

JAERI-Tech

2000-083



JP0150248



プレートフィン型再生熱交換器フィン・
プレート構造の強度解析

2001年1月

松井 真吾・武藤 康・椎名 保顕

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 2001

編集兼発行 日本原子力研究所

プレートフィン型再生熱交換器フィン・プレート構造の強度解析

日本原子力研究所大洗研究所核熱利用研究部

松井 真吾^{*}・武藤 康・椎名 保顕

(2000年11月8日受理)

高温ガス炉から出る6 MPa, 850~950°Cの高圧, 高温ヘリウムガスを用いたガスタービンサイクルにおいて、約50%の高い熱効率で発電を行う為には、高性能でかつコンパクトな再生熱交換器が不可欠である。

本再生熱交換器の型式として、プレートフィン型熱交換器が最も適すると考えられているが、このような高圧、高温下で使用されたものではなく様々な技術開発が必要である。その一つとしてプレートフィン型熱交換器の強度解析及び評価の手法を確立することが必要であり、本報告ではその第一段階の検討として、内圧荷重に対するフィン・プレート構造の強度解析を行った。

本解析より、フィン・プレート構造のモデル化方法を検討し、フィン・プレートを3段にわたってモデル化する方法が適切であることを確認し、フィン内部の応力状態及びその特徴を明らかにした。続いて一段に簡素化したモデルにおいても、定性的な評価においては十分な正確さが得られることを明らかにした。また、設計パラメータであるフィン傾斜角、セパレートプレート板厚に対する強度特性を明らかにし、ここで対象とした手法、荷重等の設計条件の下では、最適なフィン傾斜角が76°近傍にあり、最も製作の難しいフィン傾斜角である90°を目標とする必要がないことを明らかにした。また、セパレートプレートの薄肉化の可能性があることも明らかにした。

Stress Analysis of Plate-fin Structures in Recuperator

Shingo MATSUI*, Yasushi MUTO and Yasuaki SHIINA

Department of Advanced Nuclear Heat Technology

Oarai Research Establishment

Japan Atomic Energy Research Institute

Oarai-machi,Higashibaraki-gun,Ibaraki-ken

(Received November 8, 2000)

A high performance compact recuperator with 95% effectiveness is required to achieve a high thermal efficiency power generation of up to 50% in High Temperature Gas Cooled Reactor(HTGR) coupled with closed cycle helium gas turbine.

Though a plate-fin type heat exchanger is proposed for this recuperator, much research and development works are needed to establish this high performance goal since there exists no state-of-the-art technology in such a high pressure and high temperature one. One of the important works is to establish the structural analysis and evaluation method in this plate-fin type heat exchanger. This paper describes the results of stress analysis of the plate-fin structure under the internal pressure as the first step of this work.

First, the modeling of a unit plate-fin structure for the analysis was examined and a three layers model was confirmed to be most adequate. The stress distribution within the structure was clarified by using this model. Second, the three layers model was simplified to one layer model with sufficient accuracy. By using this model, both the effects of an inclined angle of fin and a thickness of separate plate on the strength were examined parametrically. Under the relevant design conditions, it was revealed that the optimum inclined angle of fin locates in the neighborhood of 76 degree rather than most difficult fabrication angle 90 degree and there is a possibility to adopt thinner thickness than 0.5mm in the current design.

Keywords : HTGR, Gas Turbine, Plate-fin, FEM, Recuperator, Stress, Analysis

*Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co.,Ltd

目 次

1. はじめに	1
2. プレートフィン型再生熱交換器	1
2. 1 ガスタービンサイクルプラントと再生熱交換器	1
2. 2 構造	1
2. 3 一般的設計方法	2
2. 3. 1 フィン	2
2. 3. 2 セパレートプレート	2
2. 4 解析の意義	3
3. 热交換器構造のモデル化検討	4
3. 1 モデル化の基本方針及び条件	4
3. 1. 1 対象構造, 荷重及び材料物性値	4
3. 1. 2 使用解析コード及び要素	4
3. 1. 3 ろう材	4
3. 1. 4 境界条件	5
3. 2 標準モデル（三段モデル）	5
3. 2. 1 モデルの作成	5
3. 2. 2 標準モデルによる解析結果	7
3. 3 モデルの簡素化検討	7
3. 3. 1 段数削減（一段モデル；モデル3）	7
3. 3. 2 負荷圧力の差圧化（モデル4）	8
3. 3. 3 内圧荷重状態と引張荷重状態の関係（モデル1）	8
4. 簡素化解析モデルを用いた設計検討	9
4. 1 条件	9
4. 1. 1 フィン傾斜角変更モデル	9
4. 1. 2 セパレートプレート板厚変更モデル	9
4. 2 結果	9
4. 2. 1 フィン傾斜角 (θ) 特性	10
4. 2. 2 セパレートプレート板厚 (t_p) 特性	10
5. まとめ	11
謝辞	12
参考文献	13
参考資料-1 「標準モデル z 方向境界条件」	94
参考資料-2 「内圧荷重解析と引張荷重解析の整合性評価」	98
参考資料-3 「簡易計算によるFEM解析評価」	101

Contents

1 . Introduction	1
2 . Plate-fin Type Recuperator	1
2 . 1 Gas Turbine Cycle Plant and Recuperator	1
2 . 2 Structure	1
2 . 3 General Design Methods	2
2 . 3 . 1 Fin	2
2 . 3 . 2 Separate Plate	2
2 . 4 Significance of Analysis	3
3 . Examinations of the Heat Exchanger Modeling	4
3 . 1 Basic Principles and Conditions for Modeling	4
3 . 1 . 1 Object Structure, Loads and Material Properties	4
3 . 1 . 2 Analysis Code and Element	4
3 . 1 . 3 Brazing Material	4
3 . 1 . 4 Boundary Conditions	5
3 . 2 Standard Model (Three Layers Model)	5
3 . 2 . 1 Modeling	5
3 . 2 . 2 Result of Analysis by Standard Model	7
3 . 3 Examinations of Model Simplification	7
3 . 3 . 1 Reduction in Layers (One Layer Model ; Model3)	7
3 . 3 . 2 Differentiation Load Pressures (Model4)	8
3 . 3 . 3 Relation of Internal Pressure Load Condition and Pull Load Condition(Model1)	8
4 . Design Examinations by Simple Analysis Models	9
4 . 1 Conditions	9
4 . 1 . 1 Inclined Angle of Fin Changed Model	9
4 . 1 . 2 Thickness of Separate Plate Changed Model	9
4 . 2 Results	9
4 . 2 . 1 Effect of Inclined Angle of Fin(θ)	10
4 . 2 . 2 Effect of thickness of Separate Plate(t_p)	10
5 . Conclusions	11
Acknowledgements	12
References	13
Appendix— 1 「Boundary Conditions of z-Direction of Standard Model」	94
Appendix— 2 「Estimations of Consistency between Internal Pressure Load Analysis and Pull Load Analysis」	98
Appendix— 3 「Estimations of FEM Analyses by Simple Calculations」	101

1. はじめに

高温ガス炉から出る6 MPa, 850~950°Cの高圧, 高温ヘリウムガスを用いたガスタービンサイクルにおいて、約50%の高い熱効率で発電を行う為には、高性能かつコンパクトな再生熱交換器が不可欠である。

本再生熱交換器の型式として、プレートフィン型熱交換器が最も適すると考えられているが、このような高圧、高温下で使用されたものではなく様々な技術開発が必要である。その一つとしてプレートフィン型熱交換器の強度解析手法を確立することが必要であり、本報告ではその第一段階の検討として、内圧荷重に対するフィン・プレート構造の強度解析を行い、高圧、高温用プレートフィン型熱交換器の設計、製作に資することを目的とする。

本報告においては、多層のフィン・プレート構造を3層あるいは1層にモデル化する方法及び、フィン内部応力状態につき検討する。統いて設計パラメータであるフィン傾斜角、セパレートプレート板厚の強度特性について検討し、フィンの応力の形成機構及び応力が最小となるフィン傾斜角の値等を明らかにする。

2. プレートフィン型再生熱交換器

2. 1 ガスタービンサイクルプラントと再生熱交換器

ガスタービンサイクルプラント系統及び熱物質収支を図-1¹⁾に示す。ガスタービンサイクルプラントでは原子炉にて加熱された高温、高圧ヘリウムガスをタービンへ送り込み発電を行う。その際、タービンから排出されてくる低圧、高温のガスと、原子炉への入口流体となる高圧、低温ガスとを熱交換させることにより熱を有効利用することが出来、この役割を担うために再生熱交換器を用いる。

ここで図-2に再生熱交換器温度効率のサイクル熱効率への影響を示すが、その再生熱交換器の性能はプラント全体のサイクル熱効率に大きく影響し、サイクル熱効率=48%以上を達成するには95%以上の温度効率をもつ再生熱交換器が必要となる。

よって、その温度効率を達成でき、かつコンパクトであるプレートフィン型熱交換器が、ガスタービンサイクルプラント再生熱交換器として不可欠である。

2. 2 構造

プレートフィン型再生熱交換器の構造例を図-3に示す。サイドプレート、サイドバーで囲まれた容器内に数千段にわたるフィン、セパレートプレートが存在する。フィンの存在する流路各段に加熱(低圧)側、被加熱(高圧)側の流体が交互に流れ熱交換を行う。

典型的なフィン、セパレートプレートの詳細な構造を図-4に示す。高い温度効率を達成するためには、フィンの細密化が必要であり、これまでに全体サイズが200mm×200mm×200mmの立方体熱交換器の試作に成功している²⁾。以下このフィン・プレートの詳細構造を対象に検討を行った。ここでフィン・プレート構造は、高さ1.2mm, 1ピッチ1.6mmの波形の

微小なフィンが、厚さ 0.5 mm のセパレートプレートへろう付けにて接合されている構造となっている。

2. 3 一般的設計方法

一般的なフィン、セパレートプレートの強度設計方法³⁾を以下に示す。また、本一般的設計方法を用いた上記のフィン、セパレートプレート構造の強度設計も以下に示す。なお、用いる設計温度、設計圧力は、600MW プラントにおける値を標準として用い、計算式中の記号は図-4 中の記号に対応させた。

(本一般的設計方法は「高圧ガス取締法 特定設備検査規則省令4号 昭和54年改正 通産省立地公害局長通達 特定設備検査規則の運用及び解釈について」によるものであり、高圧ガス取締法は、平成9年の官報で「高圧ガス保安法」とされたが当該部は単位系の変更であるので、単位系を読み替えて計算した。また、許容応力値は同法別表1において、変形がある程度許容できる場合の値を採用した。)

2. 3. 1 フィン

1ピッチのフィン上下のセパレートプレートが設計圧力相当の等分布荷重を受けるときに発生するフィンの単純引張応力値が、フィン材の許容引張応力未満となる様、次式によりフィン板厚等を決定する。

$$t_F = \frac{P P_t}{\sigma_a}$$

t_F ; フィンの最小厚さ(mm)

P ; 設計圧力 = 6.24(Mpa) (設計温度 = 477°C)

P_t ; フィンの平均ピッチ = 1.6(mm)

σ_a ; 設計温度における材料の許容引張応力 = 104(Mpa)

よって、

$$\begin{aligned} t_F &= \frac{6.24 \times 1.6}{104} \\ &= 0.096(\text{mm}) < 0.2(\text{mm}) \end{aligned}$$

2. 3. 2 セパレートプレート

以下の(1)～(3)の各荷重に対する式による板厚のうち、最も大きいものをセパレートプレート最小厚さとする。

ここにおいて、

t_{P1} ; 単純引張りに基づくフィンの最小厚さ(mm)

t_{P2} ; 曲げ強さに基づくフィンの最小厚さ(mm)

t_{P3} ; せん断強さに基づくフィンの最小厚さ(mm)

P ; 設計圧力 = 6.24(Mpa) (設計温度 = 477°C)

h ; フィンの高さ = 1.2(mm)

P_t ; フィンの平均ピッチ =1.6(mm)

σ_a ; 設計温度における材料の許容引張応力 =104(Mpa)

τ_a ; 設計温度における材料の許容せん断応力 =0.8 σ_a (Mpa)

(1) 引張

$$t_{P1} = \frac{Ph}{\sigma_a}$$

よって、

$$\begin{aligned} t_{P1} &= \frac{6.24 \times 1.2}{104} \\ &= 0.072(\text{mm}) \end{aligned}$$

(2) 曲げ

$$t_{P2} = P_t \sqrt{\frac{P}{2\sigma_a}}$$

よって、

$$\begin{aligned} t_{P2} &= 1.6 \sqrt{\frac{6.24}{2 \times 104}} \\ &= 0.28(\text{mm}) \end{aligned}$$

(3) せん断

$$t_{P3} = \frac{PP_t}{2\tau_a}$$

よって、

$$\begin{aligned} t_{P1} &= \frac{6.24 \times 1.6}{2 \times 0.8 \times 104} \\ &= 0.06(\text{mm}) \end{aligned}$$

よって、セパレートプレート最小厚さ t_p は

$$t_p = 0.28 < 0.5(\text{mm})$$

2. 4 解析の意義

前節に示す如く、曲げ応力が考慮されずにフィン設計が行われているが、フィンはろう付け部分でRをとっているほか、フィン自体傾斜している場合も多く、実際は曲げ応力が発生する。また、プレート設計においても、上述のような簡易計算で局所的な応力値を求められない。

従来のプレートフィン型熱交換器においては、それら評価不足分を十分な設計裕度を見込み、更に実寸大の試作品による耐圧試験を行うことにより補足してきた。しかし本再生熱交換器においては、不要な設計裕度を取り除くことにより、可能な限りコンパクト化を進めることが必要であり、内部の応力状態及び応力値の正確な値を明らかにすることは、非常に有意義なことである。

3. 熱交換器構造のモデル化検討

図-3に示す如く本熱交換器構造はフィン及びセパレートプレートが数千段にわたって存在するので、全てをモデル化することはほとんど不可能である。よって、解析対象範囲を設定し、適切な境界条件を与えることにより、部分モデルによる解析を可能にすることが必要となる。また、多数の解析検討を行う場合には、モデルの簡素性も重要である。

本章では適切なモデル化を行う為の検討を行った。なお、その妥当性評価として、一般的には歪みゲージによる実測値との比較等が行われるが、現時点においてそれらは存在せず、各モデル間の整合性や力学的考察より評価した。

3. 1 モデル化の基本方針及び条件

3. 1. 1 対象構造、荷重及び材料物性値

(1) 対象構造

試作²⁾を行った図-4の構造を解析対象とし、特に解析価値の高いフィンの解析に重点を置くこととする。

(2) 荷重

解析手法確立の第一段階として内圧荷重のみを対象とし、その値は以下の熱出力600MWのプラントにおける値を標準値として用いる。

被加熱（高圧）側；6.24 MPa

加熱（低圧）側；1.87 MPa

(3) 材料物性値

材料は、再生熱交換器の候補材料であるSUS316を想定し、以下の物性値を用いる。

ヤング率；120 GPa

ポアソン比；0.343

3. 1. 2 使用解析コード及び要素

(1) 使用解析コード

汎用有限要素法プログラム“ABAQUS”

(2) 要素

図-4において、y方向（紙面に垂直な方向）の構造は一定である。また、荷重も内圧のみを対象としているので、一定である。よって、使用要素として、x-z二次元平面歪み要素（xはセパレートプレートに平行な方向、zはフィンの高さ方向）を用いることとする。

3. 1. 3 ろう材

フィンとセパレートプレート境界には、これらの材料と物性値（ヤング率、ポアソン比、熱膨張係数等）の異なるろう材が存在するので、これが局所応力分布に影響を与える。

しかし、通常ろう材としては十分な強度のものが採用されていることから、これまで報告された破断例は全てフィン中央部で生じている。このため、解析にあたっては、ろう材はフィン材料

であるSUS316と同じ材料物性を有するものとした。このように仮定しても本報告の目的には十分であると考える。

3. 1. 4 境界条件

(1) x 方向

解析範囲は、フィンがx方向に見るとz軸に関して対象な構造であることを利用し図-4に示す山1/2、谷1/2の範囲とする。また、その左右端境界は、図-3に示す如く十分に長く続く構造となっているので、端面に垂直な方向(±x方向)を拘束し、端面のx方向変位量、角度変化を0とする。

(2) z 方向

図-3に示す如く、熱交換器のz方向は、同じ構造のフィン、セパレートプレートが数千段にわたって存在する構造であるが、軸対象構造ではない。よって、以下に示す項目に基づき適切なモデル範囲及び境界条件を設定する必要がある。

1) 全体膨張、補強材

熱交換器に内圧が加わると、全体が膨張する。しかし図-3に示す如く熱交換器z方向は補強材(サイドバー)にて補強されており、全体の膨張が抑制されている。但し、そのサイドバーも完全な剛体ではなく、ある程度の弾性を持つ。

以上をモデル化する為に、モデル上下端辺のz方向を拘束し、サイドバー及び、ガス流路も含めたフィン部分(以下「フィン部」と呼ぶ)のヤング率(以下「フィン部等価ヤング率」と呼ぶ)を考慮した変位量を与えることとする。

2) 上下段フィンの相互作用

内圧が加わると熱交換器内部の各段のフィン、セパレートプレートも各々変形する。その際サイドバーによりz方向の全体膨張が抑制された場合、ある一段のフィン、セパレートプレートの変形をその上下段のフィンが抑制する。

以上をモデル化する為に、当該段に加え上下段一段ずつもモデル化し、中段のフィン、セパレートプレートのみを評価対象とすることとする。

3. 2 標準モデル(三段モデル)

以下に上記の基本条件を満たす3段のフィン・プレート構造から成る標準モデルの作成方法及び本モデルによるフィン応力の検討結果を示す。

3. 2. 1 モデルの作成

(1) フィン部等価ヤング率の算定

3. 1. 4節で述べたz方向全体膨張量を算出する為、サイドバー、フィン部等価ヤング率を知る必要がある。

ここでサイドバーのヤング率はサイドバー材料のヤング率そのものである。

しかしフィン部は、フィンと流路空間が存在するので、以下の解析より両方を加味したフィン部等価ヤング率を求めた。

等価ヤング率算定の為の解析モデル（モデル1）を図-5に示し、解析条件を表-1に示す。なお、本モデルはフィン部等価ヤング率算定用であると同時に、試作品等によるフィンの引張強度試験状態も再現している（3. 3. 3節参照）。

3. 1節のモデル化の基本方針及び条件の下で、図-4のフィン、セパレートプレート構造を模擬し、フィン部の等価ヤング率を算出する為、z方向に高圧側と低圧側の差圧相当（4. 3.7 MPa）の等分布引張荷重を加えた。

フィン部等価ヤング率 E_f は、次式で求められる。

$$E_f = P \left(\frac{h_{fp}}{\Delta h_{fp}} \right)$$

P ; z方向等分布引張荷重

h_{fp} ; フィン高さとセパレートプレート高さ一対の合計

Δh_{fp} ; フィン、セパレートプレート一対のz方向変形量 FEM 解析値

モデル1の変形図を図-6に、応力分布図を図-7に示す。なお、まとめた結果を表-2に示す。

フィン部等価ヤング率算定に用いる Δh_{fp} は、本解析結果における上部セパレートプレート上面各節点の変位量FEM解析値平均から、下部セパレートプレート上面各節点の変位量FEM解析値平均を引いて計算し、その値は約 6.0×10^{-7} (m) である（計算詳細は参考資料-1 A 1. 2. 1節中に示す）。

よって、フィン部等価ヤング率 E_f (Pa) は、

$$E_f = 4.37 \times 10^6 \text{ (Pa)} \times \frac{1.7 \times 10^{-3} \text{ (m)}}{6.0 \times 10^{-7} \text{ (m)}} \\ = 1.238 \times 10^{10} \text{ (Pa)}$$

となる。

(2) 境界条件及びモデル図

3. 1節のモデル化の基本方針及び条件下にて、当該段の上下段のフィン、セパレートプレートも一段ずつモデル化し、上下端辺のz方向を拘束し膨張量を与えた上で、中段のフィン、セパレートプレートのみを評価対象とした。

高圧側及び低圧側に圧力荷重を加えた場合、フィン部とサイドプレートはz方向に一様に変形するものと仮定すると、サイドプレートのヤング率及びフィン部の等価ヤング率の値から、z方向の伸び量を計算できる（詳細は、参考資料-1に記す）。境界条件としては高圧側、低圧側の伸び量をモデル上端に強制変位として入力すればよい。

以上の検討結果より、高圧側フィンを評価対象として、フィン・プレート構造をモデル化したものを図-8（モデル2a）に示す。

同様に低圧側のモデル図を図-11に示す（モデル2b）。

なお、まとめた条件を表-1に示す。

3. 2. 2 標準モデルによる解析結果

高圧側であるモデル2 a の変形図を図-9に、Mises 及び x 方向、y 方向、z 方向の応力分布を図-10に示す。なお、まとめた結果を表-2に示す。

評価対象である中段に注目すると、変形図において、内圧によりセパレートプレートには外側に向か曲げ変形が生じている。フィンのろう付けされていない側のセパレートプレートは、ろう付けされている側のセパレートプレートより剛性が小さいので、大きく変形している。

z 方向応力分布を見ると、フィンには傾斜の為、セパレートプレートの上への移動に伴う曲げ応力が発生している（以下「フィン傾斜による曲げ応力」と呼ぶ）。その発生状況を図-32-a に示す。ミーゼスの応力最大値は、セパレートプレートとの接続部近傍のフィン部分にて発生しており、フィンよりセパレートプレートが厚く剛性がかなり大きいことが、形状不連続で応力の集中しやすいろう接合コーナー部より応力ピークをフィン側へシフトさせているといえる。

一方低圧側であるモデル2 b の変形図を図-12に、応力分布図を図-13に示す。

上下段が高圧側であるので、中段の低圧側評価対象部の差圧は圧縮であるが、フィンは引張り変形している。これは z 方向全体膨張量が大きい為上下段の高圧側の圧力負荷が各々のフィンの引張りに大きく働き、中段の低圧側へ圧縮負荷をもたらす割合が小さくなつた為である。

応力分布においてはこれらの変形に対応した応力が発生しており、フィン傾斜部 z 方向応力は引張りを示している。ミーゼス応力は、当該段は低圧側であることと、高圧側からの圧縮負荷が小さい為、モデル2 a に比べ半分以下と大幅に小さくなっている。

以上より本モデル2は、物理的に矛盾の無い妥当な結果を示しているといえる。

3. 3 モデルの簡素化検討

解析モデル化においては対象構造を忠実に反映することも重要であるが、多数の解析により検討を行う場合等には、モデルの簡素性も重要なとなる。

本節では上記のモデル2を基準とし、モデルの簡素化について検討、評価した。

また、逆に以下の簡素化モデルとの比較により、モデル2の正確性も更に評価した。

3. 3. 1 段数削減（一段モデル；モデル3）

モデル2より上下段フィンの相互作用を省略し一段としたモデルを、図-14（高圧側；モデル3 a）、図-17（低圧側；モデル3 b）に示す。境界条件においても、z 方向全体膨張、サイドバーによる補強材効果を省略し、z 方向拘束点は剛体移動を抑えることを目的に、拘束点反力が極力小さくなる位置に一点のみ設けた。なお、まとめた条件を表-1に示す。

モデル3 a の変形図を図-15に、応力分布図を図-16に示し、モデル3 b の変形図を図-18に、応力分布図を図-19に示す。なお、まとめた結果を表-2に示す。

高圧側のモデル3 a に関しては、変形形状、応力分布共モデル2 a と似た傾向を示し、変形量、応力絶対値は 15～30% モデル2 a より下回っている。これはモデル2 a においては z 方向全体膨張による変位が存在する為、上下段の低圧側圧力が各々のフィンの引張りに大きく働き中段に圧縮負荷をもたらす割合が小さかつた為である。対してモデル3 a では、上下端辺の低圧側圧力負荷が、全て高圧側に圧縮力をもたらすことに働いている。つまりモデル3 a ではモデル2 a

より上下フインが省略され変形し易くなつたが、 z 方向全体膨張も省略されたので、低圧側圧力が高圧側引張変形を抑制する圧縮効果が大きくなり、変形量、応力値共にモデル2 a より小さくなつたと考えられる。

以上、両モデルの変形形状、応力分布状態は似た傾向を示し、物理的に矛盾も無いので、高圧側フインの定性的強度評価を行うにはモデル3 a も適用可能と考えられる。

一方低圧側のモデル3 b に関しては、絶対値を表示するミーゼス応力分布以外はモデル3 a の正負が逆転した応力分布を示している。変形形状、応力分布状態共モデル2 b と異なつており、引張りと圧縮が逆転するほど大きな差がある。これもモデル2 b においては z 方向全体膨張による変位が存在する為、上下段の高圧側圧力負荷が各々のフインの引張りに大きく働き中段に圧縮負荷をもたらす割合が小さかつた為である。対してモデル3 b では、上下端辺の高圧側圧力負荷が、全て低圧側に圧縮力をもたらすことに働いている。つまりモデル3 b ではモデル2 b より上下フインが省略され変形し易くなつた上に、高圧側圧力が低圧側へ与える圧縮効果も大きくなり、変形量、応力値共にモデル2 b より大きく圧縮側へシフトしたと考えられる。

両モデルの変形形状、応力分布状態は大きな違いがあり、定性的な低圧側フインの強度評価を行うにおいてもモデル3 b は不適切と考えられる。

3. 3. 2 負荷圧力の差圧化（モデル4）

負荷圧力を差圧化した高圧側モデル（モデル4）を図-20に示す。

モデル4の変形図を図-21に、応力分布図を図-22に示す。なお、まとめた条件を表-1に、結果を表-2に示す。モデル3 a に対し、変形形状、応力分布状態はほぼ一致している。但しフイン傾斜部においては、モデル3 a は6. 24 MPa、モデル4は4. 37 MPaの異なる圧力が加わる為、 x 方向応力分布は若干ではあるが異なつてゐる。

以上より、両モデルの変形形状、応力分布状態はほぼ一致し、また、その値もほぼ一致することから、高圧側フインの強度評価を行うにはモデル4も適用可能と考えられる。

3. 3. 3 内圧荷重状態と引張荷重状態の関係（モデル1）

3. 2. 1節にてフイン部等価ヤング率算定解析に用いたモデル1（モデル図；図-5）は、モデル4の内圧荷重を等分布引張荷重へ置き換え簡略化したものといえる。

変形図である図-6、応力分布図である図-7を見ると、モデル4に対し変形形状、応力分布状態は一致し、値もほぼ一致している。例えばMisesの相当応力で見ると、モデル4の47. 5 MPaに対してモデル1では48. 8%で差は約3%である。また、詳細モデルであるモデル2 a と比べると、モデル2 a では58. 5 MPaであるので、約17%小さい値になつてゐる。

以上より、高圧側フインの強度評価を行うには、2割ほど小さい値を念頭に置くことでモデル1も適用可能と考えられる。

また、内圧荷重を用いた解析結果と等分布引張荷重を用いた解析結果とがほぼ一致することは、フイン・プレート構造の強度を調べるにあたり、内圧試験に代えてより簡便な引張強度試験で代用できることを示している（さらに詳細にモデル1とモデル4の整合性を評価した結果を参考資料-2に示す）。

以上より、各モデルともモデル2に対して変形、応力とも差はあるが、物理的に矛盾はなくその差はモデルを簡略化していったことによる誤差であるといえる。よって、モデル2が最も正確にフィン・プレートの応力状態を示しているといえる。

4. 簡素化解析モデルを用いた設計検討

前章において検討した解析モデルを用い、熱交換器の設計検討を行った。

ここで、低圧側より大きな応力が発生している高圧側のみを代表的に評価することとし、使用モデルは正確性と簡素性との兼ね合いよりモデル4を採用した。

4. 1 条件

解析条件は、3. 1節の基本条件及びモデル4をベースとし、以下のモデルを作成した。なお、まとめた条件を表-1に示す。

4. 1. 1 フィン傾斜角変更モデル

製作面からはフィン傾斜角が小さいほど製作を行い易いが、強度面ではフィン傾斜角が小さいほど強度が低くなると予想される。本モデルではその強度低下の程度を調べ、フィン傾斜角を決定する為のデータを得ることを目的とする。標準モデルのフィン傾斜角 63° に対して、 90° のケースと、中間の角度 76° のケースを取り上げた。

- (1) フィン傾斜角= 90° ; モデル5 (モデル図; 図-23)
- (2) フィン傾斜角= 76° ; モデル6 (モデル図; 図-26)

4. 1. 2 セパレートプレート板厚変更モデル

性能面からはセパレートプレート板厚は薄いほど伝熱効率が高くなり性能が向上するが、強度は低くなる。本モデルではその強度低下の程度を調べ、セパレートプレート板厚を決定する為のデータを得る。標準モデルの板厚 0.5 mm を、サイジング条件を満たす範囲で薄肉化し、 $1/2$ にした。フィン傾斜角は、 76° とした。

- (1) セパレートプレート板厚= 0.25 mm ; モデル7 (モデル図; 図-29)

4. 2 結果

解析結果を以下に示す。また、まとめた結果を表-2に示す。

なお、モデルの妥当性は3章においても評価したが、さらに本モデル5とモデル4を用いその整合性を簡易計算との比較により確認した。結果を参考資料-3に示す。モデル4とモデル5の不整合及び簡易計算とFEM解析との差は大きいものもあるが、その原因は参考資料-3中に示す如く物理的に説明可能な為、本FEM解析値は妥当な結果を示しているといえる。

4. 2. 1 フィン傾斜角 (θ) 特性

モデル5の変形図を図-24に、応力分布図を図-25に示す。変形図及び z 方向応力分布図において、セパレートプレートに関してはモデル4とほぼ似た傾向を示す。

フィン鉛直部に関しては傾斜角が 90° である本モデル5においても、曲げが発生しており、その z 方向応力ピークは、3. 2. 2節で述べたフィン傾斜による曲げと x 方向に反対の位置に発生している。

これはモデル5フィン鉛直部においても、構造が左右不均一である為曲げが発生している為と考えられる(以下「左右不均一構造による曲げ」と呼ぶ)。その発生状況を図-32-bに示す。内圧により、フィンのろう付けされている側及びフィンのろう付けされていない側の両方のセパレートプレートが土 z 方向へ曲げ変形を受けるが、その変形における土 x 方向の力のバランスにおいて、剛性の小さいフィンのろう付けされていない側のセパレートプレートが、剛性の大きいフィンのろう付けされている側のセパレートプレートに押し戻される形で影響を受ける。その結果フィン鉛直部にモーメントが生じ、上下両方のセパレートプレートで上述の現象が起こっているためモデル中心を中心とし、曲げ変形が発生していると考えられる。

モデル1～4フィン傾斜部においては、この左右不均一構造による曲げとフィン傾斜による曲げ2つが組み合わさった曲げ変形が現れていると考えられる。

次にモデル6の変形図を図-27に、応力分布図を図-28に示す。特にミーゼス応力、 z 方向応力分布において、フィン傾斜部曲げ応力がモデル4に比べ目立たなくなってきた。これはフィン傾斜による曲げと、左右不均一構造による曲げ応力の大きさが、同程度で相殺する為と考えられる。

さらに、モデル4($\theta = 63^\circ$)、モデル6($\theta = 76^\circ$)、モデル5($\theta = 90^\circ$)による、フィン傾斜角と最大応力との関係を図-33に示す。ここで、接合部のろうの形状の違いによる応力集中の違いの影響を避ける為、接合部を除いた最大応力と傾斜角との関係も表示した(図-33-b)。また、フィンのみに注目した最大応力と傾斜角との関係も表示した(図-33-c)。

いずれの図においても、傾斜角 $\theta = 63^\circ \rightarrow 76^\circ \rightarrow 90^\circ$ の変化に対して、ミーゼスの相当応力及び z 方向応力は、一端減少し、再び増加する傾向があることが分かる。即ち、モデル6の傾斜角($\theta = 76^\circ$)近傍において、左右不均一構造による曲げ応力と、フィン傾斜による曲げ応力がバランスし、フィン最小応力を与えていると考えられる。

4. 2. 2 セパレートプレート板厚(t_p)特性

モデル7の変形図を図-30に、応力分布図を図-31に示す。セパレートプレートの変形、応力分布ともモデル6と似た傾向を示しているが、その値はセパレートプレート板厚が小さくなり剛性が下がった分、大きくなっている。

また、フィン傾斜部 z 方向応力分布において、モデル6に比べ曲げ応力がまた顕著に現れています。これは、セパレートプレート板厚が変わったことにより、前節で述べた左右不均一構造による曲げ応力も変化し、フィン傾斜による曲げ応力とのバランスが崩れた為と考えられる。

また、モデル7のミーゼス応力分布において、応力ピークがフィンからろう接合コーナー部へと移動している。これはセパレートプレートが厚いモデル4等においては、セパレートプレート

剛性がフィン剛性より非常に大きかった為、コーナー部に発生し易い応力ピークがフィン側へずれていたが、モデル7においてはセパレートプレート剛性とフィン剛性との差が小さくなり、コーナー部へとピークが移動した為と考えられる。

さらにモデル6 ($t_p = 0.5 \text{ mm}$)、モデル7 ($t_p = 0.25 \text{ mm}$)による、セパレートプレート板厚と最大応力との関係を図-34に示す。ここで図-33と同じく、接合部のろう形状の違いによる応力集中の違いの影響を避ける為、接合部を除いた最大応力とセパレートプレート板厚との関係も表示し(図-34-b)、フィンのみに注目した最大応力とセパレートプレート板厚との関係も表示した(図-34-c)。

