

Indigo Decolorizing Enzyme for Denim Washing : デニム洗い加工向けインジゴ脱色酵素の用途・作用機 序・工程上の位置づけ

Enzymes.bio リサーチチーム・ニュージーランド・ウェリントン・June 18, 2026

Indigo Decolorizing Enzyme for Denim Washing は、インジゴ染色デニムの洗い加工で、表面色を穏やかに落とし、フェード感、ウォッシュダウン、バイオウォッシュ調の外観を得るために使われる酵素系加工助剤です。デニム表面のインジゴを含む繊維層への作用と、インジゴイド色素の酸化的脱色を組み合わせると、セルラーゼ系のバイオウォッシュやラッカーゼ系の脱色技術との違いが明確になります^[1]。

Enzymes.bio は本製品を製造業者・研究所としてではなく、1 kg 単位でオンライン直接購入できる産業用酵素供給品として提供し、CoA と SDS は注文時に併せて提供されます。

デニム洗い加工におけるインジゴ脱色酵素の役割

デニム洗い加工では、濃紺のインジゴ染色生地を「ただ薄くする」のではなく、縫い目、シワ、ヒゲ、アタリ、面のムラ、柔らかさ、毛羽の見え方を含めて、製品ごとの外観を作り分けます。インジゴ染色デニムは、一般に経糸の表面側にインジゴが多く存在し、糸内部には白色または淡色の芯が残るため、仕上げ工程では表面層のインジゴまたはインジゴを含む微細繊維を部分的に減らすことで、自然なフェード感が現れます。酵素洗いは、この表面変化を水系工程の中で制御しやすくする加工技術として位置づけられます^[1]。

Indigo Decolorizing Enzyme for Denim Washing は、デニム洗い工程でインジゴ由来の色調を弱めるための酵素カテゴリーとして理解できます。セルラーゼが綿繊維表面に作用して色素を含む毛羽やフィブリルを取り除きやすくするのに対し、ラッカーゼなどの酸化還元酵素はインジゴイド色素そのものの発色構造に作用する研究が進んでいます。したがって「インジゴ脱色酵素」は、従来のデニム用セルラーゼと同義ではなく、色素脱色をより明確な目的として設計される工程助剤と見るのが実務的です^[2]。

デニム加工現場では、フェード効果を強く出すために機械的摩耗、軽石、漂白、レーザー、オゾン、酸化還元処理などが組み合わされることがあります。一方で、過度な摩耗は引張特性、縫目強度、寸法安定性、外観均一性に影響しやすく、工程ごとの負荷を分散させる設計が重要です。レーザー処理と工業洗いがデニムの張力特性に与える影響を扱った研究もあり、仕上げ効果と物性保持を同時に管理する必要性が示されています^[3]。

Enzymes.bio の本製品は、こうした仕上げ工程の中で、インジゴ表面色の調整、バックステイニングの抑制補助、洗い浴中の着色負荷低減、柔らかなウォッシュダウンの形成に利用される酵素供給品です。Enzymes.bio は製造設備や研究開発施設を持つメーカーとしてではなく、オンラインで購入できるB2B酵素供給業者として本品を扱います。製品は1 kg単位で直接販売され、注文時に CoA と SDS が提供されます。

インジゴ染色デニムで「脱色」が難しい理由

インジゴは、水に溶けた状態で繊維へ均一に浸透する染料ではなく、還元状態で繊維に付着した後、酸化されて不溶性の青色インジゴとして繊維表面に固定されます。この発色は、分子内の共役構造に由来するため、単に洗浄水に溶かして除去するのは容易ではありません。デニム洗い加工では、染料を溶解させるというより、繊維表面から物理的・酵素的に少しずつ露出状態を変え、発色部位の見え方を変えることが基本になります^[1]。

このため、強い色落ちを短時間で得ようとする、繊維表面の損傷、過剰な重量減少、白場への再付着、ムラの制御不良が起こりやすくなります。インジゴ染色デニムと硫化染色デニムの酵素洗いに関する研究では、酵素処理がウォッシュダウン効果を与える一方、処理条件によって生地物性や色調が変化することが示されています^[1]。この知見は、酵素を「強い薬剤の代替」として単純に置き換えるのではなく、繊維、染料、機械作用の相互作用として扱う必要があることを示しています。

