

東北学院大学教養学部論集
第172号（平成27年12月）

【研究ノート】

熱作用によるナイロンロープの切断機構について

高 橋 光 一

【研究ノート】

熱作用によるナイロンロープの切断機構について

高橋 光 一*

ナイロンロープにストレスを生む外的影響下でのナイロンロープ切断の機構を、NITEにおけるナイロンロープ切断実験 (NITE 2014) の実験状況を踏まえ、熱作用に焦点を当てて推測する。

1955年1月に北アルプスで起きた墜死事故が発端となった「ナイロンロープが自然の岩角で切断するのかしないのか」という問題は既に決着されたということになっている。しかし、この問題を解明する努力の中で明示された切断時の特異現象に関連する二つの問題—本稿では石岡の第1問題 (石岡・笠井 1972) および第2問題 (石岡 1990) と呼ぶことにする—は、これまで意識的に取り上げられることが無く、したがって系統的に総括されることも無かったようにみえる。本稿では、これらの問題に対する答を得るための試論を提示する。

切断への外的影響としては、力学的のものと熱的のものを考える。力学的に生成されるストレスは、引っ張り応力と圧力である。熱的影響は、ロープ切断のために用意された物体 (以後、切断台) の角部分 (以後、切断角) とロープとの相互作用で発生する熱のナイロン繊維への作用である。力学的ストレスが熱にどの程度転化するかを知ることがこの考察の最終的な目標である。

引っ張り応力は、重力と合成されて錘に作用し、錘の落下運動を決定する最も重要な要素である。議論を簡単にするために、引っ張り応力に対しては弾性体近似を用いる。そのほか、切断台との間の摩擦力とロープ内のエネルギー散逸も錘の運動に影響を与えるが、その割合は小さいとして無視する。まず、錘が自由落下を終えた直後から、切断角との摩擦で発生する熱に着目する。第二に、切断角がロープに強く圧着したときに作用する圧力とナイロンの破壊応力とを比較する。第三に、上記の圧力によりロープが塑性変形するときなされる仕事の熱への変化量を見積もり、ナイロンの熱的物性と比較する。

ナイロンロープ切断においては第三の効果が大きいこと、1956年に確認されたナイロンロープ切断の特異現象に関わる問題—石岡の第1問題—がこの効果によって解決できる可能性があることが示される。最後に、1975年以降に行われた通産省における研究で確認された新たな特異現象に関わる問題—石岡の第2問題—は、非ニュートン流体に特有の現象によるものであることを示唆する。

Keywords : Nylon Rope Rupture, Ishioka's First Problem, Ishioka's Second Problem, Heat, Melting, Non-Newtonian Fluid

*東北学院大学名誉教授

I. 問題と取り組みの経緯および石岡の第1問題

ロープは外力の作用によって切断することがある。この当然の事実が特に日本の社会で注目されるようになったのは、1955年に北アルプスで起きたある遭難事故からであろう。この年の1月2日、前穂高岳東壁を登攀中の三人のグループの一人が滑落時のロープの切断によって墜死した。この時に彼等が使用していたのが当時商品化されて間もないナイロンロープであって、従来の麻ロープに比べ数倍の強度を持つとされていたものであった。その後になされたナイロンロープの強度に関する調査実験は、表向きでは製造者側と使用者側で相反する結果をもたらして論争の原因となり¹、さらに、井上靖による小説『氷壁』（1956～57）とその映画化がこの問題－ナイロンザイル事件－についての社会的な関心を引き起こすことになったのはよく知られている。

「ナイロンザイル事件」は、登攀用ロープがどのような物理的負荷の下で切断するのかを解明し、後に日本社会に製造物責任の概念を定着させることになる上で重要なきっかけを提供した。その「事件」を解明する中で、最も重要な事実とデータを提供したのが石岡繁雄とその共同者の研究であった。時を同じくして、篠田らも実験調査を行っている（Shinoda et al. 1956。以下SKK 1956）が、「経験・論理・公開」という科学の3原則の観点からは、石岡・笠井のもの（石岡・笠井 1972）が勝るようである。その理由は後に述べる。

「ナイロンザイル事件」直後、当事者達が直面することになったのは主に次の4つの問題である：

- (1) 登攀用ナイロンロープ＝ナイロンザイルの一般的性能はどのようなものか。
- (2) 事故が起きた登攀中に使用されたナイロンロープに欠陥はあったか。
- (3) 事故が起きた登攀で、ナイロンロープの操作に誤りはなかったか。
- (4) ナイロンロープの適切な操作法はどのようなべきか。安全を確保する方法はあるか。

(2)～(4)は、製造と登攀に詳しい知識を持つ人たちによって取り組まれるべき技術的問題であり、本稿での議論の対象にはしない。本稿では、(1)に関連する問題だけを検討する。

¹ 一連の実験が、製造者側（‘蒲郡実験’と通称されることになる公開実験を行った篠田（大阪大学工学部）とロープ製造企業）と使用者側（遭難死した登山者の親族である石岡とその共同者）という、利益が相反する当事者によってそれぞれ独立に行われたというのが、この出来事の特異的な面である。さらに、第三者の職業研究者による冷静な調査検討よりもマスメディアの報道が先行して社会的関心の誘導がなされたことも、特異性を際立たせることに寄与している。なお、実験結果が一見相反したのは、鍵となる実験条件（切断角の面取り）の秘匿という行為が製造者側にあったためであることが明らかになっている。この間の経緯は、例えば石岡・相田（2004）の総括報告に詳しい。論争は既に決着しているが、本稿では、歴史的経緯と本稿の目的を明確にするために、必要に応じて両者の論述に言及する。

もちろん、上記の問題のいずれも、切断の物理的機構の本質的理解に基づいて考察されることがより望ましい。

石岡らが明らかにした事実の一つに‘三つ撚り（または、三つ打ち）ロープの縦傷’がある（岩稜会 1956；石岡・笠井 1972）。三つ撚りロープは、三本のストランド-小綱-を螺旋状に撚り合わせて作られるロープである。ストランドは数本から数十本のヤーン-繊維束-から、また各ヤーン数百本から千本程度のファイバー-ナイロン繊維-からなる。石岡が調査したロープでは、ストランドは、内側の2本のヤーンが10本のヤーンで取り巻かれるような構造をしていた。

捻れない三つ撚りナイロンロープでは、横から見たときに、同一のストランドが二つおきに現れる。このときの、現れた同一のストランド上の手前の2点をストランドに沿って結ぶ線の長さで最短のものをLピッチと呼ぶことにすると、石岡らが解明した切断の機構は以下の通りである。三つ撚りロープを岩角のような硬い角-切断角-に圧着させながらロープ長方向に移動させると、表面の擦過傷は1Lピッチに相当する距離 a をおいて各ストランドに繰り返し作られる。圧着力が強いとき、結果的に、ストランドの外周囲にあるヤーンで切断角に接触しているもの全てが長さ a に断片化される。1Lピッチ内で断片化されたヤーンの数十分多いとき、ストランド従ってロープは荷重に対抗しうる張力を発生させる性能を失う。切断と同時に、1Lピッチ長の繊維断片の束が作られる。

また、石岡らは、ヤーンが切断する直接の原因は剪断力と繊維間摩擦による発熱溶融で、おそらく後者の役割が大きいだろうと推測した（岩稜会 1956）。この点については、実験調査を製造者側の立場で行った篠田ら（SKK 1956）も同様の結論に達している。また彼らは、ロープの長さ方向の運動で作用する剪断力の作用は認めず、水平移動するロープと切断角の間に作用する摩擦が重要であろうと推測した。

