

積雪寒冷期における電動車椅子の性能評価と 走行シミュレーション手法に関する研究

学位論文内容の要旨

脊髄損傷者をはじめとする歩行障害者にとって、車椅子は有効な移動手段の一つである。近年、福祉医療技術の発達や福祉政策の充実などにより車椅子利用者のQOL（Quality of Life：生活の質）も次第に改善され、積極的に屋外活動する機会も増えてきた。しかしながら、北海道等の積雪寒冷地域では、歩行障害者が冬期間に外出することはかなりの困難を伴う。降雪と低温は、路面の圧雪・アイスバーンを発生させ、凹凸・段差も多く出現させる。また低温環境は電動車椅子の動力源である蓄電池の放電能力低下も引き起こす。そのため通常の手動車椅子による屋外移動はほとんど不可能となる。こうした状況から、歩行障害者が冬期間安心して外出できるための車椅子の要望は非常に高い。

以上のことにより本論文では、積雪寒冷期に屋外走行可能な電動車椅子開発のための基礎研究として、①凍結路・雪路走行時における電動車椅子走行性能評価、②電動車椅子の冬期走行性能が評価可能な計算機走行シミュレーション手法の提案、③車椅子用蓄電池の低温特性実験、を行った。電動車椅子を積雪路面や凍結路面で走行させた場合、最も重要なことは駆動輪がスリップせずに走行することである。そのため駆動輪の回転による理論走行速度と実走行速度の比率でスリップ度を定義することで、駆動輪のスリップ状態が測定可能となった。駆動方式の異なる3種類の車椅子を用いて冬期路面における走行実験を行った。車椅子の走行性能は駆動方式の他に全体構造や搭乗者を含めた重心位置の影響も大きい。利用者個別の身体能力や体型を考慮した車椅子の設計が重要である。しかしながら設計開発段階で試作を繰り返し、実験することは多大の費用と時間を要する。このため車椅子の走行シミュレーション手法を提案した。これにより様々な路面条件による発進から加速時と一定速度時の走行性能が解析された。また、低温環境下で電動車椅子用鉛蓄電池の電力量（放電容量）が低下してしまうことから、外部環境温度一定で放電容量測定実験を行い、低温環境における鉛蓄電池の特性を明らかにした。さらに実車走行試験により実際の使用環境における鉛蓄電池の特性を評価した。

本論文は第1章から第6章まで全6章で構成されている。以下に各章の要旨を示す。

第1章は、我が国における福祉の現状や、積雪寒冷地域において車椅子利用者を取り巻く問題事項等、本研究の目的と背景について述べている。

第2章では、積雪寒冷期における走行性能の評価手法を提案し、構造や駆動方式の異なる3種類の車椅子を用いて凍結路走行実験と雪路走行実験を行った。凍結路

走行実験は、氷板を敷き詰めた凍結路スロープを屋内に作製し、発進性と登坂走行距離から各電動車椅子の特性の違いを評価した。その結果わずかな凹凸や路面の滑りがキャスターの方向安定性に大きく影響を及ぼすことが確認された。雪路走行実験は屋外圧雪路面と屋内乾燥路面で直進走行を行った。駆動輪の走行状態を定量的に評価するため、スリップ度を定義することで各電動車椅子の比較評価が可能となった。

第3章では、積雪寒冷期における電動車椅子の走行性能を評価する手法として、計算機上で走行をシミュレートする手法を提案した。そのため、まず車椅子と搭乗者の三次元モデリングを示した。搭乗者モデルは人体各部位を10個の要素でモデリングすることにより、利用者個別の体型を考慮したシミュレーションが可能となった。これらから車椅子-搭乗者の三次元一体モデルを構成した。モデル各要素は空間において独立に運動するのではなく、空間からまたは各要素相互に拘束を受けて運動する。本シミュレーションでは、多体動力学系の解析ができるマルチボディダイナミクスを車椅子-搭乗者の三次元一体モデルに適用することを述べた。マルチボディダイナミクスでは、モデル各構成要素の並進と回転についての仮想仕事の原理から、ニュートン・オイラーの方程式にラグランジェ未定乗数によって拘束条件の制約式を結合させた微分代数方程式を構築する。そして独立な一般化座標を導出し、制約式を消去して汎用的な数値解析が可能であることを述べた。また走行解析では路面-車輪相互の作用力とスリップ度を定義し、車輪のモデリングについて述べた。

第4章では、前章で提案した走行シミュレーション手法を用いた解析結果を示した。走行解析は、発進から加速時を想定した走行シミュレーションと一定速度時を想定した走行シミュレーションについて示した。加速時の走行シミュレーションは静止状態の駆動輪に一定トルクを与えた。一定速度時の走行シミュレーションは、実車走行と同様に6 km/hモードで走行できる駆動トルク条件を設定した。走行路面は摩擦係数を変えることで夏期乾燥路面から冬期凍結・圧雪路面をモデル化し、スリップ度を用いて走行状態を評価した。そして走行実験結果と比較検討し、計算機による車椅子走行性能評価の妥当性を確認した。さらに搭乗者モデルの座位位置を前後に移動させることで車椅子-搭乗者一体モデルの重心位置を変化させ、重心位置が走行性能に及ぼす影響を走行シミュレーションにより検討した。

