



T. Iwamoto

TRIP 鋼の衝撃塑性変形中における温度、組織変化、力学特性を測る

岩本 剛*

1. はじめに

準安定なオーステナイト組織を持つ鋼が塑性変形を受けると、ひずみ誘起マルテンサイト変態 (SIMT) 効果によりその組織の一部がより安定なマルテンサイト相へと変化する。SIMT を伴う鉄鋼系材料は強度だけでなく延性およびじん性の向上も期待できる。この SIMT により高強度、高延性および高じん性を示す現象を TRIP (変態誘起塑性) と言う¹⁾。TRIP を示す鉄鋼系材料を TRIP 鋼と呼ぶ。

近年、自動車業界では衝突安全性の向上と軽量化が求められている。これらの要求を満足するために、TRIP 鋼の優れた機械的特性を利用した衝撃吸収部材を自動車に適用することが期待されている。一方で、優れた延性を有する TRIP 鋼を使用することによって構造材料の板厚を薄くすることができる可能性がある。この薄肉化に伴い、車体が軽量化されると考えられる。TRIP 鋼の信頼性を向上させる上で、衝撃荷重下において SIMT 挙動を制御することが重要となる。その第一歩として、変形中のマルテンサイト量を評価することが必要である。

従来の研究から TRIP 鋼の体積抵抗率とマルテンサイト量は相対関係にあることが報告されている^{2), 3)}。それゆえ、高速現象においても連続的に測定が可能である電気抵抗法を用いて体積抵抗率変化を測定し、間接的にマルテンサイト量の変化を評価することは効果的な方法であると考えられる。過去に報告されているように、マルテンサイトは低温において大量に生成される。また、低温では変形中の体積抵抗率が著しく変化することが報告されている。しかしながら、室温においては生成されるマルテンサイト量が少ないため、体積抵抗率変化も小さくなり測定が困難となる。それゆえ、室温において体積抵抗率変化を精度よく測定することが求められる。一方で、マルテンサイトの生成は温度に強く依存する。そのため、衝撃試験中の塑性変形では不可逆仕事により試験片の温度が上昇することを考慮しておくべきである。

本研究では、TRIP 鋼の一種である SUS304 試験片を用いて、分割式ホプキンソン棒法による衝撃圧縮および引張試験を行い、万能材料試験機による準静的圧縮および引張試験を行う。その後、電気抵抗法に基づく直流電位差法回路および Kelvin ダブルブリッジ回路を試作し、体積抵抗率変化の測定を試みる。加えて、極薄熱電対を用いて室温での変形中の試験片の温度変化測定を行う。

2. 実験装置

2.1 分割式ホプキンソン棒装置

分割式ホプキンソン棒法は高速変形における材料の変形挙動を研究するために広く使用されている。この方法は応力棒中を伝播する弾性波を測定することにより衝撃変形中の試験片に作用する応力ひずみ曲線とひずみ速度を間接的に得るものである。

ここでは、試験片に作用する平均公称応力、平均公称ひずみおよび平均公称ひずみ速度を計算する一般的な方法を紹介する。図 1 に圧縮試験用の分割式ホプキンソン棒装置の概略図を示す。打撃棒が入力棒端面に衝突すると接触面に弾性ひずみ波が生じ、入力棒中を伝播する。図 2 に示すようにひずみ波は出力棒へと透過し、一部の弾性波は接触面において反射する。入力棒から出力棒へ透過するひずみ波により試験片は圧縮され、その際の試験片内の平均公称応力 σ_{av} は次式によって計算される。

$$\sigma_{av} = \frac{A}{A_s} E(\varepsilon_i + \varepsilon_r + \varepsilon_t) \quad (1)$$

ここで、 ε_i は入射ひずみ波、 ε_r は反射ひずみ波、 ε_t は透過ひずみ波を表す。 A 、 A_s 、および E はそれぞれ応力棒と試験片の断面積、および応力棒のヤング率を示す。

次に、試験片の平均公称ひずみ速度および平均公称ひずみについて考える。一次元弾性波伝播理論に従えば、試験片と応力棒の接触面での粒子速度は

$$v_{in} = C(\varepsilon_r - \varepsilon_i), \quad v_{out} = -C\varepsilon_t \quad (2)$$

