

1000倍

10000倍

(j) 7%CNT添加PEEK CNT突出量多量部分

图 3-2 機械加工面 SEM 画像

#### 4. 数値解析

CNT と PEEK の複合材料において、強度設計を含めた設計手法は確立されていないが、実際の設計には数値解析による力学的評価は欠かせない。そこで CNT が複合材料の機械的性質に与える影響をマイクロメカニクス理論を用いて解析した。また、実際のケージの形状における応力解析を試みた。数値解析の妥当性は実験により評価する必要があるため、赤外線応力測定における応力解析のためのモデリングを行った。

##### 4-1 マイクロメカニクス理論を用いた CNT- Polymer 複合材料の弾性解析

カーボンナノチューブ (CNT) は、ナノメートルの直径をもつ筒状の炭素からなるナノ材料である。その発見以来、そのユニークな構造と卓越した材料物性や種々の興味深い機能が見出され、ナノテクノロジーの中心的存在となっている。例えば、従来の炭素繊維と比較して CNT により補強されたポリマー材料は、従来の複合材料では決して得られない優れた機械的性質を実現できる大きな可能性を秘めている。

また CNT- Polymer 複合材料の特徴として、航空工学から生体工学まで適用できる多機能性、エネルギー吸収能、CNT 繊維の架橋による破壊靱性の向上、製造の容易さなどが挙げられる。しかしながら CNT の優れた材料特性を複合材料の補強材料として十分に生かすためには、製造プロセス、CNT- Polymer 間の界面状態、CNT の複合材料中における形状や分散状態を適切に評価・理解することが近頃の課題とされている<sup>1)</sup>。

本研究では、CNT- Polymer 複合材料中の CNT のうねりの影響をマイクロメカニクスを用いて評価し、これらがマクロな材料挙動に与える影響について解析的研究を行った。マイクロメカニクスは、複合材料や合金などの材料の微視構造を数学的に解析する連続体力学の一分野である。その歴史は Eshelby の楕円形介在物に関する応力解析<sup>2)</sup>に端を発し、ノースウェスタン大学の Mura の研究<sup>3)</sup>が有名である。

##### 4-1-1 うねった CNT 繊維のモデル化

Mori-Tanaka method<sup>4)5)</sup>を用いて、図 4-1 に示す一方向繊維強化複合材料の弾性剛性テンソルは次式で求めることができる。

$$C^* = C^0 \cdot \left\{ I + \phi \left[ (C^1 - C^0)^{-1} \cdot C^0 + (1 - \phi) S \right]^{-1} \right\} \quad (1)$$

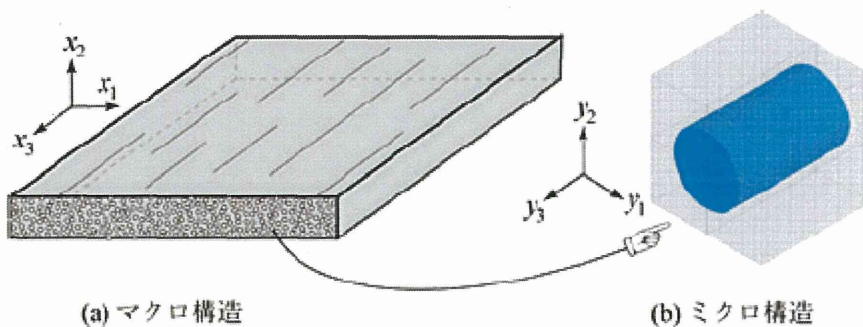


図 4-1 一方向繊維強化複合材料

<http://www.cybernet.co.jp/ansys/multiscale/relation/mono011.html>

ここで  $C^0$ ,  $C^1$  はマトリクスと繊維の 4 階弾性剛性テンソル、 $S$  は長繊維に対応する Eshelby テンソル<sup>2) 3)</sup>、 $I$  は 4 階単位テンソル、そして  $\phi$  は繊維の複合材料中の体積分率を表す。連続体力学にもとづいた式(1)による CNT のモデル化を行うために、次のような簡略化がなされている：1) 補強材料を中実材料と考えることで、中空材である CNT の特徴を無視している、2) SWNT

