

令和元年6月26日現在

機関番号：82727

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K21705

研究課題名(和文)ホール係数を用いた金属表面の応力評価

研究課題名(英文) Stress evaluation of metal surfaces using Hall coefficients

研究代表者

小坂 大吾 (KOSAKA, daigo)

独立行政法人高齢・障害・求職者雇用支援機構職業能力開発総合大学校(能力開発院、基盤整備センター)・能力開発院・准教授

研究者番号：50648904

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：過酷な環境下で用いられる金属製品は、供用期間中の安全性を担保するため定期的に残留応力を評価することが求められている。従来手法とは原理の異なる手法を提案することで、従来手法では適用が困難であったアプリケーションにおいても安全の担保に寄与することができる。本研究では、(1)理論的に予想されるホール係数の応力依存性を定量的に測定する装置を制作した。次に(2)いくつかの材料を対象にホール係数の応力依存性を測定した。(3)予想されたホール係数の応力依存性より大きな値が測定されたことから、その原因を考察した。これらの結果から、適用対象を限定することで本手法の実用化が早期に実現することが期待できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で提案する手法は、これまで提案されたX線回析法や電気伝導率を用いた金属の応力評価手法とは原理が異なる。ホール効果を用いる本手法は従来手法では適用が困難であったアプリケーションへの適用が期待できる。

この研究の主な適用先としてはジェットエンジンのタービンブレードが想定される。本手法を用いた簡便かつ正確な応力評価手法が実用化されれば、航空機の安全性、経済性が向上する。航空機は国民生活にとって欠かすことのできない輸送手段であり、したがって本研究は広く国民に利益を与える有意義な研究であると言える。

研究成果の概要(英文)：Stress evaluation of metals is important to ensure the safety of structures which are made of metal. It is possible to contribute to the security of the safety even in the application which is difficult to be applied by the conventional technique by proposing the appropriate technique which is different in principle from the conventional technique. In this study, (1) a device for quantitatively measuring the stress dependence of the Hall coefficient, which is theoretically expected, was fabricated. Next, (2) the stress dependence of the Hall coefficient was measured for several materials. (3) Since the stress dependence of the Hall coefficient was larger than expected, the cause was discussed.

From these results, it is expected that the practical application of this method can be realized early by limiting the application objects.

研究分野：計測工学

キーワード：引っ張り応力 残留応力 ホール係数 ホール効果

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

過酷な環境下で用いられる金属製品は、供用期間中の安全性を担保するため定期的に残留応力を評価することが求められている。この分野においては X 線回折法のようにすでに確立された手法が存在する。応力によって変化する金属内の原子間距離を X 線の回折から測定する X 線回折法は、多くの場合、試験体を回転させる必要があるため回転テーブルに試験体を載せる必要がある。鉄骨のような動かさないものや、タービンブレードのように組み込まれた状態の部品に対しての適用は困難である。したがって、X 線回折法に代わる簡便な手法が求められている。例えば、応力によって変化する金属の電気伝導率を非接触で評価する渦電流を用いた手法が研究されている。センサとして小径のコイルを用いる本手法は X 線回折法と比較してセンサが小さいため組み込まれた状態の部品に対しての適用が容易になる可能性がある。一方で、電気伝導率は冷間加工や高温による結晶構造の変化の影響を受けることから、これらの応力以外の影響を排除することを考えなければならない。以上のことから、金属の応力評価の適用範囲を広げるためには、これまで実用化された又は研究されているものとは異なる原理に基づく手法が求められている。

