

Abstract of Doctoral Thesis

Name Dito Anggoro

Title: Comprehensive Biomechanical Analysis of Canine Orthopedics: Evaluation of Patellar Tendon, Radius and Ulna Fractures, and Post-Screw Removal Stress

(犬の整形外科におけるバイオメカニクス分析：膝蓋腱、橈骨・尺骨骨折、スクリュー抜去後のストレスの評価)

Abstract of thesis:

Orthopedic injuries in small animal patients represent a considerable concern within veterinary medicine, influencing their overall well-being and functional capacity. Among these injuries, patellar tendon (PT) and bone fractures can result in reduced mobility, producing discomfort and restricting their capacity to participate in regular physical activities. In particular, the phase of removing screws after a surgical procedure might also potentially cause unexpected stress on the skeletal system, affecting the overall effectiveness of orthopedic treatments. The current studies delve into the complex biomechanical aspects of small animal orthopedics, specifically focusing on prevalent issues involving tendons and bones.

The first chapter quantitatively evaluates the biomechanical and viscoelastic properties of the dog PT under the influence of neuromuscular blocking agents (NMBA), particularly at varying stifle angles. This study not only delves into the biomechanics of the dog PT but also aims to establish a standard reference and introduce a novel examination method for this crucial anatomical structure. Diagnosing dog PT disorders in clinical practice involves various methods, including radiography, magnetic resonance imaging (MRI), and elastography. However, these instrument's availability and dependability often depend on laboratory settings, non-quantitative analysis methods, and operator skills or experience. Alternatively, myotonometric methods have been widely employed in human tendon evaluation and have emerged as a promising approach for dog PT assessment. This approach presents several advantages, including portability, non-invasiveness, and high reliability. By integrating this evaluation into the comprehensive biomechanical testing methodologies employed in the study, the research aims to provide a more thorough understanding of the complex responses of the PT. The method not only helps to advance scientific knowledge but also has the potential to improve diagnostic precision and assist clinicians in optimizing treatment strategies for tendon-related conditions.

The second chapter employs finite element analysis (FEA) to elucidate fracture mechanisms within the radius and ulna of toy breed dogs. This computational approach allows for a detailed examination of stress distribution patterns during the fracture condition, offering a deeper comprehension of small animal orthopedics. To the best of our knowledge, no studies have investigated fracture mechanisms in toy breed dogs utilizing FEA, especially in toy poodles. The insights from this novel approach fill a critical gap in existing research, providing valuable information that could significantly impact veterinary surgery

(Appended form No. 3)

practices. While FEA is widely used in human medicine to study radius ulna fractures, its application in veterinary orthopedics remains limited. Nevertheless, the evolving potential of FEA in veterinary orthopedics holds promise for addressing a range of complex challenges, offering insights into tissue deformation, stress distribution, and other biomechanical aspects. Moreover, the FEA method provides an alternative substitute for directly investigating these phenomena in living dog experiments, which could present ethical obstacles. The limitation underscores the significance of utilizing computational models to advance understanding of fracture dynamics, contributing to more informed and ethically sound approaches to diagnosing and treating fractures in toy-breed dogs. The implications of this research would potentially influence veterinary orthopedics and the broader field of animal welfare.

In the third chapter, we extend our investigation into veterinary orthopedic implants by examining post-screw removal stress in toy poodle radius. The research was prompted by the recognition of complications associated with screw removal, with a particular emphasis on reported occurrences of refracture in the radius. The primary objective is to contribute valuable insights into the biomechanical implications of screw arrangements on post-operative screw removal on bone stress distribution in dog radius fractures. Notably, our study addresses a gap in existing research, as there have been no prior examinations of stress distribution on the toy poodle radius after screw removal using FEA. Treating radius fractures in toy poodle dogs is a complex clinical challenge due to their small size, unique bone structure, and limited blood supply. Innovative approaches were necessary for effective treatment and optimal post-operative outcomes. Implementing the revolutionary impact of FEA in biomedical engineering, our methodology plays a pivotal role in predicting biological responses to mechanical stimuli and efficiently analyzing tissue deformation and stress distribution. This insightful knowledge significantly enhances the understanding of the stress distribution related to the removal of the screw after surgery, providing essential insights for more informed clinical decision-making.

As these chapters coalesce, the dissertation aims to provide a comprehensive foundation of knowledge that advances the understanding of small animal musculoskeletal biomechanics and shapes the future landscape of surgical interventions in veterinary orthopedics. The outcome of this research suggests considerable promise for improving the overall well-being and health outcomes of companion animals.

