAINED\_LAGRANGE\_IN\_SOLID

2 4 1 1 -2 2

\*CONSTRAINED\_LAGRANGE\_IN\_SOLID

6 4 1 1 -2 2

\*\$CONSTRAINED\_LAGRANGE\_IN\_SOLID

\$ 8 4 1 1 -2 2

\*SET\_PART\_LIST

2  
2 4

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$  
\$ SEGMENT SET CARDS  
\$  
\$

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8  
\$  
\$ INITIAL VELOCITY CARDS  
\$  
\$

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

^VELOCITY

\$ NID VX VY VZ VXR VYR VZR  
1 0.0 0.0 -280.0 0.0 0.0 0.0

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

^VELOCITY

\$ NID VX VY VZ VXR VYR VZR

6 0.0 0.0 -280.0 0.0 0.0 0.0

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

^VELOCITY

| \$ | NID | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|----|-----|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
|    | 7   | 0.0 | 0.0 | -280.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

^VELOCITY

| \$ | NID | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|----|-----|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
|    | 2   | 0.0 | 0.0 | -280.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

^VELOCITY

| \$ | NID | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|----|-----|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
|    | 76  | 0.0 | 0.0 | -280.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

^VELOCITY

| \$ | NID | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|----|-----|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
|    | 77  | 0.0 | 0.0 | -280.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

^VELOCITY

| \$ | NID | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|----|-----|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
|    | 78  | 0.0 | 0.0 | -280.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$

\$

\$

NODE INFORMATION

\$

\$

\$

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*NODE

| \$ | NID | X        | Y         | Z    | TC  | RC  |
|----|-----|----------|-----------|------|-----|-----|
|    | 1   | 3.0      | 0.0       | 20.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 2   | 3.0      | 0.75      | 20.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 3   | 3.0      | 1.5       | 20.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 4   | 3.0      | 2.25      | 20.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 5   | 3.0      | 3.0       | 20.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 6   | 2.25     | 0.0       | 20.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 7   | 2.25     | 0.7812499 | 20.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 8   | 2.25     | 1.5625    | 20.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 9   | 2.249999 | 2.34375   | 20.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 10  | 2.249999 | 3.125     | 20.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 11  | 1.5      | 0.0       | 20.0 | 0.0 | 0.0 |

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$  
 \$ ELEMENTS INFORMATION \$  
 \$

\$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8  
 \$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8

\$  
 \$ SOLID ELEMENTS \$  
 \$

\$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8

\*ELEMENT\_SOLID

| \$ | EID | PID | NID1 | NID2 | NID3 | NID4 | NID5 | NID6 | NID7 | NID8 |
|----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
|    | 49  | 2   | 1    | 6    | 7    | 2    | 76   | 77   | 78   | 79   |
|    | 50  | 2   | 2    | 7    | 8    | 3    | 79   | 78   | 80   | 81   |
|    | 51  | 2   | 3    | 8    | 9    | 4    | 81   | 80   | 82   | 83   |
|    | 52  | 2   | 4    | 9    | 10   | 5    | 83   | 82   | 84   | 85   |
|    | 53  | 2   | 6    | 11   | 12   | 7    | 77   | 86   | 87   | 78   |
|    | 54  | 2   | 7    | 12   | 13   | 8    | 78   | 87   | 88   | 80   |

\$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8

\*END

付録 3

```
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$ LS-DYNA(950) DECK WRITTEN BY : eta/FEMB-PC version 27.0
$ ENGINEER :
$ PROJECT :
$ UNITS : MM, KG, MSEC, KN
$ TIME : 11:52:08 PM
$ DATE : Monday, October 07, 2002
```

```
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*KEYWORD
```

```
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*TITLE
```

2tanexp250

```
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
```

\$

\$

\$

PART CARDS

\$

\$

\$

```
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
```

\*CONTROL\_TERMINATION

```
$ ENDTIM ENDCYC DTMIN ENDNEG ENDMAS
.300E+00 0 .000 .000 .000
```

\*CONTROL\_TIMESTEP

```
$ DTINIT SCFT ISDO TSLIMIT DTMS LCTM ERODE
MS1ST
```

```
.000 .5 0
```

\*CONTROL\_HOURLASS

```
$ IHQ QH
1 .100
```

\*CONTROL\_BULK\_VISCOSITY

```
$ Q2 Q1
1.500 .060
```

\*CONTROL\_SHELL

```
$ WRPANG ITRIST IRNXX ISTUPD THEORY BWC MITER
20.000 2 -1 0 2 2 1
```

\*CONTROL\_CONTACT

```
$ SLSFAC RWPNAL ISLCHK SHLTHK PENOPT THKCHG ORIEN
.100
```

```
$ USRSTR USRFAC NSBCS INTERM XPENE
0 0 10 0 4.000
```

\*CONTROL\_ENERGY

```

$   HGEN      RWEN      SLNTEN      RYLEN
      1        2        1        1
*CONTROL_DAMPING
$   NRCYCK      DRTOL      DRFCTR      DRTERM      TSSFDR      IRELAL      EDTTL
IDRFLG
      250      .001      .995
*CONTROL_OUTPUT
$   NPOPT      NEECHO      NREFUP      IACCOP      OPIFS      IPNINT      IKEDIT
      0        0        0        0      .000      0      100
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
$
      (3) DATABASE CONTROL CARDS - ASCII HISTORY FILE
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
$*DATABASE_HISTORY_OPTION
$   ID1      ID2      ID3      ID4      ID5      ID6      ID7      ID8
$
$OPTION : BEAM      BEAM_SET      NODE      NODE_SET
$   SHELL      SHELL_SET      SOLID      SOLID_SET
$   TSHELL      TSHELL_SET
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
$
      (4) DATABASE CONTROL CARDS FOR ASCII FILE
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
$*DATABASE_OPTION
$   DT
$
$OPTION : SECFORC RWFORC NODOUT ELOUT  GLSTAT
$   TUFORC  MATSUM NCFORC RCFORC DEFGEO
$   SPCFORC SWFORC ABSTAT NODFOR BNDOUT
$   RBDOUT  GCEOUT SLEOUT MPGS  SBTOUT
$   JNTFORC AVSFLT MOVIE
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
$
      (5) DATABASE CONTROL CARDS FOR BINARY FILE
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
$ DT/CYCL      LCDT      NOBEAM
      .100E-01
*DATABASE_BINARY_D3THDT
$ DT/CYCL      LCDT      NOBEAM
      .250E-01
$*DATABASE_BINARY_OPTION

```

\$ DT/CYCL LC DT NOBEAM

\$

\$OPTION : D3DRFL D3DUMP RUNRSF INTFOR

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*DATABASE\_EXTENT\_BINARY

0 0 3 0 1 1 1 1  
0 0 0 0 0 0

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$ (6) DEFINE PARTS CARDS

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*CONTROL\_ALE

2 1 4 -1 0.000000 0.000000 0.000000  
0.000000 0.000000 0.000000

\$ (6) DEFINE PARTS CARDS

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*PART

\$HEADING

PART PID = 5 PART NAME :TAMA

\$ PID SID MID EOSID HGID GRAV ADPOPT TMID  
5 5 5

\*PART

\$HEADING

PART PID = 1 PART NAME :MIZU

\$ PID SID MID EOSID HGID GRAV ADPOPT TMID  
1 1 1 2

\$HEADING

PART PID = 3 PART NAME :vido

\$ PID SID MID EOSID HGID GRAV ADPOPT TMID  
3 1 1 2

\*PART

\$HEADING

PART PID = 9 PART NAME :ITA

\$ PID SID MID EOSID HGID GRAV ADPOPT TMID  
9 9 9

\*PART

\$HEADING

PART PID = 7 PART NAME :SUISOU

\$ PID SID MID EOSID HGID GRAV ADPOPT TMID  
7 9 9

\*initial\_void\_part

3

\*set\_part\_list

2

7 9

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*MAT\_piecewise\_linear\_plasticity

5 2.690e-6 70.000000 0.34500

1

\$ EPS1 EPS2 EPS3 EPS4 EPS5 EPS6 EPS7 EPS8

\$ 0.000E+00 3.090E-02 4.090E-02 5.000E-02 1.510E-01 3.010E-01 7.010E-01 1.500E+00

\$ ES1 ES2 ES3 ES4 ES5 ES6 ES7 ES8

\*MAT\_piecewise\_linear\_plasticity

6 7.830e-6 2.07e+06 0.2800

\$ EPS1 EPS2 EPS3 EPS4 EPS5 EPS6 EPS7 EPS8

0.000E+00 3.090E-02 4.090E-02 5.000E-02 1.510E-01 3.010E-01 7.010E-01 1.500E+00

\$ ES1 ES2 ES3 ES4 ES5 ES6 ES7 ES8

0.040E+00 0.075E+00 0.085E+00 0.095E+00 0.120E+00 0.150E+00 0.180E+00 1.257E+00

\*MAT\_NULL

1 1.000e-6 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000

\*EOS\_linear\_polynomial

2 0 3.109000 -4.433000 50.556000 0.0000000 0.0000000 0.0000000

0.000000000

\*MAT\_RIGID

\$ MID RO E PR N COUPLE M ALIAS

9 7.830E-06 2.070E+02 2.800E-01 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00

\$ CMO CON1 CON2

1.0 7.0 7.0

\$LCO or A1 A2 A3 V1 V2 V3

\*define\_table

1

0.0045

0.030

0.40

3.80



30.  
800.  
10000

\*define\_curve

11

|      |       |
|------|-------|
| 0.0  | 0.020 |
| 0.02 | 0.060 |
| 0.04 | 0.078 |
| 0.06 | 0.085 |
| 0.08 | 0.095 |
| 0.10 | 0.105 |
| 0.12 | 0.110 |
| 0.14 | 0.115 |
| 0.50 | 0.150 |
| 1.00 | 0.180 |
| 1.50 | 0.500 |

\*define\_curve

12

|      |       |
|------|-------|
| 0.0  | 0.024 |
| 0.02 | 0.062 |
| 0.04 | 0.079 |
| 0.06 | 0.090 |
| 0.08 | 0.098 |
| 0.10 | 0.107 |
| 0.12 | 0.112 |
| 0.14 | 0.116 |
| 0.50 | 0.160 |
| 1.00 | 0.190 |
| 1.50 | 0.550 |

\*define\_curve

13

|      |       |
|------|-------|
| 0.0  | 0.030 |
| 0.02 | 0.065 |
| 0.04 | 0.082 |
| 0.06 | 0.092 |
| 0.08 | 0.105 |
| 0.10 | 0.110 |
| 0.12 | 0.112 |
| 0.14 | 0.116 |
| 0.50 | 0.170 |

|               |      |       |
|---------------|------|-------|
|               | 1.00 | 0.200 |
|               | 1.50 | 0.560 |
| *define_curve |      |       |
| 14            |      |       |
|               | 0.0  | 0.036 |
|               | 0.02 | 0.066 |
|               | 0.04 | 0.083 |
|               | 0.06 | 0.093 |
|               | 0.08 | 0.106 |
|               | 0.10 | 0.112 |
|               | 0.12 | 0.116 |
|               | 0.14 | 0.118 |
|               | 0.50 | 0.180 |
|               | 1.00 | 0.250 |
|               | 1.50 | 0.600 |

|               |      |       |
|---------------|------|-------|
| *define_curve |      |       |
| 15            |      |       |
|               | 0.0  | 0.040 |
|               | 0.02 | 0.068 |
|               | 0.04 | 0.088 |
|               | 0.06 | 0.100 |
|               | 0.08 | 0.110 |
|               | 0.10 | 0.120 |
|               | 0.12 | 0.125 |
|               | 0.14 | 0.130 |
|               | 0.50 | 0.200 |
|               | 1.00 | 0.400 |
|               | 1.50 | 0.660 |

|               |      |       |
|---------------|------|-------|
| *define_curve |      |       |
| 16            |      |       |
|               | 0.0  | 0.050 |
|               | 0.02 | 0.070 |
|               | 0.04 | 0.090 |
|               | 0.06 | 0.108 |
|               | 0.08 | 0.118 |
|               | 0.10 | 0.130 |
|               | 0.12 | 0.142 |
|               | 0.14 | 0.150 |
|               | 0.50 | 0.250 |
|               | 1.00 | 0.500 |

```

1.50    0.700
*define_curve
17
0.0     0.045
0.02    0.080
0.04    0.100
0.06    0.120
0.08    0.140
0.10    0.180
0.12    0.200
0.14    0.260
0.50    0.300
1.00    0.800
1.50    1.000

```

```

$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$              (7.1) SECTION CARDS

```

```

$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*SECTION_SOLID

```

```

$      SID      ELFORM      AET
      5         2

```

```

*SECTION_SOLID_ale

```

```

$      SID      ELFORM      AET
      1         12

```

```

*SECTION_SOLID

```

```

$      SID      ELFORM      AET
      9         2

```

```

*CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID

```

```

      1         1         2         0         6         4         2         1
      0.1

```

```

*CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID

```

```

      2         1         0         0         -2         0         0         0

