

1. 乾燥地植林による炭素固定システムの構築

研究代表者 信州大学 山田興一

緒言

大気中の二酸化炭素濃度の増加による地球温暖化は、人間活動による膨大なエネルギー消費に端を発しており、現代が抱える地球環境問題の中でも最も解決が困難な問題とされている。大気中の二酸化炭素濃度の増加を緩和するには大きく分けて二つの方法がある。一つはエネルギーの利用効率を上げる、あるいは代替エネルギーを開発するなどにより、二酸化炭素の大気中への放出量を削減する方法であり、もう一つは大気中或いは排出源から直接回収される二酸化炭素を海洋または陸上に回収・固定する方法である。本研究プロジェクトでは、その中でも、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「植林による陸上炭素固定」に着目している。

地球温暖化の対策となりうる規模で炭素を固定するためには大規模に植林できる土地が必要となる。しかしながら、樹木の生育環境が良い土地は食糧生産など他の目的との競合があり、大面積を確保することは望めない。一方乾燥地、半乾燥地は地球上に陸地の3~4分の1の面積存在しながらも利用価値が低く、その大部分は未利用のまま放置されている。また、森林伐採、過放牧などによりこれらの土地はさらに拡大しつつある。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、例えば単位面積あたりの炭素固定速度は小さくても、全体として大きな炭素シンクとなり、地球温暖化を緩和することが出来ると期待される。

これまでも乾燥地の緑化に関しては多くの要素的、基礎的な研究がなされてきたが、それらはいくまでもその土地の環境改善が主目的であり、持続的な炭素固定を見据えたものではなかった。そこで本研究プロジェクトでは、従来の緑化技術に加え、乾燥地に適した新規な技術を提案、実証するとともに、乾燥地の気象、土壌、植生を調査し、それらを統合した持続的な炭素固定システムを構築することを目的とする。

研究対象地

主調査地として選定された Leonora (Sturt Meadows) は西オーストラリア州の内陸部にあり、乾燥地と半乾燥地の境界付近に位置している。平均年間降水量は 200mm 前後であるが、年毎の変動が大きく 500mm 以上になる年もある。夏の最高気温は 40 度を超え、降雨と極度の乾燥を繰り返すことにより、土壌が硬くしまっている地域が多い。そのため降水が土壌に浸透しにくく、表面流出により流れ去ってしまい、最終的に到達する塩湖で無駄に蒸発している。また現地特有のハードパンと呼ばれる不透水層が地下浅層に形成されており、降水が土壌に浸透したとしても、深層へ達することが出来ず、すぐに乾燥してしまう。このように降水の利用効率は極めて低くなっている。

植生は微地形による集水量の違い、ハードパンの有無、表土の厚さなどに大きく依存し、同じ地域内でも植生の多寡が大きく変化している。特にハードパンは根の深層への伸張を阻害し、植生を制限する大きな要因となっている。対象地の主な植生は、ワジ(降雨時のみできる川)沿いに密生するユーカリ低木林とハードパンが形成され表土の薄い地域に生

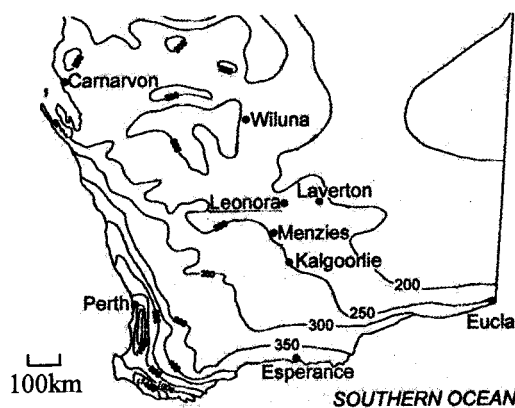


図1 降雨量分布と研究対象地

育するアカシア低木林である。また、塩湖の近くではメラルーカなどの塩生樹木が生育している。

主調査地以外に Leonora から南岸の Esperance にかけて 3 つの調査地 (Salmon Gums Research Station-300mm、Karingal-350mm、Agnew's Top Farm-400mm、数値は平均年間降水量) を設け、植林されている樹木の成長速度、土壌水分などを測定し、主調査地との比較を行っている。

