

# 応力解析

1610581 堀田 大地

2018/6/7

## 1 目的

応力解析とは、物体に荷重が作用したとき、物体内に生じている応力 (およびひずみ) の分布を求めることである。機械設計においては、機械部分・構造における応力集中箇所やその値を求める上で、応力解析が重要な役割を果たしている。一般に、物体が弾性体と仮定しても、構造や材料が複雑な場合、応力分布を厳密に求めるのは困難であり、そのような状況においても解を得る手段として、応力分布を求める基礎方程式を近似式に置き換え、具体的な荷重や変位拘束条件を与えて近似的解を数値的に計算する数値解析という手法がある。本実験では、代表的な数値解法である有限要素法を用いて、第1週目では、有限要素法の基礎を習得を目的としてトラスの応力解析、第2週目では、円孔のある平板の2次元有限要素解析を行なった。

## 2 理論

本項では、トラスの有限要素解析についての説明を行う。トラス構造とは、棒状の複数の要素がピン結合によってつなぎ合わされた構造であり、個々の部際には軸力のみが伝達され、はりのような横荷重曲げモーメントは受けない。要素の断面形状、ならびに弾性係数 (ヤング率) が一様であれば、それぞれの要素ごとの垂直応力も一様となる。トラス構造においては、まず各要素毎に要素合成方程式 (1) をたて、次に (1) から全体剛性方程式 (2) を組み立ててトラス全体の解析を行う。

### 2.1 要素剛性方程式

各要素ごとに成立する力学関係について調べ、方程式を導出する。また、特に断りのない場合は右向きを正とする。断面積  $A$ 、長さ  $L$ 、ヤング率  $E$  の一様な棒を考える。棒は静止しており、その両端を節点 1, 2 とする。この条件下で両端に強制的に変位  $u_1, u_2$  を引き起こすために必要な力  $f_1, f_2$  を求めることを考える。ひずみ  $\epsilon$  は (1) であり、棒内部に作用する応力は (2) である。節点 1, 2 には (3), (4) の応力が作用する。また、 $f_1 + f_2 = 0$  であるので、力の釣り合い関係が満足されていることがわかる。(3), (4) をまとめると、(5) となり、これは要素剛性方程式というトラス構造解析における基礎式である。

$$\epsilon = \frac{u_2 - u_1}{L} \quad (1)$$

$$\sigma = E\epsilon = \frac{E}{L}(u_2 - u_1) \quad (2)$$

$$f_1 = -\sigma A = -\frac{AE}{L}(u_2 - u_1) \quad (3)$$

$$f_2 = \sigma A = \frac{AE}{L}(u_2 - u_1) \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \end{pmatrix} = \frac{AE}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

次に、二次元平面状に偏角  $\theta$  で傾いた長さ  $l_a$  の棒要素  $a$  について考える。要素  $a$  の断面積とヤング率は  $A_a$ ,  $E_a$  である。両端 1, 2 から要素  $a$  に加える力  $f_{1ax}$ ,  $f_{1ay}$ ,  $f_{2ax}$ ,  $f_{2ay}$  と変位  $u_1$ ,  $v_1$ ,  $u_2$ ,  $v_2$  との間に成り立つ関係式を求める。棒材に沿った向きに座標軸を取り、両端に加える地方を  $f_{1a}$ ,  $f_{2a}$ , 変位  $U_1$ ,  $U_2$  とすれば (4) より (5), (6) が成り立つ。また、節点力及び変位を  $x$ ,  $y$  成分で表示すれば, (5), (7) と書けるので, (8) となり、要素  $a$  に関する要素剛性方程式である。

$$\begin{pmatrix} f_{1a} \\ f_{2a} \end{pmatrix} = k_a \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$k_a = \frac{A_a E_a}{L_a} \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} f_{1ax} \\ f_{1ay} \\ f_{2ax} \\ f_{2ay} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} f_{1a} \cos \theta \\ f_{1a} \sin \theta \\ f_{2a} \cos \theta \\ f_{2a} \sin \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & \cos \theta \\ 0 & \sin \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{1a} \\ f_{2a} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} f_{1ax} \\ f_{1ay} \\ f_{2ax} \\ f_{2ay} \end{pmatrix} = k_a \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & \cos \theta \\ 0 & \sin \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \theta & \sin \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \cos \theta \sin \theta & -\cos^2 \theta & -\cos \theta \sin \theta \\ \cos \theta \sin \theta & \sin^2 \theta & -\cos \theta \sin \theta & -\sin^2 \theta \\ -\cos^2 \theta & -\cos \theta \sin \theta & \cos^2 \theta & \cos \theta \sin \theta \\ -\cos \theta \sin \theta & -\sin^2 \theta & \cos \theta \sin \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

