

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

航空機用アルミニウム合金のひずみ 速度依存性基本データベース

岩崎 和夫, 宮木 博光, 少路 宏和, 峯岸 正勝

2013年3月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

目 次

1. まえがき.....	1
2. 試験片.....	2
2.1 静強度試験片.....	2
2.2 高速引張り試験片.....	2
3. 静強度試験.....	2
3.1 試験装置.....	2
3.2 試験方法.....	2
4. 高速引張り試験.....	4
4.1 試験装置.....	4
4.2 試験方法.....	4
4.3 試験条件.....	4
4.4 荷重及びひずみ.....	4
5. 特性値の換算方法.....	5
5.1 公称引張り強さ.....	5
5.2 縦弾性係数.....	5
5.3 0.2% 耐力.....	5
6. 試験結果.....	5
6.1 静強度試験結果.....	5
6.2 高速引張り試験結果.....	5
6.3 ひずみ速度と引張り強さ.....	7
6.4 ひずみ速度と縦弾性係数.....	8
6.5 ひずみ速度と 0.2%耐力.....	9
6.6 各ひずみ速度に対応した代表的真の応力 - ひずみ線図.....	9
7. まとめ.....	12
8. 謝意.....	12

航空機用アルミニウム合金のひずみ速度依存性基本データベース

岩崎 和夫^{*1}、宮木 博光^{*1}、少路 宏和^{*1}、峯岸 正勝^{*2}

Data Base for High Velocity Strain- Rate Properties Data of Aircraft Aluminum Alloys

Kazuo IWASAKI^{*1}, Hiromitsu MIYAKI^{*1}, Hirokazu SHOJI^{*1}, Masakatsu MINEGISHI^{*2}

Abstract

High velocity tensile strain rate properties of four different kinds of aluminum alloys (A2024-T3clad, A7075-T6clad, A5052 and A6061) for aircraft structures are evaluated by using high rate servo-hydraulic machine at strain rates from 100 s^{-1} to nearly 1000 s^{-1} . In this paper, tensile strength, yield strength, Young's modulus and 0.2% proof stress of aluminum alloys on various strain rates are reported. The experimental results for true stress strain diagrams on various strain rates are also compared.

Key Words ; Strain- Rate, Tensile Test, Aluminum Alloy

概 要

航空機用及び汎用材料として使用されている4種類のアルミニウム合金(A2024-T3clad, A7075-T6clad, A5052及びA6061)について、引張り強さ、縦弾性係数及び2%耐力のひずみ速度の違いによる変化を検証するため、航空機の衝突時に発生するひずみ速度 100 s^{-1} から 1000 s^{-1} 近くまでインストロン社製の油圧サーボ式高速衝撃試験機を用いて試験を実施した。試験より取得したひずみ速度 100 s^{-1} から 1000 s^{-1} 近くまでの応力及びひずみの基礎データから各ひずみ速度に対応した引張り強さ、縦弾性係数、2%耐力について求め、基本データベースとして纏めた。また静強度試験と各ひずみ速度での真の応力ひずみ線図についても比較し、基本データベースとした。

1. まえがき

航空機の安全性向上をめざし、宇宙航空研究開発機構では、今までにYS-11の実機部分胴体垂直落下試験¹⁾²⁾及びMH-2000の実機水平落下衝撃試験を実施し、落下衝撃試験データの蓄積も進んでいる³⁾。一方、航空機構造が衝撃力を受ける際の変形や破壊様式をより精度良く解析するためには、そのアルミ合金等の使用材料のひずみ速度依存性、つまりひずみ速度により引張り強さ、縦弾性係数、応力ひずみ特性等の材料特性が変化するため、

衝突時の高ひずみ速度での材料特性を用いる事が重要となり、材料データベースが有れば非常に有用である。

ひずみ速度の試験法としては、ホプキンソン棒法が一般的に知られている⁴⁾。この方法ではひずみ速度は 1000 s^{-1} 以上が適しており⁵⁾、応力とひずみの関係で透過波を利用するため試験片は円柱形状⁶⁾が良いといわれている。しかし、航空機の構造部材では、円柱形状はほとんど無い。そのため、ここで用いる高速の油圧サーボ式試験法^{7,8,9)}は、航空機構造に一般的に使用されている

* 平成 25 年 1 月 7 日受付 (Received 7 January 2013)

*1 航空プログラムグループ 環境適合機体技術チーム

(Aviation Program Group Environmentally Compatible Airframe Technology Team)

*2 (財) 航空宇宙技術振興財団

(Foundation for Promotion of Japanese Aerospace Technology)

板材でそのまま試験が行え、航空機の衝突時に発生するひずみ速度 100s^{-1} から 1000s^{-1} 近くまで試験できる利点があるため、採用した。

今回、アルミ合金の高速歪速度依存性データベースを構築するため、基本的なものとして一般に航空機材料として使用されているアルミニウム合金 A2024-T3clad, A7075-T6clad 及び A5052, A6061 の 4 種類について、軽量化した高速引張り試験ジグによりひずみ速度 100s^{-1} から 1000s^{-1} 近くまで試験を実施した。用いた試験機は、インストロン社製の油圧サーボ式高速衝撃試験機 (Instron8500) である。本報告では静強度試験及び高速引張り試験より取得したひずみ速度 100s^{-1} から 1000s^{-1} 近くまでの応力及びひずみの基礎データから各ひずみ速度に対応した引張り強さ、縦弾性係数、2%耐力について求め、基本データベースとして纏めた。また、静強度試験と各ひずみ速度での真の応力ひずみ線図についても比較し、基本データベースとした。

2. 試験片

2.1 静強度試験片

静強度試験片の形状 (JIS 13A 号試験片) を図 1 に示す。試験片長さ 300mm とし、掴み部の長さ 40mm、幅 36mm 平行部長さ 180mm、幅 20mm とした。試験片は材料の圧延方向が引張り方向となるように切り出した。試験片は各材料 4 枚とした。各試験片の板厚 t と破壊評定部幅 b の詳細寸法を表 1 に示す。表 1 において試験片番号 Ac2024 は、A2024-T3clad であり Ac7075 は A7075-T6clad を表している。

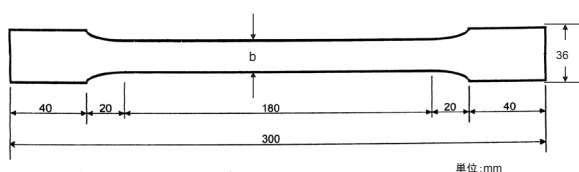


図 1 静強度試験片

2.2 高速引張り試験片

高速引張り試験片の形状を図 2 に示す。試験片の形状については、標準的なものは無く、掴みしろの長さ、荷重換算用ゲージの貼付等を考慮し、試験片長さ 120mm、幅 20mm とした。各試験片の板厚 t 、破壊評定部幅 b 及び試験片幅 B の詳細寸法を表 2 に示す。図 3 にゲージ貼付位置を示す。図中の破線は掴み部位置を示しており、掴み部の長さは 30mm、試験片の破壊評定部長さを 16mm、幅 10mm とした。図 3 に示すように、破断ひずみ値を検出するゲージ①、②には弾性域から塑性域までの約 10～15% の大ひずみ測定可能なゲージ長 2mm のゲージ (共和電業製 KFEL-2-120-C1-23L1 M2R) を破壊評定部中央表裏に、また、荷重換算用ゲージ (共和電業製 KFG-2-120-C1-23L1 M2R) ③、④は、掴みによる拘束の影響を受けないよう考慮して上チャックから 7mm 下の中央部分表裏に貼付した。

3. 静強度試験

3.1 試験装置

静強度試験は油圧サーボ式材料試験機 (Instron8802) を用い、掴み具チャックは、油圧式で試験中は一定圧力 (2000psi) で締め付けた。荷重は上部チャック上のロードセルで検出し荷重容量は 100kN である。試験機のアクチュエータストロークは、最大 100 mm である。

