

Brewed Protein™ 繊維のライフサイクルアセスメント(LCA)

カシミアとメリノウール繊維生産における“Cradle to Gate”(ゆりかごからゲートまで)との比較

2023年7月

Spiberのミッションは、人類の持続可能なウェルビーイングへの貢献です。私たちは、当社の事業が社会の各分野にプラスの影響を与えることを目指しています。そのためには、私たちと顧客の皆様が、当社が開発する素材と生産工程が環境に与える影響を十分に理解できることが非常に重要だと考えています。

そこで当社は、Brewed Protein™(ブリュード・プロテイン™)、カシミア、メリノウールの各繊維の製造が環境に与える影響を比較するために、社内および各分野の専門家の協力を得て実施した1年にわたる分析結果をこの報告書にまとめました。本報告書では、研究過程とその結果、そして今後Brewed Protein™繊維を既存素材と比較してさらに価値あるソリューションにするために、私たちが学んだことをどのように活かしていくか、また、ライフサイクルアセスメント(以下、LCA)の過程で得られた興味深い発見や、異なる製品と環境影響を比較することにおける課題についてもご説明します。

本試験に関するお問い合わせは、websiteのコンタクトフォーム (<https://spiber.inc/ja/contact/>) にお寄せください。

Brewed Protein™

Brewed Protein™(ブリュード・プロテイン™) 素材とは、Spiber独自の発酵プロセスにより、タンパク質の粉末から製造されるタンパク質繊維、フィルム、その他の多様な種類の高分子素材(Figure 1参照)の総称です。植物由来の糖類を主原料とするBrewed Protein 素材は、従来の素材に代わる、バイオベースで生分解性を有し、かつアニマルフリーでプラスチックフリーの素材に対する市場の需要の高まりに対応するソリューションを提供します。

そのBrewed Protein 繊維の特性や特徴の多くは、カシミアやウールなどの動物性タンパク質繊維と比較することが可能であり、本分析では、それら既存素材とBrewed Protein 素材の環境上の利点を定量的に比較した内容、そこから得られた示唆や課題などをお伝えします。

Figure 1



Figure1-1 : Brewed Protein™素材。(a) 長繊維、(b) 短繊維、(c) ポリマー、(d) 紡績糸、(e) レザー、(f) レジン



Figure1-2 : Brewed Proteinポリマーを溶媒に溶かし、ノズルから押し出して成形される長繊維(フィラメント糸)。シルクのような光沢と繊細さをもつ。



Figure1-3 : Brewed Proteinフィラメントを短くカットし、開毛した短繊維。繊維同士の絡み合いの具合や、綿の空隙率によってその後の素材の風合いが大きく変化する。

目標と範囲

当社初となる包括的なLCAを実施するため、私たちはサステナビリティ・LCAコンサルティング分野の先進企業であるEarthShift Global社と提携し、同社と共同で国際標準化機構(ISO)14040および14044の規格に従いモンゴル産カシミヤとオーストラリア産メリノウール繊維とBrewed Protein™繊維との比較分析を行い、3名の第三者専門家からなる審査委員会から2度にわたるフィードバックを受け、調査結果を改善するための修正や更新を都度行いました。

本報告書に記載されている詳細は、全試験のレビュー結果を示していますが、特に、以下のことを明らかにするために、上記各繊維の製造工程の比較分析を行いました。

- ・ 当社の工場がフル稼働した場合、現在開発しているBrewed Protein繊維の製造工程はどのような環境影響をもたらすのか。
- ・ それを他の高級獣毛繊維の製造工程とどのように比較できるのか。
- ・ Brewed Protein素材製造をより環境に配慮して行うために、私たちが優先的に改善すべき点は何か。

また、本分析のもう一つの大きな目的として、生産およびプロセス開発、事業開発、コミュニケーションに関わる社内関係者、ならびに投資家、最終消費者、直接の顧客、繊維バリューチェーンのメンバー、一般消費者など、社外関係者を含め、さまざまなステークホルダーの皆さまに広く結果を共有させていただくことを掲げ実施しております。多くの方にご参照いただき、当社繊維の環境優位性や課題、今後の展望などについての示唆について理解を深める機会にさせていただければ幸いです。

モデル

本分析は、自然界からの原材料採取(ゆりかご=Cradle)から始まり、繊維が工場から出て出荷されるようになる(Gate)までのスコープを指す“Cradle to Gate”、つまり繊維の生産に関わるすべての活動から生じる環境影響を対象としています。Figure 2は、私たちがBrewed Protein繊維と動物性繊維の生産についてモデル化した「システム」の概要です。発生した廃棄物は、最終的に環境に戻される地点まで追跡されます。既存の生産システムを考慮しているため、生産施設の建設に使用する資材は除外しています。また、畜産のための農場運営に使用される光熱費や、研究開発に利用される資源など、事業運営の非生産的側面に関わる資源も含めていません。ただし、原料の糖の栽培に必要な肥料を作るための化石燃料の採取、湖や川、地下水からの水の採取、非農場環境で栽培されたヤギによる放牧地からの乾草の消費など、自然界との最初の相互作用は考慮しています。水や肥料の使用、トラクター用のディーゼル、環境から塩水を回収して様々な化学薬品に加工するプロセスなど、農業がもたらすすべての影響も含んでいます。

また、社内の発酵培養槽や廃水処理槽から排出される大気汚染物質、廃棄物の埋立地からの排出物、使用原料の生産工程で発生する廃棄物からの排出物など、環境への排出物を含む生産に関わる全工程のアウトプットについても追跡調査しています。同様に、畜産システムにおいても、動物が食べる飼料から、紡績工場に送られる前のカシミアやメリノウールの短繊維（原綿）の洗浄や梳毛にいたるまで、Brewed Protein 繊維の生産工程と同じ段階を測定するよう努めました。畜産システムでは、ミルク、肉、皮革など、家畜を飼育することで得られるその他の価値ある生産物についても考慮に入れました。

家畜飼育による環境負荷は、製品の Product Environmental Footprint (PEF) 配分係数を用いて各製品に配分しました（こちらについて詳しくは副産物の配分の項を参照ください）。ただし、繊維を紡いで糸を作るなど、農場や工場の域を超えた工程でのインプットやアウトプットは考慮していません。

