

熱収縮ポリエステル繊維布の力学特性に関する実験的研究

谷口与史也*
中谷 昌弘**
中島 宏幸**

梗 概

重さ 4kg 程度の一人乗りの布張りボートを実現している熱収縮ポリエステル繊維布 (Dacron heat-shrink fabric) の基本的な力学特性を調べる。また組み立てに利用している熱収縮性の熱量と収縮率の関係をしらべる。その結果、引張強さは縦糸方向 170 N/cm 程度、横糸方向 100 N/cm 程度であり、熱収縮率は摂氏 120 度下 1 分間の熱入力に対して、縦糸方向は 5 % 程度、横糸方向は 1.5 % 程度であることが分かった。

1. はじめに

膜材料は物流、海洋、土木分野で広く使用されており、加えて建築分野にも徐々に適用されてきている。しかしその適用範囲は倉庫建築や空間構造物の屋根部分、一部補修用に天井材などに限定されており、絶対多数の一般建築物への適用はほとんど見られない。一方、二酸化炭素排出量低減などの地球環境問題を考慮すると建築生産においても真摯に検討する時期にあると言える。建築学会をはじめとする産業界は建築物の長寿命化による二酸化炭素の排出量抑制を提唱しているが、建設時の排出量にも目を向けるべきである。膜材使用による建設時の省エネルギーと建物の軽量化は大きな可能性を有している。

そこで本研究では、一般小規模建築物への膜材料の適用を検討するための基礎的な調査研究として、側圧を受けるボートに使用されている熱収縮ポリエステル繊維布 (Dacron heat-shrink fabric) の力学特性を調べる (Fig.1 参照)。



Fig. 1 Geodesic Airolite Boat (<http://gaboats.com/>)

これは一般建築物に適用する場合には屋根だけでなく面積割合が大きい壁面に用いることを想定した場合、膜材の下地材への定着方法の問題、壁面に作用する風などの側圧に対する強度問題などを解決するヒントと考えたからである。具体的には引張実験、せん断実験、側圧実験、熱収縮実験の 4 種類を実施する。

2. 熱収縮ポリエステル繊維布の剛性と強度

2.1 繊維布の外観的特徴

使用した Dacron 社の繊維布の大きさと重量を Table 1 に示す。重量は約 0.11 kg/m² であり、すりガラスのように白色で半透明の印象である。

Table 1 Dimensions and weight of fabric sheet

Fabric sheet (mm)		Thickness (mm)	Weight (kg)	Density (g/mm ³)
short side	long side			
1832	4683	0.178	0.956	0.627

2.2 伸び剛性

Table1 の繊維布から Fig.2 に示すように 40×400mm に切り取ったものを試験体とする。試験体は短辺方向と長辺方向のそれぞれ 3 体ずつとする。試験体をチャック間距離 300mm に設定し万能引張試験機に取り付け、これを初期状態とする。荷重は上部に装着したロードセルにより測定する。伸び変形は Fig.3 に示すようにチャック間をレーザー変位計で測定する。

* 大阪市立大学 大学院工学研究科 都市系専攻 教授

** 大阪市立大学 大学院工学研究科 都市系専攻 大学院生

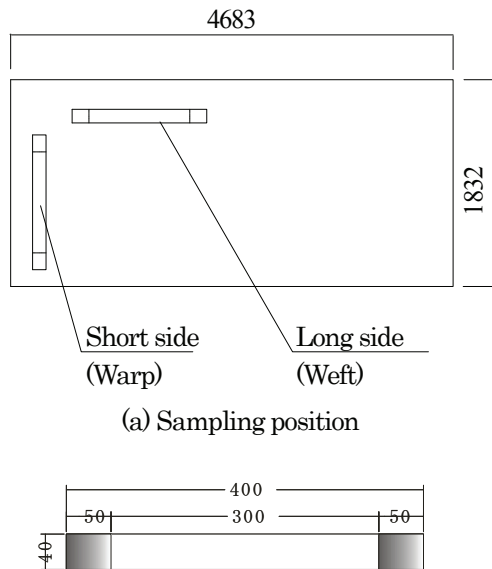


Fig. 2 Specimens for tensile tests

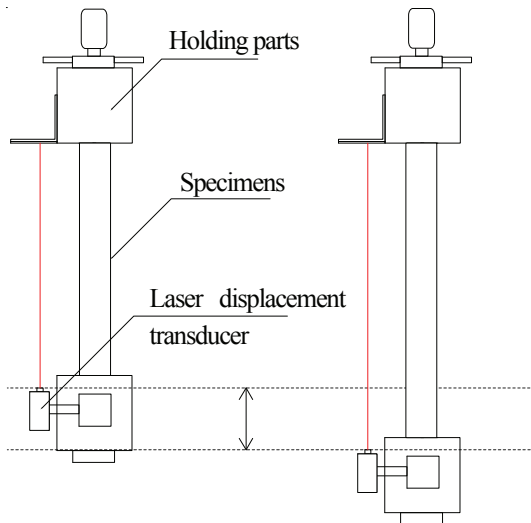


Fig. 3 Setup for tensile tests

引張実験結果を Fig.4, 5 に示す。単位幅当りの荷重とひずみ関係に表現した結果を Fig.6, 7 に示す。また 300N 付近での割線剛性を算出した結果を Table2 に示す。

