

## 高温下でのSUS304モデル突起の\* 変形特性に関する研究

新田 勇\*\*

下田 茂\*\*

加藤 康司\*\*\*

STUDY ON THE DEFORMING PROPERTIES OF THE MODEL ASPERITY  
OF SUS304 AT ELEVATED TEMPERATURES

Isami NITTA, Shigeru SHIMODA, and Kohji KATO

In this paper, the deforming properties of the model asperity of SUS304 were researched experimentally at elevated temperatures when the asperity was flattened by a flat punch. The shape of the asperity was a two-dimensional wedge. The asperity angle  $2\theta$  was  $100^\circ, 120^\circ, 140^\circ$  or  $160^\circ$ , and the temperature range was from  $200^\circ\text{C}$  to  $600^\circ\text{C}$ . The load to flatten the asperity was constant throughout the experiment. Two ways of loading were adopted to flatten the asperity with a flat punch: one was that the asperity was flattened again at an elevated temperature after being flattened at room temperature; and the other was that the asperity was flattened only at an elevated temperature. The former is called the condition of loading at room temperature and the latter is called the condition of not loading at room temperature. The deformation of the asperity increased with a rise in the temperature. The deformation under the condition of not loading at room temperature was larger than the one under the condition of loading at room temperature. The real contact pressure decreased with an increase of the asperity angle. The deforming properties are discussed in more detail.

Key Words: Tribology, Welding, Asperity, Workhardening, Real Contact Pressure, Real Contact Area, Creep, Diffusion Bonding, Contact Mechanism, Elevated Temperature

### 1. 緒言

一般に機械構造部品には、機械加工の際の表面微小突起、うねりが存在する。これらが機械構造物の剛性を低下させることに関しては、R.H.Thornleyら<sup>(1)</sup>の研究を走り、その後の研究が行われてきている。塚田ら<sup>(2)</sup>、久門ら<sup>(3)</sup>も表面微小突起が機械構造物の剛性に与える影響を知るために突起の変形を解析している。しかし、いずれも室温における突起の変形が前提であり、温度変化に伴う突起変形特性の変化については明かにされていない。

一方、拡散接合においても突起の変形特性は重要である。これまでは突起の形状と接触面積の関係を調べた大橋ら<sup>(4)</sup>や、表面あざと酸化膜破断の関係を調べた円城ら<sup>(5)</sup>の研究がある。今後さらに拡散接合の技術を向上させるためには、加工硬化等を考慮した接触面積の正確な予測が必要になる。さらに突起の変形特性と接合強度との関係をより詳細に明らかにするためには、高温における接触領域のひずみを知らなければならぬ。

そこで本論文では、高温中でよく使用されるステンレス鋼SUS304の突起の垂直変形に及ぼす突起形状の影響の基礎的データを得るために、4種類の頂角を持つくさび形突起試験片を用い、一定荷重の下2種類の負荷方法で突起の垂直変形量を測定した。

2種類の負荷方法とは、剛体平面で突起を押し潰した後除荷し、 $200^\circ\text{C}$ ~ $600^\circ\text{C}$ のある温度で再負荷するものと、最初から $200^\circ\text{C}$ ~ $600^\circ\text{C}$ のある温度で突起を押し潰すものである。そして、突起の頂角、温度及び負荷方法が突起の垂直変形に及ぼす影響について実験的に検討した。

### 2. 実験

試験片材料は、ステンレス鋼SUS304である。その成分を表1に、又試験片の形状及び寸法を図1に示す。

突起は図1に示す様にくさび形であり、頂角 $2\theta$ は $100^\circ$ 、 $120^\circ$ 、 $140^\circ$ 、 $160^\circ$ の4種類とした。実験装置の概略を図2に示す。変位計として、あざ計のセンサー(小坂研究所製)の先に石英ガラス棒(直

\* 昭和61年8月26日 北陸信越支部信越地方(長野)講演会において講演、原稿受付 昭和60年11月13日。

\*\* 正員、新潟大学工学部(〒950-21 新潟市五十嵐 8050)。\*\*\* 正員、東北大学工学部(〒980 仙台市荒巻字青葉)。

径1.5mm) を付けたものを2個③④使用した。この論文でいう変位とは、これらの変位計による変位の差すなわち相対変位を意味する。すべての実験で荷重は7.07kN一定とし、実験温度は200℃、400℃、600℃の3種類とした。加熱は電気ヒータで行い試験片の両側に溶接した熱電対をセンサーとして温度制御を行った。電気ヒータのふく射熱を防ぐために熱電対はセラミックスでコーティングした。炉の一部に変位測定用の穴をあけたために試験片の両端で温度差が生じたが、その温度差は全温度域でほぼ20℃であった。