Figure 2

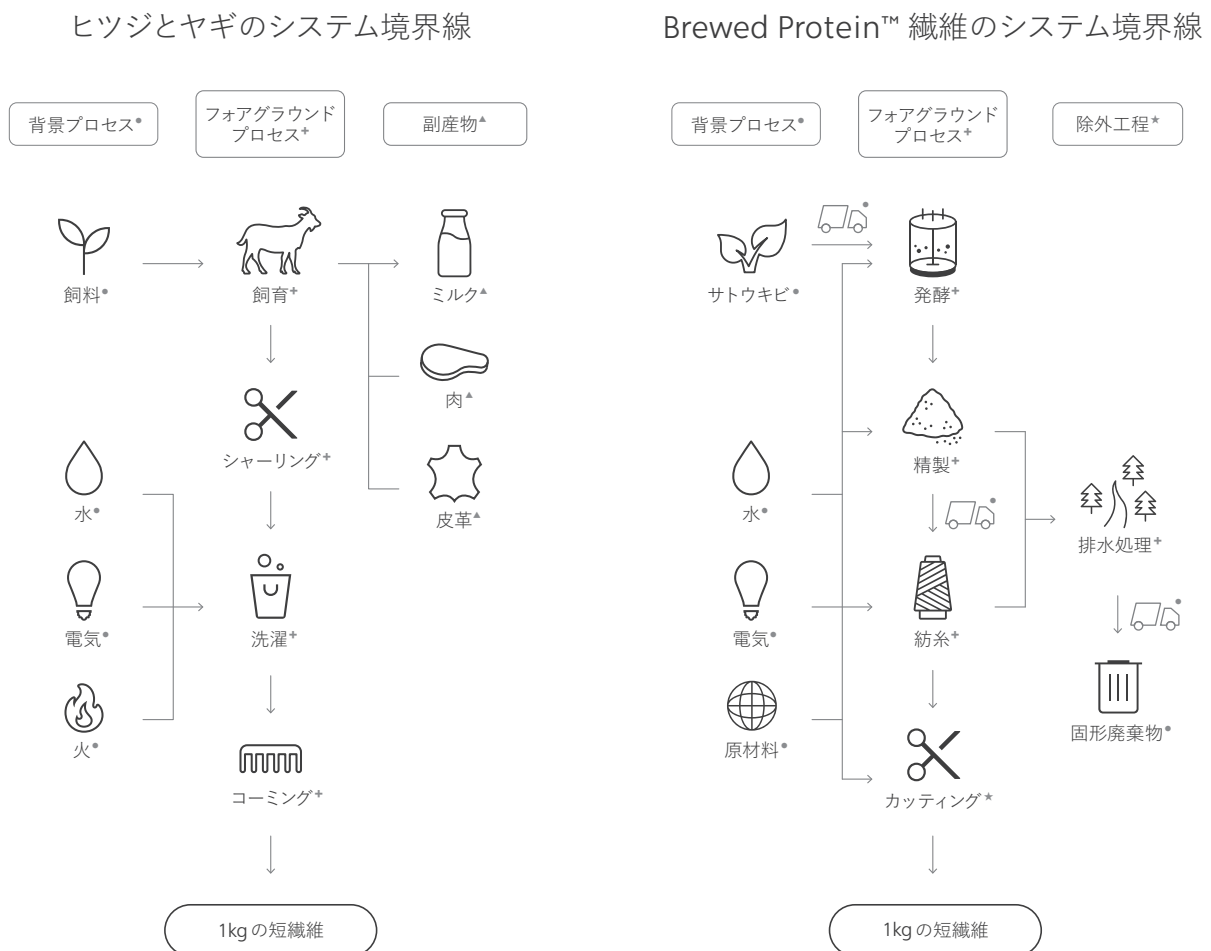


Figure 2: カシミア繊維とメリノウール繊維の生産(左)とBrewed Protein™繊維の生産(右)のモデルに含まれる要素について、調査範囲とするシステムを定義する境界を示す図。

「ゆりかごからゲートまで」を範囲とする意義

カシミア、メリノウール、またはBrewed Protein™繊維を使用した衣料品製造の影響、およびこれらの繊維で作られた衣料品の使用や製品の使用後に生じる影響は、いずれの繊維も同等であると仮定しているため、この比較分析からは除外しています。それに従い、環境負荷の比較についてよりよく理解するべく、短繊維の製造工程のみに焦点を当てることにしました。

さらに、当社の素材を購入いただく先は紡績会社やアパレルメーカー等の企業ですが、購入各社は最終的な衣料品製造にあたってBrewed Protein 繊維を利用する際、さまざまな加工方法を選択することができます。その中において、同繊維のゆりかごからゲートまでのデータセットを提供することで、B2Bの顧客は当分析結果を利用し、自社製品の影響を正確に計算することが可能となります。

一方、環境負荷の削減を計画するためにゆりかごからゲートまでの影響を使用いただく際、ゆりかごからゲートまでの環境フットプリントは削減できても最終製品の使用段階や使用後のフットプリントが結果的に大きくなってしまふようなケースがあります。例えば、製品の耐久性を低くすることでゆりかごからゲートにおける環境への影響を減らすことは可能な場合でも、全体的な環境負荷は高くなる可能性が高く、計画の際にどのようなオプションを選択するかは注意が必要です。



山形県鶴岡市の鶴岡サイエンスパークにあるSpiber 本社

制限事項

基礎データ

LCAモデルの作成に際し、定義されたシステム境界内の各入力、出力、プロセスに対応する環境影響データを収集しますが、それらデータを入手する最も正確な方法は実測であるものの、実測には法外な費用がかかるため、最も一般的なアプローチは、文献調査または環境影響データを提供する専門のデータベースを活用するという方法です。そのため、LCA分析は結果の精度がモデリングに使用するデータの精度に依存し、正確性の確保に難しさをもたらします。

例えば、動物性繊維の生産に必要な工程に関する私たちの理解は、EarthShift Global社の研究パートナーによる文献分析によるものです。しかし、残念ながらこの方法には限界があり、文献やデータベースにあるデータが、モデル化されるプロセスを必ずしも最も適切かつ正確に表しているとは限りません。他方で、ヨーロッパで実施されるプロセスの環境影響については、アジアで実施されるプロセスよりもはるかに多くのデータが入手可能であるため、特定のプロセスケミカルについては、調達先の特定地域に対応するデータではなく、世界平均を使用してモデル化される場合があります。

発展途上プロセスのモデル化

Brewed Protein™繊維の製造工程は、タンパク質ポリマーの製造と繊維への紡糸という2つの主要工程から構成されています。両工程のデータは、当社のタイの商業規模の生産工場が稼動する前の技術計画に基づいているため、現在は稼動中の施設で測定されたデータと比較すると、若干の差異や不確実性を有しています。この問題に対処するべく、当社ではパイロット規模の日本の工場でのポリマーや繊維生産から得られた実測データを用いて、あらゆるギャップを埋めるよう試みました。このような初期段階のデータの限界についてきちんと理解しながら、可能な限り早い時期に軌道修正し、より環境に優しいプロセスを採用できるよう、生産プロセスとその影響について早急に検討を開始することが急務であり、不可欠であると考えています。現在、量産プラントの生産データを用いてモデルを更新しており、進捗状況をモニターするために定期的に更新を行う予定です。

本調査は2021年から2022年にかけての生産計画を捉えたものですが、当社の事業計画とプロセス最適化は日々進展しているため、現状に合致しない点もあります。そのため、できる限り正確な報告ができるよう、いくつかの考え得る生産シナリオをモデル化し、当社の現在の生産プロセスに最も関連すると考えられるシナリオに焦点を当てました。しかしながら、その二つは類似性のあるシナリオながら、当社の現在の生産体制や近い将来の方向性と完全に一致するものではないため、現在の生産設備で測定されたデータに基づき、本調査の更新を行っています。一方、Brewed Protein、カシミア、メリノウール繊維の生産工程のモデル化は、各繊維生産の相対的な影響や、Brewed Protein繊維製造の影響が何によってもたらされるのかを把握するには十分な示唆を与えませんでした。

Results

Brewed Protein™ 繊維の生産における、カシミアやウールの生産と比較した際のさまざまな利点

私たちは主に、Higg Material Sustainability Index (MSI)²とReCiPe³の2つの影響評価手法を用いました（詳細は影響評価手法のセクションと付録を参照）。Higg MSIで使用されている指標の結果を見ると(Figure 3)、Brewed Protein 繊維は、**気候変動、水資源の枯渇、富栄養化に対する影響**がカシミア繊維生産よりも低く、**化石燃料の枯渇に対する影響**は同程度であることがわかりました。また、メリノウール繊維と比較すると、水資源の枯渇と富栄養化の影響は低いことがわかりました。なお、Brewed Protein 繊維とウール繊維の気候変動への影響、および、Brewed Protein 繊維とカシミア繊維の化石燃料の枯渇への影響は、甲乙つけ難いほど近似していました。これらの指標を見ると、環境影響という観点からは、Brewed Protein 繊維はカシミア繊維よりも明らかに優れていると言えます。一方、ウール繊維との比較では、いくつかの大きな環境影響に関する利点が見られたものの、特筆すべき点としてBrewed Protein 繊維生産による**化石燃料の枯渇**がウール繊維のそれより多いことが判明しています。

より包括的なReCiPe 影響評価を考慮すると（正規化した結果はFigure 5をご参照ください）、18カテゴリー中13カテゴリーでBrewed Protein 繊維の環境影響はカシミア繊維の影響より低く、別の2カテゴリーではほぼ同じでした。一方、メリノウール繊維の環境影響は、18カテゴリー中10カテゴリーでBrewed Protein 繊維の影響を上回り、他の3カテゴリーではBrewed Protein 繊維の値の10%以内の幅に納まっています（すなわち、ほぼ同じと言えるほど近似）。

