

招待講演

2D07

新たなシルク産業の創出に向けて～ミノムシシルクの可能性～

(興和株式会社 興和先端科学研究所 ○浅沼 章宗)

はじめに

2015年、国連にて17項目の持続可能な開発目標 (Sustainable Development Goals : SDGs) が採択された。この目標達成のためには、政府・各省のみならず民間セクターでの取り組みが不可欠であると同時に、人類が自然と向き合い、経済、社会を発展させ、生活を豊かにする努力の中で大きな役割を果たしてきた「科学技術イノベーション」こそが、必要不可欠な鍵と考えられている¹⁾。弊社でも、人々が健康を楽しんで暮らしていくことをテーマにした商品開発や地球環境にやさしい持続可能な製品作りを推進し、環境問題への取り組みをビジネスの中で実践している。シルクは、環境にやさしい天然素材であり、繊維製品のみならず医薬品、医療機器、化粧品原料などとしても有効な素材になる可能性がある。我々は、特に機能性を有するシルクに着目し、シルク研究に関して世界最先端の科学技術イノベーション力を持つ農研機構と連携し、いくつかの共同研究を進めてきた。その過程で、次世代新規素材として新産業を創出するほど魅力的なミノムシのシルクを見出したので報告する。

1. 夢の繊維

炭素繊維のように「強い」が「もろい」もの、あるいはゴムのように「伸びる」が「弱い」ものは存在しているが、「強く伸びる」という物性を示すことで高いタフネス (破断までに要するエネルギー量) を有する繊維素材はほとんどなかった。一方で、石油に依存しない繊維で環境問題に対応しようという流れがあり、この両者を兼ね備えた繊維こそ「夢の繊維」と言われている。自然界で最も強い繊維とされるクモのシルクは、炭素繊維に比べて破断強度は劣るものの、高いタフネスを示すことから、革新的バイオ素材かつ脱石油社会に貢献する持続可能な夢の繊維として、世界中で研究されている。ただし、クモは、網状の巣に絡まった昆虫を食べる肉食であり、人工飼育する場合には生餌を供給しなければならないという高いハードルがある。さらに、クモには共喰いをする習性があるため、カイコのように高密度で大量飼育することはできない。このような状況から、クモそのもののシルクを大量に採取することは困難な状況にある。そこで、遺伝子工学を用いて、クモのシルクを人工的に作り出す研究が展開されている²⁾。具体的には、クモのシルクフィブロインの遺伝子の一部を大腸菌などに導入し、そこで産生されたタンパク質を精製後、タフで強い糸に成形するという方法や、当該遺伝子をカイコの遺伝子に組み入れ、カイコにクモ糸成分を含んだシルクを吐かせる方法が進められている。しかしながら現在までのところ、天然のクモ糸と同程度の強度・タフネスを示す糸が製造されたという報告は見当たらない。

Towards the Creation of Cutting-edge Silk Industry - Potential of Bagworm Silks -,

Akimune ASANUMA: Kowa Company. Ltd., 1-25-5, Kannondai, Tsukuba-city, Ibaraki 305-0856, JAPAN,

Tel: 029-836-2255, Fax: 029-836-4800, E-mail: aasanuma@kowa.co.jp

2. ミノムシシルクの特徴

ミノムシは鱗翅目に属する蛾:ミノガの幼虫である。世界に 1300 種以上、日本国内でも約 50 種類ミノムシが確認されている³⁾。ミノムシは枝や葉で作った蓑で身を包み、これを移動可能な隠れ家として利用している。ちなみに、雄は羽化するまで蓑から出ることはない。さらに、雌は羽化後も蓑から出ることなく一生蓑の中で暮らす。蓑には上部に頭を出す開口部と、下部に糞を出す開口部があり、筒状の形状になっている。そしてその内部は、極めてソフトな糸で満たされている。生まれてすぐのミノムシは、1 mmにも満たない蓑を作り、その後は自身の成長に合わせて徐々に蓑を継ぎ足していくため、蓑内部の糸は連続した糸とはなっていない。一方、ミノムシは、移動する際に、必ずジグザグ状に糸を連続して吐くことがわかってきた。この糸に脚をひっかけ、はしごのように足場として利用し垂直方向にも移動していた。この糸を特殊な技術を用いて連続した1本の長繊維として採糸する基本技術を開発した。その方法で採取したミノムシのシルクは、極めて細く、風合いがあるだけでなく、弾性率、破断強度、およびタフネスの全てにおいて、自然界で最強と言われるクモのシルクを凌駕していることを見出した。表1に示すように、ミノムシの足場糸は、オニグモの糸よりも、弾性率は 2.8 倍、破断強度は 1.8 倍、タフネスは 2.3 倍、それぞれ高値であった。

