

令和2年度環境省委託業務

令和2年度脱炭素社会を支えるプラスチック等  
資源循環システム構築実証事業

(マイクロプラスチックによる汚染防止のための  
化石資源由来素材からの代替)

(人工タンパク質を用いたマイクロビーズ  
および繊維の開発事業) 委託業務

成果報告書

令和3年3月  
Spiber 株式会社

## ■日本語要約

近年、海洋中のマイクロプラスチックの問題が注目されており、自然界に排出されるマイクロビーズや繊維の対策が叫ばれている。この問題の解決のためには素材や、商品構成、回収システムなど多角的な取り組みが求められる。本事業では微生物による発酵生産が可能であり、かつ生分解性に優れた人工タンパク質を用いたマイクロビーズ及び繊維の開発に取り組むことで、素材という観点からこの問題解決の一助となろうとするものである。特に化石資源の依存度が高く、生分解性が低く、かつタンパク質だからこそその代替が可能であると考えられるウレタンビーズとアクリル繊維をベンチマークとした。人工タンパク質素材を社会に普及させる上での大きな課題は製造コストであり、タンパク質生産コスト、ビーズ加工コスト、繊維加工コストのいずれも大幅に下げることが求められる。また開発を進めるマイクロビーズ及び繊維は商品仕様に耐え得るものにしなければならない。したがって本事業では、人工タンパク質素材のコストダウンと品質確保に重きを置き、3 カ年計画の中にスケールアップまで盛り込んでいる。主な開発項目としては、1. タンパク質生産性向上検討、2. ビーズ加工法の開発、3. ビーズの実用化開発、4. 水系湿式紡糸法の確立、5. かさ高性向上繊維の開発とし、それぞれに本年度の目標を設定した。その結果、ほとんどの項目において当初目標を達成した。タンパク質生産コストについては、微生物発酵生産での生産性を1.3 倍程度に高めた。タンパク質ビーズについては、基本的な加工方法を構築し、得られたビーズの各種溶媒中での分散性や安定性を確認した。タンパク質繊維については、水系での基本的な紡糸方法を確立するとともに、かさ高性を向上させた繊維の創出に成功した。

## ■English summary

In recent years, the problem of microplastics in the ocean has attracted attention. Therefore, countermeasures for microbeads and fibers discharged into the natural world are being called for. In order to solve this problem, multifaceted efforts such as materials, product composition, and collection system are required. In this project, we will work on the development of microbeads and fibers using artificial proteins that can be fermented and produced by microorganisms and have excellent biodegradability. By doing so, we try to contribute to solving this problem from the viewpoint of materials. In particular, we aim to replace urethane beads and acrylic fibers with protein, because they are highly dependent on fossil resources and have low biodegradability. A major issue of spreading artificial protein materials in society is manufacturing costs. So it is required to significantly reduce all of protein production costs, beads processing costs, and fiber processing costs. In addition, the microbeads and fibers need to be developed to fulfill the product specifications. Therefore, in this project, we will focus on cost reduction, quality assurance of artificial protein materials and scale-up in the three-year plan. The main development items are 1. Examination of protein productivity improvement, 2. Development of bead processing method, 3. Practical development of beads, 4. Development of water-based wet spinning method, 5. Development of bulkiness improving fiber. As a result, the initial goals were achieved in most items. Regarding protein production costs, the productivity of microbial fermentation production was increased by about 1.3 times. For protein beads, a basic processing method was constructed, and the dispersibility and stability of the obtained beads in various solvents were confirmed. For protein fibers, we have developed a basic spinning method in an aqueous system. And we succeeded in creating a fiber with a more bulkiness.

## ■目次

- 1 : 事業概要 : 5P
- 2 : 技術的課題の解決目標 : 8P
- 3 : 実施体制 : 21P
- 4 : 業務の実施スケジュール : 22P
- 5 : 今年度の事業成果 : 23P
  - ・ 5.1 : 開発成果まとめ : 23P
  - ・ 5.2 : タンパク質生産性向上検討 : 24P
  - ・ 5.3 : ビーズ加工法の開発 : 27P
  - ・ 5.4 : ビーズの実用化開発 : 34P
  - ・ 5.5 : 水系湿式紡糸法の確立 : 36P
  - ・ 5.6 : かさ高性向上繊維の開発 : 42P
- 6 : 来年度の事業目標 : 44P
- 7 : ライフサイクルでの CO2 削減効果 : 45P
- 8 : 事業化の検討 : 47P
  - ・ 8.1 : 人工構造タンパク質素材の実用化に向けた取り組み : 49P
  - ・ 8.2 : 市場分析の視点 : 64P
  - ・ 8.3 : 分析すべきマイクロビーズ : 65P
  - ・ 8.4 : 事業化すべきマイクロビーズの絞り込み (生産量分析) : 68P
  - ・ 8.5 : 事業化すべきマイクロビーズの絞り込み (価格分析) : 70P
  - ・ 8.6 : 事業化すべきマイクロビーズの絞り込み (競合分析) : 72P
  - ・ 8.7 : 2次的マイクロプラスチックの発生源 : 74P
  - ・ 8.8 : 合成繊維におけるマイクロプラスチックの排出状況 : 77P
  - ・ 8.9 : 高価格帯アパレル商品における合成繊維の利用状況 : 79P
  - ・ 8.10 : 人工構造タンパク質素材の優位性 : 80P
  - ・ 8.11 : 工業的に生産・利用されているタンパク質 : 87P
  - ・ 8.12 : 人工タンパク質素材を手掛ける主要企業 : 91P

## 1：事業概要

現在、持続可能な社会の実現に向けて バイオベースマテリアルの需要が世界的に高まってきている。しかしながら、今日使用されている高分子材料は依然として化石資源ベースの割合が大きく、またそれらの多くは生分解性が非常に低いため、マイクロプラスチックによる生態系等への影響が懸念されている。令和元年5月31日に環境省が策定した「プラスチック資源循環戦略」では海洋プラスチック対策として、マイクロプラスチック抑制対策や代替イノベーションの推進が掲げられている。そのような中、日米独を中心に人工構造タンパク質材料の実用化が進められ、国際的に注目が高まっている。これは、1.「タンパク質は微生物を用いた発酵法で製造することができるため、原材料を化石資源に大きく依存せず、かつ生分解性も高いという特徴を有すること」、2.「タンパク質は20種類のアミノ酸が任意の並び方をした高分子であり、各アミノ酸の割合や並び方をコントロールすることで、物理化学的に様々な性質を付与できること」、の大きく2つの理由からである。特に1の生分解性については、海洋生分解性評価の ISO 18830、ASTM 6691 を模した複数の試験条件を当社のタンパク質粉末及び繊維に対して予備試験実施したところ、それぞれの素材、形態、試験条件によって分解速度は異なるものの、基準以上の生分解性（6ヶ月以内に60%以上分解）が認められた。この基準を満たすことができる化学素材は多くなく、かつ当社材料はバイオマスを用いて製造することが可能であるため、海洋生分解性とバイオマス由来を高いレベルで実現する数少ない材料と言える。

当社ではこれまで10年以上にわたり人工構造タンパク質素材開発を行なってきたおり、当該分野における実用化開発で世界をリードしていると自負している。開発を行なっている素材形態は多岐にわたっているが、この中でも繊維に最も力を入れている（図1-1）。2019年、2020年にはいずれも限定数量とはなるが、当社繊維を使用したアパレル製品を THE NORTH FACE（Tシャツ及びアウトドアジャケット）、Goldwin（セーター）ブランドそれぞれより販売した（図1-2）。これは世界中から大きな注目を集め、人工タンパク質繊維時代の到来を予感させる象徴的な出来事となった。また2021年にはタイランドにて世界最大級の構造タンパク質の発酵生産プラントを稼働させる予定となっており、量産化についても着実に歩みを進めている（図1-3）。一方で、本素材を社会に広く普及させるためには低コスト化や各種用途開発に見合った素材加工が必要であり、本実証事業ではその一部に取り組んでいる。



図1-1：当社タンパク質素材  
左上から、樹脂、ゲル、スポンジ、フィルム  
左下から、パウダー、短繊維、紡績糸、長繊維



図 1-2 : 当社繊維を使用したアパレル製品  
左 : Planetary Equilibrium Tee  
右 : MOON PARKA



図 1-3 : タイランドにて開所した構造タンパク質の発酵生産プラント

本事業においては、海洋マイクロプラスチック問題の一因となっているマイクロビーズとマイクロファイバーに関するタンパク質素材開発を行う。具体的には化粧品や自動車部品向けのマイクロビーズとして使用されるウレタンビーズと、アパレルや家具向けに使用されるアクリル繊維をタンパク質素材で代替するための開発である。両素材とも化石資源への依存度が高く、かつ生分解性も低く、新たな素材が求められている。

またウレタンビーズ及びアクリル繊維の代替を目指す上での共通課題として、素材コストの高さが挙げられる。タンパク質ビーズ及びタンパク質繊維は共に、原料となるタンパク質から加工することになるが、現状においては、原料となるタンパク質コストが高く、そのコストダウンも必要となる。そのため本事業では微生物培養工程でのタンパク質生産性を高めることによるコストダウンにも取り組む。

本実証事業では上記開発を通して、ウレタンビーズ及びアクリル繊維代替素材の実用化を進め、持続可能な社会を実現するための新たな選択肢を提供していきたい。

## 2：技術的課題及び目標

### 【人工タンパク質繊維の製造工程】

本章では、本事業で取り組む技術的課題及び目標について記載する。まず人工構造タンパク質繊維の製造工程に関して説明する。タンパク質の合成方法についてはいくつか手法が存在するが、当社は目的とするタンパク質を遺伝子組換え微生物を用いた発酵生産により生合成する手法を採用している（図 2-1）。そもそも生物は生命活動を維持するために様々なタンパク質を利用しており、生物自身が体内でタンパク質を合成する機構を有している。タンパク質を合成するためには、その設計図となる遺伝子が必要であり、その遺伝子を微生物の中に組み込むことで微生物が目的タンパク質を生産できるようになる。一般的に構造材料として用いられるタンパク質は繰り返し配列を有していることが多く、このようなタイプの遺伝子は合成が難しい。しかしながら当社ではこのような繰り返し配列を持つような遺伝子を合成できる独自技術を構築しているため、タンパク質を自由度高く設計できるという強みがあり、これまで 2,000 種類以上の遺伝子を合成してきた。本事業においてもこの技術を活用し、生産性の向上や素材スペックの向上に取り組む。合成された遺伝子は微生物の中に導入され、目的タンパク質の合成が可能な宿主を構築する。その後、培養工程にて宿主の数を増やし、目的タンパク質の生産を行う。この工程においては培地成分（糖源、窒素源、ミネラル等）や培養条件（温度、pH、培地の投入速度、曝気量等）でその生産性は大きく変わることがわかっており、培養液あたりのタンパク質生産性を高めることがコストに大きく影響する。培養後、目的タンパク質のみを取り出す必要があることから、目的タンパク質の精製を行い、微生物成分を除去する。最終的に得られたタンパク質は乾燥し、粉体状にする。その後、繊維化する場合、タンパク質を有機溶媒に溶解し、タンパク質溶液（ドープ液）を調整する。そしてドープ液を微細な穴が空いたノズルから吐出し、液中で脱溶媒することでタンパク質を繊維状に固化させる。繊維は水洗工程、オイリング工程、乾燥工程等を経て巻き取られ、その後のアプリケーションによって必要な加工が施されることになる。なお、タンパク質のビーズ化においても精製工程の途中もしくはタンパク質粉末の状態から加工を行い、目的とする形状に仕上げていくことになる。以下に各工程における研究開発のポイントについて説明する。

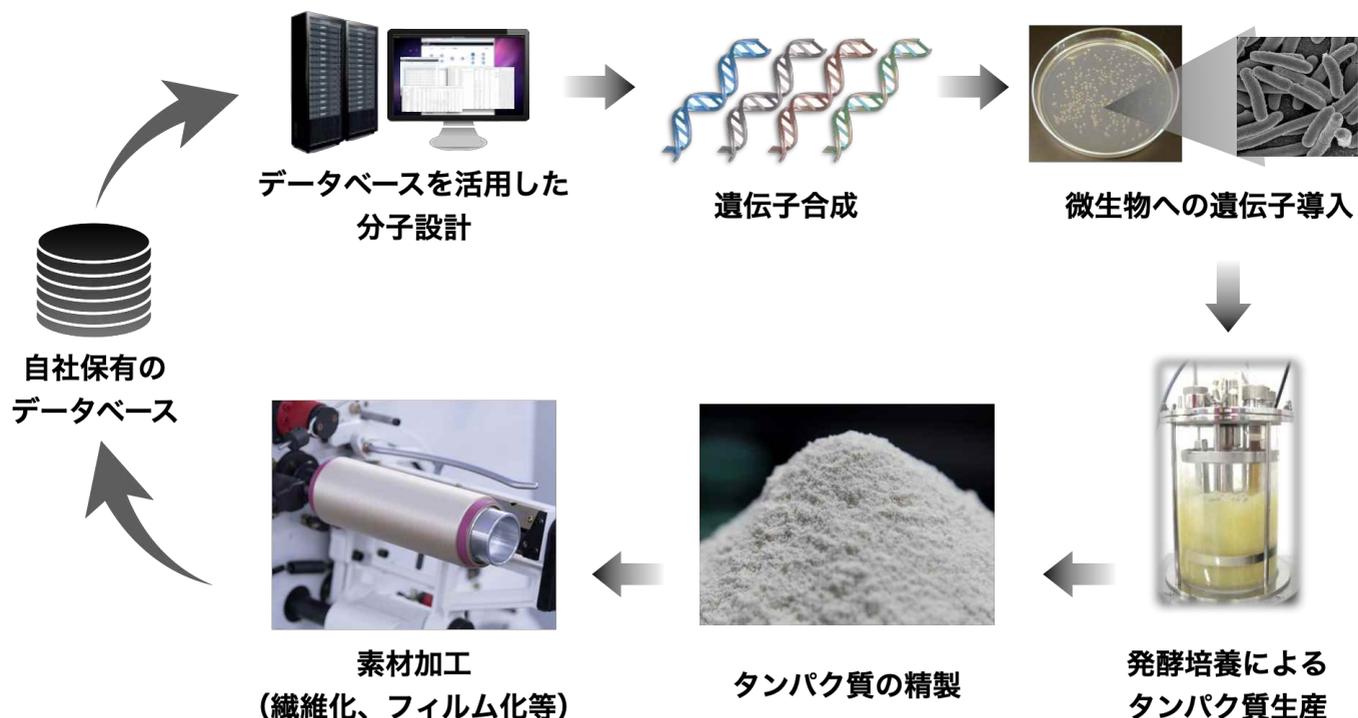


図 2-1：人工タンパク質繊維の製造フロー

### ①分子設計～遺伝子合成～微生物への導入

分子デザインにおける開発のポイントは、微生物発酵時の生産性と素材化した際の物性（機械的特性、水への応答性等）の2点である。生産性については、一般的にGC含有量やコドン使用頻度、繰り返し配列の長さ等のパラメータが影響することが知られており、論文等で公知となっている知見や弊社ラボで蓄積したデータに基づき、各パラメータについて複数の分子デザインを行い、微生物に組み込んだ際の生産性を比較することで、生産性の高い分子設計を実現する。また、物性に関しては、結晶領域／非晶領域の長さや分子量、使用するコドン性質等が、強度や伸度、耐熱性等の特性に寄与することが知られている。こちらについても、様々な遺伝子配列を設計・比較することによって、データを蓄積し、配列と物性の紐付けを行うことによって、任意の物性を持ったタンパク質の設計に向けたデータを蓄積する。弊社では、人工構造タンパク質の生産性や物性に関する独自のデータベースを構築すると同時に、そのデータベースから得られた知見に基づき、任意の遺伝子配列を設計するためのアルゴリズムも作成している。データベース及びアルゴリズムを活用することによって、ハイスループットに人工構造タンパク質素材のデザインを検討することが可能となっている。

また、天然に存在する構造タンパク質の遺伝子配列解析及び構造解析を通じて物性発現メカニズムについても研究を行っており、それらの知見も活用することによって、天然構造タンパク質の特性を人工的に再現する（もしくは更に向上させる）ための検討を進めている。

### ② 発酵培養

人工構造タンパク質の発酵培養による生産においてポイントとなるのは、宿主選定と発酵培養条件の2点である。宿主選定については、紫外線照射等の方法で変異を加えた宿主に対して遺伝子の組み込みを行い、組み込みの成否及び組み込み後の生産性評価によって選定を行う。発酵培養条件においては、培地組成、溶存酸素量、濁度、培養温度、攪拌速度、タンパク質発現誘導タイミング等のパラメータが生産性に影響を与えることが知られている。まずは、小規模（培養液が数リットルスケールの培養槽）で培養を行い、これらのパラメータについて条件振りを行うと共に、既に弊社が保有している知見に基づき、高効率でタンパク質の生産が可能な発酵培養条件の絞り込みを行った後、大規模培養槽を用いた生産を行うことでまとまった量の人工構造タンパク質原料を確保し、製品化に向けた研究開発に使用する。



図 2-2 : 小規模培養槽



図 2-3 : 大規模培養槽

### ③ 精製

培養槽内で生産された人工構造タンパク質は、培養液の培地成分や微生物由来のタンパク質と混在した状態になっているため、目的の人工構造タンパク質以外の成分を除去する必要がある。精製工程においては、人工構造タンパク質を含む培養液中に存在する様々な成分の化学的性質（水や有機溶剤への溶解性等）や物理的性質（分子量、凝集体の大きさ等）の違いを利用し、人工構造タンパク質のみを抽出することによって純度を高め、最終的には乾燥粉末の状態に次工程に引き渡す（図 2-4）。一般的に高分子材料は、分子量が低下するほど、材料の強度や耐久性が落ちてしまうことから、人工構造タンパク質が分解しないように精製することが非常に重要である。また人工構造タンパク質が分解することは純度低下にも直結することから、分解を防ぎつつ、効率的かつ低コストに精製する必要がある。



図 2-4：精製後に乾燥させた人工構造タンパク質粉末

### ④ 素材化（繊維化）

素材化工程においては、人工構造タンパク質の溶解条件と紡糸条件の 2 点である。溶媒中及び紡糸中のタンパク質の構造は物性に大きく影響することが知られている。溶解条件の検討については、工業的に使用されている溶媒を用いて、溶解時間、溶解温度、剪断力の検討を行った後、作成したドープ液（タンパク質溶液）について構造解析、粒度分布及び粘弾性の評価を行う。紡糸条件については、繊維の固化、延伸、後加工（オイリング等）、各工程において条件検討を行う。繊維の固化工程では固化浴槽の温度／通過速度、延伸工程では延伸時温度／湿度／延伸倍率／通過速度、後加工工程においてはオイリング剤／繊維の保管条件について検討を行う。溶解条件検討及び紡糸条件検討から得られたデータを統合し、繊維の作成条件と作成された繊維の物性について分析することによって、両者の因果関係を明らかにする。

人工構造タンパク質素材の形態として、フィラメント糸（図 2-5）、紡績糸（図 2-6）、織物（図 2-7）、編物（図 2-8）、樹脂（図 2-9）、フィルム（図 2-10）、スポンジ（図 2-11）、ナノファイバー不織布（図 2-12）など、用途に合わせた幅広い加工形態を実現している。

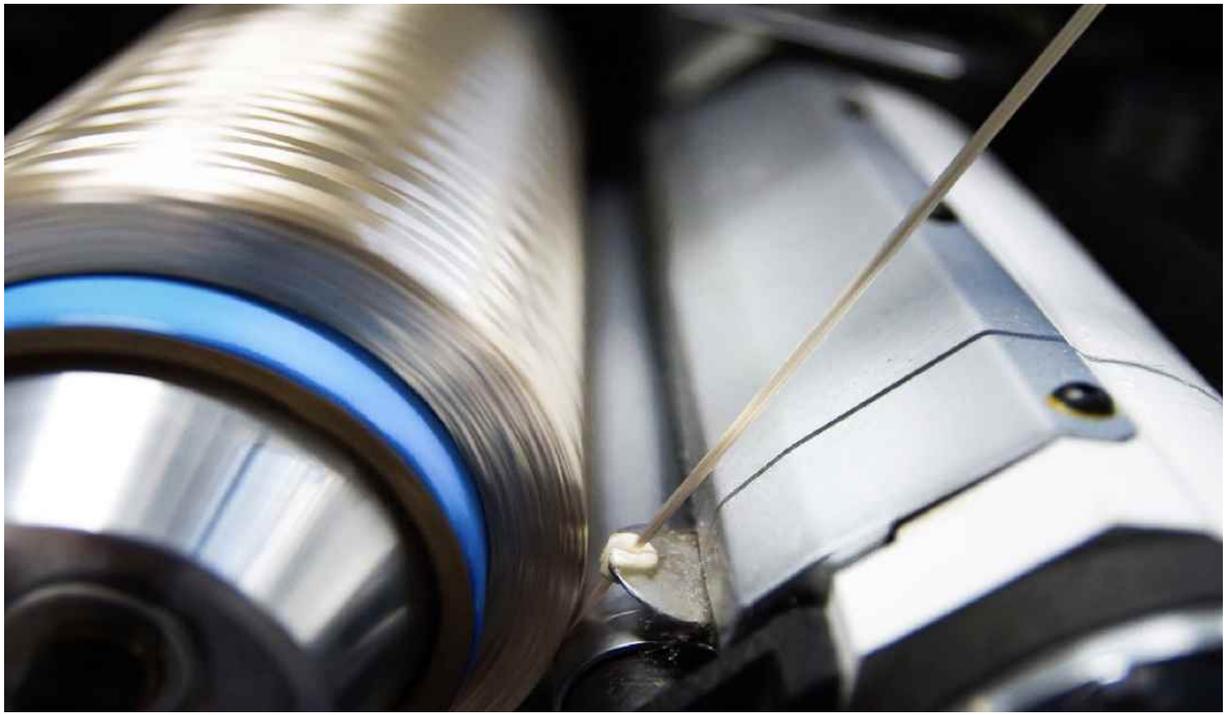


図 2-5 : フィラメント糸



図 2-6 : 紡績糸



图 2-7：織物



图 2-8：編物



図 2-9 : 樹脂

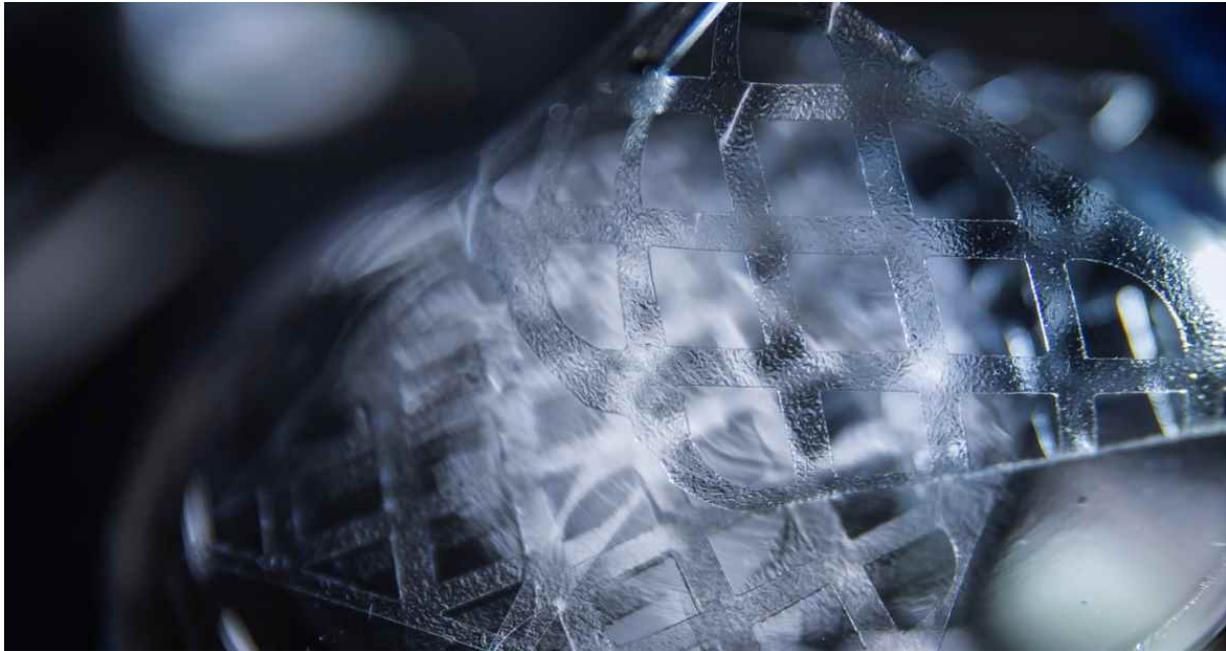


図 2-10 : フィルム



図 2-11 : スポンジ

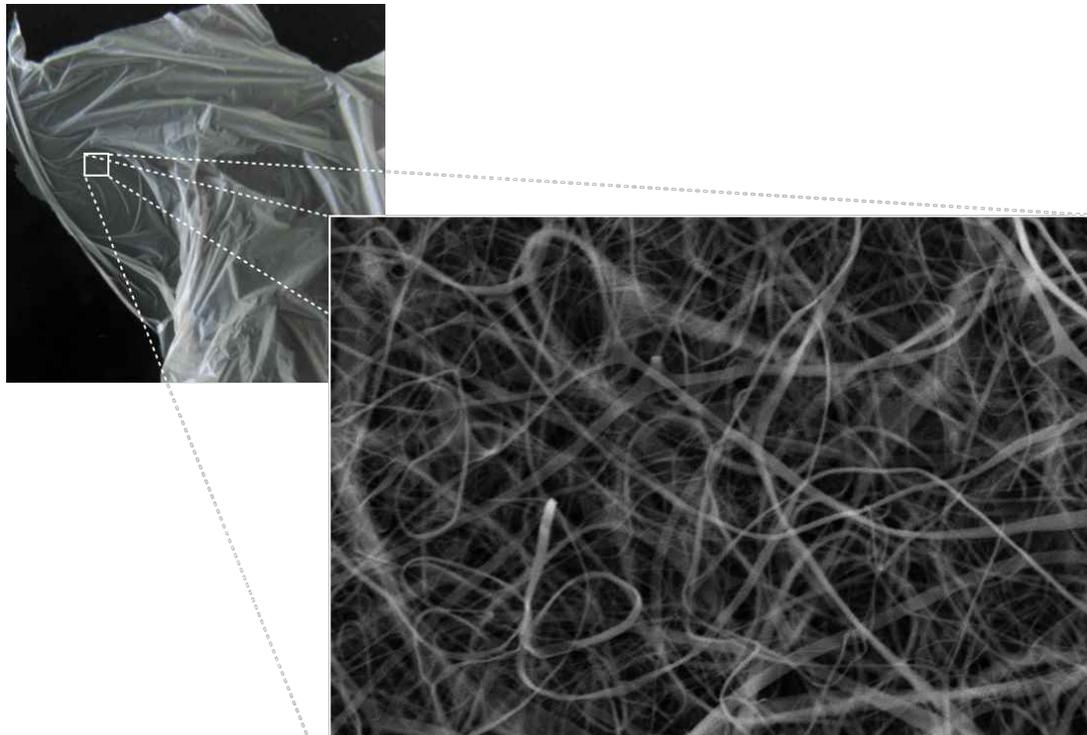


図 2-12 : ナノファイバー不織布

### ⑤材料開発・製品開発

共同開発を行なっているパートナー企業との協業を通じて、当社にて生産された人工構造タンパク質素材を用いた材料開発および製品開発を行う。特に、アパレル産業と自動車産業に向けた材料開発・製品開発に注力している。アパレル産業においては、織物・編物だけでなく、毛皮のような質感を持ったテキスタイルを作るための加工技術開発にも取り組んでいる（図 2-13）。自動車産業に向けては、ドアパネル等への適用を想定した人工構造タンパク質-CFRP 複合材（図 2-14）や、シート等に用いられる人工構造タンパク質-ウレタン複合材（図 2-15）の開発を行なっている。また、メディカル産業への展開を想定した材料開発や人工毛髪への適用に向けた繊維加工、建築材料への適用に向けた検討等、人工構造タンパク質素材の用途を拡大するための研究開発を進めている。