植林実証試験

乾燥地に植林を行う場合、少ない降水を有効に利用することが最大の課題であり、対象地では、集中降雨時に起こる表面流出をいかに獲得し樹木の成長に利用するかが水利用の基本戦略の一つである。また獲得した水を保持するために、土壌の貯水容量を増加し、蒸発を遅らせるような土壌改良が必要である。

本研究プロジェクトでは表 1 に示すように、現在までに 8 つの植林サイトを設け、各コンセプトに基づき植林試験を行っている。表に各植林サイトのコンセプトと導入技術などを示す。導入された主な土壌改良技術は、降雨時の表面流出を捕集するためのバンク造成、土壌深部への水の浸透を可能にし、根が伸張できる領域を拡大するためのハードパン破碎である (Site B,C,D,T)。このうち Site C は最大の植林本数を持つサイトで、大規模緑化の可能性を検討するために設けられている。Site T は Site C とほぼ同様の技術を導入しているが、さらに実験的な意味合いが強く、初期灌水の仕方、植林密度、施肥の効果を把握するために設定されている。

Site E では、ハードパン破碎により土壌深部を利用可能にするのではなく、上流側の表土を下流側に盛り表土を厚くし、その上に植林を行っている。表土の厚さを 2 段階に設定し、表土の厚さが植林樹木の成長、土壌水分に及ぼす効果を明らかにする。また、盛り土をした幅広のバンク内への水の浸透を促進するための技術を導入し、その効果も明らかにしよ

表 1 植林サイトのコンセプト及び導入技術

Site	Concept	導入技術	植林開始時期	植林本数
A	異なる水条件 (灌水頻度)	灌水制御	1998年7月	80
		ハードパン破碎		
B	ハードパン破碎効果	ハードパン破碎	1999年7月	50
		バンク造成 (既設)		
C	大規模集水 大規模植林	大規模バンク造成	1999年7月	700
		貯水バンク造成		
		ハードパン破碎		
D	異なる集水法	マイクロキャッチメント	1999年7月	50
		ハードパン破碎		
E	土壌厚さの効果	表土層厚の増加	2000年9月	200
		バンク造成		
		バンクへの浸透促進		
F	補間植林	疎林に格子状に植林	2001年5月	120+ 種50箇所
G	無機保水材の施用	焼成ボーキサイトの混入	2001年5月	60
		異なる混入法		
T	SiteCのコントロール	大規模バンク造成	2001年7月	250
		貯水バンク造成		
		ハードパン破碎		
		施肥		
		灌水制御		

うとしている。Site F は既に植生が疎らに存在する地域に設定され、現有の環境を利用することにより、最低限の投入エネルギーで炭素固定速度を増加させる方法を見出すことを目的としている。Site G では、既に実験室レベルでは保水材としての利用可能性が検討されている焼成ボーキサイトを土壤に混入し、樹木の成長に対する効果を明らかにすることを目的としている。

植林サイトの一例として、図 1 に Site C の模式図を示す。表面流出をバンク上流部の V 字部分で捕集し、外側のバンクで囲まれたエリア内に導く。捕集された流出水は入り口で二手に振り分けられ、貯水バンクで囲まれた 12 個の pond 内に流れ込む。pond 内では縦 6~7 列、横 7~8 列の格子状にハードパンを破碎し、破碎によって出来た穴に複数の樹種が決められた配置で植えられている。pond 5 のみはハードパンの破碎を行わず植栽を行った。Site C の植林は 1999 年 5 月に行われ、気象観測、流出入水量、TDR による土壤含水率などの測定が行われており、また、数ヶ月毎に各植林樹木の成長を記録している。

