

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	革新的環境研究プロジェクトのうち炭素貯留能力に優れた造林樹種の効率的育種プロジェクト			担当開発官等名	研究開発官（基礎・基盤・環境）
				連携する行政部局	林野庁森林整備部整備課 林野庁森林整備部研究指導課
研究期間	R 3年～R 7年（5年間）			総事業費（億円）	2.3億円（見込）
研究開発の段階	基礎	応用	開発		

研究課題の概要

- ① 気候変動問題は国際的にも大きな課題となっており、日本においても2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指すことが宣言され、具体的な施策が進められている。農林水産省においては、「みどりの食料システム戦略」が策定され、森林・林業分野では、森林によるCO₂吸収の最大化と資源の循環利用の実現が大きな柱となっている。また、革新的環境イノベーション戦略（2020年1月閣議決定）では、CO₂の吸収・固定能力や木材としての性能に優れ、さらに地域に適した特性を併せ持ったエリートツリー（※1）や成長に優れた樹種である早生樹（※2）に転換し、森林によるCO₂の貯留を促進することの必要性が位置づけられている。これらの計画による取組を推進し、森林によるCO₂吸収・固定能力の最大化を進めるため、ゲノム情報等を活用し、炭素貯留能力に優れたスギ等の系統を短期間で作出するための育種技術を開発するとともに、スギを対象に炭素貯留能力に優れた系統を作出する。
- ② 本研究課題では以下の研究を行う。
- ・スギ、カラマツ等の造林用樹種やコウヨウザン等の早生樹における、遺伝子情報の収集・基盤整備
 - ・炭素貯留能力に関連する形質の評価手法の高度化と組織構造等のデータの取得・解析
 - ・炭素貯留能力に関連する形質を予測するためのモデル構築・DNAマーカー（※3）開発
 - ・ゲノム編集技術（※4）を活用したスギの炭素貯留能力を増減可能にするための基盤技術の創出

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 令和4年度末までにカラマツ、ヒノキ、コウヨウザンについてリファレンスゲノム（※5）を決定するとともに、得られたデータは、ゲノムデータベースへ格納する。スギ交配家系集団における炭素貯留能力を予測するモデルを構築する。	① 令和7年度末までにスギを対象に炭素貯留能力に優れた系統を3系統以上作出する。
② スギ第一世代精英樹（※6）約100系統の年輪構造データの取得を完了するとともに、成長能力の早期選抜に重要度の高い形質の絞込みに着手する。	② 令和7年度末までにスギ以外の樹種1種以上について、ゲノム情報の活用による選抜手法を開発する。
③ 炭素貯留能力を改変するためのゲノム編集ベクター（※7）を導入したスギについて、無菌植物体を作製する。また新たな標的遺伝子のベクターを構築し、スギへの導入に着手する。	③ 令和7年度末までにスギにおいてゲノム編集技術を活用し、炭素貯留能力の増減を可能にする技術を開発する。

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（R17年）

- ① 本研究で開発した炭素貯留能力に優れた品種については研究開発終了後5年を目途に、開発した選抜手法によって作出される品種・系統については10年を目途に原種の生産・配布を開始し、都道府県と連携しつつ採種園・採穂園（※8）に導入する。このように造林現場で求められるエリートツリー等の苗木生産を加速させることで、2050年の林業用苗木に占めるエリートツリー等の活用割合9割以上の達成に貢献する。

【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

地球温暖化の抑制のために森林は炭素吸収源として大きな役割を果たしている。我が国の森林は、国土の約7割を占めており、その4割は人工林であるため、今後の森林によるCO₂吸収・固定能力の最大化を進める上で適切な人工林管理は重要である。現在、人工林は高齢級化が進んでおり、このまま高齢級化が進行した場合、CO₂吸収・固定能力が低下すると予測されている。このため、革新的環境イノベーション戦略では、CO₂の吸収・固定能力や、木材としての性能に優れ、さらに地域に適した特性を併せ持ったエリートツリーや成長に優れた樹種である早生樹に転換し、森林による炭素の貯留を促進することの必要性が位置づけられている。また、2021年に農林水産省が策定した「みどりの食料システム戦略」でも、森林によるCO₂吸収の最大化と資源の循環利用の実現を大きな柱としており、森林に対するCO₂吸収源としての期待は高まっている。これらに対応するためには、炭素貯留能力に優れる系統を早期に選抜できる育種技術を開発することにより、これまで数十年間を要してきた林木の品種改良を大幅に短縮し、炭素貯留能力に優れた系統の作出を促進することが重要である。