ここで、 C はひずみ波の伝播速度、 v_{in} および v_{out} は試験片両端面の粒子速度である。それ故、試験片の長さを ℓ とすれば、試験片の軸方向における平均公称ひずみ速度は次の式によって表される。

$$\dot{\varepsilon}_{av} = \frac{v_{out} - v_{in}}{\ell} = \frac{C}{\ell}(\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) \quad (3)$$

さらに、上式を時間積分すれば平均公称ひずみを得る。

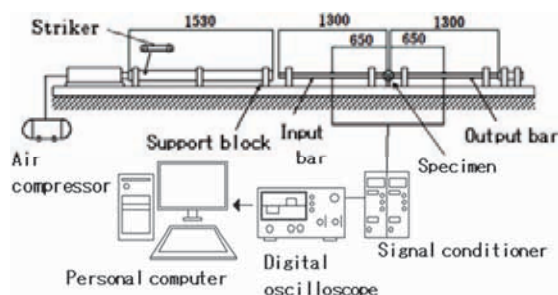


図 1 ホプキンソン棒法型衝撃圧縮試験装置の模式図

* 広島大学大学院工学研究院 准教授

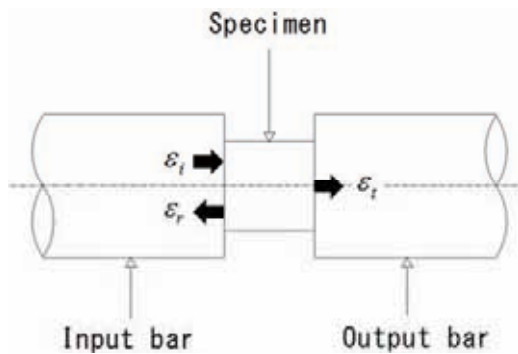


図 2 弾性波伝播課程中の試験片付近の入射, 反射および透過ひずみ波

2.2 体積抵抗率測定回路

図 3 は Kelvin ダブルブリッジを用いた回路図を示す。5 つの標準抵抗 M, N, m, n, r , 可変抵抗 R および抵抗値 R_x の試験片から構成される。可変抵抗器の抵抗値を調節することによって, A - B 間の電位差がゼロとなり, 平衡状態を得る。試験片の抵抗が変化すれば, この A - B 間の平衡状態は失われ, 電位変化 Δe が生じる。 Δe を測定することにより, キルヒホッフの法則を用いれば, 下式のように試験片抵抗の変化 ΔR_x を求めることができる。

$$\Delta R_x = \frac{M+N}{M I_1} \Delta e \quad (4)$$

ここで, I_1 は可変抵抗器を流れる電流を表す。 I_1 および Δe はオシロスコープにより記録され, 各時刻における試験片の抵抗変化を得ることが出来る。 ΔR_x を時間積分した後, 体積抵抗率 ρ は試験片の抵抗値を用いて次式により計算可能である。

$$\rho = \frac{A_s}{\ell} R_x \quad (5)$$

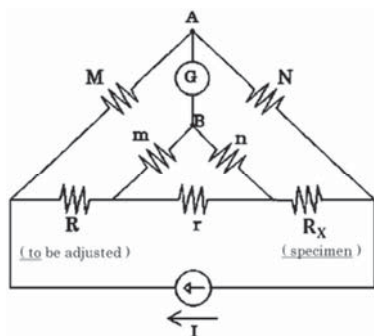


図 3 Kelvin ダブルブリッジ回路の模式図

四端子法に基づく直流電位差法回路を図 4 に示す。この回路は標準抵抗 R_s および抵抗値 R_x を持つ試験片から成る。試験片抵抗はオームの法則を用いて標準抵抗および試験片の電圧を測定することにより, 次式から求められる。

$$R_x = \frac{V_x}{V_s} R_s \quad (6)$$

ここで, V_x および V_s は試験片および標準抵抗に印加される電圧を表す。なお, 試験片の体積抵抗率は式 (5) より算出することが出来る。

式 (5) および式(6)に示すように, 直流電位差法は各時刻における試験片の抵抗値を測定することに対して, Kelvin ダブルブリッジでは試験片の初期抵抗値からの変化分を測定する。それ故, 直流電位差法では測定レンジを試験片抵抗値に合わせる必要がある。一方, Kelvin ダブルブリッジでは, 測定レンジを抵抗値の変化そのものに合わせて設定する事が出来る。これより, 変形中の抵抗値変化の測定に関して, 直流電位差法に比して Kelvin ダブルブリッジの方が優位であると考えられる。

