

ナイロンマルチフィラメントの伸長による発熱と切断

大野 亮

(共立女子大学家政学部)

平成7年5月11日受理

Heat Generation and Breaking of Nylon Multifilaments by Drawing

Ryo OONO

Faculty of Home Economics, Kyoritsu Women's University, Hachioji, Tokyo 193

In order to discuss the relationship between the heat generation by elongation and the breaking of multifilaments, the heating of nylon 66 multifilaments during drawing was measured with a thermographic apparatus. In a simple elongation, several filaments broke before allover breaking and those filament ends were thought to cause the chain breaking of neighbor filaments by collision and friction. The temperature of the filament ends was increased instantaneously because of contractions, and the generated heat conducted to the neighbor filaments. The left filaments were elongated and heated still more because of increased temperature and stress, and they broke at the peak temperature point. The temperature of the breaking point increased 29.5°C from the room temperature and the other points increased 12°C. In a loop elongation, the heat generation of the looped point was larger than others and the temperature increased 6.2°C at breaking. In a knot elongation, only the knotted point was heat generated and the temperature increased 10.5°C at breaking.

(Received May 11, 1995)

Keywords: nylon ナイロン, multifilament マルチフィラメント, elongation 伸長, heat 発熱, thermogram 熱画像, breaking 切断.

1. 緒 言

プラスチックや高分子フィルム, フィラメントは変形時に発熱することが知られている^{1)~3)}. 特にネッキングによる発熱は顕著で, 局部的に熔融しているとも考えられている⁴⁾. また高周波ウェルダ (誘電加熱) は塩化ビニルなどの絶縁物に高周波電磁界を与えて分子を振動させ, 摩擦発熱して加工する技術である⁵⁾. このように高分子の発熱はよく知られ, 応用されているにもかかわらず, 発熱量やそれが物性に及ぼす影響についてはほとんど調べられていない. 変形や振動に付随して生じる現象であり熱自体が主原因でないことや, 伝導して拡散するためとらえ難いなどの理由によるとみられる.

ナイロンモノフィラメントは伸長発熱して高温となるが, 切断時には切断面が百数十°Cに達し, 他の部分も急速な収縮により発熱すると報告されている⁶⁾. そ

のような高温でなくとも物性に大きく影響する. ここではマルチフィラメントの変形時の発熱量, 糸内の温度分布, 温度が切断に与える影響などを検討した.

2. 実験方法

試料は旭化成工業 (株) のレオナ 66 (ナイロン 66) で, 密度 1.155 g/cm³, 密度から求めた結晶化度 43%, 複屈折度からの配向度 0.059 である. 6 デニールのフィラメントを 35 本束ね, それを 3 本 Z 撚りにした 690 デニール (=76.6 tex) のマルチフィラメントである. 撚りのためらせん形であることおよびフィラメント間の摩擦の効果を検討するため, 比較試料としてナイロン 6 モノフィラメントを用いた. これは宇部興産 (株) 製テグス 12 号, 直径 0.59 mm, 織度 310 tex, 密度 1.142 g/cm³, 密度から求めた結晶化度 52%, 複屈折による配向度 0.0459 である.

試長 2 cm で引張り試験機に固定し、10 cm/min の速度で伸長した。試験機は丸菱科学機械製作所の精密力量測定機 PL-200 型およびオリエンテック (株) の RTA-100 型であった。伸長方法は単純伸長、引掛け伸長、結節伸長の 3 種である。

フィラメント温度は日本電子 (株) の赤外線温度測定装置サーモビューワ 3210 型で測定した。測定の詳細は前報に記載したとおりである⁷⁾。

3. 結果と検討

(1) 単純伸長

マルチフィラメントの伸長切断は構成フィラメントで何らかの欠陥を有するものが最初に切断し、その収縮時に周囲のフィラメントに打撃を与えたり応力の集中を引き起こして他のフィラメントが連鎖的に切断していく現象と考えられる。フィラメント切断部では高分子鎖の切断や滑りが起きていて、それに伴い摩擦発熱も生じる^{6,7)}。熱の拡散が小さければ発熱量はフィラメントの変形量とともに増加する。したがって発熱分布からフィラメント各部の変形量や均一・不均一さが観察できる。変形量の大きいところが何らかの欠陥部分あるいは伸長しやすい部分であり、そこで切断するとみられる。

