

S-2 陸域生態系の活用・保全による温室効果ガスシンク・ソース制御技術の開発

4 研究プロジェクトの統合的推進のプラットフォーム形成と情報共有化

成蹊大学 理工学部

山田 興一

平成15～19年度合計予算額	75,662千円
(うち、平成19年度予算額	15,070千円)
上記の合計予算額には、間接経費	17,459千円を含む

〔要旨〕本プロジェクトでは1aから3bまで6つのテーマでGHG排出削減のシステムを開発している。それらシステムを効率的に開発し、プロジェクト全体としての成果を最大限にするために各開発システムの技術的な課題を明らかにする必要がある。

各チームの協力を得て、横断的評価として、各テーマの研究成果から提案されるGHGの固定・削減の手法に基づいたポテンシャルの評価、研究成果がGHG削減という結果に結びつくまでの道筋をまとめたロードマップの作製を行った。さらに、幾つかの手法については、仮想的なプロジェクトを想定してGHGの固定・削減量とそのプロジェクトの実施に際してのコストと排出されるCO₂や他のGHGの量を見積もり、固定・削減効率も求めた。

横断的評価の結果、各研究テーマによって研究開発された技術に基づく削減プロジェクトが全て実施されたとするとGHG削減ポテンシャルとして20年間で100億t-C以上になると推定された。このうち、最大のポテンシャルをもつのは開発によりCO₂排出が増大している東南アジア泥炭地であり、その量は36億トンCにも達した。

対象や手法が異なる複数のプロジェクトを同じ基準で評価する横断的な評価では、不確実性のため時に大胆な仮定も必要となったが、その作業を通じて各研究テーマでの目標の明確化とテーマ間での研究内容の相互理解が進むことによって、本研究の目的のひとつである効率的なプロジェクトの推進が実現されたと考える。

〔キーワード〕 固定・排出制御、シナリオ、ロードマップ、プラットフォーム、評価

1. はじめに

中長期的視点すなわち京都議定書第二約束期間以降を見据えた大気中の温室効果ガス濃度の安定化に向け、地球環境政策オプションを支える新たな技術開発が求められている。特に、陸域生態系の活用・保全を通じて温室効果ガスのシンクを増強し、ソースへの転換を防止あるいは排出抑制するための技術については、温暖化抑制技術としてのポテンシャルが非常に大きいと考えられており、また、人類が再生可能エネルギーへの完全転換を実現するまでの期間において、最も信頼でき、低コストで広範囲への適用が可能な貴重な技術として期待されているものの、科学的知見や基盤技術の整備は未だ非常に不十分な段階にとどまっている。今後、CDMあるいはJIへの適用を視野に入れた場合も含めて、このような技術の開発促進及びそれに伴う様々な環境影響の把握等、広範な科学的知見の蓄積が喫緊の課題となっている。

2. 研究目的

陸域生態系の中でも地球温暖化抑制ポテンシャルが大きいと期待される、森林生態系、熱帯低湿地生態系、農林業生態系において温室効果ガス（GHG）の排出量低減/固定量増加のためのシンク・ソース制御技術を開発することを本プロジェクトの目的とする。さらに、開発された技術及び得られた知見を広範な地域へ適用した場合の温室効果ガス削減ポテンシャル、環境への影響、コストを明らかにし環境政策へ役立てることも目的である。

3. 研究方法

（1） 各研究テーマの削減技術ロードマップを利用した横断的評価

本プロジェクトでは1aから3bまで6つのテーマでGHG排出削減のシステムを開発している。それらシステムを効率的に開発し、プロジェクト全体としての成果を最大限にするために各開発システムの位置づけを明確にする必要がある。

このための横断的評価の目標・要件をまとめると

- 1) 評価はGHG制御への寄与を主な基準とする。
- 2) テーマ間の比較にとどまらず、広く一般のGHG制御技術との比較を可能とする必要がある。
- 3) 各要素技術の開発の難易度・不確実性についても評価する。
- 4) 評価結果は、CDM、JI等のUNFCCCの枠組みとシームレスにつながる事が望ましい。
- 5) 評価に際して各テーマの実施グループに過剰な負荷を求めない。
- 6) 評価の枠組みの妥当性・有用性について、定期的に点検し改善する。

となる。

目標1) から各テーマにおいて開発されている要素技術を実際にプロジェクトとして実施した場合のGHG削減ポテンシャルを評価の対象とし、2) に示したようにテーマ間の序列付けや相対評価ではなく、他のGHG制御技術とも比較可能な定量的な評価を行うことを目的とする。その際、4) に示した様にCDM、JIにおけるクレジットの評価基準に相当する基準での評価が必要となる。もちろん、本プロジェクトの性質上、研究は各要素技術の自然科学的・社会的・技術的な側面を対象とするものであり、CDM、JI等にもとづくクレジットの計算方法の細部に拘泥する必要はないが、これらの枠組みで求められているGHG排出量、ベースライン算定での方法論（計算式）とデータの明示、モニタリングプランの立案などを念頭にGHG削減ポテンシャルを計算するべきであろう。また、計算に際して確立していない技術の効果を見積もり、欠損している情報を推測で補うことがなど必要となるが、このような過程で研究プロジェクトに重要性が高い技術、情報が洗い出されることにもなった。

さて、1a～3bの各テーマによりGHGの固定・排出抑制をおこなういくつかの要素技術が提案された。テーマ4では、この作業を効率化する方法について検討しているが、各テーマから提案されている技術が第二約束期間までに実現するためにどのような問題点・不確実性があるのか、を具体的にイメージするために、実現までに、どのように実現されていくのか、あるいは、ここでは固定・削減がどのようにおこなわれるのか、その具体的なイメージを示し、理解を容易にするコミュニケーションのツールとしても、具体的な固定・削減事業がおこなわれる様子をシナリオとしてとり

まとめる方法に関して検討・試行した。

目的・要件としての3)を考慮すると、シナリオを読むことで固定・削減事業がどの様に進むのかが理解され、利点や問題点を具体的なイメージとして把握できることが望ましい。そのような具体的なシナリオの作成には各テーマに実際の担当者の持つ情報が不可欠であるところから、シナリオ作成は各テーマで実際に作業に関わっているメンバーによって準備されることが望ましい。したがって、シナリオ作成の手順としてはテーマ4から他のテーマに対して、ある程度のガイドラインとともに作成を依頼する形式とした。

さて、具体的なシナリオの形式であるが、5)の観点から、各グループになるべく新たな負担を求めないこと、また4)のUNFCCCとの連関性から、具体的なCDMを念頭に、CDMのプロジェクトデザインドキュメント(CDM-PDD)の形で表現するのが相応しいと考えられる。CDM-PDD形式にまとめておけば将来的に他のいろいろな場面で利用が可能となると期待される。特に具体的にUNFCCCの枠組みの中で利用される場合のひな形として利用されることが予測されるので、テーマ4の評価のためだけに書類作りをする、手間は不要である。

これらCDM-PDDの形式を利用した検討結果をとりまとめ「SSCP横断的評価用資料書式」を作成した。これは必要項目の一覧と若干の説明を付記したフォーマットで、これを各テーマのチームリーダーに送付し具体的な内容の記入を依頼した。

各チームによって作成され返送されてきた「SSCP横並び評価用資料」の内容について本テーマ4のチーム内で検討した。その結果に基づいて、再度、内容に対する質問、より進んだ分析のリクエスト、誤記と可能性のある部分の確認などを「評価用資料に対するコメント」としてまとめ、各チームに送付した。各チームにはこの内容に応じて資料の修正、回答書の作成を行ってもらった。

さらに、チームリーダーにそれぞれの削減技術に関してのロードマップ作成を依頼した。回答のとりまとめを行い、再度チームリーダーに内容の確認を依頼し、最終的なロードマップとした。また、その際の依頼内容は以下の様なものである。

① ロードマップについて

2006年～2030年の期間を対象とした。

目的は、それぞれのGHG削減技術がどのように確立され、発展してゆくか、を具体的に考えてもらうことで、本プロジェクトにおける研究がどのように最終的な炭素固定に役立つか、について具体的なイメージをもって示せるよう、この結果をまとめて横断的評価表に加えることである、とした。

② 削減技術の概略

対象とするGHG削減技術の名称と概要の記述。

③ 技術確立と実施へのシナリオ

CDM/JIなどの取り組みが順調に進み、社会的な状況の激変が無く、また、本プロジェクトにおける研究と、それに続く研究開発が順当に進行し、技術上の大きな問題が発生しなかった、という状況を想定する、として、まずシナリオの作成を依頼した。

実用化に至るまでの、シナリオの進行の目安となるような特徴的な事柄や、大きく状況が変わる時点など、幾つかのポイントを選択して、その内容について、(a) 実現が期待できる時期、(b) その時点で実際に固定される炭素量、(c) その時点で解決されているべき

技術的な課題とその達成の難易度、について示す。

以上の結果を受けて、チーム4と各チームのチームリーダー、チームメンバーとで個々の削減・固定プロジェクトの実施に際しての必要な作業、資材について詳細に検討した。対象とした検討を行った固定・削減技術は、

- 1a: オーストラリア乾燥地でのハードパン爆破による植林・塩害防止植林によるCO₂固定 (2件)
- 1b: 早生樹林育成と木材生産によるCO₂固定
- 2a: 泥炭開発地の再湿地化と植林によるCO₂排出量削減
- 2b: 泥炭開発地の水田化によるCO₂排出量削減
- 3a: インドネシア水田の水管理によるCH₄排出量削減・畜産業における最適飼料選択によるCH₄排出量削減 (2件)

である。これらの項目については実施に際してのコストや発生するGHGの評価を行い、炭素固定の効率、コストの見積もりを行った。

4. 結果・考察

(1) 各グループのロードマップについて

1) テーマ1a「集水・土壌改良技術導入による荒漠地植林」

① 削減手法の概要

土壌改良や集水技術によって乾燥地に植林を行うことで炭素固定を行う。

SSCP1aが乾燥地を対象として実施している研究では集水技術としてバンクを、土壌改良技術として不透水層（ハードパン）破碎を中心として検討してきたが、ここではより一般化に集水・土壌改良技術の導入による荒漠地植林についても記述した。

② 固定ポテンシャルの推定

推定の概要は以下のようなものである。

- ・ 年間降雨量200mm～300mmの地域への植林を行うことによってCO₂を固定する
- ・ ベースラインケース
 - － 「裸地」 → 「裸地」
- ・ プロジェクトケース
 - － 「裸地」 → 「植林地」 (全域の22.7%の裸地の半分を利用)
- ・ 実施対象域
 - － 西豪州レオノラ付近 25km×25km

試算された625km²当たりのまとめは、

	プロジェクトケース	ベースラインケース	リーケージ	純吸収量
土地利用形態の変化にともなう吸収 kgCO ₂ (tCha ⁻¹)	1.51X10 ⁹ (6.59)	0	22.6X10 ⁶ (0.099)	1.49X10 ⁹ (6.50)
継続する吸収 kgCO ₂ km ⁻² y ⁻¹ (tCha ⁻¹ y ⁻¹)	0	0	0	0

()内の数値は1ha当たりの値に換算したものの。

固定ポテンシャルに対する推計は西オーストラリアを対象としたもので、対象面積を1,120,000km²としている。（算定根拠：西豪州、年間降雨量200-300mmの地域の面積）

固定量は以下ようになる。

	純吸収量
土地利用形態の変化にともなう吸収 kgCO ₂ (MtC)	2.66X10 ¹² (700)
継続する吸収 kgCO ₂ y ⁻¹ (MtCy ⁻¹)	0 (0)

さらに、全球での固定量について、

降水量が200mm/y～300mm/y

月間平均温度が0℃を下回らない

土壌分類が西オーストラリア乾燥地と類似する

という条件で対象面積を算出すると 4,700,000km² となる。全球での固定量は 1,800MtCと求められた。

③ ロードマップの概要

炭素固定を目的とした植林は、初期には樹木の育成に適した条件の土地を対象として進められると予想される。乾燥地を対象とした植林が本格的に実施されるのは、条件の良い土地への植林が、他の土地利用との競合によって次第にコスト高になった後の事で、このコストの上昇分が乾燥地への土壌改良や集水技術への投資の原資となるのである。より安価で効果的な土壌改良法や集水技術が開発されれば、乾燥地への植林は前倒しされると期待される。今回のシナリオ作成では以下に述べる様に、2021-25年頃に、植林適地でのコスト上昇と乾燥地の植林への適用のコストとが釣り合い始め、2026-30年頃には本格的な乾燥地植林が展開されると予測している。

2011年までは現在のJI、CDMの枠組み内でのみ植林による炭素固定が進められる。同時に植林・再植林による炭素固定量の見積もり評価手法の標準化とさまざまな候補地への適用の検討が進み、この枠内で対象となりうる地域での植林の限界が関係者に強く認識されるのではないだろうか。比較的早い時期、例えば2015年頃までに現在のJI、CDMの枠組み内での有望な植林対象地は底をつき始めるだろう。

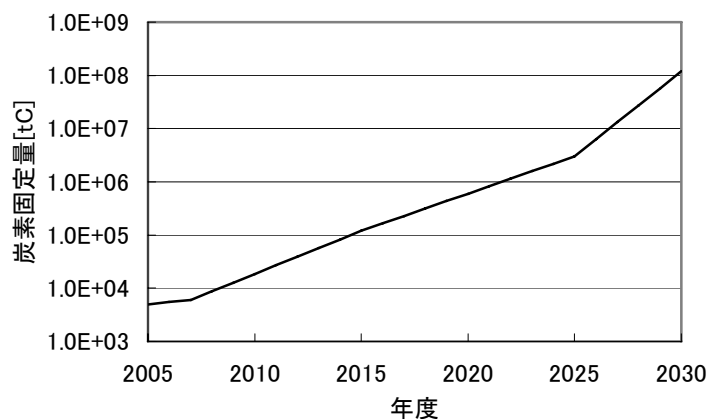


図1 炭素固定量の変化。2025年以降、急速に普及すると予想している。（縦軸は対数である事に留意）

これと平行して乾燥地植林に対するより実証的な取り組み（乾燥地植林の実証、インフラ整備など）が進められると予想される。技術的なブレークスルーは、土壌改良や集水の技術に係わるハードの部分と、適切な場所とタイミングでそれらのハードを運用する運営・管理というソフト部分とに分けられる。特に、樹木を含む生態系の挙動予測と、それに基づく適切なタイミングでの適切な技術の選択により、限られたハード部分への投資を有効に活用する、管理運営のノウハウといったソフト面が強い技術の存在は重要である。その意味で、本SSCPが掲げる、プラットフォーム構築が有効に働くと期待される。

さて、2016-20年頃までには、現在のJI、CDMの枠組みの限界が明白となり、その限界を超えるシナリオが議論されているはずである。途上国での自発的森林破壊の防止と植林とが、経済的に自立できるような仕組みが、国際的に合意されていることが望ましい。その場合、途上国がその

