

図 4-15 Abaqus にインポートした治具の形状モデル

インポートした形状モデルを 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。分割したケージの有限要素モデルは、総節点数 359,390 個、総要素数 253,309 個となった。

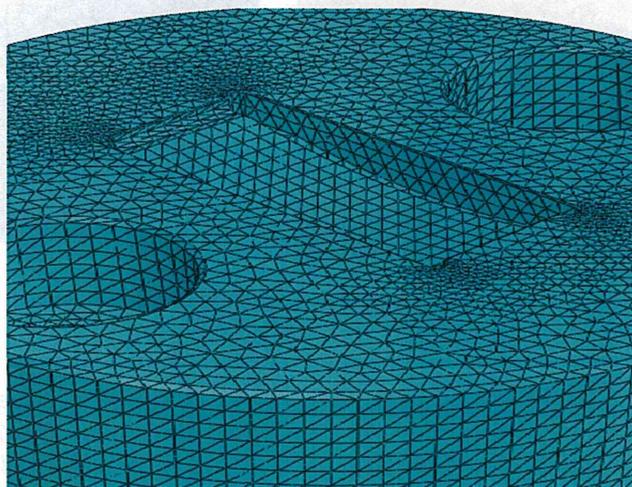


図 4-16 治具の 4 面体要素による有限要素分割

図 4-13 の圧縮試験と同じ脊椎ケージと固定治具の組み合わせを Abaqus 上で位置関係を指定し、アセンブリを設定した (図 4-17)。図 4-18 で強調表