ここでモデル化したBrewed Protein 繊維の生産シナリオは、当社の現在の生産方法に最も関連したものです。他のBrewed Protein 繊維の生産シナリオの結果を見るには、以下の生産シナリオのセクションを参照ください。

2. "Higg MSI Methodology Document – User Resources: How to Higg," Higg Index, <https://howtohigg.org/higg-msi/higg-msi-methodology-document/>, accessed August 2022

3. "LCIA: the ReCiPe Model," RIVM, <https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/recipe/>

Figure 3

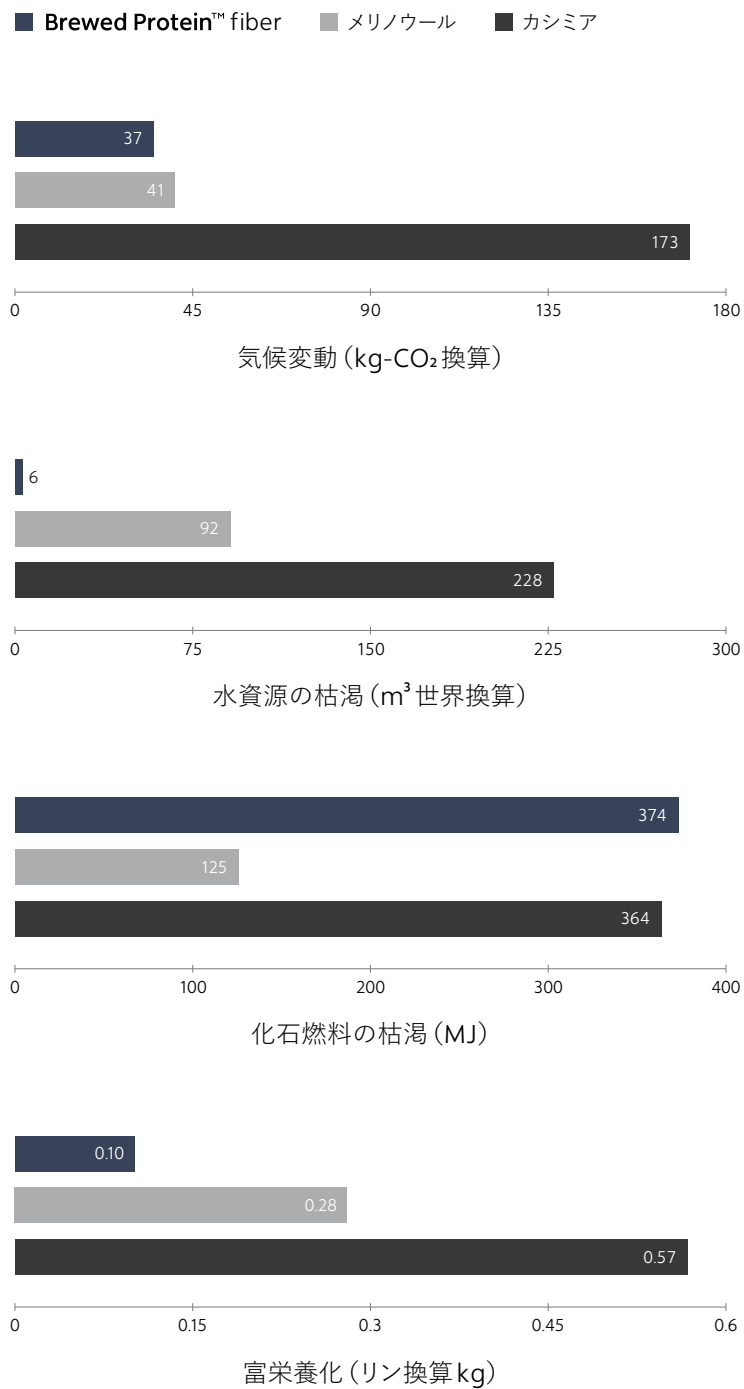


Figure 3: サステナブル・アパレル連合のHigg MSI評価法で使用されている影響指標を使用した、1kgのBrewed Protein、メリノウール、カシミア繊維を生産する際のゆりかごからゲートまでのライフサイクルにおける中間的な環境影響（ミッドポイント）結果。

エンドポイント結果

LCAでは、中間的な環境影響(ミッドポイント)指標と最終的な環境影響(エンドポイント)指標はプロセスの影響を定量化するための異なる手法です。エンドポイント指標は、「保護対象」に対する被害の量を考慮するものであり、ミッドポイント指標は、自然環境への排出と最終的な損害の間の「中間点」を捉えるものです。

例えば、**気候変動**のミッドポイント指標は、二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素などの温室効果ガスの大気中への排出量を二酸化炭素換算の単位で足し合わせたものです。これらの排出量は、各温室効果ガスの単位を二酸化炭素の単位に換算するために気候科学の専門家が決定した換算係数を用いて測定・推定することができ、また、それら換算係数は、気候科学に対する科学界の理解が進むにつれて数年ごとに更新されます。

ReCiPe 影響評価では、「人間健康」、「生態系多様性」、「資源利用可能性」の3つを保護対象としています。

Figure 4は、18のReCiPe ミッドポイントカテゴリーと3つのエンドポイントカテゴリーの関係を示したもので、**気候変動**のように、複数のエンドポイントに影響を与えるミッドポイント指標もあります。また、ある一定量の温室効果ガスが排出された結果として、今後100年間で人間の健康にどれだけの被害が生じるかを把握するためには、科学者はさらに仮定を加えたモデル化を行う必要があります。例えば、人間の健康のエンドポイントは、障害調整生存年(DALY: Disability-adjusted Life Year)で測定され、そのため喘息で生きる年数や癌で早期死亡する年数を同じ単位に換算するための換算係数がモデル内に存在します。このように、被害を単一の数値で表すことは、必然的に主観的な判断を含むこととなります。エンドポイント指標を用いればより簡潔に理解することができますが、ミッドポイント指標を人間の健康、生態系の質、または非再生資源の確保に関する被害に結びつけるには、さらにモデル化が必要になるため、これらの結果の不確実性は高くなります。

エンドポイント指標とミッドポイント指標によるBrewed Protein™繊維、カシミア、ウール繊維との比較では、いずれの指標でも、すべての保護対象においてBrewed Protein繊維はカシミア繊維よりも環境影響において優位に立っていること、そして、Brewed Protein繊維製造工程は、カシミア繊維製造工程に比べ、人体への影響が70%、生態系への影響が82%、資源枯渇への影響が32%低く、メリノウール繊維製造と比較すると、人間の健康への影響が25%、生態系への影響が14%低いことがわかりました。一方で、メリノウール繊維と比較すると資源枯渇への影響は95%高いことがわかりました。資源枯渇の影響は、熱エネルギーのための化石燃料の使用や、その他のサプライ・チェーン全体におけるポイントによって引き起こされるもので、2035年の温室効果ガス排出量ネット・ゼロの目標に向けて取り組みを進めていくことで、この影響の値の大幅な減少を見込んでいます。