```

```

$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

```

```

$
$              SEGMENT SET CARDS
$
$

```

```

$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

```

```

*SET_SEGMENT

```

```

$^TAMA

```

```

$      SID      DA1      DA2      DA3      DA4

```

|    |      |      |      |      |     |     |     |     |  |
|----|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|--|
|    | 1    | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0 |     |     |     |  |
| \$ | N1   | N2   | N3   | N4   | A1  | A2  | A3  | A4  |  |
|    | 9902 | 9907 | 9906 | 9901 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 9903 | 9908 | 9907 | 9902 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 9904 | 9909 | 9908 | 9903 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 9905 | 9910 | 9909 | 9904 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 9907 | 9912 | 9911 | 9906 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 9908 | 9913 | 9912 | 9907 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 9909 | 9914 | 9913 | 9908 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$  
\$  
\$ INITIAL VELOCITY CARDS  
\$  
\$

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

\$^VELOCITY

|    |      |     |     |        |     |     |     |
|----|------|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
| \$ | NID  | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|    | 9901 | 0.0 | 0.0 | -250.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

\$^VELOCITY

|    |      |     |     |        |     |     |     |
|----|------|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
| \$ | NID  | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|    | 9906 | 0.0 | 0.0 | -250.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

\$^VELOCITY

|    |      |     |     |        |     |     |     |
|----|------|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
| \$ | NID  | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|    | 9907 | 0.0 | 0.0 | -250.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

\$^VELOCITY

|    |      |     |     |        |     |     |     |
|----|------|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
| \$ | NID  | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|    | 9902 | 0.0 | 0.0 | -250.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

\$^VELOCITY

|    |      |     |     |        |     |     |     |
|----|------|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
| \$ | NID  | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|    | 9976 | 0.0 | 0.0 | -250.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

\$^VELOCITY

|    |      |     |     |        |     |     |     |
|----|------|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
| \$ | NID  | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|    | 9977 | 0.0 | 0.0 | -250.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

\$^VELOCITY

| \$                     | NID  | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|------------------------|------|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
|                        | 9978 | 0.0 | 0.0 | -250.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| *INITIAL_VELOCITY_NODE |      |     |     |        |     |     |     |
| \$^VELOCITY            |      |     |     |        |     |     |     |
| \$                     | NID  | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|                        | 9979 | 0.0 | 0.0 | -250.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| *INITIAL_VELOCITY_NODE |      |     |     |        |     |     |     |
| \$^VELOCITY            |      |     |     |        |     |     |     |
| \$                     | NID  | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|                        | 9908 | 0.0 | 0.0 | -250.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| *INITIAL_VELOCITY_NODE |      |     |     |        |     |     |     |
| \$^VELOCITY            |      |     |     |        |     |     |     |
| \$                     | NID  | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|                        | 9903 | 0.0 | 0.0 | -250.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| *INITIAL_VELOCITY_NODE |      |     |     |        |     |     |     |
| \$^VELOCITY            |      |     |     |        |     |     |     |
| \$                     | NID  | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|                        | 9980 | 0.0 | 0.0 | -250.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| *INITIAL_VELOCITY_NODE |      |     |     |        |     |     |     |
| \$^VELOCITY            |      |     |     |        |     |     |     |
| \$                     | NID  | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|                        | 9981 | 0.0 | 0.0 | -250.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| *INITIAL_VELOCITY_NODE |      |     |     |        |     |     |     |
| \$^VELOCITY            |      |     |     |        |     |     |     |
| \$                     | NID  | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|                        | 9909 | 0.0 | 0.0 | -250.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| *INITIAL_VELOCITY_NODE |      |     |     |        |     |     |     |
| \$^VELOCITY            |      |     |     |        |     |     |     |
| \$                     | NID  | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|                        | 9904 | 0.0 | 0.0 | -250.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| *INITIAL_VELOCITY_NODE |      |     |     |        |     |     |     |
| \$^VELOCITY            |      |     |     |        |     |     |     |
| \$                     | NID  | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|                        | 9982 | 0.0 | 0.0 | -250.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| *INITIAL_VELOCITY_NODE |      |     |     |        |     |     |     |
| \$^VELOCITY            |      |     |     |        |     |     |     |
| \$                     | NID  | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|                        | 9983 | 0.0 | 0.0 | -250.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| *INITIAL_VELOCITY_NODE |      |     |     |        |     |     |     |
| \$^VELOCITY            |      |     |     |        |     |     |     |

| \$ | NID  | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|----|------|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
|    | 9910 | 0.0 | 0.0 | -250.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

^VELOCITY

| \$ | NID  | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|----|------|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
|    | 9905 | 0.0 | 0.0 | -250.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

^VELOCITY

| \$ | NID  | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|----|------|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
|    | 9984 | 0.0 | 0.0 | -250.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

^VELOCITY

| \$ | NID  | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|----|------|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
|    | 9985 | 0.0 | 0.0 | -250.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$

\$

\$

NODE INFORMATION

\$

\$

\$

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*NODE

\*NODE

| \$ | NID | X        | Y        | Z      | TC  | RC  |
|----|-----|----------|----------|--------|-----|-----|
|    | 1   | 0.0      | 0.0      | -160.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 2   | 2.5      | 0.0      | -160.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 3   | 5.0      | 0.0      | -160.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 4   | 7.5      | 0.0      | -160.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 5   | 10.0     | 0.0      | -160.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 6   | 0.0      | 2.5      | -160.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 7   | 2.317    | 2.317    | -160.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 8   | 4.634    | 2.134    | -160.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 9   | 6.951    | 1.951    | -160.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 10  | 9.268    | 1.768    | -160.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 11  | 0.0      | 5.0      | -160.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 12  | 2.134    | 4.634    | -160.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 13  | 4.268    | 4.268    | -160.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 14  | 6.402001 | 3.902    | -160.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 15  | 8.536    | 3.536    | -160.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 16  | 0.0      | 7.5      | -160.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 17  | 1.951    | 6.951    | -160.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 18  | 3.902    | 6.402001 | -160.0 | 0.0 | 0.0 |

|    |       |       |        |     |     |
|----|-------|-------|--------|-----|-----|
| 19 | 5.853 | 5.853 | -160.0 | 0.0 | 0.0 |
| 20 | 7.804 | 5.304 | -160.0 | 0.0 | 0.0 |
| 21 | 0.0   | 10.0  | -160.0 | 0.0 | 0.0 |

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$

\$

SOLID ELEMENTS

\$

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*ELEMENT\_SOLID

| \$ | EID | PID | NID1 | NID2 | NID3 | NID4 | NID5 | NID6 | NID7 | NID8 |
|----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
|    | 1   | 1   | 1    | 6    | 7    | 2    | 26   | 31   | 32   | 27   |
|    | 2   | 1   | 2    | 7    | 8    | 3    | 27   | 32   | 33   | 28   |
|    | 3   | 1   | 3    | 8    | 9    | 4    | 28   | 33   | 34   | 29   |
|    | 4   | 1   | 4    | 9    | 10   | 5    | 29   | 34   | 35   | 30   |
|    | 5   | 1   | 6    | 11   | 12   | 7    | 31   | 36   | 37   | 32   |
|    | 6   | 1   | 7    | 12   | 13   | 8    | 32   | 37   | 38   | 33   |
|    | 7   | 1   | 8    | 13   | 14   | 9    | 33   | 38   | 39   | 34   |

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*END

付録 4

LS-DYNA(950) DECK WRITTEN BY : eta/FEMB-PC version 27.0

\$ ENGINEER :

\$ PROJECT :

\$ UNITS : MM, KG, MSEC, KN

\$ TIME : 10:55:10 PM

\$ DATE : Tuesday, March 11, 2003

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*KEYWORD 15500000

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*TITLE

打ち抜き

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$

PART CARDS

\$

\$

\$

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

計算時間と展示時間

\*CONTROL\_TERMINATION

|    |          |        |       |        |        |  |  |  |
|----|----------|--------|-------|--------|--------|--|--|--|
| \$ | ENDTIM   | ENDCYC | DTMIN | ENDNEG | ENDMAS |  |  |  |
|    | .500E+00 | 0      | .000  | .000   | .000   |  |  |  |

\*CONTROL\_TIMESTEP

|       |        |      |      |         |      |      |       |
|-------|--------|------|------|---------|------|------|-------|
| \$    | DTINIT | SCFT | ISDO | TSLIMIT | DTMS | LCTM | ERODE |
| MS1ST | .000   | .1   | 0    |         |      |      |       |

\*CONTROL\_HOURLASS

|    |     |      |
|----|-----|------|
| \$ | IHQ | QH   |
|    | 1   | .100 |

\*CONTROL\_BULK\_VISCOSITY

|    |       |      |
|----|-------|------|
| \$ | Q2    | Q1   |
|    | 1.500 | .060 |

\*CONTROL\_SHELL

|    |        |        |       |        |        |     |       |
|----|--------|--------|-------|--------|--------|-----|-------|
| \$ | WRPANG | ITRIST | IRNXX | ISTUPD | THEORY | BWC | MITER |
|    | 20.000 | 2      | -1    | 0      | 2      | 2   | 1     |

\*CONTROL\_CONTACT

|    |        |        |        |        |        |        |       |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| \$ | SLSFAC | RWPNAL | ISLCHK | SHLTHK | PENOPT | THKCHG | ORIEN |
|    | .100   |        |        |        |        |        |       |

|    |        |        |       |        |       |
|----|--------|--------|-------|--------|-------|
| \$ | USRSTR | USRFAC | NSBCS | INTERM | XPENE |
|    | 0      | 0      | 10    | 0      | 4.000 |

\*CONTROL\_ENERGY

|    |      |      |        |       |
|----|------|------|--------|-------|
| \$ | HGEN | RWEN | SLNTEN | RYLEN |
|    | 1    | 2    | 1      | 1     |

\*CONTROL\_DAMPING

|        |        |       |        |        |        |        |       |
|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|
| \$     | NRCYCK | DRTOL | DRFCTR | DRTERM | TSSFDR | IRELAL | EDTTL |
| IDRFLG | 250    | .001  | .995   |        |        |        |       |

\*CONTROL\_OUTPUT

|    |       |        |        |        |       |        |        |
|----|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|
| \$ | NPOPT | NEECHO | NREFUP | IACCOP | OPIFS | IPNINT | IKEDIT |
|    | 0     | 0      | 0      | 0      | .000  | 0      | 100    |

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$

(3) DATABASE CONTROL CARDS - ASCII HISTORY FILE

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*DATABASE\_HISTORY\_OPTION

|    |     |     |     |     |     |     |     |     |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| \$ | ID1 | ID2 | ID3 | ID4 | ID5 | ID6 | ID7 | ID8 |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|

\$

\$OPTION : BEAM BEAM\_SET NODE NODE\_SET

\$ SHELL SHELL\_SET SOLID SOLID\_SET



```

$          TSHLL  TSHLL_SET
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$          (4) DATABASE CONTROL CARDS FOR ASCII FILE
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$*DATABASE_OPTION
$      DT
$
$OPTION : SECFORC RWFORC NODOUT ELOUT  GLSTAT
$      DEFORC  MATSUM NCFORC RCFORC DEFGEO
$      SPCFORC SWFORC ABSTAT NODFOR BNDOUT
$      RBDOUT  GCEOUT SLEOUT MPGS  SBTOUT
$      JNTFORC AVSFLT MOVIE
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$          (5) DATABASE CONTROL CARDS FOR BINARY FILE
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
展示時間間隔
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
$ DT/CYCL      LCDT      NOBEAM
.100E-01
*DATABASE_BINARY_D3THDT
$ DT/CYCL      LCDT      NOBEAM
.250E-01
$*DATABASE_BINARY_OPTION
$ DT/CYCL      LCDT      NOBEAM
$
$OPTION : D3DRFL D3DUMP RUNRSF INTFOR
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*DATABASE_EXTENT_BINARY
          0          0          3          0          1          1          1          1
          0          0          0          0          0          0
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$          (6) DEFINE PARTS CARDS
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
ALE の設定
*CONTROL_ALE
          2          1          1          -1 0.0000000 0.0000000 0.0000000
0.0000000 0.0000000 0.0000000
$          (6) DEFINE PARTS CARDS
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
PART の設定
*PART
$HEADING
PART PID =      2 PART NAME :TAMA
$      PID      SID      MID      EOSID      HGID      GRAV      ADPOPT      TMID
          2          2          2
*PART
$HEADING
PART PID =      12 PART NAME :MIZU
$      PID      SID      MID      EOSID      HGID      GRAV      ADPOPT      TMID
          12          3          3          2
$HEADING
PART PID =      11 PART NAME :vido
$      PID      SID      MID      EOSID      HGID      GRAV      ADPOPT      TMID
          11          3          3          2
*PART

