

水中衝撃波を利用した金属板の爆発圧着及び
成形過程に関する研究

2002年 3月

熊本大学大学院自然科学研究科

井山 裕文

目次	頁
第 1 章 緒論	1
1.1 研究の背景	1
1.1.1 爆発圧着法	1
1.1.2 爆発成形法	2
1.2 目的	4
1.3 論文の構成	6
参考文献	7
第 2 章 解析方法	9
2.1 緒言	9
2.2 基礎式	10
2.3 衝撃波に関する理論	13
2.4 爆薬の爆ごうに関する理論	15
2.4.1 爆薬について	15
2.4.2 爆ごう理論	16
2.5 状態方程式	18
2.5.1 Mie-Grüneisen 状態方程式	18
2.5.2 JWL 状態方程式	21
2.6 C - J Volume Burn 法	23
2.7 金属材料の応力計算	24
2.7.1 構成式	24
2.7.2 弾塑性解析	25
2.8 境界条件	29
2.9 結言	30
参考文献	31
第 3 章 水中衝撃波による金属平板の変形について	33
3.1 緒言	33
3.2 実験方法	35
3.3 解析モデル	35
3.4 結果および考察	37

	頁
3.5 結言	43
参考文献	45
第4章 水中爆発圧着法の数値解析および実験について	46
4.1 緒言	46
4.2 アモルファス金属箔の爆発圧着	46
4.3 解析モデル	49
4.4 解析結果	51
4.5 結言	59
参考文献	61
第5章 水中衝撃波を利用した金属円板の自由張出し成形について	62
5.1 緒言	62
5.2 実験方法	62
5.3 解析モデル	65
5.4 結果および考察	66
5.5 結言	75
参考文献	76
第6章 金属平板の自由張出し成形における爆薬配置の変形過程 におよぼす影響について	77
6.1 緒言	77
6.2 解析モデル	78
6.3 爆薬の位置を横方向に変化させた場合の変形過程	80
6.4 爆薬の位置を縦方向に変化させた場合の変形過程	90
6.5 最終変形形状の比較	98
6.6 結言	100
参考文献	101

第 7 章 総括	102
謝辞	106

第 1 章 緒論

1.1 研究の背景

爆薬の爆発エネルギーを金属板などの試料あるいは圧力媒体に与えると、それら内部に極めて高い圧力状態を生じたり、試料に短い加速距離で高速の飛翔速度を与えたりすることができる。爆薬のこの特性は各種の特徴ある加工法を生み出した。これらの加工法を総称して、爆発加工法¹⁾と言う。

爆薬は火薬の一種であり、17世紀まで土木工事や鉱山などで使用されるまで軍事的な目的のみに用いられていた。20世紀半ばになると破壊以外の目的で利用されるようになり、その後爆発加工における機械加工や材料開発、医学・生物学への応用などに利用されるようになった²⁾。このような爆薬の平和利用とした爆発加工法の代表的なものとして、爆発圧着法³⁾⁴⁾⁵⁾や爆発成形法³⁾⁵⁾などがある。

1.1.1 爆発圧着法

弾丸が高速で金属板に衝突した際、弾丸が金属板と接合したり、爆薬の性能試験中に重ね合わせた金属板同士が局部的に接合することは古くから知られていた。1950年代には爆発成形の試験中に、過装薬によって試験片の金属板が金型に接合したことで、この現象をクラッド材の製造に応用する研究が進められ、1960年代には実用化された⁶⁾。一般的な爆発圧着法において、合わせ材に直接のせてある爆薬が雷管によって起爆されると、その爆薬固有の速度で爆ごうが進行する。このとき発生した爆ごう生成ガスの圧力作用により、合わせ材は下方へと飛翔し、合わせ材に対して平行あるいは傾斜させて配置してある母材に衝突する⁵⁾。この際、合わせ材が十分な加速を行うためには、有限の加速距離が必要であり⁷⁾、これを確保するために予め合わせ材と母材との間に適当な間隔が与えられている。合わせ材の衝突速度は数百 m/s に達し、衝突点近傍では極めて高い圧力が発生する。その衝突点では両者の表面部が流体的な挙動となり金属ジェットが前方に射出される⁸⁾。この金属ジェットは衝突直前の両金属板表面（衝突面）の薄い表層をえぐるように除去する⁸⁾。この作用により両金属表面の酸化膜や吸着ガス層は排除され、清浄な面が露出する。その直後に衝

突して高圧力が加えられるので、金属結合を生じる範囲までに近づけられ、冶金的な結合が行われる。その際、良好な爆発圧着がなされると、波状の接合界面となる。

爆発圧着法の接合条件範囲の研究は、多くの研究者によって様々な金属の組み合わせに対してなされ、その範囲は Weldability window⁵⁾として求められている。それらは、合わせ材と母材の衝突速度と衝突角度⁹⁾、衝突点の移動速度(接合速度と衝突角度¹⁰⁾等のパラメータによって整理されている。良好な接合界面を得るにはこれらのパラメータを適当な範囲に保つことが必要となる。

しかし、このような工業生産で行なわれている爆発圧着法では板厚が数十 μm の金属箔や脆性材料の接合は困難であると考えられる。例えば、アモルファス金属箔の爆発圧着を取り上げてみる。アモルファス金属箔は非結晶構造の金属であり、耐磨耗性、高硬度、高強度を示す優れた機械的特性を有するが、高い破壊靱性をもつ¹¹⁾。また、400~600℃でアモルファス構造が壊れてしまうため、溶接などの熱的影響が大きい接合法は用いることはできない。しかし、アモルファス金属は組成によっては優れた耐食性を持つので、耐食性構造用材料としての応用が考えられる。Prumer¹²⁾¹³⁾や Vigueras¹⁴⁾等が爆発圧着法による接合を試みているが、クラックを完全に除く事ができず実用化に至っていない。そこで、近年、外本ら¹⁵⁾は新しい爆発圧着法として水中で爆薬を爆発させた際に生じる水中衝撃波を利用した爆発圧着法によってアモルファス金属箔と鋼の接合に成功している。ここでは、金属板に貼り付けた爆薬を水に沈め、試料に対し適度な角度と距離を調整することで、良好な接合材を得る方法である。このように、実験装置のセットアップ状態を変化させることにより、合わせ材に作用する圧力状態が変化し、母材との衝突速度や衝突角度を変化させることが可能である。その条件が適当である場合、両者の接合が良好に行うことができる。

1.1.2 爆発成形法

爆発成形法は、爆薬の爆発エネルギーを利用して金属板に適当な変形を与え、所要の形状に成形する方法である。1950年代以降、爆発成形法が工業的に行なわれるようになり、1960年代にかけて大型のドーム状の部品成形が盛んに

行なわれた¹⁶⁾。この当時ロケット開発の発展に伴いロケットの弾頭部の成形⁵⁾も重要な目標であった。

爆発成形法は一般に圧力容器内部に水を充満させ、水中で爆薬を爆発させて行なわれている。爆薬は圧力容器頂上部に配置され、金属板と型との隙間は真空状態となっており、爆薬の水中爆ごうによって生じる水中衝撃波を利用して成形を行う。ここで、金属板への圧力作用は、初期における水中衝撃波によるものと、その後の爆ごうガスの膨張エネルギーによってもたらされる水の流動圧によるものの2つの段階に分かれてもたらされる¹⁷⁾。第1のピーク圧力は極めて短いパルスでその圧力値は非常に高い。第2の圧力作用は比較的圧力値が低く、作用時間の長いパルスとなる。

水中衝撃波が金属板に作用すると、金属板は瞬時に高い速度で加速され、型に衝突する。その際、金属板には十分な塑性変形を伴い、容易に加工硬化する。そのため、一般の静的な成形加工と比較してより高い型形状の転写性と精密性を有する¹⁸⁾。この特徴を利用してロケット関係の様々な精密部品⁵⁾や金属床¹⁹⁾などが製作された。また、爆発成形法に用いる型材は金属ばかりでなく、石膏、樹脂、紙などで作成された型でも十分に成形できる。その特徴を生かして藤田²⁰⁾は爆発成形法による美術品製作法を確立した。ここでは、厚さ1mm以下の金属板が和紙や樹脂の型形状に沿って成形され、みごとなレリーフが製作された。

1.2 目的

前節では、これまでの爆発加工に関する研究で代表的な爆発圧着法と爆発成形法について述べた。また、それぞれの加工技術の背景と近年の動向にも触れた。

1.1.1 節で述べた新しい爆発圧着法は、これまでの爆発圧着法とは違い、爆薬の水中爆ごうの際生じる水中衝撃波を利用して飛翔板を加速させ、母材と衝突することにより両者の接合を行うが、一般の工業生産で行われている爆発圧着法では不可能なアモルファス金属箔の接合が行われている。しかし、この良好な接合を得るためのセットアップ条件は実験的に求められたものである。ここで、この装置を用いて、いくつものセットアップ条件設定を変えて実験を行うことは、労力と費用および時間を大きく費やすものとなる。また、この装置全体のシステムとしての評価がまだ行われていない。

近年、コンピューターの発達が著しく、それに連れて新しい計算方法の開発が盛んに行なわれており、パーソナルコンピュータでも容易に数値解析を行うことができる。そこで本研究では、この水中衝撃波を利用した新しい爆発圧着法において、数値解析を用いて所定のセットアップ条件に対して、合わせ材に作用する水中衝撃波の圧力状態、および合わせ材の変形過程、母材との衝突角、衝突点の移動速度などを求めて、この装置の評価を行う。ここで用いる数値解析法は爆薬の爆ごうから、水中衝撃波の伝播過程およびその作用による金属板の変形までの一連の現象を表現できる方法である。また、本研究ではこの解析方法を爆発圧着法における金属板の変形に適応できるかその妥当性を検証するために、実験結果との比較を行う。

更に本研究では、もうひとつの爆発加工法である、爆発成形法についてもこの数値解析法を用いて、水中衝撃波の伝播過程、金属板への圧力作用、金属板の変形過程について議論を行う。ここで、爆発成形法の新しい試みを提案しその評価を行う。

最近の工業生産における金属板の成形加工分野では、モデルチェンジが頻繁に行なわれており多品種少量生産の製品が多くなってきている。一般のプレス成形や液圧バルジ成形法では高価な金型・装置を必要とし、その対応が困難である。それ故、石膏やプラスチックなどの型で十分な製品が得られる爆発成形法の方がはるかに容易で簡便である。実際の爆発成形技術をもう一步能率化で

きるようにすれば、多品種少量生産には適用できると考えられる。そこで、ここで提案する方法は金属板の自由張出し成形を用いて、爆薬のセットアップ条件を変えることにより、その圧力作用の差異により金属板を所定の形状に成形する方法である。その前段階として、爆薬の配置を変えることで、金属板にどのような圧力が作用し、その金属板がどのように変形するか確かめる必要がある。そこで、本研究では爆薬の位置変えた場合のいくつかの解析モデルを取り上げ、そのときの変形形状への影響にどのようにおよぼすか、数値解析による評価を試みる。また、これらを行う前に、爆発成形法においても本研究で用いる解析方法が妥当であるかその検証が必要であると考え、ピンコンタクト法による速度計測の実験結果と実験および解析結果での最終形状の比較を行い、その妥当性を検討する。

1.3 論文の構成

論文は7章から構成されている。

第1章では、本研究の背景と水中衝撃波を利用した爆発圧着法および爆発成形法についての概要について述べ、本研究の目的について記述している。

第2章では、本研究で用いる数値解析法について述べる。本研究で用いた数値解析法はラグランジュ座標を用いた有限差分法であり、ここで用いられる数値解析方法は爆薬の爆ごう過程から、水中衝撃波の伝播過程、金属板の変形および金属板同士の衝突問題まで含めて表現できる方法である。これらに関する運動方程式、状態方程式、材料の構成式などについて説明する。

第3章では、第4章で述べる水中衝撃波を利用した爆発圧着法の数値解析を行う前に、数値解析法の妥当性を確かめるために実験結果との比較検討を行った。ここでは、爆薬を水中爆ごうさせ、そのとき発生した水中衝撃波による金属平板の変形過程について、写真観察実験によって得られたデータと比較する。

第4章では、水中衝撃波を利用した2枚の爆発圧着過程について数値シミュレーションを行い、その結果から、爆薬と飛翔板の間の傾斜角、距離、飛翔板と母材の間隙などのセットアップ条件を変えることにより、飛翔上に作用する水中衝撃波の圧力分布、飛翔板と母材の衝突角度および衝突点移動速度などへの影響について述べる。

第5章では、爆発成形法において、軸対称問題として自由張出し成形のピンコンタクト法による計測実験を行い、その計測結果と解析結果との比較を行う。これより、爆発成形への本解析方法の妥当性を検証する。

第6章では、まず、新しい試みである水中衝撃波を利用した自由張出し成形について述べる。そこで、爆薬の位置を変えることで金属板の変形過程にどのように影響を及ぼすか解析結果に基づきその詳細を明らかにする。

第7章は、本論文の総括である。

参考文献

- 1)工業火薬協会編：発破ハンドブック。山海堂(1976).
- 2)高山和喜 編： 衝撃波ハンドブック, Springer Verlag (1995).
- 3)日本塑性加工学会編, 高エネルギー速度加工, コロナ社, p.101(1993).
- 4) B. Crossland, Explosive Welding of Metals and its Application, Oxford University Press(1982).
- 5)J. S. Rinehart and J. Pearson, explosive Working of Metals, Pergamon press(1963).
- 6) Y. Takizawa, T. Izuma, T. Onzawa and M. Fujita, An Experimental Study of the Acceleration Zone and the Terminal Velocity of the Flyer plate Driven by Explosives, Proc. 5th Int. Conf. on High Energy Rate Fabrication p.4.18.1(1975).
- 7) J. M. Walsh, R. G. Shreffler and F. J. Willing, Limiting Conditions for Jet Formation in High Velocity Collisions, J. Appl. Phys. 24. P.349(1953).
- 8) G. R. Cowan and A. H. Holtzman, Flow Configuration in Colliding Plates, Explosive Bonding, J. Appl. Phys. 34, P.928(1963).
- 9) A. Szecket: An Experimental Study of the Explosive Welding Window, Ph.D Thesis of the Queen's University of Belfast(1979).
- 10) A. A. Deribas and V. A. Simonov: Investigation of Explosive Welding Parameters for Arbitrary Combinations of Metals and Alloys, Proc. 5th Int. Conf. On HERF(1975).
- 11) 増本健, 深道和明 編, 塑性と加工 32-360, p. 27(1991).
- 12) R. A. Prummer, Thin Solid Films, 45. 205(1977).
- 13) R. A. Prummer, Z. Werkstofftech, 13, 44(1982).
- 14) D. J. Viguera, O. T. Inal and A. Szecket, Metallurgical Applications of Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenomena, (1986).
- 15) K. Hokamoto, M. Fujita, T. Ono, B. Shao and Z. Liu, The Explosive Welding of an Amorphous Film to a Steel Plate Using a Regulated Underwater Shock Wave, Metallurgical Applications of Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenomena, pp. 831-837(1995).
- 16) D. M. Shuford, The Chemical Milling of Explosive Formed 10-foot Diameter Aluminum Domes, Proc. of the First Int. Conf. of the Center for High Energy Forming, Vol. 1.3, 3, 1-3, 3.31(1967).

- 17) H. M. Shauer, Pressures and Impulses from Underwater Explosion, Proc. of 1st Int. Conf. of the Center for High Energy Forming, 5.5.1-5.5.17(1967).
- 18) 藤田昌大, 苧阪浩男, 爆発加工の現状, 機械の研究, 41, 12, 1315-1321(1989).
- 19) 清田堅吉, 藤田昌大, 伊妻猛志, 爆発成形法の新しい工作, 塑性加工学会誌, 11, 118, 831-837(1968).
- 20) 藤田昌大, 爆発加工の新しい試み, 塑性と加工, 37, 426, 682-687(1996).

第2章 解析方法

2.1 緒言

本研究で対象とする水中衝撃波を利用した爆発圧着法や爆発成形法などの数値シミュレーションを行う場合、爆薬の爆ごう現象や水中衝撃波の伝播過程およびその圧力作用による金属板の変形過程まで含めた解析方法を用いなければならない。特に爆薬部の圧力は十数 GPa にもなり、この爆薬部の爆ごう圧が金属板に作用する衝撃圧に影響を及ぼす。よって爆薬部の爆ごう過程においてその圧力計算を正しく表現できる手法が必要となる。また、金属板に作用する圧力は、金属板の変形を伴いながら水中衝撃波の作用が生じるため、金属板の変形と水中衝撃波の相互作用による現象を正しく表現できる解析方法が必要となる。

近年、コンピューターの高性能化、低価格化が過渡に発達し、比較的安価に数値計算が行えるようになってきた。そのため、爆薬の水中爆ごうあるいは金属板の変形解析のような高速流れや高速塑性変形などを伴う数値解析が容易にできる。数値解析法の利点は、物理現象を十分精度良くシミュレーションできる方法が一度確立すれば、様々な条件での現象を容易かつ正確に予測することが可能であるということである。そこで、本研究では、高性能爆薬の水中爆ごうによって発生する水中衝撃波およびその圧力作用による金属板の変形までを表現できる数値解析法の確立を行い、水中衝撃波を利用した爆発圧着法および爆発成形法の数値シミュレーションを行い、それぞれの装置の評価および金属板の変形メカニズムについて議論することを目的としている。

本章では、数値シミュレーションで用いた有限差分法および状態方程式、金属板の構成式、金属板と水の境界に用いた境界条件などの概要について述べ、対象とする計算場をどのように解析を行うか、その方法について説明する。

2.2 基礎式

本研究で対称とする解析モデルにおいては、爆薬、水、金属の要素から成る。そこで、爆薬部と水の要素は非粘性・圧縮性流れとし、金属板においては材料の変形における曲げ剛性を考慮するため静水圧成分のみでなく、応力成分も含めた形の運動方程式を用いる必要がある。

まず、非粘性・圧縮性の二次元流れに対する保存則は以下の式で与えられる。

連続の式：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial r \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} = 0 \quad (2.1)$$

x 方向の運動量の式：

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial r \rho u^2}{\partial x} + \frac{\partial \rho uv}{\partial y} = \frac{\partial (P + q)}{\partial x} \quad (2.2)$$

y 方向の運動量の式

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial r \rho v}{\partial x} + \frac{\partial \rho v^2}{\partial y} = - \frac{\partial (P + q)}{\partial y} \quad (2.3)$$

エネルギーの式：

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial r \rho e u}{\partial x} + \frac{\partial \rho e v}{\partial y} = -\nabla \cdot \mathbf{U} (P + q) \quad (2.4)$$

ここで、 x は半径方向座標、 y は軸方向座標で、円筒座標の場合、 $r=x$ 、直行座標の場合は $r=1$ である。また、 u 、 v 、 ρ 、 P 、 q 、 e はそれぞれ、 x 、 y 方向の速度、密度、圧力、人工粘性圧力、比内部エネルギーである。

$\nabla \cdot \mathbf{U}$ は速度発散で字式で与えられる。

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2.5)$$

速度発散 $\nabla \cdot \mathbf{U}$ を用いると、人工粘性圧力 q は $\nabla \cdot \mathbf{U} < 0$ の場合、 $q = \lambda_0 A \rho \nabla \cdot \mathbf{U}$ 、 $\nabla \cdot \mathbf{U} \geq 0$ の場合 $q = 0$ である。ここで、 λ_0 は定数で 0.2 とした。A は格子要素の面積である。

また、金属材料の要素においては静水圧成分のみならず、応力成分も考慮した式となる。直行座標における二次元の運動方程式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} = - \frac{\partial (P + q - S_x)}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} = - \frac{\partial (P + q - S_y)}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} \quad (2.7)$$

また、円筒座標の場合は

$$\frac{\partial u}{\partial t} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial (P + q - S_x)}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{2S_x + S_y}{x} \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial (P + q - S_y)}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\tau_{xy}}{x} \quad (2.9)$$

と与えられる。ここで、 P は静水圧、 S_x 、 S_y はそれぞれ x 、 y 方向の偏差応力成分であり、 τ_{xy} はせん断応力である。ここで、静水圧 P においては、爆発圧着法に関しては金属板に作用する圧力は数 GPa と極めて高いため、後述の Mie-Grüneisen 状態方程式より求められた圧力値を用いた。一方、爆発成形法の解析においては、円筒座標系の場合、平均応力を σ_m として次式で与えられる。

$$P = -\sigma_m = -\frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_\theta) \quad (2.10)$$

ここで、 σ_x 、 σ_y 、 σ_θ はそれぞれ x 、 y 、 θ 方向の応力成分であり、偏差応力成分

との関係式は次式となる。

$$\sigma_x = S_x - \sigma_m, \quad \sigma_y = S_y - \sigma_m, \quad \sigma_\theta = S_\theta - \sigma_m \quad (2.11)$$

直行座標系の場合には(2.10)、(2.11)式において σ_θ を z 方向応力成分 σ_z と置き換えることにより求められる。

本解析方法において、(2.1)～(2.4)および(2.6)～(2.9)の運動方程式を Lagrange 変数により離散化され、計算場に含まれる各媒体に応じた状態方程式による圧力計算および構成式による応力計算を組み合わせることにより解かれる。離散化などの計算手法の詳細については文献¹⁾にゆずる。

2.3 衝撃波に関する理論

静止媒体中に微小な圧力変化が生じると、この衝撃波は媒体中をその音波 c で伝播する。

$$c = \sqrt{\frac{dP}{d\rho}} \quad (2.12)$$

ここで P と ρ はそれぞれ媒体の圧力と密度で、 dP は圧力変化の大きさ、 $d\rho$ は dP に対応する密度変化である。この音速 c で伝ばする波を音波という。しかし圧力変化が大きい場合、波は媒体の音速よりも速い速度で伝ばする。この波を衝撃波といい、その伝ば速度を U_s 、媒体中の粒子速度を u_p とすると、

$$U_s = c_0 + s u_p \quad (2.13)$$

という直線関係が成り立つことが実験的に知られている²⁾。ここで c_0 、 s は定数であり、圧力媒体となる多くの物質について実験的に求められた定数である³⁾⁴⁾。

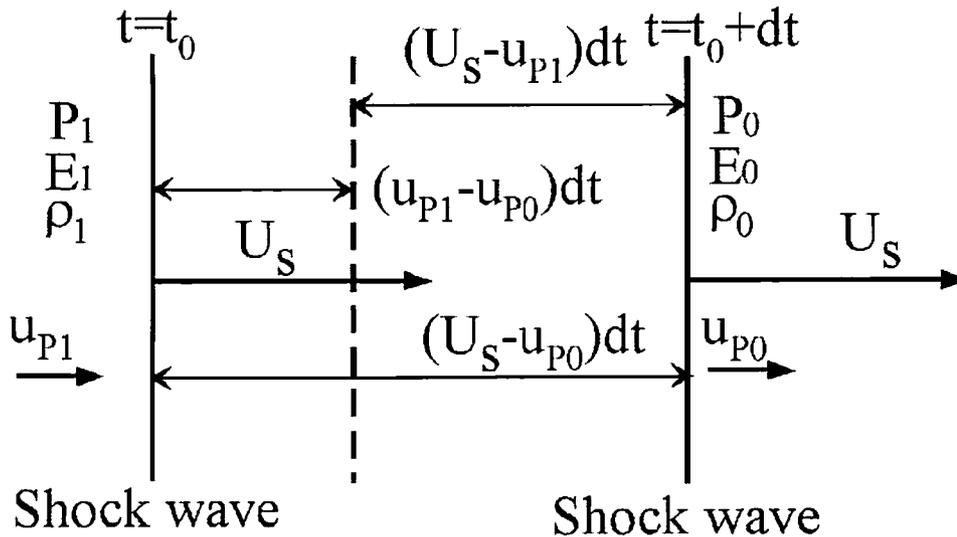


図 2.1 平面衝撃波による一次元圧縮

図 2.1 において、衝撃圧縮前後の状態量をそれぞれ下添え字 0 および 1 で示す。粒子速度 u_{p0} の媒体中を衝撃波が速度 U_s で伝ばし、粒子速度 u_{p1} に加速す

ると考える。衝撃波面は時間 dt の間に $(U_s - u_{p0})dt$ の距離だけ伝播する。このとき波面が単位面積あたりに横切る質量は $\rho_0(U_s - u_{p0})dt$ である。波面の背後の媒体は粒子速度が u_{p1} となり圧縮されるため単位面積あたりに横切る質量は $\rho_0(U_s - u_{p1})dt$ となる。衝撃波面の前後で質量保存則が成り立つと次式が得られる。

$$\rho_0(U_s - u_{p0}) = \rho_1(U_s - u_{p1}) \quad (2.14)$$

波面の前後における運動量の変化は $\rho_0(U_s - u_{p0})dt \cdot (u_{p1} - u_{p0})$ であり、この運動量の変化は波面の単位面積に作用する力積 $(P_1 - P_0)dt$ に等しい。ゆえに運動量保存則から次式が成り立つ。

$$P_1 - P_0 = \rho_0(U_s - u_{p0})(u_{p1} - u_{p0}) \quad (2.15)$$

また、圧力 P_1 によってなされた仕事 $P_1(u_{p1} - u_{p0})$ が、単位面積あたりに波面が横切る質量 $\rho_0(U_s - u_{p0})dt$ についての運動エネルギーの増加 $(1/2)(u_{p1} - u_{p0})^2$ と比内部エネルギーの増加 $E_1 - E_0$ との和に等しいため、エネルギー保存則より次式が成り立つ。

$$P_1(u_{p1} - u_{p0}) = \frac{1}{2}\rho_0(U_s - u_{p0})(u_{p1} - u_{p0})^2 + \rho_0(U_s - u_{p0})(E_1 - E_0) \quad (2.16)$$

この式と(2.14)、(2.15)式を組み合わせると、次式に示す Rankine-Hugoniot の式が得られる。

$$E_1 - E_0 = \frac{1}{2}(P_1 - P_0)(V_0 - V_1) \quad (2.17)$$

ここで V は比容積で、 $1/\rho$ である。

2.4 爆薬の爆ごうに関する理論

2.4.1 爆薬について

爆薬とは火薬の一種である。火薬類とは利用価値のある爆発物であって、その一部に熱または衝撃を加えるときは化学変化を起こし、熱量を遊離すると同時に多量のガスを発生して局部的に急激な圧力上昇を起こし、高温ガス中の活性分子の作用によって他の部分に引き続き急激な分解を起こすものである³⁾。火薬類は物体を推進させることを目的とするもので、分解による火炎の伝播速度がその媒体中の音速より低い。この反応形態は燃焼と呼ばれている。爆薬の場合には分解による火炎の伝播速度がその媒体中の音速より速いため、火炎の直前に圧力の不連続な隆起を伴う衝撃波が生じる。このときの反応形態を爆ごうという。また、爆薬の化学反応を伴う衝撃波のことを爆ごう波、爆ごう波の伝播速度を爆速という。この爆ごうによって生じるガスのことを爆ごう生成ガスと称する。

本研究で使用した爆薬は旭化成工業（株）製の SEP (Safety Explosives) と呼ばれるもので主成分は PETN であり混合物として主にパラフィンが加えられている。この SEP の爆速 D 、充填密度 ρ_e 、C-J 圧 P_{CJ} を表 2.1 に示す。C-J 圧については次節 2.3.2 で説明する。本研究の実験ではこの SEP の起爆は旭化成工業(株)社製の 6 号電気雷管を用いて行った。

表 2.1 爆薬 SEP の特性値

	Density ρ_e (kg/m ³)	Detonating velocity D (m/s)	C-J pressure P_{CJ} (GPa)
SEP	1310	6970	15.9

2.4.2 爆ごう理論

前述したように爆薬中を伝ばする爆轟波は化学反応を伴う衝撃波であるから、2.2 で述べた衝撃波の理論が適用できる。衝撃波速度 U_s のかわりに爆速 D 、粒子速度 u_{p0} をゼロ、粒子速度 u_{p1} を衝撃波面直後の爆轟生成ガスの流速 w として式(2.14)、(2.15)を書き換えると、

$$\rho_0 D = \rho_1 (D - w) \quad (2.18)$$

$$P_1 - P_0 = \rho_0 D w \quad (2.19)$$

が得られる。また式(2.17)は反応による生成熱 Q を加えて、

$$E_1 - E_0 + Q = \frac{1}{2} (P_1 + P_0) (V_0 - V_1) \quad (2.20)$$

となる。以上の3式に爆轟生成ガスの状態方程式を加えても、爆轟の状態を定める未知数 D 、 w 、 P_1 を決定することは出来ない。そこで Chapman は Hugoniot 式に合う D のうち最小のものが安定爆速を与えると仮定し、Jouguet は安定爆速が次式で与えられると仮定した。

$$D = c + w \quad (2.21)$$

両者の示した仮定が理論的に同じであることがわかったため、これは Chapman-Jouguet の条件(C-J 条件)といわれている⁶⁾。また Hugoniot 曲線上でこの条件を満足する点のことを Chapman-Jouguet 点(C-J 点)といい、この時の爆轟生成ガスの圧力を爆轟圧(あるいは C-J 圧)と呼び、 P_{CJ} と表記する。爆轟圧の値は爆速がわかれば C-J 条件と式(2.18)、(2.19)を用いて次式で求めることができる。

$$P_{CJ} = \frac{\rho_0 D^2}{\gamma + 1} \quad (2.22)$$

ここで γ は比熱比で気体爆轟の場合は約 1.3、凝縮系爆薬の場合は約 3.0 であることが知られている。

電気雷管などを用いて爆薬の一部を起爆すると、多量のガス（爆轟生成ガス）と高熱を放出するような化学反応が起こり、次々と周囲の爆薬へと進行していく。このように化学反応しながら進行する部分が爆轟波で、衝撃波と同じ速さで伝ばしていく。爆轟波が通過した未反応部分の爆薬は、化学反応する以前に、先行する衝撃波によって激しい衝撃を受け、それにより頭圧を生じる。頭圧の値は不安定で C-J 圧の数%から 2 倍近くの値をとる。この部分のさらに後方で爆薬は化学反応し、圧力は C-J 圧まで減少する。爆轟波が通過した後方の未反応部分の爆薬幅はほぼ $0.1 \mu\text{m}$ 程度で、さらに後方の圧力が C-J 圧まで減少するまでの部分の爆薬の幅は爆薬によって異なり 1mm から 10mm といわれている⁶⁾。

2.5 状態方程式

本研究のように爆薬の水中爆ごう現象を計算する場合、爆薬、爆ごう生成ガス、水、メタクリル樹脂 (Polymethylmethacrylate、以下 PMMA と略記)、アルミニウムや銅およびステンレス鋼といった金属板などを含む計算場を取り扱わなければならない。そこで、それぞれの物質に応じた状態方程式が必要となり、それは現象を正確に捉えるために非常に重要なものとなる。ここでは適用した状態方程式の概要を説明する。

2.5.1 Mie- Grüneisen 状態方程式

一般に固体は流体と異なり、静水圧成分以外の応力成分を考えなければならない。しかし、爆薬の爆ごうを伴うような非常に強い衝撃波を含む現象においては静水圧成分が支配的であり、偏差応力成分はそれに比べて小さい。個体は粒層的な挙動を示す。このような場合、状態方程式における圧力は静水圧成分を用いる。圧力 P と比内部エネルギー e は、 $0K$ において熱エネルギーを全く無視できる状態での圧力 P_c および比内部エネルギー e_c 、原子の熱運動に基づく圧力 P_T および比内部エネルギー e_T に分けて考える事ができる。すなわち圧力とエネルギーはそれぞれ次の式のようになる。

$$P = P_c + P_T \quad (2.23)$$

$$e = e_c + e_T \quad (2.24)$$

熱力学関係式

$$Tds = dE + PdV \quad (2.25)$$

より、温度 T が $0K$ のとき $P=P_c$ 、 $e=e_c$ であるから次式が成り立つ。

$$p_c(v) = -\frac{de_c(v)}{dv} \quad (2.26)$$

ここで v は比容積である。 P_T は温度が $0K$ のままで圧力を $P_c(v)$ 間で等温圧縮し、その後等容のままで温度 T まで加熱したときの圧力増分である。 P_T は格子熱振動則より次式で表せる。

$$P_T = \Gamma(v) \frac{e_T}{v} \quad (2.26)$$

ここで $\Gamma(v)$ は Grüneisen 係数と呼ばれ、

$$\frac{\Gamma(v)}{v} = \frac{\Gamma_0}{v_0} \quad (2.27)$$

と仮定することが多い。式(2.23)、(2.24)、(2.27)より次式が得られる。

$$P - P_c(v) = \frac{\Gamma_0}{v_0} (e - e_c(v)) \quad (2.28)$$

この式が Mie-Grüneisen 状態方程式⁷⁾と呼ばれている。状態方程式において圧力 P に静水圧成分のみを考慮すればよい場合、流体の衝撃波面上前後で成立する Rankine-Hugoniot の式(2.17)で e を消去すると圧力と密度の関係式が得られる。これは衝撃波波面上で実現しうる圧力と密度の関係で、 P - v 面上で一本の曲線を表す。この曲線を Hugoniot 曲線といい $P=P_H(v)$ で表す。各種の材料について Hugoniot 曲線を求める実験が多くの研究者により行われ、データにまとめられている⁸⁾⁹⁾。