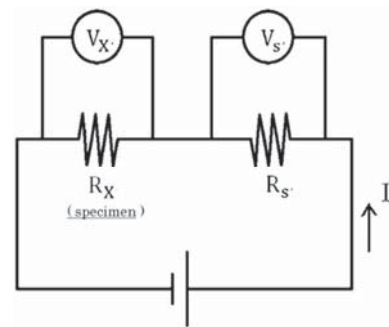


図 4 直流電位差法を基礎とした電気回路の模式図

3. 実験方法

3.1 準静的試験

準静的圧縮および引張試験は, 万能力学試験機 (Shimadzu AG-25kN) を用いて 2 種類のひずみ速度で行う。圧縮および引張試験ともにひずみ速度が $1.2 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ および $1.2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ になるよう, クロスヘッド速度を設定した。圧縮試験では試験片端面にモリブデングリースを塗布しており, 摩擦の影響を軽減している。

3.2 衝撃試験用分割式ホプキンソン棒法

衝撃圧縮試験用装置は直径 16mm, 長さ 1300mm の入力棒および出力棒, 直径 16mm, 長さ 500mm の打撃棒, そしてシグナルコンディショナー, オシロスコープおよび PC から成る測定装置によって構成される。衝撃引張試験用装置は直径 16 mm, 長さ 2500 mm の入力棒, 直径 16 mm, 長さ 1250 mm の出力棒, 内径 17 mm, 外径 23 mm, 長さ 533 mm の打撃棒および測定装置から成る。

図 1 および 5 はそれぞれ圧縮ならびに引張試験用装置の概略図を示す。入出力棒はリニアベアリングにより保持されており, 打撃棒と一直線上に設置, 調整されている。2 本の光ファイバーがランチャー先端部に 20 mm の間隔を持って設置されており, 打撃棒が光ファイバーの間を通過する時間を測定することによって, 打撃棒が入力棒に衝突する瞬間の速度を求めることが可能である。

圧縮試験では, 試験片は入力棒と出力棒の間に挟み込んで固定される。引張試験では, 試験片を応力棒間に固定するため, 応力棒と試験片にはネジ部が設けられている。入力棒の一端にはフランジ部が設けられており, 打撃棒はこのフランジに向け圧縮試験と同様に圧縮空気を瞬間的に開放することにより射出される。打撃棒がフランジに衝突すると, 圧縮ひずみがフランジ内で反射され引張ひずみ波となって応力棒中を伝播する。平均公称応力, 平均公称ひずみおよび平均公称ひずみ速度は前述

した衝撃圧縮試験と同様の方法で得られる⁴⁾。

応力棒中を伝播する弾性波を曲げひずみの影響を除去した形で測定するために、2つの半導体ひずみゲージ(共和電業 KSP-2-120-E3)を入出力棒に軸方向中央部の軸対称位置に貼付けた。これらのゲージは Wheatstone ブリッジに接続されており、ブリッジ内に生じた電位差をシグナルコンディショナー(共和電業 CDV-700A)を用いて増幅し、デジタルオシロスコープ(横河電機 DL-2700)へと記録する。この電圧をひずみへと変換する。図6は圧縮試験において入出力棒から得られた軸方向ひずみの時刻歴を示す。正の信号は引張ひずみパルスであり、負の信号は圧縮ひずみパルスを表す。

