最近の不織布研究動向

Recent Development in Studies of Nonwoven Fabrics

渡 邊 明

1. はじめに

我が国の不織布産業は、1960年に当時の呉羽紡績(株)(現東洋紡績(株))が米国より乾式不織布製造設備1系列を購入し、関連会社「リットンセンター(株)(現呉羽テック(株))」で生産したのが始まりであるとされている。一方、ニードルパンチ機が最初にわが国に輸入されたのは1961年12月であった¹⁾。我が国のニードルパンチ機は1962年3月寿工業(株)によって作られたのが最初であった²⁾。その後、不織布は目覚ましい発展を遂げ、今では宇宙用材料にも欠かせない材料となっている。

2. 不織布の生産量および研究の分類

まず最初に、日本における1999年度の不織布生産高の製法別と用途別分類をそれぞれ図1、図2に示す³⁾。製法別では、ニードルパンチ式が30%で最も多く、次いでケミカルボンド式、スパンボンド式と続く。用途別では、産業用が27%と最も多く、医療・衛生用と続く。衣料用はわずか4%にすぎない。

次に、最近の不織布に関する研究の分類と各分野の報文数を表1に示す。表1は、最近3年間('99/11~'02/10)に記載されたJICSTファイルの不織布分野の文献を分類したものである。まず“報告”と“論文”に大別した。論文をさらに分野別に分類するに当たって、ジオテキスタイル(土木)関連は当然工学に属するが、論文数がきわめて多く特殊分野として別分類にした。工学関連の“研究論文”をさらに“基礎”と“応用”に分けた。“基礎”とは、不織布そのものを研究対象とし、その構造解析および力学特性を中心とした論文、および構造と物性(力学、実用)との関係について研究した論文を指す。一方、“応用”とは、不織布の特異的性質を生かし、具体的に用途・製品を視野に入れて、製品の一部に利用した研究を指す。いずれの分類に

図1 日本の不織布生産高(製法別)

図2 日本の不織布生産高(用途別)

おいても、明確に区別することが困難な報文がきわめて多くあったが、あえて勇断した。

この分類より、最近3年間で約1600件の不織布の“報告”および“論文”があり、それぞれ同程度の数である。“報告”の内、“解説と市場調査”で約半分(46%)を占める。次いで、“技術開発・新加工法”が、約20%と続く。評価・検討および不織布を利用した新製品の紹介もそれぞれ同程度(約10%)報告されている。

一方、“研究論文”では、“工学関連”が約60%(ジオを含めると約80%)を占める。工学関連の“基礎”と“応用”の論文数の割合は、前者が約40%、後者約60%である。これらの論文の内、著者が現在興味をもっているニードルパンチ不織布に関する論文数は、約30%である。この割合は、偶然にしろ図1のニードルパンチ不織布の製法別生産量の割合と一致している。

AKIRA WATANABE
岐阜大学工学部応用化学科
助教授 工学博士
〒501-1193 岐阜市柳戸1-1
Tel: 058-293-2625 Fax: 058-293-2625
E-mail: watanabe@apchem.gifu-u.ac.jp
〈専門〉繊維工学、高分子材料
〈趣味〉水泳、テニス、魚釣り

表1 不織布関係の論文の分類

3. 最近の研究動向

表1の工学分野から抜粋した論文の内、ニードルパンチ不織布に関する研究論文を中心に特性別に紹介する。

3.1 力学特性

Ganguly らは、化学加工ジュート(TJ)およびジュートとポリプロピレン混紡ウェブを、80,120,160Pene/m²でニードルパンチした不織布について、曲げ剛性、密度、引張挙動、応力緩和、繰返し荷重に対するパンチ密度の影響を検討した。混紡不織布はTJ不織布に比べて、引張強度、弾性率は全てのパンチ密度で高いが、応力緩和による応力低下は著しく大きかった⁴⁾。

