クモの糸の秘密

Mystery of Spider Silks

大 崎 茂 芳

1. はじめに

20 世紀の後半は、人類の創り出すハイテクノロジーがすべてであるかのような錯覚を与えた時代であった。ところが、“スマトラ沖”大地震や米国の“カトリナ”による大洪水などのようにいくらハイテク時代といえども太刀打ちできない場合がある。このことから、人類といえども、やはり長い進化の歴史を持つ生物に学ばねばならないことが分かり、「自然に学べ」というキーワードが生きてくる。ここで取り上げるクモも長い期間に厳しい自然環境の下で糸という道具を巧く使いながら生き延びてきた。そのクモに焦点を当ててみると、クモの巣の張り方の神秘性や、その強さに驚いたりする。実際、糸の強さや柔軟性はどのようなになっているのであろうか？細い命綱を通じてどのような危機管理をして生きのびてきたのであろうか？また、命綱のどこを信頼しているのであろうか？などいろいろな疑問が湧いてくる。もしかしたら、クモの糸には何か秘められたものがあるのではないのか？と思ってしまう。そこで、その秘密の一端を覗いてみたい。

2. クモの巣と糸の性質

2.1 クモの巣の構造

クモは世界中に約 4 万種いる中で、日本には 1200 種ほどいる。その約半数は巣を張る造網性のクモであり、残りは巣を張らない非造網性のクモである。すべてのクモは糸を出すことでは共通している¹⁾。

クモの腹部にある多数の吐糸管はいろいろな形の絹糸腺に連結している。腹にある七個の絹糸腺は、大嚢状腺(だいのうじょうせん)、小嚢状腺、管状腺、聚状腺(じゅじょうせん)、鞭毛状腺(べんもうじょうせん)、葡萄状腺(ぶどうじょうせん)、梨状腺と呼ばれる。7 種類の絹糸腺からはそれぞれ異なったアミノ酸組成を持つタンパク質が分泌され、それぞれの目的に合った機能を果たしている。

SHIGEYOSHI OSAKI

奈良県立医科大学 医学部 教授 理学博士(大阪大学)、農学博士(京都大学)

〒634-8521 奈良県橿原市四条町 840

Tel: 0744-22-3051 Fax: 0744-29-8810

E-mail: s-osaki@naramed-u.ac.jp

〈専門〉生体高分子学

〈趣味〉絵を描くこと、旅行

巣を張るクモの中でよく見られる円網は種々の糸から構成されている(図 1)。巣の中心部は糸をやや密に張った「こ

図 1 クモの円網の構造

1. 枠糸, 2. けい留糸, 3. 縦糸, 4. 横糸, 5. こしき, 6. 付着盤, 7. 牽引糸

しき」というクモの住居になっている。巣の中心部から外へ放射状に伸びている糸は、巣の骨格を形成する「縦糸」といわれ、力学的に強い。粘着球がほぼ等間隔につき、渦巻き状に張られている「横糸」は、弾性的で非常に伸びやすく、獲物捕獲に適した機能を持っている¹⁾。また、巣を囲んでいる「枠糸」や、枠糸と木をつなぐ「けい留糸」がある。「牽引糸」はクモが獲物を迅速に捕まえる際や危機に遭遇した場合などの命綱としての役割を果たしている。卵を保護するための「卵のう」の表面は、規則的に編まれた織布とは違って、太い糸と細い糸からなる繊維が不織布状になっている。

2.2 牽引糸の物理化学的性質

ジョロウグモ牽引糸はグリシン、アラニン、グルタミン酸の三つの代表的なアミノ酸残基の繰り返しからなるタンパク質である²⁾。そして、牽引糸は春から夏にかけて白色で、秋になると黄金色を示す。その密度は 6 月で 1.13 g/cm^3 、10 月で 1.29 g/cm^3 である³⁾。クモの体内の液状タンパク質の分子量は約 27 万であり、分子量分布は非常にシャープである⁴⁾。

ジョロウグモ牽引糸は赤外線吸収スペクトルにおけるアミド基の吸収バンド (1510 cm^{-1} , 1630 cm^{-1} , 3200 cm^{-1}) における顕著な二色性から繊維方向への配向性が見られる⁵⁾。

その配向性はマイクロ波方式からも裏づけされる⁶⁾。非晶性の牽引糸には明瞭なX線回折パターンは得られていないが、逆並行からなる β 構造をとっていることが示唆される⁷⁾。このように、牽引糸は非晶性のためか、融点がなく、少なくとも200℃まで熱的に安定している²⁾。

