令和３年度環境省委託業務

令和３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
（公開版）

令和４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ヵ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。タンパク質生産向上については、微生物発酵生産での生産性を23g/Lにまで高めた。タンパク質ビーズについては、量産に向けたプロセス検討を行い、目処づけができた。また得られたビーズの機能性評価も良好であった。タンパク質繊維については、3,000ホールノズルでの水系湿式紡糸のスケールアップを達成するとともに、アクリル繊維と同程度のかさ高性を持つ加工方法の開発に成功した。

■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, regarding the improvement of protein production, the productivity of microbial fermentation production was increased to 23 g / L. Regarding protein beads, we investigated the process for mass production and the functional evaluation of the obtained beads was also good. For protein fibers, we have achieved a scale-up of water-based wet spinning with a 3,000-hole nozzle, and succeeded in developing a processing method that is as bulky as acrylic fibers.

■目次

１：事業概要：5P

２：技術的課題の解決目標：9P

３：実施体制：23P

４：業務の実施スケジュール：24P

５：今年度の事業成果：25P
・５．１：開発成果まとめ：25P
・５．２：タンパク質生産性向上検討：26P
・５．３：ビーズ加工法の開発：53P
・５．４：ビーズの実用化開発：64P
・５．５：水系湿式紡糸法の確立：71P
・５．６：かさ高性向上繊維の開発：77P

６：来年度の事業目標：82P

７：ライフサイクルでの CO2 削減効果：83P

８：事業化の検討：86P
・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：88P
・８．２：人工タンパク質素材を手掛ける主要企業：102P

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ており、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 年には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（T シャツ及びアウトドアジャケット）THE NORTH FACE 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 年からはタイランドにて世界最大級のタンパク質生産プラントの稼働が始まっており、商業生産に向けた準備を進めている（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：タイランドに建設されたタンパク質生産プラント

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して、タンパク質を使用した代替素材開発を行う。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（図 1-4）。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。

ウレタンビーズはそのソフトな触感から化粧品や自動車内装表皮材などに使われている。マイクロビーズ分野において、ハードな触感であるアクリルビーズや PE ビーズなどについては、セルロースビーズの代替が進んでいる。しかしながらセルロースビーズは硬く、ウレタンビーズの様な柔らかい触感を出すことができない。一方でタンパク質はセルロースと異なり、様々なアミノ酸がランダムに並んだポリマーであるため、結晶化度のコントロールが可能であり、かつ吸湿性が高い。したがってセルロースビーズよりもソフトな触感となるポテンシャルが高く、ウレタンビーズの代替素材となれる可能性が十分ある。しかしながら、これまで当社においてタンパク質素材を用いたマイクロビーズの開発は行なってきておらず、本事業を活用してその開発に取り組む。

アクリル繊維は羊毛に最も近い化学繊維と言われており、良好なかさ高性を有し、保温性が高い。主な用途としてはセーターなどのアパレルや、ソファーやカーペットなどの家具等が挙げられる。そのような中、これらの業界ではマイクロプラスチック問題に加え、家畜の環境負荷の高さやアニマルフリーの観点から獣毛も扱い辛くなってくることが予想されており、新たなかさ高性繊維のニーズが高まっている。一方、当社繊維はシルクに近い特徴を有しており、アクリル繊維に比べ、かさ高性は大きく劣る。したがって本事業では、当社繊維のかさ高性を向上することで、アクリル繊維の代替を目指す。

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非常に高く、まずはそのコストダウンが必要なる。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で大幅なコストダウンを目指す。次にタンパク質からビーズや繊維への加工コストについてもプロセスの見直しにより大きくコストを下げることができると見込んでおり、その課題にも取り組む。

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。

図 1-4：本実証事業の概念図

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、繊維化する場合は、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。以下に各工程の概要について説明する。

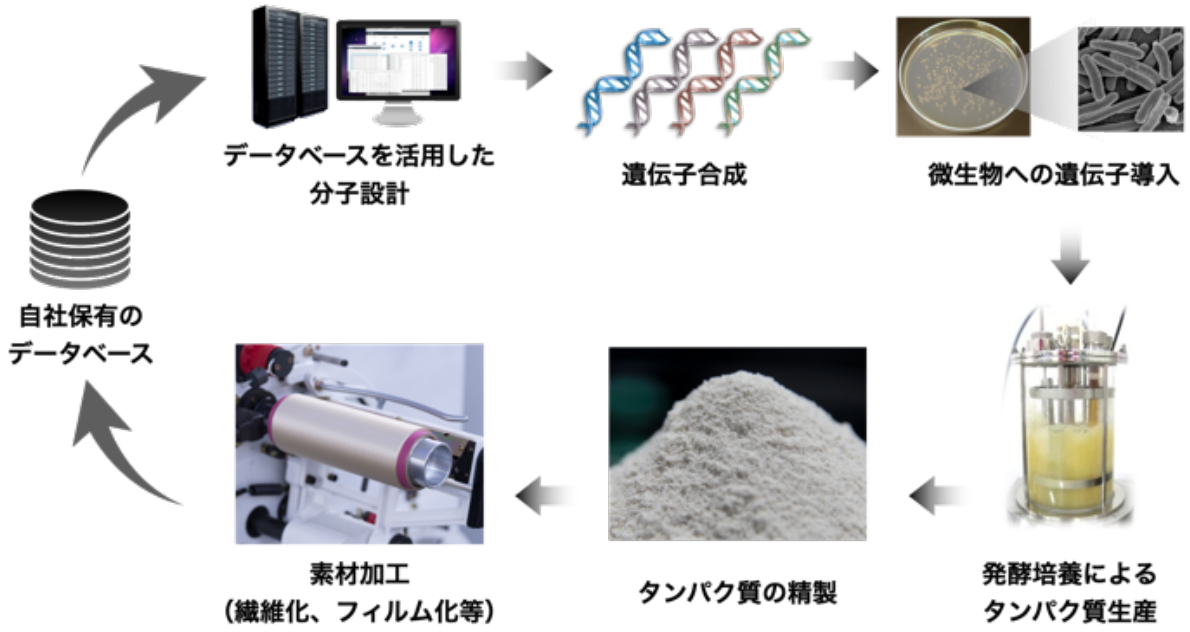


図 2-1：人工タンパク質繊維の製造フロー

① 分子設計

分子デザイン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、化学的特性等）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、使用するアミノ酸等が、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なっており、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 宿主

微生物を使用したタンパク質生産において、宿主はタンパク質の生産性に大きな影響を与える。当社ではこれまでにさまざまな菌株の検討を行い、また必要に応じて育種（変異

導入や遺伝子導入等）を行ってきた。社内の開発においては引き続き宿主の開発を行い、生産性向上の検討を進める予定ではあるが、現時点である程度のレベルに達していると考えているため、本事業においては菌株や育種の検討はスコープに入れていない。

③ 発酵培養

培地や発酵条件によって生産性は大きく変化する。パラメータとしては、培地組成、溶存酸素量、濁度、培養温度、撹拌速度、タンパク質発現誘導タイミング等を挙げることができる。まずは、小規模（培養液が数Ｌ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う。その後、パイロットスケールでの実証を行い、大規模培養での適応が可能となるように検討する。

図 2-2：小規模培養槽

図 2-3：パイロット培養槽

④ 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で次工程に引き渡す（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

⑤ 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、最適な紡糸条件へと作り込んでいく。

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。

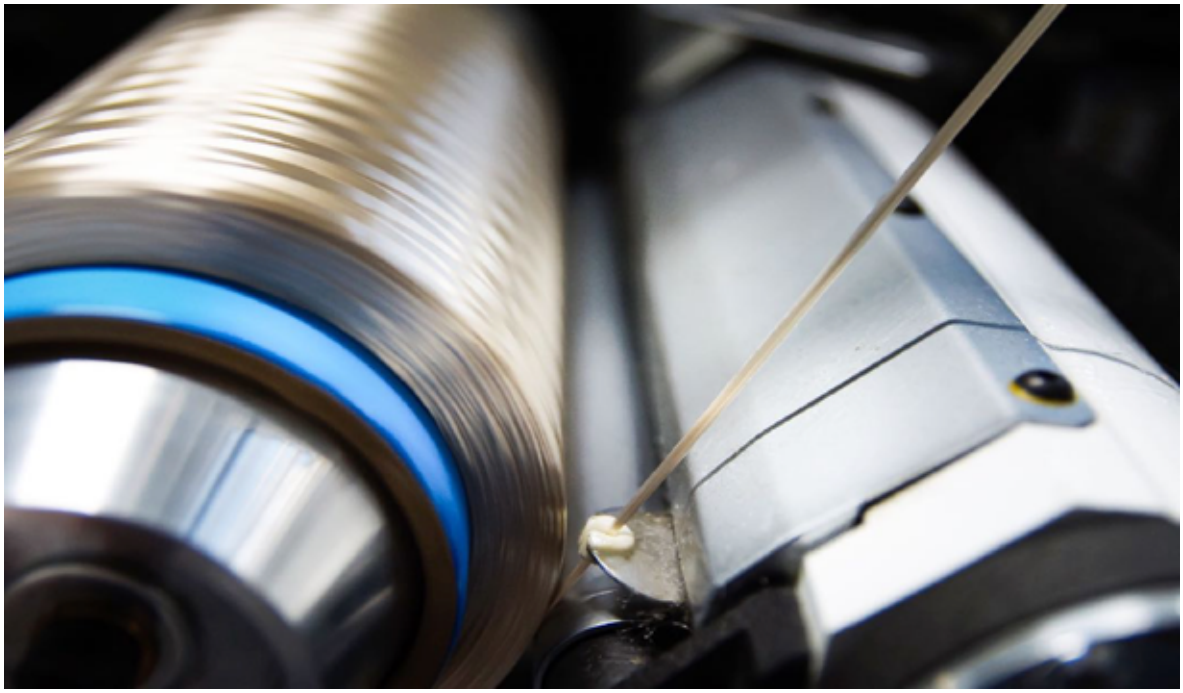


図 2-5：フィラメント糸

図 2-6：紡績糸

図 2-7：織物

図 2-8：編物

図 2-9：樹脂

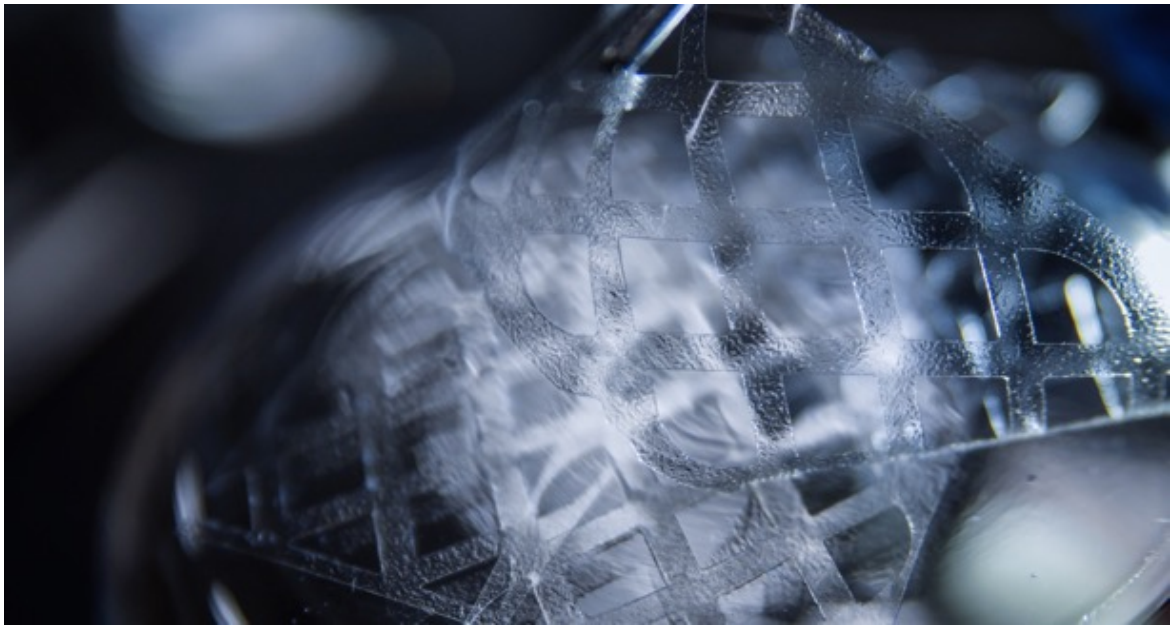


図 2-10：フィルム

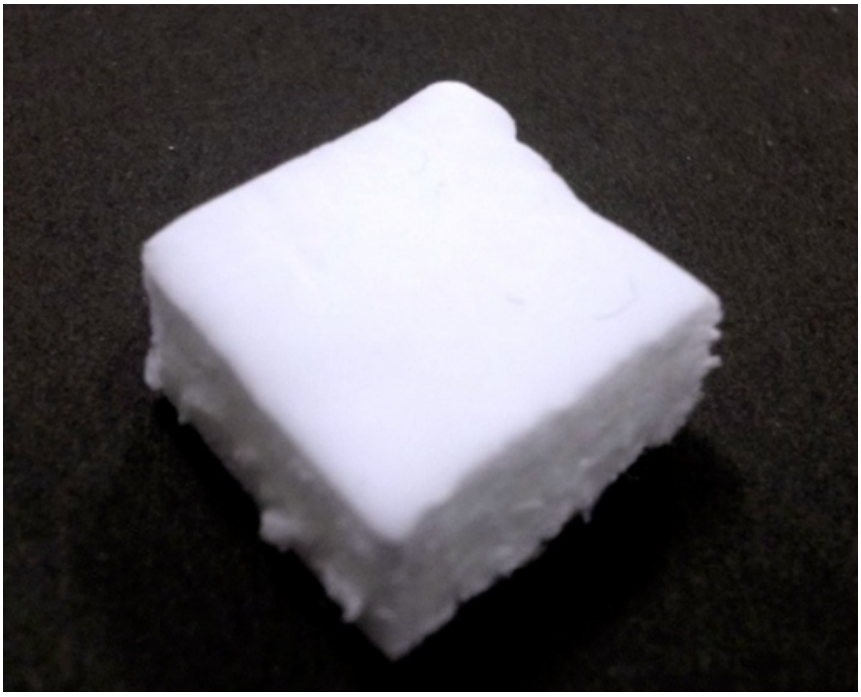


図 2-11：スポンジ

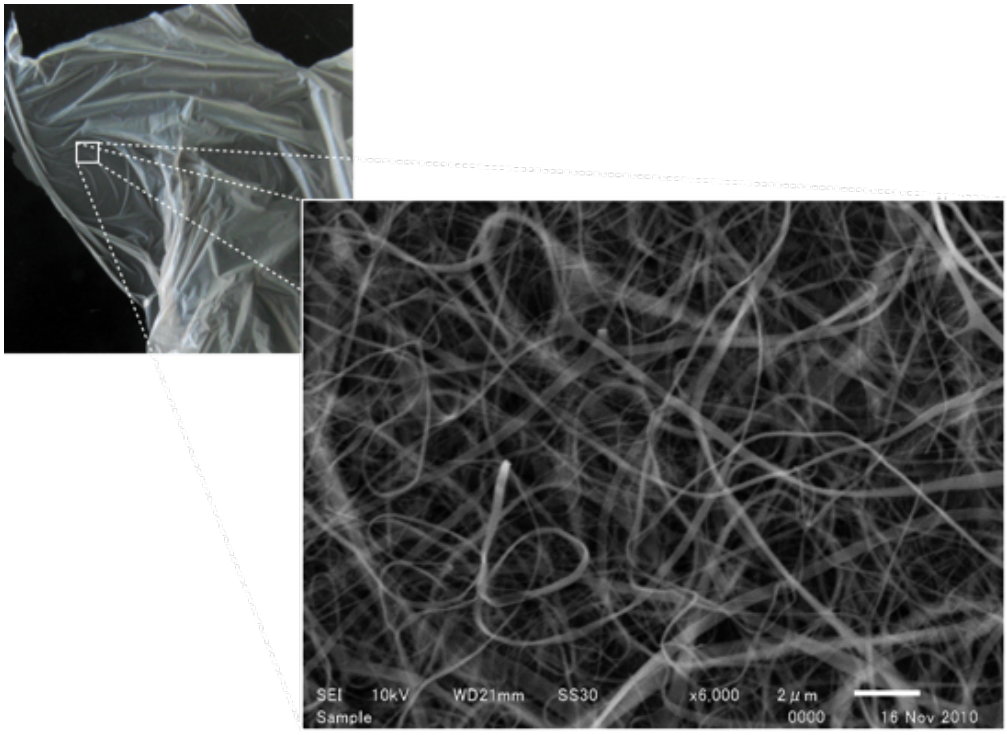


図 2-12：ナノファイバー不織布

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っている。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、シート等に使われる人工構造タンパク質-ウレタン複合材（図 2-15）の開発に取り組んでいる。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、化粧品分野に向けた素材開発、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

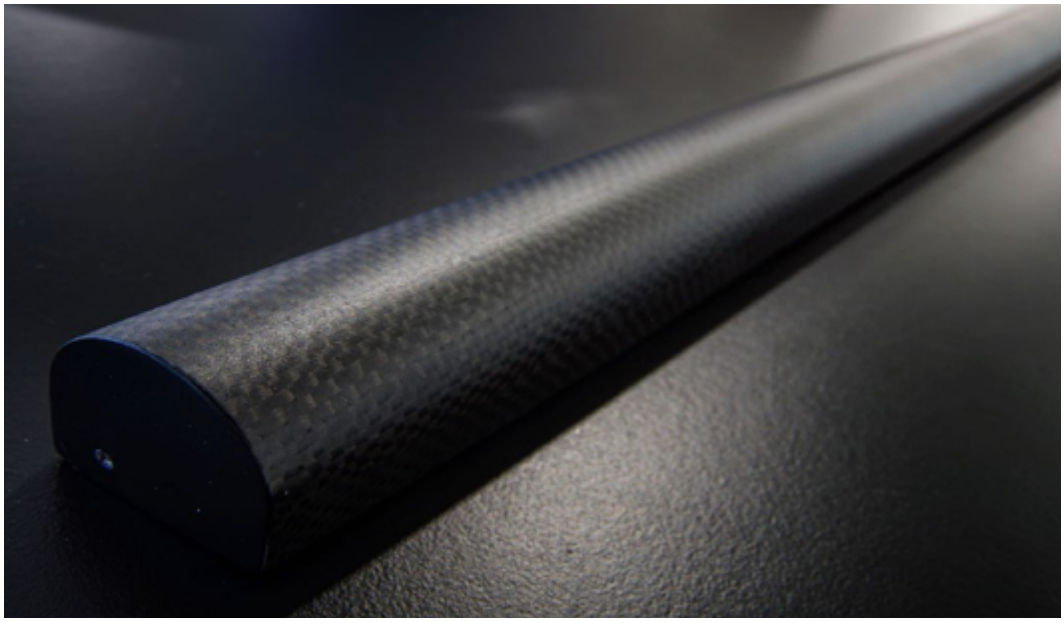


図 2-14：人工構造タンパク質-CFRP 複合材

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。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。これらの事業最終年度の目標は、全てを達成すれば既存素材の代替がすぐにでも可能になるというものではないが、この新規素材の市場を創出することは十分できると思われる。当社としてはこれら目標をクリアできれば、当分野に対して更なる投資を行うことは可能であると判断しており、開発を継続することで既存素材の代替に向けた動きを加速することができると考えている。なお本報告書では、3 ヵ年事業の 2 年経過時点としての目標に対する取り組みについて記載するものである。

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採択時の 1.53 倍	タンパク質生産性を採択時の 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（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）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）で良好な分散性を保持し、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

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採択時の 1.66 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。昨年度の事業ではタンパク質の生産性を採択時の 1.33 倍まで高めることができた。本年度はタンパク質生産性を採択時の 1.53 倍に高めることを目標にする。

【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。昨年度の事業の結果、噴霧法により真球ビーズの創出に成功したため、本年度は噴霧法の検討のみを進める。精製後のタンパク質を起点とし、量産化可能な球状ビーズの加工方法を開発する。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。

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：「各種溶媒で良好な分散性を保持し、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。」
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。昨年度までの事業の結果、1,000 ホールでの水系紡糸プロセスの構築に成功した。したがって本年度は、ホール数をさらに高

めるための各種条件検討を実施する。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。

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。したがって本事業においては、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。また繊維化後の加工によってもかさ高性を付与できるため、その検討も行う。得られた繊維については必要に応じて、紡績糸やアプリケーションの評価を実施する。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。本年度は共同実施者を設定していないため、各開発項目について当社が主体となって開発を行った。

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。全て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。

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

番号	業務内容 ＼ 実施月		4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	備考
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													

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「タンパク質生産性を採択時の 1.53 倍」に対して、実際にタンパク質生産性が採択時の 1.53 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「直径 10um 真球ビーズを実機を用いて 1kg 以上取得すること」であり、直径約 10um 真球ビーズを 1kg 以上取得することができたため、達成度は 100%とした。なお、目標は達成しているが、量産化を見据えたプロセス検討では、粒子径が 20um 弱となった。したがってこの粒子径でも 10um と同等の触感になるかの検討を来年度実施し、問題なければ、直径 20um ビーズでの開発を進めたいと考えている。

ビーズの実用化開発においては、「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」を目標としており、実際に各溶媒（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）での安定性評価で問題がなかったことから、達成度は 100%とした。なお、安全性評価については 3 月から着手しており、結果については来年度報告することとする。

水系湿式紡糸法の確立では、「水系固化溶媒にて 3,000 ホールでの紡糸プロセス確立」としており、3,000 ホールでの連続紡糸ができたことから、達成度は 100%とした。今年度得られた課題を元に、来年度更なるホール数の増加に取り組む。

かさ高性向上繊維の開発では、「アクリル繊維と同等のかさ高性の実現」を目標としており、タンパク質繊維でアクリル繊維と同等のかさ高性を実現できたことから、達成度は 100%とした。なお、本年度で最終年度の目標をすでに達成したため、本開発は本年度で終了とする。

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	タンパク質生産性を採択時の 1.53 倍	タンパク質生産性を採択時の 1.53 倍以上を達成した。達成度 100%
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	直径約 10um の真球ビーズを 1kg 以上取得することに成功した。達成度 100%
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	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を確認した。達成度 100%
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	3,000 ホールノズルでの連続紡糸に成功した。達成度 100%
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
・５．２．１指数流加培養法の最適化

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、流加培地は主に炭素源で構成されるのが一般的である。本年度ではタンパク質の生産性を高めるために、指数流加法に関する検討を行ったため、以降、具体的な検討項目とその結果について述べる。

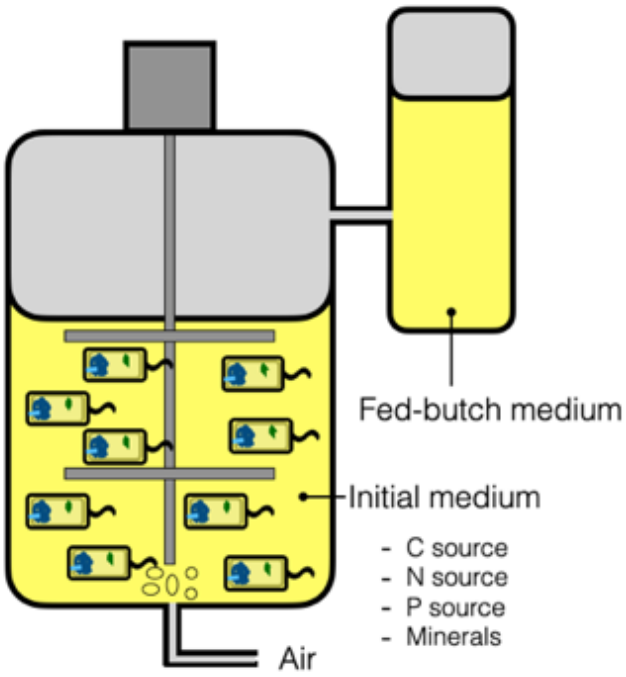


図 5.2-1：流加培養法による培養

まず流加培地の投入方法について説明する（図 5.2-2）。一般的に流加培養においては、定速流加法が採用される。理由としては流加培地の投入量が一定であるため、オペレーションが容易であることが挙げられる。一方で、培養液中の菌体数によって必要となる栄養分も変化するため、定速流加法では菌体増殖のフェーズによっては、栄養分の過不足が発生することになる。通常、栄養分が多すぎると微生物が余計な成分を生産することがあり、また栄養分が不足する場合には菌体の増殖や菌の活性に影響を与えることも多い。したがって理想的には菌体数に応じて、時間経過と共に流加培地の投入量を適切に変化させることが好ましい。そして微生物は指数関数的に増殖するものであるため、結果として流加培地の投入量も指数関数的に増え、このような培養方法を指数流加法と呼ぶ（当然、

培地を投入できる速度や量は設備の制約を受けるため、初めから最後まで指数流加法を続けることはできない）。上手く指数流加法が実現できれば、培養時間の短縮や、菌の活性を高めた状態で目的物の生産を行うことができるため、生産性の向上も期待できる。

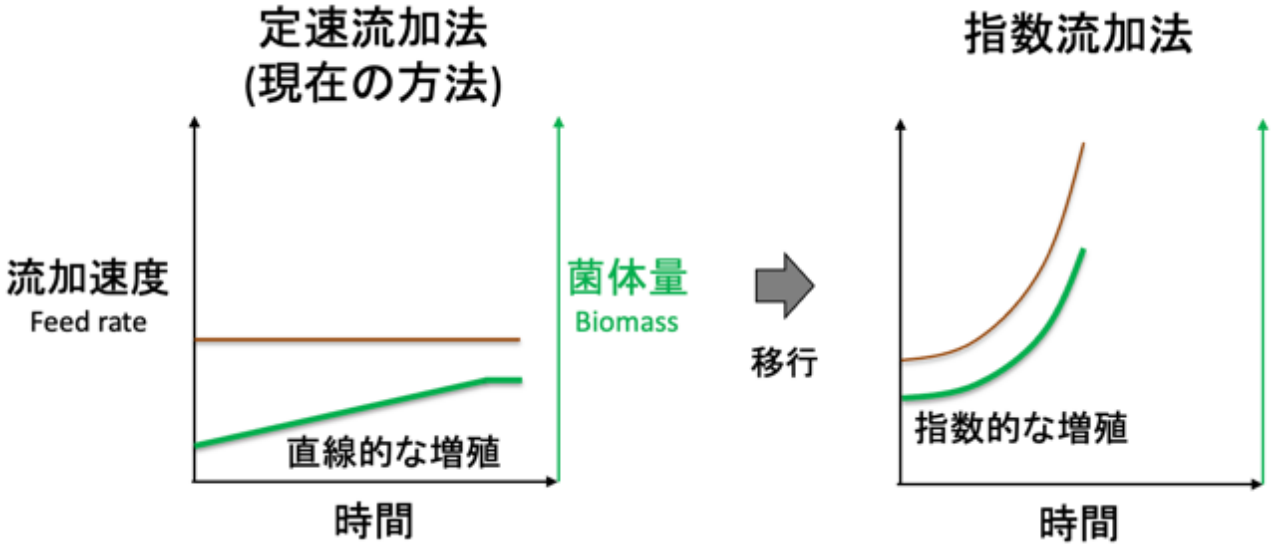


図 5.2-2：指数流加法の概略

まず指数流加法の実装について結果を説明する。図 5.2-3 は定速流加法と指数流加法を比較したものである。縦軸は培養液中の濁度であり、これはつまり菌体数を意味している。横軸は培養時間である。同じ植菌量から始め、10 時間培養を行った。培養 6 時間あたりまでは同じような増殖速度となっていたが、それ以降、増殖に差が出始めた。定速流加法では菌体の増え方が直線的である一方で、指数流加法では培養攪拌に菌体が指数関数的に増えている。そして培養 10 時間目には約 1.5 倍程度菌体数に違いが見られた。したがって指数流加法を適応することによって、菌体数をある閾値まで増殖させる時間を大幅に短縮できることが確認された。以降の開発では、指数流加法によって菌体数をある一定値まで増殖させた後、各種培養条件を調整することでタンパク質生産性の向上を目指した。