3.2 試験方法

静的引張り試験用の試験片には、図 1 に示した試験片破壊評定部の中央両面、引張り方向にひずみゲージ (共

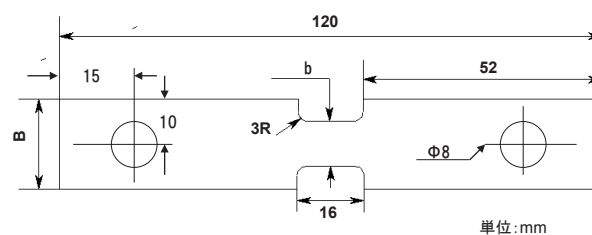


図 2 高速引張り試験片

表 1 静強度試験片の詳細寸法

試験片番号	t (mm)	b (mm)
A5052-1S	0.68	20.01
A5052-2S	0.68	20.02
A5052-3S	0.68	20.02
A5052-4S	0.68	20.01
試験片番号	t (mm)	b (mm)
Ac2024-1S	0.81	20.01
Ac2024-2S	0.81	20.01
Ac2024-3S	0.81	20.02
Ac2024-4S	0.81	20.02

試験片番号	t (mm)	b (mm)
A6061-1S	0.78	19.98
A6061-2S	0.78	19.99
A6061-3S	0.78	20.00
A6061-4S	0.78	20.01
試験片番号	t (mm)	b (mm)
Ac7075-1S	0.64	19.99
Ac7075-2S	0.64	19.99
Ac7075-3S	0.64	20.00
Ac7075-4S	0.64	20.00

表 2 製強度試験の結果

試験片番号	t (mm)	b (mm)	B (mm)	試験片番号	t (mm)	b (mm)	B (mm)
A5052-1	0.68	10.00	20.00	A6061-1	0.78	9.99	19.98
A5052-2	0.68	10.00	19.99	A6061-2	0.78	9.99	19.98
A5052-3	0.68	10.00	20.00	A6061-3	0.78	9.98	19.97
A5052-4	0.68	10.01	19.99	A6061-4	0.78	9.98	19.99
A5052-5	0.68	10.01	19.99	A6061-5	0.78	9.98	19.99
A5052-6	0.68	10.00	20.00	A6061-6	0.78	9.99	19.99
A5052-7	0.68	10.00	19.99	A6061-7	0.78	9.98	19.99
A5052-8	0.68	10.00	20.00	A6061-8	0.78	9.98	19.99
A5052-9	0.68	10.00	19.99	A6061-9	0.78	9.98	19.99
A5052-10	0.68	10.01	20.00	A6061-10	0.78	9.98	19.99
A5052-11	0.68	10.01	20.00	A6061-11	0.78	9.98	19.99
A5052-12	0.68	10.01	20.00	A6061-12	0.78	9.98	19.99
A5052-13	0.68	10.01	20.00	A6061-13	0.78	9.98	19.99
A5052-14	0.68	10.01	19.99	A6061-14	0.78	9.97	19.99
A5052-15	0.68	10.01	19.99	A6061-15	0.78	9.96	19.99
A5052-16	0.68	10.01	19.99	A6061-16	0.78	9.98	19.99
A5052-17	0.68	10.01	19.99	A6061-17	0.78	9.97	19.99
A5052-18	0.68	10.00	19.99	A6061-18	0.78	9.98	19.99
A5052-19	0.68	10.01	19.99	A6061-19	0.78	9.99	19.99
A5052-20	0.68	10.00	19.99	A6061-20	0.78	9.98	19.99

試験片番号	t (mm)	b (mm)	B (mm)	試験片番号	t (mm)	b (mm)	B (mm)
Ac2024-1	0.81	10.00	20.01	Ac7075-1	0.64	9.99	20.00
Ac2024-2	0.81	10.00	19.99	Ac7075-2	0.64	9.99	20.00
Ac2024-3	0.81	10.00	20.00	Ac7075-3	0.64	9.99	19.99
Ac2024-4	0.81	10.01	20.00	Ac7075-4	0.64	9.99	20.00
Ac2024-5	0.81	10.01	20.00	Ac7075-5	0.64	9.99	19.99
Ac2024-6	0.81	10.00	20.00	Ac7075-6	0.64	9.99	20.00
Ac2024-7	0.81	10.01	20.00	Ac7075-7	0.64	9.99	19.99
Ac2024-8	0.81	10.00	20.01	Ac7075-8	0.64	9.99	20.00
Ac2024-9	0.81	10.01	20.00	Ac7075-9	0.64	9.99	19.99
Ac2024-10	0.81	10.00	20.00	Ac7075-10	0.64	10.00	19.99
Ac2024-11	0.81	10.00	20.01	Ac7075-11	0.64	9.99	20.00
Ac2024-12	0.81	10.01	20.00	Ac7075-12	0.64	9.99	20.00
Ac2024-13	0.81	10.00	20.00	Ac7075-13	0.64	10.00	19.99
Ac2024-14	0.81	10.00	20.00	Ac7075-14	0.64	9.99	19.99
Ac2024-15	0.81	10.00	20.00	Ac7075-15	0.64	10.00	20.00
Ac2024-16	0.81	10.00	20.00	Ac7075-16	0.64	9.99	20.00
Ac2024-17	0.81	10.00	20.01	Ac7075-17	0.64	10.00	19.99
Ac2024-18	0.81	10.01	20.00	Ac7075-18	0.64	9.99	19.99
Ac2024-19	0.81	10.00	20.00	Ac7075-19	0.64	9.99	19.99
Ac2024-20	0.81	10.00	20.00	Ac7075-20	0.64	9.99	19.99

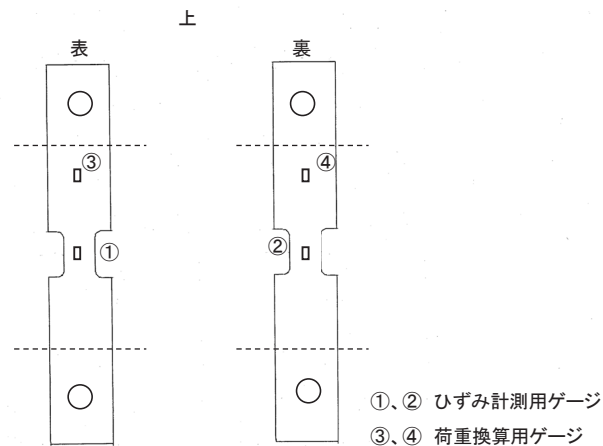


図 3 ゲージ位置

和電業製 KFG-2-120C1-23L1 M2R) を貼付し、1V を $5,000 \mu$ で設定し、最大 10V で $50,000 \mu$ の計測を可能とした。ひずみ値を求めるためのゲージ率の補正は、データ取得後、計測された値に 2.0/ゲージ率を掛けて行った。引張り荷重負荷は、引張り速度 2mm/min の変位制御で行った。

4. 高速引張り試験

4.1 試験装置

高速引張り試験は、油圧サーボ式高速衝撃試験機 (Instron8500) を用いた。試験装置の概要を図 4 に示す。試験では、アクチュエータロッドを高速で下方に引くことによりスライダ部を A 位置から B 位置へ 200mm 助走して加速し、下チャックを介して試験片に衝撃の引張り力を負荷する。本報告の試験以前のチャックは、試験片板厚 6mm まで試験可能な可変構造にしたため構造が複雑かつ重量が 4kg と重いものとなり、試験時の衝撃によりアクチュエータロッドの損傷を生じるため、軽量化したチャックを本試験では用いている。軽量化したチャックは、試験片板厚に対して可変ではなく各板厚ごとに使用するよう設計し、中央の径 8mm のボルトと 4 隅のボルトで試験片を締め付ける方式とした。軽量化したチャックの重量は、以前の重量の約 1/8 の 0.52kg となり、アクチュエータロッドを損傷することも無くなった。図 4 のチャックは、軽量化チャックである。

4.2 試験方法

本高速衝撃試験機は、電気・油圧サーボ制御で行い $0.0002\text{m/s} \sim 21\text{m/s}$ のアクチュエータ速度を制御が可能である。高速衝撃試験機からは荷重及びアクチュエータロッドの移動量等のデータを電圧出力として YOKOGAWA 製デジタルメモリ WE7000 で直接計測