さらに、デニム洗いでは、剥離または分散したインジゴ粒子が白い緯糸、ポケット布、淡色部へ再付着するバックステイニングが問題になります。脱色酵素が有用なのは、布表面から色を落とすだけでなく、浴中に出たインジゴ由来の発色を低減し、再付着しても目立ちにくい状態へ近づける可能性があるためです。ラッカーゼ媒介系を用いたインジゴ染色デニムの生物脱色研究は、この観点からデニム仕上げへの応用可能性を示しています^[2]。



Figure 1. 효소 데님 워싱에서 인디고 탈색은 주로 표면에서 일어나는 현상인데, 눈에 보이는 파란색의 상당 부분이 실의 바깥쪽에 집중되어 있기 때문이다.

作用機序：セルロース表面への作用とインジゴイド色素への酸化作用

セルラーゼ的な表面改質：色素を含む微細繊維を取り除きやすくする

綿デニムの主成分はセルロースです。セルラーゼ系酵素は、セルロース鎖の一部を加水分解し、表面の毛羽、微細フィブリル、突出した弱い繊維構造を切断しやすくします。ドラム内での機械作用と水中膨潤が加わると、インジゴを含む表面層が少しずつ除去され、芯部の明るい色が見えるため、自然なウォッシュダウンが形成されます。微生物セルラーゼの工業利用に関するレビューでは、セルラーゼが繊維加工を含む複数の産業で利用される重要な酵素群であることが整理されています^[4]。

この作用は、色素分子を直接壊すというより、色素を担持している繊維表面を選択的に変える作用です。そのため、セルラーゼ処理では、色落ちと同時に、柔軟性、毛羽の減少、表面の滑らかさ、吸水性、重量変化なども起こり得ます。デニム酵素洗いを扱った文献では、インジゴ染色および硫化染色デニムの仕上げにおいて、酵素処理が外観だけでなく物性面にも関係することが示されています^[1]。

ただし、セルラーゼの作用を強くしすぎると、望ましいフェード感を超えて、過度の繊維損傷、強度低下、裾や縫い目の過剰摩耗につながる可能性があります。したがって、インジゴ脱色酵素を使う場合でも、セルラーゼ的な表面改質が関与する工程では「色が落ちるほど良い」ではなく、目標外観と物性保持のバランスが重要です。近年の微生物酵素レビューでも、産業酵素は高効率で選択性がある一方、工程条件との適合が性能を左右することが強調されています^[5]。

ラッカーゼ的な酸化脱色：インジゴイド発色構造を弱める

ラッカーゼは、多銅酸化酵素に分類される酸化還元酵素で、酸素を最終電子受容体として用いながら、芳香族化合物やフェノール性化合物などの酸化を触媒します。インジゴイド染料の脱色では、発色に関与する共役構造が酸化的に変化し、可視光吸収が弱まることで青色が低減すると考えられます。ラッカーゼを用いたインジゴ染色デニムのバイオ脱色システムは、デニム生地上のインジゴ色調を酵素的に変化させるアプローチとして報告されています^[2]。

インジゴカーミンのような水溶性インジゴイド染料を対象にした研究では、ラッカーゼ、酸素、媒介成分を組み合わせた系が、染料分解に利用できることが示されています。TEMPO/laccase/O₂系による Indigo Carmine の分解研究では、反応条件とラッカーゼ失活が議論されており、酸化酵素を工業的に使う際には、脱色速度だけでなく酵素安定性が重要であることがわかります^[6]。

一方で、Indigo Carmine は水溶性のインジゴイド染料であり、デニム用の不溶性インジゴとは溶解性と繊維上での存在状態が異なります。したがって、インジゴカーミンの脱色データを、デニム表面のインジゴ脱色効果へそのまま換算することはできません。実務上は、インジゴイド構造が酵素的酸化の対象になり得るという根拠として扱い、生地上での色調変化は布構造、染色濃度、機械作用、浴条件と合わせて評価する必要があります^[7]。

