参考資料３

遺伝子組換えカイコの
隔離飼育試験の実施について
ー生物多様性影響評価内容の概要ー

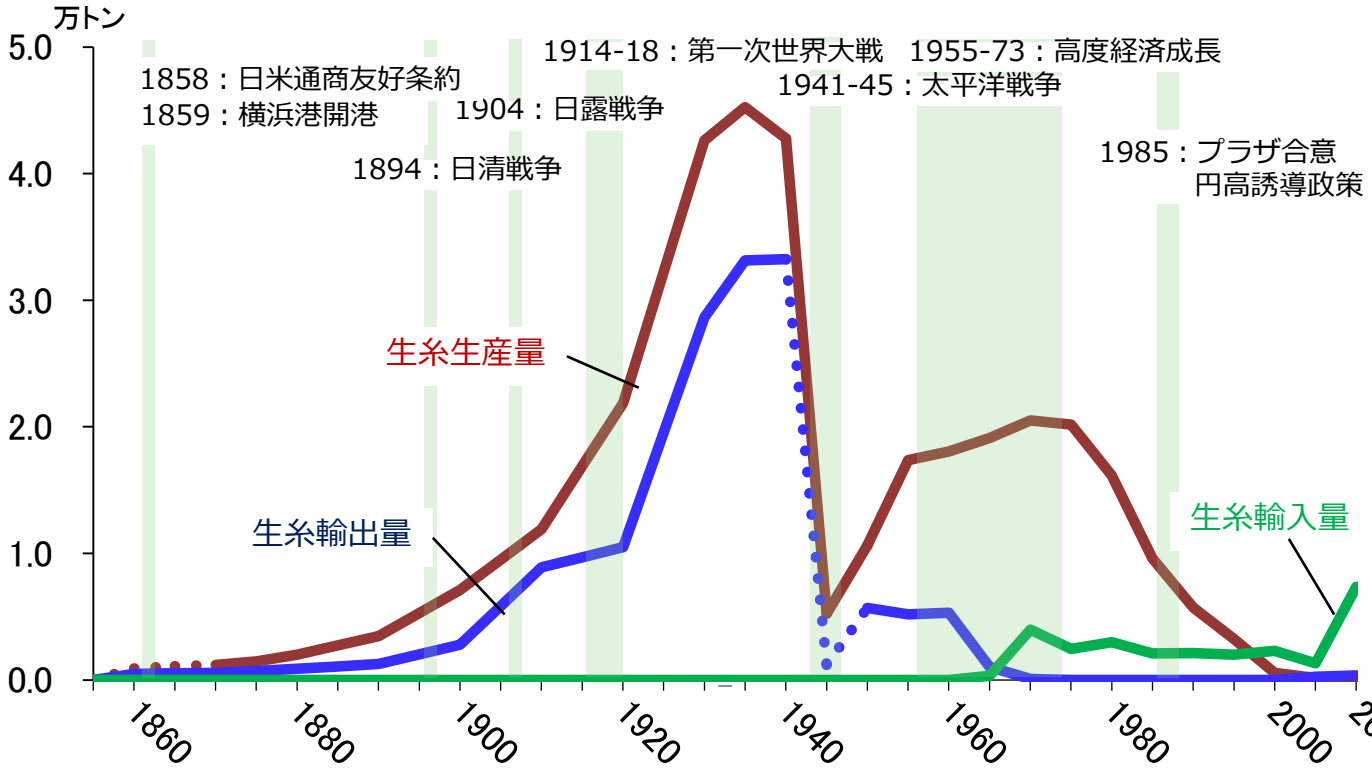
平成２６年２月

農林水産技術会議事務局
（独）農業生物資源研究所

養蚕業の歴史

養蚕業は、戦前に日本の近代化を支えた重要な産業であったが、化学繊維の普及や海外との価格競争などにより産業規模が縮小。ピーク時（昭和5年）には、全国の農家の約４割（約220万戸；桑園面積71万 ha）が養蚕業に従事していたが、現在は群馬県を中心に約600戸にまで減少。

