

欠陥を内包したチタン製鑄造クラスプの機械的性質に関する研究

渡邊 誠

松本歯科大学 大学院歯学独立研究科 顎口腔機能制御学講座
(主指導教員：黒岩 昭弘 教授)

松本歯科大学大学院歯学独立研究科博士（歯学）学位申請論文

Mechanical properties of a dental casting clasp made by
the titanium which contained an internal defect.

MAKOTO WATANABE

*Department of Oral and Maxillofacial Biology, Graduate School of Oral Medicine,
Matsumoto Dental University
(Chief Academic Advisor : Professor Akihiro Kuroiwa)*

The thesis submitted to the Graduate School of Oral Medicine,
Matsumoto Dental University, for the degree Ph.D. (in Dentistry)

要 旨

【目的】

本研究は補綴装置の構成要素の破壊の一因である鑄造欠陥に着目し、特に欠陥がチタン製クラスプに内包されたときの機械的性質について検討する事を目的に、まず、基本的な形態の試験片に実験的な欠陥を加工し、3次元有限要素解析と物証実験を比較し、最終的には欠陥を内包したモデルを製作し機械的性質に及ぼす影響について検討した。

【方法】

実験1 有限要素解析パラメータの算出と妥当性の検討

Commercially Pure チタン（以降、CP チタンと呼ぶ）には JIS 第2種の線材（直径1.0, 2.0

mm）と鑄造用インゴットを使用した。まず直径2.0mm 線材と鑄造体について引張試験を行い、それぞれの応力-ひずみ曲線から得られた値を解析パラメータとした。さらに、線材と鑄造体について曲げ試験（本実験で行う曲げ試験はすべて片もちはり曲げ試験とした）を行い、実測値と解析値を比較検討し、解析に用いるパラメータの妥当性を確認した。

実験2 実験的に欠陥を加工した線材の曲げ試験
鑄造欠陥を想定して直径0.3, 0.5, 0.7mmの仮想欠陥を1試料につき1ヶ所切削加工した直径1.0mm 線材の曲げ試験を行った。欠陥の位置は固定部から3.0, 6.0, 9.0mm（以降、固定側、中央部、荷重側と呼ぶ）として、機械的性質に与える影響について検討した。

実験3 テーパー付き鋳造体における曲げ試験と非線形解析の比較

テーパー付き鋳造体に関して、万能試験機による曲げ試験の結果とコンピュータ上で製作したモデルによる解析値を比較した。

実験4 欠陥を含有したテーパー付き鋳造体の非線形解析

直径0.3, 0.5, 0.7, 1.2mmの球状欠陥を1試料につき1ヶ所含有したテーパー付き鋳造体のモデルについて解析した。また、欠陥の位置は実験1と同様に固定側、中央部、荷重側に設定した。作製したモデルについて曲げによる解析を行い、欠陥の位置と大きさが鋳造体に与える影響について検討した。

実験5 欠陥の位置が機械的性質に及ぼす影響

これまでの実験で曲げ試験時に最も差が認められた固定側の条件について、鋳造体の位置を中心軸から外側と内側に0.05mmずつ偏位させて解析した。

【結果および考察】

欠陥が鋳造クラスの機械的性質に与える影響について有限要素で解析を行ったところ、

1. 直径1.0mmの鋳造による円柱状試験片では、欠陥の直径が0.3, 0.5mmのとき、機械的性質には影響を及ぼさず、直径が0.7mm以上になると疲労破壊が生じる可能性が示唆された。
2. 幅2.0mm, 厚さ1.7mm(固定部), 幅1.6mm, 厚さ1.3mm(荷重部)長さ13.0mmのテーパー付き鋳造体では直径1.2mmの欠陥が固定側に存在すると機械的性質は低下し、より小さな応力で変形を起こすことが判明した。
3. 欠陥が鋳造体の外側に偏位もしくは外側に向かって開放された状態になると機械的性質が大きく低下する傾向が示された。

一連の結果より、臨床で欠陥を内包した鋳造体を補綴装置に応用する場合、幅2.0mm, 厚さ1.7mm(固定部), 幅1.6mm, 厚さ1.3mm(荷重部)長さ13.0mmのテーパー付き鋳造体では直径1.2mm以上の欠陥が鉤脚部から鉤肩部に存在すると、欠陥周囲に応力が集中し、破壊する可能性が高くなるので、非破壊検査によってこのような欠陥が認められた場合、再製作する必要がある事が判明した。

緒言

欠損補綴によって口腔の諸機能が回復することは補綴臨床の最も重要な目的である。加えて、口腔内に装着された補綴装置は長期に壊れることなく機能しなければならない。しかしながら、日々の診療で補綴装置を修理する機会は多く、その際、補綴装置を構成する高分子材料は比較的補修が容易であるのに対して、金属材料は根本的に補綴装置を作り直す必要が多い。この金属材料の破壊の原因には金属疲労を始めとして鋳造時の欠陥を起始とするものも見受けられる。

一方、チタンおよびチタン合金には優れた生体安定性や低比重、金合金に弾性率が近いことなどから歯科臨床応用の範囲が拡大している^{1,2)}。これまで我々は優れた性質をもつチタンを安定して鋳造するために数多くの検討を行ってきた^{3,4)}。その中でチタンは、金属の融点が高く、それに対して鋳型は反応を抑えるために鋳型温度を低く設定するので、非常に鋳型と溶湯の温度差が大きく、鋳込時に溶湯は凝固しながら鋳窩を満たすので鋳込み不良が生じやすく、加えてチタン自身の比重が低いのでガス圧鋳造を行った場合、独特な球状の形態を示す欠陥が発生しやすいと報告している。この欠陥は、遠心鋳造では生じにくい欠陥であるが、チタン鋳造に遠心鋳造を応用した場合、鋳造機の規模が大きくなり、鋳造圧の立ち上がり、溶解時の雰囲気コントロールしにくいので、現状ではガス圧のみによって構成された鋳造システムが多く存在する^{5,6)}。そのため、ガスによる鋳造欠陥の予防についての検討が主に行われ、欠陥を内包した補綴装置の機械的性質について詳細な検討は行われていない。しかしながら補綴装置に欠陥が存在する時に発生するリスクや使用限界を知ること、補綴装置の寿命や安全性を予測することとなり、予知性の高い治療に必要な。

以上の背景から本研究は補綴装置の破壊の一因である欠陥の存在について、特に欠陥が存在するチタン製クラスの機械的性質に及ぼす影響について検討する事を目的に、まず、基本的な形態の試験片について3次元有限要素解析と物証実験を比較し、最終的には欠陥を内包したモデルを製作し機械的性質に及ぼす影響について検討した。

実験材料および方法

実験 1 有限要素解析パラメータの算出と妥当性の検討

1) 試料の作製

金属は JIS 第 2 種 Commercially Pure チタン (以降, CP チタンと呼ぶ) 線材 (直径 2.0×45.0 mm, 東京チタニウム), 鋳造体には JIS 第 2 種 CP チタンインゴット (直径 25.0×9.0 mm, 19.5 g, 新金属工業) を使用した。

鋳造による試験片の作製は, まず, 50.0 mm に切断した直径 2.0 mm の SUS 304 を円錐台に植立し鋳造用の蠟型とし, 鋳型の通気度を一定にするために埋没時に蠟型の端から鋳造リング底面までの距離を 5.0 mm に設定した。緩衝材 (ニューキャストインライナー, CG) を 1 枚ライニング (乾式) し, Al_2O_3 , MgO を骨材としたセメント系埋没材 (チタンキャストコム-TC, デンケン) を混水比 0.2 にて 15 秒手練和した後, 真空練和器にて 30 秒練和し, 練和終了から 1 分以内に埋没した。埋没材が硬化した後に SUS 304 を引き抜き, 埋没 2 時間後に電気炉 (KDF009H, デンケン) にて 850℃ まで 6℃/分にて昇温し, 850℃ にて 1 時間係留した後 100℃ まで炉内放冷し, 全方向加圧型鋳造機 (AUTOCAST HC-III, GC) にて鋳造圧 7 kgf/cm² で鋳造を行った。鋳造終了後, 大気中放冷し, 埋没材除去後, 押し湯から鋳造体を切断し, アルミナを 2.0 気圧にて 8 秒間, 鋳造体を 90 度ずつ回転させながらサンドブラスト (Jet Blast II, モリタ) した。その後, 各々試験片の長さを引張試験は 45.0 mm, 曲げ試験 (本研究ではすべて片もちり曲げ試験) は 33.0 mm に調整した。なお, 鋳造体はすべて X 線画像診断装置 (MAX-DC70, モリタ) を使用し, 管電