## 2.2 全体剛性方程式の導出

(5), (8) の要素剛性方程式を組み合わせることで、1 つの方程式にすることで、トラス構造全体の剛性方程式を導くことができる。図 1 に示す 2 要素トラス構造を例にして、全体剛性方程式の導出と応力解析を試みる。

### 1. 例題

同一材料から成り、断面積も等しい 2 本の要素 (要素  $a$ ,  $b$ ) が、図 1 のようにピン結合され、水平荷重  $P = 15\text{kN}$ , 鉛直荷重  $Q = 10\text{kN}$  を受けている。要素  $a$ ,  $b$  の長さは  $L_a = L_b = 2.0\text{m}$ , ヤング率は  $E_a = E_b = 200\text{GPa}$ , 断面積は  $A_a = A_b = 100\text{mm}^2$  としたとき、各要素に生じる応力とひずみ、および支持位置における支持反力を求める。

### 2. STEP1 要素毎に要素剛性方程式を立てる節点力、変位を次のように考える。

(a)  $f_{1ax}$  : 節点 1 が要素  $a$  に及ぼす  $x$  方向の力

(b)  $f_{1ay}$  : 節点 1 が要素  $a$  に及ぼす  $y$  方向の力

(c)  $f_{2ax}$  : 節点 2 が要素  $a$  に及ぼす  $x$  方向の力

(d)  $f_{2ay}$  : 節点 2 が要素  $a$  に及ぼす  $y$  方向の力

(e)  $f_{2bx}$  : 節点 2 が要素  $b$  に及ぼす  $x$  方向の力

(f)  $f_{2by}$  : 節点 2 が要素  $b$  に及ぼす  $y$  方向の力

(g)  $f_{3bx}$  : 節点 3 が要素  $b$  に及ぼす  $x$  方向の力

(h)  $f_{3by}$  : 節点 3 が要素  $b$  に及ぼす  $y$  方向の力

(i)  $u_1$  : 節点 1 の  $x$  方向変位

(j)  $v_1$  : 節点 1 の  $y$  方向変位

(k)  $u_2$  : 節点 2 の  $x$  方向変位

(l)  $v_2$  : 節点 2 の  $y$  方向変位

(m)  $u_3$  : 節点 3 の  $x$  方向変位

(n)  $v_3$  : 節点 3 の  $y$  方向変位

また, (8) をそれぞれに適用すると,

$$\begin{pmatrix} f_{1ax} \\ f_{1ay} \\ f_{2ax} \\ f_{2ay} \end{pmatrix} = k_a \begin{bmatrix} \cos^2 \theta_a & \cos \theta_a \sin \theta_a & -\cos^2 \theta_a & -\cos \theta_a \sin \theta_a \\ \cos \theta_a \sin \theta_a & \sin^2 \theta_a & -\cos \theta_a \sin \theta_a & -\sin^2 \theta_a \\ -\cos^2 \theta_a & -\cos \theta_a \sin \theta_a & \cos^2 \theta_a & \cos \theta_a \sin \theta_a \\ -\cos \theta_a \sin \theta_a & -\sin^2 \theta_a & \cos \theta_a \sin \theta_a & \sin^2 \theta_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{pmatrix} f_{2ax} \\ f_{2ay} \\ f_{3ax} \\ f_{3ay} \end{pmatrix} = k_a \begin{bmatrix} \cos^2 \theta_b & \cos \theta_b \sin \theta_b & -\cos^2 \theta_b \\ -\cos \theta_b \sin \theta_b & \sin^2 \theta_b & -\cos \theta_b \sin \theta_b \\ \cos \theta_b \sin \theta_b & -\sin^2 \theta_b & \cos \theta_b \sin \theta_b \\ -\cos \theta_b \sin \theta_b & \sin^2 \theta_b & -\cos \theta_b \sin \theta_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \end{bmatrix} \quad (10)$$

### 3. 全体剛性方程式にまとめる

各節点に加わる外力の  $x, y$  成分を, それぞれ  $f_{1x}, f_{1y}, f_{2x}, f_{2y}, f_{3x}, f_{3y}$  とする. 各節点における力の釣り合いを考えると, (11) となり, これが全体剛性方程式である.

