

座屈およびせん断破壊を考慮した鉄道車両用  
アルミニウム合金部材の衝撃圧縮試験

永田 恵輔\* 沖野 友洋\* 高野 純一\*

## Dynamic Compression Tests of Aluminum-alloy Structure for Railway Vehicles Considering Buckling and Shear Fracture

Keisuke NAGATA Tomohiro OKINO Jun-ichi TAKANO

Two types of impact compression tests were conducted to investigate the crushing characteristics of a double-skinned aluminum-alloy carbody structure used in a conventional railway vehicle. One of the two tests is an overall compression test in which the overall specimen's end face is compressed. Another one is a local compression test in which part of its end face is compressed. As a result of the tests, buckling was the main cause of failure in the overall compression test, whereas shear crushing was the main cause of failure in the local compression test. Finite element analyses were conducted in which several material rupture laws were used to compare with the test results. According to the comparison of the analyses and the tests, the results of the analyses applying the ESI-Wilkins-Kamoulakos model agree with those of the tests.

キーワード：車両構体，アルミニウム合金，圧縮試験，有限要素解析，材料の破断則

## 1. はじめに

我が国では、鉄道と道路の立体交差化等による踏切の廃止、踏切障害物検知装置の導入等の継続的な取り組みにより、自動車との衝突が生じた踏切事故の件数は、1987年の約700件から2016年には約100件に低下した。しかしながら、踏切遮断後の自動車の誤進入等により踏切事故が発生する可能性は排除されず、鉄道車両の踏切事故に対する衝突安全性を検討することは重要と考えられる。鉄道車両と自動車の衝突シナリオ（衝突対象、衝突位置、衝突速度等）は数多く想定され、これらを実車試験で網羅的に調査することは困難であることから、解析による検討が有用であり、車体構造の衝撃挙動を精度よく再現できる解析モデルを構築することが重要となる。国内の在来線向け旅客車両で用いられるのは主にステンレス鋼製車体構造、次いでアルミニウム合金製車体構造である。これらは適用材料の材料特性、加工特性の違いから、車体構造が大きく異なるため、それぞれ特有の車体構造を解析モデルで構築する必要がある。

国内の在来線向け車体構造での衝撃挙動を解析的に検討した事例として、主にステンレス鋼製車体構造を対象とした研究が挙げられる<sup>1)2)</sup>。一方、アルミニウム合金製車体構造に関する圧壊挙動の検討は、主に輸出車両を対象に実施されているが、これらは前頭部に設置したエネルギー吸収部材、あるいは前頭部や車両連結面を衝撃吸収構造とし、変形させることを想定している<sup>3)4)5)</sup>。すなわち、積極的に圧壊させる部分の圧壊挙動を検討した事例がほとんどで、車体構造自体の圧壊挙動を詳細に調査した事例は、シングルスキン構体の中間車体に着目した事例にとどまってお<sup>6)</sup>、近年製造された車両で主に用いられるダブルスキン構造を対象とした事例は確認されず、さらには踏切事故を対象とした研究は実施されていないのが実情である。

また、踏切事故の検討において、実際の事故での衝突状況は多岐にわたり、大型自動車に衝突する場合

\* 車両技術研究部 車両強度研究室

のように車体構造の広い範囲で衝撃荷重を受ける状況だけでなく、自動車の積荷との衝突のように狭い範囲で衝撃荷重を負担する状況が考えられる。積荷に接触したことにより主要な構体部材の一部が削られてせん断破壊が生じた事例があり<sup>7)</sup>、踏切事故時の車体構造の変形状態を詳細に検討するためには、圧縮座屈変形に限らず、せん断破壊モードが生じる場合の衝撃破壊特性についても考慮する必要がある。

一方で、アルミニウム合金材料の衝撃圧縮変形に関する解析では、様々な破断則（破断判定モデル）が適用されている状況である。解析での破断則の適用例として、比較的単純なモデル化手法である相当塑性ひずみを閾値にした例<sup>4) 6)</sup>、あるいは塑性変形時に延性材料中のポイドが生成、成長することをモデル化した Gurson-Tvergaard-Needleman model<sup>8)</sup>（以下「GTN model」という。）を適用した例<sup>5) 9)</sup>が挙げられる。ところが、解析で適用すべき破断則について荷重-変位曲線等を示しながら詳細に議論された研究は少なく、また、今回の検討対象であるせん断破壊モードに対して有効な破断則等も示されていない状況である。

本研究では、踏切事故時の挙動を解析できるアルミニウム合金製鉄道車体構造モデルの構築を目指し、その前段階として、アルミニウム合金部材としての衝撃挙動を把握するため、ダブルスキン構造を有する実車両用の構体部材（A6005CS-T5、屋根用）を用いて、複数の圧縮条件で衝撃圧縮試験を実施し、構体部材の座屈変形挙動のみならず、せん断破壊挙動についても明らかにした。また、本試験の再現解析を実施し、試験結果と比較した。再現解析では、複数の破断則を比較検討し、各圧縮条件での衝撃変形破壊挙動への影響を明示するとともに、破断則の選定により、座屈変形およびせん断破壊を解析的に再現できることを示した。本報では文献 10 をもとに、一部に加筆および修正した内容を紹介する。

