2D10

ミノムシの糸の強さの解明

（農研機構）○吉岡太陽、亀田恒徳、坪田拓也、上樂明也（豊田工大）田代孝二

1．背景

カイコ絹糸やクモ牽引糸に代表される「シルク」は、強度と伸度のバランス、すなわち高タフネス性に優れることから、再生可能な次世代の構造材料候補として近年大きく注目されている。我々は、日本最大のミノガであるオオミノガの幼虫（以後、ミノムシと呼ぶ）がつくり出す糸が、カイコ絹糸やクモ牽引糸よりも強くタフであることを見出し（Table 1）[1]、その産業利用の実現に取り組んできた。その第一歩として、長い一本の糸を採集する技術を確立し、世界で初めて、ミノムシの糸の撚糸に成功した[2]。大崎は、チャミノガの幼虫がつくる糸がクモ牽引糸を上回る弾性率を示すことを報告しており[3]、我々もこれを確認した。さらに我々は、ニトベやシバミノガの幼虫といった比較的大型のミノムシについて、強くタフな性質が共通的に認められることを確認した。では、なぜミノムシの糸が他のシルクに比べ顕著に強くタフな性質を示すのか？本研究では、アミノ酸配列の解析から、結晶構造、さらには結晶と非晶から成る階層構造の解析までを包括的に進めることで、ミノムシの糸の構造的特徴を明らかにし、さらに、構造と力学特性との因果関係を調べることで、その強さの秘密の解明を試みた。

Table 1 Tensile properties of various silks [1].

	Modulus / GPa	Strength / GPa	Elongation / %	Toughness / MJ m^{-3}
Bagworm silk (*E. Variegata*)	28 1 (± 2 1)	2 0 (± 0 2)	32 (± 3 0)	364 0 (± 44 1)
Spider dragline* (*A. diadematus*)	10	1 1	27	160
B. mori silk*	7	0 6	18	70

*[4] Values in parentheses are ± standard error of the mean (n=19)

2．実験

ミノムシ終齢幼虫の後部絹糸腺より抽出した糸遺伝子の塩基配列の解析により、糸タンパク質のアミノ酸特徴配列 を決定した。また、終齢幼虫が吐糸した糸の階層構造を、広角 X 線回折（WAXD）および小角 X 線散乱（SAXS）測定により調べた（NANOPIX, Rigaku Co.）。糸を引っ張った際の構造変化を、放射光施設 SPring-8 (Bl40B2：謝辞 太田昇 博士) の高輝度 X 線を利用した時分割 WAXD・SAXS 同時測定により追跡し、構造と力学特性との因果関係を調べた。

3．結果・考察

SAXS 解析より、ミノムシの糸は高度な周期性階層構造を有するナノフィブリル集合体であることが分かった（Fig.1）。子午線方向の周期構造を示す散乱が少なくとも５次まで観測され、その周期（長周期）は 39nm であった（結晶相 23nm ＋ 非晶相 16nm）。クモ牽引糸や野蚕糸の多くは、同じく子午線方向に約 8nm の周期を有することが知られているが、ミノムシの糸の秩序性はそれらに比べ圧倒的に高く、長周期も約５倍長いことが分かった。糸を引っ張った際の構造変化を解析した結果、ミノムシの糸の優れた力学特性の発現は、この高い秩序性階層構造故に、糸を引っ張った際に応力が結晶部と非晶部に対し、(他のシルクに比べ) より均一に伝搬・分布し、また、その秩序構造が破断まで崩れることなく維持されるためであることが分かった[1]。

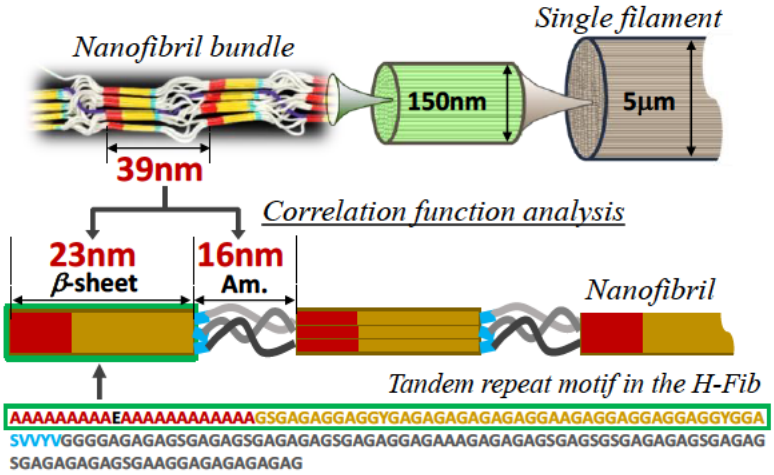

Fig. 1 Hierarchical structure model of bagworm silks [1].

[1] Yoshioka T. *et al.*, Nat. Commun. 2019, doi: 10.1038/s41467-019-09350-3. [2] 吉岡太陽 他, JATAFF ジャーナル 2019, 7(5) (in press). [3] 大崎茂芳, 繊維学会誌 2002, 58(3), p74-78. [4] Gosline J. M. *et al.*, J. Exp. Biol. 1999, 202, 3295-3303.

Study on relationship between hierarchical structure and mechanical property of bagworm silks, Taiyo YOSHIOKA, Tsunenori KAMEDA, Takuya TSUBOTA, Akiya JOURAKU, Kohji TASHIRO: National Agriculture and Food Research Organization (NARO), Tsukuba, Ibaraki 305-8634, Japan, Tel: 029-838-6213, E-mail: yoshiokat@affrc.go.jp