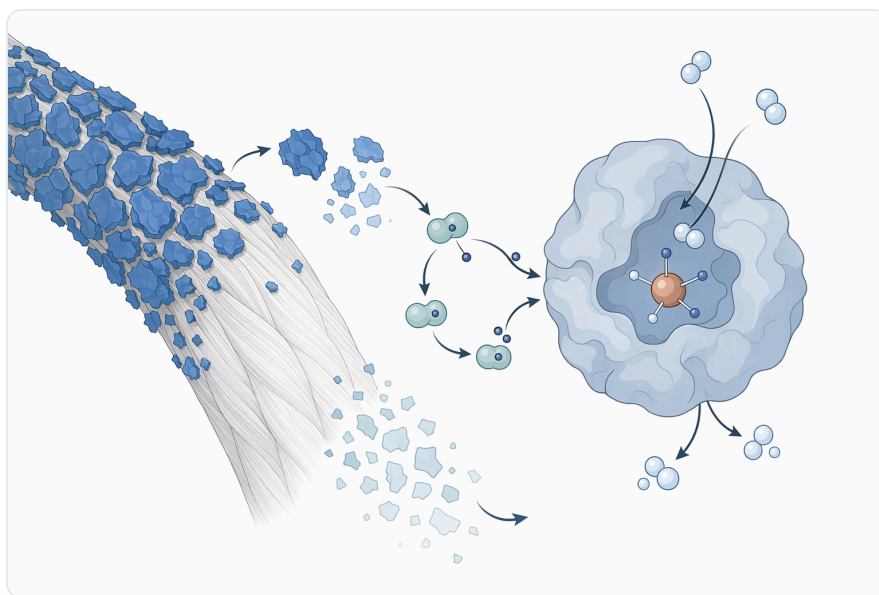


Figure 2. 셀룰라아제는 접근 가능한 면 표면의 미세섬유를 가수분해하여, 기계적 워싱 과정에서 인디고를 포함한 조각들이 떨어져 나가 의류의 색이 옅어지게 한다.

セルラーゼとラッカーゼは競合ではなく、役割が異なる

デニム洗いにおけるセルラーゼとラッカーゼは、同じ「色落ち」に寄与しても、主な作用点が異なります。セルラーゼは綿セルロース表面を改質し、インジゴを含む表面フィブリルを除去しやすくします。ラッカーゼは、インジゴイド発色構造を酸化的に変化させ、浴中または表面近傍の色素の発色を弱める方向に働きます。この違いを理解することで、バイオウォッシュ、バイオポリッシュ、インジゴ脱色、バックステイニング低減を混同せずに工程設計できます^[2]。

デニム用途では、セルラーゼの表面除去効果だけでは青味の再付着が残る場合があります。ラッカーゼ的脱色だけでは繊維表面の物理的フェード感が十分に出ない場合があります。そのため、現実の仕上げでは、酵素、機械作用、温度、pH、洗浄、すすぎ、必要に応じた他の低負荷加工を組み合わせ、狙いの外観に近づけます。工業バイオ触媒の研究では、酵素は単独の魔法の薬剤ではなく、持続可能な工程統合の中で効果を発揮する触媒として位置づけられています^[8]。

デニム脱色・フェード技術の比較

下表は、Indigo Decolorizing Enzyme for Denim Washing を、関連するデニム仕上げ技術の中で整理したものです。実際の工場条件では複数技術が併用されるため、表は「どれが常に優れるか」ではなく、作用点と管理すべきリスクの違いを示します。

技術・工程	主な作用点	得られやすい効果	管理すべき点	文献上の位置づけ
インジゴ脱色酵素	インジゴ表面色、浴中のインジゴイド発色	穏やかな色調低減、バックステイニング抑制補助、洗い浴の着色低減	生地上の不溶性インジゴと水溶性モデル染料の違いを考慮	ラッカーゼ媒介系によるインジゴ染色デニムの生物脱色が報告されている ^[2]
セルラーゼ系バイオウォッシュ	綿セルロース表面、毛羽、フィブリル	ウォッシュダウン、柔軟化、毛羽低減、表面のクリア化	過作用による強度低下、重量減少、局部摩耗	デニムの酵素洗いで広く研究されている ^[1]
レーザーフェード	表面の染料・繊維への局所エネルギー作用	立体的な柄、ヒゲ、アタリ、再現性の高いパターン	処理前後工程、物性、色ムラ、設備条件	持続可能なデニムフェード技術として研究されている ^[9]
工業洗いとの複合加工	機械摩擦、洗浄、すすぎ、薬剤・酵素の相互作用	実製品に近い風合いと外観	張力特性、寸法、縫製部の耐久性	レーザー処理と工業洗いが張力特性へ与える影響が検討されている ^[3]
染料回収・電気化学的	廃デニムや排水中のインジゴ	資源循環、染料再利用、排水負荷低減	仕上げ工程そのものとは別の処理設	廃デニムからのインジゴ染料リサイクルが研