2. 研究の目的

本研究は、応力によって変化する電荷キャリア密度を測定することで、金属の残留応力を評価する手法の開発を目的とする。本研究で提案する手法は、これまで提案された X 線回折法や電気伝導率を用いた金属の応力評価手法とは原理が異なる。ここで、自由電子モデルを用いて電荷キャリア密度と応力の関係を説明する。電荷キャリアの総数が一定の場合、応力によって変化する体積  $v$  と電荷キャリア密度  $n$  の関係は次式で表される。

$$k_v \sigma / E = \Delta v / v = n / \Delta n \quad (1)$$

$$k_v = 1 - 2p \quad (2)$$

ここで、 $k_v$  は応力依存係数、 $\sigma$  は応力、 $E$  はヤング率、 $p$  はポアソン比である。電荷キャリア密度はホール効果によって測定することができる。ホール効果とは図 1 に示すように、直交する磁束密度と電流によって電気伝導体に電位が生じる現象である。ホール効果によって現れるホール電圧  $V_H$  はホール係数  $R_H$  を用いて次式で表される。

$$V_H = R_H I B / T \quad (3)$$

ここで、 $I$  はベース電流、 $B$  は磁束密度、 $T$  は試験体の厚さである。自由電子モデルのホール係数  $R_H$  は、 $n$  と単位電荷  $q$  によって次式の様に定義される。

$$R_H = 1 / nq \quad (4)$$

式(1),(4)から、ホール係数と応力の関係は次式で表せる。

$$\Delta R_H / R_H = k_v \sigma / E \quad (5)$$

以上のことから、自由電子モデルにおいては応力によって生じた歪とホール係数は比例関係にある。この理論的予想を実際に確認する必要がある。

ホール効果自体は、磁気センサの原理としてよく知られた現象である。しかしながらこれまで金属のホール効果を応力評価に用いた手法は我々の知る限り実用化されていない。なぜなら金属のホール効果は磁気センサに用いられる半導体のホール効果と比較してかなり小さい。また、予想されるホール係数の変化は歪みの可逆領域内では 1% に満たない。このような微小な変化を定量的に評価するためには、測定において相当の工夫が求められる。

予備実験では、当初の予想より大きなホール係数の応力依存性が確認された。これは理論的な背景を整理する必要があることを意味する。

以上のことから本研究では、(1)ホール係数の応力依存性の確認、(2)その測定手法の改善、及び(3)自由電子モデルでは説明できない現象の理論的な説明を目的とする。

ホール係数の応力依存性を定量的に評価する試みは他に例を見ないものである。ホール係数の応力依存性が明らかになることで、提案手法を用いた評価装置の開発を行うことができる。この研究の主な適用先としてはジェットエンジンのタービンブレードが想定される。簡便かつ正確な応力評価手法が実用化されれば、航空機の安全性、経済性が向上する。航空機は国民生活にとって欠かすことのできない輸送手段であり、したがって本研究は広く国民に利益を与える有意義な研究であると言える。

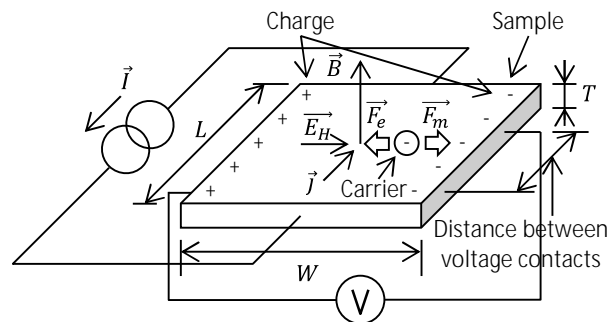


図 1 ホール効果

3. 研究の方法

本研究は、ホール効果をベースに金属の応力を評価する手法を確立することである。金属の小さなホール電圧の微小な変化を測定する必要がある。そこで、試験体に印加する磁束密度とベース電流を交流とすること、及び、大きな磁束密度を試験体に印加することで、十分な有効桁を持つ測定結果を得ることとした。ベース電流と磁束密度を交流とすることで測定電圧  $V$  は

以下の式で表される。

$$V(t) = R_H B \sin(\omega_B t + \theta_B) / T \cdot I \sin(\omega_I t + \theta_I) \quad (6)$$