Fig.4,5を見ると、短辺方向に採取した試験体では700N程度で最大耐力に達しており、長辺方向に採取した試験体は400N程度であり、短辺方向／長辺方向強度比は1.75となっている。

破断の状況は、いずれも伸びひずみが0.1前後から試験体の両側の糸が切断し始め、順次中央部に進展して最大荷重値に達する(Photo.1 参照)。

Table 2より引張剛性について、短辺方向試験体は長辺方向試験体の約2.4倍となっている。ここで、繊維布の顕微鏡写真をPhoto.2に示す。写真より、長辺方向糸は隙間なく流れているのに対して、短辺方向糸の間隔は長辺方向糸によってやや広げ

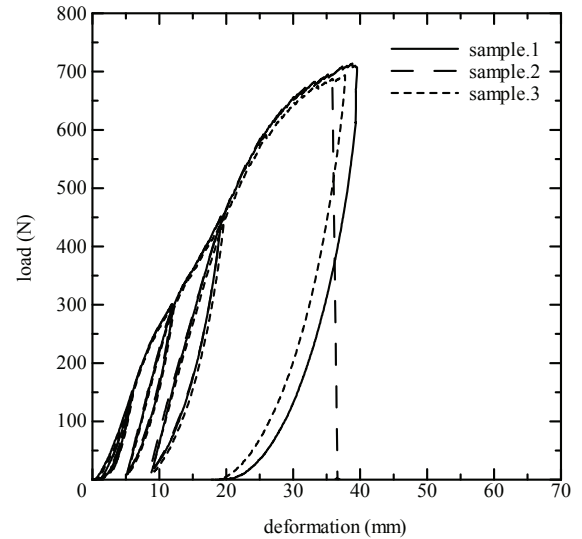


Fig. 4 Load-elongation curves of short side

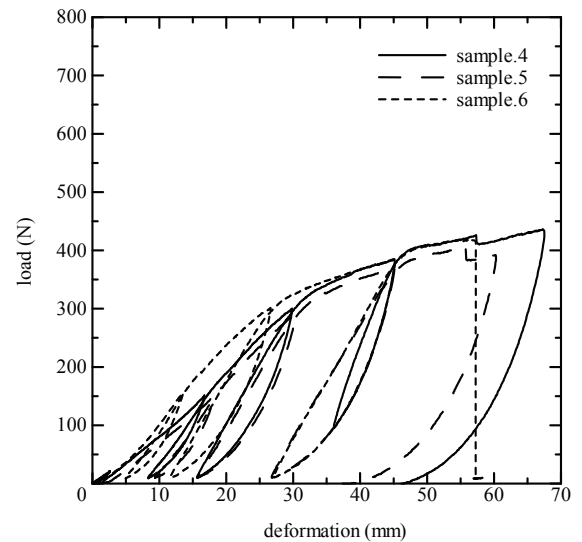


Fig. 5 Load-elongation curves of long side

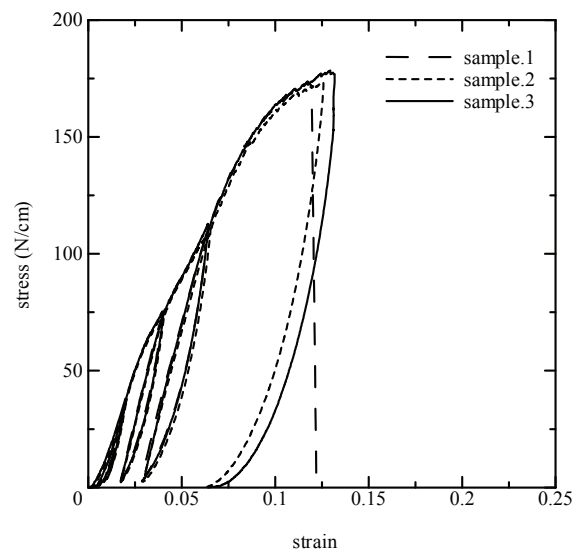


Fig. 6 Stress-strain curves of short side

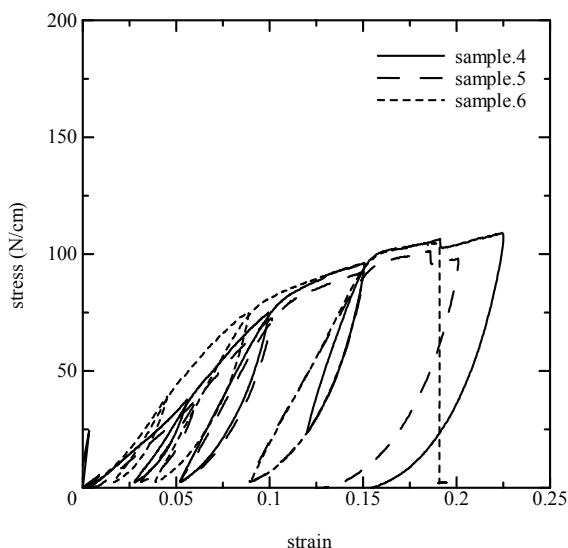


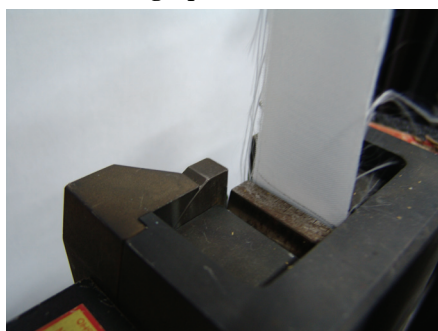
Fig. 7 Stress-strain curves of long side

Table 2 Elastic modulus of elongation

Specimens		Elastic constants of secant line (300 N) $E \cdot t$ (N/cm)	Mean value $E \cdot t$ (N/cm)
Short side	sample 1	1883	1882