技術・工程	主な作用点	得られやすい効果	管理すべき点	文献上の位置づけ
処理			計が必要	究されている ^[10]

工程上の考え方：色落ち、風合い、物性を同時に見る

インジゴ脱色酵素を使う工程では、処理結果を「色がどれだけ薄くなったか」だけで判断すると、実製品の品質を見誤ります。デニム衣料では、縫製部のアタリ、腰回りや膝周辺のシワ、ポケット周辺の濃淡、裾の摩耗、手触り、厚み感、寸法変化が同時に評価されます。デニム衣料の機械的性質や収縮を主成分分析で扱った研究もあり、仕上げ品質は複数物性の組み合わせとして捉える必要があります^[11]。

酵素工程で重要なのは、布の前処理状態です。糊抜きが不十分な生地では、酵素が本来作用したいセルロース表面やインジゴ表面へ届きにくく、ムラや不十分な色落ちにつながる場合があります。また、ストレッチデニムでは、綿以外の弾性繊維や混用繊維が含まれるため、綿100%デニムと同じ見え方にならない場合があります。デニム仕上げ研究では、同じ加工でも生地構成や処理履歴によって物性変化が異なることが示されています^[3]。

pH と温度も、酵素の働き方に大きく影響します。酵素はタンパク質であり、立体構造が保たれる範囲で触媒作用を示しますが、条件が外れると活性低下や失活が起こります。Indigo Carmine 分解を扱った TEMPO/laccase/O₂ 系の研究では、操作条件とラッカーゼ失活が重要な検討点とされており、酸化脱色系では「脱色できる条件」と「酵素が安定に働く条件」の両立が課題になります^[6]。

機械作用は、酵素脱色の見え方を決めるもう一つの要素です。セルラーゼ的な作用では、酵素が繊維表面を弱めても、機械摩擦がなければインジゴを含む表面層は十分に脱落しにくい場合があります。一方、機械作用が強すぎると、酵素の選択性を超えて物理摩耗が支配的になり、局所的な白化や破れ、縫製部ダメージが出やすくなります。デニムの工業洗いと張力特性の関係を扱う研究は、こうした仕上げ条件と物性の連動を理解する上で参考になります^[3]。



Figure 3. 셀룰라아제 기반 탈색은 염료를 포함한 먼 표면 물질을 제거하는 방식인 반면, 라카아제 유형의 탈색은 산화에 취약한 염료 발색단의 산화적 변화를 통해 작용한다.

ラッカーゼ研究から見たインジゴ脱色の科学的根拠

ラッカーゼを用いたインジゴ染色デニムの生物脱色研究では、酸化酵素がデニム表面の青色を低減するための加工手段として検討されています。New Laccase-Mediated System Utilized for Bio-Discoloration of Indigo-Dyed Denim Fabrics では、ラッカーゼ媒介系がインジゴ染色デニム生地 of 脱色に利用されており、化学漂白だけに依存しないデニム脱色技術の研究例として重要です^[2]。

また、インジゴブルー染色 100% 綿生地に対するラッカーゼの影響を調べた研究では、脱色だけでなく、生分解性との関係も扱われています。これは、デニムの仕上げを単に外観加工として見るのではなく、繊維製品の使用後や廃棄後の環境影響まで含めて評価する流れとつながります。インジゴブルー染色綿に対するラッカーゼの影響は、酵素処理が色素と綿基材の両方に関わる可能性を示しています^[12]。

染料そのものの分解研究としては、白色腐朽菌 *Ganoderma lucidum* 由来 LAC-4 ラッカーゼによる構造の異なる染料および混合染料の分解・解毒化が報告されています。混合染料への対応は、実際の繊維排水が単一染料だけで構成されとは限らない点で重要です。ただし、排水処理での染料分解と、デニム衣料表面でのフェード形成は同じではないため、前者は「インジゴ系を含む染料脱色の酵素化学的根拠」として位置づけるのが適切です^[13]。