いずれの図においても、セパレートプレート板厚が薄くなると発生応力は大きくなるといえる。これは上述の通り、セパレートプレートの剛性が下がり変形が大きくなることにより、これに接合するフィン接合部の応力が増加し、さらにフィン傾斜部における左右不均一構造による曲げ応力が変化し、フィン傾斜による曲げ応力とのバランスが崩れたためと考えられる。

以上より、セパレートプレート板厚を薄くすると、セパレートプレート応力が増大するだけでなく、他のフィン、ろう接合コーナー部の強度へも影響を及ぼすといえる。但し、応力値そのものは最大 70 MPa 程度で、約 100 MPa の許容応力値と比べるとまだ余裕があり、薄肉化できる可能性が高い。

5. まとめ

高温ガス炉ガスタービン発電プラントのプレートフィン型再生熱交換器のフィン・プレート構造のモデル化と応力解析を行い、下記の事項を明らかにした。

- ① 内圧荷重解析に対するフィン・プレートのモデル化方法として、z 方向全体膨張、補強材及び上下段フィンの相互作用を考慮し、三段のフィン・プレートをモデル化する方法(三段モデル；モデル2)が好ましい。しかし、簡素性が要求される場合には、変形形状や応力分布傾向が三段モデルにほぼ似た傾向を示すので、高圧側フィンの定性的な強度評価用の解析に限り、一段のみをモデル化する方法(一段モデル；モデル1, モデル3～4)が採用可能である。
- ② 低圧側フィンの解析においては、一段のみをモデル化し解析を行う方法は、変形形状や応力分布傾向が三段モデルと引張りと圧縮が逆転するほど違いがあるので不適切である。しかし、三段モデルの解析結果から分かるように、低圧側フィンの方が高圧側フィンよりミーゼスの応力は小さくなる傾向が予想できるので、低圧側フィンの強度保証を一段モデルの高圧側フィンの解析に代表させ評価することは可能といえる。
- ③ 内圧荷重を用いた解析結果と等分布引張荷重を用いた解析結果とがほぼ一致することより、フィン・プレート構造の強度を調べるにあたり、内圧試験に代えてより簡便な引張強度試験を代用できることが確認できた。

- ④ 高圧側フィンにおいて圧力荷重によりフィンには、左右不均一構造の為発生する曲げ応力と、フィン傾斜により発生する曲げ応力が発生し、その二つが釣り合うとき応力は最小となる。そのときのフィン傾斜角は、本報告で対象とした手法、荷重等の設計条件の下では 76° 近傍である。よって、最も製作の難しいフィン傾斜角である 90° を目標とする必要はないことがわかった。
- ⑤ セパレートプレート板厚がフィンの板厚よりある程度大きいと、ミーゼスの応力最大値は応力の集中し易いろう接合コーナー部ではなく、フィンに発生する。
- ⑥ コンパクト化のためセパレートプレート板厚を薄くする場合、セパレートプレート部応力が増大するだけでなく、他のフィン、接合部への強度へも影響を及ぼす。但し最大発生応力の値自体は許容応力に対してまだ余裕があるので、0.5 mm を 0.25 mm に薄肉化できる可能性が高い。

謝辞

本報告を纏めるにあたり、貴重なご意見をいただいた核熱利用研究部の西原哲夫氏、稻垣嘉之氏、石山新太郎氏方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 武藤 康, 石山 新太郎, “高温ガス炉ガスタービンシステムの技術課題とその解決法”, 日本原子力学会誌, Vol.42, No.10, 2000年10月
- 2) 武藤 康, 宮本 喜晟, 田中 利幸, “高温ガス炉ガスタービン発電システムの開発, 1.我が国における開発の現状”, 火力原子力発電, Vol.50, No.9, 1999年9月, PP.90-96
- 3) 高圧ガス取締法 特定設備検査規則省令4号 昭和54年改正 通産省立地公害局長通達 特定設備検査規則の運用及び解釈について

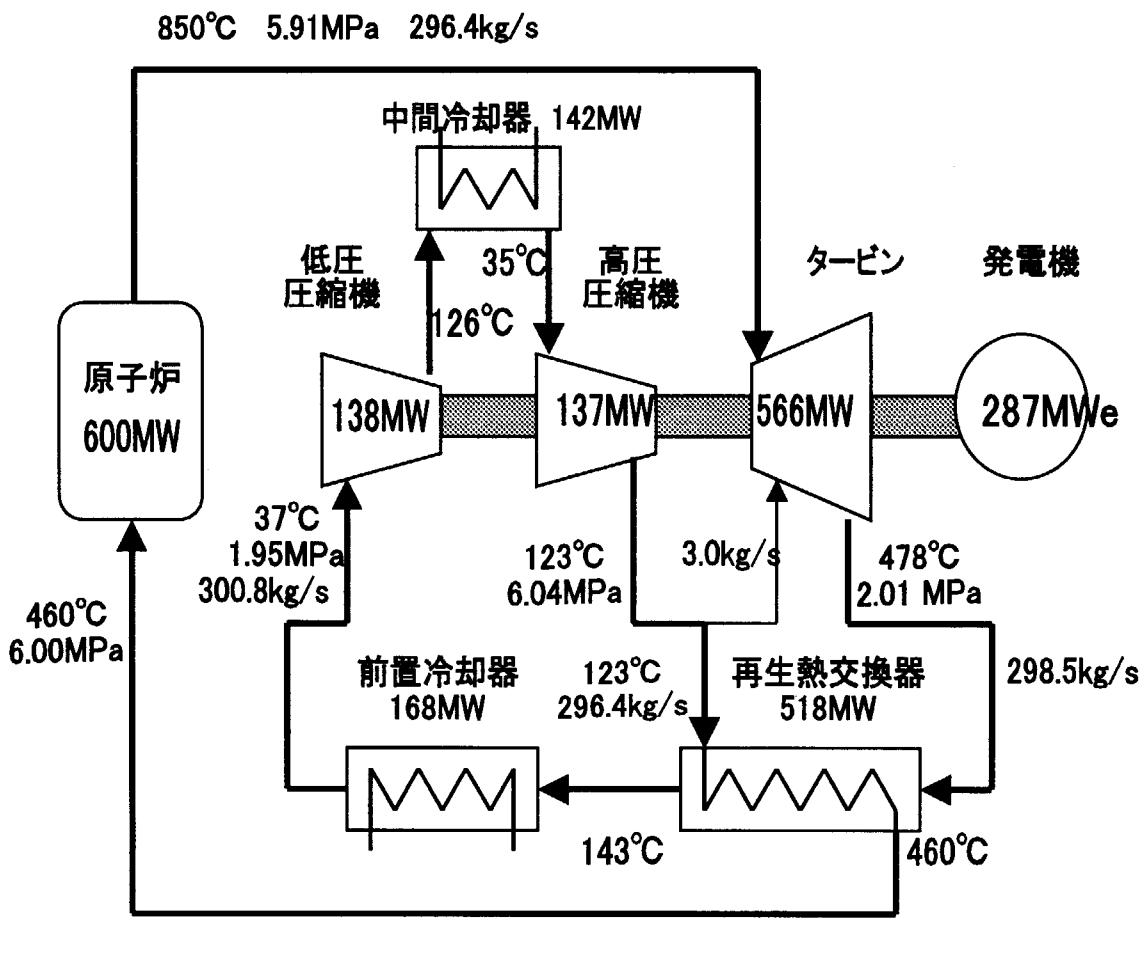
表-1 解析条件

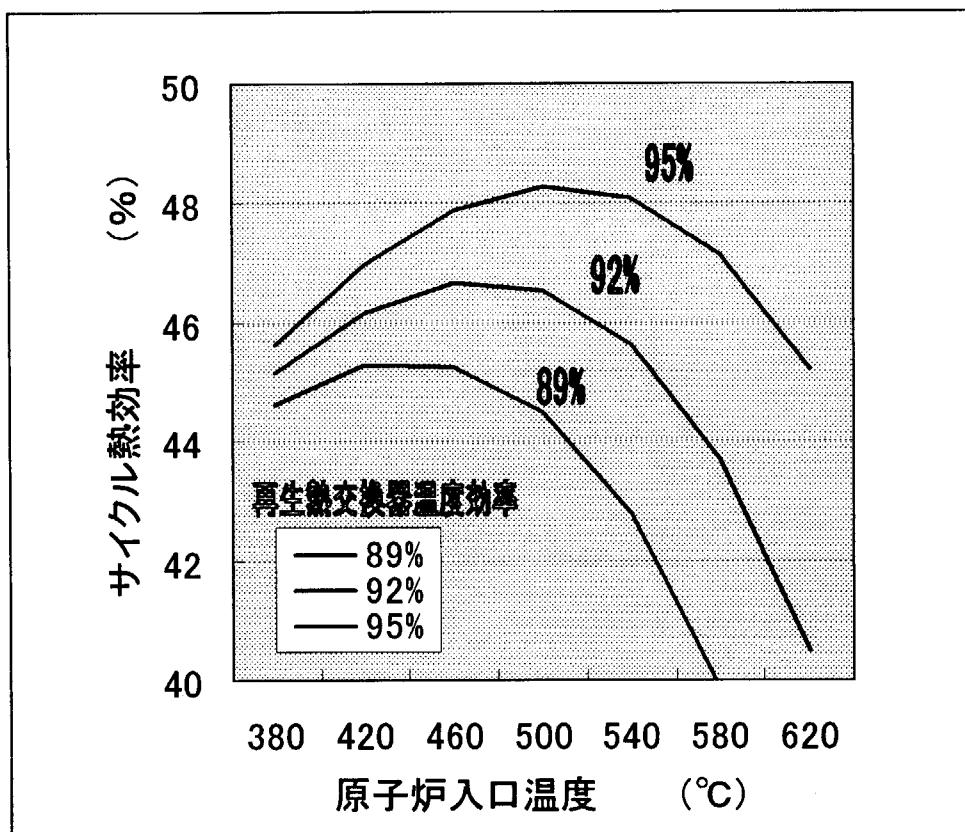
モデル名	ファイル名	モデル図	負荷圧力(MPa)	フィン傾斜角(deg)	プレート板厚(mm)	備考
モデル1	pffin15jt	図-5	4.37	63	0.5	上下端辺へ等分布引張荷重を負荷
モデル2 a	pffin22n4	図-8	上下段1.87 中段6.24	63	0.5	三段モデル、高圧段評価用
モデル2 b	pffin22n6	図-11	上下段6.24 中段1.87	63	0.5	三段モデル、低圧段評価用
モデル3 a	pffin19n2	図-14	上下端辺1.87 フィン部6.24	63	0.5	高圧段評価用
モデル3 b	pffin19n3	図-17	上下端辺6.24 フィン部1.87	63	0.5	低圧段評価用
モデル4	pffin19	図-20	4.37	63	0.5	
モデル5	pffin18	図-23	4.37	90	0.5	
モデル6	pffin20	図-26	4.37	76	0.5	
モデル7	pffin21	図-29	4.37	76	0.25	

縦弾性係数：120 GPa
 ポアソン比：0.343

表-2 解析結果

モデル名	変形図	応力分布図	最大変位量(mm)	フィン最大応力(MISES)(MPa)	備考
モデル1	図-6	図-7	7.68E-04	48.8	
モデル2 a	図-9	図-10	-	58.5	評価対象内の応力を表示した。
モデル2 b	図-12	図-13	-	22.4	評価対象内の応力を表示した。
モデル3 a	図-15	図-16	6.93E-04	46.9	
モデル3 b	図-18	図-19	-7.92E-04	49.4	
モデル4	図-21	図-22	7.15E-04	47.5	
モデル5	図-24	図-25	3.57E-04	41.4	
モデル6	図-27	図-28	5.09E-04	34.4	
モデル7	図-30	図-31	1.13E-03	41.8	

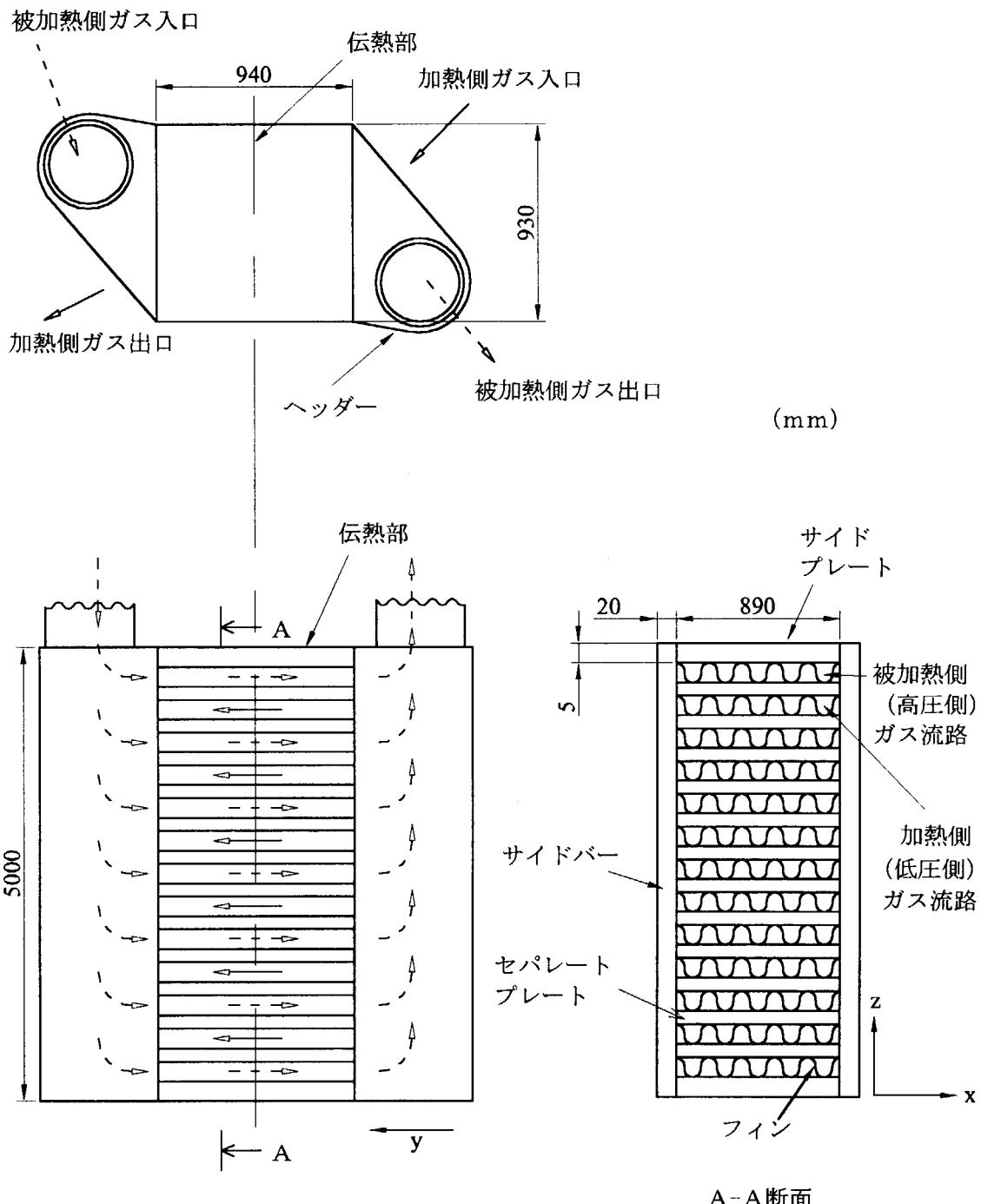
図-1 ガスタービンサイクルプラントの系統及び熱物質収支¹⁾



計算条件

中間冷却再生サイクル	
原子炉出口温度	850°C
タービンポリトロープ効率	91.66%
低圧圧縮機断熱効率	89.33%
高圧圧縮機断熱効率	89.21%
タービンディスク冷却シールガス	3.07%
機器圧力損失率合計	4.417%

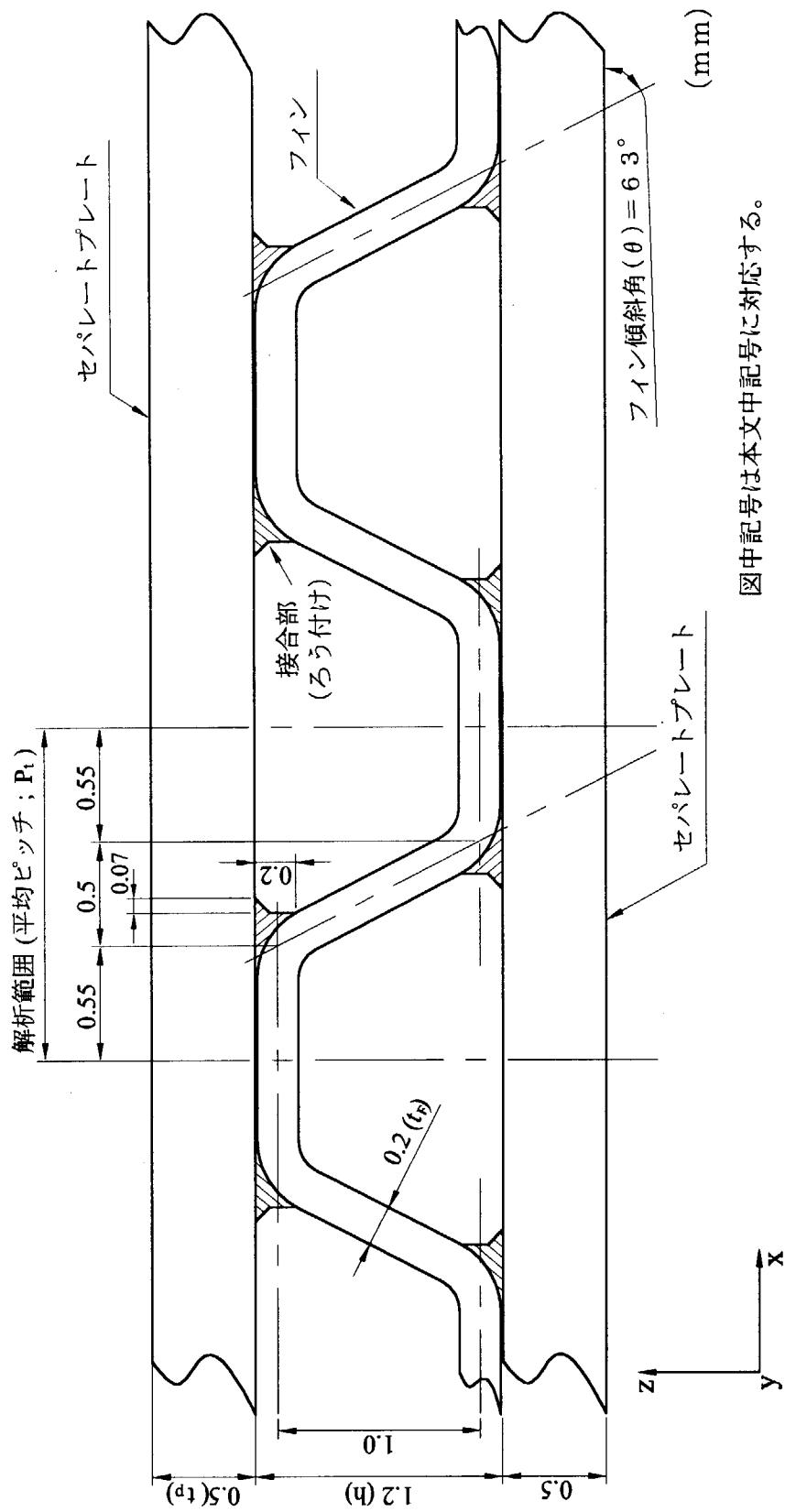
図-2 再生熱交換器温度効率のサイクル熱効率への影響



→ 加熱側ガス
↔ 被加熱側ガス

注 1) 本図ではフィン、セパレートプレートは拡大描画されている。
(実際は、数千段存在する。)
図-4 参照。

図-3 プレートフィン型再生熱交換器構造



図中記号は本文中記号に対応する。

図-4 フィン・プレート構造の詳細

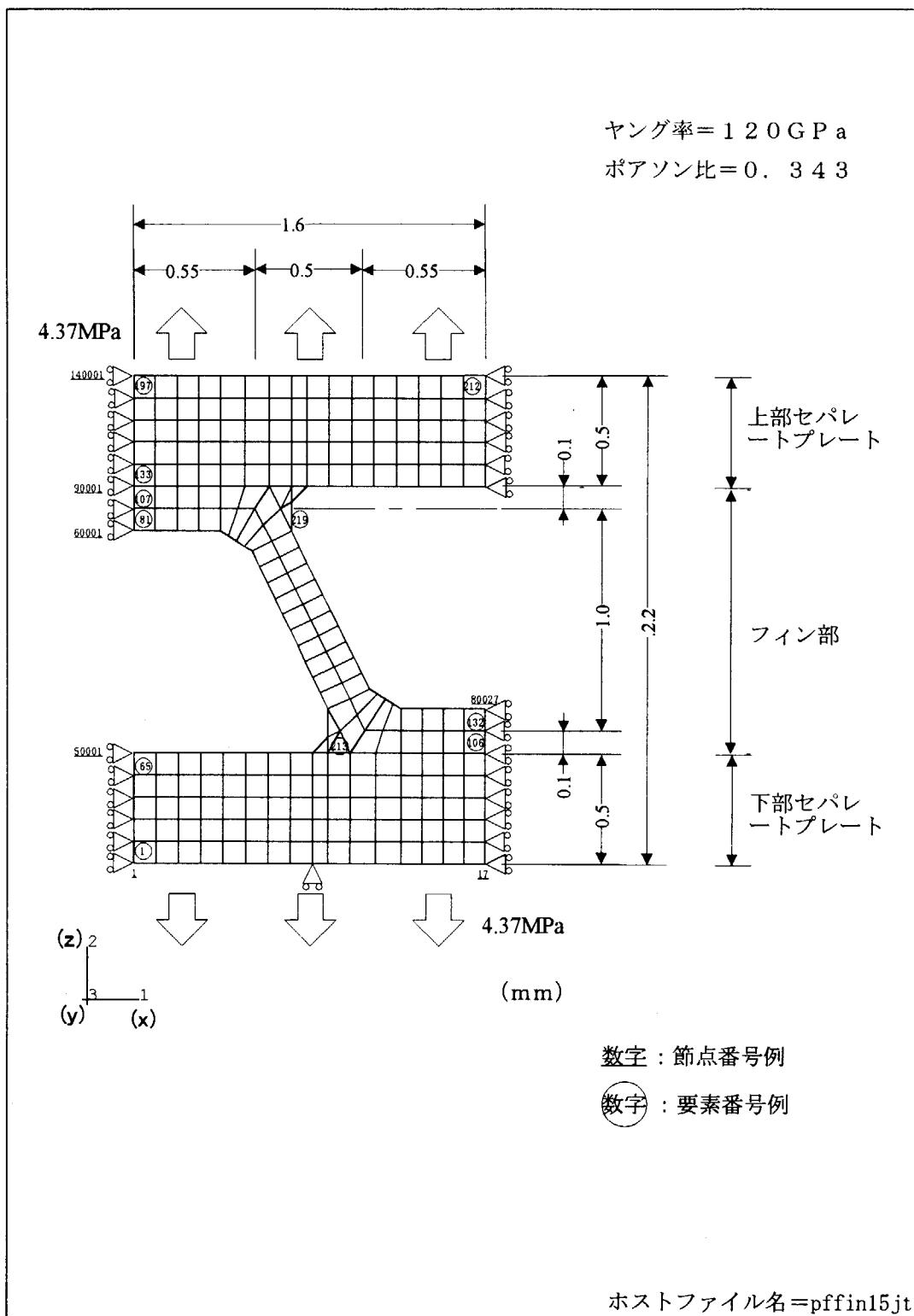
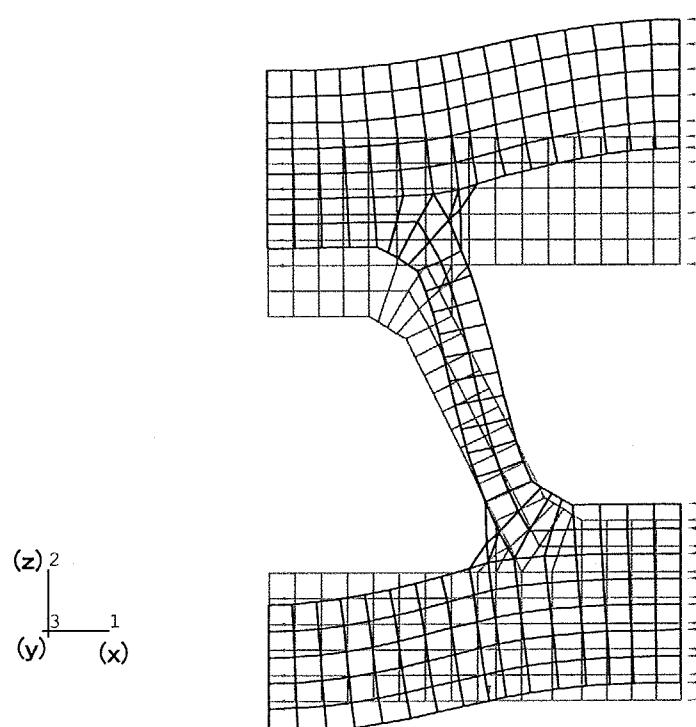


図-5 モデル図(モデル1)



変形倍率 = 600

図-6 モデル1変形図

This is a blank page.

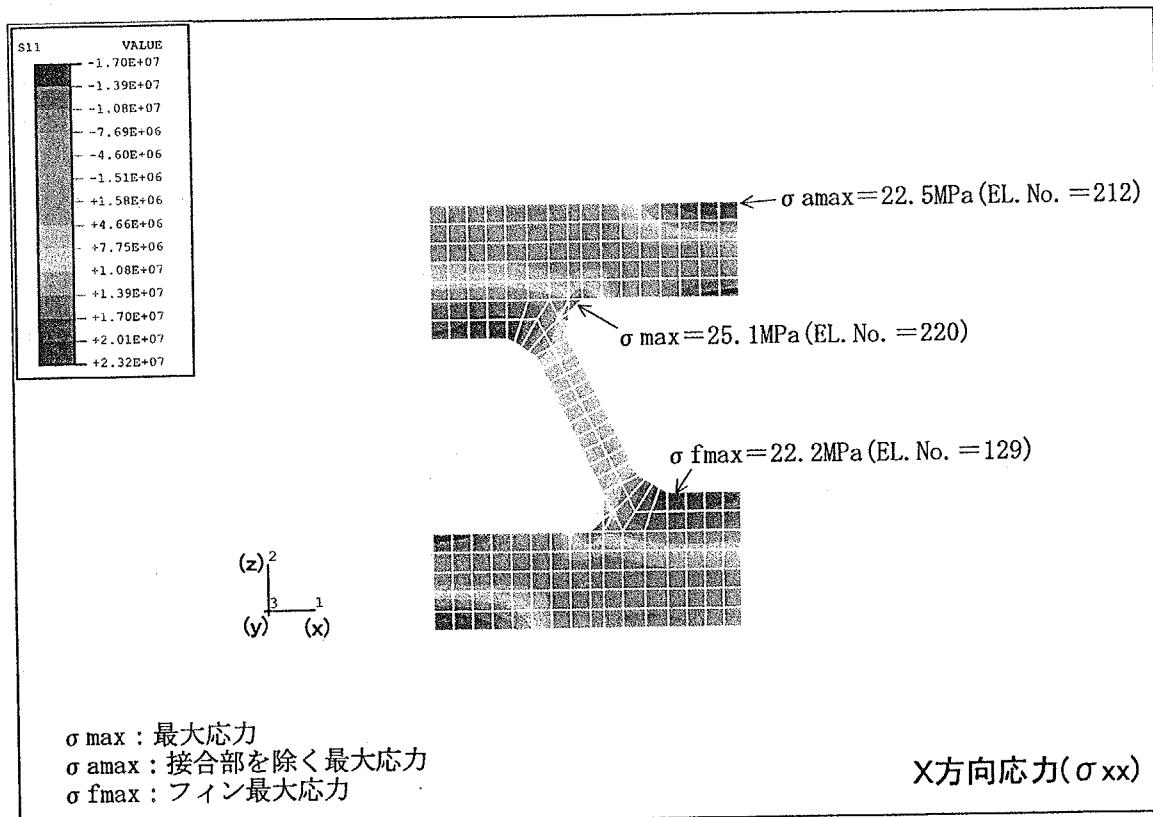
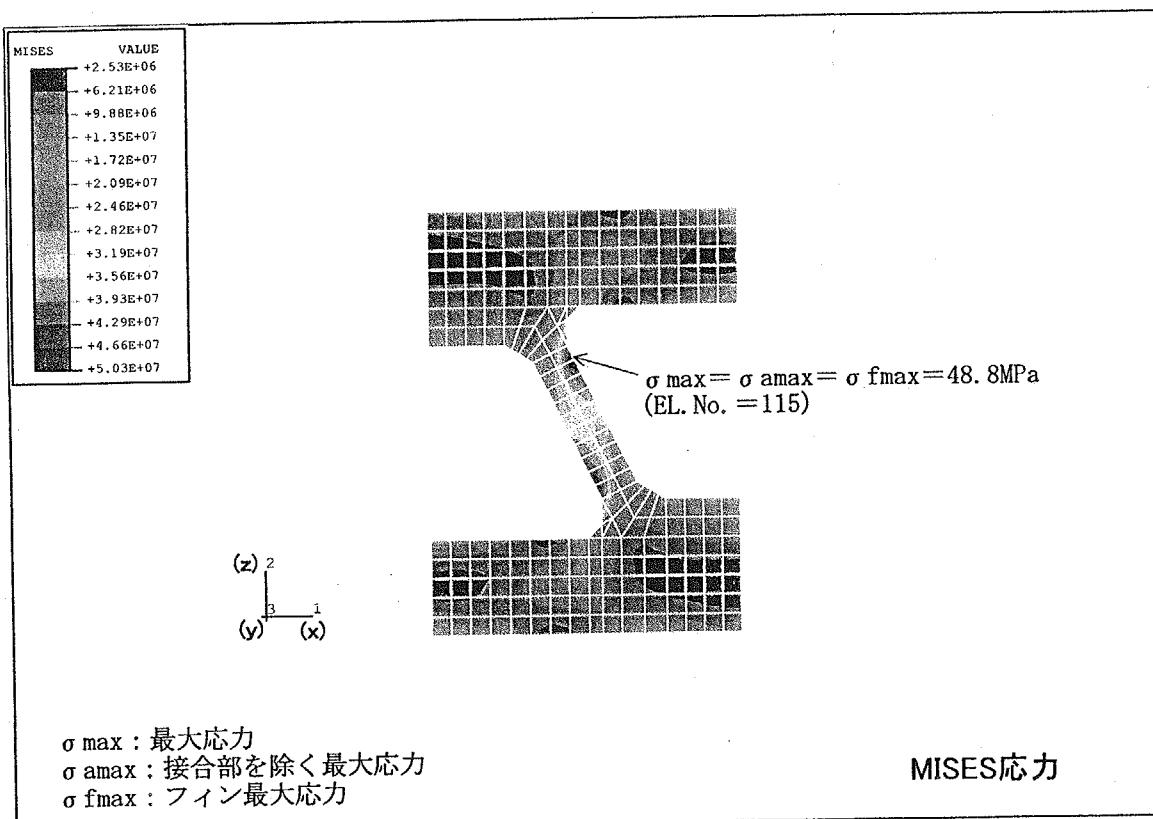


図-7(1/2) モデル1応力分布図

This is a blank page.