図 2-13：毛皮を模した人工構造タンパク質テキスタイル

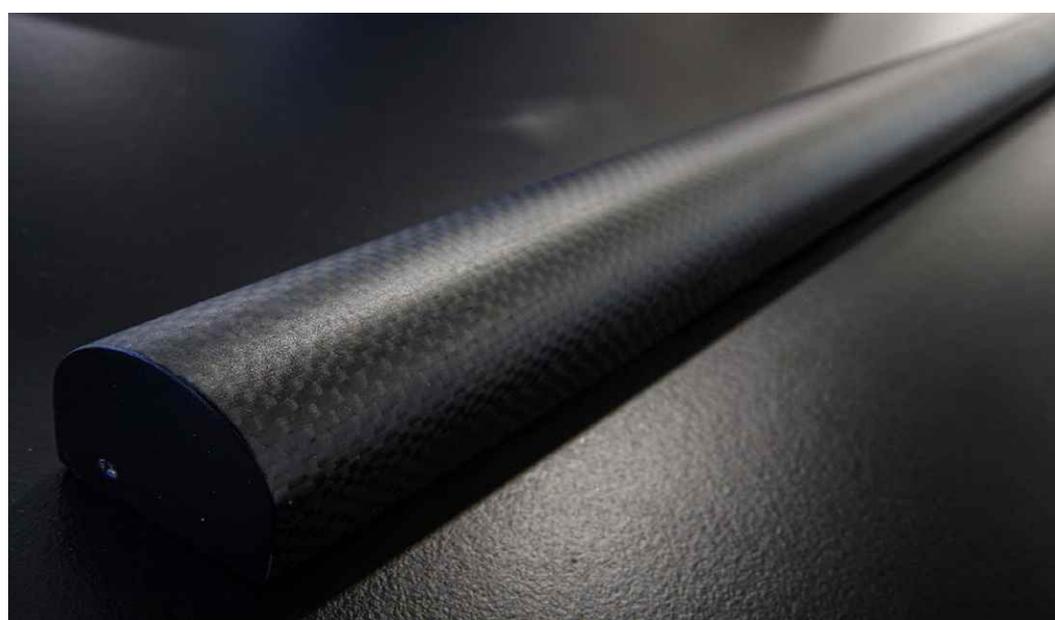


図 2-14：人工構造タンパク質-CFRP 複合材



図 2-15 : 人工構造タンパク質-ウレタン複合材

【本事業での技術課題と目標】

次に本事業での技術課題と目標について記載する。事業概要にも記載したが、ビーズ・繊維の実用化に向けては、共にスペックの確保とコストダウンが技術側面では重要である。したがって以下、5つの技術課題を挙げた。

- 1：原料タンパク質コストの低減（タンパク質生産性向上検討）
- 2：タンパク質ビーズコストの低減（ビーズ加工法の開発）
- 3：タンパク質ビーズの分散性及び安定性の確保（ビーズの実用化開発）
- 4：タンパク質繊維コストの低減（水系湿式紡糸法の開発）
- 5：タンパク質繊維のかさ高性向上（かさ高性向上繊維の開発）

これら課題に対して、本年度の目標と事業最終年度の目標を設定した（表 2-1）。項目 1, 2, 4 はコストダウンに関するものであり、2, 3, 5 は素材スペックの確保についてのものである。

表 2-1：本事業での目標

	項目	本年度の目標	最終目標
1	タンパク質生産性向上検討	タンパク質生産性を現状比 1.33 倍	タンパク質生産性を現状比 1.66 倍
2	ビーズ加工法の開発	噴霧法または乳化法による直径 10um 真球ビーズの加工技術の開発	直径 10um 真球ビーズの加工技術及び量産化技術の構築
3	ビーズの実用化開発	上記目標のビーズの各溶媒での安定性及び分散性の評価の実施	各種溶媒（イオン交換水、エタノール、1,3-ブチレングリコール、ジメチコン、イソドデカン）で 3 時間以上分散を保持し、凝集後再分散可能であり、50 度の溶媒中で 3 か月安定していること。
4	水系湿式紡糸法の確立	ラボスケールでの水系湿式紡糸の最適条件確立及び量産時の課題抽出	水系固化溶媒にて 5,000 ホールでの紡糸プロセス確立
5	かさ高性向上繊維の開発	アクリル繊維の 2/3 程度のかさ高性	アクリル繊維と同等のかさ高性の実現

以下、各項目の目標に対する具体的取り組みについて簡単に記載する。

#### 【原料タンパク質】

##### 課題 1. 原料タンパク質コストの低減

解決目標 1: 「タンパク質生産性を現状比 1.33 倍」

実証事業 1: タンパク質生産性向上検討

タンパク質生産性向上のため、ここでは培養工程を中心とした技術開発に取り組む。これまで当社は強みである遺伝子の改変を軸にタンパク質の生産向上に取り組んできた。一方で、培地や培養条件の検討にはまだ本格的に着手できておらず、ここに生産性を向上させる大きな余地があると考えている。培地については、培地成分の種類や濃度、新規成分の追加などの検討を行う。また培養条件については、培地添加速度・温度・pH・酸素供給などを検討する。必要に応じて遺伝子の塩基配列検討を行い、培養法と組み合わせて生産性の向上を目指す。最終的にパイロットプラントでのプロセス実証も行い、実際のプラントで使用可能なプロセスに作り込む。

#### 【マイクロビーズ】

##### 課題 2. タンパク質ビーズコストの低減

解決目標 2: 「直径 10um 真球ビーズの加工技術及び量産化技術の構築」

実証事業 2: ビーズ加工法の開発

低コスト化・量産化可能なビーズ加工プロセスの開発に取り組む。ここでは主に噴霧法と乳化法について検討する。噴霧法については当社にてスプレードライヤー (SD) を中心に検討する。乳化法は共同実施者である根上工業株式会社で開発を進める。いずれも精製後のタンパク質を起点とし、10um 球状ビーズの加工を目指す。また後工程 (洗浄や分級) についても必要に応じて検討する。両プロセスの基礎検討後、品質・コスト面を比較し、より有利なプロセスについて、量産を見据えたプロセス開発に取り組む。

##### 課題 3. タンパク質ビーズの分散性及び安定性の確保

解決目標 3: 「各溶媒での適合性評価に合格すること」

実証事業 3: ビーズの実用化開発

実証事業 2 にてプロセスの方向性が見えてきた段階で、タンパク質ビーズの実用化に向けた開発を進めていく。まずは化粧品原料での実用化を目指す。各種溶媒での分散性及び安定性について評価し、基準を満たすようビーズの改良に取り組む。ビーズの改良にあたっては、タンパク質の改変、加工条件の検討、ビーズ成形後の加工を想定している。またビーズの安全性についても外部機関を活用し、問題ないことを確認する。その後、ビーズを使用したアプリケーション試作を行い、課題の抽出、更なるビーズの改良に取り組む。

#### 【繊維】

##### 課題 4. タンパク質繊維コストの低減

解決目標 4: 「水系固化溶媒にて 5,000 ホールでの紡糸プロセス確立」

実証事業 4: 水系湿式紡糸法の確立

水系固化溶媒を用いた湿式紡糸量産プロセス開発に取り組む。一般的にタンパク質の繊維化において固化溶媒はメタノールなどの有機溶媒が使用されるが、当社はタンパク質を改変することで固化溶媒の水系化の可能性を見出した。水系プロセスで量産ができれば、原材料費・設備費共に大幅に削減することができる。現状では水系固化溶媒を使用した場合、ノズルあたり数十ホールであれば安定的に紡糸ができるが、数百～数千となると、固化不足による繊維の癒着や、脱溶媒ムラが発生し、糸切れや物性不良の原因となっている。したがって本事業では、まず繊維固化条件や脱溶媒条件の検討を行い、基礎条件を確定する。また必要に応じて、紡績糸やアプリケーションの評価を行う。次に量産化に向けた課題を抽出すると共に、各種紡糸設備設計や廃液処理方式についても検討する。そしてパイロット設備で 5,000 ホールでの紡糸を行い、プロセス実証を目指す。

## 課題 5. タンパク質繊維のかさ高性の向上

解決目標 5 : 「アクリル繊維と同等のかさ高性の実現」

実証事業 5 : かさ高性向上繊維の開発

タンパク質繊維のかさ高性を向上するための開発に取り組む。かさ高性を付与するためには、一般的に繊維の断面形状の変更及び複合繊維化（サイドバイサイドなど）が手法として採用される。一方で当社繊維は、これまで断面が真円型かつ一種類のポリマーを前提とした開発をしてきたため、かさ高性を付与するような加工法にはまだ取り組んでいない。本事業においては、異形断面化（扁平、Y字型など）と複合繊維化（異なるタンパク質を使用）を組み合わせることで良好なかさ高性を持つ繊維の開発を目指す。また必要に応じて、紡績系やアプリケーションの評価を行う。そしてプロセスの目処がある程度たった段階で、量産化に向けた課題を抽出し、量産化に向けた準備を進める。

### 3：実施体制

本事業に関する実施体制について記載する。申請代表者は当社が、そして共同実施者として根上工業株式会社が参加した。共同実施社である根上工業はアクリルビーズやウレタンビーズを開発・販売しているメーカーであり、ビーズ化の技術力が高い会社である。根上工業株式会社は乳化法を得意としていることから、乳化法によるタンパク質ビーズの開発に取り組んだ。それ以外の開発項目に関しては当社にて開発を実施した。

#### 4：業務の実施スケジュールと結果

本年度の実施スケジュールについて記載する。ビーズ加工法の開発に関して、スプレードライヤーの稼働が順調に進まなかったため、昨年 10 月で一部遅延が発生したが、その後の検討は順調に進んだため、遅延分を取り戻すことはできた。その他の開発項目については、特段の遅れなく、開発を進めることができた。ビーズの実用化開発について、昨年 12 月からのスタートとなっているのは、ビーズ加工法の開発で目処が立ったタイミングで開始したためである。

番号	業務内容	実施月	前月の結果												備考	
			4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3		
1	タンパク質生産性向上検討	予定														
		進捗														
2	ビーズ加工法の開発	予定														
		進捗														
3	ビーズの実用化開発	予定														
		進捗														
4	水系湿式紡糸法の確立	予定														
		進捗														
5	かさ高性向上繊維の開発	予定														
		進捗														

凡例  
 前月の結果: ■ 予定通り、■ 遅延  
 当月の見込: ■ 予定通り、■ 遅延する可能性有り

図 4-1：本年度の実施スケジュールと結果

## 5：今年度の事業成果

### ・ 5.1：開発成果まとめ

本項では本年度の事業成果と達成度について記載する（表 5.1-1）。各項目の詳細については次項以降にて説明する。

タンパク質生産性向上検討においては、本年度の目標がタンパク質生産性現状比 1.33 倍に対して、実際にタンパク質生産性現状比 1.33 倍に達したため、達成度は 100%となっている。

ビーズ加工法の開発においては、本年度の目標が「噴霧法または乳化法による直径 10um 真球ビーズの加工技術の開発」であり、達成度は 90%とした。乳化法によるビーズの加工開発は目処が立っていない状況であるが、噴霧法については真球に近いビーズができてきており、直径のピークも 11um であったことから、当初目標にかなり近い成果を出すことができたと考えている。

ビーズの実用化開発においては、「上記目標のビーズの各溶媒での安定性及び分散性の評価の実施」としており、達成度は 100%とした。これは 1 月に噴霧法によるビーズ化の目処が立ったため、そのビーズを使用した評価を 2 月中旬より開始したためである。最終的な評価結果は来年度の初めに判明する。

水系湿式紡糸法の確立では、「ラボスケールでの水系湿式紡糸の最適条件の確立及び量産時の課題抽出」としており、達成度は 100%とした。本年度はラボでの紡糸検討が順調に進んだことから、すでにパイロット設備を使用して、200 ホールノズルそして 1,000 ホールノズルを用いた紡糸検討に着手できており、開発スケジュールを前倒して進めている。

かさ高性向上繊維の開発では、「アクリル繊維の 2/3 程度のかさ高性」を目標としており、達成度は 100%とした。本年度の検討の結果、異形ノズルと細繊維により当初繊維と比較して大幅にかさ高性が向上し、アクリル繊維の 70%程度のボリュームが出るようになった。

表 5.1-1：本年度の事業成果と達成度

実証内容	目標	成果と達成度
①タンパク質生産性向上検討	タンパク質生産性現状比 1.33 倍	タンパク質生産性現状比 1.33 倍を達成した。達成度 100%
②ビーズ加工法の開発	噴霧法または乳化法による直径 10um 真球ビーズの加工技術の開発	噴霧法については基本プロセスの目処が立った。達成度 90%
③ビーズの実用化開発	上記目標のビーズの各溶媒での安定性及び分散性の評価の実施	2 月より評価試験を実施した。達成度 100%
④水系湿式紡糸法の確立	ラボスケールでの水系湿式紡糸の最適条件の確立及び量産時の課題抽出	ラボスケールでの検討が順調に進み、1,000 ホールノズルでの検討に着手した。達成度 100%
⑤かさ高性向上繊維の開発	アクリル繊維の 2/3 程度のかさ高性	アクリル繊維の 2/3 程度のかさ高性となった。達成度 100%

## ・ 5. 2 : タンパク質生産性向上検討

ここではタンパク質生産性向上検討結果について記載する。まず当社はタンパク質の生産においては、流加培養法（Fed-batch 法）と呼ばれる培養方法を採用している（図 5. 2-1）。この方法は初期に張り込む初期培地とは別に、培養中に栄養分が切れないように追加で培地を投入して、菌体をより高密度化かつ活性を維持し、生産物の収量を高める方法である。初期培地には炭素源（グルコースなど）、窒素源（アンモニアや天然物など）、リン源、ミネラル（マグネシウムやカリウムなど）が含まれ、流加培地はほぼ炭素源のみで構成されるのが一般的である。本年度で生産性が向上した検討は主にこの初発培地の成分変更による。以降、具体的な検討項目とその結果について述べる。

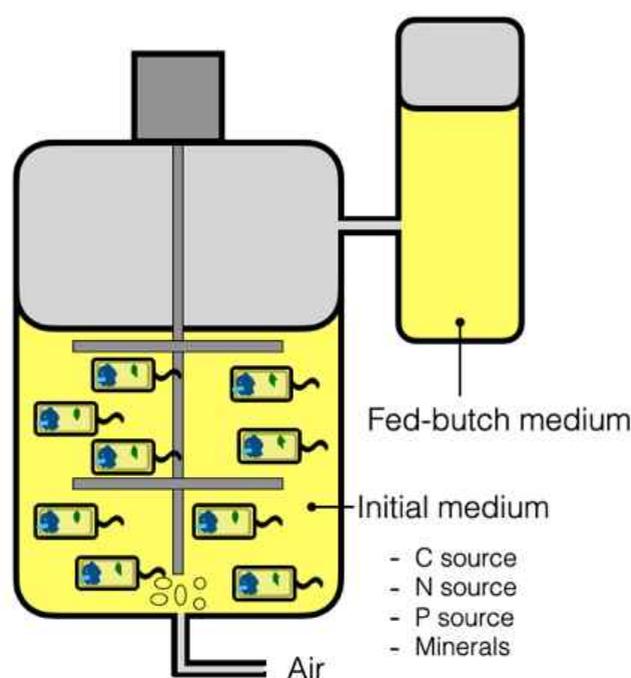


図 5. 2-1 : 流加培養法による培養

窒素源の検討結果について説明する。培地原料として使用される窒素源には一般的に天然物の抽出物を使用される。これらはペプチドやアミノ酸のほか、様々な代謝物を含んでおり、宿主との相性も含めて、生産性に寄与するか否かは使ってみないとわからないものがある。これまで窒素源については、添加量の検討はしてきたが、その種類やサプライヤーによる違いについては本格的な検討を行なってきたが、その種類やサプライヤーによる違いについては本格的な検討を行なってきたが、その種類やサプライヤーによる違いについては本格的な検討を行なってきた。そこで今回、様々な天然物を各社より調達し同一条件で培養したときに生産性に違いが出るかを確認した。その結果、現在使用している窒素源での生産性を1とすると、他の商品で0.9~1.25までの違いが見出された（図 5. 2-2）。当然、生産性が高いほど、タンパク質粉末のコストには有利に働く一方で、天然物抽出物の市場価格がかなり高いこと、また商品によってはバルクでの調達が難しいことなどを総合的に考え、Y 社の商品 D（生産性相対値 1.18）が最もコストパフォーマンスが良いと判断した。なお、Y 社商品 D については、培地への添加量についてもその後の検討で当初の予定よりも減らすことができる結果が得られており、最終的に最もコスト面においても優位になることがわかった。

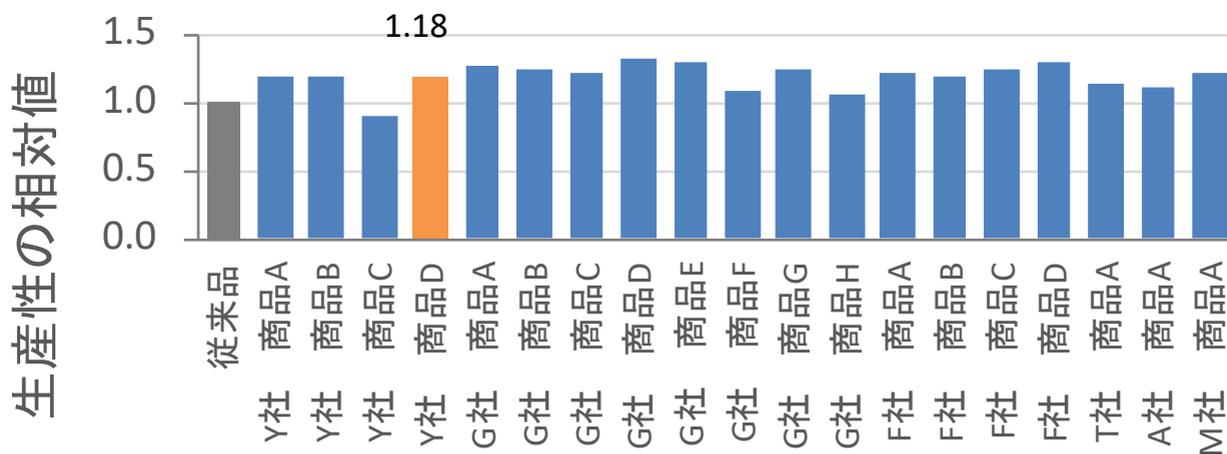


図 5.2-2 : 窒素源の検討結果

次に炭素源の検討結果について述べる。当社ではこれまで炭素源 A を基本に培地の設計に取り組んできた。今回、宿主の開発により炭素源 B も使用可能となったことから、炭素源 A と炭素源 B での生産性比較を行なった。その結果、炭素源 B の方が 1.14 倍タンパク質生産性が向上することが判明した（図 5.2-3）。なぜ炭素源 B の方が生産性が向上するかは、代謝経路から仮説を立てることは難しく、今のところその要因は判然としない。また炭素源 B のメリットとしては、炭素源 A よりも水溶液中の糖濃度を高めることができるため、流加培地の体積あたりの糖分量を上げることができる。それにより菌体の増殖やタンパク質生産性向上が炭素源 A よりも炭素源 B の方が優位にできる可能性が高い。これについては今後の検討課題とする。

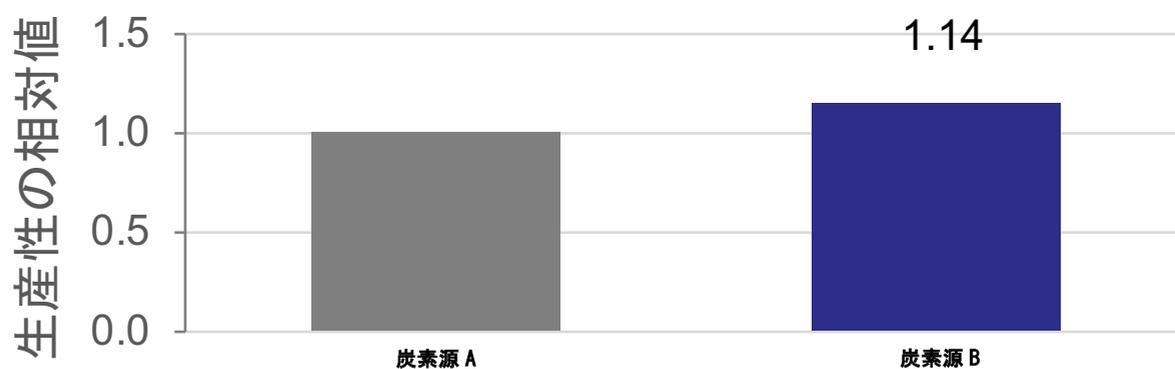


図 5.2-3 : 炭素源の検討結果

次に微量金属添加検討結果について記載する。培地にはマグネシウムやカリウムのように大量に加える金属塩がある一方で、ごく少量の金属を加えることで目的物の生産性が多少なりとも向上することがよく報告されている。今回、論文調査の結果、微量金属として比較的良好に使用されている金属 A、金属 B、金属 C、金属 D について、添加実験を行なった。今回、まず 4 種類の金属のカクテルを用意し、生産性の確認を行なったところ、添加なしと比較すると 1.1 倍程度生産性が向上することが確認された（図 5.2-4）。一方で、それぞれ一種類ずつ微量金属を加えた培地では生産性が向上せず、複数種類を同時に添加する必要性が示唆された。そこでカクテルから一種類ずつ微量金属を除去したものを用意し、生産性を確認したところ、金属 A、金属 B、金属 C を除いた場合はいずれも生産性が向上せず、金属 D を除いたものだけが、4 種類のカクテルを

用いた時と同等の生産性を示した。したがって、金属 A、金属 B、金属 C を同時に加えることで生産性に寄与することが判明した。

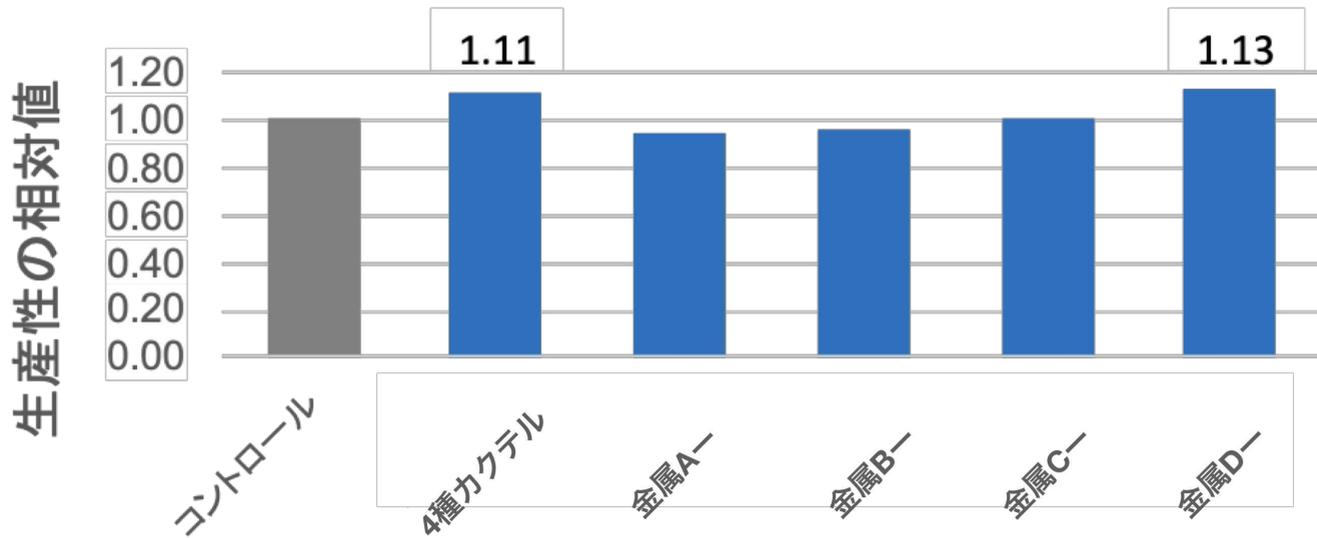


図 5.2-4 : 微量金属添加の検討結果

最後にこれまで得られた結果を組み合わせた培地で生産性の検討を行なった。これまでの検討結果を踏まえて作製した新規培地を用いた培養では、培養終了時点の生産性が本事業開始時と比較して 1.33 倍となった (図 5.2-5)。これは培養途中でタンパク質誘導を開始した直後からの一定時間内でのタンパク質生産性が大きく向上しており、その差が培養終了時点まで維持されていた。今回の改良後の条件は特殊な対応を従来に比べて、特殊な対応を要するところはないため、スケールアップや量産が可能な系であると考えている。

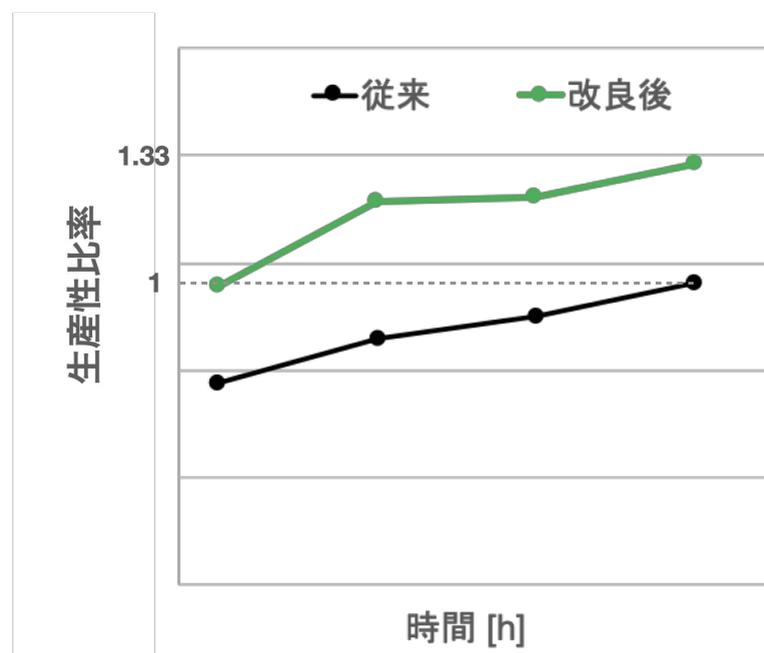


図 5.2-5 : 改良後のタンパク質生産性

### ・ 5.3 : ビーズ加工法の開発

ここではビーズ加工法の開発について述べる。まず噴霧法についての結果を述べ、その後、乳化学法での検討結果を説明する。

噴霧法はスプレードライヤー (SD) を使用して、タンパク質を粒子状に乾燥し、ビーズ化する方法である。以下、検討結果について記載する。

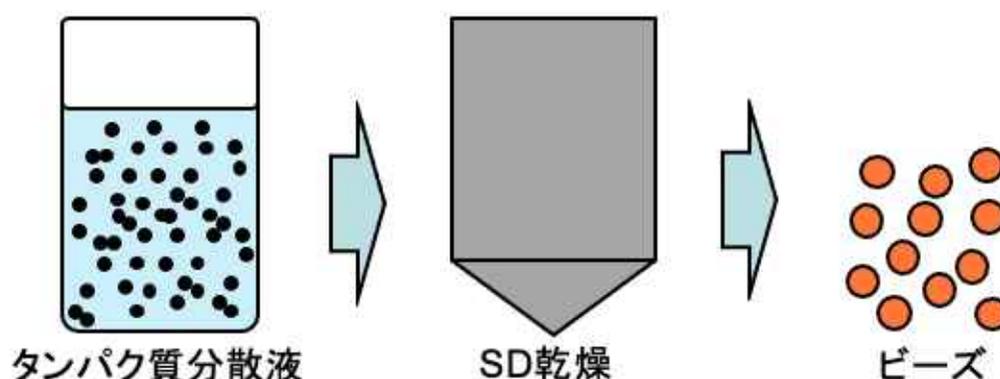


図 5.3-1 : 噴霧法の概要

まずタンパク質分散液の調整方法に関してである。培養後精製工程の途中から一部サンプルを抜き取り、SD 乾燥により粒子化するフローを当初より想定していたため、精製工程途中のサンプルをどのように処理すれば、適したタンパク質分散液になるかを検討した。初期検討として、工程中のタンパク質を抜き取って洗浄しそのまま SD したところ、形状が球状にならず、かつ直径も 100 $\mu\text{m}$  を超えるようなものが取得された。一般的に SD 前の目的物の分散状態が細かければ細かいほど、得られる乾燥物も細くなり易い。したがって、コントロールの状態では、液中でタンパク質が細かく分散できていないと推察されたため、タンパク質がより細かく分散する状態となるよう条件を振った (図 5.3-2)。その結果、処理方法の違いにより得られるビーズに大きな違いが観察され、中性処理が特に良好であった。酸処理条件では、コントロールよりも形状が悪化した。これは酸処理によってタンパク質同士が凝集してしまい、分散液中のタンパク質粒子がより大きくなってしまったからだと考えられる。次にアルカリ処理については、酸処理よりも格段に細かなビーズを取得することができたが、2,500 倍の SEM 写真を見ると粒子がゴツゴツした形状になってしまっており、真球状にすることが困難であると思われた。これはアルカリ条件によりタンパク質が一部分解してしまった可能性がある。一方で中性処理では、細かいビーズを取得することができ、かつアルカリ処理と比較して表面がゴツゴツしていなかった。そのため、タンパク質分散液の調整にあたっては、中性処理を基本プロセスとして定め、タンパク質濃度や処理条件を検討することでさらに良好なビーズを得られる条件の探索を進めた。

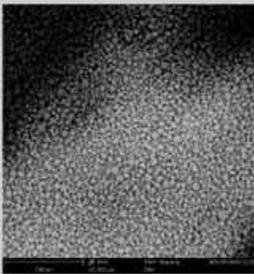
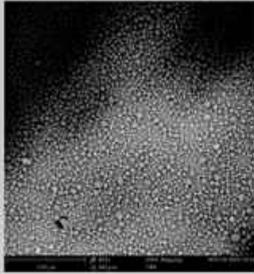
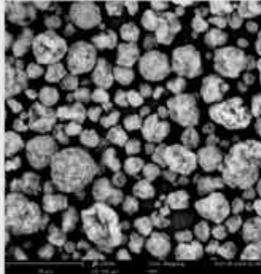
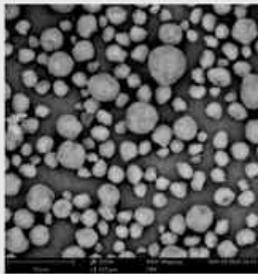
	No.1	No.2	No.3
分散液調整方法	タンパク質 酸処理	タンパク質 アルカリ処理	タンパク質 中性処理
粉末写真			
SEM (×400)			
SEM (×2500)	n.d.		