(Single-Wall CNT), MWNT (Multi-Wall CNT) など CNT の種類の区別をしていない。

複合材料中の CNT のうねりを考慮するために、Hsiao and Daniel によるモデル<sup>6)</sup>をマイクロメカニクスによる定式化に取り入れた。CNT のうねりは次式で表される正弦曲線をもつと仮定する (図 4-2)。

$$v = A \sin \frac{2\pi x}{L} \quad (2)$$

図 4-2 に示すように、うねりの影響により CNT 中で異なる配向性を持つ。そこで式(1)をもとに次式に示すテンソル変換を行い、弾性剛性テンソ

ルの配向性に関する平均化 (Orientational averaging) を行った。

$$v = A \sin \frac{2\pi x}{L} \quad (3)$$

図4-2に示すように、うねりの影響によりCNT中で異なる配向性を持つ。そこで式(1)をもとに次式に示すテンソル変換を行い、弾性剛性テンソ

ルの配向性に関する平均化(Orientational averaging)を行った。

$$\bar{C}_{ijkl} = \frac{1}{L} \int_0^L Q_{ip} Q_{jq} Q_{kr} Q_{ls} C_{pqrs}^* dx \quad (4)$$

ここで、

$$Q_{ij} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

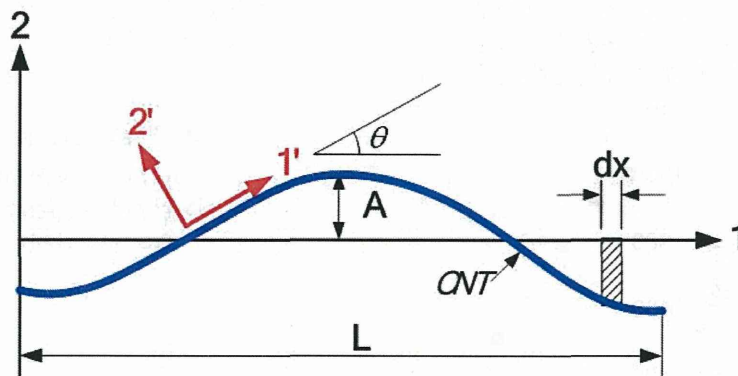


図 4-2 うねった繊維モデル<sup>6)</sup>

さらに式(2)と図 4-2 をもとにして、次のような関係が成立する：

$$\begin{aligned} \cos\theta &= \left[ 1 + \left( \frac{2\pi A}{L} \cos \frac{2\pi x}{L} \right)^2 \right]^{-1/2} \\ \sin\theta &= \frac{2\pi A}{L} \cos \frac{2\pi x}{L} \left[ 1 + \left( \frac{2\pi A}{L} \cos \frac{2\pi x}{L} \right)^2 \right]^{-1/2} \end{aligned} \quad (6)$$

式(3)を利用して、うねった CNT の補強効果の検証を次節で行う。

4-1-2 CNTのうねりと補強効果の関係

式(3)から図4-2に示す”1方向”の複合材料のヤング率 $\bar{E}_1$ を求め、CNT繊維の見かけ上のヤング率である $E_{\text{wavy}}$ を次式により評価する<sup>7)</sup>。

$$E_{\text{wavy}} = \lim_{\phi \rightarrow 0} \frac{\bar{E}_1 - (1-\phi)E^0}{\phi} \quad (7)$$

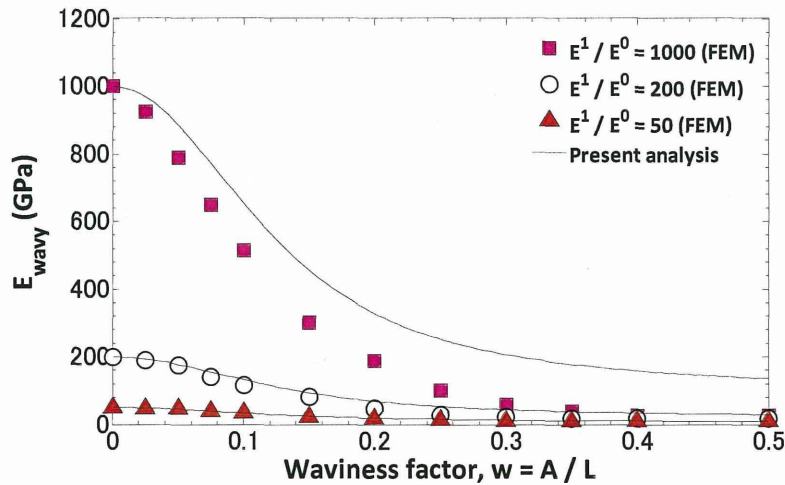
ここで、

$$\bar{E}_1 = \frac{1}{\bar{D}_{1111}} ; \bar{D}_{ijkl} = \bar{C}_{ijkl}^{-1} \quad (8)$$

