

EXPLORING FABRIC DYNAMIC BREATHABILITY

生地のアクティブな 吸放湿性を検証



概要

- ウール100%のベースレイヤーは、ハイキング、サイクリング、ロッククライミングなど「ストップ・アンド・ゴー（運動と休息）」を繰り返すスポーツに最適です。特に「アフター・チル（運動後の汗冷え）」対策でウールのメリットが発揮されます。
- この研究結果は他の天然素材や合成繊維と比べて、ウールを着用したアスリートの方が体温維持のために消費するエネルギーが少ないことを示しています。つまりアスリートは、ウールを着用することで体力を温存し、スポーツやパフォーマンスにより多くのエネルギーを費やすことができるのです。
- 「ストップ・アンド・ゴー」スポーツにおけるアスリートの身体状況を実態に即して正確に再現するため、繊維製品の透湿度試験方法であるISO 11092（発汗ホットプレート法）の改良版を開発・提案しています。

アクティブな吸放湿性とは？

人間を含む哺乳類は、火、雨、熱、湿度、寒さなど、自然界の極度の環境下でも生きていけるよう進化してきました。また、ウール、カシミア、アルパカ、キャメル、モヘア（および毛髪）など構造が複雑なタンパク質ベースの天然繊維も、環境や季節変化に応じて最大限の体温調節ができるよう、自然の中で長い年月をかけて進化してきました。

ハイキング、サイクリング、ロッククライミングなどアクティブなアウトドアスポーツは、激しい運動と休息を何度も繰り返すことから「ストップ・アンド・ゴー」スポーツに分類されています。「ストップ・アンド・ゴー」スポーツのアスリートは運動中に汗をかきますが、その汗は衣服に吸収され、休息中に衣服から外気へ放出されます。つまり「ストップ・アンド・ゴー」のスポーツでは、衣服は発汗による吸湿発熱と、その汗の蒸発による冷却を繰り返しています。こうした衣服の温度変化は、アスリートの身体に大きな負担となります。ウールのベースレイヤーは肌と生地間に適度な空間を保持することで、温度変化が比較的小さい、安定して快適な衣服内気候を実現できます。事実、ウールのベースレイヤーを着用したアスリートたちはこのように語っています。

「ウールは湿気を帯びても断熱性を維持できる」

「寒くならないし、更に重要な点として、暑くて汗だくになることもない」

「濡れても保温性が変わらない」

しかし残念ながら、こうした性能を適切に試験する方法はまだ開発されていません。そのため、アウトドアウェアのデザイナーは、様々な動きや変化のある動的な状況で使用される衣服にも関わらず、変化のない静的な環境を再現する研究機器を使用して「ストップ・アンド・ゴー」スポーツ用のウェアを開発しています。現在使われている繊維製品の透湿度試験方法 (ISO 11092) 「定常状態での熱及び水蒸気抵抗の測定」などの生地試験方法では、「ストップ・アンド・ゴー」スポーツ用に作られた衣服の体温調節性能を、効果的に測定することはできません。

私たちは「ストップ・アンド・ゴー」を繰り返すアスリートの競技中の身体状況を正確に再現するため、繊維製品の透湿度試験方法 (ISO 11092) の改良版の開発に着手しました。

現在の研究について

熱的快適性とは、最適な体温レベル ($37^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$) を維持することです。これは安定した状態に限らず、直接的な環境変化（暑い場所から寒い場所への移動など）や身体の代謝率の変化（運動の開始や終了など）にも関係します。人間は衣服によって体温を調節していますが、ウールは他の衣料用の主要な繊維と比較して、衣服と身体の間にある安定した状態に維持する機能が高いと判明しています。

ウールが持つ断熱性と湿度調節という2つの特性は連動しており、単独または組み合わせで作用することで、ウール製品の使用者に様々なメリットをもたらします。

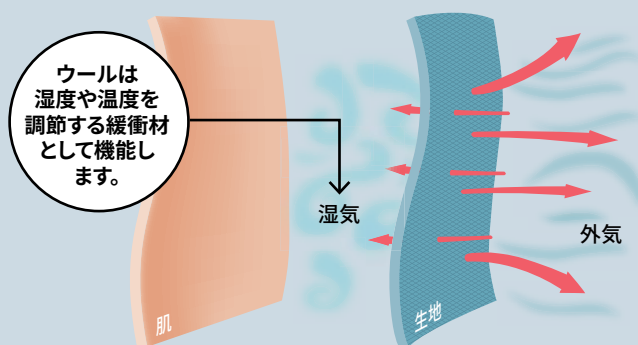


図1: ウールは、生地と肌の間にある動的な衣服内気候を快適に維持します。

研究調査

ノースカロライナ州立大学はテキスタイル分野の研究をリードしており、主任研究者のエミール・デン・ハルトグ教授は、テキスタイルが人間の快適性や健康へ及ぼす影響に関して60以上の論文を発表しています。