＜明治時代以降の日本の養蚕業の推移＞



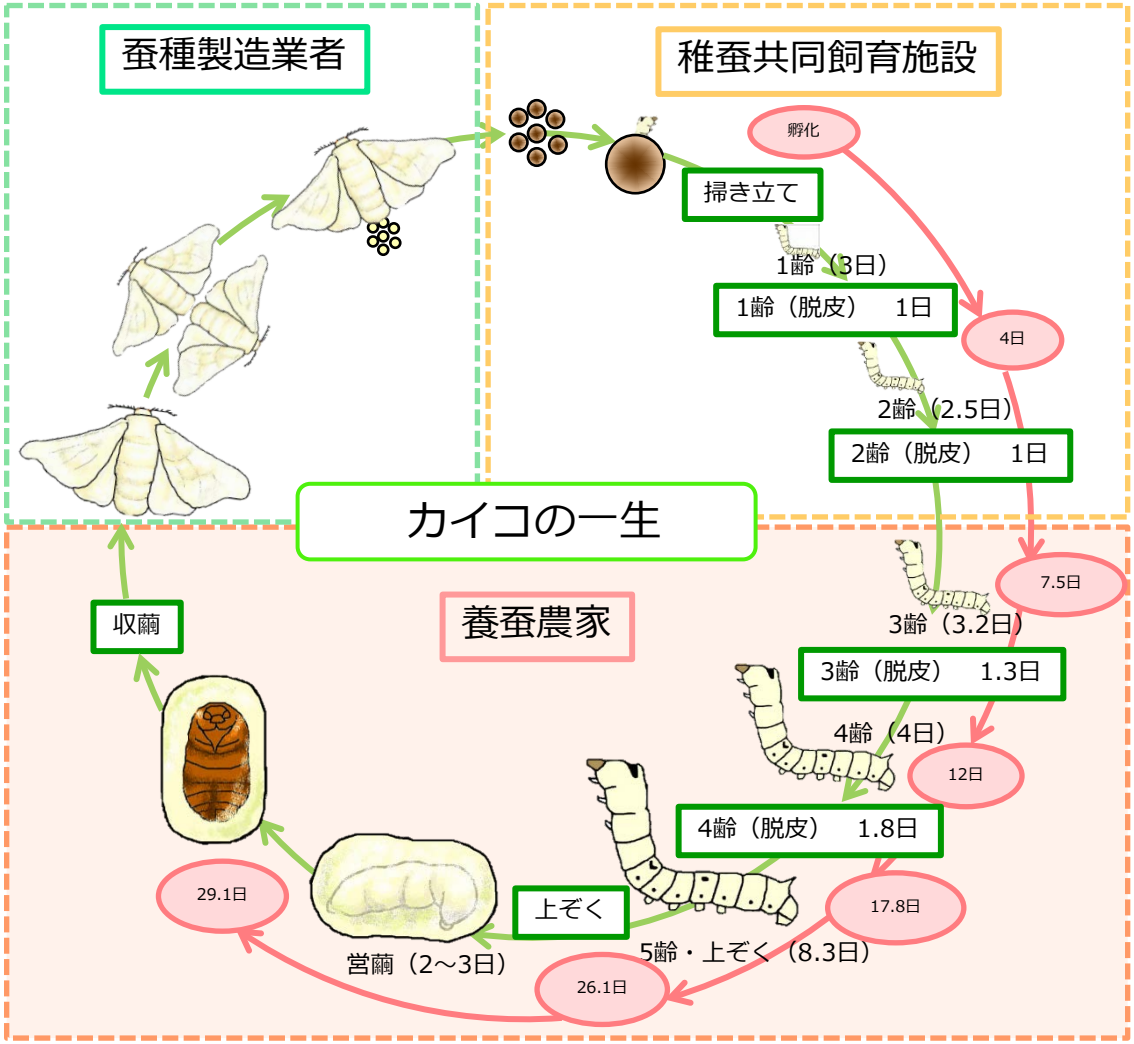
＊点線の箇所は推定値

資料：貿易統計（財務省）、日本貿易月表（日本関税協会）、横浜市史（第2巻）　養蚕統計、蚕糸統計月報、繭生産統計調査（農林水産省）　より作成

世界遺産登録を目指す富岡製糸場

カイコの特性

カイコは、動物の中でも一番家畜化された生き物と言われ、「逃げない・飛べない・人間に危害を加えない」などの特性をもち、人間による管理なしでは生存できない生物。



カイコの特性

飼育がしやすい

- エサがなくても逃げずに待っている
- 野外では自力で生きることができない
- 触られても嫌がらない、かまない、刺さない
- 短期間で成長(卵から繭まで約30日)

物質生産能力が高い

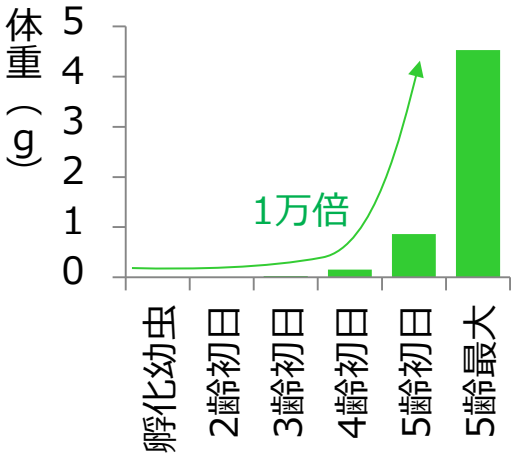
- 繭糸にはタンパク質成分が豊富
- 1頭が作る繭糸の長さは1,200～1,500 m
- 孵化から幼虫の終わりまでに体重が1万倍に

カイコの有用性

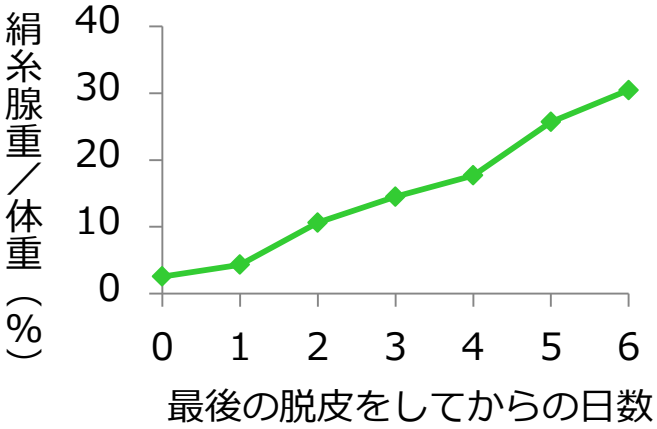
カイコの繭糸の中には、タンパク質が豊富に含まれ、大量の繭糸を短期間に生産できる能力を持つことから、この特徴を活かして、医薬品等の有用なタンパク質を製造する「昆虫工場」として利用することが可能。

物質生産能力が高い

カイコの繭糸の97%はタンパク質



孵化直後から幼虫の最後まで3週間で体重は1万倍



絹糸を作る器官である絹糸腺は幼虫体重の30%以上にも達する。

短期間に大量の有用タンパク質を製造可能

遺伝子組換え技術を応用して、ヒトに有用な様々なタンパク質を製造（昆虫工場）

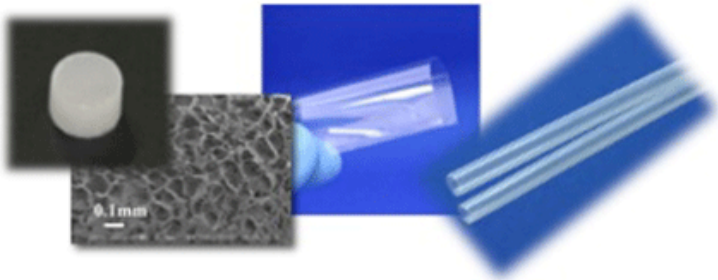
遺伝子組換え技術を用いた応用例

既に、化粧品の素材として実用化が始まっているほか、医薬品や人工血管などの医療用器具に利用するための研究開発も進行中。

カイコは、比較的小さなロットでも飼育できるため、様々な用途に少量多品目なタンパク質を供給可能。

既に実用化が進んでいる例

・ 化粧品の素材（ヒト型コラーゲン）



実用化を目指し開発を進めている例

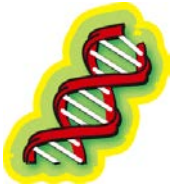
・ 抗体医薬、タンパク質医薬
　　リソソーム病治療薬など
・シルク素材の医療器具
　　人工血管、軟骨再生用素材

臨床検査薬の製造などに利用される遺伝子組換えカイコは、閉鎖された施設内で飼育。

シルク素材への応用

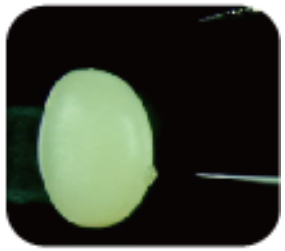
一方、シルクの分野では、新たな機能性を持った絹素材の開発も進行。
（独）農業生物資源研究所では、オワンクラゲ由来の緑色蛍光タンパク質（GFP）遺伝子を組み込んだ遺伝子組換えカイコを開発。
さらに、赤や橙等の蛍光色や、極細で光沢に優れたシルク等も開発中。

