

電磁力振動と音響信号による強磁性鋼管裏面スケール厚さの非接触測定

東原 純^{*1}

Non-contact Measurement of Scale Thickness on the Back Side of Ferromagnetic Steel Pipe Using Electromagnetic Vibration and Acoustic Signals

Makoto Tohara

産業プラントにおける大口径配管では内面にスケールが堆積し、流動効率及び設備全体の性能を低下させることが多い。スケール厚さの評価には一般に放射線透過試験が用いられるが、検査コストが高いため検査頻度が制限される。一方、電磁力に基づく検査手法は低コストな代替手段となり得るが、通常は損傷を受けやすい接触型加速度計に依存している。本研究では、コンデンサマイクを用いた非接触測定手法により強磁性鋼管のスケール厚さを測定する方法を検討し、実験的検証による有効性の確認を行った。その結果、スケール付着に伴いマイクから得られる振動音(出力電圧)が低下し、帯域実効値の変化率を指標とすることでスケール厚さを評価できる可能性が示された。

1 はじめに

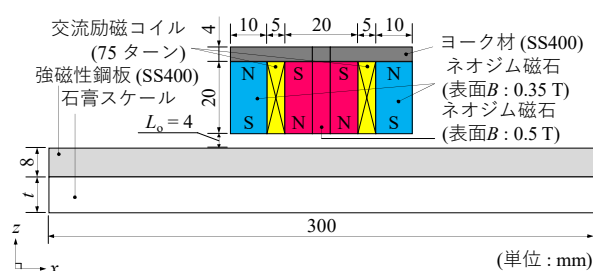
冷却水配管や蒸気配管は工業プラントや発電施設において広く使用されている。これらの配管の内部状態の把握は保守管理上重要である。配管内部を流れる流体には、硫黄やカルシウムなどの無機成分が含まれており、時間の経過と共に固化して配管内面に非金属スケールを形成する。スケールの堆積は流路の狭窄や閉塞を引き起こし、設備の運転効率を低下させる要因となる。配管内面に付着したスケール厚さの評価には、従来から配管外側からの放射線透過試験が用いられてきた。しかし、放射線透過試験は安全管理上の制約が大きく、検査時の作業区域設定や設備停止を要する場合がある他、検査コストも高いため、頻繁な実施は困難である。また、超音波探傷試験は比較的容易に適用可能であるものの、非金属スケールが多孔質で不均質な構造を有する場合に超音波の散乱や減衰が顕著となり^{1,2)}、スケール厚さの定量評価が難しいという課題がある。このような背景から、電磁力加振に基づく検査手法が提案され、比較的低コストに実施できることが報告されている³⁾。しかし、これらの手法では接触型加速度計を用いる場合が多く、振動や摩耗によるセンサ損傷の懸念がある。そこで、本研究では、強磁性鋼管に付着した非金属スケールの厚さを測定することを目的として、コンデンサマイクを用いた非接触検査手法に関する基礎的検討を行った。

2 鋼板での実験

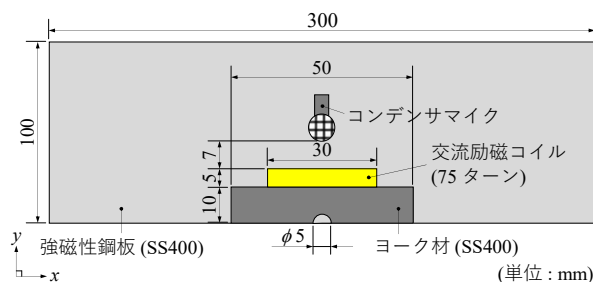
2-1 電磁力加振器

本研究で用いる電磁力加振器は、永久磁石(ネオジム磁石)、交流励磁コイル、およびコンデンサマイクを主な構成要素としている。図1に、鋼管への適用前に基礎的実験として使用した電磁力加振器および強磁性鋼板への1/2領域の設置位置を示す。