図 5.3-2 : 分散液調整法によるビーズの違い

社内での小型 SD での検討結果、ある程度の乾燥条件が定まったため、実機トライを行なった。これは小型 SD では細かな条件振りができず、また量を取得するにも長時間必要となるためである。今回のトライにおいては、球状かつ直径が 10 $\mu$ m のビーズを取得することを目標として、SD を実施した。タンパク質分散液は中性処理を行い、SD の入り口温度は 180 度、出口温度は 80 度に設定し、粉末の状況を確認しながら、条件調整した。その結果、図 5.3-3 のようなビーズを得ることができた。写真を見る限りはどの粒子もほぼ真球状になっており、思っていた以上に良い形状となっていた。また粒子径については 11 $\mu$ m がピークとなっており、全体の 13% 程度を占めていた。10 $\mu$ m をわずかに上回ったが、大方目標通りの粒子径となっていた。ただし 5 $\mu$ m を下回るようなものや、20 $\mu$ m を上回るようなものも、それなりの割合で存在しているため、もう少し粒子分布の幅を狭めてビーズ化できるよう今後トライしていく必要がある。こちらについては、分散液処理条件の検討や SD の種類や乾燥条件を詰めていくことで改善することは可能だと考えている。また後工程での対応としては、ふるいにかけて分級することもできるため、様々な手段を組み合わせることで解決していきたい。

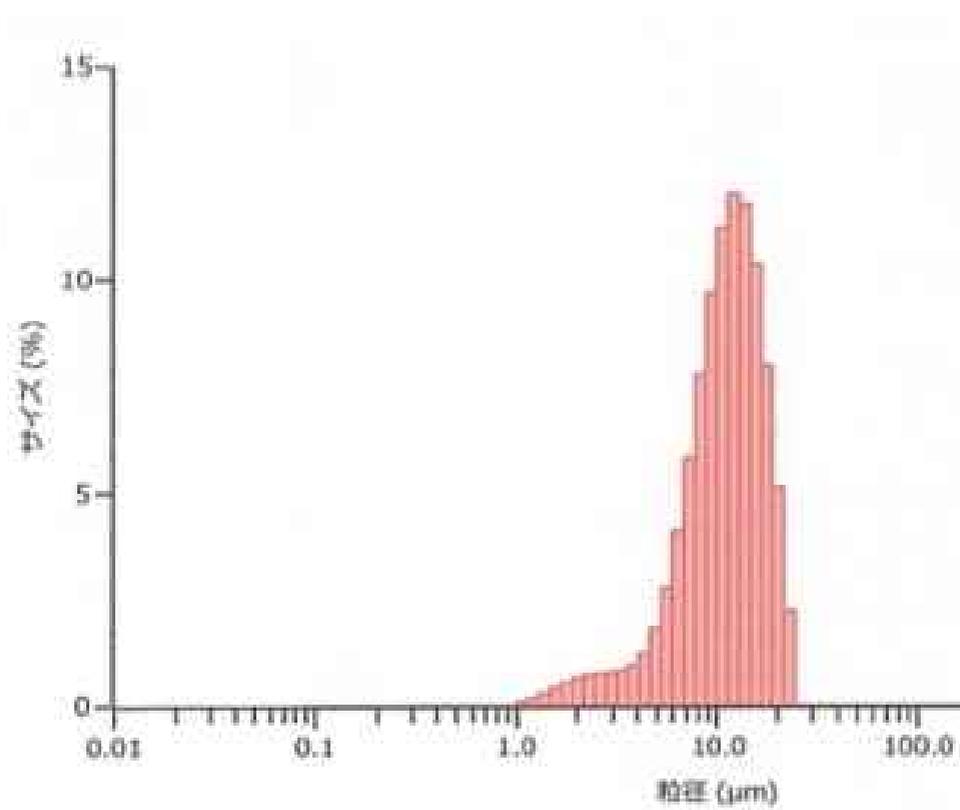
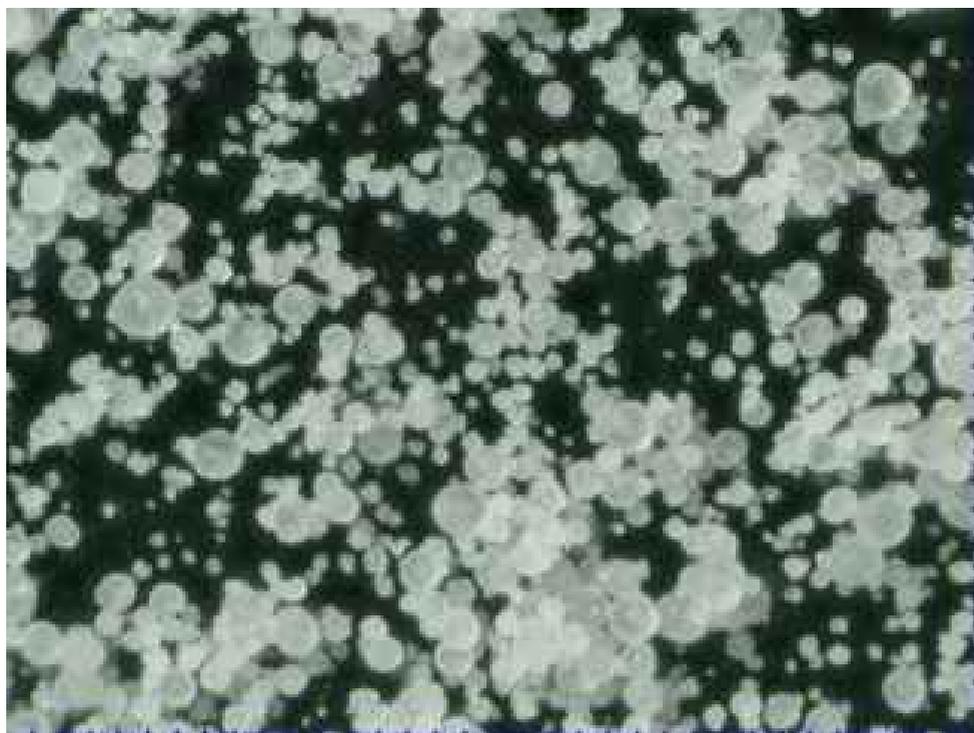


図 5.3-3 : 得られたビーズ(上)と粒子径分布 (下)

次に乳化法での検討結果について記載する。乳化法の基本的な工程は以下のようなものである(図 5.3-4)。まずタンパク質溶解液を用意し、次に溶解液が油滴化するような溶媒に分散する。その後、油滴中のタンパク質を固め、乾燥することによってビーズを取得する。スプレードライによる粒子化と比較すると、ノズルから噴霧するスプレードライでは溶液粘度に制限があるが、乳化法ではそれよりも高粘度のものでも対応でき、固形分濃度を高くすることができる。固形分濃度を高くすることができれば、タンパク質の仕込み量も増え、粒子化後に除去しなければならない溶媒量も減るため、コストを下げることができる。また、スプレードライでは、ノズル径や形で粒子径をコントロールするが、乳化法では、界面活性剤や攪拌などで調整するため、より広い範囲での粒子径コントロールが可能である。今回、タンパク質の乳化自体が初めての試みであるため、まずは乳化できる条件を探索することとした。

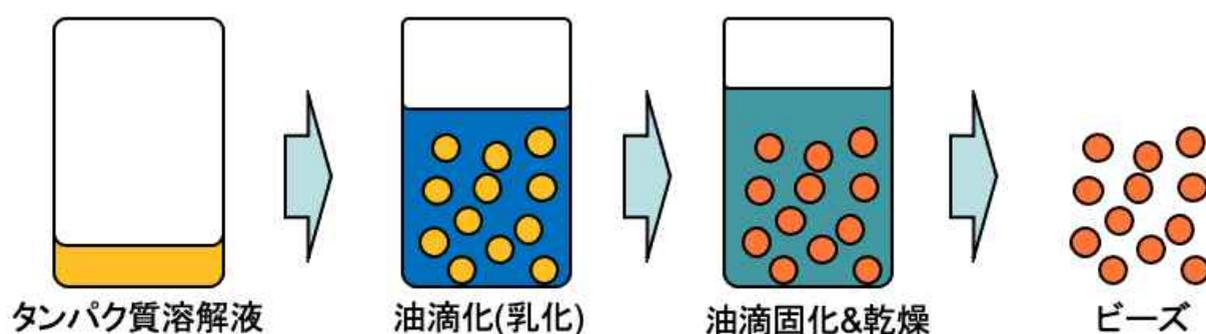


図 5.3-4 : 乳化法の概要

まずタンパク質を水酸化ナトリウム水溶液に入れ、90°Cで加熱したが、不溶分が残った。次に不溶分を除いた上澄み液を使って、各種有機溶媒への相溶性を確認した(図 5.3-5)。この結果から MEK を選択し、界面活性剤を添加後、攪拌しながらタンパク質水酸化ナトリウム水溶液を滴下し、油滴を得た。さらに、酸を加えて中和したが粒子を得られなかった。これは水酸化ナトリウム水溶液中のタンパク質が分解してしまっている可能性がある。



図 5.3-5 : 水酸化ナトリウム溶解液

次に有機溶媒を溶解溶媒として用いた検討を行なった。タンパク質を有機溶媒に溶解した溶液を使用して、各種溶媒への相溶性を確認した。その結果、トルエンを選択し、界面活性剤を添加後、攪拌しながらタンパク質有機酸溶液を滴下し、油滴を得た。そこに中和剤を加えた。その結果、析出し、粒子は得られたが中和時に異形となった（図 5.3-6）。

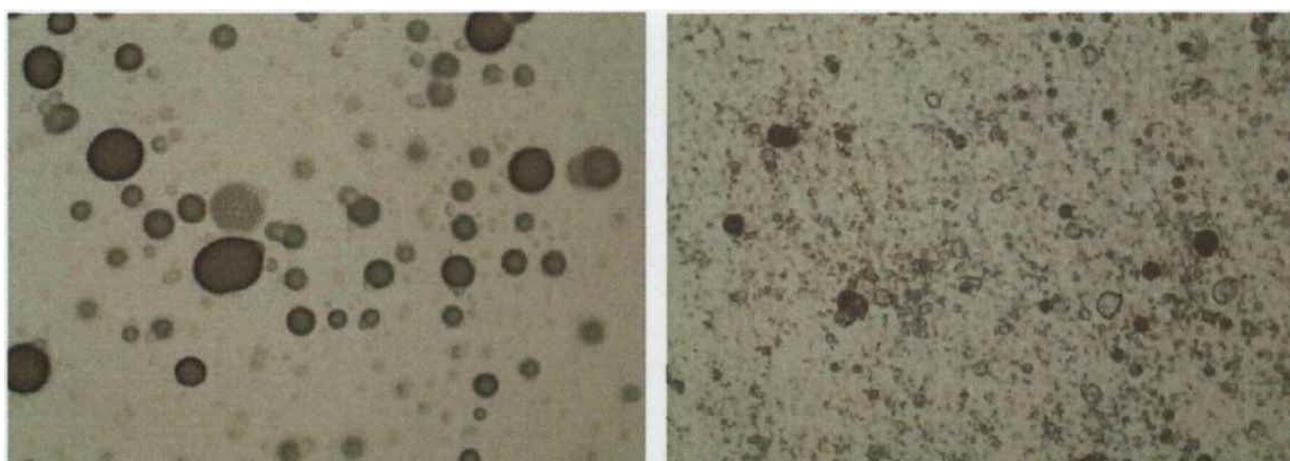


図 5.3-6 : タンパク質有機溶媒溶液の油滴（左）と中和後の形状（右）

上記結果から、油滴中での粒子化は困難だと判断し、塩析による直接の粒子化を試みることにした。この手法はタンパク質溶液に塩析剤を加えることで、タンパク質を析出させて粒子化するという方法である（図 5.3-7）。まずタンパク質有機溶媒溶液を準備し、攪拌しながら、そこに塩析剤を滴下していった。濃度の高い塩析剤や、二価の塩析剤を滴下すると、タンパク質が一気に析出しやすく、凝集体や糸状のものが得られた。一方で、濃度の薄い塩析剤や一価の塩析剤は粒子として析出しやすいが、大量に塩析剤を投入する必要があった（図 5.3-8）。

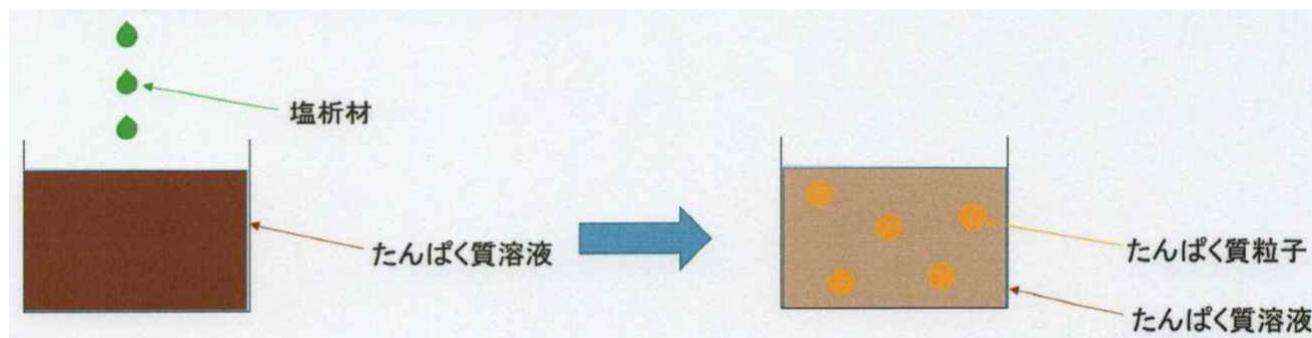


図 5.3-7 : 塩析法の概要

次に粒子化試験で得られた粒子を含むスラリーを遠心管に入れて、遠心分離し、上澄を捨てて不純物を除去した。しかしながら粒子状であったものが遠心分離を終えると一塊のゴム状になってしまった。これは比較的柔らかいタンパク質粒子が遠心時のGで凝集・合一してしまったためだと考えられる。Gの問題を解決するため、スラリーをデカンテーションし、洗浄する検討も行ったが、こちらも時間経過で凝集・合一していく傾向にあった。この凝集したタンパク質を棚型乾燥機で乾燥し、解砕・分級を行なったが、凝集したものを球状の一次粒子として取り出すことはできなかった（図 5.3-9）。



図 5.3-8 : 硫酸アルミニウム水溶液での塩析（左）と塩化ナトリウム水溶液での塩析（右）

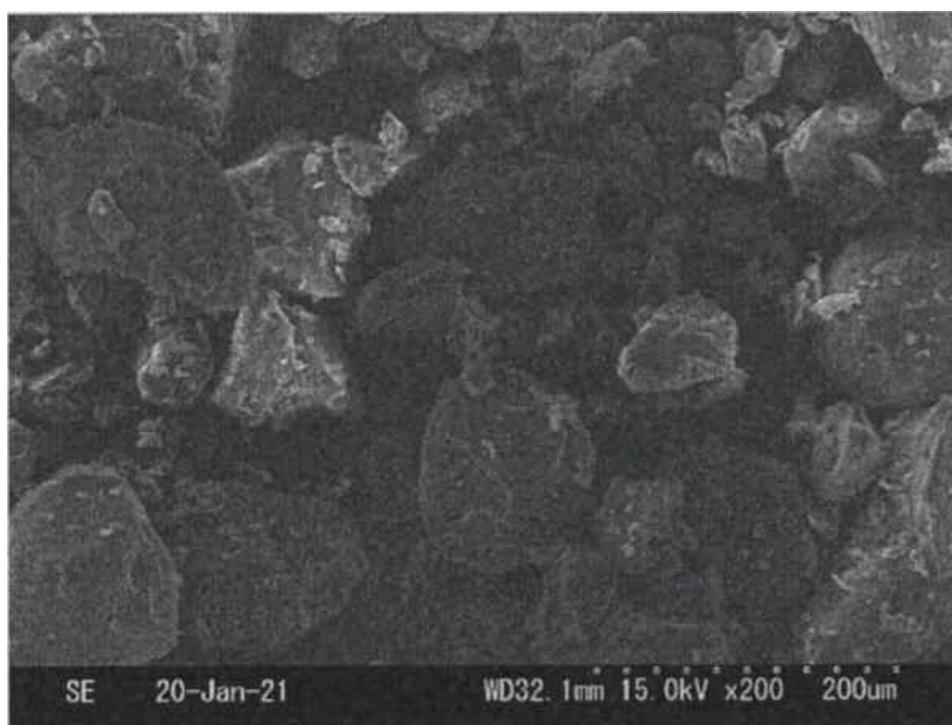


図 5.3-9 : 乾燥処理後の SEM 写真

乳化法は中和時に異形になってしまうことや、得量の少なさ、また有機溶媒を使用する点などデメリットが多く、開発は困難であると思われた。一方で塩析を用いた粒子化は塩析剤の条件を検討することで球状粒子が得られる可能性がある。今後の課題としては、塩析剤の検討に加えて、得られた球状粒子を1次粒子のまま取り出す後処理方法の確立であると考えられる。

以上、今回のタンパク質のマイクロビーズ加工技術検討に関してまとめる。大きく噴霧法と乳化法を検討してきた。噴霧法では平均粒子径 11 $\mu$ m で真球状のビーズ化に成功した。一方、乳化法では球状ビーズを取得するまでには至らなかった。乳化法についてはまだ検討の余地は残されているが、本実証事業においては今後は噴霧法に絞って検討を進めることとする。次年度以降では、マイクロビーズを用いたアプリケーション試作や量産条件の検討などを進めていく。

#### ・ 5.4 : ビーズの実用化開発

スプレードライによる噴霧法にて得られたマイクロビーズ（平均粒子径 11 $\mu$ m）に関して、各種溶媒を使用した安定性・分散性試験を開始した。これはマイクロビーズを種々の液体成分に含浸させた状態で、25 $^{\circ}$ Cと 50 $^{\circ}$ Cで保管し、1 ヶ月、3 ヶ月、6 ヶ月毎に粉体を取り出し、目視やマイクロスコープでの確認により評価する。今回、用意した溶媒は化粧品全般において汎用性の高いものを選定した。

- 1 : イオン交換水（メチルパラベン 0.2%配合）
- 2 : エタノール
- 3 : ジメチコン 1.5cs（揮発性シリコン油）
- 4 : イソドデカン（揮発性炭化水素油）
- 5 : 1,3-ブチレングリコール
- 6 : パルミチン酸エチルヘキシル（低粘度エステル油）

3 以降の溶媒について捕捉しておくとして、ジメチコンはシリコンオイルの一種であり、揮発性・撥水効果・潤滑性を兼ね備えた溶媒である。メイク用品に多用され、ファンデーションやコンシーラー、シャンプーなどに配合される。

イソドデカンは油性成分を溶かし込み、軽い質感でべたつきもなく、高揮発性の溶媒である。このような溶媒であるため、べたついた感触が好まれないアイライナー、マスカラ、口紅などのメイクアップ化粧品に使用される。

1,3-ブチレングリコールは二価アルコールであり、保湿剤としてべたつきが少なく、使用感が軽いことから、非常に様々な化粧品に使用されている。例えばスキンケア化粧品、メイクアップ化粧品、ボディ&ハンドケア製品などである。

パルミチン酸エチルヘキシルはエステル油であり、安定性に優れ、低粘度で油性感が少なく、さっぱりした軽い感触を付与することができる。乳化系スキンケア化粧品、日焼け止め製品、クレンジングオイルなどによく使用される。

まず各種溶媒にマイクロビーズを含浸させたところ、凝集することもなく、溶液中に均一に分散し、分散性は良好であった。また1ヶ月後の状態を確認したところ、ビーズが各溶液の底に溜まっていることは確認されたが、再分散のため、軽く振ったり、ヘラで攪拌したりすると特に問題なく攪拌できたことから、再分散についても大きな問題はないと思われる（本コメントは評価を実施した化粧品 OEM メーカーからのコメントであり、これまでの経験値から他のビーズと比較して分散性や再分散性に問題はないとのことであった）。また各溶液中のマイクロビーズについてマイクロスコープで確認したところ、温度の違いも含め、マイクロビーズの形状がブランクと比較して大きく変化したような形跡は確認されなかった（図 5.4-1）。したがって1ヶ月経過時点においては、ビーズは安定して各溶液中に存在できていると考えている。

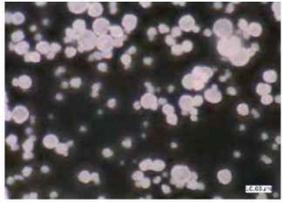
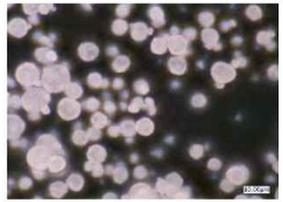
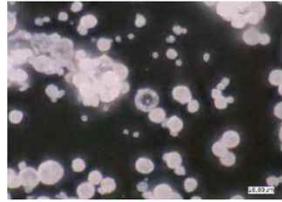
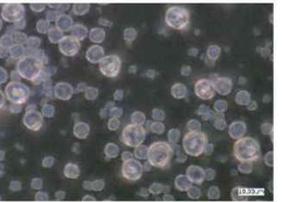
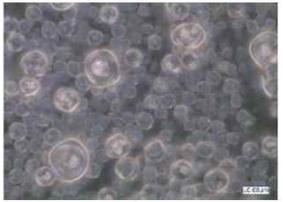
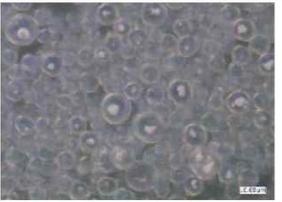
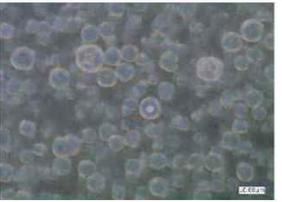
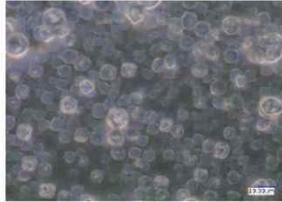
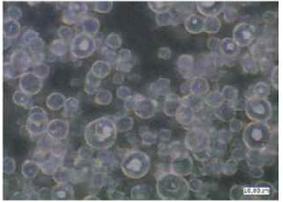
ブランク (粉体のみで保管)		イオン交換水 (メチルパラベン0.2%配合)	
25℃	50℃	25℃	50℃
			
エタノール		ジメチコン1.5cs	
25℃	50℃	25℃	50℃
			
イソドデカン		1,3-ブチレングリコール	
25℃	50℃	25℃	50℃
			
パルミチン酸エチルヘキシル			
25℃	50℃		
			

図 5. 4-1 : ビーズの各種溶媒での安定性・分散性評価

## ・ 5.5 : 水系湿式紡糸法の確立

ここでは水系湿式紡糸法の確立について記載する。まず代表的な当社の紡糸工程の概要について説明する。タンパク質は一般的に熱可塑性ではない。したがってナイロンやポリエステルのように熱で熔融した状態でノズルから吐出し、冷却によって繊維化する熔融紡糸法では繊維化できない。そこで当社ではタンパク質を溶媒に溶解し、溶解液を作製し、それをノズルから吐出し、凝固浴で脱溶媒することで繊維化させる湿式紡糸法を採用している(図 5.5-1)。具体的にはタンパク質を有機溶媒に溶解することでドープと呼ばれるタンパク質溶解液を調整し、凝固浴内にドープをノズルから吐出することで繊維を固化させる。その後、繊維は水で洗浄され、オイリングなどを経て乾燥、ワインダーで巻き取られる。当社ではこれまで凝固浴に有機溶媒を使用してきたが、コストが高い上、作業の危険性も増すことから、できれば水系の溶媒に変更したいと開発を続けてきた。その結果、水系の凝固浴でタンパク質繊維を凝固できる条件を見出すことができた。本年度では、この水系凝固浴での量産化を目指し、ラボスケールからパイロットスケールまでの各種検討に取り組んだ。