遺伝子組換えカイコの開発方法

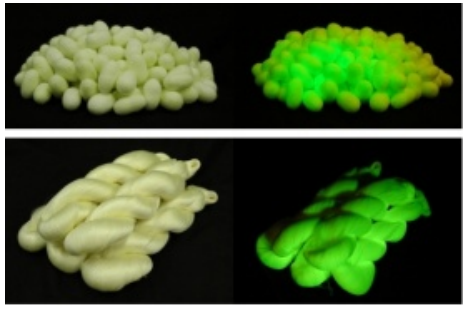


オワンクラゲ由来
GFP遺伝子

カイコの卵に
注入



交配、選抜、
大量飼育



遺伝子組換えカイコの繭、絹糸

青色LED
照明下では…

㈱ユミカツラインターナショナルと（独）農業生物資源研究所が共同制作したウェディングドレス

＊黄色フィルター使用

現在開発を進めている
蛍光絹糸の例

養蚕農家や大規模飼育による産業利用に向けた課題

遺伝子組換えカイコの農家等での産業利用に当たっては、国内の野生動植物等の生物多様性に悪影響が生じないよう配慮が必要。特に、国内には、カイコと交雑可能な近縁種として野生のガであるクワコが存在。

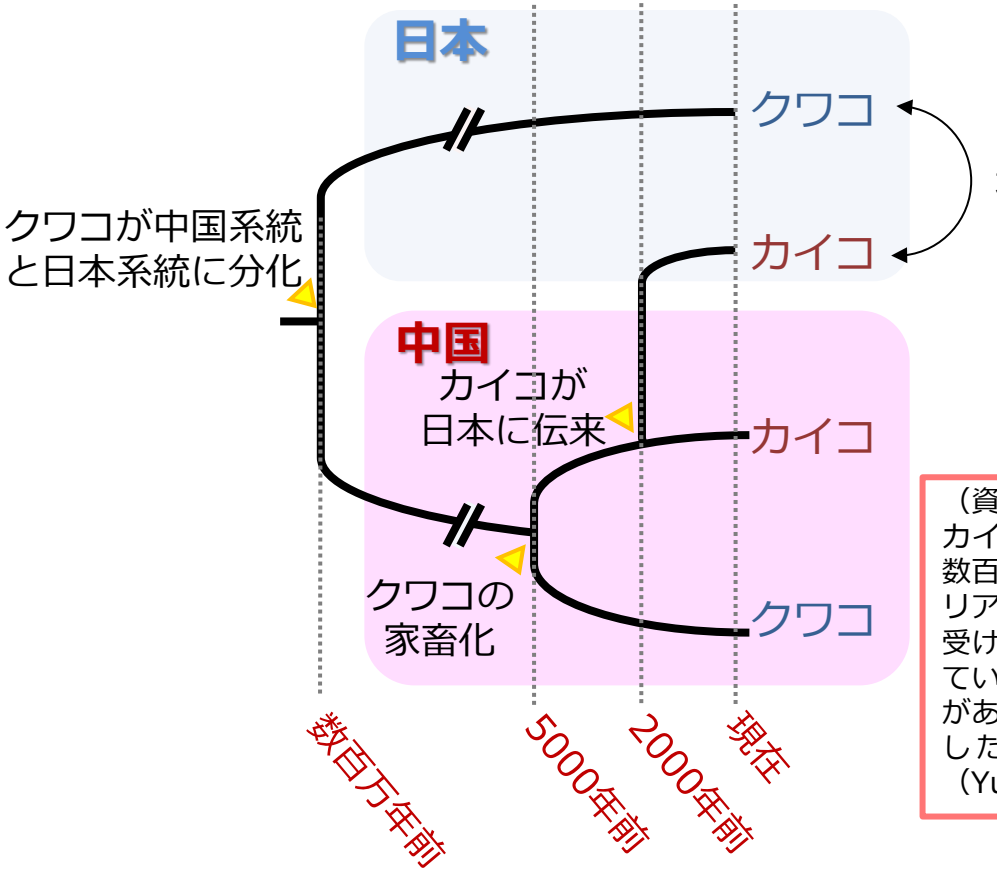
約5,000年前
中国で野生の**クワコ**が家畜化されてカイコになる。

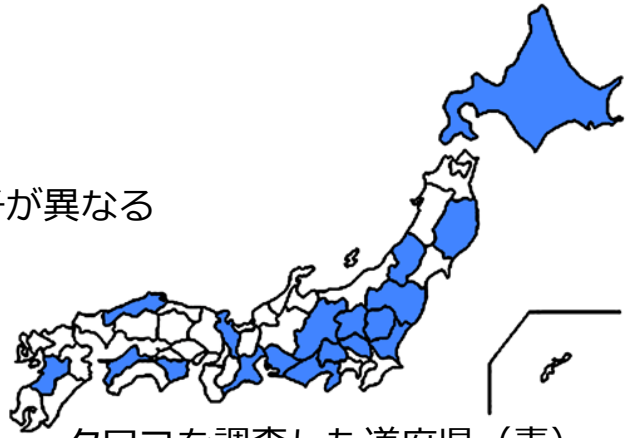
約2,000年前
カイコが日本へ伝来。

野生のクワコへの影響の可能性

過去、全国各地で養蚕業が盛んに行われていたが、これまでカイコが野生のクワコの生息等に悪影響を及ぼしたとの報告はない。

日本各地から採集した3,600頭以上のクワコの遺伝子を解析したところ、カイコと交雑した痕跡がみられず、通常の飼育方法であれば交雑（カイコからクワコへの遺伝子流入）は起こらないのではないかとの新たな知見が得られたところ。





クワコを調査した道府県（青）

（資料解説）
カイコは5000年前に中国で野生のクワコを改良して家畜化。他方、数百万年前に中国のクワコから分化した日本のクワコは、ミトコンドリア*cox1*遺伝子がカイコと異なる。ミトコンドリアは母親から子供に受け継がれるため、過去にカイコ（メス）とクワコ（オス）が交雑していれば、その子孫にカイコの遺伝子を持つ個体が発見される可能性がある。しかし、**全国各地から3600頭以上のクワコを採集**して調査したところ、**カイコの遺伝子を持つ個体は発見されなかった**（Yukuhiro et al., 2012）。

