

# 列車衝突時における乗客傷害評価のための 内装材変形挙動解析

高野 純一\* 沖野 友洋\* 中井 一馬\*\*  
鈴木 大輔\*\* 榎並 祥太\*\*

## Deformation Behavior of Interior Components in the Event of Train Collision

Junichi TAKANO Tomohiro OKINO Kazuma NAKAI  
Daisuke SUZUKI Shota ENAMI

Passengers have a risk of getting injured in collision with interior components in the event of train crash. In order to lower the risk of passengers getting seriously injured, it is important to figure out the situation of collision between passengers and interior components. In this investigation we intended to figure out the behavior of interior components when passengers collide with them. We got mechanical properties of interior materials by performing tensile tests. Besides, we examined the behavior of boards made of each interior material by striking them with an impactor and carried out the reproduction analysis.

キーワード：列車衝突，有限要素法，人間工学

### 1. はじめに

鉄道車両の衝突時には、乗客は様々な形で傷害を負う可能性がある。その一つとして考えられるのが、客室内装との衝突による負傷である。乗客と内装との衝突状況は、衝突時の車両の速度、車両と衝突対象物との接触位置等、車両側の状況や、乗客の姿勢および内装の配置状況等、様々な要因の組み合わせにより複雑に変化する。また、内装は金属、樹脂等様々な材料から構成されている。これらの条件を考慮した上で、乗客の傷害を評価する必要がある。

自動車においては、エンジンフード部と歩行者の衝突に関する研究<sup>1)</sup>等においてインパクトを用いた試験実施例が数多くあるが、鉄道車両の内装を構成する各種材料（以下、内装材）についての実施例はない。沖野らは、車両を再現した解析モデル中に人体ダミーモデルを置き、衝突解析を行うことで踏切事故時の乗務員傷害評価を行った<sup>2)</sup>。この手法を乗客の傷害評価に用いる際、乗客と直接接し、傷害の状況に大きな影響を与える内装材の解析モデルを精度良く作成することが重要となる。

本研究では、内装材の変形挙動把握を目的とする試験および数値解析を実施した。乗客との衝突を考える場合には、内装材の変形におけるひずみ速度が大きくなるこ

とが予想されることから、内装材の変形挙動把握のためには、様々な材料の広いひずみ速度域での材料データの取得が必要である。これに関しては谷村<sup>3)</sup>、三村<sup>4)</sup>らによる、様々な材料に関する広いひずみ速度域での強度特性取得の例があり、本研究においても同様の手法で内装材の応力-ひずみ特性の取得を行った。

さらに、各材料の板材に対し、人体の頭部を模したインパクトを衝突させ、乗客と内装材の衝突を想定した試験を実施し、板材の変形挙動の把握を試みた。

同時にFEMによる再現解析を行い、試験結果との比較を行うことで、取得した材料データとFEM解析の妥当性を確認した。

### 2. 小型試験片による引張試験

内装材の公称応力-公称ひずみ曲線の取得を目的とし、板材から小型試験片を製作し引張試験を実施した。

今回、試験を実施した内装材はSS400材、アルミニウム・メラミン樹脂複合材および塩化ビニル樹脂材の3種類である。

SS400材（以下、軟鋼材）は、主に内装の骨組み等構造材として使用される。アルミニウム合金・メラミン樹脂複合材（以下、複合材）は、アルミ材と樹脂材を貼り合わせた二層構造の板材であり、客室内壁の化粧板として使用される。塩化ビニル樹脂材（以下、樹脂材）は、腰掛けの仕切り板等に使用される。

\* 車両構造技術研究部 車両強度研究室

\*\* 人間科学研究部 人間工学研究室

特集：車両技術

また、衝突時の大きなひずみ速度を考慮して、準静的引張試験に加え、高速引張試験を実施し、軟鋼材については7段階、その他の材料については各5段階のひずみ速度における材料データの取得を試みた。各材料の最もひずみ速度の低い試験条件については静的材料試験機を、それ以外の試験条件については、検力ブロック式材料試験機を使用した。ひずみ速度は、本試験機において安定して応力-ひずみ曲線を取得できる範囲で設定<sup>3) 4)</sup>した。

