

周波数掃引渦電流法による非破壊検査装置の開発と 表面処理検査への適用

Development of non-destructive inspection device by frequency sweep eddy current method and application to surface treatment inspection

牧野 良保*
Yoshiyasu Makino

The quality of surface treatment processes such as shot peening is controlled by process control and sampling inspection, and the product itself to be shipped cannot be inspected at present. So far, we have been working on the development and commercialization of an eddy current non-destructive inspection device that performs non-destructive all-point inspection in addition to quality control of surface-treated products, which was only random inspection. This paper introduces a new eddy current non-destructive inspection device that uses the frequency sweep eddy current method, the measurement principle, development efforts, and measurement examples.

KEY WORDS: Eddy current, Frequency Sweep, Nondestructive inspection, Surface treatment, Shot peening

1. はじめに

熱処理、メッキ処理、溶接などは特殊工程とされ、製品そのものの品質を非破壊では確認できない工程とされている。その内の1つとしてショットピーニングがある¹⁾²⁾。ショットピーニング(以降、SP)とは、無数の金属あるいは非鉄金属のショットと呼ばれる丸い粒子を高速で金属表面に衝突させて種々の効果を得る冷間加工の一種である。SPによる作用として、打痕の生成、表面改質、圧縮残留応力の付与、加工硬化などがあり、これらの作用により疲労強度の向上、耐摩耗性の向上といった効果を得ることができる³⁾。また、SPによる圧縮残留応力や加工硬化を積極的に付与させるには被加工面の適切な表面硬さが求められるため、熱処理後の工程に組み込まれることが多い。

当社の表面処理事業では、SPをはじめ、ブラスト、研磨による表面処理技術を生かした表面処理装置・投射材/研磨材・操業サポートの提案を行い、トータルに時代のニーズや産業構造の変化に対応してきた。その内のSPは、航空機や自動車、建機などの業界において、部品の軽量化、長寿命

化を目的として活用いただいている。

SP処理の品質は、処理装置に設置されているセンサなどにより管理されている。また、製品の品質管理としては、抜き取りによるX線回折法を用いた残留応力評価や硬さ試験が行われている。しかし、製品内部のSP作用の検査は破壊検査となるため、出荷される製品そのものを検査できないのが現状である。このことから、SP処理品を非破壊で全点検査できる技術が求められている。

当社では表面処理技術をソリューションするメーカーとして、数値化が困難である表面処理の評価技術と検査装置の開発、製品化に取り組んできた。本稿では周波数掃引渦電流法による新たな検査手法を採用した非破壊検査装置について、その測定原理と開発の取り組み、測定事例、についてご紹介する。

2. 実製品における非破壊検査手法の選定

2.1 X線応力測定法における課題

前述したように、SP品質を製品にて管理する手法としてX線回折法による応力測定が主に行わ

*サーフェステックカンパニー 開発グループ 企画開発チーム

れている。しかし、X線回折によるX線の有効浸透深さは、最表面から数 μm の薄層までである。このため、最表面から数百 μm 程の製品内部に処理が付与されるSP処理製品全点を電解研磨せず、X線回折法だけでその品質を管理することは不十分である。このような理由から、製品内部の処理状況だけでも検査可能な非破壊検査手法が必要となる。

SPなどの表面処理を非破壊にて検査する手法については、X線回折法のほかに、陽電子消滅法、超音波法、渦電流法、バルクハウゼン効果法など、様々な方法が提案されている。中でも近年、渦電流法による電磁気的手法が再認識されており、SP品を検査する手法として自動車部品業界を中心に歯車などの検査工程に組み込まれ始めている。

2.2 渦電流法の原理と特長

Fig. 1 に渦電流が発生する模式図を示す。渦電流とは、経時変化する磁界によって導体に生じる電流であり、渦電流の測定は専用の検出コイルにて行われる。被検体が導体である場合、表面処理によって金属内部の弾性・塑性などの組織的な歪みの変化や表面処理による材料の相変態によって導体の透磁率や導電率が変化する。渦電流は主に上記要因に対して変化するため、SPなどの表面処理前後の渦電流反応を比較することで処理製品の良し悪しを評価することが可能となる。また、渦電流は与えられる磁界の周波数（励磁周波数）によって被検体に浸透する深さを変える特長がある。この深さは、磁界の強さまたは渦電流密度が表面におけるそれらの約37%になる深さとされ、式(1)が目安とされている⁴⁾。

$$\delta = 1/\sqrt{\pi f \sigma \mu} \quad \text{式(1)}$$

δ : 表面からの深さ (m)

f : 励磁周波数 (Hz)