② 引き続き国が関与して研究を推進する必要性

「みどりの食料システム戦略」に掲げる、森林によるCO₂吸収の最大化と資源の循環利用を実現するには、林木の炭素貯留能力を向上させるための育種を進め、速やかに苗木生産現場に提供することが求められており、育種事業を担う国が引き続き関与して研究を推進する必要がある。

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

小課題1「スギ等の遺伝子情報の収集・基盤整備と形質を予測するためのDNAマーカーの開発」については、中間時の目標としていたカラマツ、ヒノキ、コウヨウザンのリファレンスゲノムを決定したことに加えて、前倒しでスギのリファレンスゲノムも決定し、これらの情報をデータベース化して予定より早めて公開した。また、様々な系統のスギの炭素貯留能力を予測する、ゲノミック予測モデル（※9）を目標通り構築した。

小課題2「炭素貯留能力に関連する形質評価の高度化」については、スギ第一世代精英樹について中間時の数値目標（100系統）の3倍以上の335系統の年輪構造の樹幹内分布等の詳細な表現型を解析するとともに、第二世代精英樹（エリートツリー）系統についても表現型の解析を開始した。また、スギは空間利用効率（樹冠面積あたりの成長速度）の系統間差が大きく、成長能力の高いスギの評価基準として樹冠面積の大きさが活用できることを明らかにした。

小課題3「ゲノム編集技術を活用したスギの炭素貯留能力を増減可能にするための基盤技術の創出」については、炭素貯留能力への関連が推定される2遺伝子についてゲノム編集し、目標通りスギ植物体を作製した。また、その他炭素貯留能力への関連が推定される6つの標的遺伝子については、ゲノム編集ベクターを導入したスギの培養細胞の獲得に成功した。

以上のように、研究は中間時の目標に対し100%以上の達成率で順調に進捗している。

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

炭素貯留能力に関連する形質の予測精度を高めるため、ゲノミック予測モデルの改良とスギ以外の樹種への拡張を行う。すでに作製しているゲノム編集植物体の評価を着実に実施することで、最終目標の達成は可能である。

具体的には、新たに炭素貯留能力に関連する木材密度等の形質を解析しデータ量を拡大することで、スギのゲノミック予測モデルの改良を図り、この改良モデルを用いて炭素貯留能力に優れたスギ候補の選抜・育種を加速化する。また、スギ以外の樹種についても、大量のジェノタイピング基盤（※10）構築を進めてゲノミック予測モデルを用いた選抜手法を開発する。さらに、すでに作製している炭素貯留能力の改変が推定されるゲノム編集植物の育成と細胞壁等の解析・評価を進めることで、炭素貯留能力を改変可能な遺伝子の同定とそれをゲノム編集するための技術の確立が可能である。

以上のように、スギを対象に炭素貯留能力に優れた系統の作出、スギ以外の樹種におけるゲノム情報の活用による選抜手法の開発、並びにゲノム編集技術によるスギの炭素貯留能力の増減を可能にする技術開発が可能と考えられることから、最終到達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：A

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

本課題により開発する炭素貯留能力に優れた系統について、林野庁補助事業「エリートツリー等の原種増産技術の開発事業」で開発した原種増産に関する技術を活用して効率的に増産することで、研究開発終了後、5年目以降に開発品種・系統の原種配布を開始する見込みである。これらの原種は、本課題への参画機関である静岡県をはじめ都道府県と連携し、採種園・採穂園に導入し早期の種苗生産を目指す。ゲノム編集スギにおいては、研究終了後3年を目標に外来遺伝子を除去することを目標としており、野外栽培に向け、野外植栽可能な炭素貯留能力に優れたゲノム編集スギについて開発期間中から主務省との事前相談を開始し、開発後すみやかに情報提供を開始する。以上の取組により、2050年の林業用

