

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名

乾燥地植林による炭素固定システムの構築

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名（研究機関名・職名は研究参加期間終了時点）

研究代表者	山田 興一（信州大学 繊維学部 教授）
主たる研究参加者	小島 紀徳（成蹊大学 工学部 教授）
	安部 征雄（筑波大学 農林工学系 教授）
	小宮山 宏（東京大学大学院工学系研究科 教授）

3. 研究内容及び成果：

多くの地球温暖化対策の中でも、植林による大気中炭素の陸上固定は経済的かつ環境に与える負荷が低い方法として期待される。しかし、温暖化抑制に寄与するためには大規模に植林を行う必要があり、そのための土地の確保が必須である。樹木の生育環境が良い地域は食糧生産など他の土地利用との競合があり大面積を確保することは望めない。一方乾燥地、半乾燥地は地球上の陸域面積の3~4分の1を占めながら、その大部分は未利用のまま放置されている。この(半)乾燥地を植林により大規模に緑化することが出来れば、大きな炭素シンクとなり、温暖化を緩和することが出来ると期待される。さらにはこのようなプロセスにより、緑化面積の持続的な拡大も可能と期待される。

しかし、(半)乾燥地では樹木の成長に必要な水が不足しており、ただ植えたのでは樹木の持続的な成長は望めない。また、水不足以外にも浸食土壌、塩集積などの環境条件がある。それらの不利な条件を最小限の投入エネルギーで改変し、少ない降雨を最大限に利用することが乾燥地緑化成功の鍵となる。これまでも乾燥地の緑化に関して多くの要素研究がなされてきたが、温暖化対策として持続的な炭素固定を達成するためには、従来の要素技術を参考にしつつ、緑化を総合的に捉えた手法が必要である。

本研究の目的の一つは、オーストラリア乾燥地における大規模植林により持続的な炭素固定システムを構築することにある。その為には、様々な要素研究、すなわち、気象条件、土壌構造、地形、水移動、塩移動、植物生理、森林構造、炭素循環などに関する多くの調査及び要素研究とその統合が必要である。本プロジェクトで考える炭素固定システムは、大気、土壌及び植生の3つのサブシステムから成り、持続的な炭素固定システムを構築し、その結果を有効に利用できるようにするためには、3つのサブシステム間の物質およびエネルギー輸送を明らかにする必要がある。本研究の第二の目的は、対象地域内にある様々な条件に適した緑化技術を選択し、または新規な技術を提案し、それらを組み合わせたシステムアプローチ手法を実証することにある。最終的には、全球的に広がる多くの乾燥、半乾燥地の植林手法を提案し、全球的な炭素固定シナリオを構築することである。

国内では信州、成蹊、筑波、大阪、静岡、東京大学、及び森林総合研究所、産業総合研究所から、工学、農学及び林学の分野に属する研究者が多数参加している。また、現地の大学及び協力研究者と共同体制を取りながら研究を進めている。研究体制は、全体システム構築、土壌システム研究、植生システム研究、大気システム研究の4つのグループから

構成され、各グループが研究目的を明確にしつつ、有機的に結合するよう運営されている。

西オーストラリア州レオノラ近郊の乾燥地（Sturt Meadows、平均年間降水量 200mm 前後）において、塩湖を中心とした流域内およそ 50km 四方を主調査実験地として選定した。また、主調査地との比較を行うために、Leonora から南岸の Esperance にかけて降水量の異なる 3 つの調査地（Salmon Gums - 300mm、Scaddan - 350mm、Esperance - 400mm、数値は平均年間降水量）を設けた。これらの比較調査地では、予め植林されていた樹木の成長測定、土壌水分、地下水位の測定を行い、異なる環境条件が樹木成長に及ぼす影響を把握した。

主調査地では、地形、植生を考慮して 12 の調査サイトを設けた。生態環境を把握し、また後述する緑化シミュレータのパラメータとして利用するために、これらの調査サイトにおいて各種の基礎データの測定を行った。基礎データ取得の概要は以下の通りである。

（１）植生

毎木調査、伐倒調査を行い、各サイトの現存植生量、成長速度を推定した。また衛星データ、航空写真データと関連させることにより、広域の植生分布を明らかにした。Eucalyptus camaldulensis と Acacia aneura の樹液流量変化及び自記式デンドロメータによる肥大成長の連続測定を行った。その二樹種については、光合成、蒸散、幹呼吸、葉水ポテンシャルなどの生理特性およびリター落下量、リター分解速度の測定も行った。

（２）土壌

粒度分布、嵩密度、水分特性、透水係数などの土壌物性、ハードパンまでの深さを各サイトで測定した。また pH、EC、土壌炭素、窒素、交換性陽イオン、可給態リン、硝酸態、アンモニウム態窒素などの分析を行い、土壌化学性に関するデータの蓄積を行った。TDR 土壌水分計により各サイトの地温、土壌含水率の連続測定を行った。さらに土壌呼吸速度の測定を定期的実施した。降雨の流出率を把握するために、塩湖及び天然の溜池（Jims pool）において水収支観測を行った。

