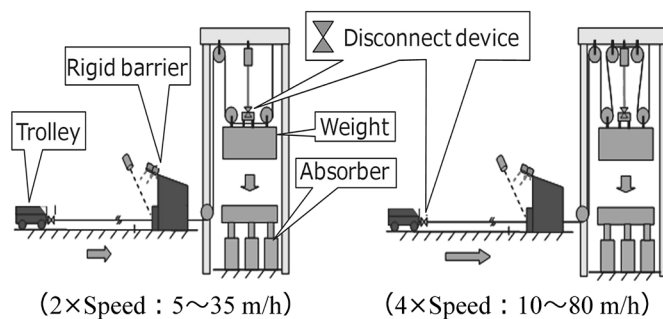


お詫びと訂正

2024年11月28日に発行いたしました本誌「Vol.73, No.2 特集：自動車用材料・技術」におきまして、記載に誤りがございましたので以下のように訂正いたします。

ご愛読いただいている皆さま、ならびに関係各位にご迷惑をお掛けしましたことをお詫び申し上げます。

21ページ右段 図1：



誤：(2×Speed : 5 ~ 35 m/h)

正：(2×Speed : 5 ~ 35 km/h)

誤：(4×Speed : 10 ~ 80 m/h)

正：(4×Speed : 10 ~ 80 km/h)

(技術資料)

落錘動力を利用したポール側面衝突試験設備の開発

船田健介*1・橋村 徹*1 (博士(工学))・渡辺憲一*1 (博士(工学))

Development of Pole Side Collision Test Facility Powered by Falling Weight

Kensuke FUNADA・Dr. Toru HASHIMURA・Dr. Kenichi WATANABE

要旨

カーボンニュートラル社会の実現のため、ハイブリッド車や電気自動車 (EV) の開発が活発となっている。長距離走行を実現するために床下面にバッテリーが満載されることの多いEVの場合、バッテリーが損傷しやすい側面衝突に対する設計評価として、ポール側面衝突試験の重要性が高まっている。当社では自動車産業に対するソリューション活動の一環として、大型落錘 (らくすい) 設備を動力源とした衝突試験設備を構築し、その結果としてポール側面衝突試験を実施可能にした。本稿ではEVによる試験実施例を題材に、設備概要、各種計測データを用いた考察などを紹介する。

Abstract

The development of hybrid cars and electric vehicles (EVs) is being more actively pursued to realize a carbon-neutral society. In particular, for EVs with a whole load of batteries installed under the floor to enable long-distance driving, pole side collision testing is becoming increasingly important as a design evaluation for side collisions, which are likely to damage the batteries. Kobe Steel has constructed a collision test facility powered by large falling weight equipment, which enables the implementation of pole side collision tests, as part of its solution-finding activities for the automotive industry. This paper presents an example of an EV test, an overview of the facility, and considerations based on various measuring data.

検索用キーワード

パッシブセーフティ, 衝突試験, 側面衝突, 車体構造, エネルギー吸収, 試験/評価, CAE

まえがき = カーボンニュートラル社会の実現のため、自動車分野では各国の燃費法規やアセスメント規制が年々強化されつつある。ハイブリッド車 (HV) やプラグインハイブリッド車 (PHV) など、内燃機関車 (以下、ICE車という) に比べて省燃費化された車が増え、さらに電気自動車 (以下、EVという) の開発も増加している。HV、PHVの燃費改善やEVの長距離走行のためには車体軽量化が求められるが、いっぽうで自動車の衝突安全基準の強化傾向は変わらず、車両骨格を強化するニーズは依然として強い¹⁾。とくにEVでは、航続距離を長くするため、床下面に大容量二次電池を設置する構造が多い。そのため車両側面より荷重入力される衝突形態に対し、電池を保護できる車体設計が求められる。ポール側面衝突試験はそのような車体設計の評価に対応しており、近年需要が高まっている。

これらの需要に対応すべく、当社では大型落錘 (らくすい) 設備を動力として、ワイヤロープに接続した試験車両や試験用台車を水平牽引し、コンクリート製の大型バリア壁に取付けたアタッチメントに衝突させる独自の汎用衝突試験設備を立ち上げてきた²⁾。さらに同設備を拡張し、ポール側面衝突試験も実施できるようにした。本稿では、Euro NCAP (EUROPEAN NEW CAR ASSESSMENT PROGRAMME) やNHTSA (NATIONAL

HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION) といった衝突アセスメントに準拠したポール側面衝突試験が実施可能な設備の概要と、構築した計測手法を紹介し、さらに得られた計測データ (衝突荷重や撮影動画など) から、車両の衝突形態を分析した結果を紹介する。

1. 開発した衝突試験設備の原理

1.1 落錘動力による台車水平牽引方式

当社の衝突試験設備は、図1に示す様に、台車走行路設備と大型の落錘設備で構成されている。落錘設備は動力源であり、台車走行路設備に設置された試験車両または台車には、落錘設備から伸ばしたワイヤロープが接続される。落錘設備は動滑車およびワイヤロープを介し

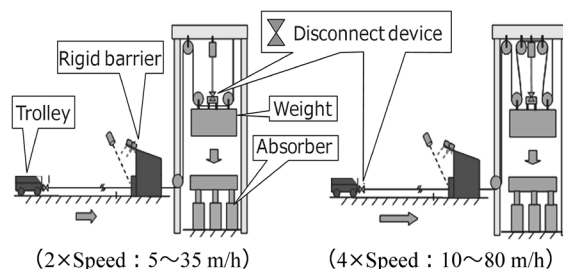


図1 当社衝突試験設備の機構模式図

Fig.1 Power source and mechanism of our collision test facility

*1 技術開発本部 ソリューション技術センター

て吊り上げられた重錘（じゅうすい）と、重錘下部のアブソーバで構成される。またタワー上部から吊り下げられたワイヤロープと重錘の間には切り離し装置があり、任意の高さで重錘を切り離すことができる。ここで重錘の落下速度に対する被牽引物の走行速度は、動滑車の原理に従って、滑車使用数を変更することで2倍速または4倍速の設定に変更できる。

重錘が落下することにより試験車両または台車が牽引されて走行し、走行路端に設置された大型バリア壁に取付けられたアタッチメントに衝突する。ポール側面衝突試験の場合は、衝突部がポール型のアタッチメントを大型バリア壁に取付ける。

1.2 速度制御手法

ポール側面衝突試験では図2に示すように4倍速設定で大型落錘設備を使用しており、式(1)(2)を解くことで、試験条件として設定した衝突速度 v_1 に対応した重錘落下高さ H を求めることができる。

$$m_2gH = \frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 + m_2gh + \mu m_1g \times 4(H-h) \quad \dots (1)$$

$$v_1 = 4v_2 \quad \dots (2)$$

式(1)は重錘の落下開始時と切り離し後のエネルギー保存式であり、被牽引物の重さを m_1 、落下させる重錘の重さを m_2 、重錘落下高さを H 、台車切離し時の落錘高さを h 、走行路面や滑車部を含めたシステム全体の等価摩擦係数を μ としている。等価摩擦係数 μ のみが未知のパラメータであったため、実験データを蓄積することで、試験設備の状態、台車質量等に応じて変化する μ を、設備特性として把握した。これにより試験車両の設定する速度に応じた台車牽引距離 $4(H-h)$ と、落錘の落下高さが決定可能となった。

2. ポール側突試験方法

2.1 衝突アセスメントに従った試験方法の概要

今回開発したポール側面衝突試験設備は、Euro NCAPやNHTSAといった衝突アセスメントに準拠した試験が実施できるように構築した^{3),4)}。アセスメントに記載されたポール側面衝突試験では、低床台車に搭載した試験車両を、32 km/hでポールに側面衝突させる。このとき、通常ダミー人形を搭載し、内部センサにより計測した荷重や加速度等で損傷を計測する^{5),6)}。本設備ではダミー人形による評価までは行わず、試験車両に付与される加速度や荷重、変形を計測し、構造体としての車体評価を目的とした。いっぽうで、同アセスメントによると、試験車両とポール先端の衝突位置については、ダミー人形頭部の重心を基準とする必要がある。そこで図3に示すように、CAD上でダミー人形を車体側面図（諸元表の図）に仮想的に座らせ、頭部重心から衝突位置を決定した。