苗木に占めるエリートツリー等の活用割合9割以上の達成に貢献するというアウトカム目標の達成は可能であると考える。

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

本プロジェクト研究について、令和3年度林業研究・技術開発推進ブロック会議育種分科会（北海道、東北、関東・中部、近畿・中国、九州）において、開発される品種の利用者にあたる都道府県の林木育種事業・研究担当者に情報提供している。また、林木育種成果発表会（令和5年2月8日）においても得られた研究成果について発表する予定としており、研究成果の活用のための取組は妥当である。

③他の研究や他分野の技術の確立への具体的貢献度（研究内容により該当しない場合は、除外して評価を行う。）

本課題の成果として公開した針葉樹4樹種のリファレンスゲノム情報や、ゲノム編集技術を活用した植物細胞の二次壁形成にかかる遺伝子機能に関する情報は、被子植物を含めた植物の進化に関連する生物分野の幅広い科学技術研究や、草本も含めた他の植物の炭素貯留能力の効果的な改変技術などの技術開発研究への活用への貢献が期待される。

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

本課題の各小課題は計画通りまたは計画以上に進捗しており、最終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

外部有識者及び関係する行政部局で構成する「炭素貯留能力に優れた造林樹種の効率的育種プロジェクト」運営委員会を設置し、行政ニーズや各課題の進捗状況を踏まえて、実施計画の見直し等の適切な進行管理を行っている。上記の運営委員会を年1回開催し、進捗状況の確認、研究計画・推進体制の見直し、研究成果の共有と公表等について、指導等を行っている。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等を随時開催し、コンソーシアム内の情報共有や意見交換、推進体制の検討等を行っていることから、研究推進体制は妥当である。

③研究課題の妥当性（以後実施する研究課題構成が適切か等）

小課題1でスギ等の遺伝子情報の収集・基盤整備と形質を予測するためのDNAマーカーの開発を行い、炭素貯留能力に関連する表現型値の予測を可能とするゲノム育種技術を開発する。小課題2で炭素貯留能力に関連する形質の評価の高度化を行い、小課題1で開発されるゲノム基盤から得られた遺伝子型情報の活用によるゲノム育種技術と合わせ、炭素貯留能力に優れた系統の作出を行う。小課題3でゲノム編集技術を活用したスギの炭素貯留能力を増減可能にするための基盤技術を創出する課題構成となっており、目標達成に向けた課題構成として妥当である。

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（選択と集中の取組など）

委託プロジェクト全体で、課題の進捗状況や研究成果の有用性を踏まえた予算配分の重点化を行っている。各課題ともに計画通りまたは計画以上に進捗しており、最終目標の達成も見込まれることから、予算配分額は妥当である。

【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

- ・カーボニュートラル、脱酸素社会の実現に資する育種技術開発に関する課題であり、研究の必要性は高く、国の関与は必要である。
- ・研究は概ね予定通り進捗しており、研究目標の達成は可能と思われる。既に多くの成果が公表されている点も高く評価できる。
- ・本研究は、カーボニュートラル実現のための森林吸収源対策に貢献する課題であり、継続して実施することが妥当である。

2. 今後検討を要する事項に関する所見

- ・炭素貯留能力に優れたエリートツリーの開発はカーボニュートラル実現に極めて効果的な研究であるが、優れた樹種が開発されたとしても、林業従事者が経済的に潤うエコシステムとセットで実現しない限り、効果を発揮できないことが考えられる。林野庁がエコシステムの道筋に本研究をフィットさせる努力をしていただきたい。

