

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：33919

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500623

研究課題名(和文) 重度障がい者用車いすシーティングにおける身体の長期変形過程シミュレーション

研究課題名(英文) Simulation of physical transformation in long-term interaction between severely disabled person and wheelchair seat

研究代表者

塚田 敦史 (Tsukada, Atsushi)

名城大学・理工学部・准教授

研究者番号：70349801

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：車いす上の座位姿勢の長時間にわたる支持環境が身体に与える状況の模擬が可能な解析を目指し、胸郭を含めた脊柱の脊柱有限要素モデルを構築した。モデルは、解の精度を考慮し物性が軟らかい椎間板付近のモデル化を行ったが、時刻歴応答解析の遂行は困難な結果であった。荷重条件と時刻歴応答解析に十分耐えうる要素数の更なる増大の必要性が課題となった。また車いすモデルを構築し、身体モデルが車いすに着座する状態を模擬できる解析を検討した。車いすシートは厚さが薄いため、接触時の食い込み量を考えなければならない。食い込み量を調整できる垂直剛性係数の設定が最も重要であり、シートと身体簡易モデルとの接触解析が可能になった。

研究成果の概要(英文)：The aim of this research was to simulate a model of the relationship between a user and the seating support of a wheelchair, focusing on wheelchair-users suffering from scoliosis. The long-term mechanical interaction was considered using a visualization. A three-dimensional model of the spinal column and thorax was constructed. To improve the analysis accuracy, a larger number of elements had to be used when modeling the spine, because they have a more flexible physical property than the vertebrae. It was found that increasing the number of elements was essential for tolerable load conditions and sufficient time-series analysis. To simulate the seating interaction, a model of a standard wheelchair and simplified human model were constructed. The amount of penetration at contact had to be controlled for the thin seat of the wheelchair. Adjusting this made it possible to analyze the contact between the seat and simplified human model.

研究分野：リハビリテーション工学

キーワード：アクティブバランスシーティング

1. 研究開始当初の背景

(1) 症候性側彎と称される脊柱変形は、身体が車いすから受ける反力と重力との物理的（力学的）な相互作用及び、症状に起因する筋機能の状態変化など内的な要因が複合している。車いすユーザー（以下、当事者）の症候性側彎は、年月単位の長期にわたる物理的、社会的環境が影響しているとされる。障がい者の個性の広さもあり、すべての因子を複合して人-車いす系における身体変形過程を推論し、この機序を解き明かすことは難しい。しかしながら観点を換え、重力場と車いす機器などの物理的環境が、当事者の身体変形に及ぼす影響を考察することにより、身体変形過程を推論できる可能性が出てくる。

(2) 一方近年になり、従来とは全く異なるアクティブ・バランス・シーティング論が提案され、この理論に基づいた機器（車いす）が創出されてきた。アクティブ・バランス・シーティングは、“身体が支えられつつ繰り返し動ける”ことを目的とするため、支えるべき身体部位は支え（主の支え）、それ以外は支えを減らす（従の支え）というこれまでにない減算の考えを併せもつ。この車いすの適用によって姿勢変形の程度に大きな改善のみられる事例が出現してきた。

(3) 人-車いす系には、異なった工学的・臨床的方法論が混在しており、その方法論は、地域による対応の違いや専門職の経験的な前提に基づいて提唱されているにすぎない。車いすは、当事者にとって一生涯共にする機器となるだけに、車いす座位における力学的な影響の大きさは計り知れない。それにも関わらず、経験的なシーティング構築の方法論が大勢であり、学術的なアプローチによって説明されたものは極僅かである。

(4) 本申請課題の目標である、年月単位という時間的スケールで力学的な観点から進めた研究は、国外も含めて見あたらぬ。この背景には過去の計算機環境の能力が十分とは言えなかったことも推察される。身体変形の亢進に、車いすの座位姿勢支持に対する機能や形状といった、工学的因子が影響することは十分考えられ、長期の時間因子を考慮した人-車いす系の関係を明示する挑戦は、急がれる。

2. 研究の目的

(1) 本研究は、車いす使用者の症候性側彎に焦点を合わせ、車いす上の座位姿勢の長時間にわたる支持環境を模擬した解析の実現を目指す。力学的に最も過酷な状態である骨部と椎間板のみの脊柱で考えた場合、車いすか