圧 70.0 kVp, 管電流 3.0 mA, 照射時間 0.06 秒にて撮影を行い, 鋳造欠陥が存在しないものを試験片とした (図 1)。

2) 有限要素解析パラメータの算出と妥当性の検討

線材と鋳造体の引張試験を万能試験機 (INSTRON[®]5800, INSTRON Japan, クロスヘッドスピード 1.0 mm/min) にて行い, 得られた応力-ひずみ曲線から弾性率と 0.2% 耐力 (以降, 耐力とする) を求め, この値を非線形解析のパラメータとした。さらに, 線材と鋳造体の曲げ試験を行った。

有限要素解析にはパーソナルコンピュータを用い, 各試験片と同じ形態のモデル (図 2) を 3 次元 CAD ソフト (Solid Works[®]2007, Solid Works Japan) にて作製し, 有限要素解析ソフト (COSMOS[®] Design Star Professional Advanced 2007, Solid Works Japan) にて非線形解析を行った。この際, 分割条件は 10 節点, 放物型 4 面体要素を用いて平均要素サイズ 0.25 mm にて分割し, 最終的に要素数 19567, 節点数 29352 のモデルを作製した。拘束条件はモデルの固定部を XYZ 軸方向について固定し, 義歯着脱時にクラブ鉤腕が外側に抜がったことを想定して固定部から 12.0 mm の位置を 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 mm 外方に変位させたときの荷重量について検討した。

3) 解析パラメータの妥当性

線材と鋳造体の物性の実測値と有限要素の解析値を比較することによって解析パラメータの妥当性を確認した。なお, 今回の実験では, 実測値と解析値の差が, 実測値の 10, 5% のときについて比較検討し, 値の近似についての基準とした。以

欠陥無し



欠陥あり



図 1: 引張試験, 曲げ試験に用いた鋳造体の X 線写真 (直径 2.0 mm)

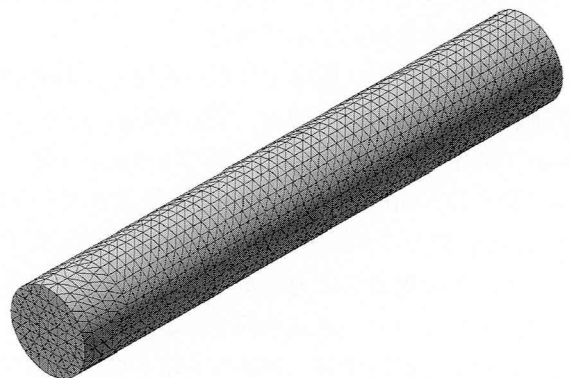


図 2: 線材の解析モデル

上のことを行い、解析パラメータの妥当性を判断した。

4) 統計処理

各試験は5回行い、得られた値の平均、偏差を求めた。また、線材と鋳造体の応力とひずみについて Mann-Whitney の U 検定を有意水準0.05にて比較した。

実験2 実験的に欠陥を加工した線材の曲げ試験

1) 試料の作製

JIS第2種CPチタン線材(直径1.0×33.0mm, 東京チタニウム)に、鋳造欠陥を想定した円柱状の仮想欠陥(直径0.3, 0.5, 0.7mm)を1試料につき1ヶ所切削加工した。この時、仮想欠陥の位置は固定部から3.0, 6.0, 9.0mmに設定した。以降、各々の欠陥の存在する位置を固定側、中央部、荷重側と呼ぶ(図3)。試験片の長さは鉤腕長12.0mmのクラスプを想定し、片持ちはり曲げ試験の圧子の接触部分として1.0mmを確保し、最終的に13.0mmの試験片を調整した(図4)。

2) 曲げ試験

試験片は精密バイス(VA-50, トラスコ中山)に固定し、曲げ試験を万能試験機(クロスヘッド

スピード0.6mm/min)にて測定した。この時の測定は実験1と同様に試験片を内側から外側へ向かって0.25, 0.5, 0.75, 1.0mm変位させたときの荷重量について検討した。また、欠陥と荷重方向に関しては仮想欠陥の軸方向が荷重方向と同一になるように固定した。

有限要素解析には同一の寸法の試験片のモデルを3次元CADソフトにて作製した後、曲げ試験を有限要素解析ソフトにて再現し、荷重、たわみおよび応力分布について解析した。

3) 統計処理

各試験は5回行い、得られた値の平均と偏差を求め、それぞれ、Kruskal-WallisのH検定を行った。有意水準は0.05とした。

実験3 テーパー付き鋳造体における曲げ試験と非線形解析の比較

1) 試料の作製

クラスプ鉤腕を想定した部分には長さ13.0mmのクラスプ用既製パターン(Rapid-Flex Pattern®, デグサ)、バイス固定部には直径2.0×20.0mmのランナーバー用既製パターン(プラキャストバー, S-2, 石福金属)にて蠟型を作製し、鋳造および埋没は実験2に供した直径2.0mmの円柱状鋳造体と同様の方法で行った。なお、鋳造体はすべてX線画像診断装置を使用し

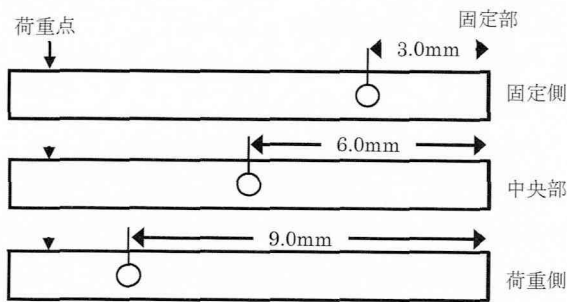


図3：線材における欠陥の設定位置

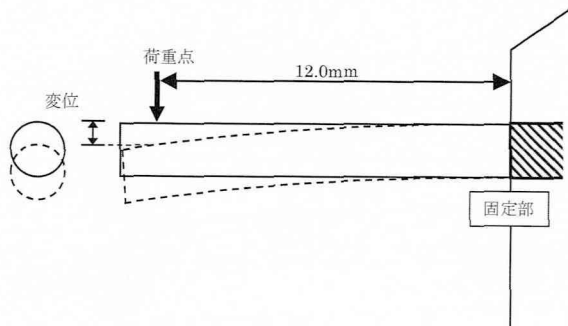


図4：線材の荷重条件

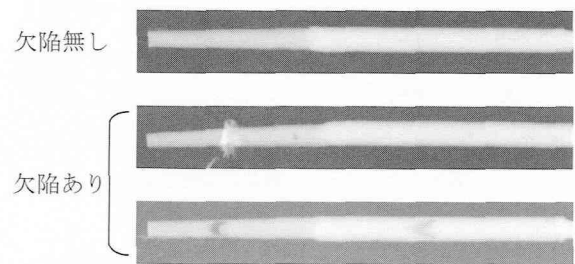


図5：テーパー付き鋳造体のX線写真

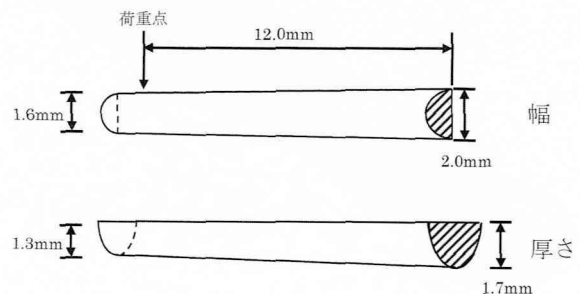


図6：テーパー付き鋳造体の形状

て非破壊検査を行い、鋳造欠陥の存在しないものを試験片とした(図5)。なお、テーパの形状は、固定部で幅2.0mm、厚さ1.7mm、荷重部で幅1.6mm、厚さ1.3mmとした(図6)。

2) 曲げ試験

試験片を精密バイスにて固定し、固定部より12.0mmの位置に万能試験機(クロスヘッドスピード0.6mm/min)にて荷重を加えた。測定は試験片を外方へ0.25, 0.5, 0.75, 1.0mm変位させたときの荷重量について検討した(図7)。

3) 欠陥の無いテーパ付き鋳造体の非線形解析

テーパ付き鋳造体と同じ形態のモデル(図8)を3次元CADソフトにて作製し、有限要素解析ソフトにて非線形解析による片もちり曲げの解析を行った。要素分割は10節点、放物型4面体要素を用いて平均要素サイズ0.25mmにて分割し、最終的に要素数11964、節点数18642のモデルを作製した。拘束条件は固定部をXYZ軸方向について固定し、義歯着脱時にクラスプ鉤腕が外側に拡がったことを想定して固定部から12.0mmの位置を0.05mmから1.0mm外方まで0.05mm毎に変位させたときの荷重量について検討した。なお、非線形解析には直径2.0mmの鋳造体引張試験によって得られたパラメータを使用した。