ロープ切断実験に関する研究報告の中で歴史的に重要かつ筆者が入手できたものは、石岡ら（1956；1972）によるものと篠田ら（SKK 1956）によるものの二つがある。共に、錘を付けたロープの一端を固定し他端に錘を付けて自由落下させ、切断角で切断されるかどうかを、落下の高さやロープの太さ等を変えながら見るという実験を行っている。ロープの切断が起きる部分での力の作用状況を図1に示す。

石岡と篠田らの実験では、主要な結論は相反している。すなわち、前者は、切断角が‘鋭い’ときロープは長さ方向の運動で切断するという結果を得たが、後者では、製造者工場がある愛知県蒲郡で行われた実験に基づき、長さ方向の運動はロープが運動エネルギーを吸収する結果切断に至らず、水平方向の運動が切断を引き起こし、同時に切り口に熱を発生させる、としている。

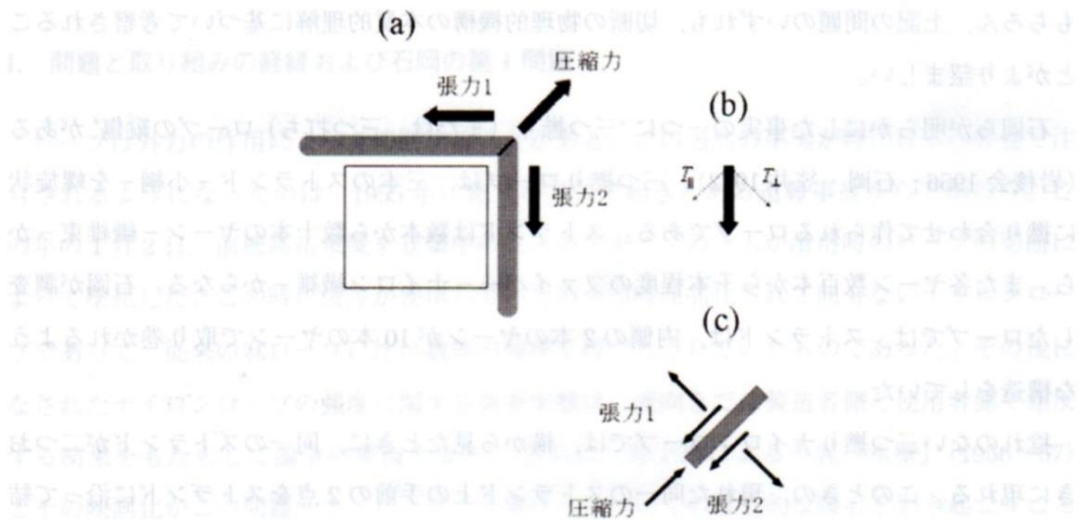


図 1. (a) 切断角で曲げられたロープには、屈曲箇所には 3 種の力が作用している。(b) 張力 2 は、屈曲箇所では、圧縮力に平行な成分 T_1 と垂直な成分 T_2 に分解できる。張力 1 も同様である。(c) 屈曲箇所 - (a) でロープの黒く塗った部分 - の両側の面に、圧縮力と平行逆向きに T_1 が作用している。この圧縮力と T_1 の組がここでの剪断力を構成している。

両者とも、ナイロンロープの物性を理解する上で必要な項目について、多くの数値データを報告している。しかし、SKK 1956 にはいささかの問題が認められるようである。理由は次の通りである。SKK 1956 は

1. 最終結論の根拠を蒲郡での実験においている。切断角の丸みの程度(通常 R 値で表す。1R は曲率半径が 1 mm の角を意味する。)が結果に大きく影響するのであるが、それについてのデータの提示が無いので彼らの結論の評価ができない。
2. 直径 11 mm のナイロンロープは直径 24 mm の麻ロープの 4 倍強いと結論付けている。他方、同一の高さからの落下試験で、11 mm ナイロンロープは破断するが、24 mm 麻ロープは破断しないという結果を得ている (SKK 1956, Fig. 4)。この食い違いに対する説明が無い。
3. 上記 2 の結論を導くに際して描いたと思われる、12 mm 麻ロープの安全-危険境界線の位置に必然性が無く、むしろ恣意的であるように見える (SKK 1956, Fig. 4)。破断点 (2 点しか与えられていない) を単純に結べば、描かれた境界線よりも傾きの大きい線が得られる。
4. ロープが切断角の上で水平に動く運動が熱を発生させロープを溶かすと述べている。それを支持するものとして、ある登攀事故で切断したロープの切断面は溶けているという事実、8 mm ナイロンロープを 40 kg の負荷をかけながら鋭い岩角で横に滑らせると切断するという実験、を挙げている。しかし、初めの事例では水平移動の程度が

その有無を含めて不明で、後の事例では熱と熔融の因果関係の検証について述べられていない。共に主張を支持するための例証となっていない。

このように、SKK 1956 には、実験条件とデータの提示、処理、解釈、論理展開について学術的に難点があるように見える²。用いられたすべてのデータや論理が無意味というわけではない（むしろ、石岡・笠井 1972 の仕事と比較すると注目すべき点もある。後の記述を参照のこと。）が、本稿では、研究の信頼性の観点から、石岡らが得た諸結論を念頭に置いて考察を進める。

上に略述したようなナイロンロープ切断の機構に関する仮説は、20 年以上に渡って第三者による立証や反証 - 科学の第 4 の原則は「検証」である - はなされないままであったようである。ナイロンロープの性能の問題が、実用性・安全性・経済性の観点から企業内で、あるいは企業との結びつきの中で取り上げられる傾向が強かったことの表れであるとも推測される。充実した研究環境が、そのような場合に得られる機会が増えるということもあるだろう。

2014 年に独立行政法人製品評価技術基盤機構（NITE）は、加重落下によるナイロンロープ切断実験を実施し、その内容を報告している（NITE 2014）。実験は、1955 年の事故品（三つ撚りロープ）と現在市販されているナイロンロープ（編み被覆ロープ）について 1. 構造、2. 材質、3. 融点、4. 動的粘弾性、5. 落下切断試験、6. 落下切断後の破壊形態、の比較を行ったものである。明らかになった主なものは、(a) 事故ロープの材質はナイロン 6 であるが、現在市販のものよりは発熱しやすく弾性性能が劣る、(b) 切断では、剪断破壊（すべりによる小さな塑性変形が累積する。図 2 を参照のこと）・延性破壊（大きい塑性変形を伴う）・脆性破壊（塑性変形が無いまま破壊する）が同時的に進行する、ということである。



図 2. 剪断破壊の概念図。左端の、規則的に並んだ分子配列が、右に行くに従って位置の小さなずれが累積していく様子が描かれている。ずれが大きくなって分子間結合が切れると、点線で示した剪断面に沿って破壊が起きる。剪断面の両側に向きが反対の力が面に平行に作用することが、剪断破壊が起きるための条件である。

² 論文を含む著述は通常読者の範囲を想定してなされる。SKK1956 は工学者向けに書かれたが、本稿では、公表された入手可能なデータをもとに諸事を理学の面から検討する。いずれにせよ、論理に整合性が求められるのは当然のことである。

