

学 位 論 文 題 名

生体骨とセラミックスのレーザ接合に関する研究

(Study on Laser Bonding between Bone and Ceramics)

学位論文内容の要旨

生体内に埋め込まれる人工関節やインプラント材による治療には、治療期間の短縮や生体骨との強固な接合が要求される。一般的に生体骨とバイオマテリアルとの接合には、骨セメントによる化学的結合やスクリュー等による機械的接合が用いられている。しかし、骨セメントによる接合は、骨セメント硬化時の重合化合熱反応によって周囲骨組織が熱的ダメージを受けることが指摘されている。スクリューによる機械的結合では、強固な結合が得られる一方、スクリューが長期使用により周囲骨組織を破壊する恐れもある。また侵襲的な手術によるため、患者の負担が大きいことも課題である。

産業分野で広く利用されているレーザ加工技術は、レーザ光の微小領域集光による高エネルギー密度化を利用して、非常に短時間で材料の切断や溶接に応用されている。医療分野においては、生体組織の切断や除去を目的としたレーザメスやレーザ凝固装置などが開発されてきた。しかし、バイオマテリアル同士の接合やバイオマテリアルと生体骨の接合へ応用した例はない。レーザ加工技術がバイオマテリアル同士の接合に応用できれば、個々の患者に合わせた人工骨補填材の加工が可能となる。また、バイオマテリアルと生体骨の接合に応用できれば、手術時間の短縮や手術範囲が局所に限定されるなど患者の大幅な負担軽減が期待できる。そこで本研究では、リン酸カルシウム焼結体およびガラス含有リン酸カルシウムセラミックスのレーザ加工性の調査、およびバイオセラミックス同士のレーザ接合方法、生体骨とバイオセラミックスのレーザ接合方法の基礎的検討を目的とした。

まず、リン酸カルシウム焼結体、およびガラス含有リン酸カルシウムセラミックスについて、レーザ加工性を調査した。その結果、リン酸カルシウム焼結体は線膨張係数が大きいため、レーザ照射時に割れが生じた。そのため、線膨張係数を低減させるため線膨張係数の小さいコーディエライトガラスを添加した結果、レーザ照射による割れが生じにくいことを確認した。つぎに、コーディエライトガラス含有リン酸三カルシウムセラミックス (TG セラミックス) 試験片同士を加圧して突き合わせ、境界線上に CO₂ レーザを照射した。その結果、レーザ照射部に TG セラミックスが熔融・凝固し、接合部が生成された。レーザ照射しても熱衝撃割れないセラミックスが提案できた。

次に、厚さ 1mm の骨試験片を TG セラミックス上に配置し、CO₂ レーザを照射した。その結果、骨試験片に形成された貫通穴に多孔質な白色介在物が充填され、骨試験片と TG セラミックスが固定された。生体骨と TG セラミックスの接合強度は、レーザ照射時間が長いほど増加した。レーザ照射時に生成する多孔質白色介在物が接合強度の向上に大きく寄与することを確認した。

この白色介在物の発泡について、生体骨中のコラーゲンおよび水分の影響を調査した。その結果、これらの成分の有無により、白色介在物の発泡が大きく変化することがわかった。生体骨と TG セラミックスのレーザ接合過程では、TG セラミックスの熔融によりガラス融液が生じ、生体

骨中のコラーゲンが熱分解または水分が気化することでガスが噴出され、ガラス融液中にガスが取り込まれることによってガラスの発泡が生じた。

さらに、生体骨とセラミックスのレーザー接合におけるレーザー波長、試験片形状、および試験片配置の影響について調査した。その結果、波長 $1.06\ \mu\text{m}$ の YAG レーザにおいても、CO₂ レーザ同様の熔融生成物が生じることを確認した。また、TG セラミックス粉末を用いた場合においても発泡した熔融生成物が生じることを確認した。さらに、TG セラミックスを骨試験片の上に配置しレーザー照射を行なった結果、適正なレーザーパラメータの設定により発泡した熔融生成物が生じることを確認した。

以上より、本研究では、レーザー照射しても熱衝撃割れがないセラミックスを提案し、レーザー加工技術を用いた生体骨とセラミックスの接合技術を開発した。

本論文は全 7 章で構成されており、各章の概要は以下のとおりである。

第 1 章では、本論文の総括的な序論として、研究の背景および目的について述べた。

第 2 章では、レーザー加工の概要および過去の研究について述べた。

第 3 章では、ハイドロキシアパタイト焼結体、TG セラミックス、および骨組織のレーザー加工性について述べた。線膨張係数の小さいコーディエライトガラスをリン酸三カルシウムに添加することで、CO₂ レーザの照射による割れが生じにくいことを確認した。この TG セラミックス同士を加圧し突き合わせ、境界線の上に CO₂ レーザを照射した結果、レーザー接合が可能であったことを示した。また、骨組織にレーザー照射した際に生じる貫通穴の大きさとレーザーのエネルギー密度の関係を示した。

第 4 章では、生体骨と TG セラミックスのレーザー接合について述べた。厚さ 1mm のウシ大腿骨皮質骨試験片を第 3 章で提案した TG セラミックスの上に配置し、CO₂ レーザを照射した。その結果、骨試験片に形成された貫通穴に多孔質な白色介在物が充填され、両者が固定されることを示した。また接合強度は、レーザー照射時間が長いほど増加した。