本実験では2種類の負荷方法を試みた。一つは、室温で一定荷重を加えて突起を押し潰した後除荷し、その状態で温度を所定の温度に上昇させ、試験片の温

度を安定させるためにその温度に5分間保持した後再負荷を行うものである。もう一つは、無負荷状態で温度を所定の温度に上昇させその温度に5分間保持した後、一定荷重を加えるものである。本論文では、前者を室温負荷の実験、後者を室温無負荷の実験と呼ぶ。実験時間は3時間とした。実験後押し潰された突起の写真を撮り、それからプランメータにより接触面積を求めた。又、くさび形突起の奥行き方向の真中を切断してその断面内の突起下の組織の観察を行った。

### 3. 実験結果

突起の変形が時間と共にどの様に進むかを見るために、一例として図3に頂角120°の試験片の時間に対する変形量を示した。図を作成するにあたっては、試験片をセットした状態を変位0とし、また試験片の温度を安定させる為の保持時間5分は削除した。図中の実線は室温負荷の場合を表し、破線は室温無負荷の場合を表す。時間0の所で室温負荷と室温無負荷の場合で変形量に差があるが、これは室温で負荷を与えたことの影響であると考えられる。変形が落ち着くまでの変形量の増加率は、同一温度で比べた場合室温無負荷の方が大きかった。

すべての場合に対して変形量は15分後までには落ち着きそれ以降本実験の実験範囲内の180分まではほとんど増加しなかった。そこで本研究では、180分後の変形量をそれぞれの条件での変形量の代表値であると考えたことにした。図4は横軸に頂角 $2\theta$ 、縦軸に

表1 SUS304の成分表(%)

Chemical Components of SUS304(%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
0.06	0.46	1.08	0.33	0.19	8.23	18.25