カルタヘナ法に基づく産業利用規制

遺伝子組換えカイコを一般的な環境下で産業利用するためには、「カルタヘナ法*」に基づき、野生動植物等の生物多様性に悪影響を及ぼすおそれがないとの承認を受ける必要。

（独）農業生物資源研究所では、新たな機能性シルク素材の実用化に向け、昨年７月、環境省及び農林水産省に対して、オワンクラゲ由来の緑色蛍光タンパクを産生する遺伝子を組み込んだ組換えカイコの隔離飼育試験（3齢幼虫期以降から繭の形成まで）を申請。

［第１ステップ］

遺伝子組換えカイコの開発

①

［第２ステップ］

生物多様性影響を評価（カルタヘナ法）

隔離飼育試験の承認 ② 一般的な使用(養蚕農家段階での使用)の申請

④

［第３ステップ］

養蚕業・絹織物業等における産業利用促進

試作品開発 → 試験販売 販売促進

遺伝子組換えカイコの養蚕農家による使用（飼育）を承認

科学データの収集や飼育試験

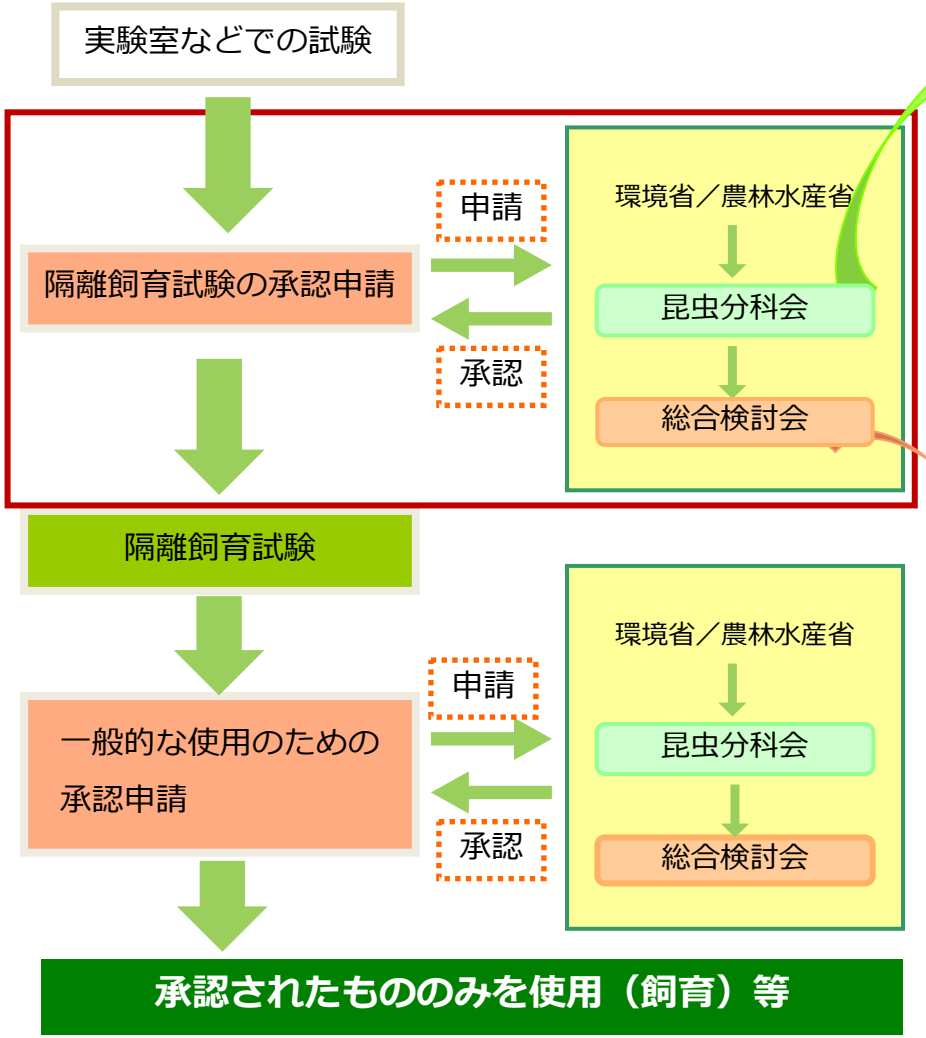
③

・パブリックコメント
・国民との双方向コミュニケーション

カルタヘナ法*：「遺伝子組換え生物等の使用等の規制による生物の多様性の確保に関する法律」

（参考1）生物多様性影響評価の流れ

遺伝子組換えカイコを一般的な環境下で産業利用するためには、隔離された小規模な飼育施設での試験段階、養蚕農家段階での飼育の段階それぞれについて、可否を国が判断。いずれも専門家による厳格な審査を実施。



昆虫分科会で意見を聴いた専門家

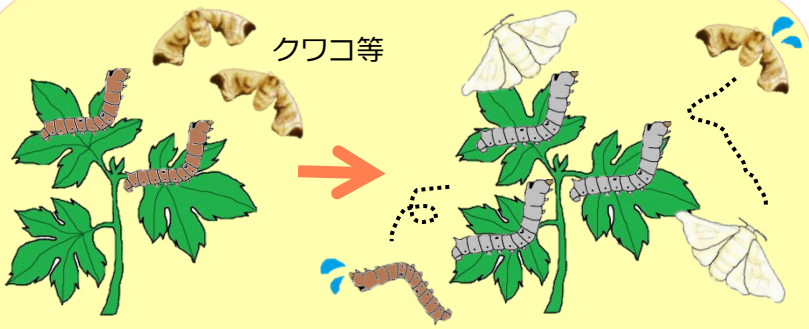
氏　名	現　職	専門分野
石　井　　実	公立大学法人大阪府立大学大学院生命環境科学研究科教授	昆虫生態学
片　倉　晴　雄	国立大学法人北海道大学名誉教授	動物分類学・種分化学
五　箇　公　一	独立行政法人国立環境研究所生物・生態系環境研究センター主席研究員	昆虫生態学
佐　藤　令　一	国立大学法人東京農工大学大学院農学研究院教授	昆虫病理学・昆虫生理学
嶋　田　　透	国立大学法人東京大学大学院農学生命科学研究科教授	昆虫遺伝学
嶋　田　正　和	国立大学法人東京大学大学院総合文化研究科教授	保全生態学
藤　原　晴　彦	国立大学法人東京大学大学院新領域創成科学研究科教授	分子生物学

