羊毛繊維と低温プラズマ処理

森 益一 MORI Masukuni
森技術士事務所

1. はじめに

低温プラズマ処理は高分子最表面の極めて薄い層の化学組成を変化させ、表面を改質することに特徴がある。最近では、表面の数分子層の改質がナノテクノロジーにおける技術革新の主要技術として電子、生体、センサー、繊維材料および複合材料など幅広い分野で展開され、新しい研究が始まっている。繊維分野でもプラズマ処理は非水、非溶剤、非塩素など薬剤を使用することなく短時間処理で新しい機能を付与する改質加工に適している。特に、羊毛繊維に対しては高い防縮性付与と染色性改善という非常に価値のある改質効果が期待できる。また、この改質効果は恒久的に保持されることが明らかにされている。そして、この永久性は羊毛特有の組織化学的構造によるものと考えられる。

元来、羊毛繊維は優れた特性を持っているが、その特徴のひとつである縮絨性のために家庭で洗濯するとフェルと収縮することが唯一の欠点である。この欠点を補うために低温プラズマ防縮法は現在、防縮羊毛として一般的な塩素処理法に代わる方法として期待されている。

本報では羊毛の他、繊維にない優れた特性について述べるとともに低温プラズマ照射におけるナノテクノロジー技術のもたらす効果について防縮性および染色性改善の立場から報告する。

2. 羊毛の優れた特性

羊毛繊維は綿とともに永年、人間生活に密着し、羊毛繊維特有の柔らかい肌触り、優れた外観や着心地の良さから高級な衣料として愛用されてきた。そして合成繊維がこれほど進化した今でも合成繊維にはない羊毛特有のいくつかの優れた特性が認められている。この特長を残したまま、安全な方法で耐洗濯性を付与することができればその技術的および商業的意義は大きい。ここで、羊毛繊維の特徴を列挙する。

1. 羊毛は優れた弾性繊維であるとともに水による可塑性もある。

2. 羊毛は吸湿性、保湿性がよく、水分を発散しやすい。
3. 羊毛には縮絨性がある。
4. 羊毛は染色性がよい。
5. 羊毛は保温性がよい。
6. 羊毛は撥水性がある。
7. 羊毛は難燃性である。
8. 羊毛は軽い。
9. 羊毛は生分解性繊維である。

表1は羊毛と衣料用繊維として多用されているレギュラーポリエステルおよび綿と比較して繊維特性をまとめたものである。

表1に基づいて、羊毛の優れている点を説明すると、羊毛のヤング率はポリエステルの1/3、綿の1/4-1/7で、繊維が曲がりやすく、しなやかであることを示す。また、羊毛単繊維を強く引っ張って歪みを生じても時間が経つと、独特の α -ヘリックス構造とジスルフィド(SS)結合があるために徐々に回復し、ついに元に戻る。その意味で羊毛は弾性体とすることができる。羊毛は2%程度の伸張では直ちに99%が回復し、20%伸張しても63%回復する。それらの伸張に必要な力は1.0-1.5gf/dであるのに対し、ポリエステルは20%伸張するのに4.7-6.5gf/dの力が必要で、その時点で破断する。綿は5%伸張の場合、45%しか回復せず、7%伸張すると切断し、伸びにくい性質であることを示している。

この性質は衣服にした場合の着心地の良さと密接に関係する。例えば、純毛のジャケットを着用して車の運転すると身体の僅かな動きに対して被服は、あたかも皮膚のように敏感に追従して伸縮回復し、抵抗がないが他の素材のジャケットなどではしばしば伸びないために運転しにくいと感ずるのは日常、良く経験することである。織物の風合いはKESシステムにより数値評価される。いま、2/2の綾織物で紳士服地としての総合風合い(THV)を5段階評価で比較すると毛織物は平均して、3.5-4.5の範囲に入るのに対してポリエステル織物は2.0-2.5で毛織物の方が着心地が良いことが示される。この評価法は織物を引っ張ったり、曲げたり、せん断したり、圧縮したりさらに表面こすったときの特性を測って、それらの値から総合的に判断するもので5は最も快

