

クモの糸の不思議

大崎 茂芳 (奈良県立医科大学医学部)

※日本家政学会誌vol. 66No. 10 521-528 2015年発行

(注) 本レビューでは、『著者』が元論文の著者である大崎 茂芳氏、『私』がレビュアーである五十嵐 哲を示している。

近年、クモの糸が科学者、一般人を問わずクモの糸が注目され、その繊維産業化が目指されている。本論文では、ひとつはクモの巣を観察することでクモの生態について調査している。一方でクモの糸を物理(力学・熱・波動)的、化学的な面から見た考察を行っている。

著者はまずクモの生態に着目した。ズグロオオグモというクモを観察したところ、毎夕巣を張り替えている事を確認した。また、張り替えて不要となった巣を口に運んでいることが判明した。DAVID B. PEAKALL (1971) ^{※a}は放射性同位体によってクモが巣を食べていることを証明した。

次に著者は直径1.5mの巣を張るオオジョロウグモを対象とした観察に着手した。この巣の一部を切り取り、餌としてミルワームを与え続けた結果、数日間巣を張り替える様子はなかった。その後餌を与えることを止めてからその2日後には巣の張替えに励むようになった。以上の結果から、クモは餌が補給され続けて飽食になれば、たとえ荒れ続けている巣でも張り替えないままであることが判明した。

クモの糸を構成するタンパク質のアミノ酸配列の一部が、1985年にPCR法が発達したことにより解明された。Jenkins, J.E (2010年) ^{※b}は、グリシンに富んだセグメントには α -ヘリックス^{※1}や β -ターン^{※2}などの二次構造からなる結晶構造を持たない部分(非晶域)が形成され、アラニンに富んだセグメントでは β -シート^{※3}による結晶構造を持つ部分(結晶域)が形成されていることを発見した。さらに、クモの牽引糸の結晶化度は20%であることを発見した。非晶域は伸びなど弾性的性質に、結晶域は力学強度にそれぞれ寄与する。このため、 β -シートからなる結晶域が非晶域に取り囲まれていると著者は推測している。(図1)

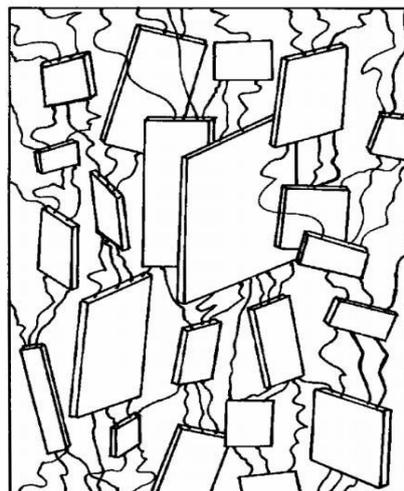


図1. グリシンに富んだ非晶域の海に浮かぶアラニンに富んだ β シート構造による結晶域の模式図

クモの糸には、飛来した獲物を粘着球で動きを止める横糸や放射状に巣の骨格を形成している縦糸など、合計11種類ある。ここでは、その内の1つで命綱の役割を果たす牽引糸を中心に話を進めていく。牽引糸の熱的性質としては、200°Cから分解が始まり、約300°C、340°Cで化学種の蒸発に起因する発熱反応のピークが起こり、約500、580、600°Cで高分子タンパク質の分解による発熱反応のピークになると推測する。

Osaki.S (1989年)^{※c}は牽引糸はグリシン残基40%、アラニン残基が約29%からなるタンパク質であるということを証明している。グリシン残基は横糸に多く含まれていることから、弾性力に富んでいると考える。(図2)

Osaki.S (2002年)^{※d}は5000本以上のフィラメントからなるクモの糸の断面積を1本ずつ求めることは不可能に近いと、細いフィラメント1本の、張力と伸びる長さの関係を表した曲線(図3)から弾性率を求めた。