```

```

$HEADING
PART PID =          4 PART NAME :suisou
$   PID      SID      MID      EOSID      HGID      GRAV      ADPOPT      TMID
      4        4        4
*PART
$HEADING
PART PID =          6 PART NAME :ita
$   PID      SID      MID      EOSID      HGID      GRAV      ADPOPT      TMID
      6        6        2
$HEADING
PART PID =          9 PART NAME :kata
$   PID      SID      MID      EOSID      HGID      GRAV      ADPOPT      TMID
      9        9        4
Void の設定
*set_part_list
  1
 12      11
*set_part_list
  2
  4      6
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
物質物理量の設定
*MAT_piecewise_linear_plasticity (純アルミニウム場合, 弾塑性体)
  2  2.690e-6 70.000000  0.34500
      1
$   EPS1      EPS2      EPS3      EPS4      EPS5      EPS6      EPS7      EPS8
$   ES1       ES2       ES3       ES4       ES5       ES6       ES7       ES8
*MAT_piecewise_linear_plasticity (鉄質弾丸場合, 弾塑性体)
  2  7.830e-6 210.000000  0.3
      1
$   EPS1      EPS2      EPS3      EPS4      EPS5      EPS6      EPS7      EPS8
      0.000E+00 3.090E-02 4.090E-02 5.000E-02 1.510E-01 3.010E-01 7.010E-01 1.500E+00
$   ES1       ES2       ES3       ES4       ES5       ES6       ES7       ES8
*MAT_piecewise_linear_plasticity (銅質弾丸, 弾塑性体)
  2  8.90e-6  140.000000  0.3500
      1
$   EPS1      EPS2      EPS3      EPS4      EPS5      EPS6      EPS7      EPS8
      0.000E+00 3.090E-02 4.090E-02 5.000E-02 1.510E-01 3.010E-01 7.010E-01 1.500E+00
$   ES1       ES2       ES3       ES4       ES5       ES6       ES7       ES8
*MAT_piecewise_linear_plasticity (PC 質弾丸, 弾塑性体)
  2  1.60e-6  50.000000  0.3000
$   EPS1      EPS2      EPS3      EPS4      EPS5      EPS6      EPS7      EPS8
      0.000E+00 3.090E-02 4.090E-02 5.000E-02 1.510E-01 3.010E-01 7.010E-01 1.500E+00
$   ES1       ES2       ES3       ES4       ES5       ES6       ES7       ES8
*MAT_NULL(水 流体)
  3  1.000e-6  0.0000000  0.0000000  0.0000000  0.0000000
*EOS_linear_polynomial

```

```

      2      0      3.109000 -4.433000 50.556000 0.0000000 0.0000000 0.0000000
0.0000000 (Eos 方程式)
*MAT_RIGID (鉄質収束レンズ, 水槽等, 剛体)
$      MID      RO      E      PR      N      COUPLE      M      ALIAS
      4      7.830E-06 2.070E+02 2.800E-01 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
$      CMO      CON1      CON2
      1.0      7.0      7.0
$LCO or A1      A2      A3      V1      V2      V3

```

(ひずみ速度の影響を考慮した多直線近似弾塑性体)

```
*define_table
```

```

1
0.0045
0.030
0.40
3.80
30.
800.
10000

```

```
*define_curve
```

```

11
      0.0      0.020
      0.02      0.060
      0.04      0.078
      0.06      0.085
      0.08      0.095
      0.10      0.105
      0.12      0.110
      0.14      0.115
      0.50      0.150
      1.00      0.180
      1.50      0.300

```

```
*define_curve
```

```

12
      0.0      0.024
      0.02      0.062
      0.04      0.079
      0.06      0.090
      0.08      0.098
      0.10      0.107
      0.12      0.112
      0.14      0.116
      0.50      0.160
      1.00      0.190
      1.50      0.350

```

```
*define_curve
```

```

13
      0.0      0.030
      0.02      0.065
      0.04      0.082
      0.06      0.092
      0.08      0.105
      0.10      0.110
      0.12      0.112
      0.14      0.116
      0.50      0.170
      1.00      0.200

```

|               |      |       |
|---------------|------|-------|
|               | 1.50 | 0.360 |
| *define_curve |      |       |
| 14            |      |       |
|               | 0.0  | 0.036 |
|               | 0.02 | 0.066 |
|               | 0.04 | 0.083 |
|               | 0.06 | 0.093 |
|               | 0.08 | 0.106 |
|               | 0.10 | 0.112 |
|               | 0.12 | 0.116 |
|               | 0.14 | 0.118 |
|               | 0.50 | 0.180 |
|               | 1.00 | 0.250 |
|               | 1.50 | 0.370 |

|               |      |       |
|---------------|------|-------|
| *define_curve |      |       |
| 15            |      |       |
|               | 0.0  | 0.040 |
|               | 0.02 | 0.068 |
|               | 0.04 | 0.088 |
|               | 0.06 | 0.100 |
|               | 0.08 | 0.110 |
|               | 0.10 | 0.120 |
|               | 0.12 | 0.125 |
|               | 0.14 | 0.130 |
|               | 0.50 | 0.200 |
|               | 1.00 | 0.400 |
|               | 1.50 | 0.460 |

|               |      |       |
|---------------|------|-------|
| *define_curve |      |       |
| 16            |      |       |
|               | 0.0  | 0.050 |
|               | 0.02 | 0.070 |
|               | 0.04 | 0.090 |
|               | 0.06 | 0.108 |
|               | 0.08 | 0.118 |
|               | 0.10 | 0.130 |
|               | 0.12 | 0.142 |
|               | 0.14 | 0.150 |
|               | 0.50 | 0.250 |
|               | 1.00 | 0.300 |
|               | 1.50 | 0.500 |

|               |      |       |
|---------------|------|-------|
| *define_curve |      |       |
| 17            |      |       |
|               | 0.0  | 0.045 |
|               | 0.02 | 0.080 |
|               | 0.04 | 0.100 |
|               | 0.06 | 0.120 |
|               | 0.08 | 0.140 |
|               | 0.10 | 0.180 |
|               | 0.12 | 0.200 |
|               | 0.14 | 0.260 |
|               | 0.50 | 0.300 |
|               | 1.00 | 0.400 |
|               | 1.50 | 0.550 |

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8  
 \$ (7.1) SECTION CARDS  
 \$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8  
 \*SECTION\_SOLID (要素 Type)

\$     SID     ELFORM     AET  
        2       2

\*SECTION\_SOLID

\$     SID     ELFORM     AET  
        4       2

\*SECTION\_SOLID

\$     SID     ELFORM     AET  
        6       2

\*SECTION\_SOLID\_ale

\$     SID     ELFORM     AET  
        3       5

\*SECTION\_SOLID

\$     SID     ELFORM     AET  
        9       2

(流体と固体の連接)

\*CONSTRAINED\_LAGRANGE\_IN\_SOLID

       2       12       1       1       6       4       2       1

\*CONSTRAINED\_LAGRANGE\_IN\_SOLID

       6       12       1       1       -2       2       0       0

\*CONSTRAINED\_LAGRANGE\_IN\_SOLID

       4       12       1       1       -2       2       0       0

\$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8

\$

\$

SEGMENT SET CARDS

\$

\$

\$

\$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8

(要素と節点)

\*SET\_SEGMENT

\$^TAMA

\$     SID       DA1       DA2       DA3       DA4  
        1       0.0       0.0       0.0       0.0

\$     N1       N2       N3       N4       A1       A2       A3       A4  
        2       9       8       1       0.0       0.0       0.0       0.0

\$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8

\$

\$

INITIAL VELOCITY CARDS

\$

\$

\$

\$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8

(速度の定義)

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

\$^VELOCITY

\$     NID       VX       VY       VZ (垂直方向) VXR       VYR       VZR  
        1       0.0       0.0       -200.0       0.0       0.0       0.0

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

\$^VELOCITY

\$     NID       VX       VY       VZ       VXR       VYR       VZR  
        6       0.0       0.0       -200.0       0.0       0.0       0.0

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

\$^VELOCITY

\$     NID       VX       VY       VZ       VXR       VYR       VZR  
        7       0.0       0.0       -200.0       0.0       0.0       0.0

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

\$^VELOCITY

\$     NID       VX       VY       VZ       VXR       VYR       VZR  
        2       0.0       0.0       -200.0       0.0       0.0       0.0

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

^VELOCITY

| NID | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|-----|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
| 76  | 0.0 | 0.0 | -200.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

^VELOCITY

| NID | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|-----|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
| 77  | 0.0 | 0.0 | -200.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

1 2 3 4 5 6 7 8

\$  
 \$  
 \$ NODE INFORMATION \$  
 \$  
 \$

1 2 3 4 5 6 7 8

(節点座標)

\*NODE

| NID | X    | Y         | Z    | TC  | RC  |
|-----|------|-----------|------|-----|-----|
| 1   | 3.8  | 0.0       | 20.0 | 0.0 | 0.0 |
| 2   | 3.6  | 0.7499999 | 20.0 | 0.0 | 0.0 |
| 3   | 3.4  | 1.5       | 20.0 | 0.0 | 0.0 |
| 4   | 3.2  | 2.25      | 20.0 | 0.0 | 0.0 |
| 5   | 3.0  | 3.0       | 20.0 | 0.0 | 0.0 |
| 6   | 2.85 | 0.0       | 20.0 | 0.0 | 0.0 |
| 7   | 2.7  | 0.7999999 | 20.0 | 0.0 | 0.0 |

1 2 3 4 5 6 7 8

\$  
 \$  
 \$ ELEMENTS INFORMATION \$  
 \$  
 \$

1 2 3 4 5 6 7 8

1 2 3 4 5 6 7 8

\$  
 \$  
 \$ SOLID ELEMENTS \$  
 \$  
 \$

1 2 3 4 5 6 7 8

8 接点 12 線

\*ELEMENT\_SOLID

| EID | PID | NID1 | NID2 | NID3 | NID4 | NID5 | NID6 | NID7 | NID8 |
|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 49  | 2   | 1    | 6    | 7    | 2    | 76   | 77   | 78   | 79   |

\*SET\_PART\_LIST

^MIZU

| SID | DA1 | DA2 | DA3 | DA4 |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1   | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

| PID1 | PID2 | PID3 | PID4 | PID5 | PID6 | PID7 | PID8 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1    | 3    |      |      |      |      |      |      |

1 2 3 4 5 6 7 8

\$  
 \$  
 \$ CONTACT CARDS \$  
 \$  
 \$

1 2 3 4 5 6 7 8

(固体と固体の接触)

\*CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE\_TITLE

| CID | SSID | MSID | SSTYP | MSTYP | SBOXID | MBOXID | SPR | MPR |
|-----|------|------|-------|-------|--------|--------|-----|-----|
| 1   | 2    | 3    | 0     | 0     | 0      | 0      |     |     |

\$ (摩擦係数)FS    FD    DC    VC    VDC    PENCHK    BT    DT

|    |        |        |        |        |        |       |       |           |  |  |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-----------|--|--|
| \$ | 0.90   | 0.90   | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0     | 0.0   | 1.000E+23 |  |  |
|    | SFS    | SFM    | SST    | MST    | SFST   | SFMT  | FSF   | VSF       |  |  |
| \$ | 1.0    | 1.0    | 0.0    | 0.0    | 1.0    | 1.0   | 1.0   | 1.0       |  |  |
|    | SOFT   | SOFSCL | CIDAB  | MAXPAR | PENTOL | DEPTH | BSORT | FRCFRQ    |  |  |
| \$ | 0      | 0.10   | 1.025  | 0.0    | 2.0    | 0     | 1     |           |  |  |
|    | PENMAX | THKOPT | SHLTHK | SNLOG  | ISYM   | I2D3D |       |           |  |  |
| \$ | 0.0    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     |       |           |  |  |

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$  
\$  
\$  
\$  
\$

NODE INFORMATION

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

節点番号

\*NODE

| \$ | NID   | X          | Y         | Z      | TC  | RC  |
|----|-------|------------|-----------|--------|-----|-----|
|    | 1     | 10.0       | 0.0       | -160.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 2     | 9.5        | 1.166667  | -160.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 3     | 9.0        | 2.333333  | -160.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 4     | 8.5        | 3.5       | -160.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 5     | 8.0        | 4.666667  | -160.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 6     | 7.5        | 5.833333  | -160.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 7     | 7.0        | 7.0       | -160.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 69038 | -0.3750861 | -5.109274 | -196.9 | 0.0 | 0.0 |
|    | 69039 | -0.1875414 | -5.180017 | -196.9 | 0.0 | 0.0 |