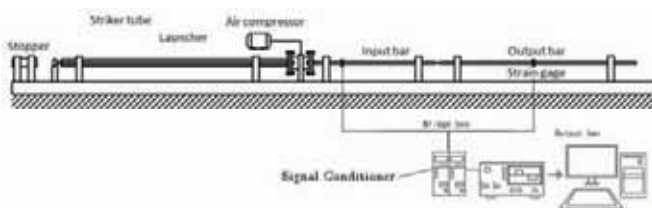


図5 ホプキンソン棒法型衝撃引張試験装置の模式図

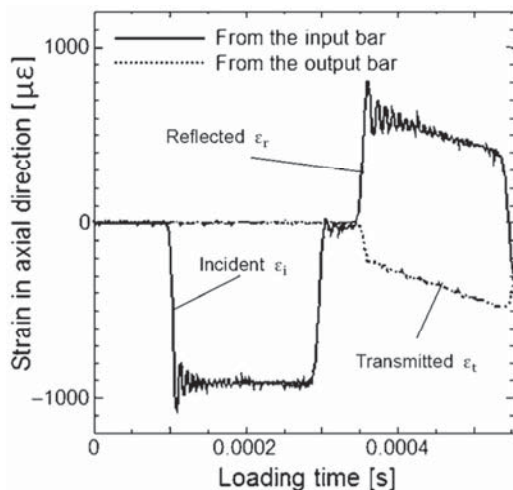


図6 入射、反射、透過ひずみ波の生時系列データの一部

3.3 体積抵抗率変化

低抵抗値の測定ではリード線の役割は2つに分別される。電流を供給するリード線は電圧を測定するリード線の外側に設置される。リード線の設置にはスポット溶接を用いた。これらのリード線は直流電源(松定プレジジョン PLE-18-3)および Kelvin ダブルブリッジまたは直流電位差法に基づく電気回路に接続される。

Kelvin ダブルブリッジ回路では2つのシグナルコンディショナー(共和電業 CDV-700A)が接続されている。ひとつのシグナルコンディショナーは試験片にかかる電圧を増幅し、一方は標準抵抗に負荷される電圧を増幅する。これらの電圧信号をオシロスコープ(横河電機 DL-2700)に記録する。同様に、直流電位差法に基づく回路においても電圧信号はシグナルコンディショナーを用いて増幅されオシロスコープに記録される。これら2つの回路の測定精度を調べるため、低抵抗器の値を測定し、市販の抵抗測定装置(HIOKI 3541)を用いて得られた値

と比較する。

3.4 温度変化

衝撃変形では、塑性変形に伴う不可逆仕事により試験片の温度が上昇し、マルテンサイトの生成に影響を及ぼすことが予想される。それゆえ、衝撃変形中の温度変化を捉えることが必要となる。ここで、衝撃変形中の温度変化を捉えるため極薄熱電対を用いて測定を行う。衝撃変形中に温度は急激に変化すると考えられ、測定には高い応答性が要求される。赤外線カメラを用いて衝撃変形中の温度変化の測定を試みられている⁵⁾が、熱電対以外の測定装置では、衝撃試験を追従できるような高い応答性は得難い。しかし、通常の熱電対ではそれほど速い現象を捉えることは不可能であるため⁶⁾、本研究では熱電対の先端を厚さ100 μm に圧延し、応答性を向上させた後、スポット溶接を用いて試験片に固定した。

3.5 試験片

試験片には TRIP 鋼の一種である SUS304 を用いる。準静的圧縮試験片は直径14 mm、長さ21 mm、準静的引張試験片は直径5 mm、ゲージ長6 mm、衝撃圧縮試験片は直径5 mm、長さ6 mm、衝撃引張試験片は直径4 mm、ゲージ長さ5 mmである。試験片はワイヤーカット放電加工装置を用いて加工され、材料組織を準オーステナイト組織にするため1323 Kにおいて30分間固溶化熱処理を施した。

4. 実験結果及び考察

4.1 応力ひずみ曲線およびひずみ速度

図7は、分割式ホプキンソン棒法衝撃試験から得られた真応力-塑性ひずみ曲線、図8はひずみ速度の時刻歴を示す。図に示すように、応力は衝撃引張試験に比して圧縮試験の方が高く、ひずみ速度についてはほぼ同様である。図9は、応力ひずみ曲線を衝撃試験と準静的試験において(a)圧縮、および(b)引張に分類し、比較したものである。圧縮、引張試験の両者において衝撃試験下での応力レベルが準静的試験よりも高くなっている。応力レベルはひずみ速度の上昇に伴い増加しているように見えるが、準静的試験ではその変化は僅かである。準

