蜘蛛糸の物理的性質の研究（1）

太さ，比重，強さ，伸び，弾性率，吸湿性，脱湿性及び屈折率について

窪　田　　潤*

Jun Kubota : A Study of the Physical Properties of Spider Silk (1)
On the Size, Specific Gravity. Strength, Elongation, Elasticity, Sorption or Desorption of Water and Refractive Index.

(1955年12月10日受理)

I 緒　　　言

蜘蛛糸と言えばマダガスカルヂョロオグモの糸から織布が作られること，日本のヂョロオグモの糸も絹糸の代用にと試みられたことがある等紡織原料として取り上げられたこともあるが，今日のところ実用価値が少ない為か忘れられたかたちであり，従つて科学的研究特に物理的性質について我が国では殆んど研究されてないようである。

しかし蜘蛛糸の横断面が円形で所謂完全度は100％に近いものであり膠質物なき糸条は表面極めて滑らかで細太の変化甚だ少なく他の動物繊維の遠く及ばぬ所である他，強さ，伸び特に伸長率が非常に大である等繊維として特長あるものである。著者は先に繊維学会春期研究発表会（1951年）に蜘蛛糸の強力伸度についてと題して一部を発表したことがあるが此の他，太さ，比重，吸湿性，脱湿性等の測定を行つた故これらの結果を報告する。

II 太　　　さ

蜘蛛糸の太さは種類により，同種でも成長状態によつて異なる。又同一蜘蛛糸でも網を造るに当つて縦糸，横糸，足場糸等によつて異なる。これは紡管が例えばオニグモであれば4種あつて夫々異つた糸を紡出する故である。この蜘蛛糸を円形と見做して外面的に巾を測定し直径として太さを示せば次表の如くである。但しオニグモ(B)は(A)と異なり成熟期が九月下旬～十月上旬のものである。

足場糸は種々の太さのものが集まつていたが大体太い方の平均(1)と細いものの平均(2)を求めて見た。

繭の糸は繭の周囲にある太いものを測定して見たのである。本実験の範囲内では大体縦糸は横糸の1.4～2.6倍（直径）であり横糸は絹糸の分岐繊維に相当し其の細いものはラウジネス繊維に匹敵するものがある。尚蜘蛛の成長と太さの関係をオニグモ(A)の横糸について見れば次の如くである。

第1表　蜘蛛糸の太さ

種別		蛛糸別	直径（平均値）（μ）	標準偏差	変動係数	試料採取日
オニグモ	A	縦糸	2.8	0.09	0.03	5月9～12日
		横糸	1.2	0.31	0.258	
	B	縦糸	11.2	2.19	0.196	9月14～19日
		横糸	4.3	1.14	0.265	
ヂョロウグモ		縦糸	5.7	1.34	0.235	10月20～24日
	○	〃	5.3	0.36	0.686	
		横糸	3.2	1.38	0.431	
	○	〃	3.9	0.31	0.079	
	足場糸○	1	7.2	0.65	0.090	
		2	3.8	0.41	0.108	
	繭の糸		11.5	1.94	0.169	11月
オオヒメグモ			0.9～2.6μ			9月18日
ハエトリグモ			3.7～5.8			〃
ハシリグモ			1.6μ			4月30日

表中の○印は断面測定値

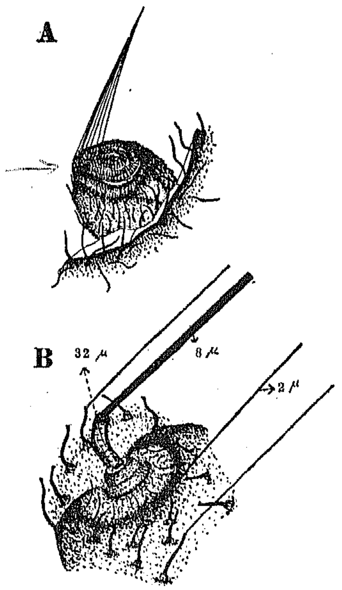
第2表

5月10日	6月19日	7月31日
1.2μ	1.3μ	1.6μ

III 比　　　重

糸を量的に集めるにヂョロオグモが容易である点から数多くのヂョロオグモを集め約0.16gramの蜘蛛糸（粘性のないもの）を紡出させ比重瓶によつて比重を測定し次の結果を得た。