## 2. アルミニウム合金部材の衝撃圧縮試験

### 2.1 衝撃圧縮試験の概要

本衝撃圧縮試験では、アルミニウム合金部材を供試体とした（図 1）。本報ではその詳細を割愛するが、本供試体から試験片を作成して単軸引張試験を実施し、基礎的な材料特性を把握している。合金部材の寸法は幅：約 380mm、高さ：約 90mm、奥行：約 300mm であり、質量は約 2kg である。本衝撃圧縮試験では、アルミニウム合金部材が局所的に圧縮される際の損傷についても把握することが重要であると考え、部材の全断面を圧縮する場合（以下「全体圧縮条件」という。）および一部の断面を圧縮する場合（以下「局所圧縮条件」という。）の 2 条件で試験を実施した。全体圧縮条件では、部材を座屈させる際に必要なエネルギー量が、後述する試験装置の能力を超えることから、部材の一部を切断し、圧縮断面積を小さくした。一方、局所圧縮条件では、試験体を後述する衝突台車に取り付けられるようにするため、試験体の片端にアルミニウム合金板材（A5052、厚さ 5mm）を溶接した。なお、試験体を構成する部材は押出成形品であり、溶接箇所はない。本試験では、前川試験機製作所製の水平衝撃荷重装置を用いた。装置の概要は文献 11 のとおりである。衝突台車（取り外し可能な面板を含めると約 140kg）の射出機構部にはゴムばねおよびクランプ装置があり、クランプ装置を動かすことでゴムばねにひずみエネルギーが蓄積される。クランプ装置の拘束を解放することにより、蓄積されたひずみエネルギーが衝突台車の運動エネルギーに変換される。クランプ装置の移動量に応じて射出速度を調整することができ、衝突速度の最大値は約 10m/s である。試験体を装置内の衝突台車と衝撃用治具の間に配置し、衝突台車を突放することにより、試験体に対し衝撃荷重を負荷することができる。試験装置の端部には剛体壁があり、圧電式ロードセル 4 個（PCB 製、Model 205C）を介して、衝撃用治具が取り付けられている。剛体壁、ロードセルと衝撃用治具の位置関係を図 2 に示す。剛体壁の内側にレーザー変位計（Keyence 製、LK-GD500）を取り付け、レーザーを衝突台車の端面に照射し、衝突台車の変位を測定した。圧縮荷重が作用する間は衝突台車の端面と試験体とが接触

していることから、衝突台車の変位を試験体の変位とみなした。全体圧縮条件では、試験体の片端を衝撃用治具に接触させて静置し、他端に衝突台車を約 10m/s で衝撃させた。一方、局所圧縮条件では、試験体を衝突台車に取り付けた上で、初速約 10m/s で衝撃用治具（局所圧縮条件用治具）に衝撃させた。当初、両条件とも試験体を衝突台車に取り付ける予定であったが、全体圧縮条件での予備試験を実施したところ、試験体の片端に板材を溶接した際の入熱が試験結果に影響を及ぼす可能性が確認された。このため、全体圧縮条件では衝突台車への取り付けを断念した。試験前の試験体の設置状況を図 3 に示す。全体圧縮条件、局所圧縮条件とも、試験体が衝撃圧縮する直前に走行台車が有する運動エネルギーは約 7kJ であり、衝撃圧縮挙動の進展に伴い、衝突台車の速度は減少する。試番数は全体圧縮条件、局所圧縮条件とも 3 試番とした。本試験のデータレコーダー（NEC 三栄製、オムニエース RA2300）のサンプリング周波数は 100kHz とした。



図 1 試験体 (A6005CS-T5)

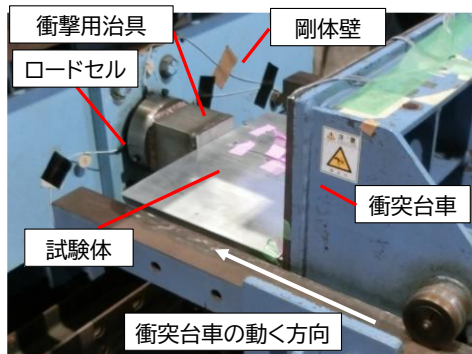


図 2 剛体壁、ロードセルと衝撃用治具の位置関係 (局所圧縮条件)

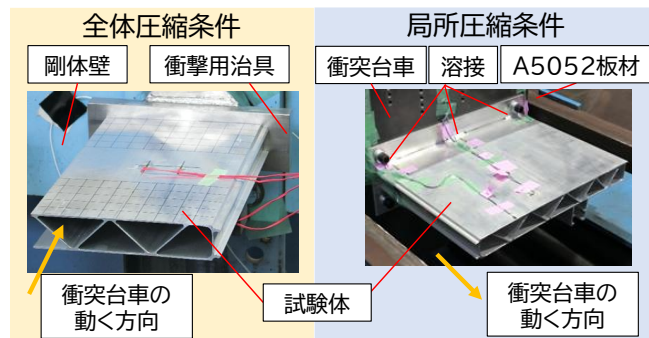


図 3 試験体の設置状況

## 2.2 衝撃圧縮試験結果および考察

はじめに、本論文での衝撃荷重（以下単に「荷重」という。）、時刻、変位および速度の定義について記す。4 個の圧電式ロードセルの出力の和を荷重とし、荷重の波形が立ち上がった瞬間の時刻を 0 とした。また、時刻 0 での衝突台車の位置を変位の原点とした。速度は変位（生波形）の微分により算出し、荷重、変位および速度について、1kHz のローパスフィルタ処理（位相遅れ補正）を行った。衝撃時の衝突台車の速度は、衝撃直前の 1ms 間の速度の平均値で表した。

### 2.2.1 全体圧縮条件

試番 2 の試験体について、形状の時刻歴を図 4 に、圧縮後の形状を図 5 にそれぞれ示す。いずれの試番も、試験体の片端で座屈変形が生じた。試番 1 および試番 3 では、剛体壁側の端部で座屈の進展に伴い大変形が生じ、試験体の一部が破断した一方、試番 2 ではこれらの大変形が衝突台車側の端部で生じた。大変形が生じる位置は、衝突台車および衝撃用治具と試験体との初期不整の影響により、試番ごとに変化

したと考えられる。試験体で破断が確認された箇所は、面板（外板／内板）のうち座屈変形が生じた箇所の一部（図5中黄色破線で示した箇所）、およびリブの付け根部分（図5中赤色破線で示した箇所）であった。