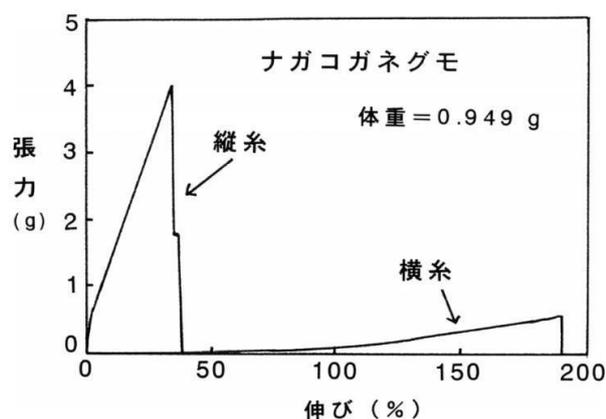


図2. ナガコガネグモの縦糸と横糸の張力-伸び曲線

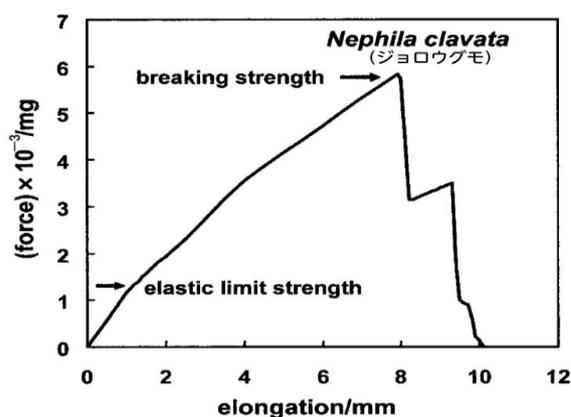


図3. 細いフィラメント1本の張力と伸びる長さの関係を表した曲線

また、成長とともに分泌する糸の太さは異なることから、成長を追いながら牽引糸の弾性率の重さ依存性を調べた。その結果、Osaki.Sはジョロウグモの幼体における弾性率はca. 10 GPaで、成体における弾性率はca. 13GPaであることを求めた。ちなみに、ポリスチレンの非晶弾性率は2.0GPaであることから、クモの糸における弾性率が大きいことが理解できる。この大きな弾性率は、β-シート構造による結晶域だけでなく、非晶域にも存在するβ-シートの寄与や、60万もある大きな分子量のタンパク質で結晶域を繋いだ架橋構造^{※4}が影響していると考えられる。

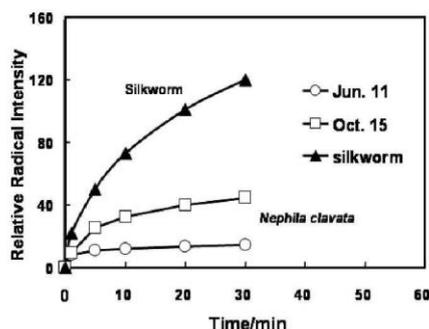


図4. ジョロウグモ (*Nephila clavata*) の牽引糸および絹糸 (silkworm silk) のESRラジカルの信号強度の紫外線照射時間依存性

Osaki.S (2004年)^{※e, f}は絹糸など様々な繊維と牽引糸を紫外線を照射して、劣化した時に発生するラジカルを測定したところ、牽引糸はラジカル量が他の繊維より少なく、また、紫外線で分解されるタンパク質の量から、クモの糸は絹糸より1.7倍も劣化しにくいことを発見した。(図4)

次に、ジョロウグモの糸に紫外線 (UV-A) を照射し、力学強度を調べたところ^{※g, h}、紫外線照射時間とともに糸は強化され、力学強度は極大を示した。(図5)そして、初期強度まで低下した時にクモは巣を貼り替えていることがわかった。

一方、夜行性のズグロオニグモの糸は紫外線で強度低下するのみであり(図5)、夜に紫外線を浴びない夜行性のクモは、巣の糸が紫外線によって強化される必要はないのである。この結果から著者は、クモが夜行性から昼行性へ進化したと考える。

著者はクモの重さとクモが出す牽引糸の力学強度を調べたところ、力学強度はクモの重さに正比例する。蜘蛛の重さに対する力学強度の大きさのグラフ(図6)の傾きは2である。