ここで、 $t$ は時間、 $\omega_B$ 、 $\omega_I$ 、 $\theta_B$ 及び $\theta_I$ は磁束密度とベース電流の角周波数及び位相である。これはホール電圧をキャリア周波数 $\omega_I$ で振幅変調していることを表している。測定電圧が交流になることで、位相敏感検波を適用することができる。位相敏感検波は測定電圧に含まれる任意の周波数成分の振幅と位相を得る手法である。本研究では、位相敏感検波を二重に用いた。まず、測定電圧をロックインアンプにより $\omega_I$ で復調する。すると $R_H B I \sin(\omega_I t + \theta_I) / T$ が得られる。これをさらに $\omega_B$ で復調する。すると $R_H B I / T$ が得られる。 $B$ と $I$ は、 $V$ と同時に測定される。 $T$ は事前にマイクロメータで測定される。また $T$ は応力により変化するため、測定された歪により補正される。以上の過程を経て $R_H$ が得られる。

実験装置は、ホール効果を生じさせ測定する装置と、応力を印加及び測定する装置から構成される。試験体に大きな磁束密度を印加するためには、本研究に合わせた電磁石が必要である。試験体に応力を加えながらホール効果を測定すること、具体的には電磁石に工夫が求められる。既存の応力評価方法とは原理が異なるため、実験装置を一から作る必要がある。ホール効果に関する実験装置の構成を図2に示す。電磁石に求められるのは、試験体とジグを置くために電磁石の磁極のギャップのスペースをできるだけ広くとること、及び、試験体にできるだけ強い磁束密度を印加できること、である。磁極部分の幅を絞ることでギャップ部分の磁束密度が大きくなるのが期待できる。そこで磁極幅の適切な値について、磁気ベクトルポテンシャル及び電気スカラーポテンシャルによる非線形電磁界有限要素法を用いて検討を行った。目標とする電磁石の仕様は、磁極のギャップを10mmとした時、磁束密度が1Tを超えることとした。結果として図3に示すように、起磁力4000Aのとき、磁極幅50mmが適切であった。得られた知見を基に、電磁石を制作した。着磁用の電磁石をベースとしており、ヨーク部分は積層電磁鋼板を用いている。これにより磁束密度の角周波数 $\omega_B$ を高くすることが期待できる。これは測定時間の短縮につながる。

図4は試験体へ引っ張り応力を印加しながらホール効果を測定する方法を示している。図4(a)は試験体に引っ張り応力を加えるジグを示す。試験体を樹脂製の板に張り付け、その板を上下に引っ張ることで試験体に応力を印加している。このジグを電磁石のギャップ部分に挿入した状態を図4(b)に示す。ジグは電磁石のフレームに取り付けられ、両ネジボルトを回すことで印加する応力をコントロールしている。試験体表面にはホール素子とひずみゲージを張り付け、磁束密度と歪を測定する。