マルチフィラメント 35% 伸長時の発熱による温度分布は Fig. 1A のようである。試料は A 中央を水平に横切って存在し、伸長発熱のため周囲の空気温 21.7 °C より 4 °C 高まっている。温度分布曲線はフィラメント方向と平行に走っている。マルチ糸表面には燃りに

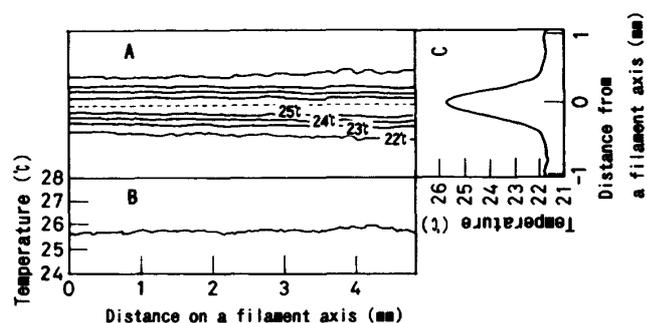


Fig. 1. Heat distribution map of a nylon 66 multifilament at 35% simple elongation

A: The lateral view of temperature distribution. The filament was situated horizontally in the figure. The dotted line shows the filament axis. B: Temperature along the filament axis. C: Temperature at right angles to the filament axis.

よる凹凸があり、表面傾斜角によって放射率が 1 から減少する。このため燃りの凹凸に対応する温度分布が見られることがあるが、A では見られない。Fig. 1B はフィラメント中心 (A の点線) 上の温度である。フィラメント固定部は金属であり熱伝導するためこれに近い部分は温度が低い。B では場所による温度差が 0.5 °C ある。Fig. 1C はフィラメントと直角方向の温度であり、ほぼ二等辺三角形に近い形状をしている。この形はフィラメント集合体の断面形状によって変化し、丸形断面は C のようになるが、楕円形断面ではピーク温度が 1 °C くらい低くなる。これはフィラメント集合状態が円形のものゝは隙間が小さく密に配列しているのに対し、楕円形断面では隙間が大きいことが影響しているものとみられる。

熱損失が小さければフィラメント温度は発熱量に比例する。伸長速度 8.3%/s は断熱的とはいえず熱損失するが、損失割合は一定であるからフィラメント温度は発熱量とともに増加する。既報にあるようにフィラメント温度は変形量とともに増加するが比例せず、30% 伸長以上での昇温が大きい⁷⁾。Fig. 2 はフィラメント中心温度 (Fig. 1B と同じ) の伸長による変化である。47% 伸長までの上昇温度は 7 °C と小さく、場所によるむらも 1 °C 以下で小さい。51.3% 以上では温度

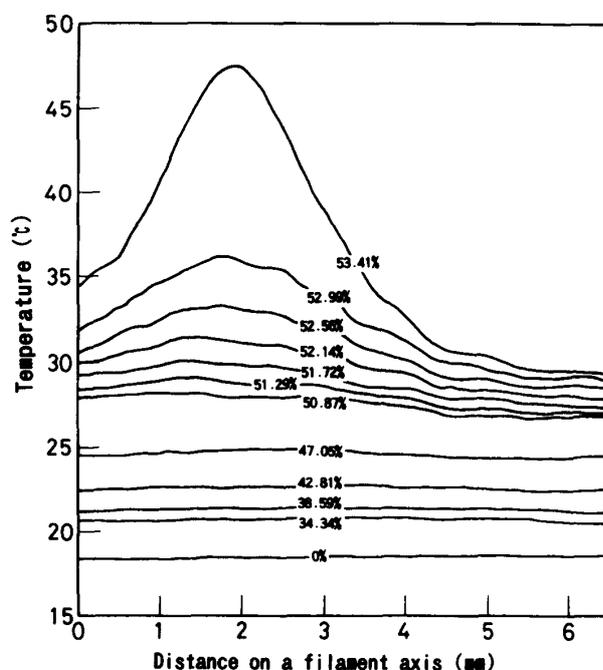


Fig. 2. Temperature change along the filament axis with strain

Numbers in the figure are strains of a simple elongation.