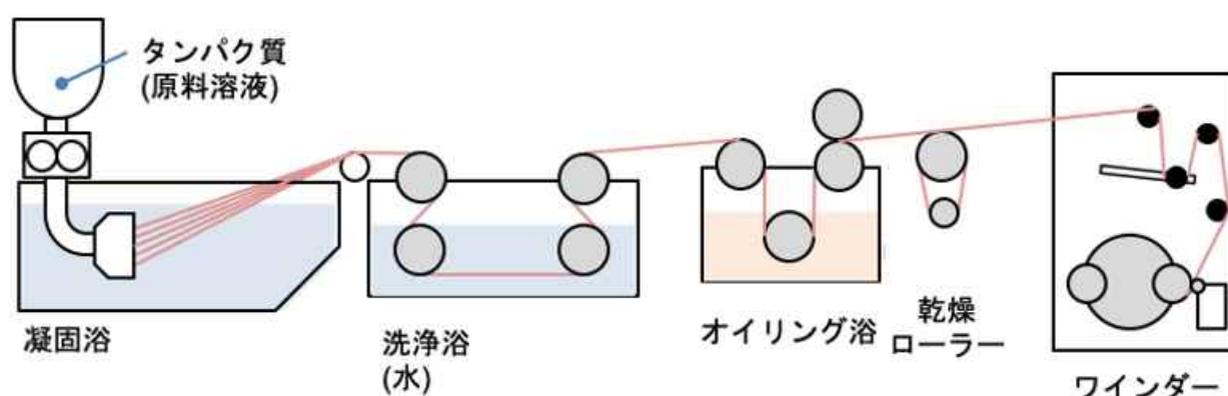


図 5.5-1 : 水系湿式紡糸法の概要

まず凝固浴での繊維固化条件の目処を立てるため、塩濃度と有機溶媒濃度で振った水溶液を準備し、紡糸性を確認した。実際の生産にあたっては凝固浴には、常にドープから有機溶媒が供給される形となるため、一定濃度の有機溶媒が存在しているという前提をおく必要がある。当該有機溶媒はタンパク質を溶かすため、あまり濃度が高いとタンパク質が凝固しない。一方であまりに有機溶媒濃度が薄いと、その後の蒸留回収での負荷が高くなる。そのためタンパク質が固化するギリギリ高い濃度の探索が求められる。また単なる水だけでは、どうしてもタンパク質の凝固が不足してしまう。そのため無機塩を凝固浴に加えることで固化を促進させる必要がある。したがって凝固浴中の有機溶媒濃度と塩濃度の条件を振り、紡糸が可能ゾーンを見出すことが量産化に向けて非常に重要である。その検討結果が図 5.5-2 となる。図の青塗りされたゾーンが今回の検討で安定して紡糸可能であると判断された領域である。最適な有機溶媒濃度および塩濃度の範囲が確認された(数値は省略)。この結果から、青塗りの条件を前提として、以降の検討を進めていくこととした。

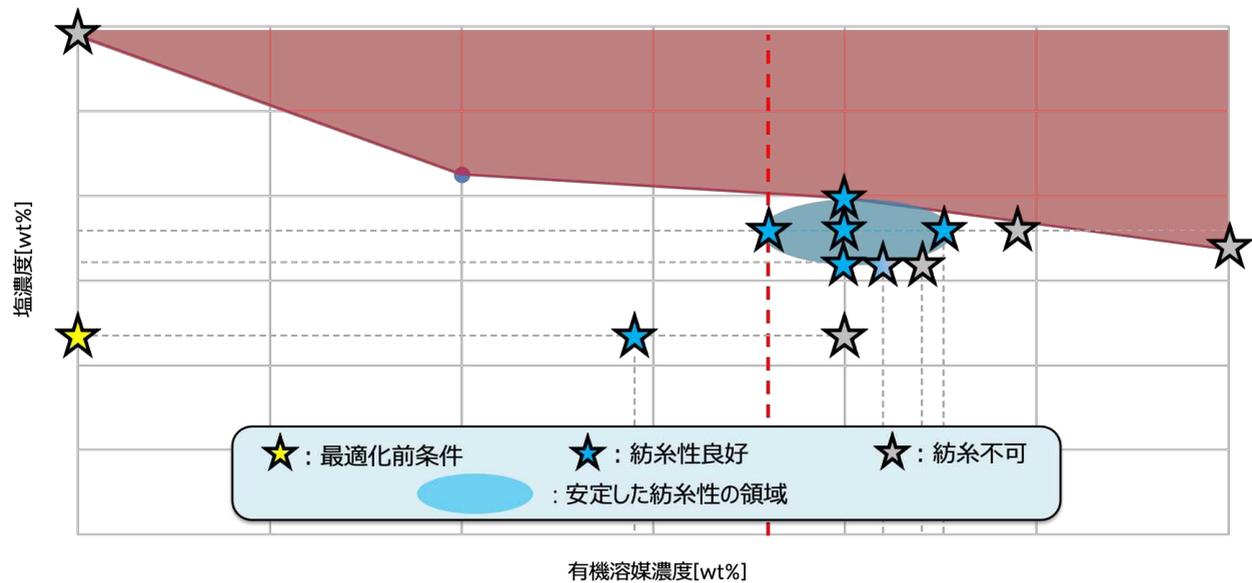


図 5.5-2 : 凝固浴溶液条件検討

次にノズル径と吐出速度、巻き取り速度の関係性を検討した。繊維一本あたりのノズル径が太ければ太いほど、単位時間あたりに取得できるタンパク質量が増えるため、生産性を向上させることができる。一方でノズル径が太ければ太いほど脱溶媒が難しくなるため、固化不良を起こし、糸切れが起こりやすい。また繊維を固化させるために凝固浴での滞在時間を長くする（＝巻き取り速度を遅くする）とその分、単位時間あたりの収量が低下してしまうため、そのバランスを追求することが重要となる。今回、ノズル数は1,000ホールとし、ノズル径としては相対値で1.0、1.5、2.0、2.5を準備し、各吐出速度、巻き取り速度での検討を行なった（図5.5-3）。その結果、やはりノズル径が細かいほど、安定して紡糸ができる領域が広くなることが確認された。ただし2.0や2.5でも巻き取り速度を落とすことなく安定して紡糸できる領域が見出され、これらの条件が最も生産性よく紡糸できることから、この条件で連続運転を行うこととした。

次に延伸条件の検討結果について述べる。延伸は繊維の質を高める上で非常に重要なプロセスである。ただし繊維の種類によって適した延伸条件は異なるため、タンパク質繊維として適した延伸条件を見つけることが必要となる。特に湿式紡糸法では凝固浴を変えるとこれまでの延伸条件の前提が大きく変わる可能性があるため、一から見直す必要がある。したがって今回、様々な延伸箇所での延伸倍率条件を振った検討を行なった。その結果、巻き取りに近い場所ほど延伸によって応力が向上してくることが判明した（図5.5-4）。特に凝固浴での延伸は、ほぼ意味がないと言って良いほど応力が向上しておらず、ただ繊維が細く伸びているだけであることがわかった。また結果的に延伸浴での延伸が最も応力が高くなっているが、これは浴槽の温度が80度であることも大きな要因であると思われる。以上から、水系湿式紡糸においてはプロセスの後半での延伸に重きを置くことにした。

ノズル種類(相対値)	Φ1.0					Φ1.5					Φ2.0					Φ2.5				
	吐出線速度(相対値) [m/min]	吐出量(相対値) [g/min]	たろみ ○●△×	出口圧(相対値) [MPa]	引取速度(相対値) [m/min]															
																		たるまない MIN	切れ ない MAX	たるまない MIN
1.0																				
1.4																				
2.0	1.0	○	1.00	1.0	10	2.2	◎	0.58	1.3	10	4.0	◎	0.76	1.4	10	6.2	◎	1.58	1.8	10
3.0						3.3	◎	0.75	1.3	10	5.9	◎	1.09	2.0	10					
4.0	2.0	◎	1.58	1.3	10	4.5	○	0.90	1.3	1.3										
6.0	3.0	◎	2.03	1.5	10															
8.0																				
グラフ																				

◎：たるみなく通織可能 ○：たるみあるが通織可能 △：たるみ大きいに通織可能 ×：たるみが大きく通織不可 赤字：紡糸性△

図 5.5-3：ノズル径の違いによる吐出条件検討



図 5.5-4：延伸条件検討

最後に 1,000 ホールでの連続紡糸結果について記載する。これまでの結果、ラボ条件の検討がスムーズに進み、かつ 1,000 ホールでの各種検討についても筋の良い結果が得られたことから、連続運転を実施して今後の量産に向けた課題を抽出することとした。今回は先のノズル径検討で候補として挙げた 2.0 と 2.5 のノズルを使用し、経時での物性や遷移状態をモニタリングすることで安定した紡糸ができていないかを判断することとした。実際に約 2 日間連続で紡糸を行った結果が図 5.5-5 である。まず運転開始直後で巻き取った繊維の所々で毛羽がみられ、各織

維が均一な条件で加工されていない可能性が示唆された。また開始から 11 時間後には糸切れが発生し、その後もローラーへの巻きつきなども確認された。一度紡糸を中断し、ノズルを 2.0 に切り替え、凝固浴もフレッシュな状態に入れ替えた。2.0 ノズルでは比較的安定した紡糸を行うことができたが、7h あたりでノズルに樹脂溜まりが発生し、そこで終了した。次にもう一度ノズルを 2.5 に戻し、吐出速度などを変更し、紡糸を開始した。この条件においては安定して繊維の巻き取りを行うことができた。ただ 10 時間を超えたあたりからローラーへの巻きつきやノズルでの気泡発生が確認され、長時間紡糸による凝固浴内の条件変化が紡糸の不安定性に関わっている可能性が高いと思われた。今回の連続紡糸を通して、ホール数が増えるほど各繊維が均一な条件で加工されていかないこと、そして凝固浴内のちょっとした組成変化が後工程に大きな影響を与えうることが示唆されたため、これらの課題を解決し、次のさらなる多孔ホールでの紡糸トライに進みたい。

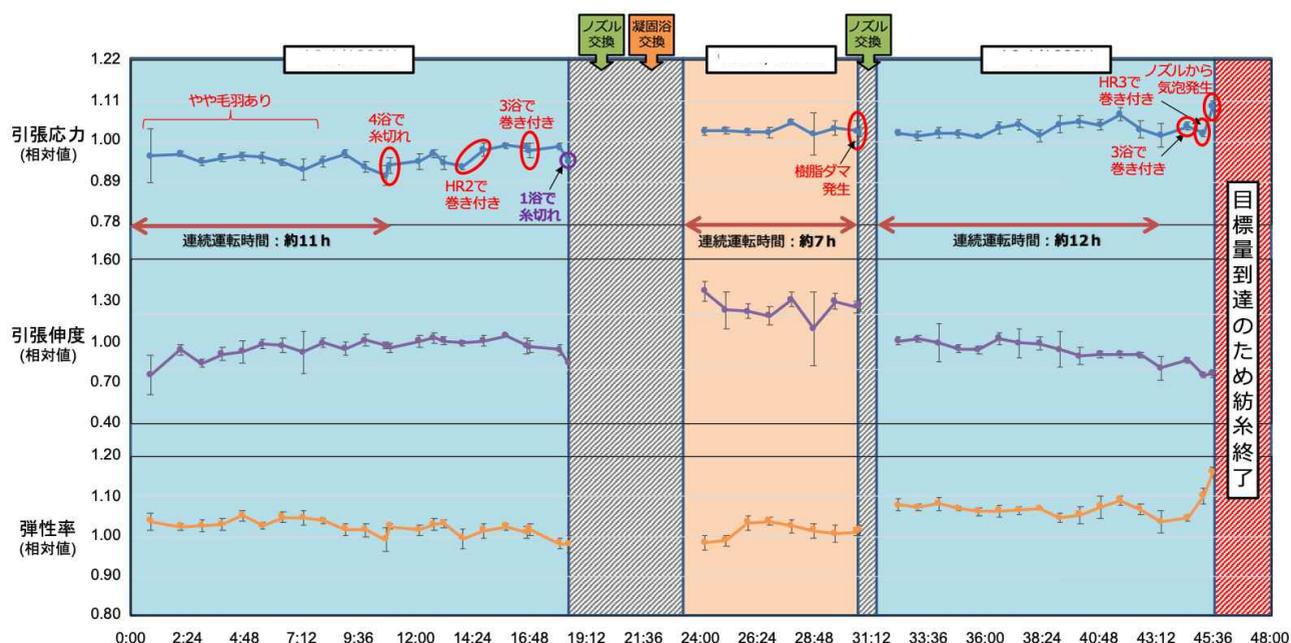


図 5.5-5 : 1,000 ホールでの連続紡糸結果

次に、本検討で作られた繊維を使用した紡績系評価、生地評価について記載する。アパレル用途において、繊維は一般的に紡績系として使用されることが多い。これは他素材とのブレンドが可能であったり、着心地の観点から好ましい場合が多いからである。紡績系を作製するためには、繊維を捲縮させ、短くカットし、絡ませて、そして多段階で細く紡いでいく必要がある。この時に繊維が切れやすかったり、絡み合いが弱かったりすると、紡績時に糸切れが発生し、大きく収率が低下してしまうことになる。また紡績できたとしても、紡績系自体の強度や風合いによって得られる生地の品質は大きく変化する。紡績については、綿紡績と絹紡績の2種類行った。綿紡績は綿で用いられる紡績方法であり、絹紡績は絹の紡績で用いられるものである。綿紡績は繊維にある程度の捲縮がかかっている必要があるが、絹紡績は捲縮があまりなくとも紡績ができることが特徴である。ただし絹紡績はその分、難易度が高く、また得られる紡績系の強度も弱くなりがちである。今回、紡績・生地評価を行った繊維は、かさ高性向上繊維の開発において創出された真円細径繊維を水系湿式紡糸で得たものであり、かさ高性向上繊維と水系湿式紡糸を掛け合わせた繊維での評価を行なった。

工程安定通過性を測る指標として歩留まりを採用した。綿紡績及び絹紡績ともに工程の歩留まりは、80%程度であった。これは一般的な化学繊維や綿、絹での収率とほぼ同程度であり、工程安定通過性については特段の問題はないと判断された。

次に得られた紡績糸で生地を作製し、耐久性試験を行った（図 5.5-6）。耐久性試験としては、反復した負荷を生地に加え、生地が裂けるまでの反復回数をカウントすることで、同じタンパク質繊維である絹との比較を行った。生地の縦方向及び横方向での評価を行い、綿紡績糸で作られた生地は、相対値でそれぞれ縦方向 0.80 回、横方向 0.88 回、絹紡績糸で作られた生地は縦方向 0.90 回、横方向 0.84 回であった。これは絹でできた生地の縦方向 1.0 回、横方向 0.65 回と遜色ない反復回数であった。したがって耐久性についても特段大きな問題はないと判断した。

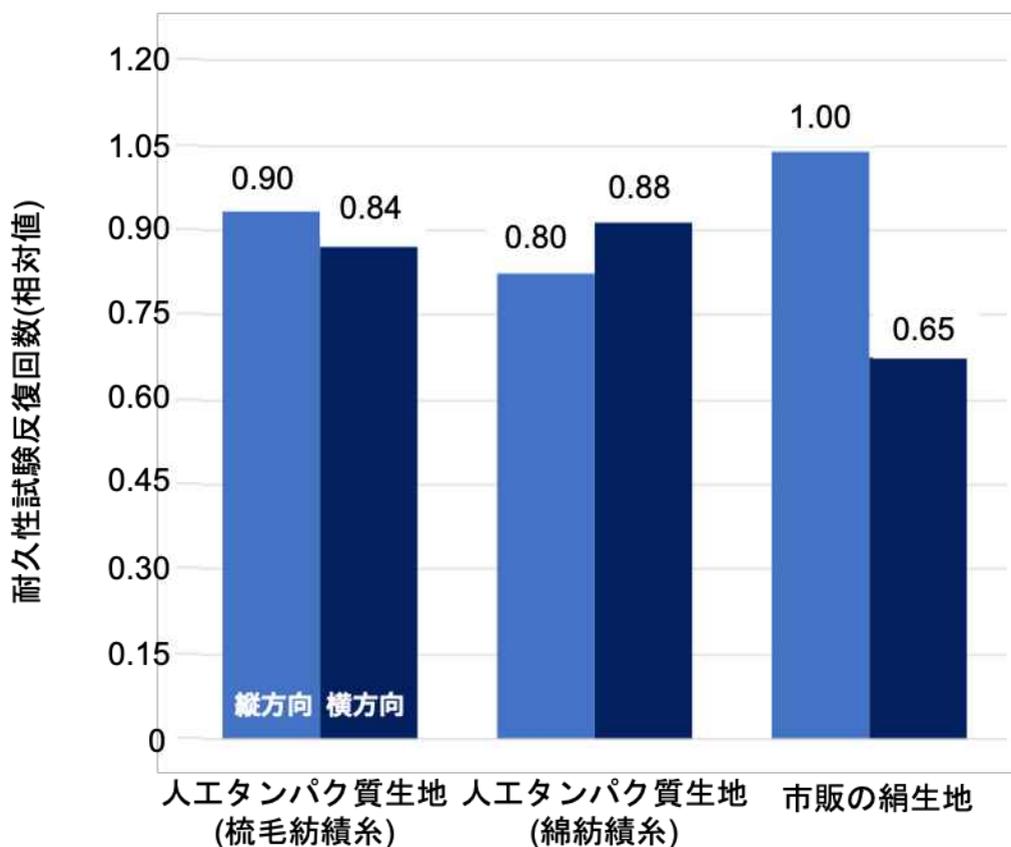


図 5.5-6 : 各生地での揉み摩耗試験

最後に風合いの官能試験を行った。風合いについては、近年いくつかの定量的な測定方法が提案されているものの、現状においては未だ人が触った時の感覚で評価が為されている領域である。特に生地はダイレクトに人の肌に触れるものでもあるため、感触による定性的な評価は判断する上で十分参考になるものであると考えている。今回、ハリ、コシ、滑りの観点に対して官能評価を実施した。いずれも官能評価でよく指標として用いられるものである。綿紡績生地と絹紡績生地では、ハリやコシは絹生地に比べて高く、また滑り性については絹生地、絹紡績生地、綿紡績生地の順となった（図 5.5-7）。滑り性は絹生地に劣るものの、総合的な生地としての風合いは劣っておらず、水系湿式紡糸で得られた繊維であっても十分な耐久性と風合いを発現できることが明らかとなった。

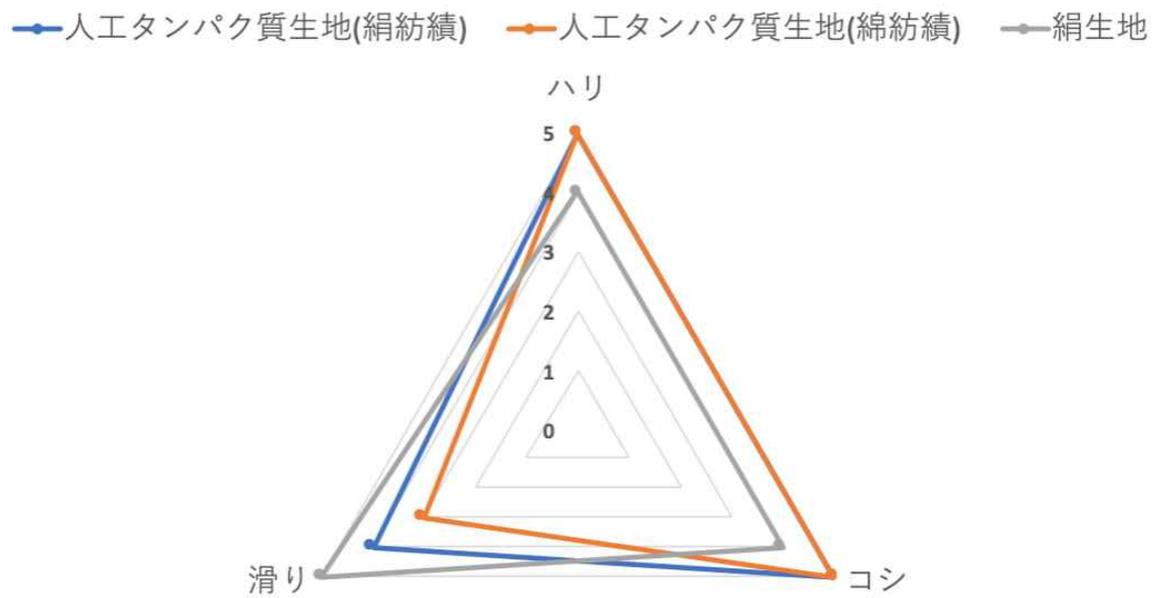


図 5.5-7 : 各生地での官能評価

・ 5.6 : かさ高性向上繊維の開発

ここではかさ高性向上繊維の開発について記載する。かさ高性とは元々、羽毛が圧縮されて開放された時に膨らむ力のことを言う。かさ高性が高いほど膨らみが出て、生地に空隙ができるため、保温性に優れた繊維となる。化繊は一般的にかさ高性が高くないものが多いが、アクリル繊維は熱で大きく収縮する特徴を利用して、かさ高性を付与することができる。ただし当社のタンパク質繊維については、アクリル繊維のように熱で大きく収縮するわけではないため、タンパク質の種類や繊維の形状、複合紡糸などによってかさ高性を付与できないか検討することとした。

本年度、大きな成果が得られた検討項目としては繊維断面形状と繊維径の組み合わせであった(図 5.6-1)。当社がこれまで作製してきた繊維断面形状は真円状のものだけであり、繊維径も比較的太いものであった。(図 5.6-1 : 真円断面、繊維径相対値 1.00)。しかしながらこの繊維ではアクリル繊維と比べるとかさ高性が大きく劣っていた。そこで今回はまず繊維径を細くすることによる違いを確認した。その結果、繊維径を細くすると真円断面であっても、多少かさ高性が向上することがわかった(図 5.6-1 : 真円断面、相対値 0.62)。これは同じ繊維重量あたりで体積中の繊維の本数が増えるためであると考えられる。ただし、これだけではかさ高性としてまだまだ物足りないため、断面形状を三角断面にしてみることにした。三角断面にした理由としては、異形断面の中でも比較的加工がし易く、かつ真円断面よりは繊維同士の接着面が減り、かさ高性が期待できるためである。まず三角断面の繊維径相対値 0.90 の繊維では同じ繊維径の真円断面よりもかさ高性が向上した。そこからさらに繊維径を細くしていくと、さらにかさ高性が大きく向上した。これは断面形状の写真からもわかるが、繊維径が細くなるにしたがい、断面形状が三角から三菱型に変化していったことも影響していると思われる。これは思わぬ発見であった。

繊維の特徴としては、繊維が細くなるほど上記で述べたようにかさ高性が向上するとともに、繊維のしなやかさが増し、ソフトな感触となっていった。またこれらの繊維はノズル型は当然変える必要があるが、同じ水系での湿式紡糸が可能であるため、繊維のタイプによって製造方法を大きく変える必要はない。



\* 繊維径は相対値

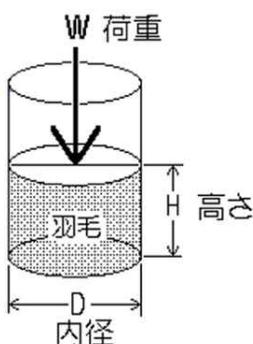
図 5.6-1 : 繊維断面と繊維径によるかさ高性の違い

次に上記検討で最もかさ高性が向上した三角断面、繊維径相対値 0.62 の繊維とアクリル繊維のかさ高性比較を行うことにした。これまで当社では、かさ高性を定性的に評価していたが、定量的な系を構築し、評価を行うこととした。かさ高性の評価方法としては種々存在しているが、羽毛のかさ高性試験で用いられている JIS L 1903 を参考にすることとした (図 5.6-2)。これはある一定空間にある一定重量の羽毛を用意し、そこに荷重をかけたあとで、どこまで膨らみが回復するかを測定する方法である。ビーカーや分銅などを使用して同じような系を社内で再現できるようにした (ビーカーサイズ: 1,000ml、重りの重量: 27g、繊維の重量: 2g)。

そして実際にアクリル繊維と今回最もかさ高いタンパク質繊維での評価を実施した (図 5.6-2)。N3 で試験を実施した結果、荷重を除去した後に繊維が膨らんだ高さがアクリル繊維では相対値で 1 でタンパク質繊維では 0.72 となった。したがってタンパク質繊維のかさ高性はアクリル繊維の約 70% 程度であることがわかった。今回の結果から、断面形状についてはより繊維の接着面積が下がる方がかさ高性は向上すると思われるため、次は星型を検討しても良いと思われる。また複合紡糸やタンパク質の種類によってもかさ高性を向上できる可能性があり、これらについては来年度本格的に取り組んでいきたい。

なお、本年度でのかさ高性繊維開発はラボスケールでの検討が中心となっていたため、実機で三角断面細径繊維での紡績加工・生地作製を行うための十分な繊維量の確保ができなかった。一方で真円細径繊維については、水系湿式紡糸の項目で示したように、水系湿式紡糸によって得た真円細径繊維を使った紡績・生地評価を行なったところ、工程安定性については大きな問題はなく、生地の肌触りも良好なものであった。したがって異形断面については、本年度の成果を活用して、来年度にスケールアップに取り組み、紡績加工での安定性評価や、得られた紡績糸を用いた生地評価を行い、アパレル分野で使用できるよう開発を行なっていきたいと考えている。

測定用シリンダー



繊維種類	高さ(相対値)			
	n1	n2	n3	平均
人工タンパク質繊維	0.65	0.73	0.77	0.72
アクリル繊維	0.89	1.03	1.08	1

図. かさ高性評価方法  
一般財団法人  
日本繊維製品品質技術センター 画像引用

図 5.6-2 : 繊維断面と繊維径によるかさ高性の違い

## 6：来年度の事業目標

本章では、各技術項目の来年度の事業目標について述べる。

タンパク質生産性向上検討においては、本年度の検討の結果、本事業開始時の生産性比で1.33倍を達成できた。最終年度の目標が本事業開始時の生産性比で1.66倍となっており、来年度は本事業開始時の生産性比で1.53倍の生産性を目指す。本年度は主に培地の検討で成果が上がったが、来年度は培養方法や遺伝子配列の検討などでも生産性向上に寄与できるよう開発を進めたい。

ビーズ加工法の開発では、来年度の目標として「直径10um真球ビーズを実機を用いて1kg以上取得すること」とした。本年度で噴霧法について基本的なプロセスの目処が立ったと思われるため、来年度では各社が所有するスプレードライヤー(SD)での実機検討を行い、SD条件の最適化やビーズのスペックをより高める条件の検討を行う。kgスケールでの実証ができれば、その後の量産化においても大方の目処を立てることができると考えている。

ビーズ実用化開発での来年度の目標は「ビーズが50度の各溶媒において3ヶ月安定していること」とした。ビーズ化の目処が立ってから取り組む項目であるため、現状は安定性評価に着手した段階である。来年度は安定性評価を問題なきことを確認し、さらに試作を進める中での課題を適宜解決していきたい。

水系湿式紡糸法の確立での来年度の目標は「水系固化溶媒にて3,000ホールでの紡糸プロセスの開発」とした。本年度の事業を通して、安定化はしていないが、1,000ホールでの紡糸検討に着手することができた。来年度は1,000ホールでの課題抽出に引き続き取り組み、その課題を解決した上で、3,000ホールにスケールアップし、安定した紡糸ができるようなプロセスの開発に取り組む。

かさ高性向上繊維の開発での来年度の目標は「アクリル繊維と同等のかさ高性の実現」としており、これは最終目標と同じものとなっている。本年度の検討の結果、アクリル繊維と比較して約7割程度のかさ高性まで当社繊維を向上させることができた。来年度にアクリル繊維とほぼ同等レベルのかさ高性繊維の開発を行い、最終年度ではそのスケールアップに取り組みたいと考えているため、このような目標設定とした。

表 6-1：来年度の事業目標

	項目	来年度の目標	最終目標
1	タンパク質生産性向上検討	本事業開始時の生産性比で1.53倍	本事業開始時の生産性比で1.66倍
2	ビーズ加工法の開発	直径10um真球ビーズを実機を用いて1kg以上取得すること	直径10um真球ビーズの加工技術及び量産化技術の構築
3	ビーズの実用化開発	ビーズが50度の各溶媒において3ヶ月安定していること	各種溶媒（イオン交換水、エタノール、1,3-ブチレングリコール、ジメチコン、イソドデカン）で3時間以上分散を保持し、凝集後再分散可能であり、50度の溶媒中で3か月安定していること。
4	水系湿式紡糸法の確立	水系固化溶媒にて3,000ホールでの紡糸プロセス確立	水系固化溶媒にて5,000ホールでの紡糸プロセス確立
5	かさ高性向上繊維の開発	アクリル繊維と同等のかさ高性の実現	アクリル繊維と同等のかさ高性の実現

