タイトル（Title）

車椅子乗員拘束システムにおける荷重経路設計の考察
― シートベルト付き車椅子を例として ―
Consideration of Load Path Design in Wheelchair Occupant Restraint Systems
― A Case Study of a Seatbelt-Integrated Wheelchair ―

著者（Authors）

吉井 勝司（Katsushi Yoshii）

Email: Katsushi.y.1995@gmail.com

所属（Affiliation）

フリーランス（Freelance）

概要

著者らは先行研究において、車椅子乗員の衝突安全性を成立させる要件として、

- 適切なアンカレッジ
- 適切な荷重経路
- 適切な挙動コントロール

の 3 要素を提案した。

これらのうち、アンカレッジおよび挙動コントロールは主として乗員傷害低減を目的とする要素である。一方、荷重経路は拘束システムそのものを成立させるための構造要件であり、発生した拘束荷重をどのように支持構造へ伝達するかを決定する。

本研究ではシートベルト付き車椅子を例として荷重経路に着目し、従来型福祉車両の拘束システムとの比較を行った。

その結果、従来構造では拘束荷重が車両だけでなく車椅子構造にも流入することで、拘束性能および構造成立性の両面に課題を有することが確認された。

さらに、アンカー兼固縛プレートを用いた構造においては、拘束荷重を車両へ直接伝達する荷重経路を構成できることを示した。

また CAE 解析により、AM50 条件では腰部支持部に約 12kN×2、肩部支持部に約 7kN の支持能力が必要となることを確認した。

本研究は、車椅子乗員安全における荷重経路の設計要件を具体化するとともに、将来の車両

側再設計を含む拘束システム設計に対する基盤的知見を提供するものである。

キーワード（Keywords）
車椅子乗員、拘束システム、荷重経路、シートベルト、衝突安全、固縛、車椅子固定

Abstract
The author previously proposed for ensuring crash safety of wheelchair occupants:

- appropriate anchorage,
- appropriate load path, and
- appropriate occupant kinematics control.

Among these factors, anchorage and kinematics control primarily contribute to injury reduction. In contrast, load path design determines how restraint loads generated during a crash are transferred to supporting structures and therefore represents a fundamental requirement for establishing the restraint system itself.
This study focuses on load path design using a seatbelt-integrated wheelchair as a case study and compares its structure with conventional wheelchair transportation systems. In conventional systems, restraint loads are transferred not only to the vehicle structure but also to wheelchair components due to interference between the seat belt and wheelchair frame. This may adversely affect both structural integrity and restraint performance.
To address this issue, an Anchor-Securement Plate was introduced to establish a direct load path from the restraint system to the vehicle structure. CAE analyses were conducted using Hybrid III AF05 and AM50 dummy models under ISO 10542-1 equivalent crash pulse conditions. The results indicated that approximately 12 kN × 2 at the lower anchorage locations and approximately 7 kN at the shoulder support location were required under the AM50 condition.
The results demonstrate that load path design should be considered as a primary engineering requirement for wheelchair occupant protection. Furthermore, the proposed design concept can be applied not only to seatbelt-integrated wheelchairs but also to future systems employing one-touch wheelchair securement and redesigned vehicle-mounted restraint systems.

Keywords：

Wheelchair Occupant, Restraint System, Load Path, Seat Belt, Crash Safety, Wheelchair Tie-down, Wheelchair Securement

---

1. はじめに

高齢化の進展に伴い、車椅子を利用したまま自動車へ乗車する機会は増加している。
現在の福祉車両では、車椅子を車両へ固定した上で車椅子乗員をシートベルトにより拘束することが一般的である。しかしながら、この拘束システムは自動車乗員を対象とした拘束システムとは大きく異なり、車椅子乗員の安全性については未だ体系的な設計手法が確立されていない。
著者は先行研究において、車椅子乗員安全を成立させるための要件として、

- アンカレッジ
- 荷重経路
- 挙動コントロール

の 3 要素を提案した。
アンカレッジは乗員に対する拘束位置の最適化を目的とし、挙動コントロールは乗員移動量と傷害値の関係を制御するための要素である。
一方、荷重経路は衝突時に発生した拘束荷重をどのような経路で支持構造へ伝達するかを規定する要素であり、拘束システムの成立に直接関わる。
しかし、車椅子乗員安全に関する既存研究の多くは傷害値評価や拘束性能評価に重点が置かれており、荷重経路そのものを設計対象として論じた例は少ない。
そこで本研究では、シートベルト付き車椅子を例として、車椅子乗員拘束システムにおける荷重経路のあり方について検討する。