最近修了した3年の博士課程研究は、体系的な手法に基づき、より有意義な生地検査法を開発するために実施されました。この研究では、比較のため厳密に規格を調整した、5種の異なる繊維で出来た生地を使用し、それらを既存の生地検査、動的発汗マネキン検査、人体検査によって評価しました。

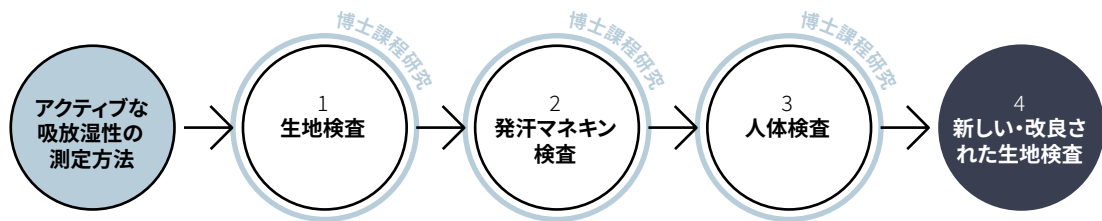


図2: アクティブな吸放湿性の研究工程
3年の博士課程研究 - ノースカロライナ州立大学

ステージ1：生地検査

特にアウトドアやスポーツの場面において、衣服の主な機能は私たちの健康と安全を守ることです。これらの場面では、着用する衣服は環境や気候に適しているだけでなく、各々の活動レベルの変化にも対応できなければなりません。

繊維の湿度調節機能や熱の透過性などは、身体と服の間にある衣服内気候に影響を及ぼします。こうした繊維の特徴を正確に理解することで、私たちは、は特定の用途に最適な繊維を選択することが可能です。これらの特徴は概して、生地の「吸放湿性」として表現されることがあります。

吸放湿性を判断する上で最も知られている測定検査は、以下の通りです。

- 液体水分管理検査 (AATCC TM195, AATCC TM200 & 201)、

重量法吸水性検査、水平 (AATCC TM198) 及び垂直 (AATCC TM197) 吸水試験

- 熱及び水蒸気抵抗の測定 (ISO 11092)

これらの検査はすべて静的な性能を測定するように設計されていますが、人とその周囲の環境はほとんど静止していない動的な状態であるため、実態と異なる結果を生じる可能性があります。

生地の質量と厚さがほぼ同等の、異なる繊維で作られた5種類の生地 (表1) について、重量法吸水性検査、湿度管理試験機を用いた液体水分管理検査 (AATCC TM195)、乾燥速度検査 (AATCC TM201) などの業界標準の検査を実施しました。

ウールのような動物繊維は、常に変化する自然界の動的な環境から身体を保護するよう進化してきました。そのため、動物繊維を使用したテキスタイルは、静的なテストでは性能を十分に発揮できないことが多々ありました。

現実的に考えると、テキスタイルの性能は「動的」条件下で評価されるべきです。つまりテキスタイルのアクティブな吸放湿性、すなわち温度と湿度が変化する条件下での熱と水分の移動特性を測定すべきです。

この測定のため、時間と費用がかかるものの、「発汗マネキン」と「人体による検査」の2つを実施しました。

表1 生地の詳細

番号	サンプルID	生地組成	生地組織	重量 (g/m ²)	厚さ (mm)	詳細
1	WBT	100% メリノウール	天竺	213	0.69	ウール (疎水性・未加工)
2	WLT	100% メリノウール	天竺	220	0.69	ウール (親水性・加工済み)
3	CL	100% コットン	天竺	188	0.65	コットン (親水性・未加工)
4	PLT	100% ポリエステル	リブ	199	0.69	ポリエステル (新水加工)
5	VB	100% ビスコース	天竺	204	0.67	ビスコース (疎水加工)

ステージ2：発汗マネキン検査

発汗マネキン検査は、厳密に管理された各種環境下で人間がどのようにテキスタイルの性能を体感するのか、有益なデータを提供することができます。

2023年のアベディンとデンハートグによる研究では、相対湿度 (RH) 環境が45%から80%へ移行する際、未加工の疎水性ウールが熱変化を最も効果的に緩和することが分かりました。この温度緩和効率は、ビスコースよりも26%、コットンよりも45%、ポリエステルよりも96%優れていました。こうした違いは静的なテストでは観察されません。