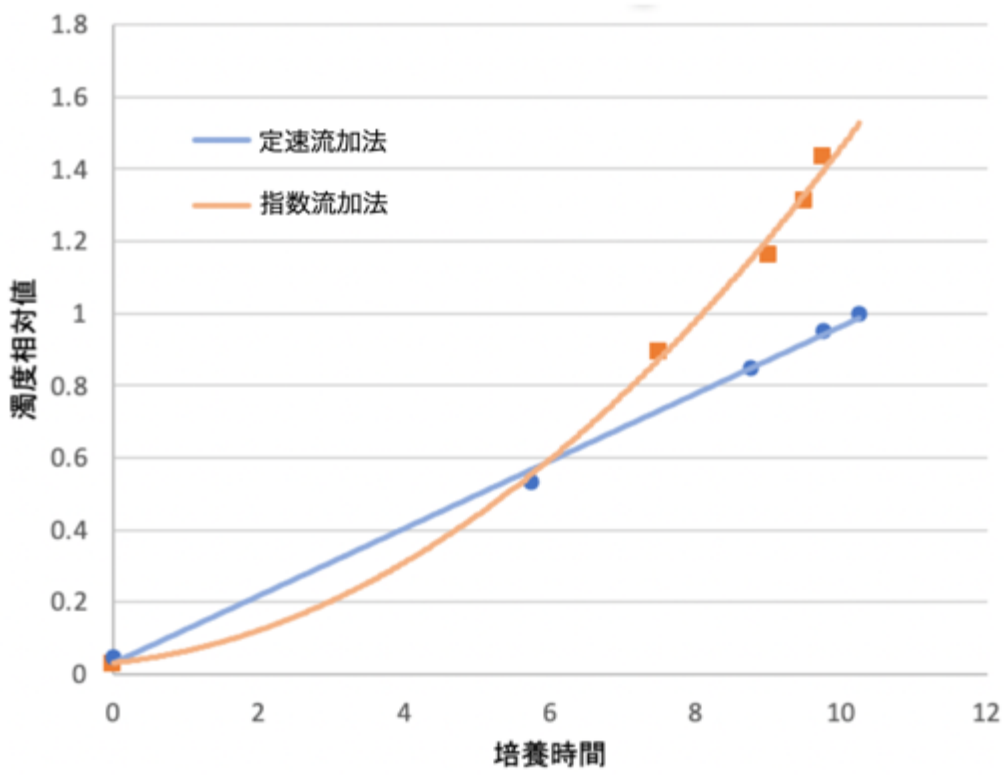


図 5.2-3：指数流加法での増殖曲線の違い

次に指数流加法により増殖した菌体に対して、どのような条件でタンパク質を生産することが生産性に寄与するかを検討した。まず培養時の温度、酸素供給、pH、培地成分（リン酸塩）の検討を行った。

培養時の温度については、28-40 度の範囲で 2 度ずつ条件を振った（図 5.2-4）。28 度未満については、量産時にその温度未満を維持することが難しいため、実験していない。その結果、34 度付近で最も生産性が高くなった。一方で 34 度を超えると生産性が急激に低下しており、34 度を基準に培養を行う場合、厳密な温度制御が求められることがわかった。また量産を想定すると、培養温度は高い方が冷却に必要なエネルギーコストが少なくて優位である。ただし 40 度程度になると生産性がかなり低くなっているため、高温耐性に向けた微生物の育種など行う必要があると思われる。

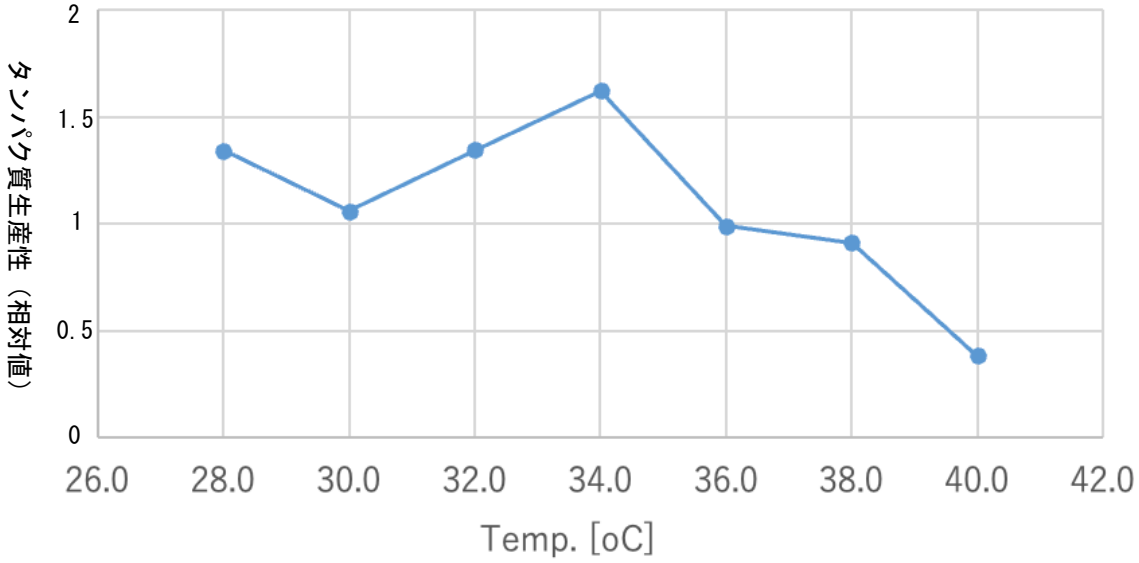


図 5.2-4：培養温度の違いによるタンパク質生産性

次に溶存酸素量の違いによるタンパク質生産性の違いを確認した（図 5.2-5）。菌体の増殖およびタンパク質生産においては、多量のエネルギーを消費するため、酸素は非常に重要なファクターとなる。今回、培養液中の溶存酸素量について 0-5mg/L の範囲で条件を振り、それぞれのタンパク質生産性を評価した。その結果、少しでも溶存酸素量を維持できれば、タンパク質生産性自体は大きく低下するわけではないことがわかった。一方で、溶存酸素量が多ければ多いほど、タンパク質生産性も高くなる傾向にあった。量産時のことを考えると、こちらについても常に培養液の溶存酸素量を高く維持することは難しいため、溶存酸素量が 0 にならない程度で維持することが重要であると思われる。

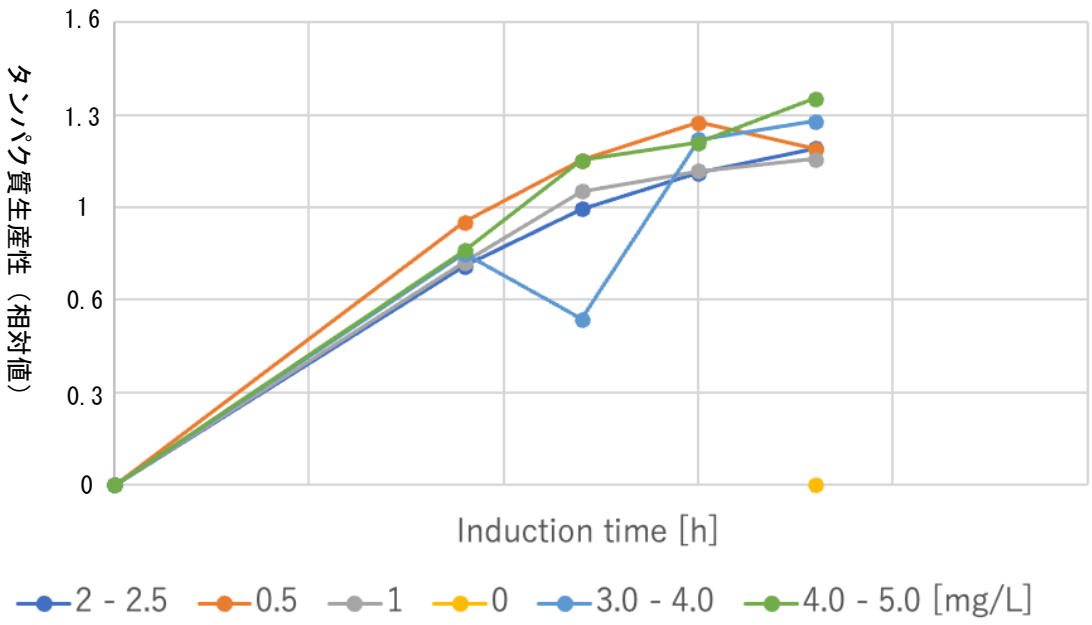


図 5.2-5：溶存酸素量の違いによるタンパク質生産性

次に pH の違いによるタンパク質生産性について述べる（図 5.2-6）。一般的に微生物はアルカリ条件に弱く、かつ培養中に有機酸を合成するため、培養液の pH は少し酸性側に寄る。今回、pH6 弱-7 強の範囲で pH を振り、培養を行った。その結果、pH6.5 および ph7.1 で生産性が最も高くなった。先に述べたように、pH をアルカリ側に寄せるとリスクが高くなるため、今回の結果から pH6.5 を基準に培養条件とコントロールすることが良いと思われる。

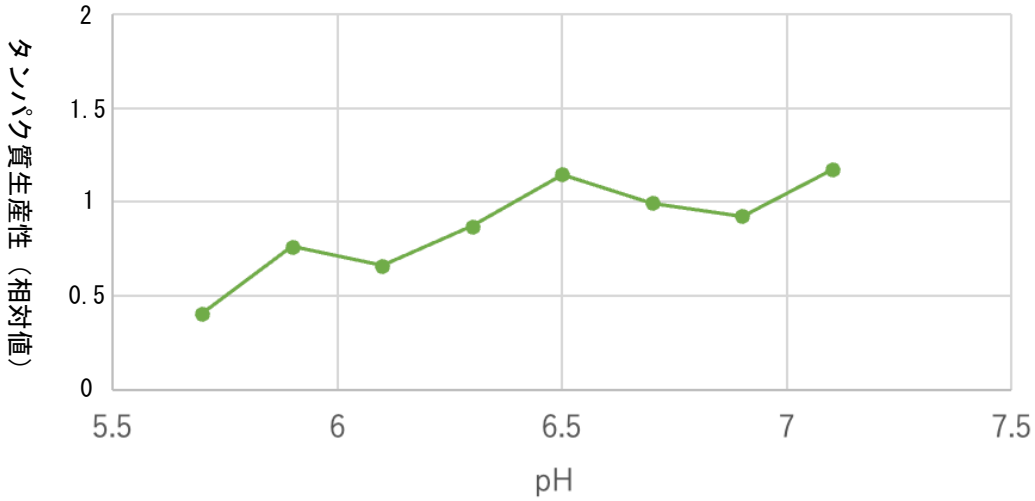


図 5.2-6：pH の違いによるタンパク質生産性

最後にリン酸塩濃度の検討を行った（図 5.2-7）。微生物培養においてリン酸塩は必須の培地源となる。従来、培養後の上清にリン酸塩が残っている状態であったため、リン酸塩の濃度を落とした検討を行っていたが、リン酸塩の濃度を下げると、タンパク質生産性も低下するという結果となった。そのため、培養後の上清にリン酸塩が残っているものの、培地に投入するリン酸塩をさらに増やすことでタンパク質生産性に変化がないかの確認を行った。通常の基準に比べてリン酸塩濃度を 10%、15%、20%増加し、培養をしたところ、タンパク質生産性が 10-20%向上する結果が得られた（コントロールでの生産性は 10g/L）。一方で培養後の上清にはその分、リン酸塩が残っていたため、排水処理負荷の観点も含め、最終的な濃度の検討を行う必要があることがわかった。

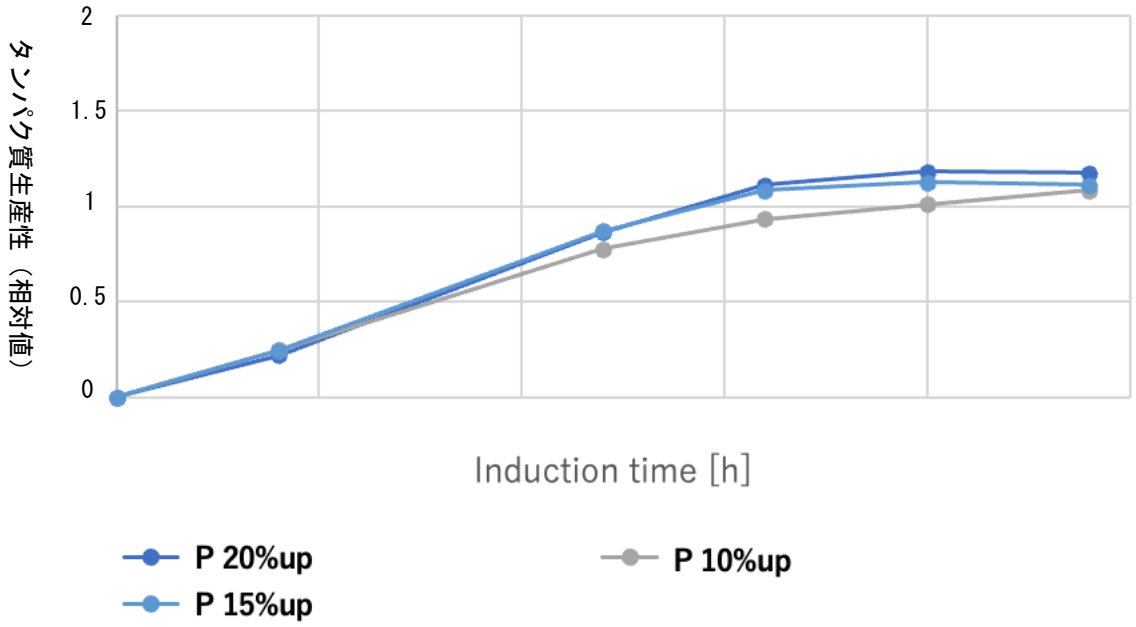


図 5.2-7：リン酸塩濃度の違いによるタンパク質生産性

上記培養条件の検討結果をもとに、最適化を行い、その培地を使用して、指数流加法でのタンパク質の誘導濁度と流加速度の比較を行った。誘導濁度の結果について、まず説明する（図 5.2-8）。当社の培養工程では微生物を増殖させる段階（増殖フェーズ）と、増殖した微生物にタンパク質生産を行わせる段階（誘導フェーズ）の 2 つがある。増殖フェーズではある一定数まで菌体を増やすが、単純に菌体数が多ければ生産性も良いかというとそういうわけではなく、培養液あたりのタンパク質生産が最大となるような菌体数を探索する必要がある。今回、指数流加法を適応するにあたっては、菌の活性状態が定速流加法とは異なることが予想されるため、改めて指数流加法で菌体増殖した場合の適切な誘導濁度を検討した。誘導時の濁度が最も低い時の OD を 1 として、濁度を増やした条件でタンパク質生産を行ったところ、濁度 OD 1.6 で誘導した場合はコントロールと比較して、1.4

倍の生産量となった。一方で濁度 OD を 2 まで増やした場合では、生産量がコントロールの 1.2 倍程度となったことから、濁度 OD 1.6 付近が最適な条件であることが確認された。

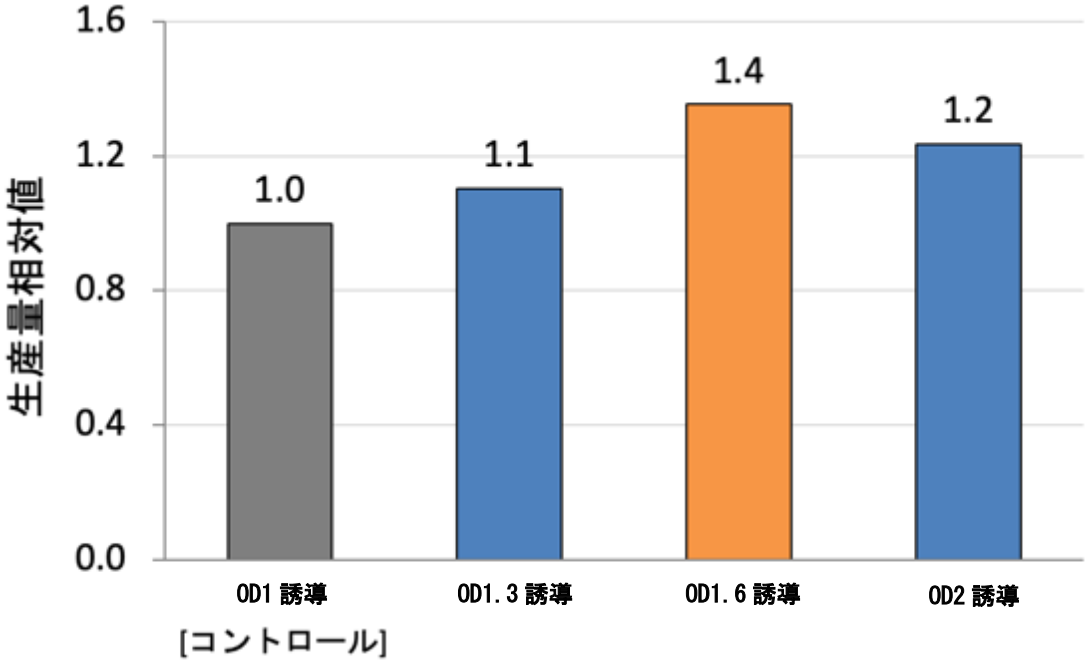


図 5.2-8：指数流加培養における誘導濁度(相対値)の最適化

次にタンパク質誘導時の流加培地の投入速度（フィードレート）の比較検討を行った（図 5.2-9）。一定の濁度まで増殖できた後に、タンパク質の生産フェーズに入るが、タンパク質生産においても多量のエネルギー投入が必要となるため、流加培地を投入する必要がある。そしてこの時のフィードレートによって、タンパク質生産量が大きく変わるため、最適な条件を見出すことが重要である。そこで先ほどの濁度検討の結果を元に、フィードレートを調整した。定速流加法においては使用しているフィードレート（FF）を 1 とし、その速度を上げた条件を検討した。その結果、指数流加法においては FF1.1 が最も生産性が高く、コントロールと比較して 6%程度、生産性が高くなった。これは指数流加法によって、増殖フェーズが短時間で済み、菌の活性が高くなったことでより多くの栄養源の取り込みが可能になったことがその要因ではないかと推測された。

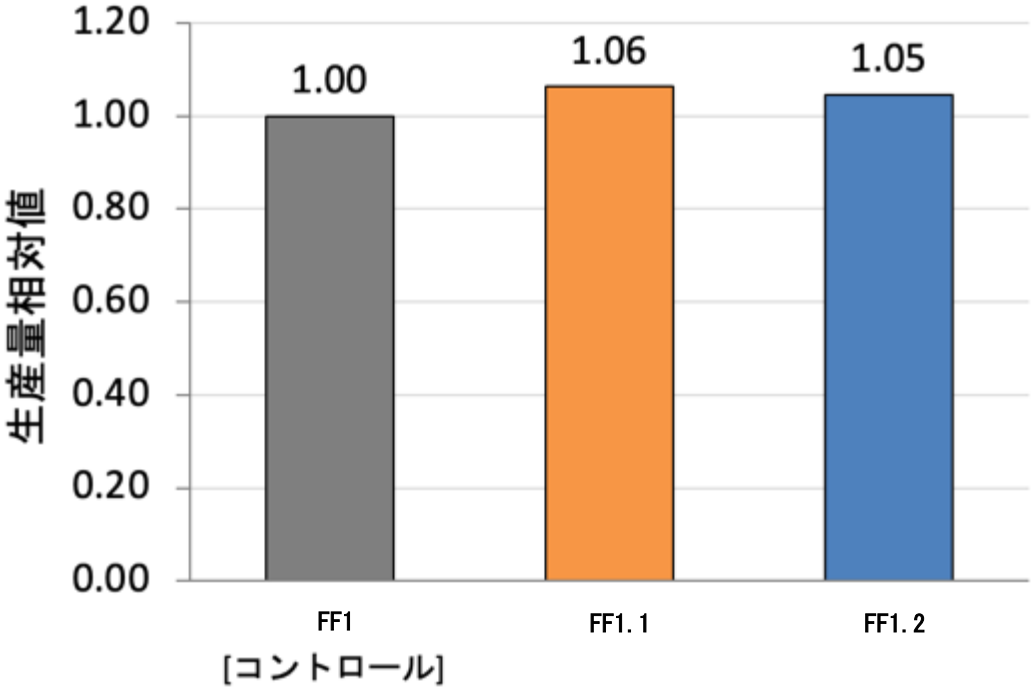


図 5.2-9：指数流加培養における流加速度(相対値)の最適化

そして上記検討結果を統合し、指数流加法での培養条件の最適化を行った。その結果、タンパク質の生産性が採択時の 1.56 倍となった。指数流加法を用いた培養では、タンパク質生産開始時点からタンパク質の生産性が高い伸びを示しており、培養時間も定速流加法と比較して数時間短くなった。したがって定速流加法と比較して、タンパク質生産性が向上するとともに、培養時間の短縮もできているため、非常に有用な培養法であることが確認された。最後に図 5.2-10 にこれまでのタンパク質生産性向上の結果についてまとめる。本年度の目標はタンパク質の生産性が採択時の 1.53 倍であったため、目標値を達することができた。来年度の最終目標はタンパク質の生産性が採択時の 1.66 倍となっている。来年度では、本年度の結果を踏まえてまだ着手できていない培養条件の検討に取り組み、タンパク質生産量の向上を狙いたい。また構築されたプロセスをパイロットプラントに移植し、量産スケールでも実証可能であることを示したい。

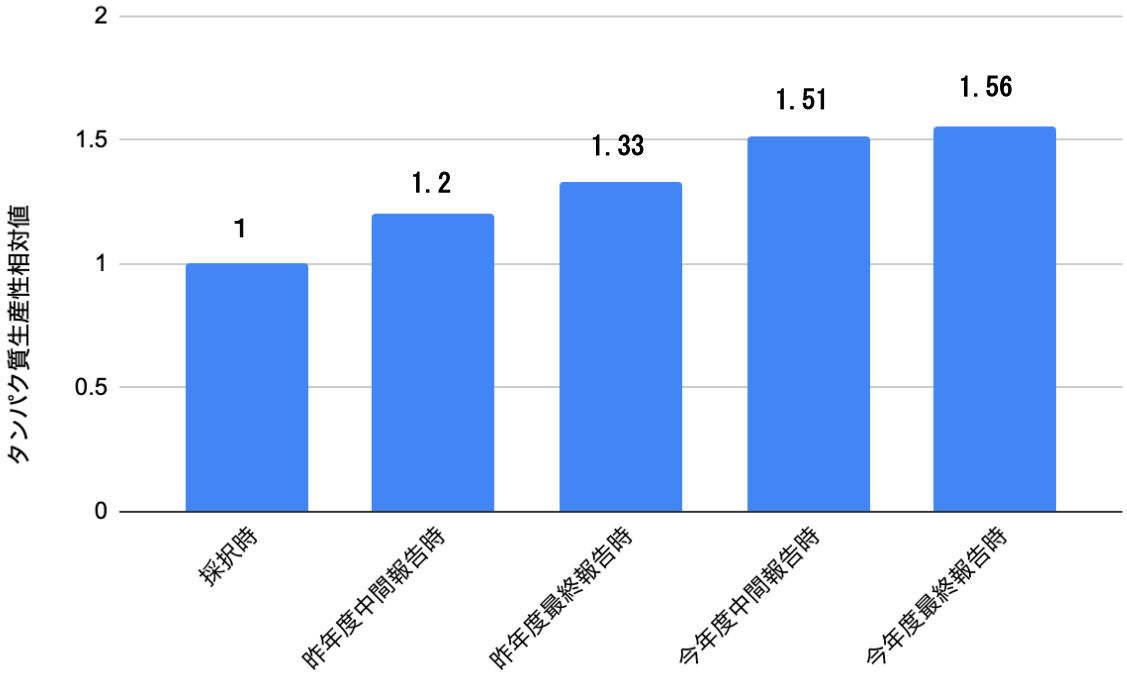


図 5.2-10：指数流加法でのタンパク質生産性の推移

・５．２．２：遺伝子配列の改変

ここでは遺伝子配列の改変によるタンパク質生産性向上検討の結果について記載する。前年度の報告では小規模培養で表 5.2-1 に示すコントロールとなる GEN1092 を含んだ複数のパラメータを振った 18 種類の遺伝子群の調査を行った。結果として図 5.2-11、図 5.2-12 に示すように GEN1092 に対して誘導後 16 時間において相対的な蛍光強度が高い配列がいくつか見出された。しかしながら、1 回目と 2 回目の試行で相対蛍光強度が大きく異なるものも存在した。そこで、これらのうち GEN1092, GEN1828, GEN1832, GEN1833, GEN1831, GEN1861 を選抜し、流加培養法（Fed-batch 法）でも同様な傾向が見られるか確認を 2 回行った。1 回目の結果を図 5.2-10 から 5.2-15 に示す。

表 5.2-1：複数のパラメータを振った 18 種の遺伝子群

遺伝子ID	2次構造予測（自由エネルギー）	CAI	tAI	Codon Pair Score
1092	低	低	低	低
1827	高	低	低	低
1139	低	低	低	中
1829	高	低	低	中
1370	低	低	低	高
1828	高	低	低	高
1371	低	低	低	中
1830	高	低	低	中
1372	低	低	低	中
1832	高	低	低	中
1373	低	高	高	低
1833	高	高	高	低
1374	低	低	低	高
1831	高	低	低	高
1823	低	高	高	低
1826	高	高	高	低
1861	低	低	低	低
1886	高	低	低	低