つぎに、本試験から得られた荷重・変形エネルギー―変位曲線を図6に示す。横軸の変位は2.1節で記したとおりレーザー変位計での測定値、変形エネルギーは荷重を変位で積分した値である。試番1では荷重および変位にノイズが混入したため、ノイズの影響を受けなかった区間のみを限定して示している。各試番での衝突台車速度、最大荷重、最大変形エネルギー、最大変位、および尺で測定した試験後の変形量を表1にまとめる。最大荷重は294kN（試番3）、最大変位は50.1mm、最大変形エネルギーは7.37kJ、最大スプリングバック量（最大変位から試験後の変形量を減じた値）は約2mm（いずれも試番2）であった。試番1～試番3とも、試験後の最終的な変形量は47～48mmとなり、荷重が0kNまで低下した際のレーザー変位計での変位の測定値とほぼ一致した。なお、試番3については、最大変位よりも試験体の変形量の方が大きい結果となったが、これは前述のとおり変位および試験後の変形量の測定方法が異なることによる。図6に示すように、試番2の荷重値に複数のピークがみられるが、これは、変形の進展により新たな座屈が生じたためと考えられる。

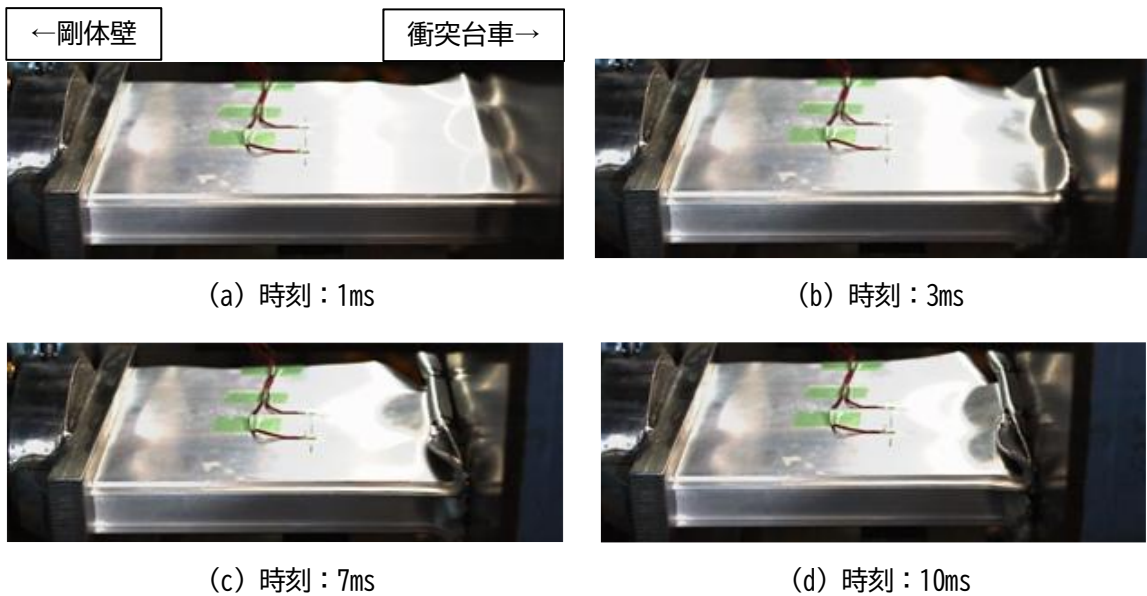


図4 形状の時刻歴（全体圧縮条件，試番2）

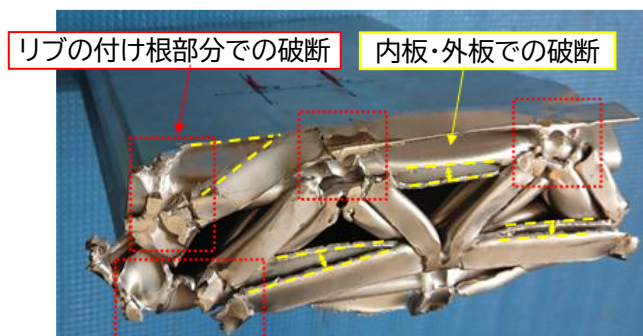


図5 圧縮後の形状（全体圧縮条件，試番2）

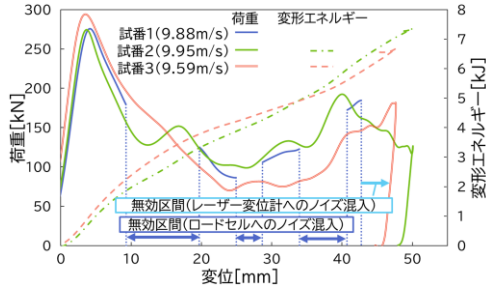


図6 荷重・変形エネルギー—変位曲線（全体圧縮条件）

表1 試験結果（全体圧縮条件）

	試番1	試番2	試番3
衝突台車速度[m/s]	9.88	9.95	9.59
最大荷重[kN]	276	275	294
最大変形エネルギー[kJ]	-*	7.37	6.69
最大変位[mm]	-*	50.1	47.7
試験後の変形量[mm]	47	48	48

\* ロードセルおよびレーザー変位計へのノイズ混入のため、示していない。

2.2.2 局所圧縮条件

試番1の試験体の形状の時刻歴を図7に、圧縮後の形状を図8にそれぞれ示す。試験体は、衝撃用治具と接触した箇所近傍の面板およびリブが蛇腹状に座屈し、衝撃用治具の側面と接触した箇所では、衝撃用治具の形状に従って、せん断破壊挙動が確認された。アルミニウム合金材料の破断ひずみが小さいことにより、衝撃用治具の貫入に応じて衝撃用治具側面との接触箇所がせん断破壊し、また座屈変形が衝撃用治具との接触箇所近傍に集中したものと考えられる。荷重・変形エネルギー—変位曲線を図9に、各試番での衝突台車速度、最大荷重、最大変形エネルギー、最大変位および試験後の変形量を表2にまとめる。最大荷重は158kN（試番3）、最大変位は78.0mm（試番1）であった。試験体で生じたスプリングバック量は約1mmであった。座屈に伴う最終的な形状は異なるものの、最大変位の差異は8.0mmであり、最大荷重は各試番で概ね一致した。全体圧縮条件と比較して最大荷重が小さいが、衝撃用治具との接触面積が小さく、変形が局所的に生じたことが原因と考えられる。荷重が最大値に達してからの荷重—変位曲線の挙動が試番により異なるが、これは各試番での座屈形状の相違によるものと考えられる。