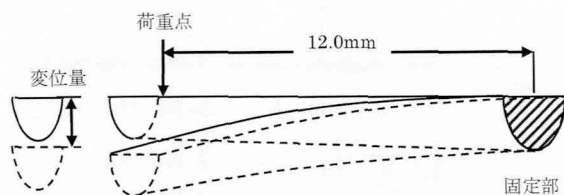


図7：テーパ付き鋳造体の荷重条件

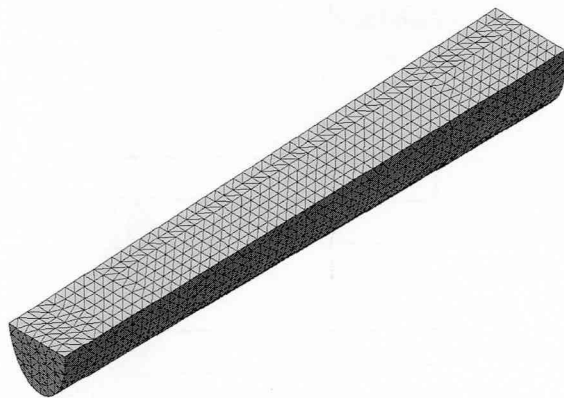


図8：テーパ付き鋳造体の解析モデル

4) 欠陥の無いテーパ付き鋳造体の実測値と解析値の比較

欠陥の無いテーパ付き鋳造体の実測値と解析値の差が、欠陥の無いテーパ付き鋳造体の実測値の10, 5%のときについて比較し、値の近似の判断基準とした。以上のことを行い、解析パラメータの妥当性について再度確認した。

実験4 欠陥を含有したテーパ付き鋳造体の非線形解析

1) 欠陥を含有したテーパ付き鋳造体の非線形解析

実験3の試験片と同じ形態のモデル(図8)を3次元CADソフトにて作製し、有限要素解析ソフトにて非線形解析による片もちり曲げの解析を行った。

欠陥を含有したモデルは実験2と同様にテーパ付き鋳造体に直径0.3, 0.5, 0.7, 1.2mm、位置固定側、中央部、荷重側に欠陥、位置を設定し、解析を行った。なお、非線形解析には実験3と同様に、直径2.0mmの鋳造体引張試験によって得られたパラメータを使用した。拘束条件はモデルの固定部をXYZ軸方向について固定し、義歯着脱時にクラスプ鉤腕が外側に拡がったことを想定して固定部から12.0mmの位置を0.25, 0.5, 0.75, 1.0mm外方に変位させたときの荷重量について検討した(図9)。

2) 欠陥の無いテーパ付き鋳造体の解析値との比較

実験3での実測値は実験の施行回数が存在し、なおかつ平均、偏差が発生するのに対し、実験4での解析値は得られる数値が1つしか存在しないので、各々の比較では欠陥の無いテーパ付き鋳

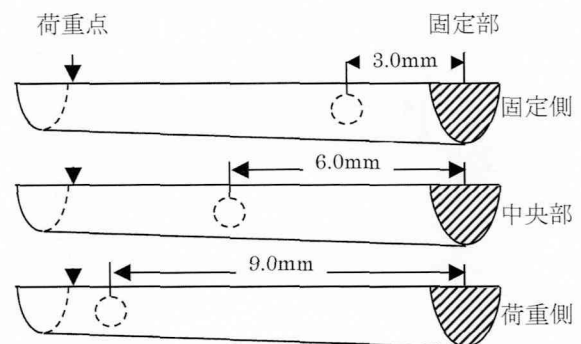


図9：テーパ付き鋳造体における欠陥の位置

造体と欠陥を含有した鋳造体の解析値の差が、欠陥の無いテーパ付き鋳造体の解析値の10、5%のときについて比較し、値の近似を判断した。

実験5 欠陥の位置が機械的性質に及ぼす影響

実験4に供したテーパ付き鋳造体の解析モデルに直径1.2mmの欠陥を設定し、欠陥の位置は、曲げ試験時に荷重と変位置に最も差が生じた固定側とし、中心軸から外側と内側にそれぞれ0.05mm偏位させた条件についてひずみと応力分布について検討した(図10)。なお、拘束条件はモデルの固定部をXYZ軸方向について固定し、義歯着脱時にクラスプ鉤腕が外側に拡がったことを想定して固定部から12.0mmの位置を0.25, 0.5, 0.75, 1.0mm外方に変位させたときの荷重量について検討した。

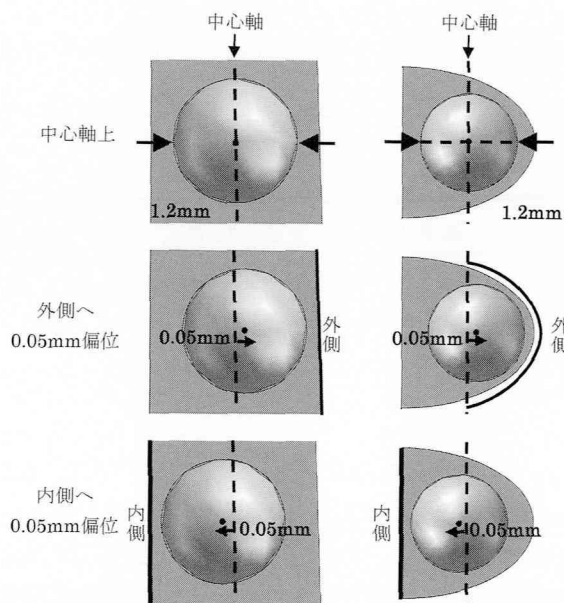


図10: 鋳造欠陥の位置

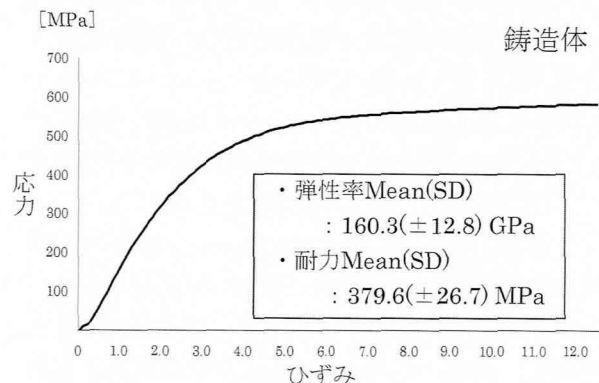
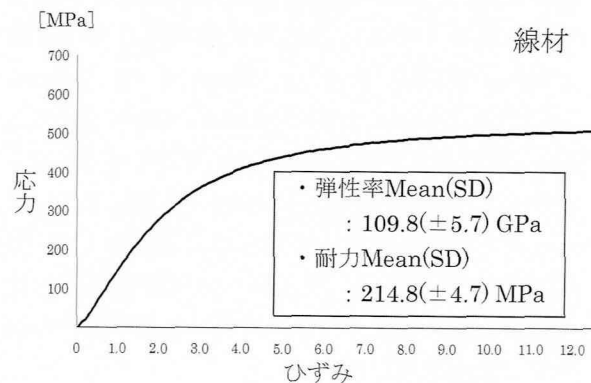


図11: 線材と鋳造体の応力-ひずみ曲線 (直径2.0mm, 引張試験)

結果

実験1 有限要素解析パラメータの算出と妥当性の検討

線材と鋳造体の引張試験から得られた応力-ひずみ曲線を図11に示す。線材は弾性率109.8 (±5.7) : Mean(SD) GPa, 耐力214.8 (±4.7) MPa, 鋳造体は弾性率160.3 (±12.8) GPa, 耐力379.6 (±26.7) MPaを示し、鋳造体の方が弾性率、耐力ともに有意に高い (P<0.05) 傾向を示した。

次に、引張試験による応力-ひずみ曲線から得られた値を有限要素の解析パラメータとして用い、荷重-変位置について解析値を得た。実測値と解析値の比較は、基準を欠陥の無い線材および鋳造体の実測値の10%としたとき、線材ではすべての解析値が実測値の10%以内を示し、鋳造体の値は測定ヶ所20のうち19 (95%) が10%以内を示した。更に、基準を5%としたとき、線材では測定ヶ所20のうち15 (75%)、鋳造体では19 (95%)

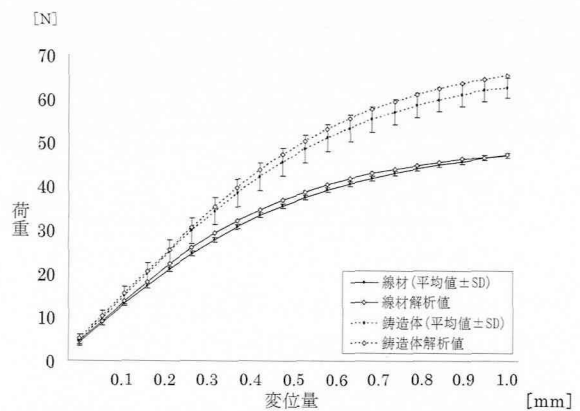


図12: 線材と鋳造体の実測値と解析値 (直径2.0mm, 曲げ試験)