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$  
\$  
\$  
\$  
\$

ELEMENTS INFORMATION

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$  
\$  
\$  
\$  
\$

SOLID ELEMENTS

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

ソリット要素番号

\*ELEMENT\_SOLID

| \$ | EID | PID | NID1 | NID2 | NID3 | NID4 | NID5 | NID6 | NID7 | NID8 |
|----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
|    | 1   | 1   | 1    | 8    | 9    | 2    | 50   | 57   | 58   | 51   |
|    | 2   | 1   | 2    | 9    | 10   | 3    | 51   | 58   | 59   | 52   |
|    | 3   | 1   | 3    | 10   | 11   | 4    | 52   | 59   | 60   | 53   |
|    | 4   | 1   | 4    | 11   | 12   | 5    | 53   | 60   | 61   | 54   |
|    | 5   | 1   | 5    | 12   | 13   | 6    | 54   | 61   | 62   | 55   |
|    | 6   | 1   | 6    | 13   | 14   | 7    | 55   | 62   | 63   | 56   |
|    | 7   | 1   | 8    | 15   | 16   | 9    | 57   | 64   | 65   | 58   |
|    | 8   | 1   | 9    | 16   | 17   | 10   | 58   | 65   | 66   | 59   |
|    | 9   | 1   | 10   | 17   | 18   | 11   | 59   | 66   | 67   | 60   |
|    | 10  | 1   | 11   | 18   | 19   | 12   | 60   | 67   | 68   | 61   |
|    | 11  | 1   | 12   | 19   | 20   | 13   | 61   | 68   | 69   | 62   |
|    | 12  | 1   | 13   | 20   | 21   | 14   | 62   | 69   | 70   | 63   |
|    | 13  | 1   | 15   | 22   | 23   | 16   | 64   | 71   | 72   | 65   |
|    | 14  | 1   | 16   | 23   | 24   | 17   | 65   | 72   | 73   | 66   |
|    | 15  | 1   | 17   | 24   | 25   | 18   | 66   | 73   | 74   | 67   |
|    | 16  | 1   | 18   | 25   | 26   | 19   | 67   | 74   | 75   | 68   |
|    | 17  | 1   | 19   | 26   | 27   | 20   | 68   | 75   | 76   | 69   |
|    | 18  | 1   | 20   | 27   | 28   | 21   | 69   | 76   | 77   | 70   |
|    | 19  | 1   | 22   | 29   | 30   | 23   | 71   | 78   | 79   | 72   |
|    | 20  | 1   | 23   | 30   | 31   | 24   | 72   | 79   | 80   | 73   |

|       |    |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 21    | 1  | 24    | 31    | 32    | 25    | 73    | 80    | 81    | 74    |
| 22    | 1  | 25    | 32    | 33    | 26    | 74    | 81    | 82    | 75    |
| 23    | 1  | 26    | 33    | 34    | 27    | 75    | 82    | 83    | 76    |
| 24    | 1  | 27    | 34    | 35    | 28    | 76    | 83    | 84    | 77    |
| 25    | 1  | 29    | 36    | 37    | 30    | 78    | 85    | 86    | 79    |
| 26    | 1  | 30    | 37    | 38    | 31    | 79    | 86    | 87    | 80    |
| 27    | 1  | 31    | 38    | 39    | 32    | 80    | 87    | 88    | 81    |
| 28    | 1  | 32    | 39    | 40    | 33    | 81    | 88    | 89    | 82    |
| 29    | 1  | 33    | 40    | 41    | 34    | 82    | 89    | 90    | 83    |
| 19509 | 4  | 28322 | 22407 | 22405 | 28324 | 28348 | 22554 | 22552 | 28350 |
| 19510 | 4  | 28324 | 22405 | 22403 | 28326 | 28350 | 22552 | 22550 | 28352 |
| 19511 | 4  | 28326 | 22403 | 22401 | 28328 | 28352 | 22550 | 22548 | 28354 |
| 19512 | 4  | 28328 | 22401 | 3750  | 5191  | 28354 | 22548 | 3897  | 5217  |
| 19513 | 4  | 28332 | 22642 | 22635 | 28333 | 27705 | 19777 | 19773 | 27701 |
| 19514 | 4  | 28333 | 22635 | 22628 | 28336 | 27701 | 19773 | 19769 | 27697 |
| 19515 | 4  | 28336 | 22628 | 22621 | 28338 | 27697 | 19769 | 19765 | 27693 |
| 19516 | 4  | 28338 | 22621 | 22614 | 28340 | 27693 | 19765 | 19761 | 27689 |
| 50672 | 12 | 67712 | 67192 | 67213 | 67713 | 69035 | 68515 | 68536 | 69036 |
| 50673 | 12 | 67713 | 67213 | 67234 | 67714 | 69036 | 68536 | 68557 | 69037 |
| 50674 | 12 | 67714 | 67234 | 67255 | 67715 | 69037 | 68557 | 68578 | 69038 |
| 50675 | 12 | 67715 | 67255 | 67276 | 67716 | 69038 | 68578 | 68599 | 69039 |
| 50676 | 12 | 67716 | 67276 | 51421 | 51841 | 69039 | 68599 | 32807 | 53164 |

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*END



付録 5

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$ LS-DYNA(950) DECK WRITTEN BY : eta/FEMB-PC version 27.0

\$ ENGINEER :

\$ PROJECT :

\$ UNITS : MM, KG, MSEC, KN

\$ TIME : 03:31:36 PM

\$ DATE : Saturday, October 12, 2002

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*KEYWORD

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*TITLE

itakakouro250

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$

\$

\$

PART CARDS

\$

\$

\$

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*CONTROL\_TERMINATION

| \$ | ENDTIM   | ENDCYC | DTMIN | ENDNEG | ENDMAS |
|----|----------|--------|-------|--------|--------|
|    | .700E+00 | 0      | .000  | .000   | .000   |

\*CONTROL\_TIMESTEP

| \$    | DTINIT | SCFT | ISDO | TSLIMIT | DTMS | LCTM | ERODE |
|-------|--------|------|------|---------|------|------|-------|
| MS1ST | .000   | .1   | 0    |         |      |      |       |

\*CONTROL\_HOURLASS

| \$ | IHQ | QH   |
|----|-----|------|
|    | 1   | .100 |

\*CONTROL\_BULK\_VISCOSITY

| \$ | Q2    | Q1   |
|----|-------|------|
|    | 1.500 | .060 |

\*CONTROL\_SHELL

| \$ | WRPANG | ITRIST | IRNXX | ISTUPD | THEORY | BWC | MITER |
|----|--------|--------|-------|--------|--------|-----|-------|
|    | 20.000 | 2      | .1    | 0      | 2      | 2   | 1     |

\*CONTROL\_CONTACT

| \$ | SLSFAC | RWPNAL | ISLCHK | SHLTHK | PENOPT | THKCHG | ORIEN |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
|    | .100   |        |        |        |        |        |       |

| \$ | USRSTR | USRFAC | NSBCS | INTERM | XPENE |
|----|--------|--------|-------|--------|-------|
|    | 0      | 0      | 10    | 0      | 4.000 |

\*CONTROL\_ENERGY

```

$   HGEN   RWEN   SLNTEN   RYLEN
      1     2     1     1
*CONTROL_DAMPING
$   NRCYCK   DRTOL   DRFCTR   DRTERM   TSSFDR   IRELAL   EDTTL
IDRFLG
      250   .001   .995
*CONTROL_OUTPUT
$   NPOPT   NEECHO   NREFUP   IACCOP   OPIFS   IPNINT   IKEDIT
      0     0     0     0   .000     0     100
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
$
      (3) DATABASE CONTROL CARDS - ASCII HISTORY FILE
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
$*DATABASE_HISTORY_OPTION
$   ID1     ID2     ID3     ID4     ID5     ID6     ID7     ID8
$
$OPTION : BEAM   BEAM_SET   NODE   NODE_SET
$   SHELL   SHELL_SET   SOLID   SOLID_SET
$   TSHELL   TSHELL_SET
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
$
      (4) DATABASE CONTROL CARDS FOR ASCII FILE
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
$*DATABASE_OPTION
$   DT
$
$OPTION : SECFORC RWFORC NODOUT ELOUT  GLSTAT
$   DEFORC  MATSUM NCFORC RCFORC DEFCEO
$   SPCFORC SWFORC ABSTAT NODFOR BNDOUT
$   RBDOUT  GCEOUT SLEOUT MPGS  SBTOUT
$   JNTFORC AVSFLT MOVIE
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
$
      (5) DATABASE CONTROL CARDS FOR BINARY FILE
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
$   DT/CYCL   LCDT   NOBEAM
      .100E-01
*DATABASE_BINARY_D3THDT
$   DT/CYCL   LCDT   NOBEAM
      .250E-01
$*DATABASE_BINARY_OPTION

```

\$ DT/CYCL LC DT NOBEAM

\$

\$OPTION : D3DRFL D3DUMP RUNRSF INTFOR

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*DATABASE\_EXTENT\_BINARY

|   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 3 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |   |   |

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$ (6) DEFINE PARTS CARDS

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*CONTROL\_ALE

|           |           |           |    |           |           |           |
|-----------|-----------|-----------|----|-----------|-----------|-----------|
| 2         | 1         | 4         | -1 | 0.0000000 | 0.0000000 | 0.0000000 |
| 0.0000000 | 0.0000000 | 0.0000000 |    |           |           |           |

\$ (6) DEFINE PARTS CARDS

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*PART

\$HEADING

PART PID = 5 PART NAME :TAMA

| \$ | PID | SID | MID | EOSID | HGID | GRAV | ADPOPT | TMID |
|----|-----|-----|-----|-------|------|------|--------|------|
|    | 5   | 5   | 5   |       |      |      |        |      |

\*PART

\$HEADING

PART PID = 1 PART NAME :MIZU

| \$ | PID | SID | MID | EOSID | HGID | GRAV | ADPOPT | TMID |
|----|-----|-----|-----|-------|------|------|--------|------|
|    | 1   | 1   | 1   | 2     |      |      |        |      |

\$HEADING

PART PID = 3 PART NAME :vido

| \$ | PID | SID | MID | EOSID | HGID | GRAV | ADPOPT | TMID |
|----|-----|-----|-----|-------|------|------|--------|------|
|    | 3   | 1   | 1   | 2     |      |      |        |      |

\*PART

\$HEADING

PART PID = 7 PART NAME :suisou

| \$ | PID | SID | MID | EOSID | HGID | GRAV | ADPOPT | TMID |
|----|-----|-----|-----|-------|------|------|--------|------|
|    | 7   | 7   | 7   |       |      |      |        |      |

\*PART

\$HEADING

PART PID = 9 PART NAME :ita

| \$ | PID | SID | MID | EOSID | HGID | GRAV | ADPOPT | TMID |
|----|-----|-----|-----|-------|------|------|--------|------|
|    | 9   | 9   | 5   |       |      |      |        |      |

```

$HEADING
PART PID =      12PART NAME :kata
$   PID      SID      MID      EOSID      HGID      GRAV      ADPOPT      TMID
      12      12      7
*initial_void_part
      3
*set_part_list
      2
      7      9
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
*MAT_piecewise_linear_plasticity
      5  2.690e-6 70.000000  0.34500
              1
$   EPS1      EPS2      EPS3      EPS4      EPS5      EPS6      EPS7      EPS8
$ 0.000E+00 3.090E-02 4.090E-02 5.000E-02 1.510E-01 3.010E-01 7.010E-01 1.500E+00
$   ES1      ES2      ES3      ES4      ES5      ES6      ES7      ES8
*MAT_piecewise_linear_plasticity
      9  7.830e-6  2.07e+02  0.2800
$   EPS1      EPS2      EPS3      EPS4      EPS5      EPS6      EPS7      EPS8
  0.000E+00 3.090E-02 4.090E-02 5.000E-02 1.510E-01 3.010E-01 7.010E-01 1.500E+00
$   ES1      ES2      ES3      ES4      ES5      ES6      ES7      ES8
  0.040E+00 0.075E+00 0.085E+00 0.095E+00 0.120E+00 0.150E+00 0.180E+00 1.257E+00
*MAT_NULL
      1  1.000e-6 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000
*EOS_linear_polynomial
      2      0  3.109000 -4.433000 50.556000 0.0000000 0.0000000 0.0000000
0.00000000
*MAT_RIGID
$   MID      RO      E      PR      N      COUPLE      M      ALIAS
      7 7.830E-06 2.070E+02 2.800E-01 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
$   CMO      CON1      CON2
      1.0      7.0      7.0
$LCO or A1      A2      A3      V1      V2      V3
*define_table
      1

```

0.0045

0.030

0.40

3.80

30.

800.

10000

\*define\_curve

11

|      |       |
|------|-------|
| 0.0  | 0.020 |
| 0.02 | 0.060 |
| 0.04 | 0.078 |
| 0.06 | 0.085 |
| 0.08 | 0.095 |
| 0.10 | 0.105 |
| 0.12 | 0.110 |
| 0.14 | 0.115 |
| 0.50 | 0.150 |
| 1.00 | 0.180 |
| 1.50 | 0.500 |

\*define\_curve

12

|      |       |
|------|-------|
| 0.0  | 0.024 |
| 0.02 | 0.062 |
| 0.04 | 0.079 |
| 0.06 | 0.090 |
| 0.08 | 0.098 |
| 0.10 | 0.107 |
| 0.12 | 0.112 |
| 0.14 | 0.116 |
| 0.50 | 0.160 |
| 1.00 | 0.190 |
| 1.50 | 0.550 |

\*define\_curve

13

|      |       |
|------|-------|
| 0.0  | 0.030 |
| 0.02 | 0.065 |
| 0.04 | 0.082 |
| 0.06 | 0.092 |
| 0.08 | 0.105 |

|      |       |
|------|-------|
| 0.10 | 0.110 |
| 0.12 | 0.112 |
| 0.14 | 0.116 |
| 0.50 | 0.170 |
| 1.00 | 0.200 |
| 1.50 | 0.560 |

\*define\_curve

14

|      |       |
|------|-------|
| 0.0  | 0.036 |
| 0.02 | 0.066 |
| 0.04 | 0.083 |
| 0.06 | 0.093 |
| 0.08 | 0.106 |
| 0.10 | 0.112 |
| 0.12 | 0.116 |
| 0.14 | 0.118 |
| 0.50 | 0.180 |
| 1.00 | 0.250 |
| 1.50 | 0.600 |

\*define\_curve

15

|      |       |
|------|-------|
| 0.0  | 0.040 |
| 0.02 | 0.068 |
| 0.04 | 0.088 |
| 0.06 | 0.100 |
| 0.08 | 0.110 |
| 0.10 | 0.120 |
| 0.12 | 0.125 |
| 0.14 | 0.130 |
| 0.50 | 0.200 |
| 1.00 | 0.400 |
| 1.50 | 0.660 |