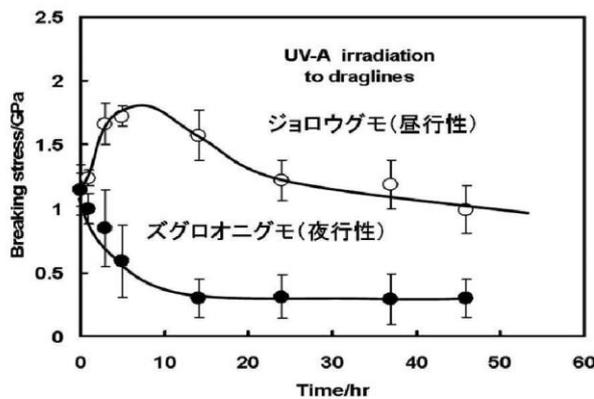


図5. ズグロオニグモおよびジョロウグモの牽引糸の破断応力 (Breaking stress) の紫外線照射時間依存性

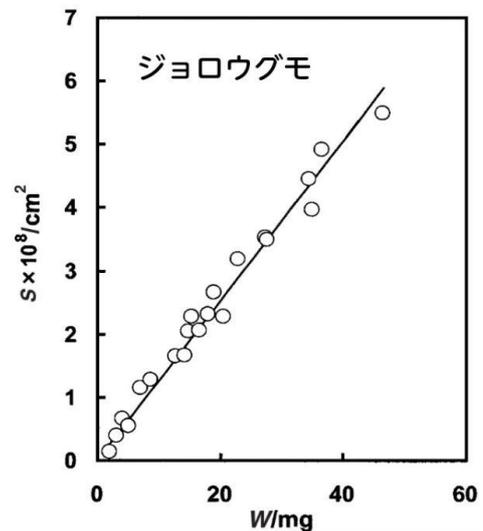


図6. 蜘蛛の重さに対する力学強度の大きさのグラフ

この比例関係を疑問に思った著者は牽引糸を電子顕微鏡で調べたところ、目視では1本に見えていた糸が実は2本のフィラメントから構成されていることが判明した。このことから、2本のフィラメントからなる牽引糸は1本が切れてももう一本で体重が支えられると考えられる。

クモの糸は強いと言われることもあるが、屋外に張られている巣などは手で簡単に壊せてしまう。もし、ヒトがクモの糸にぶら下れたら、人々はクモの糸の強さを実感として強いものだと受け入れてくれるかもしれない。そのため、著者は数年かけて失敗を繰り返し、最終的に2006年に13cm程の長さで19万本のクモの糸を集めることにより、体重65kgの著者がウッドデッキでクモの糸にぶらさがることに成功した。(図7)



図7. クモの糸束にぶら下がっている著者

一方、使用したクモの糸の集合体は糸と糸の間に間隙があり、一時的にぶらさがれたとしても時間とともに細い糸が少しずつ切れるので、実際の強度は細い糸を束ねた本数から計算される理論強度とは比べものにならないほど小さかった。^{※i}

著者は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考えたが、クモは人為的に糸を取り出そうとするとすぐに切ってしまうため、長い糸を取り出すことは極めて難しい。しかし、著者はクモが気持ちよくなり、牽引糸を出してもらえる状況を作るため、クモとのコミュニケーションを深め、長い糸から紐らしいものを作れるようになった。2010年に、切れにくい弦を作り上げ、ヴァイオリンにセットして音声の周波数特性実験を行ったところ、クモの糸で作られた弦は従来の弦と比べて倍音が非常に多く、音色に大幅な差異があることが分かった。^{※j} (図8)

ここで周波数特性について科学的に上記の結果が出たが、ヴァイオリンの演奏の心地良さは人間の感覚が優先するものであるから、プロのヴァイオリストの評価によって、この実験の裏付けを行った。その結果、弾きながら自らの耳で多くの倍音の存在を確認でき、『柔らかくて深みのある音色』という評価を受け、周波数特性に関わる感覚的な裏付けもできた。

