

塗装膜厚のインライン非接触測定技術の開発

Development of Inline Non-contact Measurement Technique for Coating Thickness

研究代表者 長崎大学工学研究科 助教 大坪 樹

Tatsuki Otsubo

In recent years, reducing the amount of paint applied to industrial products has been sought not only for cost reduction but also to mitigate environmental impact. However, due to the lack of established methods for measuring coating thickness on production lines, excessive paint is currently being used to prioritize product quality assurance. In this study, we developed a non-contact technology for measuring the thickness of coatings applied to metal surfaces. This technology combines an eddy current displacement sensor for measuring the geometry of the metal substrate with a laser triangulation displacement sensor for capturing the geometry of the coated surface, enabling highly accurate, non-contact thickness measurement. Furthermore, this method eliminates the effects of vibrations or motion errors in the measuring equipment or target objects, allowing for precise calculation of coating thickness. This report presents the results of experiments validating the effectiveness of the proposed method.

要旨

近年、工業製品に施される塗料の削減が、コスト削減だけでなく環境負荷軽減の観点からも求められている。しかし、塗装ライン上で膜厚を測定する方法が確立されていないため、製品の品質保証を優先し、必要以上に塗料を使用しているのが現状である。そこで本研究では、金属表面に塗装された膜厚を非接触で測定する技術を開発した。本技術では、金属素地の形状を測定する渦電流式変位計と、塗装表面の形状を測定する三角測量式レーザ変位計を組み合わせることで、非接触での高精度な膜厚測定を実現した。また、本手法は、測定装置や対象物に生じる振動や運動誤差の影響を排除し、正確な膜厚を算出することが可能である。本報告では、提案手法の有効性を検証した結果について述べる。

1. まえがき

自動車、鉄道、船舶、航空機、プラントを始めとした様々な工業製品においては、素地の防錆・防錆・防水・色彩効果など様々な目的から複層の塗装が施されている。塗装の効果を確保するためには各層適切な塗装膜の厚さが必要である。しかし、インラインに対応した非接触式の膜厚測定器がなく、各層ごとの膜厚検査は行われず、出荷直前に接触式の膜厚測定器により複数層の膜厚の合計値が要求を満たしているかどうかだけが確認されている状況が多くある。接触式の膜厚測定器により膜厚検査を行う場合、被測定物である塗装面は、表面が乾燥するだ

けでなく、塗料が硬化しなければならない。これは膜厚測定器が接触した際に、押しつけ力によって塗装面の形状が変形することを防ぐためである。塗装面の乾燥・硬化には長時間を要するため、生産効率や納期の観点から各層の膜厚を検査することが難しいのである。そのため、品質を保証するために、各層に必要な塗料を塗布している。一部の製品では、要求される膜厚の2倍以上に達している。そこで塗装工程内（インライン）において膜厚を非接触測定し、状況に応じて塗料の塗布量を調整する塗装システムができれば狙い通りの膜厚を安定して供給が可能となり、塗料の使用量を減らすことができる。しかしインライン膜厚測定ができず、上記の塗装システムは実現できていない。

インライン膜厚測定では、ウェット面が測定対象面になるため非接触式膜厚測定機が必須である。しかしこれまでに開発された非接触式膜厚測定機は主に精密測定室での測定を前提とした仕様であったため、インライン測定に適用すると、工場内における環境振動や測定機自身の運動誤差によって測定誤差が発生してしまう。したがって、本研究は膜厚測定に基づいた塗装制御を実現し、塗装の最適化・塗料使用量の削減することを最終目標とし、本研究助成期間で環境振動および運動誤差を除去可能な非接触式インライン膜厚測定機を開発した。

2. 測定原理

本章では、塗装表面形状を測定する三角測量法の原理について説明し、次に金属素地形状を測定する渦電流式変位計の原理について述べる。最後に、提案する非接触膜厚測定方法について詳述する。

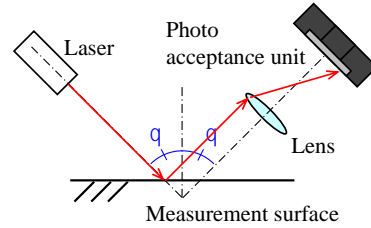


図1 三角測量法

2.1 三角測量式レーザ変位計の原理

図1に三角測量法の原理図を示す。三角測量法は、光源となるレーザ、散乱光の一部を受光面に結像させるためのレンズ、受光した位置を検出する受光素子から構成される。被測定物に照射されたレーザ光は被測定物表面で散乱し、結像レンズを介して受光素子上に結像される。被測定面がレーザの投光軸方向に変位した場合、結像したスポット位置は、被測定物までの距離に応じて変化する。この結像位置の変化量から被測定物との距離を求めることができる。

