

信州大学繊維学部 教授

山田興一

「乾燥地植林による炭素固定システムの構築」

研究期間：平成10年12月1日～平成15年11月30日

## 1. 研究実施の概要

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 (SiteE)。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を把握するための試験 (SiteA)、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 (SiteF)、新規無機保水材として研究室レベルで提案された焼成ボーキサイトの実証試験 (SiteG) 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砕時に形成されたハードパンのひびに入り込んでおり、ハードパン破砕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、利用可能性が広がると期待される。

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のようなになる。

- ・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.出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。

## 2. 研究構想

乾燥地・砂漠地における気象、生態系、水、土壌に関する研究を、要素研究として実施した例はこれまでも多く、蓄積も多い。しかしながら、持続可能かつ大規模なCO<sub>2</sub>固定法を確立することを目的として掲げると、これら相互の関係が明確ではなく、この目的を達成するために最適な研究がなされてきたとはいえない。本研究プロジェクトでは、この目的を明確に提示し、これを達成するための様々な要素研究を有機的に結合したシステム研究を特徴として掲げまた実践してきた。さらに、持続可能性、固定効率を総合評価することも目標に掲げ、持続可能かつ実現性の高いシステムの構築を目指した。

研究体制は、全体システム構築、植生システム研究、土壌システム研究、そして大気システム研究の4グループ構成とした（以下、全体、植生、土壌、大気と略称する）。与えられた5年間は、植物を相手にするプロジェクトにとって決して長いものではない。そこで、目標を達成するため、5年間の実施戦略を立案し、これに沿って研究を進めるとともに、研究の部分的修正、新たな目標設定を行った。これを以下に箇条書きで示す。

### (1)研究計画と実施概要

#### (1)－1 主要研究場所として年降雨量200mm程度の乾燥地（西豪州レオノラ地域）

を定め、植生、土壌にかかわる調査するための番号を打ったサイトをまず定めた。ただし、研究の進展から若干のサイトの追加を行った。この調査は、本研究開始時から終了直前まで行われたが、後半にはこれらの調査内容の多くを次項に述べるアルファベットを打ったサイトにも適用し、総合的な解析を行った。また、これらのサイトは、衛星あるいは空中写真による植生解析との比較にも用いた。またこれらのサイトにおけるデータは、最終的には定量的モデルシミュレーション（プラットフォーム）におけるインプット用の数字として用いられることとなる。

#### (1)－2 本来、このような乾燥地に適すると考えられる植林手法は、前項の調査結果に基づいて設定されることが通常であったと思われる。しかしながら本研究では、今まで試みられたことがない、あるいは定量的効果を評価したことがないような対策技術まで含めた、様々な可能性の高いシステム技術を、様々な分野の研究者間の経験に基づく深い討議から立案し、これを主要研究場所である乾燥地に適用した。

#### (1)－3 上記とは別に、乾燥地植林に適すると考えられる新規土壌改良材の開発を、研究当初より進めていたが、非常に高い可能性が示唆されたため、この成果を現地で試験するためのサイトも新たに加え、評価対象とした。また、

代表的な植林サイトであるサイトCにおいては、導入した手法（ハードパン破壊）の著しい成長効果を、より厳しい条件の下で試験するためのサイトも新たに設置したが、これは今後の新たな課題となった。

- (1)－4 植林による炭素固定量評価のために必要となる水移動に関しては土壌グループが、光合成・呼吸に対しては植生グループが中心にモデル化を進めたが、全体グループではこれに先立ちモデル（プラットフォーム）の全体像構築を進め、これを順次改める形とした。モデル化の進展に応じてシミュレータへの実装を行った。その際、プラットフォームとしてWebから利用可能なものとした。
- (1)－5 当初は土壌と全体とはマイクロな規模での水収支モデルの共同開発を行ったが、土壌についてはこれを広域モデルにつなげるとの方向性に至った。また植生で進めてきた衛星データによるバイオマス量評価手法も確立した。しかしながらこれらをさらに広域での植林可能性予測に結びつけることは十分なされておらず、今後の目標となった。
- (1)－6 全体でのもう一つの役割はLCA評価である。これについては、本研究での代表的な植林サイトであるサイトCに関わる評価は行われたが、今後はより類型的な、様々なターゲット、手法に関しても評価を進める必要がある。バイオマス生産などに関わる新たな発展も今後の目標となった。
- (1)－7 上記のような様々な研究を行ってきた乾燥地に加え、年間降雨量500mm程度の半乾燥地（西豪州エスペランス地域）での植生、土壌データ取得も併せて行ってきた。その結果乾燥地の2倍以上の降雨量があるにもかかわらず成長量は決して十分とはいえず、乾燥地では問題とならなかった塩類化の問題が指摘された。塩類化の定量的予測、あるいは適切な対策技術については本研究だけでは十分とはいえず、今後の目標として残された。
- (1)－8 大気研究に関しては、元々大規模な収支を扱うことから、他のサブグループとの関わりはさほど大きくはないものの、用いるデータの共有などを行い、特に大規模な灌水が、ある条件を満たせば降雨をもたらす「呼び水」となるなどの予測ができた。このような成果を実証することは今すぐには難しいものと思われるが、今後の課題として残された。

## (2)研究サブグループの役割と実施概要

以下ではそれぞれのサブグループが担った役割についてまとめる。

### (2)－1 全体システム構築グループ

全体システム構築グループのひとつの大きな目的は、本研究全体の指針を示すことである。ただし、その設定に関しては、他のサブグループとの十分な討議が事前になされてきた。まずトータルシステムの設計、計画の立案、修正、評価および、最終的な大規模緑化にむけてのスケジューリングを行ってきた。ついで、当該地域におけるトータルシステム構築に最も妥当な樹種構成（生態系）、水・土・塩条件を策定するため、当該地域の既存データ収集を行った。

乾燥地域から、特徴的な12カ所（研究当初は数カ所から）を選択し、調査サイトとして設定した。併せて、降雨量500mm程度のエスペランス地域にも調査地域を設定した。また、その具体的な測定項目の設定と分担を明確化した。

さらに、灌水間隔の違い、ハードパンと呼ばれる不透水層破壊による効果とその従来手法であるバンク形成との組み合わせ効果の評価、同手法による地下灌水評価、表層土集積による土壌厚み増大効果、補間植林効果を実証するに適した実証植林サイトの選定を行った。

上記とは別に、水・土壌制御の一有力手法として、新規かつ低コストな無機系保水透水材料の製造を進めた。その可能性を実験室的に見極めるとともに、現地にて実証を行った。

このグループのもう一つの目的は、シミュレーション手法を用いた緑化プラットフォームの構築であった。初期の構想では、乾燥地と植生とをモデル化し、そのモデルを基にしたシミュレーションによって緑化のプロセスを理解すること、さらに、これをインターネット上の分散環境に実装し、Web上でモデリングと計算を行う方針であった。前半のモデル化とシミュレータ作成はほぼそのまま実施されたが、後半の実装形式は、最終的にはWebを通じてユーザーインターフェースをインターネットに公開するWebアプリケーションの形をとることとなった。これはインターネット上の分散環境での計算がパフォーマンスの制限を受けることや、年々セキュリティ関係の制約が大きくなっていった事、一方でWebアプリケーションの基盤となる技術やツールが年々充実してきたことによる。ただし、実際の計算をサーバーで行う形式となるため、計算負荷への柔軟な対応が課題である。

このグループの最終的な目的は、評価と展開であった。前述のように評価については、実際の植林サイトを用いたエネルギー・CO<sub>2</sub>排出に関するLCA評価を行い、投入エネルギーから排出される40倍程度のCO<sub>2</sub>が、樹木中の炭素として固定できること、またそのコストも、本植林を研究としてではなく事業として行うならば当初目標とした1トン炭素あたり1万円以下の値になりうる可能性が高いことを示した。また、これらの手法が様々な地域にも展開可能であることが示唆されたが、本研究内ではそれを客観的に示すことはできず、今後の課題となった。

## (2)ー2 植生システム研究グループ

植生システム研究グループでは、上述の調査サイトに現存する樹木（良好な環境条件下では、密集した生態系が存在する）のサイズ、炭素保持量（根部も含む）、年令等を測定した。これらは、土壌システム研究グループにより測定された、土壌中有機物量、土壌中水分、塩、栄養塩量と相関することにより、炭素固定量、速度に与える土壌条件の影響を明らかにした。さらにこれらの影響あるいは採用した土壌改良効果をさらに明確にするために、試験植林サイトにも適用した。

衛星データ、空中データについても別途解析を行い、地上測定結果と相関させることにより、地上測定データが得られない地域でも現存バイオマス量を推定する手法を確立した。

ついで、光合成などの植物生理と光、温度、さらには土壌・葉の水ポテンシャルとの関係などを整理し、乾燥地特有の特性を見だし、定式化、モデル化を行った。また、水源特定、水利用効率の定量的測定法、さらにはリターによる損失分、土壌内分解速度などを定式化し、それぞれを定量化した。

これらにより、様々な樹種（特に現地優占種である *A. aneura*, *E. camaldulensis* については細かく）の、当初目的とした、炭素固定能、必要水環境、蒸散量（蒸散量と炭素保持量・生産量）、現地条件への適応性などが明らかにされた。

また、実証植林地域での調査も併せ、炭素保持量におよぼす環境条件改良の効果の予測、各樹種の集水範囲（根の構造、土壌構造との関連）なども明確化され、これらの結果から、植林対象地区に適した樹種を選択に関する指標が与えられた。また、非常に極端な条件下におかれたときの人為的灌水の必要性や栄養塩不足などに対する対策も、状況に応じて選択するための指標が得られた。また、植林法についても検討を加え、提案を行った（本成果は、個別には全体システム構築グループの部分にて詳細を記載する）。

しかしながら、当初目標として掲げた、季節変動に対する適用性の検討、シミュレーション予測による改善（炭素固定能増大）効果の実証については、これらに向けた様々な試みは行ったが、はっきりとした成果といえる形にはならなかった。今後の目標となる。

生態系創製については、当初目指したものと若干異なるが、実証植林サイトには降雨後の水たまりに水鳥が集まるなど、人工的であっても豊かな生態系創出のきっかけになりうることが実証された。

### (2)－3 土壌システム研究グループ

土壌システム研究グループの大きな目的として、水・土壌・塩の制御を掲げた。その目的を達成する第一の手段として水収支モデルの確立を目指した研究がなされた。トータルシステム構築に必要な水、土、塩の移動に関するミクロからマクロに至る様々な規模の水収支モデルの開発である。第二に、現地で実際に様々な集水、透水性増大などの対策技術を試験することである。さらに本プロジェクトでは、この技術提案対策技術の解析をも、前記の第一の手段による成果を用いて行った。最後に土壌浸透性、保水性促進のための新規無機材料の開発、実証も行った。

ミクロなスケールでのモデル解析に必要な入力データとしては降水パターン、蒸発ポテンシャル、土壌構造（透水性、ハードパン等）、塩分量などでありこれらに対して信頼性の高いデータの取得をまず目指した。当初計画に対し、土壌中の不足栄養塩量測定や、ライシメータによる蒸発量測定、土壌改良による効果などの項目も追加した。特に透水性に関しては、基礎物性としての意味に加え、実際の透水現象をモデルからの予測と比較することができ、信頼性が高いデータ取得とそのモデルへの利用が可能となった。しかし、透水性に関しては、測定データの利用の限界とその補正という大きな問題が生じた。これらの現象を広域に適用する際の不確実性、空気封入効果あるいは統計的処理という問題点が残された。

表題にもあるように、当初は塩の制御の必要性をも想定していたが、主要研究サイトである200mm程度の降雨量の地域では、このことは大きな問題とならず、詳細な検討はなされなかったが、本手法を500mm程度の地域に当てはめる際にはさらなる詳細な検討が必要となろう。

地理的状況をも含め、現状で得られるデータを用いた水平方向のマクロ(10-100km規模)な2次元的モデルの構築は、当初の予定通り行うことができた。これにより、どの場所の土壌構造を変え植林し、それによりいかにrunoff 制御を行うかに関する方針をたてることが可能となったが、モデルの妥当性を検証するには未だデータ不足である。

最後に、土壌浸透性、保水性促進のための新規無機材料の開発については、当初予定の材料開発、基礎物性の確認を行った上で、当該乾燥地での植林に適用する実証試験をも開始した。その効果については、樹木苗は未だ成長過程にあり、断定的な結論を得るには至ってはいないものの、概してその効果が得られてきた。

### (2)－4 大気システム研究グループ

大気システム研究グループでは、大気中水蒸気収支、地上部への植林に伴う蒸散が広域大気気象に及ぼす影響の解明については、今後さらに長期的な検討を加える

必要はあるものの、当初の予定に従った計画を進め、降雨量増大のための方策を提案するに至った。これらの当初の予定およびその延長となる成果に加え、現地への水資源の供給源である降水の予測を行うことを目的に、降雨データの長期的及び地域別の解析を開始した。この結果、20年程度との継続測定期間の目途が示されたが、これを地域特性と植生への影響にまで拡張することの困難さが課題として残った。大気中と地上部間のCO<sub>2</sub>フラックス測定結果は、まずタワーから開始し、ついでその重要性から小型飛行機による測定を研究途中から追加したものである。これらの観測は、最終的には、地上部での炭素収支と関係づけることにより、炭素動態の総合的把握を行うと共に、また対象乾燥地全体での炭素吸収能力推定に役立つ。

以上、当初の計画に大枠では従った研究推進を行うことができたが、その一方で今後さらに詳細に詰めるべき事項も明らかとなった。

### 3. 研究成果

研究成果について述べる前に、まず研究調査を行った対象乾燥地、及びそこに設けた調査サイトについて述べておく。

主調査地である Leonora (Sturt Meadows) は西オーストラリア州内陸に位置し(図 3-1)、平均年間降水量は 200mm 前後、夏の最高気温は 40 度を超える。また主調査地との比較調査のために、南岸の Esperance 付近に年間降雨量の異なる 3 つの地域に調査地 (Salmon Gums、Scaddan、Esperance) を設けた。

主調査地では、塩湖を中心とする約 50km 四方の流域に地形、植生を考慮して 12 の調査サイトを設けた(図 3-2)。調査サイトの立地環境、生育する優占樹種、草本種は表 3-1 に示す通りである。また、これらに加え *Eucalyptus* 属のデータを幅広く収集するために、Site1 近くに Site1C, LP などのサイトを追加した。図 3-2 中、アルファベットで示されたサイトは植林試験を行ったサイトである。

これらの調査地、調査及び植林サイトで得られた成果を、以下4つの研究グループ別に報告する。研究成果の今後期待される効果については、各研究グループの研究成果の最後にて述べた。

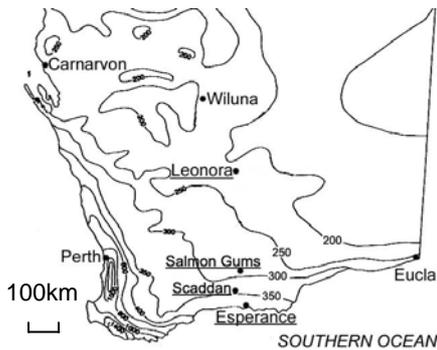


図 3-1 研究対象地

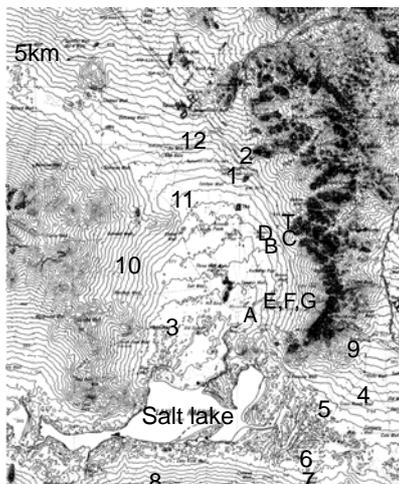


図 3-2 調査、植林サイトの配置 (Leonora の主調査地: 数字は調査サイト、英字は植林サイト。図中等高線は 2m 間隔)

表 3-1 調査サイトの立地環境及び植生

Site	Geographical feature	Representative species
1	Large creek with distributary fan	<i>E. camaldulensis</i> <i>A. burkittii</i>
2A	Drainage focus surrounded by gently inclined plain	<i>A. aneura</i>
2B		Wandarrie grass
3	Gently inclined plain with saline alluvium in lake system	<i>L. squamata</i> <i>A. ramulosa</i> <i>A. tetragonophylla</i>
4	Unincised drainage zone with shallow red earth soil over hard pan	<i>A. aneura</i> <i>Er. forrestii</i> <i>A. tetragonophylla</i>
5	Unincised broad drainage tract with red sandy soil over hard pan	<i>A. aneura</i> <i>Er. forrestii</i> <i>A. tetragonophylla</i>
6	Fringing saline plain with shallow sandy red clay over hard pan	<i>M. sheathiana</i> <i>A. aneura</i> <i>F. setosa</i>
7	Depression within gently sloping water course	<i>A. aneura</i> <i>G. berryana</i> <i>A. tetragonophylla</i>
8	Extensive plain with sandy surface	<i>A. aneura</i> <i>A. ramulosa</i>
9	Gently undulating plain with quartz mantle on granite	<i>Er. fraseri</i> <i>A. aneura</i> <i>A. craspedocarpa</i>
10	Gently undulating sand plain with Acacia spp., C. Cassia spp., E.=Eucalyptus spp., F.=Frankenia spp., G.=Grevillea spp., L.=Lupinus spp., M.=Melaleuca spp., S.=Sida spp., T.=Tetradlea spp., W.=Wickhamia spp.	<i>A. aneura</i> <i>A. coolgardiensis</i> <i>Er. forrestii</i> <i>E. camphila</i> <i>Lawsonia</i> spp., <i>M.</i>
11	Alluvial plain with playas and circular drainage foci	<i>Er. glabra</i> <i>C. subspinescens</i>
12	Gently inclined wash plain with occasional wandarrie bank	<i>A. aneura</i> Wandarrie grass

### 3. 1 植生システム研究グループ

#### 3. 1. 1 樹木個体の現存量推定式(アロメトリー)の作成

樹木の現存量(バイオマス)や成長量(炭素固定量)を算出するための推定式を作成した。樹木については、直径( $D$ )や樹高( $H$ )から個体の現存量を推定することが一般的であり、通常、生物個体の容積や重量とある部分のサイズとの間には、相対成長関係(アロメトリー)が認められ、この関係式を使って現存量の推定を行う。

研究対象地域は、疎林の広がる乾燥地域である。そのため、樹種によっては叢生になり、一個体から多幹を生じる樹型をなす種もある。ここでは、様々な部位のサイズから現存量を推定する式(アロメトリー式)を求めた。そしてそれらが汎用性を持って使用できるかを検討した。

研究対象地域には、10数種の低木～高木性樹木が分布している。主な高木種は*Eucalyptus*属、*Acacia*属、*Casuarina*属である。その中でも、広く優占している*E. camaldulensis*と*A. aneura*については種ごとの、その他の樹種については分類群や樹型に基づいて類型化した種群ごとのアロメトリー式を作成した。

現地において、サイズ別に標準的な樹型をとる個体を樹種もしくは種群ごとに10～16個体を伐倒した。伐倒した個体は、幹の直径( $D$ )や樹高( $H$ )、樹冠投影面積( $Cpa$ )等を測定し、幹・枝・葉の器官別に切り離しそれぞれの現存量(乾重)を測定した。その結果から、相対成長式( $W_i = aX_i^b$ ;  $W_i$ はある器官現存量、 $X_i$ はある部分のサイズ、 $a$ と $b$ は係数)を求めた。根の現存量については、掘り出しの困難さから標本数を確保することが困難である。そこで、他の多くの場合に使われている、地上部現存量から求める単純比例式によって推定した。

現存量推定式を作成した種および種群は5種(群)であり、本プロジェクトで採用した式を表3-1-1に示した。*Eucalyptus camaldulensis*、*Casuarina* spp. (*C. caminghamiana* and *C. obesa*)、*Acacia aneura*は、幹や枝の現存量は一般的に使われる直径および樹高( $D^2H$ )から推定する式がもっとも精度が高かった(決定係数0.95以上)。しかし、葉の現存量において、*A. aneura*で $D^2H$ からの推定式の決定係数が低かった。これは、小型の*A. aneura*では叢生型を取りやすく、個々の幹に付く葉量が幹の位置によって大きく変動するためだと解った。 $D_{0.3}$ (地上高0.3mの直径)からの各器官の推定式は、これら3種(群)において $D^2H$ からのものと比べ決定係数に差がない、もしくは高くなる(*A. aneura*の葉の場合)傾向があった。

*Melaleuca* spp.やOther speciesにおいては $D^2H$ による推定値の決定係数が低かった。これは、それらの樹種が低木であったり、その幹や枝が歪曲したりするからで、 $D^2H$ による推定式は採用しなかった。

また、すべての樹種において、空中写真のように上空から得られるデータによって現

表3-1-1 主要な樹種および種群におけるアロメリーの独立変数および係数

Species group	Wi (kg)	Independent variable		Coefficient		R <sup>2</sup>	n
		X	(unit)	a	b		
<i>Eucalyptus camuldulensis</i>							
	Ws + Wb	$D_{0.3}^2$	(m <sup>2</sup> )	4771.5	1.2849	0.9912	10
	WI	$D_{0.3}^2$	(m <sup>2</sup> )	143.24	0.862	0.9948	10
	Ws + Wb	Cpa x H	(m <sup>3</sup> )	0.1405	1.2561	0.9871	10
	WI	Cpa x H	(m <sup>3</sup> )	0.1374	0.8319	0.9648	10
	Wr	Wabove	(kg)	0.7179	1		3
<i>Casuarina</i> spp. ( <i>C. caminghamiana</i> and <i>C. obesa</i> )							
	Ws + Wb	$D_{0.3}^2$	(m <sup>2</sup> )	10546	1.3952	0.9898	10
	WI	$D_{0.3}^2$	(m <sup>2</sup> )	606.15	1.011	0.9631	10
	Ws + Wb	Cpa x H	(m <sup>3</sup> )	0.1901	1.3035	0.9925	10
	WI	Cpa x H	(m <sup>3</sup> )	0.2183	0.946	0.9322	10
	Wr	Wabove	(kg)	0.4711	1		1
<i>Acacia aneura</i>							
	Ws + Wb	$D_{0.3}^2$	(m <sup>2</sup> )	6187.9	1.2074	0.9827	16
	WI	$D_{0.3}^2$	(m <sup>2</sup> )	126.72	0.8364	0.9145	16
	Ws + Wb	Cpa x H	(m <sup>3</sup> )	0.6913	1.035	0.8977	16
	WI	Cpa x H	(m <sup>3</sup> )	0.2399	0.708	0.8146	16
	Ws + Wb	H	(m)	0.0414	3.9974	0.6390	16
	WI	H	(m)	0.0616	2.3916	0.4436	16
	Wr	Wabove	(kg)	0.4017	1		2
<i>Melaleuca</i> spp. ( <i>M. sheathiana</i> and <i>M. sheathiana</i> )							
	Ws + Wb	Cpa x H	(m <sup>3</sup> )	1.6878	1.1459	0.9956	4
	WI	Cpa x H	(m <sup>3</sup> )	0.2662	1.0046	0.9900	4
	Wr	Wabove	(kg)	0.4026	1		2
Other species ( <i>Acacia ramulosa</i> , <i>A. tetragonophylla</i> , <i>Eremophila forestii</i> , <i>E. macmillaniana</i> , <i>Lawrencia squamata</i> , etc.)							
	Ws + Wb	Cpa x H	(m <sup>3</sup> )	1.4079	0.8589	0.9411	11
	WI	Cpa x H	(m <sup>3</sup> )	0.2563	0.6705	0.8078	11
	Ws + Wb	H	(m)	1.7018	2.7058	0.8216	11
	WI	H	(m)	0.3013	2.0866	0.6882	11
	Wr	Wabove	(kg)	0.2714	1		9

推定式は、 $W_i = aX^b$ で表される。また、 $W_i$ はある器官の現存量、 $X$ はある部位のサイズ、 $a$ と $b$ は変数である。部位のサイズである $D_{0.3}$ は地上高0.3mの幹直径、 $H$ は樹高、 $Cpa$ は樹冠投影面積である。現存量の $Ws$ は幹、 $Wb$ は枝、 $WI$ は葉、 $Wabove$ は地上部(幹+枝+葉)、 $Wr$ は根(いずれも乾重)を示す。根の現存量推定式は単純な比例式である。 $n$ はサンプル数、 $R^2$ は式の決定係数である。

