

# Study of micro-testing method evaluating mechanical properties of micro-elements

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: Oda, Juhachi メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.24517/00034867">https://doi.org/10.24517/00034867</a>

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



---

# 微小部品の機械的特性を評価する マイクロテスト法の開発研究

---

(研究課題番号 07555029)

平成7～9年度科学研究費補助金〔基盤研究(A)(2) (展開)〕

研究成果報告書

平成10年3月

研究代表者 尾田 十八

(金沢大学工学部 教授)

微小部品の機械的特性を評価する  
マイクロテスティング法の開発研究

(研究課題番号 07555029)

平成7年度～平成9年度科学研究費補助金 [基盤研究(A)(2)(展開)] 研究成果報告書

平成10年3月

研究代表者 尾田 十八  
(金沢大学工学部 教授)



3000-39943-0

金沢大学附属図書館

## はしがき

現在多方面で利用されている電子デバイス、電子部品はもちろん、これから実用化へと進みつつあるマイクロマシン、さらにまた生体医用機械等は、その構成部品はミリ、ミクロンオーダーからさらに微小なものへと進みつつある。このような微小あるいは極微小機械や構造物の耐久性と信頼性を高めることは、このような分野が将来機械工学の中心となることから、その重要性は極めて大きい。しかしこの種の問題は、単にスケールオーダーが従来の機械類と異なることのみでなく、次のような点で、これまでの材料力学問題と大きく相違することが知られている。

- (1) 構造、組織が複雑で特に界面等の不連続部を多く有する。
- (2) 構成材料の制作方法から、それらの材料特性が既存のバルク材のそれと異なるものが多い。

本研究はこのような特異な問題に対して、機器を構成している微小な基本要素部品の中でも特に薄膜の応力-ひずみ特性を評価する具体的な方法としてのマイクロテスト法を、スケールオーダーに依存しない FEM 等の力学的手法を巧みに利用することで確立することを目的とした。

具体的には、薄膜と基板の 2 層構造体に対し、その引張試験を実施することで薄膜のみの破断に至る応力-ひずみ挙動を推定する方法や、また薄膜のせん断強さや 2 軸引張強さを推定する方法論を提示した。

平成 10 年 3 月  
研究代表者 尾田 十八

## 研究組織

- 研究代表者：尾田 十八（金沢大学工学部 教授）  
研究分担者：山崎 光悦（金沢大学工学部 教授）  
研究分担者：北川 和夫（金沢大学工学部 教授）  
研究分担者：門前 亮一（金沢大学工学部 助教授）  
研究分担者：坂本 二郎（金沢大学工学部 助手）  
研究分担者：多加 充彦（石川工業試験場 機械電子部・技師）

## 研究経費

平成7年度	9,000 千円
平成8年度	3,000 千円
平成9年度	1,200 千円
計	13,200 千円

## 研究発表

### (1) 学会誌等

- 1) 尾田十八, 坂本二郎, 阿部新吾: はり理論による電子デバイス・リードフレームの熱応力評価式, 日本機械学会論文集 (A編), 61 巻, 584 号, 1995-4.
- 2) K.Yamazaki and N.Tsubosaka: Stress Analysis of Junction of Plate and Shell Built-up Structures via Special Finite Shell Element, JSME International Journal, Series A, Vol.39, No.2, 1996.
- 3) S.Takabayashi, H.Nabesawa, S.Fujiki, K.Tanino, S.Yamashita, N.Takahashi, K.Nomura and K.Kitagawa: Reversible Actuator of Shape-memory Alloy Film with Inverse Force Layer, Materials Science Research International, Vol.2, No.3, 1996-9.
- 4) R.monzen and H.Mizutani: Climb of Orowan loops in an overaged Al-Li alloy, Materials Science & Engineering, A231, 1997.

### (2) 口頭発表

- 1) 尾田十八: 引張試験を利用したマイクロテスト法の開発, 日本材料学会第 11 回トライボロジー小委員会, 1997-1.
- 2) 尾田十八, 青山哲也: 引張試験を利用したマイクロテスト法の開発 (薄膜の応力-ひずみ挙動の推定法), 日本機械学会関西支部第 72 期定時

総会講演会，1997-3.

(3) 出版物

- 1) 尾田十八：電子デバイス/電子機器の簡易的応力解析法とその応用，電子デバイス/電子機器の強度・信頼性評価に関する研究分科会成果報告書，日本機械学会，1996-5.
- 2) 尾田十八：形と強さのひみつ，オーム社，1997-5.
- 3) 尾田十八：形態生成のための局所ルールとその応用，計算力学システムとその新技術への応用研究分科会成果報告書，日本機械学会，1997-6.

## 研究成果目次

1. マイクロテストイング法の現状と問題点	1
2. マイクロテストイング法のための力学的手法	6
3. 引張試験を利用したマイクロテストイング法の開発	19
3. 1 薄膜のヤング率と破断強さ推定法	19
3. 2 薄膜のせん断強さ推定法	28
3. 3 薄膜の2軸引張強さ推定法	45
資料	
発表論文等	54

## 1. マイクロテスト法の現状と問題点

マイクロマシンや電子デバイス等の特性は、それらを構成するマイクロ部品材料の特性に大きく支配される。たとえば表 1 はマクロマテリアルの物性が現在開発が進められているマイクロマシン要素に与える影響を示したものである<sup>(1)</sup>。これからわかるように内部応力やヤング率などは各種微小センサの特性に大きく影響し、また引張強さや破壊靱性値などはマイクロ構造体そのものの強度に強く影響してくる。このような事から、マイクロマテリアルの各種特性を正確に評価する試験手法が今日強く望まれている。

ところがマイクロマテリアルの物性、破壊挙動には、極微小な寸法でかつ主としてそれら材料の創生過程からくる複雑な界面を有するものが多いことから、比較的均一とみなせるバルク材と異なる現象が多い。したがってこれまで用いられてきたような標準的テストピースを使いほぼ万能な材料試験機と評価手法はそのままの形ではほとんど利用できない。このように幾つかの困難性が存在してはいるが、今日わずかに電子デバイス材料等を対象とした薄膜材料について、そのヤング率や、破壊特性を評価する具体的研究が行われている<sup>(2)~(8)</sup>。表 2 は、その方法をまとめたて示したものである。これからも了解できるようにマイクロテスト法には大きく分けて 2 つのアプローチの仕方がある。1 つは図 1 に示すような薄膜のバルジ試験法のように寸法が微小であるという困難性を何らかの手段で克服し、従来から知られている材料試験法を利用してマイクロマテリアルそのものから直接的に求めたい特性値を得ようとするものである。この方法はその特性値の誤差が入りにくいという利点がある一方、材料寸法が減少するに従い測定法の困難性も増大する。

一方、図 2 に示す薄膜の疲労試験のように、マイクロマテリアルそのものではなく、それを含む構造体に対し負荷を与えそれから測定される各種データより求めたい特性値を逆解析的に求める方法がある。この方法では試験試料作成上の問題は少なくなるが、しかしマイクロマテリアルを含む構造体として、求めたい特性値との関係からどのような形状・寸法モデルを設定すれば良いのか、また測定データから目的とする特性値をいかに分離するかという問題点が生ずる。つまりこの方法では対象とするマイクロマテリアルのどのような特性値を求めるかによって、それらを支配する力学的原理を含む物理法則を利用した独自の寸法・形状モデルの設定とその測定方法を確立する必要がある。

以上のような現状を考慮し、本研究では次のような方式を用いることにした。

- (1) マイクロテストの試料はそれを含む構造体とする.
- (2) 求める特性値に対応してそのモデルの寸法・形状や負荷条件を, FEM 等を用いた逆解析シミュレーションにより決定する.
- (3) (1), (2) の有効性をモデル実験により評価する.

このような作業を通して新しく, かつ信頼性の高いマイクロテスト法を開発することにした. 以下第 2 章では上述の (2) において不可欠なマイクロテスト法のための力学的手法を説明し, 第 3 章では新しく開発したマイクロテスト法の幾つかを述べることにしたい.

#### 参考文献

- (1) 駒井, 材料, 46 巻 12 号 (1997-12), 1442.
- (2) 神谷・他, 材料, 47 巻 1 号 (1998-1), 100.
- (3) Brotzen, F.R. and Rosenmayer, C.T., Thin Solid Films, 166(1988), 291.
- (4) Allen, M.G. and Mehregany, M., Applied Physics, 51(1987), 241.
- (5) 尾田・他, 日本機械学会論文集 (A 編), 57 巻 535 号 (1991-3), 214.
- (6) 尾田・他, 日本機械学会論文集 (A 編), 57 巻 542 号 (1991-10), 330.
- (7) 野中・他, 日本機械学会論文集 (A 編), 58 巻 548 号 (1992-4), 168.
- (8) 鳥居・他, 材料, 44 巻 500 号 (1995-7), 637.

表1 マイクロマテリアルの物性がマイクロ機械要素に与える影響

物性	影響	影響を及ぼす例
①内部応力(Pa)	弾性変形	圧力センサの感度
②ヤング率(Pa)	固有振動数, 座屈	振動型センサの固有振動数
③引張強度(MPa)	機械的強度	マイクロバルブ等の構造体の強度
④破壊靱性(Pa <sup>1/2</sup> )	信頼性	実構造体の破壊強度
⑤疲労強度(MPa)	寿命	
⑥環境強度(MPa)	寿命	
⑦熱伝導率(W/(mK))	熱時定数	フロー・センサや熱型赤外線センサ
⑧熱容量(J/K)	熱絶縁性	センサの応答性と感度
⑨摩擦	摺動抵抗	マイクロモータの動作速度
⑩摩擦	耐久性	

表 2 薄膜の機械的特性の評価法

試験片	単独膜を利用するもの	積層膜を利用するもの
試験法		
静的方法	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 液圧, 空気圧によるバルジ変形試験</li> <li>・ 引張試験</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 剛体の圧入, 接触試験</li> <li>・ 曲げ試験</li> <li>・ ひっかき試験</li> </ul>
動的方法	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 弾性波を利用するもの</li> <li>・ 超音波を利用するもの</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 弾性波を利用するもの</li> <li>・ 超音波を利用するもの</li> <li>・ AE 法の利用</li> </ul>

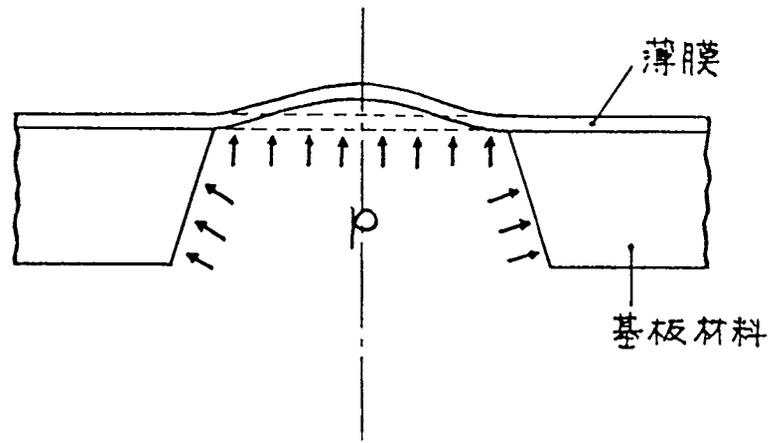


図1 薄膜のバルジ変形試験

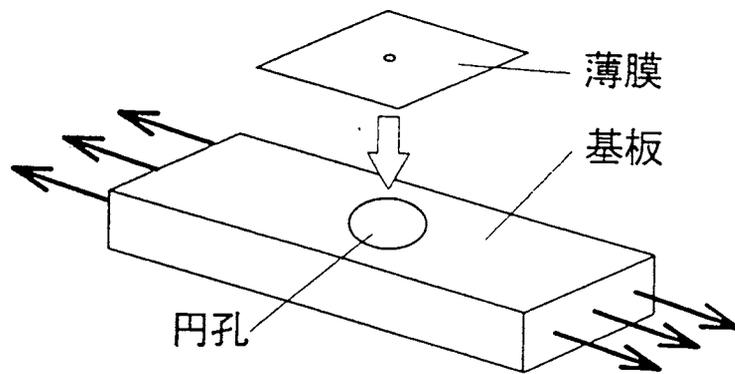


図2 鳥居ら<sup>(8)</sup>による薄膜疲労試験片

## 2. マイクロテスト法のための力学的手法

1章で述べたように、本研究ではマイクロマテリアルを含む微小構造体を試験片とする。そして、それに力学的な負荷や変形を与え、そこから得られるデータより目的とする特性パラメータを分離する。このような形での新しいマイクロテスト法を確立するためには、マイクロマテリアルを含む任意の微小構造体の力学的解析手法が必要となる。当然知られているように、これには3次元有限要素法が利用可能である。しかし試験片モデルの寸法、形状をパラメータとして、マイクロマテリアルの目的とする特性を得るための試験条件を最適に決めるには極めて多くの計算を必要とする。そこで本研究では、当面マイクロマテリアルとして薄膜材料を対象とし、かつそれを含む微小構造体として積層構造モデルを考え、これ特有の手段を用いることにした。それらは、本研究グループが開発した「多層構造体の有限要素法」と「多層ばり理論」である。ここでは、その理論を紹介し、かつその応用方法にも触れる。そして3章で述べるマイクロテスト法の開発にはこれらが活用されている。

