

Ti-6Al-4V合金の室温から250℃までの応力-ひずみ曲線の計測

内野 正和*¹ 山田 圭一*¹

Measurement of Stress Strain Curve of Ti -6Al-4V Alloy from Room Temperature to 250 degrees

Masakazu Uchino and Keiichi Yamada

チタン合金は極低温から600℃程度まで他の素材に比べ比強度に優れるという特徴を持つことから航空機部品等に広く用いられるが、チタンの強度特性はひずみ速度と温度環境に依存性を持つことが知られている。そこで本研究では、64チタン(64Ti)についてひずみ速度と温度環境をパラメータとした応力-ひずみ線図の取得を目的とし、加熱炉を付属する材料試験機とデジタル画像相関法(DIC)を組み合わせた計測法で室温から250℃までの引張計測を実施した。その結果、引張試験時においてDICによる高温環境下でのひずみ計測手法を確立し、64Tiのひずみ速度と温度環境に依存する強度特性を計測した。

1 はじめに

航空機部品には純チタンやチタン合金が多く用いられているが、強度特性はひずみ速度と温度環境に依存性がある¹⁻³⁾。この特性を評価するためには高温環境でひずみを計測する必要がある。ひずみ計測はひずみゲージを用いた計測が一般的であるが、通常のひずみゲージは80℃まで、それ以上の温度環境では高温用のひずみゲージが必要で、接着方法も特殊となる。また10%を超えるようなひずみ領域の計測はできない。接触式の伸び計もあるが、定型の計測法で汎用性が低く、高温用は装置が大型となる。また試験片との接触部のズレによる計測誤差の問題もある。一方で、近年、デジタル画像を用いてひずみ分布計測が可能なデジタル画像相関法(DIC)⁴⁾が普及している。DICは基本的に測定物表面の変位を計測する手法である。変位の計測精度は1画素の数10分の1程度のため、変位は撮影する画像の大きさに依存する。例えば1画素が1mmの場合、計測精度が1/50とすると0.05mmが計測分解能となる。この分解能で10μのひずみを評価するためにはひずみの基となる基長は5000mm(0.05mm/10μ)となり、ひずみを評価するための計測精度は十分ではない。しかしながらDICは画像全体にわたって変位を評価することが可能である。1点では不十分であるが多数点を評価し、平均化などの後処理を実施することで計測精度を補うことが可能である。本研究では、加熱

炉を付属する材料試験機とDICを組み合わせた計測手法で64チタン(64Ti)について室温から250℃までの引張試験計測を実施し、ひずみ速度と温度環境をパラメータとした応力-ひずみ曲線の取得を目指す。

2 実験方法

2-1 DICによる計測法

DICはデジタル画像を利用した非接触の変位分布計測手法である⁴⁾。図1にデジタルカメラで撮影した試料表面の画像を示す。試料表面には白と黒のスプレーでランダム模様がつけてあり、このランダム模様を基に表面の変位分布を計測する手法である。具体的には初期画像内に基準となるサブセット(数10画素角程度)を決め、変形などを与えた後の比較画像内でこのサブセットに近い輝度値分布を探索し、この輝度値分布の中心位置と初期画像中のサブセット中心位置から移動量(変位)を求める。サブセットは任意に画像中から選択できるため分布計測が可能で、評価にはデジタル画像のみを使用するため簡便な手法である。

図2に今回実施した引張試験の全体図を示す。引張

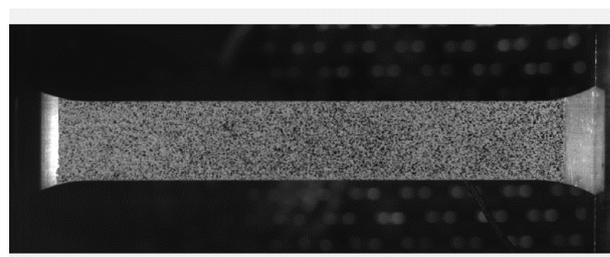


図1 試験片のデジタル画像

*1 機械電子研究所

試験機は島津製作所製のAG-100 k NX，加熱炉は島津製作所製のTCE-N300，DICの計測はGOM社製のARAMISを使用している。また加熱炉にある観察用の窓は幅60 mm，高さ300 mm程度と狭いため加熱炉を使用する場合は1台のカメラ（画素）で計測を実施する。1台のカメラによる計測ではカメラと試料を正対させる必要があり，カメラは3軸，回転，傾斜が可能なステージ上に固定し，最適な位置で固定できるようにしている。

