

課題名	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 － 大気中温室効果ガス濃度の安定化に向けた中長期的方策－ 1 森林生態系を対象とした温室効果ガス吸収固定化技術の開発と評価 (1 a) 荒漠地でのシステムの植林による炭素固定量増大技術の開発に関する研究		
課題代表者名	小島紀徳（成蹊大学 理工学部 物質生命理工学科）		
研究期間	平成15－19年度	合計予算額	315,944千円（うち19年度 60,820千円） 上記の合計予算額には、間接経費72,910千円を含む

研究体制

- (1) 荒漠地でのシステムの植林のための水・塩制御技術の開発に関する研究
- 1) 広域水・塩移動解析モデルの開発および荒漠地における水収支測定と制御（成蹊大学）
 - 2) 荒漠地における土壌環境測定およびモデル化（金沢大学）
 - 3) 実証植林地の選定、植林、測定方法の検討による半乾燥地域への技術展開（成蹊大学）
- (2) 荒漠地でのシステムの植林のための環境適応型植林・土壌制御術の開発に関する研究
- 1) 荒漠地における樹木成長に及ぼす環境条件影響評価とこれに基づく樹種選択・植林法提案（独立行政法人森林総合研究所、三重大学）
 - 2) 荒漠地植林再生バイオマスの広域変動判定技術の確立に関する研究（筑波大学）
- (3) 荒漠地植林技術のプラットフォーム構築に関する研究（大阪大学・信州大学・成蹊大学）

I. テーマ1 a の全体構成

テーマ(1a) 荒漠地でのシステムの植林による炭素固定量増大技術の開発に関する研究の全体構成

植林は、二酸化炭素問題対策の中でも低コストかつ環境負荷が低く、大規模に展開可能な技術である。しかし既存の土地利用や、今後重要性が増すと予想される食料生産用農地との競合は避ける必要がある。そこで本研究は農地として用途がないあるいは生産性の低い（半）乾燥地における、炭素固定を目的とした荒漠地植林によるプラットフォーム構築を目指した。図1にこのプラットフォームの各要素とプラットフォーム構築に向けた研究の流れを示す。

横軸は、樹木生育促進のための環境改善技術→樹木の機能（活性化）→出力としての炭素固定とな

っており、縦軸は個体レベル→生態系→地球規模とスケールの拡大を示している。本研究は、各マトリックス上での成果も重視し、また各要素間には複雑な相互関係はあるが、総体として左上から右下への炭素固定プラットフォーム構築に向けた論理展開するとの構造となっている。

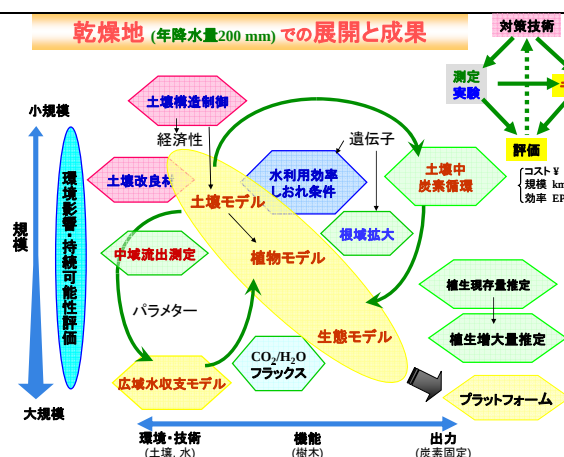


図1 本サブテーマの、乾燥地における研究コンセプトと具体的テーマの相互関連

II. 本研究により得られた科学的成果

- ・中規模流域、広域水収支測定を継続的に行ってきた。乾燥地における降水量に対する表面流出量の貴重なデータを取得することが出来た。
- ・広域植林地選定を目的とした表面流出モデルにおける境界条件および考え方を確立した。
- ・対策実施により獲得が期待される流出水量・水質の観点より、クリーク水を植林に用いることが有効であるといえる。
- ・乾燥地特有の現象であるリター流出を組み込んだ林地単位での炭素動態モデルを構築した。
- ・乾燥地でのリターの物理的移動速度について、モデル化の基礎となるデータが得られた。
- ・林地からリターが流出し、また降雨水が最終的に塩湖から蒸発するような閉じた森林生態系における炭素動態解明のためのフレームワークを構築した。
- ・土壌への効果的な保水材混入法について設計指針が得られた。
- ・塩害地への植林技術として、パイプを用いた苗木の根域制御技術（パイプ植林法）を開発した。
- ・*E. camaldulensis*が、パイプ植林法に適した樹種であることを明らかにした。
- ・成長速度において*E. camaldulensis*に劣るが、*P. radiata*はより省力的な栽培が可能な樹種である