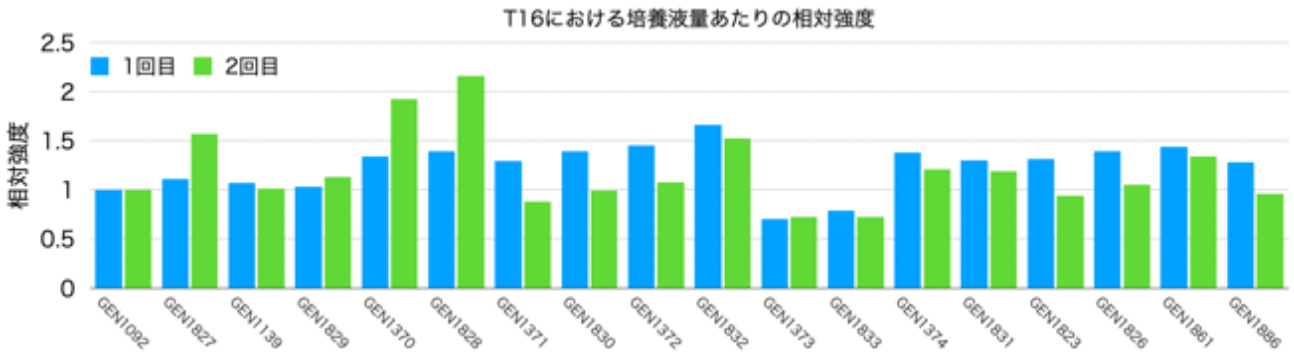


図 5.2-11：小規模培養の T16 における培養液量当たりの相対比較の 1 回目と 2 回目のまとめ

図 5.2-12：小規模培養の T16 における等細胞数当たりの相対比較の 1 回目と 2 回目のまとめ

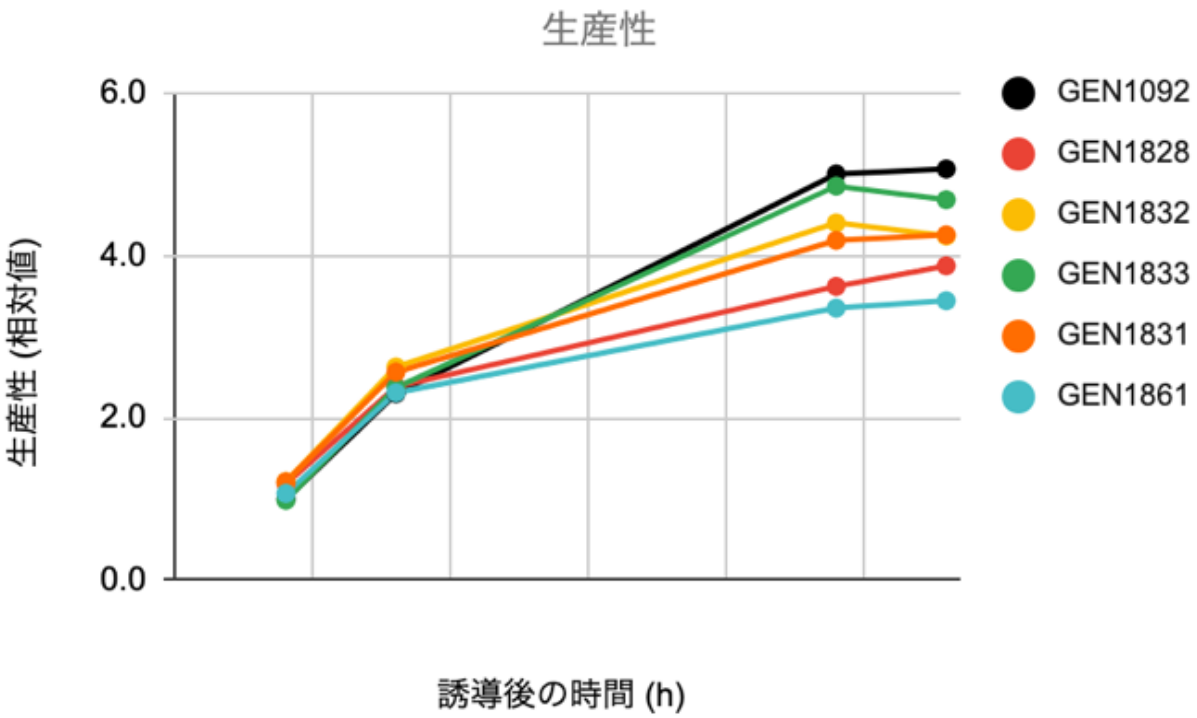


図 5.2-13：流加培養における GEN1092, GEN1828, GEN1832, GEN1833, GEN1831, GEN1861 の生産性の変化

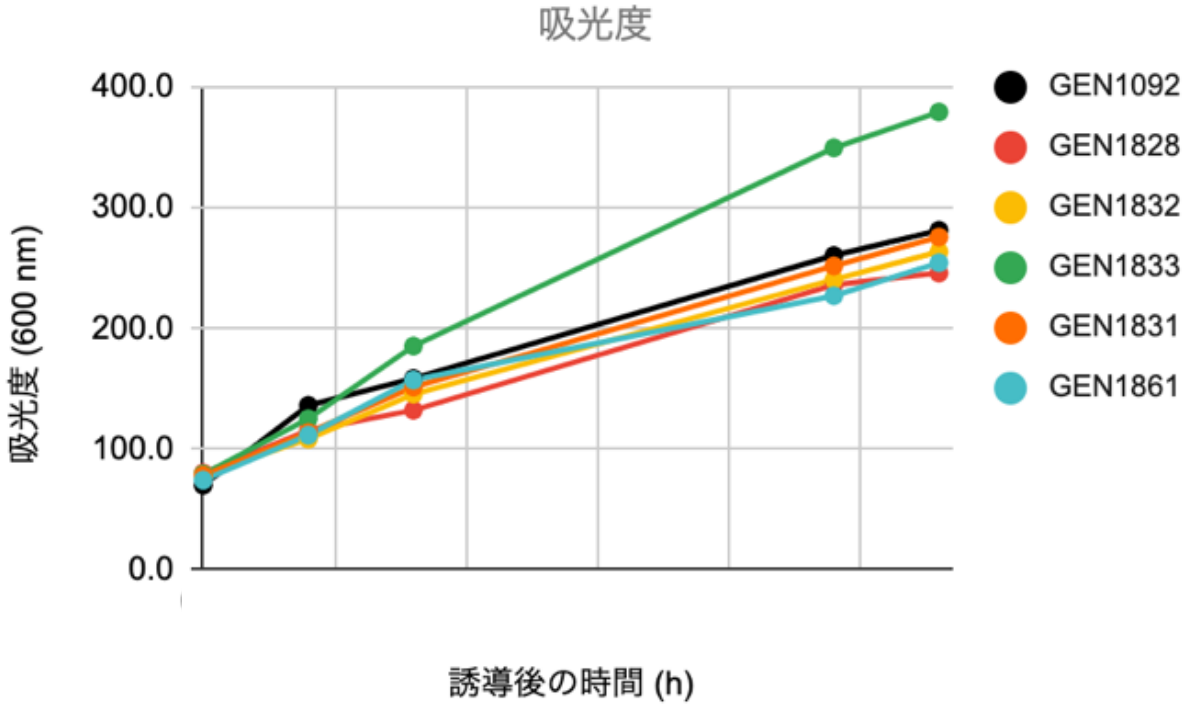


図 5.2-14：流加培養における GEN1092, GEN1828, GEN1832, GEN1833, GEN1831, GEN1861 の吸光度の変化

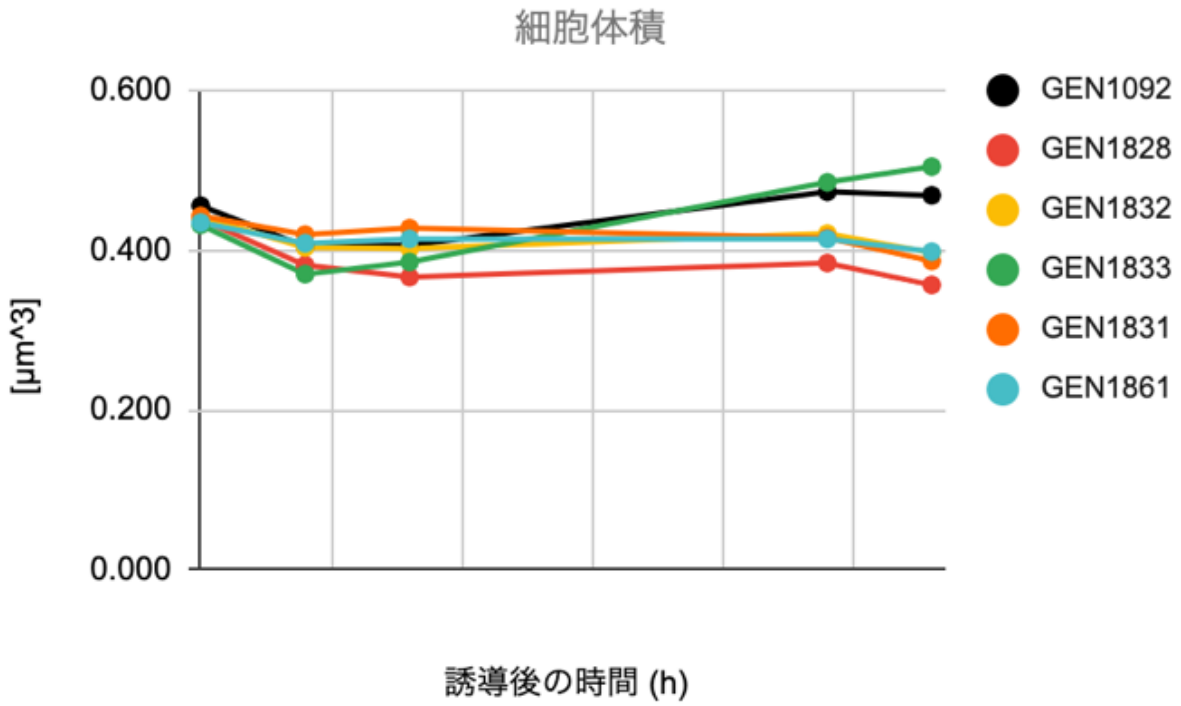


図 5.2-15：流加培養における GEN1092, GEN1828, GEN1832, GEN1833, GEN1831, GEN1861 の細胞体積の変化

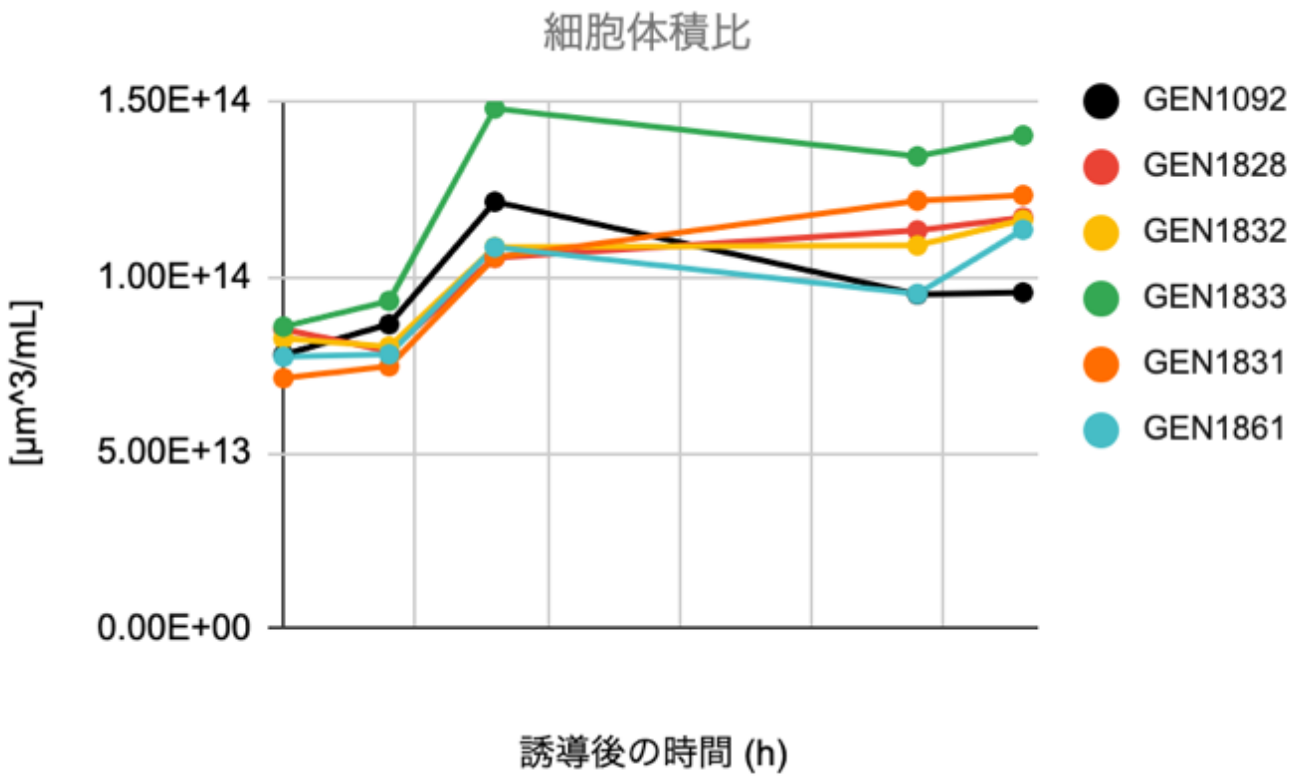


図 5.2-16：流加培養における GEN1092, GEN1828, GEN1832, GEN1833, GEN1831, GEN1861 の細胞体積比の変化

図 5.2-13 で示されているように、小規模培養ではコントロールの GEN1092 を生産性で上回っていた GEN1828, 1832, 1831, 1861 の何も GEN1092 を上回ることはなかった。また予想に反し、小規模培養では生産性の低かった GEN1833 は GEN1092 と同程度の生産性を示した。これは GEN1833 が他の遺伝子比べて比較的高い CAI、tAI を持っている影響である可能性がある。これら流加培養法による培養結果が再現するのかを確認するため、同様の遺伝子群の流加培養を再度行った。

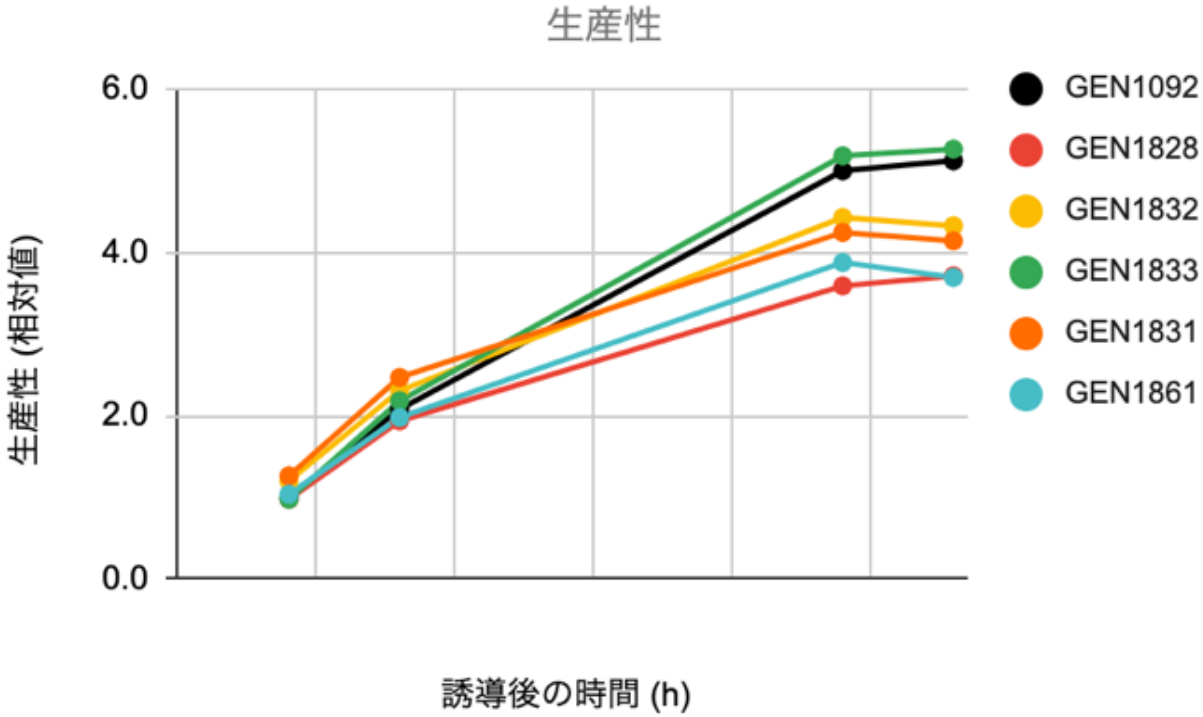


図 5.2-17：流加培養における GEN1092, GEN1828, GEN1832, GEN1833, GEN1831, GEN1861 の生産性の変化

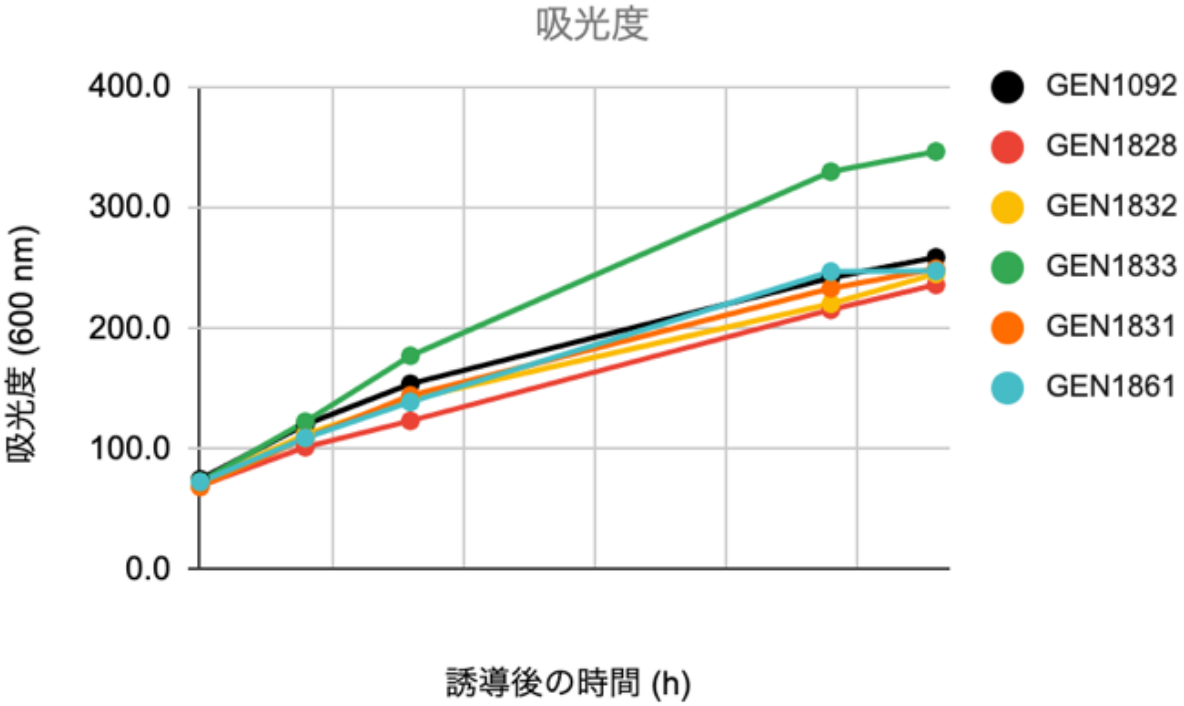


図 5.2-18：流加培養における GEN1092, GEN1828, GEN1832, GEN1833, GEN1831, GEN1861 の吸光度の変化

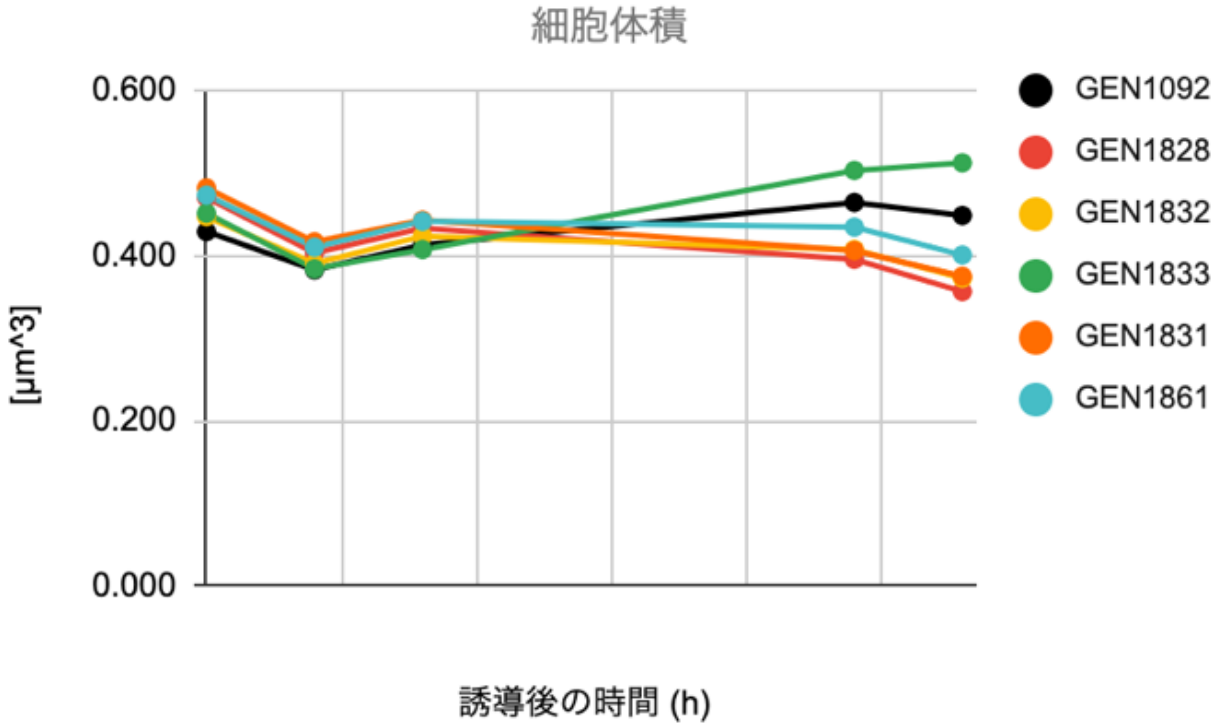


図 5.2-19：流加培養における GEN1092, GEN1828, GEN1832, GEN1833, GEN1831, GEN1861 の細胞体積の変化

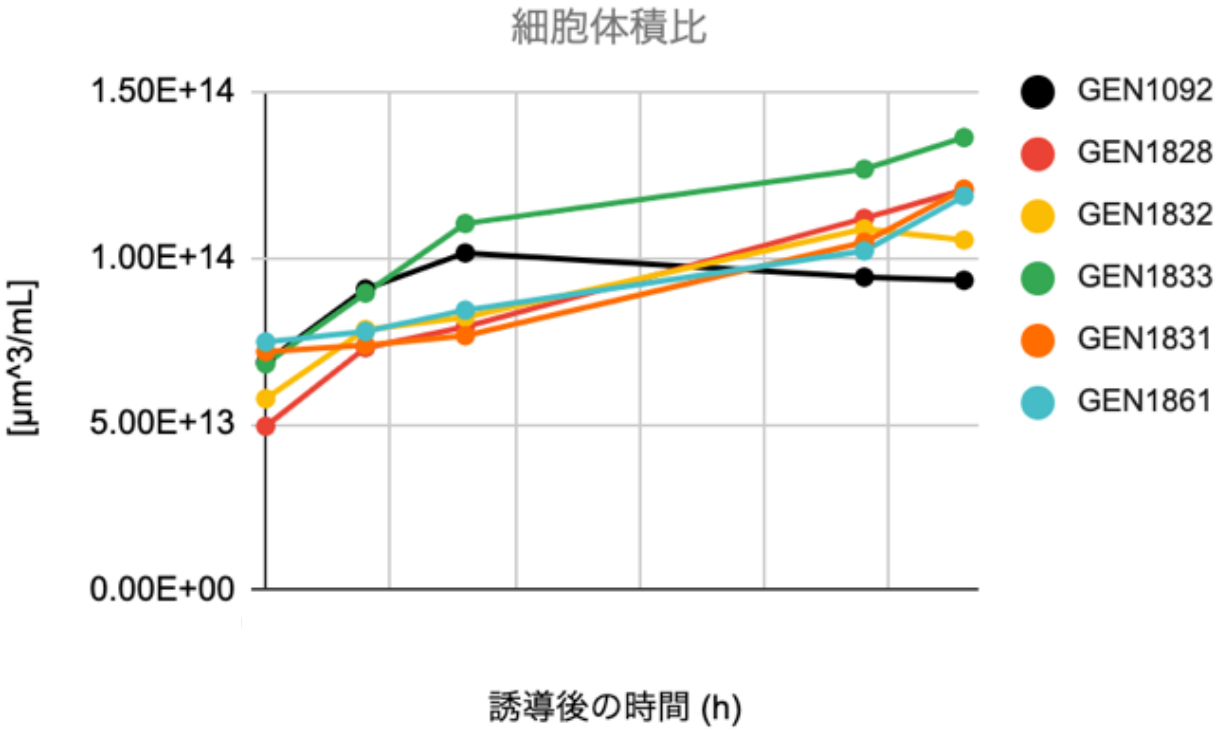


図 5.2-20：流加培養における GEN1092, GEN1828, GEN1832, GEN1833, GEN1831, GEN1861 の細胞体積比の変化

前述の実験と同様に GEN1092、1828、1832、1833、1831、1861 の遺伝子群を再度流加培養した結果を図 5.2-17 から 5.2-20 に示す。多少の違いはあるものの大まかな傾向としては前回の実験を再現できたと言える。しかしこれらの遺伝子群の中ではコントロールの GEN1092 に対して流加培養において生産性の面で特筆して優位な遺伝子は特定できなかった。また様々なパラメータを同時に調整してしまったことでパラメータ同士が複雑に相互作用し、パラメータ単体の生産性への影響をうまく分離できないという問題点も浮かび上がった。そこでコントロールの GEN1092 と同程度の生産性を見せた GEN1833 を参考にして、高 CAI、高 tAI である GEN3452 を新たに設計した。またこの新たに設計したコントロール遺伝子 GEN3452 をベースにして、コドンの配分を固定した上で再度 Codon Pair Score というパラメータと新たに Internal Shine Dalgarno-like-site (SD-like site) の数を振った表 5.2-2 に示される遺伝子群、GEN3575、3577、3578、3579 を設計し、小規模培養をおこなった。

表 5.2-2：一部のパラメータを固定し、Codon Pair Score 及び SD-like site 数のパラメータを振った遺伝子群

遺伝子ID	2次構造予測（自由エネルギー）	CAI	tAI	Codon pair score	SD like sites
3452	高	高	高	中	中
3575	同値	同値	同値	低	中と同値
3577	同値	同値	同値	高	中と同値
3578	同値	同値	同値	中と同値	高
3579	同値	同値	同値	中と同値	低