試験条件を表1に、試験片形状を図1に示す。同材料・同ひずみ速度の試験条件で3～5回試験を行い、その中で平均的と思われる公称応力-公称ひずみ曲線を材料データとして選択した。

図2～図4に各材料の引張試験結果を示す。各材料とも概ね、ひずみ速度の増大に従い応力の上昇がみられたが、複合材については他の材料と比較して、その傾向は小さかった。軟鋼材のひずみ速度  $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  の条件では、変形初期において、ひずみ速度  $0.8 \text{ s}^{-1}$  での応力値を上回っているが、この原因として、静荷重試験片材料のロットが、他の速度条件のものとは異なっていたことの影響が考えられる。複合材の結果において、各ひずみ速度とも、ひずみ 0.01 程度で応力が最大になった後、急激に低下している箇所が存在するが、これは材料が二層構造であり、樹脂の部分が破断した結果である。

表1 引張試験条件

材料	ひずみ速度 $\text{s}^{-1}$	使用試験機	試験片形状		
			平行部長さ L (mm)	平行部幅 W (mm)	厚さ t (mm)
軟鋼材	$2 \times 10^{-4}$	静的材料試験機	4.8	2.0	1.6
	$8 \times 10^{-3}$				
	0.08				
	0.8				
	8				
複合材	$3 \times 10^{-4}$	静的材料試験機	4.0	2.0	1.4
	$8 \times 10^{-3}$				
	0.8				
	80				
	800				
樹脂材	$3 \times 10^{-3}$	静的材料試験機	4.0	2.0	1.0
	$8 \times 10^{-3}$				
	0.8				
	80				
	400				