	sample 2	1907	
	sample 3	1855	
Long side	sample 4	756	774
	sample 5	715	
	sample 6	850	



(a) Photograph under max load



(b) Photograph of initial yield
Photo. 1 Typical states of yielding

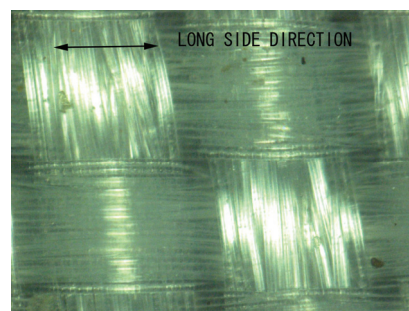


Photo.2 Micrograph of fabric

られており、長辺方向糸の起伏がやや大きい。さらに、強度と剛性の大小関係から、短辺方向が縦糸(warp)方向、長辺方向が横糸(weft)と判断できる。

2.3 セン断剛性

薄い織布であるのでせん断剛性はほとんど期待できないが、その他の膜材料との比較のために以下の要領でせん断実験を実施する。

試験フレームは木材(白木材 30×30mm)を内寸が 200×200mm になるように、ピン接合を想定し丁番で連結している。そこに繊維布を熱溶着テープでフレームに貼り付ける。フレーム内側しわは熱収縮を利用して目視でなくなる程度まで、アイロンで均一に加熱する。試験体ごとの張力の導入は振動音を合わせるによって管理する。

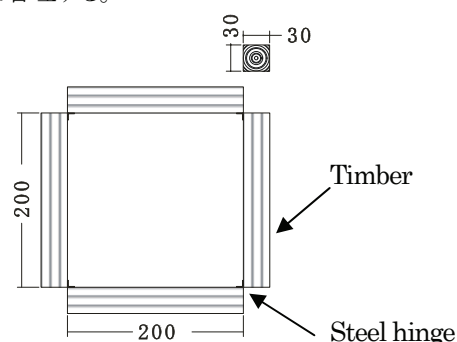


Fig. 8 Timber frame for shear tests

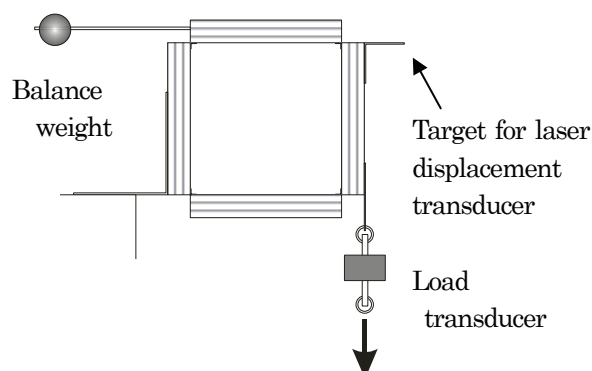


Fig. 9 Setup for shear tests

加力方法はFig.9に示すように荷重検出器の先端を矢印方向に鉛直に引張る。せん断変形はフレームの変形をレーザー変位計にて測定する。また試験フレームにはバランス用の錘を取り付けて繊維布の無い状態でフレームが変形しないように調整している。