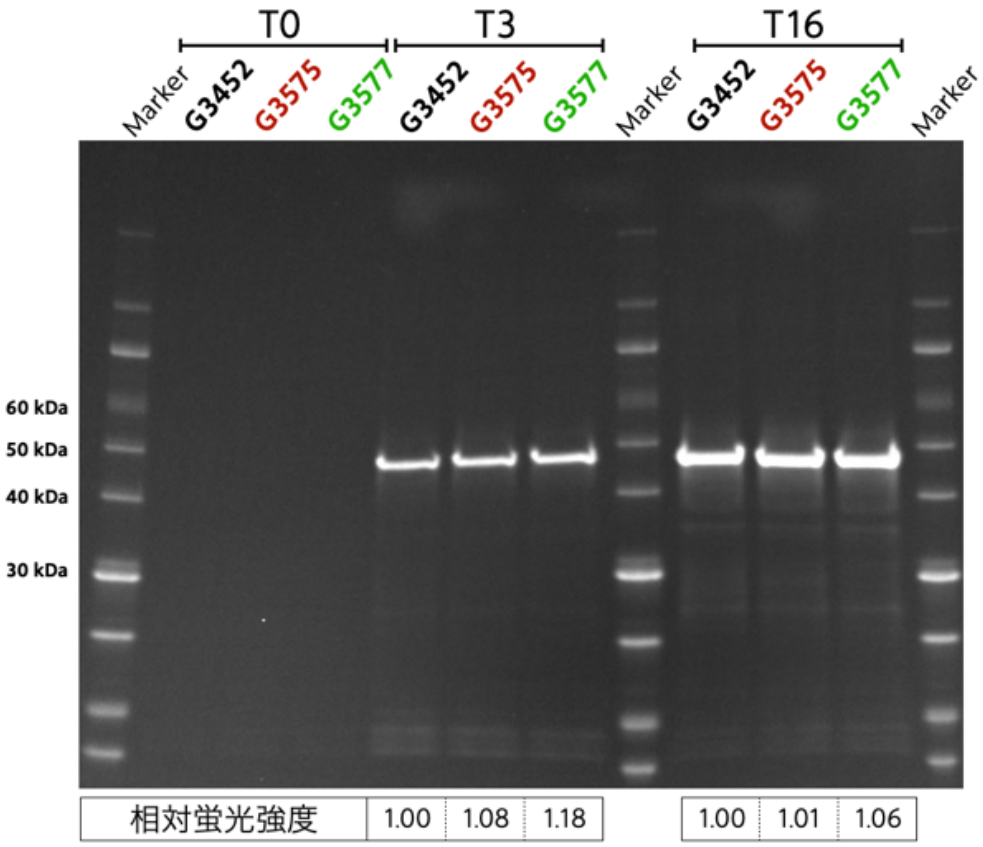


図 5.2-21：GEN3452, 3575, 3577 の培養液量当たりの蛍光強度の相対比較

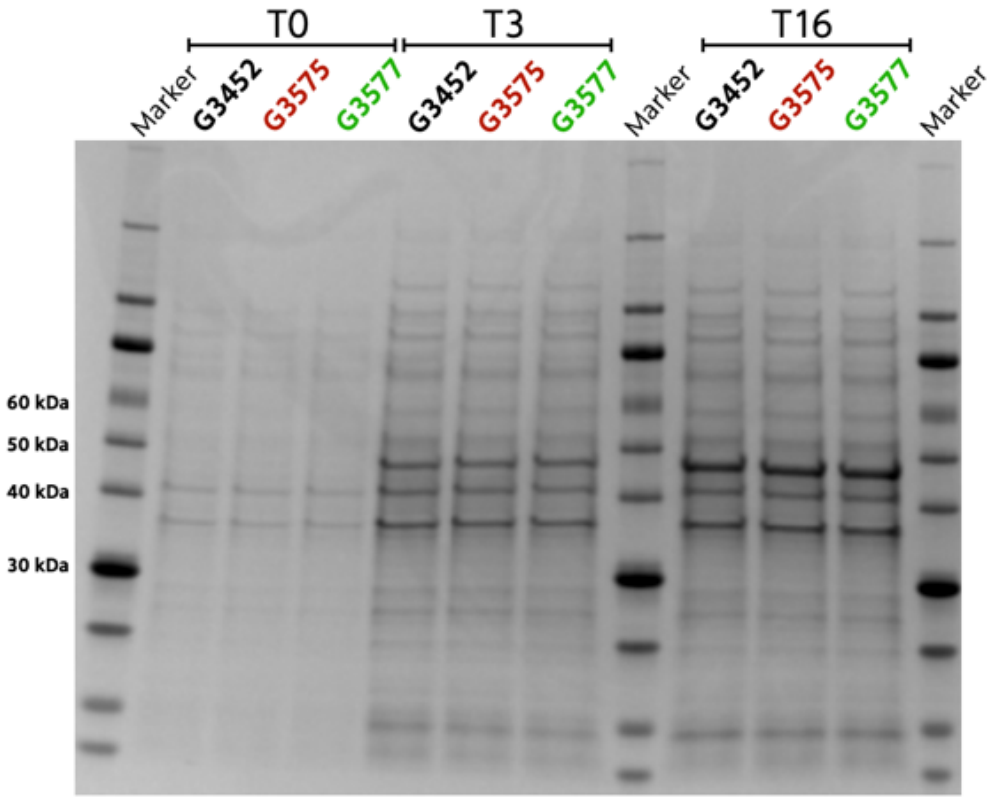


図 5.2-22：GEN3452, 3575, 3577 の培養液量当たりの CBB 染色

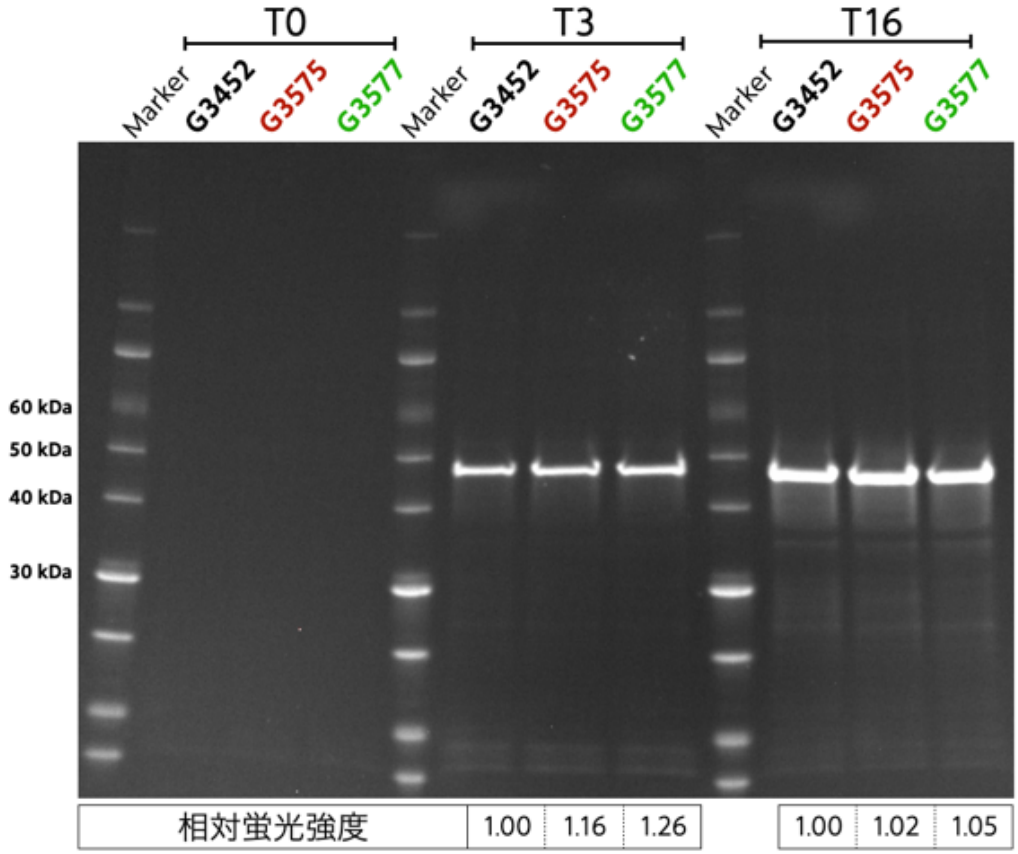


図 5.2-23：GEN3452, 3575, 3577 の等細胞数当たりの蛍光強度の相対比較

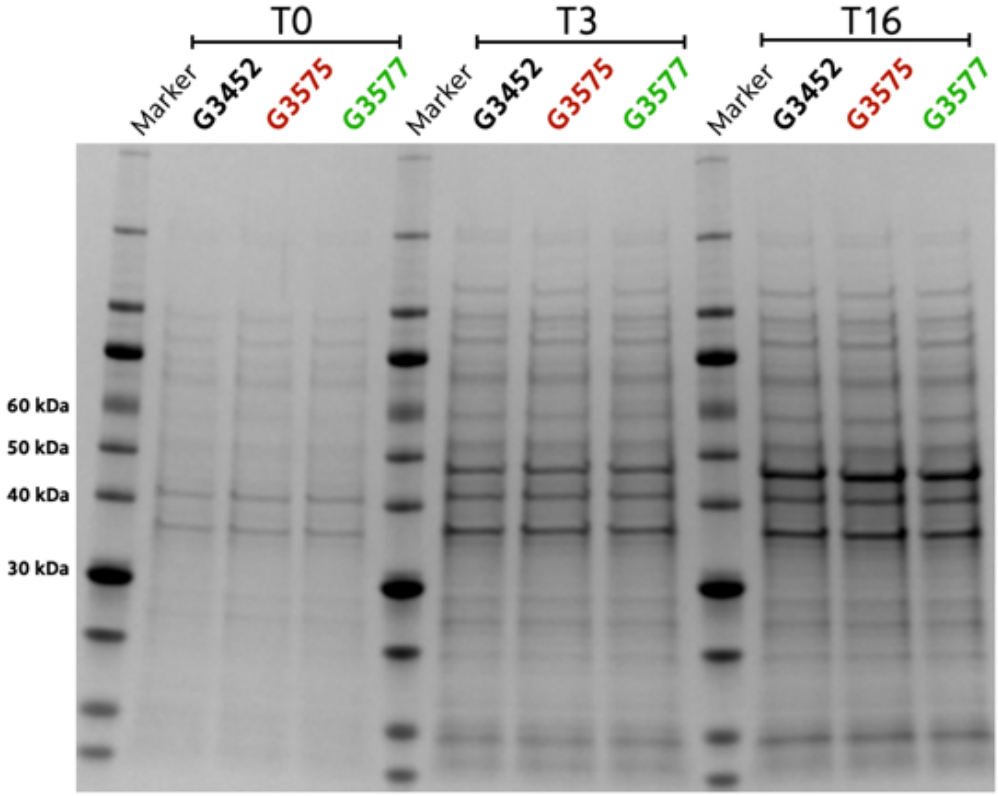


図 5.2-24：GEN3452, 3575, 3577 の等細胞数当たりの CBB 染色

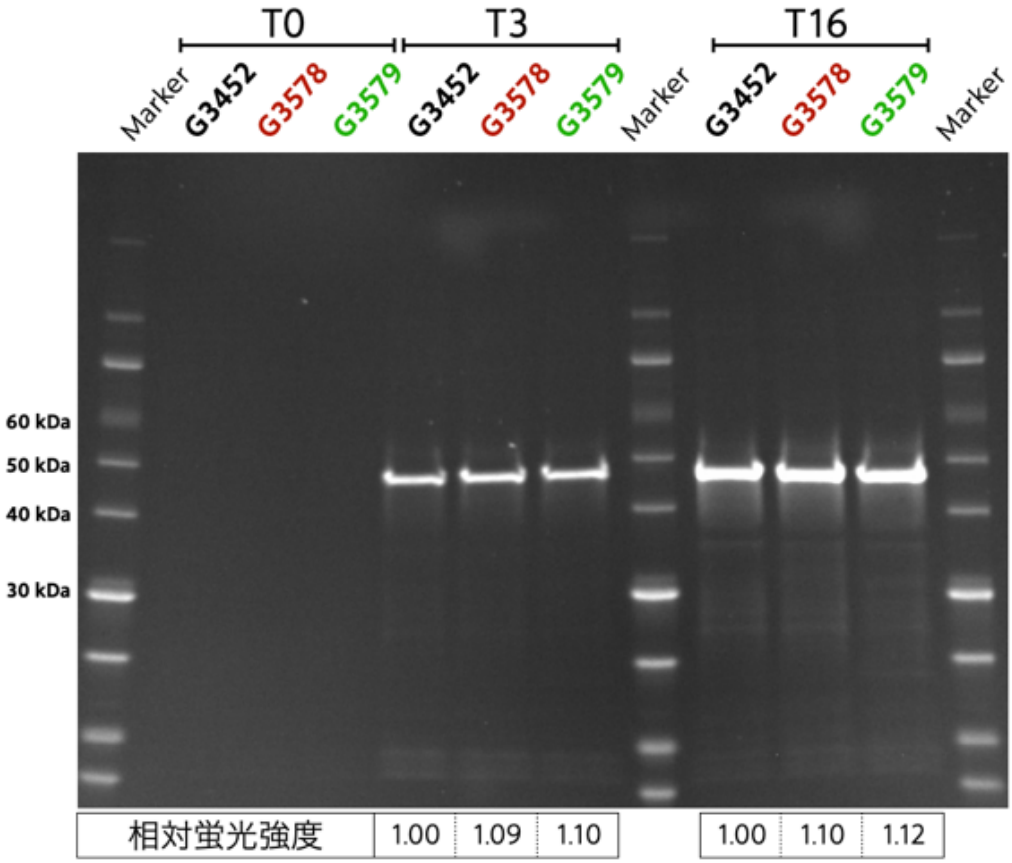


図 5.2-25：GEN3452, 3578, 3579 の培養液量当たりの蛍光強度の相対比較

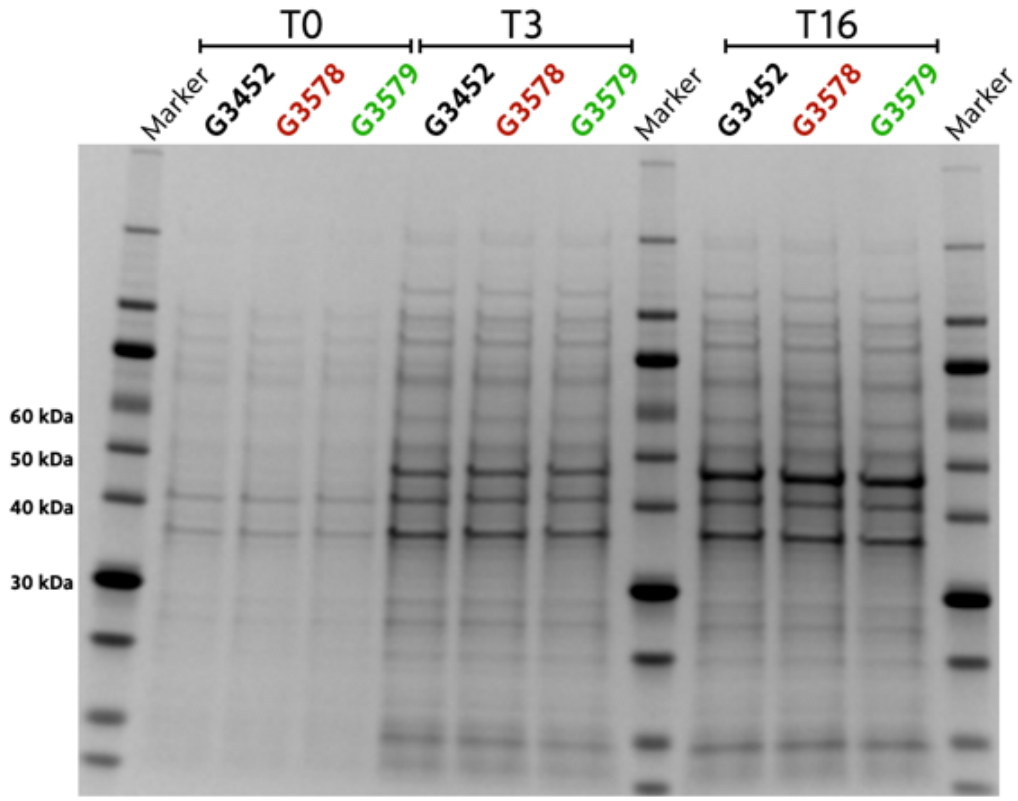


図 5.2-26：GEN3452, 3578, 3579 の培養液量当たりの CBB 染色

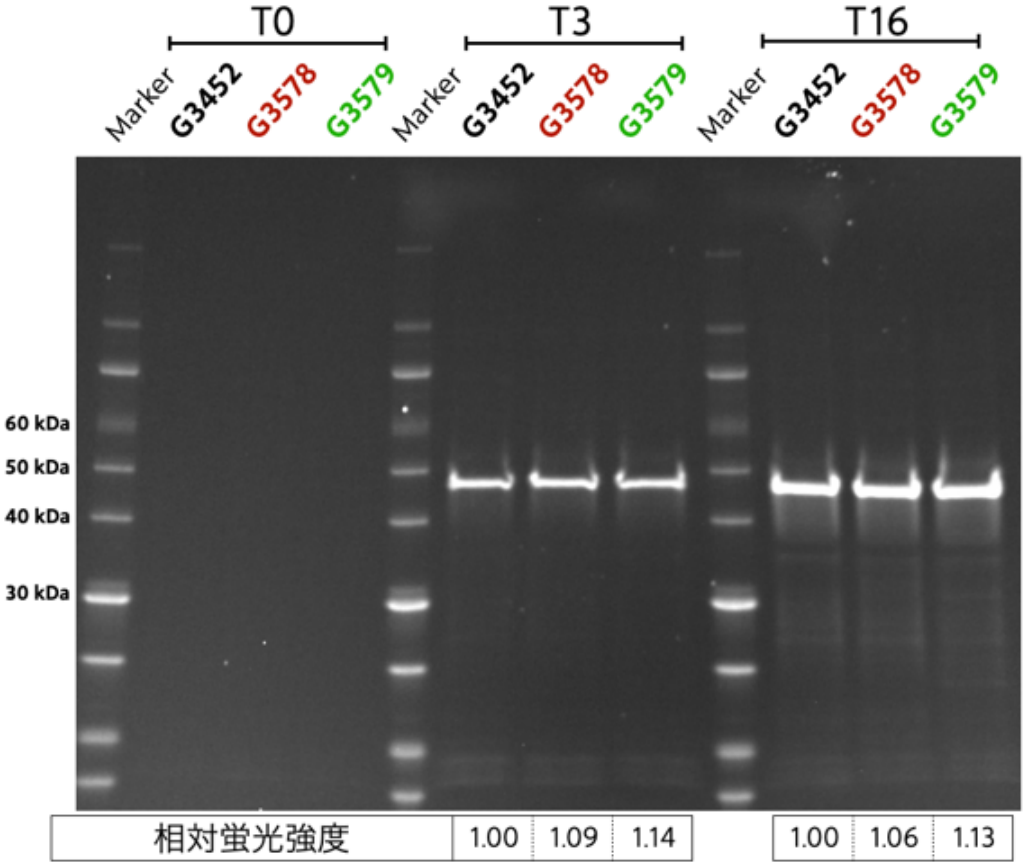


図 5.2-27：GEN3452, 3578, 3579 の等細胞数当たりの蛍光強度の相対比較

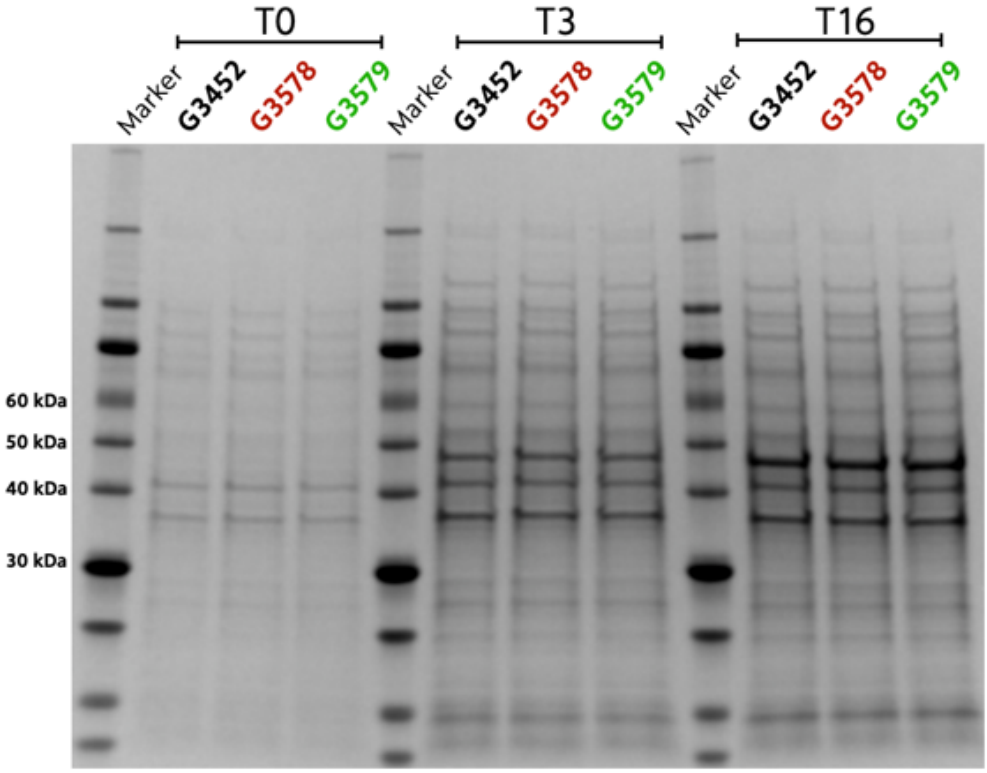


図 5.2-28：GEN3452, 3578, 3579 の等細胞数当たりの CBB 染色

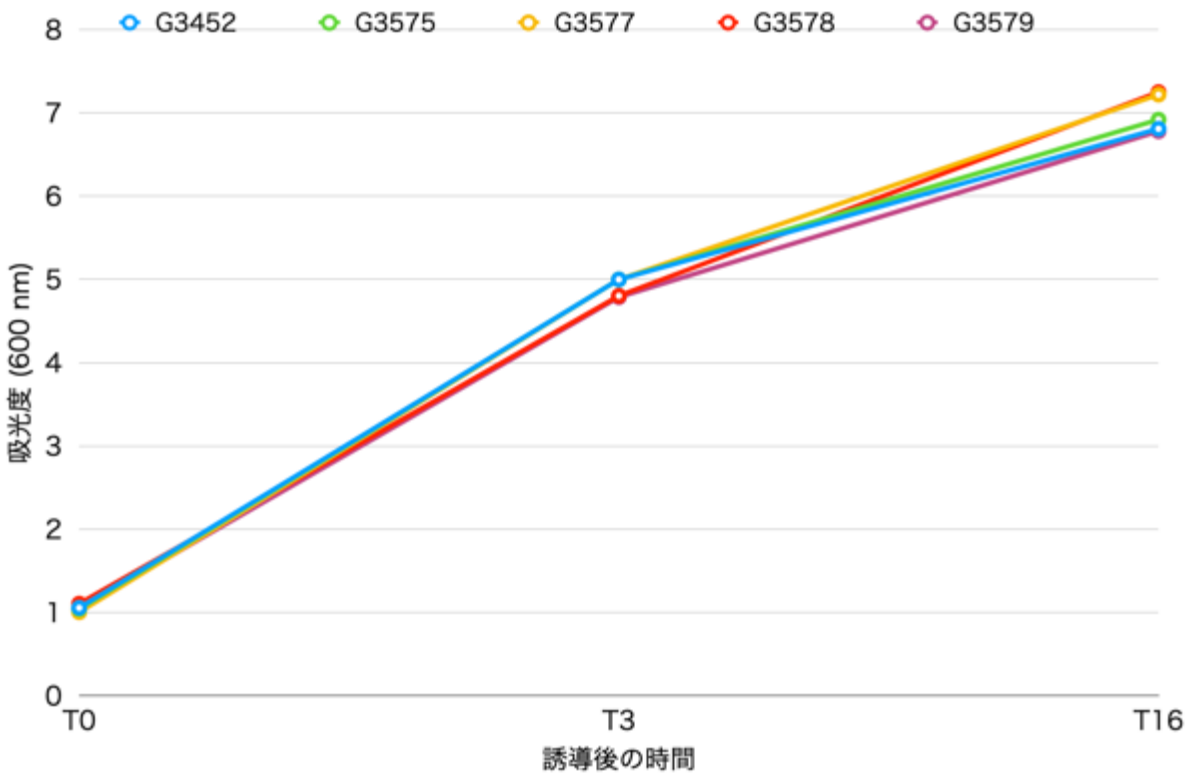


図 5.2-29：GEN3452, 3575, 3577, 3578, 3579 の誘導後の濁度の変化

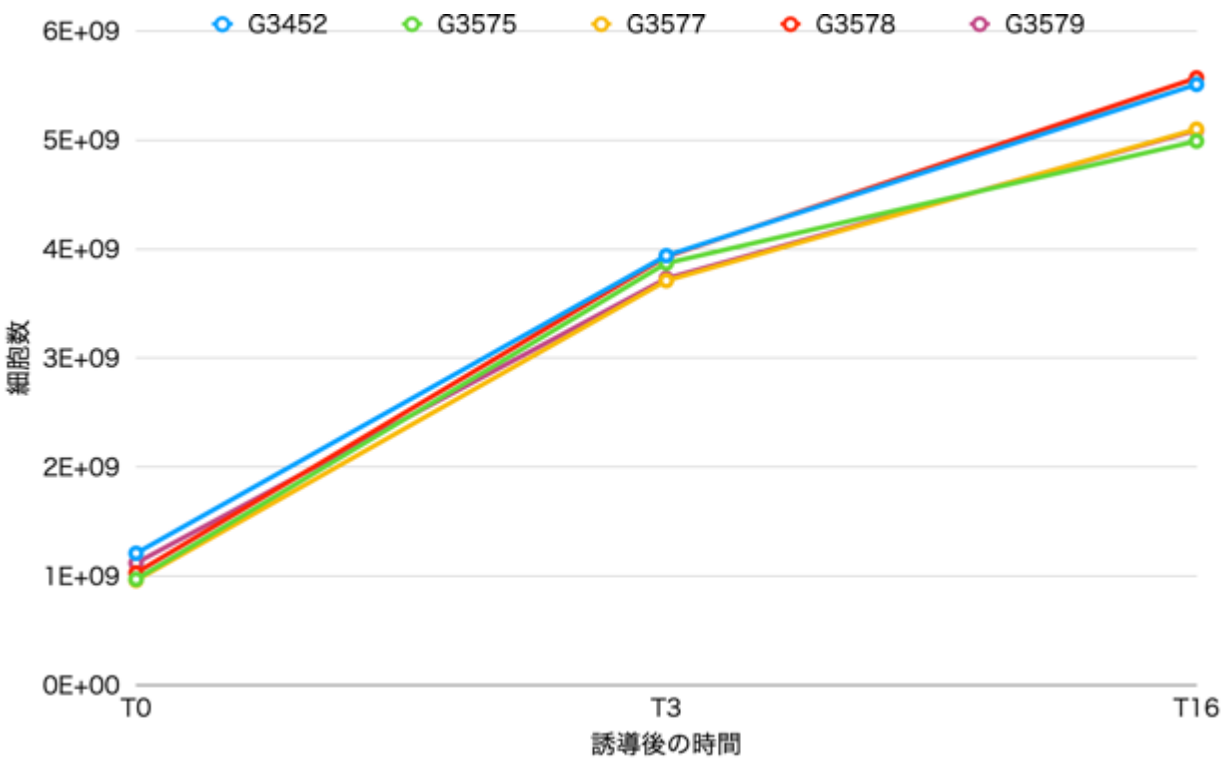


図 5.2-30：GEN3452, 3575, 3577, 3578, 3579 の誘導後の細胞数の変化

新たに設計した遺伝子群 GEN3452、3575、3577、3578、3579 の小規模培養の結果を図 5.2-21 から 2-30 に示す。GEN3575, 3577 においてはコントロールの GEN3452 とほぼ同程度の蛍光強度を示したのに対して、GEN3578、3579 は GEN3452 に対して液量当たりでも細胞数あたりでも若干強い蛍光強度を示した。これらの結果を受けて同様に流加培養条件でも同じことが再現するか確認を行った。