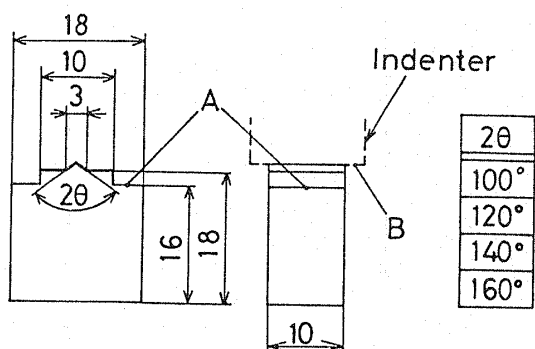


図1 試験片

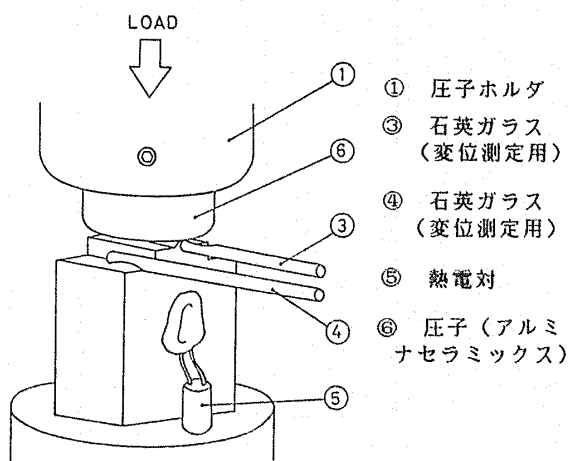


図2 実験装置概略

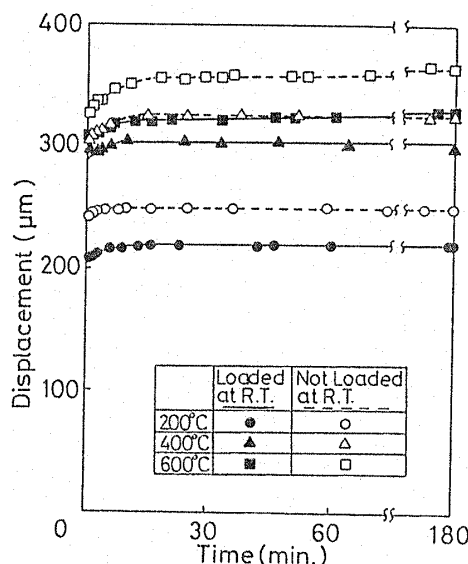


図3 変形量と時間の関係

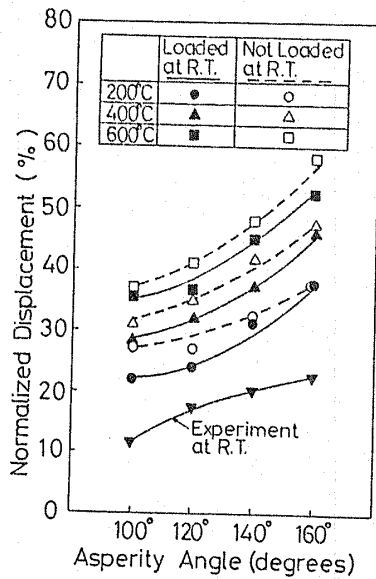


図4 正規化された変形量と頂角の関係

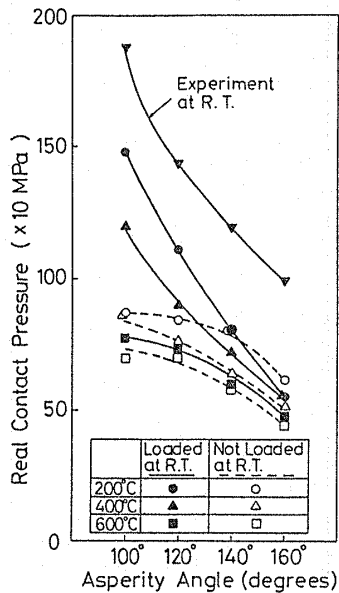
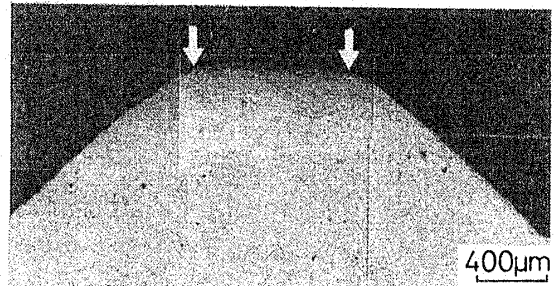
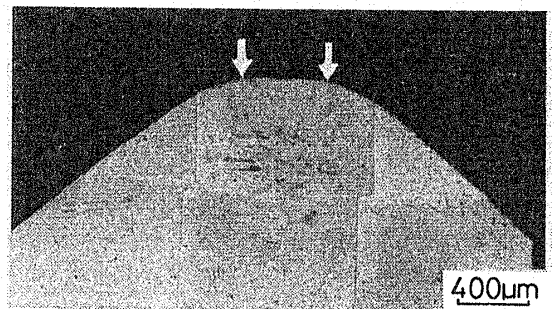


図5 接触圧力と頂角の関係

実験前の突起の高さで正規化された変形量を取って各実験の180分後の変位をプロットしたものである。図には室温のみの実験値も示してある。正規化された変形量は頂角が大きくなるに従って、また温度が高くなるに従って大きくなる傾向にある。同一温度、同一頂角において室温負荷の場合と室温無負荷の場合を比べると、一般に室温無負荷の場合の方が正規化された変形量は大きい。変形量が多く、そのため測定誤差が相対的に小さくなる頂角100°の所で、室温負荷と室温無負荷の場合の正規化された変形量の差を見

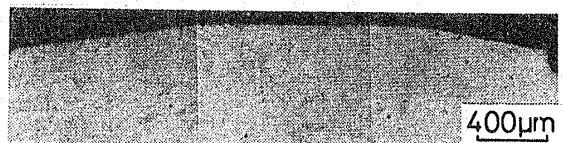


(a) 200°C 2θ=100° Not Loaded at R.T.

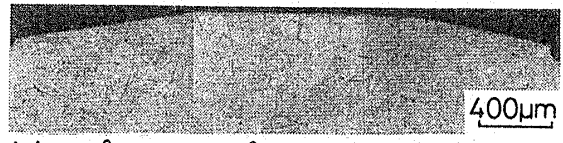


(b) 200°C 2θ=100° Loaded at R.T.

図6 突起断面の腐食写真



(a) 200°C 2θ=160° Not Loaded at R.T.



(b) 200°C 2θ=160° Loaded at R.T.