し、ひずみ計測は、共和電業製シグナルコンディショナ (CDV-700A) でひずみ値に対する出力電圧を設定しデジタルメモリ WE7000 へ出力する。サンプリング間隔は、 $5 \mu \text{sec}$ とし、総データ数は 50,000 点でデータを取得した。試験速度は、アクチュエータの移動量をリニア可変差動トランス方式により電圧変換された値を時間で割って求め、図 5 の高速引張り荷重負荷前の速度データ 100 点を平均した値をその試験速度とした。破断ひずみ値を検出するゲージ①と②の出力電圧に対するひずみ値の設定は、1V を $5,000 \mu$ とし、最大 10V で $50,000 \mu$ の計測を可能とした。荷重換算用ゲージ③と④の出力電圧に対するひずみ値の設定は、1V を $2,000 \mu$ とした。ゲージ率の補正は、データ取得後、静強度試験と同様に実施した。

4.3 試験条件

航空機の事故時に発生すると想定されるひずみ速度 100s^{-1} から 1000s^{-1} 近くまでのデータ取得を目的とし、高速引張りの試験速度は 1.6m/s から 15.2m/s ($100\text{s}^{-1} \sim 950 \text{s}^{-1}$) で実施した。ひずみ速度は、文献 6 で推奨しているアクチュエータ移動速度を破壊評定のショルダ部を含む平行部長さで割った値を用いた。

4.4 荷重及びひずみ

図 6 にロードセルから得られた荷重を破線で、試験片に貼付したひずみゲージから換算した荷重を実線で示す。横軸は時間、縦軸が荷重である。ゲージから換算した荷重に比べロードセルから得られた荷重は、約 0.1ms の時間遅れが生じている。高速引張り試験での荷重は、試験片の表、裏に貼った荷重換算用ひずみゲージから得られたひずみの平均値を静強度試験で得られた縦弾性係数に荷重換算用ゲージのひずみ値と断面積を掛けた値を用い

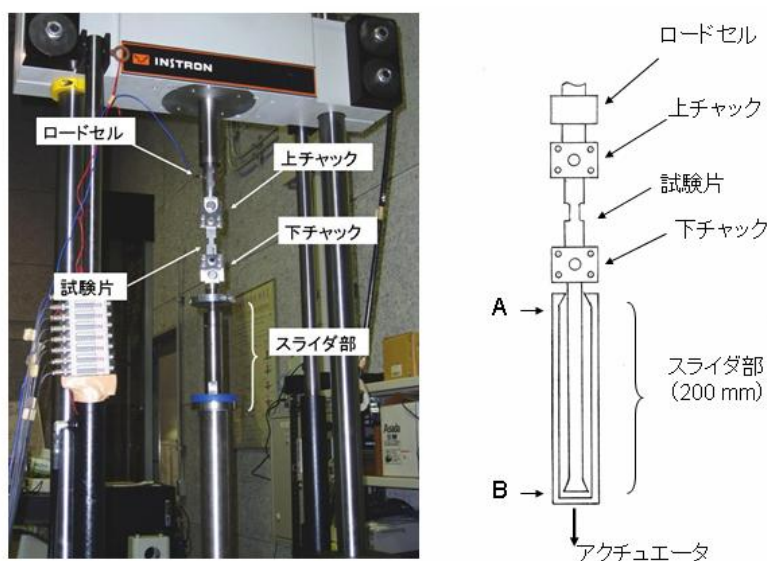


図 4 試験装置の概要

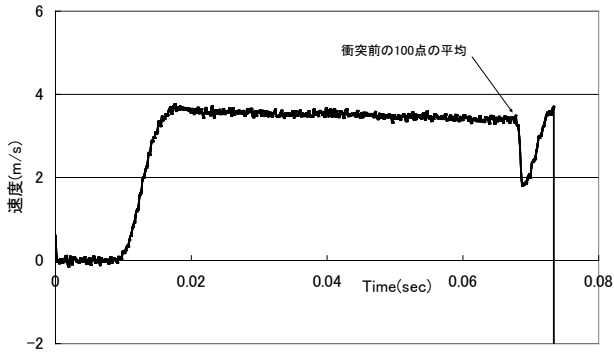


図5 速度の時刻歴線図

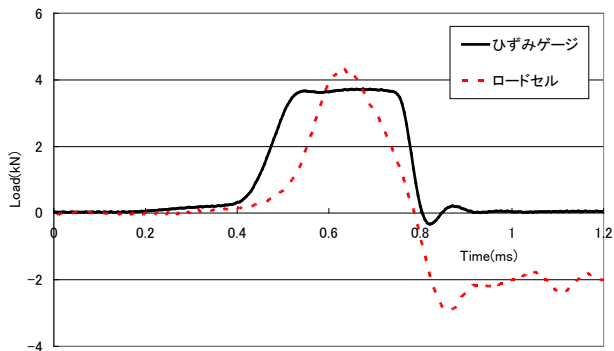


図6 荷重の時刻歴線図

た¹⁰⁾。ひずみの値は、破壊評定部の表、裏に貼った値の平均値を用いた。

本データベースでは荷重換算用ゲージから得られた荷重は、破壊評定部のひずみの1つ後のサンプリングデータとなる。なぜなら、アルミニウム試験片の下方から上方に応力波が約5,000m/sで伝わり、この試験片ではひずみ測定用のゲージと荷重換算用のゲージとの距離が23mmで、伝播時間が約5 μ sで1サンプリング間隔に相当するからである。

5. 特性値の換算方法

5.1 公称引張り強さ

公称引張り強さ σ_n は、次式により算出した。

$$\sigma_n = P_n / A \quad (1)$$

ここで、 P_n は最大荷重、 A :試験片の断面積である。データベースのデータを容易に有効利用するためには、汎用解析ソフトに入力できることが望ましい。例えば、汎用非線形構造解析ソフトLS-DYNAではひずみ速度に対応した応力-ひずみ線図を真の応力及び真のひずみで入力する必要があるため、静強度試験及び高速引張り試験を含む全ての試験において、以下の式により真の応力及び真のひずみに変換した。

$$\sigma_t = \sigma_n (1 + \varepsilon_n) \quad (2)$$

$$\varepsilon_t = l_n (1 + \varepsilon_n) \quad (3)$$

ここで、 σ_t :真の応力

ε_t :真のひずみ

σ_n :公称応力

ε_n :公称ひずみ

5.2 縦弾性係数

縦弾性係数 E については、真の応力-ひずみ線図における初期($\varepsilon = 0.05 \sim 0.25\%$)の部分の傾きから算出した。

5.3 0.2% 耐力

0.2%耐力は図7に示すように真の応力-ひずみ線図の0.2%ひずみ値から縦弾性係数 E に平行な線を引いて真の応力-ひずみ曲線と交わった値を0.2%耐力とした。

6. 試験結果

6.1 静強度試験結果

A2024-T3clad、A7075-T6clad、A5052及びA6061についての静強度試験から得られた引張り強さ、縦弾性係数及び0.2%耐力の結果を表3に示す。荷重は、油圧サーボ式材料試験機のロードセルから得られた値を用い、応力は、その荷重を表1の板厚 t と幅 b の積から求めた断面積で割って求め、ひずみは、試験片中央の裏と表に貼付したゲージの平均値を用いた。図8の各材料についての真の応力-ひずみ線図は、式(2),(3)を用いて求めた。縦弾性係数算出に対応する500 μ から2,500 μ では、線が重なっており、各材料でそれぞれ4本の結果に差異は無いと言える。

6.2 高速引張り試験結果

A2024-T3clad、A7075-T6clad、A5052及びA6061についての高速引張り試験から得られたひずみ速度と引張り強さ、縦弾性係数の関係及び0.2%耐力の結果を表4に示す。表4において、 V はアクチュエータの移動速度、 V_ε はひずみ速度である。表4のA5052の結果において、縦弾性係数 E 及び0.2%耐力で値が不定なのは、縦弾性係数