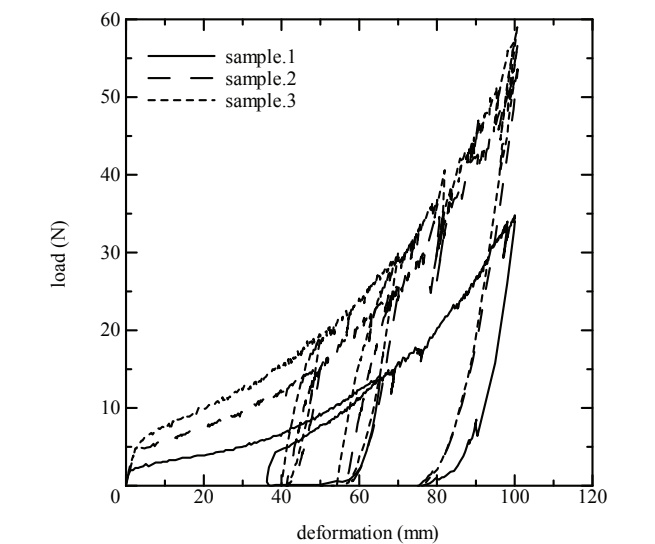


Fig. 10 Load-deflection curves of shear tests

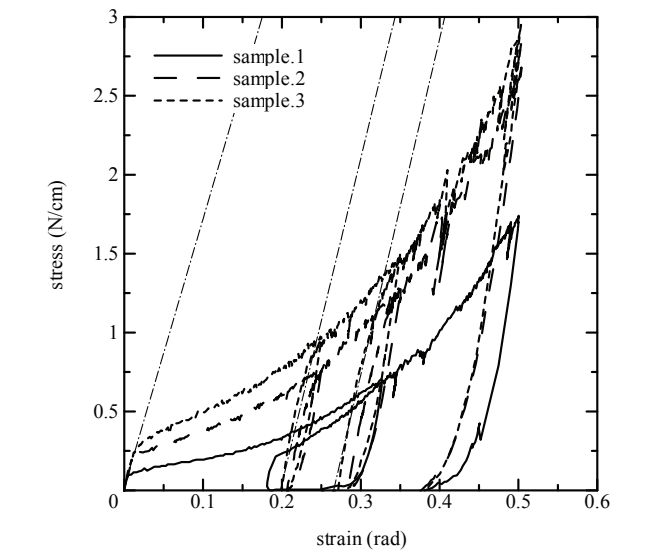


Fig. 11 Shear stress-strain curves

Table 3 Shear modulus

Estimation path	Initial loading path	1st unloading path	2nd unloading path
Shear modulus $G \cdot t$ (N/cm)	17.0	20.6	21.3

実験で得られた荷重と変形関係を Fig.10 に示し、単位長さ当たりのせん断力とせん断ひずみの関係を Fig.11 に示す。また Fig.11 の初期勾配、1, 2 番目の除荷勾配の算出結果を Table3 に示す。

繊維布の試験フレームへの取り付け方向は繊維糸がフレームと平行直角となっているので、大きな荷重を加えることなくせん断変形を示す。 実験前と実験中の様子を Photo.3 に示す。



(a) Before loading



(b) Shear deformations

Photo. 3 Figure of shear tests

2.4 側圧実験結果

Fig.12 に示すように木材(白木材 30×30)を内り 290×290mm になるように組み立てる。繊維布から平行直角に採取した試験体をせん断実験と同様にアイロンで熱を与えることによって熱溶着テープでフレームに貼り付ける。試験体ごとの張力が同程度になるように、布を振動させその音の高さによって管理する。

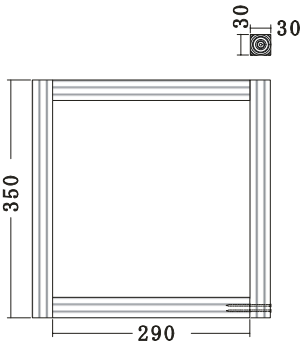


Fig. 12 Timber frame for lateral pressure tests

実験方法は万能引張試験機、ロードセル、レーザー変位計を使用する。膜材の中心に荷重検出器に取り付けた直径 11mm の円形の面で、膜面の中央を鉛直下向きに力を加える。変位は試験体の裏面から膜材の中心をレーザー変位計で測定する (Fig.13 参照)。