渡邊らは、アラミド系繊維(ノーマックス)のニードルパンチ不織布に200℃以上の高温で2MPaの高圧下で熱圧縮疲労を繰り返す(1サイクル60分で最高100回)を与え、その後の不織布の圧縮挙動に及ぼす針の形状の影響を研究し、圧縮回復特性と針のスロートの断面積との関係を詳細に考察した。スロートの断面積が大きいくほど厚さ方向に配列する繊維数が多くなり圧縮回復が良くなった^{5,6)}。また、疲労温度の方が疲労圧力より不織布の圧縮挙動により大きな影響を与えることを明らかにした^{7,8)}。一方、引張強度は、疲労温度が210℃を超えると減少し、260℃では約20%減少した。この結果は、耐熱性アラミド繊維の熱分解温度は370℃であるにもかかわらず、熱と圧力を同時に加えると、それ以下の温度でも繊維の劣化が生ずることを示唆している⁹⁾。さらに、引張特性に及ぼす針の形状とパンチ密度の影響についても研究し、スロートにキックアップがあり、さらにパンチ密度が600Pene/m²以上になると、針は繊維を切断し、引張強度が減少することを示した¹⁰⁾。

Debnath らは、黄麻をベースとしたニードルパンチ不織布の強度、破断伸度、構造異方性、圧縮厚さに及ぼす重量、針密度、混合率(黄麻/ポリプロピレン)の影響を研究し、パンチ密度200punch/cm²で構造が強固となり最適パンチ密度であると結論した¹¹⁾。

Lee らは、不織布挿入型±45°アングルプライハイブリッド複合材料の剛性を予測するため、ポアソン比を考慮した二次元複合則を提案し、実験値に近い計算値を得た¹²⁾。

Ganguly らは、100%の黄麻および黄麻とポリプロピレン混紡のニードルパンチ不織布について、パンチ密度、針浸透深さ、黄麻の繊維長、ポリプロピレン繊維の混率が力学特性に及ぼす影響を研究し、ポリプロピレン混紡の方がよりかさ高で強く、ソフトである。さらに、ポリプロピレン繊維をランダムに積層する方が機械方向の不織布の引張特性および曲げ特性が良くなると報告している¹³⁾。

Lee らは、各種針穴パンチ密度の不織布の力学的性質に及ぼす繊維構造変化の影響を研究し、引張強度、破壊靱性はパンチ密度の増加とともに増加するが、曲げ、衝撃、疲労および磨耗特性はパンチ密度の増加とともに減少すると述べている¹⁴⁾。

Wizemann は、パンチ密度が高いほどニードルフェルトの安定性が良くなること、バーブやスロートは最も重要な部分で、繊維を引掛けて交絡させ縦・横・斜め方向の強度を増加させることなどを報告している¹⁵⁾。

3.2 構造

Pourdehymimi らは、画像解析の技法を応用して、ナイロン捲縮繊維ウェブのニードルパンチ、ポリプロピレン繊維のспанボンドおよびспанボンドーメルトブロー、ポ

リエステル繊維のспанボンド等の不織布中の繊維配向特性を求めた¹⁶⁾。また、彼らは、カードウェブやспанボンド不織布を用いて、不織布の各画像から背景への最低距離を2回画像走査で求める距離変換の画像解析法で、不織布繊維の直径の分布状態を測定した¹⁷⁾。

Krucinska らは、不織布の繊維配列を画像で測定するため、円偏光顕微鏡観察技法を応用した画像処理システムを開発した。また、統計的手法による繊維配列の計算結果との整合性の評価によって、本ソフトウェアの有効性を検証している¹⁸⁾。

金子らは、パンチング中の繊維切断に及ぼす針の挿入深さ、および針の形状の影響を、針のキックアップに着目して検討した¹⁹⁾。

Kang らは、ニードルパンチ不織布は繊維の絡み合いにより三次元構造をとるが、その繊維配向度とパンチ密度との関係を画像解析システムにより解析した²⁰⁾。

Barella は、前述の Pourdehyimi ら¹⁷⁾の研究による繊維直径の統計的分布が対数正規モデルに明瞭に従うことを示した²¹⁾。

3.3 構造と物性(力学、実用特性)との関係

Thorr らは、画像解析ソフトウェアと機械的動力計と光センサとを組み合わせた装置を開発し、ポリエステルспанボンド不織布の引張りによる不織布の構造変化を追跡した。各種のパラメータに数学的解析を行うことにより、複雑な力学的挙動(降伏点など)に関する基本的情報を解明した²²⁾。