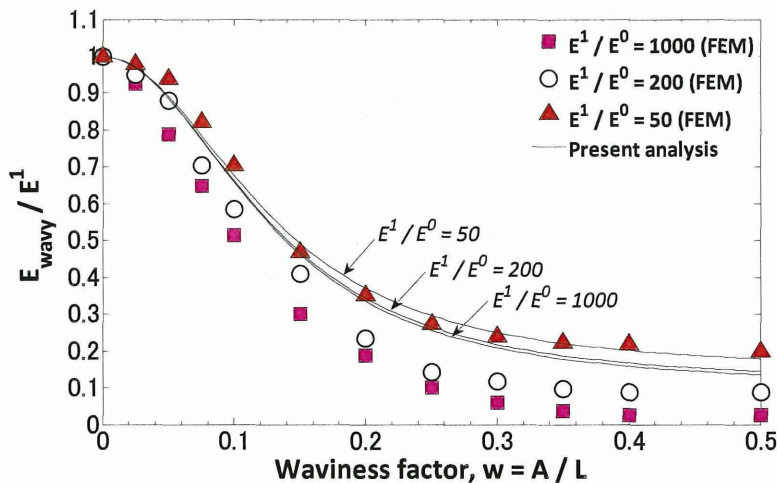
式(6)で $E^0$ はマトリックスのヤング率を表す。本解析は閉じた式(Closed-form solution)によりCNTのうねりが複合材料の機械的性質に及ぼす影響を評価でき、FEM解析のような大規模計算を必要としないという利点がある。

図4-3に $E_{\text{wavy}}$ の本解析による計算結果とFEM解析の結果<sup>8)</sup>を示す。ここで $E^0$ はマトリックスのヤング率、 $E^1$ はCNTのヤング率を表す。なお、マトリックス、CNTともに等方弾性材料と仮定してい

る。本解析結果とFEM解析ともに、CNTのうねり( $w = A/L$ )が大きくなるにしたがい、CNTの力の伝達機能が低下し、 $E_{\text{wavy}}$ が低下する結果が得られた(図4-3(a)(b))。ヤング率の相対的な低下率に着目した図4-3(b)の結果によると、本解析による予測は $E^1/E^0$ の値にそれほど敏感でないという結果が得られた。ここで $E^1/E^0$ はCNTとマトリックスのヤング率のミスマッチの度合いを表している。



(a) Effect of waviness on  $E_{\text{wavy}}$



(b) Effect of waviness on  $E_{\text{wavy}} / E^1$

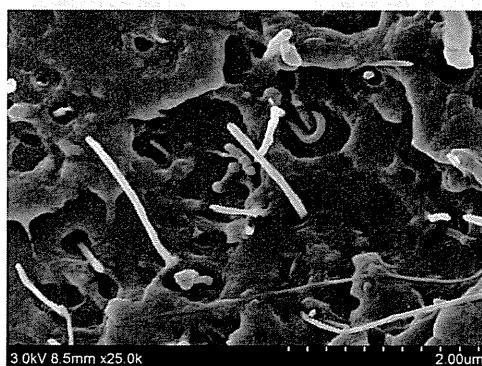
$$\nu^1 = 0.3, E^0 = 1.0 \text{ GPa}, \nu^0 = 0.3$$

図4-3 繊維のうねりがヤング率に与える影響<sup>8)</sup>

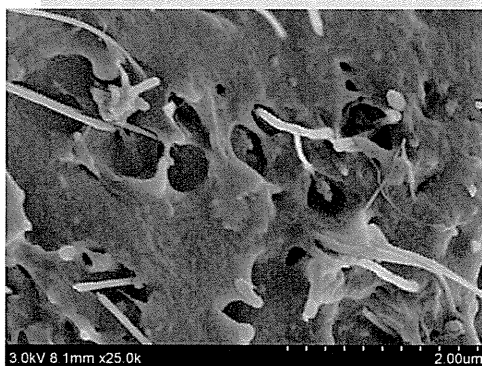


CNT-PEEK 複合材料の微視的構造を図 4-4 に示す。図 4-4 が示すように、実際の複合材料中には CNT のうねりに加えて、CNT 周辺の空隙とそれに伴う CNT- Polymer 間の不完全界面、そして CNT の凝集

