

渦電流試験によるオーステナイト系ステンレス鋼の水素脆化における相変態評価

Evaluation of Phase Transition of Austenitic Stainless Steel due in Hydrogen Embrittlement by Eddy Current Magnetic Signature Method

東北大・流体研	武田 翔	Sho TAKEDA	Member
東北大・流体研	内一 哲哉	Tetsuya UCHIMOTO	Member
東北大・流体研	高木 敏行	Toshiyuki TAKAGI	Member
東北大・大学院	山本 宏樹	Hiroki YAMAMOTO	
産総研	榎 浩利	Hiroto ENOKI	
産総研	飯島 高志	Takashi IIJIMA	

Abstract

In this study, we focus on the eddy current testing (ECT) as a method to investigate the hydrogen embrittlement mechanism of austenitic stainless steels which are widely used in hydrogen components. ECT is applied to hydrogen-charged austenitic stainless steel AISI 304 specimens with different amounts of residual strain. Permeability values of the specimens are estimated by comparing the signals obtained by the ECT experiment and the results of the electromagnetic field analysis, and the phase transformation is evaluated from the change of the permeability. As a result, it is confirmed that the relative permeability increase with increasing the applied strain, and the relative permeability also increase only by charging hydrogen. From these results, it is indicated that α' phase increases by both charging hydrogen and applying strain. Therefore, the possibility of ECT as an in-situ evaluation method of the phase transformation of austenitic stainless steel by hydrogen charge is suggested.

Keywords: hydrogen embrittlement, nondestructive evaluation, eddy current testing, austenitic stainless steel, martensitic transformation

1. 緒言

近年、従来の化石燃料に代わるよりクリーンなエネルギーキャリアとして、水素が注目を集めている。例えば、水素を燃料として用いる水素燃料電池自動車は、ここ 10 年の間で急速に開発が進んでいる。一方で、水素ステーションの普及は未だ進んでおらず、その背景には、関連機器の水素脆化の問題がある。

水素関連部品に広く用いられるオーステナイト系ステンレス鋼の水素脆化に関しては、そのオーステナイト相の安定性と水素脆化感受性との間に相関性があることが報告されているものの¹⁾、そのメカニズムは詳細には明らかになっておらず、水素普及への大きな課題となっている。特に、加工誘起マルテンサイト (α') の水素脆化への寄与については未解明の部分が多い。 α' 量と水素脆化との関係の解明には、 α' 量の定量的なモニタリングが求められるが、未だ in-situ 測定技術は確立していない。

そこで著者は、 α' 量の in-situ 測定方法として渦電流試験法(Eddy Current Testing: ECT)に着目している。先行研究ではオーステナイト相とマルテンサイト相の磁性の差異に着目し、ECT により得られた信号と電磁場解析から材料の透磁率を推定することで SUS304 試験片の残留ひず

みの増加に伴う α' 量の変化を定量的に検出できており²⁾、ECT による α' 量の in-situ 測定の可能性が示唆されている。

本研究では ECT のオーステナイト系ステンレス鋼の水素チャージによる α' 量変化を in-situ で測定する技術としての可能性を検討するため、水素を添加したオーステナイト系ステンレス鋼の相変態の評価を ECT により行う。異なる量のひずみを付与した水素チャージ試験片に対し ECT を適用し、ECT 信号と電磁場解析から試験片の透磁率変化を推定することで相変態を評価する。

2. 実験条件

表 1 に本研究で使用する SUS304 板材の化学組成を示す。今回用いたすべての供試材に対し 1080°C で 30 秒間の溶体化処理を行った。その後、板材を図 1 に示されるように JIS Z224114B 号試験片に加工し、この試験片に対し水素曝露試験を行った。水素曝露は高圧水素容器を用い、温度 270°C、圧力 100 MPa の水素ガス中で 300 時間

Table 1 Chemical composition of SUS304 (%).

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
0.06	0.40	1.11	0.032	0.004	8.03	18.01	Bal.

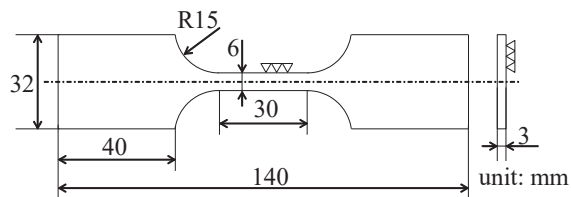


Fig. 1 Dimension of specimen.

