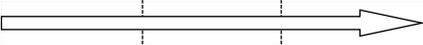
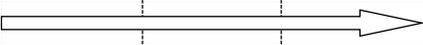


委託プロジェクト研究課題評価個票（中間評価）

研究課題名	アグリバイオ研究のうち昆虫（カイコ）テクノロジーを活用したグリーンバイオ産業の創出プロジェクト			担当開発官等名	農林水産技術会議事務局研究開発官 （基礎・基盤・環境）
				連携する行政部局	農産局果樹・茶グループ 農林水産技術会議事務局研究企画課
研究期間	R 4～R 8（5年間）			総事業費（億円）	4. 1億円（見込）
研究開発の段階	基礎	応用	開発		
					
研究課題の概要					
<p>我が国の課題の一つに天然資源の輸入に頼らない持続可能な物資の生産供給体制の構築がある。今後、予想されている世界的な繊維不足や石油由来資源からの脱却に対応するため、本事業では、繊維をはじめとした様々な素材・原料を生み出す国産バイオリクター（*1）であるカイコ（*2）を用いて、桑や食品副産物などの、人の食料と競合しない国内資源を余すことなく活用したグリーンバイオ産業の創出（エコ養蚕システムの構築）を目指す。また、情報技術（IT）や最新の昆虫改良技術を駆使した革新的なカイコや高機能シルクの開発により競争力を高め、世界の人口増加とともに需要が高まる繊維市場を新たに獲得することで、日本のカイコ産業の生産・供給体制の拡大を目指す。</p> <p><①：ITを活用した、養蚕業を変革するカイコの創出（令和4～8年度）> ・ITを活用したデータ駆動型のアプローチによって有用遺伝子を特定し、ゲノム編集技術（*3）などの遺伝子改変技術を活用して、広食性（*4）・耐暑性などの有用形質が付与された革新的なカイコの創出を目指す。さらに革新的なカイコへの適合性が高い低コスト人工飼料（*5）も同時に開発することで、早期の社会実装を促進する。</p> <p><②：未利用サナギの利活用技術の開発と実証（令和4～8年度）> ・カイコサナギの飼料等としての有用性に関わるデータを取得し、その結果を基に、採算性の見込める利活用法の開発を試みる。また、シルク回収後のサナギを資源として循環させる仕組みを構築し、実証試験を通して実用性を評価する。</p> <p><③：既存概念を打ち破る革新的なシルクの開発と実用化（令和4～8年度）> ・従来のシルク繊維の国際的な価格競争から脱却可能な、高い需要の見込まれる革新的な高機能シルク繊維を開発する。また、繊維に限らない形態のシルク（非繊維シルク）の新用途も開発することで、様々なサナギ利用と組み合わせが容易な繭の利用方法も検討する。</p>					
1. 委託プロジェクト研究課題の主な目標					
中間時（2年度目末）の目標			最終の到達目標		
①有用形質を持つカイコの作出に必要なデータの集積と作出方法を導出。			①令和8年度までに、養蚕における環境負荷軽減や低コスト化に資するカイコを2種類以上作出。		
②カイコサナギの含有成分データや飼料等としての有用性に関するエビデンスを集積するとともに、採算性の高いサナギ利活用方法を導出。			②令和8年度までに、サナギ利活用技術の確立とカイコ生産拠点3ヶ所以上で実証。		
③新しい高機能シルクを試作（物理性を改変した高機能シルク、非繊維シルク等を想定）。			③令和8年度までに、新しい高機能シルク2種類以上の開発と生産を実証。		

2. 事後に測定可能な委託プロジェクト研究課題全体としてのアウトカム目標 (R14年)

- ・低コスト化等に資するカイコを生産現場に導入によることで、繭生産費を令和4年次と比較し約2割削減。
- ・サナギの需要拡大と高付加価値化によって、繭などの生産物の取引額を、令和4年次と比較して約1.5倍向上。
- ・新しい高機能シルク等により国内外の市場を獲得（供給体制の強化により、最終的に年間200億円規模への成長を想定）