表1 代表的な繊維素材の性能

特性項目		羊毛(メリノ)	ポリエステル	綿(アップランド)
引張特性	強度(gf/d)乾(湿)	1.0-1.7(0.8-1.6) ¹⁾	4.7-6.5	3.0-4.9(3.3-6.4) ¹⁾
	伸度(%)乾(湿)	25-35(25-50) ¹⁾	20-25	3-7(7-10)
	伸張回復率(%)	99(2%伸張) 63(20%伸張)	90-99(3%伸張)	74(2%伸張) 45(5%伸張)
	ヤング率(Kgf/mm ²)	130-300	310-870	950-1300
可塑性		湿熱セット性あり	乾熱セット性あり	なし
公定水分率(吸湿係数) ²⁾		15.0(33.3-35.3) ²⁾	0.4(0.5) ²⁾	8.5(19.0-20.2) ²⁾
水蒸気拡散係数(cm ² /sec)		17.45 × 10 ⁻⁴	4.5 × 10 ⁻⁴	114 × 10 ⁻⁴
縮絨性		あり	なし	なし
難燃性(限界酸素指数) ³⁾		23.8	20.8(溶融する)	18.4
染色性		100 で高堅牢染	原則130 染色	多量の塩必要
保温性(cal/m ² .sec.) ⁴⁾ 熱損失		0.8		3.2
吸湿熱(Cal/g)		26.9	1.2	11.0
撥水性(接触角) ⁵⁾		81	67	59
生分解性		あり	なし(石油系繊維)	あり
比重		1.30	1.38	1.54

1) 洗濯引張強度

2) 吸湿係数: 大住吾八著「繊維原料」株式会社コロナ社, 179 (1964)

3) 限界酸素指数: 酸素指数法 [LOI O₂%] 値, 繊維学会発行, 「繊維便覧」126頁

4) 熱損失: 繊維便覧

5) 撥水性(接触角): 立花太郎, 白沢謙, 山内久子, 日化第15年会講演要旨集(1962)

適に感じるのに対し, 1は最も着心地が悪いことを示す。

羊毛は優れた弾性体であると同時に, 適当な圧力・水分・温度条件下で形態が保持されるような可塑性の性質がある。また, 酸化・還元剤などでセットすると与えられた形に固定されるようなセット性をもっている。セット性は羊毛のSS結合に基づくもので織物のセットに重要な役割を果たし, また, プリーツやズボンのラインをつけるときにも利用される。ポリエステルは熱可塑性繊維であるが綿には可塑性はない。

さらに, 羊毛繊維の吸湿性は他繊維と比べてかけ離れて大きい。羊毛の吸湿性は標準状態では15%, 高湿度下では33.3-35.3%まで吸湿する。また保湿力も大きい。さらに優れていることは多細胞からなる独特の構造から水分を速やかに放散し, 余剰の水分が肌についてべたついたり, 冷えて悪寒を与えたりすることがない。そのために羊毛は肌着としても他繊維にない優れた機能を発揮すると言われ, 肌着の開発もされている。また, この性質は帯電性の点でも着用した場合の快適性のよさで合成繊維とは異なる。

羊毛は色相や堅牢度の特徴を持った種々の染料により100 で短時間に染色できる。羊毛繊維はこれらの染料と強固にイオン結合し, 日光, 洗濯, 汗および摩擦に対して高い堅牢度をもつ染色物を得ることができる。羊毛の最大染料吸収量は30%とも言われ, 深く鮮明な色が得られ, 特に漆黒と言われる深い黒が得られるのも羊毛繊維の特徴である。適切な染色条件を選べば染料を100%吸尽させることができるので, 染色の再現性もよく廃液の処理も容易である。

この他にも羊毛には縮絨性など羊毛だけしかない優れた性質があり, 他繊維では置き換えられない。縮絨性は防縮性と深く関連する。

図1 羊毛と合成繊維に対する消費者のイメージ調査結果

3. 羊毛の防縮加工

羊毛特有の優れた性質である縮絨性のためにセーターなどは家庭で洗濯するとフェルト収縮し, 毛羽立ちし二度と着用できないことである。そのために羊毛製品は常にドライクリーニングに出さなければならないという取り扱い難さがある。図1に2003年に日本全国の18歳以上の女性312人を対象に, 羊毛と合成繊維の持つイメージを8つの項目についてアンケート調査した結果を示す。