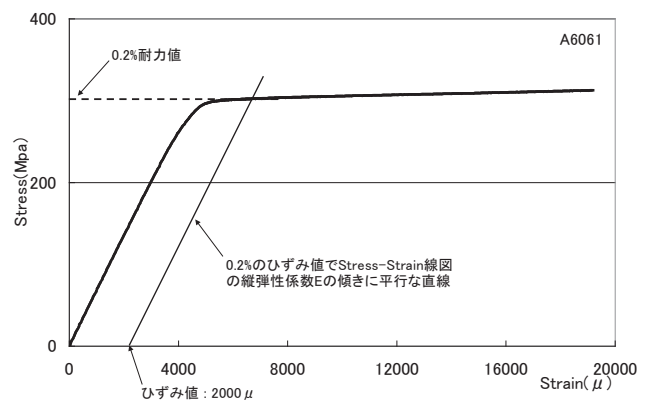


図7 0.2%耐力の算出

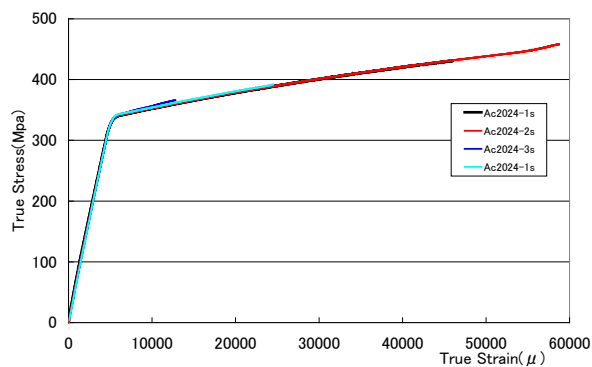
表 3 高速引張り試験片の詳細寸法

試験片番号	縦弾性係数 (GPa)	引張り強さ (MPa)	0.2% 耐力 (MPa)
A5052-1S	68.0	265	212
A5052-2S	68.3	261	212
A5052-3S	69.4	265	215
A5052-4S	69.1	267	215
平均値	68.7	265	214

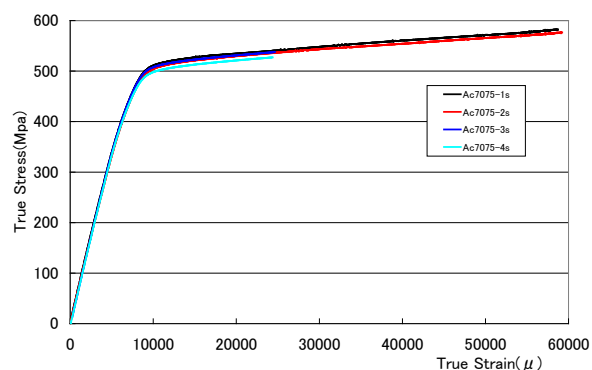
試験片番号	縦弾性係数 (GPa)	引張り強さ (MPa)	0.2% 耐力 (MPa)
A6061-1S	69.0	359	307
A6061-2S	68.9	349	305
A6061-3S	70.2	348	304
A6061-4S	70.6	348	304
平均値	69.7	351	305

試験片番号	縦弾性係数 (GPa)	引張り強さ (MPa)	0.2% 耐力 (MPa)
Ac2024-1S	67.4	480	343
Ac2024-2S	67.4	483	347
Ac2024-3S	67.7	465	346
Ac2024-4S	67.8	471	343
平均値	67.6	475	345

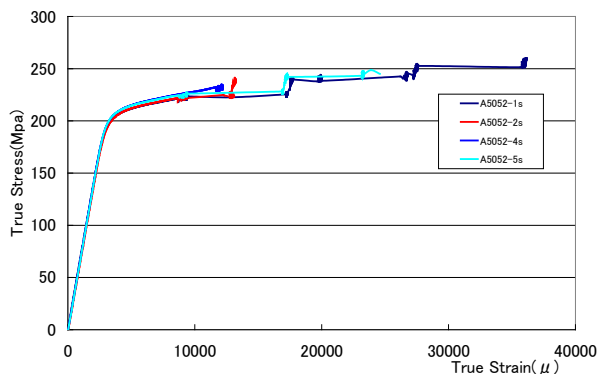
試験片番号	縦弾性係数 (GPa)	引張り強さ (MPa)	0.2% 耐力 (MPa)
Ac7075-1S	69.6	587	509
Ac7075-2S	68.2	578	500
Ac7075-3S	70.4	561	500
Ac7075-4S	69.1	550	490
平均値	69.3	569	500



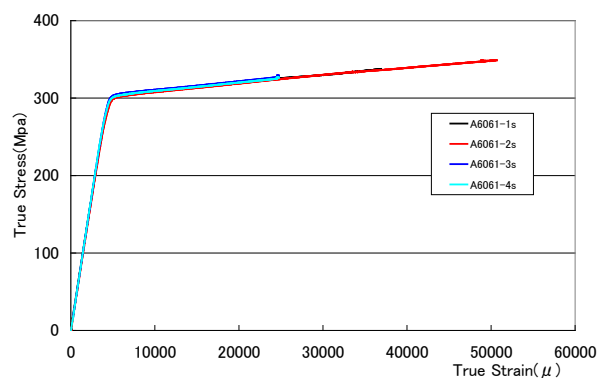
(1) A2024-T3clad



(2) A7075-T6clad



(3) A5052



(4) A6061

図 8 真の応力 - ひずみ線図

表 4 高速引張り試験の結果

試験片番号	V(m/s)	$V \cdot \epsilon$ (1/s)	E (GPa)	引張り強さ (Mpa)	0.2% 耐力 (Mpa)
A5052-1	3.4	213	71.1	270	216
A5052-2	3.3	206	76.5	269	223
A5052-3	6.8	425	69.9	280	219
A5052-4	6.9	431	70.8	268	215
A5052-5	3.6	225	70.7	277	227
A5052-6	10.6	663	65.1	272	211
A5052-7	13.2	825	***	291	***
A5052-8	3.6	225	74.9	271	227
A5052-9	10.6	663	***	292	***
A5052-10	13.1	819	***	279	***
A5052-11	7.3	456	72.5	277	224
A5052-12	7.2	450	80.2	289	227
A5052-13	13.1	819	***	288	***
A5052-14	13.9	869	***	283	***
A5052-15	13.7	856	66.5	272	203
A5052-16	15.2	950	***	281	***
A5052-17	12.8	800	76.1	278	209
A5052-18	13.5	844	69.9	279	200
A5052-19	13.0	813	***	288	***
A5052-20	13.3	831	***	285	***

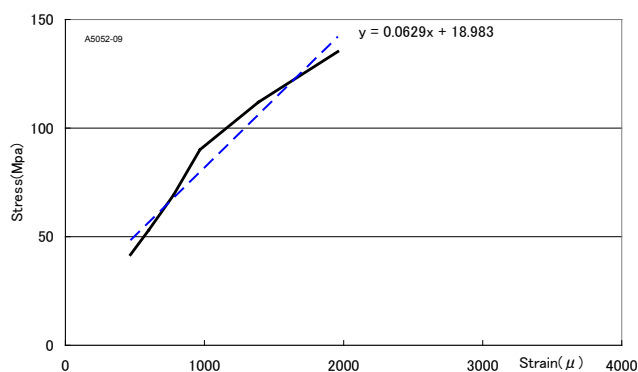
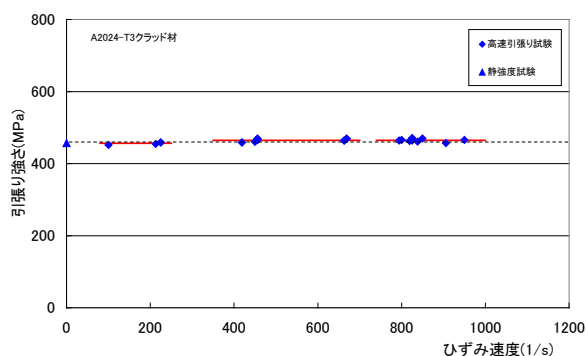
試験片番号	V(m/s)	$V \cdot \epsilon$ (1/s)	E (GPa)	引張り強さ (Mpa)	0.2% 耐力 (Mpa)
A6061-1	3.3	206	78.5	386	316
A6061-2	3.4	213	74.7	390	323
A6061-3	6.7	419	75.2	389	319
A6061-4	6.8	425	75.7	388	309
A6061-5	3.6	225	80.4	387	337
A6061-6	10.6	663	79.9	394	305
A6061-7	13.2	825	82.0	419	305
A6061-8	3.6	225	81.4	398	348
A6061-9	10.7	669	78.5	418	291
A6061-10	12.2	763	82.5	398	314
A6061-11	7.3	451	87.5	400	338
A6061-12	7.3	451	90.4	402	316
A6061-13	12.5	781	80.4	398	309
A6061-14	12.9	806	80.8	397	284
A6061-15	13.1	819	79.8	392	311
A6061-16	15.1	944	83.5	404	307
A6061-17	12.8	800	86.2	400	323
A6061-18	13.3	831	75.6	385	282
A6061-19	13.1	819	80.6	403	286
A6061-20	13.2	825	82.5	400	289