図 2 に降雨後の Site C の様子を示す。上流側（図の上側）から Site C を跨ぐようにワジが形成されており、集中的な降雨時にはワジからの溢流が Site C に流れ込む。図はその表面流出がうまくバンク内に取り込まれ、各 pond に捕集されていることを示している。ハードパンの厚さによっては破碎時にハードパンが貫通されず、そのような pond では、図 2 の写真から分かるように、水が溜まってしまふ。但し、pond 5 のみは元々ハードパンを破碎していないため、捕集された流出水が土壤にも入り込めず、長期間に渡り湛水してしまう。そのため根の呼吸が阻害され枯れてしまう樹木が多く、pond 5 の植林樹木の生存率は他に比べて著しく低くなった。このように必ずしも水が獲得できれば良いわけではなく、土壤の透水性、保水容量を考慮して、貯水バンクの高さを調節する方法により、土壤環境に見合った量の水を獲得、貯留するように制御する必要がある。

図 3 に植林 10 ヶ月後の *Eucalyptus camaldulensis* の根の様子を示す。10 ヶ月間に地上部の樹高は 2.5m から 3.3m へと 0.8m 伸びたのに対して、鉛直方向には、根がハードパンの破碎により形成された穴に沿って伸び、長

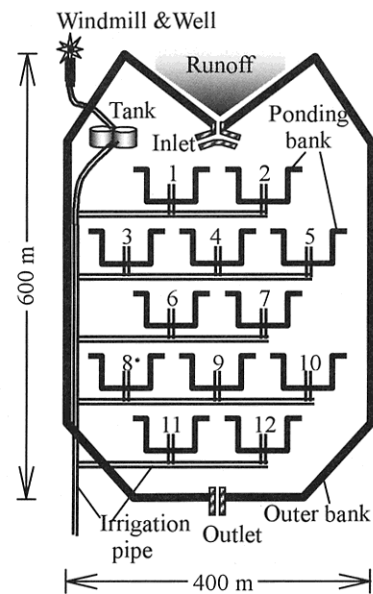


図 2 Site C 模式図



図 3 降雨後の Site C

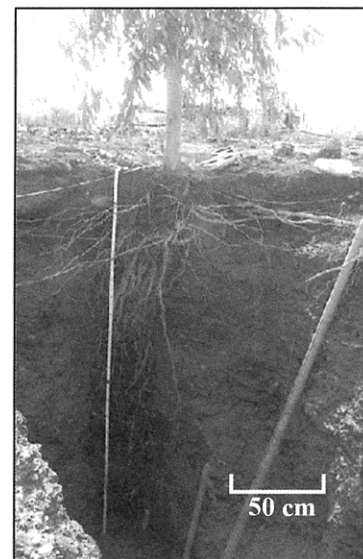


図 4 Site C 植林樹木の根の様子 (植林 10 ヶ月後, *E. camaldulensis*)

いものは 2m 以上あった。水平方向では表土とハードパンの境目を這うように伸びており、その長さは 3m 近くに達している。また、積層するハードパンの隙間に細い根が入り込んでいるのが確認された。

Site C で確認されたように、バンク造成、ハードパン破碎などの土壌改良は表面流出の獲得、植林樹木の成長に対して有効である。灌水に頼らず、表面流出水の獲得、地下水の利用により樹木が持続的に成長しうるか今後検討を行う必要がある。他の植林サイトでも土壌改良などが樹木の成長に及ぼす影響を明らかにし、導入技術の評価、提案された植林法の妥当性を検討していく。

炭素固定システムの構築

本研究プロジェクトでは、乾燥地植林による持続的な炭素固定の方法論を提案、実証するだけでなく、樹木による炭素固定という現象を、土壌、植生、大気の 3 つのサブシステムを統合した一つのシステム（炭素固定システム）として捉え、数式的に表現することにより、期待される炭素固定量を推定することを目的としている。これにより、植林のために導入された技術を横並びで評価することが出来、また、LCA 的な評価も可能になる。

