

鉄道車両用アルミニウム合金の動的強度特性

石塚 弘道* 舟津 浩二**

Dynamic Mechanical Properties of Aluminum Alloys Used for Railway Vehicles

Hiromichi ISHIDUKA Kouji FUNATSU

In the tensile or compressive test to measure the mechanical properties of materials, the higher the test speed is, the harder the precise test completion is. Besides, reproducibility of obtained data is more questionable. For these reasons, the dynamic mechanical properties, such as the dependency of properties on strain rate, are not completely apparent with respect to aluminum alloys used for railway vehicles in Japan, especially in terms of weldment. In this research, the dependency of mother metals and weldment on strain rate was investigated using three types of aluminum alloys, 5083-O, 6N01-T5, and 7N01-T5, for railway vehicles. The results of the tensile tests indicated that the 5083-O alloy was the least on the degree of strength decrease in the weld against the mother metal. Each alloy showed that the dependency of proof stress and tensile strength on strain rate was less up to the strain rate of 100s^{-1} , and became larger beyond that strain rate. On the other hand, the results of compressive test revealed that the dependency of proof stress and tensile strength on strain rate of each alloy was less up to the strain rate of 100s^{-1} , and became larger beyond that strain rate.

キーワード：車両構体，動的強度，ひずみ速度，引張強度，圧縮強度，アルミニウム合金

1. 緒言

車体材料の強度特性の測定のために行われる引張りおよび圧縮試験は、高速になるほど試験が困難で、得られたデータの再現性などに問題がある。そのため、日本国内で使用されている鉄道車両用アルミニウム合金、特にその溶接部について、ひずみ速度依存性のような動的な強度特性の解明は、必ずしも充分ではない¹⁾。

本研究では、3種類の鉄道車両用アルミニウム合金5083-O、6N01-T5、7N01-T5材を用いて、母材部および溶接部のひずみ速度依存性など動的な材料特性を調査した。

試験速度 4m/s 以下はガス油圧式、 4m/s 以上では One Bar 法を原理とした試験装置を使用して、引張試験および圧縮試験を行った。

2. 動的引張試験

2.1 試験片

3種類の鉄道車両用アルミニウム合金5083-O、6N01-T5、7N01-T5の板材（以下、5083合金、6N01合金および7N01合金と記す）を母材として、母材そのものと、突合わせ溶接部について試験片を作製した（以下、母材試験片および溶接部試験片と記す）。なお、溶接時の変形を

低減し、健全な溶接部を得るための一層貫通溶接が可能であること、また、溶接部だけでなく熱影響部、原質部も含めた引張試験片が採取できるように、母材の板厚は 8mm とした。

図1に試験片の形状を示す。母材の引張試験片については、5083合金は圧延方向と平行に、6N01合金および7N01合金は押出方向と直角に切出した。一方、溶接部試験片については、車両の構体を組み立てる際に主としてミグアーク溶接方法が適用されているため、ミグアーク溶接の突合わせ構造とした。図2のように、溶接方向は5083合金が圧延方向と直角、6N01合金および7N01合

