

## 学位論文題名

脳性麻痺者における立位・歩行障害に  
関する生体力学的研究

## 学位論文内容の要旨

リハビリテーションの目的は最終的に障害者が自立した日常生活をおくり、積極的な社会参加を果たすことを可能にすることにある。このために克服されなければならない障害は数多いが、特に立位・歩行能力の獲得は重要である。立位・歩行を実現するために必要な身体機能は、①運動の発現や調節を行なう制御機能、②運動を達成するために必要な筋力、③適切な四肢の運動範囲を規定する関節の可動性の三つに集約することができる。従来の研究では、このうち①の立位・歩行の身体制御メカニズムを追求することが主に行なわれてきた。また、立位・歩行のために必要な筋力についての分析もまれに行なわれてきている。一方、関節の可動性の問題は整形外科学やリハビリテーション医学の領域では基本的な問題として重要視されているにもかかわらず、定量的な工学的分析が行なわれずにきた。

本研究では、この関節の可動性の障害と立位・歩行障害との関連を定量的に分析し、その障害メカニズムを追求することを目的としている。なお関節の可動性の障害は、拘縮という医学用語で表現されるため以後この用語を用いる。本論文は7章で構成されている。以下に、その概要を述べる。

第1章は、序論であり、リハビリテーションの概念を概説し、立位・歩行能力の重要性について述べ、その研究の歴史を概説することで本研究の目的を設定するに至った経緯を述べている。

第2章では、本研究の主題である拘縮についてのまとめを行なっている。具体的には、拘縮を理解する上で必要な関節の基本的な構造について述べ、次に拘縮の発生機序とその臨床的評価方法について概説している。

第3、4章では、拘縮と立位障害に関する研究を述べている。第3章では、拘縮の影響を最も反映するアライメントに注目し、脳性麻痺者の立位アライメントを画像解析法によって評価している。その結果、健常者、脳性麻痺者に拘らず、拘縮が無い場合には立位面という外部環境の変化を足関節の底背屈によって補償し、常に直立位を保持することを明らかとした。一方、拘縮をもつ脳性麻痺者では拘縮の影響が大きくなるほどアライメントの悪化が確認された。こうした知見をもとに、立位アライメントの異常には二関節筋短縮が大きく関与していること、拘縮を伴う立位であっても必要な筋力が少なくなるアライメントを選択するとい

う新しい推論を提案している。

第4章では、立位アライメントのシミュレーションについて述べている。多関節にわたる拘縮の影響の全てを、前章のような実験的方法で把握することは困難である。したがって、アライメントの異常をシミュレーションを試みることは極めて意義深い。そこで本章では、まず下肢関節を対象に拘縮による関節可動制限を定量的に記述する非線形モデルを考案した。このモデルは複数の関節を対象とし、さらに拘縮の内部メカニズム（関節拘縮、二関節筋短縮）が考慮されており、関節可動域から拘縮の種類と程度を推定できるという特徴をもっている。次に、この拘縮モデルを立位のリンクモデルへ導入し、アライメントのシミュレーションを行なった。その結果、前章の脳性麻痺者の立位アライメントと質・量ともに酷似し、本モデルおよびシミュレーションの妥当性が確認できた。

第5、6章は、拘縮と歩行障害に関する研究を述べている。第5章では、歩行運動をエネルギーを入力とし、これを身体の水平移動とそれに伴う動揺（上下、前後、左右）によって消費するシステムとしてとらえ、これに拘縮がどのように関わるかを考えた。このシステムに関与する変数、つまりエネルギーは呼気ガス分析によって求めた酸素摂取量、水平移動は歩行速度・歩幅・歩調、身体動揺は鉛直方向の加速度を代表指標として用い、拘縮をもつ脳性麻痺者を対象にエネルギー消費量と力学変量を測定した。脳性麻痺者は拘縮以外の機能障害をもつことが想定されるため、健常者の足関節を装具によって固定して疑似的に拘縮を発生させた場合についても検証を行なった。その結果、拘縮の有無に関係なく、脳性麻痺者の歩幅および歩調は健常者とおおむね同様であることが明らかになった。しかし、同じ歩行速度を発生させた際の酸素摂取量および鉛直方向の加速度は健常者より過大であり、拘縮が歩行の大きな障害要因であることを明確に確認した。

第6章では、拘縮に起因する歩行障害のシミュレーションについて述べている。歩行障害を発生させる複数の機能因子を、実際の歩行状態から純粋な形で分離することは極めて困難である。したがって、異常歩行のモデルを準備し、シミュレーションを試みることは極めて意義深い。そこで、リズム発生神経回路網を具備した歩行モデルを提案し、シミュレーションを行なった。特にこのモデルは歩行運動を生成させるための力学的制約をもたず、外部環境の変化に対しても自律的に歩行パターンを変化させて対応できるという特徴をもつ。また、このモデルに拘縮という内部障害を導入し、異常歩行を発生させるという試みは極めて独創的であるといえる。シミュレーション結果は、拘縮が顕著になると歩行できなくなること、拘縮があっても歩幅・歩調は健常域を逸脱しないこと、重心の鉛直加速度は拘縮の程度、歩行速度の上昇に伴い増大するという特性を示した。さらに、この結果は前章の疑似的な足関節拘縮をもつ健常者の歩行とおおむね一致し、本方法が拘縮に起因する歩行の異常を再現できることを明らかにした。

最後に、第7章では、本研究を総括している。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 朝 倉 利 光  
副 査 教 授 伊 藤 精 彦  
副 査 教 授 伊 福 部 達  
副 査 教 授 山 本 克 之  
副 査 教 授 石 川 博 将