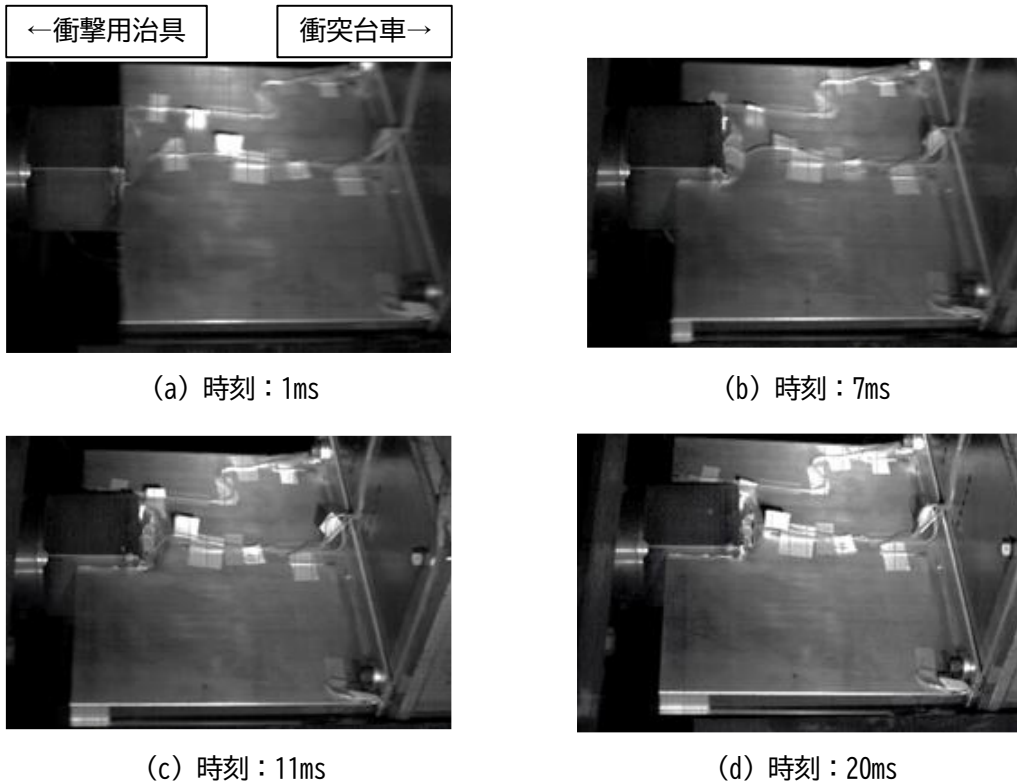


図7 形状の時刻歴（局所圧縮条件，試番1）

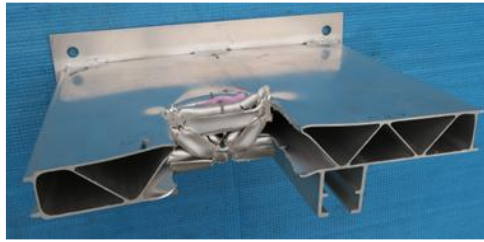


図8 圧縮後の形状（局所圧縮条件，試番1）

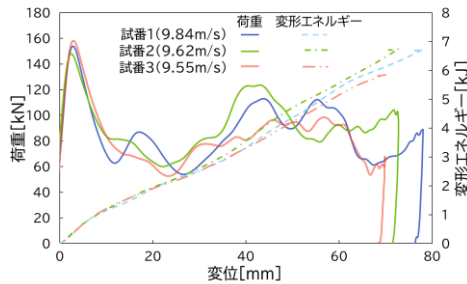


図9 荷重・変形エネルギー—変位曲線（局所圧縮条件）

表2 試験結果（局所圧縮条件）

	試番1	試番2	試番3
衝突台車速度[m/s]	9.84	9.62	9.55
最大荷重[kN]	154	148	158
最大変形エネルギー[kJ]	6.74	6.75	5.86
最大変位[mm]	78.0	72.8	70.0
試験後の変形量[mm]	77	72	70

### 3. 衝撃圧縮試験の再現解析

#### 3.1 再現解析の概要

衝撃圧縮試験について、再現解析を実施した。解析モデルの概略図を図10（全体圧縮条件）および図11（局所圧縮条件）に示す。試験体はシェル要素を用いて弾塑性体として、衝突用治具およびロードセルはソリッド要素を用いて弾性体としてモデル化した。衝突台車については、全体圧縮条件では、衝突台車の端面を剛体としてモデル化した。一方、局所圧縮条件では、試験体の衝突台車側端面に位置する節点と衝突台車の節点質量を与えた節点とをリンクで接合し、剛体としてモデル化した。解析モデルのメッシュサイズは、今後の車体モデルへの適用を考慮し、10mmを基準とした。試験体のモデル化においては材料破断を考慮しており、後述する破断則の破断クライテリアに達した要素は削除した。全体圧縮条件は試番2を、局所圧縮条件は試験の運用が安定した段階である試番3をそれぞれケーススタディのモデルとした。なお、局所圧縮条件での形状の時刻歴（図7）で試番1の結果を示したのは、高速度カメラの不具合により試番3の撮影ができなかったことによる。全体圧縮条件のモデルでは、衝突台車および衝撃用治具と試験体との初期不整が変形挙動に影響すると考えられたため、衝突台車側の端面形状を実際の試験体形状に合わせた。これにより、衝突台車側で確認された大変形を解析においても再現した。

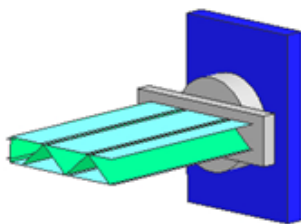


図10 解析モデル（全体圧縮条件）

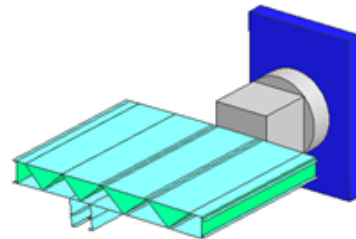


図11 解析モデル（局所圧縮条件）

アルミニウム合金部材の衝撃圧縮破壊挙動を解析する場合、適切な破断則を選択することが重要となる。有限要素解析で材料の破断を判定する場合の比較的簡易なモデル化手法として、破断時の相当塑性ひずみ

