防護資材用途の拡大と課題

久木野敏 KUKINO Satoshi
東レ・デュポン株式会社

1. はじめに

パラ系アラミド繊維 KEVLAR® が市場に出て 30 年以上になるが、その用途は着実に広がっている。多くの用途の中に人体を保護する防護資材があるが、適切な使用を進めていくためには信頼できる性能評価方法の確立が望まれている。性能試験方法の現状と今後の課題等について述べる。

2. KEVLAR® 繊維の開発と用途

デュポン社はナイロン繊維に続いて様々な繊維の開発を行っていたが、1960 年代初めから耐熱、高強度・高弾性率繊維の開発に注力することになった。目標とする特性としては石綿に代表される耐熱性繊維であり、ガラス繊維に代表される高強度・高弾性率繊維であった。当初からこれらの特性を達成するものとして芳香族ポリマーが有力な候補として挙げられていたが、溶媒に溶かすことが困難であったことから芳香族ポリマーを繊維とすることには大きな障害があった。1965 年になって S.Kwolek が芳香族ポリマーを紡糸することに成功し、新しい繊維の開発が大きな進展を見ることになった。しかし、Kwolek が使ったポリマーは非常に高価であったため、このポリマーでの量産化は困難と考えられた。そこで、量産可能なポリマーの探索が精力的に行われ、その結果パラ系芳香族ポリアミドが選定されることになっ

た。パラ系芳香族ポリアミドの紡糸には硫酸を溶媒とすることになったが、溶液粘度の高さが紡糸を行う上での大きな問題として立ちふさがることになった。この問題を解決したのが H.Blades であり、ポリマー濃度を高めていくと液晶状態となって溶液粘度が下がり、紡糸可能な粘度となることを見い出した（図 1）。さらに、紡糸口金と中和浴の間隔をあける（エアーギャップ）ことにより、紡糸口金を出た直後のポリマー配向の乱れを中和浴に達するまでの間に再び配向させることに成功した（図 2）。このふたつの発見により、パラ系芳香族ポリアミドポリマーを使って高強度・高弾性率繊維を高速で安定的に紡糸することが可能となり、量産へ向けての大きな一歩を踏み出すことになった。1972 年にデュポン社は米国バージニア州のリッチモンド工場に 500 トン／年の規模の生産設備を設置し、ここにパラ系芳香族ポリアミド繊維、KEVLAR® の量産が開始されることになった^{1, 2)}。

KEVLAR® は耐熱性、高強度・高弾性率の繊維であるが、当初は耐熱性よりも高強度・高弾性率の繊維としての活用が図られることになった。デュポン社はデラウェア州ウイルミントンの研究所にタイヤを試作する設備を設置し、タイヤ補強用繊維としての実用化を目指した。同時に、防弾チョッキが必要とする特性も有していることが判り、この用途に向けての開発も行われることになった。これらの開発は繊維メーカーが最終製品の開発に積極的に関与していったものであり、事業化初期におけ

図1 PPTA 溶液濃度と溶液粘度

図2 エアーギャップスピニング

る高強度・高弾性率繊維としてのKEVLAR®の地歩を固めるのに大いに役立つことになった。その後、複合材料や工業資材などの、高強度・高弾性率の特徴を生かした用途への適用が進められたが、1970年代後半になって石綿代替材料としての検討が本格的に行われることになった。当初は短くカットした繊維を用いるものであったが、他素材との混合プロセスにおいて繊維同士の絡み合いが発生しやすく、均一な混合が困難であるという問題があった。絡み合いを防止するためには繊維長を短くするのが有効であるが、短くするためには切断回数を多くする必要があるが、経済的に生産することが困難であった。製紙用パルプの繊維長は短い、その加工にはディスクリファイナが広く使われている。これは複雑な表面形状をもつ2枚のディスクを相対的に回転させ、その間に導入した水に激しいせん断作用を持たせるものである。これにより木材繊維は切断、かつフィブリル化され機械パルプに加工される。KEVLAR®繊維をディスクリファイナで加工すると同様なパルプが得られ、これが石綿の代替品として広く使われるようになった³⁾。米国での石綿に対する考え方は既に1970年代においても非常に厳しく、石綿を使用した学校の閉鎖を要求する父母のデモなどがニュースで報道されていた。このよう背景から、80年代にはブレーキパッドやガسケットの石綿代替材料としてKEVLAR®パルプが注目を浴びるようになった。この用途では耐熱性が重要な要素であり、KEVLAR®の耐熱性が十分に生かされる用途である。

これらの開発において常に問題とされてきたのがKEVLAR®繊維の切りにくさ・切れにくさである。この特性を防護資材として活用することが早い段階から考えられており、現在、我が国の産業界においても重要な防護資材として広く受け入れられている。

