

チュウガタシロカネグモ (*Leucauge blanda*) は 発する糸を変えて機能的な巣を形成する

兵庫県立姫路東高等学校 科学部

赤瀬彩香 池田伊織 清川貴文 久本直毅 平田涼 本間涼華 榎本貫太 山口光輝 大隅皓平
高瀬健斗 中崎恭佑 岩本滯治 奥見啓史 安原倭

要 旨

クモの糸を光学顕微鏡レベルで観察して糸の構造を明らかにする基礎的研究は、ほとんどおこなわれていない。筆者らは、チュウガタシロカネグモ 30 個体の発する糸を 3 か月間かけて顕微鏡観察を行った結果、多くの点で先行研究と異なる結果を得た。

チュウガタシロカネグモは最初に枝から枝へと 1 本の繊維からなり粘球を付着させない縦糸を張る。粘球を付着させた糸を発しながらこの縦糸の上を往復して、複数本の糸からなる縦糸を完成させる。次に縦糸が中央で交差する付近から外側に向かって、粘球が付着しない横糸を螺旋状に張っていく。縦糸の途中まで横糸を張ったら、次に縦糸に沿って外側まで移動し、こんどは逆に外側から内側に向かって 1 本の繊維からなり粘球を付着させた横糸を張りながら移動する。すでに中心から外側に向かって張っていた横糸部分にたどりつくとき、この糸を切断しながらさらに中心部へ横糸を張っていく。専門書には縦糸には粘球がないとされているが、これは誤りである。発する糸の繊維は、縦糸は太く横糸は細い。クモは目的に応じて発する糸を変えることで、結果的に機能的な円網を形成する。

キーワード

チュウガタシロカネグモ (*Leucauge blanda*): アシナガグモ科シロカネグモ属のクモで水平円網を張る。

円網: 中央部から放射状に張られた糸に、同心円状に細かく糸が張られた構造をもつクモの巣網

縦糸: 円網の中央部から放射状に張られた糸

横糸: 円網に同心円状に張られた糸

粘球: クモの糸に付着する粘着物質が表面張力によって球状になったもの

1. はじめに～動機と目的

クモの糸に関する先行研究は多くあるが、それらはいずれも糸の微視的レベルで構造に注目した研究で、人間生活を豊かにする目的で活用しようとするものである。たとえば、電子顕微鏡などを用いて糸の分子構造を明らかにしたり (大崎, 1996)、糸のフィブリン分子の高次構造を解明したりする研究 (朝倉・中澤, 2006、朝倉, 2007) がある。また、糸の化学成分が光や水の影響を受けてどのように変化するかを明らかにしたり (北川ほか, 1998)、糸のタンパク質合成機能を活用する研究 (馬越ほか, 1997)、その成果をもとにして、クモの糸のタンパク質アミノ酸配列に類似したポリペプチド鎖を人工合成する研究 (Tsuchiya and Numata, 2017) などもある。これらは、クモの糸が軽量でしなやかな性質を利用して、衣類の繊維や生物包帯、自動車の構造体など、糸の工業的活用につなげようとするものである。

一方で、クモの糸を光学顕微鏡レベルで観察して構造を明らかにしようとした研究はほとんどなく、

筆者らは、兵庫県立西脇高等学校生物部と同様に、昨年度からクモの糸の構造に興味をもち、チュウガタシロカネグモの円網の研究をおこなってきた。特に、完成された巣糸とともに、チュウガタシロカネグモが発した直後の糸にも着目して、観察を繰り返した。その結果は、糸の構造に関しても、粘球の有無に関しても、兵庫県立西脇高等学校生物部の結果とは異なるものであった。クモ類の糸の性質やその多様性に関する基礎研究は、クモ類の生態や進化の研究において注目されている (梶元, 1998)。筆者らの詳細な観察の結果から考察したチュウガタシロカネグモの糸の特徴についてまとめる。

2. 観察方法と結果

2. 観察方法と結果

本校内に生息するクモのほとんどは、チュウガタシロカネグモ (図1) であり、他にはごくわずかにコガネグモがみられるのみである。2019年5月中旬から8月中旬まで3か月間をかけて校内を詳しく調査したが、これ以外のクモを発見することができなかった。さらに、隣接する世界遺産の姫路城公園などにも出かけて行って調査したが、やはり発見することができたのは、チュウガタシロカネグモであった。そこで、チュウガタシロカネグモについて、30個体の巣の縦糸と横糸を採取し、さらにチュウガタシロカネグモ個体も採取した。室内の飼育ケースでチュウガタシロカネグモを飼い、発する糸を採取して光学顕微鏡で観察した。



図1 チュウガタシロカネグモ (左: 背面/右: 腹面)

なお、大崎 (1985) は、季節によって糸の反射色は変化するが、成分や太さは規則的に変化することはないとしている。

(1) チュウガタシロカネグモの糸の構造

チュウガタシロカネグモは多くの場合糸を発しながら歩行しているが、場面によって発する糸の構造が異なっている。枝の上を歩行する際に発する糸は1本の糸で、粘球は付着していない (図2)。また、巣を張る際に、巣の縦糸になる糸も1本の糸からなっており、粘球は付着させていない (図3)。一方、