2.2 ポール側面衝突試験の設備詳細

ポール衝突試験設備を図4に示す。ポール部分には十四個の荷重計を内蔵することで衝突荷重を計測できるようにした。また高速度カメラをポール上部、左右側面に設置し、車両衝突を様々な角度から撮影している。さ

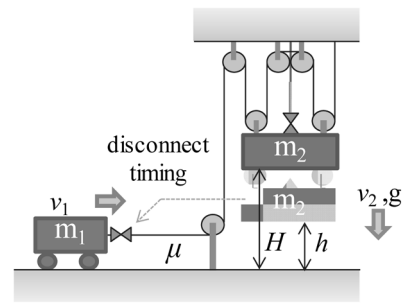


図2 速度制御手法の計算式条件
Fig.2 Conditions of formulas for test speed control

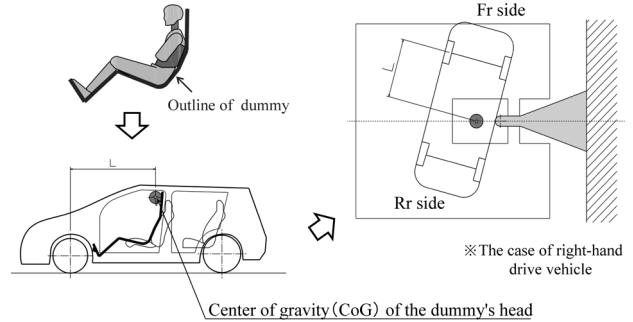


図3 プロトコルで定義された衝突条件およびCADによる衝突試験条件の検討
Fig.3 Protocol-defined collision conditions and CAD consideration of our test collision condition

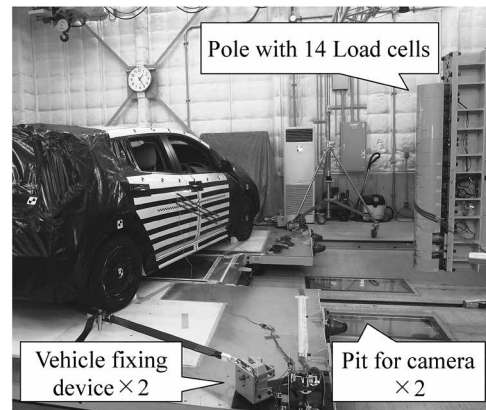


図4 ポール側面衝突試験の試験前状況
Fig.4 Pre-test condition of our EV pole side collision test

らに車両下面の衝突変形を撮影する地下ピットを走行路地面に設置した。

大型落錘設備を動力とする本設備のポール側面衝突試験では、台車の牽引開始～走行時に比較的大きめの慣性力が試験車両に発生する。そしてその慣性力により試験車両が台車上で移動するリスクがあるため、試験車両を台車に固定するための装置（以下、車両固定装置（Vehicle fixing device）という）を開発した。台車が牽引開始位置まで走行すると、大型落錘が着地するとともに、ワイヤロープが台車から切り離されるため慣性力が消失する。そこからさらに走行すると、センサが反応して車両固定装置が解除される仕組みとしている。その後、試験車両は一定速度、かつ固定無し状態でポールに衝突する。

3. ポール側突衝突試験の計測結果

3.1 速度と荷重の計測

今回、ポール側面衝突試験の試験車両として、CセグメントのEVである車両A、およびICE車である車両Bを選定し試験を行った。その際、先述の衝突速度の制御手法を用いて、落錘落下高さを設定した。このとき車両Aの衝突速度の予測範囲は 32.3 ± 0.5 km/hであったが、試験結果は32.31 km/hとなり、ほぼ予測中央値となった。この予測範囲は各衝突アセスメント（Euro NCAPやNHTSA）が規定する衝突速度の設定速度と、その許容誤差範囲（ 32.0 ± 0.5 km/h or 32.2 ± 0.8 km/h）を満足している。いっぽう、車両Bの衝突速度は30.55 km/hであり、規定から少し外れるが、ほぼ同等と考えて、本稿では比較対象として示すこととした。