Figure 4

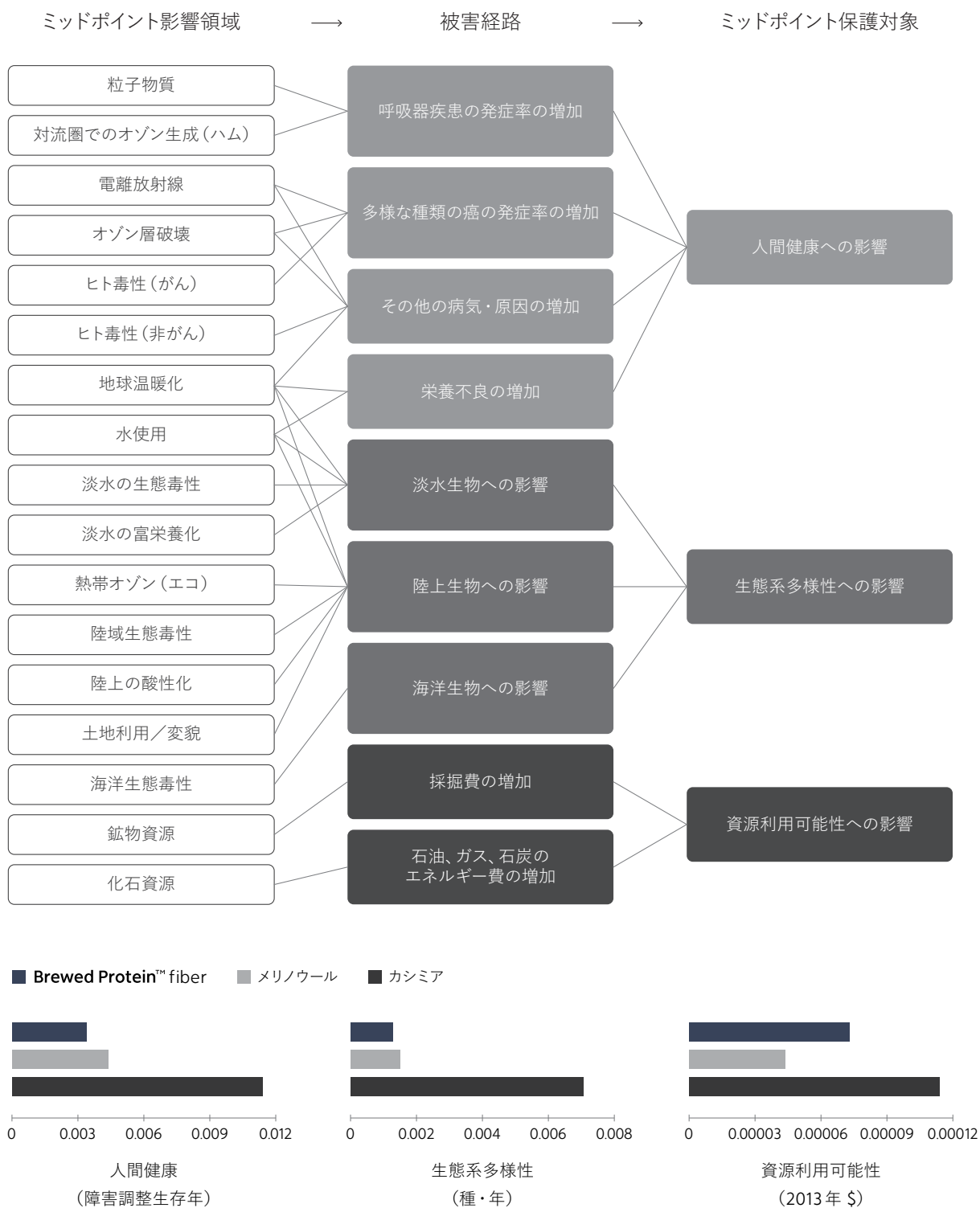


Figure 4: エンドポイント分析では、ミッドポイントの影響指標を拡張するためにさらなるモデル化を行い、人間健康、生態系多様性、資源利用可能性に最終的にどのような影響を及ぼすかを測定しました。(上)ミッドポイントとエンドポイントのつながり。

図は <https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/recipe/> より引用

資源のエンドポイントに関する注意

化石燃料や金属の使用および不適切な取り扱いの影響は、環境に深刻な悪影響を及ぼす可能性があります。資源のエンドポイントは化石燃料や天然資源が使用される際の資源枯渇の経済的影響をモデル化しようとするものであり、その影響指標は、有限資源の枯渇のみを測定するものです。資源使用によるその他の損害は、人間の健康と生態系のエンドポイントで把握されるという整理としています。

正規化された結果

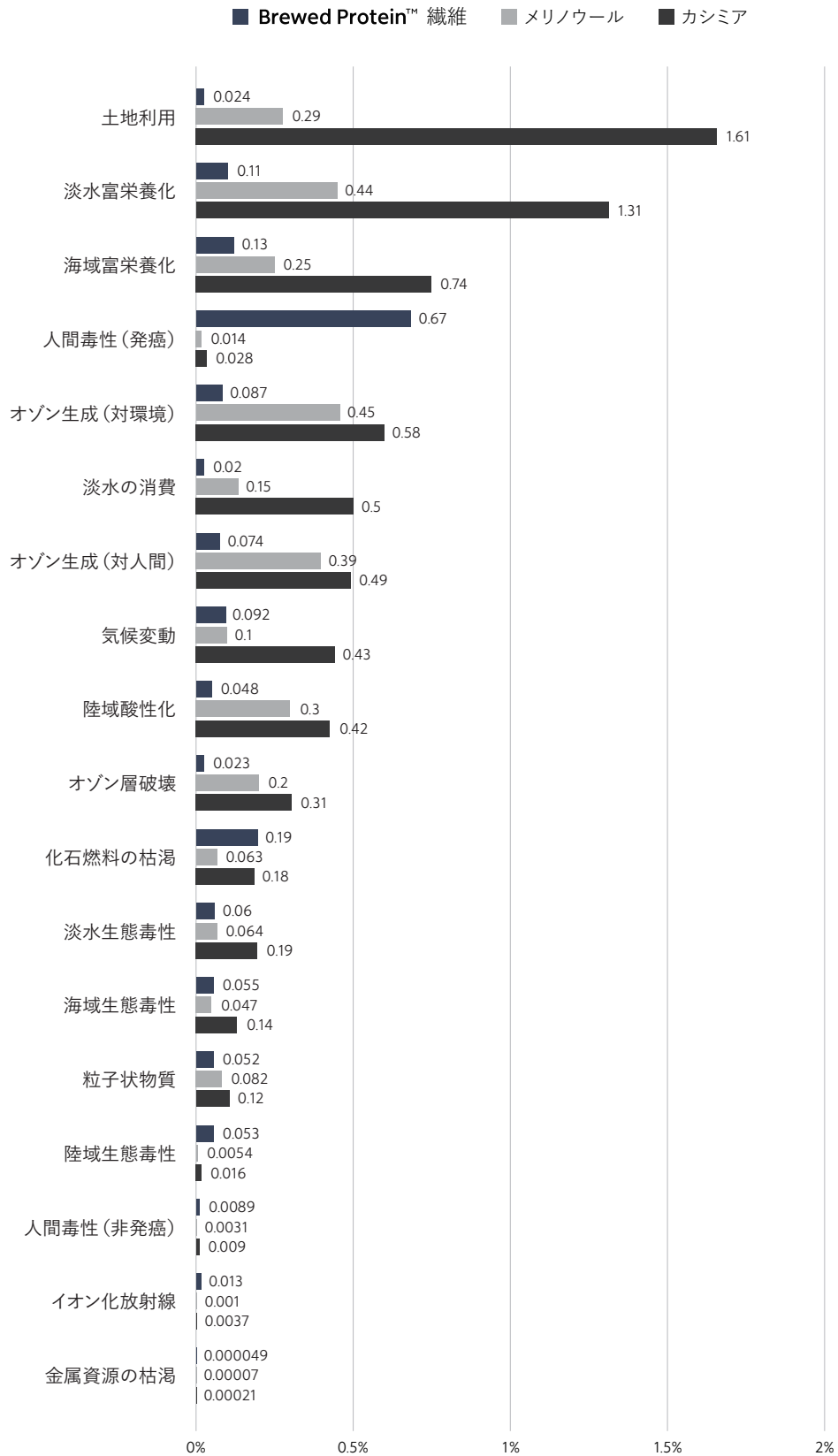
結果が示す、動物性繊維と比較した際の Brewed Protein™繊維のさまざまな利点と、生産プロセスの気候影響と川上のサプライチェーンへの毒性影響に関する継続的な改善努力の必要性

