

Evaluation of Unidirectional Fracture Surface of Ferrite from Leaked Magnetization Flux Vectors

Shigeo KOTAKE, Mitsuhiro OHOTA, Hiroichi HASE

Tomotsugu AOYAMA and Yasuyuki SUZUKI

1 緒 言

非破壊検査として磁性を利用する試みは古くからなされてきた。これは工業上重要な材料が鉄合金を始めとする強磁性体であり、この強磁性の物性が外部応力に依存して変化することを利用したものである。しかしながら透磁率等の測定¹⁾には外場の印加が必要であり、そのため分解能を下げるなど、問題点があった。

一方、近年、強磁性体のもつ逆磁歪み効果を利用して残留応力を測定する手法が提案されている^{2,3)}。これは応力付加による弾性歪みエネルギーを磁歪みが緩和する現象であり、加工変形場や弾性変型場において漏れ磁束の増加が確認されている。しかしながら一般に磁束ベクトル B は3次元であり、また応力もテンソル量であるなど、これらの間の関係は明確ではなかった。

他方、材料における破壊現象は一般に高速であり、制御不能であることから、破面に掛かる応力も複雑であり、破壊過程を議論するには、破面形態の評価法であるフラクトグラフィに頼るしかなかった。

本研究では、温度勾配下一定速度で移動させながら破壊を進行させる一方向破壊法を用い⁴⁾、Sr フェライト板に直線破壊や蛇行破壊など応力場の明らかな破面を生じさせた。その後、この破面に生じた3次元漏れ磁束密度の測定を行い、応力と逆磁歪み効果による漏れ磁束密度との関係について考察した。

2 実験方法

2.1 試料および破壊方法 試料は市販の硬磁性材料であるSr フェライト($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$)の30×100mm板の端に初期亀裂を入れたものを熱処理によって消磁させて用いた。これをFig. 1に示すような装置により、液体窒素に0.1~1.0mm/sの一定速度で沈めていくと速度に依存した温度勾配により亀裂先端に熱応力が発生し、沈下速度で破壊が進展して行く。この際、熱応力の量に応じて破壊は直線上から蛇行状へと変化する。同様の破壊実験を透明アクリル板においても行い、亀裂先端の応力場をコースティック法によって、直線時および蛇行時の亀裂先端の破壊モードの評価を行った。

2.2 磁場測定法 フェライト破面の表面漏れ磁束密度を測定するために、Fig. 2に示すような3次元ホール素子を走査させる装置を開発した。これにより、直線およ

び蛇行破壊面の磁束ベクトル分布を測定した。

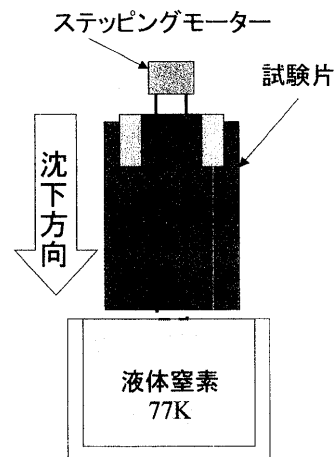


Fig.1 Schematic figure of unidirectional fracture apparatus.

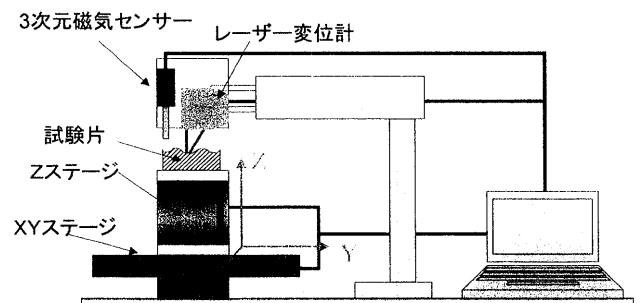


Fig.2 Schematic figure of 3 dimensional magnetic flux measurement apparatus.

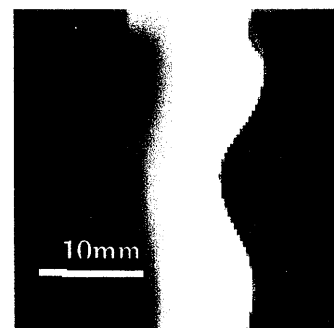


Fig.3 Photograph of side view on fractured ferrite plate.

3 実験結果および考察

3.1 破面における磁束ベクトル Fig. 3に蛇行破壊し

たフェライトの写真を、Fig. 4 に測定した直線および蛇行破壊面の磁束ベクトル分布を示す。直線破壊においては磁束ベクトルは破面に垂直方向を向き、破面上のベクトル分布は破壊進展方向に直線状に向かっていた。この際、反対側の破面には法線方向に逆方向の磁束が観察され、磁束ベクトルが破面を貫いている様子が示唆された。

一方、蛇行破壊においては、破面内のベクトル成分 B_{xy} は蛇行破面の曲面を中心として同じ方向に渦が存在していた。また反対側の破面には同じ向きの渦が存在し、法線方向が反対であることから、破面で磁束密度ベクトルの旋回流の存在が示唆された。

