

vol.99-2

Mech D & A News

Mechanical Design & Analysis Co.

July 1999



奈良 浮見堂 八月

【特集】はじめての非線形構造解析

FEM Consulting Services for Engineering Practice
URL <http://www.mech-da.co.jp>

【特集】初めての非線形構造解析

はじめに

有限要素法が構造解析の実用的レベルで使用されるようになって約30年を経て、高度な非線形問題も現実的な水準で取扱いが可能となってきました。しかしながら非線形有限要素法を主題とした実用的なテキストは、あまり見当たらないのが現状です。

特に、最近では雇用形態の変化に伴って、長期的な視野に立った技術者教育が困難になってきたというのも、大きな問題です。すなわち、練度の低い技術者であっても、誤りの少ない解析を達成できるような環境を整備することが、当面の課題と考えられます。

弊社では、このような状況は本来あるべき姿ではないと考えておりますが、次善の方策に資することを目的として、非線形構造解析の入門書を作成致しました。今回はこの入門書の概要についてご紹介致します。

本書では、非線形の原因となりうる各種の現象に着目し、その現象の理論的背景の説明とともに、非線形構造解析プログラム (MARC / LS-DYNA) を用いた場合のモデル化について示してあります。

また、使用するモデルはできるだけ簡単なものとなるよう心がけ、例題の実践とともに非線形現象の理論的な意味合いが理解できるように構成してあります。

[目次]

1章 有限要素法について

- 1.1 有限要素法とは
- 1.2 有限要素法の特徴
- 1.3 代表的な汎用プログラム

2章 有限要素法の基礎知識

3章 解析の種類

- 3.1 線形解析
- 3.2 非線形解析
- 3.3 微小変形解析
- 3.4 大変形解析
- 3.5 静解析
- 3.6 動解析
- 3.7 陰解法
- 3.8 陽解法
- 3.9 その他

4章 材料の種類

- 4.1 弾性材料
- 4.2 弾塑性材料
- 4.3 粘弾性材料

5章 要素の種類

- 5.1 軸対称シェル要素
- 5.2 4辺形平面応力要素
- 5.3 立体要素
- 5.4 3次元トラス要素
- 5.5 4辺形軸対称要素
- 5.6 4辺形平面ひずみ要素
- 5.7 接触 / 摩擦要素
- 5.8 3次元弾性はり要素
- 5.9 4辺形厚肉線形シェル要素
- 5.10 3次元薄肉閉断面はり要素
- 5.11 3次元薄肉開断面はり要素
- 5.12 熱伝導要素
- 5.13 2次要素
- 5.14 低減積分要素

6章 境界条件

1. 有限要素法について

1.1 有限要素法とは

有限要素法 (FEM) とは、連続体を幾つかの要素に分けて考え、要素ごとに方程式を作り、それをもとに全体としての方程式を組み立てて解く方法のことを言います。弾性体の変形問題、熱伝導問題、流体問題など、いわゆる連続体の問題は、数学的に記述すれば、偏微分方程式の問題となります。しかし、物体を細かく分割し、個々の小部分だけについて考えるならば、その特性を比較的簡単な式で近似的に表すことができます。そのような式を結合して解けば、全体として近似解を得ることができます。これが有限要素法の基本的な発想となっています。

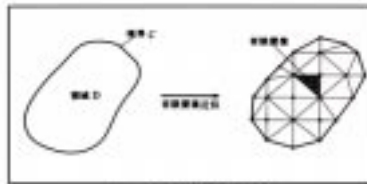


Fig. 1-1 有限要素法

1.2 有限要素法の特徴

有限要素法の第1の特徴は実際的な問題が解けるということです。「正方形の板なら解ける」とか「穴が楕円なら解ける」といった制約がなく、任意形状の構造物を解析することができます。

第2の特徴は汎用プログラムが完備していることです。豊富な機能を持ち便利で使いやすいプログラムが普及しているので、利用者はプログラムを作る必要がなく、単にデータを入力さえすればすぐに結果を手にすることができるということです。

第3の特徴は弾性力学の基礎方程式を非常にうまく、自然な形で処理できるということです。弾性力学の問題は偏微分方程式の形に書くのが難しく複雑で扱いにくくなりますが、有限要素法で強えば単純明快となります。

一方、有限要素法の欠点をあげるとすれば、計算時間がかかることです。一般的であるかわりに精度はあまり良くありません。それを補うためにコンピュータの利用を必要とします。有限要素法の今日の発達の背景として、コンピュータの大型化、高速化が大きな要因となっているでしょう。