【項目別評価】

1. 社会・経済の諸情勢の変化を踏まえた研究の必要性

ランク：A

①農林水産業・食品産業、国民生活の具体的なニーズ等から見た研究の重要性

本事業では、繊維を初めとした様々な素材・原料を生み出す国産バイオリクターであるカイコを用いて、桑や食品副産物など、人の食料と競合しない国内資源を余すことなく活用したグリーンバイオ産業を創出（エコ養蚕システム）し、持続可能な物質生産システムの実現を目指す。この物質生産システムの普及は、原料となる桑の栽培面積の拡大を伴うため、耕作放棄地の活用や二酸化炭素吸収量の増加に繋がり、環境保全にも貢献する。

国内の繭生産が海外からの安価な生糸・絹製品の流入により蚕糸業が厳しい状況に置かれる中、繭生産の低コスト化、繭の価値向上、新需要開拓は、国内生産現場における喫緊の課題であり、本課題で開発される技術は、生産者のニーズに応えるものである。また、絹製品は依然として国民生活に欠かせないものとして深く根付いているため、原料となる生糸をほとんど海外産に依存している現状を変え、予期せぬ供給の不安定化に備える必要がある。

一方で、近年、日本産の蚕・繭・生糸を使用した絹製品がブランド化され海外からも注目を集めており、本プロジェクトで開発された高機能シルクによる海外市場の獲得は、国内の繭の生産・供給体制の維持・向上に資する。

以上のことから、本事業は、持続可能で安定した環境保全、国民生活、農山漁村の活力向上等に貢献する重要な取組である。

②引き続き国が関与して研究を推進する必要性

本事業で開発される環境負荷軽減や低コスト化等に資する新しいカイコや、サナギの利活用の仕組みなどは、養蚕関連業全体に貢献する基盤的なもので、広く普及させるべき技術であることから、国が推進すべき課題である。

2. 研究目標（アウトプット目標）の達成度及び今後の達成可能性

ランク：A

①中間時の目標に対する達成度

〈課題①：ITを活用した、養蚕業を変革するカイコの創出〉

有用形質を持つカイコ作出に必要なデータを得るために、広食性・耐暑性に関わるゲノムデータの取得と、神経内分泌機構改変に必要な遺伝子群データの集積を実施し、標的形質に関わる候補遺伝子領域の特定を進めた。また、有用形質にも関係する繭色をモデルとしてカイコの改変技術を開発し、関連する論文を3件発表した。さらに、繊維タンパク質を改変することで、低コストで繰糸（従来は熱水で繭の糊状タンパク質のセリシンをほぐして生糸を取り出す作業）が可能になる有用形質カイコの作出に関する特許2件の出願を完了した。以上のことから、中間時の目標である有用形質を持つカイコの作出に必要なデータの集積と作出方法の導出が達成された。現在、改変モデルカイコを8種（耐暑性品種の繭形質の改良や、繭タンパク質改変のためのゲノム編集カイコ7種と、栄養要求性改善のための遺伝子組換えカイコ1種）を作出し、低コスト人工飼料との適合性を検討の上、実用化の可否を判断するための機能解析に着手したことから、一部計画以上に進んでいる。

〈課題②：未利用サナギの利活用技術の開発と実証〉

カイコサナギの含有成分データを取得し有効成分のエビデンス蓄積を進めた結果、サナギ含有成分であるシルクロースによる養殖魚に対する高温耐性効果等を確認した。カイコサナギの高付加価値飼料と

しての能力が明らかとなったため、流通業者や製品化企業との共同研究に関する話し合いを進め、養殖（ブリ、ウナギ等）や養鶏の飼料への利用を開始した。また、環境負荷が小さく採算性の高いサナギ利活用法の課題を洗い出すために、生産拠点等での環境負荷をLCA（*5）によって解析し、桑の肥料と飼育残渣（桑の枝・カイコの糞等）が環境へ与える影響が大きいことを明らかにした。さらに、生産コスト削減に資する自動給餌装置の改良や実証試験地でのカイコの飼育試験を行った。現在、これまでの成果を基に環境負荷が小さく採算性が高い養蚕システムの構築・実証を進めている。

