

# クモの糸でヴァイオリンは弾ける？

奈良県立医科大学名誉教授 大崎茂芳

## なぜクモの糸なのか

最近では、クモと言えば、映画の『スパイダーマン』を思い浮かべる人も多く、「クモ」に対する抵抗感が少なくなってきたように思われる。ところが、これはどうも私の思い過ごしのようなものである。今でもグロテスクな姿や、毒グモを連想する人が多いことから、クモはやはり嫌われている代表的な動物の一つである。私は嫌われもののクモとつき合って35年以上になる。つき合い始めた頃は、近所の子供の間で、「クモを扱う変なおじさんに近づかないように！」との噂が流れた。

今から20数年前のこと、ある新聞社の記者から「クモのことについて書いてくれませんか？」との依頼があり、原稿を書き始めたところ、「クモが汚い廃屋に巣を張るイメージにしてくれませんか？」との話があった。クモは汚いというよりは小奇麗にする習性がある。さらに、廃屋というよりは人間の生活の匂いのする場所に多く生息していることから、私はその執筆を取り止めた。長年にわたってクモと付き合ってきたことから、その頃には、クモは私にとって掛替えのない良きパートナーになっており、多くの人の持つイメージとは異なっていたのである。

私がクモと付き合うきっかけは、生き物を対象として、自宅でもできる趣味の研究課題を探していたことに始まる。大学院博士課程ではプラスチックや繊維などに使われる高分子物質の特性を調べる誘電的研究をしていたが、その後、企業で粘着紙の研究をした。粘着では、接着とは違って、くっつくプロセスとともに剥がれるプロセスも大事である。この研究で剥離のメカニズムを明らかにして、それに基づいた実用化研究に成功した頃に、大阪大学の上山憲一先生から粘着に関する総説原稿を依頼された。粘着は接着と異なって当時の新しいトレンドであった。そこで、世界の潮流をまとめ始めた。ところが、粘着剤の化学的な構造や微細な構造はほとんど分かっていなかった。私としては、自分の研究だけでは少し範囲が狭すぎるし、粘着の研究分野全体にわたって書くと深みに欠ける内容になってしまうと判断して、粘着の総説を書くのを諦めた。ところが、粘着の潮流をまとめている際に、粘着の視点からクモの巣も調べていたところ、クモの糸の物質としての研究は世界的にほとんど行われていないことに気が付いた。

当時の「クモ学」は分類学が主流で、関係者のほとんどはマニアであり、クモを専門とする研究者は極めて少ない状況であった。また、世界的に化学工業が幅を利かし、合成繊維が花盛りの時代で、「研究は試薬や器具を使って実験室でするものだ」と認識している人が多かった。今でもその傾向は衰えていない。そのためか、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が不可欠なクモの糸の研究に興味を持つ人がほとんどいなかったのも当然なことであった。生き物相手なので論文が出にくい領域でもあったし、いま振り返ってみれば、クモは共食いの習性があるためクモの糸を繊維として産業化するのは無理なことだから、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、私は依頼されたテーマを粘着からクモの糸に変えて総説を書いてみようと思いついた。もちろん、クモについては素人であった当時の私にとっては粘着よりも厳しい選択であった。総説など素人が書くものではないと思っていたからである。

とにかく、私は、フィールドワークを通じてクモの生態を理解しつつ、自らの糸の実験を組み入れながら足掛け3年かかって総説を書き終えた。幸いなことに、これを契機に、クモ学の世界の動向が

およそ把握できたことから、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ていた<sup>1,2</sup>。その後からフィルムの配向性の研究に始まり、今に至っては人間の皮膚、血管、骨、肺などの生体組織におけるコラーゲン線維の配向性の研究<sup>3-5</sup>に携わっている。