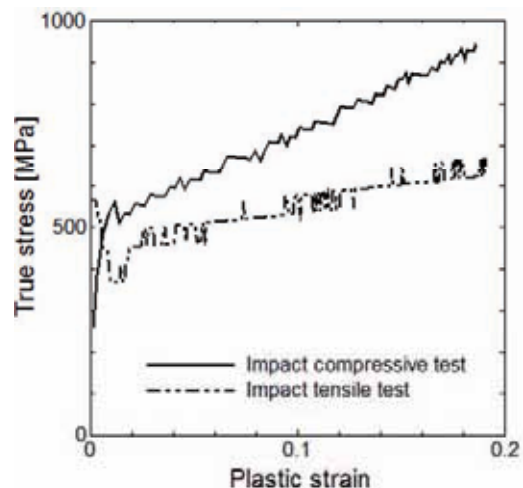


図7 衝撃引張および圧縮試験により得られた真応力-塑性ひずみ関係

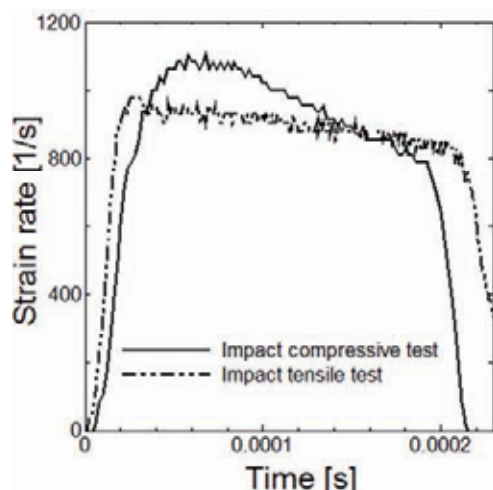
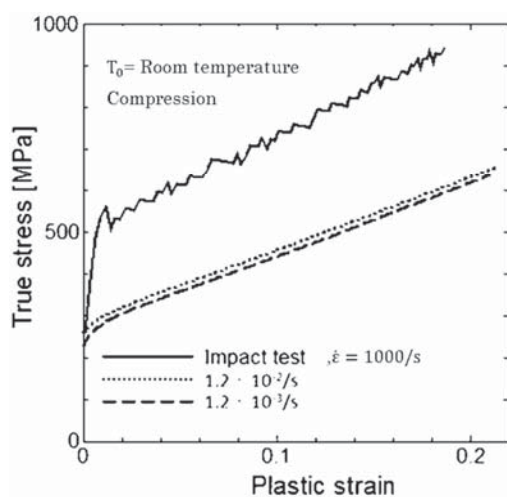
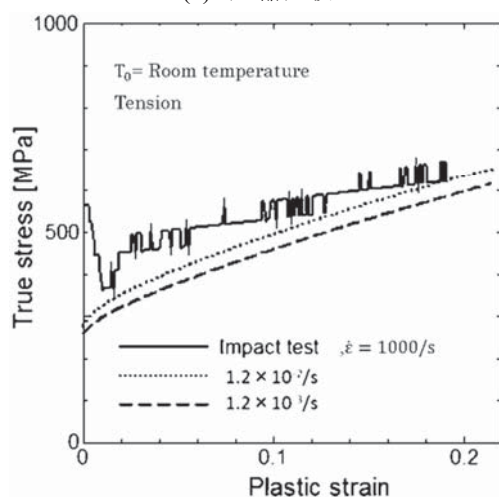


図 8 衝撃引張および圧縮試験により得られた公称ひずみ速度の時刻歴



(a) 圧縮試験



(b) 引張試験

図 9 各ひずみ速度における圧縮、引張試験より得られた真応力－塑性ひずみ関係

静的圧縮および引張試験中の応力レベルはほぼ同程度であるが、準静的引張試験中のひずみに対する応力レベルの増加量は徐々に減少しているように見える。これらの結果より、応力ひずみ関係はひずみ速度だけでなく、変