〈課題③：既存概念を打ち破る革新的なシルクの開発と実用化〉

品種育成と加工技術によって物理性を改変したシルクの試作品を作出し、物性試験を行った。その結果、破断強度が40%以上向上し、競合品である合成繊維をベンチマークとして設定した最終的な目標値（破断強度・伸度のいずれかが50%以上向上）と比較して、試作品の完成度は80%程度となった。また、従来の4～8倍の長さの長鎖クモ糸遺伝子を導入した遺伝子組換えカイコの作出に成功した。この技術を用いて長鎖クモ糸遺伝子を開発中のシルクに導入することで、目標値の破断強度に近づくことが期待される。サナギ利用と組み合わせが容易な非繊維シルクの開発では、開発したシルクフィルムの試作品が組織癒着防止効果を持つことを示し、関連特許を3件出願した。また、廃棄シルクの利用拡大を目指した環境浄化シルクの開発に関しては、シルクのもつ電子伝達系による環境浄化機能に関する基礎的な知見を集積し、その知見を基にコンソーシアム外企業（ゼネコン企業）との共同研究への打合せが進んだ。

②最終の到達目標の今後の達成可能性とその具体的な根拠

〈課題①：ITを活用した、養蚕業を変革するカイコの創出〉

現時点までにデータの取得を実施し、8種のモデルカイコを作出していることから、有用系統2種類以上を確立するという最終目標の達成可能性は高い。耐暑性、広食性、蛹休眠性、低温でのセリシン溶解性等の有用形質をターゲットとしている。これらの有用形質が改変されたカイコが作出されれば、コンソーシアム内の普及機関（群馬県・企業7社）との連携によって速やかに実用化が進められる体制となっている。

〈課題②：未利用サナギの利活用技術の開発と実証〉

カイコサナギの利用技術として、例えば養殖飼料としての機能性（高温耐性効果等）が明らかになりつつあり、これまで有効利用されていなかったサナギの養殖飼料への利用が見込まれる。今後、これらの結果をもとに、カイコ生産拠点及びコンソーシアム外企業での実証を進めることで社会実装が進むことが期待される。現在、カイコ生産拠点4ヶ所で実証を開始し、計画を一部前倒してコンソーシアム内外の企業との連携も進めているため、最終目標達成の可能性は高い。

〈課題③：既存概念を打ち破る革新的なシルクの開発と実用化〉

物理性を改変したシルクに関して、現時点での完成度は80%であり、長鎖クモ糸遺伝子等を導入した遺伝子組換えカイコとの組み合わせで、目標を達成できる見込みである。非繊維シルクの開発では、シルクフィルムの医療現場での実用化を目指し、出願した関連特許や基礎的な研究データを元にコンソーシアム内外企業とのマッチングが開始されており、最終目標の達成可能性は高い。

**3. 研究が社会・経済等に及ぼす効果（アウトカム）の目標の今後の達成可能性と
その実現に向けた研究成果の普及・実用化の道筋（ロードマップ）の妥当性**

ランク：S

①アウトカム目標の今後の達成の可能性とその具体的な根拠

本プロジェクトのアウトカム目標は、課題①と課題②、課題③の成果を組み合わせることで達成が可能となる。課題①では、低環境負荷、低コストで飼育可能な革新的なカイコの開発が計画通りに進行しており、このカイコの普及によりカイコ飼育コストを2割以上削減できる見込みである。また、課題②の成果によって、これまで利用されていなかったサナギが有価物として利用され、課題③で開発される高付加価値なシルク繊維により、生産物の取引価格の1.5倍以上の上昇が期待される。