存量を推定できるよう、樹冠投影面積 ( $Cpa$ ) を変数とした推定式も求め、実用可能な精度を持つことを確認した。樹高 ( $H$ ) による推定式は決定係数が低く、精度も低くなかった。*A. aneura*の場合、その決定係数は0.65以下となるが、植林サイトにおいて樹高しか測定していない植栽初期のデータセットがあるため、この式を採用した。根の現存量 ( $Wr$ ) 推定式を除いて、表3-1-1に示すいずれの回帰式にも有意な相関関係 ( $p < 0.05$ ) が認められている。

根の現存量 ( $Wr$ ) は、サンプル数が少なく、決定式の有意性を検定することが出来なかった。暖温帯である日本の場合、地上部現存量に対する根の現存量の割合 (地下部/地上部、現存量推定式の係数 $a$ ) は、スギで0.27、広葉樹で0.22という報告があり、その値に比べると調査樹種の値は高かった (Other speciesを除く)。例えば、*Eucalyptus camaldulensis*は0.72、*Casuarina* spp.と*Acacia aneura*は0.40および0.47を示した。乾燥地においては、湿潤度が低いほど地下部/地上部の値が増加するとされており(調査地域の環

境下では1を超えることもある)、より乾燥した地域ほど光合成産物の地下への配分量が増えるためと説明されている。それは、乾燥地に行けば行くほど光合成産物の地下への配分量が増えるためと説明されている。本調査の結果は、このことを支持するもので、その値は妥当であると判断された。

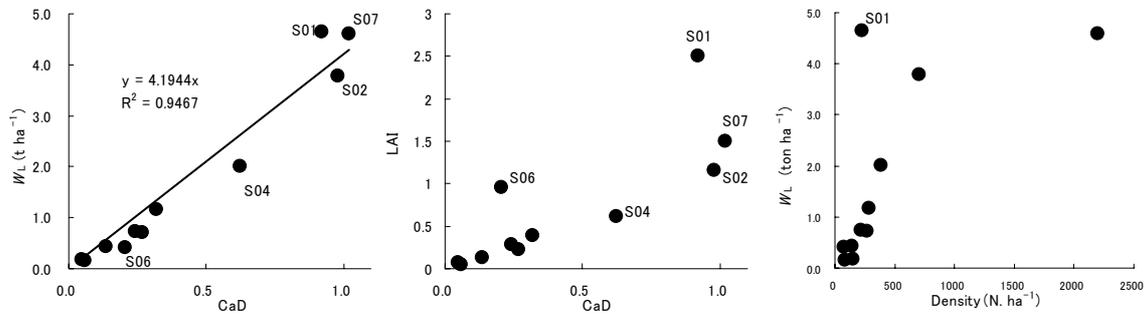
研究対象地に生育する主な樹種の現存量推定式を作成することが出来た。これにより植栽サイトにおける現存量や成長量を高い精度で求めることが出来るようになった。また、樹冠サイズから求める推定式も高い決定係数を持っているため、広域での現存量を算出するために、樹冠投影面積を変数として使えることが解った。また、これらの推定式は、他の研究にも使用できる汎用性を持っている。

### 3. 1. 2 葉量及び葉面積指数の推定

植物による炭素固定は葉で行われるため、葉量（葉現存量）及び葉面積の推定は炭素固定量を推定する上で最も重要なパラメータである。自然植生調査サイトにおける樹高2m以上の樹木の毎木調査データを利用し、アロメトリー式から各個体の葉量を計算し、単位土地面積あたりの葉量 ( $W_L$ ; t/ha) を推定した。この時、全ての樹種に対して  $C_{pa} \times H$  (樹冠投影面積×高さ) を独立変数とした。葉量を葉面積に変換するために比葉重量 (単葉面積当たりの絶乾燥重量; LMA、 $g/m^2$ ) が必要であるが、*Eucalyptus camaldulensis* (+*Eucalyptus*属)、*Acacia. aneura* (+*Acacia*属) についてはそれぞれ複数の葉の平均値、他の樹種は便宜上それら全ての平均値を用いることにした。LMAは*E. camaldulensis*で $169.5g/m^2$ ( $n=170$ ,  $SE=3.3$ )、*A. aneura*で $327.9 g/m^2$ ( $n=75$ ,  $SE=7.9$ )であった。これは両樹種の葉が厚く、堅いためであり、日本の樹木に比較して非常に大きい値である。これらすべてのサンプルの平均は $214 g/m^2$  ( $SE=5.9$ ) であった。

広域での葉量及び葉面積指数を評価するために、各林分の林冠閉鎖度 (単位面積当たりの樹冠投影面積合計; CaD) と  $W_L$ 、及びLAI (比葉面積、または葉面積指数: 単位土地面積あたりの葉の面積) の関係を図3-1-1と3-1-2に示した。閉鎖したSite7では樹冠の重なりがありCaDが1を超えている。CaDと  $W_L$  は正の比例関係となり、高い相関が得られた。葉量の多いサイトは*A. aneura*の優占するSite2と7、*E. camaldulensis*の優占するSite1であった。一方LAIの場合はSite1とSite6がCaDに対して大きかった。*Eucalyptus*属のLMAは*Acacia*属に比べて小さい事が、Site1で大きなLAIを示す原因である。Site6は両樹種以外の樹種が多く、全平均値のLMAから計算したためにLAIが大きくなったと考えられる。立木密度と  $W_L$  の関係 (図3-1-3) では、Site1を除き、 $W_L$  は立木密度の増大と共に5 t/ha弱で頭打ちを示すようである。Site1は樹冠サイズの大きい*E. camaldulensis*が多く、低立木密度でも閉鎖しており (LAIも最大)、当該地域では林冠の閉鎖した林分は葉量が4-5 t/haで安定することが示唆された。

樹高2m以上の木本個体に対し、広域を評価する場合に有効となる林間閉鎖度で葉量を推定することが可能であり、本プロジェクト周辺域では最大5 t/haと見積もられた。しかし *Eucalyptus* 属は比葉重量が小さいため、同じ葉量であっても葉面積指数は大きく、*A. aneura* が優占する場所と、*E. camaldulensis* が優占する場所では葉面積指数が1以上異なった。航空写真等、光学的手法で葉面積指数を推定する場合、最低でも *E. camaldule*



*nsis* が優占する立地と *A. aneura* が優占する立地を区別して推定する必要がある。

図3-1-1 林冠閉鎖度と葉現存量 図3-1-2 林冠閉鎖度と葉面積指数 図3-1-3 立木密度と葉現存量

### 3. 1. 3 各サイトのバイオマス、成長量

本研究対象地域における、林分現存量及び林分成長量を推定することを目的とした。1997年から2003年に渡り、13箇所の調査サイトにおいてTRAPS法に基づいた2期の毎木調査を行った。個体サイズに関するアロメトリー関係(3.1.1参照)から、個体の現存量を幹枝、葉、根に分けて推定し、毎木調査の結果から各サイトの林分現存量(乾量)を算出した。ここで林分現存量は各期の生存個体の総量である。林分成長量は、2期間中に枯死した個体を除外後、2期分の林分現存量を基にした相対成長率を用い、期首から1年間の林分現存量の増分として計算した。また、草本類の現存量の把握のため1997年9月にsite1-7において1m<sup>2</sup>のコドラートを使用してその重量を推定した。

各サイトの草本の現存量は樹木(H≥1.0m)現存量の1%以下であった。同様に1m未満の樹木の現存量に占める割合は低灌木地(site3やsite6)で比較的大きくなったが、その値は0.2 kg m<sup>2</sup>以下であった。このため林分単位での植物現存量は、樹高1m以上の樹木現存量のみで十分推定可能であった。各林分の現存量をみると、大きなクリーク沿いに成立する *Eucalyptus camaldulensis* 林(現地植生面積の1%未満)は、13.1 kg m<sup>2</sup>(Site1)、6.5 kg m<sup>2</sup>(Site13)と乾燥地としては大きな林分現存量(地上部と地下部を合わせた全体)を有していた。これは集中降雨時に他からの流出水がクリークへと流れ込み、それらが地下水分として長期間滞留することが原因であると考えられる。また、現地植生の大半(約80%)を占める *Acacia aneura* 林のサイト間の平均林分現存量は5.2 kg m<sup>2</sup>であった。しかし林冠のうっ閉した Site2A と Site7 の林分現存量及び林分成長量は大きく、これらは比較的表面流出水が流れ込みやすい立地環境にあった。一方、調査地域の約15%を占める低灌木林である Site3 の林分現存量は0.16 kg m<sup>2</sup>と低い。特にこの Site3 は塩湖近くに存在し、土壌は塩性であるため植生の発達が制限されている。このように自然植生は

地上部・地下部双方からみた立地環境と非常に密接に関係しており、これに応じて林分現存量と林分成長量は大きく変化していた。

表 3-1-2 植物現存量と林分成長量

サイト	林冠閉鎖度	平均樹高 [m]	本数 [No./ha]	林分現存量 (kg m <sup>-2</sup> )						枯死木量 (kg m <sup>-2</sup> )	林分成長量 (kg m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup> )	期首測定日	期末測定日
				期首			期末						
				Ws+b	Wl	Wr	Ws+b	Wl	Wr				
1	0.82	5.4	240	7.46	0.45	5.09	7.50	0.46	5.12	0.03	0.022	1997/11/1	2001/7/1
2A	0.74	4.9	711	7.07	0.61	3.08	7.85	0.67	3.42	0.00	0.308	1997/11/1	2001/7/1
3	0.11	0.4	4750	0.07	0.02	0.02	0.10	0.02	0.03	0.00	0.013	1997/11/1	2001/7/1
4	0.31	1.1	488	3.74	0.30	1.60	4.14	0.35	1.77	0.00	0.145	1997/11/1	2001/7/1
5	0.30	3.7	260	2.10	0.15	0.86	2.17	0.16	0.89	0.00	0.035	1998/4/18	2001/7/29
6	0.22	3.0	75	2.92	0.22	1.26	2.85	0.21	1.23	0.00	-0.025	1997/11/1	2001/7/1
7	0.84	3.8	2200	5.24	0.51	2.15	6.35	0.59	2.63	0.32	0.422	1997/11/1	2001/7/1
8	0.31	2.6	403	1.12	0.13	0.46	1.21	0.14	0.49	0.03	0.039	1999/11/1	2002/12/1
9	0.09	1.7	228	0.29	0.04	0.12	0.31	0.04	0.12	0.01	0.008	1999/11/1	2002/12/1
10	0.23	4.2	223	1.04	0.13	0.53	1.07	0.14	0.52	0.06	0.008	1999/11/1	2002/12/1
11	0.13	1.2	800	0.42	0.05	0.16	0.71	0.08	0.27	0.00	0.086	1999/11/1	2002/12/1
12	0.16	3.5	165	0.97	0.11	0.43	0.96	0.11	0.43	0.02	-0.005	1999/11/1	2002/12/1
13	0.44	3.2	364	2.89	0.21	2.11	3.59	0.26	2.65	UNKNOWN*	0.445	1999/11/1	2002/7/9

各林分の現存量、林分成長量と枯死木量は樹高1m以上の固体から計算した樹木の重量である。Wsは幹、Wbは枝、Wlは葉、Wrは根、Wwは地上部と地下部を合わせた全体(幹+枝+葉+根)を示す。林間閉鎖度は航空写真より目視判別したもの、平均樹高は期末測定におけるものである。サイト13の期首林分現存量は期末の現存量データから固体の直径成長率を勘定して算出。枯死木量は未測定(星印)。

### 3. 1. 4 天然*Eucalyptus*属の更新、樹齢とバイオマス

洪水によって自然成立した*Eucalyptus*稚樹群落の炭素固定能力を評価するとともに、異なる植栽手法による炭素固定量との比較をおこなった。

ワジの周辺では天然更新(自然の力で世代交代すること)による若木が多く見られる。その多くは枯死するが、そのうちのいくつかはそのまま成長を続ける。このような*Eucalyptus camaldulensis*の成長源である土壌水分と栄養塩類の供給は自然に繰り返されるフラッドにはほかならない。*Eucalyptus camaldulensis*の若木の周辺には、おびただしいリターが堆積している。リター層は地温の上昇を抑え、露蒸発を抑制し、天然のマルチングとして役立っている。したがって、クリーク近くの立地は*Eucalyptus camaldulensis*にとって、栄養塩類の供給と洪水による物理的な破壊力の狭間にあるといえよう。

2000年1月中旬に降った雨は1週間で150mmを超え、洪水となった。その後20万本/haを超える*Eucalyptus camaldulensis*稚樹が発生した。現地を観察するとクリーク付近には齢の異なる様々な*E. camaldulensis*群落がパッチ状に分布している。そこで、2002年3月に多数の稚樹の伐倒調査によって現存量を把握するとともに、毎木調査を行い、群落全体の諸量を推定した。図に示したように、ちょうど5年ごとに*E. camaldulensis*の稚樹群が発生しており、最近30数年近くまでさかのぼることができる。5年ごとの連年成長(5年間における樹木の平均的な成長)を比べると、最初の5年で20トン/ha前後の現存量があることから、年間で4トン程度の成長量とすることができる。カーボン換算では、炭素量は乾物重量の約50%として、最初の数年は1.5-2.0トン/haを超えるカーボンを固定している。齢が進むにしたがい炭素固定能力が低下し、30年を経ると最終的には

成長量は限界点にするが、それでも平均年炭素固定量0.4トン程度で安定することが判った。

生き残った巨大な*E. camaldulensis*林が成長を続けるにはさらに多くの無機栄養と十分な水が必要になる。しかしながら、5年ごとの固定効率の低下は、群落全体として枯死個体の増加により原資の消耗を減じてもおお栄養塩類の供給不足によって期待された成長を確保する事がはなはだ困難であることを示している。すなわち、見方を変えれば、5年に数回程度のフラッドの頻度によって供給される栄養塩類と水資源の供給キャパシティーとユーカリによる消費のバランスが局所的に成り立つことを示している。従って、立地条件に応じた生物的な限界値があることを示しているといえよう。

現状のような確率で降水およびフラッドの発生が期待できるとすれば、立ち上がりの時期は0.1~0.2 kg-C/(m<sup>2</sup>・yr)を確保できる。

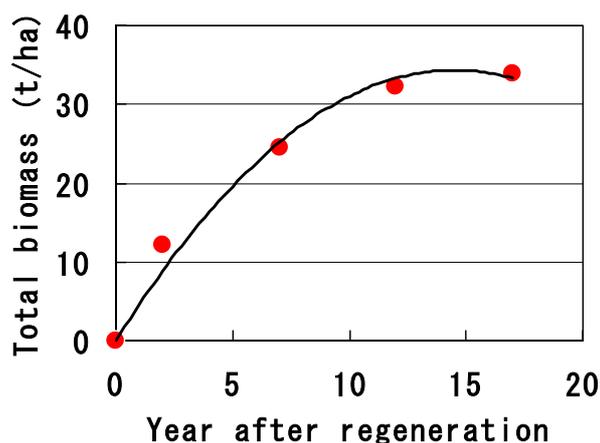


図 3-1-4 ユーカリ天然更新による現存量の時系列変化

### 3. 1. 5 林冠閉鎖度と林分バイオマスの関係

3. 1. 3で行なった調査結果を面的に広げるために、リモートセンシングを念頭に置いた林分バイオマス推定指標を作成する必要がある。そこで優占種である*E. camaldulensis*及び*A. aneura*林について、林冠閉鎖度 (CC : Canopy Coverage) と林分バイオマスの対応関係を明らかにした。なお林冠閉鎖度とは、各個体樹冠の水平投影面積の合計値から重複面積を引いた値の単位地表面積に対する割合であり、最大で1を示す。

前掲の調査サイト中該当する9地点に加え、さらに50m×50mの調査区画を16区画設け、毎木調査を行なった。その調査結果をもとに、3.1.1で作成したアロメトリー式を用いて各区画の林分バイオマスを計算した。また、調査結果より林分胸高断面面積合計(SBA: Stand Basal Area)、立木密度、林冠閉鎖度、林分平均樹高等を計算し、林分バイオマスとの対応関係を見た。

表3-1-3に毎木調査により得られた結果から各林分パラメータと林分バイオマスとの対応関係を明らかにした。まず他地域の森林同様に西豪州乾燥地においても、(林分胸高断面面積合計, SBA) × (林分平均樹高, H) によるバイオマス推定方法が有効であることが確認された。さらに林分胸高断面面積合計のみでも、高精度の林分バイオマス推定が可能であることが明らかにされた。この方法では、3.1.3で明らかにされた年成長量を判

別するのに十分な精度を有していた。

次に（林冠閉鎖度）×（林分平均樹高）とバイオマス及び、林冠閉鎖度とバイオマスに対応関係が見られた。前者の関係は、乾燥地の森林が開放林であり、林冠が完全閉鎖するまでの林冠閉鎖度がほぼ樹冠投影面積の単純加算から求められる事、そして乾燥地の樹木のバイオマスを（樹冠投影面積）×（樹高）から高い精度で推定できるためであると考えられた。この方法では各年成長を判別するのに十分な精度を有していた。最後に林冠閉鎖度とバイオマスの関係であるが、単木レベルに於いても樹冠投影面積とバイオマスの高い相関関係が得られているが、林分レベルでは単木レベルと比べて推定精度が向上している。これは、林冠閉鎖度の値が大きくなるにつれて林分平均樹高が増大する傾向があるからであると考えられる。つまり計算値に林分平均樹高を組み込まなくとも、たいていの森林にて林冠閉鎖度のみからバイオマス推定できることを示している。この方法では、3～4年分の成長を判別するのに十分な推定精度を有していた。

本調査によって、乾燥地の森林の年成長量を求めるためには、現地調査にて胸高断面積合計値と優占樹種を求めれば良いことが判った。また、現在のリモートセンシング技術を用いて求められる林冠閉鎖度では、3～4年分の成長量を判別することが精度限界であることが示された。

表3-1-3 林分バイオマスと各林分パラメータの関係

Dominant species	X	Y [kg/m <sup>2</sup> ]	Regressive Equations	R <sup>2</sup>	n
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	SBA×H [m <sup>3</sup> /ha]	Biomass	Y = 0.3921X <sup>0.7822</sup>	0.9359	9
	SBA [m <sup>2</sup> /ha]	Biomass	Y = 1.1292X <sup>1.0185</sup>	0.9718	9
	CC×H [m]	Biomass	Y = 3.8488X <sup>0.7474</sup>	0.9568	9
	CC	Biomass	Y = 19.101X <sup>0.9049</sup>	0.9391	9
<i>Acacia aneura</i>	SBA×H [m <sup>3</sup> /ha]	Biomass	Y = 0.1386X	0.9691	16
	SBA [m <sup>2</sup> /ha]	Biomass	Y = 0.805X	0.9926	16
	CC×H [m]	Biomass	Y = 1.9598X <sup>1.0102</sup>	0.9863	16
	CC	Biomass	Y = 12.818X <sup>1.3399</sup>	0.9418	16

SBA: Stand Basal Area    CC: Canopy Coverage    H: Mean Stand Height

### 3. 1. 6 航空写真を用いた林冠閉鎖度の推定

空間解像度の高い航空写真を用いて、林冠閉鎖度（CC）を高精度に推定する方法を確立する。これにより、3.1.5で明らかにされた林冠閉鎖度と林分バイオマスの関係を用い、現地調査のみでは不足してしまう植生調査区画数を補い、衛星画像によるバイオマス推定方法確立のための基礎データとする。

オーストラリアKEVRON AERIAL SURVEY社に依頼して撮影した空間解像度0.25mのデジタル航空写真を使用した。1枚が2.5km×2.5kmであり、調査対象地の主要領域である東西47.5km南北57.5kmの約2700km<sup>2</sup>が撮影された。ここから植生調査を行った地点を含む写真を選び出し、リモートセンシング解析ソフトであるERDAS IMAGINEを利用し

て木本植物・草本植物・土壌・陰・岩盤などの赤と緑のDN値分布を抽出した。抽出されたDN値分布に基づき判別分析を行い、判別関数を求めた。その際木本植物のみが完全に抽出されるように、判別関数に修正を加えた。その結果からERDAS IMAGINEを利用して林冠閉鎖度を計算した。

林冠閉鎖度分布を図3-1-5に示す。図中に現れている矩形の幾何学模様は、航空写真特有の周辺減光の影響を強く受けて、判別誤差が大きくなった領域である。図下方の林冠閉鎖度0%の領域は塩湖である。この図から流路沿いに繁茂する閉鎖林分や裸地が正確に判別されていることが判る。図3-1-6に植生調査による林冠閉鎖度の実測値と、航空写真による推定値の関係を示す。周辺減光の影響が弱い領域（全体の75%）での判別では、熟練者による目視判読結果と同等かそれ以上の精度を有していた。周辺減光の強い領域でも、衛星画像による判別精度と同程度であった。

これにより、目視判読と同精度のコンピューター計算による林冠閉鎖度の簡易推定方法が確立された。周辺減光の影響を取り除き、航空写真上での樹種判別が可能になれば、衛星画像と対比するための完璧なデジタルデータを整備することができる。

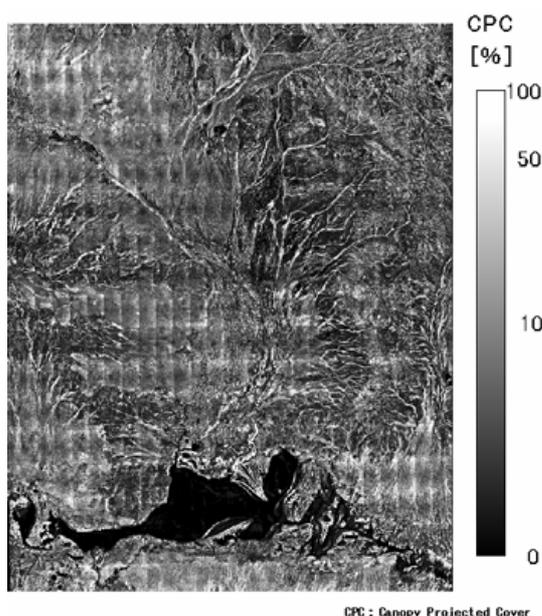


図3-1-5 調査地域の林冠閉鎖度(CPC)分布

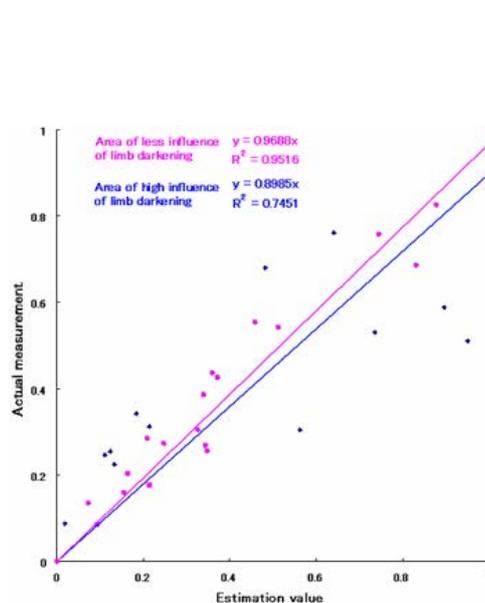


図3-1-6 林冠閉鎖度推定値と実測値の関係

### 3. 1. 7 衛星データ(LANDSAT TM)を用いた植生分布の推定

赤色光及び近赤外光による植生指数と林分バイオマスには単純な相関が見られないことが報告されている。これは植生指数では優占樹種を判別することが出来ず、優占樹種に依存するバイオマス量を精度良く表せないのが原因の一つと考えられている。そこでバイオマス推定精度の向上を目指して、衛星データによる植生分布図の作成を試みた。

幾何補正 (UTM, WGS84) と大気補正 (ヘイズ処理) を行なった衛星画像 (LANDSAT TM)

を用いた。この画像を用いて主成分分析を行い、6バンド分の情報を第1～3主成分に集約した。そして植生調査とグラントゥールスによって確定されたトレーニングポイントを利用し、各植生区分の主成分上での分布を求めた。ここから各植生区分の分類項目間距離を算出し、最尤法による教師付分類を行い、植生分布図を作成した。