### 3. 引張試験を利用したマイクロテスト法の開発

#### 3. 1 薄膜のヤング率と破断強さ推定法

1章の表1に関して述べたように、マイクロマテリアルの特性としてヤング率や破断強さは基本的に重要なものである。ここでは、これらの値を求める新しい方法を提案する。それは薄膜と基板からなる2層構造体を用い、それを引張試験することによって得るものである。

具体的には基板に平行部を有する特異な形状の薄膜を形成し、それを引張試験する。そしてそこで得られる薄膜平行部の変位と2層試験片の全荷重を求めることによって、薄膜の破断までに至る全応力-ひずみ挙動を推定するものである。特異な薄膜形状の決定には2章で述べた「多層構造体の有限要素法」が利用された。

またこのような試験方法の有効性は紙フェノール基板に銅箔が蒸着されたポジ感光基板を材料として実際に引張試験を実施することにより明らかにされた。もちろんそのための顕微鏡下で引張試験を行う専用の試験機も試作した。これらについてここで記述することにしたい。

### 3. 2 薄膜のせん断強さ推定法

前節で述べた方法とほぼ同様の形で、薄膜の面内せん断強さを求める試験方法を考えた。一般にバルク材のせん断強さを求める方法として、これまで図 1 に示すものが知られている<sup>(1)</sup>。しかし(1)は試験片を円筒状に加工することの難しさ、また(2)、(3)は板面外のせん断試験であり本問題には適用できない。一方(4)～(7)は板面内のせん断試験法であるが、全て単独膜を用いるものでもそれが薄膜化する場合、直接的には利用できないものと思われる。ただ(7)の方法は単独膜であっても特別のジグも必要なく、引張試験のみで実施できること、さらに基板と一体化させることで単独膜でなくともより薄い膜のせん断試験にも応用できる可能性を有している。そこで(7)のタイプでのよりよい試験方法の可能性を検討することにした。

まず、試験法(7)について、これまでの研究<sup>(2)</sup>を調べると、せん断部の切り欠き形状がそのせん断強さに大きく影響することがわかっている。図 2 は FEM シミュレーションによってせん断部に生ずる応力が単純せん断状態に近くなるとして得られた、最もよい形状を示している。しかし、これを用いた AI 試験片による実験では、そのせん断部での変形に伴い、形状の点対称性から切り欠き部全体で面外変形が生じ、不安定性が起こり、かつ、そのためせん断部の応力状態も複雑に変化して破断するという欠点のあることがわかった。そこでこのような問題点をまず解消する試験片形状の決定を試みた。その際薄膜では、放電加工やエッチング等で任意の形状が加工できることから、形状決定にあまり制約を設けないこととした。ただ基本形状としては、上記の(7)のタイプの点対称を除く立場より、図 3 に示すものを設定した。

このモデルは Y 軸に対して対称であることから、先のタイプ(7)のような問題点は生じないものと考えられる。しかしこの試験片形状でのせん断ラインで生ずる応力分布が妥当なものであるかどうかを吟味する必要がある。そこで板材を表 1 に示す特性の AI とし、引張試験下での基本モデルの応力分布を FEM によって解析することにした。図 4 はそのための要素分割であり、図 5 はせん断ライン上での各種応力分布を示している。これらより、生ずる $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\tau_{xy}$ の値がほぼ等しくまたせん断ライン両端で $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ は高く、逆に $\tau_{xy}$ は低いという一様性を欠く分布となっていることが分かる。よってこれらの問題点を解決するため基本モデルの C 部の形状、特にせん断ライン両端部の応力集中を避ける形状を考えた。具体的には図 6～9 に示すような円孔および半円孔切欠きをせん断ライン両端に設けた。これら図中で A1, B1 モデルはその切欠きが大きいものであり、A2, B2 は小さいモ

デルを示している。図 10～13 はこれらすべての改良モデルのせん断ライン上の応力分布を示したものである。これらより、いずれのモデルにおいても先の基本モデルのそれと比較し、 $\tau_{xy}$  の値が  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  の値よりかなり大きく、しかも  $\tau_{xy}$  の一様性にも優れていることがわかる。

以上、FEM シミュレーションにより、薄膜を対象としたせん断強さ試験法のための基本的なモデル形状が一応決定した。しかし、その真の有効性は実際の試験を行うことでのみ評価される。よって、表 2 に示した特性・寸法の Al 板材を用いて先の A1、B1 の試験片をワイヤカット放電加工機を用いて作成した。図 14、15 はその試験片形状を示すものであり、表 3 はそれを用いた試験から得られた板材のせん断強さを示している。これらの値は、別に実施した同種 Al 板の打ち抜き試験より求めたせん断強さ（表 4 参照）と比較して若干高めの値であるが、前者が板面内の、一方後者が板面外のせん断強さであることを考慮すると、ほぼ妥当な結果が得られたものと思われる。今後は、このような試験方法を板厚の薄い、薄膜の領域に入るマイクロマテリアルに対しても適用する方法へと拡張してゆく所存である。

#### 参考文献

- (1) 川田・他編，材料試験（1974），73，共立出版。
- (2) 鶴崎・他，日本機械学会論文集 47 巻 417 号（昭 56-5），512。

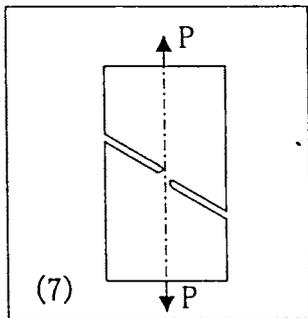
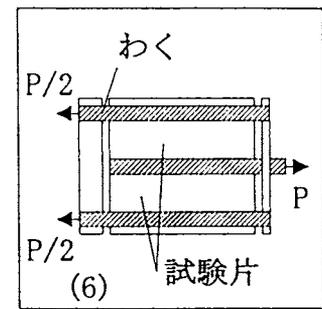
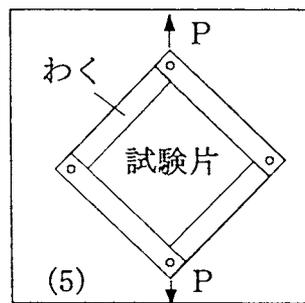
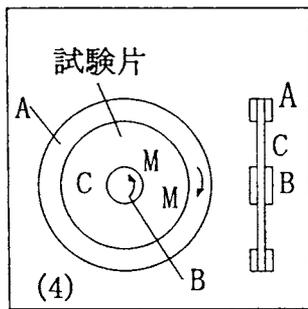
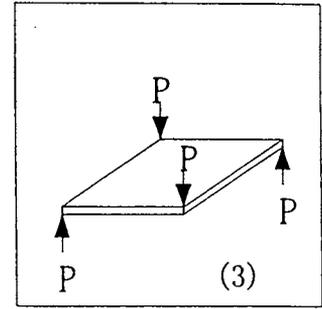
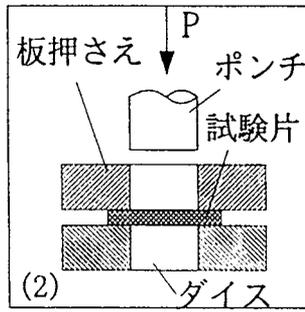
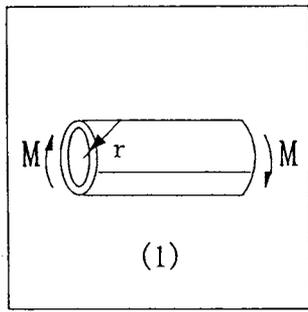
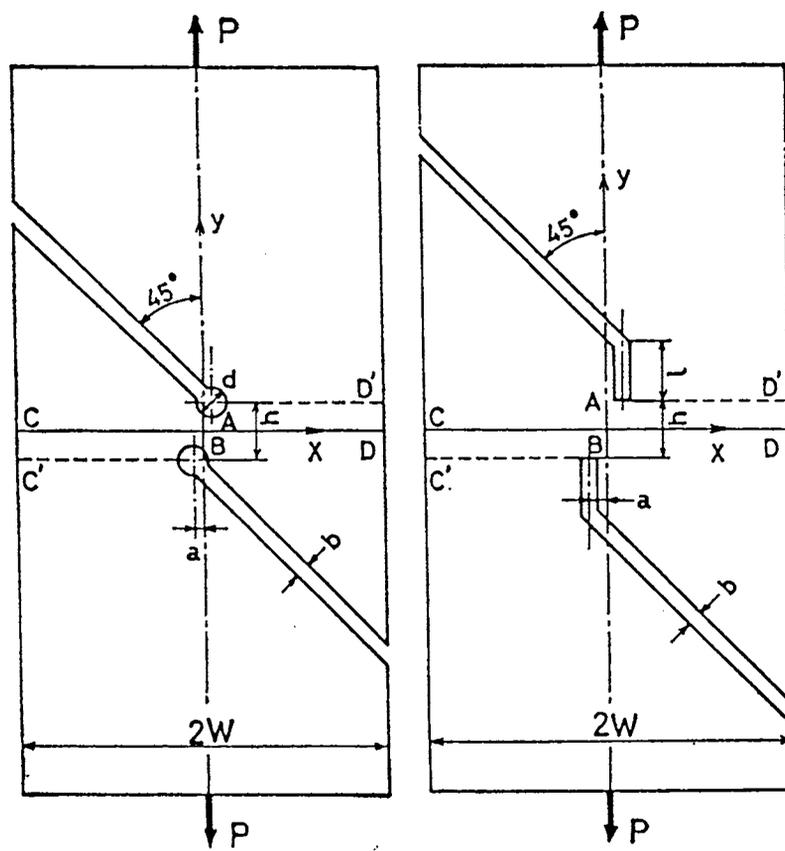


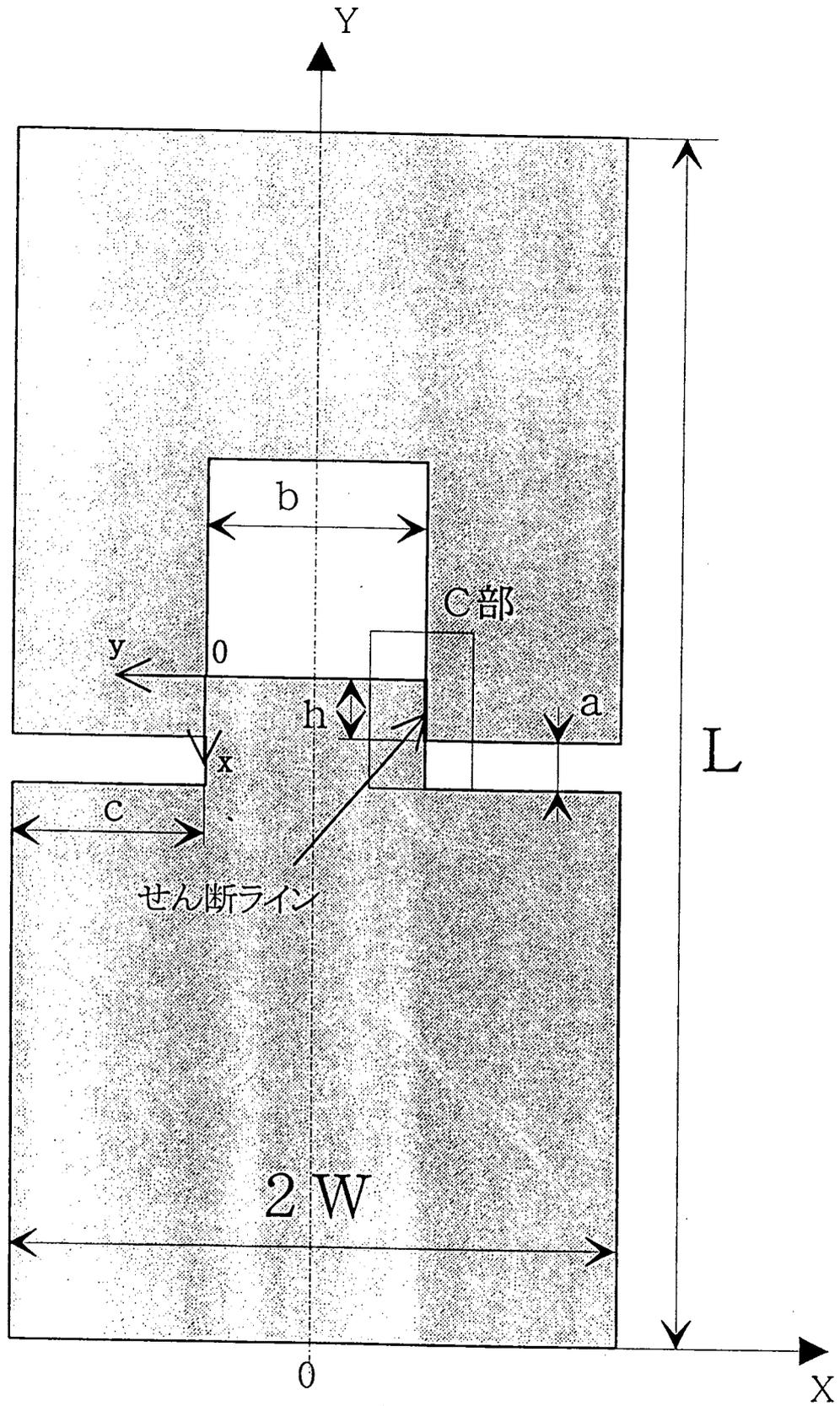
図 1. 各種せん断試験法



(a) モデル 1

(b) モデル 2

図 2 せん断試験片



$W=25, L=100, a=4, b=18, c=16$   
 $h=5$

図3. 基本モデル形状

表 1 材料特性値

材 料	板厚 t (mm)	ヤング率 E (kgf/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比 ν	降伏応力 σ <sub>B</sub> (kgf/mm <sup>2</sup> )
Al	4.0	7490	0.32	13.7