総合検討会で意見を聴いた専門家

氏　名	現　職	専門分野
井　出　雄　二	国立大学法人東京大学大学院農学生命科学研究科教授	森林遺伝・育種学
大　澤　　良	国立大学法人筑波大学生命環境系教授	植物育種学
佐　藤　　忍	国立大学法人筑波大学生命環境系教授	植物生理学
嶋　田　　透	国立大学法人東京大学大学院農学生命科学研究科教授	昆虫遺伝学
嶋　田　正　和	国立大学法人東京大学大学院情報学環／総合文化研究科教授	保全生態学
高　村　典　子	独立行政法人国立環境研究所生物・生態系環境研究センター長	陸水生態学・保全生態学
武　田　和　義	国立大学法人岡山大学名誉教授	育種学
矢　木　修　身	中央大学大学院理工学研究科客員教授	環境微生物学

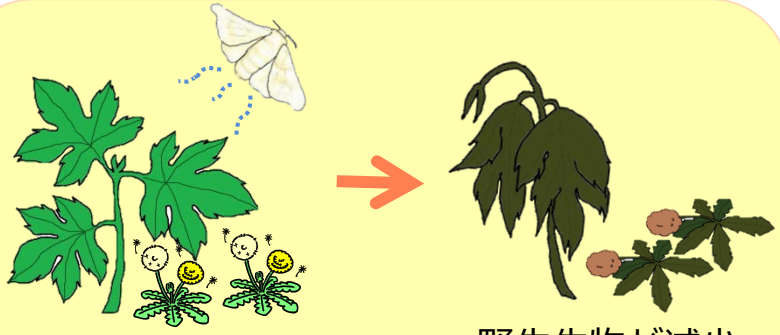
（参考2）生物多様性影響評価の評価項目

生物多様性影響評価においては、遺伝子組換えカイコが、野生動物を駆逐して野外で増殖したりしないか（競合における優位性）、野生動物と交雑して置き換わってしまったりしないか（交雑性）など野生動植物等への影響を総合的に評価。



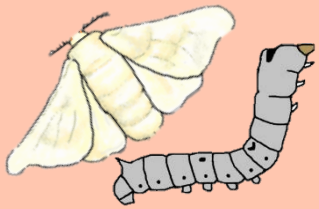
野生動物　　野生動物を駆逐しないか？

競合における優位性による影響

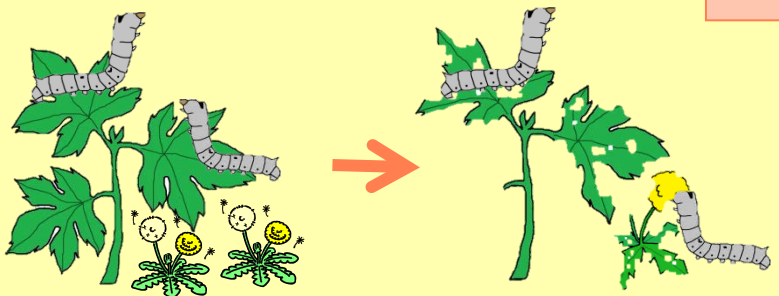


野生動植物や微生物　　野生生物が減少しないか？

有害物質の産生性による影響

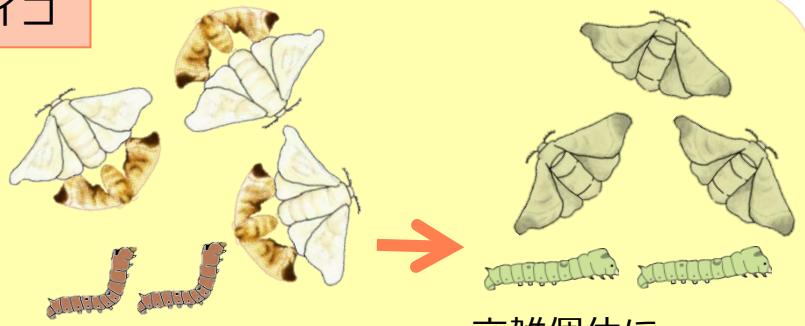


遺伝子組換えカイコ



野生動植物や微生物　　野生生物が減少しないか？

捕食性による影響



近縁野生種　　交雑個体に置き換わらないか？

交雑性による影響

隔離飼育施設（試験）の概要

今回、（独）農業生物資源研究所が研究所敷地内（茨城県つくば市）で実施する予定の隔離飼育試験は、フェンスで周囲を囲い部外者の侵入を防止するとともに、飼育室の窓などには網を設置し飼育室内にクワコ（カイコと交雑可能な近縁野生種の蛾）が飛来し侵入するのを防止する。

隔離飼育区画の周囲のフェンス
関係者以外が入らないように管理。

隔離飼育区画内の飼育室
窓などを開放する場合は、クワコの成虫の飛来を防止するために網を張る。

飼育で出るクワの枝や糞など（残渣）を隔離飼育区画内で一定期間管理する場所
混入しているかもしれないカイコがすべて死ぬまでの間、網をかけて保管し、クワコとの交尾を防ぐ。

隔離飼育試験に関する生物多様性影響評価内容の概要

今回の隔離飼育試験に関して、生物多様性影響評価検討会における評価内容の概要は、以下のとおり。

競合における優位性（１）

カイコの性質をみると

・長年にわたる飼育の中で、**自然環境下で繁殖した報告はない**。
・仮に野外に出しても、**幼虫はほとんど移動できず、**エサ（桑）を探せないことや、野鳥や昆虫にすぐに食べられることなどから、**繁殖する可能性は極めて低い**。

カイコ幼虫の屋外放飼試験

放飼を開始した時期	覆いの有無	放飼した数	発生した成虫の数
4齢2日目	有	500	0
5齢2日目	有	300	0*
5齢2日目	無	800	0

*羽化の可能性のある繭が1個見つかったが成虫は確認されなかった。

覆いをかけない場合

覆いをかけた場合

（資料解説）
深さ30cmの穴に幼虫を入れ、1日に1回桑葉を与えて飼育した。鳥類やハチ類に捕食される影響を調べるため、網で覆いをかけた場合とかけなかった場合の試験を行なった。**覆いをかけないと数日のうちに鳥類やハチ類に捕食されて全滅**した。覆いをかけた場合も、アリ類やシデムシ類に捕食された。