* 信州大学繊維学部　絹糸学研究室



オニグモのSpinnerets

A図
前疣左側紡糸状態

B図
A図矢印の部分拡大図 [redacted]

第3表　ヂョロオグモの比重

平均値	標準偏差	変動係数
1.362	0.0135	0.0091

蜘蛛糸の比重は絹糸の比重に類似している。

(ATHEWS 氏によればマダカスカルヂョロオグモの比重は1.34である) 上記の結果から断面積81.6μ^2が1デニールに相当することを知る，従つて蜘蛛糸の直径(x)とデニール(d)との関係は

$$d = 0.00962x^2 \quad \text{unit} = \mu$$

で示される。

IV　強さ，伸び，弾性率

試料及び実験方法

試料はオニグモ(A)は五月～七月に渡つて(B)は九月にヂョロオグモは十月に蜘蛛網から採取したものを用いた。

蜘蛛糸は極めて細く従つて強さも又少さく0.01g内外のものもあること故普通の繊維強度試験では測定不可能な場合が少なくない，それ故種々の測定法を考案して見た，本実験に用いた装置を掲げて見れば次の如くである。

(1)　O，K式短繊維自記強伸度測定機

(2)　セニメーター

(3)　マイクロメーターとセリメーターを組合せたもの

(4)　マイクロメーターとトーションバランスを組合せたもの

(5)　マイクロメーターとP. Krais 式を組合せたもの

(1) のO，K式は伸長速度一定のもとに針金のトーションを利用し繊維の強力を計るのである，又伸長率は顕微鏡を用いて其の精度迄拡大して記録出来る他，記録の為のペン及び紙の間の摩擦等は全くない装置である。

(3)(4)(5) は M. Polanyi 氏考案の測定機と原理は同一で上部の繊維の抓みの所の荷重測定部にセリメーター，トーションバランス，或いはクライス式を用いたのである。即ち糸の一端を取り附けた下部糸狭み装置を有するマイクロメーターを一定距離だけ下げ次にトーションバランス又はセリメーターの上部糸狭み装置が定点を指示する迄荷重を増し糸の伸長に対する強さを計り，糸の切断時迄伸長0.18mm毎に記録測定するのである。装置は試料の長さ強伸度の大きさにより適当のものを用いた。

尚試料の長さ1cmを標準としたが，ヂョロオグモの糸の如くクモ網の関係で0.5cmを用いたもの，或はO，K式の如く，伸長率が余り大で測定不能の場合もあつて0.3cmを用いたものもある。

実験結果及び考察

各試料について強さ，伸び，弾性率を示すと第4表の如くである。

第4表　蜘蛛糸の強さ，伸び，弾性率

種別		蛛糸別	強伸度別	平均値	標準偏差	変動係数	測定装置
オニグモ	A	縦糸	強さ(対1 mm / kg)	124	24.4	0.197	(3)
			伸長率(%)	81.2	8.45	0.104	
			強さ(対1本 / g)	1.6	0.297	0.186	
		横縦	強さ(対1 mm² / kg)	26.9	6.31	0.235	(4)
			伸長率(%)	151.	47.8	0.315	
			強さ(対1本 / g)	0.066	0.0224	0.339	
	B	縦糸	強さ(対1 mm² / kg)	29.7	4.31	0.145	(1)
			伸長率(%)	49.6	11.5	0.232	
			強さ(対1本 / g)	2.65	0.409	0.151	
オニグモ	B	縦糸 弾性限界	強さ(対1 mm² / kg)	5.17	1.22	0.236	(1)
			伸長率(%)	0.84	0.117	0.134	
			弾性率	614	134	0.218	
		横糸	強さ(対1 mm² / kg)	15.5			(1)
			伸長率(%)	174			
			強さ(対1本 / g)	0.725			

