

TRIP 効果のある鋼を利用した最大ひずみセンサの研究

—第2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

—2 nd Report, Sensor characteristics of a stainless steel—

大堀 真 敬*・藤田 隆 史*

Masanori OHORI and Takafumi FUJITA

1. はじめに

建物や土木構造物の基礎杭の構造健全性を監視するセンサの開発を目的として、オーステナイト系のステンレスの特性である TRIP (Transformation-Induced Plasticity) 効果を利用することの可能性について、第一報では基礎特性について調べた。このとき TRIP 鋼と同様な性質を有する安価な材料として SUS 304 を用いて単軸引張りと同様の試験について調べた。TRIP 効果は応力と材料の結晶構造の変化として現れ、その結果として透磁率の変化として検出できることから、試験片にコイルを巻きインピーダンスの変化として応力に対するひずみの関連を検出する方法とした。

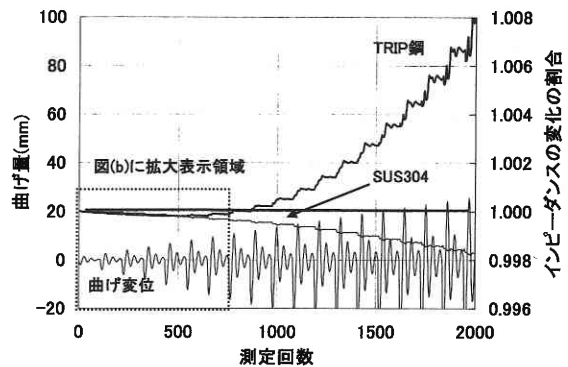
結果として以下の二点が明らかになった。¹⁾ 単軸引張りでは、比例的ではないもののひずみとインピーダンスの関係が対応付けられる。²⁾ 繰返し3点曲げ試験では一定繰返しひずみの条件では必ずしも最大ひずみは保存されないものの、減衰するような変形に対しては最大ひずみが保存されるような性質がみられた。

本報告では、第一報で SUS 304 で行った繰返し3点曲げ試験を TRIP 鋼について行い、続いて直径1mmの SUS 304 細線を用いて定量的な特性を調べる試験を行った。

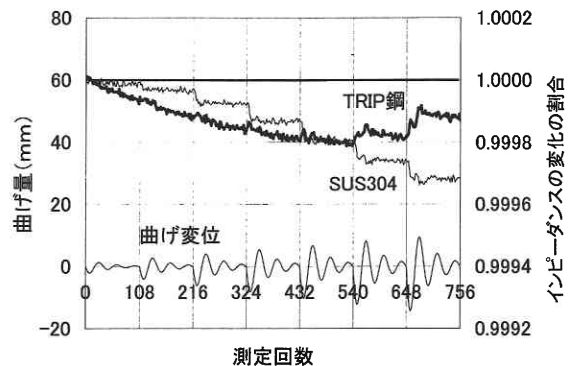
2. TRIP 鋼による繰返し3点曲げ試験

図1(a)は減衰波形状繰返し3点曲げを TRIP 鋼に対して行い、前報で示した SUS 304 の結果と比較したものである。曲げ変形量の増大に対してインピーダンスが階段状に増加する様子が明瞭に現れており、減衰波形に対してはある程度の記憶的な傾向が見られることがわかる。しかし、SUS 304 の場合と大きく異なるのは、インピーダンス値が SUS 304 では常に減少しているのに対し、TRIP 鋼の場合は曲げ開始時では僅かに減少するものの変形振幅が大き

なるに従い増加に転じていることである。図1(b)は振幅の小さいところでの様子を拡大したものであるが、TRIP 鋼では一度減少傾向を示した後増加している様子がわかる。この結果からはひずみの増大は TRIP 効果によってインピーダンスが増加するのか、あるいは減少するのか判断できない。TRIP 鋼がひずみに対して感度が高いことによるものと考えると、SUS 304 ではこの実験を行った数%



(a) 広いひずみ領域におけるインピーダンス変化



(b) 微小ひずみ領域におけるインピーダンス変化

図1 TRIP 鋼と SUS304 による減衰繰返し変形のインピーダンス変化の比較

*東京大学生産技術研究所 情報・システム部門

のひずみよりさらに大きい領域ではインピーダンスが増大する可能性が考えられる。

3. 細線による引張り試験

前報では最初に単軸引張り試験を行い、その結果においてひずみの増加に対してはインピーダンスの値は常に減少を示すことを確認しているが、使用した装置の機能的な制約から引張り変位の制御が精度良く行えなかった可能性もある。そこで繰返し3点曲げ試験を行ったモータ駆動の試験機を用いて1mmのSUS 304試験試料に対して引張り試験を行った。この装置では力は計測できないものの、引張り変位は精密に制御することが可能である。