永田らは、マイクロ波を用いた繊維配向測定法により、アラミド紙およびそのプレプレグの繊維配向を測定し、アラミド繊維の線膨張係数の長軸方向と短軸方向の比と配向度(MOR)とは強い相関関係があることを示した²³⁾。

Adanur らは、有限要素法による不織布の応力ひずみ挙動を予測するコンピュータモデルをさらに発展させ、不織布の引張挙動(特に曲線の形状)は繊維ウェブの捲縮(カール)分布の影響を大きく受けることを示した。さらに、引張変形中の不織布の横収縮を解析するための数値法を提案し、不織布の力学的性質に及ぼす繊維配向諸特性の影響を実験的および理論的に解析した²⁴⁾。

森沢らは、спанレース不織布では、高圧水ジェット(WJ)で繊維を交絡させるため、WJが通過した孔が残る特殊な構造になることに着目し、不織布およびWJの条件を変えて、細孔径分布および官能特性(柔らかさ、風合い)に及ぼす影響を研究した²⁵⁾。

Kim らは、点接着不織布の引張試験による構造変化をリアルタイムで詳細に把握できる装置を開発した。この装置により不織布が変形を受けた時、内部の繊維配向、接着点ひずみなどの変化を知ることができることを示した²⁶⁾。

Mitra らは、ポリプロピレン繊維ニードルパンチ不織布の構造パラメータ(繊維数指数(INF)と繊維配向)と引張試験における破壊荷重(F)、破壊伸度(E)および横縮み

(poisson 比:P 比)との関係を研究し、INFが高いほどFおよびP比が高く、Eが低い、また、横方向繊維配向度が高いほどFとP比が低く、Eが高いことなどを示した²⁷⁾。

Lasic は、ステッチボンド不織布のバイアス方向の引張試験を行い、いずれの角分布についても破断強度は Gauss 関数に従うことを示した²⁸⁾。

Kim らは、ポリプロピレン繊維の熱接着式不織布の引張変形中の構造変化を観察する新しい装置を開発した。本装置により、繊維配向分散関数(ODF)、結合領域のひずみ、単位セルのひずみ等の変形パラメータを計測し、その解析の結果、繊維 ODF は引張特性に大きく影響することを明らかにした²⁹⁾。また、彼らは、不織布の加工条件(カレンダー温度など)に起因する構造特性(繊維配向、接着点など)と縦方向、横方向および34度方向での引張特性の関係を本装置を用いて解析した³⁰⁾。

Patel らは、спанボンドのニードルパンチ不織布(A)、спанボンドの熱接着不織布(B)およびステープルファイバのニードルパンチ不織布(C)の応力-歪挙動を解析するために、繊維の回路網理論を適応した。B 不織布は理論値と実験値が良く一致し、C 不織布の理論応力-歪曲線は実験曲線から大きく逸脱し、A 不織布はわずかに逸脱することを示した³¹⁾。また、通常幅の引張試験法(X 法)と幅広の試験法(Y 法)の結果、A 不織布の初期弾性率はX 法の方がY 法より著しく低いが、B 不織布はほとんど同程度であることを示した³²⁾。

渡邊らは、ニードルパンチ不織布における針の繊維把持本数、貫通力、繊維の絡み合いの大きさを測定し、それらと不織布の引張強度との関係を数種類の針について比較検討した。針の繊維把持本数は、貫通力、繊維の絡み合いの大きさと高い相関があるが、把持本数が20本以上になると、ウェブの構造が破壊されて良い不織布ができなく、1つのスロートの把持繊維本数は7本程度が最適であると結論した³³⁾。

Ghassmieh らは、レーヨン/ポリエステル混合繊維を原料とする水流交絡法不織布について、その微細構造特性を決定する繊維配向およびストレートセグメント長の分布をSEM 観察と画像分析によって実測し、レーヨン比率、ウェブ配向(直交、平行)、噴射回数および噴射面角度が、繊維配向角分布、引張強度および弾性率に及ぼす影響について研究した³⁴⁾。