(b) のような複数の破壊形態があるとして、それが起きる順序や条件についての実態がすべて明らかになっているわけではない。例をあげると、錘を付けた三つ撚りナイロンロープを錘の落下時に鋭い切断角で切断する実験では、落下距離が(0.5 m~2 mの範囲で)長くなると衝撃力が小さくなるという興味深い事実がある(石岡・笠井 1972)。石岡らの極めて重要な発見である。しかし、ロープ切断における縦傷の役割について既に知っていたにもかかわらず、石岡・笠井は、切断原因を縦傷と関連づけることをせず、この事実の由来を不明とするという態度をとっている。そのことについては、少なくとも二つの理由が考えられる。一つは、縦傷の広がり(とくに深さと横巾)がロープと切断角の相対速度とどのような関係にあるかが不明であったことである。極端な場合として、縦傷の広がりが相対速度と無関係であるとする、傷ついたロープの強度は1Lピッチ相当のヤーンまたは繊維の破断でほぼ決定されてしまうはずで、上記の事実は全くの謎となる。実際は、速度と破壊の範囲の間に何らかの関係があるのだろうが、その詳細は調査できなかった。根気のいる顕微鏡検査が必要だが、これが障害になったと思われる。二つ目に、発熱の状況が知られていなかったことがある。経験的にも論理的にも、熱が一つの鍵となることは容易に想像されるのであるが、石岡・笠井の実験環境では定量的な測定が難しく、石岡らは即断を避けたと思われる。

ただし、篠田ら(SKK 1956)はすでに、発熱に関する初期段階の調査は行っていた。その中で、11 mm ナイロンロープで高さの違う落下実験をしたとき、切断に至った高い位置からの落下の方が温度上昇(4°C程度)が小さいという報告をしている(SKK 1956 Table II)³。これは、まさに上記の石岡・笠井の結果と対応している。しかし、篠田らはこの結果について何の見解も述べていない。

破壊の一般論に依れば、この現象は実は当然期待されるべきものである。図3に示すように、外力が作用したとき、物体内に、変形に抵抗する応力が生じる。外力が小さいうちは応力はHookeの法則に従う。外力が除かれれば変形は元に戻る(弾性領域)。外力が増えると、変形が線形的に進むが応力が0でも変形が元に戻らなくなる(弾性-塑性領域)。さらに外力が増すと、応力が0のときの変形が著しくなる。応力は内部構造の変化のために減少することもある(塑性領域)。ある外力値で応力は最大に達し、その後応力は減少し物体はやがて破壊に至る(破壊点)。ナイロンロープの切断実験では、'衝撃力'は応力に対応すると考えられるので、最大応力値を越えて破壊点に至るまでに衝撃力は減少することが期待される。例えば、Benenson等(2006)の第5章を参照されたい。

問題は、ナイロンロープの切断において、どのような機構が塑性変形と破壊をもたらすか

³ 測定方法と測定箇所をSKK1956から正確に読みとることはできない。

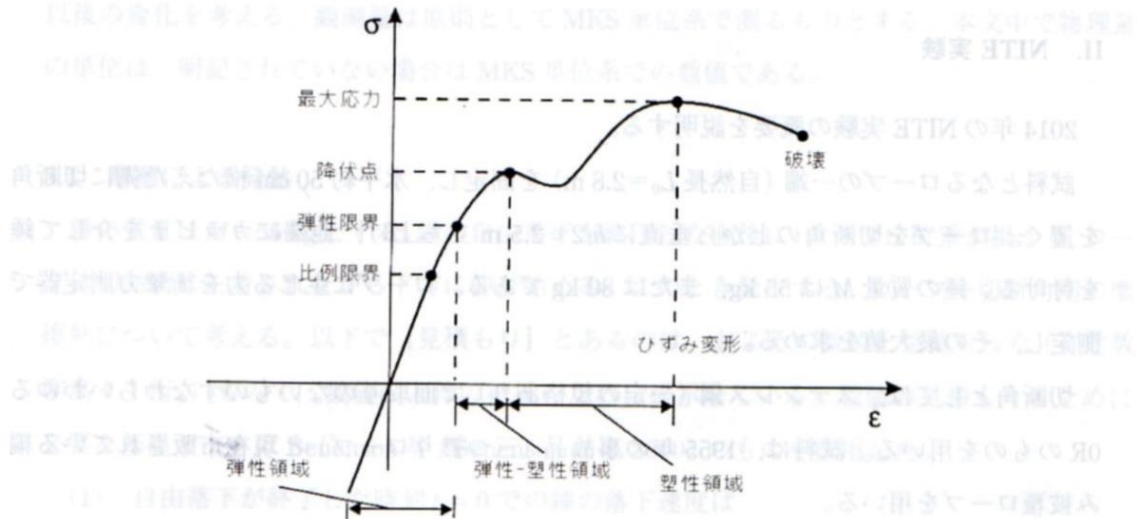


図3. 応力とひずみの間の一般的関係 (Benenson 等 2006 の図を描き直した。)

ということである。著者の知る限り、この問題は提起から今日に至るまで未だ答を提示されぬままに残されている。ここで、これを石岡の第1問題と呼ぶことにする。すなわち

石岡の第1問題：いわゆる 0R 切断角によるナイロンロープ切断時の衝撃力は、錘の落下距離が増えると小さくなる。そのメカニズムはどのようなものか⁴。

既に述べたように、石岡ら (岩稜会 1956) と篠田ら (SKK 1956) は、共に破壊に於ける発熱の役割を指摘しているが、NITE 実験において上記3種の破壊形式が発熱とどのように関係しているかという問題は依然未解明である⁵。特に、剪断破壊とされている破壊形状では水玉状の固まりが切断された繊維の先端に作られるが、これは鋏による切断のような緩やかな剪断破壊では見られない、落下衝撃破壊に特徴的な現象のようである。緩やかな破壊と衝撃破壊の違いは、後者が熱の発生と蓄積を伴うということであり、水玉状の固まりの形成がその結果である可能性が高い。以下で、この熱発生に注意を払いつつ、NITE 実験その他の状況に於けるナイロンロープ切断の機構を再考し、石岡の第1問題に答を与えることを試みる。石岡の第2問題については第IV節で述べる。

⁴ 切断角の R 値の重要性を意識した実験は石岡・笠井 (1972) によって行われた。そこでは、直角の切断角の R 値として 0R (曲率半径 0 mm), 1R (同 1 mm), 5R (同 5 mm) を用いた場合のデータが公表されている。ただし、幾何学的直角-厳密な 0R-は現実にはあり得ないが、どの程度の 0R なのかの記述はない。現在では、通産省安全基準に従って所定の方法で作成された角を指す。もちろん NITE2014 ではこの基準に従って実験を行っている (<http://www.sg-mark.org/KIJUN/S0026-05.pdf> を参照)。なお、石岡自身は、1972 年以降この第1問題には言及していないようである。理由は分からない。

⁵ NITE 実験でも温度の測定はしていない。ただ、切断ロープは‘素手で持てないくらい熱くなる’ (NITE 菊池久氏からの私信による)。

II. NITE 実験

2014年のNITE実験の概要を説明する。

試料となるロープの一端（自然長 $L_0=2.8$ m）を固定し、水平約50 cm横たえた先に切断角を置く。ロープを切断角の上から垂直に $h/2\equiv 2.5$ m立ち上げ、他端にカラビナを介して錘を付ける。錘の質量 M は55 kg, または80 kgである。ロープに生じる力を衝撃力測定器で測定し、その最大値を求める。

切断角としては、ステンレス鋼（一定の規格あり）で面取りのないものすなわちいわゆるORのものを用いる。試料は、1955年の事故品（三つ撚りロープ）と現在市販されている編み被覆ロープを用いる。