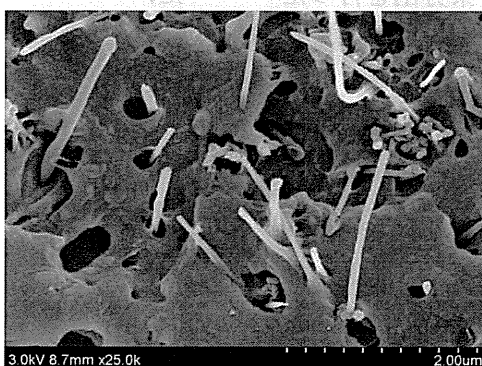
が観察され、これらの要因も複合材料の機械的性質に大きな影響を及ぼすことが考えられる。これらの要因の影響を検証するために、今後の研究で新たな解析モデルの構築に取り組む必要がある。



(a) CNT volume fraction  $\phi = 0.03$



(b) CNT volume fraction  $\phi = 0.05$



(c) CNT volume fraction  $\phi = 0.07$

図 4-4 CNT-PEEK 複合材料の SEM 画像

## 4-2 脊椎ケージの有限要素解析

3D-CAD で脊椎ケージの形状を作成し、圧縮試験下におけるケージの応力分布を有限要素解析で求めた。特に脊椎ケージの 3D-CAD 形状データの解析へのインポートおよびインポートされたケージの有限要素分割、圧縮試験に対する解析条件の設定、圧縮下の応力分布表示を試みた。

### 4-2-1 方法

脊椎ケージ圧縮試験の力学解析は、3D-CAD で作成した形状データを汎用有限要素解析ソフト Abaqus (ver6. 11, SIMULIA) に読み込み実行した。3D-CAD から Abaqus への形状データの受け渡しは、CAD システム間で相互にグラフィックのやり取り可能な中間データ形式である IGES 形式で行った。図 4-5 に Abaqus にインポートした脊椎ケージを示す。

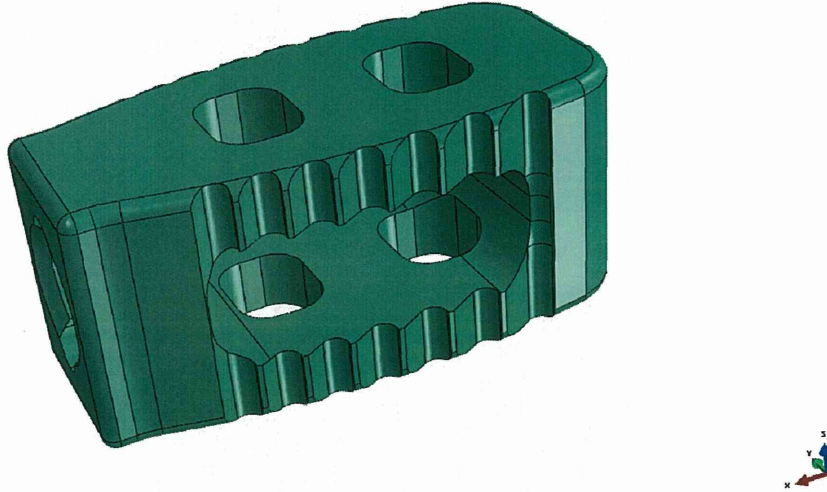


図 4-5 Abaqus にインポートされた脊椎ケージの形状モデル

読み込んだ形状モデルを Abaqus のフリーメッシュ機能により 10 節点 4 面体要素で要素分割を行った (図 4-6) . 分割したケージの有限要素モデルは、