らの支持により、身体がどのように変形を生じるのかを明らかにすることが目的である。

(2) 車いすユーザーの脊柱に長期的に重力の負荷をかけ続けることで、脊柱が時系列でどのように変形していくのか、力学的に検証を行った実績は見当たらない。

3. 研究の方法

(1) 概念としての方法論の理解を支援する1つとして、身体と椅子環境との力学的相互作用の“見える化”について検討を始めた。その経緯は下記による。

症候性側彎において、重力場と車いす機器などの物理的環境が、身体変形に及ぼす影響を考察することにより、身体変形の過程を概念的に表現できる可能性が期待される。

人-重力-車いす系における力学的な相互関係を時間因子とともに可視化ができれば、ABSの概念につながるより本質的な問題の理解に非常に有効であると期待される。

(2) 本課題では、主に身体体幹部の骨格モデルの構築を進めた。本研究の初期では、骨格標本模型をベースにして脊柱-胸郭の3次元モデルの開発を進めた。骨格標本模型より特徴座標点を抽出し、ソリッド形状を構成する直接生成法で構築した。構築したモデルを図1に示す。本モデルの要素数は15580、節点数は22268である。仙尾骨部を固定し、(i)鉛直方向に重力加速度を作用させる、(ii)標準型車いすの背角度を参考に、着座状態を模倣する意味から鉛直から15°方向に重力加速度を作用させる、2つの条件を設定した。



図1 脊柱/胸郭のモデル化

(3) 静的な解析は実行可能であったが、時刻歴解析を目標とするにはモデルの要素形状や精度の向上が必須となることがわかった。このため、モデルの大規模な再構築が必要となった。骨格標本模型から幾何形状をリバースして仮想空間上で3次元モデルを表現させた後に、すべて6面体要素形状の有限要素モデル化を進める手法を採用した。しかしながら、解析のためのモデルとして脊柱の棘突起や椎間板の形状表現において左右非対称性

が大きい問題が生じ、精度は十分では無い結果であった。時刻歴解析を遂行可能なモデルを実現するには、課題が多いと推察された。本研究の目的達成には、モデル化におけるこの課題を精査して克服することが必須であった。

(4) 前述の課題を克服するため、最終的に考案したモデル生成手法は、BodyParts3D/Anatomography (Database Center for Life Science) による解剖学的な実測を基にした3次元人体モデルのデータ(オブジェクトファイル)を基に、ソリッドモデル化を実行して有限要素モデル化を行った。ソリッドモデル化までの新たなモデリング手法の構築、およびモデルの骨格標本との近似度向上を目的に、椎骨や椎間板といった体幹部の有限要素モデルの構築を進めた。解析精度を考慮し、特に解析に影響を与えると考えられる椎間板や椎骨(棘突起部分を除く)には、6面体要素形状で有限要素モデルを開発した。構築したモデルを図2に示す。本モデルの要素数は328614、節点数は230800である。本手法の確立とモデル構築には約2年費やす結果となった。この結果から、次のことが得られた。

有限要素のベースとなるソリッドモデル作成時に、滑らかなモデルを作成することが可能である。したがって要素を構築しやすくなる。

形状表現時の誤差と考えられる椎骨と椎間板との隙間は、サーフェスモデル生成ツールによって修正することが可能であり、無くすことができた。

仙尾骨、胸骨、肋骨を含めた有限要素モデルまで構築が可能となった。

椎骨の棘突起部分を、四面体要素で有限要素モデル化し椎体と結合することで、オリジナルの形状により近似した有限要素モデルを構築することができた。

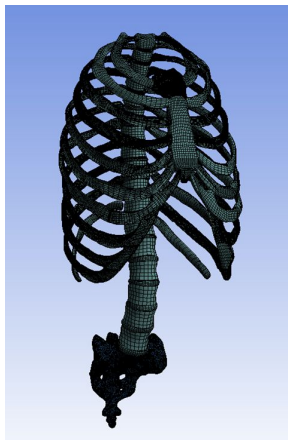


図2 解剖学的な形状データを基にモデル構築した脊柱有限要素モデル

(5) 解析精度のためには十分な要素数が必要であるが、他方、長時間を想定した時刻歴解析を実現するためには、モデルの要素数を抑えて解析時間を速くすることが求められる。時刻歴解析において生ずる問題、すなわち解析コスト低減と解析時間の短縮や最低限必要な要素数を検討するために、脊柱の一部分である腰椎4~5番をベースにした単純な円筒モデルを作成し、これを実際の脊柱を構成する椎骨と椎間板の個数分を縦に積み上げた簡易モデルを構築して(図3)、解析手法を検討した。