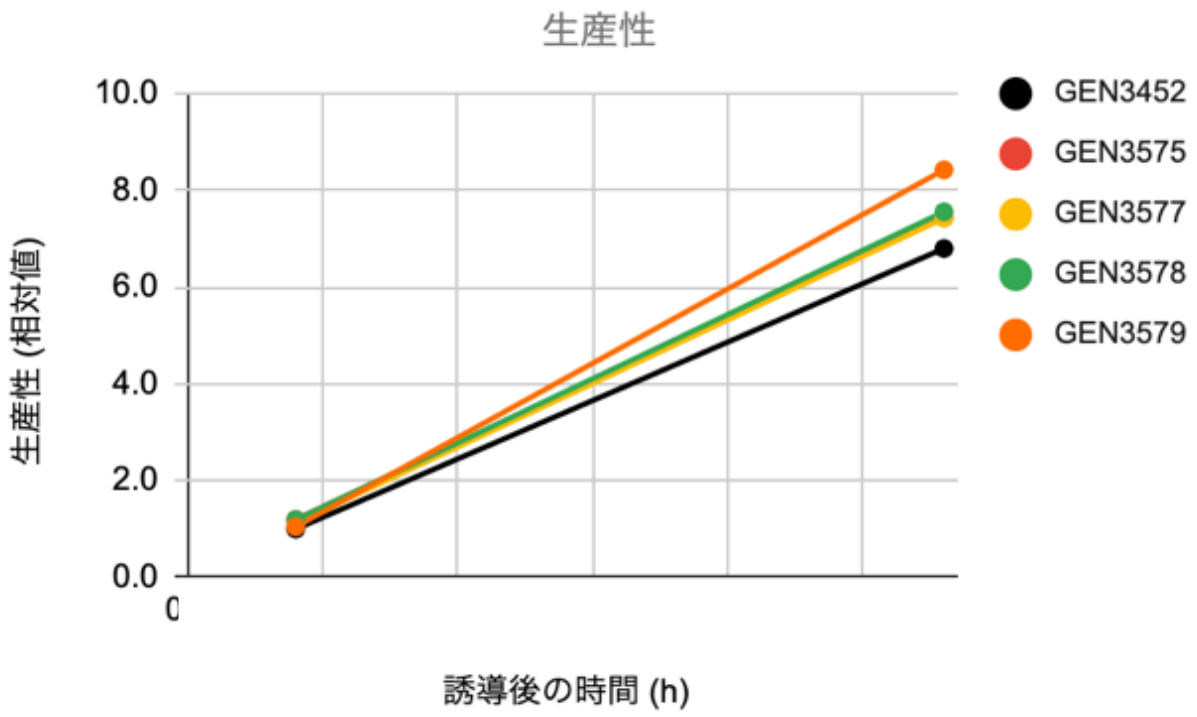


図 5.2-31：流加培養における GEN3452, 3575, 3577, 3578, 3579 の生産性の変化

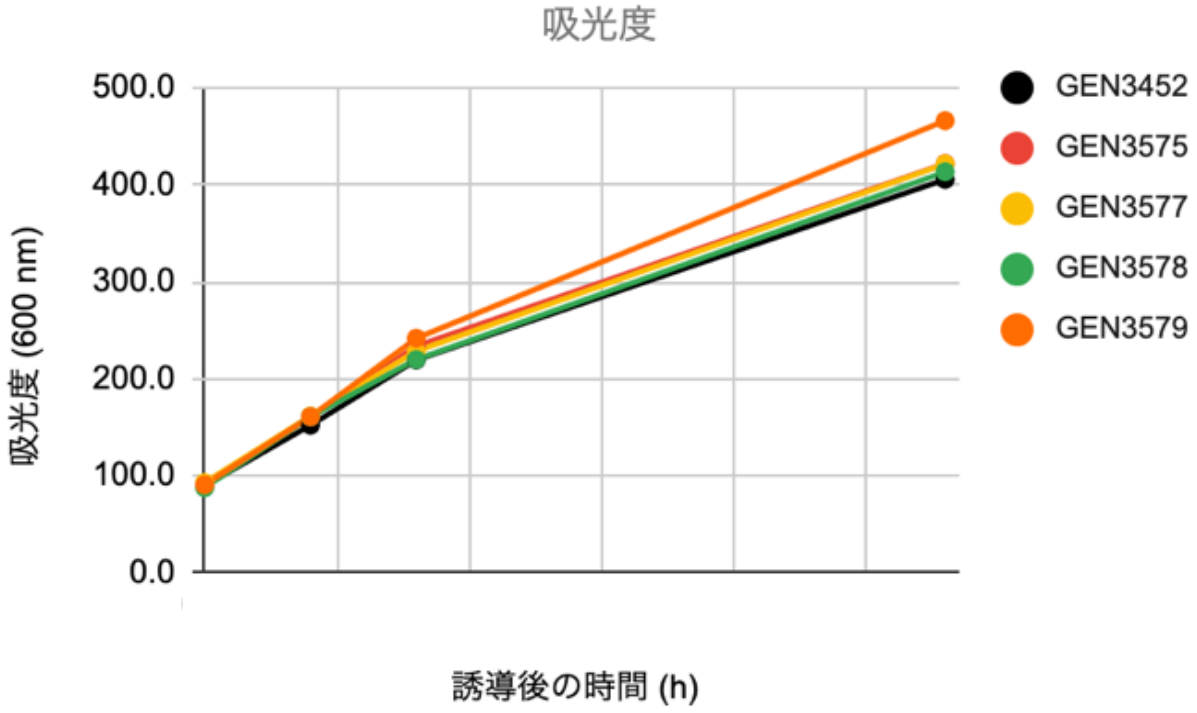


図 5.2-32：流加培養における GEN3452, 3575, 3577, 3578, 3579 の吸光度の変化

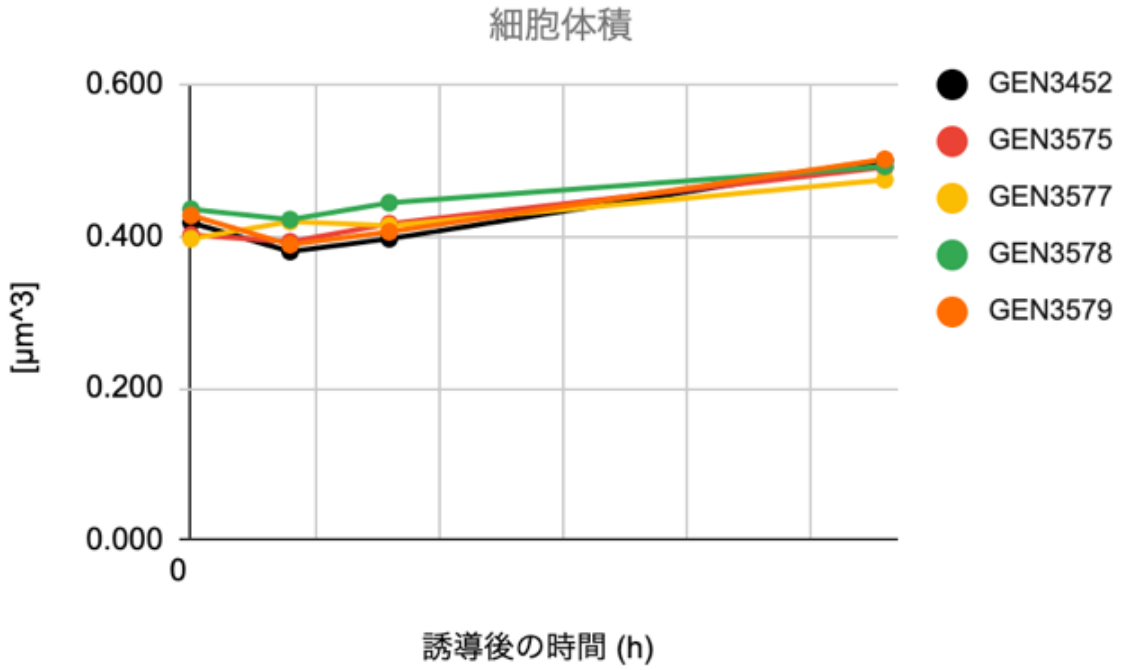


図 5.2-33：流加培養における GEN3452, 3575, 3577, 3578, 3579 の細胞体積の変化

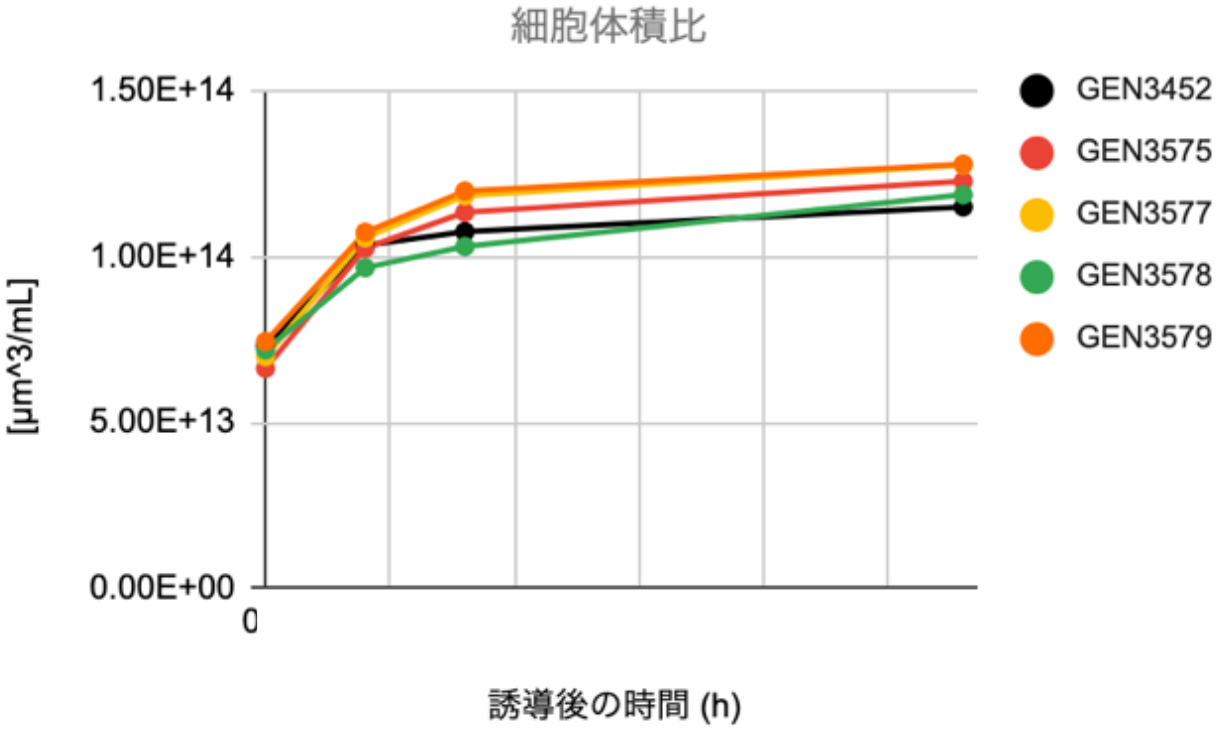


図 5.2-34：流加培養における GEN3452, 3575, 3577, 3578, 3579 の細胞体積比の変化

GEN3452、3575、3577、3578、3579 の遺伝子群を流加培養条件で培養した結果を図 5.2-31 から 2-34 に示す。小規模培養での結果に反して生産性においては GEN3575、3577、3578、3579 の何もコントロールの GEN3452 よりも高い値を示した。これらの結果を受けて、再現性を確認するために同じ遺伝子群の流加培養再度行った。

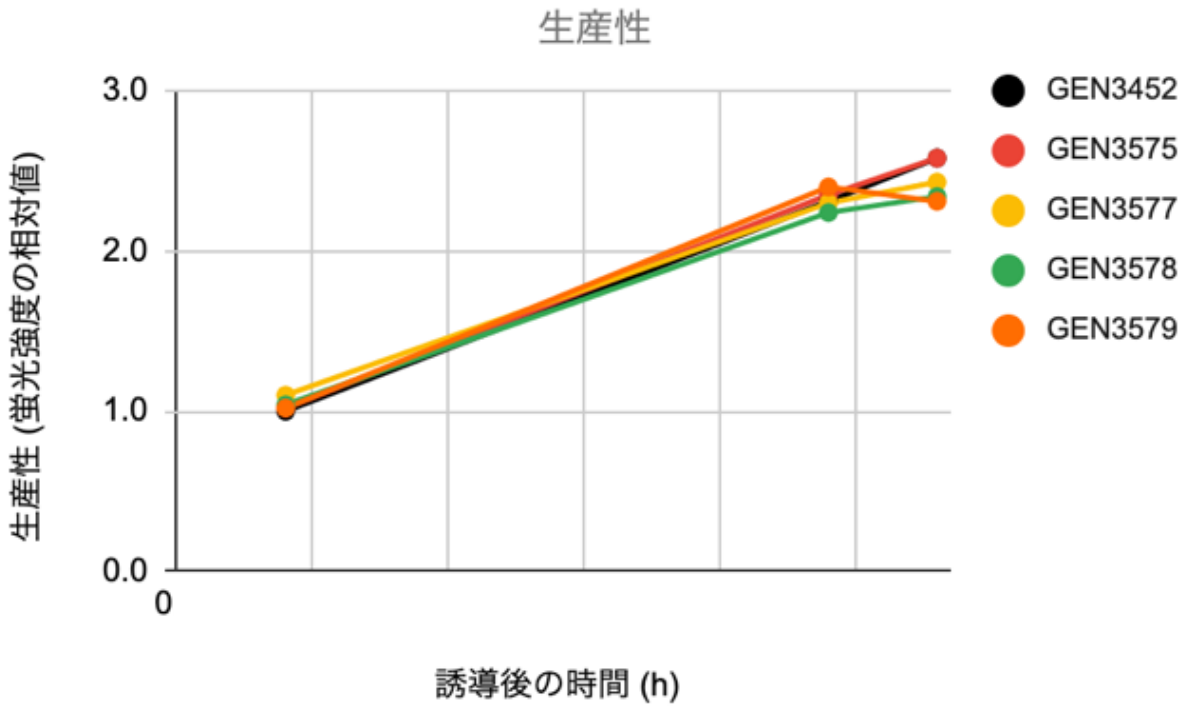


図 5.2-35：流加培養における GEN3452, 3575, 3577, 3578, 3579 の生産性の変化

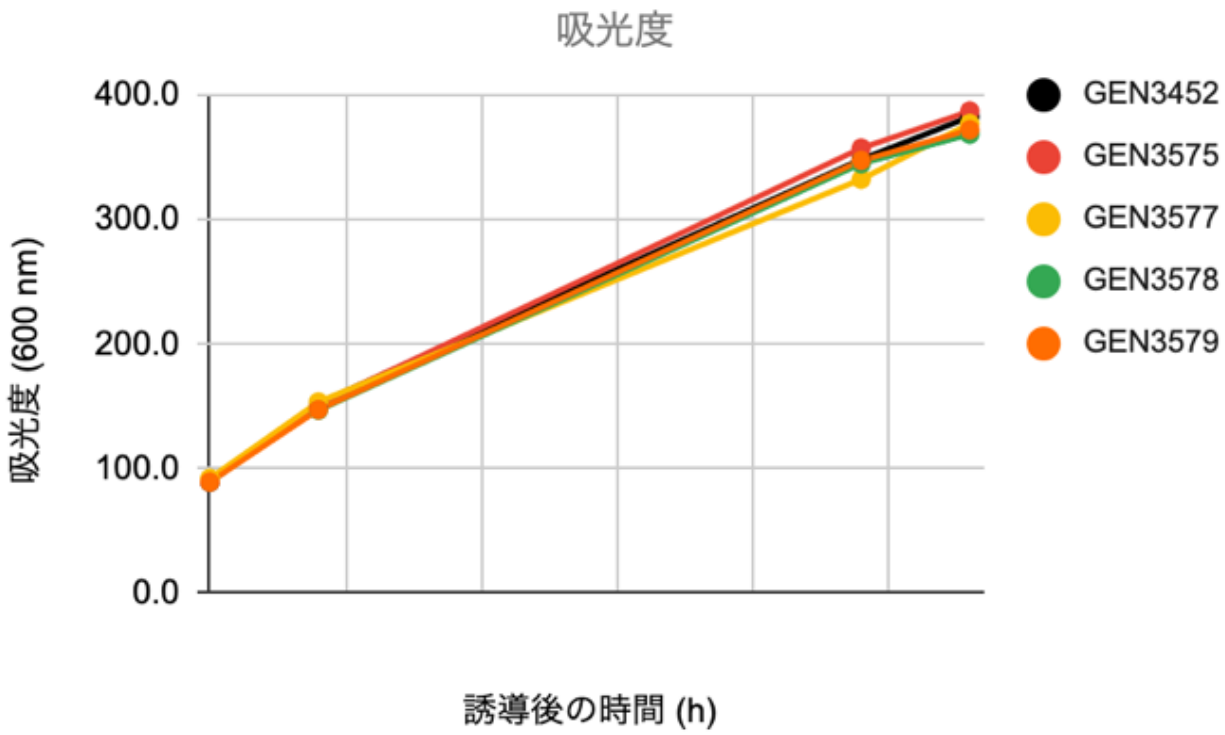


図 5.2-36：流加培養における GEN3452, 3575, 3577, 3578, 3579 の吸光度の変化

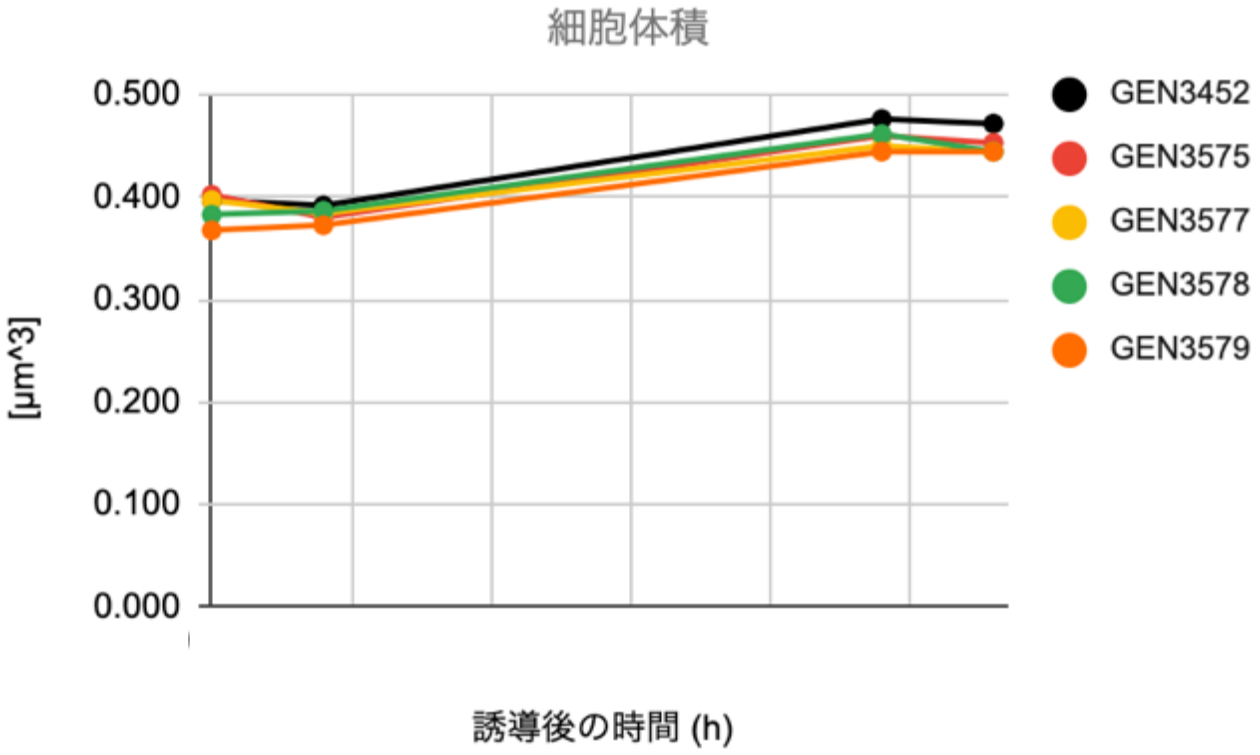


図 5.2-37：流加培養における GEN3452, 3575, 3577, 3578, 3579 の細胞体積の変化

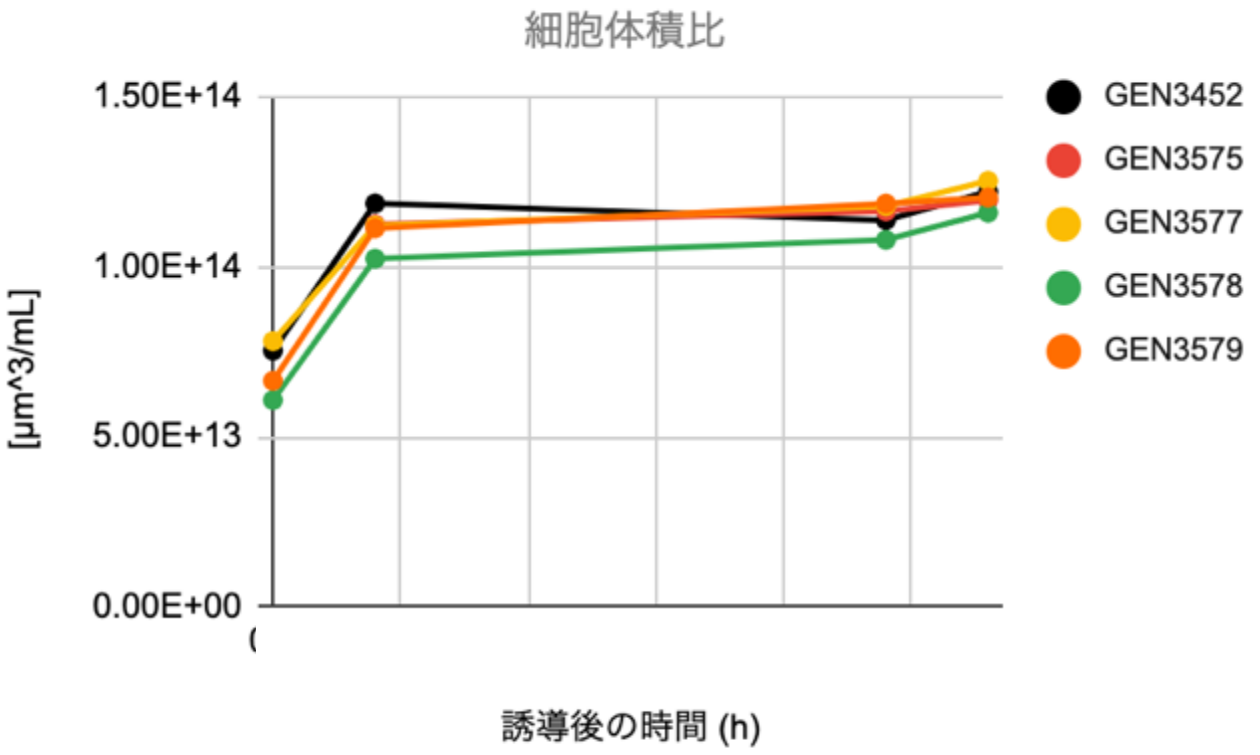


図 5.2-38：流加培養における GEN3452, 3575, 3577, 3578, 3579 の細胞体積比の変化

GEN3452、3575、3577、3578、3579 の遺伝子群を再度流加培養条件で培養した結果を図 5.2-35 から 2-38 に示す。しかしながら、2 回目の検討ではコントロールの GEN3452 に比べて何の遺伝子も生産性が同等か低い結果になってしまった。これは 2 回目の流加培養でスケールの異なる培養槽を用いた事に起因する可能性もあるが断定はできない。以上の結果から GEN3452 をベースとして振った遺伝子群の中からも流加培養条件において生産性の点で明確に優位な遺伝子配列を得ることはできなかった。

・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。まず昨年度の事業においてビーズ加工法の基礎技術を確立するため、乳化法と噴霧法の検討を行った。その結果、乳化法では適切なビーズ加工が難しい一方で、噴霧法では目的形状のビーズ取得に成功したため、本年度は噴霧法に絞ってビーズ加工プロセスの検討を進めた。まず噴霧法の基本プロセスについて説明する（図 5.3-１）。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。最初のステップとしては溶媒中に細かくタンパク質を分散させたタンパク質スラリーを調整する必要がある。仮にスラリー中の粒子が大きいと、SD を行った際に得られるビーズが大きくなってしまうことから、スラリー中の粒子は極力小さくすることが重要である。またスラリー中のタンパク質濃度も重要であり、濃度が薄いほど細かなビーズはできやすいが、生産性は大きく低下してしまうため、スラリーの濃度は極力高くできることが好ましい。次に乾燥条件であるが、SD と噴霧するディスク形状、そして入口温度と出口温度が主なパラメータとなる。一方で、それほど様々な条件を振ることができる装置でもないため、実質的には標準条件でビーズ化が可能かどうかという話になる。最終的に得られたビーズについては、その中に一部粗大なものも含まれていることもあるため、メッシュをかけて取り除くことになる。以上が噴霧法の基本プロセスとなる。

