

蜘蛛の糸が色付いて見えるのはなぜか

井上 聡一郎*, 今村 有希**, 佐藤 誠***

Why does the spider silk shine with rainbow colors ?

Soichiro INOUE*, Yuki IMAMURA**, and Makoto SATO***

Rainbow like color observed on spider web may be result of interference of light scattered by pseudo periodic structure of droplets on spider silk string. Assuming that the each droplet on the spider silk act as a light source, color on the web is reproduce by calculation of interference.

Key Words : Rainbow, Spider Silk, Interference

1. はじめに

学校の登下校中、太陽の光が当たって虹色に光る蜘蛛の巣を見ることがたびたびあり、不思議に思っていた。この現象は蜘蛛の巣の向こう側に太陽が位置し、暗い背景に太陽光に照らされた蜘蛛の巣を見るときに観察される。太陽の高度が低い朝夕に観察され易いのはそのためである。図1は校内で撮影したジョロウグモの巣の写真である。虹色と言っても、雨粒による虹とは異なり、彩度の高い色ではなく、ピンクや淡い緑、黄色などで、また、赤から青といった系統的な波長の変化が見られるわけでもなく、場所ごと、糸ごとに異なった色合いが観察される。以下、この現象を蜘蛛糸虹と呼ぶことにする。類似の現象と思われるものに、車のフロントガラスについての細かな傷が色付いて見える現象がある。色合いが蜘蛛糸虹と似ており、太陽光線が正面から当たっているときにしか観察されない点も同じである。蜘蛛糸虹は空間に存在する線状の物体、ガラスの傷はガラスの表面についた線状の構造である。虹色を呈する、何らかの共通した原因があると考えられる。

太陽光のような連続スペクトルが色に分かれて観察される現象として、プリズムや回折格子による分光がまず連想される。しかし、プリズムや回折格子の場合は、観察方向によって色が変わる、あるいは光が色に分かれる方向が狭い範囲に限定されるのに対して、蜘蛛糸虹は比較的広い角度範囲で色が見え、角度を変えても急激に色が変わるようには見えない。したがって、蜘蛛の糸の屈折率の波長分散による屈折、すなわちプリズム効果による分光とは考えにくく、また、色の角度依存性が低いことと色の周期性が見られないことから、蜘蛛の糸が細いことに由来する干渉でもないことが分かる。それでは

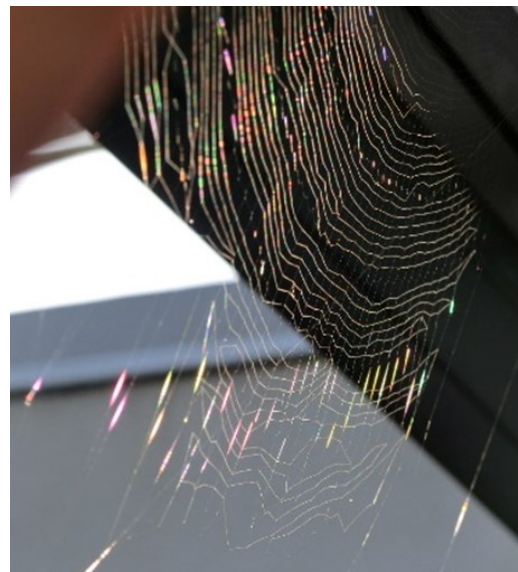


Fig.1 Colored web of a joro spider.

どのような仕組みで蜘蛛の糸が虹色に輝くのであろうか。ガラスの傷の虹色もあわせ、原因を確認したく、調べた。

なお、この報告は、2017年度の3年生チャレンジゼミナールの成果に基づく。

2. 蜘蛛糸の構造と光の散乱

蜘蛛の巣をスライド枠に採集し、顕微鏡で観察したところ、糸の長手方向にほぼ等間隔に数珠状に粒が並んでいることが分かった。図2にジョロウグモ



Fig.2 Pseudo periodic structure on a web string of a jiro spider.