Xu は、アラミド、ガラスおよび炭素繊維不織布の画像に Hough 変換法(HT 法)による画像解析を行い、不織布内の繊維配向分布とゼロспан引張強度との関係を考察した³⁵⁾。

3.4 その他(吸音、透過、吸水、断熱など)

Hoshani らは、不織布の騒音抑制材の広範囲な応用に関連して、Zwicker-Kosten 理論(音響性能の数値計算)から誘導した数学モデルを用いて、多孔質中の音波の伝搬を検討した。特に、繊維ウェブの厚みと間隙率の変化に対する

繊維ウェブの吸音係数を算出し、アクリル繊維、綿、ポリエステル繊維の不織布に関して、計算値と実測値が比較的良く一致することを示した³⁶⁾。

Haase らは、織物と不織布から構成される接着布の燃焼性は、不織布の構造、燃焼方向、密度の影響を大きく受けることを示した³⁷⁾。

Sengupta らは、黄麻(J)および化学的に加工した黄麻(YJ)とポリプロピレン繊維(PP)との混織ニードルパンチ不織布について、空気透過性と不織布の製造条件(混合率、パンチ密度、針貫通深さ、黄麻繊維長、布厚さ、布密度)との関係を研究した³⁸⁾。

Jirsk らは、ポリエステル繊維 75% とポリエステルパイコンポーネント繊維 25% の混合ウェブを原料とし、ウェブ直角配列(PLN)とウェブ交差配列(CLN)のかさ高性不織布の断熱特性を比較検討した。PLN は CLN よりも圧縮抵抗率が高いため、任意の圧縮力に対して高い断熱特性を維持すること、不織布を圧縮するほど熱伝導率は減少し、繊維自身の熱伝導率に近づくこと、繊維が太いほど圧縮下での熱抵抗が高いことなどを示した³⁹⁾。

Koehler らは、亜麻繊維/ポリプロピレン繊維混紡ウェブのニードルフェルトの諸性質に及ぼす生産条件の影響について研究した⁴⁰⁾。

Homonoff は、高吸水生繊維(SAF)から作られたニードルパンチ不織布の構造及び一般的な特性、衣服、医療用品等の応用等について詳細に検討した⁴¹⁾。

梶原らは、不織アルミニウム繊維層(WAFL)の有効熱伝導率特性を明らかにした⁴²⁾。

3.5 予測および設計

Barker は、最終形状と寸法制御が特に重要である自動車の内装用ニードルパンチ不織布部品の限界寸法を正確に測定するシステムを開発した⁴³⁾。

Tsai は、不織布の透過率、細孔径、ろ過効率に関する計算式(繊維径、充填密度の関数：A 式)および力学強度に関する計算式(単繊維弾性率、繊維配向角分布の関数：B 式)の理論的誘導を行い、計算値と実験値と比較検討した。A 式は、メルトブローン不織布の場合良く実測値と一致したが、ニードルパンチ不織布の場合、透過率は実測値の方が低かった。B 式は両不織布で良く一致したと報告している⁴⁴⁾。

Kothari らは、熱接合およびニードルパンチ不織布のクリープ挙動を予測するため、構成繊維のネットワーク構造を考慮した理論式を提案した。クリープ挙動の理論的予測はこの式からできるけれども、熱接合およびニードルパンチ不織布の実測曲線は、残念ながら理論曲線から離れた⁴⁵⁾。

渡邊らは、Van Wyk の繊維集合体の圧縮理論⁴⁶⁾をニードルパンチ不織布の圧縮に適用できるように圧縮による繊維の交錯点間距離の変化を考慮して理論を発展させ、不織布の圧縮曲線を予測できる推定式を提案した⁴⁷⁾。また、針のスロートの形状を三角錐と仮定し、スロートに把持される

繊維本数を推定する計算式を提案し、12 種類の針について計算値と実測値を比較検討した結果、両者の値は良く一致した。また、針による厚さ方向に配列する繊維の割合を検討した結果、1つのスロートに把持される繊維本数は7本程度が最適であると報告している⁴⁸⁾。