ことを明らかにした。

- ・アグロフォレストリーによる塩害抑制の可能性を示した
- ・乾燥地のみではなく半乾燥地の小麦栽培地帯でも炭素固定植林を展開できる余地があることが判明した
- ・乾燥地であっても、樹木が必要とする水分を十分に吸収できる根域を確保すれば、生育は可能である。
- ・ハードパン破碎、初期灌水、ハードニングは植林木の生存・成長に効果的である。
- ・*E. camaldulensis*、*C. cunninghamiana*、*C. obesa*が生存率、成長量とも大きく、乾燥地に植林する樹種として有望である。
- ・乾燥地に生育する*Acacia*属樹種の発芽には、熱湯に1分間漬ける前処理が適している。
- ・*Acacia*属の根系の成長は早く、地下からの灌水法が成長促進に効果がある。
- ・*E. camaldulensis*の光合成には高い光要求性（高い V_{cmax} ）を示すことが明らかになった。
- ・*E. camaldulensis*は少なくとも-1.5 Mpaの土壤中水ポテンシャル条件で生育可能であり、この値は草本植物の永久萎凋点以下である。
- ・年間降水量が500 mm以下の地域では、*E. camaldulensis*の植栽密度は200本 ha^{-1} 程度が適切である。
- ・*E. camaldulensis*は年間降水量350-500 mm以上、塩濃度45 mSm^{-1} の立地においても他の*Eucalyptus*属や*E. camaldulensis*のエコタイプと同様に成長できることから、乾燥地を含めた広域にわたる植栽樹木として有望である。
- ・西豪州乾燥地域での自然植生（木本植物）の成長傾向を明らかにした。
- ・推定の難しいベースライン純吸収量について、簡易推定式を作成した。
- ・西豪州乾燥地における植林展開可能面積と炭素固定量を数値的な根拠を持って予測した。
- ・荒漠地での植物成長を予測するためのシミュレータを開発した。地表水の流出と浸潤、浸潤した土壤の水移動、土壤の乾燥状況を反映した光合成シミュレーションを連携させた。光合成による炭素固定と呼吸・枯死脱落の収支から樹木の生長量を求め、それがアロメトリー関係を満たすように各器官に分配されるとして計算した。これにより表面流出の起こる環境での疎林の成長を予測することができるようになった。
- ・炭素アカウンティングシステムに、樹木の生長シミュレーション、Debrisの分解、土壤炭素の分解を組み入れて、荒漠地植林による炭素固定量を予測できるようにした。
- ・実証的な植林事業を想定し、その事業に係わる作業項目毎に発生する CO_2 、コストを概算し、植林事業全体にわたって積算し事業全体で発生する CO_2 量、総コストを算出した。これにと炭素固定量から固定効率、固定コストを求めた。
- ・プラットフォームでの利用を念頭に、シミュレータの開発、実行、複数のシミュレータの連携を目的としたソフトウェアフレームワークを作成した。このフレームワークを利用する事によって、利用する変数の変数名、デフォルト値、説明文書等の情報が一つのファイルにまとめられ、データの一元的管理が可能となる。フレームワークでの統一されたデータ構造とシミュレーションプログラムの組み合わせを利用して、複数のシミュレータ間のデータ連携が容易となる。

Ⅲ. 成果の地球環境政策への貢献

- ・表面流出モデルの確立により、水・塩収支の観点から植林選定地選択を広範囲に行うことができるようになり、より効果的な植林による CO_2 固定に関する情報提供が可能となった。
- ・乾燥地でのリター流出プロセスとその影響が明らかになれば、リター流出防止などの技術的方策と組み合わせることで、乾燥地植林による炭素固定量の更なる増大のみならず、乾燥地の表層土壤の改善が期待できる。
- ・降雨水が最終的に塩湖から蒸発するような閉じた森林生態系における炭素循環の解明に指針を与える。
- ・本研究成果をもとに、保水材を用いた植物成長促進技術について、より効果的な施工法・設計指針が提案できる。
- ・過度の土地利用により塩害が生じた荒廃地への植林技術を開発し、塩害地を炭素固定の場所として利用できるようにした（CDM植林技術開発）
- ・乾燥地・半乾燥地への植林技術、特に郷土樹種による植林技術が改善されたことにより、これらの地域および半乾燥地に広がる荒廃地などに科学的な根拠を基に植林を行うことが可能になり、炭素排出権取引を念頭に入れた炭素吸収・固定を目的とした植林を行う目処がついた。
- ・炭素固定植林好適樹種の生理生態的特性を明らかにし、その適応域や効率的な植林技術を開発し、広域的か普遍的に利用できる手法を示した。

- ・オーストラリアと日本の間で将来的に乾燥地を利用した大規模JI（共同実施）植林が実施された場合の予想炭素クレジットを試算した。
- ・荒漠地への植林（乾燥地植林での水管理・土壌改良を用いた植林、半乾燥地での塩害対策としての部分植林）について、1以上の炭素固定効率が期待でき、CO₂固定の手法として有効である事を示した。さらに固定コスト、テンシタルについても評価し、GHG固定・削減技術としての特徴を明らかにした。
- ・荒漠地における植林について、その固定効率、コストなどを試算した結果は他のサブテーマで検討されたCO₂固定・削減技術とともに、サブテーマ4の横断的評価の基礎資料として用いられている。

IV. 研究概要

1. 序（研究背景等）

再生可能エネルギーへ完全転換技術が開発されるまで、様々な二酸化炭素問題対策技術が講じられる必要がある。その中で森林の造成（植林）は最も環境への負荷が小さく、低コストで大規模化が計れる技術として期待されており、CDMあるいはJIの適用を狙って海外植林事業を開始した企業も多い。しかし、今後地球規模での食料生産の重要性が増すにつれ、農地と植林地の競合を避ける対策を講じる必要がある。長期的かつ大規模な対策を想定する際、植林地として乾燥害、塩害などが生じるより悪条件の地域をターゲットにする必要がある。以上の背景の下、本研究の大目的は、農地として適さない低生産性の（半）乾燥地、あるいは疲弊した農地（以下、両者を併せて荒漠地と呼ぶ）を植林対象とし、システム的大規模植林のための基盤・応用技術の開発をおこない、二酸化炭素吸収源の拡大を図るものである。さらに長期的には、農業生産との複合化・共存（アグロフォレストリー）あるいはエネルギー生産をも含めた、持続可能なシステム構築をめざすものである。