を閾値とする方法（以下「ひずみ判定」という。）、要素の厚さの倍率がある閾値に達した際に破断と判定する方法（引張変形時のみ破断が生じると扱うことができる。以下「板厚減少率判定」という。）等が挙げられ、より詳細なモデル化手法としては、前述の GTN model のほか、ひずみ速度および応力三軸度の関数として破断ひずみを表す Johnson-Cook model<sup>12)</sup> 等が挙げられる。先行研究<sup>5) 9)</sup> では、アルミニウム合金材料に対して GTN model を適用し、単軸引張試験結果からパラメータを同定した。一方でパラメータの厳密な同定に際しては単軸圧縮試験が必要であり、本研究では GTN model のパラメータを厳密に同定することが困難であると考えられた。また、Johnson-Cook model を導入する場合、複数の応力三軸度条件で破断ひずみを求めるための材料試験を別途実施する必要がある。そこで、本研究では、パラメータの設定が容易である ESI-Wilkins-Kamoulakos (EWK) model に着目した。これは、き裂の生成および進展に関する研究を実施していた Wilkins が提案したモデル (Wilkins model) をもとに構築されたものである。式(1)のように応力を静水圧応力 ( $\sigma_m$ ) 成分および偏差応力 ( $s_i$ , ただし  $s_1 > s_2 > s_3$ ) 成分に分け、それぞれの項を合成して損傷値  $D$  を計算する。

$$D = \int \left(1 - \frac{\sigma_m}{P_{lim}}\right)^\alpha \left(2 - \max\left(\frac{s_2}{s_1}, \frac{s_3}{s_2}\right)\right)^\beta d\epsilon \quad (1)$$

ここで、 $P_{lim}$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  は EWK パラメータであり、それぞれ静水圧成分の閾値ならびに静水圧成分および偏差応力成分の項の指数を表す。本研究では、この EWK model を用いることとし、実際の部材試験結果と比較しながら入力すべきパラメータ(局所垂直ひずみおよび局所せん断ひずみ)を定めた。本解析で用いた EWK パラメータ(入力したパラメータからソルバーが自動的に計算した値)はそれぞれ  $P_{lim}: 384\text{MPa}$ ,  $\alpha: -2.34$ ,  $\beta: 1.47$  である。

本解析では、EWK model による破断判定（以下「EWK 判定」という。）の他、板厚減少率判定（単軸引張試験から閾値を同定）、およびひずみ判定（単軸引張試験から同定した値 (0.162) の他、0.5 および 0.6 をそれぞれ閾値に設定した 3 種類のモデル）を扱い、結果を比較した。

## 3.2 再現解析結果および考察

### 3.2.1 全体圧縮条件

EWK 判定、板厚減少率判定、およびひずみ判定（閾値：0.162, 0.5 および 0.6）（以下、「ひずみ判定」の後に続く括弧書きの数値は閾値を表す）による各解析結果、ならびに試験結果（試番 2）について、荷重-変位曲線を図 12 に、変形エネルギー-変位曲線を図 13 に、形状の比較を図 14 に示す。ひずみ判定 (0.162) による解析では著しく変形したことから、図 14 (c1) には変位が 52mm 時点での形状を示した。板厚減少率判定および EWK 判定による解析では、形状が試験結果と概ね一致する傾向が確認された。特に、板厚減少率判定による解析では、最大変位が試験結果とほぼ一致し、変形エネルギー-変位曲線は変位が 36mm に達するまでほぼ一致する結果となった。ただし、試験では面板およびリブの付け根部分で破断が発生したが、板厚減少率判定による解析では要素の破断がほとんど発生しなかった。破断形態の違いに関わらず解析結果と試験結果がほぼ一致した要因として、全体圧縮条件での破断が座屈変形の著しい箇所でのみ発生しており、これらの破断自体が全体の圧縮変形に及ぼす影響が小さかったことが考えられる。EWK 判定による解析では、一部の要素が破断したことにより、試験よりも変形が進展する結果となった。しかしながら、実際に試験体で生じた破断を部分的にはあるが再現した点で妥当と考えられ、最大変位の誤差が 11% であることから、実用上十分な精度であると考えられる。ひずみ判定による解析では、単軸引張試験から同定した閾値 (0.162) を入力した結果、最大変位が著大となることが確認された。ひずみ判定では、

他の破断判定モデルと比較して容易に要素が消滅するため変形抵抗が小さく、変形がより進展したと考えられる。一方、ひずみ判定の閾値を 0.5 および 0.6 とした場合は、最大変位が試験結果よりも大きくなるものの、試験で確認された付け根部分の破断、座屈等が再現された。ひずみ判定による解析で試験と同等の変形モードを再現するためには、単軸引張試験で同定したひずみ判定の閾値の約 3 倍以上の値を設定する必要がある。なお、ひずみ判定による解析では入力した閾値によらず、変位が約 10mm 増加するごとに荷重値が大きく変動しているが、これは解析モデルのメッシュサイズ (約 10mm) に対応し、要素が破断した際に荷重変動が生じたためと考えられる。

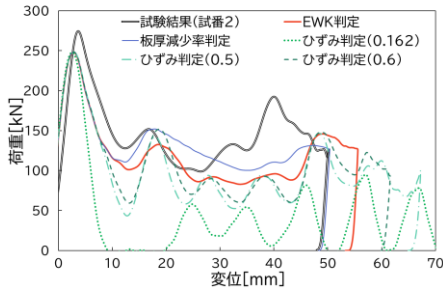


図 12 荷重－変位曲線 (全体圧縮条件)

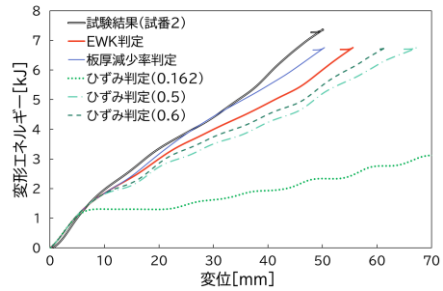


図 13 変形エネルギー－変位曲線 (全体圧縮条件)