σ : 導体の導電率 (S/m)

μ : $= \mu_0 \times \mu_S$

[μ_0 =真空の透磁率、 μ_S =導体の比透磁率] (H/m)

このことから、被検体の内部を検査できるほか、検査したい被検体の表面からの深さに合わせて励磁周波数を設定することで、表面処理の傾向をより具体的に評価することができる。

渦電流法の特長は、被検体面の水・油への影響が少なく、脱磁処理なども不要であるため、装置を簡素化できることである。また、測定が迅速であるため、生産ラインでの全点検査も可能となる。加えて、SP工程のような粉塵などが漂う測定環境下においても検査が可能であり、比較的検査環境に自由度のある手法であることから本手法を採用している。

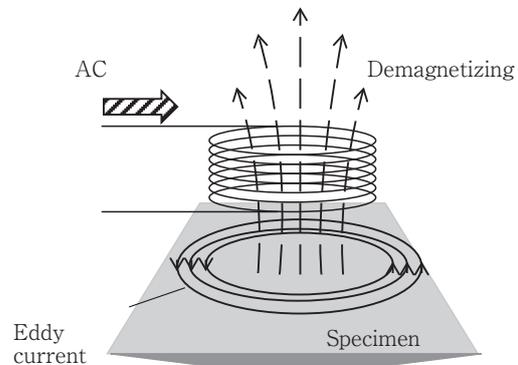


Fig. 1 Schematic diagram of eddy current.

3. 周波数掃引渦電流法とその装置化

3.1 渦電流法による表面検査動向と開発目標

従来、渦電流手法を用いた表面検査装置では、単一周波数や多重周波数にて単一チャンネル、複数チャンネルの表示による検査が主流である。これは、特定の検体深さのみの検査となり、検体内部において表面処理有無などの何らかの異常の発見は可能であるが、その要因の評価に至ることは困難であった。そこで、本開発ではコイルの励磁周波数を掃引する手法である周波数掃引渦電流法を採用し、装置化を目指した。これにより、原理的には検体最表面から任意の深さに渦電流の浸透を掃引することができるため、検体内部を徐々に渦電流がスキヤニングすることとなる。また、この掃引効果により検体内部の表面処理状況に渦電流が反応することが可能となる。以降、非破壊検査装置の開発内容について説明する。

3.2 非破壊検査装置の構成

Fig. 2 に検査装置システムの概略図を示す。検査システムは、測定コイルを備えたプローブと、プローブの電気信号を抽出処理/解析する測定システム、解析された信号を判定する判定システムの大きく3つで構成される。

前述のように、渦電流法は測定から判定までの時間が数秒であるため、加工が数秒～数十秒である製品のインライン検査が可能となる。しかし、ここで問題となるのが検体へ配置するプローブの位置決め方法である。渦電流法はペン型プローブによる製品の部分的な傷検査への適用例が多いが、コイルと検体の距離（リフトオフ）による測定値のばらつきが顕著である。

そこで、本装置のプローブは、検体とプローブの軸を制御することで簡易的にコイルと検体間の位置決めが可能となる検体貫通型コイル（Fig. 3）を採用した。このプローブにより、検体の配置から測定、取り出しまでの一連の搬送システムが簡易的になるほか、リフトオフを軽減した安定した検査が可能となる。

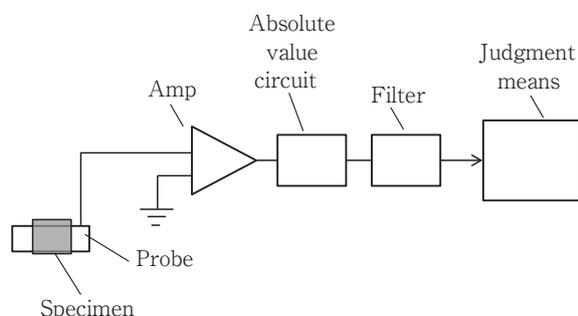


Fig. 2 Schematic diagram of eddy current.

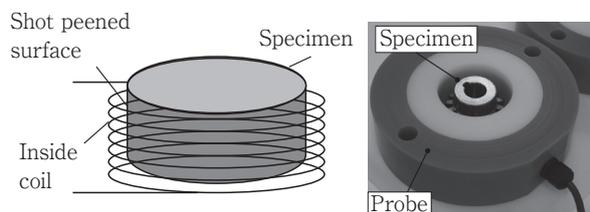


Fig. 3 Encircling coil.