ナイロンマルチフィラメントの伸長による発熱と切断

が急に増加し、場所による温度差も大きくなる。温度ピークは53.4%伸長で47.5℃に達したのち切断している。フィラメント上で温度差が生じるのは、マルチ糸表面の凹凸と、伸びの不均一さに起因する。表面凹凸による放射率の減少から生じる温度むらは曲線上に小さな波形となって現れ、Fig. 2では1℃くらいの上下幅がある。他の試料では最高2.2℃の幅があった。この温度むらの間隔は撚りのらせん間隔と一致し、凹部が低温となっている。したがって温度むらは測定誤差によるもので、高温部分が真の温度を反映している。フィラメント変形の不均一さによる温度分布は、伸びの大きい部分ほど発熱して高温となるために生じる。フィラメントが固定端で切れる場合を除くと、固定端近くは熱伝導で温度が低く、伝導しない中心部は始め一定で途中から徐々に高くなる。特に切断直前の数%で温度上昇が大きくなる。これはつぎのような現象である。マルチ糸の切断は105本の構成フィラメントのうちまず1本ないし2本が切れ、続いて数本切断したのち、全体が切れる。最初に切断したフィラメントは末端部分がムチのような首振り運動をしながら隣接フィラメントと衝突したり、摩擦して収縮する。損傷した隣接フィラメントは連鎖切断を引き起こすであろう。急速収縮によりフィラメントは発熱し、周囲に熱伝導する⁶⁾。収縮発熱は分子鎖間の摩擦熱が、分子鎖収縮による温度低下(ゴム弾性のエントロピー項によるもので最大でも3℃くらい)より大きいためである。フィラメント1本が切断すると、残りの104本に力が分散してかかる。わずか1/105の力の増加でも他の場所より増えると、その付近の伸びが大きくなる。またナイロン66の弾性係数は20℃から60℃に昇温すると半分以下の大きさになって著しく軟化する⁷⁾。こうして発熱と応力の増加の相乗効果でその付近の材料は軟化し、いっそう伸び、ついには切断する。これが51.3%以後の急速な昇温の原因である。切断までの2.1%の間に18℃昇温している。

昇温の原因にはフィラメントの伸長発熱、切断フィラメントの切り口の発熱と収縮発熱および隣接フィラメントとの衝突・摩擦による発熱などがある。マルチフィラメント中のフィラメント1本(6デニール)では温度測定が不可能なため、ナイロン6モノフィラメント(4,788デニール)の結果から推論する。モノフィラメントの伸長発熱は切断時に約77℃、切断面は25℃、切断後の収縮発熱は約15℃である⁶⁾。ただし切断面はもっと大きい可能性が高い。衝突・摩擦などに

よる発熱は不明である。これらの値から伸長発熱の割合が最も大きいことがわかる。しかしマルチフィラメントの特定の点で発熱が大きくなり、そこで切断する原因は、最初に切れたフィラメントの収縮発熱や隣接フィラメントとの衝突・摩擦による損傷のためであろう。それらの熱の絶対量は小さくても、その付近の温度を他の場所より高め、フィラメントを伸びやすくする。

Fig. 3はFig. 2のピーク温度A、ピーク(=切断点)から4mm離れた温度B、および応力-歪み曲線Cを示す。応力はほぼ直線的に増加して、40%位から緩やかになる。これと反対に昇温は40%位まで小さく、それ以後から増加する。その原因は撚りの効果と構成フィラメントの昇温特性である。撚りでらせん形のためフィラメントは真つすぐに伸長せず、実質の伸長率が小さいため昇温も小さい。また構成フィラメント1本の昇温は30%伸長までは元々小さいためである。40%付近から昇温が大きい理由は、40%以上では1本1本のフィラメントの昇温が大きいためと、ピーク温度が切断点の温度だからである。切断点の昇温は室温から29.5℃と大きい。そこから4mm離れた場所の昇温は12℃である。40%以後の応力の鈍化と温度の急上昇は同じ原因と考えられる。すなわち40%以上では伸長により分子鎖間の滑りが増加し、応力は増加しなくなり、摩擦熱は増大するためとみられる。

Fig. 4は撚りの効果を見るためマルチフィラメント

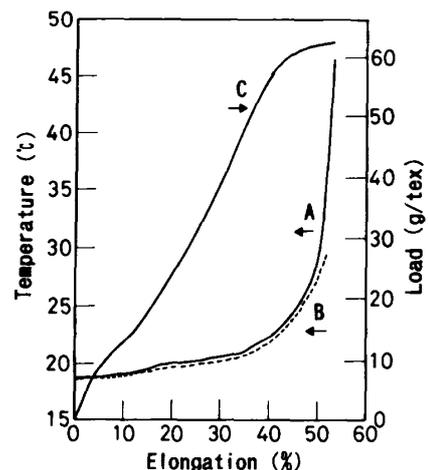


Fig. 3. Filament temperature and a stress-strain curve of a nylon multifilament in a simple elongation

A: Peak temperature at breaking point. B: Temperature at a non-breaking point. C: A stress-strain curve.

