

高速変形と金属加工を想定した構造材料の変形挙動解析

兵庫県立大学大学院 工学研究科 物質系工学専攻

准教授 土田紀之

(平成 23 年度一般研究開発助成 AF-2011029)

キーワード: 高速変形, 金属加工, 応力-ひずみ関係

1. 研究の目的と背景

鉄鋼材料や金属材料の変形を考えると, 変形挙動に大きな影響を与える因子として「ひずみ速度」があげられる. 例えば, クリープのような変形を考えると $10^{-6} \sim 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ といった低速変形であり, 金属材料の基本となる機械的特性を調査する静的引張試験は通常 $10^{-2} \sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ のひずみ速度で行われることが多い. さらに, 自動車衝突時や大地震のような約 10^0 s^{-1} 以上の高ひずみ速度での変形挙動の解明は重要な課題のひとつであり, そのための新しいアプローチや評価手段に関する検討が求められている. また, 金属を加工する際には 100% 以上の大ひずみがかかる場合があり, このような大きなひずみがかかった際の変形挙動は実験的にはほとんど明らかにされていない¹⁻⁵⁾. 金属加工においては高ひずみ速度で変形を受ける場合もあり, 耐震性のような高速変形とも共通点がある.

金属材料の変形挙動を知る代表的な手段のひとつに, 引張試験がある. 引張試験では荷重と伸びの関係から応力-ひずみ関係が得られるが, 破断までの引張変形挙動となるとほとんどが公称応力-ひずみ曲線で議論することが多い. 一方で, 材料の本当の変形挙動を知るためには, 公称ではなく真応力と真ひずみの方が重要度が高い. しかしながら, 通常引張試験では, 最高荷重点以降の局所変形中の真応力と真ひずみを求めることは難しい¹⁻⁷⁾.

以上のことを背景に, 本研究では「高ひずみ速度変形」「大ひずみ変形」「破断までの引張変形挙動を明らかにする評価手段」の 3 つをキーワードとしてあげ, 大地震に相当するひずみ速度が約 10^0 s^{-1} における引張変形時の破断直前までの真の応力-ひずみ関係を実験により明らかにする. 本研究ではまず, 高ひずみ速度での引張試験結果から真応力-ひずみ関係を推定可能とするための実験方法および実験手段の確立を行った. 次に, 市販の鉄鋼および金属材料を用いた実験を行い, 真の応力-ひずみ関係におよぼすひずみ速度の影響について検討した. さらに, 鉄鋼材料における重要な強化機構のひとつである「結晶粒微細化強化」⁸⁻¹⁰⁾を取り上げ, 結晶粒径の異なる低炭素鋼を用いて真応力-ひずみ関係におよぼす結晶粒径とひずみ速度の影響について検討を行った. 以上の結果を整理することで, 破断直前までの真応力-ひずみ関係を塑性加工時における変形挙動を知るツールとしての利用を目指す.

2. 実験方法

2.1 供試材および試験片について

a. 市販の鉄鋼および金属材料を用いた実験

本研究では, まず結晶構造の異なる 5 種類の材料を用いて実験を行った. 純銅(Cu), 純チタン(Ti), オーステナイト系ステンレス鋼(SUS310S, SUS304)と二相ステンレス鋼(SUS329J4L)である⁶⁾. いずれも市販の鉄鋼・金属材料であり, 各材料の組成や熱処理条件については, 文献 6) に詳細が示されている.