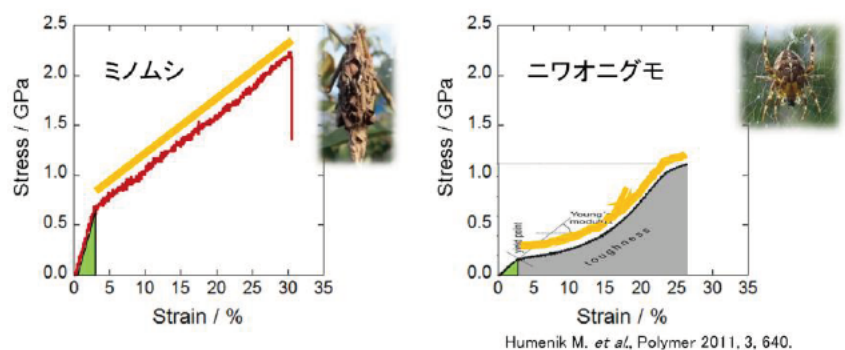


表1 様々なシルクの1本糸の物性比較

	弾性率 / GPa	破断強度 / GPa	破断伸び / %	タフネス / MJ/m ³
ミノムシの糸 (オオミノガ幼虫)	28 (± 2.1)	2.0 (± 0.2)	32 (± 3)	364 (± 44)
クモの糸* (オニグモ)	10	1.1	27	160
カイコの絹糸*	7	0.6	18	70

* (物性値は Gosline J. M. et al. J Exp. Biol. 202, 3295 (1999) より引用)

さらに、ミノムシシルクの引張試験時の応力ひずみ曲線を見てみると、驚くべきことに、タフネスが高いことに加え、荷重を除くと元の状態に戻る弾性領域が広いという特徴、および弾性変性後は破断まで一定の塑性変形を示すという特徴を持つことがわかった(図1)。これらの外力への応答性は、構造材料として極めて理想的な特性と考えられた。また、DSCによる最大分解温度は 340℃であり耐熱性があることも明らかとなった。



広い弾性領域(荷重を除くと元の状態に戻る)

弾性変形後は破断まで一定の塑性変形を示す

図1 ミノムシシルクとクモ牽引糸の応力ひずみ曲線の比較

3. ミノムシシルクの強さの理由

ミノムシのシルクは、なぜ強いのか？この理由を明らかにするための研究が行われた。すなわち、シルクの構造と力学特性との因果関係を明らかにするため、農研機構にて、世界有数の放射光施設 SPring-8 を用いた X 線解析、ならびにフィブロインの遺伝子解析が行われた。その結果、ミノムシシルクは、特異的配列の繰り返して規定されるベータシート結晶領域と非晶領域が長さ方向に極めて高い秩序性をもって、交互に並んだ周期性階層構造を形成していることが明らかになった(図2)。

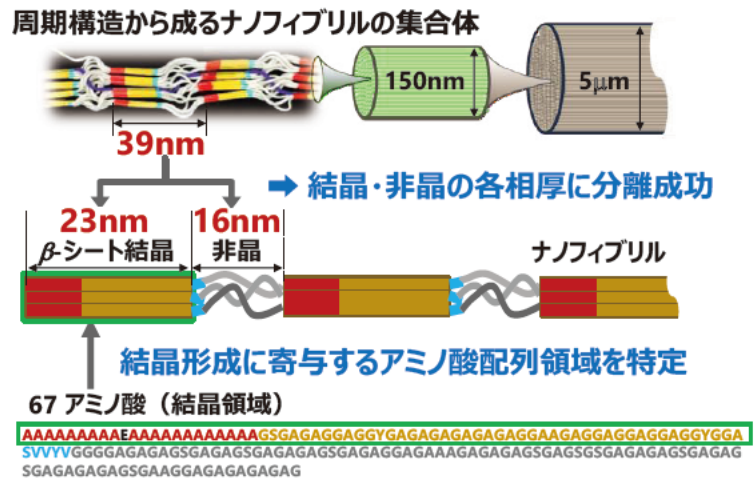


図2 ミノムシシルクの階層構造モデル

実際に、引張試験の過程で生じる構造変化を高輝度 X 線で解析したところ、糸が引っ張られる過程で、高い秩序性階層構造は壊れず、糸が切れるまで、応力が結晶と非晶に均一に伝搬することで、それぞれの役割が最大限に引き出されていることが明らかにされた⁴⁾。