を確定する $\epsilon = 0.05 \sim 0.25\%$ の部分が非線形になっているためである。図 9 は、 $\epsilon = 0.05 \sim 0.25\%$ の部分での試験片 A5052-09 の応力とひずみの関係が非線形になることを示している。図中、実線が応力とひずみの試験結果であり、破線はその一次近似線で、試験結果が非線形となっている。表 4 より、A5052 の $\epsilon = 0.05 \sim 0.25\%$ の間で非線形になっているものは *** で表しており、ひずみ速度で見ると 400 s^{-1} 以上 700 s^{-1} 未満で 1 個であり 700 s^{-1} 以上では 7 個である。これは A5052 は、高ひずみ速度では他の材料に比べ降伏点が低く、小さな歪で降伏するた

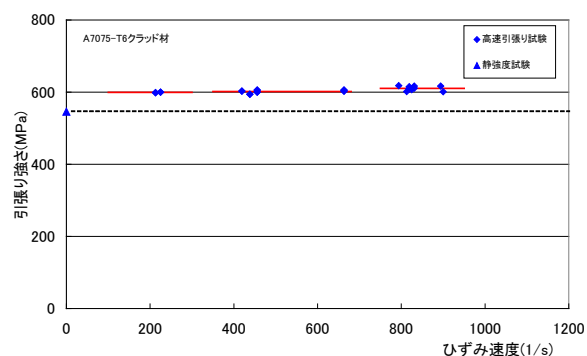
めと考えられる。

6.3 ひずみ速度と引張り強さ

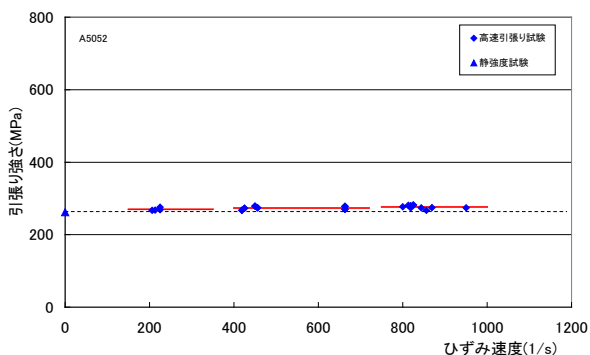
図 10 に A2024-T3clad、A7075-T6clad、A5052 及び A6061 についてひずみ速度と引張り強さの関係を示す。図中、三角が静強度試験の結果で、ひし形が高速引張り試験の結果である。赤い実線は、左からひずみ速度が 400 s^{-1} 未満、 400 s^{-1} 以上 700 s^{-1} 未満、 700 s^{-1} 以上での引張り強さの平均値である。図中、右下の表は静強度試験、 400 s^{-1} 未満、 400 s^{-1} 以上 700 s^{-1} 未満、 700 s^{-1} 以上

図 9 $\varepsilon = 0.05 \sim 0.25\%$ で非線形状態

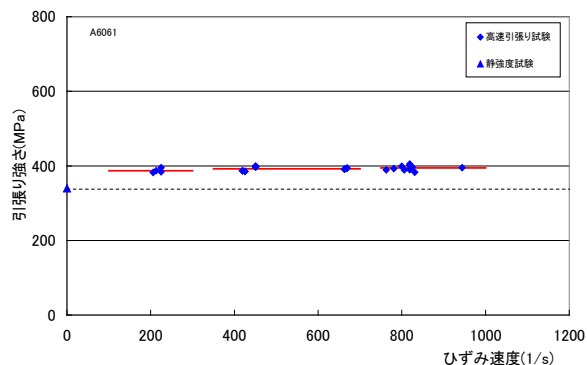
(1) A2024-T3clad



(2) A7075-T6clad



(3) A5052



(4) A6061

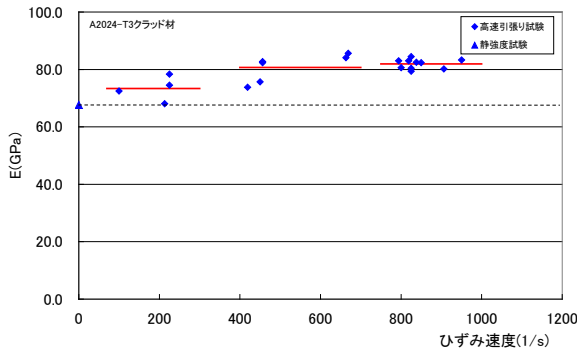
図 10 ひずみ速度と引張り強さの関係

での引張り強さの平均値を示しており、カッコ内の値は静強度試験の値に対する比率を表している。A2024-T3clad、A7075-T6clad、A5052 及び A6061 全てでひずみ速度が高くなると引張り強さも増加する傾向がある。また、A2024-T3clad と A5052 は、引張り強さの平均値が最大で静強度試験の結果に比べそれぞれ 1.7%、5.5% と僅かであるが大きく、A7075-T6clad と A6061 は、それぞれ 11.8%、15.9% とかなり大きい値を示している。

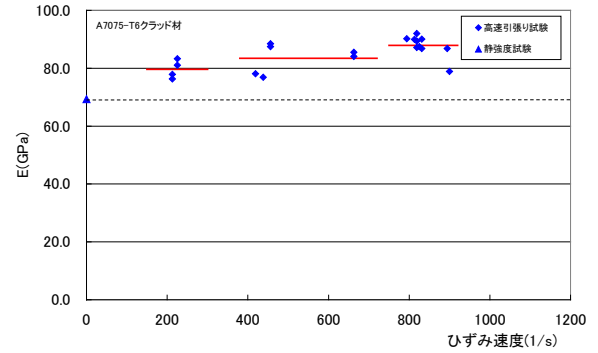
6.4 ひずみ速度と縦弾性係数

図 11 に A2024-T3clad、A7075-T6clad、A5052 及び

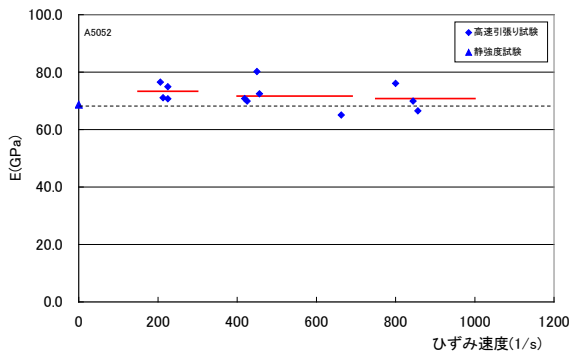
A6061 について、ひずみ速度と縦弾性係数の関係を示す。図中の記号は図 10 と同じである。図中、右下の表は、静強度試験、400 s⁻¹ 未満、400 s⁻¹ 以上 700 s⁻¹ 未満、700 s⁻¹ 以上での縦弾性係数の平均値を示しており、カッコ内の値は、静強度試験の値に対する比率を表している。A2024-T3clad、A7075-T6clad 及び A6061 は、静強度試験の結果に比べひずみ速度が高くなると縦弾性係数も増加する傾向があり、それぞれ最大で静強度試験の結果より 21.2%、26.8% 及び 16.8% と大きい。一方、A5052 は、高ひずみ速度で縦弾性係数が僅かに低くなる傾向となっている。しかし、ひずみ速度 700 s⁻¹ 以上で縦弾性係数を