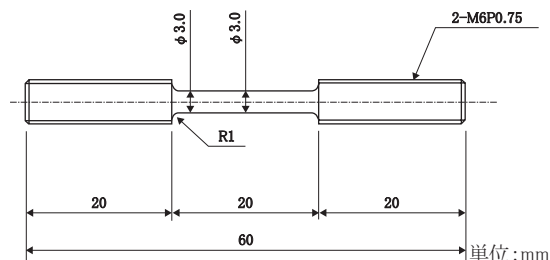


図1 引張試験片形状

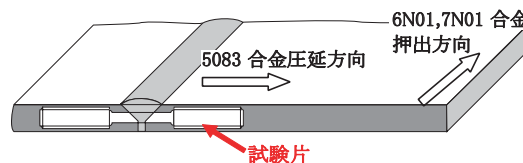


図2 溶接部引張試験片の切出位置

* 車両構造技術研究部

** 車両構造技術研究部（車両強度）

特集：車両技術

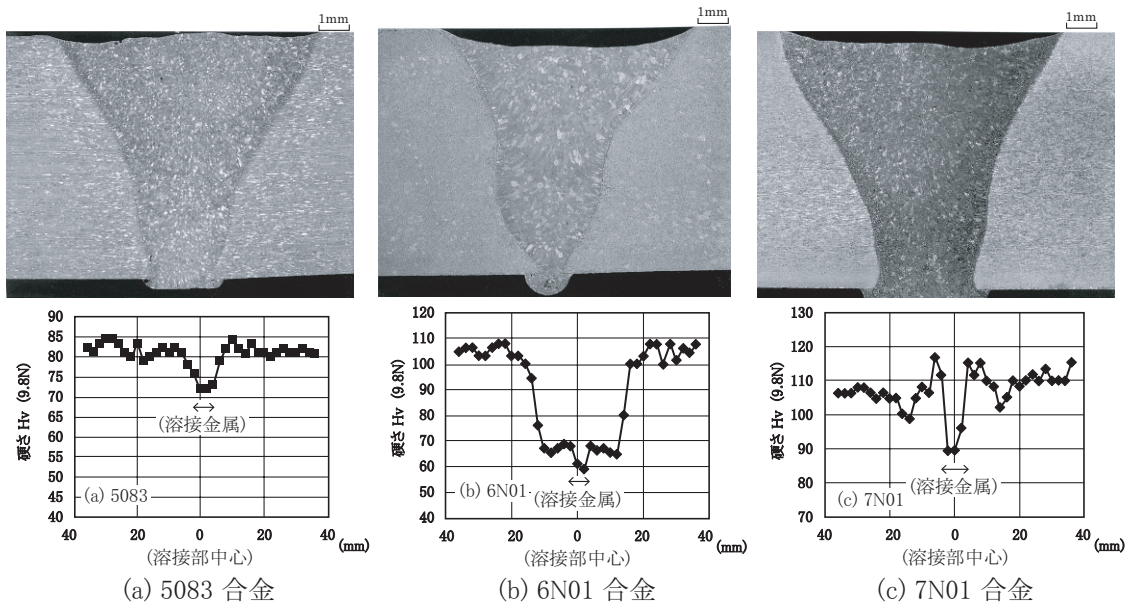


図3 溶接部の金属組織と硬さ分布

金は押出方向と平行とし、40度のY型開先で溶接ワイヤ5356を用いて溶接した。

6N01合金および7N01合金については、溶接後1ヶ月間室温で保持した後、試験に供した。溶接部の金属組織および溶接方向と直角の横断面の硬さ分布を図3に示す。

放射線検査で溶接部にブローホールなどの欠陥の無いことを確認した後、熱影響部も含めて溶接部が試験片平行部の中央になるように、試験片を切り出した(図2参照)。表1に試験片の機械的性質を示す。

表1 機械的性質

材料	方向	耐力 (MPa)	引張強度 (MPa)	伸び (%)
5083 合金	圧延方向	169	323	20
	圧延直角方向	160	323	27
6N01 合金	押出方向	241	272	24
	押出直角方向	231	256	24
7N01 合金	押出方向	297	364	20
	押出直角方向	281	346	18

2.2 試験装置

試験速度が4m/sまでの引張試験では、動的破壊試験装置を使用し、4m/sより高速の引張試験では、衝撃試験装置(空気砲)を使用した。

図4に示す動的破壊試験装置の作動原理はガス油圧式で、一定速度の引張りが可能である。一方、図5に示す衝撃試験装置の計測原理はOne Bar法であり、所定の載荷速度となるように、あらかじめ窒素ガス圧を調整し弾丸を射出する。荷重検出棒の先端に試験片とフランジを