(a) 節点 1

$$f_{1x} = f_{1ax}$$

$$f_{1y} = f_{1ay}$$

(b) 節点 2

$$f_{2x} = f_{2ax} + f_{2bx}$$

$$f_{2y} = f_{2ay} + f_{2by}$$

(c) 節点 3

$$f_{3x} = f_{3bx}$$

$$f_{3y} = f_{3by}$$

### 4. 未知変数を求める

全体剛性方程式のうち変位が未知のもののみを連立させて解く.(11) では,  $u_1, v_1, u_3, v_3$  が既知であるので, 求めるのは  $u_2, v_2$  のみである.

$$\begin{pmatrix} f_{2ax} \\ f_{2ay} \end{pmatrix} = k_a \begin{bmatrix} k_a \cos^2 \theta_a + k_b \cos^2 \theta_b & k_a \cos \theta_a \sin \theta_a + k_b \cos \theta_b \sin \theta_b \\ k_a \cos \theta_a \sin \theta_a + k_b \cos \theta_b \sin \theta_b & k_a \cos^2 \theta_a + k_b \cos^2 \theta_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

5. 支持反力, ひずみ, 応力を求める各節点の変位が決まれば, 全体剛性方程式から節点力が求められる. そのうち, トラス構造の固定点における反作用力が支持半力である. また, 変位からは各要素のひずみも求められ, さらに要素  $a, b$  に加わる応力も決まる.

### 3 実験方法

#### 3.1 平面応力解析 (二次元問題)

薄板などの平面構造に関する応力解析を考える。前節のトラス構造は、線形変形する要素によって構成されているが、平面構造にはそのような要素がない。そのため、応力解析の実施にあたっては、まず解析しようとする平面領域を三角形や四角形の小領域に仮想的に分割する必要がある。このとき用いられる三角形や四角形を要素と呼び、それぞれの頂点を節点と呼ぶ。

##### 1. 理論の概要

三角形要素  $a$  を考え、節点  $i$  が要素  $a$  に加える力を  $(f_{iax}, f_{iax})$ , 変位を  $(u_i, v_i)$  とする (ただし,  $i=1, 2, 3$ ). いま、弾性体の微小変形を考え、三角形要素内の任意の変位  $(u, v)$  が線形関係となることを仮定すると、(13), (14) となり、(15) が導かれる。また、変位とひずみの関係式は (16) で与えられる。(15), (16) より、三角形要素の要素剛性方程式 (17) が得られる。ここで、 $A$  は  $6 \times 6$  の要素剛性行列で、三角形要素の節点座標と弾性定数から定まる。その後は、トラス解析と全く同じであり、要素剛性方程式を組み合わせ、全体剛性方程式を作る。また、ここで導入した三角形要素の要素剛性方程式の応力・ひずみが一定値となり、応力やひずみの急変部では、十分に細かい要素を用いなければ近似が粗くなることに注意を払うべきである。 $u = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 y$  (13)  $v = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 y$  (14)

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \end{pmatrix} = k_a \begin{bmatrix} 1 & 0 & x_1 & 0 & y_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & x_1 & 0 & y_1 \\ 1 & 0 & x_2 & 0 & y_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & x_2 & 0 & y_2 \\ 1 & 0 & x_3 & 0 & y_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & x_3 & 0 & y_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \alpha_1 \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = \beta_2 \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = \alpha_1 + \beta_2 \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} f_{1ax} \\ f_{1ay} \\ f_{2ax} \\ f_{2ay} \\ f_{3ax} \\ f_{3ay} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \end{bmatrix} \quad (17)$$

##### 2. 有限要素法で平面応力問題を解析する手順

(a) 解析の対象となる領域を分割し、要素で埋め尽くした。

i. なるべく正三角形に近い三角形を用いた。

ii. 三角形の辺上には新たな節点をつくらないようにした。

iii. 応力集中すなわち応力勾配 (あるいはひずみ勾配) 大きいと予想されるところは細かく分割した。

(b) 節点に番号をつけ、節点の  $(x, y)$  座標リストを作成した。

- i. 1 番から順番に番号付けをし，欠番がないようにした.
- (c) 要素に番号をつけ，各要素の 3 節点を，反時計回りになるように列挙した.
- (d) 解析対象を取り囲む外形線上の節点座標を列挙した.
- (e) (b)，(c)，(d) を 1 つの.txt ファイルに保存した.
- i. 節点数，手順 b の節点情報要素数，手順 c の要素情報，輪郭点数，手順 c の輪郭点情報，という順番で記述した.
- (f) XFEM というソフトウェアを用いて解析を行った.
- (g) 境界条件を設定した.
- i. 端部の節点に作用する力についての条件を求めた.
- ii. 端部の節点の変位についての条件を求めた.
- (h) 材料の力学的特性値 (ヤング率，ポアソン比，厚み) を調べ，設定した.