もう一つ、有限要素法の長所が発揮されるのは一般的な問題においてです。特殊な問題に関してはその特殊性を利用した専用解法に遠く及びません。特別な工夫をしない限り、デリケートな現象の解析には使えません。有限要素法が土木、建築、機械などの分野でよく使われるのは歴史的事情もさる事ながら、有限要素法の性格にマッチした問題が多いためでしょう。

1.3 代表的な汎用プログラム

汎用プログラムとは、広汎な用途に供することのできるプログラムに対する総称を言います。このようなプログラムでは、解析機能が豊富であるだけでなく、入力データ作成の省力化を計るためのプリプロセッサや、利用者の多様な要求に応えるためのポストプロセッサが

更に、弊社ではこの入門書を用いたセミナー活動も実施しております。皆様のご利用をお待ちしております。

尚、本書の作成に当たり、日本マーク株式会社殿、株式会社日本総合研究所殿発行のマニュアルから図象を一部引用させて頂きました。この場を借りまして御礼申し上げます。

[1 章] 有限要素法について

弾性力学の問題は偏微分方程式の形に書くと概して複雑で扱いにくくなりますが、有限要素法で扱えば単純となります。こういった有限要素法の基本概念を理解して頂くために、この章では、はじめて有限要素法を学ぶ人を対象に、その概念、特徴及び汎用ソフトの一覧など、有限要素法の概要を説明します。

[2 章] 有限要素法の基礎知識

有限要素法では、扱う変数が多いこと、コンピュータによる処理が容易であることなどの理由により、マトリックスによる表記が行われています。この章では、ばねを取り上げ、マトリックス計算の基本概念について説明します。

一般に市販されている有限要素法の専門書と異なり、ここではマトリックス計算における複雑な数学的知識や弾性論、及び有限要素法における形状関数等の説明は省いています。それに替えて、はじめて有限要素法に取り組む際に、ブラックボックスとしての有限要素法の内部計算の概略が理解できるようにつとめています。

また、例として取り上げた問題は、手計算でも確認できるように3本のばねを組み合わせた簡単な問題としています。マトリックス計算で得られた結果と手計算結果の整合性を確認することにより、マトリックス計算の基本概念を理解して頂けると思います。

2. 有限要素法の基礎知識

ある物体(弾性体)に荷重を加えると変形が生じます。この荷重と変形つまり変位の関係は、その物体の剛さを示すものと考えられています。このような意味で、この関係を表わす式を剛性方程式と呼びます。荷重および変位をベクトルで表わして、この式をマトリックス表示したときに現れるマトリックスを剛性マトリックスといいます。つまり、剛性マトリックスは荷重ベクトルと変位ベクトルを結びつけるものであり、その物体の剛さを示すものです。ここでは、例としてばねを取り上げ、剛性方程式を求めて、剛性マトリックスの一般的な性質を考察します。

下図に示すような、2つのばねが直列に、他のばねが並列に並んでいる場合について考えます。

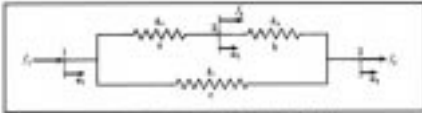


Fig. 2-1 3本のばねの組合せ

各々のばねに対する剛性方程式はばね*a*に対して、

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad \dots\dots(2-1)$$

ばね*b*に対して、

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_1 \end{Bmatrix} \quad \dots\dots(2-2)$$

ばね*c*に対して、

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_3 & -k_3 \\ -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_1 \end{Bmatrix} \quad \dots\dots(2-3)$$

これらを組み合わせて、全体の剛性方程式は、次のようになります。

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1+k_2 & -k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1+k_2 & -k_1 \\ -k_1 & -k_1 & k_1+k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad \dots\dots(2-4)$$

ここで点1が固定されているものとします。つまり、点1における変位 u_1 は0、また点3に荷重 f_2 が加わっているものとします。未知数は、点2、点3の変位 u_2 、 u_3 と点1における力(反力) f_1 となります。剛性方程式は、以下のようになります。

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1+k_2 & -k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1+k_2 & -k_1 \\ -k_1 & -k_1 & k_1+k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} \quad \dots\dots(2-5)$$

上式において、変位0に対応する成分を下にもっていき、他は上につめて以下のように書き直します。

$$\begin{Bmatrix} 0 \\ f_2 \\ f_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1+k_2 & -k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1+k_2 & -k_1 \\ -k_1 & -k_1 & k_1+k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_2 \\ u_2 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \dots\dots(2-6)$$

これより、

$$\begin{Bmatrix} 0 \\ f_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1+k_2 & -k_1 \\ -k_1 & k_1+k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_2 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad \dots\dots(2-7) \quad U(1) = \begin{bmatrix} -k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1+k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_2 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad \dots\dots(2-8)$$