原稿受付 令和元年9月19日

*機械工学科5年

**機械工学科5年

***総合理工学科 先進科学系

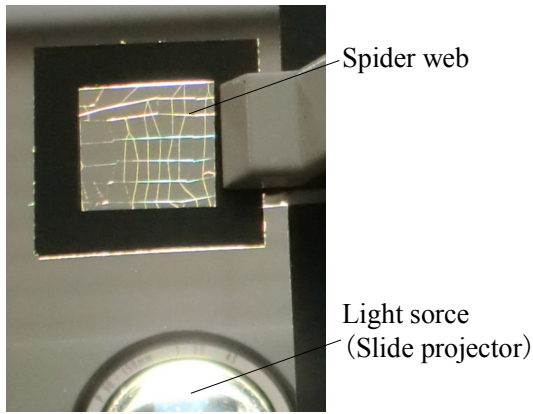


Fig.3 Color of spider web observed in laboratory.

(学名：*Nephila clavata*) の糸の顕微鏡写真を示す。この粒は粘球と呼ばれる粘着性の液滴であると思われる。約0.1mmの周期的な構造が観察される。しかし、光の波長に比べて2桁大きなサイズであるため、この周期構造が回折格子として機能しているとはすぐには了解し難い。別の種類の蜘蛛の糸では間隔が1桁小さいもの(10～20 μm)も観察されたが、そのような糸よりは、ジョロウグモの糸のように間隔の広い数珠構造を持つ糸の方が色が見えやすい。

実験室内で観察するため、プロジェクタの光を、採取した蜘蛛の糸に照射して観察した。図3に室内で観察される蜘蛛糸虹を示す。

図3では、水平方向の糸に色が見え、縦方向の糸は白く見えるだけである。観察方向を糸の長手方向を軸に回転(図3では上下方向)させても色合いが大きく変化することはない。焦点をずらして写真を撮ると、糸に垂直な方向に色が広がって撮影される。このことから糸の長手方向に見られる周期的な構造による一次元の干渉がこの分光現象の原因であると考えるのが妥当であろう。

レーザー光を蜘蛛の糸に照射して散乱される方向と強さを確認し、これをもとに光の干渉計算を行い蜘蛛の糸が虹色に見える仕組みについて考察を行うことにした。

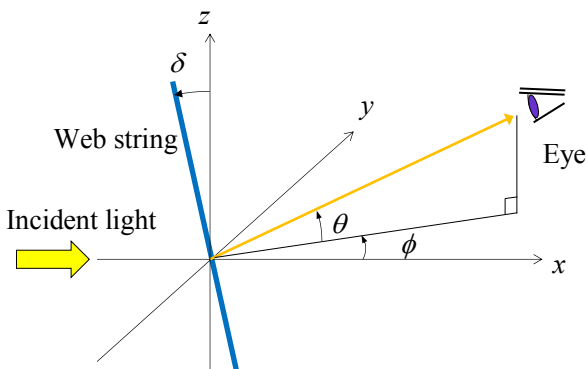


Fig.4 Geometric notation of angles.

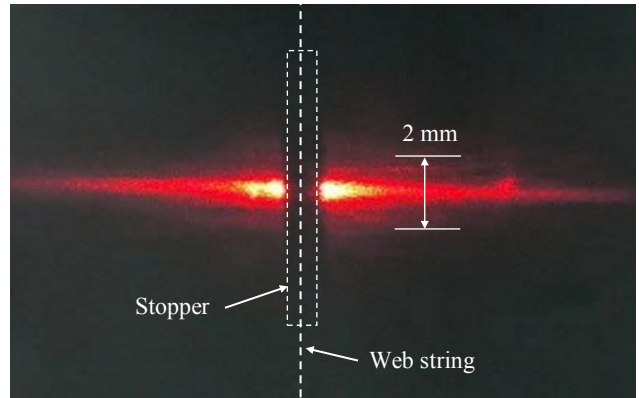


Fig.5 Scattered laser beam by a web string.

