

SUS304 極薄板材の機械的特性に及ぼす 試験片形状及び寸法の影響

電通大[院] ○木之本剛

電通大[院] 田中絢子

電通大 松村 隆

電通大

越智保雄

電通大

政木清孝

1 緒 言

近年、マイクロマテリアルの需要増加に伴い、その機械的特性値を把握するための静的強度及び疲労強度評価特性に関する研究が国内外で盛んに行われている。しかしながら JIS 等でマイクロマテリアルの試験方法は確立されておらず研究者により試験方法及び試験片形状が異なり¹⁾、マイクロマテリアルの機械的特性のデータが不足しているのが現状である。

そこで本研究では、供試材にオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 を用いて引張試験を行い、マイクロマテリアルの機械的特性に及ぼす試験片形状及び寸法の影響を調査した。また近年、薄膜等の機械的特性評価に用いられている微小押込み試験を行い、ヤング率を算出し、引張試験により求めた値との比較を行った。

2 実験方法及び供試材

2.1 供試材及び試験片形状 供試材は、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 を用いた。主な化学成分を Table I に示す。引張試験では、板厚 $t=20, 80\mu\text{m}$ (極薄板材) の試験片はエッチング加工により、 $t=500, 1000\mu\text{m}$ (バルク材) の試験片は機械加工により作成した。試験片形状を Fig.1 に示す。試験片板幅の影響を調査するため、 $t=20\mu\text{m}$ の試験片では板幅 W を 0.5, 2, 5mm の 3 種類とした。エッチング加工による試験片を E、機械加工による試験片を M で表し、例えば、 $t=20\mu\text{m}$, $W=2\text{mm}$, 標点間距離 $GL=20\text{mm}$ のエッチング加工による試験片を E-t20L20W2 と呼ぶ。微小押込み試験は、引張試験と同一ロット材の板厚 $t=500, 1000\mu\text{m}$ の供試材を用いた。例えば $t=500\mu\text{m}$ の試験片を M-t500 と呼ぶ。

2.2 実験方法

2.2.1 引張試験方法 極薄板材の引張試験には、微小荷重試験機 Tytron250 (MTS 社製) を用い、標点間の伸びの測定には、接触型の伸び検出器えびな 50SSS (有) テストロニクス製) を用いた。アクチュエータの引張速度は 0.05mm/s とし室温大気中にて試験を行った。バルク材の引張試験には Instron4505 万能型試験機 (Instron 社製) を用い、標点間の伸びの検出にはひずみゲージを用いた。引張速度は極薄板材の平行部のひずみ速度とほぼ等しくなるように 0.08mm/s とし、室温大気中にて試験を行った。

2.2.2 微小押込み試験方法及びヤング率算出式 微小押込み試験には微小表面材料特性評価システム MZT-3 (株アカシ製) を用いた。圧子には稜間隔 116° の三角圧子を用い、負荷荷重は 1, 5, 10, 50, 100gf の 5 種類とした。微小押込み試験におけるヤング率 E の算出式には Oliver²⁾ が提案した試験機のコンプライアンスを考慮した式

$$\frac{1}{S} = C = C_f + \frac{\sqrt{\pi}}{2E_f \sqrt{A}} \quad \frac{1}{E_f} = \frac{(1-\nu^2)}{E} + \frac{(1-\nu_f^2)}{E_f} \quad (1)$$

を用いた。ここで S は徐荷曲線の最大負荷時における曲線の傾き、 C は全体のコンプライアンス、 C_f は試験機のコンプライアンス、 A は最大負荷時の圧痕の投影面積、 ν , ν_f 及び E , E_f はそれぞれ試験片及び圧子のポアソン比、ヤング率である。また、圧子先端の丸みが無視できる場合

$$A = 32.42h_c \quad (2)$$

が成り立つ。ここで h_c は最大押込み深さである。本研究では、硬さ基準片 (HMV40: 山本科学工具社製) を用いて押込み試験を行い、(1), (2) 式より $C_f=5.2 \times 10^{-2} \text{nm/mN}$ 及び $E_f=8.8 \times 10^5 \text{mN/nm}^2$ を得た。また、圧子先端の丸みを補正するため、 A と h_c の関係を、

$$A(h_c) = C_0 h_c^2 + \sum_{i=1}^4 C_i h_c^{\frac{1}{i}} \quad (3)$$

で近似した結果、 $C_0=39.18$, $C_1=9.039 \times 10^4$, $C_2=1.438 \times 10^7$, $C_3=7.492 \times 10^7$, $C_4=6.725 \times 10^7$ が得られ、式(1), (3)を用いることでヤング率の算出を行った。