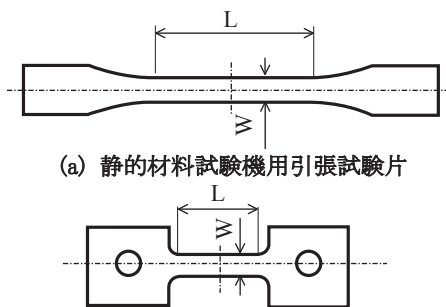


図1 引張試験片形状

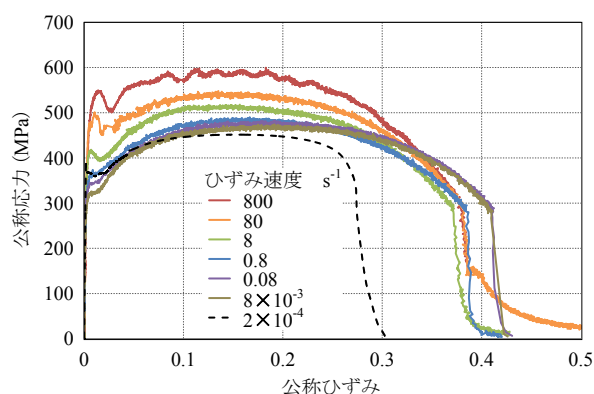


図2 引張試験結果（軟鋼材）

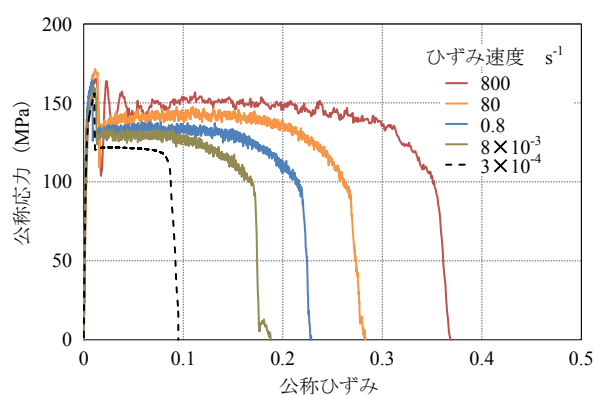


図3 引張試験結果（複合材）

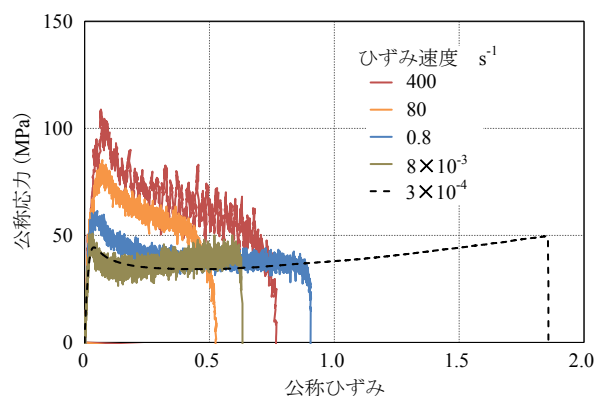


図4 引張試験結果（樹脂材）

これらの材料データは、くびれの発生、試験片形状等の影響を受けたものであるため、解析モデルの材料データとしては直接使用できない。このため、3章のFEM解析では、引張試験の再現解析を行い、試験結果との比較を行うことで、解析モデルにおける材料データ（真応力-真ひずみ曲線）を作成した。

複合材については、アルミニウム合金とメラミン樹脂が接着剤で貼り合わされているが、この接着剤のモデル化は困難と考えられる。また、1章で述べたように内装

材のモデルは、最終的に鉄道車両を再現した大規模なモデルに反映することを想定しており、計算時間の増加を避けるため、単純なモデルであることが望ましい。これらの理由から、ここでは、複合材を板厚方向に均質な材料として扱い、単一種類のシェル要素を用いてモデル化を行って、均質材料における真応力-真ひずみ特性に相当する材料データを作成して解析に用いた。

### 3. 内装板材へのインパクト打当て試験

人体が内装材に衝突した際の内装材の変形挙動を調査することを目的とし、軟鋼材、複合材および樹脂材の供試体（板材）に対して、人体の頭部を模したインパクトを衝突させ、板材の荷重-変位特性を取得した（以下、打当て試験）。FEMにより打当て試験の再現解析を実施し、2章で作成した材料データの妥当性の確認を行った。

#### 3.1 打当て試験概要

試験装置を図5に示す。打当て試験では、インパクトを空気圧により打出し、衝突対象物に衝突させた。インパクトに取付けられたロードセルおよび加速度計で荷重を、磁気式変位計により変位を測定し、衝突対象物の荷重-変位曲線を取得した。本試験では、衝突対象物と人体の頭部との衝突を想定しているため、インパクトは直径を人体の頭部相当の165mmとした半球形状とした。

試験条件を表2に示す。衝突対象物である板材の固定方法は図6に模式図で示すように、二つの治具ではさみ、ボルトで固定するものである。インパクト衝突速度については、小美濃らによる、マルチボディダイナミクスを用いた衝突事故（列車速度60km/hで40tのトラックに衝突）の再現解析<sup>5)</sup>を参考に決定した。小美濃らによると、ロングシートに着座している乗客の車両に対する相対速度は乗客の着座条件により異なるが、頭部において、最大9m/s程度になる場合がある。この結果から、インパクト衝突速度については、10m/sを最大として数段階設定した。軟鋼材についてはインパクト衝突速度の影響