ここで、

$$f(1) = \begin{Bmatrix} 0 \\ f_2 \end{Bmatrix} \quad (1) = \begin{Bmatrix} u_2 \\ u_2 \end{Bmatrix}$$

$$K(1) = U(1) \quad (1) = f(1)$$

$$[K_{11}] = \begin{bmatrix} k_1+k_2 & -k_1 \\ -k_1 & k_1+k_2 \end{bmatrix} \quad [K_{12}] = \begin{bmatrix} -k_1 \\ -k_1 \end{bmatrix}$$

$$[K_{21}] = \begin{bmatrix} -k_1 & -k_1 \end{bmatrix} \quad [K_{22}] = \begin{bmatrix} k_1+k_2 \end{bmatrix}$$

とくと、未知変位 $\{ \delta \}$ は、

$$\{ \delta \} = [K_{11}]^{-1} f(1) \quad \dots\dots(2-9)$$

で求められ、未知変位 $\{ \delta \}$ が得られれば、未知反力も求められます。

$$\{ \delta \} = [K_{11}]^{-1} f(1) \quad \dots\dots(2-10)$$

さて、実際にこれを解いてみましょう。

[3章] 解析の種類

有限要素法は1950年代のなかばに、欧米の航空機構造力学の研究者によって提案された構造解析に始まり、今日では、流体解析、熱伝導解析、電磁気解析など、理工学のあらゆる分野に普及しています。また、構造解析だけに着目しても、その切り口は様々で、一言に解析の種類を述べるのは非常に難しいと考えられます。

この章では以下に示す、4つの視点から構造解析を種類分けし、それぞれの解析における基本理論を示しています。また、ここでは簡単な解析例も用意していますので、実際の解析を通して、各解析の特徴をより深く理解して頂けると幸いです。

線形解析・非線形解析

いわゆるフックの法則に従う線形問題に対し、材料非線形、幾何学的非線形、境界条件非線形などの要因が加わり、その線形性が失われた問題について解説しています。

微小変形解析・大変形解析

変位とひずみの関係式において、2次の項を無視できる微小変形解析、及び無視できない大変形解析の違いについて解説しています。

静解析・動解析

釣り合い方程式が剛性マトリックスのみに依存する静解析に対し、質量マトリックスや減衰マトリックスが釣り合い方程式のなかに含まれる動解析について解説しています。

陰解法・陽解法

マトリックスの逆変換を求め繰り返し計算により解を収束させる陰解法と、時間幅を小さくとることにより繰り返し計算なしに解を計算する陽解法について解説しています。

幾何学的形状による非線形性

(2) 幾何学的形状による非線形性
幾何学的非線形性はひずみと変位の関係、あるいは応力と力の関係が非線形であることからもたらされます。幾何学的非線形性には飛び移り座屈等があります。

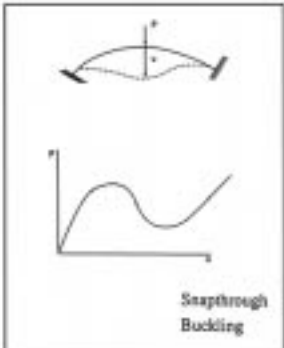


Fig. 3-3 幾何学的形状による非線形性

境界条件による非線形性

(3) 境界条件による非線形性
境界条件及び荷重条件も非線形性の要因となります。例えば、接触や摩擦は非線形の境界条件の代表的な例です。また、構造物に加わる荷重も、構造物の変形にしたがって変化する場合には非線形性の要因となります。

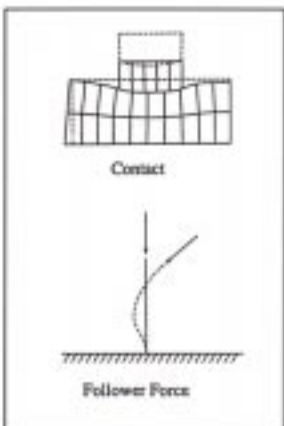


Fig. 3-4 境界条件による非線形性

幾何学的形状による非線形性 (解析モデル)

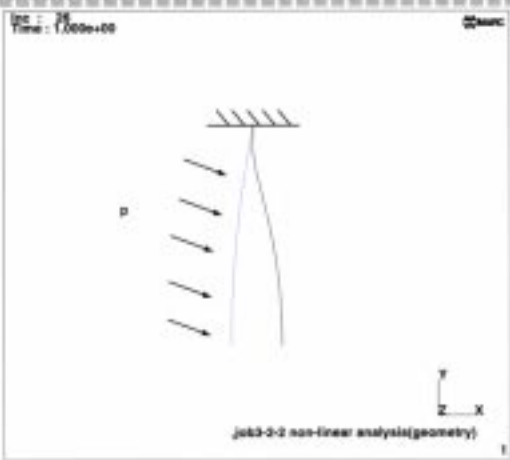


Fig. 3-e 幾何学的形状による非線形性 (解析モデル)