$P_H(v)$ は Mie-Grüneisen 状態方程式を満足するから、 $P_H(v)$ を用いて Mie-Grüneisen 状態方程式は次式で表せる。

$$P - P_H(v) = \frac{\Gamma_0}{v_0} (e - e_H(v)) \quad (2.29)$$

式(2.14)に式(2.13)を代入すると

$$U_s = \frac{c_0}{1-s\eta}, \quad U_p = \frac{c_0\eta}{1-s\eta} \quad (2.30)$$

が得られる。ここで $\eta=1-\rho_0/\rho$ である。式(2.15)に式(2.30)を代入し、 $P_0=0$ 、 $P_1=P_H$ 、 $u_{p1}=u_p$ 、 $u_{p0}=0$ とすると次式が得られる。

$$P_H = \rho_0 U_s u_p = \frac{\rho_0 c_0^2 \eta}{(1-s\rho)^2} \quad (2.31)$$

エネルギー保存則により

$$e_H = \frac{P_H \eta}{2\rho_0} \quad (2.32)$$

と表せ、式(2.29)に式(2.31)、(2.32)を代入すると Mie- Grüneisen 状態方程式は次のように表せる。

$$P = \frac{\rho_0 c_0^2 \eta}{(1-s\eta)^2} \left[1 - \frac{\Gamma_0 \eta}{2} \right] + \Gamma_0 \rho_0 e \quad (2.33)$$

爆薬の爆ごうを伴う現象では発生する圧力が非常に高いため、数値計算に用いる状態方程式としては Mie- Grüneisen 状態方程式が適当であると考えられる。そこで水、PMMA、ステンレス鋼 (SUS304)、銅、アルミニウム (A1050) についてこの状態方程式を適用した。Mie- Grüneisen 状態方程式に用いた各定数について表 2.2 に示す⁸⁾¹⁰⁾¹¹⁾。

表 2.2 Mie-Grüneisen 状態方程式に用いた定数

	ρ_0 (kg/m ³)	C_0 (m/s)	s	Γ_0
Water	1000	1490	1.79	1.65
PMMA	1180	2260	1.82	0.75
SUS304	7896	4569	1.49	2.17
Copper	8930	3940	1.49	1.96
Aluminum	2790	5330	1.34	2.00

2.5.2 JWL 状態方程式

爆薬が化学反応によって生じる爆ごう生成ガスに対しては、木原、疋田、田中 (KHT)状態方程式¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾、Becker-Kistiakowsky-Wilson (BKW)状態方程式¹⁵⁾ならびに Jones-Wilkins- Lee (JWL)状態方程式¹⁶⁾¹⁷⁾など多くの状態方程式が提案されている。この中で JWL 状態方程式は Lawrence Livermore National Laboratory では各種の爆薬に対してシリンダー膨張試験が行われ、その計算について試行錯誤した結果得られた定数(JWL パラメータ)¹⁸⁾である。しかしながら、その計算が複雑であるので、その後シリンダー膨張の理論的モデル解析と nonlinear curve fitting 法を組み合わせ JWL パラメータを求める方法が提案され¹⁹⁾²⁰⁾、シリンダー膨張のデータさえ実験的に得られれば比較的簡単に JWL パラメータを求められるようになった。KHT 状態方程式などは、定数を求めるために爆発性物質およびその爆ごう生成物の初期状態と熱力学データを必要になるのに対し、JWL 方程式爆ごう実験に基づいて、JWL パラメータを算出するためそれらの情報を必要としない。そのため、シリンダー膨張試験ができれば比較的簡単にパラメータを求めることができる JWL 方程式は、様々な爆薬に対して容易に応用できるようになる。このような利点を考え、本研究では爆ごう生成ガスの状態方程式として JWL 方程式を採用した。爆ごう生成ガスの断熱膨張過程は次式で表現される。

$$P_s = A \exp(-R_1 V) + B \exp(-R_2 V) + \frac{C}{V^{\omega+1}} \quad (2.34)$$

$$E_s = \frac{A}{R_1} \exp(-R_1 V) + \frac{B}{R_2} \exp(-R_2 V) + \frac{C}{\omega} \frac{1}{V^\omega} \quad (2.35)$$

ここで A、B、C、 R_1 、 R_2 、 ω は JWL パラメータ、 V は(爆薬の充填密度 ρ_0)/(爆ごう生成ガスの密度 ρ)である。Mie- Grüneisen 状態方程式(2.29)で $P_H(v)=P_s$ 、 $e_H(v)=E_s/\rho$ 、 $e=E/\rho$ 、 $v_0=V/\rho$ 、 $\Gamma_0=w$ とすると、

$$P = P_s + \frac{\omega}{V}(E - E_s) \quad (2.36)$$

上式に式(2.34)、(2.35)を代入して整理すると、JWL 方程式は次式のようになる。

$$P = A \left[1 - \frac{\omega}{VR_1} \right] \exp(-R_1 V) + B \left[1 - \frac{\omega}{VR_2} \right] \exp(-R_2 V) + \frac{\omega E}{V} \quad (2.37)$$

爆薬 SEP の JWL パラメータを表 2.3 に示す¹⁸⁾。

表 2.3 数値計算に用いた爆ごう生成ガスの JWL パラメータ

	A(GPa)	B(GPa)	R ₁	R ₂	ω
SEP	365	2.31	4.30	1.10	0.35

2.6 C-J Volume Burn 法

本研究における数値解析において、爆薬の爆ごう過程を実際の現象と比較してより正確に表現できる方法が必要である。本研究で対象とするような圧力媒体に水を用いてさらに金属板の変形過程の評価を行うには、爆薬部の圧力計算の差異によりその影響は著しい。よって、ここでは一つの爆薬部要素内でも爆ごう波が到達したときに完全に爆ごうしてしまうのではなく、不完全な未爆ごうまでも考慮する必要がある。特に爆薬を金属板に貼付け、反対の爆薬表面が水との境界である場合、爆薬部下表面（金属板側）と上表面（水側）では爆薬の厚さ方向に爆ごう波面の形状が湾曲した形状となる。そこで C-J Volume Burn 法²¹⁾を用いて爆薬部の圧力計算を行った。C-J Volume Burn 法は非常に簡単な爆ごう過程モデルである。爆薬部要素の爆ごう反応において、その要素が生成ガスにどれだけ分解されたか分解率を考えることにより圧力が決定される。この分解率 w は C-J 状態まで体積に比例すると仮定され、次式で与えられる。

$$w = \frac{V - V_{CJ}}{V_0 - V_{CJ}} \quad (2.38)$$

ここで、 V_0 は爆薬部要素の初期比体積、 V_{CJ} は C-J 状態での比体積、および V は計算時刻での要素の比体積である。また、 $w=1$ であれば固体爆薬の状態、 $w=0$ のときが生成ガス状態と表現される。この分解率と JWL 状態式で求められる圧力 P を用いて、要素の圧力 P_e は次式で示される。

$$P_e = P \cdot (1 - W) \quad (2.39)$$

2.7 金属材料の応力計算

2.7.1 構成式

金属板の変形問題において高速塑性変形を伴う場合、ひずみ速度効果を考慮することが重要となってくる。藤田らは²¹⁾は衝撃荷重を受ける金属板の変形解析において材料の構成式モデルを弾完全塑性体、ひずみ硬化材およびひずみ速度効果を考慮したモデルを取り上げ、それぞれの条件で金属板の変形過程に相異があることが確認された。このようにどんな構成式モデルを取り上げるかにより、その解析結果は異なる。本研究で用いる金属板はアルミニウム、銅、ステンレス鋼である。用いたそれぞれの材料の構成式を流動応力 σ_p (MPa)、塑性ひずみ ϵ^p 、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_p$ で表すと次式となる。

アルミニウム²²⁾

$$\sigma_p = 34 + 175 \epsilon_p^{0.29} + 12.8 \epsilon_p^{0.71} \ln(\dot{\epsilon}_p / 2.0 / 10^{-4}) \quad (2.40)$$

銅²³⁾

$$\sigma_p = 20 + 430 \epsilon_p^{0.445} + C(\epsilon_p) \ln(\dot{\epsilon}_p / \dot{\epsilon}_s) + 2.9 \times 10^{-2} (\dot{\epsilon}_p / \dot{\epsilon}_u) \quad (2.41)$$

ここで、 $\dot{\epsilon}_s = 5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 、 $\dot{\epsilon}_u = 1.0 \text{ s}^{-1}$ であり、 $C(\epsilon^p)$ は谷村²³⁾が $\epsilon^p=0.05 \sim 0.2$ まで4段階の数値を示したもので、ここではそれを数式化して用いた。

ステンレス鋼²⁴⁾

$$\sigma_p = 28 + 580 \epsilon_p^{0.57} \quad (2.42)$$

また、上記それぞれの材料の縦弾性係数、ポアソン比を表 2.4 に示す。

表 2.4 金属材料の材料定数

	Young's modulus E(GPa)	Poisson ratio ν
Aluminum	69	0.345
Copper	129.8	0.343
Stainless steel	210	0.26

2.7.2 弾塑性解析

応力場解析において、ひずみ速度成分から弾塑性応力-ひずみ関係式に導入されて応力増分を求めなければならない。ここでは、円筒座標系モデルについて(2.8)、(2.9)、(2.11)式で必要な偏差応力成分の計算方法を示す。

まず、ひずみ速度成分 $\dot{\epsilon}_x$ 、 $\dot{\epsilon}_y$ 、 $\dot{\epsilon}_\theta$ おいび $\dot{\gamma}_{xy}$ は次のようにして求められる。

$$\dot{\epsilon}_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.43)$$

$$\dot{\epsilon}_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2.44)$$

$$\dot{\epsilon}_\theta = \frac{u}{x} \quad (2.45)$$

$$\dot{\gamma}_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2.46)$$

ここで、 u 、 v はそれぞれ x 、 y 方向の速度成分である。

これらのひずみ増分は、時間刻みを dt として

$$d\varepsilon_x = \dot{\varepsilon}_x dt \quad (2.47)$$

$$d\varepsilon_y = \dot{\varepsilon}_y dt \quad (2.48)$$

$$d\varepsilon_\theta = \dot{\varepsilon}_\theta dt \quad (2.49)$$

$$d\gamma_{xy} = \dot{\gamma}_{xy} dt \quad (2.50)$$

と求まる。また、体積ひずみ増分 $d\varepsilon_v$ は次式で求められる。

$$d\varepsilon_v = d\varepsilon_x + d\varepsilon_y + d\varepsilon_\theta \quad (2.51)$$

従って偏差ひずみ増分 de_x 、 de_y 、 de_θ はそれぞれ以下のようになる。

$$de_x = d\dot{\varepsilon}_x - d\varepsilon_v \quad (2.52)$$

$$de_y = d\dot{\varepsilon}_y - d\varepsilon_v \quad (2.53)$$

$$de_\theta = d\dot{\varepsilon}_\theta - d\varepsilon_v \quad (2.54)$$

解析はまず弾性域にあるとみなして行い、降伏条件を超えているとき、塑性解析を行う。つまり、

$$dS_{xe} = 2 G de_x \quad (2.55)$$

$$dS_{ye} = 2 G de_y \quad (2.56)$$

$$d\tau_e = G d\gamma_{xy} \quad (2.57)$$

ここで、 G は横弾性係数であり、また下添字の e は弾性域を表す。

これに偏差応力成分を導入して新しい時刻の応力を弾性応力として次式のように求める。

$$S_{xe} = S_{x0} + dS_{xe} \quad (2.58)$$

$$S_{ye} = S_{y0} + dS_{ye} \quad (2.59)$$

$$\tau_e = \tau_0 + d\tau_e \quad (2.60)$$

ここで、下添字の 0 は時刻が一つ前の状態の偏差応力を示す。

これらを用いて、相当応力 σ_{eq} を求め、これを前節で述べた構成式の流動応力 σ_p と比較する。相当応力は次式で示される。

$$\begin{aligned} \sigma_{eq} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{S_{xe}^2 + S_{ye}^2 + (S_{xe} + S_{ye})^2 + 2\tau_e^2} \\ &= \sqrt{3} \sqrt{S_{xe}^2 + S_{ye}^2 + S_{xe}S_{ye} + \tau_e^2} \end{aligned} \quad (2.61)$$

この相当応力と流動応力を比較して、 $\sigma_{eq} < \sigma_p$ であれば、弾性域なので、 S_{xe} 、 S_{ye} 、 τ_e がそのまま新しい時刻の偏差応力となる。また、平均応力 σ_m は

$$\sigma_m = \sigma_{m0} + Kd\varepsilon_v \quad (2.62)$$

で求められる。ここで、 K は体積弾性係数である。

$\sigma_{eq} > \sigma_p$ の場合、塑性域の状態にあり、塑性解析を行なわなければならない。その手順は以下のとおりである。塑性領域における変形では、塑性ひずみが増加するが、この塑性ひずみ増分 $d\varepsilon_p$ は次式で与えられる。

$$d\varepsilon_p = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{de_x^2 + de_y^2 + (de_x + de_y)^2 + \left(\frac{d\gamma_{xy}}{2}\right)^2} \quad (2.63)$$

また、ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_p$ は次式で求められる。

$$\dot{\varepsilon}_p = \frac{d\varepsilon_p}{dt} \quad (2.64)$$

新しい時刻の ε_p は

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{p0} + d\varepsilon_p \quad (2.65)$$

で求められ、それに対応する流動応力は材料の構成式を用いて求めることができる。

さて、新しい時刻の各偏差応力成分は次のように求めることができる。

$$S_x = S_{x0} + dS_x = (S_{x0} + dS_{xe}) - S_{x0} \Delta \quad (2.66)$$

$$S_y = S_{y0} + dS_y = (S_{y0} + dS_{ye}) - S_{y0} \Delta \quad (2.67)$$

$$\tau_{xy} = (\tau_0 + d\tau_e) - \tau_0 \Delta \quad (2.68)$$

ここで、 $\Delta = 2 G d \lambda$ である。新しい時刻の相当応力を新しい時刻の流動応力と等しいとおくと、次式が得られる。

$$\sigma_{eq}^2 = 3(S_x^2 + S_y^2 + S_x S_y + \tau_{xy}^2) = \sigma_p^2 \quad (2.69)$$

よって、

$$\begin{aligned} & (S_{xe} - dS_{x0} \Delta)^2 + (S_{ye} - dS_{y0} \Delta)^2 \\ & + (S_{xe} - dS_{x0} \Delta)(S_{ye} - dS_{y0} \Delta) + (\tau_e - \tau_0 \Delta)^2 = \frac{\sigma_p^2}{3} \end{aligned} \quad (2.70)$$

この式は Δ を未知数とする二次方程式であり、他の値は全てこれまでに求められている。これより Δ は次式で求められる。

$$\Delta = \frac{B_2 - \sqrt{B_2^2 - 4 B_1 B_3}}{2 B_1} \quad (2.71)$$

ここで、 B_1 、 B_2 、 B_3 は

$$B_1 = S_{x0}^2 + S_{y0}^2 + S_{x0}S_{y0} + \tau_0 = \frac{\sigma_{p0}^2}{3} \quad (2.72)$$

$$B_2 = 2S_{xc}S_{x0} + S_{xc}S_{y0} + S_{yc}S_{x0} + 2S_{yc}S_{y0} + 2\tau_c\tau_0 \quad (2.73)$$

$$B_3 = S_{xc}^2 + S_{yc}^2 + S_{xc}S_{yc} + \tau_c^2 - \frac{\sigma_p^2}{3} \quad (2.74)$$

この Δ を用いて偏差応力成分は以下のように決定すればよい。こうして新しい時刻の偏差応力成分を求めることができる。

$$S_x = S_{xc} - S_{x0}\Delta \quad (2.75)$$

$$S_y = S_{yc} - S_{y0}\Delta \quad (2.76)$$

$$\tau_{xy} = \tau_c - \tau_0\Delta \quad (2.77)$$

2.8 境界条件

本研究で行うような爆発圧着法および、爆発成形法において、爆薬部が金属板に貼付けてある場合の爆薬部と金属板との境界面、あるいは水と金属板の境界面においては、衝撃波が伝播するときそれぞれの粒子速度が異なる。よって計算場において格子要素を刻むが、それぞれの物質の境界面は同時に移動することはない。これらの境界はすべり境界となり、これを表現できる方法が必要となって来る。そこで、これらの境界面には Wilkins²⁵⁾によるすべり境界の手法を取り入れた。この手法は、金属板に圧力が作用する側の水あるいは爆薬部要素の計算において、金属板が変形を伴う場合でも両者の要素にずれが生じ、その境界面と圧力計算が容易に求まる手法である。

2.9 結言

本章では、解析方法に用いる手法について述べた。ここで用いる解析方法は爆薬の水中爆ごうから、それによって発生する水中衝撃波の伝播過程および金属板の変形過程までの計算場を対象としたものである。この方法に用いる基礎式、状態方程式、構成式、応力場の計算、境界条件および衝撃波と爆ごうに関する簡単な理論について説明された。これらの手法を第3章から第6章の内容で紹介する計算場を対象として解析を行う。

参考文献

- 1) A. A. Amsden, H. M. Ruppel and C. W. Hirt, SALE: A Simplified ALE Computer Program for Fluid Flow at All Speeds, LA-8095, UC-32(1980).
- 2) 林卓夫, 田中吉之助 編, 衝撃工学, 日刊工業新聞社 (1988).
- 3) S. P. Marsh, LASAL Shock Hugoniot Data, University of California Press(1980).
- 4) R. Kinslow, High-Velocity Impact Phenomena, Academic, New York(1970).
- 5) 工業火薬協会 編, 工業火薬ハンドブック, 共立出版(1966).
- 6) 工業火薬協会 編, 新・発破ハンドブック, 山海堂(1989).
- 7) 田中克己, 衝撃波と爆轟(デトネーション波)(1), 工業火薬協会誌, 37, 5, pp. 222-232 (1976).
- 8) S. P. Marsh, LASL Shock Hugoniot Data, University of California Press (1980).
- 9) R. Kinslow, High-Velocity Impact Phenomena, Academic, New York (1970).
- 10) 高橋勝彦, 村田健司, 加藤幸夫, 水中爆発性能に及ぼす金属ケースの効果 (第 2 報) 数値計算によるアプローチ, 工業火薬協会誌, 54, 4, pp. 190-197 (1993).
- 11) 衝撃工学, 日刊工業新聞社, pp.203-234(1988).
- 12) 田中克己, 爆薬の爆ごう特性解析, 化学技術研究所 (1983).
- 13) 田中克己, 分子間ポテンシャルモデルによる爆轟特性の研究(I), 工業火薬協会誌, 43-4, pp. 239-248 (1982).
- 14) 田中克己, 分子間ポテンシャルモデルによる爆轟特性の研究(II), 工業火薬協会誌, 43-5, pp. 335-343 (1982).
- 15) C.L.Mader, Detonation Properties of Equation of State of Becker-Kistiakowsky-Wilson, pp.412-448 (1979).
- 16) J. W. Kury, H. C. Hornig, E. L. Lee, J. L. McDonnel, D. L. Ornellas, M. Finger, F. M. Strange and M. L. Wilkins, Metal Acceleration by Chemical Explosives, 4th Symposium on Detonation, A109-A120 (1956).
- 17) E. L. Lee, H. C. Hornig and J. W. Kury, Academic Expansion of High Explosive Detonation Products, UCRL-50422, TID-4500, UC-4 (1968).
- 18) E. L. Lee, M. Finger and W. Collins, JWL Equation of State Coefficients for High Explosives, Lawrence Livermore Laboratory, UCID-16189 (1973).
- 19) H. Hornberg, Detonation of Fume State Parameters from Expansion Measurements

- of Metal Tubes, Propellants, Explosives, Pyrotechnic, 11, pp.23-31 (1986).
- 20) I. F. Lan, S. C. Hung, W. M. Lin, C. Y. Chen, Y. M. Niu and J. H. Shiuan, A Simple Method of Deducing JWL Parameters from Cylinder Expansion Test, 工業火薬協会誌, 53-3, pp. 149-157 (1992).
- 21) 藤田昌大, 石氷泰夫, 持原稔, 苧阪浩男, 伊東繁, 周辺固定円板の横衝撃変形のひずみ硬化, ひずみ速度効果試料の板厚効果を考慮した数値解析, 塑性と加工, 36-412, pp. 541-546 (1995).
- 22) 吉田総仁著, 弾塑性力学の基礎, 共立出版株式会社, p.116 (1997).
- 23) S. Tanimura, Constitutive models for Dynamic Behavior of Materials, Proceedings of the International Symposium on Impact Engineering, 1, pp.17-26 (1992).
- 24) 張ルイ, 井山裕文, 藤田昌大, 伊東繁, 張鉄生, 李振声, 型を用いない爆発成形球殻技術の数値解析, 火薬学会誌 58 pp.16-22(1997).
- 25) M. L. wilkins, Calculaton of Elastic-Plastic Flow, Methods in Computational Physics, vol.3 (1964).

第3章 水中衝撃波による金属平板の変形について

3.1 緒言

金属板を水中衝撃波によって加速させる場合、その高速飛翔する金属板の変形過程についてはまだ十分に知られていない。また、金属などの固体を含む計算場を解析した報告例もあるが^{1)~3)}、いずれも固体は流体的な挙動を示すものとして計算されている。本研究では適用している数値解析法の特徴を活かし、爆薬の水中爆ごうから金属の変形過程までを一貫して解析できるプログラムを確立することを目的としている。ここでは、水中衝撃波を利用した爆発圧着法の数値解析を行う前段階として、本研究で用いる解析方法の妥当であるか検討する。数値解析結果と光学的写真観察実験によって得られた結果との比較検討を行うことで、解析方法の信頼性について議論することが必要である。

本章ではその評価のために爆薬の水中爆ごうにより生じた水中衝撃波の作用によってアルミニウム板を飛翔させる装置を用いた光学的写真観測実験より得られた結果と同一条件での数値解析の結果との比較を行い、解析方法の妥当性についての評価を行う。

3.2 実験方法

数値計算においては爆薬の大きさおよび金属薄板の寸法などは、計算機の容量の許す限り、自在に変化させることが可能である。それに対して光学的写真実験を行う場合には、実験室で使用できる爆薬量の制限や、撮影できる視野の大きさなどにより、実験装置の寸法がかなり制約される。また金属板の材質も数値計算では材料の物性がわかっているならば何でもよいが、実験の際には様々な制約が生じる。そのため、光学的観察実験と数値計算ができるだけ同じ条件で行えるように配慮し、図 3.1 に示すような実験装置を用いて水中衝撃波の作用を受ける金属平板の挙動を観察した。爆薬は SEP を用い、平面な爆ごう波が得られるように、SEP と HABW (旭化成工業 (株) 製、爆速 5000m/s、初期密度 2200kg/m³) を組み合わせた爆薬レンズを用いた。爆薬は厚さ 3mm で、幅 120mm、長さ 150mm で厚さ 5mm の PMMA 板に張って使用した。図に示すように、この爆薬を平面に対して角度 α 傾けて水槽中に配置した。また、水槽の上面に加

速される金属板を配置した。実験は熊本大学衝撃エネルギー実験所の爆発ピット内にて、高速カメラによる写真観察が行われた⁴⁾。傾斜角 α はそれぞれ 15° 、 20° 、 25° 、 30° の場合について、ストリーク撮影を行った。また、 15° の場合はフレーミング撮影も行った。これらの写真観察にはイメージコンバータカメラ (HADLAND PHOTNICS 社製, IMACON790、最大駒撮り間隔 2000 万駒、最高流し速度 1 ns/mm) を用い、通常のシャドウグラフ撮影法によった。水平面に対して金属板を傾けることにより水中衝撃波が作用する強さや角度などは金属板上のいたるところで異なってくる。そのため、観察する場所が変われば金属板の挙動の仕方も変わってくるので、実験装置の配置には注意が必要である。しかし得られるデータには金属板の変形に影響を及ぼす様々な要因を含んだものとなり、計算結果の妥当性を検討するためには好都合であると考えられる。金属板はアルミニウム平板 (A1050) を用いた。アルミニウム平板の寸法は厚さ 0.5mm で幅、長さはともに 170mm である。このアルミニウム板は水槽の底に立てた 2 枚の PMMA 板の上に置いた。水槽は、上端がアルミニウム板の下面と同じ高さとなるようにし、そこまで水を入れたとき水面とアルミニウム板の下面が接するようにした。また、観察する金属板をアルミニウム板としたのは、2 枚の PMMA 板の上にアルミニウム板を置いたときに自重によるたわみができるだけ小さくなるようにするためである。また、アルミニウム板は爆薬がちょうど水に入っている位置から板の左端までの距離が 30mm となるようにし、その真下に主爆薬の左端がくるように配置した。ストリーク撮影によるスリットの位置はアルミニウム板の左端から 30mm のところになるようにした。

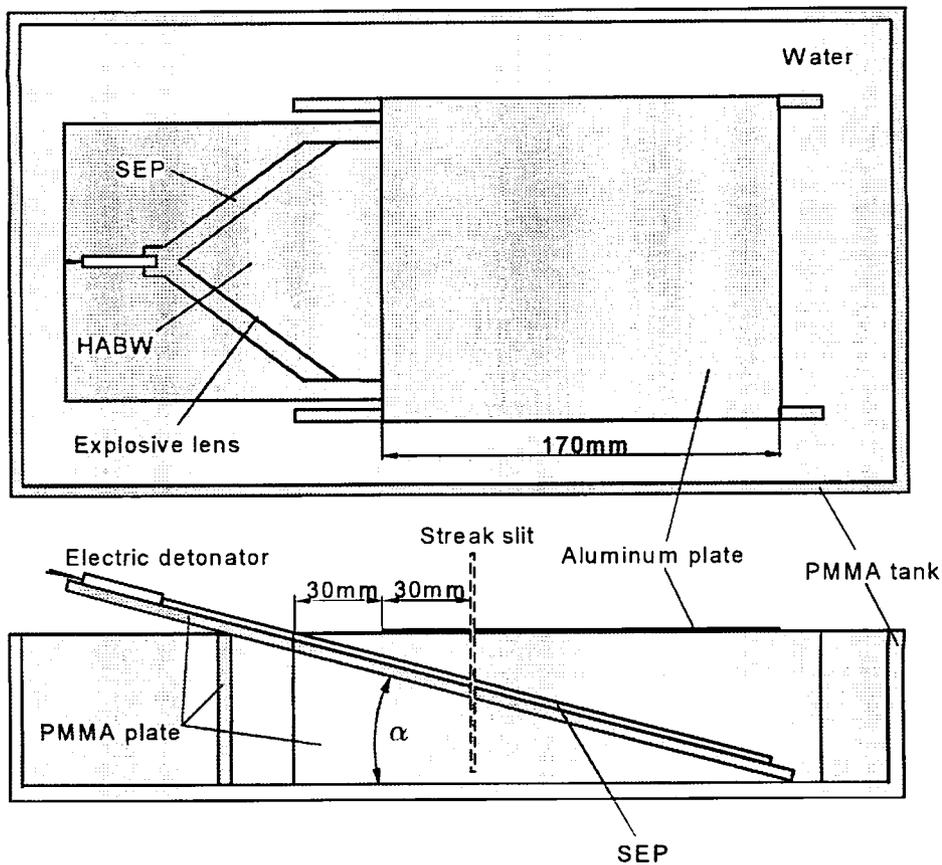


図 3.1 アルミニウム板の変形過程を調べるための実験装置概略図

3.3 解析モデル

図 3.2 は解析の対象となる計算場を示す。計算は平面問題として二次元で行った。図に示すように計算場は PMMA 板、その上部に張られた平板状爆薬 SEP、水を介して飛翔板としてアルミニウム平板を配置した。x-y 座標はアルミニウム板の左端点を原点とした。爆薬の配置角度 α は実験と同様に、 15° 、 20° 、 25° 、 30° とした。爆薬の厚さは 3mm、アルミニウム板の板厚 t は 0.5mm とした。この図で示されるように、実験の場合と同様に破線でしめされる水面の延長線と傾斜した爆薬部の延長線との交点から 30mm の位置にアルミニウム板の左端部が配置されるように設定した。爆薬レンズ部のから主爆薬 SEP に爆ごう波が到達する際、SEP の C-J 圧力が平面的に主爆薬の左端部に生じるものとして、爆薬部の左端から 2 つの格子要素までに C-J 圧力とその場合の粒子速度を格子点に与えることで、計算が始まる。あとは、JWL 状態方程式と C-J Volume Burn 法により、爆薬部の要素の圧力が算出される。

また飛翔板に作用する水中衝撃波の圧力状態を理解するため、この解析モデルにおいて、アルミニウム板を剛体面にした場合についても計算を行った。ここで、アルミニウム板と水との境界をすべり境界とした。剛体面においては水要素の格子点が剛体面に沿って水平方向に移動するよう境界条件⁵⁾を与えた。

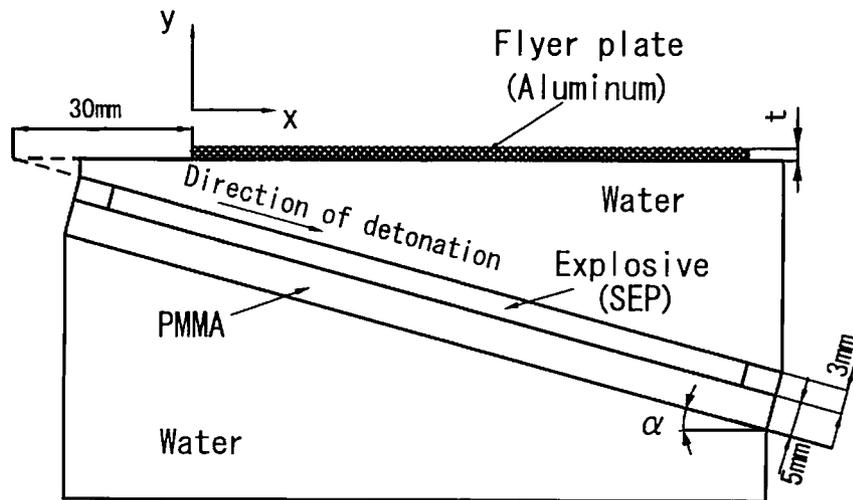
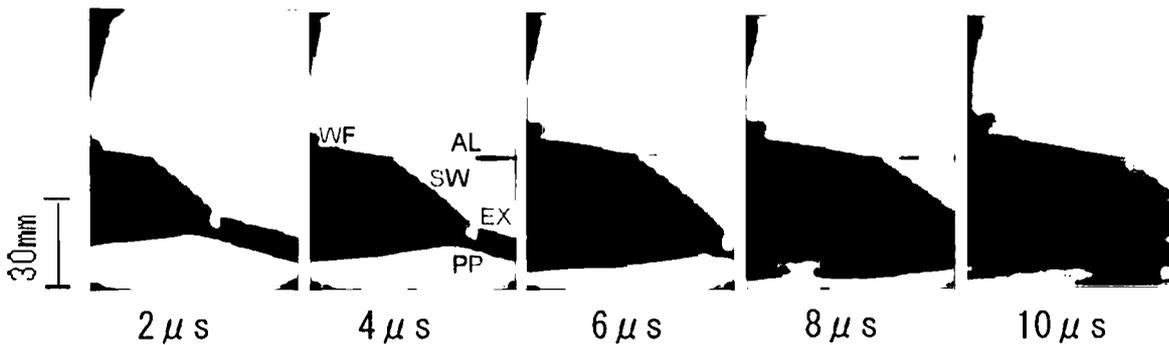


