



## 第3章 曲げを受ける部材の応力

### ポイント：曲げを受ける部材内の応力分布を知る

#### 梁部材の応力とひずみ

本章では、骨組として最も簡単な単純梁を用いて、部材に加わる荷重が軸力のみの場合、曲げモーメントのみの場合、軸力と曲げモーメントが同時に生じる場合を例として、断面内の軸方向応力分布、あるいは断面力と応力の関係を理解する。ここでは、梁理論で最も重要な「平面保持」の仮定について説明する。

最初に基本的な梁断面内の応力とひずみについて学ぶ。次に、SPACEを用いて数値解析を実施し、理論と解析結果を比較・検討する。その過程で上記の関係を実感し、理解することになる。さらにSPACEのモデラー使用法について詳細に学ぶ。

### 3.1 はじめに

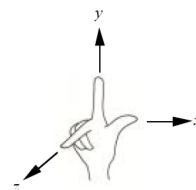
#### キーワード

応力と断面力の関係 断面特性（断面積、断面二次モーメント、断面係数）  
平面保持の仮定、断面内の軸方向応力の分布 SPACEのモデラー

### 3.2 座標系

梁理論を学ぶ前に、ここで使用する座標系について考えよう。この本では、平面的に配置された骨組について、応力や変位などを求めていくが、座標系は常に3次元を意識する必要がある。例えば、座標系によっては、回転角やモーメントの方向が逆になってしまい、混乱をきたしてしまう。コンピュータを用いて応力解析を行う場合、常に座標系を意識してモデル等を作らないと、曲げモーメントなどの符号が逆になってしまい、結果が理解できないということになりかねない。

ここでは、力学でよく使われる右手系と右ネジの法則を用いる。右手系は、親指が $x$ 軸、人差し指が $y$ 軸、中指が $z$ 軸とすると、各々、その指が示す方向が座標系の正方向となる。また、右ネジの法則とは、回転の正負の方向を決める法則であり、 $x-y$ 面で、正の回転方向は、 $z$ 軸の正方向に向かって右手でネジを回転しやすい方向となる。本章では、 $x-y$ 面を用いて梁理論を説明するが、その座標系として図3-1(a)に示すように、 $y$ 軸の正方向が下の場合と上の場合の両座標系を用いる。もちろん、両座標系とも右手系であるため、 $z$ 軸の正方向は、全く逆とな



り、図3-1(a)aでは本の裏側であり、同図bでは読者の方向となる。従って、正の回転方向は、(a)では時計回りであり、(b)では反時計回りが正となる。また、図3-1(b)には、ここで使用される断面力の正負を表す。

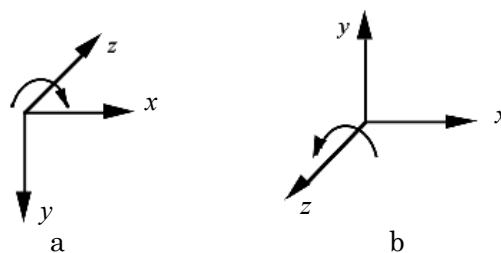


図 3-1(a) 梁内の座標系

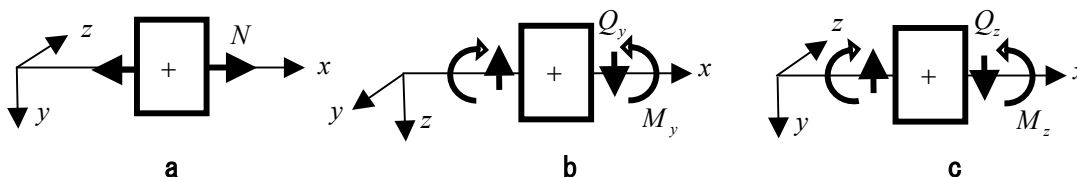


図 3-1(b) 梁内の断面力の座標系

梁に力が加わると、その梁は形を変える。この形の変化を変形と呼び単位長さ当たりの変位をひずみと呼ぶ。ここでは、図3-2 に示す軸方向ひずみについて考えよう。軸方向ひずみ  $\epsilon_x$  は、軸方向の力を受けて、梁が伸びたり縮んだりする場合に、また、梁の横方向から力を受け、材が曲がる場合にも生じる。

既に、第2章で軸方向のひずみについて学習した。ここで再度、簡単に復習してみよう。軸方向の単位長さについての変形量を、ひずみと呼ぶ。例えば、図3-2に示すように長さ  $l$  の棒が引っ張られて  $\Delta l$  だけ伸びたとすると、ひずみは次式で与えられる。

$$\epsilon_x = \frac{(l + \Delta l) - l}{l} = \frac{\Delta l}{l} \quad \dots\dots(3.1)$$

圧縮される場合でも、引張と同様に求められるが、一般的に、引張ひずみは正で、また、圧縮ひずみは負で表す。この軸方向ひずみは、式(3.1)からも分かるように単位を持たない無次元量である。

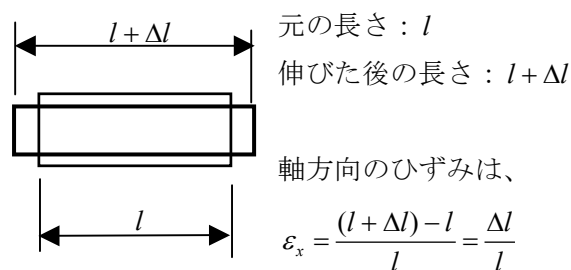


図 3-2 軸方向ひずみ

3.3 梁の軸方向応力  
と軸方向ひずみ  
3.3.1 軸方向ひずみ

次に、梁断面内のひずみの分布状態について考えてみよう。もちろん、梁内で考慮するひずみは、軸方向ひずみだけである。座標系は、図3-1(a)の図aに示すように、y 軸の正方向を下にとった右手系である。梁の長

3.3.2 断面内のひずみ分布

手方向は  $x$  軸方向にあるものとし、これをスパン方向と呼ぶ。同じく、 $z$  軸方向を梁幅方向と呼び、 $y$  軸方向を梁せい方向と呼ぶ。さらに、ここでは  $y$  軸と  $z$  軸の原点を単に断面の中心とするが、この中心位置、つまり図芯位置の決定法については後節で説明しよう。

**例題 3-1** 次に示す棒材のひずみを求めよ。

100cm の棒材が引張力を受けて、1mm 伸びた。このとき棒材に生じるひずみはいくらか。

ひずみは式(3.1)より、

$$\epsilon_x = \frac{\Delta l}{l} = \frac{100.1 - 100.0}{100.0} = 0.001 \quad \dots\dots(3.2)$$

で与えられる。

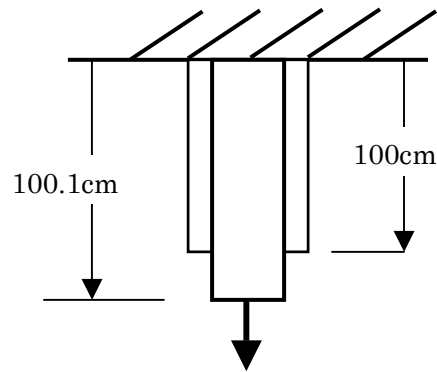
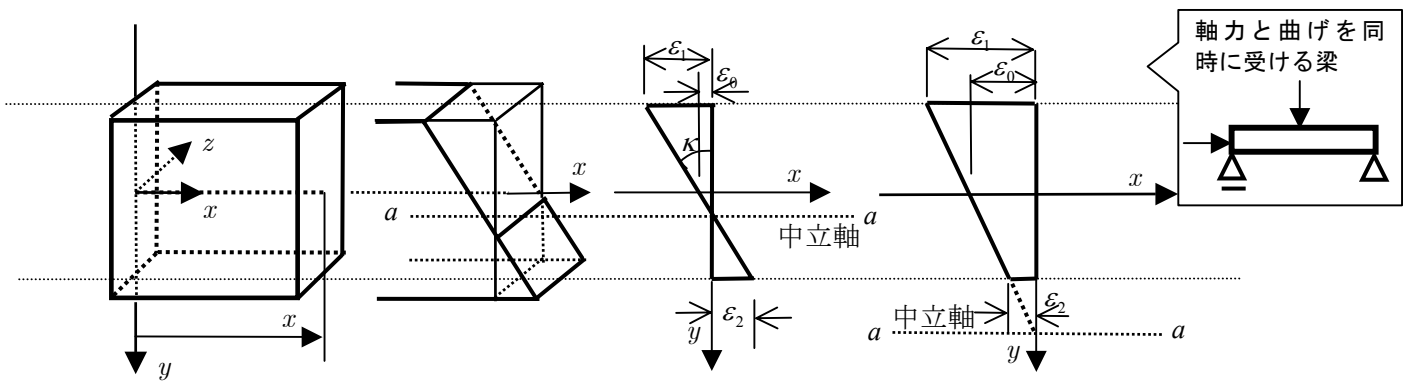


図 3-3 引張力による断面内のひずみ



(a) 梁内部のひずみ分布

(b) 中立軸が断面の外になる場合のひずみ分布

図 3-4 軸力と曲げを同時に受ける梁断面内のひずみ

次に、軸力と曲げを同時に受ける部材の断面内に生じるひずみを考えてみよう。ここでは、梁理論でもっと重要な仮定である「平面保持」を用いる。この平面保持を利用すると、断面の中心を貫く中心線の変形状態によって、断面全体に分布する応力やひずみを計算することができる。まず、部材が曲げ変形をしていない状態で、図3-4に示す原点から任意の位置  $x$  で、この軸線に垂直となる平面を考える。部材が軸力と曲げを受け、変形すると、この断面内に生じるひずみの分布は、平面保持の仮定より、次式のように断面内の  $y$  軸に関する一次式で表すことができる。建築で用いる梁や柱では、断面の大きさに比較して、部材の長さが比較

的長いため、この仮定は妥当なものとなっている。

$$\varepsilon_x = \varepsilon_0 + \kappa y \quad \dots\dots(3.3)$$

上のひずみで、 $\varepsilon_0$ と $\kappa y$ は軸ひずみ及び曲げひずみと呼ばれ、その具体的な表現はひずみと変位との関係から求められる。

一次式で仮定したひずみ分布の状態をさらに検討しよう。ひずみ分布は、梁幅方向には、常に同じ値となり、定数 $\varepsilon_0$ は断面内に分布しているひずみの平均値を表す。図3-4(a)で示すようなひずみ分布は、断面の両端で、圧縮ひずみと引張ひずみに分かれています。そのため、断面内にひずみの生じない位置が存在する。この点を $x$ 方向に連ねた線 $a-a$ を中立軸と呼ぶ。この中立軸は、図3-4(b)のように平均的なひずみ $\varepsilon_0$ が大きいとき、断面の外になる場合もある。また、断面内に生じるひずみの最大値は、ひずみ分布を一次式で仮定していることから、断面の縁部分に生じることが分かる。

**例題3-2** 次に示す断面内のひずみ分布から、式(3.3)の係数 $\varepsilon_0$ と $\kappa$ を求めよ。

ひずみの分布 $\varepsilon(y)$ は、

$$\varepsilon(y) = \varepsilon_0 + \kappa y \quad \dots\dots(3.4)$$

であるから、断面縁部分の値を代入すると、

$$\varepsilon\left(-\frac{D}{2}\right) = \varepsilon_0 - \kappa \frac{D}{2} = \varepsilon_1; \quad \varepsilon\left(\frac{D}{2}\right) = \varepsilon_0 + \kappa \frac{D}{2} = \varepsilon_2 \quad \dots\dots(3.5)$$

従って、各係数は、次式となる。

$$\varepsilon_0 = \frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{2}; \quad \kappa = \frac{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}{D} \quad \dots\dots(3.6)$$

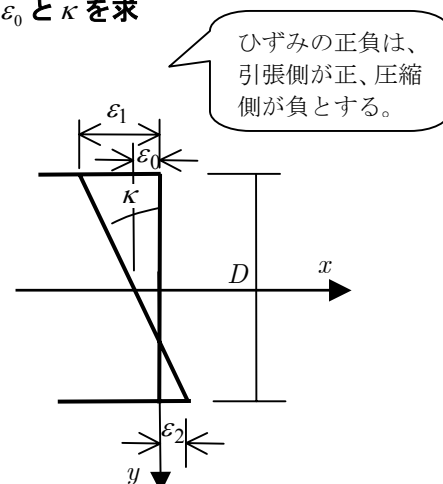


図 3-5 断面内のひずみ分布

梁内に生じる応力は、ひずみに関連して生じる。この応力とひずみの関係は、第2章で学んだように、ひずみが弾性範囲であると、以下のように比例関係が成立する。

$$\sigma_x = E\varepsilon_x \quad \dots\dots(3.7)$$

ここで、 $\sigma_x, \varepsilon_x$ の下添え字は梁の軸方向である $x$ 軸方向を意味する。比例定数 $E$ は縦弾性係数(ヤング係数)と呼ばれ、材料によって異なる値

### 3.3.3 応力とひずみの関係

をとる。代表的な建築構造材料の弾性係数は第2章の式(2.4)に示されている。

3.3.4 断面力である  
軸力と曲げモーメント

次に、軸力と曲げを同時に受ける梁断面内の応力について考えてみよう。ひずみが比較的小さく、断面内に生じる最大応力が比例限界より小さい場合、断面内の応力は、図3-6に示すように、仮定したひずみにヤング係数をかけた分布状態となる。例えば、図3-6(a)は、梁の軸方向に引張力が加わった場合であり、同図(b)は曲げモーメントが加わった場合である。

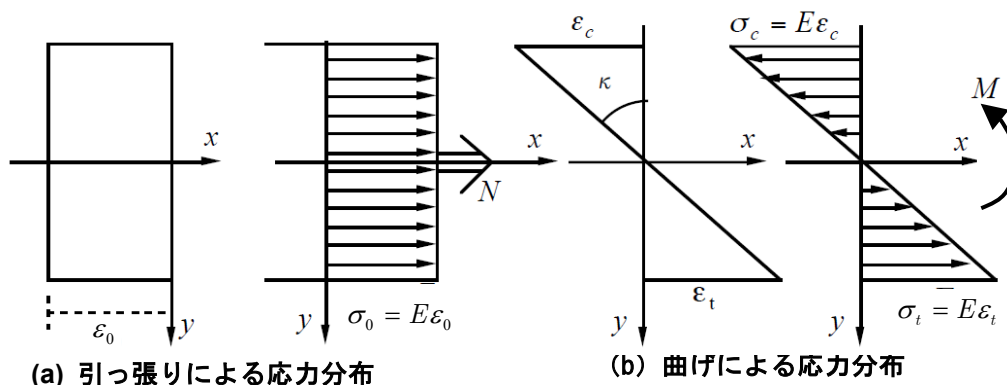


図 3-6 断面内のひずみ分布と応力分布

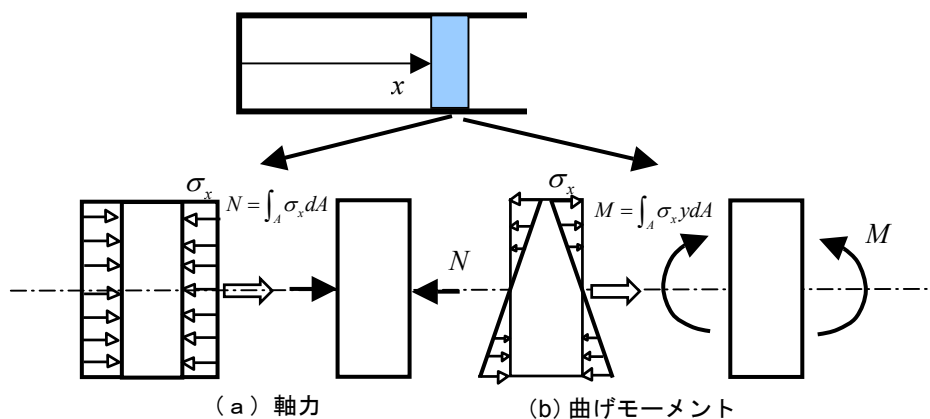


図 3-7 応力分布と断面力の定義

さらに、断面内の応力について考えよう。梁全体の応力状態を表す場合、常に、この応力の分布状態を用いていたのでは、面倒で仕方がない。そこで、この応力状態をもっと上手に言い表す方法を考える必要がある。まず、断面全体について、応力の積分値とモーメントを用いて代表させるというアイディアに思いつく。これが断面力という考え方であり、具体的には、次式で示すように、軸力  $N$  と曲げモーメント  $M$  を定義して