3.1 測定状況と環境の確認

初めに本試験機は1mmのSUS 304細線を切断できる能力があることを確認した。実験は図2に示すように内径1.5mmの中空のコイルを製作し、この中に1mmのSUS 304細線を通して引張った。これまでは試験試料は1本毎にコイルを巻いていたため試験毎にコイル特性を同じにすることは困難であった。したがって結果を定量的に把握するには問題があった。しかし今回試験毎に同一コイルで測定することとしたことによりコイルに起因する結果のばらつきは改善される。

また、試料が把持部を含めて一様な太さの1mmの丸棒であるため、引張り変形が測定部分全体に均一に分布しない可能性がある。これは試験前に油性インキでマーカを付けて試験後に確認するようにしたところ、測定部分はほぼ均一に伸びていることを確認した。

さらに、引張り試験に先立ちコイル端点における磁束に対する周囲の磁性体が影響を及ぼす範囲を確認する測定を行った結果を図3に示す。これはコイルをSUS 304あるい

は非磁性体である木により中空に保持した状態にし、磁性体であるもう一方の試料固定台からの距離に対してインピーダンスの変化を測定したものである。この結果から、コイル端点から15mm以内に固定ジグがあるとコイルに影響を及ぼすことが分かる。つまりコイル端点から把持部迄の距離は15mm以上離して固定台に取り付ける必要があることがわかる。

3.2 引張り破断試験

以上の事をふまえて、SUS 304の1mm細線を破断するまで引張った試験の結果を図4に示す。図4は4回の測定結果であるが、測定毎のばらつきはきわめて小さいことと、引張り変形量が約15mmまでの範囲ではインピーダンス値はほぼ一定であることがわかった。また、破断もほぼ43mm付近で発生しており再現性の良い結果となっている。

このことから、初期測定長70mmに対して引張り変位15mm(引張りひずみ21%)まではインピーダンスは変化せず、43mm(引張りひずみ60%)までは増加すること。さらにコイル端点の管理をきちんと行うことにより安定した再現性の良い測定が可能となることがわかった。この結果は、SUS 304は引張りひずみ21%からマルテンサ

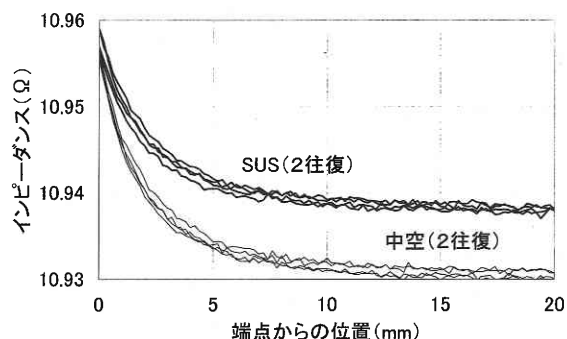


図3 コイル端点と把持ジグ距離に対するインピーダンス測定の結果

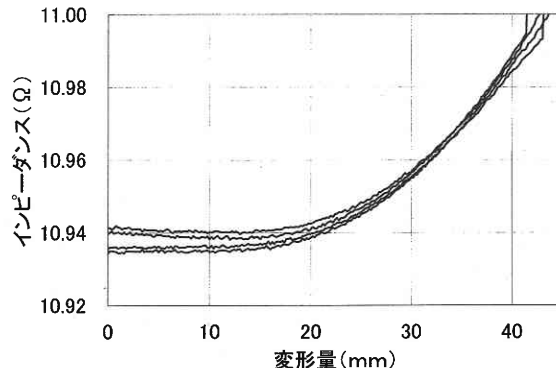


図4 コイル端点と把持ジグ間距離を管理した引張り測定管理した引張り測定

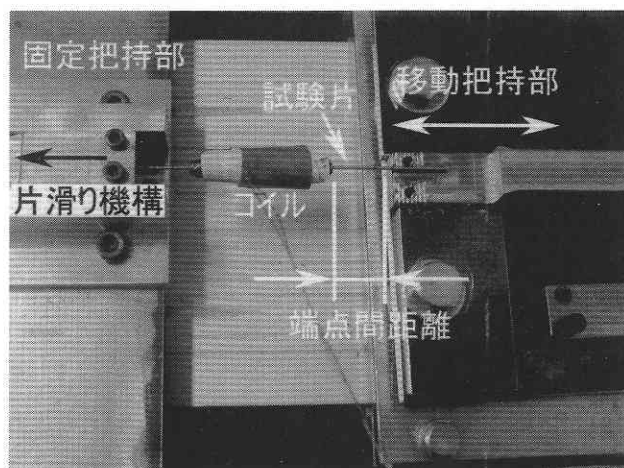


図2 細線の引張り試験におけるインピーダンス測定の様子

研究速報

イト変態が起こることにより磁気的特性が変化したものと考えられる。またコイルのインピーダンス値に反映される磁気特性としての透磁率は弾塑性の特性にかかわらず21%ひずみまで変化しないといえる。