3.2 破面に掛かる応力 アクリルの破壊時におけるコースティック像から、直進破壊時の破面にはモードⅠの応力が掛かっていることが分かった。一方、蛇行破壊時の破面にはモードⅠとモードⅡが混在しており、破面の傾き従ってモードⅡの応力が発生していることが分かった。亀裂先端近傍の応力は、各モードの応力の和で表されることから、破面に掛かる垂直応力とせん断応力が見積もられた。

3.3 破面に掛かる応力と磁束ベクトルの関係 前コースティックの結果から、直進破壊では、主として垂直応力が掛かり、せん断応力は生じないことが分かる。一方、蛇行破壊時における垂直応力とせん断応力の比と破面法線方向の磁束成分と破面内の磁束成分の比は、良く一致した。すなわち破面で測定された磁束ベクトルの方向と破面に掛かる力の方向は定量的にも良く一致することが分かる。

一般に強磁性材料の磁束ベクトルは、1. 形状異方性、2. 結晶異方性、3. 応力異方性、の3つの条件に従って向きが決まる。今回は滑らかで幅広の破面であることから、1の形状異方性は面内の磁束分布には影響を与えず、また粉末焼結によって作成されたセラミクスであることから、結晶方位もランダムで2の結晶異方性も大きな影

響を与えない。一方、応力異方性は磁性体に掛かる応力の向きと磁束ベクトルのなす角を θ とすると、以下の式で表されることから、磁歪係数 λ_s の符号に依存して、正の場合応力と同じ方向に磁束ベクトルは向くように並び、負の場合、垂直方向に向くように並ぶことが予想される。

$$E = -\frac{2}{3}\lambda_s\sigma\left(\cos^2\theta - \frac{1}{3}\right)$$

今回の結果は、3の結晶異方性により破壊時の破面における垂直応力とせん断応力の向く方向に磁束ベクトルが向いたものと考えられる。

3.4 破壊時の応力の変化 以上の考察から、磁束ベクトルの分布の形で、破壊時の応力分布が残されていることが示唆された。つまりこれは、従来破面の形状からしか議論できなかった破壊時の変化が、磁束ベクトルによって示されることを意味し、大変興味深い。一方、今回の蛇行破壊時の磁束ベクトルが渦を形成していたことから、せん断応力は破面に対して方向が変化していたことを意味し、亀裂先端の境界線が破面に対して角度を変化させながら進展し、モードⅢ状態を含んでいたことが示唆された。実際、残った破面にはうねりが存在し、この様子を物語るものと推察された。

参考文献

- 1) 山崎友裕, 山本真央, 平尾雅彦, 日本機械学会論文集中, **A63-611**, 1489 (1997).
- 2) 森久史, 藤本浩之, 辻村太郎, 太田昭男, 材料, **55**, 798 (2006).
- 3) H. Hase, S. Kotake, M. Ohota, H. Kawakami, Y. Suzuki, Key Engineering, **340/341**, 549 (2007).
- 4) T. Yang and K. Ravi-Chandar, J. Mech. Phys. Solid., **49**, 91 (2001).

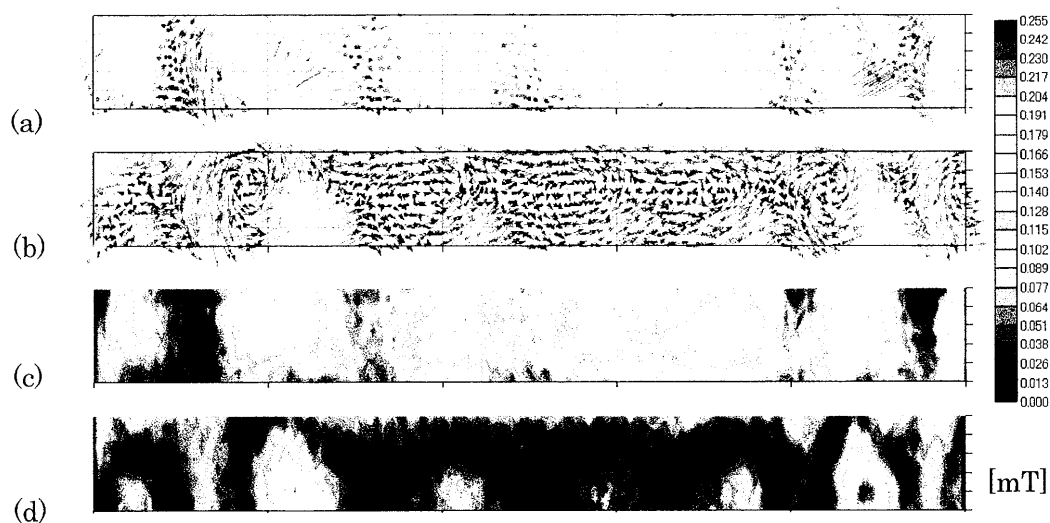


Fig.4 Distribution of magnetic flux vectors on fracture surface of ferrite (a) $\mathbf{B}$, (b) $\mathbf{B}_{xy}$, (c) $|\mathbf{B}|$, (d) $|\mathbf{B}_{xy}|$