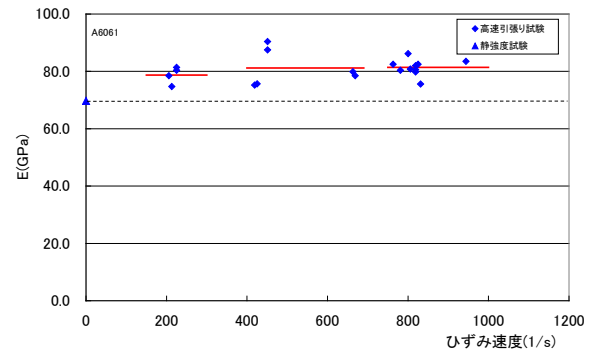
(1) A2024-T3clad



(2) A7075-T6clad



(3) A5052



(4) A6061

図 11 ひずみ速度と縦弾性係数の関係

確定する $\varepsilon = 0.05 \sim 0.25\%$ の部分が非線形になっているデータが他 3 つの材料に比べて多く、高いひずみ速度でのデータ数が少ないため、有為な傾向とは言えない。

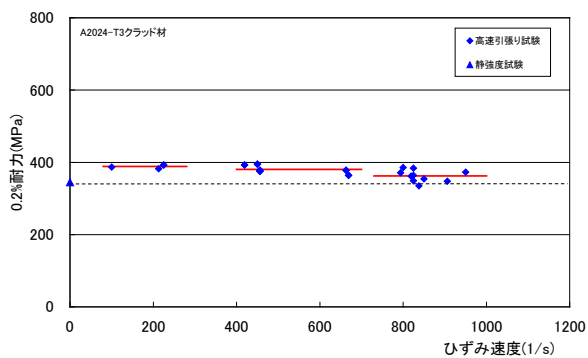
6.5 ひずみ速度と 0.2% 耐力

図 12 に A2024-T3clad、A7075-T6clad、A5052 及び A6061 についてひずみ速度と 0.2% 耐力の関係を示す。図中の記号は図 10 と同じである。図中、右下の表は静強度試験、 400 s^{-1} 未満、 400 s^{-1} 以上 700 s^{-1} 未満、 700 s^{-1} 以上での 0.2% 耐力の平均値を示しており、カッコ内の値は静強度試験の値に対する比率を表している。A5052、A6061、A2024-T3clad 及び A7075-T6clad いずれもひずみ速度が高くなると 0.2% 耐力が低くなる傾向がある。A5052、A6061 の 0.2% 耐力の値は、ひずみ速度 700 s^{-1} 以上で僅かではあるが静強度試験の値より低くなっている。

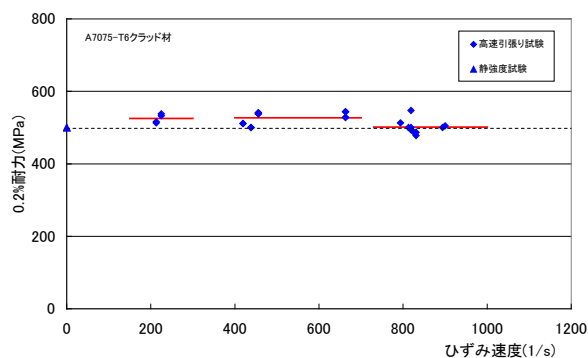
6.6 各ひずみ速度に対応した代表的真の応力 - ひずみ線図

図 13-1 から図 13-4 に A2024-T3clad、A7075-T6clad、A5052 及び A6061 についての各ひずみ速度に対応した真の応力 - ひずみ線図を示す。各材料についての真の応力 - ひずみ線図は、式 (2),(3) を用いて求めた。図中、カッコ内の値はひずみ速度を表している。黒の太い実線は、

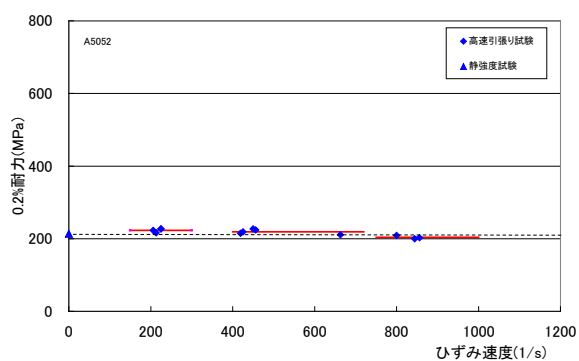
代表的な静強度試験の結果であり、その他の色の線はカッコ内のひずみ速度での結果である。いずれの結果もひずみ値が $10,000 \mu$ から $20,000 \mu$ での降伏後の応力は静強度の値より高くなっている。また、ひずみ速度が高いほど降伏点が出にくくなる傾向がある。なお、図 13-1 および図 13-2 の一部で $20,000 \mu$ から $30,000 \mu$ で応力ひずみ線が止まっているのは、破壊評定部に貼ったひずみゲージが高速引張りの衝撃で破断前に剥れたために、破断応力までのひずみ値が計測されていないためである。図中、丸印が付いているのは剥がれずにひずみが計測されたもので破断ひずみを表していると想定される。