## 4 結果

### 4.1 第 1 週目の結果

2 要素トラス，9 要素トラス構造 (2 種)，11 要素トラス構造におけるトラス構造図，トラス構造図可視化結果，計算結果データを付録に示した.

### 4.2 第 2 週目の結果

要素分割図，節点表・要素表・外形表，可視化図，応力の表を付録に示した.

## 5 考察

### 5.1 課題 1

全体剛性方程式から得られたひずみ・応力を手計算と数値実験の両方により求めた結果を表 1 に示した. 精度は， $\frac{\text{手計算}}{\text{実験結果}}$  とした. 値を比較すると，ひずみに関しては高精度に演算できているが，応力に関しては低精度であった.

表 1 2 要素トラスのひずみ・応力

	手計算	実験結果	精度
$\epsilon_a$	$\frac{\sqrt{2}}{8} \times 10^{-3}$	$0.17677670 \times 10^{-3}$	0.9999999733937611
$\epsilon_b$	$-\frac{5\sqrt{2}}{8} \times 10^{-3}$	$-0.88388348 \times 10^{-3}$	0.999999960211774
$\sigma_a$	$25\sqrt{2}$ MPa	35.355339	0.12500000020975396
$\sigma_b$	$125\sqrt{2}$ MPa	-176.77670	0.12499999667422014

## 5.2 課題 2

9 要素トラス構造 (2 種) の荷重作用点の変位, 支持点の支持力, 各要素のひずみ・応力を表 2 に示した. A, B を比較すると, A だとすべての要素に応力がかかっているが, B では要素 2, 5 にしか応力がかかっていなかった. 変位は A の方が約 1.7 倍動いていた. B のように, 力の向きに対してハの字のようにした方が変形しにくいトラス構造になることがわかった.

表 2 9 要素トラス構造 (2 種) の荷重作用点の変位, 支持点の支持力, 各要素のひずみ・応力

	A	B
荷重作用点 (節点 2) の変位	-15.519944	-9.0913729
節点 1 の支持力	15000.000	15000.000
節点 3 の支持力	15000.000	15000.000
要素 1 の応力	$0.67193116 \times 10^{-14}$	$0.67193116 \times 10^{-14}$
要素 2 の応力	-75.000000	-75.000000
要素 3 の応力	$-0.67193116 \times 10^{-14}$	$-0.67193116 \times 10^{-14}$
要素 4 の応力	-106.06602	-106.06602
要素 5 の応力	-150.00000	-150.00000
要素 6 の応力	106.06602	106.06602
要素 7 の応力	-75.000000	-75.000000
要素 8 の応力	-75.000000	-75.000000
要素 9 の応力	-75.000000	-75.000000
要素 1 のひずみ	$0.95990166 \times 10^{-19}$	$0.95990166 \times 10^{-19}$
要素 2 のひずみ	$-0.10714286 \times 10^{-2}$	$-0.10714286 \times 10^{-2}$
要素 3 のひずみ	$-0.95990166 \times 10^{-19}$	$-0.95990166 \times 10^{-19}$
要素 4 のひずみ	$-0.15152288 \times 10^{-2}$	$-0.15152288 \times 10^{-2}$
要素 5 のひずみ	$-0.21428571 \times 10^{-2}$	$-0.21428571 \times 10^{-2}$
要素 6 のひずみ	$0.15152288 \times 10^{-2}$	$0.15152288E-02 \times 10^{-2}$
要素 7 のひずみ	$-0.10714286 \times 10^{-2}$	$-0.10714286 \times 10^{-2}$
要素 8 のひずみ	$-0.10714286 \times 10^{-2}$	$-0.10714286 \times 10^{-2}$
要素 9 のひずみ	$-0.10714286 \times 10^{-2}$	$-0.10714286 \times 10^{-2}$

## 5.3 課題 3

11 要素トラス構造の荷重作用点の変位, 支持点の支持力, 各要素のひずみ・応力を表 3 に示した. 課題 2 より, 9 要素トラス A 構造のようなハの字型の方が変形しにくいトラス構造になることがわかったが, 今回も荷重作用点でハの字型になってるので, 変形はしにくい, つまり各要素に働く応力を分散できると考えられる. 実際に, 表 3 より, 応力は分散してかかっていることがわかる.