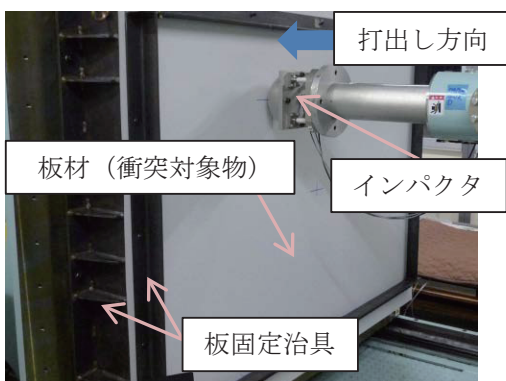


図5 打当て試験実施状況

表2 打当て試験条件

材料	衝突速度 (m/s)	インパクト質量 (kg)	板厚さ (mm)	打当て位置 図6参照
軟鋼材	3	19	1.6, 2.3	①
	5			
	7			②
	10			
複合材	5	19	1.4	①
	10	6.8		②
樹脂材	5	19	3.0	①
	10	6.8		②

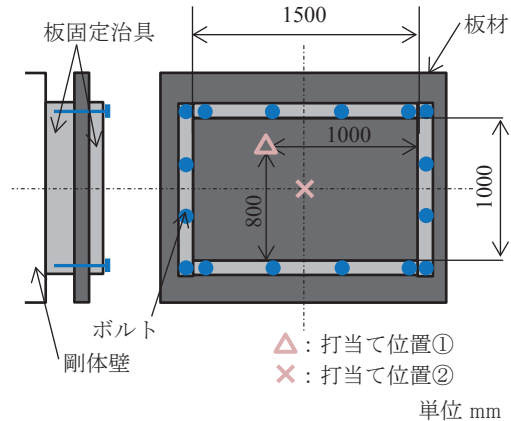


図6 板材の固定方法および打当て位置模式図

を調べるため、他の材料よりも速度条件を多く設定した。インパクトの打当て位置を図6に示す。打当て位置①は板に向かって右端から1000mm、下端から800mmの位置であり、列車衝突の際にロングシート着座乗客の頭部が袖仕切りに衝突する位置を想定したものである。また、試験と解析の結果を比較することを目的として、板中央の打当て位置②を設定した。複合材および樹脂材における、衝突速度10m/sの条件では板のたわみが大きいことが予想され、インパクトが剛体壁へ衝突することを防ぐため質量6.8kgの軽いインパクトを使用した。

#### 3.2 FEM 解析概要

打当て試験のFEM解析に使用する解析モデルを図7に示す。解析モデルは、図5の試験装置のうち、インパクト先頭部、板材および板固定治具を再現したものである。インパクトはソリッド要素、板材および板固定治具はシェル要素によりモデル化を行った。拘束条件は図7に示すとおりである。試験条件に合わせ、インパクト衝突速度、インパクト打当て位置、板の材料および厚さを変更した。なお、解析には汎用の陽解法有限要素解析プログラムPAM-CRASHを使用した。

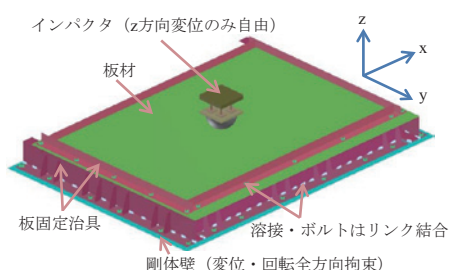


図7 打当て試験のFEM解析モデル

### 3.3 打当て試験結果およびFEM解析との結果比較

材料ごとの打当て試験と、FEM解析における荷重－変位曲線を図8～図11に示す。ここで荷重および変位はインパクトの打出し方向成分を示す。試験結果および数値解析結果には、自動車の衝撃試験に使用されるCFC1000のフィルタ<sup>6)</sup>を適用している。

インパクト衝突速度の影響をみるために、軟鋼材の試験結果(図8, 9)においてインパクト打当て位置が同条件である3m/s～7m/sの結果を比較すると、衝突速度の上昇に対し、荷重－変位曲線の立ち上がりの傾きが増大した。