前節に記した項目の調査の他に高速度撮影を行う。詳細は石岡（2014）参照されたい。

結果として、繊維の切断端に溶融痕が形成されたものが認められた。その他、延性破壊、脆性破壊と見られる形状の破壊があった。NITEは、第一のものを剪断破壊としている（NITE 2014）。

III. 落下・切断過程の物理的詳細

錘が自由落下を初めてから完全に切断するまでの間に、ロープの表面と内部は次に挙げたさまざまな状態を経過する。

- (a) 自由落下…錘の自由落下の間、ロープに応力が殆ど生じない状態
 - (b) 弾性伸張…落下距離がロープの自然長=切断角から錘までの長さの2倍に達したときからロープがHookeの法則に従って伸張している状態
 - (c) 塑性伸張…ロープの弾性係数が減少し、Hookeの法則が成り立たないまま伸張している、破壊以前の状態
 - (d) 破壊
 - (d1) 表面（外皮）擦過破壊…ロープ表面（外皮）の一部が切断角との摩擦で破れる状態
 - (d2) 剪断破壊…切断角からのロープ断面半径方向の力によっておきる変形と切断
 - (d3) 塑性破壊
 - (d31) 延性破壊…ナイロン分子構造の、長さ方向の切断
 - (d32) 脆性破壊…ナイロン分子間の横結合（または不純物分子による架橋）の切断
- 自由落下中は、ロープには殆どストレスは生じない。以下では、弾性伸張が始まってから

以後の変化を考える。観測量は原則として MKS 単位系で測るものとする。本文中で物理量の単位は、明記されていない場合は MKS 単位系での数値である。

3.1 摩擦による発熱

錘の質量は $M=55 \text{ kg}$ とする。錘の自由落下が終了した直後に、ロープに荷重が掛かり、ロープは切断角に圧着されながら下方に伸び始める。このとき発生する、ロープ一切断角間の摩擦熱について考える。以下で【見積もり】とあるのは、およその数値を見積もった（有効数字々々 1 桁。）もので、数値の大体の把握のために提示している。数値の見積もりのために必要な基礎データは Benenson 等 (Benenson et al. 2000) のものを採用した。

- (1) 自由落下が終了した時刻 $t=0$ での錘の落下速度は

$$v_0 = \sqrt{2gh_0}$$

【見積もり】 $\sqrt{2gh_0} \sim \sqrt{2 \cdot 9.8 \cdot 5} \sim 10 \text{ (m s}^{-1}\text{)}$

g は重力加速度、 $h_0=5 \text{ m}$ は自由落下距離である。

- (2) 時刻 $t>0$ におけるロープの長さを $L(t)$ とすると、フックの法則によれば

$$\frac{L(t)}{L_0} - 1 \equiv \delta(t) = \frac{1}{E} \frac{F_s(t)}{S}$$

である。ここで E は Young 率、 S はロープの断面積、 $F_s(t)$ は時刻 t でのロープの張力である。ロープの半径は 4 mm とする。

【見積もり】 ロープが 2 割伸びたときの張力: $\delta ES \sim 0.2 \cdot 1000 \cdot 10^6 \cdot 3.1 \cdot (4 \cdot 10^{-3})^2 = 10^4 \text{ (N)}$

- (3) 錘の運動方程式 (錘の速度を v , 鉛直座標は下向きを正とする。)

$$\frac{d^2L}{dt^2} = \frac{dv}{dt} = g - \frac{F_s}{M} = g - \frac{ES}{M} \left(\frac{L}{L_0} - 1 \right)$$

$$= \frac{ES}{ML_0} \left(\frac{ML_0}{ES} \tilde{g} - L \right),$$

$$\tilde{g} \equiv g + \frac{ES}{M}$$

【見積もり】 $\tilde{g} = g + \frac{ES}{M} \sim 9.8 + \frac{1000 \cdot 10^6 \cdot 3.1 \cdot (4 \cdot 10^{-3})^2}{55} \sim 9.8 + 900 \sim 910 \text{ (ms}^{-2}\text{)}$

* 荷重がかかると S も変化するが、ここでは定数として扱う。

* 錘の運動への影響では、摩擦力は重力に比べ小さいのでここでは無視する。

$s \equiv \frac{L}{L_0} - \frac{M}{ES} \tilde{g}$ という変数について、調和振動子運動方程式

$$\frac{d^2s}{dt^2} = -\frac{ES}{ML_0}s \equiv -\frac{s}{\tau_c^2}$$

を得る。これは簡単に解くことができ、解は

$$s = s_0 \cos(t/\tau_c) + s_1 \sin(t/\tau_c)$$

となる。ここで特性時間

$$\tau_c \equiv \sqrt{\frac{ML_0}{ES}} = \frac{1}{\omega}$$

を定義した。

【見積もり】 $\tau_c \sim \sqrt{\frac{55 \cdot 2.8}{1000 \cdot 10^6 \cdot 3.1 \cdot (4 \cdot 10^{-3})^2}} \sim \sqrt{0.0031} \sim 0.056 \text{ (s)}$

【見積もり】 $\frac{L_0}{\tau_c} \sim \frac{2.8}{0.056} \sim (\text{m s}^{-1})$

錘の鉛直位置と速度はそれぞれ以下で与えられる：

$$L = \frac{\bar{g}ML_0}{ES} + L_0 s$$

$$v = \frac{dL}{dt} = L_0 \frac{ds}{dt} = \frac{L_0}{\tau_c} (-s_0 \sin(t/\tau_c) + s_1 \cos(t/\tau_c))$$

初期条件は $t = 0$ で $L = L_0, v = v_0, s = s_0$ であるから次式が成り立つ：

$$L_0 = \frac{\bar{g}ML_0}{ES} + L_0 s_0, v_0 = L_0 \frac{s_1}{\tau_c}$$

【見積もり】 $s_0 = 1 - \frac{M\bar{g}}{ES} = -\frac{Mg}{ES} \sim -\frac{55 \cdot 9.8}{1000 \cdot 10^6 \cdot 3.1 \cdot (4 \cdot 10^{-3})^2} \sim -\frac{55 \cdot 9.8}{5 \cdot 10^5} \sim -1.1 \cdot 10^{-2}$

【見積もり】 $s_1 = \frac{\tau_c v_0}{L_0} \sim \frac{0.056 \cdot 10}{2.8} \sim 0.2$

この s_0, s_1 を用いて、時刻 t における L は次のように表される：

$$\begin{aligned} \frac{L}{L_0} &= \frac{\bar{g}M}{ES} + s_0 \cos(t/\tau_c) + s_1 \sin(t/\tau_c) \\ &= 1 - s_0 + s_0 \cos(t/\tau_c) + s_1 \sin(t/\tau_c) \end{aligned}$$

(4) 時刻 t での張力は

$$\begin{aligned} F_s &= M \left(g - \frac{d^2L}{dt^2} \right) \\ &= M \left(g + \frac{L_0}{\tau_c^2} (s_0 \cos(t/\tau_c) + s_1 \sin(t/\tau_c)) \right) \end{aligned}$$

【見積もり】 $\frac{L_0}{\tau_c^2} \sim \frac{2.8}{0.056^2} \sim 890 \text{ (ms}^{-2}\text{)}^6$

⁶ この値を使うと、張力の最大値は 10^4 N 程度となる。ちなみに石岡・笠井 (1972) によれば、市販されているザイルの‘荷重’は $1,400 \sim 2,700 \text{ kg}$ で、これは $1.4 \times 10^4 \sim 2.6 \times 10^4 \text{ N}$ に相当する。

