HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Numerical and experimental analysis of mechanical characterization of sacroiliac joint in physiology and pathology [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	豊原, 涼太
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第15357号
Issue Date	2023-03-23
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/89432
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Toyohara_Ryota_review.pdf, 審査の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称　博士 (工学)　　氏名　豊原　涼太

審査担当者　主　査　教　授　大橋 俊朗
副　査　教　授　東藤 正浩
副　査　教　授　清水 裕樹
副　査　教　授　Niels Hammer （Medical University of Graz）

学位論文題名

Numerical and experimental analysis of mechanical characterization of sacroiliac joint in physiology and pathology
(生理病理状態における仙腸関節の力学的役割に関する数値的および実験的解析)

仙腸関節 (SIJ) は、骨盤の仙骨と寛骨の間に位置し、前方の滑膜関節領域と後方の靭帯領域で構成される。関節周囲は強力な靭帯で支持されるため、1 mm 以下のわずかな関節運動のみが許容される。関節面が重力方向に配置されているため、関節面には圧迫力とともに強いせん断力が負荷される応力環境であると推測される。このようにわずかな可動域で大きな負荷に対応するため衝撃により関節に不適合が生じ、関節機能障害を起こし疼痛の原因となりやすい。疼痛軽減には関節を固定し過剰な動きを防ぐことが有効であると考えられている。生理病理状態における仙腸関節のバイオメカニクスに関する研究はこれまでに多くない。本研究では、生理病理状態における仙腸関節の機能と骨盤内応力環境に対する骨盤と仙腸関節の形状の影響を明らかにすることを目的とした。また、仙腸関節疾患の最も一般的な治療法の 1 つである骨盤ベルトによる骨盤内応力環境を説明することも目的とした。仙腸関節は骨盤の構造から応力が集中しやすい箇所であり、わずかな関節運動により応力集中を緩和し、周囲の靭帯組織とともに荷重伝達を行う機構であることを初めて示した。また、仙腸関節表面形状が関節運動に寄与し、関節の組合せ位置によって運動範囲が決定されることが分かった。換言すれば、適した関節位置から離れると病理的範囲で運動を行い、関節機能が果たせず疼痛を生じさせる可能性が考えられる。他にも、骨盤側股関節部の寛骨臼が十分に大腿骨を覆わない寛骨臼形成不全骨盤では、後方臼蓋の不足により大腿骨からの荷重伝達が正しく行われず、結果、仙腸関節部の応力増加を招く可能性が示唆された。仙腸関節の形状だけでなく骨盤の形状も仙腸関節の力学環境に影響を与えうることが本研究の解析により示された。これらから骨盤内の応力環境は骨性構造の位置によって容易に変化することがわかる。そこで、仙腸関節機能不全患者における仙腸関節の動作制御によって荷重伝達を制御し、仙腸関節部の負荷を軽減する治療法の開発が期待できる。本研究では開発に向け、新治療技術の開発に貢献できうる既存の治療法として骨盤ベルトの骨盤内応力環境を調査し、骨盤ベルトが仙腸関節部の圧迫環境を変化させることを示した。以上より、仙腸関節のバイオメカニクスの一端を明らかにし、これを活かした新治療技術の開発可能性を示した。本論文は全 6 章で構成されており、各章の概要を以下に述べる。

第 1 章では、まず本研究の背景について述べ、仙腸関節の解剖や関節疾患とその治療法について概説した。仙腸関節や疾患に関するこれまでの研究をまとめ、本研究の目的を述べた。

第 2 章では、歩行時の仙腸関節の動きと機能を示した。仙腸関節は衝撃緩衝装置として機能して

いる考えられているものの、実際の応力環境は示されておらず推測の域を出ていなかった。本章では、詳細な仙腸関節構造と靭帯配向を再現した骨盤の有限要素モデルに 3 次元歩行解析で得た歩行データを入力し、健常二足歩行時の骨盤内応力環境の解析を行った。その結果、骨盤輪の形状のため歩行負荷が仙腸関節に集中したものの、仙腸関節のわずかな可動性によって応力集中が緩和され、周囲靭帯が荷重を担う構造であることを示した。

第 3 章では、仙腸関節の表面形状と関節運動抵抗の関係を調査した。骨盤の X 線 CT 画像から仙腸関節面モデルを作成し、表面形状の特徴を解析して関節形状を特徴づけた。また、専用の摩擦抵抗試験装置を開発し、関節の運動方向や組合せ位置によって抵抗が変化することを示し、関節状態が関節の運動性に影響を及ぼす可能性を示した。

第 4 章では、骨盤の形状による仙腸関節の力学環境を分析した。病理骨盤として、寛骨臼形成不全骨盤の有限要素モデルを作成し、立位における骨盤内応力分布の解析を行った。その結果、寛骨臼後方被覆が不足すると仙腸関節部の応力増加が認められた。同部位が大腿骨からの荷重を適切に伝達するために重要な役割を果たすことが分かり、適切でない骨盤形状では仙腸関節の応力環境が悪化し、疼痛発生に寄与しうることが示唆された。

第 5 章では、仙腸関節機能不全の治療法の 1 つである骨盤ベルトによる腰部の荷重伝達状態を視覚化した。本治療法は臨床現場で頻繁に使用されるものの、その効果機序を調査した力学的研究はほとんどない。本章では、骨盤ベルトによる腰部圧力分布を実測し、有限要素モデルにその結果を入力することで骨盤ベルト装着時の応力環境を再現した。その結果、骨盤ベルトが骨盤を外旋させ、仙腸関節が圧迫される状態となることが実証された。

第 6 章では、結論として本研究で得られた結果を要約し、この研究分野における今後の展望について述べた。

これを要するに、本論文では、数値解析技術および実験技術により仙腸関節に生じる力学環境を詳細に明らかにし、これを活かした新治療技術の開発可能性を示したものであり、生体医工学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。