

レーザートラッピングを用いた粘性計測に関する研究

Viscous measurement method using laser trapping

池野順一^{1*} 原田雅史² 舘 和幸² 山村宜弘³

Junichi Ikeno¹, Masashi Harada², Kazuyuki Tachi², Nobuhiro Yamamura³

¹埼玉大学大学院理工学研究科

Graduate school of Science and Engineering, Saitama University

²豊田中央研究所

Toyoda Central R&D Labs.,Inc

³トヨタ自動車

Toyota Motor Corporation

Abstract

Coating process of a vehicle takes a lot of time and very inefficiency. Because, it needs to coat with some paints and to print by burning on each paint in the process. Hence, It is demanded shorter lead time now. One of the solutions is printing some paints at a time. If It is possible to measure viscousness of each coating layer, the proposal will be realized. In this report, We tried to measure viscousness of stratified paints. As the result, a new measuring method using laser trapping was developed.

Key Words:Optical radiation pressure, Laser trapping, Stokes' s law, particle, coating film

1. 緒 言

工業製品の塗装は、数層の塗膜が積層したものが一般的である。現在の工程では、これらの塗膜は一層毎に炉に入れては焼き付けられるため、長時間を要し生産性の面で問題となっている。もし、塗料の粘性を知ることにより、層と層の間に影響がでない状態で何層も塗り重ね、一度に焼き付けることができれば、生産性の飛躍的向上が期待でき有益である。具体的には、厚み200 μ m程度の塗装膜を傷つけずに、各層の粘性を計測する技術が求められている。そこで本共同研究では、1年の研究期間を定めて非破壊、非接触の新たな粘性計測法の開発を試みることにした。

*〒 338-8570 さいたま市桜区下大久保 255

Phone/FAX: 電話:048-858-3578

Email: ikeno@mech.saitama-u.ac.jp

2. 粘性計測方法の提案

ここでは、「レーザートラッピング」を用いた非破壊、非接触粘性計測法を提案する。まず、レーザートラッピングについて紹介し、原理について述べる。

2.1 レーザートラッピング

光の運動量は物体の界面で反射、屈折すると変化が生じる。この時、光子と物体の間には運動量保存則によって力が発生する。これを「光放射圧」という。レーザートラッピングとは、この光放射圧によって非接触で微粒子を捕捉する技術のことである。

2.2 計測原理

図1のように膜中に存在する粒径が数 μ mの微粒子をレーザートラッピングする。トラップされた微粒子を、次に媒質中で移動させてやる。この時、進行方向と逆向きに式(1)に示されるス

トークスの粘性抵抗力が働く。

$$F = 3 \pi \eta d v \quad (1)$$

(F: 粘性抵抗, η : 媒質の粘性係数, d: 微粒子の直径, v: 移動速度.)

光放射圧による微粒子の捕捉力が予めキャリブレーションやシミュレーションなどで分かっているならば, 捕捉可能な限界移動速度 (微粒子が追従可能な限界速度) の時に, 粘性抵抗は捕捉力と一致することになるので, 媒質の粘性係数 η が求まることになる。

また, 本計測法ならば, レーザの焦点を3次元にどこにでも合わせることが可能であり, 多層に塗られた層ごとに粘性を知ることが可能になると期待される。しかも, 経時変化が捉えられることから, 技能や勘に頼っていた塗装工程に客観的データを与えることができ, 実用上, 大変有効である。

3. 実験装置の構築

実験装置は図2のように, ①レーザ発振部, ②集光部, ③観察, 計測システム部から構成した。

①のレーザ光源には連続発振タイプで, 比較的出力が高く, 安定していることが必要である。さらに, 高分子に対して比較的透過性の高い波長を有することが求められる。そこで高品位で高出力のLD励起CW YVO₄レーザ ($\lambda = 532\text{nm}$) を用いることにした。