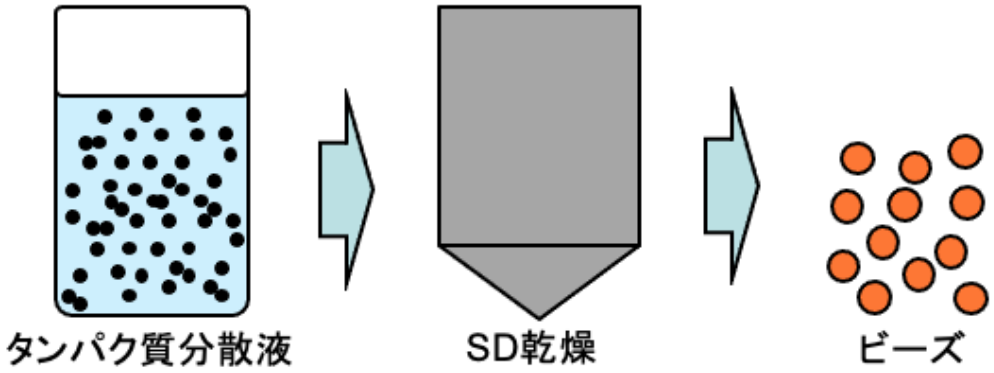


図 5.3-1：噴霧法の概要

本年度において、本開発項目では①タンパク質ビーズの性質の改変、②ビーズ加工方法の低コスト化の主に２つのテーマに取り組んだ。まず①について記載する。昨年度、製造したビーズについて、化粧品 OEM メーカーより、以下のフィードバックがあった。「しっとり感があり、滑り性が良い。一方でウレタンビーズと比較すると硬さがあり、もう少し柔らかさが欲しい」。したがって、本年度ではビーズの触感を柔らかくするということを目的として、タンパク質の種類を変更したビーズを作製した。この新規タンパク質（タンパク質 B）は従来のタンパク質（タンパク質 A）と比較して、アミノ酸配列中の結晶化し易

い領域を可能な範囲で取り除き、非結晶領域がリッチとなるような分子デザインを行った。これによってビーズ化した時に硬い領域が相対的に減り、結果として柔らかい触感が発現するのではないかと仮説を立てた。次にタンパク質 B をコードする遺伝子を合成し、菌株を作製、そして培養精製を行った。培養においては、生産性が特段低下することもなく、順調にタンパク質を生産することができた。一方で精製工程では、タンパク質の結晶化度が下がったためか、より親水的な性質が発現し、通常よりもロスが大きかった。ただし、精製すること自体は可能であったため、昨年度技術確立した中和法を使用して、タンパク質スラリーの調整を行うことができた。そして得られたスラリーを SD の外部委託業者に提供し、ビーズ化した。得られたビーズ写真を図 5.3-2 に示す。ビーズは標準乾燥条件で球状に加工することができ、特に粗大な形状のもは含まれていなかった。また粒度分布については、ちょうど 10um にピークが来ており、分布もシャープな形状であった（図 5.3-3）。また平均粒子径は 9.4um と算出された。取得量は約 1.5kg であり、目標としていた 1kg 以上の取得に成功した。こちらのビーズについて化粧品 OEM メーカーにて官能評価をして頂いたところ、滑らかで、かつしっとり感や柔らかさが向上した感触を持って頂けた。また「タンパク質の種類によって、このように触感が変化するのは驚きである。」という感想も得ることができた。したがってアミノ酸配列によって触感を変化させることは十分可能であるということと、逆にタンパク質のデザインによってある幅の中で意図した触感を発現できる可能性が示された。

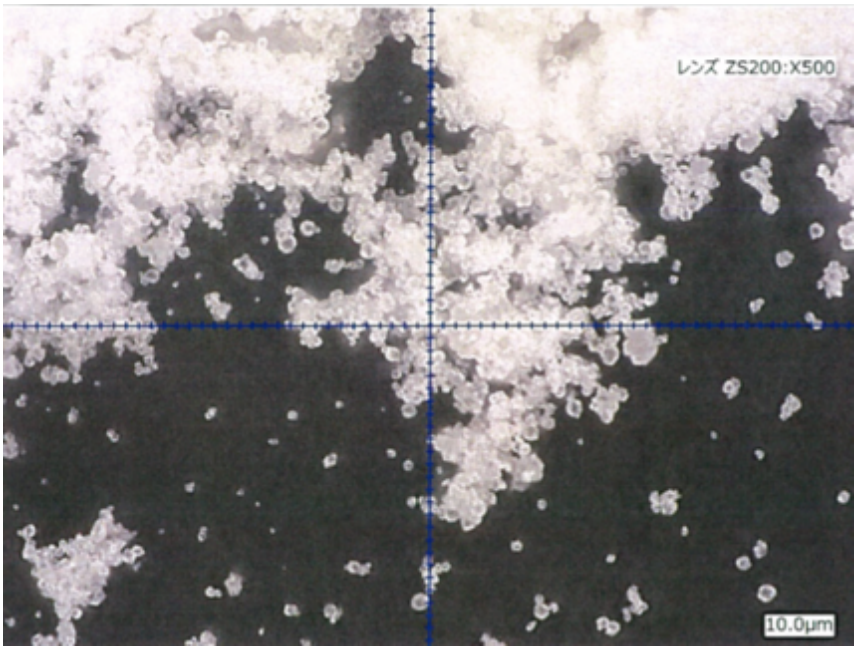


図 5.3-2：タンパク質 B のビーズ写真

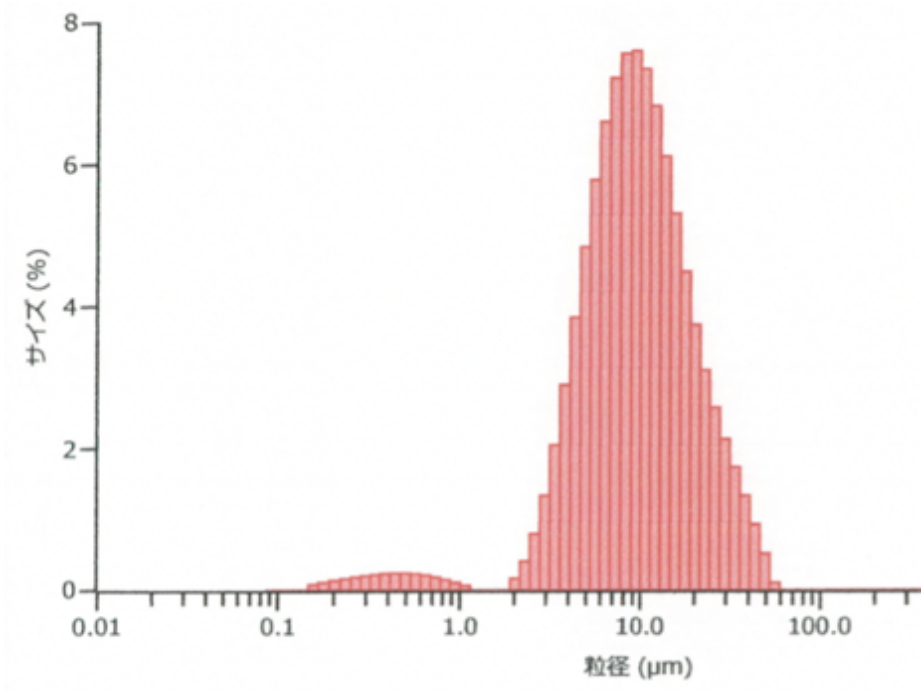


図 5.3-3：得られたビーズの粒度分布

次にビーズ加工のコストダウン開発について説明する。先述したように SD を用いたタンパク質ビーズのコストダウンにあたっては、タンパク質スラリーを極力高濃度化し、SD を行うことが重要である。昨年度開発した噴霧法において、タンパク質スラリー液は、培養後の精製工程の途中から分岐させる形で遠心分離を繰り返し、取得していた。しかしながら本手法は遠心分離機の処理時間が長くかかり、かつ得られるスラリー液のタンパク質濃度も低いため、生産性という観点では優れたものではなかった。したがってこのスラリー液を調整する工程の改善に本年度取り組んだ（図 5.3-4）。具体的には、精製工程で一度タンパク質の凝集体を取得し、それを水中で分散させることでスラリー液を取得するという方法である。これにより、一度凝集体としてタンパク質を取得できるため、遠心分離機を繰り返し使用する必要はなく、かつスラリー液のタンパク質濃度を飛躍的に向上することができる。特にポイントとなるのは、タンパク質を水中に分散させる工程であり、ここで細かい粒子径にできれば、その後の SD でも粒子径をより小さくし易い。そこでミキサーを使用して分散させる方法と、ビーズミルを使用して分散する方法を試すこととした。

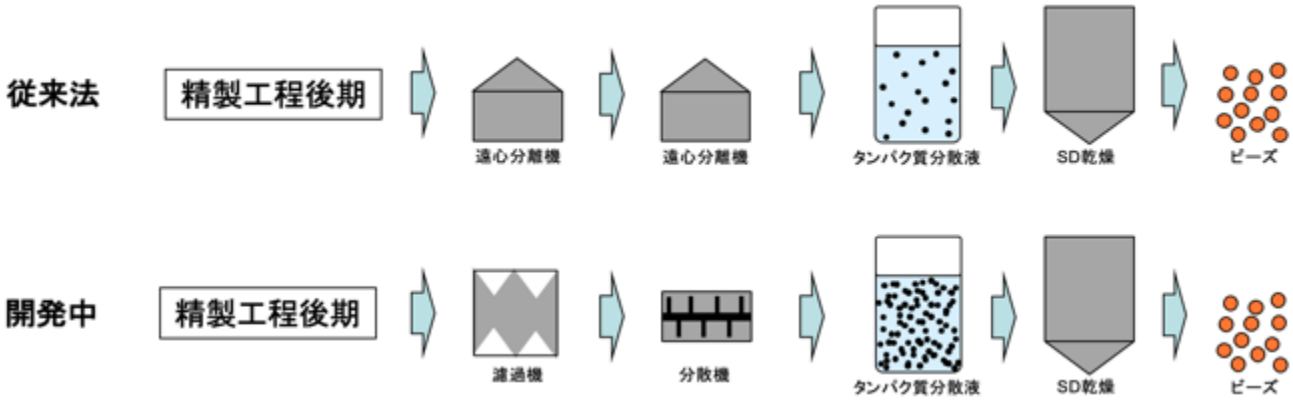


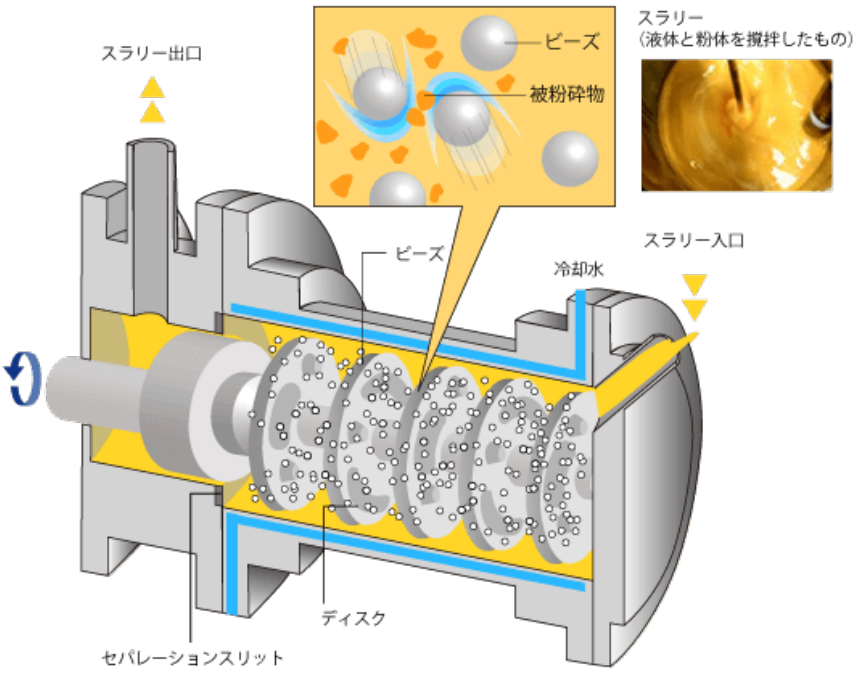
図 5.3-4：タンパク質分散液の調整方法の違い

まずミキサーを用いて分散検討を行った結果について述べる。タンパク質凝集体が 10%濃度になるように水の中に入れて、ミキサーによる分散を行った。今回、直径が 10um 程度の粒子を取得するためには、スラリー液中の粒子径を 2um 程度に抑える必要があると想定し、それを目標にした。その結果、粒子径は d50=7.2um、d100=418.6um となり、目標には未達であった。また粒子径の分布が広くなっており、ミキサーだけでの分散は不十分であると思われた。そのため、次にビーズミルを使用した分散検討を行うこととした。

図 5.3-4：ミキサーによるスラリー液の調整

まずビーズミルの原理について説明する（図 5.3-5）。基本的にはスラリー液の中の粒子にビーズを当てることで、その粒子を砕き、微細化するというものである。通常はビーズが充填された装置内にスラリー液を通し、ディスクを回してビーズを動かすことで、処理を進めていく。この際、ビーズの材質や形状、スラリー液の速度、回転数、循環式かバ

ッチ式かなどによって、微細化の程度が異なってくる。また一般的にはスラリー中の粒子の硬度が高い方が破砕され易く、柔らかい素材である場合は微細化の効率が落ちる。当社素材については、比較的柔らかい材質となるため、微細化はし辛いことが予想された。



https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.aimex-apema.co.jp%2Fseihin_beadmill%2Fbeadsmilltowa.html&psig=AOvVaw28-jnyk8VhjkUsPTlyYc9b&ust=1646797216507000&source=images&cd=vfe&ved=0CAsQjRxqFwoTCMCK2OvLtfYCFQAAAAAdAAAAABAt

図 5.3-5：ビーズミルの原理

まずビーズミルの初期検討の結果について記載する。一度ミキサーで分散したスラリー液を、ビーズミルで 3 パターンに分けて処理をした（表 5.3-1）。その結果、ミキサーによる分散と比較すると、いずれの処理についても d50 及び d100 の数値は下がっていたが、目標値には届かなかった。循環と 1 パスでは大きな差は出ず、むしろ循環を長時間行うとスラリー中の粒子径が大きくなることが確認されたため、短時間での処理が必要であることがわかった。また使用するビーズが小さい方が若干ではあるが、スラリー中の粒子径も小さくなるようである。図 5.3-6 はビーズミルで分散したスラリー液であるが、壁面に大きな形状のタンパク質が付着していた。しかしながら実機で処理を行うと破砕の効率も変わってくるため、今回の初期条件を基に実機試験に進むこととした。

表 5.3-1：ビーズミルのラボ結果

サンプル	#1	#2	#3
ビーズ径(mm)	1.0	1.0	0.3
方式	循環	1パス	循環
d50(um)	3.0	4.1	2.9
d100(um)	13.0	18.5	7.7

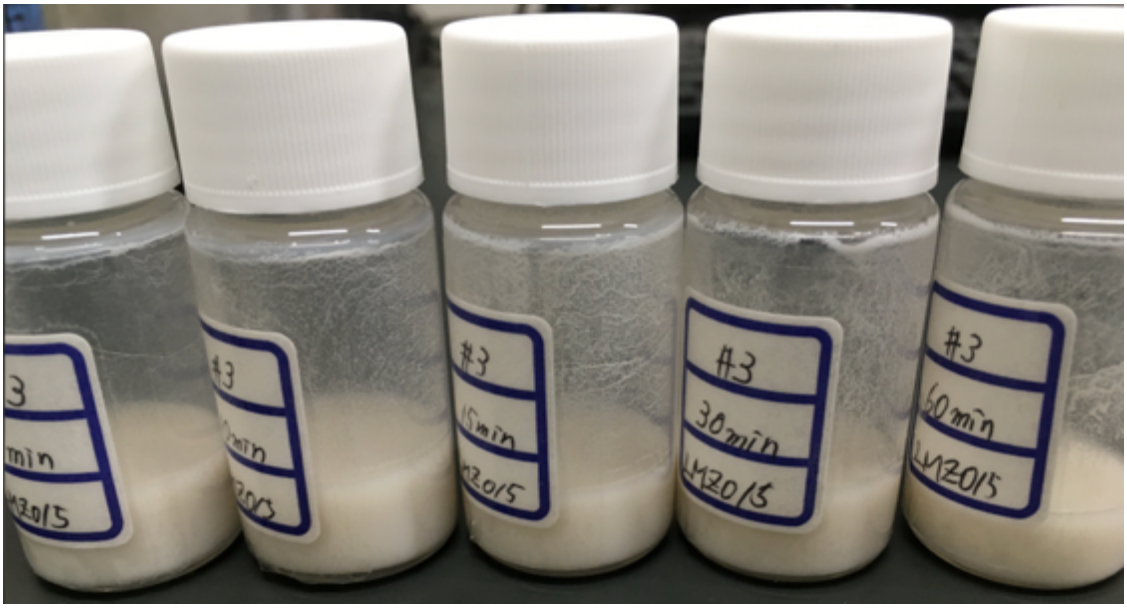


図 5.3-6：ビーズミルのラボ結果写真

次に実機結果について説明する。ラボ結果を受けて、表 5.3-2 の条件で処理を行った。その結果、ラボ結果とあまり変わらない結果が得られた。したがって当社のタンパク質スラリーはビーズミルでは期待したほど微細化できるわけではないことがわかった。これはタンパク質が比較的柔らかい素材であることに加え、一度タンパク質を凝集させた時に、一部でかなり強い結合が起こっているものと考えられる。今回、取得した#1、#2 及びミキサーで分散したスラリー液の 3 つを使用して SD を行い、どのようなビーズが得られるかの検討を進めた。

表 5.3-2：ビーズミルの実機結果

サンプル	#4	#5
ビーズ径(mm)	1.0	0.3
方式	1 パス	1 パス (#1 を使用)
d50(um)	3.7	4.1
d100(um)	15.5	13.0

上記サンプルの SD 結果について記載する。3 つのサンプルについて、同一条件で SD を行った結果を表 5.3-3 にまとめた。その結果、ミキサーによる分散サンプルも含めて、ほぼ同一のビーズが出来上がった。ミキサー分散のスラリー液は他のサンプルと比較して、d50 及び d100 の値が大きいため、得られるビーズの粒子径も大きくなると予想していたため、これは予想外であった。またいずれのビーズも写真で確認すると球状であり、粒度分布にも大きな違いは見られなかった。したがって単純に製造コストだけを考えると単なるミキサー撹拌が一番安価に済むため、この方法を採用することが良いと思われる。一方で今回、10um のビーズを作製することを目標としていたため、そこについては未達となった。ただし、この粒子径のビーズであっても使用感が 10um ビーズと変わらない可能性もあり得るため、このビーズでの評価を進め、標準とすべき粒子径を改めて設定したいと考えている。

表 5.3-3：SD の結果

サンプル	SD1	SD2	SD3
原料	ミキサー分散	#4	#5
方式	ディスク型 SD	ディスク型 SD	ディスク型 SD
d50(um)	18.0	16.7	17.6
d100(um)	28.8	28.1	30.9