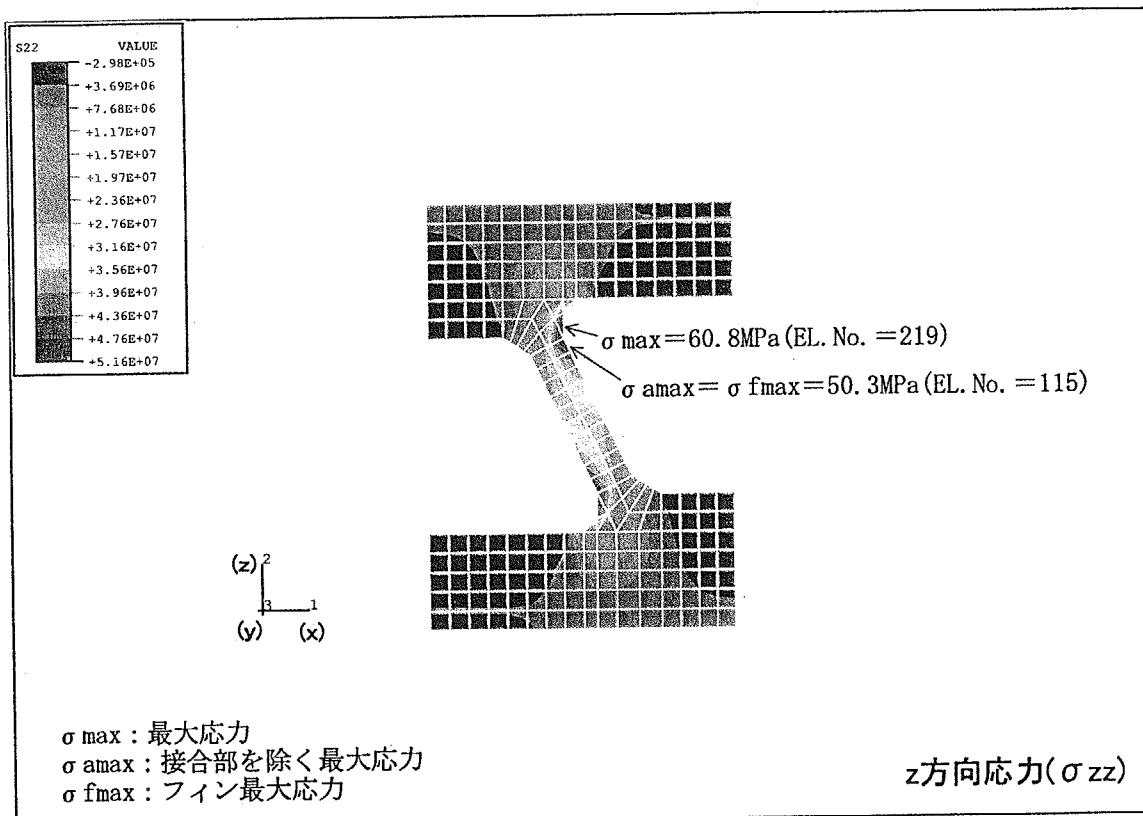
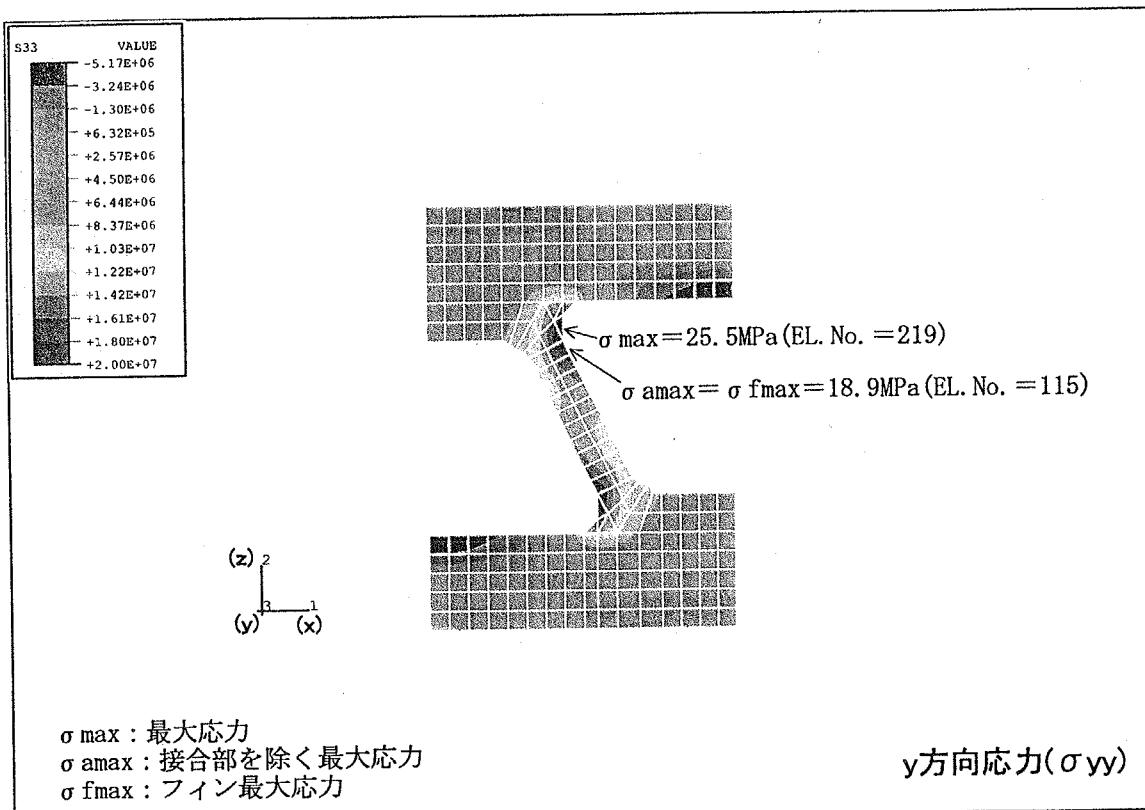


図-7(2/2) モデル1応力分布図

This is a blank page.

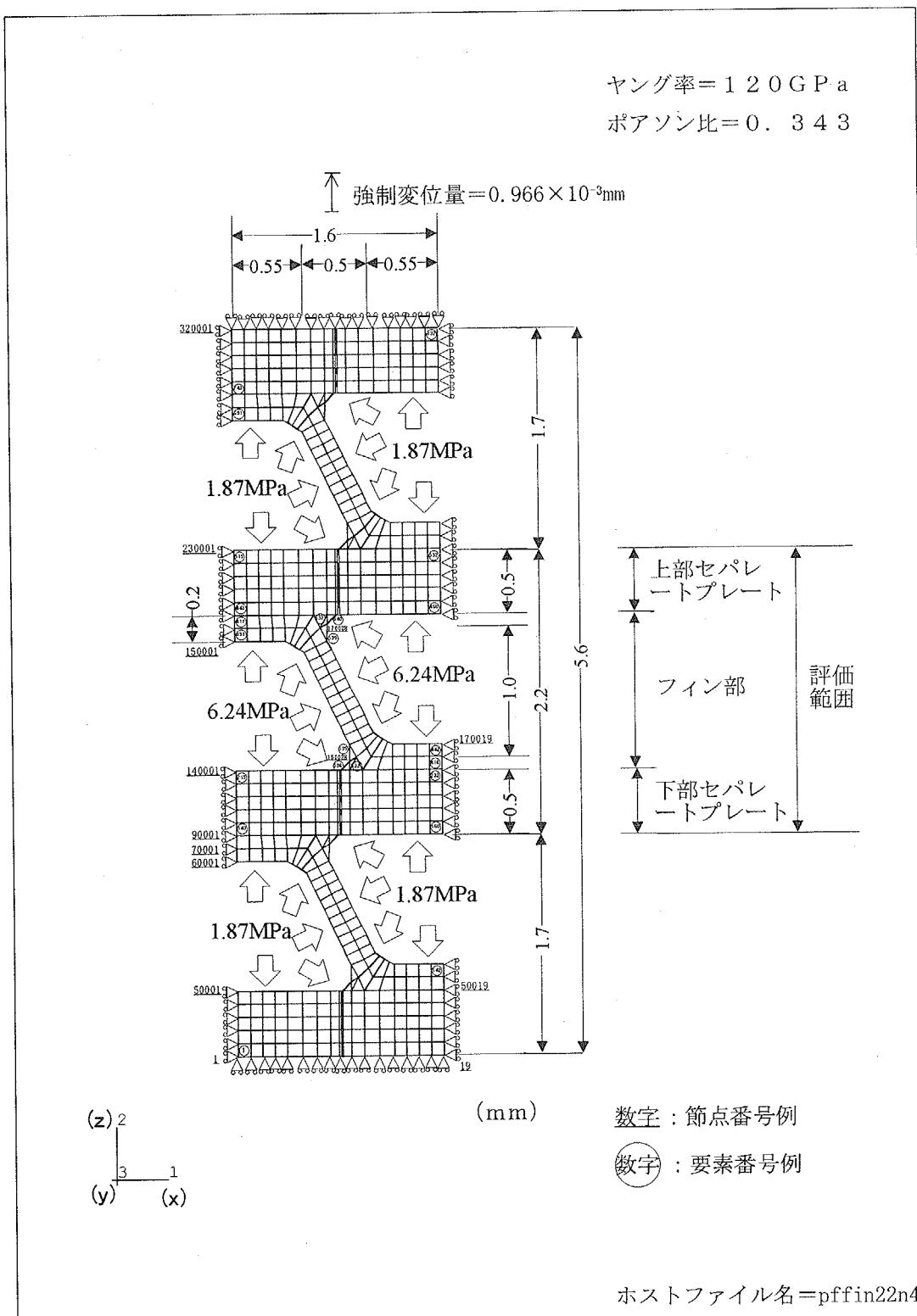


図-8 モデル図(モデル2a)

This is a blank page.

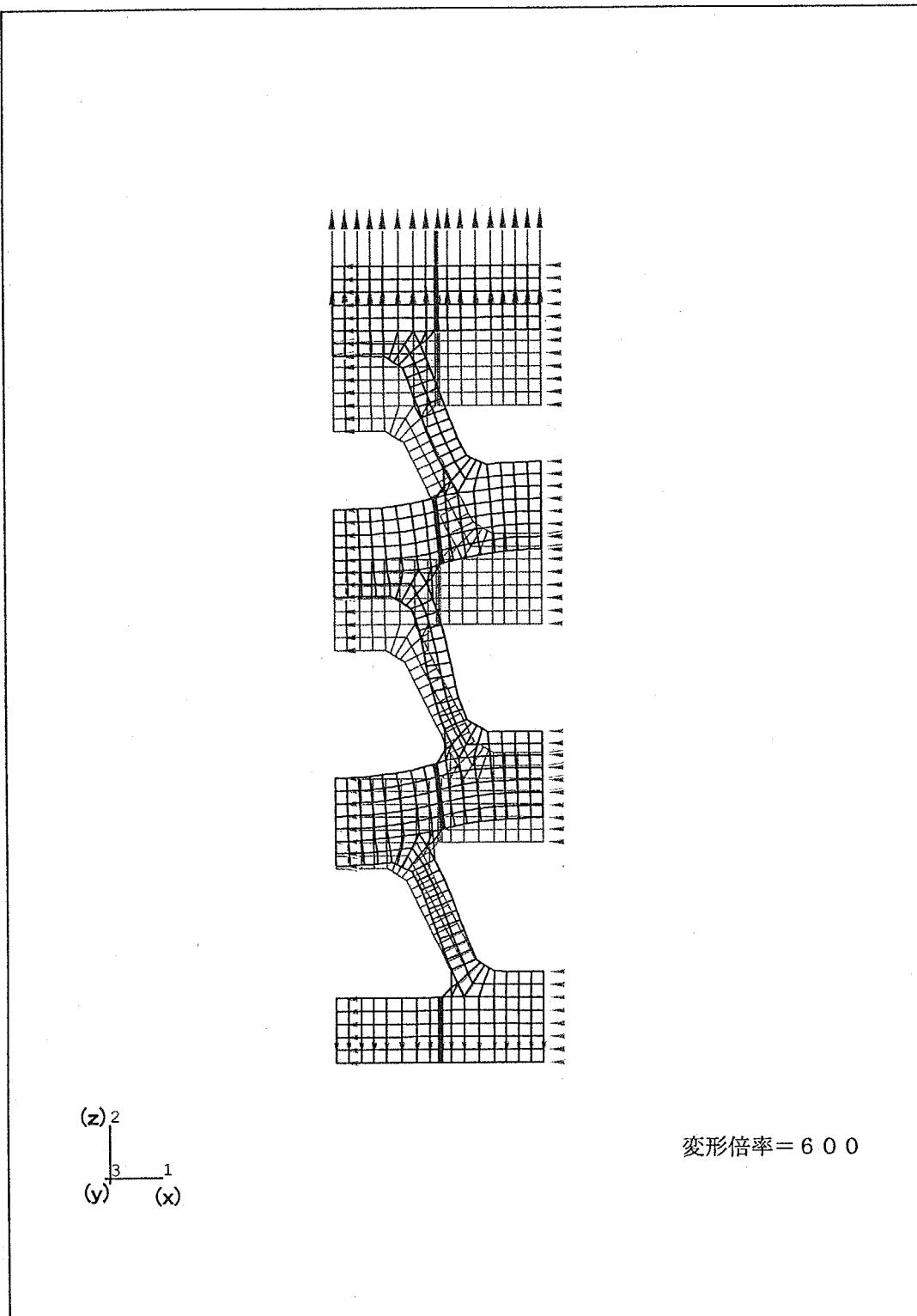


図-9 モデル2a変形図

This is a blank page.

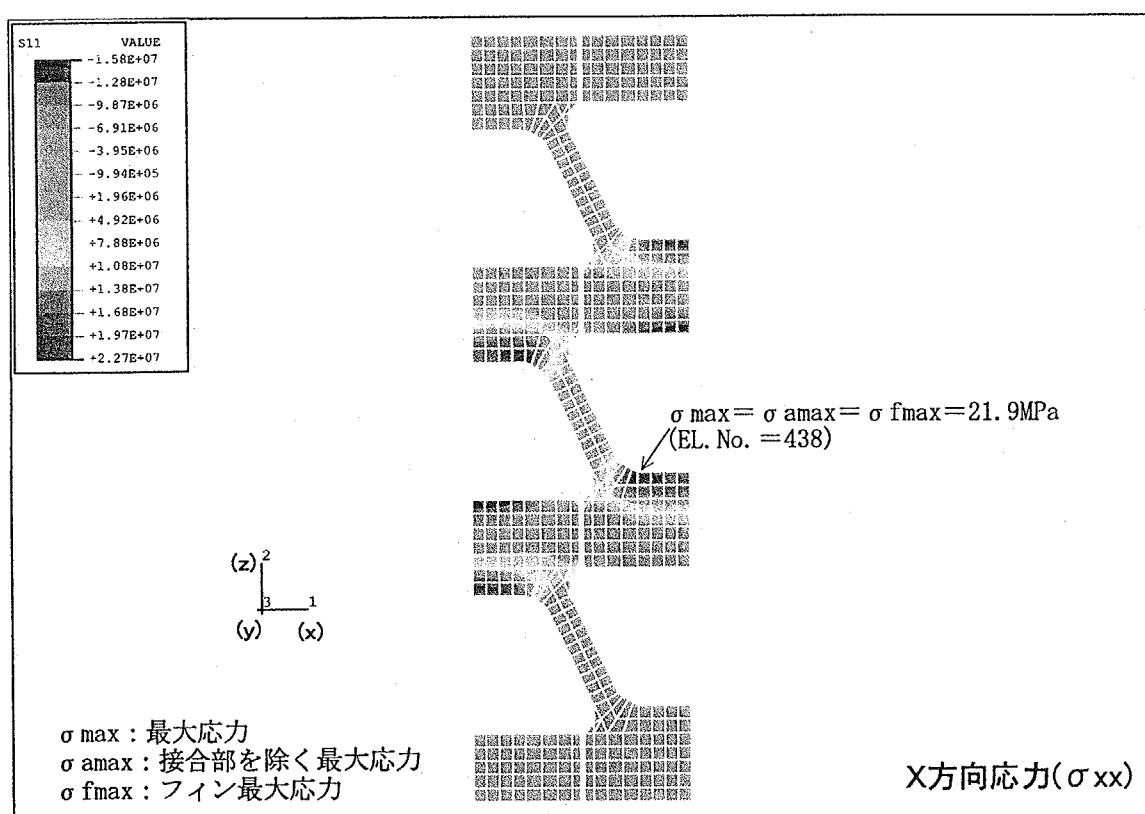
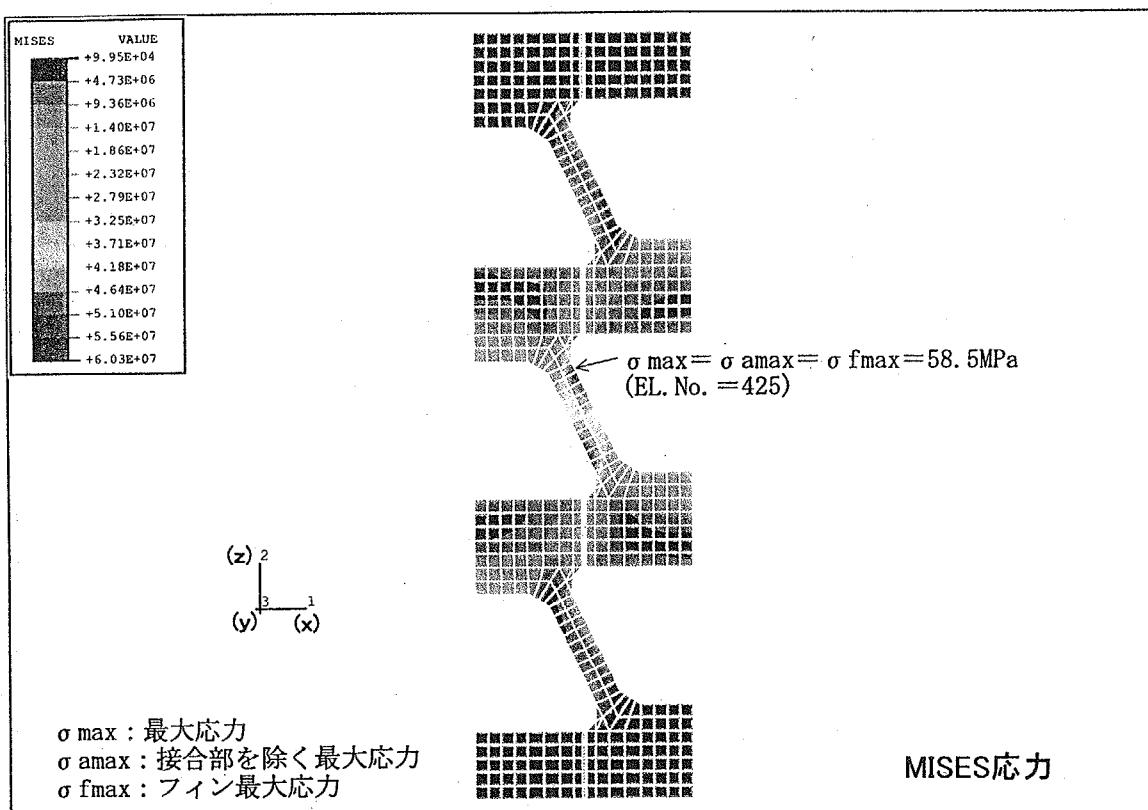


図-10(1/2) モデル2a応力分布

This is a blank page.

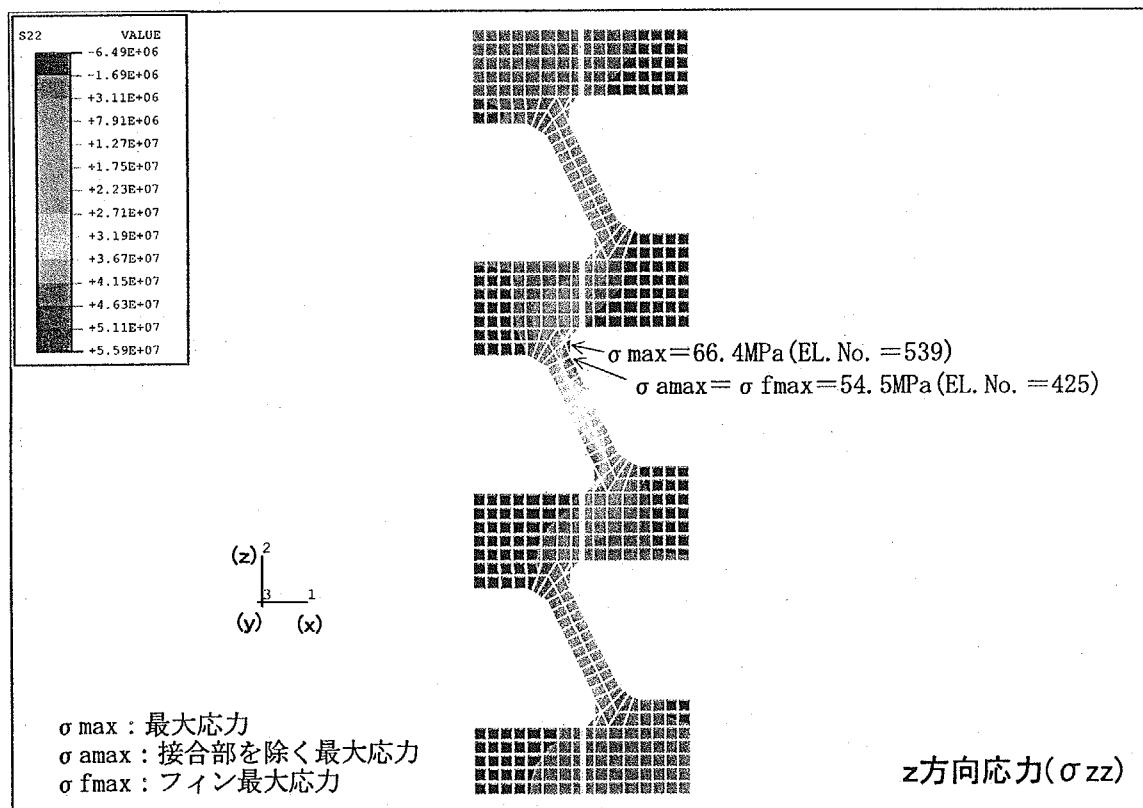
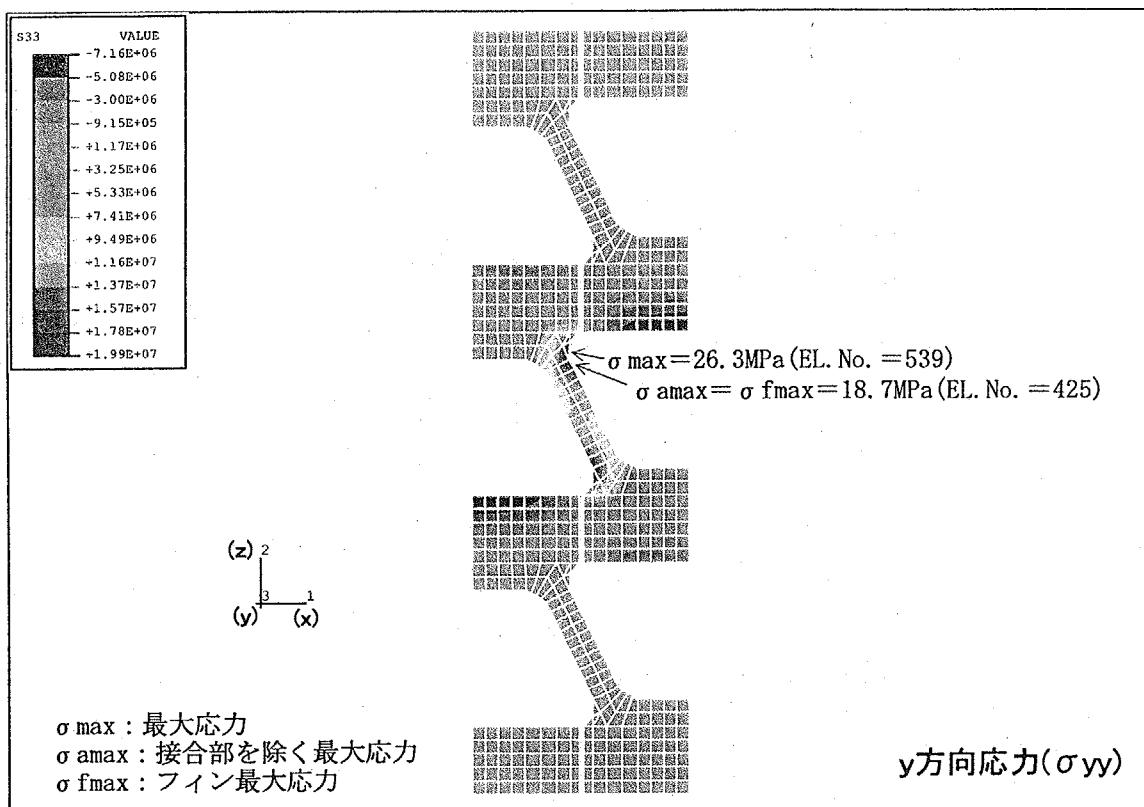


図-10(2/2) モデル2a応力分布

This is a blank page.

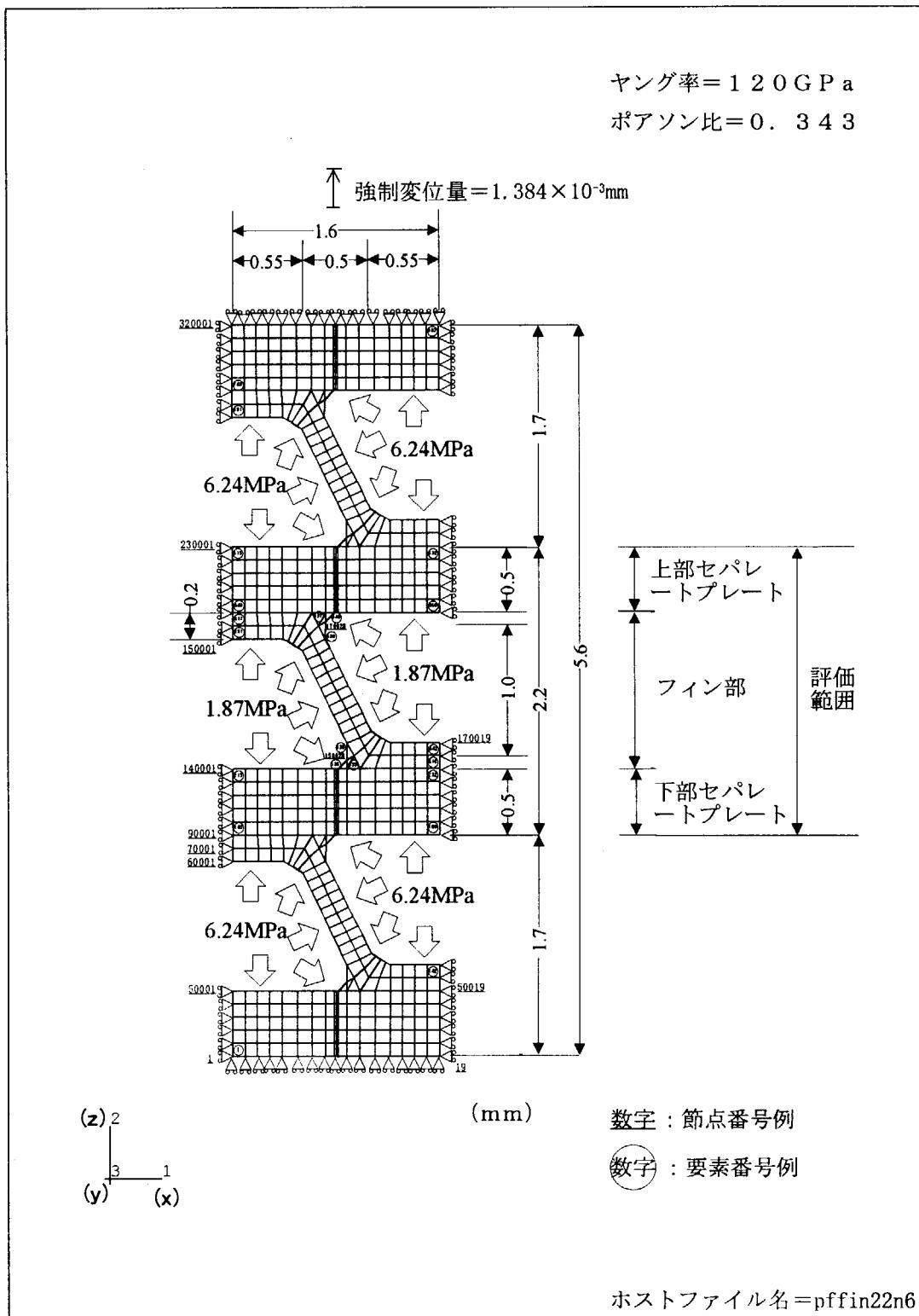


図-11 モデル図(モデル2b)

This is a blank page.

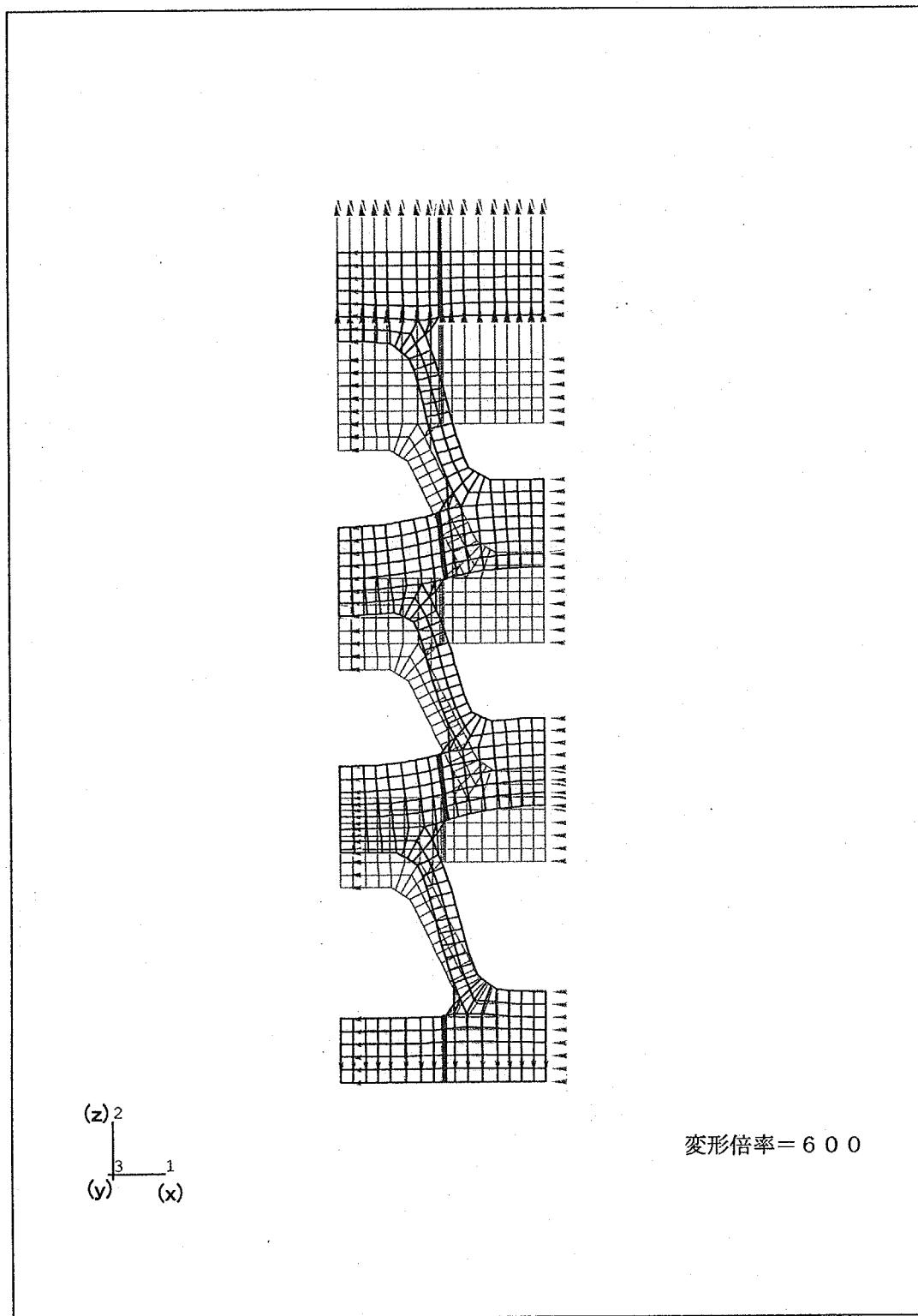


図-12 モデル2b変形図

This is a blank page.

