

特集：2015年「音の日」

クモの糸でヴァイオリンは弾けるのか？

奈良県立医科大学 名誉教授

大崎 茂芳

1. はじめに

弦楽器の貴公子とも言われるヴァイオリンは、曲線美とともに一味違った音色を醸し出す楽器である。その中でもストラディヴァリウスと言えば、イタリアのクレモナ生まれの世界的な名器として知られるヴァイオリンである。ヴァイオリンは16世紀にクレモナで生まれているが、その黎明期にあたる1582年にローマに派遣された天正遣欧少年使節団はクレモナに立ち寄っている。彼らは帰国後、聚楽第で豊臣秀吉の面前でラベイカ（ヴァイオリンの前身で高音ヴァイオリン）を演奏するなど、日本人は比較的早い時期にヴァイオリンに近いものに触れている。

ヴァイオリンの音色は、楽器本体、弓、弦、さらに演奏者というセットが必要である。その中でも、楽器本体、弓、ヴァイオリニストは注目されてきたが、弦に関しては単に消耗品レベルの評価でしかなかった。弦の素材として、古くからガット、スチール、さらに近年ではナイロンが使用され、それらは成熟レベルにある。

ところで、世の中で人々に嫌われている代表的な動物としてクモがいる。そのクモの分泌する糸がヴァイオリンの弦と結びつく話は誰が予想したであろうか。クモの糸で弦を作るとしたら、かなり多くの糸を集め、しかも強度が必要である。芥川龍之介の小説『蜘蛛の糸』では、煮えたぎる地獄で罪人カンダタがクモの糸によじ登るシーンがある。そのシーンではクモの糸は切れてしまうが、現世でも郊外のクモの巣などは手で簡単に壊すことができる。このことから、「クモの糸でヴァイオリンの弦を作る」話など極めて飛躍的で、「誰が信じるの?」というのが正直なところである。

クモの糸で弦の話になると、まずは「嫌がるクモから長い糸を取り出せるのか?」に加えて、「細くて切れにくい弦はできるの?」との疑問に答えねばならない。さらに、「クモの糸の弦での音色はどうなの?」や「普通のヴァイオリンでストラディヴァリウスの音色を凌駕できるのか?」という数々の厳しい課題に挑戦してみたい。

2. なぜクモの糸なのか?

2.1. クモとの出会い

私がクモと付き合い始めたのは今から40年ほど前のことである。大学院博士課程の後、粘着紙の研究をしていた頃に世界的に新しいトレンドであった粘着分野の総説を依頼された。粘着の世界的な動きをまとめている過程で、粘着と関係するクモの糸も調べていた。ところが、クモの糸の物理化学的研究は世界的にほとんどされていないことに魅力を感じたのがクモと付き合うきっかけとなった。

当時のクモ学では分類学が主流であった。世界的に合成繊維が花盛りの時代で、「研究は実験室でするものだ」と認識している人が多かった。特に、方向性のはっきりしている分野の研究に取

り組む研究者が多いが、クモの糸のように何が重要なのか分からぬ分野の研究に取り組むことは許されない雰囲気であった。今でもその傾向は変わってない。危険を伴うフィールドワークでのクモの採集や面倒な糸取りを伴うクモの糸の研究などは遊んでいるものと評価されるためか、興味を持つ人がほとんどいなかったのも不思議なことでもなかった。研究者にとっては、生き物相手なので論文も出にくい領域であったし、今振り返ってみれば、クモは共食いのため糸の繊維産業化も無理なことから、多くの研究者が興味を抱かなかったのであろう。

