

# Development of Energy Absorbing Light-Weight Honeycomb Cell Structure by Crushing and Fracture

|       |  |
|-------|--|
| メタデータ | 言語: jpn<br>出版者:<br>公開日: 2017-10-05<br>キーワード (Ja):<br>キーワード (En):<br>作成者: Yamazaki, Koetsu<br>メールアドレス:<br>所属: |
| URL   | <a href="https://doi.org/10.24517/00034768">https://doi.org/10.24517/00034768</a>                            |

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



---

# 破壊を伴う衝撃吸収軽量セル構造材の開発

---

(研究課題番号 14350053)

平成14年度～平成16年度 科学研究費補助金

〔基盤研究 (B)(2)〕 研究成果報告書

平成17年3月

研究代表者 山崎光悦

(金沢大学大学院自然科学研究科 教授)

金沢大学附属図書館



0500-04104-0

---

# 破壊を伴う衝撃吸収軽量セル構造材の開発

---

(研究課題番号 14350053)

平成14年度～平成16年度科学研究費補助金 (基盤研究 (B) (2))

研究成果報告書

平成17年3月

研究代表者 山崎光悦

(金沢大学大学院自然科学研究科 教授)

## 研究成果 目次

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| はしがき .....                  | 1  |
| 研究成果 .....                  | 3  |
| 1. 研究成果の概要 .....            | 3  |
| 2. 延性材料の貫通破壊に関する検討 .....    | 5  |
| 2. 1 ハニカムの形状                |    |
| 2. 2 ハニカムの特性                |    |
| 2. 3 ハニカムの特徴                |    |
| 2. 4 密度と機械的性能               |    |
| 2. 5 ハニカムの圧潰                |    |
| 3. 延性材料の貫通破壊に関する検討 .....    | 14 |
| 3. 1 貫通実験装置と実験方法            |    |
| 3. 2 試験片データ                 |    |
| 3. 3 貫通実験結果と考察              |    |
| 4. アルミニウム板貫通解析 .....        | 26 |
| 4. 1 解析手法                   |    |
| 4. 2 解析モデル                  |    |
| 4. 3 き裂進展解析                 |    |
| 4. 4 解析結果と考察                |    |
| 5. 膜破壊を伴うハニカム構造体の圧潰現象 ..... | 45 |
| 5. 1 衝撃圧潰試験装置と圧潰試験法         |    |
| 5. 2 試験片データ                 |    |
| 5. 3 衝撃試験結果と考察              |    |
| 6. ハニカム構造体の圧潰シミュレーション ..... | 60 |
| 6. 1 解析手法                   |    |
| 6. 2 解析モデル                  |    |
| 6. 3 解析結果と考察                |    |
| 6. 4 厚肉膜モデル                 |    |
| 7. 結論と今後の展望 .....           | 77 |

## はしがき

現代社会において、輸送機器は人間の生活に多くの場面で関わりがあり、経済活動や社会活動などに大きな影響を与えている。その中でも自動車は世界中でその普及率が高い反面、環境などに与える影響も大きいので、人間との関わりにおいて多くの問題を抱えている。また、人間を搭乗させて移動する輸送機器としての自動車は、何より安全性が格段に高く、信頼性、安定性が確保される必要がある。自動車の普及率からも、特に交通事故は最も人間が被害を受ける可能性の高い災害の一つである。事故を未然に防止する手段として最近の車両には走行安定性を高めるためのトランクシヨン・コントロール、危険回避のためのABS(=antilock break system)等に代表されるようなコンピューター制御の安全装置が装備されているものもある。また衝突事故時の搭乗者保護装置としてシートベルト、さらにその補助装置であるSRS(=Supplemental Restraint System)エアバックも効果的である。しかし車体損傷が搭乗者の生存空間に及ぶような状況にあつては、それらの補助安全装置も十分な役割を果たすことは期待しにくい。衝突によって発生する車体の運動エネルギーを、エンジン部分やフロントサイドメンバ部分等で、順次吸収・分散することができれば、車内空間の確保や乗員保護に繋がる。そこで車体構造の衝撃圧潰現象の解析や衝撃吸収構造の開発・研究は衝突安全ボディ等の設計において重要な課題である。

一方、最近のコンピュータ機器や携帯電話などの移動体通信でも、それらの機器を持ち歩くがゆえに落下による破損や破壊が問題となっており、衝撃を吸収して機器への衝撃力の伝播や破損・破壊を回避できるような筐体の設計が強く望まれている。

衝撃吸収構造の中でも特に、蜂の巣にヒントを得て名づけられた、本研究で対象とする「ハニカム」(=honeycomb)構造は軽量かつ高剛性、高強度の構造材料であるため、上述の衝撃吸収材料、構造体として有望視されている。ハニカム構造材料はその軽量性からジャンボジェット機をはじめとする航空機産業での使用が著しいが、他の産業(自動車、鉄道車両、建材、家具等)へも広がりを見せている。最近ではその衝撃エネルギー吸収能力を生かした緩衝材料としての利用も検討されてきている。ハニカム構造に関する過去の研究としては、衝撃吸収材として使用する際、条件に最も適したハニカム材料を選択できるように各種パラメータの組み合わせと、エネルギー吸収能力の関係導き出す研究や、各種パラメータを変えることによって、さらにエネルギー吸収能の高いハニカム構造材料を開発するための研究などがなされてきた。しかし、さらにエネルギー吸収量を増大させるためには、セルサイズを小さくし、板厚を厚くする必要があり、このとき重量や体積、圧潰荷重も増加することになる。自動車車体構造のように、通常は構造体として機能し、衝突時には衝撃吸収構造体として機能するためには、軽量かつコンパクトであることが求められる。また、最近では燃費や運動性能向上のために、軽量化は無視できない重要な因子である。

そこで本研究では、塑性圧潰と同時に薄板の膜破壊を誘発させる構造体の開発を目的として、膜破壊を伴うハニカム構造体をデザインし、動的圧潰試験装置を用いてその衝撃吸収エネルギーを実験的に求め、圧潰挙動の観察を通してその衝撃吸収効果を確認する。さらに動的有限要素法による提案する衝撃吸収ハニカム構造体モデルの数値シミュレーションを行い、その効果と有効性を確認して、シミュレーションによりハニカムセル構造体の衝撃吸収効果推定法を確立する。さらには、ハニカム構造に限定せず、より軽量でエネルギー吸収効率の高いセル構造体の開発も含めて本

研究の目的とした。

具体的には、ある一定高さのハニカムセル構造体と薄板（アルミ箔）を交互に重ねることで、セル構造体が圧潰（圧縮座屈崩壊）と同時に膜破壊を伴うセル構造体の開発を目指した。以下ではこの3年間に得られた成果を示す。

平成17年3月

研究代表者 山崎 光悦

## 研究成果

### 第1章 研究成果の概要

#### (1) 延性材料の貫通破壊

アルミの薄板（板厚 0.05～0.3mm）に3種類の円錐形貫通体を押し込む実験を実施し、初期穴ができるのに必要なエネルギー、貫通エネルギーなどを実験的に明らかにした。また、衝撃応答解析ソフト LS-DYNA を用いて貫通シミュレーションを実施し、相当塑性ひずみが限界値に達する条件によって、き裂発生及び貫通の予測がある程度可能であることを明らかにした。

#### (2) ハニカム構造体の圧潰現象

ハニカム構造体の衝撃圧潰試験を実施して、具体的な衝撃エネルギー吸収効果を確認すると共に、ハニカムの圧潰過程を高速ビデオなどで観察してその挙動を明らかにした。

#### (3) ハニカム構造体の圧潰シミュレーション

ハニカム構造体の衝撃圧潰シミュレーションを LS-DYNA を用いて実施し、そのモデル化、圧潰吸収エネルギー値の予測がある程度できることを確認した。

#### (4) 膜破壊を伴うハニカム構造体の圧潰・破壊現象

高さの低いハニカム構造体と薄膜を交互に重ねた膜付きハニカム構造体について膜厚やハニカム高さ、重ねる段数を種々変化させた、衝撃圧潰と膜破壊を同時に発生する圧潰試験を実施し、膜破壊によるエネルギー吸収効果を明らかにした。ただし、ハニカムのセルサイズとセル板厚、薄膜の膜厚との間にある一定条件が成立する場合にのみ、実単位体積当りのエネルギー吸収率の向上がみられることを見出した。

#### (5) 膜破壊を伴うハニカム構造体の圧潰シミュレーション

膜破壊を伴うハニカム構造体の圧潰現象を、LS-DYNA を用いて実施する方法を具体的に確立した。その方法を用いて、ハニカムのセルサイズとセル板厚、セル高さとの関係性を詳細に検討し、単位体積当りの衝撃エネルギー吸収効果をより高くする条件を具体的に見出した。

## 研究組織

|       |                            |
|-------|----------------------------|
| 研究代表者 | 山崎 光悦 (金沢大学大学院自然科学研究科・教授)  |
| 研究分担者 | 尾田 十八 (金沢大学大学院自然科学研究科・教授)  |
| 研究分担者 | 坂本 二郎 (金沢大学大学院自然科学研究科・助教授) |
| 研究分担者 | 北山 哲士 (金沢大学大学院自然科学研究科・助手)  |

## 交付決定額 (配分額)

単位 千円

|          | 直接経費       | 間接経費 | 合計         |
|----------|------------|------|------------|
| 平成 14 年度 | 6, 9 0 0   | 0    | 6, 9 0 0   |
| 平成 15 年度 | 4, 1 0 0   | 0    | 4, 1 0 0   |
| 平成 16 年度 | 3, 9 0 0   | 0    | 3, 9 0 0   |
| 総 計      | 1 4, 9 0 0 | 0    | 1 4, 9 0 0 |

## 研究発表

### (1) 学会誌など

- 1) 山崎光悦・古栃 真・深作亮太, 破壊を伴うハニカムセル構造体の衝撃エネルギー吸収特性, 日本機械学会論文集, A編 (投稿中).

### (2) 口頭発表

- 1) 山崎光悦・古栃 真・柏野友紀, 延性材料の衝撃破壊エネルギー吸収特性に関する研究, 日本機械学会 2003 年度年次大会講演論文集, VI, pp.7-8, 2003-8.
- 2) 山崎光悦・北山哲士・加藤智一, ハニカムセル構造体の衝撃エネルギー吸収特性, 日本機械学会材料力学部門講演会論文集, pp.1079-1980, 2003-9
- 3) 山崎光悦・古栃 真・深作亮太, ハニカム構造体の衝撃吸収能向上に関する研究, 日本機械学会北陸信越支部第 41 期総会講演会論文集, pp.273-274, 2004-3.
- 4) 山崎光悦・深作亮太・北山哲士・古栃 真, 破壊を伴う衝撃吸収軽量セル構造材の設計・開発, 日本機械学会第 17 回計算力学講演会講演論文集, pp.103-104, 2004-11.

### (3) 出版物

なし

## 第2章 ハニカム構造の形状と特徴

ハニカム構造とは、主に六角柱もしくは六角形の形状をコア材として、それらが互いに隙間なく組合さっている集合体であり、上下に剛性の高い板を貼り合わせたサンドウィッチパネルとすることにより高剛性・高強度、そして軽量性を得られる理想的な構造体である。この構造体は、衝撃負荷を受けた場合に衝撃エネルギーを吸収する緩衝材としても着目され、自動車などの機械構造物の外側部材断面構造などに用いることにより、内部に及ぼす衝突の影響を軽減させることができる。

他にもいろいろな工業製品を調べると、六角形でなくても多角形（例：八角形）などで、貫通孔を有し、その空隙率（＝孔隙率，多孔度）がある程度以上確保できるものをハニカムと呼んでいる。ここで、空隙率とは、多孔質の物質（岩石・土・スポンジなど）の全容積に対する、その中に含まれる隙間容積の割合のことをいう。

ハニカムの歴史は古く、約2000年前に中国でペーパーハニカムがつくられたと言われている。構造材料として採用されたのは約60年前であり、アメリカの軍用機に使用したという歴史をもつ。

本研究ではハニカムの動的圧潰特性について取り扱ったが、静的、準静的な特性についてはこれまでも様々な研究が行われている。ハニカム構造についての形状や特徴、圧潰理論を以下に整理して述べる。

### 2.1 ハニカムの形状

ハニカムの形状と製作工程について簡単に示すと、ハニカムは主に六角形セルが規則的に配列された蜂の巣形状で、図2.1に示すようなサンドウィッチのようにパネルにより挟まれた構造で利用されることが多い。サンドウィッチパネルは上下のパネルが曲げ荷重を受け持ち、ハニカムコアは剛性を引き出すための中間材の役割を果たす。

六角形ハニカムの主な製作方法としては、図2.2に示すように箔、シート材料に接着剤を交互に帯状塗布し、重積、熱圧してブロックを作り、これらを必要な高さに切断した後、重積した方向に展開することで六角形セルが形成される。また図2.3に示すように、予め用意した波形ローラなどで波形のシートを作製し、重積、接着して六角形セルを形成する製作方法もある。

図2.4に本研究で用いたアルミハニカムの各種基本パラメータを示す。同図に示すように展開方向 $W$ は接着剤による接合で材質は不連続となっている。一方、 $L$ 方向はシート材料からの曲げであり、材質が連続であるため $W$ 方向と $L$ 方向とは異なる特性をもつ。

### 2.2 ハニカムの特性

ハニカムの特性は材料定数による影響が大きい。しかしセルサイズ、箔厚、密度なども機械的強度に大きく影響し、材料が同一の場合は密度によりその特性が決まる。

表2.1にアルミハニカムの材質の違いによる特徴を示す。A5052はアルミハニカムで最も一般的である。最近では、特殊な耐蝕処理をしたものが多く使われ出している。A5056、A2024はA5052

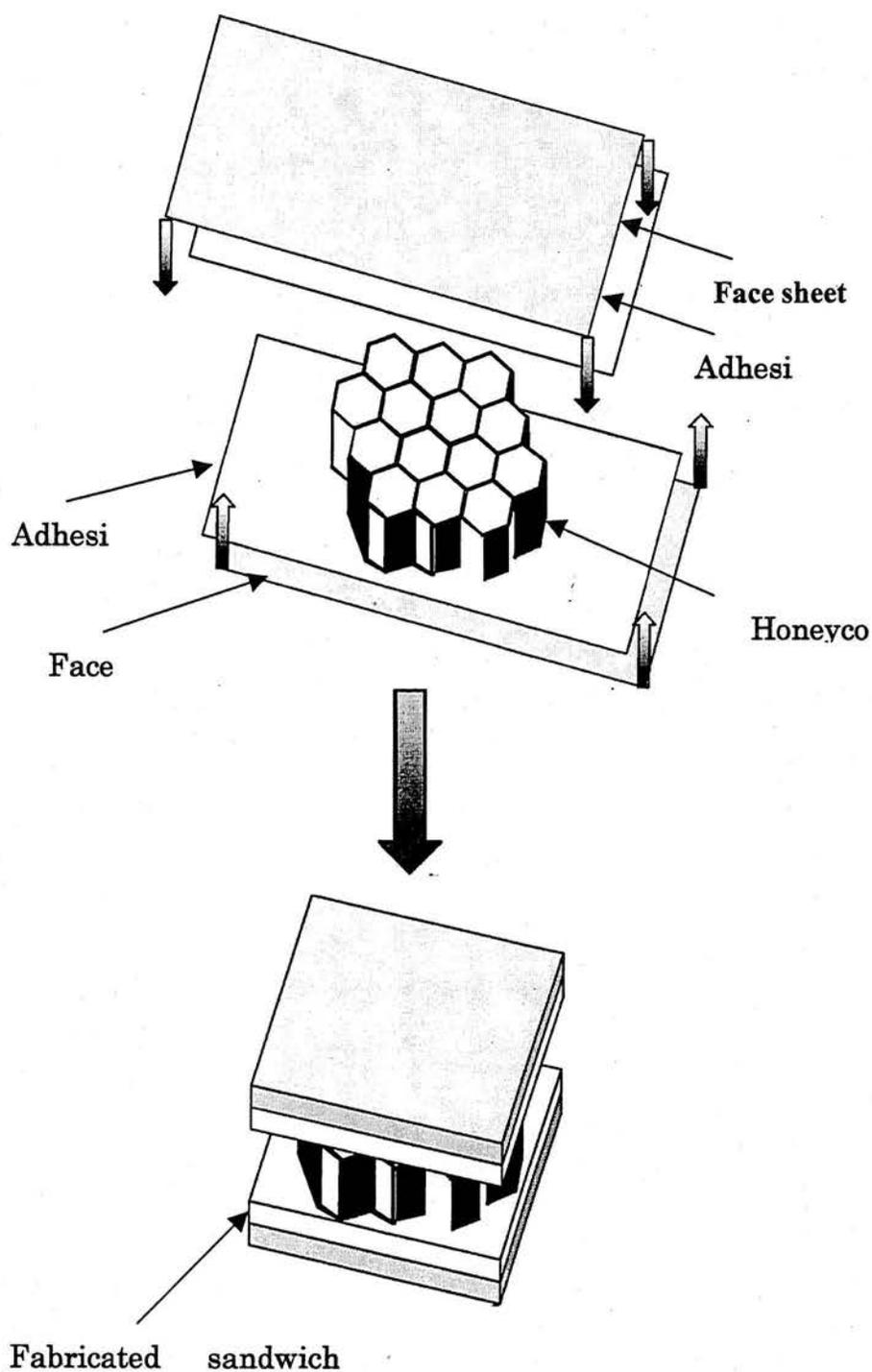


図 2.1 ハニカムサンドウィッチパネル

よりも若干機械的強度が優れているが、高価であるために一般向きではなく、主に航空機に用いられる。他にもアラミド (Aramid) ハニカムや、FRP ハニカム、クラフト紙による紙ハニカム、ケブラー炭素繊維等の複合材料によるハニカム、ステンレス、ニッケルなどによるブレージングハニカム、セラミックスハニカム、インコネルなどの耐熱合金ハニカムがあるが、非常に高価なものやほとんど試作でしか作られていない特殊用途向けのものもある。

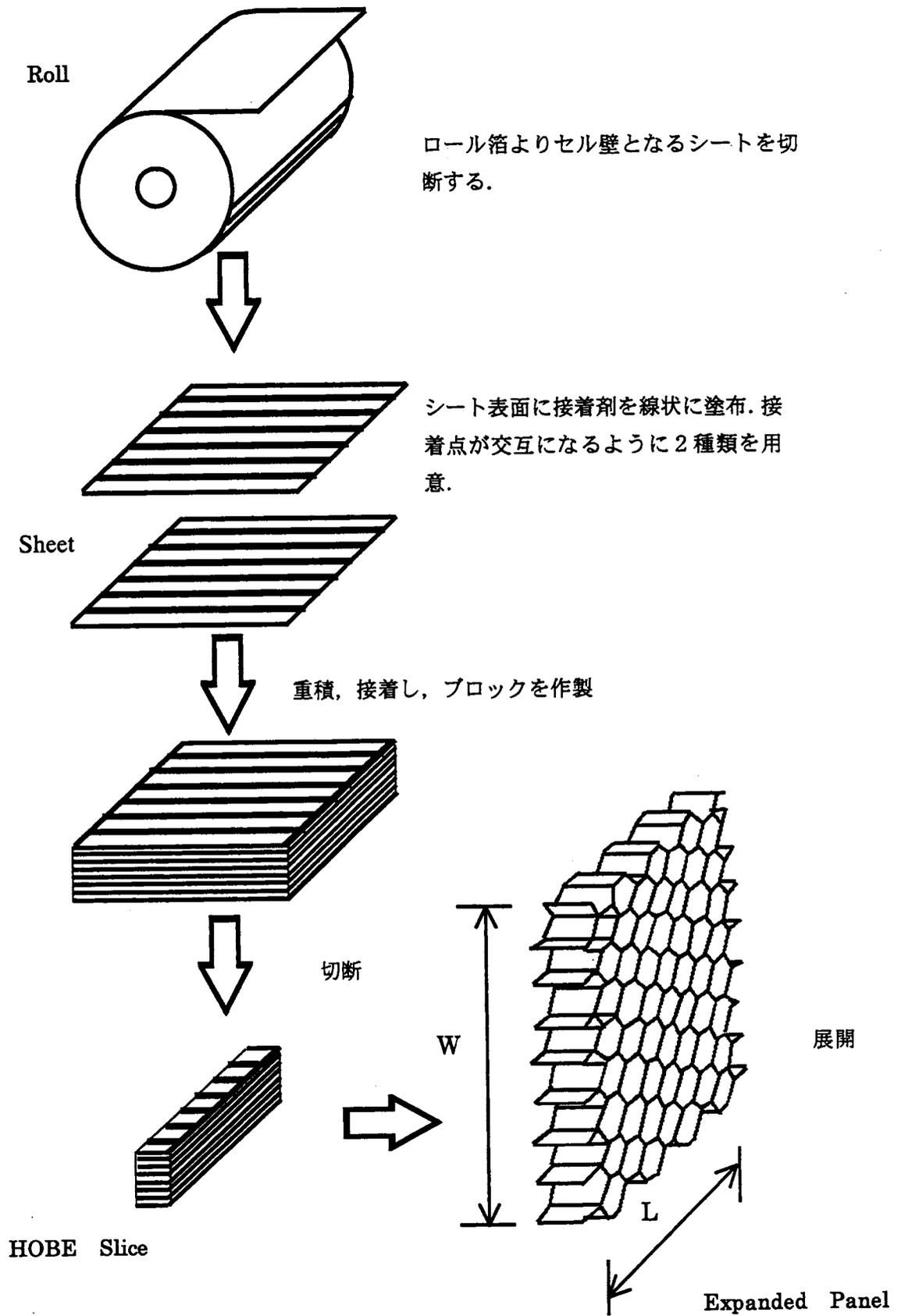
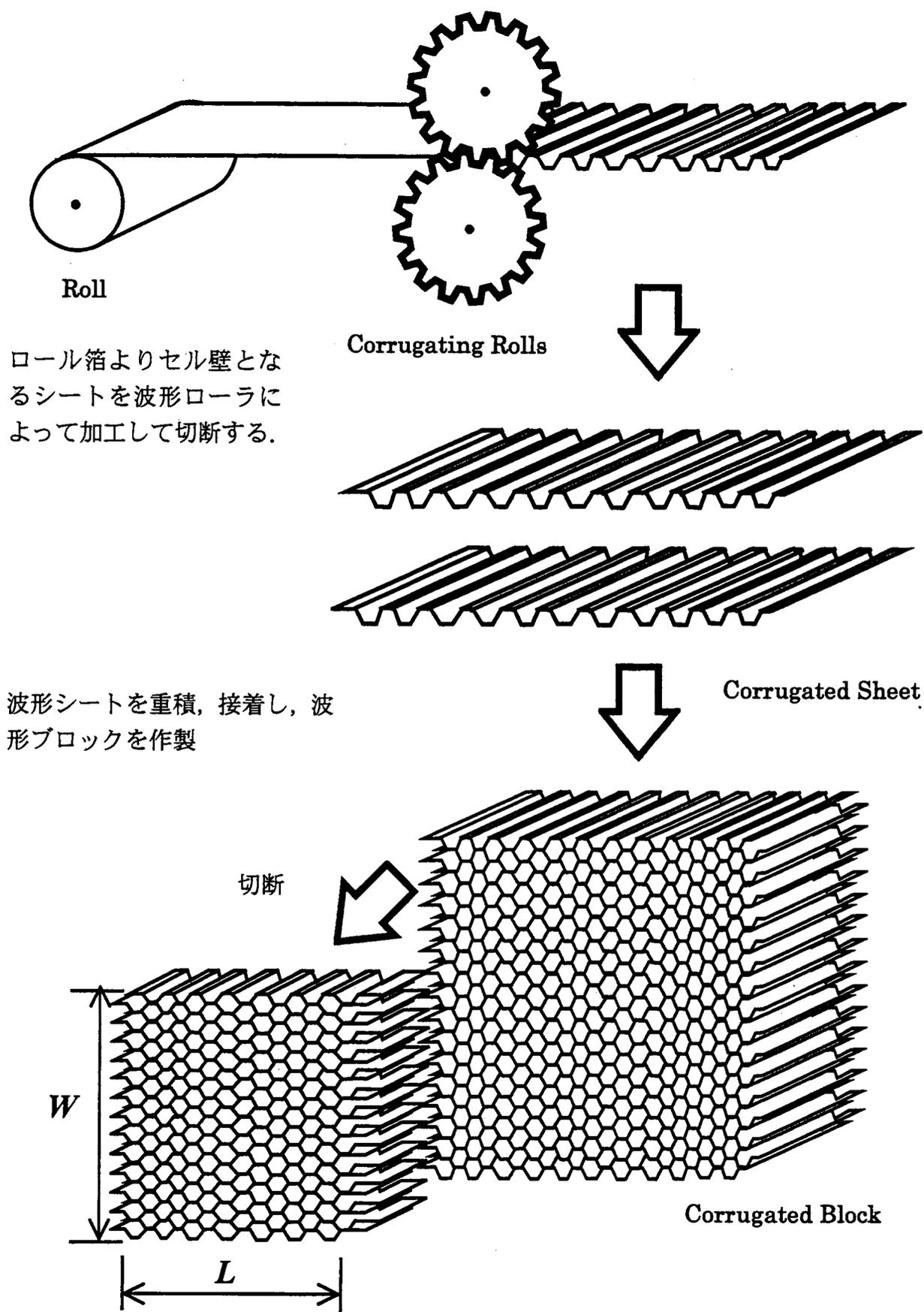


図 2.2 ハニカム製作工程 (1)



ロール箔よりセル壁となるシートを波形ローラによって加工して切断する。

波形シートを重積，接着し，波形ブロックを作製

図 2.3 ハニカム製作工程

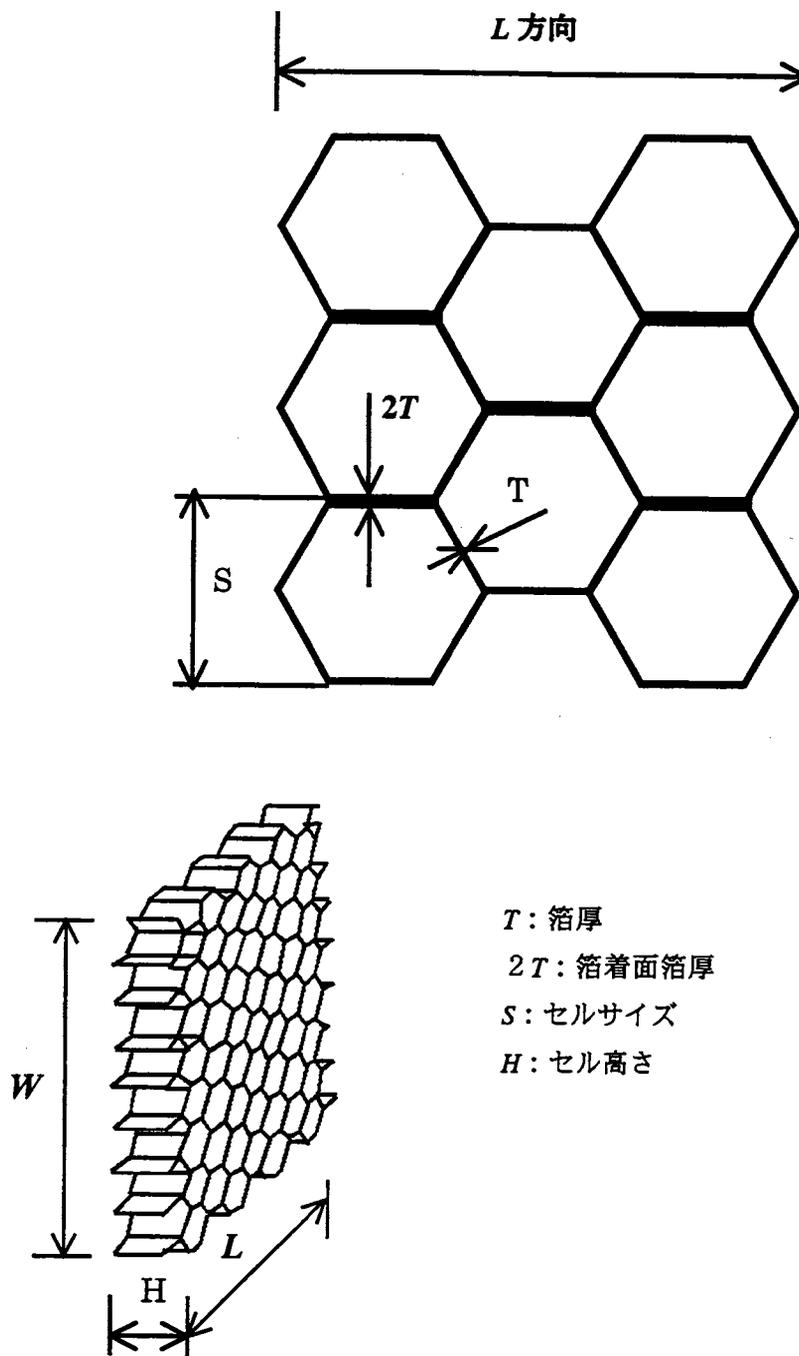


図 2.4 ハニカムパラメータの代表

表 2.1 各種アルミハニカムの特徴 (E: 優良 G: 良好 F: 比較的良好)

|            | A3003 | A5052 | A5056 | A2024 |
|------------|-------|-------|-------|-------|
| 最高使用温度(°C) | 177   | 177   | 177   | 216   |
| 耐炎性        | E     | E     | E     | E     |
| 耐衝撃性       | G     | G     | G     | G     |
| 比強度        | F     | G     | E     | E     |
| 耐湿性        | G     | G     | G     | F     |
| 耐疲労性       | G     | G     | G     | G     |
| コスト        | 安い    | 標準    | やや高い  | 高い    |