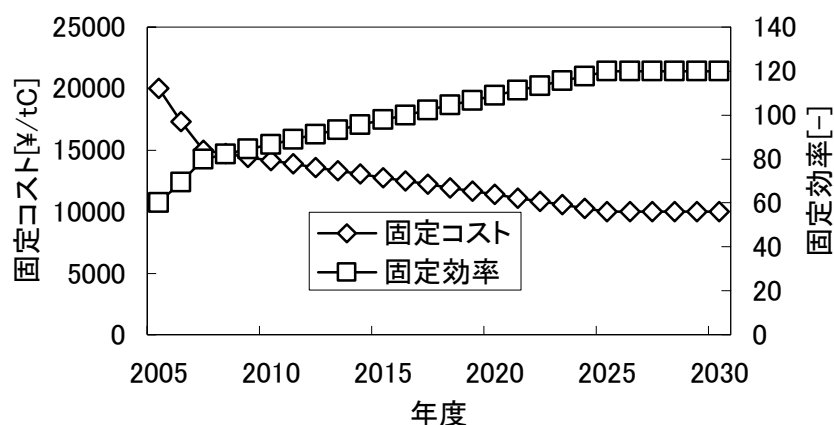


図2 固定コスト、固定効率の変化。固定コストは2025年まで技術の進歩に伴い漸減する。固定コストの減少のかなりの部分は最適な管理によって不要なハードを省くことになっている。そのため、コストの減少に対応して固定効率は上昇すると予想される。

経済発展のために低コストで技術的困難さを伴わない植林を始めるはずである。乾燥地植林は、その先の技術だが、この様な合意が成立しない場合、乾燥地植林は前倒しで進む可能性もある。

以降、途上国での低コスト植林が進むと思われる。しかし、これは同時に有利な土地の枯渇にもつながり、固定のコストは少しずつ上昇してゆくだろう。一方、この間の乾燥地植林の実施規模は限定的なものだが、技術開発の進展によって植林のコストは漸減すると期待できる。2021-25年頃には適切な技術の精度の高い管理・運営によって、西豪州での乾燥地植林でも、条件の良い場所を中心に、コスト的に成立しうるプロジェクトが開始される様になると期待される。それ以降、途上国での植林のコスト上昇に対応して乾燥地植林の対象地が拡大する傾向が続くものと予想する。

④ 考察

ここで検討した手法には土壌改良、集水など実際のハードな技術と、それらを最適に運用する管理のソフト部分とが必要になる。

ハードな技術に関しては、西豪州のハードパンに限ればその効果は実証されており、後は最適化を通じたコスト削減が計画可能な展開であろう。（もちろん、将来にわたっては革新的な技術の登場の可能性も否定できないが。）

一方、「それぞれの状況に対応した適正土壌改良技術選択」を可能にするような管理・運営のためのソフト的な技術は、そのかなりの部分を対象となる生態系の理解と予測能力に依存すると考えられる。この手法は導入時期が比較的遅いと予想されることから、実用化を目指した導入研究実施期間が長くなることが予想される。本研究も含め、この間のデータ・ノウハウの蓄積が、コストや固定効率、面積あたりの固定量を大きく向上させ得ると期待される。

2) 「部分植林による、炭素固定および農業生産量増大の複合化」

① 削減手法の概要

年間降水量300～600mm程度の西豪州小麦地帯では、穀倉地帯の湛水化、塩類化などの問題により小麦生産能の低下が問題となっている。この地域では、本来森林生態系を保持するに必要最低限に近い降雨量が確保されていると考えられる。しかしながら、18世紀末からの開発により、森林は、乾燥にも強い小麦の生産農地へと転換されていった。そのため、森林に比べ根域が表土付近にしか存在せず、かつ蒸散が行われる時期が限定されることとなり、余った降水が地下水を涵養し、湛水と、それに伴う微量塩類の表層への濃縮が観測されるようになったためである。

このような地域への部分植林を行うことによって蒸散量を増やして湛水を防ぐ。同時に炭素固定を行うことがこの手法の目標である。

② 固定ポテンシャル

西豪州の中程度塩害面積は全作付け面積の8%、5,000 km²である。この2割、1,000km²に植林すると仮定する。20年間で40tC/ha程度の固定が行われるとして、西豪州で4Mt-Cのポテンシャルが期待できる。

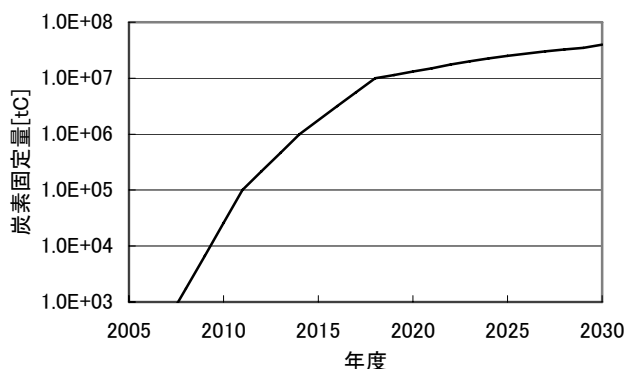


図3 炭素固定量の変化。2015年以降、急速に普及するが、2030年頃には限界が見えてくると予想している。

また、全球での塩害農地は55万 km²と見積もられているが、これには中程度以上の塩害農地の面積も含まれていることから、普及率をさらに一桁小さく見積もり10,000 km²と見積もった。西豪州同様、20年間で40tC/ha程度の固定が行われるとして、40Mt-Cのポテンシャルが期待できる。

③ ロードマップ

ロードマップの前提となる今後の植林による炭素固定の展開についての予想は、先に述べた「集水・土壌改良技術導入による荒漠地植林」のものと共通している。京都議定書の第一約束期間の間は、現在のJI、CDMの枠組み内で有利と判断されたプロジェクトのみが進展する。これが植林による炭素固定の最初のタイプであるが、比較的早期、例えば2015年ごろには限界に達すると予想する。

つづく、2016-20年頃から、現在のJI、CDMの枠組みの限界を超えて、途上国での自発的森林破

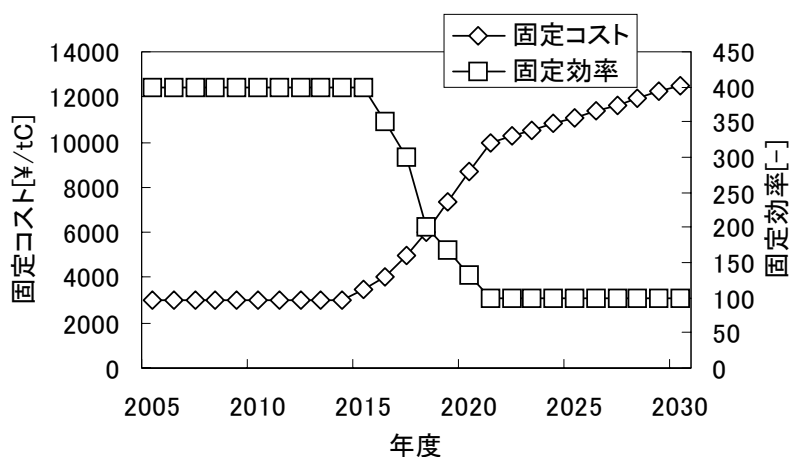


図4 固定コスト、固定効率の変化。普及が進むにつれて条件の良い土地が不足し始める。適用困難な土地への部分植林を進めるためにさらなる技術、たとえば集水工事などが導入されるが、これがコストの向上と固定効率の低下につながる事となる。

壊の防止と植林とが、経済的に自立できるような仕組みが、国際的に合意されていることが望ましい。これによって第二のタイプの植林による炭素固定が実現することになるが、本技術が想定する部分植林もこのような炭素固定のための植林の一種である。このような合意が成立しない場合、あるいは豪州がその枠組みから外れる場合には、この手法の進展は遅れることになるだろう。

2030年頃にはこの植林法は最盛期を迎え、やがて限界が見え始めると考えられる。次第に乾燥地への植林へバトンタッチされていくであろう。

本格的なプロジェクトが展開される2015年以降は規模の拡大と同時に、有利な場所が占有され、次第に部分植林の行い難いところを対象とする必要が出てくる。植林を巧く行うためにいろいろな技術、例えば乾燥地で用いられる様な集水技術の応用など、が提案されるだろうが、新たな技術は新たな道具や施設が必要とされることから、それが慢性的なコストアップ、固定効率の減少の原因となることが予想される。

④ 考察

本手法では部分植林は、降雨と蒸散のアンバランスによる地下水位の上昇とそれによる湛水、塩類集積への対抗手段と見なされている。まだ地下水位上昇による問題が深刻化していない畑での予防的な部分植林では、植栽そのものに対する技術的なハードルは低い、部分植林によって本当に農作物の生産性が維持・回復させられているのか、をはっきりと示すことが必要となる。一方、湛水や塩類集積の問題が深刻な畑への治療的な部分植林の実施に際しては、このような劣悪な条件に対応した植栽方法の開発が必要とされる。

どちらの場合も、植栽が必要な面積割合とふさわしい場所の決定を可能にするような管理・運営のためのソフト的な技術が必要となる。

3) テーマ1 b 「森林造成技術の高度化による熱帯林のCO₂シンク強化技術」

① 削減手法の概要

吸収の主な原因は農耕地、牧草地から商業植林地への土地利用の転換である。SSCP1b研究プロジェクトにより

- ・ DNA鑑定技術を応用した樹種特定によるブランド化で商業植林の経済性の向上する
- ・ 精鋭樹選択により成長速度が大きくなり、収穫時の樹木のサイズが大きくなる

といった技術改良によって植林が農耕より有利になり、このような土地利用の変化が増えると期待される。

さらに、商業植林の生産物である木材製品による炭素蓄積の効果が第二約束期間以降、削減項目として認められれば、その寄与は非常に大きなものとなる。この場合、樹木の生長パターンに応じて材質、幹形状を最適化し、歩留まりを向上させる技術が有用である。

② 固定ポテンシャルの推定

削減量計算の概要は以下のようなものである。

- ・ 木材生産性の向上により事業性の確保。植林を進めることでCO₂吸収を増やす。
- ・ ベースラインケース
 - 「休耕地」→「休耕地」

- ・ プロジェクトケース
 - － 「休耕地」→「商業植林地」
- ・ プロジェクトは20年を想定
- ・

プロジェクト実施場所での1ha当たりのまとめは

	プロジェクト ケース	ベースライン ケース	リーケージ	純吸収量
土地利用形態の変化にともなう吸収 MgCO ₂ ha ⁻¹ (tCh ⁻¹)	66.3- 23.1 = 43.2 (11.8)	23.1-23.1 = 0	1.6 (0.4)	41.6 (11.3)
継続する吸収 MgCO ₂ ha ⁻¹ y ⁻¹ (tCh ⁻¹ y ⁻¹)	0	0	0.1 (0.03)	-0.1 (-0.03)
20年プロジェクトの総計 MgCO ₂ ha ⁻¹ (tCh ⁻¹)	43.2 (11.8)	0	1.6 (0.4)	41.6 (11.3)

固定ポテンシャルに対する推計は実施面積4,420,000haとして計算されている。（算定根拠：湿润熱帯域で年間降雨量2000mm以上の国々（東南アジア、中南米、西アフリカ）を対象とし、耕地面積及び耕作可能面積の5%に適用可能と見積もる。）

固定量は以下ようになる。

	純吸収量
土地利用形態の変化にともなう吸収 MgCO ₂ (MtC)	1.84X10 ⁸ (50.2)
うち精鋭樹選択の効果 MgCO ₂ (MtC)	0.98X10 ⁸ (26.8)
木材製品によるストックの推計 MgCO ₂ (MtC)	10.4X10 ⁸ (283)

上記の表の最後の項目は、商業植林の展開にともなう木材製品としての炭素ストックを加算した計算である。この効果が将来的にGHG削減としてCDM/JIで認められるかは現状では不明であるので、固定ポテンシャルの評価には含めず、50MtCとしている。ロードマップでは木材製品としての炭素ストックを考慮したが、その場合の削減ポテンシャルは333MtCになる。

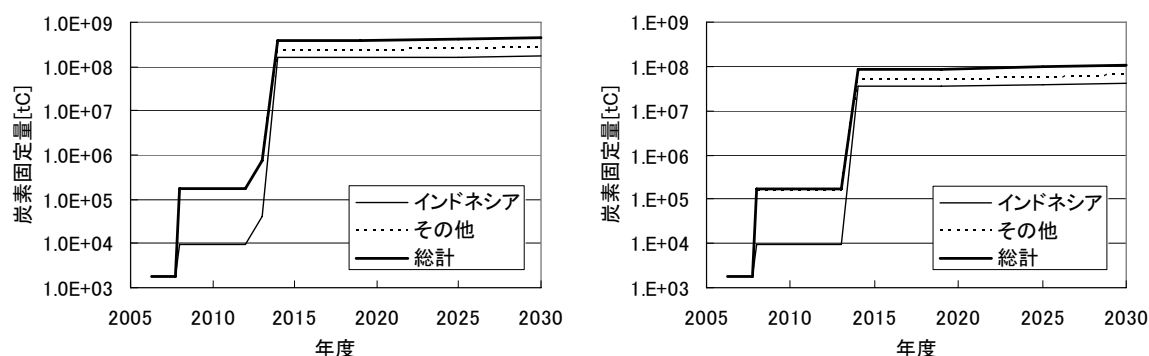


図5 炭素固定量の変化。2013年に「木材製品による炭素蓄積の効果」が削減項目として認められる場合（右）では、そうでない場合（左）に比べて4.5倍程度の固定量となる。樹木の生長時間（6年）や木材製品の寿命（5～10年）のタイムラグがあるため、実際の蓄積量はグラフよりやや遅れることになる。

③ ロードマップの概要

現在行っているインドネシアでのファルカタ森林造成のプロジェクトの発展による固定と、それを世界の他地域に展開することによる固定の二つの流れが考えられる。インドネシアでは現状の100ha程度の実施面積であるが最終的には 1.7×10^6 ha程度に拡大すると期待できる。その他の地域での実施面積は全体で 2.7×10^6 ha程度にはなるであろう。

ファルカタの造林による炭素固定量は（樹幹解析によって昨年度より改良された評価手法により）24.1tC/ha（ベースラインをひくと17.8tC/ha）と見積もられているが、精鋭樹の選択と、それに続く品種改良によって、一世代（6年と想定）ごとに6～7%程度の生長量、固定量の増加が期待され、第三世代までには31.0tC/ha（ベースラインをひくと24.7tC/ha）の炭素固定が期待できる。世代の更新はインドネシアでのプロジェクトがやや先行し、その他の地域が5年程度遅れて追随することとなるだろう。

