

TRIP 効果のある鋼を利用した最大ひずみセンサーの研究

—第一報：ステンレス鋼を用いた場合のセンサ特性—

Maximum Strain Sensor using Steels having TRIP Effects

大堀 真敬*・藤田 隆史*・大開 実**

Masanori OHORI, Takafumi FUJITA and Minoru OHIRAKI

1. はじめに

炭素鋼は温度によって結晶組織が異なり、物理的性質も異なることは一般に知られている¹⁾。オーステナイト系ステンレス鋼では高温では体心立方構造のフェライト状態であり低温になるに従って面心立方構造のオーステナイト組織、体心立方構造のマルテンサイト組織へと変化する。しかしある種のステンレス鋼では、ある温度においてオーステナイト組織であったものがひずみを受けるだけでも相変態が生じることが知られている。しかもこの現象はひずみに対して不可逆的な性質を有するとされている²⁾ので、ひずみが増加しても一度変態を生じた部分はそのまま残ることになる。したがって、ひずみと相変態の関係を知ることが可能であれば過去に受けた最大ひずみを知ることが可能になる。

上記のようにひずみによる相変態を生じる性質は TRIP (Transformation Induced Plasticity) 効果と呼ばれ、本研究

ではこの性質を有する材料を用いた最大ひずみを記憶するセンサを製作し、構造物に設置しその健全性を監視するシステムを構築することを目的とする。

一般的なオーステナイト系ステンレス鋼である SUS 304 (18-8 ステンレス) についてもこの性質があることが知られており、本報告では、システムに適用する可能性について単軸引張り試験及び3点曲げ試験を行ったので以下に報告する。

2. 測定装置

TRIP 効果を有する材料のマルテンサイト相に変態した量は材料の透磁率の変化として現れ、これはコイルのインピーダンスの変化として計ることができる。したがって丸棒状の材料にコイルを巻きつけ、引張りあるいは曲げ変形を加えながら LCZ メータによりコイルのインピーダンスを測定した。

3. 単軸引張り試験

初めに図1のようなくびれ平行部 20 mm の試験片を作成し、引張り試験機により単軸ひずみとインピーダンスの変化の関係を調べた。試験片は組織をオーステナイト状態に揃えるために、加工した後固溶化熱処理を行ったものを使用した。またひずみとインピーダンスは別々の試料で測定し、最終的にひずみとインピーダンスの関係として求めた。図1は試験片にコイルを巻いたものを並べて示した。

図2は (a) に応力対ひずみ、(b) に応力対インピーダンス、(c) には (a) と (b) のそれぞれ3回の測定結果を平均した値を用いてひずみ対インピーダンスの関係としたものを測定結果として示した。図2 (a) では測定毎にわずかなバラツキが見られるものの引張り応力が約 109 MPa から塑性域に入っている様子が分かる。同 (b) では (a) で塑性域に入るあたりから急激な減少が見られる。また、

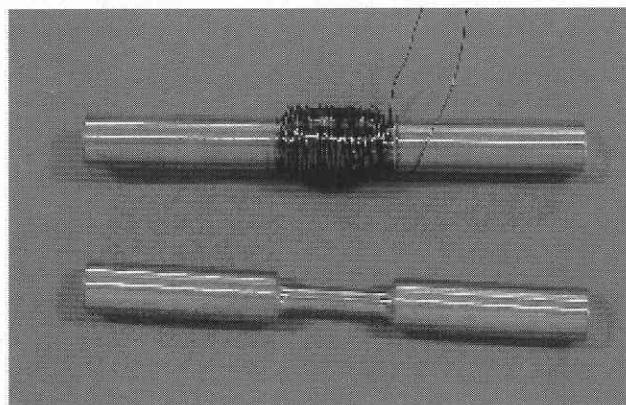


図1 引張り試験片

*東京大学生産技術研究所 情報・システム大部門

**三菱製鋼株

研 究 速 報

塑性域に入った直後までの測定毎のインピーダンスの変化は良い一致を見せているが、それ以降は測定毎のバラツキが急に大きくなっている。しかしいずれも飽和傾向を示している。なおインピーダンスの測定はLCZメータによる測定値のサンプル間隔が引張りの速度に対して遅いため滑らかでない。

図3(c)はインピーダンス変化の減少の割合に対してひずみとの関係に換算したものである。このグラフから単

軸引張りとの条件下ではあるが、インピーダンスを測定することでひずみが測定可能であることが示されている。

4. 三点曲げによる特性試験

本研究の目的は構造物が受けた過去の最大ひずみを記憶するシステム用のセンサをTRIP効果を利用した材料で開発することである。前項での単軸引張り試験では装置の制約から引張り荷重を繰り返し増減させることができなかったため、基本的な特性としてひずみとインピーダンスの関係を求めた。次に構造物が受ける外力を模擬した変動荷重状態によるひずみとインピーダンスの関係を求めるために3点曲げ試験を行った。通常の材料の3点曲げ試験は一方に加力するものであるが、本研究が目的とする繰り返し曲げを可能とする試験機を作成して実験を行った。