ヂョロオグモ	縦糸	強さ(対1 mm² kg)	55.9	11.8	0.210	(3)
		伸長率(%)	76.5	25.8	0.337	
		強さ(対1本 g)	2.10	0.420	0.200	
	横糸	強さ(対1 mm² kg)	1.23	0.659	0.535	(4)
		伸長率(%)	396	92.9	0.235	
		強さ(対1本 g)	0.019	0.0097	0.510	
	繭の糸	強さ(対1 mm² kg)	14.2	5.40	0.380	(2)
		伸長率(%)	83.3	17.0	0.204	
		強さ(対1本 g)	1.48	0.245	0.165	

種類	対1 mm² 強さ(kg)	伸長率(%)	対1本 強さ(g)	測定装置
オオヒメグモ	58.0	34.7	0.262	(1)
ハエトリグモ	37.0	20.7	0.668	

弾性限界以外の強さ，伸長率，は切断点の値を示す。又（B）の横糸は2例の平均故，標準偏差，変動係数は求めなかつた。測定装置の(1)(2)(3)(4)は前項の実験装置番号を示す。

1) 強　さ

強さ即ち引張りの強さは縦糸と横糸では甚だ異なる，これは夫々の糸腺が異なる故である，何れの蜘蛛糸も縦糸は横糸より遥かに強くオニグモ（A）は5倍近く（B）は約2倍ヂョロオグモは45倍も大である。即ち縦糸の切断強力はオニグモ（A）の如きは平均 124kg/mm² で他の繊維の強さの大なるもので45kg/mm²内外なのに比し非常に大である。（B）は30kg/mm²内外ヂョロオグモは55.9kg/mm²でこれも大なる値である。横糸はオニグモ（A)は26.9kg/mm²（B)は15.5kg/mm² ヂョロオグモは非常に弱く1.23kg/mm²を示した。ヂョロオグモの蜘蛛網を見るに他種に比し密なるもこの弱点を補う為とも考えられる。其の他の蜘蛛糸は 30～60kg/mm² の間を示し大体縦糸はラミーに匹敵する強さのものもあるが大凡絹，ナイロンに相当するものと言えよう，横糸は人造絹糸程度又は種類によつて遥かに弱いものも見られる。

2) 伸　び

伸長率は縦糸は大体50～82%横糸はこれより遥かに大きくオニグモ(A)は平均151%で縦糸の約2倍(B)は174%で約3.5倍，ヂョロオグモは396%で約5倍である。縦糸でも羊毛の伸長率に勝り横糸では驚くような伸長率を示し他繊維の遠く及ばない所である。この伸長率は粘着性物質と密接な関係があるものと考えられる。

3) 弾　性　率

弾性率は自記測定機によるもの以外は求めるに不適当であり，又横糸の如きは例え自記したものでも求めるに困難である為オニグモ(B)の縦糸だけについて求めた，この種の弾性率は614kg/mm²で羊毛の約2倍を示した。

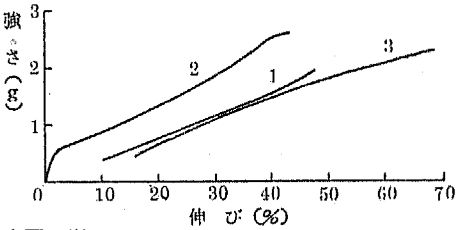
4) 荷重伸長曲線

荷重伸長曲線は縦糸と横糸ではその趣きを異にする。縦糸は自記測定機による場合は弾性曲線以後の曲線は伸びの大きくなるに従つて伸長の増加より荷重の増加の方が大きい，即ち伸び座標軸に対し外丸の曲線を示したが測定法の違いによつては直線或いは伸び座標軸に対して内丸の曲線を示した（第1図）。これに対し横糸は総て伸び座標軸に対して外丸の曲線を示し（第2図）指数曲線 $\sigma = a\varepsilon^{b}$ によく一致する。ここに σ は強さ(mg) ε は伸長率(%) a，b，は常数で次表の如くである。