主成分分析及び分類項目間距離の計算によって、現地植生が7項目に分類できた。植生分類は以下の通りである。①*Eucalyptus camaldulensis* forest and *Acacia aneura* dense forest ②Eucalypts and Acacia open forest ③Acacia open forest ④Shrub land ⑤Grass land ⑥Bare ground ⑦Salt lake。図3-1-7に教師付分類による植生分布図作成結果と各項目の全域に占める割合を示した。この分布図の分類結果は、各トレーニングポイントに対して平均98.4%の分類精度を有していた。③と⑤の分類精度が、他の項目に比べて低い結果が出ていたが、おおむね高い分類精度を有していると考えられた。

これらの植生分類図と、植生指数などの結果を組み合わせることによって、今後の林分バイオマス推定精度向上が図れる可能性が増した。ただし、分類結果に基づいて追加調査を行ったところ、様々な誤分類結果が確認された。よってバイオマス推定精度向上のために、植生分類の精度向上方法をさらに追求していく。

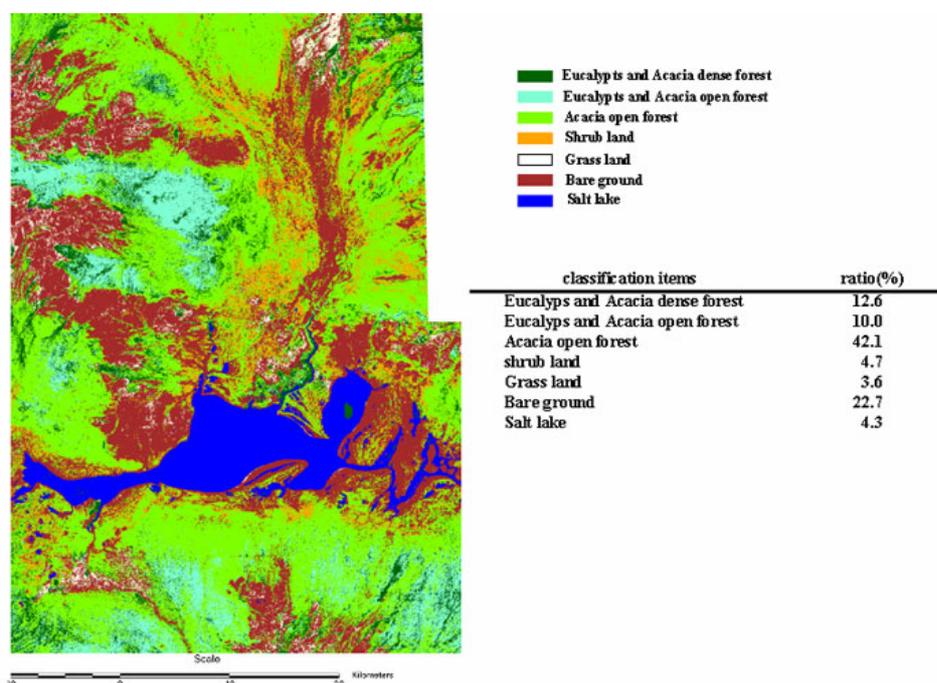


図3-1-7 植生分布図と各分類の面積割合

### 3. 1. 8 衛星データ(LANDSAT TM)を用いた広域バイオマス分布推定法の確立

大規模植林による炭素固定効果は、植林前後における炭素量や炭素量推定指標としての植物現存量の差により検討される必要があり、植物現存量分布をモニタリングする技術の確立が不可欠である。しかしオーストラリア乾燥地特有の環境条件に合致した植生

指数が何であるのか、また精度はどれくらいあるのかは明らかにされていない。そこで、現在提案されている様々な植生指数の中で試験地域に最適な指数の検討を行った。

1998年6月25日～1999年12月21日までの衛星画像（LANDSAT TM and ETM+）で対象地に雲のかかっていない16枚の画像を用いた。これらの画像に幾何補正（UTM WGS84）と放射輝度変換を加えた。これらの画像から表1に示したオーストラリアでの検討実績のある各種の植生指数を計算した。これらの植生指数と3.1.3の調査区画と追加調査で計算された20地点の林分バイオマス(現存量)との対応関係から相関式を作成し、対象地のバイオマス分布を求めた。そして求められた関係式の標準誤差、決定係数および調査区画の実測値と推定値の対応関係等から、最適な植生指数の選定を行なった。そして一番相関の高かった植生指数を2002年4月9日の衛星画像からもとめ、2002年のバイオマス分布を推定した。

表3-1-4 使用した植生指数

植生指数	波長の組み合わせ*	Landsatにおけるバンドの組み合わせ
NDVI	$(\text{NIR}-\text{R})/(\text{NIR}+\text{R})$	$(\text{B4}-\text{B3})/(\text{B4}+\text{B3})$
SAVI (土壌調整係数L : 0.5)	$[(\text{NIR}-\text{R})/(\text{NIR}+\text{R}+\text{L})]\times(1+\text{L})$	$[(\text{B4}-\text{B3})/(\text{B4}+\text{B3}+0.5)]\times 1.5$
AAR	緑色と赤色の散布図における ソイルラインからの垂直距離	B2とB3
MSVI-1	NIR/MIR	B4/B5
MSVI-2	NIR/SWIR	B4/B7
STVI-1	$(\text{MIR}\times\text{R})/\text{NIR}$	$(\text{B5}\times\text{B3})/\text{B4}$
STVI-2	$\text{NIR}/(\text{MIR}\times\text{R})$	$\text{B4}/(\text{B5}\times\text{B3})$
STVI-3	$\text{NIR}/(\text{R}+\text{MIR})$	$\text{B4}/(\text{B3}+\text{B5})$

\*R=赤色；NIR=近赤外；MIR=中間赤外；SWIR=短波赤外 O'Neill (1996) に加筆

表3-1-4で示された植生指数の中で、SAVI、STVI-1及びSTVI-3とバイオマスとの相関において高い決定係数が得られた。この中でSTVI-1とSTVI-3では塩湖内での誤差の増大が示された。また、STVI-3では最大値で異常を示しており、これらから対象地における最良の植生指数はSAVIである事が明らかになった。特に冬季（6月～9月）の画像でSAVIの決定係数が高く標準誤差が小さくなる傾向が見られ、最大で $R^2=0.826$ 平均で $R^2=0.702$ であった。これはこの時期が統計的に降雨の少ない時期にあたるために、大気による光の散乱が弱くなるのでこのような結果になったと考えられる。つぎに2002年4月9日の衛星画像のSAVIからバイオマス分布を求めた結果を図3-1-8に示す。塩湖において最小の現存量を示している一方、クリークと見られる地域の周辺には大きな現存量を有する地点が集中していた。Acacia疎林のバイオマスは、推定結果とトレーニングポイント

トの実測結果の対応関係が概ね良好であった。しかし、一部の灌木林の生育領域にてバイオマスの過大評価が見られた。バイオマスは最大21.8[kg/m<sup>2</sup>]で平均1.71[kg/m<sup>2</sup>]であった。バイオマスの平均値は一般的な乾燥地（主に砂漠）の平均値とほぼ等しく、最大値は温帯林の約半分程度であった。

研究対象地であるオーストラリアの乾燥地では、バイオマス推定には冬季で且つ無降雨時のSAVIがもっとも適していることが分かった。そして推定式の決定係数は平均R<sup>2</sup>=0.702がえられ、他の報告と同程度か良好な結果が得られた。しかしながら、バイオマスの絶対量変化を追跡するには未だに不十分な結果となった。この原因としては、植生指数と対応させたトレーニングポイントの不均一性や非

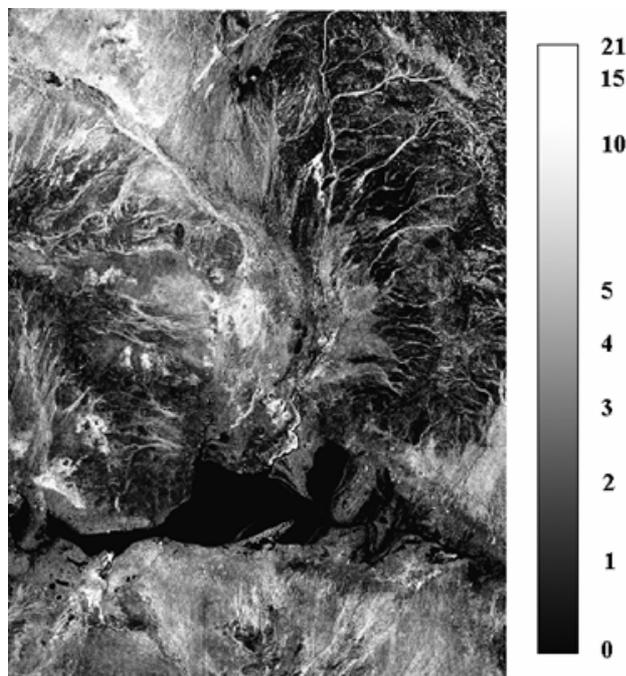


図 3-1-8 SAVIによるバイオマス推定  
(数値は kg/m<sup>2</sup>)

同時性、対応点の不足、大気補正の困難さ、画像の空間解像度の限界、ミクセルの存在、植生分類の必要性、バイオマスと植生指数の根本的な相関性の有無等諸々の原因が考えられる。今後は現在までに得られた結果を踏まえ、包括的なバイオマス推定方法を検討していかねばならない。

### 3. 1. 9 樹木生理特性把握

主要な植生である*E. camaldulensis*林、と*Acacia aneura*林を対象に、光合成、蒸散、葉の水ポテンシャル、樹液流量などの生理生態学的情報の収集を定期的を実施した。これらの情報は後述の緑化シミュレータの入力パラメータとなり、土壌水分から光合成速度の計算に利用される。

それぞれの調査サイトには観測用のタワーを設置した。光合成蒸散速度の測定には、携帯用光合成蒸散測定装置HCM-1000（WALZ社製）を用いた。光合成蒸散の日変化は携帯用光合成蒸散測定装置KIP（小糸工業社製）を用いて、外気温追従型のチェンバーを使用して測定した。これと平行して、サンプルチェンバー（C-52）とマイクロボルトメーター（WESCOR社製）を用いて葉の水ポテンシャルを測定した。

全ての計測データは生理的な情報に直接関係する環境要因に支配されるので、光量子、

気温、湿度、土壌水分、土壌温度、風速などの計測データステーションを設置し、ソーラーパネルによる電源システムにより電力をロガーに供給し、30分間隔でデータを収録した。

図3-1-9に示す光—光合成曲線は、2年間の測定の中で最も高い光合成速度を示した時の値である。光量子束密度2000  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ における*A. aneura*と*E. camaldulensis*の光合成速度は、それぞれ24  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、36  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ となり、*E. camaldulensis*は*A. aneura*の1.5倍の光合成能力を示した。図中の近似線は下記の式で表される。

$$y = \frac{ax + c - \sqrt{(ax + c)^2 - 4abcx}}{2b} + d \quad (1)$$

Constant	<i>Acacia aneura</i>	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>
a	0.073295	0.086261
b	0.11866869	0.434195
c	31.41989	44.30862
d	-4.49909	-2.86371

水ストレスが掛かっていない時の光合成速度を100%とし、葉の水分ポテンシャルの低下に伴う光合成速度の減衰の様子を図3-1-10に示す。*E. camaldulensis*は葉の水ポテンシャルが-2.5MPa以下で光合成速度が急激に低下するが、*A. aneura*では-4MPaでも50%の光合成速度を維持しており、その低下が緩やかである。図中の曲線は次の式で表される。

$$y = y_0 + a\{1 + e^{-[(x-x_0)/b]}\}^c \quad (2)$$

Constant	<i>Acacia aneura</i>	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>
a	86.1367	173.7263
b	0.5474	0.3992
c	0.3500	8.0476
$x_0$	-2.5372	-4.3852
$y_0$	14.9362	-75.6902

図3-1-11に土壌含水率と葉の水ポテンシャルの関係を示した。土壌深さ100cmの含水率であり、葉の水ポテンシャルは各測定時の日変化の平均値である。また、アカシアとユーカリのそれぞれのサイトでは、土質が異なるため分けて検討する必要があるが、ここではまとめて計算を行った。図中の近似曲線は次式で表される。

$$y = y_0 + a(1 - e^{-bx}) \quad (3) \quad (y_0 = -11.8416, a = 10.9226, b = 10.8670)$$

このようにして得られた各相関式を用い、光合成速度を決定する環境因子は、光量子束

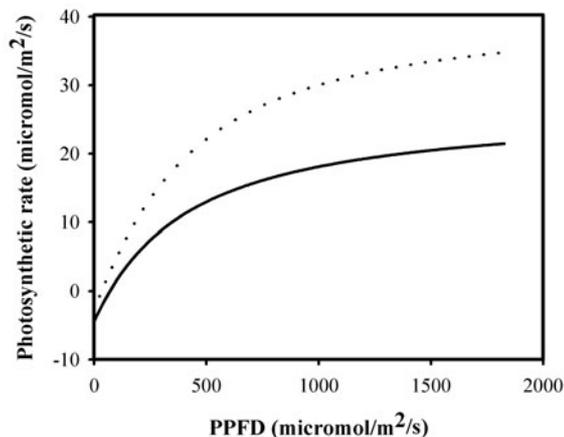


図 3-1-9 光-光合成曲線  
(点線; *E. camaldulensis*, 実線; *A. aneura*)

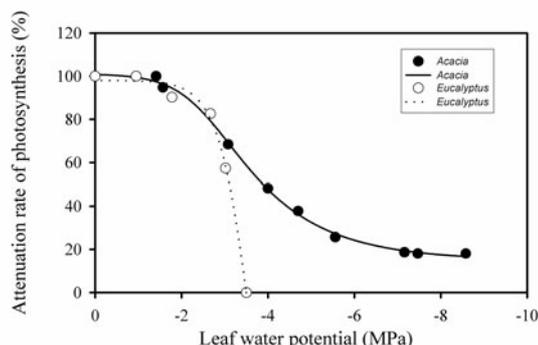


図 3-1-10 葉の水ポテンシャルと光合成減衰率

図3-1-11に土壌含水率と葉の水ポテンシャルの関係を示した。土壌深さ100cmの含水率であり、葉の水ポテンシャルは各測定時の日変化の平均値である。また、アカシアとユーカリ

密度と土壌含水率として、1999年5月から2000年11月までの1年半の外的環境要因のデータを用いて、光合成速度の計算を行った。また呼吸の日積算値は、アカシア・ユーカリ共に余弦曲線の季節変化を示した。温度の影響を考慮していないため、季節による日照時間の変化が呼吸の季節変化に反映されたと思われる。光合成から呼吸を差し引いた二酸化炭素固定の日積算値は、アカシアでは1年のうち半分以上の期間において呼吸量の方が多くマイナスの値を示した。最大は光合成の日積算値と同じ季節で、アカシアが $0.65 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、ユーカリが $1.2 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ となった。また、1年半の二酸化炭素固定量は、アカシアでは $41 \text{ mol}/\text{m}^2$ 、ユーカリでは $422 \text{ mol}/\text{m}^2$ で、約10倍の差があった(図3-1-12)。

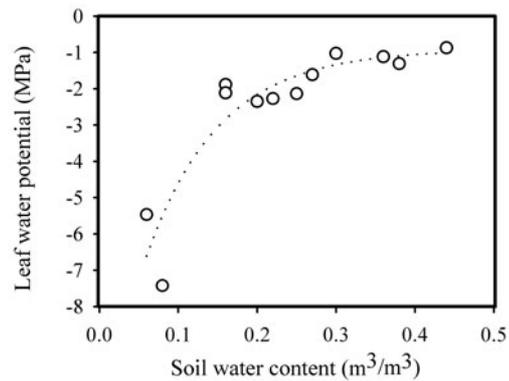


図 3-1-11 土壌含水率と葉の水ポテンシャル

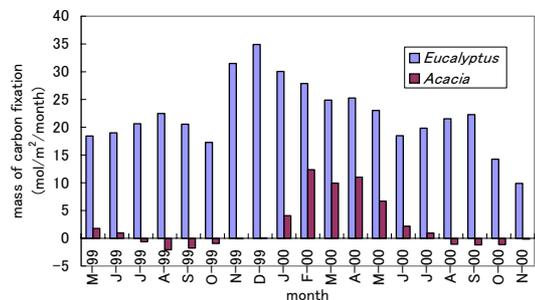


図 3-1-12 計算された月別炭素固定量

実際には光合成速度及び呼吸速度は温度によって変化するため、その影響を考慮する必要がある。温度と最大光合成速度 ( $A_{max}$ )、暗呼吸速度 ( $R_d$ ) の関係については図3-1-13に示されるような関係を得ている。図に示したように、いずれの樹種でも葉温が上昇するに従って $A_{max}$ は直線的に減少し、暗呼吸 ( $R_d$ ) は直線的に増加した。 $A_{max}$ は

*E. camaldulensis*と*A. aneura*で同じ傾向だった。 $R_d$ の増加は*E. camaldulensis*のほうが小さかった。

今後これらの温度に対する関係をモデルに組み込み、より現実に即したモデルに改良を行う。

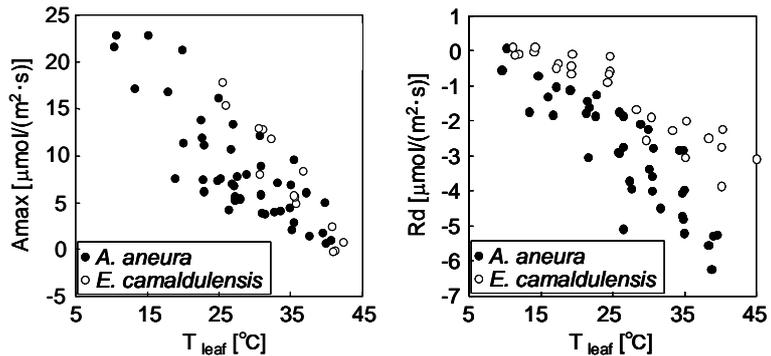


図3-1-13 温度と(左)最大光合成速度( $A_{max}$ )及び(右)暗呼吸速度( $R_d$ )の関係

### 3. 1. 10 *Eucalyptus camaldulensis*及び*Acacia aneura*の幹呼吸速度の推定

植物体の二酸化炭素収支は、(純生産量=総生産量-葉呼吸量-非同化器官呼吸量)と考えられる。幹(非同化器官)は植物体の現存量に占める割合が高く、呼吸による炭素

放出の主要器官となる。ここでは現地の優占種である *Eucalyptus camaldulensis* 及び *Acacia aneura* について幹温度と幹呼吸速度の関係を調べ、幹呼吸速度を推定するための定式化を行った。

幹呼吸速度は携帯式光合成蒸散測定装置(Li6400 Li-Cor, Inc., Linclon, NE)に取り付けられた土壌呼吸用チャンバー(Li6900-09)を流用し、閉鎖系方式で測定をおこなった。幹とチャンバーの接合部位は油粘土を用いて空気の漏れが無いよう設置した(図3-1-14)。測定部位面積とチャンバー体積は測定場所ごとに計算した。測定時の幹温度は測定面直上に深さ5cmに挿入された温度計(白金抵抗)によって測定した。*E. camaldulensis*は4本(SiteLP)、*A. aneura*は5本(Site12)を対象木とし、2001年12月、2002年6月、2002年12月、2003年3月に測定を行った。

両樹種において呼吸の単位は幹表面積当たりの呼吸速度であり、個体による明確な差異は認められなかった。*E. camaldulensis*及び*A. aneura*の季節による呼吸速度と温度の関係を調べたところ、いずれの季節においても幹温度の上昇に伴って呼吸速度は上昇した。しかし両樹種とも2002年12月の呼吸速度が高い幹温度にも関わらず他の時期より小さかった。この時期は2002年4月からの少雨による強い乾燥状態にあり、高温又は強い乾燥により呼吸速度が減少した可能性がある。



図 3-1-14 SiteLP での測定例

そこで両樹種について2002年12月を除いたデータから幹温度と呼吸速度の関係を調べたところ(図3-1-15)、それらの間に指数関数で導かれる以下のような関係を得た。

*E. camaldulensis*

$$R_{STEM} = 0.7241 \cdot \exp(0.0653 \cdot T_{STEM}) \quad (1)$$

$$Q_{10} = 1.92 \quad (r^2=0.5)$$

*A. aneura*

$$R_{STEM} = 0.6765 \cdot \exp(0.0392 \cdot T_{STEM}) \quad (2)$$

$$Q_{10} = 1.48 \quad (r^2=0.6)$$

ここで $R_{STEM}$ は幹単位面積あたりの呼吸速度 $[\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ 、 $T_{STEM}$ は幹温度 $[\text{C}]$ である。温度の低い時は *E. camaldulensis* の方が *A. aneura*より約1.1倍高い呼吸速度を示し、

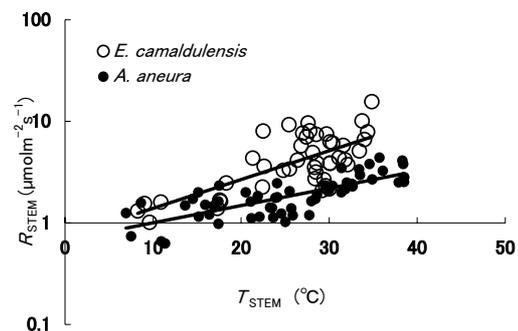


図 3-1-15 *E. camaldulensis* と *A. aneura* の幹温度と呼吸速度の関係

その差は温度の上昇と共に広がることが予想された。 $Q_{10}$ は多くの植物で1.6~3.0、平均で約2を使うことが適当であると言われているが、低温度に適応した植物では $Q_{10}$ が低くなる

(1.4-1.7)との報告もある。今回の2樹種では $Q_{10}$ が小さく、これは低温の場合と同様に、乾燥地での強いストレスに適応した結果であることが示唆される。

幹面積当たりの呼吸速度を温度により推定することがほぼ可能となり、個体のサイズ情報から林分レベルへの拡張が可能となった。

### 3. 1. 1 1 光合成プロセスモデルの構築

*E. camaldulensis*について、光合成総生産量 (Pg) と葉の呼吸速度のプロセスモデルに関するパラメタリゼーションをおこない、葉内水ポテンシャルを考慮して気孔コンダクタンス (Gs) が定常になる光合成量推定モデルを考案する。

実験はSiteLPにて2001年7月29 (5個葉)、2003年5月18-20日 (6個葉) に対し、A-Ciカーブ(光飽和時光合成速度-細胞内炭酸ガス濃度の関係)を携帯式光合成蒸散測定システム(Li6400 Li-Cor, Inc., Linclon, NE)で

表3-1-5 各パラメータの一次線形回帰の回帰係数

X \ Y	$N_{area}$	$V_{cmax}$	$r^2$
$V_{cmax}$	375.07		0.82
$J_{max}$		2.1512	0.86
$R_d$		0.0164	0.82

測定し、窒素含有率を実験室で測定した。また光合成速度および葉内水ポテンシャルの日変化を、SiteLP及びSiteCにて季節毎に7回測定した。

光合成速度を表す基本パラメータである、 $V_{cmax}$ 、 $J_{max}$ 、暗呼吸速度( $R_d$ )と窒素含有量の関係を特定した。解析結果はすべて葉温25度の時の値である。温度変換はアレニウス関数に従った。

$V_{cmax}$ は $N_{area}$  ( $N \text{ mol/m}^2$ ) と、 $J_{max}$ 及び $R_d$ は $V_{cmax}$ と強い線形の相関関係を示した。このことから調査期間内においてこれらの関係は次式で近似された。

$$V_{cmax} = 375.07 \cdot N_{area} \quad r^2=0.82 \quad (1)$$

$$J_{max} = 2.1512 \cdot V_{cmax} \quad r^2=0.86 \quad (2)$$

$$R_d = 0.0164 \cdot V_{cmax} \quad r^2=0.82 \quad (3)$$

$V_{cmax}$ 及び $J_{max}$ に関する係数はこれまでの既存報告とほぼ同様な値であった。

次に、蒸散速度( $Tr$ ) を以下の式で表すことを試みた。

$$Tr = Tr_{min} + m \cdot \frac{A_{net}}{C_s} \cdot VPD-L \cdot \Omega g \quad (4)$$

$$\Omega g = \frac{(-\Psi_{(1/2)g})^6}{(-\Psi_{(1/2)g})^6 + (-\Psi_{leaf})^6} \quad (5)$$