横系になる糸も 1 本の糸からなっているが、こちらは粘球が一定の間隔で付着している (図 4)。

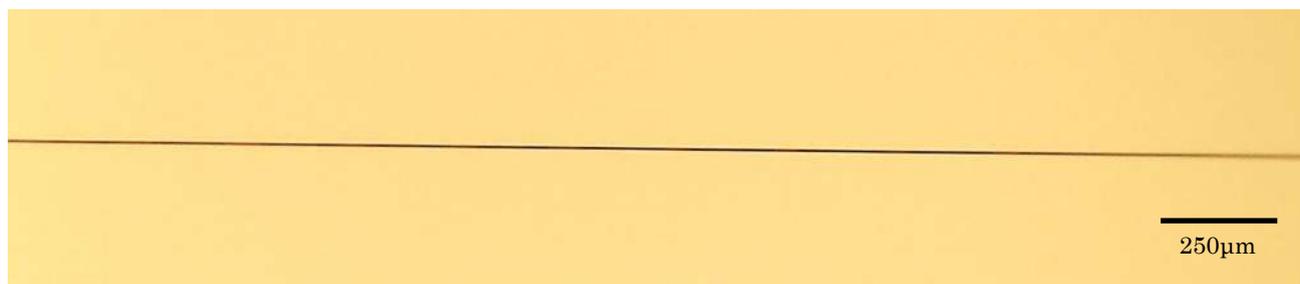


図 2 チュウガタシロカネグモの歩行中に発した直後の糸の顕微鏡写真 (40 倍)

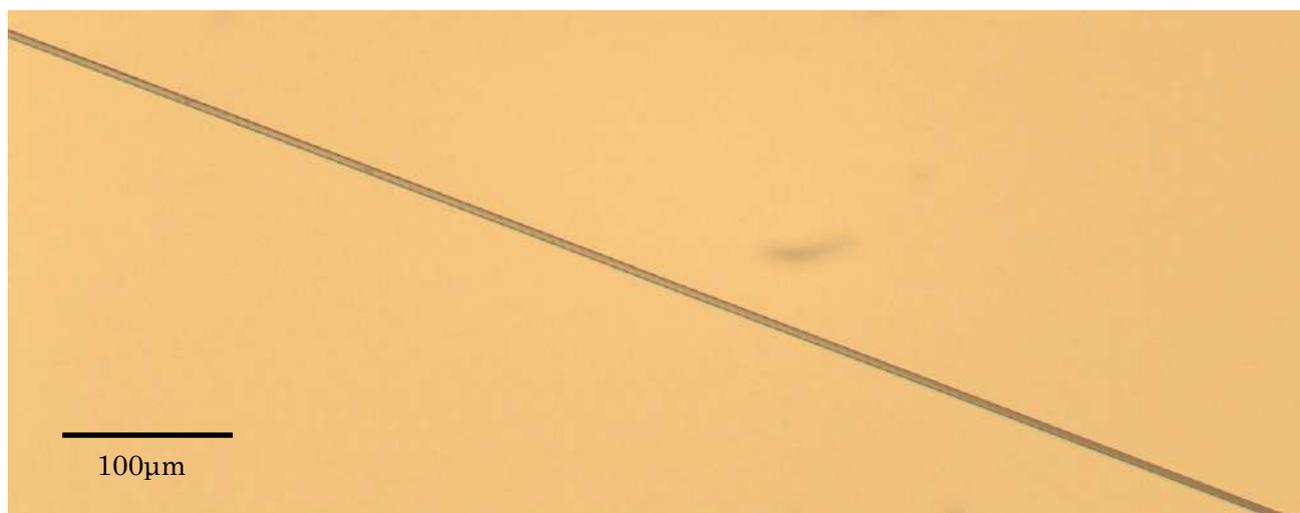


図 3 チュウガタシロカネグモが発した巣の縦系になる糸の顕微鏡写真 (40 倍)

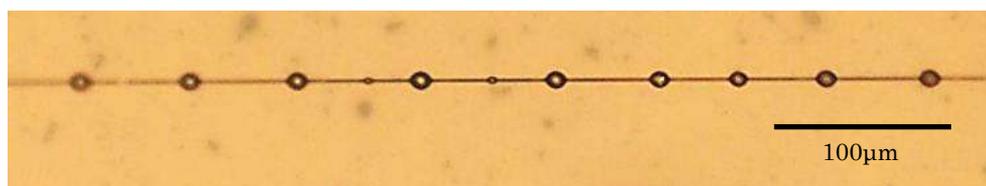


図 4 チュウガタシロカネグモが発した巣の横系になる糸の顕微鏡写真 (40 倍)

チュウガタシロカネグモが発する糸の繊維の太さは、巣の縦系になる糸と巣の横系になる糸では異なっている。観察した 30 個体のクモのうち、22 個体について、縦糸の半径 (μm)、横糸の半径 (μm)、粘球の半径 (μm)、粘球間の距離 (μm)、腹部の長さ (mm)、を測定した結果を表 1 にまとめて示す。同一の個体では、縦糸と横糸の太さは一定であった。また、粘球は部分によって紡錘体のような形状をしているが、ここでは球状のものを 20 個選択して測定して平均をとったものを、その個体の粘球の半径とした。粘球間の距離は、粘球の中心から隣接する粘球の中心までの距離を測定した。腹部の長さは、平常時の腹部の長さを測定した。粘着物質の体積は、横糸 1mm の間に付着している粘球の数と半径、糸の太さから、1mm 間に分泌された粘着物質の体積を求めた (図 5 / μm^3)。

