

令和 2 年 7 月 3 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06163

研究課題名(和文)超小型モビリティ・ミニカーの衝突安全技術の最適化

研究課題名(英文)Optimization of collision safety technology for ultra-compact mobility-minicar

研究代表者

榎 徹雄 (Maki, Tetsuo)

東京都市大学・工学部・教授

研究者番号：20465363

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：超小型ミニカーの前面衝突実験を実施し、市販車両の衝突安全性能を把握した。従来車体構造では乗員の生存空間を確保することが難しく、コンピュータ解析を用いた構造解析により車体の安全性能を大幅に向上させることができることを明確にした。具体的には車体前部の衝突エネルギー吸収量を増加し、さらにルーフへの荷重をコントロールすることで若干の重量増で、前面衝突時の安全性能を確保できることを明確にした。その結果、超小型ミニカーにも通常の市販車並みの衝突安全性能を確保できることの方向性を示すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球環境を考慮した超小型ミニカーの普及には、普通自動車との混合交通が避けられず、普通自動車との衝突事故を鑑みると超小型ミニカーの衝突安全性能を少なくとも普通自動車と同程度にまで確保することが重要である。本研究では超小型ミニカーの前面衝突時の安全性能をより向上するための車体構造として、第一段階として剛壁へのフルラップ衝突現象に着目し、コンピュータを用いた有限要素解析により改善の方向性を明確にした。この結果、若干の重量(数kg)増で乗員の生存空間を確保できるなど、50km/hの衝突速度での安全性確保の基本的な方向性を明確にすることができた。

研究成果の概要(英文)：A frontal collision test of an ultra-compact minicar was carried out, and the collision safety performance as with conventional vehicles was ascertained. It has been clarified that it is difficult to keep living space for an occupant in the conventional vehicle body structure of minicar, and the safety performance of the vehicle body can be significantly improved by using computer analysis for minicar body structure. Specifically, by increasing the amount of collision energy absorption area and controlling the load on the roof strength, to ensure the safety performance in the case of a frontal collision with the slightly increased weight condition. These technical importance were clarified.

研究分野：衝突安全

キーワード：衝突安全 超小型ミニカー 前面衝突 車体構造 乗員傷害

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

超小型モビリティのひとつであるミニカーの活躍が期待されている。ミニカーは小回りが利き運転しやすいことや駐停車スペースを広く取らないことから、高齢者の移動手段や小口配達用の車両として適していると評価されている⁽¹⁾。一方で衝突安全性に関しては法規や自動車アセスメントにおいて安全基準が定められておらず、研究の取り組みが少ない⁽²⁾。ミニカーは普通乗用車に比べ車両が小型であるため、クラッシュプルゾーンの確保が容易ではなく、前面衝突時に車体変形がキャビンまで進行し、乗員が内装部品に衝突することにより受傷する可能性がある。

これまで本研究ではミニカーを用いて衝突速度 55 km/h のフルラップ前面衝突実験を実施した⁽³⁾。このとき、キャビンまで至る車体変形のためにステアリングホイールが大きく後退し、乗員の頭部および胸部と衝突するという課題が確認され、頭部および胸部がステアリングホイールと衝突し、傷害リスクが高くなった。

2. 研究の目的

本研究では、ステアリングホイールの後退量を乗員と衝突しない範囲に抑えるために、車体構造の改善を施した。前部車体フレームおよび足回りの構造を再現した有限要素モデルと内装部品および乗員を再現したマルチボディモデルを構築した。車体下部のフレーム構造に対して、質量比で効率的な剛性向上を行い車体前部の変形を抑制し、乗員傷害の基準を満たす改善を図った。