b. 低炭素鋼の破断直前までの真応力-ひずみ関係におよぼす結晶粒微細化強化の影響

本研究では, 2.1 a) での一般的な鉄鋼・金属材料を用いた実験以外に, 破断直前までの真応力-ひずみ関係におよぼす強化機構の影響の調査を行った. ここでは, 鉄鋼材料の代表的な強化機構のひとつである「結晶粒微細化強化」を取り上げた. 我々はこれまでに, 低炭素鋼である JIS-SM490 相当鋼(0.15C, 0.4Si, 1.5Mn mass%)を用いて, 温間域での強加工を施すことにより平均フェライト粒径が 2 ミクロン以下の超微細フェライト-セメンタイト(FC)鋼を作製し, 引張特性におよぼすひずみ速度の影響¹⁰⁾や, 静的引張試験結果より破断直前までの真応力-ひずみ関係を推算し, 真応力-ひずみ関係におよぼす結晶粒径の影響⁷⁾について検討を行っている. 本実験でも同様に SM490 鋼より平均フェライト粒径が 1.3 μm の超微細 FC 鋼と 34 μm の FC 鋼を準備し, ひずみ速度を変えて引張試験を行った. 各 FC 鋼の作製条件は, 1173 K においてオーステナイト化した後, 773 K で減面率 91% の強加工を施した後水冷した材料を用い, 1.3 μm 材は 873 K で 3.6 ks, 34 μm 材は 923 K で 10.8 ks 保持後水冷の条件で得られた⁷⁾.

2.2 引張試験

2.1) で述べた材料を用いて丸棒引張試験片を作製し, 室温において引張試験を行った. 試験片形状については, 2.1 a) で述べた材料は直径 8 mm, 平行部長さ 40 mm⁶⁾, 2.1 b) の場合は直径 3.5 mm, 平行部長さ 25 mm の丸棒試験片⁷⁾を作製した. 静的引張試験はギア駆動式引張試験機を用いて, 室温 296 K においてひずみ速度 10^{-4} s^{-1} および 10^{-1} s^{-1} の 3 桁異なる 2 種類のオーダーにおいて行った. ひずみ速度 10^{-4} s^{-1} のオーダーでの引張試験では, 最高荷重点以降, 引張変形中に試験を中断し, 時々刻々の荷重(P), くびれの断面半径(a), く

びれの曲率半径(R)を繰り返し測定する断続引張試験を行った⁵⁻⁷⁾。また、ひずみ速度 10^{-1} s^{-1} での引張試験では、ひずみ速度が速く断続引張試験は困難であるため、ハイスピードマイクロスコープとデータロガーを用いることで、引張試験時の試験片の形状変化を撮影するとともに、この時の荷重の変化も測定し、真応力-ひずみ関係の推算に必要となる P , a , R の測定を行った(図 1)。またこの時、 R の計測はくびれ部の輪郭を円弧により近似し^{3, 5)}、 R の測定偏差による真応力の変化は約 10 MPa 以内であった。

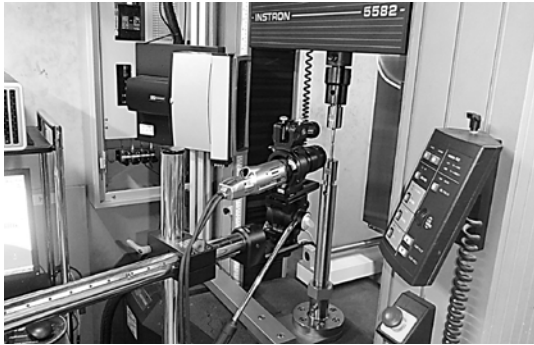


図 1 高ひずみ速度における引張試験時の様子

2.3 真応力と真ひずみの計算方法¹⁻⁶⁾

真応力(σ)と真ひずみ(ε)は通常、以下の式によって計算される。

$$\sigma = s(1+e) \quad (1)$$

$$\varepsilon = \ln(1+e) \quad (2)$$

ここで s と e はそれぞれ公称応力と公称ひずみである。(1)式と(2)式は最高荷重点までの均一変形時に成立する。丸棒引張試験片の場合、ネッキング開始後の真ひずみはくびれの断面半径かくびれ部の最小断面積を用いて以下のように計算することができる。

