

編織組織と機能性のデータベース構築と解析手法の研究（第3報）

Research on database construction and analysis methods for knitting and weaving structures and functionality
(3rd report)

材料技術部 繊維・高分子科 中島孝明 中村和由 小林慶祐 大竹翔太 遠藤悠都

織物の設計条件から通気性を予測するモデルの構築し、設計条件と通気性の関係を検討した。その結果、糸の織度、製織密度、製織組織の情報を機械学習したモデルを用いて、学習範囲の設計条件から、通気性を予測させることができた。また、通気性は、経糸密度及び緯糸密度の逆数の積や、経糸と緯糸に囲まれた空隙面積と高い相関性を持つことが分かった。平織組織に関して、任意の通毛性を持つ設計条件を、通気性と空隙面積率の回帰式を介して検討できることを確認した。

Key words: 通気性、製織組織、機械学習、小幅試験織機

1. 緒言

福島県の繊維産業では、高品質で高付加価値な繊維製品の開発を進めている。繊維製品の開発には試作と評価を繰り返しながら製造条件を決定するため、開発にかかる時間やコストが課題である。近年、編物や織物の外観については、テキスタイルシミュレーションを用いて現実感のある表現・予測することができるが、通気性をはじめとする物性値は編織物の設計書から容易に予測する手段はない。そこで、設計の段階での試作回数を低減するために、編織物の物性値を予測するシステムの構築に取り組んだ。

今年度は織物構造に着目し、着用時の熱的快適性に関わる通気性について、設計条件のみで通気性を予測するモデルの構築と、追加試織したテスト試料による精度確認を実施した。また、織物構造、特に織物組織に着目し、通気性と織物構造の関係について検証を行った。

2. 実験

2. 1. 試料

第2報¹⁾で使用した織物試料43種に加えて新たに24種類の綿織物を製織した。製織条件は表1及び表2に示す。経糸には、全ての試料で綿43番手双糸を用いた。製織は片側レピア方式の小幅試験織機（（株）トヨシマビジネスシステム製 TNY101A-20）で行った。

2. 2. 物性値の測定

物性値は、経糸方向、緯糸方向の織り上がりの密度及び寸法変化、目付、厚み及び通気性を測定した。

織物の寸法変化は、織機から下した織り上がり寸法を基準に、JIS L1096 浸せき処理法C法（浸透浸せき処理法）により測定した。また、通気性はJIS L1096 通気性A法（フラジール形法）を通気度試験機（FX3340 TEXTTEST 社）で測定した。

表1 製織条件と試料番号

緯糸 素材	製織組織	緯糸密度[本/inch]						
		33	40	50	58	66	75	80
綿 双 糸	平織	D1- 2	D5	D2- 2	D4	D3- 2	-	-
	平織 (緯2本引揃え)	F1	-	F2	-	F7	F3	-
	平織 (緯3本引揃え)	F4	-	F5	-	F8	F6	-
	1/3綾織	E33	-	-	-	-	-	-
	2/2綾織	E18 -2	E20	E10 -2	-	E11 -2	E12 -2	E21
	2/2斜子織	E19 -2	-	-	-	-	-	-
綿 ス ラ ブ	平織	-	G2	G1	-	-	-	-
	2/2綾織	-	-	Ga1	-	-	-	-

表2 通気条件と緯糸素材

箆密度[羽/inch]	通気	緯糸素材（織度[dtex]）
50	1羽2本通し	綿43番手双糸（274.7）
50	1羽2本通し	綿スラブ16番手（332.2）

試料の経糸及び緯糸密度は、デジタルマイクロスコープ（ハイロックス社製 RH-2000）で撮影した試料画像から、各糸10本以上の距離を2ヶ所以上測長し、距離を本数で除した平均から求めた。

織物の厚さは、圧縮試験機（（株）カトーテック製 KES-FB3）で圧力0.5[gf/cm²]における厚み（T0）を、加圧面積2[cm²]、上限荷重50[gf/cm²]の標準測定で測定した。

また、JIS L 0803 準拠の試験用添付白布（標準白布）9種類の織度及び製織密度、通気性を測定した。

2. 3. 製織条件を使った予測モデルの作成

2. 3. 1. 変数項目の設定

予測モデルの構成は、製織前に把握可能な設計条件を説明変数（入力）として、通気性を目的変数（出力）とした。試作試料の学習データとテストデータへの割り振りは表3に示すとおり、学習データは35種類であり、テストデータは32種類（既報の8種、新たに試織した24種類）である。