クモの糸は水で膨潤すると、長さが半分に収縮し、体積は2倍になり、弾性は1000倍に増大する性質がある。この収縮力は、85%は高分子鎖の立体配置エントロピー変化によるもので、それに対応したゴム成分の占める割合は糸の60~70%を占めると推定されている⁸⁾。

2.3 牽引糸の弾性率

古くから強いといわれるクモの糸の弾性率は報告されているが^{9,10)}、サンプルの断面積の求め方やどの時期のサンプルなのかははっきりしていない。そこで、測定するサンプルの断面積を電子顕微鏡から求め、ジョロウグモの若い頃から成熟時までの牽引糸での弾性率を測定してみた。その結果、ジョロウグモの牽引糸の弾性率はクモの成長過程によって異なることが分かってきた。体重が50mgまでの幼体での弾性率では10.0GPaであるが、体重が50mg以上の成体では12.9GPaであった¹¹⁾。この弾性率の値は、合成高分子の結晶領域の弾性率と比較すれば明らかに低い、非晶性高分子のポリスチレンの1GPa程度¹²⁾と比較するとかなり高い。つまり、通常の結晶性高分子の力学強度は非晶域によって弾性率が規定されることから、クモの牽引糸は非晶性高分子としては高い弾性率を持つことがわかる。

3. クモから学ぶ危機管理

3.1 二本のフィラメントからなる命綱の強さはクモの重さの約2倍！

クモの重さを支えている牽引糸は非常に細い糸であるにもかかわらず、クモがぶら下がっても切れず、空中で生活しているクモの生死を左右するという重要な役割を担っている。そのため、牽引糸は命綱といわれる。クモの重さを支えている牽引糸は、目視では一本に見える(図2)。しかし、牽引糸を電子顕微鏡で観察してみると、円柱状の細い二本のフィラメントからなっていることが判る(図3)。

ジョロウグモ牽引糸の張力—伸び曲線を図4に示した。張力に比例して伸びる限界点を弾性限界点といい、限界点での張力を弾性限界強度、伸びを弾性限界伸びという。限界点を越えると伸びは張力に比例しなくなる。弾性限界点内の領域のことを線形領域といい、弾性限界点を越えた領域のことを非線形領域という。弾性限界強度をクモの体重に対してプロットしたところ、弾性限界強度はクモの体重に比例して増大し、その傾きは約2であった(図5)^{1,13,14)}。牽引糸の弾性限界強度は、いつも体重の約2倍に相当するのである。このことは、二本からなるフィラメントのうち、たとえ一本のフィラメントが切れても、残りの一本のフィラメントでクモを支えることができることを意味している。このように、牽引糸は万が一の危機時に備えて、安全性の

観点から非常に効率的な命綱であることがわかる。

3.2 “効率”と“ゆとり”を考えた安全性

クモの巣づくりや獲物を捕える様子を眺めていると、巣の芸術性やクモの巧妙さに驚いてしまう。そもそも、400万年という人類の進化の歴史と比べて、クモは4億年という極めて長い進化の歴史を持っている。この気の遠くなるような長い期間に、クモは環境に適応した機能を持つ糸を作り上げてきたのであろう。長い進化の産物が、牽引糸の弾性限界強度がクモの体重(ここでは重さ)の約2倍ということである。言い換えれば、安全率(=弾性限界強度/クモの重さ)は約2ということになる¹⁾。

もし、弾性限界強度がクモの体重に等しいフィラメント一本だけで支えられていると安全率は1で、エネルギー的

図2 牽引糸にぶら下がるメスのジョロウグモ

図3 牽引糸の電子顕微鏡写真
二本のフィラメントからなる牽引糸

図4 ジョロウグモ牽引糸の張力—伸び曲線

図5 ジョロウグモの体重と牽引糸の弾性限界強度の関係には最も効率的である。しかし、その唯一のフィラメントが切れてしまうとクモの命は保証されないので極めて危険である。また、弾性限界強度がクモの体重の2倍であるような太い一本のフィラメントから成る牽引糸であっても安全率は2となる。しかし、いくら太くても一本のフィラメントのどこかに亀裂が入るとすぐに切れてしまい、その結果、クモは落下し命をなくしてしまうことになる。この点からしても、牽引糸が二本のフィラメントからなっているということは危機管理という観点から極めて重要な意味を持ってくるのである。