クモの糸に焦点を当ててから、私は家族で日本各地にクモ探しに出かけることが楽しみになり、現地の文化に触れることにも魅力を感じていた。最初の頃は、糸集めの難しさを全く理解していなかったので、「糸をたくさん集めてネクタイでも作ってみたい」と、今考えても気の遠くなるような話がすぐにでも実現できると錯覚していた。クモのことを知らないゆえの強みであった。ところが、クモと付き合い始めてみると採集などのフィールドワークのつらさに加えて、そう簡単にクモから糸を取り出せないことがわかってきた。それでも、長年かけてクモとのコミュニケーション術を探りながら、神秘的で厚いベールに覆われているクモの糸の秘密を解き明かす努力を重ねてきた。

ここでは、解き明かしたクモの糸の秘密の一端を紹介したい。

## 生き物相手の苦勞

クモを趣味としてからは、休日になると宝塚の近郊にクモ採集や糸取りに出かけた。夏休みになると家族を連れての高知、鹿児島や沖縄などの南国へ出かけるようになった。夏休みの家族旅行といっても、あくまでも私の趣味に家族を付き合わせているのが現実であった。私がゆっくり車を運転し、助手席の妻が窓の外に目を向けて道端の木々に張っているクモの巣を見つけるという作業分担も行った。

クモの生態を理解することや、クモから糸を取り出す苦勞は並大抵のものではない<sup>6</sup>。しかし、趣味としての研究ゆえにすぐに成果を求められることもない。そのため、多くの困難が次々と降りかかってくるにも拘らず、クモの行動や糸の不思議さなどが私にとってはトキメキともなり、深みにはまってしまった。

深みにはまる過程で数々のトラブルにも見舞われた。家の近くで面白いクモを見つけた時のことであった。自転車を止めて離れた直後に自転車が倒れ、後部のチャイルドシートに乗せていた子供がコンクリートのコーナーに強打した。すぐに病院に担ぎ込んだものの、一生涯子供に負い目を作ってしまったと嘆いたものである。南国の灼熱の中で自動車から降りてクモ採りに熱中していたとき、自動車の中の子供が熱中症になったこともある。また、クモ採りのとき体温の高い子供だけが蚊に刺されたりした。さらに、私が高いところの巣の中にいるクモを捕ろうとしたときに、岩から滑り落ちて新調したばかりのズボンに穴を開けたり、危険なハブに遭遇したり悪夢の思い出は多い。

研究者に好まれる研究環境は、クモの糸サンプルが容易に入手でき、研究室内でいろいろな測定ができることである。ところが、クモを扱っていると測定に適したクモの糸のサンプルを調製するのは容易でないことが分かってくる。7種類もの糸を分泌するクモの腹から「目的の糸だけをどのようにして取り出すのか？」に頭を悩ませた。測定用サンプルとしては、ヒステリシス（履歴現象）のない細い糸、すなわち、あらかじめ強い力で引っ張られたという履歴を持たないクモの糸が必要である。そこで、クモの糸は細いためわずかの力で伸びきってしまうので、「クモの腹からどのようにしてヒステリシスのない糸を取り出すのか？」も結構難しい問題であった。さらに、「成長時期による糸の太さの違いをどう処理するのか？」などを含めて、厳しい問題に直面することが多かった。そして、長年の経験の積み重ねを通して、目的に適した糸を取り出すには、クモとのコミュニケーションがキーポイントであることが分かってきた。このようなことが少しずつ分かってくると、過去に報告されてい

るいくつかのクモの糸のデータの真偽が読めるようになってきて、趣味の研究といえども、いい加減なデータを出すわけにはいかないと思うようになった。

最近、それぞれの研究者が得意とする測定法でクモの糸の性質を調べた例がいくつか報告されているが、これらの殆どは、サンプリング法の問題点を度外視しているように見受けられる。

私は7種類のクモの糸の中で、クモの命綱とも言える牽引糸に焦点を当て、その物理化学的研究を行い、クモの糸が250℃までも耐えうる耐熱性繊維であることを明らかにするとともに<sup>6</sup>、クモの糸から危機管理の原点である“2”の安全則<sup>6,7</sup>、ならびに信頼性の原点<sup>8,9</sup>を学び取ることができた。これらの成果は、趣味とは言いながら、学術雑誌に論文として公表している。