3. レーザー光の散乱

光の散乱や干渉計算を行うに先立ち、入射光線や蜘蛛糸の方向、観察方向などの位置関係を図4に示すように定める。入射光線は x 軸に平行で正の方向に照射されるとする。蜘蛛糸は $x-z$ 平面内にあり、 z 軸からの角度のずれを δ とする。観察方向は $x-y$ 平面からの仰角を θ 、 $x-y$ 平面内での偏角を ϕ とする。一次元構造による干渉現象であれば、 δ が小さい条件では、観察方向の ϕ 方向依存性は小さいことが予想される。

蜘蛛の糸に He-Ne レーザーの光 (632.8 nm) を照射し、光の散乱の様子を調べた。蜘蛛の糸から 27 cm 離れた位置にすりガラスのスクリーンを設置し、裏面から散乱光のパターンを撮影した画像が図5である。直接のレーザー光は強すぎて散乱光の観察を妨げるので、10枚程度のクッターナイフの刃を重ねて光の吸収体を作り遮蔽した。この観察ではレーザー光は蜘蛛糸に垂直に入射している ($\delta = 0$)。散乱光は糸に垂直方向 (ϕ 方向) に広く分布するが、糸に沿った方向 (θ 方向) には狭い範囲に限定されることが分かる。 θ 方向の散乱光の広がり角度にして、約 0.4° である。

図5の散乱光の弱い領域を注意して観察すると、横方向 (ϕ 方向) に伸びる明暗の筋が確認できる。このことから、蜘蛛糸の長手方向の構造による干渉が関係していることが了解される。

4. 干渉計算

蜘蛛糸に見られる数珠状の疑似周期的構造による干渉で、蜘蛛糸に見られる虹色が再現できるかを、計算で確かめる。干渉光の強度計算は、過剰虹の解析に用いた幾何光学に位相差を考慮して重ね合わせを行う方法を利用した¹⁾。

計算に用いたモデルを図6に示す。蜘蛛糸上に存在する液滴状の粒をそれぞれ新たな光源として仮定する。粒の位置を実際の蜘蛛糸の顕微鏡写真から読み取り、蜘蛛糸上の座標とする。計算に関わる蜘蛛

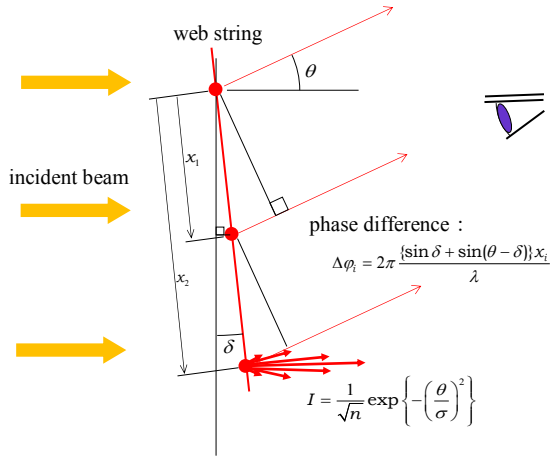


Fig.6 Model for interference calculation.

糸の範囲は、視力 1.0 の角度分解能 $(1/60)^\circ$ 内とする。蜘蛛糸から 1 m 離れて観察する場合は、約 0.3 mm の範囲からの光の干渉の結果としてその個所の色が決定される。距離が 3 m の場合は、糸上の約 1 mm の範囲が関わることになり、ジョロウグモの糸では 10 個程度の粒からの光の干渉となる。接近すればするほど関わる粒の数が減るので干渉パターンは角度 θ 依存性は緩やかになると予想される。逆に離れて観察する場合、干渉パターンは角度 θ に対する変化が激しくなり、平均化されて観察される結果、色が明瞭でなくなるのではないかと考えられる。

図 6 に示すように、蜘蛛糸上の i 番目の粒の位置を特定の粒 (0 番目の粒子) の位置を基準として x_i とすると、角度 θ に散乱される光線の位相差 $\Delta\phi_i$ は、次式に表される。

$$\Delta\phi_i = 2\pi \frac{\{\sin \delta + \sin(\theta - \delta)\}x_i}{\lambda}$$

ここで、 λ は光線の波長である。この位相差 $\Delta\phi_i$ は偏角 ϕ には依存しない。したがって、この計算モデルは、観察される色合いが偏角 ϕ に敏感ではないことを説明する。

各粒からの散乱光の振幅分布は、ガウス分布と仮定して、レーザー光の角度 θ 方向の散乱広がりである 0.4° の半分の値を分散 $\sigma = 0.2^\circ$ としして次式を用いた。

$$I = \frac{1}{\sqrt{n}} \exp\left\{-\left(\frac{\theta}{\sigma}\right)^2\right\}$$