Bacillus licheniformis 由来ラッカーゼによる Indigo Carmine の生分解研究も、インジゴイド染料が微生物由来酵素の対象になり得ることを示しています。ここでも重要なのは、Indigo Carmine が水溶性モデル染料として扱われることが多い点です。デニム表面の不溶性インジゴでは、酵素が色

素へ到達するために、繊維表面の開放、分散、機械作用、媒介成分の存在などが結果を左右します [7]。

環境負荷低減との関係：酵素だけでなく工程全体で考える

デニム産業の環境課題には、染色時の還元剤、仕上げ時の水・エネルギー使用、洗い加工で発生するマイクロファイバー、染料を含む排水、廃デニムのリサイクルがあります。インジゴ脱色酵素は、これらすべてを単独で解決するものではありませんが、仕上げ工程における強い薬剤処理や過度な物理摩耗への依存を下げる選択肢として位置づけられます。植物酵素を用いたマイクロファイバー汚染低減とインジゴ染料解毒化に関する研究は、繊維加工と環境負荷を同時に扱う方向性を示しています [14]。

レーザーによるデニムフェードも、薬剤使用量や水使用量を抑え得る代替技術として研究されています。二種類のインジゴ染色デニムに対するレーザー処理の研究では、より持続可能なフェード工程としてレーザー加工が検討されています。インジゴ脱色酵素はレーザーと競合するだけでなく、レーザー後の洗い、表面調整、風合い改善、色調微調整といった補助工程として組み合わせられる可能性があります [9]。

廃デニムからインジゴ染料を電気触媒的にリサイクルする研究も、デニムの色素を「除去して捨てるもの」から「回収・再利用できる資源」へ見直す流れを示しています。これはガーメントウォッシュの直接工程とは異なりますが、インジゴの環境負荷を工程全体で管理するという発想において、酵素脱色技術と同じ方向性を持ちます [10]。



Figure 4. 백스테이닝은 떨어져 나온 인디고 입자가 분산된 상태로 유지되어 헹굼으로 제거되지 못하고, 더 밝은 데님 부위에 다시 달라붙을 때 발생한다.

インジゴ脱色酵素を使う利点

第一の利点は、色調変化を比較的穏やかに進めやすいことです。デニム表面のインジゴを急激に破壊するのではなく、酵素作用、洗浄、機械摩擦を組み合わせることで段階的に色を変えるため、自然なフェード感やソフトなウォッシュダウンを作りやすくなります。デニム酵素洗いの研究では、インジゴ染色デニムと硫化染色デニムの双方で、酵素処理が仕上げ外観に与えることが示されています^[1]。

第二の利点は、風合い改善と外観改善を同じ工程で狙える点です。セルラーゼ的な表面改質が関与する場合、毛羽や微細フィブリルが減ることで、表面の青味の見え方だけでなく、手触り、柔らかさ、着用感にも影響します。微生物セルラーゼは、繊維加工を含む産業用途で重要な酵素群として整理されており、デニムのバイオウォッシュやバイオポリッシュの技術基盤になっています^[4]。

第三の利点は、バックステイニングの抑制を工程設計に組み込みやすいことです。洗い浴中のインジゴ由来発色が弱まれば、再付着しても白場のくすみが目立ちにくくなる可能性があります。ラッカーゼ媒介系によるインジゴ染色デニムの生物脱色研究は、布表面の脱色だけでなく、インジゴ由来色素の発色低減という観点からも重要です^[2]。

第四の利点は、環境対応型加工の一部として利用できることです。酵素は一般に穏和な水系条件下で働く触媒であり、工業バイオ触媒として省資源化や選択的反応への応用が進んでいます。ただし、酵素を使えば自動的に環境負荷が低いという意味ではなく、水使用量、温度、時間、排水処理、再洗浄の必要性まで含めた工程全体で評価する必要があります^[8]。

限界と注意点：強力漂白剤ではなく、仕上げ設計の一要素

Indigo Decolorizing Enzyme for Denim Washing は、濃色デニムを瞬時に白くする強力漂白剤ではありません。酵素は基質選択性を持つ触媒であり、反応できる部位、繊維表面への到達性、浴中環境、機械作用に依存して効果を発揮します。したがって、濃紺から極端な淡色まで一気に変化させる工程では、酵素単独ではなく、他のフェード技術や洗浄工程との組み合わせが検討されることがあります^[1]。