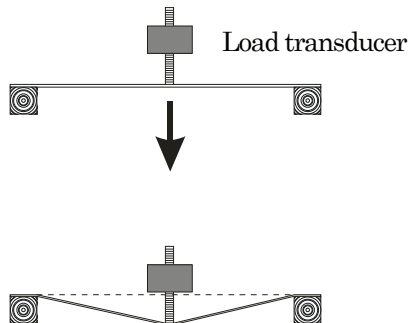


Fig. 13 Loading system

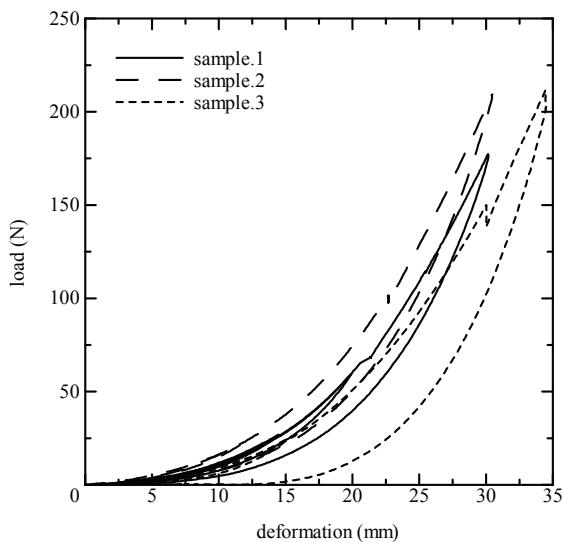
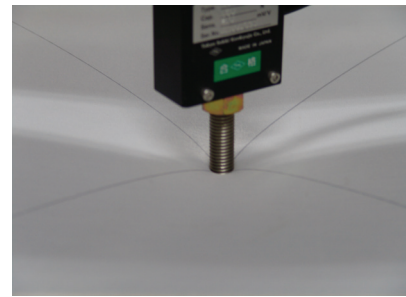


Fig. 14 Lateral pressure-deformation curves

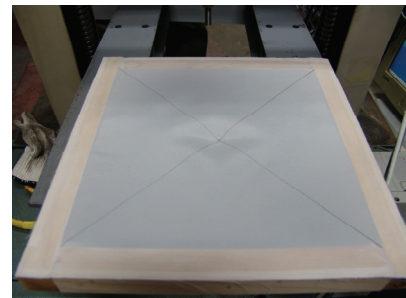
実験結果を Fig.14 に示す。図は荷重とたわみの関係を示しているが、強い非線形曲線となっている。荷重は 200N 程度まで加えているが、直径 11mm の円形の加力棒周辺では 58N/cm に相当する。

試験体 1, 2 は载荷方向残留変形が小さく、約 1~2mm であった。これに対し試験体 3 は残留変形がやや大きくなり約 7mm であり、布材のたるみも大きく、張力を失っていた。実験後の残留変形を Photo.4 に示す。

試験体 3 は最大変位 34.5mm で除荷後の残留変形が 7.2mm であるので、フレーム内のり寸法の約 12%変形したにもかかわらず、残留変形は約 2.5%であり、面外の荷重に対しては優れた復元特性と言える。



(a) Figure during loading

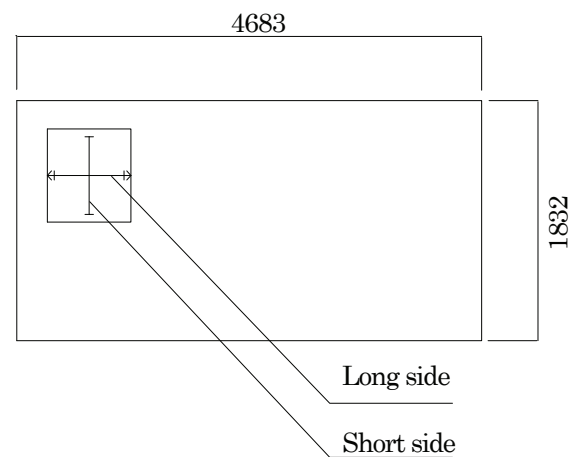


(b) Residual deformation of sample 3
Photo.4 Deformation of fabric sheet

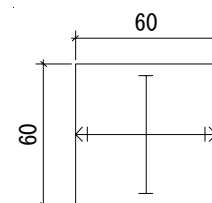
3. 熱収縮ポリエステル繊維布の熱収縮特性

3.1 試験体の製作方法

Fig.15 に示すように試験体を繊維布から 60×60mmの大きさに切り取り、切り取り方向がわかるように目印をつけ、中心に長辺方向、短辺方向に 50mmの基準線を記す。



