

クモの糸は夢の繊維か？

奈良県立医科大学名誉教授 大崎 茂芳

はじめに

クモは古事記で悪役として登場し、そのグロテスクな姿から多くの人から嫌われ続けてきた。私が嫌われ者のクモに焦点を当てた35年前は、クモ学の研究の主流は分類学であり、クモの糸の物理化学的研究はほとんど見られなかった。そのため、クモの糸の秘密は神秘的なベールに覆われたままであった。

その後、クモの糸は柔らかくて強いという相反する性質を示すのみならず、次々と興味深い性質や仕組みを持つことが分かってきたことから、最近ではクモの糸が21世紀の夢の繊維として表舞台に躍り出るようになってきた。それに伴って、遺伝子工学的手法でクモの糸の量産化の可能性も議論されるようになってきた。

ここでは、神秘的なベールに覆われたクモの糸の秘密を解き明かすに至る研究や糸の量産化に向けての最近の動向を追ってみたい。

クモとの出会い

私がクモとつき合うようになったきっかけは、生き物を対象とした趣味の研究を探していたことに始まる。大学院博士課程の後に粘着紙の研究をしていたときに、粘着に関する総説の執筆を依頼された。粘着は当時の新しいトレンドであった。ところが、粘着との関連でクモの巣を調べていたときに、世界的にクモの糸の物理化学的性質がほとんど調べられていないことに興味を持った。そこで粘着からクモの糸に変えて総説を書いてみようと思い立った。

フィールドワークを通じて私はクモの生態を理解しつつ、自ら行った糸の実験データを加えて総説を足掛け3年もかかって書き終えた。これを契機に、私は未踏領域が極めて多いクモの糸を趣味として生涯の研究対象にすることに決めた。総説を書き終えた頃には、マイクロ波という電磁波を用いて分子やコラーゲンなどの繊維の向きを調べる研究にシフトしていた^{1), 2)}。その頃、私は糸をたくさん集めてネクタイでも作ってみたいという高望みを抱いていた。

生き物相手の苦勞

クモは巣の骨格となる縦糸や粘着性のある横糸などの7種類の糸を分泌する。ところが、クモの腹から目的の糸だけを取り出すのは非常に難しい。取り出す人の精神状態が安定していないと、電子顕微鏡で調べて初めて違った糸であることが分かるなど、クモにしばしば騙される。一般にサイエンスとは感情抜きであると言われているが、生き物相手になると、必ずしも杓子定規のようにはいかない。糸取りのキーポイントはクモとのコミュニケーションであることが呑み込めるようになってきた^{3), 4)}。

クモから糸を取り出すことの難しさが分かってくると、多くの糸を集めてのネクタイ作りは現実離れした世界としか思えなくなっていた。そのため、細い一本の糸（牽引糸）の物理化学的性質を調べることに焦点を当てることにした。

クモの糸の物理化学的性質

私は命綱といわれる牽引糸に焦点を当ててきた。

クモの糸はタンパク質からなるが、構成アミノ酸のうち約4割がグリシンである。糸はほとんど非晶性であるが、 β シート状の構造がクモの糸の強度を上げている。しかし、非晶性構造の詳細は未だに分かっていない。

クモの糸は分子が繊維の長さ方向に並んでおり、300℃まで耐えうる耐熱性繊維である³⁾。クモの糸はクモの成長とともに太くなるが、単位面積当たりのクモの重さは一定である⁴⁾。また、クモの糸の弾性率は約13GPaで、結晶(～100GPa)と非晶(2GPa)の中間にあり、非晶性では極めて強度のあることが分かった⁴⁾。