3.3 測定/判定システムの開発

次にプローブから送られる電気信号を処理する測定システムについて説明する。プローブから送られる電気信号は、電圧値もしくは電流値など

の電気パラメータである。このため、被検体の情報を含んではいるが、その情報から表面処理の状況を見極めるのは困難である。そこで、電気信号に含まれる被検体情報の抽出と、1度の測定にて多点の周波数を高速で掃引することのできる高速型周波数掃引アンプの開発を行った。

また、判定システムについては、開発アンプから抽出した表面処理前と表面処理後の被検体情報を測定点である掃引周波数ごとにて比率を算出し、表面処理の良否判定に用いる判定パラメータとした。この比率を算出することで、渦電流の浸透深さごとの渦電流反応強度を可視化するため、表面処理状況を定量的に把握することができる。また、測定結果の測定画面の表示方法としては掃引する測定点を結ぶことで、Fig. 4のような2次元マップとして測定結果を表現している。

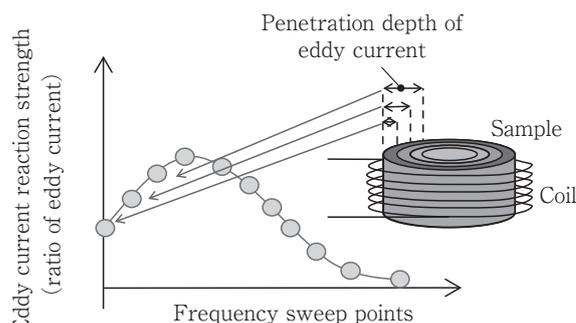


Fig. 4 Method of expressing measurement result of inspection device.

4. 測定実施例

次に、開発した周波数掃引渦電流法を装置化した検査装置の測定実施例について紹介する。今回は、当社の表面処理技術であるSPにて表面処理した試験片を複数作製し、各試験片における周波数掃引渦電流法による検査装置の反応について評価した結果である。供試材としてはSPを多く使用している自動車用歯車を想定して、歯車鋼であるクロムモリブデン鋼（JIS SCM420H）を円柱形状に機械加工したものを準備し、その後、浸炭処理を行った。SP条件としては、日常の設備稼働において変動し得るSPのカバー率とショット粒径サイズを変えた試験片を作製し、開発装置にて測定を行った。

4.1 SP処理条件による検査装置の反応

はじめに、カバー率を変えた試験片にて測定した結果について解説する。ここで、カバー率とは、試験片処理面における処理面積を示し、処理面を満面なく処理した状態（目視などにより満面度具合を判断）を100%と定義される。このカバー率はSPの処理時間にて管理される。カバー率が変化する場合の試験片内部の処理傾向としては試験片内部の加工領域の深さはあまり変わらず、試験片内部のSP処理強度が変わるような表面処理状態となる。開発した検査装置にて測定した結果をFig. 5に示す。縦軸は試験片の表面処理による渦電流反応比を示しており、横軸は励磁周波数を2.2節の式(1)にて換算した渦電流の浸透深さを示している。Fig. 5より、カバー率の増加とともに比率の分布が増えており、試験片内部の表面処理量が増えるにしたがって、試験片内部に浸透する渦電流も追従して増加することがわかる。

また、投射ショット粒径を変えた試験片について測定した結果をFig. 6に示す。ショットの粒径が変化する場合、試験片内部の処理傾向としては試験片内部の加工領域の深さが変わる。このため、Fig. 6のようにショット粒径が大きくなるほど、試験片の深さ方向へ渦電流反応が広がっていることがわかる。また、渦電流が試験片深さ方向へ広がる過程においては、粒径の大きさにより任意深さにて最大の反応ピークを持つ渦電流分布が形成される。

これらの渦電流反応は、表面処理による試験片表面層における電磁気特性が変化することによって表れる。また、電磁気特性が変化するにはその要因となる材料特性が変化している。本試験では浸炭材へSP処理することで、主として浸炭材に残留するオーステナイトが加工誘起マルテンサイト変態したことによる透磁率変化に対して、渦電流が変化した結果である⁵⁾。このため、処理前のベース素材や処理の条件、根本的な表面処理の手法によって渦電流の反応は本測定結果の限りではない。