3. 防護資材

3.1 防護資材としてのKEVLAR®

KEVLAR®は高強度・高弾性率であるだけでなく、高温でも収縮や溶融をすることがないことから防護資材として適している。使用される際の形態は多岐にわたっており、人体を保護するものだけに止まらず機械設備などを破損から守る、あるいは破損した部品による二次災害を防ぐためにも使われている。人体用保護具としてはエプロン、腕カバーなど様々な形態で使われているが、我が国では防護手袋が最も大きな用途を占めており、使用される職場は年々広がってきている。使用が拡大しているひとつの要因としては、欧米に進出した企業が現地での安全に対する高い意識を受け、国内工場の安全向上にも一層の努力をするようになったことが挙げられる。さらに、近年の従業員の安全に対する意識の高まりも、KEVLAR®のような高機能防護手袋を使用する職種を着

実に拡大させてきている。防護手袋には熱を遮断する耐熱手袋と、刃物・破片等の機械的リスクに対する手袋がある。KEVLAR®の場合、耐熱手袋として使われる場合もあるが、機械的リスクに対する防護手袋が主体である。

3.2 米国における切創事故の状況

防護手袋によって減少が期待される災害は切創事故が主体であり、生命への危険性に直接結びつくものは多くはない。我が国におけるこのような軽微な事故の統計は承知していないが、米国労働安全衛生局（OSHA）の統計では手や腕のけがのうち、71%は防護服を着用することで防止することができるものであった、としている。また、大手自動車部品工場の例では、一見軽微な事故であっても、いったん事故が起ってしまうとその対策には平均2100ドルという多額の費用がかかったとしている。従って、高機能手袋を着用することで事故予防に若干多くの費用がかかるとしても、従業員の苦痛軽減、経済的損失軽減の両面から、予防に費用をかける方が合理的である、との考えが米国では広く行き渡っている⁴⁾。

4. 切創性の評価

4.1 切創性試験方法

防護服の評価方法についてはISOなどで規格化が進められており、その規格を受けてJISも制定されるようになってきている。JISでは手袋等を含む防護服について、「一種以上の危険有害性から防護するようデザインされている、個人用衣服を覆う、またはこれに代わる服」と定義している（JIS T-8005）。ISO規格を受けて制定された防護服に関するJISはいくつかあるが、KEVLAR®の手袋などに関係するJISとしては図3に示すようなものがある。次に各試験方法の概要について説明する。

(1) JIS T 8050 (ISO 13995)：鉤裂き試験

この試験方法は試料を切り裂くことで鉤裂きに対する試料の抵抗性を評価するものである。試料を中央にスリットを有する局面に貼り付け、700mmの高さから刃物を落下させて局面に貼り付けた試料を切り裂く（図4）。試料の鉤裂きに対する抵抗性の評価は切り裂かれた長さで行うが、落下させる刃物と保持ブロックの重量を250g、500g、1000g、2000gと変えて行うことができる。それぞれの重量での切り裂き長さによって布帛の機能を規定する「性能水準」が提案（表1）されている。

(2) JIS T 8051 (ISO 13996)：防護服—機械的特性—突刺抵抗性試験方法

この試験方法は突き刺しに対する抵抗性を評価するものである。試料を直径20mmの穴が空いた保持具で把持して定速型引張り試験機に取り付け、定速型引張り試験機的一方には先端の直径が1mmの円錐状の錐を取り付ける（図5）。次いで試験機を始動させることにより、

図3 各種耐切創性試験方法

図4 JIS T8050

表1 JIS T8050 性能水準

落下重量(グラム)	2000	1000	500	250	250
切り裂き長さ(mm)	40以下	40以下	40以下	40以下	40超
性能水準レベル	4	3	2	1	不合格

毎分100mmの速度で両者を近接させていき、円錐状の錐を試料に突き刺す。このときの突き刺しに要した最大の力を測定し、試料の突刺抵抗性とする。

(3) JIS T 8121-3(ISO 13999-3)：防護服—ハンドナイフによる切創および突刺しきずを防護するための手袋およびアームガード—第3部：布はく、皮革その他の材料の衝撃切創試験

この試験方法は鋭利なナイフ刃を試料に垂直に突き刺し、ナイフの突き刺し深さを測定することによって切断抵抗性を評価するものである(図6)。この試験では110gの重量のナイフ／保持ブロックを600mmの高さから落下させ、試料を切り裂くことによって停止するまでの距離を測定して切断抵抗性とする。ナイフは先端の角度が30°の切り出しナイフ状の片刃のものであり、ナイフの侵入長さと切り裂き長さとは比例している。本試験方法では試料の取り付け方が結果に影響するため、取り付け時の試料の張り方について規定を設け、安定した測定ができるようにしている。