羊毛が合成繊維より優れていると判断されるのは, 羊毛は肌触りがよい, 長く使える, エレガントで高級感があるという点である。一方, 合成繊維が優れていると判断されるのは次の4項目である。手入れ, 洗濯が簡単, 色がきれい, 旅行に便利およびカジュアルと言う点である。この結果から消費者は羊毛には今なお, 肌触りが良いことなど羊毛のよさをハッキリと認めながら, 家庭で洗濯できないなど取り扱いの悪さから敬遠している。今や衣料用全繊維に締める割合は2004年の世界的な規模の調査では合成繊維の60%, 綿の37%に比べて羊毛は1970年に7.5%あったものが2%に下がっている。この羊毛の欠点である手入れの難しさ, すなわち, 家庭で洗濯できないという問題を解消するために1970年代から防縮加工羊毛の生産が始まっている。羊毛の防縮技術は種々, 研究されてきたがザ・ウールマーク・カンパニー

の統計によると現在、その54.3%は湿式塩素処理と樹脂加工の組み合わせによるトップの連続防縮法（クロイハーコセット法）であり、残りの45.7%は水溶性ポリウレタン樹脂による編織物あるいは製品での樹脂加工であるとされている。

しかし、AOX（吸収性有機ハロゲン化合物）放出問題と有害工場排水の規制強化でこの塩素処理法に代わる安全で環境汚染の少なく、商業的にも実用化可能な方法の実現が世界的な急務になっている。低温プラズマ処理法が実現すれば、他繊維にない優れた特性を持ち、生分解性もある羊毛は再び重要な衣料素材として見直されることは確実である。

低温プラズマ防縮法は水も化学薬品も一切使用せず、時代の要求に最も適合するものである。処理による有害な廃水やガスの放出もなく最も理想的な処理法であるが、その防縮効果には多少の懸念が持たれていた。そのためにここ数年来、ドイツの羊毛研究所などではプラズマ処理後イソシアネート樹脂加工する方法や酵素で後処理をする方法が検討されてきた。前者は特に羊毛トップの処理を前提に開発研究されたが問題があり、現在は織物で別の方法に転換している。後者はすでに1980年代からスイス、サンド社などを中心に開発されたが、酵素併用の意義は少ないと思われる。

4. 羊毛の低温プラズマ処理による防縮効果と表面変化

筆者らはアルゴンプラズマ処理だけで特に、樹脂による後処理や酵素との併用なしにマシンウオッシュャブル製品の実現が可能かどうかについて研究を行った。

日本において、低温プラズマ処理がポリエステル繊維表面の親水化処理法とともに羊毛繊維の防縮加工法として注目されたのは1980年頃であった。世界に先駆けて羊毛繊維防縮およびプリント前処理用に実用機が稼動した。筆者はこの装置を使って高級な羊毛のシャツ地、ブラウス地の実生産のチームに参加する機会を得て開発を行ってきた。この経験から羊毛製品のプラズマ処理による防縮加工法の実現の可能性を確信できるようになった。

低温プラズマはグロー放電により電離してできた電子と正イオンの他に励起した分子や原子あるいは、ラジカルが混在しながら全体として電氣的に中性を保っている。この状態をプラズマ状態と言う。低温プラズマ状態では熱エネルギーによる分子の衝突や破壊は起こらないが、高速電子による分子や原子の励起、ラジカル、イオンが生成し、この低温プラズマ活性種によって高分子表面はエッチングとインプラネーションすなわち化学組成変化を起こすと考えられる。羊毛繊維にプラズマ照射した場合にも羊毛表面に同様な現象が起こると考えられる。羊毛に低温プラズマ照射した場合に実際にどんな変