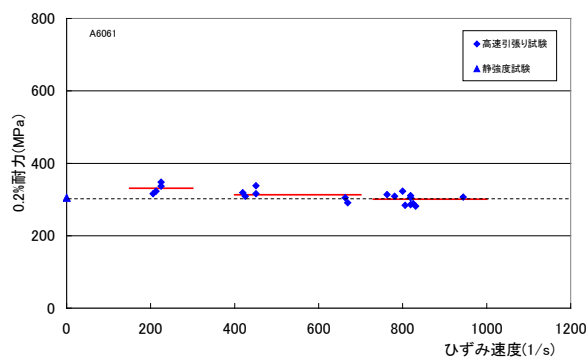
(1) A2024-T3clad



(2) A7075-T6clad

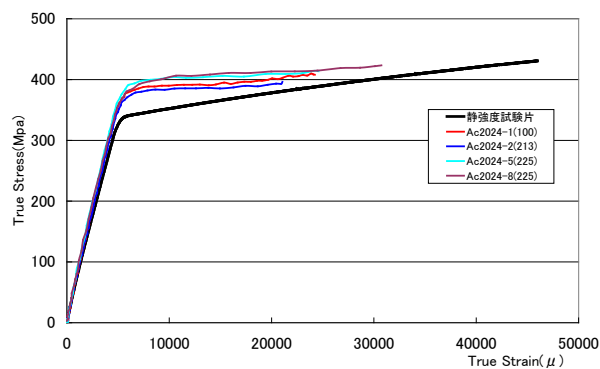


(3) A5052

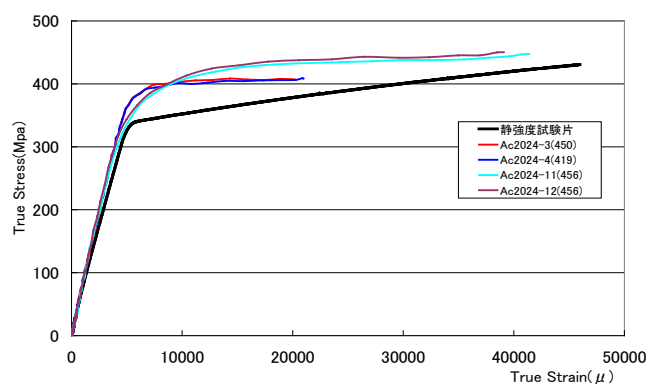


(4) A6061

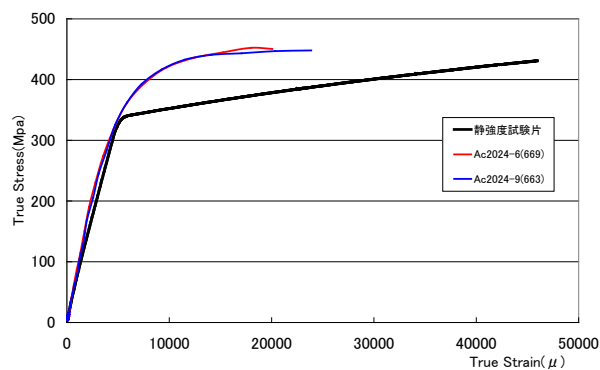
図 12 ひずみ速度と 0.2%耐力の関係



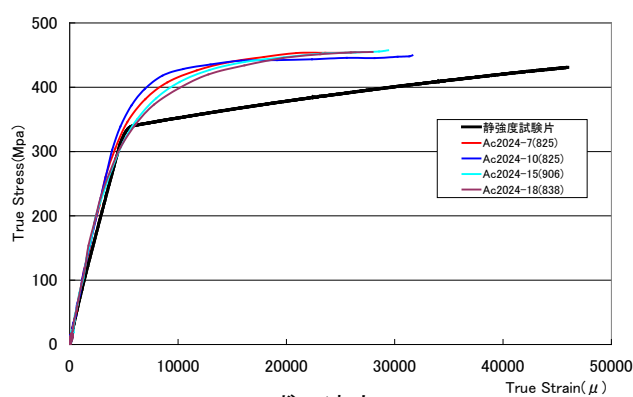
(a) ひずみ速度 100~225



(b) ひずみ速度 419~456

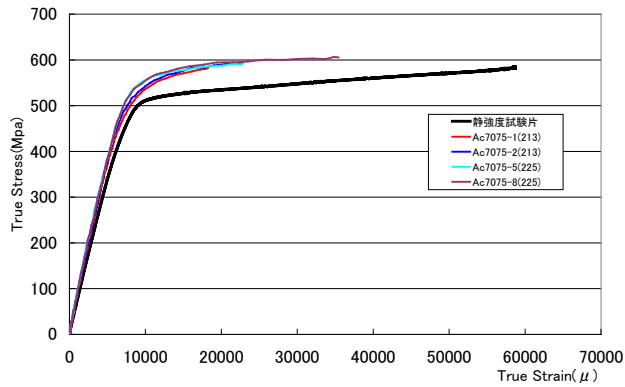


(c) ひずみ速度 663~669

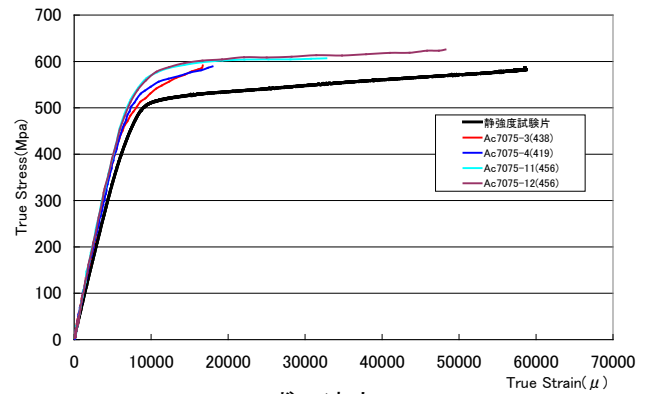


(d) ひずみ速度 825~906

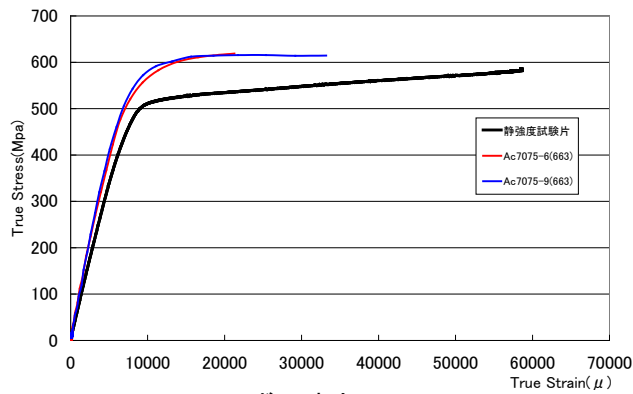
図 13-1 各ひずみ速度に対応した真の応力 - ひずみ線図 (Ac2024)



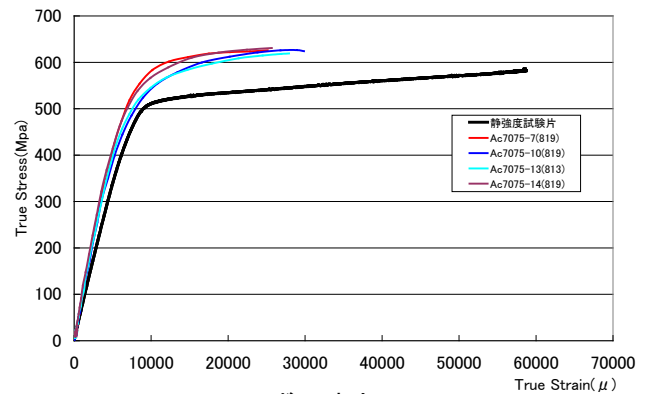
(a) ひずみ速度 213~225



(b) ひずみ速度 419~456

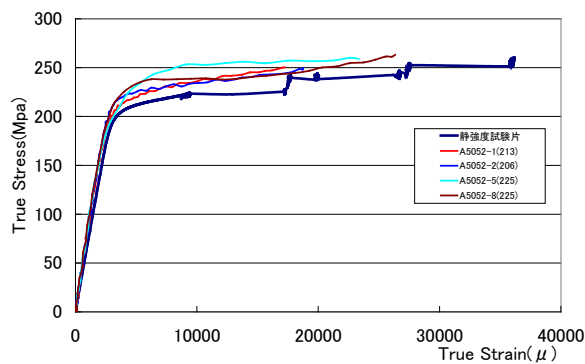


(c) ひずみ速度 663

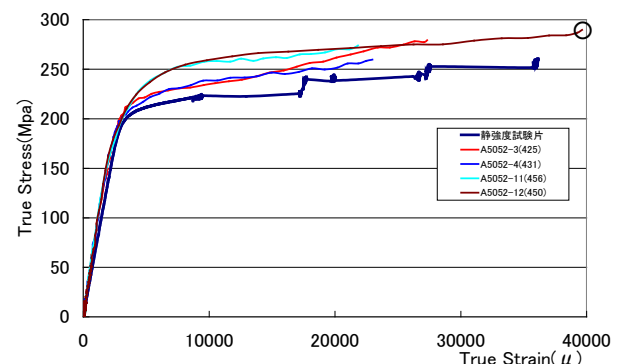


(d) ひずみ速度 813~819

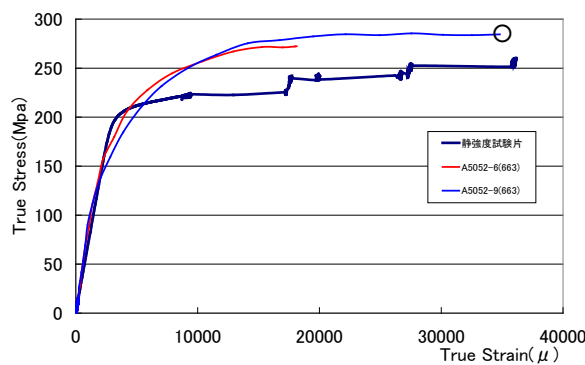
図 13-2 各ひずみ速度に対応した真の応力 - ひずみ線図 (Ac7075)