LCAの比較結果は、様々な指標に基づいて、動物性繊維に対する Brewed Protein™繊維の影響の度合いを示していますが、3つの繊維ともいずれも高いものや、無視しても差し支えない指標が紛れている可能性があります。このことは、平均的な人の1年間の活動がもたらす影響に占める割合を見ると理解することができます。ReCiPe 影響評価の開発側は、2010年の全人口の世界総排出量と資源使用量を提供しており、これにより、カシミア、ウール、Brewed Protein 繊維の「平均的な」人に対する影響を見ることができます。Figure 5は、各繊維 200g (セーター約1枚分) の影響が、平均的な人の活動の年間影響に占める割合を示しています。もちろん現実には、平均的な人など存在しませんし、世界のどこに住んでいるかによっても影響は大きく異なりますが、このようにして結果を見ることで、私たちの生産工程が環境に与える影響を一人の人間の環境フットプリントの規模に置き換えることができ、私たちの製品を消費してくださる方々に、より大きな文脈を提供することができると思っています。

影響を削減するためには、まず生産工程のどの部分が原因となっているのかをよりよく知る必要がありますが、調査の結果、3つの繊維が相対的に高い影響を持つ多くのカテゴリーにおいて、Brewed Protein 繊維の方が良い数値を示しました。また、Brewed Protein 繊維の正規化された影響が最も大きいのは、**毒性、化石燃料の枯渇、富栄養化**であることもわかりました。

Figure 5

セーター 1枚 (~200g) に使用される繊維が、「平均的な」人の活動の年間負荷に占める割合。



毒性アクションプラン

このLCA分析の結果、生産工程による**人間毒性（発癌）**カテゴリーへの影響は、Brewed Protein™繊維の方がカシミアやメリノウールよりも高いことがわかりました。現在のLCAモデルでは、このカテゴリーにおけるBrewed Protein™繊維の影響の半分は、生産工程で使用される2つの化学物質によるものであり、私たちは以下の対策を講じる予定です：

ステップ1：LCAモデルを実際の生産データに即して更新し、現在のモデルにおける使用量が正確であることを確認する。

ステップ2：実際の購入先をモデル化する。（例えば、私たちのサプライチェーンの大部分はアジアにある一方で、LCAのバックグラウンドデータはヨーロッパに多くあるため、それらを踏まえたモデル化が必要となります）

ステップ3：影響の大きい原材料の代替となる、より適切な原材料を調査する。（好ましい原材料の一例：当社が調達している Bonsucro 認証のサトウキビ由来の糖は、環境的・社会的条件の基準に従って生産されています）

ステップ4：プロセスケミカルの代替を検討し、より環境負荷の低い物質を使用する。

個人のフットプリントについて

行動や影響など、個人レベルでフットプリントを削減するには、自らのフットプリントを把握することから始めるのが最善の方法です。簡単なまとめ (www.lifestylecalculator.com/doconomy/) をご覧いただき、電気料金の請求書を手元に準備いただきましたら、こちらのサイト (www.carbonfootprint.com/calculator.aspx) にて、CO₂排出量計算ができます。

貢献量分析

動物繊維の影響要因となっているのは補助飼料、Brewed Protein™繊維の影響要因となっているのはプロセスケミカルと熱エネルギー

動物性繊維とBrewed Protein™繊維の製造工程のどの部分が環境への影響をもたらしているかをよりよく理解するために、各影響の要因の内訳を見ることができます (Figure 6)。

毒性指標と**淡水富栄養化**の影響は、プロセスケミカルの一部を製造する上流工程での影響に起因しています。これらの影響の約半分は、わずか2種類の化学物質の使用が原因であるため、影響削減の取り組みにおいて優先的に着手することができます。また、当社では、サプライヤー、製造方法、または毒性カテゴリー全体にわたる化学物質についても、代替案を検討することが可能です。

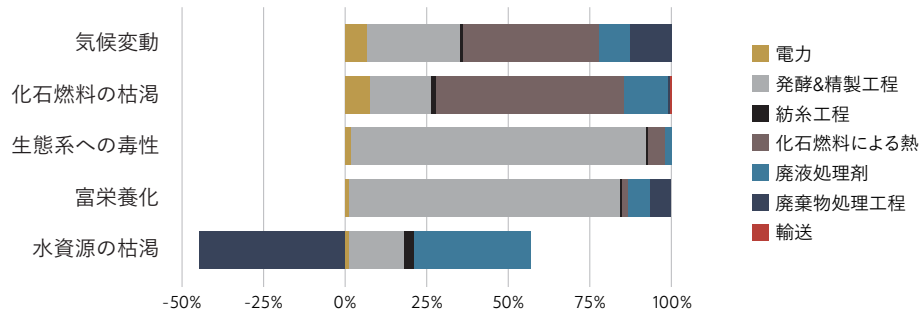
海域富栄養化の影響はサトウキビによる砂糖農業によって引き起こされますが、私たちのモデルでは従来のサトウキビ生産の背景データを使用している一方で、実際には、サトウキビ産業における世界的な持続可能性基準（環境的・社会的基準も網羅）である Bonsucro4 認証のサトウキビを調達しています。また、サトウキビの実際の影響をよりよく知るだけでなく、可能な限り影響の削減を支援するために、直接的なサプライヤーからサトウキビ農家に至るまで、サトウキビのサプライチェーン・メンバーとの協力は、私たちにとって最優先事項です。

気候変動と化石資源の枯渇の影響も同様の要因によってもたらされています。これらの影響の約半分は、当社の発酵工程で熱を発生させるための化石燃料の使用によるもので、さらに20%は、生産工程全体で使用されるさまざまなプロセスケミカルによるものです。当社の製造工程で改善可能な点を学ぶことが、LCAを推進する主な理由であり、私たちはこの情報を環境影響を軽減するために活用したいと考えています。

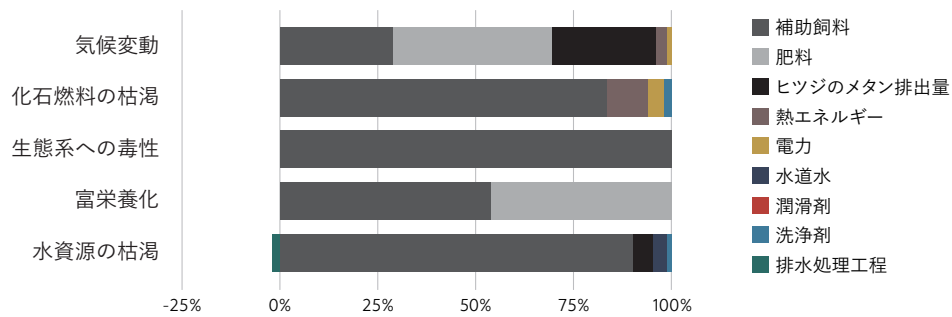
カシミアとウール繊維の製造工程では、家畜の補助飼料の生産による影響が大半を占めます。さらにヒツジやヤギから排出されるメタンガスや、糞尿からの排出も、これらの動物繊維がもたらす影響の大きな要因となっています。Figure 6に見られる貢献量チャートは、農業プロセスが生態系のあらゆる側面に与える影響を浮き彫りにしています。持続可能な農業や、補助飼料が少なくて済むように家畜を低密度で飼育すること、また糞尿管理を慎重に行うことで、これらの影響を軽減できる可能性があります。

Figure 6

Brewed Protein™ 繊維



メリノウール



カシミア

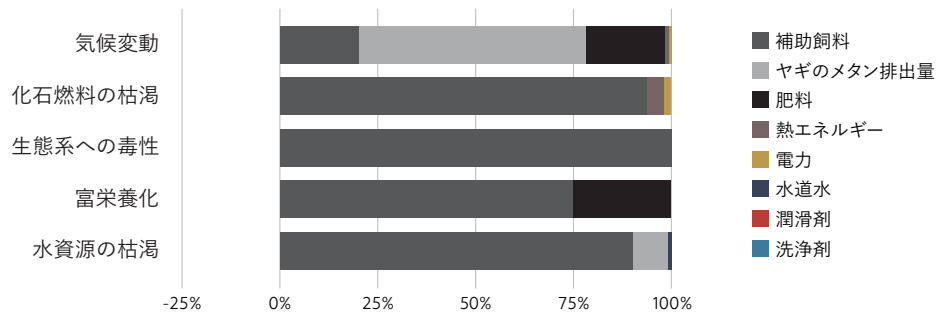


Figure 6: 繊維ごとの、気候変動、化石燃料の枯渇、毒性、富栄養化、水資源の枯渇への影響を引き起こす要因の内訳 (水資源の枯渇に対するマイナスの値は、環境面でのメリットを表しています。具体的には、排水処理によって汚れた水を取り込み、きれいな水を作った場合には水資源枯渇の解消につながる、というのが一例です)