3.2 【注意】

$$\begin{aligned}\frac{dF_s}{dt} &= M \frac{L_0}{\tau_c^3} (-s_0 \sin(t/\tau_c) + s_1 \cos(t/\tau_c)) \\ &= \frac{M}{\tau_c^2} v\end{aligned}$$

が成り立つ。 $(Mg - F_s)dt = Mdv$ を $t=0$ (速度 v_0) から τ_f (速度 v_1) まで積分して

$$\begin{aligned}M(v_1 - v_0) &= -\frac{ML_0}{\tau_c} (s_0 \sin(t/\tau_c) - s_1 \cos(t/\tau_c)) \Big|_0^{\tau_f} \\ &= -\frac{ML_0}{\tau_c} (s_0 \sin(\tau_f/\tau_c) - s_1 \cos(\tau_f/\tau_c) + s_1)\end{aligned}$$

より

$$v_1 - v_0 = -\frac{L_0}{\tau_c} (s_0 \sin(\tau_f/\tau_c) - s_1 \cos(\tau_f/\tau_c) + s_1)$$

を得る。

(5) 切断までの錘の移動距離は

$$\begin{aligned}\Delta L_f &= L(\tau_f) - L(0) \\ &= L_0 (s_0 \cos(\tau_f/\tau_c) + s_1 \sin(\tau_f/\tau_c) - s_0)\end{aligned}$$

τ_f として張力発生から切断までの時間 0.07s をとる⁷。すると $\tau_f/\tau_c = 0.07/0.056 \sim 1.25$ であるから次の見積もりが可能になる。

$$\begin{aligned}\text{【見積もり】 } \Delta L_f &\sim 2.8(-1.1 \cdot 10^{-2} \cos(1.25) + 0.2 \sin(1.25) + 1.1 \cdot 10^{-2}) \\ &\sim 2.8(-1.1 \cdot 10^{-2} + 0.2 \cdot 0.95 + 1.1 \cdot 10^{-2}) \sim 0.53 \text{ (m)}\end{aligned}$$

切断角での接触距離 Δl (ロープが切断角に接した長さ) は、ロープが一様であれば静止しているときの長さに比例する。すなわち $\Delta l : \Delta L_f \sim l : L_0$ 。従って

$$\text{【見積もり】 } \Delta l \sim \frac{l}{L_0} \Delta L_f \sim \frac{0.5}{2.8} \cdot 0.53 \sim 0.095$$

切断角とロープ間の圧縮力 F_c は F_s のオーダーであろう。ここでは

$$F_c \sim \sqrt{2} F_s$$

と近似する。静的釣り合いの場合には正しいが、実際にはロープは動いているのでこれより小さいはずである。

切断角での摩擦力は、運動摩擦係数を μ とすると

⁷ 菊池久氏からの私信。

$$F_f = \mu F_e \sim \sqrt{2} \mu F_s \quad \text{【注意】}$$

である。従って、時間 τ の間に摩擦力がする仕事 W_f は

$$\begin{aligned} W_f &= \int_0^{\Delta l} F_f dl = \int_0^{\tau} F_f \frac{dl}{dt} dt \sim \int_0^{\tau} \sqrt{2} \mu F_s \frac{dL}{dt} \frac{l}{L_0} dt = \sqrt{2} \mu \frac{l}{L_0} \int_0^{\tau} F_s \frac{\tau_c^2}{M} \frac{dF_s}{dt} dt = \frac{\mu l \tau_c^2}{\sqrt{2} L_0 M} F_s(\tau)^2 \\ &= \sqrt{2} \mu \frac{l}{L_0} \int_0^{\tau} F_s v dt \end{aligned}$$

ここで、上の【注意】の関係式を使った。

【見積もり】 $\mu = 0.5$, $\tau = \tau_f = 0.07$ として

$$\begin{aligned} \frac{\mu l \tau_c^2}{\sqrt{2} L_0 M} F_s(\tau)^2 &\sim \frac{0.5 \cdot 0.5 \cdot 0.056^2}{\sqrt{2} \cdot 2.8 \cdot 55} \times 55^2 (9.8 + 890(-1.1 \cdot 10^{-2} \cdot 1 + 0.2 \cdot 0.95))^2 \\ &\sim 314 \text{ (j)} \end{aligned}$$

こうして、切断角との摩擦力がロープに対してする仕事量の見積もりができた。これをもとに接触面を通してロープに与えられる熱量 Q_f を見積もることができる。次の仮定を採用する。

仮定 仕事 W_f のある割合が熱になる。すなわち

$$Q_f = \varepsilon W_f, \quad 0 < \varepsilon < 1$$

NITE 実験では切断角は金属で、その熱伝導率はナイロンの数百倍である。このことを考慮すると、ナイロンロープ内に流入する熱量は高々上記 Q_f の 1/100 程度であろう。

Q_f によって、温度の上昇分は次のように見積もられる：

$$\Delta T_f \sim \frac{Q_f}{c_p m} = \varepsilon \frac{W_f}{c_p m} = \varepsilon \frac{W_f}{c_p \rho S_p \Delta l}$$

c_p は圧着時に於ける単位質量当たりのロープの比熱、 m と Δl はロープが切断角と圧着接触した質量と長さ、 S_p は圧着時のロープの断面積である。

$$\begin{aligned} \text{【見積もり】} \quad \Delta T_f &\sim \varepsilon \frac{W_f}{c_p \rho S_p \Delta l} \sim \varepsilon \frac{314}{1.3 \cdot 10^3 \cdot 1.1 \cdot 10^3 \cdot 3.1 \cdot (4 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0.095} \\ &\sim 47\varepsilon \text{ (}^\circ\text{C)} \end{aligned}$$

【参考】 ナイロン 6 のガラス転移温度 $\sim 50^\circ\text{C}$ 、融解温度 225°C 。低温で分子間結合が弱くなり始めることは注意しなければならない。 ΔT_f に対する上記の見積もりは、接触面においてはナイロン分子間の結合の分断が熱作用によって起こりうることを示している。

3.2 圧縮による発熱〔切断直前〕

ロープは切断角に圧着されることでロープ面にはほぼ垂直方向に圧縮変形する。すなわち、切断角から仕事をされることになる。このとき発生する圧縮力は張力すなわちロープの弾性と塑性に関係するが、Hookeの法則が成立しなくなった時点－弾性限界－以降の応力の見積もりができない。他方、石岡・笠井(1972)によれば、鋭い切断角での落下切断実験(直径12 mm, 加重75 kg)では、0.5～2 mの落下で錘の重量の最大2.5倍程度の衝撃力が生じている。対応する破壊応力はおおよそ $180 \times 9.8 / (3.1 \times 0.006^2) \sim 16$ (MPa)である。データ表(Benenson et al. 2000)によればナイロンの静的破壊応力は大体500 MPaなので、石岡・笠井の結果はおおよそこの30分の1となる。鋭い切断角を用いたときのナイロンの動的特性は静的特性と大幅に異なるのである。

ここでは、石岡・笠井の得た結果に沿って切断直前の圧縮力を見積もることとする。すなわち、切断直前の衝撃力となる破壊応力を $2.5 Mg$ とする。 $M=55$ kgである。圧縮力は少なくともその $1/\sqrt{2}$ はあるだろう。この圧縮力がする仕事を次の手順で見積もる。

1. 切断角における圧縮力 $F_c \sim 2.5 Mg/\sqrt{2}$

【見積もり】 $2.5 \cdot 55 \cdot 9.8/1.4 \sim 960$ (N)

2. 圧縮の厚さ $d \sim r$

【見積もり】 0.004 (m)

