

クモ糸を紡ぐカイコの実用品種化に成功 ー大量生産への道を拓くー

ポイント

- ・強くて切れにくいクモ糸の性質と、シルクの性質を合わせもつ新しいシルク（クモ糸シルク）を生産するカイコの作出に成功しました。
- ・クモ糸シルクは通常のシルクの1.5倍の切れにくさを持ち、クモの縦糸に匹敵するほどでした。
- ・クモ糸シルクを用いて、通常のシルクと同様の工程で織物に加工することに成功しました。
- ・今後は、さらに強度や機能性を高めたクモ糸シルクを開発することにより、手術用縫合糸などの医療素材や防災ロープ、防護服などの特殊素材への応用が期待されます。

概要

1. クモの糸は「強く」て「伸びる」性質を併せ持つ繊維として古くから知られていますが、クモは肉食で共食いをしてしまい、大量飼育によって糸をつくることができないため、人工的に生産しようとする試みが世界中で行われています。

2. これまで微生物でクモ糸タンパク質を大量に作らせることに成功していますが、産生されたものは繊維化されず、さらに繊維化させる操作が必要でした。また天然のクモ糸タンパク質と同等なものを作らせることが難しいため、天然のクモ糸タンパク質の特性を再現させることは困難でした。一方、クモ糸タンパク質はカイコのシルクと構造がよく似ているため、カイコに作らせることができれば糸を吐くときにそのまま繊維化できることから、カイコでクモ糸タンパク質を作らせる試みもなされています。しかしながらこれまでに得られた繊維は非常に弱く、紡績機などで機械加工を行うことは困難でした。

3. そこで独立行政法人農業生物資源研究所は、機械加工にも耐えられる実用的なクモ糸タンパク質をカイコに作らせて利用することを目的として、実際のシルク生産に用いられるカイコ品種にクモの縦糸遺伝子を導入し、強くて切れにくいクモ糸の性質と、カイコ本来の光沢や柔らかさを合わせもつ新しいシルク（クモ糸シルク）を生産することに成功しました。

4. 細くても強く切れにくいクモの縦糸を含んだクモ糸シルクは、通常のカイコのシルクの1.5倍の切れにくさ¹⁾を持っており、鋼鉄の約20倍の切れにくさを持つといわれるアメリカジョロウグモの縦糸に匹敵するほどでした。

5. クモ糸シルクは、操糸²⁾から紡織までの全ての工程において従来のシルクと同様の機械を用いて加工することができるため、クモ糸シルク100%のベストやスカーフを制作することに成功しました。

6. 今後、さらに強度や機能性を高めたクモ糸シルクを開発することにより、手術用縫合糸などの医療素材や防災ロープ・防護服などの特殊素材の開発が期待されます。また、クモ糸シルク自体の利用だけでなく、蛍光シルクなどの特色あるシルクを産生するカイコ品種と掛け合わせて「切れにくさ」という特性を付与することも可能になることから、より高付加価値を持つシルクの開発が期待されます。

7. この成果は、8月27日に米国科学雑誌 PLoS One に発表される予定です。

予算：農林水産省「新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業」（22年度から24年度）、運営費交付金

問い合わせ先

研究代表者： (独)農業生物資源研究所 理事長 廣近 洋彦
研究推進責任者：(独)農業生物資源研究所 遺伝子組換え研究センター長 高野 誠
：(独)農業生物資源研究所 遺伝子組換え研究センター
新機能素材研究開発ユニット長 亀田 恒徳
研究担当者： (独)農業生物資源研究所 遺伝子組換え研究センター
新機能素材研究開発ユニット 主任研究員 桑名 芳彦
電話：029-838-6164 E-mail：kuwana@affrc.go.jp
新機能素材研究開発ユニット 主任研究員 小島 桂
広報担当者： (独)農業生物資源研究所 広報室長 谷合 幹代子
電話：029-838-8469

本資料は筑波研究学園都市記者会、文部科学省記者会、科学記者会、厚生労働記者会、厚生日比谷クラブ、農政クラブ、農林記者会、農業技術クラブに配付しています。

開発の社会的背景

クモの糸は、鋼鉄の繊維と表される「強度」と「伸びる」性質を合わせ持つ、切れにくい繊維として、人工的に生産する試みが世界中で行われてきました。1990年代にアメリカジョロウグモやニワオニグモのクモの巣の縦糸をつくるタンパク質遺伝子の一部が解読され始め、その遺伝子を利用して大腸菌や酵母菌、タバコなどの植物や培養細胞等でクモ糸のタンパク質を生産する研究が盛んに行われてきました。しかし、産生される液状タンパク質から長くて強い繊維に加工するには特殊な技術を開発する必要があります。