本プロジェクトの研究課題は、計画を上回って進捗しており、計画以上のアウトプット目標の達成が

期待される。また、新しい高機能シルク等により国内外の市場を獲得するためには、生産拠点の拡大も重要となる。現在、研究コンソーシアムメンバー等が中心となって、カイコを活用した有用タンパク質や高機能シルクの生産を行う生産拠点の拡大が進められており、国内合計12カ所の生産拠点が整備されている。新規事業者の参入も進んでおり過去5年間のペースで試算すると、令和14年には国内20ヶ所程度の生産拠点が整備される見込みとなる。さらに、世界的な天然繊維需要の伸びが市場獲得の後押しになることが期待でき、高付加価値化と低コスト化を実現することで、最終的に年間200億円規模の市場獲得を目指す。

②アウトカム目標達成に向け研究成果の活用のために実施した具体的な取組内容の妥当性

研究成果を速やかに事業化へつなげる体制を早期に構築するため、研究期間中から外部企業との意見交換を進め、必要な技術開発要素を洗い出し、これまで20件以上の外部企業と意見交換を行った。具体的には、養殖や養鶏へのサナギ飼料利用に関して、4社のコンソーシアム外企業との打合せが進み、シルクを用いた環境浄化技術や非繊維シルクの利用では、2社のコンソーシアム外企業との打合せが進んでいる。その他、カイコを活用した物質生産やサプライチェーンに関して10社以上の意見交換を行い、そのうち5社以上と成果の実装先として打合せが進んでいる。さらに、本研究成果を迅速に普及・実用化する目的でプレスリリース・報道・テレビ放映（13件）やシンポジウム等でプロジェクトの成果を紹介（アウトリーチ活動10件）した。

③他の研究や他分野の技術の確立への具体的貢献度

過去の委託プロジェクトの成果としてカイコによる有用組換えタンパク質生産技術が社会実装されており、検査薬や化粧品の生産に利用されている。本プロジェクト研究で開発されるエコ養蚕システムは、シルク生産のみならずカイコを用いた有用組換えタンパク質生産にも活用できる技術である。さらに、本プロジェクトで開発されるゲノムデータを活用した育種技術は、近年、用途拡大が検討されているミズアブ、コオロギ、ミツバチなどのカイコ以外の昆虫の育種法にも適用可能であると考えられるため、技術の発展性・横展開も期待できる。

4. 研究推進方法の妥当性

ランク：A

①研究計画（的確な見直しが行われているか等）の妥当性

外部有識者5名と関連する行政部局及び研究代表者によって構成する「委託プロジェクト研究運営委員会」を設置し、各小課題の進捗状況を確認し、行政ニーズや研究の進捗状況を踏まえ、実施計画の見直し、スケジュールの明確化、アウトカム目標達成に向けた戦略の構築などの的確な進行管理に努めている。現在までの進捗状況から、アウトプット目標の達成も見込まれることから研究計画は妥当である。

②研究推進体制の妥当性

本プロジェクト研究の実施に当たっては、委託プロジェクト研究運営委員会を年に2回開催し、推進状況の確認、研究計画・推進体制の見直し、研究成果の共有と知財戦略について議論を行っている。また、研究コンソーシアムの自主的な推進体制として、推進会議を随時開催し、コンソーシアム内の情報共有や意見交換を行っており、研究推進体制は妥当である。

③研究課題の妥当性

研究課題を推進する上で、解決すべき技術的課題が明らかになれば、新たな専門家をコンソーシアムメンバーに加えるなど、研究体制の更新を行っている。さらに、本プロジェクト小課題の実施内容に関して、進捗状況に応じてプロジェクトの目的やアウトカム目標の達成に合致するように適宜修正を行っている。本プロジェクトでは、課題①や課題③で開発された革新的なカイコやシルクの加工技術等を、課題②の参画企業、プロジェクトの協力機関、コンソーシアム外企業で実証する計画となっており、研究目標を確実に達成するための課題構成は妥当である。

④研究の進捗状況を踏まえた重点配分等、予算配分の妥当性

委託プロジェクト研究課題全体で課題の進捗状況、研究成果の有効性や緊急性等を踏まえ、予算配分の重点化を行っている。本プロジェクト研究の課題は、計画通り進捗しており、最終目標の達成も見込まれることから、予算配分は妥当である。