個体	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
縦糸の半径(μm)	0.08	0.13	0.16	0.29	0.13	0.13	0.13	0.13	0.11	0.21	0.16
横糸の半径(μm)	0.11	0.13	0.13	0.11	0.08	0.11	0.12	0.13	0.11	0.11	0.13
粘球の半径(μm)	0.26	0.46	0.66	0.58	0.26	0.58	0.45	0.53	0.26	0.42	0.43
粘球間の距離(μm)	2.63	2.26	5.84	2.79	1.79	4.53	3.79	2.18	1.68	2.35	2.11
粘着物質の体積(μm ³)	2.20	15.86	19.18	27.68	3.69	17.06	8.85	25.33	3.08	12.04	13.76
腹部の長さ(mm)	3.0	5.0	6.0	6.0	3.0	5.0	5.0	5.0	4.0	7.0	5.0

個体	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	平均
縦糸の半径(μm)	0.18	0.16	0.21	0.26	0.24	0.16	0.16	0.13	0.18	0.18	0.18	0.17
横糸の半径(μm)	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.13	0.11	0.13	0.11	0.11	0.11	0.11
粘球の半径(μm)	0.78	0.41	0.65	0.44	0.40	0.41	0.33	0.38	0.24	0.25	0.40	0.44
粘球間の距離(μm)	3.89	1.93	4.95	1.66	2.02	1.74	1.69	1.17	1.66	1.57	4.47	2.67
粘着物質の体積(μm ³)	49.93	13.52	22.61	19.16	11.91	13.81	7.85	16.36	2.46	3.18	5.25	14.31
腹部の長さ(mm)	5.0	5.0	6.0	5.0	5.0	5.0	5.0	4.0	5.0	5.0	5.0	5.0

表1 チュウガタシロカネグモの糸の太さと粘球の大きさ、粘球間の距離と粘着物質の体積

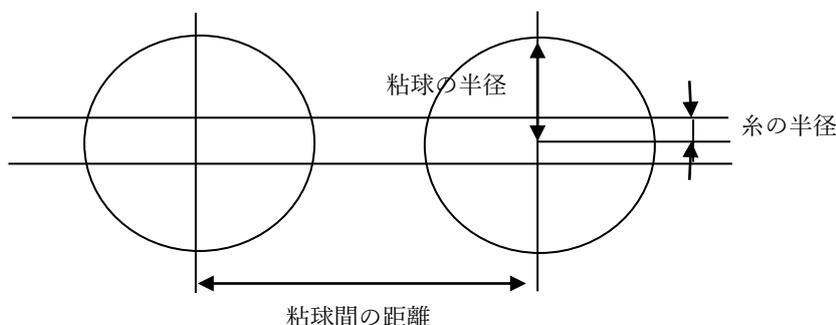
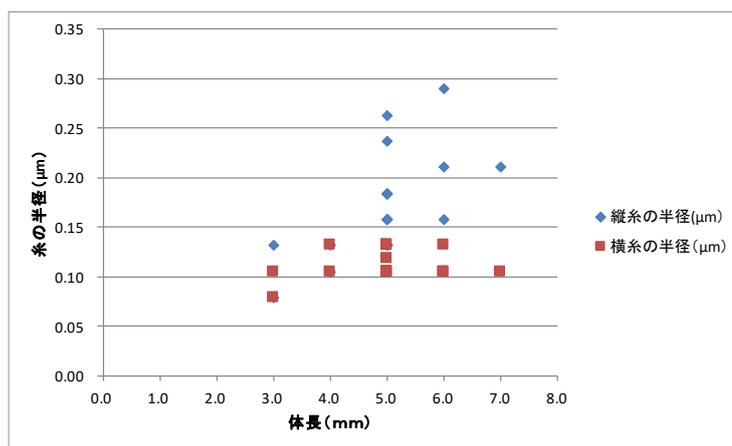


図5 粘着物質の体積の求め方

$$\frac{10^3}{\text{粘球間の距離}} \times (4/3\pi \times \text{粘球の半径}^3 - 2\pi \times \text{粘球の半径} \times \text{糸の半径}^2)$$

発する糸の太さは環境によってさまざまに異なるが、概ね縦糸になる糸は太く（平均半径 0.17μm）、横糸になる糸は細い（平均半径 0.11μm）（図6）。なお、巣糸ではない糸の半径は平均 0.11μm である。縦糸は体長が大きい程太くなる傾向にあるが、横糸は体長に関わらずほぼ一定の太さである。

図6 体長と縦糸と横糸の太さの関係



(2) 縦糸と横糸の張り方

チュウガタシロカネグモの円網の縦糸と横糸で構造が異なる原因を明らかにするために、チュウガタシロカネグモが巣を張るようすを観察した（図7）。チュウガタシロカネグモは、最初に枝から枝へと粘球の付着していない1本の繊維からなる縦糸（図3）を放射状に何本か張る。この縦糸の上を、粘球が

付着している糸を発しながら何度か往復して、複数本数からなり粘球が付着した繊維の束にする（図8・図9）。次に、縦糸が中央で交差する付近から周辺部に向かって螺旋状に横糸を張っていく。この横糸も1本の繊維からできており、粘球はみられない（図10）。このようにして縦糸の途中まで横糸を張ったら、次に縦糸に沿って周辺部まで移動し、こんどは逆に周辺部から内側に向かって横糸を張りながら螺旋状に移動する。横糸は同心円状とされているが、実際には螺旋状に張られている。この横糸も1本の繊維からなるが、糸を発したときから一定間隔で粘球が付着している（図4）。前に張っていた横糸の部分にたどりつくと、顎で横糸を切断して第1脚と第2脚で巻き取り、その断片を塊にして縦糸に付着させながら中央部まで新たに横糸を張っていく。