板厚の影響については、図8と図9の同じ速度条件の

試験結果を比較すると、いずれの速度においても板厚が大きい方が、荷重－変位曲線の立ち上がりの傾きが大きくなった。これは板の曲げ剛性の影響によるものと考えられる。

各材料の衝突速度10m/sの解析結果および軟鋼材の衝突速度10m/sの試験結果においては、荷重が一度、低下した後再び増大している。

板厚1.6mmおよび2.3mmの軟鋼材(図8, 図9)については、衝突速度3m/s, 5m/s, 7m/sの条件に関して、試験結果と解析結果は概ね一致した。10m/sの条件に関しては、試験結果と比較し、解析結果の荷重が立ち上がりから徐々に低くなる傾向がみられた。

複合材(図10)については、衝突速度が5m/sの条件における試験結果と解析結果は概ね一致した。衝突速度10m/sに関しては変位の増大に従い、試験結果と比較し、解析結果の荷重が徐々に小さくなった。複合材では、他の2種類の材料と異なりインパクト衝突後、衝突速度5m/sおよび10m/sの条件ともに、板材に破断が生じた。衝突速度5m/sにおける破断の状況を図12に示す。板裏面のアルミ板にインパクト衝突位置を中心とした直径35mm程度の円弧上のネッキングがみられ、その上部から破断が生じたものと考えられる。数値解析上で材料の

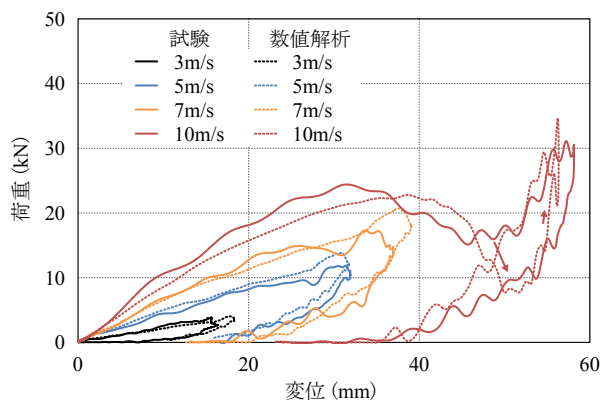


図8 打当て試験結果(軟鋼材 t=1.6mm)

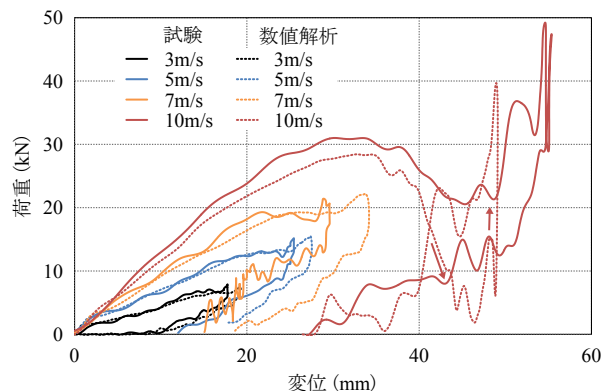


図9 打当て試験結果(軟鋼材 t=2.3mm)

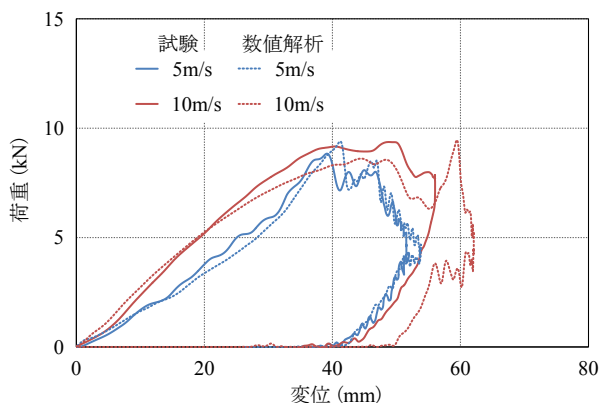


図10 打当て試験結果(複合材)

