

# 渦のねじれ流によるコラーゲンナノファイバーの形成制御と形態変換

神戸大学大学院理学研究科

津田 明彦

## 1. 緒言

バイオナノファイバーが大きな注目を集めている。中でも、植物のパルプから抽出されるセルロースナノファイバーは、再生医療工学や創傷材料などのヘルスケア、超純水製造フィルターやエアフィルターなどの環境工学、生体分子の精製などのバイオテクノロジー、複合材料の強化剤や防護服などの防犯・セキュリティ、ポリマーバッテリーや高分子膜燃料電池などのエネルギー分野、ボールペンなどのインクや塗料においての実用化が始まっている。ナノファイバーの産業利用は我が国の重要政策の一つに掲げられており、その市場規模は将来数兆円規模になることが見込まれている。

植物性バイオナノファイバーに期待と関心が集まる一方で、コラーゲンなど動物性線維への関心が薄れつつある。コラーゲンは、美容や健康を目的としたサプリメントやドリンク、様々なコスメアイテムに配合され、現在も数多くの商品が存在する。しかし、分子化学的な視点から、コラーゲン線維からミクロフィブリル（ナノファイバー）を取り出し、その構造や形態をナノレベルで修飾・制御して、機能を引き出している例はほとんどない。これまでのコラーゲン配合化粧品も多くは、その効用として肌の保水効果をうたっている。しかし、コラーゲンナノファイバーには、上記セルロースナノファイバーと同様の機能に加え、そのゴムのように高い柔軟性や伸縮性、人体とのより高い親和性などを活かした様々な新機能が期待される。本研究課題において我々は、新しいコラーゲンマテリアルの創製とコラーゲンナノコスメへの展開を目標に、メカニカル攪拌によって生じる渦のねじれ流を用いることによるコラーゲンナノファイバーの形成制御と形態変換を企てた。

我々の研究グループでは、これまでに生体高分子を模倣した様々な超分子ナノファイバーを創製し、分子科学的な視点からそれらの構造解析と機能開拓を行ってきた。それらの超分子ナノファイバーは溶液の流れに沿って配向し、直線二色性（LD）を誘起する。一方向にねじれた構造を持つナノファイバーは、攪拌によって生じる渦の流れに沿ってねじれ配向して、ファイバーと渦のねじれ方向が一致する時、より効率的に配向することができる。またその時、形成するナノファイバーのサイズも大きくなる。そのような研究背景において我々は、動物体内に大量に存在するバイオ線維として知られているコラーゲンと、渦の流れの不斉流体力学的相互作用に着目した。体内におけるコラーゲン線維の形成や分解には、血液、リンパ液、および組織液などの体液の流れ（体内流）が深く関わっている。したがって、コラーゲンによる体内流刺激のメカノセンシングと体組織による体内流統制のメカノバイオロジー機構の研究が、コラーゲンナノコスメにおける全く新たな技術と概念を生み出す可能性を秘めている。

## 2. 方法

コラーゲンと液体の流れによる流体力学的相互作用を期待し、左右の攪拌によって生じる不斉な渦の流れにおけるコラーゲン分子（三重鎖および一重鎖）のねじれ配向挙動をフロー誘起 LD スペクトル法で調査し、コラーゲンと渦の流れの流体力学的相互作用およびキラルセンシング機構を明らかにする。10×10×45 mm の石英セルに 0.05 mg/mL のコラーゲンもしくはゼラチン水溶液を 3 mL 加え、 $\phi 2 \times 5$  mm のスターラーバーで溶液を 1300 rpm の回転速度で攪拌し、LD スペクトルを測定した。

## 3. 結果

無攪拌条件下、10 °Cあるいは20 °Cでコラーゲン水溶液の LD スペクトルを測定しても、LD シグナルを観察することはできなかった。しかし、攪拌条件下において測定を行ったところ、コラーゲンの吸収帯に相当する 200 nm 付近に誘起 LD を確認することができた。攪拌の ON-OFF に応じて、LD スペクトルも即座に変化した。温度を一旦 75 °Cまで上昇させて、再度 20 °Cにまで冷却し、LD を測定したところ、攪拌条件下において誘起 LD 強度の著しい減少が確認された。一方、ゼラチン水溶液を用いて同様の実験を行っても、攪拌による誘起 LD を確認することはできなかった。

## 4. 考察

以上の結果より、三重鎖構造を持つコラーゲンは、比較的剛直で硬い構造を持つため、溶液の流れに沿って配向することができ、誘起 LD を与えたと考えられる。一方、ゼラチンは、コラーゲンの三重鎖がほどけた構造を持ち、剛直性が低く柔らかい構造のため、溶液の流れに沿って配向することができなかつたと考えられる。実際にそれを支持する結果として、三重鎖構造を持つコラーゲンを加熱すると、三重鎖が解離してゼラチンと同じ状態となり、誘起 LD の強度が弱まったと考えられる。

## 5. まとめ

本研究から、三重鎖構造を持つコラーゲンが溶液の流れに沿って配向して、直線二色性スペクトルを与えることが明らかになった。一方、それが解離したゼラチン状態では配向現象を与えないこともわかった。いくつかのタンパク質は、その線維形成過程において溶液の流れによって、その集合形態が変化することが知られている。今後は、この解離したコラーゲンの再凝集プロセスにおける攪拌の効果を調査し、新たな機能性バイオマテリアルの開発につなげたい。