3. 研究の方法

(1) フルラップ前面衝突実験方法

トヨタ車体制コムス(以下、実験車両)のフルラップ前面衝突実験(以下、実車衝突実験)を国内の自動車アセスメントに即して行った。実験車両の衝突速度は 55 km/h とした。乗員ダミーとして運転席には Hybrid-III AF05 (身長: 145 cm, 体重: 45 kg) を搭載し、乗車姿勢は通常の使用方法に準じ調節した。乗員ダミー搭載時の車両重量は 460 kg となった。なお実験車両のシートベルトには、プリテンショナーおよびフォースリミッターは装備されていない。乗員ダミーの頭蓋骨内の頭部重心位置にブラケットを介し、3 軸の加速度計を取り付けた。車両のフレーム後端部に 3 軸加速度計を設置した。取り付け方向は x 軸を車両の前後方向、y 軸を車両の左右方向、z 軸は車両鉛直方向である。剛体壁には多分割ロードセルを取り付け、各場所でのバリア荷重を計測した。多分割ロードセルのサイズは高さ 125 mm、幅 125 mm とし、縦 10 列、横 16 列の計 160 個を設置した。多分割ロードセル設置時の下端を地上高 80 mm とし、最大許容荷重は 300 kN および 500 kN とした。

(2) 実験結果

実験車両の後端部に取り付けられた加速度計の測定結果から、実験車両の車両減速度を評価するため、平均車両減速度を算出し、普通乗用車のものと比較した。

$$\bar{a} = \frac{V_0}{t_1} \quad (1)$$

V_0 [m/s] は衝突速度であり、15.3 m/s (55 km/h) である。 t_1 [msec] は車体潰れ量が最大となる時刻であり、70.2 msec であった。(1)式より算出した平均車両減速度の大きさ \bar{a} は 218 m/s² (22.2 G) となった。これは普通乗用車の平均車両減速度である 150~225 m/s² (15.3~22.9 G) と同程度である。

車体前部の変形はキャビンまで至り、車体の潰れ量が 427 mm となった時点においてステアリングホイールが 120 mm 後退し乗員の上体と衝突することが確認できた。その後ステアリングホイールは最大で 276 mm 後退した。以上より、ステアリングホイールの後退量を乗員と衝突しない範囲とするために、本研究では車体の潰れ量を 427 mm 未満に抑制することとした。ステアリングホイールの後退量はステアリングホイールとシートのターゲットマークの移動量の差とし、

高速度ビデオから求めた。

合算した多分割ロードセルのバリア荷重の遷移、ピークの荷重を示した 19 msec および 40 msec の荷重分布から、バリア荷重は 19 msec で最大となり、最大値は 385 kN となった。この時刻のバリア荷重の分布から前輪、車体下部および上部のフレームが剛体壁に衝突し、バリア荷重が最大となったと考えられる。車体前端部のフレームが座屈し、前輪が後退した 20 msec から 32 msec の間においてバリア荷重は低下した。その後、前輪と車体下部のフレームが剛体壁に衝突した 40 msec にて、2 次ピークが生じた。以上より、剛体壁から車両に加わった荷重が前輪を含む車体下部のフロントフレーム構造に集中していることが分かった。

頭部の 3 軸合成加速度から、ステアリングホイールと頭部が衝突を始めた 44 msec において 1 次ピークが生じ、頭部が最も倒れこむ 55 msec にて頭部減速度が最大となった。頭部傷害値である HIC_{36} は 1521 となり、傷害基準である 1000 を上回った。胸部についても 32 msec にステアリングホイールと衝突を始めているため、胸たわみが増大し傷害リスクが高くなると推定される。乗員の上体とステアリングホイールが衝突した要因は、車体変形がキャビンまで進行したことによるステアリングホイールの後退が挙げられる。