対象と考えられる地域は、塩害等が発生し農地として不適化したあるいはその可能性が懸念される地域等をも含めた広い意味の乾燥地（荒漠地）である。人為的造水を植林に用いることはエネルギー収支的には成立せず、従って少ない降雨量を積極的に利用した広域での天水利用の最適化技術開発や、広域に渡る水・塩移動の観点も含めた植林適地の選択が必須であり、このような条件に適した植林樹種あるいは優れた遺伝子を有する個体の選抜、および許される範囲内での創造（品種改良）、および上記の場所・物に適する方法（植林法）の開発も同時に求められる。

さらに、これらの導入技術の効果を定量的に評価し、これを再び技術開発に結びつけるといった、技術開発のループを形成しない限り、単なる思い付きにしかならない。このような手法をまず確立し、ついで対象地域を拡大することにより、はじめて実効性のある吸収源拡大が可能となると考えられる。本研究のコンセプトを、本研究の流れをまとめた図1の右上に示した。

2. 研究目的

- ・水量・水質の現状把握の為に広域水・塩移動解析モデルを開発し、それに基づいて植林地を選定するとともに環境影響評価を行う。
- ・5km四方規模の閉鎖流域（Jims pool）でのモデルと実測データとを比較検証し、詳細なパラメータを決定する。
- ・広域モデル（100km四方規模）への展開と高い信頼性を維持した水・塩移動解析を展開する。
- ・現地森林生態系の枯葉枯枝（リター）・土壌の炭素動態の解明
- ・植物成長促進効果を目指した効果的な保水材混入方法の模索
- ・塩害地において有効な植林技術を開発する。
- ・開発した植林技術に適した樹種を選定する。
- ・乾燥地に生育する郷土樹種の中から、耐乾性、耐塩性が大きく、成長が早い植林最適樹種を選択すること。
- ・樹木の生育を妨げている要因を究明し、その影響を緩和することによって、植林を可能にすること。
- ・乾燥地植林・沙漠緑化の技術を改善すること。
- ・温暖化対策植林による炭素クレジットはUNFCCCによる取り決めに従って算定する必要があるため、植林による地上部地下部の炭素変化を予測する手法の開発を目指した。
- ・研究対象地および近隣の乾燥地域での植林展開可能面積と植林を展開した場合に計上される炭素量の試算を目指した。
- ・*E. camaldulensis*の乾燥地植林における有効性が示されたことを受け、該当樹種の単葉光合成生理特性を解明し、また塩害の発生する沿岸部における*E. camaldulensis*の植栽試験結果も踏まえ、該当樹種のより広域への適用と造林密度に関する植栽方法を明らかとする。

- ・プラットフォームの構成要素であるプロセスベースの森林シミュレータを実装する。荒漠地植林を念頭に水条件の制限を含めた光合成モデルを起点として樹木の生長速度を予測し、実測との比較により検証を試みる。
- ・プラットフォームの一部としてGHG固定技術の評価のための計算をおこなう。荒漠地植林や半乾燥地の部分植林を対象として、CO₂固定量と発生量の比較による純固定量の見積もり、固定スト、実施可能なポテンシャルの試算を実施する。
- ・シミュレーションや試算の結果をプラットフォームとしてまとめるため、WEB上でインタラクティブに操作可能なシミュレータとして実装する。シミュレータのWEBへの実装と、シミュレータ間のデータ連携、モデルとの整合性および自動的な検証を行うためのフレームワークを作成する。

3. 研究の方法及び結果

(1) 荒漠地でのシステマ的植林のための水・塩制御技術の開発に関する研究

1) 広域水・塩移動解析モデルの開発および荒漠地における水収支測定と制御

- ・ Sturt Meadows Stationを中心とした4×5kmの中規模流域において、雨量計、土壌水分センサーをtop、middle、bottomに設置し、研究期間中に連続的に降雨量と土壌水分量の測定を行った。また集水地には水位計と流量計を設置し、降雨時の表面流出量と集水地の水量を連続的に測定した。集水地において多くが流出していると見られる貯水量のデータを除去し、降雨量と表面流出量のデータ化を解析した結果、降水量と表面流出量の間に一定の関係があることが確認された。
- ・ Sturt Meadows Stationを中心とした4×5kmの中規模流域水収支モデルを確立した。本研究では集水地の水量からこの地域の粗度係数・浸透補正係数・time step・メッシュサイズといった貴重なパラメータを決定することができた。これによりモデルの精度を高めることができ、また精度向上プロセスを確立できた。
- ・ Sturt Meadows南部にある塩湖に水位計と流量計を設置し、塩湖の水量と塩湖からの流出量の測定を行った。雨量計のデータ等と比較することにより、2003年11月に起こった広域降水イベント時の直後に水位の上昇が確認され、貴重な荒漠地における広域流域の表面流出データを観測することができた。
- ・ 水・塩収支モデルをベースとした水年齢という概念を確立した。水年齢から塩と水の挙動を評価できるようになり、植林地選定の有益な情報を提供することが可能となった。
- ・ 水・塩収支モデルから、表面流出水よりもクリーク水は水年齢が若く、塩濃度が低いと推測された。また同様に、降雨時の水量は表面流出水よりクリーク水の方が多いと考えられることから、表面流出水よりもクリーク水を植林に用いることが有効であると評価された。