表1：線材と鋳造体の実測値と解析値

(直径2.0mm, 曲げ試験)

線材				鋳造体			
変位量 (mm)	実測値(N): Mean(SD)	解析値 (N)	誤差 (%)	変位量 (mm)	実測値(N): Mean(SD)	解析値 (N)	誤差 (%)
0.05	4.2 (±0.4)	4.5	7.9	0.05	4.6 (±1.3)	5.1	12.0
0.1	8.7 (±0.6)	9.1	4.7	0.1	9.7 (±1.7)	10.2	4.9
0.15	13.1 (±0.5)	13.6	4.1	0.15	14.8 (±2.1)	15.3	3.1
0.2	17.2 (±0.5)	18.1	5.4	0.2	20.0 (±2.4)	20.4	1.9
0.25	20.9 (±0.5)	22.2	6.3	0.25	25.0 (±2.7)	25.5	1.8
0.3	24.5 (±0.5)	26.0	6.0	0.3	29.8 (±2.9)	30.5	2.3
0.35	27.7 (±0.5)	29.2	5.4	0.35	34.3 (±3.1)	35.2	2.9
0.4	30.7 (±0.5)	32.1	4.7	0.4	38.4 (±3.2)	39.7	3.3
0.45	33.2 (±0.5)	34.6	4.1	0.45	42.1 (±3.2)	43.7	3.7
0.5	35.5 (±0.5)	36.8	3.7	0.5	45.5 (±3.2)	47.2	3.8
0.55	37.4 (±0.5)	38.7	3.4	0.55	48.5 (±3.2)	50.3	3.9
0.6	39.1 (±0.5)	40.3	3.1	0.6	51.1 (±3.1)	53.1	4.0
0.65	40.6 (±0.5)	41.7	2.9	0.65	53.3 (±3.0)	55.5	4.1
0.7	41.9 (±0.5)	43.0	2.7	0.7	55.3 (±3.0)	57.6	4.1
0.75	43.0 (±0.5)	43.9	2.2	0.75	57.0 (±2.8)	59.4	4.1
0.8	44.0 (±0.5)	44.8	1.8	0.8	58.5 (±2.8)	61.0	4.2
0.85	44.9 (±0.5)	45.6	1.4	0.85	59.9 (±2.7)	62.4	4.2
0.9	45.8 (±0.5)	46.3	1.2	0.9	61.0 (±2.6)	63.6	4.3
0.95	46.5 (±0.5)	46.6	0.3	0.95	62.0 (±2.5)	64.6	4.2
1.0	47.2 (±0.5)	47.2	0.04	1.0	62.9 (±2.3)	65.4	3.9

が5%以内を示したため(図12, 表1), それぞれの値は近似したと判断した。

実験2 実験的に欠陥を加工した線材の曲げ試験 (図13, 表2)

欠陥の位置が固定側のとき, 欠陥の直径が0.3mmでは欠陥の存在が機械的性質に影響を及ぼさず(変位量:P値, 0.25mm:0.18, 0.5mm:0.56, 0.75mm:0.32, 1.0mm:0.66), 直径が0.5と0.7mmの条件では変形に必要な応力が有意($P<0.05$)に減少する傾向を示した。この時, 直径0.5mmに比べて0.7mmの条件の方が機械的性質に及ぼす影響が大きい傾向を示した。次に, 欠陥の位置が中央部では, 固定側のときと同様に, 欠陥の直径が0.3mmでは試験片を変形させる応力に差は認められず(変位量:P値0.25

mm:0.57, 0.5mm:0.32, 0.75mm:1.0, 1.0mm:0.66), 直径0.5, 0.7mmのとき変形に必要な応力は有意($P<0.05$)に減少した。この結果を固定側の結果と比べた場合, 機械的性質が受ける影響は減少していた。また, 欠陥の位置が荷重側では, 欠陥の直径が0.3, 0.5mmともに試験片を変形させる応力に差は認められず(直径0.3mm, 変位量:P値, 0.25mm:0.32, 0.5mm:0.57, 0.75mm:1.0, 1.0mm:0.66; 直径0.5mm, 変位量:P値, 0.25mm:0.32, 0.5mm:0.57, 0.75mm:0.66, 1.0mm:0.32), 直径0.7mmのときのみ変形に必要な応力が減少した($P<0.05$)。荷重側は, 固定側, 中央部の結果と比べると欠陥の存在が機械的性質に及ぼす影響が減少する傾向を示した。

図14に示した欠陥の無い直径1.0mmの線材の

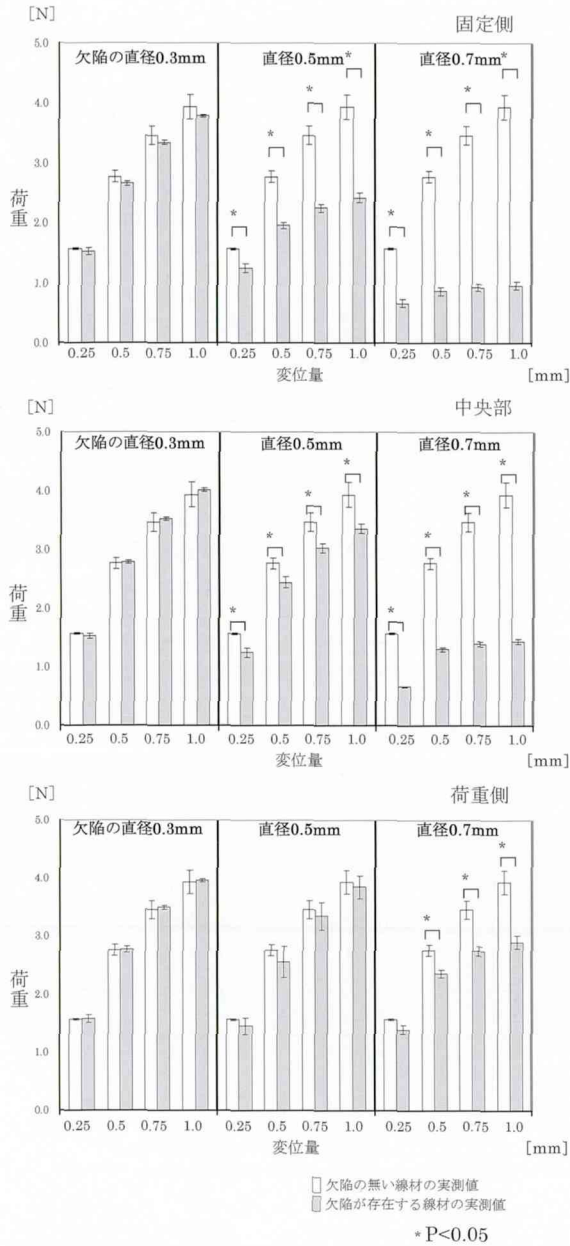


図13：欠陥の位置と大きさが線材の機械的性質に及ぼす影響 (直径1.0mm, 曲げ試験)

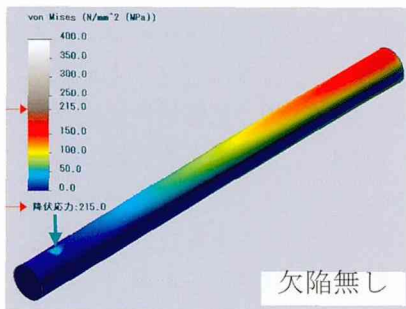


図14：欠陥の無い直径1.0mm 線材の応力分布 (変位量0.25 mm)

応力分布は固定部から荷重側に向かって上面1/3に応力が三角錐状に集中する傾向が認められ、特に試験片中には耐力を超える応力分布は存在しなかった。

また、欠陥を含有した直径1.0mmの線材の応力分布(図15)に関しては欠陥の直径が0.3mmの場合、荷重点側の面の固定部から荷重側に向かって1/3に応力が三角錐状に集中する傾向が認められ、これは欠陥の無い線材の応力分布に近似した。また、固定側、中央部の条件では欠陥の周囲に応力が集中する傾向が生じた。一方、直径が0.5mmになると固定側、中央部ともに耐力値を超える応力が欠陥に集中する傾向を示し、これが0.7mmになるとすべての位置で欠陥周囲に耐力を超える応力が存在した。

実験3 テーパー付き鋳造体における曲げ試験と非線形解析の比較

テーパー付き鋳造体の実測値と解析値を比較すると、基準をテーパー付き鋳造体の実測値の10%としたとき、測定ヶ所20のうち19(95%)が実測値の10%以内を示し、基準を5%としたとき、測定ヶ所20のうち13(65%)が実測値の5%以内を示したため(図16, 表3), それぞれの値に近似すると判断した。実験3においても実験1の鋳造体から得られたパラメータの妥当性が再確認された。