(About 800 words in English)

学位論文審査の結果の要旨

氏 名	Dito Anggoro
審 査 委 員	主 査： 山口大学 教授 谷 健二
	副 査： 鹿児島大学 教授 三浦 直樹
	副 査： 山口大学 教授 佐々木 直樹
	副 査： 山口大学 教授 日下部 健
	副 査： 山口大学 准教授 板本 和仁
題 目	Comprehensive Biomechanical Analysis of Canine Orthopedics: Evaluation of Patellar Tendon, Radius and Ulna Fractures, and Post-Screw Removal Stress (犬の整形外科におけるバイオメカニクス分析：膝蓋腱、橈骨・尺骨骨折、スクリュー抜去後のストレスの評価)
審査結果の要旨： 近年、 <i>in vivo</i> や <i>in vitro</i> といった研究手法に加え、 <i>in silico</i> の可能性に大きな期待が集まっている。「シリコン内で」を意味する <i>in silico</i> 手法は、数理モデルを基盤としたコンピュータ上での数値実験であり、境界条件を変化させた多数のパラメトリック研究に対して、倫理的制約無く実施できる自由度の高さが利点である。有限要素解析 (FEA; Finite Element Analysis) は、建築や素材の構造力学解析などの工業分野で発展した力学解析法である。近年、医学分野の生体力学解析にも応用されており、Computed Tomography (CT) データと組み合わせた CT based FEA (CT/FEA)によって、三次元骨モデルをコンピュータ上に作成し、骨の形態と構造と力学特性に骨密度を加えた三次元 FEA モデルに変換後、荷重拘束条件を設定することで、生体内では実現不可能な個体固有の力学的解析が可能となる。獣医領域において、このような <i>in silico</i> 解析に関する試みの報告は少なく、参考となる条件値に関する報告は皆無である。 本学位論文では、 <i>in silico</i> 解析の精度向上のための基礎となる生体内靭帯の硬度や弾力性などの特性について定量的解析を試みた。また、本邦での報告が多いトイ種の橈骨・尺骨骨折の発生病態を説明しうる解析モデルの作成およびインプラント抜去後の応力変化について、CT/FEA を実施した。 第一章では、組織硬度計 (Myoton Pro) を用いて犬の膝蓋腱靭帯の特性について検討した。全身麻酔下の健常ビーグル犬 5 頭を横臥位にし、膝の正常位に対し最大進展位および最大屈曲位を設け、さらに筋緊張を減ずるために神経筋弛緩剤使用条件下で測定した。測定項目は、トーン (Hz)、硬度 (N/m)、弾力性 (log)、緩和 (ms)、クリープ (dn) であった。	

トーン、硬度、弾力性は、それぞれ、正常位、最大進展位、最大屈曲位の順に増加し、神経筋弛緩治療後は、5-22%減少した。いっぽう、緩和およびクリープは、それぞれ正常位、最大進展位、最大屈曲位の順に減少し、神経筋弛緩治療後は、13-31%増加した。以上のことから、全身麻酔下における健常ビーグル犬の膝蓋腱靭帯の特性について明らかにすることができた。

第二章では、トイ種の橈骨・尺骨骨折の発生病態を説明しうる解析モデル作成を試みた。トイブードルを撮影した CT (60 列、Supria, Hitachi) データから Simpleware ScanIP v21 (Synopsis, Sunnyvale) を用いて三次元骨モデル (メッシュサイズ; 200 μ m) を作成し荷重拘束条件を設定し、CT/FEA を行った。静的解析では、ミーゼス応力は橈骨および尺骨の遠位 1/3 に分布し、0.001-0.0025 秒間の動的解析では、ミーゼス応力は同部位周辺で経時的に増加した。いっぽう、骨形状が異なるミニチュア・ダックスフンドの橈骨および尺骨ではこのような変化は認められず、応力分布に遍在性は認められなかった。これらの結果から、トイ種の橈骨・尺骨骨折は発生頻度が高く、発生した場合には前腕骨遠位 1/3 部に多いという臨床的事実と関連性があることが示唆された。

第三章では、第二章で得られた解析モデルを用いて、市販の内固定用骨プレート情報から橈骨皮質骨および同遠位海綿骨に螺子孔 (径 1.5mm および 2.0mm) を設けた三次元骨モデルを作成し、CT/FEA を行った。トイ種の前腕骨骨折の整復には内固定法が用いられることが多いが、骨癒合後にインプラントを抜去した場合、第二章で認められた前腕骨遠位 1/3 部の応力分布は骨皮質部の螺子孔周囲に移動し、特に橈骨短軸方向で応力が増加していた。いっぽう、遠位の海面骨部の螺子孔周囲に変化は認められなかった。これらのことから、骨癒合後のインプラント抜去直後には近位螺子孔周囲の応力が増加し、同部位での再骨折の危険が高くなることが考えられた。

本研究から、生体の犬膝蓋腱靭帯の工学的な特性が明らかになり、より複雑な *in silico* 解析を高い精度で実施するためのデータが蓄積できた。また、トイブードルの三次元骨モデルを用いた 40cm の段差からの着地を再現した解析では、応力分布が前腕骨遠位 1/3 に集中することが明らかになり、さらに螺子孔があった場合には、その周囲に応力が増加することが明らかになった。これらのことから、生体では実現不可能な個体固有の力学的解析が可能であり、獣医整形外科の病態解析・予後予測の一助となり得、獣医臨床学の進展に大いに寄与することが期待された。

以上より、本論文は博士 (獣医学) の付与に資する内容であると考えます。