2) 荒漠地における土壌環境測定およびモデル化

① 荒漠地におけるリター・土壌の炭素動態解析

- ・ 現地生態系を対象として植物枯死以降の炭素動態について、①リター流出を組み込んだリター・土壌炭素動態モデルを用いて林地単位での炭素動態を解析し、②現地試験サイトでリター流出の実態把握試験を行った。また、③林地以外での炭素動態を調査し、現地森林生態系全体の炭素収支の推算を試みた。
- ・ その結果①自然林サイトでは年間リターフォール量のうち6～7割程度のリターが風、Runoffなどの物理的要因によりサイト外に流出していることがわかった。②現地のリター流出現象について実験的に明らかとした。③リター流出の影響を組み込んだ、現地生態系全体の炭素動態解析のためのフレームワークを作成した。

② 保水材を用いた土壌水分移動の制御方法に関する検討

- ・ カラム実験を行い、様々な条件下での保水材の乾燥抑制効果について検討した。
- ・ 保水材を均一に混入するよりも、ある程度の土壌深さに集中的に投入するほうが乾燥抑制に効果があることがわかった。また、集中的に保水材を投入した場合でも、投入した深さによっては、乾燥抑制効果に差があることがわかった。

3) 実証植隣地の選定、植林、測定方法の検討による半乾燥地域への技術展開

① パイプ植林方法+ノーザン地域の植林木の樹種特性（尾田+相川+宇都木）

- ・ 様々なパイプ径（根域制御の強度）での栽培実験を行った結果、*E. camaldulensis*は直径10cm未満のパイプで生育させる処理では成長量が減少した。
- ・ 浅根性の*A. lasiocalyx*の成長は30cm未満のパイプで減少し、*P. radiata*、*C. obesa*の成長はパイプ径に有意な影響を受けなかった。
- ・ 深根性樹種の中での成長量は*E. camaldulensis*が最も大きかった。
- ・ パイプ長を変化させた栽培実験の結果、長さ100cmのパイプを用いることで土壌深い層の根へのバイオマス分配を増やすことができた。

② 概要+水収支（菅沼+濱野）

- ・ 地表面データから集水域を区切り、流量計を設置して、水収支を計算した。水の供給は対象地近傍のWickepin Station（南緯32.53度、東経117.46度）の降雨データを利用し、水の蒸散を植林4樹種の毎木調査結果とTDP（Thermal Dissipation Probe）による樹液流量測定から求めた。その結果累積表面流出量と累積降雨量の関係が求まり、植林利用可能水量および植林可能量の推定が可能となった。また、樹種ごとの蒸散能の違いを把握でき、その年間蒸散量から塩害対策のために植えるべき樹種が選定できた。

（2） 荒漠地でのシステムの植林のための環境適応型植林・土壌制御術の開発に関する研究

1） 荒漠地における樹木成長に及ぼす環境条件影響評価とこれに基づく樹種選択・植林法提案

① 樹種選択・植林方法

- ・ 植林サイトCおよびTの植栽木の生長経過を解析した。この結果、*Eucalyptus camaldulensis*、*Casuarina obesa*、*C. cunninghamiana*の3樹種が生存率、成長量とも大きかった。
- ・ 植栽孔がハードパンを貫通しているポンドとそうでないポンドの成長を比較した結果、ハードパンを貫通する植栽孔において生存・成長とも大きい。
- ・ 灌水頻度と灌水期間を変え植栽木の成長を解析した結果、*E. camaldulensis*においてはハードニングを行えば、灌水期間は短くても十分成長する。
- ・ *Casuarina*属2種の場合は根が浅いため、灌水を継続するか地下水位が浅い場所に植栽する必要がある。
- ・ *Acacia*属樹種の発芽および栽培実験の結果、発芽には1分間熱湯に漬ける処理が最適であること、根系の発達を促すには下から水を供給する方法が適していることが明らかになった。

② 環境条件影響評価

- ・ 環境条件の異なる3試験サイト（降水量200-500 mm）で*E. camaldulensis*の光合成・蒸散特性を測定した。また降水量350-500 mmの5試験地で*E. camaldulensis*を含む9樹種の植栽試験を実施した。その結果、*E. camaldulensis*の高い光合成能力と水分条件に柔軟に対応する気孔制御システムが明らかとなり、モデル解析から光合成生産が-1.5 Mpaの土壌水ポテンシャルまで可能であることが分かった。降水量500 mm程度の立地では、植栽本数によらず幹枝の生産量が5 Mgha⁻¹y⁻¹ほど得られ、また塩濃度が46 mSm⁻¹程度の立地にも生育可能であった。

2） 荒漠地植林再生バイオマスの広域変動判定技術の確立に関する研究

- ・ 植林地22区画、自然林45区画の中からそれぞれ12区画抽出して毎木調査をし、植林木の地上部・地下部の成長量が平均2.19 ± 1.25 Mg ha⁻¹ y⁻¹、自然植生の地上部・地下部の成長量（ベースライン）が-0.3~4.44 Mg ha⁻¹ y⁻¹と計算された。
- ・ ベースラインと林冠閉鎖度を回帰分析した結果、有意な両者に関係があることが判明。リモートセンシング画像による林冠閉鎖度分布と、林冠閉鎖度によるベースライン推定式を組み合わせることによって、研究対象地のベースライン分布を計算できた。
- ・ 植林木による地上部・地下部の成長量、ベースライン分布、林分バイオマス分布を組み合わせることで、研究対象地の植林展開可能面積と炭素固定量を試算した。試算結果は植林期間によって異なり、5年では最大で対象地の70.9%にあたる1,850 km²に植林することで582.9 kt-Cの炭素固定量が計上されるが、20年間では最大で対象地の98.0%にあたる2,557 km²に植林することで4,225 kt-Cの炭素固定量が計上される。
- ・ 研究対象地と同一の生態系区分となっているMurchison生態領域では、仮に植林展開可能面積の割合と単位面積当たりの炭素固定量が同一と仮定すると、適応可能面積が約197,000 km²となり320,000 kt-Cの炭素量が計上されると試算された。