先に触れたように、木材製品による炭素蓄積の効果が削減項目として認められた場合、その寄与は大きく、一回の伐採、出荷に対して育種前で367.5tC/ha、第三世代では492.1tC/haと予想される。（6年サイクルでの伐採・出荷を仮定しているので、単年度当たりではそれぞれ、61.3tC/ha、82.0tC/haとなる。）この場合、2013年を境に固定量もそれに応じて大きなものとなり、2030年ごろまでに固定量は全体で448MtCに達すると期待している。（評価値330MtCより増加しているのは樹幹解析によって固定炭素量の評価値が向上したこと、また品種改良によって生長量が増えた効果による。）

固定コストは、現時点で育成前の種に対して100.3\$/tCと見積もられている。品種改良の世代が進むに従って同じ作業でより多くの固定が可能となるので（一世代当たり6～7%増加する）、その分、コストは低減する。また、2013年に木材製品による炭素蓄積の効果が認められた場合、コストは一気に低下する。木材製品の製造は商業植林としての性格上すでに採算がとれていると期待できるので、追加コスト無しに炭素固定量が増えたことになるためである。たとえば、選抜された精鋭樹では、93.5\$/tCから21.3\$/tCへと低下すると期待される。

炭素の固定効率についても同様の効果が期待される。現時点で育成前の種では、造林に際して

放出された炭素(ここでは20年間の総計)の30倍の炭素固定が可能であるが、選抜された精鋭樹で32倍、これに木材製品への蓄積を上乗せすると140倍の固定効率が期待される。

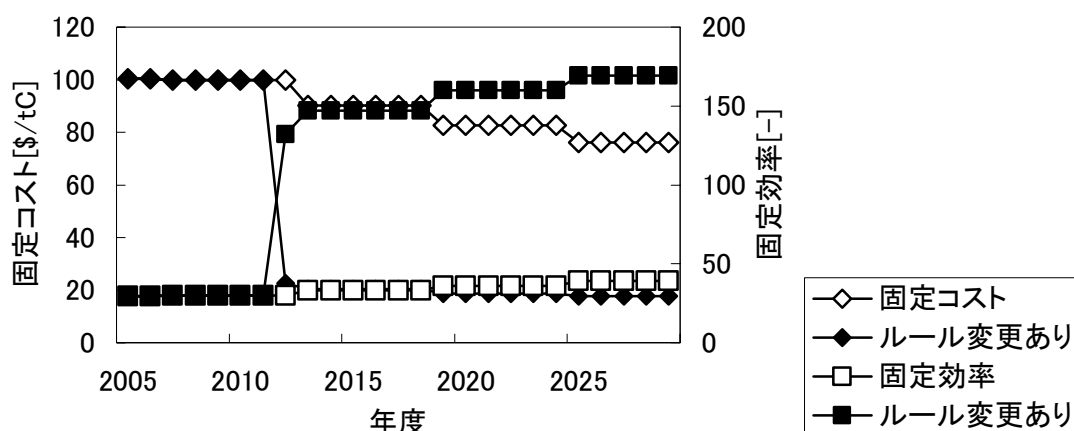


図6 炭素固定のコストと固定効率の経年変化。各年度で開始されたプロジェクトが達成すると期待されるコスト・効率である。

④ 考察

進捗状況と課題

CO₂の純吸収量の算定のために、排出量、リーケージの計算の評価が行われている。プロジェクトを実施した場合、発生するCO₂の110倍のCO₂が固定できる計算になっており、この手法の有効性が示されている。他のテーマと比較して固定ポテンシャルは低く見積もられているが、具体的な実施計画を元に手堅く予測した結果であり、実現の可能性は高い。

技術的な課題としては、継続的な品種改良による成長量の増大、その実証と地域別の予測法の確立が挙げられる。

今回のシナリオでは6年ごとに胸高直径で10%の増加を見込んでいるが、初期のサイクルでは比較的容易に達成されるが、次第に達成は困難になるであろう。改良種の成長については各地域での実証実験が必要である。同時にその結果から地域や立地区別の生長量予測法を確立する事が必要となるが、これは技術的に大きな困難はないと予想される。

また、外部的要因として「木材製品による炭素蓄積の効果」が削減項目として認められるかどうかによって、大きな固定量、固定コスト、固定効率の違いがみられる。もちろん、認められなかったとしても有意義な計画であるが、実際に木材製品による固定効果が有ることは確かなので、これが認められるための働きかけも必要ではないだろうか。(SSCPの枠を外れているかも知れないが。)

4) テーマ2 a 「熱帯泥炭湿地のGHGソース制御・シンク強化技術開発」

① 削減手法の概要

主に、開発・放棄され乾燥している熱帯泥炭湿地への湛水と再植林を行う。再植林による植物の生長に伴う炭素固定に加え、酸化的な条件下での泥炭の分解を抑制することによる排出抑制の

効果を合わせることで大きな削減効果を達成しようとするものである。また、火災による泥炭の消失の効果も含めるとより大きな削減効果があることとなる。

② 固定ポテンシャルの推定

試験地における実施結果のまとめは以下のようである。

- ・ 対象地：
 - 熱帯泥炭湿地（タイ）
 - 32,000ha
- ・ 個別の手法
 - 荒廃地への植林（湛水メラルーカ林）
 - 保全管理の導入（完全湛水化）

以下に推定されるGHG削減を示す。

	状態(開始時)	状態(終了時)	GHG削減速度
ケース1	オイルパームプランテーション	湛水メラルーカ林	18 tC ha ⁻¹ y ⁻¹
ケース2	荒廃地	湛水メラルーカ林	30 tC ha ⁻¹ y ⁻¹
ケース3	荒廃地(野火頻発)	湛水メラルーカ林	51 tC ha ⁻¹ y ⁻¹

ここで、GHG削減速度は20年間での平均値である。また、植林したメラルーカの成長に伴い3～8 tC ha⁻¹ y⁻¹程度のGHG固定が期待できる。なお、乾燥した泥炭地を放置した場合、泥炭の分解も20年間は持続すると考えられているが、それ以降については不明である。

対象となりうるのはすでに開発された泥炭地のうち、乾地化している部分である。放棄地やオイルパームの生産に利用されている土地も含まれており、正確な状況は分からないという事であるが、デジタル土壌図と衛星画像データより、東南アジアの泥炭湿地面積と開発地（裸地ないし低植被地）の面積を推定したところ、それぞれ2260万ha、514万haと推定されたとの事である。

全対象地でのオイルパームプランテーション、荒廃地の比率は明かではないが、低い方の固定速度18 tC ha⁻¹ y⁻¹から20年間での削減のポテンシャルを評価すると1,850MtCとなる。荒廃地の存在、メラルーカの成長による固定の効果を含めれば、少なくともこの約2倍の

3,600MtC

の削減・固定が期待できると考えられる。これは非常に大きな値である。

③ コストの推定

i. 計算の前提

コスト、GHG削減率の計算の一例として泥炭のうち、すでに開発されている土地の再湿地化によるCO₂排出削減の事例を示す。削減・固定技術の概要は以下の様なものである。

排水された熱帯泥炭湿地の泥炭を、最適な水管理により開発により保全してCO₂放出を抑制する。その環境条件に適合した樹種を用いた造林により、CO₂吸収を行う。

具体的には、タイ国南部の泥炭湿地開発地を対象とする。試験プロジェクトを実施した対象面積は300 haで、開発のために堤防と排水施設が設置されている。プロジェクトの境界はこの堤防である。現在の土地利用は放棄地であるが、オイルパームプランテーションに転換される可能性がある。国有地であるが、農民に貸与されており、土地借料が発生する。

既存の堤防と排水施設を利用して、水管理を行い、泥炭が保全される最低水位を維持する。ここに、*Melaleuca cajuputi*の森林を造成する。植栽間隔は2 m×2 mで、2,500本/haの植栽密度である。プロジェクトの期間は20年とする。

オイルパームプランテーションをベースラインとした場合、泥炭の保全による二酸化炭素放出抑制が18 tC ha⁻¹ y⁻¹、造林による二酸化炭素吸収増加が5 tC ha⁻¹ y⁻¹の計23 tC ha⁻¹ y⁻¹が得られる。

このような仮想的な削減・固定プロジェクトに関する記述に基づいて、以下のように計算した。

ii. 回復手順

対象地（開発された後、破棄された裸地を想定）において行われる作業は以下のようなものである。まず、*Melaleuca*苗の植林を行う。一部は枯死することが予想されるので、その部分への補植の作業も発生する。また、水路の水門を閉めて湿地にもどすことで泥炭の分解（自然酸化・火事）を防ぎ、CO₂の発生を抑える。ここで水路・水門は既に整理されていると想定している。

iii. 基本データ

タイにおける実施を想定し、主に現地でのプロジェクト実施に際し得たデータに基づいて、以下の数値を利用することとした。

- a. 人件費＝700円/人・日
- b. 苗代＝15円/本
- c. 苗植栽速度＝50本/人・日
- d. 苗植栽本数＝1,500本/ha
- e. 補植本数＝500本/ha
- f. 土地代（借地）＝20,000円/ha・年

iv. コスト計算の概要

項目毎に以下のように計算した。

- a. 苗代：2,000本/ha×15円/本＝30,000円/ha
- b. 人件費：700円/人・日×2,000本/ha÷50本/人・日＝28,000円/ha
- c. 借地代：20,000円/ha・年×20年＝400,000円/ha

以上、合計：458,000円/ha。したがって、

$$\text{CO}_2\text{コスト} = \underline{458,000 \text{ 円/ha}}$$

となる。上記はプロジェクト期間20年での値である事を考慮してカーボン換算の削減・固定コストを求めると¥996/t-Cとなる。

v. システム導入のためのCO₂排出量に関してのチェック

CO₂発生の主な要因となる項目として以下のものについて検討した。

ア. プラスティックポット（*Melaleuca*の育苗時に使用）

$$20 \text{ g/個} (\text{CO}_2\text{排出量} = 6 \text{ g-C/個}) \rightarrow$$

$$6 \text{ g-C/個} \times 2,000 \text{ 個/ha} = 12 \text{ kg-C/ha}$$

イ. 人運搬

ガソリンから0.1 kg-C/人・日→

$$0.1 \text{ kg/人・日} \times 40 \text{ 人・日/ha} = 4 \text{ kg/ha}$$

以上、合計：16kg-C/haとなる。固定量のわずか0.07%であり、十分に無視できる量であると言える。

vi. 結果について

今回計算された削減コストは炭素1トン当たり¥1,000程度であり、競争力のある価格であると言える。ポテンシャルも大きく有望な削減手段の一つである。見かけ上は水管理と植林で炭素固定の様にも見えるが、実際には泥炭の分解抑制という削減による寄与が大きい。ベースラインの取り方によって値が変化する点に注意が必要である。

今回の計算はチーム2aの実験プロジェクトのデータによるものであるが、他にチーム2bからも水管理と稲作を組み合わせた削減技術が提案されている。

ここに示した計算、特にコスト計算では各種品目の価格の変動、国による物価のレベルの違いによって計算結果の数値そのものは今後変動する可能性が大きい。ただ、計算に際して列挙する作業項目は一般にそれほど変化することは無いと期待できる。また、異なる場所・国であっても、コストそのものは大きく変化する一方で、作業項目は大きく変化しないと期待できるので、データさえそろえば別の場所でのプロジェクトに対するコスト計算・削減率計算に流用可能である。

④ ロードマップの概要

京都議定書の第一約束期間中は吸収源CDMにとまなう泥炭分解の防止・抑制は削減量にカウントされない。このため、再植林による固定のみで吸収源CDMを考える必要があるが、これでは大きな削減量を期待できない。従来型の条件のよい地域での植林プロジェクトと比較して、造林の失敗リスクも高いことから、第一約束期間の間は大規模な展開は控えられ、調査研究、技術開発研究が中心に進められると考えられる。この間の実施面積は小さいが、研究の進展にともなって単位面積当たりの削減量は増えることが期待されている。

おそらく第二約束期間以降の新ルールでは、吸収源CDMにおいて、プロジェクトによるGHGの放出抑制量がカウント対象になると予想される。2013年頃には、最初の熱帯泥炭保全と造林による吸収源CDMプロジェクトが東南アジアで行われるだろう。

2016年頃以降、承認された方法論に基づいて、類似の熱帯泥炭保全・造林プロジェクトが東南アジア各地で開始されるだろう。しかし、水環境、土壌環境条件や水利施設の整備状態が場所により異なり、導入可能樹種や造林技術も異なるため、単位面積当たりのGHG排出削減量が低いプロジェクトやコストが高いプロジェクトも生じるだろう。

2013年以降の推移について、明確な予測をすることは難しいが、たとえば、2MtC/yの固定を目標とした場合、毎年5,000ha程度の規模のプロジェクト（期間20年間）を実施しつづけて、20年間かけて恒常的に100,000haのプロジェクトを維持すれば達成できる。毎年5000haのプロジェクトを開始し続ければプロジェクトに有利な土地はやがて使い尽くされてしまうだろうが、研究成果の公表・普及と技術の移転等により、削減量とコストの両面での改善が期待されるので、無理なく達成可能なレベルであると考えられる。

炭素固定のコストと固定効率も予測が難しい。上記のように、CDMプロジェクトが継続的に実施されている状況を想定し、ある種目標値として図のような値を提示する。

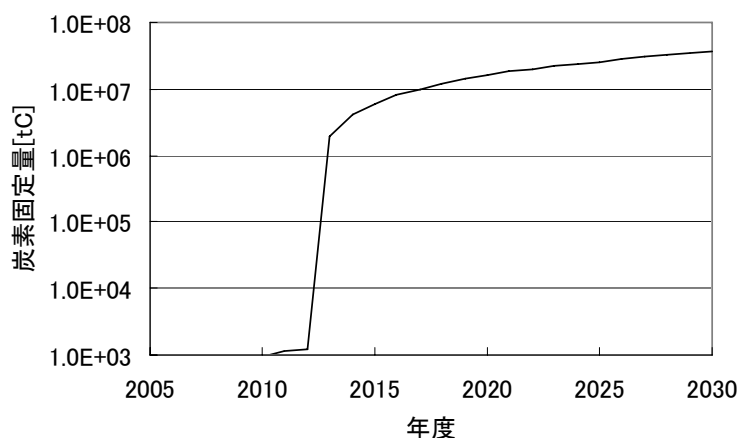


図7 炭素固定量変化。2013年に吸収源CDMプロジェクトによる放出抑制がカウントされる様、ルール改正が行われる、と仮定して、それ以降本格化する。ここでは日本が関与するGHG削減事業によって、年間2MtCの固定を安定的に行う事を想定している。