表 3 11 要素トラス構造

	11 要素トラス
荷重作用点 (節点 6) の変位	-2.4743583
節点 1 の支持力	10000.000
節点 4 の支持力	-20000.000
要素 1 の応力	-57.735027
要素 2 の応力	57.735027
要素 3 の応力	-57.735027
要素 4 の応力	57.735027
要素 5 の応力	-57.735027
要素 6 の応力	57.735027
要素 7 の応力	-19.245009
要素 8 の応力	38.490018
要素 9 の応力	-19.245009
要素 10 の応力	-57.735027
要素 11 の応力	-57.735027
要素 1 のひずみ	$-0.82478610 \times 10^{-3}$
要素 2 のひずみ	$0.82478610 \times 10^{-3}$
要素 3 のひずみ	$-0.82478610 \times 10^{-3}$
要素 4 のひずみ	$-0.82478610 \times 10^{-3}$
要素 5 のひずみ	$0.82478610 \times 10^{-3}$
要素 6 のひずみ	$-0.82478610 \times 10^{-3}$
要素 7 のひずみ	$-0.27492870 \times 10^{-3}$
要素 8 のひずみ	$0.54985740 \times 10^{-3}$
要素 9 のひずみ	$-0.27492870 \times 10^{-3}$
要素 10 のひずみ	$-0.82478610 \times 10^{-3}$
要素 11 のひずみ	$-0.82478610 \times 10^{-3}$

## 5.4 課題 4

1. 無限平板に対する引張応力  $\sigma_y$  の解析解は,  $x$  軸に接している要素重心の  $x$  座標に対して (18) が成り立つ.

$$\sigma_y = \frac{T}{2} \left( 1 + \left( \frac{a}{x} \right)^2 + \left( 1 + 3 \left( \frac{a}{x} \right)^4 \right) \right) \quad (18)$$

数値解析で得られた  $x$  軸に接している要素の重心の座標  $x$  を横軸に, その要素の  $y$  方向応力  $\sigma_y$  を縦軸としたものを図 1 に示した. 2 本の曲線を比較すると,  $x$  座標が 300 700 あたりで, 理論式の方が小さな値を取っている. 理由として考えられるのは, この定義域に存在する三角形の配置方法が, 適切でなかったためということや, 三角形の形が原因となっていると考えられる.

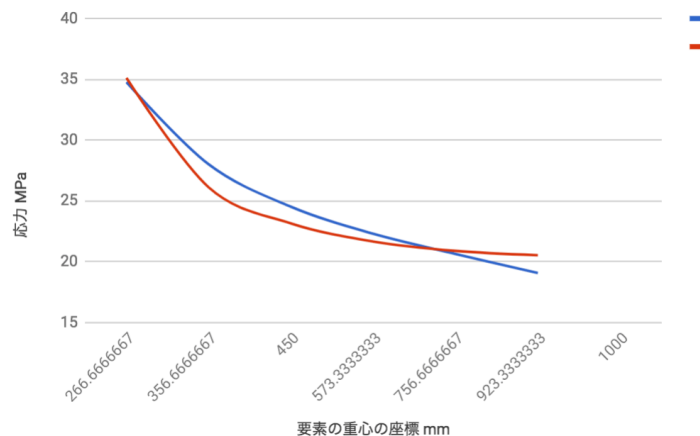


図 1 数値解析と理論式の結果

2. 円孔に沿う要素の  $\sigma_x, \sigma_y$  の分布を観測すると、どちらも x 軸に近くなるにつれて大きくなっていることがわかる。荷重を y 軸の方向にかけているため、もちろん  $\sigma_y$  の方が大きい。よって、荷重を加えて行くと縦長く伸びていくことがわかる。

## 5.5 課題 5

まずは、無理を言って 1 週間実験を早めてもらいありがとうございました。おかげで人工知能学会に発表をしに行くことができました。ありがとうございます。実験について、材料力学の授業で曖昧にしかわかってなかったものを、実際に実験をしてみることで、トラス構造の違いによる変形の違いや理論的なところへの理解が深まりました。しかし、課題 4 での三角形の形による応力のかかり方がよくわからなかった。実際に全て正三角形で埋めたり、縦長い二等辺三角形で埋めるとどうなるのかが気になった。