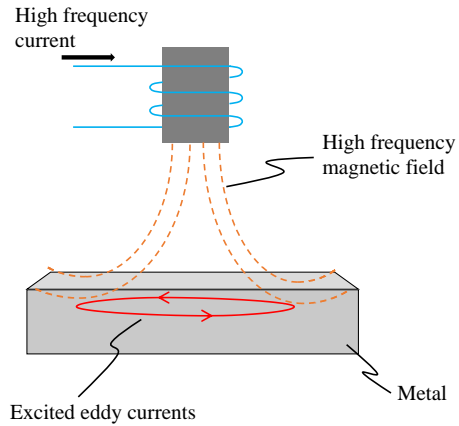
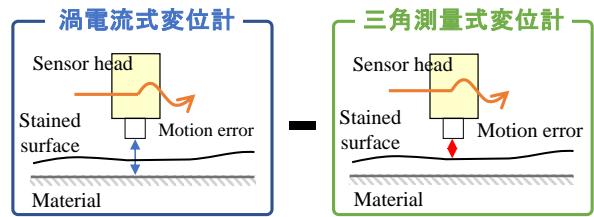


図2 渦電流式変位計

2.2 渦電流式変位計の原理

渦電流式変位センサとは、高周波磁界を利用し、距離を測定するセンサで、センサヘッド内部のコイルに高周波電流を流して、高周波磁界を発生させる。図2のように、この磁界内に測定対象物(金属)があると、電磁誘導作用によって、対象物表面に磁束の通過と垂直方向の渦電流が流れ、センサコイルのインピーダンスが変化する。渦電流式変位センサは、この現象による発振状態(発振振幅)の変化を検出することにより距離を測定する。



$$\text{(渦電流式変位計出力)} = (\text{測定機と素地までの距離 } L_g) + (\text{運動} \cdot \text{振動誤差}) \dots \text{①}$$

$$\text{(三角測量式変位計出力)} = (\text{測定機と塗面までの距離 } L_f) + (\text{運動} \cdot \text{振動誤差}) \dots \text{②}$$

$$\text{式①} - \text{式②} \\ \text{(渦電流式変位計出力)} - \text{(三角測量式変位計出力)} = (\text{膜厚})$$

図3 非接触膜厚測定原理

2.3 非接触膜厚測定方法

本研究で提案する非接触膜厚測定法(図3)では、渦電流式変位計と三角測量式変位計の二つの異なる非接触式の変位計を組み合わせる(図4)。これにより、[渦電流式変位計と素地までの距離]、[三角測量式変位計と塗面までの距離]を測定する。それぞれの変位計が同一箇所を同時に測定した場合、変位計に含まれる環境振動や運動誤差は同量となる。したがって、差分することで運動誤差や振動誤差を除去した膜厚のみを算出することができる。提案方法では、ウェット面の非接触膜厚測定が可能であるとともに、環境振動の影響を受けないため、これまで実現の難しかったインライン非破壊膜厚測定が可能となる。