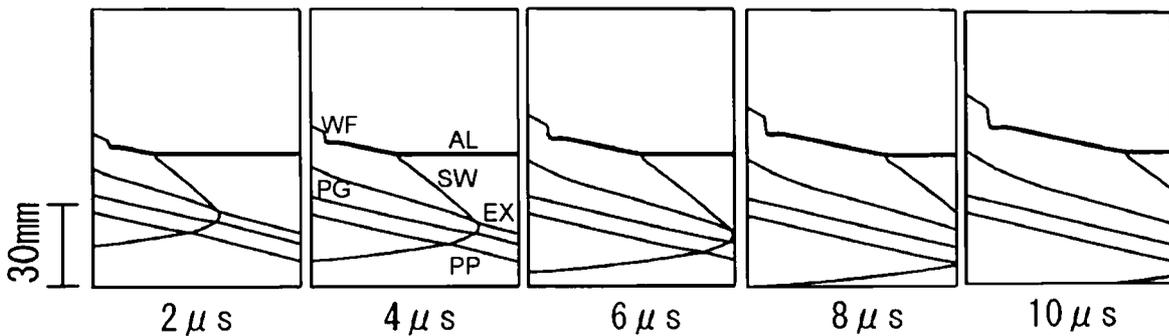
図 3.2 水中衝撃波によるアルミニウム平板の飛翔解析モデル

3.4 結果および考察

フレーミング写真撮影によって得られた結果を図 3.3 に示す。図中 AL はアルミニウム板、EX は未反応部の爆薬、SW は水中衝撃波の先頭波面を示す。WF は水中衝撃波によって加速されあふれ出た水である。爆ごう波の先頭は同図(a)にて白く観察される。フレーミング写真は $2\mu\text{s}$ おきに撮影された。ほぼ同時刻に得られた解析結果を同図(b)に示す。図中 PG は爆ごう生成ガス、PP は PMMA 板を示す。爆薬の爆ごうによって発生した爆ごう生成ガスが膨張し、水を上面に押し上げている様子が見られる。解析結果においても実験結果と同様 WF で示される水の跳ね上がりが観測されるがその形状は実験結果のそれとは多少異なることが両者の比較から分かる。その点をのぞけば、解析結果は発生した水中衝撃波の形状および AL 板の変形形状を比較的良好に表現している。



(a) フレーミング撮影結果



(b) 解析結果

図 3.3 水中衝撃波を受けるアルミニウム平板の変形過程 ($\alpha = 15^\circ$): AL (アルミニウム板)、PG (爆ごう生成ガス)、WF (水面)、SW (水中衝撃波)、EX (未爆ごう爆薬部)、PP (PMMA 板)

次に、爆薬の水中爆ごう過程、アルミニウム板の変形過程を撮影したストリーク写真の例を図 3.4 に示す。同図は、 $\alpha=25^\circ$ の場合に撮影された。図中 SW は水中衝撃波のストリーク、AL はアルミニウム板のストリークを示す。写真右側を原点とし、左の方向に時間が経過している。図中に示す水平軸の基準長さは $10\mu\text{s}$ で、距離は垂直方向の基準長さが 50mm である。爆薬の水中爆ごうによって発生した水中衝撃波がアルミニウム板に衝突するとアルミニウム板は直ちに加速される。その後ストリーク写真上でほぼ直線的な記録が得られており、このことより、一定時間後は、アルミニウム板はほぼ等速で飛翔しているように見られる。またアルミニウム板の軌跡のわずかに上部に傾きが大きいストリークが見られるが(図中 AS)、これは水中衝撃波がアルミニウム板と衝突し、さらにアルミニウム板を通過し、空気中に出た衝撃波の時間軌跡を表す。この空気中の衝撃波が時間の初期ではアルミニウム板の変形と重なってしまうため初期の変形過程は、正確には観測できなかった。同写真をもとに画像処理して得られたアルミニウム板の y 方向変位と時間との関係を表したものを図 3.5 に示す。横軸は水中衝撃波がアルミニウム板に到達し、アルミニウム板が変形し始める時刻をゼロとして、それからの経過時間であり、縦軸はアルミニウム板が図 3.1 中に示されているストリークスリットを遮っていく距離である。図中(○)は $\alpha=15^\circ$ 、(△)は $\alpha=20^\circ$ 、(●)は $\alpha=25^\circ$ 、(◎)は $\alpha=30^\circ$ の実験結果をそれぞれ示す。なおそれぞれの角度に対応する解析結果を実線、破線、一点鎖線、二点鎖線でそれぞれ示す。いずれの角度においても計算と実験結果には比較的良い一致が得られた。

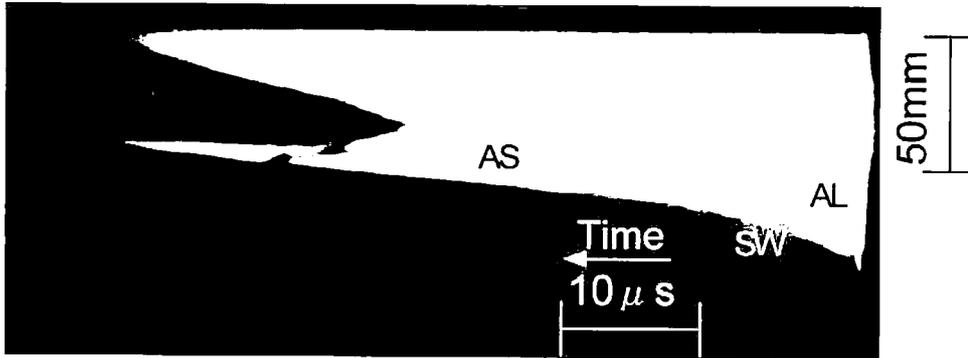


図 3.4 $\alpha=25^\circ$ の場合のストリーク写真 (AS : 空気中の衝撃波、AL : アルミニウム板)

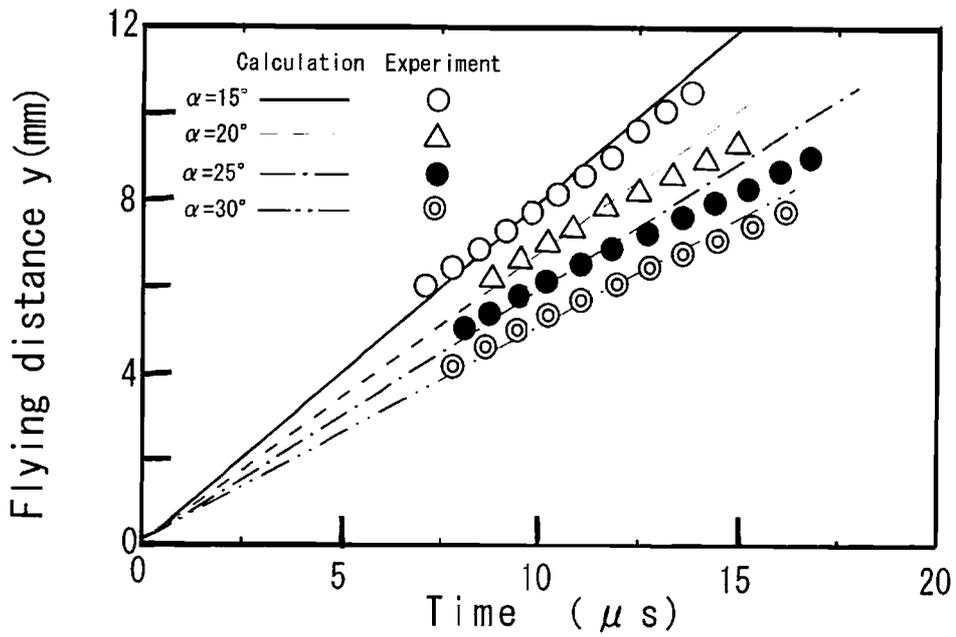


図 3.5 アルミニウム板左端部より 30mm ($x=30\text{mm}$) の位置における飛翔履歴

図 3.6 は解析結果より得られた、 $x=30\text{mm}$ の位置でのアルミニウム板の変形状に対して法線方向の速度成分と変位 y の関係を示している。

同図から分かるように、水中衝撃波が板に入射すると板厚分程度の極めて僅かな距離で板は最高速度に達し、その後、ほぼ一定の速度で飛翔する。さらに到達の最終速度は α が大きくなるにつれ小さくなることが同図から分かる。結果を Table 3.1 に示す。次に数値計算によって得られた飛翔板面上の圧力分布を同時刻の変形状と併せて図 3.7 に示す。図中横軸は平板面に沿った水中の距離 x 、縦軸は圧力である。いずれの α の場合も計算のはじめから $20\mu\text{s}$ における結果を示している。図中右側が水中衝撃波の未到発達領域で、水中衝撃波がアルミニウム板に衝突すると急激に圧力が上昇し、その後左側に向かって減衰することがわかる。またいずれの α の場合も水中衝撃波の後方 10mm 程度まで圧力が負荷され、その後はほとんど圧力が作用しない。また圧力のピーク値は α の増加につれて減少することが同図から分かる。このようなパルス形の圧力作用では、アルミニウム板ははじめ加速されるが、その後はアルミニウム板の慣性によってのみ飛翔すると考えられているため、前述のように平板の加速過程の後に速度がほぼ一定値をとると考えられている。

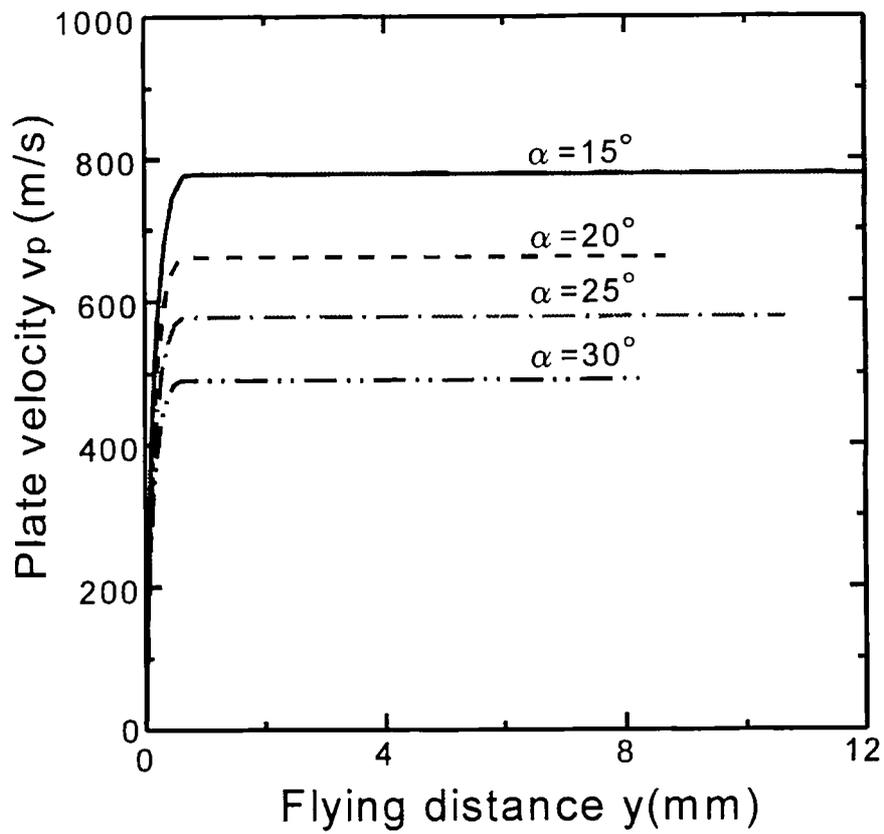


図 3.6 $x=30\text{mm}$ の位置におけるアルミニウム板の鉛直方向速度変化

表 3.1 図 3.6 におけるアルミニウム板の最終到達速度

α (deg.)	15	20	25	30
V_p (m/s)	780	677	576	490

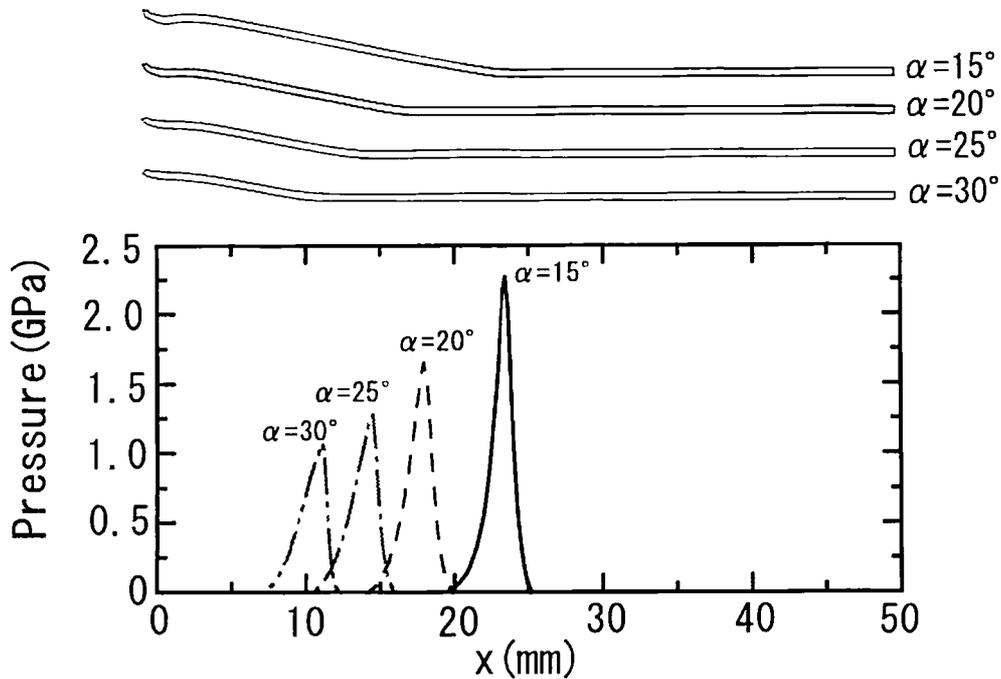


図 3.7 20 μ s 時におけるアルミニウム板の変形形状と圧力分布

数値計算によって得られた剛体と板厚 $t=0.5\text{mm}$ の場合に得られた圧力の等高値分布と変形形状を図 3.8 に示す。結果が示すように変形平板の場合反射衝撃波が不明瞭で、また板の変形し始めた領域での圧力減衰は急激である。このため水中衝撃波が飛翔板に入射した場合急激に圧力が上昇し、また減衰することが明らかになった。以上のことよりこの圧力の急激な上昇によって飛翔板が加速され、そして入射衝撃波後方領域の急激な圧力の減衰により、アルミニウム板は慣性力によって飛翔するようになると推察されるため、速度がほぼ一定値をとると考えられる。これらのことは爆発圧着の際、飛翔板の速度が爆薬の配置角度と爆薬から飛翔板までの距離を設定することによって、一定の飛翔速度を与えることが可能であることを示し、本装置の有用性を明らかにした。

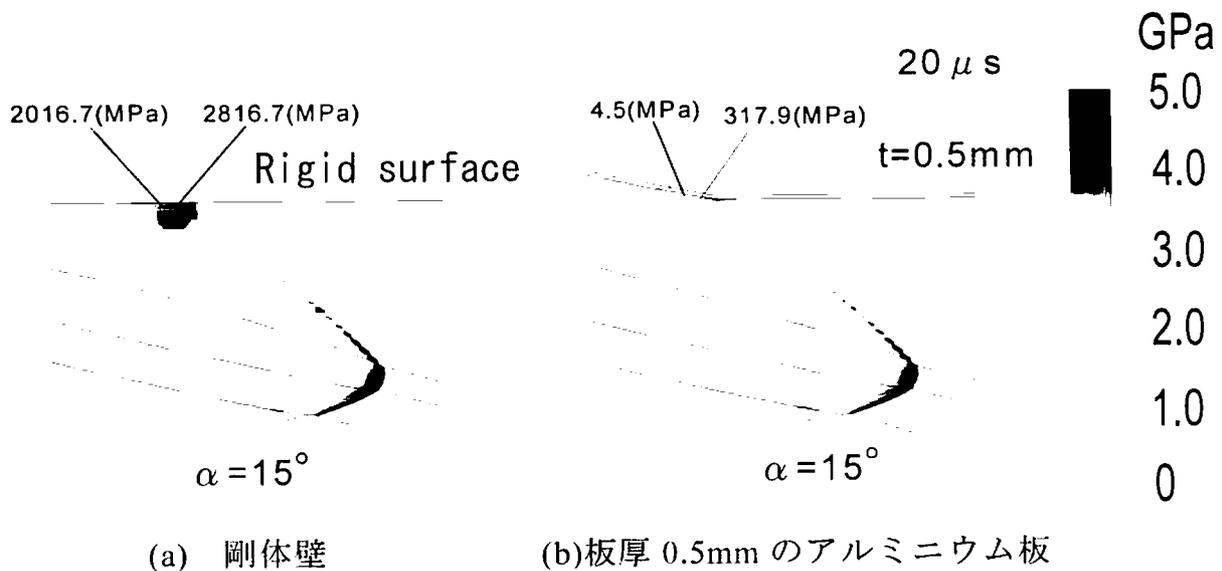


図 3.8 20 μs 時の圧力等高地分布図

3.5 結言

爆薬の水中爆ごうによって発生した水中衝撃波を利用した爆発加工の中で極めて重要な因子となる飛翔板の加速特性を実験と数値計算によって評価した。

ここでは、まず実験方法について紹介した。ここで行った実験は爆薬の水中爆ごうにより発生した水中衝撃波によるアルミニウム板の変形過程の観測について高速度カメラを利用したフレーミング撮影とストリーク撮影実験である。前者は対象とする視野を一定の時間間隔で撮影する方法で後者は任意の位置にスリットを設け、そのスリットを置いた観測点における変化量の時間履歴を記録する方法である。これらの実験状況と同様の計算場を解析し、その結果と照合させて水中衝撃波による金属板の変形解析において、本研究で用いる解析方法が適合しているかその検証を行った。その結果を以下にまとめる。

1. フレーミング撮影による結果と解析結果において、爆薬の爆ごう過程および水中衝撃波の伝播過程、またアルミニウム板の変形過程における両者の形状が時間履歴とともによく一致した。
2. 爆薬と飛翔板の間の傾斜各 α を 15° 、 20° 、 25° 、 30° と変化させた場合、

ストリーク撮影結果から読み取られたアルミ板の変形過程と解析による変形過程の結果において両者がよく一致した。

3. 飛翔板までの距離ならびに爆薬と飛翔板の設定角度 α を変化させることにより、その加速された飛翔板はほぼ一定の速度をとり、0.5mmのアルミニウム板の場合 $\alpha=15^\circ$ の場合 680m/s、 $\alpha=30^\circ$ の場合 480m/sであった。このことより金属板の飛翔速度を制御することができ、その有用性を示した。
4. アルミニウム板ではなく剛体とした場合とアルミニウム板が変形しながら水中衝撃波が反射する場合と比較を行い、その反射形態および変形を伴うことによる急激な圧力の減衰について述べた。

参考文献

- 1) J. N. Johnson, C. L. Mader and S. Goldstein, Performance Properties of Commercial Explosives, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 8, pp. 8-18(1983).
- 2) 片山雅英, 相澤龍彦, 田中克巳, 爆縮成形における衝撃波構造解析 (第1報: 自由表面水中爆ごうによる爆縮成形), 第41回塑性加工連合講演会講演論文集, pp.183-186(1990).
- 3) 片山雅英, 相澤龍彦, 田中克巳, 爆縮成形における衝撃波構造解析 (第1報: K-H-T の状態方程式による爆ごう過程の詳細シミュレーション), 第42回塑性加工連合講演会講演論文集, pp.703-705(1991).
- 4) 吉良章夫, 高性能爆薬の水中爆ごうによって発生した水中衝撃波に関する研究, 熊本大学大学院自然科学研究科博士課程論文, pp. (1997).
- 5) A. A. Amsden, H. M. Ruppel and C. W. Hirt, SALE: A Simplified ALE Computer Program for Fluid Flow at All Speeds, LA-8095, UC-32(1980).

第4章 水中爆発圧着法の実験および数値解析について

4.1 緒言

これまで、工業生産で行われている爆発圧着法では、様々な異種金属板同士の接合が可能である。しかし、非常に薄い金属箔や脆性材料と他金属との接合は非常に困難である。これらの接合を可能にするには、飛翔板に作用する圧力を制御し、それぞれの接合条件に適合するようにしなければならない。水中衝撃波を利用した新しい爆発圧着法¹⁾では、爆薬と飛翔板との間隔および傾斜角などのセットアップ条件を変えることで、飛翔板に作用する圧力を制御できる。この方法を利用してこれまでアモルファス金属箔の爆発圧着が可能となっている。本章ではまず、このアモルファスの爆発圧着例¹⁾を紹介する。次に、この方法の装置特性を明らかにするために、飛翔板と母材を共に銅板として数値解析を行った。ここでは、爆薬の水中爆ごうにより生じる水中衝撃波がどのように飛翔板に作用し、その飛翔板がどのように加速され母材と衝突するか等について解析結果に基づき、飛翔板に作用する水中衝撃波の移動速度、飛翔板の飛翔速度、飛翔板と母材との衝突角度などの結果を紹介しながら議論する。本解析方法では、爆薬の水中爆ごう過程から水中衝撃波の伝播過程および金属飛翔板への作用、更に母材との衝突現象まで一貫して表現できる方法である。

4.2 アモルファス金属箔の爆発圧着

ここでは、外本ら¹⁾が行ったアモルファス金属箔と鋼の爆発圧着実験について述べる。図4.1に装置概略図を示す。左図(a)は装置全体の概略図を示しており、右図(b)は試料部分の詳細を示している。実験はこの装置全体を水中に沈めて行われる。爆薬は厚さ5mmの旭化成(株)製のSEPを用いる。爆薬は反射板(鋼)に貼り付けてあり、アンヴィルからの高さを左端部で20mmとして試料に対して α だけ傾斜している。起爆は左端部の電気雷管により行われる。アモルファス金属箔はAllied Metaglas社より供給された長さ50mm、厚さ38 μ mのBNi2である。また母材には長さ60mm、厚さ3mmのSS400を使用した。アモルファス金属箔の上部にはエポキシ樹脂と耐熱塗料を挟み、ステンレス

(SUS304) のカバープレート 2 枚で覆われている。SS400 との間隙は 0.1mm となるようにスペーサーで保持され、周囲には水が入りこまないようにシールテープが貼り付けてある。実験は爆薬の傾斜角 α を 10~22° まで変えて行われた。

図 4.2 に実験結果を示す。 $\alpha=10^\circ$ では、爆発圧着の特徴である波状の接合界面は得られておらず、クラックや亀裂が発生している。 $\alpha=15^\circ$ 以上では、ほとんどクラックや亀裂が見られず、接合界面が波状となるのがわかると同時に、傾斜角が大きくなるほど接合界面の波の波長が短くなっていることがわかる。

この装置として要求されることは、①金属飛翔板が十分高速に加速され、母材と衝突して接合が行われること。②金属板の飛翔速度が容易にコントロールできること。③衝突の際に発生する熱の影響が大きくないこと等が考えられる。従来の空気中で行う爆発圧着の場合、飛翔板が母材に衝突する際の衝突移動点速度が、溶接素材の音速を超えては爆着がうまく行えないことが指摘されており²⁾、取り扱える爆薬の爆速に制限がある。また、金属飛翔板の速度制御は難しい。さらに金属材料同士の爆着は、多くの場合図 4.2 に見られように接合界面部分が波状を呈し、その振幅は爆着条件によっては数百マイクロンとなる。厚さ数十マイクロン程度のアモルファス金属箔の爆着には、この波の振幅を巧妙に制御することが必要となる。また界面に金属間化合物が生成されると、接着強度が不十分となるため、生成される化合物も少ないことが要求される。

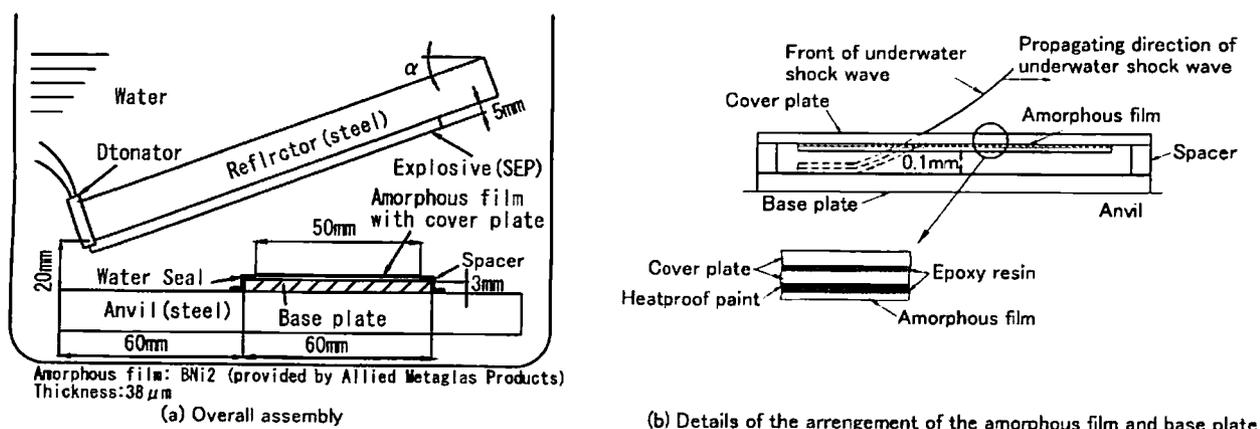


図 4.1 アモルファス金属箔の爆発圧着実験装置

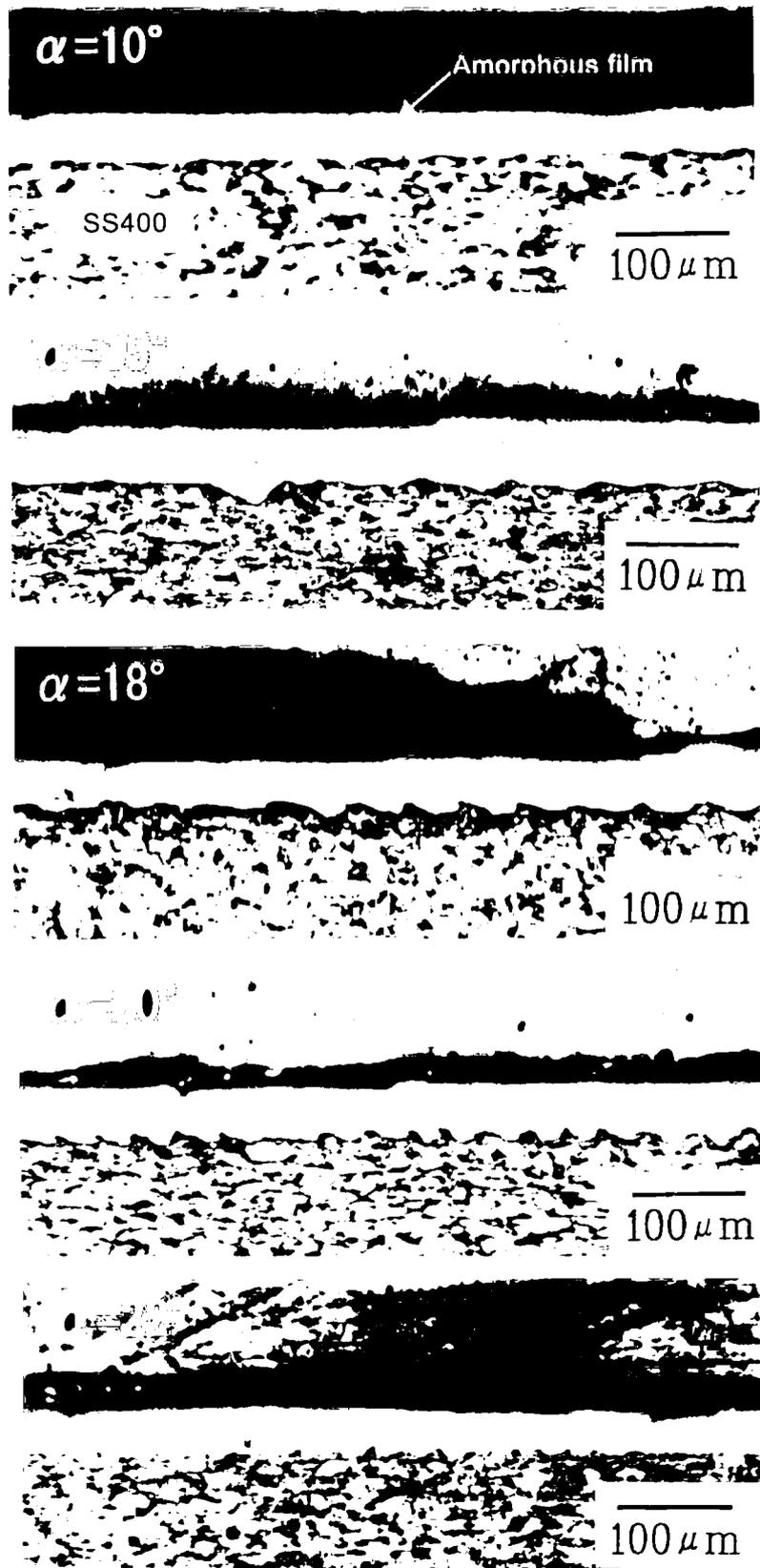


图 4.2 接合界面扩大写真

4.3 解析モデル

ここでは、水中で行う爆発圧着法において、水中衝撃波がどのように飛翔板に作用しているか、また飛翔板の変形速度、母材との衝突角度や衝突点移動速度などについて、この装置のセットアップ条件を変えることにより、どのように変化するか数値解析の結果に基づき議論する。本研究では飛翔板と母材を銅板として二次元問題として取り上げた。

図 4.3 に 2 枚の金属板の爆発圧着過程を対象とした解析モデルを示す。飛翔板は厚さ 5mm の銅板であり、母材は板厚は 3mm の銅板とした。爆薬 SEP は厚さ 5 mm とし、板厚 10mm のステンレス鋼 (SUS304) に貼り付けられている。また、x-y の直交座標系を図のように飛翔板の左端部を原点にした。また、境界条件として爆薬部とステンレス鋼板との境界、水と飛翔板との境界および飛翔板と母材との境界においてすべり境界として解析を行った。ここで、飛翔板が加速され母材と衝突すると、飛翔板の格子点は母材から離れず、母材表面上を移動するという条件とした。

この装置の特徴であるようにセットアップ条件を変えることにより、飛翔板に作用する衝撃圧の状態が変化し、その接合過程の条件が変わることで良好な条件が得られる。この評価を行うためにいくつかのセットアップ条件について、それがどのように接合過程に影響を及ぼすかということを議論するために様々な条件で解析を行った。ここで変化させたセットアップ条件のパラメータは、爆薬と飛翔板の角度 α 、爆薬中央の位置と飛翔板中央の位置での距離 D および飛翔板と母材との間隙 s である。これらのパラメータを変えて行った計算条件を表 4.1 に示す。ここで示されるように、No.1~4 は爆薬と飛翔板の距離 D および飛翔板と母材との間隙 s を一定として爆薬の傾斜角 α のみを変化させて解析を行った。また、No.4、5、6 においては距離 D および No.4、7、8 においては間隙 s の影響を調査するために行った。

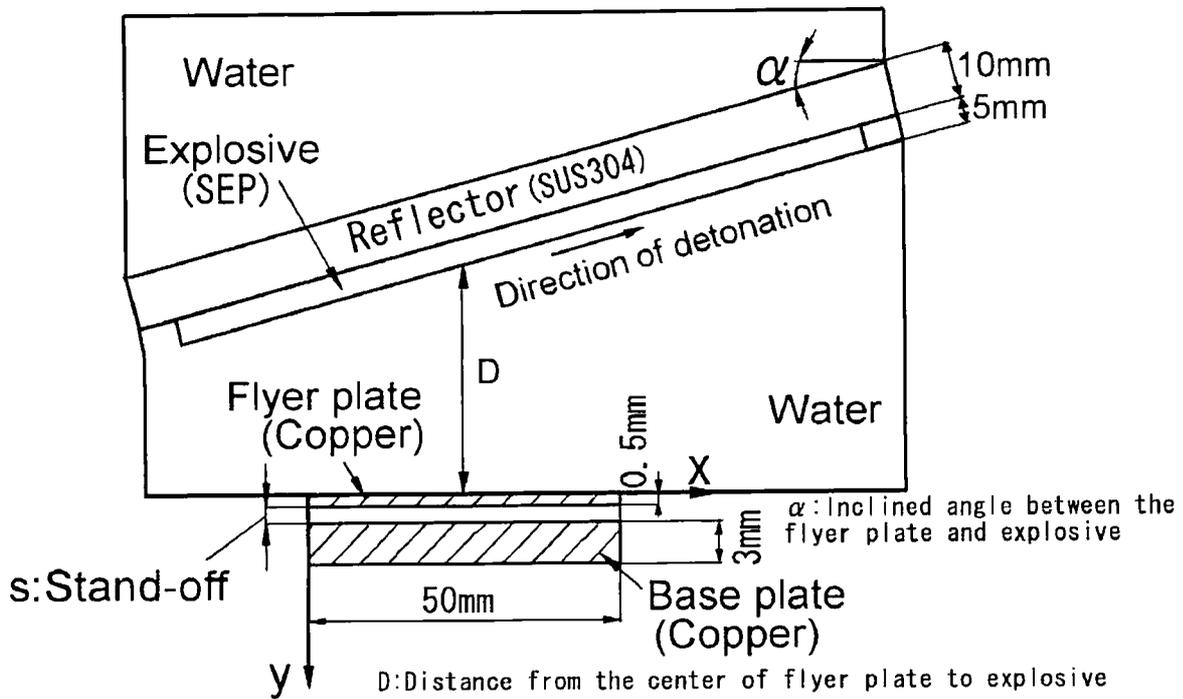


図 4.3 水中衝撃波を利用した爆発圧着過程の解析対象モデル

表 4.1 計算条件

Set-up No.	α (deg.)	D (mm)	s (mm)
1	0	40	1.0
2	10	40	1.0
3	20	40	1.0
4	30	40	1.0
5	20	30	1.0
6	20	50	1.0
7	20	40	0.5
8	20	40	2.0