(a) Sampling position



(b) Dimensions of specimens

Fig. 15 Specimens for heat-shrink tests

3.2 実験方法

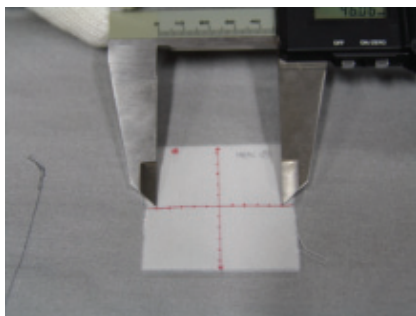
厚さ十数ミリのアルミ板材(重さ313g)をPhoto.5(a)に示すようにアイロンで熱し、デジタル温度計で板材全体の温度が均一になるように管理する。このアルミ板材を試験体の上に一定時間乗せて熱する。時間管理にはストップウォッチを用いる。試験体の収縮寸法はノギスを用いて測定する。この作業を繰り返し試験体の収縮長さを調べる。本実験の設定温度は 100℃, 120℃, 140℃の3種類、各温度3体ずつとする。



(a) Heating method



(b) Digital thermometer

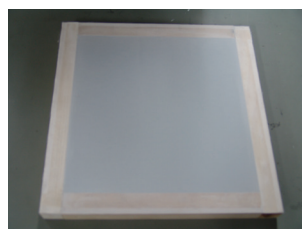


(c) Measuring by vernier caliper

Photo.5 Method for heat-shrink tests



(a) Before heating



(b) After heating

Photo.6 Specimens for lateral pressure tests

Photo.6 は側圧試験用の試験体作成過程の写真である。左写真はフレームに繊維布を取り付ける前の状態で、右写真は熱収縮によりしわが取り除かれた状態を示している。

3.3 実験結果

実験で得られた熱量と収縮ひずみの関係を Fig.16-21 に示す。縦軸は収縮したひずみ量を表し、横軸は設定された温度によって熱を加えた時間を表している。Table4 には最小二乗法により算定した収縮率と加熱時間(秒)の実験式を示す。

短辺方向(縦糸)と長辺方向(横糸)を比較すると短辺方向は収縮幅が大きく長辺方向の 1.3 倍程度から数倍程度の幅となっている。これは縦糸、横糸の構成に関係があり、真っ直ぐな縦糸は伸び縮みに直接影響するので変化しやすい。それに対し横糸は編みこまれているので変化しにくいと思われる。また、引張実験で得られた剛性と強度は、いずれも短辺方向が長辺方向より大きくなっていることより、短辺方向は縦糸であり長辺方向が横糸であると判断できる。

温度に対する短辺方向と長辺方向の特性については、Fig.17,19から分かるように長辺方向は100℃ではほとんど熱収縮しないが、短辺方向はFig.16より熱収縮していることが分かる。ここでも糸の構成が影響している。

Fig.18,19 の設定温度 120℃では短辺方向は 60 秒から収縮長さ変化が小さくなり、実験回帰曲線からも熱を 80 秒程度与えた付近で頭打ちになっていることが分かる。本実験の範囲から 120℃では 70~80 秒あたりで収縮限界となるといえる。収縮の長さは、短辺方向では平均 2.5 mm、長辺方向では平均 1 mm であった。実験範囲内でのひずみは、短辺で平均 0.05 であり、長辺方向では平均 0.02 であった。

Fig.20,21 の設定温度 140℃では熱を 1 秒間与えただけで布材の収縮長さは大きな値を示し、60 秒熱量を入力した辺りから収縮長さ変化は小さくなった。実験回帰曲線から 70 秒付近で収縮長さ変化が頭打ちになっている。本実験範囲内で短辺方向では平均 4.6 mm の収縮長さであった。長辺方向では平均 3.4 mm の収縮長さであった。収縮ひずみは、短辺で平均 0.092 であり、長辺方向では平均 0.068 であった。

側圧実験とせん断実験用試験体で熱収縮により張力を与えるとき、100℃では収縮率が少なく張力を与えにくい、140℃では収縮時間も短く、収縮率も大きいので取り扱いにくい。従って 120℃付近で熱量を与えることで比較的安定した張力を与えることができたことを記しておく。

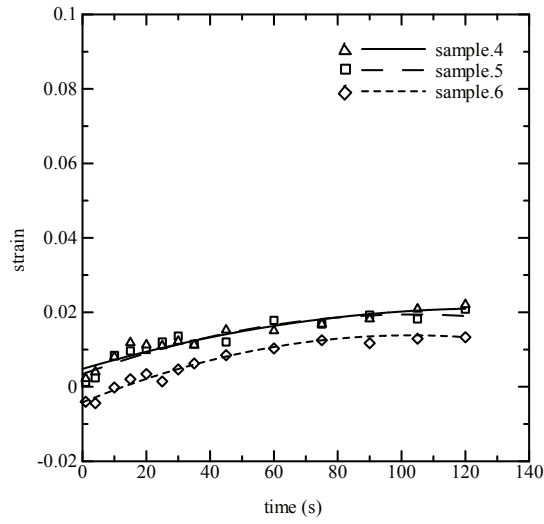


Fig.16 Shrink strain-heat time curves under 100°C for short side direction (Warp)