また、インジゴカーミンなどのモデル染料で高い脱色効果が報告されていても、それをデニム表面の不溶性インジゴへそのまま適用することはできません。水溶性染料では酵素が分子へ接近しやすい一方、デニム上のインジゴは繊維表面に粒子状・層状に存在し、糊剤、仕上げ剤、繊維構造の影響を受けます。Indigo Carmine 分解研究は、インジゴイド発色構造が酵素的に変化し得ることを示す根拠であり、実製品での外観は別途工程条件に左右されます^[6]。



Figure 5. 인디고 탈색 효소 기술은 의류 워시다운, 스톤-효소 효과, 바이오플리싱, 복합 효소 연구, 인디고 함유 폐수 처리 개념을 지원한다.

酵素の安定性も重要です。酸化酵素は条件によって失活し、セルラーゼは条件によって過度に繊維へ作用する可能性があります。固定化酵素技術のレビューでは、酵素の安定性、再利用性、工程適合性を高めるための技術が産業応用で重要視されていることが示されています。ただし、Enzymes.bio の本製品を固定化酵素として説明するものではなく、ここでは酵素利用一般における安定性課題の背景として理解するのが適切です^[15]。

Enzymes.bio 製品としての位置づけ

Enzymes.bio の Indigo Decolorizing Enzyme for Denim Washing は、デニム洗い加工向けのインジゴ脱色酵素として、1 kg 単位でオンラインから直接購入できる供給品です。Enzymes.bio は本品の製造業者または研究機関ではなく、B2B酵素供給業者として取り扱います。製品に関する CoA と SDS は注文時に併せて提供されるため、購入後の受領文書として保管し、実際の作業では SDS に基づく安全管理を行うことが前提になります。

本製品の理解で重要なのは、酵素を「インジゴを消す粉」と単純化しないことです。デニム表面のインジゴ、綿セルロース、浴中に分散した色素、機械摩擦、前処理状態が同時に関与するため、結果は生地と工程に依存します。ラッカーゼ媒介系によるインジゴ染色デニムの脱色研究、セルラーゼを含むデニム酵素洗い研究、インジゴイド染料の酵素分解研究を合わせて読むことで、本カテゴリーの技術的背景がより明確になります^[2]。

特に、バイオウォッシュ済みの柔らかい製品、濃淡差を残したヴィンテージ調製品、白場のくすみを抑えたい淡色製品では、インジゴ表面色の制御が仕上げ品質に直結します。酵素を用いることで、強い機械摩耗や単純な化学漂白だけに頼らず、色調、風合い、表面状態を組み合わせ調整す

る余地が広がります。デニム酵素洗いの研究が示すように、酵素工程は外観と物性の両方に影響する加工技術です^[1]。

まとめ

Indigo Decolorizing Enzyme for Denim Washing は、インジゴ染色デニムの洗い加工で、フェード感、ウォッシュダウン、バックステイニング低減補助、表面外観の調整に利用される酵素系加工助剤です。セルラーゼ的な作用は綿表面のインジゴを含む微細繊維を除去しやすくし、ラッカーゼ的な酸化作用はインジゴイド発色構造の脱色に関与します。デニム生地上の不溶性インジゴと、水溶性モデル染料である Indigo Carmine は同一ではありませんが、複数の研究がインジゴ系色素に対する酵素的脱色の技術的可能性を示しています^[6]。

実務上は、酵素を単独の万能脱色剤としてではなく、前処理、機械作用、洗浄、すすぎ、必要に応じたレーザーなどの低負荷フェード技術と組み合わせる工程要素として扱うのが適切です。

Enzymes.bio は本製品を1 kg単位でオンライン直接販売する供給業者であり、CoA と SDS は注文時に併せて提供されます。デニム洗い加工で、自然な色落ちと風合いを保ちながらインジゴ色調を制御したい場合、本製品は検討に値する酵素カテゴリーです。

Indigo Decolorizing Enzyme For Denim Washingをオンライン注文

1 kg単位で販売、在庫あり・即出荷可能です。オンラインストアで直接ご注文・決済いただければ、当社でご注文を処理します。すべてのご注文に試験成績書（CoA）と安全データシート（SDS）が付属します。

[Indigo Decolorizing Enzyme For Denim Washingを購入 →](#)

