

# KOERZIMAT J-H



## 開磁路におけるヒステリシス測定



### ハイライト

- 迅速で正確な測定
- 試料に外的ストレスを与えない測定
- シールドされたフィールドコイル
- 完全なヒステリシスループの測定
- 高度な消磁補正

### サンプル形状

- 円筒状サンプル
  - 長さ  $l < 140$  mm
  - 直径  $8 < d < 14$  mm
  - 長さ/直径  $> 9$
- シートと正方形のサンプル<sup>1</sup>
  - 長さ  $l < 140$  mm
  - 最大幅  $b = 10$  mm
  - 最大高さ 1.6 mm または 2.1 mm

### 開磁路におけるヒステリシス測定

磁気ヒステリシスの測定は、磁気研究や産業界において非常に重要です。工業規格では、パーミアメーターやトロイダルサンプルを使用することが推奨されています[1,2]。しかし、これらの測定方法には、形状、磁場、試料作製時間などの制約があります。

これらの確立された測定技術とは対照的に、開磁路でのヒステリシス測定はこの問題を克服することができます。しかし、ヒステリシスループを減磁効果のために補正する必要があり、これは容易な作業ではありません。しかし最近、非常に有望なアルゴリズムが利用できるようになりました。

### KOERZIMAT J-HとFOERSTER

は、最大100kA/mまでの磁場での測定を可能にする高度な減磁補正機能を備えた市販のJ-Hループレースターを発表しました。円筒形の試料だけでなく、特定の形状の角柱の測定も可能です。

<sup>1</sup> ご要求によりアスペクト比を変更可能

## 開磁路における軟磁性材料の磁気特性の測定

### 測定原理

開磁路におけるヒステリシスループの測定結果を図1に示します。セットアップには、磁場コイル、ピックアップコイル、磁束計が必要です。

KOERZIMATは、KOERZIMAT HCJのフィールドコイルと測定コントローラーを利用しています。サンプルホルダーはセンスコイルとフラックスメーターで構成されています。

測定では、試料は試料ホルダーの検出コイルに挿入され、コイル内に配置されます。この設計により、試料は磁場コイルの均質な領域の中心に置かれます。

測定開始前に、試料は最大 120 kA/m の磁場で消磁されます。次のヒステリシス測定はKOERZIMATコントローラーによって制御され、渦電流による副作用を避けるために十分な測定時間を確保し、最大100 kA/mまでのヒステリシス測定を可能にします。

### 消磁補正

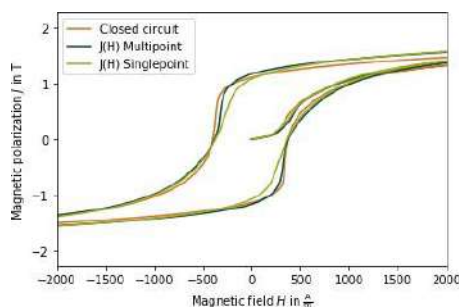


図 1: IEC60404-4 (オレンジ色) に準拠したパーミアメーターと KOERZIMAT J-H (濃い緑色 - J-H マルチポイント、薄い緑色 - J-H シングルポイント) を使用して測定した透磁率約 1050 の低炭素鋼のヒステリシス曲線。

開磁路でのヒステリシス測定は減磁効果の影響を受けますが、これは数学的に補正することができます。

伝統的なアプローチは、試料の形状と透磁率によって決まる一定の減磁率を計算することです。

ただし、透磁率は磁場に依存して変化するため、減磁率を一定にすると不正確になります。

より正確な結果を得るために、KOERZIMAT J-H では、単一の減磁係数を計算するだけでなく(J(H) Singlepoint method と呼ばれる)、実際の透磁率を使用して各測定ポイントについて計算することができます(Multipoint method と呼ばれる)。PardoとChenの研究に基づくアルゴリズムは、高精度の減磁係数を保証するために微分常磁性アプローチを採用しています。

図 1 では、両減磁補正法の結果を低炭素鋼の測定で比較しています。多点法がIEC 60404-4による測定と非常に良い一致を示していることが容易にわかります。

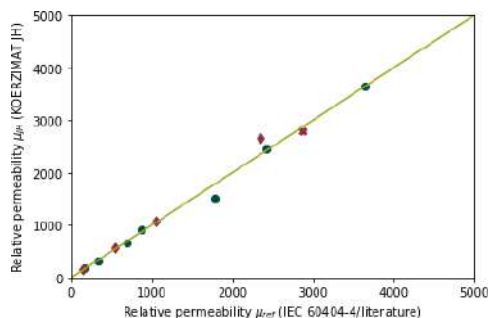


図2: KOERZIMAT J-HとIEC 60404-4による最大相対透磁率の比較。

消磁法により、KOERZIMAT J-H は、**比透磁率 100 から 4000 までの円筒状材料サンプルの正確な測定を可能にします。**透磁率の高い材料での測定では、測定の不確かさが増加します。しかし、最大比透磁率が15000もある試料でも、現在まで信頼性の高い測定が可能となっています。