さらに、クモの糸の弦を安価なヴァイオリンにセットした場合でも、名器ストラディヴァリウスに遜色ない音色を醸し出すことがわかった。また、本物のストラディヴァリウスに従来の弦とクモの糸の弦をそれぞれセットして比較したところ、クモの糸がストラディヴァリウスにより適していることが確かめられた。しかし私は、これはあくまで人間の感覚的な考察であると考えます。

そこで、切れにくい弦の断面を調べてみると、繊維間に殆ど隙間のないユニークな細密充填構造になっていた。(図9)

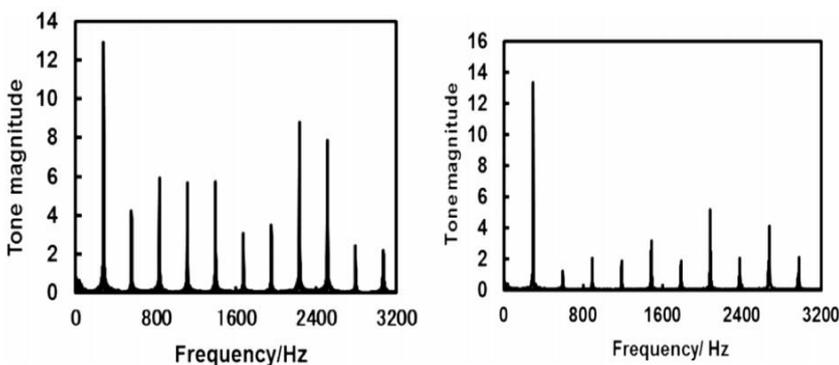


図8. ヴァイオリンにおける音声信号 (tone magnitude) をフーリエ解析して得たパワースペクトル⁽²⁸⁾
左: クモの糸の弦 右: スチール弦

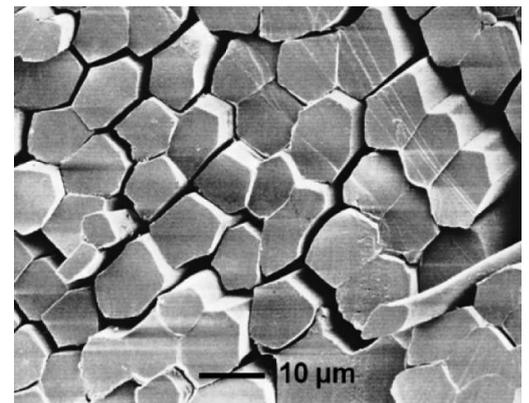


図9. 糸の弦の断面写真

もしこの糸束を構成する1本1本の糸が円柱型の場合、従来では糸相互は線接触に過ぎなかったが、図10のような多角形の場合は面接触になり、糸と糸の間の面摩擦が大きくなり、弦として切れにくくなるのである。これが高強度で深い音色を醸し出す糸束の秘密であると考察する。

20世紀後半には、本研究を含む研究からクモの糸が持つユニークな構造、機能が明らかになってきた。しかし、クモの腹から直接取り出すことによる糸の量産化は難しい。そこで、

遺伝子工学でミミック版のクモの糸を合成し、それを量産化できるか検証した。Lazaris, A (2002) [※]哺乳動物への遺伝子組み換えをすることによってヤギのミルクからクモの糸を紡糸するという研究成果を発表し、2007年には信州大学で蚕の遺伝子組み換えによってクモの糸が10%含まれる絹糸を作った。しかし、この絹糸はクモの糸に見られるような特徴が発現していない。

現在人工的に作られているクモの糸と称するものは、アミノ酸の繰り返し単位の一部のみを重ねる合成法を試みられているに過ぎず、10倍も大きい分子量を持つ天然のタンパク質に近づくには程遠い。