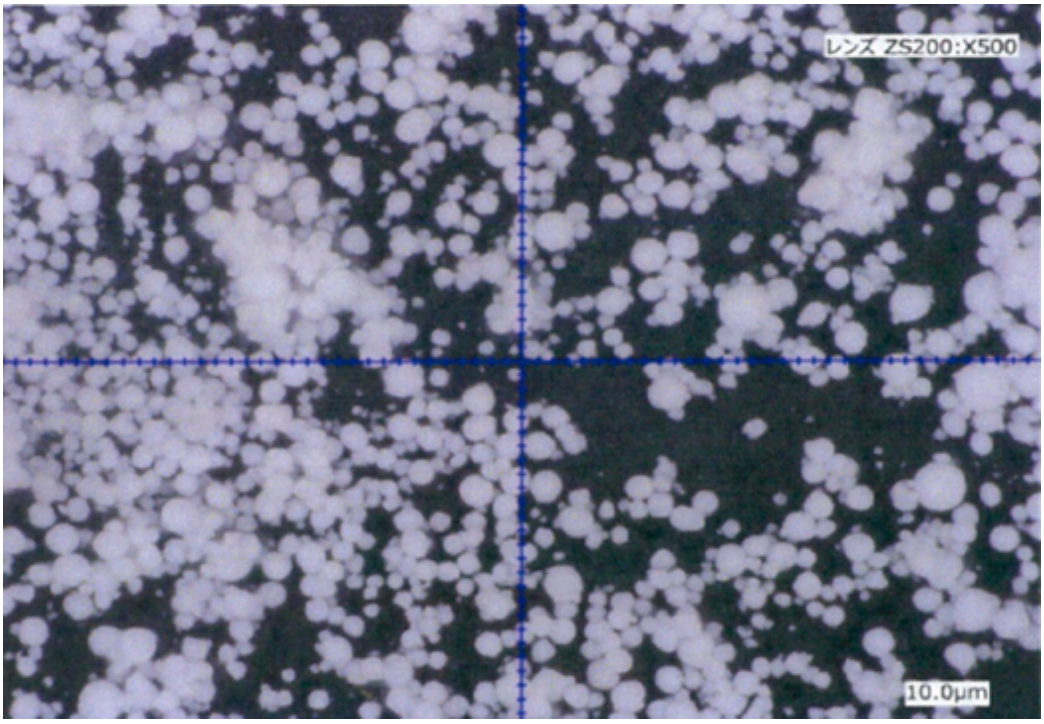


図 5.3-6：SD1 の写真

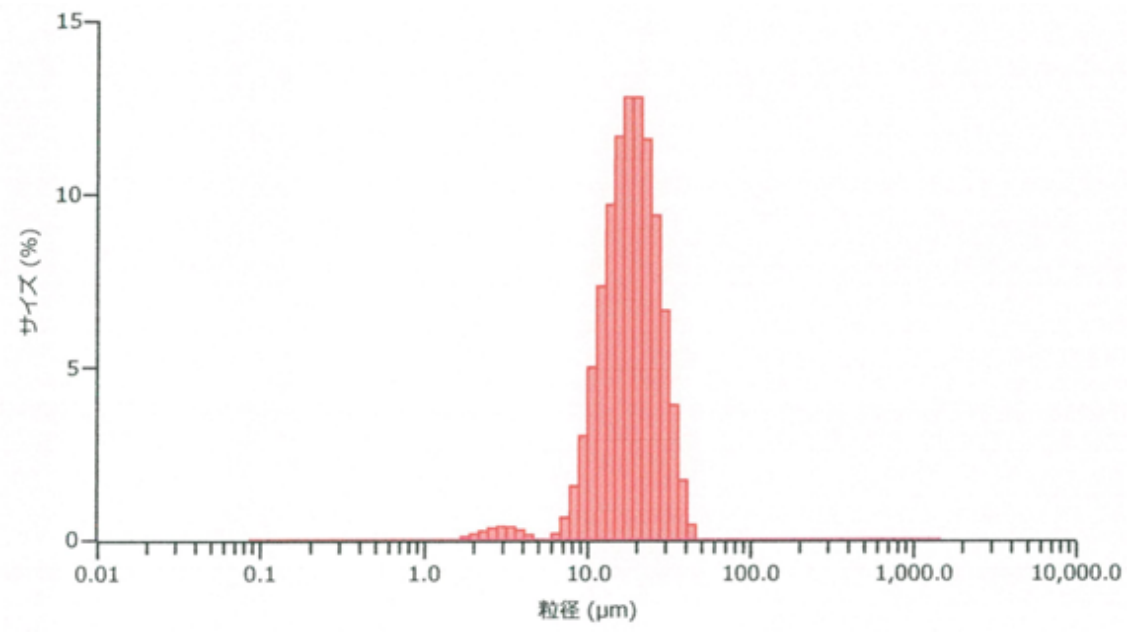


図 5.3-7：SD1 の粒度分布

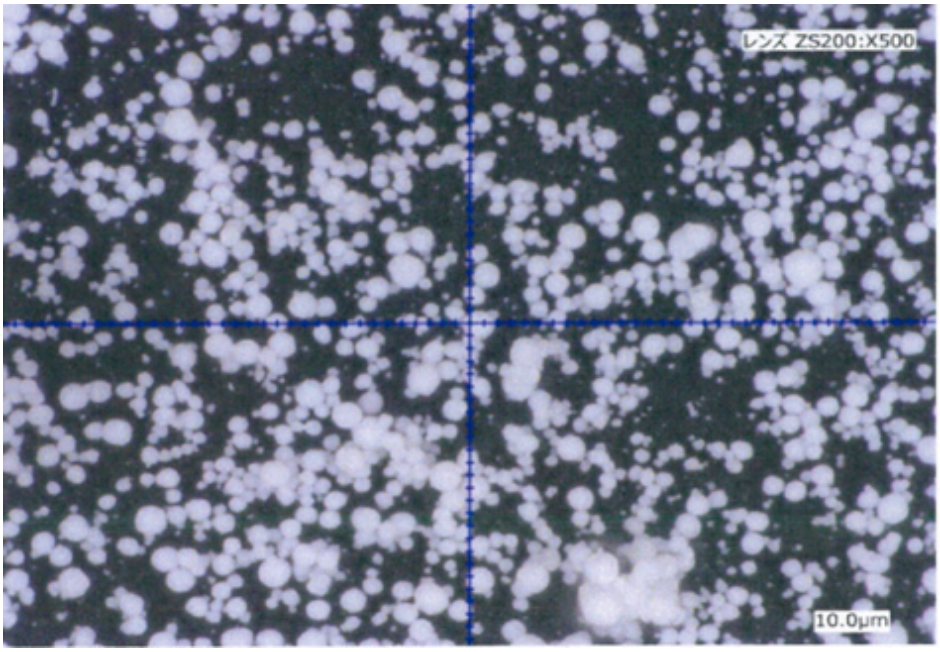


図 5.3-8：SD2 の写真

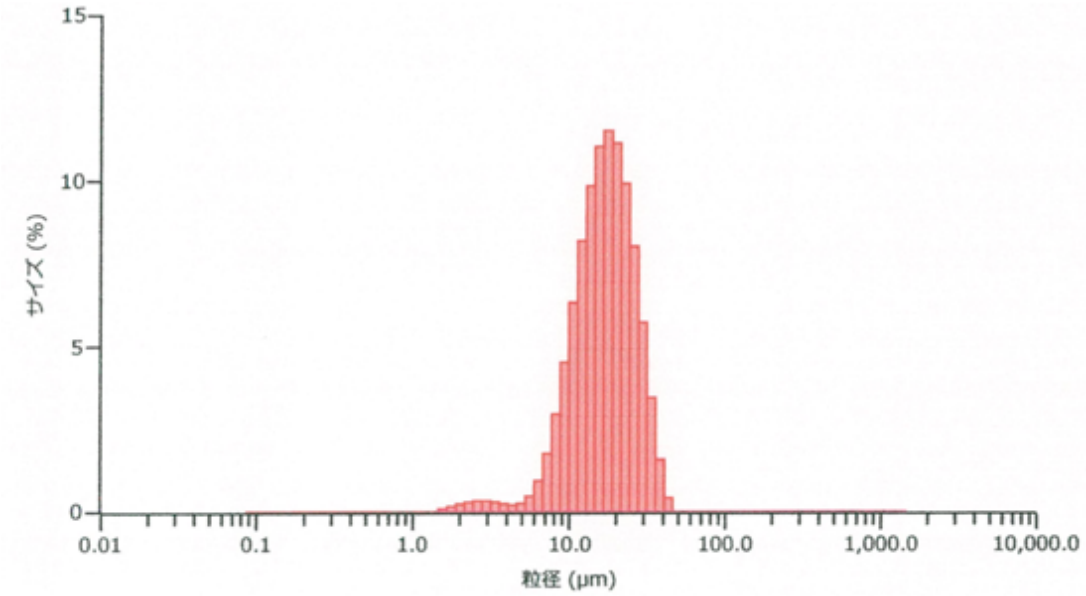


図 5.3-9：SD2 の粒度分布

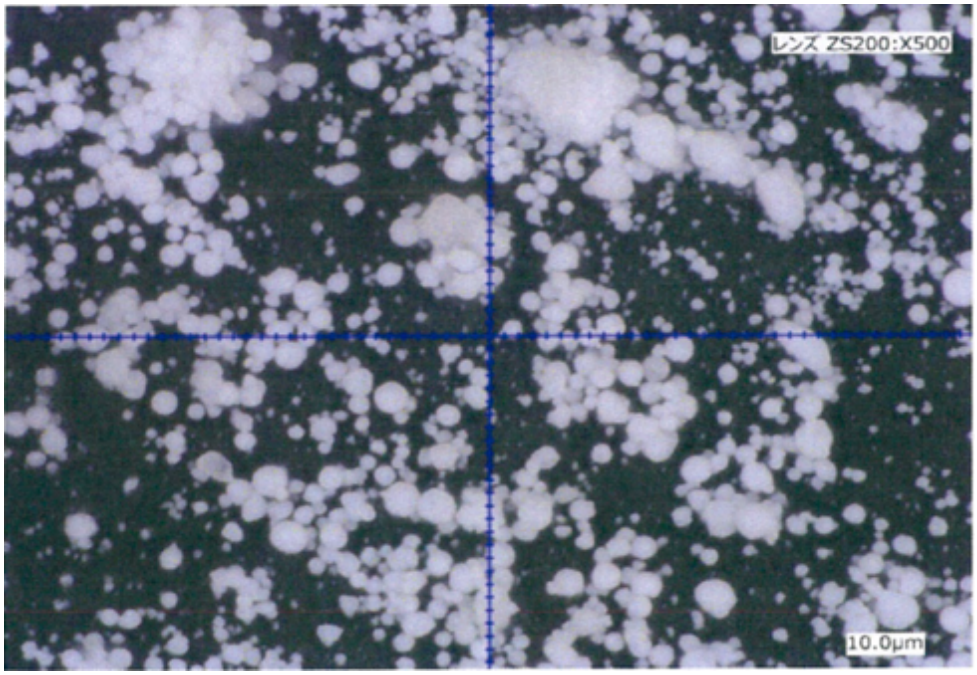


図 5.3-10：SD3 の写真

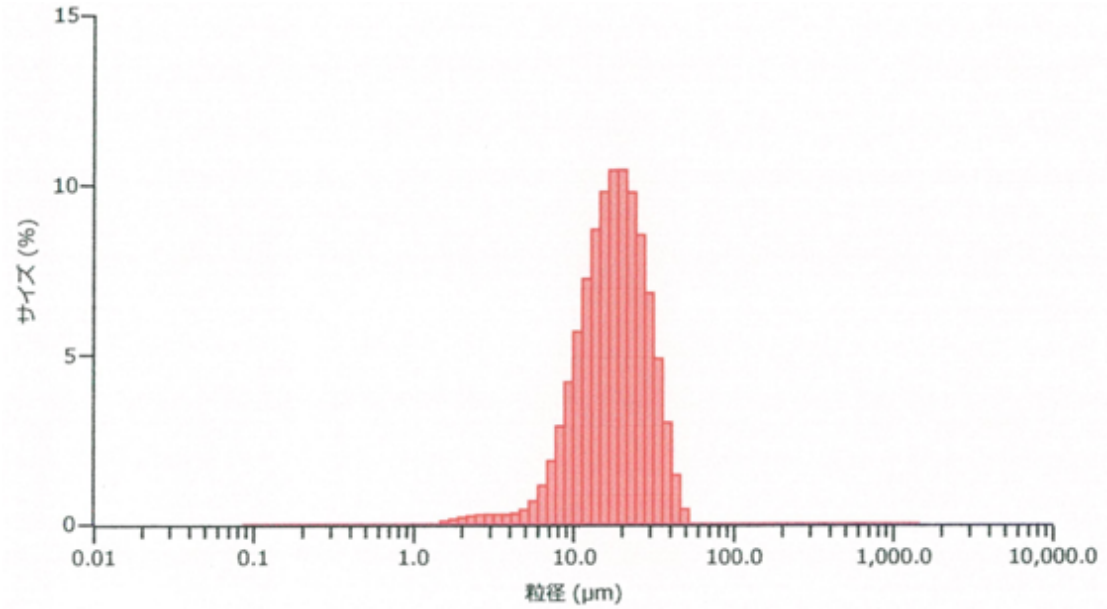


図 5.3-11：SD3 の粒度分布

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。ビーズの性質改変については、タンパク質のアミノ酸配列を変えることで触感を大きく変化させることができることがわかった。また今回の取り組みによって、よりウレタンビーズに近いタンパク質ビーズを得ることができた。ビーズ加工法の開発においては、タンパク質の凝集体を分散することでより高濃度のスラリー液を調整することができた。またこのスラリー液はSDを行うこともでき、球状のビーズが得られた。一方で粒子径が10umよりも大きくなった。来年度はこのビーズを評価し、さらなるプロセス改良に取り組んでいく。

・５．４：ビーズの実用化開発

本開発項目では、ビーズの実用化を目指し、溶媒への耐性やアプリケーションの試作結果について記載する。まずこれまでに取得されたビーズは図 5.4-1 のような外観をしており、やや黄色がかかっているが、化粧品 OEM メーカーからのコメントでは特に問題ないレベルであると言われた。また匂いについても特異臭があるわけでもなく、他のパウダーともよく混ざることから、ファンデーション向けの加工は十分に可能であるとのことであった。

図 5.4-1：タンパク質ビーズの写真

次にビーズの触感について、KES 試験を行った（図 5.4-2）。KES 試験は人工皮革の表面にビーズを塗布し、摩擦感測定器を使用して、滑り性及びなめらか感を評価するものである。滑り性は平均摩擦係数によって測定され、この係数が小さいほど滑り性が良いとされる。滑り性が良いということは、真球状のビーズができていることを意味している。またなめらか感については平均摩擦係数の変動によって評価され、これが大きいとざらざらした感じとなる。なめらか感はビーズの粒子径のバラツキをみているということができ、なめらか感が優れるということは、粒子径がそろったビーズになっていると考えることができる。ここではファンデーションによく使用されるビーズ(シリカ多孔質、シリカ無孔質、ナイロン、PMMA)を比較対象として、評価した。その結果、当社ビーズは滑り性及びなめらか感いずれも良好な結果が得られた。プロットが左下に行くほど良いビーズとされ、当社ビーズは総合的に既存ビーズと同等以上となっている。したがってこの結果からうまくビーズ化できていることが確認された。なめらか感については多少、他のビーズと比較して

多少上の方にプロットされているが、これは粒子径に多少のバラツキがあるためだと思われる。ただし触感としては全く問題ないレベルであり、ファンデーション用のビーズに使用することは可能と判断された。

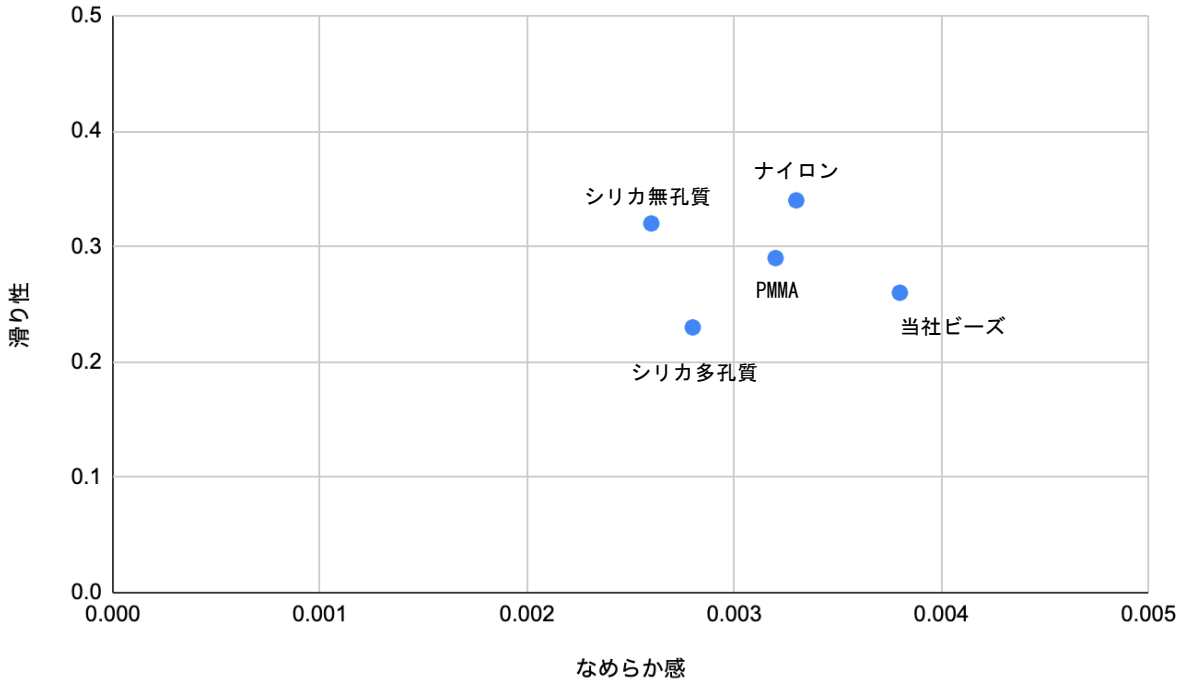


図 5.4-2：KES 試験結果

次に艶ヘーズ試験を実施した（図 5.4-4）。この試験は曇り具合を評価するものであり、数値が小さいほど透明であることを意味している。ファンデーションに使用するビーズとしては、ヘーズ値が高いほど好ましい。これはヘーズ値が高いほど、艶消しやシミ、シワを隠す効果が高くなるためである。当社ビーズを評価したところ、シリカ多孔質と同等レベルであるという非常に優れた結果が得られた。恐らくビーズの表面に微細な凹凸があるためだと思われる。したがってファンデーションに求められる機能を当社ビーズが保持していることが確認された。

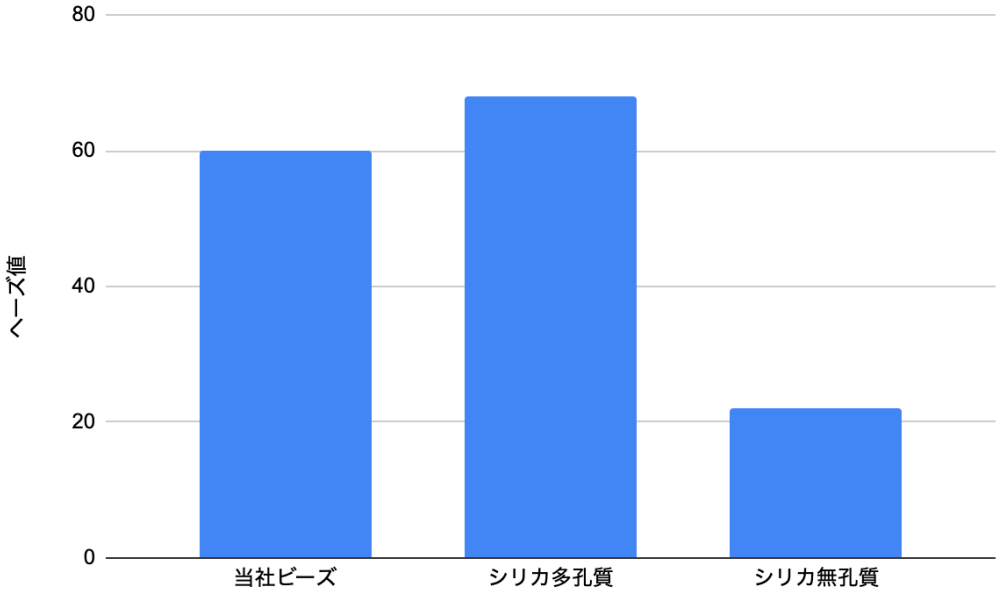


図 5.4-3：ヘーズ試験結果

ここではファンデーションの試作結果について報告する。ファンデーション向けビーズとして基本的な特性を当社ビーズが保持していることが確認できたため、実際に化粧品OEM メーカーにて、ファンデーションを試作した。一般的なプレストファンデーションの処方に沿って、各ビーズを約 10%配合したファンデーションを作製した（図 5.4-4）。当社タンパク質ビーズは他のビーズと同様に問題なく作製することができた。また写真ではわかりにくいが、肌にファンデーションを塗布した後の外観も問題なかった（図 5.4-5）。

図 5.4-4：当社タンパク質を使用したファンデーション

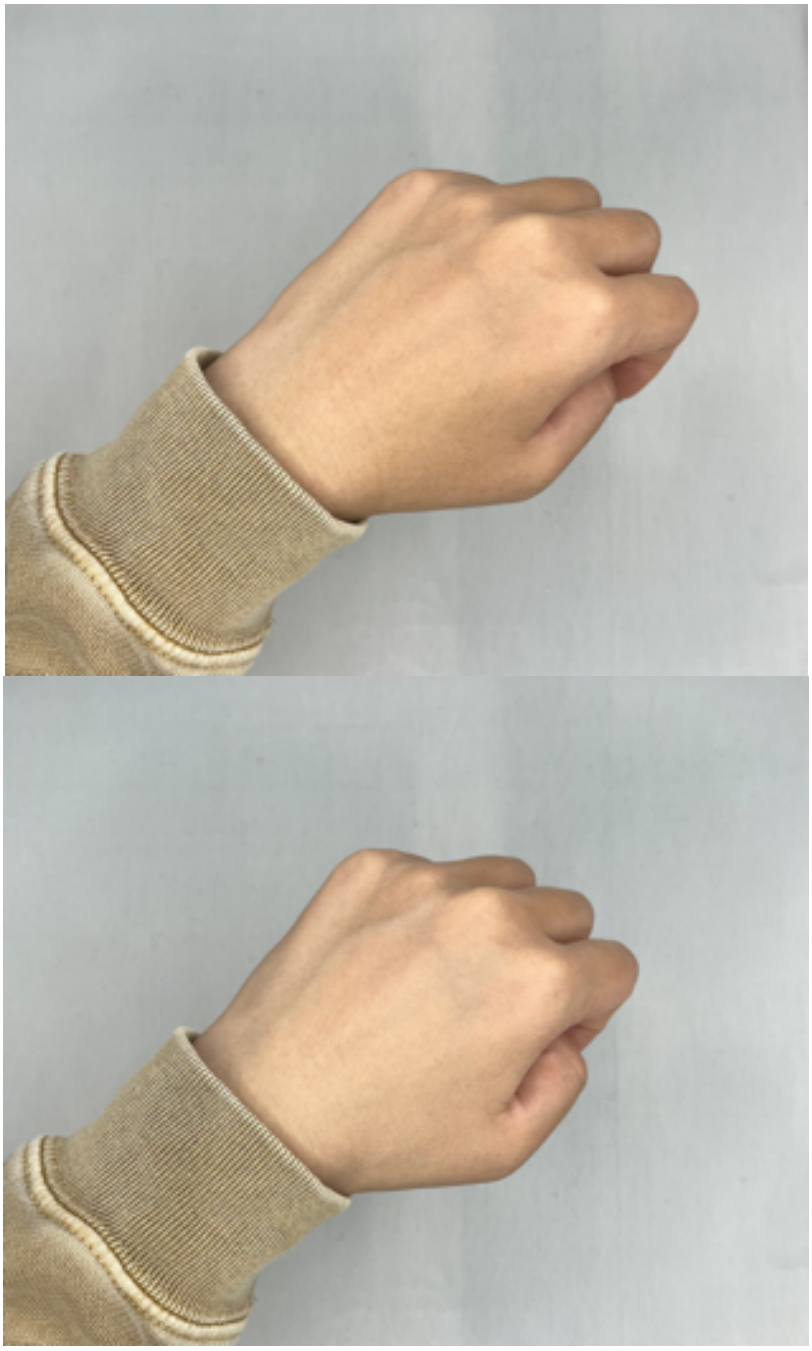


図 5.4-5：ファンデーション効果（上が塗布前、下が塗布後）

各ビーズを使用したファンデーションの評価結果について表 5.4-1 にまとめた。PMMA、ナイロン、シリカ無孔質、シリカ多孔質を比較対象とした。PMMA は滑らかだが、硬いため、肌に塗布したときにその硬さが感じられた。一方でナイロンは柔らかいが、肌馴染みが良くなく、落ち易いところが欠点である。シリカ無孔質は滑らかではあるが PMMA に劣り、かつ硬さもある。シリカ多孔質は滑らかさと柔らかさを備えているが、それぞれ PMMA やナイロンほどではなかった。そして当社ビーズについては、柔らかく滑らかで肌馴染み

が良いということで、最も高い評価結果となった。化粧品 OEM メーカーからは、今回確認された特徴が、既存ビーズの中でもユニークなものであり、その上でバイオ由来でかつ生分解性を備えているため、非常に面白いビーズである、というコメントが寄せられた。

表 5.4-1：ファンデーション使用時の各ビーズの特徴

ビーズ	PMMA	ナイロン	シリカ 無孔質	シリカ 多孔質	当社 タンパク質
特徴	滑らかだが硬い	柔らかいが付きが良くない	滑らかさがあるが、PMMA に劣る	滑らかさ、 柔らかさがあるが、PMMA, ナイロンほどではない	柔らかく滑らかで肌馴染みが良い

最後にビーズの溶媒安定性について説明する。得られたビーズに関して、各種溶媒を使用した安定性・分散性試験に取り組んでいる。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℃と50℃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（揮発性シリコーン油）
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、ジメチコンはシリコー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、ベタ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、保湿剤としてベタつきが少なく、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。

今回、3ヶ月経過時点での各種溶媒中のビーズを観察した（図5.4-6）。まず各ビーズについて、25度と50度のいずれにおいても消失したり、変形したりしているものはなかった。特に50度の条件下において、3ヶ月経過時点で特段の変化が見られないことから、本ビーズの溶媒安定性は特に大きな問題はないと考えられ、様々な化粧品への展開が期待される結果となった。

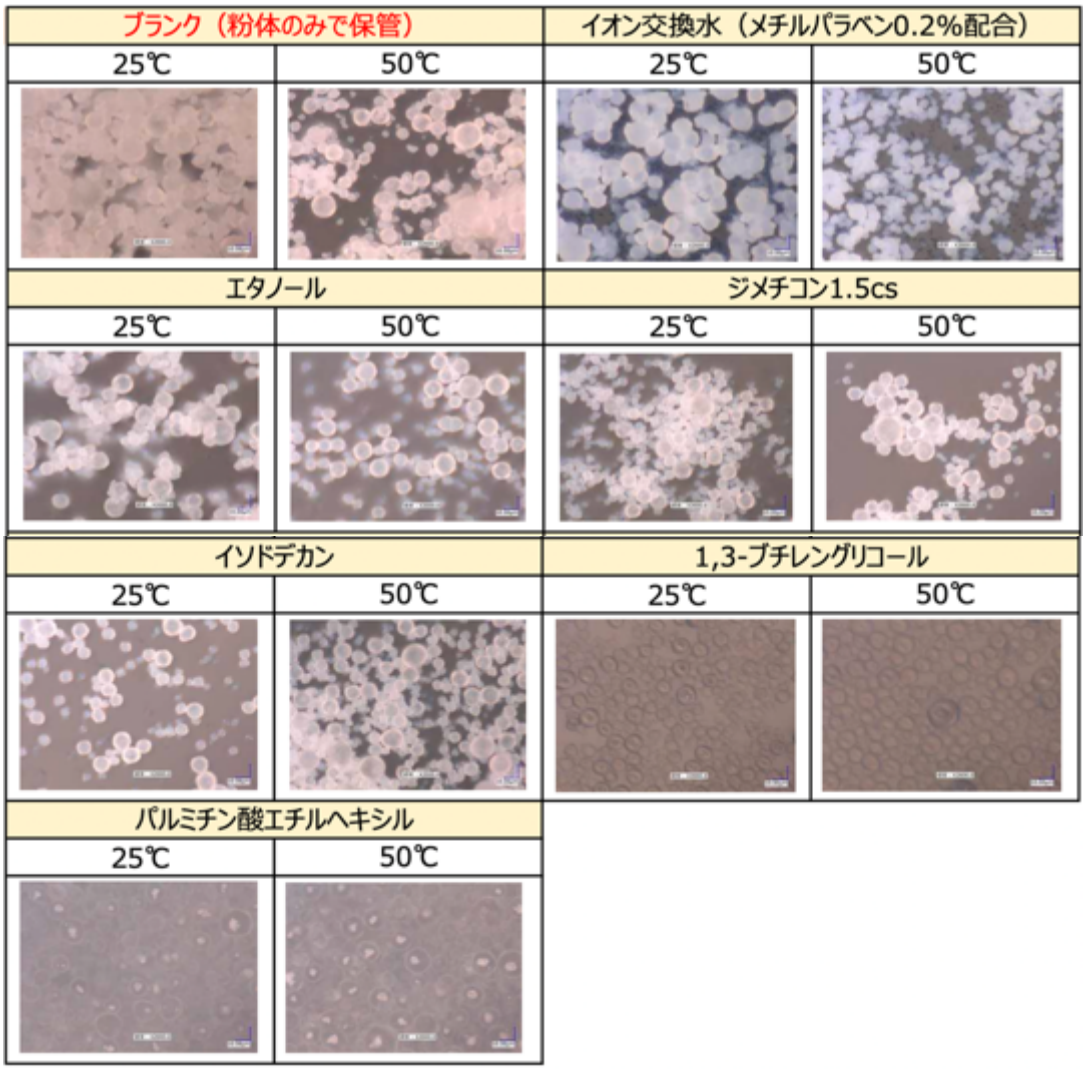


図 5.4-6：ビーズの各種溶媒での安定性・分散性評価

以上の検討結果から、当社ビーズはファンデーションへの活用において、非常に大きなポテンシャルを持っていることが確認された。今後、各化粧品メーカーへのサンプルワークを進めるとともに、安全性や安定性の確認を進め、また各メーカーのニーズに応じたタンパク質ビーズを作製していきたい。

・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溶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溶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）。

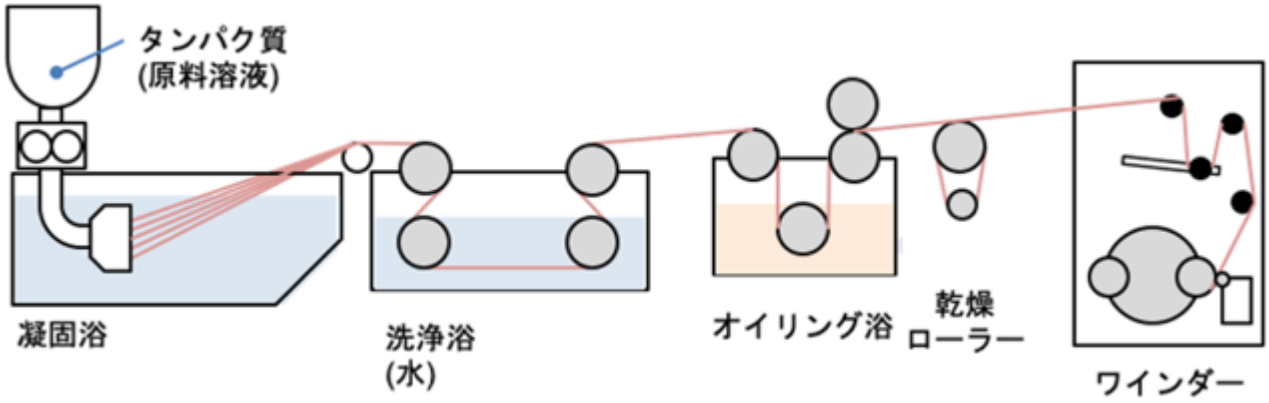


図 5.5-1：水系湿式紡糸法の概要

具体的にはタンパク質を有機酸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。昨年度の報告では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。具体的には、1.凝固浴での繊維固化条件の最適化、2.ノズル設計の最適化、3.延伸条件の最適化である。まずは昨年度の結果について簡単にまとめる。

1については無機塩濃度と有機酸濃度を振った水溶液を準備し、紡糸性を評価した。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酸が供給される形となるため、一定濃度有機酸が存在しているという前提をおく必要がある。有機酸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酸濃度が薄いと、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酸濃度と無機塩濃度の条件を振り、紡糸が可能なゾーンを見い出す検

討を行い、その結果、有機酸濃度は 20%前後、無機塩濃度は 18%前後がバランスの良い条件として見出された。

2 については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。検討の結果、量産に適したノズル径、巻き取り速度、吐出速度が見出された。

3 については紡糸工程における様々な延伸箇所で延伸倍率条件を振り得られた繊維の機械強度を比較する事で最適な延伸条件を評価した。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。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。

以上 1-3 の検討を行う事で、前回は最終目標である 5,000 ホールのノズルでの紡糸実現に対し、1,000 ホールのノズルでの紡糸に成功し(図 5.5-2)、さらに得られた繊維でアプリケーションの試作を行なった結果、生地の風合いは良好で生地の機械強度にも大きな懸念がない事も確認されたことを報告した。
一方で得られた繊維には品質不良(残留溶媒やケバ: 少量の切断した繊維が繊維束から飛び出している状態)が少なからず確認されていた。

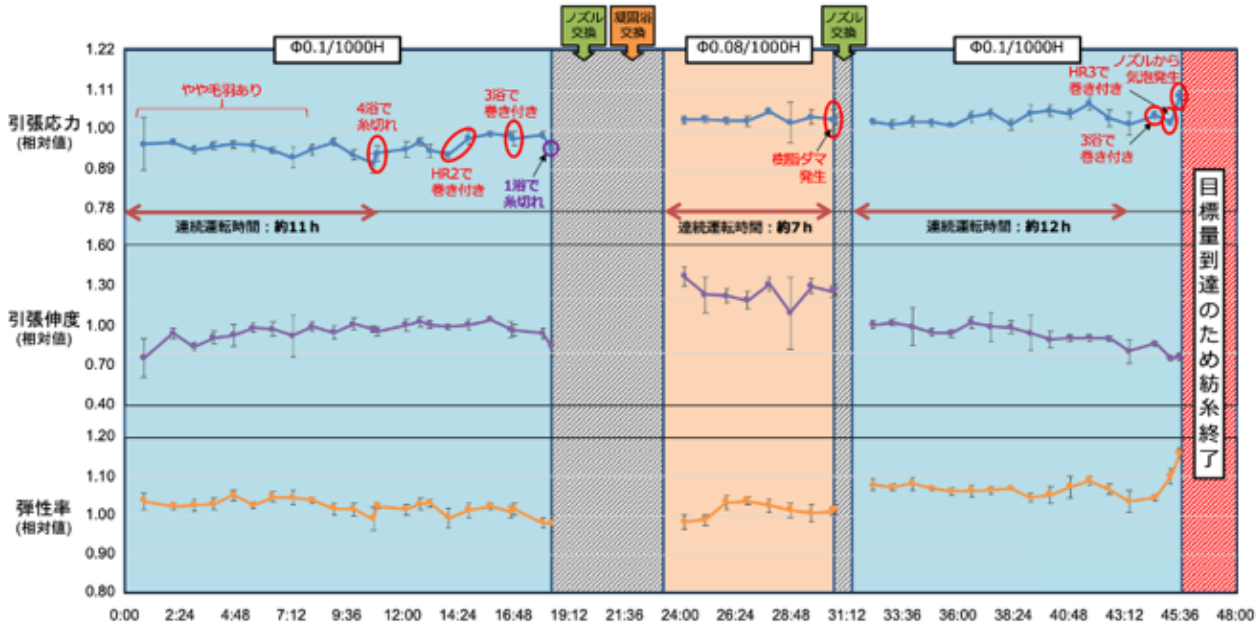


図 5.5-2：1,000 ホールでの連続紡糸結果

本年度は繊維の品質安定化およびさらなるノズルホール数の増大を目的に紡糸工程における 1) 繊維の洗浄効率の向上、2) 原料溶液吐出速度と巻き取り張力の最適化を行った。そして最終的に 3,000 ホールでの紡糸トライを実施した。