交流励磁コイル(75ターン)により強磁性鋼板に交流



(a) xz 平面



(b) xy 平面

図1 電磁力加振器モデル(1/2領域)

*1 機械電子研究所

磁界を印加すると、鋼板表面に渦電流が誘起され、その結果ローレンツ力が発生する。永久磁石及びヨーク材は、鋼板内部に発生するローレンツ力を増強する目的で配置している。中央に配置したネオジウム磁石の表面磁束密度は0.5 Tであり、両側に配置したネオジウム磁石の表面磁束密度はそれぞれ0.35 Tである。

周期的に変化するローレンツ力により鋼板が振動し、これに伴って振動音が発生する。本研究では、この振動音をコンデンサマイクにより取得した。加振器と鋼板表面との距離(リフトオフ: L_0)は4 mmに設定した。

2-2 実験方法

図2に実験機器の構成を示す。実験機器は、加振部及び測定部から構成される。加振部ではファンクションジェネレータにより任意の波形を生成し、アンプ(バイポーラ電源)による電力増幅を行った後、電磁力加振器の励磁コイルに交流電流を印加する。測定部ではコンデンサマイクにより鋼板から発生する振動音を取得し、ロックインアンプを用いて参照周波数成分における出力電圧のピーク値を抽出した。抽出した信号は、データロガーにより逐次記録した。

実験では、電磁力加振器の交流励磁コイルに交流電流を印加し、励磁周波数を所定の周波数範囲で線形スイープした。図1に示すように、測定対象物は強磁性鋼板及び非金属スケールから構成される。強磁性鋼板には、長さ200 mm、幅300 mm、厚さ8 mmのSS400鋼材を用いた。また、非金属スケールとして使用した材料は、スケールの硬くて脆い性質に類似しており、厚さ制御が容易な石膏とした。

産業プラントや発電設備に使用される外径355 mm程度の大口徑配管では、20 mmを超える厚さのスケール付着が運用上の問題を引き起こすことがある。この点を考慮し、本実験ではスケール厚さ t を10 mm, 20 mm,

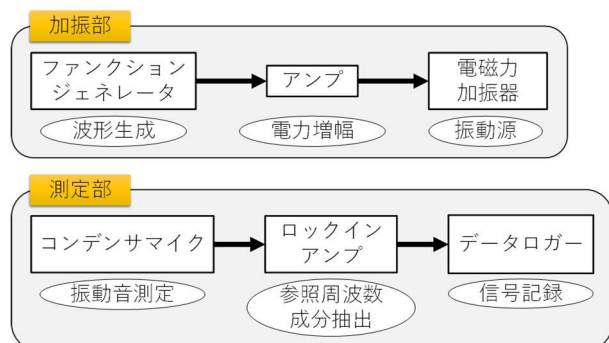


図2 実験機器構成

30 mmに設定した。図3に実験時の外観写真を示す。筐体の四隅にはボールローラーを取り付け、測定時の移動調整を容易にしている。また、電磁力振動センサは筐体中央に設けた開口部内に格納した。コンデンサマイクは、筐体の壁を隔てて電磁力振動センサの正面位置に設置している。

2-3 実験結果

まず、電磁力振動を利用して鋼板裏面に付着した非金属スケール厚さを測定する際、測定対象物のサイズや形状の影響を極力低減するため、測定に用いる周波数帯域は共振点から十分に離れた範囲に設定する必要がある。図4に、周波数1 kHzから13 kHzの範囲において、200 Hzごとに測定した結果を示す。なお、測定対象はスケールを施していない鋼板を使用し、交流励磁電流は、各周波数において2.3 Aとなるよう調整した。縦軸はコンデンサマイクにより取得した出力電圧の振幅値を示し、横軸は周波数を示す。この結果から、およそ2 kHzから8 kHzの範囲に共振点が存在することが確認できる。以上より、本実験では共振点を除く8 kHzから13 kHzの周波数範囲において、スケール厚さ評価の検討を行った。