用いる。

$$N = \int_A \sigma_x dA \quad \dots\dots(3.8)$$

$$M = \int_A \sigma_x y dA \quad \dots\dots(3.9)$$

図3-7に示すように、軸力  $N$  は軸方向応力  $\sigma_x$  を断面内全てについて寄せ集めた値、つまり積分値である。また、曲げモーメント  $M$  は軸方向応力  $\sigma_x$  と図芯からの距離  $y$  をかけたモーメントを断面内全てについて集めた値である。

次に、上で定義した断面力を具体的に求める。ここでは、ひずみ分布は平面保持の仮定による式(3.3)を用い、また材は弾性体とし、応力とひずみの関係は式(3.7)を用いる。まず、軸力  $N$  から求めることにする。軸力は、式(3.8)に(3.3)と(3.7)式を代入し、 $\varepsilon_0$  と  $\kappa$  が定数であることから

$$N = \int_A \sigma_x dA = E(\varepsilon_0 \int_A dA + \kappa \int_A y dA) \quad \dots\dots(3.10)$$

となる。上式右辺の中の積分は、部材の断面が決まれば、計算することができる。ここで、上の積分を次に示す記号で表す。

$$A = \int_A dA \quad \dots\dots(3.11)$$

$$S_z = \int_A y dA \quad \dots\dots(3.12)$$

上式(3.11)の積分は断面積を意味することから、記号  $A$  は部材の断面積を示す。また、式(3.12)の積分は断面に関する一次のモーメントを表すことから、記号  $S_z$  を  $z$  軸に関する断面一次モーメントと呼ぶ。

この断面一次モーメントは  $z$  軸を中心とするモーメントであることから、 $y$  軸の原点を移動することによって、モーメントがゼロとなる位置が存在するはずである。この位置を  $y$  軸の原点とすれば、断面一次モーメント  $S_z$  はゼロとなる。同様に、 $y$  軸に関する断面一次モーメント  $S_y$  も、断面内の座標軸を移動することによって、ゼロにすることができる。両者の断面一次モーメントがゼロとなる位置を断面の図芯位置と呼び、今後、この位置を断面内の座標原点とする。座標原点を断面の中心位置に設定するといったが、実は、座標原点はこの図芯位置を指す。具体的な図芯位置の求め方は次節で説明しよう。

図芯位置を原点にとると軸力を表す式(3.10)の第2項は当然ゼロとなり、軸力は次式となる。

$$N = E\varepsilon_0 A = \sigma_0 A \quad \dots\dots(3.13)$$

ただし、応力は弾性域であり、また、断面は一様な材料であることを仮定している。従って、次式が成立し、上式はこれを用いている。

$$\sigma_0 = E\varepsilon_0 \quad \dots\dots(3.14)$$

次に、曲げモーメント  $M$  を求めてみよう。曲げモーメントの定義式(3.9)に応力とひずみの関係、並びに、ひずみの式(3.3)を代入すると、曲げモーメントは次式で与えられる。

$$M = \int_A \sigma_x y dA = E(\varepsilon_0 \int_A y dA + \kappa \int_A y^2 dA) \quad \dots\dots(3.15)$$

軸力を計算したときと同様、上式中に2種類の積分が出現する。この中で、次式で示す  $I_z$  は断面に関する二次のモーメントを表すことから断面二次モーメントと呼ばれる。

$$I_z = \int_A y^2 dA \quad \dots\dots(3.16)$$

また、式(3.15)の中には、軸力の場合と同様に、断面一次モーメントが含まれるが、断面内の座標として図芯位置を原点にとることにより、この断面一次モーメントはゼロとなる。もちろん、式(3.16)で示される断面二次モーメントも図芯位置を原点にとって積分する。従って、断面一次モーメントがゼロとなることから、曲げモーメントは、次式で与えられる。

$$M = EI_z \kappa \quad \dots\dots(3.17)$$

このように、軸力は仮定した軸方向ひずみ  $\varepsilon_0$  によって、また、曲げモーメントは曲げひずみの係数  $\kappa$  によって生じることが理解できる。

曲げによって生じる軸方向応力  $\sigma_b$  は、応力とひずみの関係式(3.7)と曲げモーメントが軸方向ひずみ  $\varepsilon_0$  に無関係であることを考慮すると、

$$\sigma_b = E\varepsilon_x = E\kappa y \quad \dots\dots(3.18)$$

で与えられる。従って、軸力によって生じる応力  $\sigma_0$  と曲げモーメントによって生じる応力  $\sigma_b$  は、各々、式(3.13)と(3.17)、式(3.18)より次のように得られる。

$$\sigma_0 = \frac{N}{A} \quad \dots\dots(3.19)$$

$$\sigma_b = \frac{M}{I_z} y \quad \dots\dots(3.20)$$

### 3.3.5 軸力と曲げモーメントによる応力

断面内の応力状態は、軸力と曲げモーメントが同時に加わる場合、それぞれの応力状態を重ね合わせることによって以下のように得られる。

$$\sigma_x = \sigma_0 + \sigma_b = \frac{N}{A} + \frac{M}{I_z}y \quad \dots\dots(3.21)$$

上式は、仮定したひずみと同じように、 $y$ に関する一次式となっている。そのため、圧縮及び引張の最大応力が生じる位置は、図芯より最も遠い梁断面の縁となることが分かる。この応力を縁応力と呼び、以下の式で得られる。

$$\sigma_t = \frac{N}{A} + \frac{M}{Z_t}; \quad \sigma_c = \frac{N}{A} - \frac{M}{Z_c} \quad \dots\dots(3.22)$$

ここで、 $\sigma_t$ を下端縁応力(引張側縁応力)、 $\sigma_c$ を上端縁応力(圧縮側縁応力)と呼ぶ。また、 $Z_t$ 、及 $Z_c$ は各々下端と上端に関する断面係数と呼び、以下の式で与えられる。

$$Z_t = \frac{I_z}{y_t}; \quad Z_c = \frac{I_z}{y_c} \quad \dots\dots(3.23)$$

上式で、 $y_t$ と $y_c$ は断面内で図芯位置から、各々、引張応力が生じる断面の縁までの距離と圧縮が生じる断面の縁までの距離である。無論、圧縮側と引張側の断面形状が図芯に対し、対称であると $Z_t$ と $Z_c$ は同じ値となる。

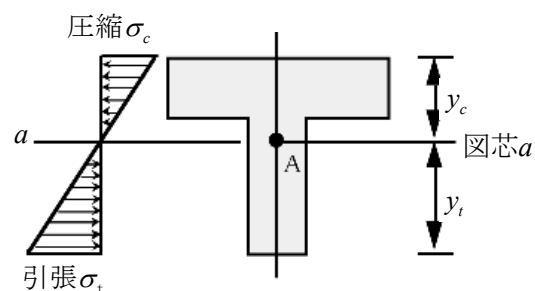


図3-8 T型梁の応力

3.4 課題

本節では、SPACEにより単純梁の応力解析を行い、部材内部に発生する応力状態、ひずみの分布を検証する共に、SPACEの使用方法を学ぶ。

本節で使用する解析モデルは、下図に示す単純梁である。荷重は、次の3形式とし、これらのモデルには、軸力、曲げモーメント、軸力と曲げモーメントが各々断面内に生じる。

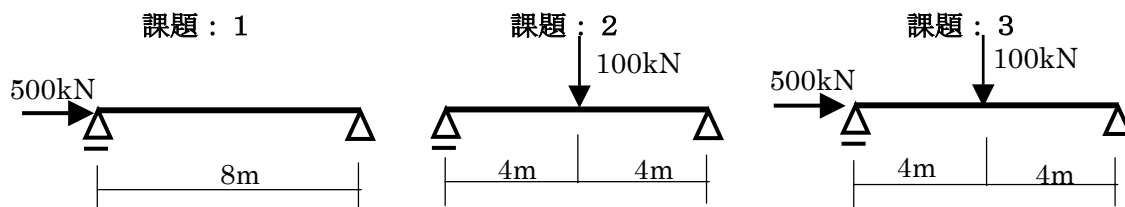


図3-9a 解析モデル

部材の断面は次に示す角型鋼管とし、この断面の断面特性は、式(3.16)、(3.23)より次のように計算される。



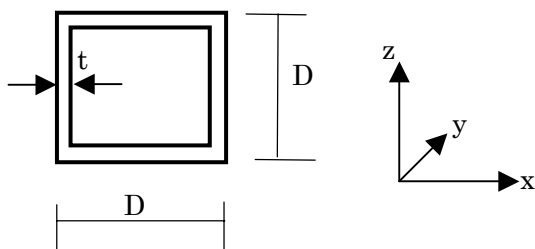


図 3-9b 部材断面と SPACE 使用座標系

角型鋼管の断面特性を以下に示す

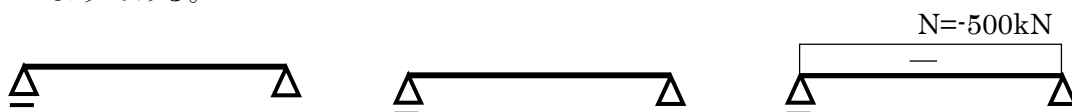
$$D = 40\text{cm}; \quad t = 1.2\text{cm}$$

$$A = 186.24\text{cm}^2$$

$$I_y = 0.4677 \times 10^5 \text{ cm}^4$$

$$Z = Z_c = Z_t = \frac{I_z}{\frac{D}{2}} = \frac{0.4677 \times 10^5}{20} = 2339\text{cm}^3$$

各解析モデルに対する曲げモーメント図、せん断力図、軸力図は以下のようである。

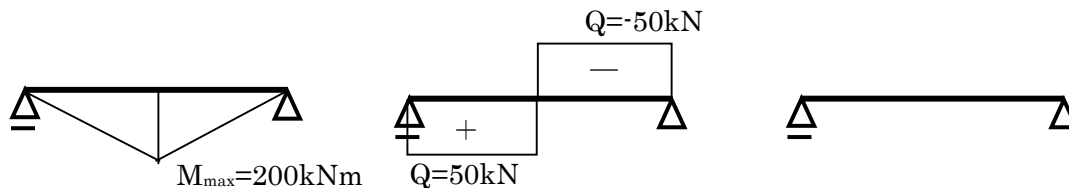


曲げモーメント図

せん断力図

軸力図

課題：1

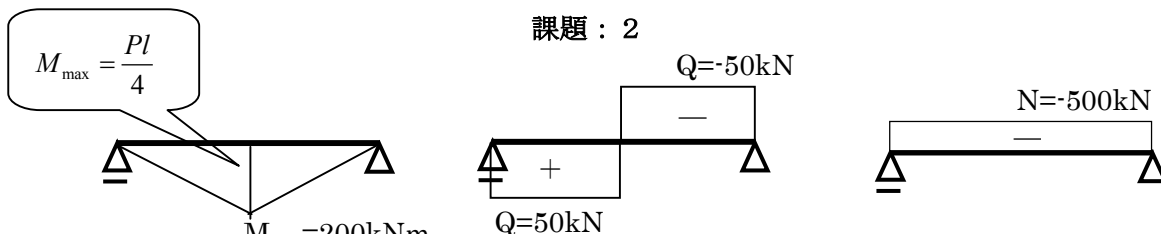


曲げモーメント図

せん断力図

軸力図

課題：2



曲げモーメント図

せん断力図

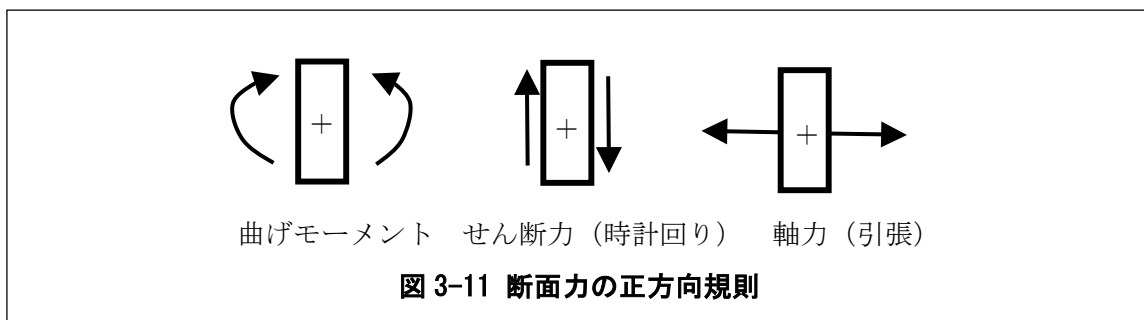
軸力図

課題：3

SPACE では、平面問題を X-Z 面を使用してモデルを作成する場合が多い。従って、断面二次モーメントなどの下添え字は y 軸を使用し、 $I_y$  と記す。課題で角型鋼管を使用しているが、この段階では、この断面の断面特性は計算できない。ここでは、この値を使用して計算を進められたい。後の章で計算結果を確認されたい。

図 3-10 解析モデルの曲げモーメント図、せん断力図、軸力図

断面力の正負及び断面力図の描き方は、次のルールに従う。



曲げモーメント    せん断力（時計回り）    軸力（引張）

図 3-11 断面力の正方向規則

曲げモーメント：曲げモーメントは、断面内の軸方向応力が引張となっている側に描く。

せん断力： 時計回りを正とする。

軸力： 正は引張力、負は圧縮力とする。

各解析モデルについて、断面内の最大軸方向応力は式(3.22)を用いると次のように計算される。

$\sigma_{\max} = \frac{N}{A} = \frac{-500}{186.24} = -2.68kN/cm^2$	課題：1
$\sigma_{\max} = \frac{M_z}{Z} = \frac{20000}{2339} = 8.55kN/cm^2$	課題：2
$\sigma_{c\_max} = \frac{N}{A} - \frac{M_z}{Z} = \frac{-500}{186.24} - \frac{20000}{2339} = -11.24kN/cm^2$	(断面上端)
$\sigma_{t\_max} = \frac{N}{A} + \frac{M_z}{Z} = \frac{-500}{186.24} + \frac{20000}{2339} = 5.87kN/cm^2$	(断面下端)
	課題：3