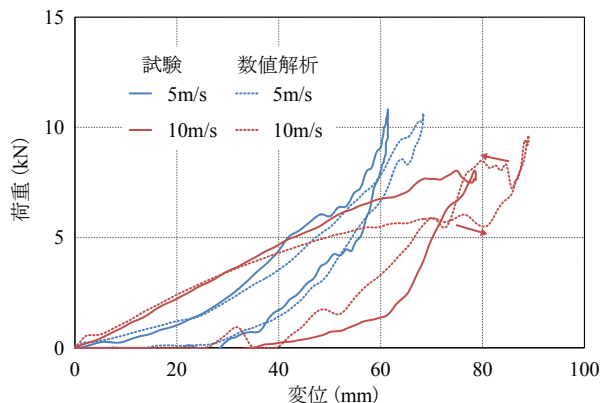


図11 打当て試験結果(樹脂材)

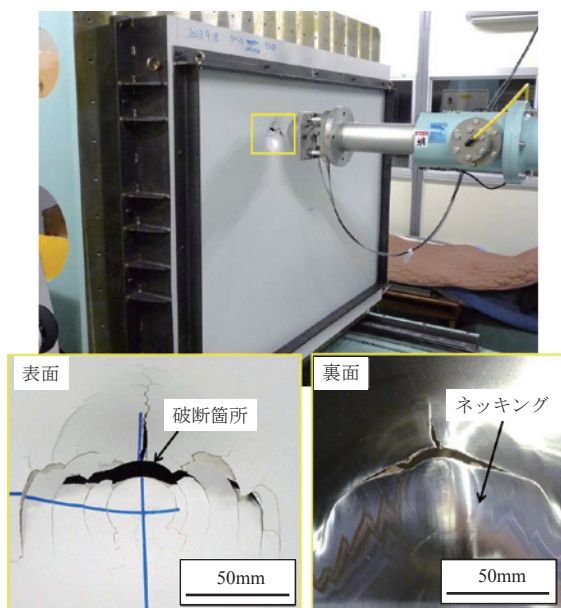


図 12 複合材の破断状況  
(インパクト衝突速度 5m/s)

破断は、小型試験片の準静的引張における破断を再現するように設定しており、打当て解析では、5m/s および 10m/s の条件とも破断が再現された。

樹脂材 (図 11) については、衝突速度が 5m/s の条件においては試験結果と解析結果は概ね対応した。速度が 10m/s の場合、変位が小さい領域では対応するが、変位の増大に従い、試験結果と比較し、徐々に解析結果の荷重が小さくなった。

### 3.4 打当て試験結果および FEM 解析結果考察

3.3 節の結果を受けて、いくつかの考察を行った。

軟鋼材のインパクト衝突速度 3m/s ~ 7m/s の試験結果を比較したところ衝突速度の上昇に対し、荷重-変位曲線の立ち上がりの傾きが増大した。これは乗客が内装材に衝突する際の接触剛性が増速により高くなることを示している。この理由として、衝突速度が大きいく程、変形が局所的に進み、同一深さにおける変形抵抗が増大することが考えられる。

各材料の衝突速度 10m/s の解析結果および軟鋼材の衝突速度 10m/s の試験結果においては、荷重が一度、低下した後再び上昇している。数値解析によると、インパクトが板中央に衝突することで発生する板のたわみ波は、板固定治具にて反射した後に板中央に戻るが、この時刻と荷重の再上昇がみられる時刻が対応しており、荷重の再上昇は、板固定治具により反射した、たわみ波が板中央に到達することにより生じると考えられる。

複合材については試験において破断が発生し、数値解析上でも破断を再現した。5m/s の条件では、破断は荷重のピーク (図 10 参照) で発生した。試験結果でも

同様のピークがみられることから、破断発生のタイミングは対応していると考えられる。10m/s の条件では、変位 59mm 付近における荷重のピークで破断が発生した。試験結果では、このピークがみられないことから、試験での破断はこれより以前に発生したものと考えられる。10m/s については破断のタイミングに差があるが、この理由の一つとして、解析における破断前の荷重が試験と比較して低くなっていることが挙げられる。