## 学位論文題名

### 脳性麻痺者における立位・歩行障害に 関する生体力学的研究

立位・歩行能力は人類に特異的な能力であり、日常生活をおくる上で必要不可欠な能力である。これらの能力の異常は、①運動の発現や調節の不全、②運動を達成するために必要な筋力の低下、③四肢の運動範囲を決定する関節の可動性の低下（拘縮）といった三つの機能の障害によって発生する。脳性麻痺に代表されるような実際の患者では、これらの機能の障害が単独で立位・歩行を阻害することはまれであるため、個々の機能の障害による立位・歩行の障害メカニズムを知ることが必要とされている。また、このことは、この能力を獲得するための治療や訓練といったリハビリテーションの観点からも重要である。従来の研究では、立位・歩行の身体制御メカニズムを追求することが主に行なわれ、また、立位・歩行のために必要な筋力についての分析もまれに行なわれてきている。一方、拘縮の問題は整形外科学やリハビリテーション医学の領域では基本的な問題として重要視されているにもかかわらず、定量的な工学的分析が行なわれずにきている。

本論文では、この拘縮と立位・歩行障害との関連を定量的に分析し、その障害メカニズムを追求することを目的とした研究を行なっている。このため本論文では、脳性麻痺者を対象とした立位・歩行の計測・分析を行ない、さらにリンクモデルを用いたシミュレーションを行なっている。

第1章では、リハビリテーションの概念を概説し、立位・歩行能力の重要性について述べ、その研究の歴史を概説することで本研究の目的を設定するに至った経緯を述べている。

第2章では、本研究の主題である拘縮についてのまとめを行なっている。まず、拘縮を理解する上で必要な関節の基本的な構造について述べ、次に拘縮の発生機序とその臨床的評価方法について概説している。

第3、4章では、拘縮と立位障害に関する研究を述べている。第3章では、拘縮の影響を最も反映するアライメントに注目し、脳性麻痺者の立位アライメントを画像解析法によって評価している。その結果、健常者、脳性麻痺者にかかわらず、拘縮がない場合には立位面という外部環境の変化を足関節の底背屈によって補償し、常に直立位を保持することを明らかにしている。一方、拘縮をもつ脳性麻痺者では拘縮の影響が大きくなるほどアライメントが悪化することを示している。こうした知見をもとに、立位アライメントの異常には短縮が大きく関与していること、拘縮を伴う立位であっても必要な筋力が少なくなるアライメントを選択するという新しい推論を提案

している。

第4章では、立位アライメントのシミュレーションについて述べている。まず、下肢関節を対象に拘縮による関節可動制限を定量的に記述する非線形モデルを考案している。このモデルは複数の関節を対象とし、さらに拘縮の内部メカニズム（関節拘縮、二関節筋短縮）が考慮されており、関節可動域から拘縮の種類と程度を推定できるという特徴をもっている。次に、この拘縮モデルを立位のリンクモデルへ導入し、アライメントのシミュレーションを行なっている。その結果は、前章の脳性麻痺者の立位アライメントと質・量ともに類似することを示し、本モデルおよびシミュレーションの妥当性を確認している。

第5、6章は、拘縮と歩行障害に関する研究を述べている。第5章では、歩行運動をエネルギーを入力とし、これを身体の水平移動とそれに伴う動揺（上下、前後、左右）によって消費するシステムとしてとらえ、これに拘縮がどのように関わるかを考えている。このシステムに関与する変数、つまりエネルギーは呼気ガス分析によって求めた酸素摂取量、水平移動は歩行速度・歩幅・歩調、身体動揺は鉛直方向の加速度を代表指標として用い、これらを拘縮をもつ脳性麻痺者を対象にして測定している。脳性麻痺者は拘縮以外の機能障害をもつことが想定されるため、健常者の足関節を装具によって固定して疑似的に拘縮を発生させた場合についても検証を行なっている。その結果、拘縮の有無に関係なく、脳性麻痺者の歩幅および歩調は健常者とおおむね同様であることを明らかにしている。しかし、同じ歩行速度を発生させた際の酸素摂取量および鉛直方向の加速度は健常者より過大であり、拘縮が歩行の大きな障害要因であることを明確に確認している。

第6章では、拘縮に起因する歩行障害のシミュレーションについて述べている。歩行シミュレーションのためにリズム発生神経回路網を具備した歩行モデルを用いている。特にこのモデルは歩行運動を生成させるための力学的制約をもたず、外部環境の変化に対しても自律的に歩行パターンを変化させて対応できるという特徴をもっている。また、このモデルに拘縮という内部障害を導入し、異常歩行を発生させるという極めて独創的な試みを行なっている。シミュレーション結果は、拘縮が顕著になると歩行できなくなること、拘縮があっても歩幅・歩調は健常域を逸脱しないこと、重心の鉛直加速度は拘縮の程度、歩行速度の上昇に伴い増大するという特性を示している。さらに、この結果は前章の疑似的な足関節拘縮をもつ健常者の歩行とおおむね一致し、本方法が拘縮に起因する歩行の異常を再現できることを明らかにしている。

最後に、第7章では、本研究でえられた結果を総括し、結論が述べられている。

これを要するに、著者は、従来医学的にのみ取り扱われてきた拘縮という問題とそれに起因する立位・歩行能力の障害メカニズムを解析するいくつかの工学的方法を提案し、それらの有用性を実験的・シミュレーション的方法によって明らかにすることによって、その障害メカニズムに関する有益な多くの新知見を得ており、生体工学およびリハビリテーション工学の進歩に寄与するところきわめて大きい。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。