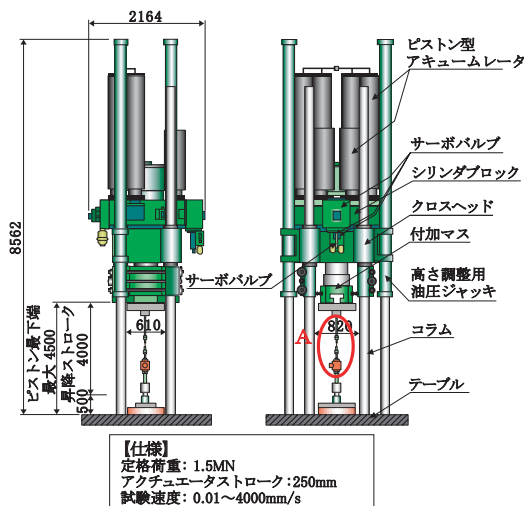
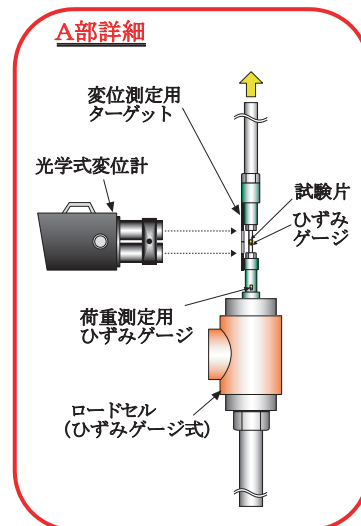


図4 動的破壊試験装置



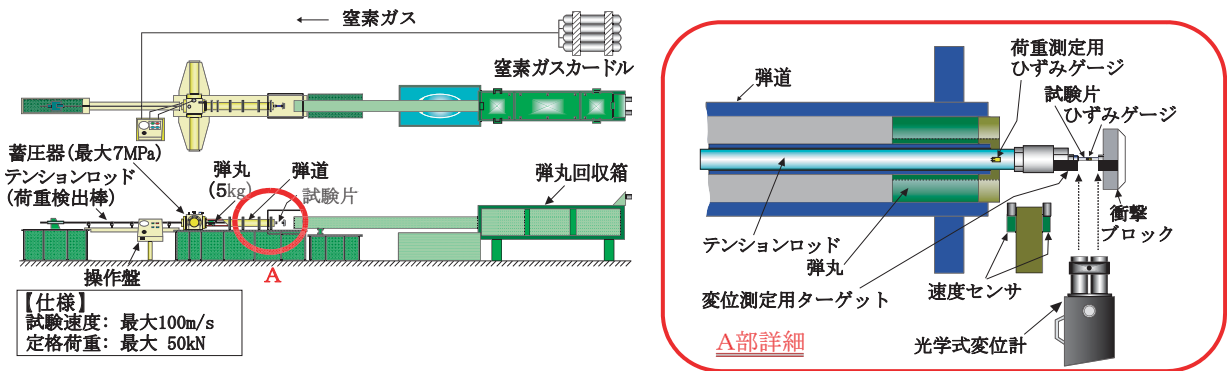


図5 衝撃試験装置

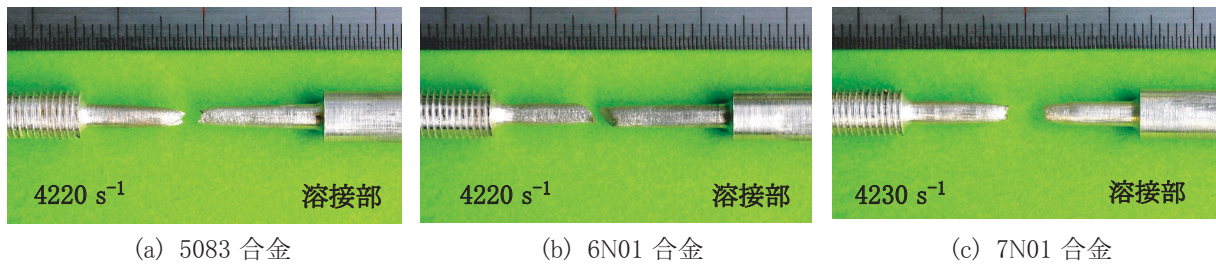


図6 動的引張試験後の試験片

取り付け、射出された弾丸がフランジに打ち当たることにより、試験片を引張る。

応力は、試験片のつかみ部に貼り付けた荷重測定用ひずみゲージを用いて測定した。また、荷重検出棒に貼り付けたひずみゲージでも同様の測定を行い、両者を比較した。試験片の変位は光学式変位計を用いて測定し、また、試験片に貼り付けたひずみゲージで測定したひずみからも算出した。各測定データの収録にはデータロガーおよびパソコンを用いた。