実験4 欠陥を含有したテーパー付き鋳造体の非線形解析

欠陥の無いテーパー付き鋳造体と欠陥を含有したテーパー付き鋳造体の解析値を比較すると、基準を欠陥の無いテーパー付き鋳造体の解析値の10%としたとき、欠陥の直径が0.3, 0.5, 0.7mmでは試験片を変形させるすべての条件で応力に差が認められなかった。これに対して、直径が1.2mmの場合、欠陥の位置が固定側のときのみ測定ヶ所の50%に差が存在した。なお、比較の基準を5%としたとき、直径が1.2mmの条件で固定側および中央部に差が認められ、欠陥の位置が固定側に近いほど鋳造体の機械的性質に与える影響は増加した。しかしながら、この結果は線材に現れたような顕著な傾向とはならなかった。応力分布では(図17, 18, 表4), 特に欠陥が0.7mm

表2：各欠陥の位置と大きさにおける変位量に対する荷重量

(直径1.0 mm, 曲げ試験)

固定側					
変位量 (mm)	欠陥の 条件	欠陥無し(N): Mean(SD)	直径 0.3 mm(N): Mean(SD)	直径 0.5 mm(N): Mean(SD)	直径 0.7 mm(N): Mean(SD)
0.25		1.6 (±0.01)	1.5 (±0.1)	1.2 (±0.1)	0.7 (±0.1)
0.5		2.8 (±0.1)	2.7 (±0.04)	2.0 (±0.1)	0.9 (±0.1)
0.75		3.5 (±0.2)	3.3 (±0.03)	2.2 (±0.1)	0.9 (±0.1)
1.0		3.9 (±0.2)	3.8 (±0.03)	2.4 (±0.1)	1.0 (±0.1)
中央部					
変位量 (mm)	欠陥の 条件	欠陥無し(N): Mean(SD)	直径 0.3 mm(N): Mean(SD)	直径 0.5 mm(N): Mean(SD)	直径 0.7 mm(N): Mean(SD)
0.25		1.6 (±0.01)	1.6 (±0.04)	1.4 (±0.1)	1.0 (±0.01)
0.5		2.8 (±0.1)	2.8 (±0.04)	2.4 (±0.1)	1.3 (±0.03)
0.75		3.5 (±0.2)	3.5 (±0.03)	3.0 (±0.1)	1.4 (±0.04)
1.0		3.9 (±0.2)	4.0 (±0.03)	3.4 (±0.1)	1.4 (±0.05)
荷重側					
変位量 (mm)	欠陥の 条件	欠陥無し(N): Mean(SD)	直径 0.3 mm(N): Mean(SD)	直径 0.5 mm(N): Mean(SD)	直径 0.7 mm(N): Mean(SD)
0.25		1.6 (±0.01)	1.6 (±0.1)	1.5 (±0.1)	1.4 (±0.1)
0.5		2.8 (±0.1)	2.8 (±0.1)	2.6 (±0.3)	2.4 (±0.1)
0.75		3.5 (±0.2)	3.5 (±0.04)	3.4 (±0.2)	2.8 (±0.1)
1.0		3.9 (±0.2)	4.0 (±0.02)	3.9 (±0.2)	2.9 (±0.1)

になると固定部の集中と欠陥が接合するようになり、1.2mmでは耐力付近の応力が欠陥と接合する傾向を示した。

実験5 欠陥の位置が機械的性質に及ぼす影響

欠陥が鋳造体の中心軸上に存在する条件に比べ欠陥が0.05mm外側へ偏位すると変形に必要な荷重は減少する傾向が認められた。一方、欠陥が0.05mm内側へ偏位すると、機械的性質に及ぼす影響が減少する傾向が認められた(図19)。応力分布(図20)では欠陥の位置が中央に存在する条件と異なり、特に外側へ0.05mm偏位すると耐力を超える応力集中が欠陥部に接合する形で発現した。

考 察

チタン鋳造にはガス圧により構成された鋳造システムが多く存在し、独特な球状の形態を示す欠陥が発生しやすいことが報告されている⁷⁾。これまで鋳造体の品質を向上させるために欠陥を予防しようとした報告は多く存在するものの^{8,9,10)}、欠陥を内包した鋳造体の機械的性質についての検討はされていない。そこで、本実験では特に欠陥が存在するチタン製クラスプの機械的性質に及ぼす影響について検討する事を目的に欠陥を内包したモデルを製作し機械的性質を検討した。

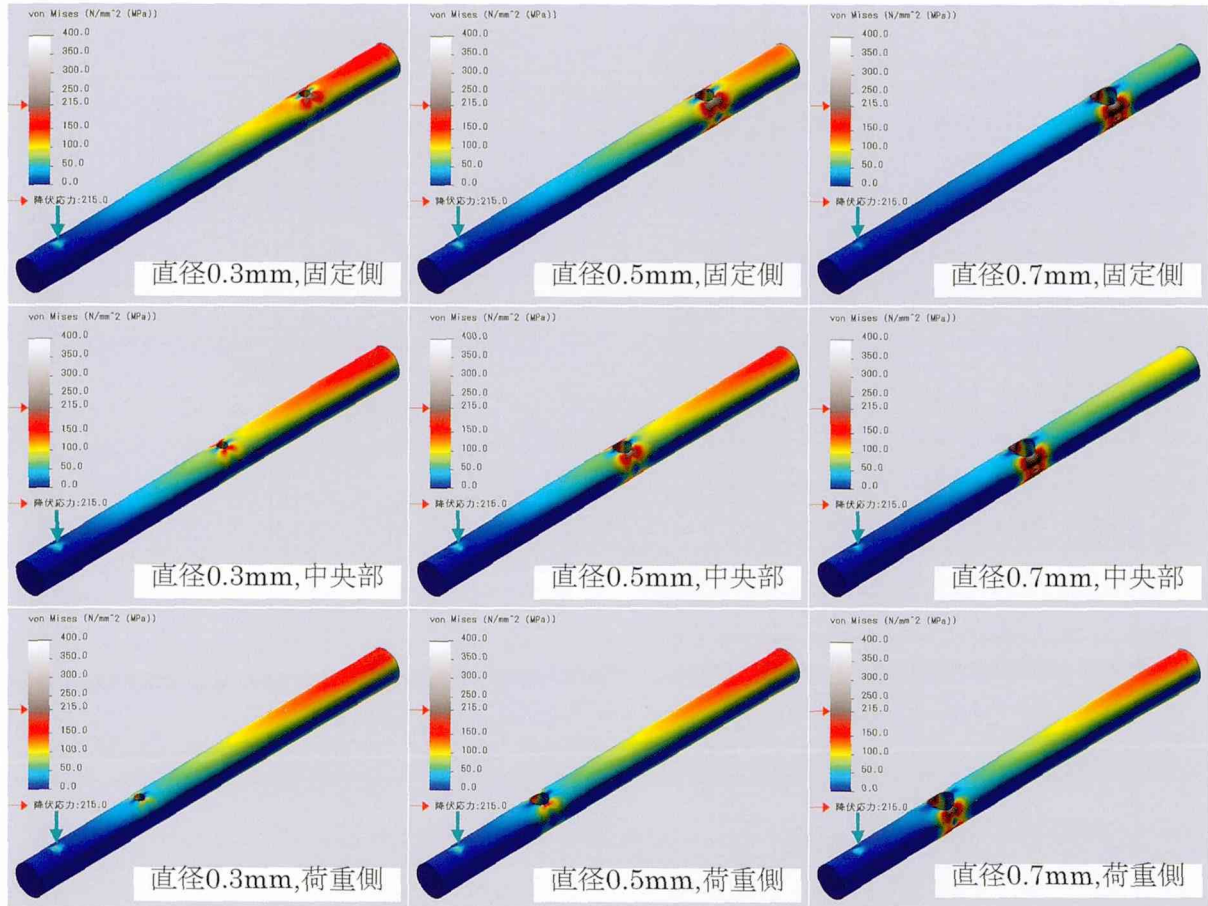


図15：欠陥を含有する直径1.0mm 線材の応力分布（変位量0.25mm）

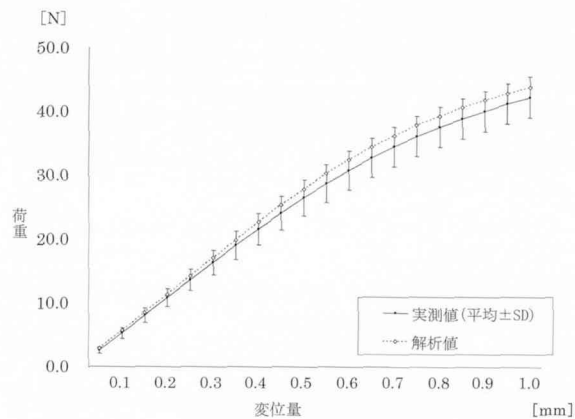


図16：テーパ付き鋳造体の実測値と解析値（曲げ試験）

と鋳造体の実測値と解析値を比較すると、ほぼ近似する傾向を示したので、本パラメータの妥当性が確認された。

実験2 実験的に欠陥を加工した線材の曲げ試験

欠陥の直径が0.3mmの条件では試験片に対する位置が変わっても機械的性質は影響を受けず、直径が0.5mmになると固定側、中央部のとき影響が認められた。また、欠陥の直径0.7mmのとき荷重側、中央部、固定側の全てに影響が認められ、欠陥の位置が固定側寄りになるほど小さな荷重で変形する傾向が認められた。実際、曲げ試験を行った試験片の肉眼的観察においても、直径0.3mmの欠陥では線材の曲がり方は欠陥無し線材と同様の変形を示したのに対して、直径が0.7mmの条件では欠陥のある位置から折れ曲がるように変形した。この傾向は直径0.5mmよりも0.7mmの条件が明確で、加えて位置が中央部、固定側になるにつれてはっきりした傾向として現れた。応力分布から線材の固定部に加わった