表 2 アルミニウム板材の機械的性質を求めるための引張試験結果

材料	板厚 t (mm)	ヤング率 E (kgf/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比 ν	降伏応力 σ (kgf/mm <sup>2</sup> )	伸び (mm)
Al	1	6999	0.33	14.35	7.18

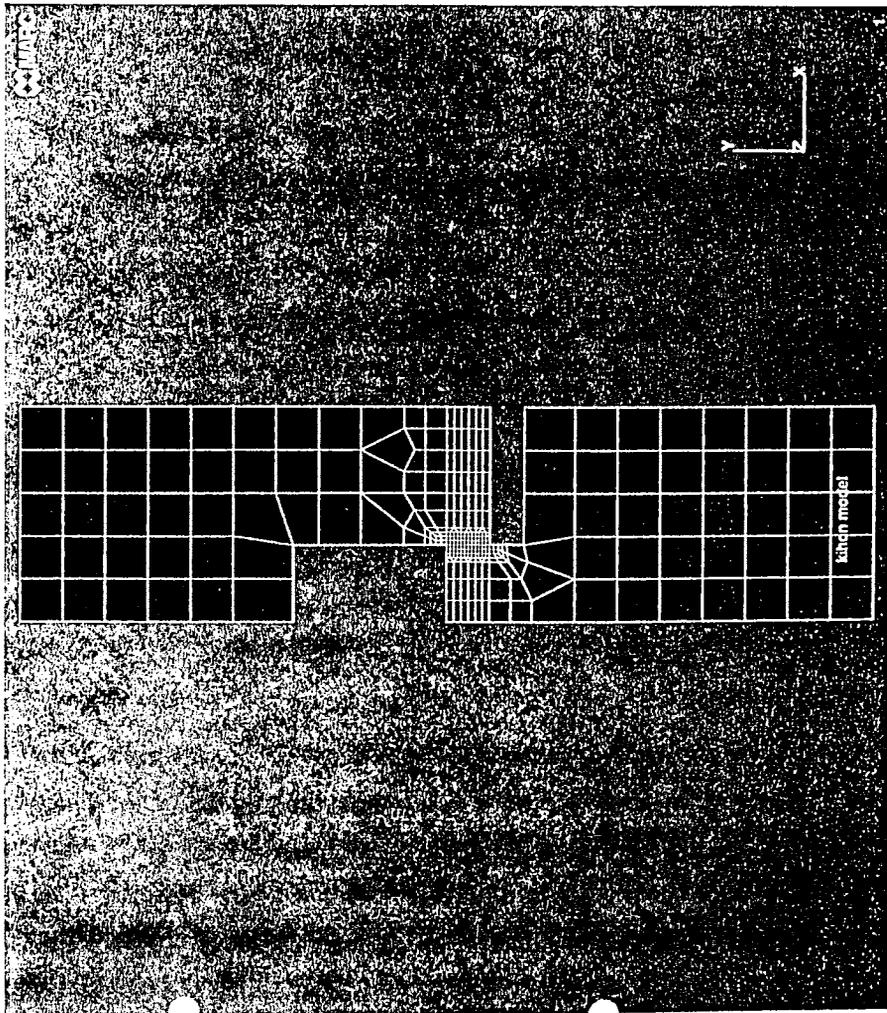


図 4. (a) 基本モデルの要素分割図

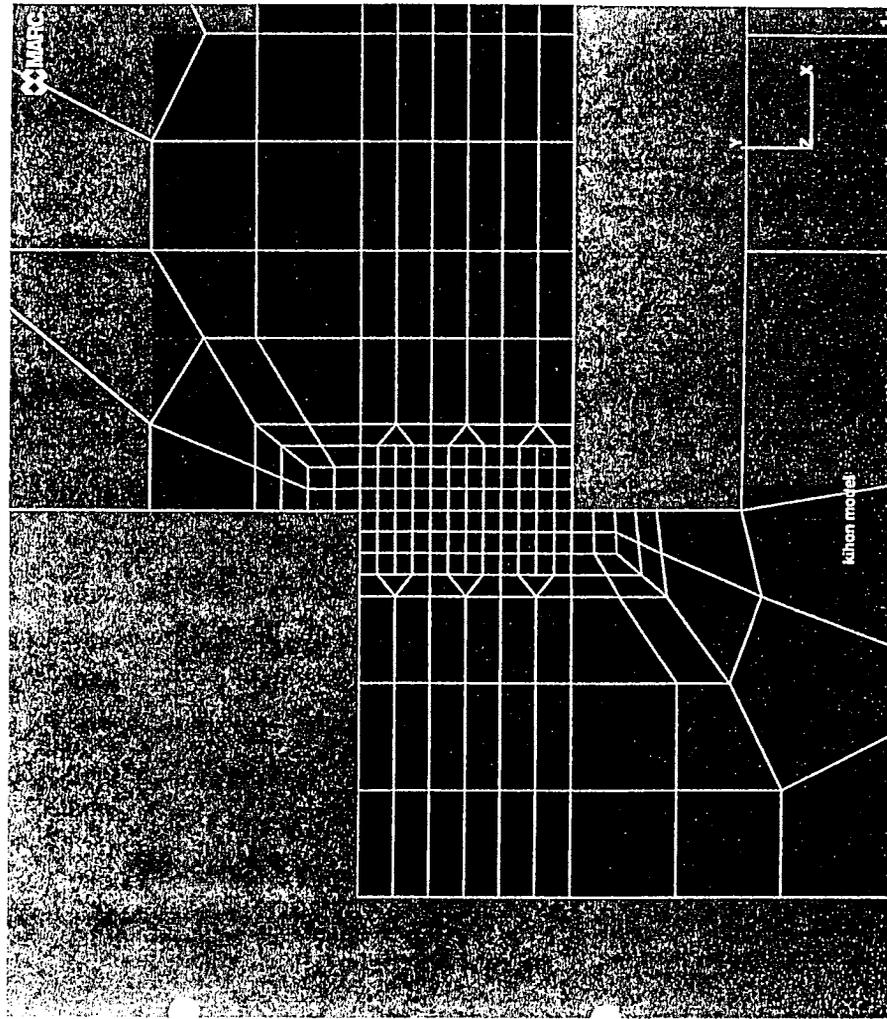


図 4. (b) 基本モデルの詳細図

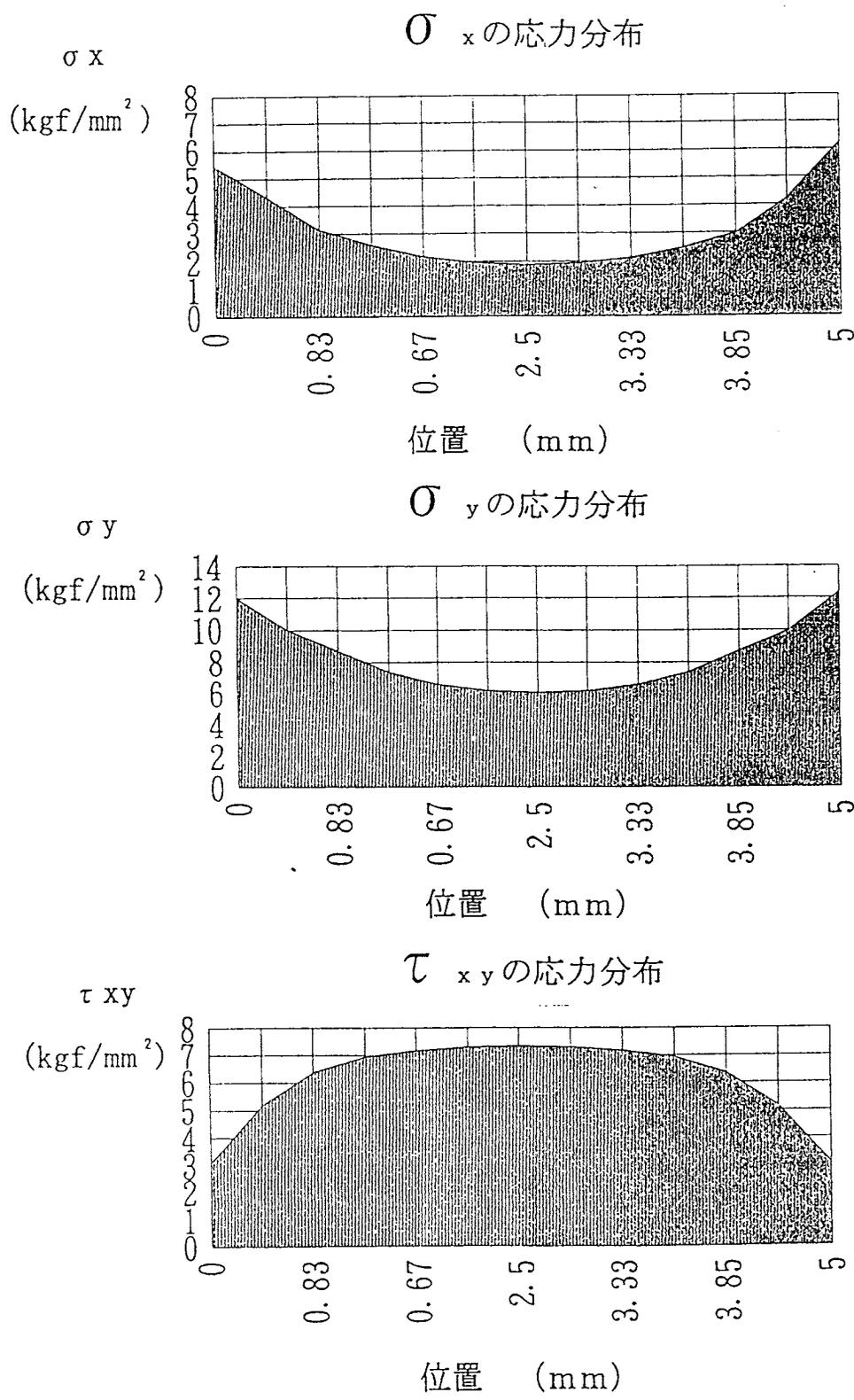


図 5. 基本モデル  
せん断ラインの応力分布

