



R. Ueji

高強度鋼に優れた高速温間塑性変形特性を付与する組織設計指針の確立

上路 林太郎*

キーワード：高強度鋼，高速変形，温間変形，金属組織，引張試験，絞り

1. 研究の目的と背景

環境問題や世界各国における技術力の向上といった社会情勢変化に応じて、鉄鋼材料の開発研究競争は激化している。日本では加工・熱処理による材質改善に関する研究が種々の大型国家プロジェクトとして展開され、500℃近傍の温間域加工の利用や、温間テンプレフォーミングと称される塑性加工プロセスによる金属組織の異方性制御を通じた靱性向上の達成など、新しい組織制御指針に基づく新素材が生みだされている¹⁾。

競争力の高い新素材であるためには、単に高強度を有するだけでは不十分であり、延性などの塑性変形特性が優れていることも求められる。特に近年ではサーボプレスが普及し、高速化に加えて変形速度の精密制御が可能となっている。また、ホットスタンプに代表される二次加工時の加熱を利用した金属組織の作りこみも開発・実用化されてい

る。こうした塑性加工プロセスの技術革新の優位性をさらに引き出すための視点が新素材研究に必要である。特に、二次加工において変形速度や温度制御が積極的に利用されつつある状況の中、新素材の成形性調査もあって然るべきである。

前述の温間テンプレフォーミングのような新しい組織設計指針により得た新素材の温間域変形挙動は、これまでの炭素鋼とは異なる挙動を示す可能性がある。しかし、そもそも鋼の高速塑性変形研究は降伏点近傍の強度のひずみ速度依存性に終始することが多く、加工性の指標となる絞りなどの報告がほとんど見当たらないのが現状である。そのため、高速温間塑性変形特性と材料組織との相関を明らかにできれば、これまで知られていない高強度鋼に優れた高速温間塑性変形特性を付与する組織設計指針が得られるはずである。

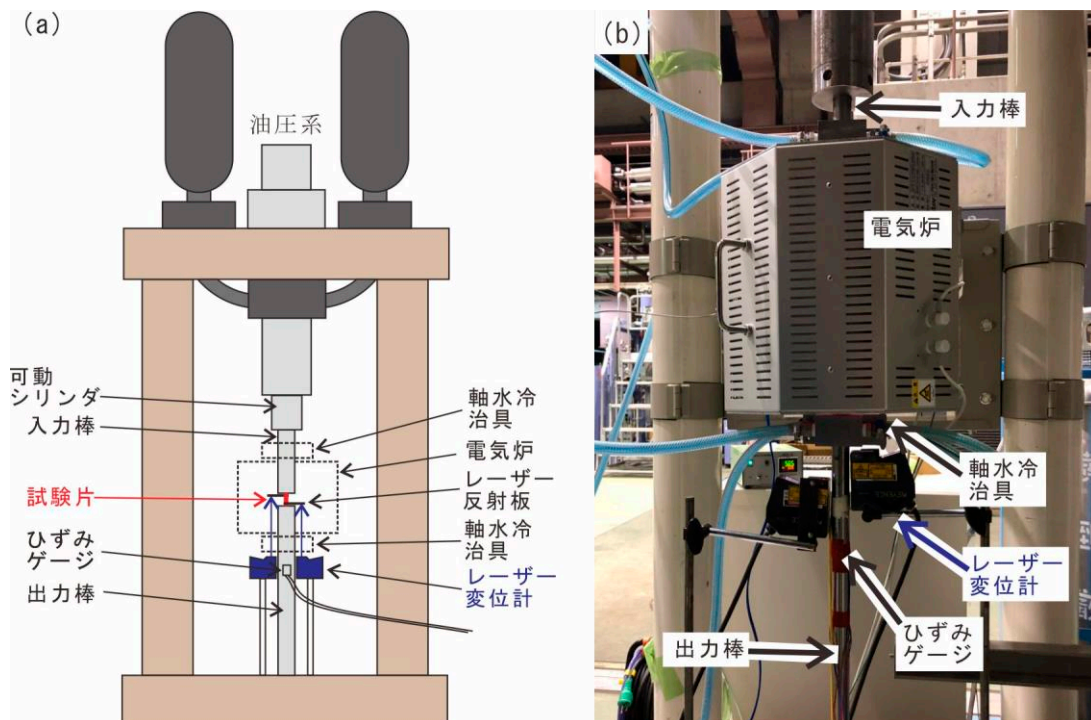


図1 高温高速引張試験機のレイアウトを示した模式図(a)と電気炉周辺の実物外観(b)