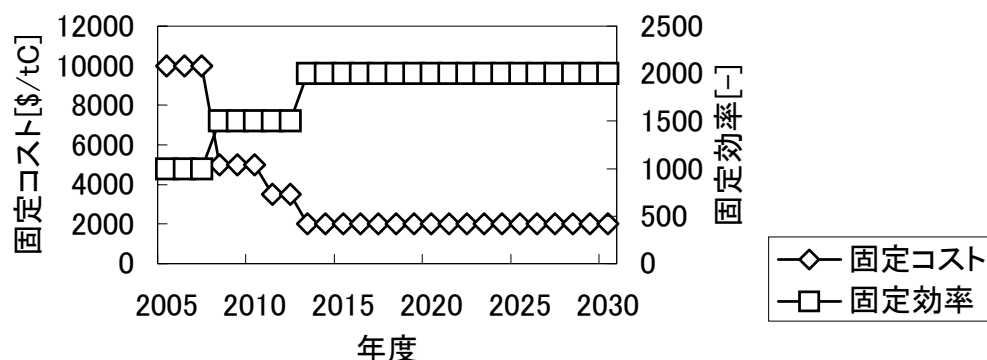


図8 炭素固定のコストと固定効率の経年変化。各年度で開始されたプロジェクトが達成すると期待されるコスト・効率である。

⑤ 考察

ここでは、2MtC/yの固定を仮定したが、東南アジアだけでも、この固定速度で200年間は継続して固定を進めるだけのポテンシャルがある。対象地に応じた造林技術などの開発が予想以上に進めば、より大きな固定速度の達成も可能であろう。

本手法を広く展開するための前提条件として、泥炭地帯での炭素収支の精度向上により泥炭の炭素シンクとしての重要性和再植林の効果の大きさが広く認知されることが大切である。より具体的な技術的課題として、湛水環境での造林技術・水管理技術の改善により、再植林・造林のリスクを低減が求められている。これらの技術を統合した熱帯泥炭湿地の持続的な管理システムが確立されれば、この手法の実現に大きく役立つと期待される。

なお、第二約束期間での吸収源CDMにおいて、プロジェクトによるGHGの放出抑制量がカウント対象となるかどうかは外部的な要因である。単純な植林の対象地としてはリスクの高い場所なので、泥炭分解の抑制がカウントされるかどうかで状況は大きく変化する。望ましい方向でルールが決まる様、データの信頼性の向上や、他の知見による補助的な証明を集めるなどの活動が期待されるだろう。

5) テーマ2 b 「土地資源管理技術と地域社会エンパワーメント活用方法（泥炭湿地林の持続的経営技術）」

① 削減手法の概要

既に泥炭湿地林が伐採され、土地が荒廃した場所における土地資源管理オプションの設定と森林修復技術の開発、地域社会エンパワーメントを行う。これによって農業、林業、水産業等の多目的な土地利用の適正配置と持続的な管理を実現し、土地利用変化でCO₂固定の増加を目指すものである。原生林の伐採が止まり、荒廃地への植林が進められる事により炭素の固定が行われる。

② 固定ポテンシャルの推定

推定はエンパワーメントの有無による土地利用の変化を仮定しておこなった。

- ・ 対象地：
 - マングローブ林
 - 淡水湿地林
 - 泥炭湿地林
- ・ 個別の手法
 - 泥炭湿地林破壊の防止
 - 既開発地への再植林

地域社会エンパワーメントの内容は、

- 天然林の保全
- 荒廃地の拡大防止・利用転換

などである。エンパワーメントの有無（プロジェクトケースとベースラインケース）による土地利用形態の違いのイメージの一例を下表に示す。

	現状(%)	プロジェクト ケース(%)	ベースライン ケース(%)
天然林	25	25	10
農耕地	20	30	25
集落・道路	7.7	7.7	7.7
荒廃地	35	17.3	42.3
植林地	12.3	20	15

上記のイメージに基づいた固定量の試算は以下のようになる。

	プロジェクト ケース	ベースライン ケース	リーケー ジ	純吸収量
土地利用形態の変 化にともなう吸収 kgCO ₂ km ⁻² (tCha ⁻¹)	1.41×10^7 (38.4)	-1.42×10^7 (-38.6)	0	2.83×10^7 (77.2)
細目				
天然林の保全 kgCO ₂ km ⁻² (tCha ⁻¹)	0	-1.93×10^7 (-52.5)	0	1.93×10^7 (52.5)
農耕地の拡大 kgCO ₂ km ⁻² (tCha ⁻¹)	1.10×10^5 (0.3)	5.50×10^4 (0.2)	0	5.50×10^4 (0.2)
荒廃地の減少 kgCO ₂ km ⁻² (tCha ⁻¹)	-1.30×10^5 (-0.4)	5.35×10^4 (0.1)	0	-1.83×10^5 (-0.3)
植林地の増加 kgCO ₂ km ⁻² (tCha ⁻¹)	1.41×10^7 (38.4)	4.95×10^6 (13.5)	0	9.17×10^6 (25.0)

固定ポテンシャルに対する推計は対象地面積の推定などが困難であるが、世界最大の低湿地面積を有するボルネオ島全体 (740,000 km²) を対象として場合、固定ポテンシャルは5,700MtCとなる。また、対象地を泥炭湿地に限定した場合、その面積を226,000 km²として固定ポテンシャルは1,740MtC と求められる。ここは両者の中間の値として

3,600MtC

とした。

③ ロードマップの概要

低湿地の土地資源管理オプションは2005年に一応確立したが、それを大規模に展開するには2010年頃までかかる。地域社会エンパワーメントに関してはファシリテータの育成に2010年までかかる。メディエータ（研究指導者）は既に存在し、村落における地域社会エンパワーメントに従事し、2007年までにシステムを確立する。2010年が目標となる。

具体的には2010～2015年の間は年間約50km²(5000ha)程度の地域をエンパワーメントの対象に組み入れる。それ以降、順次拡大の速度を増す。例えば、2015～2020年では年間約100km²(10000ha)程度、2021～2025年で150km²(15000ha)、2026～2030年で200km²(20000ha)といった展開を想定している。

エンパワーメントの対象となった土地では、原生林の保護、廃棄された荒廃地への再植林、農業生産性の向上により余った農地への再植林などが行われる。これによる炭素固定量の増加は対象地の特性につよく依存するが、例えば昨年度の評価では対象地の全面積（原生林・再植林地・農地・荒廃地・集落などを含む）の平均で77.2tC/haと予想している。ただし、この削減量は達成

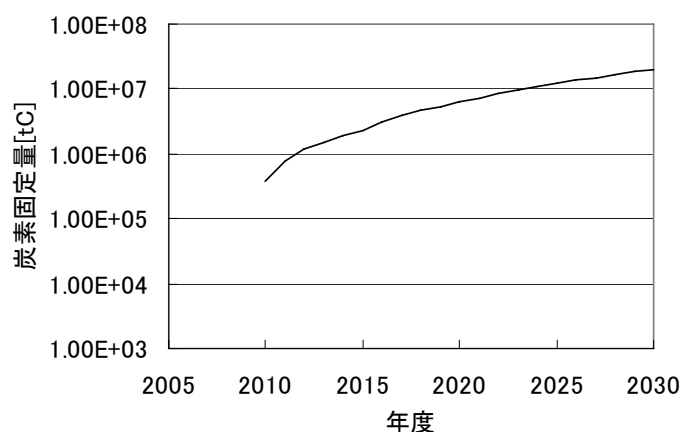


図9 エンパワーメントによる土地利用転換によって固定される炭素量。ここでの固定可能量はエンパワーメントを開始した年度に計上されているので、実際に固定量が増加するには時間的な遅れがあると予想される。

される最大値であり、エンパワーメントの活動が順調に進んだとしても十数年程度に渡って実現されていくものと予想される。

なお、解決されるべき技術的課題とその達成の難易度として、以下のポイントがある。

- i. 土地資源管理オプションについては洗い流し法による硫酸酸性の中和であるが、大規模な面積になれば施設の問題と湿地帯全体の水の流れの制御が必要となり、大規模な洗い流し法の開発はかなり困難である。小規模なシステムの組み合わせによる面積拡大が必要でこの方法の達成の難易度は中程度であろう。
- ii. 地域社会エンパワーメントについては人材育成、市場開拓と地域住民のリスポンスがシステムとして確立しなければならない。これは現在、FAO等でも議論されている地域住民参加型の問題でこの4から5年でまとめられる予想が付く。しかし、かなりサイトスペシフィック（地域固有な問題）な問題であり、ケースバイケースになる可能性がある。

④ 考察

技術的な課題として、酸性化した土壌の回復手段としての洗い流し法の確立、が挙げられている。地域社会エンパワーメントについては複数の主体が協調するシステムの存在が必要であるが、その成立は地域固有、かつケースバイケースであろう。ただ、SSCPの枠内で、技術的な側面に限って考えれば、各種土地利用転換に関する適切な状況判断や、効果的な技術導入を可能とする様な技術基盤の拡充が大切であろう。

6) テーマ3 a 「水田の水管理によるメタン排出削減技術」

① 削減手法の概要

水稻栽培期間中の落水（中干し）を強化することによりメタン排出削減効果が得られることが示されている。この技術は、水稻の生産性を低下させず、かつ、多大なコストを必要としない農

家が実用可能な技術である。

国内での現地試験から、常時湛水水田からのメタン発生は、水稻の収量を低下させない範囲での中干し等の水管理を行うことにより21～63%削減できることが示された。また、すでに中干し等の間断灌漑水管理（慣行水管理）を行っている水田においても、中干しの開始を7日間早め、さらに酸化的な水管理を行うことにより、水稻の収量を低下させずに通常の中干しの場合よりもさらに22～51%削減できることが示された。この結果は、世界の実測データベース解析より求められた結果とおおむね一致する。さらに、インドネシアの水田での水管理によるメタン放出削減率は23～72%であり、亜酸化窒素・二酸化炭素放出量および収量には影響は見られなかった。

② 削減量の見積もりとロードマップの概要

・わが国における削減量の見積り

国内での現地試験から、常時湛水水田からのメタン発生は、水稻の収量を低下させない範囲での中干し等の水管理を行うことにより21～63%削減できることが示された。また、すでに中干し等の間断灌漑水管理（慣行水管理）を行っている水田においても、中干しの開始を7日間早め、さら

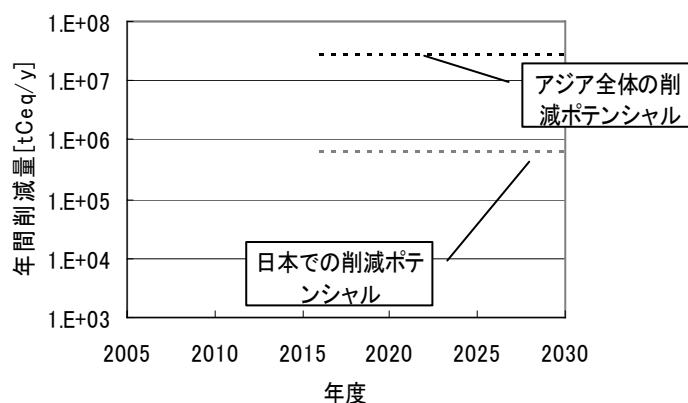


図10 CH₄排出削減量の予測値。ここでは日本、およびアジア全域での削減ポテンシャルを示す。

この手法では年間継続的な期待できるので縦軸は年間削減量である。CH₄を炭酸ガスの相当量に換算し、さらに炭素基準で示した。

に酸化的な水管理を行うことにより、水稻の収量を低下させずに通常の中干しの場合よりもさらに22～51%削減できることが示された。この結果は、世界の実測データベース解析より求められた結果とおおむね一致する。

わが国の水田において慣行より7日早い中干しを行う水管理によるメタン発生削減量を以下のように見積もった。まず水田を慣行水管理水田（全体の98%）と常時湛水田（全体の2%）に区分し、慣行水管理水田では中干しの開始を7日間早めた場合のデータを直接もちい、常時湛水田では中干しを行った場合の削減率に、7日間早い中干しを行った場合の削減率を加味して計算した。

慣行水管理水田での計算は以下のとおり

わが国の水田面積（2000年）：1.77 Mha（農林水産省）

慣行水管理水田の割合：98%（環境庁、2002）

わが国の水田からのCH₄排出係数：16.0 g CH₄ m⁻² y⁻¹（環境庁、2000）

排出削減割合：35%（試験結果より設定）

CH₄のGWP：21（IPCC、2001）

削減ポテンシャル： $1.77 \times 10^6 \times 0.98 \times 16 \times 10^4 \times 0.35 \times 21 \times 10^{-9} = 2,040 \text{ Gg CO}_2 \text{ eq. y}^{-1}$

常時湛水田での計算は以下のようになる

わが国の水田面積（2000年）：1.77 Mha（農林水産省）

常時湛水水田の割合：2%（環境庁、2002）

常時湛水水田からのCH₄排出係数：36.0 g CH₄ m⁻² y⁻¹（環境庁、2002）

排出削減割合：61%

CH₄のGWP：21（IPCC、2001）

削減ポテンシャル： $1.77 \times 10^6 \times 0.02 \times 36 \times 10^4 \times 0.61 \times 21 \times 10^{-9} = 163 \text{ Gg CO}_2 \text{ eq. y}^{-1}$

上記の合計でメタン発生削減量は全体で2.20 Tg CO₂ eq. y⁻¹（0.60MtCeq./y）となる。

・アジア諸国での削減量の見積り

まず、常時湛水水田において上記の試験結果と同等のCH₄発生削減が期待できると仮定すると、その削減ポテンシャルは以下のように計算される。

アジアの常時湛水水田からのCH₄発生量： $8,553 \text{ Gg y}^{-1} = 180 \text{ Tg CO}_2 \text{ eq. y}^{-1}$

削減割合40%の場合の削減ポテンシャル： $180 \times 0.40 = 72 \text{ Tg CO}_2 \text{ eq. y}^{-1}$

また、間断灌漑水管理を行っている水田において、さらに酸化的な水管理を行った場合の削減ポテンシャルは以下のように計算した。

アジアの間断灌漑水管理水田からのCH₄発生量： $7,534 \text{ Gg y}^{-1} = 158 \text{ Tg CO}_2 \text{ eq. y}^{-1}$

削減割合35%の場合の削減ポテンシャル： $158 \times 0.35 = 55 \text{ Tg CO}_2 \text{ eq. y}^{-1}$

以上、合計で127 Tg CO₂ eq. y⁻¹（34.6MtCeq./y）となる。

③ コスト試算

わが国の水田では、灌漑用水の使用量は年間契約であることから、費用の増減は発生しない。また、追加の作業もないことから、人件費も発生しない。実態としては、既に行っている水田の水管理において手順を多少変更することで対応できるので、コストの増減はない。

また、アジアにおける適用の具体例として、インドネシア南カリマンタン州の水田について検討した。ここでは灌漑水の管理を可能とするため、水口にコンクリート製のゲートを作成する。ゲートの仕様は例えば、以下のようなものである。

コンクリート製で、ゲートを30 cm(高さ) x 50 cm(横幅) x 15 cm(奥行き)程度と仮定すると、22 Lのコンクリートが必要。1農家毎（平均水田面積：0.5 ha）に製作する。