製織に使用した糸織度及び製織密度は表4のとおり、製織組織は表5のとおり数値化し、L1を除く8種類の変数を入力値として学習させた。図1に、3/1 破れ斜紋織を例に、製織組織による変数項目の設定方法を示す。製織組織の変数項目 8x8 は、隣り合う経糸が緯糸と交錯する関係や、経糸が緯糸の上で交錯する浮きの数を反映させるため、L1～L4 は経糸と緯糸の交差点数やその位置関係を反映させるために定義した。組織図の最も左下に該当する L1 は、経糸の浮きとして記載し始めることとするため必ず 1 となる。試料に用いた製織組織 8 種類に対応する変数項目の数値は表6に示す。変数項目 8x8、L2、L3、L4 によって、8 種類の製織組織は区別できる。

表3 試験試料の振り分け

データ項目	試料
教師データ	第2報 35種
テストデータ	第2報 8種 表1 24種 32種
標準白布データ	表10 9種

表4 製織条件（設計値）による変数項目

変数項目	内容	単位
T_TEX	経糸	
Y_TEX	緯糸	
T_密度	経糸	
Y_密度	緯糸	
	使用した織度	[dtex]
	設計上の糸密度	[本/cm]

表5 製織組織による変数項目

変数項目	内 容
8x8	8×8 の組織図中で経糸の浮きを示すマスの周辺の数
L1、L2、L3、L4	左下から L 字型に組織図を展開した時に 1 経路に記す浮の数

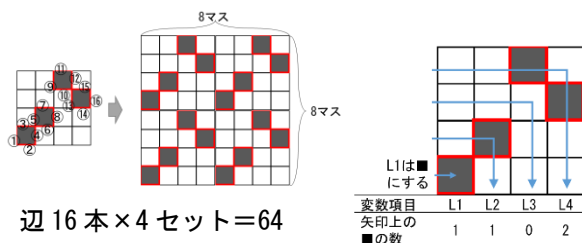


図1 3/1 破れ斜紋織の 8x8 と L1～L4 の設定方法

表6 組織毎の変数項目の数値対応表

組 織（組織図）	変数項目	8x8	L1	L2	L3	L4
平織		128	1	1	3	3
平織 (緯2本引揃え)		96	1	1	3	3
平織 (緯3本引揃え)		88.5	1	1	4	2
1/3 綾織		64	1	1	1	1
2/2 綾織		72	1	2	2	3
2/2 斜子織		64	1	3	1	3
3/1 破れ斜紋織		64	1	1	0	2
8枚朱子織		32	1	0	1	0

2. 3. 2. 機械学習による予測モデル

機械学習による予測モデルの構築は、ニューラルネットワーク（Artificial Neural Network：ANN）を用い、ANN 解析ソフトウェア（Neural Ware 社製 Neural Works Predict）で解析モデルを作製した。このソフトウェアは、表計算ソフト（Microsoft 社 Excel）のアドインとして動作する多層パーセプトロン（MLP）モデル構築ソフトである。解析モデルの構築条件は、表7で示す設定で行った。また、解析モデルの評価には、表8の指標を用いた。

表7 Predictにおけるモデル構築設定

選択項目	使用設定
データのノイズの程度	多少の雑音データ
データ変換の程度	表面的な
変数選択の程度	変数選択しない
ネットワーク探索の程度	徹底的な
カスケード変数選択	用いる

表8 評価指数

R	予測値と実測値の相関係数
RMS	予測値と実測値の差の2乗平均平方根

2. 4. 織物構造の解析

製織条件による通気性への影響を検討するため、織物試料面積に対して、経糸と緯糸に囲まれた空隙面積率を計測した。

平面に置いた試験試料をデジタルマイクロスコープで真上から撮影した画像に対し、画像処理ソフト (Intel 社 OpenCV 4.10.0) を用いて、閾値を 88 で二階調化した。標準白布は、繊維素材毎に閾値を個別に設定した。図 2 に平織 (緯 2 本引揃え) を例に、試料画像と二値化した画像を示す。黒色のピクセル数を空隙面積とみなし、処理画像の全体のピクセル数と黒色のピクセル数の割合から、式 1 より空隙面積率を算出した。