4. ミノムシシルクの利用

ミノムシシルクは、自動車、防弾服、飛行機、電子機器、タイヤ、スポーツ用品のみならず、空飛ぶ自動車や宇宙エレベータなど夢の構造材料にも使える可能性がある(図3)。さらに、ミノムシシルクは、ミノガの幼虫であるミノ「虫」によって製造されたタンパク質であることから生分解性であり、カイコシルクのように、再生医療や化粧品用のバイオマテリアルとして使える可能性もある。特に、構造材料として極めて理想的な外力への応答性を示すだけでなく、耐熱性も有している



いろいろな可能性を持った素材

図3 将来ミノムシシルクの利用が期待される材料分野

ことから、ミノムシシルクはFRP用の強化繊維として極めて理想的なものと考えられる。炭素繊維の強度特徴は、極めて強く硬いということであり、熱にも安定であることから、形状安定性が求められる部位の強化繊維として広く使われている。ミノムシシルクの強度特徴は、強く伸びるということであり、両者の強度特徴が全く違うため、ミノムシシルクがそのまま炭素繊維の置き換えになるとは考えられない。ただし、ミノムシシルクは炭素繊維より壊れにくく、軽いという点から、炭素繊維が今まで利用できなかった領域の素材として使える可能性が考えられる。このように、ミノムシシルクは、今までにない繊維であることから、新たなフィールドの商品となり、必然的に新しい産業が立ち上がることが期待される。

5. 産業化に必要な条件

たとえミノムシシルクが素晴らしい性質を持っていても、長い糸の形にできず、ミノムシの飼育方法や繁殖方法が確立されないと産業応用は困難である。そこで、我々は、これらの技術開発に取り組み、成功した。ミノムシシルクの長い糸を採取するのに必要な基本的テクノロジーを見出したのである（図4）。すなわち、足場となる糸を長い繊維のまま連続的に吐くミノムシの特性を利用することで、ミノムシを殺さずに複数回の採糸が可能で、その後もミノムシは生存し子孫を残すことも可能となる方法である。昆虫自身が生産するため、製造プロセスで環境負荷を起こさないことも特徴と言える。さらに、ミノムシの繁殖と飼育の方法も確立した。ミノムシは、広食性の草食昆虫であり、共喰いをしないことから、クモよりも大量飼育に適している。野外のミノムシは、夏から秋に成長し、その後越冬を経て、春に成虫となり、初夏に産卵という年1回のサイクルで活動するが、ある条件の人工環境内で年間を通じた飼育に成功した。また、繁殖法についても確立した。ミノムシの雌は数千個の卵を産むが、産卵から孵化、その後の成長に至るまで継代飼育にも成功した。



図4 ミノムシシルク

6. 今後の展望

数千年の歴史があるカイコシルクと比べると、ミノムシシルクは、まだスタート地点に立ったところである。ミノムシのシルクは、地球環境に優しい次世代素材として、また、新しい機能性素材として、その潜在的な可能性は計り知れないものがある。我々は、ミノムシのシルクが夢の繊維として、新産業を創出するに値すると捉えており、今後、産業化に向けた取り組みを推進していく予定である。そのためには、量産化に向けた技術連携や様々な商品化に向けての幅広い連携についても模索していく必要があるが、何よりも、科学技術を土台としたイノベーションを起こし続けることが重要と考えている。近代日本を興してきたシルクを含む繊維産業が、科学技術イノベーションを最大限活用しながら、課題を解決してきたように。

7. 引用文献

- 1) 平成30年度版科学技術白書 文部科学省, pp1-9.
- 2) Bourzac, K. (2015) Nature, 519: s4-s6.
- 3) 三枝豊平 他 (2013) 日本産蛾類標準図鑑Ⅲ ミノガ科, pp136-155.
- 4) Yoshioka, T. *et al.* (2019) Nat. Commun., in press.