②では, 光放射圧がレンズの N.A. に比例して大きくなることから, N.A. の大きい対物レンズ

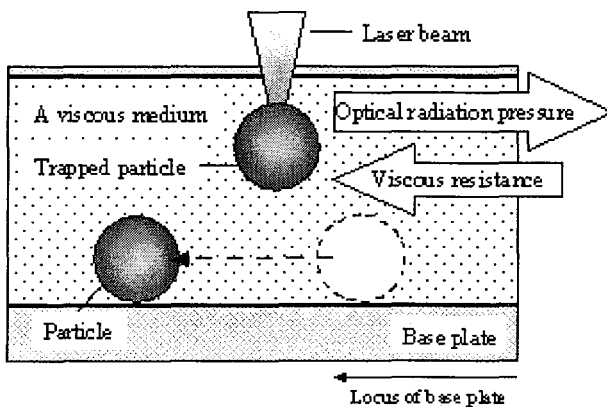


図1 粘性測定原理

を選定した。本実験では N.A. が 0.9 のものを用いた。さらに, 長焦点レンズを選択することで, 作業性を確保した。

③では, PCで制御されたPZTステージが設置されており, 一往復ごとに徐々に速度を上昇させていく運動を行わせた。速度は0~100 $\mu\text{m}/\text{min}$ までの範囲である。どの速度でトラップされた微粒子が捕捉から逸脱するかは, CCDカメラで試料上方から観察することによって認識することができる。ただし, これらの実験を手作業で行えば, ヒューマンエラーが生じるため, 正確な実験データが収集できないことが懸念される。さらに実験に時間を要してしまうため, 時々刻々変化していく粘性の変化を迅速に把握することは不可能である。

そこで, CCDカメラの映像とピエゾステージの情報を統合した自動計測システムを構築することにした。すなわち, CCDでとらえたトラップ微粒子の輪郭を2値化によって明確化し, PC内で微粒子を認識する。その後, 微粒子を囲むように枠を仮想で設定し, ステージの高速化に伴って微粒子が枠から逸脱してしまった瞬間をPCで自動認識するのである。この時, PZTステージの速度情報をPCに取り込み, 粘性を算出した。なお, 調査対象を乗せるステージは, 駆動距離: 100 μm , 制御分解能: 0.7nmのピエゾステージである。

4. 粘性計測実験

4.1 グリセリンを用いた粘性基礎実験

理論的な光放射圧の大きさは, ある程度計算

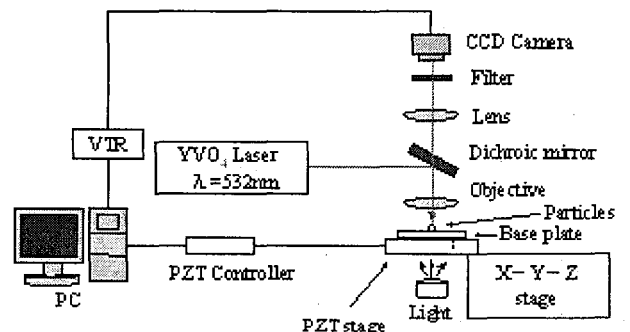


図2 実験装置の概略

によって求めることが可能である。しかし、実際は実験環境によって大きな誤差を伴ってしまう。そこで本研究では、まず高分子と透過性の等しい粘性の明らかな物質を用いて実験を行った。これにより、微粒子の捕捉限界速度と粘性の関係を求めることができ、粘性と捕捉力の関係を算出することが可能である。これにより、粘性が未知な高分子に対する粘性計測において、より実質的な実験結果が期待できる。

図3にグリセリンを用いた計測実験結果を示す。これにより、粘性の高いグリセリンほど、捕捉限界速度は小さいことが判明した。この実験結果を基にストークスの法則を用いて捕捉力を算出した。図4に算出した捕捉力とレーザー照射出力との関係を示す。これにより、同出力では粘性が異なるグリセリンであっても光放射圧による捕捉力は一致することが分かった。これにより、粘度と捕捉限界速度の関係が適正であることが確認できた。したがって、レーザーラッピングを用いた粘性計測は可能であることを実証できた。ただし、グリセリン中では微粒子