---

2. 車椅子乗員拘束システムの構造的課題

現在、多くの福祉車両では、

- 車椅子を 4 点固縛等の方法で固定する
- 車両側に設けられた車椅子乗員用シートベルトを使用する

という構成が採用されている。
しかし、この構成には構造上の課題が存在する。
まずアンカレッジの観点から見ると、車椅子の位置が常に一定であるとは限らない。

車椅子の寸法や形状は多様であり、同じ車両であっても車椅子乗員の位置は変化する。
その結果、車椅子乗員に対して最適なアンカレッジポイントを設計することが困難となる。
次に挙動コントロールの観点である。
車椅子フレームとの干渉を避けながらシートベルトを装着する必要があるため、自動車で一般的な 3 点式シートベルトをそのまま適用することが難しい。
その結果、多くの福祉車両では、

- 胸部拘束用ベルト
- 腰部拘束用ベルト

を別系統で構成している。
この構造では胸部と腰部を統合した拘束系として挙動を設計することが難しく、乗員挙動を積極的にコントロールすることができない。
また、自動車用拘束系で一般的に用いられるフォースリミッターも適用しにくい。
フォースリミッターは、乗員移動量と胸部荷重の関係を考慮しながら設定されるものであり、拘束系全体の挙動が計画可能であることが前提となるためである。
さらに、本研究で着目する荷重経路についても課題が存在する。
従来構造では、シートベルトと車椅子との干渉が避けられない場合が多く、拘束荷重は必ずしも車両へ直接伝達されない。
その結果、車椅子構造へ荷重が流入し、拘束性能および構造成立性の双方に影響を及ぼす可能性がある。

---

3. 荷重経路の定義

本研究では荷重経路を、
「衝突時に拘束装置へ発生した荷重を適切な支持構造へ伝達するための経路」
と定義する。
ここで重要なのは、荷重経路は傷害値の問題ではなく、拘束システム成立の問題であるという点である。
アンカレッジや挙動コントロールは、乗員傷害を低減するための条件である。
しかし、どれほど適切なアンカレッジや優れた挙動コントロールを実現したとしても、発生した拘束荷重を支持できなければシステムとして成立しない。
したがって荷重経路は、
「発生した拘束荷重をどこへ流すのか」
を規定する設計要件として考える必要がある。

4. 従来構造における荷重経路

従来方式の荷重伝達経路を図１に示す。

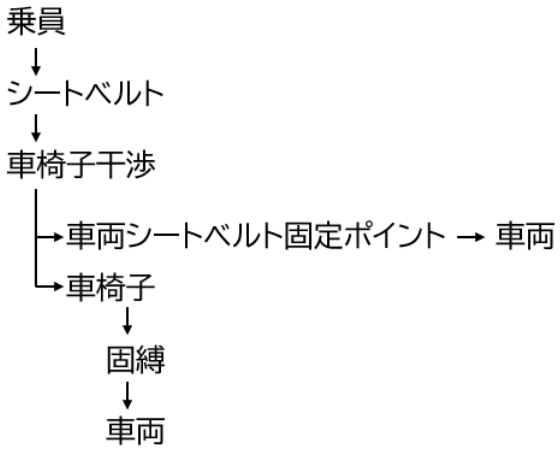

図１　従来方式の荷重伝達経路

本来、シートベルト荷重は車両へ伝達される。
しかし実際にはシートベルトが車椅子フレームや構造部と干渉するため、一部荷重が車椅子側へ流入する。
つまり拘束荷重は、

- 車両へ伝達される経路
- 車椅子へ流入する経路

に分流している。
車椅子へ流入した荷重は、車椅子構造を変形させたり、場合によっては破損させたりする可能性がある。
また、車椅子へ入力された荷重は最終的に固縛装置を介して車両へ伝達されるため、固縛装置にも大きな荷重が入力される。
さらに、シートベルトと車椅子の干渉そのものがベルトのスラッグや拘束遅れを発生させる原因となる。
したがって従来構造では、