$$\varepsilon = 2 \ln \frac{a_0}{a} \quad (3)$$

ここで a はくびれ部の最小半径、 a_0 は初期の試験片断面半径である。一方で、くびれ部中心の応力状態は単軸引張状態ではなく、試験片表面から中心に向かって応力分布が生じる。図 2 は丸棒引張試験片のくびれ部における応力分布の模式図を示す。真応力は荷重とその時の試験片の断面積を用いた次式で計算されることがある。

$$\sigma_{av.} = \frac{P}{\pi a^2} \quad (4)$$

ここで、 P は荷重である。しかし、図 2 のようにくびれが生じると三軸応力状態になるため、その場合(4)式は真応力ではなく平均応力($\sigma_{av.}$)となる。Bridgman^{1, 2)}は丸棒試験片におけるくびれ発生以降の真応力の推定式を以下のように提案した。

$$\sigma = \frac{P}{\pi a^2 \left(1 + \frac{2R}{a}\right) \log \left(1 + \frac{a}{2R}\right)} \quad (5)$$

(5)式の導出については、参考文献 1), 2), 5)にその詳細が書かれている。(3)式と(5)式、そして引張試験で測定した P , R , a の値を用いることで、ネッキング開始から破断直前に至るまでの真応力と真ひずみを推定することができる。真応力を推定する(5)式については、Marshall and Shaw³⁾によりその妥当性が検討されており、様々なくびれ形状を持つ試験片についてもすべて同じ真応力-ひずみ関係が得られている。一方で、Bridgman による方法は(5)式のようなくびれ発生以降の平均値としての真応力を計算する際には有効であるが、その時の応力分布の議論には適当でない場合もあることには注意する必要がある。

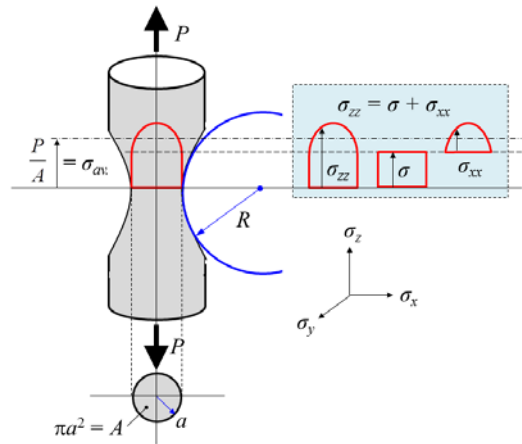


図 2 丸棒引張試験片を用いた引張試験におけるくびれ発生時の応力分布の模式図

3. 実験結果

3.1 様々な金属材料における引張試験結果

図 3 に 5 種類の鉄鋼・金属材料を用いてひずみ速度を変え引張試験した際の公称応力-ひずみ曲線を示す。図における実線はひずみ速度 10^{-1} s^{-1} 、点線は 10^{-4} s^{-1} のオーダーでの結果をそれぞれ示す。引張試験結果から得られた機械的特性は、表 1 に整理した。いずれの材料も、ひずみ速度が約 3 桁増加することにより降伏強さや引張強さといった強度は増大し、均一伸び、全伸びといった延性は低下した。また、絞りもひずみ速度増加によって大きく低下した結果が多い。図 3 や表 1 において、ひずみ速度増加による機械的特性の変化が大きいのはオーステナイト系ステンレス鋼である SUS304 であった。SUS304 の場合、準安定オーステナイト鋼であるため、引張変形中にオーステナイト組織の一部がマルテンサイトに加工誘起変態する。この加工誘起変態挙動は、ひずみ速度により大きく変化することが予想され、ひずみ速度が増加する場合は加工誘起変態が起りにくくなるのがこれまでの研究でも明らかにされている¹¹⁾。今回の実験結果においても、同様のことが起こったことが推察される。