$Tr_{min}$  は最小蒸散速度、 $m$ は係数、 $VPD-L$ は葉-大気飽差、 $A_{net}$ は純光合成速度、 $C_s$ は大気炭酸ガス濃度、 $\Psi_{(1/2)g}$ は $Tr$ を半減させるときの葉内水ポテンシャル、 $\Psi_{leaf}$ は葉内水ポテン

シャルである。各測定日の早朝の $\Psi_{\text{leaf}}$ を $\Psi_{\text{pd}}$ と おくと、 $\Psi_{(1/2)g}$ 及び $m$ は以下の様に近似することができた。

$$\Psi_{(1/2)g} = 2.5677 \cdot \exp(0.2559 \cdot \Psi_{\text{pd}}) \quad r^2=0.98 \quad (6)$$

$$m = 107.52 \cdot \exp(-0.785 \cdot \Psi_{\text{pd}}) \quad r^2=0.96 \quad (7)$$

これらのことから土壌の乾燥に伴って、蒸散を半分にする葉内水ポテンシャルが下がり(絶対値が大きくなり)、また光合成やVPD-Lといった蒸散を増大させる要因に対する蒸散速度増加率の低下が定式化された。

VcmaxはNarea の関数として表現され、同様にJmax、RdがVcmaxと相関することから、各パラメータの25度での値はNareaの関数として表現された。またそれぞれの温度依存性は既存の報告から決定することができる。葉の水ポテンシャルやVPD-Lに対する蒸散速度の応答は $\Psi_{\text{pd}}$ で説明することができ、大気湿度からVPD-Lを決めることができればGsを決定することができる。Amthor(1994)のモデルでは気温とPPFDの熱収支から葉温が決定できるので、Narea、光量、気温、大気湿度、 $\Psi_{\text{pd}}$ のデータからPgとGsを一定値に収束させる光合成日変化推定モデルを構築することが可能となった(図3-1-16)。一般に $\Psi_{\text{pd}}$ は早朝の土壌水分条件と等しいと考えられるので、土壌水分条件の年変動が明らかになることで、*E. camaldulensis*における年間の単葉光合成速度が推定可能になった。

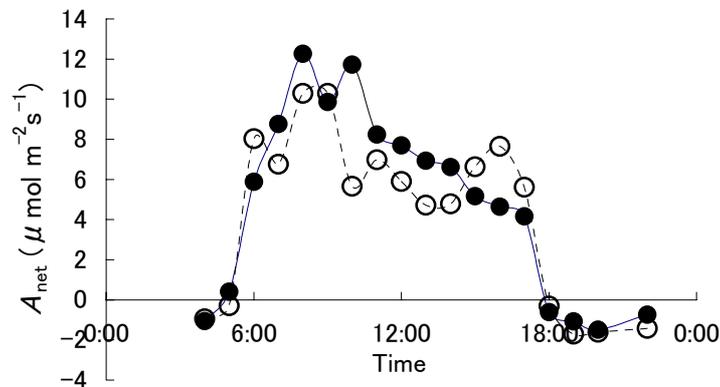


図3-1-16 2001年12月10日の光合成日変化のシミュレーションモデルによる再現(●が実測値、○が計算値)

### 3. 1. 12 成長と水分 — 肥大成長と降雨・土壌水分・樹液流との関係

調査地一帯に分布する高木種*E. camaldulensis*, *Acacia aneura*, *Casuarina obesa*を解析対象とし、幹の肥大成長及び樹液流量に及ぼす環境条件を明らかにすることを目的とした。

アルミバンドを用いた自記式高感度デンドロメータを作成し、約2年間1時間間隔で、自生する*E. camaldulensis*と*Acacia aneura*の幹成長量を測定した。また植栽サイトでは*E. camaldulensis*と *Casuarina obesa*の測定を同様に行った。金属部分の線膨張量は気温の

データより補正した。各測定箇所において降雨量、気温、深さ別の土壌水分、樹液流量の測定を行った。雨量については連続した日において降雨があった場合、その総和を1降雨量とし、次の1降雨があるまでの期間を1降雨期間とした。

基本的に、降雨によって土壌水分が一定以上になると、幹は急激に膨張しその後停滞および収縮が始まった。その収縮量が膨張量より少ないうちに次の降雨があれば膨張を続け、降雨間隔単位で見ると、見かけ上肥大（膨張量－収縮量）となった。自生の *A. aneura* と *E. camaldulensis* の膨張収縮パターンは少し異なっていた（図3-1-17）。両種ともまとまった降雨に反応して膨張するが、*A. aneura* は降雨後2-3週間緩やかな膨張と停滞を繰り返し、その後収縮が始まった。*E. camaldulensis* は、降雨量が多い時には降雨後1ヶ月以上膨張を続けた。*A. aneura* の直径成長は1降雨7-8mm以上で起きた。1降雨間隔における膨張量と環境要因との関係を調べるために、降雨量・前回の降雨量・前回降雨からの今回降雨までの日数・次回降雨までの日数・期間平均気温・期間平均土壌水分を独立変数として重回帰分析を行ったところ、降雨量と土壌水分（深さ25cm）に有意な偏回帰係数 ( $p < 0.05$ ) が得られた。降雨量と土壌水分には交互作用が認められることから、膨張量は降雨量（1変数）を変数とした単純回帰直線として表すことができた ( $R^2 = 0.835$ ,  $p < 0.001$ )。一方、*A. aneura* の幹の収縮量は、前回降雨からの日数と正の比例相関を持った ( $p < 0.01$ )。幹の膨張量は降雨後の総樹液流量と相関関係にあり（図3-1-18）、これは対数関数で近似できた ( $p < 0.01$ )。これは樹液流量の増加とともに膨張が一気に進み、その後の緩やかな肥大成長となるためと考えられる。一降雨期間の膨張量－収縮量は見かけの肥大大量であり、その期間に新たな木部組織が形成されなければ真の肥大とはならないが上記のような関係から真の肥大量を切り分けて環境要因から推定できる可能性が高い。

*E. camaldulensis* の幹は、樹液流との連動が見られたが、樹液流が減少しても着実に肥大していた。また幹の膨張量は降雨量

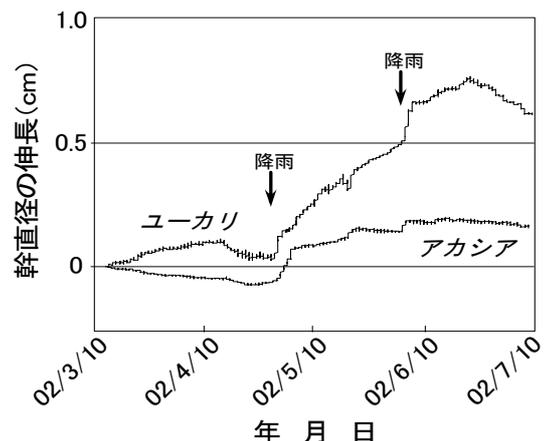


図 3-1-17 *E. camaldulensis* と *A. aneura* 自生個体の直径成長様式

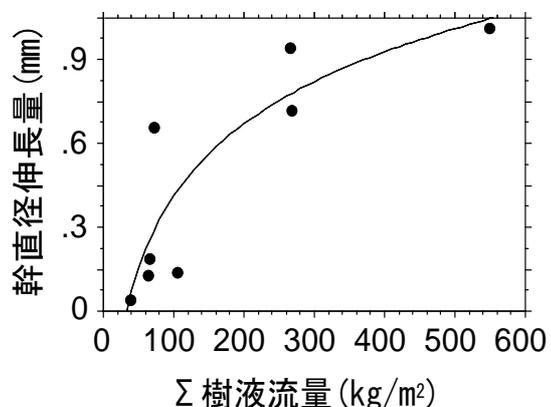


図 3-1-18 降雨後に生じた樹液流量の総和と幹直径伸長量との関係(*A. aneura*)

と有意な正の比例関係にあった ( $R^2=0.652$ ,  $p<0.05$ )。しかし、*A. aneura*が降雨後20日前後から収縮し始めたのに対し、より長い無降雨でも肥大につながる膨張が続いた。深さ100cmの土壤水分量と膨張量は有意な正の相関を示し、深さ50cmの土壤水分量とは相関を示さなかった。また*E. camaldulensis*の生育する立地では、*A. aneura*よりも平均土壤水分量が高かった。そのため樹液流量が多く、連続的な肥大成長を示したと考えられる。深さ100cmの土壤水分値は降雨量と明瞭な比例関係を示さなかった。これらより、*E. camaldulensis*は深い位置での土壤水分を利用しており、それは降雨由来だけでなく、地下水由来の水分を利用していると考えられた。

植栽サイトの*E. camaldulensis*は、ほとんど降水のない極少降水期間でも幹は膨張を続けて結果的に肥大成長を行ったが、これは、*E. camaldulensis*が深根性 (2-3m)であるからと考えられた。一方*C. obesa*はまとまった降雨直後に膨張したが、肥大に至らなかった。また灌水を行うと、*C. obesa*はそれに反応して膨張したが*E. camaldulensis*は反応しなかった。このことから、*C. obesa*は*A. aneura*に似た肥大成長動態を示すが、*C. obesa*の根は深さ約2m未満であることから、その肥大成長には降雨以外の水分供給の必要性が示唆された。

以上をまとめると、乾燥地における樹木は、降雨によって幹が膨張と収縮を繰り返しながら成長していることが解った。*A. aneura*の幹の膨張量は一降雨量と強い相関をもち、深さ25cmの土壤水分変化の影響を受け、より低い土壤水分環境で生存していた。これは、浅根性ではあるが高い耐乾性を持っているためと考えられた。その伸長パターンは、降雨直後に急激に膨張し、その後停滞もしくは次の降雨までゆっくり収縮するという形をとり、降雨間隔が狭まらないと肥大には至らない。*E. camaldulensis*も降雨直後は同様な伸長パターンをとるが、降雨がなくても肥大でき、深さ1m以上の土壤水分が有効であった。これは*E. camaldulensis*は*A. aneura*より深根性で、地下水由来の水を利用できるためと考えられた。*C. obesa*も*A. aneura*と同じような動態を示すが、*E. camaldulensis*と*A. aneura*の中間の深さに根系を発達させるため、深さ1-2mへの水分供給がなされるかどうかによって、成長の可否が決まると考えられた。全種に共通して言えることは、肥大のためには収縮に至る前に次の水分供給が必要であり、それぞれの種の特性を踏まえれば、効果的な植栽・育成方法が確立できる。

### 3. 1. 13 同位体元素を用いた樹木の水源特定

現地に自生する*E. camaldulensis*及び*A. aneura*がどの水源 (地下水や表層水) を利用しているか安定同位体比分析( $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ )を用いて検討した。

Site1の*E. camaldulensis*及びSite2の*A. aneura*について、枝は樹高や方角を、根は深さを変えて採取した。各サイトで表層土壤水を採取するとともに、両サイトに近いDoyles

wellの水を採取した。これらのサンプルを安定同位体比分析( $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ )した。安定同位体比分析結果は $\delta[0/00] = (RSA-RST) / RST$ で定義される $\delta(\delta D, \delta^{18}O)$ 値で表した。ここでRSAはサンプル中の、またRSTは標準平均海水 (SMOW) 中の、D/Hあるいは $^{18}O/^{16}O$ の存在量比であり、 $\delta$ 値は標準物質からの同位体存在量比の偏差を表す。樹木水と地下水及び表層土壌水の $\delta$ 値を比較し、樹木がどちらの水資源を利用しているか推定した。

図3-1-19に*E. camaldulensis*の結果を示す。左下に行くほど $\delta$ 値が小さく軽い水であることを示す。図中、根、土壌についての数字は地表面からの深さ[cm]、枝についての英字は方角を表す。枝、根の $\delta$ 値には方向や深さによる大きな違いは見られず、また根と枝の違いもはっきりとは見られない。また、それらの $\delta D$ 値及び $\delta^{18}O$ 値は、周辺地下水であるDoyles wellの値とほぼ一致し、表層(深さ60cm)土壌水とは異なった値を示した。従って、*E. camaldulensis*は地下水を主な水源としていられる。*E. camaldulensis*が生育する地域は、降雨が起こればクリークに水が流れ、そのクリーク沿いの深層に水が溜まる地域である。通常、耐乾性が高いと言われている*E. camaldulensis*ではあるが、降水量200mm程度の本乾燥地域では、その中でも水条件のよい地域でしか生育していないことから、この樹種の育成のためには深層で水が確保できるような立地条件を得ることが重要である。

一方*A. aneura*の場合(図3-1-20)は、枝、根の $\delta D$ 値、 $\delta^{18}O$ 値ともに、表層(深さ20cm)土壌水の値と近く、表層土壌水が主要な水源と考えられる。*A. aneura*が生育している地域では深さ100cm以内にハードパンと呼ばれる不透水層が存在しており、この結果は*A. aneura*の根がハードパンを貫通することなく、ハードパン上の表層土壌内の水分しか利用できないことを裏付けている。

尚、本結果中ではDoyles wellの地下水の $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 値は表層土壌水よりも低く、軽い水であるとの結果であることが分かった。降雨自身の同位体比には季節変動があることから、降雨後から長時間かけて集積したと思われる地下水の同位体比が、比較的直近に得られた雨水を反映する表層土壌水と大きく異なると考えられる。

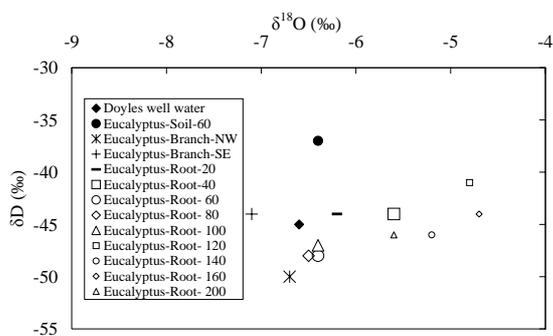


図3-1-19 同位体比分析結果 (*E. camaldulensis*)

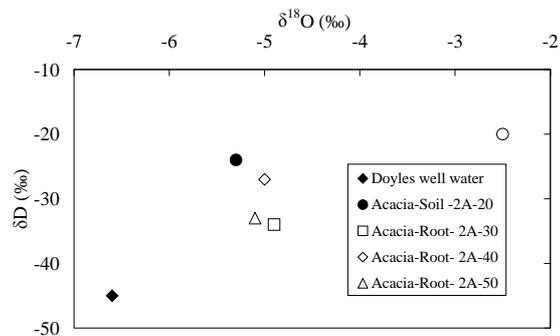


図3-1-20 同位体比分析結果 (*A. aneura*)

### 3. 1. 14 *E.camaldulensis*の水利用効率の推定

樹木の水利用効率は、利用できる水量から期待される炭素固定量を予測する際に重要な指標となる。天然の*E. camaldulensis*について、樹液流量と成長量を測定することにより、水利用効率を算出し、またその季節変化、土壌の水分状態との関係を検討した。

クリーク沿いの*E. camaldulensis*林の林縁に位置し、成長途上にある*E. camaldulensis*若木を選び、樹液流量測定用のTDP (Thermal dissipation probe) を設置した。樹液流速データは、太陽電池システムを電源とするデータロガーに15分間隔で収録した。また樹木から3mほど離れた位置に土壌水分プローブを深さ0.5m、1.0m、2.0mに埋設し、土壌含水率の連続測定も行った。定期的に測定樹木の樹高、樹幹径などを測定し、アロメトリ一式により乾燥重量を推定した。なお、乾燥重量から炭素量への換算率は実測から47.7%とした。

図3-1-21に測定期間中の土壌含水率変化及び日雨量を示す。また図3-1-22には樹液流速の測定データから計算した日積算樹液流量の時間変化を示す。2001年12月に37mmの降雨があり、樹液流量は急激に増加した。この時、0.5m及び1.0mの深さの土壌含水率は降雨の浸透に伴い増加したが、2.0mの土壌含水率はほとんど変化しなかった。このことから測定対象樹木の根の多くは2.0mより浅いところに存在していると予想され、樹液流量は0.5-1.0mの土壌水分に依存して変化した。測定開始時には約6mの樹高で現存量が約60kgであった測定樹木は、約2年間に10mの高さで約150kgまで成長した。この成長測定期間の成長量と総樹液流量から水利用効率を計算した結果を表3-1-6に示す。対象木

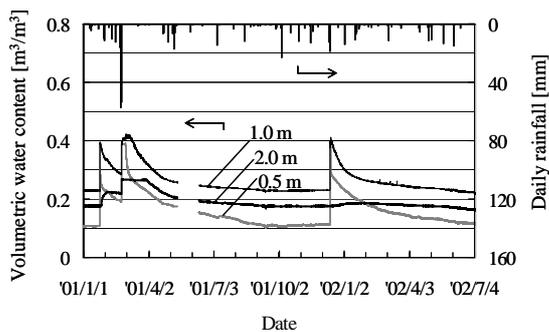


図 3-1-21 土壌含水率および日雨量との関係

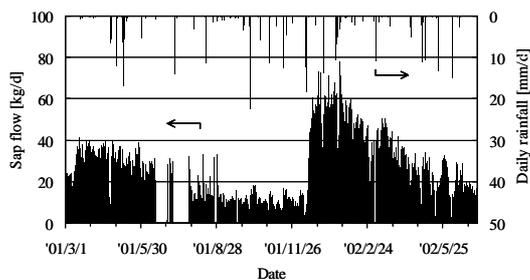


図 3-1-22 日積算樹液流量と日雨量との関係

表 3-1-6 水利用効率の推定

	Sap	Tree growth	WUE <sub>P</sub>	Water content (50-100cm)
	[t]	[kg]	[g-C / kg-H <sub>2</sub> O]	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]
2001.3.10-2001.6.12	2.9	13	2.1	0.26
2001.6.12-2001.9.7	2.1	13	3.0	0.19
2001.9.7-2001.12.10	2.2	15	3.3	0.17
2001.12.10-2002.3.24	5.0	19	1.8	0.24
2001.3.10-2002.3.24	12	61	2.4	0.21

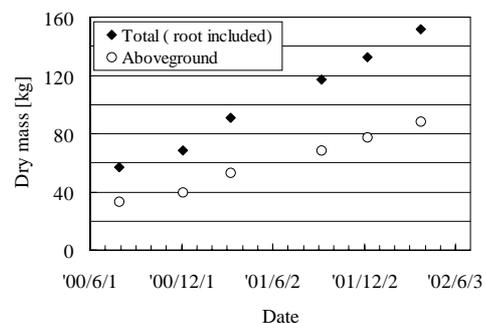


図 3-1-23 水利用効率からの炭素固定量の推定

の水利用効率は2001年の3月から2002年3月までの年間では2.4g-C/kg-H<sub>2</sub>Oであった。しかし、より短い期間で見ると、水利用効率は土壌含水率に依存して変化しており、土壌含水率が高いほど水利用効率は低くなった。樹液流量も土壌水分に依存して変化しており、その関係を把握することにより、土壌水分から樹液流量及び水利用効率を推定し、炭素固定量を予測することが可能になるとと思われる。

### 3. 1. 15 栄養塩をトレーサーとした水利用効率の推定

樹木の水利用効率（単位水量に対する固定炭素量）は樹木の成長予測だけでなく、植林適種の選択においても重要な指標である。ここでは、より迅速で簡便な水利用効率推定法として、栄養塩をトレーサーとした推定法を提案し、検討した。

樹液中栄養塩濃度と樹木中の炭素と栄養塩量の比から水利用効率を次式により推定した。

$$R_{C/W} = \frac{C_{N/W}}{R_{N/C}} \quad (1)$$

$R_{C/W}$ [kg-C/kg-H<sub>2</sub>O]は水利用効率、 $C_{N/W}$  [kg-nutrient /kg-H<sub>2</sub>O]は樹液中栄養塩濃度、 $R_{N/C}$  [kg-nutrient/kg-C]は樹木組織中の炭素と栄養塩の比である。実際にはこの概念が成り立つには、根から吸収した栄養塩は全て炭素と結びつくなど、満たすべきいくつかの条件があり、それらを満たす栄養塩元素をトレーサーとして選択すべきである

が、ここではどの樹種にも高濃度で存在するK及びCaをトレーサーとして選択した。

*Casuarina obesa*、*Eucalyptus camaldulensis*、*E. torquata*、*E. lesouffei*、*Acacia aneura*、*A. tetragonophylla*の6樹種について、樹木組織（葉、枝、幹等）試料を採取し、C、K、Caの含有量を分析した。また、プレッシャーチャンバーを用いて葉から樹液を採取し、樹液中に含まれるK及びCaを分析した。

図3-1-22で示されるように、 $C_{N/W}$ を縦軸に、 $R_{N/C}$ を横軸にプロットすると、プロットが形成する直線の傾きとして水利用効率が求められる。どの樹種でも、Kをトレーサーとした場合の水利用効率は $10^2$  kg-C/kg-H<sub>2</sub>O前後、Caの場合は $10^3$  kg-C/kg-H<sub>2</sub>O前後であ

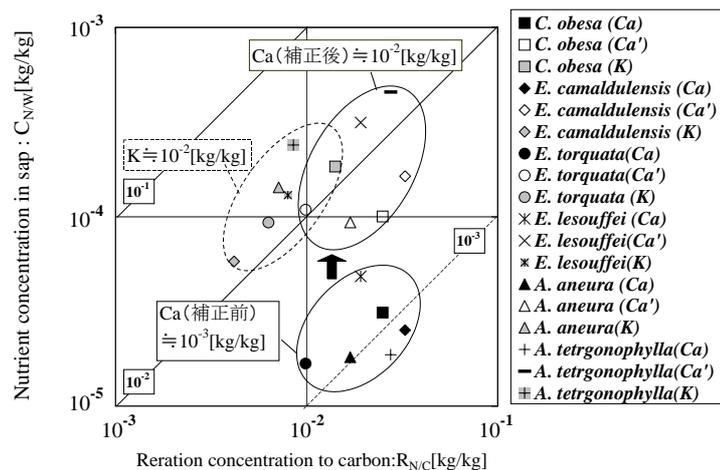


図 3-1-24 水利用効率の推定

った。しかし、別途測定した樹液中Ca濃度の高さ方向の違いから、樹液中Caは葉に到達する前に失われている可能性があり、上方の葉で測定される濃度は根から入ってきた時の濃度よりも低くなっている。そこで、樹木内Ca挙動の特徴を考慮し、次式により補正を行った。

$$C_{N/W}' = C_{N/W} \times \frac{C_{Ca-Total}}{C_{Ca-Leaf}} \quad (2)$$

$C_{N/W}'$  [kg-Ca/kg-H<sub>2</sub>O]は補正後の樹液中Ca量、 $C_{N/W}$  [kg-Ca/kg-water]は補正前の樹液中Ca量、 $C_{Ca-Total}$  [kg-Ca]は樹木中全Ca量、 $C_{Ca-Leaf}$  [kg-Ca]は葉中Ca量を示している。この補正を行った樹液中Ca濃度を用いたところ、KおよびCaいずれの場合も水利用効率は、 $10^{-2}$  kg-C/kg-H<sub>2</sub>O前後となった。

### 3. 1. 16 リターフォール量、土壌及びリター分解率

森林生態系において正味の炭素固定速度を把握するために、地表面からの炭素収支を明らかにする必要がある。ここではリターフォール（落葉枝）の量、リターフォールの分解速度及び土壌からの炭素放出速度（土壌呼吸速度）を推定することを目的とした。

半乾燥地で見られる疎林では林冠が閉鎖していないため、林分としてのリター量を把握することが困難である。本プロジェクトでは個体のリターフォール量から林分のリターフォール量を捉えることを試みた。まず図3-1-23に示すように個体全体をネットで囲いリターフォール全量を捕捉する手法(Method I)を考案した。また大型の個体に対しては円型のリタートラップを単木の周りに距離を変えて複数個設置し、各トラップに回収されたリター量をもとに、樹木からの距離に対するリター量の関数を求め、個体リターフォール全量を計算により推定する手法を考案した(図3-1-24, Method II)。対象木はサイズの異なる各4本の *Eucalyptus camaldulensis* 及び *Acacia aneura* を用いた。1-3ヶ月毎にリターを回収し、葉、枝、種子、その他に分離後、乾燥・秤量した。2001年9月から1年間のリターフォール量と、個体地上部現存量の関係を見たところ、Method I と Method II の結果は、個体現存量に対して同一直線上にあることから、両手法は同等の精度を有すること、またリターフォール量は個体地上部現存量と比例関係にあることが示された(図3-1-25,3-1-26)。図中に示した関係式より、*E. camaldulensi* と *A. aneura* の個体の年間