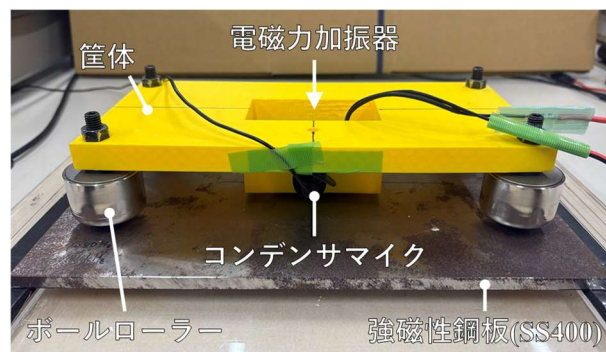


図3 実験時外観

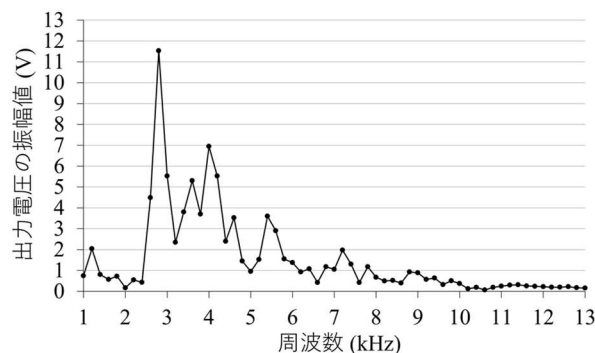


図4 各周波数における出力電圧の振幅値
(スケール厚さ0mm, 2.3A固定)

図5に、励磁周波数を8 kHzから13 kHzまで線形スイープした際の、スケール厚さごとの出力電圧波形を示す。なお、交流励磁電流は周波数8 kHzにおいて振幅2.5 Aとなるように印加した。縦軸はコンデンサマイクにより取得した出力電圧、横軸は周波数を示す。この結果より、9 kHz付近において、スケール厚さが増加するにつれて出力電圧が減少する傾向を確認できる。

また、本実験では、標準サイズ鋼板(200 mm×300 mm×8 mm)に加え、300 mm×300 mm×8 mmの大型鋼板についても測定を行った。その結果、9 kHz付近において、大型鋼板と標準サイズ鋼板の出力電圧が概ね一致することが確認された。これにより、9 kHz付近が鋼板のサイズ変化(板厚変化除く)による出力電圧への影響が小さい周波数であることが示された。

本研究では、周波数帯域にわたる電圧応答を実効値として評価する指標として、式(1)、(2)により定義される周波数帯域実効電圧(以下、帯域実効値と称す) $V_{\text{band,rms}}$ を用いる。まず、コンデンサマイクからロックインアンプを通して得られた振幅電圧 V_{amp} から、各周波数における時間方向の実効電圧 V_{rms} を算出する。次に、この V_{rms} を二乗し、周波数帯域にわたって積分することで、各周波数の電圧応答を加算する。更に、