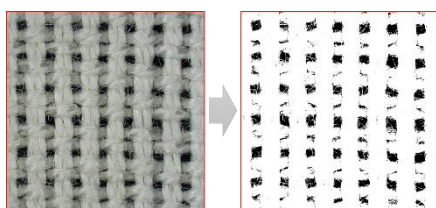


図 2 織物の二値化と空隙面積

$$\text{空隙面積率}[\%] = \frac{\text{黒色ピクセル数}[\text{pixel}]}{\text{全ピクセル数}[\text{pixel}]} \times 100 \quad (\text{式 1})$$

3. 結果

3. 1. 試料の物性値

表 9 に追加織物試料 24 種類の物性値を測定した結果を、表 10 に標準白布 9 種類の物性値の測定結果を示す。通気性が最大となったのは F4 (平織 (緯 3 本引揃え)) で、152.6[cc/cm²/sec]、最小になったのは緯糸密度 26[本/cm] の D3-2 (平織) で 2.4[cc/cm²/sec]であった。D1-2 等「-2」が付く試料は、第 2 報で製織した設計条件と同じ試料である。前回作製した試料との通気性の差は D1-2 が最大で 2.0[cc/cm²/sec]であり、製織条件が同じであれば、通気性は同様の値を示すことが確認できた。

表 9 物性値の測定結果

試料番号	密度 [本/cm]		寸法変化 [%]		目付 [g/m ²]	通気性 [cc/cm ² /sec]	T0 [mm]
	経	緯	経	緯			
D1-2	40.1	14.2	5.2	1.3	161.9	32.8	0.92
D2-2	40.7	21.1	6.1	0.6	189.3	7.8	0.93
D3-2	40.4	27.7	5.7	0.7	213.0	2.4	0.84
D4	40.8	24.4	4.2	3.7	204.0	4.3	0.94
D5	40.8	16.8	4.5	3.9	173.8	19.4	0.89
E10-2	41.7	21.6	5.7	2.5	183.3	53.0	1.02
E11-2	41.6	27.8	5.0	2.5	207.9	20.8	1.00
E12-2	41.8	31.3	5.9	1.8	220.1	12.1	1.02

E18-2	41.3	14.3	4.7	3.9	160.4	137.8	1.13
E19-2	40.7	13.8	3.6	2.8	154.1	69.8	1.07
E20	41.2	17.1	5.6	2.3	170.8	94.8	1.06
E21	42.0	31.7	5.8	2.1	230.9	6.7	1.15
E33	40.2	14.0	4.8	1.8	158.4	129.6	1.17
F1	40.6	14.0	4.9	2.3	157.3	104.6	1.14
F2	40.3	21.1	5.7	1.2	181.2	38.5	1.15
F3	40.3	31.6	4.9	1.6	217.1	8.4	1.19
F4	40.1	13.8	4.2	2.4	154.7	152.6	1.19
F5	41.5	20.8	5.1	1.5	177.1	72.2	1.18
F6	40.6	31.6	5.0	1.3	209.8	18.6	1.20
F7	40.4	28.2	5.0	2.1	200.1	14.7	1.06
F8	40.7	27.9	5.7	1.7	194.6	30.5	1.13
G1	40.5	21.0	5.7	1.7	201.6	6.9	1.21
G2	41.3	17.3	5.7	1.7	185.4	18.0	1.10
Ga1	41.2	22.2	5.7	1.7	200.4	46.6	1.15

表 10 標準白布の物性値の測定結果

試料名	密度 [本/cm]		織度 [dtex]		目付 [g/m ²]	通気性 [cc/cm ² /sec]
	経	緯	経	緯		
アセテート	45.1	29.2	111.3	102.4	80.1	8.9
ポリエステル	39.7	32.4	87.7	86.1	62.8	17.8
キュプラ	55.0	36.5	66.3	84.2	67.2	42.5
ビニロン	38.9	30.3	144.3	154.5	103.0	37.3
綿	27.1	31.7	139.9	170.0	91.8	55.5
アクリル	31.0	27.7	130.8	159.3	84.7	45.7
レーヨン	37.6	22.8	125.9	124.2	75.7	74.8
ナイロン	41.8	32.1	78.7	80.4	58.7	19.3
ウール	29.3	27.0	168.5	151.0	90.1	68.7