示した治具とケージ間の表面に、接触相互作用特性として摩擦係数 0.2 の接触条件を設定した。

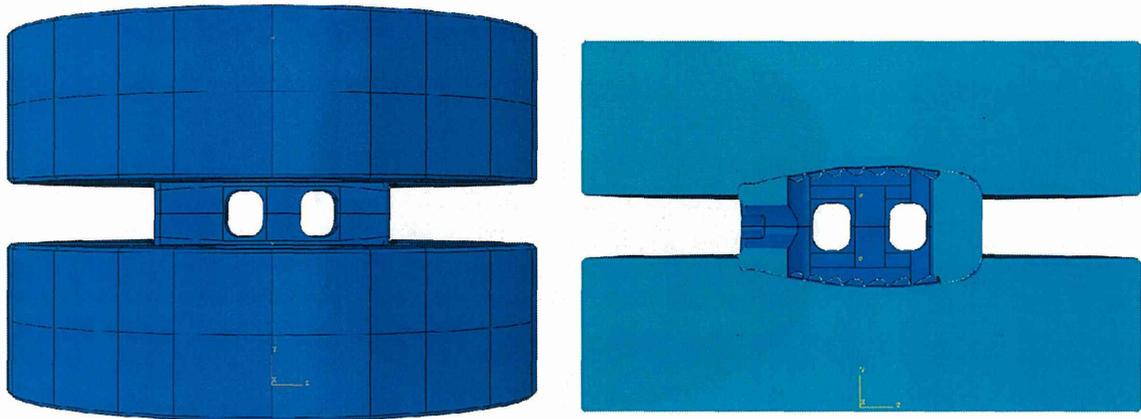


図 4-17 脊椎ケージと治具の組み立て正面図と断面図

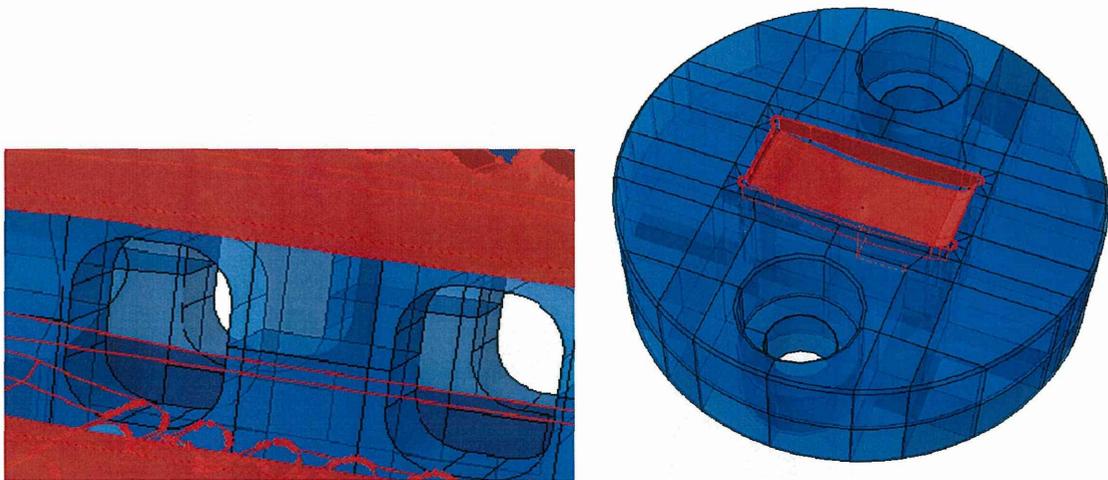


図 4-18 脊椎ケージと治具の接触表面

解析対象の材料特性として、脊椎ケージと治具はともに等方線形弾性体と仮定した。脊椎ケージの材料特性は、純 PEEK の物性値を参考に縦弾性係数 3368 MPa、ポアソン比 0.4 を与えた。治具の材料特性は、PPSU の物性値を参考に縦弾性係数 2300 MPa、ポアソン比 0.4 を与えた。圧縮試験の境界条件は、図 4-19 に示す下方治具の下面を完全固定し、上方治具の上面に圧縮力を与えた。熱弾性法に基

づく応力測定では、非接触での対象物表面の応力測定が可能で、被測定物の材質に制限が少ない特徴があるが、測定には荷重の繰り返し負荷が必要となる。応力測定時に実行した圧縮試験では、治具上面に 337.5 N~3375 N、2 Hz で周期的に時間変化する繰り返し荷重を与えた。本件ではまず単純な圧縮試験状態を再現するために、治具上面に最大荷重 3375 N の静的な圧縮力を与えた。

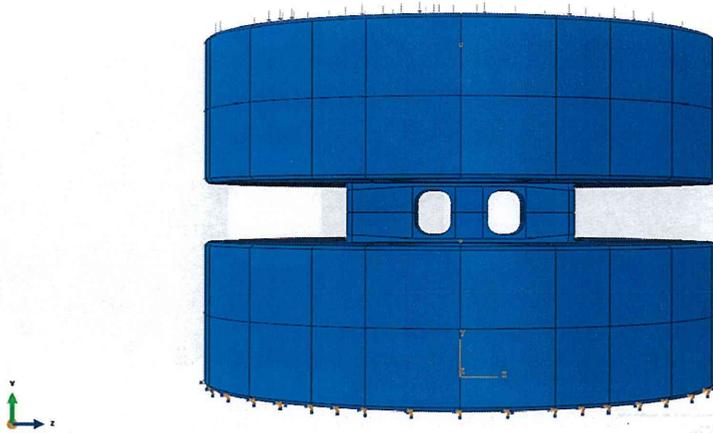


図 4-19 圧縮試験の境界条件

対象物体（固体）に、引張応力を作用させると応力変動に比例した温度降下が、逆に圧縮応力を作用させれば温度上昇を生じる熱弾性現象が起きる。この温度変化は等方均質な線形弾性体の材料においては主応力の総和の変化量に比例することから、熱弾性法に基づく赤外線応力測定では赤外線サーモグラフィで測定した温度変化をもとに主応力総和の時間変化分布を計測する。本件では赤外