総節点数 469, 452 個、総要素数 316, 549 個となった。

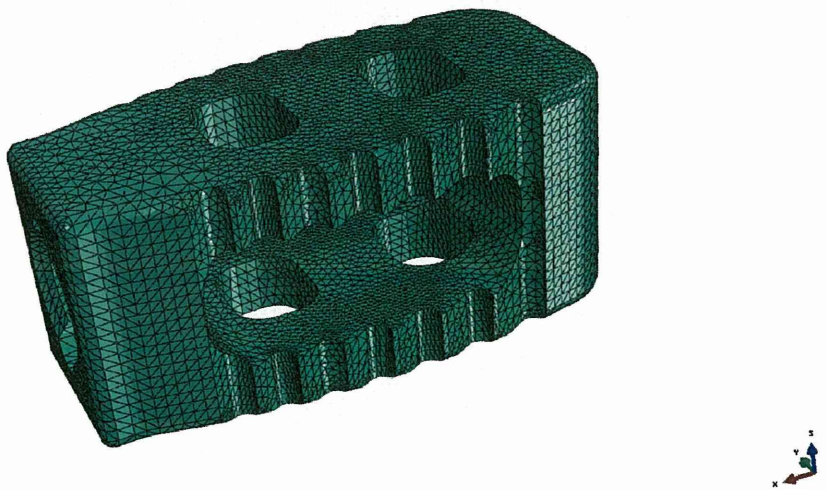


図 4-6 脊椎ケージの 4 面体要素による有限要素分割

解析条件として、脊椎ケージは等方線形弾性体と仮定し、その材料特性は steel の物性値を参考に縦弾性係数 209GPa、ポアソン比 0.3 を与えた。圧縮試験の境界条件は、図 4-7 に示すケージ下面を完全固定し、ケージ上面に 50MPa の圧縮圧力を

与えた。外力として一軸の圧縮力を与えた時に発生するケージ表面、あるいは内部に発生する圧力の伝播状態をみるために、構造物強度に対する評価指標である応力の分布を表示させた。

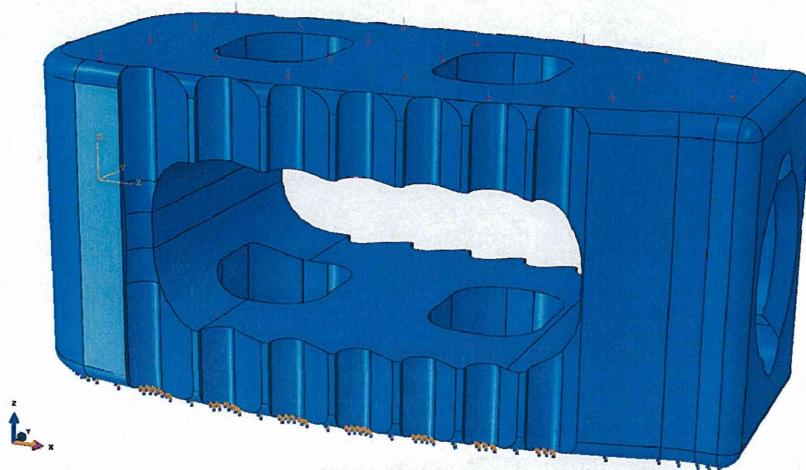


図 4-7 圧縮試験における境界条件

#### 4-2-2 結果

圧縮下における脊椎ケージの応力分布を図 4-8 ~ 図 4-11 に示す。物体内部の力の流れや引張または圧縮に対する指標である最大主応力 ( $\sigma_1$ )、中

間主応力 ( $\sigma_2$ )、最小主応力 ( $\sigma_3$ ) とそれらの方向を、図 4-8 ~ 図 4-10 に示す。各主応力に対し、正值は引張、負値は圧縮を示す。

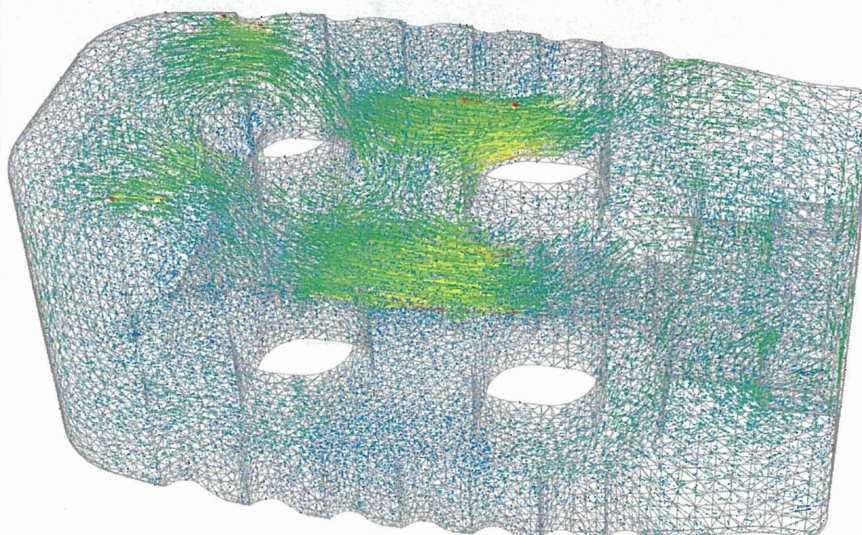
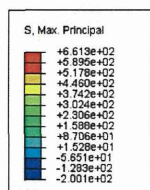