二本のフィラメントのうち、いずれかの一本のフィラメントは危機時に必要な“ゆとり”として働くことになる。それは命に対する“ゆとり”なのである。そのため、危機管理という観点からみて、牽引糸は最も効率的にクモの重さを支えるシステムをとっていることになる。

安全性とエネルギーの観点から、最大の効率性とゆとりを持つ牽引糸によって初めて、クモの俊敏な活動性が保証されていることになる。ここに、クモの命綱に関する“2”の安全則が得られたのである。

3.3 危機管理の究極の数字は“2”

“2”の安全則は、エレベーター、橋(図6)、飛行機、家屋、トンネルなどの構築物や紐などの工業用素材の安全率や社会科学的な危機管理に対して、重要な示唆を与えてくれる^{1,13)}。たとえば、家を造るとき、屋根を支える柱を太くすると安全性は上がるが、費用がかかりすぎるとともに、使用できる空間が減ってしまう。また、家の柱を細くしすぎると、屋根の重みで家がつぶれかねない。したがって、構造物の素材に強度があって、なおかつ、適度な太さが必要なのである。また、結婚式や卒業式などは、人生のうちに、TPO(時期、場所、機会)の点で二度と同じ状況にはめぐり合えないという記念すべきイベントである。そのような重要性から、万が一記念写真が映っていないという失態を避けるために、一般にカメラのシャッターを最低2回は切っている。

企業などでは、社長と会長などは同じ飛行機に乗って出張しないことになっている。万が一事故が起こっても企業

図6 安全率が考慮されている明石海峡大橋

維持のために危険を分散している。また、重要なポストでは、出張の際に必ず代理をおいて危機管理に備えねばならない。さらに、玄関のドアに2つの鍵を付けるのも、防犯に対する危機管理なのである。

医療事故が起こる場合、しばしば油断して厳密なチェックを忘れている。最低二人が、それぞれ操作や処置を十分に確認することにより、事故を避けることができるものである。いくら、一人が二倍の時間を費やしてチェックしても、安全性は本質的にはアップしない。ところが、問題点を含む重要な書類が回覧されて、大勢の人が押印しているにも拘らず、意外と簡単に関門を通過してしまうこともある。この場合、誰かがチェックしてくれるだろうと思い、個別的には詳しくチェックしていないのである。多数で行うことで、かえって責任の所在があいまいになるケースがある。したがって、一人が十分にチェックした後、もう一人が綿密にチェックする二人体制の方が効率的であると言える。

3.4 本当の“ゆとり”とは何か？

クモの牽引糸は二本のフィラメントから構成されているが、その実態を調べてみると、クモの重さが二本のフィラメントのそれぞれに分散している(図7)。一本のフィラメントにはクモの半分の重量が加わっているに過ぎない。つまり、クモは命綱の力学的機能の半分を危機管理用の“ゆとり”として考えているのである。いくら“ゆとり”であっ

図7 二本のフィラメントを出して獲物を待っているジョロウグモ

ても、迅速さが要求される。たとえば、コンピューターは、万が一故障をしても予備コンピューターを準備しておくことが大切である。いざという時に稼動しない場合もありえるので、予備のコンピューターといえどもいつも稼動させて、準備状態にしておくことは危機管理にとって非常に大切なことである。

最近の“ゆとり教育”においては、学習内容の軽減による学力低下が指摘されている。“ゆとり”とは、遊ぶことを意味しているのではなく、いつでも役に立つための学習を積み重ねておくことである。また、いくら学習しても、いざという時に使えない知識だけでは、万が一の際に機能する“ゆとり”にはなりえない。つまり、クモの命綱から学ぶことは、本当の“ゆとり”とはいつでも機能しうる状態にあることなのだろう。

3.5 子グモは過保護でその安全率は“3”

成体のジョロウグモの牽引糸で得られた安全率“2”が子グモに当てはまるのかどうかは興味深いことである。クモの体重に対してプロットした弾性限界強度との関係で、50mg以上の体重のジョロウグモでは、体重と弾性限界強度のグラフでの傾きは間違いなくほぼ2であった。しかし、体重が50mgより小さい幼体のジョロウグモから採取した牽引糸では、傾きがほぼ3であった。つまり、成体の安全率は“約2”であるが、幼体では“約3”になる¹⁵⁾。子グモでも牽引糸のフィラメントは2本であることから、子グモの牽引糸の体重当たりの断面積が成体のクモより大きく作られていることがわかった。多くの危険に曝されている子グモは、遺伝的には過保護にされているのである。