実験1 有限要素解析パラメータの算出と妥当性の検討

線材と鋳造体について比較したところ、鋳造体の弾性率と耐力がやや増加する傾向を示した。これは、鋳造時にチタン溶湯が鋳型と反応して鋳造体表面に硬い反応層が150~250μm生成されたために生じたと考えられる^{11,12,13,14)}。さらに、線材

表3：テーパ付き鑄造体の実測値と解析値
(曲げ試験)

変位量 (mm)	実測値 (N) : Mean (SD)	解析値 (N)	誤差 (%)
0.05	2.5 (±0.5)	2.9	12.0
0.1	5.3 (±0.9)	5.7	7.6
0.15	8.1 (±1.1)	8.5	5.6
0.2	10.9 (±1.4)	11.4	4.7
0.25	13.6 (±1.7)	14.2	4.2
0.3	16.4 (±2.0)	17.1	4.2
0.35	19.0 (±2.2)	19.9	4.5
0.4	21.6 (±2.5)	22.7	4.8
0.45	24.1 (±2.7)	25.4	5.0
0.5	26.5 (±2.8)	27.9	5.2
0.55	28.8 (±2.9)	30.3	5.3
0.6	30.8 (±3.0)	32.5	5.3
0.65	32.8 (±3.1)	34.5	5.1
0.7	34.6 (±3.1)	36.3	5.0
0.75	36.2 (±3.1)	37.9	4.8
0.8	37.6 (±3.1)	39.4	4.6
0.85	38.9 (±3.1)	40.7	4.5
0.9	40.1 (±3.1)	41.9	4.4
0.95	41.3 (±3.2)	42.9	4.0
1.0	42.3 (±3.2)	43.9	3.7

応力の圧縮と伸展による応力集中が表層に存在しているが、さらに発生するとそこに欠陥肉厚が少ない欠陥周囲に応力が集中し、応力集中が構造的に弱い部位に加わったため発生した現象であることが推察される。また、この加工された欠陥は貫通した状態を呈し、突き抜けた状態の欠陥周囲の応力集中からも、欠陥が外表面に現れた時に構造的に弱くなることが考えられる^{15,16,17)}。

実験3 テーパー付き鑄造体における曲げ試験と非線形解析の比較

テーパ付き鑄造体の曲げ試験による荷重-変位量と解析値を比較したところ、ほぼ近似する傾向が得られ、実験3においても鑄造体から得られたパラメータの妥当性が確認された。さらに、直径2.0mmの鑄造体とテーパ付き鑄造体の実測値を比較すると、テーパ付き鑄造体の方が変位

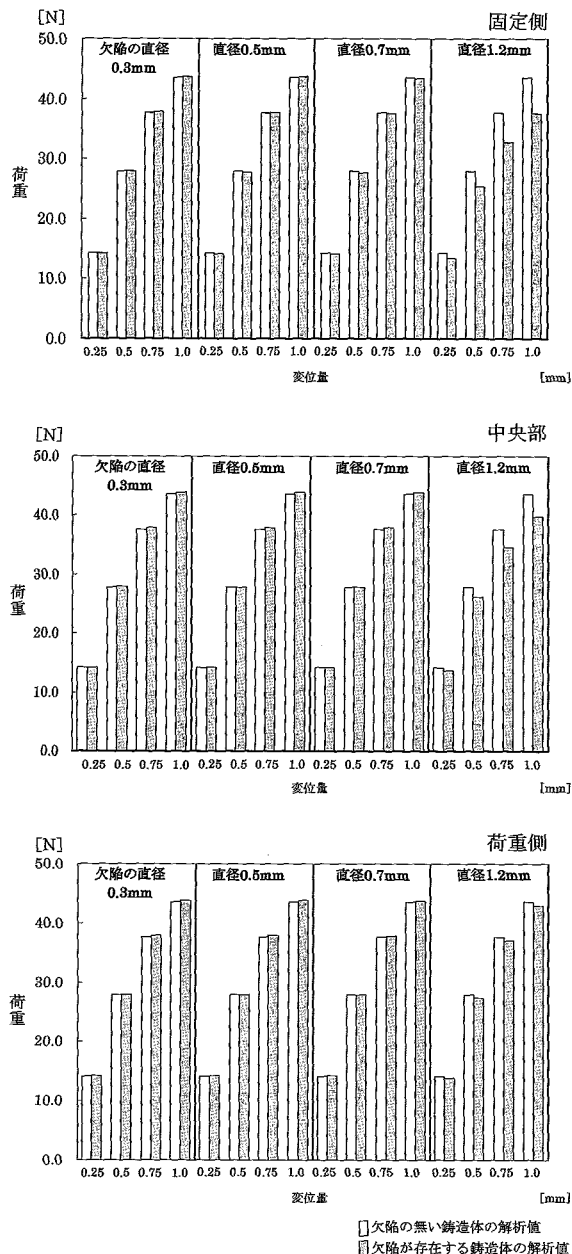


図17：欠陥の位置と大きさがテーパ付き鑄造体の機械的性質に及ぼす影響 (曲げ試験)

量に対する荷重が減少する傾向が認められた。また、欠陥のない線材に応力を加えた場合 (図21) とテーパ付鑄造体の応力分布 (図22) を比較すると、線材は荷重を加えた反対側の固定部に比較的大きな応力集中が存在するのに対して、テーパ状の形態ではほとんど応力集中が発生せず、その対側に応力がわずかながら集中する傾向があることが確認できた。この様にテーパ状の形態は円柱状の条件と比べ内側と外側で応力分布に差があり円柱状形態で得られた結果とテーパ状形態で結果の差は形態の差によるものであったこと