### クモの糸は紫外線に強い！

クモが屋外に巣を張っているところをよく見かけるが、「クモの糸は太陽からの紫外線を浴びて劣化して、獲物が捕れなくなるのではないか？」という疑問が湧いてくる。蚕の絹糸は紫外線に弱いことはよく知られていて、「夏には和服で表を歩かないように」と言われるほどである。これに対して、昼行性のクモの糸は紫外線で力学的な強度が強化されることが分かってきた<sup>10</sup>。すなわち、昼行性のクモの糸は時間とともに力学的に強化された後、長い時間がたつと強度が低下したのである。もとの強度まで低下したころには、クモは巣を張り替えていることも分かってきた。一方、夜行性のクモの糸は紫外線で強度低下が起こるのみであった。夜行性のクモはそもそも紫外線を浴びないので、糸が紫外線によって強化される必要はないのである。これらの結果は、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<sup>11</sup>。



図1 ジョロウグモの牽引糸（命綱）

### “2”の安全則の発見

長年にわたって糸取りをしていて、クモの糸は細いのになぜ切れないのか不思議に思っていた（図1）。ある時、重さの異なるクモから取り出した牽引糸の弾性限界強度（糸に錘をぶら下げた時に糸が伸びきってしまわないで、バネのように伸び縮みできる性質（弾性）を残しているギリギリの強度のこと）を測定した。すると、弾性限界強度はクモの体重が異なっても、いつも体重の2倍に相当することが分かった。また、目では1本に見える牽引糸も電子顕微鏡で観察すると、図2に示したように、実際は円柱状の細い2本のフィラメントから成っていることも明らかになった。これが、危機管理の原点ともなる『“2”の安全則』の確立に繋がったわけである。この安全則の根本理念は、クモの糸の場合、2本のフィラメントからなる牽引糸（命綱）は、その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からなるものである。余分と思われるもう1本のフィラメントが危機時に役に立つのである。『“2”の安全則』の論文は、1996年のNature誌に掲載された<sup>7</sup>。

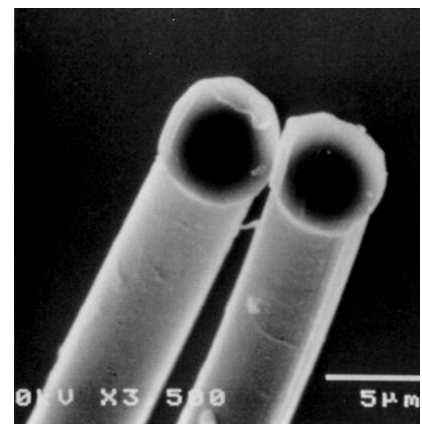


図2 牽引糸の電子顕微鏡写真（フィラメントは中空ではなく円柱状である）

この自然界での経験則のような形で得られた安全則の概念は、橋、エレベーター、トンネルなどの素材や構造材の選択のみならず、記念写真の撮影、企業の最高幹部の飛行機での出張、玄関の鍵の付け方、医療事故の防止などの社会的現象にも幅広く適用される。簡単な例でいえば、玄関には2種類の鍵を付ける、記念写真は必ず2枚とる、非常口は2か所に作るなどの類である。「2に限定しなくても、3でも良いだろう、その方がもっと安全だ」というような意見もあろう。確かに、2よりも3の方が安全率は高くなる。しかし、同時に無駄に消費されるエネルギー・費用が増大する。必要・最小限の安全性を効率よく達成できるのが「2」の良いところである。

クモの糸も太ければ太いほど安全性は向上するが、タンパク質とそれが生み出すエネルギーが必要になり、その上、クモの体重が増えて空中での動きが鈍くなる。もちろん、糸が細すぎるとエネルギー的には効率的であるがすぐに糸が切れてしまう危険性がある。長い進化の歴史の中で、クモの俊敏な活動性と安全性を保障する現在の牽引糸が作り上げられたのであろう。

なお、牽引糸の破断強度、すなわち糸に錘をぶら下げた時に糸が切れる錘の目方は、クモの体重に拘わらず、そのおよそ6倍であることも明らかになった。この結果は、クモはその自重程度の目方の獲物であれば、捕獲して牽引糸で容易に吊り上げられることを示している。