### 2.3 ハニカムの特徴

ハニカムの最大の特徴は、サンドウィッチ構造のコア材として用いたときに、軽量で高剛性が得られる点である。その他の特徴を以下に示す。

#### 1) 整流効果

ろ過（浄化）材などとして用いられる。単位体積当たりの表面積が大きいこともその理由の一つだが、通過流体の整流効果もある。セル軸は乱流流れを整流する効果がある。空気や水、油の流体中に設置し利用する。

#### 2) 衝撃吸収効果

ハニカム構造は、隣り合う六角形により安定した剛性、強度が得られるため、補強部材として用いられる。セル軸方向圧縮では圧縮強度に当たるピークを過ぎると、潰れて底付きするまでほぼ一定の荷重を保ちながら逐次座屈していく特性がある。

#### 3) 光の拡散

アルミハニカムは表面の光沢を利用し、光の拡散を行うことができる。

#### 4) 電磁遮へい性

導電性を持つ材料で作られたハニカムは電磁遮へい性がある。鉄（フェライト）が優れているが、今のところその防錆対策に十分なものがないことから、アルミハニカムが用いられている。

#### 5) 断熱性

ハニカム内の多数のセルにより熱伝達効率が低く断熱性がある。発泡材に比べて断熱性は劣るが、必要な場合はハニカムセル中に発泡材を充填することにより優れた特性が得られる。

#### 6) その他

吸音効果、電波透過性など。

### 2.4 密度と機械的性能

図 2.5 にアルミハニカムの密度と圧潰強度の関係を一例として示す。ハニカムの密度はセルサイズと箔厚の組み合わせにより決定され、機械的性能はほぼ密度に比例する。せん断弾性係数は素材によって決まる。例えば、FRP、アラミドハニカムなどはせん断強度がアルミハニカムと大差がないにもかかわらず、せん断弾性係数は約 1/4 と低い値となっている。

また圧潰強さはアルミハニカムで顕著に高いが、その他のハニカムでは変動が大きい。クラフト紙をつかったペーパーハニカムではパルプ繊維が塑性変型しにくく、紙質も一定でないため低く、また FRP ハニカムでは樹脂がもろく、いわゆる折りたたみ現象が起きず、くだけてしまうため低い圧潰強度を示す。アラミドハニカムではクラフト紙より繊維が大きく、折りたたまれる現象が起き易いが、スプリングバックが激しく、圧潰強度の変動が大きい。

以上のことから、低強度のものではクラフト紙を用い、高い圧潰強さ、及びばらつきのない強度を必要とする緩衝材ではアルミハニカムを使用するのが望ましい。

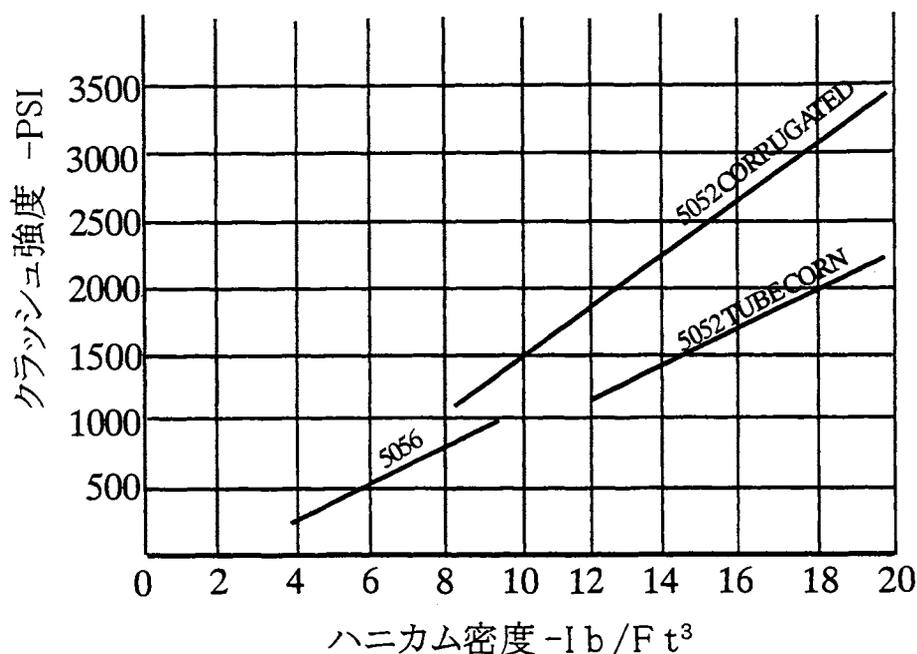


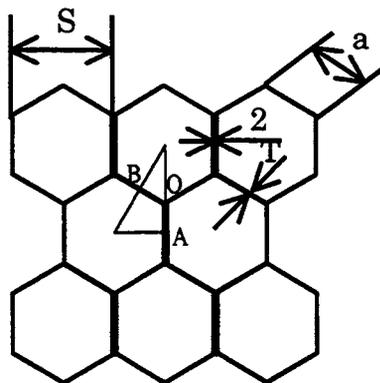
図 2.5 ハニカムクラッシュ強度

## 2.5 ハニカムの圧潰

静的または、動的進行性座屈をする薄肉断面部材の理論的解析は円筒や角筒における一般的な手順に従うが、しかしながら衝突過程や解析に対する詳細は、実際には、より複雑なものである。図 2.6 のようなハニカム構造の六角形セルの 1/12 モデルの静的進行性座屈現象は、図 2.7 に示した二つの基本座屈モードによって支配されている。またこれらの座屈モードは動的進行性座屈の解析にも用いられる。

このような現象は四つの異なる進行性座屈要素を持っている。これらの要素は図 2.7 のような基本座屈モードの垂直な境界面において、幾何学的適合の必要性から生じる。これに対応する平均軸圧縮力は軸圧縮力がなす外部仕事を、図 2.7 (a) または、図 2.7 (b) のどちらか一方の基本座屈モードによって形成される一つの完全な層、または図 2.7 (a) と図 2.7 (b) における二つの基本座屈モードが隣り合った層を形成することによって、内部に吸収されるエネルギーに等しいとおくことによって求められる。

図 2.6 の 1/12 モデルは六角形セルの接着接合層を考慮しないモデルである。すなわち、接着面は比較的簡単にはく離し、六角形セルの 1/6 モデルが 2 枚に分かれて座屈していると仮定したものである。しかし実際には、接着のはく離がハニカムパネルのどこで起こっているかは、接着接合の仕方などにより微妙に変化するために定かではない。



- $T$ : 箔厚
- $2T$ : 箔着面箔厚
- $S$ : セルサイズ
- $a$ : セル一辺の長さ
- $H$ : セル高さ
- $P$ : 軸圧縮力

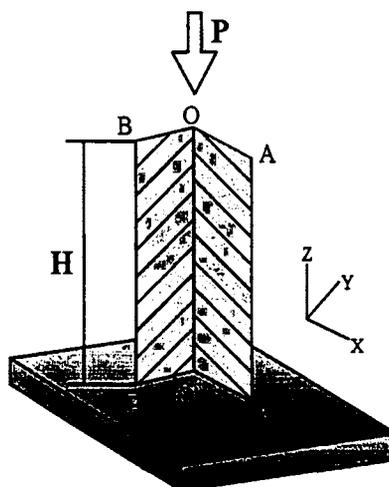


図 2.6 軸圧縮を受ける六角形セルの 1/12 モデル

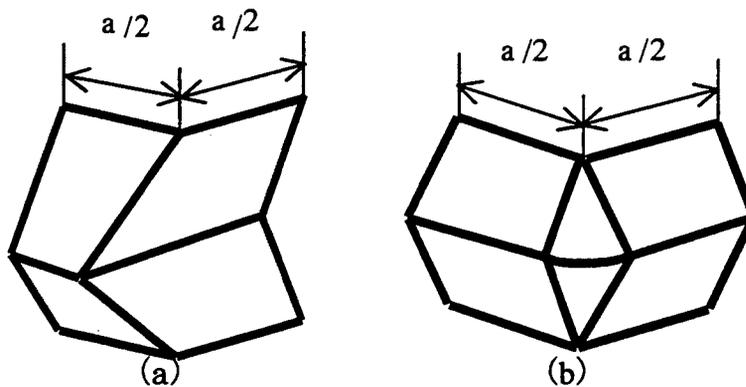


図 2.7 軸圧縮を受ける六角形セル 1/12 モデルの基本座屈モード

図 2.8 に示すように、ハニカム構造は受けた荷重を隣り合う別の 6 個の六角形セルに分散し、さらに連鎖して隣り合う六角形セルに分散して行くことにより、結果的に個々の六角形セルにかかる応力は小さくなり、製品全体で荷重を受けて変形を抑えることができる。

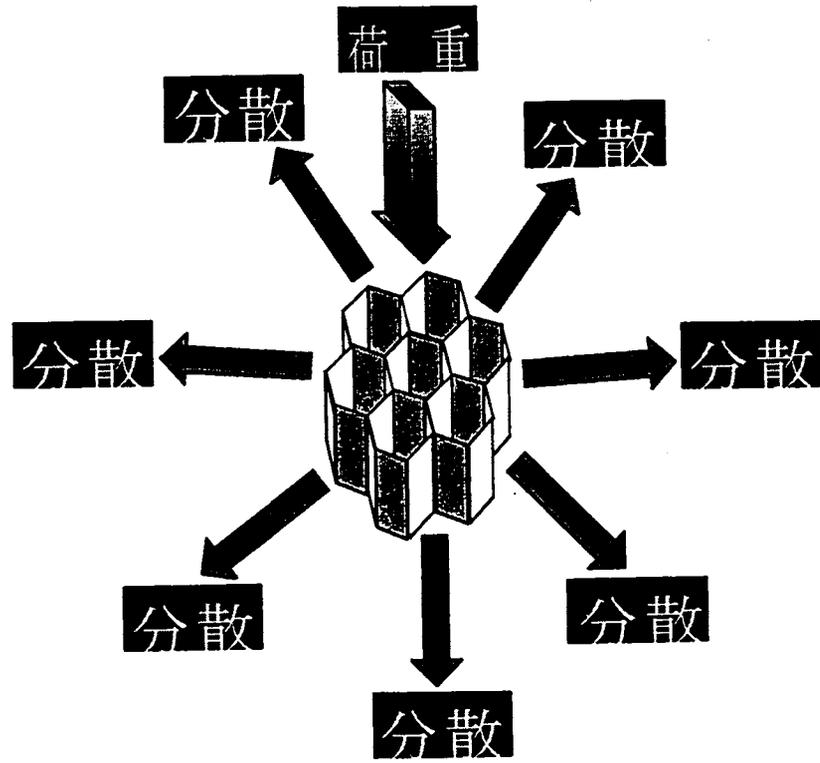


図 2.8 八二カム構造体

### 第3章 延性材料の貫通破壊に関する検討

#### 3.1 貫通実験装置と実験方法

実験モデルを図 3.1 に示す。引張圧縮機を用いて円形固定台にアルミニウム板を固定し、先端が円錐形状の貫通体を介し静的な荷重をかけて貫通させ、このときの変位－荷重曲線を求める。衝撃吸収構造材の開発のためには貫通体に大きな初速を与えて吸収エネルギーを求める必要があるが、本研究ではその基礎的なデータ計測の目的で準静的に実験を行うため、貫通体の速度は 10mm/min とした。以下に実験装置の詳細を述べる。

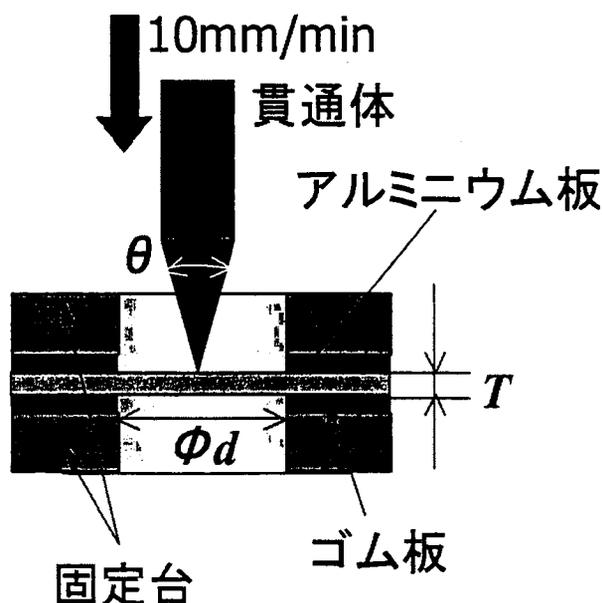


図 3.1 実験モデル

#### (1) 引張圧縮試験機

実験に用いた引張圧縮試験機((株)島津製作所 AGS-100D)を図 3.2 に示す。負荷の方法は、AC サーボモータによる高精度低速ひずみ方法で、荷重の検出にはロードセルを用いる。引張と圧縮の切り替えが可能で、付属のアナログ記録計(XT-P 形)で荷重－変位曲線または荷重－時間曲線を求めることができる。本研究では荷重－変位曲線を求めるために、圧縮荷重を加えて貫通体を貫通させた。

#### (2) ロードセル

貫通に必要な荷重に応じて 2 種類のロードセル((株)共和電業 LU-20KA, (株)島津製作所 SBL-1kN)を用いた。



図 3.2 引張圧縮試験機(島津製作所 AGS-100D)

(3)貫通体

図 3.3 に示す貫通体には、アルミニウムより十分に剛性のある鋼を用い、先端部には貫通による磨耗などが起こらないように焼入れを施してある。先端角度  $\theta=30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$  の 3 種類を用いた。鋼の基本特性を表 3.1 に示す。

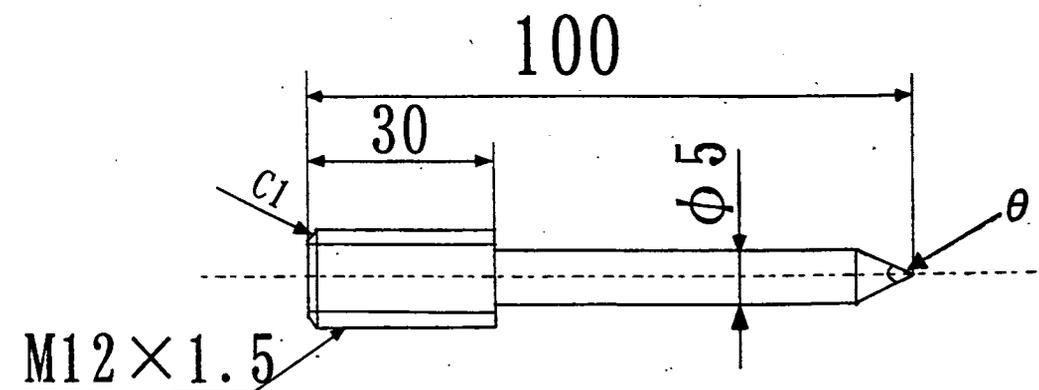


図 3.3 貫通体

表 3.1 鋼の主な機械的性質

|         |                        |
|---------|------------------------|
| 縦弾性係数   | 200 GPa                |
| せん断弾性係数 | 35 GPa                 |
| ポアソン比   | 0.3                    |
| 密度      | 7380 kg/m <sup>3</sup> |
| 比熱      | 540 J/kg·°C            |

## (4) 固定台

固定台を図 3.4 に示す。固定台はアルミニウム板を円形に完全固定できるように、アルミニウム板の上下をゴム板で挟み、8本のボルトで固定する。円形にアルミニウム板を固定する固定台の直径  $\phi 7\text{mm}$ 、 $\phi 15\text{mm}$ 、 $\phi 20\text{mm}$  の3種類を用意した。固定台の直径  $d$  は、目標とするアルミハニカムセルのセルサイズに近いものとし、材料にはジュラルミンを用いた。

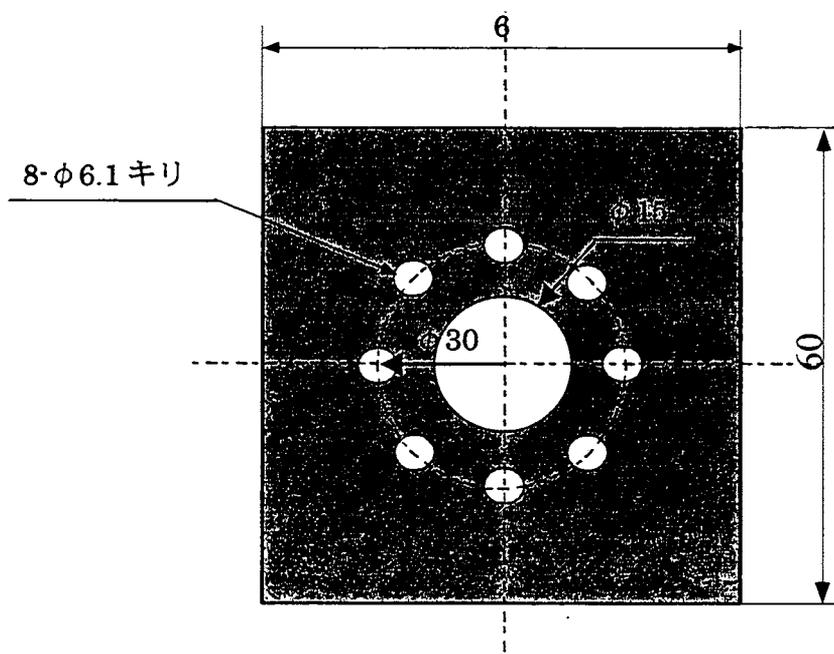


図 3.4 固定台

## 3.2 試験片データ

本実験に用いた試験片は縦 60mm、横 60mm の正方形平板であり、板厚  $T=0.05\text{mm}$ 、 $0.1\text{mm}$ 、 $0.2\text{mm}$ 、 $0.3\text{mm}$  の4種類を準備した。試験片の一例を図 3.5 に示す。また、アルミニウム 3003 材の基本特性を表 3.2 に示す。

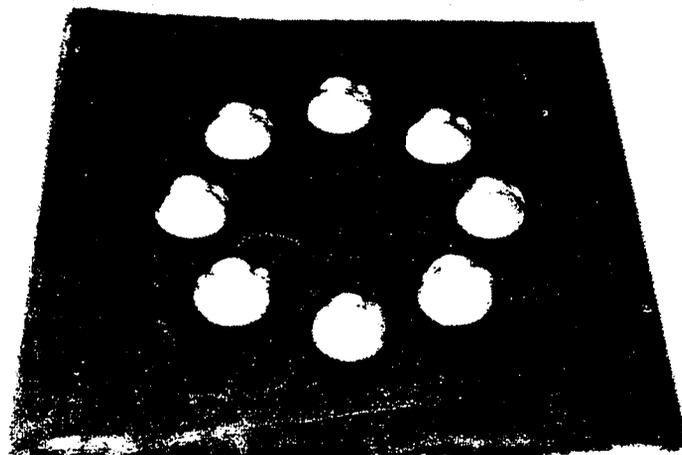
図 3.5 アルミニウム試験片( $T=0.2\text{mm}$ )

表 3.2 アルミニウム 3003 の主な機械的特性値(99%純アルミ)

|         |  |
|---------|--|
| 縦弾性係数   | 69 GPa                                 |
| せん断弾性係数 | 25 GPa                                 |
| ポアソン比   | 0.33                                   |
| 密度      | 2705 kg/m <sup>3</sup>                 |
| 比熱      | 900 J/kg·℃                             |
| 体積膨張係数  | $68.1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ |
| 線膨張係数   | $24 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$   |
| 降伏応力    | 100 MPa                                |
| ひずみ硬化率  | 280 MPa                                |

### 3.3 貫通実験結果と考察

貫通実験で求められた荷重-変位曲線を図 3.6 に示す。最初のき裂が発生するまで(①)をき裂発生部分とし、最初のき裂が発生してから貫通体先端部分が完全に貫通するまで(②)をき裂進展部分として区別した。き裂発生荷重は、実験によりき裂が発生すると推定される変位に至った時の荷重を計測する。また、き裂発生エネルギー、貫通エネルギーは荷重-変位曲線の

面積を算出する。

き裂発生荷重と固定台直径による比較を図 3.7(a), 固定台直径  $\phi=15$  の先端角度による比較を図 3.7(b)に示す. 固定台直径による差は  $\phi 7$ ,  $\theta=90^\circ$  を除けばほとんど見られない. 板厚による比較をすると, 板厚が厚いほど荷重も大きくなるのがわかる. また, 先端角度が大きいほどき裂発生荷重も大きくなっている.

$\theta = 60^\circ$  のときのき裂発生エネルギー, き裂進展エネルギーと固定台直径との関係を図 3.8(a), 図 3.9(a)に示し,  $\phi = 15\text{mm}$  における先端角度との関係を図 3.8(b), 図 3.9(b)にそれぞれ示す. き裂発生荷重と同様に各エネルギーは固定台直径による差はなく, 板厚が厚いほど大きくなるのがわかる. しかし, 先端角度による比較をしてみると, き裂発生エネルギーは先端角度が大きいほど大きくなっているが, き裂進展エネルギーは先端角度が大きいほど小さくなっている. き裂進展エネルギーと先端角度の関係が, き裂発生エネルギーの関係と逆転している理由は, 貫通体先端角度が鋭角になるにつれて先端円錐部分が長くなり摩擦力によるエネルギー消費が大きくなるためであると考えられる.

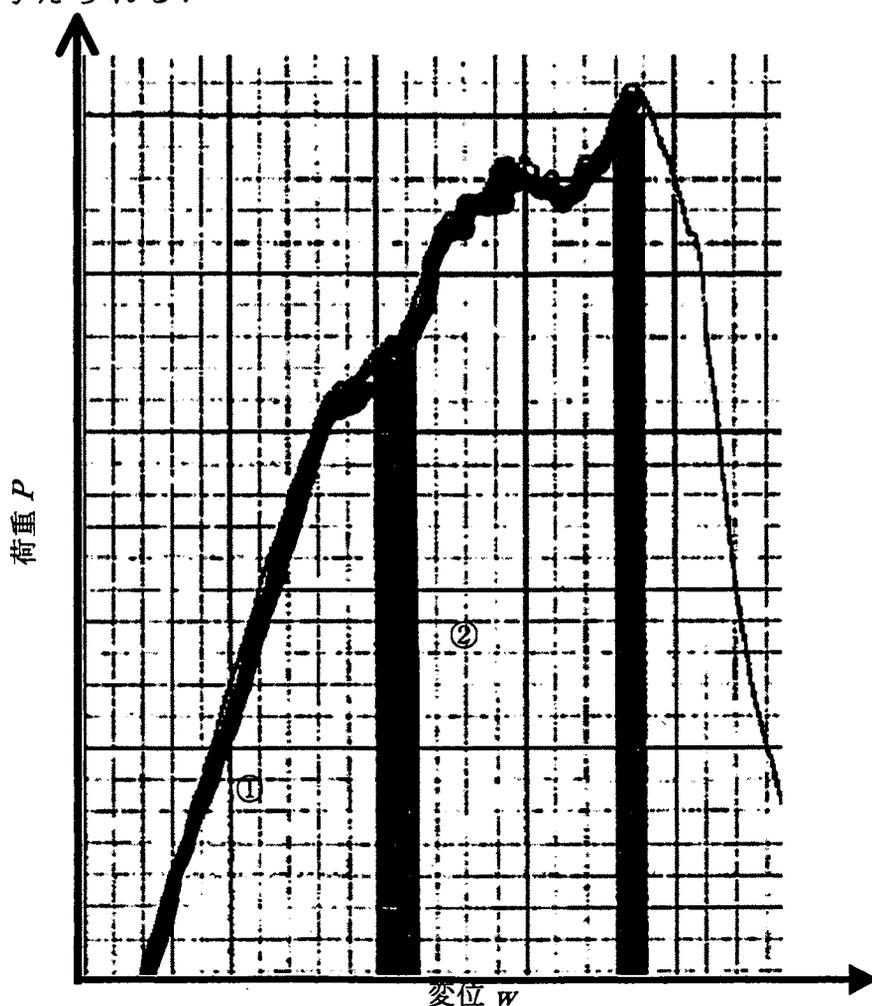


図 3.6 貫通実験から得られた代表的な荷重-変位曲線

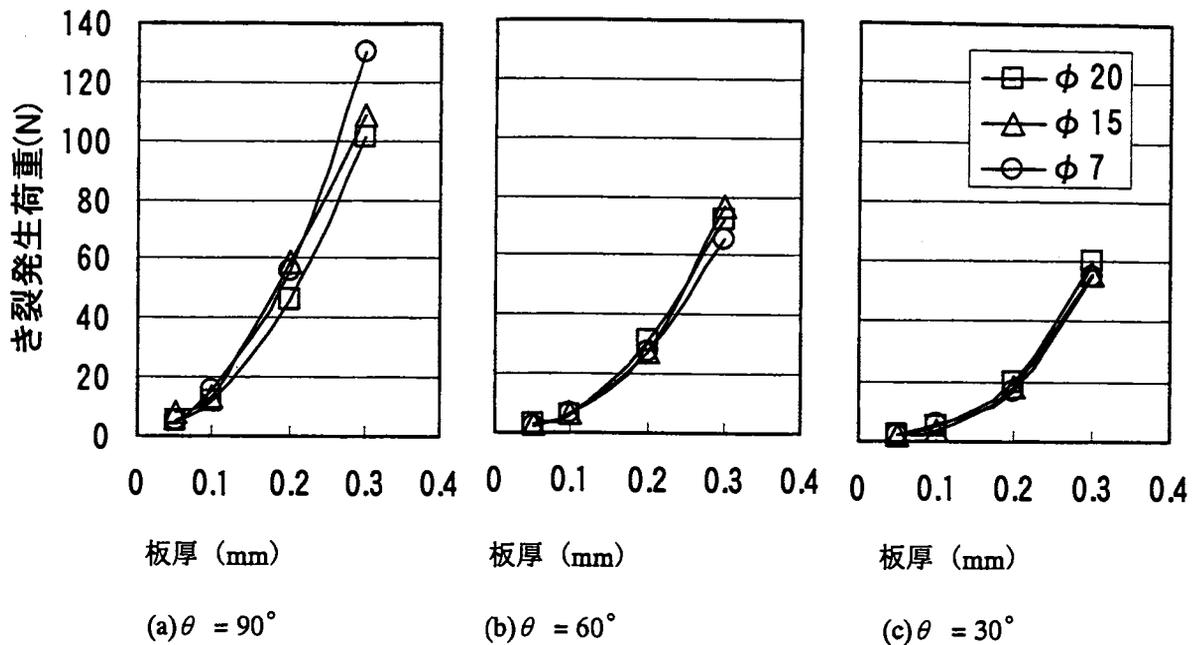


図 3.7(a) き裂発生荷重と固定台直径の関係

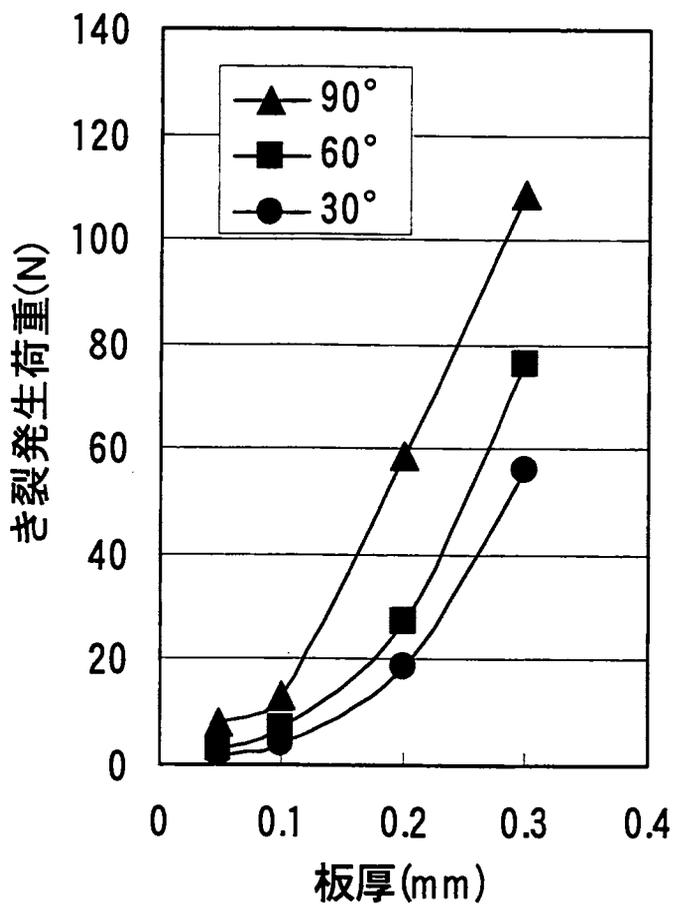


図 3.7(b) き裂発生荷重と先端角度の関係

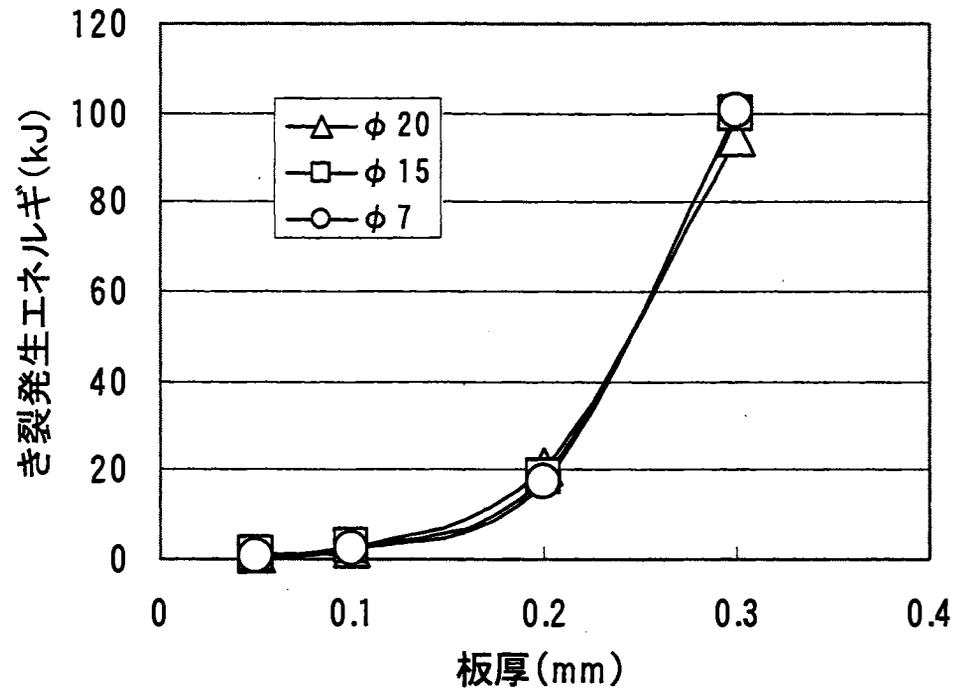


図 3.8(a) き裂発生エネルギーと固定台直径の関係 ( $\theta = 60^\circ$ )