SPACE のモデラーを用いて、上記の解析モデルをコンピュータ内に作成しよう。まず、SPACE を起動する。このSPACEの「ファイル」→「新規作成」メニューを用いて、「演習解析モデル」-「第3章」フォルダ内の「課題」フォルダ中にコントロールファイルを作成する。コントロールファイルの名前を「単純梁.ct1」としよう。

### 3.5 モデラーで解析モデルを作成する



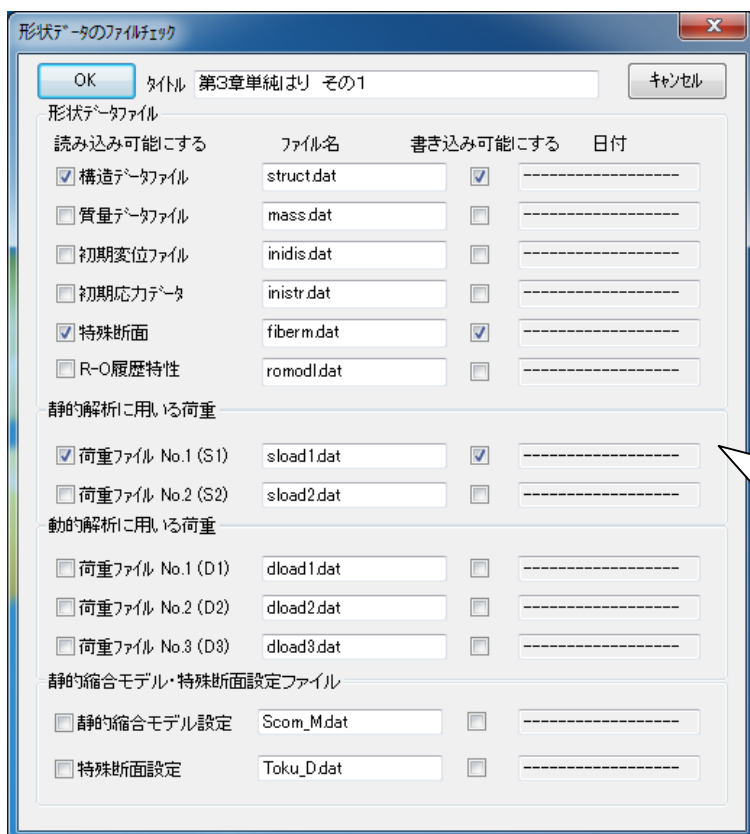
図 3-12 SPACE のメニューとツールチップ

SPACE を用いて応力解析を行うためには、多くの手続きが必要となる。これらを学ぶには多少時間がかかると思うが、あきらめずに粘り強く勉

\*1

強して欲しい。この章では、分かり易くその手続きを述べるつもりであるが、詳細を知りたい場合はモデラーの利用マニュアル、ソルバーやプレゼンターのユーザーマニュアルを参照されたい。

まず、メニュー「I/O データ」→「形状ファイル」から次に示すダイアログを表示させ、使用するファイルにチェックマークと、タイトルを設定する。ここでは、ファイル名として規定値をそのまま使用する。



解析モデルに関するファイル群の設定。この演習で必要となるファイルの名前と読み・書き可能なチェックマークを設定する。  
特に注意すべき点は、荷重ファイルの「読み込みを可能にする」をチェックすると、この荷重ファイルが自動的に読み込まれ、解析が実行されることである。

図 3-13 形状データのファイルチェックダイアログ

各種のコントロールファイルに、読み込みと書き込みを可能とするチェックマークを設定する。次に、メニューを用いて静的解析コントロールファイルを表示させ、この演習では、次のようにチェックマークを記入し、「OK」ボタンを押す。



ここでは、静的解析を制御する3つのファイルについて、そのファイル名と読み込み・書き込み状態を設定する。  
静的解析コントロールファイルには静的解析を制御するパラメータが格納される。座屈コントロールファイルには座屈に関する制御パラメータが、また、静的解析条件の選択・出力コントロールファイルには、静的解析条件や解析結果の出力情報を制御するパラメータが各々格納される。

図 3-14 静的解析コントロールファイルのダイアログ

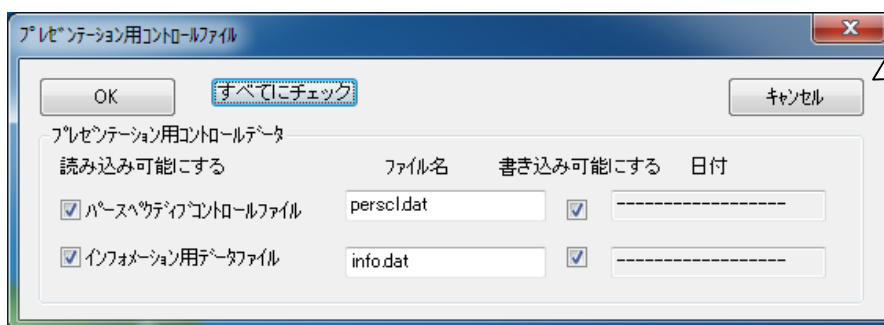
メニューを用いて図 3-15 に示すダイアログを表示させ、静的解析結果ファイルにも、同様にファイル名と読み込み・書き込み可能のチェックマークを設定する。ダイアログ上の「全てにチェック」ボタンを押して、現在使用しているファイルの全てにチェックマークを付けることも可能である。



このダイアログでは、静的解析結果を出力するファイルについて、その名前と読み・書き可能チェックマークを設定する。演習では、全ファイルについてチェックマークを記入し、名前は規定値のままとしよう。「全てにチェック」ボタンを利用してチェックマークを設定することもできる。

図 3-15 静的解析の結果ファイルダイアログ

次に、モデラーで使用するパースペクティブコントロールファイルとインフォメーション用データファイルを設定する。



パースペクティブコントロールファイルは、ソルバーやプレゼンターでも使用される。インフォメーション用データファイルはモデラーとレポーターで使用され、特に、インフォメーション用データファイルはモデラーによって、自動的にデータが作成されることになる。

図 3-16 プレゼンテーション用コントロールファイル

メニュー「I/O データ」→「3Dアニメーション用データ」を選択し、パースペクティブコントロールデータを設定する。ここでは、解析モデ

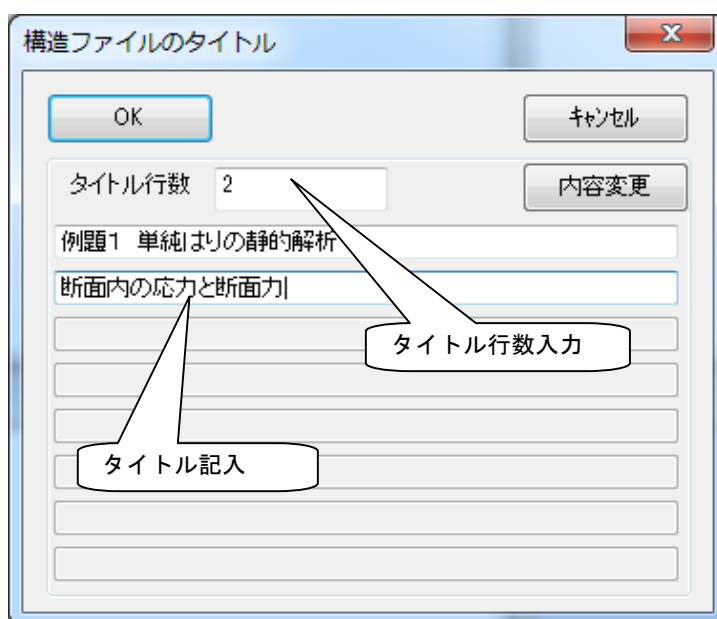
ルが、X-Z 平面に置かれているため、透視図の視点は y 軸の負方向とする。また、透視図原点は図形の中央に設定する。



このファイルでは、透視図の外形や視点位置、あるいは、変形の倍率、曲げモーメントの図形、矢印などの大きさを設定する。このファイルはモデラーを使用する場合は必ず必要となるので忘れずに設定しよう。

図 3-17 「パースペクティブコントロールデータ」ダイアログ

以上でファイル関連の設定を終えたので、次にモデラーを起動し、解析モデルを作成する。最初は、初期設定ウィザードが自動的にダイアログを表示させるので、これに従ってデータを入力すれば良い。入力仕様の詳細は、マニュアル「モデラー使用編」を参照されたい。



モデラーの起動は、SPACE のメニュー「モデラー」→「骨組モデル」→「新規作成・変更」を選択するか、もしくは、SPACE の左より 10 番目のツールチップ\*2 を押す。

1. タイトルを入力する。このタイトルは、構造データファイルの先頭に出力される。最初に、内容変更ボタンを押し、タイトル行数をセットする。タイトル設定後、「OK」ボタンを押し、次へ進む。

図 3-18 構造ファイルのタイトル

2. 解析構造種別を選択する。演習では、平面フレームを選ぶ。「次へ」ボタンを押し、次のダイアログへ進む。

解析モデル  
を選択

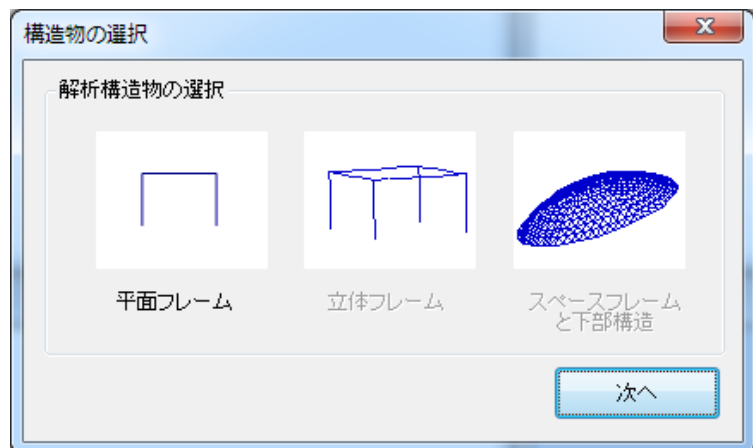
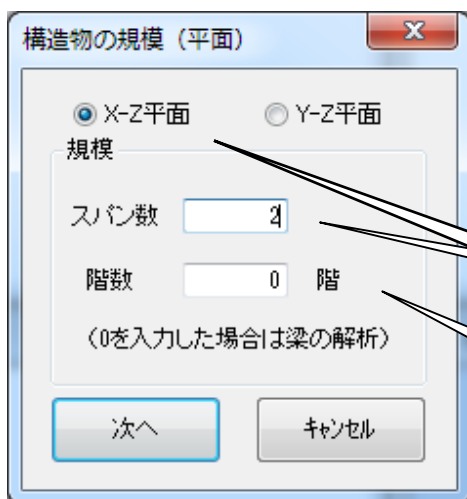


図 3-19 構造物の  
選択



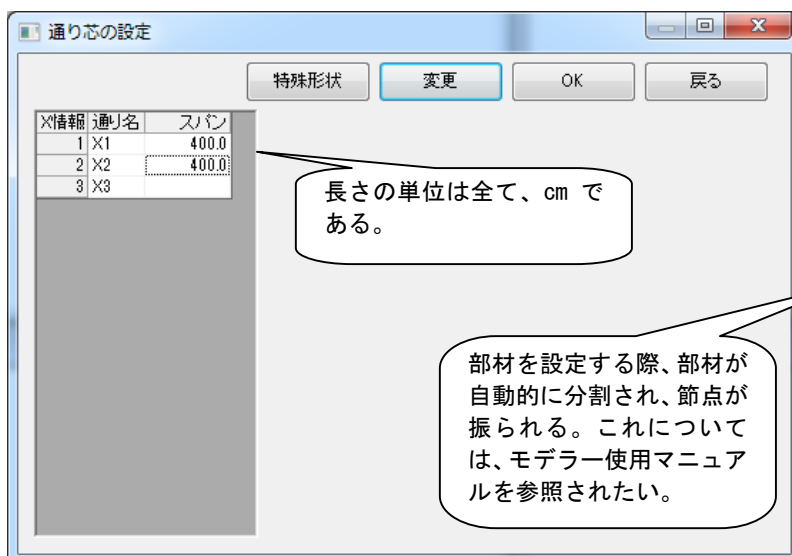
3. 構造の規模を設定する。平面フレームの場合、まずモデルが存在する平面を選択する。ここでは、x-z平面を選択。次に構造規模はスパン数と階数をセットする。ここでは、梁であるため、スパン数は2、階数は0をセットする。「次へ」ボタンを押し、次のダイアログに進む。

スパン数記入、この例題では  
2を設定する。

梁の場合は0  
をセット

理論では、x-y平面を用いたが、  
このテキストでは、全て x-z 平  
面を使用する。混乱しないよう  
に注意しよう。

図 3-20 構造物の規模



4. スパン長をセットする。ここでは、全スパンが8mであり、スパン数2としているため、各々4mをセットする。ただし、部材分割数として、3が設定されているため、解析モデルである単純梁は6部材に分割される。設定終了後、「OK」ボタンを押して次へ進む。

図 3-25 に示されるダイアログが表示される。ここで、ダイアログ右の「追加」ボタンを押すと次の使用材料の設定ダイアログが表示される。

図 3-21 通り芯の設定

5. 単純梁の断面を設定する。ここでは、鉄骨を選択し、要素モデルは、両端ファイバーとする。「次へ」ボタンを押して、次に進む。

主要な部材使用材料を選択。ここでは、鉄骨を選択する。

使用材料の設定

鉄骨 SS400  
 コンクリート Fc18  
 鉄筋(主筋) SD295A  
 鉄筋(副筋) SD295A  
 鉄筋(せん断補強筋) SD295A

木種 べいまつ  
 等級 特級  
 モデル 両端ファイバー

次へ キャンセル

図 3-22 使用材料の設定

6. 使用部材の断面を設定する。ここでは、角形鋼管を使用し、図に示す名称の断面を選択する。符号はG01とする。設定終了後、「OK」ボタンを押して次へ進む。

ここでは、DB(データベース)を用いて、断面性能を設定するか、内部で計算した値を用いるかを選択する。部材の変位などを理論と比較する場合は、内部計算を選択しなければならない。DBの値を用いると断面二次モーメントなどが数パーセント計算値と異なる場合がある。

次に、図 3-25 に示す要素設定ダイアログが表示され、ダイアログ右の「特殊断面作成」ボタンを押すと、図 3-24 に示す要素データ登録ダイアログが表示される。ここで、先に設定した断面を作成する。

設定する部材の符号を記入

断面形状を選択、例題では角型鋼管

断面を選択、例題では 400x400x12 の断面を選択する。

断面特性を DB か内部計算で設定するかを選択、例題では内部計算を使用する。

鉄骨の材料断面・設定

NO. 1 符号 G 01

鉄骨  
 使用部位選択  
 はり  柱  プレース

形状 角形鋼管  
 名称 □-400×400×12 r30

ビルドアップ断面 検索

断面性能  
 DB値を採用  
 内部計算値を採用

OK キャンセル

図 3-23 鉄骨の材料断面の設定

7. ファイバー用の特殊断面データを作成する。ここでは、先に設定した部材の断面用ファイバーデータ作成のためのパラメータを設定する。ただし、設定用パラメータは、部材断面用のデータベースから該当する断面を取り出し、規定値として表示されている。変更部分は、ファイバー用断面分割数程度であろう。ここでは、「せい分割」、「幅分割」共に 24 に変更する。設定終了後、「作成開始」ボタンを押し、実際の特断面用データを作成する。