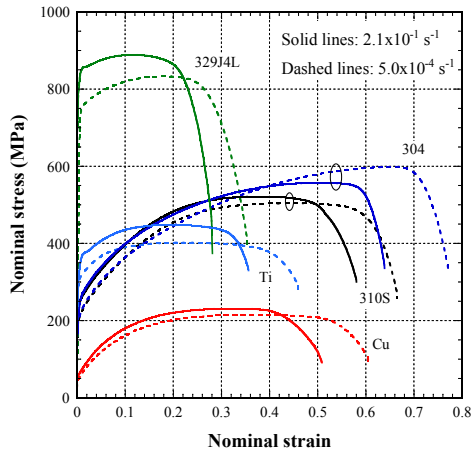


図 3 5 種類の鉄鋼・金属材料の引張試験で得られた公称応力-ひずみ曲線

表 1 引張試験で得られた機械的特性

材料	$\dot{\epsilon}$ (s ⁻¹)	降伏強さ (MPa)	引張強さ (MPa)	均一伸び (%)	全伸び (%)	絞り (%)
310S	10 ⁻¹	220	522	37.6	58.3	80.7
	10 ⁻⁴	192	505	45.0	66.5	88.5
304	10 ⁻¹	195	557	51.3	64.0	80.3
	10 ⁻⁴	190	599	65.2	77.2	85.3
329J4L	10 ⁻¹	747	889	11.5	28.1	77.9
	10 ⁻⁴	730	834	18.2	34.8	79.7
Cu	10 ⁻¹	55	231	32.9	50.9	91.8
	10 ⁻⁴	49	215	35.9	60.3	92.6
Ti	10 ⁻¹	273	448	20.0	35.6	60.5
	10 ⁻⁴	273	402	22.6	45.9	74.2

図 4 に 5 種類の鉄鋼・金属材料の破断直前までの真応力-ひずみ関係を示す。図 4 (a)はひずみ速度 $5.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 、図 4 (b)は $2.1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ における結果をそれぞれ示す。ここで各図における実線は最高荷重点までの結果であり、プロットは最高荷重点以降の真応力と真ひずみの結果を示す。最高荷重点以降の P , R , a の値と(3), (5)式を用いることで、真ひずみにして約 1~1.5 までの真応力-ひずみ関係を推定できることがわかった。図 3 に示した公称応力-ひずみ曲線では、材料間で横軸の公称ひずみの大きさ(均一伸び, 全伸び)に大きな違いが見られたが、図 4 では Ti を除きいずれも真ひずみが 1.5 近くあり、公称応力-ひずみ曲線で比較した場合とは異なっていた。また、図 4 における真応力-ひずみ関係におよぼすひずみ速度の影響については、Cu の結果を除き、ひずみ速度増加により真応力と真ひずみのどちらも低下した。変化が最も大きい SUS304 については、先程も述べたようにひずみ速度増加により加工誘起変態マルテンサイト体積率が減少したことが大きく影響している¹¹⁾と推察される。(1), (2)式を用いて計算できる最高荷重点までの真応力-ひずみ曲線では、公称応力-ひずみ曲線のひずみ速度依存性のように真応力は増加し、

真ひずみは低下する結果は多く見られてきたが、破断直前までの真応力-ひずみ関係で見るとその結果は大きく異なっていた。ひずみ速度増加により真ひずみが減少した理由のひとつとして、表 1 に示した絞りの大きさがあげられる。絞りも最高荷重点以降の真ひずみもくびれの最小半径である a の大きさが関係している。つまり、ひずみ速度増加によって絞りが低下することは破断時の a が大きいことを意味し、これは(3)式から考えると真ひずみが低下することに繋がる。一方で、真応力の大きさについては、(5)式より荷重 P と曲率半径 R の大きさが関係している。同じ真ひずみ(つまり、同じ a)における真応力は、 P と R が大きいほど大きくなる。

