

第27回青葉工学研究奨励賞



位相シフト技術を導入した光学計測手法の開発と熱物質輸送現象への展開

東北大学大学院工学研究科
機械機能創成専攻
助教 庄 司 衛 太

濡れ現象は極めて基礎的な物理現象であるとともに、接着、印刷、コーティング、塗装、積層などの多様な工学プロセスにおいて重要な役割を果たしている。一般に基板上における液体の濡れ現象は、固/気/液の三相接触線における巨視的な接触角で評価されるが、最近ではナノ流体デバイス、ナノプリンティング、ナノリソグラフィ、マイクロレンズアレイなどの分野で濡れ現象のより微視的な評価、具体的には接触線近傍のナノマイクロスケールの液膜挙動（ここではマイクロ動的濡れと表現）を含めた評価が益々重要となっている。マイクロ動的濡れの研究の歴史は古く、マクロな接触線の先に存在するナノ液膜（先行薄膜）は、1919年には既にその存在の可能性が示されていた。しかし、このナノ液膜挙動の理論的な描像が示されたのは1984年のことである。この理論研究に端を発し、以降マイクロ動的濡れが盛んに研究され始め、これまで先行薄膜を含むマイクロ動的濡れの計測にはエリプソメータ、原子間力顕微鏡（AFM）、光干渉計、蛍光顕微鏡などが用いられてきた。しかし、例えば、既往のエリプソメータやAFMは点計測であることから膜厚分布の動的計測は難しいなど、これまで用いられてきた測定手法には課題があった。

そこで著者らはマイクロ動的濡れの新たな計測手法の一つとして、偏光解析法（エリプソメトリ）に位相シフト技術を導入し、厚さ方向にシングルナノスケールの空間分解能で二次元膜厚分布の動的計測が可能な位相シフトエリプソメータ（図1）を開発した^[1]。偏光解析法とは、直線偏光の光が試料面に入射・反射した際の偏光状態の変化から、試料面に存在する薄膜の屈折率といった光学物性や膜厚を求める手法である。一方、位相シフト技術は従来光干渉計に用いられてきた画像処理技術の一つであり、二つの光の間に所定の位相差を導入し、複数枚の画像を取得・処理することでデータを解析する手法である^[2]。位相シフト技術を導入すると解析画像の全ピクセルで膜厚が得られるため、面方向の空間解像度が向上するとともに、使用機器に由来するノイズを低減したより高精度計測が可能となる。



図1 位相シフトエリプソメータ

本研究では、この位相シフト技術を偏光解析法へと導入可能な光学系および位相シフト技術の処理アルゴリズムを考案することで位相シフトエリプソメータを実現した。開発した位相シフトエリプソメータの妥当性を実証するために、Si基板上に2-100 nmの範囲内の各種膜厚で製膜したSiO₂試料について膜厚分布の計測を行った^[1]。ここで、点計測ではあるが高精度な分光エリプソメータを用いた膜厚計測を併せて実施し、これら結果の比較から開発した光学装置を評価した。比較の結果、位相シフトエリプソメータは高い正確度を有することが示された。また、位相シフトエリプソメータでは測定点は70万点以上であったが、その標準偏差は1-2 nm程度であり、開発した位相シフトエリプソメータは高い精度を有することも示された。

最近はこの位相シフトエリプソメータを新しい流体材料、具体的にはナノ粒子が高濃度に分散したナノフルイドなどのナノ材料のマイクロ動的濡れの観測に展開している。例えば、先行薄膜の研究で多く用いられてきたモデル物質である不揮発性ポリジメチルシロキサン（PDMS）、そしてこのPDMSにナノ粒子を添加したナノ粒子懸濁液のマイクロ動的濡れの観測を実施した（図2）。結果、先行薄膜領域の膜厚に対して粒子サイズが大きい場合、ナノ粒子は接触角に影響を与える一方、先行薄膜にはほとんど影響を与えないことが示された^[3]。マイクロ動的濡れに対するナノ粒子の影響は熱工学分野における冷却技術や排熱回収・エネルギー有効利用技術、化学工学分野では印刷・塗布プロセスにおいて重要な知見となる。今後は本研究を通じてこれら研究分野へと貢献していきたい。

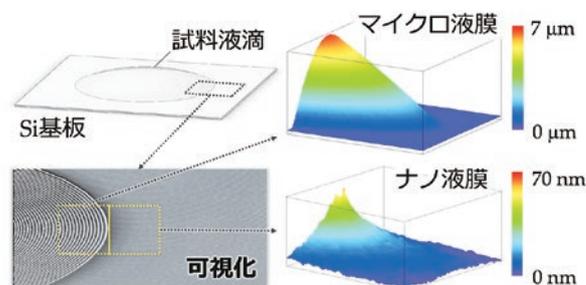


図2 基板上PDMS液滴の固気液三相接触線近傍のナノマイクロ液膜の可視化計測結果

[1] E. Shoji et al., *Opt. Laser Eng.*, 2019, 112, 145-150.

[2] E. Shoji et al., *Appl. Opt.*, 2015, 54, 6297-6304.

[3] E. Shoji et al., *Exp. Fluid*, 2021, 62, 206.