この費用として 20,000円/haのコストが必要となる。プロジェクト期間を10年とすれば年間経費は 2,000円・ha⁻¹・y⁻¹となる。

また、栽培期間中に、一定期間、灌漑水の導入を停止するため、水口のゲートを開閉するための人件費を計上するとして、

必要作業量は1 Man-day 0.5 ha⁻¹（各農家で半日の作業）で、一回のゲート操作に必要な人件費は、¥300（=30,000 Rupiah）と見積もられる。したがって、年間の稲作では開と閉の二回の操作があることを考慮して 1,200円・ha⁻¹・y⁻¹のコストが見込まれた。

これらの作業によってCH₄排出量は 141kg/ha・y(炭素換算値: 0.8 t-C/ha・y)減少する。この値から削減コストを計算すると

$$(2,000\text{円} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{y}^{-1} + 1,200\text{円} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}) / (0.8 \text{ t-C/ha} \cdot \text{y}) = 4,000\text{円/t-C}$$

となる。

この工事、作業により排出されるCO₂量は後で削減されるCH₄量(CO₂換算値)の1%以下である。

④ 考察

すでに中干しを行っている水田では、追加投資無しでCH₄発生量を削減できる。インセンティブさえあれば一気に広がると期待できるが、その基礎となるべき、削減量のモニタリングや間接的な評価の手法の確立が望まれる。

7) テーマ3 a 「水田の有機物管理によるメタン排出削減技術」

① 削減手法の概要

水稻の生産性を低下させず、かつ、多大なコストを必要としない農家が実用可能な技術として、水田からの稲わら除去によりメタン発生の削減効果が得られる事を示した。

現地試験から、稲わら除去により水田からのメタン発生を40%程度削減できることが示されている。また、除去した稲わら堆肥化して再度すき込んだ場合でも、16%程度の削減が期待できる。

② ロードマップの概要

・わが国における削減量の見積り

国内の温室効果ガスインベントリによる排出係数のデータから、稲わらを施肥した場合を基準として、堆肥施用の場合のメタン排出量は16%減、稲わらをすべて水田から除去した場合は30%減であることが分かる。また、有機物管理別の水田面積(農林水産省統計情報等)では、現状では稲わら施用、堆肥施用、および無施用の面積割合が、それぞれ、60%、20%、および20%と見積もられている。以上のデータとわが国の水田からのメタン排出量、合計286 Gg (6,013 Gg CO₂ eq.) とから、稲わらの堆肥化による削減効果は、現状の稲わら施用水田のすべてを堆肥施用とした場合46 Gg CH₄ y⁻¹ (962 Gg CO₂ eq. y⁻¹、0.26 MtCeq./y) と推定された。また、すべての水田からわらを持ち出した場合は86 CH₄ y⁻¹ (1,800 Gg CO₂ eq. y⁻¹、0.49 MtCeq./y) の削減効果と推定された。

・アジア諸国での削減量の見積り

世界の水田の有機物施用に関する情報はきわめて限られている。東南アジアおよび南アジアでは、稲わらは燃料や家畜の飼料として使用されているので、日本のように土壤に施用する割合は多くないと考えられる。仮に、アジアの10%の水田で、上記の削減技術が適用可能であると仮定すると、アジアの水田からのCH₄発生量: 55 Tg yr⁻¹の1/10に対して約40%の削減となるので、2.2 Tg CH₄ y⁻¹ (46.8 Tg CO₂ eq. y⁻¹、12.8 MtCeq./y) となる。

③ 考察

水管理と同様、比較的少ない投資でメタン発生量を削減できる。広く導入されるためには農業従事者へのインセンティブが必要である。京都メカニズムの枠組みでインセンティブを与えることを考えると、削減量のモニタリングや信頼性の高い間接的な評価の手法によって、GHGの削減が確実に行われていることを立証できるようにする必要があるだろう。

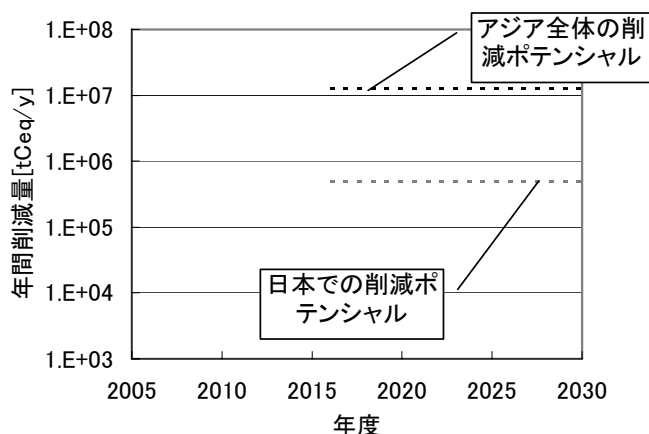


図11 メタン削減量の予測値。ここでは日本、およびアジア全域での削減ポテンシャルを示す。

この手法では年間継続的な期待できるので縦軸は年間削減量である。メタンを炭酸ガスの相当量に換算し、さらに炭素基準で示した。

8) テーマ3 a 「緩効性肥料と施肥管理による農耕地土壌からの亜酸化窒素排出削減技術」

① 削減手法の概要

緩効性肥料の導入と施肥管理によって作物の生産性を低下させず、かつ、多大なコストを必要としない、農家が実用可能な技術で、最大の亜酸化窒素排出削減効果を示すものを開発する。現地試験から、緩効性肥料の使用により、農耕地土壌からの亜酸化窒素発生を20～70%削減できることが示された。また、環境保全型農業技術の導入促進により、農耕地への窒素施肥量をさらに削減できることが期待される。

② ロードマップの概要

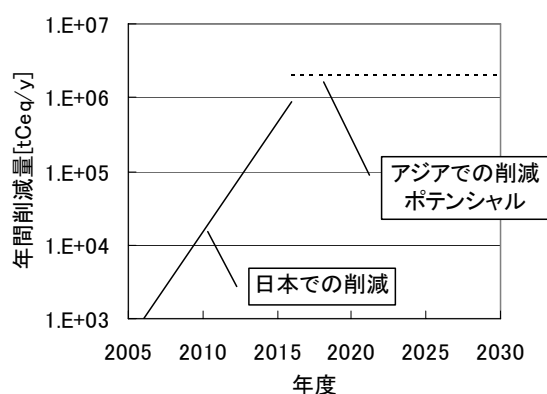


図12 N₂O削減量の予測値。日本での排出については今後の動向の予測を、アジア全域では削減ポテンシャルを示した。この手法では年間継続的な期待できるので縦軸は年間削減量である。N₂Oを炭酸ガスの相当量に換算し、さらに炭素基準で示した。

・わが国における削減量の見積り

国内および中国での現地試験から、化学肥料からの N_2O 発生は硝化抑制剤入り肥料など緩効性肥料の使用により、20～70%削減できることが示されている。また、世界の実測データベース解析（予備的）からも、農耕地において緩効性肥料の使用を導入することから、30%程度の N_2O 発生削減が期待できると考えられる。

わが国では、窒素施肥量を削減する農業技術はさまざまな作物、地域について開発が進められている。実際、単位農耕地面積あたりの平均窒素肥料施用量は2000年（ 101 kg N ha^{-1} ）において、1990年（ 117 kg N ha^{-1} ）の6%減となっている。

これらの技術の導入により、わが国の農耕地における N_2O 発生量は今後10年程度で約40%削減できるポテンシャルがあると考えられる。わが国における2003年の N_2O 発生量は、 $7900 \text{ Gg CO}_2\text{eq.}$ であることから、削減ポテンシャルは以下のように $3.2 \text{ Tg CO}_2 \text{ eq. yr}^{-1}$ （ 0.87 MtCeq. /y ）と計算される。

$$\text{削減ポテンシャル} : 7900 \times 0.40 = 3200 \text{ Gg CO}_2 \text{ eq. yr}^{-1}$$

・アジア諸国での削減量の見積り

アジアの全域でこの肥料が普及された場合、アジアでの窒素肥料消費量（ 40 Mt N ）、IPCCガイドラインでの N_2O 排出係数（0.0125）、削減率（30%）から、削減ポテンシャルは以下のように $7.2 \text{ Tg CO}_2\text{eq. yr}^{-1}$ （ 2.0 MtCeq. /y ）と計算される。

$$\text{削減ポテンシャル} : 40 \times 10^{12} \times 0.0125 \times 0.30 = 150 \text{ Gg N}_2\text{O-N. yr}^{-1} = 73 \text{ Tg CO}_2 \text{ eq. yr}^{-1}$$

③ 考察

窒素肥料を有効利用し、過剰分が N_2O となることを防ぐものであり、省資源型、環境保全型の農業技術とも整合的である。京都メカニズムの枠組の利用を前提としなくてもインセンティブが見いだせる可能性もあり得よう。

京都メカニズム、すなわちGHG削減によるクレジットでインセンティブとする場合には、 N_2O 削減効果の検証が重要である。一方、省資源型、環境保全型農業としてみれば、窒素肥料のより効果的な利用法が技術的な課題となりうるだろう。

9) テーマ3 a 「反すう家畜の飼養改善によるメタン排出削減技術」

① 削減手法の概要

反すう家畜の生産性を低下させず、かつ、多大なコストを必要としない農家が実用可能な技術として、飼料の改善によるメタン発生の削減効果が得られる事を示した。

国内における試験から、飼料中の非構造化炭水化物及び蛋白質のルーメン内消化特性や飼料中繊維含量を制御することにより反芻家畜からのメタン発生量は約12%の削減が可能であることが示されている。

② ロードマップの概要

これまでの検討により、我が国のような給与飼料構成が先進国型の国であっても、飼料の改善によって反芻家畜からのメタン発生量は約12%の削減が可能であることが示されている。

また、給与飼料条件の厳しい開発途上国における試験からは、泌乳牛（タイ）では低繊維含量の良質粗飼料を利用することによりメタン発生量は約17%の削減が可能であり、非泌乳牛（イン

ドネシア)では食品製造副産物(醤油粕、糖蜜・尿素)などの利用や飼料給与回数制御により約13%の削減が可能であることが示された。

以上の結果から、反芻家畜からのメタン発生量は特殊な飼料添加物等を利用しなくとも飼養改善により10~20%程度の削減が可能であると考えられる。

従って、2030年ごろに向けて一頭当たりのメタン発生量を10% (先進国)、15% (発展途上国)削減する技術が開発され、普及すると仮定した。現時点ですでに12%程度の削減技術は開発されているが、それ以降は新たに開発された技術の普及が必要となる。削減ポテンシャルとしては平均的に3%程度の削減が可能になると想定して計算すると $3.2 \text{ Gg CH}_4 \text{ y}^{-1}$ ($18.5 \text{ MtCeq y}^{-1}$)となる。

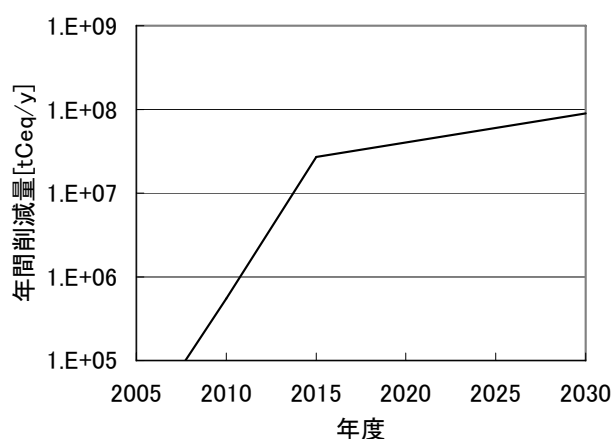


図13 全球でのメタン削減量の予想。この手法では年間継続的な期待できるので縦軸は年間削減量である。メタンを炭酸ガスの相当量に換算し、さらに炭素基準で示した。

以上の前提で全球での反芻家畜由来のメタン発生量から削減量を計算した。2015年での全球で発生量は $106,500 \text{ Gg CH}_4 \text{ y}^{-1}$ 、2030年で $115,100 \text{ Gg CH}_4 \text{ y}^{-1}$ 、と予測される。その結果、削減量は2015年で $99.2 \text{ Tg CO}_2 \text{ eq. y}^{-1}$ (27.0 MtCeq./y)、2030年で $329.8 \text{ Tg CO}_2 \text{ eq. y}^{-1}$ (89.9 MtCeq./y)、となる。

なお、ここで計算された削減量はメタン生成量の予測に基づいているので、その分の不確実性をもっている。

また、削減技術の普及については、当初は緩やかに、その後は急速に進むと仮定している。発展途上国の削減率については平均値として15%を用いたが、10から20%の範囲で変動する可能性をもっている。

③ 考察

昨年度報告書での削減ポテンシャルはアジアに限定し、2000年の反芻家畜由来のメタン発生量を基準として求めた値であったが、今回は反芻家畜の頭数が今後も増加すると仮定して削減量を求めているために、今回の削減量より小さな値となっている。

また、2015年以降、現在よりも進んだ削減技術の登場を予想しているが、その実現のためには、飼料中の非構造化炭水化物およびタンパク質のルーメン内消化特性や、飼料中の繊維含量の影響の理解が必要であろう。

10) テーマ3 a 「家畜ふん尿処理改善による亜酸化窒素排出削減技術」

① 削減手法の概要

家畜ふん尿を堆肥化する過程で、通気量を増加して好気的な発酵を促進させた場合、亜酸化窒素発生を低下させる。

② ロードマップの概要

家畜ふん尿を堆肥化で、好気的な発酵を促進させた場合、 N_2O 発生を最大10%以下に低下させることが可能であることが示されている。しかし、この場合、アンモニアの発生を増加させる。堆肥化からのアンモニア等間接的な発生要因を抑制できる技術開発については、現在、開発中であるが、日本全体の家畜排泄物管理からの N_2O 発生を20%程度削減できると考えられる。

現在のわが国における家畜排泄物管理からの N_2O 年間発生量は3650 Gg CO_2eq (2004算定値) と見積もられていることから、削減ポテンシャルは以下のように730 Gg $CO_2 eq. yr^{-1}$ (0.20MtCeq./y) と計算される。

$$\text{削減ポテンシャル} : 3650 \times 0.20 = 730 \text{ Gg } CO_2 \text{ eq. } yr^{-1}$$

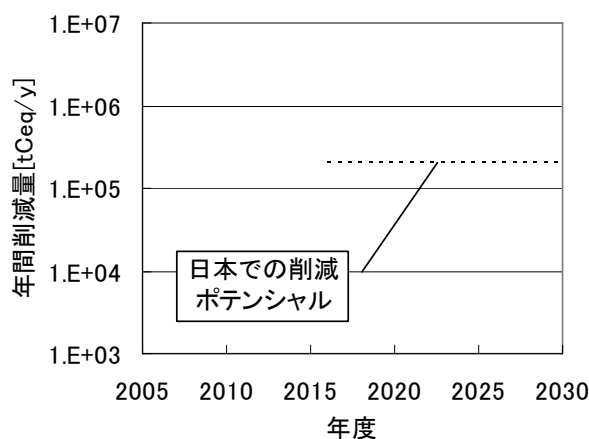


図14 N_2O 削減量の予測値。ここでは、日本での削減ポテンシャルを示した。この手法では年間継続的な期待できるので縦軸は年間削減量である。 N_2O を炭酸ガスの相当量に換算し、さらに炭素基準で示した。