### 3.5 材料のひずみ速度依存性の影響の検討

2章で示したように、解析モデルにおける材料データを作成するにあたり、材料のひずみ速度依存性を考慮した。打当て解析における、材料のひずみ速度依存性の影響を調べるため、準静的試験結果のみを反映した解析モデルとの比較を行った。結果を図 13 に示す。実線がひずみ速度依存性を考慮した結果であり、破線は考慮していない結果である。インパクト衝突速度はいずれも 10m/s である。図に示すように、両者の荷重-変位特性にはほとんど差がみられなかった。図 14 に軟鋼材の打当て解析 ( $t=1.6\text{mm}$ ) におけるひずみ速度の分布を示す。

(a) はインパクト変位が 4.5mm の、インパクトと板が接触して間もない段階であり、インパクト衝突位置付近で最大のひずみ速度  $0.022\text{ s}^{-1}$  が生じている。(b) はインパクト変位が 55.5mm の、インパクト荷重が最大となる段階であり、ボルト固定位置付近で最大のひずみ速度  $0.015\text{ s}^{-1}$  が生じている。(a) および (b) とも、局所的にひずみ速度の大きな領域がみられるものの、板の大部分の領域でひずみ速度  $2 \times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$  に満たないことがわかる。ひずみ速度  $2 \times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$  は軟鋼材の準静的材料試験を実施した速度であり、数値解析において、このひずみ速度以下の領域では準静的材料特性が採用される。このように、打当て解析において板に生じるひずみ速度が小さいために、ひずみ速度依存性の考慮の有無で差が生

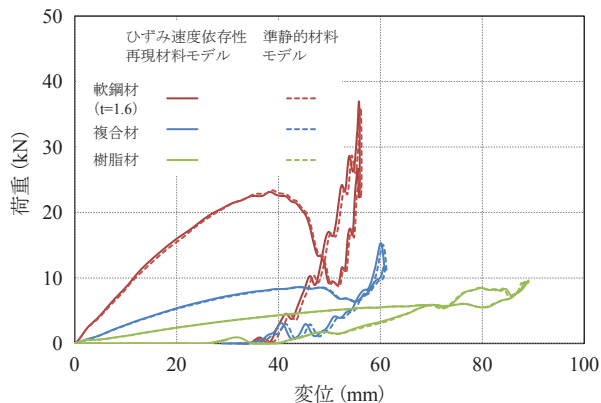


図 13 解析モデルの材料データにおけるひずみ速度依存性の影響  
(インパクト衝突速度 10m/s の打当て解析)

特集：車両技術

じなかったものと考えられる。今回の打当て解析において、ひずみ速度が大きくならなかった理由として、インパクトの進行方向と板材に生じる引張の方向が一致していないことが考えられる。一方、小型試験片の引張試験では明確なひずみ速度依存性が認められており、変形の状態によっては差が顕在化する可能性が考えられる。

また、3.4節で示したように軟鋼材において衝突速度の上昇に対し、荷重-変位曲線の傾きが増大したが、本節の結果から、本試験のひずみ速度域では材料自体のひずみ速度依存性の影響は小さいものと考えられる。ただし、衝突の状況によっては差が拡大する可能性があり、引き続きひずみ速度依存性を考慮する必要があると考えられる。