線応力測定で計測した同種の応力分布として最大、中間、最小主応力の総和の分布を表示させた。

#### 4-3-2 結果

本圧縮試験モデル全体の主応力総和の分布を図 4-20 に示す。また、脊椎ケージのみを抽出した主応力総和分布を図 4-21 に示す。

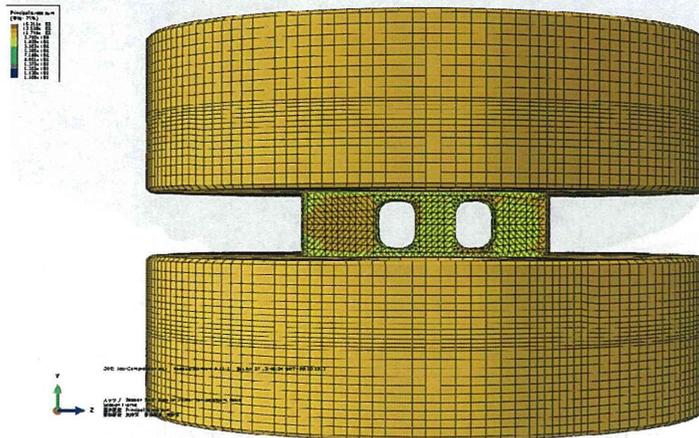


図 4-20 圧縮試験有限要素モデルの主応力総和分布

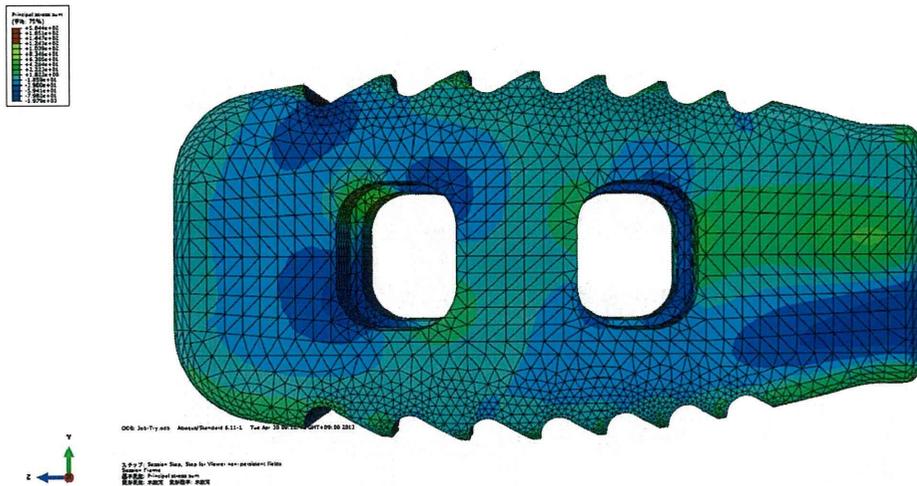


図 4-21 脊椎ケージの主応力和分布

ケージの応力分布において、応力分布が滑らかに変化せず不連続になっている(図 4-22)。

これは要素分割に依存してライン (応力の集中) 発生したものと考えられる。

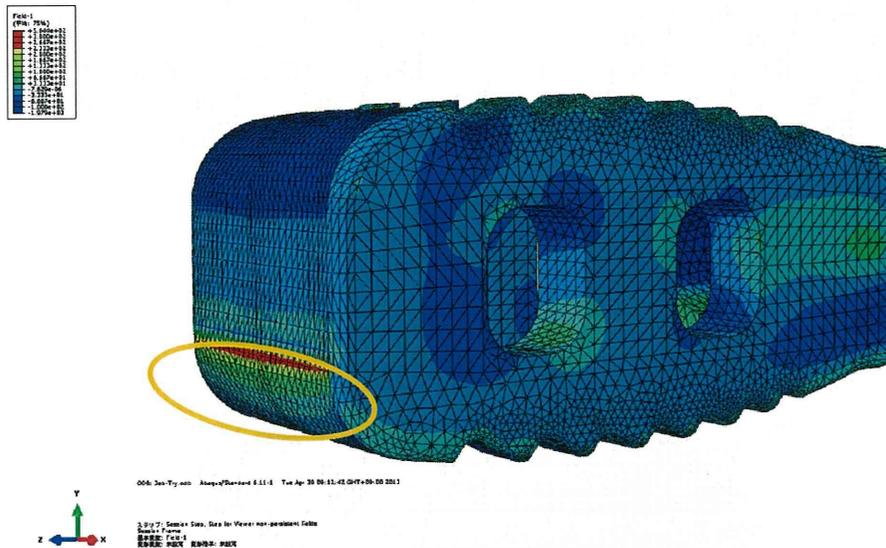


図 4-22 脊椎ケージ表面の不連続な応力分布

本圧縮モデル全体では治具とケージ合わせて総節点数 1,188,232 個、総要素数 823,167 個と、節点数、要素数ともに多いため、解析コストが大きい。現状の要素分割はフリーメッシュ機能を用いたものであるため要素数が多く、解析に非常に時

間がかかる。また、自動で要素分割を行う際、偶発的に図 4-23 で強調表示したような形状の歪んだ要素が発生する可能性がある。このような不適切な要素があると解析精度が著しく損なわれ、収束など解析コストが悪化する。

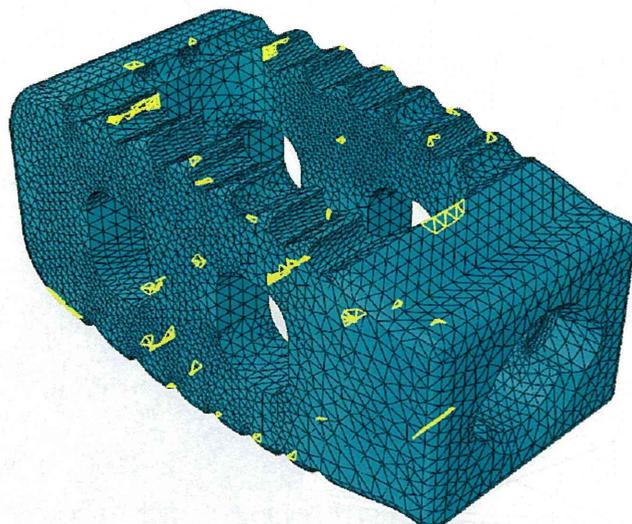


図 4-23 要素分割の際に発生した形状の歪んだ要素

以上の問題点より、解析対象物体の要素分割に対して、物体を要素分割の容易な単純形状の小領域にするためのパーティションを図 4-24 のように手動で設定した。この際、歪んだ要素が発生しないように試行した。脊椎ケージは手動でパーティ

ションを入れ、要素分割の検討を行ったことで、脊椎ケージは総節点数 280,216 個、総要素数 186,124 個、治具は総節点数 310,612 個、総要素数 216,452 個まで減少した。