そのような時代に、私は粘着からクモの糸の内容に変えて総説を書いてみようと思いついた。もともとクモに関心のなかった私にとっては大決心であった。クモに素人の私は、クモの生態をはじめ、クモから取り出した糸の実験を行いながら、糸の特徴を理解することに焦点を当てた。その結果、世界におけるクモの糸の最先端レベルの研究が理解できるようになり、私は足掛け3年で総説を書き終えた^{1), 2)}。幸いなことに、これを契機に、私はクモの糸を趣味としての生涯の研究対象にすることに決めたのである。クモの糸についての総説を書き終えた頃には、私はマイクロ波という電磁波の研究にシフトし、分子や繊維の配向性を迅速に測定する従来にない新しいマイクロ波方式を見出していた^{3)~5)}。その後からフィルムの配向性の研究に始まり、今では血管、骨、肺、皮膚におけるコラーゲン線維の配向性の研究を行っている^{6), 7)}。

2.2. 糸取りに奔走

最初の頃は、糸をたくさん集めてネクタイや三味線の弦を作ってみたいという希望に満ちていた。三味線の弦は京都祇園のお座敷で弾くのは粋なものと思っていた。しかし、生き物を対象にしてみると、クモからの糸集めは途方もなく大変であることを思い知らされた。机上での空論と現実とのギャップの大きさを認識するに至っては、ネクタイづくりや三味線の弦の話など吹っ飛んでしまった。

糸を集めるといっても、まずは巣を見つけることである。見つけても、巣からクモを取り出すのは並大抵のことではない。家の近くでは昼のみならず夜もクモを探し求めた。クモを扱っていると近所の評判は良くないことが分かってくる。そのため、夜に橋の欄干でクモが巣を張る様子を観察するために懐中電灯をつけるが、不審者扱いを避けるべく幼い子供を伴うことも多かった。休日には近郊に車で出かけ、夏休みともなると、和歌山、高知、鹿児島、沖縄などの日本各地を家族とともに訪れてクモ採集を行った。高所に巣を張るクモを採集するには危険を伴うことが多く、ハブの生息する沖縄では命がけと言っても過言ではなかった。とにかく、クモの生息地の把握とともに集めたクモからの糸取りに力を注いだ。次第に、研究用の細い一本の糸のサンプリング方法や、糸をたくさん集めるノウハウを蓄積していった。

2.3. 糸取りはクモとのコミュニケーション

クモの巣は縦糸や横糸などを含む7種類の糸からなる(図1)。それらは、クモの腹にある別々の腺から目的に応じて分泌される。巣の骨格である縦糸は力学的に強い。それに対して、横糸(図2)は粘着球がついて伸びやすく、飛来した獲物の行動を抑制し、獲物が暴れても横糸だけが切れる仕組みになっている。

私が焦点を当てたのはクモが逃げるときに出す牽引糸で、それは命綱とも呼ばれる。牽引糸を

取り出そうとするとクモは嫌がってすぐ切ってしまう。また、取り出しても、目的の牽引糸と違った糸であることが多い。

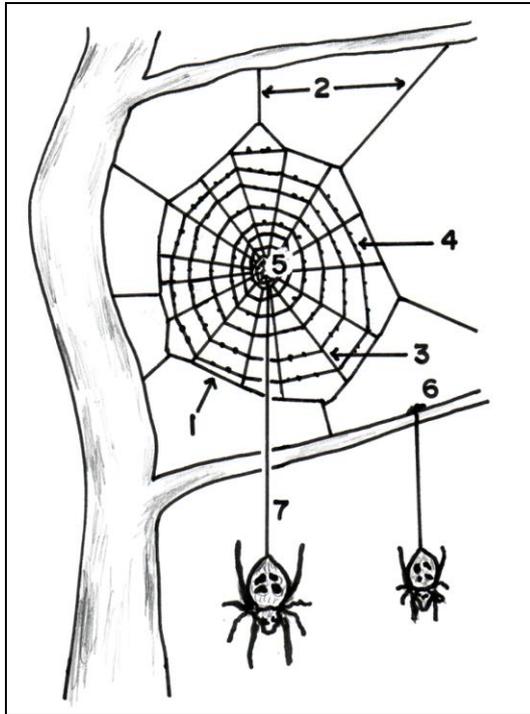


図1. (左) 円網を構成するクモの糸 :