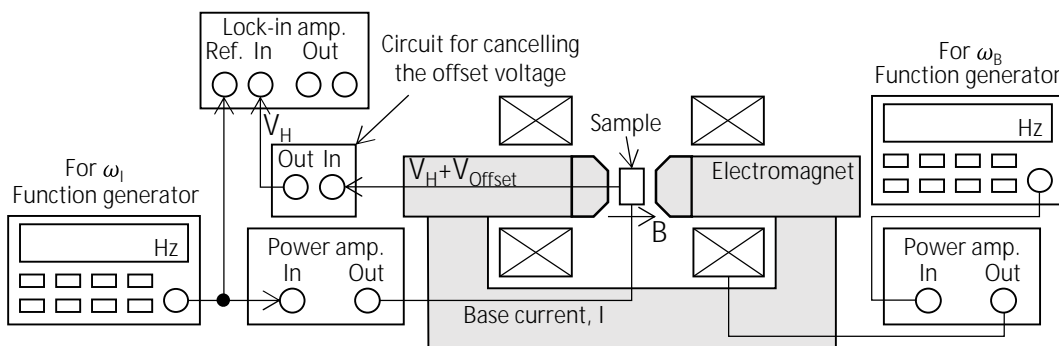
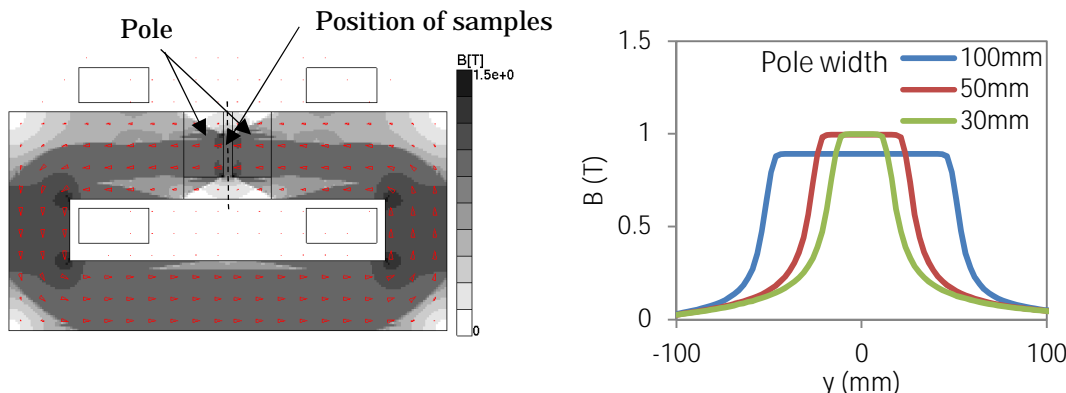


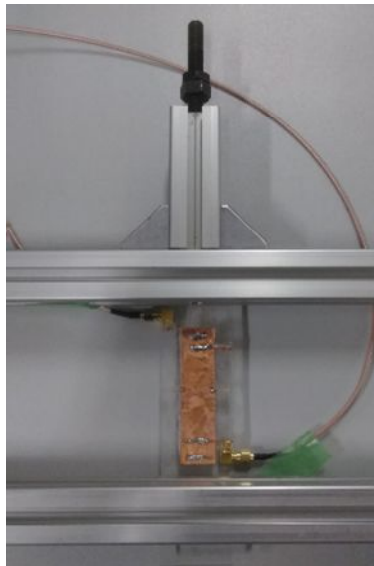
図2 実験装置



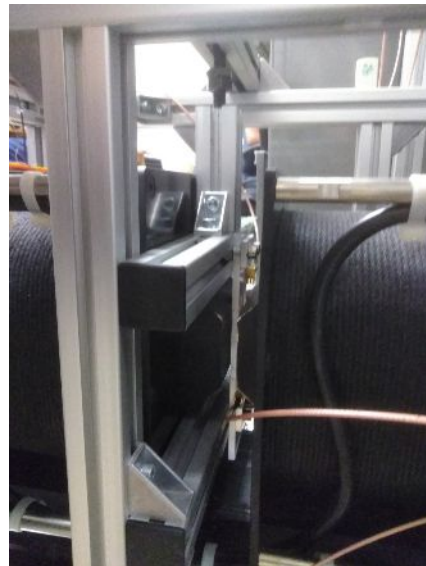
(a) 磁束密度分布(磁極幅 50mm)

(b) 試験体位置の磁束密度分布

図3 磁極幅による磁束密度分布の数値実験結果(起磁力 4000A)