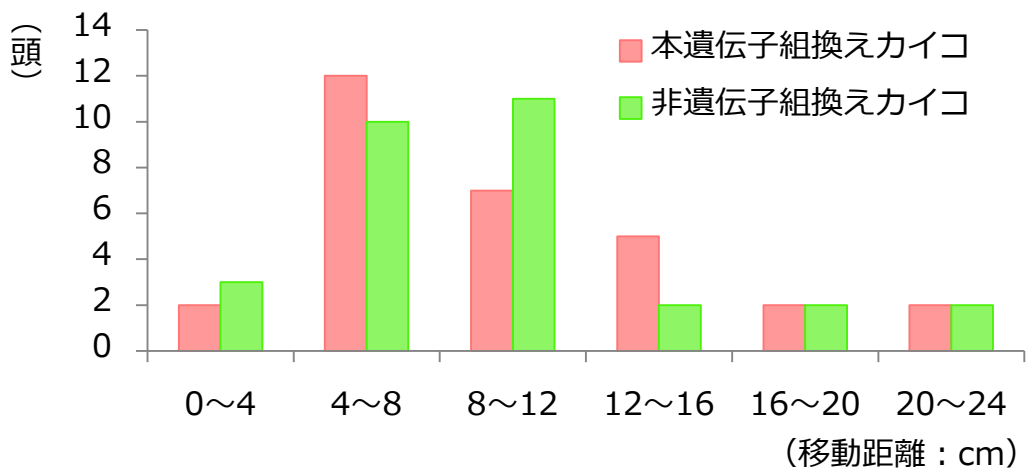
競合における優位性（２）

本遺伝子組換えカイコの特性をみると、

・蛍光タンパク質を絹糸腺や眼で発現するだけで、
幼虫の運動性が高まったり、成虫に飛ぶ能力を与えたりすることはない。

・産卵数や孵化率、幼虫や成虫の行動範囲は、非遺伝子組換えカイコと比較して競合における優位性は高まらない。

幼虫の移動距離



（資料解説）
本遺伝子組換えカイコと非遺伝子組換えカイコの幼虫の移動能力を比較するため、それぞれ30頭を等間隔に置いて、16時間後の移動距離を計測した結果、本遺伝子組換えカイコの平均は9.4cm、非遺伝子組換えカイコの平均は9.6cmで、有意な差は見られなかった。

本遺伝子組換えカイコと非遺伝子組換えカイコの比較

系統	1個体あたりの産卵数（個）	孵化率（%）
本遺伝子組換えカイコ	516.4	97.6
非遺伝子組換えカイコ	645.6	98.1

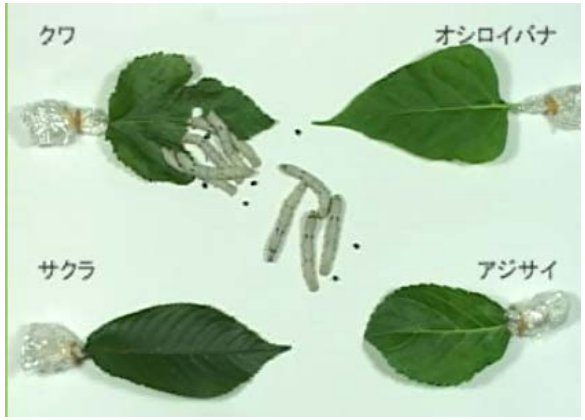
（資料解説）
本遺伝子組換えカイコは非遺伝子組換えカイコに比べて産卵数が少なく、孵化率には有意な差は見られなかった。

本申請の範囲内では競合における優位性に起因する影響はないと考えられた。

捕　食　性

カイコの性質をみると

・**幼虫期は、**人に与えられた**桑葉だけを食べる**。
・**成虫期は、**食べるための口をもたず、**何も食べない**。



http://www.viva-insecta.com/tuat_acv/archive/shiryo/xp_syoku01.htm
http://www.viva-insecta.com/tuat_acv/archive/shiryo/xp_syoku02.htm

本遺伝子組換えカイコの特性をみると

・蛍光タンパク質を絹糸腺や眼で発現するのみで、桑葉以外の動植物を捕食することはない。

本申請の範囲内では捕食性に起因する影響はないと考えられた。

有害物質の産生性

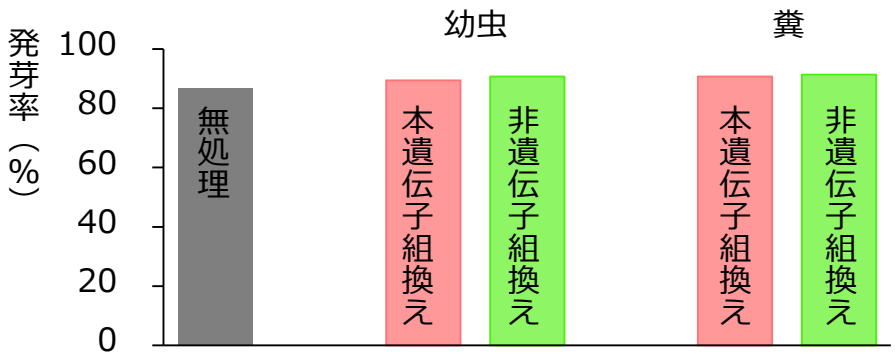
カイコの性質をみると

・これまで野生動植物等の生息や生育に影響を及ぼす**有害物質を産生したとの報告はない**。
・養蚕農家における飼育残渣（カイコが食べた後の桑葉やカイコの糞・死体）が**野生動植物等に有害であるという報告はない**。

本遺伝子組換えカイコの特性をみると

・絹糸腺や眼で発現する**蛍光タンパク質は、**生物に対する**毒性は認められていない**。
また、これまでに知られている**有毒タンパク質やアレルゲンとの類似も認められていない**。
・糞や死体を土壌に混合して、ブロッコリーの生育や微生物に与える影響を比較したところ、本遺伝子組換えカイコと一般的なカイコとの間で統計的な差はなかった。

カイコの幼虫や糞がブロッコリーの発芽に与える影響の比較



（資料解説）
本遺伝子組換えカイコと非遺伝子組換えカイコの幼虫と糞をそれぞれ粉末にして土壌に混合し、ブロッコリーの発芽率を比較したところ、有意な差は見られなかった。