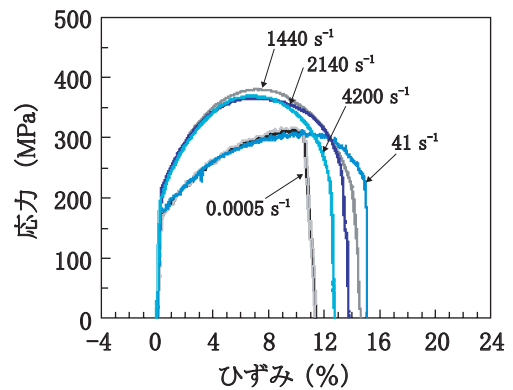
2.3 試験結果

最高速度で動的引張試験を行った後の溶接部試験片の外観を図6に示す。いずれの合金においても、母材試験片は中央部で破断したのに対して、溶接部試験片については、5083合金および7N01合金は溶接金属部で、6N01合金は熱影響部（HAZ）で破断した。

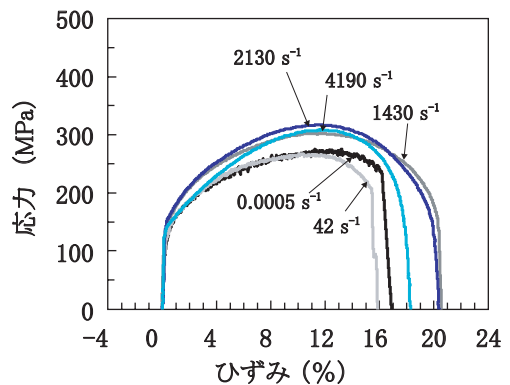
引張試験結果の一例として、5083合金試験片の応力とひずみの測定結果を図7に示す。弾性範囲内では、試験片に貼り付けたひずみゲージの方が、変位計よりも分解能が相対的に高いので、試験片に貼付したひずみゲージから求めた応力-ひずみ曲線の0.2%オフセット値を耐力とした。なお、衝撃試験装置で得られた高速引張試験での引張強さは、衝撃载荷によるノイズ変動を平滑化した応力-ひずみ曲線における最大応力値とした。ここで、ひずみ速度は試験速度を試験片長さで除して求めた公称値である。

2.3.1 応力とひずみの関係

各合金の耐力および引張強さとひずみ速度の関係を図



(a) 母材



(b) 溶接部

図7 応力とひずみの測定結果の一例 (5083合金)

8に示す。

各試験片による試験結果を要約すると、以下のとおりである。

特集：車両技術

5083合金の母材の引張強さは、ひずみ速度に関係なく耐力の約1.8倍であった。母材と比較して溶接部は、ひずみ速度に関係なく、引張強さに達するまでのひずみ量が增大した。

6N01合金の母材の引張強さは、ひずみ速度に関係なく耐力の約1.1倍となった。また、ひずみ速度に関係なく、弾性変形後ほとんど加工硬化せずに引張強さに達した。一方、溶接部は、耐力から引張強さに達するまでのひずみ量が母材よりも増大した。

7N01合金の母材の引張強さは、ひずみ速度40s⁻¹までは耐力の約1.2倍、ひずみ速度1000s⁻¹以上では約1.3倍とわずかに大きくなった。

2.3.2 ひずみ速度依存性

各合金の母材の耐力および引張強さは、ひずみ速度が100s⁻¹までは一定か微増する程度で、ひずみ速度が100s⁻¹以

上では増加傾向を示した。高ひずみ速度で耐力および引張強さが上昇する傾向は、転位の熱活性化が原因とされている¹⁾。一方、各合金の溶接部の耐力は高ひずみ速度でもほとんど変化しなかった。