## クモの糸の実用的強度

### ヒトはクモの糸にぶら下がるのか？

2002年にカナダのベンチャー企業ネクシアと米国の陸軍が共同で、ヤギのミルクからクモの糸を作り出したというサイエンス誌の報告が世界中を駆け巡った<sup>12</sup>。2003年にモントリオールのネクシアの研究所を訪れたときには、糸の試供品がもうすぐ世に出回るという話を聞いて、間もなく糸が入手できるとばかり思い込んでいた。ただ、その手ざわりや強度などはどのようなものかを知るすべはなかった。

私は、長年の経験から、クモに嫌がられずに多量のクモの糸を集めるというノウハウを持っていた。2004年になって、そろそろクモの糸の実用的価値を調べる時期に来ている、と感じるようになった。ちょうどその年のことである。日本テレビ制作の所ジョージの番組『目がテン』の誘いを受けて、芥川龍之介の小説『蜘蛛の糸』のシーンにある「ヒトはクモの糸にぶら下がるか？」の課題にスタジオで挑戦することにした。しかし、スイカ玉を合計22キログラム程度乗せたところで糸は切れてしまい、再挑戦も含めて2回とも失敗という無残な結果に終わった。

今度は、クモの採集から多量の糸集めにいたる一連の工程を自ら準備してリベンジする機を狙っていた。周到な用意をして、「ヒトはクモの糸にぶら下がるか？」の課題に再度挑戦することにした。ヒトがぶら下がるには、かなり多くの本数の糸集めが必要である。本数の多さを考えただけでも嫌になるくらいで、これをクモに嫌がら



図3 クモの糸束にぶら下がる著者  
クモの糸は矢印の細い部分で、木に結んだ綿ロープとハンモックの間に直列に繋がれている。

れずに行うのはかなりの難事業であった。やっと集めた糸束にぶら下がってみても、あっという間に切れてしまうという失敗の連続であった。一度切れた糸束は再度使用することはできないので、失敗の後には、クモから再度糸集めという根気のいる作業の繰り返しである。一回の採取では 13 cm 程度の長さの糸しか得られないので、捩じることや結び目をつくる作業の難さも並大抵ではなかった。2006 年になって、19 万本のクモの糸を集めることにより、我が家のウッドデッキで体重 65kg の私がクモの糸にぶら下がることに成功した (図 3)<sup>13,14</sup>。

芥川龍之介の『蜘蛛の糸』の世界を実現し、クモの糸は強いという実感を多くの人々に与えたことは確かである。ただ、成功したとはいっても、使用したクモの糸の集合体は糸と糸との間の隙間が多く、一時的にぶらさがれたとしても、時間とともに細い糸が少しずつ切れるので、とても丈夫な紐とはいええないものであった。つまり、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くらい低かった。「これを何とかしなければ」という思いが、頭の片隅に残っていた。

### クモの糸でヴァイオリンは可能か？

2009 年の春のこと、新型インフルエンザが流行し始め、予定されていた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。その頃、やっと休日らしい休日が取れたときに、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ことから、「ぶら下がる紐作りに用意していた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。一度やってみたら面白いかもしれないと思いつつも、どのような音になるのかもまったく想像すらできず、しばらくはアイデアを温めていた。もちろん、そのとき手元にあったクモの糸束は長さが 13 cm しかないので、弦にするには何本か短い糸を結びつけなければならず、たとえ結びつけたとしても、当然、弦に使えるようなものにはならなかった。

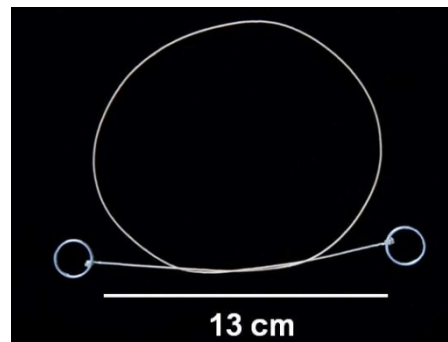


図 4 クモの糸で作った  
ヴァイオリンの弦

このようなことがあって、その年の夏から、クモから長い糸を集めることに焦点を当てて研究を進めることになった。ここでは、長年培ったクモとのコミュニケーション力がものをいうことになった。とはいえ、苦勞して弦を作ったものの、すぐに切れるなど期待とは裏腹に、しばらくは失意のどん底を味わうことになった。