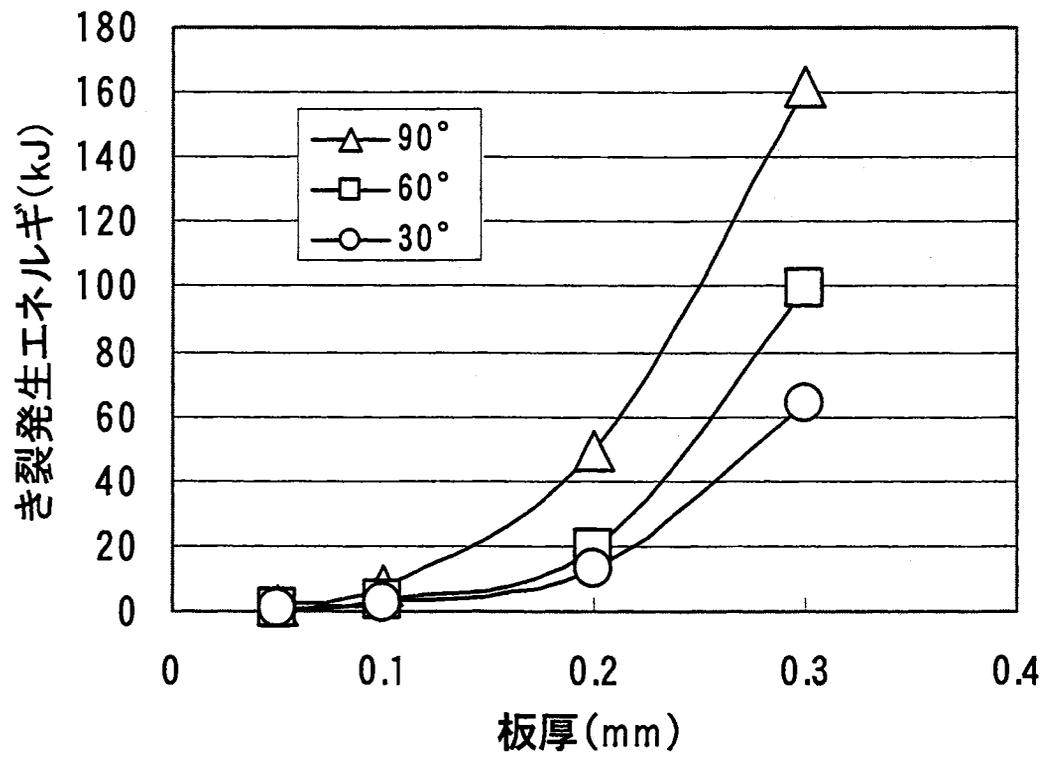


図 3.8(b) き裂発生エネルギーと先端角度の関係 ( $\phi 15\text{mm}$ )

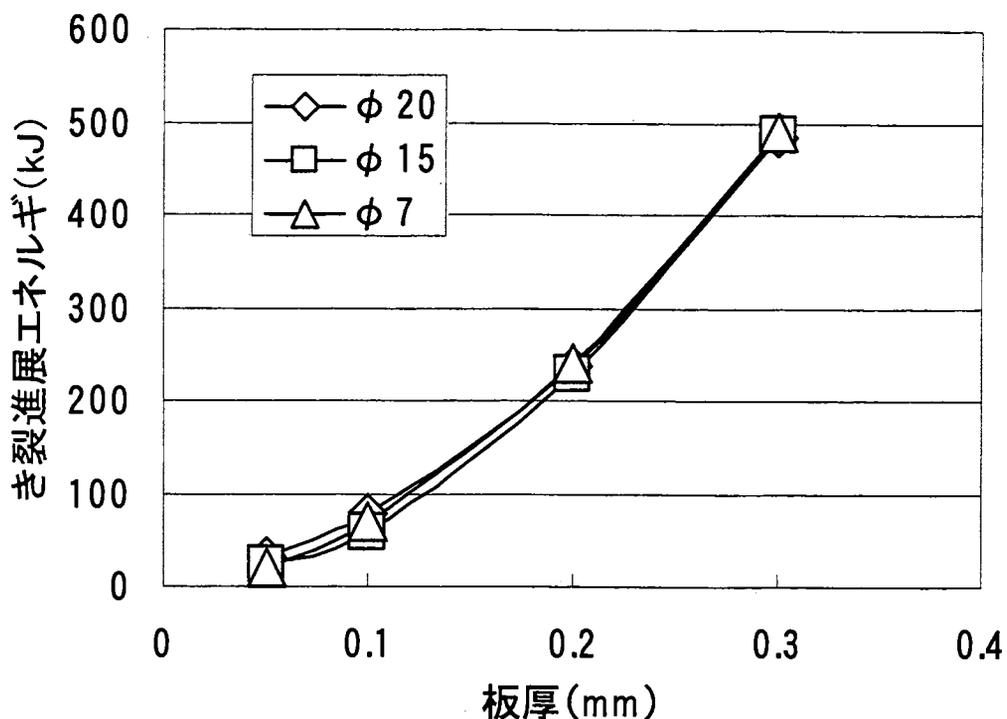


図 3.9(a) き裂進展エネルギーと固定台直径の関係 ( $\theta = 60^\circ$ )

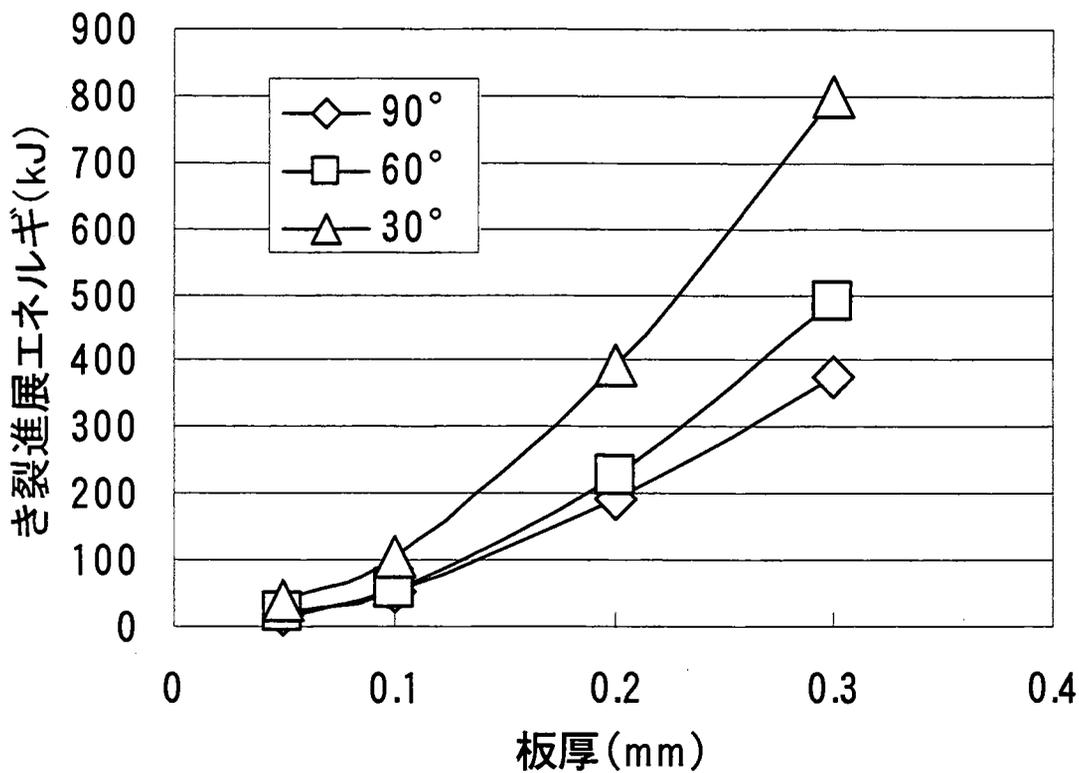


図 3.9(b) き裂進展エネルギーと先端角度の関係 ( $\phi 15\text{mm}$ )

次に、アルミニウム板の貫通挙動を観察した結果を示す。図 3.10 にき裂が発生した時、図 3.11 から図 3.13 に貫通が完全に終了した時のアルミニウム板の貫通穴の様子を示す。貫通挙動は、まず小さなき裂が様々な方

向に無数に発生する。板厚が厚く、先端角度が大きい場合には、その中の3, 4個のき裂が成長し、貫通後の形状は三角形や四角形となる。逆に板厚が薄く、先端角度が小さい場合には、大きく成長するき裂はなく、貫通後は多角形や円形に見えるような形状となる。

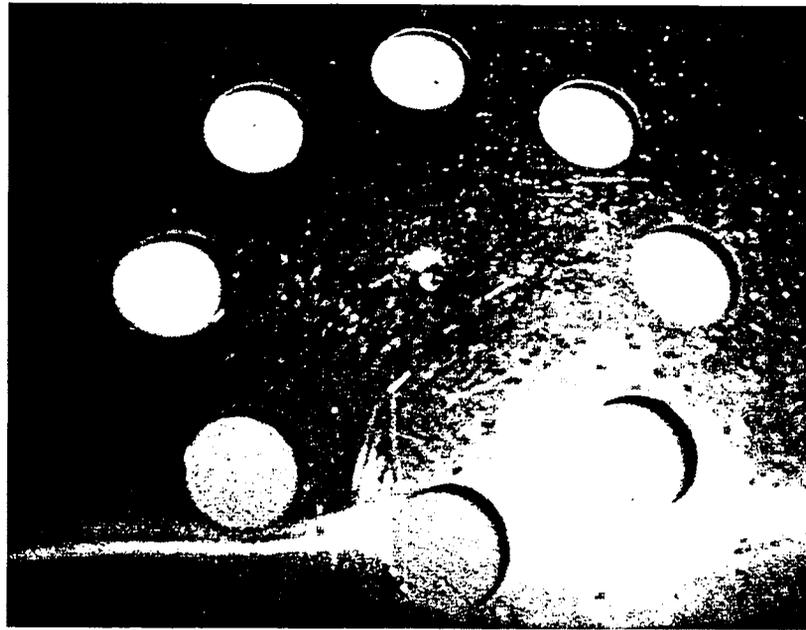


図 3.10 き裂発生時の様子( $\phi = 15\text{mm}$ ,  $\theta = 90^\circ$ ,  $T = 0.2\text{mm}$ )

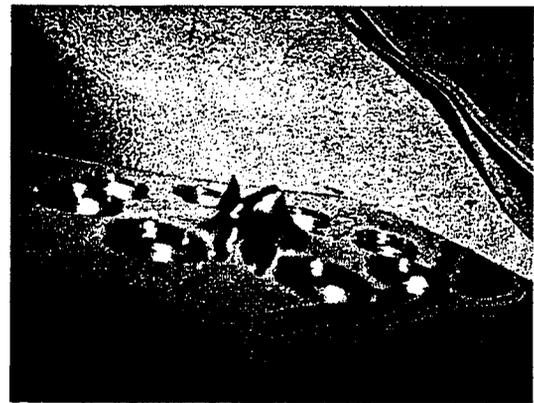


図 3.11 貫通後の様子1 ( $\phi = 15\text{mm}$ ,  $\theta = 90^\circ$ ,  $T = 0.2\text{mm}$ )

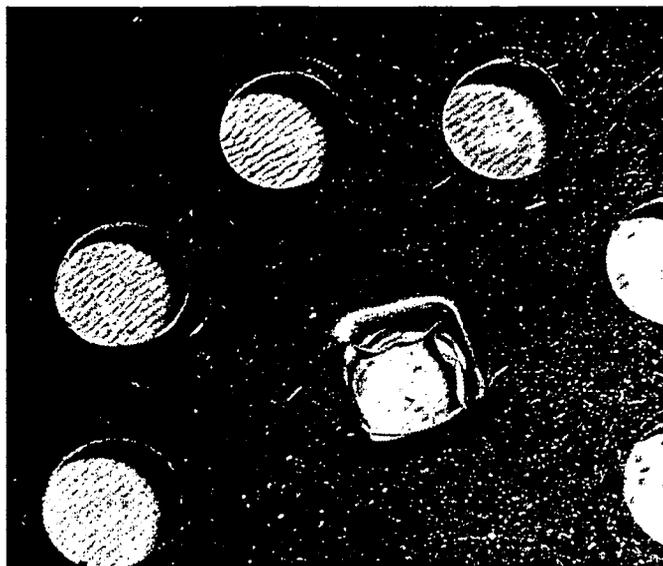


図 3.12 貫通後の様子 2 ( $\phi 15\text{mm}$ ,  $\theta = 60^\circ$ ,  $T = 0.2\text{mm}$ )

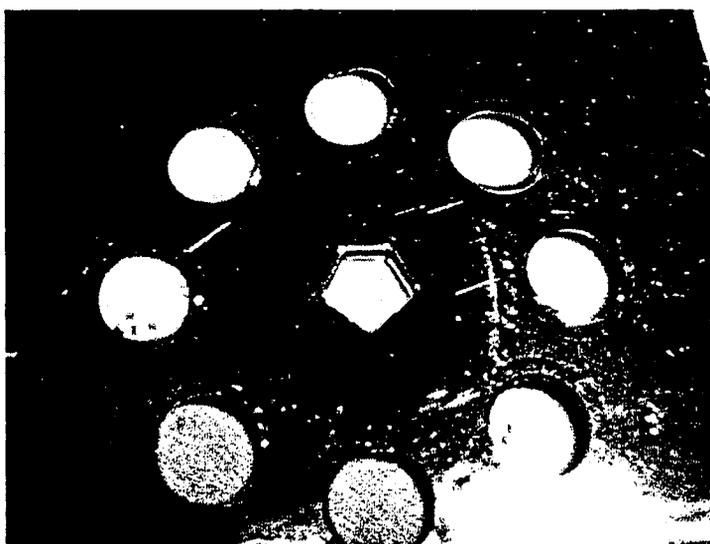


図 3.13 貫通後の様子 3 ( $\phi 7\text{mm}$ ,  $\theta = 30^\circ$ ,  $T = 0.05\text{mm}$ )

## 第4章 アルミニウム板貫通解析

### 4.1 解析手法

これまでに、アルミニウム板に貫通体を貫通させる解析は行われてきているが、実験と同様なエネルギー吸収を示す解析モデルが作成されていない問題点がある。そこで、今回、新たにアルミニウム板のモデルを作成し、貫通体をアルミニウム板に貫通させる解析を行った。

今回使用した動的有限要素解析ソフトウェアは LS-DYNA である。このソフトウェアは構造の大変形応答を解析するための汎用陽解法有限要素解析プログラムであり、衝撃問題から準静的な塑性加工問題までの解析が可能である。さらに、陽解法を用いているため、大次元の連立方程式を解く必要は無く安定した解を得られることや、計算機の負担軽減やアルゴリズムの単純化という利点を持っている。

解析を行うことによって、実験では得られにくい時間毎の貫通挙動の観察や荷重値の算出が可能となる。

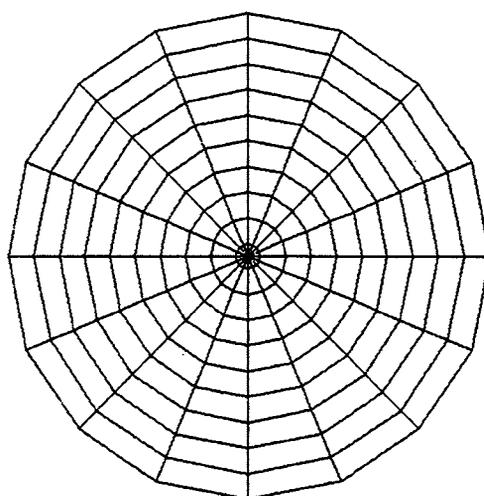


図 4.1 アルミニウム板モデル (20mm×20mm)

### 4.2 解析モデル

解析に用いるモデルは実験と同様の形状を持つことが理想である。本研究では実験で想定される条件で解析するため、周囲の節点を完全固定して、一定速度 10m/s を与えた貫通体を貫通させる解析を行った。今回は一定速度を与えていることから、変位は時間と速度から算出している。一方、荷重に関しては、完全固定された貫通体の上端に剛体壁を接触させて、その剛体壁に働いた力を用いている。また、吸収エネルギー量は変位 - 荷重曲線の面積から算出した。

アルミニウム板及び貫通体のモデル寸法を図 4.1 及び図 4.2 に、解析モデルを図 4.3 にそれぞれ示す。また、今回解析に用いた材料定数を表 4.1 に示す。アルミニウムのひずみ硬化率が直線的であることから、アルミニウム板のモデルには 2 直線近似弾塑性モデルを用い、貫通体は先端角度を変えた 3 種類 (30°, 60°, 90°) アルミニウム板は厚さを変えた 3 種類 (0.1mm, 0.2mm,

0.3mm) のモデルを用意した。以後、解析モデルは Type で表し、Type の後のアルファベットは A が貫通体先端角度 90°，B が 60°，C が 30° を表し、その後の数字はアルミニウム板の厚さを表す。

要素に関しては、貫通体はソリッド要素，アルミニウム板は四辺形一次シェル要素を用いた。また、貫通体とアルミニウム板の接触については動摩擦係数を 0.3 と定め、面対面の接触を定義し、アルミニウム板には自分自身への接触も考慮している。

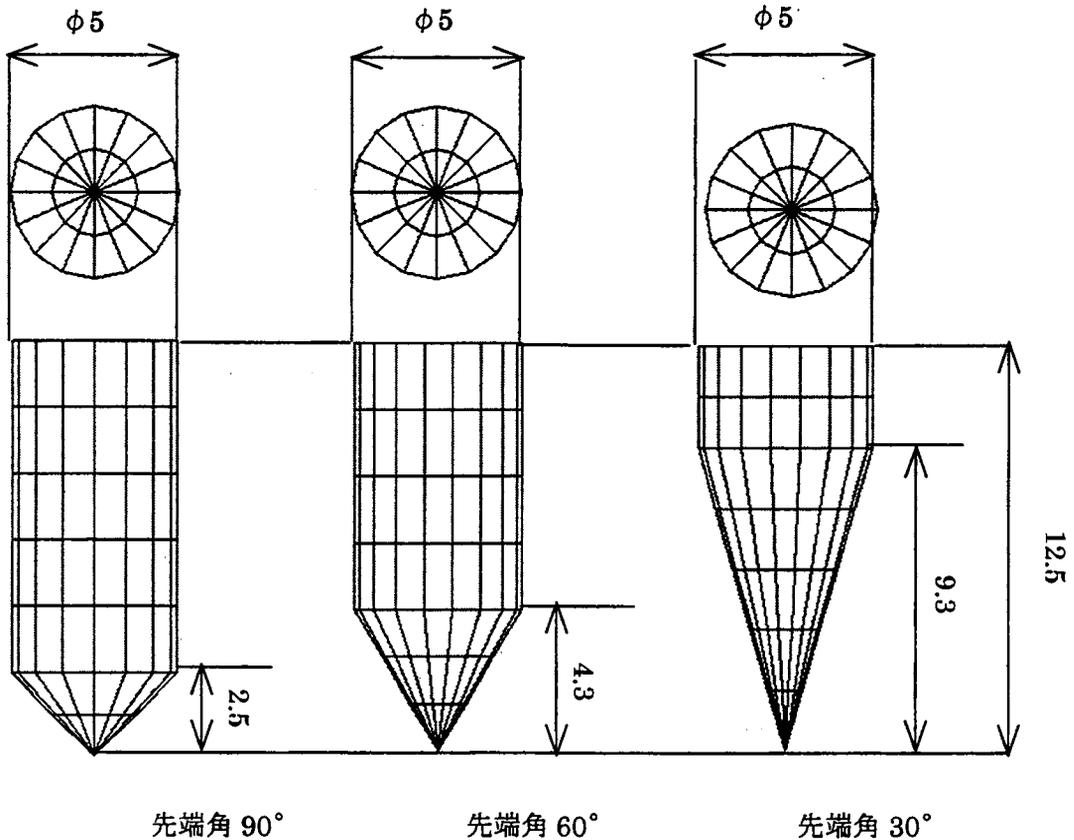


図 4.2 貫通体モデル (単位 : mm)

表 4.1 解析に用いた材料定数

| 材料定数                    | アルミニウム平板            | 貫通体                 |
|-------------------------|---------------------|---------------------|
| 密度 (kg/m <sup>3</sup> ) | 2.7×10 <sup>3</sup> | 7.9×10 <sup>3</sup> |
| ヤング率 (GPa)              | 69                  | 206                 |
| ポアソン比                   | 0.3                 | 0.3                 |
| 降伏応力 (MPa)              | 100                 |                     |
| ひずみ硬化率 (MPa)            | 280                 |                     |

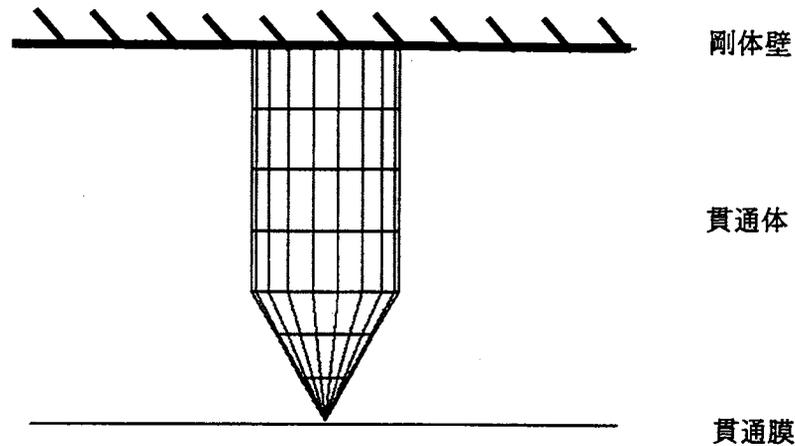


図 4.3 解析モデル

### 4.3 き裂進展解析

今回、アルミニウム板に発生するき裂の進展挙動の解析に用いたモデルには、塑性相当ひずみ  $\epsilon_p$  が限界値に達したら拘束している節点を切り離す方法である。この他にも、LS-DYNA によるき裂進展解析には、特定の線に沿ってき裂を進展させる方法や、破壊を考慮したマテリアルを使用する方法などが挙げられる。

図 4.4 に要素の設定方法を示す。同じ座標に複数の節点を作成し、その節点を1つのセットとする。この節点における相当塑性ひずみが限界値  $\epsilon_p = 0.15$  を超えると破断が生じる条件と設定した。本研究では、先行の研究で行われた実験で得られたき裂の形状から、解析でのき裂の進展方向を予測し、半径方向にのみき裂が進展する条件としている。

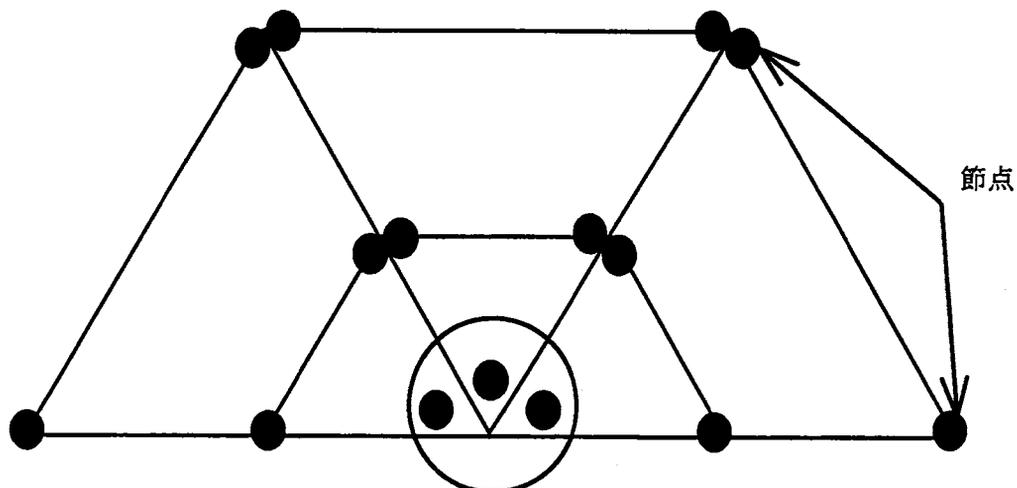


図 4.4 要素の設定方法例

### 4.4 解析結果と考察

#### 4.4.1 Type A0.3

まず貫通体先端角度  $90^\circ$  , アルミニウム板厚 0.3mm のモデルの解析を行った。要素分割は、半

径方向に10分割，円周方向に16分割した．総要素数は368要素，総節点数は552節点のモデルとした．以下，貫通体先端角度が $90^\circ$ の解析においては，この要素分割を用いた．

図4.5に，このモデルの有限要素解析による貫通挙動を示す．また，図4.6にこのモデルの変位-荷重曲線を示す．まず，塑性ひずみ値が限界値0.15を超えるまで，貫通体が接触するとともにアルミニウム板は変形している．そして， $t=8.0 \times 10^{-5} \text{s}$ で最初のき裂が生じている．その後時間の経過とともに半径方向にき裂が進展しており， $t=5.0 \times 10^{-4} \text{s}$ でき裂の進展はほぼ終わっている．最終的には貫通体直径に等しい円形の穴が形成された．これに対し，実験では3個のき裂が進展して三角形のき裂形状となった．き裂発生およびき裂進展に費やされた全体のエネルギー吸収量は0.205 Jで，これを先に行われたアルミニウム板貫通実験の結果と比較すると約11.8%の差となった．

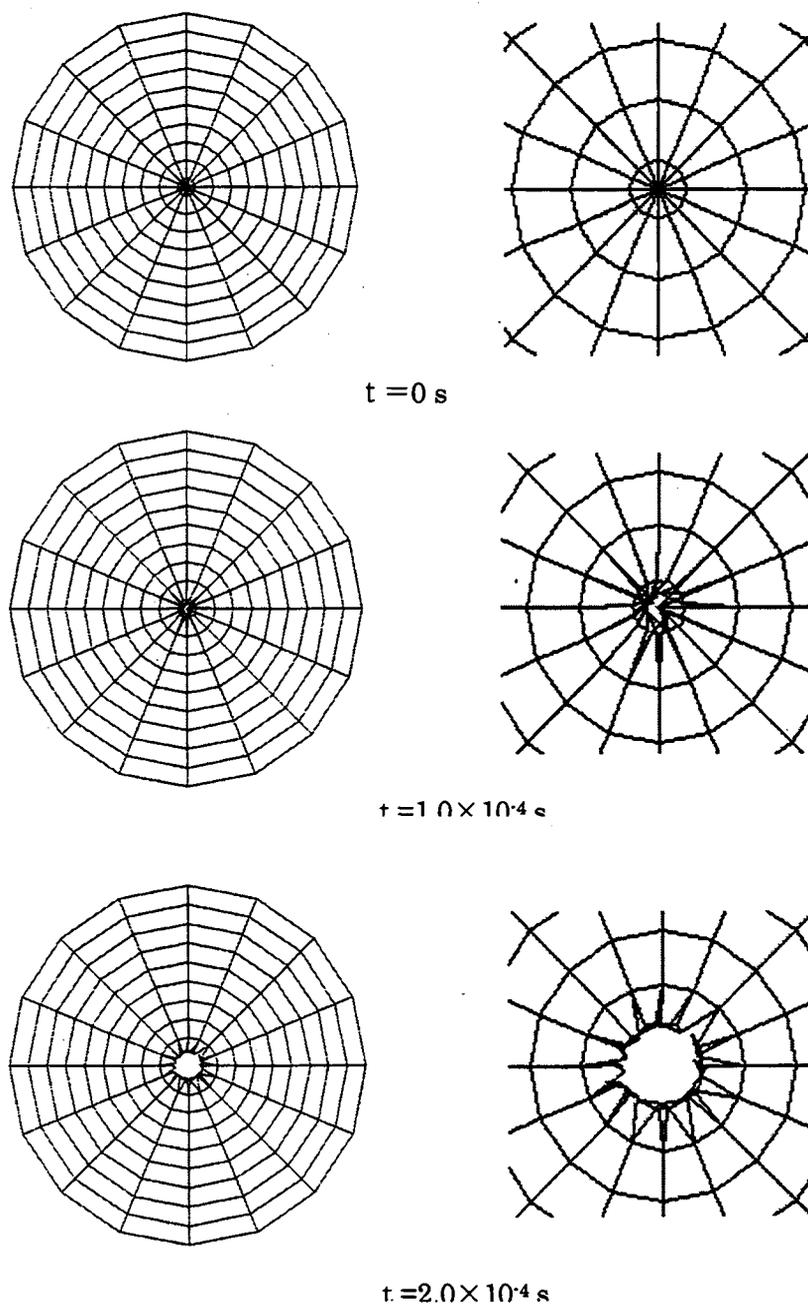


図4.5 (a) Type A0.3 貫通挙動 (右図は拡大図を示す)

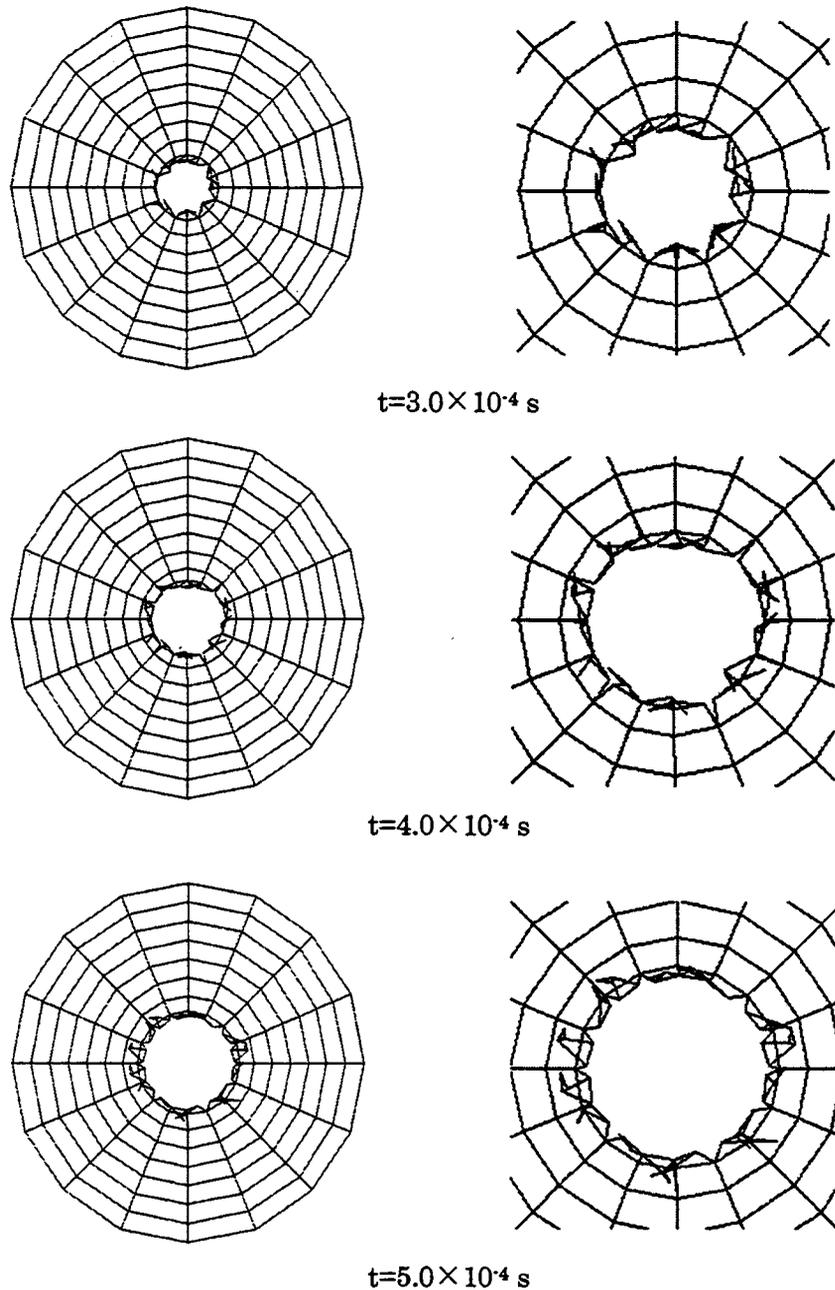


図 4.5 (b) Type A0.3 貫通挙動 (続き) (右図は拡大図を示す.)