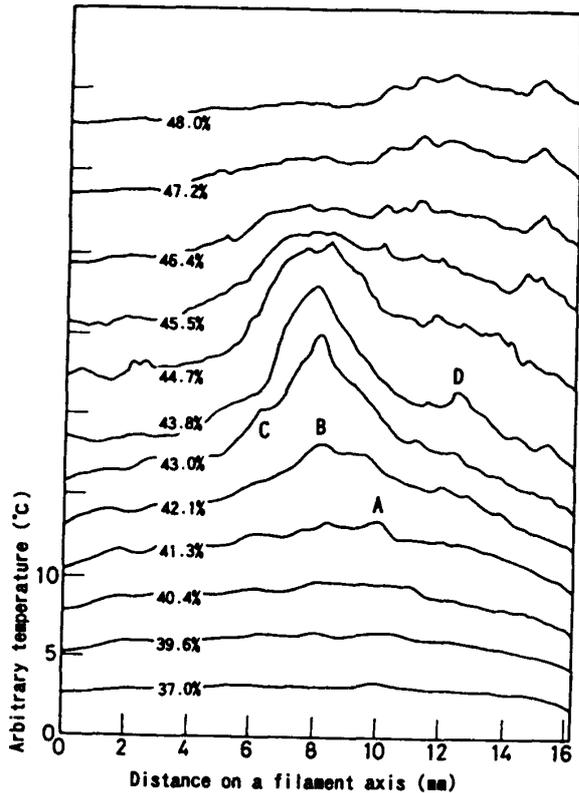


Fig. 4. Temperature change of a twistless nylon multifilament in a simple elongation

Numbers in the figure are strains. Temperature curves were shifted upwards with strains, consequently temperature was arbitrary.

を分解し、105本の1/3の35本を取り出して伸長した温度変化である。撚りのない、35本のフィラメントからなる平行フィラメントである。温度曲線は伸長率とともに上方向にずらして、重ならないようにした。したがって温度の絶対値は比較できない。37%伸長までは小さな温度むらのみみられる程度である。約40%伸長から温度分布が生じ、大きい温度ピークが一つと小さなピークが数個ずつみられる。平行フィラメントは45.5%伸長で大半が切断している。ある温度曲線にあった小さなピークが次の曲線にないのは、切断により移動して赤外線カメラの視野からはずれたため、瞬間的に熱伝達するためではない。このような温度分布は平行フィラメントの切断が40~45.5%の伸長範囲にわたり、1本ずつ場所も時間もランダムに生じているためである。応力-歪み曲線からも平行フィラメントの切断は3~7%の伸長範囲にわたることが観察される。Fig 4の試料の温度分布は、40℃まではモノフィラメントと同じく固定端で低く、中央部で高い。40.4~41.3%伸長で最初の切断がA点であり、その

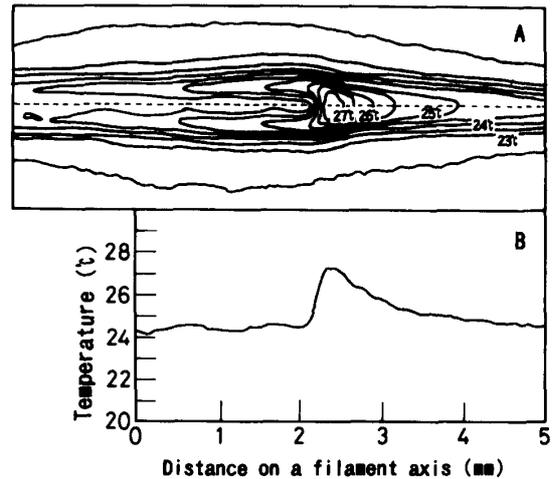


Fig. 5. Heat distribution map of a nylon 66 multifilament at 35% loop elongation

A: The lateral view of temperature distribution. The dotted line shows the center axis of two filaments. B: Temperature along the filament axis. The temperature peaks of 27 °C in A and B correspond to the loop point.