3. 2. 予測モデルの予測結果

学習データ及び、テストデータ、標準白布データに対する評価指数を表 11 に示す。また、テストデータに対する予測結果を横軸に実測値、縦軸に予測値として図 3 に示す。このモデルでは 80[cc/cm²/sec] 以下では実測値より小さい値に、80 より大きい場合は実測値より大きな値に予測する傾向が見られた。

表 11 予測モデルの評価指標

入力データ	R	RMS [cc/cm ² /sec]
教師データ	0.992	8.97
テストデータ	0.968	13.2
標準白布データ	0.562	37.8

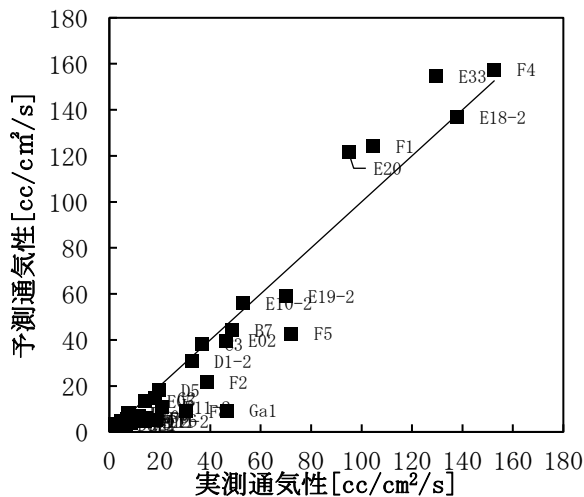


図3 テストデータの予測値と実測値の関係

3. 3. 通気性と間隔面積の関係

通気性と緯糸密度及び経糸密度の関係を考察するため、経糸密度及び緯糸密度の逆数を緯糸間隔、経糸間隔と定め (式2)、緯糸間隔、経糸間隔の積を間隔面積とした。間隔面積のイメージを図4に示す。横軸を間隔面積、縦軸を実測通気性として、製織組織毎に図5及び図6に示す。

$$\text{糸間隔[mm]} = \frac{10}{\text{糸密度[n/cm]}} \quad (\text{式2})$$

$$\text{間隔面積[mm}^2\text{]} = \text{経糸間隔[mm]} \times \text{緯糸間隔[mm]}$$

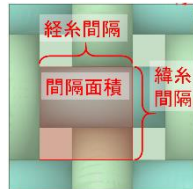


図4 間隔面積の算出

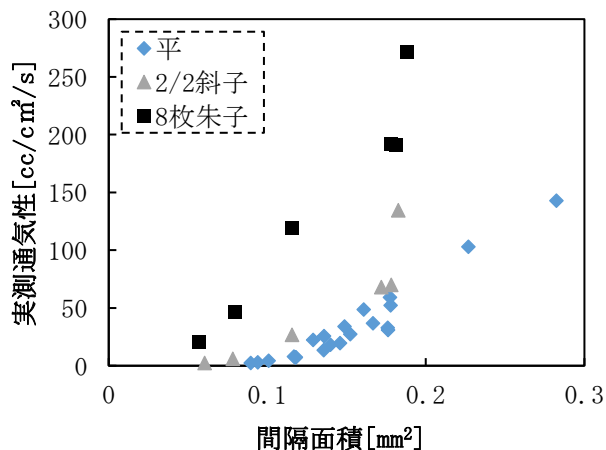


図5 間隔面積と通気性の関係

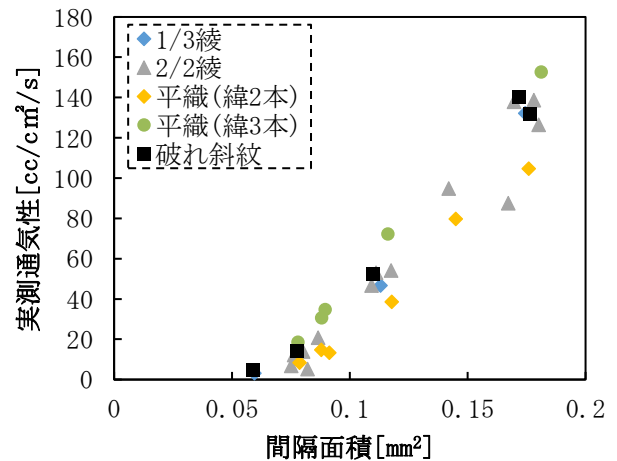


図6 間隔面積と通気性の関係

3. 4. 織物構造の解析

図7及び図8は、二値化した画像から得られた空隙面積率と通気性の関係を示しており、縦軸に実測した通気性を、横軸に空隙面積率を示している。平織、2/2斜子織、8枚朱子については図7に、「2/2綾、1/3綾、平織 (緯糸2本、緯糸3本)、破れ斜紋」については図8に示す。また、表12に、図7と図8における空隙面積率と通気性の相関係数を示す。