一方で、処理工程が決められ、且つ製品の素材自体も明確な生産ラインでの品質管理においては、これら測定例のように本検査装置を用いることで、SP品質を製品全点にて検査することは可能である。また、設定された条件にてSP処理が施されているか、処理設備自体の状態は正常かなど、製品のSP品質以外に、設備状態の推定などへ検査結果を活用することができるようになる。

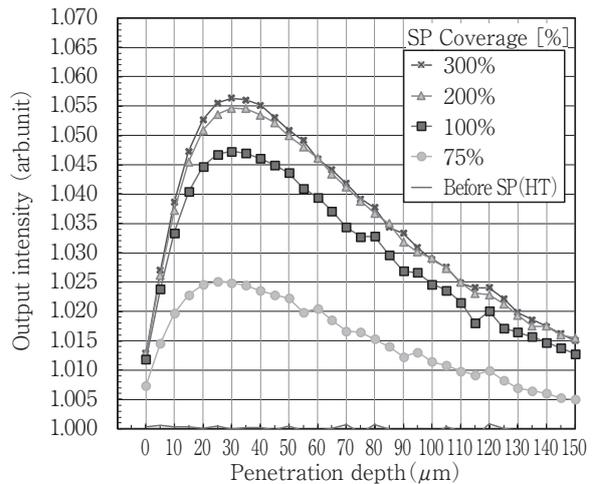


Fig. 5 Eddy current response due to SP coverage.

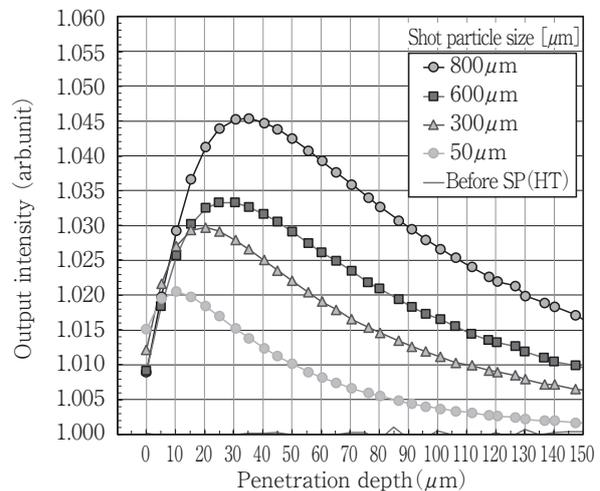


Fig. 6 Eddy current response due to shot particle size.

4.2 非破壊検査を適用することによる効果例

熱処理やSPのような表面処理は現場レベルにおいて、抜き取り検査と併用して、現場作業者が表面処理後の製品面の色合いなどを目視にて確認するなど、できる限りの製品全数の品質管理が行われている。しかし、処理の色合いによる目視検

査は熟練の経験が必要であるため、誰にでも実施できる技能ではない。また、目視による処理有無の判断は最表面の色合いを判別するだけで、製品の内質を確認することは不可能である。

例えば、複数のSP処理条件を組み合わせた2段階ピーニングの例を挙げる。2段階ピーニングとはサイズの異なるショットを使用したSP処理法であり、自動車のトランスミッション用歯車を中心に使用されている。1段階目では通常サイズのショットにて処理を行い、その後1段階目よりも小さなショットを使った2段階目の処理を行う。試験片の最表面は2段階目の処理の影響を大きく受けるため、1段階目の処理が抜けた場合、目視にてその異常を見極めることはほぼ不可能である (Fig. 7 参照)。このため、Fig. 8 のように製品の内質を本検査装置にて測定することで、1段階目が抜けた異常品と完成品を見極めることが可能となる。また、検査装置による定量的な評価となるため、熟練の作業員でなくても、簡易的に判別することが可能となる。これにより、目視の代替となる品質検査として、目視検査人員の削減や現場作業員の負担軽減など、本検査装置を適用することによる人が介在する生産ラインでのコスト低減効果は大きい。

上記だけに限らず、歯車などの製品は材料、機械加工条件、表面処理条件など、各工程の品質によって製品の品質が決まるため、工程異常が発生した場合、目視検査だけでは異常検出が困難となる場合がある。そのようなときには本検査装置のように製品を直接検査する手法が対策の1つとなり得る。

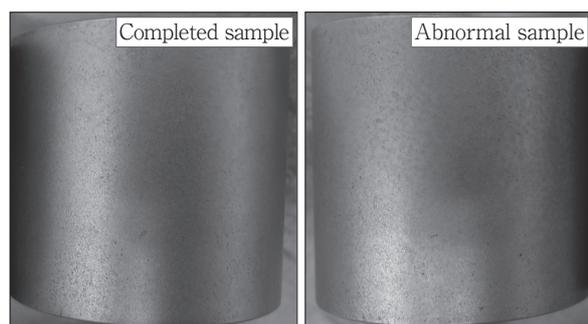


Fig. 7 Surface photograph of completed sample and abnormal sample.