(3) 車体構造の改善のための解析車両モデル

車体構造の改善を行うために、実験車両を参考に前部車体フレームおよび足回りを再現した車両モデルを構築した。材料については実験車両に即して、クラッシュバー、メインフレーム、フロントフレーム、アッパーフレーム、サスペンションアームは SS400、ホイールは A5154 とした。またバッテリーは剛体とし、タイヤは Neon モデルを参考に作製した。衝突解析を行う際の計算コストを考慮し、衝突時の車体変形に大きく影響しない車両先端から 1070 mm のフロア前半部以降の構造については、集中質量を用いて簡易化した（車両重量 460 kg のうち 353 kg 相当の構造）。各部材間の接続については、実験車両に即してスポット溶接、連続溶接、ボルト締結とした。サスペンションアームとホイールは剛体要素で接続した。ショックアブソーバーの沈み込みに関しては車体の並進方向の変形に対して影響が小さいと判断し、ショックアブソーバーを剛体要素で再現し、ホイールおよびメインフレームと接続した。解析ソルバーは Livermore Software Technology 社製の LS-DYNA ver.971 を用いた。なお車両モデルの節点数は 31,886、要素数は 37,717 である。

(4) 乗員の拘束方法の改善と傷害評価のための車内モデル

乗員の拘束方法の改善と傷害値の評価を行うために、乗員と実験車両の内装部品を再現した車内モデルを構築した。乗員は Siemens 製 MADYMO version7.7 の Hybrid-III AF05 相当のマルチボディモデルとした。実車衝突実験にて測定したシートフレームの変形、シヨルダーベルトアンカーとインストルメントパネルの位置、ステアリングホイールの後退量、車両のピッチング角度を再現した。シートの荷重変位特性については、Siemens にて公開されているモデルを用いた。また本研究において乗員とシート間では、摩擦係数が乗員の衝突挙動に最も影響すると考え、乗員とシート間の摩擦係数を 0.4 とした。

(5) 車内モデルの妥当性確認

車内モデルの妥当性を確認するため、実車衝突実験の車両減速度を車内モデルに入力し、乗員挙動と頭部の 3 軸合成加速度を比較した。実験車両および車内モデルともに、32 msec にステアリングホイールと胸部が衝突し始めた。44 msec には、ステアリングホイールと頭部が衝突し始め、頭部減速度波形には 1 次ピークが生じた。55 msec には、頭部が最も倒れこみ、頭部減速度は最大となった。またこのタイミングにおいて、乗員は車両前方に最も移動した。以上より、乗員の車両前方への移動量が最大となるまでの間において、車内モデルは実車衝突実験を再現で

きていると判断した。

4. 研究成果

(1) 車体下部フレームの板厚変更

実車衝突実験のバリア荷重の分布より、剛体壁から車両に作用した荷重は車体下部のフロントフレーム構造に集中していることが分かった。そのため車体の剛性の向上によりキャビン変形を抑制することを目的に、車体下部の構造の変更を行った。車体下部の剛性向上案として車体下部フレームの板厚を増加させた。車体下部フレームはフロントフレーム()、ジョイント()、メインフレーム()から構成されている。そこで車体下部フレームを構成している、の、のうち、車体の潰れ量の低減に最も効果のあるフレームを選定するために、の、の、それぞれの質量増加が 1 kg となるように板厚を増加させ、車体の潰れ量の比較を行った。その結果、フロントフレーム()の板厚を厚くすることで車体の潰れ量が最も低減された。以上より、車体の剛性を向上させるためには、フロントフレーム()の剛性を上げることが最も有効であると確認できた。

(2) フロントフレームの剛性の改善

1.5 mm から 0.5 mm ずつ厚くし、車体の最大潰れ量が目標値の 427 mm 以下となる最低の板厚を確認した。フロントフレームの板厚が 3.5 mm のとき車体の最大潰れ量が 423 mm となり、目標値を下回った。一方で、車体下部フレームの剛性が上昇したため、フロントフレームおよびメインフレームが座屈する 11 msec から 27 msec の間においてオリジナルモデルに対し車両減速度が増大し、最大値は 14 G 高くなった。これより、乗員の最大減速度も増大しシートベルトの圧迫により胸部傷害が発生することが考えられる。よって、車両の最大減速度を抑制するために衝撃吸収部材の追加を検討した。