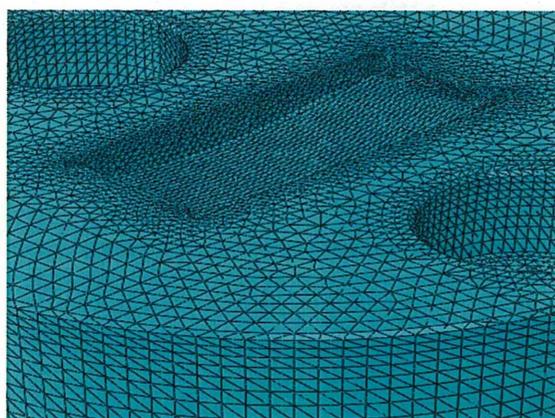
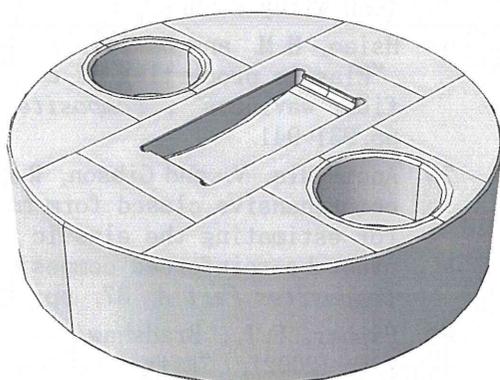
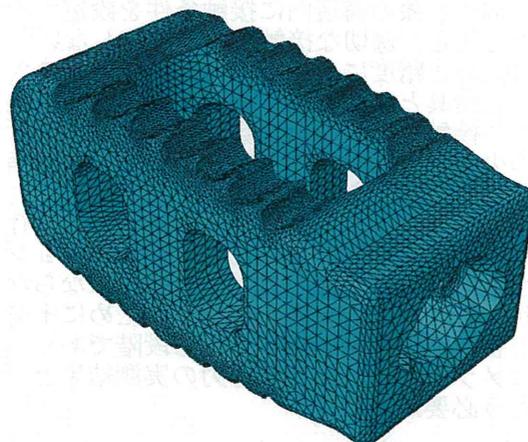
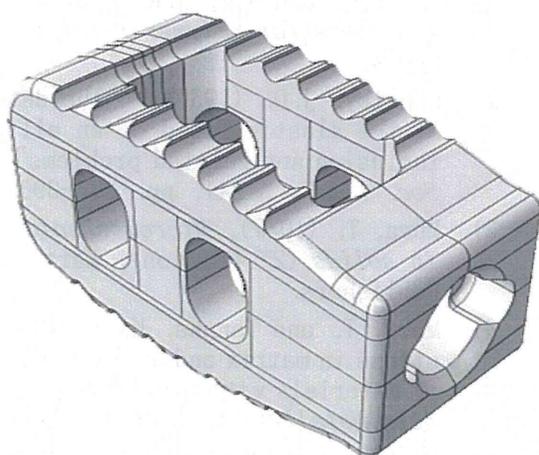


図 4-24 脊椎ケージと治具のパーティション分割

また、1つの6面体（立方体）は5つ、または6つの4面体に分割できることから、4面体要素分割よりも6面体による分割の方が空間の要素分割数の更なる減少が期待できる。治具を図4-25に示すパ

ーティションを設定し、8節点6面体要素分割した結果、総節点数93,708個、総要素数86,096個となった。

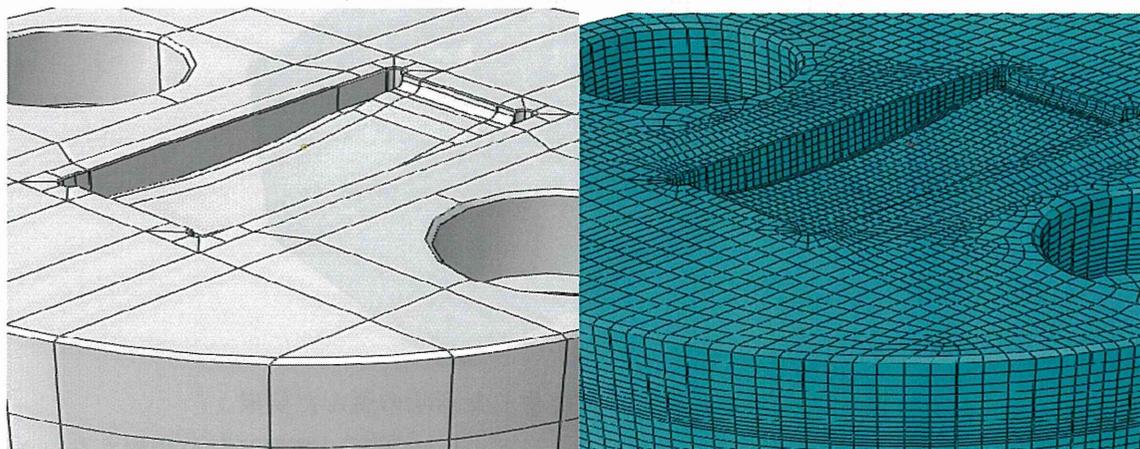


図4-25 治具の6面体要素による有限要素分割

有限要素解析でシミュレートした実現象や実験結果と解析結果との間に生じる差異を小さくするためには、適切な境界条件の設定が不可欠である。一般的に解析対象の構造内に接触条件を設定する必要がある場合、適切な接触条件を設定しないと、解析の収束性と精度に多大な影響を及ぼす。このことから、治具とケージ間の表面相互の接触条件において、接触領域や摩擦係数の指定など、解析コストの少ない適切な条件をパラメータや領域指定を変更する必要がある。