ここで n は光強度は観察に関わる粒の数である。散乱光の振幅 I は偏角 ϕ の関数でもあるがここでは考慮しない。また、正面 $\theta = 0$ での強度が 1 になるように振幅を規格化した。入射光に対する蜘蛛糸の傾きは $\delta = 0$ 、偏角は $\phi = 0$ の条件で、十分遠方で観

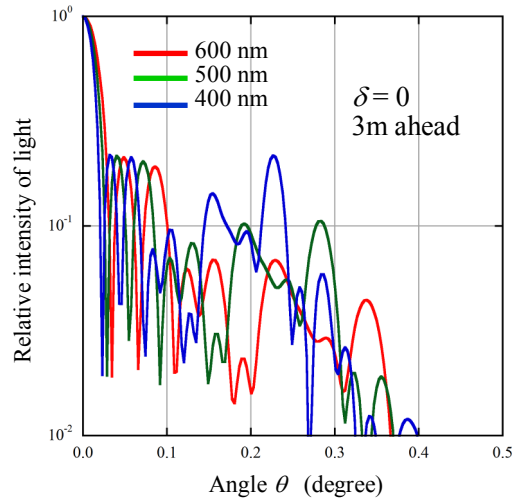
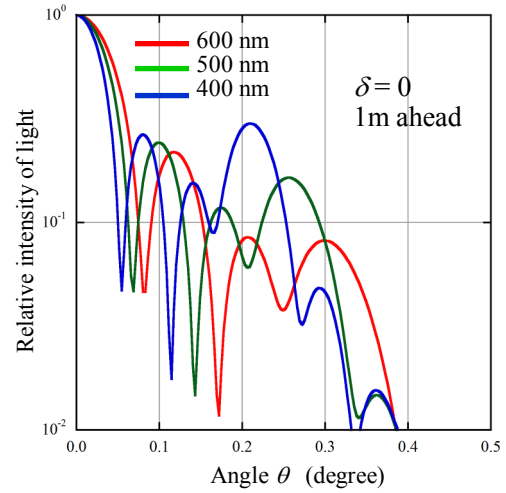


Fig.7 Calculated relative intensities of light for $\lambda = 400$ nm, 500 nm and 600 nm. Upper result is for distance of 1 m and lower is for 3 m.

察している (フラウンホーファー条件) として計算した。観察角度 θ 方向に各粒から散乱される光線を位相差を考慮して重ね合わせ、振幅の自乗から光強度を算出し、 θ 依存性を求めた。

偏角 $\phi = 0$ の条件で 3 つの波長、400 nm、500 nm、600 nm について、観察方向 θ の関数として相対的な散乱強度を算出した結果を図 7 に示す。横軸が θ で観察方向に対応する。

上のグラフは距離 1 m で観察する場合、下のグラフは距離 3 m で観察する場合である。横軸 θ は観察方向を表すが、蜘蛛糸上の位置と見做すこともできる。ただし、実際には別の領域では散乱源となる粒の並びが異なるので、干渉のパターンは異なる。

人の目のダイナミックレンジは広く、光強度の感じ方は対数的なので、実際の見え方に近い表示にするため縦軸は相対強度を対数で表示した。3 つの波長、400 nm、500 nm、600 nm について、それぞれ青、緑、赤の線でグラフ化した。観察角度により特定の波長の光が相対的に強く見えることがわかる。

太陽の視直径が 0.5° であることから、入射光に

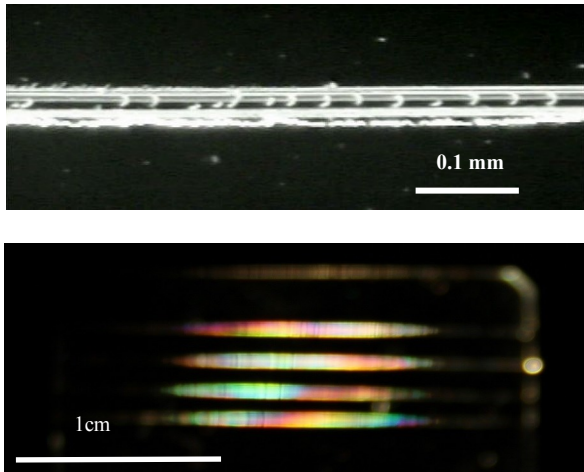


Fig. 8 Rainbow like color observed in scratches on a glass plate. Upeer is micro photograph of scratch. Lower picture is taken with out of focus condition to clear color.