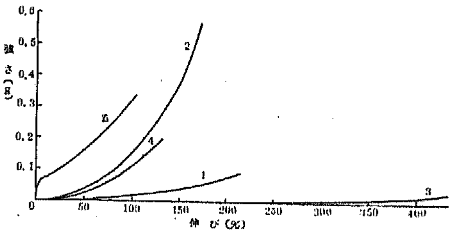
第5表

種別		a	b	1mm²当りの強さを求めるには(mg)
横糸	オニグモ(A)	0.00126	2.00	476000倍
	オニグモ(B)	0.00215	2.41	50000 〃
	ヂョロオグモ	0.000115	2.01	133000 〃

ヂョロオグモの横糸の場合は $\sigma = ae^{b\varepsilon}$ の方がよりよく適合するが此の場合の a は 0.317 b は0.0120 である。



第1図　縦　糸
1：オニグモ(A)の縦糸，断面積 12.4μ^2
2：オニグモ(B)の縦糸，断面積 104μ^2
3：ジョロオグモの縦糸，断面積 38.0μ^2



第2図　横　糸
1：オニグモ(A)の横糸，断面積 3.3μ^2
2：オニグモ(B)の横糸，断面積 33.2μ^2
3：ジョロオグモの横糸，断面積 15.1μ^2
4：オニグモ(A)の横糸，断面積 10.5μ^2
5：同　上　で水に漬したもの

5）水の横糸への影響

雨にうたれた蜘蛛糸の横糸は粘着性を失つて居るのに気付くであろうが，此の粘着性を失つた糸の荷重伸長曲線は明らかに変つて居る。即ち多分に縦糸の傾向を示し弾性限度が大きく表われている。（第2図参照）そして強さは倍以上に増大しているが，伸度は逆に減少している。（第6表）即ち粘着性物質は強さ，伸び，弾性率に密接なる関係があるものである。

第6表　浸水の影響

浸水時間	強さ(対1 mm²)	伸び	測定装置
0分	25.8kg	155%	(5)
2	73.8	128	
5	67.5	92	
10	52.4	86	

6）乾燥の影響（横糸）

粘着性の横糸を乾燥して見たところ，粘性が少しばかり減少した感じがした程度で第7表に示す如く，乾燥40分以内では粘着性は消失しない。強さは時間経過と共に幾分減少するものと見られるが，伸長率の場合はその傾向が明瞭でなく例え減少するとしても微々たるものであろうと考えられる。

第7表　乾燥の影響

乾燥時間	強さ(対1 mm²)	伸び	測定装置
0分	28.2kg	162.%	(5)
5	27.4	169.	
10	28.8	90.	
20	17.0	126.	
30	20.3	160.	
40	9.5	122.	

7）アルコール，エーテルの影響

横糸をアルコールに浸すと球状の粘液は1分位で固化し，全く粘性を失い其の結果強さも伸びも減少する如くである。（第8表）しかしエーテルでは粘着性には変化なく（15分浸漬）強さにも伸長率にも変化は見られなかつた。

第8表　アルコールの影響

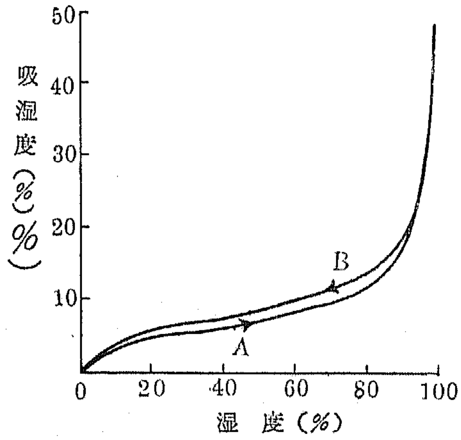
アルコール浸漬時間	強さ(対1 mm²)	伸長率	測定装置
0分	28.2kg	162%	(5)
2	28.3	128	
4	21.0	117	