* 物質・材料研究機構 構造材料研究拠点 主幹研究員

そこで本研究では、温間域において高速度での引張試験が実施可能な実験系を構築し、温間テンプレフォーミング等による微細粒組織化など、塑性加工を利用して組織制御された低合金高強度鋼の塑性変形特性（とくに絞り）の温間域ひずみ速度依存性と金属組織の関係を明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

2・1 実験装置の概要

材料の高速変形特性は、静的試験とは異なり慣性力の影響を無視できないため、その影響を考慮した試験機系が必要になる。従来の高速変形特性試験で、最も広く用いられている方法は、ホプキンソンバー法と称される大きな長さを有する入力棒と出力棒を用いる方法である²⁾。この方法により種々の金属材料の高速変形特性が調査されている。しかし、室温以上の高温における当該試験機系の適用は、試験機系を構成する材料の弾性率温度依存性の問題などから、その例は極めて限定的である。そこで本研究では、ホプキンソン-コルスキーバー法をベースとして、高温高速試験を実現できる試験機系の構築に取り組んだ。

本研究で構築した試験機系は図1に示すような構成を有している。既存の縦型スプリットホプキンソンバー試験機に対して、電気炉と冷却機構およびレーザー変位計を設置することにより大気中の高温高速引張試験を実現した。主な特徴は以下の通りである。

- ・**水冷装置**： 入力棒および出力棒に水冷装置を新設し、加熱部以外の温度が常温となるようにした。水冷装置は鋼片に直径 10mm 程度の直線穴を切削加工し、その内部にチラーから供給される循環水が流れるだけの簡単なものである。水冷装置の設置により、出力棒

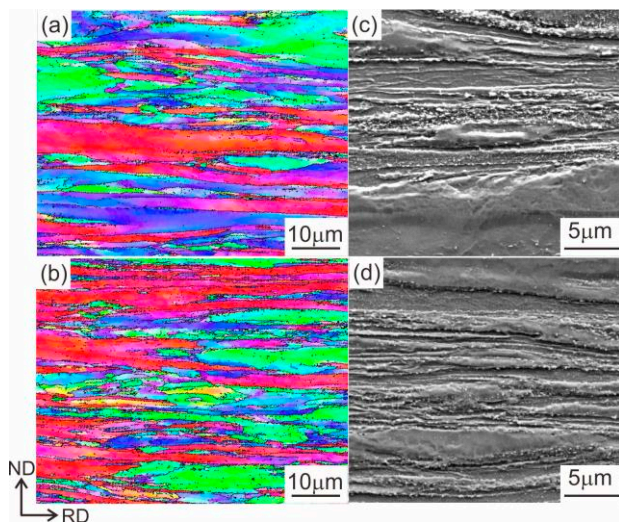


図2 空冷材(a,c)および水冷材(b,d)の EBSD 測定結果 (a,b)および SEM 二次電子像(c,d)。

に取りつけられた荷重検出用のひずみゲージ設置部は常に常温に保つことができる。一方で、出力棒に取り付けた冷却装置は高速打撃を与える際も外さずそのままにするため、これに起因する入力波形に乱れが生じる可能性があることが弱点である。

- ・**レーザー変位計**：試験片のゲージ部両端に直接取り付けられた反射板を利用して、二台のスポットレーザー変位計により試験片変位を高サンプリング速度で計測できるようにした。レーザー変位計を用いるために、電気炉体（耐火物）と水冷装置に 5mm 幅程度の小さな溝を加工し測定ビームパスを確保した。加工幅を必要最低限としたため、電気炉内部の保温状態に溝加工の影響はほとんど無かった。また、レーザー変位計の応答遅れは装置のマニュアルに記載されている情報および室温における応答状況から補正した。（今回の研究における高速変形測定条件では応答遅れは 0.4msec であった。）

- ・**試験片**：試験片は直径 4mm×長さ 20mm のゲージ部を有する丸棒試験片とした。丸棒試験片とすることにより、加工性の重要な指標となる絞りの測定が可能となる。