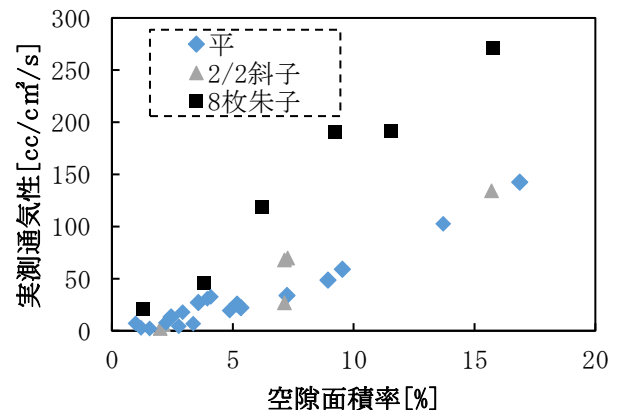


図7 空隙面積率と通気性の関係

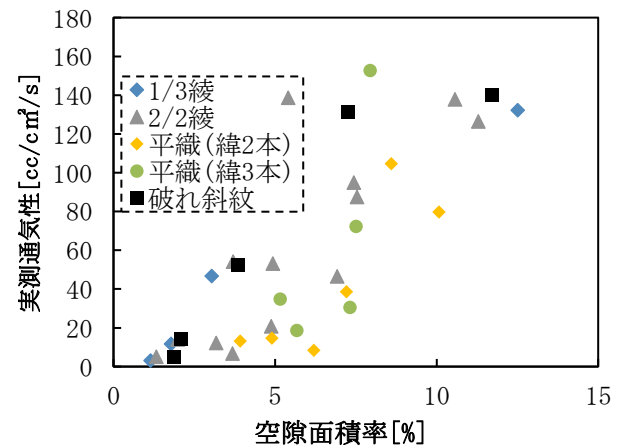


図8 空隙面積率と通気性の関係

表 1 2 空隙面積率と通気性の相関係数

対象組織	通気性と空隙面積率の 相関係数
図 7 : 8 枚朱子	0.983
図 7 : 平織、2/2 斜子	0.960
図 8 の組織全体	0.789

4. 考察

4. 1. 機械学習を用いた通気性の予測

製織前に確認可能な設計条件である、糸の繊度及び密度、製織組織の情報を、教師データ 35 種類から機械学習した予測モデルを作製した。その結果、表 1 1 に示すようにテストデータ 32 種に対して、教師データと同様の相関係数、RMS 値で、予測値を算出することができた。図 3 に示すテストデータは、教師データと同じ経糸及び緯糸で製織し、緯糸密度は教師データの範囲内である。したがって、35 種と比較的少ない教師データにもかかわらず、残差が小さい予測値を出力できたと考える。

一方で、教師データ範囲外の設計値として、標準白布データを入力した際の予測値は、表 1 1 に示すとおり、相関係数 0.6 を下回り、RMS 値が 30 を超えた。標準白布データでは、繊度が教師データの 274.7[dtex] よりも低いデータを含むことから、残差が大きくなったと考える。

しかし、機械学習する教師データの繊度・密度の範囲やバリエーションを増やすことで、残差が少ない予測モデルに更新できると見込まれる。

4. 2. 織物形状と通気性の関係

繊度と密度、製織組織の情報から、残差が少ない通気性を予測できたことから、製織密度と通気性の関係について検討した。製織密度が変化すると図 4 に示す間隔面積が変化することから、通気性との関係を検討した。図 5 及び図 6 に示すように、間隔面積は通気性と強い相関を持つことが確認できた。これは、通気性は単位面積、単位時間あたりに試料を通過する空気量であり、間隔面積が増加することで、糸と糸の間を通過する空気量が増加するからであると考えられる。したがって、糸間の間隔が広い試料は通気性が高く、緯糸の打ち込み数が多い試料は、糸同士の間隔は確認されず、通気性は低くなる。