1. 枠糸、2. 繋留糸、3. 縦糸、4. 横糸
5. こしき、6. 付着盤、7. 牽引糸

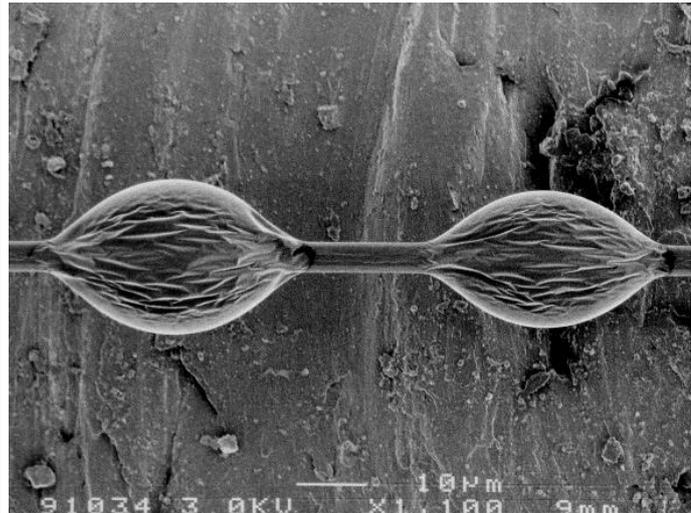


図2. 粘着球がついた横糸

そのため、糸取りのキーポイントはクモとのコミュニケーションに依存することが分かってきた⁸⁾。まさに、クモを厳しく扱うとへそを曲げ、優しく扱うとなめられるなど、牽引糸を取り出すのは容易なことではないのである。

3. クモの糸の性質

3.1. クモの糸の物理化学的性質

クモの糸は柔らかく強いのが特徴と言われる。クモの糸が柔らかいのは誰でも理解できる。ところが、巣は手で簡単に壊せることから、「クモの糸は本当に力学的に強いのか？」と疑ってしまう。実際に弾性率（変形のしにくさを反映）を測ると、ジョロウグモの牽引糸の弾性率（約 13 GPa）⁹⁾は、非晶質であるポリスチレンの弾性率（2 GPa）よりもはるかに大きく、破断強度はナイロン繊維より 2~3 倍も大きい。このように、クモの糸は柔軟性であるにも関わらず、力学的に優れている珍しい天然繊維なのである。

超高分子量ポリエチレン（東洋紡のダイニーマ）繊維の理論弾性率（32 GPa）は大きいですが、融点は 141℃と低いため、高温に耐えられないというウィークポイントがある。ところが、クモの糸は 250℃まで耐えうる耐熱性繊維¹⁰⁾であるため、将来的な用途が広がる可能性がある。

絹糸などの天然繊維は紫外線で劣化しやすいので、夏には着物で出歩かないほうが良いと言われる。クモの糸も同様に思われるが、昼行性のジョロウグモの糸が紫外線で力学的に強化されるという想定外の結果を見出した¹¹⁾。昼行性のクモの巣の強度が紫外線で低下しては獲物を捕れなくなるなどクモにとっては死活問題となる。そのため、紫外線でタンパク質分子間に架橋が起こ

って力学的強化されることが考えられる。また、紫外線を浴びない夜行性のクモの糸は強化されなかった事実は、昼行性のクモは夜行性から進化した根拠を与えるものとして興味深い^{12), 13)}。

