

Abstract

The aim of this study was to develop a mathematical model of cytoskeletal remodelling in bone cells, which forms the basis of osteoid adaptation, as well as to perform numerical simulations of cell and bone tissue adaptation under mechanical loading. The dissertation summarizes research on the mathematical representation of how mechanical interactions influence the activity and resilience of bone cells, and thus the adaptive processes of the tissue, thereby enabling computer-based simulation and analysis of bone remodelling.

The work presents the structural characteristics of bone tissue, with particular emphasis on the role of specific cell types and their involvement in remodelling processes. It discusses the role of the cytoskeleton in mechanotransduction and highlights environmental factors, such as hormones and mineral metabolism, that affect the rate and nature of remodelling. A review of existing models of bone tissue, single cells, and the cytoskeleton was carried out, with their limitations identified. Two complementary approaches were proposed: modelling bone tissue on the basis of mechanical signals regulating cellular activity, and a cytoskeletal remodelling model based on optimization equations, allowing for the analysis of topological changes within the filamentous architecture.

Numerical simulations using the finite element method confirmed the validity of the proposed concept. The results indicate that integrating the signal-based model with the description of cytoskeletal remodelling opens new opportunities for studying adaptive processes and may be applied to predict the response of bone tissue to mechanical loading.

keywords:

mathematical modelling, numerical simulations, finite element method, osteocyte, cytoskeleton, remodelling

Streszczenie

Celem pracy było opracowanie matematycznego modelu przebudowy cytoszkieletu komórek kostnych stanowiącego podstawę adaptacji osteoidu oraz symulacji numerycznych adaptacji komórek i tkanki kostnej pod wpływem obciążeń mechanicznych. Rozprawa stanowi podsumowanie badań nad matematycznym ujęciem wpływu oddziaływań mechanicznych na aktywność i odporność komórek kostnych, a tym samym na procesy adaptacyjne tkanki, co otwiera możliwość komputerowej symulacji i analizy przebudowy kości.

W ramach pracy przedstawiono charakterystykę budowy tkanki kostnej, ze szczególnym uwzględnieniem roli poszczególnych typów komórek i ich udziału w procesach przebudowy. Omówiono rolę cytoszkieletu w mechanotransdukcji oraz czynniki środowiskowe, takie jak hormony i gospodarka mikroelementów, wpływające na tempo i charakter procesów przebudowy. Przeprowadzono analizę istniejących modeli tkanki kostnej, pojedynczych komórek i cytoszkieletu, wskazując ich ograniczenia. Zaproponowano dwa uzupełniające się podejścia: modelowanie tkanki kostnej w oparciu o sygnały mechaniczne regulujące aktywność komórek oraz model przebudowy cytoszkieletu oparty na równaniach optymalizacyjnych, pozwalający na analizę zmian topologicznych w architekturze filamentów.

Symulacje numeryczne z wykorzystaniem metody elementów skończonych potwierdziły zasadność przyjętej koncepcji. Wyniki wskazują, że integracja modelu sygnałowego z opisem przebudowy cytoszkieletu otwiera nowe możliwości badania procesów adaptacji oraz może znaleźć zastosowanie w prognozowaniu odpowiedzi tkanki kostnej na obciążenia mechaniczne.

Słowa kluczowe:

modelowanie matematyczne, symulacje numeryczne, metoda elementów skończonych, osteocyt, cytoszkielet, przebudowa