5083合金の母材に対する溶接部の耐力および引張強さの低下率は、ひずみ速度に関係なくほぼ一定で、耐力は母材の約0.7倍、引張強さは約0.8倍となった(図8(a))。

6N01合金の母材に対する溶接部の耐力および引張強さの低下率は、ひずみ速度に関係なくほぼ一定で、耐力は母材の約0.4倍、引張強さは約0.8倍となった(図8(b))。

7N01合金の母材に対する溶接部の耐力の低下率は、ひずみ速度に関係なくほぼ一定で母材の約0.5倍となった。引張強さの低下率は、ひずみ速度が約2100s⁻¹までは、ひずみ速度に関係なく母材の約0.8倍で、それ以上のひずみ速度では約0.7倍となった(図8(c))。

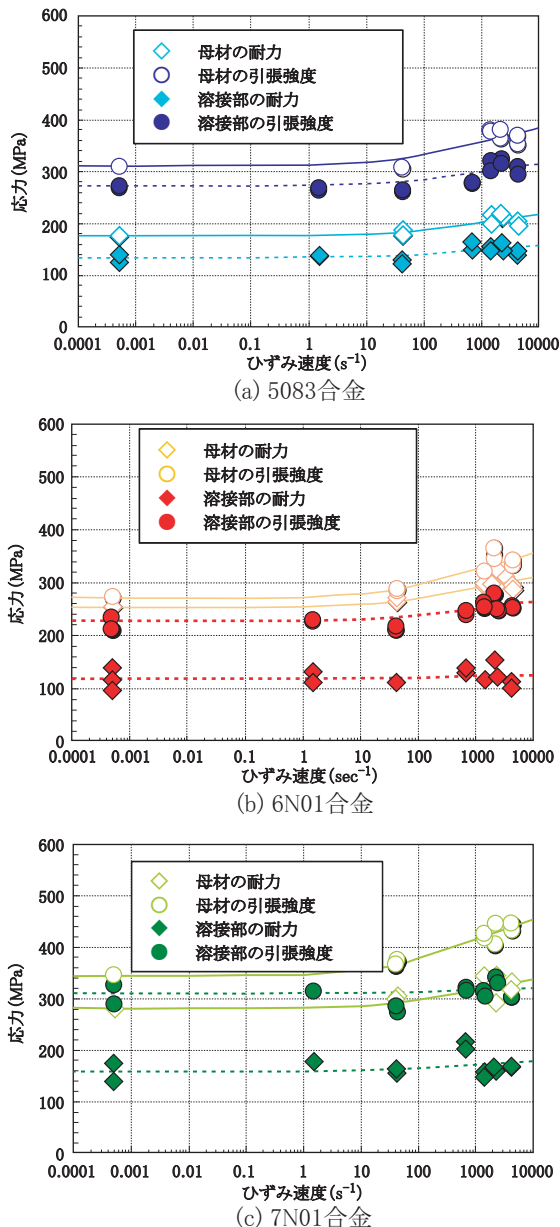


図8 耐力および引張強さとひずみ速度の関係

3. 動的圧縮試験

各アルミニウム合金の厚さ20mmの板材を母材として、母材と突合わせ溶接部について静的および動的な圧縮試験を行い、ひずみ速度の違いによる強度の変化を調査した。

3.1 供試体および試験片

試験片は、圧縮時に軸方向のずれ、曲げ変形が生じないこと、また、中央部表裏にひずみゲージを貼り付け可能な太さであることを勘案し、図9のように直径15mm、長さ30mmの形状とした。