## 6 結論

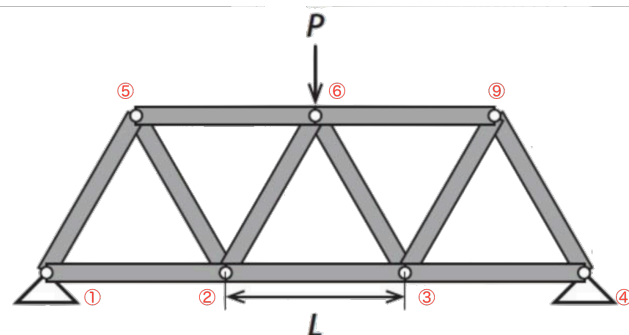
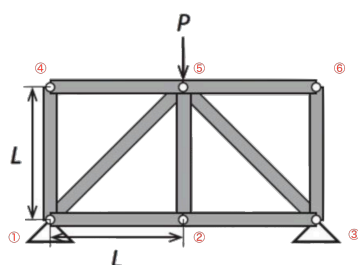
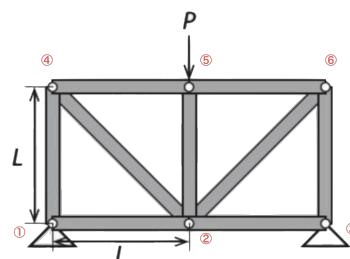
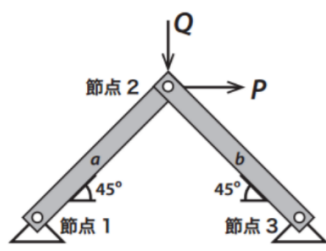
トラス、平面構造について荷重をかけ、どのように変化したのかを確認した。

## 7 付録

表 4 応力

Circle			X 軸		
elements	$\sigma_x$	$\sigma_y$	elements	x	y
12	-16.6408	1.6413	47	4.23288	34.7697
24	-5.9007	8.77725	53	4.087659	28.0074
108	4.8958	27.106	54	3.39397	24.5173
46	8.18081	44.4715	69	2.28494	22.2941
48	11.5468	58.9244	92	0.553267	20.6366
			96	0.541824	19.0723





, pagebox,

```

* Initial Setup
* Nodes: SPXDFREE3, X, Y, U, V, Fx, Fy
0.000000 0.000000
1 FIXED 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
2 FREE 144121.236 144121.236 0.000000 0.000000 0.000000 15000.000
3 FIXED 2828.271 2828.271 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
* Elements: Node 1, Node 2, sigma, epsilon, i, theta(rad), thet(deg)
0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
-0.75358196 -45.000000
* Total stiffness matrix
0000 0.000000
0000 0.000000
0000 0.000000
0000 -5000.0000
0000 -5000.0000
0000 -5000.0000
0000 -5000.0000
0000 5000.0000
* RESULT: Nodes
* Node No., Xbefore, Ybefore, X2after, Y2after, U, V, Fx, Fy
0.000000 0.000000
-2500.0000 -2500.0000
1.5000000 -1.5000000
15000.000 -10000.000
0.000000 0.000000
-12500.000 -12500.000
* RESULT: Elements
* elem [N1] [N2] [sigma] [epsilon]
2 1 2.3555339 0.17678708E-03
2 3 2.3555339 0.17678708E-03
* Nodes: (X1,Y1) [N1] (X2,Y2) [N2] (X1,Y1) [N1] (X2,Y2) [N2]
0.000000 0.000000
14415.736 144121.236
14415.736 144121.236
2828.271 2828.271

```

[illegible]

```

# Initial Setup
# Nodes, FIXED/FREE, X, Y, U, V, Fx, Fy
1 FIXED 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
2 FREE 3000.0000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
0.000000
3 FIXED 6000.0000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
0.000000
4 FREE 0.000000 3000.0000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
0.000000
5 FREE 3000.0000 3000.0000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
-3000.000
6 FREE 6000.0000 3000.0000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
0.000000
# Elms, Node_1, Node_2, sigma, epsilon, l, theta[rad], theta[deg]
0.000000 0.000000
1 5.707963 90.000000
0.7833816 45.000000
0.000000 0.000000
1 5.707963 90.000000
-0.7833816 -45.000000
1 5.707963 90.000000
0.000000 0.000000
0.000000 0.000000
# Total stiffness matrix
0000 0.000000
0 0.000000
0000 0.000000
0 0.000000
6667 0.000000
0 0.000000
0000 0.000000
0 0.000000
3825 -1649.9158
0 0.000000
9158 6316.5825
0 -466.6667
0000 0.000000
0 0.000000
0000 0.000000
9158 1649.9158
67 0.000000
-1649.9158 -1649.9158 0.000000 -466.6667 1649.9158 -1649.9158
0.000000
0000 0.000000
0000 -466.6667
0 -466.6667
# RE20.117-Nodes
# Node No., Xbefore, Ybefore, Xafter, Yafter, U, V, Fx, Fy