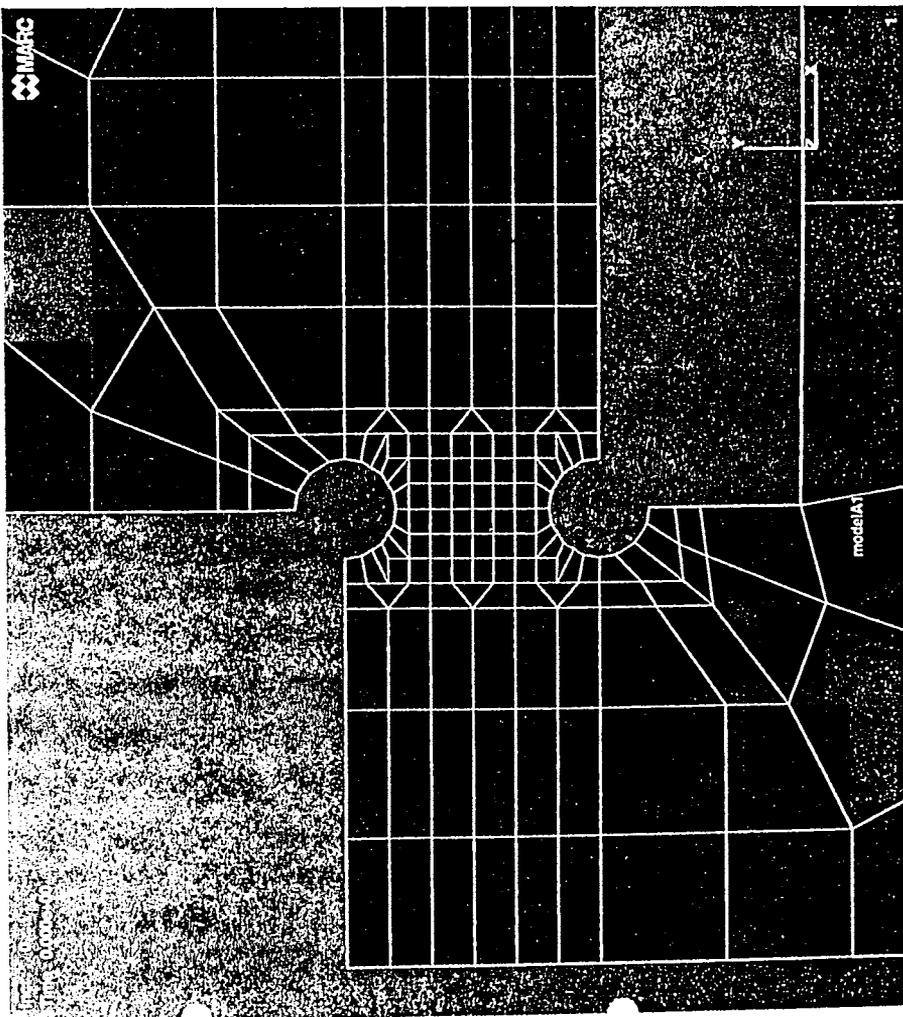


図 6. model IA1 の要素分割詳細図

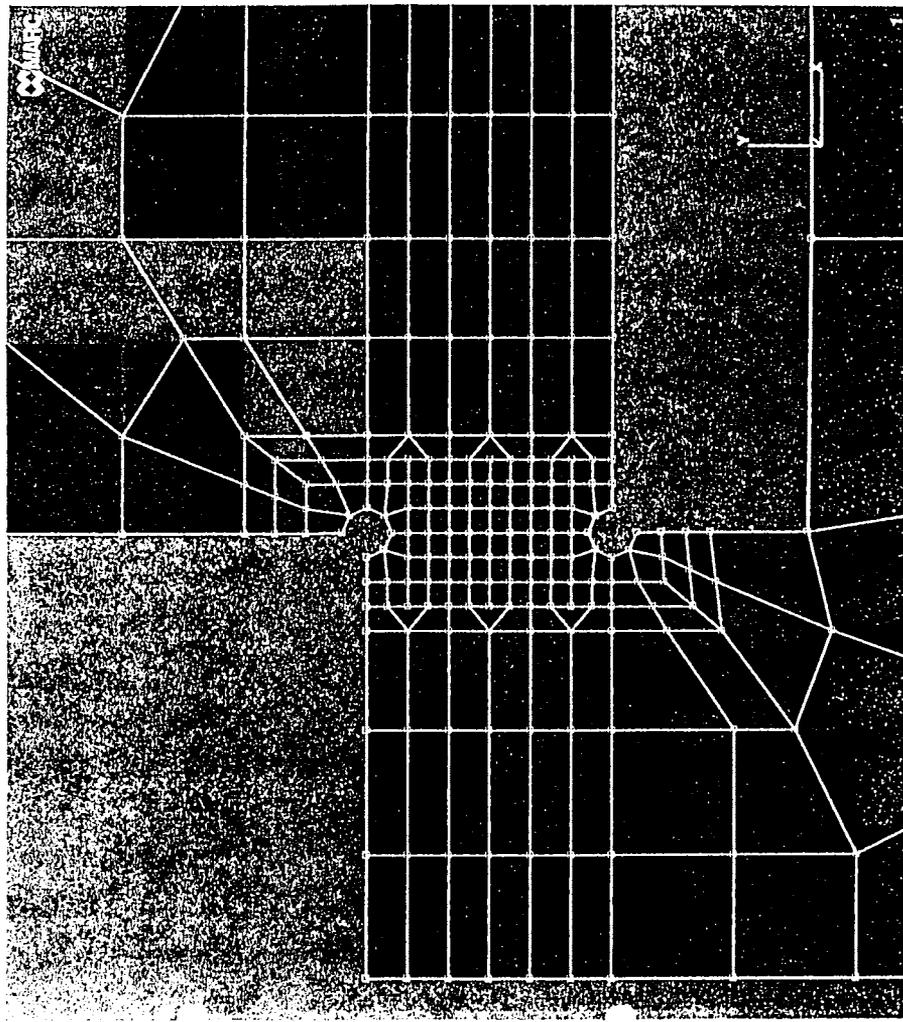


図 7. model IA2 の要素分割詳細図

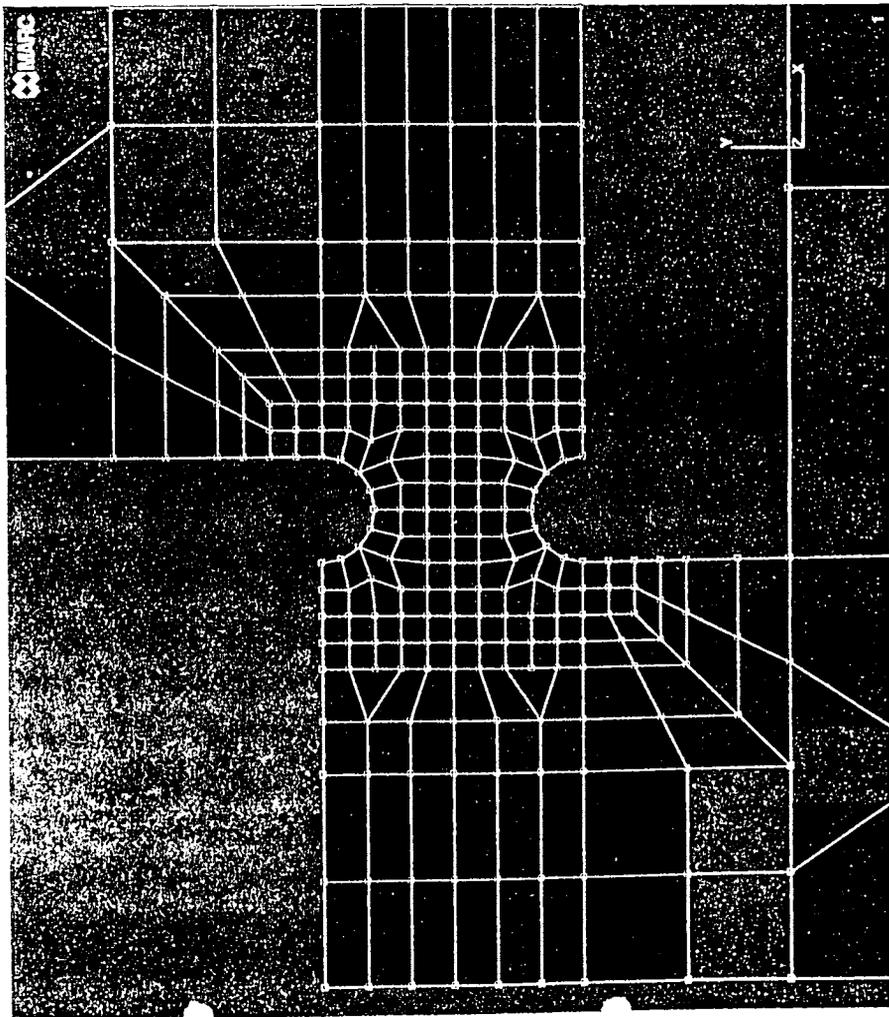


図 8. model B1 の要素分割詳細図

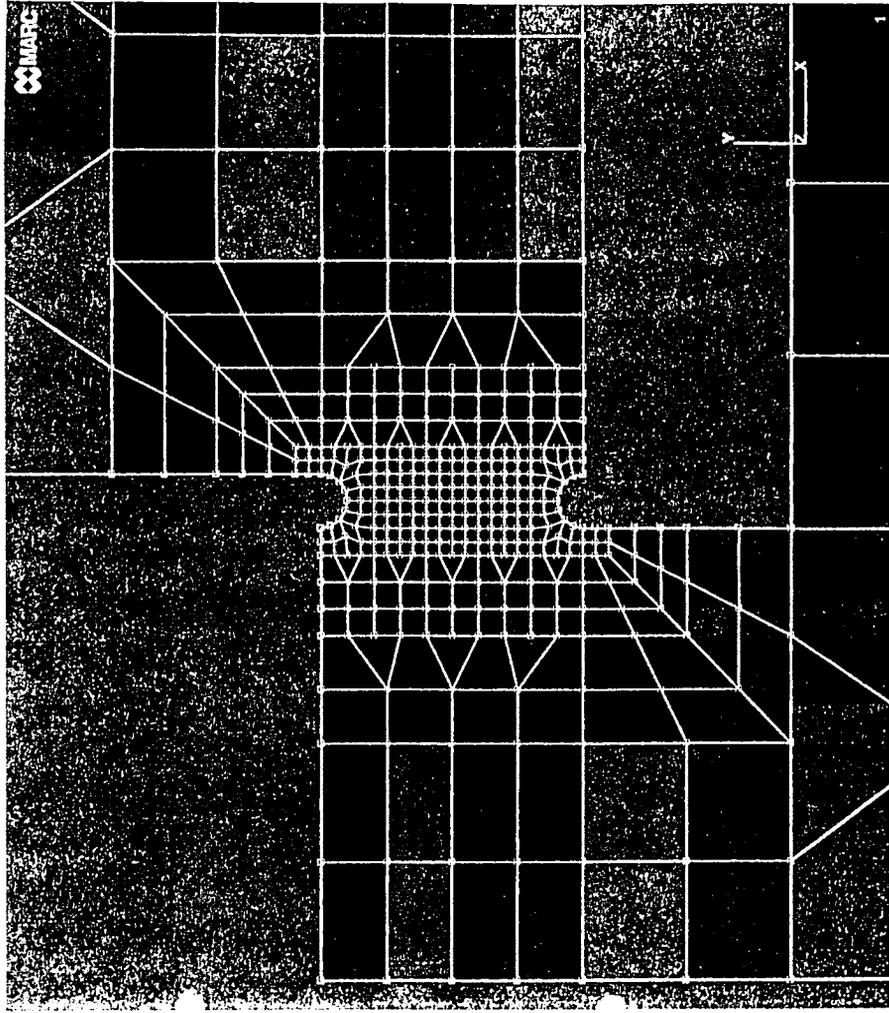


図 9. model B2 の要素分割詳細図

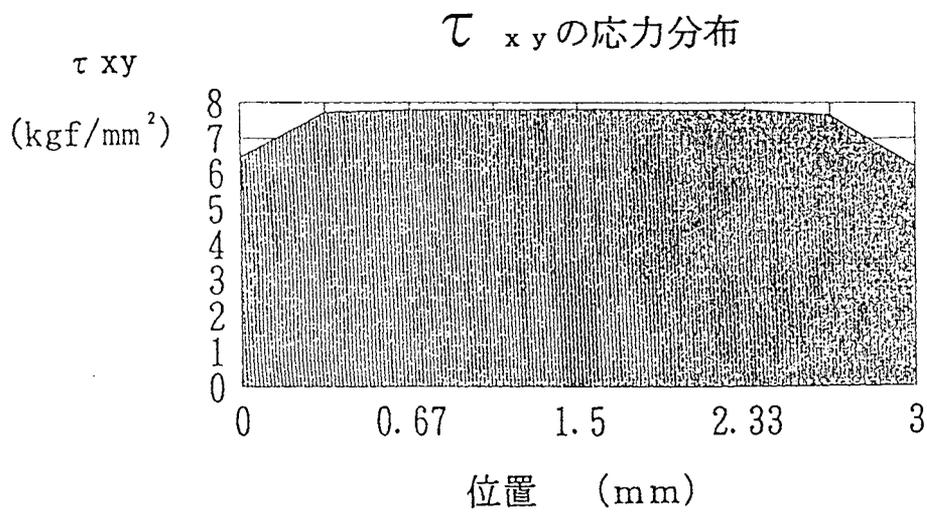
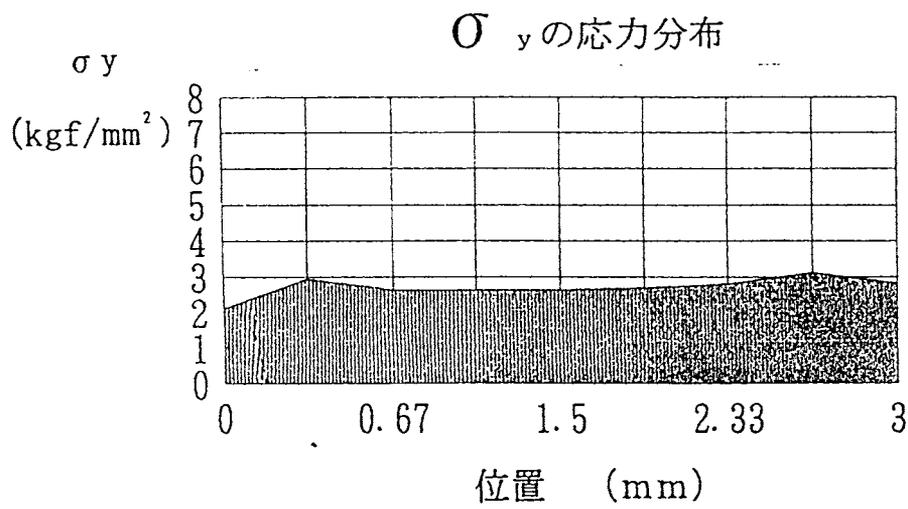
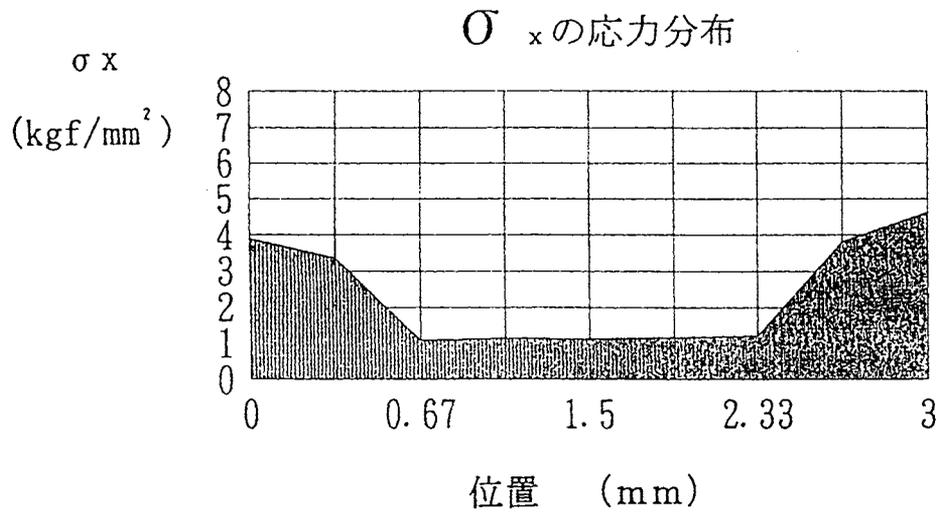