幾何学的形状による非線形性 (荷重-変位)

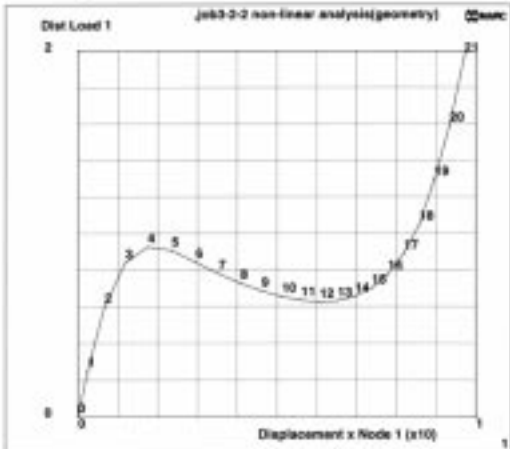


Fig. 3-f 幾何学的形状による非線形性 (荷重-変位)

[4 章] 材料の種類

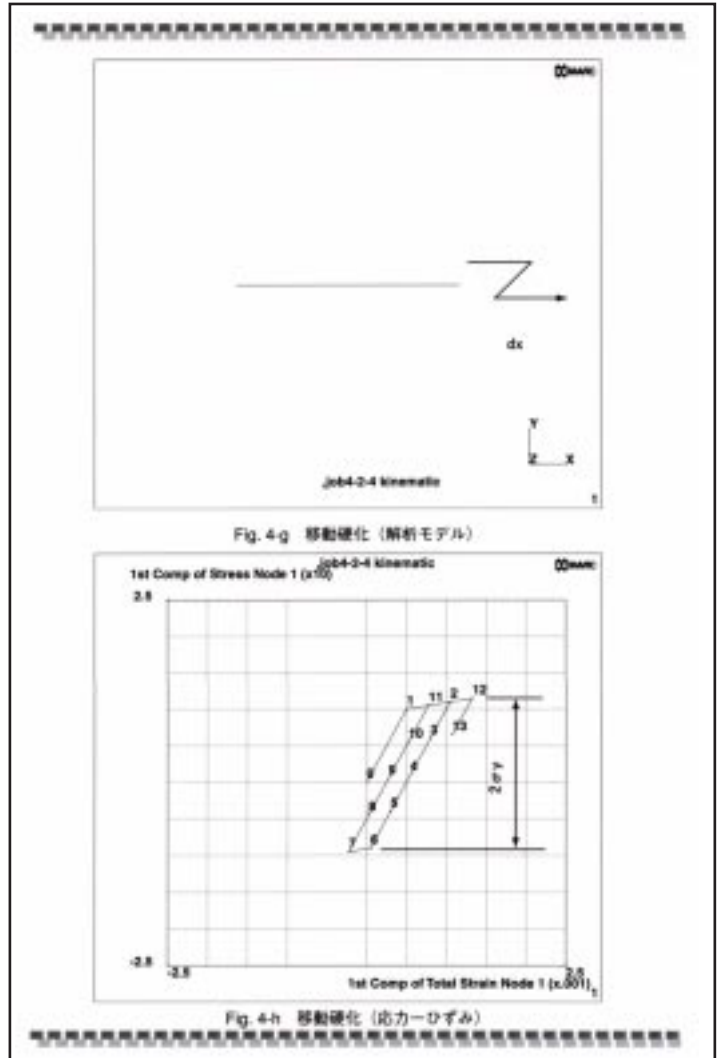
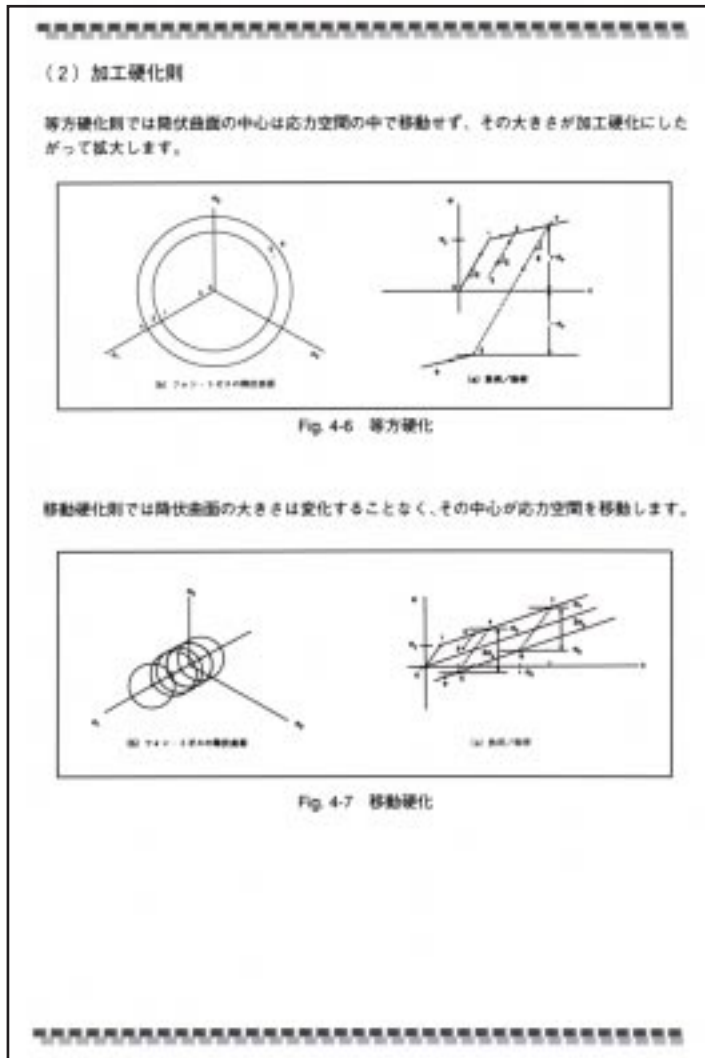
塑性や粘弾性によって代表される材料非線形性に着目し、その性質について説明します。また、ここでは解析により実際にその性質を再現できるよう、それぞれの材料特性を有した簡易モデルを用意しています。