研究の経緯

カイコにクモ糸を吐かせるためには、クモ糸の遺伝子をカイコに導入する必要があります。様々なクモの遺伝子を検討した結果、生物研が解析したオニグモの遺伝子データが最長かつ最良であったため、オニグモの縦糸遺伝子を導入したカイコの作出に着手しました。まず2007年に、オニグモの縦糸をつくる遺伝子の一部を明らかにし、遺伝子組換え技術を用いて実験用のカイコ品種（実験品種）に導入することに成功しました。しかし生産される糸は少量で、また操糸などの機械工程に耐えられず実用化レベルに至りませんでした。

実用化レベルに至らなかった原因は、実験品種がつくるシルクが元々少量で弱い（＝切れやすい）こと、クモ糸タンパク質の発現量が少なかったことが原因と考えられました。そこで、遺伝子導入技術を改良し、通常のシルク生産に用いられるカイコ品種（実用品種）にオニグモの縦糸遺伝子を導入することを試みました。（図1に実験品種の繭と実用品種の繭の比較写真を掲載。）

研究の内容・意義

1. カイコの卵に遺伝子を注入するには、細胞が分裂し始める時期に行う必要がありますが、実用品種カイコの卵は卵休眠するため、人工的に休眠を打破する必要があります。私たちのグループは、休眠を打破するための**浸酸**³⁾後に遺伝子注入をする技術の改良を重ね、実用品種を用いて、オニグモの縦糸タンパク質遺伝子の一部とカイコのシルクタンパク質であるフィブロイン遺伝子を融合した遺伝子をもつカイコの作出に成功しました。
2. 作出したカイコが作った繭から操糸した糸は、通常のカイコの糸に使用する機械での加工に耐える強度をもっており、機械加工により**生糸**⁴⁾を作ることができました（図2）。この生糸はオニグモの縦糸タンパク質を約1%（重量比）含んでいました。この生糸の強度と伸びを調べたところ、切れにくさを示す数値が、天然の生糸より1.5倍以上に上がっており、アメリカジョロウグモの縦糸に匹敵するほどになっていました（図3及び4）。
3. この生糸を**精練**⁵⁾したところ、光沢や柔らかい風合いはシルクと同様で、紡織機械にかけて織物にすることもできました（図5）。これにより、クモ糸のような強く切れにくい性質をもつ新たなシルク（クモ糸シルク）の生産と製品化が可能になりました。

今後の予定・期待

服飾分野では、これまでのシルクに比べ摩擦に強い新しいシルク、「クモ糸シルク」の製品開発が期待できます。また、極細シルクを生産する実用カイコ品種や蛍光シル

クを生産する実用品種との掛け合わせにより、強く細いシルクや強く光るシルクを生産し、薄く強い織物や光る織物の開発など、これまでなかった新たな繊維素材としての利用が期待できます。今回私たちが生産した「クモ糸シルク」が含むクモ糸タンパク質は1%程度にもかかわらず、アメリカジョロウグモの縦糸に匹敵するほどのタフネスを持っていました。今後は、クモの縦糸タンパク質の量を増やすことで、さらに強い「クモ糸シルク」の開発も期待できます。

また、今年から遺伝子組換えカイコの一種使用（屋外での飼育）の実験が始まります。今後一般の養蚕農家での遺伝子組換えカイコ飼育が可能になれば、高い付加価値をもつ「クモ糸シルク」の生産を通して養蚕業やそれに関連する地域産業を盛んにすることが期待されます。

発表論文

Yoshihiko Kuwana, Hideki Sezutsu, Ken-ichi Nakajima, Yasushi Tamada and Katsura Kojima.
High-toughness silk produced by a transgenic silkworm expressing spider (*Araneus ventricosus*) dragline silk protein. PLoS One 2014

用語の解説

1) 切れにくさ

「タフネス」とも言い、糸が伸びて切れるまでに加えられたエネルギーのこと。

2) 操糸

熱湯で煮た繭から繭糸を引き出し、それを数本まとめて1本の糸にすること。

3) 浸酸

塩酸水溶液に卵を浸して人工的に休眠を打破する方法。

4) 生糸

上記のように、繭を煮て得られた糸。撚糸や精練をしていないもの。

5) 精練

弱アルカリ性溶液や酵素溶液などで生糸を煮て、生糸に付着している「セリシン」タンパク質を取り除くこと。



図 1. 繭の比較 (左：実験品種、右：実用品種 (クモ糸シルク系統)、各 20 個ずつ)