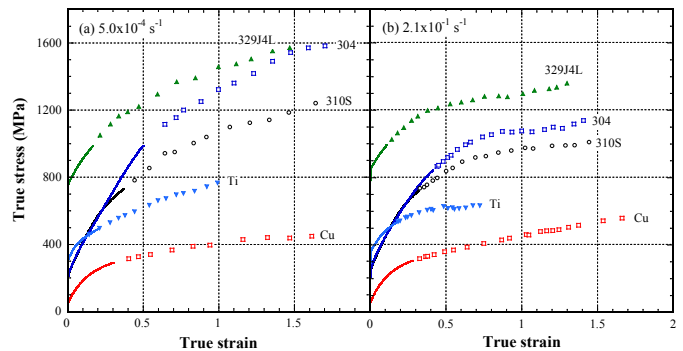


図 4 5 種類の鉄鋼・金属材料の引張試験より推定した破断に至るまでの真応力-ひずみ関係。(a) ひずみ速度 $5.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 、(b) $2.1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 。

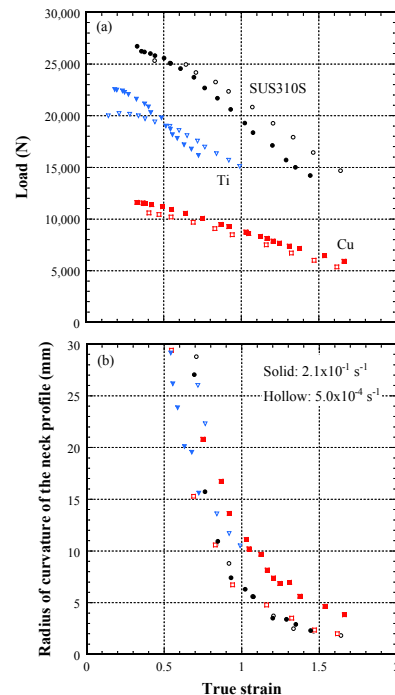


図 5 最高荷重点以降の(a)荷重と(b)曲率半径の変化

図 5 に、SUS310S, Ti, Cu の最高荷重点以降の真ひずみに対する(a) P と(b) R の変化を示す。図 5 (a)の P の変化において、310S と Ti については途中で P の大きさが逆転し 10^{-1} s^{-1} の方が同じ真ひずみにおける P が小さくなった。一方、Cu に

については、ひずみ速度増加により同じ真ひずみにおける P は大きくなった。図 5 (b)の R の変化についてみると、310S はひずみ速度により挙動に変化は見られず、Ti はひずみ速度増加により同じ真ひずみにおける R は小さくなり、Cu はひずみ速度増加により同じ真ひずみにおける R は大きくなった。図 5 より、ひずみ速度増加によって真応力が下がった理由としては P が低下したことが大きな影響を及ぼしていると考えられる。また、くびれの R が小さくなることはくびれが集中したことを意味し、 R が小さくなったことで破断に近づいたとも予想される。Ti についてはこれが影響して、ひずみ速度増加により真ひずみや絞りの低下に繋がったのではないかと考えられる。

3.2 低炭素鋼を用いた結晶粒微細化強化の影響

図 6 に、平均フェライト粒径 1.3, 34 μm の FC 鋼の引張試験で得られた(a)公称応力-ひずみ曲線と(b)真応力-ひずみ関係をそれぞれ示す。公称応力-ひずみ曲線および各機械的特性について、同じフェライト粒径の FC 鋼の場合、ひずみ速度増加により強度は増大し、延性は低下した。この時、絞りはひずみ速度増加によりわずかに大きくなった。また、同じひずみ速度での引張試験結果は、フェライト粒径が微細な方が強度は大きく、延性と絞りは低下した。