は同程度の角度広がりが存在する。蜘蛛糸による散乱光の θ 方向の広がりが 0.4° であることと、入射太陽光の広がりから、蜘蛛糸虹の見える範囲は 0.5° 程度と推測される。実際、蜘蛛糸虹として、散乱光が観察される見かけの角度は一定である。

接近して観察すると散乱光は糸のごく一部に限定されて観察される。同時に色合いが明瞭になる（彩度が上がる）傾向がある。場合によっては、糸の長手方向に色の変化が観察される。これらの特性は計算結果から説明できる。

距離を取り、糸の一区画がこの角度範囲に収まると、色が平均化され、糸全体が同じ色に見えるものと思われる。図7下のグラフでは観察方向 θ に対して小刻みに強度が変化するので、入射光の角度広がり を考慮すると色が平均化されるものと思われる。離れると彩度の低い色合いが観察されることと整合する。

この計算モデルでは散乱光の最大強度の方向を蜘蛛糸の方向とは関係なく、 $\theta = 0$ の角度で強度を最大とした。この仮定は、妥当ではないかもしれない。糸の表面での反射方向が散乱強度最大なのかもしれない。いずれにしても以上のような散乱強度最大の観察方向で位相差が発生しない条件では白色として観察されることになる。しかし、 ϕ が大きいとき実際には最大強度で色付いて見える。このことは説明できない。もしかすると $\theta = \delta$ で最大とするべきかもしれない。この条件であれば、散乱強度最大の方向で位相差が発生するので色付いて見えることは説明できる。

計算では、散乱角度が低いほど強度が大きいとしているので、短波長である青色が長波長の赤や緑に対して強く表れることになる。しかし、実際にはピンクや薄緑が観察されることが多く、鮮やかな青色は観察されることはないように思う。色が平均化さ

れる場合でも、短波長側の色が優性になることが計算からは推測されるが、実際には、淡いピンクや薄緑が観察される。散乱光強度の角度依存性は、波長によって異なるのかもしれない。

なお、干渉計算は、十進BASIC²⁾ を用いてプログラムを組み、グラフ出力した。

5. ガラスの傷

プレパラートガラスの表面にダイヤモンドカッターで軽く傷をつけ、スライドプロジェクターの光線を照射し、低い偏角 ϕ で観察すると蜘蛛の糸とよく似た虹色を観察することができる。

図8上は、傷の顕微鏡写真である。欠き傷の中に、疑似周期的な構造を確認できる。蜘蛛糸の周期構造と比べると規則性が低い。これを1 m程度の距離から撮影した写真が、図8下である。広い角度範囲の散乱光を集光して色が平均化されることを防ぐため絞りは小さくして露光時間を長く設定した。さらに、色を明瞭に撮影するため、焦点をずらして撮影した。色が傷の方向に垂直に広がって撮影されている。これは蜘蛛糸虹と同じく、長手方向の構造に起因した現象であることを意味する。おそらく、蜘蛛糸より場所ごとの構造が不規則なため、傷の長手方向に色の変化が観察されるのだろう。蜘蛛糸は周期構造が比較的規則的で均質なためひとつの糸の中での色の変化が発生しにくいのではないかとと思われる。

6. まとめ

蜘蛛の糸の観察と光の散乱実験、計算機による干渉計算の結果から、蜘蛛の糸が虹色に輝くのは、糸に並んだ粒がほぼ等間隔に並び、各粒で太陽光がごく限られた狭い範囲に散乱されることが主要な原因で、干渉光に波長による強度の大小が発生し、そのために薄く色づいて見えると推測される。

しかし、計算では青が優性になると予想されるが実際にはピンクや緑が優性である色合いや散乱強度最大の観察方向でも色付いて見えることなどいくつか説明できないことがある。

今後、蜘蛛糸によるレーザー光の散乱の δ 依存性を詳細に調べ、干渉計算のモデルを修正し、実際の現象を正しく再現できるようにしたい。

参考文献

- 1) 佐藤, 「位相差を加えた光線近似による虹の計算」, 津山高専紀要第52号, p. 57-62, 2011.
- 2) 「十進BASICのホームページ」, <http://hp.vector.co.jp/authors/VA008683/>, (参照2019. 12. 20).