弾塑性材料

金属材料などに代表される弾塑性挙動について、その降伏条件及び加工硬化則についてまとめています。

粘弾性材料

プラスチックなどに代表される粘弾性挙動について、Maxwellモデル及びVoightモデルでの挙動の違いや温度依存性についてまとめています。



PC版 JVISION および NIKE-Works の販売開始

従来、弊社ではLS-DYNA(国内総販売元：株式会社日本総合研究所殿)を代理店販売していましたが、このたび以下のようにラインアップを追加致しました。詳細はお問い合わせ下さい。

- PC/LS-DYNA : 販売価格 170 万円 (プリ・ポスト付は 200 万円)
- EWS/LS-DYNA : レンタル価格 360 万円 / 年
- PC/JVISION : 販売価格 150 万円
- PC/NIKE-Works : 販売価格 300 万円

粘弾性材料における応力-ひずみ関係は、必ずしも Maxwell モデルや Voigt モデルのように現在の応力とひずみにのみ依存するわけではなく、それまでの履歴に依存する場合があります。このような材料の構成則は履歴積分の形で表現することができます。

$$\sigma(t) = \int_0^t G(t-\tau) \frac{d\epsilon(\tau)}{d\tau} d\tau \quad \dots (4-3)$$

ここで、 G は応力緩和関数と呼ばれ、単位ひずみにおける応力の応答を表しています。応力緩和関数は指数関数的に減衰する性質を基本としていることより、Prony 級数による展開が可能となります。

$$G(t) = G_0 + \sum G_n \exp(-t/\lambda_n) \quad \dots (4-4)$$

ここで G_n は適当な緩和時間 λ_n に対するせん断弾性係数を表しており、指数関数の特徴を踏まえて、応力緩和関数の実測値より決定できます。

また、多くの粘弾性材料は温度変化に対して非常に敏感に変化するため、温度変化を有する解析では材料の温度依存性を無視することができません。例えば、多くのポリマーは一定温度の下で線形粘弾性構成則の適用が可能です。その特性を表す関数は対数時間目盛に沿って、温度変化に対して平行に移動する特徴を持っています。このような材料を熱レオロジー的に単純な材料と言います。