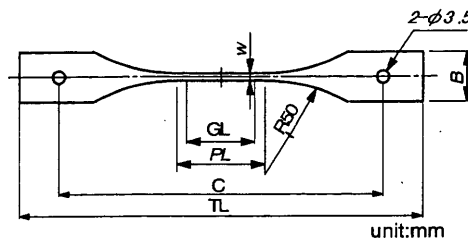
3 実験結果及び考察

3.1 引張試験結果及び考察

3.1.1 応力-ひずみ曲線の比較 Fig.2 に板厚 t の異なる 4 種類の試験片の応力-ひずみ曲線を示す。図より E-t20L20W2 を除き、最大引張応力に達した後、ひずみの増加と共に徐々に応力が低下し破断に至る。 $t=500, 1000\mu\text{m}$ のバルク材では試験片平行部の一部分にリューダース帯が形成され、ネッキングし破断に至った。また、E-t80L20W2 では試験片平行部に数本のリューダース線が形成され、そのリューダース線に沿って破断した。しかし E-t20L20W2 においては降伏後、ひずみ

Table I Chemical composition of test specimens.

item	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
t20 μm	0.060	0.530	1.110	0.031	0.004	8.06	18.34
t80 μm	0.054	0.500	0.850	0.024	0.004	8.68	18.40
t500 μm	0.059	0.560	0.830	0.031	0.003	8.58	18.45
t1000 μm	0.050	0.550	0.810	0.031	0.003	8.14	18.45



Specimen	t, μm	W,mm	GL,mm	PL,mm	C,mm	TL,mm	B,mm
E-t20L20W0.5	20	0.5	20	25	87.5	115	10
E-t20L20W2	20	2	20	25	92.5	115	14
E-t20L20W5	20	5	20	25	Nothing	115	20
E-t80L20W2	80	2	20	25	92.5	115	14
M-t500L50W12.5	500	12.5	50	60	Nothing	180	32
M-t1000L50W12.5	1000	12.5	50	60	Nothing	180	32

Fig.1 Shape and dimensions of the specimen.

が増加しても応力は増加せず破断に至っている。E-t20L20W2では、降伏後平行部全域でリューダース帯が形成されており、板厚が非常に薄いためひずみ量の増加に伴うすべり変形が容易であったためと考えられる。t=20 μ mの試験片では、板幅Wによらず同様な傾向を示した。

3.1.2 引張強度 σ_B 測定結果 Fig.3 に引張強度 σ_B と $\sqrt{A}$ (A: 試験片の原断面積)の関係を示す。また、Table II に σ_B の平均値を示す。図より板厚t=80, 500, 1000 μ mの試験片を比較すると板厚tの減少に伴い σ_B の増加が見られるが、これは圧延率の増加に伴う加工硬化により、硬さが増加しているためと考えられる。しかしながらt=20 μ mの試験片においてはこの関係が成立しておらず、t=80 μ mの試験片よりも σ_B は低い値となっている。これは3.1.1項で述べた破壊形態の違いによるものと考えられる。また、t=20 μ mの試験片における σ_B の平均値を比較すると $\sqrt{A}$ の減少つまり板幅Wの減少と共に σ_B が若干増加していることがわかる。

3.1.3 ヤング率E測定結果 Fig.4にヤング率Eと $\sqrt{A}$ の関係を示す。また、Table II にEの平均値を示す。本研究ではEはオフセット法により応力-ひずみ曲線から求めた。なお、直線近似範囲は100~300MPaとした。図よりEは $\sqrt{A}$ の減少と共に増加する傾向が見られた。この原因の一つとして次のことが考えられる。 $\sqrt{A}$ が減少すると測定される荷重は減少する。例えばE-t20L20W0.5のEの近似範囲の荷重は1~3N、またE-t20L20W5では10~30Nである。本研究では許容荷重 ± 250 Nのロードセルを用いており、 ± 5 N程度の微小荷重の測定精度が影響していると考えられる。

3.2 微小押込み試験結果 2.2項で求めたヤング率の算出式

の妥当性を確認するため、硬さ基準片(HMV400:山本科学工具社製)を用いてヤング率を算出した。結果をFig.5(a)に示す。ヤング率Eは最大押込み深さ h_c によらずおおむね一定であり、本研究におけるヤング率の算出式が妥当であることがわかる。