チュウガタシロカネグモは、縦糸、横糸を問わず自由に歩き回るが、強度に優れた縦糸の上を歩くことが多い。粘球のついた糸の上を歩くと、脚の毛で粘球をからめ取ってしまうことが多い。



図7 チュウガタシロカネグモの円網（体長 10mm）

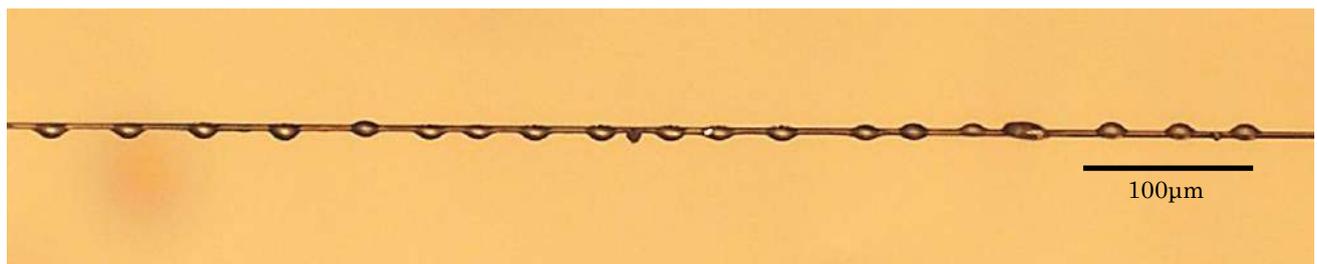


図8 チュウガタシロカネグモの2本の糸からなり粘球が付着した縦糸の顕微鏡写真（100倍）

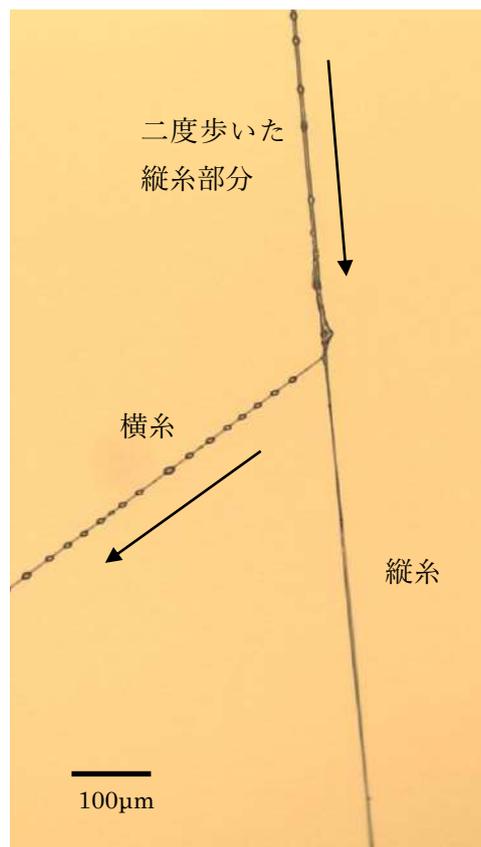
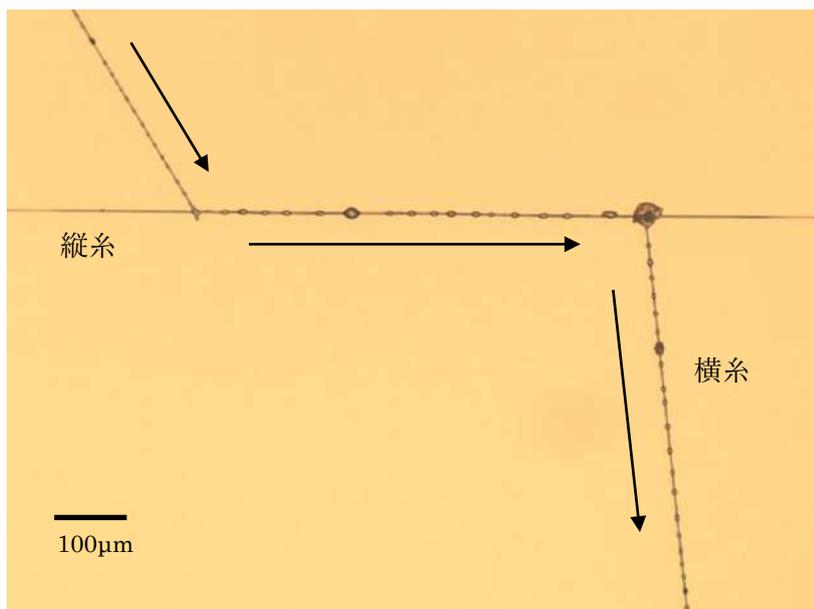


図9 チュウガタシロカネグモが往復した部分のみ、粘球が付着した複数本の糸からなる縦糸になる (クモが歩いた方向を矢印で示した/40倍)