本設備では十四個の荷重計を内蔵したポールを導入したことにより衝突荷重およびその分布を計測でき、車両変形量など、他の計測結果と組み合わせることで衝突現象をより深く理解することができる。車両A（EV）、およびB（ICE車）によるポール側面衝突試験にて、計測された衝突荷重の時刻歴波形を図5に示す。図中、右側はポール前面の上下方向に複数設置した荷重計と支持具の側面図を示し、LC1~LC14は各荷重計の記号を示す。

さらに各荷重計が計測時間中に検出した最大値を、高さ別にプロットしたグラフを図6に示す。

車両Aのポール衝突では、図5より、LC4→LC2→LC1の時系列順で最大値を計測している様子が確認できる。ここで図6に示すように、各荷重計と車両の対応高さを確認すると、一番先に荷重が立ち上がるLC4はBピラー下部の高さに位置し、LC2はサイドシルの高さに位置する。またLC1に対応する高さ位置の車体骨格部材は、衝突前の時点には無い。よって現象としては、まずドアパネルやドアインパクトビームを介して、Bピラー下部が荷重を強く受け持つようにポールと衝突した結果、LC4の荷重が増加した。つぎにサイドシルがポール

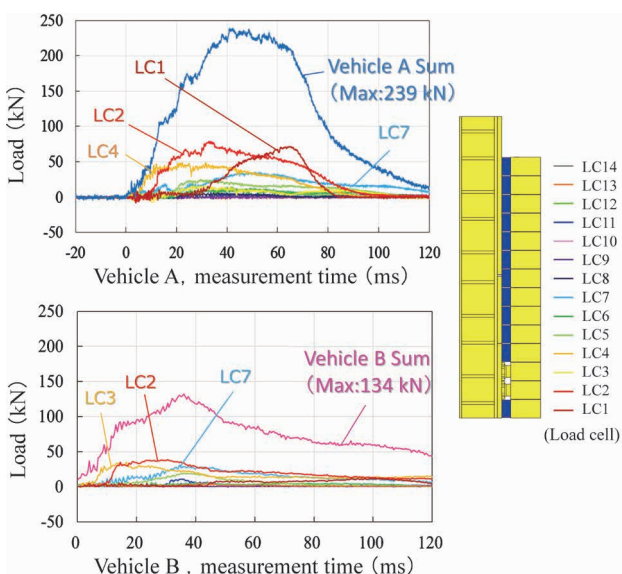


図5 計測荷重の時刻歴波形
Fig.5 Load measurement results

により押し込まれた結果、LC4に少し遅れてLC2の荷重が増加したものとする。そのほか、各荷重計の計測値と時刻歴、各部の変形状態について撮影動画も参照して次節4.1で詳述する。なお、各荷重計の荷重データを合算した波形（Sum）の最大値は239 kNであり、同車格の車両B（ICE車）の荷重最大値134 kNに対し、2倍近くなった。これはサイドシルおよびその周辺部材が、バッテリーケースを保護するために強化されていることを示していると考えられる。

3.2 車両変位の計測

ポール側面衝突試験では、車両の変位量（移動量）を計測することも衝突現象を理解する上で重要である。図7で示すように、車両Aの試験では動画上でターゲットマークなどを追跡することで変位抽出した（フロア底面の撮影は四個のカメラで行い、試験後に動画を合成している。）。Euro NCAPのアセスメント規定に従い、ターゲットマークを車体各部に300 mm間隔で貼付けている。変位抽出の結果、衝突序盤はルーフパネル上面とフロア底面の変位増加量がフロア底面を上回り始めた。これは図8に示す様に、車両重心位置付近を回転軸として、車両全