化が起こるか実験した結果に基づいて簡単に紹介する。

羊毛編織物製品を洗濯すると緩和収縮とフェルト収縮とが複合して発生するので、フェルト収縮に絞って結果を得るには編織物よりは、むしろ製造工程中に、応力の比較的に加わっていない羊毛トップを用いてプラズマ処理と性能評価を行うことが望ましい。さらに、フェルト性を正しく評価するには羊毛品種の選定も重要な問題である。フェルト収縮が起こりやすい繊細なメリノ羊毛とフェルト収縮の起こりにくい太くて硬いニュージーランド羊毛の2種類を選んで検討した。プラズマ処理条件は基本的には工業生産を前提として行い、処理ガスとしては改質効果の大きいアルゴンを選定した。放電出力は100Wで行った。洗濯はトップのフェルト性評価に一般的に使われるアーヘンフェルトボール試験法を用いた。

羊毛繊維をアルゴンプラズマで100W、90s処理すると羊毛の種類に関係なく、現在、商業的に流通している塩素処理羊毛より高い防縮性が得られることが見出された。100W、360s処理ではほぼ完璧な防縮性が得られた。織物の場合も、織物組織構造に関係なく、完全なマシンウオッシュャブル性が得られることがわかった。

処理時間を5sから360sまで変えてプラズマ処理した場合の重量変化から減量速度を計算した結果、重量減少量と処理時間の単純な一次関数で回帰すると、その寄与率(r^2)は0.9802となり、非常に強い相関があることがわかった。すなわち、羊毛繊維は低温プラズマ処理すると繊維表面が処理時間の増加とともに削り取られることを示している。この場合の重量減少速度は $3.77\mu\text{g}/\text{cm}^2\cdot\text{s}$ でポリエステルと比べると約1/3に相当することがわかった。

アルゴンプラズマ照射時間90-180sでは、表面深さ30-60nmエッチングされると計算された。また、同時に羊毛最表面には種々のラジカルが生成すると推定された。羊毛繊維の最表面に位置し、18-メチルエイコサン酸からなる2-3nmの脂質層と5-7nmのエピキューテクルは完全に崩壊し、さらに、その下部層を形成しSS結合を多量に含む硬いA層と呼ばれる組織の1/3-2/3がエッチングされると推定された。そして羊毛繊維表面は強い親水性に変化することが見出された。しかし、羊毛繊維表面の組織も形態も一様ではなく、したがって、削り取られる厚さも一様ではなく、部分的に強く削り取られたところとそうでないところがあり、表面は未処理羊毛表面よりかなり凸凹の分布の不均一性が増加していると推定されるが、プラズマ処理羊毛単繊維の強伸度試験の結果からは羊毛繊維はプラズマ処理で強度、伸度およびヤング率など物性的に全く変化せず、プラズマの影響はコルテックス内部までは達していないことが見出された。インプラネーション反応により羊毛表面の化学組成は変化しC-O, C=O, C(O)Oのような多量の酸化物が生成されることも見出されている¹⁾。

5. 羊毛の低温プラズマ処理による防縮のメカニズム

羊毛は短時間のプラズマ処理で塩素処理と同様の高い防縮性が得られることが明らかになったが、なぜ、羊毛はプラズマ処理でフェルト収縮しなくなるのかそのメカニズムは現在、明らかにされていない。プラズマ処理による表面の化学組成変化はX-線光電子スペクトル(XPS)法により、また、形態変化はSEMや原子間力顕微鏡(AFM)などの最新の分析装置を用いて研究した。これまで、羊毛の収縮および防縮の発現について多くの研究があるが、「スケールの摩擦係数の異方性」による説を支持する研究者が多い。しかし、今回のアルゴンプラズマ処理羊毛における防縮性の発現は、種々の物性変化、例えば、摩擦係数や引抜き強度の測定からスケール方向における摩擦係数の差が防縮性を決定するとする異方性の理論だけで説明できないことがわかった。