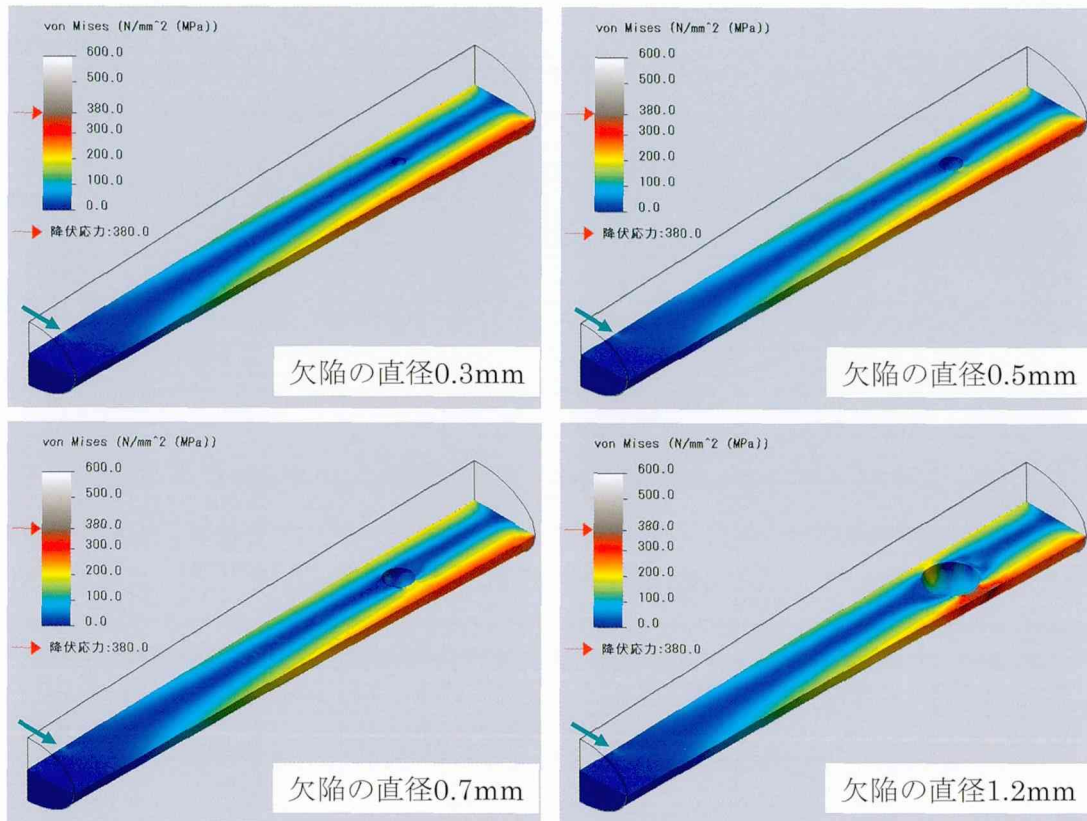


図18：欠陥を含有するテーパ付き鋳造体の応力分布（変位量0.25mm）

が推察できる．加えて対側に偏った位置に欠陥が発生すると影響を大きく受ける可能性があると思われた．

実験4 欠陥を含有したテーパ付き鋳造体の非線形解析

欠陥の直径が0.3, 0.5, 0.7mmのときは試験片の機械的性質に対する影響は認められず、欠陥の直径が1.2mm、位置が固定側のときのみに影響が認められた．このとき、欠陥が存在する線材の実験と同じく、欠陥の位置が固定側寄りになるほど影響が大きくなり、より小さな荷重で変形する傾向が認められた．また、応力の分布状態から、固定側付近の応力が荷重点の対側表層に偏る傾向が認められた．このことから直径0.3, 0.5mmの欠陥では欠陥周囲に厚さが存在したので、鋳造体の機械的性質に対する影響が少なくなったと思われる．直径0.7mmの欠陥になると、欠陥と外側の厚さが減り、欠陥の外側から外側表面にかけて応力が集中する部位が認められたが、まだはっきりした傾向とはならず、これは、テーパ形状に発生する内側（今回は荷重点

側）には応力集中が生じず、外側にやや集中するといった性質によって0.7mmの欠陥での影響が発生しなかったのではないかと推察する．これが直径1.2mmの欠陥になると、欠陥の外側から外側表面にかけての厚さが減少し、応力が欠陥に集中したことから変形を起こしやすくなったと思われる（図18）．この様に我々が日頃用いているクラスプの鉤腕に気泡状の欠陥が内包された場合、欠陥の大きさは円柱状の条件に比べかなり増加しないと機械的性質に影響を及ぼさないことが判明した．加えて、実験2において得られた結果から、もし、鋳造欠陥がクラスプ以外の円柱状態を呈す構成要素に発生した場合、容易に変形を起こすので詳細な検査が必要になる．試しに直径0.7mmの球状欠陥（内部欠陥として）を円柱状試験片の固定側に設定分析すると（図23）、実験2によって得られた結果より機械的性質に及ぼす影響が減少する傾向を示したので、特に外部欠陥が発生した場合は更に、容易に変形することが予想されることから装置としての使用は中止すべきである．このことから、今後は外部欠陥に関しても詳細な検討が必要であると思われる．

表4：各欠陥の位置と大きさにおける変位量に対する荷重量

(テーパー付き铸造体の解析値, 曲げ試験)

固定側						
変位量 (mm)	欠陥の 条件	欠陥無し (N)	直径 0.3 mm (N)	直径 0.5 mm (N)	直径 0.7 mm (N)	直径 1.2 mm (N)
	0.25		14.2	14.2	14.1	14.1
0.5		27.8	27.9	27.7	27.6	25.2
0.75		37.6	37.8	37.6	37.5	32.8
1.0		43.6	43.7	43.6	43.4	37.5
中央部						
変位量 (mm)	欠陥の 条件	欠陥無し (N)	直径 0.3 mm (N)	直径 0.5 mm (N)	直径 0.7 mm (N)	直径 1.2 mm (N)
	0.25		14.2	14.2	14.2	14.2
0.5		27.8	27.9	27.9	27.8	26.2
0.75		37.6	37.9	37.9	37.8	34.5
1.0		43.6	43.9	43.8	43.8	39.8
荷重側						
変位量 (mm)	欠陥の 条件	欠陥無し (N)	直径 0.3 mm (N)	直径 0.5 mm (N)	直径 0.7 mm (N)	直径 1.2 mm (N)
	0.25		14.2	14.2	14.2	14.2
0.5		27.8	27.9	27.9	27.9	27.3
0.75		37.6	37.9	37.9	37.8	37.0
1.0		43.6	43.9	43.9	43.7	42.9

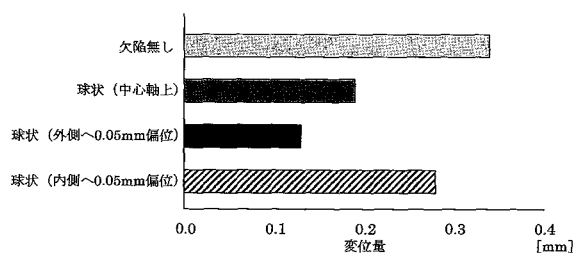


図19：欠陥の位置が铸造体の機械的性質に与える影響

実験5 欠陥の位置が機械的性質に及ぼす影響

解析結果から、铸造体を外側へ向かって0.25 mm 変位させ、欠陥が外側へ0.05 mm 偏位すると、応力集中している範囲と欠陥が接合する部分が拡大し、集中した応力は耐力を超えるため铸造体に対する影響が大きくなると思われる。一方、

欠陥が内側へ0.05 mm 偏位した場合、欠陥が表層に接近してもより応力が集中する荷重点の対側より離れ変形に抵抗できる厚さとなるため影響が減少したと思われる (図20)。

一連の結果より、テーパー状の铸造体に直径1.2 mm の欠陥が臨床上における固定部と考えられる鉤脚部から鉤肩部に存在すると、欠陥周囲に変形が発生し、破壊が生じやすいため、当該部位に欠陥が存在した場合は補綴物の再製作が必要になるとと思われる。加えて、欠陥の位置が外側に偏位、あるいは外側に開放された状態であった場合、更なる機械的性質の低下が予想されるので装置を使用することは好ましくないと判断した。