ジョロウグモの糸はタンパク質（分子量約 27 万）二個が化学結合によって形成された大きい分子量のタンパク質（約 60 万）からなることが分かってきた¹⁴⁾。

3.2. クモの糸には危機管理機能がある！

クモが細い牽引糸（命綱）にぶら下がっているシーンをみると、「細い糸にも拘らず、どうして切れないのだろうか」（図 3a）と不思議に思うことがある。クモの糸の力学強度とクモの重さとの関係を調べてみたところ、力学強度はクモの重さに比例して上昇し、その強度はクモの重さの約 2 倍であることが分かった。「なぜ 2 倍なのか？」と思い、糸の微細構造を調べてみた。すると、目視では 1 本である牽引糸も電子顕微鏡では 2 本のフィラメントからなっていた（図 3b）。この結果は、2 本のフィラメントのうち 1 本が切れてももう 1 本でクモの体重を支えることができることを意味する。もし、力学強度が 2 倍の太いフィラメントであっても、1 本だけであれば一旦亀裂が入ってしまえば切れてしまい命を落としてしまう。そのため、余分と思われる 1 本のフィラメントが危機時に役に立つ 2 本のフィラメントからなる命綱に意味があるのである。このように、いつでも予備を備えておくことが大切なのである。これが、危機管理の原点ともなる「“2” の安全則」の発見となり、1996 年の『ネイチャー』誌のハイライト版に掲載された¹⁵⁾。

この安全性の概念は、トンネル、橋や道路などを含む構造物の設計、通信、コンピューターのバックアップ、防犯用の鍵や非常口の数に重要である。また、入学試験のチェック体制や押印などの社会科学的な事例にも適用できる¹⁾。



図 3a. 細い糸（命綱）にぶら下がっているジョロウグモ

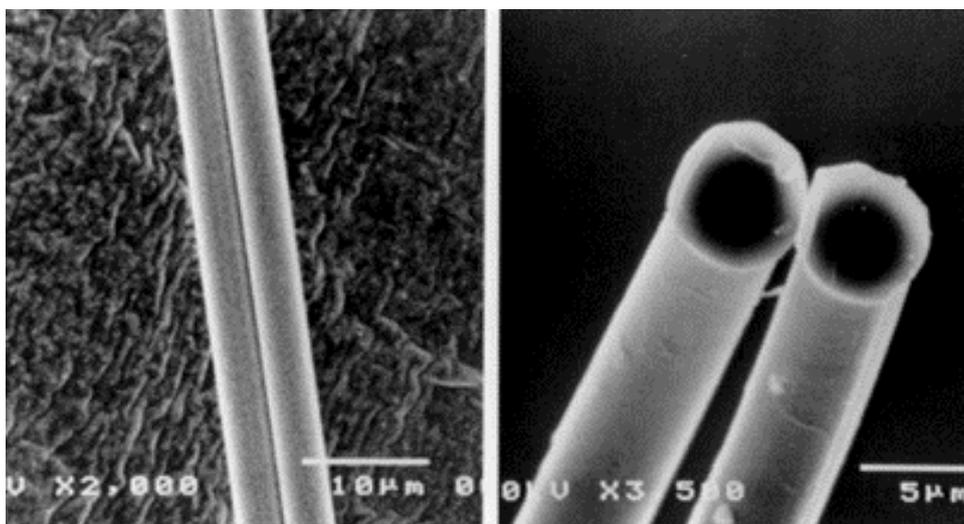


図 3b. 命綱の電子顕微鏡写真

4. ヒトはクモの糸にぶら下がるのか？

クモの糸の実用化を考えるには多量の糸を集め、その集合体の特性を調べる必要がある。クモが嫌がって糸を切ってしまうので、なかなか多量の糸集めは難しく、ネクタイを作る話は吹っ飛んでしまっていた。そのため、長年にわたって細いクモの糸に焦点を当て、糸そのものの特性を調べることに重点を置いていた。それでも、クモの糸をたくさん集める手法を次々と改良しながら、最初の頃から 21 世紀に入ってからも日本各地を訪れて糸集めを行っていた。

2002 年の世界中を駆け巡ったビッグニュースは、『サイエンス』誌に掲載されたヤギのミルクからクモの糸を創り出すことに成功した話であった¹⁶⁾。カナダのベンチャー企業（ネクシア）と米国の陸軍とが共同で開発したものだが、2003 年にカナダのネクシアの研究所を訪れた私は糸の試供品がまもなく世に出回る話を聞いた。