3.6 宇宙用材料への応用

宇宙用不織布は、特殊な極限状態の環境下で使用されるため、特異性能が要求される。

坂部らは、370~1200℃に加熱されるスペースシャトルなどの宇宙往復機熱防護システム、特にひずみ緩衝材への不織布の適用を検討した。耐熱アラミド繊維を原料とし、通常の不織布製品には要求されない特殊な性能、例えば高温における不織布の引張強度や撥水性、アウトガス特性、断熱性などを研究した⁴⁹⁾。

Tang らは、宇宙および惑星上の真空環境での船外活動(EVA)用の宇宙服に用いられる不織布の断熱材料としての特性を研究した。低高度軌道の高い真空条件(10^{-5} torr)、中間的真空条件(10^{-3} torr)、および火星表面の真空条件(8 torr)のそれぞれの環境下で実験を行い、熱伝導特性を評価した⁵⁰⁾。

4. まとめ

最近の報告では、他の材料との複合化あるいは積層された不織布、および高強度・高弾性、耐熱性などの高機能性繊維不織布、ポリ乳酸などの生分解性繊維不織布に関する論文が多かった。しかしながら、生分解性繊維の不織布の紹介は、紙面の関係で割愛させていただいた。今後、さらなる新機能性不織布の開発・応用が期待される。

参考文献

- 1) 西川文子良、繊維誌(繊維工学)、55, 234-236(2002).
- 2) 鈴木龍雄、繊維誌(繊維工学)、55, 228-230(2002).
- 3) 通商産業省生産動態統計調査(1999).
- 4) P. K. Ganguly, S. Sengupta, and S. Samajpati, *Indian J. Fiber Text. Res.*, 22, 169-175(1997).
- 5) 渡邊 明、横井輝之、三輪 實、繊維学会予稿集, 1999 (G), 156(1999).
- 6) A. Watanabe, M. Miwa, and T. Yokoi, *Text. Res. J.*, 70, 402-408(2000).
- 7) 三輪敏宏、渡邊 明、横井輝之、三輪 實、繊維学会予稿集, 55, 261(2000).
- 8) 三輪敏宏、渡邊 明、横井輝之、三輪 實、繊維学会予稿集, 56, 305(2001).
- 9) 深谷賢志、渡邊 明、横井輝之、三輪 實、繊維学会予稿集, 57, 221(2001).
- 10) 立松寛之、渡邊 明、横井輝之、三輪 實、繊維学会予稿集, 55, 262(2000).
- 11) C. R. Debnath and A. N. Roy, *Indian Text. J.*, 110, 50-53 (1999).