感度分析と解釈

生産シナリオ

フットプリントに大きな影響をもたらす生産における電力源の選択

本報告書に含まれる生産シナリオをTable 1に、各シナリオのHigg MSI影響指標における影響の比較をFigure 7に示しています。本報告書で想定したメインシナリオでは、紡糸工程に再生可能電力を100%と溶媒の回収・再利用システムを採用することを前提としています。いずれも2023年時点の実際の生産工程に当てはまるものです。

さまざまな生産シナリオを比較すると、水資源の枯渇を除くすべてのHigg MSI影響指標の影響が大幅に減少していることから、再生可能電力の利用が不可欠であることが明らかとなりました。

また、繊維製造のための資源回収・再利用システムの導入は水資源の枯渇の改善に、再生可能電力の使用は、メインシナリオと保守的に見積もったシナリオいずれにおいて生態毒性の改善に寄与することがわかりました。その他の影響とグリッド電力を使用した場合の生態毒性については、メインシナリオと保守的シナリオの差は10%以内であり、研究の精度を超えるほど大きくはありません。一方で、資源回収システムは毒性影響を減少させるものの、グリッド電力への変更は毒性影響を増加させるため、化石燃料ベースのエネルギーを使用したメインシナリオと保守的シナリオの生態毒性は同じとなっています。

表1：さまざまなBrewed Protein™繊維製造工程の説明

	エネルギー源	繊維紡績廃棄	ポリマー生産収率
保守的なプロセス	Grid	No	Moderate
メインシナリオ (グリッド電力使用)	Grid	Yes	High
保守的シナリオ (再生可能電力使用)	Renewables	No	Moderate
メインシナリオ	Renewables	Yes	High

Figure 7

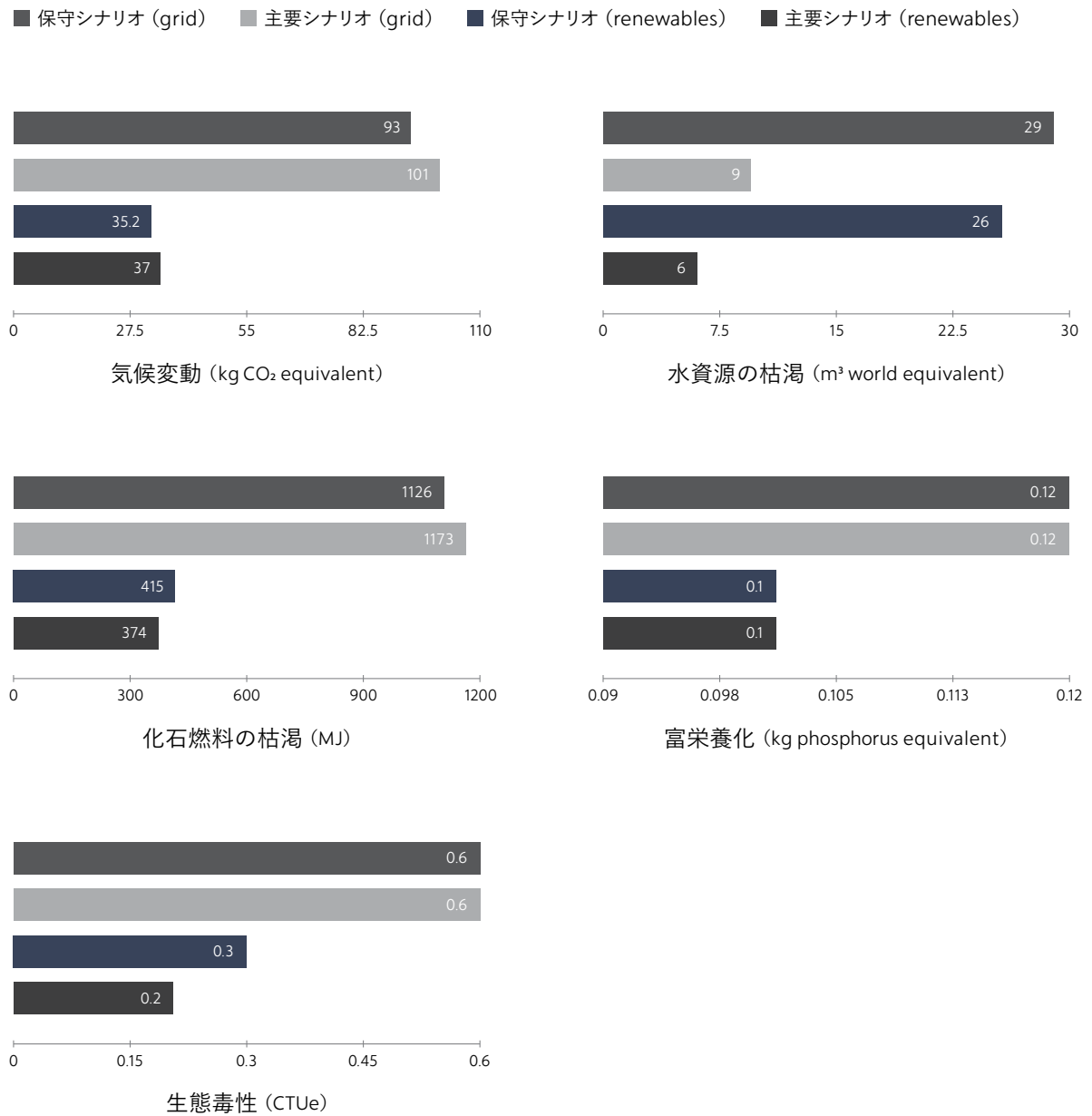


Figure 7: Brewed Protein™ 繊維製造工程におけるさまざまな影響（一般的に、より効率化されたプロセスは環境への影響が低減するとされます）

複数製品への配分

配分方法の選択によって大きく結果が異なる、カシミア繊維の気候変動への影響

現在、Brewed Protein™ポリマーは当社の発酵工程による唯一の製品ですが、ヤギやヒツジの飼育からは、繊維だけでなく、ミルク、肉、皮革など複数の製品が生産され、それら動物の飼育による環境負荷は、選択された配分方法（アロケーション）によってそれぞれの製品に異なる方法で割り当てられています。各配分方法においては、カシミア繊維とメリノウール繊維は、畜産の全体的な影響において異なるウェイトを占めます（Figure 8上）。例えば、ミルクは短繊維よりもはるかに大量に生産されますが、コストで見ると、繊維はミルクよりもはるかに経済的価値があることがわかります。他方、EUの製品環境フットプリント（PEF）法では、これらの各副産物を作るために動物が使用しなければならないエネルギー、すなわち、体や繊維自体を大きくすることやミルクを生み出すことに必要なエネルギーに基づいて配分が行われています。ヒツジとヤギでは、動物の大きさ、繊維の収量、乳量の違い、メリノウールとカシミアの価格の違いにより、配分係数が異なります。

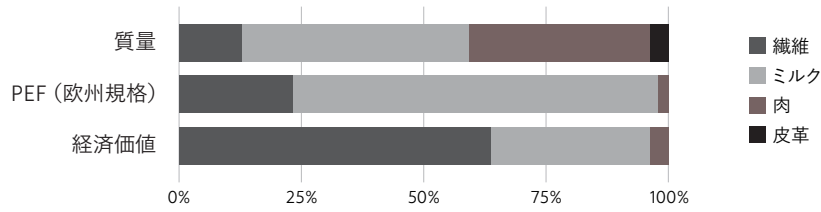
それらを踏まえ本報告書では、主要な配分方法として、欧州基準に由来し繊維産業でも広く使用されているPEF配分係数を採用し、本報告書のすべてのデータにてFigure 8を除き、PEFによる影響の計測値を使用しています。