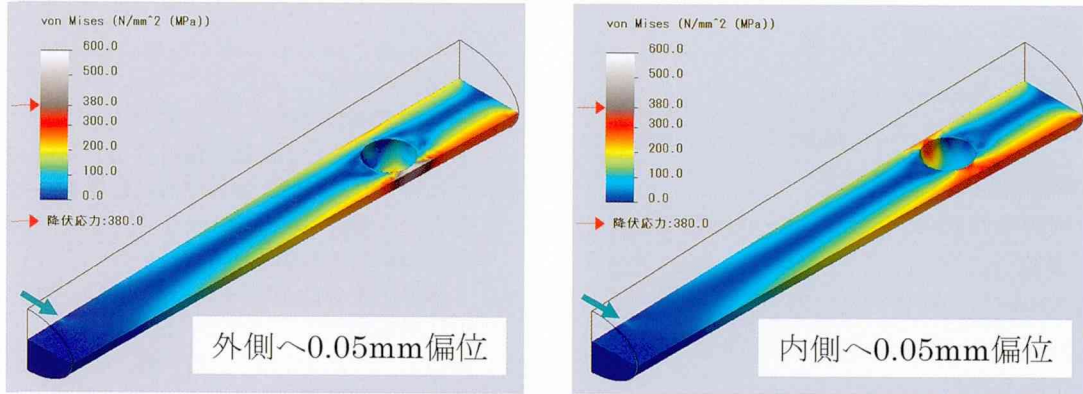


図20：欠陥を偏位させたテーパ付き鋳造体の応力分布

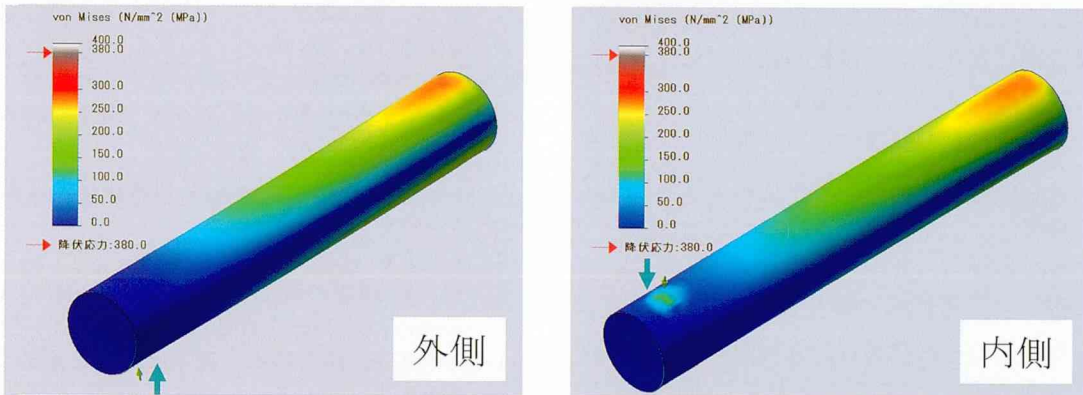


図21：欠陥の無い線材の応力分布（変位量0.25mm）

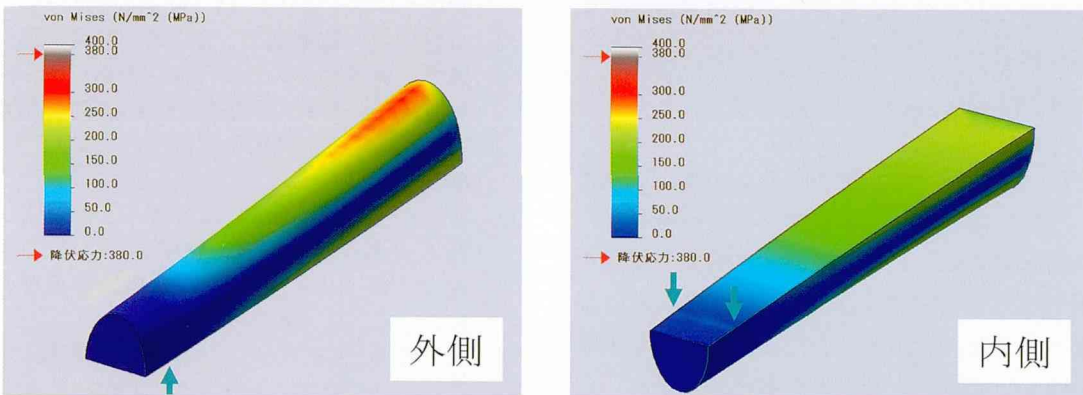


図22：欠陥の無いテーパ付き鋳造体の応力分布（変位量0.25mm）

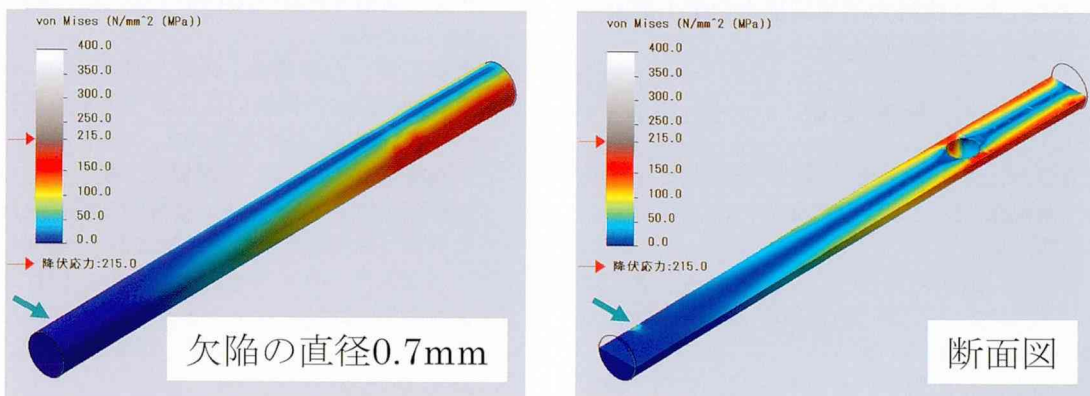


図23：球状欠陥を含有する線材の応力分布（変位量0.25mm）

結 論

欠陥が鑄造クラスプの機械的性質に与える影響について有限要素で力学的解析を行ったところ、以下の結論に達した。

1. 今回の条件で用いたテーパー状の鑄造体における欠陥の直径が0.3, 0.5, 0.7mm のとき、鑄造体の機械的性質には影響を及ぼさず、直径が1.2mm 以上になると疲労破壊が生じる可能性が示唆された。
2. 直径1.2mm の欠陥が固定部寄り、すなわち臨床上での固定部にあたる鉤脚部から鉤肩部への移行部に存在すると機械的性質が低下した。
3. 欠陥が鑄造体の外側に偏位もしくは外側に向かって開放された状態になると内側に欠陥が生じたものに比べて機械的性質が低下する傾向が示された。

以上のことから、非破壊検査によってクラスプの鉤脚部から鉤肩部への移行部に直径1.2mm 以上の欠陥が認められた場合、欠陥の周囲に応力が集中し変形が生じやすく、耐力値以下の応力であっても比較的短期間に当該部から疲労破壊を起こす可能性があるので装置として使用不可能であると思われる。

謝 辞

稿を終えるにあたり、懇切なるご指導、ご高閲を賜った松本歯科大学大学院歯学独立研究科顎口腔機能制御学講座 黒岩昭弘教授に謹んで感謝の意を表します。併せて、本研究を遂行するに際し、数々のご助言を頂きました松本歯科大学大学院歯学独立研究科硬組織疾患制御再建学講座 伊藤充雄教授、永沢 栄准教授に心より謝意を表します。また、松本歯科大学歯科補綴学第1講座の皆様を重ねて厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 三浦維四, 井田一夫編 (1988) チタンの歯科利用. 第1版, 84-93, 161-266, クインテッセンス出版, 東京.
- 2) 井田一夫 (1988) 純チタンとは何か-宇宙工学から生体材料まで-. *Quintessence of Dental Technology* **13**: 43-50.
- 3) 黒岩昭弘, 和田賢一, 日比野 靖, 吉田 修, 覚本嘉美, 胡内秀規, 長山克也, 橋本弘一 (1990)

チタン鑄造に関する研究 (第1報) -鑄造温度がチタン鑄造体におよぼす影響について-. 歯材器 **9**: 279-88.

- 4) 黒岩昭弘 (1992) スプルーの条件がチタン鑄造の鑄込率に及ぼす影響. 歯材器 **11**: 262-77.
- 5) 長谷川二郎 (1992) 歯科における純 Ti および Ti 系合金の現況-鑄造体の機械的性質-. 日歯医師会誌 **44**: 1202-9.
- 6) 各社のチタン鑄造システム (1993), 歯科技工 **21**: 918-33.
- 7) 渡辺孝一, 大川成剛, 宮川 修, 中野周二, 塩川延洋, 小林正義 (1991) 歯科精密鑄造における「標識元素溶解法」を用いたチタン湯流れの研究 2. 板状鑄型における湯流れと欠陥の関係. 歯材器 **10**: 77-96.
- 8) 佐藤秀樹, 奥田礼一 (1988) アーク融解・加圧吸引鑄造機の試作 4. 純チタン鑄造体内部の鑄巢. 日歯保誌 **31**: 1342-57.
- 9) 上新和彦 (1993) 鑄巢. 月刊歯科技工別冊/歯科鑄造のすべて: 100-9.
- 10) 森本敏夫 (1995) 鑄造欠陥を起こさないスプルーイング-従来の鑄造欠陥のウソと実際-. *Quintessence of Dental Technology* **20**: 209-24.
- 11) 橋本弘一, 黒岩昭弘, 和田賢一, 日比野 靖, 胡内秀規, 橋本孝雄, 長谷川祐司, 安藤芳昭, 赤岩祐一 (1992) チタン鑄造体表面の反応生成物について. 歯材器 **11**: 603-14.
- 12) 小野内真, 菊池久二, 沈 凌, 松崎 誠, 森隆宏, 掛谷昌宏, 石井 語, 太田 肇, 西山 寛 (1995) チタンの鑄造に関する研究-鑄造体の表面反応層と機械的性質について-. 日大歯学 **69**: 897-903.
- 13) 菊池久二, 飯塚秀人, 黒谷知子, 河西宗一郎, 井上太郎, 椎名芳江, 柴崎米雄, 升谷滋行, 西山 寛 (1998) チタン鑄造歯冠修復物の硬さについて. 日大歯学 **72**: 242-6.
- 14) 大川成剛, 渡辺孝一, 宮川 修, 中野周二, 本間ヒロ, 塩川延洋, 小林正義 (1995) チタン鑄造において新しくわかったこと-特に市販埋没材とチタン鑄造体表面の反応層について. 歯科技工 **21**: 673-85.
- 15) 吉成正雄, 山根照人, 丹野 研 (1980) 金銀パラジウム合金の機械的性質に及ぼす鑄造欠陥の影響について. 歯科学報 **80**: 579-85.
- 16) 田島清司, 柿川 宏, 小園凱夫, 林 一郎 (1986) 歯科鑄造用 Ni-Cr 合金の機械的性質に及ぼす鑄造方法と合金組成の影響. 歯材器 **5**: 268-78.
- 17) 水本登志雄, 新家光雄, 赤堀俊和, 中野芳規, 福井壽男 (2003) 金銀パラジウム合金鑄造材の疲労特性に及ぼす微小組織の影響. 歯材器 **22**: 210-20.