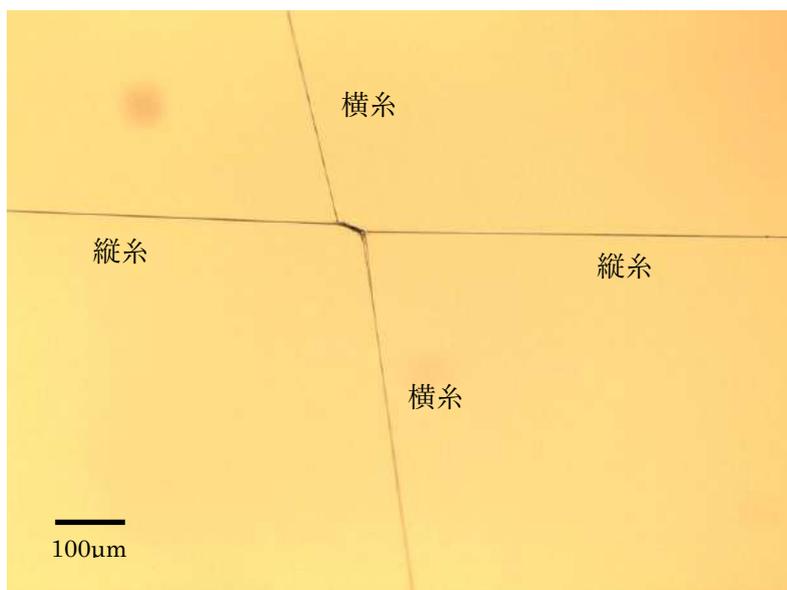
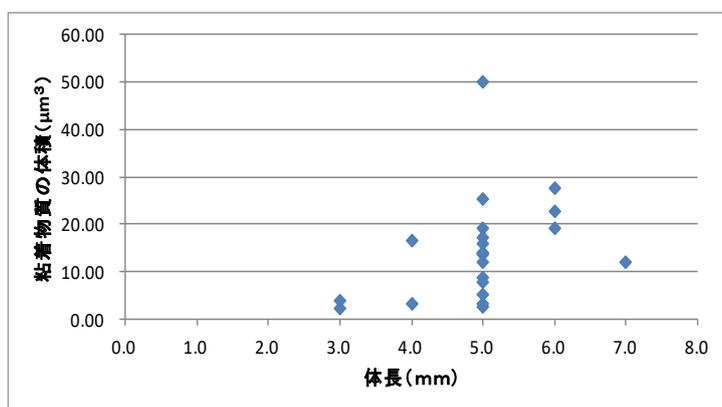


図10 チュウガタシロカネグモの巣の中央部から周辺部に向けて張る横糸の顕微鏡写真 (40倍)

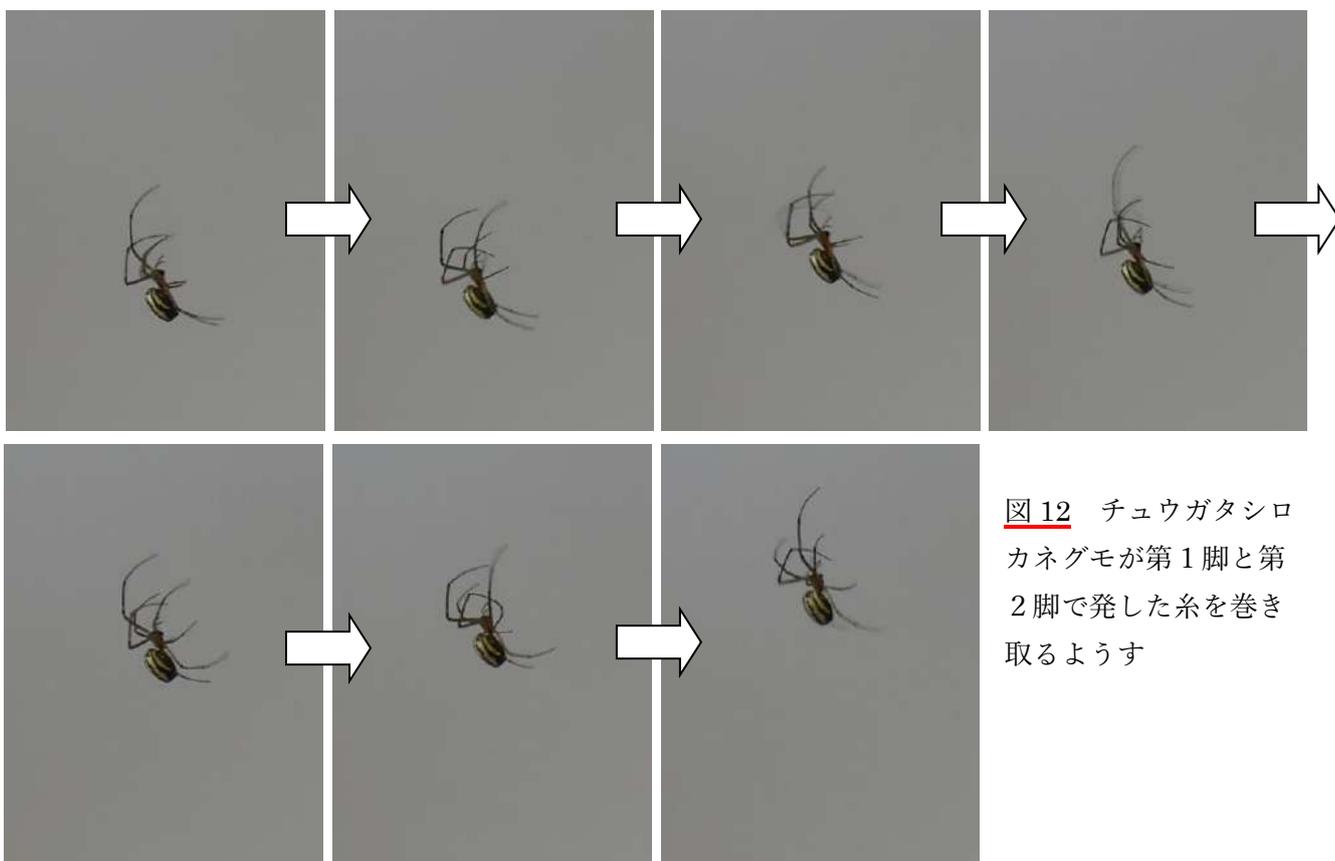
表1をもとにして、粘着物質の分泌量と体長との関係を図11に示した。腹部の長さと粘着物質の体積には、一定の相関関係はみられない。