図10. modelA1  
せん断ラインの応力分布

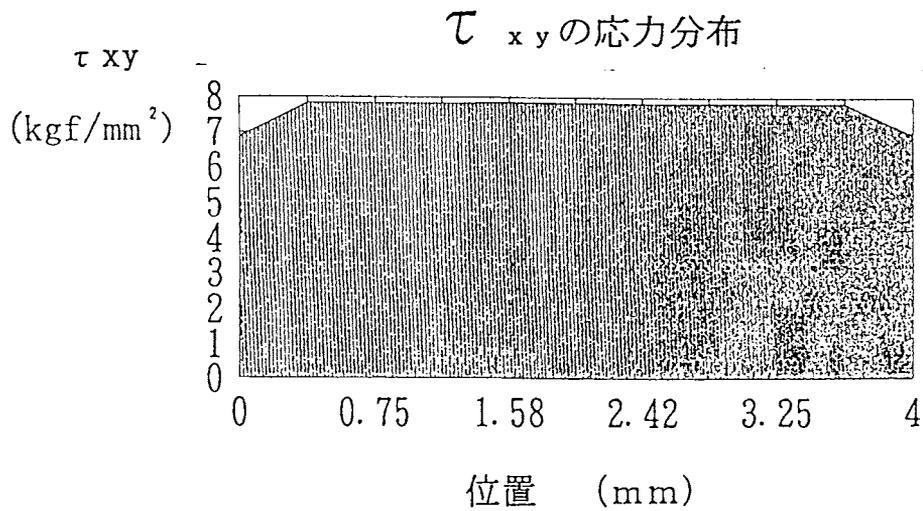
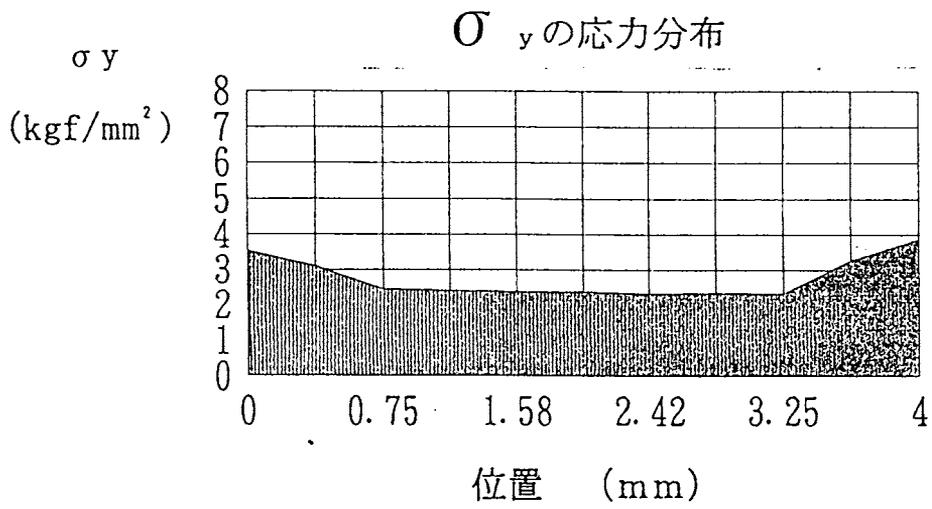
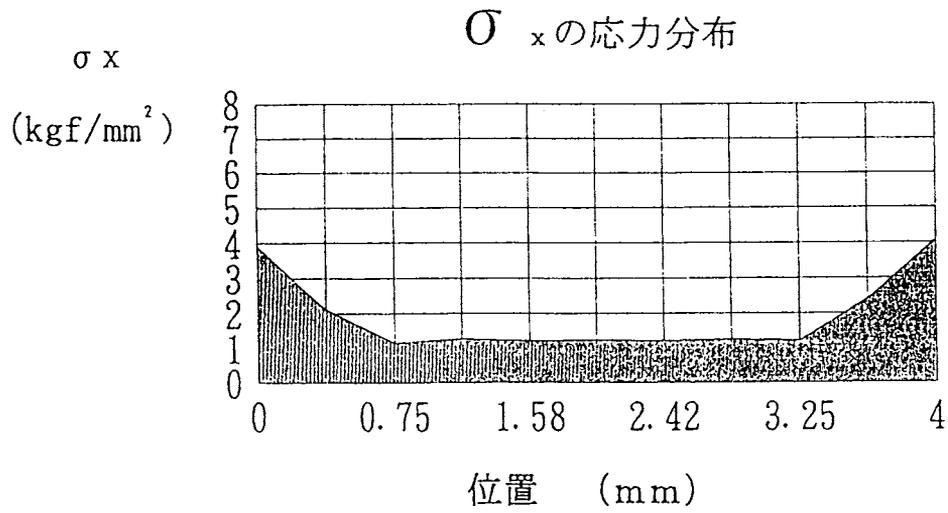


図 11. modelA2  
せん断ラインの応力分布

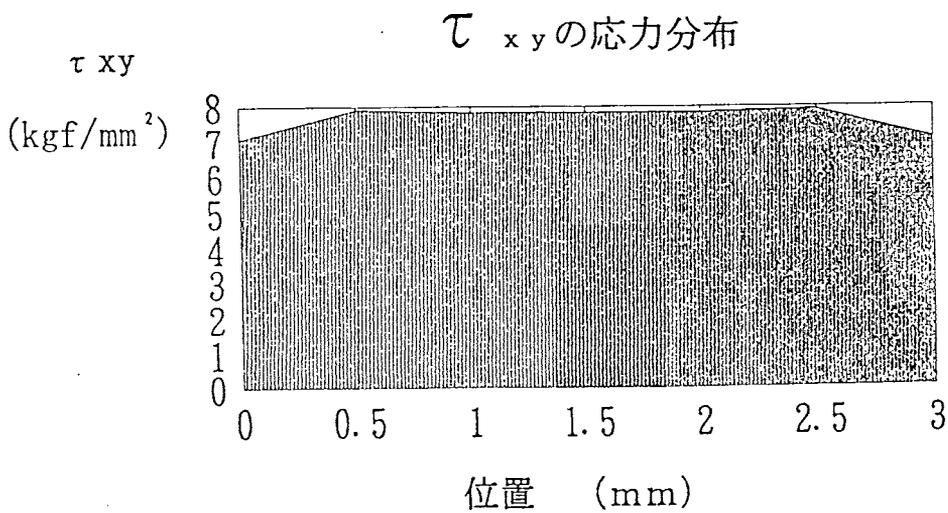
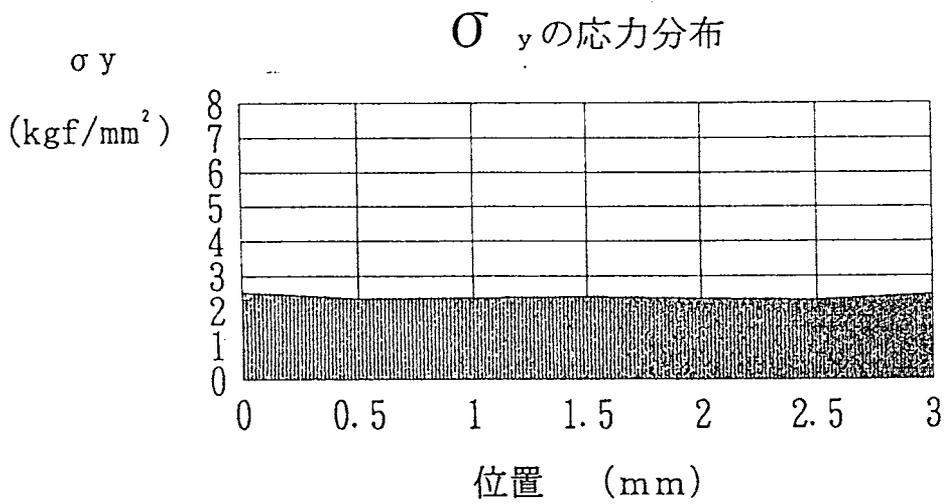
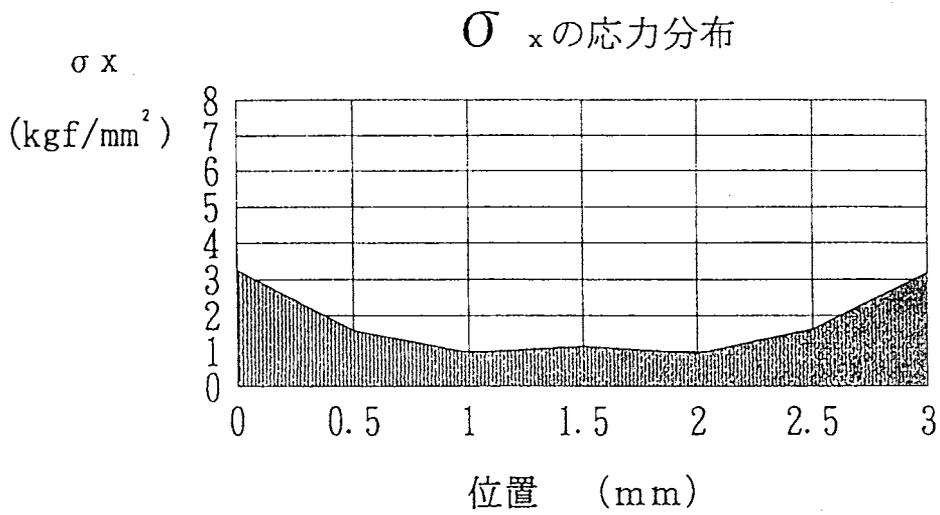