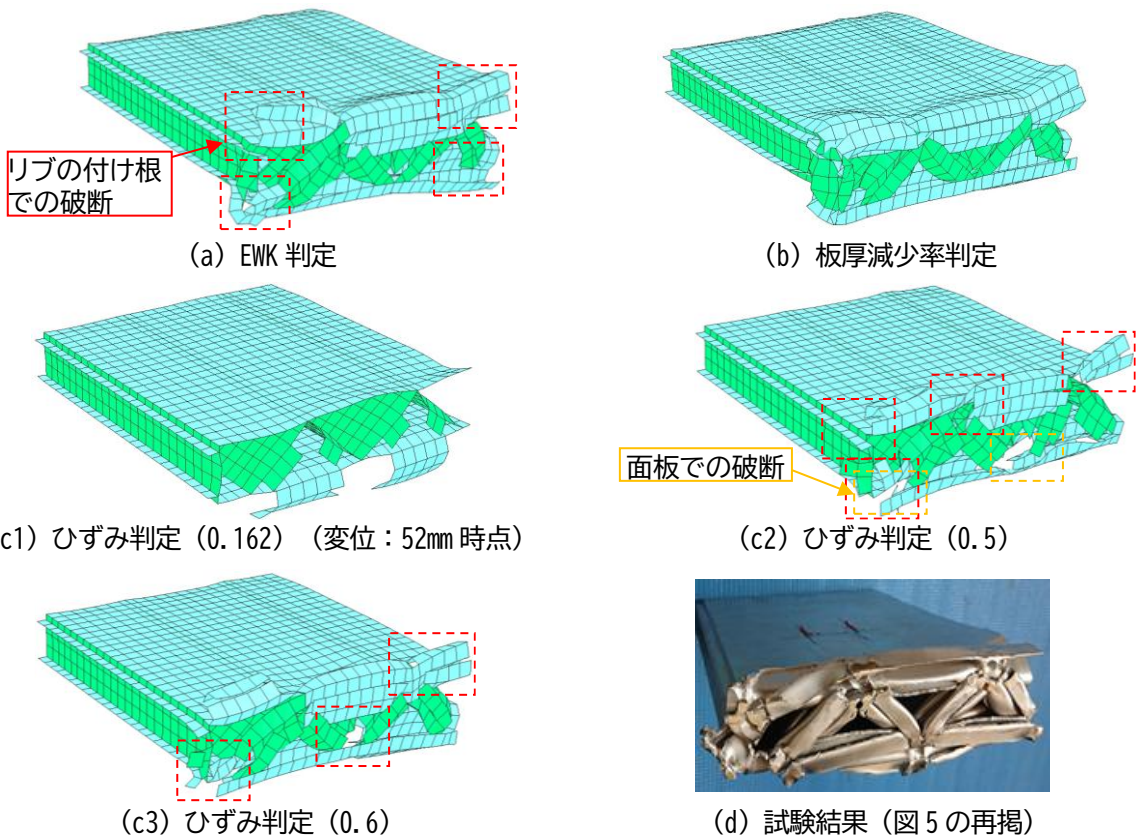


図 14 形状の比較 (全体圧縮条件)

### 3.2.2 局所圧縮条件

EWK 判定、板厚減少率判定、およびひずみ判定 (閾値: 0.162, 0.5 および 0.6) による各解析結果、ならびに試験結果 (試番 3) について、荷重－変位曲線を図 15 に、変形エネルギー－変位曲線を図 16 に、形状の比較を図 17 に示す。ひずみ判定 (0.162) による解析では著しく変形したことから、図 17 (c1) には変位

が82mm 時点での形状を示した。EWK 判定による解析では、衝撃用治具に沿って生じたせん断破壊、衝突面背後の座屈変形がよく再現された。最大変位についても、試験に対して9%の誤差の範囲内にあり、その荷重－変位特性を概ね再現した。変形エネルギー－変位曲線は、変位が70mm に達するまでほぼ一致した。一方、板厚減少率判定による解析では、衝撃用治具に接触した部分以外の部分で曲げ変形が生じ、せん断破壊が再現されない結果となった。これは、せん断変形が要素の板厚変化に寄与しない変形モードであり、破断基準に達しないことが原因と考えられる。ひずみ判定による解析では、閾値が0.162 の場合は変形抵抗を受けることなく破断した一方で、閾値を0.6 に設定した場合はEWK 判定による解析と類似した結果となった。詳細は割愛するが、閾値を0.7 に設定した場合、曲げ変形が卓越し、形状は板厚減少率判定による解析と類似する結果となった。EWK 判定および板厚減少率判定による解析で生じた、変位15mm での2つめの荷重のピークは、試番3 の試験ではみられなかったが、試番1 の試験で生じたピーク（試番1 では17mm：図9を参照）に対応すると考えられる。