```

図 8 9 要素トラス構造 B 計算結果

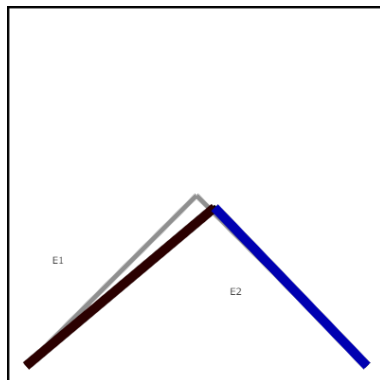


図 10 2 要素トラス構造可視化結果

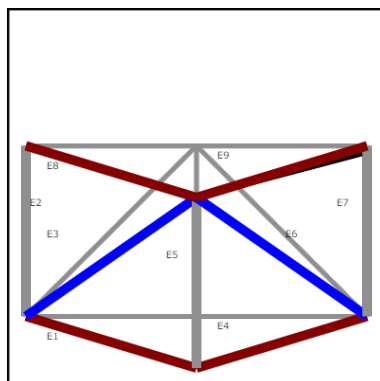


図 12 9 要素トラス構造 B 可視化結果

```

# Initial Setup
# Nodes, FIXED/FREE, X, Y, U, V, Fx, Fy
1 FIXED 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
0.000000
2 FREE 1500.0000 2598.0762 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
0.000000
3 FREE 3000.0000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
0.000000
4 FREE 4500.0000 2598.0762 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
-2000.000
5 FREE 6000.0000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
0.000000
6 FREE 7500.0000 2598.0762 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
0.000000
7 FIXED 9000.0000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
0.000000
# Elms, Node_1, Node_2, sigma, epsilon, l, theta[rad], theta[deg]
1.0471976 -60.000000
-1.0471976 -60.000000
1.0471976 -60.000000
-1.0471976 -60.000000
1.0471976 -60.000000
-1.0471976 -60.000000
0.000000 0.000000
0.000000 0.000000
0.000000 0.000000
11 4 0.000000 0.000000 3000.0000 0.000000 0.000000
# Total stiffness matrix
5813.1333 2020.7259 -1166.6667 -2020.7259 -466.6667 0.000000
0 0.000000
0.000000 0.000000
0000 0.000000
0 0.000000
0.000000 0.000000
-1166.6667 -2020.7259 7000.0000 -1166.6667 2020.7259
0 0.000000
0.000000 0.000000
7259 -3368.0000
0 0.000000
0.000000 0.000000
-466.6667 0.000000 -1166.6667 2020.7259 1166.6667 0.000000
-1166.6667 -2020.7259 -466.6667 0.000000 0.000000 0.000000
0.000000 0.000000
0000 7000.0000
00 0.000000
0.000000 0.000000
0.000000 0.000000 -466.6667 0.000000 -1166.6667 2020.7259
1166.6667 0.000000 -1166.6667 2020.7259 -466.6667 0.000000
0.000000 0.000000