箇所は約2℃昇温している。切断本数は不明である。続いて42.1~43%伸長のB点、C点、43.8%のD点で切断している。なかでもフィラメント中央に位置するB点付近の温度上昇が大きく、時間も長い。この付近での切断本数が最も多いことを示している。1本のフィラメントの切断が周囲のフィラメントに影響して、連鎖反应的に切れていることがわかる。平行フィラメントでも切断が連鎖する原因は切断末端による隣接フィラメントへの打撃と熱の伝播が考えられるが、打撃の方が直接的原因であろう。Fig. 2とFig. 4の差が撚りの効果といえる。すなわち、外部からの変形力に対しそれぞれの限界までまぢまぢに抵抗する平行フィラメントと、糸全体の抵抗力の限界まで共同して抵抗するマルチ糸の違いが発熱特性に表れている。

(2) 引掛け伸長

引掛け伸長は引掛け点のU字湾曲部の変形が大きく、外側は引張り変形で内側は圧縮変形である。このような特徴をもった変形下の発熱を検討した。Fig. 5Aはマルチフィラメントを35%引掛け伸長したときの温度分布である。27℃の付近が、2本のフィラメントをU字に組んだ引掛け点である。引掛け点の温度が高く、左右に遠ざかるにつれ低下している。U字部の曲げ変形による摩擦発熱が直線部の伸長発熱より大きいことを示している。Fig. 5Bはフィラメント中心(Aの点線)の温度分布である。発熱は引掛け点付近

ナイロンマルチフィラメントの伸長による発熱と切断

の1mmの狭い範囲に集中している。

Fig. 6はフィラメント中心の温度の伸長による変化である。伸長によりU字部のピーク温度は上昇するが、直線部(ピーク右側)も昇温し、ピーク上昇温度/直線部上昇温度は約2である。ナイロンモノフィラメントの上昇温度比は約7で、引掛け点の発熱が著しい⁷⁾。マルチフィラメント・モノフィラメントの両方とも直線部で伸長発熱するがその量は小さい。マルチフィラメントの上昇温度比がモノフィラメントより小さいのは撚りのため、U字形に湾曲しても構成フィラメント1本はらせん形がさらにU字湾曲して、単純に伸長しているわけではない。

Fig. 7はU字部のピーク温度Aとそこから4mm離れた直線部の温度Bを示す。どちらも伸長とともに直線的に上昇している。Cは応力-歪み曲線である。ピーク温度Aと応力Cはよく対応し、応力に比例して昇温しているように見える。加えられた力によって最も変形するのは湾曲U字部で、応力-変形-昇温の三つが線形に関連しているためとみられる。切断時にピーク温度は6.2℃昇温し、そより離れた場所は3℃昇温している。単純伸長に比べると小さな発熱である。

(3) 結節伸長

結節伸長の結節点は伸長変形のほか圧縮・曲げ・捻り・剪断などの変形が同時に起きているうえ、伸長とともに結節点は小さくなるという特異な変形をする。Fig. 8Aはマルチフィラメントを結節して31%伸長したときの温度分布を示す。単純および引掛け伸長では

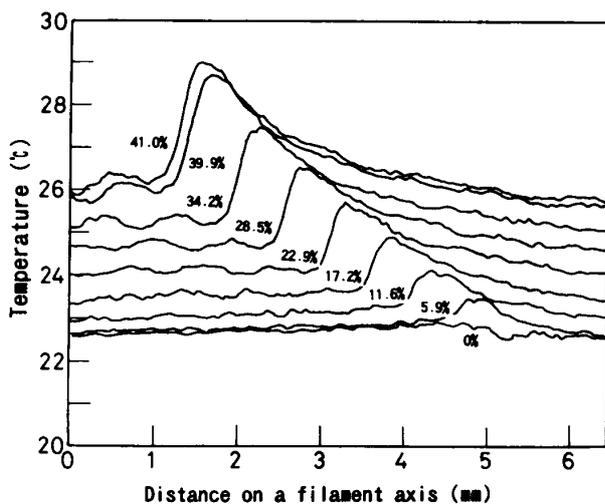


Fig. 6. Temperature change along the filament axis with loop in an elongation

Numbers in the figure are strains.

