

学 位 論 文 題 名

HAp インプラントと生体骨組織の X線残留応力測定法に関する研究

学位論文内容の要旨

最近骨組織と結合する生体活性セラミックスが開発され、インプラント材料としての期待が大きい。しかし、この材料は骨成分のハイドロキシアパタイト(HAp)から成る脆性材料であるため、金属に比べ機械的信頼性や加工性が劣る。そのためHApは金属基材の表面改質材としての用途が広がっている。HApに限らず、セラミックスをコーティングしたインプラントには、コーティング層の割れやはく離が生じやすい。生体内に埋込まれたインプラントでコーティング層に欠陥が生じると、重大な事故となる。それらの欠陥の力学的原因の一つとして、コーティング時に生じた接合界面近傍の残留応力が考えられる。しかし、セラミックコーティング界面近傍のコーティング層と金属基材の両方に分布する残留応力を、非破壊的にかつ同時に評価した研究はほとんど見られない。

そこで本論文では、白色X線を用いてHApコーティング層と金属基材の両者に生じた残留応力分布を同時に測定する方法を提案する。広い波長分布をもつ白色X線は、特性X線に比べ強度が弱いものの、透過能が高い短波長を含んでいる。HApコーティング材に白色X線を照射すれば、コーティング層とその下の基材の格子面情報を同時に測定することが可能である。まず、HAp焼結材について測定を行い、HApに生じた残留応力の非破壊測定における白色X線回折法の可能性を検討した。次に、同法によりコーティング層と金属基材の両者に生じた残留応力分布を非破壊的に同時に測定する方法を提案し、実際にチタン基材にHApをコーティングした試料のコーティング界面近傍の三次元残留応力分布を非破壊的に評価した。

一方、生体骨の無機成分もHApである。生体HApは結晶性を有しているため、人工HApと同様にX線回折が可能である。そのため本論文では、白色X線回折を用いた骨組織の残留応力測定法もあわせて提案する。

生体骨は力学的環境に適応して、その形態や構造を変える性質をもつ。この現象をリモデリングと呼ぶ。リモデリングを誘引する力学的刺激の一つに「応力」がある。応力に対する生体骨のリモデリングを解明するために様々な研究が行われてきたが、これまでは臨床的な現象論的研究がほとんどであり、そのメカニズムには未知な点が多い。リモデリングによって骨の形態や構造変化を引き起こすには、比較的長期にわたって骨組織内に応力が分布する必要がある。この場合、リモデリング

応力は骨組織内に分布する一種の「残留応力」と考えることができる。この残留応力を非破壊的に評価できれば、骨組織の応力適応メカニズムをより明らかにすることができる。

白色X線には短波長のX線も含まれているため、より深い位置の格子面間隔まで測定される。そのため白色X線を利用すれば、骨膜などの線維性表層組織を除去することなく、深層部の皮質骨の残留応力が測定可能となる。皮質骨は、管状の骨単位が配列された構造である。その構造を材料力学的に見ると、一方向に繊維強化された直交異方性材料と見ることができる。そのため白色X線回折法による皮質骨の異方性残留応力測定理論を示す。また、本法により牛大腿骨骨幹部の骨軸方向と円周方向の残留応力分布を確認した結果を示す。

本論文の全体の構成は5章から成っており、第1章は序論、第2章から第4章は各測定実験、第5章は結論である。

第1章では、HApの結晶構造や合成・加工法、その臨床応用例について、また生体骨の構造や力学的環境に対する機能的適応、ならびに生体HApについて概説する。また本研究で提唱する残留応力測定法の基本原理であるX線回折について述べ、本研究の背景と目的について述べる。

第2章では、白色X線を用いてHAp焼結材の残留応力を測定した例を示す。二段階加水分解法により生成したHAp粉末を用いて焼結を行った。異なる焼結条件でHAp焼結材を作製した。この焼結材の厚さ方向に分布する残留応力を白色X線により測定した。HAp焼結材に生じた残留応力の非破壊測定法としての本法の可能性を検討するとともに、HAp焼結材の焼結条件と残留応力分布の関係を考察する。

第3章では、白色X線を用いてハイドロキシアパタイトのコーティング層と金属基材の両者に生じた三次元残留応力を同時に測定する方法を提案する。金属基材にはチタンを用いた。サンドブラスト処理を施したチタン表面に、プラズマ溶射によりハイドロキシアパタイトをコーティングして試料を作製した。試料のコーティング層と基材の両者に存在する残留応力を測定し、コーティング界面近傍の残留応力を非破壊的に評価した結果を示す。

第4章では、白色X線による皮質骨の異方性残留応力測定法を示す。骨組織は、その無機成分としてHApを含んでいる。そのHApの結晶格子ひずみを測定し、その値から骨組織内の残留応力を算出することが可能である。その際、皮質骨の力学的異方性を考慮した構成式を使用する。白色X線により牛大腿骨骨幹部の骨軸方向と円周方向の残留応力を測定した結果を示す。