「システム拡張」または代替法を採用すると、動物繊維とともにミルク、肉、皮革を含むように、システム境界を拡張し、さらにBrewed Protein繊維とともに代替製品を含めることになります。例えば、1kgのメリノウールをBrewed Protein繊維に置き換えた場合、羊肉の需要を他の食料源で満たす必要がありますが、この代替による影響の結果は、選択した代替食料源によって大きく異なります。このように、配分の方法が変わると結果も大きく変わってしまう可能性があり、また、方法について客観的に正しい選択肢があるわけではないため、ISOのLCA基準では可能な限り副産物の加味を避けることが推奨されています。

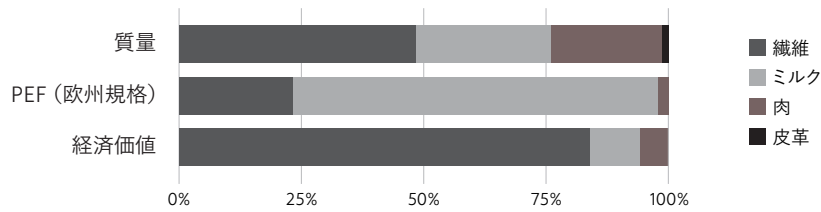
Figure 8の右側は、各配分方法による各繊維源の気候変動影響を示していますが、この場合、カシミアの影響は配分方法にかかわらず、3つの素材の中で一貫して最も高いことがわかります。しかし、このように数値の幅が大きいため、配分方法の選択によって、ある素材と他の素材との比較優位性が逆転する可能性があることも確かです。これは、異なる研究のLCA結果が比較しにくい理由の1つでもあります。

Figure 8

ヤギ



ヒツジ



気候変動

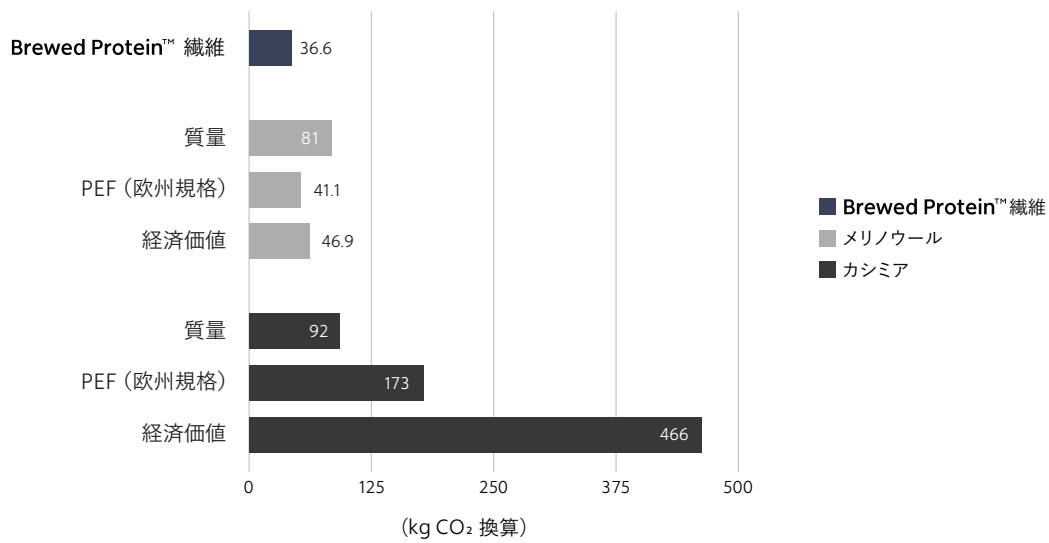


Figure 8: 配分方法。(上)ヤギやヒツジの飼育は複数の製品を生み出します。配分方法とは、飼育による環境影響を繊維、ミルク、肉、皮革にいかに分けるかということで、これはそれぞれの製品の生産量(質量)、それぞれの製品を生産するために動物が必要とするエネルギー(PEF)、生産された製品の価値(経済価値)、あるいは私たちが考慮に含めていない前述以外のポイントも含め、さまざまな観点で算出されます。(下)さまざまな配分方法による動物繊維の気候への影響。

影響評価の方法

結果をより確実性のあるものにする異なる方法での評価

LCA分析を困難にする要因の一つに、検討の対象となる環境影響が多岐にわたることが挙げられます。例えば、本分析に際しては、世界的に著名で包括的と考えられているReCiPeを採用しましたが、ReCiPe法であっても、騒音、臭気、光害の指標は、これらが人間の健康や生態系への影響と関連しているにもかかわらず、含まれていません。さらに、マイクロプラスチック汚染のように、引き起こされる被害の科学的理解や証明がまだ限定的であるがゆえに、きちんと合意形成された影響評価の実施が不可能な環境課題もあります。さらに、ある影響を定量化するために使用できる指標が複数ある場合もあります。Figure 9は、富栄養化を評価するための3つの異なる指標を示しています。これらの評価指標の差異は、対象とする境界が異なるため、あるいは排出量と環境への影響を対応させるモデルが他のモデルよりも完全であったり最新であったりするため、あるいは排出量が環境に及ぼす影響と排出量によってもたらされる(人の健康や生態系などへの)最終的な影響のミッドポイント⁵が異なることによって引き起こされます。したがって、異なる影響評価指標(あるいは、同じ評価指標の異なるバージョン)が使用された異なる研究の結果を比較することは避けなければなりません。

本分析で採用したHigg Material Sustainability Index (MSI) アセスメントは、繊維産業とLCAに精通している専門家によって開発されたもので、繊維産業にとって使いやすく適切なLCAフレームワークを作成することに重点を置いています。指標には、国際的に認められているライフサイクル影響評価(Life Cycle Impact Assessment: LCIA)手法から導き出された、企業がデザイン段階での素材選択にも参考可能な共通のプラットフォームを提供することを目的としている5つの指標を使用しています。Higg MSIは当初、アパレル、フットウェア、ホームテキスタイルの各分野から250以上の業界メンバーを擁するサステナブル・アパレル連合(SAC)によって作成され、繊維業界で定期的に参照されていることも踏まえ、潜在的な購入者が製品開発プロセスにおいてBrewed Protein™繊維の環境影響を考慮できるようにするため、本分析ではHigg影響評価法を使用することとしました。

また、オランダのRIVM、ラドバウド大学ナイメーヘン校、ライデン大学、PRé コンサルタンツが共同で作成した、国際的に認知されているReCiPe影響評価を使用しました。ReCiPe手法は包括的な影響評価であり(指標の説明は付録を参照)、気候変動や富栄養化のような単一の環境問題をモデル化したミッドポイント指標と、Figure 4に示すように、各環境問題が最終的に人間の健康への被害、種の喪失による生態系への被害、天然資源の枯渇にどのように影響するかを検討するエンドポイント指標を含んでいます。

この場合、**気候変動、富栄養化、水資源の枯渇、化石燃料の枯渇**の影響に関する3つの繊維の相対的な傾向は、Higg評価とReCiPe評価の間で同じであり、結果がより確実性のあるものと言えます。

5. 富栄養化の被害経路と定義可能なさまざまなミッドポイントに関する有用な図解は、PRéの『Introduction to LCA with SimaPro』のp.32を参照。