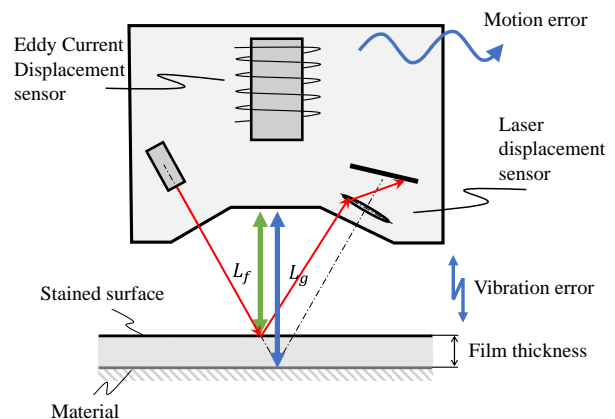


図4 非接触式膜厚測定器の概要

3. 測定方法の有効性評価

3.1 塗面表面形状計測

インライン膜厚測定に必要な要件として、塗装面が乾いていない状態での測定が必要となる。また、塗料の乾燥過程における収縮率が測定できれば、塗装時に乾燥後の膜厚が推定でき、塗料の使用量を調整することができる。そこでレーザ変位計を使用した塗装面の測定手法の有効性を評価した。拡散反射モードの三角測量式レーザ変位計を用いて、塗料の乾燥過程における膜厚の変化を測定した。実験概要を図5に示す。実験装置は三角測量式レーザ変位計と直動の自動ステージで構成した。塗装直後の塗装サンプルを直動ステージに取り付け、一定速度で走査させ塗装表面形状を測定した。測定実験は、塗装後13分後、73分後、133分後に測定した。塗装表面の形状測定結果を図6に示す。13分後のサンプルは、塗装表面が乾燥していないウェット状態であり、73分後、133分後の塗装表面は、乾燥が進みドライ状態であった。ウェット状態である13分後の測定結果と73分後および133分後のドライ状態での測定結果は、塗装膜厚は違うものの塗装表面形状に大きな違いはなかった。したがって、レーザ変位計はウェット状態の塗装表面形状を測定できると判断した。

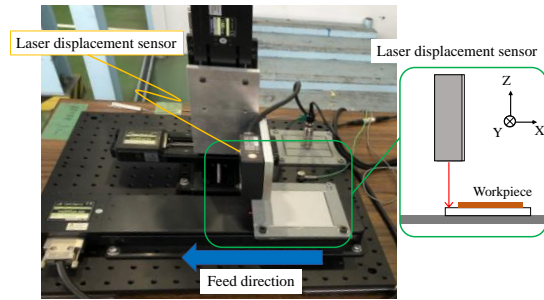


図5 塗装表面形状測定概要

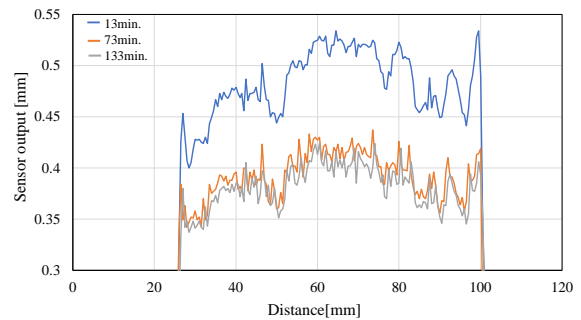


図6 塗装表面形状測定結果

3.2 金属素地形状計測

渦電流式変位計による金属素地形状測定の有効性を評価した。金属素地形状の測定実験方法を図7に示す。測定サンプルを直動の自動ステージ上に設置し、X方向に測定した。図8に測定サンプルの概要と測定箇所を示す。測定サンプル中央部には塗装が施され、外周部は金属素地のままである。測定の1カ所目は素地部分のみを測定し、2カ所目は外周部の金属素地から中央の塗装部に渡り測定した。測定結果を図9に示す。2カ所目（図9下）の測定結果に着目すると、未塗装部と塗装部の継ぎ目部分において、渦電流式変位計の出力に特徴的な変化はみられなかった。また1カ所目の測定結果と2カ所目の測定結果ともにサンプル中央部分が湾曲していることを示しており、金属素地形状の特徴を捉えることができる。以上より渦電流式変位計は、塗装の影響を受けずに金属素地の形状を測定できる。