第5章では、本研究で得られた結果の総括を行うとともに、HAp残留応力測定の今後の発展について述べる。

以上のように、本論文ではX線回折法を用いてHApインプラントおよび生体骨の残留応力を測定する手法を提案した。HAp焼結材の残留応力測定では焼結条件により焼結時に生じる残留応力に差が認められた。またHApコーティングインプラント材の測定例では、コーティング層と基材の両者の残留応力測定が可能であり、その残留応力にコーティングの影響が確認された。また牛大腿骨皮質骨に適用した結果、骨組織内部にも残留応力が存在し、その値が部位によって異なることが確認さ

れた。これらのことから、本法がHApインプラントおよび生体骨組織の非破壊的応力評価法として有用であることが確認できた。

学位論文審査の要旨

主査	教授	鶴 飼 隆 好
副査	教授	石 川 博 將
副査	教授	野 口 徹
副査	助教授	但 野 茂

学位論文題名

HAp インプラントと生体骨組織の X線残留応力測定法に関する研究

最近生体内埋込みインプラントに生体活性セラミックスが利用されている。このセラミックス材料は、骨成分と同じ分子構造の合成ハイドロキシアパタイト (HAp) を持ち、骨組織と結合しやすい。しかし脆性材料であるため、金属に比べ機械的強度や加工性が劣る。そのため合成ハイドロキシアパタイトは単体よりも金属基材の表面改質材として使用される場合が多い。HApに限らず、セラミックスをコーティングしたインプラントには、コーティング層の割れやはく離が生じやすい。生体内に埋込んだ後コーティング層に欠陥が生じると、重大な事故となる。このような欠陥を発生させる力学的要因の一つとして、製造時に生じた接合界面近傍の残留応力が考えられる。そのためセラミックコーティング界面近傍におけるコーティング層と金属基材の両方に存在する残留応力の同時かつ非破壊的な測定・評価技術の開発は、コーティングインプラントの製品安全性の保証や製造工程開発の上で緊急な課題とされている。

また、インプラントを生体内骨組織内に埋込んだ場合、骨組織の生理学的力学環境は急変する。骨組織は、新たな力学環境に機能的に適応し、それ自身の構造を再構築する機能を持つ。この現象をリモデリングといい、それを誘引する力学的刺激の一つに「応力」がある。リモデリングによって骨の形態や構造変化を引き起こすには、比較的長期にわたって骨組織内に応力が残留する必要がある。この場合、骨組織内に「残留応力」が生じていると予想される。この応力を非破壊的に評価できれば、骨組織の応力適応メカニズム解明に多くの力学的指針を与える。しかしながら、無負荷状態で皮質骨組織の応力を測定した例はない。

白色X線は波長の異なる多くのX線群を含んでいるため、より深い位置の格

子面間隔まで測定される。そこで本論文では、白色X線を用いたハイドロキシアパタイトの残留応力測定法を開発している。まず、合成ハイドロキシアパタイト単体の残留応力測定と焼結条件との関係を示している。次に、チタン基材にハイドロキシアパタイトをコーティングしたインプラントを想定し、コーティング層と金属基材の両者の残留応力を同時に測定する方法を提案している。さらに、ハイドロキシアパタイトが主要な成分である骨組織の残留応力測定法に発展させている。その主要な成果は以下の点に要約される。

1) HAp焼結材の白色X線による残留応力測定法を示した。二段階加水分解法により合成したHAp粉末から焼結試料を作成し、厚さ方向に分布する残留応力を測定した。そしてCIP圧と残留応力分布の相関を確認した。

2) 合成ハイドロキシアパタイトのコーティング層と金属基材の両者に生じた三次元残留応力を同時に測定する手法を提案した。そして、プラズマコーティングすることにより、チタン基材には引張り残留応力が、コーティング層には表層で圧縮、界面では引張り残留応力が発生することを確認した。

3) 皮質骨の異方性残留応力測定法を示した。そして、牛大腿骨骨幹部の骨軸方向と円周方向の残留応力を測定し、骨軸方向に大きな残留応力が生じていることを示した。

以上のように、本論文では白色X線回折法を利用した、ハイドロキシアパタイトの残留応力測定手法を提案した。これまで焼結材には空孔が多く残留応力が生じにくいとされてきたが、HAp焼結材には残留応力が存在し、それは密度にほとんど関係が無く、焼結条件に大きく影響されることを明らかにした。

また、HApコーティングインプラントの基材とコーティング層の残留応力の発生メカニズムを製造工程との関連から明らかにした。さらに、骨組織には無負荷の状態でも残留応力が生じており、それは部位と方向によって大きく異なることを示した。これらのことから、本手法がHApインプラントおよび生体骨組織の非破壊的応力評価法として有用であることを示した。

これを要するに、著者は、白色X線回折法を用いてHApインプラントおよび生体骨の残留応力を測定する手法を提案し、その測定例から生体材料の加工による残留応力発生現象および生体骨組織と残留応力の関連に関し、多くの有益な知見を得たものであり、医療機器設計工学およびバイオメカニクスの発展に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。