## 7：ライフサイクルでの CO2 削減効果

本章では、タンパク質ビーズ及び繊維のライフサイクルでの CO2 削減効果について述べる。これらと代替対象素材とのライフサイクルフロー（原材料調達・生産・流通・使用・廃棄・リサイクル）について説明する（図 7-1、図 7-2）。タンパク質ビーズ及び繊維に関して、原材料調達・生産については、代替対象素材と原材料や製造方法は当然異なる。一方で、流通・使用については代替対象素材と同じように扱われることを想定しているため、特に CO2 の削減等には寄与しないと考えている。また代替対象素材については、最終製品として使用された後、焼却処分が環境中に流出することが多く、特にリサイクルシステムも確立されていない。タンパク質ビーズ及び繊維についても特別な回収フローは現時点では措置していないため、廃棄・リサイクル工程においても特段の違いは出ないと考えている。なお、タンパク質素材は高い海洋生分解性を示しているため、仮に環境中に流出してもマイクロプラスチックとして問題になることはない。

現在、当社はタイランドにタンパク質を量産する工場を建設中であるため、タンパク質の製造はタイランドで行うこととしており、タンパク質を製造するための発酵原料も現地調達する予定である。ビーズに関しては、タンパク質製造の精製工程から直接製造するフローを考えているため、製造場所はタイランドとしている。一方でタンパク質繊維に関しては、日本の紡糸パイロットラインでの製造を予定しているため、タイランドから原料となるタンパク質を輸入し、日本で製造することとしている。

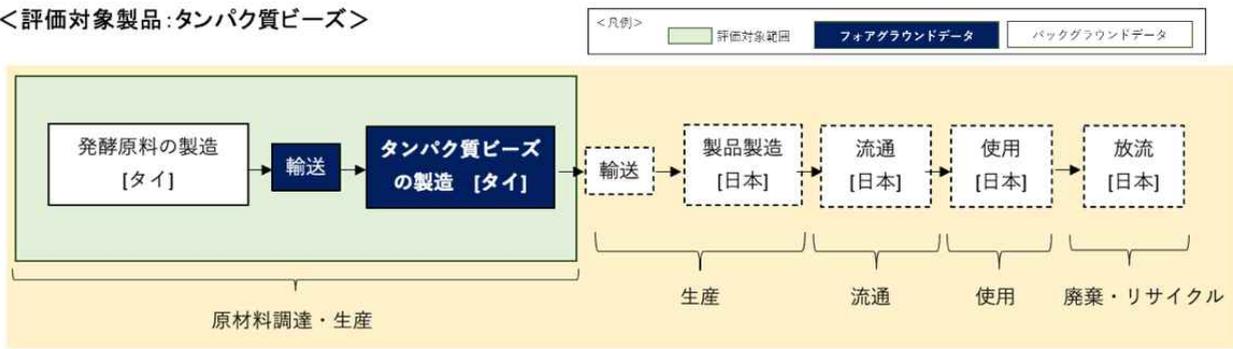
次に CO2 の算出方法について記載する。タンパク質素材を含むバイオ由来製品の原料から生産プロセスまでの一貫したライフサイクルアセスメント（LCA）については、標準的な評価手法が確立されておらず、また、代替対象物質の公知のデータが公開されていないため、Gabi でシナリオを設定して試算した（Gabi <http://www.gabi-software.com/japanese/index>）。本年度の実証事業の結果、当初目標で設定したタンパク質ビーズ及びタンパク質繊維の製造プロセスを実現できる可能性が高まったことから、量産時点での CO2 排出量は当初想定と変更していない。代替対象素材のウレタンビーズ・アクリル繊維については、Gabi に付属のウレタン樹脂・アクリル繊維の標準データを比較検討のベースとして引用し（PCR が異なるため参考指標）、各々比較検討した。なお、代替対象素材の詳細が非開示のため、エネルギー起源・非エネルギー起源 CO2 排出量は均等に按分した。最後にウレタンビーズのエネルギー起源 CO2 排出量を 1 とした場合の各素材の CO2 排出量を比率で算出した（表 7-1）。

その結果、タンパク質ビーズの CO2 排出量はウレタンビーズの約 62%、タンパク質繊維の CO2 排出量はアクリル繊維の約 75%であると算出された。

表 7-1：ビーズ及び繊維の CO2 排出量比

	ウレタンビーズの CO2 排出量	タンパク質ビーズ の CO2 排出量	アクリル繊維の CO2 排出量	タンパク質繊維の CO2 排出量
エネルギー起 源	1.00	0.53	1.05	0.76
非エネルギー 起源	1.00	0.70	1.05	0.80
合計	2.00	1.23	2.10	1.56

<評価対象製品:タンパク質ビーズ>



<ベースライン:ウレタンビーズ>

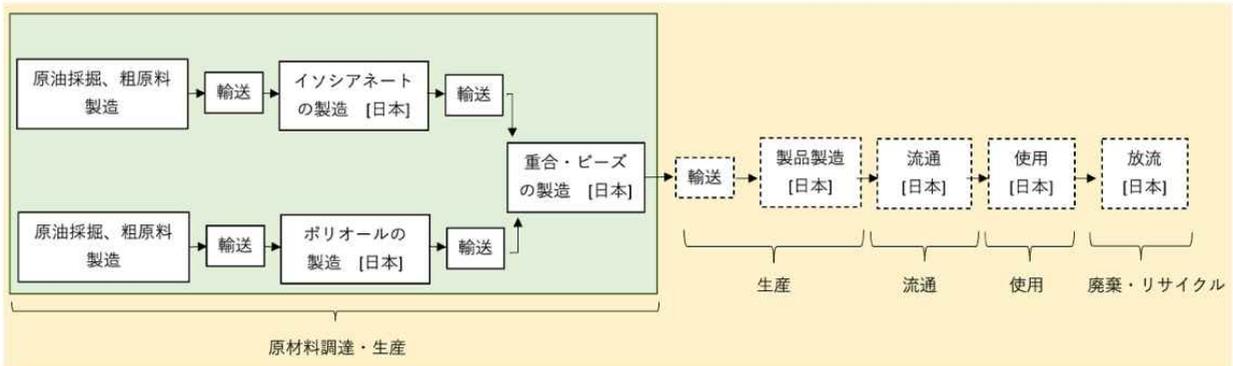
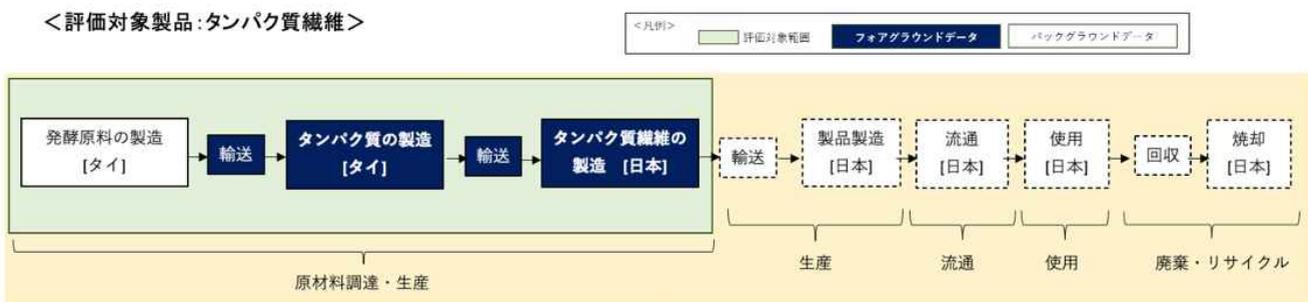


図 7-1 : ビーズのライフサイクルフロー図と評価範囲

<評価対象製品:タンパク質繊維>



<ベースライン:アクリル繊維>

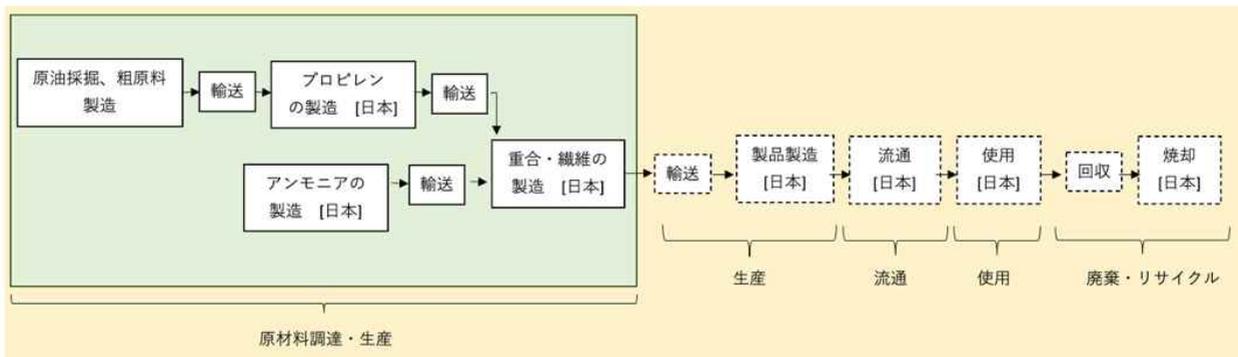


図 7-2 : 繊維のライフサイクルフロー図と評価範囲

## 8：事業化の検討

本章では、事業化の検討状況について記載する。当社はこれまで約13年間にわたりタンパク質素材の研究開発及び事業化に向けた取り組みを続けてきた。現状においては、研究開発は日本、量産実証及び初期のタンパク質製造はタイランド、本格的な普及に向けてのタンパク質製造はアメリカという大きな構造ができてきている（図8-1）。以下、各拠点での活動内容について説明する。日本には本社研究棟及びパイロットプラントが設置されている。本社研究棟においては、タンパク質素材の性能の向上、コストダウンの検討、関連分野の新技术開発などが行われている。またパイロットプラントではラボで構築されたプロセスのスケールアップや、新しい遺伝子のタンパク質原末の取得、そして当社素材を用いた製品開発のための原料供給などを担っている。本事業も日本拠点で開発が実施されている。次にSpiber (Thailand) Ltd. に関して述べる。ここでは日本のパイロットプラントで構築されたプロセスをさらにスケールを100倍近くにまで上げた実証及び生産が行われる。タイプラントは2021年3月に完成し、2021年末より商業生産を開始する予定となっており、年間数百トンのタンパク質を供給できる能力がある。本事業を通してタンパク質ビーズ及び繊維の生産に目処が立った場合、まずはタイプラントを活用してその量産に取り組む予定である。そして更なる量産の拠点としてアメリカプラントが予定されている。本拠点はアイオワ州のクリントンに設置されている穀物メジャーのアーチャー・ダニエルズ・ミッドランド（ADM）の発酵プラントを活用する計画であり、すでにADMとは資本提携をし、本工場でタンパク質を生産するための設計業務を開始している。本拠点は2023年以降に稼働する計画となっており、年間数千トンのタンパク質生産能力を確保できる。したがって本格的な量産は本拠点が中心的な役割を担うことになる。その後はタンパク質素材の生産を行いたい企業を世界中から募り、技術ライセンスを行うことで、広く世の中に本素材を普及する体制を構築したいと考えている。

次に事業化の展開について概要を記載する。当社は現在、アパレルと自動車部品を主力の出口商品と考えている。アパレル分野に関しては2015年にTHE NORTH FACEの商標権を日本と韓国に持つ株式会社ゴールドウインと資本提携し、2019年に当社繊維と綿との混紡糸を使用したTシャツと、最外層生地を当社繊維100%で作ったアウトドアジャケット「ムーン・パーカ」の限定販売を行った。いずれも大きな注目を集め、即完売となった。一方で上市はできていないものの、自動車部品としての樹脂複合材（繊維強化プラスチック）の開発も継続しており、当社繊維と炭素繊維を組み合わせたCFRPや当社繊維とウレタン樹脂と複合材を自動車部品メーカーと共同開発している。

本事業においては、ウレタンビーズ及びアクリル繊維の代替開発に取り組んでいるが、これらの素材は今まで当社のスコープに入っていなかった領域であり、今後の事業展開の幅を広げる素材と考えている。マイクロビーズについては、化粧品分野を初期のターゲットとして想定している。本年度の事業を通してビーズ化の目処が立ってきたため、来年度は実際のアプリケーション試作を実施する計画である。当然いくつか課題は出てくると思われるが、化粧品分野におけるタンパク質に対するイメージの良さや、これまでタンパク質ビーズ自体がそもそも市場にほとんどなかったことなどから、マーケティング次第で多少の欠点は十分補えるのではないかと考えている。また現状の噴霧法であれば、ほぼ既存の精製工程とプロセスが同じであるため、大幅な改造もなく、比較的迅速に量産化の体制を構築することができるとと思われる。繊維に関しては、既存の当社繊維があまりかさ高性がないため、他の繊維と組み合わせることでかさ高性をカバーしてきた。本年度の事業では、アクリル繊維の約7割程度のかさ高性の付与まで漕ぎつけたわけだが、これでもまだ本繊維単独でアクリル生地を代替することは難しい。こちらについてはかさ高性を向上するための基礎技術の開発が引き続き求められる。ただし、すでにアパレル用途向けに構築している繊維の製造方法と大きく異なるプロセスを構築すると、量産化までに多大な時間を要するため、極力同じようなプロセスで製造できる範囲でかさ高性を付与するというコンセプトで開発を続けていきたい。なお、繊維の評価や商品化検討については既存のパートナーを活用することで迅速に進めることができる体制は構築されており、来年度もフィードバックを速く回し、上

市に向け最速で検討を進めていく。次ページより、当社の人工構造タンパク質素材の実用化に向けた取り組みに関する経緯を記載する。

## 8.1 : 人工構造タンパク質素材の実用化に向けた取り組み

タンパク質とは20種類のアミノ酸(図8.1-1)がペプチド結合により結合している生体高分子である。結合するアミノ酸の種類や順番によって、そのタンパク質が発現機能が異なる。一般的に、生体内で触媒として作用する酵素や、輸送タンパク質、免疫を司る抗体等は「機能性タンパク質」と呼ばれるのに対し、ヒトの皮膚や髪の毛、羊の毛や蚕が吐き出す糸等の機械的特性に優れたタンパク質は「構造タンパク質」と呼ばれる。理化学研究所に所属する沼田圭司氏は、構造タンパク質の定義を「特徴的なアミノ酸もしくはモチーフの繰り返し構造を有し、骨格の形成や、生物、細胞、物質の機械的な性質に寄与するタンパク質」としている(Keiji NUMATA, (2020). How to define and study structural proteins as biopolymer materials. *Polymer Journal*, volume 52, 1043-1056.)。

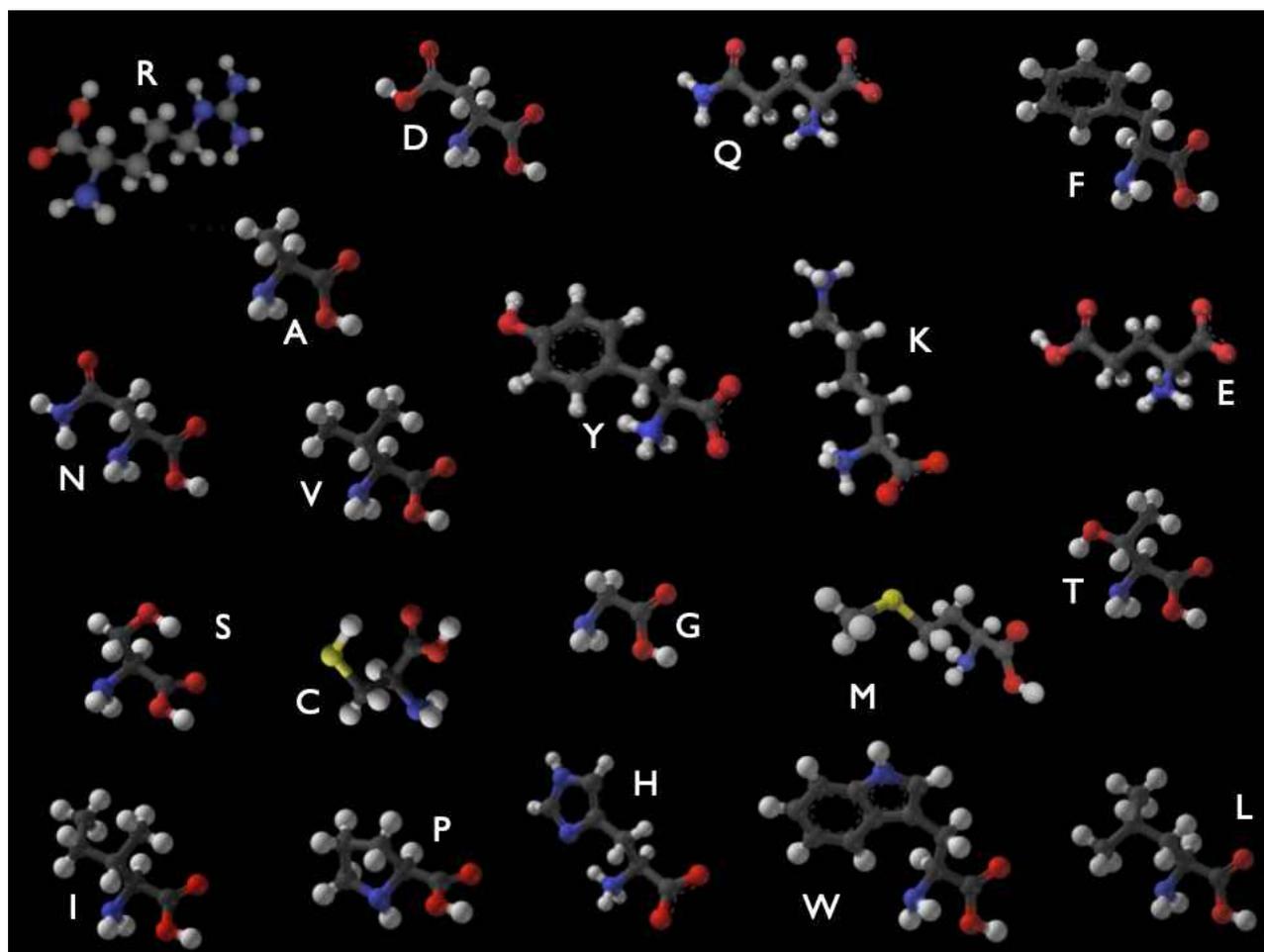


図 8.1-1 : 生物が利用する 20 種類のアミノ酸

構造タンパク質の中でも、近年注目を集めているのがシルクやクモ糸に代表されるフィブロインと呼ばれる構造タンパク質である。特にクモが命綱として使う牽引糸は、高い引張強度と伸度を兼ね備えた、タフな素材として知られていることから、その物性発現メカニズムについて盛んに研究の対象となっており、クモ糸を人工的に再現する試みも、数多く行われている。弊社における人工構造タンパク質素材の生産技術も、その発端は天然クモ糸に関する研究であり、以下に人工構造タンパク質素材の実用化に向けたこれまでの取り組みを記載する。

### ① Spiber の創業

人工構造タンパク質の実用化に向けた取り組みは、2004年に当時、慶應義塾大学の博士課程に所属していた関山和秀（現・Spiber 株式会社 取締役兼代表執行役）が、研究開発テーマとして取り組んでいた「微生物による天然クモ糸タンパク質の生産」に端を発する。関山が研究開発の拠点としていた慶應義塾大学先端生命科学研究所（図 8.1-2）は、2001年に鶴岡タウンキャンパス（山形県鶴岡市）に設置されたバイオの研究所であり、遺伝子工学をはじめとした最先端のバイオテクノロジーを用いて生体や微生物の細胞活動を網羅的に計測・分析し、コンピュータで解析・シミュレーションを行う「統合システムバイオロジー」を通じて、医療や食品発酵などの分野への応用に向けた研究開発に取り組む研究所である。



図 8.1-2：慶應義塾大学先端生命科学研究所（外観）

先端生命科学研究所にて、天然クモ糸の遺伝子配列の解析や微生物によるタンパク質生産手法等の研究開発に取り組んだ結果、2007年にごく微量ではあるが、人工的に生産したタンパク質の繊維化に成功した（図 8.1-3）ことを受け、Spiber 株式会社を創業した。

また、同研究所では様々な研究開発が行われており、研究開発を通じて得られた知見や技術を活用し、多くのベンチャー企業が生まれている。生体内に含まれる代謝物質の網羅的な分析を行う「メタボローム解析」をコア技術として、バイオマーカーの探索等の事業を行なっているヒューマン・メタボローム・テクノロジーズ株式会社や、メタボローム解析と遺伝子解析（メタゲノミクス）を統合し、腸内環境評価による健康増進・疾患予防に取り組む株式会社メタジェン等、多くの研究成果が実用化に繋がっている。



図 8.1-3 : 人工的に生産・繊維化したタンパク質素材 (2007 年)

2007 年に Spiber 社を立ち上げた後、人工構造タンパク質素材の量産化に向けた取り組みを加速させ mg スケールでの生産を実現した (図 8.1-4)。それと同時に、人工構造タンパク質の繊維化に関する技術開発も進め、年を経るごとに紡糸技術も向上した (図 8.1-5)。



図 8.1-4 : 創業後に製造した約 20mg のタンパク質原料 (2008 年)



(a)



(b)



(c)

図 8.1-5 : 人工構造タンパク質繊維  
(a) 2009 年 2 月、(b) 2009 年 10 月、(c) 2010 年

## ② 世界初の人工構造タンパク質繊維を用いた製品試作

2007年の会社設立以降、人工構造タンパク質の生産条件、紡糸条件の検討を続け、人工構造タンパク質の紡糸や巻き取りを行うための設備・装置の開発により、2013年時点では数kg規模での繊維生産を実現した（図8.1-6）。製品試作を行う上で十分な量の繊維が生産できるようになったことから、世界初の人工構造タンパク質を用いたドレスとして「Blue dress」を作成した（図8.1-7）。

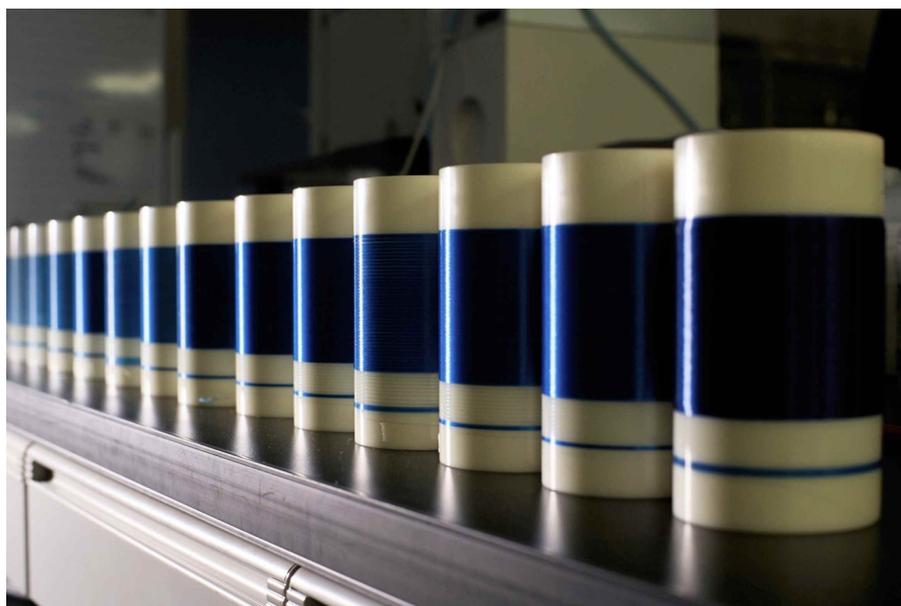


図 8.1-6：人工構造タンパク質繊維を巻き取ったボビン



図 8.1-7：人工構造タンパク質繊維を使用して作成した衣服「Blue dress」

### ③ 革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）への参加

内閣府が主導する革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）は、実現すれば産業や社会のあり方に大きな変革をもたらす革新的な科学技術イノベーションの創出を目指す、ハイリスク・ハイインパクトな挑戦的研究開発を推進するプログラムである。Spiber がコア機関となり提案した「超高機能構造タンパク質による素材産業革命」（図 8.1-8）が採択されたことを受け、2014 年～2019 年の約 5 年間に渡り、アカデミアや企業と連携し、研究開発を推進することとなった。

本プログラムでは、高機能を有する人工構造タンパク質素材の設計・製造の実現を目指し、それと同時進行で開発した人工構造タンパク質素材を工業用材料として適用するための加工技術開発及び製品化試作を進めた。材料開発の用途ターゲットとして、まずは高機能・高付加価値な次世代素材としてのニーズが見込まれる①アウトドアアパレル、②ゴム製品、③耐衝撃性材料、④人工衛星、⑤自動車ボディの 5 領域にフォーカスした開発を進め、基盤技術の構築及び知財の創出・蓄積を推進した（図 8.1-9）。



図 8.1-8 : 「超高機能構造タンパク質による素材産業革命」 テーマ概要

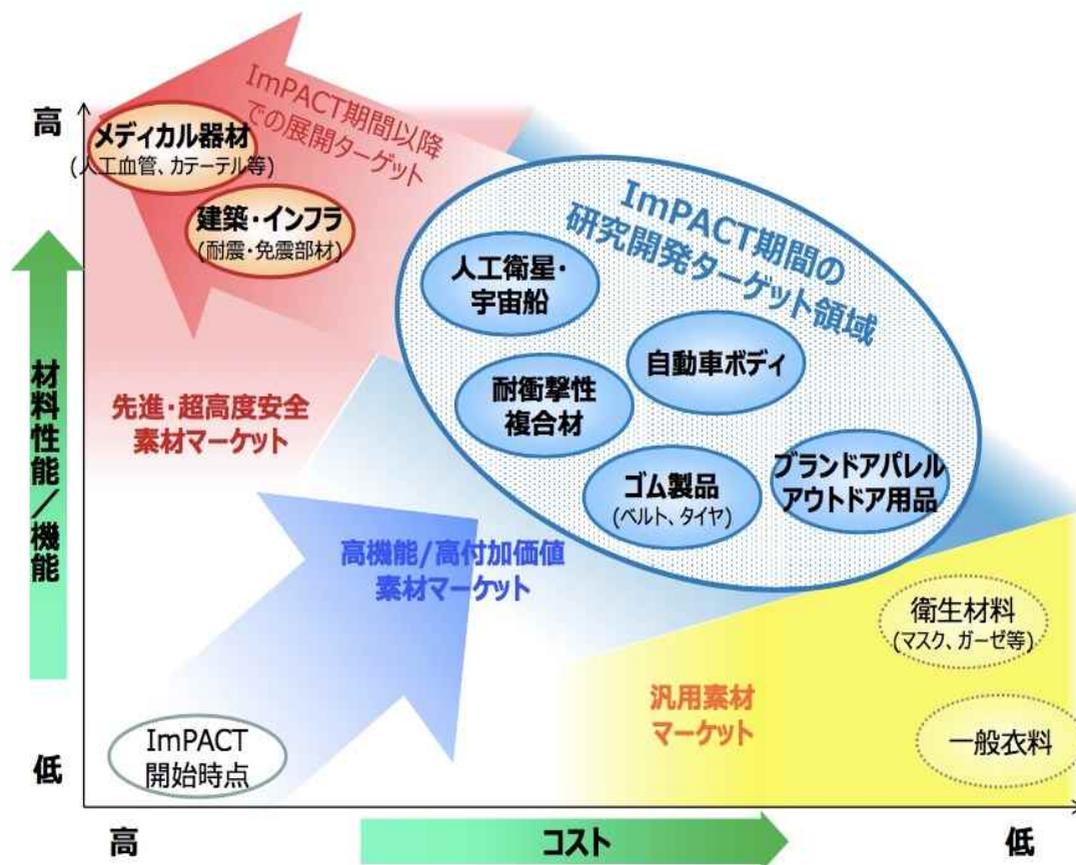


図 8.1-9 : ImPACT における用途開発ターゲット

ImPACTにおいては、人工構造タンパク質素材の実用化に向けた課題を2つ設定し、その解決に向けた研究開発に取り組んだ(図 8.1-10)。

課題①：アミノ酸配列の組み合わせが無限大である

タンパク質は20種類のアミノ酸配列が連結することで機能を発現するため、20のn乗の組み合わせが考えられる。これらの膨大な組み合わせの中から個別のトライアンドエラーにより有用なアミノ酸配列を同定することは容易では無い。