そのうちに、やっとヴァイオリンの弦らしいものができるようにはなったが、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ダメの烙印を押されることは分かっていた。そこで、私自身がヴァイオリン教室のレッスンに通うことにした。そして、弦の張り方、チューニングの方法、弦の手入れの仕方、弾きやすさ、切れやすさなどを私が勉強し調べて、どのようにしたら切れ難い弦が作れるのかを休日の自宅の研究したのである。

2009 年 9 月になって、やっと切れにくい弦が出来上がった (図 4)。もちろん、クモの糸の弦といっても、音色に特徴がなければまったく意味がない。そこで、力学特性や周波数分析などについて従来の弦との比較実験を行った。その結果、クモの糸の弦では倍音が非常に多く、従来の弦と比べて音色に大幅な差異のあることを確かめた (図 5)<sup>15</sup>。いくら周波数分析を用いた科学的裏付けがあるとしても、このレベルでは科学者の自己満足に終わるかもしれない。そこで、自分の講演会の最後でヴァイオリンを弾くことにしてみた (図 6)。音楽通の聴衆からしばしば「柔らかくて、深みがありますね」

と言われる。この言葉を、クモの糸から作ったヴァイオリンの弦の、柔らかくて深みのある音色に対する賛辞と素直に受け取るべきか、それとも、レッスンに通っているレベルの研究者で演奏者の個人に対する単なるお世辞と捉えた方がよいのかを、私は判断し兼ねた。

ヴァイオリン演奏の心地よさは人間の感覚が判断するものである。そこで、科学者と弦の製作者の自己満足に終わるという過ちを犯さないために、プロのヴァイオリニストに頼んで評価してもらうことにした。その時、プロは弾きながら「耳で多くの倍音の存在を認識できますよ」と言われ、私の実験結果を裏付けることが出来たのである。科学的評価と芸術的評価が重なったともいえよう。