形様式にも依存しているものと考えられる。

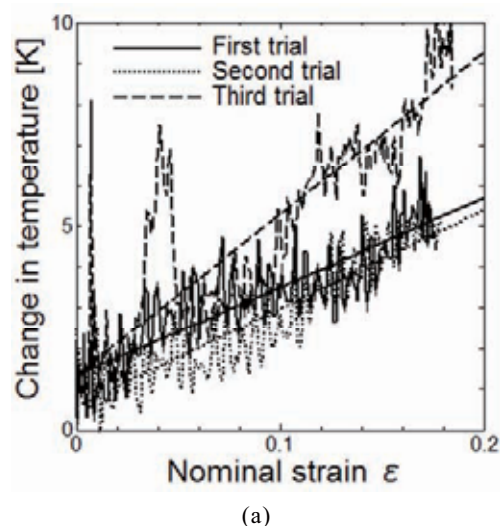
この結果は過去の研究における準静的状態においても見受けられる⁷⁾。衝撃試験下においても引張・圧縮での応力ひずみ関係の非対称性が観察できる。

4.2 温度変化

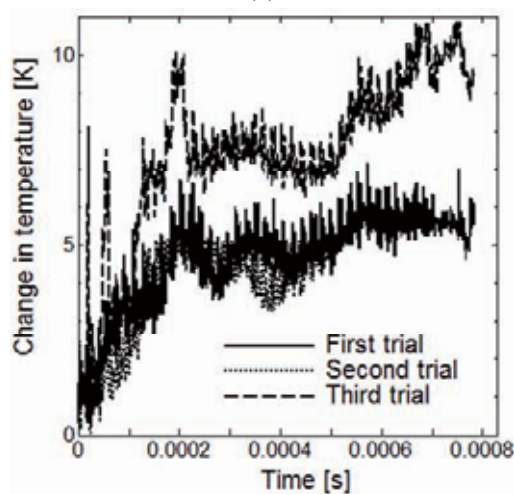
図 10 (a) は温度－公称ひずみ関係、(b) は温度変化の時間履歴を示す。この図 (a) より振動が見られるが温度変化の平均形状はおよそ直線的であり、およそ 6～10 K の上昇であると考えられる。また、図 6 より試験片が変形する時間間隔はおよそ 2 ms であると考えられ、図 10 (b) に示すように変形後の温度上昇は僅かである。従って、極薄熱電対は衝撃変形中の温度変化を捉えることが可能であるものと考えられる。しかしながら、過去に行われた数値シミュレーションによれば、公称ひずみ 0.2 における温度上昇はおよそ 20 K⁸⁾ であることから、更なる検討を要する。

4.3 体積抵抗率変化

変形中の TRIP 鋼の体積抵抗率変化を測定するにあたり、Kelvin ダブルブリッジと直流電位差法を用いて予め抵抗値の分かった抵抗器と衝撃圧縮試験で使用する試験片の抵抗値を静止状態において測定し、市販の抵抗



(a)



(b)

図 10 衝撃圧縮試験から得られた (a) 温度－公称ひずみ関係、(b) 温度の時刻歴

計で得られた測定値と比較して測定精度を調査した。抵抗器は 3 つのチップ抵抗器を並列に接続したものから成る。それぞれのチップ抵抗の抵抗値は $200\ \mu\Omega$ であることから、抵抗器全体の抵抗値は理論上 $66.67\ \mu\Omega$ である。表 1 は直流電位差法回路、Kelvin ダブルブリッジ回路および市販の抵抗計から得られた測定結果を示す。これらの測定値はよく一致している。よって、本実験で試作した 2 つの測定回路の静止状態における測定精度は市販の抵抗計と同レベルであると考えられる。次に、試作した測定回路を用いて TRIP 鋼の体積抵抗率変化を測定する。図 11 は Kelvin ダブルブリッジ回路により測定された (a) 圧縮試験中の体積抵抗率変化、および (b) そ