本申請の範囲内では有害物質の産生性に起因する影響はないと考えられた。

交　雑　性（1）

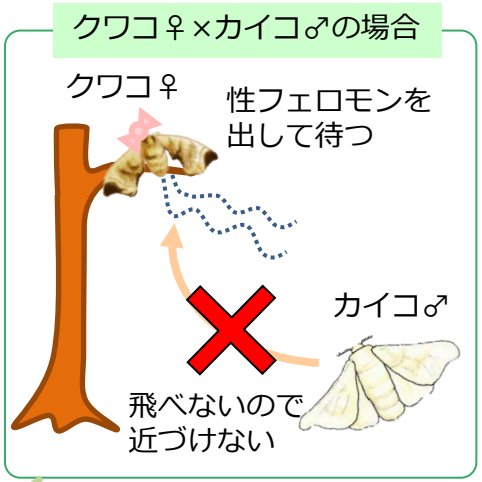
カイコの性質を見ると

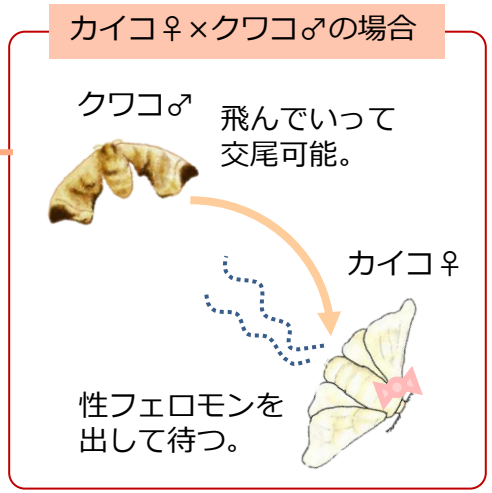
カイコのオス成虫は飛べないため、クワコのメス成虫に近づけず交尾する可能性は無い。カイコのメス成虫にクワコのオス成虫が交尾する可能性はあるが、クワコ同士に比べて交尾成功率は低い（下表：85%→45%）。

篭取り法による交配実験

メス（♀）	×	オス（♂）	供試したペア数	受精卵を産んだペア数	交尾成功率（%）
クワコ	**×**	**クワコ**	20	17	**85**
クワコ	**×**	**カイコ**	20	0	**0**
カイコ	**×**	**クワコ**	20	9	**45**
カイコ	×	カイコ	20	20	100

「飯塚哲也・行弘研司（2007）野外におけるカイコ遺伝子拡散の可能性評価手法の開発」による





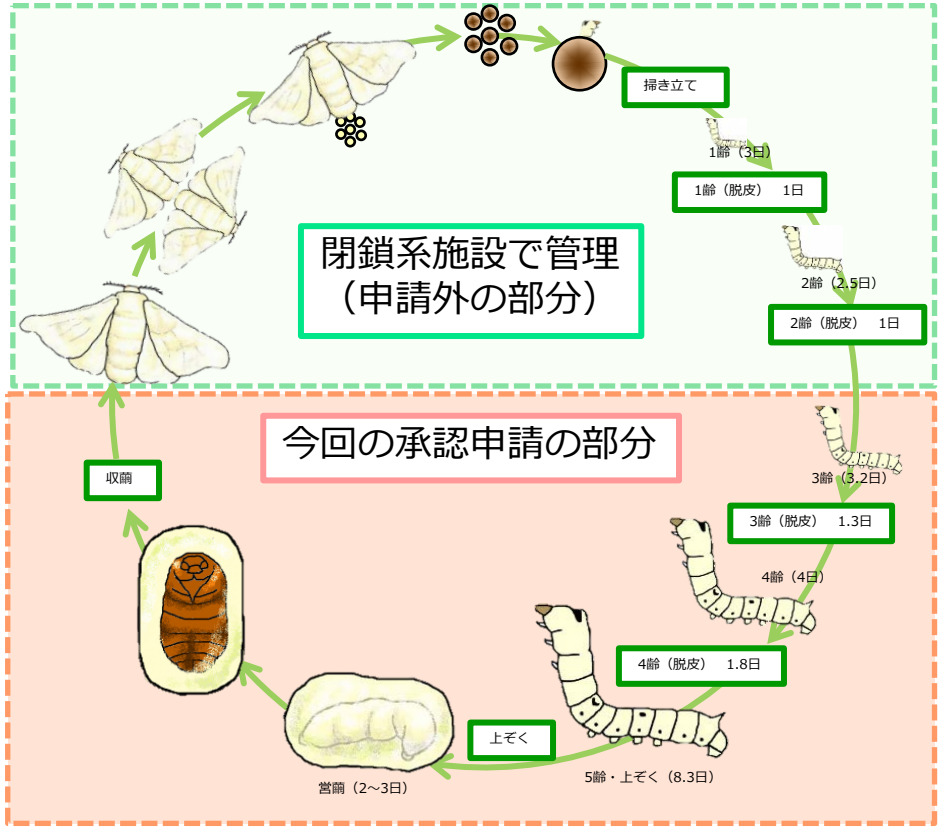
（資料解説）
カイコ・クワコ間の交配能力を調べるために、ざるカゴの中にクワコ成虫とカイコ成虫を入れて観察した結果をみると、クワコのメス成虫とカイコのオス成虫の組み合わせでは交配していない。

交　雑　性（2）

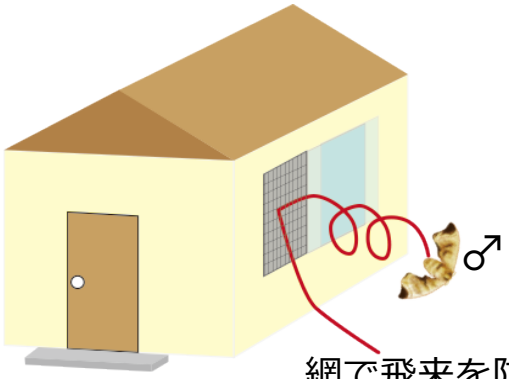
本遺伝子組換えカイコの飼育管理をみると

・飼育は3齢幼虫から繭の形成までとなるため、**成虫が発生する可能性はほとんどない。**
・さらに、飼育室の**窓等に網を張るので、クワコのオス成虫は侵入できない。**
・万一、桑葉等に付着してクワコが飼育室に侵入したとしても、カイコとは外見が異なり、飼育中に見つけて捕殺可能。