これらのデータはシステムが管理するデータベースより取り出す。幅分割、せい分割共に 24 に変更する。

特殊断面作成

作成開始 キャンセル

特殊断面番号	要素数	形状番号	履歴番号	幅分割数	せい分割数	幅	せい	幅板厚	せい板厚	鉄筋総数	作成用番号
1	36	2		8	8	40.00	40.00	1.20	1.20		1

図 3-24 断面設定用のダイアログ

8. 両端ファイバーモデルの要素データが作成されたことを示す。要素モデル番号は 11 であり、特殊断面データ番号は 1 である。部材要素が設定されたことを確認した後、「OK」ボタンを押して次へ進む。

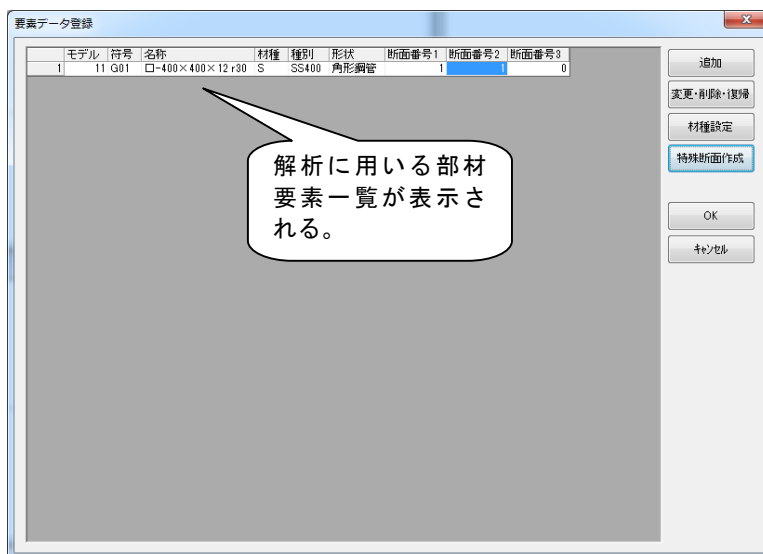


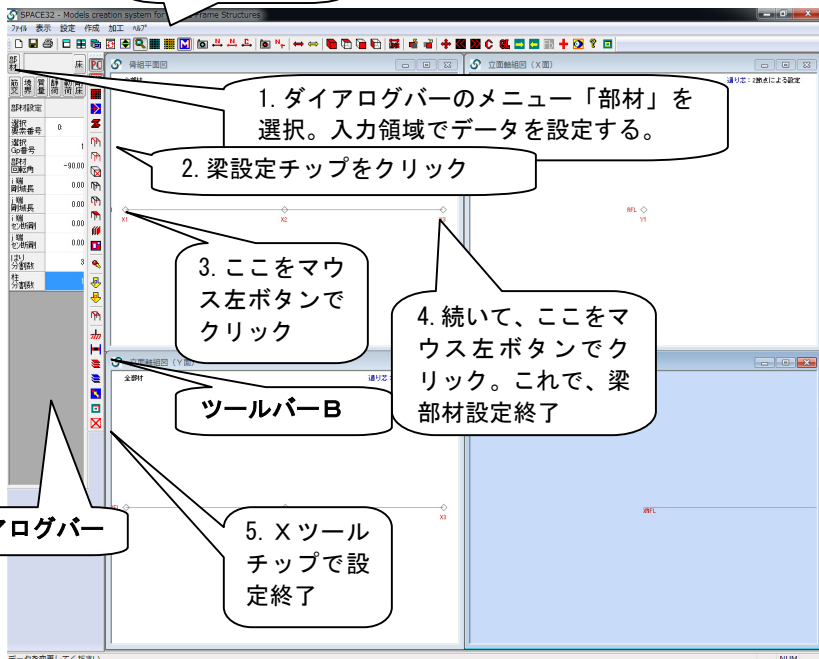
図 3-25 設定した部材要素一覧

以上の処理を全て終わると、初期設定が完了する。次は、解析モデルの形状と境界、荷重を、グラフィック画面を用いて、次の順序で CAD 入力する。詳しい操作方法については、「モデラー使用編」を参照されたい。

1. 梁部材の設定とデータ入力
2. 境界条件を設定する。
3. 荷重を設定する。
4. ファイルに出力する。

図 3-26 に示すモデラー画面について説明する。画面右側の 4 つのウインドウは、各々骨組平面図 (左上)、立面軸組図 (X 通り面 : 左下)、立面軸組図 (Y 通り面 : 右上)、骨組透視図 (右下) である。ここでは、既に設定した通り芯や構造物の規模などを利用して、構造物の外形を表す通り芯とその記号が表示されている。また、画面左はダイアログバーと言い、梁、柱、境界などを割り付ける際に使用する。

ツールバー A

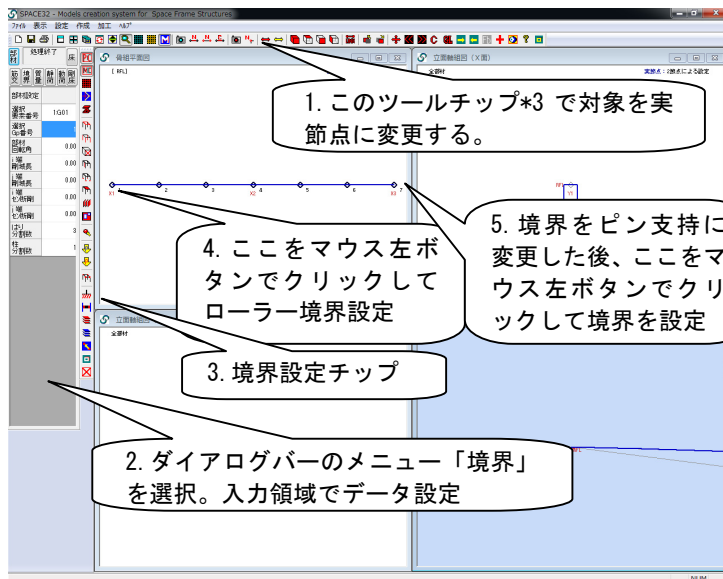


9. 平面図を用いて、梁を割り付ける。ダイアログバーのメニューで「部材」を選択し、梁の設定を行う。ここでは、要素を G01 とする。次に、平面図の全表示をツールバー A の図面前進ツールチップボタンを押して平面図を RF 表示とし、ツールバー B の梁設定チップを押す。マウスを平面図の通り芯位置 x1 でクリックし、次に、x2 でクリックすることで梁を平面図に割り付ける。梁の割付終了は、ツールバー B の X チップをクリックする。

\*3

図 3-26 部材の設定





10. 解析モデルに境界条件を設定する。解析モデルが単純梁であることから、x1の境界はx方向ローラー、x3の境界はピン支持とする。設定は平面図を用いて行う。平面図をクリックした後、ツールチップを押すことで対象節点を実節点に変更する。まず、ダイアログバーのメニューで「境界」を選択し、境界条件で、「3:X ローラー」を選択する。ツールバーBの境界設定チップを押し、マウスを平面図の通り芯位置 x1 でクリックして設定する。同様に、境界条件で、「2:ピン」を選択し、x3 位置でクリックする。これで、境界の設定が終了する。後は、ツールバーBのXチップをクリックして、境界条件の設定を終了する。

図 3-27 境界条件の設定

11. 静的荷重を設定する。演習では、2種類の荷重を使用するため、鉛直方向荷重をファイル No. 1 に、水平方向荷重はファイル No. 2 に設定する。ダイアログバーのメニューで「静荷」を選択し、荷重 No. 1 に鉛直荷重を設定する。次に、ツールバーBの静的荷重チップを押す。マウスを平面図の通り芯位置 x2 でクリックして設定する。同様に、荷重 No. 2 に水平荷重を設定し、x1 位置でクリックする。設定終了後、ツールバーBのXチップをクリックして、設定を終了する。

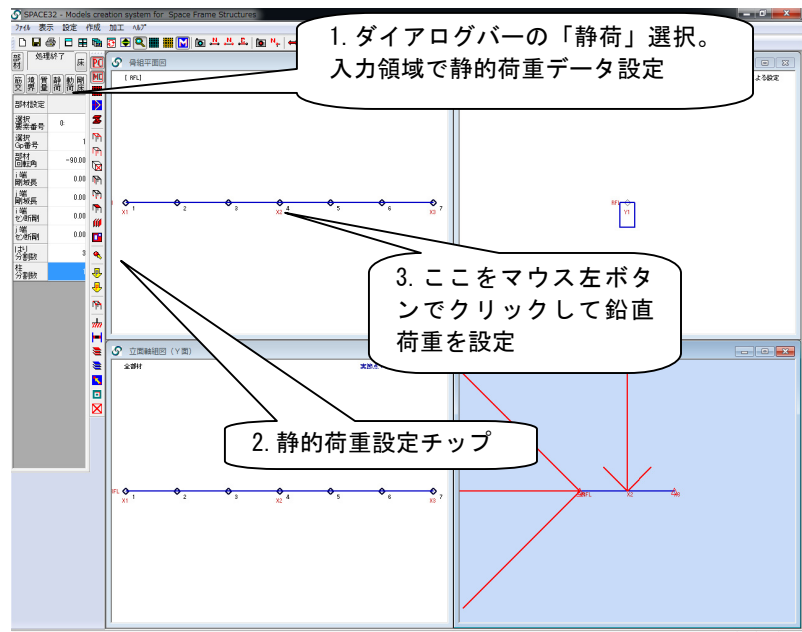


図 3-28 荷重データの設定

節点情報

座標	局所座標系	境界条件・剛床	静的荷重1	静的荷重2	動的荷重1	動的荷重2	動的荷重3	質量
節点番号	x座標	y座標	z座標	不整x座標	不整y座標	不整z座標		
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
2	133.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
3	266.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
4	400.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
5	533.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
6	666.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
7	800.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

OK  
キャンセル

12. 設定データが正確に行われたかどうか確認しよう。まず、平面図で、対象を「実節点」、「集団による設定」にツールチップ\*4 を用いて変更する。次に、「節点表示」チップ\*5 で節点を表示した後、節点設定ツールチップ\*6 を押し、マウス左ボタンを押しながらドラッグして梁の全節点を囲む。この操作によって、図 3-29 に示されるダイアログが表示される。ここで、節点座標、境界条件、荷重を確認する。

図 3-29a 節点座標

図 3-29b: 境界条件設定画面

座標	局所座標系	境界条件・剛床	静的荷重1	静的荷重2	動的荷重1	動的荷重2	動的荷重3	質量
節点番号	変位u(x)	変位v(y)	変位w(z)	回転θx	回転θy	回転θz	剛床番号	
1	0	-1	-1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0
7	-1	-1	-1	0	0	0	0	0

注釈: 節点の境界 (0:自由, -1:拘束)

注釈: 節点自由度を表す数字 (0:自由, -1:拘束)

図 3-29b 境界条件



図 3-29c: 静的荷重1設定画面

座標	局所座標系	境界条件・剛床	静的荷重1	静的荷重2	動的荷重1	動的荷重2	動的荷重3	質量
節点番号	Px	Py	Pz	Mx	My	Mz		
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000		
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000		
3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000		
4	0.0000	0.0000	-100.0000	0.0000	0.0000	0.0000		
5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000		
6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000		
7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000		

注釈: 鉛直方向荷重

図 3-29c 静的荷重 1



図 3-29d: 静的荷重2設定画面

座標	局所座標系	境界条件・剛床	静的荷重1	静的荷重2	動的荷重1	動的荷重2	動的荷重3	質量
節点番号	Px	Py	Pz	Mx	My	Mz		
1	500.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000		
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000		
3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000		
4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000		
5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000		
6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000		
7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000		

注釈: 軸方向荷重

図 3-29d 静的荷重 2

図の上より  
 図 3-29b 境界条件  
 図 3-29c 静的荷重 1  
 図 3-29d 静的荷重 2



13. データ入力情報を SPACE の仕様に合わせて、ファイル出力する。ファイル出力メニューから、左図のダイアログを表示させ、出力させるファイルを選択する。  
 ここでは、構造ファイル、特殊断面ファイル、静的荷重ファイル\_1、静的荷重ファイル\_2、情報ファイルにチェックマークを入れ、「OK」ボタンを押す。これで、所定のファイルが出力されることになる。  
 メニュー「ファイル」→「アプリケーションの終了」を選択して、モデラーを終了する。

図 3-30 ファイルの出力用ダイアログ

前節までで、解析用のファイルが全て整った。ソルバーを起動して、実際に数値解析を行うことにする。ただし先に示したように荷重状態が3種類あり、そのため計算結果を蓄えるファイル群を3種類用意する必要がある。そこで、まず環境を整えることにする。SPACE のメニューで「ファイル」→「コピー」を選択し、コピー用ダイアログを表示させる。

### 3.6 数値解析を実行する

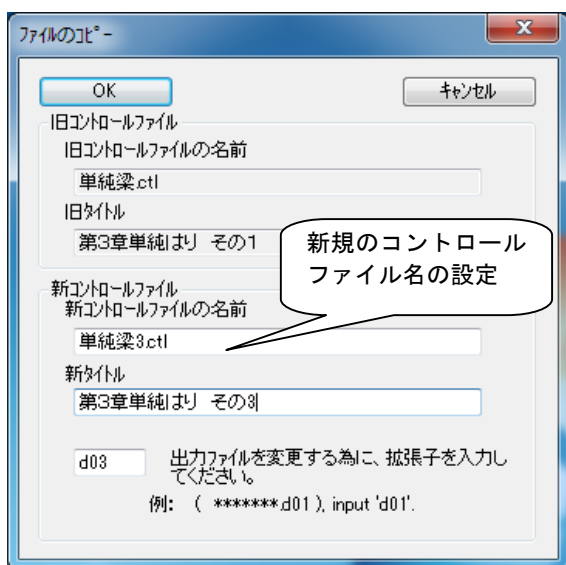


図 3-31 コントロールファイルのコピー

一つのフォルダで3つの課題を解析するために、次の手続きを行う。

1. コピーコマンドを用いて、コントロールファイルを新規に2つ作成
2. 静的解析コントロールファイル名を変更
3. 荷重ファイルの入力状況を変更
4. 静的解析コントロールファイルの内容を変更

14. 同じフォルダの中で、現在のコントロールファイルを新規のコントロールファイルにコピーする。この時、新規のコントロールファイル名を「単純梁3.ctl」とする。また、出力ファイルを他と区別するため、拡張子をd02とする。なお、上記は第3番目の荷重状態に対するコントロールファイルであり、第2番目は、「単純梁2.ctl」と出力ファイル拡張子はd01とする。

これで、3つの課題に対する3つのコントロールファイルが用意された。この3つのコントロールファイルに定義付けられたファイル名(拡張子によって分類:第1課題:\*.dat、第2課題:\*.d01、第3課題:\*.d02)によって、解析結果が分類されて出力される。

次に、課題3つに対し各々異なった荷重状態を作り出すため、静的解析コントロールファイル名とその内容を変更する。演習では、この静的解析コントロールファイル名を、次のように指定しよう。