（3） 荒漠地植林技術のプラットフォーム構築に関する研究

- ・ 荒漠地の特徴を考慮した樹木の生長予測のため、乾燥の効果を考慮した光合成シミュレータを作成した。光合成プロセスに対する標準的なモデルをベースとし、乾燥の影響は葉と大気とのガス交換に際しての抵抗の変化、主に気孔抵抗の変化として現れる、と考えガス交換実験のデータをベースに気孔抵抗の応答を定式化した。Debrisの発生、幹呼吸を考慮し、葉、幹・枝、根の成長がアロメトリー関係を再現するように、樹木の成長速度を予測するものとした。
- ・ 疎林の間の裸地の水移動を表現する水移動のシミュレータを作成した。地表の水の土壌へのしみ込みと蒸発を表現する土壌水分移動シミュレータを作成し、その結果を精度良く再現できる簡便な式を提案して計算負荷を減らせる様にした。これをサブモデルとして組み入れて地表水の流出のシミュレータを作成し、降雨から地表水、土壌水までの水の移動を再現した。
- ・ 樹木成長のシミュレーションと水移動のシミュレーションに基づいて炭素蓄積量の予測を行っ

た。炭素プールとして、Debris、土壌炭素を考慮し、既存の分解モデルをもちいて定式化した。これら複数のシミュレータの統合に際しては、森林の炭素アカウンティング様に開発されたシミュレーションモデルを枠組みとして利用した。

- ・ 荒漠地での植林の具体的な事業を想定し、そのプロジェクトでの固定可能な炭素量を実際の植栽実験の結果や、上記の樹木成長シミュレーションの結果等を参考にしつつ、推定した。発生するCO₂量とコストも概算し、CO₂の固定効率を求め、固定コストを算出した。
- ・ 荒漠地での植林について、既存のデータベースを利用し、西オーストラリアや全球レベルで実施可能な条件に合致する土地面積を概算し、それぞれのレベルでの固定ポテンシャルを評価した。
- ・ 上記の作業の基礎として、シミュレータを効率的に作成するためのフレームワークを作成した。シミュレーションモデルに含まれる変数の一覧表からデータ入出力用のプログラムのソースコードを自動生成する補助的なプログラムを作成し、シミュレータのデータ入出力の統一的な管理、複数のシミュレータ間のデータの交換、さらにシミュレーションプログラム実行のモデル検証の自動的を行えるようにした。

4. 考察

(1) 荒漠地でのシステムの植林のための水・塩制御技術の開発に関する研究

1) 広域水・塩移動解析モデルの開発および荒漠地における水収支測定と制御

観測データを解析した結果、中規模流域における降水量に対する表面流出率は最大で19%、広域流域では2003年11月の降水イベント時には1.11%と見積もられた。これらのデータは荒漠地において植林地に利用可能な水量を推定するための情報となりうる。水移動モデルの精度を高めた結果、対象地付近で使用するパラメータとして、粗度係数 $n = 0.015$ 、浸透補正係数 $PR = 9.0$ を決定した。

2) 荒漠地における土壌環境測定およびモデル化

① 荒漠地におけるリター・土壌の炭素動態解析

解析の結果、林地からはかなりの量のリターが流出しており、林地での炭素循環、栄養塩の循環に大きな影響を与えていると考えられる。したがって、疎林が多い乾燥地の炭素動態を解析するには、このようなリターの流出現象を考慮した解析手法が必要である。また、リターの一部が流入すると考えられる塩湖においては、局所的に二酸化炭素の20倍の温室効果をもつメタンの発生を確認した。地域全体の炭素動態把握のためには、林地だけでなく、裸地、塩湖といった植生が存在しない箇所の炭素動態を含めた総合的解析が必要と考えられるが、本研究ではそのためのフレームワークを構築した。

② 保水材を用いた土壌水分移動の制御方法に関する検討

保水材の投入に関しては、期待される降雨強度において、第1に保水材の位置まで水分が十分にいきわたること、第2に、保水材に水が入った場合に、蒸発抑制効果が十分にあること、の2つを考える必要がある。実際の適用には、少量の降雨でも保水材に十分な水がいきわたるために、保水材の上の土壌の透水性を改良すること、保水材からの水分放出抑制のためには、保水材をまとまった層として設置し、周辺土壌への水分の拡散を抑制することが有効であると考えられる。後者の知見はフィールドでの結果と一致する。

3) 実証植隣地の選定、植林、測定方法の検討による半乾燥地域への技術展開

① パイプ植林方法＋ノーザン地域の植林木の樹種特性

栽培実験の結果から、樹木自らが持つ根系構造と人為制御による可塑性の程度が明らかになった。塩害疲弊農地を植林地としたときに、根域を制限し地表に集積した高濃度の塩を回避することと、速く根を垂直方向に伸長させて、できるだけ深いところの土壌水を利用することは必須である。*E. camaldulensis*はこれまでの我々の乾燥地での研究から、成長が速く、炭素固定能力が高いことが明らかになってきている。同種は塩害地での根域制御パイプ植林においても、1) 直径10 cmのパイプで根域を制限したときも、直径30 cmのパイプを適用した時と同等のバイオマスを得ることができ、植林のコストを低減できる。2) その際に他種よりも大きなバイオマスを得られる。3) 根の垂直方向への伸長速度が速い。4) 根系の垂直方向への伸長を促進するための細いパイプの適用に対しても、根の垂直方向の分布に対して大きな可塑性を示し、深いところの根量を大きくできる。といった、ストレス回避能力を付加した苗木育成に適した性質を持つことが明らかになった。これらの結果から、*E. camaldulensis*は乾燥地だけではなく、塩害地での植林樹種としても適していると言える。また、成長速度において*E. camaldulensis*に劣るものの、*P. radiata*はより細いパイプを用いても成長量が減少しないため、*E. camaldulensis*よりも省力的な栽培が可能な樹種である事が解った。