4. クモは紫外線を利用する！

4.1 クモの糸の紫外線劣化

絹糸は紫外線によって劣化し黄変するため、絹素材の和服を着て紫外線の強い屋外を歩くのは良くない。同じようにタンパク質からなるクモの糸も紫外線で劣化することが予想される。月ごとに採取したジョロウグモの牽引糸に紫外線を照射し、そのラジカル量をESRで調べてみた(図8)。紫外線による化学結合の開裂によって、タンパク質分子の

図8 紫外線照射によるラジカル量の時間依存性

Cα中心のラジカルが生成することが明らかになった。ところが、若いクモの糸は成熟したクモよりラジカル量が少なく、また、クモの糸の方が絹糸よりもラジカル量が少ない。このことは、絹糸よりクモの糸の方が、また、若いクモの糸ほど紫外線に対して劣化しにくいことを意味する¹⁵⁾。

4.2 紫外線は巣を力学的に強くするのか？

牽引糸は力学的にクモの巣の骨格を構成する縦糸によく似ている。その牽引糸に太陽光の強度分布に似た紫外線UV-A* (320-400 nm), UV-B* (290-320 nm), UV-C* (200-290nm)をそれぞれ照射した。牽引糸の応力—ひずみ曲線から求めた破断応力を紫外線照射時間に対して図示した(図9)。UV-C*照射の場合の応力は時間とともに大幅に低下した。ところが、UV-B*照射の場合、応力が照射直後に少し上昇してから低下した。また、UV-A*照射では、応力は時間とともにかなり上昇し極大値を示してから低下した¹⁸⁾。なお、ここで、応力は単位面積あたりの力学強度を意味する。

図9 紫外線(UV-A*, UV-B*, UV-C*)照射した後におけるジョロウグモ牽引糸の破断応力の時間依存性

破断応力の極大値は、照射波長が大きくなると上昇した。具体的には、破断応力の極大値は初期破断応力と比べて、UV-A*では60%、UV-B*では40%、UV-C*では15%も増大した¹⁸⁾。この結果から、紫外線照射によって、クモの糸を構成するタンパク質が分解して分子量が低下して力学強度が低下する因子と、架橋によって分子量が増加して力学強度が上昇する因子の二つの因子の重ねあわせによって、破断応力が極大を示すものと思われる。特に、UV-A*の紫外線が架橋の生成に大いに寄与していることがわかる。

紫外線照射によって、極大値になるまでの時間は波長が長くなるほど長くなる。この極大値になるまでの時間は、破断強度が初期値よりも大きい期間に比例した。太陽光からUV-Aと一部のUV-Bが地上に降り注いでいる。UV-A*照射に関して一日の太陽光の照射時間を換算したところ、力学応力が初期値にまで低下する時間は、ジョロウグモが巣を張り替える周期(二日間)とよく対応した。つまり、ジョロウグモの巣は糸の破断応力が一定の値に低下すると、巣を張りかえるのであろう。このように、ジョロウグモは紫

外線を上手に利用していることがわかった。

5. クモの糸から学ぶ信頼性

5.1 クモの糸の線形領域は変化しにくい

ジョロウグモは巣を構成する糸の力学強度の限界値をよく理解していることが分かってきた。ところで、クモは自らの命を託する命綱をどこまで信頼しているのであろうか？興味深い問題である。

晴れや曇りなどの天気具合によって地上に降りそそぐ紫外線量が異なる。そのため、紫外線によって糸の破断応力も大幅に変わることが予想される。このようなことから、糸の破断応力における非線形挙動をクモが正確に予測することは、事実上極めて難しいと考えられる。

牽引糸に UV-A より分解力の強い UV-B を照射すると、牽引糸の破断応力が大幅に減少する。しかし、牽引糸の弾性限界応力は、長時間にわたりほとんど変化しないことがわかった(図 10)¹⁹⁾。つまり、弾性限界応力は、紫外線を長時間照射しても変化しないように設計されている。このように、クモは牽引糸の力学特性の線形領域には絶対的な信頼性をおくことができる。つまり、クモにとっては線形領域だけは間違いなく予測可能な領域なのだ。