著者は40年近くクモの糸の研究をしているが、その過程で、クモから多くのことを学んだ。著者にとってクモは絶えず新鮮な刺激を与えてくれる良き師であるのかもしれない。

やはり、ユニークな特性を持つクモの糸は『夢の繊維』であることに間違いはない。

今後の課題は、クモの糸をまとめた糸束において、少しでも間隙をなくし、強度を、細い糸を束ねた本数から計算される理論値に近づけることである。また、クモの糸のアミノ酸配列の全貌を明らかにし、そのアミノ酸配列を完璧に合成できるのか、クモの糸の特徴を持った物質を作ることが出来るのか検証することは有意義である。

私は以上をふまえて、クモの糸のアミノ酸配列の解明をする上でPCR法を用いる。しかし、指定したの範囲のアミノ酸配列を特定するPCR法では、その作業がヒトゲノムを解明するよりも大変大きい作業になる。よって、地道に読み取り、ミスなどが完全に無くクモの糸のアミノ酸配列を読み取るのは困難であると考ええる。しかし、PCR法以上に最適な検出方法もないと考えられる。そこで私はクモの糸のアミノ酸配列を解明、完全に複製できるよう、PCR法について学んでいく。

また、クモの糸の産業化については今後さらに期待が集まると推測され、未来の繊維として役立つことの出来るよう、アミノ酸配列を解明した上で、質と量を安定して複製することが可能になるよう、今後自身でも研究に着手していきたい。

さらに、大崎の研究により明らかになったユニークなクモの糸の性質を利用した弦楽器や、クモの糸の強度を活用したブランコ等の作成が実現した。これは日常と自然科学の融和というテーマへと繋がる研究になりうると私は考える。

注釈

- ※1…タンパク質の立体構造を形成する一般的なモチーフのひとつで、共通骨格構造がラセンを描いて形成されたりボン状構造である。
- ※2…タンパク質の立体構造を形成する一般的なモチーフのひとつで、二個の β -シートが折れ曲がってつながっているもの。
- ※3…タンパク質の立体構造を形成する一般的なモチーフのひとつで、少なくとも2~3本の骨格水素結合によって横方向に結合して構成されたもの。
- ※4…線状の高分子中の原子同士が直接あるいは他の原子を介して共有結合すること。

文献

- ※a…Peakall, D. B. Conservation of web proteins in the spider, *Araneus diadematus*. *J. Exp. Zool.* 1971, 176, 257-264.
- ※b…Jenkins, J. E.; Creager, M. S.; Lewis, R. V.; Holland, G. P.; Yarger, J. L. Quantitative correlation between the protein primary sequences and secondary structures in spider dragline silks. *Biomacromol.* 2010, 11, 192-200.
- ※c…Osaki, S. Thermal properties of spider's thread. *Acta Arachnol.* 1989, 37, 69-75.
- ※d…Osaki, S.; Ishikawa, R. Determination of elastic modulus of spider's silks. *Polym. J.* 2002, 34, 25-29.
- ※e…Osaki, S. Effects of ultraviolet rays and temperature on spider silks. *Acta Arachnol.* 1997, 46, 1-4.
- ※f…Osaki, S.; Yamamoto, K.; Kajiwara, A.; Murata, M. Evaluation of the resistance of spider silk to ultraviolet irradiation. *Polym. J.* 2004, 36, 623-627.
- ※g…Osaki, S. Ultraviolet rays mechanically strengthen spider's silks. *Polym. J.* 2004, 36, 657-660.
- ※h…Matsuhira, T.; Yamamoto, K.; Osaki, S. Effects of UV irradiation on the molecular weight of spider silk. *Polym. J.* 2013, 45, 1167-1169.
- ※i…Osaki, S. Can a man hang from spider silks? *Polym. Prepts. Jpn.* 2006, 55, 1844.
- ※j…Osaki, S. Spider silk violin strings with a unique packing structure generate a soft and profound timbre. *Phys. Rev. Lett.* 2012, 108, 154301-1 - 154301-5.
- ※k…Lazaris, A.; Arcidiacono, S.; Huang, Y.; Zhou, J-F.; Duguay, F.; Chretien, N.; Welsh, E. A.; Soares, J. W.; Karatzas, C. Spider silk fibers spun from soluble recombinant silk produced in mammalian cells. *Science.* 2002, 295, 472-476.