

氏 名	よし だ ひろ あき 吉 田 宏 昭
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2022 号
学位授与の日付	平 成 13 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	工 学 研 究 科 高 分 子 化 学 専 攻
学位論文題目	BIOMECHANICAL ANALYSES ON NONLINEAR BE- HAVEIORS OF THE HUMAN SOFT TISSUES IN DYNAMIC NECK MOTION UNDER IMPACT LOADING AND TOPOLO- GICAL SKIN PROPERTIES UNDER SUTURING DEFORMA- TION (生体軟組織の非線形挙動に関する生体力学的研究, 特に頸部衝撃時の変形 特性および皮膚縫合時の強制変異特性の解析)
論文調査委員	(主 査) 教 授 岩 田 博 夫 教 授 池 内 健 教 授 堤 定 美

論 文 内 容 の 要 旨

生体の構造と機能を力学的観点から理解するために、これまで生体硬組織に関して様々な研究がなされてきたが、軟組織についてはほとんど研究はなされておらず、解析方法自体の開発を含め、非線形大変形挙動現象の把握が望まれている。本論文は、生体軟組織の非線形性挙動に関して研究を行っており、特に動的な衝撃解析として頸部鞭打ち損傷の発生メカニズムの解明、静解析として代表的な軟組織である皮膚の変位特性を研究したものであり、緒言、本論2編7章、および総括から構成されている。

緒言では、生体力学とその手法について概説し、本研究の目的とその背景、および本論文の概要が述べられている。

第1編では、頸部鞭打ち損傷のメカニズムおよび発症部位の解明などを行っている。鞭打ち損傷の典型例は、自動車の後方追突にみられ、統計データでは、時速5キロの低速でも40%の人が頸部傷害を受けている。従来の実験では国際標準としてHybrid IIIダミーが多く用いられてきたが、このダミーは高速前方衝突用に作製されているため、低速でも生じる鞭打ち損傷の解明には使用できない。したがって、新しい頸部モデルが求められている。

第1章では、低速後突専用の新しい生体疑似頸部モデルを作製し、その構成要素と妥当性について検討している。頸部モデルは、頸椎、靱帯、椎間板と周辺の軟組織を代替する解剖学的形状物質から構成され、生体力学的適合性を考慮して、生体の物性値に近い高分子人工材料を用いて作製した。特に、靱帯に関しては、生体軟組織に特有である非線形挙動を再現できる高分子材料を選定している。頸部モデルの妥当性は、ダミー頸部の標準検定試験である振り子試験を用いて行い、頸部モデルはより生体に近いことが分かった。また、国際的に後突専用モデルはこれまで2種ほど開発されてきたが、本研究で開発した頸部モデルは各頸椎が生理学的な可動性を有するという従来にない特徴を持ち、現段階ではより生体に近く優れていると評価できる。

第2章では、生体疑似頸部モデルの各頸椎および各頸椎間の挙動追跡などの実験的解析を行い、鞭打ち損傷のメカニズム解明を行っている。解析結果から、椎間板間にせん断変位が生じており、せん断変位が鞭打ち損傷の発生メカニズムの最も重要な原因の一つであると提唱している。

第3章と第4章では、実験的解析では内部応力などを求めることが困難なため、数値モデルを用いた計算解析も行い、実験的解析と数値解析の両面から鞭打ち損傷のメカニズムや発症部位の検討を行っている。数値解析の計算結果と生体疑似頸部モデルを用いた実験の変形挙動結果はよく一致しており、数値解析結果から、第2頸椎と第3頸椎の周辺の応力が高く、この部位が最も鞭打ち損傷が生じやすいことが分かった。また、これらの結果は、臨床事例結果ともよく一致している。さらに、これまでの数値モデルには、筋肉が含まれていないので、筋肉モデルを導入し、より生体に近い数値モデルの構築も

試みた。

第2編は、代表的な軟組織である皮膚に関する研究を行っている。皮膚の変位挙動を調べるために、形成外科領域の皮膚縫合手術に注目している。腫瘍などを切除し、その切除部分を縫合すると、術後に両端は盛り上がるが、その程度がひどい場合は、再手術が必要になる。よって、この盛り上がり減少させる手術法の開発が重要な課題となっている。

第5章と第6章では、皮膚縫合に関する解析を行っている。これまでは2次元解析ばかりであったが、本論文において、皮膚組織の変形特性を考慮した、すなわち、皮膚要素の応力ひずみ曲線には非線形性を導入し、皮膚と皮下組織間の摩擦および接触の役割を果たすGAP（ギャップ）要素を導入し、3次元解析を行っている。従来からの紡錘モデルと、新たに提唱したS字型縫合モデルとの比較を行い、S字型により約4割ほど盛り上がり高さが減少し、S字型縫合法が有効な方法であることを示した。

第7章では、3次元形状測定ならびに数値解析法を応用して、皮膚縫合手術シミュレーションシステムの構築を試みている。最適な手術プランを立てるには、手術の部位形状などをあらかじめ詳細に知ることが重要である。非接触高速3次元計測装置により皮膚表面を計測し、数値モデルを作成および解析を行い、術後形態を評価し、最適な縫合法を探索する。本システムは広範な対象に適用でき、様々なうねりがある皮膚表面で解析可能である。すでにシミュレーションで得られた縫合法を臨床に適用し、良好な結果が得られている。

以上、本論文では、生体軟組織の非線形挙動に関する生体力学的研究を行い、頸部鞭打ち損傷に関して、その発生メカニズムや発症部位の解明を行い、皮膚縫合解析に関して、新たな縫合法の提唱や臨床への応用を行っている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、生体軟組織の非線形挙動に関する実験的解析および数値解析研究であり、特に自動車の後方追突解析専用の新しい生体疑似頸部モデルの作製、後方追突時における頸部鞭打ち損傷の発生メカニズムと発症部位の解明、皮膚縫合時の変位特性、および皮膚縫合手術シミュレーションシステム構築について研究したものであり、得られた主な成果は次の通りである。

1. 低速でも生じる鞭打ち損傷の発生メカニズムを解明するため、生体力学的適合性を考慮し、生体頸部の物性値に近い高分子材料を用いて、後方追突解析専用の新しい生体疑似頸部モデルを作製した。
2. 生体疑似頸部モデルを用いた衝撃実験から、頸部にせん断変位が発生しており、鞭打ち損傷の重要な一つの原因であることが示唆された。
3. 実験的解析では生体内部の応力評価が困難なため、有限要素法を用いた数値解析により、生体内応力や変形挙動を調べた。実験的解析と数値解析における変形挙動結果はよく一致しており、数値解析結果から第2頸椎と第3頸椎間の応力が高く、最も受傷しやすい部位であることを突き止めた。また、これらの結果は、臨床事例結果とも一致している。
4. 非線形挙動を示す代表的な軟組織である皮膚に関する研究を行っている。形成外科の皮膚縫合手術において大きな課題となっている縫合後の盛り上がり高さをいかに減少させるかを、これまでにはない3次元有限要素法を用いて解析を行った。解析結果を基に、新たな縫合法を提唱し、臨床手術に応用し、縫合後の盛り上がり高さを低減させている。
5. 3次元形状測定ならびに有限要素法を用いて、皮膚縫合手術シミュレーションシステムを構築し、臨床分野への応用を試みている。

以上、要するに、本論文は、非線形挙動を示す生体軟組織について、実験的解析および数値解析を行い、鞭打ち損傷のメカニズム解明、また、皮膚縫合手術シミュレーションの構築等に関して、重要な知見を得たものであり、学術上、實際上、寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成13年1月22日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。