図7 突起断面の腐食写真

てみると、温度が高くなるにつれてその差は小さくなる傾向がある。このことより、室温で与えた変形が高温での変形に及ぼす影響の大きさは、温度が高くなるにつれて小さくなってゆくと考えられる。

図5は接触圧力と頂角の関係を示したものである。図には室温のみの実験値も示してある。この図より接触圧力は頂角が大きくなるに従ってまた温度が高くなるに従って小さくなるのが分る。同一温度、同一頂角において、室温負荷の場合と室温無負荷の場合を比べると、一般に室温無負荷の場合の方が接触圧力が小さい。また、高温になるに従って接触圧力に及ぼす室温で与えた変形による影響は小さくなるのが分る。

図6(a)、6(b)は温度200°C、頂角100°のそれぞれ

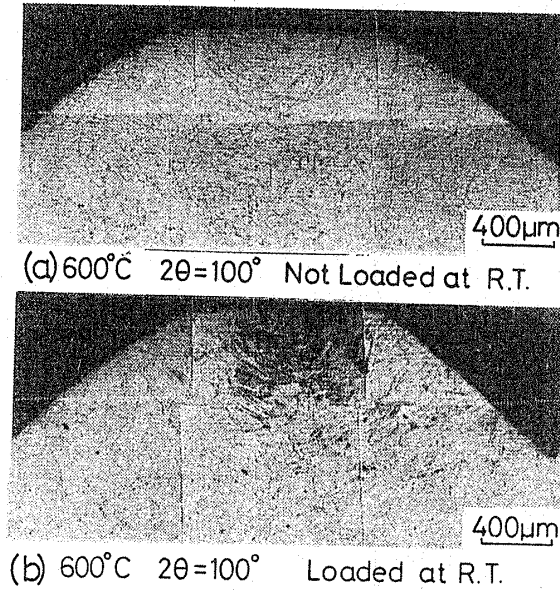


図8 突起断面の腐食写真

室温無負荷と室温負荷の場合の突起の長手方向中央の断面の写真である。 図中の2つの白矢印の間が接触部である。 図6(a)の室温無負荷の場合、突起は平坦化された結果その断面形状は三角形から台形にかわる。 図6(b)の室温負荷の場合は、室温無負荷の場合と同様断面形状は台形にかわるが、その上底の両端は丸みを帯びていて、室温で与えた変形が200°Cでの変形に影響を与えていることが分る。

図7(a)、7(b)はそれぞれ温度200°C、頂角160°の室温無負荷と室温負荷の場合の断面写真である。 この場合は図7(a)、7(b)とも断面の形状における差異はなく、頂角が大きくなるに従って室温で与えた変形が高温での変形に与える影響は小さくなること分る。

図8(a)、図8(b)はそれぞれ温度600°C、頂角100°の室温無負荷と室温負荷の場合の断面写真である。 この場合も図8(a)、図8(b)ともに断面の形状における差異はほとんど無い。 従って頂角が100°であっても高温になるに従って室温で与えた変形が高温での変形に与える影響は小さくなること分る。

#### 4. 考察

SUS304は、ある温度以下で変形を与えるとマルテンサイト変態を起こす性質がある。 室温負荷の場合は、突起押し潰しによる変形の歪に加えてこの加工誘起マルテンサイト変態歪も加わって室温無負荷に比べて歪が大きくなると考えられる。 図8(b)で平坦化された部分の下の黒味がかっている部分がマルテンサイト変態した部分である。 同一温度、頂角で比べた場

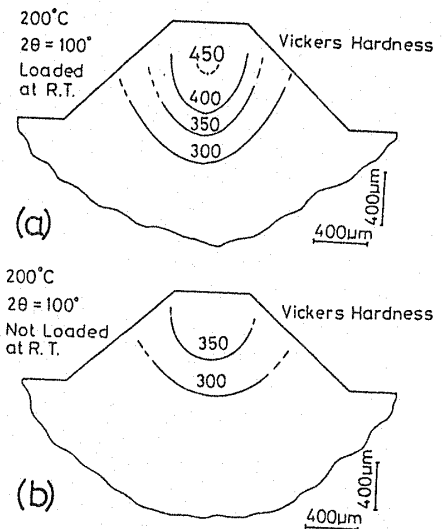


図9 突起断面内のピッカース硬さ分布

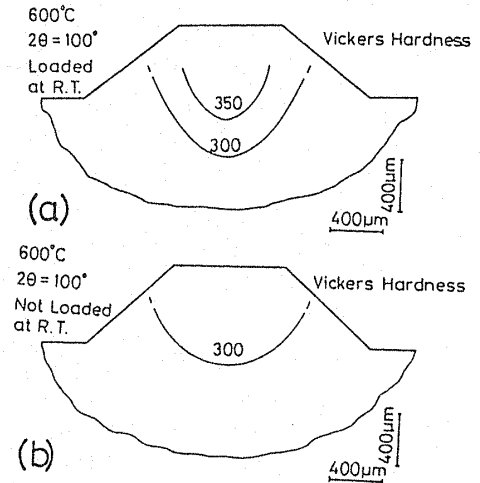


図10 突起断面内のピッカース硬さ分布

合、変形量は室温負荷の場合の方が室温無負荷の場合より小さくなったが、これは室温負荷の場合は変形による歪の他に加工誘起マルテンサイト変態歪が生じてより強く変形を妨げている為と考えられる。