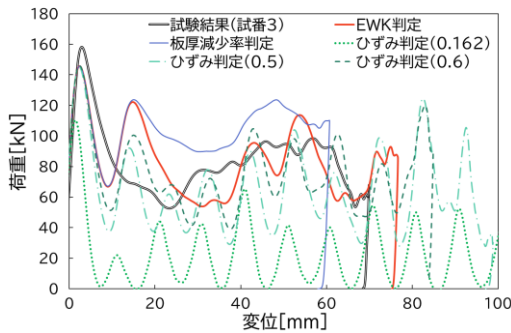


図15 荷重－変位曲線（局所圧縮条件）

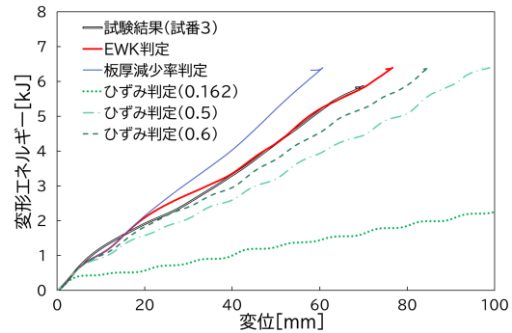


図16 変形エネルギー－変位曲線（局所圧縮条件）

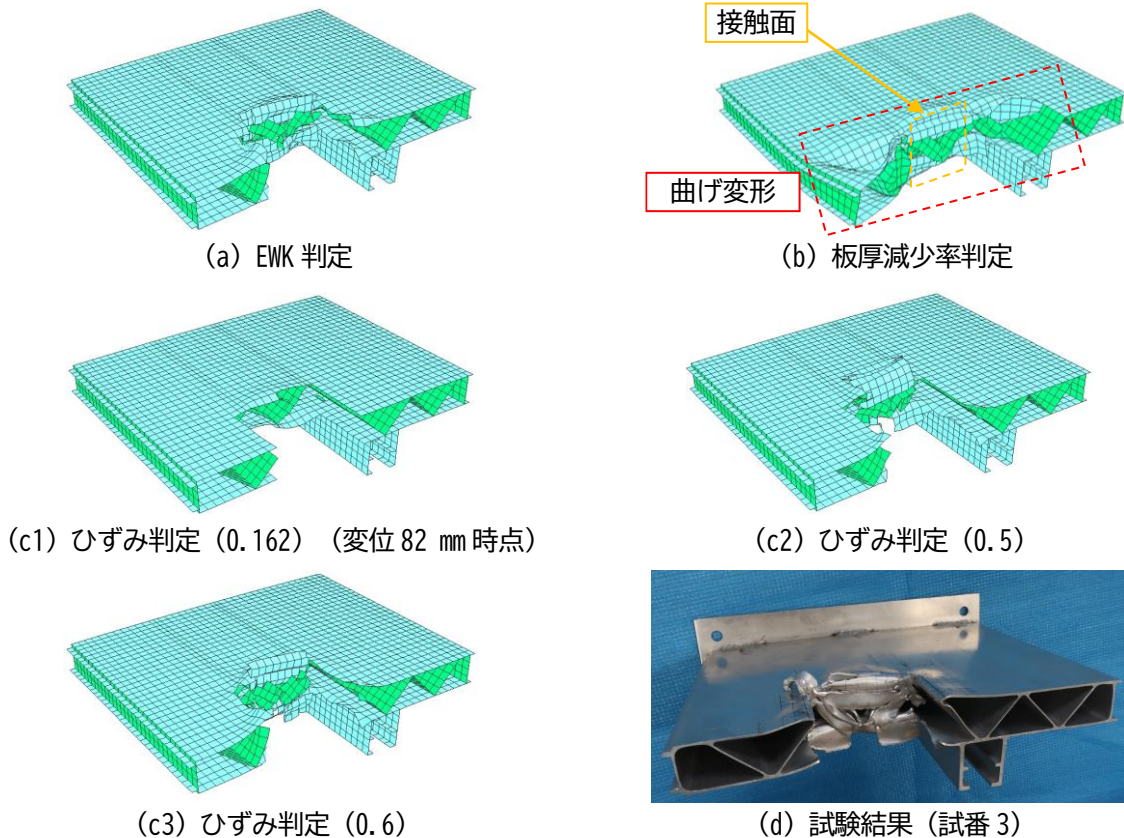


図17 形状の比較（局所圧縮条件）

### 3.2.3 再現解析結果の整理

3.2.1 項で示した全体圧縮条件，および 3.2.2 項で示した局所圧縮条件について，それぞれの試験結果および各破断則を適用した場合の再現解析結果を，最大変位，最大荷重，変形エネルギーおよび試験体の形状の 4 項目で整理して表 3 に示す．変形エネルギーは，同一の変位での値を比較するため，全体圧縮条件では試験（試番 2）での最大変位（50.1mm）時点での，局所圧縮条件では板厚減少率判定による解析での最大変位（60.7mm）時点での値をそれぞれ記した．同表中に括弧書きで示した百分率の数値は，試験結果に対する誤差を表す．表 3 中で，試験結果との差異が最も小さい項目を赤背景で示した．なお，ひずみ判定（0.162）による解析では，局所圧縮条件および全体圧縮条件ともに変位が 100mm を超えてもなお変形したため，>100 と記した．

表 3 試験結果および各破断則を適用した場合の再現解析結果との比較

(a) 全体圧縮条件					
		最大変位 [mm]	最大荷重 [kN]	50.1mm 時点での変形エネルギー [kJ]	形状
試験結果（試番 2）		50.1	275	7.37	—
EWK 判定		55.6 (+11%)	248 (-9.8%)	6.02 (-18.3%)	試験結果と一致
板厚減少率判定		50.4 (+0.6%)	248 (-9.8%)	6.72 (-8.8%)	破断はほぼ確認されず
ひずみ判定	0.162	>100	248 (-9.8%)	2.34 (-68.2%)	(変位 52mm 時点の状況) 要素が破断判定されたことにより座屈が確認されず
	0.5	67.2 (+34.1%)	248 (-9.8%)	5.22 (-29.2%)	試験結果と一致
	0.6	61.6 (+23.0%)	249 (-9.5%)	5.49 (-25.5%)	試験結果と一致
(b) 局所圧縮条件					
		最大変位 [mm]	最大荷重 [kN]	60.7mm 時点での変形エネルギー [kJ]	形状
試験結果（試番 3）		70.0	158	5.21	—
EWK 判定		76.6 (+9.4%)	146 (-7.6%)	5.26 (+1%)	試験結果と一致
板厚減少率判定		60.7 (-13%)	146 (-7.6%)	6.30 (+20.9%)	せん断破壊：確認されず 座屈：衝突用治具側の広い範囲で確認された
ひずみ判定	0.162	>100	110 (-30%)	1.47 (-71.8%)	(変位 82mm 点での状況) せん断破壊：確認された 座屈：確認されず
	0.5	98.8 (+41.1%)	145 (-8.2%)	3.98 (-23.6%)	せん断破壊：確認された 座屈：部分的に確認された
	0.6	84.8 (+21.1%)	146 (-7.6%)	4.58 (-12%)	せん断破壊：確認された 座屈：部分的に確認された