図 12. modelB1  
せん断ラインの応力分布

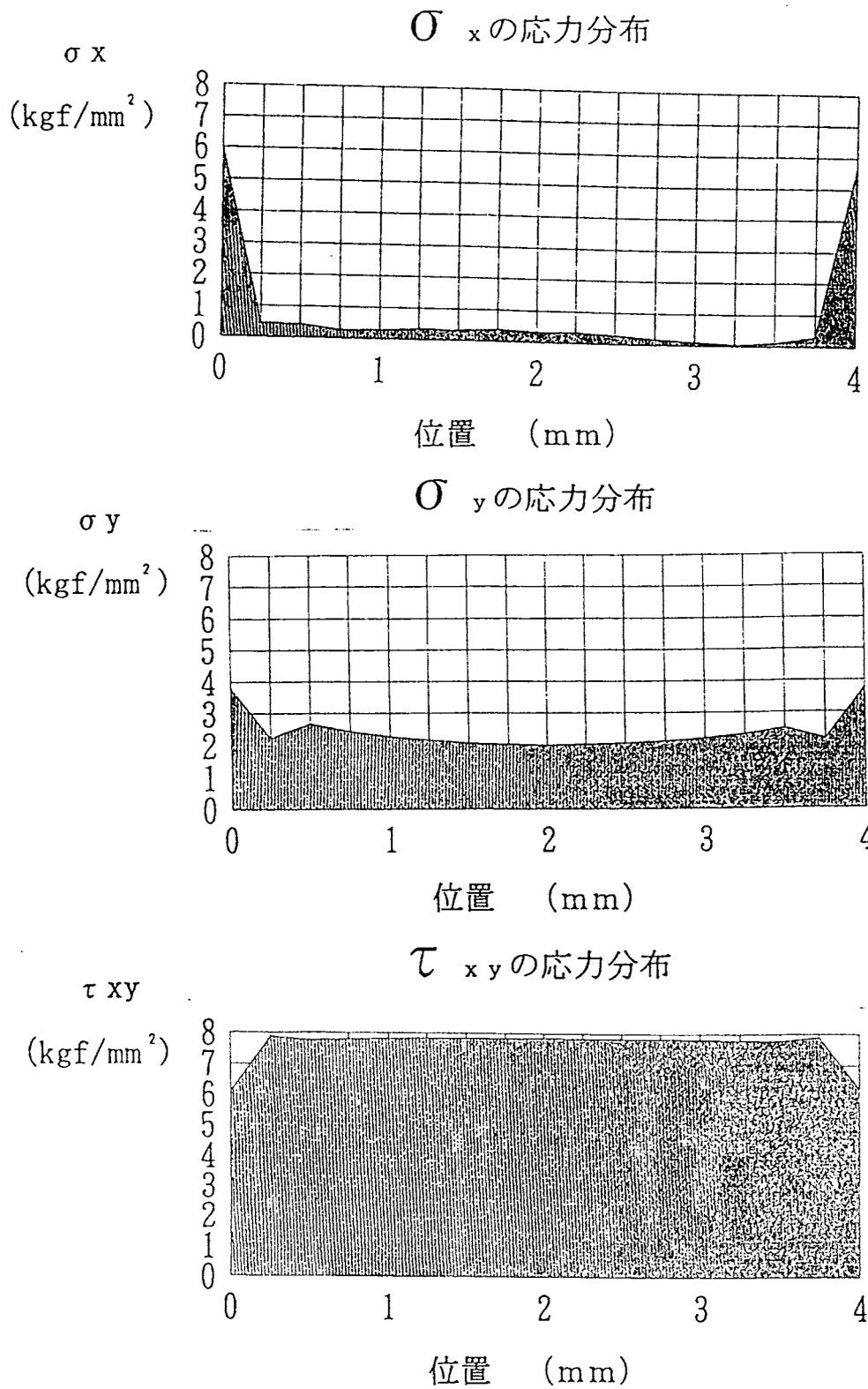
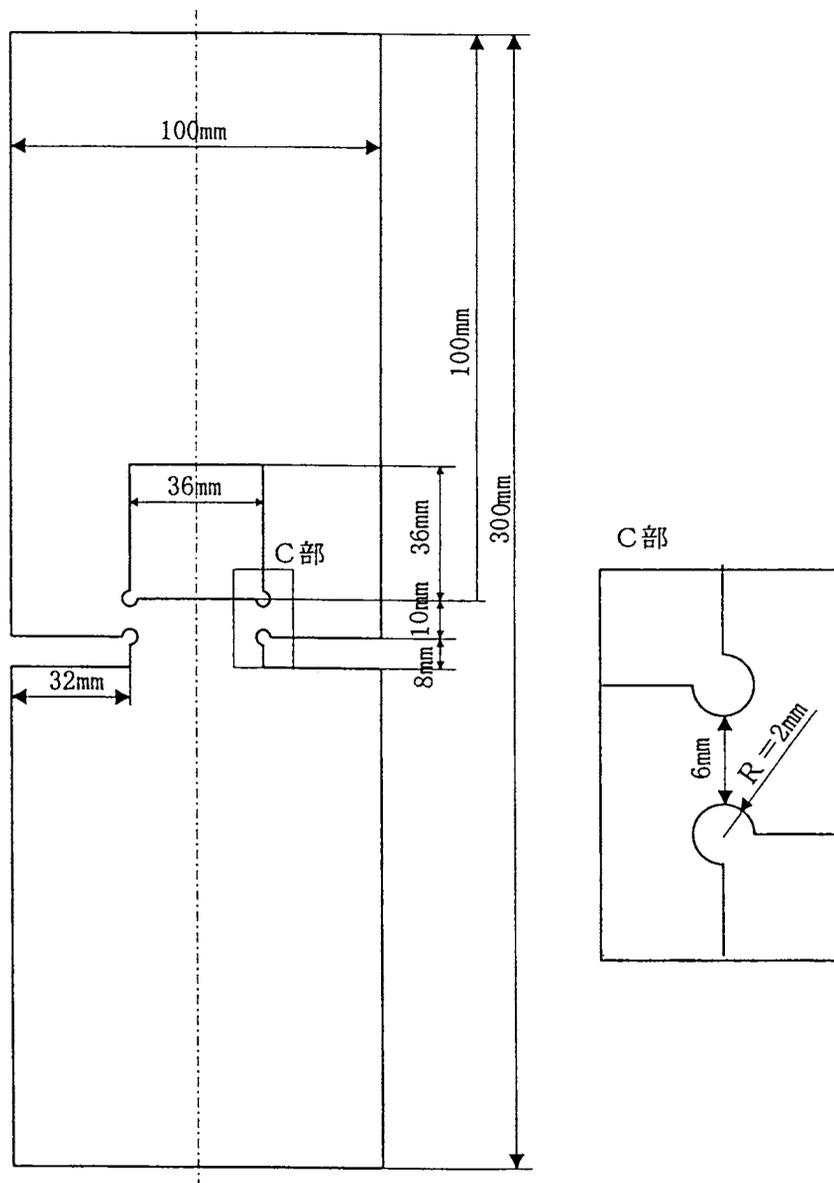
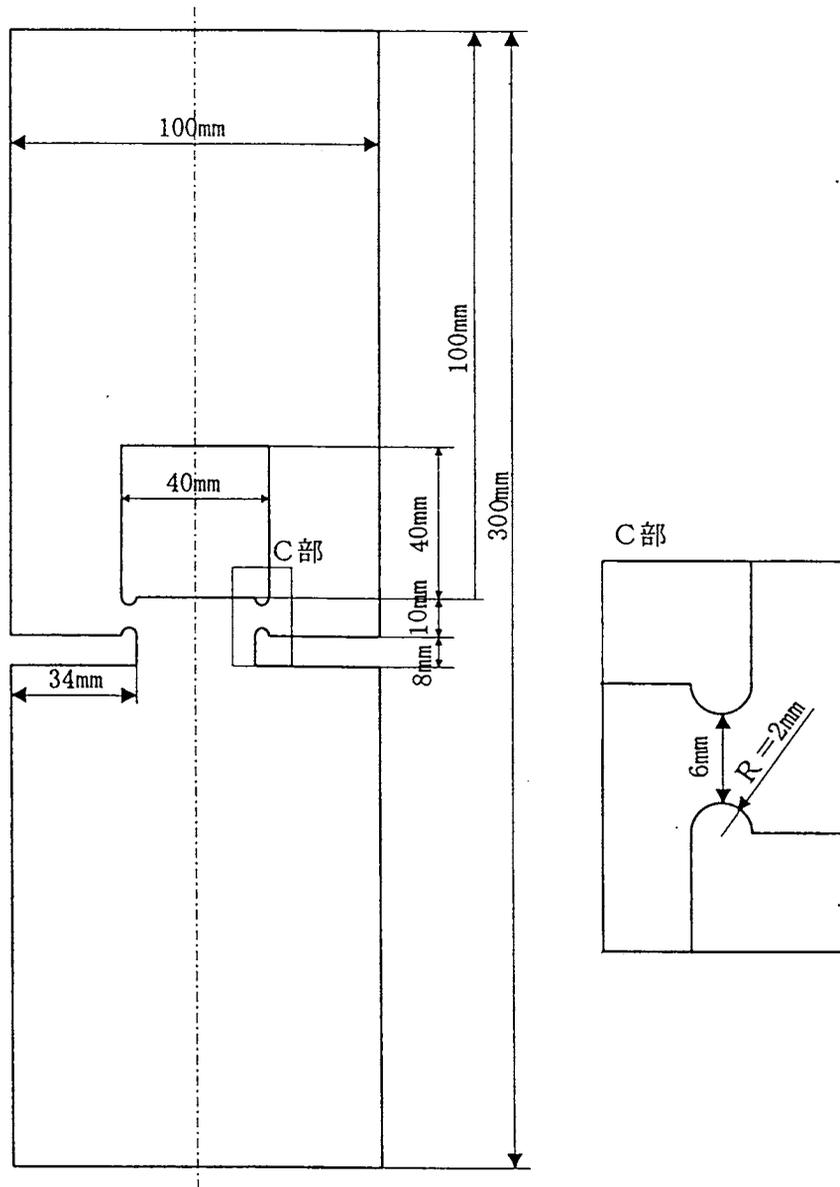


図 13. modelB2  
せん断ラインの応力分布



modelA1

図14. modelA1試験片形状 (尺度 1 : 2)



modelB1

図15. modelB1試験片形状 (尺度1 : 2)

表3. 各モデルの試験結果と平均

Model	せん断部長さ (mm) $h$	最大荷重 (kgf) $P_m$	破断点 (mm)	せん断強さ (kgf/mm <sup>2</sup> ) $P_m/A$
A1				
NO. 1	5. 867	117. 16	4. 339	9. 985
NO. 2	5. 867	116. 15	4. 473	9. 899
NO. 3	5. 867	116. 96	4. 201	9. 968
NO. 4	5. 867	115. 75	4. 326	9. 864
B2				
NO. 1	5. 852	122. 79	4. 336	10. 491
NO. 2	5. 852	122. 59	4. 591	10. 474
NO. 3	5. 852	122. 39	4. 471	10. 457
A1の平均	5. 867	116. 51	4. 335	9. 929
B1の平均	5. 852	122. 59	4. 466	10. 474

ただし A はせん断破壊部  
断面積  $A=th$  とする

表4. 板の打ち抜き試験結果

ダイス直径 d (mm)	ポンチ直径 D (mm)	試験速度 (mm/min)	最大荷重 $P_m$ (kgf)	せん断強さ $\tau$ $P_m/d$ (kgf/mm)
10	9. 5	0. 1	279. 9	8. 91

ただしせん断強さ  $\tau$  は最大荷重  $P_m$  をダイス直径  $d$  でわった  
値  $\tau = P_m/d$  とする.

### 3. 3 薄膜の 2 軸引張強さ推定法

一般に板材，膜材はその面内の 2 軸応力場下で用いられている．したがって，その強度を評価するには 2 軸応力下の特性試験を行うことが必要となる．従来このようなものの 1 つとしての 2 軸引張試験は，ある種の試験片の 1 つの軸方向に特殊なジグを用いて予応力を与え，もう一方の軸方向に対し引張試験機によって種々の負荷を与える方法が用いられてきた．しかし，この方法はかなり大型の試験片の場合適用できるが，本研究で対象としている薄膜材料に対しては不可能なものである．

そこで，本研究では薄膜の 2 次元的形状加工の自由度を生かし，1 軸方向のみの引張りによって，測定部では 2 軸応力状態を実現する特異な形状の試験片を創生する．このような試験片が創生されれば，単なる引張試験機を使うことのみで，薄膜や板材の 2 軸試験を行うことができ，きわめて有用であるといえる．

さて，以上述べたような板状試験片を創生するのに，まず図 16 に示すような部材 I，II，III からなるはりモデル構造を考える．つまりこのような一種の骨組み構造によって，Y 軸方向荷重 P により部材 III の A 点は矢印右方向へ，また B 点はそれと反対の矢印左方向へ変形することになる．そして結果として中心に位置する C 部には部材 I と II による引張力  $T_1$ ， $T_2$  によって，2 軸の応力状態の発生することが期待される．そして各部の寸法（部材長さや，断面積等）を適当に変化させることにより，任意の  $T_1/T_2$ ，つまり 2 軸応力状態を得ることも可能となる．

次に上で述べたような 2 軸応力場が推定どうり発生するのかどうかを，ラーメン構造解析のための FEM を用いて計算することにした．つまり図 16 をさらに簡略化して，図 17（ただし対称性を考慮して上半分をモデル化した）のようなラーメンモデルを設定した．この構造では図中の表に示す通り材料はすべての部分で同じ物であるが，2 軸応力を期待する図 16 での PartC に関連する要素のみ断面積を変化させている．そして，計算の目的は要素 13，（14），15 に発生する引張応力がほぼ等しくなるように各要素の長さを決めることで，これは一種の最適化問題であり，そのための手法がここで応用できる．

図 18 はこのようにして得られたラーメン構造モデル形状を示す．この構造において，要素 13（14）と 15 に発生する軸方向の引張応力の比は 0.995 となりほぼ完全な 2 軸応力状態がこれらの要素の結合部近傍に発生しているといえる．そこでさらにこのラーメン構造を，先に示した各要素のもつ断面積に対応して，2 次元的に変換した形状，つまり 2 次元連続体としたものが図 19 である．これにより当初目的とした 1 軸引張りのみで 2 軸応力を発生するような板状，膜状試験片の