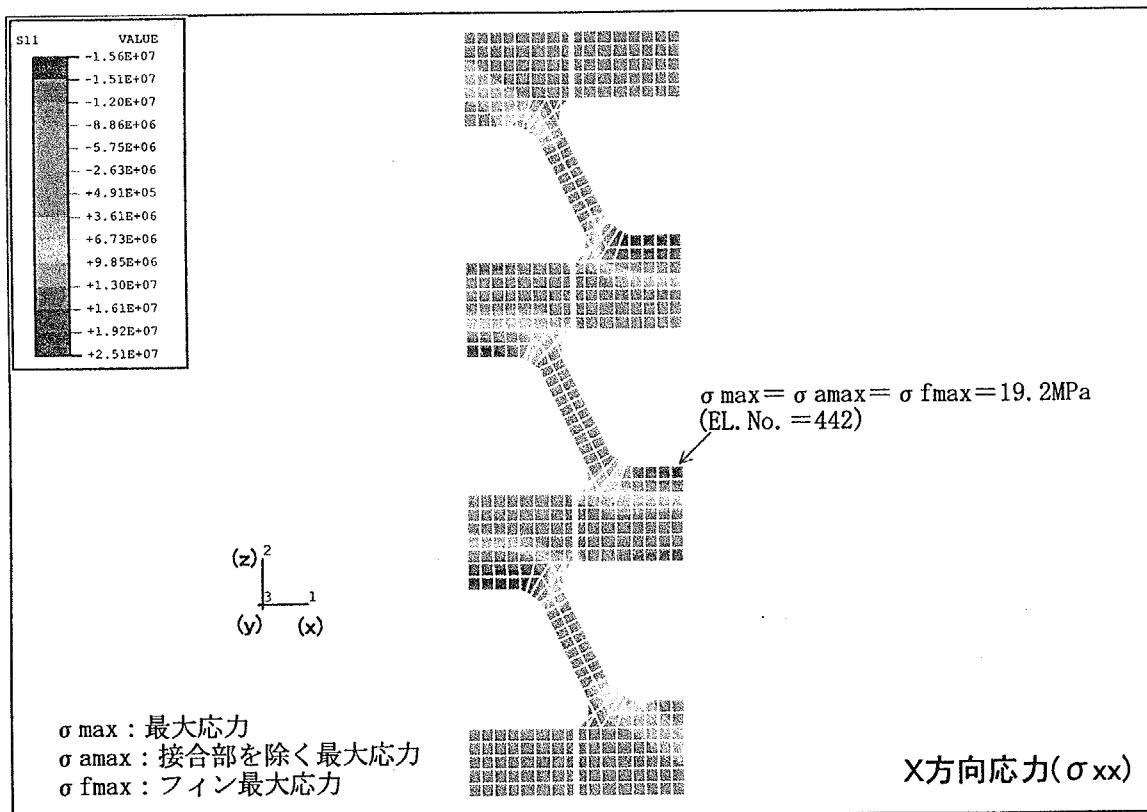
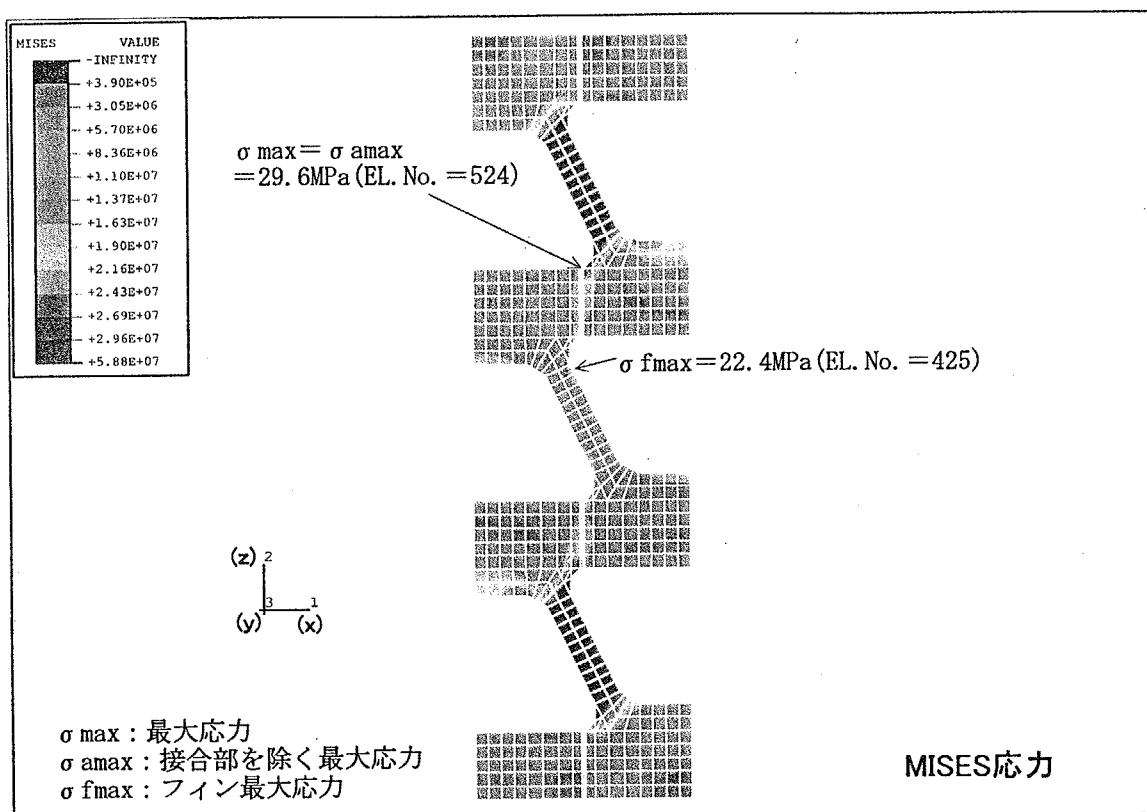


図-13(1/2) モデル2b応力分布

This is a blank page.

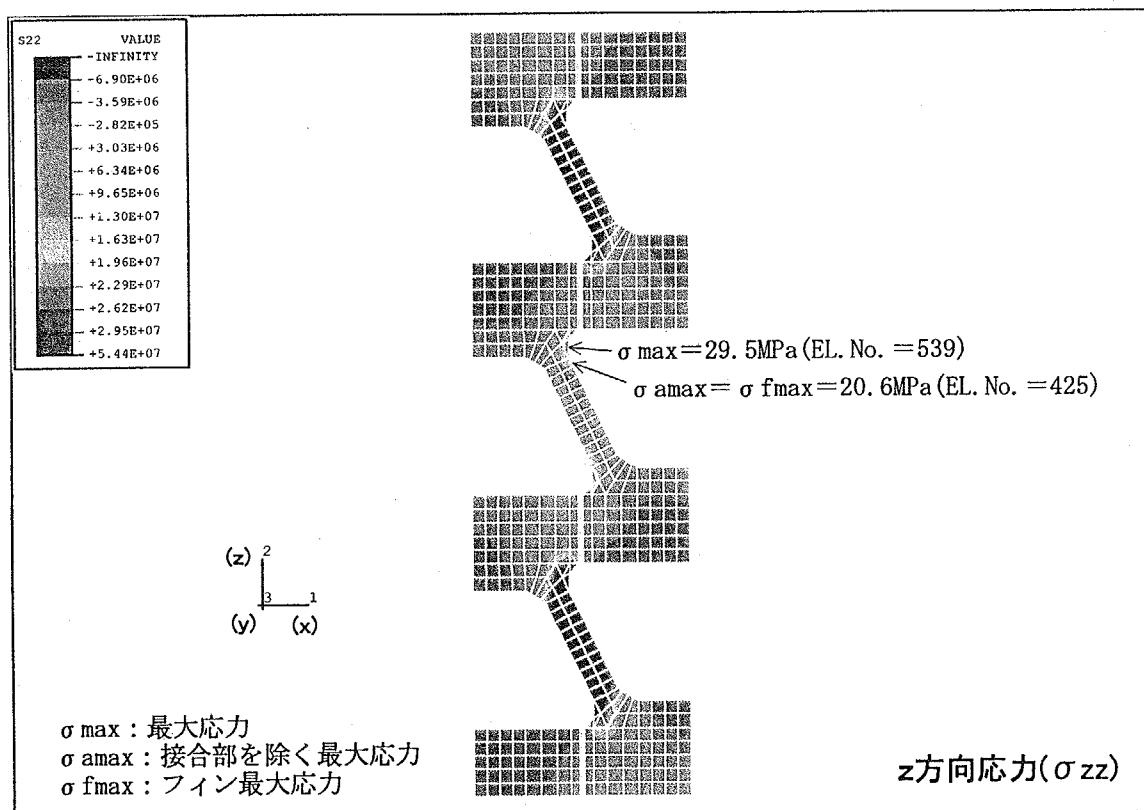
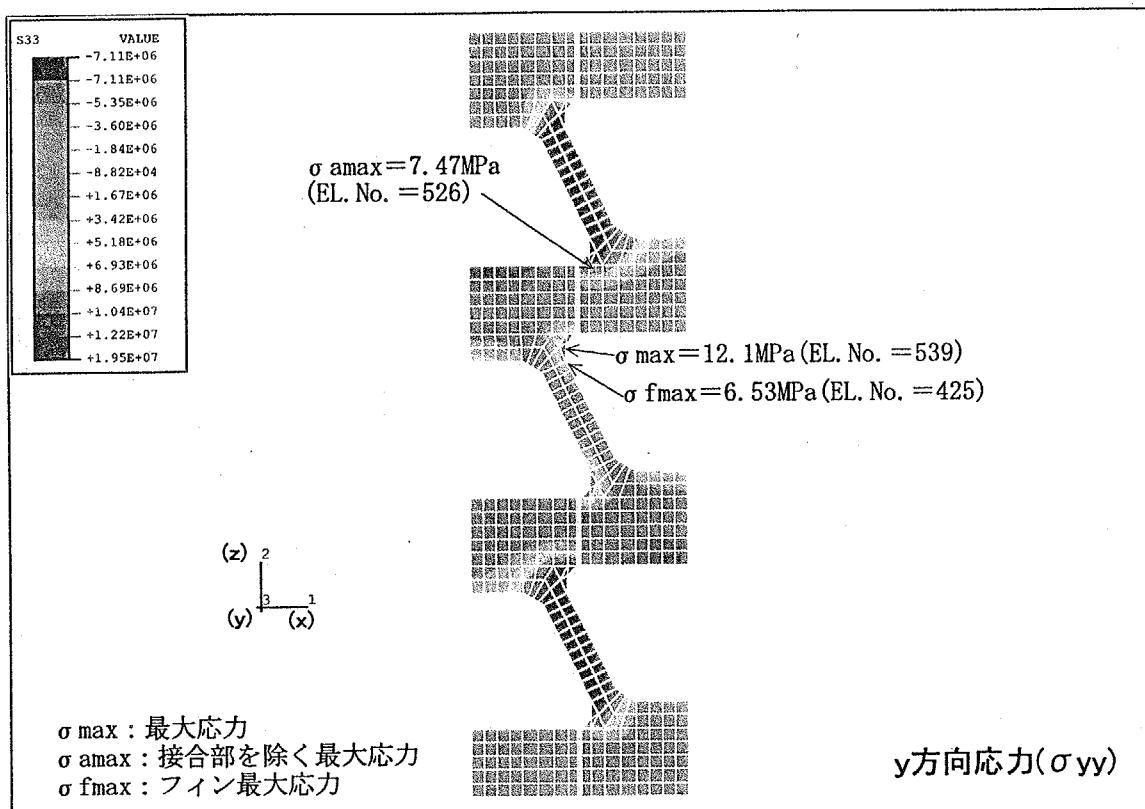


図-13(2/2) モデル2b応力分布

This is a blank page.

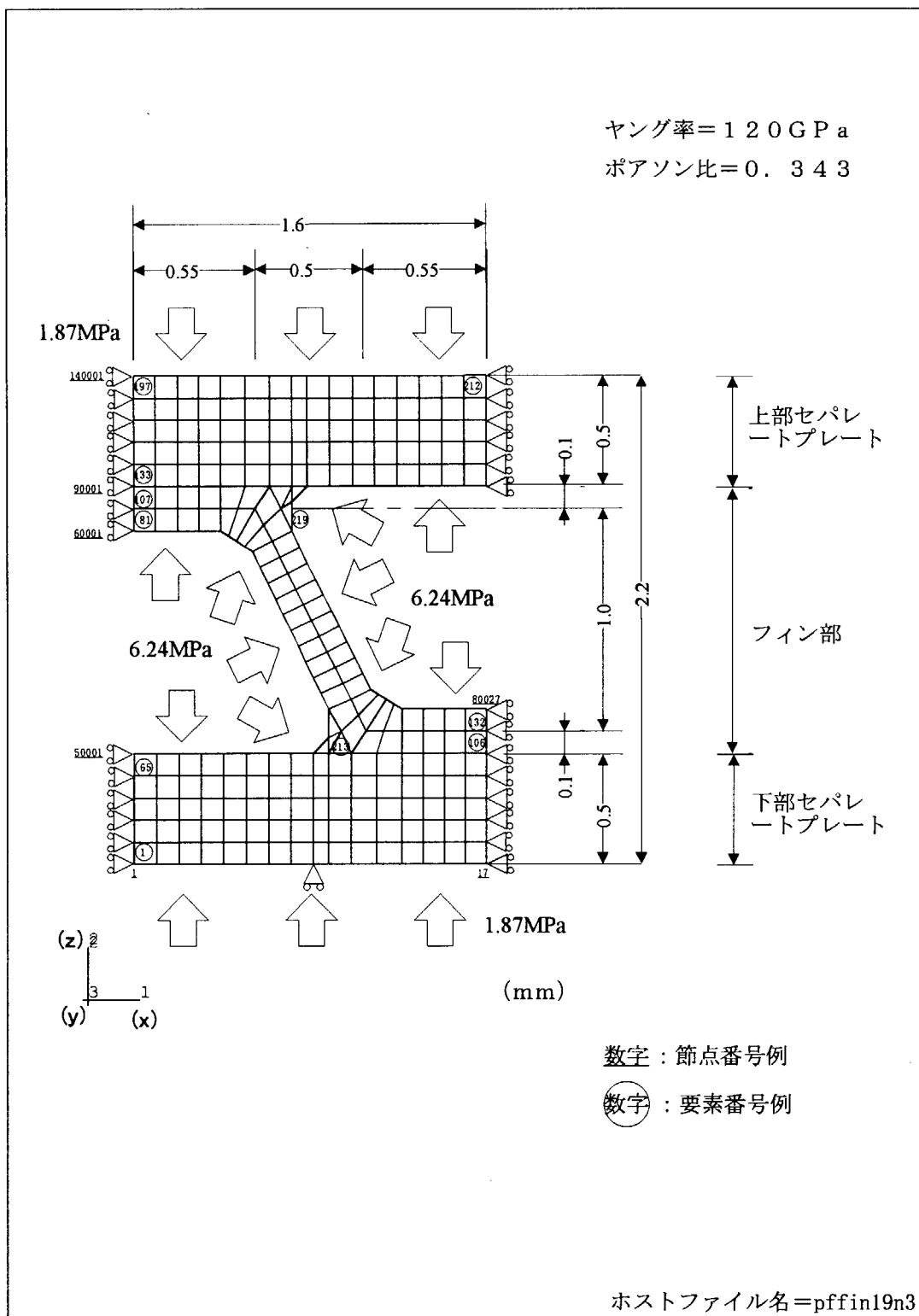


図-14 モデル図(モデル3a)

This is a blank page.

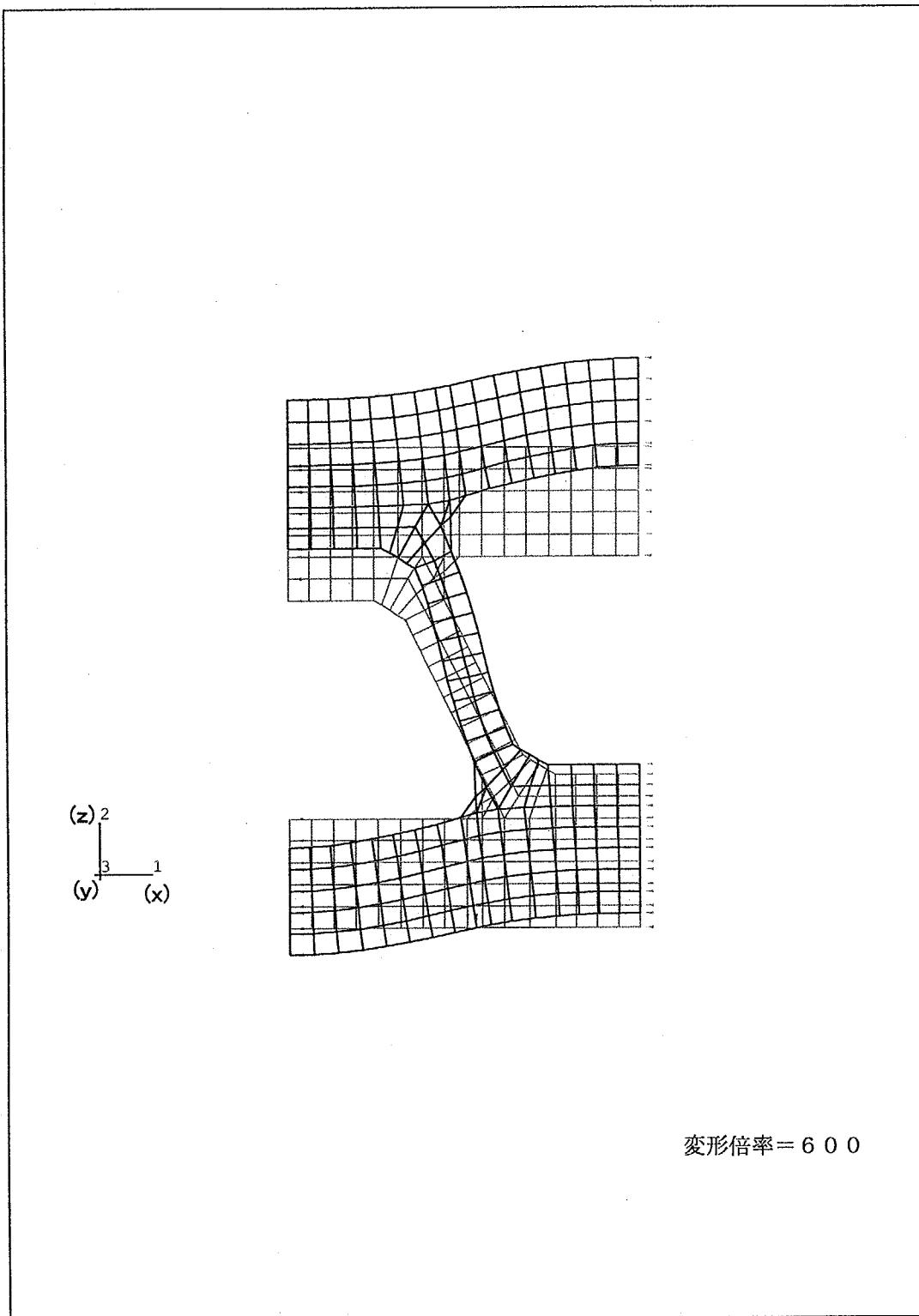


図-15 モデル3a変形図

This is a blank page.

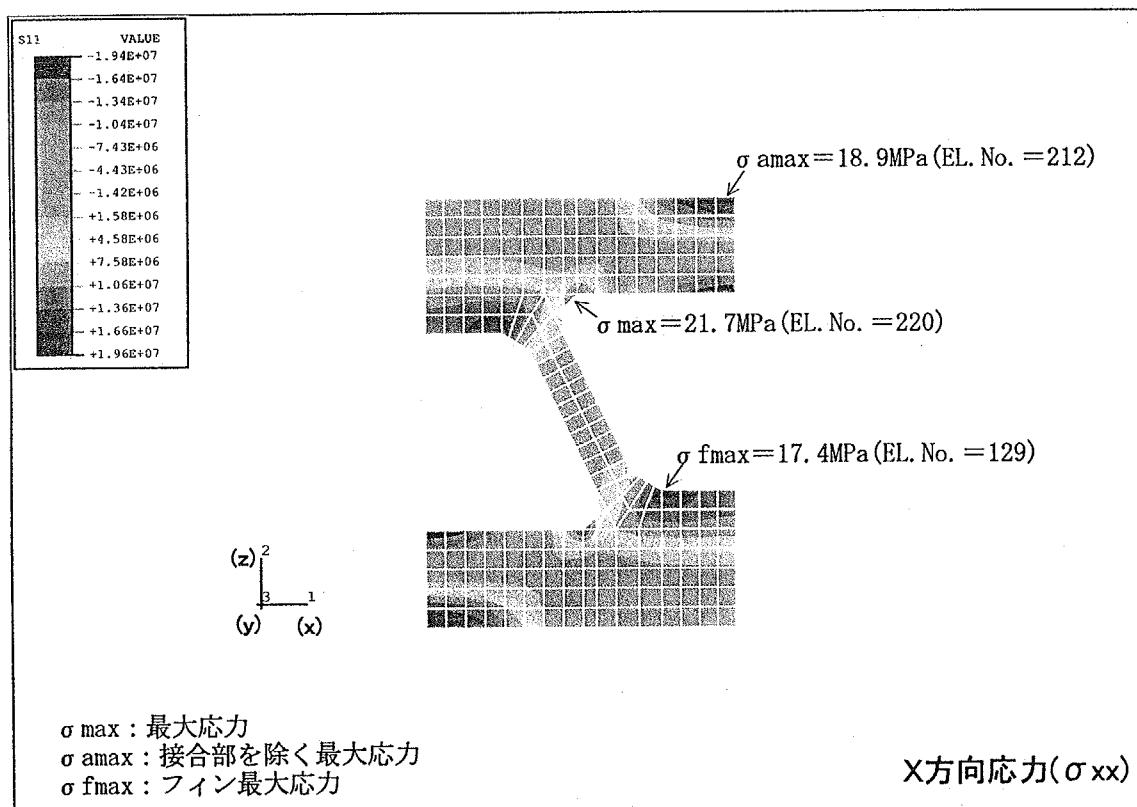
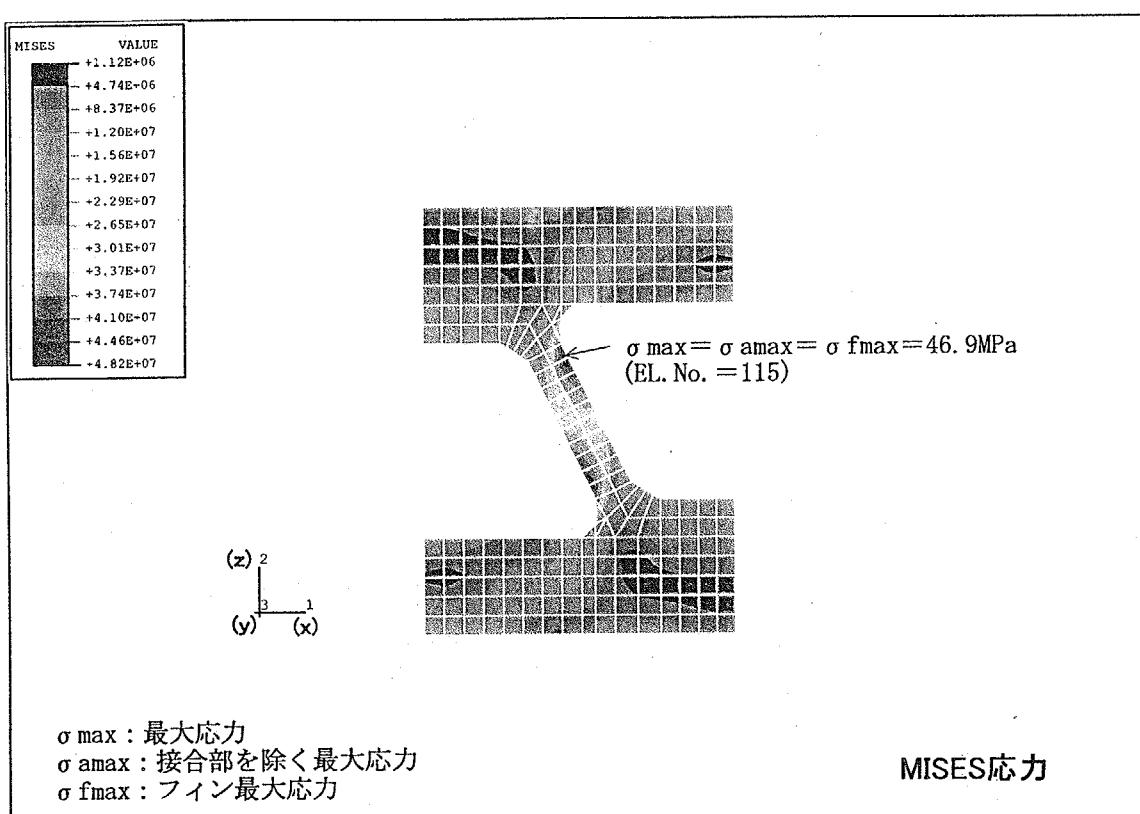


図-16(1/2) モデル3a応力分布

This is a blank page.

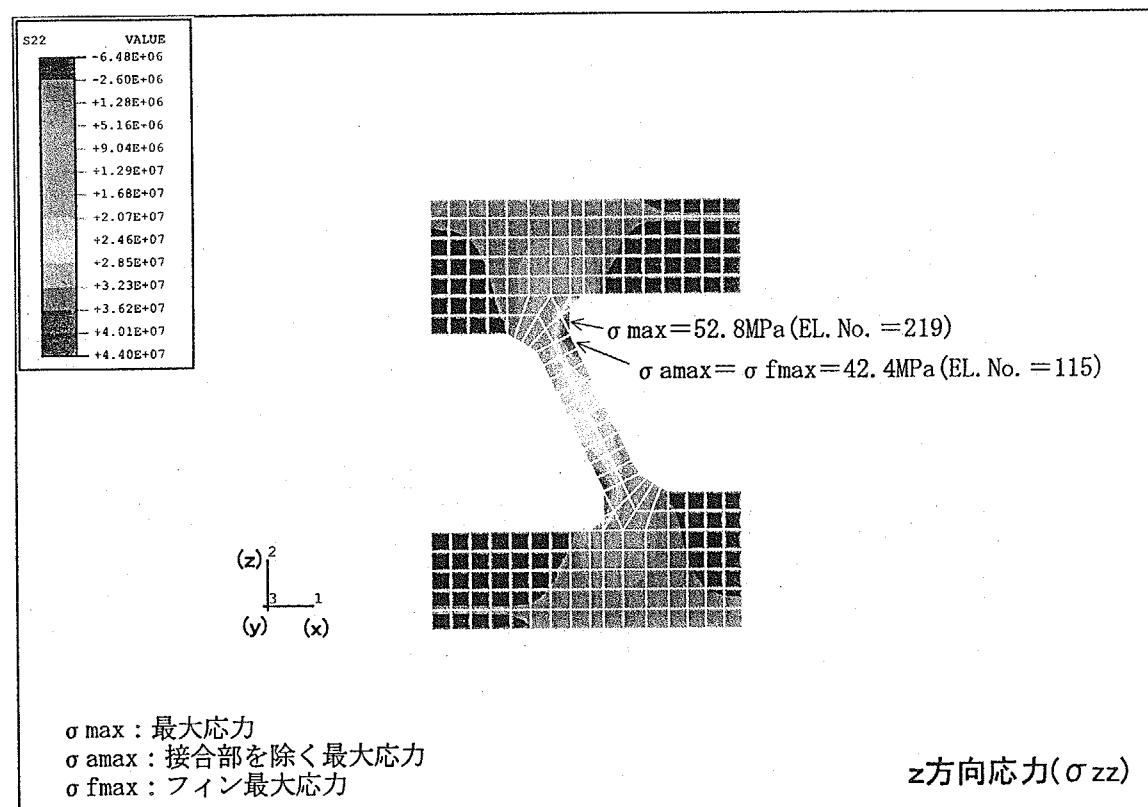
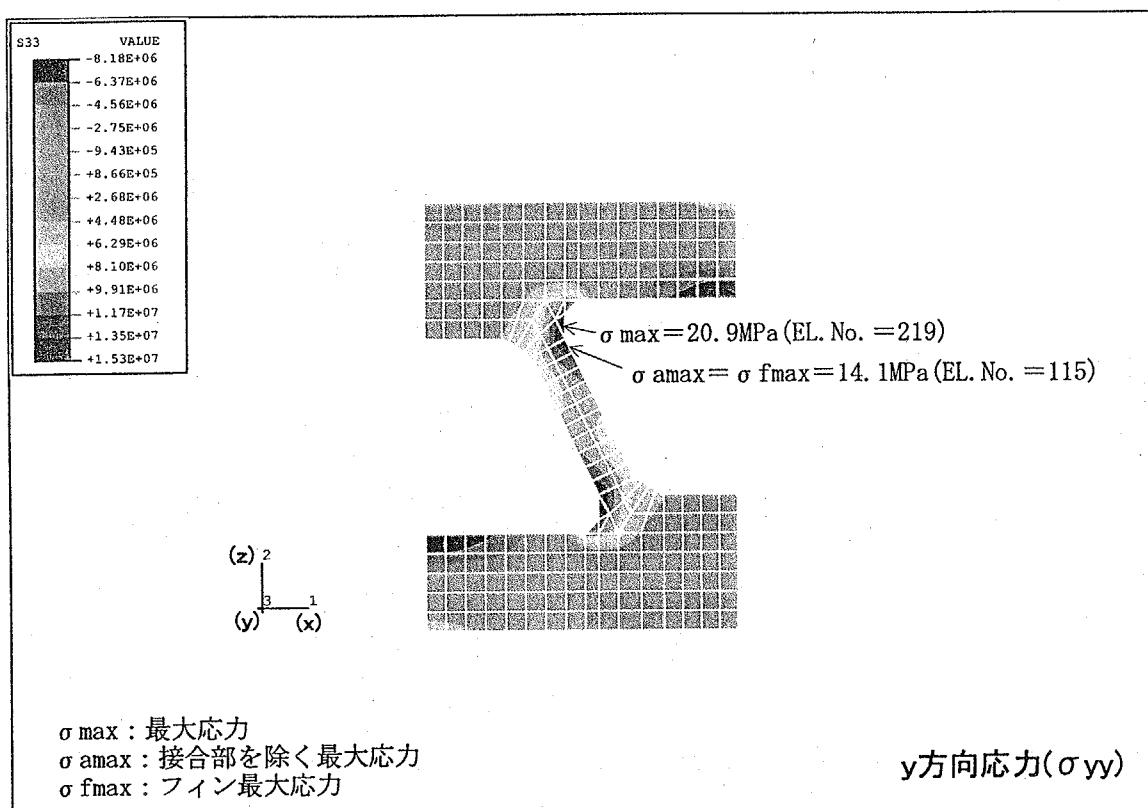


図-16(2/2) モデル3a応力分布

This is a blank page.

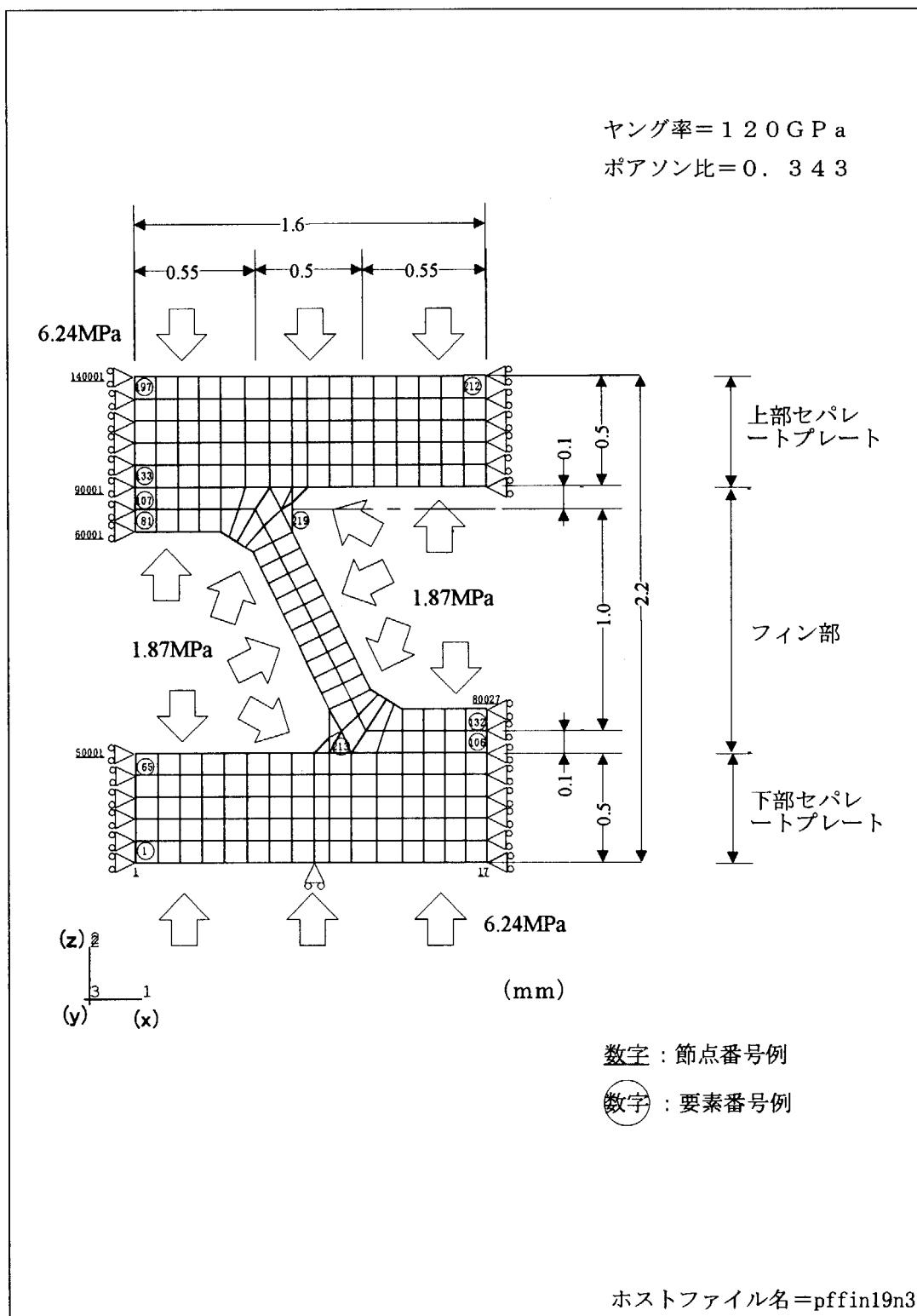


図-17 モデル図(モデル3b)

This is a blank page.