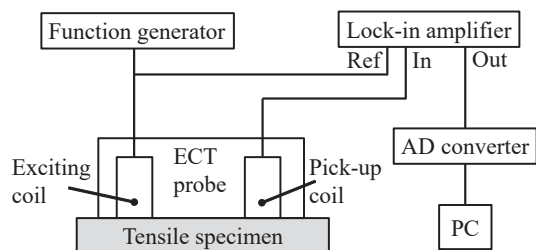


Fig. 2 Experimental setup.

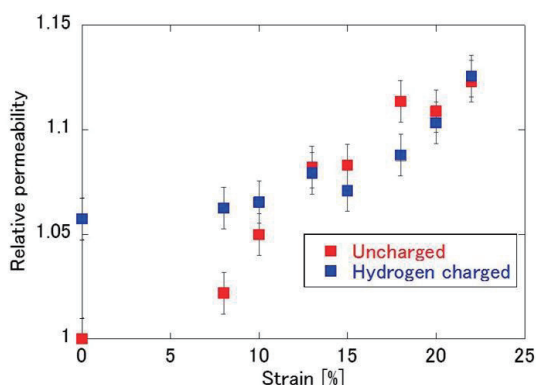


Fig. 3 Relation between applied strain and relative permeability of samples.

暴露することで行った。続いて、試験片に塑性ひずみを付与するため、試験片に対しひずみ速度 $5.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ で低ひずみ速度試験引張試験を行った。付与する塑性ひずみを 8, 10, 13, 15, 18, 20, 22% と変化させ、8 種類の試験片を作製した。

図 2 に ECT 装置の概念図を示す。ECT 装置はロックインアンプ、ファンクションジェネレータ、AD 変換器、プローブからなる。プローブには、TR(Transmitter/Receiver) 型プローブを用いた。今回用いた TR プローブには同一のパンケーキコイルをコイル間距離が 2.0 mm になるように配置している。コイルの外径、内径、高さ、および巻き数はそれぞれ 1.7 mm, 0.77 mm, 2.5 mm, 410 回である。ECT 信号は試験片平行部にプローブを置き取得した。

また、各試験片の比透磁率を推定するために、変形磁気ベクトルポテンシャル法に基づく 3 次元電磁場解析³⁾を行った。解析では、材料の透磁率を変化させることで得られる渦電流信号を計算した。実験により得られた渦電流信号と解析結果を比較することで、異なるひずみ量を付

与された試験片平行部の比透磁率を推定した。

4. 実験結果

図 3 に付与ひずみと電磁場解析により推定した比透磁率との関係を示す。水素添加の有無に関わらず、付与された塑性ひずみの増加に伴い、試験片の比透磁率が増加する。これは、塑性ひずみを付与されることで、オーステナイト相の加工誘起マルテンサイト変態により磁性相である α' 相が増加し、比透磁率が増加したためと考えられる。また、同じひずみ量でも水素添加後の比透磁率の方が大きいことから、水素添加のみでも磁性相が増加することが示唆された。

5. 結言

本研究では ECT のオーステナイト系ステンレス鋼の水素添加による α' 量変化を in-situ で測定する技術としての可能性を検討するため、水素を添加したオーステナイト系ステンレス鋼の相変態の評価を ECT により行った。その結果、試験片の透磁率は付与するひずみの増加と共に増加し、また水素の添加のみでも増加することが明らかになった。この結果から、水素添加およびひずみ付与により α' 相が増加することが示唆された。従って、ECT のオーステナイト系ステンレス鋼の水素添加による α' 量変化を in-situ で測定する技術としての可能性が示唆された。

一方で比透磁率の変化の要因が α' 相の増加であると断定するためには更なる解析が必要である。当日は α' 相断定のため解析や組織観察を行った結果を示し、ECT 信号と α' 量の関係についてより詳細に議論する予定である。

謝辞

本研究の一部は JKA 研究補助事業 No.158 「オーステナイト系ステンレス鋼の水素脆化過程の電磁センシングによる可視化に関する研究開発補助事業」の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] L. Zhang, B. An, S. Fukuyama, T. Iijima, and K. Yokogawa, Characterization of hydrogen-induced crack initiation in metastable austenitic stainless steels during deformation, Journal of Applied Physics, Series (A), Vol. 108 (2010), 063526.
- [2] 佐藤聖也, “励磁制御型渦電流試験法による構造材料のひずみ評価”, 東北大学大学院 修士論文, 2013.
- [3] 福富広幸, 高木敏行, 谷順二, “渦電流探傷試験におけるコイルとき裂のメッシュレス有限要素解析法”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 64, No. 622, (1998).