図 3-1-25 Method I  
(リターフェンス)



図 3-1-26 Method II  
(円型リタートラップ)

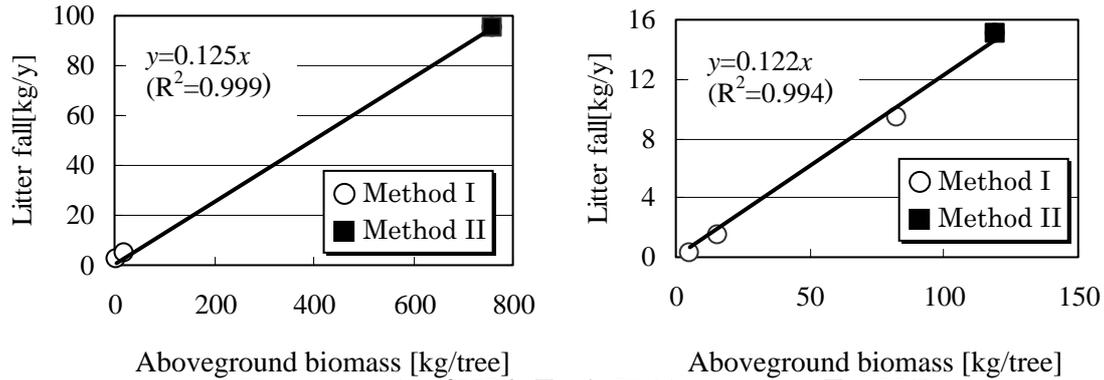


図 3-1-27 地上部現存量と年間リターフォール量の関係  
(左; *E. camaldulensis*, 右; *A. aneura*)

リター量は、地上部現存量の約12.5%、及び12.2%であった。内訳は葉72~85%、枝5~7%、表皮0~1%、種その他10~20%であった。

リター分解率及び土壌呼吸速度の測定は2000年12月よりアカシア疎林 (site12)、アカシア閉鎖林 (site7、site2)、ユーカリ林 (site LP) で行った。アカシア林においては各サイトの地表面に *A. aneura* の葉を、またユーカリ林では *E. camaldulensis* の葉を封入した1mmメッシュのリターバッグをそれぞれ100個設置した。約1年及び2年経過後、リターバッグを回収して求めた重量ベースの残存率から、年間のリター分解率を求めた(表3-1-7)。

土壌呼吸速度と地温(深さ5cm)の測定は、携帯式光合成蒸散測定装置(Li6400 Li-Cor, Inc., Linclon, NE)及び土壌呼吸用チャンバー(Li6900-09)を用い、同時に土壌含水率を測定した。土壌呼吸速度は土壌含水率について1次反応式に従うとし、温度が与える影響についてはアレニウス則を用いて解析した。この結果より関係式の定数項を決定し、年間の含水率と地温の変化から各サイトでの年間土壌呼吸量を推定した(表3-1-7)。

リターフォールの分解率はサイト2で高く、他のサイトではほぼ同等であった。土壌呼吸量はユーカリ林であるサイトLPで高くなったが、これまで世界各地で測定された土壌呼吸速度の範囲内にあった。各測定サイトでのリターフォール量を地上部現存量から推定し(サイトLPに関しては近隣の林分であるサイト1のデータを用いた)、1年間に分解されるリターフォール量を試算した。土壌呼吸量に対してリター分解量がサイト2で大きかったが、それ以外の林分ではこれらは相関

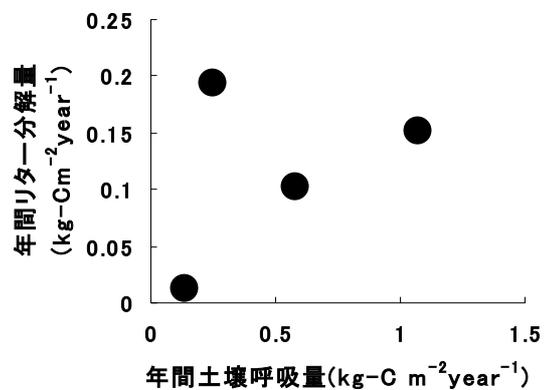


図 3-1-28 年間土壌呼吸量と年間リター分解量の関係

表 3-1-7 各測定サイトでのリター分解率及び年間の土壌呼吸量

	s2-1	s2-2	s7-1	s7-2	s7-3	s12-1	s12-2	s12-3	LP-1	LP-2	LP-3
リター分解率 (% year <sup>-1</sup> )	25	26	20	18	15	16	20	19	23	15	21
サイトの平均	26		17			18			19		
土壌呼吸量 (g-Cm <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup> )	256	236	914	357	465	125	141	157	1293	1118	807
サイトの平均	246		579			141			1072		

関係を示した。土壌呼吸量のうち、リター分解量は15%であり、残りは蓄積されてきた有機物の分解及び根による呼吸速度が含まれると考えられる。しかしこれまで各植生帯域で推定されてきたリターフォール量と土壌呼吸量の関係を概観すると、土壌呼吸量はリターフォール量の2.5倍から3.3倍にあると考えられる。本プロジェクトサイトの場合、土壌呼吸量は推定されたリターフォール量に対してそれほど大きい値を示すとはいえなかった。このことは葉の分解率が低く、リターフォールが未分解のまま蓄積もしくは流亡している可能性を示唆する。

### 3. 1. 17 LeonoraとEsperanceの成長比較

LeonoraおよびEsperance地域における*E. camaldulensis*と*C. obesa*の成長傾向より、降水量および樹種による成長の違いを把握する。

乾燥地であるLeonoraから湿潤地のEsperanceまでの3つの植林地で、1999年9月と2001年2月に行われた毎木調査結果を用いRGR (H)、RGR(S)、年平均樹高成長量、年平均地際断面積成長量を算出した。これらを用い、2種の成長傾向の比較検討を行った。

RGR (Relative Growth Rate,  $RGR = \{\ln(W2) - \ln(W1)\} / (T2 - T1)$ ) は、重量(W)の対数の差を時間(T)の差で割ったものである。今回は、重量の代わりにそれぞれ樹高、地際断面積を用いたものをRGR (H)、RGR(S)とし、解析の指標とした。

LeonoraとScaddanにおける成長量の比較から、共に*E.camaldulensis*が*C.obesa*よりも高い成長を示すことが明らかになった。これは、Sturt Meadowsにおける灌水量と成長量との相関が得られている結果と一致する。図3-1-28は*C.obesa*の積算降水量とRGR(H)の関係を示す。その結果、年平均降水量480mm(積算降水量700mm)付近で最も高く成長し、それ以上の降水量では増加傾向が見られない。この結果からでは、降水量と成長量との相関は得られていないが、Sturt Meadowsにおける灌水量－成長量とに相関があること

表 3-1-8 解析対象地の概要

地域	サイト	積算降水量(mm)	<i>E.camaldulensis</i>	<i>C.obesa</i>
Esperance	2	853.2	×	○
Scaddan	2A	652.3	×	○
Scaddan	3A	685.6	○	○
Scaddan	4A	685.6	○	×
Leonora	A	628.3	○	○

は確認されている。EsperanceおよびScaddanにおけるサイトでは、塩害やWaterloggingなどの問題があると言われていることから、Esperance site2では何らかの樹木の成育阻害が生じていると考えられる。今後、土壌水分や土壌中栄養塩（特に塩濃度）とのデータを含めた複合的な解析により、これらの成長阻害因子を明らかにしていく。

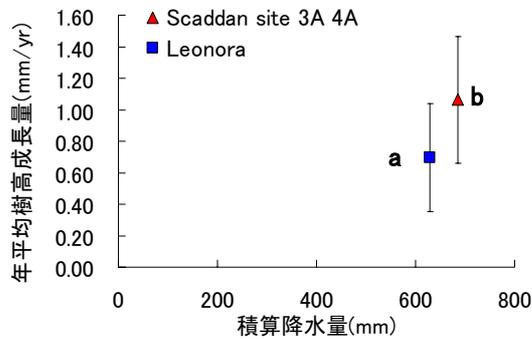


図3-1-29 *E. camaldulensis*の年平均樹高成長量比較

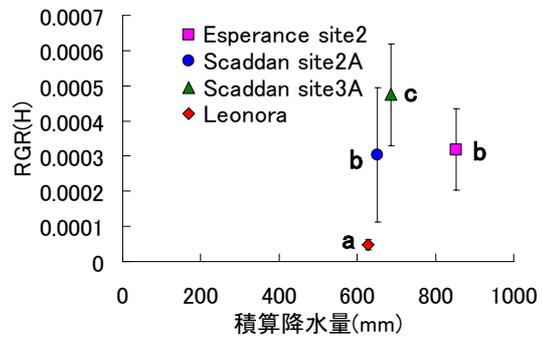


図3-1-30 *C. obesa*のRGR(H)比較

### 3. 1. 18 研究成果の今後期待される効果

調査地域における開放林の現存植物量の推定法を確認したことによって、今後の当地域における植林活動による植物量の増減に対するモニタリングが精度良く実施可能となり、乾燥地植林の評価の信頼性が向上する。同時に、広域の植物量が従来より高精度に推定可能となると共に、オーストラリア全土およびさら推定法を改良することによって全球的な植物量の検討が可能となると期待される。

限定された樹木成長環境にあつて、水資源、土壌栄養素および植物生理等に関する条件がどのように影響を及ぼすかの基礎的な試みが行われ、個々のターゲットに対する特徴は把握できたが、調査期間の不足もあつて定量的な確実性確認には至らなかった。しかし、これらの方法論や基礎データは今後の乾燥地植物の研究に十分に寄与すると考えられる。また、最終的には樹木成長にとって重要となる個々の要因の相互影響関係とシステムとしてのまとまりの評価が不可欠となるので、それに向けての成果としての寄与は大きい。

### 3. 2 土壌システム研究グループ

#### 3. 2. 1 土壌基礎物性および土壌水分とバイオマスとの関係

バイオマスと土壌水分および土壌基礎物性との関係を理解することは、土壌－植物のサブシステム間の繋がりを構築するのに欠かせない情報であり、更には植林における土壌改良技術への指針を与えることが可能となる。そこで土壌環境およびバイオマスとの相関を取るために、Site1～12の植生調査サイトを対象とし、現在までに得られている各種土壌基礎物性、バイオマス量、成長速度等の実測データを元に解析を行った。

評価指標として用いた土壌基礎物性および土壌水分は、以下の6つである。(1)土層厚み、(2)植物利用可能水量：水分特性曲線を作成し、その結果を基に植物が生長に利用できる土壌ポテンシャル $pF=1.8\sim 4.2$ 間の含水率を算出、(3)最大土壌保水量（土層厚み(1)×植物利用可能水量(2)）、(4)年間平均土壌含水率：土壌水分センサーから得られたデータ(1999/12/22～2002/8/17)の全平均値、(5)年間平均土壌含水率×土壌深さ：各サイトにおける土壌深さを考慮した年平均土壌層含水率、(6)正常生育有効水分到達時間：土壌水分(センサー)データにおいて一番大きなピークを用いて、降雨直後の湿潤状態から $pF=3$ の正常生育土壌水分までに至る時間。

バイオマスに関するデータは、植生システム研究グループで得られた現存量推定式を用い、*A. aneura*と*E. camaldulensis*については $D^2H$ ( $D$ :幹直径、 $H$ :樹高)から、その他の樹種は樹冠被覆率から算出された値を用いた。この推定法からバイオマス量と成長速度の関係は、図3-2-1に示すような一次近似の相関関係が得られた。

(1)～(6)の評価指標とバイオマスとの相関を整理した結果、(6)正常生育有効水分到達時間とバイオマス量とに高い相関があることが分かった。正常生育有効水分到達時間は、透水性と土壌深さと密接な関係があり、今後、様々な降雨パターンでの到達時間、土壌環境でより詳細な解析を進めていく。

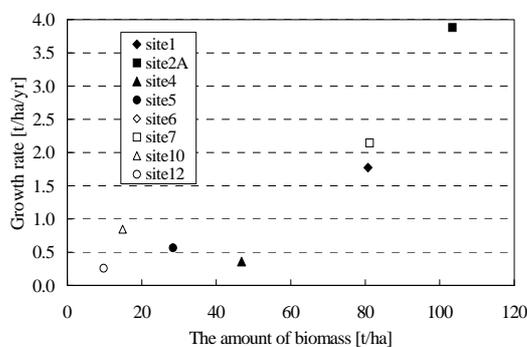


図 3-2-1 バイオマスと成長速度の関係

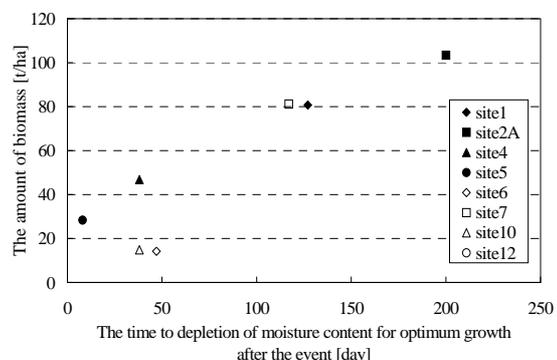


図 3-3-2 正常生育有効水分到達時間とバイオマスの関係

### 3. 2. 2 土壌の化学性と植生との関係、不足栄養塩の特定

現地の土壌の化学性を明らかにし、植生との関係を把握する。また、現地の優占種である*Acacia aneura*について、土壌中と樹木中の栄養塩含有量を比較することにより、不足している栄養塩元素を特定する。

各サイトにおいて深さの異なる2、3点から土壌を採取し、各種分析を行った。*A. aneura*の葉、枝、表皮、根を生育するサイトから採取し、分析した。それぞれに含有される栄養塩元素の定量分析は表3-2-1に示す方法で行った。

表 3-2-1 栄養塩分析法

	測定元素	分析方法
土壌	交換性K, Ca, Mg	NH <sub>4</sub> Cl or BaCl <sub>2</sub> 抽出+原子吸光法
	可給態P	NaHCO <sub>3</sub> 抽出+吸光光度法
	硝酸態N	KCl抽出+ナフチルエチレンジアミン吸光光度法
	アンモニウム態N	KCl抽出+インドフェノール吸光光度法
樹木	N	乾式燃焼法+GC
	K, Ca, Mg, P	硝酸・過塩素酸分解+ICP-MS

#### 土壌の化学性と植生との関係

各サイトの土壌の分析結果を表3-2-2に示す。各サイトの土壌化学性は、全体的に炭素、窒素、リンの含有量が、特に表層以外ではかなり少なく、対象乾燥地域では土壌中においてこれらの元素は不足している。アンモニウム態窒素と硝酸態窒素では前者の方が大きく、硝化作用は抑制されている。但し、Site 1及びSite 7の表

表 3-2-2 各サイト土壌の化学性

Site	Soil depth (cm)	EC (1:5) (mS/m)	pH (H <sub>2</sub> O)	C (total) (%)	N (total) (%)	C/N	Exchangeable cation					Nitrogen		Phosphorus		ESP (%)	
							Al (me%)	Ca (me%)	K (me%)	Mg (me%)	Na (me%)	T.E.B. (me%)	(NH <sub>4</sub> ) (mg/kg)	(NO <sub>3</sub> ) (mg/kg)	(total) (mg/kg)		(HCO <sub>3</sub> ) (mg/kg)
1	0	45	6.9	5.54	0.45	12		19.66	1.39	5.59	0.10	26.74	44	29	360	45	0.4
	30	6	7.0	0.44	0.04	11		6.26	0.69	2.17	0.18	9.30	4	1	170	9	1.9
	60	9	6.9	0.76	0.06	13		12.22	0.76	4.50	0.20	17.68	9	1	180	11	1.1
2a	0	12	6.8	0.90	0.08	11		4.79	1.32	2.01	0.09	8.21	16	2	250	17	1.1
	15	6	7.0	0.48	0.05	10		4.90	1.33	2.30	0.13	8.66	6	1	240	14	1.5
	30	8	7.1	0.51	0.05	11		7.23	1.59	3.82	0.26	12.90	6	1	210	11	2.0
3	0	16	6.5	0.46	0.05	10		0.79	1.10	0.28	1.03	3.20	6	1	250	13	32
	20	59	7.0	0.26	0.03	7.6		1.39	0.78	3.26	2.24	7.67	7	1	180	4	29
4	0	11	5.2	1.49	0.13	12	0.20	2.52	0.80	1.24	0.07	4.63	22	2	310	12	1.5
	15	9	5.0	0.68	0.06	11	0.17	2.53	0.76	1.17	0.06	4.52	14	2	270	6	1.3
	30	8	5.8	0.28	0.04	7.0	<0.02	3.44	0.62	2.27	0.19	6.52	10	1	210	5	2.9
5	0	11	5.6	1.63	0.13	13	0.08	3.36	0.87	1.21	0.06	5.50	19	2	320	18	1.1
	15	10	5.2	0.56	0.05	11	0.09	2.50	0.64	0.89	0.08	4.11	11	2	270	8	1.9
	30	9	5.3	0.33	0.04	7.9	0.02	2.57	0.56	0.93	0.13	4.19	12	1	230	5	3.1
6	0	13	6.0	1.63	0.14	12	<0.02	4.74	0.76	2.01	0.16	7.67	16	1	330	26	2.1
	15	32	7.7	0.34	0.03	10		6.24	2.27	6.67	1.05	16.23	4	1	180	6	6.5
	30	85	7.9	0.31	0.04	7.6		6.34	2.26	9.03	1.96	19.59	4	1	180	6	10
7	0	15	4.8	1.82	0.14	13	0.44	2.32	0.56	1.00	0.09	3.97	19	18	300	9	2.3
	15	6	4.5	0.43	0.04	10	0.85	0.30	0.40	0.34	0.04	1.08	8	2	180	4	3.7
	30	6	4.5	0.42	0.04	11	0.73	0.24	0.38	0.36	0.04	1.02	8	2	160	4	3.9
8	0	4	4.8	0.80	0.07	12	0.61	0.66	0.26	0.30	0.03	1.25	7	4	220	11	2.4
	25	7	4.4	0.40	0.04	9	0.81	0.63	0.32	0.16	0.03	1.14	9	1	140	4	2.6
	50	6	4.8	0.27	0.04	7.3	0.24	1.21	0.34	0.45	0.05	2.05	9	1	120	3	2.4
9	0	8	5.7	0.77	0.07	11	0.03	2.26	0.88	2.21	0.24	5.59	6	1	270	13	4.3
	20	5	6.1	0.31	0.04	8.6	<0.02	2.84	0.49	2.91	0.40	6.64	4	1	200	3	6.0
10	0	2	6.0	0.41	0.03	12	<0.02	1.27	0.51	1.20	0.06	3.04	2	1	170	10	2.0
	30	3	7.2	0.26	0.02	12		2.81	0.84	0.62	0.07	4.34	2	1	110	<2	1.6
	60	4	8.0	0.24	0.02	10		3.68	0.77	0.92	0.08	5.45	2	1	100	<2	1.5
11	0	6	6.8	0.43	0.04	10		3.18	0.99	1.25	0.25	5.67	4	1	460	32	4.4
	20	4	6.8	0.28	0.03	10		2.96	0.74	2.12	0.60	6.42	3	1	250	5	9.3
12	0	9	5.1	1.59	0.14	12	0.24	1.92	0.66	0.58	0.03	3.19	14	4	260	10	0.9
	15	5	5.0	0.47	0.04	11	0.21	1.00	0.64	0.36	0.03	2.03	6	1	170	4	1.5
	30	7	5.0	0.44	0.04	11	0.19	0.97	0.63	0.44	0.07	2.11	6	1	160	3	3.3

層では他に比べて硝酸態窒素の量が多く、またアンモニウム態窒素との差も小さく、硝化作用が進んでいる。炭素率（C/N比）を見ると、サイトによって全炭素、全窒素の量は異なるものの、表層土壌の炭素率はどのサイトでも10～13の範囲にあり、別途測定した*A.aneura*の落葉中の炭素率が約40であることから、対象乾燥地では土壌微生物によるリターの分解、無機化が進んでいることが分かる。また、深層に向かうほど炭素率は小さくなる傾向が見られ、さらに無機化が進んでいる。

#### 土壌中含有量と樹木中含有量との関係

各元素の土壌中及び樹木中含有量の関係（図3-2-3）から分かるように、K、Ca、Mgについては、樹木中の含有量は土壌中含有量の増加に伴い増加するが、あるところから頭打ちになる傾向がある。この頭打ちになる範囲では、樹木の栄養塩要求量に対して土壌から十分な量が供給されていると言える。樹木中含有量のこの頭打ちの値が*A.aneura*の栄養塩要求量であると言え、K、Ca、Mgの要求量はそれぞれ約5 mg/g-tree、20 mg/g-tree、1.2 mg/g-treeであると推定される。また土壌中含有量に関しては、Kは300 mg/g-soil以上、Caは600 mg/g-soil以上、Mgは200 mg/g-soil以上あれば*A.aneura*にとって良好な栄養環境を与えると考えられる。一方、Pの樹木中含有量は土壌中含有量とともに増加するが、前の3元素のように土壌中含有量の増加に対して頭打ちになる傾向は見られない。以上の結果から、研究対象とする乾燥地では土壌中に*A.aneura*のP要求量を満たす十分なPが存在していないと言えることができる。

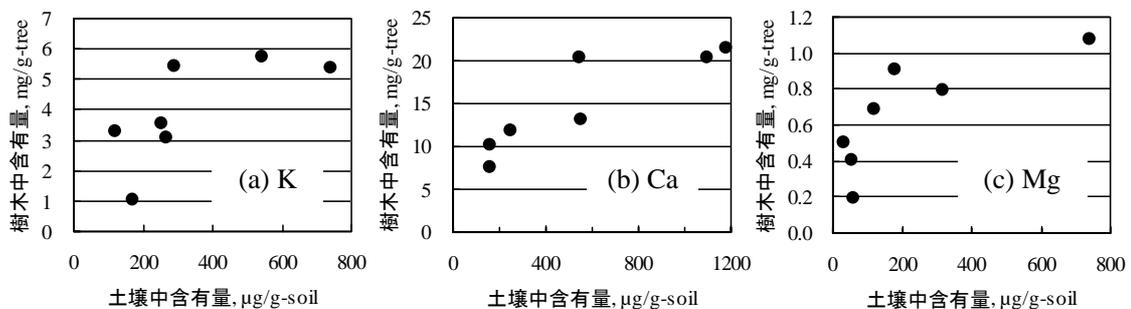


図 3-2-3 土壌中と樹木中の栄養塩含有量の関係

### 3. 2. 3 雨水土壌浸透の定量的把握

現地土壌環境条件を表す物性を把握し、これを用いて降雨水の土壌への浸透および流出水量を予測することは、降雨後の土壌中水分量を決定づける重要な過程であるとともに、土壌条件改良手法の提案に不可欠な情報である。そこで、現在までに分かっている雨水土壌中浸透阻害要素が、実際に浸透に与える影響の大きさを、これまで得られてきた測定値から評価するとともに、このような現象が透水性に大きく影響を与える可能性があることを数値解析により定量的に考察した。

(測定結果1：ハードパンが水分移動に与える影響) SiteTに、約25～30cm程度の深さにハードパンが存在する裸地とハードパン破砕により3mほどの穴が開いている破砕穴の2カ所に土壤水分センサーを埋設した。その結果から、破砕穴では50cm程度の深さまで十分浸透が起きていることが確認されたが、裸地土壤では限界含水率に近いと思われる水分量のまま推移している。これはほとんど透水が起きていることを示唆している。土壤の透水係数の測定値は大きくは異ならないにもかかわらずこのような違いが生じたことは、以下に述べる空気の封入効果(大量の雨水が降ることにより、土壤中の空気が封入され逃げ道を失い浸透が妨げる)が原因の一つと推測される。

(測定結果2：クラストの影響) Site4におけるシリンダーインテークレート試験および変水位法による結果から、土壤本体より桁違いに細かい土壤粒子からなるクラストが表層に存在すると、表層からの浸透速度は下層土より一桁小さい結果が得られている。