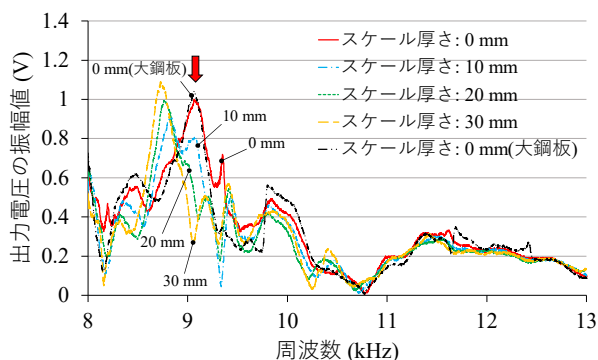


図5 スケール厚さごとの出力電圧波形

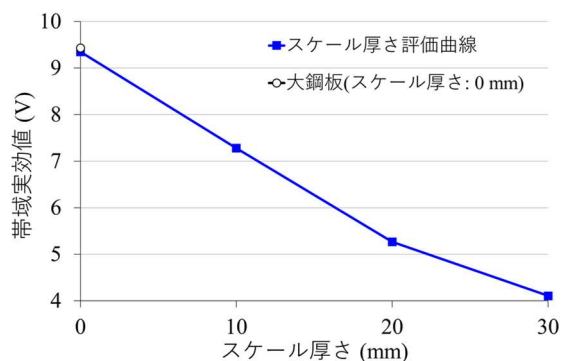


図6 帯域実効値とスケール厚さの関係

帯域幅で除した後に平方根を取ることで、帯域実効値を求めた。

$$V_{\text{rms}} = \frac{V_{\text{amp}}}{\sqrt{2}} \quad \text{式(1)}$$

$$V_{\text{band,rms}} = \sqrt{\frac{1}{f_2 - f_1} \int_{f_1}^{f_2} V_{\text{rms}}(f)^2 df} \quad \text{式(2)}$$

このように周波数帯域にわたる積分処理を導入した理由は、単一周波数における出力電圧が共振条件や測定条件(筐体の設置状態等)のわずかな違いによりばらつきやすいためである。周波数帯域全体の電圧応答を統合的に評価することで、スケール厚さに対する出力電圧の再現性向上を図った。図6に帯域実効値とスケール厚さの関係を示す。縦軸には、9.0 kHzから9.2 kHzの周波数帯域において算出した帯域実効値を示し、横軸にはスケール厚さを示す。なお、四角印で示した実線は、スケール厚さ0 mm～30 mmの計4種類の測定体の実験結果それぞれから算出した帯域実効値と、スケール厚さの関係を示した評価曲線である。丸印は、スケール厚さ0 mmの大型鋼板における帯域実効値を示す。本結果より、スケール厚さが増加するにつれて帯域実効値は減少することが確認された。また、スケール厚さ0 mmの大型鋼板においても、標準サイズ鋼板と測定値が概ね一致しており、鋼板サイズの違いによる影響が小さいことが示された。

3 鋼管への適用とスケール厚さ推定

図7に実験で用いた鋼管を示す。この鋼管は強磁性鋼製(SGP)であり、外径355.6 mm、肉厚8 mm、長さ360 mmである。内面の周方向に沿って3つの領域を設けており、各領域は周方向の1/3を占め、それぞれスケール厚さを0, 10, 20 mmとした。スケールの材料には石膏を使用した。電磁力加振器と鋼管外面頂部との距離(リフトオフ: L_0)は4 mmとした。励振周波数は8 kHzから13 kHzまでスイープし、交流励磁電流は周波数8 kHzにおいて振幅2.5 Aとなるよう印加した。

図8にスケール厚さに対する帯域実効値を示す。縦軸には、9.0 kHzから9.2 kHzの周波数帯域において算出した帯域実効値を示し、横軸にはスケール厚さを示す。帯域実効値はスケール厚さの増加に伴い減少し、鋼板の結果(図6)と同様の傾向を示した。しかし、その実効値は鋼板の結果に比較して小さいことが分かる。これは鋼管の曲率に起因するリフトオフの不均一性に

より、頂部から離れるにつれてリフトオフが増加し、測定信号が低下するためであると考えられる。このように、形状の違いによって同一のスケール厚さであっても実効値が変化する場合、形状ごとに評価曲線を導出する必要があることが実用上の制約である。