- 構造成立性
- 拘束性能

の両面において荷重経路が課題となる。

シートベルト荷重が車椅子へ流入すると、単に車椅子強度の問題が発生するだけでなく、シートベルトと車椅子の干渉によるスラッグ発生や拘束遅れの要因となる。したがって荷重経路の問題は構造問題であると同時に乗員保護性能の問題でもある。

---

5. シートベルト付き車椅子における荷重経路設計

本研究で対象とするシートベルト付き車椅子とは、車両側ではなく車椅子側に 3 点式シートベルトを装備した構造である。

5.1 基本的な考え方

前章で示したように、従来構造ではシートベルト荷重の一部が車椅子へ流入する。
この問題を解決するためには、発生した拘束荷重を可能な限り直接的に車両へ伝達する必要がある。
そこで本研究では、
「車椅子を固定する機能」
と
「シートベルト荷重を車両へ伝達する機能」
を統合した構造として、アンカー兼固縛プレートを導入した。
当初の設計思想は極めてシンプルである。
シートベルト荷重は最終的には車両へ伝達する必要がある。
一方、車椅子を車両へ固定するためには固縛機構も必要である。
両者は、
「車両へ荷重を伝達する」
という共通の役割を持つ。
このため、
シートベルトアンカーと固縛構造を一体化することで、荷重経路を明確化できると考えた。

5.2 腰部荷重の伝達

シートベルト付き車椅子では、
腰部アンカレッジはアンカー兼固縛プレート上に設けられている。
そのため腰部拘束荷重を図 2 に示す。

乗員
↓
シートベルト(腰)
↓
アンカー兼固縛プレート
↓
車椅子固定ベルト
↓
車椅子固縛ポイント
↓
車両

図２　アンカー兼固縛プレートによる腰部拘束荷重経路

という経路で伝達される。
従来構造のように車椅子フレームへ荷重を入力しないため、拘束荷重をより直接的に車両へ伝達することが可能となる。
また、荷重を支持する構造が明確になることで、必要な支持能力の設計も可能となる。
これにより、拘束荷重を支持する構造と、車椅子を支持する構造とを分離して設計できるようになる。

5.3 肩部荷重の伝達

肩部アンカレッジについても同様の考え方を採用した。
肩ベルトは、車椅子背面に設けた肩ガイドを経由して、車両後方上部に配置した固定ポイントへ接続される。
荷重経路を図３に示す。

乗員
↓
シートベルト(胸)
↓
肩ガイド
↓
肩固定ベルト
↓
車両肩ベルト固定ポイント
↓
車両

図３　肩ガイド荷重経路

この構造では、肩ガイド自体が拘束荷重を支持するのではなく、車両側支持構造へ荷重を伝達する役割を担う。
その結果、
肩アンカレッジ位置の維持と荷重伝達を両立することが可能となった。

5.4 アンカー兼固縛プレートの位置付け

アンカー兼固縛プレートは、単なる車椅子固定部品ではない。
本研究においては、
「荷重経路を成立させるための中核部品」
として位置付けられる。
もしアンカー兼固縛プレートを使用せず、シートベルトを直接車椅子へ取り付けた場合の荷重経路を図４に示す。