次にM-t500及びM-t1000におけるEと h_c の関係をFig.5(b), (c)に示す。図よりM-t500, M-t1000共に、 h_c が500~1000nmの領域でヤング率Eがピークを示すことがわかる。特に、M-t500では、 $h_c > 2000$ nm以上でヤング率が大きく低下する傾向が見られた。この理由として $h_c = 250$ nmの場合、試験片表面粗さの影響によりEの値が小さくなったと考えられる。また、 $h_c > 2000$ nm以上では、試験片の非常に小さな反りの影響によりヤング率Eが小さくなったと考えられ、特に、板厚の薄いM-t500の方に大きな影響が出たと考えられる。

以上の結果より、本研究では、 h_c が500~1000nmの範囲のヤング率Eが、試験片表面粗さの影響及び試験片の反りの影響を受けずにEが算出されていると考えられる。この範囲にヤング率Eの平均値はM-t500及びM-t1000で、それぞれ161, 164MPaであった。また、引張試験で求めたEはTable IIより板厚t=500及び1000 μ mでそれぞれ174, 172MPaであり、微小押込み試験によって求められたEの方が若干小さな値となったが、おおむね一致していると考えられる。

(結言・参考文献省略)

Table II Mean values of Young's modulus E and tensile strength σ_B .

Specimen	E, GPa	σ_B , MPa	Specimen	E, GPa	σ_B , MPa
E-t20L20W0.5	190	1206	E-t80L20W2	171	1390
E-t20L20W2	185	1191	M-t500L50W12.5	174	1264
E-t20L20W5	173	1175	M-t1000L50W12.5	172	1181

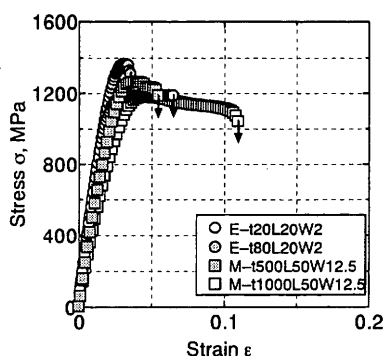


Fig.2 Stress-strain curves.

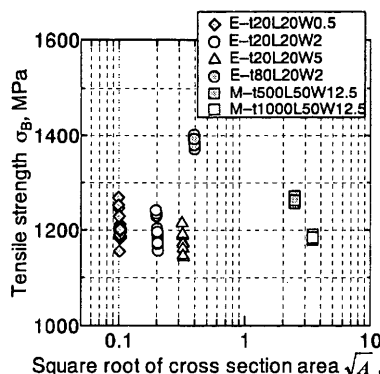


Fig.3 Relationship between tensile strength σ_B and square root of area $\sqrt{A}$.

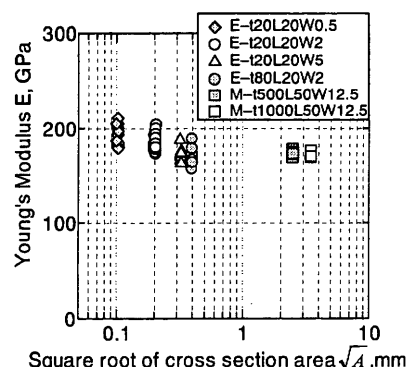
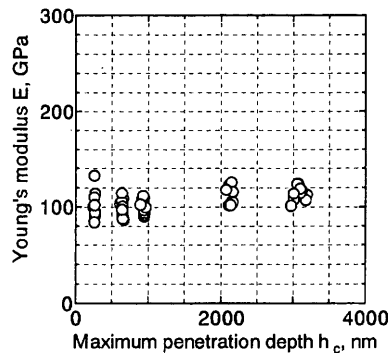
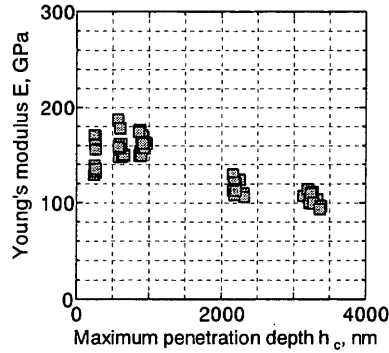


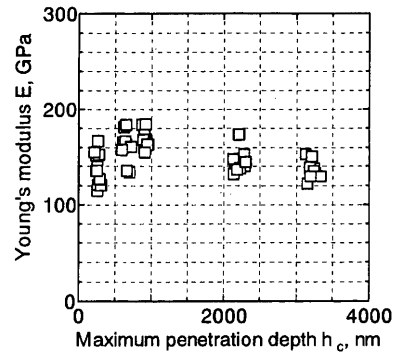
Fig.4 Relationship between Young's modulus E and square root of area $\sqrt{A}$.



(a) HMV400



(b) M-t500



(c) M-t1000

Fig.5 Relationship between Young's modulus E and maximum penetration depth h_c .