\*define\_curve

16

|      |       |
|------|-------|
| 0.0  | 0.050 |
| 0.02 | 0.070 |
| 0.04 | 0.090 |
| 0.06 | 0.108 |
| 0.08 | 0.118 |
| 0.10 | 0.130 |

|      |       |
|------|-------|
| 0.12 | 0.142 |
| 0.14 | 0.150 |
| 0.50 | 0.250 |
| 1.00 | 0.500 |
| 1.50 | 0.700 |

\*define\_curve

17

|      |       |
|------|-------|
| 0.0  | 0.045 |
| 0.02 | 0.080 |
| 0.04 | 0.100 |
| 0.06 | 0.120 |
| 0.08 | 0.140 |
| 0.10 | 0.180 |
| 0.12 | 0.200 |
| 0.14 | 0.260 |
| 0.50 | 0.300 |
| 1.00 | 0.800 |
| 1.50 | 1.000 |

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$ (7.1) SECTION CARDS

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*SECTION\_SOLID

|    |     |        |     |
|----|-----|--------|-----|
| \$ | SID | ELFORM | AET |
|    | 5   | 2      |     |

\*SECTION\_SOLID\_ale

|    |     |        |     |
|----|-----|--------|-----|
| \$ | SID | ELFORM | AET |
|    | 1   | 12     |     |

\*SECTION\_SOLID

|    |     |        |     |
|----|-----|--------|-----|
| \$ | SID | ELFORM | AET |
|    | 9   | 2      |     |

\*SECTION\_SOLID

|    |     |        |     |
|----|-----|--------|-----|
| \$ | SID | ELFORM | AET |
|    | 7   | 2      |     |

\*SECTION\_SOLID

|    |     |        |     |
|----|-----|--------|-----|
| \$ | SID | ELFORM | AET |
|    | 12  | 2      |     |

\*CONSTRAINED\_LAGRANGE\_IN\_SOLID

|   |   |     |   |   |   |   |   |
|---|---|-----|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 2   | 0 | 6 | 4 | 2 | 1 |
|   |   | 0.1 |   |   |   |   |   |

\*CONSTRAINED\_LAGRANGE\_IN\_SOLID

2 1 0 0 -2 2 0 0  
 \$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8

\$  
 \$ SEGMENT SET CARDS \$  
 \$ \$

\$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8

\*SET\_SEGMENT

\$^TAMA

| \$ | SID  | DA1  | DA2  | DA3  | DA4 |     |     |     |  |
|----|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|--|
|    | 1    | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0 |     |     |     |  |
| \$ | N1   | N2   | N3   | N4   | A1  | A2  | A3  | A4  |  |
|    | 9822 | 9827 | 9826 | 9821 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 9823 | 9828 | 9827 | 9822 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 9824 | 9829 | 9828 | 9823 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 9825 | 9830 | 9829 | 9824 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 9827 | 9832 | 9831 | 9826 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 9828 | 9833 | 9832 | 9827 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 9829 | 9834 | 9833 | 9828 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 9830 | 9835 | 9834 | 9829 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 9832 | 9837 | 9836 | 9831 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 9833 | 9838 | 9837 | 9832 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 9834 | 9839 | 9838 | 9833 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 9835 | 9840 | 9839 | 9834 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 9837 | 9842 | 9841 | 9836 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 9838 | 9843 | 9842 | 9837 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 9839 | 9844 | 9843 | 9838 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 9840 | 9845 | 9844 | 9839 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 9847 | 9852 | 9851 | 9846 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 9847 | 9846 | 9921 | 9924 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 9848 | 9853 | 9852 | 9847 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 9848 | 9847 | 9924 | 9926 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 9849 | 9854 | 9853 | 9848 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 9849 | 9848 | 9926 | 9928 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 9850 | 9855 | 9854 | 9849 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 9850 | 9849 | 9928 | 9930 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |

\$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8

\$  
 \$ PART SET CARDS \$  
 \$ \$



\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*SET\_PART\_LIST

\$^MIZU

| \$ | SID | DA1 | DA2 | DA3 | DA4 |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|
|    | 1   | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

| \$ | PID1 | PID2 | PID3 | PID4 | PID5 | PID6 | PID7 | PID8 |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|
|    | 1    | 3    |      |      |      |      |      |      |

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$

\$

\$

INITIAL VELOCITY CARDS

\$

\$

\$

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

\$^VELOCITY

| \$ | NID  | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|----|------|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
|    | 9821 | 0.0 | 0.0 | -250.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

\$^VELOCITY

| \$ | NID  | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|----|------|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
|    | 9826 | 0.0 | 0.0 | -250.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

\$^VELOCITY

| \$ | NID  | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|----|------|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
|    | 9827 | 0.0 | 0.0 | -250.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

\$^VELOCITY

| \$ | NID  | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|----|------|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
|    | 9822 | 0.0 | 0.0 | -250.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

\$^VELOCITY

| \$ | NID  | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|----|------|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
|    | 9896 | 0.0 | 0.0 | -250.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

\$^VELOCITY

| \$ | NID  | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|----|------|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
|    | 9897 | 0.0 | 0.0 | -250.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

\$^VELOCITY

| \$ | NID   | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|----|-------|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
|    | 11315 | 0.0 | 0.0 | -250.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$ \$  
 \$ CONTACT CARDS \$  
 \$ \$

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE\_TITLE

| CID | SSID   | MSID   | SSTYP  | MSTYP  | SBOXID | MBOXID | SPR   |           |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-----------|
| 1   |        |        |        |        |        |        |       |           |
|     | 2      | 3      | 0      | 0      |        | 0      | 0     |           |
|     | FS     | FD     | DC     | VC     | VDC    | PENCHK | BT    | DT        |
|     | 0.90   | 0.90   | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0      | 0.0   | 1.000E+23 |
|     | SFS    | SFM    | SST    | MST    | SFST   | SFMT   | FSF   | VSF       |
|     | 1.0    | 1.0    | 0.0    | 0.0    | 1.0    | 1.0    | 1.0   |           |
|     | SOFT   | SOFSC  | LCIDAB | MAXPAR | PENTOL | DEPTH  | BSORT |           |
|     | 0      | 0.10   | 1.025  | 0.0    | 2.0    | 0      | 1     |           |
|     | PENMAX | THKOPT | SHLTHK | SNLOG  | ISYM   | I2D3D  |       |           |
|     | 0.0    | 0      | 0      | 0      | 0      |        |       |           |

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$ \$  
 \$ NODE INFORMATION \$  
 \$ \$

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*NODE

| NID   | X                    | Y         | Z      | TC  | RC  |
|-------|----------------------|-----------|--------|-----|-----|
| 1     | 10.0-0.0000005771092 |           | -160.0 | 0.0 | 0.0 |
| 2     | 9.268                | 1.767999  | -160.0 | 0.0 | 0.0 |
| 3     | 8.536                | 3.536     | -160.0 | 0.0 | 0.0 |
| 4     | 7.804                | 5.304     | -160.0 | 0.0 | 0.0 |
| 5     | 7.072                | 7.072     | -160.0 | 0.0 | 0.0 |
| 6     | 7.5-0.0000004328319  |           | -160.0 | 0.0 | 0.0 |
| 7     | 6.950998             | 1.951     | -160.0 | 0.0 | 0.0 |
| 8     | 6.401999             | 3.902     | -160.0 | 0.0 | 0.0 |
| 23802 | -0.3922756           | -4.984396 | -199.5 | 0.0 | 0.0 |

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$ \$  
 \$ ELEMENTS INFORMATION \$  
 \$ \$

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$

\$

\$

SOLID ELEMENTS

\$

\$

\$

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*ELEMENT\_SOLID

| \$ | EID   | PID | NID1  | NID2  | NID3  | NID4  | NID5  | NID6  | NID7  | NID8  |
|----|-------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|    | 1     | 1   | 1     | 6     | 7     | 2     | 26    | 31    | 32    | 27    |
|    | 2     | 1   | 2     | 7     | 8     | 3     | 27    | 32    | 33    | 28    |
|    | 3     | 1   | 3     | 8     | 9     | 4     | 28    | 33    | 34    | 29    |
|    | 4     | 1   | 4     | 9     | 10    | 5     | 29    | 34    | 35    | 30    |
|    | 5     | 1   | 6     | 11    | 12    | 7     | 31    | 36    | 37    | 32    |
|    | 6     | 1   | 7     | 12    | 13    | 8     | 32    | 37    | 38    | 33    |
|    | 7     | 1   | 8     | 13    | 14    | 9     | 33    | 38    | 39    | 34    |
|    | 8     | 1   | 9     | 14    | 15    | 10    | 34    | 39    | 40    | 35    |
|    | 9     | 1   | 11    | 16    | 17    | 12    | 36    | 41    | 42    | 37    |
|    | 10    | 1   | 12    | 17    | 18    | 13    | 37    | 42    | 43    | 38    |
|    | 11    | 1   | 13    | 18    | 19    | 14    | 38    | 43    | 44    | 39    |
|    | 12    | 1   | 14    | 19    | 20    | 15    | 39    | 44    | 45    | 40    |
|    | 13    | 1   | 16    | 21    | 22    | 17    | 41    | 46    | 47    | 42    |
|    | 14    | 1   | 17    | 22    | 23    | 18    | 42    | 47    | 48    | 43    |
|    | 15    | 1   | 18    | 23    | 24    | 19    | 43    | 48    | 49    | 44    |
|    | 16    | 1   | 19    | 24    | 25    | 20    | 44    | 49    | 50    | 45    |
|    | 17    | 1   | 26    | 31    | 32    | 27    | 51    | 56    | 57    | 52    |
|    | 18    | 1   | 27    | 32    | 33    | 28    | 52    | 57    | 58    | 53    |
|    | 19    | 1   | 28    | 33    | 34    | 29    | 53    | 58    | 59    | 54    |
|    | 20    | 1   | 29    | 34    | 35    | 30    | 54    | 59    | 60    | 55    |
|    | 21    | 1   | 31    | 36    | 37    | 32    | 56    | 61    | 62    | 57    |
|    | 22    | 1   | 32    | 37    | 38    | 33    | 57    | 62    | 63    | 58    |
|    | 23    | 1   | 33    | 38    | 39    | 34    | 58    | 63    | 64    | 59    |
|    | 24    | 1   | 34    | 39    | 40    | 35    | 59    | 64    | 65    | 60    |
|    | 25    | 1   | 36    | 41    | 42    | 37    | 61    | 66    | 67    | 62    |
|    | 26    | 1   | 37    | 42    | 43    | 38    | 62    | 67    | 68    | 63    |
|    | 27    | 1   | 38    | 43    | 44    | 39    | 63    | 68    | 69    | 64    |
|    | 28    | 1   | 39    | 44    | 45    | 40    | 64    | 69    | 70    | 65    |
|    | 29    | 1   | 41    | 46    | 47    | 42    | 66    | 71    | 72    | 67    |
|    | 14212 | 12  | 23800 | 22202 | 22204 | 23802 | 23801 | 22203 | 21478 | 23095 |

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*END

付録 6

```
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$  LS-DYNA(950) DECK WRITTEN BY : eta/FEMB-PC version 27.0
$  ENGINEER :
$  PROJECT :
$    UNITS : MM, TON, SEC,  N
$    TIME  : 12:22:05 AM
$    DATE  : Monday, September 16, 2002
```

```
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*KEYWORD
```

```
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*TITLE
rennzunai500
```

```
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
```

```
$
$                                     PART CARDS
$                                     $
$                                     $
```

```
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
```

\*CONTROL\_TERMINATION

```
$  ENDTIM   ENDCYC   DTMIN   ENDNEG   ENDMAS
   .500E+00     0     .000     .000     .000
```

\*CONTROL\_TIMESTEP

```
$  DTINIT     SCFT     ISDO     TSLIMIT     DTMS     LCTM     ERODE
MS1ST
   .000     .900     0
```

\*CONTROL\_HOURLASS

```
$  IHQ     QH
   1     .100
```

\*CONTROL\_BULK\_VISCOSITY

```
$  Q2     Q1
   1.500     .060
```

\*CONTROL\_SHELL

```
$  WRPANG   ITRIST   IRNXX   ISTUPD   THEORY   BWC   MITER
   20.000     2     -1     0     2     2     1
```

\*CONTROL\_CONTACT

```
$  SLSFAC   RWPNAL   ISLCHK   SHLTHK   PENOPT   THKCHG   ORIEN
   .100
```

```
$  USRSTR   USRFAC   NSBCS   INTERM   XPENE
   0     0     10     0     4.000
```