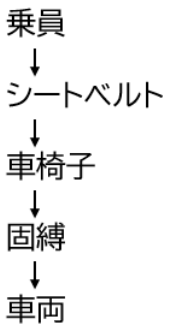

図４　アンカー兼固縛プレートを用いない場合の荷重経路

という経路となる。
この場合、車椅子そのものが拘束荷重を支持しなければならない。
その結果、

- 車椅子構造の高強度化
- 固縛部の高強度化
- 車椅子重量増加

などが必要になる。
一方、本研究の構造では拘束荷重を直接車両へ伝達することで、車椅子構造へ要求される荷重負担を低減している。

6. CAE による荷重評価

6.1 解析目的

荷重経路を成立させるためには、拘束荷重の大きさだけでなく、その荷重がどの部位へ入力されるかを把握する必要がある。

そこで本研究では、シートベルト付き車椅子構造に対して CAE 解析を実施し、拘束荷重の伝達経路および各支持部に発生する反力を評価した。

本解析の目的は傷害値評価ではなく、

- 荷重経路上に必要となる支持能力
- 固縛構造に必要な強度条件
- 車両側支持構造に必要な設計条件

を把握することである。

6.2 解析条件

解析条件を表 1 に示す。

衝突波形	ISO10542-1相当　48km/h
ダミーモデル	Hybrid III AF05
	Hybrid III AM50
車椅子	主要構成部材に対して 実機相当の材料特性を定義
シートベルト	3点式シートベルト
	一般的なリトラクター機構および ベルト特性を定義
フォースリミッター	3.5kN（リトラクター直上）
車椅子固定方法	車両フロアーに アンカー兼固縛プレートにて固縛
	肩部支持構造を車両後方上部に固定

表 1　CAE 解析条件

本解析では、アンカー兼固縛プレート、後方固縛部および肩固定部に発生する反力を取得した。　また、本解析では、Hybrid III AF05（5th Percentile Adult Female：身長約 152 cm、体重約 49 kg）および Hybrid III AM50（50th Percentile Adult Male：身長約 175 cm、体重約 78 kg）を使用した。

6.3 解析モデル

解析モデルは、シートベルト付き車椅子および車椅子乗員拘束システムを対象とした。
車椅子は主要フレーム、座面支持部、背支持部等について実機相当の材料定義を行った。またシートベルトについてはウェビング、リトラクターおよびフォースリミッター特性を定義した。
また、腰部拘束荷重についてはアンカー兼固縛プレートを介して車両へ伝達される構造とし、肩部拘束荷重については肩ガイドから車両後方上部固定点へ伝達される構造とした。