(a) 引っ張り応力ジグ



(b) 電磁石の磁極部分に挿入したジグ

図 4 試験体への応力の印加方法

#### 4. 研究成果

##### (1) ホール係数の応力依存性の確認

表 1 は測定されたホール係数 $R_H$ の応力依存性 $k$ を示す。まず構築した実験装置の信頼性について確認する。表 1 に示す $R_H$ の値は本研究で使用した実験装置で測定された値と先行研究で測定された値である。これらの差は小さいと考えている。よって構築した実験装置はホール係数を正しく測定できている。次にホール係数の応力依存性の理論値と測定値の比較を行う。自由電子モデルから予想された通り、歪みの可逆領域ではホール係数は応力に対して線形に変化した。一方でその大きさは予備実験で得られた結果と同様に、理論値と測定値に大きな差が見られた。またその差は材料により異なった。これについての考察は後で述べる。

表 1 ホール係数及びその応力依存性

Materials	Young's modulus $E$ (GPa)	Poisson's ratio $\nu$	Estimated $k_v$	Measured $k$	Measured $R_H$ ( $\times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{C}$ )
Copper	130	0.34	0.32	unmeasurable	$-5^{[1]}$
Stainless steel 316L	200	0.27	0.46	$4.0 \pm 0.1$	$12.3 \pm 0.1$
Inconel 600	214	0.32	0.35	$26.0 \pm 2$	$-2.2 \pm 0.1$
Inconel 716	200	0.30	0.40	$2.1 \pm 0.4$	$8.4 \pm 0.1$
					$8.0 \pm 0.2^{[2]}$
					$9.7 \pm 0.2^{[2]}$

##### (2) 測定手法の改善

本手法を適用可能な材料を増やすため、測定するホール係数の有効桁の向上に努めた。例えば試験体に対する引っ張り応力の印加を、アクチュエータを使って自動化した。さらに、計画時の予定にはなかったが、実機適用を視野にベース電流の周波数の高周波化に取り組んだ。現在、試験体は厚さ 0.1mm 程度のシートを用いている。これはホール電圧と試験体の厚さが反比例の関係にあり、できるだけ大きなホール電圧を生じさせるためである。本研究の最終目標はタービンブレード等の表面応力であるからその厚さは 10mm 以上ある。これはホール電圧が 1/100 以下になり、ホール電圧の応力依存性の測定がより困難になることを意味する。そこで、ベース電流の周波数を高くして表皮効果でもって試験体表面のベース電流密度を大きくすることでそれを補おうという戦略である。高周波になると電線のインダクタンス成分が大きくなる。理論的にはホール係数はベース電流の周波数には依存しないので、ホール係数の応力依存性はベース電流の周波数に依存しないことが期待できる。一方で電線のインダクタンス成分による電圧は周波数に比例するため、インダクタンスが大きいくほど求められる測定器のダイナミックレンジが大きくなる。また試験体にはベース電流と磁束密度によりローレンツ力が働いている。ベース電流を交流とすることでローレンツ力によって試験体が振動する。これはホール電圧をピックアップする回路に誘導起電力を生じることを意味する。これらは測定には不利益を与える。我々の知る限り先行研究のベース電流の周波数は最大数 kHz であった。しかしながら、受動素子のみで構成するシンプルな回路(図 5 参照)を試験体とロックインアンプの間に入れることで、これらの要素を許容値まで下げることができ、ベース電流の周波数を 100kHz まで高くすることができた。これは Inconel 718 であれば表皮厚さ 1.75mm に相当する。図 6 はベース電流の周波数を 100kHz とした時の測定電圧を示している。銅のホール係数はマイナスである。したがってホール電圧の位相は磁束密度の位相から 180 度反転する。測定結果はそれを表している

が、ホール電圧の測定波形が磁束密度の波形と比較して歪んでいるのが確認できる。試験体の振動によってホール電圧の測定波形に高調波成分が含まれるためであると考えられる。試験体の振動の影響は、ベース電流の周波数が高くなるほど強くなった。図7はベース電流の周波数を変化させた時にホール係数に対する標準偏差の割合を示している。1%以下であったことから、有効桁は3桁程度確保できていると言える。ベース電流の最大周波数が100kHzとなったのは使用した測定器の測定限界に依存したためで、今後はより高周波数に対応した測定器を用いることで、ベース電流の周波数をより高くしての測定を試みる。