\*CONTROL\_ENERGY

```

$   HGEN   RWEN   SLNTEN   RYLEN
      1     2     1     1
*CONTROL_DAMPING
$   NRCYCK   DRTOL   DRFCTR   DRTERM   TSSFDR   IRELAL   EDTTL
IDRFLG
      250   .001   .995
*CONTROL_OUTPUT
$   NPOPT   NEECHO   NREFUP   IACCOP   OPIFS   IPNINT   IKEDIT
      0     0     0     0   .000     0     100
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
$
      (3) DATABASE CONTROL CARDS · ASCII HISTORY FILE
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
$*DATABASE_HISTORY_OPTION
$   ID1     ID2     ID3     ID4     ID5     ID6     ID7     ID8
$
$OPTION : BEAM   BEAM_SET   NODE   NODE_SET
$   SHELL   SHELL_SET   SOLID   SOLID_SET
$   TSHELL   TSHELL_SET
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
$
      (4) DATABASE CONTROL CARDS FOR ASCII FILE
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
$*DATABASE_OPTION
$   DT
$
$OPTION : SECFORC RWFORC NODOUT ELOUT  GLSTAT
$   DEFORC  MATSUM NCFORC RCFORC DEFGE0
$   SPCFORC SWFORC ABSTAT NODFOR BNDOUT
$   RBDOUT  GCEOUT SLEOUT MPGS  SBTOUT
$   JNTFORC AVSFLT MOVIE
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
$
      (5) DATABASE CONTROL CARDS FOR BINARY FILE
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
$ DT/CYCL   LCDT   NOBEAM
  .100E-01
*DATABASE_BINARY_D3THDT
$ DT/CYCL   LCDT   NOBEAM
  .250E-01
$*DATABASE_BINARY_OPTION

```

\$ DT/CYCL LCDT NOBEAM

\$

\$OPTION : D3DRFL D3DUMP RUNRSF INTFOR

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*DATABASE\_EXTENT\_BINARY

0 0 3 0 1 1 1 1

0 0 0 0 0 0

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$ (6) DEFINE PARTS CARDS

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*CONTROL\_ALE

2 1 4 -1.000000 0.000000 0.000000 0.000000

0.000000 0.000000 0.000000 0

\$ (6) DEFINE PARTS CARDS

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*PART

\$HEADING

PART PID = 2 PART NAME :TAMA

| \$ | PID | SID | MID | EOSID | HGID | GRAV | ADPOPT | TMID |
|----|-----|-----|-----|-------|------|------|--------|------|
|    | 2   | 2   | 2   |       |      |      |        |      |

\*PART

\$HEADING

PART PID = 4 PART NAME :MIZU

| \$ | PID | SID | MID | EOSID | HGID | GRAV | ADPOPT | TMID |
|----|-----|-----|-----|-------|------|------|--------|------|
|    | 4   | 4   | 4   | 2     |      |      |        |      |

\*PART

\$HEADING

PART PID = 6 PART NAME :suisou

| \$ | PID | SID | MID | EOSID | HGID | GRAV | ADPOPT | TMID |
|----|-----|-----|-----|-------|------|------|--------|------|
|    | 6   | 6   | 6   |       |      |      |        |      |

\*PART

\$HEADING

PART PID = 8 PART NAME :ita

| \$ | PID | SID | MID | EOSID | HGID | GRAV | ADPOPT | TMID |
|----|-----|-----|-----|-------|------|------|--------|------|
|    | 8   | 8   | 8   |       |      |      |        |      |

\$HEADING

PART PID = 11 PART NAME :kata

| \$ | PID | SID | MID | EOSID | HGID | GRAV | ADPOPT | TMID |
|----|-----|-----|-----|-------|------|------|--------|------|
|    | 11  | 11  | 6   |       |      |      |        |      |

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*MAT\_piecewise\_linear\_plasticity

2 2.690e-6 70.000000 0.34500

1

\$ EPS1 EPS2 EPS3 EPS4 EPS5 EPS6 EPS7 EPS8

\$ 0.000E+00 3.090E-02 4.090E-02 5.000E-02 1.510E-01 3.010E-01 7.010E-01 1.500E+00

\$ ES1 ES2 ES3 ES4 ES5 ES6 ES7 ES8

\$ 0.040E+00 0.075E+00 0.085E+00 0.095E+00 0.120E+00 0.150E+00 0.180E+00 1.257E+00

\*MAT\_piecewise\_linear\_plasticity

8 7.850e-6 210.0000 0.30

\$ EPS1 EPS2 EPS3 EPS4 EPS5 EPS6 EPS7 EPS8

0.000E+00 3.090E-02 4.090E-02 5.000E-02 1.510E-01 3.010E-01 7.010E-01 1.500E+00

\$ ES1 ES2 ES3 ES4 ES5 ES6 ES7 ES8

0.040E+00 0.075E+00 0.085E+00 0.095E+00 0.120E+00 0.150E+00 0.180E+00 1.257E+00

\*MAT\_NULL

4 1.000e-6 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000

\*EOS\_linear\_polynomial

2 0 3.109000 -4.433000 50.556000 0.0000000 0.0000000 0.0000000

0.00000000

\*MAT\_RIGID

\$ MID RO E PR N COUPLE M ALIAS

6 7.830E-06 2.070E+02 2.800E-01 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00

\$ CMO CON1 CON2

1.0 7.0 7.0

\$LCO or A1 A2 A3 V1 V2 V3

\*define\_table

1

0.0045

0.030

0.40

3.80

30.

800.

10000

\*define\_curve

11

|      |       |
|------|-------|
| 0.0  | 0.020 |
| 0.02 | 0.060 |
| 0.04 | 0.078 |
| 0.06 | 0.085 |
| 0.08 | 0.095 |
| 0.10 | 0.105 |
| 0.12 | 0.110 |
| 0.14 | 0.115 |
| 0.50 | 0.150 |
| 1.00 | 0.180 |
| 1.50 | 0.500 |

\*define\_curve

12

|      |       |
|------|-------|
| 0.0  | 0.024 |
| 0.02 | 0.062 |
| 0.04 | 0.079 |
| 0.06 | 0.090 |
| 0.08 | 0.098 |
| 0.10 | 0.107 |
| 0.12 | 0.112 |
| 0.14 | 0.116 |
| 0.50 | 0.160 |
| 1.00 | 0.190 |
| 1.50 | 0.550 |

\*define\_curve

13

|      |       |
|------|-------|
| 0.0  | 0.030 |
| 0.02 | 0.065 |
| 0.04 | 0.082 |
| 0.06 | 0.092 |
| 0.08 | 0.105 |
| 0.10 | 0.110 |
| 0.12 | 0.112 |
| 0.14 | 0.116 |
| 0.50 | 0.170 |
| 1.00 | 0.200 |
| 1.50 | 0.560 |

\*define\_curve

14



|      |       |
|------|-------|
| 0.0  | 0.036 |
| 0.02 | 0.066 |
| 0.04 | 0.083 |
| 0.06 | 0.093 |
| 0.08 | 0.106 |
| 0.10 | 0.112 |
| 0.12 | 0.116 |
| 0.14 | 0.118 |
| 0.50 | 0.180 |
| 1.00 | 0.250 |
| 1.50 | 0.600 |

\*define\_curve

15

|      |       |
|------|-------|
| 0.0  | 0.040 |
| 0.02 | 0.068 |
| 0.04 | 0.088 |
| 0.06 | 0.100 |
| 0.08 | 0.110 |
| 0.10 | 0.120 |
| 0.12 | 0.125 |
| 0.14 | 0.130 |
| 0.50 | 0.200 |
| 1.00 | 0.400 |
| 1.50 | 0.660 |

\*define\_curve

16

|      |       |
|------|-------|
| 0.0  | 0.050 |
| 0.02 | 0.070 |
| 0.04 | 0.090 |
| 0.06 | 0.108 |
| 0.08 | 0.118 |
| 0.10 | 0.130 |
| 0.12 | 0.142 |
| 0.14 | 0.150 |
| 0.50 | 0.250 |
| 1.00 | 0.500 |
| 1.50 | 0.700 |

\*define\_curve

17

|     |       |
|-----|-------|
| 0.0 | 0.045 |
|-----|-------|

|      |       |
|------|-------|
| 0.02 | 0.080 |
| 0.04 | 0.100 |
| 0.06 | 0.120 |
| 0.08 | 0.140 |
| 0.10 | 0.180 |
| 0.12 | 0.200 |
| 0.14 | 0.260 |
| 0.50 | 0.300 |
| 1.00 | 0.800 |
| 1.50 | 1.000 |

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$ (7.1) SECTION CARDS

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*SECTION\_SOLID

|    |     |        |     |
|----|-----|--------|-----|
| \$ | SID | ELFORM | AET |
|    | 2   |        |     |

\*SECTION\_SOLID\_ale

|    |     |        |     |
|----|-----|--------|-----|
| \$ | SID | ELFORM | AET |
|    | 4   | 5      |     |

\*SECTION\_SOLID

|    |     |        |     |
|----|-----|--------|-----|
| \$ | SID | ELFORM | AET |
|    | 6   |        |     |

\*SECTION\_SOLID

|    |     |        |     |
|----|-----|--------|-----|
| \$ | SID | ELFORM | AET |
|    | 8   |        |     |

\*SECTION\_SOLID

|    |     |        |     |
|----|-----|--------|-----|
| \$ | SID | ELFORM | AET |
|    | 11  |        |     |

\*CONSTRAINED\_LAGRANGE\_IN\_SOLID

|   |   |   |   |    |   |
|---|---|---|---|----|---|
| 2 | 4 | 1 | 1 | -2 | 2 |
|---|---|---|---|----|---|

\*CONSTRAINED\_LAGRANGE\_IN\_SOLID

|   |   |   |   |    |   |
|---|---|---|---|----|---|
| 6 | 4 | 1 | 1 | -2 | 2 |
|---|---|---|---|----|---|

\*CONSTRAINED\_LAGRANGE\_IN\_SOLID

|   |   |   |   |    |   |
|---|---|---|---|----|---|
| 8 | 4 | 1 | 1 | -2 | 2 |
|---|---|---|---|----|---|

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$

\$

\$

SEGMENT SET CARDS

\$

\$

\$

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*SET\_SEGMENT

\$\$^ITA

| \$ | SID | DA1 | DA2 | DA3 | DA4 |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|
|    | 1   | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

| \$ | N1    | N2    | N3    | N4    | A1  | A2  | A3  | A4  |
|----|-------|-------|-------|-------|-----|-----|-----|-----|
|    | 4346  | 4367  | 4366  | 4345  | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 4347  | 4368  | 4367  | 4346  | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 4348  | 4369  | 4368  | 4347  | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 4349  | 4370  | 4369  | 4348  | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 4350  | 4371  | 4370  | 4349  | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 49795 | 49711 | 24816 | 24900 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$

\$

\$

INITIAL VELOCITY CARDS

\$

\$

\$

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

\$\$^VELOCITY

| \$ | NID | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|----|-----|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
|    | 1   | 0.0 | 0.0 | -500.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

\$\$^VELOCITY

| \$ | NID | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|----|-----|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
|    | 6   | 0.0 | 0.0 | -500.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

\$\$^VELOCITY

| \$ | NID | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|----|-----|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
|    | 7   | 0.0 | 0.0 | -500.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

\$\$^VELOCITY

| \$ | NID | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|----|-----|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
|    | 2   | 0.0 | 0.0 | -500.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

\$\$^VELOCITY

| \$ | NID | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|----|-----|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
|    | 76  | 0.0 | 0.0 | -500.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

\$\$^VELOCITY

| \$ | NID | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|----|-----|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
|    | 77  | 0.0 | 0.0 | -500.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

^VELOCITY

| \$ | NID | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|----|-----|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
|    | 78  | 0.0 | 0.0 | -500.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

^VELOCITY

| \$ | NID   | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|----|-------|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
|    | 37719 | 0.0 | 0.0 | -500.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$

\$

\$ CONTACT CARDS \$

\$

\$

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE\_TITLE

\$ CID

1

| \$  | SSID | MSID | SSTYP | MSTYP | SBOXID | MBOXID | SPR |
|-----|------|------|-------|-------|--------|--------|-----|
| MPR | 1    | 2    | 0     | 0     | 0      | 0      |     |

| \$ | FS  | FD  | DC  | VC  | VDC | PENCHK | BT            | DT |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|--------|---------------|----|
|    | 9.0 | 9.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0      | 0.0 1.000E+20 |    |

| \$ | SFS | SFM | SST | MST | SFST | SFMT | FSF | VSF |
|----|-----|-----|-----|-----|------|------|-----|-----|
|    | 1.0 | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 1.0  | 1.0  | 1.0 |     |

| \$     | SOFT | SOFSC | LCIDAB | MAXPAR | PENTOL | DEPTH | BSORT |
|--------|------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|
| FRCFRQ | 0    | 0.10  | 1.025  | 0.0    | 2.0    | 0     | 1     |

| \$ | PENMAX | THKOPT | SHLTHK | SNLOG | ISYM | I2D3D |
|----|--------|--------|--------|-------|------|-------|
|    | 0.0    | 0      | 0      | 0     | 0    | 0     |