一方で、製織組織に着目すると「平織、2/2 斜子織」、「8 枚朱子」、「2/2 綾、1/3 綾、平織（緯糸 2 本、緯糸 3 本）、破れ斜紋」で同じ傾きを持つ直線上にまとまる傾向が表れた。平織と 2/2 斜子織では、経糸と緯糸が交互に交わる形状をしているため、間隔面積当

りの通気性は類似すると考える。また、8 枚朱子織は、試料の組織で最も交差点が少なく、経糸は緯糸を 7 本飛ばして交差するため、経糸・緯糸は自由度が大きくなる。したがって、試料上部から観察できる間隔面積が平織と同じであっても、通気性は 2 倍程大きくなる と考える。

その他の組織については、いずれも経糸は緯糸を 2 本または 3 本飛ばす組織であり、面積当たりにおける交差点の数に大きな違いが見られないことから、間隔面積に対する通気性の増加量が一致すると考えられる。

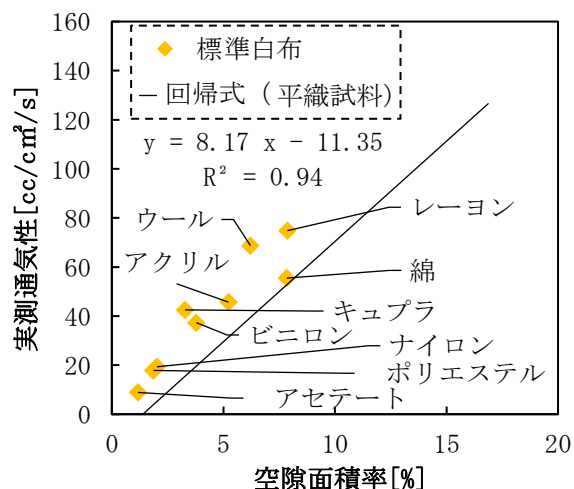


図 9 平織の空隙面積率と通気性の回帰式と標準白布の空隙面積率と通気性の関係

表 1 3 図 9 の回帰式による予測結果

入力データ	R	RMS[cc/cm²/sec]
標準白布データ	0.933	18.6

4. 3. 織物の間隔面積と通気性の関係

図 4 の間隔面積には、経糸及び緯糸の見かけの糸幅が含まれる。見かけの糸幅は、繊維素材や撚り回数など、糸の条件や製織密度、製織組織によって変化することから、繊度から概算した値にならないことがある。しかし、糸幅を除いた空隙面積を算出することができれば通気性との関係を最も直接的に比較できると考えられる。したがって、空隙面積と通気性の関係を、二値化した試料画像から算出した空隙面積率から検討した。

通気性との関係を示す図 7、図 8 を確認すると表 1 2 に示すように、こちらも製織組織毎に強い相関を持つことが確認された。このことから、織物の通気性は、製織組織と空隙面積率から推測可能と考えられる。

このことを検証するため、図 9 に平織試料の空隙面積率と実測通気性から求めた回帰式を示し、この回帰式から標準白布の空隙面積率を用いて予測した通気性の残差結果を表 1 3 に示す。表 1 3 から、平織におけ

る回帰式は、織度や製織密度の違いに影響されることなく、残差が小さい予測値を算出できることが確認できた。このことから、平織組織については、任意の通気性を持つ設計条件を、空隙面積率を介して検討することが可能であると考えられる。

5. 結言

- 1) 機械学習を用いて、織物の設計条件（織度、製織密度、製織組織）から通気性を予測するモデルを構築した。その結果、教師データの経糸、緯糸を用いた綿織物に対して、相関係数 0.968、RMS は 13.1、で通気性を予測した。ただし、教師データ範囲外の予測値は、残差が大きくなった。
- 2) 織物における通気性は製織組織毎に、経糸と緯糸に囲まれた空隙面積と高い相関性を持つことが分かった。平織組織については、回帰式を求めることで、通気性から製織条件を設計できることが示唆された。

参考文献

- 1) 中島孝明,長澤浩,中村和由,小林慶祐,東瀬慎. 編織物の物性評価データベースと予測システムの構築 (第2報). 令和5年度福島県ハイテクプラザ研究報告書, 2024.