#### 4.4.2 Type A0.2

次に貫通体先端角度  $90^\circ$  , アルミニウム板厚  $0.2\text{mm}$  のモデルの解析を行った結果を示す。図 4.7 にこのモデルの貫通挙動を示す。また、図 4.8 にこのモデルの変位 - 荷重曲線を示す。この場合も Type A0.3 と同じように、塑性ひずみ値が限界値  $0.15$  に達するまで貫通体と接触するにつれて変形し、およそ  $t = 8.0 \times 10^{-5}\text{s}$  で最初のき裂が発生している。その後、き裂は半径方向に進展していき、最終的に  $t = 5.0 \times 10^{-4}\text{s}$  で進展はほぼ終了している。最終的には貫通体直径に等しい円形の穴が形成された。これに対し、実験では 3 個のき裂が進展して三角形のき裂形状となった。全体のエネルギー吸収量は  $0.124\text{J}$  で、実験値と比較すると約  $5.3\%$  の差となり、良い一致がみられる。

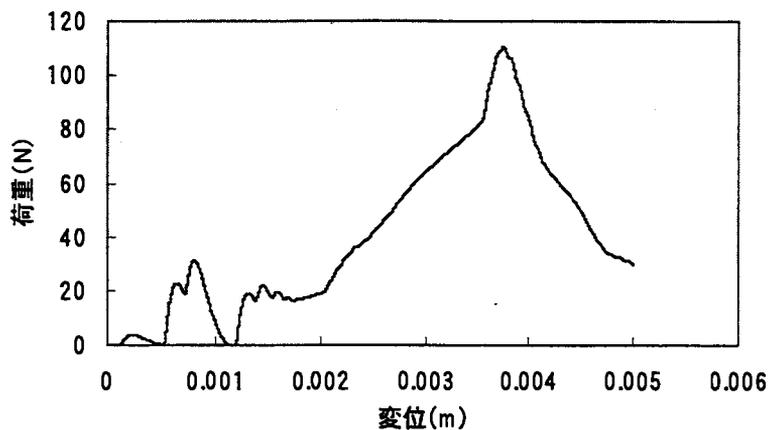


図 4.6 Type A0.3 変位-荷重曲線

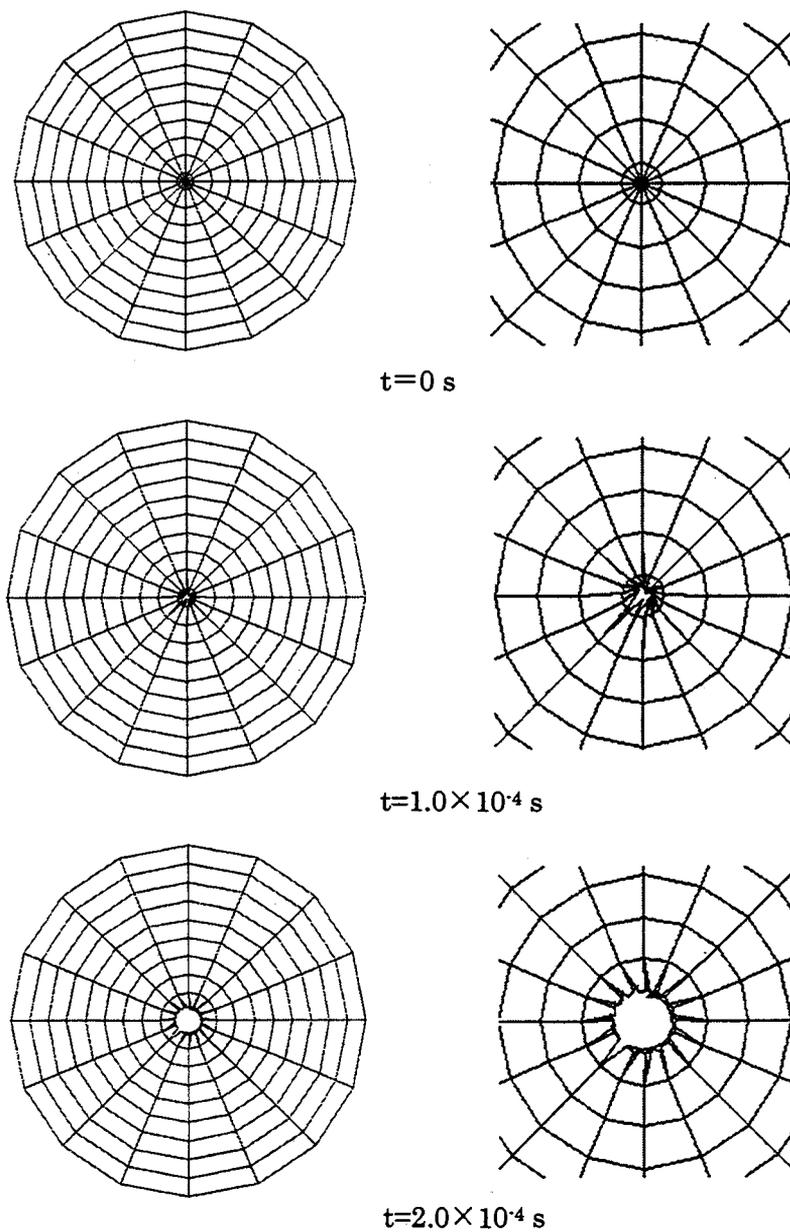


図 4.7 (a) Type A0.2 貫通挙動 (右図は拡大図を示す)

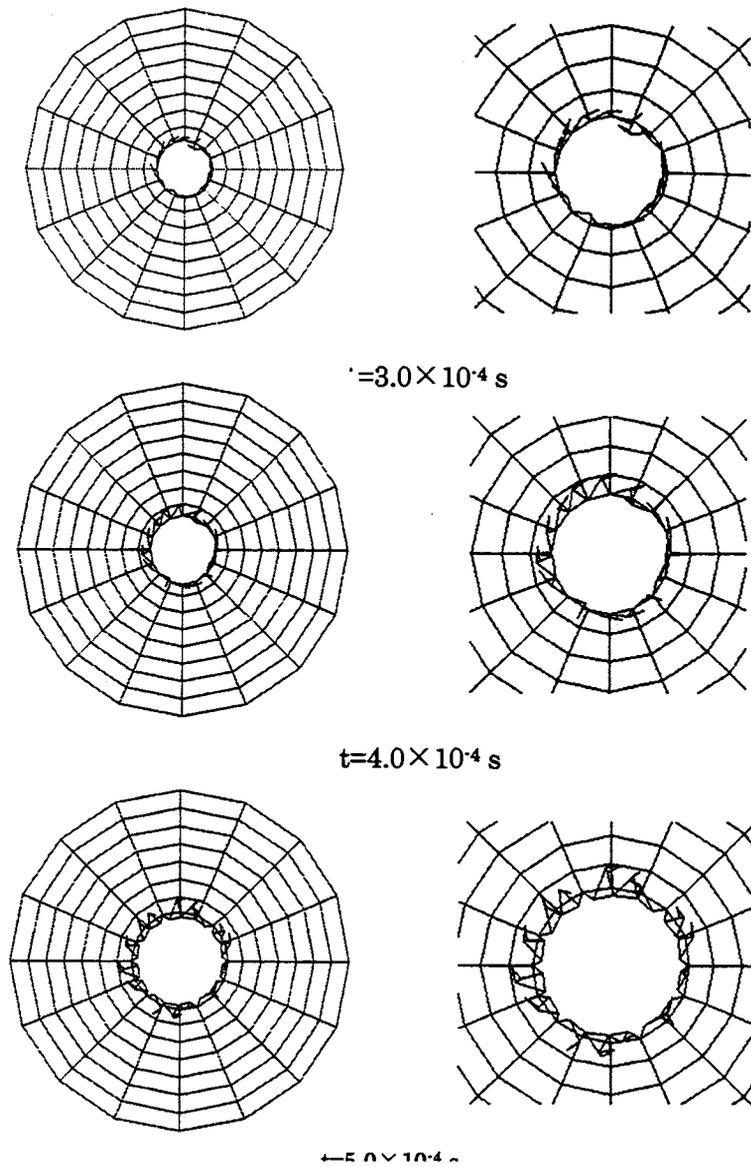


図 4.7(b) Type A0.2 貫通挙動 (続き) (右図は拡大図を示す)

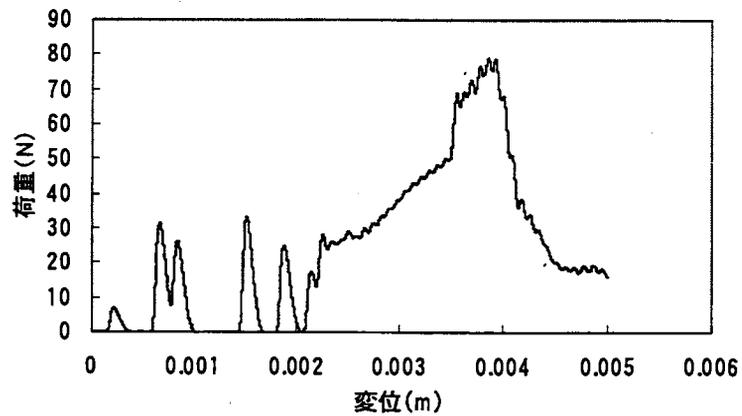


図 4.8 Type A0.2 変位-荷重曲線

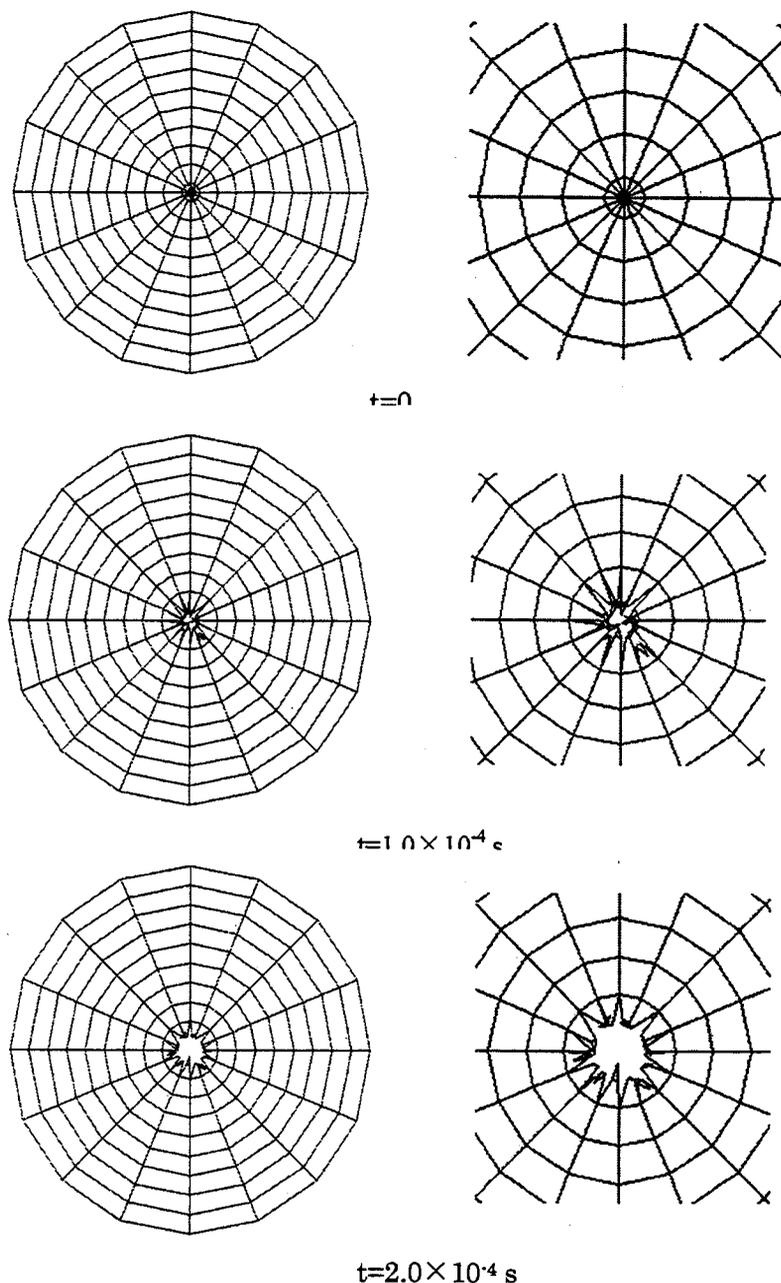


図 4.9 (a) Type A0.1 貫通挙動 (右図は拡大図を示す)

#### 4.4.3 Type A0.1

次に貫通体先端角度  $90^\circ$  , アルミニウム板厚  $0.1\text{mm}$  のモデルの解析を行った結果を示す. 図 4.9 にこのモデルの貫通挙動を示す. また, 図 4.10 にこのモデルの変位 - 荷重曲線を示す. 最初のき裂が生じる  $t=7.5 \times 10^{-5}\text{s}$  まで, これまでと同様の変形挙動を示している. その後もこれまでと同じようなき裂の進展がみられ,  $t=5.0 \times 10^{-4}\text{s}$  でき裂の進展は終了した. 最終的には貫通体直径に等しい円形の穴が形成された. これに対し, 実験では 3 個のき裂が進展して三角形のき裂形状となった. 全体のエネルギー吸収量は  $0.0499\text{J}$  で, 実験値と比較すると約 23.8% の差となった.

なお, 図 4.11 に貫通体先端角度  $90^\circ$  においてアルミニウム板の厚さを変えた場合のエネルギー吸収量の比較をグラフに示す.

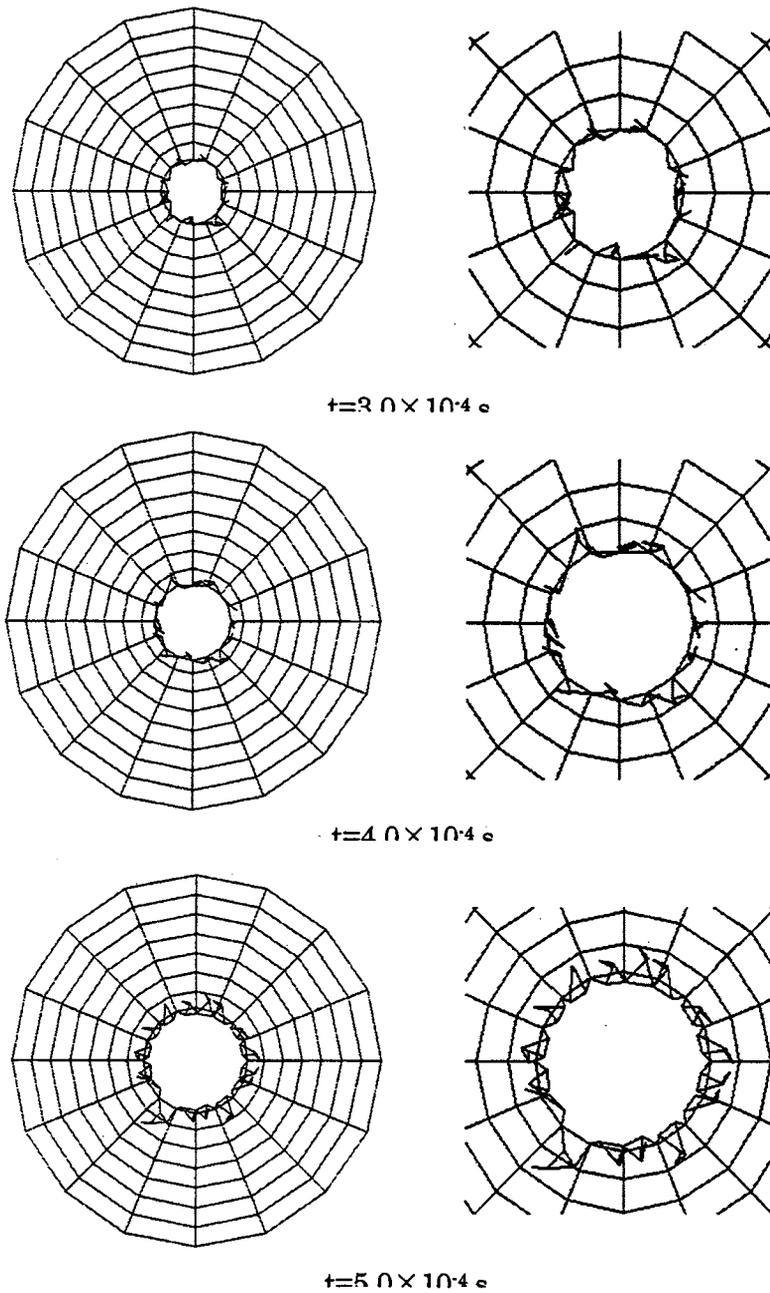


図 4.9(b) Type A0.1 貫通挙動 (続き) (右図は拡大図を示す)

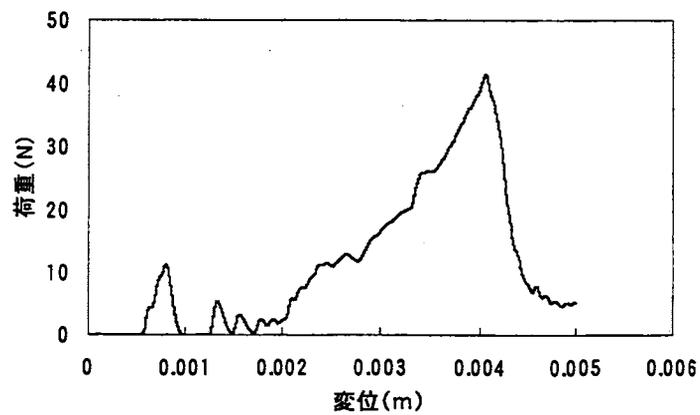


図 4.10 Type A0.1 変位-荷重曲線

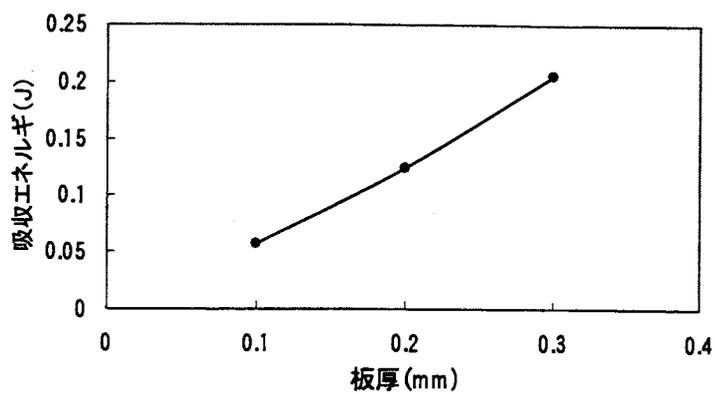


図 4.11 エネルギー吸収量の比較

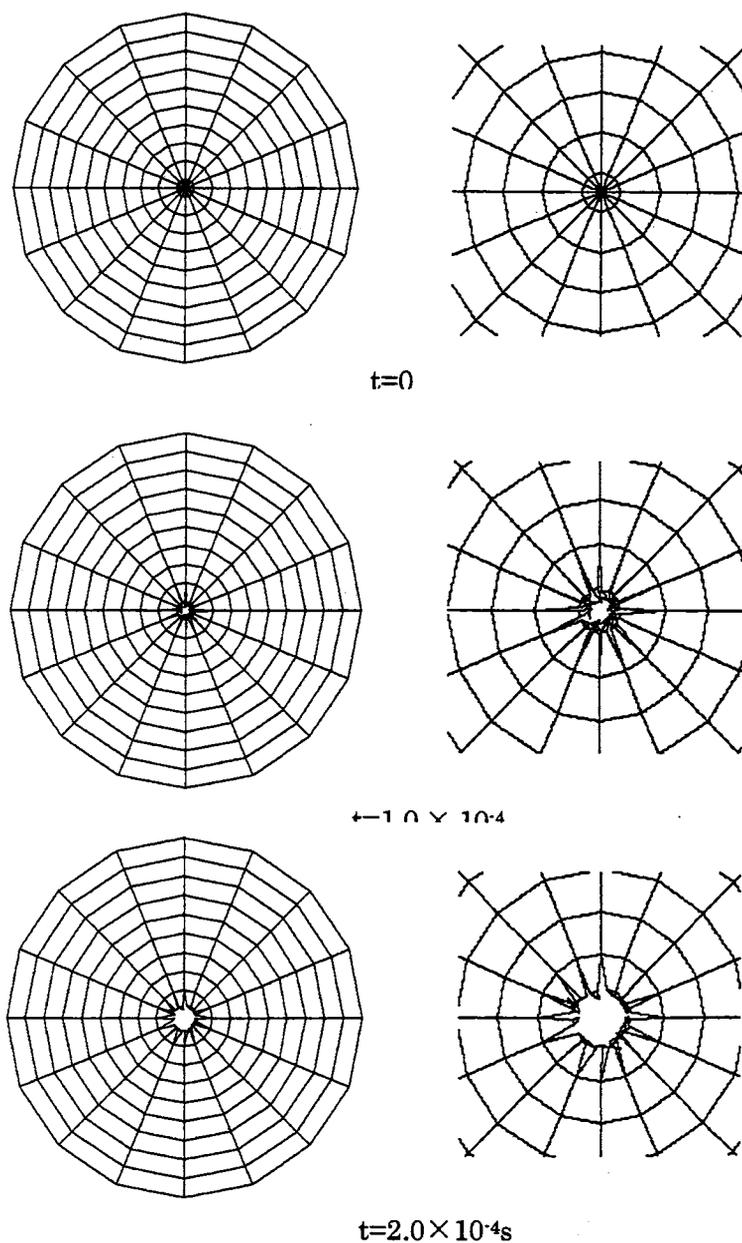


図 4.12 (a) Type B0.3 貫通挙動 (右図は拡大図を示す)

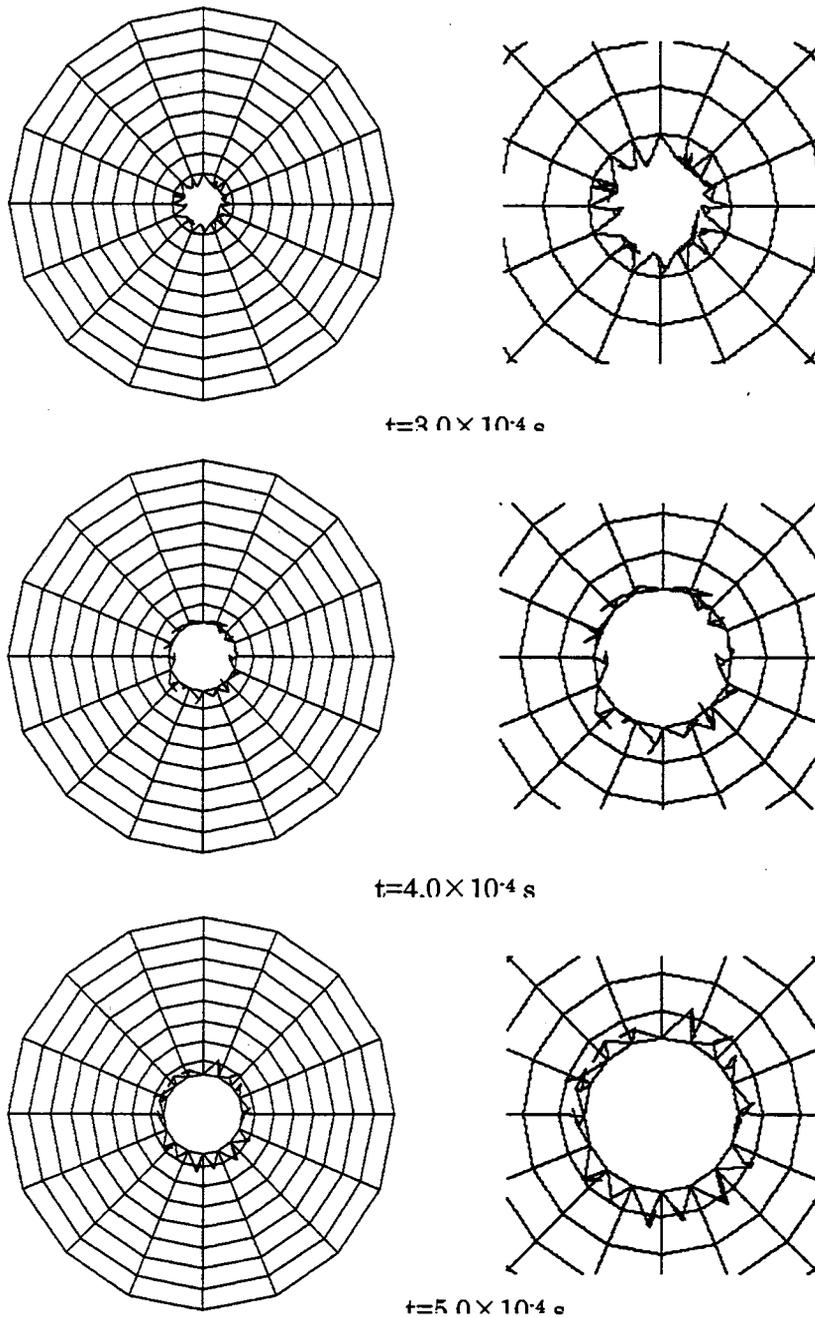


図 4.12 (b) Type B0.3 貫通挙動 (続き) (右図は拡大図を示す)