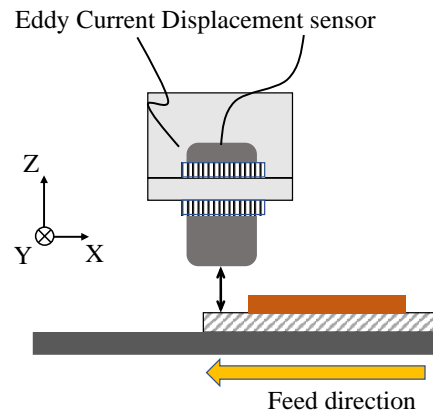


図7 金属素地形状測定実験概要

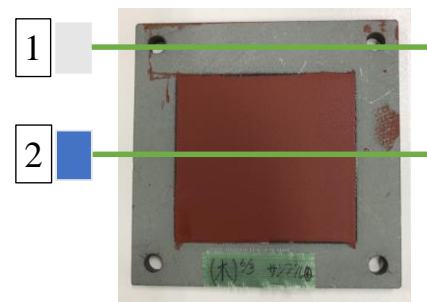


図8 金属素地形状測定サンプル

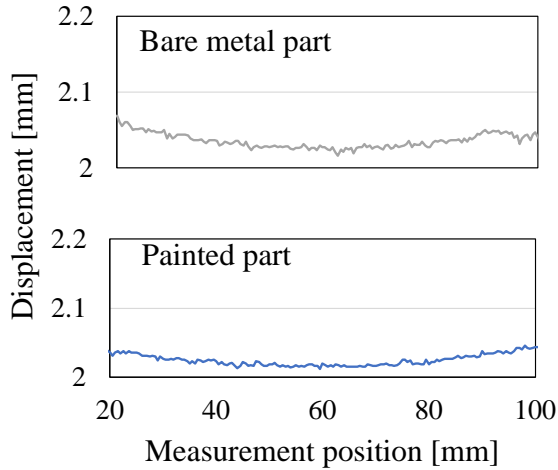


図9 金属素地形状測定結果

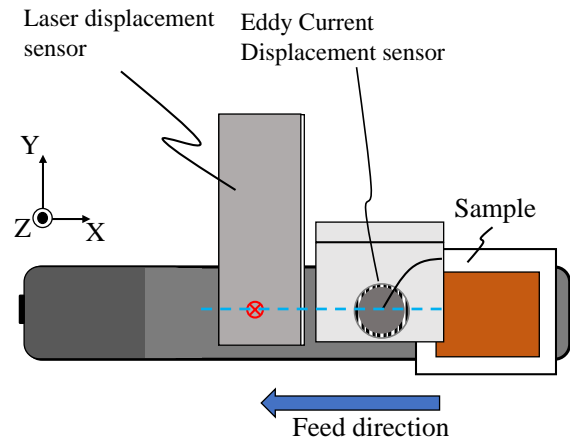


図10 同一ライン膜厚測定実験概要

3.3 同一ライン膜厚測定

三角測量式レーザ変位計の出力と渦電流式変位計の出力の差分による膜厚測定方法の有効性について評価した。非接触膜厚測定実験の概要図を図10に実験装置の写真を図11に示す。レーザ変位計と渦電流式変位計を同一の測定ライン上に設置し、被測定物を自動ステージにより走査することで、2つの変位計が同じ位置を測定できるようにした。レーザ変位計と渦電流式変位計の測定結果を図12に示す。図中の上部がレーザ変位計の出力、下部が渦電流式変位計の出力を示している。レーザ変位計は塗装表面の形状を測定し、渦電流式変位計は金属素地の形状を測定できていることがわかる。レーザ変位計と渦電流式変位計の出力差分から算出した膜厚値を図13に示す。この結果から被測定物には塗装膜厚約100 μm が塗布されたことがわかった。詳細に評価するため未塗装部1箇所と塗装部3箇所において

(図14)、算出された膜厚値と接触式膜厚計にて測定した結果を比較した。膜厚値の比較結果を図15に示す。なお非接触式で算出した膜厚値は、各比較位置において前後5mmの膜厚の平均した結果である。測定範囲全体で、非接触式と接触式ともに測定結果は同様の傾向を示すとともに、値もほぼ同等の結果となった。この結果から三角測量式レーザ変位計と渦電流式変位計が同一点を測定することでできれば、提案した非接触膜厚測定方法で膜厚を算出できることを確認した。