また、スケールの形態に関して最新の超深度カラー3D形状測定顕微鏡を用いて、未処理、プラズマ処理後およびプラズマ処理羊毛を水に浸したときの羊毛表面の形態変化を同じ繊維の同じ場所で観察したが、上記の3つの状態のいずれの場合においても、スケール先端が開いたり開いたりする状況は観察できなかった。顕微鏡付属のソフトにより繊維の長さ方向における約160 μm の直線距離間の起伏を測定したが、その結果からもスケールの開閉に関係するような高低差が生じていることは確認できなかった。さらに、最新のSEMを用いて1万および2万倍の2次電子像をそれぞれ繊維20本について比較した結果、メリノ羊毛およびニュージーランド羊毛の何れ場合も高倍率にすると処理羊毛の上部キューティクルと下部キューティクルの接合部位に穴が開いたり、スケールの厚さが薄くなったように見える箇所があったが、そのように観察されるものは40本中の4本程度で繊維表面における連続的なスケール形状の変化は認められなかった。これら拡大倍率下ではプラズマ処理の有無で形態の差はほとんど発見できず、形態変化と防縮性を関係付けるような情報は得られなかった。湿式SEMでもプラズマ処理羊毛が水中でスケールが開かなくなるというような観察結果は得られなかった。しかし、AFMの測定結果はrms値でアルゴンプラズマ処

理羊毛の表面粗さが未処理の2.5倍になったが、分布の差として確認するためには、試料を変えてさらに観察を続ける必要がある。

筆者らは今までの研究とは全く別の観点から、プラズマ処理を施した羊毛編織物の風合い変化に着目し、羊毛繊維間相互作用、すなわち、羊毛トップの繊維間凝集力をテンシロン引張試験機を用いて引抜き強度を調べることにより評価した。測定回数20回の測定値の変動は1以内に入る確率が85%以上でプラズマ処理した羊毛の引抜き強度は未処理羊毛の2.5から3.0倍に増加し、さらに水中では7倍から10倍になった。このように、引抜き抵抗の大きいこと、すなわち、繊維間凝集力増大によって繊維同士が密着して繊維間の相互移動が抑制される結果、フェルト収縮せず、高い防縮性が得られると考えた。これは今までのスケール先端のみが収縮、防縮の原因とする考えとは異なり、羊毛表面全体が粗面になるとともに、インプラネーション反応によって生じた官能基の作用も加わりキューティクル表面全体の摩擦係数が増加して繊維同士が強固に接着すると考えるのが種々の物性変化や形態観察の結果から妥当であると結論した。羊毛の防縮機構の研究にトップの引抜き強度を考慮に入れたのは筆者が最初である。

しかし、羊毛はプラズマ処理するとなぜそのように繊維同士が密着して動かなくなるか、そのメカニズムはそれ程簡単に断定できない。エッチングによる表面粗さの増大、強い酸化反応で新しく生成した酸化物が関与する凝集力の増大および繊維表面電位の変化など予想されるが、非常に短時間のプラズマ処理で羊毛繊維最表面の脂質層、F層のみが除去された時点で既に高い防縮性が発現していると考ええるとF層の主成分である、18-メチルエイコサン酸のような潤滑剤の喪失が繊維表面すべりを抑制し、繊維間の移動を抑えて、収縮しなくなると単純にも考えられるがこの魅力的な問題を解決するには、さらに新しい観点から実験を行い研究する必要がある。

図3 18.9 μm 羊毛繊維の同じ繊維の同じ場所を超深度カラー3D形状測定顕微鏡で観察($\times 1000$) 下方の曲線は繊維軸方向の起伏の変化を示す

6. 低温プラズマ処理羊毛の染色性

プラズマ処理羊毛の染色性を明らかにするため、染料構造と染色機構の明らかな染料を用いて羊毛繊維表面に新しく生成した官能基と染料との間の相互作用および防縮との因果関係を検討した。低温プラズマ処理羊毛を未処理羊毛と同じ条件で6部属20種類の羊毛用染料で染色した結果を次に示す。

羊毛用染料として汎用される均染性酸性染料、堅牢型酸性染料、金属錯塩染料、酸性媒染染料および反応性染料の何れも、プラズマ処理により染着濃度 (K/S 値) が110%から500%高くなった。この効果はプリント性においても同じでプラズマ処理羊毛は、未処理羊毛より染色濃度が高くなるとともに絵際が鮮明になり、染料の繊維内部への浸透も助長される。特にインクジェットプリントの場合、顕著に差が生じた。