解析結果が要素分割の粗密さや解析条件に依存するため、十分な精度を持ったシミュレーションの妥当性を示すには条件の検討しなければならない。現状としては応力分布を把握するために十分な精度と妥当性の確保を行っている段階であり、赤外線カメラを用いた熱弾性応力の実測結果との比較を行う必要がある。

#### 4-4 参考文献

- 1) Ma, P.C. and Kim, J.K. (2011), *Carbon nanotubes for polymer reinforcement*, CRC Press.
- 2) Eshelby, J.D. (1957), "The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems", *Proc. R. Soc. Lond., A* 241, pp. 376-396.
- 3) Mura, T. (1987), *Micromechanics of defects in solids* (2<sup>nd</sup> Edition), Martinus Nijhoff Publishers.
- 4) Mori, T. and Tanaka, K. (1973), "Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions", *Acta Metall.*, 21, pp.571-574.
- 5) Qu, J., and Cherkaoui, M. (2006), *Fundamentals of micromechanics of solids*, John Wiley & Sons, Inc.
- 6) Hsiao, H.M. and Daniel, I.M. (1996), "Elastic properties of composites with fiber waviness", *Composites Part A*, 27A, pp. 931-941.
- 7) Anumandla, V. and Gibson, R.F. (2006), "A comprehensive closed form micromechanics for estimating the elastic modulus of nanotube-reinforced composites", *Composites Part A*, 37, pp.2178-2185.
- 8) Fisher, F.T., Bradshaw, R.D. and Brinson, L.C. (2002), "Effects of nanotube waviness on the modulus of nanotube-reinforced polymers", *Applied Physics Letters*, 80(24), pp. 4647-4649.

## 5. 動物試験

動物実験は信州大学動物実験実施規定に基づいて行った。in vivo 試験として、日本白色家兔（オス、体重2.5-3.5kg）の大腿骨遠位端に、カーボンナノチューブ（carbon nanotubes；CNT）を複合したPEEK（CNT/PEEK）を埋植し骨親和性、骨誘導能、骨固定力の評価を行う。コントロールの純粋なPEEKとの相違を明らかにすることで、CNT/PEEKの骨親和性、骨誘導性を検討し、さらにどの程度CNTを混合したCNT/PEEKが、より脊椎手術のための高機能インプラントとして優

れているか組織学のおよび力学的試験に評価することを目的とした。使用したCNT/PEEKおよびコントロールのPEEKインプラントは径5.0X14.0 mmの大きさで（図5-1）、組織親和性試験を行うための単純な円柱状のインプラントと、引き抜き試験を行うために円柱状のインプラントにネジ穴を空けたインプラントを作成した。家兔大腿骨への埋植期間は4、12、26週と設定した。CNT/PEEKはCNTを純粋なPEEKに3、5、7%複合したものを作成し、骨親和性試験（組織標本）用、力学試験（引き抜き試験）用をそれぞれn=3、n=5とした。