(測定結果3：降雨強度と流出率およびシリンダーインテグレート法による測定結果との整合性) 解析対象は表面流出測定が行われているJim's Pool 流域のデータを用いた。降雨強度は、クリマテック社簡易雨量計(CEM-TBRG)を用いて測定したものである。浸透速度は土壤表面に水が常に存在する条件下でのシリンダーインテークレート(CI)試験結果を示したものである。この浸透式は湛水条件下で測定された物であり、本来散水状態で降るはずの降雨に伴う浸透は湛水下の1/6 (Raoら, 1998)との報告に基づき、これを1/6にした値を書き、降雨強度がこれを越えた部分のみが流出すると考えて表面流出量を計算すると、表面流出量は全降水量の5.3%となる。一方、この降雨での表面流出率は17%であることが測定結果として得られており、この値と一致するように、補正係数を与えると、図3-2-4のように1/8.4となる。

(数値解析による空気の封入効果の影響評価) 数値解析により空気の封入効果の影響評価を行った。土壤深さは0.6mとし、その下にはハードパ

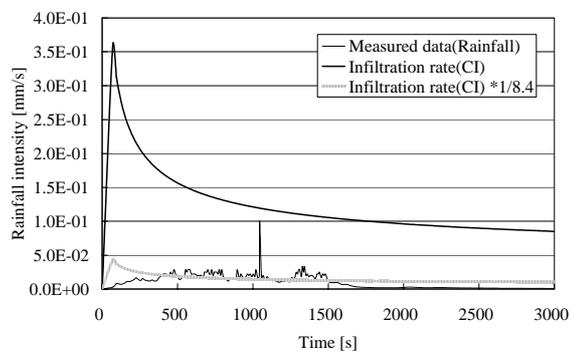


図 3-2-4 降雨強度と表面流出との関係

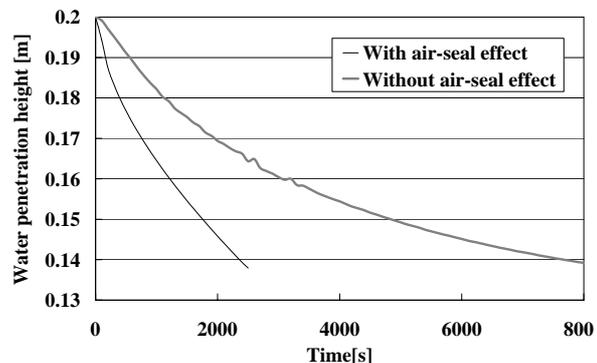


図 3-2-5 空気封入効果の影響評価

ンのような空気も水も通さない層と0.20mの深さの湛水の存在を仮定し、しかるべき入力パラメータを与えて計算を行った。水分特性曲線にはvan Genuchten式を、不飽和透水係数にはMualem式を用いた。空気封入効果ありの場合には、無しの場合に加え、空気層が存在する体積を別途計算し、初期体積に対する比から圧力の変化を与えた。この圧力変化をも考慮して水浸入ポテンシャルを計算した。土壌中の含水率はある場所を境に大きく変化する。その変化が一番大きいところを水浸入深さと定義し、これを時間に対して計算した結果を図3-2-5に示す。封入された空気の逃げ道がない場合には、ある場合の半分くらいの水浸入にとどまることがわかった。

以上のことから、従来の通説的な測定結果を、現地の透水性評価にそのまま当てはめるには問題があることが分かった。これは不確定性にも依るところが大であり、厳密な予測は困難であるが、降雨および土壌条件に適した補正值を与えることは可能と考えられる。

### 3. 2. 4 気象データからの可能蒸発散量計算

現地の気象観測データを用いて可能蒸発散量を推定し、植林試験において投入されている灌水量と可能蒸発散量の関係を明らかにすることで、植林において灌水する場合の量、時期に対する指針を与えることを目的とする。

研究対象地に設けられている植林サイトSite Aの近くで測定されている気象データを用い、気温、湿度、風速の日平均値及び日照時間からペンマン式により可能蒸発散量を計算した。その結果、可能蒸発散量は12月から1月に最大値をとり、約10~13mm/dayとかなり大きい。また6~7月に最小となり約1~2mm/dayであった。

Site Aでは、2週間に一度、1ヶ月、3ヶ月、6ヶ月に一度及び無灌水の5段階の異なる灌水頻度区画を設け、植林試験を行っている。表3-2-3に2000年と2001年について各月の可能蒸発散量、降雨量、及び2週間区画と1ヶ月区画における供給水量(降雨量+灌水量)を示す。計算された年間可能蒸発散量は約1800mmであり、この2年間は夏の集中雨があり比較的降雨量が多かったものの、年間を通してみれば可能蒸発散量が降雨量を大きく上回っている。また、灌水量を加えた供給水量は、2週間区画、

表 3-2-3 月別可能蒸発散量と供給水量(2000-2001年, Site A)

	PET [mm]	Rainfall [mm]	Supplied water [mm]	
			2 weeks	1 month
2000年1月	270	115	143	143
2月	206	49	106	78
3月	158	177	262	205
4月	105	17	74	46
5月	61	0	28	28
6月	45	6	92	35
7月	46	12	69	40
8月	72	14	70	42
9月	134	1	58	30
10月	187	37	94	66
11月	240	11	68	39
12月	295	0	57	28
Total	1820	439	1121	780
2001年1月	307	9	66	38
2月	191	129	185	157
3月	168	0	57	28
4月	124	9	66	37
5月	67	42	99	70
6月	42	1	58	29
7月	53	18	75	47
8月	85	12	69	41
9月	134	9	94	37
10月	176	36	93	65
11月	234	20	77	49
12月	258	32	89	60
Total	1840	318	1028	659

1ヶ月区画では、それぞれ降雨量の約3倍、約2倍となっているが、やはり可能蒸発散量の方が大きい。しかしながら月別にみると、降雨量が可能蒸発散量を上回っている2000年3月の他、2週間区画では2000年6、7月、2001年5-7月、1ヶ月区画については2001年の5月に供給水量が可能蒸発散量を上回っている。それ以外にも供給水量が可能蒸発散量に匹敵する月が見られる。可能蒸発散量が供給水量を大きく上回る場合には、実蒸発散量は供給水量に等しく、また植物の成長は水により制限され、その量に大きく依存すると言われているが、これらの月では水が成長の制限要因となっていない可能性がある。Site Aは供給水量と樹木成長の関係を調べることを目的としているが、可能蒸発散量を考慮し灌水する時期を決定することは樹木の有効な水利用にとって重要である。

### 3. 2. 5 簡易ライシメータによる土壌面蒸発量の把握

土壌面蒸発は、降水-土壌-気象の相互関連によって決定される「実際に地表から奪われる」水量である。従って、植生を導入しようとする立地の検討に際しては、最も重要な要素のひとつであるといえる。ここでは、Start Meadowsの土壌面蒸発について、気象及び土壌の面から考察する。

(土壌面蒸発量の測定) 土壌面蒸発は、マイクロライシメータによって測定した。マイクロライシメータは、ペットボトルを利用して作成し、これに現地土壌の5mmふるい通過試料を乾燥密度 $1.55\text{gcm}^{-3}$ で充填したものとした。マイクロライシメータは、site Cの一角に設置した、 $1.5\text{m}\times 1.5\text{m}$ の土壌面蒸発量測定地に埋設して、一定時刻に電子天秤で秤量された。土壌面蒸発量測定地は、深さ0.1mまで掘り出され、底面にポリエチレン製のビニル袋の両側面をカットして作成したシートを敷き、掘り出された土を5mmふるいでふるいながら埋め戻した。0.05m埋め戻すごとに、土壌が飽和する水量を散水し、すべての水が土に吸水された後、さらに埋め戻した。マイクロライシメータは、測定に先立って約6時間水浸され、土壌は飽和された。また、マイクロライシメータの秤量時には、土壌面蒸発量測定地の土壌から採土を実施し、土壌水分プロファイルを作成した。

(土壌面蒸発の算出) 熱収支項の総和となる純放射 $Rn$ は、次式によって求めた。

$$Rn = (1 - \alpha) Sr - Rln, \quad Rln = \sigma Ta^4 (0.48 - 0.065 e^{-1/2}) (1 - cn)$$

ここで、 $Rn$ ：純放射、 $\alpha$ ：アルベド、 $Sr$ ：日射、 $Rln$ ：有効放射、 $Ta$ ：気温、 $\varepsilon$ ：射出率(=0.95)、 $\sigma$ ：シュテファン-ボルツマン定数、 $e$ ：水蒸気圧、 $n$ ：平均雲量(0.3)および $c$ ：定数である。土壌面蒸発はバルク法によって算出を試みる。潜熱のバルク式および顕熱 $Q$ のバルク式は、次の通りとなる。 $\lambda E = \lambda \rho C_E U (q_s - q)$  ,  $Q = C_p \rho C_H U (T_s - T_a)$

次に示す熱収支式  $Rn = \lambda E + Q + G$  から、潜熱は熱収支の残差として次式で算出される。

$$\lambda E = Rn - C_{pp} C_H U (q_s - q) - G$$

上記において、 $\lambda E$ ：土壌面蒸発、 $C_{pp}$ ：空気の容積熱容量、 $q, q_s$ ：比湿及び地表面温度  $T_s$  に対する飽和比湿、 $C_p, C_H$ ：潜熱及び顕熱のバルク係数、 $U$ ：風速である。必要な気象要素として、日射及び反射、風速、気温、湿度(以上は高度1.5m)、地中熱伝流量(深度0.005m)、地表面及び地温(0.005m)を測定した。

マイクロライシメータによる土壌面蒸発  $E_{sML}$  の推移を示した図3-2-6によれば、 $E_{sML}$  は灌水後の日数  $D$  に対して、指数関数的に急激に減少している。推定積算蒸発量は蒸発可能水分を上回り、また表層部分の乾燥に伴う水蒸気拡散抵抗の増加により、実際には5日目以降の蒸発量はさらに減少することが予想された。

バルク式による土壌面蒸発の推移(熱収支)を図3-2-7に示した。降雨直後の湿潤な地表面を想定した「散水部」(約0.025m<sup>2</sup>)を設け、乾燥地表面とともに表面温度をT熱電対で測定した。バルク式による顕熱の計算値は、地表面が湿潤な状態にあっては最大で25W/m<sup>2</sup>程度、乾燥地表面で大きくなるが、地表面の乾燥と同時に、乾燥地表面と差異は認められなくなる。熱収支を見ると、顕熱量  $Q$  が純放射  $Rn$  に占める割合が、湿潤時には20%程度であるのに対し、地表面の乾燥に伴い40%程度まで増加し、一方、潜熱量は湿潤時のほぼ50%から20%程度まで減少している。さらに、純放射の最大値を示す時刻より早い時刻に潜熱の最大値を示すようになり、午後には、著しく小さな値を示すようになる。

土壌水分プロファイルによれば、表層付近にきわめて乾燥した土層が存在する一方、比較的浅い部分(深度約0.4-0.5m)に体積水分率  $\theta$  が20%を越える土層があり、これ以深も  $\theta$  は20%程度と湿潤であった。マイクロライシメータ及び熱収支からは、比較的速やかに土壌面蒸発による土壌水分の損失は減少し、下層土層に水分は保持されると推定される。これらの結果により、降雨直後の大きな土壌面蒸発強度を除け

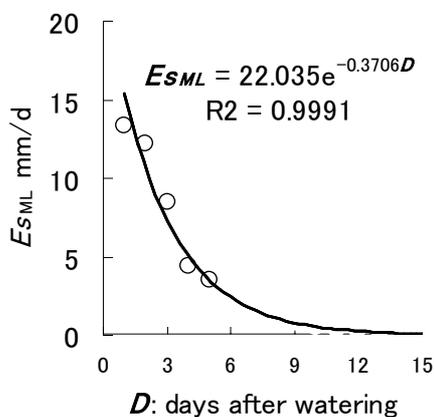


図 3-2-6 土壌面蒸発量の経時変化

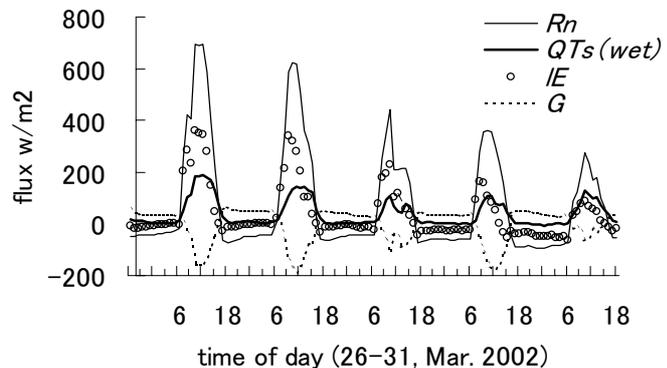


図 3-2-7 熱収支の変化

ば、地中に浸透した雨水は、土層内にとどまることが予想された。比較的小さな空隙率Pの影響で乾燥した表層の水蒸気拡散抵抗は大きく、下層土層に対して乾燥した表土は「マルチ」のように装い、水損失を妨げていると考えられる。この結果は、浸透した降水は植物により高い効率で利用されることを示している。

### 3. 2. 6 新規土壌改良法（高透水性溝）による蒸発抑制効果

乾燥地での既存のウォーターハーベスティングは流出水の捕集のみが注目され、蒸発抑制効果を持つものは皆無に等しい。そこで本研究では、乾燥環境下で蒸発抑制効果をもつ表面流出水捕集法を提案する。この手法においては、地表面に溝を掘った後、内部を高透水性の砂礫で充填することにより、流出水の浸透促進効果と深部浸透による蒸発抑制効果が期待される。まこれらの効果を検証するため、土壌水分の二次元挙動や蒸発量に着目した室内実験を実施し、手法の評価を行った。

アクリル製土壌槽（90×95×15cm）を用意し、これに珪砂と木節粘土を重量比8：2で混合したものを供試体として充填した。また溝内充填物質として高透水性の珪砂と川砂利の2種類を用意し、供試体表面の中心部に掘った溝（深さ40cm幅10cm）に充填した。表3-2-4に、供試体および溝内充填物質の物理性を示す。容器側面にはADR土壌水分センサーを24本設置した。センサーから得られた体積含水率の分布の変化から、土壌水分の二次元挙動を明らかにした。実験期間中は白熱灯によって地表面温度が約40℃となるように保った。

装置の準備完了後、土壌表面に水を散布した。灌水量は10.125kgで単位面積あたり75mmに相当し、散布した水は浸透が終了するまで土壌表面で湛水状態となった。灌水開始から、灌水がすべて土壌に浸透するまでの期間を浸透過程とし、その時間を計測した。また、浸透過程中は蒸発が起こらぬようにプラスチックフィルムで装置を覆った。

浸透が終了したらプラスチックフィルムを取り除き蒸発を開始させた。蒸発開始から実験終了までの14日間を蒸発過程とし、この間は重量計をもちいて装置全体の重量を測定することにより蒸発量を算出した。また測定期間中の外気温と湿度も計測した。溝なし、珪砂溝、川砂利溝の3条件でそれぞれ実験を行い、結果を比較した。

浸透所要時間は、溝なし条件では灌水を地中に浸透させるのに28.5時間かかったのに対し、

表 3-2-4 供試土壌の物理特性

	Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	Saturation hydraulic conductivity (cm/s)	Saturation volumetric water content (%)
Specimen	1.65	2.76×10 <sup>-4</sup>	34.8
Silica sand (in ditch)	1.67	1.05×10 <sup>-1</sup>	39.6
River gravel (in ditch)	1.44	1.46	45.7

溝ありのものは両条件とも4時間以内に浸透が終了したことがわかる。溝の存在により、湛水時間が約7分の1に短縮され、溝による浸透促進効果が確かめられたといえる。図3-2-8には浸透過程終了時の体積含水率の分布を示したが、溝なしの浸透が地表面に水平で浅いのに対し、溝ありでは溝周囲への浸透により、浸潤前線が深部に達していることがわかった。

図3-2-9には蒸発過程における各条件の積算蒸発量の経時変化を示した。溝なしの積算蒸発量は溝ありのものを終始上回っており、溝の存在によって蒸発が抑制されたことがわかる。

蒸発過程終了時である14日目においては、溝ありの積算蒸発量は溝なしに比べ20%以上抑制されている。溝ありにおいて蒸発が抑制された理由は、乾燥層の形成により不飽和透水係数が急激に低下し、蒸発による水分移動が妨げられたためと考えられる。溝ありのものでは、地表面近くに浸透した水分量が少ない分、早い段階で乾燥層が形成された。また溝内の水分は周囲の土壤に速やかに排水されており、溝内も乾燥状態となっていた。これらにより、溝ありでは地表面付近でT字型の乾燥層が形成されていることになり、これが下部での蒸発抑制に大きく寄与したと考えられる。

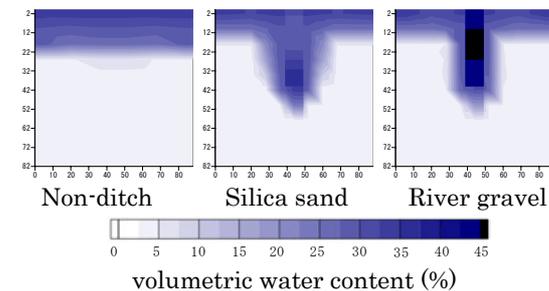


図 3-2-8 浸透過程終了時の水分分布

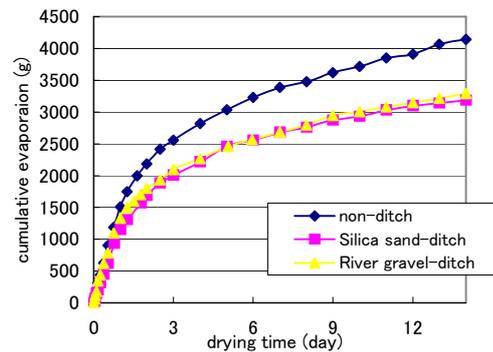


図 3-2-9 積算蒸発量

### 3. 2. 7 各種植林施工による土壤基礎物性の変化

本プロジェクトでは、ハードパン破碎、表土層厚の増加、バンクへの浸透促進など新たな土壤改良技術が導入され、その有効性が証明されてきた。これらの土壤改良技術を、土壤基礎物性の観点から評価をすることで、導入技術の有効性がどこにあるのかが明らかになり、対策施工における更なる改善の指針となると考える。試料採取には5cm×5cmのステンレス製コアサンプルを用いた。水分特性曲線の作成には、 $pF$ が2までを水頭法、 $pF=2-4$ までを加圧板法を用いて測定を行った。飽和透水係数は変水位法を用いた。

解析対象としては、ハードパン破碎についてはSiteC、表土層厚の増加についてはSiteEでの測定結果を用いた(これらのサイトについては3.4を参照)。測定は、

SiteCではOuter bankの外に植林されている箇所で、*C. obesa*を植林した後に伐倒調査後の爆破穴で行った。この他、爆破穴の近くで20cmほどの深さにハードパンが見られる非破壊土壌、ハードパン破碎が行われていないPond5でも試料採取し、比較検討を行った。SiteEは、60cm、90cmバンクの表層0-5cmの土壌試料採取し測定を行った。比較対照として、深さ15cmほどの深さにハードパンが存在する施工前の状態と考えられる非破壊な土壌箇所(同サイト上流側)を選び、試料採取、測定を行った。

**嵩密度** 嵩密度の測定結果を図3-2-10に示す。この結果、破碎穴の嵩密度は非破壊の土壌と比べ低い値となっている。しかし、Pond5における嵩密度は更に低い値を示しており、これが地点による差なのかは明らかになっていない。

SiteEでは、60cmバンクの方が90cmバンクと比べ小さい嵩密度値を示している。また、Trenchにおける嵩密度は他の

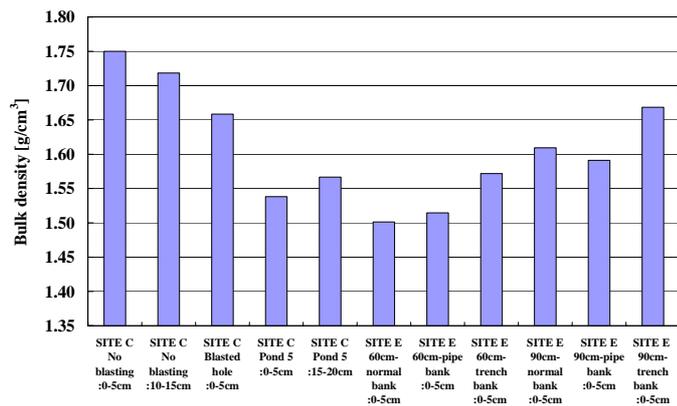


図 3-2-10 SiteC, SiteE における嵩密度分布

NormalとPipe bankのいずれよりも大きくなっており、雨水浸透効果による土壌の締め固めが起きた結果と予想される。

**保水性** 図3-2-11にSiteCにおける水分特性曲線の測定結果を示す。破碎穴における水分特性は、飽和含水率は非破壊と比べ同じかもしくは高い値を示している。一方の乾燥領域である $pF=4$ では、爆破穴の含水率は低い値を示すことが分かった。以上のことから、爆破前の土壌は締め固まった土壌であるため、嵩密度も高く、飽和含水率も小さく、さらには乾燥領域では多く水を保持している。一方の破碎穴では、構造が一度壊されることにより、嵩密度が小さくなるために飽和含水率も多少改善され、乾燥領域では水の保持はそれほど高くない。ここで植物が成長に利用できるとされる $pF=1.8\sim 4.2$ の水分量を特性曲線から求めてみると、破壊穴では $0.178\text{m}^3/\text{m}^3$ 、非破壊穴では $0.134\text{m}^3/\text{m}^3$ と改善されていることが分かった。

SiteEでも同じような観点から評価を行った

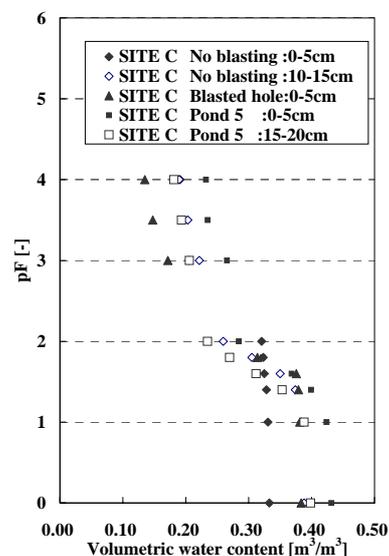


図 3-2-11 SiteC における水分特性

結果、まず60cm側と90cm側とでは元々の非破壊土壌からして $0.167 \text{ m}^3/\text{m}^3$ と $0.105 \text{ m}^3/\text{m}^3$ とで差があることが確認された。このことを考慮して、非破壊土壌での植物利用可能水量を基準に考えると、60cmバンクではNormal, Pipe, Trenchいずれもが $0.229 \sim 0.251 \text{ m}^3/\text{m}^3$ と改善されていることが分かった。90cmバンクではTrenchが非破壊よりも植物利用可能水量が小さくなっているが、他の2つに関しては $0.175 \text{ m}^3/\text{m}^3$ と $0.107 \text{ m}^3/\text{m}^3$ と現状維持もしくは改善効果が確認された。

#### 透水性

SiteCでの非破壊地点での飽和透水係数は、 $7.73 \sim 11.2 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ であった。破壊穴はそれよりも小さく $3.44 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ となり、透水性の改善は変水位法からでは見られなかった。SiteEにおける非破壊箇所での飽和透水係数は $2.17 \sim 3.09 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ であり、60cm、90cmバンクでは $1.52 \sim 2.68 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ とこちらも透水性の改善効果は確認されなかった。

一方、シリンダーインテークレート試験からは、測定開始時には非破壊土壌の方が早い $4 \sim 5$ 分を境に破壊穴の浸透速度が早い結果となった。これは、非破壊土壌では表層から15cmの位置にハードパンが存在しており、ある時間から水平方向への浸透しかできないためと考えられる。つまり、ハードパン破碎の利点として、土壌層が見かけ上厚くなるために浸透可能な土壌容量が地中深くに確保できる点にある。

### 3. 2. 8 ハードパン破碎のエネルギー評価

ANFOとはAmmonium Nitrate Fuel Oil explosive爆薬のことで、SiteCを始めハードパン破碎において用いられた。本報では、このANFOを用いた爆破を $\text{CO}_2$ の排出量の観点より、同じ土壌を動かすとした時にどこまで有効なのかを明らかにし、他地域への適用の際の指針を与える。