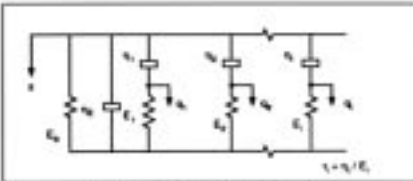


Fig. 4-10 一般化 Maxwell モデル

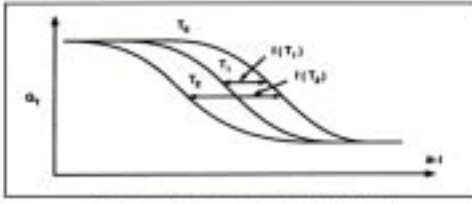


Fig. 4-11 熱レオロジー的に単純な材料

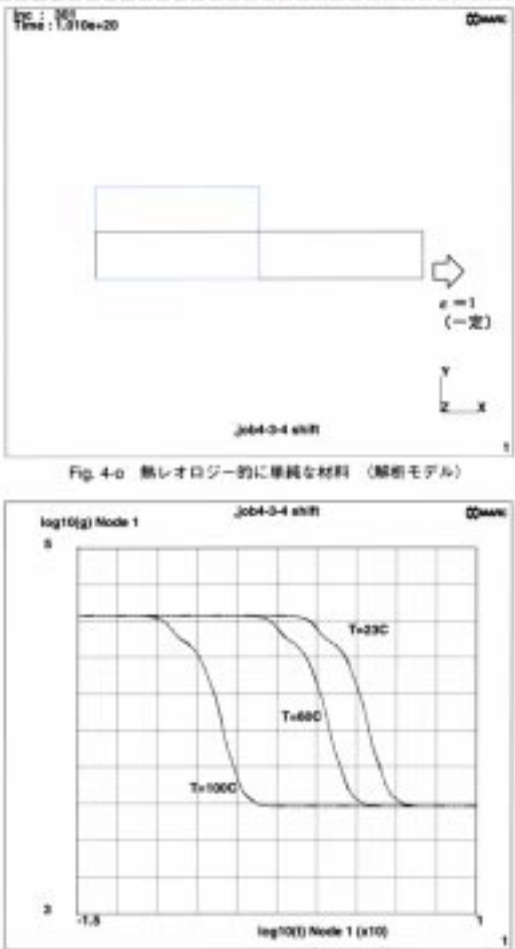


Fig. 4-p 熱レオロジー的に単純な材料（応力緩和係数の履歴）

メカニカル・デザイン作成 セミナーテキスト

<p>セミナー - テキスト 初級編 約 200 ページ 定価 20,000 円</p>	<ol style="list-style-type: none"> 各種要素の使用法 はりの曲げを例に取り、同一の問題を各種の要素で解析しました。 ・トラス要素 ・ソリッド要素（低次） ・ビーム要素 ・ソリッド要素（高次） ・シェル要素 解析機能の応用 解析上、有用な代表的機能について使用法をまとめました。 ・対称性のモデル化 ・サブルーチンの使用 ・弾塑性解析の基礎 ・アダプティブ・メッシュ ・荷重や拘束条件の履歴の入力 熱伝導・熱応力解析 熱伝導と熱応力の基礎的な例題です。 ・定常熱伝導・熱衝撃問題 ・定常熱応力
<p>セミナー テキスト 中級編 約 200 ページ 定価 20,000 円</p>	<ol style="list-style-type: none"> ユーザ・サブルーチンの利用 ユーザ・サブルーチンについて基礎および応用的使用法をまとめました。 ・一般的使用法 ・ユーザ定義の外部ファイル出力 ・時間変数の使用 ・複数サブルーチン間のデータ授受 ・ユーザ定義のポスト出力（亀裂進展の解析） 接触解析 接触のモデル化として Gap と CONTACT の使用法をまとめました。 ・定方向ギャップ要素 ・定距離ギャップ要素 ・円筒の焼ばめ問題 ・CONTACT の使用法（一般的使用法）（リゾーニング） 動的解析 固有値および時刻歴応答の解析です。 ・片持梁の動的応答解析・棒の弾性衝突解析（ギャップ要素）（CONTACT） 非弾性材料モデル 弾塑性およびクリープの例題をまとめました。 ・弾塑性解析 ・熱弾塑性クリープ解析

[5 章] 要素の種類

有限要素法では解析対象を幾つかの有限要素の集合体として表現しますが、解析者は、問題の種類に応じて種々の要素のタイプの中から適切なものを選択して使用することになります。

この章では、MARC プログラムで用意されている 100 以上の要素の中から、以下に示す代表的な要素に着目し、その性質についてまとめています。


軸対称シェル要素 3次元トラス要素 接触摩擦要素 3次元薄肉閉断面はり要素 2次要素	4辺形平面応力要素 4辺形軸対称要素 3次元弾性はり要素 3次元薄肉閉断面はり要素 低減積分要素	立体要素 4辺形平面ひずみ要素 4辺形厚肉線形シェル要素 熱伝導要素
--	--	---

[6 章] 境界条件

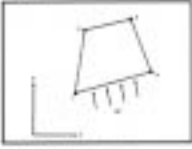
この章では、MARC プログラムで用意されている特殊な境界条件について説明すると共に、その使用例について説明します。