基本形状が得られたことになる。ただ当然予想されるようにこの試験片では、角部が多く、それらの部分での応力集中効果のため、2軸応力の発生部での破壊や破断以前にそのような角部での試験片破壊や破断が生ずる可能性が大きい。そこでそれらの応力集中効果をできるだけ少なくしたものが図 20 である。この図での試験片中央部 C での応力状態を図 21 に示す。これより、ほぼ期待どおりの 2 軸引張応力状態を生じていることがわかる。このような形状を用いて、たとえば中央部 C のみを薄膜化することによって、図 22 に示すように、薄膜の 2 軸破壊、破断や耐久試験も行うことが出来るものと考えられる。

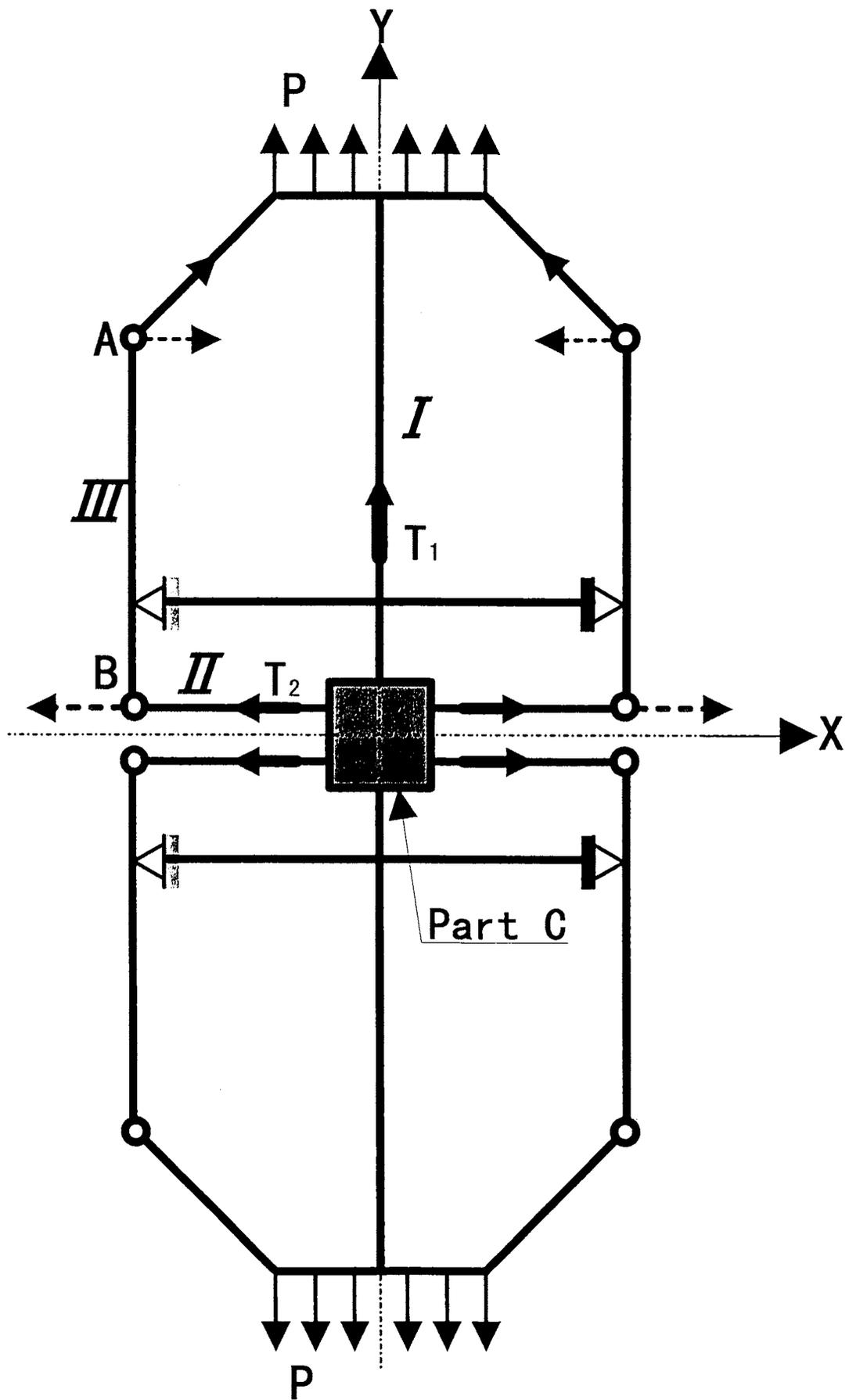
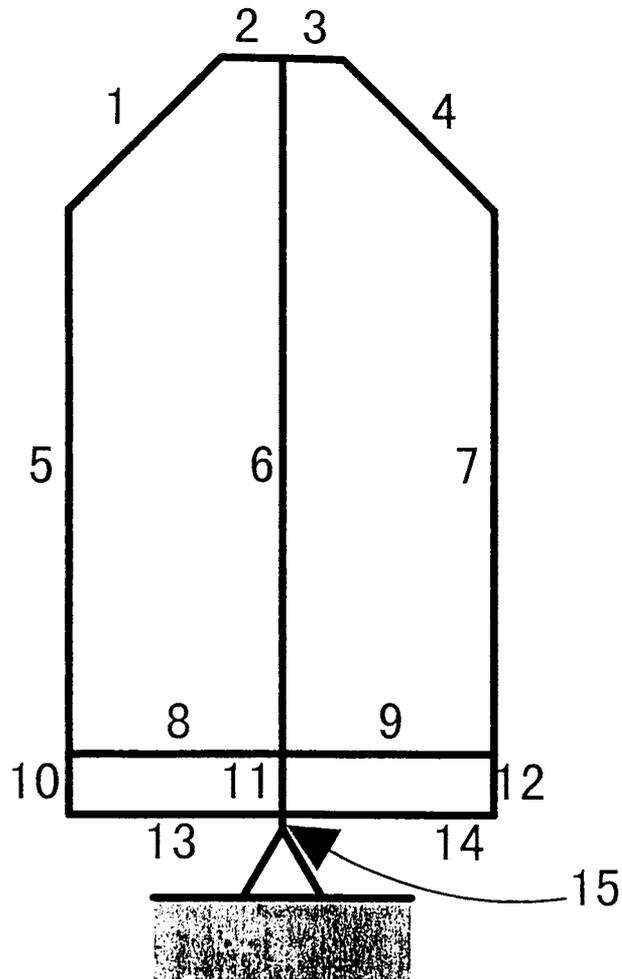


図16 はりモデルを用いた試験片の原理図



各材料の材料特性

材料番号	ヤング率(N/mm <sup>2</sup> )	断面積(mm <sup>2</sup> )	断面係数(mm <sup>3</sup> )
1	200000	0.25	0.0052
2	200000	0.5	0.0417
3	200000	1	0.33
4	200000	2	2.67

各要素の材料番号

材料番号	要素番号
1	13,14
2	6
3	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,12
4	11,15