### 3.3 各破断モードで適用すべき破断則の整理

3.2 節では，全体圧縮条件および局所圧縮条件の再現解析で適用する破断則による解の挙動の変化を確認した．これらの結果から，アルミニウム合金部材の衝撃挙動を数値解析で考察する上で適用すべき破断則について整理する．

ひずみ判定による解析について，本試験結果から閾値を試行錯誤的に決定した場合，メッシュサイズが 10mm では，その値は実際の相当破断ひずみの 3 倍以上の数値となり，荷重－変位曲線における荷重は試験と比較して小さくなった．板厚減少率判定による解析では，全体圧縮条件のように主に曲げ変形モードが生じる場合には適切な解が得られた一方で，せん断破壊を扱うことができないことが確認された．EWK 判定による解析では，せん断および曲げによる破壊を考察できることが確認され，特に局所圧縮条件のように，母材部の破断が生じるような衝撃挙動の考察で有効と考えられる．

以上を踏まえ，母材部での破断等が生じることが想定される場合は板厚減少率判定による簡易なモデル

化は適切でなく、破断に関する詳細なモデル化が必要である。モデル化手法としては、詳細なモデル化の中では比較的容易な EWK model で、材料破断を含めた衝撃挙動を再現できることを示した。一方、全体圧縮条件のように材料の破断が重要にならない場合では、板厚減少率判定による解析が有効であると考えられる。ひずみ判定による解析では、いずれの条件でも妥当な結果が得られない結果となった。

#### 4. まとめ

アルミニウム合金製車体構造に用いられるダブルスキン部材の衝撃圧縮挙動を把握することを目的に、複数の圧縮条件のもとで衝撃圧縮試験を実施し、座屈変形挙動のみならず、せん断破壊挙動についても明らかにした。さらに、衝撃試験の再現解析を実施した。再現解析では、複数の破断則を適用し、それぞれの結果を比較することにより、せん断破壊挙動も考慮できる破断則を示した。

衝撃圧縮試験では、部材全体を圧縮した条件、および部材断面の一部を局所的に圧縮した条件の 2 条件を実施した。全体圧縮条件では、曲げ座屈変形が主であり、著しく変形した面板およびリブの付け根部分の一部で部材が破断した。一方、局所圧縮条件では、衝撃用治具と接触した箇所近傍の面板およびリブが蛇腹状に座屈し、衝撃用治具の側面と接触した箇所では、衝撃用治具の形状に従って、せん断破壊した。変形が衝撃用治具まわりの近傍以外に伝搬しなかった原因として、アルミニウム合金材料の破断ひずみが小さいことによる影響が考えられる。衝撃圧縮試験の再現解析の結果、全体圧縮条件では、全体的に座屈変形が卓越したため、破断則が及ぼす影響は小さいと考えられ、板厚減少率判定および EWK 判定による解析で適切な解が得られた。破断則にひずみ判定を適用する場合は、単軸引張試験結果から同定した破断判定ひずみでは適切な解が得られず、約 3 倍以上の値を設定する必要があることを示した。一方、局所圧縮条件のようにせん断破壊モードが生じる場合は、ひずみ判定および板厚減少率判定による解析ではせん断破壊を再現できず、EWK 判定による解析で、せん断破壊および座屈挙動を適切に再現できることを明らかにした。

今後、アルミニウム合金製車体構造の解析モデルにおいて EWK model を適用し、アルミニウム合金製車体構造の衝撃挙動を明らかにしていく方針である。

#### 文 献

- 1) 田口真, 藤本亜紀子, 山田敏之, 井原禎之, 吉川孝男: 数値解析による踏切衝突事故の検証 (鉄道車両の衝突安全性評価の研究), 日本機械学会論文集, Vol.81, No.829, 2015
- 2) 沖野友洋, 永田恵輔, 佐藤裕之, 堀川敬太郎, 小林秀敏: 踏切衝突事故時の各因子が列車乗員の被害度に及ぼす影響評価, 日本機械学会論文集, Vol.85, No.869, 2019
- 3) 川崎健, 山本隆久, 大場英資, 正井健太郎, 中村英之: 焼鈍したアルミニウム合金製中空押出形材を用いた鉄道車両用エネルギー吸収部材の開発, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.70, No.697, pp.187-193, 2004
- 4) 川崎健, 山口貴吏, 用田敏彦: 鉄道車両用アルミ合金製衝撃吸収構造を対象にした準静的圧壊実験と数値解析による基礎検討, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.74, No.737, pp.154-161, 2008
- 5) 木村宗太, 用田敏彦, 川崎健, 中村英之, 山口貴吏: 鉄道車両向け衝撃吸収構造のエネルギー吸収特性評価 (損傷力学モデルを用いた数値シミュレーション), 日本機械学会論文集 A 編, Vol.78, No.793, pp.98-112, 2012
- 6) 濱島豊和, 西村和彦, 曄道佳明: 非線形動的解析を用いた鉄道車両構体の塑性領域を含む長手方向強度評価, 日本機械学会論文集, Vol.81, No.821, 2015
- 7) 運輸安全委員会: RA2014-10 II 九州旅客鉄道株式会社 佐世保線 高橋駅構内 踏切障害事故, 2014, <https://www.mlit.go.jp/jtsb/railway/rep-acci/RA2014-10-2.pdf> (参照日: 2025 年 9 月 10 日)
- 8) V.Tvergaard, A.Needleman, "Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar," Acta Metallurgica, Vol.32, Issue 1, pp.157-169, 1984.

- 9) J.Davenport, W.Xu, M.Wilson, D.Zangani, "Modelling of crashworthy welded joints of aluminium railway carriages," Conference paper of WCRR2006, 2006.
- 10) 永田恵輔, 沖野友洋, 高野純一:せん断破壊を考慮した鉄道車両用アルミニウム合金部材の衝撃圧縮試験, 日本機械学会論文集, Vol.87, No.903, 2021
- 11) 佐藤裕之:研究開発七つ道具 117 水平衝撃荷重装置, RRR, Vol.79, No.4, p.47, 2022
- 12) G.R.Johnson, W.H.Cook, "Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures," Engineering Fracture Mechanics, Vol.21, No.1, pp.31-48, 1985.