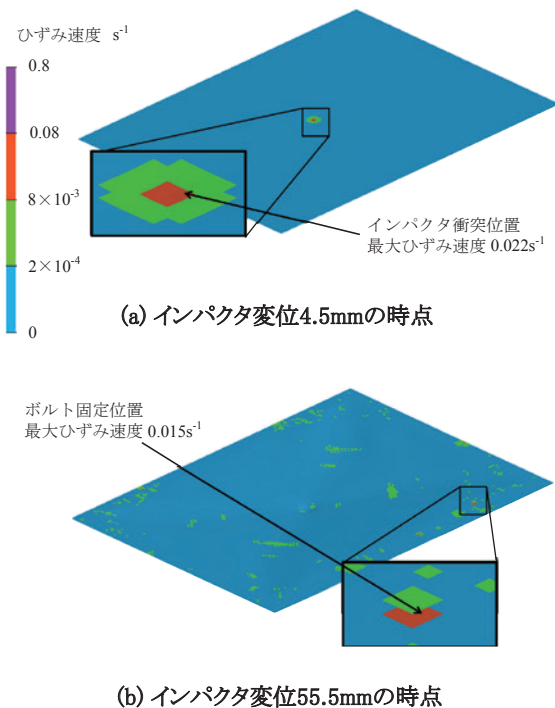


図14 軟鋼材の打当て試験 ( $t=1.6mm$ , インパクト衝突速度  $10m/s$ ) における板材のひずみ速度分布

#### 4. おわりに

本研究では、内装材の解析モデルを作成する上で重要な、内装材の変形挙動把握のための引張・打当て試験およびFEM解析を実施した。結果を以下に示す。

- (1) 各種内装材（軟鋼材，複合材，樹脂材）について、応力-ひずみ曲線取得のための引張試験を実施した。各材料ともひずみ速度の増大に従い、応力の上昇がみられた。
- (2) 軟鋼材の打当て試験結果から、板厚の増大に従い、

荷重-変位曲線の立ち上がりの傾きが増大する傾向がみられた。

- (3) 軟鋼材のインパクト衝突速度  $3m/s \sim 7m/s$  の打当て試験結果を比較すると、衝突速度の上昇に従い、荷重-変位曲線の立ち上がりの傾きが増大する傾向がみられた。
- (4) 打当て試験結果と解析結果の荷重-変位曲線を比較したところ、インパクト衝突速度  $3 \sim 7m/s$  については概ね対応しており、解析の妥当性が確認できた。しかし、衝突速度  $10m/s$  の条件では荷重-変位曲線が試験結果と解析結果で十分に対応しない結果となった。
- (5) 打当て解析においてひずみ速度依存性を考慮した材料データと、準静的試験による材料データを使用した結果を比較したところ、両者の荷重-変位特性にはほとんど差はなかった。しかし、衝突の状況によっては差が拡大する可能性があるため、材料のひずみ速度依存性を考慮することは必要であると考えられる。

今後、解析モデルの材料データの見直しを中心に、試験結果と解析結果のずれが生じる原因の検討を行う。また、客室仕切板など、実際の車両内装についても今回と同様の検証を進め、精度の良い内装解析モデルの作成および衝突事故時の乗客の傷害評価につなげる。

#### 文献

- 1) 加藤英晃, 古賀良佑, 粕谷平和: 歩行者頭部保護を目的とした自動車エンジンフード補強板構造の衝撃緩衝特性, 日本機械学会論文集A編, Vol.78, No.790, pp.817-828, 2012
- 2) 沖野友洋, 山本勝太, 高野純一, 宇治田寧: 列車乗務員の傷害度を指標とした踏切事故時の車両の衝突安全性評価, J-RAIL2012, pp.557-560, 2012
- 3) 谷村眞治, 林寛幸, 山本照美: 各種プラスチック材料の広ひずみ速度域での動的引張強度特性, 日本機械学会論文集A編, Vol.77, No.780, pp.1347-1356, 2011
- 4) 三村耕司, 平田晋, 中馬義孝, 谷村眞治: 検力ブロック式動的負荷試験装置の開発とその実験的検証, 材料, Vol.45, No.8, pp.939-944, 1996
- 5) 小美濃幸司, 中井一馬, 白戸宏明, 鈴木大輔: 通勤列車の踏切事故時の乗客挙動シミュレーション, 鉄道総研報告, Vol.26, No.1, pp.21-26, 2012
- 6) 日本工業規格 JIS D 1050, 自動車-衝撃試験における計測, 1998