3. 圧縮力がする仕事 $W_c = F_c d \sim F_c r$

【見積もり】 $960 \cdot 0.004 \sim 4$ (Ws)

4. 圧縮領域の体積 $V_c \sim S_c(2r-d) \sim S_c r$

S_c は切断角での接触面積である。ただし、次の2点に注意しておく (NITE 2014)。

* 接触面を長方形と見なしたとき、縦の辺は r に比べ非常に短い。

* 横の辺はロープの直径程度である。

従って

【見積もり】 $S_c = \text{横長} \times \text{縦長} \sim \frac{r}{10} \cdot 2r = 3.2 \cdot 10^{-6} (\text{m}^2)$ として $S_c r \sim 1.3 \cdot 10^{-8} (\text{m}^3)$

* NITE 実験では切断角は鋭い(いわゆる'R'値が0)ので、 S_c の見積もり値をさらに小さく取るとは妥当だろう。半分にすれば、次に述べる温度上昇は2倍になる。

ついでに切断直前の圧力 p_c を見積もっておく。

$$p_c \sim F_c/S_c$$

【見積もり】 $\frac{960}{3.2 \cdot 10^{-6}} \sim 300$ (MPa)

【参考】 ナイロンの静的破壊応力は Benenson et al. (2000) によれば約 500 MPa である。ここでの p_c の見積もり値が静的破壊応力とオーダーで一致しているのは、切断角とロープの接触面積の狭さによる。

以上で、ロープ内で発生する熱量 Q_c を見積もる準備が整った。最後に次の仮定をおく。

仮定 仕事 W_c のある割合が熱になる。

$$Q_c = \varepsilon_c W_c, \quad 0 < \varepsilon_c < 1$$

熱はロープ内で発生し、かつ逃げ場がないので ε_c は 1 のオーダーとしてよいだろう。 Q_c による温度上昇は

$$\Delta T_c \sim \frac{Q_c}{c_p \rho V_c} = \varepsilon_c \frac{W_c}{c_p \rho V_c}$$

【見積もり】 $\Delta T_c \sim \varepsilon_c \frac{W_c}{c_p \rho V_c} \sim \varepsilon_c \frac{4}{1.3 \cdot 10^3 \cdot 1.1 \cdot 10^3 \cdot 1.3 \cdot 10^{-8}} \sim 220 \varepsilon_c$ (°C)

ΔT_f と ΔT_c の式と概略値がこの節での結論である。

*上記の見積もり値は、不確定度が大きい V_c の値に敏感に依存する。例えば、 V_c を半分を取れば $440 \varepsilon_c$ になる。

IV. 結論または推測

石岡の第1問題

3.1 の ΔT_f と 3.2 の ΔT_c が本稿の主要な結果である。55 kg 錘の落下切断実験 (NITE2014) を参照すると以下のような推測が可能になる。

- ① ロープと切断角との接触による発熱量を弾性体近似で見積もると、ロープの温度上昇は 50ε °C 程度である。切断角が金属の場合、 $\varepsilon < 0.01$ と思われるのでこれは小さい⁸。
- ② 切断直前の、錘の落下が一旦急減速した瞬間の圧縮応力は 300 MPa 程度になる。これは、ナイロンの破壊応力に匹敵する。
- ③ 切断直前、圧縮応力による発熱に起因する温度上昇を見積もると最大 $200 \varepsilon_c$ °C 程度

⁸ 既に述べたように、NITE 実験では切断角としてステンレス鋼によるものを用いる。ステンレス鋼の熱伝導率は花崗岩・大理石の 10~20 倍程度である。したがって、ナイロン・接触面間の発熱がナイロンに及ぼす熱作用を詳細に見積もり、自然の岩角による切断状況を推測しようとする場合、NITE 実験の条件下では発熱効果を過小評価することになる。本稿ではこの点には踏み込まない。

となる。力学変形ないし化学変性に使われるエネルギー損失を考慮すれば ϵ_c は 1/2 程度、すなわち温度上昇は少なくとも 100°C 程度となると思われる。得られた数値は桁見積もりによるものに近い。1/2~2 倍程度の変動を見込むのが妥当である。

ロープが伸びきった直後から錘が落下している間の温度上昇は、NITE 実験に関しては無視してよい。なお、コンクリートや石英ガラスの熱伝導率はナイロンの 5 倍程度である。切断角がこれらの素材で作られた場合でも、ロープ内温度上昇への摩擦力の寄与はたかだか 10°C 程度であろう。

錘の落下が一旦ほぼ停止してからロープが切断する直前までのロープ内温度上昇は、2 倍程度の誤差（誤差の原因については下記を参照のこと。）を見込んでおよそ 100°C 前後に達しうる。この温度上昇がナイロン融解に直結するかは、この瞬間の時間間隔（切断時間）が非常に短いことを考えると厳密には不明である。しかし、ナイロンの融点が 220°C 程度、軟化点が 50°C 前後であることを考慮すると、i) 熱運動による固体原子の振動周期が 1 兆分の 1 秒程度である。仮に切断時間が 0.01 秒であったとしても、それは限られた数のナイロン分子が熱平衡に達するには十分な時間であり、融解に達する可能性がある、ii) 部分的なガラス変性をもたらす可能性は高い、であろう。この変性が起きるとすると、この時点でナイロンの破壊応力はほとんど 0 となり、破壊は容易に進行するだろう。

切断時の温度上昇は $W_c/\rho V_c$ に比例する。より高い場所から落下すれば、ロープの圧縮変形の増大による W_c の増加によってこの値はより大きくなることが期待される。さらに、繊維の伸びによる ρV_c の実質的な減少も起きるだろう。こうして、より大きい落下距離はロープ内部でのより高い温度上昇と繊維のより速い軟化・溶融をもたらす。このことが、石岡・笠井（1972）が見出した、石岡の第 1 問題の現象を引き起こす原因となっていると考えられる。

ここで、これまで用いた「軟化」「溶融」という語について補足しておく。これは、ナイロンのような結晶質の部分と非晶質の部分が混在する物質を考える場合に必要となる概念である。単純結晶は、固体から液体への相転移が紛れなく観察され、従って融点も明確に定義できる。一般の高分子では、ある特定の測定法によってある物理量（熱移送量や比体積など）の急激な変化を見て、公称される「融点」を定義するが、実は非晶質の存在によってそれよりも低い温度で既に分子の流動化は起きている。すなわち「溶融」は融点以前に連続的に起きているのである。結晶質・非晶質の割合によって、流動化の様態はさまざまであろう。これまでの我々の考察は、ナイロンの衝撃切断ではこの熱的メカニズムが重要となる場合が

あることを示している。

データ表 (Benenson et al. 2000) によれば、ナイロンの最大応力は 490~635 MPa である。ここでの見積もりによれば、ロープ切断直前の圧縮応力は ~300 MPa であったが、実際はこれを超えている可能性もある。この場合、ナイロン融解が起きていなくとも、力学的切断は起きる。

上記の事情を総合すると、ロープの切断に至る過程は、一般には、切断角からの圧力がもたらすロープ表面及びロープ内温度上昇によるナイロン繊維の変性と破壊応力発生との同時的進行によるものである可能性がある。このとき、もしもロープ表面及び内部温度上昇が(室温での)破壊応力発生よりもわずかでも早ければ、温度上昇がロープ切断の主原因となる。この結論は、切断角の熱的性質によらない。