【総括評価】

ランク：A

1. 委託プロジェクト研究課題の継続の適否に関する所見

- ・日本産シルクはグローバルでも需要が高く、期待があり、研究の意義は高い。
- ・カイコ以外の昆虫の育種方法にも応用可能であり、横展開が期待できる。
- ・研究期間、大学、都道府県のみならず、化粧品利用や医薬部外品利用を目的とする民間企業等、幅広い参加主体が認められ、研究推進方法は妥当である。
- ・当初の計画を上回って進捗しており、研究の継続は妥当である。

2. 今後検討を要する事項に関する所見

- ・社会的な関心も高い課題であり、引き続きアウトリーチ活動の充実に努めていただきたい。
- ・コンソーシアムが地域活性化へ貢献できるような拠点に繋がることを期待したい。

[研究課題名] アグリバイオ研究プロジェクトのうち昆虫(カイコ)テクノロジーを活用したグリーンバイオ産業の創出プロジェクト

用語	用語の意味	※ 番号
バイオリクター	生体の触媒を使って物質の合成や分解を行う装置のこと。餌を食べて有用物質を生み出す生物もバイオリクターとみなすことができる。	1
カイコ	チョウ目カイコガ科に属する昆虫の一種。桑を食餌し、絹糸(シルク)を吐いて繭を作る。	2
ゲノム編集技術	人工ヌクレアーゼ(ゲノムを切断する酵素)などを用いて、特定の箇所のゲノム配列を改変する技術。	3
広食性	動物の餌となる対象が多種にわたる性質。カイコは通常、桑しか食べないが桑以外の餌でも食べる広食性のカイコが存在する。	4
人工飼料	加工して作成した人工の飼料。カイコの人工飼料としては、桑粉末、大豆粉末、ビタミン剤などから構成される羊糞状の飼料が流通している。人工飼料に対する摂食性はカイコ系統によって異なる。	5
LCA	life-cycle assessmentの略。ある製品のライフサイクル全体(製造、輸送、販売、使用、廃棄、再利用)又は、特定段階における環境負荷を定量的に評価する手法。	6

昆虫（カイコ）テクノロジーを活用したグリーンバイオ産業の創出プロジェクト【継続】

背景と目的

- 輸入や有限な天然資源への依存を減らした持続可能な製品や原料の生産体制構築が喫緊の課題。
- この課題の解決に向け、国内地域資源である桑や未利用の食品副産物等を様々な有価物に変換する無二の国産バイオリアクターとしてカイコの利用技術を高めてきたが、シルク回収後のサナギが大量に廃棄されている等、資源の損失が未だに大きいことが問題。
- そこで、ITを活用した昆虫デザイン技術等を駆使し、サナギの利活用技術の開発と実証、世界的に需要の見込まれる革新的なシルクの開発等を行い、桑や食品副産物等の資源を余すことなく効率的に活用するエコ養蚕システムを構築。
- 未利用資源を活用した新しいエコシステムの確立と普及を推進し、新しい市場の創出を実現。