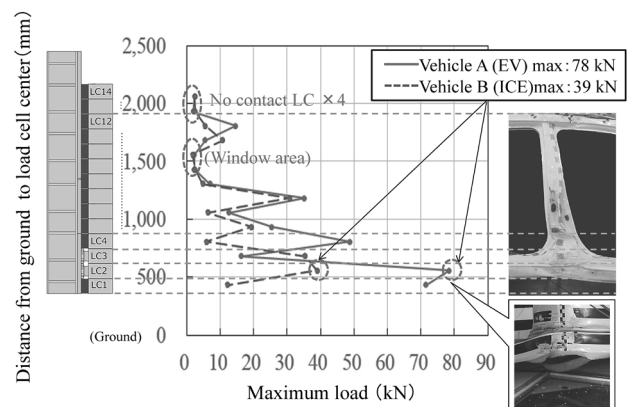


図6 ポール高さ方向の最大荷重分布
Fig.6 Maximum load distribution toward pole height

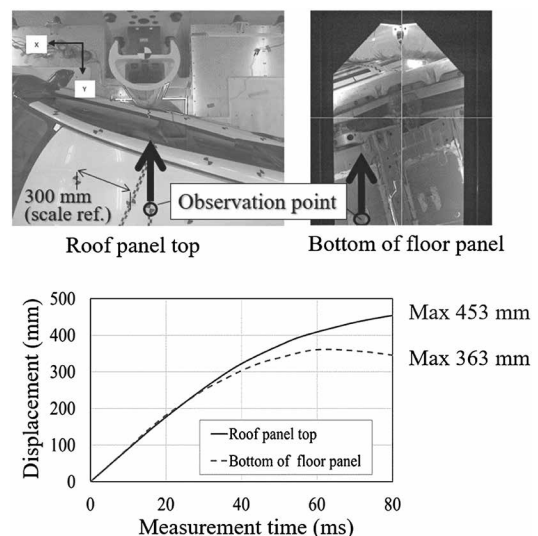


図7 動画から抽出した時刻歴変位
（ルーフパネル上面とフロアパネル下面）
Fig.7 Displacement curve obtained from the video data
（Roof panel top and bottom of floor panel）

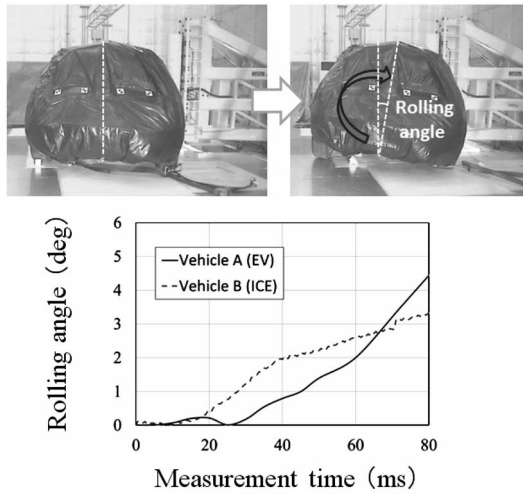


図8 ポール衝突時のローリング角度の時刻歴変化
Fig.8 Vehicle rolling angle results during pole side collision

体がローリングしながらポールと衝突しているためと考える。

4. 考察

4.1 EVのポール計測荷重—撮影動画の検証

本章では、衝突荷重が高くなる車両A (EV) について、ポール計測荷重と撮影動画の比較を行い、時系列にどのような変形が生じているか分析した。

図5で示した車両A (EV) のポール計測荷重波形では、とくにLC1, LC2, LC4に注目し、この三つの波形および合計波形 (Sum) の変化を、高速度カメラで撮影したフロア変形と比較した。その結果を図9 (ポール荷重の時刻歴波形) と図10 (衝突時の観察写真, (左) 車両前面視, (右) 床下面視) に示す。

まず図9, 図10の時間(a)は車両Aがポールに衝突し、荷重計測および動画撮影の開始する時間(0 ms)である。続く時間(b)はLC4が最大になる時間(23 ms)であり、ドアパネルがポールによって押し込まれている様子が確認できるため、ドアインパクトビームを介してBピラー下部が押し込まれ、座屈が生じていると考えられる。また床下動画(複数カメラの合成)により、この時点でサイドシルアウトの座屈も始まっていると考えられるが、サイドシルインナまでは変形が及んでいない様子も確認できる。続いて時間(c)はLC2が最大になる時間(33 ms)であり、床下動画の変化から、サイドシルとバッテリーケースの間にある部材が座屈した時間と考える。続いて時間(d)は荷重計測値の合計 (Sum) が最大になる時間(42 ms)である。Sumの内訳としてはLC2が最大となり、床下動画より、サイドシルインナまでポール先端が達している様子が確認されるため、バッテリーケース領域に達する前に、サイドシル周辺構造でポール衝突荷重を受け止める設計思想と推定される。また車両Aのローリング(図8参照)が始まっている時間でもあり、ルーフサイドレールがポールに衝突している様子も確認できる。最後に時間(e)はLC1が最大になる時間(65 ms)である。LC1はフロア底面よりも下に位置しているが(図6参照)、ローリングの進行に伴い、車体のポールサ