V　吸濕性及び脱濕性

本実験試料には比重の試料と同時に採取せるヂョロオグモの粘着性なき糸を用いた。

1）吸湿量及びヒステレシス

始め試料を高温接触をなるべく避ける為89.95％の硫酸で乾燥した空気中に放置して充分乾燥状態にした後，同じく硫酸で所要の湿度に調整した500ccの容器中で72時間宛づつ吸湿せしめた。（測定温度12°C～14°C）而して関係湿度100％附近では水分率48.1％に達した。次に同一試料を逆に低湿度の容器中に順次に入れて脱湿せしめた所第3図の様な関係曲線となつた。一部の試料は関係湿度100％附近に12日間放置しておいた所水分率59.2％に及び尚吸湿の傾向を示した。



第3図　A：吸湿曲線
B：脱湿曲線

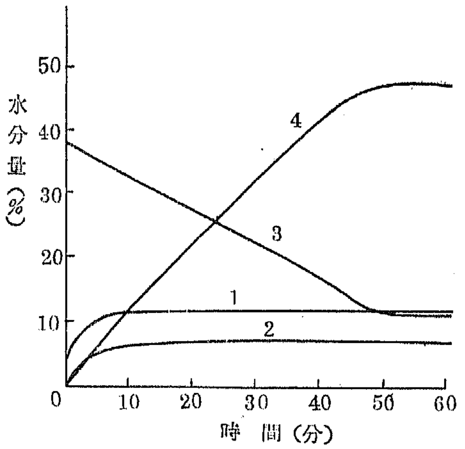
湿度に対する吸湿状態は一般繊維と同様S字形を示し絹等に比し数値的な比較は測定温度が異なる故出来ぬが吸湿量少なく其の差は高湿度程大となつた。鯨井氏及び小栗氏等の関係式

$$Q=\frac{H}{a+bH+cH^2}$$

但しQ＝吸湿量％。H＝関係湿度。a，b，c＝常数。これを適用すればa＝1.42，b＝0.196，c＝−0.00152で80％附近迄はよく一致するが，これより湿度高くなるに従い実験値の含水率が計算値より大となつて来る。吸湿曲線と脱湿曲線を見るに，両曲線は一致せず所謂履歴現象を示し脱湿平衡値は1％～2.4％範囲で吸湿平衡値より大であり70％附近の差が最大で絹糸の場合と同様であつた。

2）吸湿速度及び脱湿速度

吸湿速度試験の試料は関係湿度10%容器中に，脱湿速度試験のものは100%容器中に夫々3日以上入れて充分脱湿及び吸湿せしめ，温湿度を一定に保つた室内に取り出し測定した結果第4図の如くであつた。



第4図　1：水分率（吸湿の場合）
3：水分率（脱湿の場合）
但し水分率は原量に対する水分量(%)
2：吸湿速度曲線
4：脱湿速度曲線

図に明らかなように蜘蛛糸の吸湿度は時間の始めに大で次第に飽和状態となるが，吸湿飽和曲線が人絹，絹，羊毛に比し短時間なのは細繊維で表面積大及び拡散係数の大なること等が主要原因と考えられる。脱湿速度は吸湿速度より幾分遅く，速度が緩慢になる変化位置は50分附近で吸湿の約10分に比すれば長時間である。これは100%中に放置した場合の吸湿量が非常に多量のため即ち脱湿量が48.4%に及んだ為であつて水分率11.4%で略平衡水分量に達している。

