

テラヘルツ電磁波パルスを用いた塗装膜測定法の開発 Measurement of painting film using terahertz electromagnetic pulse

○安井武史¹⁾、光成俊泰^{1),2)}、荒木勉¹⁾

○Takeshi Yasui¹⁾, Toshiyasu Mitsunari^{1),2)} and Tsutomu Araki¹⁾

阪大院・基礎工¹⁾、住友重機²⁾

Grad. Sch. of Engg. Sci., Osaka Univ.¹⁾, and Sumitomo Heavy Industries, Ltd.²⁾

e-mail: t-yasui@me.es.osaka-u.ac.jp

Painting of the industrial products (for example, car body) is an important factor of quality control for rust prevention, water proofing and color effect of a substrate. Hence, there is a considerable need for a monitoring method of the paint film thickness. In this study, we propose a new method for measurement of thickness and dry-state of the paint film using a terahertz electromagnetic pulse. This method is useful for in-process monitoring and control of the painting film.

1. はじめに

自動車ボディを始めとした様々な工業製品においては、素地（下地）の防錆・防錆・防水・色彩効果の目的から、表面塗装が施されている。塗装膜の厚さムラ（不均一性）や品質不良（気泡・異物混入、乾燥不十分）はこれらの効果を低下させることから、塗装膜評価は塗装製品の重要な品質管理の1つである。しかし従来の接触式膜厚計測法（超音波法、渦電流法ほか）では、インプロセス計測による厳密な膜厚制御が困難であった。

光波と電波の境界に位置するテラヘルツ周波数帯（0.1～10THz）は、これまで光源と検出器の制限から、ほとんど研究が行われていない未開拓研究領域である。しかし、最近の超短パルスレーザー技術と周波数技術の発達により、テラヘルツ電磁波パルスの発生及び検出が可能になった¹⁾。テラヘルツ電磁波パルスは、（1）自由空間伝搬、（2）良好な物質透過特性、（3）コヒーレントなサブピコ秒パルス光、（4）広帯域スペクトル、（5）散乱の影響が小さい、（6）イメージング測定が可能、といった特徴を有する。

本研究では、テラヘルツ・エコー法を用いた膜厚測定により、従来の接触式膜厚計の制限（金属素地上の単層ドライ膜の点測定）を解消し、様々な膜厚測定ニーズ（非接触リモート、ウェット膜、多層膜、プラスチック素地、膜厚ムラ等）に対応すると同時に、テラヘルツ時間領域分光法による塗装膜の品質評価（乾燥状態、気泡・異物混入等）も可能な、高機能塗装膜モニタリング法について報告する。

2. 測定装置

図1に、測定装置図を示す。テラヘルツ電磁波パルスの発生及び検出にはフェムト秒パルスレーザー（AVESTA TiF-Kit-100, パルス幅 60fs、パワー 200mW、繰り返し周波数 87MHz、中心波長 = 810nm）を用いる。レーザー光はビーム・スプリッター（BS）によって、テラヘルツ電磁波パルス発生用ポンプ光と検出用プローブ光に分岐される。ポンプ光はレンズによって、光伝導スイッチ（PCスイッチ）に集光される。その結果、テラヘルツ電磁波パルスが超半球型シリコンレンズ（Siレンズ）側に放射される。テラヘルツ電磁波パルスは軸外し放物面鏡によって平行光線にされる。平面ミラーで反射された後、別の軸外し放物面鏡によってサンプルに照射される。サンプルから反射されたテラヘルツ電磁波パルスは軸外し放物面鏡によって再び平行光線にされた後、3番目の軸外し放物面鏡によって電気光学結晶（EO）に集光される。プローブパルス光は時間遅延を経て偏光子で直線偏光にされた後、BSによってテラヘルツ電磁波パルスと空間的にEO内で重ね合わされる。テラヘルツ電磁波パルスとプローブパルス光が結晶内で時間的に重なった時のみ、テラヘルツ電磁波パルスによる電気光学効果（複屈折）をプローブ光が受け、直線偏光のプローブ光が楕円偏光化される。複屈折量はテラヘルツ電磁波パルスの電場強度に比例する。その複屈折量を $1/4$ 波長板（ $\lambda/4$ ）、検光子（A）、バランス検出型フォトダイオード（PD）を用いてロックイン検出する。プローブパルス光はテラヘルツ電磁波パルスに比べてパルス幅が短いので、プローブ光の時間遅延を連続的に変化させながら複屈折変化量を測定することにより、テラヘルツ電磁波パルスの時間波形を再現する。

3. 測定結果

図2は、塗装膜の厚さと時間遅延の関係を示している。塗膜厚は、接触型膜厚計（渦電流式、精度 = ±

3%)で測定した。また、縦軸には時間遅延用自動ステージの変位量も併せて示してある。膜厚とステージ変位量の関係(傾き)から、塗装膜の群屈折率が決定される。言い換えると、膜厚未知でも群屈折率が分かっていたら、時間遅延(ステージ変位量)から膜厚を逆算できる。塗膜サンプルはアクリル塗料(黒)とエナメル塗料(白)の2種類であり、群屈折率に差が見られた。測定精度は、近似直線のばらつきから4 μm であった。