表 1 本研究で試作した直流電位差法, Kelvin ダブルブリッジを基礎とする抵抗測定装置ならびに市販の抵抗計を用いた抵抗値の比較

Apparatus Object	Ohm meter	DC current potential difference	Kelvin double bridge
Tip resistor	$62.5\ \mu\Omega$	$64.0\ \mu\Omega$	$63.7\ \mu\Omega$
Specimen	$69.5\ \mu\Omega$	$63.0\ \mu\Omega$	$63.1\ \mu\Omega$

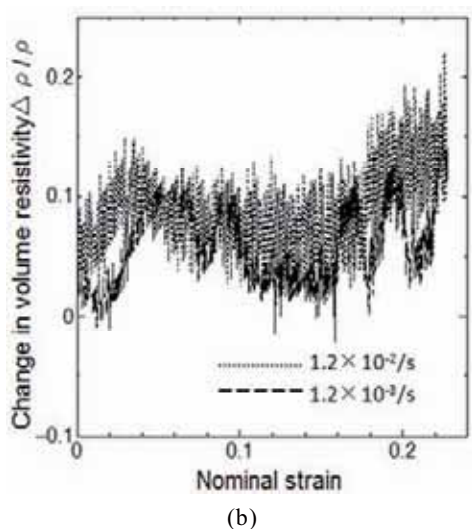
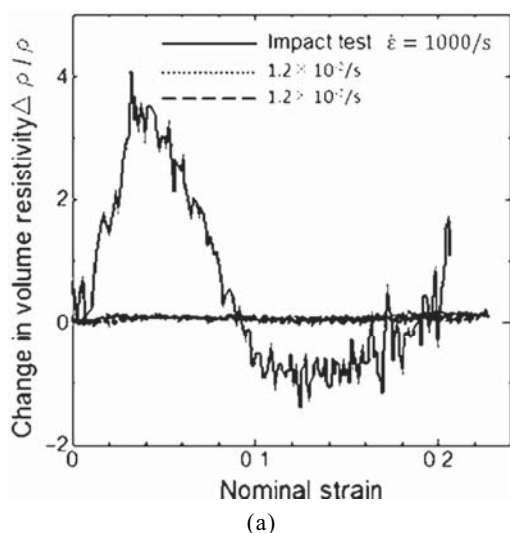


図 11 各ひずみ速度における引張試験中に Kelvin ダブルブリッジを用いて測定した体積抵抗率－公称ひずみ関係, (b) その縦軸の拡大図

の縦軸を拡大したものである。図 12 は Kelvin ダブルブリッジ回路により測定された (a) 引張試験中の体積抵抗率変化、および (b) その縦軸を拡大したものである。まず、圧縮試験の測定結果について考察する。衝撃試験中の体積抵抗率変化は初期変形においてピークを示しており、準静的試験においても小さいピークを持っている。体積抵抗率変化はピーク後に僅かながら増加傾向を示している。Kelvin ダブルブリッジにより得られた体積抵抗率変化は公称ひずみに対して増加しており、加えてひずみ速度依存性を示している。体積抵抗率変化は圧縮変形と引張変形の間で差異が生じており、引張変形中の体積抵抗率変化はおおよそ直線的に変化しているように見える。一方、圧縮変形中の体積抵抗率変化は非線形的であり、より複雑な変化であるように見える。しかしながら、本研究では圧縮試験において試験片と応力棒間にモリブデングリースを塗布しており、応力棒から試験片を絶縁しているのに対し、引張試験ではネジ部により試験片を応力棒に固定しているため、絶縁が不十分である。そのため、圧縮試験と引張試験の測定に影響を及ぼす可能性があると考えられる。