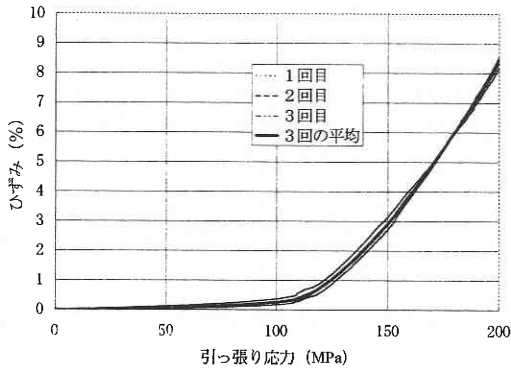


図2 (a) 応力とひずみの測定結果

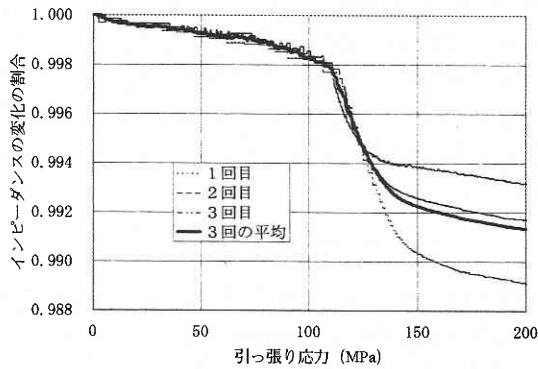


図2 (b) 応力とインピーダンスの測定結果

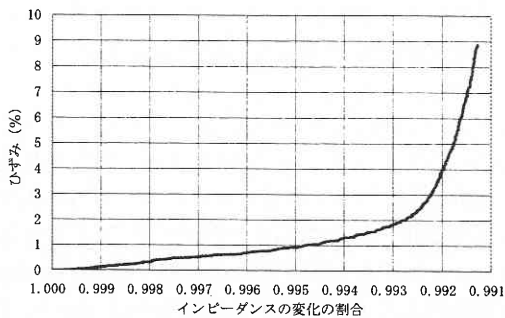


図2 (c) インピーダンスとひずみの関係

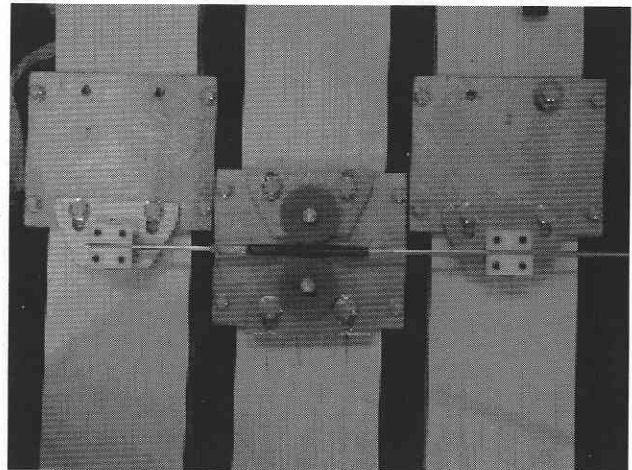


図3 (a) 3点曲げ装置の概観

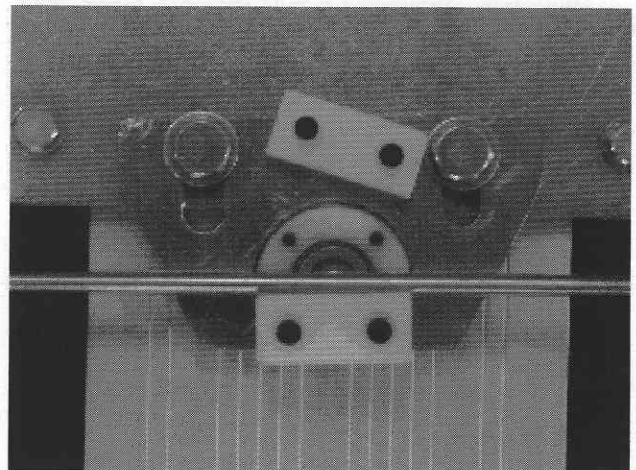


図3 (b) 両側スライド支持部の分解詳細

4.1 試験機の構成と試験片

試験機は図3(a)に示すように3個のリニアガイドに取りつけた支持部に試験片が固定されるようになっており、それぞれのガイドが独立にモータで駆動され試験片を曲げるような構成になっている。本実験では3点曲げが目的であるので両端のガイドは固定されており、装置中央のガイドのみ初期位置から前後に駆動させた。中央の移動ガイドはプラスチック製のプーリ2個でコイルを巻いた試験片を両端から挟みつけ固定する。また両端の固定ガイド部は、この位置での曲げモーメントの発生を押さえた点支持を実現させる構造とした。すなわち回転ベアリングの中心を通る直動滑りガイドで試料をゆるく挟み、試験片が曲げられた分だけ回転を伴いながら軸方向にスムーズに押し出されるような構造とした。それぞれの支持部の間隔は150 mmであり、図3(a)ではコイルを巻いた試験片を取りつけた様子を示している。図3(b)は両側の回転支持ガイド部分であるが、回転スライド支持部の構造が見えるようにスライドガイド部分の片側を外した状態である。

試験片は試験機の能力を考慮して直径5 mmのSUS 304の丸棒を使用した。また引張り試験で用いた試験片と同様固溶化熱処理を行った。

4.2 3点曲げによるひずみ分布の測定