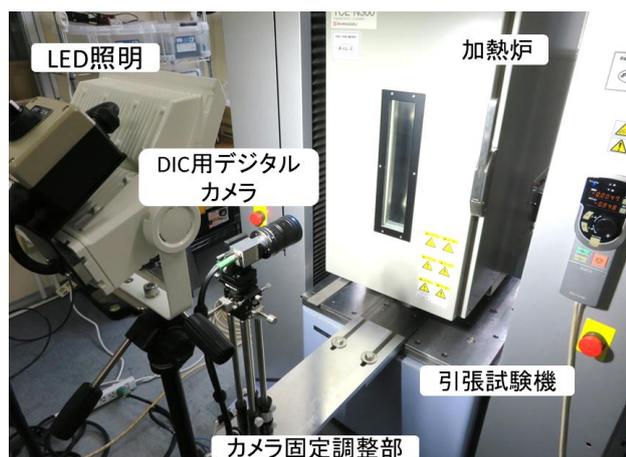


図2 DICによる計測風景

2-2 DICを用いた引張試験

今回使用した試験片形状はJIS 13Bで平行部の長さ70 mm，幅12.5 mm，厚み1 mmで，ワイヤー放電加工で作製した。引張試験は，室温，80，150，200，250 °Cの環境温度で，引張速度を0.01，0.1，1 mm/sの3種類で実施した。

次に，DICを用いた引張試験の計測手順を以下に示す。試料表面に艶消し白のスプレー塗料を塗布し，ある程度乾いたところで艶消し黒のスプレー塗料で斑点模様を付ける。塗料が硬化しすぎると塑性変形中にスプレーが剥離するため，完全には硬化しない状態で試験を実施することが破断まで計測を実施する上で重要である。斑点模様のサイズは数ピクセル程度である。引張試験時は試験実施中，時系列に試験片表面のデジタル画像を取り込む。その際，試験機からの荷重データを併せて取り込み，荷重データと関連付けている。なお，ARAMISでは試験中に画像の取り込み枚数を変えることが可能で，微細な変形情報が必要な弾性域は枚数を多く，詳細な情報が必要とならない塑性域は少なく，破断直前などは多くするなどし，解析時間の短縮

や計測データの効率化が可能である。試験終了後，DICにてひずみ評価を行う。ARAMISには予め応力-ひずみ曲線やヤング率，ポアソン比などを評価するツールが用意されており，それを活用した。

3 評価結果

図3は引張速度が0.1 mm/s，室温（22 °C）の環境温度で64Tiを応力-ひずみ線図を計測した例で，破断までのひずみが得られているのが分かる。ヤング率を求める範囲を200-600 MPaと設定，ヤング率は115.6 GPaとなった。0.2 %耐力は約980 MPa，引張強さは1021.6 MPaとなった。これらの値は製造メーカーが公表している数値と同等の結果であった¹⁾⁵⁾⁶⁾。図4は引張速度を0.1 mm/sで，異なる試験環境温度で得られた応力-ひずみ線図の計測例である。試験環境温度が高く