その翌年（2004 年）になって、テレビ局（『目がテン』）のディレクターから、芥川龍之介の小説『蜘蛛の糸』のシーンにある「ヒトがクモの糸にぶら下がれないものか？」という要請を受けた。多量の糸集めは非常に難しいことから、最初はその要請を断った。ところが、担当のディレクターの熱意に押されて無理を承知で協力することになった。

「クモの糸は強い」と言われるが、これはあくまでも細い命綱のことであるので、人間としては細いため強いという実感はない。そのため、人間の実感として受け入れてもらうにはやはり、芥川龍之介の小説のシーンを実現するしかない。多量の糸集めは簡単なものではなかったが、幸いなことに、マスコミの力もあって鹿児島の中学生の協力が得られたので、多量の糸を集めることができた。計算上は、何とか成功する可能性は予想できたが、余分な糸束がないので切れたら終わりという状況であった。スタジオに入るまでは、その可能性を期待していた。ところが、スタジオでの実演では、スイカ玉 22 kg ぐらいで糸束が切れてしまうという無残な結果に終わってしまった。当然、スタジオに待機していた女性をぶら下

げるデモは出来なくなってしまった。その年の秋にもリベンジを行ったが、前回にもまして哀れな結果になった。

2006 年からは、糸集めからクモの糸にぶら下がるまでのすべての過程を自らの力で行ってみようと考えた。苦労して 13 cm 長で 19 万本のクモの糸を集め、我が家のウッドデッキの大きな木にロープとハンモックの間にクモの糸を直列にして、65kg の私がハンモックに乗ることに挑戦することにした。予備の糸束もないので、切れてしまえば元も子もないので、あらかじめ愛犬のももちゃん（5 kg のミニチュアダックスフント）を乗せてみた。これが動物としてクモの糸に乗った最初である。次に、私が恐る恐るハンモックに両足を乗せたときに初めて、小説の世界を現世のものとした瞬間であった（図 4）⁸⁾。しかし、その後の何回もの実験では一時的にぶら下がれたとしても、いずれも切れてしまった。この原因を探ってみたところ、クモの



図 4 クモの糸にぶら下がった著者（65 kg）

糸束には隙間が多いため、加重によって時間とともに弱い繊維から順次切れていくので、ますます強度が下がるという問題が残り、その解決が大きな課題となった。

5. クモの糸でヴァイオリンは奏でられるのか？

5.1. なぜヴァイオリンなのか？

休日をクモに関するフィールドワークやデータ整理に当てていたことから、私にとって長年にわたってゆっくりとした休日とはあまり縁がなかった。新型インフルエンザが流行し始めた2009年の春に、体調のことも考えて、久しぶりの休日を取った。その時に、「休みって、こんなに良いものなんだ！」と思いながら、車の中で聴いたロシア民謡のヴァイオリン曲に感動してしまった。同時に、ヨーロッパの教会に招待されたときに聴いた弦楽器の音色が脳裏に浮かび、ふと、「クモの糸束がヴァイオリンの弦に使えるら良いかもしれない？」と考えてみた。しかし、これは空想に過ぎなかった。ヴァイオリンの弦となると少なくとも70 cm～100 cm ぐらいの長さが必要であるが、ぶら下がる時の糸束の長さはせいぜい13 cm と短いため弦作りは無理な話である。しかも繊維間に隙間が多いため張力を加えている間に切れてしまうことや、弓を引いていると簡単に切れることから、ヴァイオリンの弦にはなり得ないという状況であった。もちろん、クモの糸の弦と言っても何が特徴になるのかの当ては全くなかった。あくまでも、ロシア民謡からヴァイオリンの音色を思い出したことから、「クモの糸を使ってみたらどうなるのか？」というレベルに過ぎなかった。

ヴァイオリンは本体、弓、弦の部分からなっており、弓の毛と弦の摩擦によって、本体で共鳴が起こって音色を発するものである。もちろん、奏者によっても影響される。弦はガット（羊の腸）、スチール、ナイロンなどの素材が使われているが、主流はナイロン弦である。いくら音色に感動したからといっても、弾いたこともないヴァイオリンの分野に足を踏み入れることは私にとっては無謀そのものであった。