図17 ラーメンモデルの要素番号と材料データ

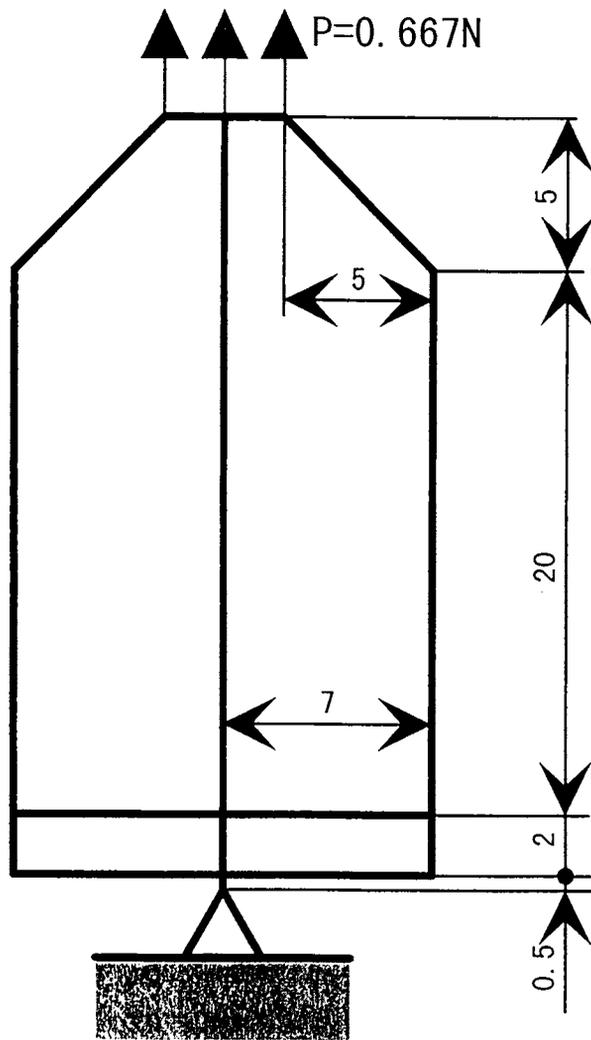


図18 要素13(14)と要素15に発生する引張応力が  
ほぼ等しくなるラーメンモデルの寸法

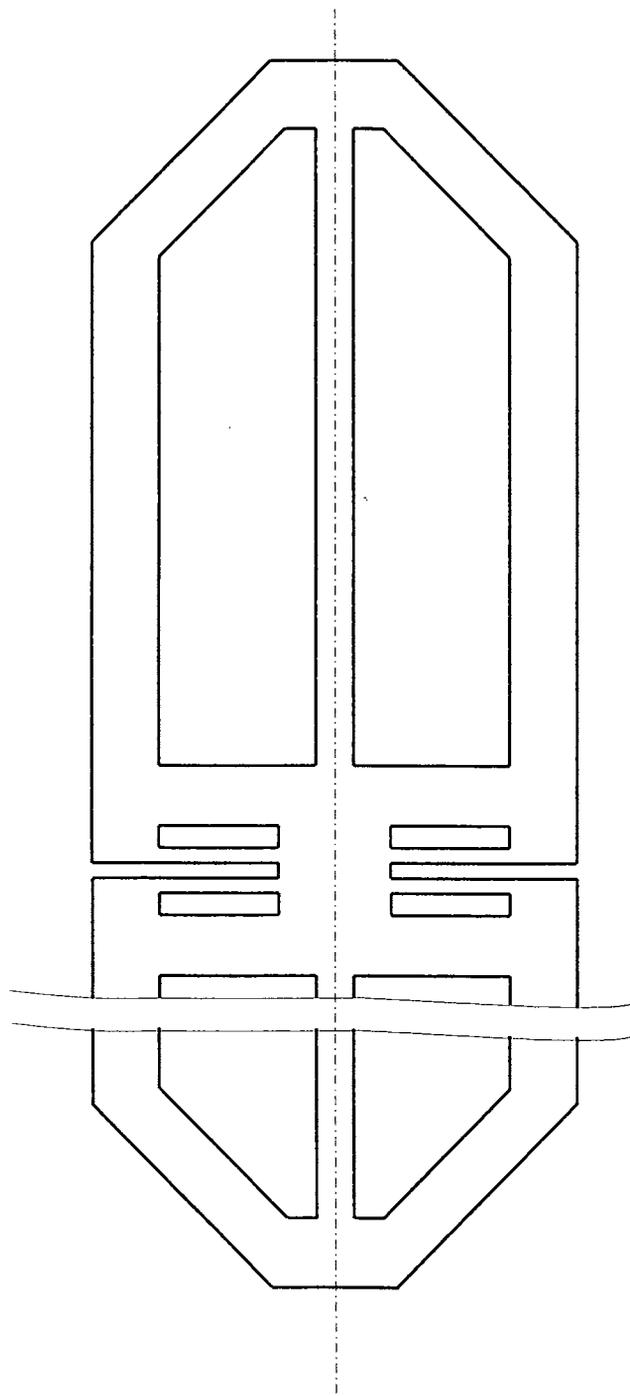


図19 ラーメンのモデルを  
そのまま連続体にした場合の形状

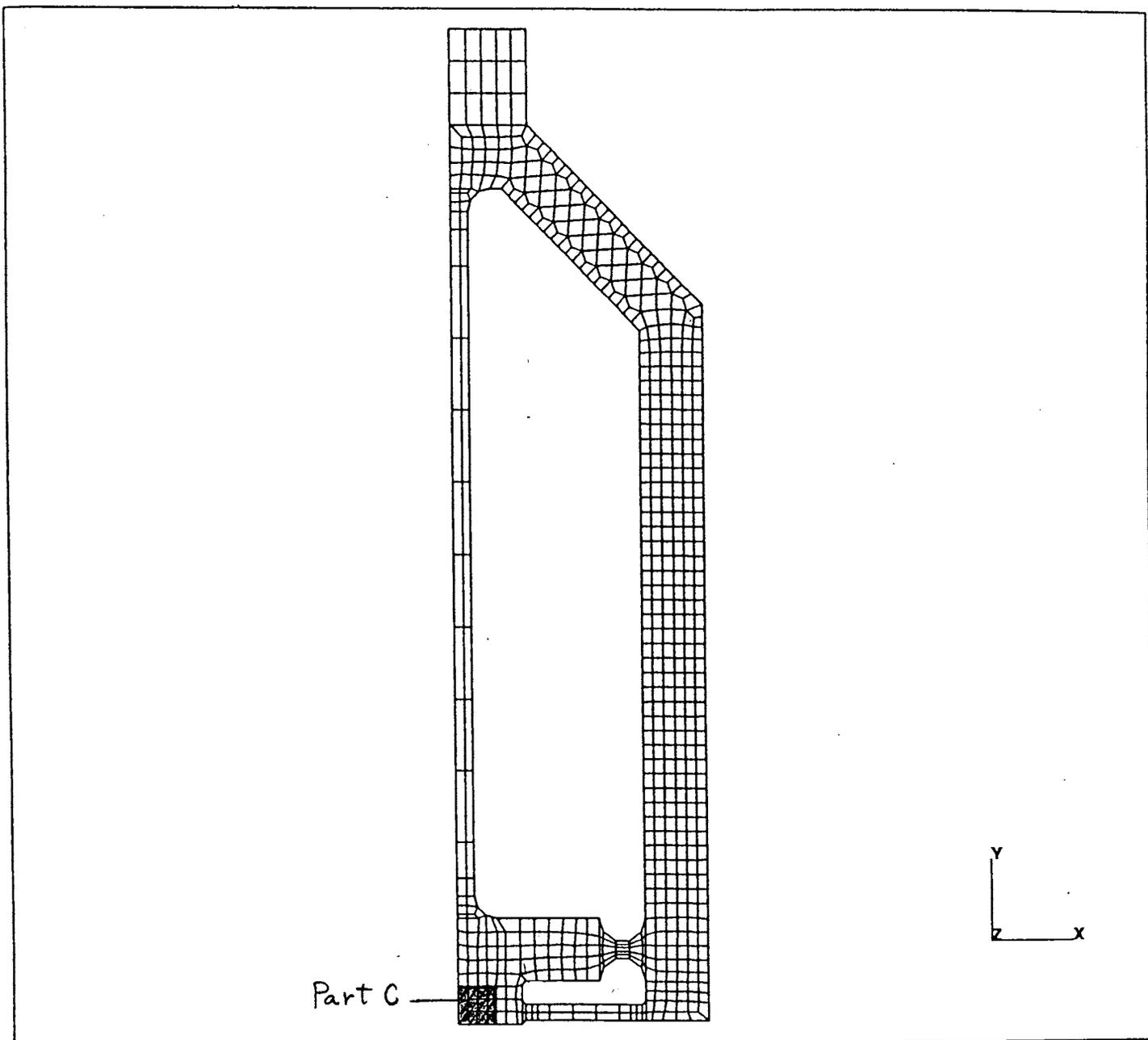
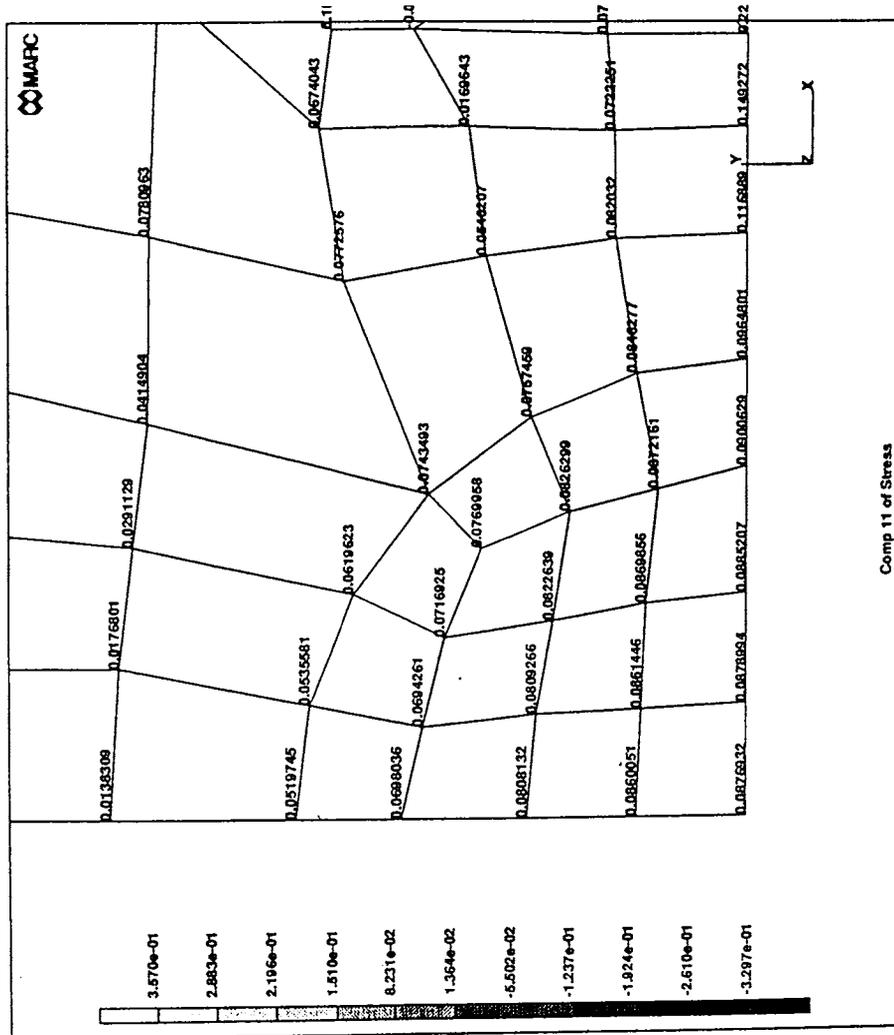
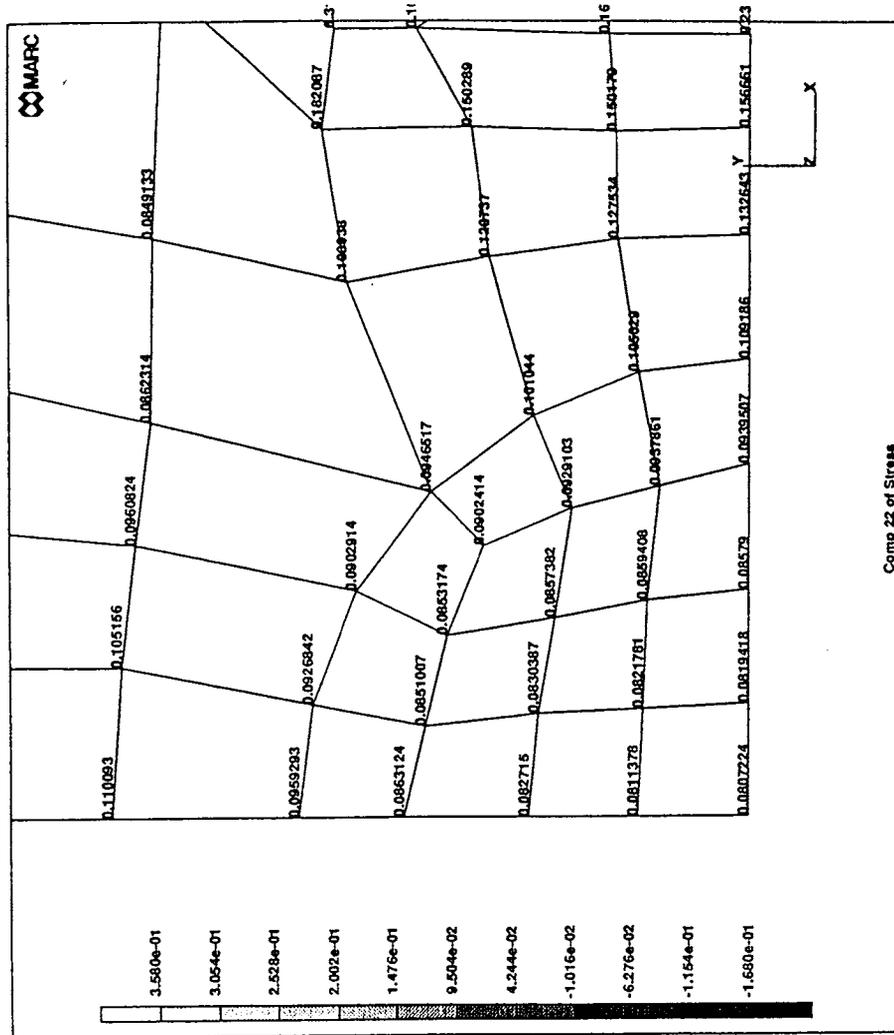


図 20 2軸引張試験用モデル(1/4領域)



(a)  $\sigma_x$  の分布



(b)  $\sigma_y$  の分布

図 21 Part C 2 の応力分布

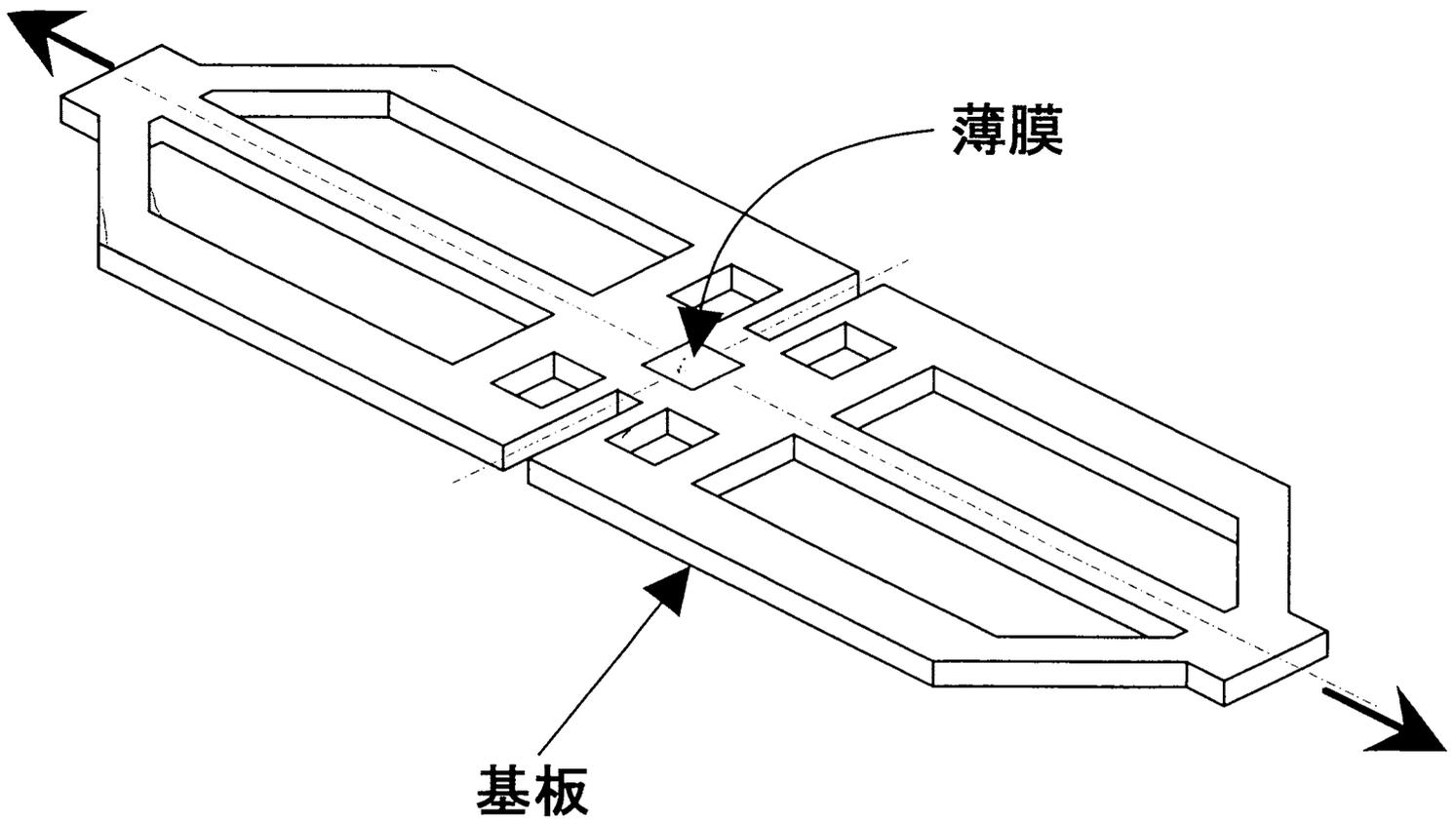


図22 薄膜の2軸引張試験状況