繭の熱乾燥などにより蛹を殺すので、成虫は生じない。



隔離飼育試験では、3齢幼虫から繭（蛹）まで飼育するので、基本的に成虫は生じない。

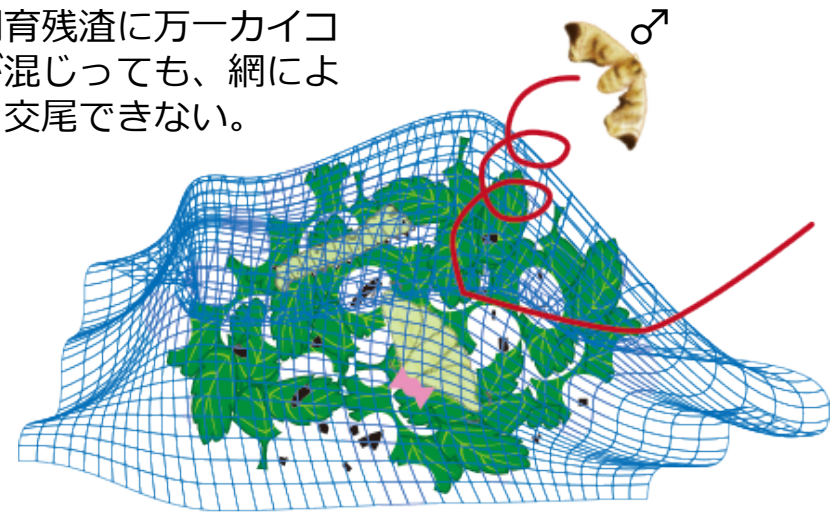


網で飛来を防止。

交　雑　性（3）

飼育残渣に混じって飼育室から外に出る可能性については

- 飼育残渣を飼育室外に出す前に、**カイコが混じっていないことを確認**。
- さらに、**飼育残渣に網をかけるなどにより管理。**



本申請の範囲内では交雑性による影響はないと考えられた。

以上より、限定された環境下で一定の作業要領に従いながら、隔離飼育区画において本遺伝子組換えカイコの幼虫を飼育し、繭の生産等を行う範囲内では、生物多様性に悪影響が生ずるおそれはないと評価。

モニタリング及び緊急措置

隔離飼育試験では、不測の事態に備え、モニタリングを実施してクワコとの交雑が発生していないかを監視。

○モニタリング

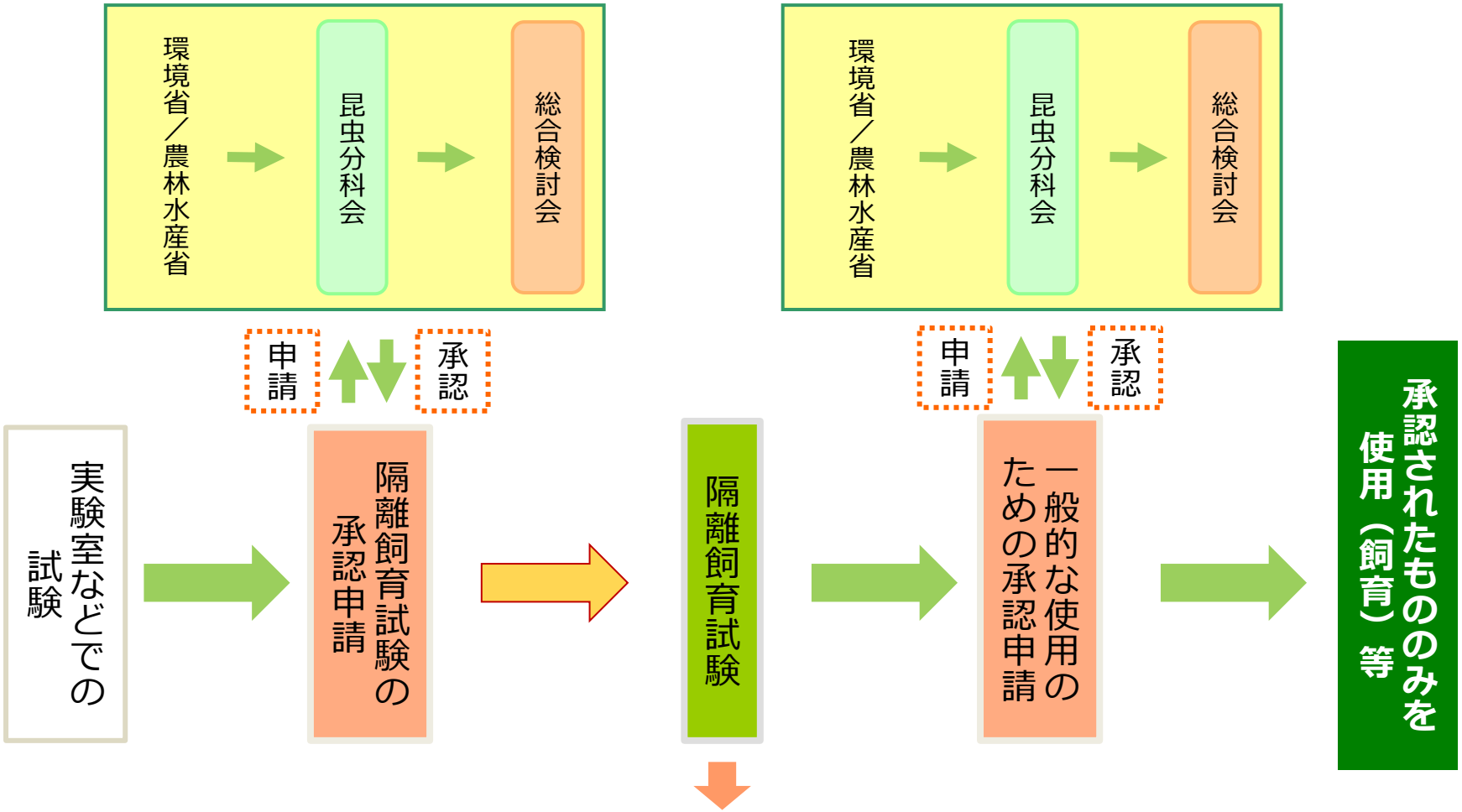
隔離飼育区画の周辺にフェロモントラップを設置し、カイコとクワコの交雑体が発生していないかを念のため確認。

○緊急措置計画

万一、交雑体が発見された場合には、直ちに規制当局に報告するとともに、隔離飼育区画での飼育を直ちに中止し、飼育中の遺伝子組換えカイコを殺処分するとともに、モニタリングを強化するなどして交雑の拡大を防止。

カイコのメス成虫や合成された性フェロモンを置く。

粘着板

今後の予定

今後、本隔離飼育試験の実施が承認された場合は、生物多様性影響評価データ等をさらに充実させ、農家段階での遺伝子組換えカイコの飼育（一般的な使用のための承認申請）の可否を検討。