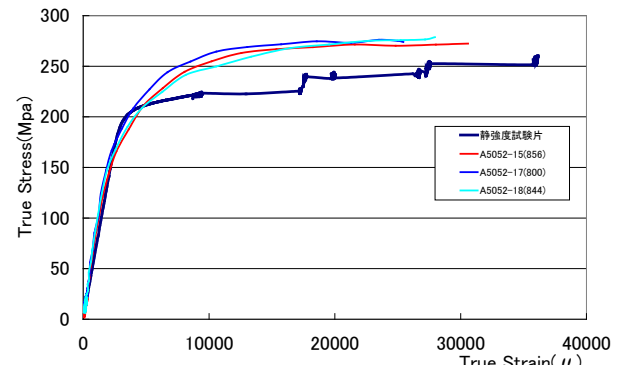
(a) ひずみ速度 206~225



(b) ひずみ速度 425~456

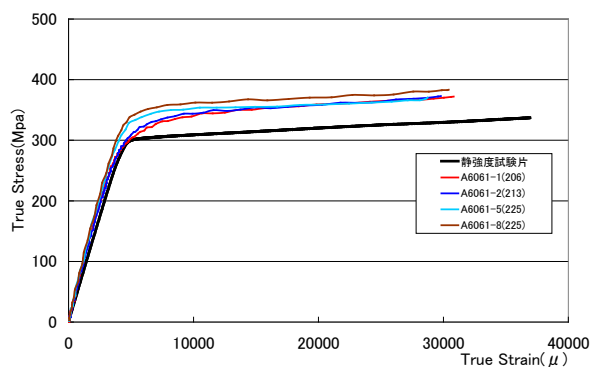


(c) ひずみ速度 663

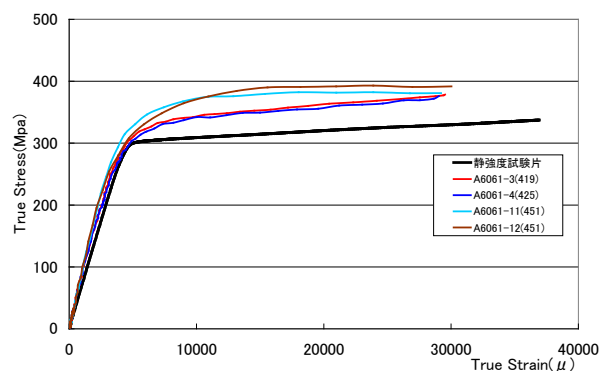


(d) ひずみ速度 800~856

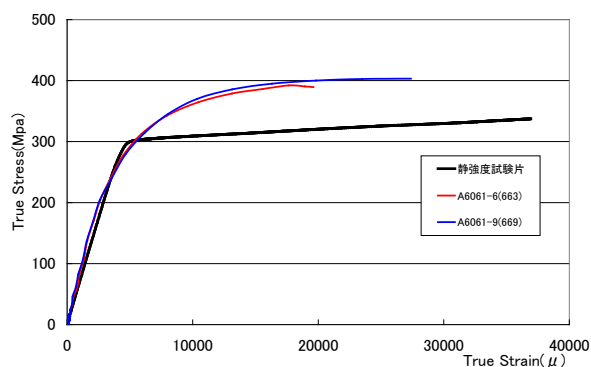
図 13-3 各ひずみ速度に対応した真の応力 - ひずみ線図 (A5052)



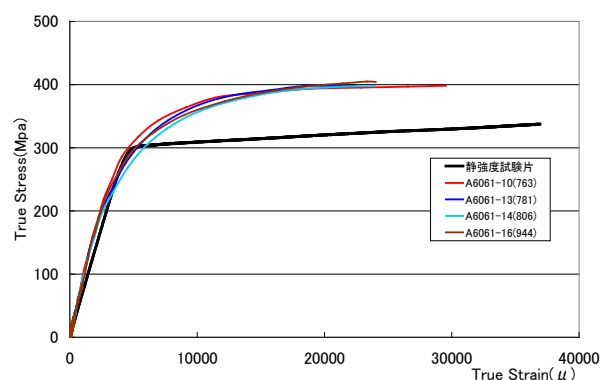
(a) ひずみ速度 206~225



(b) ひずみ速度 419~451



(c) ひずみ速度 663~669



(d) ひずみ速度 763~944

図 13-4 各ひずみ速度に対応した真の応力 - ひずみ線図 (A6061)

7. まとめ

一般に航空機材料として使用されている A7075-T6clad、A2024-T3clad、A5052 及び A6061 の 4 種類のアルミニウム合金について、ひずみ速度 100 s^{-1} から 1000 s^{-1} 近くまでの高速引張り試験を実施し、以下の結論を得た。

- (1) 引張り強さとひずみ速度の関係は、静強度試験の結果に比べ A7075-T6clad、A5052 及び A6061 については、ひずみ速度が高いほど高くなる傾向があるが A2024-T3clad はほとんど変化がない。
- (2) 縦弾性係数は、4 種類の材料全てで静強度試験の結果より高速引張り試験の結果の方が大きい。A2024-T3clad、A7075-T6clad 及び A6061 ひずみ速度が高くなると増大する傾向があるが A5052 は逆に僅かに低下する傾向がある。
- (3) 0.2% 耐力は、A2024-T3clad、A7075-T6clad、A5052 及び A6061 の全てでひずみ速度が高くなると低くなる傾向がある。
- (4) 高速引張り試験の真の応力値は、A2024-T3clad、A7075-T6clad、A5052 及び A6061 の全ての材料でひずみ値の $10,000 \mu$ から $20,000 \mu$ の領域において静強度の値より高く、最大応力値も高くなっている。

る。また、ひずみ速度が高いほど降伏点が出にくくなる傾向がある。

8. 謝意

本試験で使用した高速引張り試験用のジグ製作に当たり、(株) 石原製作所の河野哲也氏に多大なご協力を戴いた。ここに深く感謝致します。

参考文献

- 1) 峯岸正勝、岩崎和夫、熊倉郁夫、少路宏和、吉本周生、寺田博之、指熊裕史、磯江 暁、山岡俊洋、片山範明、林 徹、赤楚哲也：YS-11 型機胴体構造の落下衝撃試験 (その1) 日本航空宇宙学会論文集, Vol51, No594, 2003 年 7 月、pp354-363
- 2) 岩崎和夫、峯岸正勝、少路宏和、宮木博光、吉本周生、寺田博之、熊倉郁夫、片山範明、林 徹、小坂英之、赤楚哲也、磯江 暁、山岡俊洋：YS-11 型機胴体構造の落下衝撃試験 (その2) 日本航空宇宙学会論文集、Vol51, No599, 2003 年 12 月、pp675-682
- 3) 岩崎和夫、峯岸正勝、熊倉郁夫、宮木博光、吉本周生、町田 茂、高崎浩一、少路宏和、松本浩至、阿部健一郎：ヘリコプタ実機落下衝撃試験の計測結果について、第 46 回構造強度に関する講演会講演集、2004 年 8 月、pp108-110
- 4) (社) 日本鉄鋼協会：自動車用材料の高速変形に関する研究会成果報告書、2001 年 3 月
- 5) 前 博行、高田賢治、高橋順一、山本敏治：樹脂材料の常温での非線形ひずみ速度依存性挙動について：実験の考察、Honda R & D Technical Review, Vol.16 No1(April 2004)
- 6) Michael Borsutzki, Dominique Cornette, Yukihsa Kuriyama, Akihiro Uenishi, Benda Yan, Ed Opbroek. Recommendations for Dynamic Tensile Testing of Sheet Steels, International Iron and Steel Institute, August 2005.
- 7) 岩崎和夫、宮木博光、少路宏和、熊倉郁夫、峯岸正勝：航空機用アルミニウム合金の高速引張りひずみ特性、第 47 回構造強度に関する講演会講演集、2005 年 7 月、pp287-289
- 8) 岩崎和夫、宮木博光、少路宏和、峯岸正勝：航空機用アルミニウム合金のひずみ速度依存性データ取得試験について、第 45 回飛行機シンポジウム講演集、2007 年 10 月、pp1128-1132
- 9) 岩崎和夫、宮木博光、少路宏和、峯岸正勝：航空機用アルミニウム合金のひずみ高速データベース、第 50 回構造強度に関する講演会講演集、2008 年 7 月、pp43-45
- 10) 杉浦信康、小林俊郎、山本 勇、西戸誠志、林 勝三：AC4CH-T6 アルミニウム合金鋳物の衝撃引張特性値のひずみ速度依存性、軽金属 Vol.45, No11 (1995), pp638-642