[研究課題名]革新的環境研究プロジェクトのうち炭素貯留能力に優れた造林樹種の効率的育種プロジェクト

用語	用語の意味	※番号
エリートツリー	スギ・ヒノキ等の造林樹種で、成長等の形質が優れた個体を一般林地から選抜したものを「第1世代精英樹」、この精英樹同士を交配してできた子供からさらに選抜したものを「第2世代精英樹」と呼び、第2世代以降の精英樹を総称して「エリートツリー」と呼んでいる。選抜にあたっては、成長量だけでなく、材の剛性や幹の通直性に著しい欠点がないこと、雄花着花量が多くないこと等も基準となっている。	1
早生樹	成長が優れた樹種。針葉樹としてはコウヨウザン、広葉樹としてはセンダン、チャンチン、チャンチンモドキ、ハンノキ、ユリノキ等が代表樹種である。これまで家具材として使用されてきたブナ、ミズナラ等の広葉樹資源が減少し、再造成には長い期間が必要なため、成長の早い早生樹が注目を集めている。	2
DNAマーカー	ゲノム中の任意の遺伝子について、個体間での塩基配列の違いや遺伝子発現量の違いを目印としたもの。DNAマーカーは、個体の識別や特性の予測等に用いられる。	3
ゲノム編集技術	ゲノムDNAを切断するハサミのような酵素（DNA切断酵素）を利用して、狙った遺伝子に突然変異を起こすことができる技術。	4
リファレンスゲノム	その生物種を代表するゲノム配列であり、その生物種の個体間で配列を比較するための参照配列として用いられる配列情報のこと。	5
精英樹	スギ・ヒノキ等の造林樹種で、成長等の形質が優れた個体を一般林地から選抜したものを「第1世代精英樹」と呼び、この精英樹同士を交配してできた子供からさらに選抜したものを「第2世代精英樹」と呼ぶ。選抜にあたっては、成長量だけでなく、材の剛性や幹の通直性に著しい欠点がないこと、雄花着花量が多くないこと等も基準となっている。第2世代以降の精英樹を総称して「エリートツリー」と呼んでいる。	6
ゲノム編集ベクター	ゲノム編集を行うために必要な酵素の遺伝子や標的遺伝子を特定するための塩基配列情報を持った核酸などを細胞内に導入するための運搬用DNA。	7
採種園・採穂園	苗木を生産するための種子を採取するための樹木園を採種園、挿し穂による苗木を生産するための穂（若い枝）を採取する樹木園を採穂園と呼ぶ。	8
ゲノミック予測モデル	任意の個体の遺伝的能力を予測するための予測式。予測モデル構築後は、DNA分析の結果から個体の特性を予測することが可能となる。	9
ジェノタイプング基盤	スギ、ヒノキなど樹種ごとの種内の系統間の遺伝的な違いについて、DNA分析することが可能なDNAマーカーのセット（このプロジェクトでは樹種ごとに大量のDNAマーカーを整備）を用いてDNA分析を行い、得られる遺伝子型情報の総体。	10

炭素貯留能力に優れた造林樹種の効率的育種プロジェクト

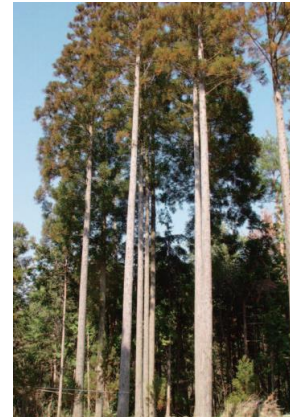
1. 研究目的

人工林の高齢化に伴うCO₂吸収・固定能力の低下の課題に対応し、炭素貯留能力に優れたスギや早生樹等を早期に選抜し造林することにより、カーボンニュートラル実現のための森林吸収源対策に貢献することを目的とする。

2. 研究背景

脱炭素社会の実現に向けて、炭素吸収源として人工林の役割を最大限活用するために、炭素貯留能力や成長等に優れたスギ等の優良種苗に転換し、森林吸収源対策を促進することが必要である。