```

図 9 11 要素トラス構造計算結果

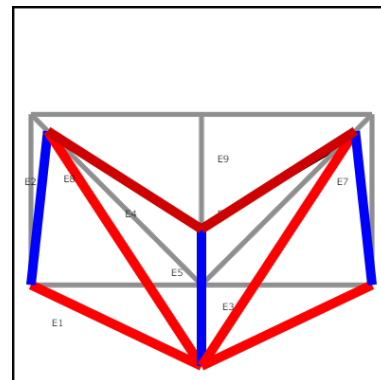


図 11 9 要素トラス構造 A 可視化結果

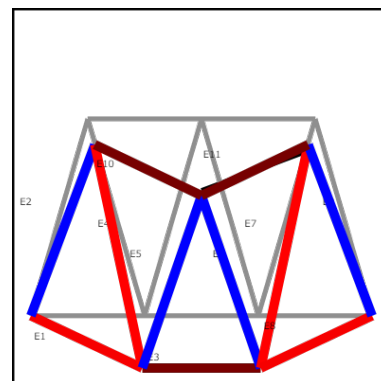


図 13 11 要素トラス構造可視化結果

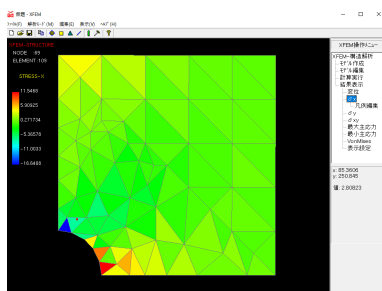


图 14  $\sigma_x$  可视化

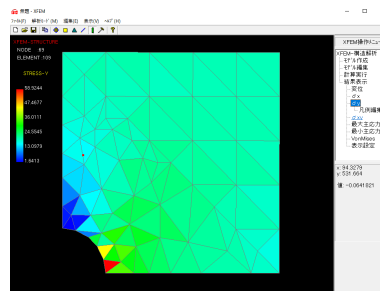


图 15  $\sigma_y$  可视化

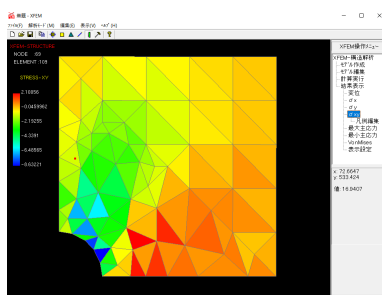


图 16  $\sigma_x$  可视化

節点番号	要素番号	要素番号	要素番号	要素番号	要素番号
1	0	200	1	0	2
2	0	200	2	2	10
3	0	430	3	2	10
4	0	640	4	3	11
5	0	670	5	3	11
6	0	800	6	4	12
7	0	1000	7	4	12
8	40	100	8	5	13
9	40	200	9	5	13
10	60	300	10	6	14
11	100	400	11	6	14
12	80	670	12	7	15
13	100	730	13	7	15
14	100	800	14	8	16
15	120	100	15	8	16
16	130	200	16	9	17
17	150	400	17	9	17
18	200	570	18	10	18
19	150	670	19	10	18
20	100	800	20	11	19
21	200	730	21	11	19
22	200	800	22	12	20
23	200	1000	23	12	20
24	180	120	24	13	21
25	180	180	25	13	21
26	230	270	26	14	22
27	330	330	27	14	22
28	370	800	28	15	23
29	320	800	29	15	23

图 17 節点表・要素表・外形表-1

20	200	800	30	10	20
31	300	700	31	30	30
32	400	800	32	30	31
33	400	1000	33	30	31
34	140	80	34	30	30
35	240	120	35	30	30
36	210	220	36	30	30
37	400	310	37	30	37
38	410	470	38	11	27
39	440	500	39	10	28
40	400	800	40	30	30
41	600	800	41	30	31
42	600	1000	42	31	31
43	200	0	43	31	30
44	270	80	44	30	32
45	340	120	45	30	34
46	450	100	46	30	34
47	560	140	47	42	32
48	600	400	48	41	44
49	600	800	49	30	45
50	600	800	50	30	44
51	800	1000	51	44	46
52	320	0	52	30	45
53	400	0	53	30	45
54	500	0	54	30	54
55	640	0	55	30	46
56	710	200	56	40	46
57	800	400	57	36	46
58	100	800	58	30	37
59	1000	800	59	37	37

图 18 節点表・要素表・外形表-2

60	800	1300	60	27	38
61	870	0	61	27	38
62	740	700	62	38	38
63	800	200	63	10	39
64	1000	400	64	38	39
65	1000	0	65	38	40
66	900	700	66	39	40
67	1000	200	67	40	39
68	800	900	68	34	47
69	1000	800	69	34	47
70	40	47	70	40	47
71	37	46	71	37	46
72	37	46	72	37	46
73	37	46	73	37	46
74	38	39	74	38	39
75	38	39	75	38	39
76	38	39	76	38	39
77	46	46	77	46	46
78	46	46	78	46	46
79	46	46	79	46	46
80	46	46	80	46	46
81	41	42	81	41	42
82	47	47	82	47	47
83	47	47	83	47	47
84	47	47	84	47	47
85	47	47	85	47	47
86	47	47	86	47	47
87	47	47	87	47	47
88	46	46	88	46	46
89	46	46	89	46	46

图 19 節点表・要素表・外形表-3

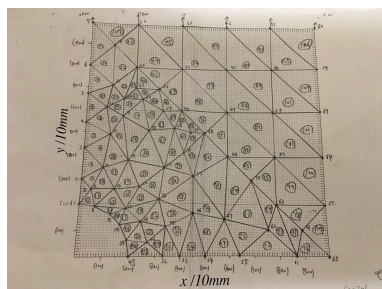


图 20 要素分割図

## 参考文献

- [1] 知能機械工学基礎実験テキスト P.96-P.105