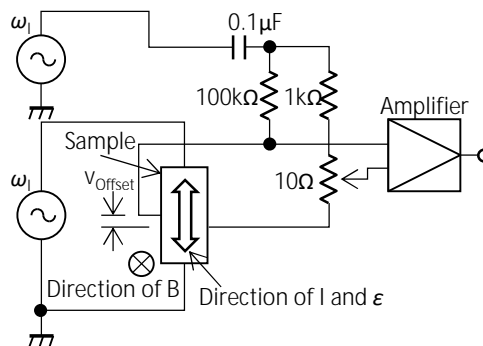


図5 オフセット電圧除去回路

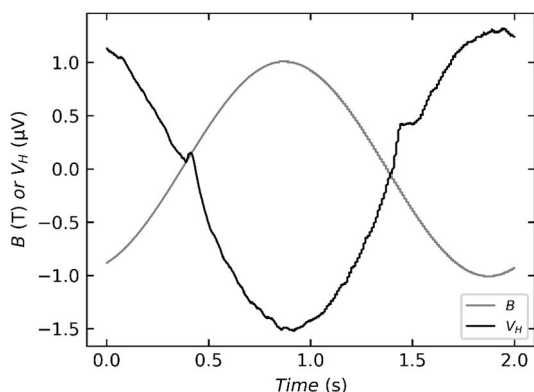


図6 測定波形(銅、ベース電流周波数100kHz)

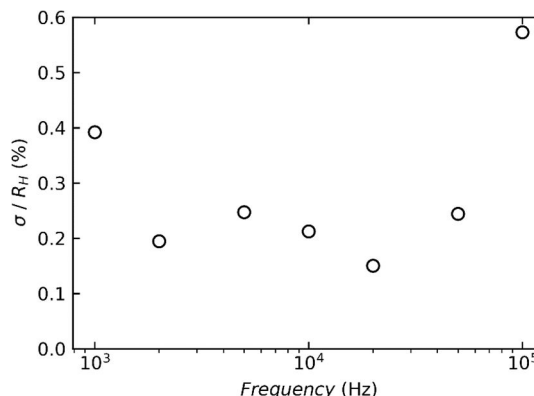


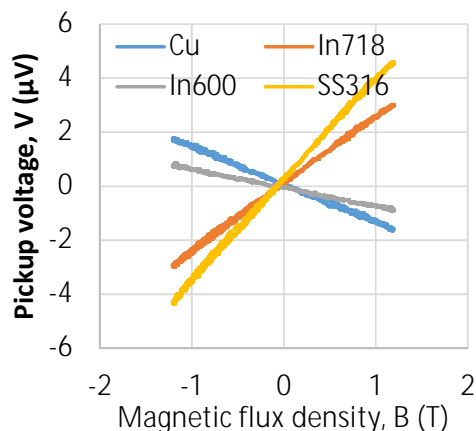
図7 高周波数帯でのホール係数の標準偏差

(3) 測定されたホール係数の応力依存性が理論値より大きかった理由

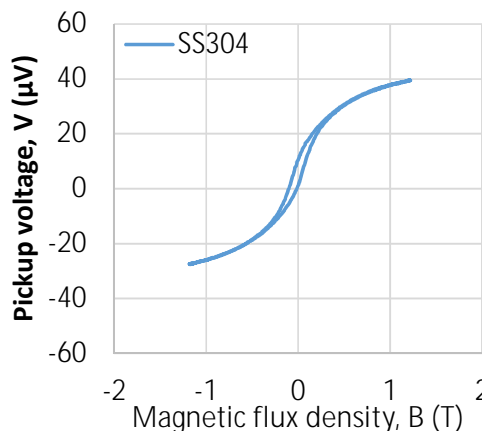
1T以上の磁束密度を維持しつつ、交流駆動できる電磁石を設計・製作し、金属のホール係数の応力依存性を評価するための測定系を構築した。これを用いて、特定の非磁性体合金において理論値を超えるホール係数の応力依存性を観測した。その原因を考察する。ホール電圧は式(1)からわかるようにホール係数、磁束密度、及びベース電流に比例する。ここで磁束密度に着目する。電磁石によって試験体に加えられているのは磁界Hであるから試験体内部の磁束密度Bは以下の様に表される。