4. 最大ひずみセンサとしての実用化に向けて

これまでの結果から SUS 304 でもひずみとインピーダンスの関係が明確に対応できることが分った。これを最大ひずみセンサとして使うためには以下の3点を考慮する必要がある。

- (1) センサ材料である SUS 304 に 21% の初期ひずみを与え、最大 60% のひずみまでの範囲で使用する
- (2) 圧縮時の線材の座屈を防ぐために、機械的に逃げる機構と組合せる必要がある
- (3) コイル端からの漏れ磁束の影響を受けないように注意すること

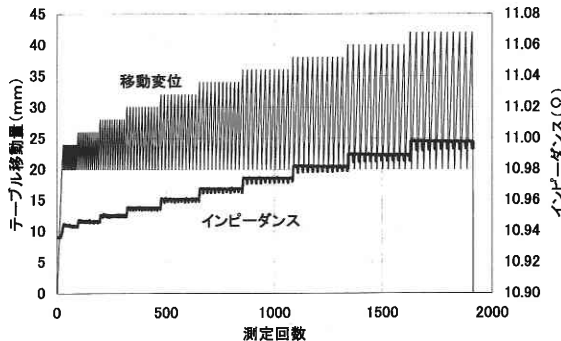
これらの事項を踏まえて実用化を想定した実験を行った。使用した装置は図2で引張り試験に使用したものである。この装置は試料の右側把持部はモータで駆動され、左側把持部は右側への引張りに対してはストッパーに当たり固定されるが、左側へ圧縮されるような動作に対しては左側に逃げるような構造になっている。

初期ひずみとして、変化を明確化するために 20 mm 伸ばしたところを測定開始原点として、緩やかな引張り変形を与えて測定した。最初に 20 mm 伸ばしたところを初期位置としてそこから最初は 4 mm 伸ばしては 20 mm 位置まで戻す動作を 10 回繰り返す、次に最大伸ばし量を 2 mm づつ増加させながら同じ操作を行った結果である。最大伸ばし量は 42 mm まで行っている。ひずみ量としては 28% から 60% まで検証したことになる。

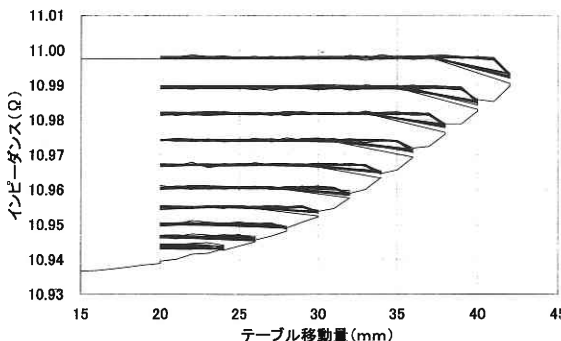
図5 (a) は繰り返し測定回数に対して引張り変位と、インピーダンスの変化を並べたものである。同じく (b) は引張り変位に対するインピーダンスの関係としたものである。この結果から一部弾性回復による戻りはみられるものの、ほぼ最大変位をインピーダンス値から求められる事が分かる。

5. ま と め

TRIP 効果を利用した最大ひずみ記憶センサへの適応に関する基礎特性について種々の実験を行いその可能性について検討した。杭への曲げ破壊部分への直接的な実装を考慮して繰返し3点曲げ試験を行って特性を調べたが、TRIP 鋼と SUS 304 では大きく異なる結果となった。これは、曲げではひずみが圧縮と引張りの両方が存在し、さらに繰返すことによりひずみ分布が複雑に進行することによるもの



(a) 測定回数に対する移動変形量とインピーダンス



(b) テーブル移動量に対するインピーダンス変化の関係

図5 機械的一方方向機構を用いて余歪を与えた後のインピーダンス変化

と考えられる。この方法ではインピーダンス値を最大ひずみに関連付けることは不可能であることがわかった。

次に SUS 304 について破断するまでの大きなひずみの範囲で新たにひずみとインピーダンスの関係について詳細な実験を行った。その結果 20% のひずみまではインピーダンスに変化を与えないが、それ以後 60% まではインピーダンスがひずみに関連していることを確認した。そのうえで、機械的な機構と組合せる事によって最大ひずみが測定できることを示した。

(2001年3月12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: Designe and evaluation of passive and active structural health monitoring system for gridges and buildings, SPIE Vol. 2466, 73-45, 1995.
- 3) 日本機械学会編：機械工学便覧A編（材料力学）。
- 4) 大堀真敬, 藤田隆史, 大開実：TRIP 効果のある鋼を利用した最大ひずみセンサの研究（第1報），生産研究，Vol. 52, No.5 pp. 251-254.