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$

\$

\$ NODE INFORMATION \$

\$

\$

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*NODE

| \$ | NID | X     | Y         | Z    | TC  | RC  |
|----|-----|-------|-----------|------|-----|-----|
|    | 1   | 3.5   | 0.0       | 20.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 2   | 3.325 | 0.6999999 | 20.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 3   | 3.15  | 1.4       | 20.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 4   | 2.975 | 2.1       | 20.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 5   | 2.8   | 2.8       | 20.0 | 0.0 | 0.0 |

|       |           |           |        |     |     |
|-------|-----------|-----------|--------|-----|-----|
| 6     | 2.625     | 0.0       | 20.0   | 0.0 | 0.0 |
| 7     | 2.493749  | 0.7624999 | 20.0   | 0.0 | 0.0 |
| 8     | 2.362499  | 1.525     | 20.0   | 0.0 | 0.0 |
| 9     | 2.231249  | 2.2875    | 20.0   | 0.0 | 0.0 |
| 10    | 2.099999  | 3.05      | 20.0   | 0.0 | 0.0 |
| 11    | 1.75      | 0.0       | 20.0   | 0.0 | 0.0 |
| 12    | 1.662499  | 0.825     | 20.0   | 0.0 | 0.0 |
| 13    | 1.574999  | 1.65      | 20.0   | 0.0 | 0.0 |
| 14    | 1.487498  | 2.475     | 20.0   | 0.0 | 0.0 |
| 15    | 1.399998  | 3.300001  | 20.0   | 0.0 | 0.0 |
| 16    | 0.875     | 0.0       | 20.0   | 0.0 | 0.0 |
| 49795 | -1.961375 | -24.92199 | -200.0 | 0.0 | 0.0 |

\$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8

\$

\$

\$

ELEMENTS INFORMATION

\$

\$

\$

\$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8

\$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8

\$

\$

\$

SOLID ELEMENTS

\$

\$

\$

\$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8

\*ELEMENT\_SOLID

| \$    | EID | PID   | NID1  | NID2  | NID3  | NID4  | NID5  | NID6  | NID7  | NID8 |
|-------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
|       | 49  | 2     | 1     | 6     | 7     | 2     | 76    | 77    | 78    | 79   |
|       | 50  | 2     | 2     | 7     | 8     | 3     | 79    | 78    | 80    | 81   |
|       | 51  | 2     | 3     | 8     | 9     | 4     | 81    | 80    | 82    | 83   |
|       | 52  | 2     | 4     | 9     | 10    | 5     | 83    | 82    | 84    | 85   |
|       | 53  | 2     | 6     | 11    | 12    | 7     | 77    | 86    | 87    | 78   |
|       | 54  | 2     | 7     | 12    | 13    | 8     | 78    | 87    | 88    | 80   |
|       | 55  | 2     | 8     | 13    | 14    | 9     | 80    | 88    | 89    | 82   |
|       | 56  | 2     | 9     | 14    | 15    | 10    | 82    | 89    | 90    | 84   |
|       | 57  | 2     | 11    | 16    | 17    | 12    | 86    | 91    | 92    | 87   |
|       | 58  | 2     | 12    | 17    | 18    | 13    | 87    | 92    | 93    | 88   |
|       | 59  | 2     | 13    | 18    | 19    | 14    | 88    | 93    | 94    | 89   |
|       | 60  | 2     | 14    | 19    | 20    | 15    | 89    | 94    | 95    | 90   |
|       | 61  | 2     | 16    | 21    | 22    | 17    | 91    | 96    | 97    | 92   |
|       | 62  | 2     | 17    | 22    | 23    | 18    | 92    | 97    | 98    | 93   |
| 36581 | 11  | 49216 | 49782 | 49786 | 49220 | 49783 | 49699 | 49703 | 49787 |      |
| 36582 | 11  | 49220 | 49786 | 49790 | 49224 | 49787 | 49703 | 49707 | 49791 |      |

|       |    |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 36583 | 11 | 49224 | 49790 | 49794 | 49228 | 49791 | 49707 | 49711 | 49795 |
| 36584 | 11 | 49228 | 49794 | 23834 | 24333 | 49795 | 49711 | 24816 | 24900 |

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*END

付録 7

```

$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$  LS-DYNA(950) DECK WRITTEN BY : eta/FEMB-PC version 27.0
$  ENGINEER :
$  PROJECT :
$  UNITS : MM, TON, SEC, N
$  TIME : 05:58:25 PM
$  DATE : Saturday, September 14, 2002
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*KEYWORD
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*TITLE
v300delto0.4
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
$                                     $
$                                     PART CARDS                                     $
$                                     $
$                                     $
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*CONTROL_TERMINATION
$  ENDTIM      ENDCYC      DTMIN      ENDNEG      ENDMAS
   .700E+00      0      .000      .000      .000
*CONTROL_TIMESTEP
$  DTINIT      SCFT      ISDO      TSLIMIT      DTMS      LCTM      ERODE
MS1ST
   .000      .660      0
*CONTROL_HOURLASS
$  IHQ      QH
   1      .100
*CONTROL_BULK_VISCOSITY
$  Q2      Q1
   1.500      .060
*CONTROL_SHELL
$  WRPANG      ITRIST      IRNXX      ISTUPD      THEORY      BWC      MITER
   20.000      2      -1      0      2      2      1
*CONTROL_CONTACT
$  SLSFAC      RWPNAL      ISLCHK      SHLTHK      PENOPT      THKCHG      ORIEN
   .100
$  USRSTR      USRFAC      NSBCS      INTERM      XPENE
   0      0      10      0      4.000
*CONTROL_ENERGY

```

```

$   HGEN   RWEN   SLNTEN   RYLEN
      1     2     1     1
*CONTROL_DAMPING
$   NRCYCK   DRTOL   DRFCTR   DRTERM   TSSFDR   IRELAL   EDTTL
IDRFLG
      250   .001   .995
*CONTROL_OUTPUT
$   NPOPT   NEECHO   NREFUP   IACCOP   OPIFS   IPNINT   IKEDIT
      0     0     0     0   .000     0     100
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
      (3) DATABASE CONTROL CARDS - ASCII HISTORY FILE
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$*DATABASE_HISTORY_OPTION
$   ID1     ID2     ID3     ID4     ID5     ID6     ID7     ID8
$
$OPTION : BEAM   BEAM_SET   NODE   NODE_SET
$   SHELL   SHELL_SET   SOLID   SOLID_SET
$   TSHELL   TSHELL_SET
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
      (4) DATABASE CONTROL CARDS FOR ASCII FILE
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$*DATABASE_OPTION
$   DT
$
$OPTION : SECFORC RWFORC NODOUT ELOUT  GLSTAT
$   DEFORC  MATSUM NCFORC RCFORC DEFCEO
$   SPCFORC SWFORC ABSTAT NODFOR BNDOUT
$   RBDOUT  GCEOUT SLEOUT MPGS  SBTOUT
$   JNTFORC AVSFLT MOVIE
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
      (5) DATABASE CONTROL CARDS FOR BINARY FILE
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
$   DT/CYCL   LCDDT   NOBEAM
      .100E-01
*DATABASE_BINARY_D3THDT
$   DT/CYCL   LCDDT   NOBEAM
      .250E-01
$*DATABASE_BINARY_OPTION

```



\$ DT/CYCL LC DT NOBEAM

\$

\$OPTION : D3DRFL D3DUMP RUNRSF INTFOR

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*DATABASE\_EXTENT\_BINARY

0 0 3 0 1 1 1 1  
0 0 0 0 0 0

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$ (6) DEFINE PARTS CARDS

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*CONTROL\_ALE

2 1 1 1.00000 0.0000000 1.0000000 0.0000000  
0.0000 0.0e+00 0.0000000 0

\$ (6) DEFINE PARTS CARDS

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*PART

\$HEADING

PART PID = 3 PART NAME :TAMA

| \$ | PID | SID | MID | EOSID | HGID | GRAV | ADPOPT | TMID |
|----|-----|-----|-----|-------|------|------|--------|------|
|    | 3   | 3   | 3   |       |      |      |        |      |

\*PART

\$HEADING

PART PID = 1 PART NAME :MIZU

| \$ | PID | SID | MID | EOSID | HGID | GRAV | ADPOPT | TMID |
|----|-----|-----|-----|-------|------|------|--------|------|
|    | 1   | 1   | 1   | 2     |      |      |        |      |

\*PART

\$HEADING

PART PID = 12 PART NAME :ITA

| \$ | PID | SID | MID | EOSID | HGID | GRAV | ADPOPT | TMID |
|----|-----|-----|-----|-------|------|------|--------|------|
|    | 12  | 12  | 5   |       |      |      |        |      |

\*PART

\$HEADING

PART PID = 4 PART NAME :SUISOU

| \$ | PID | SID | MID | EOSID | HGID | GRAV | ADPOPT | TMID |
|----|-----|-----|-----|-------|------|------|--------|------|
|    | 4   | 4   | 6   |       |      |      |        |      |

\$HEADING

PART PID = 10 PART NAME :kata

| \$ | PID | SID | MID | EOSID | HGID | GRAV | ADPOPT | TMID |
|----|-----|-----|-----|-------|------|------|--------|------|
|    | 10  | 10  | 6   |       |      |      |        |      |

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*MAT\_piecewise\_linear\_plasticity

3 2.690e-6 70.000000 0.34500

1

\$ EPS1 EPS2 EPS3 EPS4 EPS5 EPS6 EPS7 EPS8

\$ 0.000E+00 3.090E-02 4.090E-02 5.000E-02 1.510E-01 3.010E-01 7.010E-01 1.500E+00

\$ ES1 ES2 ES3 ES4 ES5 ES6 ES7 ES8

\$ 0.040E+00 0.075E+00 0.085E+00 0.095E+00 0.120E+00 0.150E+00 0.180E+00 1.257E+00

\*MAT\_piecewise\_linear\_plasticity

5 7.850e-6 210.0000 0.30

\$ EPS1 EPS2 EPS3 EPS4 EPS5 EPS6 EPS7 EPS8

0.000E+00 3.090E-02 4.090E-02 5.000E-02 1.510E-01 3.010E-01 7.010E-01 1.500E+00

\$ ES1 ES2 ES3 ES4 ES5 ES6 ES7 ES8

0.040E+00 0.075E+00 0.085E+00 0.095E+00 0.120E+00 0.150E+00 0.180E+00 1.257E+00

\*mat\_add\_erosion

5

0.4

\*MAT\_NULL

1 1.000e-6 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000

\*EOS\_linear\_polynomial

2 0 3.109000 -4.483000 50.556000 0.0000000 0.0000000 0.0000000

0.000000000

\*MAT\_RIGID

\$ MID RO E PR N COUPLE M ALIAS

6 7.830E-06 2.070E+02 2.800E-01 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00

\$ CMO CON1 CON2

1.0 7.0 7.0

\$LCO or A1 A2 A3 V1 V2 V3

\*define\_table

1

0.0045

0.030

0.40

3.80

30.

800.

10000

\*define\_curve

11

|      |       |
|------|-------|
| 0.0  | 0.020 |
| 0.02 | 0.060 |
| 0.04 | 0.078 |
| 0.06 | 0.085 |
| 0.08 | 0.095 |
| 0.10 | 0.105 |
| 0.12 | 0.110 |
| 0.14 | 0.115 |
| 0.50 | 0.150 |
| 1.00 | 0.180 |
| 1.50 | 0.500 |

\*define\_curve

12

|      |       |
|------|-------|
| 0.0  | 0.024 |
| 0.02 | 0.062 |
| 0.04 | 0.079 |
| 0.06 | 0.090 |
| 0.08 | 0.098 |
| 0.10 | 0.107 |
| 0.12 | 0.112 |
| 0.14 | 0.116 |
| 0.50 | 0.160 |
| 1.00 | 0.190 |
| 1.50 | 0.550 |

\*define\_curve

13

|      |       |
|------|-------|
| 0.0  | 0.030 |
| 0.02 | 0.065 |
| 0.04 | 0.082 |
| 0.06 | 0.092 |
| 0.08 | 0.105 |
| 0.10 | 0.110 |
| 0.12 | 0.112 |
| 0.14 | 0.116 |
| 0.50 | 0.170 |
| 1.00 | 0.200 |

|               |      |       |
|---------------|------|-------|
|               | 1.50 | 0.560 |
| *define_curve |      |       |
| 14            |      |       |
|               | 0.0  | 0.036 |
|               | 0.02 | 0.066 |
|               | 0.04 | 0.083 |
|               | 0.06 | 0.093 |
|               | 0.08 | 0.106 |
|               | 0.10 | 0.112 |
|               | 0.12 | 0.116 |
|               | 0.14 | 0.118 |
|               | 0.50 | 0.180 |
|               | 1.00 | 0.250 |
|               | 1.50 | 0.600 |

|               |      |       |
|---------------|------|-------|
| *define_curve |      |       |
| 15            |      |       |
|               | 0.0  | 0.040 |
|               | 0.02 | 0.068 |
|               | 0.04 | 0.088 |
|               | 0.06 | 0.100 |
|               | 0.08 | 0.110 |
|               | 0.10 | 0.120 |
|               | 0.12 | 0.125 |
|               | 0.14 | 0.130 |
|               | 0.50 | 0.200 |
|               | 1.00 | 0.400 |
|               | 1.50 | 0.660 |

|               |      |       |
|---------------|------|-------|
| *define_curve |      |       |
| 16            |      |       |
|               | 0.0  | 0.050 |
|               | 0.02 | 0.070 |
|               | 0.04 | 0.090 |
|               | 0.06 | 0.108 |
|               | 0.08 | 0.118 |
|               | 0.10 | 0.130 |
|               | 0.12 | 0.142 |
|               | 0.14 | 0.150 |
|               | 0.50 | 0.250 |
|               | 1.00 | 0.500 |
|               | 1.50 | 0.700 |