(3) 衝撃吸収部材の追加

車体の衝撃吸収量を増加させるため、フロントフレームの板厚を 3.5 mm に変更した条件において、衝撃吸収構造を車体の前端部に追加した。衝撃吸収構造はアルミハニカムコアとアルミハニカムコアをメインフレームに接続するステー（材料：SS400、板厚：2 mm）とした。衝撃吸収構造は、車両前端部の取り付け可能なスペース（L 326 × W 320 × H 86）に追加できる最大の寸法に設定した。アルミハニカムコアとステーはボルト締結、ステーとフロントフレームはスポット溶接で接続した。アルミハニカムコアの板厚は 0.6 mm、0.7 mm、0.8 mm の厚さを検討し、車両減速度の最大値で評価した。アルミハニカムコアの板厚が 0.8 mm のとき、衝撃吸収構造の剛性が高いため、衝撃吸収構造が十分に潰れず、フロントフレームおよびメインフレームの変形の仕方が変化したことで、36 msec における最大減速度が元形状より大きな値となった。アルミハニカムコアの板厚が 0.6 mm、0.7 mm のとき、衝撃吸収構造が潰れたことで、30 msec までのフロントフレームとメインフレームが座屈するタイミングにおける減速度が元形状より低くなった。また車体の剛性向上前の車体での最大減速度が 44G であるのに対し、アルミハニカムコアの板厚が 0.7 mm における最大減速度は 46 G となったことが確認できた。これより、車体の剛性が上昇したことにより増大した車両の最大減速度は、アルミハニカムコアの板厚を 0.7 mm とした衝撃吸収構造を追加することで、車体の剛性向上前と同程度に抑えることが可能となった。

以上より、フロントフレームの剛性を向上させることに加え、衝撃吸収構造を車両前端部に追加して衝突初期の衝撃吸収量の増加を行うことにより、車両の最大減速度を抑制しつつ、車体の潰れ量の抑制を満たせたことを確認した。一方で車体の剛性を上昇させたことにより乗員に加わるエネルギー、すなわち減速度の時間積分は増大するため乗員傷害の対策について検討する必要がある。

(4) 頭部および胸部の最大減速度の低減効果

前述の車体構造および乗員の拘束方法の改善案を車内モデルに適用し、頭部と胸部の最大減速度の低減効果を確認した。車内モデルでは、頭部および胸部傷害値を評価するため、解析時間を 80 msec までとした。これは実車衝突実験において、 HIC_{36} の最大となる時間が 40 msec から 76 msec であったためである。車内モデルに入力する車両減速度については、フロントフレームの板厚が 3.5 mm の条件(条件 1)および条件 1 に衝撃吸収構造(アルミハニカム)の板厚 0.7 mm)を追加した条件(条件 2)の解析結果を 50 msec まで与えた。50 msec から 80 msec までは、80 msec までの車両の運動エネルギーの総和が実車衝突実験に対して等しくなるように、実車衝突実験の車両減速度をスケーリングした。またステアリングホイールの最大後退量は 120 mm とした。条件 1 と条件 2 の車両減速度を入力した場合、頭部とステアリングホイールは衝突したため頭部減速度はオリジナルモデルに対し低減しなかった。しかし車体構造を改善したことで、胸部とステアリングホイールの衝突は回避され、胸部の最大減速度はオリジナルモデルに対して低減した。入力した車両減速度別で頭部および胸部の最大減速度を比較すると、条件 2 が条件 1 に比べて小さくなった。これは条件 2 の最大減速度が 8 G 小さいためと考えられる。条件 2 にプリテンショナーとフォースリミッター (4 kN) を追加した場合(条件 4)、乗員の拘束性能が向上したため頭部および胸部の最大減速度は、オリジナルモデルに対してそれぞれ 44 G、39 G 低減し最も抑制された。各減速度が最大となったのは、 H_4 (Head of Condition 4)に示すように頭部はステアリングホイールと衝突した 45 msec、 C_4 (Chest of Condition 4)に示すように胸部は乗員が最も車体前方へ移動した 33 msec であった。以上より、車体構造の補強および衝撃吸収部材の追加により乗員に加わる減速度を調整し、シートベルトの拘束方法を改善することにより拘束時の乗員に加わる荷重を抑制した。この 2 点を用いて、頭部と胸部の最大減速度が低減したことを確認した。なお、本研究の結果は、乗員の前方移動に影響するパラメーターがシートの荷重変位特性よりも、シート乗員間の摩擦係数が支配的であり、シート座面への潜り込みの影響は考慮する必要がないという仮定に基づき得られた。