（３）気象、その他

日射量、温湿度などの気象観測を 2 地点で行うとともに、各サイトで降雨量観測を行った。約 60 箇所の井戸の水位、水質を分析し、良質な水資源の所在を把握した。ユーカリ天然林、植林サイトの炭素フラックスを小型飛行機、及びタワーを用いて測定した。空中写真を全域で撮影し画像及び標高データを取得した。また、植林樹木の成長に伴う鳥の飛来や微生物環境の変化など、生態系の変化の追跡も開始した。

これらの調査に加え、本プロジェクトでは 8 つの植林サイトを設け植林試験を行った。少ない降水を有効に利用するための主な土壌改良技術として、降雨時の表面流出を捕集するためのバンク造成、及び土壌深部への水の浸透を可能にし、根の伸張領域を拡大するためのハードパン破碎を提案し、導入した（Site B、C、D、T）。また岩盤上に 15cm 程度の表土を有する地域での土壌改良法として、上流側の表土を剥ぎ下流側に盛りバンクを造成する方法を提案した（Site E）。バンク上に植林し、バンクにより捕集した流入水を樹木成長に利用するというものである。その他、灌水頻度を段階的に変え、供給水量と樹木成長の関係性を把握するための試験（Site A）、既存の環境を利用し最小限の投入エネルギーでの炭素固定量増加を目指した補間植林試験（Site F）、新規無機保水材として研究室レベルで提案された焼成ポーキサイトの実証試験（Site G）も行った。

最も大規模な植林サイトである SiteC では 11 樹種、合計約 700 本の樹木が植林された。試験開始から約 4 年が経過し、植林樹木は良好に成長しており、導入した土壌構造改良、集水技術の有効性が実証された。植林 3 年後に *Eucalyptus camaldulensis* の根を観察したところ、根は 3m 以上の深さに達し、また横方向の根は破碎時に形成されたハードパンのひびに入り込んでおり、ハードパン破碎が樹木成長にとって有効であることが確認された。成長速度は樹種によって異なり、*Eucalyptus camaldulensis*、*Casuarina obesa* 及び *Acacia aneura* の三種が、SiteC の植林樹種の中では成長が速かった。供給水量と成長速度の関係が樹種毎に得られ、樹種間の違いが明らかになった。またその樹種間の優劣は植林法によって異なることが分かった。この結果と根堀調査により確認された各樹種の根の展開パターン、土壌水分と肥大成長パターンから、緑化に適した樹種及びその適した植林法が明らかになった。

本プロジェクトでは、樹木による炭素固定を、土壌、植生、大気の 3 つのサブシステムから成る一つのシステム（炭素固定システム）として捉え、気象条件をインプットとし、そこから期待される炭素固定速度を推定するために、各サブシステムを数式的に表現し、それらを結合した緑化シミュレータの構築を行った。現段階では、植物の成長を制限している第一要因である水の移動を中心として単木の成長速度を予測するシミュレータの構築が完了した。これにより、植林技術を横並びで評価し、最適な組み合わせを選択することが出来、LCA と組み合わせ、植林技術の効果と費用を分析し、実行可否の意思決定を行うことが出来る。

シミュレータ本体はサーバー上で管理し、利用は WEB を経由して行う WEB アプリケーションとしてのシミュレータプラットフォームの実装を行った。主調査地で取得されたパラメータをデフォルトとして与えているが、パラメータを換えることにより、異なる地域、樹種についても計算でき、利用可能性が拡がると期待される。

その他、SiteC と SiteE の建造時の炭素放出量を計上し、それを基礎データとして、測定した成長速度から両植林法を適用した場合の炭素固定効率を計算した結果、SiteC タイプでは 32、SiteE タイプでは 49 と計算された。

単木の炭素固定量の推定から、それを広域に展開し、対象乾燥地での炭素固定ポテンシャルを推定するための取り組みも行った。対象地域での利用可能水量及びその地域分布を明らかにするために、広域の水収支を観測するとともに、100km 四方規模の表層水移動シミュレータの開発も行った。衛星データ解析により求めた植生分布、土壌深さ、土壌物性のゾーニング、また土壌の塩濃度分布も考慮し、植林可能地域の選定、炭素固定ポテンシャル分布の推定も試みている。

より広域（オーストラリア全土、全球）の炭素固定ポテンシャルを推定するためには、異なる地域でのデータの取得、蓄積、推定法の確立が望ましいが、まずは対象地のみから得られたデータを用いて、西オーストラリアでの炭素固定ポテンシャルの推定を試みたところ、年間降水量 200 ~ 300mm の地域を利用して、約 0.3 億 t-C/y の炭素固定速度になると計算された。