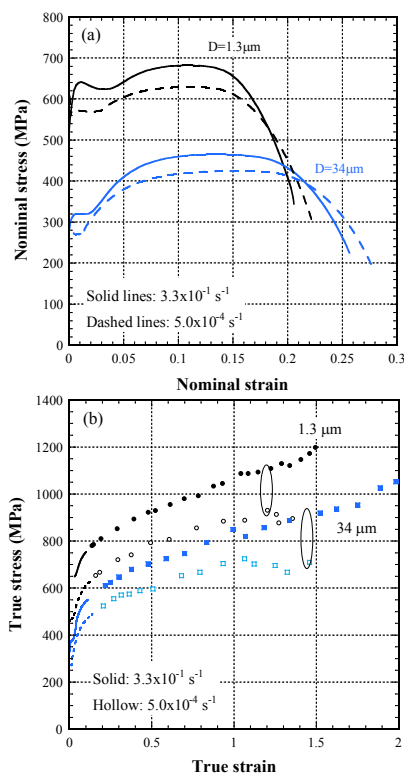


図 6 低炭素鋼より作製したフェライト-セメンタイト鋼の(a)公称応力-ひずみ曲線と(b)真応力-ひずみ関係

一方で、図 6 (b)に示した真応力-ひずみ関係を見ると、同じフェライト粒径の FC 鋼では、ひずみ速度増加により真応力も真ひずみも増大した。平均フェライト粒径が 34 から 1.3 μm に微細化した際には真応力は増大するが、真ひずみは低下し

た。図 6 (b)の結果より、FC 鋼の場合ひずみ速度を大きくすることは、破断直前までの真応力-ひずみ関係を向上させることができると言える。FC 鋼でひずみ速度増加によって真応力、真ひずみともに大きくなったことは、図 4 に示した結果とは異なっていた。その理由としては、図 5 で考察したように、真ひずみの大きさはひずみ速度増加による絞りの向上が大きく関係しており、真応力については P と R の大きさより図 6 (b)の結果を説明できる。FC 鋼の場合、破断においてはフェライトとセメンタイトの変形も重要であり、組織間の変形差がポイドの発生に繋がることも明らかになりつつある⁷⁾。今後これらの点について検討するために変形を加えた材料の組織観察が必要である。

4. まとめ

本研究では、金属加工と高速変形を想定し、ひずみ速度約 10^0 s^{-1} における引張変形時の破断直前までの真の応力-ひずみ関係について調査した。デジタルマイクロスコープとデータロガーを組み合わせることで、ひずみ速度 10^{-1} s^{-1} のオーダーにおける引張試験を行い、破断に至るまでの真応力-ひずみ関係の推定を可能とする実験手法を確立した。材料によって、ひずみ速度増加による真応力-ひずみ関係の変化に違いが見られた。これは、最高荷重点以降の荷重と曲率半径や絞りが関係していることがわかった。

謝辞

本研究は公益財団法人天田財団の平成 23 年度一般研究開発助成(AF-2011029)を受けて行ったものである。ここに記して深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) P.W. Bridgman: *Studies in Large Plastic Flow and Fracture*, (McGraw-Hill, New York, 1952) pp. 9-37.
- 2) P.W. Bridgman: *Trans. ASM*. **32** (1944) 553.
- 3) E.R. Marshall and M.C. Shaw: *Trans. ASM*. **44** (1952) 705.
- 4) J.H. Hollomon: *Trans. AIME*. **162** (1945) 268.
- 5) K. Enami and K. Nagai: *Tetsu-to-Hagane*. **91** (2005) 712.
- 6) N. Tsuchida, T. Inoue and K. Enami: *Mater. Trans.*, **53** (2012), 133.
- 7) N. Tsuchida, T. Inoue and H. Nakano: *J. Mater. Res.*, **28** (2013) 2171.
- 8) Y. Okitsu, N. Takata and N. Tsuji: *Scripta Mater*. **64** (2011) 896.
- 9) R. Song, D. Ponge, D. Raabe, J.G. Speer, D.K. Matlock: *Mater. Sci. Eng. A*. **441** (2006) 1.
- 10) N. Tsuchida, H. Masuda, Y. Harada, K. Fukaura, Y. Tomota, K. Nagai: *Mater. Sci. Eng. A*. **488** (2008) 446.
- 11) N. Tsuchida, Y. Yamaguchi, Y. Morimoto, T. Tonan, Y. Takagi and R. Ueji: *ISIJ Int.*, **53** (2013), 1886.