しかし、ふと考えてみれば、学生時代には合唱クラブに入っており、社会人になってもヴァイオリンの演奏会には度々行っていた。ヴァイオリンそのものには触れたこともなかったが、高校に辻久子さんが来られたこともあって、ヴァイオリンを含む音楽そのものに関心を持ち続けていた。また、クモの糸の研究は40年続けており、ナイロン弦やガット弦に関する高分子素材の力学研究はさらに長く続けてきた。音の共鳴と関係する共振現象に関する装置の開発も行っており、周波数解析にはそれほど抵抗はなかった。このような事情とともに、音楽そのものが極めて数理的な学問であることに興味を持った。ヴァイオリニストはあくまでも演奏の技術者であって、楽器を含めた材料を揃えて如何に上手く料理をするかである。そのため、ヴァイオリニストにとっては材料の議論は演奏のそれとは対極的にあることが分かり、私は無謀にも音楽分野に参戦(?)してみようという気になったのである。

その年の夏から、クモとのコミュニケーションを密にし、それまで得られなかった長い糸を集めることに集中した。しかし、現実は厳しいものであった。弦らしきものを作っても切れてばかりであった。

中途半端な弦であればプロのヴァイオリニストからすぐに「使い物にならない！」と烙印を押され兼ねない。そのため、私はヴァイオリンのレッスンに通って、自ら弾けるようにしながら、

弦の問題点を探し始めた。何年ものレッスンの中で徐々に、使い勝手がよく切れにくい弦とはどのようにすれば良いのかが掴めてきた。

5.2. 一味違うクモの糸の音色

ヴァイオリンにセット中に弦が切れたり、セットした後も切れたりする失敗を幾度となく重ねた。ところが、弦の均一さや密度を上昇させることにより、切れにくいクモの糸の弦ができあがったのは2010年8月であった(図5)。



図5. 1m長のクモの糸束

もちろん、クモの糸の音色など全く予想すらできないことから、クモの糸で弦を作ってみるというレベルでしかなかった。まずは、従来の金属弦(図6a)、ガット弦、ナイロン弦における音声信号の周波数解析を行ってみたところ、当然のことながら基本周波数(293 Hz)は明瞭に出ていた。次に、ところが、音声信号の周波数解析では、基本音より高周波側に強度のある倍音が多く観測され(図6b)、従来の弦の音色と大幅な差異のあることを見出した¹⁷⁾。