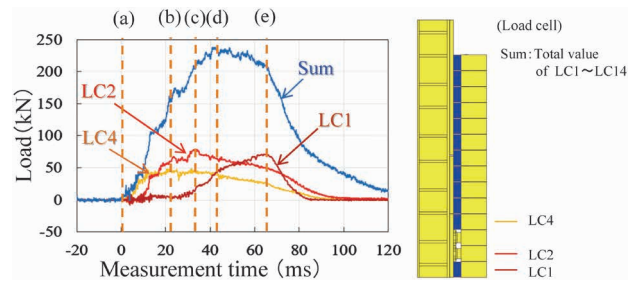


図9 車両A (EV) の荷重時刻歴波形と観察時間
Fig.9 Load curves and moment of vehicle A (EV) camera observation

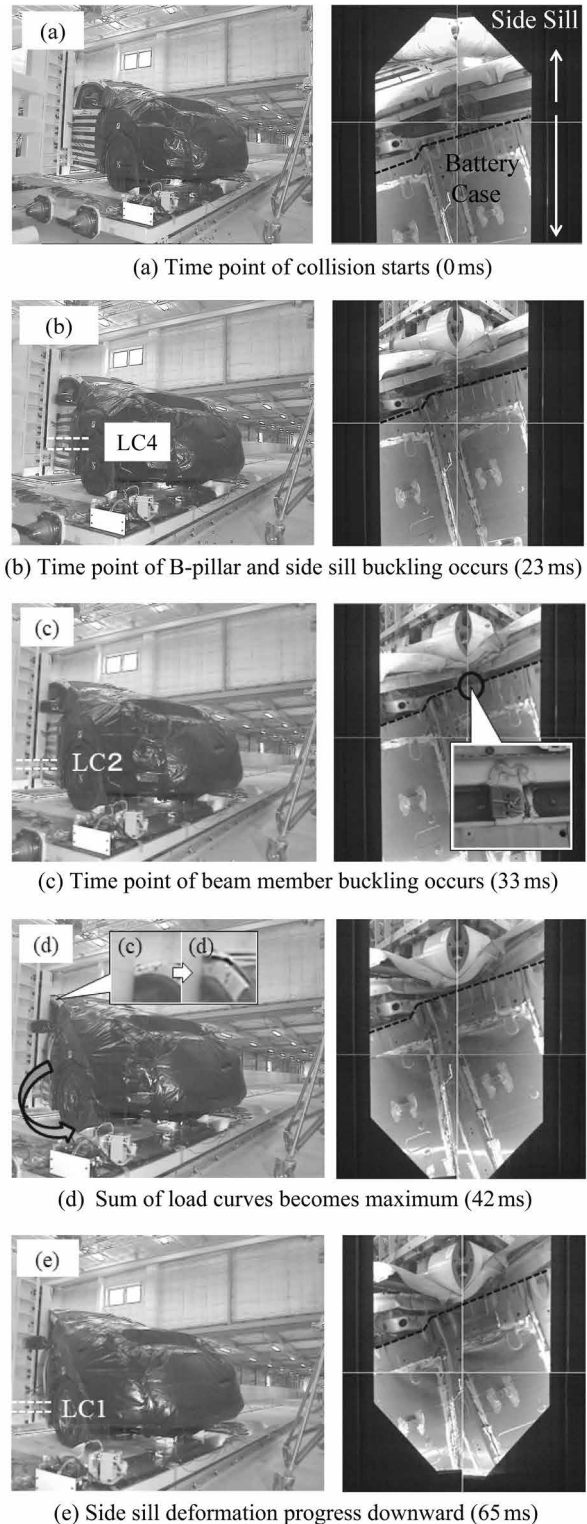


図10 車両Aの動画観察の結果
Fig.10 Results of camera observation (vehicle A)