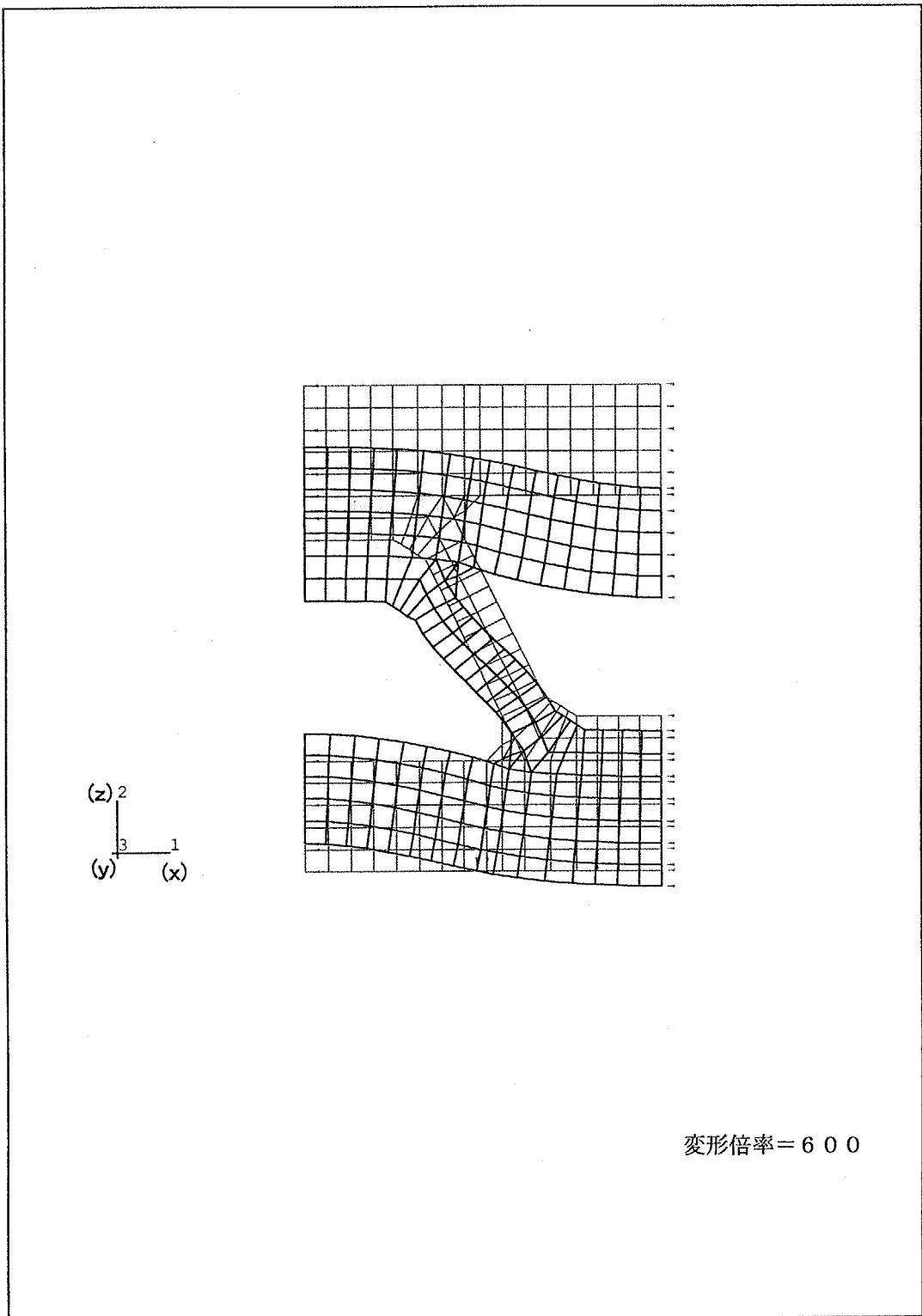


図-18 モデル3b変形図

This is a blank page.

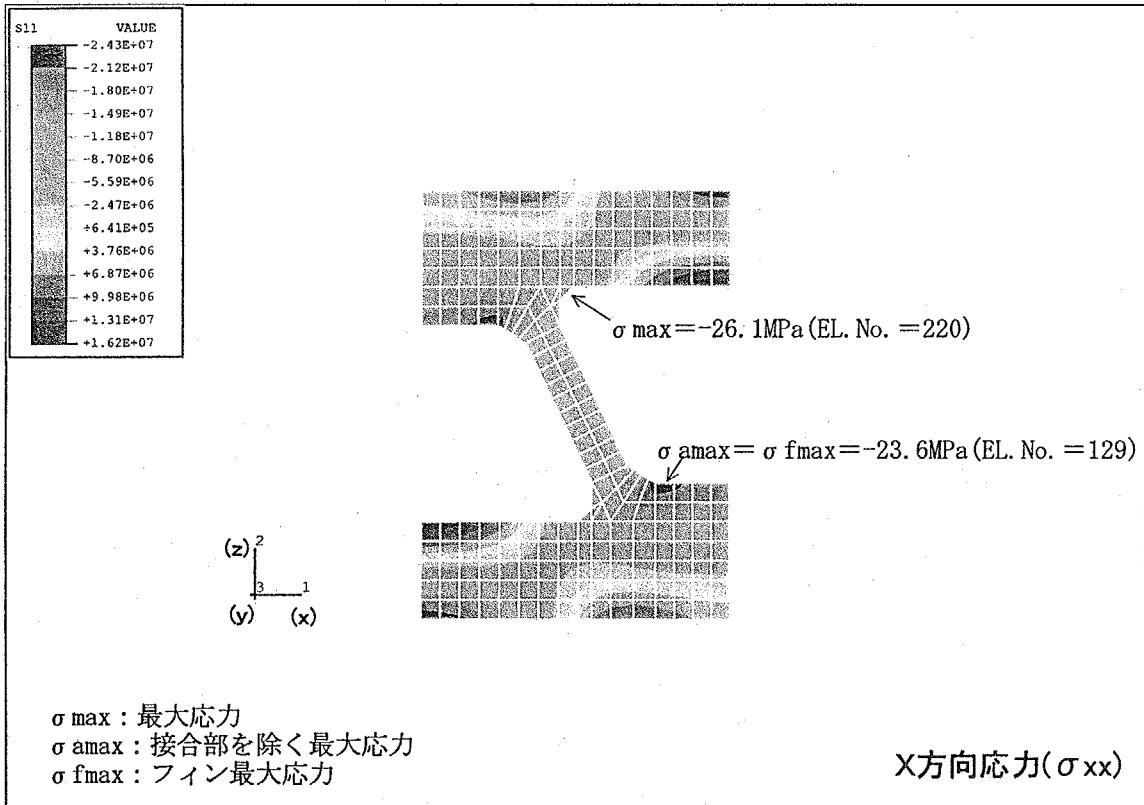
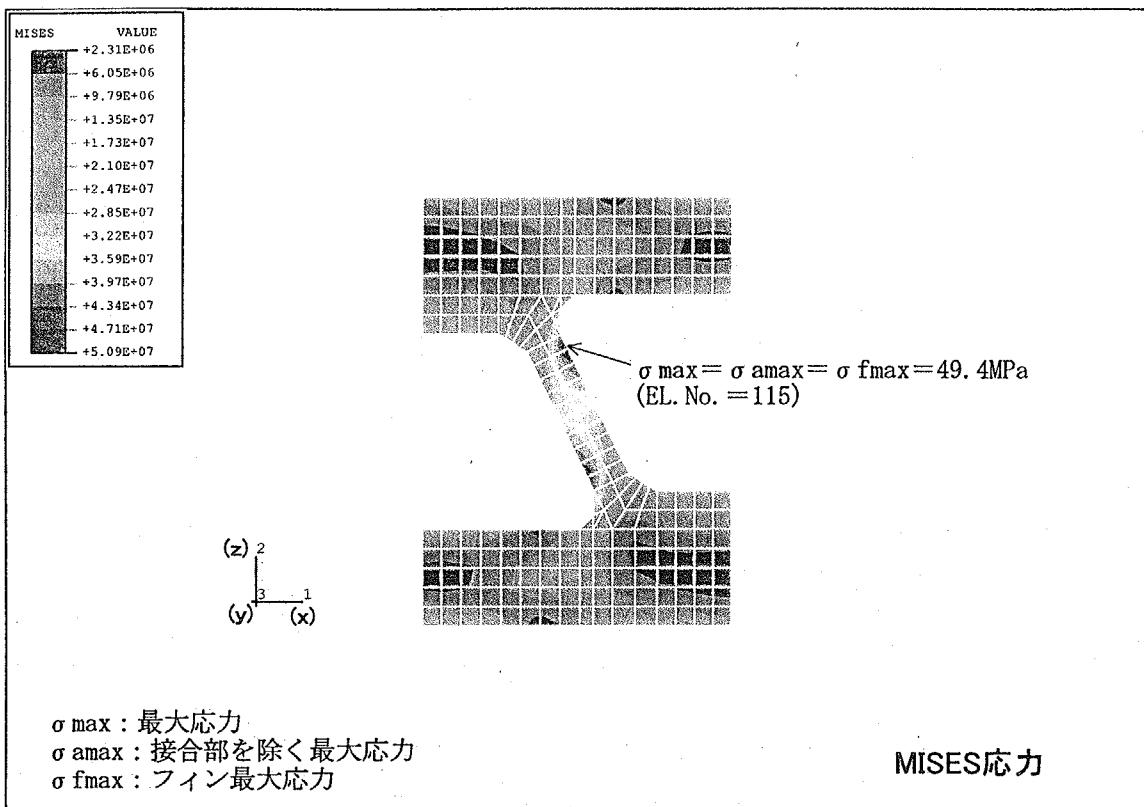


図-19(1/2) モデル3b応力分布

This is a blank page.

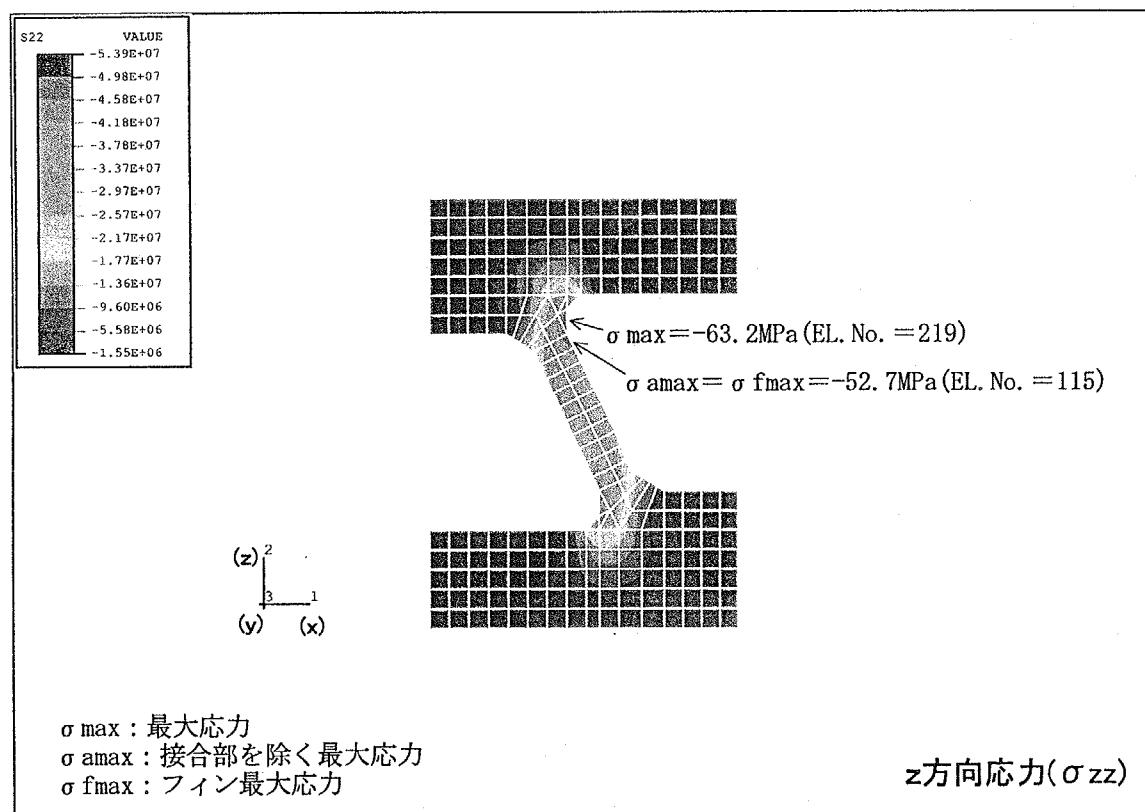
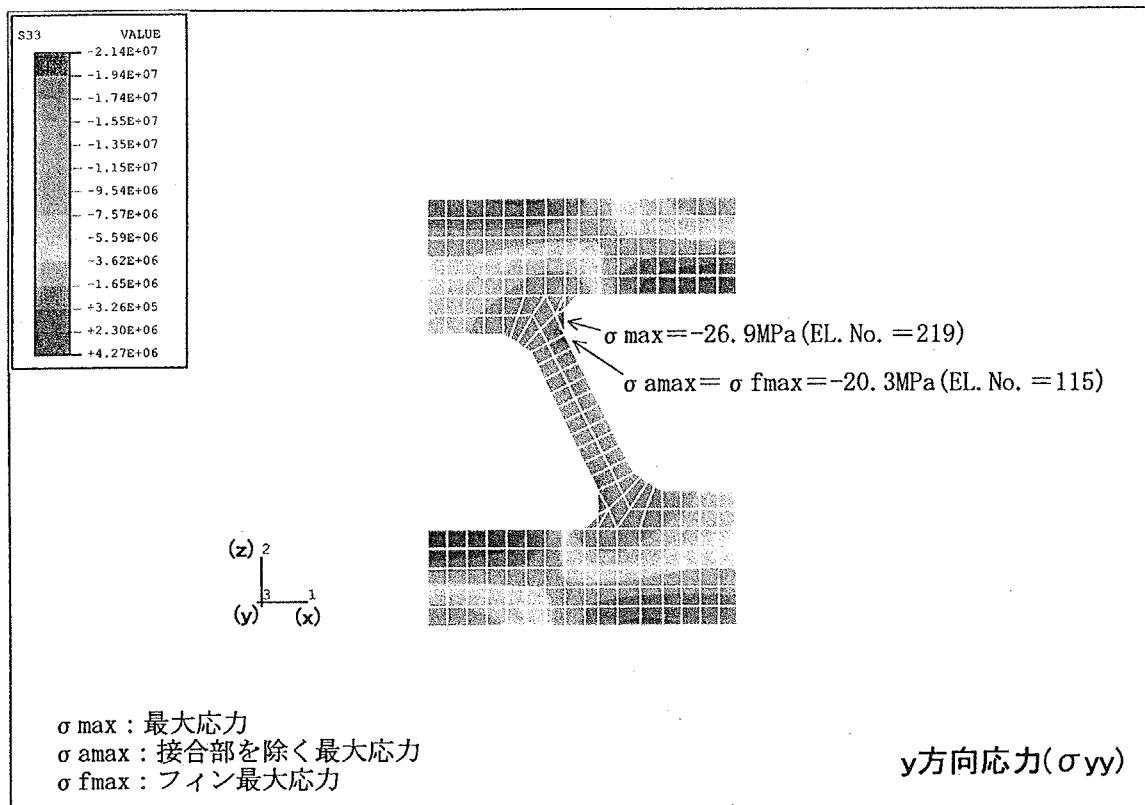


図-19(2/2) モデル3b応力分布

This is a blank page.

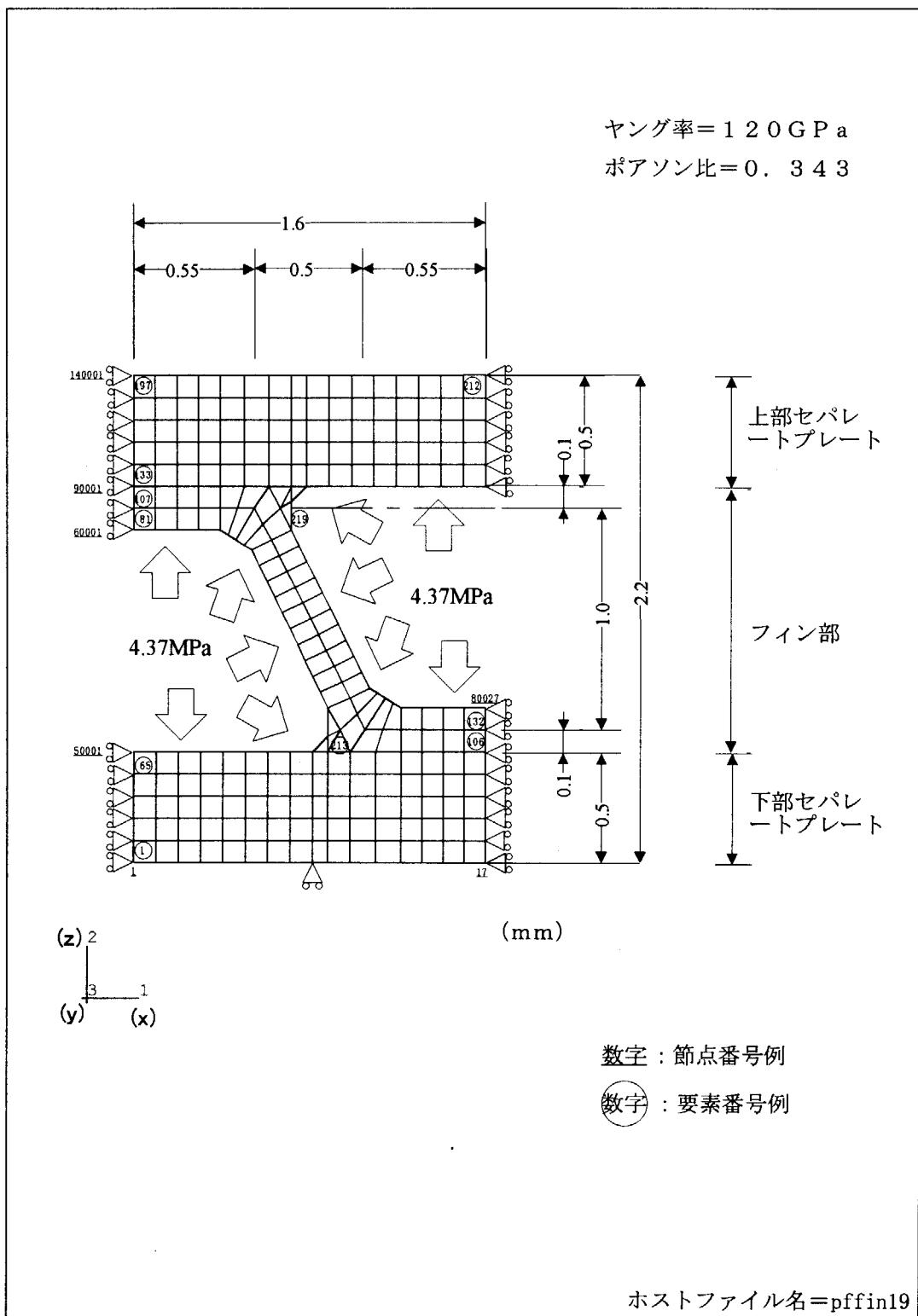


図-20 モデル図(モデル4)

This is a blank page.

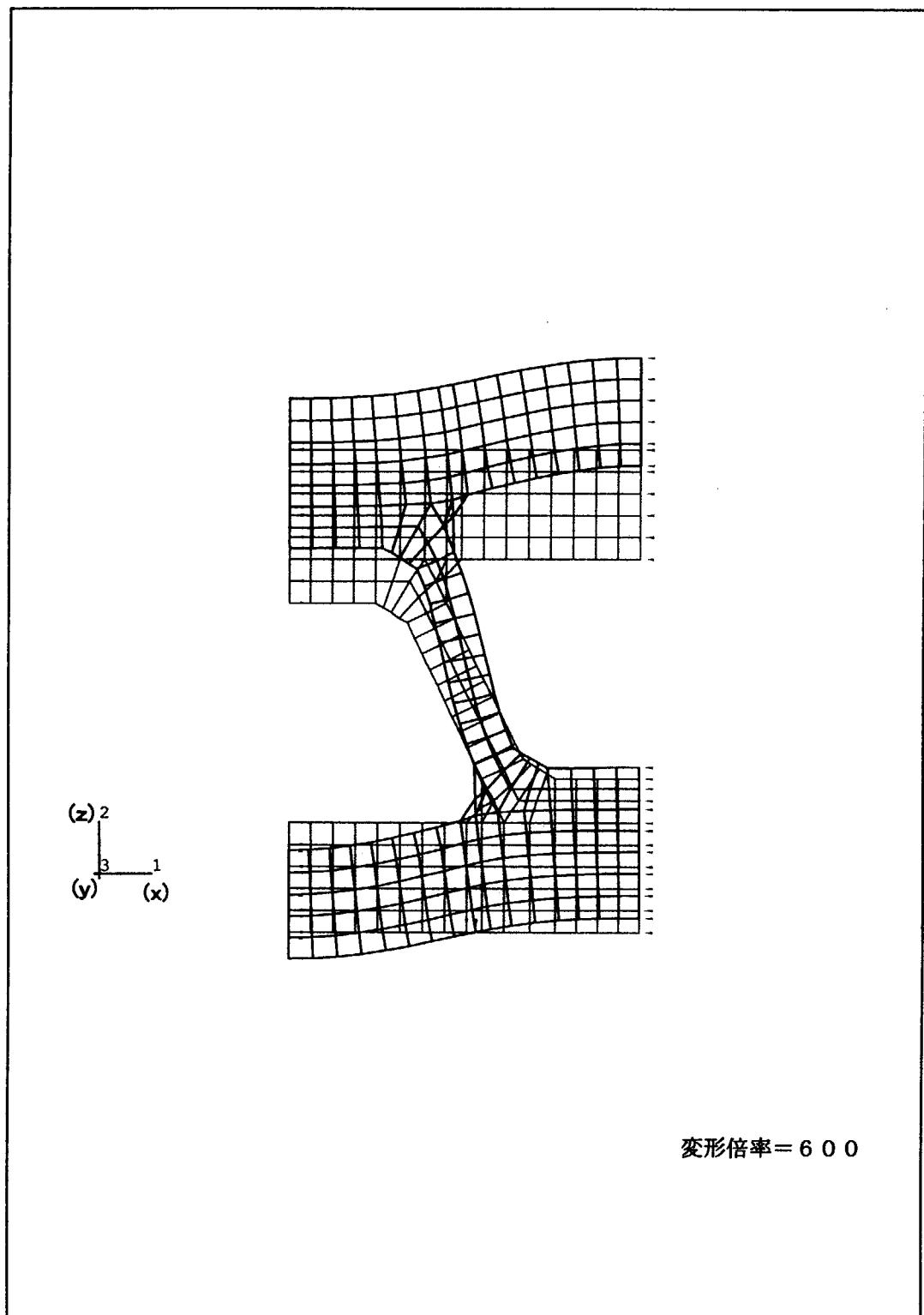


図-21 モデル4変形図

This is a blank page.

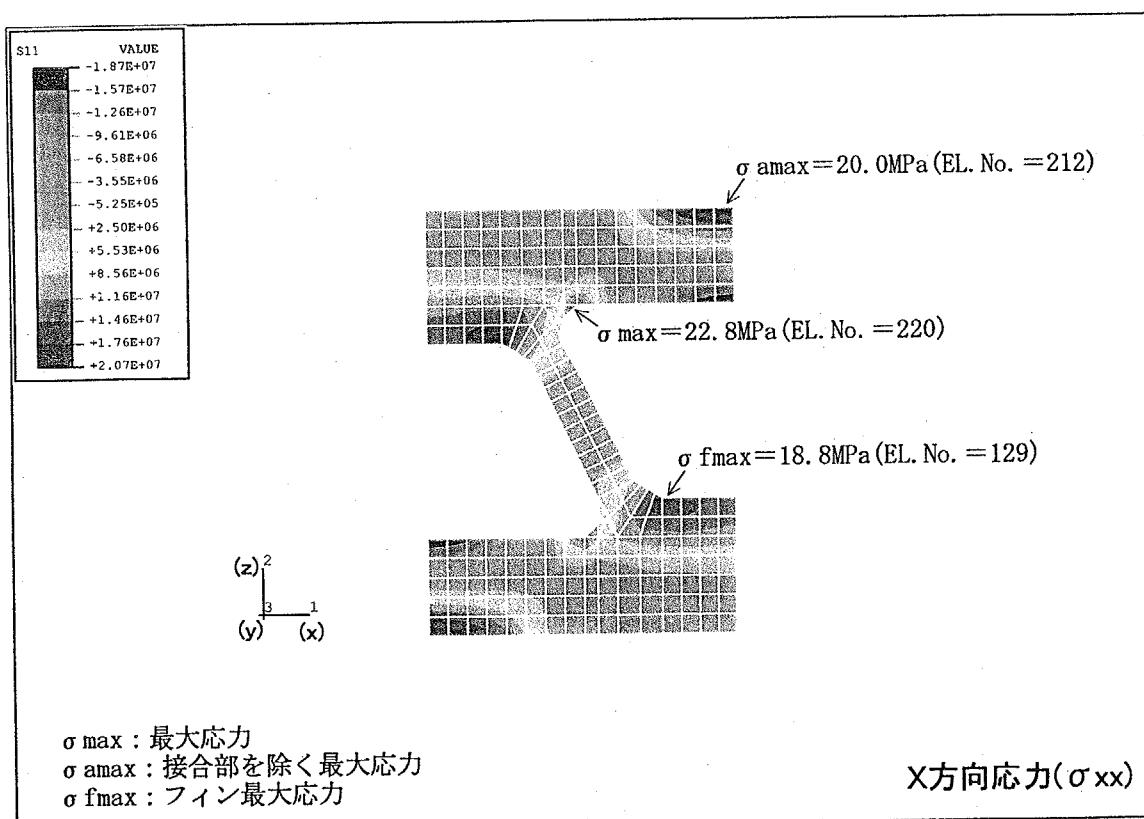
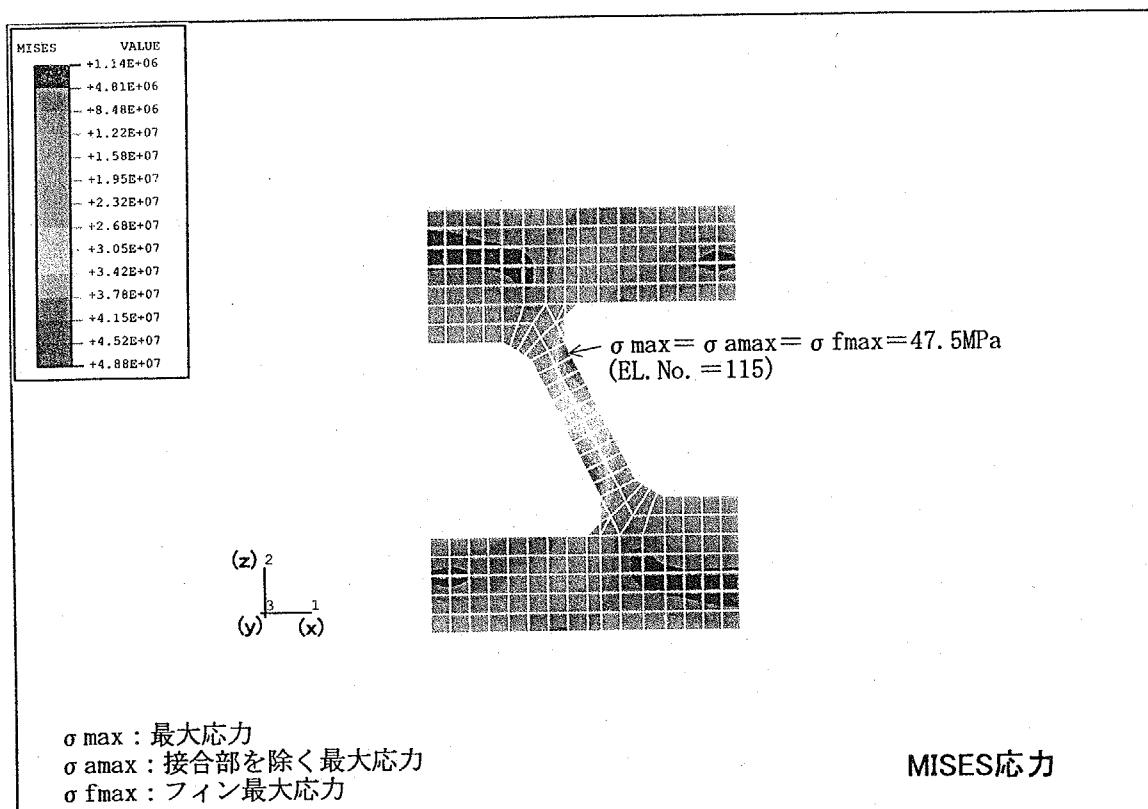


図-22(1/2) モデル4応力分布図

This is a blank page.

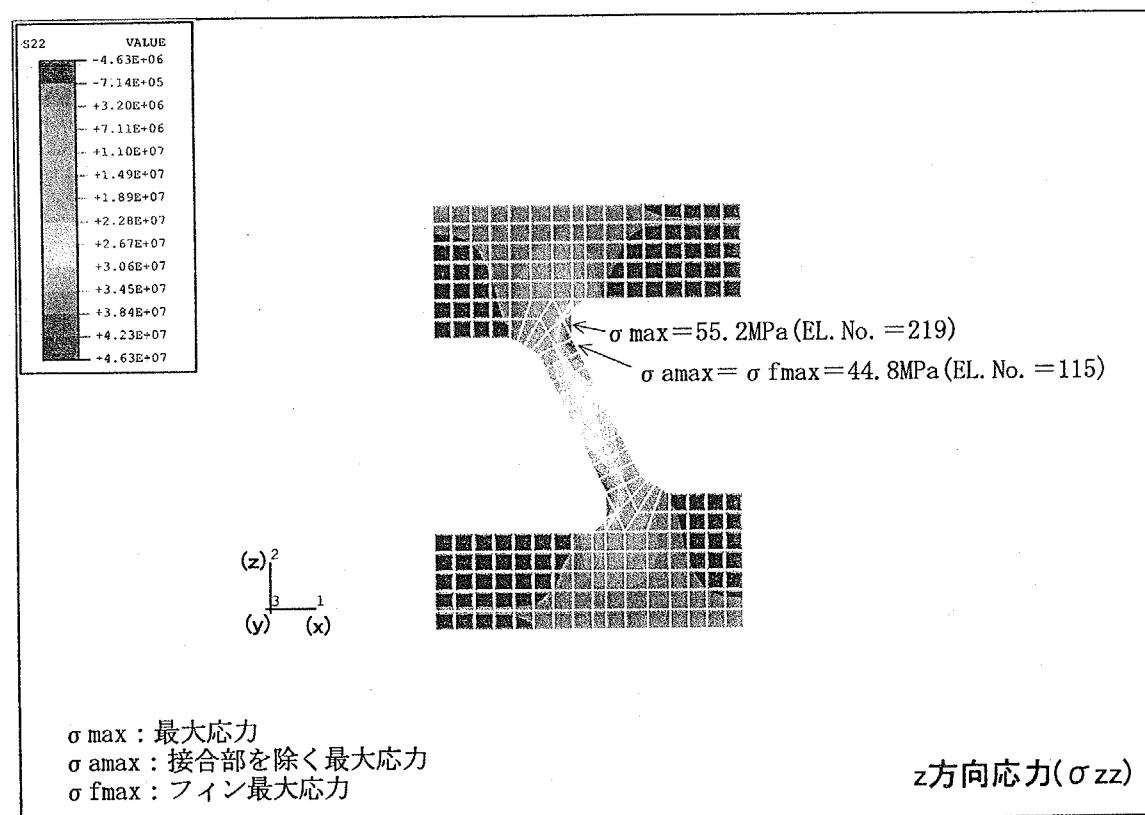
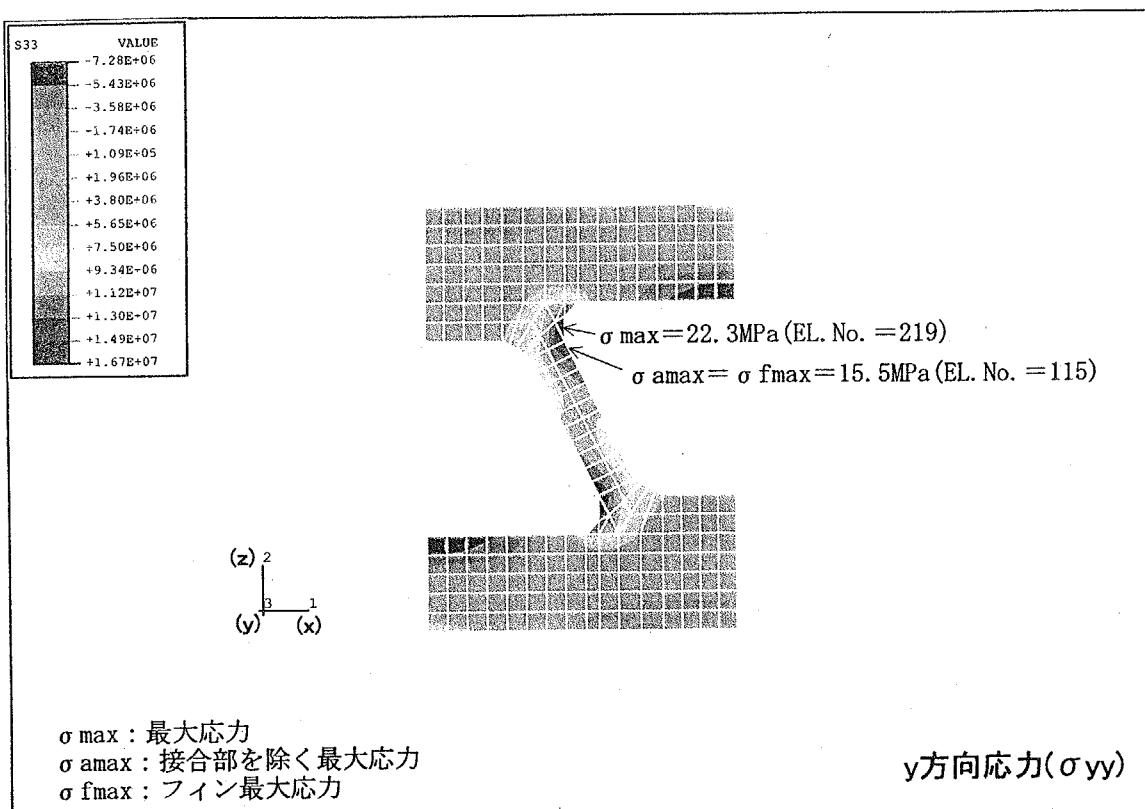


図-22(2/2) モデル4応力分布図

This is a blank page.