35%伸長の温度分布であったが、測定間隔があるため同一伸長率に合わせられなかった。結節伸長では結節点(23℃の等温線)の中心に温度ピークが生じている。またフィラメント軸方向(図中の点線)に沿って温度が高い。Fig. 8Bはフィラメント軸方向の温度分布で、結節点の発熱が大きいこと、結節点に近い直線部の発熱もあることを示している。結節点に近い直線部は最初は結節内部であったものが伸長とともに外に引きずり出された部分で、結節内部にあるときに変形発熱している。結節中心からの熱伝導より自己の変形発熱

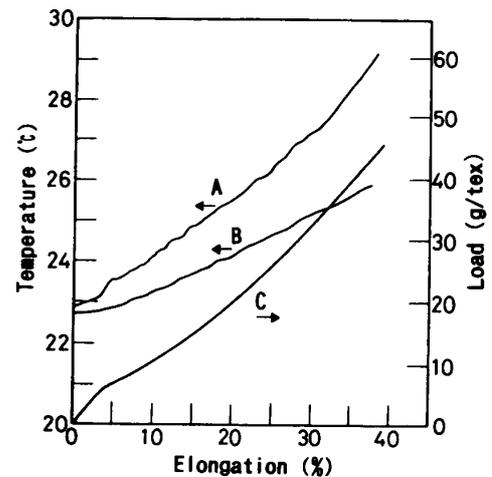


Fig. 7. Filament temperature and a stress-strain curve of a nylon multifilament in a loop elongation

A: Peak temperature at a loop point. B: Temperature at a non-loop point. C: A stress-strain curve.

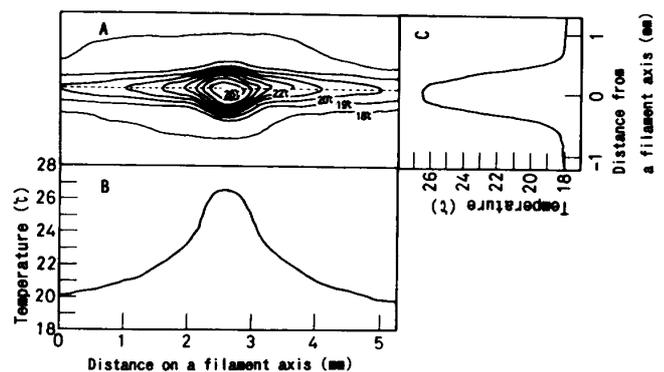


Fig. 8. Heat distribution map of a nylon 66 multifilament at 31% knot elongation

A: The lateral view of temperature distribution. The dotted line shows the center axis of a knotted filament. B: Temperature along the filament axis. C: Temperature at right angles to the filament axis.

量の方が大きい。Fig. 8Cは結節点を通りフィラメントに直角方向の温度分布である。結節点はほかの部分より太いため高温部分の幅も広い。単純伸長のFig. 1Cと比べて1.7倍くらい広い。

Fig. 9は伸長によるフィラメント中心の温度変化である。39.6%までは結節点の温度ピークが伸長とともに滑らかに増加している。39.9%で切断し、急激に温度上昇している。これは全フィラメントが一度に切れた例である。マルチフィラメントの結節伸長では2段階ないし3段階で切れることもある。その場合の温度変化は、フィラメントの切断と対応して2~7℃の急な温度上昇が観測される。

Fig. 10はFig. 9のピーク温度Aとそこから4mm離れた場所の温度変化Bを示す。ピーク温度は直線的に上昇し、切断時に10.5℃昇温する。それから離れた場所は2.7℃昇温する。ピーク、すなわち結節点のみが昇温し、変形していることがわかる。Fig. 10Cは応力-歪み曲線で、引掛け伸長(Fig. 7)と同様にピーク温度と応力に比例性がみられる。単純伸長(Fig. 3)では40%以上になって急激に昇温し、ピーク温度と応力に比例性はない。引掛け・結節変形では変形が局所に集中するため、小さい伸長率から発熱し始めるとみられる。また温度と応力の比例性は湾曲部の変形量が応力に比例することを示唆している。

以上でナイロン66マルチ糸の3種の伸長方法による発熱の状態を検討した。

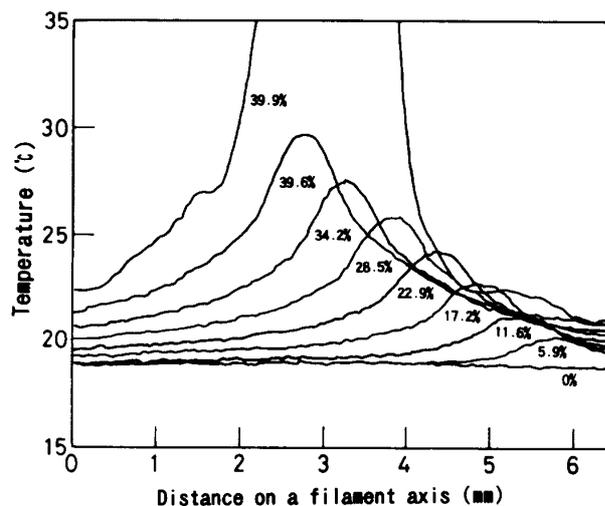


Fig. 9. Temperature change along the filament axis with knot in an elongation

Numbers in the figure are strains. In this case the multifilament broke all at once in the knot point.