図 10 ジョロウグモ牽引糸の弾性限界応力および弾性限界応力の紫外線(UV-B*)照射時間依存性

5.2 クモは命綱のどこを信じるのか？

同じクモから採取した牽引糸から複数個のサンプルを作り、そのサンプルの張力—伸び曲線を測定すると、バネのように伸び縮みができる線形領域ではデータの再現性は非常に良い。そのため、原点から弾性限界点までは、どれくらいの力を加えるといくら伸びるのかを十分予測することができる。その結果、牽引糸に対する信頼感が生まれてくる。たとえば、体重計のバネは使用可能な範囲では体重と目盛りの間に線形(比例)関係が成立している。そのため、我々は体重計の線形部分のみを信用しているのである。しかし、バネの弾性限界強度以上に重い人が体重計に乗ってバネが非線形的に変形してしまうと、体重計は正常に機能しなくなる。

また、牽引糸にクモがぶら下がっても弾性限界伸びの半分の長さまでしか伸びないので、クモが命を落とすことは

まずありえない。牽引糸は弾性限界点以下では正常なバネとして機能するので、線形領域では確実にクモの安全性が保証されているのである。

牽引糸の破断強度はクモの体重の約 6~10 倍であるので、牽引糸に弾性限界点以上の力が加わっても牽引糸はすぐには切れないはずである。しかし、弾性限界点以上の張力を加えると、伸びはサンプル毎に測定値は大きく変わるなどして、データの再現性は悪く、糸が切れる可能性は十分ある。したがって、牽引糸に弾性限界点以上の力が加わった非線形領域では、クモは牽引糸にぶら下がり続けても 100 %安心するわけにはいかない。つまり、クモには牽引糸がいつ切れるかもしれないという不安が常につきまとう。このようなことから、クモは牽引糸の力学的線形領域の限界点までしか信頼がおけないことを十分に承知していると考えざるを得ない。

要するに、安全性の観点からクモが命を託せるのは線形領域の挙動に対してのみということになる。クモは糸の弾性限界強度を安全性の基準値として採用し、線形領域の限界内に自らの命を委託して行動していると考えるのは、妥当と思われる。このことは、クモは予測が可能な命綱の線形領域に絶対的な信頼をおいていることに他ならないのである¹⁹⁾。

5.3 信頼できる相手は線形関係が成立する！

クモは線形領域を信頼できるようだが、はたして人間の場合はどうであろうか？人間が信頼できる相手となるかどうかは、クモと同じように、刺激(指示)と応答(報告)が線形的か、非線形的かによって、決まることがわかった。

多くの組織において、上司というものは、安心して仕事をまかせられる部下を心に決めている。ところが、そんな部下ほど忙しいもので、ときに、暇な部下に仕事を与えてみると、期日が過ぎてもまともな報告をしてこないことが多い。

上司から見た信頼できる部下とは、上司が指示(刺激)した課題に対して期限内に予想通りに報告(応答)してくれるなど、指示と報告との間に線形関係が成立する人物である(図 11)¹⁹⁾。両者の間に線形が成立すれば、上司にとってはさらなる課題を課してもあらかじめ部下の報告が予測できるので、全体の仕事を遂行しやすい。そのため、線形の成立する部下は上司から見れば信頼に値する。一方、指示とまるっきり違ったデタラメな報告しかできない部下は、上司の指示と部下の報告との間に線形関係は成立しない。このような部下は、当然のことながら上司にとっては信頼がおけないのである。

このような信頼性は様々なケースに当てはめられる。たとえば、数週間先の短期的未来は現在の生活の延長で線形的に話が進むことが多いから、信頼しやすい。ところが、中長期的未来は非線形的に推移するため、予測することは極めて難しい。そのため、中長期的な話は夢の話で終わることが多いために信頼できないのである。

図 11 信頼できる部下と信頼できない部下のパターン比較
上司の指示(刺激)と部下の報告(応答)との間に直線関係が成立する領域に信頼関係が成立する。しかし、上司との間に直線関係の成立しない部下は信頼されない。○：信頼できる部下 ●：信頼の置けない部下

6. おわりに

クモの秘密を探るべく、クモの牽引糸の性質を調べてみたところ、非晶性で柔軟性があり、弾性率が高く、耐熱性にすぐれた素材であることが判ってきた。その特徴ある牽引糸の秘密を覗いてみると、4億年という長い進化の歴史の間に、“安全”と“信頼”の原点が秘められていることがわかってきた。