図 4-8 最大主応力



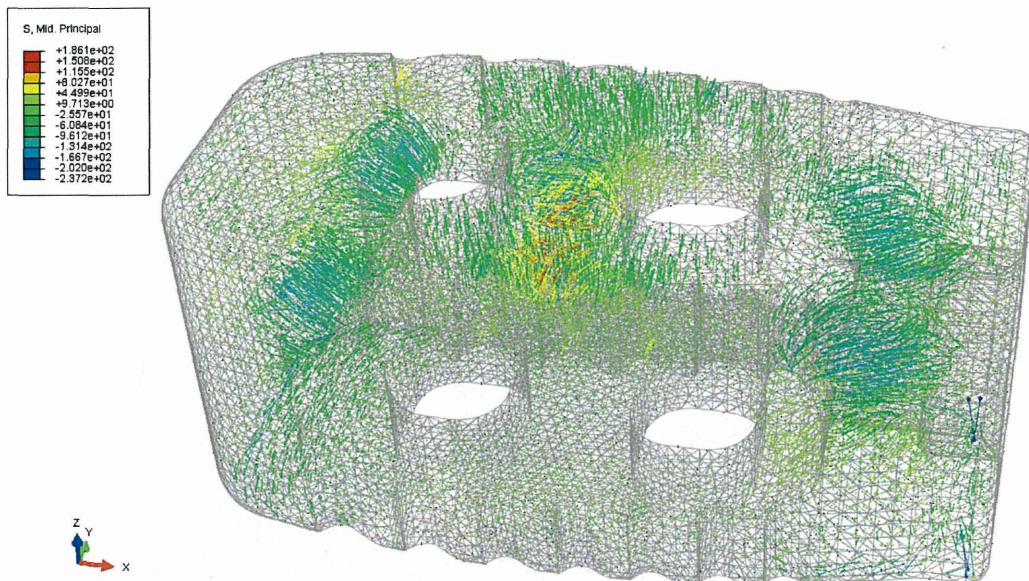


図 4-9 中間主応力

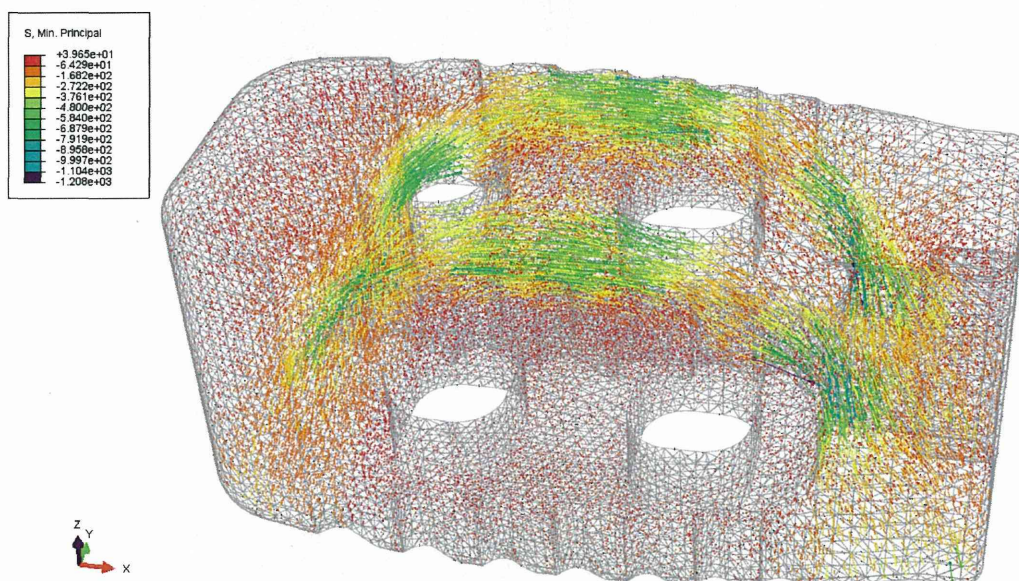


図 4-10 最小主応力

脊椎ゲージを正面，側面，上面から見た時の Mises 相当応力分布を図 4-11 に示す。Mises の相当応力は材料の降伏（破壊）に対する指標として

用いられる。また，ケージ内部の応力分布について任意断面で示したものを図 4-12 に示す。



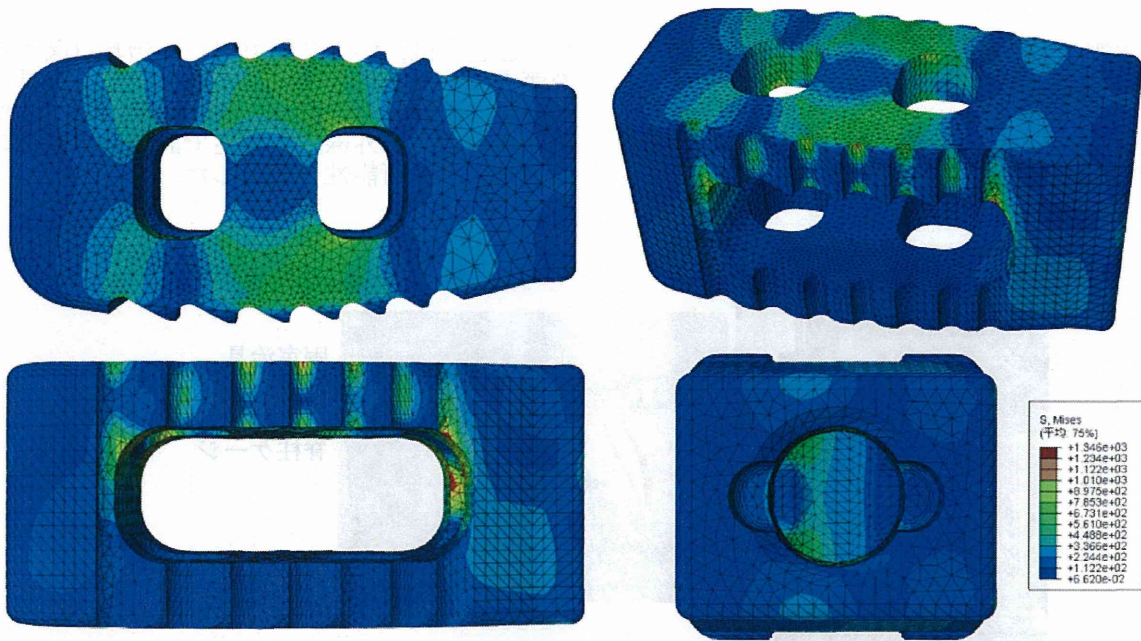


図 4-11 脊

椎ケージの正面，側面，上面における Mises 相当応力分布

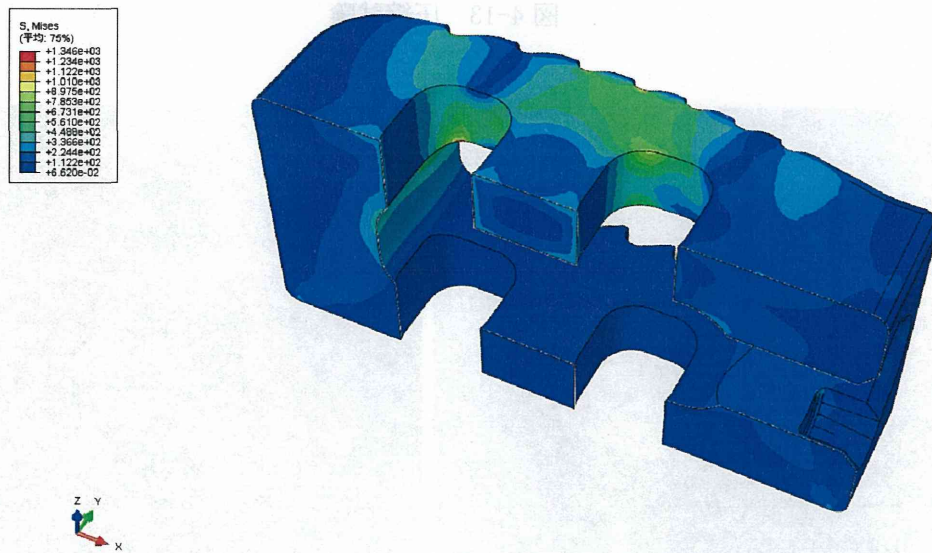


図 4-12 脊椎ケージ断面の Mises 相当応力分布

以上より，脊椎ケージの 3D-CAD 形状データを IGES データ形式で Abaqus に読み込めることを確認した。読み込んだ形状モデルは，4 面体要素によるフリーメッシュ分割機能によりその形状を忠実に再現し

た有限要素モデルに分割することができた。圧縮試験条件を設定して解析を実行し，圧縮時のケージ表面及び内部の応力分布図を視覚化することが可能となった。

#### 4-3 赤外線応力測定との連携のための脊椎ケージ力学試験の有限要素解析

赤外線応力測定における脊椎ケージの圧縮試験(図 4-13) のシミュレートをも有限要素解析で試み

た. ここでは, 圧縮試験で用いた治具(図 4-14)の要素分割, 治具とケージの組み立て, 治具とケージ間の接触条件の設定, 圧縮試験に対する解析条件の設定, 赤外線応力測定で計測した同種の応力分布表示の可能性を検討した.