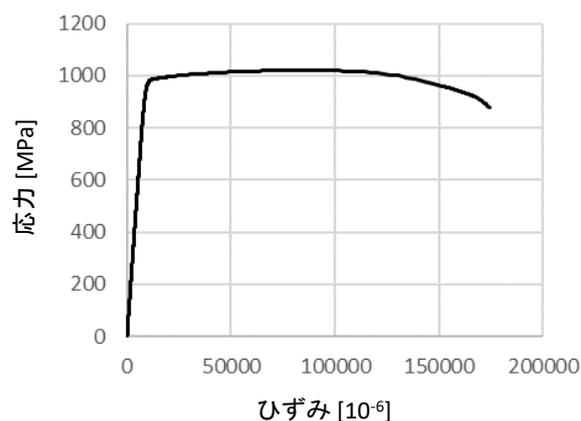


図3 64Tiの応力-ひずみ線図（引張速度：0.1 mm/s，試験環境温度22 °C）

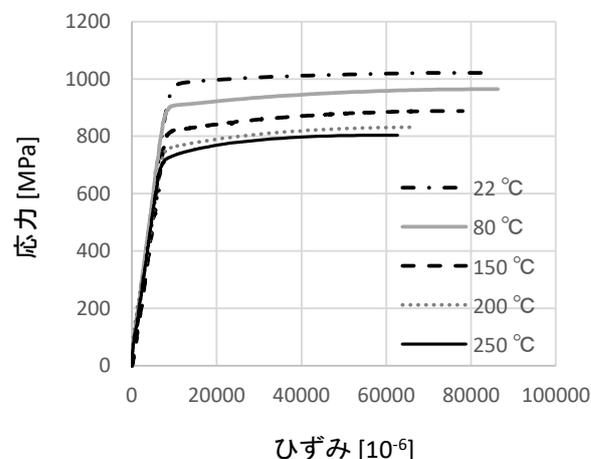


図4 64Tiの試験環境温度別の応力-ひずみ線図（引張速度0.1 mm/s）

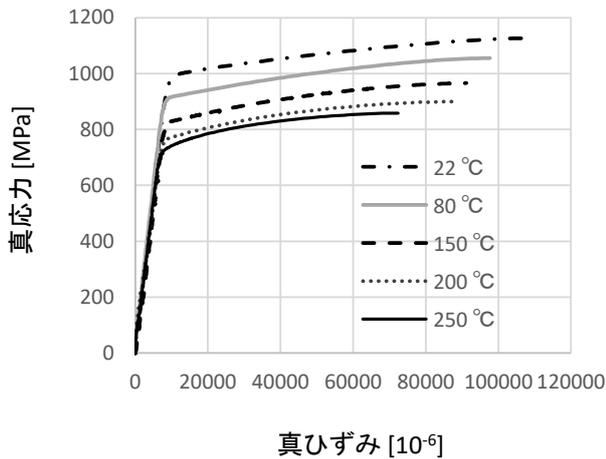


図5 64Ti の試験環境温度別の真応力-真ひずみ線図
(引張速度 0.1 mm/s)

なるにつれて応力-ひずみ線図が下側に推移しており、温度上昇とともに降伏点、引張強さが低下することが確認できた。これはチタンの強度が温度に依存し、温度が高くなると強度が低下していることを示している。図5は図4の結果を基に、真応力-真ひずみ線図を求めた結果で、構造解析における弾塑性解析で使用するための材料物性値となる。ひずみゲージはひずみ計測で最もよく利用されているが、10%を超えるような塑性変形計測用のひずみゲージは80℃までの計測は可能であるが、それ以上の温度での計測は対応できない。また高温用のひずみゲージは10%を超えるようなひずみ計測はできない。今回使用したDICでは環境温度250℃でも10%を超えるようなひずみ計測が可能であり、高温下での応力-ひずみ線図を計測するための有効な計測手法であることが確認できた。

表1に今回実施した引張試験の結果を示す。図6は表1の結果より引張速度0.1 mm/sの時の引張強さの温度依存性をまとめた結果である。200℃までは引張強さがほぼ線形に低下するが、250℃では低下が緩やかになる特徴がみられる。図7は表1の結果全てについて縦軸に引張強さ、横軸に引張速度でまとめたものである。試験環境温度の違いが区別できるようにしている。室温から200℃までは引張速度が速いほど引張強さが大きい結果が得られており、ひずみ速度が速いほど強度が強くなる結果が得られている。一方で、250℃の環境温度では引張速度0.01 mm/sの引張強さが最も大きな値となり、室温から200℃での結果と

表1 試験結果

	試験速度 [mm/s]	試験温度 [°C]	引張強さ [MPa]
1	0.01	16	1,028.0
2	0.1	16	1,033.6
3	1	16	1,053.3
4	1	17	1,051.0
5	0.1	22	1,020.1
6	0.1	22	1,021.6
7	0.1	22	1,025.7
8	0.1	22	1,024.0
9	0.1	28	1,016.1
10	0.1	28	1,017.1
11	0.01	80	953.6
12	0.1	80	961.5
13	1	80	972.6
14	0.01	150	876.3
15	0.01	150	876.0
16	0.1	150	885.4
17	0.1	150	883.2
18	1	150	898.0
19	1	150	900.4
20	0.01	200	826.0
21	0.01	200	828.8
22	0.1	200	832.4
23	0.1	200	833.9
24	1	200	846.2
25	1	200	847.0
26	1	200	843.9
27	0.01	250	810.0
28	0.01	250	809.8
29	0.1	250	804.7
30	0.1	250	797.8
31	1	250	801.2
32	1	250	807.9