イドが沈み込んだ結果、サイドシルとポールの衝突位置が下方へ移動し、荷重が発生したと考えられる。

また全ての時間を通して、バッテリーケースの領域には変形が及ばない様子が動画確認できた。試験後の車両観察でも、バッテリーケースに大きな損傷は無く、バッテリーケース周辺部材がケース保護のため強化されていることがわかる。

4.2 衝突エネルギーの検証

今回のポール側面衝突試験では、衝突荷重および車両変位量を計測しており、車両衝突によって生じるエネルギー量の算出を試みた。

図7は高速度カメラ撮影動画から、ルーフパネル上面と、フロア底面の移動を追跡して抽出した衝突方向の車両変位であり、両位置に対応する衝突荷重計はLC12およびLC2である。両荷重計で得られた荷重値に変位を乗じると、それぞれの高さ位置における車両の吸収エネルギー量の概値を得ることが出来る。同様にLC1~LC12 (LC13, LC14は車両衝突無しのため除外) までの各荷重計に対応した車両高さ位置の変形量が、ルーフパネル上面と、フロア底面まで直線的に分布するものと仮定し、各高さ位置の変形量の変化を図11に示す様に直線補間して求めた。図中の各点線が直線補間して求めた各荷重計位置の変形量の推定値を示す。得られた各位置

の変形量に、同じ高さ位置に設置した荷重計の荷重値(図5, 9)を乗じれば、LC12, LC2と同様に、各高さ位置のエネルギー吸収量の概値が図12に示すように算出される。またここでは、弾性回復エネルギー量や、車両の回転運動、跳ね返り運動や、摩擦などで消費されるエネルギー量は、車両各部の塑性変形によって消費されるエネルギー量に比べて小さいものと仮定している。

車両Aが吸収するエネルギー量の最大値は時間累積で51 kJとなった(図12)。これは衝突速度結果(32.31 km/h)から算出した運動エネルギー69 kJの74%である。上述した様に、残り26%はポールを回転軸とした車両Aのヨーイング運動や、タイヤ-台車間の摩擦損失などで消費されるエネルギーなどが内訳として推定される。

図12で得られた吸収エネルギー量を、ポール高さ方向に分布させて描画し、車両の骨格部材と対比させたグラフを図13に示す。図13では、車両Aと車両Bの比較も示している。その結果、EVである車両Aについては、サイドシルやフロアクロスに相当する高さの吸収エネルギー量が最も高い。また図10において、バッテリー領域まで衝突変形が及んでいなかったことから、サイドシルやフロアクロスが高強度・高剛性で設計されていることが推測される。対してICE車である車両Bは、吸収するエネルギーの総量も51 kJに対し、相対的に低く

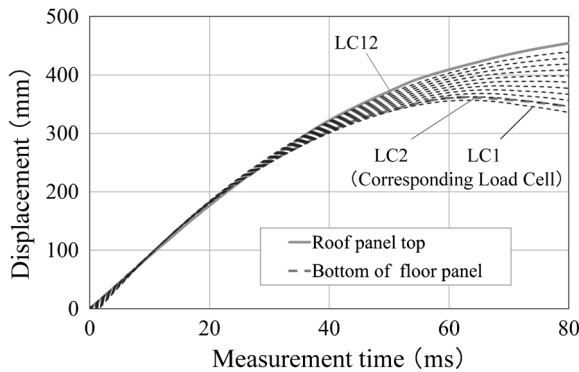


図11 直線補間した車体変形量(車両A)
Fig.11 Linear Complementary Displacement Curve (vehicle A)

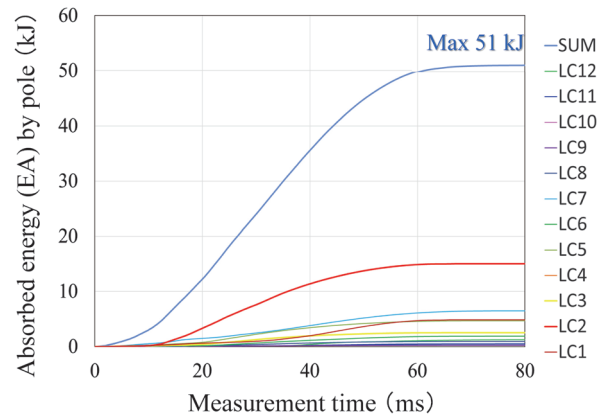


図12 ポールによるエネルギー吸収量(車両A)
Fig.12 Distribution of energy absorption by corresponding pole height (vehicle A)