単軸引張りの場合と同様ひずみとインピーダンスは同時には計測できないため、初めに曲げ量とひずみの分布を確認するためのひずみ測定を行った。ひずみゲージを試験片の曲げ中心から10, 20, 30 mmの位置に貼付し曲げ量に対して各部位に発生するひずみ量を計測した。曲げパターンは図4(a)の太線右縦軸で示すように一定振幅の三角形を9往復繰返し曲げることを1回の曲げ動作とし、2 mmから14 mmまで順次振幅を2 mmずつ大きくするパターンで行った。図中の下側細線左縦軸は最初の曲げ始めに対して引張りひずみが発生する側に位置する最大ひずみの変化の様子である。ほぼ変形パターンに追従しており、一定振幅での繰返し中も比較的再現性が良いが、(1) ひずみが

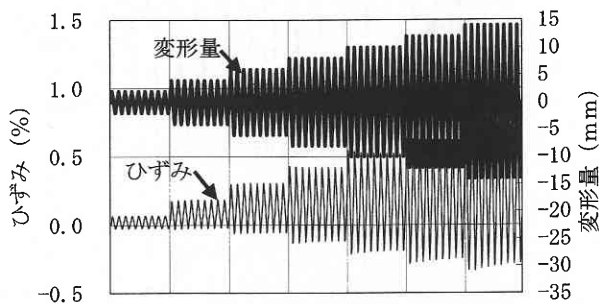


図4(a) 繰返し曲げにおけるひずみの変化

0.5%を越える頃から一定振幅の繰返しに対してひずみ変化の振幅が減少する傾向があること、(2) 三角形の1往復曲げに対する平均ひずみの変化が引張り側に偏っていること、(3) 支持間隔150 mmに対して曲げ量15 mmでも表面部の最大ひずみが1%に満たないことなどが特徴である。

図4(b)は最大ひずみが生じる曲げ先端部の最初に引張りひずみが生じる位置での曲げ量とひずみの関係を両軸として表現したものであるが、繰返し曲げに対してヒステリシスをもち引張り側に蓄積して行く様子が明瞭に示されている。この特性は反対側の表面においても符号が異なるのみで同様であった。

これらの結果から(1) 試験片表面での最大ひずみは曲げ位置から30 mm離れると最大曲げ位置での約30%に減少すること、(2) 最初に引張られるか、あるいは圧縮を受けるのかの初期曲げ方向にかかわらず、ひずみは引張り側に蓄積されるように偏る傾向があることなどがわかった。

4.3 曲げによるインピーダンス測定

4.3.1 一定振幅による繰返し曲げの場合

前項と同じ条件で3点曲げを行いインピーダンスの変化を測定した結果を図5に示す。ひずみ測定において曲げ変形量に対して表面のひずみは小さいことと、曲げ変形位置から離れるに従い急激にひずみが小さくなることがわかっているため、インピーダンス測定の効率を考慮して曲げ変形位置の付近を集中的に測定するようにコイルを巻いた。コイル長は約20 mmで約10層とした。図5は下側(左縦軸)の三角波形はひずみ測定時と同じ変形パターンを表し、右側(右縦軸)の曲線(右縦軸)はインピーダンスの変化の割合を表す。この時の変化の様子は、ひずみの変化が概ね変形量に追従して増減したのとは全く異なっている。すなわち特徴は3点あり、(1) 繰返し曲げ変形量の振幅が2 mmずつ