図11 チュウガタシロカネグモの腹部の大きさと粘着物質の分泌量の関係

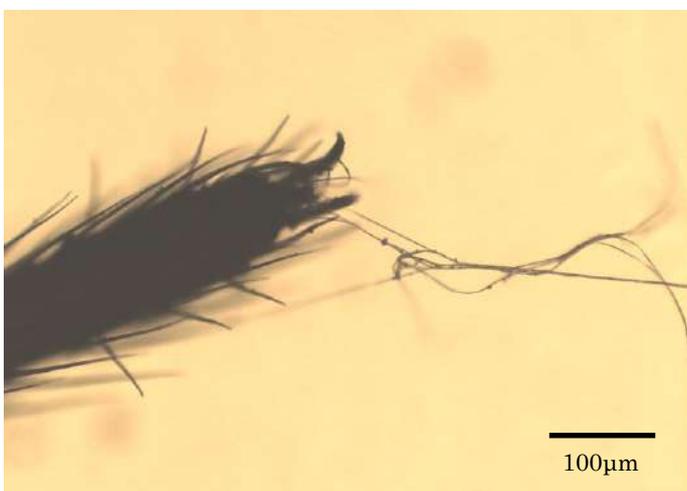


(3) 円網の縦糸に巻きつくらせん状の糸

円網の縦糸のケーブルには、しばしば螺旋状の糸が巻きついている。その理由を明らかにするために、さまざまな環境下で発した糸を観察した。チュウガタシロカネグモは、ヒトなどの外敵から逃れたり、新たな場所に移動したりする際には、枝に糸の端を付着させて枝から垂れ下がり、地上に降りたり枝を伝わったりして移動する。この際に発する糸は、すでに示したように粘球が付着していない1本の糸である。地上に降りる前に、強風などの影響で危険を感じると、発した糸を前の4本の脚（第1脚と第2脚）で巻き取り、再び枝まで上がっていく（[図12](#)・[図13](#)）。この巻き取られた糸を顕微鏡で観察すると、螺旋状になっていることがわかる（[図14](#)）。チュウガタシロカネグモは、巣に獲物がかかったり強風などで巣の補修が必要になったりしたとき、しばしばこの巻き取った糸をそれにあてる。こうして、縦糸のケーブルに螺旋状の糸が巻き付く構造が作られることになる（[図15](#)）。



[図12](#) チュウガタシロカネグモが第1脚と第2脚で発した糸を巻き取るようす



[図13](#) チュウガタシロカネグモの第1脚の先端部が糸を巻き取るようす（100倍）

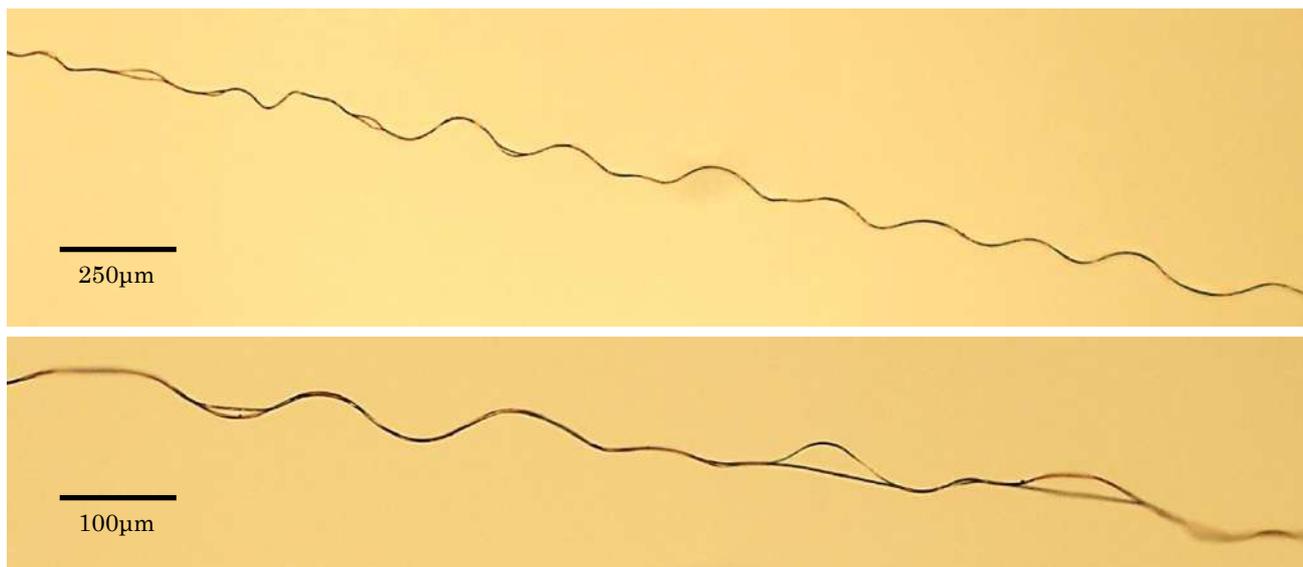


図 14 チュウガタシロカネグモが巻き取った糸の顕微鏡写真
(一部で巻き取った糸がからんで二重になっている／上：40倍／下：100倍)