② 概要＋水収支

水収支検討結果より、流域内の塩害発生危険性をもつ余剰水を植林によって排除する可能性が示された。今回設定した流域内の約20%に植林されているが、その20%の植林面積で総降雨量の40%を蒸散可能なことが明らかとなった。本研究では土壌中の含水率や蒸発を把握していないため、まだ完全な水収支を取れていない。しかし本研究によって半乾燥地におけるアグロフォレストリー事業において、植林に利用できる水の量や、植林による湛水害・塩害進行の抑止効果を議論する際の基礎データになりうる。

(2) 荒漠地でのシステムの植林のための環境適応型植林・土壌制御術の開発に関する研究

1) 荒漠地における樹木成長に及ぼす環境条件影響評価とこれに基づく樹種選択・植林法提案

① 樹種選択・植林方法

サイトCおよびサイトTの植林実験とその後の成長経過を解析した結果、次のことが明らかになった。ハードパンが存在し、従来は植栽不可能と考えられていた場所であっても、樹木が根系を発達させるために必要な土壌層を確保すれば植栽が可能である。植栽孔は大きいほど良いが、孔の直径ではなく深さ、特にハードパンを貫通していることが植栽木の生存および成長に大きな影響を与える。周辺の生態系を攪乱させないため、当該地域に生育している郷土樹種から植栽樹種を選択した。成長を解析した結果、*E. camaldulensis*、*C. cunninghamiana*、*C. obesa*が生存率、成長量とも大きく、乾燥地に植林する樹種として有望である。灌水方法を検討した結果、*E. camaldulensis*については苗木に乾燥耐性を与えるためにハードニング処理を行い、植栽直後に灌水するのみとする方法が最も効率的である。*Casuarina*属2種は根系が浅いため、乾期の時期には灌水を継続する必要がある。あるいは、地下水位が浅い地域に植栽するのも1方法である。

現地の自然植生を構成している*Acacia*類の植林方法を構築するため、4樹種の発芽試験を行った。4樹種ともそのまま播種したのでは、ほとんど発芽しない。5種類の発芽前処理法の効果を比較した結果、爪切りで1部を切除する処理と1分間熱湯に浸す処理が最も効果が高かった。発芽特性を比較すると*A. aneura*は3日ほどで発芽を終えるが、*A. acuminata*および*A. lasiocalyx*は発芽勢が揃わず、すべてが発芽するには7~10日かかることがわかった。*A. saligna*はどの方法を用いても発芽率が向上せず、種子の一部を切除する処理で約50%の発芽であった。

*A. aneura*の育苗法を検討した結果、容器・灌水法などの処理にかかわらず、地上部の成長は遅かった。しかし、下から水を吸わせる地下水型灌水法では根系の成長が大きかった。特に地表付近および容器底で根系のバイオマスが大きい傾向が認められた。箱形の容器では横に根系を広げる余地があるにもかかわらず、主根・二次根とも下方へ伸長した。発芽後4週間で根系は深さ50 cmの容器底まで伸長したことから合わせ、乾燥地植林における根域確保の重要性が明らかになった。これらの成果を元に植林技術を改良し、普及に努める。

② 環境条件影響評価

*E. camaldulensis*はオーストラリア内陸部に自生することから耐乾性が高い樹種と考えられていたが、さらに光要求性も非常に高いことがわかった。よって当該樹種の植栽には葉の相互被陰の生じない粗植が適切であり、植栽本数が200本 ha^{-1} 程度（葉面積指数<1）とし、土壌水分条件は-1.5Mpaを下限とした立地での植林が適切であろう。また耐塩性も比較的高いことから、疲弊農地のリハビリテーションにも適していると考えられる。

2) 荒漠地植林再生バイオマスの広域変動判定技術の確立に関する研究

植林木の年成長量が平均 $2.19 \pm 1.25 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ で求められた。オーストラリアやブラジルの熱帯林植林に比べれば絶対値は少ないが、降雨量100mmあたりの成長量は同等であった。ベースラインの値は-0.3~4.44 $\text{Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ と計算され、東オーストラリア半乾燥地とほぼ同等の値を示した。

林冠閉鎖度とベースラインの回帰分析によって両者に有意な相関関係があることが示されたことにより、ベースラインを単純な関数で表すことができるようになった。既往研究では胸高断面積合計を用いて実施していたため広域推定が難しかったが、本研究では林冠閉鎖度をパラメータとしているためリモートセンシング技術を用いて広域推定が可能であることが示された。このことより、デジタル化した航空写真を用いたベースライン分布推定が可能となった。

本研究によって求められた植林木の年成長量、ベースライン分布、既往研究にて求められたバイオマス分布を用いて植林展開可能面積と炭素固定量予測が可能となった。試算結果より、植林期間を長く取れば取るほど多くの面積に植林を実施できることが分かった。20年の植林期間ではオーストラリア温帯林の1/3程度、50年の植林ではオーストラリア温帯林程度の炭素固定量を計上できることが分かった。