4.4 解析結果

図 4.4 に解析条件 No.3 の場合における、16~30 μ s までの金属板の変形過程及び圧力等高地分布を示す。また、図 4.5 にそれぞれの時刻における飛翔板に作用する圧力の分布を示す。飛翔板に水中衝撃波が到達すると飛翔板は急激に加速され、このとき飛翔板からは強い衝撃波の反射が見られる。飛翔板は一定の間隙を保つところに配置してある母材に衝突する。母材に衝突するとさらに飛翔板表面において強い反射が見られる。そこで、20 μ s における飛翔板と母材の衝突状態と圧力分布を同図でわかるように示したものが図 4.6 である。x=27mm 付近で水中衝撃波が飛翔板に作用し、およそ 3.9GPa の圧力上昇が見られる。その後方において、飛翔板が飛翔して母材と衝突した位置は x=20mm 近傍であるが、それより若干遅れて圧力上昇がおこり、水中衝撃波が到達した後、一旦圧力は減少するがこの衝突により飛翔板の速度が急激に減少するので、この地点における水の要素の圧力が上昇する。その圧力はこの場合、およそ 2.8GPa である。図 4.7 は同時刻における母材の上表面層の圧力分布を示している。およそ x=18mm の近傍において飛翔板と母材が衝突しており、その地点では約 3.8GPa まで圧力が上昇しており、衝突により母材に急激な圧力が生じることがわかる。

これらの状態が連続的に左方から右方へと移動しながら、二枚の接合が行われる。

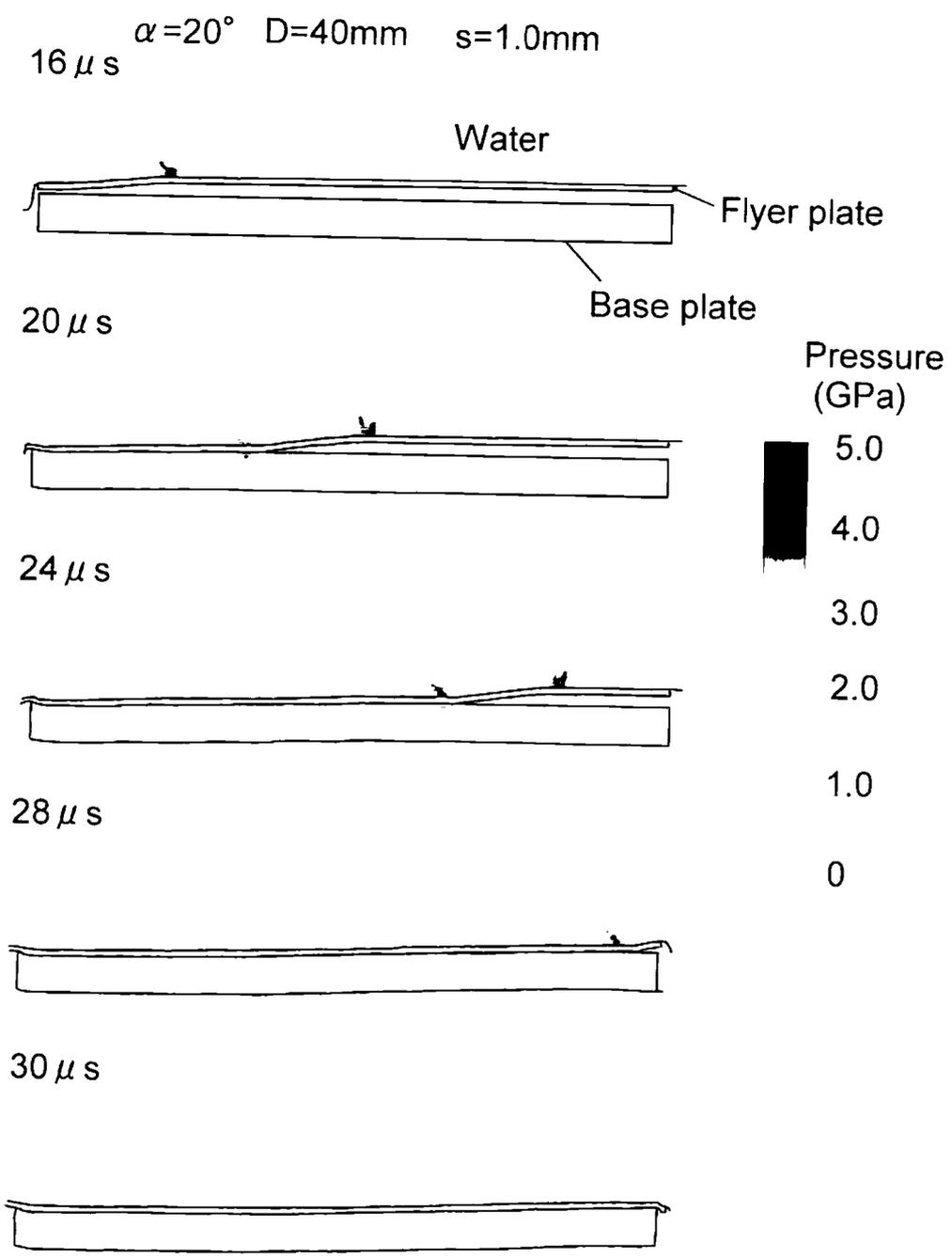


図 4.4 セットアップ条件 No.3 における飛翔板と母材の衝突過程および圧力等高地分布

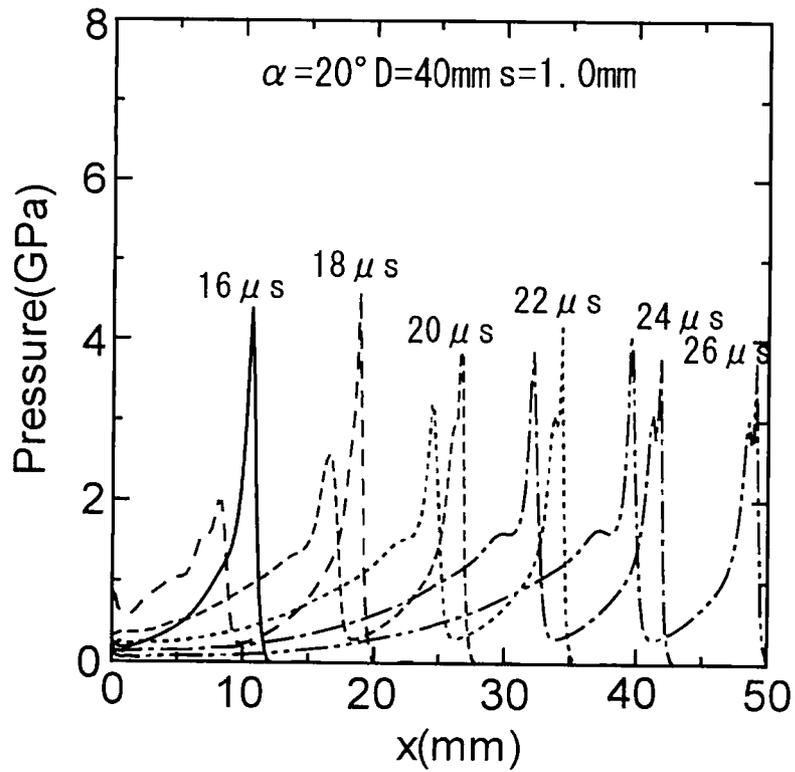


図 4.5 セットアップ条件 No.3 における飛翔板に作用する圧力分布

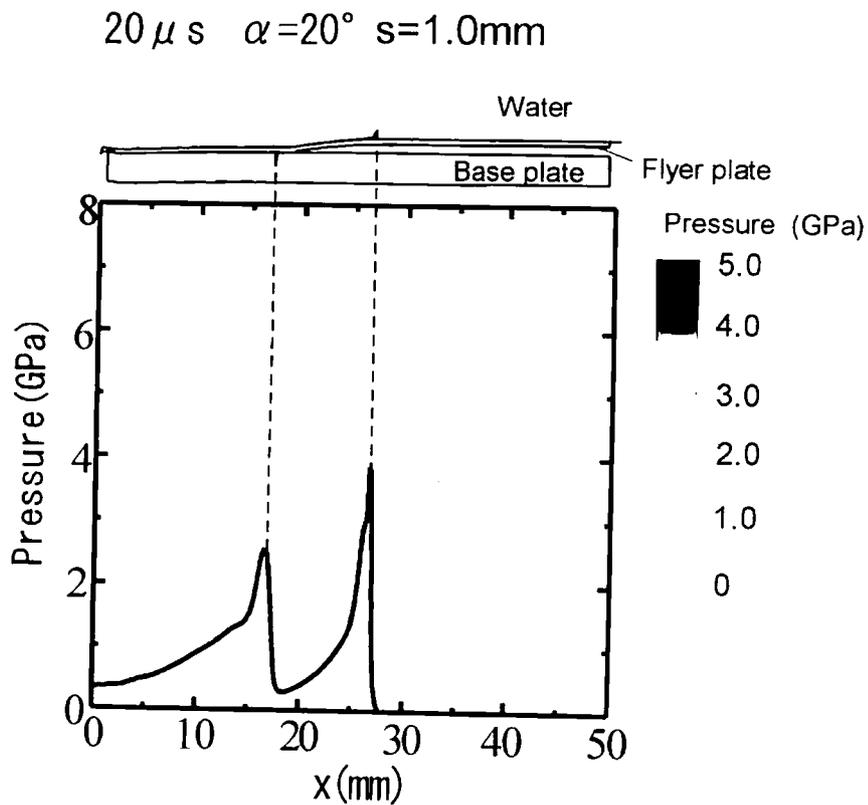


図 4.6 $20\mu s$ における飛翔板と母材の変形形状と飛翔板に作用する水中衝撃波の圧力分布

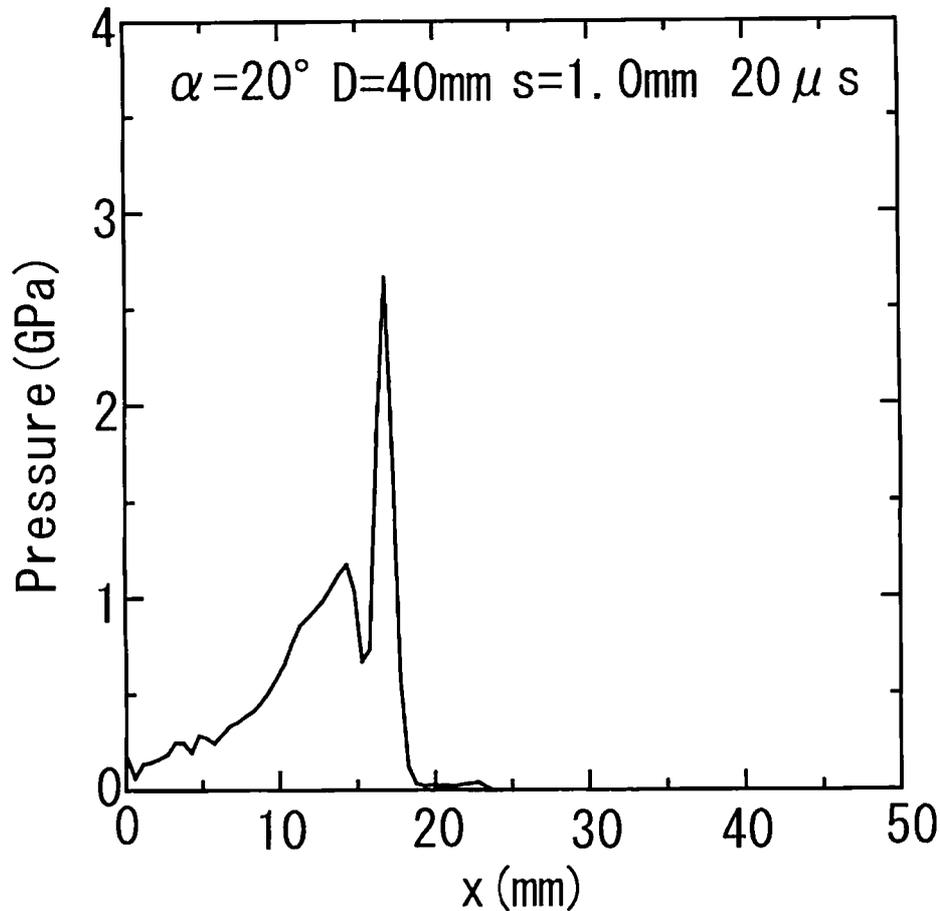


図 4.7 20 μ s 時における母材の上表面層の圧力分布

図 4.8 は、爆発圧着過程における接合条件を評価することについて重要なパラメータを説明したものである。ここで、 v_s は飛翔板上に作用する水中衝撃波の移動速度、 v_p は飛翔板に対して垂直方向の飛翔速度、 v_w は飛翔板と母材との衝突点移動速度であり、 β は衝突点における衝突角度を示す。これらの値を用いて以降の結果について説明する。

図 4.9 は全てのセットアップ条件における飛翔板の変形速度 v_p を横軸に鉛直方向変位 y をとって示したものである。同図(a)はセットアップ No.1~4 における飛翔速度の結果である。また同図(b)は No.3、5、6 および同図(c)は No.4、7、8 の場合の結果を示す。爆薬の傾斜角 α を変化させた場合、飛翔板が母材に衝突するまでは飛翔速度は加速状態にあり、傾斜角が浅いほど速度上昇は大きい。しかし、衝突直前に $\alpha=30^\circ$ においては急激な速度上昇が見られ、その値は 600m/s 以上になる。これは、後述の衝突角度において傾斜角 α が大きいほど、衝突角

度が大きく傾斜角度が浅い場合に比べて、衝突点近傍において飛翔板の面に対してより垂直な方向で水中衝撃波が作用すると考えられる。そのため、この速度上昇が生じる。同図(b)の爆薬と飛翔板との距離 D を変えた条件においては、距離が近いほど飛翔速度が大きく、また衝突直前における急激な速度上昇も大きくなっている。また、同図(c)においては飛翔板と母材の間隙 s が大きいほど飛翔板の変形速度は大きく、飛翔距離 y も大きくなるとそれだけ加速され、衝突点の速度上昇も大きい。そこで、図 4.9 の(a)、(b)、(c)図に対応させて衝突角度の分布を求めたものを図 4.10 の(a)、(b)、(c)に示す。すべての条件において、衝突角度は左端部では浅い角度となりそれが次第に一定角度で衝突していく。爆薬の傾斜角が大きいほど、あるいは爆薬と飛翔板の距離が小さいほど、衝突角度も大きく、更に飛翔板と母材の間隙についても同様のことが言える。これらの要因は飛翔板に作用する水中衝撃波の移動速度および飛翔板と母材の衝突点の移動速度に関係する。そこで、全ての条件における水中衝撃波移動速度と衝突点移動速度を爆薬の傾斜角に対してプロットしたものが図 4.11 である。下添字は表 4.1 のセットアップ No.を示している。ここでの速度は $x=10\sim 40\text{mm}$ の間の平均で表している。爆薬の傾斜角 α が小さいほど、衝撃波の移動速度および衝突点移動速度は大きい。また、 $\alpha=0^\circ$ のとき、両者の値は爆薬 SEP の爆ごう速度とほぼ等しくなっていることがわかる。ここで示してある実線と破線はそれぞれ傾斜角 α を変えた条件 No.1~4 のプロット点を結んだもので、実線が衝突点移動速度、破線が水中衝撃波の移動速度を示している。これより、両者の速度はほぼ同じ値であるといえる。また、傾斜角以外のパラメータを変えた場合においては、爆薬と飛翔板の距離が大きいほど両者の速度は速くなっている。飛翔板と母材の間隙においては、間隙が大きいほど両者の速度は遅くなる。

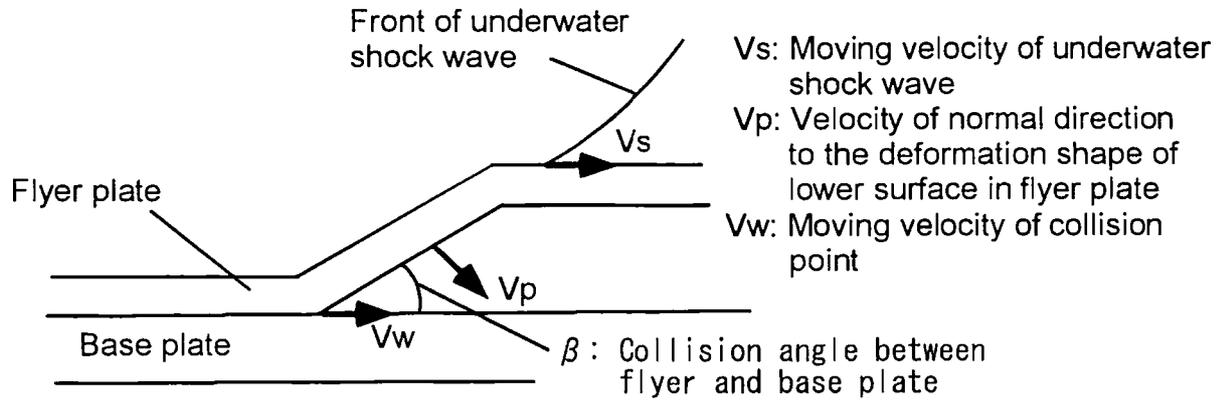


図 4.8 爆発圧着過程の模式図

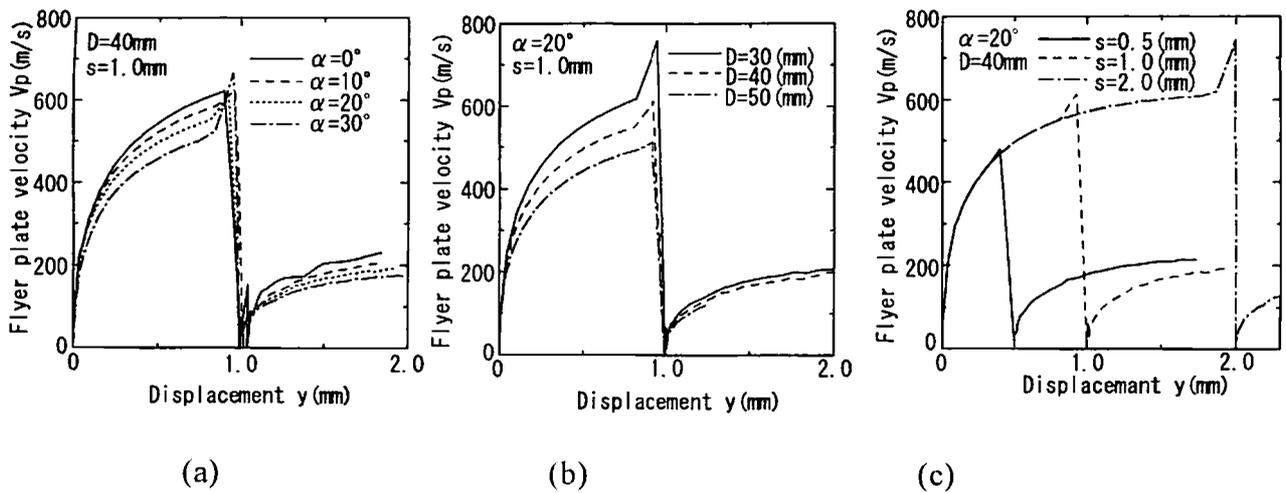


図 4.9 $x=30\text{mm}$ における飛翔板の飛翔速度変化

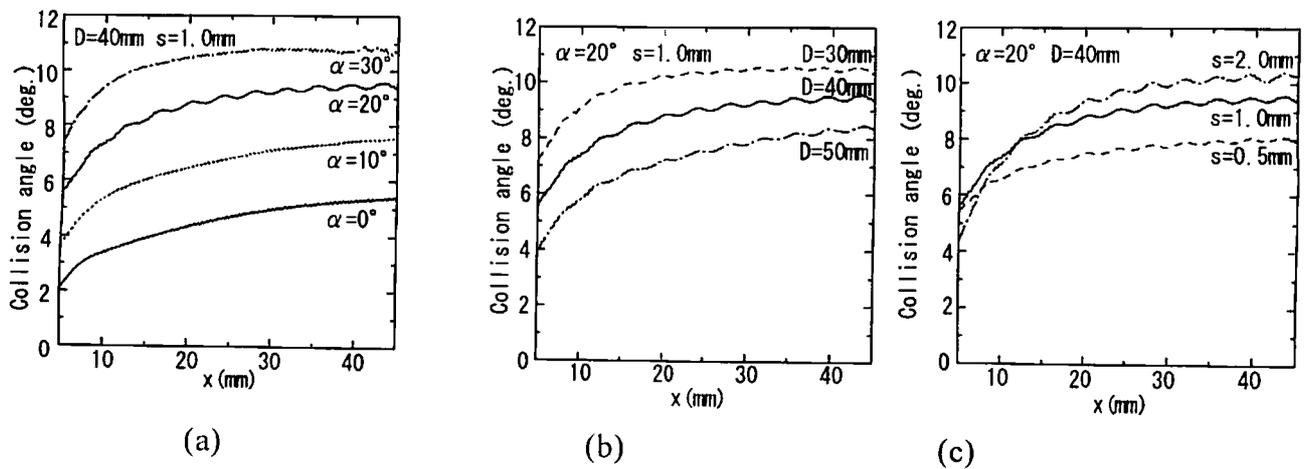


図 4.10 飛翔板と母材の衝突角度分布

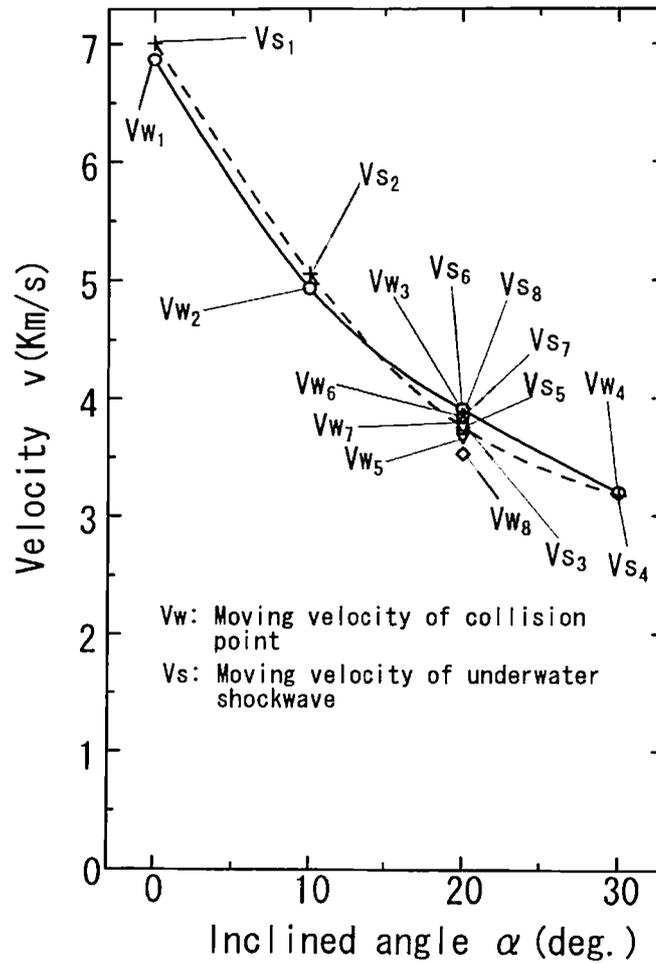


図 4.11 水中衝撃波の移動速度と衝突点移動速度の関係

次にこれらの条件において爆発圧着が可能かどうかについては、文献³⁾に記載されている Weldability window がある。これは、衝突点移動速度と衝突角度の関係で、接合可能な領域を実験的に求められたものである。これにそれぞれの解析結果についてプロットしたものが図 4.12 に示される。この Window は同板同士の爆発圧着について評価したものである。ここで、太線の領域が爆発圧着可能な領域であり、その中でも破線の領域を境として接合界面が波状であるかどうかの判断ができる。これより、今回行った条件では衝突点移動速度が速い領域にあり、且つ衝突点角度も低い。その中で Weldability window 内に 4 点がプロットされている。良好な接合を得るためには、今回取り上げたようなモデルにおいては衝突点移動速度を遅くし、衝突角度を大きくするようなセットアップ条件が必要である。つまり、爆薬と飛翔板の距離に関しては適度なもので離れすぎると良くない。爆薬の傾斜角においては大きくした方がよい。また、飛翔板と母材との間隙は大きくした方が良好な接合が得られるといえる。

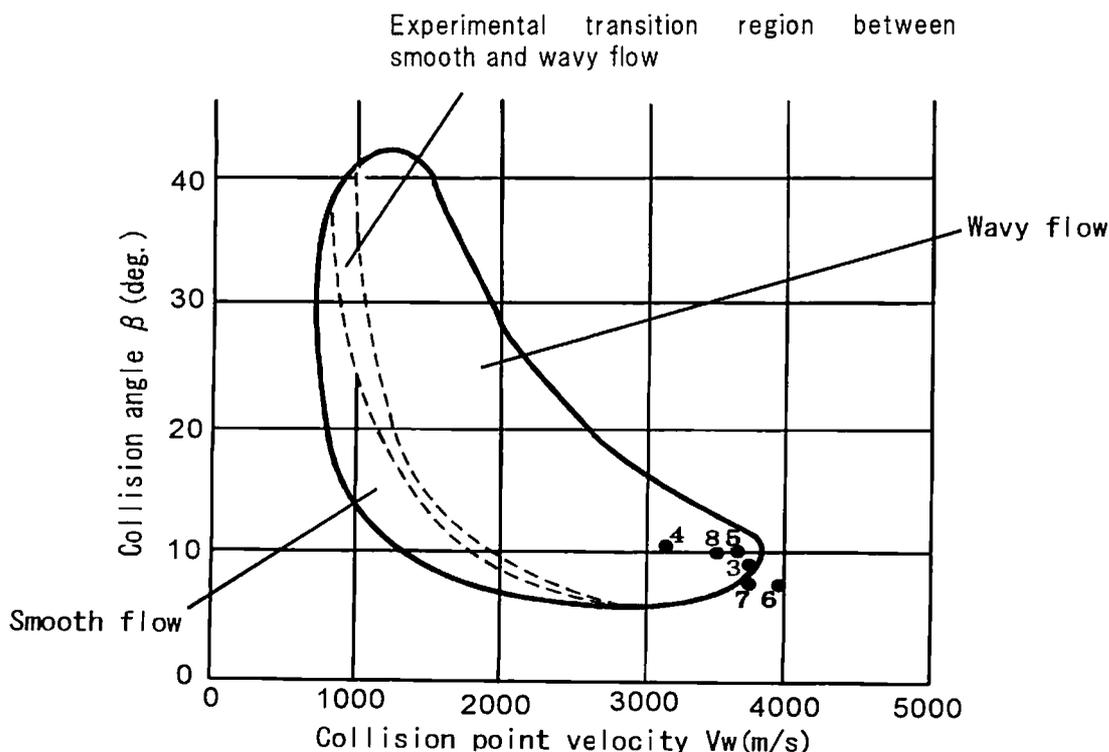


図 4.12 良好な爆発圧着条件

4.5 結言

本章では、水中衝撃波を利用した爆発圧着法についてその応用例の紹介及びこの方法を数値解析によって評価することを試みた。ここでは、爆薬の水中爆ごうから飛翔板の変形および母材との衝突過程まで表現できる解析方法を用いた。これらの結果を以下に示す。

1. 水中衝撃波を利用した爆発圧着法によるアモルファス金属板と鋼板の接合実験例を紹介した。ここでは、爆薬と試料の間の傾斜角を変化させることで接合部の波状界面の振幅が変化することが紹介され、この方法ではセットアップ条件により、接合状態が変化することが示された。
2. 飛翔板と母材を銅板とした場合の爆発圧着について数値解析を行った。ここでは、爆薬と飛翔板の間の距離、傾斜角および飛翔板と母材との間隙を変化させた計算条件において、水中衝撃波の圧力作用の状態、飛翔板と母材の衝突過程について述べた。
3. 上記2.の結果において、爆薬の傾斜角を変化させた場合、傾斜角が浅いほど速度上昇は大きく、 $\alpha=30^\circ$ においては衝突直前に急激な速度上昇が見られ、その値は600m/s 以上になった。爆薬と飛翔板との距離を変えた場合、その距離が近いほど飛翔速度が大きく、また衝突直前における急激な速度上昇も大きくなる。飛翔板と母材の間隙が大きくなるほど飛翔板の変形速度は大きく、飛翔距離も大きくなるとそれだけ加速される。
4. 飛翔板と母材の衝突角度においては、すべての条件において、衝突角度は飛翔板の左方では浅い角度となりそれが次第に一定角度になっていく。爆薬の傾斜角が大きいほど、あるいは爆薬と飛翔板の距離が小さいほど衝突角度は大きくなり、飛翔板と母材の間隙においてもその値が大きいほど衝突角度は大きくなっている。
5. 水中衝撃波移動速度と衝突点移動速度を爆薬の傾斜角に対してプロットした結果、爆薬の傾斜角 α が小さいほど、衝撃波の移動速度および衝突点移動速度は大きく、両者の速度はほぼ同じ値になる。また、傾斜角以外のパラメータを変えた場合においては、爆薬と飛翔板の距離が大きいほど両者の速度は速く、また飛翔板と母材の間隙においては間隙が大きいほど両者の速度は遅くなる。

6. これらの条件において爆発圧着が可能であるかどうかについて実験的に求められた Weldability window 上に各解析条件における結果をプロットした。その結果、4 つの解析条件において波状の界面が得られる領域におさまり、適当なセットアップ条件を設定することで、良好な接合界面が得られることが示された。

参考文献

- 1)K. Hokamoto, M. Fujita, T. Ono, B. Shao and Z. Liu, The Explosive Welding of an Amorphous Film to a Steel Plate Using a Regulated Underwater Shock Wave, Metallurgical Applications of Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenomena, pp. 831-837(1995).
- 2)G. R. Cowan and A. H. Holtzman, Flow Configuration in Colliding Plates, Explosive Bonding, J. Appl. Phys. 34, P.928(1963).
- 3)B. Crossland, Explosive Welding of Metals and its Application, Oxford University Press(1982).