拡散接合を行う場合には、加圧してから加熱する方法と加熱してから加圧する方法、または加圧と加熱の両方を同時に行う方法と三通りが考えられる。 前二者が拡散接合を行う場合の両極端な接合方法であると考えて、本実験では室温負荷と室温無負荷の条件で実験を行った。

さらに負荷方法の影響が温度によってどの様に変化するかを調べるために、突起断面内のピッカース硬さを測定した。 図9(a)、(b)はそれぞれ温度200°C

頂角 $100^\circ$ の室温無負荷と室温負荷の実験における突起断面内のピッカース硬さ分布を示したものである。

図中の実線はピッカース硬さが同じ場所を結んだものであり、以下では等硬さ線と呼ぶ。母材の硬さはほぼHv(200g)225であった。これらの図を比較すると室温負荷の方が硬さ値は大きく、等硬さ線の曲率も大きいことが分る。室温負荷の場合は変形による歪に加えて前述のマルテンサイト変態歪も加わるために、室温無負荷よりも硬さが大きくなると考えられる。

図10(a)、(b)はそれぞれ温度 $600^\circ\text{C}$ 、頂角 $100^\circ$ の室温無負荷と室温負荷の場合の等硬さ線図である。どちらの場合も突起が平坦化された部分の近くでは、 $200^\circ\text{C}$ の場合に比べて硬さが減少しており、 $600^\circ\text{C}$ において高ひずみ域でひずみの回復が起っていることを示している。従って温度 $600^\circ\text{C}$ の場合で室温無負荷と室温負荷の場合で実験結果にあまり差が出なかつたのは、高ひずみ域でのひずみの回復が起つたためと考えられる。

M.G.Nicholasら<sup>(6)</sup>は、種々のひずみを与えた試験片で拡散接合の実験を行いひずみが大きい程接合可能温度が低下することを報告している。本実験の結果より頂角の小さい突起の室温負荷の条件では、突起の平坦化による歪は大きくなり、従って頂角の小さい突起を利用することにより拡散接合はより低温側で可能になると考えられる。しかし、頂角を小さくすると接合界面のポイドを完全に消失させるにはかなりの時間が必要となり、そのため頂角を小さくしてより低温側で接合することはあまり接合強度を問題にしない様な場所に適用できると考えられる。また、頂角を小さくすることによりどの程度接合温度が低温側に移行するかは、今後実験により定量的に検討しなければならない問題である。

## 5. 結言

高温、腐食環境及び真空機器関係でよく使用されるステンレス鋼SUS304の主に拡散接合技術向上のための基礎データを得る目的で、SUS304の2次元くさび形突起を高温下で剛体平面により押し潰す実験を行って以下の様な結果を得た。

- (1)突起の変形が落着くまでの変位の増加率は、同一温度、同一頂角であれば室温無負荷の場合の方が大きい。
- (2)突起の変形量を実験前の突起高さで割ったものを正規化された変形量とすると、温度が高い程、頂角が大きい程、また一般に室温無負荷の方が正規化された変形量は大きくなる。
- (3)接触圧力は室温負荷の場合のほうが大きく、室温無負荷の場合との差は、頂角が大きくなるに従って小さくなる。また高温になるに従ってもこの負荷方法による接触圧力の差は小さくなる。

最後に、頂角が小さく、室温負荷の場合の方が突起押し潰しの際に、突起下の歪は大きくなり、拡散接合を促進する可能性が高いと考えられる。どの程度促進させるかは今後の実験で検討していかねばならない問題である。

## 謝辞

本実験に御協力下さった小坂研究所に対して感謝致します。試験装置及び試験片製作については田村隆技官、工場技官の方々に負うところが多く感謝の意を表します。また本実験の遂行に協力頂いた4年次学生南保光秀君(現北海道電力)、平田直樹君(現院一年生)に対して感謝致します。

## 文献

- (1)R.H.Thornley 他3名 Int.J.Mach.Tool Des.Res. 5(1965)pp.57-54
- (2)塚田 他1名 機論 37-304(昭46)pp.2400-2406
- (3)久門 他2名 機論 42-359(昭51)pp.2185-2195
- (4)大橋 他1名 溶接学会誌 45-4(1976)pp.295-301
- (5)円城 他1名 金属学会会報 21-12(1982)pp.959-964
- (6)M.G.Nicholas 他1名 Brit.Welding J.,8(1961) pp.375-383