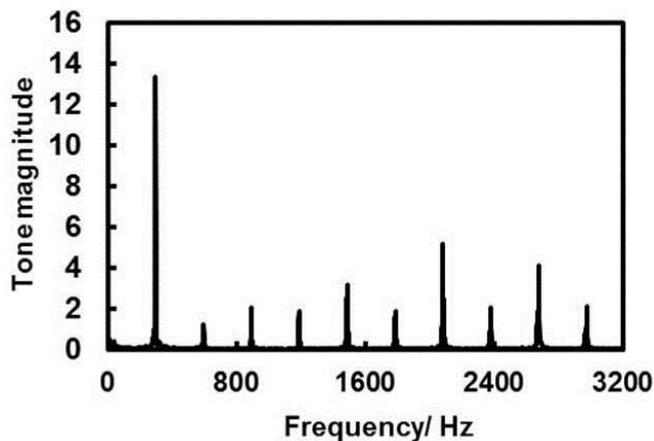


図6a. スチール弦のパワースペクトル

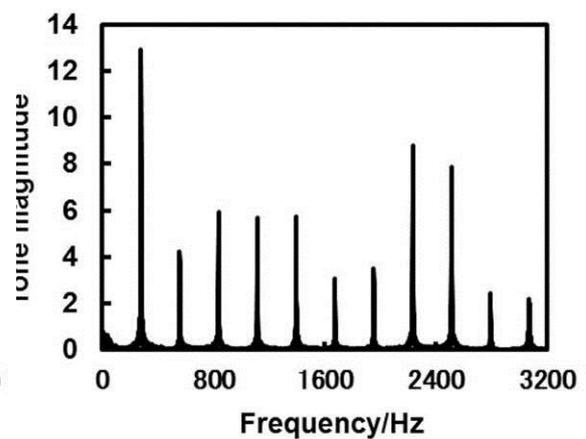


図6b. クモの糸の弦のパワースペクトル

いくら周波数解析という科学的裏付けがあっても、最後は人間の感覚による判断である。そこで、プロのヴァイオリニストに評価を仰ぐことにした。その結果、弾いている際に多くの倍音を耳で確認できるなど私の実験結果は裏付けられることになった。また、クモの糸の弦では柔らかく深みのある音色を醸し出し、ストラディヴァリウスと弾き比べて音色で遜色ないことが分かった。しかも、実際にプロがストラディヴァリウスにスチール、ナイロン、ガット、クモの糸の弦をセットして弾いた比較実験では、クモの糸の弦が従来の弦よりもストラディヴァリウスに最も適していることも明らかになった (<http://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.108.154301> の SUPPLEMENTAL MATERIAL。但し閲覧は「Authorization Required」となっております)。これらの結果を含めて、音楽の専門家から、クモの糸の弦を用いれば音楽が変わるという評価も頂戴することになった¹⁷⁾。

5.3. 弦のユニークな構造

細いクモの糸の集合体で弦が作れるようになったが、「なぜ切れにくいのだろうか？」の疑問を探るべく、弦の繊維構造を調べてみることにした。その結果、驚くべきことが見つかったのである。

細い糸の集合体はいくら纏めても、繊維間に必ず隙間が存在している。ところが、オオジョロウグモの牽引糸の集合体から作った弦では、隙間のなくなった繊維集合体できていたのである(図7)。もし、繊維間に隙間のない集合体できれば、高強度化および軽量化が実現できることになる。

クモの糸の弦が切れにくく独特な音色を呈することは、今まで世界的にもまったく見られなかった繊維間に隙間のないユニークな最密充填構造に起因していることが分かった。つまり、繊維間が面接触のため荷重は全体で支えることができ、切れにくくなっているのである。なお、図7での隙間は切断時にできたものである。

クモの糸の弦の独特な音色とユニークな構造に関する科学的裏付けを含めた内容の論文が、2012年4月に米国の物理学会誌「フィジカル・レビュー・レターズ」に掲載された¹⁷⁾。その際、英国のBBC、米国のABCを含めて、世界25か国以上のマスコミから取材・報道があり、電子ジャーナルというご時世でもあるために、インターネットにユニークな音声の一部が流され、世界的に多くの視聴者から“cool”という評価をいただいた。

6. おわりに

クモの糸は柔らかくて強く、耐熱性や紫外線耐性を持ち、しかも、危機管理に適した仕組みを持ち合わせていることには驚きを禁じ得ない。クモと付き合ってから、クモの糸がヴァイオリンで素晴らしい音色を醸し出すことなど夢にも思っていなかった。今後、さらに素晴らしい音色