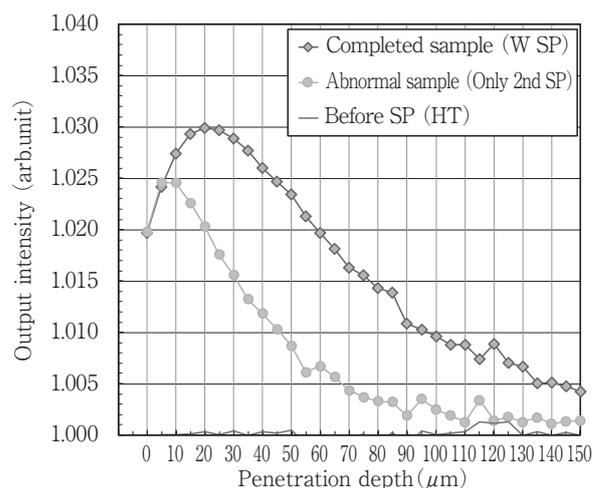


Fig. 8 Eddy current response of completed sample and abnormal sample.

5. おわりに

本稿では、周波数掃引渦電流法による検査手法を採用した非破壊検査装置について、開発の取り組みとSP処理品における測定事例について紹介した。開発した渦電流非破壊検査装置の実機をFig. 9に示す。渦電流法は製品内部の材質変化を非破壊にて検査可能な手法として、生産現場でのインライン検査への適用も可能な非常に有効な手段である。また、本開発にて採用した周波数掃引渦電流法との組み合わせにより検査装置製品内部での渦電流の反応挙動を可視化することが可能となり、従来の渦電流式検査装置のような単なる良否判定機だけではなく、製品内部の表面処理品質の広がりや製品の不具合要因などを探ることが可能となった。

近年では、トレーサビリティやIoTのように製品1個1個に対する品質管理の概念が表面処理のような特殊工程においても求められてきており、本装置にて取得した検査データを加工設備の条件データと紐づけることで製品側の管理による加工設備の保全管理ツールとしての活用が期待される。また、現場の人材不足や熟練者の退職による技術伝承不足、ここ最近でのコロナによる景気悪化に伴った生産現場の検査人員削減など、省人化への対策も急務となっており、本装置とロボットを組み合わせた生産工程における自動化が始まってきている。

今後も現場における表面処理の品質管理の取り組みを通して、お客様の課題解決やニーズに応じていきたい。

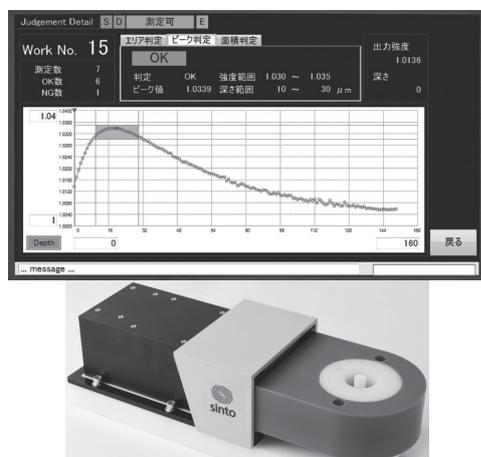


Fig. 9 Frequency sweep type eddy current nondestructive inspection device.

参考文献

- 1) 石倉亮平、狩野隆、小林祐次、宇治橋諭：浸炭材の表面組織とショットピーニングで発生する最大圧縮残留応力に関する研究、電気製鋼、Vol.79、No.1 (2008)、25-35
- 2) 加藤万規男、松村康志、石倉亮平、小林祐次、宇治橋諭：浸炭材の疲労強度に及ぼすショットピーニング条件の影響、電気製鋼、Vol.79、No.1 (2008)、69-76
- 3) ショットピーニング技術協会：金属疲労とショットピーニング、現代工学 (2005) 1-11,114,120
- 4) JIS Z2300 (2003)
- 5) Y.Makino : Evaluating Compressive Residual Stress Depth Distribution by Eddy Current、ICST-1、(2015)、29-36