バックホウの単位掘削量当たりの $\text{CO}_2$ 排出量とANFO爆薬の単位破碎量当たりの $\text{CO}_2$ 排出量を比較する。

バックホウの単位掘削量当たりの $\text{CO}_2$ 排出量の算出方法 以下の式を用いてバックホウ1サイクル当たりの掘削量 $[\text{m}^3]$ に対する単位掘削量当たりの $\text{CO}_2$ 排出量 $[\text{kg-C}/\text{m}^3]$ を算出している。

$$1 \text{ サイクル当たりの掘削量}[\text{m}^3] = \text{ショベル容量}[\text{m}^3] \times \text{作業効率}[-]$$

$$\text{単位掘削量当たりの} \text{CO}_2 \text{ 排出量}[\text{kg-C}/\text{m}^3] =$$

$$(\text{燃料消費量}[\text{l/h}] / 1 \text{ 時間当たりの土工量}[\text{m}^3/\text{h}]) \times \text{軽油の発熱量}[\text{MJ/l}]$$

$$\times \text{発熱量当たりの} \text{CO}_2 \text{ 排出量}[\text{kg-C}/\text{MJ}]$$

(土工量の算出) 治山必携(林野庁)によるとバックホウの一時間当たりの土工量

$V_s[m^3/h]$ の算定式は、 $V_s = (3600/C_m) \times q \times E [m^3/h]$ で表され、 $q$ :1サイクル当たりの掘削量 $[m^3]$ 、 $E$ :作業効率[-]、 $C_m$ :1サイクルの所要時間 $[sec]$ である。

1. 作業効率: 作業効率は作業現場の状況(地山の状態、作業効率)から、良好、普通、不良の3つに分類し、現場条件、土質、掘削状況を加味したデータを元に算出した。2. 1サイクル当たりの掘削量 $q$ :  $q=0.2, 0.35, 0.60$ とする。

3. 1サイクルの所要時間 $C_m$ : 地山必携によるとバックホウについては掘削が $90^\circ$ 旋回を標準としているので1サイクルの所要時間は $30sec$ である。以上の、1~3より一時間当たりの土工量 $V_s[m^3/h]$ を算出している。

(燃料消費率の算出) バックホウの運行における燃料消費率を算出している。単位時間当たりの燃料消費量は $0.138 \text{ l/PS-h}$ に機関出力を乗ずることにより算出できる。

( $CO_2$ 排出量の算出) 土工量 $V_s$ を燃料消費量で除することにより単位掘削量当たりの燃料消費量 $[l/m^3]$ を算出し、軽油の単位量当たりの発熱量 $[MJ/l]$ 、軽油の発熱量当たりの $CO_2$ 排出量 $[kg-C/MJ]$ を乗ずることにより単位掘削量当たりの $CO_2$ 排出量 $[kg-C/m^3]$ を算出している。また1サイクル当たりの掘削量 $[m^3]$ はショベル容量に作業効率を乗じて算出している

ANFO爆薬の $CO_2$ 排出量の算出 ANFO爆薬の製造からの排出量をJEMAI-LCAにより算出している。爆破時には $CO_2$ が排出されるが、この時の排出量はあらかじめ製造の際の排出量に含まれている。

両者の比較 バックホウ1サイクル当たりの掘削量 $[m^3]$ に対する単位掘削量当たりの $CO_2$ 排出量 $[kg-C/m^3]$ を図3-2-12に示す。グラフ中の左からシャベルの容量 $0.2, 0.35, 0.6 \text{ m}^3$ を示している。バックホウなどの機械的な掘削するのに必要な仕事( $CO_2$ )排出は、土壌条件が悪くなるに従い急速に大きくなる。ANFO爆薬での結果は土壌が良好な状態でのバックホウでの $CO_2$ 排出とほぼ同じであり、その結果、土壌条件の悪いハードパン爆破に対しては大きな効果があることが分かった。しかし、砂土、粘性土ではバックホウが有利になる可能性がある。

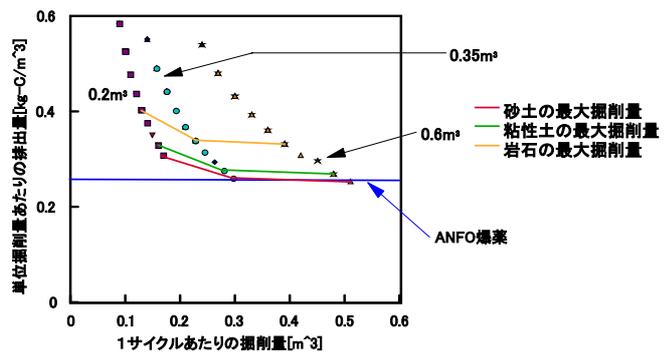


図 3-2-12 ANFO 爆破および重機の  $CO_2$  排出量

### 3. 2. 9 土壌改良材としての焼成ボーキサイトの利用

現地において大量かつ安価に入手できるボーキサイトを利用して土壌改良を行

うことを目的とし、ラテライト土壌に混合した場合の保水性および透水性を評価する。

ボーキサイトは700℃のマッフル炉中に1時間保持したのち粒径2～6.7 mmにふるい分けしたもの、土壌はsite 2Aで採取し1 mm以上の粗粒子を取り除いたものを用いた。また、両者の混合物は、樹木周辺に集中的に使用することを想定し、ボーキサイトを体積比で12.5および25 %とした。

焼成ボーキサイトの特性としては、比表面積、平衡含水率、水分の細孔内拡散係数を、保水性については混合土壌の水分特性および乾燥速度を測定した。乾燥は主に内径80 mm、深さ2 cmの円筒カラムを5段に重ねたものを用いて、現地土壌の嵩密度1.71 g/cm<sup>3</sup>を再現し、40℃で行った。また、透水性の指標である飽和透水係数を定水位法および変水位法で、不飽和透水係数を水分分布法と定常蒸発法で測定し、水の浸透速度を電気伝導法によって求めた。

ボーキサイトは約50 wt%のAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を含み、焼成により比表面積100 m<sup>2</sup>/g程度に多孔質化する。水はマクロ孔では自由水であるが、ミクロ孔では吸着剤としての作用によって相対湿度10 % ( $pF \approx 6.5$ )においても約2 %の含水率を示し、拡散係数は $0.5 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s前後である。

**保水性** 図3-2-13は水分特性で、混合物の含水率 $\theta_m$ とラテライト土壌、ボーキサイトの含水率 $\theta_s, \theta_b$ の間には、 $x$ をボーキサイトの混合比とすれば  $\theta_m = (1-x)\theta_s + x\theta_b$  の加成性が成り立つ。図中の実線はこの関係を表している。図3-2-14は乾燥過程における深さ方向の含水率分布で、丸のプロットは飽和状態から乾燥開始1日後、三角は3日後、四角は15日後、また、中塗りはラテライト土壌、中抜きはボーキサイトを12.5%混合、2重のプロットは25%混合した場合を示している。限界含水率は12%で、乾燥1日間は恒率乾燥期間である。この期間ではボーキサイトからの脱水はずかであるから、土壌からの蒸発が主となり、土壌の量が少ないボーキサイト混合物がよく乾く。減率乾燥に入ると混入量の多いものほど乾きにくく、ボーキサイトの保水効果が現れる。

**透水性** 図3-2-15は含水率と透水係数の関係を示す。右上の黒丸のプロットはラテライト土壌の飽和透水係数( $1.1 \times 10^{-3}$  cm/s)で、ボーキサイトを20%混合した場合に最小値( $0.8 \times 10^{-3}$  cm/s)を示し、それ以上混合すると増加する。その他のプロットは、図3-2-14と同様の測定を繰り返し、水分分布法で求めた不飽和透水係数である。 $x=0.125$ のケースは除いてあるが、ボーキサイトを混入すると係数が小さくなり、水分が移動しにくくなる。また、実線は図3-2-13の土壌のプロットからvan Genuchtenのモデル( $n=2.5, \alpha=0.013$ )によって計算した結果で、実測値よりも大きい値が得られた。

乾燥が進み $pF=4.2$ のしおれ点に達すると、図3-2-13から土壌は2.5%、ボーキサイトは22%の含水率を示すことがわかる。この状態で浸透速度を測定したところ、土壌だけでは $2 \times 10^{-3}$  cm/s、 $x=0.125$ の混合土壌では $3 \times 10^{-3}$  cm/s、 $x=0.25$ では $5 \times 10^{-3}$  cm/sになり、ボーキサイトの混入によって水が浸透しやすくなることが明らかになった。

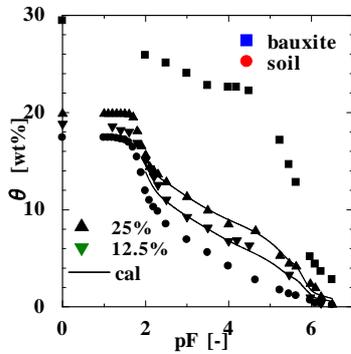


図 3-2-13 水分特性

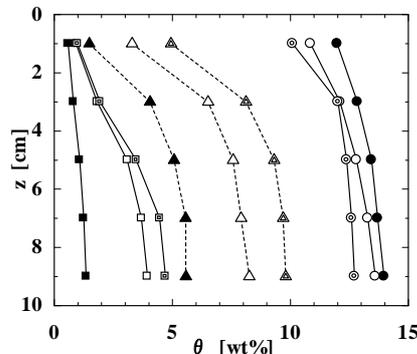


図 3-2-14 含水率分布

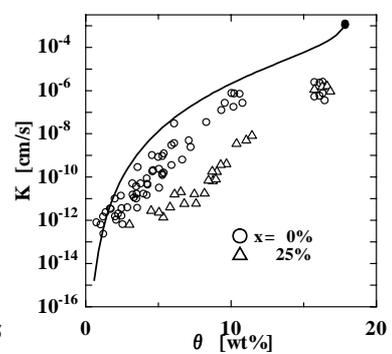


図 3-2-15 不飽和透水係数

### 3. 2. 10 無機保水材焼成ボーキサイトの肥料吸着と排出

乾燥地における大規模植林を実施するには、植物の生育に必要な水の確保がその成功のポイントとなる。本報告はアルミニウム製造原料であるボーキサイトに着目し、焼成処理後のボーキサイトによる肥料保持とその排出について検討した。

ボーキサイトの急速昇温焼成は、流動層焼成炉を用いて行った。雰囲気ガスは空気をを用い、流動化ガス流量 $Q_{mf}$ は最小流動化流量の1.5倍とした。利用ボーキサイト粒径は $53 \sim 3350 \mu\text{m}$ 、焼成温度は $200 \sim 1000^\circ\text{C}$ で行った。

焼成ボーキサイトの保肥能評価

a) Hyponex液体肥料吸着処理： 試料ボーキサイト約10gとHyponex液肥100倍液30 ml(株式会社 ハイポネックスジャパン)をよく混合攪拌し、室温で24時間浸漬後、吸引濾過によりボーキサイトを濾別した。濾液（肥料吸着残液）は溶液量、ECおよびpHを計測した。

b) リン酸による前処理： 液体肥料Hyponex吸着処理したボーキサイトからのリン酸溶出特性改善法として、試料ボーキサイトにリン酸の前処理を行った。試料ボーキサイト約10g( $110^\circ\text{C}$ 恒温乾燥器内で2時間以上乾燥)と0.01~1% $\text{H}_3\text{PO}_4$ 溶液の各溶液中に10分、1、5、24時間それぞれ浸漬した。浸漬処理後、吸引濾別、脱イオン水洗浄後、 $110^\circ\text{C}$ 恒温乾燥器内で2時間以上乾燥した。

c) 肥料分溶出試験および溶出液中のイオン組成と定量分析： 乾燥後の肥料吸着ボーキサイト試料約10gを内径15mmのガラスカラムに充填し、脱イオン水10 ml/minで溶出、50mlずつ分取した。各画分のECは、ECメーター (YOKOGAWA・SC82)

で測定した。なお、溶出液のEC値が $10\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下になるまで、溶出を継続した。溶出液のイオン組成（陽イオン、陰イオン）と定量分析はIon Chromatograph HIC-6 A (Shimadzu Inc.)を用い、定法で行った。

(急速昇温焼成ボーキサイトの肥料吸着とその排出) 図3-2-16は、 $700^{\circ}\text{C}$ 急速昇温焼成ボーキサイトによるHyponex吸着残液（濾液）の粒径別イオン組成を示す。残液中のイオン組成も大きく変化し、特にリン酸イオンはすべて吸着され全く検出されなかった。硫酸イオンは0から約 $300\text{ppm}$ の濃度に上昇した。カラム溶出試験によればカリウムイオンの溶出には多量の溶出水を必要とするが、硝酸イオンは $300\sim 350\text{ml}$ で溶出した。いずれのイオンも未焼成ボーキサイトに比べ、溶出には多量の溶出水を必要とした。

(リン酸前処理後の肥料吸着ボーキサイトからの肥料分溶出) 図3-2-17は、 $700^{\circ}\text{C}$ 急速昇温焼成ボーキサイトを1%リン酸液に5時間浸漬処理後、さらに液肥Hyponexを吸着処理したボーキサイトからの溶出イオン組成とその濃度の推移を示す。液肥Hyponex吸着処理に先立ち、流動層急速昇温焼成ボーキサイトにリン酸処理を行うと、リン酸未処理焼成ボーキサイトに比して、リン酸分排出量は10倍以上に増加、しかも持続的に長期間排出されることが明らかになった。

すなわち予め、リン酸の焼成ボーキサイトへの前処理を行うことにより、リン酸も緩やかに排出されることが明らかになり、緩効性保肥機能と保水材機能と有する土壤改良資材として利用できることが明らかになった。

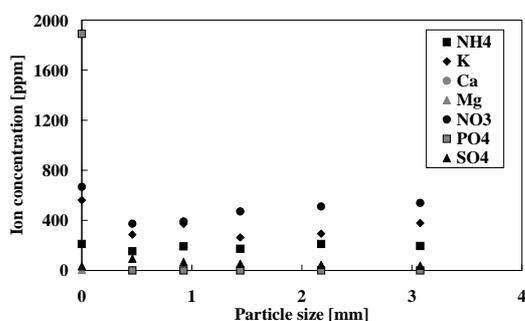


図 3-2-16  $700^{\circ}\text{C}$ 急速昇温焼成ボーキサイトの液体肥料吸着処理後の残液イオン濃度

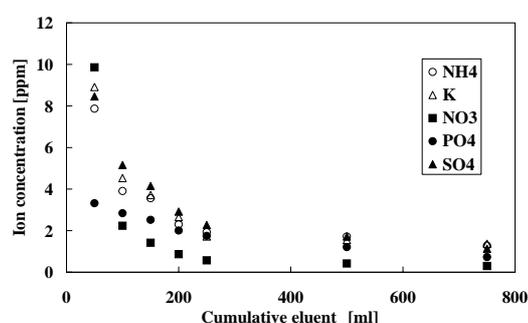


図 3-2-17  $700^{\circ}\text{C}$ 急速昇温焼成ボーキサイトのリン酸前処理に引き続き液体肥料吸着処理を行った残液イオン濃度

### 3. 2. 1 1 保水材混合による土壤の透水性・保水性の変化

土壤に保水材を投入することにより、透水性と保水性の改善を図り、様々な保水材を混入した土壤の改善効果を評価した。

土壤として豊浦砂（平均粒径 $0.171\text{mm}$ 、社団法人セメント協会研究所）を使用した。保水材としては、SAP・AP-100（アクアリザーブ、三菱化学、 $100\sim 300\mu\text{m}$ ）、ボーキサイト、ピート（Tropical Peat、インドネシアKalimantan産）を使用した。

焼成ボーキサイトは700°C急速焼成したものを利用した。未焼成、焼成後試料はいずれも粒径が2.0mm~2.36mmのものを使用した。ボーキサイトの混合率70wt%以上では、試料が均一に混ざらないため上限を60-70wt%とした。SAPについては、透水試験で安定した結果が得られる0.5wt%を上限とした。ピートについても圧縮により乾燥嵩密度が0.5g/cm<sup>3</sup>以下にできる60wt%を上限とした。

飽和透水係数は、豊浦砂のみおよびボーキサイト混合の場合は自然充填下、ピート混合の場合は自然充填および圧縮の2条件を試験した。SAPは混合により膨潤が著しいため、乾燥嵩密度が1.48 g/cm<sup>3</sup>となる充填高さ以上にならないようにした。測定には、測定資料に応じて定水位法および変水位法を用いた。

水分特性曲線は、すべて試料を自然充填の条件下で、脱気水を使用して測定を行った。各々の測定法の最適測定範囲 ( $pF=0\sim 2.0$ では水頭法、 $pF=2.0\sim 4.0$ では加圧板法、 $pF=4.0\sim 5.6$ ではサイクロメータ法) を考慮し測定を行った。

(飽和透水係数) 図3-2-18はボーキサイトとピートの、飽和透水係数( $K_s$ )の測定結果を示す。ボーキサイトについては、混合率60wt%までは混合率の増加に伴い $K_s$ 値が減少した。ボーキサイトは豊浦砂より十分に大きいことから、充填部の空隙の体積は無視できるほど小さく、空隙比は豊浦砂と豊浦砂の空隙をしめる体積のみに依存するので、混合率が增大するほど空隙比が減少したと考えられる。

ピートについて、圧縮条件下では混合率増加に伴い $K_s$ 値が減少している。これはピートの乾燥嵩密度が豊浦砂よりも大きいにもかかわらず、圧縮のため、混合率を上げるほど試料全体の圧縮率が增大し試料全体の空隙比が減少したためと考えられる。一方自然充填条件下では、常に圧縮条件下より高い $K_s$ 値を示し、混合率に伴い $K_s$ が減少することもなかった。自然充填では混合率の増加に伴って試料全体の空隙も大きくなり、 $K_s$ が増加したものと考えられる。

SAPの場合、0.025wt%までの混合では投入量が微量であり、豊浦砂の試料とほぼ同じ $K_s$ 値を得た。それ以上では、乾燥嵩密度一定であるため、混合率増大に伴い $K_s$ 値がほぼ直線的に減少した。また、わずかな混合によっても大きな $K_s$ の減少が見られた。

(植物利用可能水量) 一般に植物が利用できる水は $pF=1.8\sim 4.2$ の間であることが知られている。しかし、乾燥地によく見られるアカシアについてはLeaf Water Potential が-13MPa (R.E.Munns,1980) すなわち $pF=5.1$ に相当する値が報告されていること、またボーキサイト等の保水材を混合することにより $pF=5.0$ 以上でもかなりの水が保持され、 $pF=4.2$ 以上でも可動な液状水の移動ならびに植物の蒸散があり得ると考えられることなどから、 $pF=4.2$ 以上の水も一部利用可能と考え以下を考察した。

図3-2-19は各試料の水分特性曲線の測定結果から、ある $pF$ 値間での含水率増大分を示したものである。いずれの試料についても体積含水率は増加する結果となった。特にSAPは少量の混合によっても大きな体積含水率の増加が認められた。ポーキサイトは混合により若干体積含水率が増加する結果となった。焼成ポーキサイト50wt%では大きく体積含水率が増加したが、その大半は $pF=5.0$ 以上に含まれる水量である。ピートは逆に、 $pF=1.8\sim 4.2$ の水のみが大きく増大した。

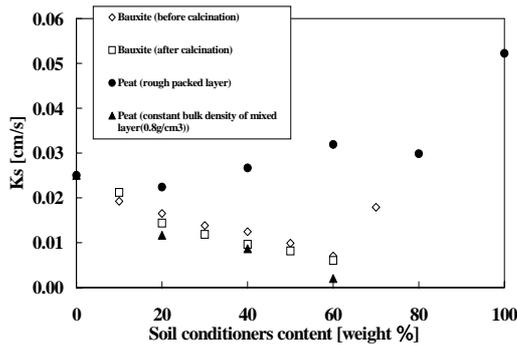


図 3-2-18 保水材混合土壌の飽和透水係数

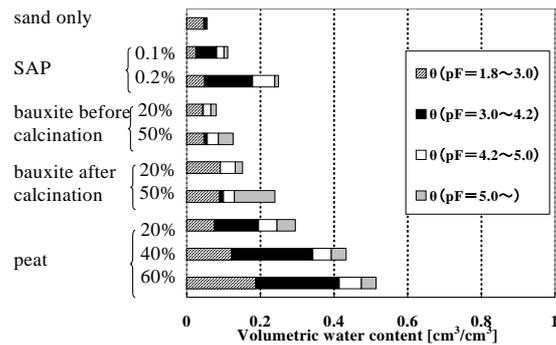


図 3-2-19 土壌水の植物による利用可能性

### 3. 2. 1 2 広域水収支測定

植林を成功させる鍵として、表面流出水の獲得つまり雨水の有効利用は欠かせない。現状として、対象地域の地理的特徴として、表面流出水は最終的には塩湖に集まって来る。この水文学的な特性を生かし、塩湖内の水位上昇、流出量を測定することで対象地域内での表面流出量を推定することを目的とした。また、中規模な流域をサイトとして選定し、流域内における降水量、土壌水分、表面流出水量の計測、流域からの流出量に関する計測を行うことで、精度良い降雨量と流出率との関係を明らかにし、年平均表面流出率の推定を行った。将来的には表面流出モデルとの比較・検討を行いたい。

(設置および測定状況)

広域水収支 各測定機器は、Blue Well、Lake View Well、Ernie Wellの各井戸の近くに設置したまた以下では各井戸の名前を設置場所の名前とした。各測定機器の設置場所を図3-2-20に示す。Blue、Lake Viewには水位計を、Ernieには流量計を設置した。塩湖内に流入してきた水量は塩湖内



図 3-2-20 塩湖内における測定地点

の水位の増加により計測し、塩湖からの流出量は下流部で流路が狭まるErnieに流量計を設置することで計測する。広域水収支に関する塩湖における測定は、設置場所により異なるが2002年に設置しており、まだ解析に十分な20mm以上の降雨が得られていない。今後の降雨に期待することとなるが、それまでの間、各地点におけるデータを用いどのように塩湖全域の水量を推定するかという手法の確立を進めていく。

中規模流域水収支 測定はJim's Poolと呼ばれる貯水池で行われた。5kmほどの流域で発生した表面流出水がこのPoolに集まるとの地理的特性を持つ。従って、Jim's Pool

における水位の変動から、表面流出水量を

知ることが出来る。また、数十ミリ以上の大きな降雨では流域から雨水が流出していくため、流出路にコンクリートで堰を設け、その堰には流量計を設置することで流域からの流出水量を計測する。Jim's poolの流域、雨量計の設置場所、および測定結果を図3-2-21に示す。これらの水収支観測により、1回の降雨量と流出率の関係が得られた。このデータを元に降雨量と流出率との関係を線形近似し、1917年から得られている日降水量データを用いて、年平均流出率を求めたところ約15%であることが明らかになった。

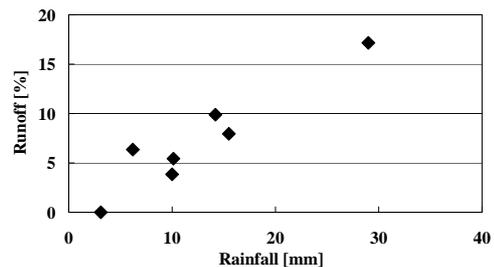
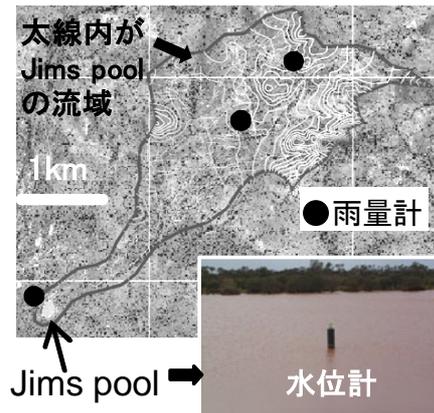


図 3-2-21 塩湖内における測定地点

### 3. 2. 1 3 表面流出モデル構築

表面流出水の有効利用、最適な制御のために、現状における水収支、分布状態を把握する。蒸発、浸透、表面流出、クリークによる集水効果を加味した流出モデルを開発し、モデルの整合性および表面流出における影響因子に関して検討を行った。(解析方法) 対象地である西オーストラリア州レオノラ地域(年間降水量約200mm)の標高データには、容易に入手可能な25万分の1の地図を用い、各地点の標高を5kmおよび10kmメッシュで読み取り、塩湖を中心とする約100km四方の分水嶺を決定した。本解析では、2001年2月22日17時から52時間かけて降った126mmの降雨を対象とした。