#### 4.4.4 Type B0.3

次に貫通体先端角度  $60^\circ$  , アルミニウム板厚 0.3mm のモデルの解析を行った。要素分割は半径方向に 10 分割, 円周方向に 16 分割した。総要素数は 394 要素, 総節点数は 580 節点のモデルとした。以下, 貫通体先端角度が  $60^\circ$  の解析においては, この要素分割を用いた。

図 4.12 にこのモデルの貫通挙動を示す。また, 図 4.13 にこのモデルの変位 - 荷重曲線を示す。この場合もこれまでと同様な変形挙動を示し, 最初のき裂が  $t=7.8 \times 10^{-5} \text{ s}$  で生じている。その後, き裂は半径方向に進展しており, およそ  $t=7.0 \times 10^{-4} \text{ s}$  で進展は終了した。最終的には貫通体直径に等しい円形の穴が形成された。これに対し, 実験では 3 個のき裂が進展して三角形のき裂形状となった。全体としてのエネルギー吸収量は 0.177 J で, 実験値の約 54.6% の値にとどまった。

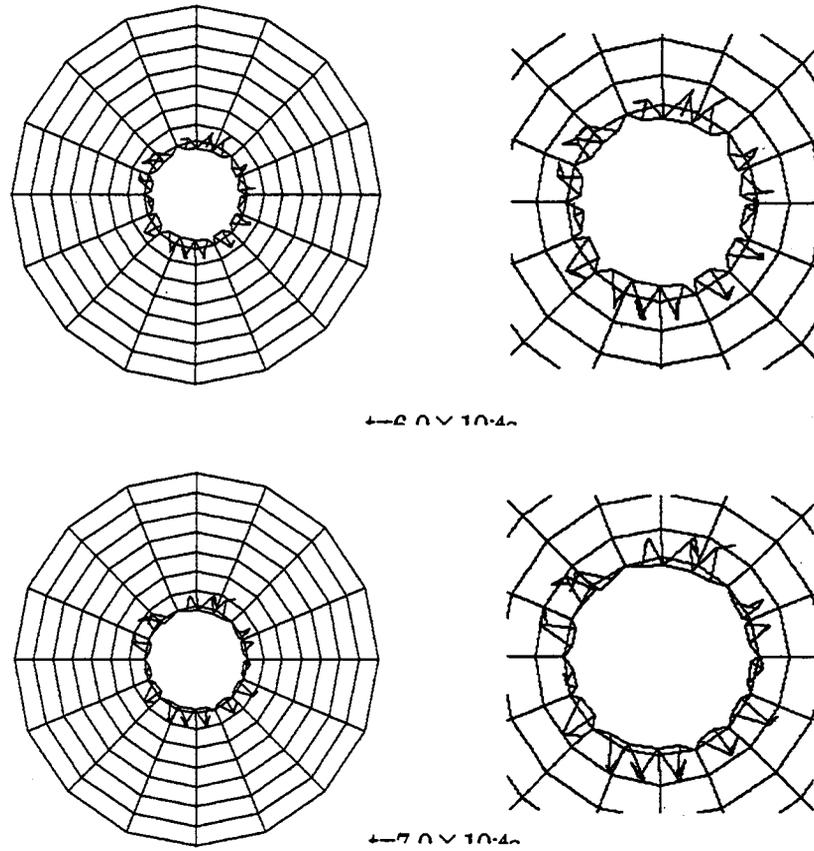


図 4.12 (c) Type B0.3 貫通挙動 (続き)

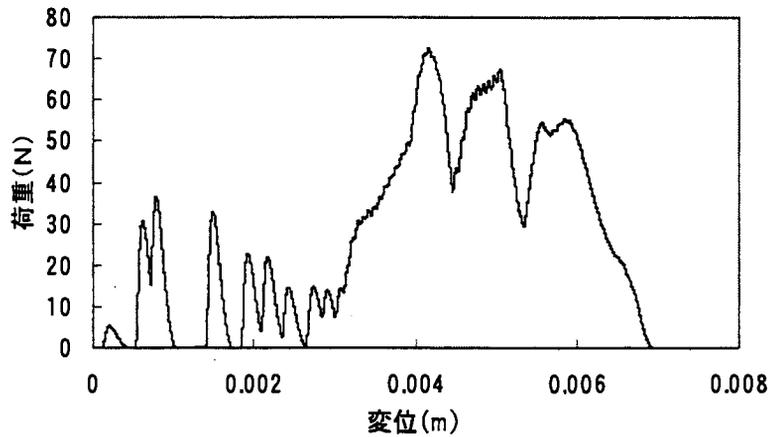


図 4.13 Type B0.3 荷重・変位曲線

#### 4.4.5 Type B0.2

次に貫通体先端角度  $60^\circ$  , アルミニウム板厚  $0.2\text{mm}$  のモデルの解析を行った結果を示す。図 4.14 にこのモデルの貫通挙動を示す。また、図 4.15 にこのモデルの変位 - 荷重曲線を示す。これまでと同じように、塑性ひずみ値が限界値  $0.15$  に達するまでアルミニウム板は変形し、およそ  $t = 8.0 \times 10^{-5}\text{s}$  で最初のき裂が発生している。その後もこれまでと同様のパターンでき裂は進展しており、およそ  $t = 7.0 \times 10^{-4}\text{s}$  で進展が終了している。最終的には貫通体直径に等しい円形の穴

が形成された。これに対し、実験では3~4個のき裂が進展して三角形や四角形のき裂形状となった。エネルギー吸収量は0.100 Jで実験値の約51.3%の値となった。

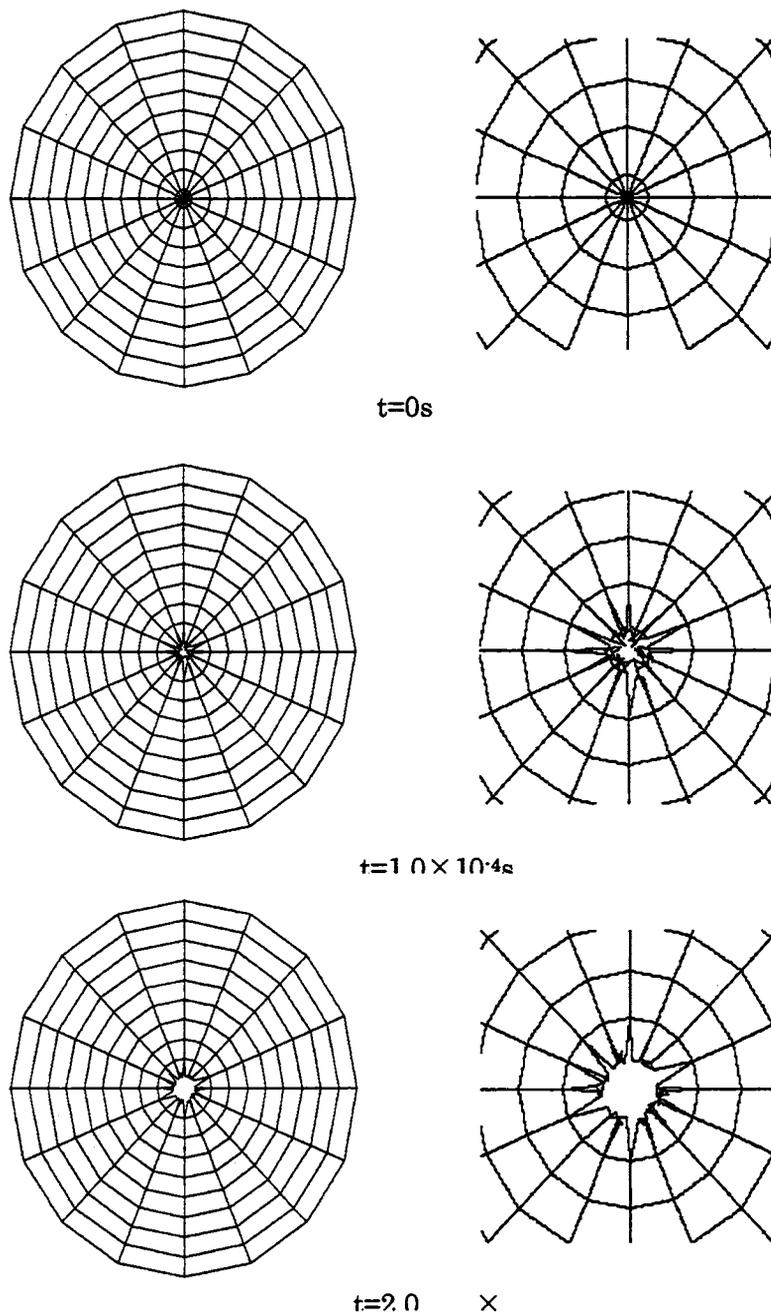


図 4.14 (a) Type B0.2 貫通挙動 (右図は拡大図を示す)

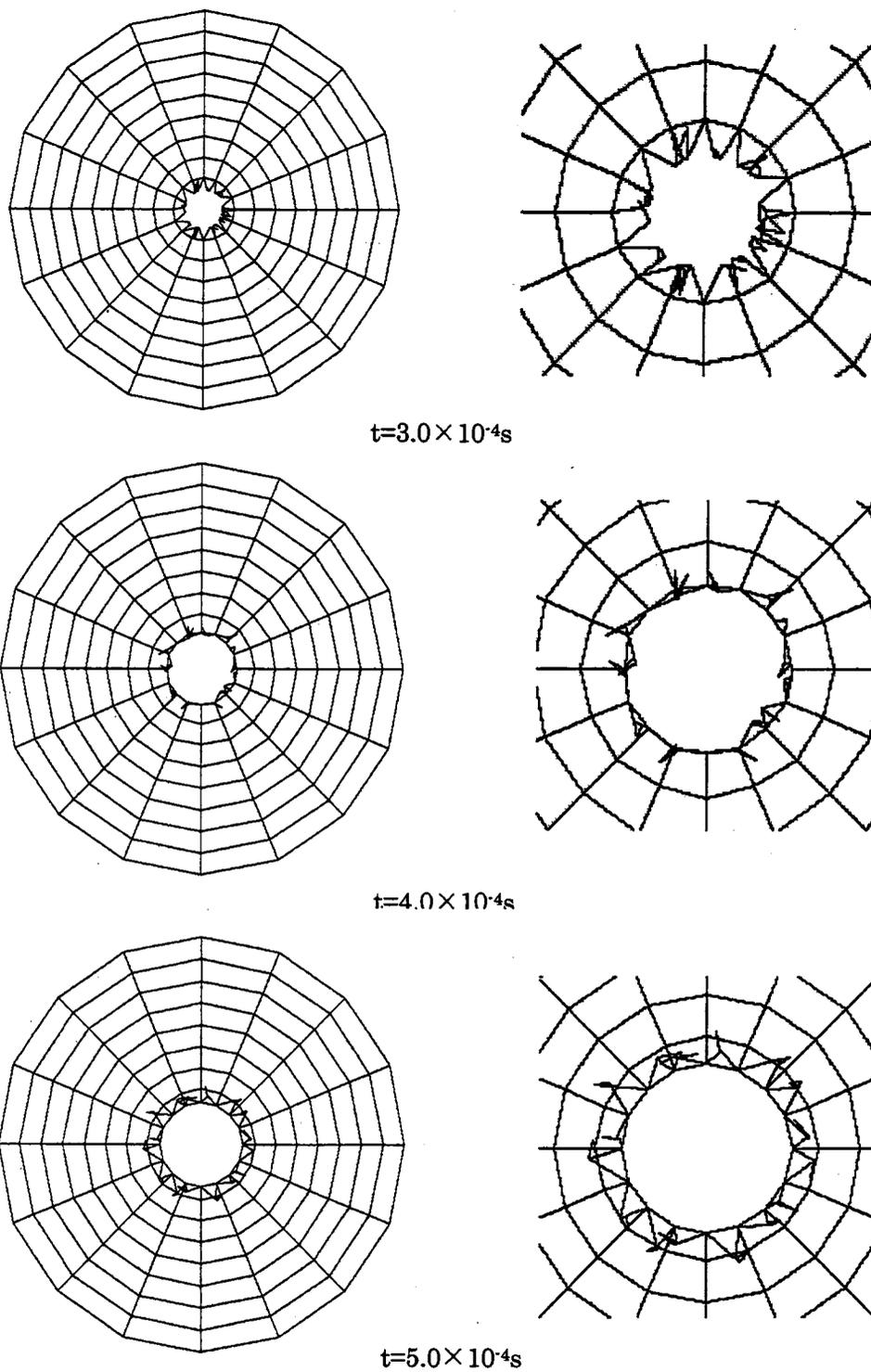


図 4.14 (b) Type B0.2 貫通挙動 (続き)

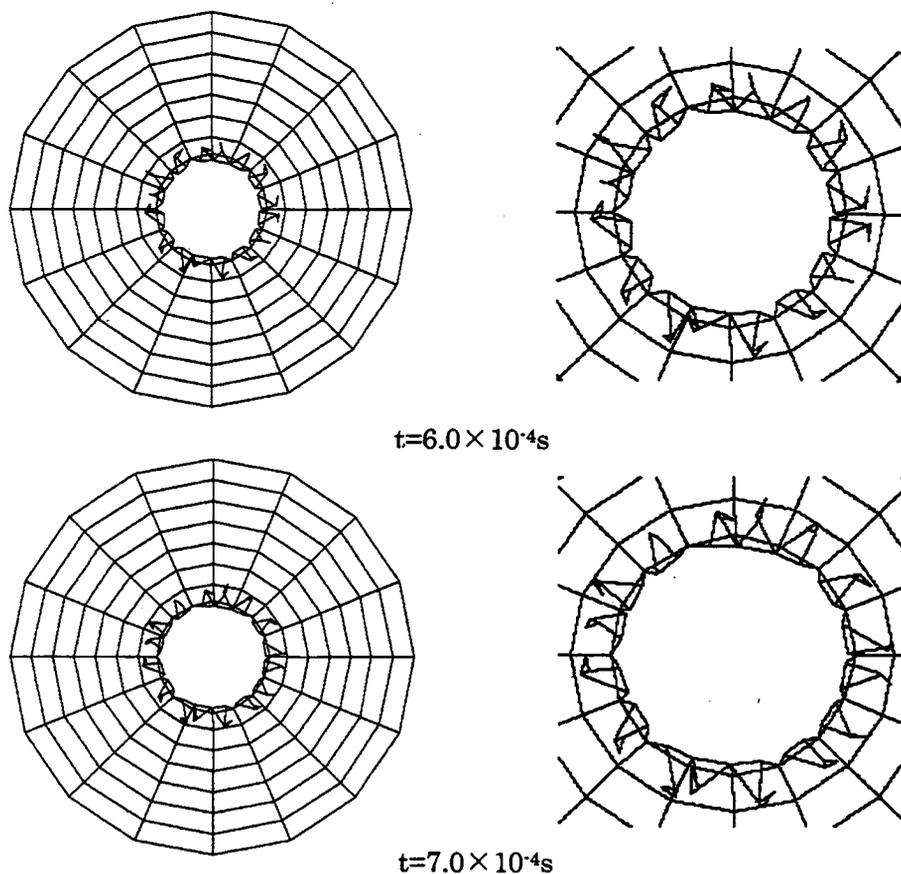


図 4.14 (c) Type B0.2 貫通挙動 (続き)

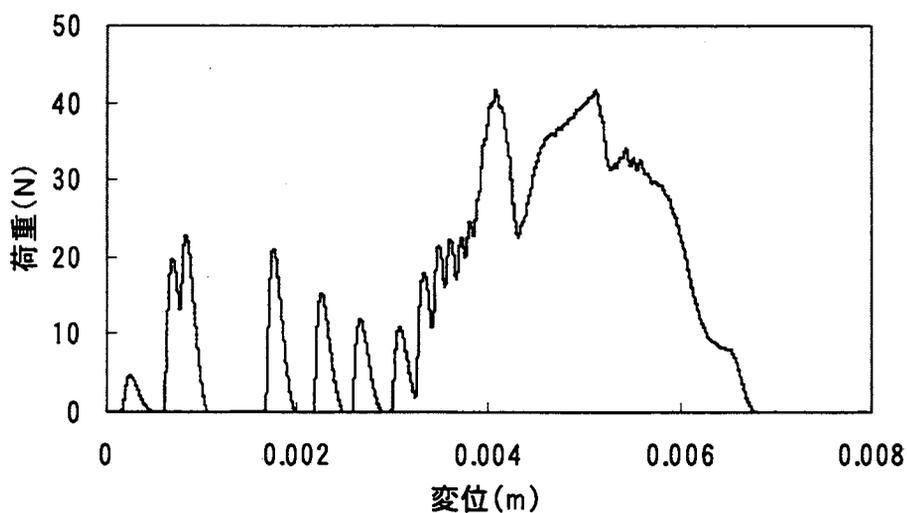


図 4.15 Type B0.2 変位-荷重曲線

#### 4.4.6 Type B0.1

次に貫通体先端角度  $60^\circ$  , アルミニウム板厚  $0.1\text{mm}$  のモデルの解析を行った結果を示す. 図 4.16 にこのモデルの貫通挙動を示す. また, 図 4.17 にこのモデルの変位 - 荷重曲線を示す. やはり, これまでと同じような変形挙動を示し,  $t = 7.7 \times 10^{-5} \text{ s}$  で最初のき裂が生じている. その後, き裂はおよそ  $t = 7.0 \times 10^{-4} \text{ s}$  まで半径方向に進展した. 最終的には貫通体直径に等しい円形の穴

が形成された。これに対し、実験では4個のき裂が進展して四角形のき裂形状となった。全体としてのエネルギー吸収量は0.0405 Jで実験値の約86.2%の値となり、Type B0.3及びType B0.2の場合よりも近い値を示している。

なお、図4.18に貫通体先端角度 $60^\circ$ においてアルミニウム板の厚さを変えた場合のエネルギー吸収量の比較を示す。

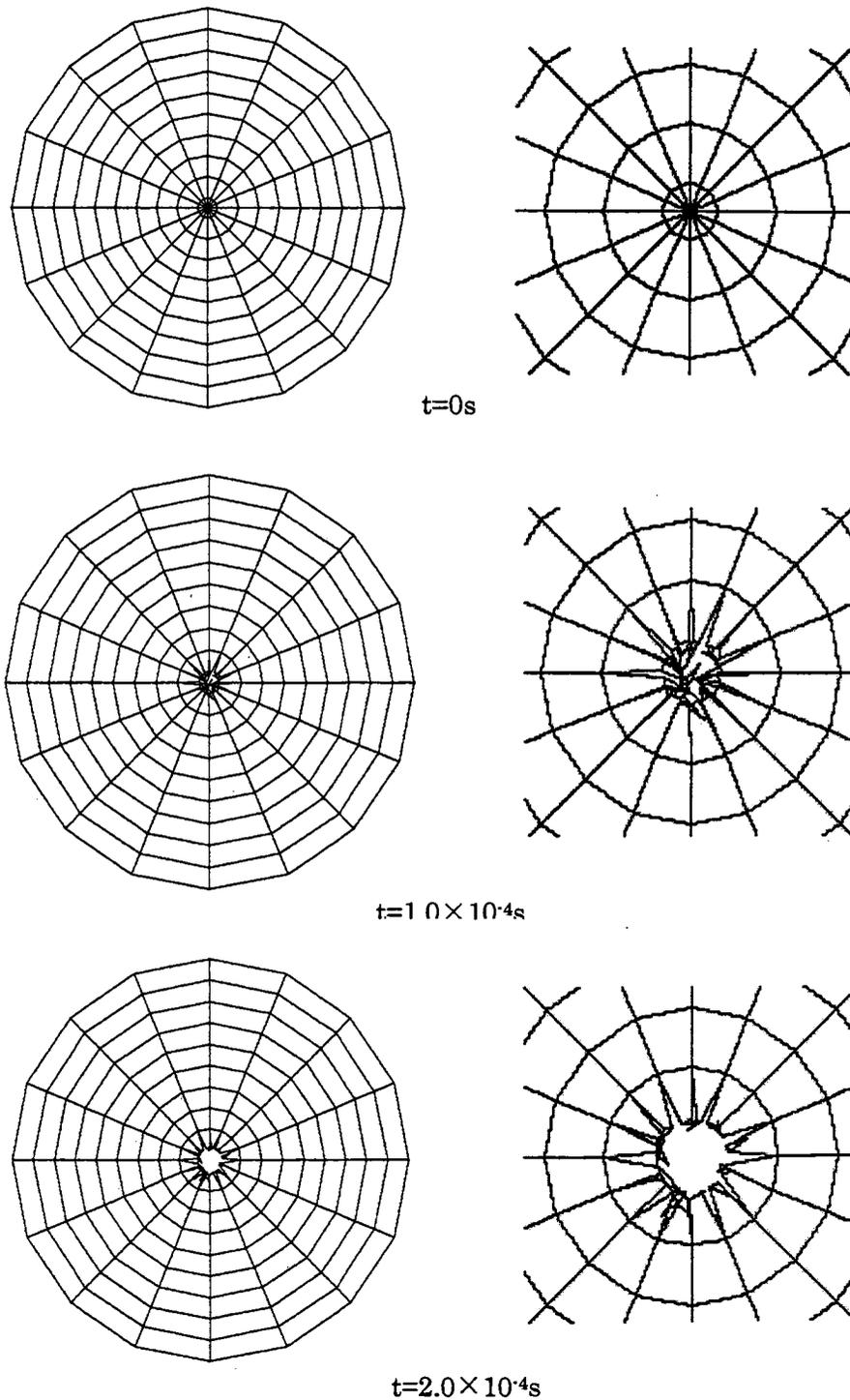


図4.16 (a) Type B0.1 貫通挙動 (右図は拡大図を示す)

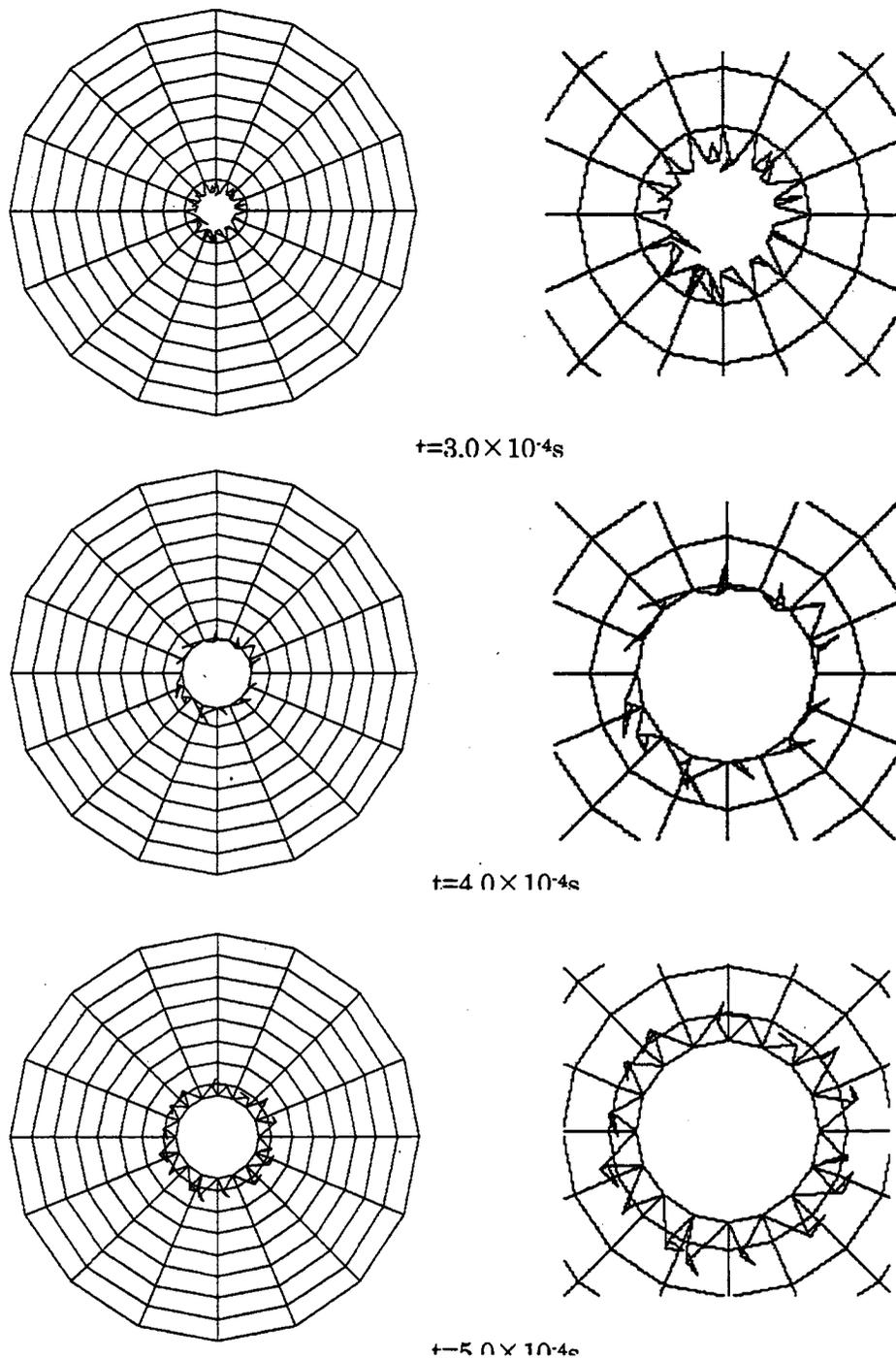


図 4.16 (b) Type B0.1 貫通挙動 (続き)

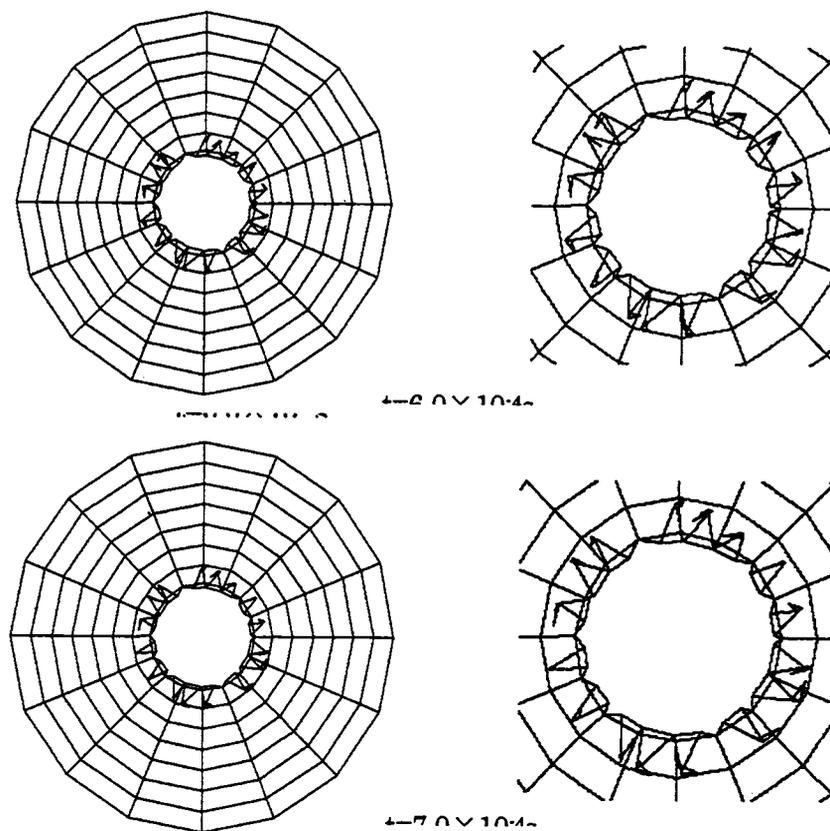


図 4.16 (c) Type B0.1 貫通挙動 (続き)

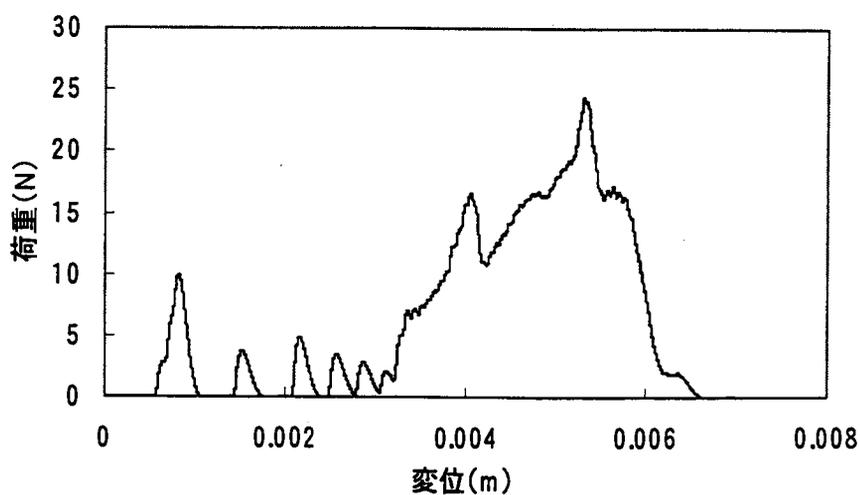


図 4.17 Type B0.1 変位・荷重曲線

#### 4.4.7 考察

表 4.2 に実験と解析のエネルギー値の比較を示す。今回の解析結果から、貫通体先端角度が大きいほど、またアルミニウム板が厚いほど吸収エネルギーが大きいことが確認された。