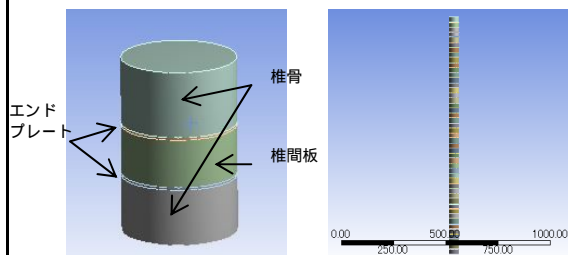


図3 脊柱の簡易モデル

(6) 六面体の一次要素で簡易有限要素モデルを生成した。節点数は49061であった。物性値は、椎間板のエンドプレートと髄核は等方性、線維輪と椎骨は直交異方性材料として与えた。各椎骨と椎間板との間は全て、分離も滑りもしない完全固着とした接触状態を

設定した。身体の全体重を60[kg]として頭部を5[kg]、体幹部を45[kg]と考え、頸椎1番の上面に頭部重量相当の50[N]のみ作用しているものと仮定した。また鉛直方向に重力加速度が作用している条件で解析を実行した。解析は、静解析および10[sec]の時刻歴応答解析を行い、確認した。その結果、解が収束せずに解析が中断するような問題が生じないことを確認した。この予備的検討を、脊柱の3次元モデルへ反映させる。

(7) 次に解剖学的な実測を基にした人体モデルから構築を進めた、脊柱の3次元有限要素モデルを用い解析を行った。構築した脊柱モデルは、棘突起部のない椎骨と椎間板から構成したものである。物性値は、簡易モデルと同様とした。生理的に湾曲したSカーブをなす形態であり、力学的により厳しい条件となるため、解析が実行可能かを確認する。また、境界条件も簡易椎骨積立モデルと同じ条件で解析した。その結果、頭部の荷重相当である50[N]を作用させた条件では、正常に解析することができなかった。荷重を作用させずに重力のみで解析したところ、正常に解析できた。この原因として、生理的湾曲の形態が影響して主に椎間板の有限要素崩壊または要素座屈が疑われ、解析が困難になってし

まうことが推測された．節点数 23 万まで増大させて問題解決を図ったが，更なる要素の増大が必要と判断した．本課題で用いる有限要素解析コードに節点数が制限（約 25 万）されている一方で，要素数の増加は避けられず，今後最適な要素数による解析モデルを開発し，時刻歴解析の実現を行うことが課題となった．

(8)本研究では，身体と車いすとの関係性を可視化することが目標である．身体における椎間板や皮膚などは軟組織であり，柔らかな物体同士の「接触」を有限要素法（FEM）で表現し解析を行う必要がある．このため身体モデルが車いすに着座している状態を仮定して簡易モデルを構築し，軟組織が含まれた車いすと接触した解析のできることを目指した．

(9)身体が車いすに座ると，重力やいすから受ける反力の作用があり，身体のずれなどが生じるのみでなく，長期的に身体の変形に寄与してしまうとされる．そこで，身体と車いすとの力学的な相互作用を解析により検証できることを目標に，第一歩として車いすのシート部と皮膚といった変形体同士での接触の表現を試みる．矩形形で表わした骨部周囲に皮膚を一様に付着させて模擬したものを，身体の簡易モデルとして表現した．車いすに座らせている状態を仮定し，解析における影響が出てくるかを評価した．

(10)モデルとした車いすは，日進医療器(株)製の車いす NC-1CB 型車いすである（図 4）．車いすの中でも最も簡易な形状であること

から予備解析用を選んだ．最終目標であるアクティブ・バランス・シーティング用の車いすは，構造的にも使われる素材の物性においても異なり，それらの物性もさらに多様になる．拘束条件はフレームを完全固定させた．