長方形のサンプルの場合、最大比透磁率が2200にも達するサンプルの測定に成功しています。

### 校正方法

KOERZIMATフィールドコイルはPTBでトレースされた硬磁性保磁力校正標準試料で校正されます。

この校正により、測定の不確かさは1%未満となります。しかし、最初のテストでは、新しい方法は現在の校正方法よりもはるかに高い精度が必要であることが示されました。

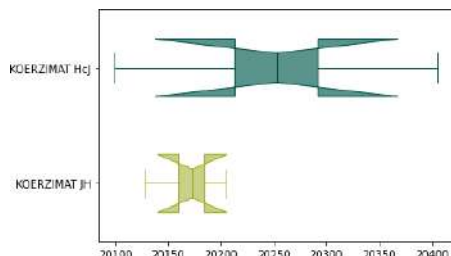


図3：KOERZIMAT HCJで使用された校正方法とKOERZIMAT J-Hで使用された校正方法で測定されたKOERZIMATフィールドコイルのコイル係数k。

これに基づき、軟磁性校正標準にトレーサブルな新しい校正ルーチンが開発されました。この新しい方法により、測定の不確かさを現在適用されている方法の不確かさの4分の1以下にまで下げることが可能になりました（図3参照）。この結果ホールプローブを用いたチェックによってさらに確認され、完全な一致を示しました。

この新開発により、当社のKOERZIMATフィールドコイルを用いた高精度な磁気特性測定が可能になります。この方法はKOERZIMAT J-Hシステムだけでなく、KOERZIMAT HCJシステムの測定精度向上にも応用できます。

## 測定の不確かさ

測定システムの測定不確かさは、試料の形状（および形状の測定不確かさ）と試料の透磁率に大きく依存します。

図4と図5には、複数の測定結果に基づく測定誤差が示されています。最大比透磁率が $\mu_{max}=2800$ のサンプルと、およそ $\mu_{max}=15000$ のサンプルについて、それぞれ200回の測定を行いました。

測定の不確かさが大幅に増加しても、透磁率の標準偏差は、15000もの高い比透磁率の試料では、依然として10%以下であることが実証されました。透磁率が著しく低い試料（図4参照）では、さらに低くなります。

他のパラメーター（ $J_{max}$ 、 $J_r$ 、 $H_cJ$ 、パワーロスなど）については、標準偏差はさらに低くなります。

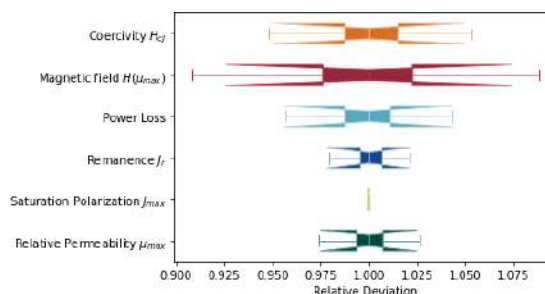


図4：最大比透磁率2800の低炭素鋼における各種ヒステリシス測定の不確かさ。

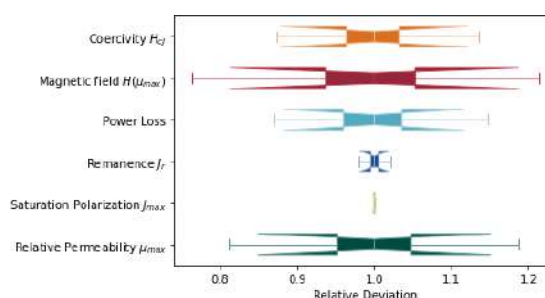


図5：最大比透磁率15000の低炭素鋼における各種ヒステリシス測定の不確かさ。

## 結論

KOERZIMAT J-H は市販の J-H ループトレーサーで、高度な減磁補正機能により最大 100 kA/m の磁場での測定が可能です。比透磁率100～4000の範囲での測定を目的とし、円筒状試料や特定の形状の棒状試料を測定することが可能です。しかし、応用研究によれば、比透磁率範囲100-15000の円筒状試料では、IEC 60404-4による測定と良い一致が得られることが示されています。近い将来、このような測定の標準化が予定されています。

## 参考資料

- [1] [D.-X.Chen, J. A. Brug and R. B. Goldfarb, IEEE Trans.Magn. 27巻, No.4, pp.3601-3619, 1991.](#)
- [2] [D.-X.Chen, E. Pardo, A. Sanchez, J. Magn.Magn.Mater., vol. 306, no. 1, pp 135-146, 2006.](#)
- [3] [D.-X.Chen, IEEE Magnetics Letter, vol.9, 6504904, 2018.](#)
- [4] [D.-X.Chen, E. Pardo and A. Sanchez, IEEE Trans.Magn., 41巻, 6号, 2077-2088頁, 2005年.](#)
- [5] [D.-X.チエン, E.パルド, Y.-H.Zhu, L.-X.Xiang, J.-Q. Ding, J. Magn.Magn.Mater., 449巻, 447-454頁, 2018年.](#)