しかし、貫通実験ではアルミニウム板の厚さに関わらず貫通体先端角度が小さいほどエネルギー吸収量が大きいという結果が得られており、今回の解析結果と異なる。考えられる原因としては、

まず貫通実験では速度10mm/minを与えていることから、静的に行われた実験であるといえるが、今回の解析では一定速度10m/sを与えているために動的な解析であることが挙げられる。貫通体先端角度が鋭角になるにつれて、貫通体の先端部分が長くなり摩擦の影響をより受けやすくなる。また、動的な解析よりも静的に行われた実験の方が、より摩擦の影響を受けやすいといえる。また、もう1つの理由としては貫通実験においてのアルミニウム板を固定台に固定する方法が考えられる。実験では、アルミニウム板の上下をゴムで挟み8本のボルトで固定しているが、この方法では完全にアルミニウム板を固定しているとはいえず、貫通体との接触が進むにつれてエネルギーのロスが徐々に生じてしまう。貫通体先端角度が大きくなるにつれて、アルミニウム板に加わる荷重は上昇することから、結果として先端角度が大きくなるほどエネルギーのロスも増大していく。ゆえに、貫通実験においては貫通体先端角度が小さいほどエネルギー吸収量が大きくなったものと思われ、以上の理由から実験と解析においてエネルギー吸収量のパターンに違いがみられたものと考えられる。これらのことを踏まえると正確に吸収エネルギー量の比較ができたとはいえない。

今回の解析結果から、アルミニウム板単体のエネルギー吸収量は最大でも0.205Jと小さいことが判明した。しかし、アルミニウム板の厚さを増やす、あるいはより多くのアルミニウム板を用いることで、アルミハニカムを単体で用いるよりもエネルギー吸収量が飛躍的に増大するセル構造体を開発することが可能であると期待される。

表 4.2 実験値と解析値の比較

|     |           |           |           |
|-----|-----------|-----------|-----------|
|     | Type A0.3 | Type A0.2 | Type A0.1 |
| 実験値 | 0.232J    | 0.131J    | 0.0403J   |
| 解析値 | 0.205J    | 0.124J    | 0.499J    |
|     | Type B0.3 | Type B0.2 | Type B0.1 |
| 実験値 | 0.324J    | 0.195J    | 0.047J    |
| 解析値 | 0.177J    | 0.1J      | 0.0405J   |
|     | Type C0.3 | Type C0.2 | Type C0.1 |
| 実験値 | 0.405J    | 0.207J    | 0.0633J   |
| 解析値 | 0.159J    | 0.0928J   | 0.0364J   |

## 第5章 膜破壊を伴うハニカム構造体の圧潰現象

### 5.1 衝撃圧潰試験装置と圧潰試験法

一般的によく行われている衝撃圧潰試験は、試験片を壁面に固定し、試験片に対して数百倍の質量を衝突させて圧潰させる形式が多い。本研究においても試験片と貫通体を剛体壁側に固定した後、7kgの円筒型質量を衝撃子として時速約23kmで衝突させる形式をとる。衝撃子を発射させる動力源としてはバネの復元力を利用する方法を採用することにした。

バネ以外にも衝撃圧潰試験において考えられる動力源は、空気や窒素などの圧縮ガスや爆薬を用いたエアガン型、重力を利用したクロスヘッドや錘を自由落下させる落下型などが挙げられる。本試験で装置に要求する性能は7kgの衝撃子を時速約23kmで発射できることであり、目的は試験片の圧潰挙動および貫通体によるき裂の進展状況の観察と衝撃吸収エネルギーを求めることである。このときの衝撃子の初速度と跳ね返り速度の2乗差より衝撃吸収エネルギーを求めるので、この点を考慮すると装置の動力源には、比較的容易に測定できるエアガン型がよく用いられるが、エネルギーの供給不足が危惧される。また落下型の試験法は供給可能なエネルギーも大きく、比較的簡単に変化させることも可能であるが、適度な高さが必要で大半は屋外実験となり風や雨などの天候、外部の影響を受けやすい。さらに吸収エネルギーの測定が困難である。そこで本試験では適度な供給エネルギーを発生させることができ、屋内で可能な実験法であるバネの復元力を利用する方法にした。供給エネルギーの変化、衝撃子の速度差測定も可能な試験法である。図5.1に動的圧潰試験装置を示し、以下に装置の詳細を述べる。

#### (1) ラバーチューブ

試験片を加速するための動力源として、室内の限られた空間を利用でき、引張長さの調整により、供給エネルギーを容易に変化させることのできるラバーチューブ（外径40mm、内径30mm）を用いた。このチューブの両端を土台に固定した支柱に取り付け、連結部を介して手巻きウインチにより引張り、必要なエネルギーを発生させる。同時に図5.2に示すように、台車を急停止させるためのブレーキとして、引張りと同様のラバーチューブを台車下面に取り付けた。ブレーキ用のラバーチューブが作用するため初速度の推定は困難であるが、参考までに引張長さや付加質量を変化させた場合の初速度を示せば3.3~4.7m/sである。ラバーチューブに錘をつりさげて測定したラバーチューブ自身のバネ定数は約400N/mである。なおラバーチューブ長さは全て固定点から台車までの距離で表している。

#### (2) 引張・連結部分

ラバーチューブの引張には手巻きウインチを用いる。確実な保持と瞬時の解除を可能にする機能を持たせるため、ラバーチューブとワイヤーとの連結部分には図5.3に示すようなピン結合方式を採用した。淡色部分が台車側にワイヤーで固定されており、濃色部分がウインチ側に固定されている。ウインチによりラバーチューブを引張り、連結部両端に引張力が発生している状態でピン結合を解除することにより、瞬時に台車とウインチが分離する仕組みとなっている。

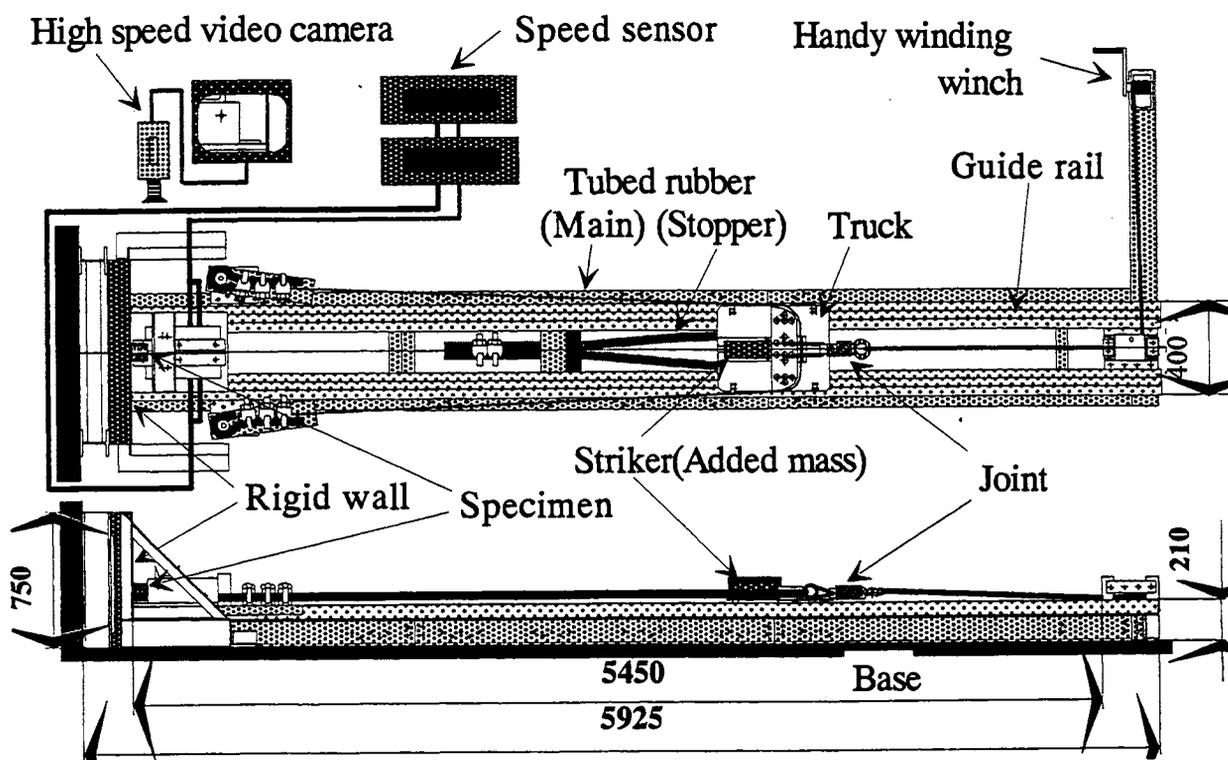


図 5.1 衝撃圧潰試験装置全体図

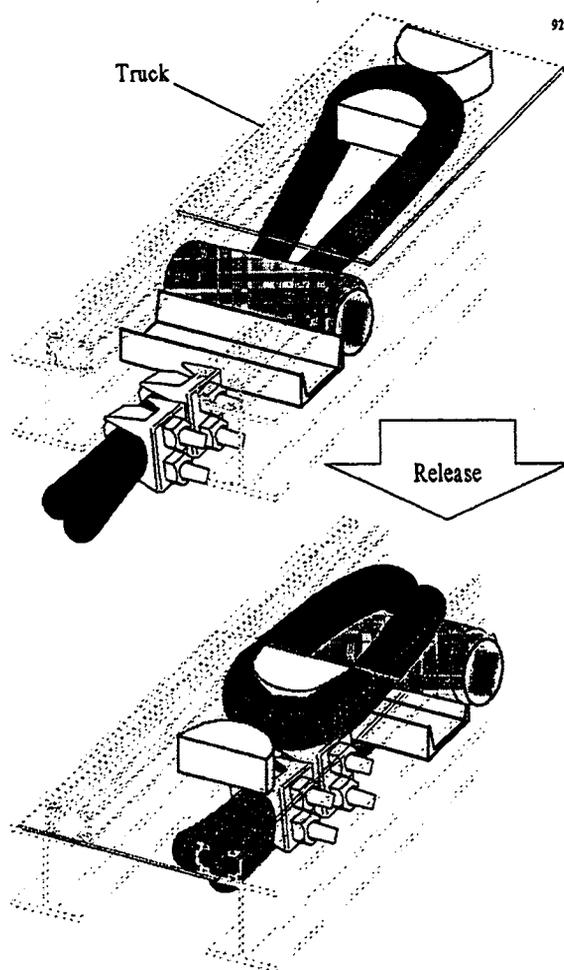


図 5.2 台車停止用ラバーチューブ

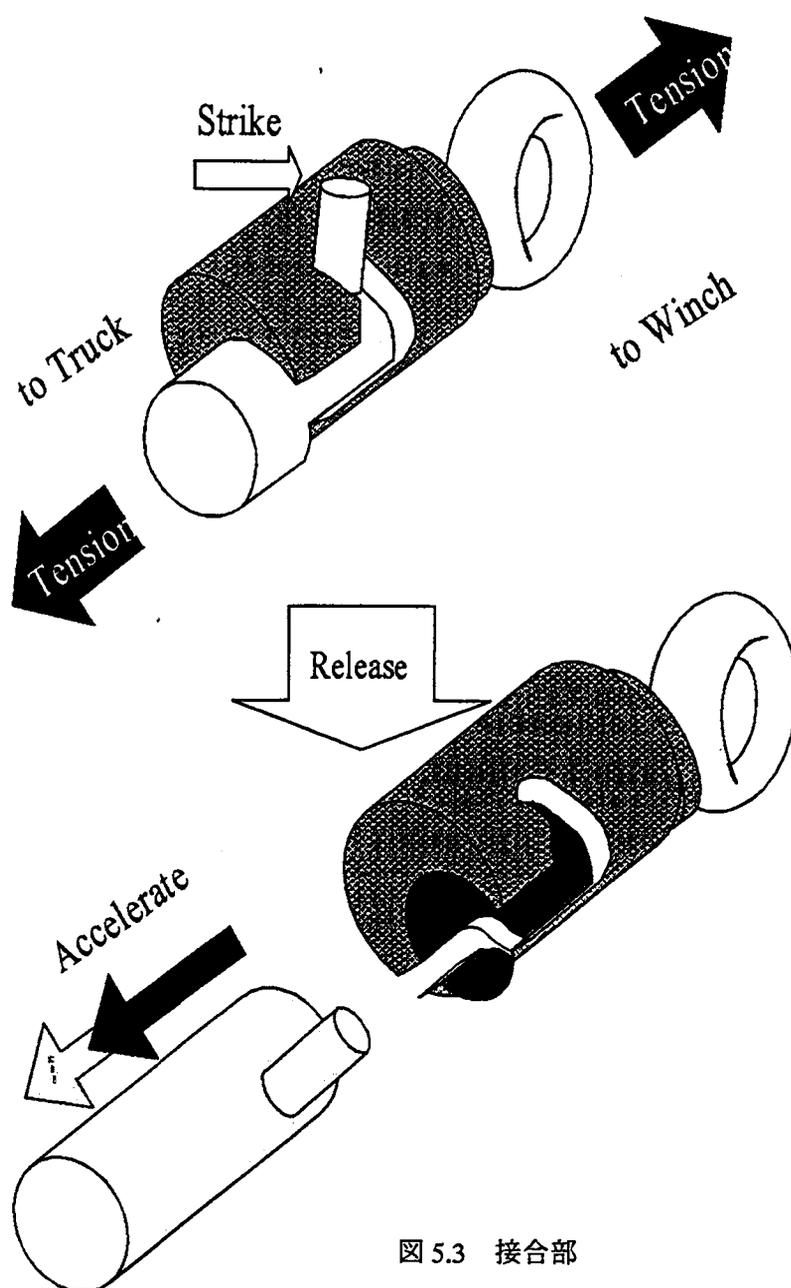


図 5.3 接合部

### (3) 台車

衝撃子をスムーズに移動させるため、台車を用いた。台車本体は 6mm のアルミニウム平板をベースとし、下面に車輪としてのベアリングを取り付けた。上面には台車の動力用、下面には台車停止用のラバーチューブをそれぞれ台車に固定し、ラバーチューブと直接接触する部分には台車の軽量化を考慮して木材を加工して製作したものを用いた。また台車上面には衝撃子をスムーズに発射させるため、フリーベアリングを取り付けたガイドを設けている。図 5.4 に台車の車輪部分の拡大図を示す。ガイドレールはこのような複雑な断面形状をしており、台車を支えるベアリングとの隙間はほとんどなく、鉛直方向変位を拘束できる。また水平方向の拘束のために、さら

に小径のベアリングをガイドレールとの接触部に用いた。これにより衝突面方向へのスムーズな移動を可能にしている。

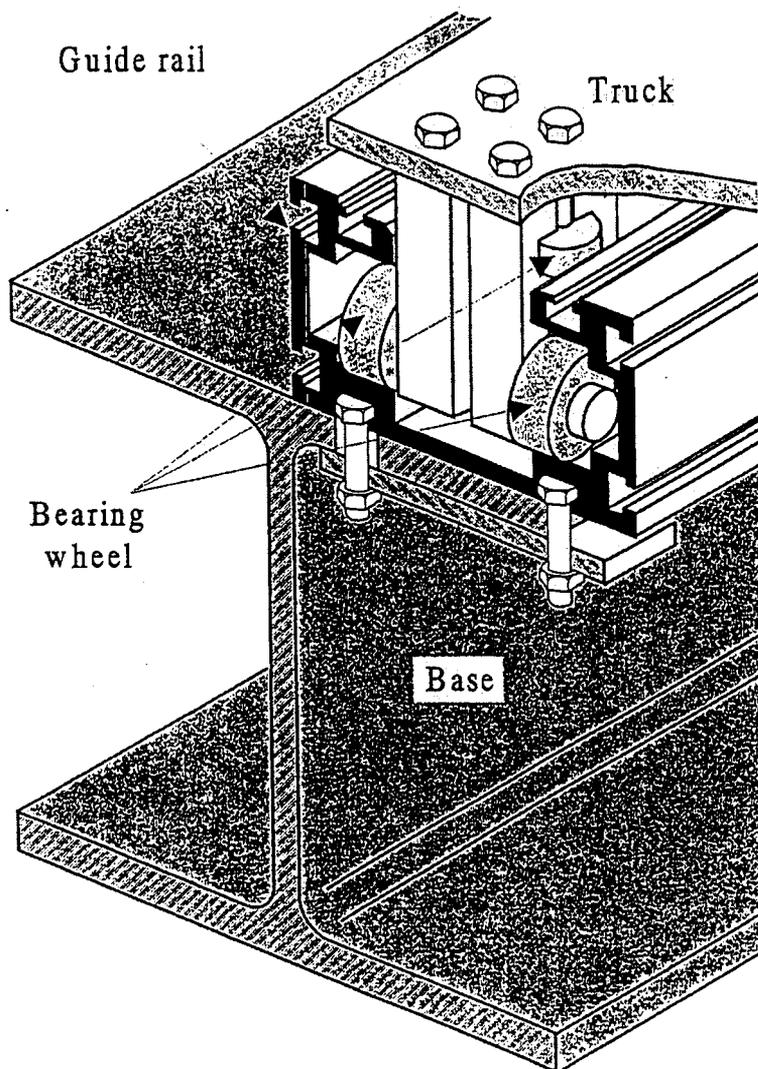


図 5.4 台車車輪部

#### (4) 剛体壁

衝突面として鉄板を取り付けた定盤を壁面に密着させて用いた。側面には倒壊防止のためのフレームを組み合わせてある。定盤は本体のみで 180kg 以上あり、剛体壁とみなすのに十分であると考えられる。

#### (5) 測定部

衝撃吸収エネルギー算出のため、速度センサーを用いて初速度と跳ね返り速度を計測した。このセンサーは剛体壁前面、土台部分に定間隔に配置してあり、その 2 点間の距離と通過する時間を計測することにより速度を測定する。この透過型光センサーは、 $0.1\mu\text{sec}$  まで検出可能である。センサーの結線図を図 5.5 に示す。また同時に圧潰挙動を観察するために高速度ビデオカメラによる撮影も行った。このビデオカメラはフレーム間隔  $0.5\text{msec}$  まで撮影可能であるが、光量、撮

影範囲などを考慮してフレーム間隔 1msec で用いた。速度計測をビデオでも行えるように測定台上に 2mm の目盛りを刻んである。なお、台車に用いたものと同様のガイドを測定部土台にも設け、衝突と跳ね返りをスムーズに行えるようにした。

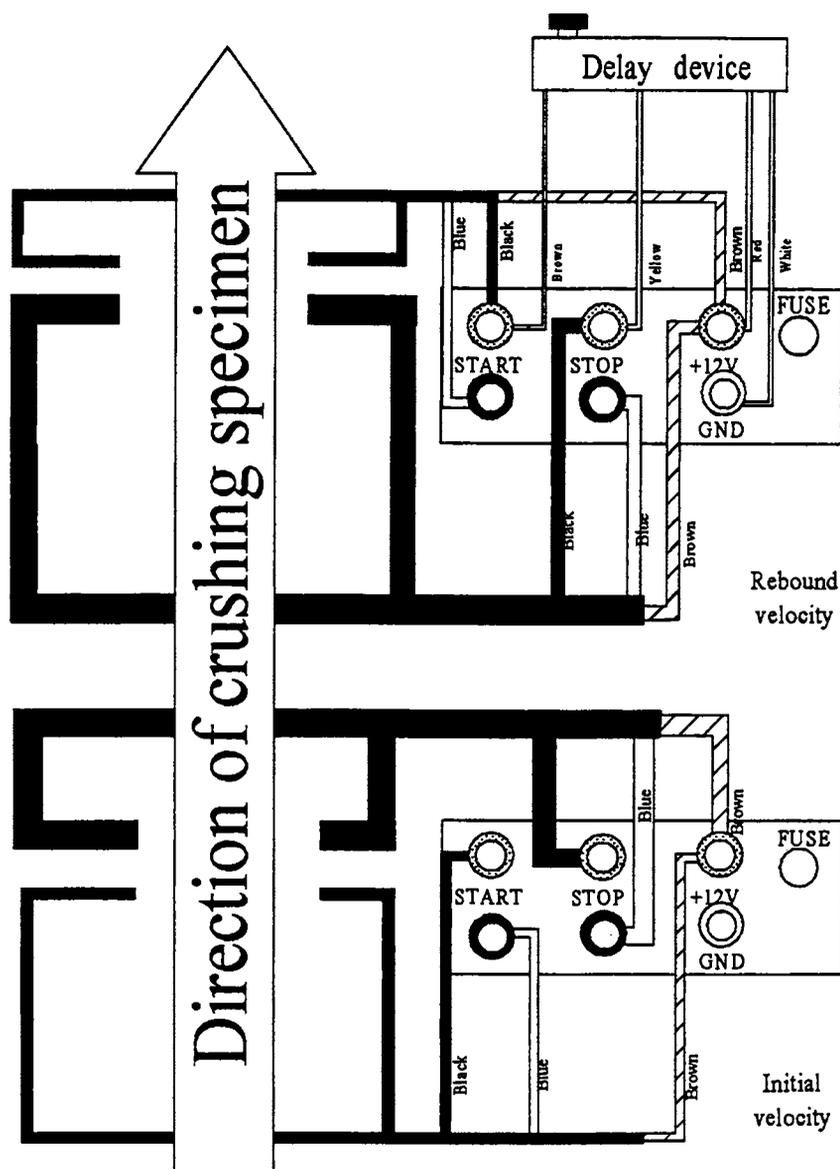


図 5.5 センサー配線図

#### (6) 貫通体

ハニカムセル間のアルミニウム板を貫通するために図 5.6 のような貫通体を作成した。土台となる部分の材質は鋼，寸法は 100×250，厚さは 25mm，貫通体材質は真鍮，直径 5mm，長さは 10mm である。貫通体の数はハニカムセルに合わせて，21 個とした。

#### (7) 衝撃子

試験片圧潰のため用いた衝撃子は SS410 材の円柱を加工したものをを用いた。

以下に本研究で使用した機材一式を示す。

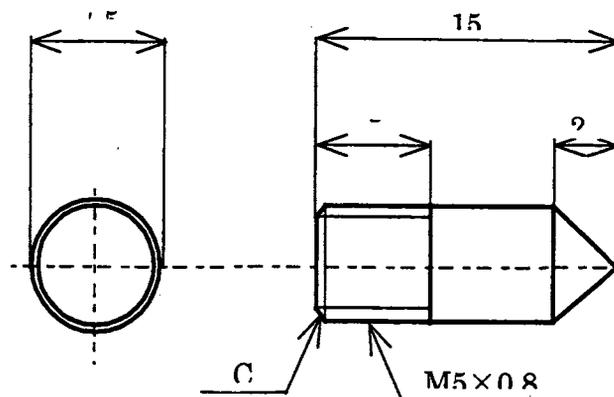


図 5.6 貫通体

・素材

|              |                  |           |
|--------------|------------------|-----------|
| ラバーチューブ      | φ40 (内径 30) × 6m | TSUZUMI   |
| 等辺山型鋼        | 65 × 65 × 6      |           |
| 溝型鋼          | 125 × 65         |           |
| H型鋼          | 150 × 150        |           |
| 箱型定盤 (機械仕上げ) | 750 × 1000 × 125 | 大西測定工具製作所 |
| アングルフレーム     | 40 × 40          |           |
| アクリル板        | 900 × 2000 × 5   |           |

・ラバーチューブ止め

|          |         |         |
|----------|---------|---------|
| ワイヤークリップ | 33 - 38 | 株式会社カクマ |
| 鍛造クリップ   | 33 - 04 | 株式会社カクマ |

・レール

|          |                         |                |
|----------|-------------------------|----------------|
| アルファフレーム | AFC - 9660 - 6 (6m × 2) | NIC オートテック株式会社 |
|----------|-------------------------|----------------|

・引張部分

|               |         |          |
|---------------|---------|----------|
| ボールベアリング入りV車  | 125NKS  | (株) 永瀬工場 |
| ワイヤロープ        | WR - 6S | ニッコウ     |
| ラチェット式手巻きウインチ | MR - 3  | マックスプル   |

・台車構成部品

|             |                         |                |
|-------------|-------------------------|----------------|
| 保持器付針状ころ軸受け | NA4902                  | NTN            |
|             | NA496                   | NTN            |
| アルファフレーム    | AFS - 3030 - 6 (2m × 1) | NIC オートテック株式会社 |

フリーベア C - 3S (株) フリーベアコーポレーション

・速度計測部

|                   |          |         |
|-------------------|----------|---------|
| ファイバ式 (ファイバ・ユニット) | FU - 7F  | KEYENCE |
| 光電スイッチ (アタッチメント)  | F - 2    | KEYENCE |
| (アンプ・ユニット)        | FS2 - 60 | KEYENCE |

(アンブ・ユニット) ES2 - 65

・時間出力装置

高速度ビデオカメラ

MEMRECAMci - 3

nac IMAGE TECHNOLOGY

## 5.2 試験片データ

本実験で用いたハニカム試験片は全てモリシン工業製アルミハニカム（ハニカムセル自体は（株）住友金属工業）で、材料であるアルミハニカムの基本特性を表 5.1 に示す。試験片は縦（重積した方向） $W=100\text{mm}$ ，横  $L=100\text{mm}$ ，高さ  $H=10\text{mm}$ ， $20\text{mm}$  の 2 種類，セルサイズは  $S=3/4\text{ inch}$  の合計 2 種類を準備した。ハニカムセル高さ方向の一端にはハニカムと同様の基本特性をもつアルミニウムパネルが接着されている。図 5.7 にそのアルミハニカムパネルを示す。パネルの厚みは  $0.1\text{mm}$  である。このアルミハニカムを縦に積み重ねることで膜付ハニカムセル構造体を構成する。試験片の種類は、TypeA が  $10\text{mm}\times 4$  段，TypeB が  $20\text{mm}\times 2$  段をそれぞれ意味する。2 種類の試験片を図 5.8 に示す。

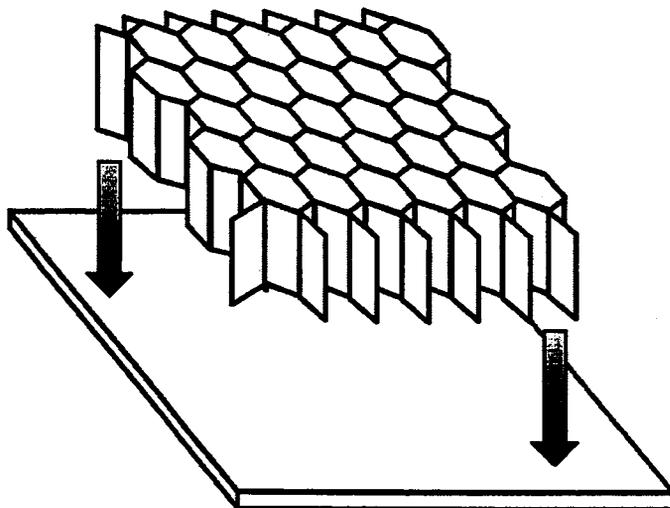


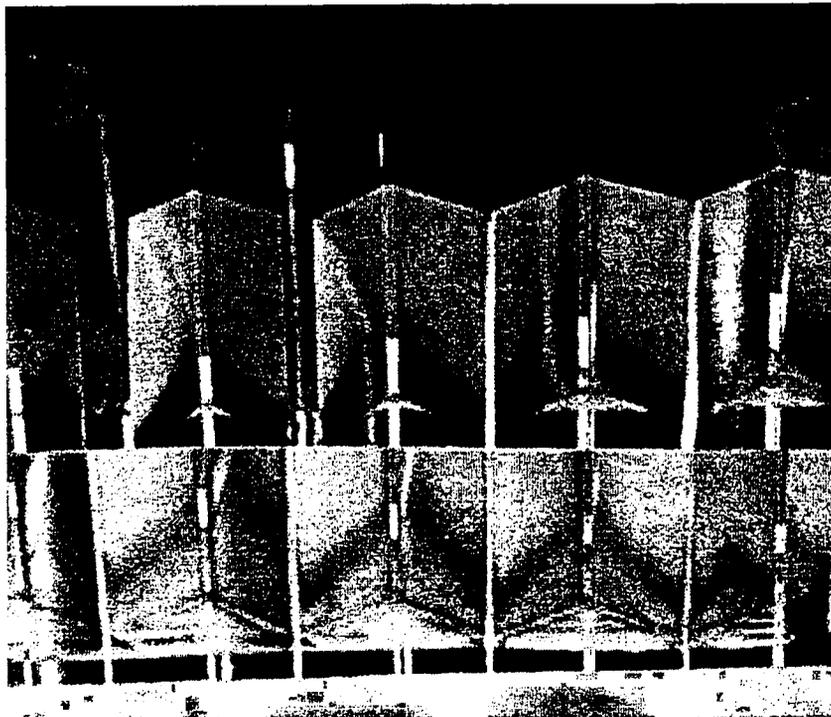
図 5.7 ハニカムパネル

表 5.1 アルミニウム 3003 の主な機械的性質

|         |   |
|---------|---|
| 縦弾性係数   | 69GPa                                       |
| せん断弾性係数 | 25GPa                                       |
| ポアソン比   | 0.33  |
| 密度      | $2705\text{kg/m}^3$                         |
| 比熱      | $900\text{J/kg}\cdot^\circ\text{C}$         |
| 体積膨張係数  | $68.1\times 10^{-6}\text{ }/^\circ\text{C}$ |
| 線膨張係数   | $24\times 10^{-6}\text{ }/^\circ\text{C}$   |
| 降伏応力    | 186MPa                                      |
| 歪み硬化率   | 39.4MPa                                     |