Figure 9

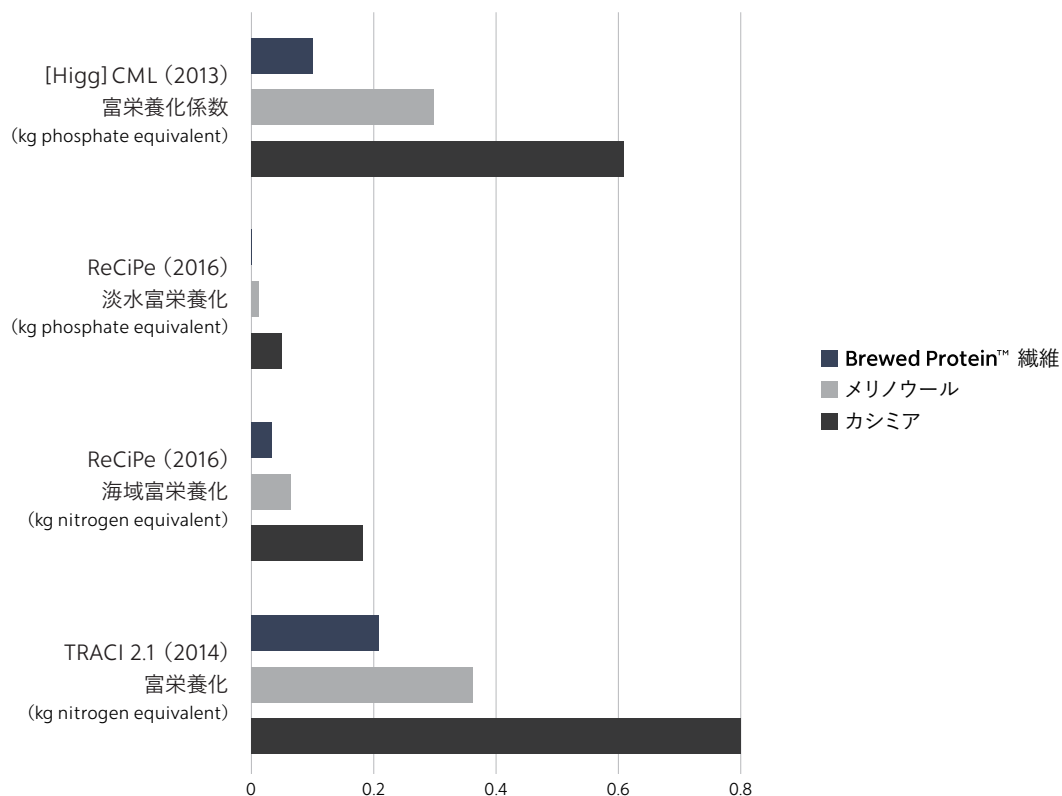


Figure 9: Higg MSI, ReCiPe, TRACI 影響評価法を用いた繊維生産の富栄養化影響。

富栄養化は水質の問題である

本来、海水には窒素が、淡水環境にはリンが豊富ではないため、微生物は際限なく増殖します。しかし、肥料の流出によって余分な窒素やリンが、海、そして川や湖にそれぞれ流れ込むと、微生物は生態系とのバランスを崩した形で増殖し、水中の酸素を吸い上げ、魚のような食物連鎖の上位に位置する生物にとってはデッドゾーン（無酸素、貧酸素の水域）となります。これは漁業の崩壊、地理的に限定された種の絶滅、その他の環境破壊につながる可能性があります。

Brewed Protein™繊維製造の前途

今回の分析結果を振り返ると、再生可能電力を使用したフルスケールのBrewed Protein™繊維生産は、多くの環境指標においてカシミア繊維生産よりも優位性があり、その優位性は場合によってはかなり程度が大きいことがわかりました。また、メリノウール繊維生産に対しても、カシミア繊維と比べるとそれほど大きくはないものの、優位性を享受していることが示されました。この優位性は、現在期待されている本格生産によるものに加え、時間の経過とともに拡大することが期待されるものですが、カシミアやウールの生産は何千年も前から行われているのに対し、Brewed Protein繊維の生産プロセスは極めて新しく、一般的にプロセスは時間の経過とともに効率的になる傾向があるため、当社では今後数年間で生産方法の改善を見込んでいます。全社的な取り組みや産業界とアカデミアのパートナーの皆様との協力を通じて、私たちは現在、改善の機会を特定し、実行に移すためのアプローチ、施策を積極的に探っています。

今後、当社が生産工程の改善で注力する主な分野は、生産に投入された主原材料の量に対する最終的に生産されるBrewed Protein繊維の収量を増やすことと、例えば農業廃棄物など可能な限り影響の少ない原材料を使用することです。

私たちは、LCAを使用して当社の生産工程を研究し続けながら、世界の平均化された推測値に頼るのではなく、当社のサプライチェーンにおける実際の農業や生産慣行をより深く正しく理解するべく、自社の生産工程を超えて最も改善に向けて影響を最大化できるサプライヤーと関わってまいります。そして最終的には、バリューチェーン全体の環境負荷低減を最大限サポートしていくべく、取り組みを進めていきたいと考えています。

Appendix: ミッドポイントの指標

気候変動: ガス状排出物が大気中に留まる時間と赤外線を吸収する能力の影響を組み合わせたカテゴリーを指標とし、地球温暖化係数はCO₂のkg換算値として測定。生物起源炭素は含まれない。

オゾン層破壊: 成層圏で不安定な物質群で、オゾン層破壊反応を触媒して適切なオゾン濃度を低下させ、紫外線を増加させる。kg Chlorofluorocarbon (CFC)-11換算値を特性係数として算出。

陸域酸性化: アンモニア、窒素酸化物、硫黄酸化物の酸性化ガス排出は、陸上生態系の質に悪影響を及ぼす。化石燃料とバイオマスの燃焼が、これらの排出の主な原因である。このモデルでは、SO₂のkg当量として表される、底面飽和度の変化に対する土壌の感度を計算する。

海洋と淡水の富栄養化: 富栄養化とは、水域の窒素やリンの濃度が上昇した結果、植物が過剰に生育し、腐敗して低酸素環境になることである。富栄養化は、他の複雑な植物よりも単純な藻類やプランクトンを好むため、水質の深刻な低下を引き起こす。単位は、淡水ではkgP換算、水域ではkgP換算である。海水のN換算値。

人体毒性および陸上、淡水、海洋の生態毒性: この分類では、大気、水、土壌への排出による毒性影響を考慮し、化学物質の環境残留性(運命)、ヒト食物連鎖への蓄積(暴露)、毒性(影響)を考慮する。特性評価の単位は、kg 1,4-DB当量である。

光化学オキシダントの形成光化学スモッグまたは地上オゾンは、太陽光の存在下で起こる様々な化学反応によって生成され、人間の健康や生態系に悪影響を与える。オゾン前駆物質の主な発生源は、自動車、電力会社、工業施設である。特性係数は、kg NMVOC換算値で表される。

粒子状物質の形成粒子状物質は、呼吸器系疾患の原因となる大気中の小さな粒子の集まりである。一般的な粒子状物質の発生源は、化石燃料の燃焼、木材の燃焼、道路や畑からの塵埃である。特性係数はPM10換算kgで表される。

電離放射線: 人の健康に直接影響する放射能による大気や水への影響を測定する。特性係数はウラン235当量として測定される。

農業用地と都市用地の占有率: 農地または市街地の一定期間の占有面積(m²*yr.)

自然土地の変形: 1年間に変容し、占有された自然の土地の量。

金属の枯渇: 採掘による鉱石品位または鉱石濃度の低下を測定する。

化石資源の枯渇: 再生不可能なエネルギーの累積消費量を測定する。エネルギー消費量は石油換算キログラムで測定される。

水の枯渇: 淡水の消費量に基づく。この指標は水の消費量のみを測定するものであり、消費による環境への影響を測定するものではないことに留意すべきである。単位はm³。



Spiber Inc.

山形県鶴岡市覚岸寺字水上234-1

お問い合わせ先：<https://spiber.inc/jp/contact/>

Web site：<https://spiber.inc>

LinkedIn：<https://www.linkedin.com/company/spiber-inc./>

Instagram：[@spiber_inc](https://www.instagram.com/spiber_inc)

SpiberとBrewed Protein™は、日本およびその他の国におけるSpiber株式会社の商標または登録商標です。

© Spiber Inc. All rights reserved.