第5章 水中衝撃波を利用した金属円板の自由張出し成形について

5.1 緒言

本章では、爆薬の水中爆ごうにより発生した水中衝撃波を利用した金属板の自由張出し成形法の数値解析について述べる。一般に爆発成形法では型を用いる。水中衝撃圧が金属板に作用すると高速変形する。やがて型に衝突した金属板は十分な塑性変形を伴い、次第に型になじみながら変形が終了する。このように金型を用いることにより、金属板は所定の形状に成形されるが、ここで、取り上げる方法は自由張出し成形である。これは、複雑な形状を有する金型ではなく、金属板を支持するだけの型を用いる。その場合、周辺部に丸みを有し、その内側中央部では自由に金属板が張出すことができるようになっている。ここでは、本研究で用いる数値解析をこの自由張出し成形法にも適用できるかその妥当性を実験結果との比較検討を行う。また、このような金属板の高速変形において、金属板の変形メカニズムを知っておくことが重要であり、数値解析から得られた結果により、その変形メカニズムについても議論する。

5.2 実験方法

本実験で行った内容は、金属円板の自由張出し成形においてピンコンタクト法¹⁾による金属板の変形速度計測実験である。これにより金属板のある位置での変形速度を求め、解析結果との照合を行う。図 5.1 に自由張出し成形の実験装置概略図を示す。また、図 5.2 に測定用のピンを示す。実験装置は上部の圧力容器部と下の型部で構成される。上部圧力容器の内面形状は円錐状である。頂上開口部は直径 20mm であり、それより下に 150mm の位置にある下部の開口部径は 120mm となっている。爆薬は SEP であり、樹脂でできた爆薬ホルダ一内に電気雷管と共に保持されている。爆薬の寸法は直径 14mm、厚さ 5mm とした。金属板は厚さ 2mm、直径 150mm の銅円板であり、圧力容器と型を 8 本の締め付けボルトで締結してある。銅板がセットされる圧力容器底辺部と型部の金属板保持部には、直径 140mm の位置にビート加工が施されており、締め付けボルトを締めることにより、金属板はビート溝に食込み、中央部の張出し

と共に金属円板周辺部が中央へ絞り込まれるのを防ぐようになっている。型部の角には半径 5mm の丸みが付けられている。また、図 5.2 の計測ピンは PMMA 板に固定され、さらに二つの PMMA 板で銅板に接着されている。この計測部が図 5.1 の実験装置内部にちょうど収まるような寸法で製作されている。

ここで、ピンコンタクト法について述べる。金属板が変形すると、所定の位置にセットしてあった銅製のピンに接触する。このとき、ピンは電圧パルス発生器に接続され、さらにデジタルオシロスコープ (Lecroy 社製 Model 9314) に接続されている。また、グランド線として実験装置の型部より計測用回路のグランド側に接続してあるため、金属板が変形してピンに接触すると、ひとつの閉回路ができることによって、オシロスコープに電圧パルスとして表示される。本実験においてピンの配置は同心円状に半径方向に $x = 10, 20, 30\text{mm}$ の位置に設置してある。ここで、計測ピンの先端部の位置は銅板の下表面から 5mm と 6mm の位置にある。合計 6 本のピンによる計測結果より、中心軸方向に銅板が 1mm 変形するまでかかった時間により速度が求まる。また、事前に銅板上に置いておいたケガキ線上を実験後、三次元形状測定機 (ミットヨ製 LEGEX910) で計測した。

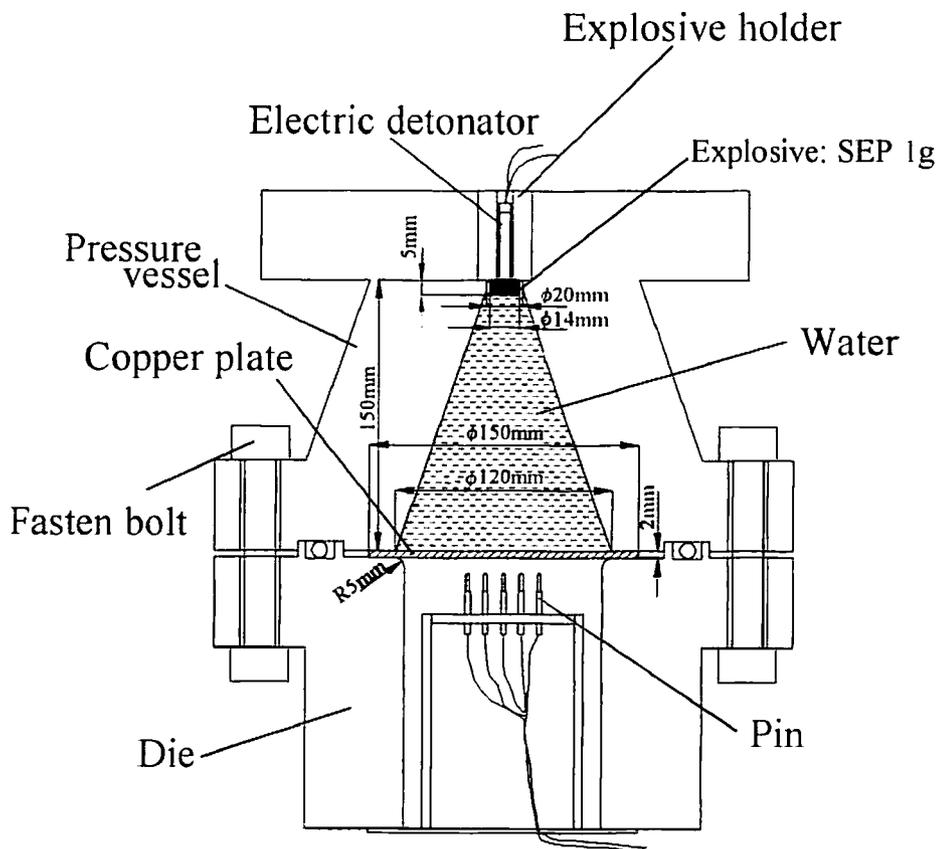


図 5.1 実験装置

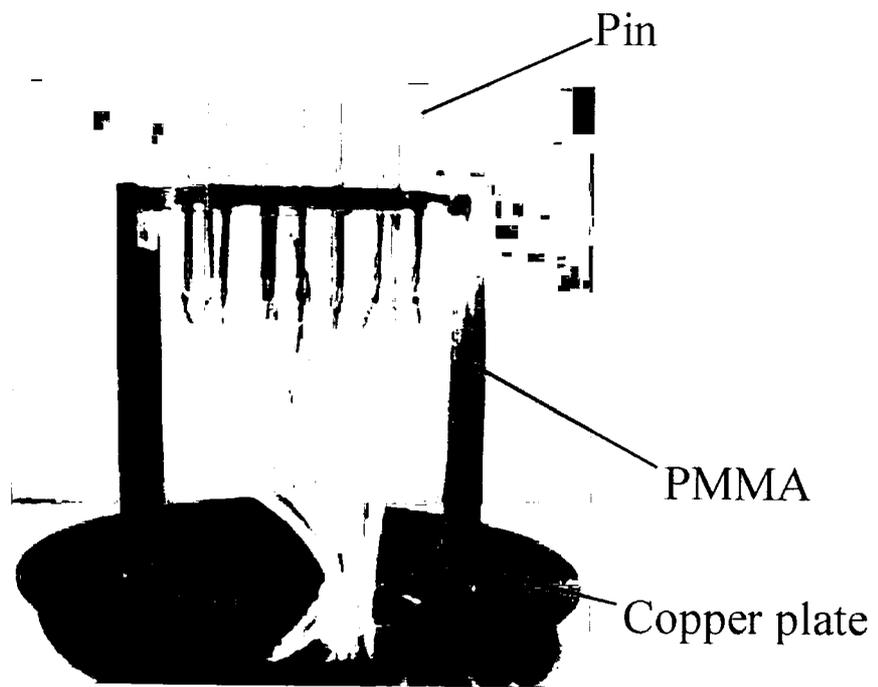


図 5.2 計測ピン

5.3 解析モデル

図 5.3 に解析モデルを示す。同モデルにおける寸法については、図 5.1 の実験装置と同様に圧力容器の内部形状および銅円板および型の寸法を決定した。ここで、圧力容器と型は剛体と仮定した。剛体との境界条件は簡単であり、SALE 法²⁾に基づく手法で剛体壁面の方向に格子点が移動するようにした。円筒座標 x - y を図のようにおき、軸対称であるので計算は y 軸から半分を行った。計算の初期に爆薬部頂上から下に二格子分に CJ 圧を与えて、C-J Volume Burn 法と JWL 状態方程式を用いて繰り返し計算によって爆ごう過程を解いた。また、水と銅板の境界面はすべり境界として解析した。

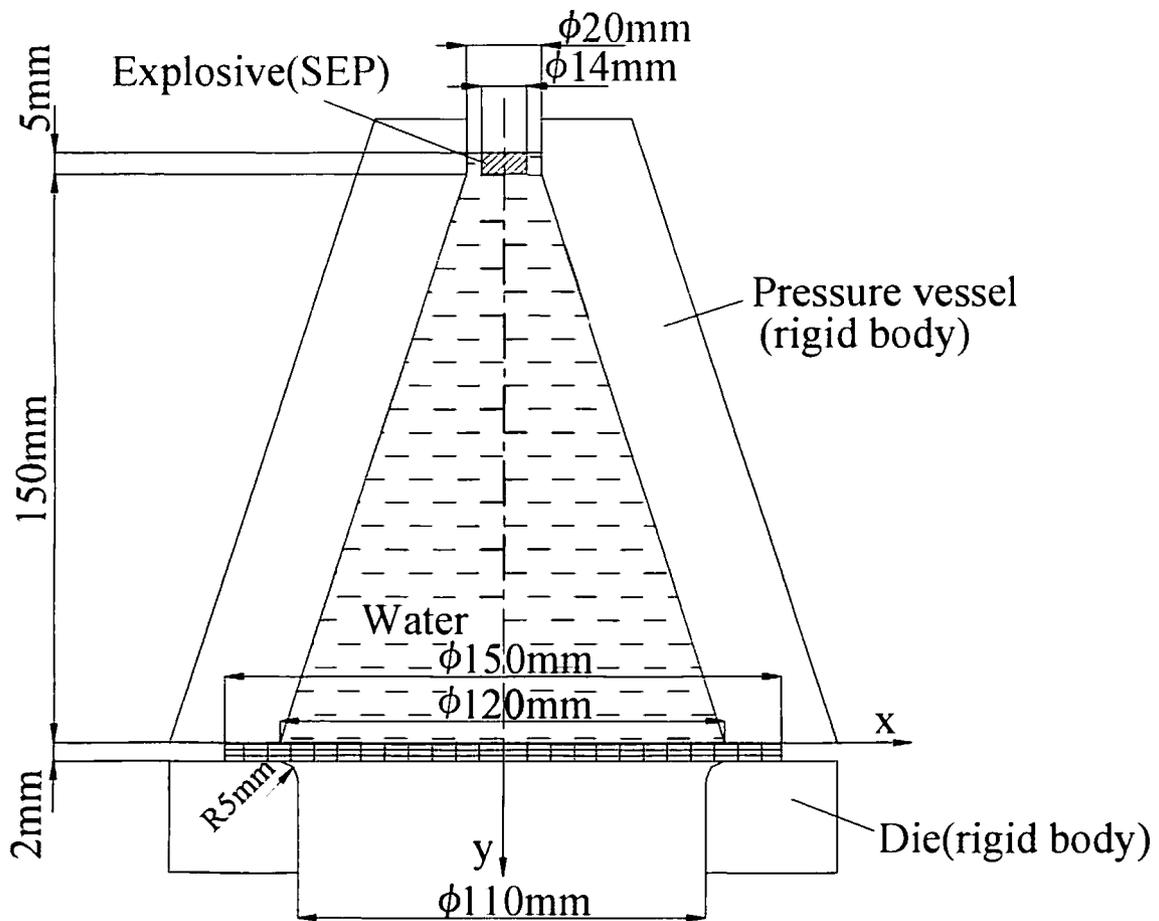


図 5.3 解析モデル

5.4 結果および考察

図 5.4 に解析結果による圧力容器内部の圧力分布を示す。爆薬の爆ごうにより生じた水中衝撃波が発生し、 $20\mu\text{s}$ から $80\mu\text{s}$ にかけてその先頭面が球状となって圧力容器の下方へ伝播していく。それが、およそ $80\mu\text{s}$ 時において銅板に到達する。そのとき、衝撃波の一部は銅板を通過するが、衝撃波による水の格子点の移動速度が銅板との衝突により急激に抑制させられるために、 $100\mu\text{s}$ では銅板に接する界面付近の水の要素において急激な圧力上昇が伴い反射衝撃波が生じていることがわかる。その後、その反射波が次第に圧力容器の上方へと伝播する。この水中衝撃波の作用により銅板が加速され、変形が生じる。

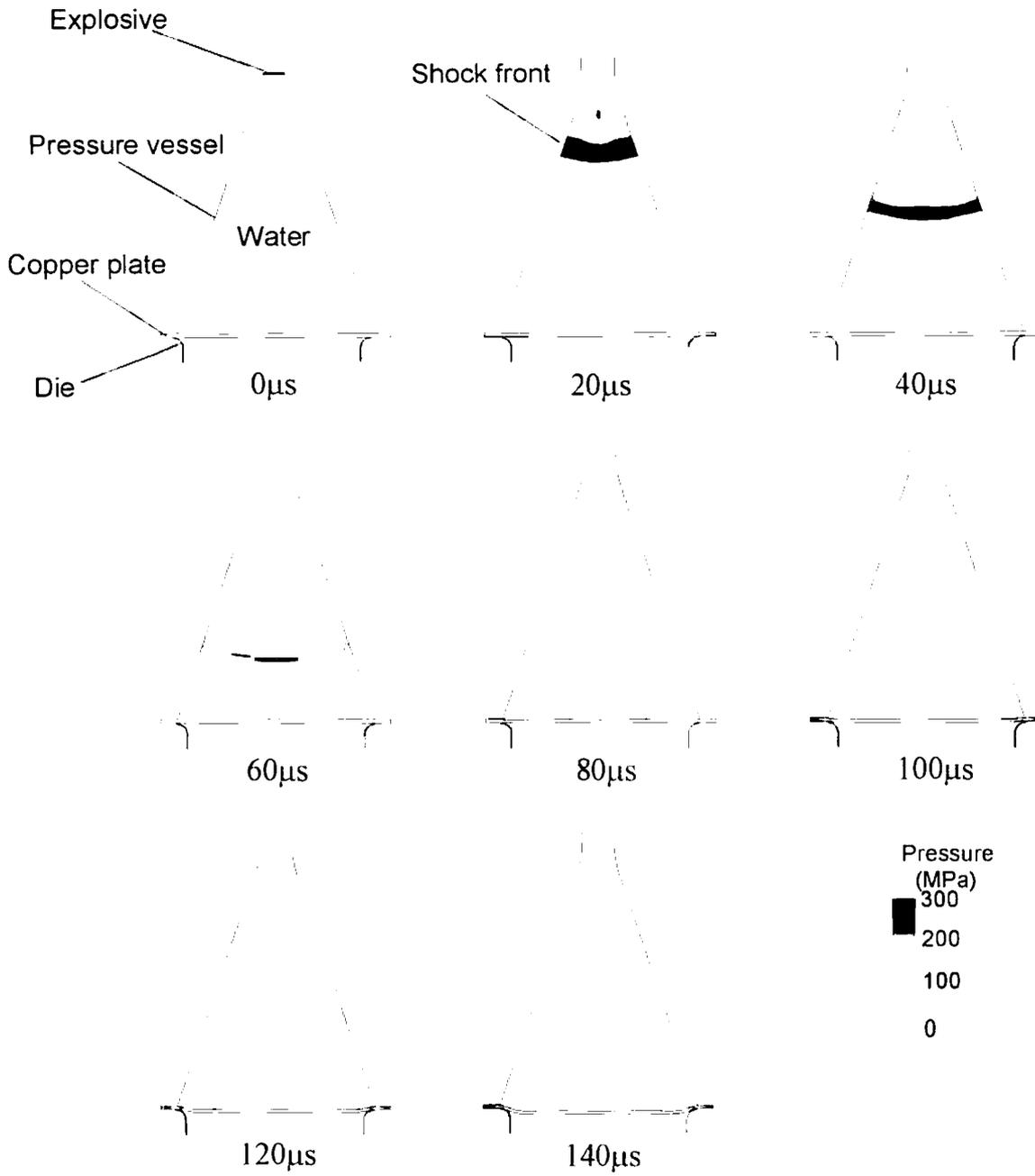


図 5.3 圧力容器内部の圧力分布

図 5.4 は銅板と水の境界面における、 $x=0$ から 60mm の位置の水要素の圧力履歴を示す。これより、銅板の中央部近傍においておよそ $80.1 \mu\text{s}$ で急激な圧力上昇が生じる。銅地点における最大圧力はおよそ 275MPa である。それから次第に圧力が減衰すし、銅板中央部から次第に外周部方向へ衝撃波が到達する。およそ $85 \mu\text{s}$ までの間に外周部まで圧力上昇が生じる。また、それぞれのピーク圧を比較すると、中央部から外周方向にかけてその値は減少している。

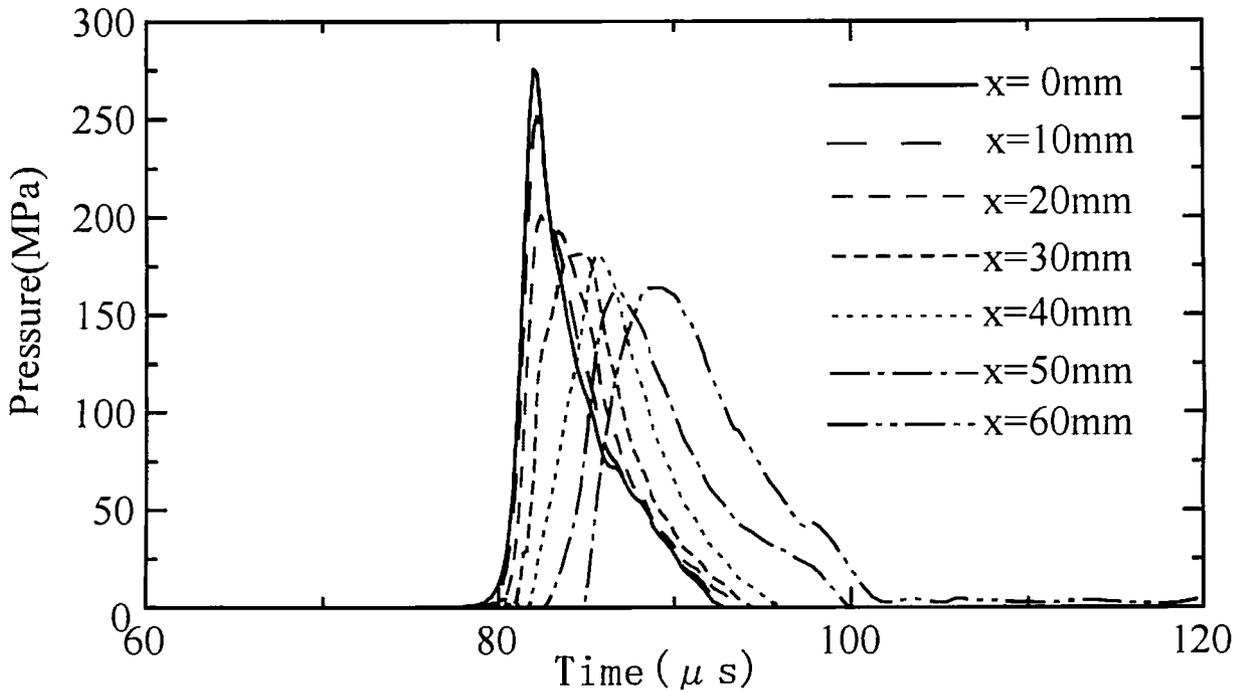


図 5.4 $x=0,10,20,30,40,50,60\text{mm}$ の位置における銅板面上の水要素の圧力履歴

銅板の変形過程を図 5.5 に示す。また、図 5.6 にそれぞれ $x=0$ から 50mm までの銅板下面の y 方向速度を示す。まず、 $100 \mu\text{s}$ において衝撃圧が作用した銅板は、型の角部の近傍で A 点の上に凸の曲げ変形が生じている。このとき図 5.6 の速度履歴も見てわかるように、銅板全体が同時に変形が生じていることがわかる。 $150 \mu\text{s}$ では、その内側 B 点において下に凸の曲げ変形が生じており、板の中央部ではほぼ平坦となっている。この下に凸の曲げ変形が次第に中央へと移動しながら変形が進行し、 $250 \mu\text{s}$ での銅板中央部 C 点ではやや上方へ沿った形状となっている。この上に沿った銅板中央部が今度は下方へと突き出る変形に変わる。速度履歴よりそれは $200 \mu\text{s}$ 付近から生じることがわかる。この突出する最大速度はおよそ $350 \mu\text{s}$ で 85m/s に達する。その後、急激に減速され、最終的には全体が丸みを帯びた形状となって変形が終了する。

Time (μs)

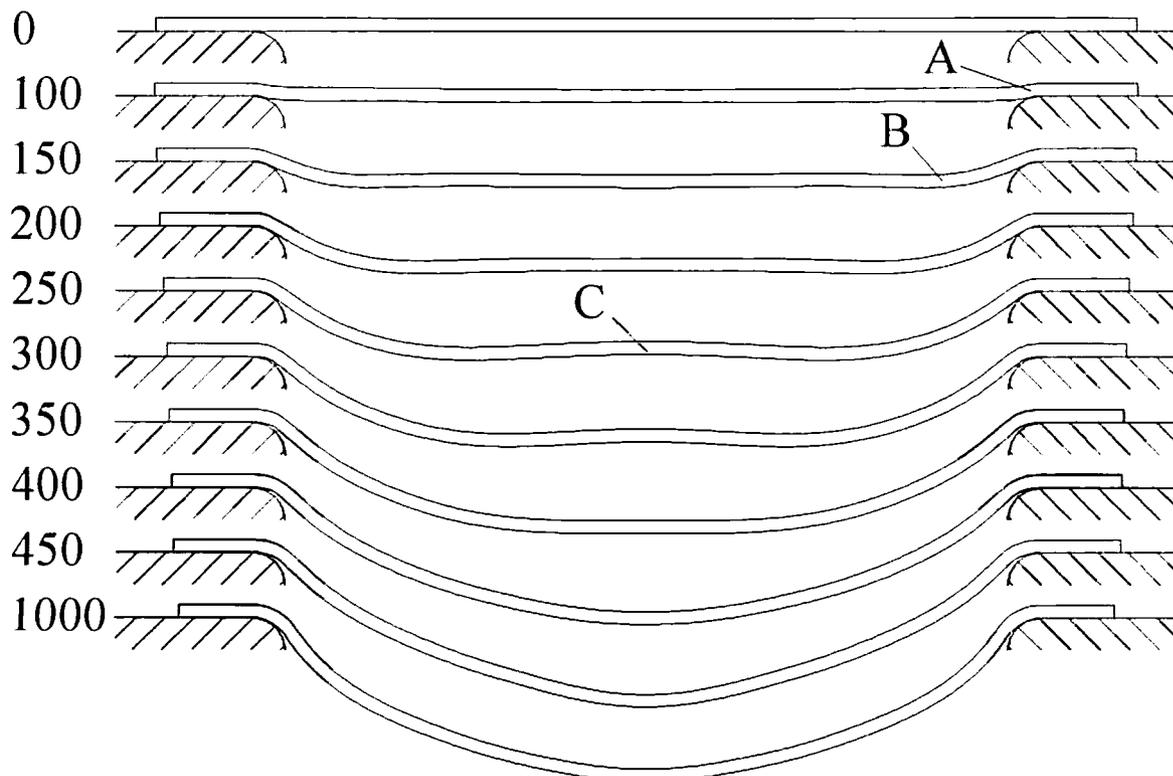


図 5.5 軸対称自由張り出し成形における変形過程

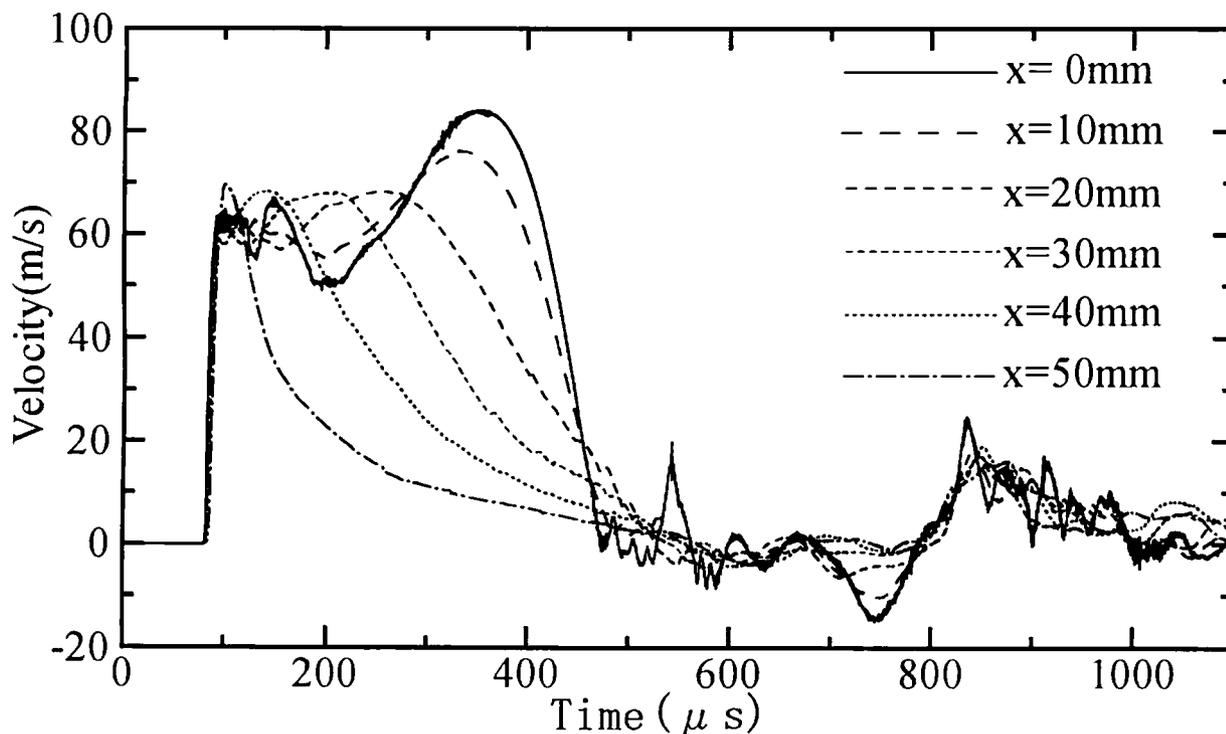


図 5.6 $x=0,10,20,30,40,50\text{mm}$ の位置における銅板の y 方向変形速度

ここで、この変形メカニズムを詳細に述べるため、銅板内部の応力状態を観察してみる。図 5.7 から 5.10 まではそれぞれ 150,200,250,300 μs における銅板の変形形状および上表面層と下表面層の変形形状に沿った方向の応力分布を示している。ここで、上表面層の応力が下表面層の応力を上回るときは上に凸の曲げ、その逆の場合は下に凸の曲げ変形を表している。図中 a 点は型の角における上に凸の曲げ変形であり、b 点は下に凸の移動曲げ変形、c 点は中央部における上に凸の曲げ変形を示している。150 μs においておよそ 45mm 付近に b 点の下に凸の曲げ変形の中心がある。これが、時間の経過と共に、200 μs ではおよそ 37mm 付近になり、250 μs では次第にこの曲げ変形の曲率が大きくなり、中央へさらに移動している。また 300 μs ではほとんど銅板の面内に一様の引張り応力となり、上下表面での応力差が小さくなってきている。このように下に凸の曲げ変形の移動が応力分布において示される。