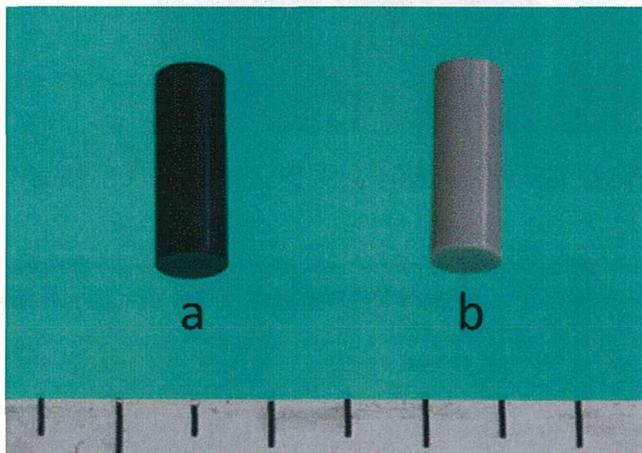


図5-1 動物試験用インプラント  
a. CNT/PEEKインプラント  
b. PEEKインプラント

日本白色家兔にネンブタール(30~40mg/kg)を耳静脈注射にて麻酔を行い、無菌条件下で手術を行った。膝関節を皮膚上から触り関節裂隙、大腿骨顆部を確認して顆部の外側から大腿骨遠