6.4 AF05 条件における荷重評価

AF05 条件において発生した荷重を図 5 に示す。

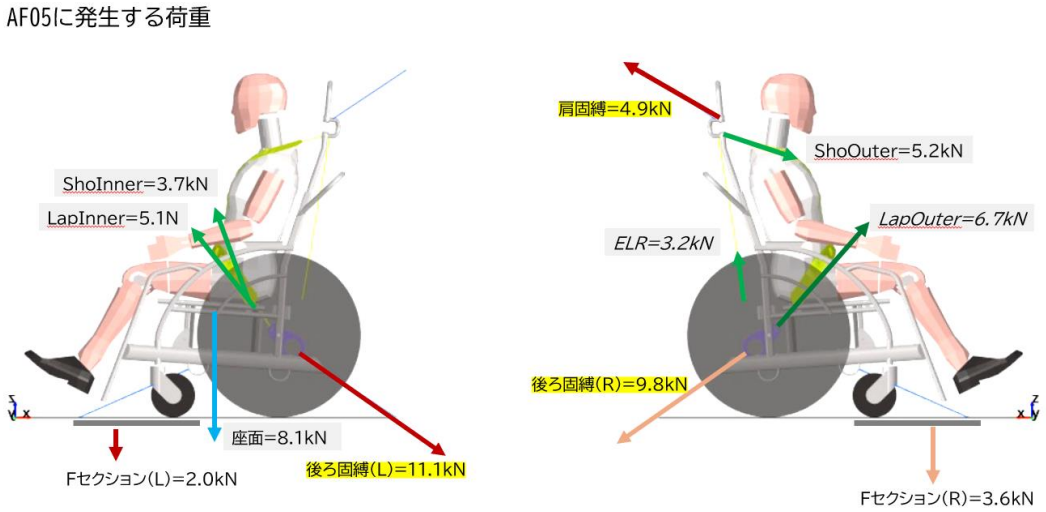

図 5 AF05 条件における拘束荷重分布

AF05 条件では、

- 後方固縛部：約 9.8～11.1kN
- 肩固定部：約 4.9kN

の荷重が発生した。
また、

- 座面：約 8.1kN
- F セクション：約 2～4kN

の荷重も確認された。
これらの結果より、小柄な乗員条件であっても 10kN 級の支持構造が必要となることが分かった。

なお、左右支持部に発生する反力は完全には一致していない。これは 3 点式シートベルトによる拘束荷重が左右非対称に作用するためである。

6.5 AM50 条件における荷重評価

AM50 条件において発生した荷重を図 6 に示す。

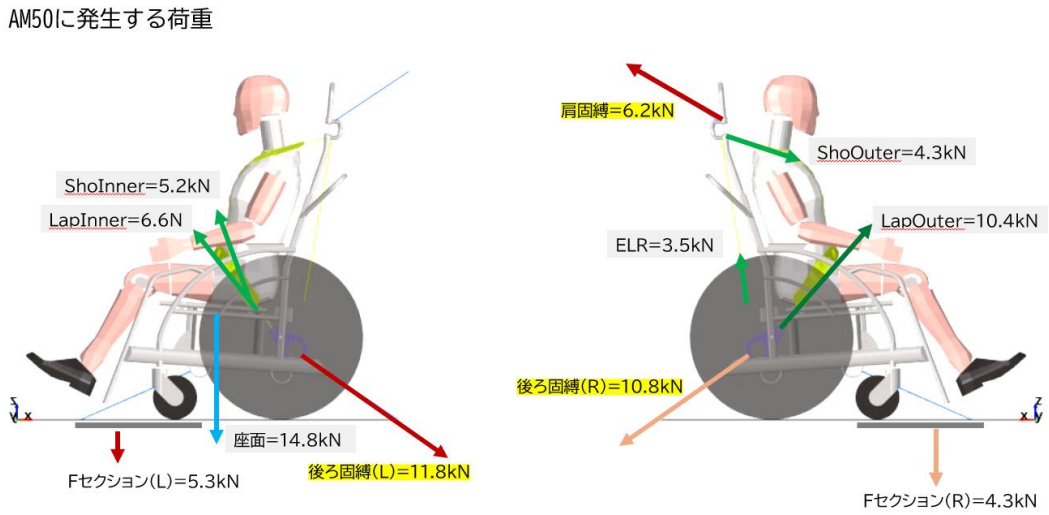

図 6 AM50 条件における拘束荷重分布

AM50 条件では、

- 後方固縛部：約 10.8～11.8kN
- 肩固定部：約 6.2kN

の荷重が発生した。

また、

- 座面：約 14.8kN
- F セクション：約 4～5kN

の荷重も確認された。

設計上は、

- 腰部支持部：約 12kN×2
- 肩部支持部：約 7kN

を支持できる構造が必要と考えられる。

これらの荷重は単純な固縛荷重ではなく、従来構造において分散して存在していた車椅子固定荷重とシートベルト拘束荷重を荷重経路成立のために集約した結果である。

なお、左右支持部に発生する反力は完全には一致していない。これは 3 点式シートベルトによる拘束荷重が左右非対称に作用するためである。

6.6 荷重評価の意味

本研究で得られた荷重値は、傷害値を評価するためのものではない。
荷重経路を成立させるために、

- 車両側固定部に必要な支持能力
- 固縛ベルトに必要な強度
- 肩固定構造に必要な支持能力

を示す設計条件である。
特に AM50 条件では、

- 腰部支持部：約 12kN×2
- 肩部支持部：約 7kN

の支持能力が要求されることが確認された。
これらの荷重は、従来構造において車椅子固定機構とシートベルト固定機構に分散していた荷重を、荷重経路成立のために集約した結果として発生する荷重である。
したがって、アンカー兼固縛プレートを採用する場合には、プレート自体だけでなく、プレートを車両へ接続する固縛ベルト、および車両側固定部についても同等の荷重を支持できる設計が必要となる。

---

7. ワンタッチ固定＋車両側シートベルト再設計との関係

本研究で整理した荷重経路の考え方は、シートベルト付き車椅子に限定されるものではない。
ワンタッチ固定機構を採用した場合、
車椅子位置が安定する。
その結果、
車椅子乗員位置も安定するため、
車椅子乗員に適したアンカレッジ設計が可能となる。
さらに、
従来方式のような、

- 胸用ベルト
- 腰用ベルト

を独立して用いる構成ではなく、
着脱式 3 点シートベルトを採用することで、

胸部と腰部を統合した拘束システムを構成できる。
これにより、
乗員挙動を計画可能となり、
自動車用拘束系と同様にフォースリミッターを適用できる。
また、シートベルト荷重は基本的に車体へ直接伝達されるため、
荷重経路の観点からも有利な構造となる。
一方で、
シートベルト荷重が車椅子へ流入しないよう、
車椅子側にはベルトホールやフレーム逃げなどの構造設計が必要となる。
つまり実現方法は異なるものの、
アンカレッジ、
荷重経路、
挙動コントロール
という 3 要素は共通して成立させなければならない。