- 12) S. LEE, 小野村貫治、木村 誠、野口博司, S. CHEONG, 日本機械学会材料力学講演会講演論文集, 407-408 (1999).
- 13) P. K. Ganguly and S. Sengupta, *Indian J Fiber-Text. Res.*, **24**, 34-40(1999).
- 14) S. H. Lee and T. J. Kang, *J. Compos. Mater.*, **34**, 816-840 (2000).
- 15) G. Wizemann, *Tech. Text.*, **43**, 20-22(2000).
- 16) B. Pourdeyhimi, R. Dent, A. Jerbi, S. Tanaka and A. Deshoande, *Text. Res. J.*, **69**, 185-192(1999).
- 17) B. Pourdeyhimi and Ntr, *Text. Res. J.*, **69**, 233-236 (1999).
- 18) I. Krucinska and S. Krucinski, *Text. Res. J.*, **69**, 363-369 (1999).
- 19) 金子純一、高寺政行、清水義雄, 繊維学会予稿集 G, 63 (1999).
- 20) T. Kang and S. H. Lee, *J. Compos. Mater.*, **33**, 2116-2132 (1999).
- 21) F. Thorr, J. Y. Drean, and D. Adolphe, *Text. Res. J.*, **69**, 162-268(1998).
- 22) A. Barella, *Text. Res. J.*, **70**, 277(2000).
- 23) 永田紳一、川北嘉洋、小山清人、繊維学会予稿集, G, 307(1998).
- 24) S. Adanur and Liao, *Text. Res. J.*, **69**, 816-824(1999).
- 25) 森沢 純、林 幸男、沢村淳二、近森麻矢、矢井田修, 機能紙研究会誌, **38**, 55-61(1999).
- 26) H. S. Kim, A. Deshpande, and B. Pourdeyhimi, *Text. Res. J.*, **71**, 157-164(2001).
- 27) A. Mitra, M. Cybulska, and B. C. Goswami, *TAPPI Proc. Nonwovens Conf.*, 283-293(1999).
- 28) V. Lasic and M. V. Bottteri, *J. Text. Inst.*, **91**, 324-332 (2000).
- 29) H. S. Kim and B. Pourdeyhimi, *Text. Asia*, **32**, 51-56 (2001).
- 30) H. S. Kim, B. Pourdeyhimi, A. S. Abhiraman, and P. Desai, *TAPPI Proc. Nonwovens Conf.*, **2000**, 38(2000).
- 31) P. C. Patel and V. K. Kothari, *Indian J. Fibre Text. Res.*, **26**, 398-402(2001).
- 32) P. C. Patel and V. K. Kothari, *Indian J. Fibre Text. Res.*, **26**, 409-413(2001).
- 33) 立松寛之、渡邊 明、横井輝之、三輪 實、繊維学会予稿集 **56**, No.1, 307(2001).
- 34) E. Ghassmieh, H. Rsteeg, and M. Acar, *TAPPI Proc. Nonwovens Conf.*, 42(2000).
- 35) B. Xu, *TAPPI Proc. Nonwovens Conf.*, 43(2000).
- 36) Y. Houshani and Y. Yakubov, *Text. Res. J.*, **69**, 519-526 (1999).
- 37) J. Haase and H. Mehlhorn, *Tech. Text.*, **42**, 289-290 (1999).
- 38) S. Sengupta, S. Samajpati, and P. K. Ganguly, *Indian J. Fibre Text. Res.*, **24**, 103-110(1999).
- 39) O. Jirsk and U. T. G. Sadikogl, *Text. Res. J.*, **70**, 121-128 (2000).
- 40) E. Koehler, A. Bergner, and S. Odenwald, *Tech. Text.*, **43**, 25-26(2000).
- 41) E. Homonoff, *Text. Asia*, **31**, 45-47(2000).
- 42) 梶原征洋、吉木裕也、日本伝熱シンポジウム講演論文集, **38**, 519-520(2001)
- 43) J. R. Barker, *Pap. Am. Soc. Mech. Eng.*, 5(1999).
- 44) P. P. Tsai, *TAPPI Proc. Nonwovens Conf.*, 37(2000).
- 45) V. K. Kothari and P. C. Patel, *Indian J. Fibre Text. Res.*, **26**, 273-279(2001).
- 46) C. M. Van Wyk, *J. Text. Inst.*, **37**, T285-292(1946).
- 47) 内藤隆文、渡邊 明、横井輝之、三輪 實、繊維学会予稿集, **56**, 306(2001).
- 48) 立松寛之、渡邊 明、横井輝之、三輪 實、繊維学会予稿集, **57**, 220(2002).
- 49) 坂部敦彦、安藤則雄、稲田一英、繊維機誌, **53**, 44-51 (2000).
- 50) E. S. Orndoff and L. A. Trevino, *SAE. Tech. Pap. Ser.*, (Soc. Automot Eng.)10(2001).

第 6 回 CPD(一般共通課題)講演会

主 催：日本繊維技術士センター 共 催：日本技術士会近畿支部

日 時：平成 15 年 5 月 16 日(金) 13:30~16:30

場 所：大阪産業創造館(中央区本町 1-4-5 TEL:06-6264-9800) 6階 E 会議室

(地下鉄 堺筋本町駅 出口①② ②③本町通り東へ約 300m、北側

CPD 区分 A、課題 1、時間 3.0 です(CPD 手帳をお持ち下さい)

演題及び講師：CPD 活動の 1 年を振り返って

技術者倫理について(2)

日本繊維技術士センター 常務理事 松尾 達樹

日本繊維技術士センター 常務理事 小林 宏臣

参加申込等の詳細は下記にお問合せ下さい

日本繊維技術士センター(JTCC)事務所 〒564-0062 吹田市垂水町 3-7-18(P&M ビル 5F)

TEL:06-6339-1237、FAX:06-6339-0337