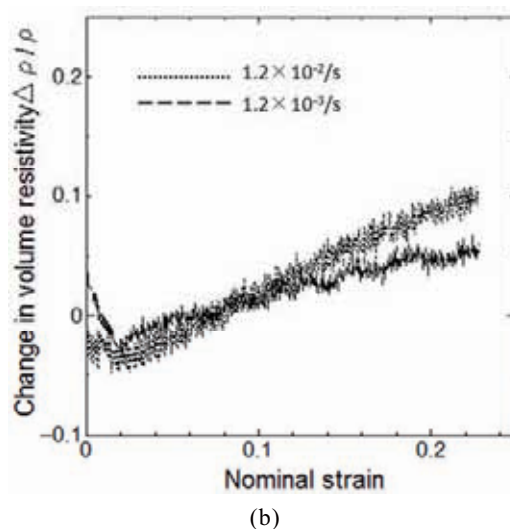
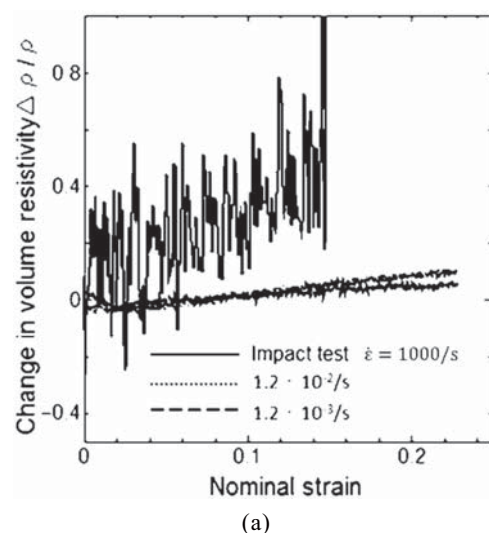


図 12 各ひずみ速度における圧縮試験中に Kelvin ダブルブリッジを用いて測定した体積抵抗率－公称ひずみ関係, (b) その縦軸の拡大図

体積抵抗率変化をマルテンサイト変態量に換算するため、今後体積抵抗率とマルテンサイト量の関係を表す校正が必要となる。

5. おわりに

本研究では、TRIP 鋼の一種である SUS304 の準静的および衝撃変形中の体積抵抗率変化および温度変化の測定を試みた。変形中の体積抵抗率変化を測定するために Kelvin ダブルブリッジおよび直流電位差法を用い、衝撃圧縮変形中の温度変化の測定には極薄熱電対を用いた。

高ひずみ速度においても、応力-ひずみ関係は、過去の研究において報告されているような変形様式依存性を示すものと考えられる。

Kelvin ダブルブリッジおよび直流電位差法の静止状態における試料の抵抗値測定の精度は同程度であることを確認した。体積抵抗率変化はひずみ速度の上昇に伴い増加し、また、圧縮と引張において異なる挙動を示す。

用いた極薄熱電対は、衝撃変形中の温度変化を捉えることが可能であると考えられ、衝撃変形中の温度変化は平均化すればおよそ直線的に上昇する挙動を捉えることが可能となった。

謝辞

本研究は、(財) 天田金属加工機械技術振興財団の補助のもとに行われた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) I. Tamura, On TRIP steel, J. the Iron Steel Inst., Japan, 56, 3, 429-445, 1970
- 2) H. Date, M. Futakawa, S. Ishikura, Strain rate dependence of electric resistivity of stainless steel, Proc. of Jpn. Soc. Mech. Eng, 1, 01-1, 363, 2001
- 3) A. Takimoto, R. Nishida and S. Shoda, Relationship between the Electrical Resistivity and the Volume Fraction of Martensite Induced by Quenching and Deformation, J.Inst. Metals Japan, 49, 5, 313-319, 1985
- 4) T. Yokoyama, Impact Tensile Properties of Friction Welded Butt Joints between 6061 Aluminum Alloy and Type 304 Stainless Steel, JSME Int. J., 46, 3, 308-315, 2003
- 5) R. Kapoor and S. Nemat-Nasser, Determination of temperature rise during high strain rate deformation, Mechanics of Materials, 27, 1-12, 1998.
- 6) D. Rittle, On the conversion of plastic work to heat during high strain rate deformation of glassy polymers, Mechanics of Materials, 31, 131-139, 1999
- 7) T. Iwamoto, T. Tsuta and Y. Tomita, Investigation on deformation mode dependence of strain-induced martensitic transformation in TRIP steels and modeling of transformation kinetics, Int. J. Mech. Sci., 40, 2-3, 173-182, 1998
- 8) T. Iwamoto, M. Cherkaoui and T. SAWA, A Numerical Study on an Impact Deformation Behavior of TRIP Steel, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, 75, 752, 404-409, 2009