---

8. 考察

本研究では荷重経路を中心に検討を行った。
ただし、本研究で議論したアンカレッジ、荷重経路、挙動コントロールはいずれも車椅子が適切に固定されていることを前提としている。
車椅子固定が成立しない場合、シートベルト荷重の入力位置や乗員位置が変化し、荷重経路および挙動コントロールも成立しなくなる。
したがって、車椅子乗員安全は、

前提条件
・車椅子固定

成立条件
・アンカレッジ
・荷重経路
・挙動コントロール

の階層構造として理解する必要がある。
そのうえで、本研究で示したアンカー兼固縛プレートは、

- 車椅子固定
- 荷重経路成立

を同時に実現する構成要素として機能する。
なお、本研究で議論した 3 要素は、適切な車椅子固定を前提として初めて成立する。

本研究では、荷重経路の成立性ならびに必要支持荷重の整理を主目的として検討を行った。
このため、従来構造と提案構造との定量比較は実施していない。
一方で、従来構造ではシートベルトと車椅子との干渉に起因する荷重分流、拘束遅れ、および車椅子構造への荷重流入が発生する可能性がある。
今後は、従来構造および提案構造を対象とした CAE 解析ならびに SLED 試験を実施し、荷重伝達特性および拘束性能の比較評価を行う予定である。

---

9. 結論

本研究では、車椅子乗員拘束システムにおける荷重経路設計について検討した。
従来方式では、シートベルト荷重が車両だけでなく車椅子構造にも流入するため、荷重経路が分流し、構造成立性および拘束性能の両面で課題を有していることを示した。
これに対し、シートベルト付き車椅子にアンカー兼固縛プレートを適用することで、拘束荷重をより直接的に車両へ伝達する荷重経路を構築できることを示した。
また CAE 検討により、AM50 条件では腰部支持部に約 12kN×2、肩部支持部に約 7kN の支持能力が必要であることを確認した。
アンカレッジおよび挙動コントロールは主として乗員保護を目的とする要素である。
一方、荷重経路は拘束システムそのものを成立させる要素であり、車椅子乗員安全における基本設計条件の一つである。
さらに、本研究で示した荷重経路の考え方はシートベルト付き車椅子に限定されるものではなく、ワンタッチ固定＋車両側シートベルト再設計など、将来の車椅子乗員拘束システムにも適用可能である。
車椅子乗員安全においては、傷害値評価に先立ち、
「発生した拘束荷重をどこへ伝達するのか」
を設計することが重要である。
荷重経路の設計とは、単に荷重に耐える構造を設計することではなく、衝突時に発生した拘束荷重を意図した構造へ伝達するよう整理する設計行為である。

謝辞
本研究の一部は複数機関との共同検討の過程で得られた知見に基づくが,
本稿の内容は著者個人の見解として整理したものである。

参考文献

[1] 一杉 正仁, 桑原 歩夢, 福祉車両に乗車する車椅子利用者の安全性―安全な拘束装置の提案―, 自動車技術, Vol. 79, No.6, pp.124–130, 2025

[2] 一杉 正仁, 桑原 歩夢, 車椅子乗員の安全確保に向けた拘束装置の提案, 自動車技術会 2025 年春季大会学術講演会予稿集, No. 79-25, 2025

[3] 一杉 正仁, 桑原 歩夢, 福祉車両に乗車する車椅子利用者の安全性について―ダミーを用いたスレッド試験による検証―, 自動車技術会 2024 年春季大会学術講演会予稿集, No. 81-24, 2024

[4] 桑原 歩夢, 一杉 正仁, 車椅子乗員の死亡事故についての検討―より効果的なシートベルト装置の提言―, 日本交通科学学会誌, Vol. 23, No. 1, pp.24–32, 2023

[5] 吉井 勝司, 車椅子乗員の衝突安全性を成立させる拘束系成立条件の導出と要素分解, Jxiv, 2026. https://jxiv.jst.go.jp/index.php/jxiv/preprint/view/4729