

氏 名	布施 直也
本 籍	東京都
学 位 の 種 類	博士（工学）
学 位 の 番 号	乙第17号
学 位 授 与 年 月 日	2023年6月17日
学 位 授 与 の 要 件	本学学位規則第14条
学 位 論 文 題 目	分光学的手法を用いた毛髪構成成分の解析法の確立と加齢毛への応用
論 文 審 査 委 員	主査 森田 成昭 副査 齊藤 安貴子 副査 湯口 宜明

論文内容の要旨

毛髪は、人の見た目の印象を決定する要素の一つである。ヘアスタイルや髪色を変えると、自分のもとより人の受ける印象が大きく変わるため、健康的で美しい髪が望まれている。近年、毛髪における化学処理やヘアスタイリング行動によるダメージが深刻化している。毛髪の化学処理には、メラニンを分解して髪色を明るくするブリーチ処理や、ジスルフィド結合の酸化還元反応によるパーマネントウェーブ処理などが挙げられる。これらの処理によって毛髪の色や形状をコントロールできる反面、毛髪の構造や構成成分、および物性を変化させてしまうというデメリットをもっている。また、日常におけるヘアスタイル行動として、ドライヤーやヘアアイロンなどの熱器具の使用、手ぐしやブラシなどによる毛髪を引っ張る行為は、生活者が望むヘアスタイルを維持できる反面、ダメージが蓄積しやすくなり、結果的により髪の扱いにくさが低下する。このようなヘアケアの現場で起きている諸問題については、現状最適な解析方法がなく、毛髪の階層ごとによる分析ができ、現場での問題を精度よくシミュレートできるような評価手法が望まれている。

本研究では、物質の化学的特性を分析するのに有用な技術であり、毛髪を対象とした分析に汎用されている赤外分光分析(IR)に着目した。これは、ケラチンタンパク質や脂質や水分が、C、H、O、NおよびSなどの元素から構成されており、中赤外領域で同時に観測しやすいことが理由に挙げられる。また、測定方法を変えることで毛髪組織のさまざまな構造に焦点を絞って測定でき、その測定方法によっては非破壊で毛髪を評価できることも大きな利点である。しかし、毛髪はケラチンタンパク質をはじめ、脂質、水分、メラニンなどの多くの構成成分から成り、さらに複雑な階層構造をとることから、各官能基におけるIRスペクトルがオーバーラップしやすく、解析が困難であるという課題も存在する。そのため、毛髪を対象としたIRを用いた研究は、毛髪の基本的な理解に留まるものが多く、ヘアケアの応用という面では不十分であるのが現状である。

そこで本研究では、毛髪科学研究の分野に、多変量スペクトル分解（MCR）や二次元相関分析（2DCOS）などのケモメトリックスの手法を組み合わせ、ヘアケア現場での問題を精度よくシミュレートできるような評価手法の開発を目的とした。また、実際のヘアケアの問題を解決し、毛髪化粧品業界への実質的な貢献を目標とした。

第3章では、顕微IRを用いて、未処理毛とブリーチ処理毛の水分挙動を空間的かつ時間的にイメージングし、任意の部位における水分量を数値化する手法を開発した。さらに、この手法を加齢毛に適用し、湿度変化による毛髪の形状変化と水分挙動との関係性を評価した。第4章では、顕微IRとMCRを用いて毛髪内部タンパク質のケラチンタンパク質の二次構造を迅速かつ機械的にイメージングする手法を開発した。さらにこの手法と生化学的手法、および熱力学的手法を用いて、加齢毛の水分反応性向上におけるメカニズムについて、特に毛髪内部タンパク質の変性に着目して解析を実施した。さらに加齢毛の基礎的研究をベースに、還元アミノ化反応を用いた毛髪改質技術の開発を試みた。第5章では、顕微ATRとMCRを組み合わせることで、未処理毛とブリーチ処理毛を日常に起こり得る力学的負荷で反復延伸をした際に生じる毛髪内部の構造変化を定量化する方法を開発した。また得られたデータについて2DCOSによる解析を行い、反復延伸による構造変化の順序を明らかにした。第6章では、加齢に伴って生えてくる、うねりやくせ、広がりがある毛髪を“ゆがみ毛”として、そのゆがみ毛が日常的なコーミングでよりうねり/くせが強くなってしまう原因について、第5章にて開発した手法を用いて解析した。さらに要因を解明した後に、実際に毛髪化粧品業界への実質的な貢献を目指し、ゆがみをケアするシーズの探索を実施し、最終的にはゆがみ毛における技術情報の開発を行った。

以上のように、本研究では、顕微IRおよび顕微ATRで得られた膨大なスペクトルデータをケモメトリックスの手法を用いて解析を行うことにより、ヘアケアの現場で実際に起きている問題の解明に成功した。また、IRデータ解析を主としながらも、分光分析と測定原理が異なる生化学的および熱力学的分析を適宜組み合わせることで、加齢性の毛髪に特有の髪乱れのメカニズムを一次構造から高次構造までをシームレスに明らかにすることができた。

論文審査結果の要旨

本論文は、多くの生化学的な構成成分が複雑な階層構造をなしている毛髪について、分光学的手法を用いた解析法を確立し、さらにその手法を加齢毛の特性を理解することに応用した研究成果が示されている。

毛髪の生化学的な分析には、これまでに様々な手法が用いられてきた。本論文では官能基レベルの分子情報が得られる赤外分光に着目し、顕微赤外分光や顕微全反射減衰（ATR）赤外分光を応用して研究を行っている。これにより、電子顕微鏡などの真空を必要とする分析手法では測定が困難な、毛髪中の水の分析がなされた。このとき、軽水（ H_2O ）ではなく重水（ D_2O ）を用いることで、絶乾させることができない、毛髪と強く結合した水の情報を避け、加湿によって水和した水の情報だけを選択的に得ることに成功している。また、分光イメージングや繰り返し測定によって得られる大量のスペクトルをまとめて多変量データとして扱い、ケモメトリックス（機械学習）によってデータ解析を行うことで、1本のスペクトルデータからは得られない、豊富な分子情報を抽出しており、これによって本論文の新規性が示されている。具体的には、分光イメージングデータにおけるアミドIバンドをMultivariate Curve Resolution（MCR）によって解析することでタンパク質の二次構造のマッピングを達成しており、加齢に伴うカルボニル化を突き止めている。また、日常のブラッシングをシミュレートした毛髪の反復延伸に対して逐次スペクトル測定を行い、得られたデータセットに対してデータ解析を行うことで、破断の原因や加齢に伴うゆがみ毛の曲率増加の原因を究明している。

以上のように本論文は、精緻な分光分析を行うことで、ヘアスタイリング行動における未解明な現象を明らかにしており、分光学、および香粧品学の分野で新規性を示している。よって本論文は博士学位論文として価値のあるものとして認める。

論文審査委員	主査	森田	成昭
	副査	齊藤	安貴子
	副査	湯口	宜明

論文審査結果の要旨

最終試験の結果、合格と認める。

論文審査委員	主査	森田	成昭
	副査	齊藤	安貴子
	副査	湯口	宜明