5. 要素の種類


5.1 軸対称シェル要素 (#1)
 回転シェル構造物の2次元解析を行う際に用います。



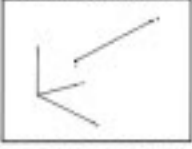
5.2 4辺形平面応力要素 (#3)
 x-y平面に垂直なz方向の応力が0となる平面応力状態の2次元解析に用います。平板状の薄板構造物のような場合が対象となります。



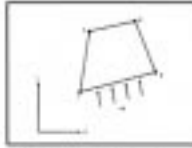
5.3 立体要素 (#7)
 3次元形状を正確に表現できる要素ですが、要素数の増加と共に解析時間が長大となるため使用には注意が必要です。



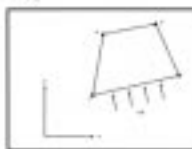
5.4 3次元トラス要素 (#9)
 変位の自由度のみをもつ直線要素です。



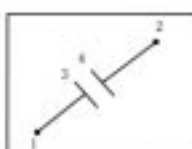
5.5 4辺形軸対称要素 (#10)
 回転ソリッド構造物の2次元解析を行う際に用います。



5.6 4辺形平面ひずみ要素 (#11)
 x-y平面に垂直なz方向のひずみが0となる平面ひずみ状態の2次元解析に用います。異尺厚材の断面のような場合が対象となります。



5.7 接触/摩擦要素 (#12)
 2節点間に接触および摩擦による結合条件を定めるためのものです。ラグランジュの束定要素を用いた構成条件の形で処理が行われます。



6. 境界条件

円孔を有する薄板に引張り荷重を負荷する場合を考えます。一般に解析する部分が小さいほど、計算時間は少なくて済みます。ここでは、解析対象の対称性より1/4部分について行えば良いことがわかります。

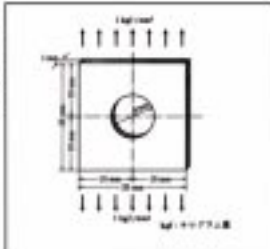


Fig. 6-1 円孔を有する薄板

この時、境界条件は対称条件として、下面節点をy方向に、左面節点をx方向に拘束する必要があります。

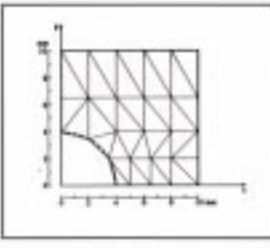


Fig. 6-2 解析対象

また、ここで1/2モデルについて考えます。この場合、x方向の変位が決まらなくなってしまいます。つまり、x方向に全ての部分が同一に変位しても別に応力は生じず、剛体変位となります。このような剛体変位を許せば変位が決まらないために計算できなくなります。このように、対象とする部位及び境界条件の設定は解析結果に非常に影響してきます。

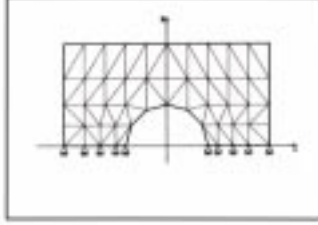


Fig. 6-3 剛体変位を許す解析対象

Mech D & A News 解析データ申込書

ふりがな お名前			
貴社名・御所属			
御住所	〒		
TEL・FAX	TEL	FAX	
フロッピーディスクの種類 (をつけて下さい。)	・SUN フォーマット	・DOS/V	・不要(資料のみ)
通信欄	注：納品書兼請求書は弊社様式で商品と共に送付致します。 代金の振込手数料はお客様の負担とさせていただきます。		