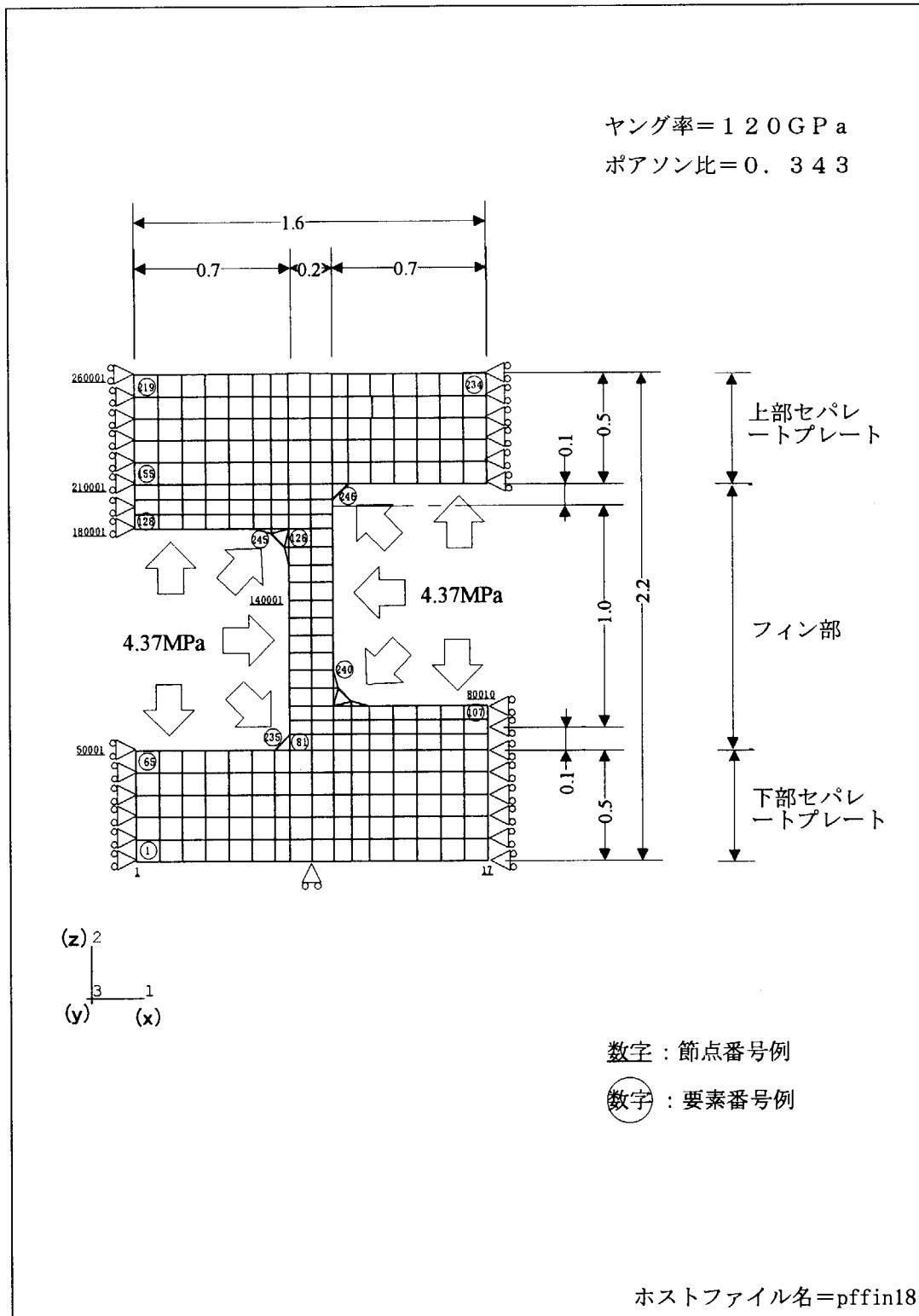


図-23 モデル図(モデル5)

This is a blank page.

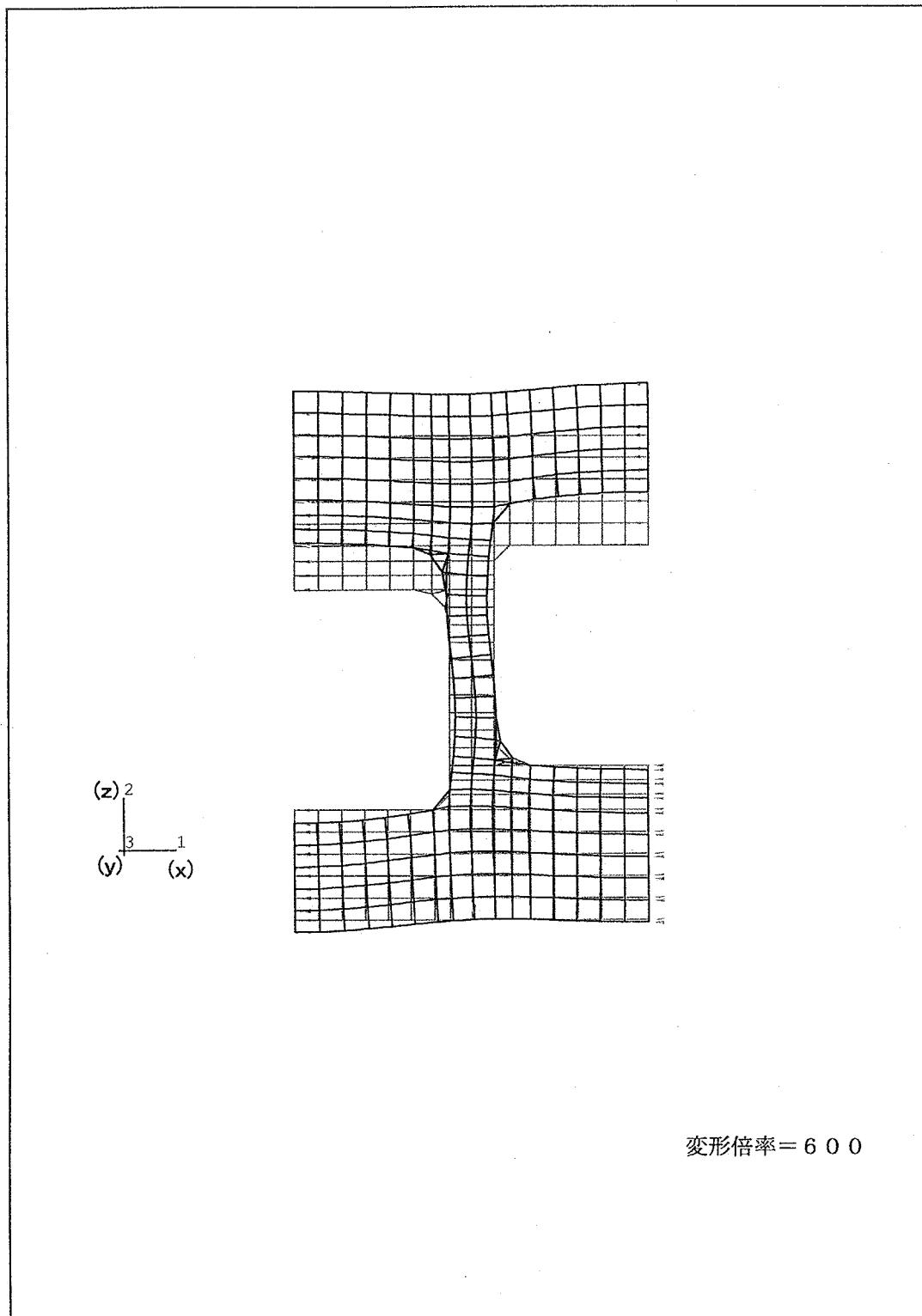


図-24 モデル5変形図

This is a blank page.

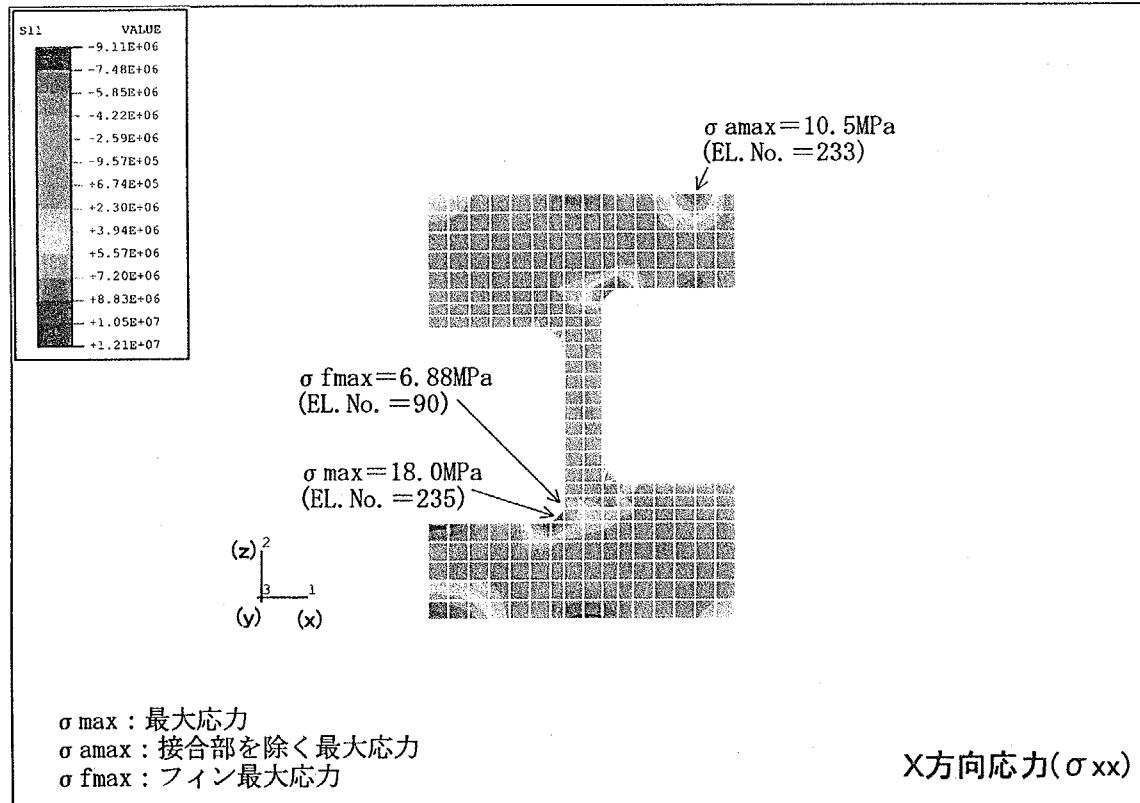
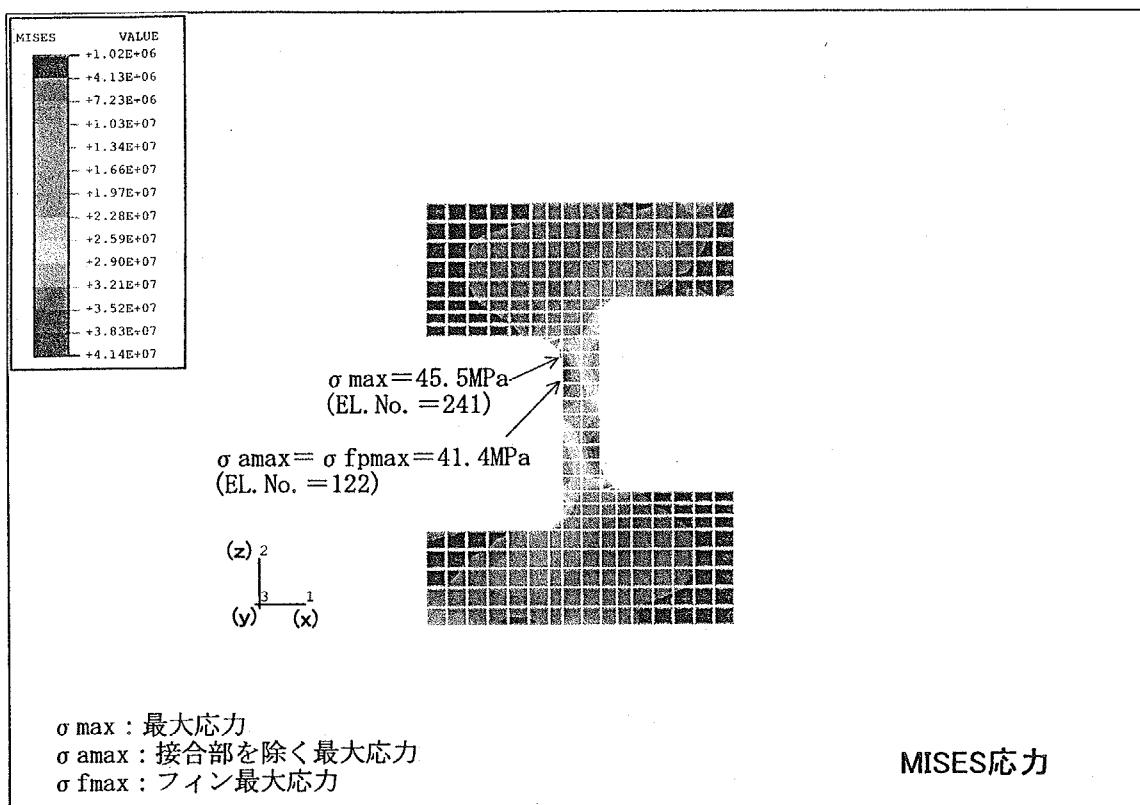


図-25(1/2) モデル5応力分布

This is a blank page.

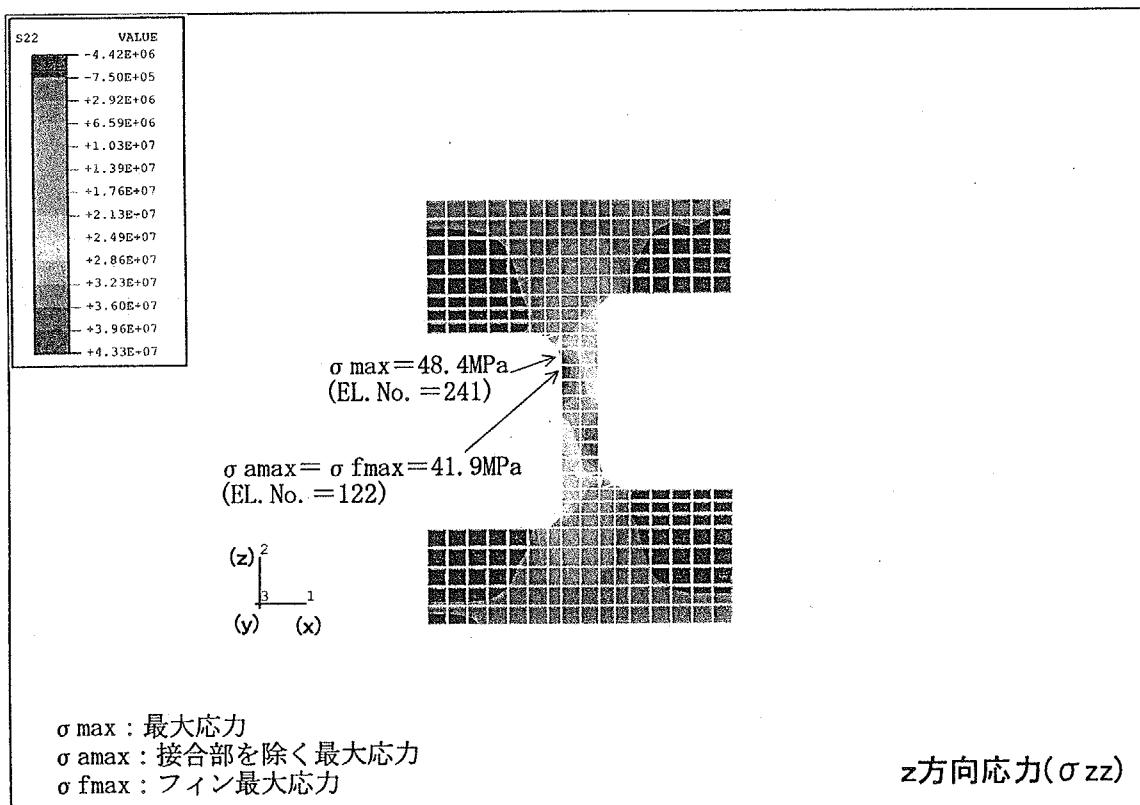
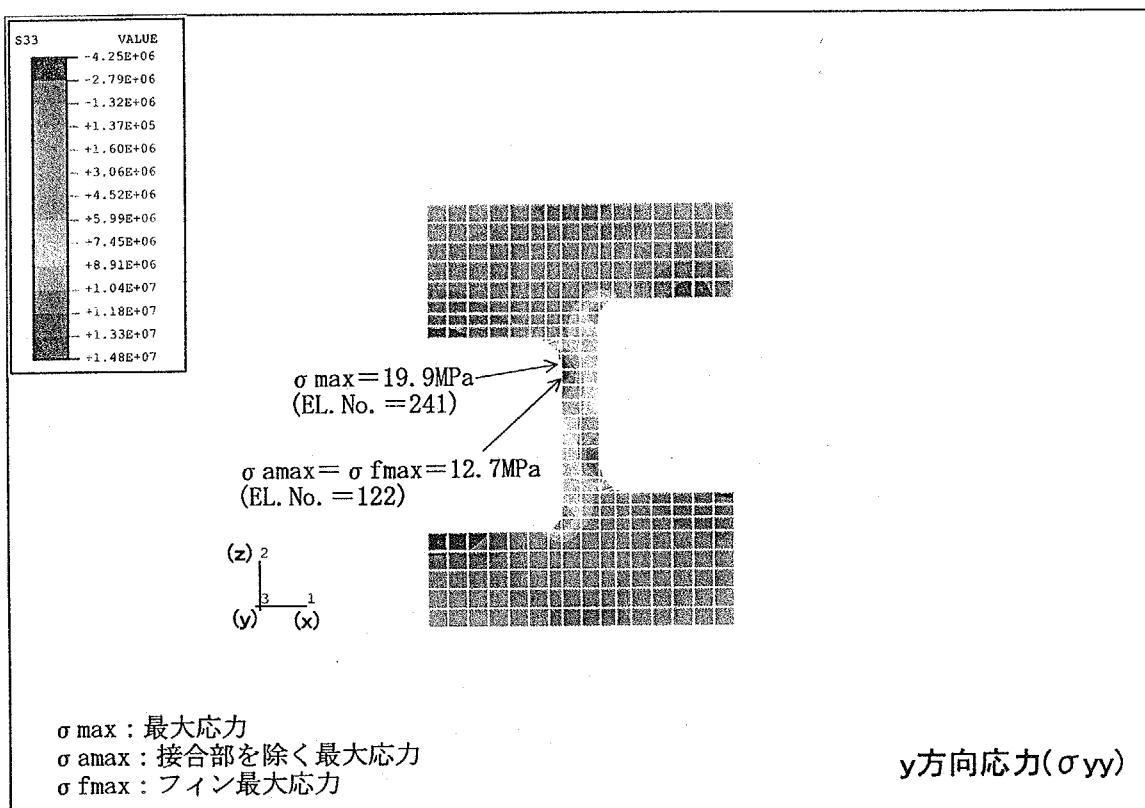


図-25(2/2) モデル5応力分布

This is a blank page.

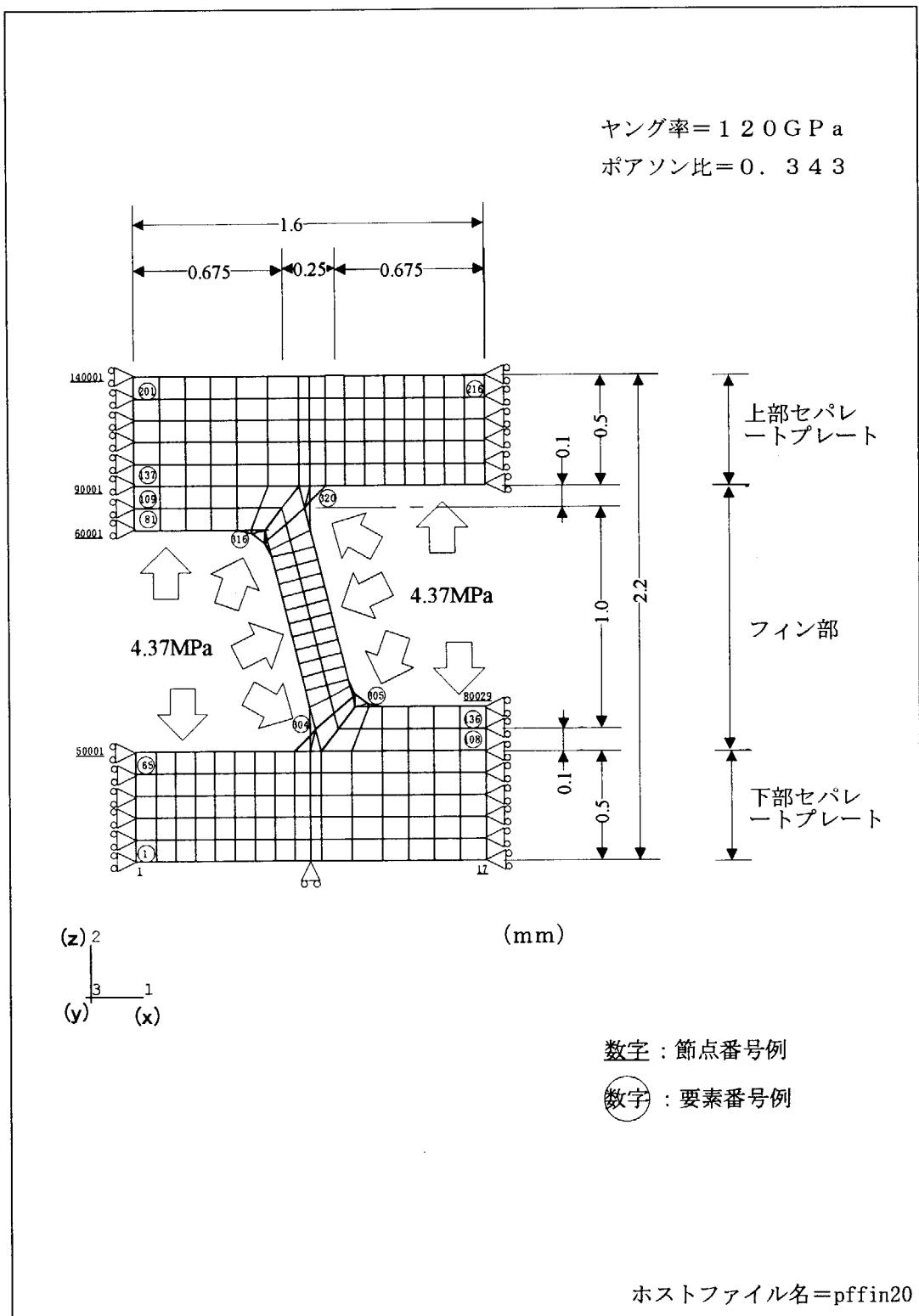


図-26 モデル図(モデル6)

This is a blank page.

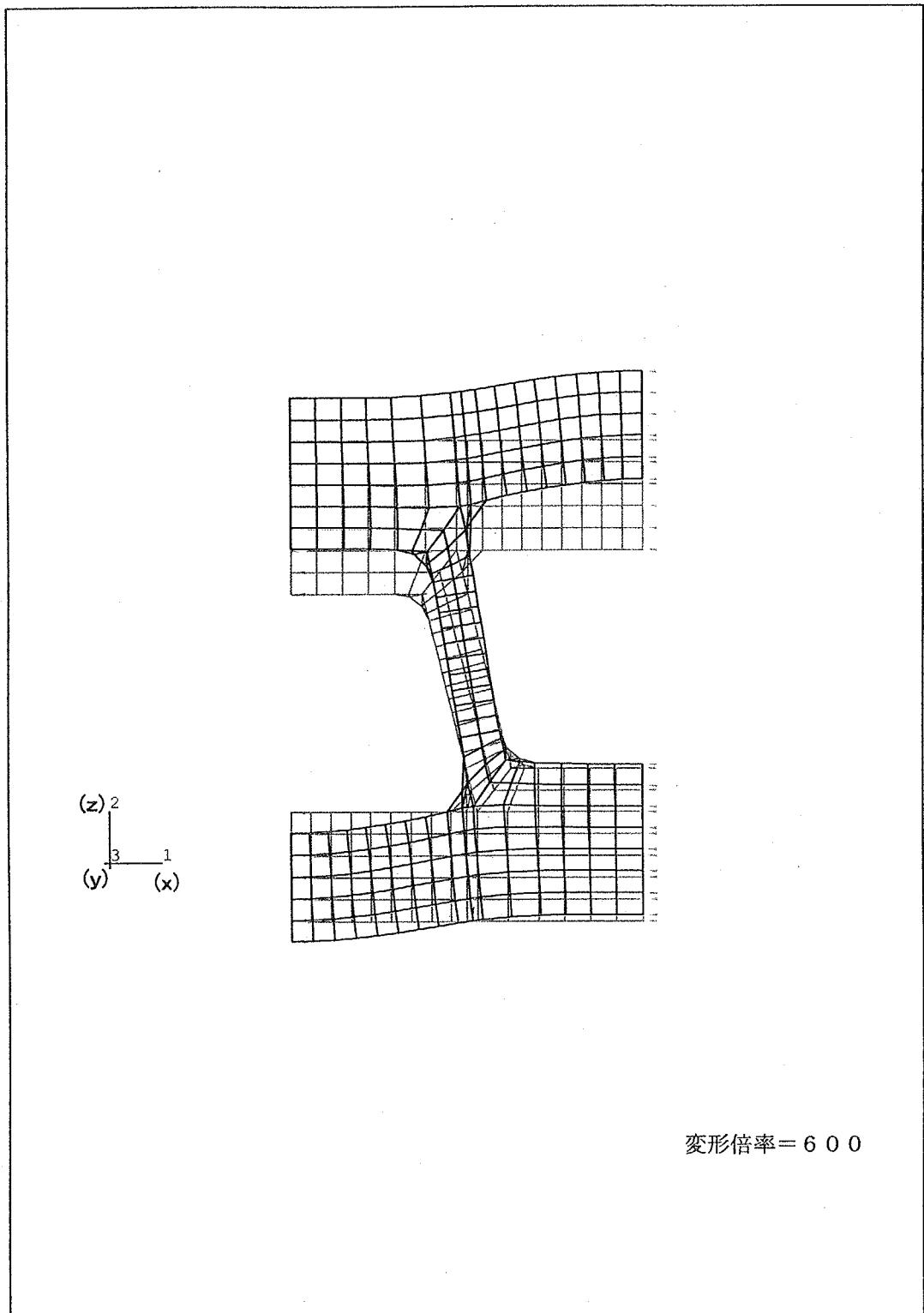


図-27 モデル6変形図

This is a blank page.

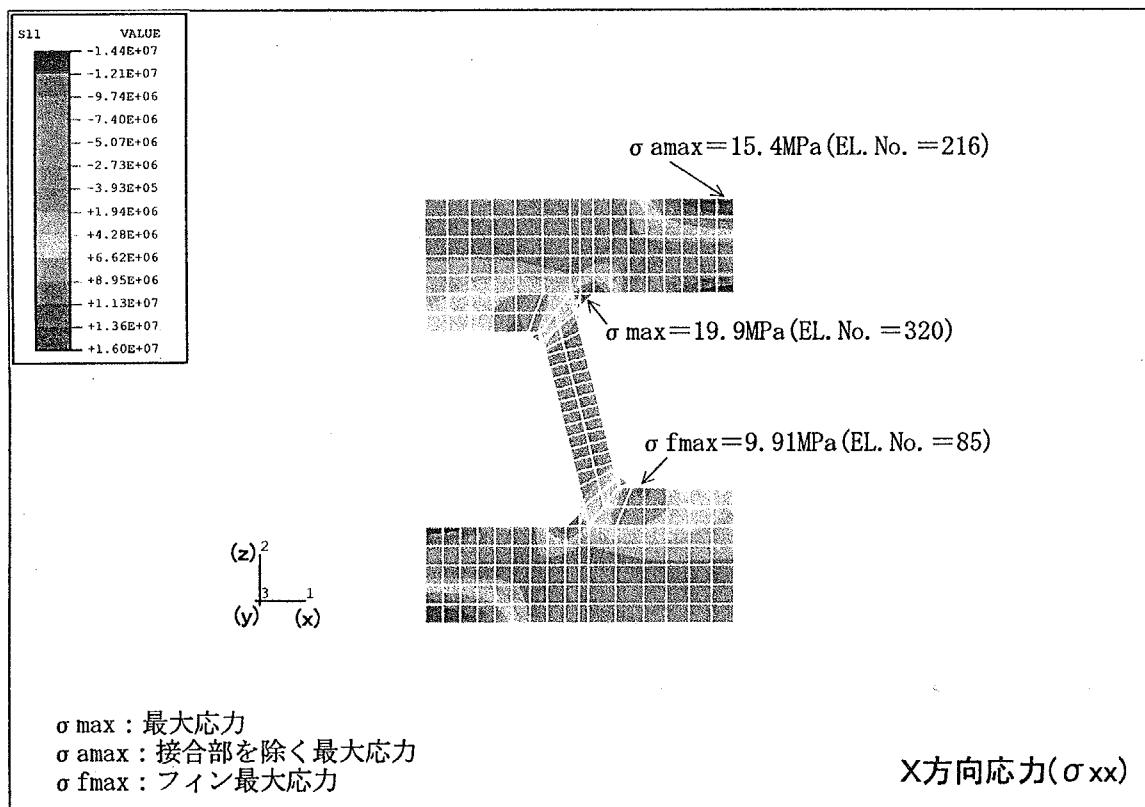
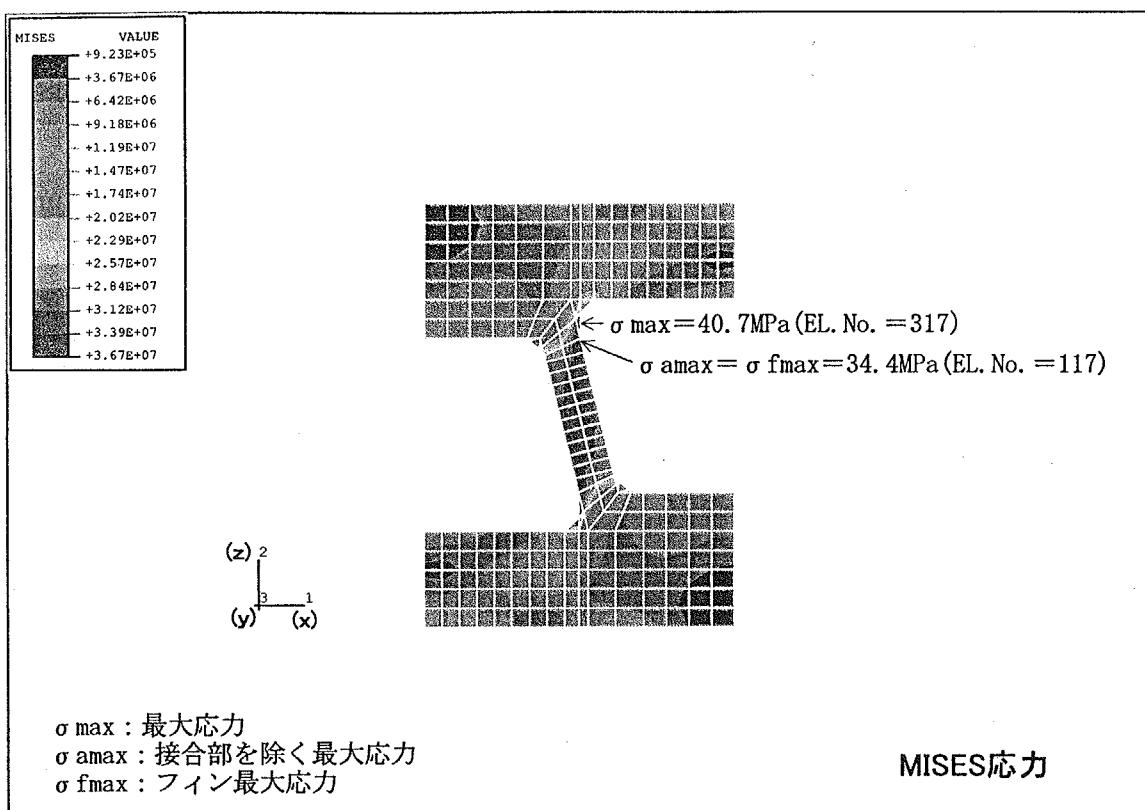


図-28(1/2) モデル6応力分布図

This is a blank page.