第 5 章では、接合部に生成された白色介在物の発泡に対する生体骨中のコラーゲンおよび水分の影響について述べた。生体骨中のコラーゲンおよび水分の有無により、白色介在物の発泡が大きく変化することを示した。

第 6 章では、生体骨と TG セラミックスのレーザー接合におけるレーザー波長、試験片形状、および試験片配置の影響について述べた。その結果、YAG レーザにおいても、CO₂ レーザ同様の熔融生成物が生じることを確認した。また、TG セラミックス粉末を用いた場合においても発泡した熔融生成物が生じることを確認した。さらに、TG セラミックスを骨試験片の上に配置しレーザー照射を行なった場合においても、発泡した熔融生成物が生じることを確認した。

第 7 章では、結論として本研究で得られた結果を総括し、今後の展望についてまとめた。

学位論文審査の要旨

主査	教授	但野	茂
副査	教授	梶原	逸朗
副査	教授	佐々木	克彦
副査	教授	中村	孝

学位論文題名

生体骨とセラミックスのレーザー接合に関する研究

(Study on Laser Bonding between Bone and Ceramics)

生体内に埋め込まれる人工関節やインプラント材による治療には、治療期間の短縮や生体骨との強固な接合が要求される。一般的に生体骨とバイオマテリアルとの接合には、骨セメントによる化学的結合やスクリュー等による機械的接合が用いられている。しかし、骨セメントによる接合は、骨セメント硬化時の重合化発熱反応によって周囲骨組織が熱的ダメージを受けることが指摘されている。スクリューによる機械的結合では、強固な結合が得られる一方、スクリューが長期使用により周囲骨組織を破壊する恐れもある。また侵襲的な手術によるため、患者の負担が大きいこともスクリュー使用の課題である。

産業分野で広く利用されているレーザー加工技術は、レーザー光の微小領域集光による高エネルギー密度化を利用して、非常に短時間で材料の切断や溶接に応用されている。医療分野においては、生体組織の切断や除去を目的としたレーザーメスやレーザー凝固装置などが開発されてきた。しかし、これまでバイオマテリアル間の接合やバイオマテリアルと生体骨間の接合へ応用した例は見られない。レーザーがバイオマテリアル間の接合に応用できれば、個々の患者に合わせた人工骨補填材の加工が可能となる。また、バイオマテリアルと生体骨の接合に応用できれば、手術時間の短縮や手術範囲が局所に限定されるなど患者の大幅な負担軽減が期待できる。そこで本研究では、リン酸カルシウム焼結体およびガラス含有リン酸カルシウムセラミックスのレーザー加工性の調査、およびバイオセラミックス間のレーザー接合方法、生体骨とバイオセラミックスのレーザー接合について基礎的検討を行っている。

まず、リン酸カルシウム焼結体、およびガラス含有リン酸カルシウムセラミックスについて、レーザー接合性を調査している。リン酸カルシウム焼結体は線膨張係数が大きいため、レーザー照射時に割れが生じた。線膨張係数を低減させるため線膨張係数の小さいコーディエライトガラスをセラミックスに添加することにより、レーザー照射による割れの防止が可能なことを示している。このコーディエライトガラス含有リン酸三カルシウムセラミックス (TG セラミックス) 間を加圧して突き合わせた、CO₂ レーザー照射実験を行っている。この場合、レーザー照射部に TG セラミックスが溶融・凝固し、接合部が生成されることを確認している。

次に、厚さ 1mm の骨試験片を TG セラミックス上に配置し、CO₂ レーザー照射すると、骨試験片の貫通穴に多孔質な白色介在物が充填され、骨試験片と TG セラミックスが固定されることを確認している。生体骨と TG セラミックス間の接合強度は、レーザー照射時間が長いほど増加し、レーザー

照射時に生成する多孔質白色介在物が接合強度の向上に大きく寄与することを確認している。白色介在物の発泡メカニズムについて、生体骨中のコラーゲンおよび水分の効果を詳細に調査している。これらの成分の有無により、白色介在物の発泡が大きく変化し、生体骨とTGセラミックスのレーザ接合過程では、TGセラミックスの溶融によりガラス融液が生じ、生体骨中のコラーゲンが熱分解または水分が気化することでガスが噴出され、ガラス融液中にガスが取り込まれることによってガラスの発泡が生成することを示している。

さらに、生体骨とセラミックス間のレーザ接合におけるレーザ波長、試験片形状、および試験片配置の影響について調査し、波長 $1.06\ \mu\text{m}$ の YAG レーザにおいても、CO₂ レーザ同様の溶融物が生じることを確認している。また、TGセラミックス粉末の場合も発泡溶融物が生成することも確認している。TGセラミックスを骨試験片の上に配置しレーザ照射を行なった場合でも、適切なレーザパラメータを設定することにより、発泡溶融物が生成することを明らかにしている。

これを要するに、著者は、レーザ照射しても熱衝撃割れ生じないバイオセラミックスを提案し、レーザを用いた生体骨とセラミックスの新たな接合技術を開発したものであり、これらの成果は、医療福祉工学や人間機械システムデザイン学の発展に寄与するところ大である。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があるものと認める。