第1課題 : scontl.dat  
 第2課題 : scontl.d01  
 第3課題 : scontl.d02

ファイル名の変更は、次のダイアログで行う。



15. ここから変更するファイル名や解析パラメータは、先に設定した3つのコントロールファイルを指定した後、その課題に該当するデータを変更しなければならない。まず、ここでは、左図ダイアログを用いて、静的解析コントロールファイル名を変更する。

図 3-32 ファイル名の変更

静的荷重ファイルは、

鉛直荷重データ : sload1.dat  
 水平荷重データ : sload2.dat

であり、この2つのファイルを用いて課題の荷重状態を設定する。

16. 静的解析に用いる荷重状態を作成する。  
 ○印がある場合、該当ファイルは使用する。  
 課題1 : sload1.dat ○sload2.dat  
 課題2 : ○sload1.dat sload2.dat  
 課題3 : ○sload1.dat ○sload2.dat  
 変更方法は、右図のダイアログを用いて行う。

課題2 に対する設定 : 鉛直荷重ファイル sload1.dat を荷重ファイル NO.1 にセットし、読み込み可能チェックマークを記入する。  
 課題2 では、荷重ファイル No.2 を使用しないため、読み込み可能にチェックマークを付けてはならない。

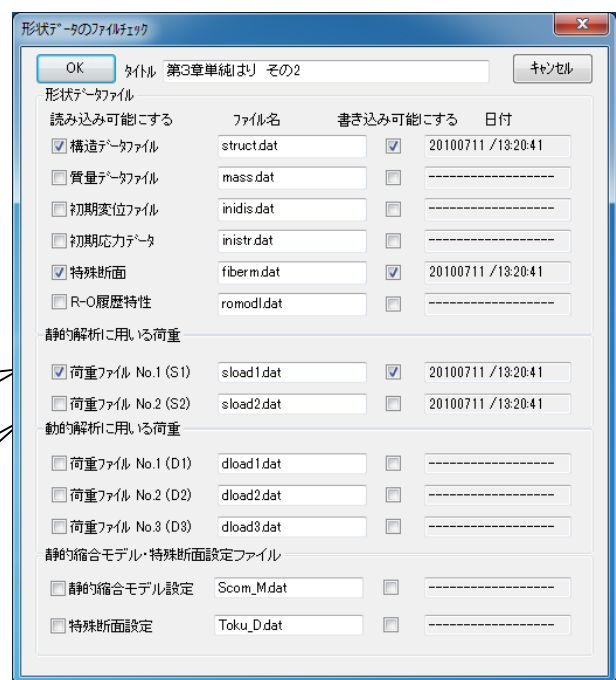
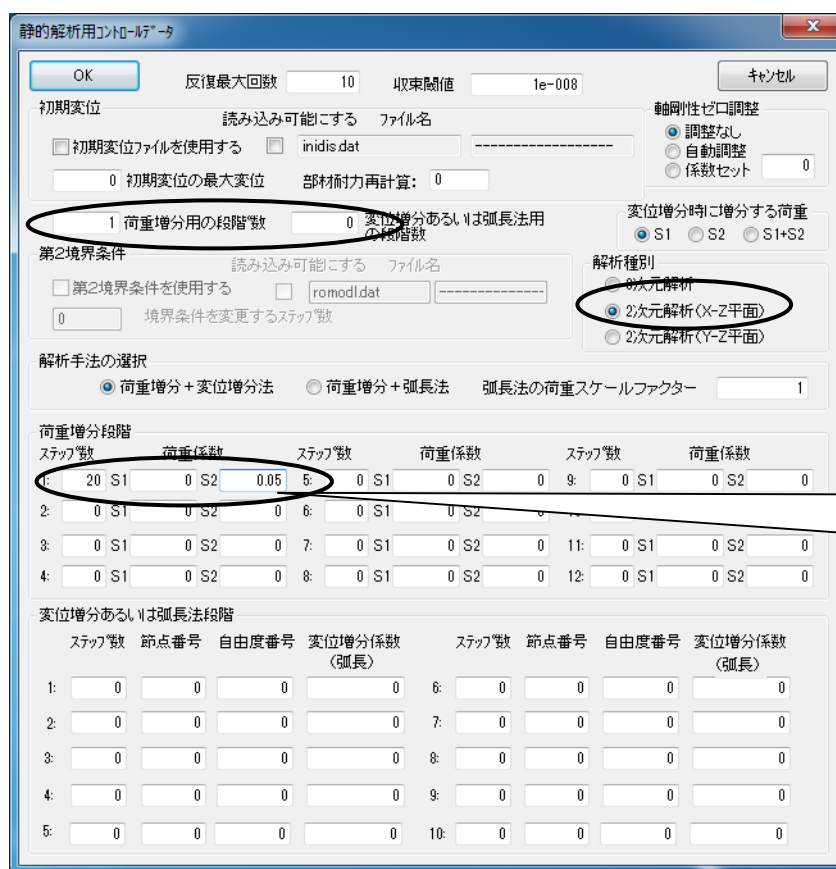


図 3-33 形状データ設定用ダイアログ

次に、静的解析コントロールファイルの内容を変更する。先に設定した荷重ファイルに関連して、そのファイルの解析パラメータとして、各々、荷重の増分段階を次のように設定する。

	ステップ数		荷重係数	
		s1		s2
第1 課題 :	20	0	0.05	
第2 課題 :	20	0.05		0
第3 課題 :	20	0	0.05	
	20	0.05		0



17. 静的解析用コントロールデータを左図のダイアログを用いて設定する。荷重増分用の段階数を「1」に、解析種別を「2次元解析「X-Z平面」」に設定、また、荷重増分段階を3つの課題に対して、ステップ数と荷重係数を、左表のように各々設定する。設定法の詳細はリファレンスマニュアルを参照のこと。

課題1に対する設定：水平荷重ファイル sload2.dat の荷重データを20等分し、荷重増分法を20回適用して計算する。

図3-34 静的解析用制御データ設定ダイアログ

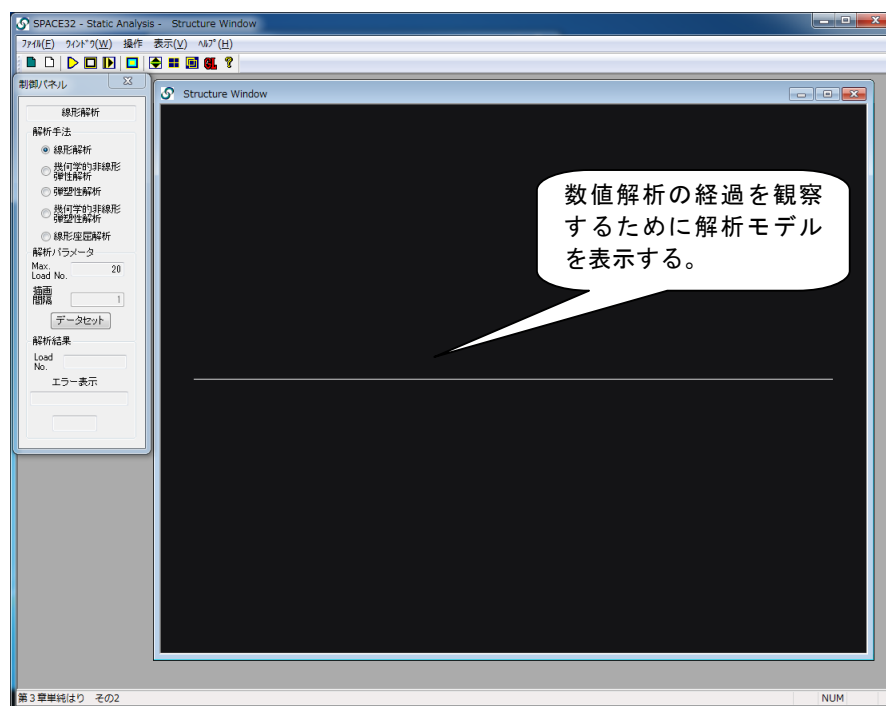
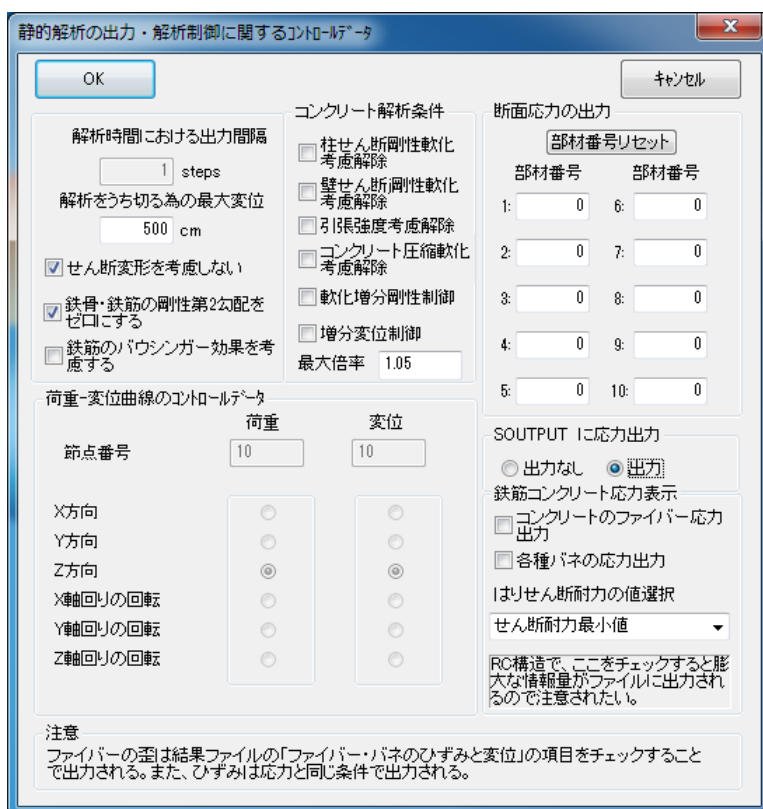
静的解析を行うに当たって、最後のコントロールデータを設定する。SPACE のメニューより、「静的解析条件の選択及び出力コントロールデータ」を選択する。図 3-35 に表示されたダイアログで各種の解析条件を選択することになる。ここでは、図のように「せん断変形を考慮しない」と「鉄骨・鉄筋の剛性第二勾配をゼロにする」にチェックマークを入れる。これらの意味は学習が進むにしたがって、学ぶことになる。後のパラメータは規定値のままとする。

これで、静的解析用のパラメータは全て設定した。これで、いよいよ

解析を実行することが可能となる。演習では線形解析を実行するため、SPACEのメニューから「ソルバー」→「静的解析」→「線形解析」を選択する。その結果、次のソルバー用の新しいウィンドウが表示される。ここでは、このウィンドウ上に解析モデルを表示させ、解析経過を観察する。

次に、ソルバー画面のメニューから「操作」→「静的解析開始」を選択し、解析を実行させる。最初は、「予備計算開始」で予備計算が行われ、「予備計算終了・計算開始」表示で、解析が実行される。

図3-35 静的解析条件の選択及び出力コントロールデータ設定ダイアログ



18. ソルバー用のウィンドウが表示された後、ウィンドウ内でマウス右ボタンを押し、プルダウンメニューを出現させる。まず、メニューから「解析画面」を選択し、解析モデルを表示させる。その後、同じウィンドウ上で、同様にプルダウンメニューを表示させ、そのメニューから「プロパティ」を選択する。表示したダイアログで、色表示、荷重・反力、曲げモーメント表示を選択する。これで、解析経過が観察できることになる。

図3-36 静的ソルバーの構造表示ウィンドウ

解析が進むと、曲げモーメントや変形図でその経過が表示される。途中でエラーメッセージが表示されない場合は、解析は正常終了となる。途中でエラーメッセージが表示されるとデータやパラメータの設定に

間違いがあったことになり、再度、モデラーやSPACEのダイアログを使用して、データなどを変更する。

19. エラーがなく、解析が正常終了すると、これで解析は終了である。3つの課題に対し、コントロールファイルを順次指定し、解析を実行することで、3課題の結果が各々のファイルに得られる。

静的解析はこれで完了である。これまでの説明で、多くの手続きを必要とすることが分かる。第3章以降でも同様な処理を行わなければならないが、このような詳細な説明は行わない。ここで演習を多く行い、またマニュアルなどを参照して、操作法を十分にマスターされたい。

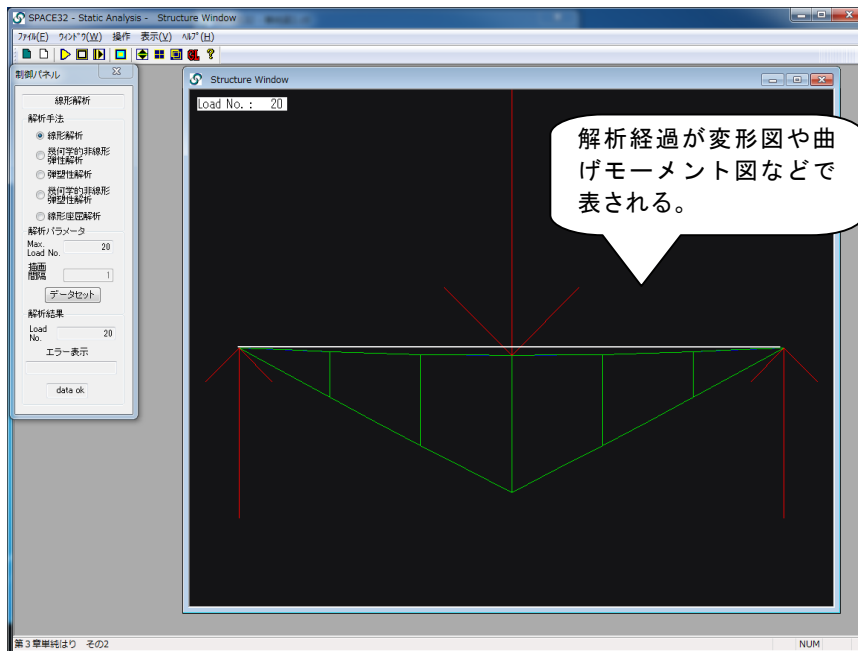


図 3-37 静的解析過程の表示

SPACEのメニューからプレゼンターを起動し、解析結果を分析する。まず、メニューから「プレゼンター」→「静的解析」を選択し、静的解析用プレゼンターを起動する。プレゼンター用ウィンドウが表示されると、そのウィンドウ内の子ウィンドウに解析モデルを表示させる。

3.7 プレゼンターで結果を分析する  
3.7.1 プレゼンターを起動する



20. プレゼンターでは、多くの子ウィンドウを表示させ、各ウィンドウ内に各種のグラフや解析モデルを表示させる。これらのグラフを利用して、解析結果を分析することになる。左図の解析モデルの表示法は、囲み番号17で示した方法と同じである。

図 3-38 プレゼンターを用いて静的解析結果を分析

3.7.2 軸力から軸方向応力を求める

本節では、課題1の結果より軸力から軸方向応力を求め、軸力によって断面内にどのように応力が分布するかを観察する。

解析モデルは、課題1の単純梁に軸方向荷重が加わる場合であり、断面内には、500kNの圧縮軸力が生じることになる。断面内の断面力は、圧縮軸力のみであることから、軸方向応力の分布状態は断面内一様で、その値は、

$$\sigma_x = \frac{N}{A} = \frac{-500}{186.2} = -2.68 \text{ kN/cm}^2 \quad \dots\dots(3.24)$$