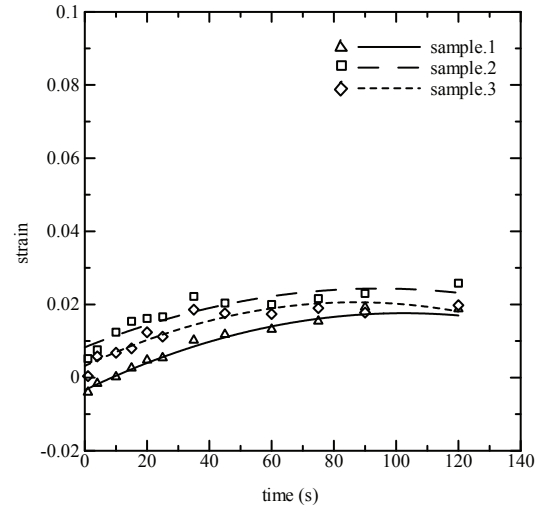


Fig.19 Shrink strain-heat time curves under 120°C for long side direction (Weft)

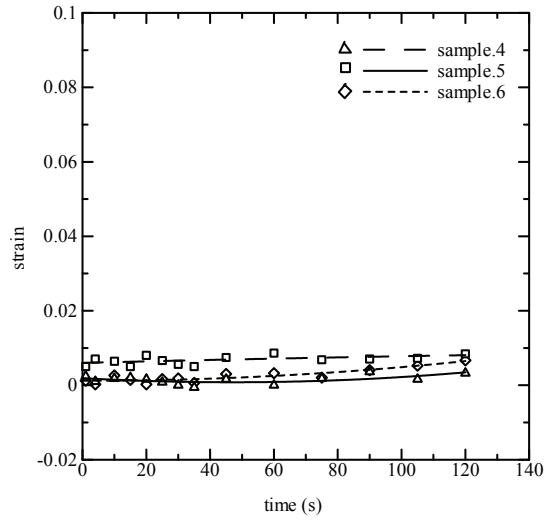


Fig.17 Shrink strain-heat time curves under 100°C for long side direction (Weft)

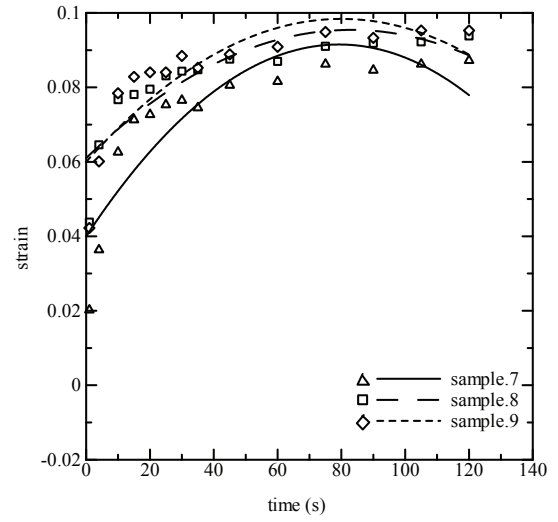


Fig.20 Shrink strain-heat time curves under 140°C for short side direction (Warp)

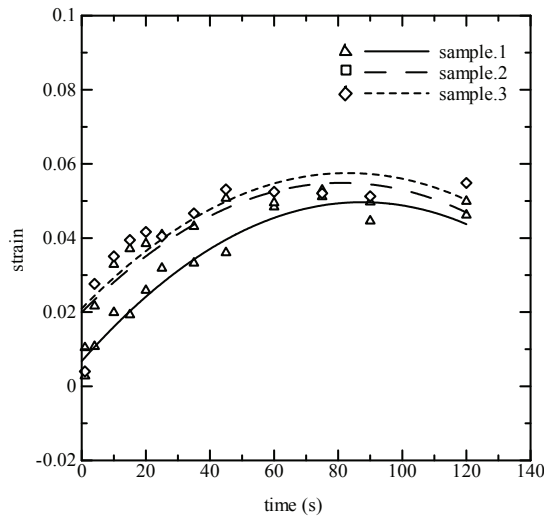


Fig.18 Shrink strain-heat time curves under 120°C for short side direction (Warp)