ブレークスルーのポイント：世界初の天然構造タンパク質データベースの構築・活用

天然に存在する構造タンパク質の中から高機能・高物性を発現するものを収集し、遺伝子配列解析及び構造解析の結果を統合化・集積することにより、天然構造タンパク質の高機能発現メカニズムの分析に活用する。これまでに収集したタンパク質素材の解析結果から様々な知見が得られており、特に耐水性においては解析結果を分子設計にフィードバックすることによって、水接触時の収縮を大幅に低減(約90%低減)する等、素材の性能を向上させた。今後もデータを拡充していくことで様々な物性発現メカニズムに関する更なる知見を得ながらアミノ酸配列の設計に活かしていくことが可能であると考えている。

課題②：工業用材料として構造タンパク質素材を適用する事例・知見が乏しい

現在使用されているウールやシルク等の天然の構造タンパク質素材は、天然素材であるがゆえに均質性の担保が難しく、また化学繊維等と比較して耐熱性等の基本性能が不十分であるなどの課題があり、これまで衣料用以外での工業用材料化するための技術開発が進んでこなかった。

ブレークスルーのポイント：分野横断的なフィードバック体制による素材の作りこみ

天然の構造タンパク質素材の解析から得られた知見に基づき、人工的な構造タンパク質素材の設計・生産からその素材を工業用材料として使いこなすための評価・加工技術開発までを同時進行かつ分野横断で課題抽出～問題解決のフィードバックを迅速に繰り返すことにより、天然の構造タンパク質素材を上回る性能を持ち且つ工業用材料利用に適合する人工構造タンパク質素材をいち早く創出することを目指す。

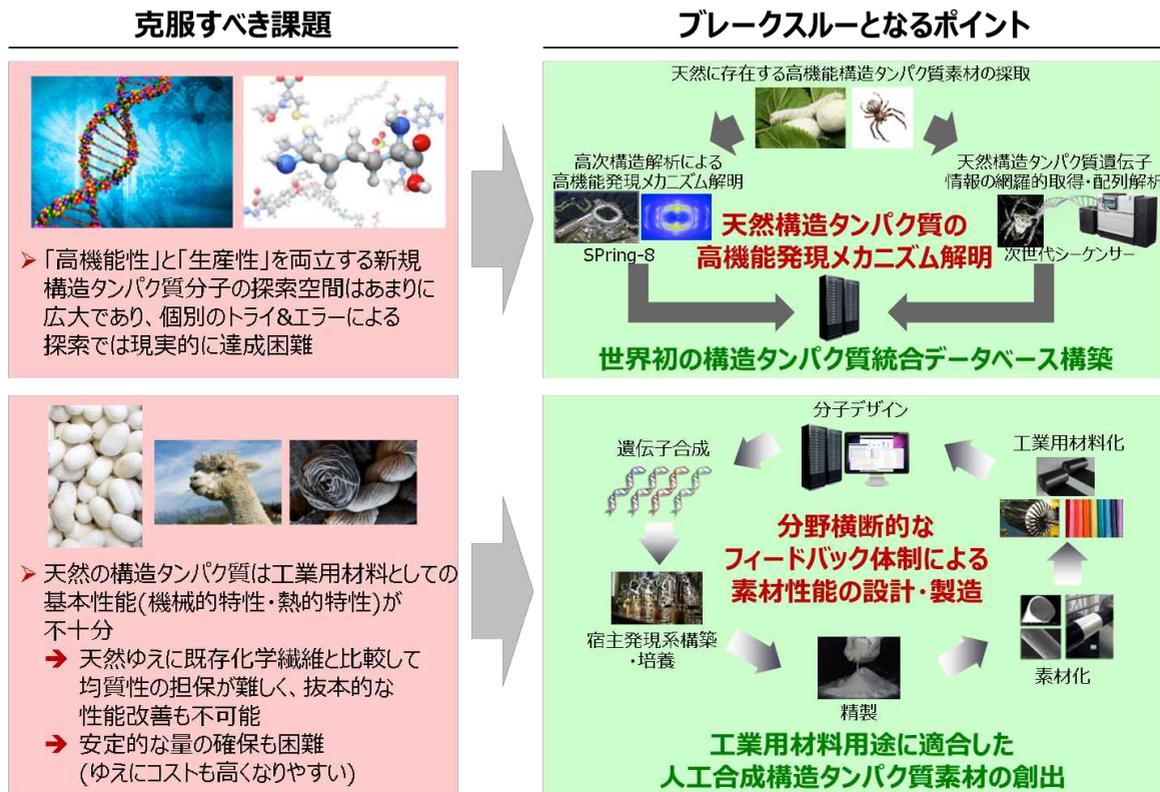


図 8.1-10 : 人工構造タンパク質素材の実用化における課題とブレイクスルーのポイント

上述の課題について、ImPACTに参画した28機関(当社を含む企業19社、アカデミア9機関)で課題解決に取り組んだ(図8.1-11)。本プログラムは、素材の開発を行う「大規模ゲノム情報を活用した超高機能タンパク質の設計・製造」と、開発した素材を用いて製品化を目指す「超高機能タンパク質素材の成形加工基本技術の開発」の大きく2つに分かれ、実用化に向けた研究開発を推進した(図8.1-12)。

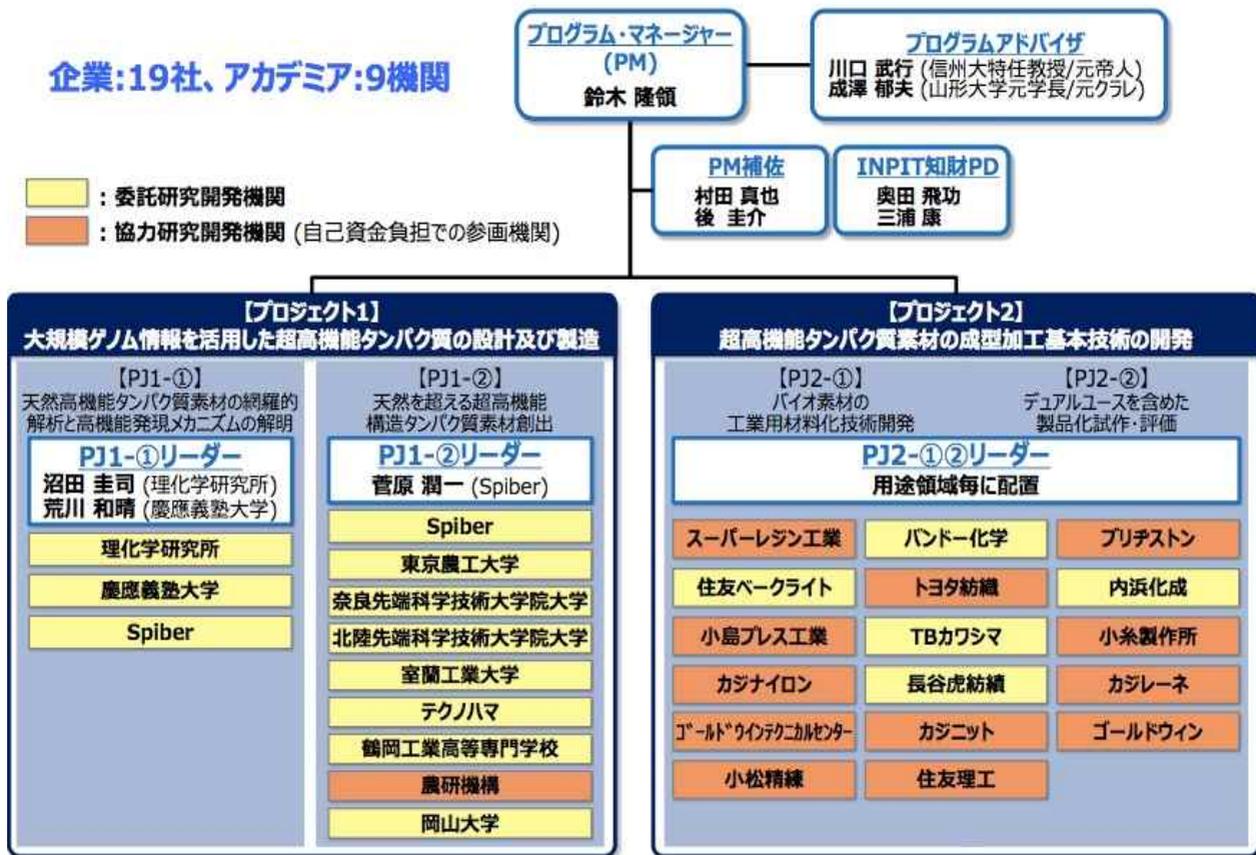


図 8.1-11 : ImPACT 参画機関一覧 (プログラム終了時点)

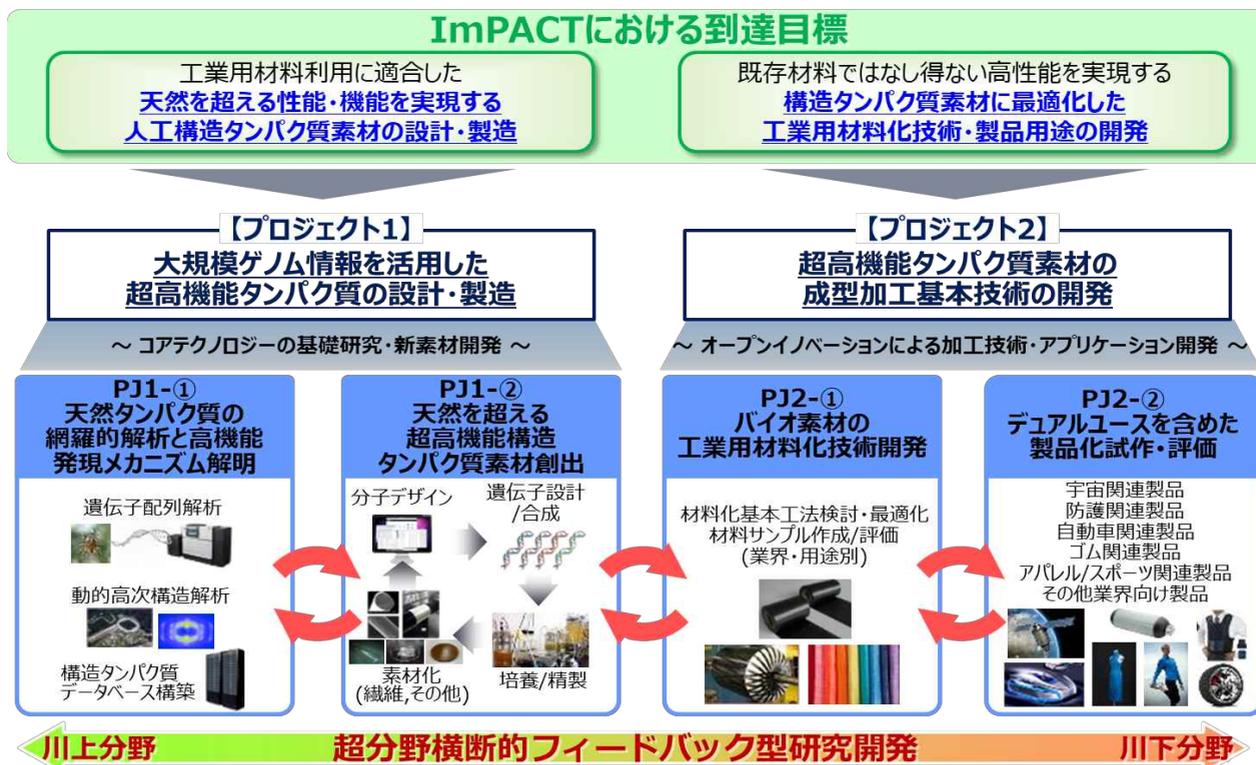


図 8.1-12 : 研究開発プログラムの全体構成図

約5年間の研究開発を通じて、自動車産業・航空宇宙産業用途での使用が見込まれる人工構造タンパク質繊維を用いた繊維強化樹脂（FRP：Fiber Reinforced Plastic）や、自動車シート等への展開を見据えた人工構造タンパク質繊維-ウレタン複合材、ゴムへの人工構造タンパク質の添加による性能向上等の成果を得ることができた（図8.1-13）。また、タンパク質素材の課題であった水接触時の収縮挙動の低減を実現したことによって、後述するアパレル領域での製品発売に繋がった。また、ImPACTで集積した知財を含む構造タンパク質に関連する特許の一元的な管理及び構造タンパク質素材の普及・拡大を目的として、構造タンパク質素材産業推進コンソーシアム（CASPI）を設立した（図8.1-14, 15）。



図8.1-13：人工構造タンパク質素材を使用した自動車ドアパネル及びシートの試作  
（画像提供：ImPACT）

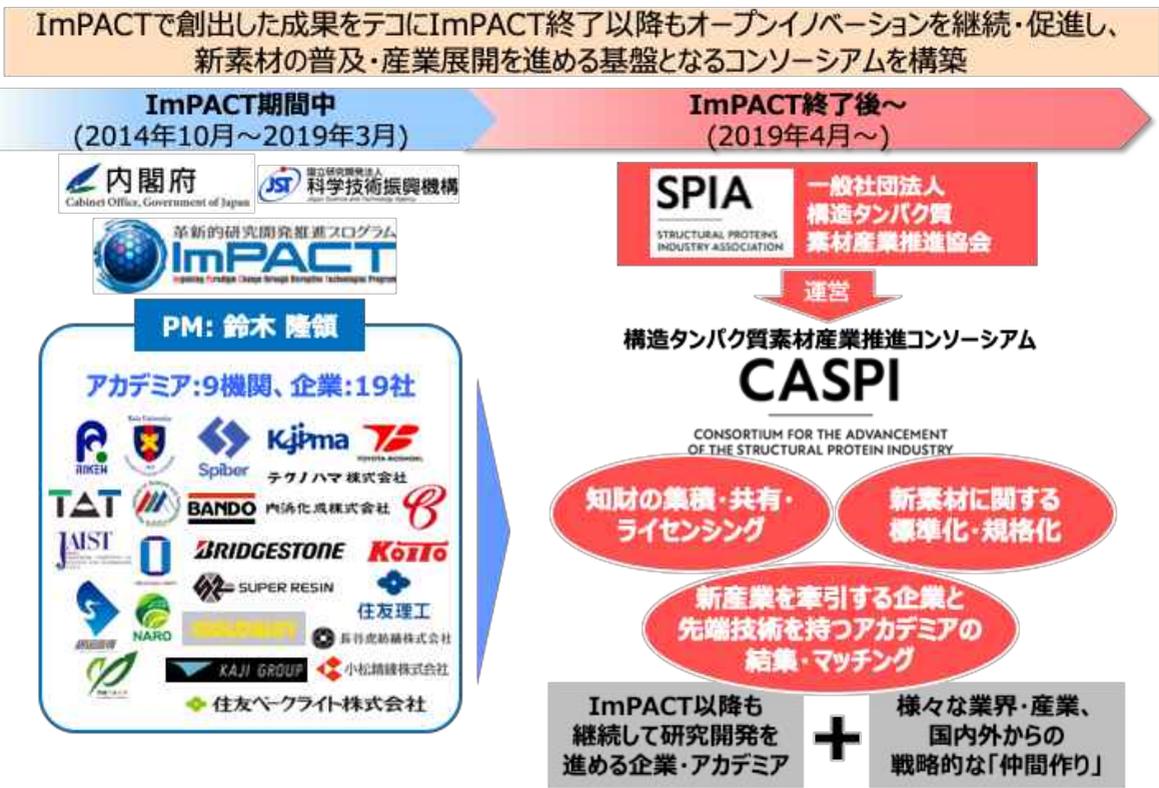


図 8.1-14 : 構造タンパク質素材産業推進コンソーシアム (CASPI) の設立



図 8.1-15 : CASPI の活用内容・目的

#### ④ アパレル産業における製品販売及びイベント参加

ImPACT を通じた研究開発を通じて、水接触時の収縮挙動の低減や人工構造タンパク質素材の量産化及び製造コストの削減を実現できたことを受け、開発パートナーである株式会社ゴールドウインとの協業によって、2019 年以降、アパレル産業において複数の製品を販売するに至った（図 8.1-16～18）。



図 8.1-16 : Planetary Equilibrium Tee



図 8.1-17 : MOON PARKA



図 8.1-18 : The Sweater

また、サステイナブル素材としてのアパレル分野での活用の一環として、YUIMA NAKAZATO ブランドを展開している中里唯馬氏とのコラボレーションにより、パリファッションウィークへの出展を行った。(図 8.1-19~22)。当社が開発した人工構造タンパク質素材を使い、立体的なテクスチャーや造形を生み出すテキスタイル技術であるバイオスモッキング (Biosmocking) を開発し、パリファッションウィークで発表した衣服に適用した。



図 8.1-19 : 中里唯馬氏

※ バイオスマッキング (Biosmocking)

YUIMA NAKAZATO のために特別に設計された当社開発の構造タンパク質で作られたテキスタイルの超収縮（形状変容）する特徴を、デジタルファブリケーションにより精密にコントロールすることで、生地の上に 3 次元のテクスチャーを作り出すことができるテキスタイル技術。研究を重ねた結果、2020 年 1 月のコレクションでは収縮をコントロールする技術の精度が飛躍的に向上し、表面のテクスチャーを作り出すだけでなく、生地自体を自由に変容させることができるまでになり、現在もさらなる進化を続けている。生地に印刷された無数の長方形一つ一つに、「体に沿わせる」「体から離れる」など様々な指示がプログラムされており、その指示通りに生地が反応、自己組織化することで、衣服の立体造形が生み出される。



図 8.1-20 : Paris Fashion Week 'BIRTH' Couture a/w 2019-2020

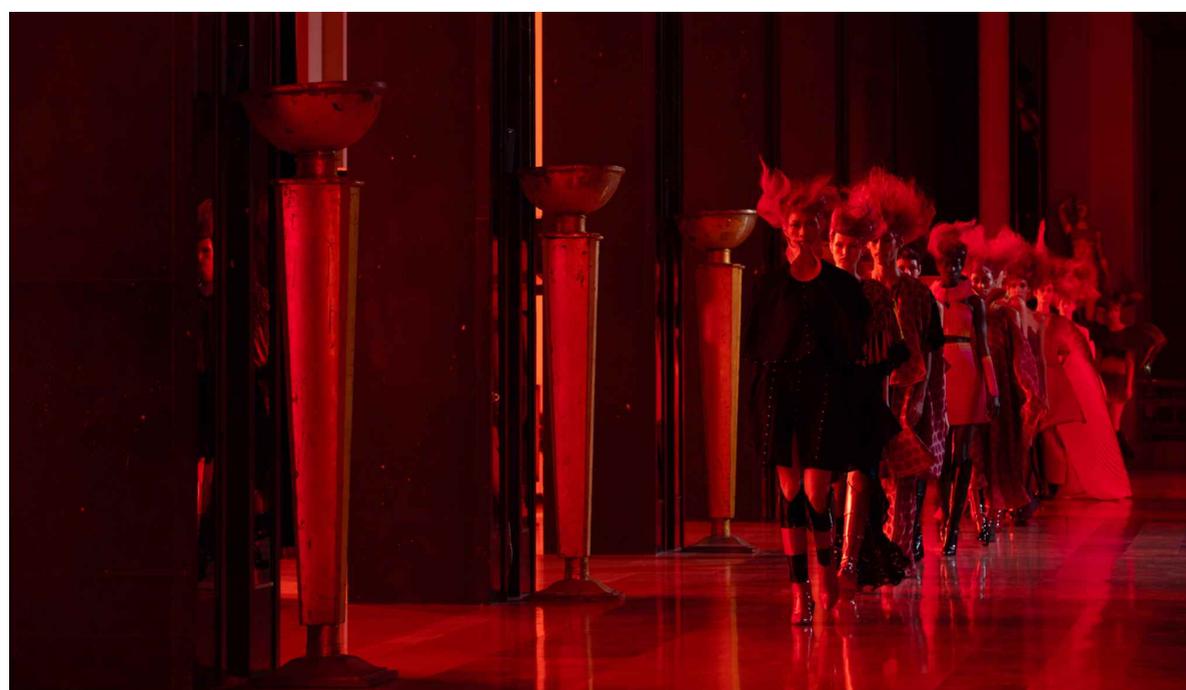


図 8.1-21 : Paris Fashion Week 'COSMOS' Couture s/s 2020



図 8.1-22 : Paris Fashion Week ‘ATLAS’ Couture s/s 2021

⑤ 海外における量産プラントの建設

人工構造タンパク質素材の普及に向けて、現在、量産プラントの建設を進めている。タイランドに完成したプラントは、2021 年中の稼働を予定しており、フル稼働時には年間数百トンの人工構造タンパク質原末を生産できる見込みである（図 8.1-23）。また、更なる大規模生産に向けて、米国での生産拠点構築についても準備を進めている。



図 8.1-23 : タイランドに完成した構造タンパク質の量産プラント

## 8.2：市場分析の視点

本事業では海洋マイクロプラスチック問題の一因となっているマイクロビーズと、マイクロファイバーを発生させるアクリル繊維を代替することを目的として、タンパク質素材開発を行っている。

海洋放出されるマイクロプラスチックは、元々マイクロサイズで製造された一次的マイクロプラスチックと、大きなサイズで製造されたプラスチックが自然環境中で破碎・細分化した結果発生する二次的マイクロプラスチックに整理することが一般的である。

マイクロビーズは一次的マイクロプラスチックの代表例であり、アクリル繊維は洗濯した際に大量のマイクロプラスチックを発生させるため、海洋マイクロプラスチックにおける主要な発生源とされる素材である。

本章では世にあるマイクロビーズとアクリル繊維製品の環境に対する影響を評価し、より優先的に代替すべき製品の市場を分析していく。そして人工タンパク質素材がまだ製造原価の高い新素材である現状を踏まえ、人工タンパク質製品が初期に参入・代替を狙いやすい高付加価値な製品の市場を検討していく。

表 8.2-1 市場分析の視点

	本事業の分析対象	海洋プラスチック問題への マイクロプラスチックの影響
一次的マイクロプラスチック	● マイクロビーズ	<ul style="list-style-type: none"> <li>● マイクロビーズを含む製品を使用する間、または廃棄する際に、マイクロビーズが未処理のまま下水道など環境中に排出される。</li> <li>● 下水処理場では微小なマイクロビーズを回収できず、河川放流された水と共に海洋に至る。</li> </ul>
二次的マイクロプラスチック	● アクリル繊維	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 服など合成繊維製品から洗濯等を通じてマイクロファイバーが排出される。合成繊維由来のマイクロプラスチックは、環境中で大きな割合を占めている。</li> <li>● 服素材となる代表的な合成繊維（ポリエステル、ナイロン、アクリル）の中でも、服あたりの発生量が一番多い繊維がアクリルとされる。</li> </ul>

第1に、一次的マイクロプラスチック及び二次的マイクロプラスチックについて、その排出量が多い製品の市場規模をマクロデータから調査する。製品や素材などの生産量データから規模的に大きな市場を特定するだけでなく、製品や素材別にマイクロプラスチックの放出しやすさを定性的に調べ、環境負荷の天から優先的に対処すべき市場を絞り込んでいく。

第2に、候補となった製品や素材グループの価格情報を調査する。そしてより高価格な製品や素材を人工タンパク質を使って代替する優先候補として仮定する。

第3に、代替する優先候補となった製品や素材グループについて、競合となる製品や素材の特徴をより詳細に分析して、人工タンパク質が競合製品に対して持つべき比較優位明らかにする。実際に人工タンパク質素材のサンプルを準備し、その素材を使って製品を製造する企業の意見をヒアリングすることで、本事業を事業化していくための具体的な開発指針を得ることを目標としていく。

### 8.3：分析すべきマイクロビーズ

本事業が狙う市場は、海洋プラスチック問題を引き起こす可能性のあるアクリルなどのポリマーである。これらの素材は、化粧品や洗剤などのライフサイエンス分野だけでなく、自動車、エレクトロニクス、建築といった多様な産業において利用されている。

化粧品や洗剤等に含まれるマイクロビーズと海洋プラスチック問題の関係について消費者の関心が高まる中、産業用途の微粉体を製造する企業も、代替マイクロビーズの生産を進めている。そうした代替マイクロビーズは生分解性をもつセルロース系のビーズと、生分解性はないもののマイクロプラスチックの海洋流出は発生しないシリカ等の汎用無機素材等ビーズや超微粒子酸化チタンなどの金属酸化物ビーズに分けられる。

本事業検討にあたっては、代替対象となるポリマーマイクロビーズだけでなく、競合となる代替マイクロビーズも合わせて分析し、市場の棲み分けを前提とした事業化の方法を考えていく。

表 8.3-1 マイクロビーズの種類

素材分類	具体的なマイクロビーズ素材
ポリマー	● アクリル、シリコン、ポリウレタン、フッ素樹脂（低分子量 PTFE）、超高分子量ポリエチレン、ポリアミド、その他熱可塑性微粒子（PS、PE、PES、PEEK、PPS、PAI）、その他熱硬化性樹脂微粒子（フェノール、ベンゾグアナミン・メラミン、全芳香族ポリエステル、PI）、高吸水性樹脂
セルロース	● セルロース、セルロースナノファイバー
汎用無機	● シリカ（結晶・溶融）、フェームドシリカ、湿式シリカ、高純度コロイダルシリカ、炭酸カルシウム、タルク、ゼオライト、活性炭、水酸化アルミニウム、高純度マグネシウム系化合物
金属酸化物	● 超微粒子酸化チタン、高純度酸化チタン、光触媒酸化チタン、超微粒子酸化亜鉛、酸化セリウム（研磨材用）
金属	● アルミニウム粉、ニッケル超微粉、銀粉、銅粉・銅超微粉、チタン粉、鉄粉・鉄系合金粉
セラミックス	● アルミナ、ジルコニア（湿式法）、窒化アルミニウム、窒化ケイ素、窒化ホウ素、炭化ケイ素、チタン酸バリウム
その他	● カーボンナノチューブ

出典：富士キメラ総研『2020年 微粉体市場の現状と将来展望』より作成

第1に、マイクロプラスチックの排出量が多いマイクロビーズ製品の市場規模についてマクロデータから分析する。その前提として、まず海洋プラスチック問題を引き起こすポリマービーズが、どのような経緯で海洋プラスチック問題を引き起こすのか、用途別に整理する。

表 8.3-2 用途別のマイクロプラスチック流出プロセス

ポリマー用途	具体的用途例	マイクロプラスチック流出のプロセス	流出可能性
化粧品	ファンデーション(リキッド、パウダー)、フェイスパウダー、チーク、アイシャドウ、クリーム、ローション、口紅、ボディパウダー、クレンジングクリーム、せっけん	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 化粧品中に含まれるマイクロビーズが、化粧を落とした時に下水に放出される。</li> <li>● 下水処理場では微小なマイクロビーズを回収できず、河川放流された水と共に海洋に至る。</li> </ul>	高
塗料・コーティング	塗料、インキ、接着剤、各種バインダー、家電製品・建材のつや出し、着色・触感付与、看板、ポスター、パッケージ、雑誌	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 直射日光や摩擦にさらされる塗料が紫外線や経年劣化によって剥落する。</li> <li>● 塗料片が雨などによって下水に放出され、下水処理場で回収されないマイクロビーズが最終的に海に至る。</li> </ul>	高
樹脂・ゴム添加剤	OA 機器部品、電気・電子部品、軸受、歯車、カム、家庭用品	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 軸受や歯車が摩耗し、マイクロビーズが排出される。</li> <li>● ダストが雨などによって下水に放出され、下水処理場で回収されないマイクロビーズが最終的に海に至る。</li> </ul>	高
自動車部品	自動車用表皮材、インストルメントパネル、コンソールボックス、ドアノブ、シフトノブ、他	<ul style="list-style-type: none"> <li>● シートなどの表皮剤が摩擦や経年劣化などで剥離して断片化し、環境中に排出される。</li> <li>● ダストが雨などによって下水に放出され、下水処理場で回収されないマイクロビーズが最終的に海に至る。</li> </ul>	並
拡散材	拡散シート、照明カバー、反射シート、拡散板、AG フィルム、リアプロ用スクリーン	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 経年劣化により表面の素材やフィルムが剥離して断片化し、環境中に排出される。</li> </ul>	低