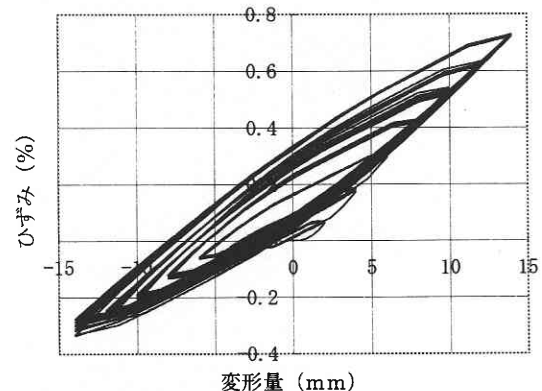


図4(b) 繰返し曲げにおける変形量とひずみ

研究速報

増加した瞬間にインピーダンスも急激に減少している、(2)一定振幅で9回繰返す間にも徐々にインピーダンスは減少を続けているが、この割合は変形量が増加する際に見られる減少の割合に比べて小さい、(3)繰返し曲げに対してインピーダンスは増加することはなく、常に減少している、ことである。

この結果から SUS 304 はある程度の最大ひずみを記憶する傾向がみられるものの、最大ひずみ記憶センサとして使用するためには上記特徴の(2)の特性が改善される必要がある。しかし低サイクルのひずみでも繰返し加えることで加工効果が進行する³⁾ことが一般に知られており、このことを考慮すると特性の(2)は材料内部でマルテンサイト変態が常に進行していることを示唆しているものと思われる。このことから一定ひずみ状態での繰返しによるマルテンサイト変態の進行速度とひずみ増加による変態進行速度の差が大きければ近似的に記憶効果ととらえることも可能と思われる。

4.3.2 減衰波形による繰返し曲げの場合

図6は3波で減衰する波を1動作として順次振幅を増加させていった結果である。下側の曲線(左縦軸)が変形曲線であり、3波が減衰する間は最初のインピーダンス値を一定に保持する階段状の傾向が見られる。しかし変形量が10mmを越えるあたりからこの傾向に乱れの発生がみられ、以後さらに悪くなっていることがわかる。このことは SUS 304 が理想的な最大ひずみの記憶という観点での特性は不十分であるが、コイルの検出方法やセンサとしての設置の方法など改善することで実用化できる可能性を示しているといえる。

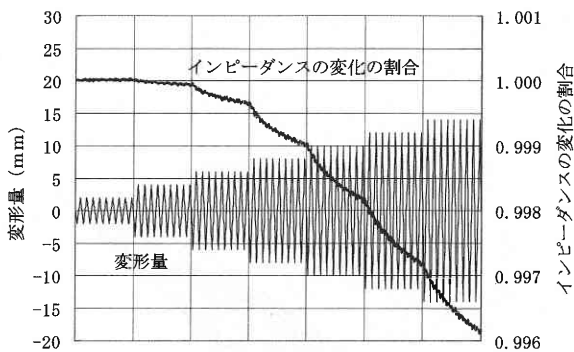


図5 繰返し曲げにおけるインピーダンスの変化

5. ま と め

SUS 304 の TRIP 効果を利用して最大ひずみ記憶センサ特性について調べた。単軸の引張りひずみとインピーダンスの関係は見出されたものの、3点曲げ試験においては理想的な最大ひずみ記憶特性は見られなかった。センサに要求される信頼性の観点からは一定ひずみの繰返し曲げは必要な条件ではあるが、センサに要求される条件としては厳しい項目である。しかし図6に示されたように繰返し回数を少なくした場合には記憶効果の特性が見られた。

本報告で行った3点曲げにおいては表面のひずみしか測定できないが、曲げられた時にセンサ材料に生じている変化は常に圧縮と引張りの両ひずみが内部に存在している。圧縮ひずみに対してどのような関係があるのか明らかにする必要があるが、現時点では定量的には単軸の引張りとの関係しか判明できず、曲げに対する特性を十分に明らかにすることはできなかった。

(2000年3月22日受理)

参 考 文 献

- 1) ステンレス協会編：ステンレス鋼便覧(第3版)。
- 2) Bruce D. Westermo and Larry D. Thompson: Design and evaluation of passive and active structural health monitoring systems for bridges and buildings, SPIE Vol. 2466, 37-45, 1995.
- 3) 日本機会学会編：機会工学便覧A編材料力学。

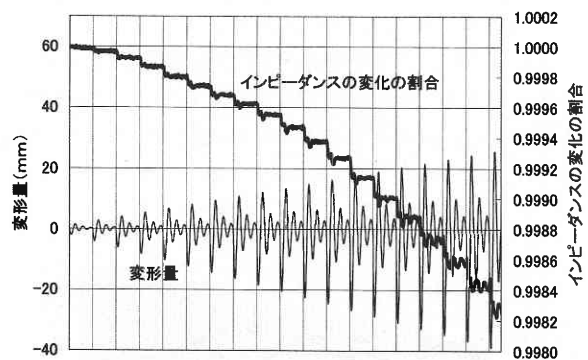


図6 漸増減衰変形におけるインピーダンスの変化