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (7)$$

ここで、 $\mu_0$ は真空の透磁率、 $\mu_r$ は試験体の比透磁率である。 $\mu_r$ が1を大きく超える強磁性材料におけるホール効果は異常ホール効果といい、電荷キャリア密度のみを考慮したホール係数から得られる理論的なホール電圧を大きく上回るホール電圧が得られる。これは試験体の比透磁率が1より大きいことによって試験体内部の磁束密度が大きくなるためである。図8は横軸を試験体表面に配置したホール素子を用いて測定した磁束密度、縦軸を測定電圧としたグラフである。ただし、応力は印加していない。図8(a)に示すのは銅、Inconel 718及び600、Stainless Steel 316L(以下、SS316L)の測定結果である。ホール電圧と磁束密度がほぼ比例の関係にあることが確認できる。図8(b)に示すのはStainless Steel 304(以下、SS304)の測定結果である。



(a) 異常ホール効果を示さない材料



(b) 異常ホール効果を示す材料

図8 ホール電圧と磁束密度の関係

図 8(a)と比較して測定電圧の絶対値が 10 倍程度大きい。また測定電圧に磁束密度に対するヒステリシスがみられる。SS304 は SS316L と比較して結晶構造がマルテンサイト変態しやすく、磁化しやすいことが知られている。これは SS304 の比透磁率が SS316L の透磁率より大きいことを意味する。よって図 8(b)の結果は異常ホール効果であるといえる。今回用いた試験体は銅以外、磁性材料であるニッケルを含む合金である。これらの $\mu_r$ はほぼ 1 である非磁性材料であるが、金属結合によりニッケルの持つ特定の対電子の軌道に他の元素の電子が入り込み安定することで、 $\mu_r$ がほぼ 1 となる。しかしながら、応力が金属結合を妨げられる方向に働き、ニッケルの持つ特定の対電子が現れ、磁性を持つことが予想される。つまり、測定されたホール係数の応力依存性には体積効果以外に、応力によって現れる試験体の磁化の影響が含まれていると考えることができる。強磁性体元素が含まれている材料においてはそうではない材料より、ホール係数の応力依存性が大きくなることが期待できる。これは材料によっては本手法の適用が容易になる材料が存在することを意味する。つまり適用対象を限定することで本手法の実用化が容易になることが期待できる。

#### 参考文献

- [1] J.K. A. Alderson, T. Farrell, and C. M. Hurd, Hall Coefficients of Cu, Ag, and Au in the Range 4.2-300K, Physical review Vol. 174, No. 3(1968), pp. 729-736.
- [2] Dheeraj Velicheti, Peter B. Nagy, Waled Hassan, The Effect of Hardness on Eddy Current Residual Stress Profiling in Shot-Peened Nickel Alloys, J. Nondestruct Eval. Vol. 36, No. 13 (2017).

#### 5 . 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 4 件)

小坂 大吾、表面応力評価のためのホール効果測定、電気学会ものづくり技術委員会研究会、2019

小坂 大吾、金属のホール係数と応力の関係、第 27 回 MAGDA コンファレンス、2018  
Daigo Kosaka, Hall Effect Measurement for Surface Stress Evaluation, The 23rd International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation, 2018

Daigo Kosaka, Development of a Hall Effect Measurement System for Stress Evaluation of Metals, 18th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, 2017

#### 6 . 研究組織

(1)研究分担者なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。