なお図には示していないが、試験片の平行部近傍に熱電対を設置して測定した温度を試験温度とした。また、荷重(出力棒ひずみゲージ)およびレーザー変位計のデータはアナログ信号として単一のデータロガーにより高速サンプリングした。

2・2 測定試料および試験条件

0.15wt%C-0.3%Si-1.5%Mn-bal. Fe の化学組成を有す

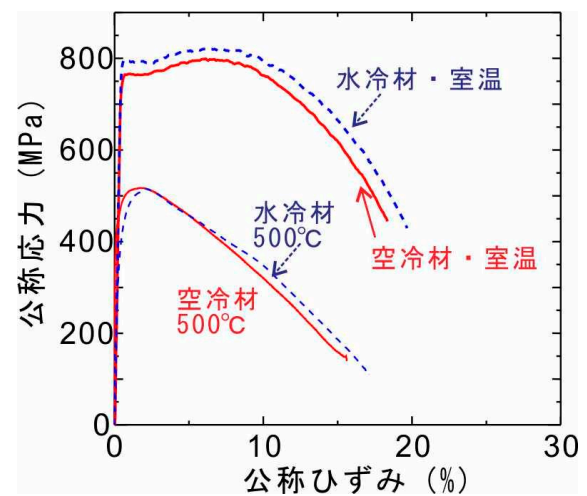


図3 空冷材および水冷材の室温および 500°C における準静的引張試験により得られた応力ひずみ曲線。

る低炭素鋼を用いた。40mm角の熱間鍛造棒材を受け入れた。初期組織における炭化物の分散状況を変化させるため、二種類の熱処理を温間加工の前に施した。すなわち、受入まま材に対して、900℃で3600秒間保持しオーステナイト化したのちに、水冷または空冷することにより組織をマルテンサイトおよびフェライト・パーライトとした。以降、それぞれ水冷材および空冷材と称することとする。

微細粒組織は、温間域で溝ロール圧延を施すことにより得た。溝ロール圧延はサンプルのほぼすべての領域に大きなひずみを与えることができる塑性加工プロセスであることがすでに知られている³⁾。水冷材と空冷材に対して、500℃で3600秒間保持後、溝ロール加工を施した。種々の大きさの角型溝を用い13パスにより総減面率88%の加工を施した。溝ロール加工の詳細については、すでに別の報告において述べている³⁾。溝ロール加工後の形状は14mm角であった。得られた試験片に対して、背面反射電子線回折(EBSD)解析システムの搭載された走査電子顕微鏡(SEM)により組織観察を行った。