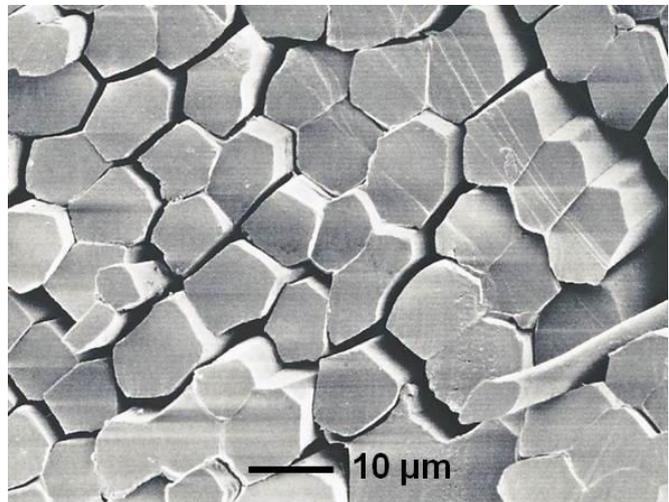


図7. クモの糸の弦の断面における組織

を呈する弦づくりに励みたいと思っている。これも、クモが4億年という長い進化の歴史を生き延びてきた道具としての糸が、夢の繊維である証なのかもしれない。

趣味からスタートして40年も続けているクモの糸の研究であるが、神秘的なベールに覆われているクモの糸の秘密はまだ奥深いようである。

ただ、趣味としての研究には期限が設定されることもないので、新規チャレンジに不足はないことを学んだ。初期の頃にはクモの糸と三味線という結びつきの発想であったのが、いつのまにかクモの糸とヴァイオリンという関係になったが、音楽という心に響く領域に踏み込めたことは幸いである。また、生きもの対象ではいろいろ驚く発見に出会う機会に恵まれ、多くの感動を味わわせてもらったクモに感謝したい。

参考文献

- 1) 大崎茂芳, クモの糸のミステリー, 中央公論新社, 2000.
- 2) 大崎茂芳, 化学の領域, 36, No.6, 62 (1982).
- 3) S. Osaki, Polym. J., 19, No.7, 821 (1987).
- 4) S. Osaki, Nature, 347, 132 (1990).
- 5) S. Osaki, Rev. Sci. Instr., 68, No. 6, 2518 (1997).
- 6) S. Osaki, Anat. Rec., 254, 147 (1999).
- 7) 大崎茂芳, コラーゲンの話, 中央公論新社, 2009.
- 8) 大崎茂芳, クモの糸の秘密, 岩波書店, 2008.
- 9) S. Osaki & R. Ishikawa, Polym. J., 34, No.1, 25 (2002).
- 10) S. Osaki, Acta Arachnol., 37, No.2, 69 (1989).
- 11) S. Osaki, Polym. J., 36, No. 8, 657 (2004).
- 12) S. Osaki & M. Osaki, Polym. J., 43, 200 (2011).
- 13) 大崎茂芳, クモはなぜ糸から落ちないのか 2002, PHP 研究所, 2004.
- 14) T. Matsuhira & S. Osaki, Polym. J., 47, 456 (2015).
- 15) S. Osaki, Nature, 384, 419 (1996).
- 16) A. Lazaris, et al., Science, 295, 472 (2002).
- 17) S. Osaki, Phys. Rev. Lett., 108, 154301 (2012).

著者プロフィール:



大崎 茂芳 (おおさき しげよし)

◇ 略歴

- 1946年：兵庫県に生まれる
 1969年3月：大阪大学理学部卒業
 1971年3月：大阪大学大学院理学研究科修士課程修了
 1976年3月：大阪大学大学院理学研究科博士課程修了
 1995年4月：島根大学教授(兼)島根大学大学院教育研究科教授
 1999年6月～2012年3月：奈良県立医科大学医学部教授

2004年4月～2012年3月：奈良県立医科大学大学院医学研究科（博士課程）教授（兼）

2008年4月～2012年3月：奈良県立医科大学大学院医学研究科（修士過程）教授（兼）

2012年4月～2015年3月：奈良県立医科大学特任教授

2012年4月：奈良県立医科大学名誉教授 現在に至る

（学位）

1976年3月：理学博士（大阪大学） 1990年3月 農学博士（京都大学）

（受賞歴）

2013年4月：文部科学大臣表彰 科学技術賞

（主な著書）

大崎茂芳、「クモの糸のミステリー」（中公新書）、中央公論新社、pp.1-186, 2000.

大崎茂芳、「コラーゲンの話」（中公新書）、中央公論新社、pp.1-188, 2007.

大崎茂芳、「クモの糸の秘密」（岩波ジュニア新書）、岩波書店、pp.1-182, 2008. など