以上、本プロジェクトの結果をまとめると以下ようになる。

対象乾燥地の土壌、樹木を中心とした生態系、気象に関する調査をほぼ完了した。

乾燥地緑化を目的とした集水、土壌改良、樹種選定手法を提案し、確立した。植林樹木の順調な成長により乾燥地植林法が実証された。また炭素固定効率は約 40 倍と推定された。

炭素固定シミュレータに関しては、光合成速度予測シミュレータの開発を終了した。成長速度予測は今後行う予定である。

炭素固定ポテンシャルは、主調査地で 2Mt-C、W.A. で 600Mt-C、固定コストは、15,000 円 / t-C と推算された。

地球規模への適用シナリオは作成するための参考データが得られた。

4. 事後評価結果

4 - 1 . 外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果の状況

乾燥地、半乾燥地は地球上の陸域面積の 3 ~ 4 分の 1 を占めながら、その大部分は未利用のまま放置されている。この(半)乾燥地を植林により大規模に緑化することが出来れば、大きな炭素シンクとなり、温暖化を緩和することが出来ると期待される。

しかし、(半)乾燥地では樹木の成長に必要な水が不足しており、ただ植えたのでは樹木の持続的な成長は望めない。また、水不足以外にも浸食土壌、塩集積などの環境条件がある。それらの不利な条件を最小限の投入エネルギーで改変し、少ない降雨を最大限に利用することが乾燥地緑化成功の鍵となる。本研究の目的の一つは、オーストラリア乾燥地における大規模植林により持続的な炭素固定システムを構築することにある。その為には、様々な要素研究とその統合が必要である。

本研究の第二の目的は、対象地域内にある様々な条件に適した緑化技術を選択し、または新規な技術を提案し、それらを組み合わせたシステムアプローチ手法を実証することにあった。

国内では信州、成蹊、筑波、大阪、静岡、東京大学、及び森林総合研究所、産業総合研究所から、工学、農学及び林学の分野に属する研究者が 96 名参加した大グループとなった。更に現地の大学及び協力研究者と共同体制を取りながら研究が進められた。

西オーストラリア州レオノラ近郊の乾燥地 (Sturt Meadows、平均年間降水量 200mm 前後) において、塩湖を中心とした流域内およそ 50km 四方を主調査実験地として選定し、他に主調査地との比較を行うために、降水量の異なる 3 つの調査地を設けて、予め植林されていた樹木の成長測定、土壌水分、地下水位の測定を行い、異なる環境条件が樹木成長に及ぼす影響を調べている。

計測量は植生量、成長速度、広域植生分布、特定の樹種については、光合成、蒸散、幹呼吸、葉水分ポテンシャルなどの生理特性およびリター落下量、リター分解速度の測定も行っている。

土壌については、粒度分布、高密度、水分特性、透水係数などの土壌物性、ハードパンまでの深さ、pH、EC、土壌炭素、窒素、交換性陽イオン、可給態リン、硝酸態、アンモニウム態窒素などの分析を行い、土壌化学性に関するデータの蓄積を行っている。TDR 土壌水分計により各サイトの地温、土壌含水率の連続測定も行った。さらに土壌呼吸速度の測定を定期的実施したほか、降雨の流出率を把握するための塩湖及び天然の溜池 (Jims pool)

における水収支観測も行われた。

更に、気象、その他については、日射量、温湿度などの気象観測を 2 地点で行うとともに、各サイトで降雨量観測を行ったほか、約 60 箇所の井戸の水位、水質を分析し、良質な水資源の所在を把握している。さらにユーカリ天然林、植林サイトの炭素フラックスを小型飛行機、及びタワーを用いて測定したほか、空中写真を全域で撮影し画像及び標高データを取得している。固定炭素量が灌漑水量の 1.4 乗に比例すること、ユーカリの木が根から地下水を吸い上げて、葉から大気中に水蒸気を放散するが、対象地区で雨量が 20～50% 増加することを見出したことなど、重要な成果である。更に本プロジェクトでは 8 つの植林サイトを設け植林試験を行っており、現在、想定されるほぼ全てのデータが実証的に取得され、当初の研究構想が殆ど満足されたことは、今後の応用展開に貴重な資料となろう。今後は、開発されたシミュレーションモデルの適用性を確認し、多くの地域に適用できるよう発展させて欲しい。

論文発表は国内 31 件、海外 8 件、招待・口頭発表は国内 105 件、海外 20 件、特許出願は国内 1 件、新聞・雑誌報道など 4 件、など成果は十分に挙がっている。

4 - 2 . 成果の戦略目標・科学技術への貢献

「資源循環・エネルギーミニマム型システム技術」の開発という本研究グループの戦略目標に対しては、よく適合している。地球温暖化抑止という国家的な大テーマに対しても、乾燥地植林の可能性に対して、科学的、技術的に途を拓いた意義は大きく、グローバルにも大いに評価されよう。この種の研究は長期の継続が必要である。今後もオーストラリア拠点の共同研究サイトとしての維持を含め、環境政策としての世界的サポートが望まれる。

4 - 3 . その他の特記事項（受賞歴など）

特になし。