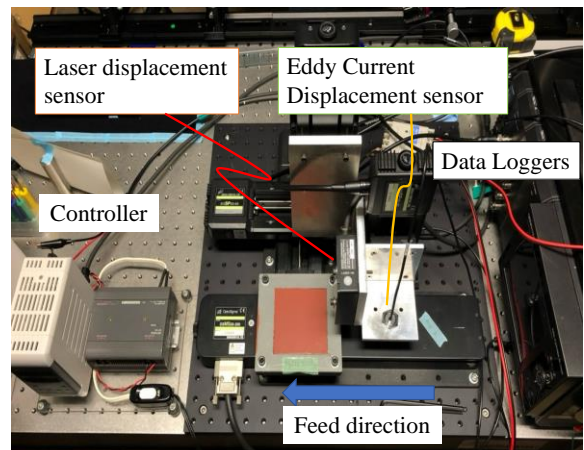


図11 同一ライン膜厚測定実験装置

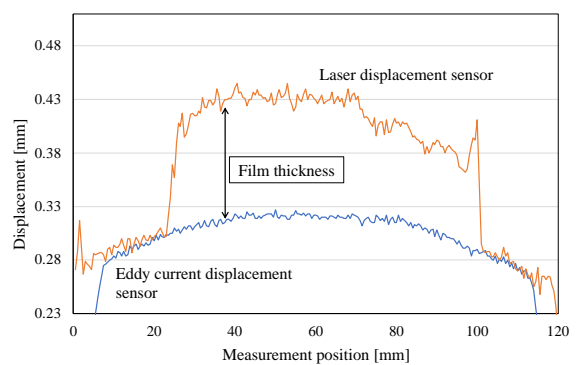


図12 同一ラインにおける測定結果

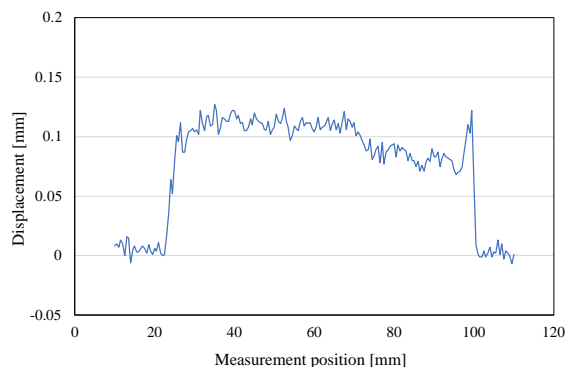


図 13 膜厚算出結果

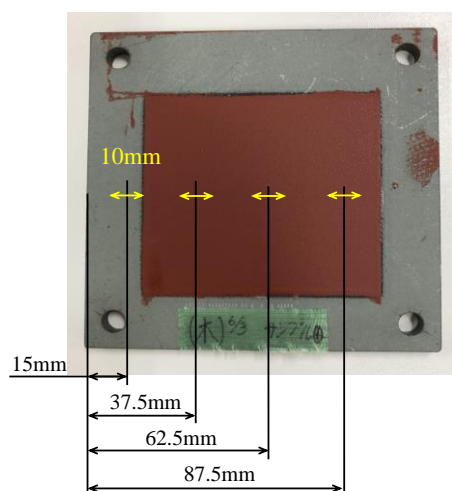


図 14 膜厚評価位置

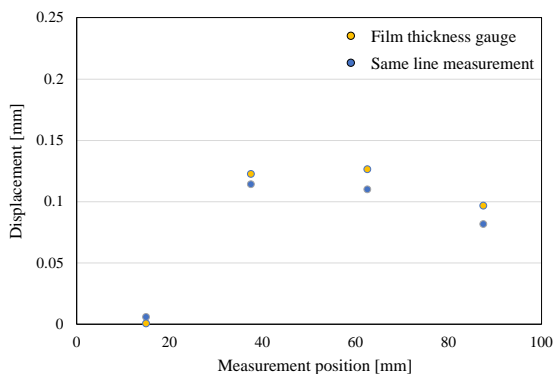


図 15 接触式膜厚計との比較

4. 非接触膜厚測定方法の有効性評価

4.1 非接触膜厚測定光学系

提案した非接触膜厚測定を実現する装置光学系を図 16 に示す。提案手法を実現するには三角測量式変位計測光学系の測定位置と渦電流式変位計の測定位置を一致させる必要がある。そこでレーザを入射角 7.2 度で渦電流の測定点に照射し、測定点を一致

させた。測定面は、粗面であるため照射したレーザ光は、塗装面上で散乱光が生じる。そこで受光系側にはレンズ 1 枚を設置し、散乱光を受光素子上に集光させ三角測量式光学系を構築した。集光に使用したレンズの焦点距離は 100 mm とし、光学倍率が 1 倍となる位置に設置した。これにより渦電流式変位計と三角測量式変位計の同一点・同時計測を満たした非接触膜厚測定システムを構築した。