まず繊維洗浄効率の向上について説明する。紡糸工程で洗浄効率に影響する因子を洗い出した。具体的には 1. 浴槽温度、浴槽長、延伸倍率、物理的なしごきの有無(図 5.5-3)及び、2. 浴槽中のローラー間の距離、浴槽中のローラーの浴面からの深さ、浴槽外のローラーの浴面からの高さ(図 5.5-4)であり、それらが脱溶媒に与える影響を評価した。その結果、温度は 40℃以上、延伸倍率は 1.4 以上、浴槽長は 20 以上、しごきは有りのほうが脱溶媒効率は上がる傾向にあった。また、ローラーに関しては浴中に沈める深さに比例して洗浄効率は向上したが、距離や高さに関して相関は見られなかった。

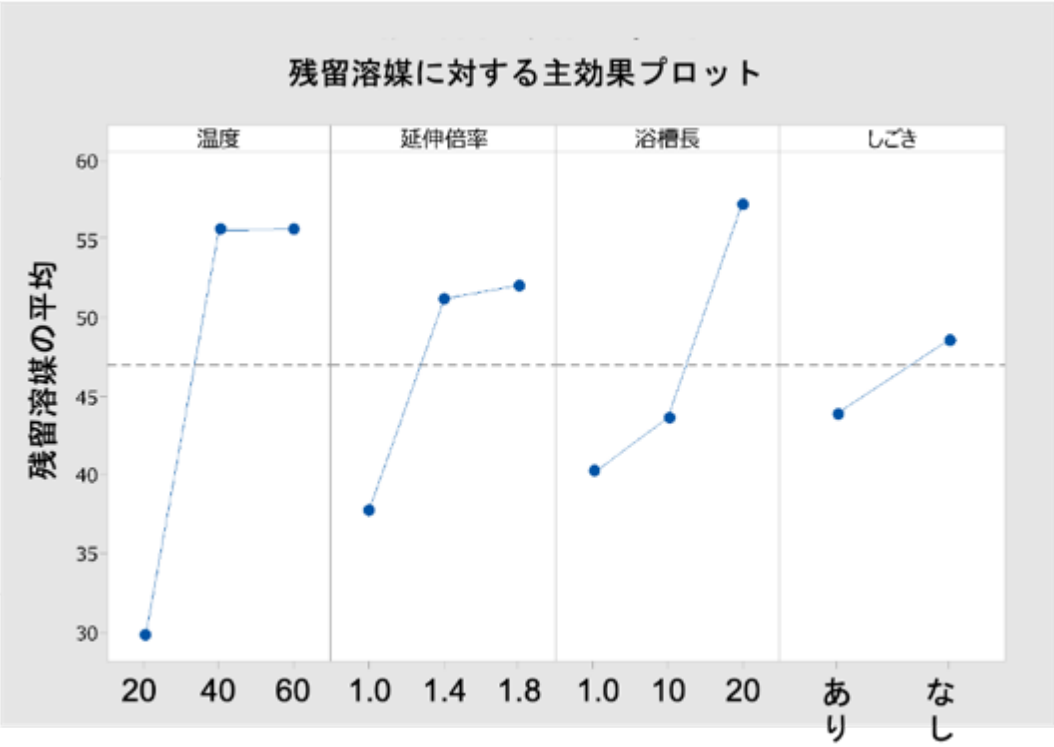


図 5.5-3: 浴温度、浴長、延伸倍率、しごきの有無と残留溶媒の関係(相対値)

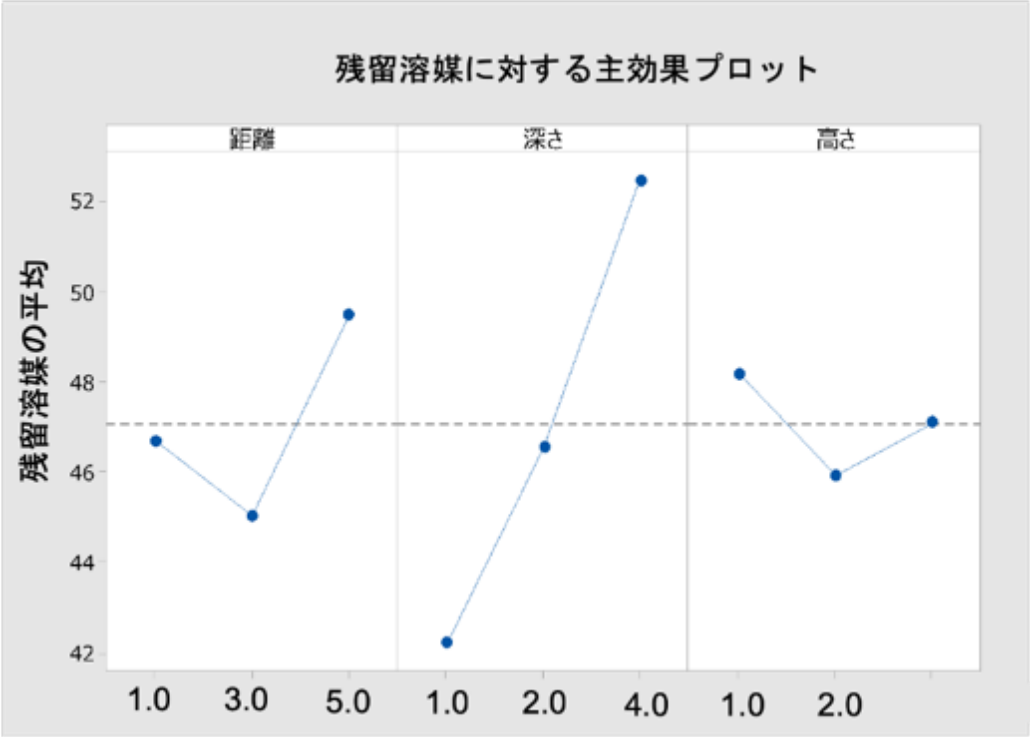


図 5.5-4:ローラー間の距離、ローラーの浴面からの深さ、ローラーの浴面からの高さと残留溶媒の関係(相対値)

次に原料溶液吐出速度と巻き取り張力の最適化について報告する。本検討では繊維の品質に強い影響を与えると考えられる、紡糸工程の最初の段階である原料溶液の吐出と、最終段階である巻き取りについて最適化を行なった。具体的には吐出速度を 1.0、1.3、1.7 の 3 水準で振り、得られた繊維の巻取張力を繊維の引張強度に対して強め、通常の 2 段階に変化させ繊維の品質を確認した。その結果吐出速度と繊維巻取張力を下げることで紡糸安定性が向上することが示された(図 5.5-5)。吐出速度に関しては低くする事で凝固性が向上し繊維間での凝固のばらつきが低減した事が理由と考えられる。巻取張力に関しては単純に物理的なダメージが低減したためと推測できる。また、懸念点である張力不十分による巻き取った繊維の脱落は確認されなかった。

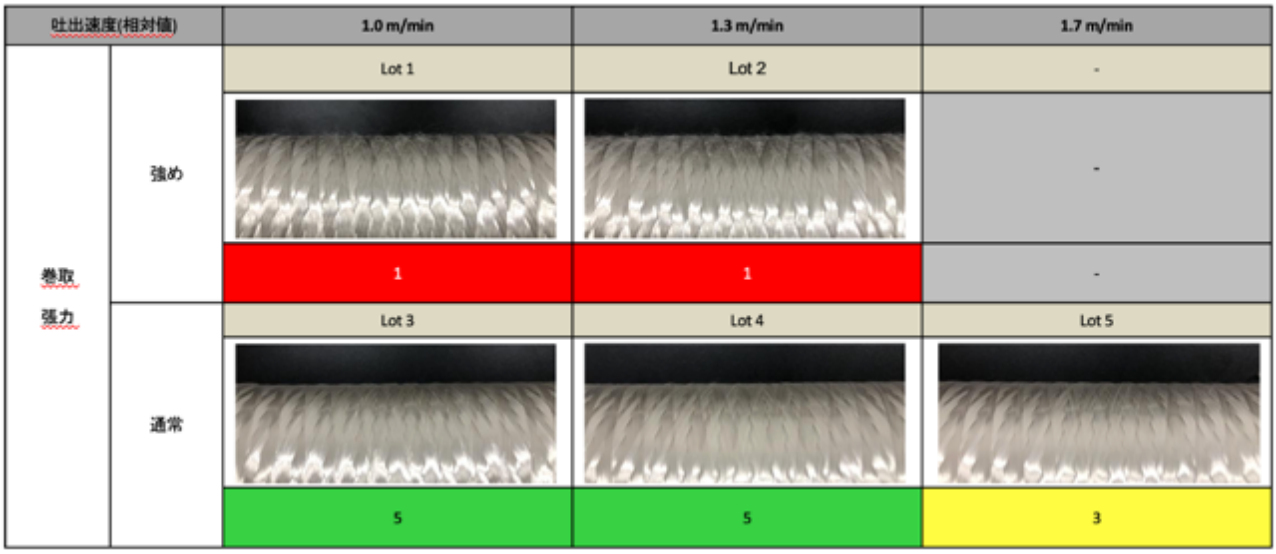


図 5.5-5: 紡糸安定性への吐出速度、巻き取り張力の影響（紡糸安定性: 5 > 1）

上述したように 3,000 ホールのノズルを用いたタンパク質紡糸の基本条件が見出されたため、量産製造を見据え 3,000 ホールのノズルで連続紡糸を行った。結果としては開始からおよそ 24 時間後にノズルの吐出不良や延伸不良が発生し、ノズル及び凝固溶媒のリフレッシュを行ったものの最終的には 42 時間連続紡糸を実施することができた(図 5.5-6)。前回行った 1,000 ホールのノズルでの連続紡糸と比較すると、人手の介在をより減らすことができ、かつ安定した紡糸ができるようになった。一方でホール数の増加に伴い、思っていたよりも早くノズルや凝固溶媒の交換が必要となったことから、最終目標である 5,000 ホール/ノズルに向けては、ノズル使用時間の向上や、適切な凝固溶媒条件の維持などが大きな課題になると思われる。また得られた繊維については、次の開発項目で確立されたクリンプ加工法によって、かさ高性を付与することができ、紡績工程においても既存の繊維（アクリル繊維、綿、ウールなど）と同様に加工することが可能であった。

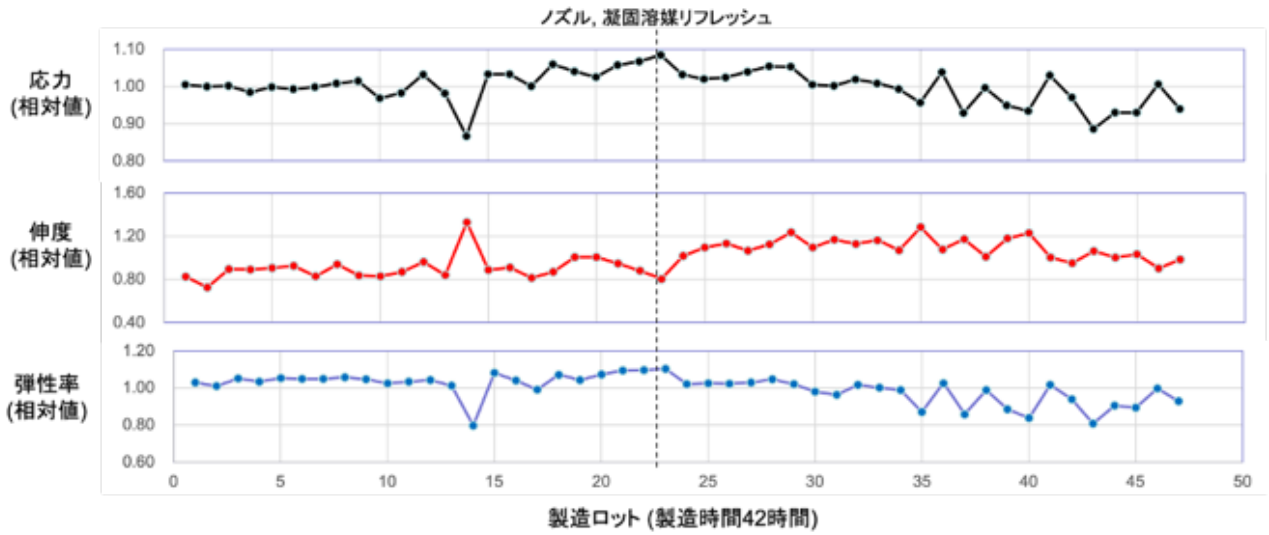


図 5.5-6：3,000 ホールのノズルでの連続紡糸結果

・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。これまで報告してきたようにかさ高性とは元々、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、タンパク質繊維に最適な加工方法の開発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。

前回までは、繊維断面形状と繊維径がタンパク質繊維のかさ高性に影響する因子であることを報告してきた（図 5.6-1）。繊維断面形状に関しては真円よりも三角形(Y 字)の方が繊維間の隙間が大きくなりかさ高性に寄与しており、繊維径に関しては細径にすることで重量当たりの繊維本数が多くなることでかさ高性に寄与していることが示された（図 5.6-1：三角形断面、繊維径 13um）。これらの検討により目標としていたアクリル繊維のかさ高さの 2/3 以上を達成できたことを報告している(図 5.6-2)。今回はアクリル繊維と同程度のかさ高性を実現するために紡糸以降の加工を検討した。

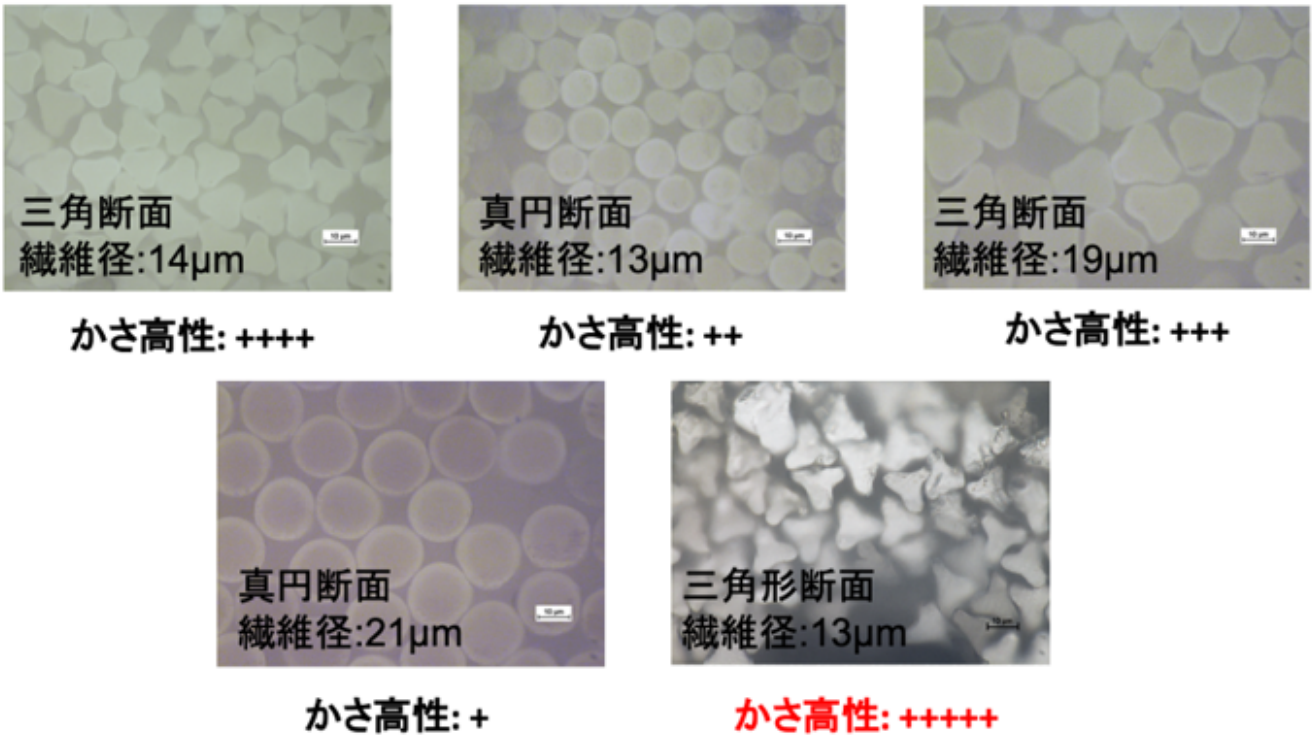


図 5.6-1: 繊維断面形状と繊維径によるかさ高性の違い

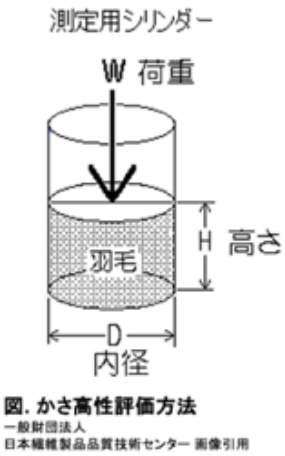


図. かさ高性評価方法
一般財団法人
日本繊維製品品質技術センター 画像引用

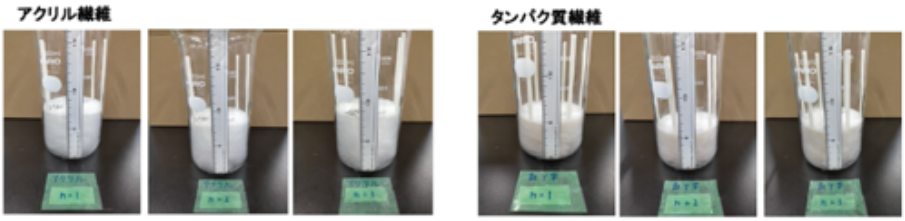


表. かさ高性試結果

	高さ(mm)			
繊維種類	n1	n2	n3	平均
タンパク質繊維	46	52	55	51
アクリル繊維	63	73	77	71

図 5.6-2: 繊維断面形状と繊維径によるかさ高性の違い

ここからは本年度取り組んだ紡糸以降の工程でタンパク質繊維へかさ高性を付与する検討について説明する。本検討は紡糸直後のタンパク質繊維の形状がそもそもストレート状であるため、かさ高性が低いということに着目し、物理的に繊維を細かく折り曲げることでかさ高性を付与することを目的とした。通常、当社繊維を含むシルクなどのタンパク質長繊維はウールのようなねじれはなく、かつ捲縮を付与することが難しい（実際にシルクの紡績糸はほとんどない）。したがって単なる機械捲縮だけでは、なかなかかさ高性が付与できず、また付与できたとしても保持性が良くないなどの問題があった。そのため各種検討の結果、最終的には図 5.6-3 に示した設備を用いて繊維の束へのクリンプ付与が可能であることがわかった。

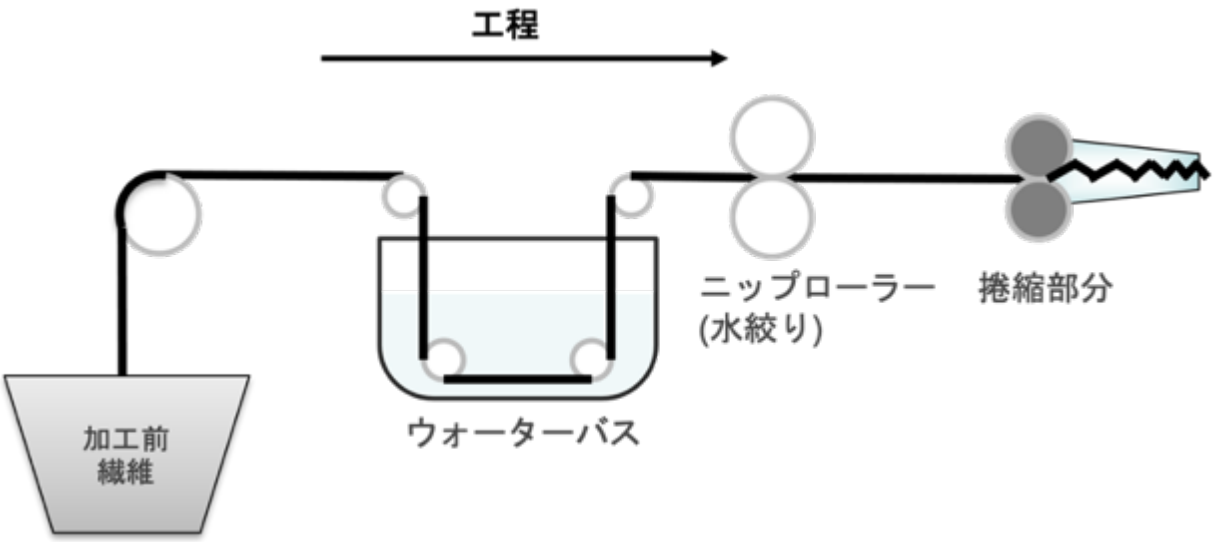


図 5.6-3: クリンプ付与工程

表 5.6-1 にはタンパク質繊維へのクリンプ付与の検討結果を示している。結論としてはクリンプ直前に水に浸漬することが重要であり、さらに水温は室温より高い方がクリンプの付与数が高いことがわかった(図 5.6-4)。これは水がタンパク質の可塑剤として働くことで、物理的なクリンプの付与が効率的に生じたためであると考えられる。
また得られた繊維のかさ高性試験の結果（図 5.6-5、表 5.6-2）、クリンプ加工を行ったタンパク質繊維はアクリル繊維に対し 1.2 倍のかさ高性を有することが示され、本年度の目標としていたアクリル繊維同等のかさ高性を付与することに成功した。

表 5.6-1: クリンプ付与検討結果

No.	水温(℃)	水分率(%)		単位長さあたりの形状付与数
		ディップ後	クリンプ後	
1	25	51.21	40.73	少
2	40	48.99	46.60	多
3	50	52.89	48.55	多
4	ウォーターバスなし	<15	<15	極めて少ない

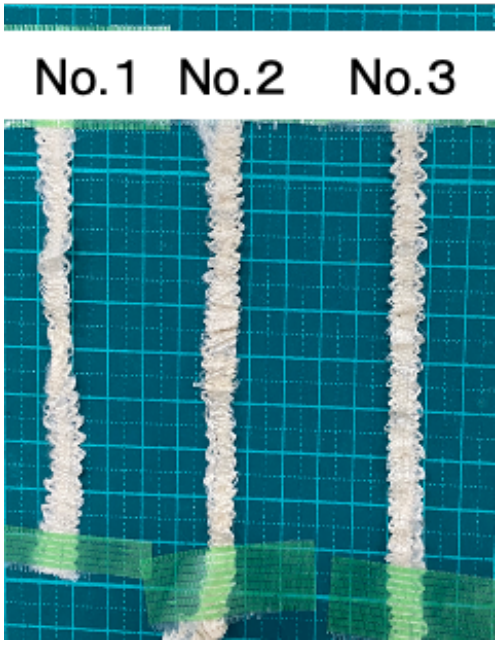


図 5.6-4: クリンプ付与検討結果

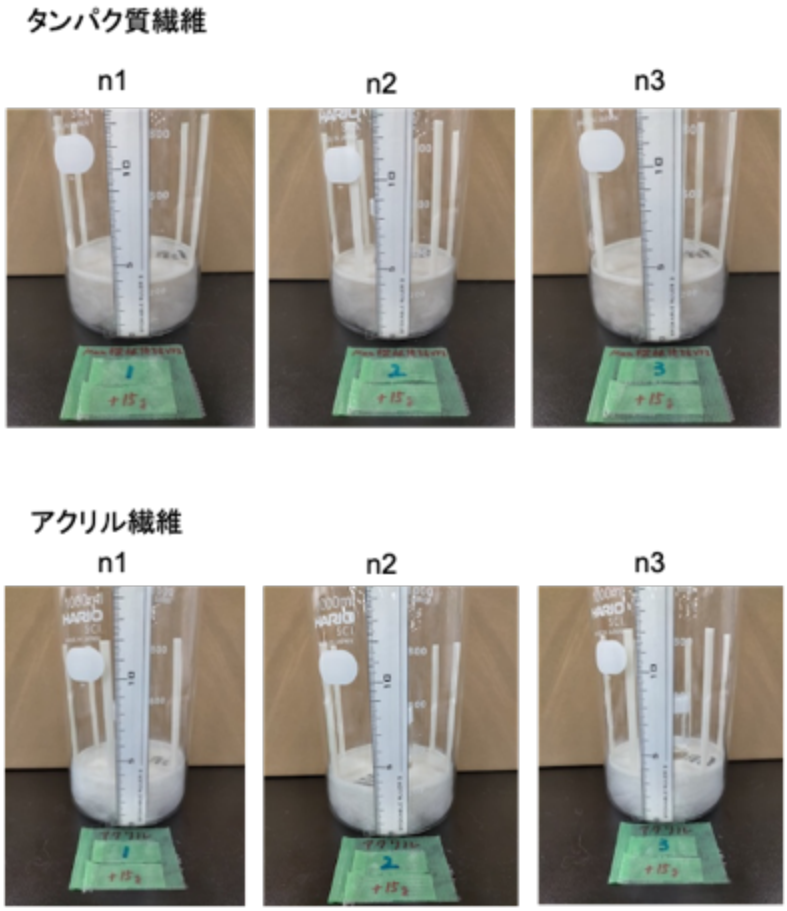


図 5.6-5: クリンプ加工済みタンパク質繊維とアクリル繊維のかさ高性比較

	高さ(mm)			
繊維種類	n1	n2	n3	平均
タンパク質繊維	36	38	37	37
アクリル繊維	31	29	32	31

表 5.6-2: クリンプ加工済みタンパク質繊維とアクリル繊維のかさ高性比較結果
＊測定荷重を前回報告の 2 倍としかさ高性の差をより明確にしている。

本クリンプ加工は非常に簡便で汎用性の広い方法であり、かつ量産化も可能である。断面形状が真円状のタンパク質繊維であっても十分なかさ高性を付与できるため、昨年度検討したかさ高性を付与する異形断面のタンパク質繊維と組み合わせればさらなるかさ高さ

も期待できる。当社繊維はアクリルと異なり、吸水性があり、また吸湿発熱性もあるため、よりウールに近い特性を持った繊維になれる可能性が十分ある。本手法で付与したクリンプは保持性もよく、また各種繊維（アクリル、綿、ウールなど）の紡績ラインで遜色なく紡績が可能であったため、今後、本手法をベースにさらなる量産化を進めていく予定である。