“2”の安全則の発見

クモから糸を取り出していると、「クモは細い命綱(牽引糸)(図1a)にぶら下がっているが、なぜ切れないのだろうか?」と考えてしまう。



図1a 細い命綱(牽引糸)にぶら下がっているジョロウグモ。

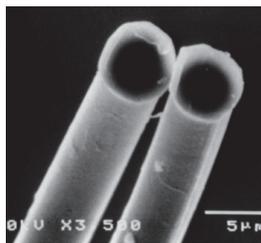


図1b 電子顕微鏡で観た牽引糸。2本のフィラメントからなる。

あるとき、クモから取り出した糸の力学強度をクモの重さに対してプロットして、データを眺めていた。すると、なんとクモの重さにはほぼ比例して力学強度は上昇し、その傾きは約2であった。「なぜ糸の強さがクモの重さの2倍なのだろうか?」と不思議で、その解釈には何週間も悩んだ。目視では1本に見える牽引糸も電子顕微鏡で調べてみると2本のフィラメントからなっているところに秘密が隠されていた(図1b)。これが、危機管理の原点ともなる「2」の安全則」の発見に

つながった。安全則は、2本のフィラメントからなる牽引糸(命綱)は、1本が切れてももう1本で体重が支えられるという考え方である。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のである。安全則の発見は、1996年の『ネイチャー』誌に掲載された⁵⁾。この概念は橋や道路などの構造物の設計、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のみならず社会科学的な多くの事例にも適用することができる。また、社会科学的な信頼性をクモの糸の力学特性のデータで科学的に示すことができる⁶⁾。

クモの進化と紫外線

絹糸などの生体繊維は紫外線に非常に弱い。夜行性のズグロオニグモの糸の力学強度は紫外線によって低下するのみである。ところが、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データが得られた。夜行性のクモは紫外線を浴びないので、紫外線によって糸が強化される必要もない。しかし、昼行性のクモが、紫外線で巣の強度が低下しては獲物を取れなくなるなどクモにとっては死活の問題となる。これらの紫外線の影響は、クモが夜行性から昼行性へ進化したという証拠を与えるものとして興味深い⁶⁾。

ヒトはクモの糸にぶら下がるのか?

2002年の『サイエンス』誌に掲載されて世界中を駆け巡ったビッグニュースは、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⁷⁾。その翌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世に出回る話を聞いた。2004年になって、テレビ局(『所さんの目がテン!』)の要請で、天然のクモの糸の実用的な強さを確かめるべく、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るのか?」という難題に挑戦した。多量の糸を集めるのは並大抵のものではなく、スイカ玉22kgぐらいで糸束が切れて失敗に終わった。2006年になって13cm長で19万本のクモの糸を



図2 クモの糸にぶら下がった65kgの著者

集めることによって、我が家のウッドデッキで65kgの私がクモの糸にぶら下がることに成功した(図2)。小説の世界を実現し、クモの糸は強いという印象を多くの人に与えた。しかし、クモの糸束には隙間が多く一時的にぶらさがれたとしても時間とともに少しずつ切れるので、実際は丈夫な紐というほどのものではなかった。

クモの糸でヴァイオリンは可能か？

新型インフルエンザが流行し始め、クモの糸にぶら下がる実演を入れた講演会が中止になった2009年の春のこと。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、「実演用のクモの糸束がヴァイオリンの弦に使えるのではないか?」と思い始めた。そのとき手元にあった13cm長の短いクモの糸束では弦を作れるはずもなかった。その夏から、クモから長い糸を集めることに集中した。

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烙印を押されることを知っていた。そのため、私はヴァイオリン教室のレッスンに通って、どのようにしたら使い勝手がよく切れにくい弦が作れるのかを試してみることにした。

2009年9月になって、切れにくいクモの糸の

弦ができ上がった。もちろん、音色に特徴がなければまったく意味がない。ところが、音声信号の周波数解析では、高周波側に強度のある倍音が多く観測され(図3a)、従来のスチール弦(図3b)と比べて音色に大幅な差異のあることを見出した。

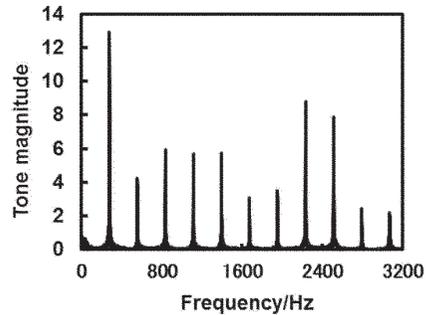


図3a 音声信号のパワースペクトル(クモの糸の弦)