第5章では、冬期間に電動車椅子を使用する場合のもう一つの問題として低温環境が電動車椅子用鉛蓄電池に及ぼす影響について評価した。そのためまず、低温環境における鉛蓄電池特性実験の方法を検討した。鉛蓄電池の放電性能は電気化学反応によるため、放電容量をあらかじめ予測することは難しい。特性実験では外部環境温度と放電率に着目して、一定外部環境温度における放電容量の測定を行った。そして外部環境温度と放電容量の関係を明らかにした。併せて鉛蓄電池への簡便な防寒対策を検討した。また有限要素法を用いて蓄電池の内部温度解析を行い、内部温度から蓄電池の放電容量が推定可能なことを確認した。これより様々な保温材による防寒対策を評価予測することが可能となった。さらに、冬期間実際に走行した場合の蓄電池性能を把握するため実車走行試験を行った。冬期間の蓄電池放電特性は、外部環境温度だけでなく路面状態によっても大きく影響されることがわかった。

第6章は、本論文の結論で、得られた結果を総括した。

以上、本論文では積雪寒冷期に電動車椅子を使用する場合の問題点を検討し、冬期走行状態の定量的評価手法と、電動車椅子の計算機走行シミュレーション手法、

電動車椅子用鉛蓄電池の低温環境における放電特性実験評価手法を提案した．計算機走行シミュレーションによる解析結果は，電動車椅子の走行性能実験結果と定性的に一致することを確認した．積雪寒冷期の屋外走行可能な車椅子を仮想空間上で評価することが可能となった．

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	鶴 飼 隆 好
副 査	教 授	石 川 博 將
副 査	教 授	野 口 徹
副 査	教 授	山 田 元
副 査	助教授	但 野 茂

学 位 論 文 題 名

積雪寒冷期における電動車椅子の性能評価と

走行シミュレーション手法に関する研究

脊髄損傷者をはじめとする歩行障害者にとって、車椅子は有効な移動手段の一つである。近年、福祉医療技術の発達や福祉政策の充実などにより車椅子利用者のQOL（Quality of Life：生活の質）も次第に改善され、積極的に屋外活動する機会も増えてきた。しかしながら、北海道等の積雪寒冷地域では、歩行障害者が冬期間に外出することはかなりの困難を伴う。降雪と低温により、路面が圧雪・アイスバーン状態となり、通常の手すりによる屋外移動はほとんど不可能となる。また電動車椅子の動力源である蓄電池の放電能力低下も引き起こす。こうした状況から、歩行障害者が冬期間安心して外出できるための車椅子の要望は非常に高い。

本論文では、積雪寒冷期に屋外走行可能な電動車椅子開発のための基礎研究として、①凍結路・雪路走行時における電動車椅子走行性能評価、②電動車椅子の冬期走行性能の評価が可能な計算機走行シミュレーション手法の提案、③車椅子用蓄電池の低温特性実験、を行っている。その主要な成果は以下の点に要約される。

（１）電動車椅子を積雪路面や凍結路面で走行させた場合、最も重要なことは駆動輪がスリップせずに走行することである。そのため駆動輪の回転による理論走行速度と実走行速度の比率でスリップ度を定義し、駆動輪のスリップ状態の測定方法を提案している。そして、駆動方式の異なる３種類の車椅子を用いて冬期路面における走行実験を行っている。

（２）車椅子の走行性能は駆動方式の他に全体構造や搭乗者を含めた重心位置の影響も大きい。利用者個別の身体能力や体型を考慮した車椅子の設計が重要

であるが、設計開発段階で試作を繰り返し、実験することは多大な費用と時間を要する。このため車椅子の走行シミュレーション手法を提案している。これにより様々な路面条件による発進から加速時と一定速度走行時の走行性能を解析している。

(3) 低温環境下で電動車椅子用鉛蓄電池の電力量（放電容量）が低下してしまうことから、外部環境温度を一定にして放電容量測定実験を行い、低温環境における鉛蓄電池の特性を明らかにしている。さらに実車走行試験により実際の使用環境における鉛蓄電池の特性を評価している。

以上、本論文では積雪寒冷期に電動車椅子を使用する場合の問題点を検討し、冬期走行状態の定量的評価手法と、使用環境を想定した電動車椅子の計算機走行シミュレーション手法、電動車椅子用鉛蓄電池の低温環境における放電特性実験評価手法を提案した。計算機走行シミュレーションによる解析結果は、電動車椅子の走行性能実験結果と定性的に一致することを確認した。本手法により、積雪寒冷期の屋外走行可能な車椅子を計算機仮想空間上で実験・評価することが可能となった。

これを要するに、著者は、積雪寒冷期の屋外走行可能な車椅子開発のための基礎研究として、数値シミュレーションおよび電動車椅子の実験に関し多くの手法を提案し、それにより多くの有益な知見を得たものであり、設計工学および福祉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。