生地が乾く際には気化熱によって身体の熱が奪われます。ウールはこれを緩和し、運動後の休息時にも熱的快適性を維持している可能性が、発汗マネキン検査で明確に示されました。

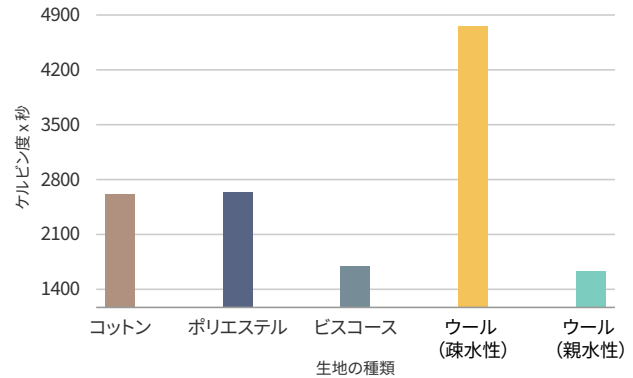


図3: クールダウン時の保温性

ステージ3：人体による検査

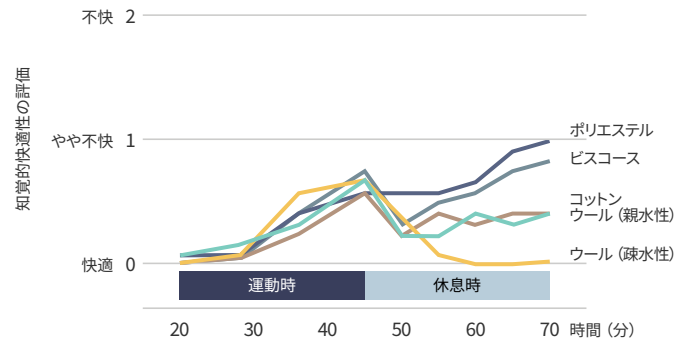
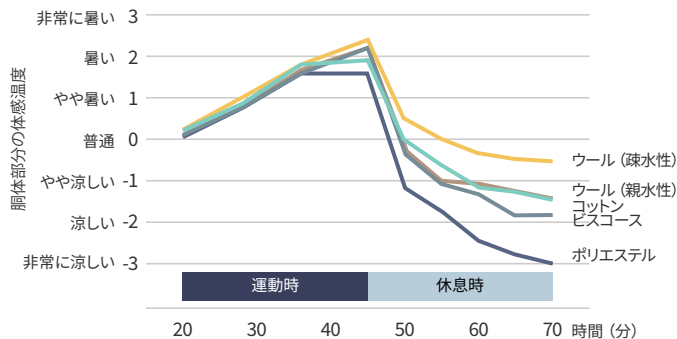


図4: 「ストップ&ゴー」の運動時と休息時における、時間経過に伴う体感温度と知覚的快適性の評価。

生地やマネキンを使った検査で得られた客観的データを検証し、実態に即して解釈するためには、人体を使った検査が不可欠です。熱的快適性は衣服熱抵抗 (Clo 値) と身体の活動レベルに関連しており、これらの影響下で最適な体温の範囲が存在しています。例えばベースレイヤーを着用していてもアスリートの代謝率が低下すれば、快適性には劇的な影響があります。深部体温を維持するために人間の身体は蓄えたエネルギーを代謝・燃焼させており、代謝率の低下が体温と熱的快適性の低下に繋がるためです。

2023年のアベディンとデンハートグによる研究では、「ストップ・アンド・ゴー」スポーツを想定した気温と風の条

件下で、一定期間の活動後に休息した被験者に対するテキスタイルの性能を評価しました。

図4が明示している研究結果は以下の通りです。

- 運動段階における体感温度と知覚的快適性において、繊維間に有意な差はありませんでした。
- 休息段階で継続的に快適さを維持したのはウールのみで、その他繊維では「アフター・チル (運動後の汗冷え)」が認められました。
- 休息を開始して25分が経過した後でも、繊維間の体感温度の差異は持続していました。

ステージ4：アクティブな吸放湿性を測定するための、より簡易で安価な新しい検査法の開発

時間と費用がかかるマネキンや人体による検査は時間と費用の点で非効率であるため、アクティブな吸放湿性を測定する新しい検査が必要です。

既存の標準的検査方法は、ISO 11092の「定常状態での熱及び水蒸気抵抗の測定」であり、これは「発汗ホットプレート」装置を使用している。そして「ストップ・アンド・ゴー」を繰り返す活動におけるスポーツ用生地の特徴を評価するために、この方法を改良しました。