TypeA(セルサイズ 3/4inch,セル高さ 10mm×4段 膜厚 0.2mm)



TypeB(セルサイズ 3/4inch,セル高さ 20mm×2段 膜厚 0.2mm)

図 5.8 試験片

## 5.3 衝撃試験結果と考察

衝撃圧潰試験結果として、高速度ビデオカメラで撮影した映像からそれぞれの圧潰挙動を観察した。各試験片に対し、二回ずつ実験を行った。図 5.9 に TypeA, 図 5.10 に TypeB の圧潰挙動の例を示す。衝撃子が衝突する瞬間を 0msec とし、1msec ごとの圧潰挙動を衝撃子が跳ね返るまで示した。また、図 5.11 に試験後の TypeA の写真を、図 5.12 に TypeB の写真をそれぞれ示す。

まず圧潰挙動であるが、TypeA, TypeB ともに貫通体に接触し、ハニカムが剛体に接触した面から順に圧潰している様子がわかる。図 5.11(c), 5.12(c)からも分かるように、貫通状態では膜に対して3~4個のき裂が入り、貫通している様子がわかる。しかし、各ハニカムパネルによって六角形の並びにかなりの違いがあり、実験の際なるべく近いものを積み重ねたが、圧潰途中にずれが生じ、すべての膜を貫通することはできなかった。

実験によって得られた衝撃子の初速度と跳ね返り速度から求めた全吸収エネルギー、単位体積当たりの吸収エネルギー、しわ数、貫通した膜数、エネルギー吸収率を表 5.2 に示す。表より全吸収エネルギー、単位体積当たりのエネルギー吸収とともに貫通膜数の多いものの方が大きくなっていることが分かる。TypeA は約 13%, TypeB は約 3% 貫通膜のないものに比べてエネルギー吸収量が増加した。

表 5.2 衝撃圧潰試験結果

| Specimen type                                   | TypeA<br>(1st) | TypeA<br>(2nd) | TypeB<br>(1st) | TypeB<br>(2nd) | Without<br>projectile<br>(1st) | Without<br>projectile<br>(2nd) |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Total energy absorption [J]                     | 169.36         | 144.99         | 142.24         | 139.24         | 139.67                         | 133.74                         |
| Specific energy absorption [MJ/m <sup>3</sup> ] | 38.16          | 32.67          | 32.01          | 31.37          | 31.47                          | 30.13                          |
| Number of wrinkle                               | 2~3            | 2~3            | 2~3            | 2~3            | 3~4                            | 3~4                            |
| Penetrated film                                 | 2~3            | 2~3            | 1~2            | 1~2            | -                              | -                              |
| Rate of absorption [%]                          | 99.6           | 96.9           | 98.6           | 96.2           | 96.5                           | 98.0                           |
| Initial velocity [m/s]                          | 6.97           | 6.54           | 6.42           | 6.43           | 6.43                           | 6.47                           |
| Rebound velocity [m/s]                          | 0.44           | 1.16           | 0.76           | 1.25           | 1.20                           | 1.91                           |

| Specimen Type                                   | TypeA | TypeB | TypeC  | TypeD  | Without Projectile |
|---|-------|-------|--------|--------|--------------------|
| Total energy absorption [J]                     | 356.1 | 342.4 | 146.58 | 136.99 | 132.99             |
| Specific energy absorption [MJ/m <sup>3</sup> ] | 23.58 | 30.8  | 17.14  | 20.8   | 15.55              |
| Number of wrinkle                               | 6~9   | 4~6   | 4~6    | 4~6    | 4~6                |
| Penetrated film                                 | 2~3   | 1~2   | 2~3    | 1~2    | -                  |
| Initial velocity[m/s]                           | 10.2  | 10    | 6.76   | 6.43   | 6.59               |
| Rebound velocity[m/s]                           | 1.58  | 1.46  | 0.8    | 1      | 1.56               |

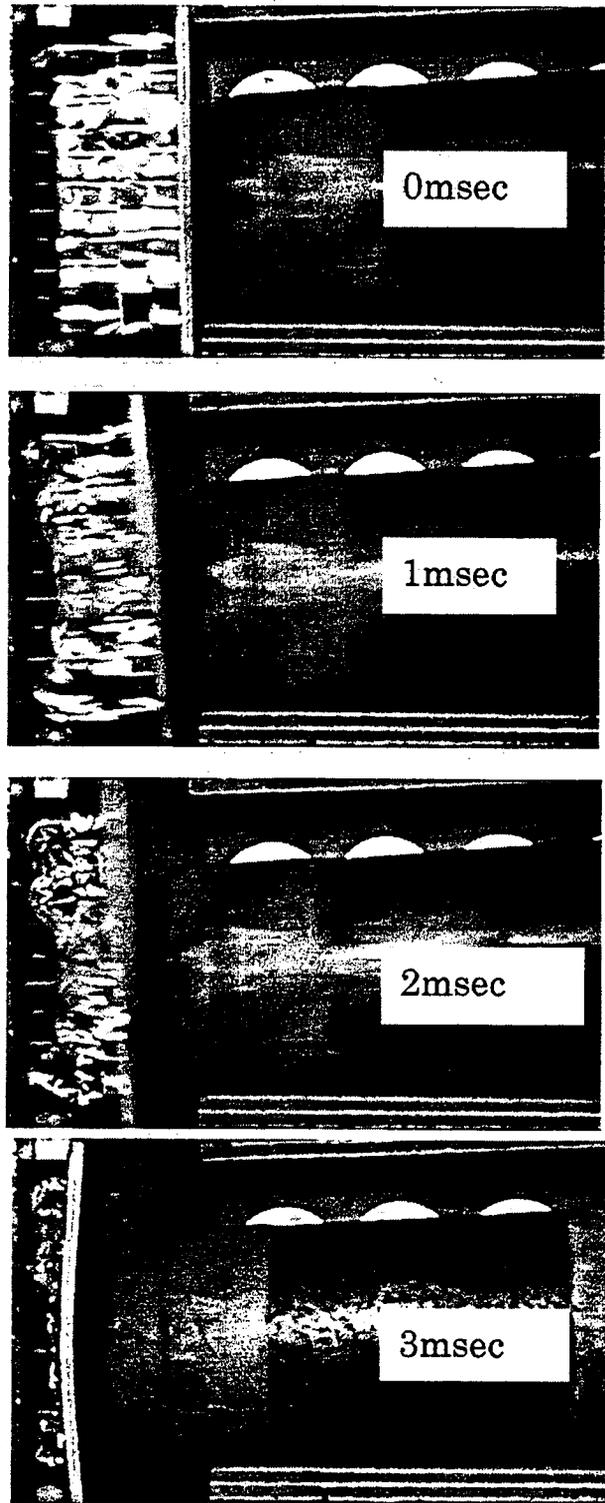


图 5.9 TypeA 压溃举動

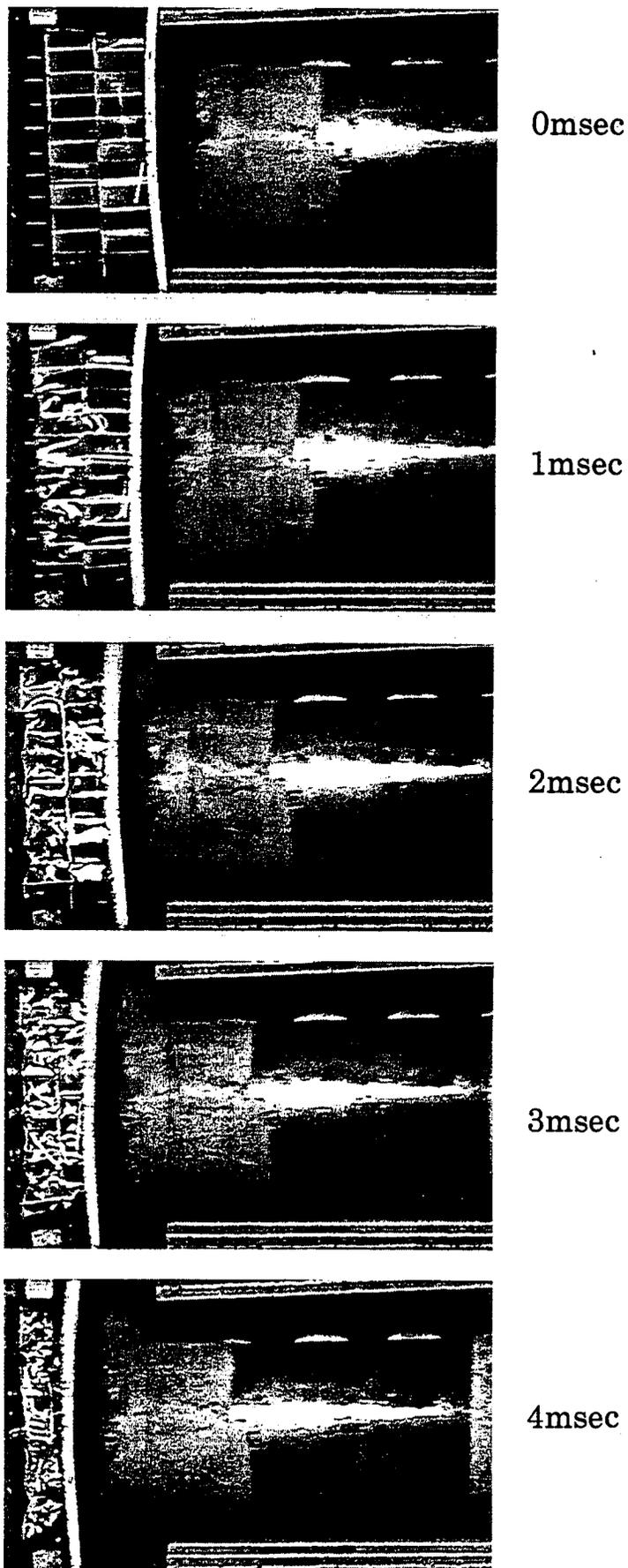
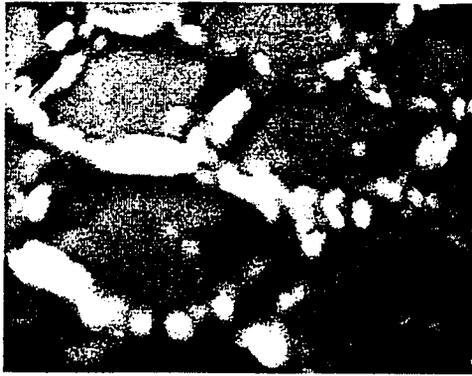


図 5.10 TypeB 圧潰挙動



1段目



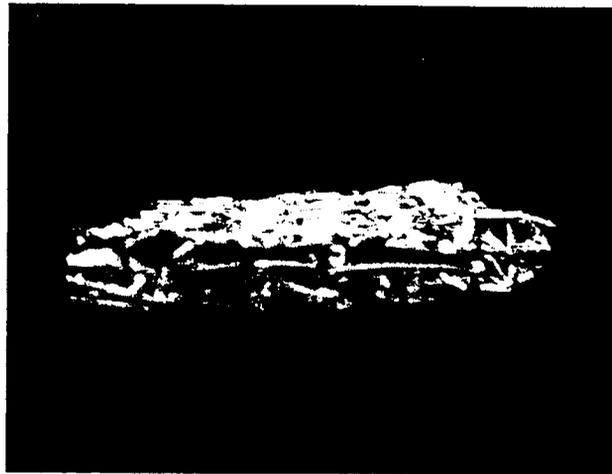
2段目



3段目

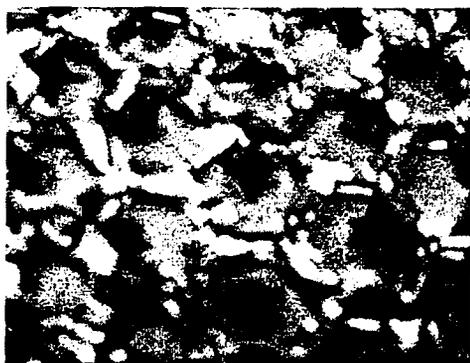


4段目

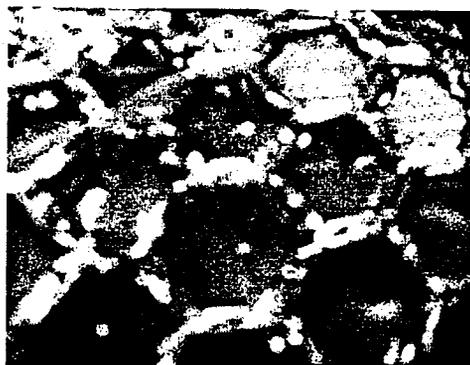


全体図

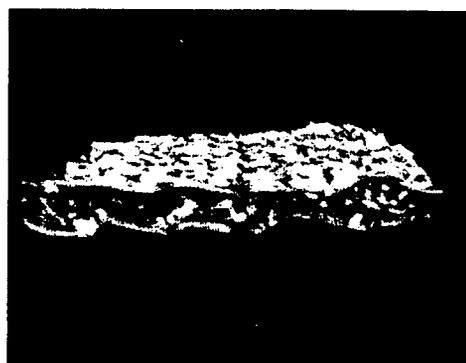
図 5.11 TypeA 衝撃圧潰試験結果



1 段目



2 段目



全体図

図 5.12 TypeB 衝撃圧潰試験結果

表 3.2 の試験片の種類は、TypeA が 10mm×4 段 膜厚 0.2mm, TypeB が 20mm×2 段 膜厚 0.2mm, TypeC が 10mm×4 段 膜厚 0.1mm, TypeD が 20mm×2 段 膜厚 0.1mm をそれぞれ意味する。

## 第6章 ハニカム構造体の圧潰シミュレーション

### 6.1 解析手法

第5章で示した膜付ハニカム構造衝撃圧潰実験と並行して動的有限要素解析プログラム LS-DYNA によるシミュレーションも行った LS-DYNA の詳細は第4章に示したとおりである。

### 6.2 解析モデル

解析に用いるモデルは試験片と同様の形状を持つことが理想的であることは4.1節で述べたとおりであるが、解析時間や、要素分割ともに非常に困難な作業になる。そこでハニカムの六角形セルによる理想的な対称構成を利用して、一部を取り出した簡易モデルを作成した。

ハニカムを構成している最小の形状モデルは六角形セルを12等分した1/12モデルとなるが、貫通体とハニカムセルの両方の対称性を考慮したモデル化は非常に難しく、また、全体モデルでは解析時間に膨大な時間を費やすためハニカムセル、貫通体ともにモデル化の容易な1/2モデルを採用した。1/2モデルの形状を図6.1に示す。ハニカムの接着部分の箔厚は2倍の厚みとした。

衝撃圧潰試験では剛体壁に側に試験片と貫通体を固定し、衝撃子を衝突させて圧潰させる。図6.2に示すように、LS-DYNAによるシミュレーションにおいても、モデルの上部に衝撃子に等しい質量を付加して圧潰させている。衝撃圧潰試験における衝撃子と同様の約7kgの荷重を、1/2モデルに換算し、ABCD面に一様に配置して一定速度10m/sで剛体壁に固定した貫通体に試験片を衝突させるモデルとした。ここで一定速度を用いたのは吸収エネルギー値の導出を簡単にするためである。モデル寸法、材料定数は試験片に準じた寸法、値とし実験と同様に10mm×4段、20mm×2段のモデルを作成した。また、拘束条件はハニカム形状の1/2分割を考慮して、ADD'A'面(対称面)にはY方向への変位・回転を拘束した。辺AD、A'D'上の点には、局所座標系を設定し、それぞれAB、CD方向への変位・回転を拘束した。さらに剛体壁に固定している貫通体はXY方向に変位・回転拘束し、射出された衝撃子がハニカムに衝突圧潰、貫通する様子を再現した。要素は、ハニカムには四辺形1次シェル要素、貫通体、貫通膜には三角形1次シェル要素、四辺形1次シェル要素の両方を用いた。貫通膜のき裂進展条件としては、第4章でのアルミニウム板貫通シミュレーションと同条件を用いた。き裂発生条件は、第4章で記述したように、節点における相当塑性ひずみが限界値0.15を超えると破断が生じる条件となっている。

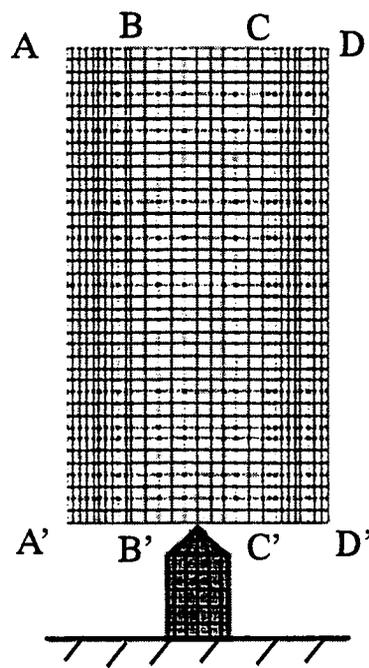
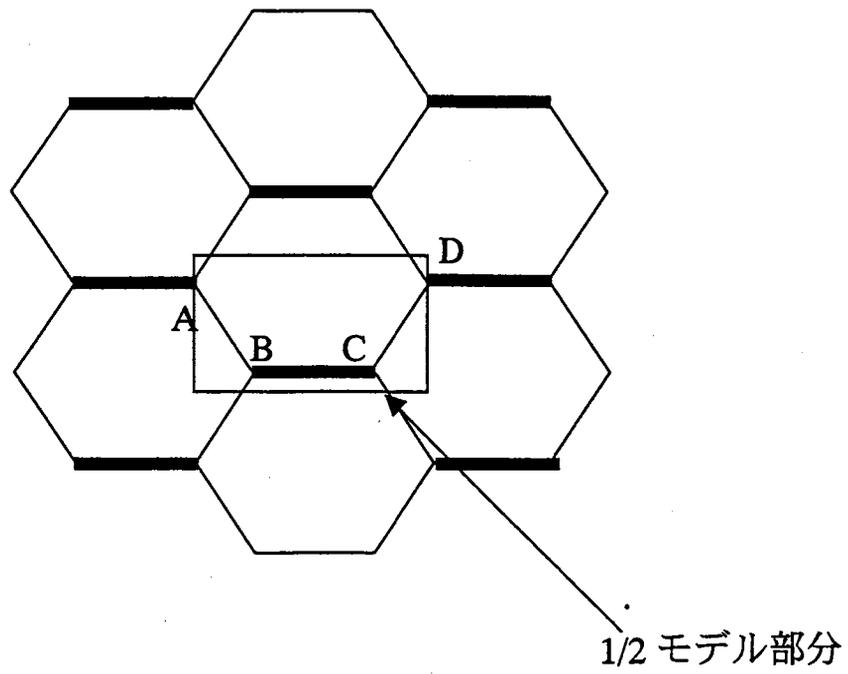


図 6.1 1/2 モデル

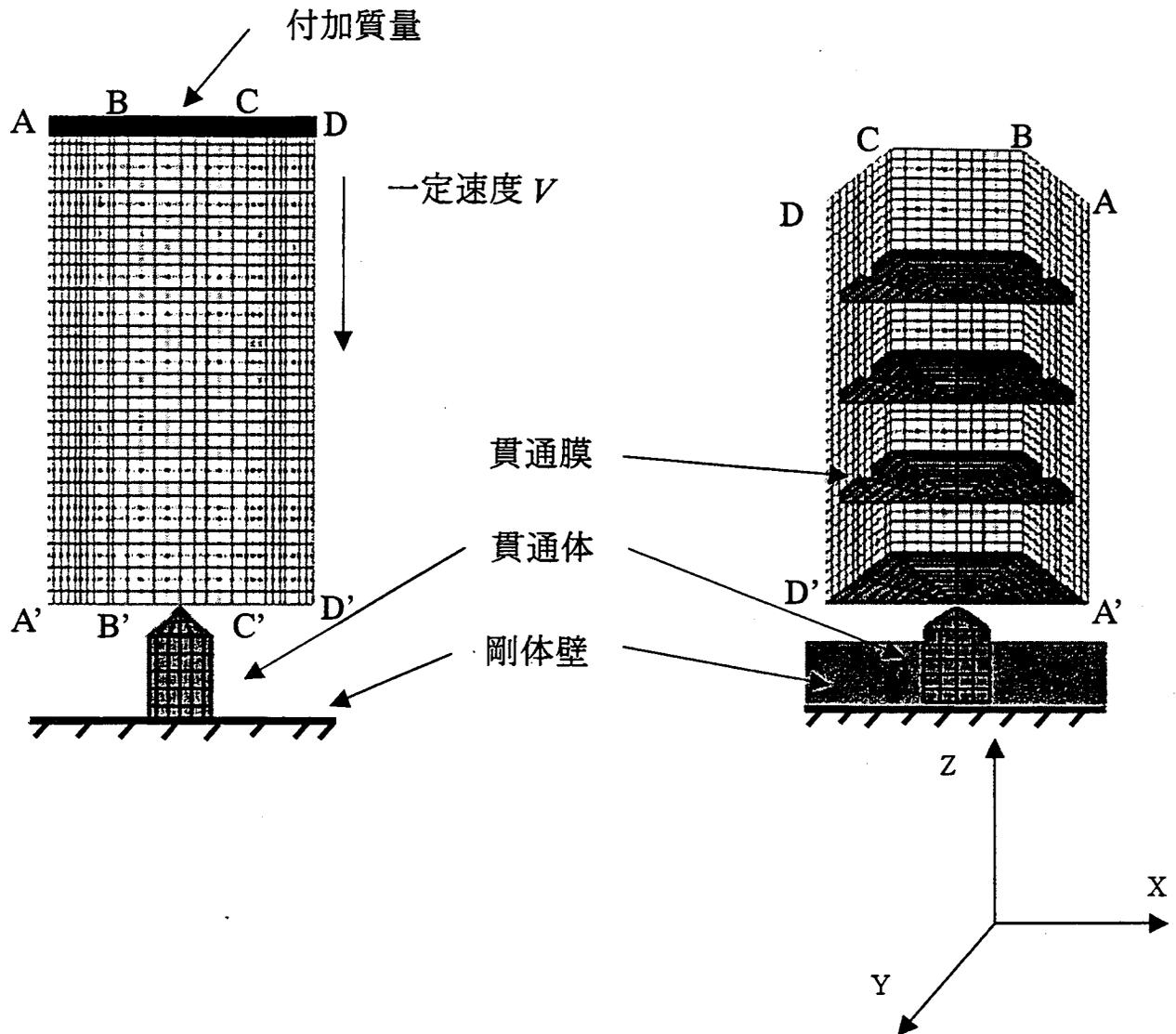


図 6.2 有限要素解析モデル(TypeA)

### 6.3 解析結果と考察

#### 6.3.1 TypeA モデル

まず実験における TypeA に対応するモデルの解析を行った。要素分割は AB, BC, CD 方向に 10 分割, セル高さ方向に 40 分割, 各貫通膜は X 方向に 10 分割, Y 方向に 10 分割した 1568 要素, 1909 節点のモデルとなった。

図 6.3 に TypeA の有限要素解析による圧潰挙動とミーゼス応力を示す。時間の経過とともに剛体壁との接触面からしわが形成されて圧潰しており, 全体で 4~5 個のしわが形成されている。また, 貫通体が接触した膜から順にき裂が入り, 貫通している様子も確認できる。き裂の形状は実験では 2~3 個のき裂が入っていたが, 解析では要素分割した方向すべてにき裂が入る結果となった。さらに, 実験ではハニカムパネルの個々の不均一から貫通体が全ての膜を貫通することができなかつたため, しわの数や貫通枚数の比較はできなかつた。解析から得られた荷重-変位曲

線を図 6.5 に示す。グラフ上に示した点 A で一枚目の膜を貫通する際の最大荷重となっている。点 B はハニカムが剛体壁に接触した点であり、剛体壁が受ける荷重が急激に上昇している状態にある。点 A での荷重が点 B での荷重に比べて非常に小さいことから分かるように、点 B 以降の膜の貫通点は荷重-変位曲線からは確認することができなかった。き裂の形状としては、最初に対角線方向にき裂が入りその後全方向にき裂が進んでいく結果となった。

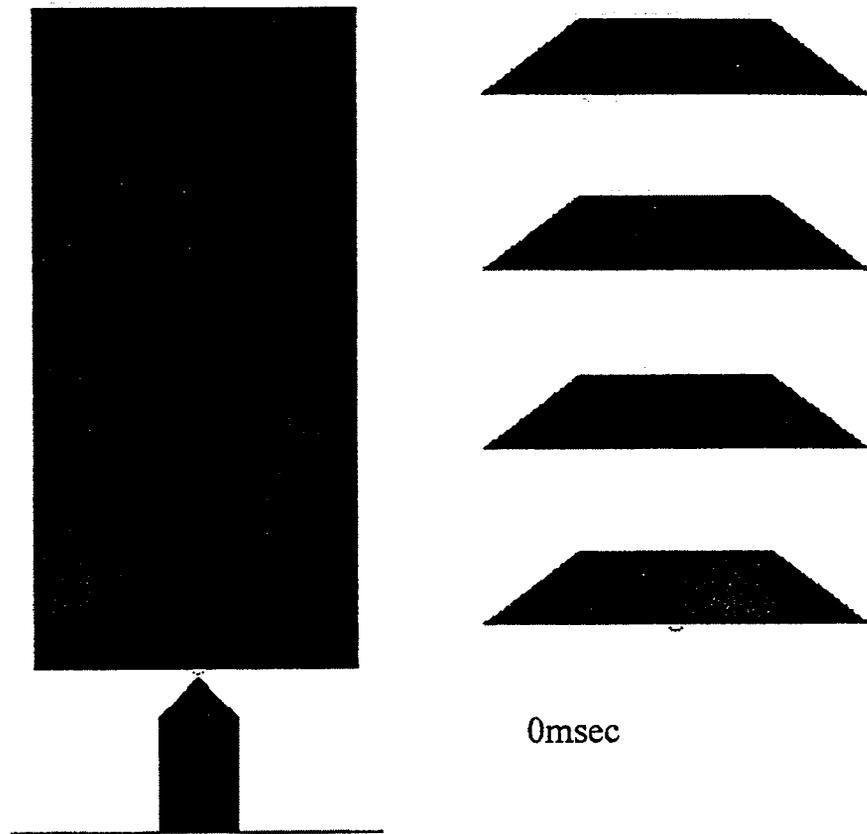


図 6.3 TypeA 有限要素解析結果 (その1 0msec. 右図は貫通膜状態を示す)

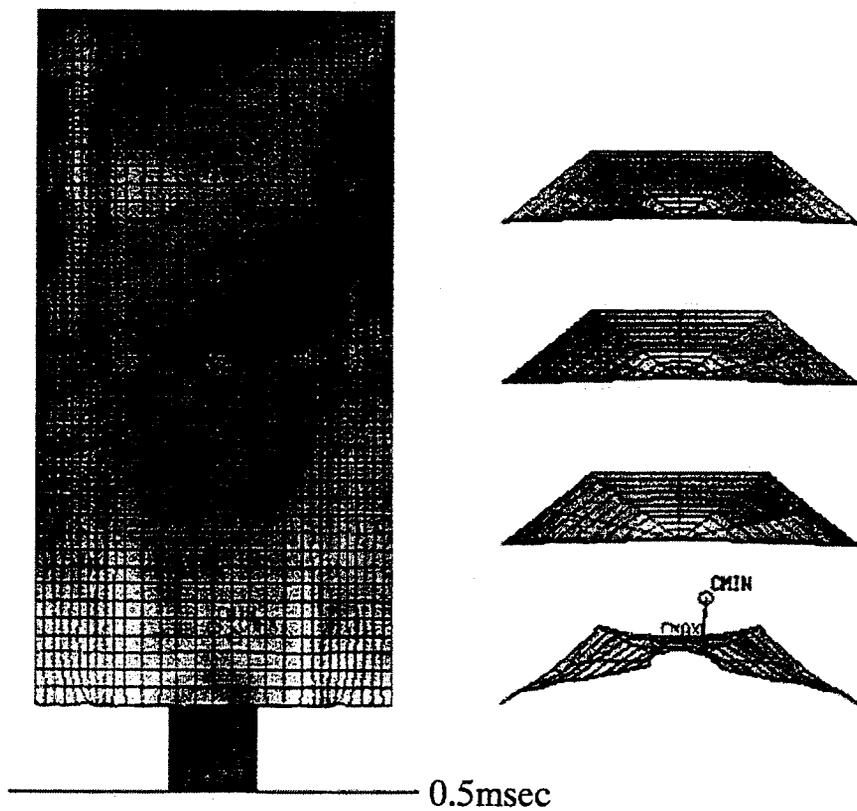


図 6.3 TypeA 有限要素解析結果 (その2)