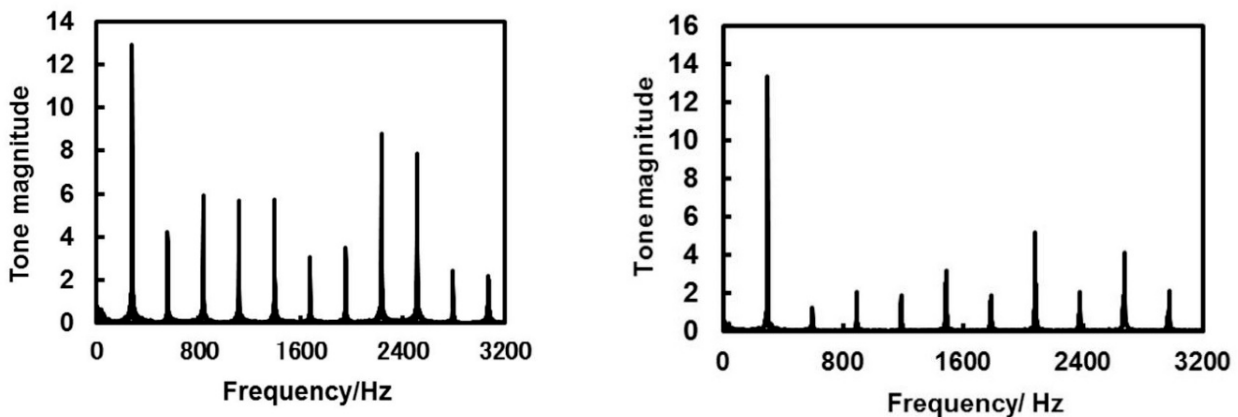


図5 音声信号のフーリエ解析で得られた音の周波数分布を表すパワースペクトル  
左：クモの糸の弦、右：スチール弦

クモの糸の弦では柔らかく深みのある音色が得られ、この弦をセットすると通常のヴァイオリンでも、名器ストラディヴァリウスの音色と比較して遜色ない音色を醸し出すことが分かった。私の演奏に対する多くの人からの「柔らかく深みのある音色ですね」という言葉は必ずしもお世辞ではなかったのである。さらに、従来の弦とクモの糸の弦をそれぞれストラディヴァリウスにセットして比較したところ、クモの糸の弦の方がストラディヴァリウスにより適していることも確かめられた。これらの結果を含めて、音楽の専門家からは、「クモの糸の弦を用いれば音楽が変わる！」とまでの評価を頂戴している。

クモの糸の弦の高強度化とその弦をセットしたヴァイオリンの深い音色は、糸の束を少し振りながら加圧することで実現したものである。糸束の断面の写真（図7）を見ると、繊維間に殆ど隙間のないユニークな最密充填構造になっていた。1本1本の糸は4～7角形になっている。これが、高強度で深い音色を醸し出す糸束の秘密と思われるのである。この構造の糸束はこれまで世界のどこでも作られていなかったものである。糸束を構成する1本1本の糸が円柱型の場合、隣どうしの糸と糸は線接触であるが、図7のような多角形の場合は面接触になるので、糸と糸との相互作用が強くなり、糸束としての強度が強くなるのである。



図6 講演会の終りにヴァイオリンを弾く著者

このような構造の弦は、当然、糸と糸の間に殆ど隙間がないので、弦の密度が大きくなり、それがヴァイオリンの音量や音色に関係するものと考えられる。細い糸束の弦では演奏中に弦が弓でこすられて外側の糸が切れてもそれが内部の糸に伝搬するようなことはない。これは円柱状の糸束からなる弦と違って、多角形の断面からなる最密充填の場合は、外側の一部の糸が切れたとしても他の糸同士はかなり強い相互作用を持っているので、弦全体に及ぼす影響が少ないと考えられる。ところが、一本の太い均質な弦であればどこかに亀裂が入ると全体がすぐに切れてしまうことになる。このようなところが、クモの糸で出来た弦の良いところなのである。この最密充填構造を持つ繊維束は、クモの糸に限らず、ナイロンなどでも作れることが分かり工業化を目論んでいる。

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私の論文が、2012年4月に米国の物理学会誌 *Physical Review Letters* に掲載された<sup>15</sup>。その1カ月前から英国のBBCや米国の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、それらの報道を通してクモの糸のヴァイオリンの音色が流され、世界の多くの視聴者から”Cool”という評価をいただいた。また、ブラジル、ロシア、ドイツなどの遠い国の放送局の人たちも収録のために来日された。

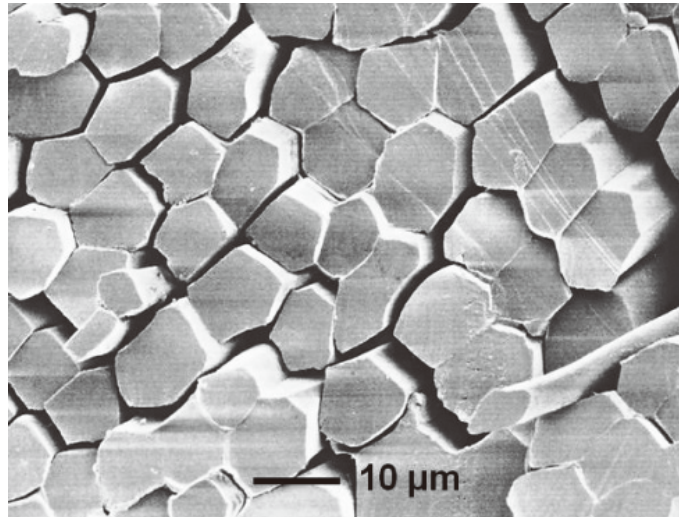


図7 クモの糸で作ったヴァイオリンの弦の断面写真  
繊維間に見られる隙間は、切断時にできたものである。

なお、BBC News <http://www.bbc.co.uk/news/science-environment-17232058> や NewScientist <http://www.newscientist.com/article/dn21540-spider-silk-spun-into-violin-strings.html#.Us-GqL6Cg6Y> では論文に添付された「クモの糸の弦を使ったヴァイオリンの音色」を聴くことができる。演奏はヴァイオリニスト松田淳一先生、曲目はチャイコフスキーのヴァイオリン協奏曲 二長調の第2楽章の一部である。