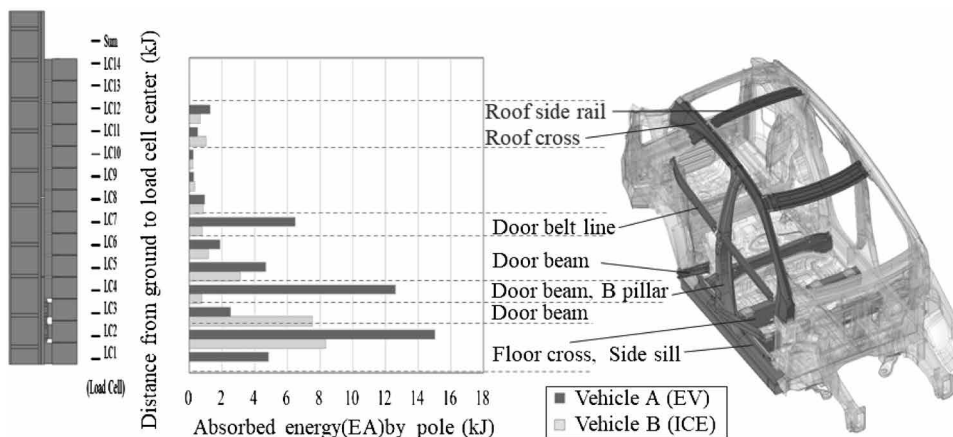


図13 エネルギー吸収量と衝突対応部品の比較
Fig.13 Comparison of energy absorption and corresponding parts to collision

24.7 kJ (運動エネルギーの51%) である。

このように衝突対応部品ごとの吸収エネルギー量を考察することで、車両に組み込んだ状態の部品性能評価や、次世代車両の部品設計に活用可能なデータとすることができる。

むすび = 落錘を動力として利用し、台車や自動車車両を水平牽引することができる衝突試験設備を立ち上げ、ポール側面衝突試験を実施可能にした。以下に結果概要をまとめる。

- (1) 衝突アセスメント規定を満足する精度で衝突速度、衝突挙動を制御した試験が、落錘を動力源とする当社独自の衝突試験設備で遂行可能であることを確認した。
- (2) 荷重波形データと動画観察を連携させて、衝突現象についてより詳細な検討を実施した結果、試験車両の各部が、どのような順番で変形し、反力荷重の上昇、減少に関与しているかを推定した。
- (3) 車両高さごとに計測した衝突荷重、および動画から抽出した車両変位量を用いて、ポール衝突による車両の吸収エネルギー量を試算した。

このように各部材の荷重・変形・吸収エネルギー量を詳細に分析することで、お客様の車両に組み込んだ状態の部材性能評価や次世代車両の設計などに活用されることが期待される。

参 考 文 献

- 1) 細川成之ほか. 交通安全環境研究所フォーラム. 2007. No.13.
- 2) 船田健介ほか. 自動車技術会論文集. 2022. Vol.53.No.3. p.535-540.
- 3) EUROPEAN NEW CAR ASSESSMENT PROGRAMME (Euro NCAP). OBLIQUE POLE SIDE IMPACT TESTING PROTOCOL. Ver 7.1.1. 2019.
- 4) U. S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION. LABORATORY TEST PROCEDURE FOR THE NEW CAR ASSESSMENT PROGRAM SIDE IMPACT RIGID POLE TEST. 2013.
- 5) 中嶋太一ほか. 自動車技術会論文集. 2020. Vol.51. No.3. p.537-542.
- 6) 高木俊介ほか. 自動車技術会論文集. 2013. Vol.44. No.3. p.851-856.

本稿は「船田健介ほか『自動車技術会大会学術講演会議予稿集(秋). 2021』」で発表した内容に、一部の図と考察を加えて編集したものである。