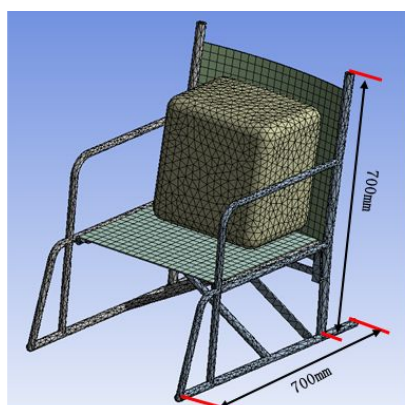


図 4 標準型車いすと物体との接触を模擬した有限要素モデル

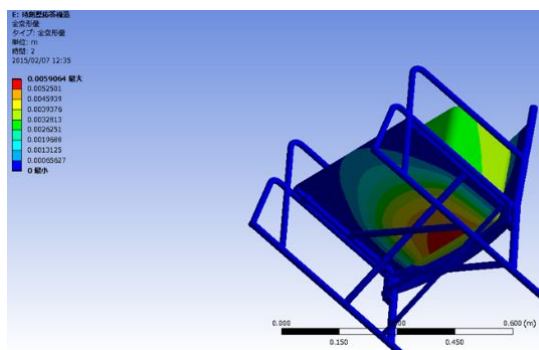


図 5 標準型車いすと物体との接触を模擬する解析結果（時刻歴解析における変形量）

また，荷重条件は重力を与えた．身体モデルを模擬した簡易モデルとフレームを 4 面体，シートを 6 面体で有限要素を作成した．身体簡易モデルと車いすシート間には，拡大ラグランジェ法による接触状態を設定した．静的構造解析と時刻歴応答解析を行い検討した．モデルとした標準型車いすのシートは厚さが 1～2[mm]ほどと，薄いものであるため，接触時の食い込み量を考えなければならない．本研究で最も重要であったのが食い込み量を調整できる，接触を模擬するための垂直剛性係数の設定である．静解析および 2 秒間の時刻歴応答解析を実行した結果，シートと身体簡易モデルとの接触解析は成功した（図 5）．

(11)今後の課題は，車いすの折りたたみ機構の運動を考慮し，簡易モデルでは無く身体モデルとの接触解析を行う必要がある．さらに，シートの材質がナイロンのみであったため，他の材質も解析し，身体への影響を検証していく必要がある．

4. 研究成果

(1)車いす上の座位姿勢の支持環境によって身体が力学的にどのような影響を受けるのかについて，長時間を模擬した解析を行うために，胸郭を含めた人体の脊柱モデルを構築した．その結果，相対的に物性が軟らかい椎間板付近の要素を増大しても，時刻歴応答解析の完全な実行は困難であった．このため，荷重条件と時刻歴解析に十分耐えうる要素数の更なる増大が必要であることがわかった．力学的にも過酷な条件下で解析が実行可能な堅牢なモデルの構築を早急に進めることが課題となった．

(2)車いすモデルを構築し，身体モデルが車いすに座っている状態を模擬する解析手法の実現可能性を検討した．車いすシートは厚さが薄いものであるため，接触時の食い込み

量を考えなければならない。本研究で最も重要であったのが食い込み量を調整できる垂直剛性係数である。本研究の結果、シートと身体簡易モデルとの接触解析は成功することができた。

(3)今後の遂行課題として、力学的にも過酷な条件下で解析が実行可能な堅牢なモデルの構築を早急に進めていく。続いて、アクティブ・バランス・シーティング仕様の車いすでのシミュレーションを可能とするために、シート部の主の支えとなる複数のベルト構造のモデル化と解析の実行可能性を評価し、身体-車いす間の長時間時刻歴応答解析を実現していく。車いす上での症候性側彎の機序の可視化を目指す。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計2件)

- (1) Atsushi Tsukada, Shigeo Nishimura, Tatsuo Hatta, Simulation on the effect of gravity, human body and wheelchair on active balance seating, EUROPEAN SEATING SYMPOSIUM 2013, 2013-11-06, Dublin(Ireland)
- (2) 塚田敦史 西村重男 八田達夫 平田学, ABSに基づく身体-車椅子の重力による影響についての検討の方向性,第28回八工学カンファレンス 2013年8月23日, いわて県民情報交流センター(岩手県盛岡市)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：

取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等
・該当なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

塚田 敦史 (TSUKADA ATSUSHI)
名城大学・理工学部・准教授
研究者番号：70349801

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：