## おわりに

趣味からスタートして35年以上続けているクモの糸の研究ではあるが、その過程でクモから多くのことを学ばせてもらった。特に、ベールに覆われているクモの秘密を少しでも理解できたときには、恋人に出会うがごとく感動を味わった。私にとっては、やはりクモは新鮮な刺激を与えてくれる良きパートナーであるのかもしれない。今後もクモとのコミュニケーションを通じて、クモの糸の秘密にもっと深く迫っていきたいと考えている。

## 謝辞

私の「クモの糸を弦にしたい」という製作意欲を後押しするきっかけの一つとなったのは、大阪音楽大学のヴァイオリニスト松田淳一先生の「弦の素材を反映しやすいのはヴァイオリンですよ」とのお言葉であった。それに加えて、電子版の論文に添付したヴァイオリンの演奏曲において、松田先生には多大なるお世話になったことに感謝したい。同じ頃、奈良県立医科大学の上野聡教授からの「音楽の世界では、やはりヴァイオリンですよ」というお言葉がさらなる後押しになったことに感謝したい。

また、本文の編集でいろいろとご支援・ご協力をいただいた畑田家住宅活用保存会事務局長畑田耕一氏ならびに同運営委員北山辰樹氏、渋谷亘氏に心より厚く御礼申し上げる。

## 参考文献

1. S. Osaki, *Polym. J.*, **19**, 821 (1987).
2. S. Osaki, *J. Appl. Phys.*, **67**, 6513 (1990).
3. S. Osaki, *Nature*, **347**, 132 (1990).
4. S. Osaki, *Anat. Rec.*, **254**, 147 (1999).
5. 大崎茂芳, 「コラーゲンの話」(中央公論新社) 2007 年.
6. 大崎茂芳, 「クモの糸のミステリー」(中央公論新社) 2000 年.
7. S. Osaki, *Nature*, **384**, 419 (1996).
8. 大崎茂芳, 「クモはなぜ糸から落ちないのか」(PHP 研究所) 2004 年.
9. S. Osaki, *Polym. J.*, **43**, 194 (2011).
10. S. Osaki, *Polym. J.*, **36**, 657 (2004).
11. S. Osaki & M. Osaki, *Polym. J.*, **43**, 200 (2011).
12. A. Lazaris et. al., *Science*, **295**, 472 (2002).
13. S. Osaki, *Polym. Prepts. Jpn.*, **55**, 1844 (2006).
14. 大崎茂芳, 「クモの糸の秘密」(岩波書店) 2008 年.
15. S. Osaki, *Phys. Rev. Lett.*, **108**, 154301 (2012).

## 追記

畑田耕一先生(大阪大学名誉教授)から、「クモの糸でヴァイオリン」について書いてほしいという話を頂いたのはもう2年ぐらい前だと思う。その時は快く引き受けた。しかし、後になって、いろいろな分野に興味を持ち好奇心旺盛な畑田先生のことであるからと、かなり躊躇して今となってしまった。私は2010年からヴァイオリンのレッスンを始めて、クモの糸の音楽を聴いてもらうときは、何とか「自分で弾いた音色を」と思っている。ドイツ、ロシア、ブラジルなどのテレビ局から取材に来たときも私が弾いた。それでも、上記の *Physical Review Letters* の論文の電子版用に添付する演奏では、選曲、演奏技術には自信が持てなくて、ヴァイオリニスト松田淳一先生に弾いて頂いた。最近、クモの糸の弦の改良も一段と進んでおり、私のヴァイオリン演奏の腕も徐々に上がってきている。肩を張らずに私が弾いた音色を聴いて頂ける日も近いと思う。ご期待いただきたい。