マイクロビーズの環境への流出の経緯は製品ごとに異なるため、マイクロビーズ製品の各生産量を比較するだけでは、マイクロプラスチックの排出源の最大のポリマーマイクロビーズを特定することはできない。一方で、製品別にライフサイクルでのマイクロビーズの排出量を比較した網羅的なデータを揃えることは困難である。そのため、上記のマイクロプラスチックの流出のプロセスから、マイクロプラスチックの流出量が多いと思われる製品を仮定する。

#### 製品そのものの排出

マイクロビーズを含む化粧品は、洗い流された場合は、そのまま下水を通じて環境に放出される可能性が高い。

#### 製品が摩擦により微細化されて排出

マイクロビーズを含む歯車や軸受は、使用段階での摩擦により、微粒子が発生する。粉塵回収機を持たない設備の場合は、マイクロビーズを含む微粒子は大気中に放出される。その後地上に溜まったマイクロビーズが雨などで下水配管に入り、最終的に海に至る。

#### 製品が紫外線などにより経年劣化が加速することで微細化して排出

経年劣化により、製品表面やその上の塗料などが微細化し、マイクロビーズを含んだ状態で排出

される。劣化とマイクロビーズ排出の程度は製品ごとに異なるが、直射日光に常にさらされる塗料などは紫外線劣化が早いと想定できる。また、摩擦とあわせて劣化が進むカーシートなども、外的刺激のない製品に比べて表面の劣化が早く進む可能性がある。

以上のパターンに該当する製品は、マイクロビーズ排出量が多いと想定し、その生産量を代替すべき市場規模として重視する、一方で、熱や光、摩擦や過剰な水分などの使用環境上の刺激が少ない製品は、ポリマーマイクロビーズが含まれていても、劣化による排出はそれほど多くなならない可能性が高い。そのため、そうした製品は生産量は多くても、環境へのインパクトが評価しきれないため、最初に代替すべき市場としての緊急性は低いと考える。

#### 8.4：事業化すべきマイクロビーズの絞り込み（生産量分析）

マイクロビーズの生産量については、素材別、また製品用途別の生産量のデータが利用できる。ここ数年の間にマイクロプラスチック問題に対する社会的関心は高まり、化粧品用途のマイクロビーズ利用規制なども自主的な取り組みも含めて始まっている。

「表 8.4-1 マイクロビーズの生産量」の中で 2015 年と 2019 年のポリマーマイクロビーズの生産量について比較すると、アクリルマイクロビーズの生産量は若干減少しているが、それ以外のポリマーマイクロビーズの生産量はいずれも増加している。

アクリルマイクロビーズの減少の要因は、化粧品用途向けの需要が、特にヨーロッパ市場において縮小していることが一因である。その意味で、規制の強化によってポリマーマイクロビーズ問題の解決の目処が立っている市場は一定程度存在する。

しかし、化粧品用途のマイクロビーズにおいて、アクリルビーズは低価格品向けであり、高価格品向けに使われるその他のマイクロビーズの需要は減少していない。こうした価格帯の分析は次項以下で行うが、同じ化粧品でも製品カテゴリーごとに求められるマイクロビーズの物性が異なり、代替が進んでいない現状がある。

それ以外の需要が増加しているポリマーマイクロビーズの生産量を俯瞰すると、主に紙おむつや生理用品に利用される高級水性樹脂、塗料や樹脂・ゴム添加剤として使われるフッ素樹脂（低分子量 PTFE）、塗料などに使われるポリウレタンが挙げられる。

紙おむつや生理用品など衛生用品に使われる高級水性樹脂は、燃えるゴミとして適切に回収されて処理されていけば、環境中への放出は限定的と考えられる。

フッ素樹脂（低分子量 PTFE）は、軸受や歯車、塗料に使われる場合は、環境中に放出されるはずである。

ポリウレタンは、多くは自動車用表皮材（インストルメントパネル、コンソールボックス、ドアノブ、シフトノブ）等に使われ、これらは摩擦により多少は環境中に排出される可能性はあるが、より可能性があるのは塗料用途で用いられた時と思われる。

以上の通り、生産量の数字からだけでは、マイクロプラスチックの排出量が多いために優先して代替すべき製品を絞りきれない。「製品そのものの排出」「製品が摩擦により微細化されて排出」「製品が紫外線などにより経年劣化が加速することで微細化して排出」といったカテゴリーに該当する製品を優先して代替すべきマイクロビーズの市場規模として仮定する。

表 8.4-1 マイクロピーズの生産量 (単位：t/年)

種類	エレクトロニクス	化学・工業・産業	自動車	建築・構造物	環境浄化	ライフサイエンス	その他	2019年累計	2015年累計
アクリル	3,800	420	-	710	-	970	-	5,900	6,350
シリコン	980	190	-	-	-	620	-	1,790	1,750
ポリウレタン	-	320	7,650	-	-	280	-	8,250	4,390
フッ素樹脂 (低分子量PTFE)	1,100	3,600	2,300	7,400	-	-	-	14,400	13,200
超高分子量ポリエチレン	-	560	400	-	100	35	-	1,095	1,050
ポリアミド	-	2,300	-	20	-	235	-	2,555	145
その他 熱可塑性樹脂微粒子	70	3,068	-	10	-	30	386	3,564	2,963
その他 熱硬化樹脂微粒子	490	2,625	210	-	-	-	-	3,325	2,975
高吸収性樹脂	-	-	-	僅少	-	2,930,000	120,000	3,050,000	2,330,000

出典：富士キメラ総研『2016年 微粉体市場の現状と将来展望』『2020年 微粉体市場の現状と将来展望』より作成

## 8.5：事業化すべきマイクロビーズの絞り込み（価格分析）

化粧品、塗料・コーティング材、摺動部品に使われる樹脂・ゴム添加剤、摩擦材に使われる自動車部品を代替すべき市場としたが、新素材である人工タンパク質が初期段階で代替できる市場は限られる。初期段階で事業化すべき製品を絞り込むため、より高価格であることが確認できる製品や素材を、優先候補と仮定する。

前項でマイクロプラスチックを放出しやすいと想定した製品の多くは、相対的に高価格帯に位置付けられるものが多い。まずはこれらの製品を人工タンパク質素材で代替していくことを考える。

表 8.5-1 種類別の価格情報（ポリマー）

品目名	種類	価格帯(円/kg)	
ポリマー	アクリル	化粧品用	2,000 ~ 5,000
		塗料・インク用	500 ~ 1,500
		フィルム用	1,500 ~ 4,000
		拡散剤用	1,000 ~ 1,500
	シリコーン	化粧品用	6,000 ~ 10,000
		拡散剤用	3,000 ~ 4,000
	ポリウレタン	化粧品用	5,000 ~ 11,000
		コーティング用	3,000 ~ 6,500
		スラッシュ成形用	1,000 ~ 2,300
	フッ素樹脂 (低分子量PTFE)	重合品	3,000 ~ 4,000
		再生品	1,000 ~ 1,500
	超高分子量ポリエチレン	20μm ~ 30μm	1,500 ~ 2,500
		10μm (化粧品、塗料、対摩耗性ゴム添加剤)	5,000 ~ 7,000
	ポリアミド	PA (化粧品、3D造形)	10,000 ~ 15,000
	その他 熱可塑性樹脂微粒子	PE (化粧品用)	4,000 ~ 6,000
		PE (その他)	2,000 ~ 4,000
		PS (ERP添加剤)	500 ~ 1,100
		PS (その他)	2,600 ~ 3,000
		PES (CFRP添加剤用)	4,000 ~ 6,000
		PEEK (金属コーティング用)	14,000 ~ 18,000
		PPS (メッシュ品)	2,000 ~ 3,000
		PPS (破砕品)	3,000 ~ 4,000
		PAI (コーティング材)	14,000前後
	その他 熱硬化性樹脂微粒子	フェノール (熱溶融タイプ)	1,000 ~ 2,500
		フェノール (有機フィラータイプ)	1,000 ~ 2,500
		フェノール/アモルファスカーボンタイプ (電極材用など)	5,000 ~ 8,000
		ベンゾクアナミン・メラミン/ベンゾクア ナミンメラミンベース (拡散材、塗料・つや消し材用など)	2,500 ~ 10,000
ベンゾクアナミン・メラミン/メラミン樹 脂 (拡散材、塗料・つや消し材用など)		6,000 ~ 11,000	
全芳香族ポリエステル(航空用摺動部品用)		10,000前後	
PI(摺動部品用)		20,000 ~ 50,000	
高分水性樹脂	衛生材材料	200 ~ 350	
	その他	500 ~ 1,000	

出典：富士キメラ総研『2020年 微粉体市場の現状と将来展望』より作成

## 8.6：事業化すべきマイクロビーズの絞り込み（競合分析）

消費者意識が高まる現在、各ブランドのマイクロビーズへの需要は変化している。実際、化粧品用途のアクリルビーズの需要は減少している。マイクロプラスチックを放出しやすく相対的に高価格な製品・素材グループが分かったとしても、それとすでにある代替マイクロビーズの市場の棲み分けを考慮しない限り、本事業で取り組むべき本当の事業規模は見えてこない。

前項までで優先すべき論拠が積み上がっている化粧品向けポリマーマイクロビーズについて、現在代替ビーズとして注目されているものが、シリカ、セルロース、超微粒子酸化チタンビーズである。これらのマイクロビーズの化粧品用途での生産量や価格帯も確認する必要がある。

代替ビーズの中で、各社で採用が進んでいる素材はシリカである。マイクロプラスチック問題を重視する本事業において、まず気になる競合製品はむしろ生分解性を特徴とするセルロースビーズの方であるが、この採用はシリカに比べて進んでいない。その理由は、海洋プラスチック問題を意識してウレタンマイクロビーズの使用を控える企業も、環境性だけを重視してセルロースビーズに転換するのではなく、まずは最低限のマイクロプラスチック問題を回避しつつ素材として安い合成球状シリカの採用を進めているからである。

表 8.6-1 代替マイクロビーズの価格情報

品目名		種類	価格帯(円/kg)
セルロース	セルロース	セルロース	5,000 ~ 20,000
	セルロースナノファイバー	セルロースナノファイバー	2,000 ~ 5,000
汎用無機	シリカ（結晶・溶融）	合成球状シリカ	700 ~ 1,000
		タイヤ用	100 ~ 200
	湿式シリカ	ゴム用	200 ~ 350
		歯磨き粉用	150 ~ 250
		塗料用	500 ~ 1,000
ゼオライト	合成（洗剤助剤）	100 ~ 130	
金属酸化物	超微粒子チタン	化粧品用	3,000 ~ 6,000
		塗料用	2,500 ~ 4,000
		トナー用・特殊品	8,000 ~ 10,000

出典：富士キメラ総研『2020年 微粉体市場の現状と将来展望』より作成

一方でアクリルビーズより高価格帯のポリウレタン、ポリアミド等の化粧品用途のマイクロビーズは、それほどシリカなどの代替ビーズに切り替わっていない。その理由は化粧品に求められるマイクロビーズの品質・物性である。化粧品のOEM事業を手がけ、化粧品ブランドのマイクロビーズの採用動向について詳しい企業にヒアリングを実施した

ところ、代替マイクロビーズは硬いものばかりであり、特に高価格帯の化粧品については肌触りに悪影響をもたらすことから代替が遅れていることが確認できた。

低価格帯の化粧品に用いられるアクリルと異なり、ポリウレタンは粒子が柔らかいため肌触りの良いファンデーションなどを作るのに欠かせない。ポリアミドも、肌触りの良い高級品用途に好まれており、代替は進んでいない。

代替ビーズの中には、超微粒子酸化チタンビーズの紫外線吸収効果のように肌触りとは異なる付加価値を有するものもあるが、それなりに高価格であり、最も重要な肌触りに影響する硬さの問題は残ることから、本格的な普及には至っていないようである。

表 8.6-1 代替マイクロビーズの特徴と人工タンパク質による改善の方向性

	代替マイクロビーズの化粧品用途での実態	人工タンパク質ビーズ開発の方向性
シリカビーズ	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 真球に整形でき、ファンデーションなどの滑りをよくする効果は高い。</li> <li>● 粒子が硬いために、肌触りが悪化する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 人工タンパク質の結晶化度のコントロール、高い吸湿性の活用により、ソフトな触感を出す。</li> <li>● 真球化、分球による粒度調整により、他素材に匹敵する均一な真球を作る。</li> <li>● 従来品と同等の品質に加えて、生分解性を付加価値として訴求する。</li> <li>● 紫外線吸収効果など、更なる高機能化の研究を進める。</li> </ul>
セルロースビーズ	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 生分解性を訴求できる。</li> <li>* その他はシリカ同様</li> </ul>	
酸化チタンビーズ	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 紫外線吸収効果がある。</li> <li>* その他はシリカ同様</li> </ul>	

出典：化粧品 OEM 企業に対する弊社ヒアリング内容より作成

こうした化粧品用途の代替マイクロビーズの苦戦状況を踏まえると、人工タンパク質素材が代替マイクロビーズにはないソフトな触感、生分解性、紫外線吸収効果を実現できれば、生分解性という強みも含めて採用が加速する可能性が高い。事実、化粧品 OEM 企業もその目線から本事業に協力してくれている。

こうした機能が元々多くは期待されていない低価格帯むけのアクリルビーズ市場の代替については、安いシリカ等のビーズで最低限の機能要求は満たせるため、人工タンパク質素材は既存の代替マイクロビーズと市場を棲み分けていくことになるだろう。

## 8.7：2次的マイクロプラスチックの発生源

本事業では、2次的マイクロプラスチックの中から海洋プラスチック問題への影響が大きい素材として、アクリル繊維を取り上げている。その根拠となる想定は、第1に、2次的マイクロプラスチックの最大の発生源が合成繊維であるということ、第2にポリエステルやナイロン、アクリルといった代表的な合成繊維のうち、洗濯によりマイクロプラスチックを発生させやすい繊維がアクリル繊維であることである。この仮説に至る説明のため、第1、第2の想定について記述する。

第1の2次的マイクロプラスチックの発生源については研究途上であり、正確なデータはわかっていない。IUCN はプラスチックの製造、プラスチック製品の製造、製品の使用、製品のメンテナンス、製品の廃棄、プラスチックのリサイクルの6段階で発生するマイクロプラスチックの量を推計するモデルを作り、その発生源別の割合を推計している。

表 8.7-1 海洋中のマイクロプラスチックの発生源

マイクロプラスチックの発生源	概要	比率
合成繊維	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 家庭もしくは事業所で合成繊維を洗濯した際に、繊維の抜け落ちや摩擦によって発生する。</li> <li>● その後下水を通り、下水処理場で処理されるが、そのサイズゆえに処理場で回収されず、河川に放流される。</li> </ul>	35%
タイヤ	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 道路との摩擦により、タイヤに使われる天然/合成ゴムと添加物がダストになる。</li> <li>● タイヤダストは風、または雨によって流され、最終的に海に到達する。</li> </ul>	28%
シティダスト	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 様々な製品の摩耗（靴底、調理関連道具の摩耗等）でダストが発生する。</li> <li>● 都市インフラの摩耗（港湾、マリーナ、ビルの塗装、人工芝等）でダストが発生する。</li> </ul>	24%
道路舗装面の塗装・標識	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 道路の建設時と補修時に発生する。</li> <li>● 塗料、サーモプラスチック、ポリマーテープ、樹脂などからなる道路の塗装や標識が、車との摩擦によって剥離する。</li> <li>● ダストが風、または雨によって流され、最終的に海に到達する。</li> </ul>	7%
塗料（船）	<ul style="list-style-type: none"> <li>● サビ止め、フジツボ付着防止剤を含む塗装（船体、上部構造、甲板上の設備）が海洋に剥落する。</li> </ul>	3.7%
パーソナルケア用品	<ul style="list-style-type: none"> <li>● プラスチックマイクロビーズが添加されたパーソナルケア用品や化粧品が下水に流される。</li> <li>● 下水処理場で処理されるが、そのサイズゆえに処理場で回収されず、河川に放流される。</li> </ul>	2%
プラスチックペレット	<ul style="list-style-type: none"> <li>● プラスチック製品の製造、加工、輸送、リサイクルなどの際、2-5mmサイズのペレット（1次的マイクロプラスチック）がこぼれることで発生する。</li> </ul>	0.3%

出典：International Union for Conservation of Nature, “Primary Microplastics in the Oceans”より作成

IUCN の調査結果を信じる限り、合成繊維対策がもっとも優先すべき 2 次的マイクロプラスチック対策となる。タイヤダストやシティダストの説明は、前項で分析した添加剤として用いられるマイクロビーズを含めて、基材となるプラスチックそのものが摩擦や劣化により微粒子化されて排出される状況を教えてくれる。

だが、2 次的マイクロプラスチックの発生源を考えた場合、IUCN が低減するもの以外にも、海上や海中を漂う不適切に廃棄されたプラスチックゴミが日光等で分解されてマイクロプラスチック化していく現象も忘れることはできない。しかし、この発生源について、IUCN には記載がない。ICUN がこの不法投棄ゴミをマイクロプラスチックの発生源に加えていない理由は、ICUN の「1 次的」「2 次的」マイクロプラスチックの定義が問題となっている。

本事業においては、元々マイクロサイズで製造された一次的マイクロプラスチックと、大きなサイズで製造されたプラスチックが、自然環境中で破砕・細分化した結果発生する二次的マイクロプラスチックとして整理している。そのため、パーソナルケア用品に含まれるマイクロビーズは 1 次的マイクロプラスチックであり、合成繊維でできたアパレル製品を洗濯した際に発生するダストは 2 次的マイクロプラスチックとして整理される。

一方で、ICUN のレポートは「Primary Microplastics in the Oceans」という名称の通り、両者を一次的マイクロプラスチックとして定義している。これは即ち、元々マイクロサイズで製造されたものと、製品の通常のライフサイクルの中で摩擦や摩耗によって発生するダストを一次的マイクロプラスチックと捉えている。この整理の上で、海洋に不適切に投棄されたプラスチックゴミが劣化することで生み出すマイクロプラスチックは製品の通常のライフサイクルから外れており、ICUN の定義する一次的マイクロプラスチックの発生源には含まれなくなるのである。

本事業は、海洋プラスチック問題を引き起こす主要な原因となる製品を人工タンパク質素材で代替していくことを目的としている。そのため、不適切に投棄されたプラスチックゴミは本事業で定義する「2 次的マイクロプラスチック」の主要発生源に加えるべきである。

しかし、ICUN の 7 種類の発生源の分類の中にも、不適切に投棄された海洋プラスチックゴミにも、当然ながら様々な種類の製品に由来する発生源が含まれる。そのため、海洋投棄されるプラスチックゴミの中から、もっとも深刻な海洋プラスチック問題を引き起こす製品を特定し、それを人工タンパク質素材で代替していく方針を立てることは難しい。

一般的に言われる 2 次的マイクロプラスチックの排出源は、魚網である。環境省は 2010 年～2016 年にかけて日本の 10 地点を調査し、プラスチック漂着ごみの種類別割合を調査した結果、重量比で 41.8%が魚網・ロープ類であった（環境省『海洋ごみをめぐる最近の動向』平成 30 年 9 月）。国連機関の UNEP と FAO の 2009 年の共同レポート『Abandoned, lost or otherwise discarded fishing gear』によれば、世界で毎年「紛失」する魚具は 64 万トンである。UNEP の定義する漂着・漂流ごみの中で、これらの魚具は全体の約 10%に及ぶ（UNEP, 2017. Marine pollution fact sheet. the Ocean Conference. United Nations）。研究によって様々であるが、二次的マイクロプラステ

ツクの排出源である漂着・漂流ごみは毎年約1千万トンに及び、魚具だけで50～100万トンを占めると仮定すると、2次的マイクロプラスチックの排出源の規模感を理解することができる。

定義上、これらの漂着・漂流ごみを加えて本事業が代替すべき「2次的マイクロプラスチック」の発生源とするが、事業上、初期から人工タンパク質素材で代替すべき優先市場とすることは難しい。漁具をはじめとする不適切に投棄されたプラスチックの漂着・漂流ごみの問題は深刻であるのは間違いない。しかしそれらの製品の製造企業に対して、製品が不法投棄されることを前提に、その素材の代替を提案することが難しいからである。それに対して、合成繊維やタイヤは通常の利用においてもマイクロプラスチックの発生源になることを根拠に、企業の社会的責任の見地から、新素材採用の提案をすることができる。

事業上の制約から、本事業で取り組むべき2次的マイクロプラスチックの排出源は、IUCNの想定に基づき、第1に合成繊維、第2にタイヤとする。

## 8.8：合成繊維におけるマイクロプラスチックの排出状況

第2に、ポリエステルやナイロン、アクリルといった代表的な合成繊維のうち、洗濯によりマイクロプラスチックを発生させやすい繊維がアクリル繊維であることを記述する。本事業ではその根拠を Imogen E. Napper & Richard C. Thompson 『Release of synthetic microplastic plastic fibres from domestic washing machines: Effects of fabric type and washing conditions』の研究成果から説明したい。この研究によれば、アクリル繊維の衣類 6kg を洗濯した場合、1回の洗濯で約 70 万本の化学繊維を放出する。これは綿-ポリエステル混合繊維の約5倍、ポリエステルの約 1.5 倍に相当するという分析である。

アクリル繊維がマイクロプラスチックの主要発生源となる背景には、繊維の機能以上に、合成繊維がどのような衣服として利用されるかということに関係がある。ウールに近い肌触りと高い保温性を持つアクリルは、セーターのような衣類や、防寒機能を重視したソックスやインナーに使われることが多い。それに対してポリエステルやナイロンの防寒性は高くなく、肌触りや耐久性をあげるための素材として主に採用される。マイクロプラスチックの排出源として関心が高まったフリースはポリエステル繊維で作られることも多いが、フリースもアクリルセーター同様に繊維が起毛している。そうした防寒のために起毛した合成繊維が洗濯の際の摩擦によってマイクロプラスチックの主要な排出源になると考えられる。なお、当社を目指す人工タンパク質素材がかさ高がある繊維を目指す背景には、そうして開発された繊維がマイクロプラスチックの排出源になるセーターやフリース、ソックスやインナーなど防寒着の素材として採用されてマイクロプラスチック排出削減に貢献できることを見越してのことである。

アクリルなどかさ高がある繊維が、2次的マイクロプラスチックの主要排出源として代替すべき市場であることは良しとして、環境に対する負荷をより量定に把握しておく。Imogen E. Napper & Richard C. Thompson の研究に戻ると、洗濯により放出されたアクリル繊維は、11.9~17.7 $\mu\text{m}$ 、長さにして5.0~7.8mmであった。このサイズのマイクロプラスチックが、洗濯機に取り付けるマイクロプラスチック流出防止ネットや下水処理場の濾過装置を抜けてどの程度の分量が海洋に至るかはいずれ追加の検証が必要であろう。

合成繊維衣類の洗濯によって排出されるマイクロプラスチックを重量ベースで把握した研究では、Niko L. Hartline et al 『Microfiber Masses Recovered from Conventional Machine Washing of New or Aged Garments』は実験期間中に0.3%強のマイクロプラスチックが放出されたという実験結果を示している。

衣類のライフサイクルを考えると、衣類の使用期間中における洗濯回数を考慮すれば、衣服重量に対して数%のマイクロプラスチックを放出することは想定できるだろう。つまり、毎年生産されるアクリルなどかさ高がある合成繊維の生産量に対して、数%の重量に相当するマイクロプラスチックが洗濯によって放出されると本事業では考える。

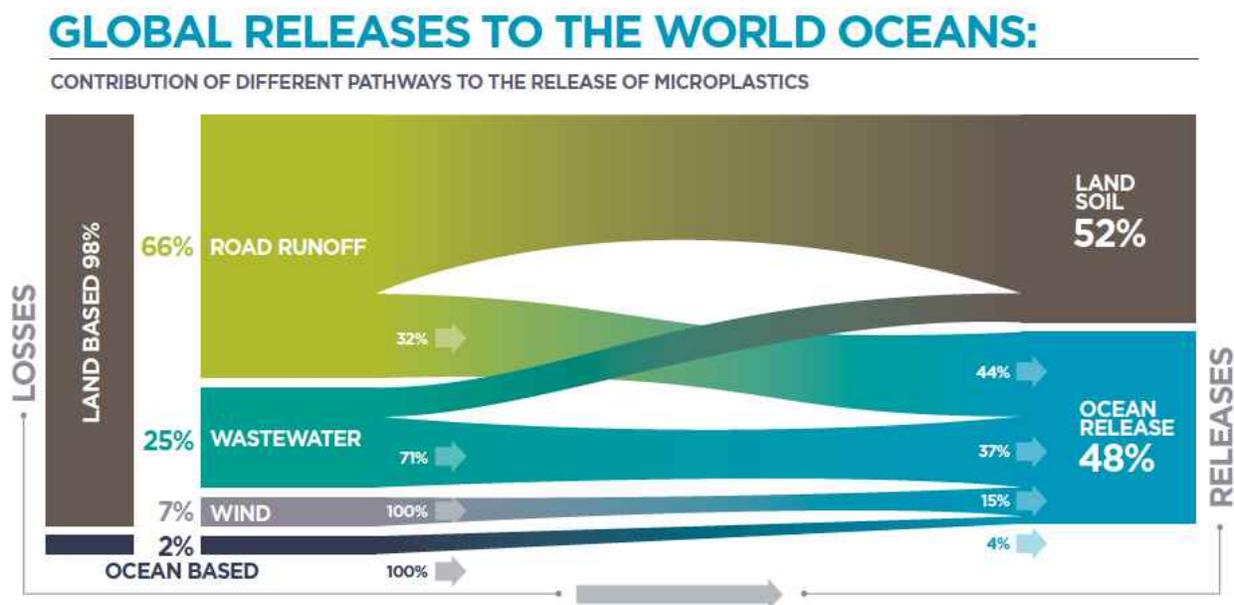
洗濯によって排出されたマイクロプラスチックの全量が環境中に放出されるかどうかについて考えるヒントが ICUN のレポートにある。それによると、下水処理場でマイクロプラスチックは一定量が回収され、直接河川放流されてしまうわけではないが、巡り

巡って土壌に蓄積される可能性が示唆されている。

下水処理で発生する汚泥は、しばしば堆肥化されて一般市民に販売・提供されている。従来は汚泥由来の堆肥の質について、少なくともマイクロプラスチック問題の観点からは重視されていなかったから、その当時の判断を批判することはできない。だが、こうしたリサイクルの結果、マイクロプラスチックが土壌中に蓄積され、それを汚泥由来の堆肥を使って育てた野菜が吸収することで、最終的には人間の体内に取り込まれる可能性が指摘されて始めた(Lianzhen Li et al, Effective uptake of submicrometre plastics by crop plants via a crack-entry mode)。

IUCN も排水に入ったマイクロプラスチックが、一部は土壌に蓄積される流出経路について図示している。

図 8.8-1 マイクロプラスチックの流出経路



出典：International Union for Conservation of Nature, “Primary Microplastics in the Oceans“より抜粋

この可能性を考慮して本事業では、アクリルなどかさ高がある合成繊維が、2次的マイクロプラスチックを排出する量は、洗濯によって発生する全量、すなわち衣類重量に対して数%の重量という説を採用することにする。

## 8.9：高価格帯アパレル商品における合成繊維の利用状況

本事業では、2次的マイクロプラスチック問題を解決するために代替すべき市場として、まずアクリルなどかさ高がある合成繊維の衣類であることは論証できたが、実際の事業化によってその代替を進めることは、マイクロビーズの時に比べてはるかに難しい。その理由は、アパレル用途に使われるアクリル繊維、また起毛状態で使われるポリエステル繊維は安価であるため、新素材であり初期には製造原価が高い人工タンパク質繊維で代替するが経済的に難しいからである。