③ 考察

広く導入されるためには農業従事者へのインセンティブが必要である。京都メカニズムの枠組みでインセンティブを与えることを考えると、 N_2O 削減量のモニタリングや信頼性の高い間接的な評価の手法によって、アンモニア等間接的な発生要因を考慮してもGHGの削減が確実に行われていることを立証できるようにする必要があるだろう。

11) テーマ3 a 「豚の飼養改善による亜酸化窒素発生抑制技術」

① 削減手法の概要

家畜排せつ物管理起源の亜酸化窒素発生抑制のため、生産物当たりの排泄窒素量を削減する。現行の飼養で給与されている餌のアミノ酸バランスを、アミノ酸の添加により必須栄養素を満た

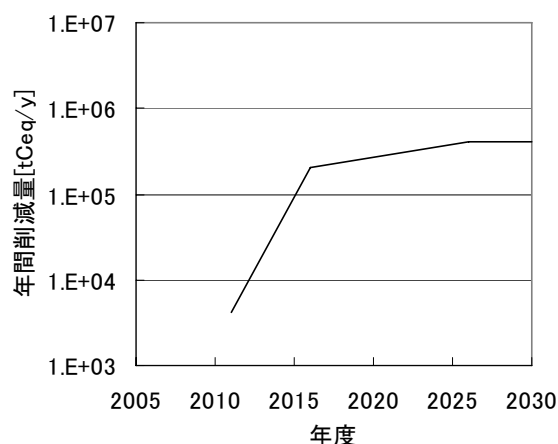


図15 N₂O削減量の予測値。アジア（稲作地域で養豚が行われている諸国）での年間削減量の予想。この手法では年間継続的な期待できるので縦軸は年間削減量である。N₂Oを炭酸ガスの相当量に換算し、さらに炭素基準で示した。

す様に改善し、過剰に給与されている窒素量を減らして排泄窒素量を低減させる（米ぬか主体のアジア小規模養豚の典型的飼料での削減）。

② ロードマップの概要

本研究によってベトナム等の米ヌカ＋破碎米飼料で、16.9%の窒素排泄量削減があることがわかっている。

そこで、米ヌカ＋破碎米主体の飼料を給与している（主に）東南アジアの稲作と養豚が結びついている地帯の豚を適応範囲と考えた。今後5年程度で現場への普及が開始され、5年後の2011年にアジアの稲作地域で養豚が行われている諸国（ベトナムの他、タイ、インドネシア、マレーシアなど）の該当養豚経営の1%程度、さらに5～10年後に適応可能な養豚の半数に普及すると予想する。また、家畜の飼料給与量も低減するので、アミノ酸の単価が低下すれば低コストな飼養方法として定着し、2026年頃には標準的な使用給与法として適応可能な全ての養豚に普及できると思われる。

なお、大規模養豚のトウモロコシ＋大豆粕飼料でも、15%の窒素排泄量削減効果があることがわかっているが、肥育効率に問題があるため今回の算定から削除した。

この技術の実現には、結晶アミノ酸として添加されたリジン、トレオニン（飼料用に生産されている。リジン200円/kg、トレオニン800円/kg程度）に加えて、イソロイシンが飼料添加物として認可・製造される事が導入の最大の条件である。（ヒト用の食品添加物としては、すでに認可を受けて製造販売されている。）

本技術で追加される作業は飼料へのアミノ酸の追加のみである。そこで、GHG削減のコストとして計上されるのは、アミノ酸のコストのみと考えられる。初期にはイソロイシンの単価を試薬並みの8000円/kgとして算定したが、その10年ほどで他の現在認可されているアミノ酸並（1/10程度）に価格が低下し、さら10年でまた1/10程度のコストダウンが続くと予想している。

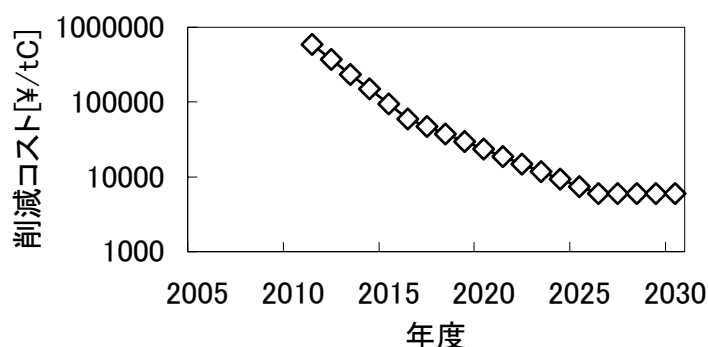


図16 削減のコストの予想。アミノ酸が主要なコスト源であり、普及がすすむにつれてコストダウンが進む、と想定している。

③ 考察

飼料中のアミノ酸を無駄なく利用させることによって N_2O の排出量を抑える手法である。飼料の量を削減できる（あるいは飼育量をその分増やせる）ため、独自のインセンティブをもち、アミノ酸のコストが十分に低ければ、自発的に普及することが期待できる。アミノ酸（あるいは適切なアミノ酸を多く含有する飼料）のコストダウンが重要である。

1 2) テーマ3 a 「焼畑移動耕作地帯における生態系管理システムの改変による炭素蓄積機能の増強」

① 削減手法の概要

焼畑移動耕作生態系に持続性・生産性・収益性の高い土地利用・生態系管理方式を導入することにより、生態系スケールで森林資源の保全と長期的な CO_2 ガス放出の抑制と炭素蓄積容量の増強を図る。

現時点でもっとも有望と考えられる技術体系は、マメ科牧草（スタイロ）休閑を挟んでイネ改良品種を2年作付した後、3年間ペーパーマルベリーを栽培、その後7年間は休閑とする12年1順の体系である。その場合、以下の条件で計算を進める。

- ・生産量を導入前の1.2倍に増収しつつ、現在の焼畑面積の1/4を保全林に移行させ、かつ単年次焼畑地面積を現在の3/8に抑えて、休閑期間を（ペーパーマルベリー込みで）10年にできる
- ・生態系炭素ストック（＝表層30cmの土壌+バイオマス）を、在来品種を用いた現行体系（地域平均で1年作付け3年休閑）と上記の代替的体系で比較すると、代替体系では35年後ストックが約50tC/ha増加することがわかった。現行の水準から後者の水準に移行する過程で、プロジェクト開始後20年間の年平均固定量として2.2 t C/ha/yrの増加が見込まれた。

「ラオス北部焼畑移動耕作地帯における生態系管理法改変による炭素蓄積機能の増強」では、1従来の焼畑の農耕のサイクル、1年耕作+3年休閑を、栽培植物をうまく組み合わせ5年耕作+10年休閑というサイクルに改善することで CO_2 吸収を減少させることを目標としている。

② 固定ポテンシャル（ここでは削減ポテンシャル）の推定
計算の前提は以下のようである。

- ・ 焼畑移動耕作生態系に持続性・生産性・収益性の高い土地利用・生態系管理方式を導入
 - － 現状： 3年休閑→火入れ→1年耕作
 - － 改良後： 10年休耕→火入れ→5年耕作

実施対象域を東南アジアの焼畑面積（休閑地を含む）200万km²の1/2と仮定し、吸収ポテンシャルは、精度に疑問のある地下部バイオマスの寄与を除いて、主要な炭素固定量変化の要因であると思われる、地上部バイオマス、とくに休閑期間の樹木による固定量の変化に注目した固定ポテンシャル評価を行った。

耕作地＋休閑地（全面積の50％）での炭素固定量の変化の結果より、耕作地の面積あたりで9.8tC/haの固定量増加が見込まれる。耕作地＋休閑地を全面積の50％と仮定すると、対象面積1,000,000km²に対しては490MtCの固定量増加となる。

③ ロードマップの概要

本シナリオでは、第一段階としてラオス北部山岳地帯を対象に今回開発された土地利用・作付け技術の導入と土地利用・生態系管理方法の改変を実施し、CO₂放出量の削減、森林資源の保全、森林炭素ストックの増強のメリットを提示する。第二段階では、これを先導事例として他の類似生態系へ波及させる。2015年までを第一期とし、それ以降を第二期と考えている。

第一段階のラオス北部山岳地帯では、15,000km²程度の土地が焼畑（休閑地を含む）に用いられているが、その周辺には少なく見積もっても200,000 km²の類似の焼畑地が存在しており、これが第二段階の対象地である。第一期末の2015年までにラオス北部山岳地帯で45,400 ha程度（ラオス北部山岳地帯の焼畑地の3％）にまで改良された作付けサイクルを導入し、それ以降、毎年20,000 ha（周辺を含めた焼畑地の0.1％）程度の土地に導入を進めていくことを想定している。ただし、改良された作付けサイクルの導入の速度は技術的な要因だけで決まるものではないので、大きな不確実性がある。ここでの想定はかなり控えめな見積もりである。

改良された作付けサイクルを導入すると、(1)改良品種の利用と休閑期間を延ばすことで在来より多くの収穫が期待でき、(2)休閑が延びることにより雑草害が減少し、除草の労働が減るに振り向けられ、(3)休閑作物であるペーパーマルベリーからの収益を期待できる、といったメリットがあり、それに対するコストは具体的には改良品種の種子代程度である。炭素のコストが120\$/tC程度であれば、種子の代金を炭素固定のみでまかなうことも可能である。

④ 考察

新規な焼畑サイクルを広めるためには、技術的な課題以外の多くの課題が存在することが予測される。具体的な技術的課題としての、イネ改良品種生産性および技術体系の安定化と環境適応範囲の拡大、といったものから、現地への導入・普及を推進する現地農業関係機関・海外援助機関等での技術オプションの採択といった個別の主体の活動に依存するもの、また、組み込まれる換金性作物のマーケットの拡充の様な社会的な要因まで、その範囲に含まれる。

(2) 横断的評価のまとめ

本プロジェクトのGHG削減ポテンシャルは1a～3b の合計で10,600MtCと大きな値であった。まとめを表1に示す。

表1 固定/削減ポテンシャルと類似生態系での位置づけ

	1a		1b	2a
テーマ	荒漠地植林	小麦ベルトにおける部分植林	木材生産性の向上による植林推進	熱帯泥炭湿地からのGHG抑制
対象地面積 km ²	2,500(実験地) 2,250,000(西豪) 4,700,000(全球)	62,000(西豪) 554,000(全球) (塩類集積農地)	335,000(インドネシア) 884,000(全球) (湿潤熱帯域)	320(タイ国王 私有地) 51,400(東南 アジアの開発済み泥 炭湿地)
吸収ポテン シャル*MtC	700(西豪) 1,800(全球)	4(西豪) 40(全球)	19(インドネシア) 50(全球)	3,600
備考	● 降雨200-300mm地域(1,120,000km ²)の30%の降雨を集中させて利用	● 中規模塩害面積5000km ² (作付け面積の8%) ● 全球は554,000km ²	● 耕作可能面積の5%での実施を想定(全球44,200 km ²)	● 全球熱帯雨林の蓄積の1% ● 開発地の泥炭分解を防ぐ ● 泥炭湿地の20%が開発済みと仮定して計算 ● 分解速度は利用形態で変動 18-68tC/(ha・y)

*削減・吸収量は20年間の量

表1 固定/削減ポテンシャルと類似生態系での位置づけ(つづき)

	2b	3a		3b
テーマ	熱帯泥炭湿地の天然林の保存と植林推進	水田からのCH ₄ 発生削減	反すう家畜からのCH ₄ 発生削減	焼畑耕作の改善
対象地面積 km ²	500(ブルバクデルタ) 200,000(東南アジア泥炭湿地)	131,000,000 (世界)	30,800,000 (アジア)	1,000,000 (過剰に耕作されている焼畑農地)
吸収ポテン シャル*MtC	3,600	削減ポテンシャル 650	削減ポテンシャル 370	490
備考	● 森林の荒廃を防ぐ ● エンパワーメントの有無で20年後の森林面積に20%の差が付くと仮定 ● 荒廃水田の再生など	● 持続的な削減が期待できる ● 全球の水田からのCH ₄ の3%、反すう家畜からのCH ₄ の1%に相当 ● 他ソースからのCH ₄ 、N ₂ O削減も ● GHGソースデータ蓄積中 ● 新技術導入評価、実証中		● 東南アジアの焼畑 2,000,000km ² ● 50%が過剰耕作されていると想定 ● 生態系炭素ストックの増加量で評価

*削減・吸収量は20年間の量

図17に、これまでに示した各チームのロードマップの集計を示す。

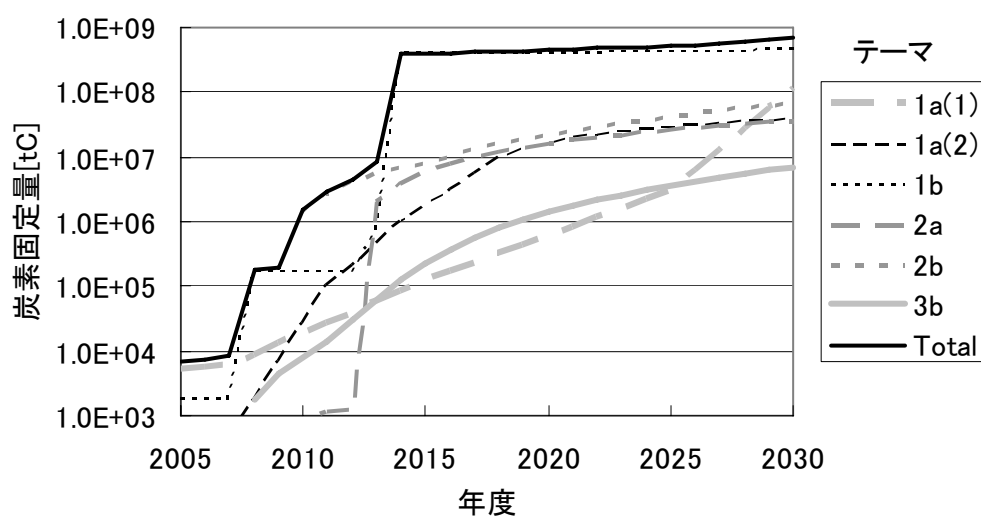


図17 炭素固定量の変化

なお、テーマ3aは継続的な削減となるので、累積ではなく、年当たりの削減量でまとめた。

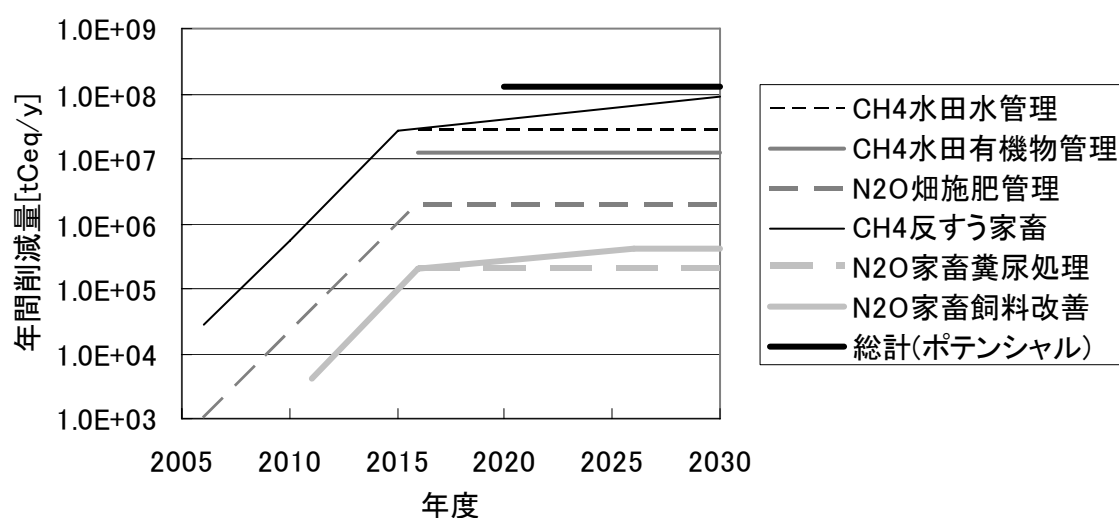


図18 CH4およびN2Oの削減量の変化

コスト、技術完成度、環境影響の観点から、短期間に実施可能で政策シナリオに結びつく方法を各研究テーマから抽出した。コストは目標とした100\$/tC以下の方法が大部分であった。