空中で死と直面しているクモが俊敏に行動できるのは、二本のフィラメントからなる牽引糸を安心して信頼できる最も効率的なシステムを作り上げていることに起因している。また、重要なことは、クモが牽引糸に命を預ける際に、確実に信頼できるのは、あくまでも張力-伸び曲線における線形領域なのである。牽引糸の力学的な非線形領域ではフィラメントが切れる可能性があるため、クモは非線形領域を信頼できないのである。このように、クモの牽引糸の弾性限界点までの線形領域は安全性と信頼性の原点として極めて重要な役割を担っている。4億年の長い進化の歴史の間に、死と直面してきたクモが生き延びてきた原点がわかったように思われる。

自然環境の中で生活している人間は、古くから予測不可能で解釈できない多くの事象に遭遇してきた。それらを少しずつ克服しながら、人類は20世紀に高度な技術を発展させた。しかし、いくらハイテクノロジーといえども、今後多くの困難な問題が次々と待ち受けており、人類が単純にそれらの問題を乗り越えることは極めて難しい。このような状況では、神秘的で歴史のある自然界から様々な情報を得ることが不可欠になってくる。まさに、21世紀の科学技術の展開には、このような自然界からヒントを得ることがますます重要になってくると思われる。

なお、クモの糸は柔軟性があり、弾性率もかなり高く、エネルギーを吸収する効果があるため、防弾チョッキの素材としてふさわしいと考えられている。また、ストッキング

グや医療用の縫合糸への応用も期待されている。クモの遺伝子組み換えによってクモの糸を作ったことが報告され²⁰⁾、それをきっかけに世界的に遺伝子工学によるクモ糸の大量生産への期待が高まっている。ただ、これらの紡糸過程に多くの課題が残っている²¹⁾。一方、生産の経済的な観点から、クモの糸の特徴的な構造と微細構造を持つ人造タンパク質繊維を作る研究が検討され始めた^{22,23)}。

参考文献

- 1) 大崎茂芳, “クモの糸のミステリー” 中公新書, 東京 (2000).
- 2) S. Osaki, *Acta Arachnologica*, **37**, 69 (1989).
- 3) S. Osaki, *Acta Arachnologica*, **38**, 21 (1989).
- 4) S. Osaki and K. Yamamoto, unpublished data.
- 5) S. Osaki, 化学の領域, **36**, 62 (1982).
- 6) S. Osaki, *Nature*, **347**, 132 (1990).
- 7) S. Osaki, “Macromolecular Nanostructured Materials”, KODANSHA Springer, London, p.297 (2004).
- 8) J. M. Gosline, M. W. Denny and M. E. DeMont, *Nature*, **309**, 551 (1984).
- 9) P. M. Cunniff, S. A. Fossey, M. A. Auerbach and J. W. Song, “Silk Polymers”, Amer. Chem. Soc., Washington, D. C., p.234 (1995).
- 10) A. M. Becker, D. V. Mahoney, P. G. Lenhert, R. K. Eby, D. Kapln and W. W. Adams, “Silk Polymers”, American Chemical Society, Washington, D. C., p.185 (1995).
- 11) S. Osaki and R. Ishikawa, *Polym. J.*, **34**, 25 (2002).
- 12) K. Nakamae, T. Nishino, K. Hata and T. Matsumoto, *Kobunshi Ronbunshu*, **42**, 211 (1985).
- 13) S. Osaki, *Nature*, **384**, 419 (1996).
- 14) S. Osaki, *Int. J. Bio.Macro.*, **24**, 283 (1999).
- 15) S. Osaki, *Polym.J.*, **35**, 261 (2003).
- 16) S. Osaki, K. Yamamoto, A. Kajiwara and M. Murata, *Polym. J.*, **36**, 3 (2004).
- 17) S. Osaki, *Polymerwerkstoffe 2002*, Halle, Germany, 617 (2002).
- 18) S. Osaki, *Polym. J.*, **36**, 657 (2004).
- 19) 大崎茂芳, “クモはなぜ糸から落ちないのか”, PHP新書, 東京 (2004).
- 20) C. A. Lazaris, S. Arcidiacono, Y. Huang, J. F. Zhou, F. Duguay, N. Chretien, E. A. Welsh, J. W. Soares and C. N. Karatzas, *Science*, **295**, 472 (2002).
- 21) C. Dicko, J. M. Kenny, D. Knight, F. Vollrath, *Biochem*, **43**, 14080 (2004).
- 22) J. O'Brien, S. Fahnstock, Y. Termonia, K. Gardner, *Adv. Mater.*, **10**, 1185 (1998).
- 23) T. Scheibel, R. Parthasarathy, G. Sawicki, X-M. Lin, H. Jaeger, S. Lindquist, *Natl. Acad. Sci. USA*, **100**, 4527 (2003).