改良後の検査方法では、評価対象を想定した環境、すなわち適切な温度、相対湿度、気流(図5)を作り、その条件下で発汗ホットプレート进行操作して検査を実施します。また他の重要な改良点として、検査対象の生地とホットプレートの上に挟むセロファン膜を取り除き、一定量の水分が検査対象の生地に浸透できるようになっています。

親水性の生地はポリエステルで観察されたように、高い熱流束によって液体の水を急速に蒸発させます(図6)。一方、疎水性のウール生地では液体の水が生地上で広がらないため、外気に触れる湿った生地の面積が小さくなり、水分の蒸発が遅くなります。

図6の曲線下の面積を計算することで、体温を維持するために必要な、人体から放出される熱流束またはエネルギーの流れを推定します。

「ストップ・アンド・ゴー」スポーツではエネルギー管理が重要であるため、アスリートにとって少ないエネルギー消費で体温を維持できる生地を選ぶことが不可欠です。適切な生地を選ぶことで、アスリートはより多くのエネルギーを競技パフォーマンスの向上に注ぐことが可能となります。

ウールを着用した場合、運動中及び休息中のどちらの状況下でも、熱的快適性を維持するために消費するエネルギーが少なくなります。総エネルギー消費量は他のすべての繊維と比較して半分以下です(図7)。

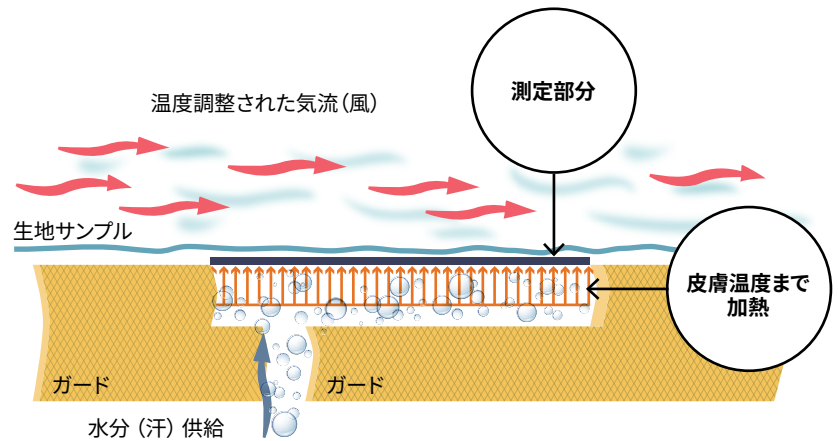


図5: 改良型発汗ホットプレート(セロファン膜なし)。

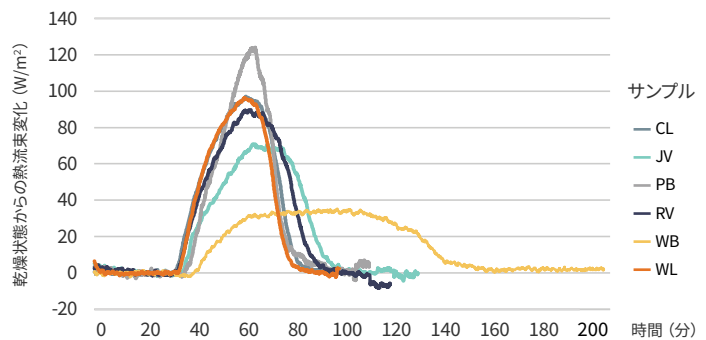


図6: 6種類の生地の熱流束(CL - 親水性コットン、JV - 疎水性ビスコース・天竺、PB - 親水性ポリエステル・リブ、RV - 疎水性ビスコース・リブ、WB - 疎水性ウール・天竺、WL - 親水性ウール・天竺)