母材試験片および溶接部試験片の作製手順は、溶接部試験片の溶接部を多層盛としたことを除いて引張試験と同様である。溶接部の形状と試験片採取位置を図10に示す。

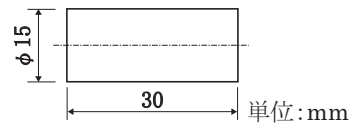


図9 圧縮試験片の形状

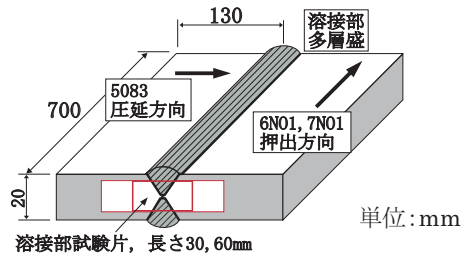


図10 溶接部の形状と試験片採取位置

3.2 試験装置

試験装置は、引張試験と同様に、試験速度が4m/sまでの圧縮試験では動的破壊試験装置、4m/sより高速の圧縮試験では衝撃試験装置を使用した。

動的破壊装置では、装置に圧縮治具を取り付けて、一定速度で試験片を圧縮した。圧縮治具上部に設置した破断ピンにより、試験片の圧縮量を10mm以下に調整した。

衝撃試験装置による圧縮試験では、図11に示すように図5のA部を改造して、窒素ガス圧で射出された弾丸を試験片手前に設置した円板に打ち当て、円板で試験片を圧縮した。試験片の外側にはフランジを取り付けて、圧縮量を10mm以下に調整した。

ひずみおよび変位の測定方法は引張試験と同様である。また、測定データの収録方法も同様である。

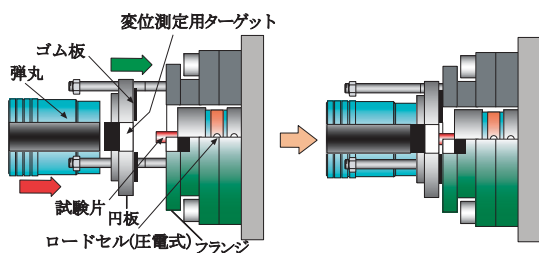


図11 動的圧縮試験用に改造した図5A部

3.3 試験結果

母材試験片については、試験後、各合金ともひずみ速度に関係なく中央部が膨らむ樽型形状となったが、7N01合金は斜めに破断した。

図12に、最高速度で動的圧縮試験を行った後の溶接部試験片の外観を示す。

5083合金溶接部試験片は、ひずみ速度に関係なく樽型形状となった。6N01合金溶接部試験片は、ひずみ速度に関係なく溶接部両端の熱影響部が膨らむ形状となり、高ひずみ速度の試験では溶接部と熱影響部の境界付近で割れが生じた。7N01合金溶接部試験片は、高ひずみ速度の試験で熱影響部から溶接部にかけて斜めに破断した。

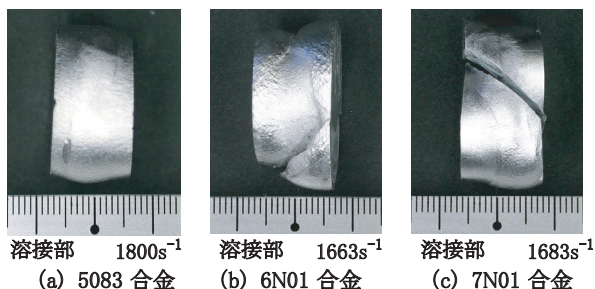


図12 動的圧縮試験後の試験片

3.3.1 応力とひずみの関係

5083合金溶接部試験片について、応力とひずみの測定結果を図13に示す。衝撃試験装置で得られた高速圧縮試験での応力-ひずみ曲線には、高速での衝撃载荷が原因と考えられる応力の変動が認められた。