図 2. クモ糸タンパク質を含むシルクで初めて作られた生糸 (比較のため、天然シルクの生糸も載せています。)

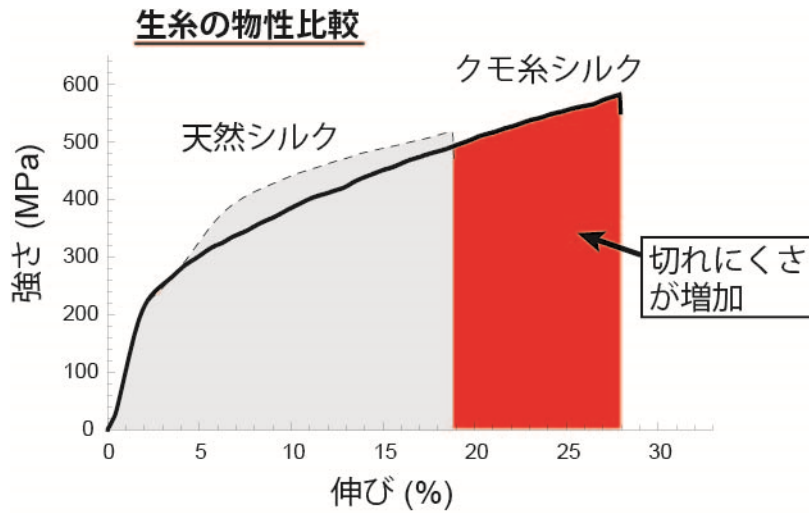


図 3. 生糸の物性比較

(縦軸が強さ、横軸が伸びを示します。グラフと横軸に囲まれた面積 (色付の部分) が切れにくさ (タフネス) になります。クモ糸シルクは、天然シルクより、良く伸び、強いので、色付き部分の面積が大きくなります。赤色部分が天然シルクに比べて増加した分になります。)

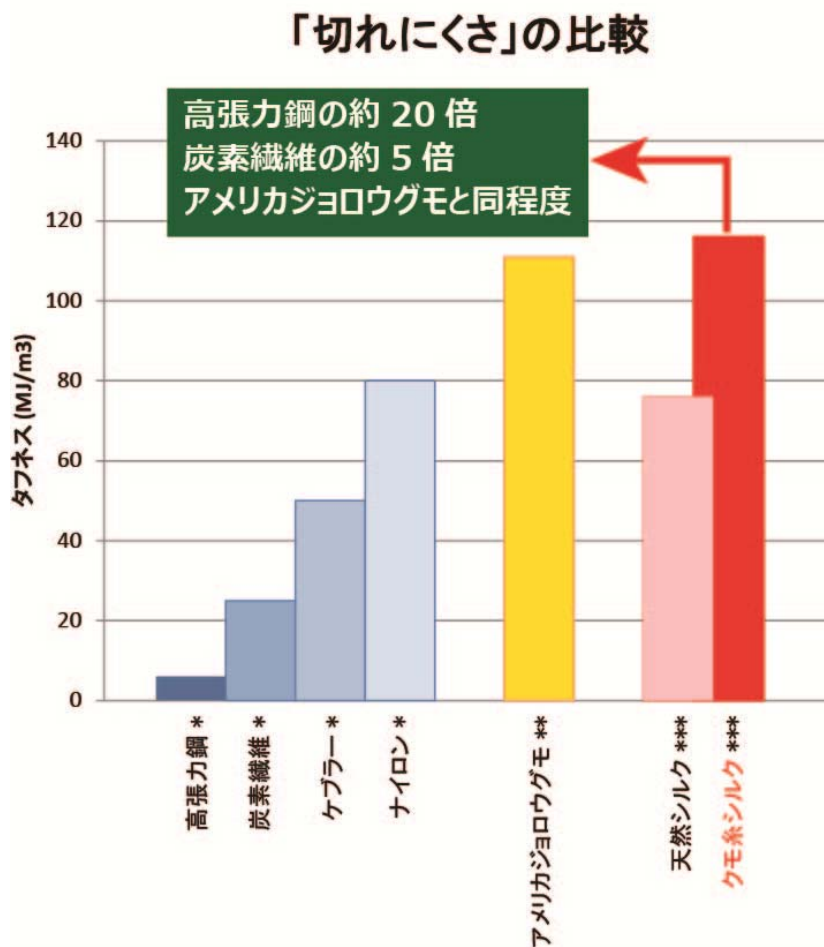


図 4. 切れにくさ (タフネス) の比較

(* Gosline (1999)、** Swanson (2006)、*** 本論文)



図 5. クモ糸シルクで作ったベストとスカーフ（ブルーの染料で染色したもの）