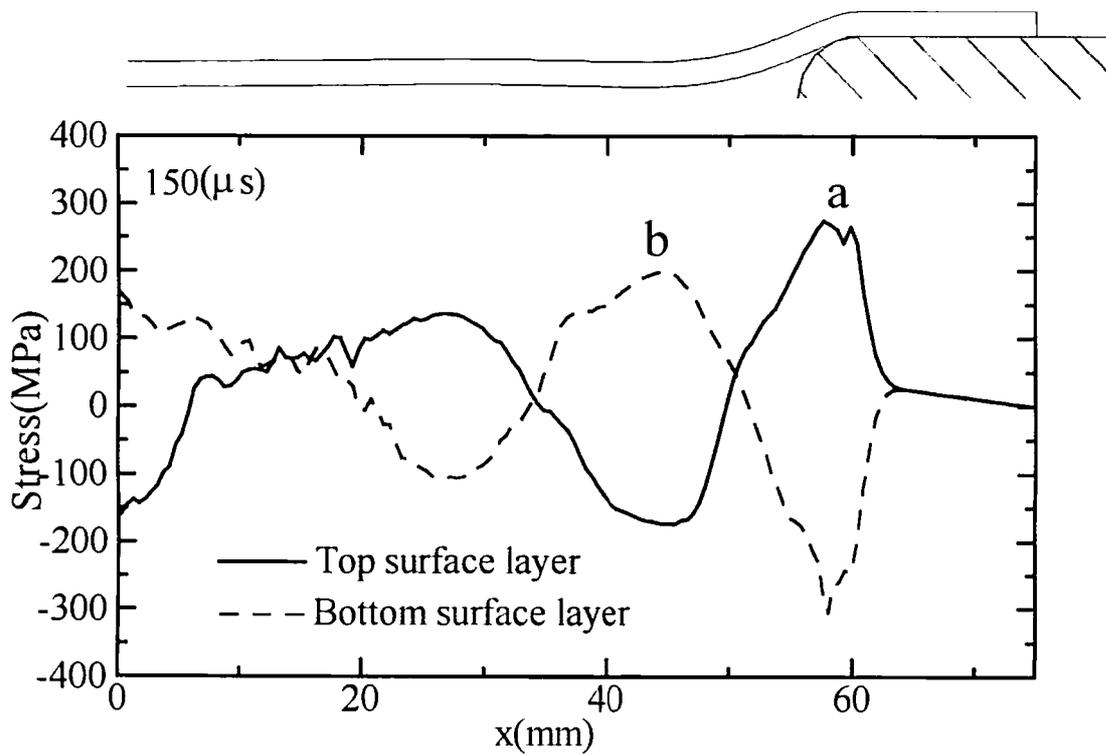


図 5.7 150 μ s における銅板の変形形状および上下表面層の応力分布

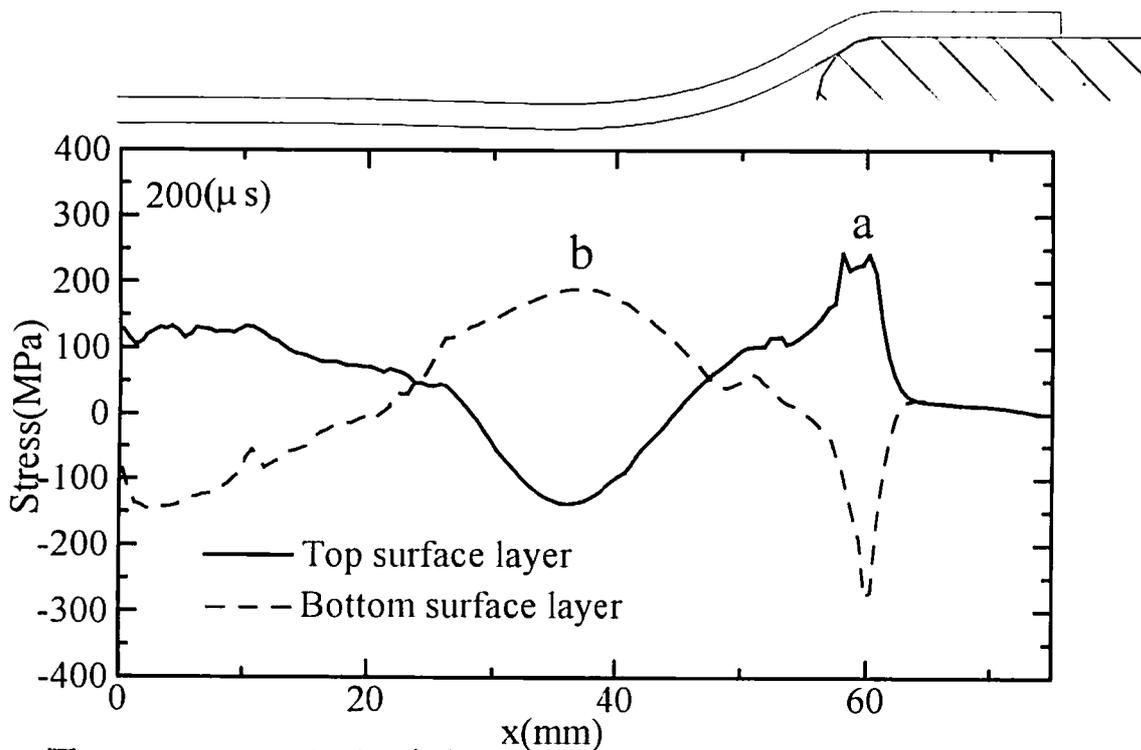


図 5.8 200 μ s における銅板の変形形状および上下表面層の応力分布

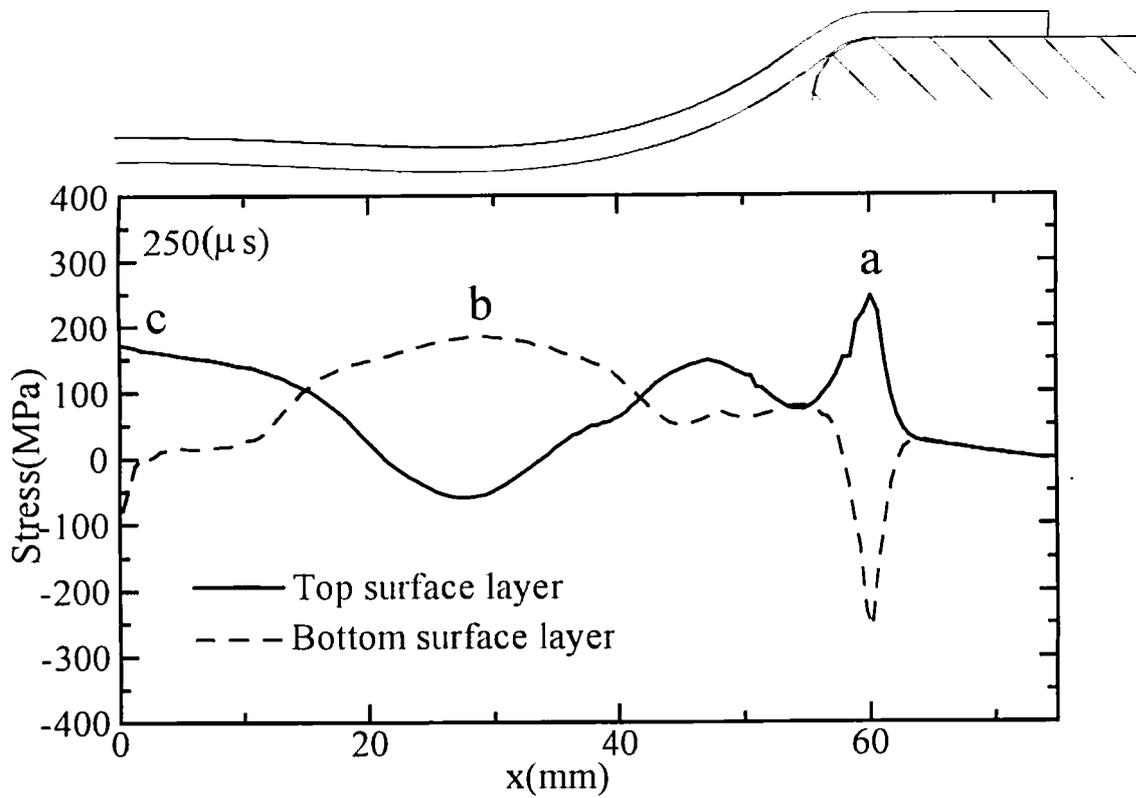


図 5.9 250 μs における銅板の変形形状および上下表面層の応力分布

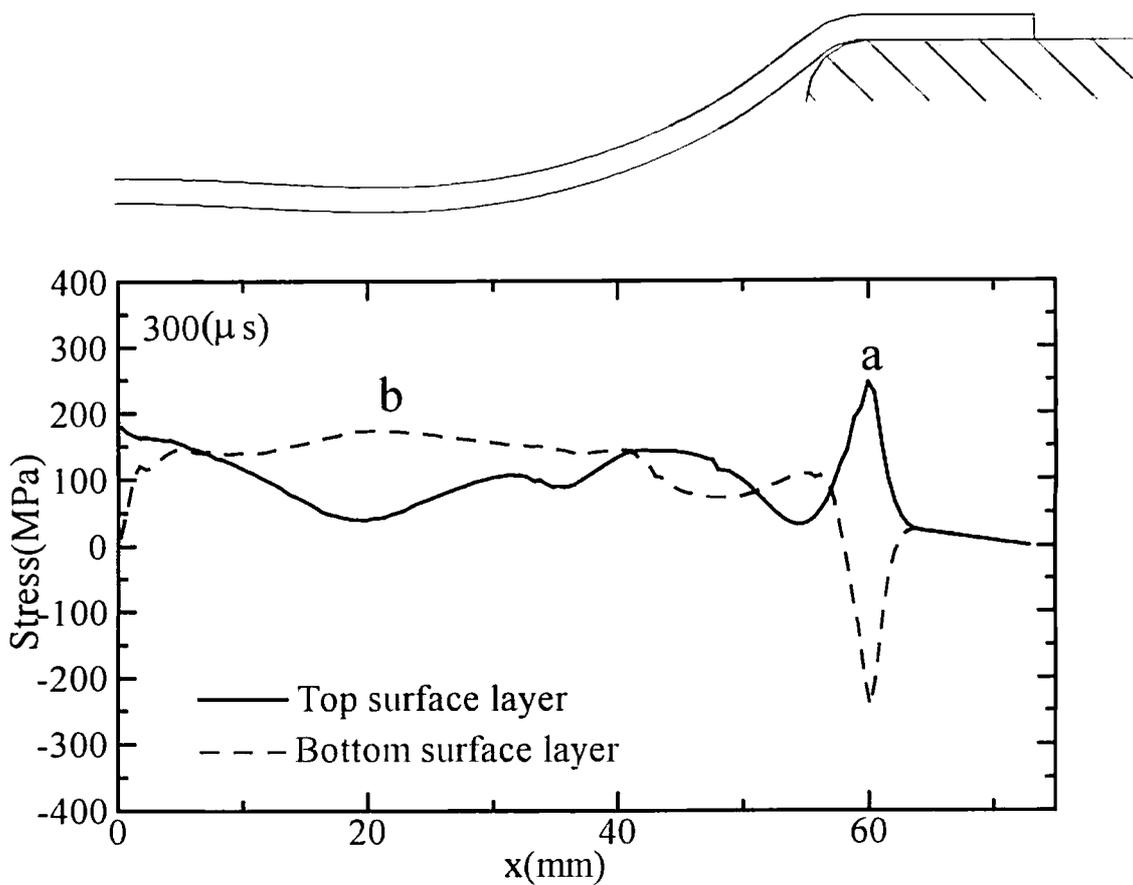


図 5.10 300 μs における銅板の変形形状および上下表面層の応力分布

以上、解析結果について述べた。このような銅板の変形メカニズムにおいては、藤田ら³⁾と同様に曲げ変形波の移動とともに変形過程が進行することが説明され、爆薬の爆ごうから水中衝撃波の伝播および金属板の変形過程まで数値解析により説明された。そこで、ここで行った数値解析が実際の現象と照合して妥当なものであるかを検討するために実験結果との比較を行う。

図 5.11 はピンコンタクト法による実験結果による $x=10,20,30\text{mm}$ の位置での銅板の y 方向平均速度を実験および数値解析による結果を比較したものである。図より $x=10$ および 30mm の位置においてはおよそ一致しているが、 $x=20\text{mm}$ においては約 10m/s くらいの誤差が生じている。また、両者の最終変形形状の比較を図 5.12 に示す。図中、実線は解析結果における最終形状であり、破線で示されるのは実験結果による銅板の下面の変形形状を示している。ここで、解析結果は十分時間が経過した $1000\ \mu\text{s}$ の変形形状であり、これ以降は殆ど形状に変化が見られなかった。この図より、全体の形状はほぼ同様な変形形状となっているが、中心点における深さがおよそ 0.8mm 程度実験の方が大きい。この差の原因は解析モデルにおいて、爆薬上端部は開放されている。この為ここからの膨張圧が銅板に作用する圧力へ影響したことが考えられる。しかし、その影響に比べて速度の比較と最終変形形状の比較からその差は小さいものである。これらの結果よりこのような爆発成形法においても本解析方法の妥当性であると考えられる。

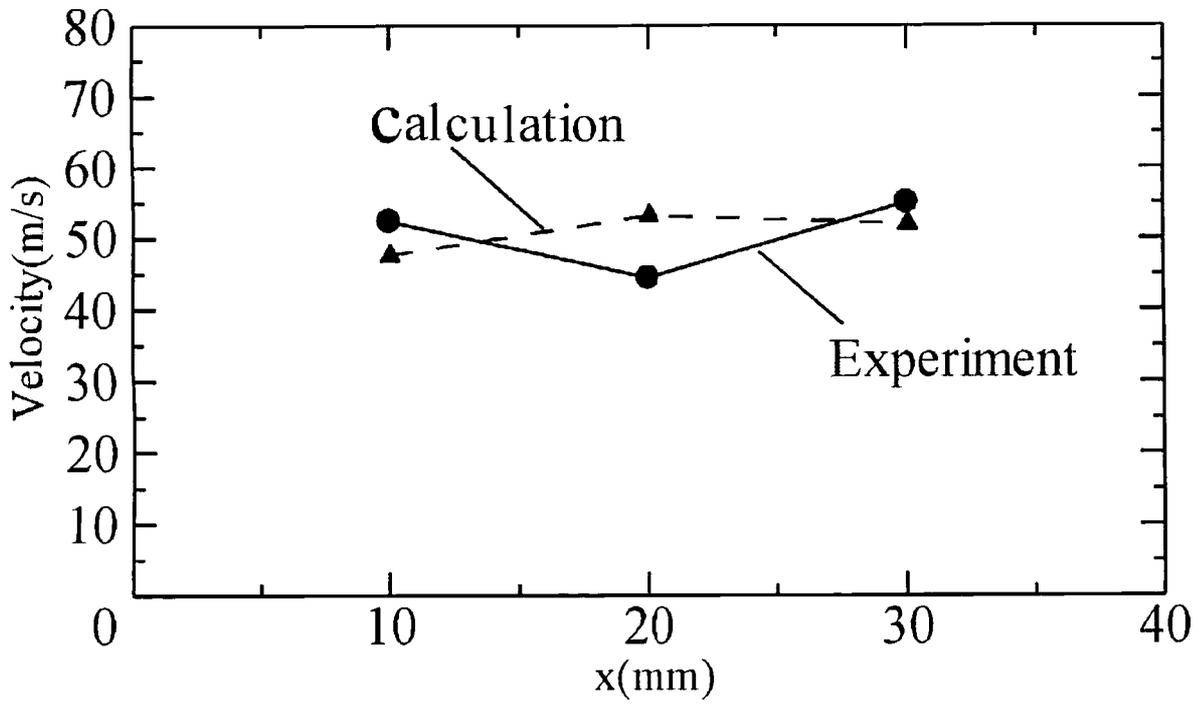


図 5.11 実験結果および解析結果による y 方向平均速度の比較

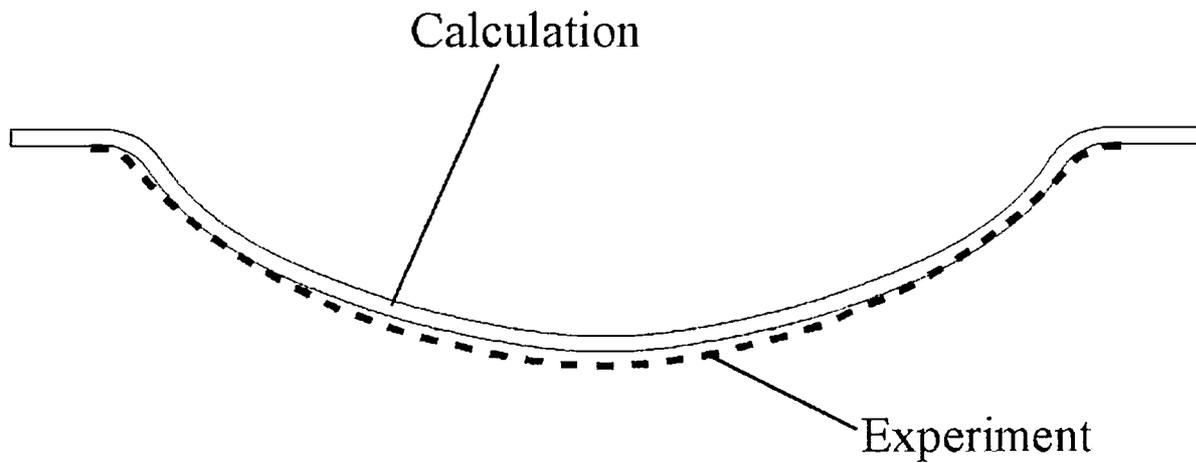


図 5.12 最終変形状の比較

5.5 結言

本章では、銅円板の爆発成形法において、自由張出し成形における数値解析を行った。ここでは爆薬の爆ごう過程から圧力容器内部での水中衝撃波の伝播およびそれによる金属板（銅板）の変形解析まで行った。また、その妥当性を検討するためにピンコンタクト法による実験から得られた銅板の変形速度および最終形状の比較を行った。これらの結果について以下にまとめる。

1. 初期の銅板の変形は型の角部に上の凸の曲げ変形が生じており、そのすぐ内側に下に凸の曲げ波が発生する。その中央部は平坦部を形成している。
2. この下に凸の曲げ変形が次第に銅板中央部へと移動しながら、変形は進行し、やがてそれが中央部に到達する直前に一旦上方へ沿った形状となるが、そこから急激に加速され、下方へ突出する変形となる。
3. これらの解析結果の妥当性を検討するための実験を行った。ここではピンコンタクト法を用いた速度計測実験を行い、同条件での解析結果より求められた速度との比較を行った。また、同実験および数値解析における最終形状の比較を行った結果、両者においてほぼ一致した結果が得られた。この結果より本数値解析法の妥当性が示された。

参考文献

- 1) J. S. Rinehart and J. Person, Explosive Working of Metals, Pergamon Press, pp.269-270(1963).
- 2) A. A. Amsden, H. M. Ruppel and C. W. Hirt, SALE: A Simplified ALE Computer Program for Fluid Flow at All Speeds, LA-8095, UC-32(1980).
- 3) 藤田昌大, 石氷泰夫, 持原稔, 苧阪浩男, 伊東繁, 周辺固定円板の横衝撃変形のひずみ硬化, ひずみ速度効果試料の板厚効果を考慮した数値解析, 塑性と加工, 36-412, pp. 541-546 (1995).

第6章 金属平板の自由張出し成形における爆薬配置の変形過程におよぼす影響について

6.1 緒言

爆発成形法は一般の静的な加工法に比べ、金属板が高速変形を伴い、型と衝突して十分な塑性変形を得ることで型形状の転写性に優れていることは第2章で既に述べた。このように型を用いた場合では、十分に加工できることは容易に理解できる。しかし、金型を用いる場合、その製造コストが高くなる。これは、一般の静的な加工法においても同様である。

近年、消費者ユーザーの個性にあわせて多品種少量生産の製品が多くなってきている。例えば、年間数百台から千台しか製造しない自動車や五百個しかしない洗面台などその他多くの製品がこのように少量の製造が行われている。現在これらの製品は静的な液圧バルジ成形やその他プレス機で製造されているが、これらの初期投資および維持管理や金型製作にかかる費用は無視できない。そこで、本研究ではこれらの製品を製造するために、爆発成形による自由張出し成形により金属板を所定の形状に成形できる方法を提案する。近年、爆発成形法の新しい試みとして様々な加工が行われている。例えば、樹脂や紙、石膏などの金属以外の材料で作られた型を用いた美術品製作¹⁾や型なしで金属の多角錐を球状に成形する方法の確立²⁾が行われている。ここでは、爆発成形法の利点を有効に取り入れ、多品種少量生産に向けた画期的アイデアによりその実用化にまで至っている。最初の例は金属ではなく、安価な材料で型を製作して行う方法であるが、使用する型は何度も繰り返し利用できない。後者の例は、予め金属片を溶接により多角錐に組立てる前処理が必要である。ここで提案する方法はもっと単純であり、安価に成形できる方法である。それは、爆薬の位置を変えるだけで金属板に作用する圧力状態を変化させ、それによって金属板を所定の形状に成形する方法である。しかしこの方法で実際に成形を行う前に、その方法で可能であるか評価することが必要である。そこで、本章では数値解析により、爆薬の位置を変化させるだけで金属板の変形を変えることができるか数値シミュレーションを行い、その評価を行う。

6.2 解析モデル

密閉容器を用いた爆発成形法では、その内部形状により金属板に作用する圧力分布が違ってくる。しかし、このような密閉容器を用いる場合、容器内部で複雑に衝撃圧が反射し、更に衝撃圧の後のガス圧が金属板に一様に作用するために、爆薬の配置による変形形状の相違が生じない可能性がある。そこで、図 6.1 に示すような解析対象を取り上げる。このモデルでは、上部の容器は両側に垂直な壁を有するだけであり、密閉した容器になっていない。そこに水を充満させておいて、この中で爆薬の配置を変える。

このモデルは二次元の平面問題として、奥行き方向は無限に長いものと仮定している。爆薬は SEP とし、初期に爆薬全体に SEP の爆ごう圧を与えた。爆薬の寸法は図中に示すとおりである。x-y 座標を図のように配置する。ここで、両側の壁間の距離を 200mm とした。また、金属板は厚さ 2mm、幅 260mm の銅板とし、その両端は固定され、型の内方には移動しないと仮定した。型の角の曲率半径は 10mm である。主な境界条件として、両側の壁と型は剛体であり、壁は上方へ無限に高いものとして、壁に接する水は上下方向にしか移動しないと仮定した。ここで、水は銅板から上方 250mm まで満たされている。水と銅板との境界はすべり境界として計算した。解析条件は爆薬の配置を左側の壁からの距離を変える場合と左側の壁面に接するようにして金属板からの高さ方向の距離を変えた場合について解析した。その条件は、左壁から爆薬の中心までの距離を w 、金属板から爆薬上部までの距離を h とし、 $h=150\text{mm}$ 一定で $w=3$ 、50、100mm と変化させた場合および $w=3\text{mm}$ 一定で $h=50$ 、150、200mm と変化させた場合の計 5 とおり設定について計算した。

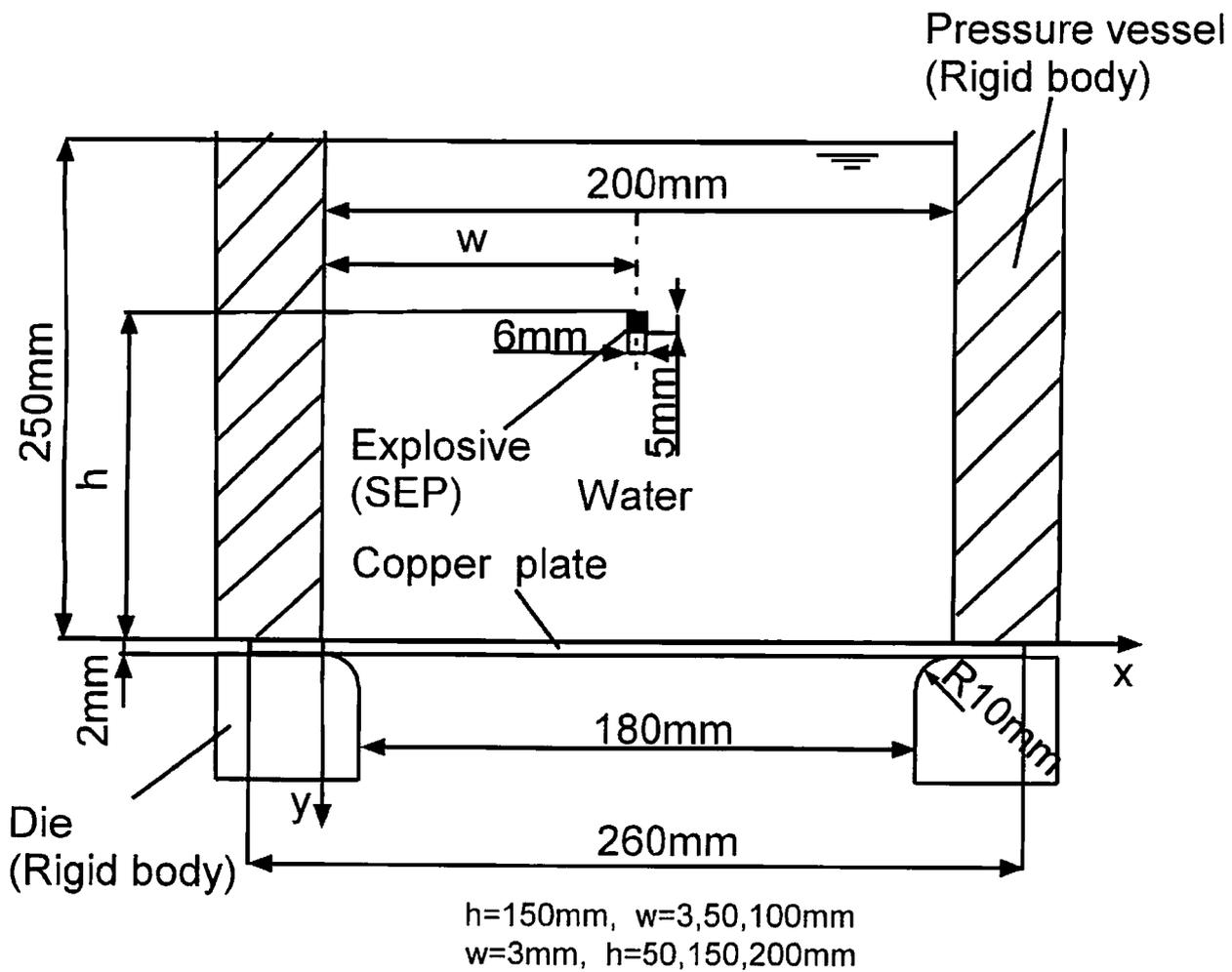


図 6.1 解析モデル

6.3 爆薬の位置を横方向に変化させた場合の変形過程

図 6.2、6.3、6.4 にそれぞれ $h=150\text{mm}$ 一定で $w=3, 50, 100\text{mm}$ と爆薬の配置を横方向に変えた場合の圧力等高値分布を示す。壁面に接して爆薬を配置した場合(図 6.2)、水中衝撃波が半円形状に広がりながら伝播する。やがて、およそ $80\mu\text{s}$ 付近で銅板に到達し、銅板からの反射波が発生する。また $120\mu\text{s}$ では、反対側の壁面に到達した衝撃波の反射が見られる。爆薬を容器中央と壁の間地点に配置した場合(図 6.3)、 $20\mu\text{s}$ では一旦円形状に衝撃波が発生するが、 $40\mu\text{s}$ において左側の壁に到達して反射波が生じ、それと初期に伝播していた衝撃波の二つが次第に容器右側方向へ移動する。やがて 80 から $100\mu\text{s}$ の間に銅板に到達する。爆薬を容器中央部に配置した場合(図 6.4)では、初期に円形状に伝播していた衝撃波がその対称性から同時刻に両側壁面に反射し、双曲面状の圧力分布となる一方、上記二つの条件と同時刻に銅板に到達する。

これらの圧力分布はその後容器内部で複雑に反射および干渉し合うが、密閉容器ではないため、上方へ水が膨張し圧力は減衰する。そこで、それぞれの場合において、銅板面上の $x=0, 50, 100, 150, 200\text{mm}$ における水要素の圧力履歴を図 6.5 に示す。爆薬が壁面に接している場合(同図(a))では、銅板の左方から順に圧力が到達しており、 $x=0, 50, 100, 150\text{mm}$ の順に圧力ピークが高い値となっている。 $x=200\text{mm}$ では、容器壁面の角部で強い圧縮が生じるため、圧力ピーク値は $x=0\text{mm}$ の場合の次に高くなっている。壁面と容器中央部の間に配置した場合(同図(b))では、 $x=50\text{mm}$ の位置に最初に衝撃波が到達し、それより距離が近い順で圧力が作用している。 $x=0\text{mm}$ の左側壁面での圧力ピーク値が大きいのは、壁面と銅板の丁度角になり、水の要素が凝縮されたように圧力が急激に上昇する。また、それは $x=200\text{mm}$ の右側の壁面と銅板との角部でも同様におこるが、そこに達するまでに圧力が減衰するので、急激な圧力上昇は見られない。容器中央部に爆薬が配置される場合(同図(c))では $x=100\text{mm}$ の爆薬中央部から圧力が作用し、その両側の $x=50$ と 150mm 、 $x=0\text{mm}$ と 200mm は対称的にそれぞれ同時刻に圧力作用が生じている。また、前の二つの条件にみられるほど圧力上昇は起こらない。