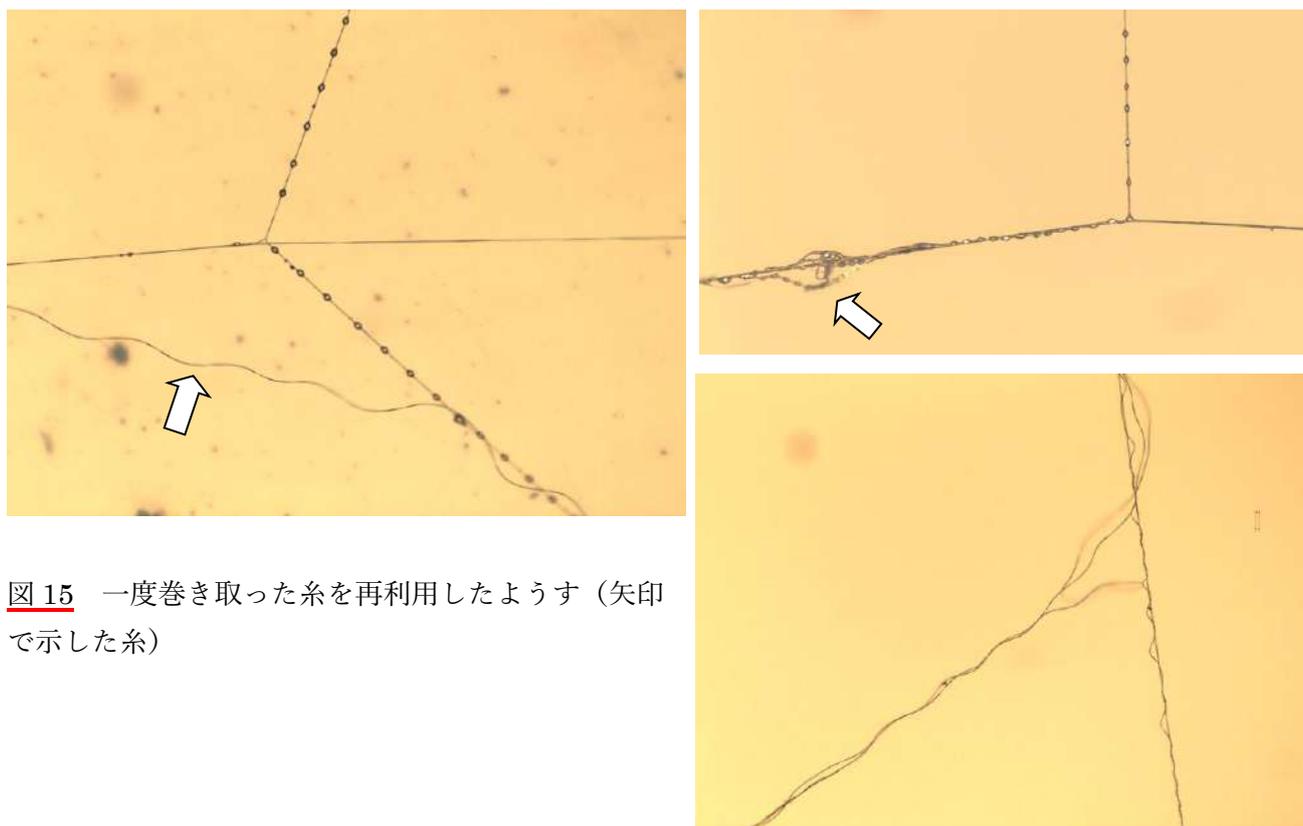


図 15 一度巻き取った糸を再利用したようす (矢印で示した糸)

3. 考察

クモの糸の性質に関する研究は、クモ類の生態や進化の理解のために重要な基礎研究である。本研究では、本校の敷地内に生息するチュウガタシロカネグモを 30 個体採取して観察した。発する糸の太さや粘球の有無などを比較した観察結果は、チュウガタシロカネグモはどのような目的で糸を発しているのかを理解していることを示している。

チュウガタシロカネグモは、粘球を付着させないで1本の糸からなる縦糸を張った後、Uターンして、粘球を付着させた糸を発しながら先ほどの縦糸の上を歩くことによって、縦糸を複数本数の糸からなるケーブルにして、雨や風、あるいはかかった獲物が暴れることによって生じる振動に対する巣の強度を高めていると考えられる。したがって、円網を張りはじめたときの縦糸は1本の糸からなっており、粘球も付着していないが、完成後の縦糸は複数本数の粘球が付着した糸からなっている。この縦糸の半径は $0.17\mu\text{m}$ 程度で太い。その後、巣を完成させるまでの一時的な補強を目的として、縦糸が交差する中心部から外側に向かって、ひとまず粘球を付着させない横糸を張り、その後、粘球を付着させながら本来の横糸を巣の外側から張っていく。この横糸は半径 $0.11\mu\text{m}$ 程度で細い。粘球を付着させながら発した糸が、チュウガタシロカネグモの意図にはよらず、結果として横糸になったり、太い糸が結果として偶然巣の縦糸になったりする、などとは考えにくい。粘球を付着させながら発した糸が、結果として枝から枝へと張る縦糸になる可能性もあるはずだからである。

