論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

論文題名

低コヒーレンス干渉法に基づく内部の色、構造と粒子分散状態の非破壊観察

Nondestructive observation of internal-color, -structure and –particle-dispersion-state based on low-coherence interferometry

論文審査の要旨

１．論文の概要

通常、光による観察は、物体の表面の情報を得るだけであり、物体の内部の情報を得ることは難しい。あるいは、物体からの反射光に、物体表面だけでなく物体内部からの光が含まれていても、表面からの光と内部からの光を区別することは難しい。光を使って、物体内部の情報を得ることができれば、格段に多くの情報を得ることが可能になる。このような物体内部の情報を光により得る手法は、光の極限的な利用という基礎的な観点だけでなく、様々な応用上の観点からも意義のある研究である。例えば、多層の塗りにより実現される表面や、肌の見え方がどのようにして実現されているのかについて知見を得ることが可能になる。

本論文提出者は、低コヒーレンス干渉法を用いた物体内部の非破壊測定法を開発し、ヒト肌の３原色を使った断層画像や紫外光による断層画像の撮像を世界で初めて実現した。低コヒーレンス干渉法は、干渉可能な距離が短い低コヒーレンス光源を用いることにより、物体の内部で多重に散乱・反射される光があるとき、特定の経路の長さを通過した光のみを選択して測定する手法である。また、３原色の同時測定と色の変化による補正を実現し、物質内部の色を定量的に推定する方法を開発し、皮膚の真皮部位の色を定量的に測定することに初めて成功した。さらに、低コヒーレンス干渉法により、懸濁液中の粒子の粒径分布を測定する装置を開発し、その感度を高めることにより、数 nm の粒子の粒径分布の測定を実現した。これらの研究成果は、新しい測定原理に基づく測定装置を自ら開発し、測定を実行し、そして、応用面で意義のある測定結果を得たものであり、光による測定の可能性を切り拓く重要な成果である。

本論文は、第１章で研究の背景や意義を述べたあと、本論文の測定原理となる光干渉断層法の理論的側面について第２章で説明を行っている。そして、第３章から第６章において、開発した測定装置の詳細と、それらを用いて得られた測定結果について述べている。

第３章は、可視光と紫外光を用いた分光断層画像撮像装置の説明と観察結果を報告している。装置は、スーパーコンティニウム光源に誘電多層フィルターを組み合わせ、シリンドリカルレンズ群を用いたスペクトラルドメイン型の Optical Coherence Tomography （OCT：光干渉

断層法、あるいは光断層撮像法）により、ワンショット型の紫外-可視光 OCT を実現したものである。20 ms の時間分解能で撮像することで、ブレの影響を受けることなくヒト肌内部の非破壊観察を可能とした。R (赤)、G (緑)、B(青)、UV (紫外) 光の深さ分解能はそれぞれ、7.7、5.3、3.6、5.0 μm である。そして、2 人の被験者の断層像の比較を行い、色空間における肌の見え方と光の侵達度が対応することを示した。UV 領域では、切削したヒト皮膚を用いて肌の断層画像を撮像したことを報告している。これらの成果は、肌内部の光の伝搬特性に対する外観や皮膚の紫外線防御能との関係の理解につながるものである。

第 4 章では、フルカラーの断層画像を得る手法の開発とその応用に関する研究成果を述べている。本研究では、断層画像をフルカラー化するために、3 原色の同時測定、及び下層で散乱した光が上層を通過することで生じる色の変化の補正を実現した。さらに、イメージング分光器を 3 台用いて、これらを同期させることで、3 色それぞれを異なる検出器で同時測定してカラー画像に合成した。ゼラチン、ポリスチレン粒子、イエローインクを用いて凝固させて作製した白色と黄色のモデル皮膚を観察し、カラー化により内部の色再現ができることを確認し、さらに、ヒト皮膚の OCT 信号の深さプロファイルから、表皮部分での減衰定数を割り出し、減衰分を補った真皮の信号強度を導出してカラー画像を得た。これにより、露出している頬は、露出の少ない腕の内側と比較して、真皮の色が暗く、かつ黄色化している傾向を確認することに成功した。OCT の分光シグナルから光の減衰を補正して物質内部の真の色を推測する方法、及び皮膚の真皮部位の色を定量的な測定を実現したのは初めてである。

第 5 章では、低コヒーレンス干渉法を用いた懸濁液中の粒子の粒径分布測定について報告している。従来の手法では、測定可能な粒径が 100 nm 程度であったのに対し、本論文では、平均粒径 13 nm のポリスチレン (PS) 粒子の粒径分布が測定できることを示した。小さな粒径の測定を可能するために、本研究で開発した装置は、シングルモードファイバーを用いたマッハツェンダー型干渉計に、散乱光を効率よく検出するための顕微光学系を組み合わせた低コヒーレンス動的光散乱システムである。さらに、顕微光学系と液浸型ファイバープローブを用いて計測信号の高周波ノイズを抑制し、数 nm の粒子の定量や 10 μL での微量計測を実現した。また、角度可変ファイバープローブシステムを開発し、PS 粒子の運動モードが並進拡散運動モードにあることを示した。第 5 章で報告されている技術は、低コヒーレンス動的光散乱法のなかで測定可能な粒径範囲が最も広く、数 10 μm から nm の粒径分布の定量に適格な方法である。

第 6 章は、本研究で開発した高感度型の低コヒーレンス動的光散乱システムを、様々な粒径分布の資料の測定に適用した結果を報告している。本論文の測定結果は、透過型電子顕微鏡の結果と比較することにより、粒径を正確に測定できることが確認されている。実際のインクについて希釈濃度を変えて測定し、粒径分布の変化を計測した、希釈操作によって粒子の凝集サイズが小さくなることから、濃厚分散粒子系で粒子間距離の短いことにより粒子同士が弱い相互作用で軟凝集していることを示した。また、沈降性のあるインク中の顔料は時間の経過とともにμm から nm で粒径分布が状態変化することを明らかにした。これらの成果はナノ粒子を用いた製品管理、商品開発のためには、濃厚粒子系の分散状態を直接、無希釈で観測する必要性があることを示したものである。

第７章では本論文の結論と将来展望を述べており、その後に、参考文献、発表リストを記載している。

２．審査の方法、内容の評価、結論

本論文は、平成２９年１２月に提出され、３名の論文審査担当者がそれぞれ査読した。さらに、平成３０年１月２４日に開催した公聴会における発表と質疑をもとに審査した。

本論文は、低コヒーレンス干渉法を用いて物体内部を非破壊に測定する装置を実現し、生体、物体、液体内部の色、構造、分散状態を観測し、化粧品開発のためのヒト肌の研究、多層フィルムやインクなどの産業材料の研究開発や品質評価に応用したものである。本論文で開発された技術と観察によって得られた知見は、様々な分野の応用に発展する可能性がある。

以上を総合すれば、本論文は博士の学位論文として十分な内容があり、３名の論文審査担当者は一致して、本学位申請者に博士（理学）の学位を授与するにふさわしいと認めた。

論文審査主査　　平野　琢也　教授
荒川　一郎　教授
渡邉　匡人　教授