図 4 に本研究で考える炭素固定システムのフロー図を示す。降雨を入力とし、最終的には植林による炭素固定速度を出力値として得る。サブシステム内の各現象を表現する数値モデルをシミュレータと呼び、例えば光合成シミュレータは土壌浸潤（蒸発）シミュレータが出力した土壌含水率を入力とし単木の光合成速度を出力する。

これらのシミュレータを構築するためには、現地の土壌、植生、気象に関する基礎データが必要となる。地形、土壌物性の違い、植生の違いなどを考慮して対象地に複数の調査サイトを選定し、基礎データ取得のための各種調査、測定を行っている。

図 4 中の右側に各シミュレータを構築する上で、また外部入力として必要となる主な調査、測定項目を挙げた。大気に関しては、気温、湿度、降雨量、風向、風速、日射量、水面蒸発量の経時変化が測定されている。水蒸気フラックス、CO₂ フラックスについては小型飛行機による計測を現在検討している。土壌に関しては、現在までに、嵩密度、粒度分布などの土壌物性、水分特性曲線、透水係数が測定されており、水移動に関するシミュレータの構築もほぼ終わっている。また、各サイトの栄養塩含有量などの測定は行っているが、塩移動シミュレータは構築するにいたっていない。各サイトでは石膏ブロックによる水分サクションの測定、TDR による地温、土壌含水率及び塩分の連続測定も行っている。

植生に関しては、現地の優先種である *Eucalyptus camaldulensis* と *Acacia aneura* について、現実の測定値として光合成、蒸散速度が測定されており、葉の光合成特性を知るための光合成曲線が測定された。土壌水分と光合成速度の関係は土壌と植物のシミュレータ間をつなぐために特に重要であるが、データの蓄積を重ね、関係を得るに至っている。その関係をもとに光合成シミュレータを構築する予定である。また、伐倒調査、毎木調査により、葉面積指数、相対成長関係が求められている。これらにより、単葉の光合成速度を単木あたり、もしくは土地面積あたりの光合成速度に換算することが出来る。樹木による正味の炭素固定量を知るためには、呼吸による損失分、及びリターによる損失分を把握する必要がある。呼吸に関しては、葉、枝、幹、根からの呼吸量を測定しなければならないが、実際にはそれら全てを測定するのは困難であるので、現段階では経験的なモデルを適用している。リターに関しては、単木のリター量を測定するための手法を提案し、実際に試行しているが、年間量を測定するには至っていない。リターの年間量、樹木の大きさによる関係式を得るには今しばらく時間を要する。

図 4 の中央のフローは単木の、或いは、ある植林法を適用した植林サイトでの炭素固定速度を得ることを目標としているが、これをさらに広域に展開し、対象乾燥地での可能炭素固定速度を推定したいと考えている。そのためには降雨時に表面流出がどこをどれくらい

流れるか、表面流出分布を知る必要があり、また、地下水を利用できるかどうか検討する必要がある。ランドサットデータや空中写真を用いた現地の植生分布の解析を行い、すでに入手している標高データを用いて表層水移動シミュレータから計算される表面流出分布と合わせ、植林可能地域、面積を推定するという試みにも着手しているところである。それらを知ることが出来れば、獲得できる水量、植林面積に応じて植林される樹種、その本数、適用されるべき土壌改良法などを決定でき、対象地域での可能炭素固定速度を推定できるものと考えられる。

まとめ

プロジェクト開始から約3年が経ち、植林された樹木の成長から導入された土壌改良技術の効果が評価できるようになってきた。引き続き観測を行い現導入技術の評価を行うとともに、さらに対象地に適した植林法を提案、実証し、大規模かつ持続的な炭素固定法を確立することを目指す。また、乾燥地での気象、土壌、植生に関するデータが蓄積され、本プロジェクトが提案する炭素固定システムの骨子が確立しつつある。さらにデータを蓄積することにより、完成に向かうものと期待される。また今後は広域への展開を視野に入れ、必要なデータの取得、モデルの構築を行い、対象地および最終的には地球規模の可能炭素固定速度の推定への適用も検討していくつもりである。