位部に沿って皮膚切開を置き、大腿側面の筋を縦に切開して大腿骨に達した。径5mmのドリルにて大腿骨遠位顆部の外側側面から内側に向けて骨孔を作成した（図5-2）。

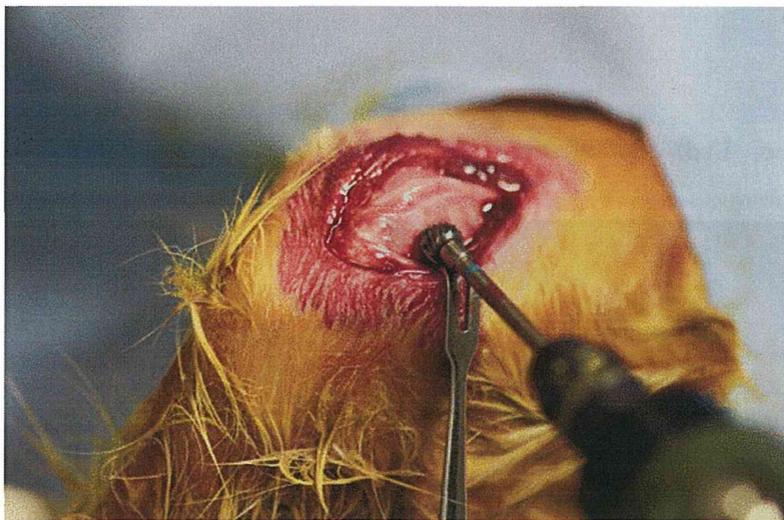


図5-2 大腿骨顆部外側より径5mmのドリルにて骨孔作成

骨孔、創内を生理食塩水にて洗浄して、ガーゼにて圧迫して止血を確認後にインプラントを挿

入、筋腹と皮膚を縫合して手術を終了とした(図5-3)。

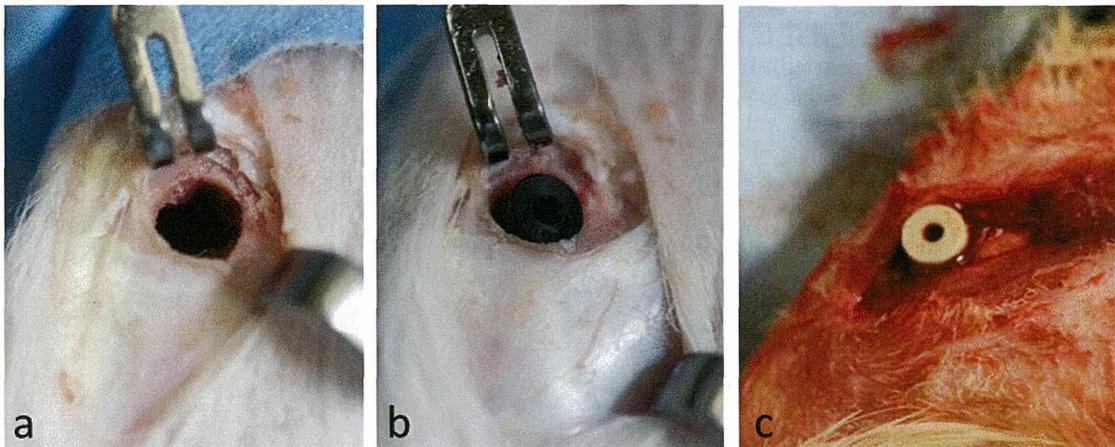


図5-3 インプラント埋植手術 a. ドリルにて骨孔作成 b. CNT/PEEKインプラント挿入 c. PEEKインプラント挿入

手術後の家兔を1羽、静脈麻酔薬の過量投与にて安楽死させ、大腿骨を採取し、動物用マイクロCT(図5-4)にてインプラントの埋植部位を確

認した。インプラントが大腿骨顆部の骨皮質を貫いて、海綿骨内に埋植されていることが確認できた(図5-5)。



図5-4 小動物用CT R-mCT (RIGAKU, co. Ltd)

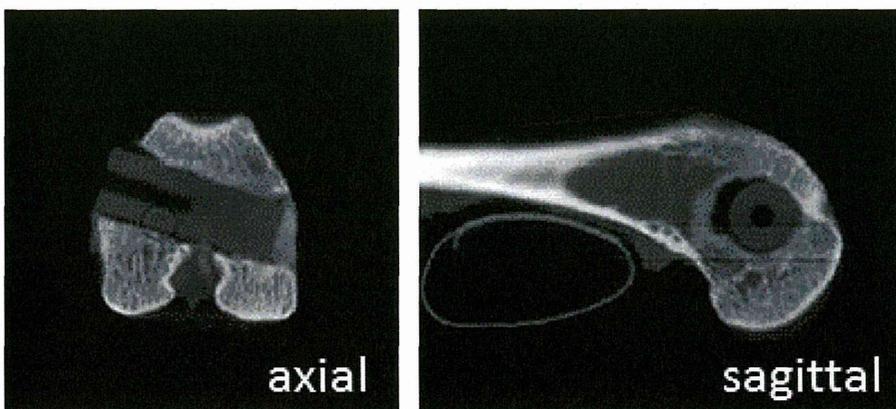


図5-5 インプラント埋植直後のCT像