各チームから抽出されたテーマは1aではオーストラリア乾燥地でのハードパン爆破による植林CO₂固定方法、1bでは早生樹林育成と木材生産によるCO₂固定、2aでは泥炭開発地の再湿地化と植林によるCO₂排出量削減、2bでは泥炭開発地の水田化によるCO₂排出量削減、3aではインドネシア水田の水管理によるCH₄排出量削減、であった。

まとめを下表に示す。

表 2. GHG 排出削減コスト、効率および削減量の横断的評価の結果

GHG排出削減コスト、効率及び削減量

テーマ	固定/削減速度 (tC/ha・y)	コスト (円/tC)	効率* (20年間)	削減量 ^{2020年} (10 ³ tC/y)
1a	3.7	16,000	60	30
1b	1.2	1,000	600	10
2a	30	1,300	1,000	6,000
2b	18	2,000	(700)	10
3a	0.8 0.6(新潟)	4,000(インドネシア) 250,000(新潟)	500 5(新潟)	200 (40)
3b	1.7	600	(>100)	10

*効率=CO₂削減量/システム構築CO₂排出量 合計 6.5MtC/y

なお、技術的な課題とは異なるが、幾つかのテーマの削減量は、第二約束期間以降、どのようなルールが合意されるかに大きく影響されることが分かっており、そのような合意形成に有用な基礎データの蓄積も潜在的な課題である。

(3) プラットフォームの基盤技術

本プロジェクトでは1aから3bの6個のテーマについて、GHGガスの固定・排出削減を定量的に評価することを目標としている。そのため、CDM-PDDをベースにした削減ポテンシャルの見積もり、ロードマップ作成によるより具体的な削減量の予測と、そこから明らかになる技術的な課題の抽出、といった作業を行っている。

当初、個別の削減技術の詳細なモデル・シミュレータを公開することを念頭に、WEB上でシミュレーションを実行できるようなサイトの構築のためのプラットフォームの作製を目標として、各種フレームワークに関する調査をおこない、また独自の実装を行い、テーマ1aの結果から得られたモデルを例として(図19)、フレームワークの有用性を検証した。

一方、横断的な評価の作成に際しては、各テーマの個別のモデルについて細かい情報が得られると同時に、ある側面について統一された評価が行えるようになっていくことが必要であることが明らかになってきた。

評価の結果は統一的であるが、それに至る過程はテーマ毎に多様であった。例えば、固定量の予測でも、あるテーマでは面積あたりの固定量変化をシミュレーションなどで予想する、という方針が進められていたが、別のテーマでは面積あたりの固定量は既知として、その面積比率が評

価の中心となるものもあることが判ってきた。これら異なる枠組みを同じ形式でまとめるのは非効率であろうが、最終的には整理された結果が求められる。

そこで、横断的評価表における固定量・削減量評価や、ロードマップに比較的近い形での評価を行う枠組みとして、炭素固定量を算出するために用いられる炭素収支システム（Carbon Accounting System）に注目した。例えば、森林による炭素固定を念頭においた GORCAM (Marland and Schlamadinger、1999) や、CAMFor (Gary、2000)、CO2FIX (Maser et al.、2003) などが対象である。

これらのシステムにはいずれも、幾つかの炭素プールが設定されており、そのプールの間の炭素の流れを計算し、時間的な変化を追跡するものである。このとき、各炭素プールの役割は、一つには系全体の炭素を適切に分類することであるが、今ひとつ、プール間の流れを計算するために必要な、系の状態を示す機能をもっている（図20(a)）。前者は横断的評価表のような、知りたい情報、アウトプット、という側面であり、後者はモデル計算を進めるために必要な情報、モデルに対するインプット、という役割に対応している。

これら二つの役割は、それぞれ別の炭素プールの分類方法に異なるニーズを発生させることになる。例えば、土壌炭素のプールは、評価の対象としては一つのプールで十分であろう。しかし、モデルのインプットとして土壌炭素の状態を表すには、難分解性成分と易分解性成分など、追加の情報を保存したくなる。炭素収支システムの炭素プールが、評価のためには不必要なほどに細分化されて（そして扱いにくくなって）いる原因はここにあるだろう。

さらに進んで、複数のGHG削減・固定プロジェクトを比較することを考えてみると、ここに示した炭素収支システムは評価のための仕組みとしては有効であると考えられる。炭素プールの間の

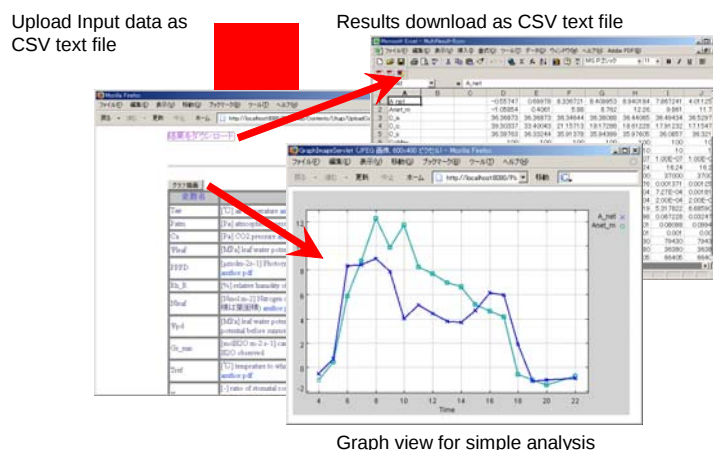


図19 WEB上へのシミュレータの実装例

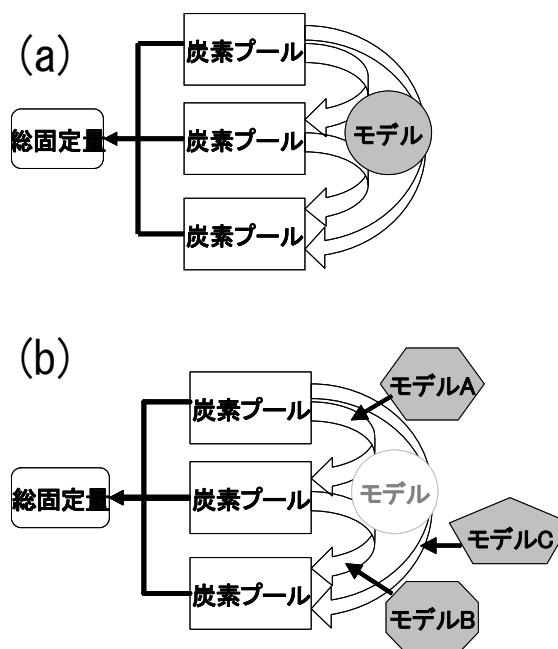


図20 炭素収支モデルにおける炭素プールの役割。

(a) 単一のモデル (b) 統合モデル

炭素のやり取りの形で炭素量を把握するので、見落とし・重複のない評価が可能になる。しかし、これにモデルの入力としての情報をも持たせようとする、おそらく非常に大量の炭素プールを扱う必要があり、同時に、その中のわずかな部分しか、実際に重要な情報を持たない、といった状態になるであろう。

この問題を解決するためには、

それぞれのGHG固定・削減技術に対し、シミュレータは個別に準備される

しかし、それぞれのシミュレータは共通の炭素プールの部分をもつ

という構造が望ましい。ここで固定・削減技術には、無駄を省いてなるべく単純なシミュレータを用意する。そのような状況でも、対象とするすべてのシミュレータに、必ず評価に必要な炭素プールが存在する（存在量は0でも）ことが保証されていれば、横断的評価に支障はない。つまり、横断的評価を行うシステムに対し、各シミュレータが共通したインターフェイスを持つこと、を保証する、というシステムを考えるべきである。

実際にはGHG固定・削減技術のシミュレータ（あるいは経験式、数表でも同じことだが）をゼロから作り出すことは少ないと思われる。各分野にはデファクトスタンダードとなったシミュレーションモデルが存在するのがふつうである。これらに必要とされるインターフェイスを付加する、という手法はおそらく大変が労力を必要とするだろう。（これはシミュレーションモデルの内部を理解する必要がある、という点の原因がある。）

より有効だと考えられる手法は、既存のモデルのシミュレータはそのままにして、炭素プールだけのシステムにそれらを統合する、という考え方である（図20b）。横並び評価の枠組みに、それぞれのGHG固定・削減技術に対応したモデルを組み込む、という見方出来るが、逆の見方をすれば、既存のモデルに横断的評価にふさわしいインターフェイスを加える、という見方も可能である。今年度、この様なモデルの統合について、特に、そのソフトウェア上の仕組みについて検討した。さらに、CAMFor(Gary, 2000)に対し、複数のモデルを組み合わせる、という具体例に対して実装を行った。

5. 本研究により得られた成果

（1）科学的意義

- ・それぞれのチームの成果に基づき、開発された技術及び得られた知見を広範な地域へ適用した場合の温室効果ガス削減量、環境への影響、コスト等に関する技術的側面からの横断的評価を実施した。
- ・横断的評価の結果、各研究テーマによって研究開発された技術に基づく削減プロジェクトが全て実施されたとするとGHG削減ポテンシャルとして20年間で100億t-C以上になると推定された。
- ・このうち、最大のポテンシャルをもつのは開発によりCO₂排出が増大している東南アジア泥炭地で20年間で36億t-Cあった。
- ・コスト、技術完成度、環境影響の観点から、短期間に実施可能で政策シナリオに結びつく方法を各研究テーマから抽出した。各チームから抽出されたテーマは

1aではオーストラリア乾燥地でのハードパン爆破による植林CO₂固定方法

1bでは早生樹林育成と木材生産によるCO₂固定

2aでは泥炭開発地の再湿地化と植林によるCO₂排出量削減

2bでは泥炭開発地の水田化によるCO₂排出量削減

3aではインドネシア水田の水管理によるCH₄排出量削減

であった。コストは目標とした100\$/tC以下の方法が大部分であった。

(2) 地球環境政策への貢献

・それぞれのチームの成果に基づき、開発された技術及び得られた知見を広範な地域へ適用した場合の温室効果ガス削減量、環境への影響、コスト等に関する技術的側面からの横断的評価を実施した。これは今後の政策決定に寄与するものと期待される。

・各チームとの協力の下、それぞれの技術の位置づけが明確になり、経済環境評価を明確にした、科学的根拠のあるGHG固定・削減システムの政策提言のための基本データが集積された。

6. 引用文献

- (1) Gary, Richard, 2000, “Carbon Accounting Model For Forests(CAMFor) User Manual Version3.35”, National Carbon Accounting System Technical Report No.26, Australian Greenhouse Office.
- (2) Masera, Omar R. J.F. Garza-Caligaris, M. Kanninen, T. Karjalainen, J. Liski, G. J. Nabuurs, A. Pussinen, B.H.J. de Jong, G.M.J. Mohren, 2003, “Modeling carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: the CO2FIX V.2 approach”, Ecol. Model. 164(2003) 177- 199
- (3) Marland, Gregg, and Bernhard Schlamadinger, 1999, “The Kyoto Protocol could make a difference for the optimal forest-based CO₂ mitigation strategy: some results from GORCAM”, Environmental Science & Policy 2(1999), 111-124

7. 国際共同研究等の状況

なし

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) S. Sinha, Sanjay Kumar, T. Matsumoto, H. Hamano and T. Kojima: Arid Land Geography, 26(S), 66-71 (2003) “Salt and Water Movement in Standard Toyoura Sand: Theoretical Estimation and Experimental Evaluation”
- 2) T. Kojima, J. Ishida, H. Hamano, K. Tahara and K. Yamada: Arid Land Geography, 26(S), 100-103 (2003) “Evaluation of Mixing Effects of Soil Conditioners under Dry Condition”
- 3) T. Kojima, E. Komaki, K. Hayakawa, S. Kato and H. Hamano: J. Arid Land Studies, 14(S), pp.151-154 (2004) “Quantitative Evaluative of Artificial Aggregate Formation”
- 4) Y. Abe, M. Taniguchi, H. Suganuma, M. Saito, Y. Yamamoto, K. Yamada, T. Kojima, Y. Egashira: J. Chem. Eng. Jpn., 36(4), 376-382 (2003) “Comparative Analysis Between

Biomass and Topographic Features in an Arid Land, Western Australia”