先行研究でも専門誌でも、縦糸には粘球がないとされているが（福島・中島,1996・馬越ほか,1997・新海,1998・中垣,2003・新海,2006・大崎,2006）、これはクモが発した直後の糸を観察した結果に基づくものではないかと考えられる。一方、兵庫県立西脇高等学校生物部（2018）が、複数の円網を作るクモの巣を観察した結果、縦糸にも一般的に粘球が付着しているとしているのは、円網が完成した後、さまざまな環境下で縦糸を補強した後の縦糸を観察した結果ではないかと考えられる。

太い縦糸は、円網を支えるハンモックの釣りひもの役割があり、風雨や獲物がかかった時の揺れに対する強度を高めることに貢献している。一方、細い横糸は、粘球を付着させることで獲物を捕獲する目的の糸として有効である。チュウガタシロカネグモは縦糸、横糸の区別なく歩くが、特に強度に優れた縦糸の上を歩くことが多い。よく歩く縦糸の粘球を脚の毛がからめ取ってしまうことで、縦糸の粘球が失われ、縦糸には粘球がみられないと誤解されることが多いのではないかと考えられる。

円網の縦糸のケーブルにしばしば巻き付いている螺旋状の糸について、兵庫県立西脇高等学校生物部（2018）は、縦糸のケーブルを補強するために、意図的に巻き付けながら縦糸を張ったものであると考えている。チュウガタシロカネグモは、環境の変化によって、いったん発した糸を巻き取るように回収することがある。回収された糸は螺旋状のばねのような形状になり、塊になって縦糸に付着させる。縦糸のケーブルに螺旋状の糸が巻き付いていることがあるのは、獲物がかかるなどして巣糸が破損した際に、第1脚と第2脚で一度巻き取った糸を用いて補修することによって、螺旋状の糸が縦糸のケーブルに巻き付いたことを示している。兵庫県立西脇高等学校生物部（2018）が示したように、新たに縦糸の補強のために繊維を螺旋状に巻き付けたわけではない。

チュウガタシロカネグモの糸に付着する粘球は、糸が発せられた際に糸に均質に付着していた粘着物質が、後に表面張力によって一定の間隔と大きさで球状になったものである。腹部にある絹糸腺から粘着物質が分泌されているが（大崎,2006）、腹部の大きさと粘着物質の分泌量の間には一定の相関関係は認められない。粘球は、獲物を捕らえる目的だけではなく、縦糸と横糸を接着したり、横糸がすべて隣接する横糸と接着したりすることを避ける、横糸をまっすぐに張るためのたるみを取る役割、などを担っていると考えられており、糸の形状に一定の影響を与えているが、まだ詳細はわかっていない（梶元,1998・北川ほか,2000）。

4. さいごに～今後の課題

チュウガタシロカネグモは、偶然による結果ではなく、その目的を理解したうえで発する糸の種類を変えていると考え、すべての行動と糸の特徴が説明できる。この説明が本当に妥当なのかどうかを、さらに多くの個体で、あるいは他の種のクモでも観察し、検証したいと考えている。また、研究が進んでいない粘球についても、その役割についての詳細を明らかにしていきたい。この研究は、クモの糸に関する基礎研究となるばかりではなく、クモの生態を明らかにする基礎研究としての意味ももつと考えられる。

引用文献

- 朝倉哲郎 (2007) フィブロインの高次構造 (蚕糸・昆虫バイオテック 76, 9-14)
- 朝倉哲郎・中澤靖元 (2006) 蚕ならびにクモが生産する絹の構造の解明-主に固体 NMR 構造解析法を用いて (高分子論文集, 63, 11, 707-719)
- 福島康正・中島宏 (1996) スパイダーシルク-遺伝子組換え法による高分子の合成- (繊維と工業, 52, 11, 441-445)
- 兵庫県立西脇高等学校生物部 (2018) クモの糸の構造と引っ張りの力に対する強度の関係 (化学と生物, 56, 9, 640-643)
- 北川正義・勝見誠二・若生豊 (1998) クモ糸の変形挙動に及ぼす光および水環境の影響 (材料. 47, 1, 55-59)
- 北川正義・新濃隆志・若生豊 (2000) クモ横糸の変形挙動に及ぼす粘着球の役割 (材料. 49, 9, 970-975)
- 榎元敏也 (1998) クモ糸の多様性 (Acta arachnol., 47, 2, 177-180)
- 中垣雅雄 (2003) スパイダーシルク (高分子, 52, 838)
- 大崎茂芳 (1985) クモの糸の化学 (有機合成化学, 43, 9, 828-835)
- 大崎茂芳 (1996) 蜘蛛の糸-その蛋白質科学 (蛋白質・核酸・酵素, 41, 14, 50-58)
- 大崎茂芳 (2006) クモの糸の秘密 (繊維と工業, 62, 2, 42-47)
- 新海明 (1998) クモの糸と生態 (日本蜘蛛学会誌, 47, 2, 191-195)
- 新海栄一 (2006) 日本のクモ (文一総合出版)
- Tsuchiya K. and Numata K. (2017) Chemical synthesis of multiblock copolypeptides inspired by spider dragline silk proteins (ACS Macro Letters, 6, 2, 103-106)
- 馬越淳・馬越芳子・秦珠子 (1997) 生物紡糸-低エネルギー・スーパー紡糸 (クモ) (繊維と工業, 53, 7, 202-211)

謝辞

本研究をおこなうにあたり、姫路市役所環境政策室計画啓発担当の津田英治氏には、クモの一般的な生態について教示いただいた。また、本校科学部顧問の川勝和哉教諭には、終始有益な助言をいただいた。ここに記して謝意を表す。