研究対象地と同一の生態系区分となっているMurchison生態領域にて、仮に植林展開可能面積の割合と単位面積当たりの炭素固定量が同一と仮定すると、2800-3200 kt-Cと莫大な炭素固定量を計上できることも分かった。ただし、実際の植林展開には水収支・土壌型・種の多様性について考慮する必要があるため、上記試算のような炭素固定量を単純に得ることはできないと考える。今後は試算した植林展開可能面積のうち実際に何%が水収支・土壌型・種の多様性の観点から利用可能であるか調べる必要があると考えられた。

(3) 荒漠地植林技術のプラットフォーム構築に関する研究

荒漠地の特徴を反映するため、乾燥の効果を考慮した光合成シミュレータ、樹木の生長シミュレータを作成した。西オーストラリア、レオノラ地区での*Eucalyptus camaldulensis*に対するガス交換実験の結果を再現するようにパラメータを設定したが、測定日ごとの乾燥の状況を樹木の水ポテンシャルで表現してパラメータの依存性を定式化した。このシミュレーション結果は樹幹流の測定値の特徴をよく再現できたが、定量的に一致させるためには、さらなるパラメータの調整が必要であった。樹木の生長については、樹木の生長段階のデータしか得られていないが、シミュレーションは実測値をよく再現していた。樹木の成長が止まった段階でのサイズは実測できなかったが、樹木のサイズとしては妥当な値であり、この成長シミュレーションは有効であると期待できる。

水移動のシミュレーションでは、土壌水移動のシミュレーションで、降雨量と土壌水分の実測データとの比較から表面流出水の割合を算出することができた。地表水の移動シミュレーションでもほぼ同じ割合の表面流出が計算結果として得られている。通常の降雨では地表水の移動の計算は比較的小さいサイズ(100m程度)で十分であったが、大きな降雨に際して起こる大規模な表面流出については今回のシミュレーションでは扱うことができなかった。この計算での植栽木への水の収集量は下限値をおさえていると考えられる。

炭素の蓄積のために加えた既存のシミュレータは、一部は西オーストラリア、レオノラ地区でのデータと整合することが確認できたが、長期間の実測との比較はできていない。このため、固定効率の評価等では炭素固定量として計上しないこととした。

植林事業を想定したCO₂の固定効率、固定コストの算出の算出結果から荒漠地への植林事業はCO₂固定に対して有効で大きなポテンシャルがあるが、比較的高いコストがかかることが明かになった。事業実施に際してのCO₂発生量・コストの算出には現時点でのデータを用いているが、これらは実施場所や時期によってCO₂発生量のエネルギー源の構成比率に対応した変化や価格の変動の影響を受ける。特に地代・人件費については大きな変化が予測され、その信頼性は限定的なものである。

上記の作業の基礎として、フレームワークを作成した。今回のシミュレータ構築や計算の実行に実際に利用してその有用性を確認した。シミュレーション実行時には計算結果がモデル基礎式を満たしていることを自動的にチェックさせた。これは本来はプログラム作成時のバグ対策として用意したものだが、モデルの基礎式が実際の幅広い条件のうち、特別な組み合わせに対して不適切な値を示すケースをチェックでき、モデルの検証にも役立つことが分かった。

(1)水・土壌、(2)植生、(3)プラットフォーム、の各グループは、研究開始当初の分野を鑑みてグルーピングしたものであるが、研究の進展に伴い、目的意識の融合に加え、各要素技術自身の内容とその問題点も相互に理解が進み、分野を超えた研究グループとなってきた。本研究の各グループにより開発された技術と達成状況を表1に示す。

乾燥地(Sturt Meadows)では中規模流域と広域の水収支測定を行い、降水量に対する表面流出量とその割合を定量評価した。また観測結果から水・塩移動モデルを構築し、乾燥地における最適植林地選定への有益な情報を提供することが可能となった。この水移動モデルは半乾燥地にも応用され、Wickepin植林地においても同様のモデルが作成された。

表1 本研究により開発された技術と研究達成状況 (a)乾燥地 (Sturt Meadows) (b)半乾燥地 (Wickepin)

(a)	開発技術	研究達成状況	(b)	開発技術	研究達成状況
	水挙動予測	- 中規模流域、広域水収支測定を行い、乾燥地における降水量に対する表面流出量の貴重なデータを記録。 5×4kmの中規模流域表面流出モデルを完成。 - 表面流出モデルを応用し、最適な植林地と水の情報を提供。		水挙動予測	- 降水量・水収支量・地下水位の経時観測に基づく、表面流出水の定量的把握による植林利用可能水量の推定。 2×3kmの表面流出と土壌中水移動のモデル作成・解析。 - 植林地の水収支と炭素固定量から、水利用効率を評価。
	樹種選定	<i>E. camaldulensis</i>、<i>C. cunninghamiana</i>が乾燥地植林に有用な可能性を示唆。 <i>E. camaldulensis</i>のバイオマス成長量と水利用量の比から水利用効率を求め、炭素固定に必要な水の量を指標化。 - 樹種による根域発達状態の違いを評価。		樹種選定	- 植林地における樹種別の枯死率評価と毎木調査を実施。 - 塩集積地における様々な樹種の成長量と半枯死塩濃度の関係を評価。 <i>E. camaldulensis</i>は耐ストレス、高成長量。
	植栽方法および土壌改良	- ハードパン爆破による植栽の有効性を確認。 - 保水材の効果を確認。層状に重ねた方がよい可能性を示唆。 - ベースライン評価を高精度化し、樹種選抜時と混植時の植林効果有効面積をSTMとWAで評価。		植栽方法および土壌改良	- 客土・パイプ・土壌構造制御を利用した塩回避植林を実施。 - 室内栽培実験から成長促進パイプの有効性を確認、<i>E. rudis</i>×<i>E. camaldulensis</i>が最適樹種と評価。