(4) モノフィラメントによる検討

Fig. 11は単純伸長下のモノフィラメント(テグス12号)撚りなし1本Aと2本撚りBのフィラメント中心温度の比較である。2本撚りは昇温が遅く、切断時の昇温量は1本より小さいが、あまり差がない。むしろ個体差の方が大きい。Fig. 12はFig. 11と同じく、モノフィラメント撚りなし1本Aと2本撚りB、4本撚りCの応力-歪み曲線である。応力も昇温と同様に本数とともに減少し、伸びが増加する。これらの結果

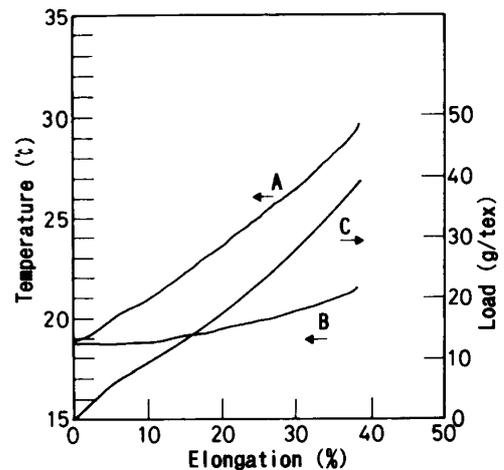


Fig. 10. Filament temperature and a stress-strain curve of a multifilament in a knot elongation

A: Peak temperature at a knot point. B: Temperature at a non-knot point. C: A stress-strain curve.

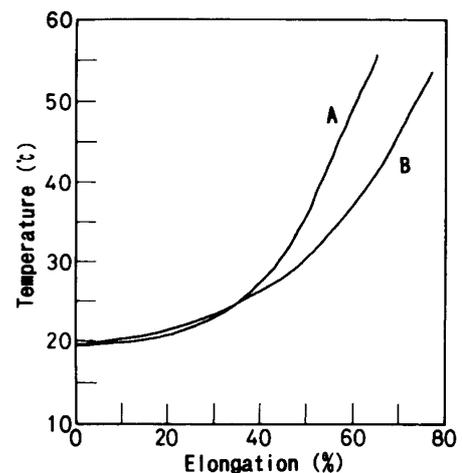


Fig. 11. Temperature changes of nylon 6 monofilaments in a simple elongation

A: Temperature of a nylon 6 monofilament. B: Temperature of two twisted filaments.

ナイロンマルチフィラメントの伸長による発熱と切断

から撚りは応力や昇温をみかけ上減少させるが、その効果は小さく、マルチフィラメントにおいても構成フィラメントの性質が現れると考えられる。撚りの効果はフィラメントをらせん形にして、みかけを短くすることである。したがってマルチフィラメントの伸長率を、構成フィラメント1本にばらして真っすぐに伸ばしたときの長さで計算すれば、Fig. 11とFig. 12の各曲線は撚りなしの曲線Aに近づく。すなわち撚りの効果はみかけのもので小さい。

Fig. 13は12号4本撚り糸(1回/cm)の切断後の温度を示す。Aは切り口で高温となり、61.4℃である。一般的にナイロンフィラメントの切り口は高温で、切断直後は百数十℃に達することが観察されている⁶⁾。また切り口以外でもフィラメントは急速な収縮発熱により昇温し、室温より数十度高くなることもある。Bは切断しないで残っているフィラメントで、だいたい50℃であるのに、高温のAが接した部分は64.3℃と高くなっている。切り口より接点のほうが高いのは、切り口のほうが早く低下するためであろう。この図から高温部の熱が周囲のフィラメントに伝達している様子がわかる。