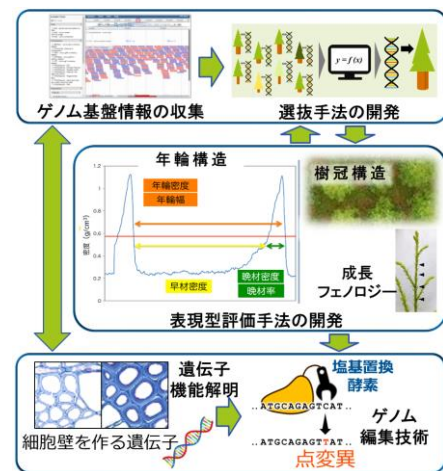
そのため、優良系統を選抜するとともに、それらの効率的な選抜を可能とする技術の開発が求められている。



スギ優良系統

3. 研究内容

- ① スギ等のゲノム基盤情報の収集及び整備と炭素貯留に関わる新たな表現型評価手法の開発
- ② ゲノム情報と炭素貯留に関連する表現型を用いた選抜手法の開発
- ③ モデル植物等の炭素貯留能力に関与する遺伝子変異をスギにおいてゲノム編集技術により再現



研究の構成

4. 達成目標・期待される効果

達成目標

- スギにおいて炭素貯留能力に優れた3系統以上の作出及びゲノム編集技術による貯留能力増減技術の開発
- スギ以外の樹種1種以上で選抜手法を開発

期待される効果

- 森林のCO₂吸収能力向上に貢献
- 育種基盤の整備による森林資源の循環利用推進



研究代表機関：森林研究・整備機構

共同研究機関：(公財)かずさDNA研究所、京都大学、静岡県立農林環境専門職大学、静岡県

【ロードマップ（中間評価段階）】

炭素貯留能力に優れた造林樹種の効率的育種プロジェクト

～R2年度	R3年度	R4年度	R5年度	R6年度	R7年度	R8年度	R9年度～	R17年度～	
既往の成果 (知見)	委託研究プロジェクト						品種開発	社会実装	
	小課題1 スギ等の遺伝子情報の収集・基盤整備と形質を予測するためのDNAマーカーの開発								
スギのEST情報を集積	ヒノキ等の塩基配列の取得	ヒノキ等のリファレンスゲノムの決定	各樹種の連鎖地図情報やEST情報に関する知見の収集	ヒノキ等の大量ジェノタイピング基盤構築	炭素貯留能力に関連する形質の予測モデルの構築及びゲノム選抜技術の開発				
スギで網羅的に多型検出可能なジェノタイピングシステムを整備		スギ交配家系集団における炭素貯留能力を予測するモデルを構築	ゲノム予測のためのスギ等のモデル系統の材質・成長形質の解析	スギ等の次代系統を含む多数系統の材質・成長形質の解析					
	小課題2 炭素貯留能力に関連する形質の評価の高度化								
UAVを活用した樹高等表現型形質の取得手法を確立	スギを対象として年輪構造等の詳細形質評価技術の開発	スギのモデル約100系統で、年輪構造等の詳細な表現型情報取得	炭素貯留能力に優れたスギの候補選定に着手	スギの木材密度及び成長に関する表現型情報の解析を完了 炭素貯留能力に優れたスギ1系統以上を選抜	炭素貯留能力に優れた優良系統3系統以上の選抜を完了				
	小課題3 ゲノム編集技術を活用したスギの炭素貯留能力を増減可能にするための基盤技術の創出								
モデル植物で二次壁形成のマスターキー遺伝子を同定	炭素貯留能力に関与が推定されるスギの候補遺伝子の単離	炭素貯留能力を改変するためのゲノム編集の標的遺伝子が決定	炭素貯留能力を改変するゲノム編集ベクターの完成	炭素貯留能力の改変を目的としたゲノム編集スギの取得	変異により炭素貯留能力を増減可能な遺伝子の同定とそれをゲノム編集するための技術の確立				
スギでゲノム編集技術を確立							外来遺伝子を除去するための次世代化を進める。		
						野外植栽可能な炭素貯留能力に優れたゲノム編集スギについて開発期間中から野外栽培に向けた主務省との事前相談を開始し、開発後すみやかに情報提供を開始する。		都道府県と連携しつつ、開発品種・系統の普及に向けて、採種園・採穂園に導入するための原種の配布を開始する。	