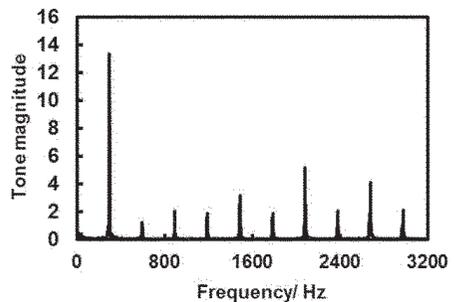


図3b 音声信号のパワースペクトル(スチール弦)

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いだ。その結果、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。

クモの糸の弦は柔らかく深みのある音色を醸し出し、ヴァイオリンの名器であるストラディヴァリウスの音色と比較して遜色ないことが分かった。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⁸⁾。

弦のユニークな構造

どのような繊維でも集合体として利用されている。もし、繊維間に隙間のない集合体ができれば、クモの糸の弦に限らず天然繊維や合成高分子繊維

において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 (図4) に起因している。

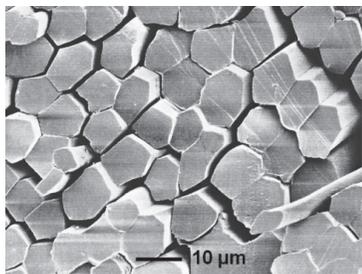


図4 クモの糸の弦の断面写真

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⁸⁾。その1カ月前から英国のBBC、米国のABCを含めて、世界25か国以上のマスコミからのアプローチがあり、インターネットに音声の一部が流され、世界的に多くの視聴者から“cool”という評価を戴いた。

クモの糸の量産化は可能か？

古くから多くの人々がクモの糸の量産化を考えてきたが、共食いすることから蚕のような養蚕は無理であった。やはり考えられるのは、人海戦術でクモから直接糸を取り出すことであった。19世紀のパリ万博でのクモの糸の手袋の展示がある。その後、2009年にはフランス人が100万匹のクモの糸からじゅうたんを、2010年には米国でクモの糸で服を作った例がある。

一方、21世紀になって遺伝子組み換え技術によるクモの糸の量産化の動きが現れてきた。最初のブレークスルーは、2002年のカナダのネクシアの発表であった⁷⁾。潤沢な資金をもとに素晴らしい研究所や大きな牧場を持っていたが、糸の分子量が60kDaと天然糸の約580kDaに比べて大幅に低く、強度も出ないことから2009年に廃業したことは記憶に新しい。2007年に信州大学で

は遺伝子組み換えによって、クモの糸の成分が10%程度含まれる絹糸を作った。しかし、クモの糸の特徴を持った糸ができたという報告はない。その後、2013年にはベンチャー企業のスパイバーがバクテリアを使ってクモの糸を作ったという報道がある。一般に遺伝子工学的手法によって作ったクモの糸の分子量は天然と比べて大幅に低いことから、いかに高分子量に近づけるかが課題と思われる。

終わりに

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。まさに夢の繊維であろう。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産物なのかもしれない。

この特徴あるクモの糸を遺伝子工学的手法で量産化を目論む動きは出てきて然るべきである。最近の遺伝子工学分野では世界的にはマスコミ先行のきらいもあるが、21世紀の夢の繊維として日の目を見るにはクモの糸の研究開発に関して着実な発展を望むばかりである。

趣味からスタートして35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。

参考文献

- 1) S. Osaki, *Nature*, **347**, 132 (1990).
- 2) 大崎茂芳, 「コラーゲンの話」(中央公論新社) 2009年.
- 3) 大崎茂芳, 「クモの糸のミステリー」(中央公論新社) 2000年.
- 4) 大崎茂芳, 「クモの糸の秘密」(岩波書店) 2008年.
- 5) S. Osaki, *Nature*, **384**, 419 (1996).
- 6) 大崎茂芳, 「クモはなぜ糸から落ちないのか」(PHP研究所) 2004年.
- 7) A. Lazaris, et al., *Science* **295**, 472 (2002).
- 8) S. Osaki, *Phys. Rev. Lett.*, **108**, 154301 (2012).