研究内容

➢ ITを活用した養蚕業を変革するDXカイコの創出

- ☆ 遺伝子ネットワーク情報等を駆使した昆虫デザイン技術確立
- ☆ 環境負荷軽減や低コスト化に資するカイコの創出

➢ 未利用サナギの利活用技術の開発と実証



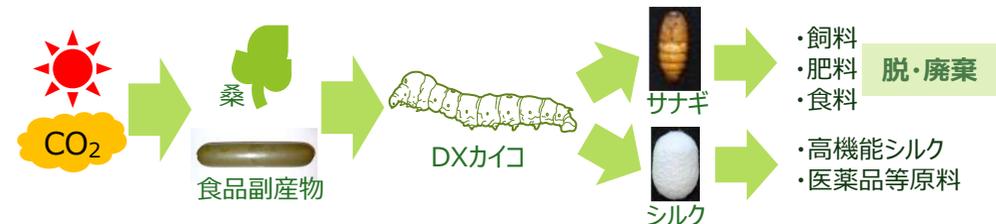
- ☆ 飼料等への利用技術開発
- ☆ 栄養等コントロール技術の開発



➢ 既存概念を打ち破る革新的なシルクの開発と実用化



- ☆ 革新的な高機能シルクの開発
- ☆ 成形加工等、新用途の開発



資源を余すことなく効率的に活用するエコ養蚕システムを確立

到達目標

- 環境負荷軽減や低コスト化に資するカイコの創出（2種類以上）
- 飼料化等、サナギの利活用技術の実証（3地域以上）
- 新しい高機能シルクの開発（2種類以上）

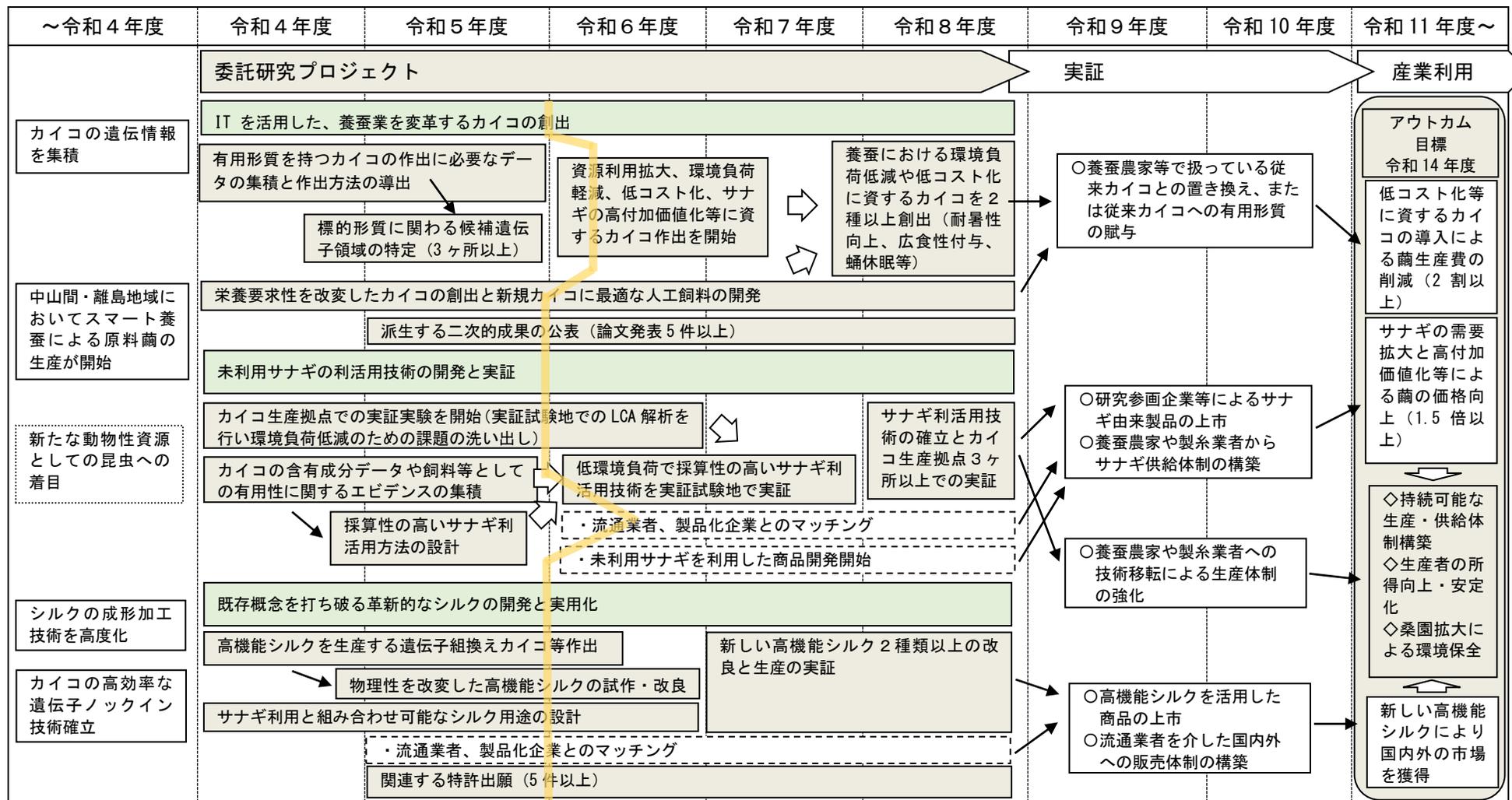
期待される効果

- 未利用資源由来グリーンバイオ製品市場の創出
- 天然資源への負荷を減らした持続可能な飼料等供給体制に貢献
- 成果普及に伴う桑園の拡大によるCO₂吸収量増加

【ロードマップ（中間評価段階）】

昆虫（カイコ）テクノロジーを活用したグリーンバイオ産業の創出プロジェクト

（供給体制の強化により、200億円規模への成長を想定）



昆虫（カイコ）テクノロジーを活用したグリーンバイオ産業の創出プロジェクト

資源を余すことなく効率的に活用するエコ養蚕システムの構築を目指す

現在までの主な成果



- 有用形質を持つカイコの作出に必要なデータの集積と作出方法を導出
- 標的に関わる候補遺伝子領域を特定