白色家兎は術後4、12、26週に静脈麻酔薬の過量投与にて安楽死させ、評価を行う。家兎より大腿骨を採取して、動物用マイクロCTにて埋植したインプラントと骨の界面を評価する。組織標本用インプラントを挿入してある大腿骨(各群 n=3)はホルマリン固定後にオステオレジン包埋キット(和光純薬、297-56001)を使用して、インプラントを取り出さずにメタクリル酸メチルモノマー(MMA)を浸透させて樹脂包埋を行う。樹脂包埋を行った大腿骨は硬組織薄切標本作成用ゼーゲミクロトーム(図5-6)にて10 $\mu$ mの厚さに薄切を行う。薄切はインプラントの長軸に対して垂直に輪切りとし、1つの検体について5枚の薄切標本を作成する。標本はヘマトキシリン・エオジン染色(HE染色)を行い、光学顕微鏡にて評価を行う。評価は病理組織像にてインプラントと骨の界面を観察し、炎症反応や骨溶解などの有害反応の有無、程度を評価する。また、JIS TS T 0011に則り、骨接触率、骨形成率、新生骨の厚さを定量化し、PEEK群、CNT/PEEK群(CNT含有量3、5、7%)各群を比較して骨親和性、骨誘導性を評価する。力学試験用インプラントを埋め込んだ大腿骨(各群 n=5)は引き抜き試験を行い、骨固定力を評価する。引き抜き試験は最大荷重をpull-out strength (N)として測定し、各群の骨固定力を比較する。PEEK群とCNT/PEEK(CNT含有量3、5、7%)各群の骨組織親和性、骨誘導能、骨固定力を評価し、CNT/PEEKが脊椎固定用インプラントとして従来のPEEK材よりも優れていることを示す。



図5-6 ゼーゲマイクロトーム Leica SP1  
600 (Leica, co. Ltd)