- 5) Koichi Yamada, Toshinori Kojima, Yukuo Abe, Masahiro Saito, Yasuyuki Egashira, Nobuhide Takahashi, Kiyotaka Tahara and Jhon Law: J. Chem. Eng. Japan, 36, 328-3332 (2003)
“Restructuring and afforestation of hardpan area to sequester carbon”
- 6) Egashira, D, Tomii, K. Ueyama, N. Takahashi, T. Kojima, Y. Abe, M. Saito, K. Yamada: J. Chem. Eng. Jpn., 36(4), 383-390 (2003) “Development of Integrated Simulator of Water Transport and Plant Growth as an Evaluation Tool of Arid Land Afforestation for CO₂ Fixation”
- 7) N. Takahashi, K. Tahara, H., Utsugi, T. Kojima, Y. Egashira, Y. Abe, M. Saito, K. Yamada: J. Chem. Eng. Jpn., 36(4), 391-400 (2003) “Water Use Efficiency of Eucalyptus Camaldulensis Growing in Arid Regions in Western Australia”
- 8) 小島紀徳・松本剛・池田裕弥・濱野裕之・加藤茂・岡田直紀・坪山良夫・斉藤昌宏・安部征雄・高橋伸英・山田興一：水文・水資源学会誌, 16(5), 518-526 (2003) 「安定同位体比分析を用いた豪州乾燥地域における樹木の水源推定に関する研究」
- 9) T. Kojima, J. Ishida, H. Hamano, K. Tahara and K. Yamada: Arid Land Geography, 26(S), 100-103 (2003) “Evaluation of Mixing Effects of Soil Conditioners under Dry Condition” ,
- 10) T. Saito, Y. Abe, H. Yasuda, T. Kojima and K. Yamada: Arid Land Geography, 26(S), 233-236 (2003) “Runoff Water Collection and Evaporation Control by means of Highly Permeable Ditch” ,
- 11) 加藤茂・照井岳也・藤重正洋・上宮成之・小島紀徳・山田興一：Macro Review, 16(2), 3-12 (2004) 「無機保水材焼成ポー キサイトの肥料吸着と溶出」
- 12) 高橋伸英・小林亮・新井親夫・小島紀徳・山田興一：化学工学論文集, 30(4), 537-540 (2004) 「焼成ポーキサイト混入による土壌の保水性改良効果」
- 13) N. Saito, S. Kato, T. Kojima, H. Hamano, K. Tahara, N. Takahashi and K. Yamada: J. Arid Land Studies, 14(S), pp.53-56 (2004) “Establishment of the Method to Estimate of Water Requirement Per Unit Carbon Fixation of a Tree in Arid Land”
- 14) T. Matsumoto, S. Kato, S. Sinha, Sanjay Kumar, Y. Abe, T. Kojima and K. Yamada: J. Arid Land Studies, 14(S), pp.147-150 (2004) “ Estimation of Water Behavior for Afforestation in Desert of Western Australia using Stable Istope Ratio Analysis”
- 15) H. Hamano, J. Ishida, T. Kojima, Y. Abe, M. Saito, N. Takahashi and K. Yamada: J. Arid Land Studies, 14(S), pp.219-222 (2004) “Infiltration Properties of Arid Land with Various Conditions in Leonora, Western Australea”
- 16) T. Kojima, N. Asaka, J. Ishida, H. Hamano and K. Yamada: J. Arid Land Studies, 14(S), pp.223-226 (2004) “Development of a Model for Large Scale Water Balance in Arid Land”
- 17) Hideki Suganuma, Yukuo Abe, Masahiko Taniguchi, Masahiro Saito, Koichi Yamada: Journal of Arid Land Study, Vol. 14-S, pp85-88 (2004) “Fundamental Research on Detection of Stand Biomass Change in an Arid Rangeland.”
- 18) Hideki Suganuma, Yukuo Abe, Masahiko Taniguchi, Masahiro Saito, Koichi Yamada: Journal

- of Arid Land Study, Vol. 14-S, pp85-88 (2004) "Fundamental Research on Detection of Stand Biomass Change in an Arid Rangeland."
- 19) 田内裕之、宇都木玄、濱野裕之、高橋伸英、安部征雄、山田興一：日本林学会関東支部大会発表論文集、55, 131-132 (2004) 「肥大か膨張かー精密デンドロメータによる乾燥地樹木の成長動態解析からー」
 - 20) T. Hirukawa, N. Asak, C. Naito, H. Hamano, T. Kojima and K. Yamada : Proceeding of the Fifth Asia Pacific Conference on Sustainable Energy and Environment Technologies (2005) "A modeling methodology of large scale water balance for selection of afforestation site"
 - 21) 山田興一、小島紀徳、安部征雄、江頭靖幸、田内裕之、高橋伸英、濱野裕之、田原聖隆：エネルギー・資源、26(6), 435-441 (2005) 「乾燥地植林による炭素固定システム構築-土壌構造改良による炭素固定促進-」
 - 22) T. Kojima, S. Kaneoya, E. Komaki, H. Hamano, S. Kato and M. Matsukata: Proceeding of the Fifth Asia Pacific Conference on Sustainable Energy and Environment Technologies (2005) "Evaluation of mixing effect of various zeolites on soil properties"
 - 23) E. Komaki, S. Kat, H. Hamano and T. Kojima : Proceeding of the Fifth Asia Pacific Conference on Sustainable Energy and Environment Technologies (2005) "Long term variation in soil physidal properties by artificial aggregate formation"
 - 24) H. Hamano, N. Saito, T. Kojima, S. Kato, M. Saito, A. Kinnear and K. Yamada: J. Arid Land Studies, 15-4, 231-234 (2006) "Death of Trees in the Wheat Belt Western Australia: Indentification of the Causes by Chemical Analysis of Soil"
 - 25) S. Kawarasaki, S. Kaneoya, H. Tanouchi, H. Hamano, T. Kojima and K. Yamada: J. Arid Land Studies, 15-4, 235-238 (2006) "Effect of temperature and light on germination of 12 afforested trees in South Western Australia"
 - 26) Adrienne Kinnerar, Peter Curry, T. Kojima and K. Yamada: J. Arid Land Studies, 15-4, 239-242 (2006) "Soil Mites in Re-afforested, Semi-arid Landscapes in Western Australia"
 - 27) T. Hirukawa, N. Asaka, H. Hamano, K. Yamada and T. Kojima: J. Arid Land Studies, 15-4, 247-250 (2006) "A Modeling Methodology of Large Scale Water Balance and Salt Accumulation for Afforestation in Arid Land"
 - 28) K. Shiono, H. Suganuma, Y. Abe, H. Tanouchi, H. Utsugi, M. Saito, N. Takahashi, T. Kojima and K. Yamada: J. Arid Land Studies, 15-4, 251-254 (2006) "Biomass Growth Estimation of an Afforestation Site and Natural Forests in an Arid Land of Western Australia"
 - 29) Y. Egashira, M. Shibata, K. Ueyama, H. Utsugi, N. Takahashi, S. Kawarasaki. T. Kojima and K. Yamada: J. Arid Land Studies, 15-4, 263-266 (2006) "Development of Tree Growth Simulator Based on Process Model of Photosynthesis for Eucalyptus Camaldulensis in Arid Land"
 - 30) N. Takahashi, H. Hamano, Y. Abe, T. Kojima and K. Yamada: "Effect of Calcined Bauxite as a Water-holding Material and a Way of Mixing it with Soil on Tree Growth", J. Arid Land Studies, 15-4, 275-278 (2006)

- 31) Hideki Suganuma, Y. Abe, Masahiko Taniguchi, H. Tanouchi, Hajime Utsugi, T. Kojima, K. Yamada: Forest Ecology and Management, 222, 75-87 (2006) "Stand biomass estimation method by canopy coverage for application to remote sensing in an arid area of Western Australia"
- 32) Tsuyoshi Matsumoto, Toshinori Kojima: J. Arid Land Studies, 16-1, 53-59 (2006)
"Simulations of salt accumulation at soil surface under different annual precipitation amounts in arid Leonora area, Western Australia"
- 33) Kumada, S., Kawamishi, T., Hayashi Y., Ogomori, K., Kobayashi, Y., Takahashi, N., Saito, M, Hamano, H., Kojima, T., Yamada, K. Journal of Ecotechnology Research 12, 167-170 (2006)
"Litter and Soil Carbon Dynamics Model in Arid Forest Ecosystems: Application to Sturt Meadows Experiments in Western Australia."
- 34) 菅沼秀樹, 長谷修平, 安部征雄, 田内裕之, 小島紀徳, 山田興一: 日本リモートセンシング学会誌 26-2, 95-106 (2006) 「植生指数と植生分類を組み合わせた乾燥地林分バイオマス推定手法の有効性の検討」
- 35) 菅沼秀樹, 安部征雄, 谷口雅彦, 山田興一: 写真測量とリモートセンシング 45-3, 12-23 (2006)
「乾燥地におけるデジタル航空写真解析による林分バイオマス推定手法の検証」
- 36) Hiroshi Iwasaki, Nobuhide Takahashi, Atsushi Kobayashi, and Koichi Yamada Journal of the Japan Institute of Energy, 85, 542-551 (2006) "Improvement of the Fermentation Process for Bioethanol -High Speed Fermentation Process-

< 査読付き論文に準ずる成果発表 >

なし

< その他誌上発表 (査読なし) >

なし

(2) 口頭発表 (学会)

- 1) K. Yamada: "Development of GHG Sink/Source Control Technologies through Conservation and Efficient Management of Terrestrial Ecosystems", International Conference of Desert Technology7, Johdpol India, 11/10~ 14 (2003) .
- 2) 齊藤則子、濱野裕之、加藤 茂、小島紀徳、山田興一、北原弘道、高橋伸英: 日本沙漠学会第17回学術大会 (2006) 「土壌改良を伴う乾燥地植林における土壌塩類濃度分布測定に基づく持続可能性の検討」
- 3) 濱野裕之、日留川知彦、小島紀徳、山田興一: 日本沙漠学会第17回学術大会 (2006) 「乾燥地植林のための表面流出モデル構築および広域展開手法の確立」
- 4) T. Kojima, T. Hirukawa, N. Asaka, H. Hamano and K. Yamada: 11th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineers, APPChE, Congress, No. 585, 4pp. Kuala Lumpur, Malyasia (2006)
"MODELLING METHODOLOGY OF WATER BALANCE AND SALT ACCUMULATION IN DIFFERENT SCALE FOR AFFORESTATION IN ARID LAND"

- 5) Kumada, S., Kawanishi, T., Hayashi, Y., Ogomori, K., Kobayashi, Y., Takahashi, N., Saito, M., Hamano, H., Kojima T. and Yamada, K., ICEM2006, Yamaguchi, Japan, 2pp., (2006)
“Modeling litter and soil carbon dynamics in Arid land: Application to Sturt Meadows Experiments in Western Australia”
- 6) H. Hamano, T. Hirukawa, N. Asaka, K. Yamada and T. Kojima: International Conference on Ecological Modeling, ICEM2006, Yamaguchi, Japan, 2pp., (2006) “Construction of Runoff Model Predicting Large Scale Water Balance with Salt Accumulation for Large Scale Afforestation of Arid Land”
- 7) 小柳卓、岩佐悠里子、飯室淳、日留川知彦、濱野祐之、小島紀徳、山田興一：化学工学会 第37回秋季大会（2006）「乾燥地植林のための広域展開を目的とした表面流出モデルの開発」
- 8) 小島紀徳：第8回秋田エネルギー教育研究会講演会，第12回石炭化学コロキウム（2006）「CO₂制約下でのエネルギー・地球環境戦略」
- 9) Kumada, S., Kawanishi, T., Hayashi, Y., Hamano, H., Kawarasaki, S., Takahashi, N., Egashira, Y., Tanouchi, H., Kojima T. and Yamada, K., Litter removal patterns and potentials in an arid land forest ecosystem, China-Japan Ecotechnology Seminar-2006, Shenyang-, (2006). 10. 23, Shenyang, China.
- 10) 熊田 俊吾，川西 琢也，林 良茂，浜野 裕之，河原崎 里子，高橋 伸英，江頭 靖幸，田内 裕之，小島 紀徳，山田 興一：化学工学会第72年会，2007.3.19-21，京都「西オーストラリア州レオノラ近郊の乾燥地林におけるリター流出挙動」
- 11) 河原崎里子、濱野裕之、斉藤則子、田内裕之、斉藤昌宏、藤村達人、安部征雄、小島紀徳、山田興一：日本沙漠学会第17回学術大会（2006）「西オーストラリア州南部小麦地帯の塩害地域における植林木の生育」
- 12) 塩野克宏、安部征雄、河原崎里子，田内裕之，宇都木玄、小島紀徳，山田興一：日本沙漠学会第17回学術大会（2006）「安定同位体トレーサー法によるハードパン破碎植林木の水源特定」
- 13) 菅沼秀樹、宇都木玄、安部征雄、小島紀徳、山田興一：日本沙漠学会第17回学術大会（2006）「乾燥地の疎林における葉面積重(LMA)と葉内窒素量の林分内変化」
- 14) N. Takahashi, H. Tanouchi, H. Utsugi, S. Kawarasaki, H. Hamano, T. Kojima and K. Yamada: 6th International Workshop on Measuring Xylem Sap Flow and its Application to Plant Science, Perth, Australia (2006) “Water use efficiency of native and planted trees in an arid region of Western Australia”
- 15) Hideki Suganuma, Katsuhiko Shiono, Yukuo Abe, Hiroyuki Tanouchi, Toshinori Kojima and Koichi Yamada: Tunisia-Japan Symposium on Society, Science & Technology 7th edition, Sousse, Tunisia, 2006. “Evaluation of actual and potential biomass growth estimated by remotely sensed data in an arid land of Western Australia”
- 16) 橋本 敦、小西 賢則、江頭 靖幸、上山 惟一、小島 紀徳、山田 興一：第17回日本沙漠学会学術大会(2006)「炭素アカウンティングシステムへのプロセスベースモデルの統合による乾燥地植林シミュレータの開発」
- 17) Yasuyuki Egashira, Miyuki Shibata, Korekazu Ueyama and Koichi Yamada: Application of Test-Driven Development Framework for Environmental Software: A Case Study in Long-Term

Photosynthetic Process Simulation, Proceedings of the iEMSs Third Biennial Meeting, "Summit on Environmental Modelling and Software", Burlington, USA, July (2006)

- 20) Y. Egashira, H. Hashimoto, K. Ueyama, H. Utsugi, H. Tanouchi, S. Kawarasaki, H. Hamano, T. Kojima and K. Yamada; Development of Simulator for Tree Growth and for Carbon Fixation in Arid Conditions by Integration of Process Based Models into Carbon Accounting System; International Conference on Ecological Modelling 2006, Yamaguchi, Japan, August, (2006)

(3) 出願特許

- 1) 山田興一、小島紀徳、安部征雄：

科学技術振興機構・産学錬成推進部・技術移転支援センター 新技術説明会科学技術振興機構 東京本部 (2006)

「乾燥地植林のための土地改良方法 (特願2003-103345 特開2004-305098 PCT/JP2004/004619) 」

(4) シンポジウム、セミナーの開催 (主催のもの)

- 1) Workshop on carbon sequestration research in semi-arid Western Australia (7-8th Feb. 2005, FPC Cong. Center (Rivervale, Western Australia, Australia))
 2) Desert Technology 8 International Conference (27th Nov.-2nd Dec. 2005, Hotel Epinard Nasu (Nasu, Japan), 74 persons)

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし

(6) その他

なし