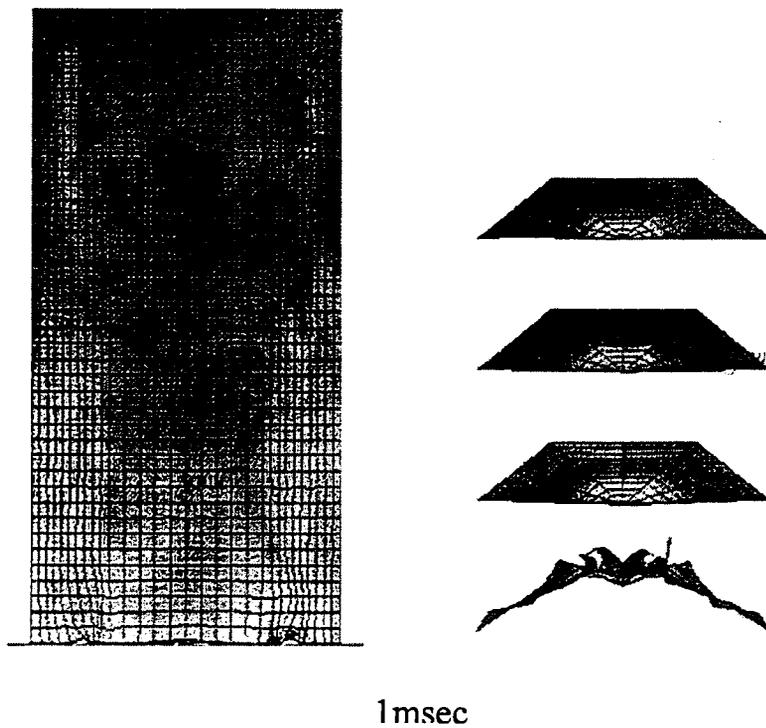


図 6.3 TypeA 有限要素解析結果 (その3)

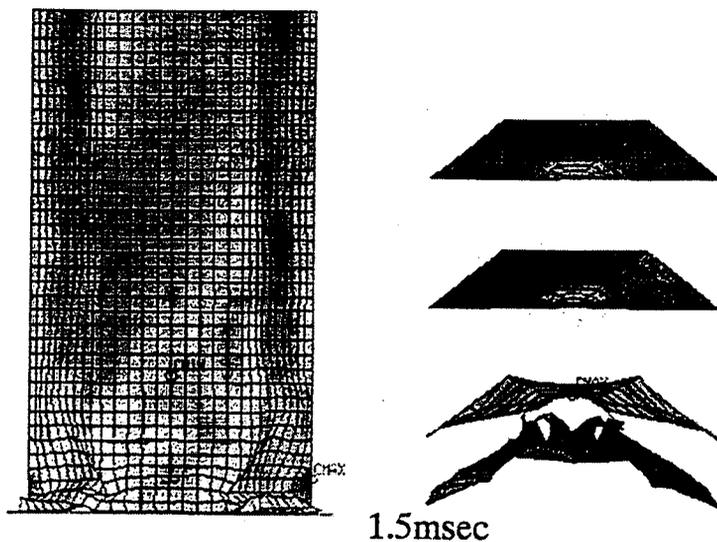


図 6.3 TypeA 有限要素解析結果 (その 4)

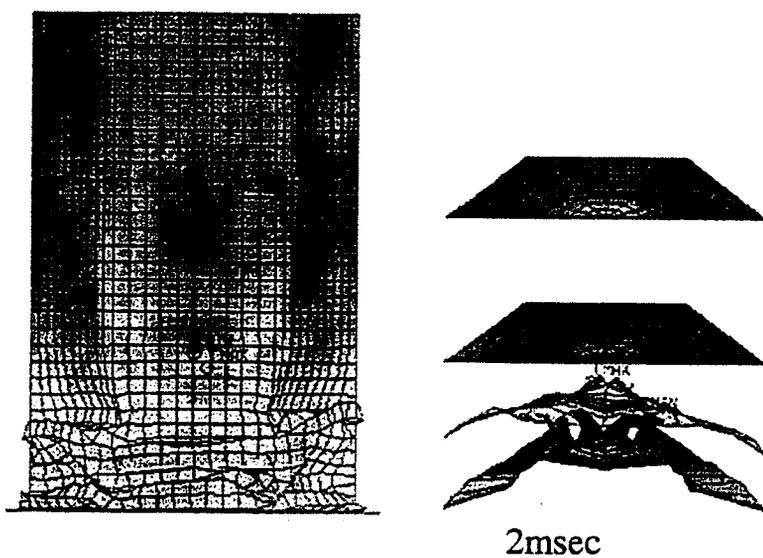


図 6.3 TypeA 有限要素解析結果 (その 5)

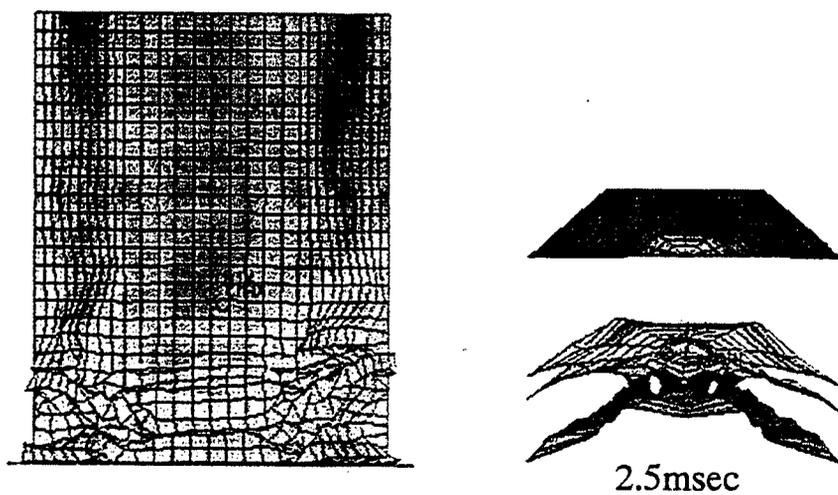
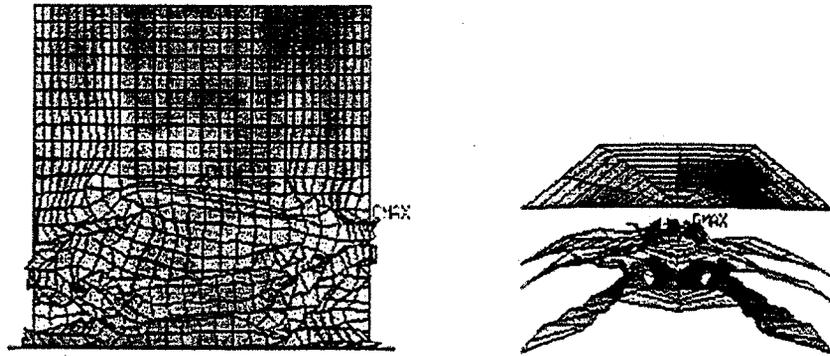
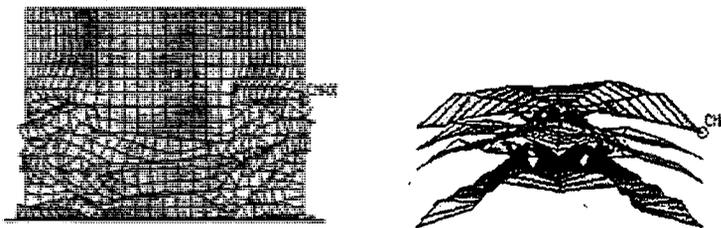


図 6.3 TypeA 有限要素解析結果 (その 6)



3msec

図 6.3 TypeA 有限要素解析結果 (その7)



3.5msec

図 6.3 TypeA 有限要素解析結果 (その8)



4msec

図 6.3 TypeA 有限要素解析結果 (その9)

### 6.3.2 TypeB モデル

次に TypeB の有限要素解析結果を示す。要素分割は TypeA のときと同様であり、膜数が二枚減っているため 1436 要素、1748 節点である。

図 6.4 に TypeB の有限要素解析結果を示す。これも同様に時間の経過とともに剛体壁との接触面からしわが形成されて圧潰しており、全体で 4~5 個のしわが形成している。荷重-変位曲線も TypeA と同様に 2 枚目以降の膜の貫通点は確認することができなかった。き裂進展方向は、TypeA と同じであった。

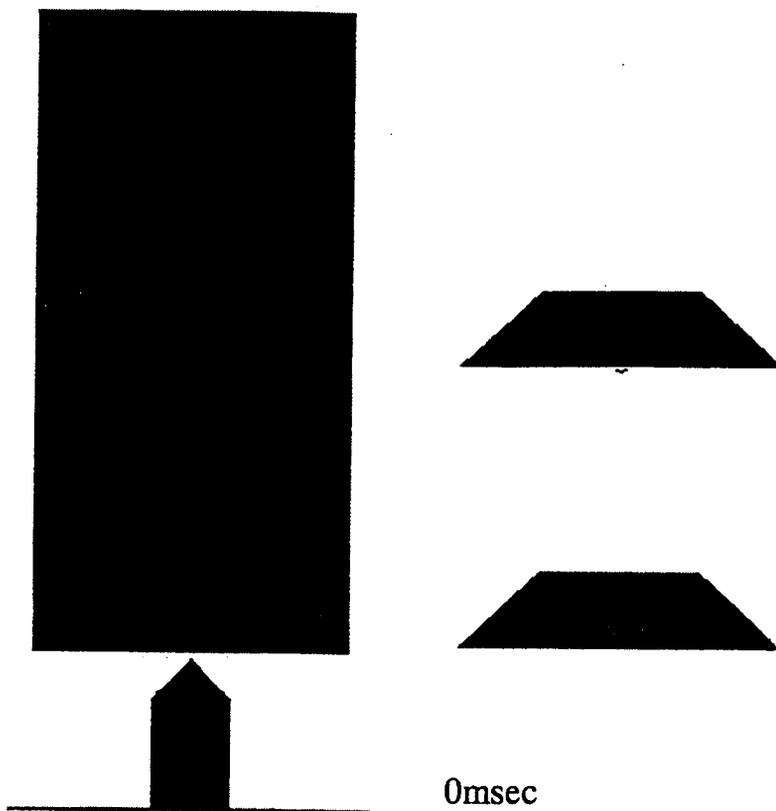


図 6.4 TypeB 有限要素解析結果(その1 右図は貫通膜状態を示す)

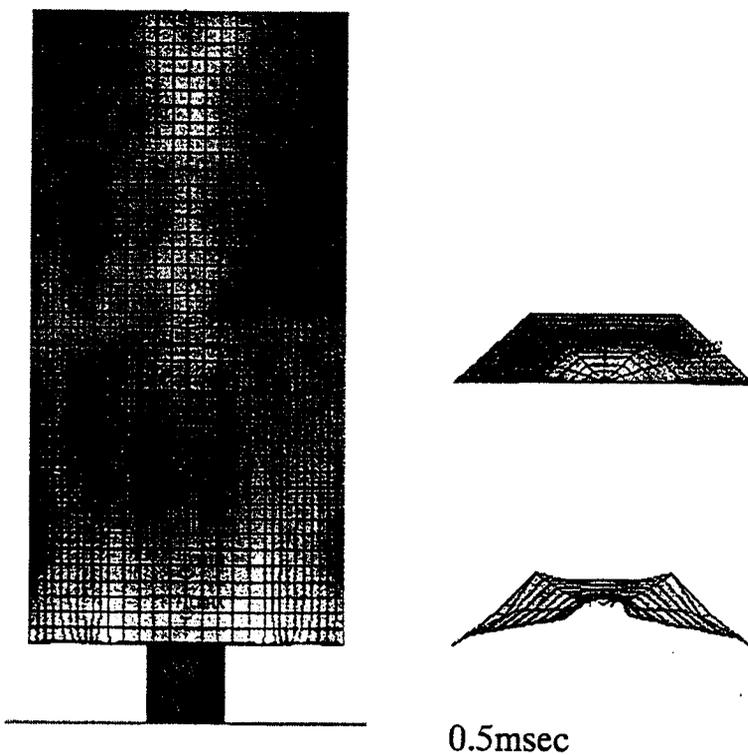


図 6.4 TypeB 有限要素解析結果(その2)

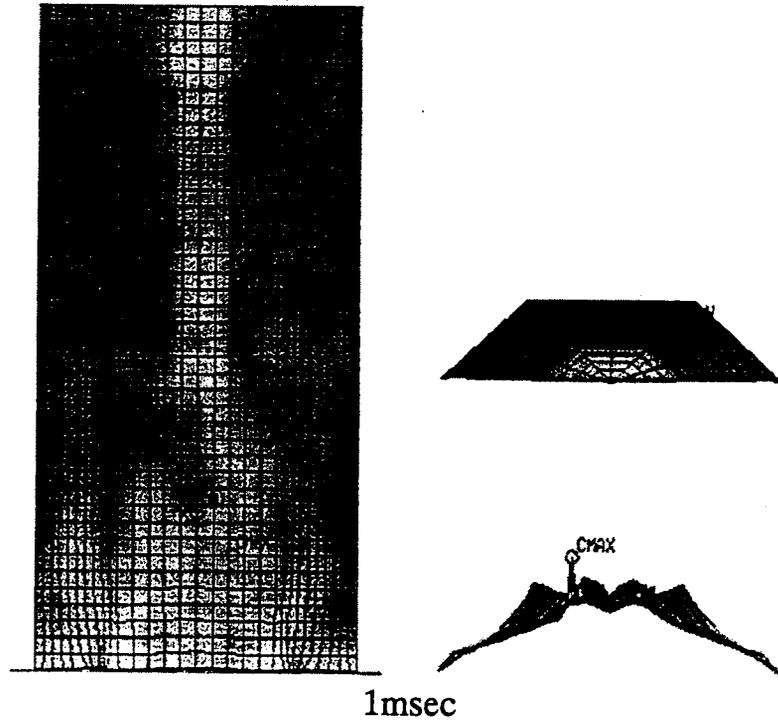


図 6.4 TypeB 有限要素解析結果(その 3)

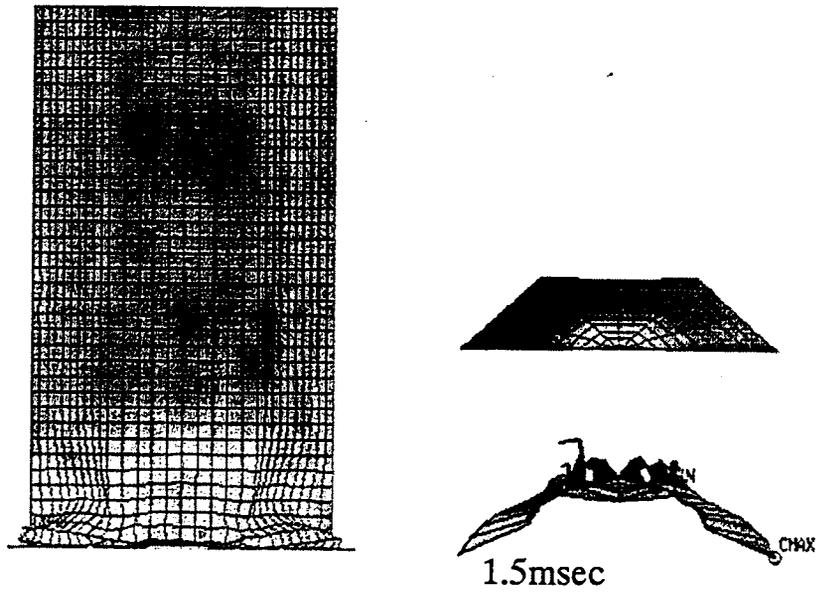


図 6.4 TypeB 有限要素解析結果(その 4)

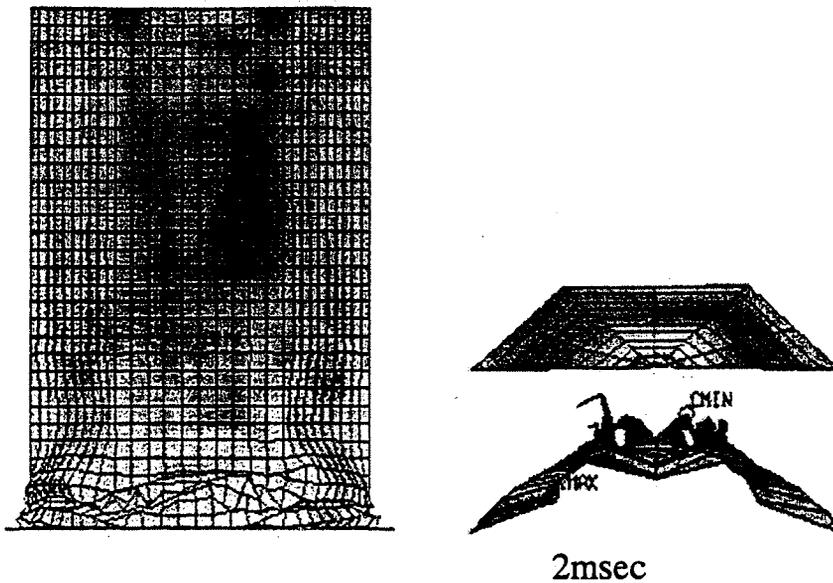


図 6.4 TypeB 有限要素解析結果(その 5)

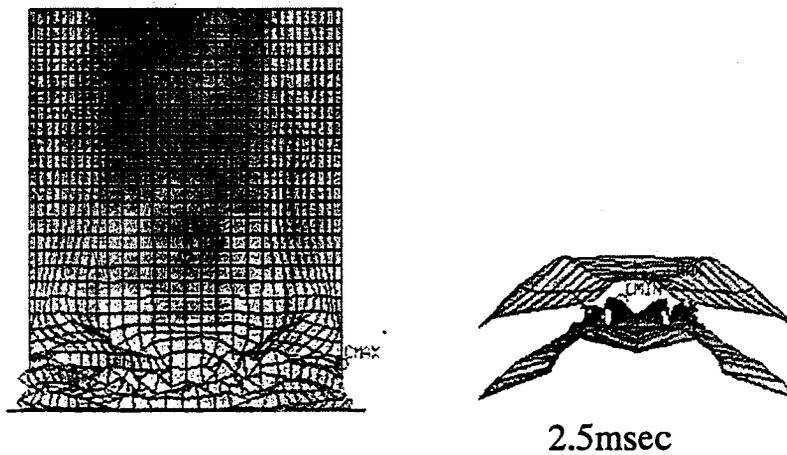


図 6.4 TypeB 有限要素解析結果(その 6)

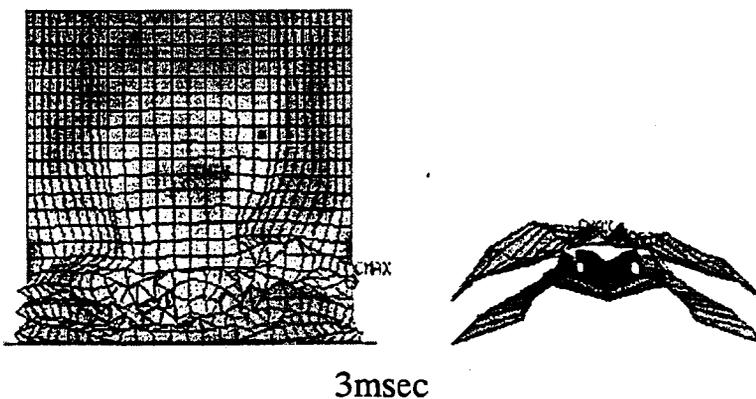


図 6.4 TypeB 有限要素解析結果(その 7)

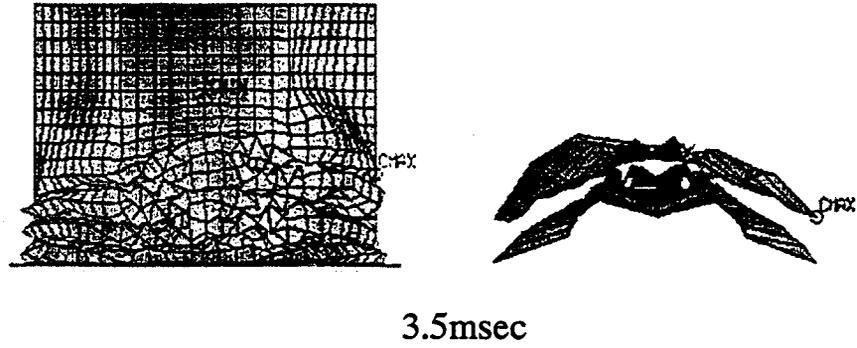


図 6.4 TypeB 有限要素解析結果(その 8)

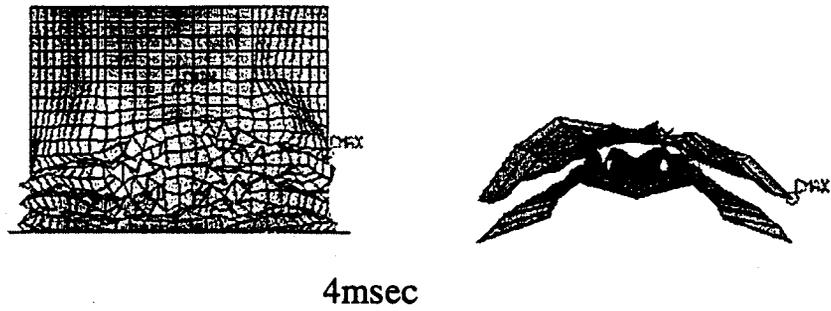


図 6.4 TypeB 有限要素解析結果(その 9)

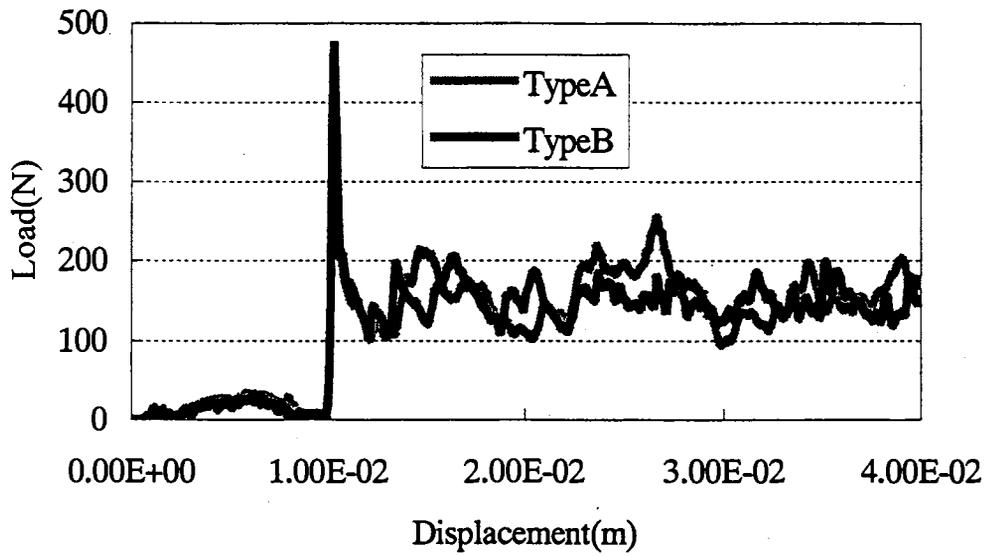


図 6.5 解析から得られた荷重—変位曲線

### 6.3.3 考察

解析から得られた荷重-変位曲線からエネルギー吸収量を算出し、実験との比較を行った(表 6.1)。速度条件が異なるため、数値的な比較は直接できないが、単位体積あたりのエネルギー吸収量は膜数が多い TypeA のほうが大きくなっている。また最大荷重は、ハニカムが剛体壁に接触した際に発生し、同じ膜厚のものを同じ枚数貫通した後にハニカムが剛体壁に接触するのではほぼ等しい値となった。

表 6.1 実験と解析との比較

| Specimen Type   | TypeA | TypeB |
|---|-------|-------|
| Specific energy absorption(Experiment) [MJ/m <sup>3</sup> ] | 35.41 | 30.80 |
| Specific energy absorption(FEM) [MJ/m <sup>3</sup> ]        | 40.13 | 38.56 |
| Maximum impact force(FEM) [N]                               | 472   | 470   |

### 6.4 膜厚 0.3mm モデル

実験結果、解析結果より膜厚 0.1mm では期待するようなエネルギー吸収能の向上は見られなかった。そこで TypeA, TypeB モデルと同様の形状で膜厚のみを 0.3mm に変更したモデルを作成し、解析を行った。同時に、貫通体のないもの(Without projectile)についても解析を行った。それぞれを TypeA', TypeB' とする。表 6.2, 図 6.6 より膜のないハニカム構造の単位体積当りエネルギー値と比べてもやはり大きくなっている。さらに、TypeA, B モデルと比べても単位体積当りのエネルギー吸収量が大きくなっていることがわかる。これより解析上では、中の膜は薄いものを複数積層するよりも、多少厚いものを数枚重ねた方がエネルギー吸収能が向上するといえる。

表 6.2 板厚による単位体積当りのエネルギー値の比較(FEM)

| Specimen type      | Specific energy absorption [FEM] |
|--------------------|----------------------------------|
| TypeA              | 40.13                            |
| TypeA'             | 48.93                            |
| TypeB              | 38.56                            |
| TypeB'             | 43.94                            |
| Without projectile | 37.33                            |

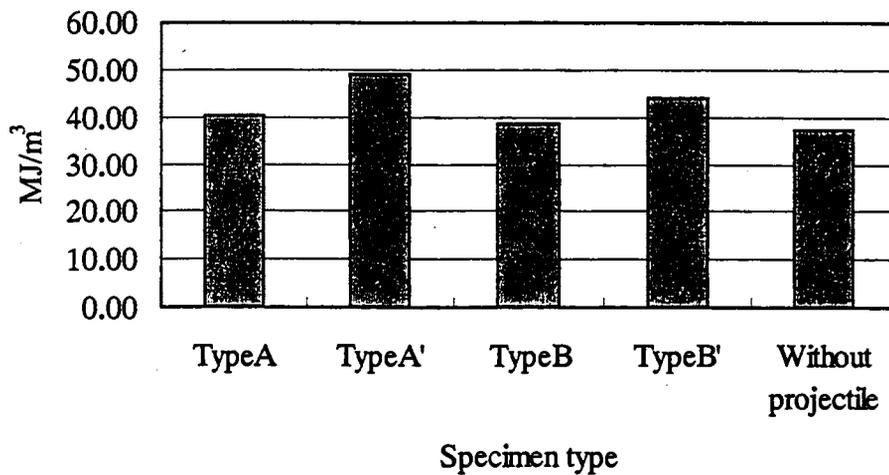


図 6.6 板厚による単位体積当りのエネルギー値の比較(FEM)

## 第7章 結論と今後の展望

本研究では、主に貫通膜数の違う2種類の膜付ハニカム構造について衝撃圧潰試験装置を用いて動的圧潰試験を行った。衝撃子の初速度と跳ね返り速度から衝撃吸収エネルギーを実験的に求め、膜付ハニカム構造の衝撃吸収性能を検討した。併せて動的陽解法有限要素法にてシミュレーションを行い、衝撃試験時の衝撃圧潰現象と比較して考察をした。さらに衝撃エネルギー吸収能を向上するために、ある条件下で各種パラメータを変化したシミュレーションを実施して検討した。その結果以下の結論を得た。

1. アルミハニカム構造はその重量に対して高い衝撃吸収性能をもつことは過去の研究より判明しているが、さらに吸収性能を高めるためにハニカム構造内部に貫通膜を設けることで、ハニカム構造による塑性圧潰と、膜破壊とが同時に発生しより高いエネルギー吸収能が得られる。
2. 同じセル高さであっても貫通膜数の多いものの方が、エネルギー吸収量、単位体積当りのエネルギー吸収量ともに大きく、衝撃吸収材としての効果が高い。
3. 有限要素解析では、速度条件に違いがあったがその傾向は実験に近いモデル化ができた。さらに、解析上で貫通膜厚を厚いものに変更したところ薄い膜を複数重ねたものより多少厚いものを数枚重ねたものの方が単位体積当たりのエネルギー吸収量が大きいという結果が得られた。
4. 総エネルギー吸収量は、貫通膜数が多いほど大きくなるが、単位体積当りのエネルギー吸収量は、貫通膜数が多すぎると、逆に小さくなることが判明した。実験値と単位体積当りのエネルギー吸収量を比較すると、TypeAが約2.1倍、TypeBが約2.3倍となった。

なお、実験では個々のハニカムパネルの不均一性が原因で貫通体が全ての膜を貫通できないという問題が生じた。これは、解析との比較にも大きな影響を与えるため、ハニカムパネルの製作方法、積層方法を検討する必要がある。また、貫通膜厚の厚いもので実際に実験を行い、解析と比較する必要がある。今回は貫通膜数、膜厚のみの検討だったが、貫通膜だけではなく箔厚、高さなど各種パラメータの検討を行っていく必要がある。

今後の課題としては、

1. 当初、予定しながら検討できなかったシート材で構成できる薄板セル構造の形態を、構造最適設計の形態最適化法を利用して六角形ハニカムや四角形ハニカム、フレキシブルハニカムなどの短い柱状薄板セル構造と貫通破壊を引き起こさせる薄板シートを交互に接着した多層構造（サンドイッチ板を多層にしたイメージ）を基本に多重セル構造やリブ付きセル構造など種々のセル構造形態を探索する必要がある。それらのセル構造体に各種形状の圧子を衝突させて、薄板シートの貫通破壊と柱状セルの圧潰を交互に誘発させながら、構造体の圧潰と破壊が同時

に誘発，進行できる構造形態を設計することを今後，目指す予定である。

2. 衝撃吸収セル構造材開発の別の方策として，構造形態最適化手法を駆使して，三次元連続体から出発してより一般的な衝撃エネルギー吸収最適形態を探索し，形態を薄板セルに制限した結果よりもさらに吸収効果の高い軽量セル構造形態の設計を目指すことも今後の目標としたい。
3. 広い範囲の衝突速度で有効なセル構造体を開発するため，セル密度の異なる多層セル構造体を組み合わせて，寸法，密度を調整した多層セル構造体を構成し，低速では薄く大きなセル構造が破壊，圧潰し，中速度では細かいセル構造が，さらに高速では厚く粗いセル構造が破壊，圧潰を引き起こして衝撃エネルギーを吸収する多層セル構造体の開発も将来の目標とする。