図6 JIS T8121-3

(4) JIS T 8052 (ISO 13997)：防護服—機械的特性—鋭利物に対する切創抵抗性試験方法

この試験方法はナイフ、金属薄板、ガラス等に対する切創抵抗性を評価するものである。KEVLAR®の手袋等の切創性を評価するため、現在、最も良く利用されている。この試験方法では試料はかまぼこ状の局面に取り付

けられ、その上に押し当てた刃が一定の速度で移動していき、刃の移動距離が20mmとなったときに試料を切り裂く力を切創力として評価する（図7）。この測定方法では、刃とかまぼこ状の局面との間に電気回路が構成されており、試料が切断されたときに導通し、刃の移動が停止するようになっている。従って刃の移動距離の測定は容易にできるが、刃の移動距離がちょうど20mmとなるとときに試料が切断されるような刃の押しつけ力を見つけるのは容易ではない。従って、異なる3つの力で刃を押しつけたとき、それぞれの力での試料を切断するまでの刃の移動距離を測定し、3点を結ぶ近似曲線から20mm移動時の切創力を算出することになる（図8）。

(5) その他の試験方法

手袋等の試験方法としてASTMとEN（European Norm：欧州規格）が知られている。ASTM F1790はISO 13997とほぼ同じ方法である。使用する刃物はISOと同じものが推奨されており、試料を切断するまでの刃物の移動距離が25mm（ISOでは20mm）になるときの刃の押しつけ力であらわすことになっている。図9はASTM F1790で各種素材の手袋の耐切創性を測定した結

図7 JIS T8052

図8 刃の押圧力と切断までの移動距離

果であるが、ヨコ軸は手袋の目付であり、目付が増加することにより耐切創性は増加することを示している。同じ目付で比較した場合、KEVLAR®の手袋は他の素材の手袋に比べて明らかに高い耐切創性を有していることがわかる。

EN388（Protective gloves against mechanical risks）では使用する刃物は円形の回転刃であり、5Nの力をかけて試料上を往復させ、切断するまでの往復回数で評価することになっている（図10）。

図11はKEVLAR®が防護資材に使われ始めたときに使われていた試験方法である。この試験方法では定速型引張試験機に取り付けた刃物で布帛を切り裂いていき、そのときの切断抵抗力で評価するものである。ISO等の規格が制定されるまでは、手袋の評価方法として有用なものであった。

4.2 切創性試験方法の課題

(1) 測定方法の課題

前述のように、JIS T 8052は防護手袋の切創性評価に広く用いられるようになってきている。一方、試験方法自体の問題も指摘されるようになってきている。大きな課題としては使用する刃物の信頼性向上がある。刃物の信頼性向上は他の試験方法においても同様な課題となりうるが、本試験方法の場合には特に影響されるようである。使用する刃物は刃先の角度が約22°とされている

図9 各種素材の耐切創性

図10 EN388

図11 初期の切創性試験

図12 刃先の角度

が、規格で推奨されているメーカーのものはさらに刃先部が仕上げ加工されており、実際の刃先の角度は 22° よりも明らかに大きなものとなっている。図12は刃先を側面方向から見たものであるが、刃先から0.25mm程度までの刃元の角度が約 20° であるのに対し刃先の角度は約 40° になっている。規定どおりに刃先の角度を 22° に仕上げた場合、規定されている刃物の検定に合格しないという問題が生じる。刃物の検定には一定の硬度のクロロプレンゴムシートが規定されており、あるロットを代表する刃物が定められた力と距離（5Nの力で刃物を押し当てたとき20から30mm）でこのゴムシートを切断することを要求している。刃先の角度が 22° の刃物の場合、この検定では20mm未満でゴムシートを切断してしまう。また、この切断は刃物を水平方向に移動させて行うことから、切創性には刃先と被切断物との摩擦も関係してくる。従って、刃先の仕上げ時のカエリ等も切創性には影響してくることが考えられる。繊維状の試料の場合には摩擦係数の違いは切創性の測定結果にはあまり影響しないようであるが、ゴムシートの場合には刃先の微小な荒さも影響するようである。検定用材料として本来測定すべき試料と別の特性を有することが好

表2 EN388性能水準

性能レベル	1	2	3	4	5
カット インデックス	1.2	2.5	5.0	10.0	20.0

注：カット インデックスは、切断までの往復回数を標準試料で補正した値

表3 ANSI 性能水準

性能レベル	0	1	2	3	4	5
25mmで切断するときの荷重(グラム)	200未満	200以上	500以上	1000以上	1500以上	3500以上

ましいか、検討の余地があろう。また、所定の硬さのクロロプレンゴムを得るためには単一のポリマーだけでは不可能であり、無機物を含む添加物を加える必要がある。そのため、検定用のゴムシートの同一性にも課題を抱えている。このように、本来の切創性以外にも測定結果に影響を及ぼす要因があるため、ある条件のもとでの相対的な評価には適しているが、絶対的な評価をする上では解決すべき課題は少なくないと言わざるをえない。