K/S 値 (染着濃度) は染料分子量の大きい染料で高く、置換基の種類など染料構造にはそれほど、関係しないことが明らかになった。

カチオン染料の K/S 値はプラズマ処理により増加しなかった。このことは、処理により生成したカルボキシル基やスルホン酸基の濃度増加が寄与していないことがわかった。

プラズマ処理時間に対する K/S 値の増加傾向は、プラズマ処理時間に対する防縮性、引き抜き強度および親水化度との関係と非常によく類似していることがわかった。プラズマ処理羊毛により親水化が増加するとともに Tippy dye (羊毛の毛先と根元の染色性の差) が減少し、繊維の Skitteriness (筋むら) もなくなり、均染性が向上して、色さえがよくなる。均染性酸性染料の均染性の指標となる半染時間も短くなった。

耐光、耐洗濯 (熱水) および摩擦堅牢度が染料によって 0.5-1.0 級向上する。これは、表面の脂質層が除かれ親水性になり、完全なイオン結合が進み、汚染がなくなることが原因と考えられた。

良好な発色と堅牢度特性を得るためには染料が繊維内部に完全に浸透することが不可欠で、染料が繊維内部に浸透するには CMC を通って侵入する細胞間拡散以外にスケールを通して拡散する細胞内拡散がある。プラズマ処理により、F 層の剥離とスケールエッジ部分の破壊が起こり、さらには、スケール間に存在する脂質や可溶性エンドキューティクル蛋白が除去されることにより染料の繊維内拡散速度が大きくなると考えられる。これは未処理羊毛の染色が、主として CMC を通る細胞間拡散によるのに対し、プラズマ処理では高濃度で均一な染色が可能になるためと考えられる。このような理由でアニオン染料の取り込みを均一化され、Tippy dyeing や Skittery dyeing が改善されるとも考えられる。このような優れ

た効果は合成繊維、綿および絹では得られないことを考え合わせると、この効果は羊毛の組織化学的構造と密接に関係すると推定される。

7. プラズマ処理羊毛製品の形態安定性

染色以外の仕上の立場から考えても羊毛編織物はプラズマ処理すると次のような効用がある。

毛織物はプラズマ処理するとフェルト収縮が抑制されるとともに緩和収縮も繊維構造により差はあるものの経緯方向とも未処理の半以下になり、安定する。

ハイグルエクスパンション挙動の範囲も小さくなり、縫製工程におよび着用中の取り扱いが容易になる。

羊毛編織物はプラズマ処理すると洗濯のみならず、着用中の摩擦に対しても毛羽立ったりせず、いつまでもクリヤーな外観を保持できる。

プラズマ処理した羊毛編織物の構造をそのまま保持するフラットセット性があり、プロセスのいずれの過程でもそれ以後の形態変化を起こさないように固定できる。特にファンシーな編織物の染色やプリントの場合、プラズマ前処理で高温長時間の染色やプリント工程における毛羽立ちや組織崩れを防止できる。

一般に羊毛編織物は、のようなロープ状での染色や精練における皺や外観変化を防ぐために湿熱での強いフラットセットが必要であるがその必要がなくなり、染色・仕上の全工程を従来の 2/3 から 1/2 に大幅に短縮でき、省力と省エネが確実に達成できる。このことは複雑な羊毛染色・仕上工程の新たな革新につながる。

8. その他、羊毛のプラズマ処理の効果

羊毛は低温プラズマ処理すると高いフェルト収縮防止効果が得られるとともに染色性の点でも非常に優れた効果があることがわかった。その他、羊毛はプラズマ処理すると親水性、接着性が向上し、羊毛と他の素材の繊維などを接着する場合に少ない樹脂量で強靱なラミネートやボンデング加工ができ、風合いも柔らかくなる。加えて、防塵・防汚効果、殺菌効果もあると言われている。

9. 羊毛のプラズマ処理の実用化の可能性

以上のように羊毛はプラズマ処理によって羊毛特有の優れた特性に加えて防縮性、染着濃度の向上、染色堅牢度の向上、Tippy dyeing や Skittery dyeing の改善、親水化、接着性の向上など多くの画期的な改善が可能であるが商業的に実用化は可能であろうか。