3.3.2 ひずみ速度依存性

各合金の耐力とひずみ速度の関係を図14に示す。

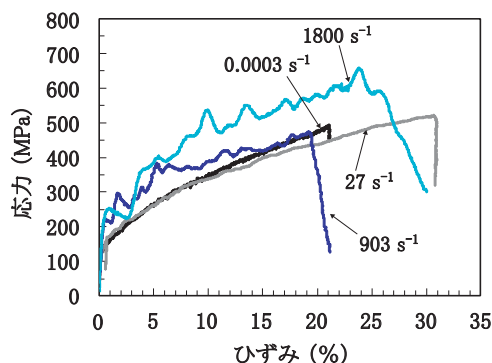


図13 応力とひずみの測定結果の一例

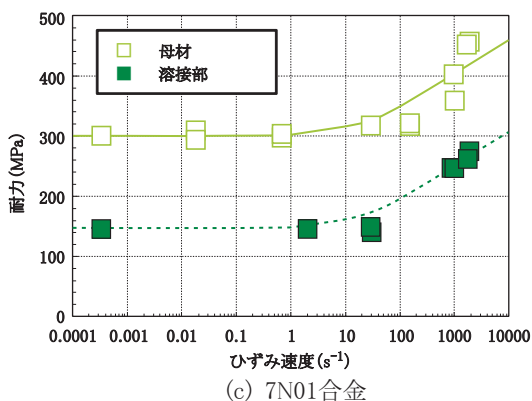
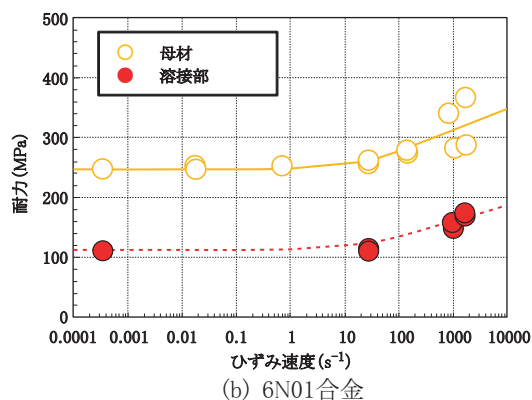
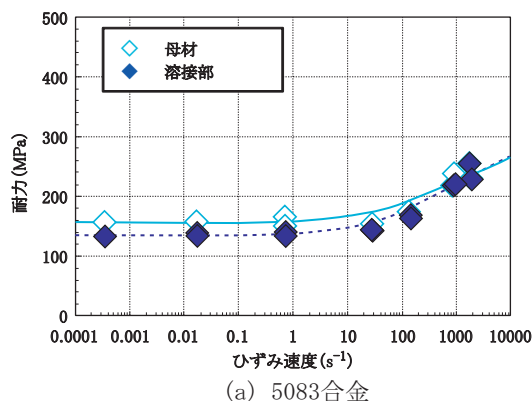


図14 耐力とひずみ速度の関係

いずれの合金においても、母材および溶接部の耐力は、ひずみ速度が $10s^{-1}$ 付近まではほぼ一定であるが、

特集：車両技術

10s⁻¹以上になると急激に上昇する傾向を示した。近似曲線からひずみ速度約1800s⁻¹での耐力を静的圧縮試験の耐力と比較すると、母材より溶接部の方が上昇率が高い傾向を示した。

母材に対する溶接部の耐力の比率も、ひずみ速度約100s⁻¹まではいずれの合金でもほぼ一定で、100s⁻¹より高速で上昇した。ひずみ速度100s⁻¹までの一定の比率は、5083合金、6N01合金、7N01合金それぞれに対し88%、43%、47%であった。また、ひずみ速度1800s⁻¹での比率はそれぞれ98%、52%、64%であった。

以上のように、高ひずみ速度では、各合金とも母材に対する溶接部の耐力の低下率は小さくなる傾向にある。

4. 動的引張試験結果と動的圧縮試験結果の比較

図15に、動的引張試験および動的圧縮試験によって得られた耐力を比較して示す。5083合金に関しては、引張試験と圧縮試験の間に、耐力の大きな違いは認められない。他方、6N01合金と7N01合金に関しては、明確な差がある。

全ての合金において、およそ100s⁻¹のひずみ速度までは引張試験結果と圧縮試験結果に違いはほとんどない。しかし、100s⁻¹以上では両者にはっきりした違いが認められ、圧縮試験によって得られた耐力は、ひずみ速度とともに上昇する傾向を明らかに示す。