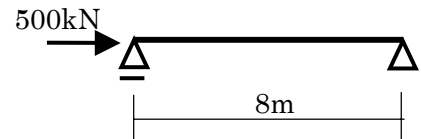
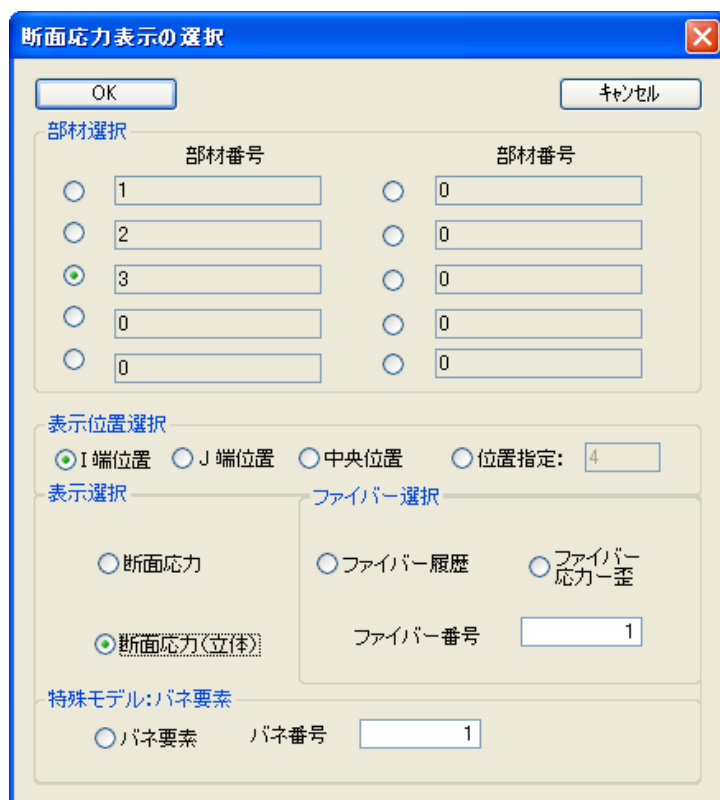


図 3-39 解析モデル

となる。

プレゼンターを利用して、断面内の応力状態を観察しよう。プレゼンター内の子ウインドウの一つに、断面の応力表示を割り付ける。アニメーションを開始すると、応力が一様に増加する様子が見られる。このように軸力のみで曲げモーメントが生じない部材では、一様な応力分布となることが理解できる(図3-42参照)。プレゼンターの任意の子ウインドウ内で右クリックし、プルダウンメニューより、「部材の応力」→「断面応力」を選択すると次のダイアログが表示される。このダイアログを使用して断面内の応力状態を表示させることになる。



このダイアログは、次の3つの領域に分かれており、各々の領域でデータを選択して設定する。

1. 部材選択  
ここでは、表示されている部材から部材番号を選択する。
2. 表示位置選択  
選択した部材の表示位置を選択する。
3. 表示選択  
断面データの表示方法を選択する。1) 断面応力は断面形状の中に応力状態が色表示される。2) 断面応力(立体)は、断面が立体表示され、応力がベクトル矢印表示される。3) ファイバー履歴はファイバー番号で指定した断面内ファイバーの履歴が表示される。4) 上記と同様で指定したファイバーの応力-ひずみ関係が示される。

図 3-40 断面内応力の表示設定ダイアログ



断面ファイバーに関する出力結果は多量となるため、一つの解析で、この断面データを出力する部材の数が10に制限されている。解析を実行する前に、静的解析の出力に関するコントロールデータを設定するダイアログで、このファイバーデータを出力する部材を選択する。図3-41右の「断面応力の出力」項で部材番号を入力する。ここで設定した部材番号が上図のダイアログ内の部材番号として表示される。

なお、「SOUTPUT に応力出力」項で、「出力」を選択すると、このファイルに部材の断面力が出力される。

このダイアログで出力データを設定した後、解析を実行することになる。

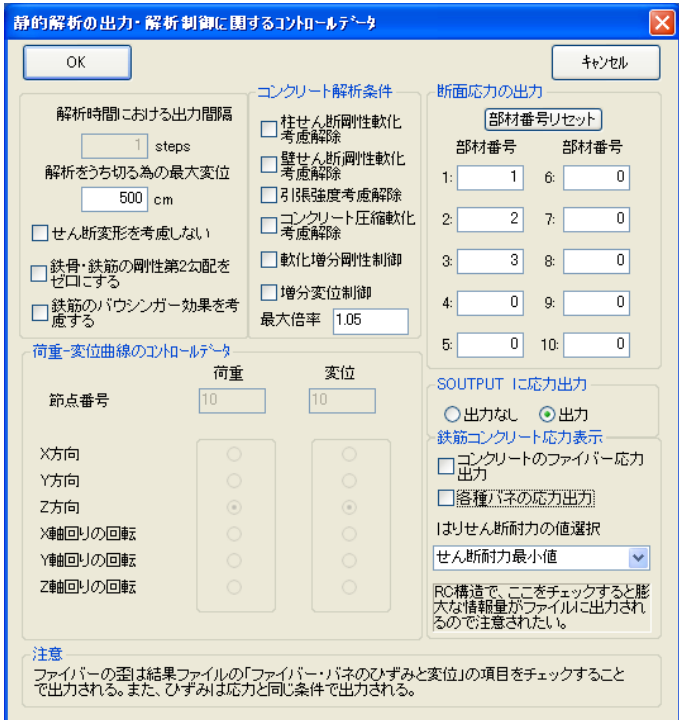


図3-41 断面内応力出力設定ダイアログ

右図は、断面内の応力状態を表す。軸力だけの場合、断面力は一様に分布していることが理解できる。ただし、これは、断面が一様な材料で構成されている場合であって、鉄筋コンクリートのような複合部材では、異なった応力分布を示す。

精度良く応力とひずみを検索したい場合は、下図の左上の図形上でマウス右クリックし、表示されたプルダウンメニューより、「データ出力」→「波形データ出力」を選択し、ファイルにデータを出力する。出力されたファイルの内容の一部を以下に示す。

ステップ数	ひずみ	応力
18	-0.00011787	-2.41623712
19	-0.00012441	-2.55047250
20	-0.00013096	-2.68470788

応力は、-2.68kN/cm<sup>2</sup> となっており、先に求めた式(3.24)の値と同じとなる。

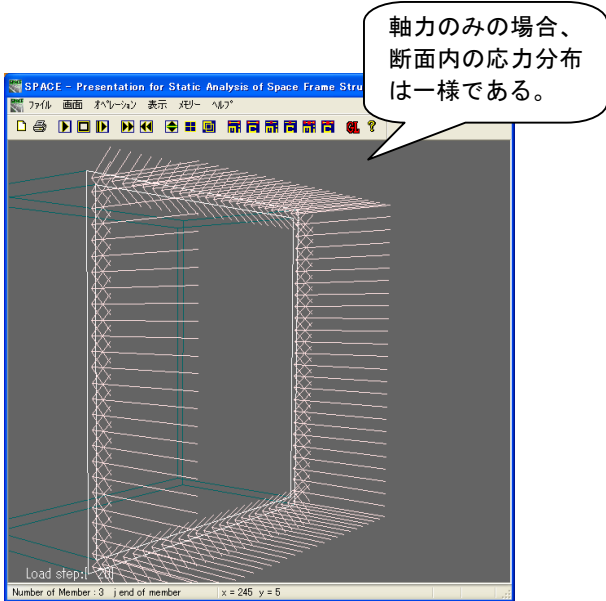


図3-42 軸力による断面内応力

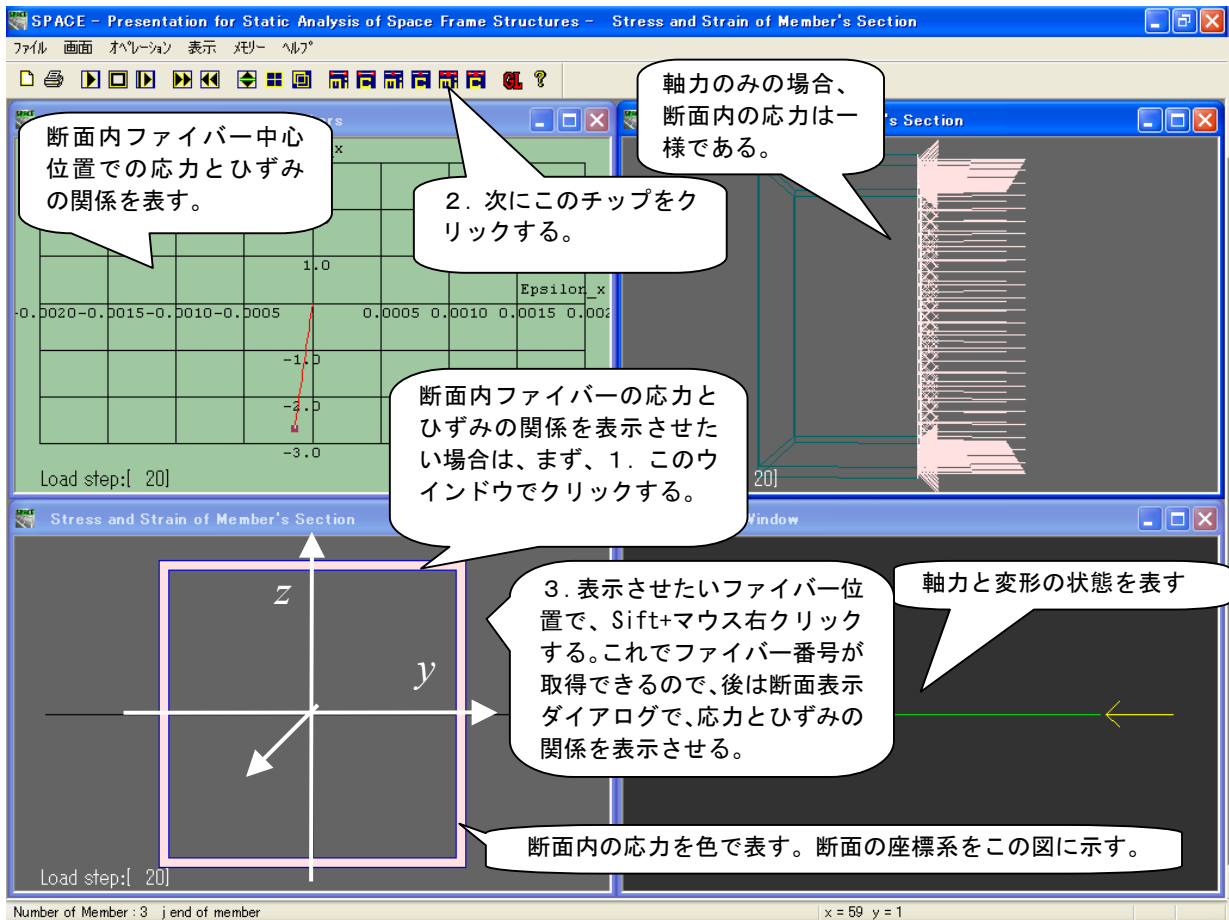


図 3-43 プレゼンター表示マルチウインドウ

上図はプレゼンター全体を表示したもので、左上より時計回りに、断面の任意位置における応力とひずみの関係（図中で、最大圧縮応力が  $2.7\text{kN/cm}^2$  となっていることが読み取れる）、断面内の応力状態をベクトルで表示、部材に加わる軸方向外力と反力、最後に断面内の応力を色表示、を各々表す。軸方向応力の色表示では、赤が圧縮を、青が引張を意味し、色の濃さが応力の大きさを表す。

これらのグラフはアニメーションで同時にシンクロ表示させることができる。読者はこれらのツールを利用して、断面内の応力状態を把握されたい。なお、プレゼンターの詳細な操作方法については、ユーザーマニュアルを参照のこと。

本節では、部材に曲げモーメントが生じるとき、断面内の応力分布がどのようになっているか、また、最大軸方向応力をどのように求めるかについて学ぶ。

解析モデルは、課題の単純梁に鉛直方向の集中荷重が加わる場合であり、部材中央には図 3.44 の課題 2 から  $200\text{kNm}$  の最大曲げモーメントが生じることになる。断面内の断面力は曲げモーメントのみであることか

### 3.7.3 曲げモーメントから軸方向応力を求める

ら、軸方向応力の分布状態は図芯位置でゼロとなり、また、断面上部は圧縮、下部は引張で、その値は線形に変化する。したがって、最大軸方向応力は、圧縮、引張共に断面の縁に生じる。最大軸方向応力である縁応力は次式で与えられる。

$$\sigma_x = \frac{M_y}{Z} = \frac{20000}{2339} = 8.55 \text{ kN/cm}^2 \quad \dots\dots(3.25)$$

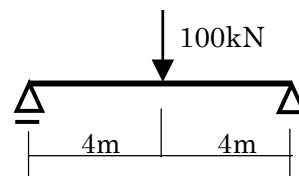
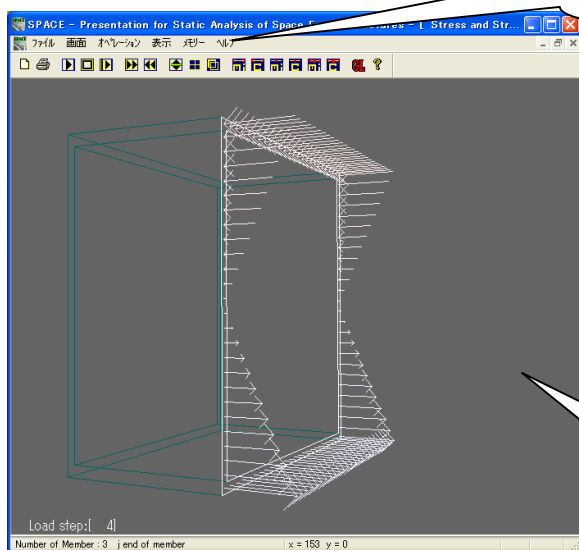


図 3-44 解析モデル

プレゼンターを用いて、断面内の応力分布の様子を観察しよう。プレゼンター用ウインドウ内の子ウインドウの一つに断面内の応力状態をベクトル矢印で示すグラフを表示させる。このグラフから分かるように、図芯位置が応力ゼロの中立軸となっている。また、断面上側が圧縮で（赤色表示）、下側が引張（青色表示）となっている様子や、応力の変化が直線的であることが理解できよう。



応力の矢印やひずみの変形状態が不適切な場合、左から8番目のツールチップ\*7押し、「断面の応力」と「断面の歪」パラメータを適切に設定し直す。



左図は、断面内の応力状態を表す。曲げモーメントのみの場合、断面力は直線的に分布していることが理解できる。ただし、これも軸力の場合と同様に、断面が一樣な材料で構成されている場合であって、鉄筋コンクリート部材では、異なった応力分布を示す。