図3に、ドライ膜及びウェット膜の吸収スペクトルを示す。ドライ膜とウェット膜の吸収スペクトルの違いは、揮発溶媒であるペイント・シンナーによるものである。すなわち、ウェット膜の吸収スペクトルは、溶媒の揮発によって乾燥が進むと、ドライ膜方向にシフトしていくと考えられる。したがって、テラヘルツ吸光度の時間的変化から、ウェット膜の乾燥状態モニタリングが可能である。

4. おわりに

テラヘルツ電磁波パルスの時間特性とスペクトル特性を用いた新しい塗装膜測定法を提案した。テラヘルツ・エコー法に基づいた膜厚測定法では、4 μm の膜厚精度が得られた。一方、テラヘルツ時間領域分光法に基づいた吸収分光測定から、ウェット膜の乾燥状態のモニタリングが可能である。このような高機能リモート塗装膜モニタリング法は、厳密な膜厚制御が可能なインプロセス計測への応用が期待される。

本研究は、NEEDO産業技術研究助成及びマツダ財団より援助を受けた。

文献

[1] D. H. Auston et al, Appl. Phys. Lett., 45, pp284-286(1984).

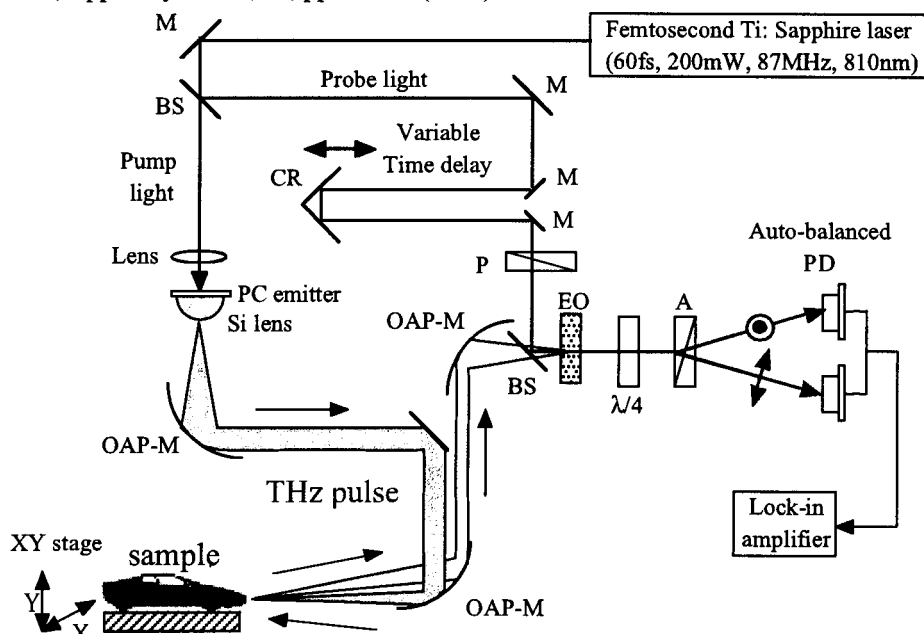


Fig. 1. Experimental setup. M: mirror, BS: beam splitter, CR: corner reflector, P: polarizer, PC emitter: photoconductive emitter, OAP-M: off-axis paraboloidal mirror, EO: electro-optic crystal, $\lambda/4$: a quarter waveplate, A: analyzer.

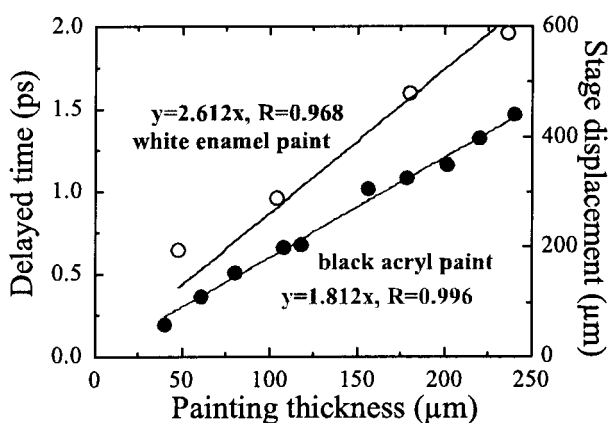


Fig. 2. Relation among painting thickness, delayed time and stage displacement.

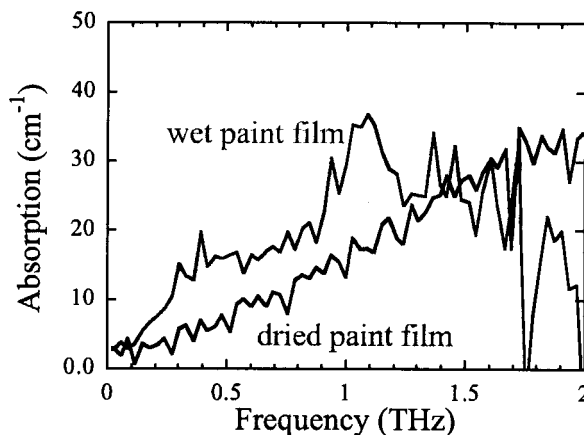


Fig. 3. Absorption spectra of dried paint film and wet one.