5. 結言

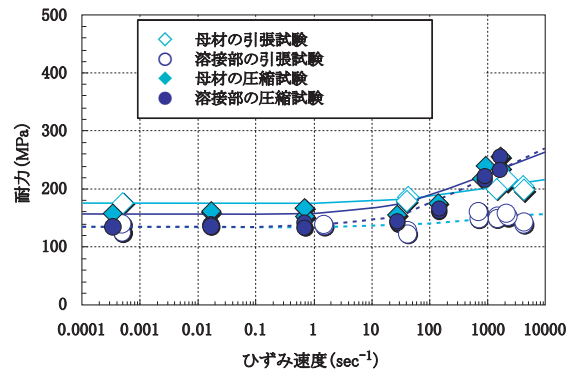
鉄道車両の衝撃安全性評価のためのデータベースを構築する一環として、5083合金、6N01合金および7N01合金について、母材とその突合わせ溶接部の衝撃引張試験および圧縮試験を行い、以下の結論を得た。

(1) 動的引張試験

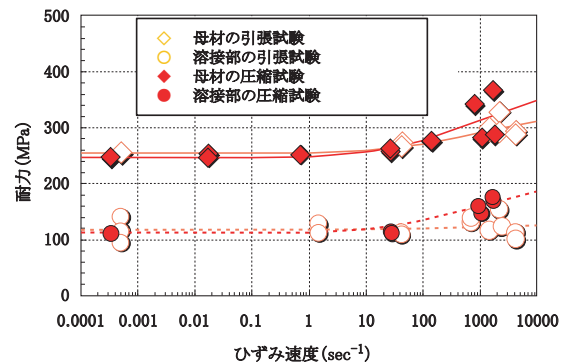
- (a) 3種類のアルミニウム合金の母材に対する溶接部の耐力および引張強さの低下率は、ひずみ速度が増大してもほぼ一定であり、三者を比較すると、5083合金が最も低下率が小さく、6N01合金および7N01合金は同程度である。
- (b) 各合金の母材の耐力および引張強さは、ひずみ速度が100s⁻¹までは、静的なそれと比較して同じか微増する程度であるが、ひずみ速度が100s⁻¹以上で明瞭に増加する。
- (c) 各合金の溶接部の耐力は、高ひずみ速度になってもほとんど変化しない。

(2) 動的圧縮試験

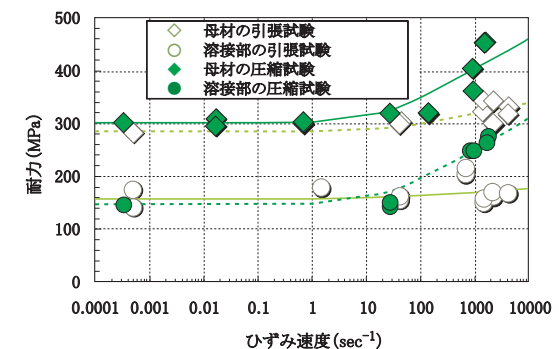
- (a) 6N01合金および7N01合金は、溶接熱影響部の変形が著しい。
- (b) 各合金の母材および溶接部の耐力は、ひずみ速度が10s⁻¹以上になると急激に上昇する傾向にある。



(a) 5083合金



(b) 6N01合金



(c) 7N01合金

図15 引張試験結果と圧縮試験結果の比較

(c) 各合金の母材に対する溶接部の耐力の低下率は、高ひずみ速度になると小さくなる。特に、5083合金は母材と溶接部の耐力がほぼ同じになる。

本研究を遂行するにあたり、(財)メトロ文化財団および(財)JKA(旧：自転車振興会)に資金援助をいただいた。また、(社)日本アルミニウム協会内に設置された車体強度小委員会のメンバーには多くの助言をいただいた。関係各位に厚くお礼申し上げる次第である。

文献

1) アルミニウム合金の強度研究部会：アルミニウム合金の静的・動的強度特性，研究部会報告書No.46，軽金属学会，2005