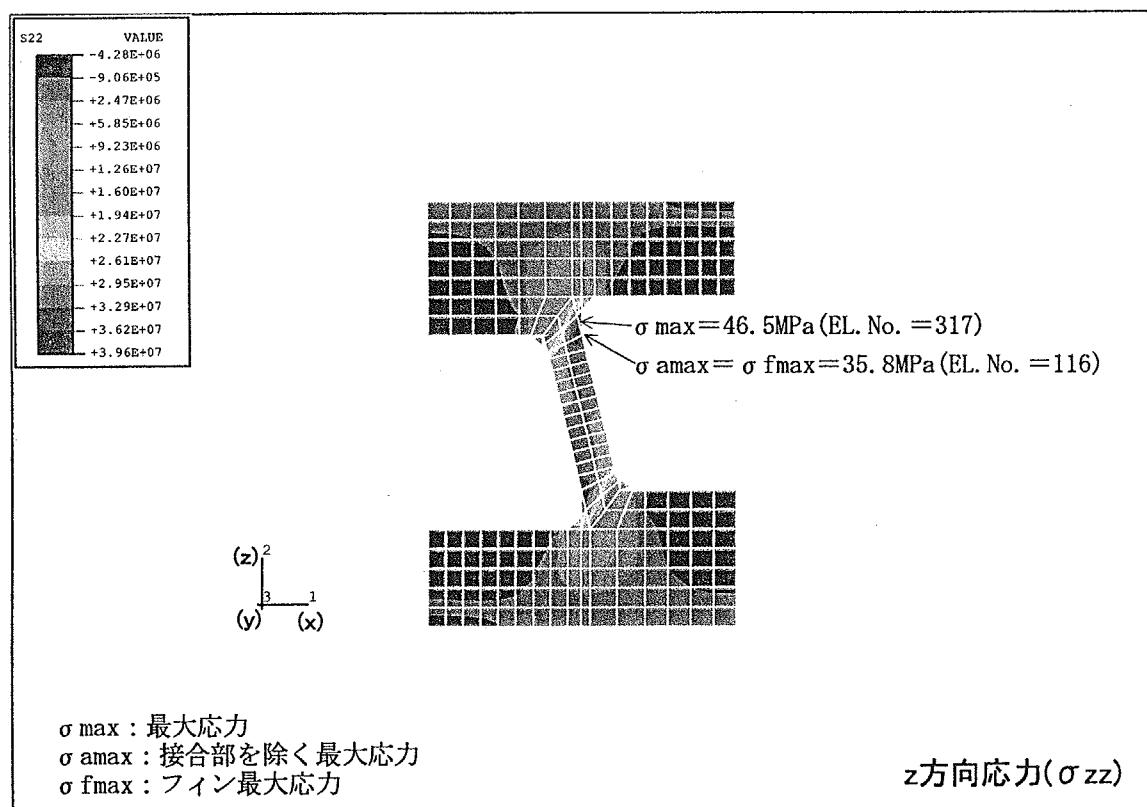
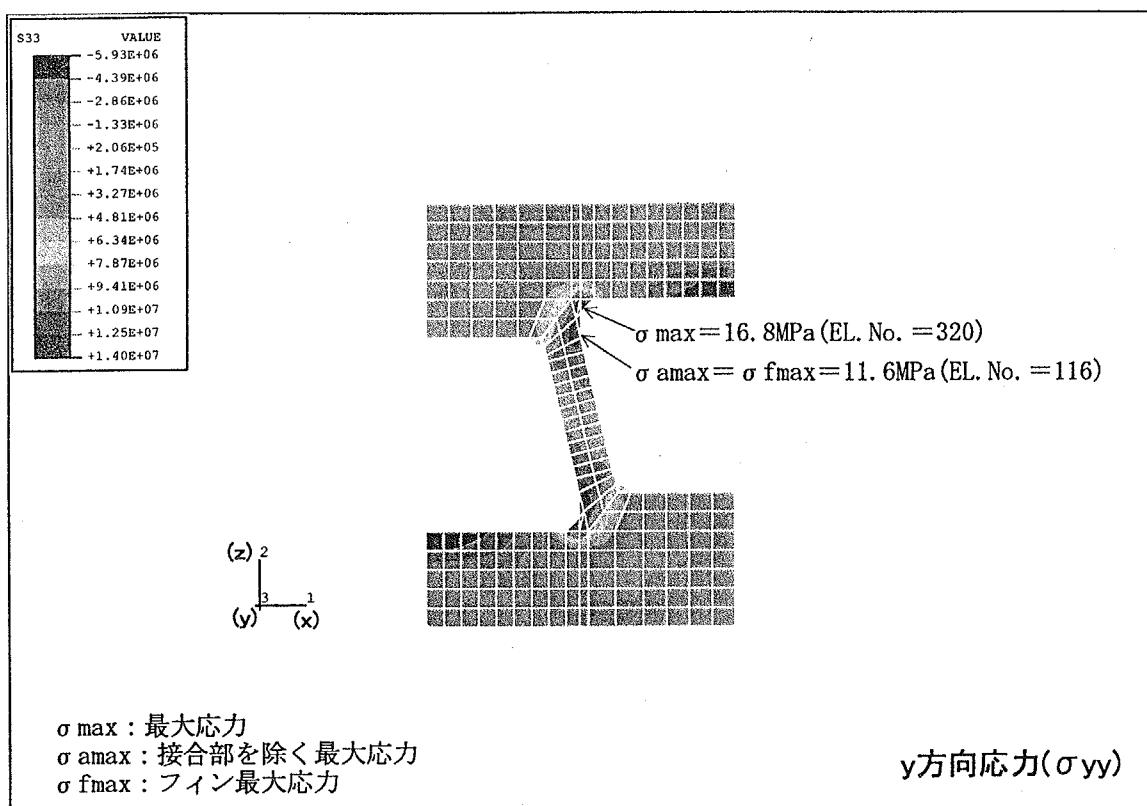


図-28(2/2) モデル6応力分布図

This is a blank page.

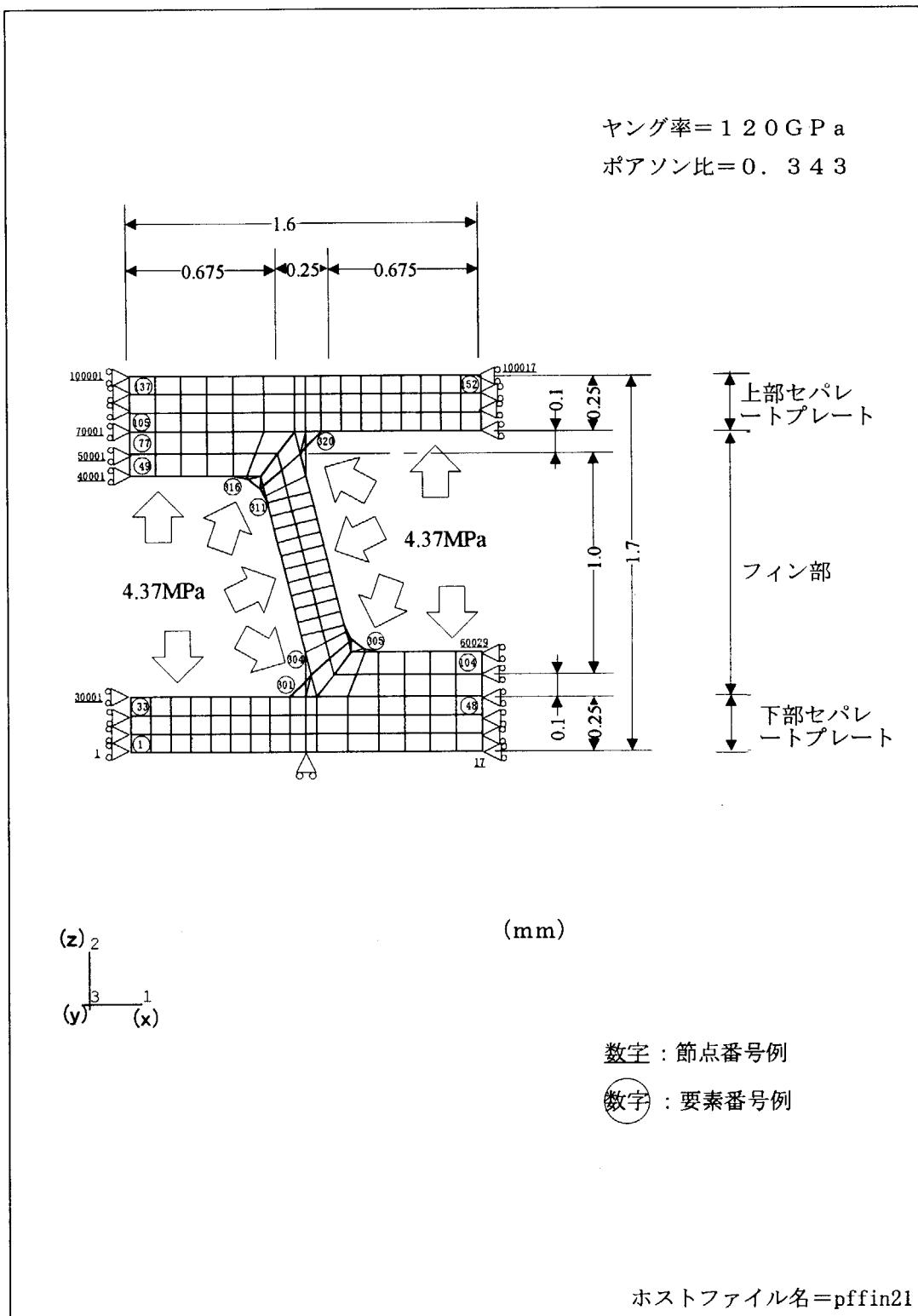


図-29 モデル図(モデル7)

This is a blank page.

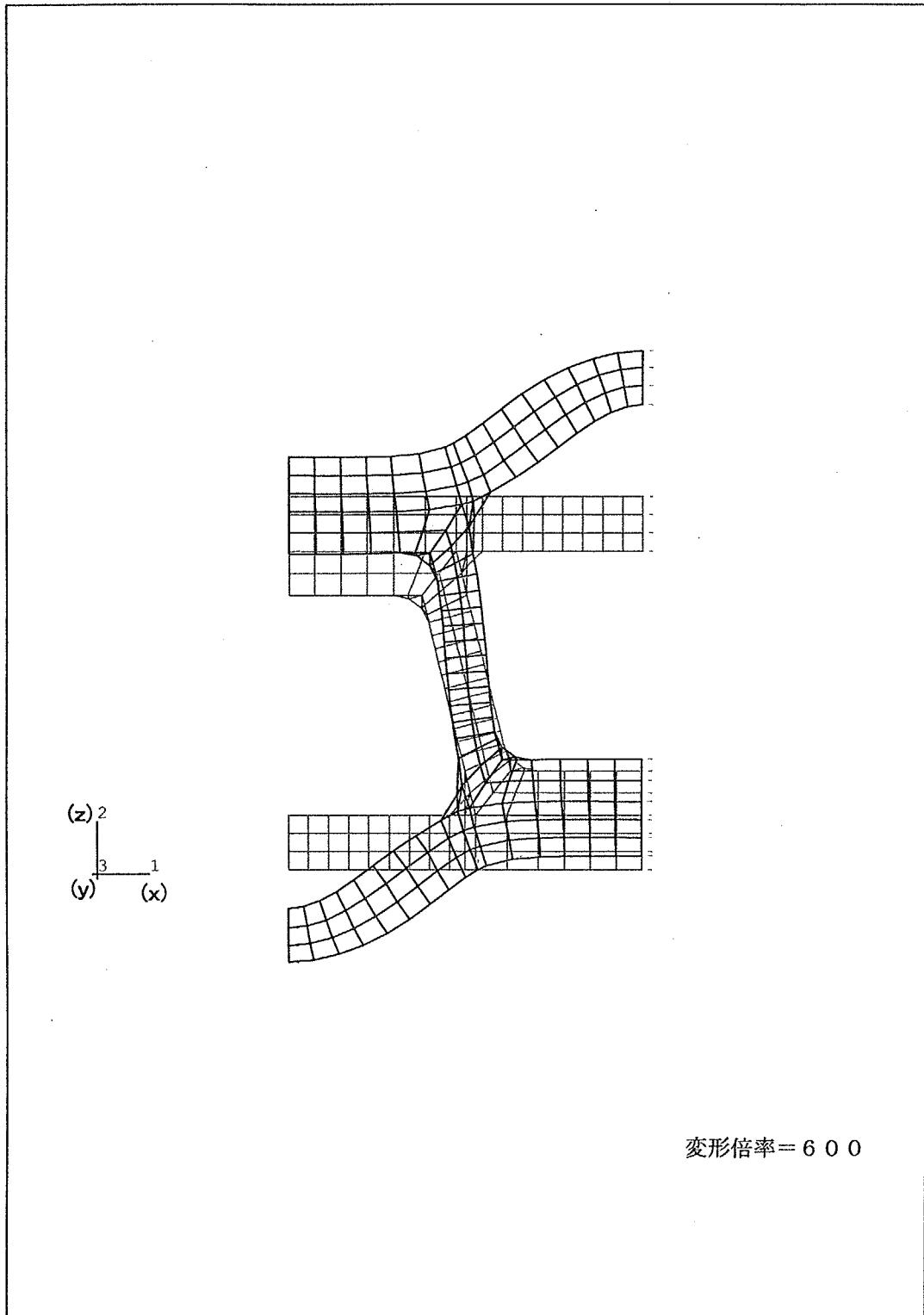


図-30 モデル7変形図

This is a blank page.

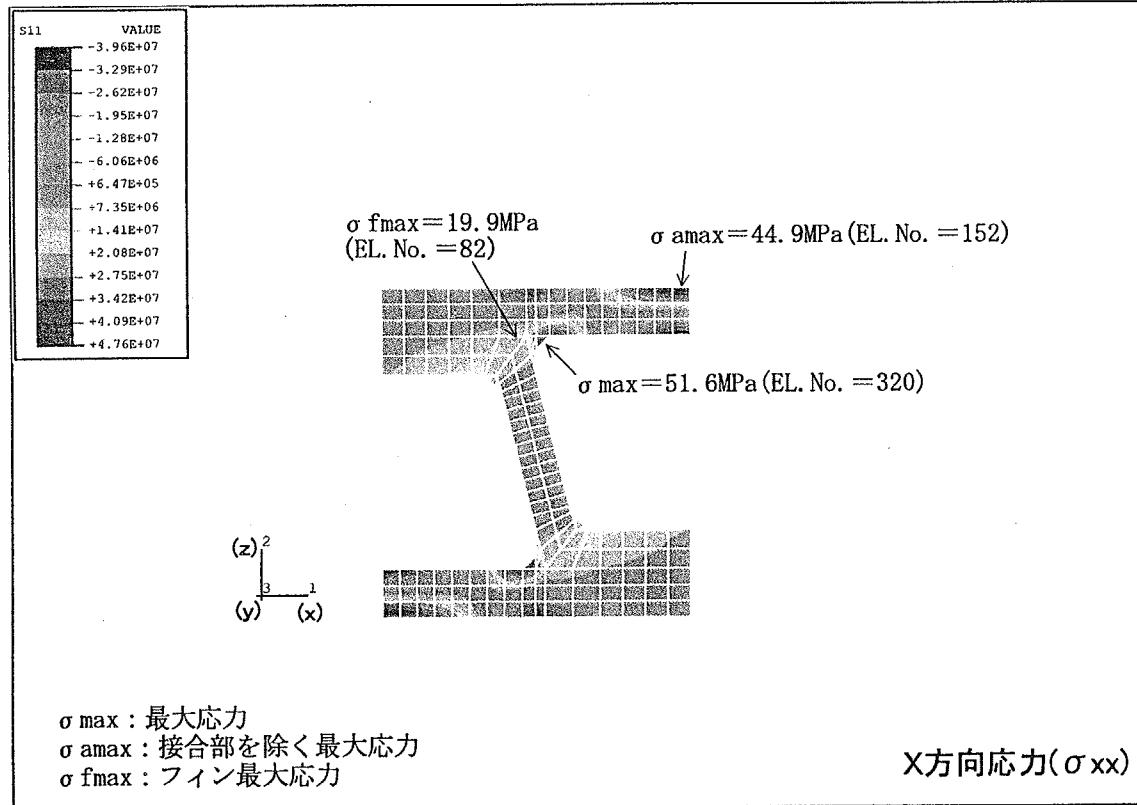
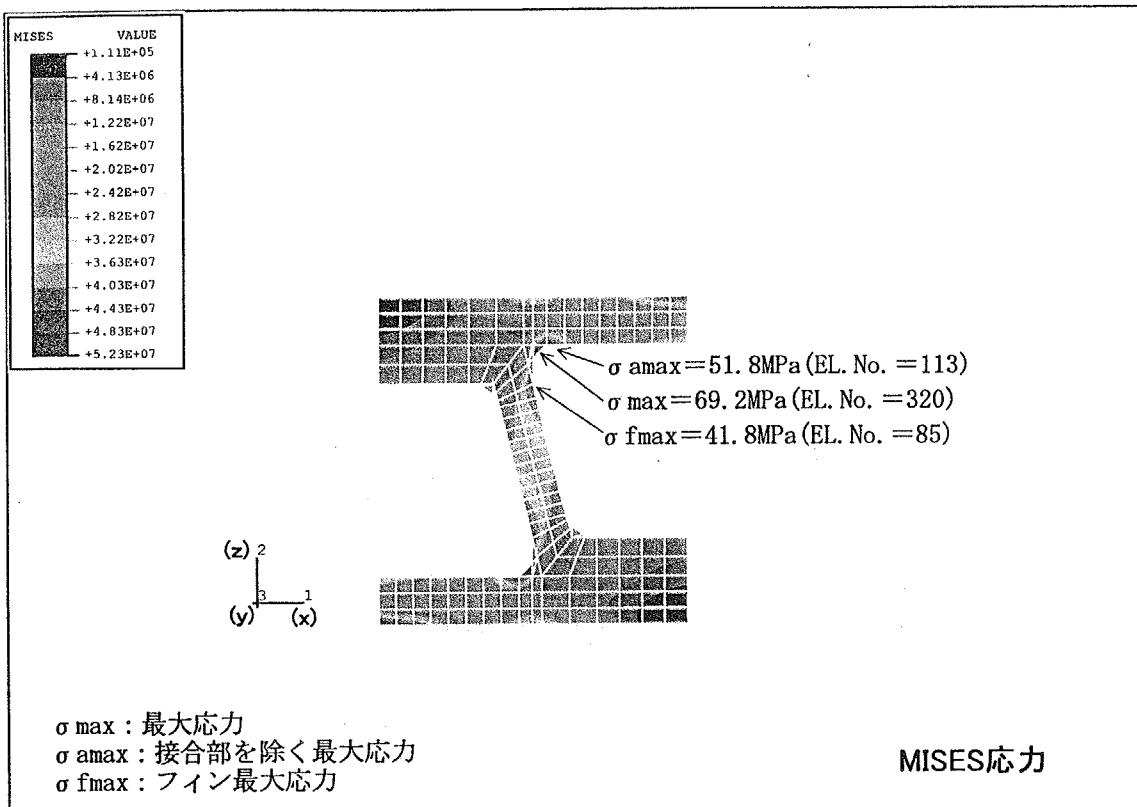


図-31(1/2) モデル7応力分布図

This is a blank page.

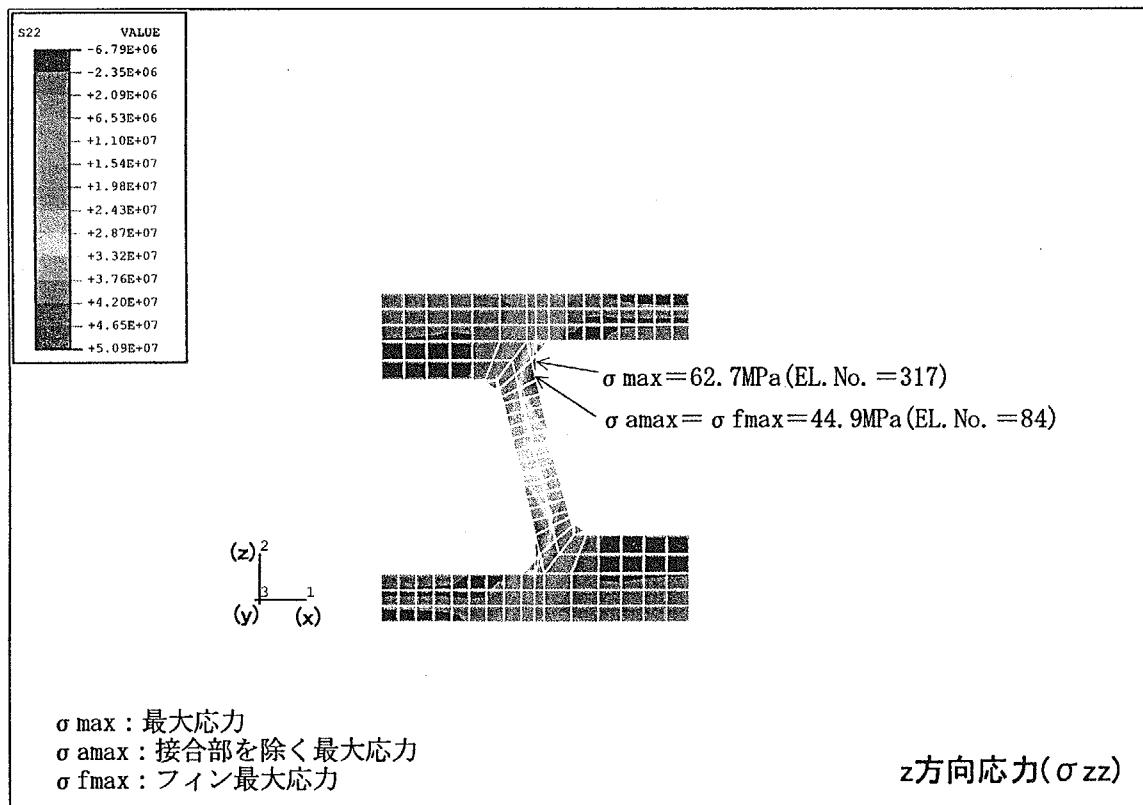
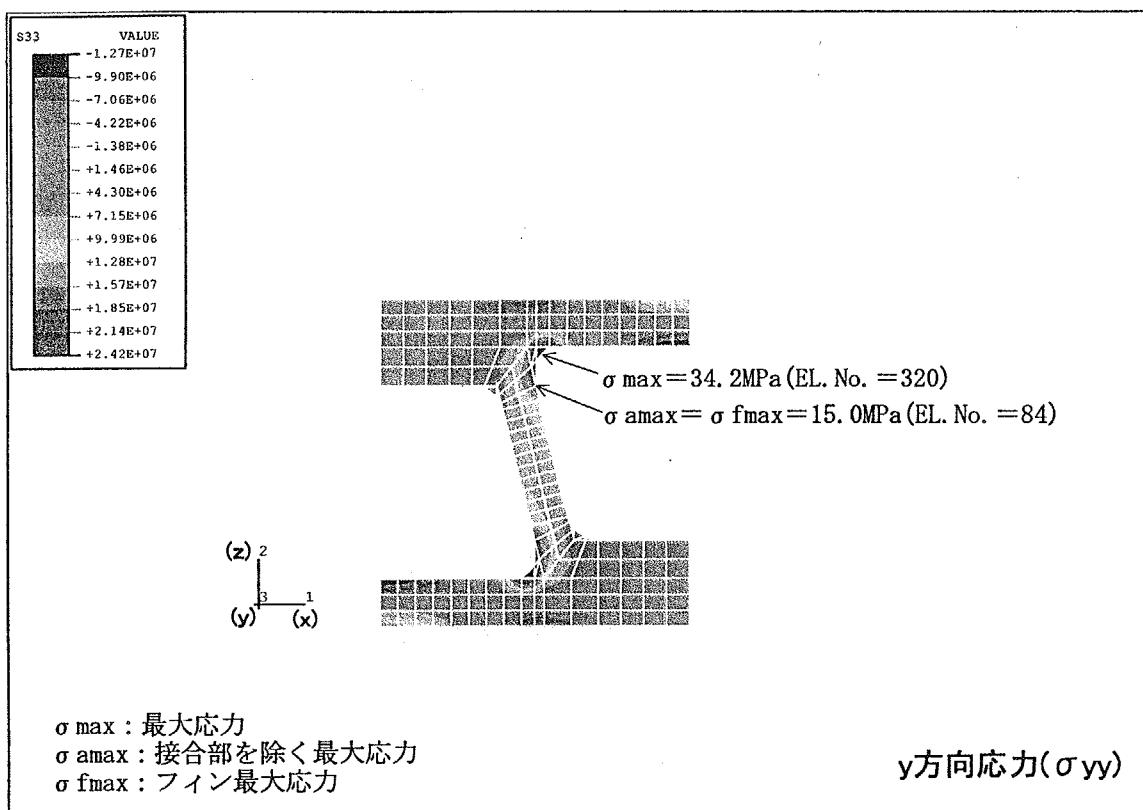
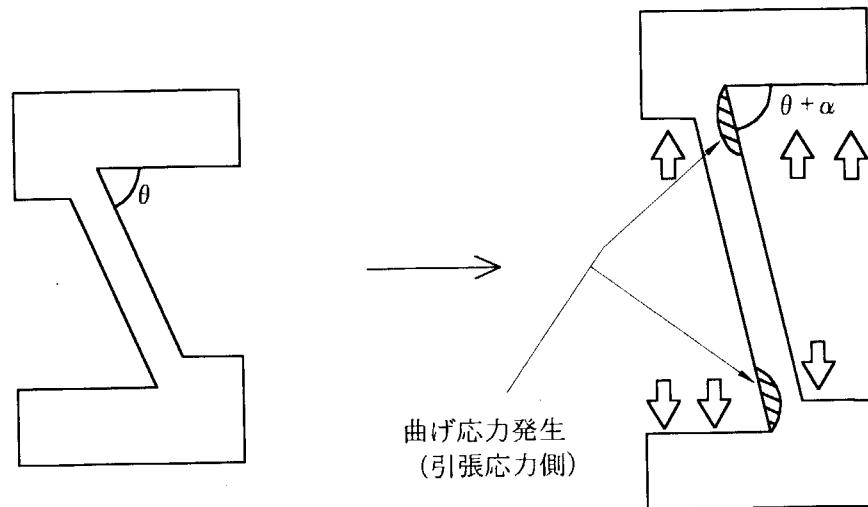
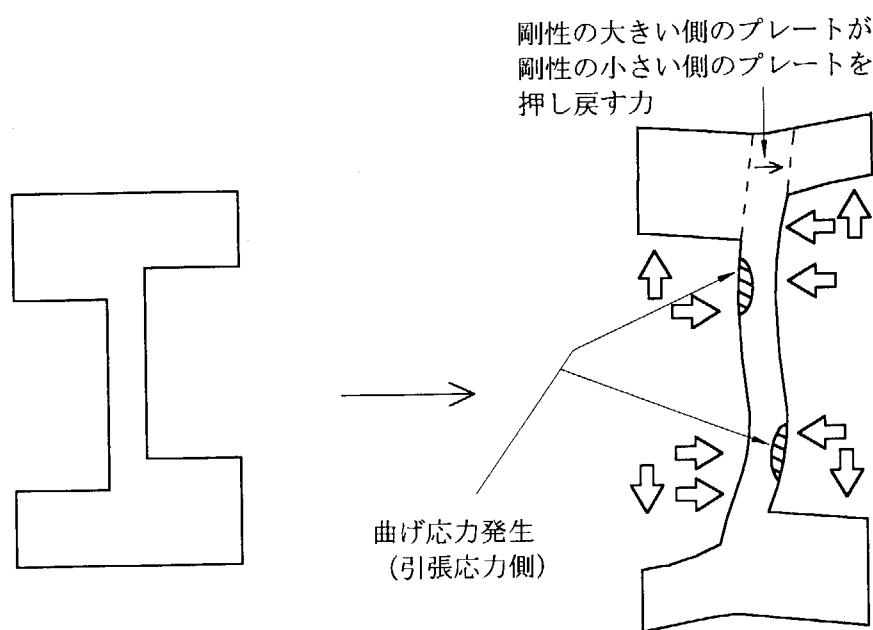


図-31(2/2) モデル7応力分布図

This is a blank page.



a. フィン傾斜により発生する曲げ応力



b. 左右不均一構造により発生する曲げ応力

◀ ; 内圧荷重

図-32 フィン部曲げ応力発生状況

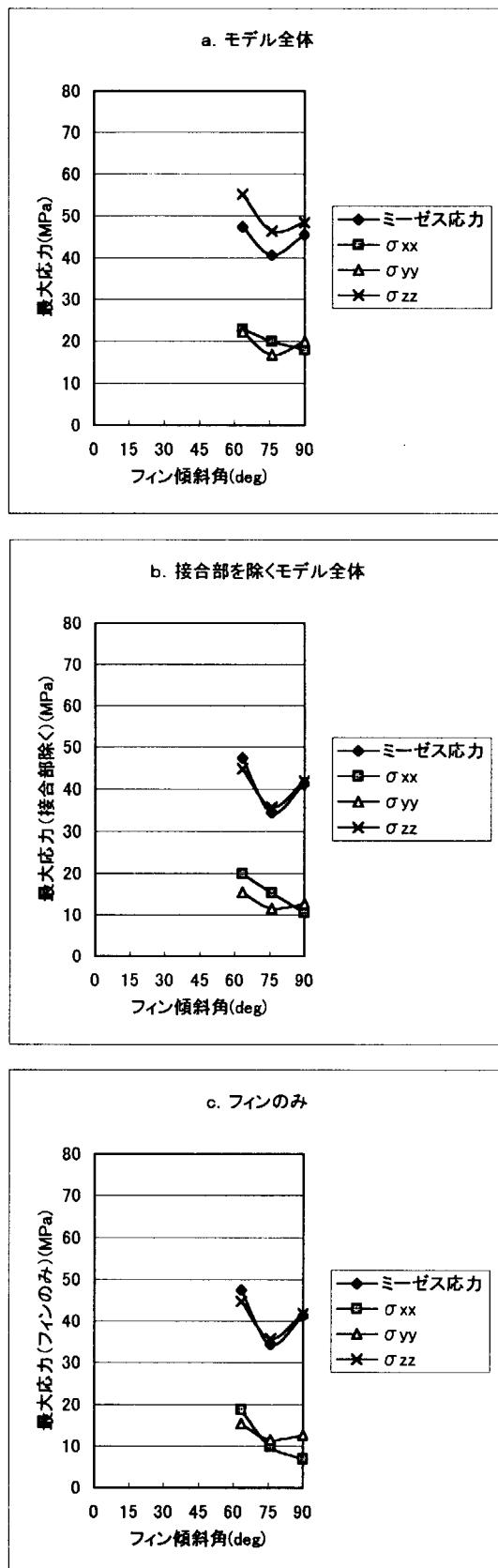


図-33 フィン傾斜角と各最大応力との関係

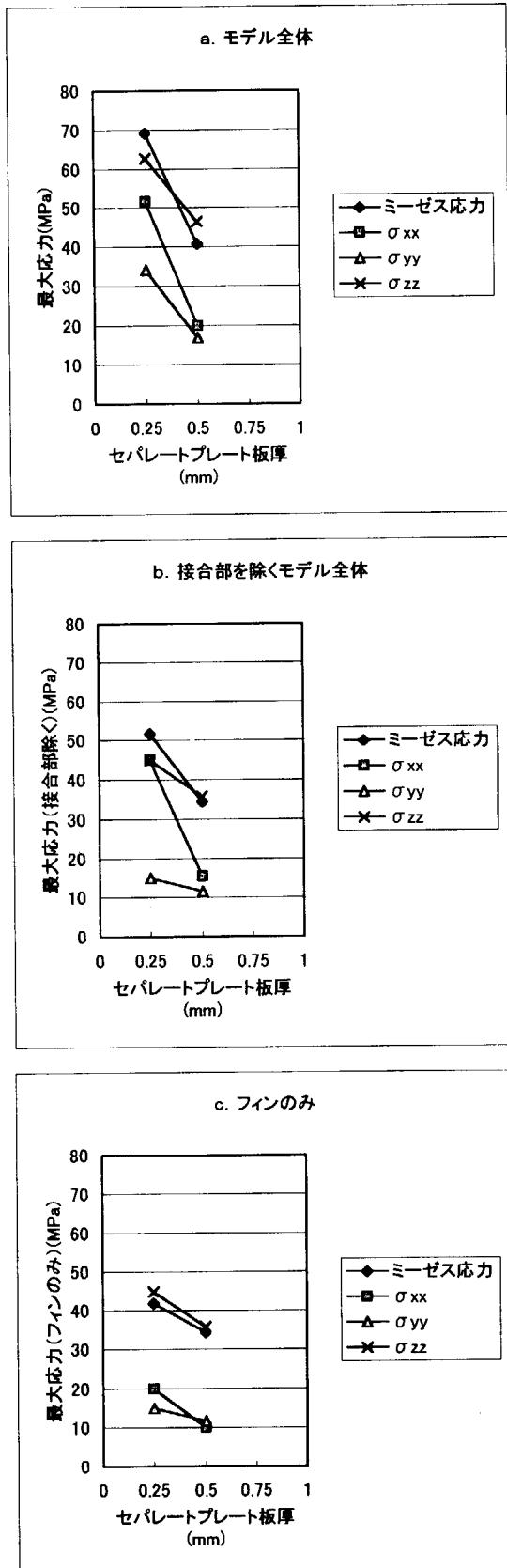
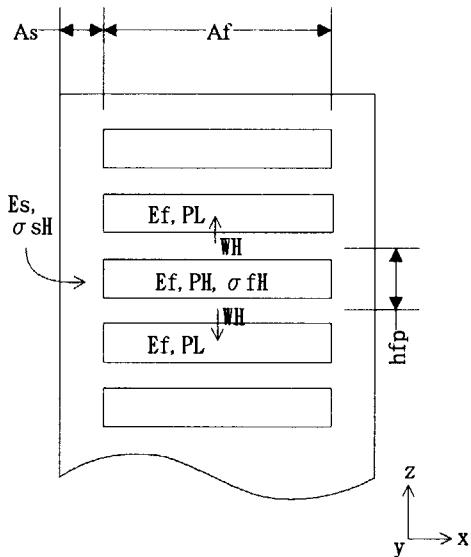