引張試験はすでに述べたように、図1に示す縦型ホプキ

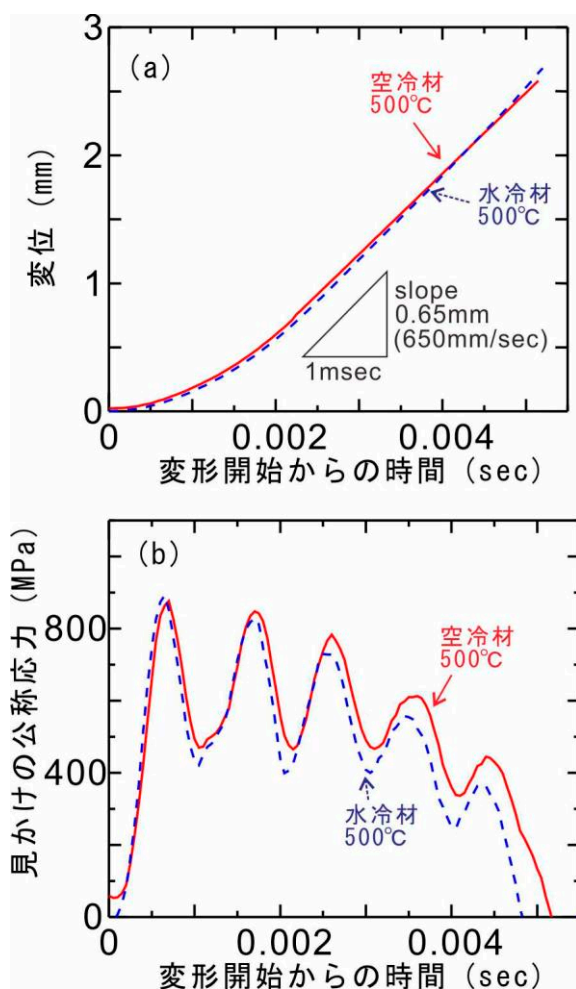


図4 空冷材および水冷材の500℃における高速引張試験時の変位(a)とみかけの公称応力(b)の推移。

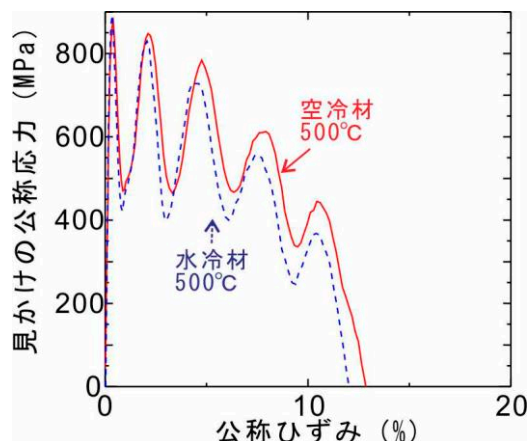


図5 空冷材および水冷材の500℃における応力ひずみ曲線。

ンソナー型試験機を用いて実施した。平行部直径4mm×長さ20mmの平滑丸棒試験片を用い、500℃にて0.1mm/secおよび650mm/secの二種類の变形速度にて試験を行った。なお高速变形条件における变形速度履歴については実験結果を示して後述する。変位は油圧サーボ駆動するシリンダにより付与し、高速变形の際には十分な助走をさせた上で入力棒に引張向きの変形を与えた。変位の計測にはレーザー変位計(ヘッド:キーエンスLK-H150)を用いた。またひずみゲージおよびレーザー変位計のデータ収集には高速サンプリング用データロガー(Data Translation社DT9832)を用いた。加工性の指標として、破断部直径より絞りを評価した。

3. 実験結果および考察

図2は温間溝ロール加工された空冷材(a,c)及び水冷材(b,d)のEBSD測定結果(a,b)およびSEM二次電子像(c,d)である。水平方向と垂直方向がそれぞれ圧延方向(RD)と圧延面法線方向(ND)である。EBSD測定結果を示した図では、隣接測定点間の方位差が15度以上の大角粒界を黒線で描いている。空冷材と水冷材ではいずれも圧延方向に伸長したラメラ状微細フェライト粒が観察された。板厚方向に沿って計測したラメラバウンダリの平均間隔は、水冷材が0.6μm、空冷材が1.7μmであり、温間圧延前の組織をマルテンサイトとした水冷材がやや微細であった。二次電子像では等軸形状を有する微細炭化物が観察され、特に水冷材のほうが均一に分散していた。これは温間圧延前の組織が炭素の過飽和固溶体であるマルテンサイトであるため、水冷中またはその後の析出時に低温で析出し、フェライトパーライト組織よりも均一に炭化物が析出するためである。こうした違いは過去に報告された結果と一致している³⁾。