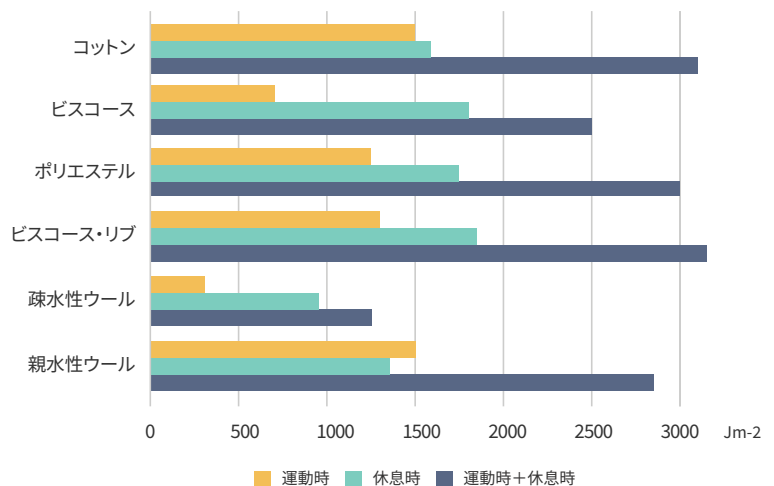


図7: 30分間の運動後に30分間休息した際の、エネルギー放射量。



今後に向けて

これまでは30分間の運動後に30分間の休息を行うシナリオで研究が実施されてきました。現在「ストップ・アンド・ゴー」スポーツにおける実際の活動時間と休息時間を想定したシナリオを使用して、3種類の繊維（ウール、コットン、ポリエステル）の熱に関する性能評価の研究が進められています。

また並行して、ISO 11092（繊維製品の透湿度試験方法）の担当機関と協議を開始し、この方法の改良案を提案してゆくことが重要です。

まとめ

ウールのような吸湿性と疎水性を持つ繊維は、運動と休息を繰り返すスポーツにおいてアスリートのエネルギー消費量を低減し、パフォーマンスに費やすエネルギーの確保を助け、また運活動中の快適性を高めることが、今回の検証から明確に示されました。

これは特殊な検査による結果ではありません。既存の標準的な透湿度試験方法（発汗ホットプレート法 - ISO 11092）を用いて、スポーツにおける実際の挙動に合わせた簡単な調整を加えることで、この検証が可能となりました。アスリートにとって重要な課題である、競技ウェアの快適性と競技中のエネルギー管理を判断する上で、この検査方法の発案も今回の重要な成果となりました。

今後は大手スポーツブランドからの理解・協力も得て、スポーツウェアの吸放湿性能が競技実態に即して適切に検証されるよう、ISO 11092の検査方法の変更をISO担当機関に働きかけてゆく考えです。

参照

- showed normal hydrophobic wool as best in buffering thermal change during transition from 45% relative humidity (RH) environment to 80% RH - showcasing a temperature buffering efficiency 26% superior to viscose, 45% superior to cotton, and 96% superior to polyester.

Abedin, Faisal, and Emiel DenHartog. "A new approach to demonstrate the exothermic behavior of textiles by using a thermal manikin: Correction methods of manikin model." **Polymer Testing** 128 (2023): 108195.

- no significant differences between fibres in perceived comfort or thermal sensation during the activity phase;
- only wool maintained ongoing comfort throughout the resting phase, with after-chill experienced for all other fibre types; and
- thermal performance differences are long-lived, with fibres still diverging after 25 minutes.

Abedin, Faisal, and Emiel DenHartog. "Clothing impact on post-exercise comfort: skin-clothing physiology in transient environment." **Ergonomics** (2023): 1-17.

- Fabric test methods such as ISO 11092 (Methods for the measurement of the thermal resistance and water-vapour resistance, under steady-state conditions) are consequently unable to effectively distinguish the thermal comfort performance of garments made from different fibre types

J. Huang, Sweating guarded hot plate test method, **Polymer Testing**, Volume 25, Issue 5, 2006, p709-716

- The ability of wool garments to maintain more stable thermal comfort by buffering the microclimate between the fabric and the skin is well documented.
- For an athlete wearing base-layer clothing, the effect of decreased metabolic rate on comfort can be dramatic. The body must create heat using stored energy reserves to maintain core body temperature.

Li, Y The Science of Clothing Comfort, **Text Prog** 31 2001 p 55

- Humans rely on clothing to help regulate their body temperatures and wool, more than all other common apparel fibres, helps maintain a more stable microclimate between the garment and the body.

Li, Y. Holcombe B. V. and Apcar F., Moisture buffering behaviour of hygroscopic fabric during wear, **Textile research Journal**, 1992, 619-627.

- The two properties of thermal insulation and moisture vapour management are coupled and can impart a series of benefits to users of wool products through acting independently or in combination

J. C. Barnes and B.V. Holcombe, Moisture Sorption and transport in clothing during wear, **Textile Research Journal**, 1996, 77-786.

"wool maintains its insulating properties when damp"

"I get neither cold, nor more importantly, hot and sweaty"

"It still keeps you warm even when wet"

<https://road.cc/content/feature/merino-wool-cycling-kit-really-sustainable-290265>