図-34 セパレートプレート板厚と各最大応力との関係

参考資料－1・標準モデルz方向境界条件

A 1. 1 方針



上図において

Es:サイドバーヤング率

Ef:フィン部等価ヤング率

WH:高圧側フィン、セパレートプレートのz方向引張荷重

σ_{sH} :高圧側サイドバーz方向応力

σ_{fH} :高圧側フィン部z方向等価応力

As:サイドバー断面積

Af:セパレートプレート耐圧面積

hfp:フィンとセパレートプレート一対の高さ

ΔhH :高圧側フィン、セパレートプレート一対のz方向変位

PH:高圧側圧力

ΔhL :低圧側フィン、セパレートプレート一対のz方向変位

PL:低圧側圧力

とする。

まずモデル2a(図-8)において、高圧側のフィン、セパレートプレート一対を考えると

$$WH = 2 \cdot \sigma_{sH} \cdot As + \sigma_{fH} \cdot Af$$

$$\sigma_{sH} = Es \cdot \frac{\Delta hH}{hfp}$$

$$\sigma_{fH} = Ef \cdot \frac{\Delta hH}{hfp}$$

よって

$$\begin{aligned} WH &= 2 \cdot Es \cdot \frac{\Delta hH}{hfp} \cdot As + Ef \cdot \frac{\Delta hH}{hfp} \cdot Af \\ &= (2 \cdot Es \cdot As + Ef \cdot Af) \cdot \frac{\Delta hH}{hfp} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta hH &= \frac{WH \cdot hfp}{2 \cdot Es \cdot As + Ef \cdot Af} \\ &= \frac{PH \cdot Af \cdot hfp}{2 \cdot Es \cdot As + Ef \cdot Af} \end{aligned}$$

同様に低圧側においても

$$\Delta hL = \frac{PL \cdot Af \cdot hfp}{2 \cdot Es \cdot As + Ef \cdot Af}$$

図-8 よりモデル2aでは高圧側1対、低圧側2対のフィン、セパレートプレートが存在するのでその合計の伸び量 $\Delta h12$ は

$$\Delta h12 = \frac{PH \cdot Af \cdot hfp}{2 \cdot Es \cdot As + Ef \cdot Af} + 2 \cdot \frac{PL \cdot Af \cdot hfp}{2 \cdot Es \cdot As + Ef \cdot Af}$$

同様にモデル2b(図-11)では高圧側2対、低圧側1対のフィン、セパレートプレートが存在するのでその合計の伸び量 $\Delta h21$ は

$$\Delta h21 = 2 \cdot \frac{PH \cdot Af \cdot hfp}{2 \cdot Es \cdot As + Ef \cdot Af} + \frac{PL \cdot Af \cdot hfp}{2 \cdot Es \cdot As + Ef \cdot Af}$$

A 1. 2 計算

A 1. 2. 1 モデル2a

モデル奥行きを1mとする(計算結果には無関係)。

モデル1圧力 $P1$ (Pa)= 4.37×10^6

フィン高さとセパレートプレート厚さ一対の合計 hfp (m)= 1.7×10^{-3}

ここで、モデル1におけるフィン、セパレートプレート一対のz方向変位 $\Delta h1$ (m)は

モデル1 FEM解析値より以下に求める。

$$\Delta h1 = \Delta hlu - \Delta hln$$

Δhlu ; モデル1の上部セパレートプレート上端辺節点の変位量FEM解析値平均(m)

Δhln ; モデル1の下部セパレートプレート上端辺節点の変位量FEM解析値平均(m)

ここで、FEM解析結果より、

$$\begin{aligned} \Delta hlu &= (4.40 + 4.41 + 4.44 + 4.50 + 4.60 + 4.77 + 5.02 + 5.30 + 5.52 + 5.89 + 6.27 \\ &\quad + 6.63 + 6.96 + 7.24 + 7.44 + 7.57 + 7.61) \cdot 10^{-7} \cdot \frac{1}{17} \\ &= 5.798 \times 10^{-7} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta hln &= (-2.07 - 2.03 - 1.90 - 1.70 - 1.42 - 1.09 - 0.707 - 0.285 + 0.237 + 0.624 + 0.879 \\ &\quad + 1.02 + 1.09 + 1.14 + 1.17 + 1.18 + 1.19) \cdot 10^{-7} \cdot \frac{1}{17} \\ &= -1.572 \times 10^{-8} \end{aligned}$$

よって、

$$\Delta h_l = \Delta h_{lu} - \Delta h_{ln}$$

$$= 6.0 \times 10^{-7}$$

よって、フィン部等価ヤング率 (Pa) は

$$E_f = P_l \cdot \frac{h_{fp}}{\Delta h_l}$$

$$= 1.238 \times 10^{10}$$

また、図-3より

$$\text{サイドバー断面積 } A_s (\text{m}^2) = 0.02$$

$$\text{セパレートプレート耐圧部面積 } A_f (\text{m}^2) = 0.890$$

$$\text{サイドバー材ヤング率 } E_s (\text{Pa}) = 1.2 \times 10^{11}$$

$$\text{高圧側圧力 } P_H (\text{Pa}) = 6.24 \times 10^6$$

$$\text{低圧側圧力 } P_L (\text{Pa}) = 1.87 \times 10^6$$

よってモデル2aのフィン、セパレートプレート3対あたりのz方向伸び Δh_{l2} (m)は、A1.1節より、

$$\Delta h_{l2} = \frac{P_H \cdot A_f \cdot h_{fp} + 2 \cdot P_L \cdot A_f \cdot h_{fp}}{2 \cdot E_s \cdot A_s + E_f \cdot A_f}$$

$$= 9.545 \times 10^{-7}$$

ここで、モデル2a全体のz方向変位 Δh_{Ma} (m)は、 Δh_{l2} にセパレートプレート一枚分のz方向変位 Δh_{lp} (m)を加えたものである。 Δh_{lp} は Δh_{l2} に比べ非常に小さい値であり、簡易的にモデル1 FEM解析値より以下に求める。

$$\Delta h_{lp} = \Delta h_{lpu} - \Delta h_{lpn}$$

Δh_{lpu} ; モデル1下部セパレートプレート上端辺節点の変位量 FEM 解析値平均(m)

Δh_{lpn} ; モデル1下部セパレートプレート下端辺節点の変位量 FEM 解析値平均(m)

ここで、FEM解析結果より、

$$\Delta h_{lpu} = (-2.07 - 2.03 - 1.90 - 1.70 - 1.42 - 1.09 - 0.707 - 0.285 + 0.237 + 0.624 + 0.879$$

$$+ 1.02 + 1.09 + 1.14 + 1.17 + 1.18 + 1.19) \cdot 10^{-7} \cdot \frac{1}{17}$$

$$= -1.572 \times 10^{-8}$$

$$\Delta h_{lpn} = (-2.09 - 2.05 - 1.92 - 1.72 - 1.44 - 1.11 - 0.744 - 0.365 + 0 + 0.229 + 0.510$$

$$+ 0.764 + 0.940 + 1.04 + 1.10 + 1.13 + 1.14) \cdot 10^{-7} \cdot \frac{1}{17}$$

$$= -2.698 \times 10^{-8}$$

よって、

$$\Delta h_{lp} = \Delta h_{lpu} - \Delta h_{lpn}$$

$$= 1.13 \times 10^{-8}$$

よって

$$\Delta hMa = \Delta h12 + \Delta hlp$$

$$= 9.658 \times 10^{-7}$$

A 1 . 2 . 2 モデル 2 b

同様に、モデル 2 b のフィン、セパレートプレート 3 対あたりの z 方向伸び $\Delta h21(m)$ は、A 1 . 1 節より、

$$\Delta h21 = \frac{2 \cdot PH \cdot Af \cdot hfp + PL \cdot Af \cdot hfp}{2 \cdot Es \cdot As + Ef \cdot Af}$$

$$= 1.372 \times 10^{-6}$$

ここでモデル 2 b 全体の z 方向変位 $\Delta hMb(m)$ は、 $\Delta h21$ にセパレートプレート一枚分の z 方向変位量 $\Delta hlp(m)$ を加えたものである。 Δhlp は $\Delta h21$ に比べ非常に小さい値であり、簡易的にモデル 1 F E M 解析値より求める。前節同様に、

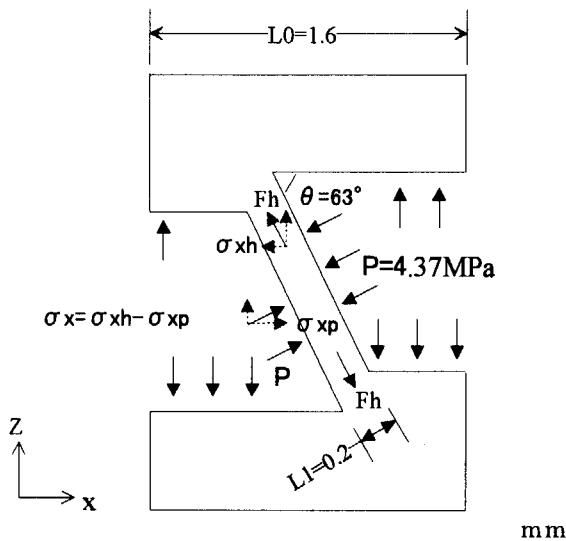
$$\Delta hlp = 1.13 \times 10^{-8}$$

よって

$$\Delta hMb = \Delta h21 + \Delta hlp$$

$$= 1.384 \times 10^{-6}$$

参考資料－2・内圧荷重解析（モデル4）と引張荷重解析（モデル1）の整合性評価



図A2-1 モデル4 フィン応力状態

 P : 内圧 F_h : プレートからの引張りによるフィン傾斜部引張力 σ_x : フィン傾斜部 x 方向応力 σ_{xh} : F_h によるフィン傾斜部 x 方向応力 σ_{xp} : P によるフィン傾斜部 x 方向応力A 2. 1 z 方向応力

モデル4とモデル1のフィンの z 方向最大応力のFEM解析値を比較すると、図-7、図-22より

$$\frac{\sigma_{ZM4K}}{\sigma_{ZMIK}} = \frac{44.8(\text{MPa})}{50.3(\text{MPa})} \\ = 0.89$$

 σ_{ZM4K} : モデル4 フィン z 方向最大応力 FEM 解析値 (MPa) σ_{ZMIK} : モデル1 フィン z 方向最大応力 FEM 解析値 (MPa)ここで図-20、図-5よりモデル4とモデル1の z 方向負荷面積を比較すると、

$$\frac{A_{ZM4K}}{A_{ZMIK}} \approx \frac{L_0 - L_1}{L_0} \\ = 0.88$$

 A_{ZM4K} : モデル4 z 方向負荷面積 A_{ZMIK} : モデル1 z 方向負荷面積

以上より両比はほぼ一致し、モデル4の z 方向応力が小さい理由は z 方向等分布荷重負荷面積が小さいからであるといえる。

A 2. 2 ミーゼス応力

ミーゼス応力は z 方向応力に比べ両モデルの差が小さい。以下にそれを考察する。

ミーゼス応力は簡易的に以下に示すことができる。

$$\sigma_{mi} = \sigma_a - \sigma_b$$

σ_{mi} : ミーゼス応力(MPa)

σ_a : 各応力成分 ($\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$) のうち最も大きい応力成分(MPa)

σ_b : 各応力成分 ($\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$) のうち最も小さな応力成分(MPa)

モデル4, モデル1においては図-22, 図-7より

$$\sigma_a = \sigma_{zz}$$

$$\sigma_b = \sigma_{xx}$$

まずモデル1のフィン傾斜部のミーゼス応力を考えると、

$$\sigma_{miM1t} = \sigma_{zM1t} - \sigma_{xM1t}$$

σ_{miM1t} : モデルNのフィン傾斜部ミーゼス応力(MPa)

σ_{xM1t} : モデルNのフィン傾斜部x方向応力(MPa)

σ_{zM1t} : モデルNのフィン傾斜部z方向応力(MPa)

ここで図-7より、近似的に

$$\sigma_{xM1t} \approx 0.1\sigma_{zM1t}$$

よって、ミーゼス応力は

$$\begin{aligned}\sigma_{miM1t} &= \sigma_{zM1t} - 0.1\sigma_{zM1t} \\ &= 0.9\sigma_{zM1t}\end{aligned}$$

次にモデル4のフィン傾斜部ミーゼス応力を考えるにあたって、モデル1とのz方向応力比をフィン最大z方向応力比で代表させると、A2.1節より

$$\sigma_{zM4t} = 0.89\sigma_{zM1t}$$

また、図-22, 図-7より、フィン傾斜部においては

$$\sigma_{xM1t} \gg \sigma_{xM4t} \approx 0$$

(原因是、モデル4フィン傾斜部に働く圧縮圧力荷重による応力低減効果と考えられる(図A2-1参照))。

よって

$$\begin{aligned}\sigma_{miM4t} &= \sigma_{zM4t} - \sigma_{xM4t} \\ &= 0.89\sigma_{zM1t} - 0 \\ &= 0.89\sigma_{zM1t}\end{aligned}$$

よって、本簡易計算によるモデル4とモデル1のミーゼス応力比R_{mit}は

$$\begin{aligned}R_{mit} &= \frac{0.89\sigma_{zM1t}}{0.9\sigma_{zM1t}} \\ &= 0.989\end{aligned}$$

ここで、解析によるモデル4, モデル1のフィン中心部ミーゼス応力比R_{mik}は、応力比をフィン最大応力で代表させると、図-22, 図-7より

$$\begin{aligned}R_{mik} &= \frac{47.5(\text{MPa})}{48.8(\text{MPa})} \\ &= 0.973\end{aligned}$$

よって、 R_{mit} と R_{mik} との差は

$$\left| \frac{0.973 - 0.989}{0.973} \right| \times 100 \\ = 1.6\%$$

となり、その差は小さい。

以上より、応力成分に関してはモデル4よりモデル1が大きいがミーゼス応力はほぼ等しい理由は、モデル1のz方向負荷面積が大きいこと、及び、モデル4 フィン傾斜部に働く圧縮圧力荷重による応力低減効果が影響しているといえる。

参考資料－3・簡易計算によるFEM解析評価（モデル4, モデル5）

FEM解析の妥当性を評価するため、モデル4及びモデル5について、材料力学を用いたセパレートプレート撓み、フィン伸びの簡易計算を行った。なお、フィン応力に関しては発生過程が複雑であり簡易計算を行うことが困難であったため、本報告では比較を見送った。

A 3. 1 モデル4

A 3. 1. 1 セパレートプレート撓み

(1) 簡易計算

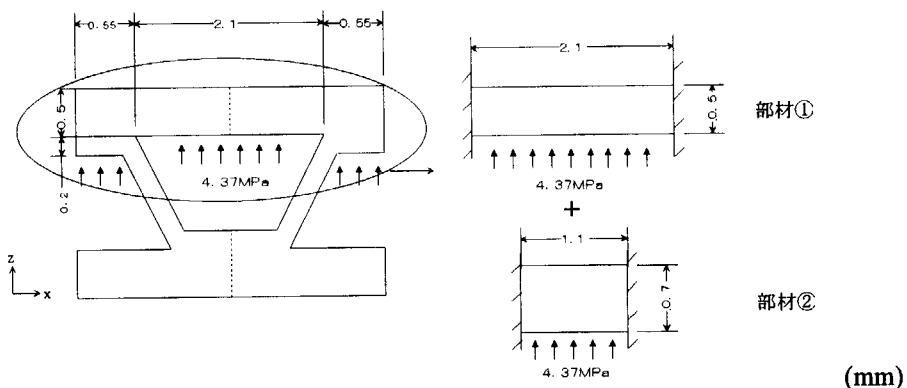


図-20のセパレートプレート部は、上図のように一对のモデルとすると、二種の両端固定梁の組み合わせと仮定できる。

1) 部材①

まず、部材①において、

$$P ; \text{内圧荷重(Pa)} \quad P = 4.37 \times 10^6$$

$$b ; \text{セパレートプレート奥行き(m)} \quad b=0.94 \text{ (図-3による)}$$

$$d ; \text{セパレートプレート厚さ(m)} \quad d=0.5 \times 10^{-3}$$

$$w ; x \text{ 方向分布荷重(Pa} \cdot m) \quad w=P \cdot b \\ =4.108 \times 10^6$$

$$E ; \text{ヤング率(Pa)} \quad E=120 \times 10^9$$

$$I ; \text{断面二次モーメント(m}^4) \quad I=\frac{b \cdot d^3}{12} \\ =9.792 \times 10^{-12}$$

$$l ; \text{撓み部長さ(m)} \quad l=2.1 \times 10^{-3}$$

よって、部材①のセパレートプレート撓み ΔZTl (m) は

$$\Delta ZTl = \frac{w \cdot l^4}{384 \cdot E \cdot I} \\ = 1.771 \times 10^{-7}$$

2) 部材②

次に部材②においては

$$d ; \text{セパレートプレート厚さ(m)} \quad d = 0.7 \times 10^{-3}$$

$$I ; \text{断面二次モーメント(m}^4\text{)} \quad I = \frac{b \cdot d^3}{12}$$

$$= 2.687 \times 10^{-11}$$

$$l ; \text{撓み部長さ(m)} \quad l = 1.1 \times 10^{-3}$$

他は 1) に同じであるので、部材②のセパレートプレート撓み $\Delta ZT2$ (m) は

$$\Delta ZT2 = \frac{w \cdot l^4}{384 \cdot E \cdot I}$$

$$= 4.858 \times 10^{-9}$$

以上より、セパレートプレート撓みは、

$$\Delta ZT = \Delta ZT1 + \Delta ZT2$$

$$= 1.819 \times 10^{-7}$$

(2) FEM 解析

$Uz120001$; 図-20 の節点番号 120001 における z 方向変位量 FEM 解析値(m)

$$Uz120001 = 3.8536 \times 10^{-7}$$

$Uz120017$; 図-20 の節点番号 120017 における z 方向変位量 FEM 解析値(m)

$$Uz120017 = 7.1314 \times 10^{-7}$$

よって、セパレートプレート撓み FEM 解析値 ΔZA は、

$$\Delta ZA = Uz120017 - Uz120001$$

$$= 3.278 \times 10^{-7}$$

(3) 差 $E\Delta Z$

$$E\Delta Z = \frac{(\Delta ZA - \Delta ZT)}{\Delta ZA} \times 100$$

$$= 44.5(\%)$$

(4) 評価

簡易計算値に比べ FEM 解析値の撓み値が大きい。これは簡易計算においては、両端完全固定と考え計算されており端部が剛な構造としている分、撓みが小さくなつたと考えられる。

FEM 解析及び実際においては、セパレートプレート両端の z 方向の変位は解放されており、柔な構造であるフインが z 方向を拘束する。

よって、FEM 解析値は妥当な結果を示しているといえる。

A 3. 1. 2 フィン伸び

(1) 簡易計算

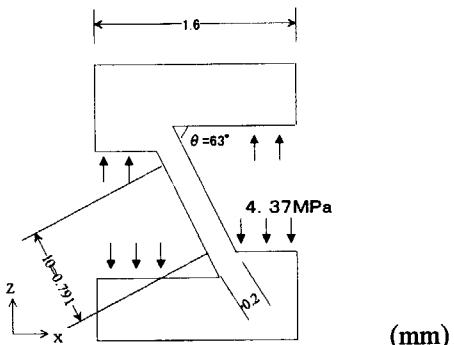


図-20のフィンは、上図のように両端引張梁と仮定できる。

$$P ; \text{内圧荷重(Pa)} \quad P=4.37 \times 10^6$$

$$\theta ; \text{フィン傾斜角(rad)} \quad \theta = \frac{63 \cdot \pi}{180} \\ = 1.1$$

$$a ; \text{セパレートプレート耐圧部 } x \text{ 方向長さ(m)} \quad a=1.6 \times 10^{-3} - 0.2 \times 10^{-3} \\ = 1.4 \times 10^{-3}$$

$$b ; \text{フィン奥行き(m)} \quad b=0.94$$

$$d ; \text{フィン幅(m)} \quad d = 0.2 \times 10^{-3}$$

$$l_0 ; \text{評価対象フィン長さ(m)} \quad l_0=0.791 \times 10^{-3}$$

$$F ; \text{フィン引張力(m)} \quad F=P \cdot a \cdot b \cdot \cos \theta \\ = 2.611 \times 10^3$$

$$E ; \text{ヤング率(Pa)} \quad E=120 \times 10^9$$

$$A ; \text{フィン引張断面積(m}^2\text{)} \quad A=b \cdot d \\ = 1.88 \times 10^{-4}$$

$$\varepsilon_F ; \text{フィン歪み} \quad \varepsilon_F = \frac{F}{A \cdot E} \\ = 1.157 \times 10^{-4}$$

よって、評価対象部フィン伸び $\Delta IT(m)$ は

$$\Delta IT = \varepsilon_F \cdot l_0 \\ = 9.154 \times 10^{-8}$$

(2) FEM解析

Nx70019 ; 図-20の節点番号 70019 における変位前の x 方向座標(m)

$$Nx70019=9.8245 \times 10^{-4}$$

Nz70019 ; 図-20の節点番号 70019 における変位前の z 方向座標(m)

$$Nz70019=7.4472 \times 10^{-4}$$

Nx70009 ; 図-20の節点番号 70009 における変位前の x 方向座標(m)

$$Nx70009=6.2755 \times 10^{-4}$$

Nz70009 ; 図－20の節点番号 70009 における変位前の z 方向座標(m)

$$Nz70009=1.45528 \times 10^{-3}$$

Ux70019 ; 図－20の節点番号 70019 における x 方向変位量 FEM 解析値(m)

$$Ux70019=-7.3999 \times 10^{-8}$$

Uz70019 ; 図－20の節点番号 70019 における z 方向変位量 FEM 解析値(m)

$$Uz70019=1.0242 \times 10^{-7}$$

Ux70009 ; 図－20の節点番号 70009 における x 方向変位量 FEM 解析値(m)

$$Ux70009=7.3092 \times 10^{-8}$$

Uz70009 ; 図－20の節点番号 70009 における z 方向変位量 FEM 解析値(m)

$$Uz70009=3.9253 \times 10^{-7}$$

よって、フィン伸び量 FEM 解析値 $\Delta lA(m)$ は、

$$\begin{aligned} \Delta lA &= \sqrt{[(Ux70019 + Nx70019) - (Ux70009 + Nx70009)]^2} \\ &\quad + [(Uz70019 + Nz70019) - (Uz70009 + Nz70009)]^2 \\ &\quad - \sqrt{(Nx70019 - Nx70009)^2 + (Nz70019 - Nz70009)^2} \\ &= 1.939 \times 10^{-7} \end{aligned}$$

(3) 差 $E\Delta l$

$$\begin{aligned} E\Delta l &= \frac{(\Delta lA - \Delta lT)}{\Delta lA} \times 100 \\ &= 52.8\% \end{aligned}$$

(4) 評価

簡易計算値に比べ解析値の伸び量が大きい。これはFEM解析及び実際において、曲げ変形の変位も加味されていることが原因と考えられる。

よって、FEM解析値は妥当な結果を示しているといえる。

A 3. 2 モデル5

A 3. 2. 1 セパレートプレート撓み

(1) 簡易計算

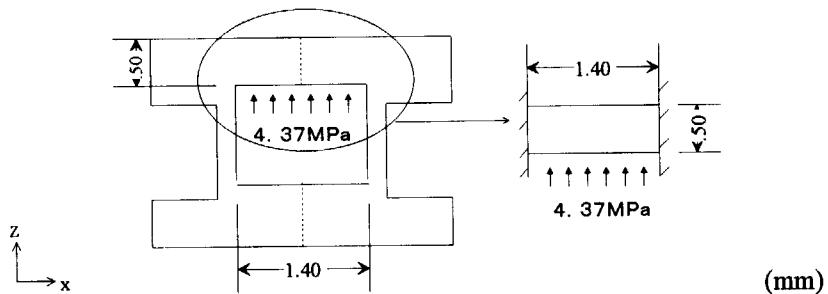


図-23のセパレートプレートは、上図のように両端固定梁と仮定できる。

$$P ; \text{内圧荷重(Pa)} \quad P = 4.37 \times 10^6$$

$$b ; \text{セパレートプレート奥行き(m)} \quad b = 0.94$$

$$d ; \text{セパレートプレート厚さ(m)} \quad d = 0.5 \times 10^{-3}$$

$$w ; \text{x 方向分布荷重(Pa} \cdot m) \quad w = P \cdot b \\ = 4.108 \times 10^6$$

$$E ; \text{ヤング率(Pa)} \quad E = 120 \times 10^9$$

$$I ; \text{断面二次モーメント(m}^4) \quad I = \frac{b \cdot d^3}{12} \\ = 9.792 \times 10^{-12}$$

$$l ; \text{撓み部長さ(m)} \quad l = 1.4 \times 10^{-3}$$

よって、部材①のセパレートプレート撓み ΔZT (m) は

$$\Delta ZT = \frac{w \cdot l^4}{384 \cdot E \cdot I} \\ = 3.497 \times 10^{-8}$$

(2) FEM解析

$Uz230017$; 図-23の節点番号 230017 における z 方向変位量 FEM 解析値(m)

$$Uz230017 = 3.5090 \times 10^{-7}$$

$Uz230009$; 図-23の節点番号 230009 における z 方向変位量 FEM 解析値(m)

$$Uz230009 = 2.6656 \times 10^{-7}$$

よって、セパレートプレート撓み FEM 解析値 ΔZA は、

$$\Delta ZA = Uz230017 - Uz230009 \\ = 8.434 \times 10^{-8}$$

(3) 差 $E\Delta Z$

$$\begin{aligned} E\Delta Z &= \frac{(\Delta ZA - \Delta ZT)}{\Delta ZA} \times 100 \\ &= 58.6(\%) \end{aligned}$$

(4) 評価

簡易計算値に比べFEM解析値の撓み値が大きい。これもA3.1.1節と同じく簡易計算においては、両端を完全固定と考え計算されていることが原因と考えられる。

よって、FEM解析値は妥当な結果を示しているといえる。

A3.2.2 フィン伸び

(1) 簡易計算

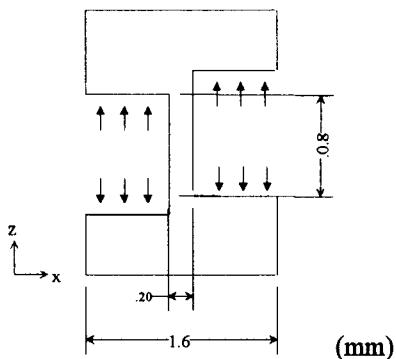


図-23のフィンは、上図のように両端引張りと仮定できる。

$$P ; \text{内圧荷重(Pa)} \quad P = 4.37 \times 10^6$$

$$a ; \text{セパレートプレート耐圧部 } x \text{ 方向長さ(m)} \quad a = 1.6 \times 10^{-3} - 0.2 \times 10^{-3} \\ = 1.4 \times 10^{-3}$$

$$b ; \text{フィン奥行き(m)} \quad b = 0.94$$

$$d ; \text{フィン幅(m)} \quad d = 0.2 \times 10^{-3}$$

$$l_0 ; \text{評価対象フィン長さ(m)} \quad l_0 = 0.8 \times 10^{-3}$$

$$F ; \text{フィン引張力(N)} \quad F = P \cdot a \cdot b \\ = 5.751 \times 10^3$$

$$E ; \text{ヤング率(Pa)} \quad E = 120 \times 10^9$$

$$A ; \text{フィン引張断面積(m}^2\text{)} \quad A = b \cdot d \\ = 1.88 \times 10^{-4}$$

$$\epsilon_F ; \text{フィン } z \text{ 方向歪み} \quad \epsilon_F = \frac{F}{A \cdot E} \\ = 2.549 \times 10^{-4}$$

よって、評価対象部フィン伸び ΔIT (m)は、

$$\begin{aligned} \Delta IT &= \epsilon_F \cdot l_0 \\ &= 2.039 \times 10^{-7} \end{aligned}$$

(2) FEM解析

Uz180009 ; 図-23の節点番号 180009 における z 方向変位量 FEM 解析値

$$Uz180009=2.2739 \times 10^{-7}$$

Uz80002 ; 図-23の節点番号80002におけるz方向変位量FEM解析値

$$Uz80002=4.9326 \times 10^{-8}$$

よって、フィン伸び量FEM解析値 $\Delta lA(m)$ は、

$$\begin{aligned}\Delta lA &= Uz180009 - Uz80002 \\ &= 1.781 \times 10^{-7}\end{aligned}$$

(3) 差 $E\Delta l$

$$\begin{aligned}E\Delta l &= \frac{(\Delta lA - \Delta lT)}{\Delta lA} \times 100 \\ &= -14.6(\%)\end{aligned}$$

(4) 評価

簡易計算値に比べFEM解析値の伸びが小さい。これは、モデル4（A3.1.2節）と逆の傾向である。原因としては第一に、本モデル5はモデル4よりフィンが垂直になったため、フィンの曲げによる変位分が無くなり、FEM解析値が大きくなる要因が無くなつたためと考えられる。

さらに第二に、FEM解析及び現実においては、フィン付け根部に近づくほど、セパレートプレート剛性によりx方向歪みが拘束され縮みにくくなり、そのポアソン比割合分z方向は伸びにくくなる。そのためFEM解析値の伸び量が小さくなつたと考えられる。

よって、FEM解析値は妥当な結果を示していると言える。

This is a blank page.

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
圧力、応力	ニュートン	N	$m \cdot kg/s^2$
エネルギー、仕事、熱量	パスカル	Pa	N/m^2
工率、放射束	ジュール	J	$N \cdot m$
電気量、電荷	ワット	W	J/s
電位、電圧、起電力	クロン	C	$A \cdot s$
静電容量	ボルト	V	W/A
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	$V \cdot s$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	$cd \cdot sr$
照度	ルクス	lx	lm/m^2
放射能	ベクレル	Bq	s^{-1}
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
ト	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10^{18}	エクサ	E
10^{15}	ペタ	P
10^{12}	テラ	T
10^9	ギガ	G
10^6	メガ	M
10^3	キロ	k
10^2	ヘクト	h
10^1	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	アト	a

(注)

- 表1—5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC開発理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N($=10^6$ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s} (\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ボアズ)} (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)} (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	MPa($=10$ bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062×10^3	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322×10^{-4}	1.35951×10^{-3}	1.31579×10^{-3}	1	1.93368×10^{-2}
	6.89476×10^{-3}	7.03070×10^{-2}	6.80460×10^{-2}	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J($=10^7$ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)
	1	0.101972	2.77778×10^{-7}	0.238889	9.47813×10^{-4}	0.737562	6.24150×10^{-18}	= 4.184 J(熱化学)
9.80665	1	2.72407 $\times 10^{-6}$	2.34270	9.29487×10^{-3}	7.23301	6.12082×10^{-19}	$= 4.1855 \text{ J (15}^{\circ}\text{C)}$	$= 4.1868 \text{ J (国際蒸気表)}$
3.6×10^6	3.67098×10^5	1	8.59999×10^5	3412.13	2.65522×10^6	2.24694×10^{-25}		
4.18605	0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272×10^{-19}	仕事率 1 PS(仏馬力)	$= 75 \text{ kgf} \cdot \text{m/s}$
1055.06	107.586	2.93072×10^{-4}	252.042	1	778.172	6.58515×10^{-11}		$= 735.499 \text{ W}$
1.35582	0.138255	3.76616×10^{-7}	0.323890	1.28506×10^{-3}	1	8.46233×10^{-18}		
1.60218×10^{-19}	1.63377×10^{-20}	4.45050×10^{-26}	3.82743×10^{-20}	1.51857×10^{-22}	1.18171×10^{-19}	1		

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad	照射線量	C/kg	R	線量当量
1	2.70270×10^{-11}	1		100	1		1	3876	
3.7×10^{10}	1		0.01	1		2.58×10^{-4}	1		

(86年12月26日現在)

マイナーフィン列再生熱交換器ヒン・ヒート構造の強度解析