この結論(仮説)の妥当性を検証する一つの方法は、温度上昇と応力破壊の順序を制御できるさまざまな組み合わせで落下切断実験を行うことである。上記の考察によれば、ロープが細い(あるいは、薄い)ほど発生熱量は少なく、したがって時間的には剪断応力破壊が優先する。具体的には、同じ断面積ならロープよりもベルトの方が切断しにくいということである。このときはナイロンの融解の程度は小さいだろう。太いロープでは、応力破壊と融解は同時的に進行する可能性があり、落下切断実験で融解を応力破壊に優先させるのは難しいかもしれない。これを実現するためには、融解点が高い異なる素材のロープを使用することが考えられる。

仮説が正しいとすれば、ロープが切断する直前の応力分布は編み被覆の有る無しにほとんど依存しない。石岡の第1問題は三つ撚りロープで見出されたが、編み被覆ロープでも同じ現象が起きれば、この仮説を支持するものとなる。反対に、もしもこの現象が編み被覆ロープでは起きないとすると、三つ撚りロープ特有の縦傷が主原因である可能性が高くなる⁹。

登山用ロープ=ザイルは寒冷の環境で使用されることが多い。仮にナイロンザイルの温度がマイナス 20°C であったとしても、NITE 実験を想定した上記の見積もり 100°C 程度の温度上昇値が妥当とすれば(すなわち、ナイロンの物性に大きな変化がないとすれば)、荷重の数メートルの落下で局部がナイロンの軟化点に達することは可能であろう。

⁹ 編み被覆は縦傷の防止には有効であろう。それ以外にも、編み被覆の生む特有の効果があるかもしれない。その効果および切断の瞬間の芯繊維の破断状況を高速度撮影で直接見るために、被覆を剥がしたロープについて同様の実験を行う意味はあると思われる。

石岡の第2問題

弾性体近似が正しいとすると、落下距離 H が 0 m - ロープを自然にだらりと垂らした状態で錘を離す - の極限で最大張力 T は錘の重量 W の 2 倍である (SKK1956)。その根拠は

$$T = W \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2kH}{WL}} \right)$$

にある。ここで、 $k (= ES)$ はロープの弾性係数、 L はロープの長さである。この式は、ロープが k を定数とする Hooke の法則に従って伸び縮みし、かつ力学的エネルギーが保存するとして導かれる。 H が 0 のとき、 T は W の 2 倍である。

1975 年以降、石岡は通産省所管の施設での研究を行うようになった。その中で、10 mm 前後径のナイロンロープで 80 kg の錘を 5 m 落下させたとき、0R 切断角での切断荷重が最大 350 kgW にまで達することを見出した。これは、0 m での理論的最大切断加重 160 kg の 2 倍以上である。この実験条件で $kH/WL \sim 1$ となるので、上式から $T \sim 3W = 240 \text{ kg}$ で、やはり実験値に及ばない。石岡はこの原因を未解明であるとした (石岡 1990)。すなわち

石岡の第2問題：切断加重は、落下距離 0 m のときよりも落下距離が有限の場合が明らかに大きくなるのはなぜか。

他方、第1問題を単純に外挿すれば、落下距離 0 m では切断加重すなわち切断時の衝撃力は 350 kgW よりさらに大きくなるのが期待される。

この見かけ上の矛盾は弾性体近似を無制限に適用することに由来すると思われる。これまでに論じたように、落下距離がある程度大きいときは、ナイロンは融解する。ナイロン分子の相互の拘束が緩んでくるということである。この状態で、二つの極端な状況が考えられる。すなわち、ナイロンは

- i) Hooke の法則に従う弾性を示すと同時に Newton の法則に従う流体として振る舞う。
- ii) Hooke の法則から外れた塑性を示すと共に Newton の法則に従わない流体として振る舞う。

実際にはこの中間の性質を持つのであろうが、話を単純にするためにこの二つの状況だけを考える。

i) の場合、ナイロンは粘弾性を示す。(粘弾性については、例えば、西川 (1992) を参照のこと。) このとき、外部から周期的ストレスを与えてその応答を線形近似で解析することで、弾性と粘性双方が共存するとしたときの全体的性質を知ることができる。例えば、NITE (2014) による動的粘弾性測定では、ナイロンのいわゆる $\tan \delta$ - 損失正接 - の測定値を求めている。これはひずみと応力の位相差の目安となるもので、この値が小さいほど位相差は小さい、言い換えると、粘性は大きく、全体として固体の弾性体に近い振る舞いをする。

NITE (2014) では温度が $-40^{\circ}\text{C} \sim +20^{\circ}\text{C}$ の範囲で $0.02 < \tan \delta < 0.07$ としていて、小さいと見てよさそうである。溶融状態でも粘性が大きい粘弾性を持てば、衝撃力は大きくなるだろう。

ii) の場合、ナイロン内の応力は外力に単純に比例しなくなる。特に、ずり応力が大きくなると粘性が増加する現象—ダイラタント流動—が知られていて、そのような現象を起こす物質をダイラタント流体と呼ぶ。その最も顕著な特徴は、外力が大きいほど変形しにくくなることである。これは多くの高分子流体に見られる性質である。融解したナイロンもダイラタント流体として振る舞うことになるだろう。落下距離が十分小さいときは融解が起きないので、相対的に小さい剪断応力が発生するだけであるが、融解してダイラタント流体化するとともに剪断応力が増すと衝撃力は大きくなるだろう。

ここに述べた可能性のいずれかが実現しているとすれば、第2問題を、さらには第1問題の意味をも理解できそうである。多くの高分子同様、ナイロンもダイラタント流体となることが石岡の第2問題を引き起こす原因であるという見方は魅力的である。この解釈の当否は、分子構造も視野に入れた物性論的な研究によって判断されるだろう。

V. 結論

これまでの考察で我々が得た、鋭い切断角によるナイロンロープ切断の機構に関する描像は以下のようなものである。落下距離が短いとき、ロープは機械的剪断力で破壊する。落下距離が増加すると共に圧縮力による(広義の)溶融がロープ内で起き始め、溶融領域が増大するようになる。ここでの溶融とは、分子間引力の減少による可動域の増加のことである。未溶融領域が減少するため弾性係数(上式の k)は減少し、それに伴い切断時の衝撃力も減少する。落下距離がさらに長くなると、短時間内にさらに大きい溶融領域が形成され、切断角に近いロープ内の一部が高粘性の粘弾性流体化またはダイラタント流体化する。これは衝撃力を一旦増加させる効果を生む。落下距離がさらに伸び溶融領域が十分に大きくなると、弾性係数の減少効果が高粘性流体化の効果を上回り切断時の衝撃力は再び減少する。この推論の当否は実験によって判定することができる。溶融への圧縮効果はとりわけ容易に取り出すことができる。たとえば、張力が生じている状態のロープを横たえて、そこにさまざまなR値の角をもつ錘を落下させ、温度も含めた繊維の変化を見ればよい。

上記の推測をするにあたっては、ナイロン繊維の力学的特性を詳細には考慮しなかった。考慮されなかったもっとも重要な特性として、繊維の伸びと剪断応力との関係がある。繊維が伸びれば単位長さ当たりの原子間ないし分子間結合の数は減るはずだから、剪断応力は小

さくなることはありうる。この効果は、それが大きければ石岡の第1問題を解くもう一つの鍵となるだろう。

石岡の第1および第2問題は、提示されてから既にそれぞれ43年と25年を経た。これらはナイロンロープに端を発してはいるが、化学合成物質一般に通じる普遍的内容を包含している。ナイロンロープの力学特性の解明へ向けた石岡の努力と寄与の大きさを考えると、この二つの問題に対する学術的総括が専門家グループによって為されるのは十分に意味のあることである。ロープの危険・安全性に、本稿で取り上げた石岡の問題を迂回して実用性の観点から社会的に対応することは可能である。これに加えて、素材の開発を含む取り組みにおいては、現象の因果関係に踏み込んだ研究に基づく総括は、われわれに問題への本質的・普遍的視点を提供してくれることが期待できるのである。