植林樹種については、乾燥地では*E. camaldulensis*と*C. cunninghamiana*が乾燥地植林に有用な可能性が示唆され、半乾燥地では*E. camaldulensis*の生長量の大きさと塩濃度に対する半枯死率の低さが示された。また植林樹種の水利用効率が求められ、システムの植林による炭素固定に必要な水の量を指標化した。

植栽方法に関しては、乾燥地ではハードパン破碎植栽の有効性が示された。また半乾燥地では湛水による塩集積が植林木の枯れの原因と考え、塩回避のためにパイプ植栽を実施した。また塩害地を想定した各樹種の室内栽培実験では、成長促進パイプの有効性と*E. rudis*×*E. camaldulensis*が最適樹種と評価された。

本研究結果を鑑みて、開発された技術を応用したときに見込まれる炭素固定量を表2に示す。西豪州では、乾燥地で700 Mt-C 20yr⁻¹、半乾燥地で4～27 Mt-C 20yr⁻¹の炭素固定が見込まれる。また全球規模では、乾燥地で19,000 Mt-C 20yr⁻¹、半乾燥地で210～1,400 Mt-C 20yr⁻¹の炭素固定が見込まれる結果となった。本研究は食料生産のための農地利用の難しく広大な乾燥地や半乾燥地を炭素吸収源として利用することであり、本研究技術の応用は地球環境政策上の大きな貢献となり、技術展開における日本の大きなイニシアチブとなりうる。

表2 荒漠地でのシステムの植林によって見込まれる炭素固定量

テーマ	荒漠地植林	(小麦) 農地における塩害防止部分植林
対象地面積 (荒漠地/収獲面積) (km ²)	2,500 (実験地) 171万 (西豪300 mm/y以下) 4,700万 (全球)	40,000 (西豪小麦) 210万/1,400万 (全球小麦/農地)
吸収ポテンシャル (Mt-C 20yr ⁻¹)	700 (西豪200-300 mm/y) 19,000 (全球)	4～27 (西豪) 210～1,400 (全球)
備考	西豪では降雨200～300 mm地域 (112万 km ²) を本技術適用可とした。世界でも同一の割合を仮定。草原から温帯林への転換時の炭素固定量を10000 t C/k m ² とする。平均250mmの25%の降雨を集中利用。温帯森林形成のための降雨量を1000mm/yとしこれに対する比を10000 t C/k m ² に乗じて算出。	塩類化割合の仮定：西豪：対象小麦農地の1割（最小）～7割（moderate塩類化の公表値、最大） 全球：小麦農地あるいは全農地の1割と仮定 植林面積の仮定：塩類化農地の2割に植林：成長データ、水収支、50年間西豪塩害面積予測を根拠樹木成長による固定量の仮定：5000 t C/k m ² /20y（提案技術採用時： <i>E. camaldulensis</i> 栽培データより。なお、非採用時は生長速度半減）。

5. 研究者略歴

テーマ代表者：小島紀徳

1953年生まれ、東京大学工学部卒業、工学博士、現在 成蹊大学理工学部教授

主要参画研究者

(1)：小島紀徳（同上）

(2)：安部征雄

1943年生まれ、東京教育大学農学部卒業、農学博士、現在 筑波大学特任教授

(3)：江頭靖幸

1962年生まれ、東京大学工学部卒業、工学博士、現在、大阪大学基礎工学部 准教授

6. 成果発表状況（本研究課題に係る論文発表状況。）

(1) 査読付き論文

- 1) K. Shiono, Y. Abe, H. Tanouchi, H. Utsugi, N. Takahashi, H. Hamano, T. Kojima and K. Yamada: Journal of Arid Land Studies, 17-1, 11-22 (2007) “Growth and Survival of Arid Land Forestation Species (*Acacia aneura*, *Eucalyptus camaldulensis* and *E. salubris*) with Hardpan Blasting”
- 2) T. Kojima, H. Hamano, Y. Abe, H. Tanouchi, Y. Egashira, M. Saito, J. Law, N. Takahashi and K. Yamada: J. of Arid Land Studies, 16-3, 167-174 (2006) “Basic Data of Research Project on Large Scale Afforestation of Arid Land for Carbon Fixation near Leonora in Western Australia”
- 3) H. Tanouchi, H. Utsugi, N. Takahashi, H. Hamano, S. Kawarasaki, T. Kojima and K. Yamada: J. of Arid Land Studies, 15-4, 267-270 (2006) “Water Use Efficiency of Trees in Arid Lands: Plasticity to Water Conditions”
- 4) K. Yamada, T. Kojima, Y. Abe, Y. Egashira, H. Tanouchi, N. Takahashi, H. Hamano and K. Tahara: Energy and resources, 26-6, 435-441 (2005) “Establishment of a CO₂ fixation system by afforestation on arid land”
- 5) Y. Egashira, D. Tomii, K. Ueyama, N. Takahashi, T. Kojima, Y. Abe, M. Saito and K. Yamada: Journal of Chemical Engineering of Japan, 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”

全査読付き論文（56本）のうち、主要な論文（5本）のみを掲載。全査読付き論文のリストは、詳細版を参照。

(2) 査読付論文に準ずる成果発表（社会科学系の課題のみ記載可）

なし