御希望の項目に○をつけ、金額を記入して下さい。尚、()内の価格はフロッピーディスクを含まない資料だけの金額です。・@・@

最新刊		
	1 .MARC ユーザ・サブルーチンの応用的使用法 (vol.99-1) , テキスト約 300 頁	¥ 10,000 (¥ 8,000)
	2 .初めての非線形構造解析 (vol.99-2) , テキスト約 100	¥ 10,000 (¥ 8,000)
	以下既刊	
1	自動振動の解析 (vol. 95-1.1)	ブレーキを例にとり、クーロン摩擦による自動振動の発生と対策を、速度依存の外力を定義することによって解析しました。 ¥ 5,000 (¥ 3,000)
2	接触による応力集中 (vol. 95-1.2)	曲面同士の接触による応力集中 (Hertz's 応力) の理論解を、接触解析の諸機能 (Gap, CONTACT) を用いて扱った例題です。 ¥ 5,000 (¥ 3,000)
3	凝固プロセスの解析 (vol. 95-2.1)	氷の生成を例にとり、相変化を伴う熱伝導と熱応力を解析した例題です。潜熱と凝固体積変化のモデル化がポイントです。 ¥ 5,000 (¥ 3,000)
4	大ひずみ粘弾性球の衝突解析 (vol. 95-2.2)	粘弾性球の落下衝突を解析した例題です。衝突速度によって反跳の挙動に差が生ずることを明らかにしました。 ¥ 20,000 (¥ 18,000)
5	非ニュートン流体の解析 (vol. 95-3.1)	円管流れの理論解を対象として、粘性流体の速度場を求めました。また、液滴の落下問題を応用例として解析した例題です。 ¥ 15,000 (¥ 13,000)
6	粘弾性解析の基礎モデル (vol. 95-3.2)	Maxwell と Voigt モデルによる粘弾性解析の基礎データです。微小ひずみだけでなく、大ひずみの問題を含みます。 ¥ 10,000 (¥ 8,000)
7	熱衝撃応力の厳密解 (vol. 95-4.1, vol. 95-4.2)	円盤の表面を急冷する問題を例にとり、非定常熱伝導と熱衝撃応力を求めました。理論解と一致する結果が得られました。 ¥ 10,000 (¥ 8,000)
8	ボルト締結の健全性評価 (vol. 96-1)	ボルトの締付力と外力のバランスをモデル化し、締結後の浮上りやへたりを扱った例題です。理論解と一致しました。 ¥ 10,000 (¥ 8,000)
9	ロール圧延の解析 (vol. 96-2)	MARC Contact 機能における摩擦解析の精度を向上させ、ロール接触面での速度および圧力の分布を求めた例題です。理論解と一致しました。 ¥ 20,000 (¥ 18,000)
10	表面張力の解析 (vol. 96-3.1)	水がストロ - の中を表面張力によって上昇する問題を解析し、理論解と一致することを確認しました。 ¥ 20,000 (¥ 18,000)
11	浮遊体の固有振動解析 (vol. 96-3.2)	飛行体のように境界条件を持たない条件下での固有値解析の手法を示す例題です。 ¥ 10,000 (¥ 8,000)
12	衝撃応答の解析 (vol. 96-4)	質点の玉突き衝突、落下による衝撃、及び梁の衝撃曲げの理論解と整合させた例題です。 ¥ 15,000 (¥ 13,000)
13	接触による応力の集中と減衰 (vol. 97-1)	無限の領域を表現するために、半無限要素を適用した例題です。ゴムの JIS 硬さ試験を取上げて検討しました。 ¥ 20,000 (¥ 18,000)
14	MARC ユーザ・サブルーチン 支援キット (vol. 97-2)	MARC プログラム本体から、COMMON 変数を用いて種々のデータを取り出すサブルーチンをキットとしてまとめました。 ¥ 50,000 (¥ 18,000)
15	弾塑性材料試験支援キット (vol. 97-3)	材料の引張試験データを、べき乗則により曲線近似するプログラムをキット化しました。歪速度依存性への応用を含みます。 ¥ 30,000 (¥ 18,000)
16	流体連成振動解析 (vol. 97-4)	流体によって物体に作用する力の考え方を取りまとめました。付加質量効果を考慮した固有値解析の例題を含みます。 ¥ 10,000 (¥ 8,000)
17	MARC K7 による流体解析 (vol. 98-1)	厳密解のある定常・非定常流れ、混合距離理論による乱流を扱った例題です。いずれも、理論解・実測値に一致します。 ¥ 20,000 (¥ 18,000)
18	2次元の線形補間・応力の 座標変換 (vol. 98-2)	FEM の支援ツールとして、2次元平面内のベクトルによる線形補間、また、2次元・3次元の座標変換を扱った例題です。 ¥ 10,000 (¥ 8,000)
19	陰解法と陽解法による 動的応答解析 (vol. 98-3)	MARC と LS-DYNA を例にとり、理論解や実測値のある例題を解析し、検証しました。 ¥ 10,000 (¥ 8,000)
20	I-DEAS による非線形構造 解析の支援 (vol. 98-4)	I-DEAS を用いて非線形構造解析の前処理に必要な手順を概説したものです。(テキスト全約 200 頁) ¥ 10,000 (¥ 8,000)

株式会社メカニカル・デザイン・アンド・アナリシス

〒 182-0024 東京都調布市布田 1-40-2-603

TEL 0424-82-1539 ・ FAX 0424-82-5106 <http://www.mech-da.co.jp>

小 計 _____ 円

消費税 (5 %) _____ 円

合 計 _____ 円