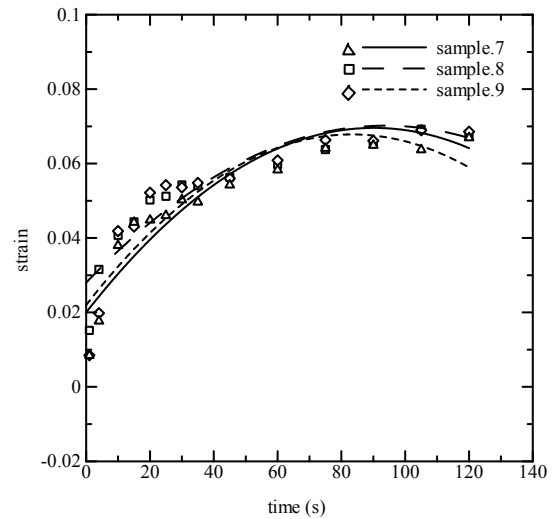


Fig.21 Shrink strain-heat time curves under 140°C for long side direction (Weft)

Table 4 Empirical formula between shrink strain and heat time

Temperature	Specimens	Shrink strain $\varepsilon = a t^2 + bt + c$, Heat time= t sec.					
		Short side (warp)			Long side (weft)		
		a	b	c	a	b	c
120°C	sample 1	-5.60E-06	9.80E-04	6.80E-03	-2.00E-06	4.10E-04	-3.40E-03
	sample 2	-5.30E-06	8.60E-04	2.00E-02	-1.80E-06	3.40E-04	8.30E-03
	sample 3	-5.30E-06	8.80E-04	2.10E-02	-2.30E-06	4.00E-04	3.20E-03
	Mean value	-5.40E-06	9.07E-04	1.59E-02	-2.03E-06	3.83E-04	2.70E-03
100°C	sample 4	-9.60E-07	2.50E-04	4.80E-03	5.00E-07	-4.70E-05	1.90E-03
	sample 5	-1.50E-06	3.10E-04	3.40E-03	-3.10E-08	2.10E-05	6.00E-03
	sample 6	-1.70E-06	3.50E-04	-4.20E-03	3.70E-07	-4.20E-07	1.20E-03
	Mean value	-1.39E-06	3.03E-04	1.33E-03	2.80E-07	-8.81E-06	3.03E-03
140°C	sample 7	-8.20E-06	1.30E-03	4.00E-02	-6.10E-06	1.10E-03	2.00E-02
	sample 8	-5.00E-06	8.30E-04	6.10E-02	-5.00E-06	9.00E-04	2.80E-02
	sample 9	-6.00E-06	9.60E-04	6.00E-02	-6.60E-06	1.10E-03	2.20E-02
	Mean value	-6.40E-06	1.03E-03	5.37E-02	-5.90E-06	1.03E-03	2.33E-02

4. まとめ

軽量の布張ボートに用いられている熱収縮ポリエステル繊維布の基本的な力学特性を、引張実験、せん断実験、側圧実験、熱収縮実験の4種類によって調べた。本実験の範囲内で得られた概要を以下に示す：

(1) 引張実験より、市販されている繊維布の短辺方向が縦糸方向であり、長辺方向が横糸方向と分かった。縦糸方向の横糸方向に対する剛性比は約 2.4 倍であり、強度比は約 1.7 倍であった。

(2) せん断実験より、せん断力とせん断変形の関係は強い非線形を示し、剛性は非常に小さい。

(3) 側圧実験より、面直交方向の荷重に対しての残留変形は最大変形の平均 10%程度と小さいことが明らかとなった。その際の最大荷重は破断応力の半分程度である。

(4) 熱収縮実験より、短辺方向は長辺方向に比べ収縮率は平均 2 倍程度大きいことが分かった。また、熱入力時間と収縮ひずみの関係の実験式を示した。

最後に、繊維布材を一般小規模建築に使用する際には、メンテナンスの問題や居住環境に対する検討などさまざまな研究が必要であることは言うまでもないが、個性的なライフスタイルや付加機能を満足する膜構造のデザインも探求すべきであると考えます。

謝辞

本研究は、財団法人能村膜構造技術振興財団の平成 18 年度研究助成金によるものであり、ここに厚く感謝致します。

Experimental Study on Mechanical Properties of Heat-Shrink Polyester Fabric

Yoshiya Taniguchi *
Masahiro Nakatani **
Hiroyuki Nakajima **

SYNOPSIS

Basic mechanical properties of heat shrinkage polyester fiber cloth (Dacron heat-shrink fabric), that has achieved the cloth - boat of getting on of one person of about 4kg in weight, is examined. Moreover, the relation between a heat contraction calorie and the contraction percentage used for the assembly is examined. As a result, the strength of warp direction is about 170 N/cm and that of weft direction is about 100 N/cm. The contraction percentage of warp direction is about 5% and the weft direction is about 1.5% under the condition of 120 centigrade and 1 minute.

*Dr. Eng. Professor, Graduate School of Osaka City University

** Graduate Student of Osaka City University