プラズマ技術は環境適合と広範囲に利用可能なため最も興味ある未来型適応プロセスである。永年の開発研究

図4 プラズマ生産機の概観図 (KPR-180)

図5 Tcnoplasma の稼働状況 (ロシア)

の結果、機械は工業生産が可能になった。ロシアのイヴァノボの開発研究所 Niekmi Research Institute でグロー放電プラズマ技術による KPR-180 型試験機 (Tcnoplasma) が開発された。この機械は現在、ロシアのプリント会社、Pavlsky Posad で4台稼働している。イタリアの H.T.P コニテックス社は Niekmi Research Institute のプラズマ発生装置を搭載して自社の釜に組み込んだ機械を世界に7台販売し稼働している。これらはいずれもバッチ式である。日本には3台のバッチ式のプラズマ処理機の他に平成10年度新エネルギー・産業技術総合開発機構委託による地球温暖化防止関連技術開発「環境調和型染色整理技術開発」で製作した連続低温プラズマ処理装置がある。図4はプラズマ生産機の外観を示し、図5は現在、イヴァノボの工場で羊毛ショールのプリント前処理機として実際に稼働している機械の写真である。

ここで現在、防縮羊毛製造の主流であるクロイハーコセットと低温プラズマ処理の製造コストを比較した。X.J.Dai²⁾の試算によれば、塩素処理法では一般的に1トンの織物を生産するのに次亜塩素酸ソーダ387kg、硫酸93kg、重亜硫酸ソーダ143kgおよび同量の酢酸と水が235t必要で、そのときの総エネルギー消費量は織物1t当たりで7MWh必要である。さらに、この強酸性の廃液処理費用および給水と処理物の乾燥のためのエネルギー消費も大きい。

一方、毛織物を低温プラズマで防縮加工する場合、ロシアの Pavlsky Posad 社³⁾の実績では幅160cm、目付が95g/m²の織物の処理の場合、総エネルギー使用量は0.043kWh/m、水の消費量は3ℓ/m (Recyclable)、生産量

は3000m/shiftである。低温プラズマ処理の場合は、電力と冷却用の僅かな水の費用以外は必要ない。これらの資料に基いて上記の織物1m当りの処理費を試算するとプラズマ処理コストは約5円に対し、クロイハーコセットの場合はその約3倍の14.7円となる。

さらに、クロイハーコセットの場合、処理による生地目減りは7-10%で相応の強度低下もあるがプラズマ処理の場合は0.3-0.5%の減量で処理による物性変化はない。さらにクロイハーコセットの場合は処理による羊毛の黄変があるがプラズマ処理では黄変は全くない。

10. 今後の展望

天然の羊毛繊維は安全で感性豊かな衣料用素材としての優れた機能を併せ持っている。その本来の特性を損なうことなく水も化学薬品も一切使用しない安全な低温プラズマ処理法により高い防縮性、染色性などの機能が付加され、新生繊維として再びその役割を果たすことが期待される。そのために低温プラズマ処理法は塩素処理に代わる羊毛繊維の表面改質技術としてその重要性は益々期待される。筆者は永年、羊毛の加工に携わり、プラズマ処理については1980年代から加工の現場にあり、最近はそのメカニズムを勉強し、益々「プラズマ防縮実現の可能性」を確信した立場から早期転換のために今後も貢献したい。

参考文献

- 1) M. Mori, I. Inagaki, *Sen-i Gakkaishi*, 61, 267-275 (2005)
- 2) J. Dai., Doctor Thesis.
- 3) I. T. B. Dyeing/Printing/Finishing, 1, 21-24 (1995)

森 益一 (もり ますくに)

平成8年、艶金興業(株)、墨総合研究所を定年退職、同年、森技術士事務所を設立、主として毛織物の染色仕上に関する技術指導等、特にKESによる織物風合い評価技術と感性豊かな織物創作に従事、平成18年9月現在、静岡大学工学部物質工学科に在学中、「羊毛のプラズマ防縮に関する研究」を実施中。