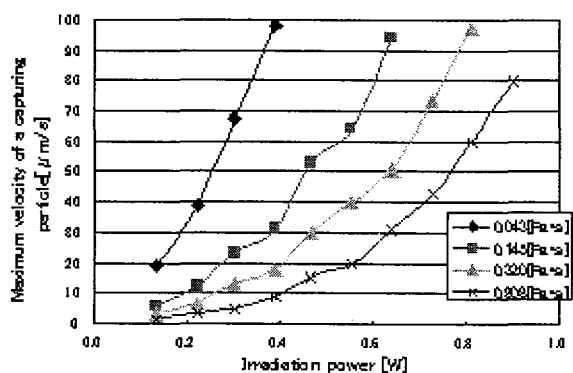


図3 レーザ出力と捕捉限界速度の関係

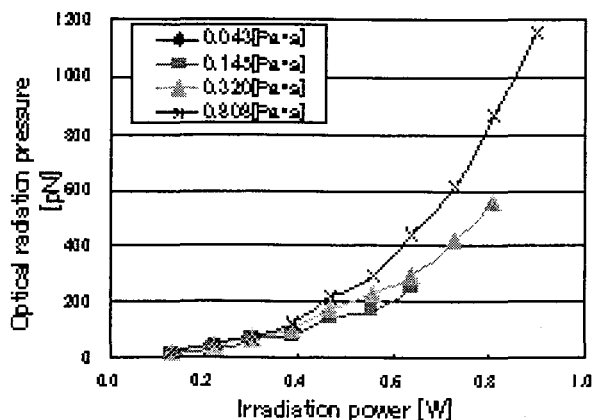


図4 レーザ出力と捕捉力の関係

に対し光放射圧は斥力の方が大きく作用し、下方にあるガラス基板に微粒子が押し当てられてしまった。この影響で基板と微粒子は吸着しやすく、実験データにばらつきが見られた。よって、微粒子とガラス基板の摩擦、吸着がデータの誤差要因となっていることが考えられた。

4. 2 塗料を用いた計測実験

4. 2. 1 単層実験

次に被測定物である高分子を単層塗布し粘性計測実験を行った。その測定結果を図5に示す。なお、比較のため、グリセリンを用いた時の実験結果も同図に示す。レーザー照射出力が大きくなるにつれ、捕捉限界速度が増加する傾向が見られた。ただし、レーザー出力が小さい場合は、基板への吸着による影響により、明確にその関係は見い出せなかった。

4. 2. 2 二層実験

基板に微粒子が吸着することが考えられたが、レーザー照射出力を大きくすることで、その影響を取り除けるため、積層での実験では出力の比較的高い状況で実験を試みた。塗装は基板に測定対象となる高分子を一層目としてガラス基板

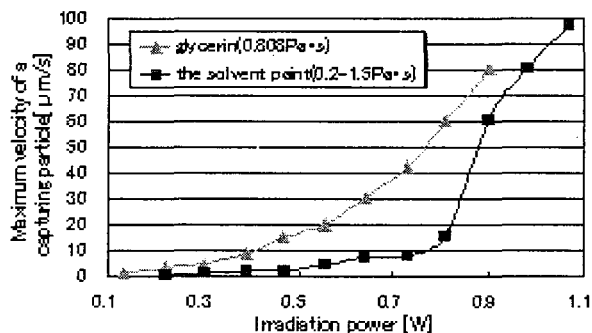


図5 レーザ出力と捕捉限界速度の関係

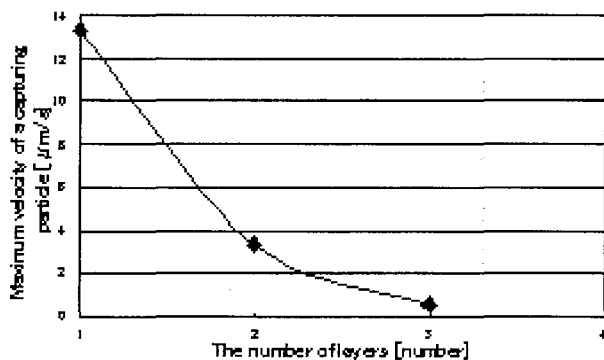


図6 積層における粘性計測結果

に塗り、その上に別の塗料を順次重ねて三層まで塗り、各層を塗る毎に一層目の粘性がどのように変化するか調査した。その測定結果を図6に示す。二層とした場合、捕捉限界速度が低下し、三層とした際にはさらに低下する結果となった。この結果は、粘性が徐々に高まったということを示しているようにも考えられるが、レーザー光線の上層部での吸収による出力低下は無視することが出来ず、まだ結論を得るには時期尚早であり、さらなる詳細な実験をする必要がある。これには、塗膜の精密な膜圧制御ができる

ような塗装技術を導入することが不可欠である。

5. 結 言

本研究では、レーザートラッピングによる高分子の粘性計測が可能であるという実証をした。

今後は、誤差要因の根本的解決策を考え、実験に適用していくことを検討していく予定である。その後、様々な種類の高分子に対し粘性計測を行い、測定可能な高分子種を明らかにすると共に、精度向上に努める予定である。