準静的条件の公称応力—公称ひずみ曲線を図3に示す。公称ひずみはレーザ変位計で測定した変位を初期平行部長さ(20mm)で割って算出している。室温の試験結果

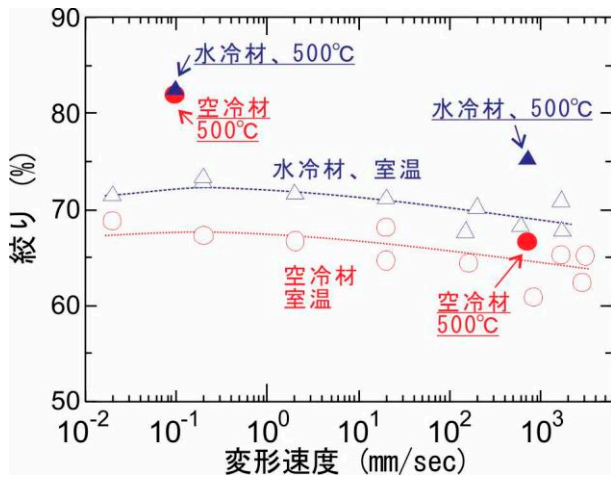


図6 空冷材および水冷材の各種変形条件における絞り試験

については別の研究で報告⁴⁾したものを引用している。本研究の狙いは温間域の試験にある。微細組織を有する空冷材、水冷材はともに室温において、750MPa以上の高強度を示すが、比較的早期に最大応力に達し、10%程度の局部伸びを示して破断する。500°Cにおいて試験した結果、両者は520MPa程度の引張強さをごく初期に示したのちに大きな局部伸びを示して破断した。破断位置はすべて標線間であった。大きな局部伸びは大きな絞りを示唆しており、試験素材が良好な加工性を有していることを示唆している。しかし、水冷材と空冷材の違いは、準静的試験条件における応力ひずみ曲線から読み取ることが困難であった。

高速変形では、慣性力が無視できなくなり、自由表面や試料/治具間の変位の反射が生じる。その状況を示したデータが図4である。水冷材および空冷材に対して、650 mm/secにて変位を与えた際の試験片の変位-時間曲線(a)、およびみかけの公称応力-時間曲線である。時間の増大に伴い変位は単調な増加を示し、0.5mm程度の変位(公称ひずみ換算で2.5%)を示した時点で打撃速度である650 mm/secに達した。図中(b)に示した見かけの公称応力は荷重を平行部初期断面積で割って求めたものであるが、試験片材質のよらずいずれも振動を示している。振動周期は1msec程度であった。振幅は引張速度の増大に伴い大きくなる傾向が見られ、今回の試験機系ではここで示した変形速度を650 mm/secとする条件が、荷重の評価が可能である最大の変形速度であった。こうした弾性変形波の顕在化は、特に引張試験片のゲージ部の大きさが大きいほど大きくなることが知られている²⁾。これらのデータから求めた公称応力-公称ひずみ曲線を図5に示す。低速試験結果と同様に温間高速変形とした場合であっても、その強度レベルには組織の差が反映し難いことがわかる。

一方で、延性に関してはこれまでに報告のない結果が得られた。図6は減面率と変形速度の関係を示している。図中に既報⁴⁾の室温試験結果に今回得られた500°Cにおける試験結果をプロットしている。室温試験結果に関して言えば、組織の違いによらず、変形速度が特に100 mm/sec以上になると絞りは減少する。同様の結果が500°Cにおける今回の結果でも確認できた。これらの特徴は、加工発熱の観点から説明することができる。一般に高速変形では加工発熱の消散する時間的余裕がなく、試験片が加熱する⁵⁾。炭素鋼の場合、青熱脆性域において延性の増大に反して絞りの低下が生じる。そのため、高速変形に伴う試験温度の高温化に伴い、絞りの低下が生じたものと考えられる。特に温間域高速変形では水冷材と比べて空冷材のほうが絞りが小さくなる傾向も見て取れた。この原因については現時点では明らかとはなっていない。少なくとも炭化物の存在密度が小さい弱い部分が局部的にも存在すると、特に温間加工性に対しては不良となる可能性を示唆しているものと思われる。

4. まとめ

本研究では、ホプキンソンバー法をベースとし、電気炉、冷却装置およびレーザ変位計を組み合わせることで高温高速変形試験が可能な試験機系を構築した。

得られた試験機系を用いて丸棒試験片を用いて高速高温引張試験を行い、絞りを評価することにより微細粒組織を有する炭素鋼の温間加工における組織と加工性の相関について考察した。炭化物の分布が金属組織スケールで不均一であると高速変形時に絞りが大きく低下するという組織-特性間の相関を得ることができた。

謝辞

本研究は、天田財団の一般研究開発助成(塑性加工)を受けることにより遂行することができた。衷心より謝意を表す。

参考文献

- 1) Y. Kimura, T. Inoue, F. Yin, K. Tsuzaki, SCIENCE, 320, (2008), 1057-1060.
- 2) S. Nemat-Nasser: ASM Handbook Vol.8; Mechanical Testing and Evaluation, (ASM International, US, 2010) p. 427.
- 3) T. Inoue, F. Yin, Y. Kimura, K. Tsuzaki, S. Ochiai, Metall. Mater. Trans. A, 41A (2010) 341-355.
- 4) R. Ueji, T. Inoue, Mater. Trans., 58 (2017) 1487-1492.
- 5) 土田紀之, 友田陽, 長井寿, 鉄と鋼, 90 (2004), 1043.