(5) 頭部傷害値および胸部傷害値の評価

乗員に加わる最大減速度が最も低減した条件 4 の頭部傷害値および胸部傷害値を算出し、実車衝突実験の結果と比較した。 HIC_{36} は実車衝突実験の 1521 から 972 に低減し、傷害基準値である 1000 を下回った。また最大胸たわみは同条件において、実車衝突実験の 74 mm から 41 mm に低減し、傷害基準値である 42 mm を下回った。以上のとおり、車体構造と乗員の拘束方法の改善により、乗員に加わる最大減速度を抑制し、 HIC_{36} および最大胸たわみを傷害基準値未満に低減できることを示した。

参 考 文 献

- (1) 国土交通省：超小型モビリティの成果と今後、www.mlit.go.jp/common/001125685.pdf, (2017)
(accessed 2020/02/20)
- (2) 超小型モビリティの安全基準検討に資する事故分析、<https://www.mlit.go.jp/common/000217255.pdf>, (2012) (accessed 2020/02/20)
- (3) 鬼本大輝, 関口樹, 湯原隆博, 大賀涼, 榎徹雄, 櫻井俊彰：ミニカーのフルラップ前面衝突時における乗員傷害に関する研究(第 3 報), 自動車技術会学術講演会前刷集, No.135-18 (2018)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 鬼本大輝、大賀涼、杉町敏之、櫻井俊彰、槇徹雄	4. 巻 19
2. 論文標題 ミニカーのフルラップ前面衝突時における乗員傷害に関する研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本交通科学学会（掲載可） doi.org/10.24597/jcts.19 予定	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 関口 樹 鬼本 大輝 大賀 涼 槇 徹雄 櫻井 俊彰
2. 発表標題 ミニカーのフルラップ前面衝突時における乗員傷害に関する研究（第2報）
3. 学会等名 自動車技術会 学術講演会春季大会 講演予稿集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鬼本 大輝 関口 樹 湯原 隆博 大賀 涼 槇 徹雄 櫻井 俊彰
2. 発表標題 ミニカーのフルラップ前面衝突時における乗員傷害に関する研究（第3報）
3. 学会等名 自動車技術会 学術講演会秋季大会 講演予稿集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鬼本大輝、関口樹、大賀涼、 槇徹雄、櫻井俊彰
2. 発表標題 ミニカーのフルラップ前面衝突時における シートベルトアンカー取り付けの改善に関する研究
3. 学会等名 自動車技術会関東支部 2017年度学術研究講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 関口 樹 出崎 勇氣 小野 真語 榎 徹雄 櫻井 俊彰 大賀 涼
2. 発表標題 ミニカーのフルラップ前面衝突時における乗員傷害に関する研究(第1報)
3. 学会等名 自動車技術会関東支部学術研究講演会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	田久保 宣晃 (Takubo Nobuaki) (50356226)	科学警察研究所・交通科学部・部長 (82505)	
研究分担者	大賀 涼 (Oga Ryo) (50392262)	科学警察研究所・交通科学部・室長 (82505)	
研究分担者	櫻井 俊彰 (Sakurai Toshiaki) (80610047)	東京都市大学・工学部・准教授 (32678)	