そこで、図9にスケール厚さ0 mmを基準とした帯域実効値の変化率を示す。縦軸には変化率を示し、横軸

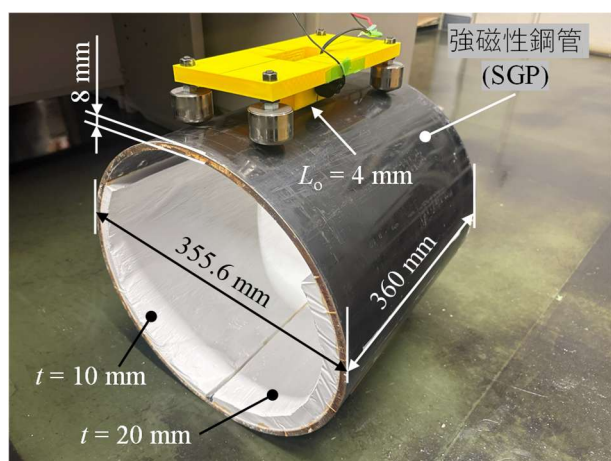


図7 スケールを施した鋼管および実験装置

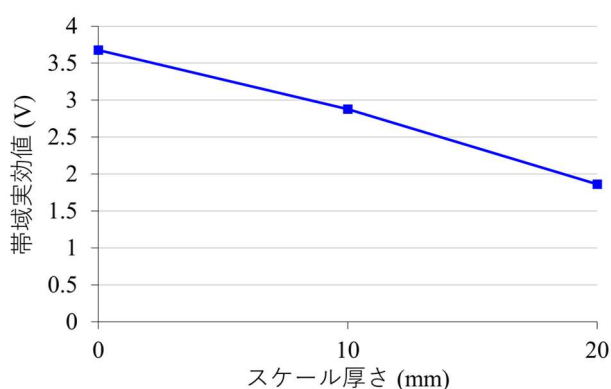


図8 鋼管における帯域実効値とスケール厚さの関係

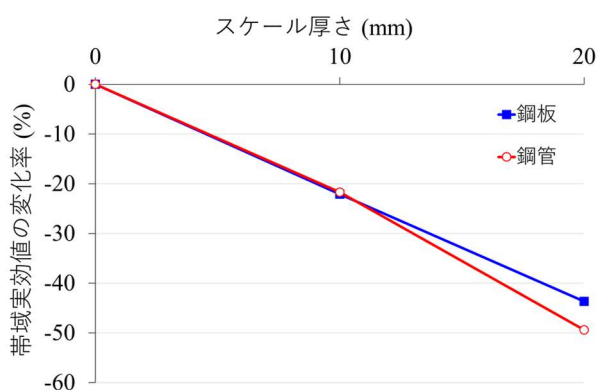


図9 鋼板および鋼管における帯域実効値の変化率とスケール厚さの関係

にスケール厚さを示す。鋼板および鋼管のいずれにおいても、スケール厚さの増加に伴って変化率が減少し、変化率は概ね一致することが確認された。従って、スケールのない状態の基準値が得られれば、その変化率からスケール厚さの推定が可能であると考えられる。

4 まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 強磁性鋼板を用いた実験において、共振から離れた周波数帯(8~13 kHz)では、スケール厚さの増加に伴って出力電圧が減少した。単一周波数における測定は共振や測定条件の変動に敏感であるため、周波数帯域に渡る応答を評価することで、スケール厚さをより安定して評価できた。
- (2) 提案手法を外径355.6 mmの鋼管に適用した。鋼管の曲率によりリフトオフが不均一となり帯域実効値は小さくなったが、変化率は鋼板の場合と同程度であり、スケールのない位置における基準値を用いることでスケール厚さを推定できることが示唆された。

提案手法の適用範囲の拡張及び、リフトオフやノイズ、材料特性などの測定条件の影響評価には、今後のさらなる検討が必要である。

5 参考文献

- 1) R. Takasugi, S. Shiota, H. Ikusada, S. Niwa, Y. Gao and Y. Gotoh, 2024 IEEE 21st Biennial Conference on Electromagnetic Field Computation (2024)
- 2) A. Hagsaka, S. Niwa, S. Shiota, Y. Gao and Y. Gotoh, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 71, No. S1, pp. S483-S491 (2023)
- 3) S. Niwa, I. Yamada, A. Hagsaka, S. Shiota, Y. Gao and Y. Gotoh, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 58, No. 8 (2022)