ゲノム編集による繭色及び繭層の重さの改変



繭色遺伝子Aを破壊

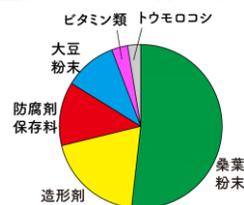
繭色遺伝子Bを破壊

繭色遺伝子AとBの両方を破壊（白化し繭層も重くなった）

ゲノム編集により繭色の改変と繭層を重くすることに成功。同様の手法を用いて人工飼料の摂食性を向上させる予定。また、有色繭の耐暑性品種を高付加価値な白繭に改変かつ繭層を重くすることで、耐暑性の実用品種を作出する予定。

○革新的なカイコと適合性が高い低コスト人工飼料の試作

人工飼料の材料別価格



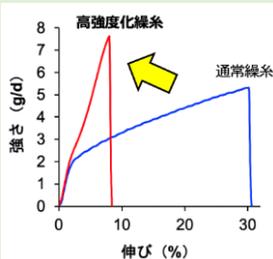
桑葉粉末や造形剤が材料費の約7割を占める

低コスト人工飼料の試作

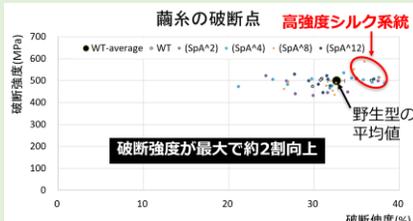


飼料の高価格要因である桑葉粉末や造形剤を削減

○遺伝子改変やシルクの加工技術によって物理性を向上



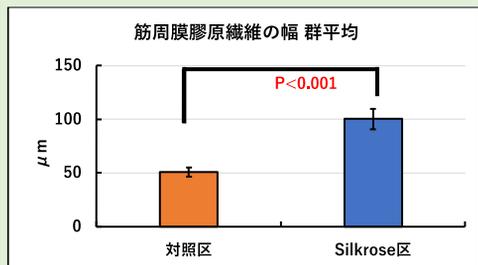
繰糸時に張力を付与することで、高強度かつ低伸度のシルクを作出



遺伝子改変によって破断強度が向上

技術を組み合わせることで、物理性を向上した繊維を開発する予定

○サナギの養殖魚飼料原料としての有用性を確認



サナギ成分（シルクロース）のウナギ筋周膜膠原繊維の厚さに与える影響

サナギに含まれる有効成分によって、養殖魚に高温耐性付与や、筋肉構造の変化を促すことを確認

○様々なサナギ利用と組み合わせが容易な、非繊維でのシルク利用方法の開発



コントロール



低分子シルク

シルク原料フィルム化素材による盲腸癒着防止効果を確認