参考文献

初出引用順に番号を付けています。各出典はオープンアクセスで、公開時にアクセス可能であることを確認済みです。本文中の引用番号からこちらにリンクしています。

1. Patra, A., Madhu, A., & Bala, N. (2018). Enzyme washing of indigo and sulphur dyed denim. *Fashion and Textiles*, 5, 1-15.
2. Sarafpour, M., Alihosseini, F., & Bayat, M. (2021). New Laccase-Mediated System Utilized for Bio-Discoloration of Indigo-Dyed Denim Fabrics. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 194, 5848 - 5861.
3. Jucienė, M., Urbelis, V., Juchnevičienė, Ž., Sacevičienė, V., & Dobilaitė, V. (2018). The influence of laser treatment and industrial washing on denim fabric tension properties. *International Journal of Clothing*

4. Sutaoney, P., Rai, S., Sinha, S., Choudhary, R., Gupta, A., Singh, S. K., & Banerjee, P. (2024). Current perspective in research and industrial applications of microbial cellulases. *International Journal of Biological Macromolecules*, 130639 .
5. Slimane, M., & El-hafid, N. (2024). Recent status in production, biotechnological applications, commercial aspects, and future prospects of microbial enzymes: A comprehensive review. *International Journal of Agricultural Science and Food Technology*.
6. Hordieieva, I., Kushch, O., Hordieieva, T., Sirobaba, S. I., Kompanets, M., Anishchenko, V., & Shendrik, A. (2023). Eco-friendly TEMPO/laccase/O₂ biocatalytic system for degradation of Indigo Carmine: operative conditions and laccase inactivation. *RSC Advances*, 13, 20737 - 20747.
7. Chopra, N. K., & Sondhi, S. (2022). Biodegradation of Indigo Carmine Dye by Laccase from Bacillus licheniformis NS2324. *Defence Life Science Journal*.
8. Farhan, M., Hasani, I. W., Khafaga, D. S. R., Ragab, W. M., Kazi, R. N. A., Aatif, M., Muteeb, G., ... et al. (2025). Enzymes as Catalysts in Industrial Biocatalysis: Advances in Engineering, Applications, and Sustainable Integration. *Catalysts*.
9. Uysaler, T., Altay, P., & Özcan, G. (2025). More sustainable denim fading process of two different indigo dyed denim fabrics with laser treatment. *International Journal of Clothing Science and Technology*.
10. Wan, Z., Wang, Z., Peng, L., & Yi, C. (2024). Electrocatalytic recycling of indigo dye from waste denim fabric: an engineering approach toward efficient denim dye reuse. *Textile research journal*, 94, 1815 - 1829.
11. Khedher, F., & Jaouachi, B. (2024). The principal component analysis method to study mechanical properties and denim manufactured garment shrinkage. *International Journal of Clothing Science and Technology*.
12. Sánchez-Martínez, A., Alejandro, M. M., Inés, M. P., Raquel, B. A., Montava, I., & Gisbert-Payá, J. (2024). Influence of Laccase Enzyme on the Biodegradability of Indigo Blue Dyed 100% Cotton Fabrics. *Advances in Science and Technology*, 146, 23 - 31.
13. Deng, W., Ge, M., Wang, Z., Weng, C., & Yang, Y. (2024). Efficient degradation and detoxification of structurally different dyes and mixed dyes by LAC-4 laccase purified from white-rot fungi Ganoderma lucidum. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 279, 116450 .
14. Wakade, G., Lin, S., Saha, P., Kumari, U., & Daniell, H. (2022). Abatement of microfibre pollution and detoxification of textile dye – Indigo by engineered plant enzymes. *Plant Biotechnology Journal*, 21, 302 - 316.
15. Maghraby, Y. R., El-Shabasy, R. M., Ibrahim, A. H., & Azzazy, H. M. (2023). Enzyme Immobilization Technologies and Industrial Applications. *ACS Omega*, 8, 5184 - 5196.


Enzymes.bioへお問い合わせ


ご注文に関するご質問は、当社チームが喜んでサポートします。

メール wholesale@enzymes.bio

電話（米国） **+1 (507) 428-6057**

[お問い合わせ →](#)

 **400+** B2B顧客

 **60+** 大学研究パートナー

 **54** 世界各国に供給

© 2026 Enzymes.bio · 産業用 · 食品加工用酵素の供給 · 人の摂取用または小売販売用ではありません。