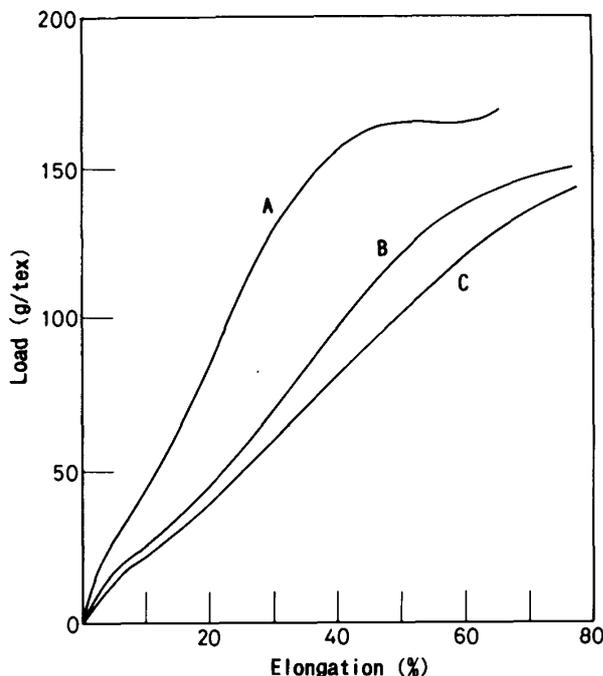


Fig. 12. Stress-strain curves of a monofilament and two multifilaments of nylon 6 in a simple elongation

A: A nylon monofilament. B: Two twisted filaments. C: Four twisted filaments.

4. 要 約

ナイロン66マルチフィラメントを試料に用い、単純伸長、引掛け伸長、結節伸長の3種の方法で伸長し、そのときの温度変化を赤外線温度測定装置で測定した。伸長による発熱の大きさ、フィラメント内の温度分布、切断との関係について検討した。

(1) マルチフィラメントの単純伸長では40%伸展位から急に昇温し、切断点のピーク温度は室温から29.5℃、その他は12℃昇温した。

(2) 単純伸長の切断は始め1, 2本のフィラメントが切れ、切断末端が隣接フィラメントに衝突・摩擦したり、急速収縮して発熱する。熱は周囲に伝導し、昇温させる。また切断フィラメントの荷重は残りのフィラメントに分散してかかる。この昇温と荷重の増加の相乗効果で付近の伸びが増加し、さらに昇温してついには切断に至る。このため切断点付近の昇温が大きく、1カ所で切断する。

(3) 引掛け伸長では引掛け点の温度が直線的に増加する。その昇温は他より2倍大きく、切断時に6.2℃昇温し、他は3℃昇温した。

(4) 結節伸長では結節点の温度が直線的に増加した。その昇温は切断時に10.5℃で、他は2.7℃昇温した。

(5) マルチフィラメントは撚りで縮んでいる分伸びが大きくなるほかは、切断時の応力や発熱は構成フィラメント1本を単純伸長したときの性質とほぼ等しいとみられる。

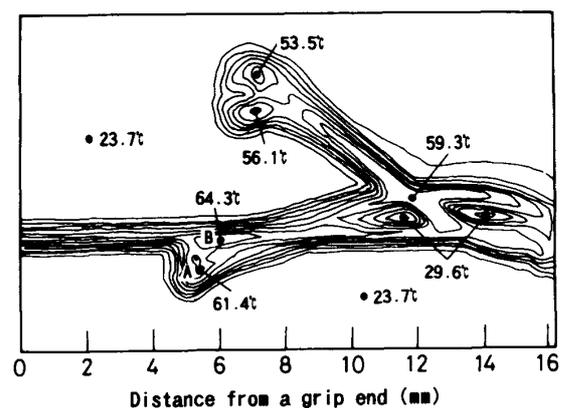


Fig. 13. Temperature distribution map of four twisted filaments just after breaking

One profile line shows the interval of 5°C. The broken filament A was heated at 61.4℃ because of rapid shrinking and the generated heat conducted to the neighbor filament B.

引用文献

- 1) Haward, R.N.: The Physics of Glassy Polymers, Applied Science, London, 353 (1973)
- 2) 飯田昌造：高分子実験学 10 力学的性質 II, 共立出版, 東京, 347 (1983)
- 3) 成沢郁夫：高分子材料強度学, オーム社, 東京, 80 (1982)
- 4) 飯田昌造, 坂見 宏：高分子論文集, **34**, 75~83 (1977)
- 5) 高分子学会(編)：高分子工学講座 11 プラスチック成形機械と成形技術 (1), 地人書館, 東京, 155 (1969)
- 6) 大野 亮：織学誌, **48**, 307~312 (1992)
- 7) 大野 亮：家政誌, **47**, 461~468 (1996)
- 8) Treloar, L.R.G.: The Physics of Rubber Elasticity, Oxford University Press, Oxford, 38 (1958)
- 9) 福本 修：ポリアミド樹脂ハンドブック, 日刊工業新聞社, 東京, 155 (1988)