単純に「かさ高感のある」人工タンパク質素材を開発するだけでは、高級アクリル繊維製品市場を代替することは難しい。発色の良さを追求し、合成繊維に負けない極細紡糸技術を開発して保温性の良さや吸水発熱性能を持たせたり、抗菌消臭機能を追加するなどの開発が、現状の高付加価値アクリル繊維製品市場に参入するためには必要である。こうした研究は本事業における来年度の研究計画には含まれていないが、事業化を目指す上で長期的に考えていくべきテーマである。

当面は、「かさ高さ」の研究に集中する。アクリルをはじめとする合成繊維はこの機能で人工たんぱく質に優れ、また高付加価値品ほど更なる高度化を図っているため、その技術開発競争に勝つのは困難ではある。しかし毛足の長い起毛や極細繊維の層を作ることによって高機能化を追求している現在の高価格帯のアクリル繊維、一部のポリエステル繊維製品は、性質上、よりマイクロプラスチックを発生させやすい方向に進化していくと言える。高機能化で先行する合成繊維に負けない技術開発を続けることで、人工タンパク質繊維は最終的には生分解性によってマイクロプラスチック問題を解決するという比較優位をより強くできるはずである。

## 8.10：人工構造タンパク質素材の優位性

昨今、環境への影響の配慮による石油等の枯渇資源由来の素材からの脱却や、動物由来の素材の使用等に対する倫理的な意識の高まりを受け、人工構造タンパク質素材へのニーズが高まっている。具体的には「マイクロプラスチック問題」「二酸化炭素をはじめとした温室効果ガスの排出」の2点において、人工構造タンパク質素材の優位性が発揮できると考える。

### ① マイクロプラスチック問題

環境中に放出・残留する微小なプラスチック生態系及び人体に対して悪影響を及ぼすことが問題視されている（図 8.10-1, 2）。一般的には5ミリメートル以下のプラスチック片がマイクロプラスチックと定義されている。プラスチックは自然分解されないことから、環境中に放出されたプラスチックは小さくなくても微細な粒子として残ってしまうため、生物が体内に取り入れてしまうリスクが高く、その結果、健康被害を引き起こす可能性がある。また、ビニール袋等の大きなプラスチックゴミの場合は、海洋生物や鳥が誤って飲み込み、気管を塞いでしまう等の直接的な被害も多く報告されている。

上述のような問題に対して、欧州を中心として対策が進んでいる。特に2018年のG7シャルルボア・サミットでの「プラスチックの製造、使用、管理及び廃棄」に関する取り決めの憲章の承認を契機として、マイクロプラスチック問題への世界規模での対応の機運が高まっている（表 8.10-1）。日本においても、環境省・経済産業省等を中心に対応策がまとめられており、2020年からはレジ袋の有料化が実施される等、具体的な取り組みが始まっている（図 8.10-3）。

弊社では、マイクロプラスチック問題に対する解決策の1つとして、人工構造タンパク質素材を活用できると考えている。人工構造タンパク質は生分解性を有しているため、コンポスト等を使って分解することが可能であることに加え、万が一、環境中に放出してしまった場合でも自然分解される。弊社のラボにおいて、実際の海水を用いた生分解性試験においても、適切に分解されることを確認していることから、人工構造タンパク質素材の普及が進み、石油由来のプラスチックを代替することによって、環境中に残留するマイクロプラスチックを低減できることが期待できる。



図 8.10-1：海洋へのプラスチックゴミの流出



図 8.10-2：海洋及び沿岸に存在するプラスチックゴミ

表 8.10-1 : 国際会議における海洋プラスチックに関する動き

開催年・月	国際会議	海洋プラスチックに関する議題等
2016年1月	ダボス会議	2050年には海洋中のプラスチック量が魚の量を超えると試算
2016年5月	G7 エルマウ・サミット	首脳宣言において、海洋ごみが世界的な問題であることを認識 海洋ごみ問題に対処するための G7 行動計画を策定
2016年6月	G7 伊勢志摩・サミット	首脳宣言において、資源効率性及び 3R に関する取組が陸域を発生 源とする海洋ごみ、特にプラスチックの発生抑制及び削減に寄与す ることも認識しつつ、海洋ごみに対処することを再確認
2017年7月	G20 ハンブルグ・サミット	G20サミットで初めて海洋ごみを取り上げる海洋ごみに対するG20 行動計画の立ち上げに合意
2018年6月	G7 シャルルボワ・サミット	カナダ、欧州各国が海洋プラスチック憲章を承認
2019年1月	ダボス会議	安倍元首相による基調講演
2019年6月	G20 大阪・サミット	大阪ブルー・オーシャン・ビジョンを共有
2019年7月	G7 ハリファックス 環境・海洋・エネルギー大臣会合	G7 の海洋プラスチックゴミ問題に対する今後の取組をまとめた 「海洋プラスチックごみに対処するためのG7イノベーション チャレンジ」採択

※ 環境省 公開資料より抜粋





**レジ袋削減にご協力下さい**  
～レジ袋有料化のご協力をお願い～



海洋プラスチックごみ問題を含めた環境問題が深刻さを増しています。



政府では環境問題解決に向けて様々な施策を実施、検討しています。



“レジ袋削減”もその一環です。

できるだけ無駄なレジ袋を少なくし、環境問題解決の一步になるよう、皆様のご協力を継続たく、よろしくお願ひ申し上げます。

## レジ袋有料化 2020年7月1日スタート

ただし、前倒しで有料化することを推奨しています。  
 売値については各事業者様のご判断にお任せします。

環境性能が認められる以下の袋への転換にご協力をお願いします。

以下の3点については、法令に基づく有料化の対象とはなりません。あらゆるレジ袋を有料化することにより過剰な使用を抑制していくことが基本です。

**プラスチックのフィルム  
の厚さが50マイクロメートル以上のもの**

繰り返し使用が可能であることから、プラスチック製買物袋の過剰な使用抑制に寄与するためです



**海洋生分解性プラスチックの配合率が100%のもの**

微生物によって海洋で分解されるプラスチック製買物袋は、海洋プラスチックごみ問題対策に寄与するためです



**バイオマス素材の配合率が25%以上のもの**

植物由来がCO<sub>2</sub>量を減らさない素材であり、地球温暖化対策に寄与するためです



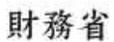
**消費者向け** レジ袋有料化お問合せ窓口  
☎0570-080180

**事業者向け** レジ袋有料化お問合せ窓口  
☎0570-000930

経済産業省  
レジ袋有料化に関するHP



[http://www.met.go.jp/press/2019/07/20190710\\_001.htm](http://www.met.go.jp/press/2019/07/20190710_001.htm)



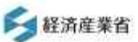




図 8.10-3 : 経済産業省によるレジ袋削減に関する周知  
(出典 : 経済産業省 website)

## ② 温室効果ガスの排出量低減

世界各国の経済の成長に伴い、工場の稼働やゴミの焼却、自動車の走行等から発生する温室効果ガス（二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素等）の排出量が増大し、地球温暖化や気候変動等の環境問題を引き起こしている。環境省の資料によると、2018年時点での世界のCO<sub>2</sub>排出量は335億トンとなっており、日本からの排出は10.8億トン（全体の約3.2%）となっている（図8.10-4）。

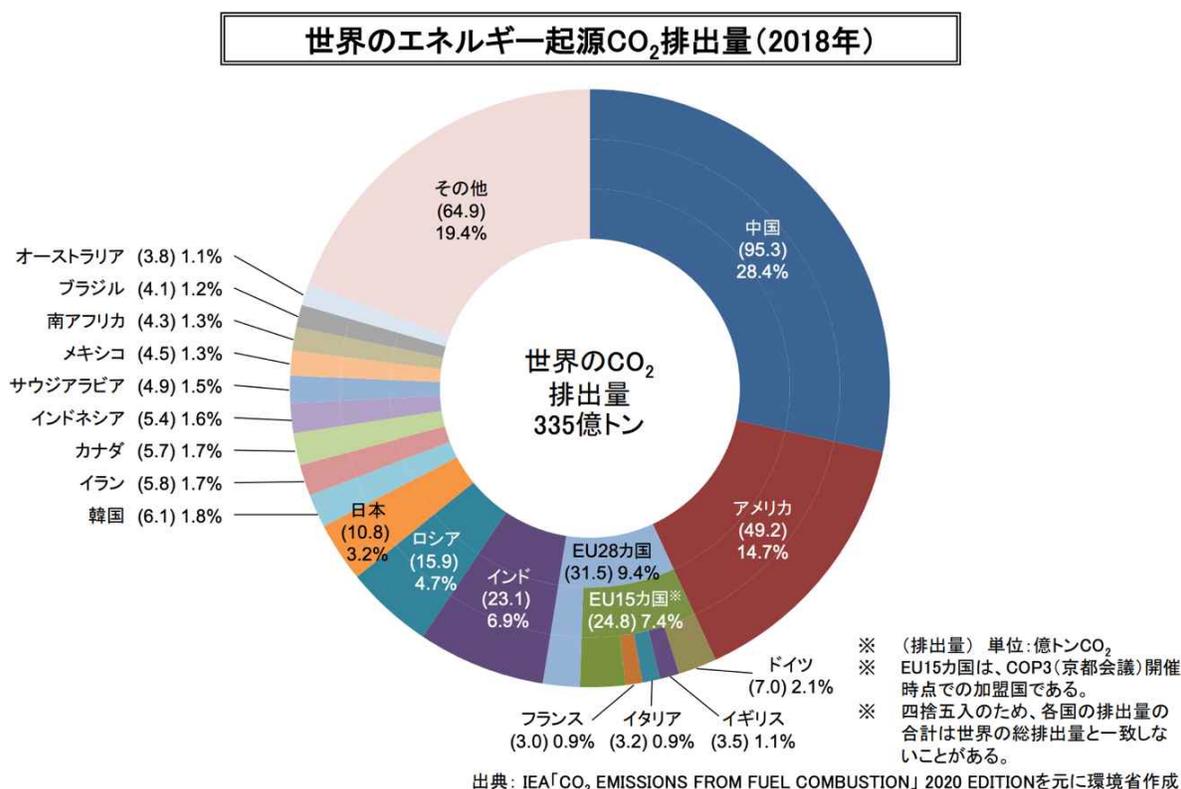


図 8.10-4 : 世界のエネルギー起源 CO<sub>2</sub> 排出量 (出典 : 環境省資料)

国連の IPCC (気候変動政府間パネル) において、温室効果ガスの影響を評価する指標の1つとして RCP (Representative Concentration Pathway : 代表的濃度経路) が採択されており、気温上昇に関する予測に用いられている。温室効果ガスの継続的な排出により、更なる温暖化が進行すると考えられているが、IPCC が評価した全ての排出シナリオにおいて、21世紀に渡って気温が上昇すると予測されている (図 8.10-5, 6)。

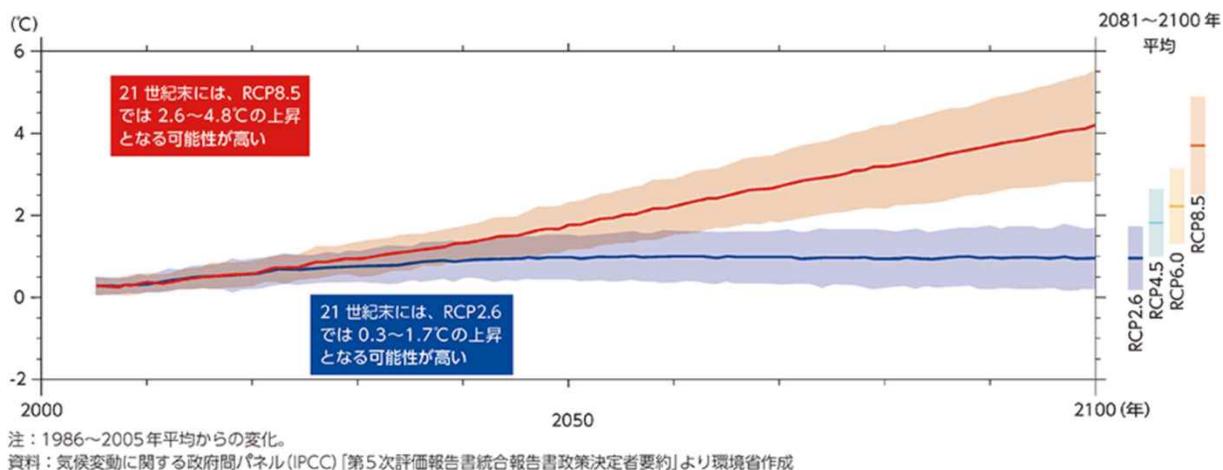


図 8.10-5：世界平均地上気温の変化（出典：環境省資料）

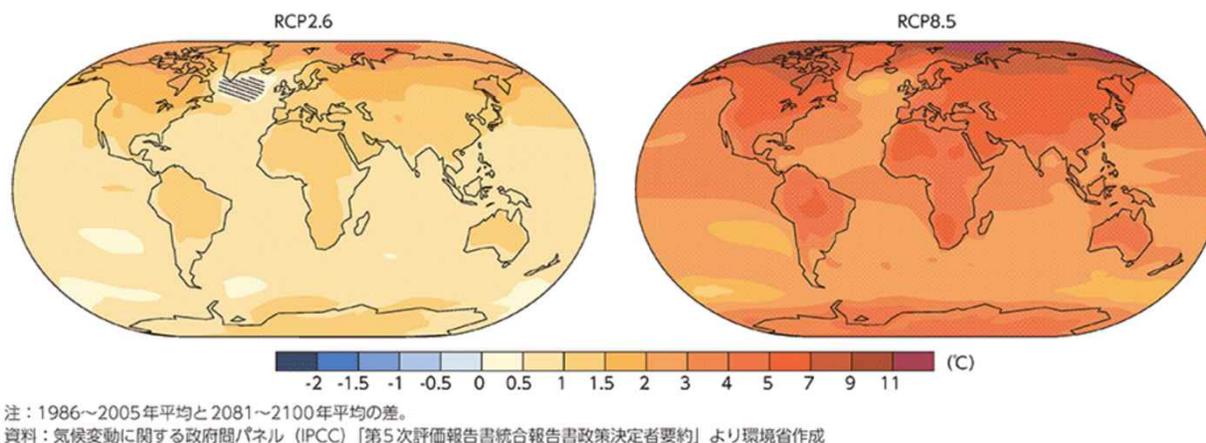
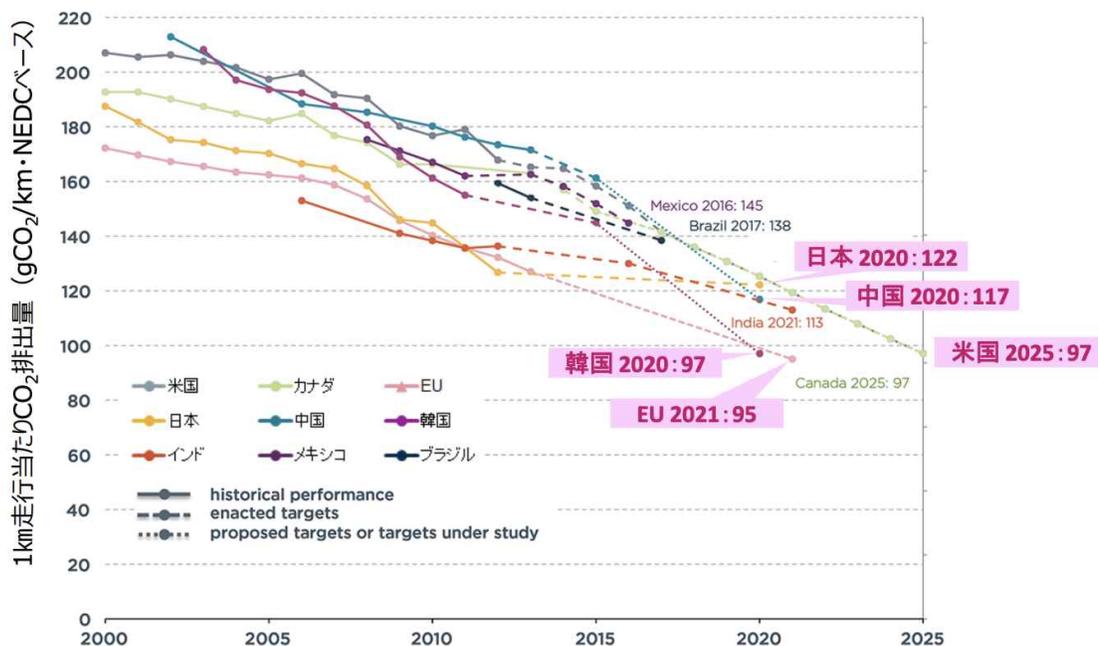


図 8.10-6：平均地上気温変化分布の変化（出典：環境省資料）

このような社会環境を受け、石油等の枯渇資源に依存した使い捨て型社会から、環境負荷の低い循環型社会へのシフトが求められており、特に自動車業界においては、世界各国で排出ガス規制が進む等、急激な変化が進んでいる（図 8.10-7）。具体的な規制としては、既にアメリカや EU で採用されている CAFE（Corporate Average Fuel Efficiency：企業別平均燃費基準）やカリフォルニア州における ZEV 規制（Zero

Emission Vehicle 規制)がある。CAFÉ では各自動車メーカーの出荷台数を加味した平均燃費が一定の基準値(2010年の目標値は 35.5mpg : 15.1km/L 相当)を満たすことが要求されている。ZEV 規制においては、各メーカーがカリフォルニア州で販売する自動車の内、排出ガスを出さない電気自動車や燃料電池車が一定の割合を占める必要がある。



(備考) ICCT (The International Council on Clean Transportation) が各国の目標値をNEDCテストサイクルベースでCO<sub>2</sub>換算したもの。日本は20.3km/L(2020年)、中国は6.9L/100km(2015年)、5L/100km(2020年・提案中)、米国は143gCO<sub>2</sub>/マイル。  
<http://www.theicct.org/blogs/staff/improving-conversions-between-passenger-vehicle-efficiency-standards>

図 8.10-7 : 主要国における CO<sub>2</sub> 排出目標 (出典 : 環境省資料)

そのような社会ニーズを受け、弊社ではこのような構造タンパク質の優位性に着目し、世界に先駆けて構造タンパク質の設計・合成プロセス及び大規模生産プロセスの開発に取り組むと同時に、研究開発テーマの1つとして構造タンパク質を使った複合材料の開発を進めている。CFRP等の複合材料に人工構造タンパク質繊維を添加することで、既存の複合材料の性能を大きく向上させることに成功したことから、人工構造タンパク質複合材の用途開発についても取り組んでいる。人工構造タンパク質複合材の用途は多岐に渡るが、その中でも自動車産業は、軽量化等を通じた燃費向上及び環境負荷の低減に対するニーズが大きく、人工構造タンパク質複合材の優位性を発揮できることが期待されている。自動車業界においては、軽量化による燃費向上を目指して、使用する部品を金属から樹脂に置き換えることが検討されているが、安全性や製造コストに課題があることから、樹脂化が進んでいない。このような現状に対して、人工構造タンパク質素材を自動車部品に適用することによって、これらの課題を解決すると共に、自動車の更なる性能向上及びエネルギー消費の低減に寄与できると考えている。

## 8.11：工業的に生産・利用されているタンパク質

洗剤用の酵素やアパレル向けのウール繊維等、既に工業的に利用されているタンパク質は数多く存在している。現在、これらのタンパク質の生産方法として、「微生物の利用」及び「哺乳類・昆虫類の利用」が採用されている。また、将来的な工業利用が期待されているタンパク質の生産手法として「生物を利用しない無細胞タンパク質合成系」に関する研究も盛んに行われている。

### 1. 微生物由来の産業用酵素

地球上に存在する微生物が持つ酵素（タンパク質）の中から有用な酵素を発見・量産することによって、工業的な利用が可能になっている。そのような酵素として代表的なのは洗剤用酵素であるが、パン等の発酵を伴う食品の生産工程やビールの醸造工程で利用されるもの、医薬品として利用されるもの等、その用途は多岐に渡る。

自然に存在するそのままの酵素を利用することもあるが、昨今では、それぞれの用途に合わせた形で酵素を最適化し、その機能性を高めることが多い。最適化を行うことを目的として、ランダム変異の導入等のゲノム改変によって人為的な多様性を作り出し、機能性や生産性の評価を通じて、目的に適った微生物及び酵素のセレクションを行う。このようにして選定された微生物は下図のフローで生産・製品化される。

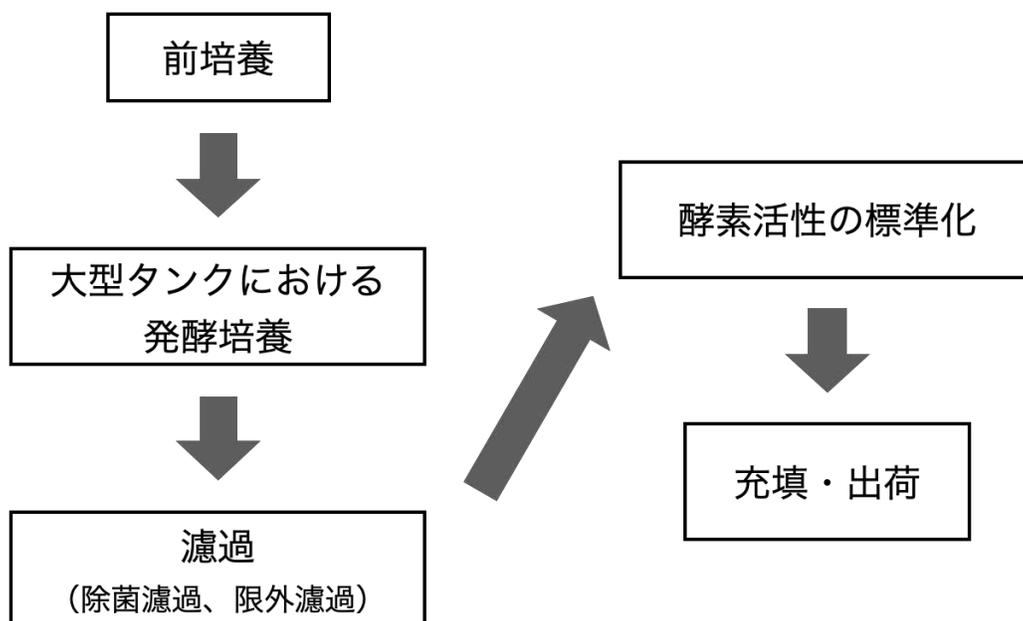


図 8.11-1：産業用酵素の生産プロセス

産業用酵素の一般的な生産プロセスにおいては、フラスコ等での前培養（小規模培養）において一定の数まで微生物を増殖させた後、栄養分、温度、酸素濃度等が管理された大型タンクにて大規模培養を行う。その後、増殖した微生物を回収し、濾過・精製を減ることによって、目的とする酵素以外の成分を取り除き、酵素の純度を高める。酵素活性の標準化を行った後に容器に充填され、出荷される。代表的な産業用酵素の用途及び機能について表 8.11-1 にまとめた。また、これらの酵素の生産に利用される微生物について表 8.11-2 に特徴及び用途を記載した。

表 8.11-1：各種酵素の用途・機能

酵素の種類	用途	機能
プロテアーゼ	洗剤	タンパク質性汚れの分解・除去
	食品	グルテン等の粘性向上、ガス成分の保持
アミラーゼ	洗剤	でんぷん性汚れの分解・除去
	食品	でんぷんの分解による微生物発酵の促進
リパーゼ	洗剤	油脂性汚れの分解・除去
セルラーゼ	洗剤	繊維中の汚れの除去
キシラナーゼ	製紙	パルプの漂白
プルラナーゼ	ビール醸造	アミロペクチンの分解（コクの向上）

表 8.11-2：各種酵素の生産に使用される微生物

微生物種	特徴
大腸菌	遺伝子発現の機構についてよく研究されているが、酵素の生産量に制約があること等から、医療用途等、付加価値の高い酵素の生産に利用される。
枯草菌	生産したタンパク質（酵素）を体外に分泌することに加え、安全性が高いことから、洗剤用酵素等の汎用的に利用される酵素の生産に使われる。
糸状菌	醸造工程において古くから利用されており、酒や味噌、醤油等を製造する際に使用される。

## 2. 哺乳類、昆虫類が生産する天然タンパク質繊維

羊から得られるウールや蚕が生産するシルク等、人類は動物由来の天然タンパク質繊維を利用してきた。天然繊維は防寒性や吸湿・吸水性、耐熱性等に優れていることから、主に衣類として利用されており、カシミアに代表される細繊維度の繊維は、肌触りも良いことから高級繊維として取引されている。現在、アパレル産業にて利用されている天然タンパク質繊維について表 8. 11-3 にまとめた。

表 8. 11-3 : アパレル向け天然獣毛繊維の直径・生産量

生物種	繊維の直径 ( $\mu\text{m}$ )	生産量 (t/年)
ビクーニャ	11 ~ 14	8
カシミア	14 ~ 16	6,500
アルパカ	19 ~ 23	4,000
ウール	16 ~ 24	1,000,000

代表的な天然タンパク質繊維としてウールの生産工程について記載する。ウールの生産工程は主に「選毛」「洗浄」「引き揃え」「紡績」「撚糸」に分かれている。「選毛工程」においては、太さや長さ等のデータの確認に加え、目視による確認を行い、不良品の除去及びランク分けが行われる。「洗浄工程」では繊維に付着している汚れや油を取り除き、白色のウール原糸を回収する。「引き揃え工程」においては、長さや太さを揃えた繊維を平行に並べ、巻き上げ「トップ」と呼ばれる中間材料を作成する。「紡績工程」において、スピンドルを用いて複数の繊維を紡ぎ、「撚糸工程」で撚りをかけることによって、紡績糸が出来上がる。その後、染色や生地加工等の工程を経て、アパレル製品として販売される。

### 3. 無細胞タンパク質合成系による生産

前述の2つの手法は微生物や哺乳類等の生物を利用してタンパク質を生産しているが、無細胞タンパク質合成系においては、生物を直接利用せず、大腸菌等の細胞内に存在する酵素や代謝物を使い、人工的にタンパク質を合成する。高純度なタンパク質が得られる一方で、取得できる量が少ないこと等から、実験目的で利用されることが多い。

## 8.12：人工タンパク質素材を手掛ける主要企業

現在、人工タンパク質素材産業は大きな注目を集めている産業であり、大学等のアカデミアによる研究だけでなく、世界各国で人工タンパク質に関連するベンチャー企業が立ち上がる等、実用化に向けた動きが加速している（図 8.12-1）。

図 8.12-1：人工タンパク質素材を手掛ける主要企業一覧

企業名	所在国	概要
Bolt Threads	アメリカ	<ul style="list-style-type: none"><li>・酵母を用いた人工タンパク質繊維「MICROSILK™」を開発</li><li>・マッシュルーム由来の天然タンパク質合成皮革「Mylo™」を発売</li></ul>
Modern Meadow	アメリカ	<ul style="list-style-type: none"><li>・酵母由来のコラーゲンを使ったタンパク質合成皮革「Zoa™」を開発</li><li>・2018年にドイツの化学メーカー Evonikとの共同開発を発表</li></ul>
Kraig Biocraft Laboratories	アメリカ	<ul style="list-style-type: none"><li>・遺伝子組み換え蚕が作るタンパク質繊維「Monster Silk™」を開発</li><li>・アメリカ国防総省等と共同開発を推進</li></ul>
AMSilk	ドイツ	<ul style="list-style-type: none"><li>・ミュンヘン工科大学発のベンチャー企業</li><li>・大腸菌を使って生産する人工タンパク質繊維「Biosteel™」を発表</li></ul>
SEEVIX	イスラエル	<ul style="list-style-type: none"><li>・人エクモ糸タンパク質繊維「SVX™」を発表</li><li>・2020年にスポーツ用品メーカー アシックスが出資を発表</li></ul>