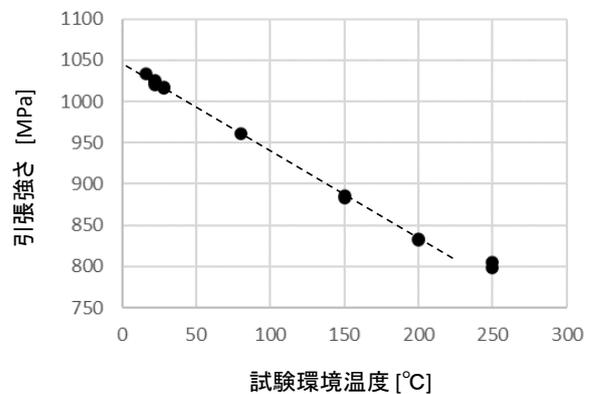


図6 64Ti の試験環境試験温度の違いによる引張強さの比較結果 (引張速度 0.1 mm/s)

異なる。試験終了後、250 °Cの環境温度では、200 °Cまでの試験片では見られなかった試料表面の酸化が観察されており、この酸化が250 °Cでの引張強さに影響を及ぼしているのではないかと推測されるが、現時点では明確にはなっていない。

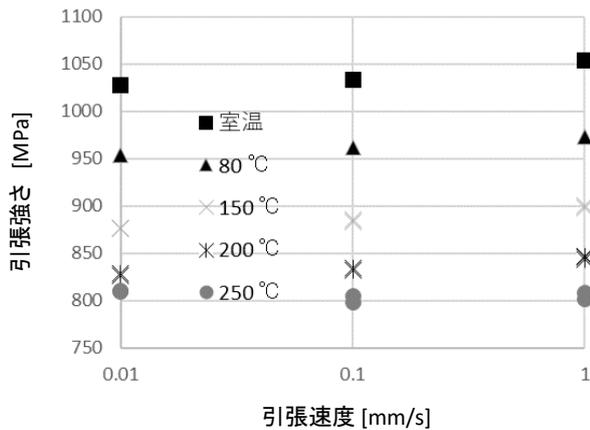


図7 64Tiの試験環境温度別の引張速度の違いによる引張強さの比較結果

4 まとめ

64Tiについてひずみ速度と温度環境をパラメータとした応力-ひずみ線図を取得するため既存の加熱炉を付属する材料試験機とDICを組み合わせた計測手法で室温から250 °Cまでの計測を実施し、DICによる高温環境下で応力-ひずみ計測手法を確立した。また以下の知見が得られた。

- ・試験環境温度として室温から250 °Cで引張試験を実施し、温度が高くなるにつれて降伏点、引張強さが低くなる強度の温度依存性を確かめた。
- ・引張速度が0.01, 0.1, 1 mm/sの試験条件で引張試験を実施し、環境温度200 °Cまではひずみ速度が速くなるにつれて降伏点、引張強さが高くなる強度のひずみ速度依存性を確かめた。ただし、試験環境温度250 °Cでは明確なひずみ速度依存性が得られなかった。理由として表面の酸化の影響があり、今後の検討課題となった。

最後に、これら本研究で得られた知見はデータベース化することで、県内企業の航空機産業参入のための技術試験を実施する。

5 参考文献

- 1) 稲垣育宏, 武智勉, 白井善久, 有安望: 新日鉄住金技報, 396号, pp.23-28 (2013)
- 2) 守谷英明, 長井寿, 河部義邦, 岡田厚正: 鉄と鋼, 82巻, 10号, pp.78-82(1996)
- 3) 小川鉄也, 野島武敏: 材料, 37巻, 421号, pp.41-47 (1988)
- 4) M. A. Sutton, S. R. McNeill, J. D. Helen, and Y. J. Chao: Photomechanics Topics in Applied Physics, Springer-Verlag, vol.77, pp.323-372 (2000)
- 5) 一般社団法人 日本チタン協会ホームページ「技術情報物理的性質」http://www.titan-japan.com/technology/physical_properties.html
- 6) KOBELCO ホームページ「チタンの特性詳細データ」<https://www.kobelco.co.jp/products/titan/files/details.pdf>