VI　屈　折　率

蜘蛛糸の屈折率は浸液法によりて求めた。その結果繊維軸方向の屈折率$n_{/\!/}$は絹と羊毛との中間の値を示し直角方向の屈折率$n_{\perp}$は何れよりも大であつた。

第9表

	$n_{/\!/}$	$n_{\perp}$	$n_{/\!/}-n_{\perp}$
蜘蛛糸	1.565	1.545	0.020
絹　糸	1.591	1.539〜1.538	0.052〜0.053
羊　毛	1.550	1.540	0.010

VII　総　　括

1　蜘蛛糸は種類により発育状態により又紡管の違い等により太さを異にする。本実験試料を見ると多くは1μ〜11μであるが0.5μ以下の細いもの，12μより太いものもある。しかして縦糸は何れも横糸より太く直径比でオニグモは1.9〜2.6倍，ヂョロオグモは1.4〜1.8倍位であつた。

2　ヂョロオグモの比重は1.362であつた。

3　切断の強さ，伸長率は同種でも糸線により異なる。縦糸の強さは甚だ大で絹糸の強さ或はそれ以上で中には124kg/mm²に及ぶものがあるが横糸は弱く縦糸の½〜$^1/_{23}$である。伸長率は繊維中最も大で縦糸でも35%〜81%，横糸は殊に大で151%〜396%であつた。

4　オニグモ(B)の弾性率は614kg/mm²であつた。

5　横糸の荷重伸長曲線はゴム糸の如くよく伸び，伸び座標軸に対し外丸の曲線を示し水で粘着性を失う時は弾性限度が明らかに現われて縦糸の傾向をおびて来る。

6　乾燥の影響は割合に少ない。

7　吸湿量，ヒステレシス，吸湿速度，脱湿速度を測定した。

8　屈折率は $n_{/\!/}=1.565$ $n_{\perp}=1.545$ $n_{/\!/}-n_{\perp}=0.020$ であつた。

終りにのぞみ屈折率を測定せられた石川博氏並びに本実験の測定に終始協力下さつた寺内佐輪子，吉川令子嬢に対し感謝致します。

文　　献

1　John, Henry, Comstock. : The Spider Book, p135
2　Mathews. J. M. : Textile Fibres, p262〜263
3　小松　栄：大日本蜘蛛類図説上巻
4　湯原　清次：蜘蛛の研究
5　鯨井恒太郎：理化研究彙報，2 (2) (1923)
6　祖父江寛・長野正満：工化誌，426号
36 (8) 1166〜1176
7　大住吾八・加藤鉄郎：繊維工業会誌，2 (12)

Summary

1　Size, strength anb elongation of spider silk vary by the species, the growing state and the difference of nozzle. ie. the following is ——

Spicies		Strength (kg/mm²)	Elonga-tion (%)	Diame-ter(μ)	Gathering time
A.V.L.K.(A)	Warp	124.0	81.2	2.7	May
	Weft	26.9	151.0	1.2	
A.V.L.K (B)	Warp	29.7	49.6	11.2	Septe-mber
	Weft	15.5	174.0	4.3	
N.C.L.K.	Warp	55.9	76.5	5.3～5.7	October
	Weft	1.23	396.0	3.2～3.9	

A. V. L. K. is Araneus Ventricosus. L. Koch.
N. C. L. K. is Nephila clovata, L. Koch.

2 Specific gravity of N.C.L.K. showed 1.362

3 Elasticity of warp of A. V. L. K (B) was 614 kg/mm^2.

4 Stress-elongation curve of weft is indicated by index number-curve.

5 Stress-elongation curve of water-washed weft is similar to curve of warp.

6 Few effects of drying are comparatively for their strength and elongation.

7 Water-content, Hysteresis speed of sorption and desprption of water were measured.

8 Pefractive indices were $n_{/\!/}=1.565$, $n_{\perp}=1.545$ and $n_{/\!/}-n_{\perp}=0.020$.