曲げモーメントのみの場合、中立軸は図芯位置となり、応力分布は直線となる。断面上側は圧縮、下側は引張となる。

図 3-45 曲げモーメントによる断面内応力

次に、材軸に沿った曲げモーメント分布と断面内の応力分布の関係について観察しよう。プレゼンターのウインドウ内に3つの子ウインドウを表示させ、そこへ、部材 1, 2, 3 の j 端断面の応力状態を表示させる。応力表示は矢印・立体表示を選択する。ここでは、材軸に沿って分布する曲げモーメントの大きさと断面内の応力分布状態を比較し、両者の関係を理解する。

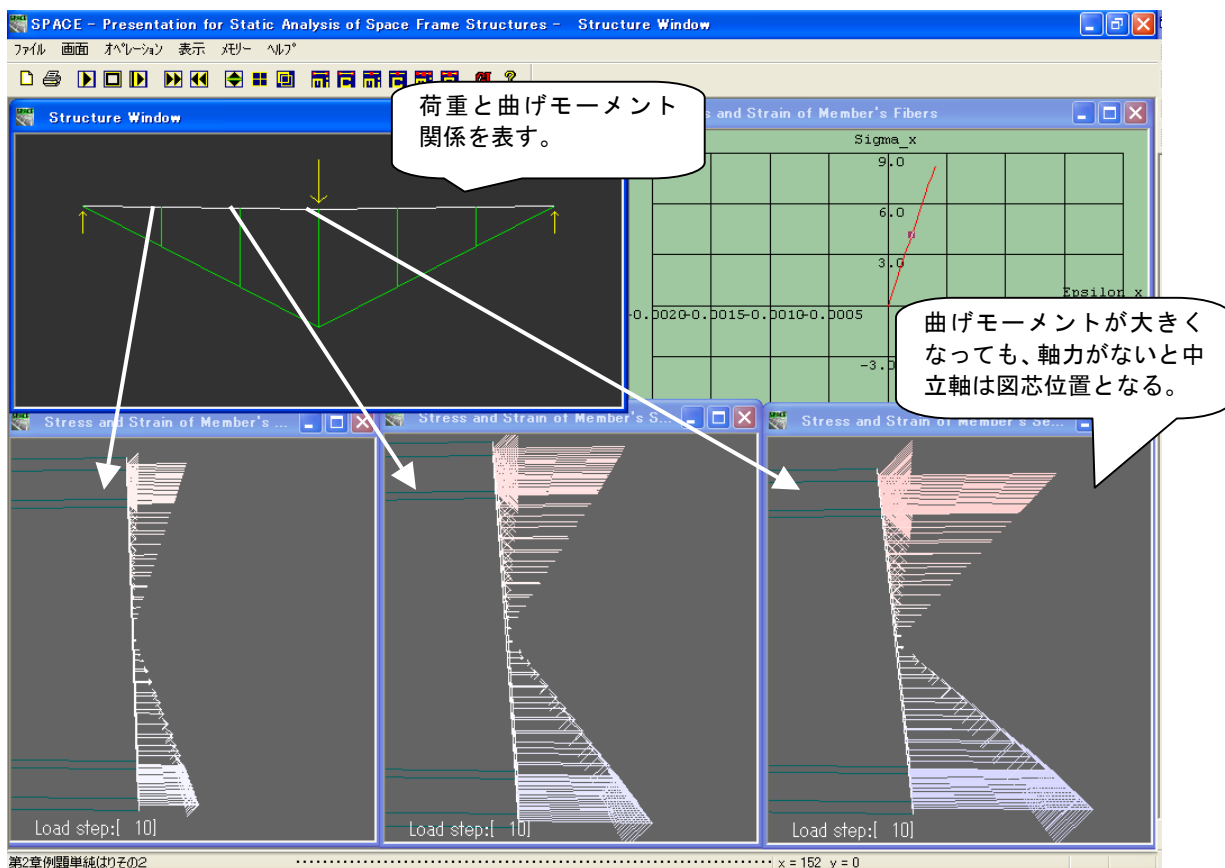


図 3-46 単純梁の曲げモーメントと断面内応力

上の図はプレゼンター全体を表示したもので、左上では、単純梁に中央集中荷重が加わったとき、部材には材軸方向に曲げモーメントが分布し、支持点では反力が生じている様子を示す。右上には、部材中央の断面上側のファイバー中心位置における応力とひずみの関係が示される。下段に示す3つのウィンドウは、部材左より、1, 2, 3部材のj 端位置における断面内軸方向応力の分布状態を矢印で示す。そのため、下右側の断面応力は部材中央における図形である。これらの3つの図形で断面内応力の分布状態と上図の曲げモーメントの大きさを比較すると、曲げモーメントが大きくなるに従って、断面内の軸方向応力が大きくなっていることが理解できる。また、両図の比較から曲げモーメント図が引張側に描かれていることも確認されたい。

上記の応力とひずみの関係を示す図で、最大応力が 8.26kN/cm<sup>2</sup> となっており、先に計算した縁応力と異なった値となっている。この原因は、SPACE ではファイバー要素の中心位置で応力を評価しており、断面の縁応力ではないことによる。図芯位置から断面上部のファイバー中心までの距離は 19.4cm であり、評価したファイバー要素の中心位置は、部材中央より左へ 2.0cm ずれている。その点の応力は次式で与えられる。

$$\sigma_x = \frac{M_y}{I_y} z = \frac{20000}{46770} \frac{398}{400} 19.4 = 8.26 \text{ kN/cm}^2 \quad \dots\dots(3.26)$$

今後ファイバー要素を使用する場合、この点を注意しておく必要がある。

先に示した方法で、断面引張側の応力を以下に示す。

ステップ数	ひずみ	応力
18	0.00036259	7.43319321
19	0.00038274	7.84614849
20	0.00040288	8.25910378

応力は、8.259kN/cm<sup>2</sup> となっている。両端ファイバーモデルは、部材長の 0.03 倍がファイバー要素の長さであり、応力評価位置は、その中央となる。ここでは、部材長は 133.33cm で、評価位置は、ファイバー長さが 4cm で、その半分の 2cm となる。従って、その位置の曲げモーメントは、200x398/400 となる。

ここでは、軸力と曲げモーメントが同時に生じる場合の断面内の応力分布を観察する。

3.7.4 軸力+曲げ  
モーメントから軸  
方向応力を求める

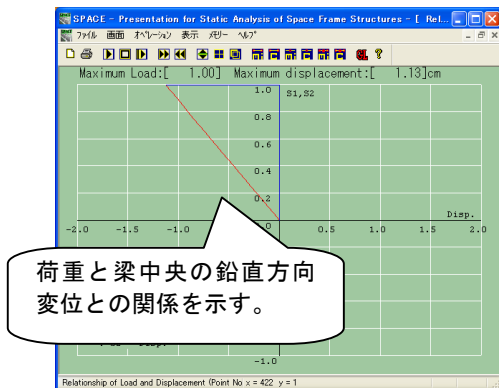


図 3-48 荷重と変位の関係

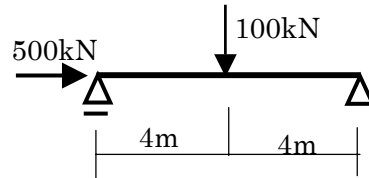


図 3-47 解析モデル

課題3では、軸方向外力を加えた後、鉛直方向集中荷重を加えている。左の図は、荷重状態と部材中央の鉛直方向変位との関係を表す。軸方向荷重(S2)のみが加わっている場合、鉛直方向変位は生じておらず、鉛直方向荷重が加わると鉛直方向変位が生じる様子が観察される。

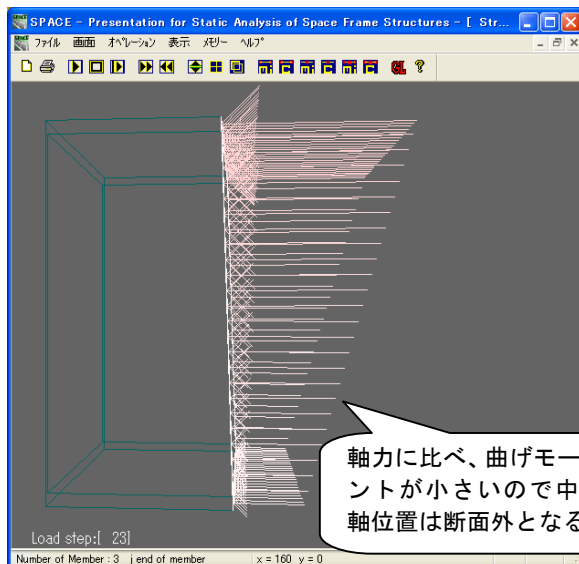


図 3-49 軸力と曲げモーメントによる断面内応力

右図は、曲げモーメントが中程度の場合の断面内応力分布を示す。曲げモーメントによって生じる引張応力と軸力による圧縮応力が断面下面の縁でキャンセルし合い、縁部分に中立軸が生じている。

課題3における部材中央部の縁応力（ファイバー応力）は、圧縮側と引張側では以下のようにその値が異なる。

$$\sigma_x = \frac{N}{A} \pm \frac{M_y}{I_y} z = \frac{-500}{186.2} \pm \frac{20000}{46770} \frac{398}{400}$$

$$\sigma_c = -10.94 \text{ kN/cm}^2 \quad \text{圧縮側縁応力}$$

$$\sigma_t = 5.57 \text{ kN/cm}^2 \quad \text{引張側縁応力}$$

先に述べた方法で数値計算した応力を求めると

ステップ数	ひずみ	応力	
40	-0.00053384	-10.94381142	圧縮側縁応力
40	0.00027192	5.57439566	引張側縁応力

となり、良い一致を示している。

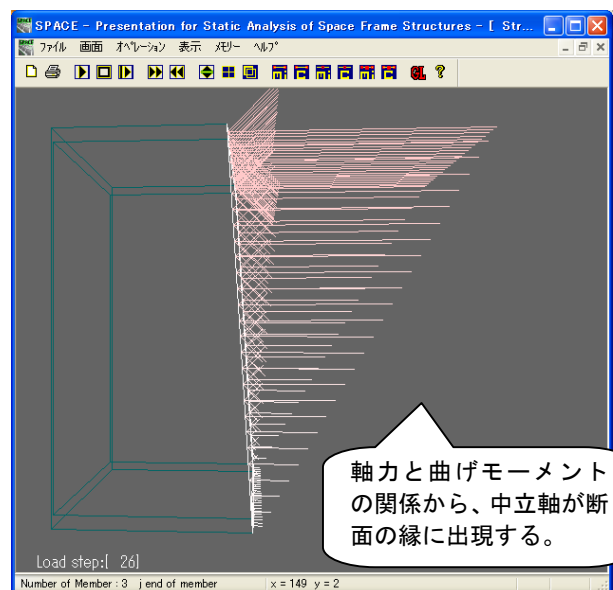
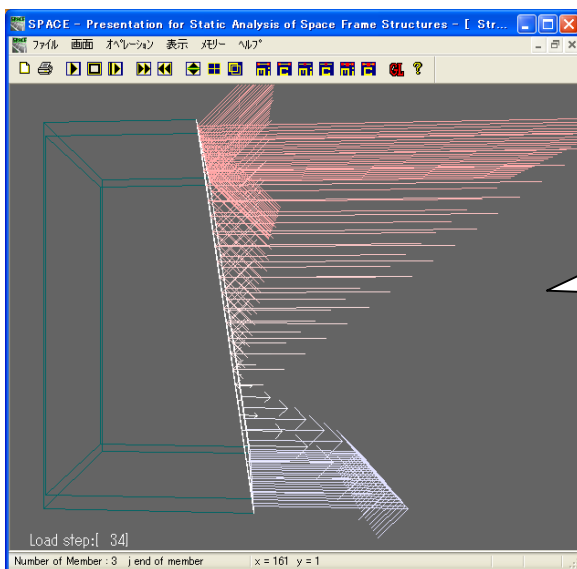


図 3-50 軸力と曲げモーメントによる  
断面内応力その2

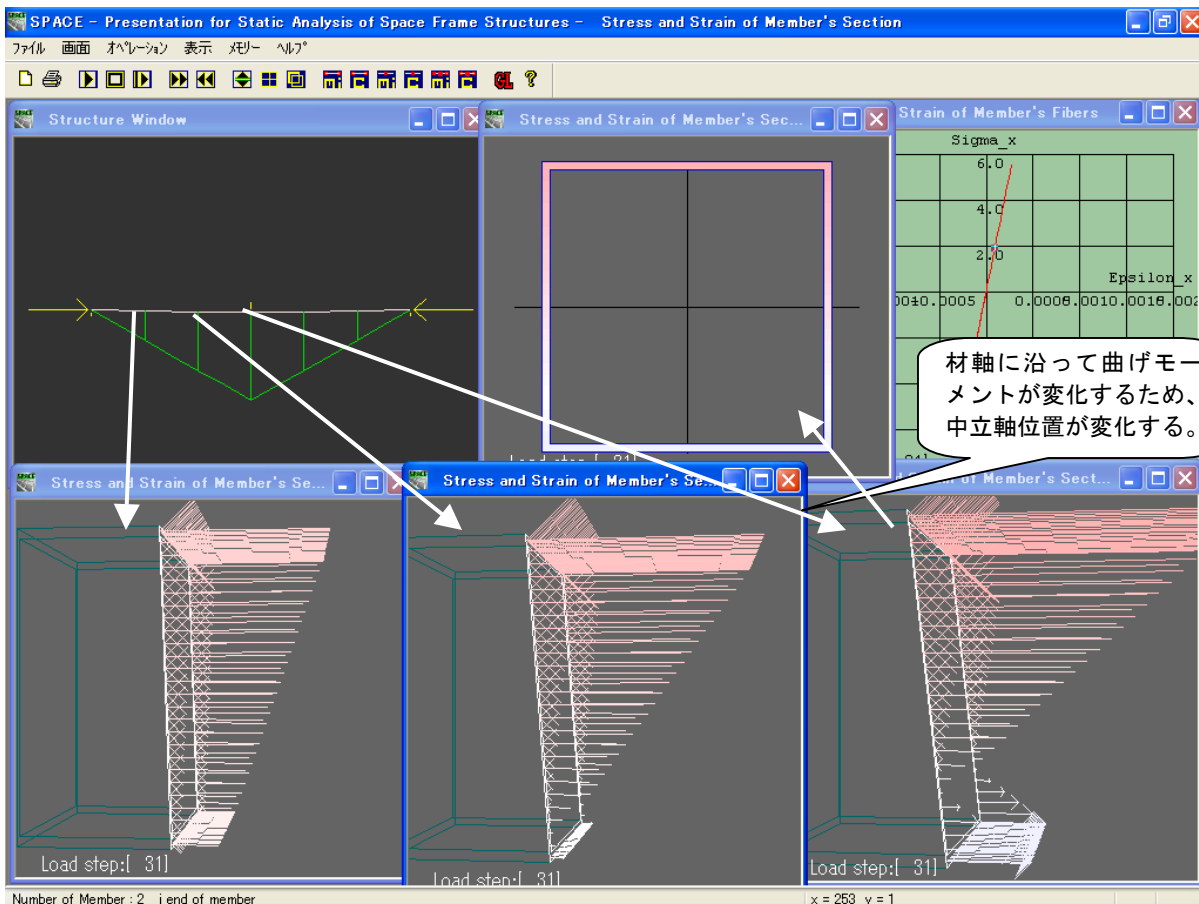


さらに曲げモーメントが大きくなると、中立軸は断面中央部分に移動する様子が、図から分かる。これら挙動は、プレゼンターのアニメーション機能を利用して容易に理解できよう。