(2) 測定結果の課題

EN388での測定を希望する防護服メーカー、防護服使用者は多くなってきている。これはEN388が測定結果（切断までの丸刃の往復回数）をもとに切創性能のレベル分けをしている点にある。ISO13997では測定結果は力の単位であるニュートンで示されるが、この数値を見ても、手袋の性能がどのようなものであるか理解するのは容易ではない。その点、EN388の測定結果は測定した手袋を1から5までのレベルに分けることができ、その性能を理解するのが容易になっている（表2）。ISO13997についてもレベル分けの要望は強く、将来の課題となっている。

米国規格協会（American National Standard Institute）では2005年11月にASTM F1790の試験結果をもとに切創性能のレベル分けを提案している（表3）。利用者の防護資材選択を容易にするものと期待されている⁵⁾。

5. 切創性に影響する要因

KEVLAR®は高強度・高弾性率繊維であるが、なぜ切れにくいのかは必ずしも明確にはなっていない。繊維の場合直径が細いため、切断が引張りによって起こっているとすれば高強度が切れにくさの要因であるといえることができる。図13はせん断時の破断状況を視覚的に確認するために、薄いプラスチック板を積層した材料をせん断して破断の進行状況を確認したものである⁶⁾。脆性材料ではくさびによってクラックが成長する場合もあるが、この図で示すプラスチック板の場合には、刃先に先行してのクラックの発生は起こっていない。KEVLAR®繊維は単繊維がマイクロフィブリルの集合体であると考えられており、プラスチック板のケースと同様な現象でせん断されると思われる。従って、マイクロフィブリルの高い強

図13 セン断時の変形

図14 繊維断面方向の応力-歪み線図

度が高い切創性に密接に関係しているものと思われる。

刃物は繊維を断面方向に圧縮し切断することから、断面方向の変形に要するエネルギーと切創性の関係についてデュボン社で検討した例がある⁷⁾。検討には単繊維の断面方向の応力-圧縮歪み特性を精密に測定できる装置が使用された。典型的なKEVLAR®の断面方向の応力と圧縮歪みの関係を図14に示すが、圧縮歪みの増大とともに応力も増大していく。この応力-圧縮歪み特性はKEVLAR®の繊維度、弾性率等を変えることで各種のものが得られる。それらを使用して作成した各種の布帛の耐切創性（タテ軸）と変形時のエネルギー（ヨコ軸）の関係を示したものが図15である。白抜きで示したものは20%の圧縮変形に要するエネルギーを示しており、黒色で示したものは40%の圧縮変形に要するエネルギーを示している。タテ軸は耐切創性を示しているが、使用

図15 繊維断面方向特性と耐切創性

した試験器は独自に製作したもので切断までの刃物の往復回数で示すようになっている。20%の圧縮変形に要するエネルギーと耐切創性との関係は必ずしも明確ではないが、40%の圧縮変形に要するエネルギーと耐切創性との関係は近似線が示すように良く一致すると思われる。この試験から繊維の違いによって圧縮変形に要するエネルギーが異なることがわかり、その結果、耐切創性を繊維の違いで増加させる可能性が見い出され、実際の防護資材の設計にも生かされることになった。

6. おわりに

企業活動の国際化に伴い、安全性を測定し定量化することが求められつつある。既にいくつかの測定方法が規格化されているが、今後、測定方法の信頼性を向上させることにより、さらに多くの分野での防護資材の使用が拡大していくものと期待されている。

なお、KEVLAR®は米国デュボン社の登録商標である。

参考文献

- 1) D.Tanner, et al. Angew. Chem. Int. Ed. Eng. Adv. Mater. Vol.28, No5, 649(1989)
- 2) J.L.Cooper, 酒井, 繊維と工業 Vol.43, No.4, P-125(1987)
- 3) Research Disclosure Feb. 1980 No. 19037
- 4) DuPont社カタログ H-77868 Rev. 1/01
- 5) ANSI/ISEA 105-2005
- 6) 橋本英文, 刃物雑学事典
- 7) W.F.Knoff, Cut Resistance Performance and Transverse Mechanical Properties of KEVLAR(R) Aramid Fibers, 1993 (未公表)

久木野 敏 (くきの さとし)

1972年、東京都立大学工学部機械工学科卒業、同年、東レ(株)に入社、繊維高次加工技術の開発に従事。1984年、東レ(株)ケブラー事業部門の発足から用途開発に従事。現在、東レ・デュボン(株)ケブラー技術開発部長。