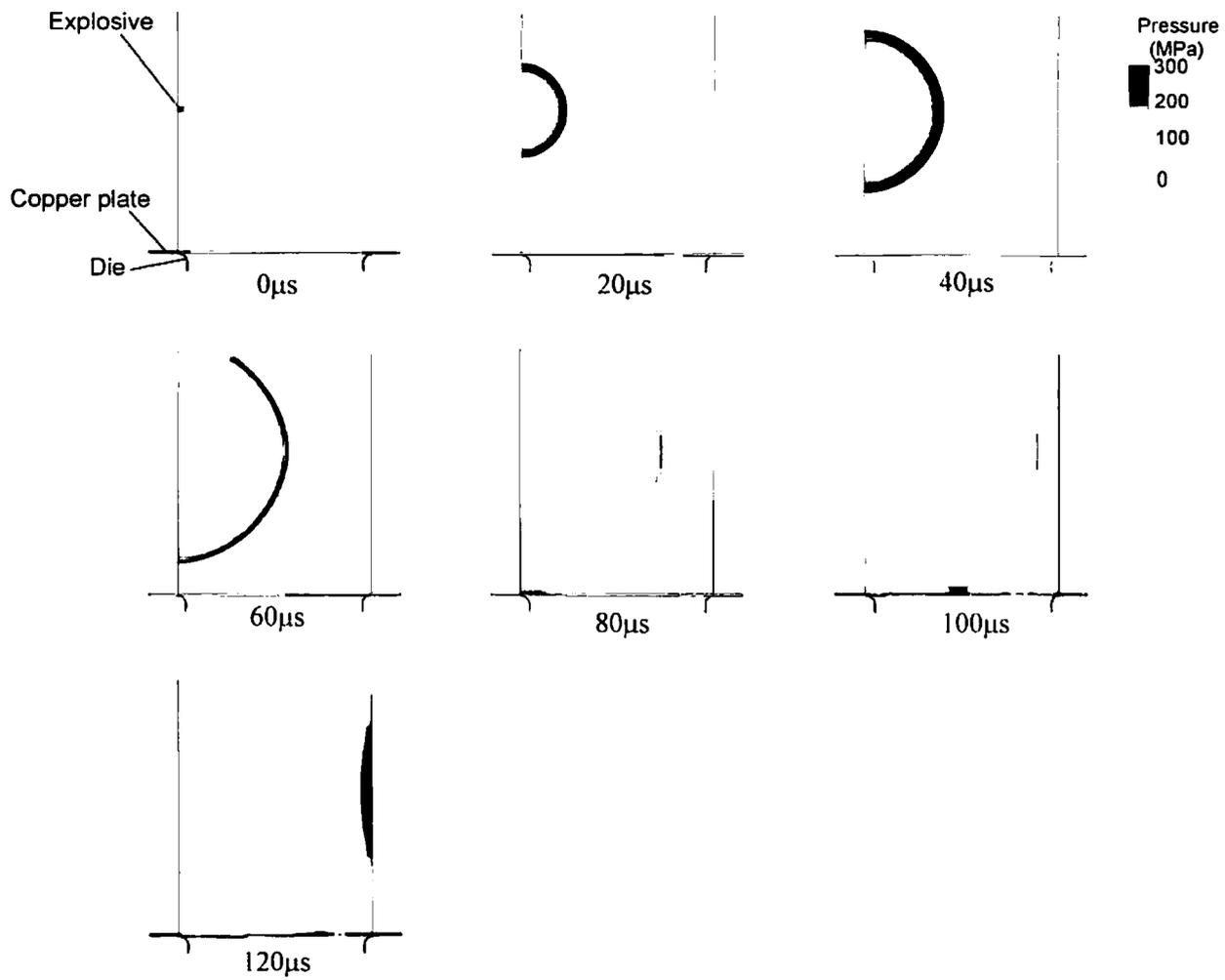


図 6.2 $h=150\text{mm}, w=3\text{mm}$ における容器内部の圧力等高値分布

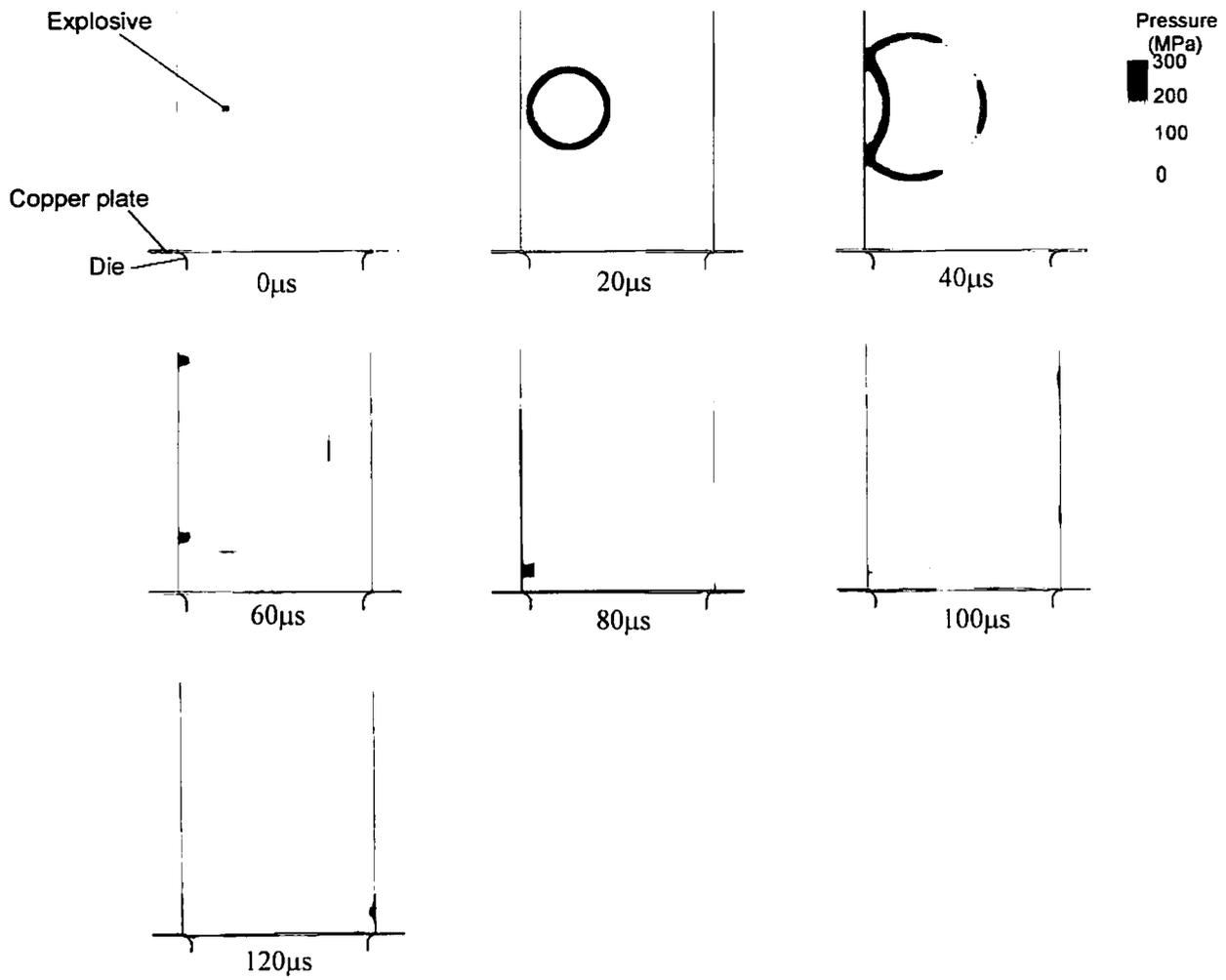


図 6.3 $h=150\text{mm}, w=50\text{mm}$ における容器内部の圧力等高値分布

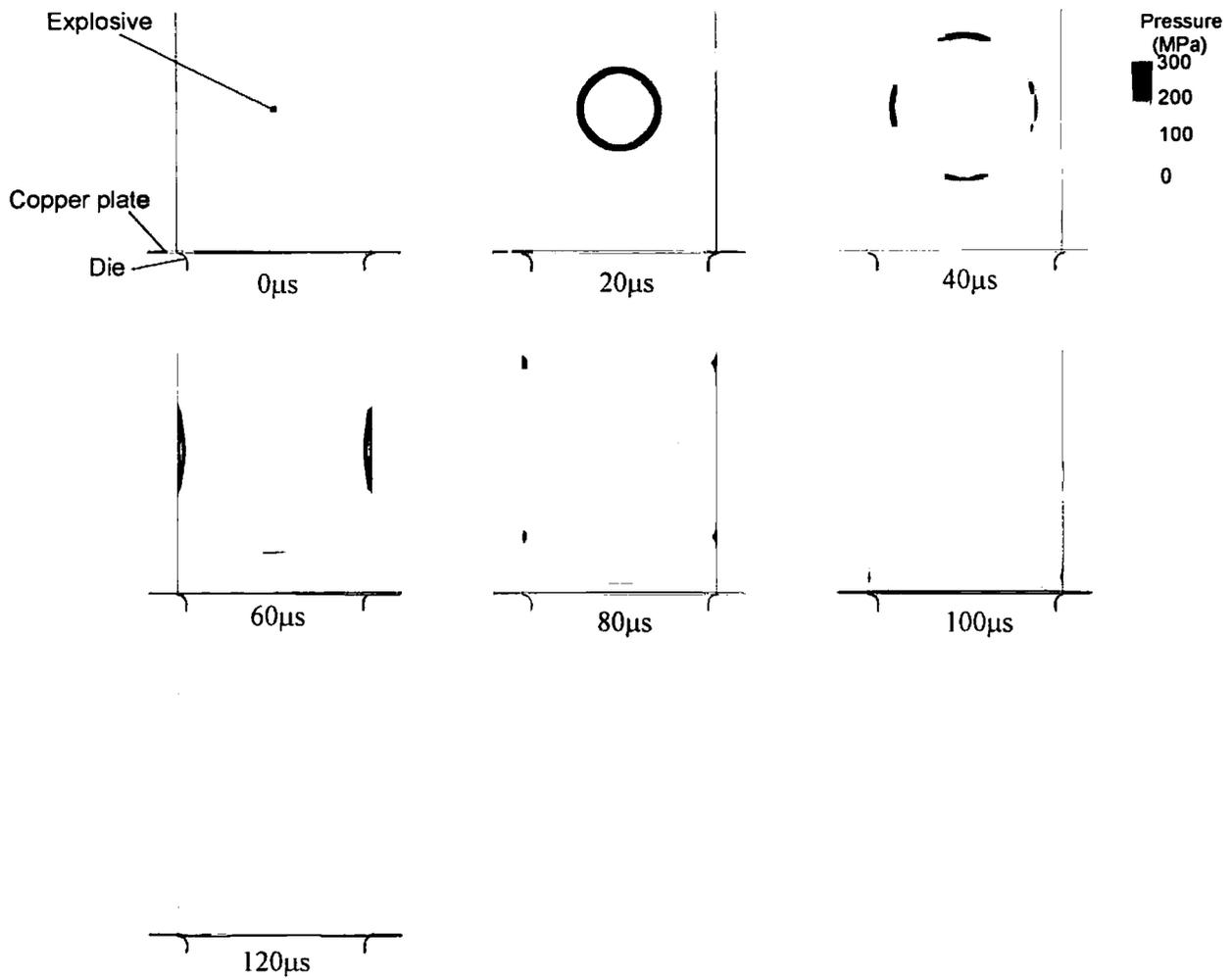
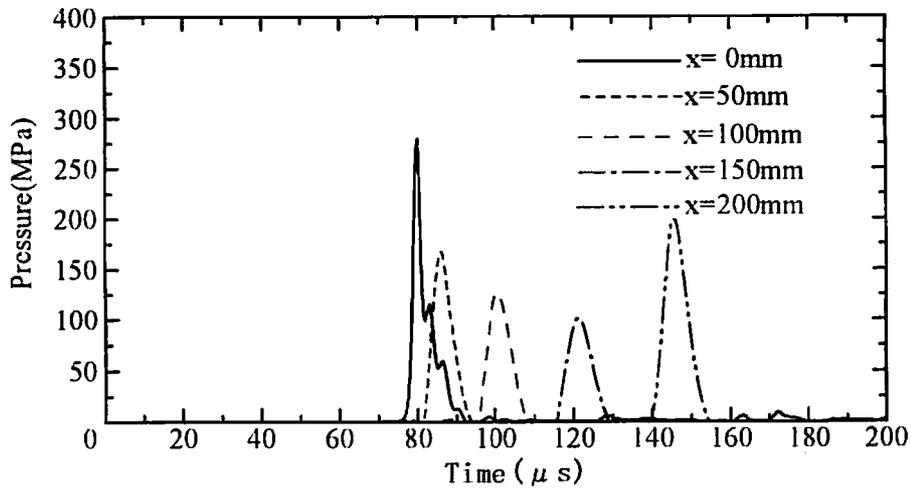
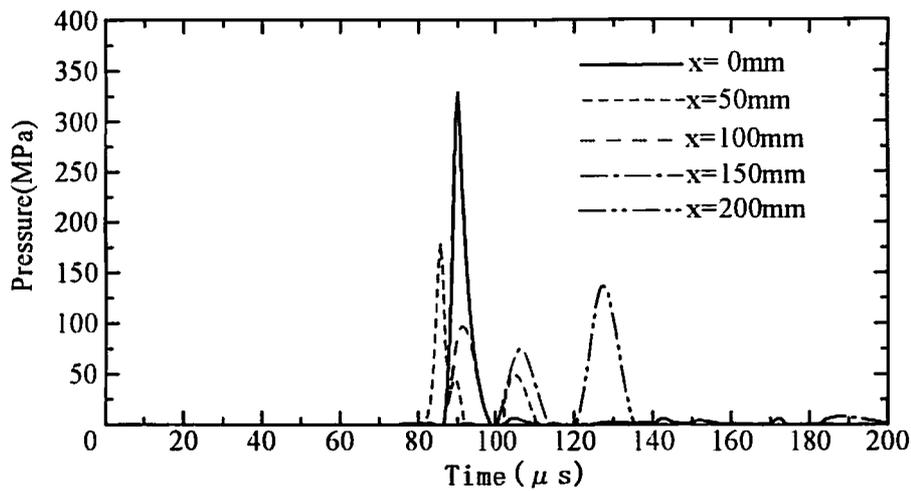


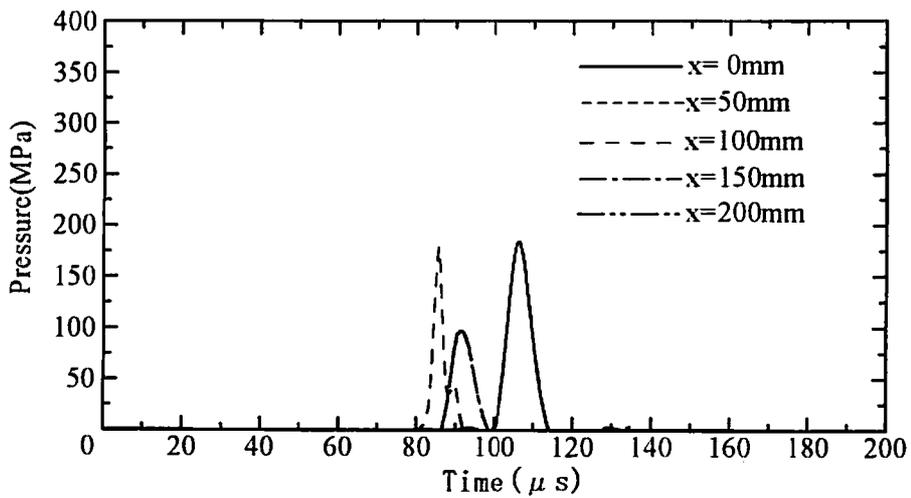
図 6.4 $h=150\text{mm}, w=100\text{mm}$ における容器内部の圧力等高値分布



(a) $h=150\text{mm}, w=3\text{mm}$



(b) $h=150\text{mm}, w=50\text{mm}$



(c) $h=150\text{mm}, w=100\text{mm}$

図 6.5 爆薬の位置を横方向に変化させた場合の銅板面上の圧力履歴

図 6.6、6.7、6.8 はそれぞれこれら三つの条件における変形過程を示している。また、図 6.9 は $x=50$ 、 100 、 150mm の位置における銅板下表面の y 方向の速度履歴を示している。

図 6.6 において、変形の初期段階の $100\mu\text{s}$ では、爆薬側の型角部近傍に僅かに下に凸の曲げ変形が見られる。 $200\mu\text{s}$ でもその反対側の角部近傍に同様の曲げ変形が見られるが、その変形量は爆薬側の方が大きく、全体的に若干左下方向に傾斜した形状となっている。この曲げ変形の曲率が次第に増大しながら変形が進行するが、およそ 400 から $600\mu\text{s}$ にかけて中央部は上方に沿った形状となり、それが次第に下方へと張出す。最終的には中央部もやや丸みを帯びた形状となっている。全体的に爆薬の反対側の変形量が若干大きくなっている。図 6.9(a)の速度履歴を見ると、 $x=50\text{mm}$ における変形が最初に生じている。また、 $x=100\text{mm}$ の銅板中央部の張出し変形もおよそ $550\mu\text{s}$ 付近から生じていることがわかる。これらより、第 5 章で述べられたような板の両側の曲げ変形の移動と中央部の張出し変形がこの場合でも生じていることがわかる。また、この張出し速度は $x=50\text{mm}$ における最大速度よりも大きくなっており、最終形状は中央部が丸みを帯びた形状となる。

図 6.7 の初期の変形過程では、図 6.6 の場合と同様に爆薬側の型角部近傍の変形量が大きくなっている。また、その変形過程も類似しており、図 6.9(b)の速度履歴からもそれがわかる。最終形状は図 6.6 の場合と比較してほぼ同様の形状となり、この場合も爆薬の反対側の変形量が大きい。

図 6.8 の場合では、圧力分布も左右対称であるため、変形形状もそれと相似に左右対称の形状となる。両側の型の角部近傍で下に凸の曲げ変形が生じ、それが次第に中央部へと移動しながら変形が進行し、 $500\mu\text{s}$ あたりから中央部が突出し始め、最終形状で全体が丸みを帯びた形状となる。図 6.9 の速度履歴では、 $x=50$ 、 100 、 150mm の速度がほぼ同時に変形が始まり、 $x=50\text{mm}$ および 150mm の位置での速度履歴は、ほぼ一致しており中央から左右対称の変形が生じていることが示される。

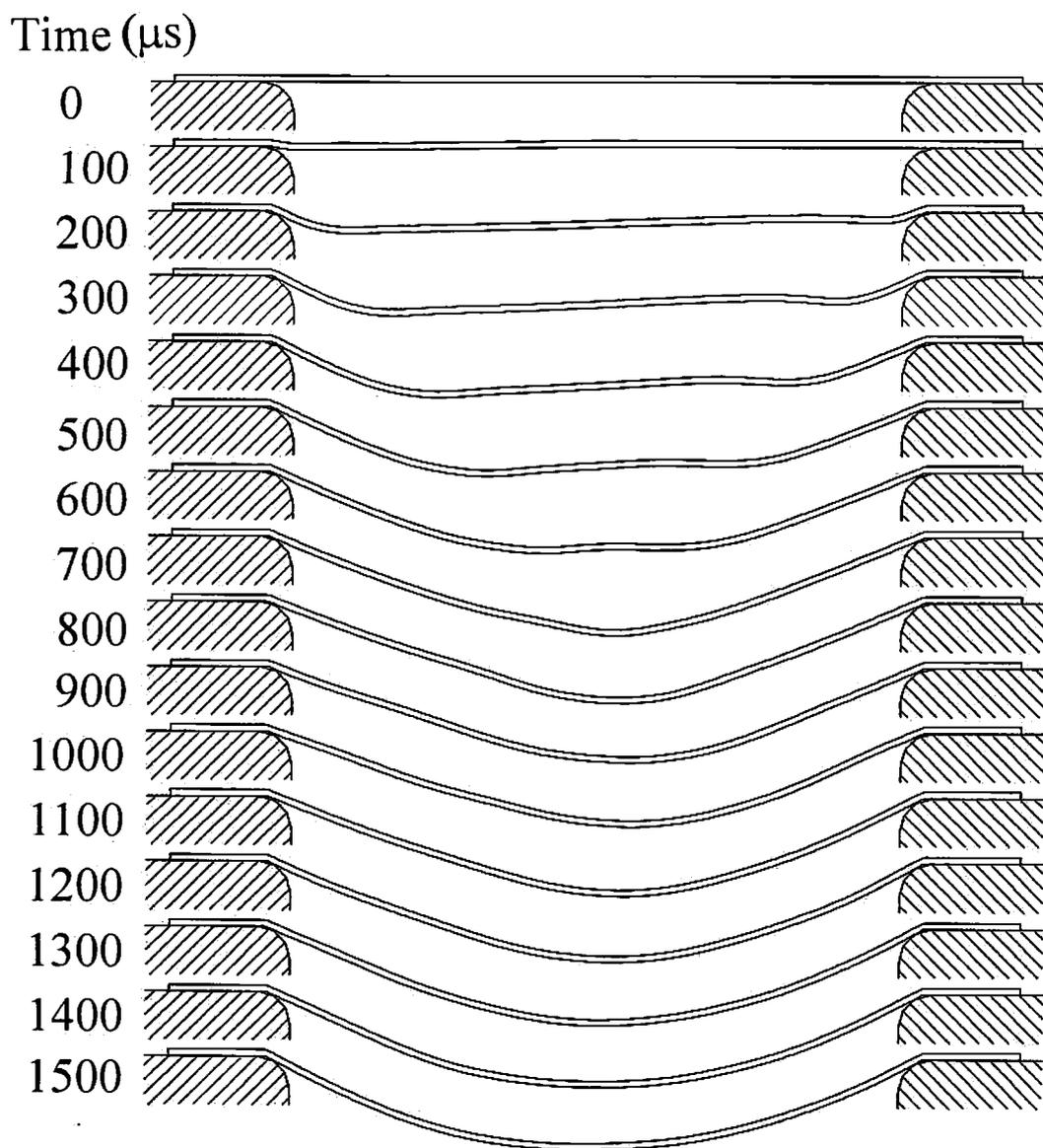


図 6.6 $h=150\text{mm}, w=3\text{mm}$ の変形過程

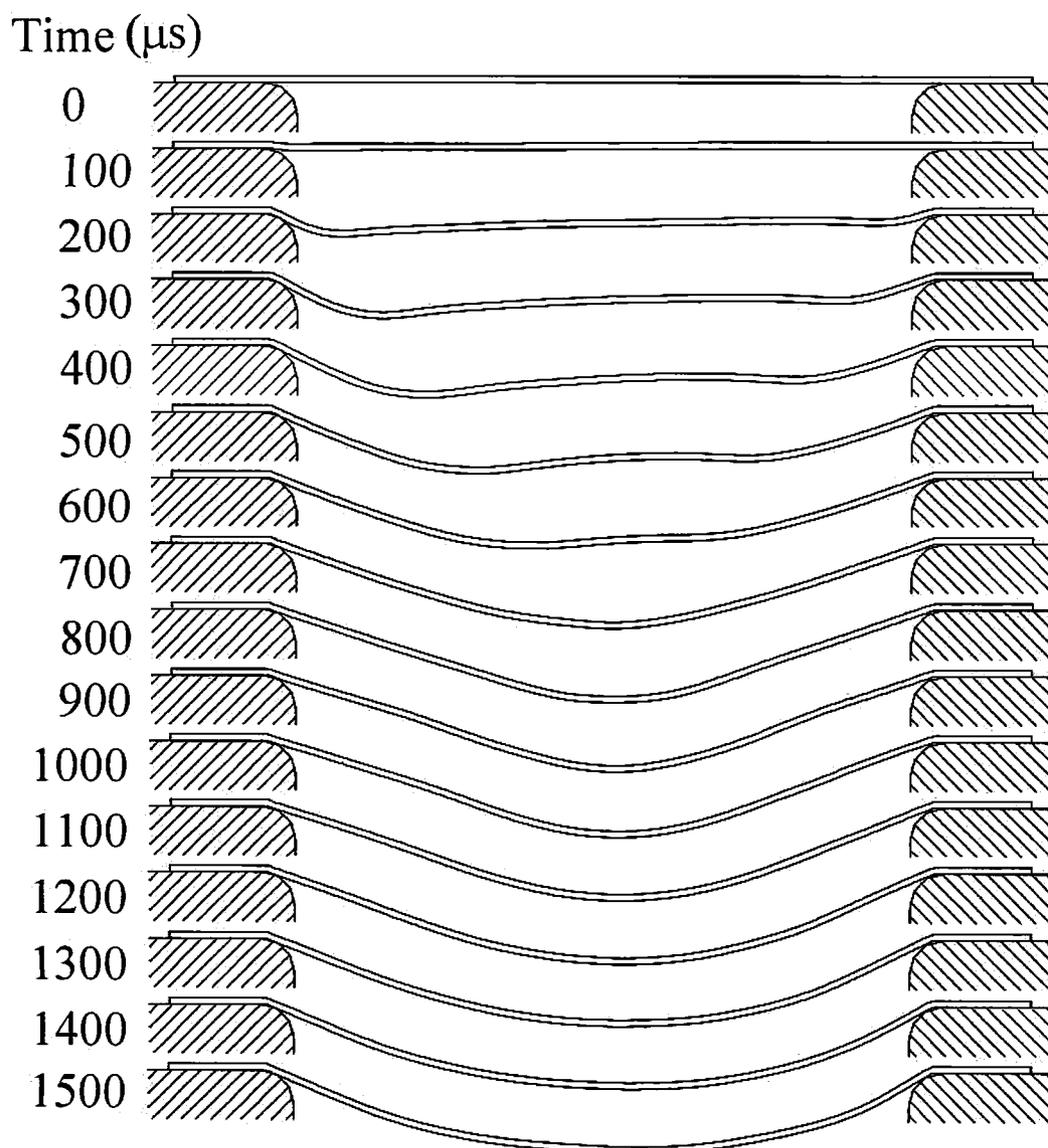


図 6.7 $h=150\text{mm}, w=50\text{mm}$ の変形過程

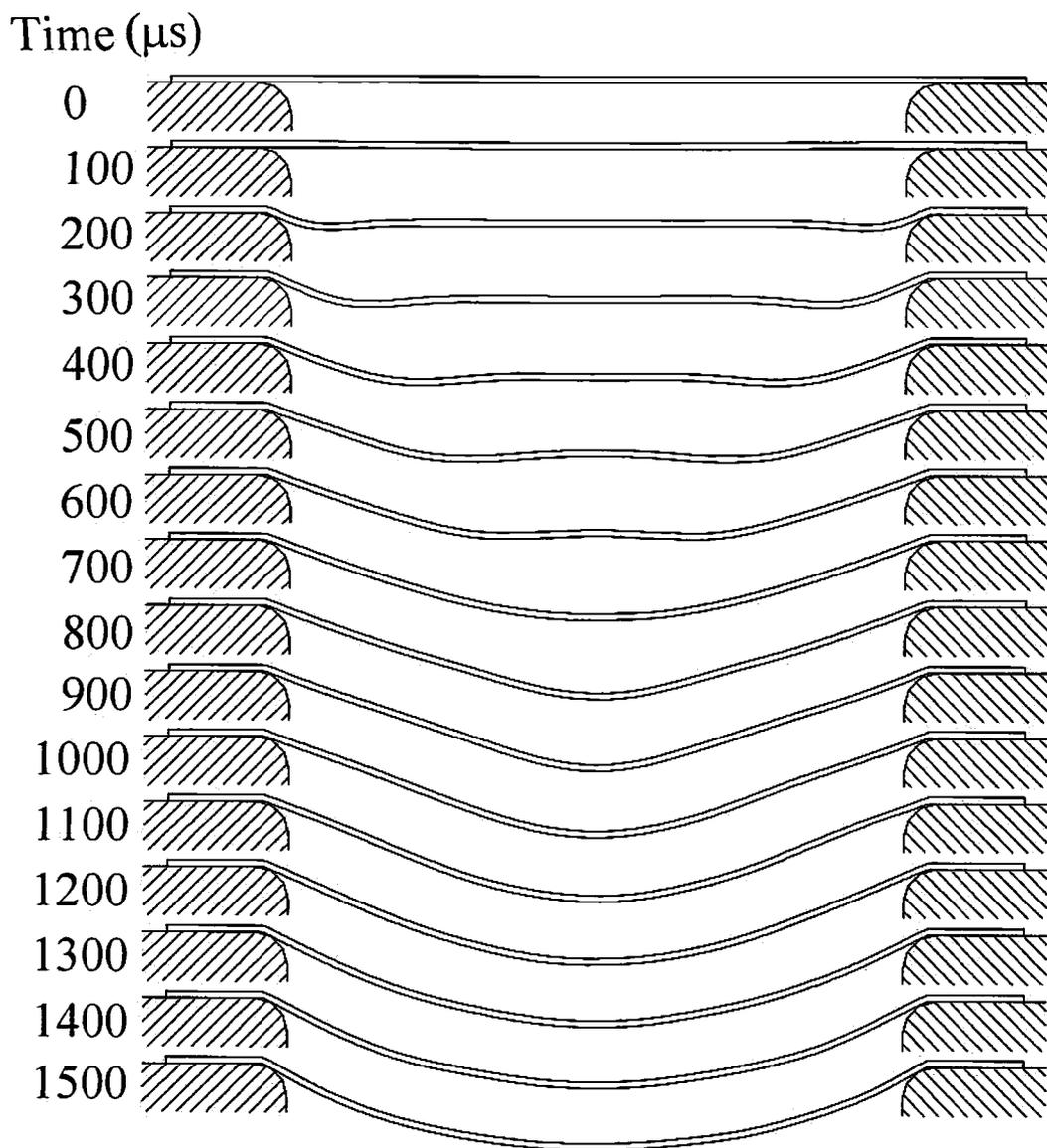
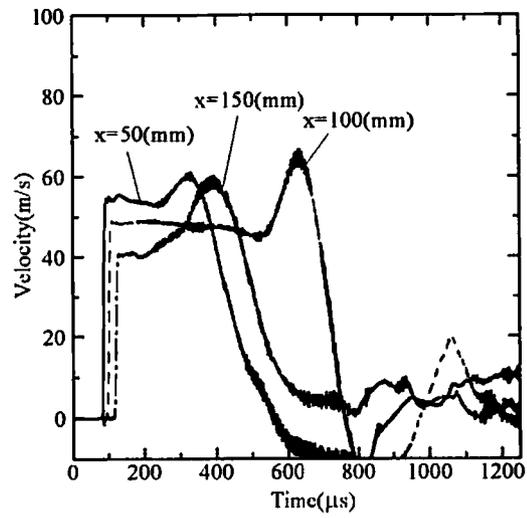
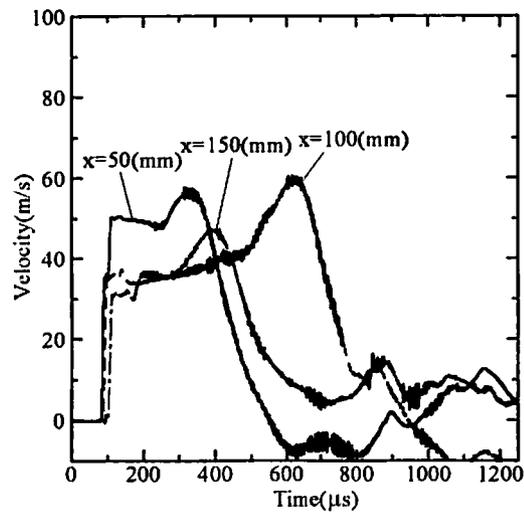


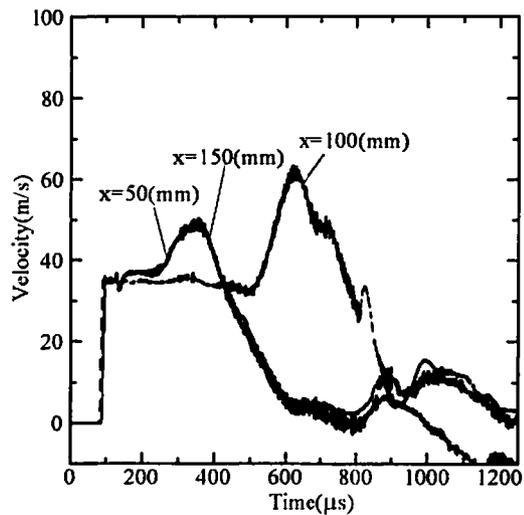
図 6.8 $h=150\text{mm}, w=100\text{mm}$ の変形過程



(a) $h=150\text{mm}, w=3\text{mm}$



(b) $h=150\text{mm}, w=50\text{mm}$



(c) $h=150\text{mm}, w=100\text{mm}$

図 6.9 爆薬の配置を横方向に変えた場合の $x=0,100,150\text{mm}$ における銅板下表面の y 方向速度履歴

6.4 爆薬の位置を縦方向に変化させた場合の変形過程

次に、左側の壁に爆薬が接しており、その高さを変えた場合について述べる。図 6.10 および図 6.11 はそれぞれ $h=50\text{mm}$ および 200mm における圧力容器内部の圧力等高値分布を示している。また、銅板表面上の $x=0, 50, 100, 150, 200\text{mm}$ における水要素の圧力履歴をそれぞれ図 6.12(a)(b)に示す。

$h=50\text{mm}$ では、爆薬から銅板まで比較的近いために衝撃波は左壁近傍において、およそ $18\ \mu\text{s}$ で銅板に到達する。このとき左壁と銅板の角の水要素圧力は 1GPa にも達している。それ以降はこの銅板からの反射波と初期に発生した二つの円形状の衝撃波が上方向へ伝播していき、次第に右方へと銅板への圧力の作用が生じる。このため、既に $40\ \mu\text{s}$ 付近から銅板は変形が始まり、その後、次第に左下方向へ傾斜した変形形状となる。一方、 $h=200\text{mm}$ では、爆薬から銅板までの距離が大きいため、衝撃波が左壁近傍でおよそ $107\ \mu\text{s}$ で銅板に到達し、図 6.11 において $120\ \mu\text{s}$ では、爆薬から銅板までの距離と右側の壁までの距離が同じであるので、両者において同時に反射波が発生していることがわかる。