4.2 非接触膜厚測定実験

提案する非接触膜厚測定システムの有効性を評価した。一枚の金属板上に厚さが異なる 3 つの塗装面を階段状に準備した。各層の膜厚を接触式測定器および本研究で提案した非接触膜厚測定方法で測定した。また接触式膜厚計は連続的な膜厚測定が困難であるため、ミクロンレベルでの非接触形状計測が可能な三鷹光器社製の NH-3N を用いて塗装面の表面形状を測定し、素地部からの変位量を膜厚として算出した。各層の中央部分における膜厚を接触式膜厚測定器、NH-3N および提案した非接触測定方法にて測定した結果を表 1 に示す。第 1 層目の膜厚は、接触式 35.5 μm 、NH-3N は 35.4 μm 、提案方式は 35.3 μm となり 3 方式はほぼ同じ測定結果となった。また第 2 層目、第 3 層目においても 3 方式の膜厚測定結果の差は 1.0 μm 以下となっており、提案した非接触方法が高い精度で測定ができることがわかった。

また提案した非接触膜厚測定方法と非接触形状測定器 NH-3N での測定結果 (図 17) は、各階層においてほぼ同じ膜厚値を示したことから、提案方法により塗装面をスキャンし測定することが可能であるといえる。おな各層の縁部分で測定値が大きくなった。その原因は、塗装時にマスキングテープを使用したため、マスキングテープの縁に塗料が溜まり厚みが増えたためである。

次に接触式および提案方法により、各塗装面を 30 回の膜厚測定を行い、標準偏差を算出し繰り返し性を評価した。なお NH-3N は、各層で 5 箇所において膜厚測定した結果から標準偏差を算出した (表 2)。接触式の標準偏差は第 1 層 1.0 μm 、第 2 層 0.8 μm 、第 3 層 0.5 μm となった。提案した非接触測定方法は、第 1 層 0.3 μm 、第 2 層 0.2 μm 、第 3 層 0.3 μm となり、提案方

法は、高い繰り返し性を有しており、接触式以上の安定性を有していることがわかった。非接触方式の標準偏差が接触式の標準偏差よりも小さい結果となったのは、非接触測定では接触式で生じるようなプローブ圧力変動を受けずに測定できるためと考えられる。

以上より、本研究で提案した三角測量式レーザ変位計と渦電流式変位計を組み合わせた非接触膜厚測定により、金属表面に塗布された塗装膜厚を測定できることを明らかにした。

5. まとめ

本研究では、非接触膜厚測定方法を提案し、本実験の範囲内において以下の結果を得た。

- (1) 渦電流式変位計は、金属表面に塗装が施された状態であっても、塗装の影響を受けることなく金属素地の変位を測定することができる。
- (2) 三角測量式レーザ変位計は、未乾燥状態の塗装面の変位を測定することができる。
- (3) 渦電流式変位計と三角測量式レーザ変位計の測定箇所を同一にし、それぞれの出力差分を算出することで非接触にて膜厚を測定することができる。
- (4) 非接触膜厚測定は、接触式膜厚計より高い繰り返し精度で膜厚を測定することができる。

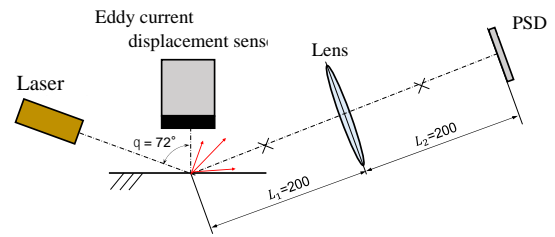


図16 非接触膜厚測定光学系

表1 各測定方法による膜厚測定結果 [μm]

	Contact type	Non-contact type	
		NH-3N	Proposed
First layer	355	354	353
2nd layer	254	255	248
3rd layer	92	94	85

表2 繰り返し性評価実験結果 [μm]

	Contact type	Non-contact type	
		NH-3N	Proposed
First layer	10	9	3
2nd layer	8	2	2
3rd layer	5	4	3

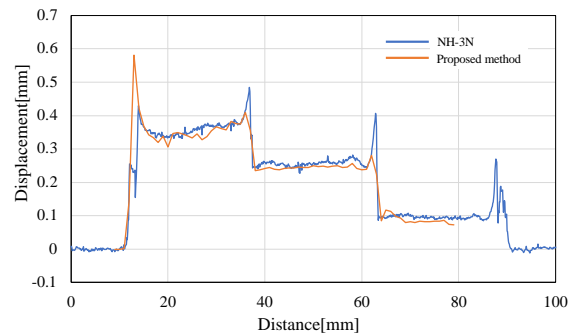


図17 膜厚形状測定結果