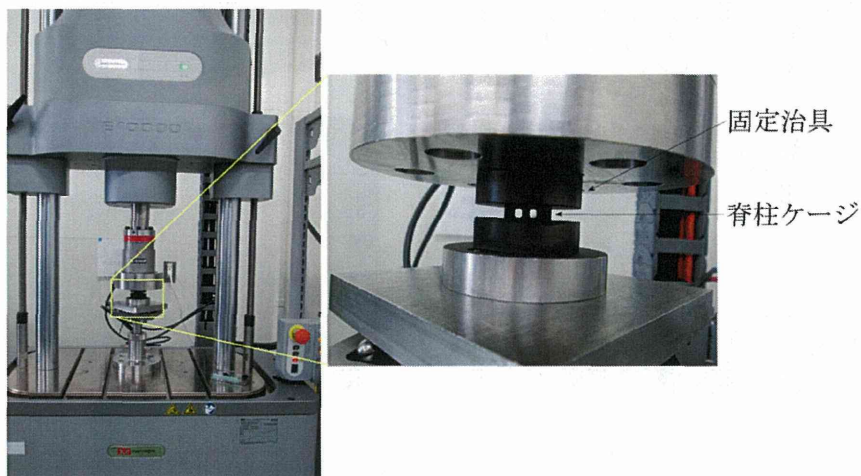


図 4-13 圧縮試験

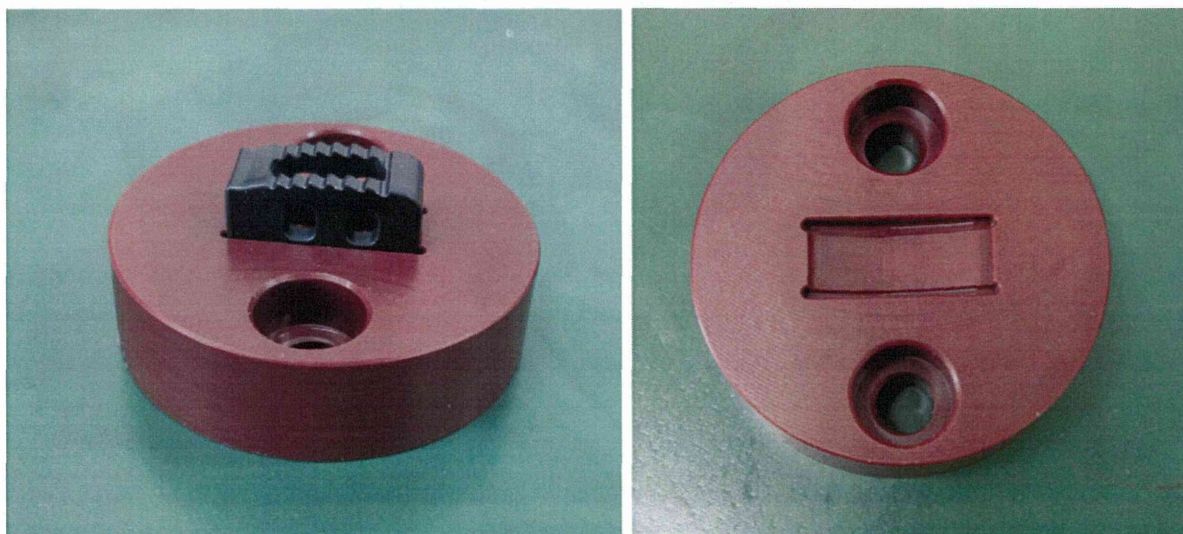


図 4-14 脊椎ケージ用固定治具

##### 4-3-1 方法

3D-CAD で作成した固定治具の形状データを Abaqus に読み込んだ(図 4-15). 3D-CAD から Abaqus

への形状データの受け渡しは, ケージと同様に IGES 形式で行った.