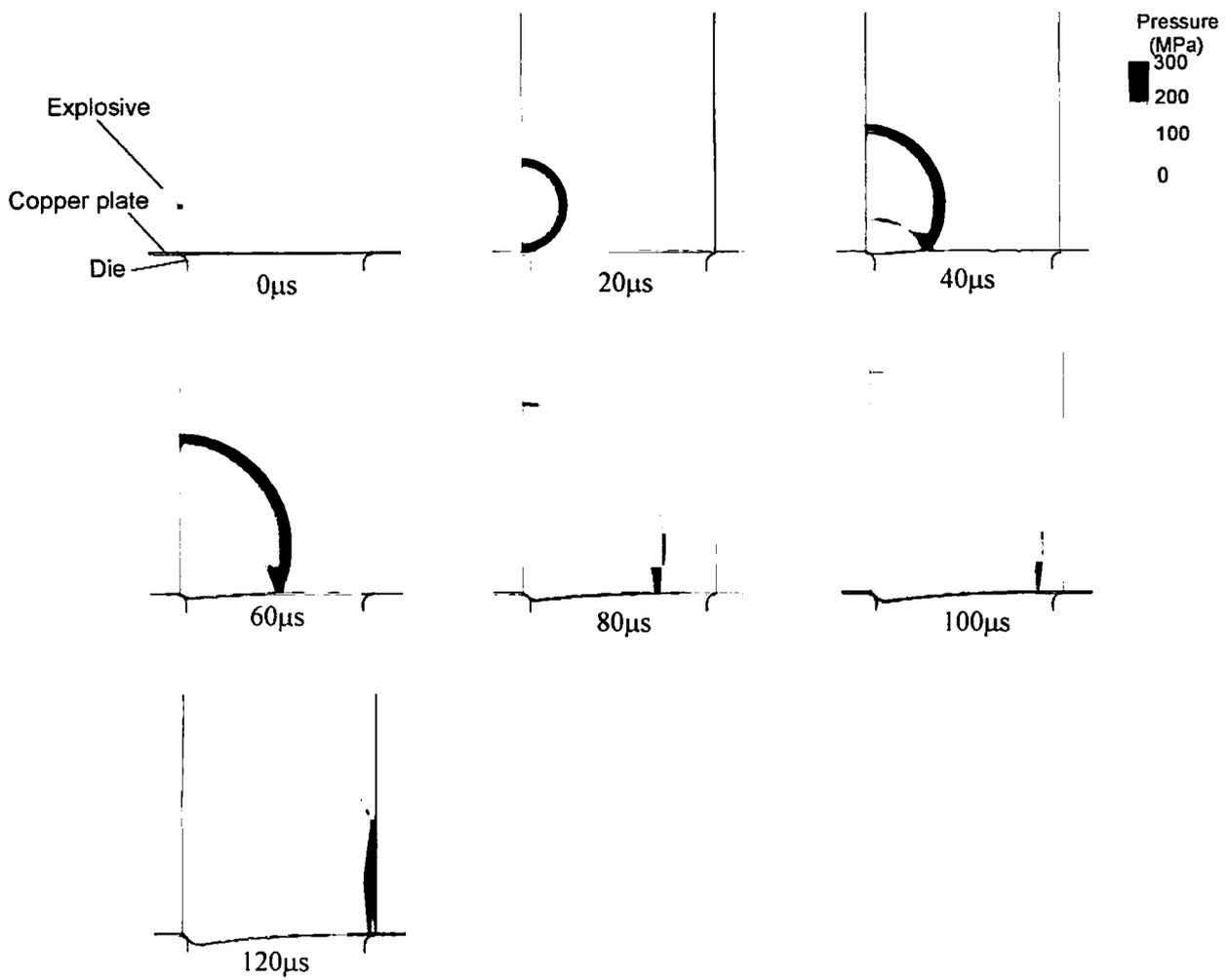


図 6.10 $w=3\text{mm}, h=50\text{mm}$ における容器内部の圧力等高値分布

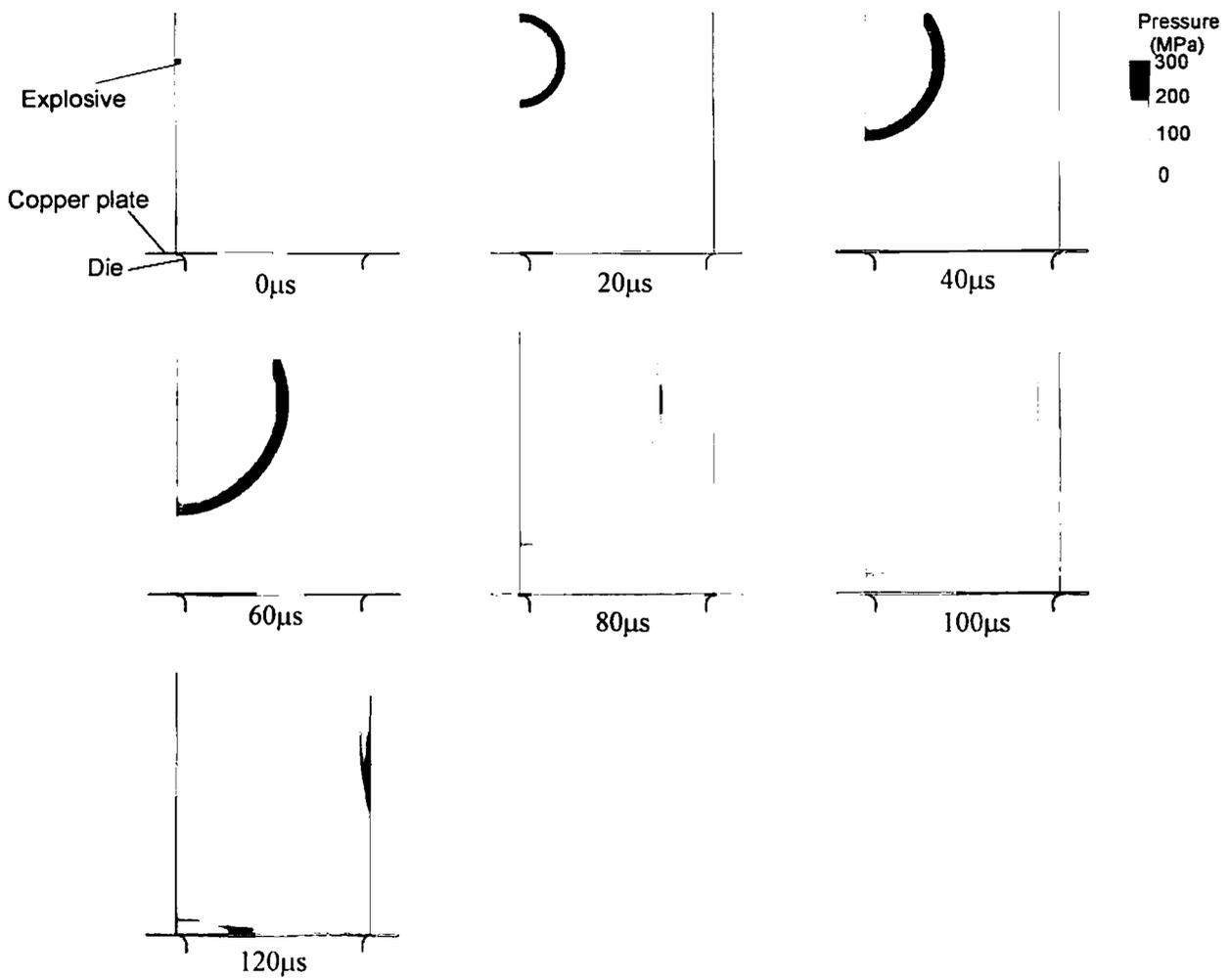
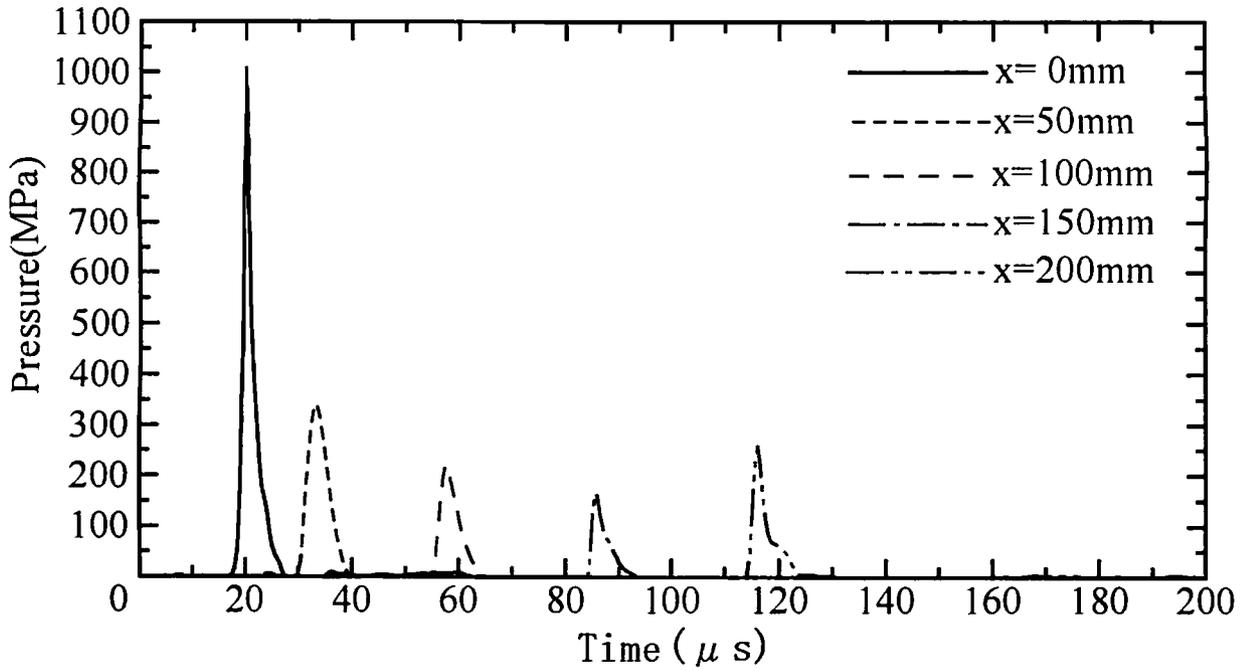
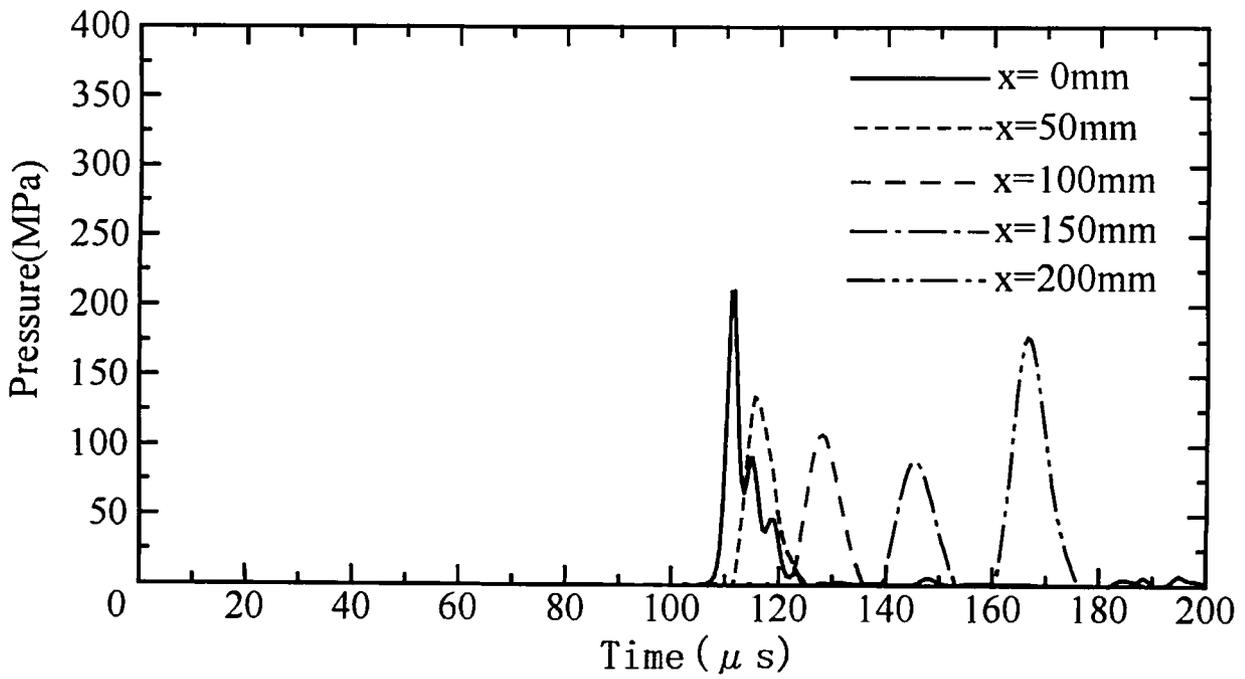


図 6.11 $w=3\text{mm}, h=200\text{mm}$ における容器内部の圧力等高値分布



(a) $w=3\text{mm}, h=50\text{mm}$



(b) $w=3\text{mm}, h=200\text{mm}$

図 6.12 爆薬の位置を横方向に変化させた場合の銅板面上の圧力履歴

図 6.13、図 6.14 にそれぞれ $h=50\text{mm}$ および 200mm の変形過程を示す。図 6.15 は $x=50、100、150\text{mm}$ の位置における銅板下表面の y 方向速度履歴である。
 $h=50\text{mm}$ の場合、銅板の左側は爆薬に最も近いので、早い時期から圧力が作用するため、 $100\mu\text{s}$ では左側の型角部の内側で急激な下に凸の曲げ変形を伴い、その傾斜角も他の条件と比較して深い。全体が左下がりに傾斜している形状となっている。 $200\mu\text{s}$ において、右側にも下に凸の曲げ変形が見られるが、その変形量は小さい。この爆薬側の下に凸の曲げ変形は次第に変形量が大きくなりながら右方へ移動し、且つ中央部の張出し変形も伴い、最終的には爆薬の反対側の変形量が大きくなっている。また、図 6.15(b)からわかるように、他の条件と比較して $x=50\text{mm}$ の位置での変形速度が非常に大きく、一旦約 87m/s まで急激に加速され、およそ $230\mu\text{s}$ で張出し変形が生じている。その後急激に減速される。爆薬からの距離が遠ざかるにつれて変形が生じているが、 $x=150\text{mm}$ では中央の銅板が減速した後も下方向への変形速度を維持しており、このため爆薬反対側の銅板の変形量が大きくなる。

図 6.14 の $h=200\text{mm}$ の場合では、爆薬から銅板まで距離が離れているために、 $100\mu\text{s}$ ではまだ変形が生じていない。左右の型の角部よりすぐ内側において下に凸の曲げ変形がほぼ同時に生じるが、右側の下に凸の曲げ変形のすぐ内側に上に凸の曲げ変形が生じており、左右の変形傾斜部を比較すると右側の方が若干傾斜角が深い変形となっている。図 6.15(b)より、 $400\mu\text{s}$ 近傍に注目すると、右側の $x=150\text{mm}$ における変形速度の方が $x=50\text{mm}$ における場合よりも大きく、その最大値も大きい。そのため、 $400\mu\text{s}$ 付近の変形量は右側の方が大きくなり、その変形傾斜角も深くなることがわかる。 $600\mu\text{s}$ 付近から上方へ沿った中央部の板が、次第に下方へ張出す。およそ $900\mu\text{s}$ では、中央より右側の銅板の変形量が若干大きいですが、次第にその最大変形量の位置が左方へ移動し、最終的に変形形状は中央より左側の方が膨らんでいる。

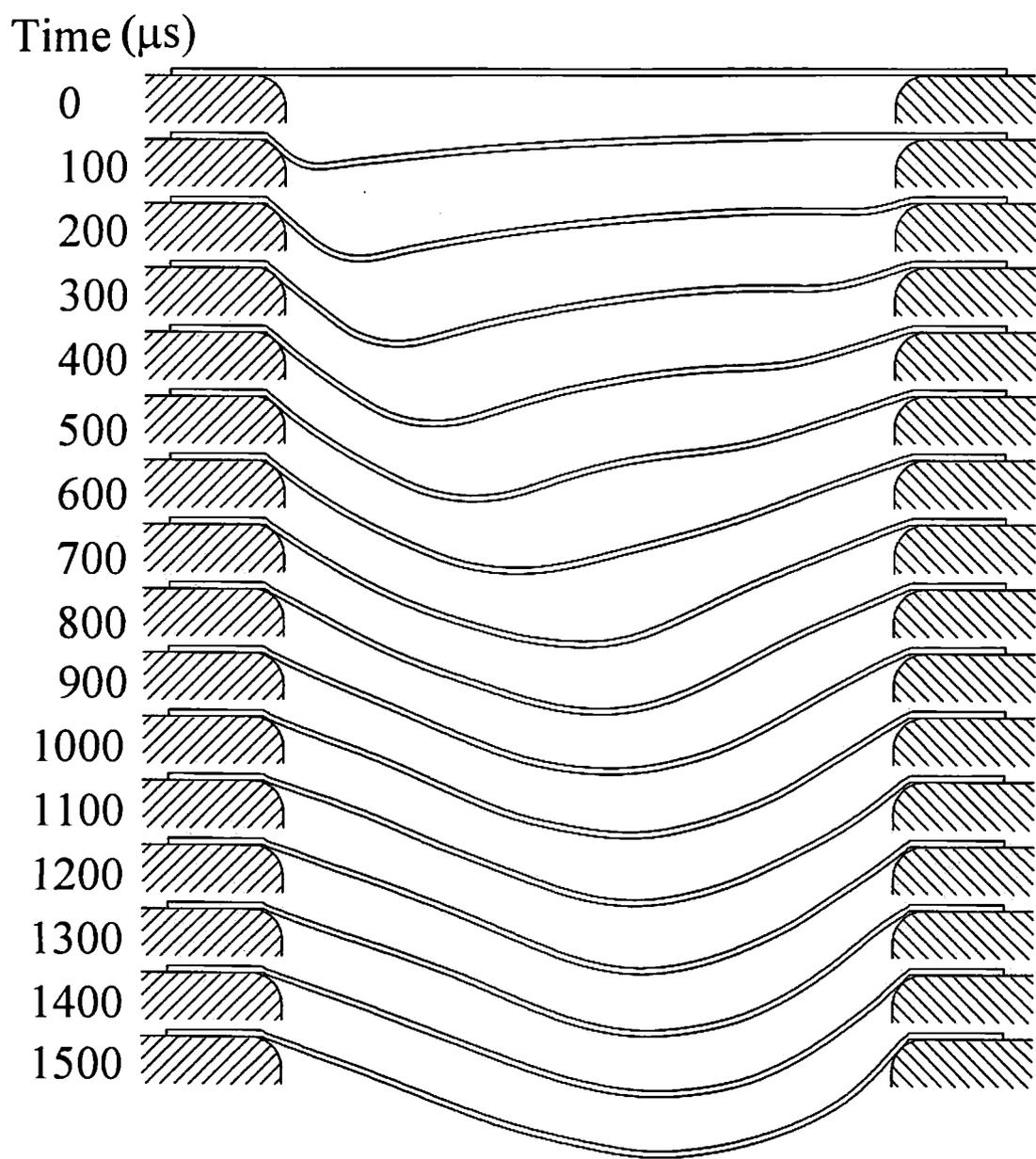


図 6.13 $w=3\text{mm}, h=50\text{mm}$ の変形過程

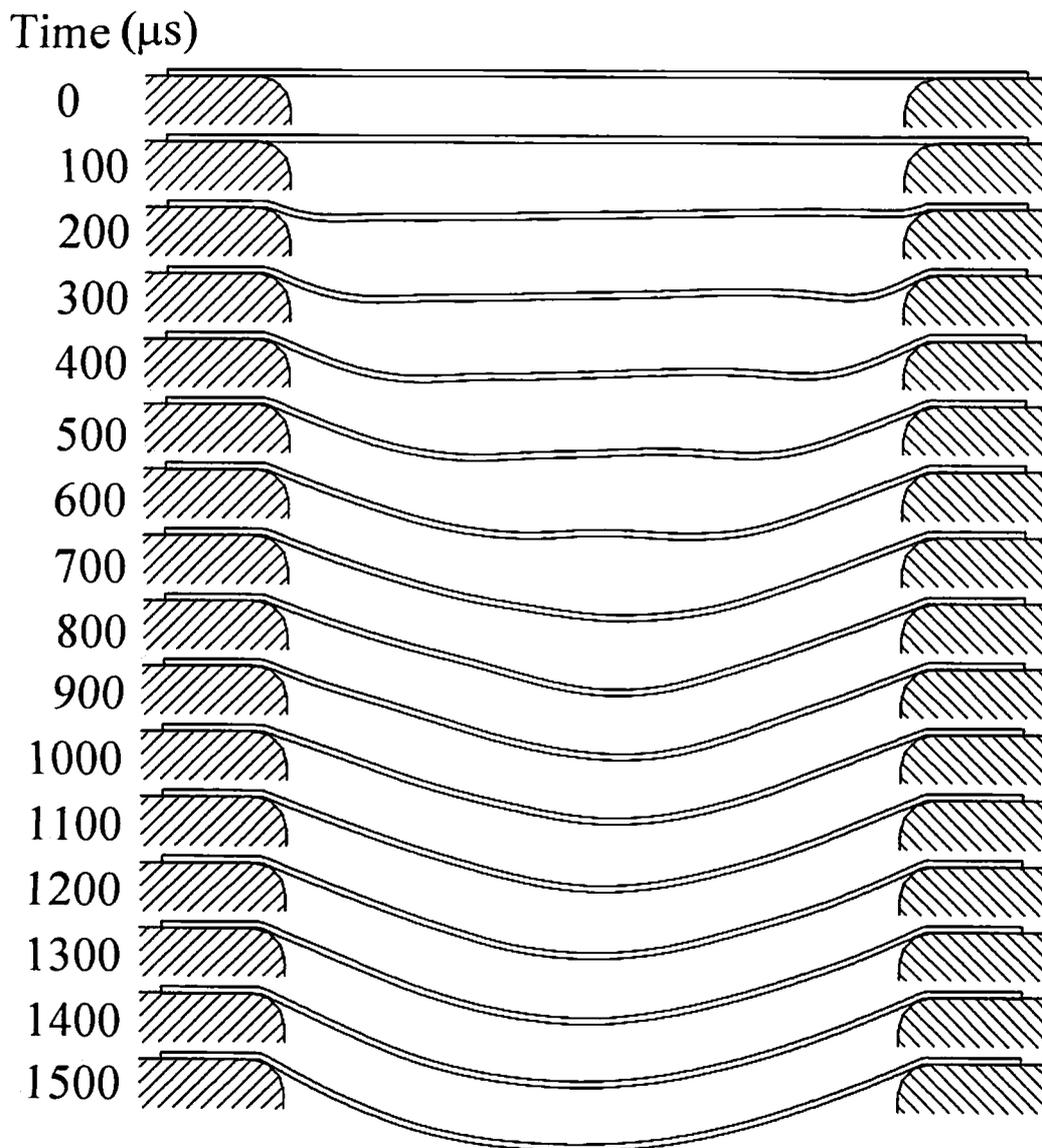
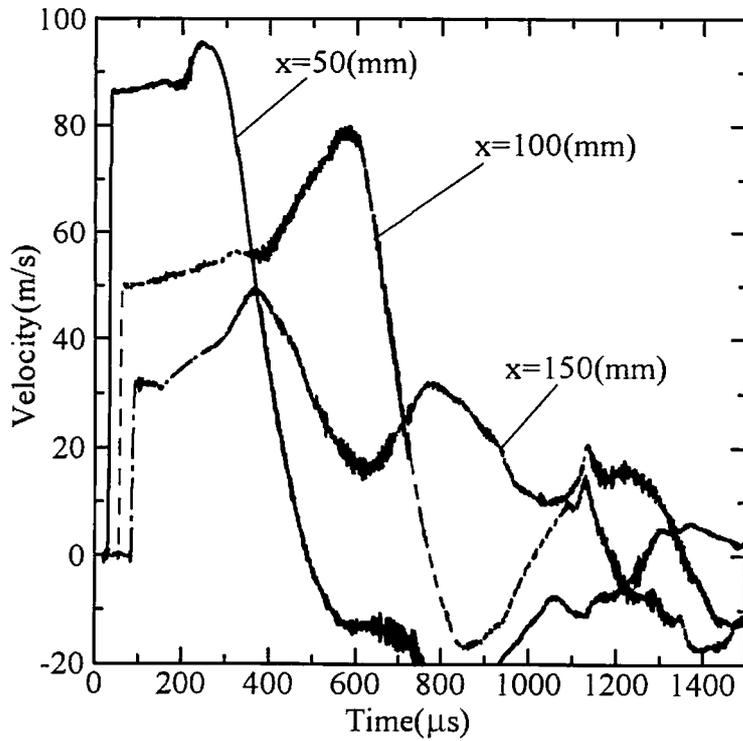
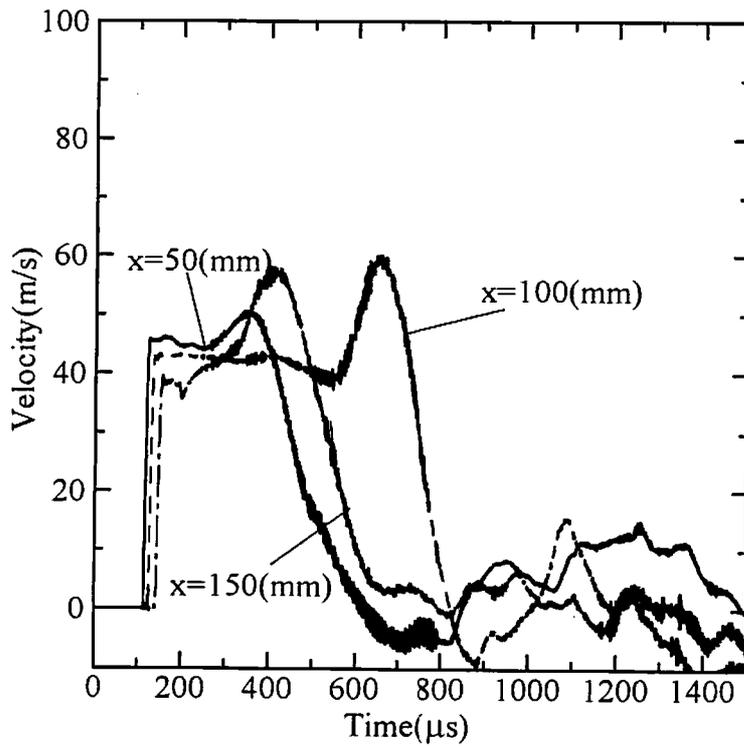


図 6.14 $w=3\text{mm}, h=200\text{mm}$ の変形過程



(a) $w=3\text{mm}, h=50\text{mm}$



(b) $w=3\text{mm}, h=200\text{mm}$

図 6.15 爆薬の配置を縦方向に変えたときの $x=0,100,150\text{mm}$ における銅板下表面の y 方向速度履歴

6.5 最終変形形状の比較

図 6.16 にすべての条件における最終変形形状の比較を示す。

これらの結果より、同図(a)から(c)における爆薬の位置を横方向に変えた場合、容器壁面から離れるにしたがって、変形量が最大の位置が次第に中央へと寄っていく。また、(a)の爆薬が壁面に接している場合よりもむしろ、壁面と中央の中間(b)における変形の方が極端に偏った変形形状となった。また、(a)、(d)、(e)における爆薬を壁面に接して高さ h を変えた場合での比較では、爆薬が銅板に近いほどその変形形状に極端に影響を及ぼし、偏った形状が得られる。しかし、銅板からの高さが離れるほど、その偏りは少ない形状となり、爆薬の配置の影響が小さくなる傾向がある。



(a) $h=150\text{mm}, w=3\text{mm}$



(b) $h=150\text{mm}, w=50\text{mm}$



(c) $h=150\text{mm}, w=100\text{mm}$



(d) $h=50\text{mm}, w=3\text{mm}$



(e) $h=200\text{mm}, w=3\text{mm}$

図 6.16 最終変形形状

6.6 結言

本章では、まず爆発成形法による新しい試みとして、自由張出し成形において爆薬の配置を変えることで、金属板を所定の形状に成形する方法を提案した。ここでは、密閉容器を使用するのではなく、両側に壁面を有する容器に水が満たされ、その中で爆薬の位置を縦方向および横方向に変化させることにより、金属平板の自由張出し成形における変形形状にどのような影響を及ぼすかを平面問題における解析モデルを取り上げ、数値解析を行った。その結果を以下にまとめる。

- 1.横方向に爆薬の位置を変えた場合、容器内部の圧力分布において爆薬が壁面に配置された場合($w=3\text{mm}$)は水中衝撃波が半円形状に広がり、容器中央($w=100\text{mm}$)および壁面と容器中央の間 ($w=50\text{mm}$) に配置した場合は円形状に広がる。また、水中衝撃波が銅板に最初に到達するのは爆薬より最も近い位置であり、その場所から変形が生じる。
- 2.爆薬配置を横方向に変えた場合の変形過程においては、容器壁面に接して配置した場合($w=3\text{mm}$)では変形量の最大位置が若干左寄りになり、容器壁面と中央部との中間($w=50\text{mm}$)に配置した場合は、逆に若干右寄りの変形となった。中央に配置した場合($w=100\text{mm}$)は圧力分布も左右対称になるため、変形形状も左右対称の形状となった。
- 3.爆薬の位置を容器壁面に接して($w=3\text{mm}$)、高さ方向に変化させた場合には、その位置が $h=50\text{mm}$ と銅板に近くなると、銅板の初期の変形量は爆薬側が大きいが、最終的には最大変形量の位置が右方へ移動すると共に、銅板中央部が張出しなが変形が進行し、爆薬の反対側で極端に膨らんだ形状となった。また、 $h=200\text{mm}$ の場合、爆薬配置の偏りの影響がほとんどなく、中央部より左側の方が若干膨らんだ形状となった。

以上のことより、密閉容器を用いず爆薬の配置を変えることにより、それぞれの場合において変形形状に影響を及ぼすことが数値解析により示された。

参考文献

- 1) 藤田昌大, 爆轟エネルギーによる成形加工, まてりあ, 第 36 巻, 第 5 号, pp.464-467(1997).
- 2) 張ルイ, 井山裕文, 藤田昌大, 伊東繁, 張鉄生, 李振声, 型を用いない爆発成形球殻技術の数値解析, 火薬学会誌 581, pp.16-22(1997).

第7章 総括

本研究では、爆薬の水中爆ごうの際生じる水中衝撃波を利用した爆発加工に関する研究として、爆発圧着法および爆発成形法における水中衝撃波の伝播過程および金属板の変形過程について数値解析によりそのメカニズムと装置の持つ特性の評価を行った。まず、爆薬の爆ごう過程から水中衝撃波の伝播過程および金属板の変形まで一貫した解析方法の妥当性を光学的観測実験の結果との照合により示した。次に爆発圧着法の実験では、さらに金属板同士の衝突問題まで解析を行った。また、爆発成形法においても金属円板の自由張出し成形法における飛翔板の速度計測実験と最終変形形状の結果と解析結果との照合を行った。また、この金属円板の変形メカニズムについても議論した。最後に、自由張出し成形において、爆薬の配置を変化させることで変形形状にどのように影響をおよぼすか、数値解析によってそれを確かめた。本章はこれまでに得られた結果の総括を行う。

第1章では、本研究を行うにあたって、その背景および目的について述べた。

第2章では、主に本研究で用いた解析方法について述べた。またここでは、衝撃波および爆ごうに関する理論について簡単に述べ、解析方法で用いる基礎式、状態方程式、金属板の構成式と降伏条件などについて説明した。

第3章では、爆薬の水中爆ごうによって発生した水中衝撃波を利用した爆発加工の中で極めて重要な因子となる飛翔板の加速特性を実験と数値計算によって評価した。ここでは、まず光学的観測実験の方法について紹介し、その結果と解析結果と照合させて水中衝撃波による金属板の変形解析において、本研究で用いる解析方法が適合しているかその検証を行った。

フレーミング撮影による結果と解析結果の比較では、水中衝撃波の伝播過程、アルミニウム板の変形過程において両者の形状が一定の時間間隔でよく一致した。また、爆薬と飛翔板の間の傾斜各を 15° 、 20° 、 25° 、 30° と変化させた場合においてストリーク撮影の結果より得たアルミニウム板の変形過程の結果と同条件における解析結果がよく一致し、これらのことから本解析方法の妥当性が示された。

また、飛翔板までの距離ならびに爆薬と飛翔板の設定角度 α を変化させることにより、その加速された飛翔板はほぼ一定の速度をとり、0.5mmのアルミニウム板の場合 $\alpha=15^\circ$ の場合680m/s、 $\alpha=30^\circ$ の場合480m/sであった。

アルミニウム板ではなく剛体とした場合とアルミニウム板が変形しながら水中衝撃波が反射する場合と比較を行い、その反射形態および変形を伴うことによる急激な圧力の減衰について述べた。

第4章では、水中衝撃波を利用した爆発圧着法についてその応用例の紹介とこの方法を数値解析によって評価することを試みた。また、多層爆発圧着法の数値解析も行った。

まず、水中衝撃波を利用した爆発圧着法によるアモルファス金属板と鋼板の接合実験例を紹介した。ここでは、爆薬と試料の間の傾斜角を変化させることで接合部の波状界面の振幅が変化することが紹介され、この方法ではセットアップ条件により、接合状態が変化することが示された。

次に飛翔板と母材を銅板とした場合の爆発圧着について数値解析を行った。爆薬と飛翔板の間の距離、傾斜角および飛翔板と母材との間隙を変化させた計算条件において、水中衝撃波の圧力作用の状態、飛翔板と母材の衝突過程について述べた。爆薬と飛翔板との距離を変えた場合、その距離が近いほど飛翔速度が大きく、また衝突直前における急激な速度上昇も大きい。また、飛翔板と母材の間隙が離れるほど飛翔板の変形速度は速くなり、飛翔距離も大きくなるとそれだけ加速されることが示された。飛翔板と母材の衝突角度においては、すべての条件において、衝突角度は飛翔板の左方では浅い角度となりそれが次第に一定角度になっていく。爆薬の傾斜角が大きいほど、あるいは爆薬と飛翔板の距離が狭いほど、更に飛翔板と母材の間隙が大きいほど衝突角度は大きい。

水中衝撃波移動速度と衝突点移動速度を爆薬の傾斜角に対してプロットした結果、爆薬の傾斜角が小さいほど、衝撃波の移動速度および衝突点移動速度は大きく、両者の速度はほぼ同じ値になる。これらの条件において爆発圧着が可能であるかどうかについて実験結果より得られた Weldability window 上に各条件における結果をプロットした。その結果、本研究で設定した条件においては4点が波状の界面を有する接合条件と重なった。

第5章では、銅円板の爆発成形法において、自由張出し成形における数値解

析を行った。ここでは、ピンコンタクト法による実験から得られた銅板の変形速度および最終形状の比較を行った。

初期の銅板の変形は型の角部に上の凸の曲げ変形が生じており、そのすぐ内側に下に凸の曲げ波が発生する。その中央部は平坦部を形成している。この下に凸の曲げ変形が次第に銅板中央部へと移動しながら、変形は進行し、やがてそれが中央部に到達する直前に一旦上方へ沿った形状となるが、そこから急激に加速され、下方へ突出する変形となる。このような変形メカニズムにより自由張出し成形が行われることが示された。

また、ピンコンタクト法を用いた速度計測実験と解析結果との比較では、両者の値がほぼ一致した。実験結果と解析結果における最終変形形状の比較を行った結果、両者においてほぼ一致した結果が得られた。

第6章では、まず爆発成形法による新しい試みとして、自由張出し成形において爆薬の配置を変えることで、金属板を所定の形状に成形する方法を提案した。ここでは、密閉容器を使用するのではなく、両側に壁面を有する容器に水が満たされ、その中で爆薬の位置を縦方向および横方向に変化させることにより、金属平板の自由張出し成形における変形形状にどのような影響を及ぼすかを検討するための解析モデルを取り上げ、数値解析を行った。

横方向に爆薬の位置を変えた場合、容器内部の圧力分布において爆薬が壁面に配置された場合($w=3\text{mm}$)は水中衝撃波が半円形状に広がり、容器中央($w=100\text{mm}$)および壁面と容器中央の間 ($w=50\text{mm}$) に配置した場合は円形状に広がる。また、水中衝撃波が銅板に最初に到達するのは爆薬より最も近い位置であり、その場所から変形が生じる。また、爆薬配置を横方向に変えた場合の変形過程においては、容器壁面に接して配置した場合($w=3\text{mm}$)では変形量の最大位置が若干左寄りになり、容器壁面と中央部との中間($w=50\text{mm}$)に配置した場合は、逆に若干右寄りの変形となった。中央に配置した場合($w=100\text{mm}$)は圧力分布も左右対称になるため、変形形状も左右対称の形状となった。

爆薬の位置を容器壁面に接して($w=3\text{mm}$)、高さ方向に変化させた場合には、その位置が $h=50\text{mm}$ と銅板に近くなると、銅板の初期の変形量は爆薬側が大きいが、最終的には最大変形量の位置が右方へ移動すると共に、銅板中央部が張出しなが変形が進行し、爆薬の反対側で極端に膨らんだ形状となった。 $h=200\text{mm}$ の場合、爆薬配置の偏りの影響がほとんどなく、中央部より左側の方

が若干膨らんだ形状となった。

以上のことより、密閉容器を用いず爆薬の配置を変えることにより、それぞれの場合において変形状に影響を及ぼすことが数値解析により示された。

謝辞

本研究の遂行に際し、指導教官として懇切丁寧にご指導、ご助言を賜りました熊本大学衝撃極限環境研究センターの伊東繁教授には心から感謝の意を表すとともに、厚く御礼申し上げます。

本論文をまとめるにあたり、熊本大学工学部知能生産システム工学科の小田勇教授、千葉昂教授、廣江哲幸教授、外本和幸助教授には、大変貴重なご討論、ご助言を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。また、崇城大学工学部機械工学科の藤田昌大教授には、本研究の遂行に際し有益なご教示と温かいご指導を賜りました。ここに深謝いたします。

本研究の大きな推進力になった数値解析法の確立のために、九州大学工学研究院地球資源システム工学部門の久保田士郎助手およびつくば中央第五事業所物質プロセス研究部門の劉志躍氏には、適切なお助言およびご指導を賜りました。爆発成形実験においては、熊本大学衝撃極限環境研究センターの秋丸進助手および熊本大学工学部知能生産システム工学科の長野司郎技官のご指導、ご協力を賜りました。ここに心から感謝の意を表します。

鹿児島工業高等専門学校機械工学科の持原稔教授、崇城大学工学部機械工学科の吉良章夫講師および熊本技術短期大学生産技術科の田中誠一郎講師には、研究を遂行するにあたり、折に触れご激励を頂きました。さらに、当時熊本大学大学院生の松村亮氏、同大学学部生の林原泰子氏、同大学研究生の村本聡氏および八代工業高等専門学校専攻科生の濱伸幸氏には実験準備および実施においてご協力を頂きました。その他熊本大学衝撃極限環境研究センター衝撃プロセス研究室の諸氏には多大なご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

最後に本研究の遂行にあたり温かいご支援を賜りました八代工業高等専門学校の佐藤泰生校長をはじめ同校機械電気工学科の諸先生方、並びにその他職員の皆様に深く感謝の意を表します。