\*define\_curve

17

|      |       |
|------|-------|
| 0.0  | 0.045 |
| 0.02 | 0.080 |
| 0.04 | 0.100 |
| 0.06 | 0.120 |
| 0.08 | 0.140 |
| 0.10 | 0.180 |
| 0.12 | 0.200 |
| 0.14 | 0.260 |
| 0.50 | 0.300 |
| 1.00 | 0.800 |
| 1.50 | 1.000 |

\$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8

\$ (7.1) SECTION CARDS

\$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8

\*SECTION\_SOLID

| \$ | SID | ELFORM | AET |
|----|-----|--------|-----|
|    | 3   |        |     |

\*SECTION\_SOLID\_ale

| \$ | SID | ELFORM | AET |
|----|-----|--------|-----|
|    | 1   | 5      |     |

\*SECTION\_SOLID

| \$ | SID | ELFORM | AET |
|----|-----|--------|-----|
|    | 4   |        |     |

\*SECTION\_SOLID

| \$ | SID | ELFORM | AET |
|----|-----|--------|-----|
|    | 12  |        |     |

\*SECTION\_SOLID

| \$ | SID | ELFORM | AET |
|----|-----|--------|-----|
|    | 10  |        |     |

\*CONSTRAINED\_LAGRANGE\_IN\_SOLID

|   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3 | 1 | 1 | 1 | 6 | 4 | 2 | 1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|

\*CONSTRAINED\_LAGRANGE\_IN\_SOLID

|   |   |   |   |    |   |  |  |
|---|---|---|---|----|---|--|--|
| 4 | 1 | 1 | 1 | -2 | 2 |  |  |
|---|---|---|---|----|---|--|--|

\*CONSTRAINED\_LAGRANGE\_IN\_SOLID

|    |   |   |   |    |   |  |  |
|----|---|---|---|----|---|--|--|
| 12 | 1 | 1 | 1 | -2 | 2 |  |  |
|----|---|---|---|----|---|--|--|

\$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8

\$

\$

\$ SEGMENT SET CARDS \$

\$

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*SET\_SEGMENT

\$^ITA

| \$ | SID   | DA1   | DA2   | DA3   | DA4 |     |     |     |  |
|----|-------|-------|-------|-------|-----|-----|-----|-----|--|
|    | 1     | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0 |     |     |     |  |
| \$ | N1    | N2    | N3    | N4    | A1  | A2  | A3  | A4  |  |
|    | 37311 | 37332 | 37331 | 37310 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 37310 | 37331 | 38634 | 38633 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 37312 | 37333 | 37332 | 37311 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 37313 | 37334 | 37333 | 37312 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 37314 | 37335 | 37334 | 37313 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 37315 | 37336 | 37335 | 37314 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 37316 | 37337 | 37336 | 37315 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 37317 | 37338 | 37337 | 37316 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 37318 | 37339 | 37338 | 37317 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 37319 | 37340 | 37339 | 37318 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 37320 | 37341 | 37340 | 37319 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 37321 | 37342 | 37341 | 37320 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 37322 | 37343 | 37342 | 37321 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 37323 | 37344 | 37343 | 37322 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 37324 | 37345 | 37344 | 37323 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 37325 | 37346 | 37345 | 37324 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 37326 | 37347 | 37346 | 37325 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 37327 | 37348 | 37347 | 37326 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 37328 | 37349 | 37348 | 37327 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 37329 | 37350 | 37349 | 37328 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |

\*SET\_SEGMENT

\$^KATA

| \$ | SID  | DA1  | DA2  | DA3  | DA4 |     |     |     |  |
|----|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|--|
|    | 2    | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0 |     |     |     |  |
| \$ | N1   | N2   | N3   | N4   | A1  | A2  | A3  | A4  |  |
|    | 8945 | 9163 | 8500 | 8941 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 8500 | 9163 | 9197 | 9196 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 8945 | 8941 | 9195 | 9198 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 9195 | 9196 | 9197 | 9198 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 8949 | 9164 | 9163 | 8945 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 9163 | 9164 | 9199 | 9197 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |
|    | 8949 | 8945 | 9198 | 9200 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |  |

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\$

\$

\$

INITIAL VELOCITY CARDS

\$

\$

\$

\$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

^VELOCITY

| \$ | NID  | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|----|------|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
|    | 4142 | 0.0 | 0.0 | -300.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

^VELOCITY

| \$ | NID  | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|----|------|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
|    | 4147 | 0.0 | 0.0 | -300.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

^VELOCITY

| \$ | NID  | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|----|------|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
|    | 4148 | 0.0 | 0.0 | -300.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

^VELOCITY

| \$ | NID  | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|----|------|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
|    | 4143 | 0.0 | 0.0 | -300.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

^VELOCITY

| \$ | NID  | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|----|------|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
|    | 4217 | 0.0 | 0.0 | -300.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

^VELOCITY

| \$ | NID  | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|----|------|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
|    | 4218 | 0.0 | 0.0 | -300.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

^VELOCITY

| \$ | NID  | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|----|------|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
|    | 4219 | 0.0 | 0.0 | -300.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

^VELOCITY

| \$ | NID  | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|----|------|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
|    | 4220 | 0.0 | 0.0 | -300.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

^VELOCITY

| \$ | NID | VX | VY | VZ | VXR | VYR | VZR |
|----|-----|----|----|----|-----|-----|-----|
|    |     |    |    |    |     |     |     |

4149 0.0 0.0 -300.0 0.0 0.0 0.0

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

^VELOCITY

| \$ | NID  | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|----|------|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
|    | 4144 | 0.0 | 0.0 | -300.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

\*INITIAL\_VELOCITY\_NODE

^VELOCITY

| \$ | NID  | VX  | VY  | VZ     | VXR | VYR | VZR |
|----|------|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
|    | 4221 | 0.0 | 0.0 | -300.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

1 2 3 4 5 6 7 8

\$ \$

\$ CONTACT CARDS \$

\$ \$

1 2 3 4 5 6 7 8

\*CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE\_TITLE

\$ CID

1

| \$ | SSID | MSID | SSTYP | MSTYP | SBOXID | MBOXID | SPR |
|----|------|------|-------|-------|--------|--------|-----|
|    | 1    | 2    | 0     | 0     | 0      | 0      |     |

MPR

| \$ | FS   | FD   | DC  | VC  | VDC | PENCHK | BT  | DT        |
|----|------|------|-----|-----|-----|--------|-----|-----------|
|    | 90.0 | 90.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0      | 0.0 | 1.000E+20 |

| \$ | SFS | SFM | SST | MST | SFST | SFMT | FSF | VSF |
|----|-----|-----|-----|-----|------|------|-----|-----|
|    | 1.0 | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 1.0  | 1.0  | 1.0 |     |

| \$ | SOFT | SOFSC | LCIDAB | MAXPAR | PENTOL | DEPTH | BSORT | FRCFRQ |
|----|------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|
|    | 0    | 0.10  |        | 1.025  | 0.0    | 2.0   | 0     | 1      |

| \$ | PENMAX | THKOPT | SHLTHK | SNLOG | ISYM | I2D3D |
|----|--------|--------|--------|-------|------|-------|
|    | 0.0    | 0      | 0      | 0     | 0    | 0     |

1 2 3 4 5 6 7 8

\$ \$

\$ NODE INFORMATION \$

\$ \$

1 2 3 4 5 6 7 8

\*NODE

| \$ | NID | X    | Y        | Z      | TC  | RC  |
|----|-----|------|----------|--------|-----|-----|
|    | 1   | 10.0 | 0.0      | -160.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 2   | 9.5  | 1.166667 | -160.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 3   | 9.0  | 2.333333 | -160.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 4   | 8.5  | 3.5      | -160.0 | 0.0 | 0.0 |
|    | 5   | 8.0  | 4.666667 | -160.0 | 0.0 | 0.0 |



|       |            |           |        |     |     |
|-------|------------|-----------|--------|-----|-----|
| 6     | 7.5        | 5.833333  | -160.0 | 0.0 | 0.0 |
| 7     | 7.0        | 7.0       | -160.0 | 0.0 | 0.0 |
| 69038 | -0.3750861 | -5.109274 | -196.9 | 0.0 | 0.0 |
| 69039 | -0.1875414 | -5.180017 | -196.9 | 0.0 | 0.0 |

\$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8

\$

\$

ELEMENTS INFORMATION

\$

\$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8

\$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8

\$

\$

SOLID ELEMENTS

\$

\$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8

\*ELEMENT\_SOLID

| \$ | EID | PID | NID1 | NID2 | NID3 | NID4 | NID5 | NID6 | NID7 | NID8 |
|----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
|    | 1   | 1   | 1    | 8    | 9    | 2    | 50   | 57   | 58   | 51   |
|    | 2   | 1   | 2    | 9    | 10   | 3    | 51   | 58   | 59   | 52   |
|    | 3   | 1   | 3    | 10   | 11   | 4    | 52   | 59   | 60   | 53   |
|    | 4   | 1   | 4    | 11   | 12   | 5    | 53   | 60   | 61   | 54   |
|    | 5   | 1   | 5    | 12   | 13   | 6    | 54   | 61   | 62   | 55   |
|    | 6   | 1   | 6    | 13   | 14   | 7    | 55   | 62   | 63   | 56   |
|    | 7   | 1   | 8    | 15   | 16   | 9    | 57   | 64   | 65   | 58   |
|    | 8   | 1   | 9    | 16   | 17   | 10   | 58   | 65   | 66   | 59   |
|    | 9   | 1   | 10   | 17   | 18   | 11   | 59   | 66   | 67   | 60   |
|    | 10  | 1   | 11   | 18   | 19   | 12   | 60   | 67   | 68   | 61   |
|    | 11  | 1   | 12   | 19   | 20   | 13   | 61   | 68   | 69   | 62   |
|    | 12  | 1   | 13   | 20   | 21   | 14   | 62   | 69   | 70   | 63   |
|    | 13  | 1   | 15   | 22   | 23   | 16   | 64   | 71   | 72   | 65   |
|    | 14  | 1   | 16   | 23   | 24   | 17   | 65   | 72   | 73   | 66   |
|    | 15  | 1   | 17   | 24   | 25   | 18   | 66   | 73   | 74   | 67   |
|    | 16  | 1   | 18   | 25   | 26   | 19   | 67   | 74   | 75   | 68   |
|    | 17  | 1   | 19   | 26   | 27   | 20   | 68   | 75   | 76   | 69   |
|    | 18  | 1   | 20   | 27   | 28   | 21   | 69   | 76   | 77   | 70   |
|    | 19  | 1   | 22   | 29   | 30   | 23   | 71   | 78   | 79   | 72   |
|    | 20  | 1   | 23   | 30   | 31   | 24   | 72   | 79   | 80   | 73   |
|    | 21  | 1   | 24   | 31   | 32   | 25   | 73   | 80   | 81   | 74   |
|    | 22  | 1   | 25   | 32   | 33   | 26   | 74   | 81   | 82   | 75   |
|    | 23  | 1   | 26   | 33   | 34   | 27   | 75   | 82   | 83   | 76   |
|    | 24  | 1   | 27   | 34   | 35   | 28   | 76   | 83   | 84   | 77   |

|       |    |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 25    | 1  | 29    | 36    | 37    | 30    | 78    | 85    | 86    | 79    |
| 26    | 1  | 30    | 37    | 38    | 31    | 79    | 86    | 87    | 80    |
| 27    | 1  | 31    | 38    | 39    | 32    | 80    | 87    | 88    | 81    |
| 28    | 1  | 32    | 39    | 40    | 33    | 81    | 88    | 89    | 82    |
| 29    | 1  | 33    | 40    | 41    | 34    | 82    | 89    | 90    | 83    |
| 19509 | 4  | 28322 | 22407 | 22405 | 28324 | 28348 | 22554 | 22552 | 28350 |
| 19510 | 4  | 28324 | 22405 | 22403 | 28326 | 28350 | 22552 | 22550 | 28352 |
| 19511 | 4  | 28326 | 22403 | 22401 | 28328 | 28352 | 22550 | 22548 | 28354 |
| 19512 | 4  | 28328 | 22401 | 3750  | 5191  | 28354 | 22548 | 3897  | 5217  |
| 19513 | 4  | 28332 | 22642 | 22635 | 28333 | 27705 | 19777 | 19773 | 27701 |
| 19514 | 4  | 28333 | 22635 | 22628 | 28336 | 27701 | 19773 | 19769 | 27697 |
| 19515 | 4  | 28336 | 22628 | 22621 | 28338 | 27697 | 19769 | 19765 | 27693 |
| 19516 | 4  | 28338 | 22621 | 22614 | 28340 | 27693 | 19765 | 19761 | 27689 |
| 50672 | 12 | 67712 | 67192 | 67213 | 67713 | 69035 | 68515 | 68536 | 69036 |
| 50673 | 12 | 67713 | 67213 | 67234 | 67714 | 69036 | 68536 | 68557 | 69037 |
| 50674 | 12 | 67714 | 67234 | 67255 | 67715 | 69037 | 68557 | 68578 | 69038 |
| 50675 | 12 | 67715 | 67255 | 67276 | 67716 | 69038 | 68578 | 68599 | 69039 |
| 50676 | 12 | 67716 | 67276 | 51421 | 51841 | 69039 | 68599 | 32807 | 53164 |

\$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8

\*END