ザイルの破壊応力を高める、または融解温度を高めることで、落下切断に対する抵抗性を増すことができる。そのためには、ザイルの局所加圧による温度上昇は瞬時に応力集中部全体で起きることを考慮すると、素材全体を融解温度の高いものにする必要がある。同時に、人体の保護のためには衝撃を吸収しうる十分な弾力性も持たなければならない。この点で、化学合成繊維でナイロンを大きく超えるものは今のところ存在しないようである。

後記

筆者がナイロンロープ切断の問題に関心を持ったのは、2014年7月に松本市安曇上高地で開かれていた展示会『「氷壁」を越えて』で、石岡繁雄の業績とNITE実験の報告に触れてからである。1955年の「事件」以後、当事者間の利害と名誉が絡んだ対立によって煽られた社会のジャーナリスティックな関心は「ナイロンザイルは岩角で切れるのか、切れないのか」の一点に向けられた感がある。切れるための条件が明らかにされるまでほぼ20年の歳月を要して当事者達の所期の目的が達成されるのであるが、管見を顧みずに敢えて一言を加えれば、このことが「切断の機構は何か」という、第二段階のより本質的な問題から関係者の注意を逸らす要因になったのではないだろうか。石岡は、石岡の第1問題と第2問題を鋭く指摘することで、科学の本質論へと一步を踏み出していたが、恐らくは時代の制約によってそれを深めることができなかった。2014年の上高地での展示会がナイロンロープ切断へと著者の関心を向かわせたのであるが、調査と考察を重ねる中で上記の印象を強く持つようになったのである。

石岡の第1および第2問題は、本来は一般化された高分子物性論の観点から取り扱われるべきものであり、本文で提示した試論もこの枠組みの中での評価が可能であると思う。この

方面からの批判・情報を頂ければ幸いである。

「ナイロンザイル事件」は、科学上の問題のみならず、安全工学や失敗工学における規範例をも提供してくれるもので、他にもそのような多くの事例がある。土木環境工学者のペトロスキーによれば、その全てに精通するよりも、少数の典型的事例で人間が犯す失敗の型をよく知っておくことがはるかに効果的である（ペトロスキー 2001）。ペトロスキーは、ガリレオが片持ち梁の強度の幾何学的考察でいかに間違い、なぜその誤りが正されるまでに100年以上もかかったのかを詳しく分析したあと、次のように述べている（ペトロスキー 2001）：

どんなに無数の成功した設計がそこから導き出されたとしても、いかなる仮説も決して議論の余地なく証明されたことにはならない。しかし、仮説の反例はたった一つの失敗（解析上でも現実でも）で足りるのであり、このことを認識するのは技術者の責任である。あらゆる破壊が最新技術に基本的欠陥があることの決定的な証明ではないが、技術の方法に対する責務を認識して、設計と解析の最も基本的な仮定を含めて、失敗した人工物を作ることになった設計・製造のプロセスの全側面を批判的に見つめるのは、技術者の職業的責任と見なされるべきである。欠陥があるのにそれが欠陥として認識されない仮定なら、どんな設計の「訂正」や洗練も無意味になりかねないのである。

この記述は、明らかに技術のみならず科学にも当てはまるのであり、科学・技術の倫理教育がいかになされるべきかという古くからの問いの答を探す上で示唆に富んでいる。この観点からの考察は価値のあるものであるが、これは本稿の目的を越える。ただ、安全の達成には、技術の開発・法的な規制・広範囲の教育・不断の検証が必要であること（高橋 2003）、ナイロンロープに関する‘技術’と‘教育’については石岡繁雄がその半生を掛けて取り組んできたこと、その遺志の後継者（石岡 2014；石岡・相田 2007）と後継組織（NITE 2014）があることは知っておきたい。

謝辞

本稿をまとめるに当たり、石岡あづみ氏からは多くの資料と諸情報のご提供を頂き深く感謝申し上げます。また、鈴木久氏からはNITE実験に関する資料を頂いた。合わせて感謝申し上げます。

参考文献・資料

- 石岡あづみ 2014 NITE (独立行政法人製品評価技術基盤機構) でのナイロンザイル検証試験について <http://www.geocities.jp/shigeoishioka/new32.html>.
- 石岡繁雄・笠井幸郎 1972 登山綱の動的特性と安全装置の研究 鈴鹿高専紀要 記念号 139
- 石岡繁雄・相田武男 2007 『氷壁・ナイロンザイル事件の真実』(あるむ).
- 岩稜会 1956 前穂高東壁事件について (岩稜会報告, 石岡・相田 2007 所収).
- 石岡繁雄 1990 ナイロンザイル事件 登山研修 (文部省登山研修所), 5 pp 123-153.
- 西川哲治 (編) 1992 『改訂版 物理学辞典』(培風館).
- NITE 2014『製品事故の原因を探るサイエンス「氷壁」～ザイル切断事故から最前線情報まで～』.
<http://www.geocities.jp/shigeoishioka/new39.html>. last retrieved in July 30, 2015.
- 高橋光一 2003 意志決定と安全 (『安全—その幻想と現実—』(丸善) 日本化学研究会, 第3章).
- ペトロスキー H 2001『橋はなぜ落ちたのか—設計の失敗学—』(中島・綾野訳 朝日選書) 第5章.
- Benenson W, Harris J W, Stocker H and Lutz H (ed.) 2000 *Handbook of physics* (Springer).
- Shinoda G, Kajiwara N and Kawabe H 1956 Dynamical behaviour of a nylon climbing rope *Technology Reports of the Osaka University*, 6 43.

Abstract

The mechanism of nylon-rope rupture under the circumstances that give rise to stress in the rope is considered by taking the experiment conducted by NITE (2014) into account.

The climbing accident happened in the northern Japan Alps in January 1955 raised the issue of whether nylon rope is cut by the natural rock edge has been considered to be solved. In the endeavour to resolve the problem, Ishioka addressed two problems concerning the anomalous phenomena in rupture events, which are called Ishioka's first and second problems in this note. These problems seem neither to have been solely reconsidered in successive works so far nor to have been systematically reviewed. In this note, an idea that sheds a light on these two Ishioka's problems is proposed.

Dynamical and thermal influences are considered which lead to the rope-rupture. The dynamically generated stresses are tension and pressure. Their thermal influence emerges as the action to nylon fibres of heats that are generated between the rope and the edge of a plate prepared to cut the nylon rope in the NITE experiment. We aim at quantifying how much dynamical stress is converted to heat.

The tension of the rope combined with the gravity is the most important factor that determines the falling motion of the weight at the end of the rope. Elastic approximation to the tension will be employed in order to simplify the arguments. Frictional force between the rope and the surface of the cutting plate together with the diffusion of heat within the rope are small and are neglected.

First, we consider the heat generated at the edge of the cutting plate just after the weight ceases free fall. Second, the pressure to the nylon rope from the edge and the rupture stress is compared. Third, the conversion of the work done by the above pressure to heat is evaluated and is compared with the known thermal property of nylon.

It is shown that the third factor mentioned above is significant and that Ishioka's first problem will be solved by taking account of this effect. Finally, it is noted that Ishioka's second problem can be closely associated to the property of the non-Newtonian fluid.