軸力に比べ、曲げモーメントがかなり大きくなると中立軸が断面内に現れる。

図 3-51 軸力と曲げモーメントによる断面内応力その 3

図 3-52 プレゼンター全体の表示



材軸に沿って曲げモーメントが変化するため、中立軸位置が変化する。

上の図はプレゼンター全体を表示したもので、軸力が加わった後、鉛直荷重が中程度加わった状態を示す。左上には、課題3の解析モデルで、荷重と反力、曲げモーメント図が描かれている。上右は、断面上側のファイバー中心位置の応力とひずみの関係を示す。下段は、部材左より、1, 2, 3部材のj端位置における断面内軸方向応力の分布状態を矢印で示す。これらの3つの図形における断面内応力の分布状態と上図の曲げモーメントの大きさを比較すると、曲げモーメント大きくなるに従って、断面内の中立軸位置に変化が見られる。これは、軸力は材軸に沿って一定であるが、曲げモーメントが材端でゼロから部材中央部分で最大となり、軸力と曲げモーメントの組み合わせが変化するからである。これらのグラフはアニメーションで同時にシンクロ表示させることができる。読者はこれらのツールを利用して、断面内の応力状態を十分に把握されたい。

3.8 ファイバー断面  
の応力表示方法  
3.8.1 先に断面を  
指定する方法

前節までで、応力分析中、多くの断面内応力図が使用されていた。ここで、ファイバー断面の表示方法について簡単に触れておこう。詳細は、ユーザーマニュアルを参照されたい。ファイバー断面に関するデータは多数必要となり、部材全部をファイルに保存するわけにはいかない。そこで、図 3-41 に示すダイアログで、解析を行う前に使用者が出力する部材を指定する。

ファイバー断面の応力を観察するために、部材番号とその表示方法を指定する。まず、マウス右ボタンでプルダウンメニューを表示させ、そのメニューより、「部材の応力」→「断面応力」を選択すると、部材番号とオプションを指定するダイアログが表示される（図 3-53）。なお、このダイアログには、先に断面応力を指定した部材番号がセットされている。このダイアログでは以下の項目を選択する。

- |              |
|--------------|
| 1) 部材番号と表示位置 |
| 2) 表示選択      |
| 3) ファイバー選択   |

2) の表示選択は、4つの選択項目から選ぶことになる。1は、断面の応力状態を色で表す。2は、断面の応力状態を立体的に表し、応力を矢印で、ひずみは形状の変化で示す。3、4はファイバー要素の応力状態を表示させる選択であり、3は、断面内の任意ファイバー要素の応力履歴がグラフで表示される。4は、ファイバー要素の応力とひずみの関係が表示される。

例えば、図 3-53 のように断面応力を選択すると、図 3-54 のように断面内の応力が色で表示される。

断面の応力状態は、ファイバー要素の応力状態を基準応力、一般には塑性応力を用いて無次元化し、それを 100 等分して色を付ける。赤色は圧縮応力を、青色は引張応力を意味する。また、赤、青共に、黒ずんだ色になると断面が塑性化したことを表す。アニメーションを開始すると、断面内の応力状態の変化に従って色が変化し、断面内応力の変化の様子が良く理解できる。

次に、ダイアログの選択項目の中でファイバ

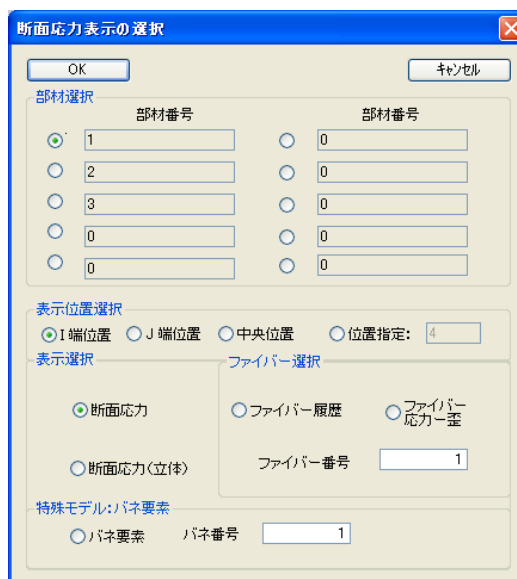


図 3-53 断面応力表示の選択

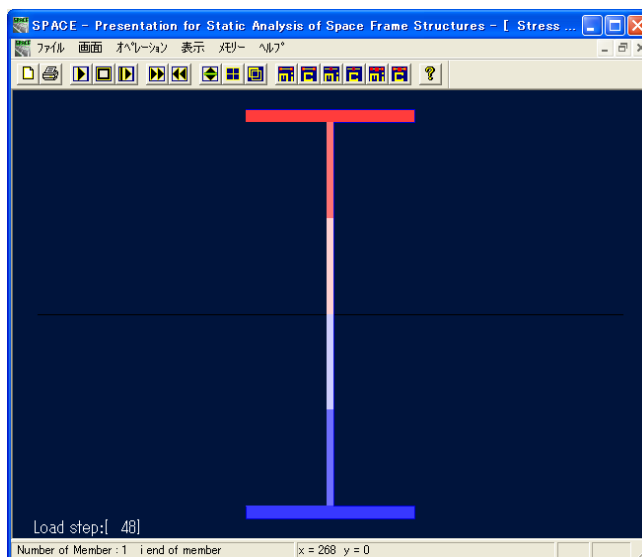


図 3-54 断面応力状態を色で表示

一選択の中のファイバー履歴か、もしくはファイバーの応力とひずみを  
選択すると、任意ファイバー要素の応力履歴が表示される。ただし、こ  
の2つの選択項目には、その下のファイバー要素番号を指定しなければ  
ならない。断面内のファイバー要素番号が判明している場合は、そこに  
番号をセットすれば良いが、分からない場合は、これを知る必要がある。

そこで、まず、断面の応力状態を表示するウインドウをアクティブに  
し、次にツールバー上のチップ\*8を押す。マウスカーソルが十字形とな  
って断面内のファイバー要素を指定することができ、ファイバー要素番  
号をメモリー内に取り込むことになる。メモリー内に要素番号がセット  
されていると、その番号が自動的に、図 3-53 に示すダイアログの中の  
ファイバー番号に設定される。ダイアログの設定が終わると、図 3-55  
に示すように指定したファイバー要素の応力とひずみの関係がグラフ  
として表示される。また、アニメーションをスタートすると赤色のマー  
クが移動し、荷重状態と同時に観測することで、どの時点でファイバー  
要素が塑性状態になったかなどの情報が容易に得られることになる。

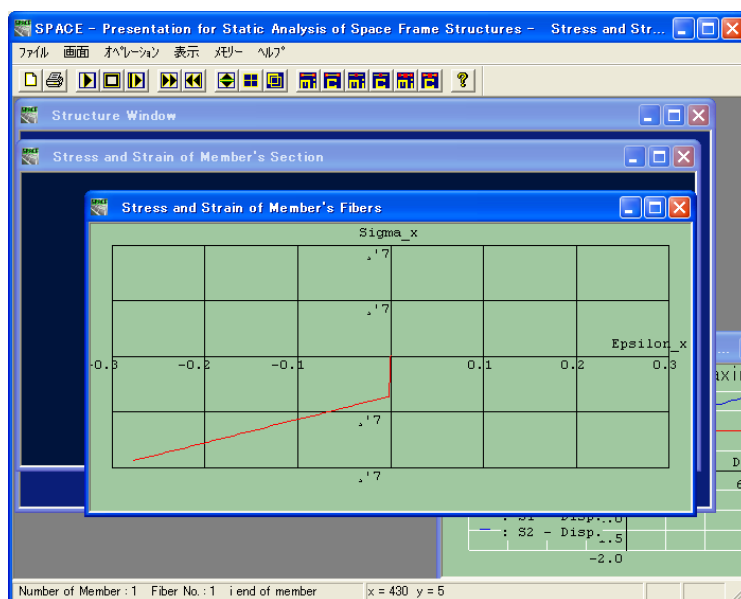


図 3-55 ファイバー  
要素の応力とひずみ  
の関係

プレゼンターで断面内の応力表示や応力-ひずみ関係を表示させる  
方法が開発され、Ver. 3.5 以上で利用できることとなった。例えば、鉄  
筋コンクリート骨組の解析結果をより詳細に分析するため、静的・動的  
プレゼンターでは、ソリッド表示に大幅な機能拡張が行われている。使  
用方法はマニュアル「SPACE 利用のためのガイド RC 編」の第 6.15 節を  
参照されたい。

### 3.8.2 透視図より 断面を指定す る方法



図 3-56 に示されるように、マウス操作によって、容易に指定した部材の断面応力状態や任意位置の断面内ファイバー要素の応力—ひずみ関係が表示されることになる。

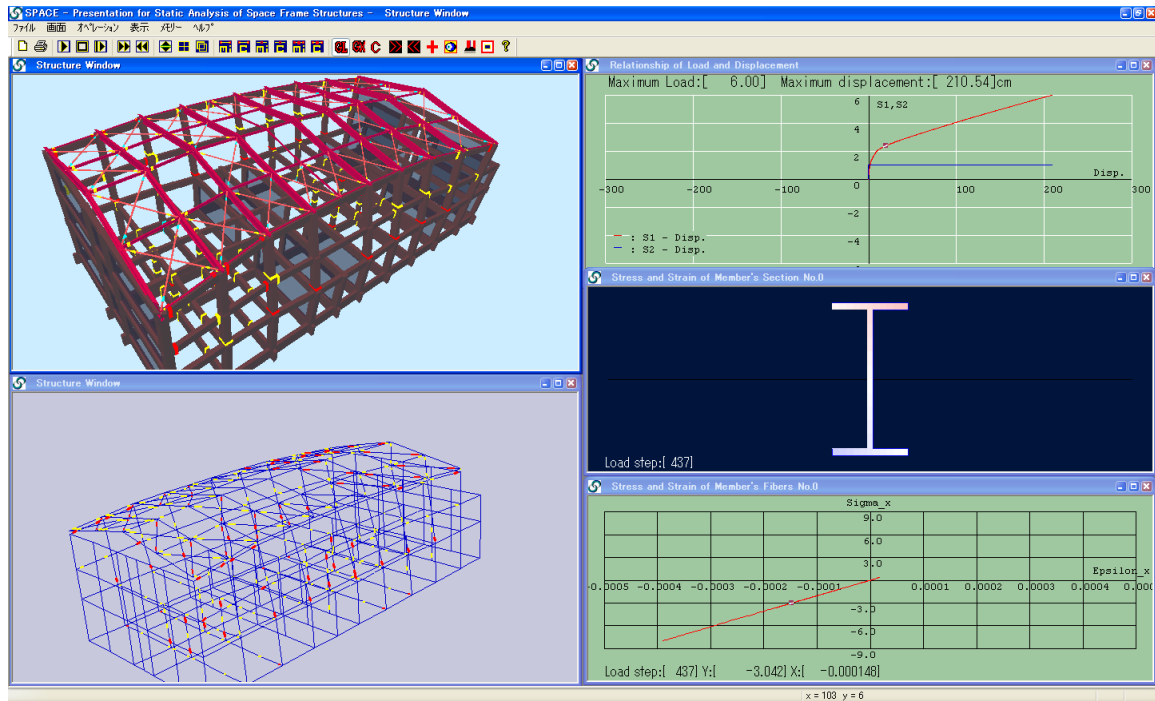


図 3-56 断面内応力及びファイバー応力—ひずみ表示画面

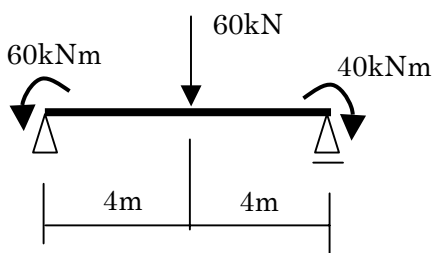
### 3.9 まとめ

本章では、単純梁を用いて部材に生じる断面力（軸力と曲げモーメント）と断面内の軸方向応力分布との関係を観察し、理解した。断面内の応力は、軸力、曲げモーメント、軸力と曲げモーメントを同時に受ける状態であり、それらの解析結果と SPACE による数値解析結果を比較し、断面内の応力状態を検討した。

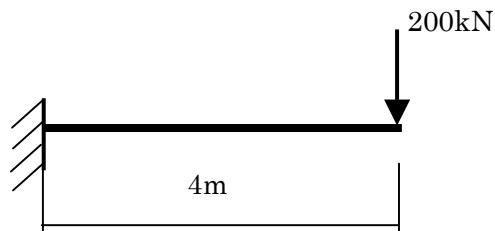
また、SPACE の基本的な操作法について学んだ。ただし、詳細な操作法については、モデラーやソルバー、プレゼンターなどの各マニュアルを参照されたい。

3.10 問題

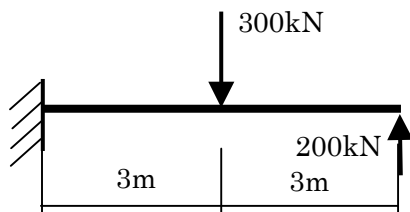
問 3-1 次に示す構造物について、SPACE を用いて静的応力解析（線形解析）を実行しなさい。また、実際に手を使って解析し、両者の断面内の応力値を比較しなさい。なお、鋼材は、SS400 を使用し、部材断面は、H-200x100x5.5x8 を使用するものとする。



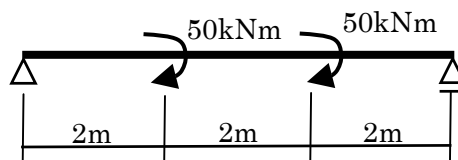
問 3-1



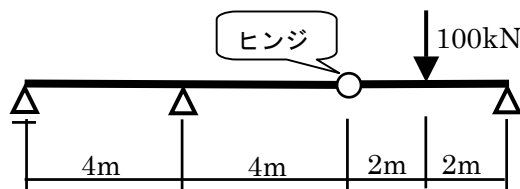
問 3-2



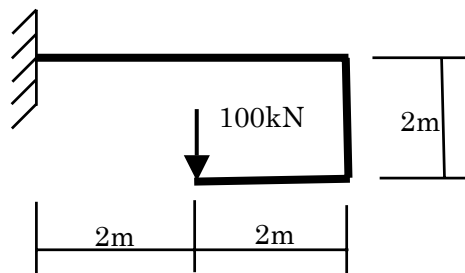
問 3-3



問 3-4



問 3-5



問 3-6

ヒント：SPACE で部材の中間にヒンジを設定することは結構難しい。ここでは、次のように設定すると良い。

まず、ヒンジ位置に節点を2つ作成する。この2つの節点にヒンジ両端の部材をリンクする。つまり、2つの部材の接合節点にこの2つの節点を各割り振る。次に、この2つの節点の一方を他方の節点に同一視するが、同一視する自由度は、 $u, v, w$  の変位とし、回転角はそのままとする。これで、ヒンジの両端にある部材の回転角は独立に回転することになる。同一視する仕様は、マニュアル「操作編」第4.2.3節、及び「演習システム：静的解析編」の第2.5節を参照されたい。