雨水は表面流出、土壌浸透、液面蒸発、土壌蒸発によって移動する。本モデルでは降雨後の表層水量を水位で表し、標高と水位の和が高い区画から低い区画に表面

流出水が流れるものとした。表面流出水は、その格子状メッシュに隣接する四方向にのみ流れるものとした。表面流出速度式は下記のManningの式を用いた。

$$Q = V \times A = (1/n) \times A \times R^{2/3} \times I^{1/2}$$

( $Q$ :流量,  $V$ :平均流速,  $A$ :通水断面積,  $I$ :底勾配,  $n$ :粗度係数,  $R$ :径深)

土壌浸透については、現地におけるシリンダーインテークレート試験結果をもとに、平均的浸透速度式を決定した。浸透速度は植生量によって大きく左右されるため、地図上から読み取った植被率と浸透速度に比例関係があるものとした。浸透量に影響する土壌厚みは、現地において測定された植被率と土壌厚みの相関より決定した。液面蒸発速度は、現地における塩湖周辺での実測データの平均値6.6mm/dayを用いた。土壌蒸発については実測値が得られていないことから、現地土壌の基礎物性を入力値として、Millyのモデルから得られる飽和土壌からの蒸発速度式を用いた。

クリークによる集水効果は、以下のようなモデルとした。表面流出水は、土壌表面を平面的に流れる水と、クリークに集まって流れる水とに分けて考える。クリークによる水の集約効果を集約率で表し、それは各区画における表層水量 $W$  [m]、四方の区画との傾斜の平均 $A$  [m/m]、地図上から読み取ったその区画中のクリークの総延長 $C$  [m/m<sup>2</sup>]、時間幅 $\Delta t$  [s] に依存すると考え、下記の式で表す。

$$\text{集約率} = 1 - \exp(-k \times W \times C \times A \times \Delta t)$$

クリーク中の水は、実際には浸透や蒸発はすることなく塩湖に流出していることから、浸透・蒸発はしないものとした。

用いている浸透式は湛水条件下で測定されたものであるが、実際の降雨状態では、測定条件とは異なる現象が生じる可能性もある。そのため実際の浸透速度は、より遅いものと考えられるので、浸透速度を一桁下げた場合についても計算を行った。

図3-2-22は、水の流れが大方止まると考えられる降雨開始から220時間後までの間の、各地域の最大の表層水量を現したものである。色が濃いほど水量が多いことをあらわす。塩湖から北に向かって集水域があることがわかる。これは現地においても大きなクリークが存在し、数値計算結果と現状が一致しているといえる。

クリークによる集水効果をモデルに取り入れない場合の数値計算結果は、表面流出率がほぼ0であった。表面流出率は、表面流出により塩湖に到達し、塩湖に残っている水のそれまでの全降雨量に対する割合である。次に集水効果を取り入れてみたが、これも表面流出率は1%程度であった。

次に浸透速度を一桁下げた場合の数値計算結果は、集水効果を考慮しない場合は表面流出率が約3%であった。集水効果を考慮した場合は、表面流出率が約20%になった。このことから、土壌の透水性と、クリークによる集水効果が水収支に大き

な影響を与えていることがわかった。

図3-2-23は浸透速度を一桁下げたときの表層水の分布を表したものである。ここで棒グラフは1時間毎の降雨量を表している。数値計算結果から、総降雨量の約20%が表面流出している。これは現地の現状に近いものであるといえる。

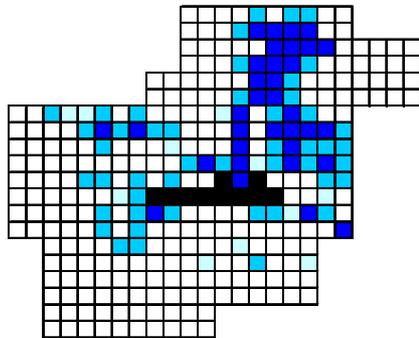


図 3-2-22 降雨開始から 220 時間後の表層水量分布

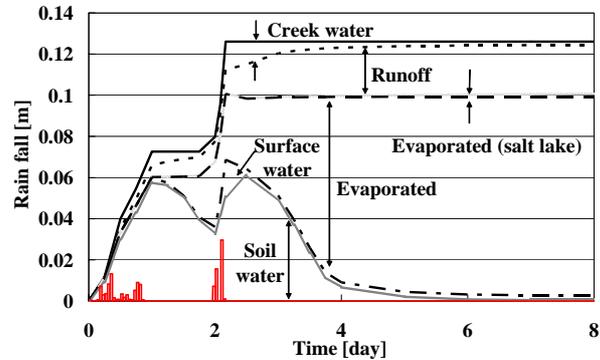


図 3-2-23 水収支

### 3. 2. 1 4 樹冠被覆率と土壌厚みおよび透水性の分布状態の関係

土壌厚みおよび透水性は、対象地内でのバイオマス量とある相関があると考えられている。広域水収支解析においても、対象地域内における土壌厚み、透水性の分布が把握できない限り、信憑性のある評価ができない。そこで、対象地での広域データとして入手可能な航空写真を用い、植生システムグループが進めてきている樹冠被覆率とバイオマスとの関係などの成果を踏まえ、樹冠被覆率と土壌の土壌厚み及び透水性との関係を明らかにし、広域水収支解析に適用していくことを目的とする。

(土壌深さとバイオマスの回帰式) バイオマス量は、36地点における毎木調査、19地点は航空写真より推定した。上記のバイオマス測定地点において、エンジンオーガを用いてハードパン深さを測定した。オーガによる測定深さ限界が115cmであるため、その地点のハードパン深さが115cmを超えた場合、一律115cmとすることとした。55地点におけるハードパン深さとバイオマスの関係から以下の1次回帰式を作成した。なお決定係数は0.714である。

$$y = 5.9335x + 24.66$$

$$y = \text{Hardpan depth (cm)}, x = \text{Biomass (kg/m}^2\text{)}$$

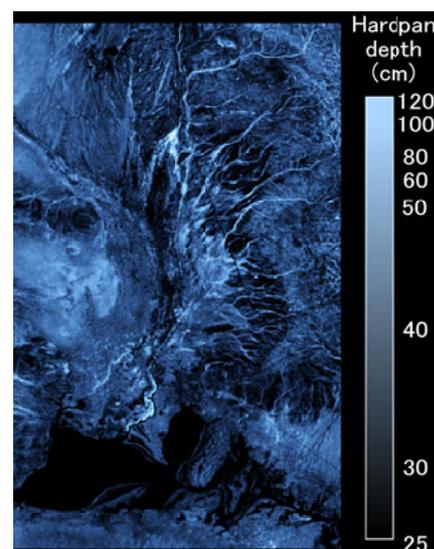


図 3-2-24 STM における土壌深さ (ハードパン深さ) 分布

(対象地ハードパン深さ(土壌厚さ)の分布図) 衛星データ(30mメッシュ)によるバイオマス分布図を元に、ハードパン深さ分布図(図3-2-24)を作成した。

(樹冠植皮率と透水性の関係) 透水試験はシリンダーインテークレート試験で行った。これらの測定を、植生調査サイトを中心とし、更には航空写真から得られている樹冠植皮率の異なる地域を選定し、その地点での測定を行った。本報ではPhilip式を用いて、各パラメータの決定および評価を行った。Philip式は以下の式で表される。

$$i = a + \frac{b}{2\sqrt{t}}$$

Philipの式では、 $i$ は浸透速度[cm/s]、 $a$ [cm/s]は無限時間経過後の浸透速度、 $b$ [cm/s<sup>1/2</sup>]は吸水度、 $t$ [s]は時間である。パラメータ $a$ は、浸透速度がほぼ定常になる時間では飽和透水係数に相当する。

図3-2-25にPhilip式のパラメータと樹冠植皮率との相関を示す。これらの浸透式は経験式であり、物理的な意味はそれほど持たない。今後、浸透土壌の含水率を加味した改良式を適用し、広域水収支解析側へと反映させていく。

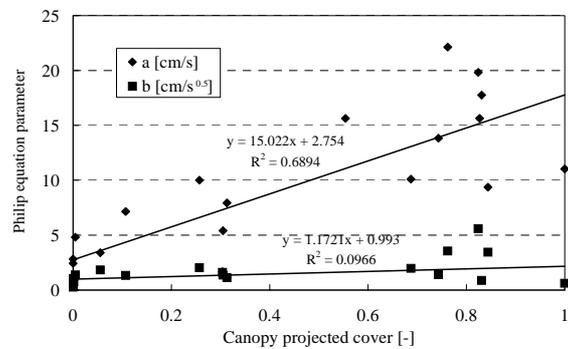


図 3-2-25 Philip 式のパラメータと樹冠植皮率

### 3. 2. 15 研究成果の今後期待される効果

乾燥地域におけるこれまでの水制御に関する研究は、いずれも農作物の収量増大が主目的であり、深い根域を有する樹木に対するものではなく、さらには、水移動に関する定量的解析例はさほど多くはみられなかった。一方、国内外での定量的広域水移動解析は、主として湿潤地における集中降雨による災害防止が主たる目的であり、乾燥地植林ではこれらとは異なる様々な手法の採用が必要であることが明らかとなった。

今後、京都議定書にも記載された、土地利用変化すなわち森林創成によるCO<sub>2</sub>固定を進めるには、当初想定したように乾燥地植林が非常に大きなポテンシャルを示すと考えられるが、本研究において提案した、乾燥地ゆえの、まれに得られる降雨をどのように効率的に集め、それを植林された樹木に供給するかという観点が不可欠であり、本研究成果はその第一歩となるものとする。

### 3. 3 大気システム研究グループ

#### 3. 3. 1 降雨量時間特性解析、空間特性解析

現地の降雨量及び降雨の分布を明らかにし、植生の量と分布の関係性を把握した。更に降雨の分布と標高やバイオマス分布の関連性について検討を行った。

調査サイト1～12と、植林サイトD,Eを合わせた14点の2001年と2002年の降雨データ及び平均値とその14点の標高とバイオマスのデータ（衛星写真のデータから）を表3-3-1に示した。

Inverse Distance to a Power法を用い、降雨量の分布図を図3-3

-1と3-3-2に示す。分布図から見ると次のような特徴が分かる。

1. 2001年は場所による降雨量の違いが大きい、2002年は少ない。2001年ではSite 3, 10, 11の降雨量が少ないなどの傾向はあるが、バイオマス量などの相関をとるには、データの蓄積が必要である。
2. 標高分布図：各サイトは全体の標高と比べ低い地域に集中しており、標高と降雨量分布との明らかな相関は見られなかった。
3. バイオマス分布図：Site 1, 2A, D付近はバイオマス量が多いが、降雨量分布との相関性は見られなかった。
4. Site 10付近は、バイオマス量がやや多く、降雨量が少ない地域である。標高分布図からは、Site 10の左側標高が高いため、大雨時には表面流出水が流れる領域である可能性がある

表 3-3-1 各サイトの年間降雨量と標高、バイオマス量

Site	X	Y	Rainfall in 2001 (mm)	Rainfall in 2002 (mm)	Mean of 2001 & 02 (mm)	Biomass (kg/m <sup>2</sup> )	Altitude (m)
Site 1	299675	6842965	221.1	194.0	207.6	11.62	390.51
Site 2	300210	6844810	272.9	167.1	220.0	6.56	395.88
Site 3	290075	6823600	168.9	185.5	177.2	0.95	370.57
Site 4	314070	6816740	242.4	193.5	218.0	3.65	378.80
Site 5	311725	6814190	216.3	205.3	210.8	2.36	371.92
Site 6	308710	6807490	240.7	169.4	205.1	4.02	368.90
Site 7	307955	6804765	237.9	189.5	213.7	2.18	372.35
Site 8	290790	6804120	330.1	162.5	246.3	0.75	384.56
Site 9	314970	6820790	228.8	193.7	211.2	1.30	387.04
Site 10	287970	6830610	196.1	174.5	185.3	3.40	384.87
Site 11	291910	6839600	169.9	161.0	165.4	1.63	383.33
Site 12	293755	6845450	293.0	221.5	257.3	0.88	391.73
Site D	304225	6835780	291.5	187.5	239.5	0.11	383.15
Site E	305275	6826425	271.1	178.5	224.8	0.11	380.04
Mean			241.5	184.5	213.0	2.8	381.7
Min.			168.9	161.0	165.0	0.11	368.90
Max.			330.1	221.5	275.8	11.62	395.88
Max. - Min.			161.2	60.5	110.8	11.5	26.98

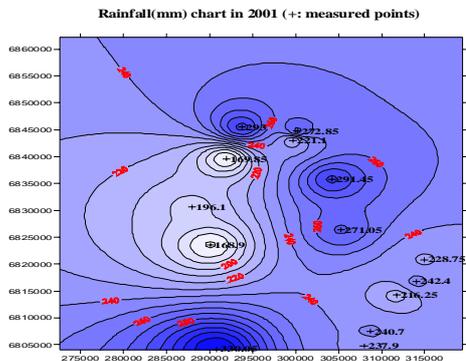


図 3-3-1 2001 年の降雨量分布図

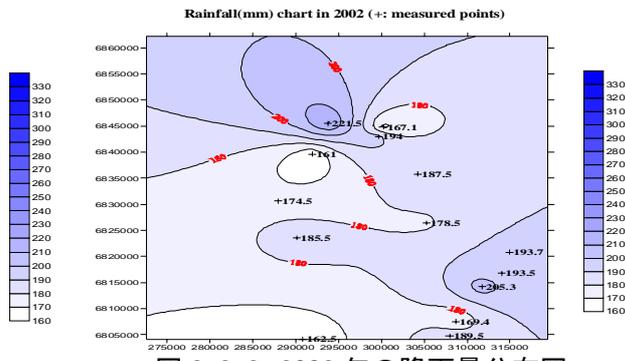


図 3-3-2 2002 年の降雨量分布図

### 3. 3. 2 植生量と降雨の長期変動及び相関関係

STURT MEADOWS地域の降水量と植生量の長期にわたる変動の解析と予測を目的とし、1917年から1998年までの日降雨量のデータを入手し、降水量の長期にわたる変動の解析を行った。連続降雨量については、6日間に300 mmを越す雨量が記録されている。連続無降雨(干天)日数については、200 日間を越す連続干天が観測されている。これらの多雨・少雨の異常値の出現は、年降雨時系列の中では同一時期に集中している。

多雨・少雨・連続降雨、連続干天などの異常値の出現を降雨量時系列との関連をみると、図3-3-3のようになる。全体トレンドとしては微増傾向にある。おおむね1950年前後は少雨期、1970、1990年代は多雨期であるといえよう。

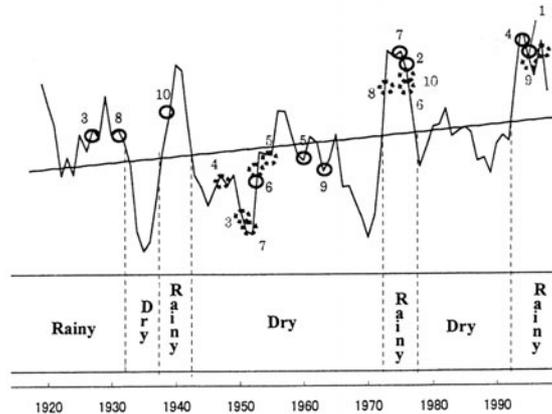


図 3-3-3 異常値の出現と降雨量時系列

図3-3-4のように大雨の日を含めると含めないの統計データを比較しても20年毎の年平均降雨量の変化傾向が変わらない。つまり各20年間での平均降雨量の順番は変化がないので、このような大雨は長期的の統計には影響しないことである。

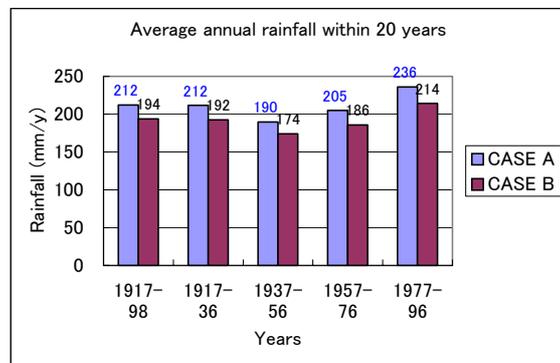


図 3-3-4 20年毎の大雨の日を含めると含めない年平均降雨量の比較

降雨時系列に12ヶ月移動平均、月別平均値による正規化の処理を行ったところ、いくつかの卓越周期が検出された。12ヶ月移動平均時系列からは太陽黒点周期対応の109ヶ月ほかいくつかの周期が、月別平均正規化時系列からは、1年以下の短周期の卓越が検出された。12ヶ月以上の変動に関しては、卓越周期成分を持つフーリエ級数でおおむね再現可能である。また、植生指数NDVIについても7周期成分からなるフーリエ級数で再現可能である。今後は海面温度・太陽黒点数なども考慮した解析が望まれる。

また、1917年から1998年までの日降雨量のデータを長期にわたる変動の解析を行った結果は、約50年前ころを最低として、降雨量は当時の190mmから、現在の236mmまで、年変動は大きいものの徐々に増大していると見ることができる。観察された

植生増加が降雨量の増大にフィードバックされている可能性は高い。20年毎に大雨の頻度と特徴について分析し、大体20年に5回、4年に1回の頻度で一日の降雨量は50mmを超える大雨が発生している。

### 3. 3. 3 植林が気象に及ぼす影響、降雨増大をもたらす灌漑法の提案

本報の目的は、持続可能な砂漠緑化のために降雨増加によって水資源を増加すること、砂漠緑化による気象および気候への影響を評価することである。

本研究では、スペクトルモデルを用いて、局地的な気候変化のシミュレーションを行った。このスペクトルモデルの特徴は次の通りである。(1) 地表の状態によって強くコントロールされる中規模領域の現象を予測することができる。(2) 地表面の気温、風、降水について、有用なデータが得られる。西オーストラリアを例とし、約500Km四方の地域で様々な地表面条件についてのシミュレーションの結果を比較する。

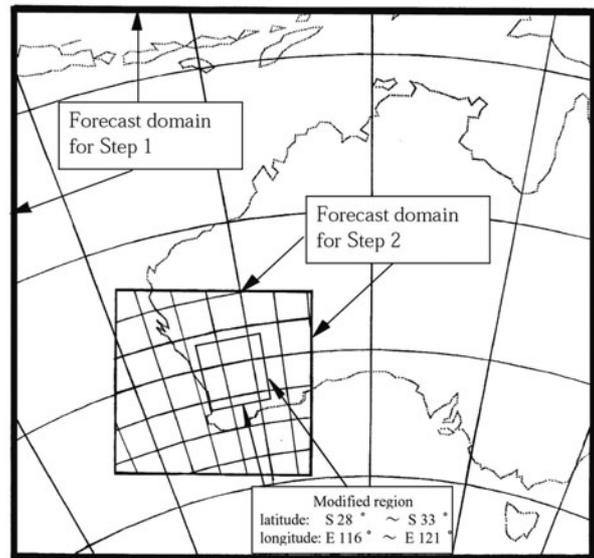


図 3-3-5 シミュレーションの範囲と地面改質の領域

計算領域および植林領域を図3-3-5に示す。鉛直方向は23層に分割、格子点は129×129、格子サイズは15から45kmで計算を行った。図3-3-5の最外枠に対して、選択された日に対する国土交通省気象庁気象研究所から提供された実測の全球解析データを、初期条件及び境界条件として用いて48時間の計算を行った。その際に、境界条件は、12時間ごとに得られる全球解析データから読み込んで変更した。図3-3-5内枠に対して、最外枠の24時間以降48時間までの計算結果を初期条件、境界条件として計算を行った。この方法によって、全球解析データと本計算実験との時間および空間スケールにおける差、植林地帯が全球データに与える急激な変化などを無理なく吸収できるものと考えた。

表 3-3-2 植林前後その領域の地表面状態

	$\beta$	$Z_0(m)$	アルベド
植林前	[全球データベースによる平均値]		
夏	0.1	0.11	0.20
秋	0.2	0.14	0.20
冬	0.2	0.14	0.20
植林後	0.60	1.00	0.15

(植林領域--緯度：S28-S32°，経度：E116-E121°)

全球解析データを用いて、初期条件と境界条件を与えて、季節によって、代表的

表 3-3-3 夏の植林領域でのシミュレーションの結果

夏の場合	代表的なケース		平均蒸発量 (mm)	平均降雨量 (mm)	蒸発の増加 (mm)	降雨の増加 (mm)
晴れの日	1月3日	植林前	2.8	0.0	2.8	0.1
		植林後	5.6	0.1		
	1月4日	植林前	3.1	0.0	3.6	0.3
		植林後	6.7	0.3		
曇りの日	1月2日	植林前	2.6	0.3	3.2	0.2
		植林後	5.8	0.5		
	1月21日	植林前	2.3	0.6	2.3	0.8
		植林後	4.6	1.4		
雨の日	1月14日	植林前	3.1	8.5	3.1	6.5
		植林後	6.2	15.0		
	1月19日	植林前	2.6	2.4	1.9	1.1
		植林後	4.5	3.5		
	1月22日	植林前	2.1	4.2	2.0	3.7
		植林後	4.1	7.9		

なケースを選択してシミュレーションを行った。地表面状態変化のパラメーターは地面の湿度を表す蒸発散係数  $\beta$ 、荒さを表す粗度  $Z_0$  と太陽光の反射を表すアルベド (albedo) である。植林前後の地表面を表3-3-2のパラメーターで表現した。

(降雨増大の可能性) 夏で最も効果的な降雨パターンは日中に晴れているか少し雲があり、夕方や夜に植林前でもその地域で雨が降ることである。計算結果の例を表3-3-3に示す。夏についての計算結果から、植林により蒸発量と降雨量は共に倍に増加することが分かった。植林地域だけではなくその周辺の降雨も増加する。典型的なパターンは午前および夕方直前に、晴れかわずかに曇りの場合、日射による地面付近の上空に十分な湿った空気が与えられ、午後および夕方から灌漑地域外からの移動性低気圧の接近によって不安定な大気の状態が引き起こされる。一方、秋、冬については、植林により降雨が増大する場合も減少する場合もみられた。

(灌水による降水量増大の可能性) 本研究の数値実験では、地面の湿度はシミュレーション中一定 (植林後、地面の湿度を表す蒸発散係数  $\beta = 0.6$ ) に設定されている。実際に植林地域の樹種は灌水後急激に水を摂取し、樹液流量のピーク値は灌水前の約3倍にも達する。このことは蒸散作用が土壌水分に強く依存すること、すなわち  $\beta$  一定の仮定が必ずしも成立しないことを意味している。計算したすべての気象条件で降水量の増加あるいは晴天であった状況で降水が生じている。このことは、植林のための灌水の一部が降水として地表に還元されること、また、夏の降水日には、蒸発水分が還元されるのみならず、蒸発水分をも上回る降水が海洋や外部からの水分によってもたらされることを示している。

我々はこの様な対流による降雨のメカニズムを活かして、外部から雲の発達を増

強し、灌漑水量以上の割増雨水を得ることを考えた。つまり、地表に灌漑した水量以上の雨水の収穫である。ある日の例では降雨増加が蒸発増加の約200%であるとの結果も得られている。このような降雨を引き起こすため適切な大気の状態を天気予報から予測し、降雨の1日前に、植林地域からの表面蒸発水量を増加させるために灌漑する。上部に雲のある不安定な大気が植林地域に移動して来るとき、地表の水蒸気は上昇気流と降雨を引き起こし、さらに解放された潜熱が上部の雲の発達を増強して、降雨を増加させる。すなわち灌水タイミングのコントロールによってより効率的な方法でより多くの降水を得ることが可能となる。

### 3. 3. 4 タワー及び小型航空機による二酸化炭素フラックス観測

森林の二酸化炭素吸収が温暖化を緩和する大きな役割を果たすことが認知されつつあるが、乾燥地のような貧植生地がどの程度の炭素吸収能力を有しているかはほとんど分かっていない。ここでは、対象乾燥地で最も炭素吸収能力が高いと予想されるユーカリ林において、渦相関法を用いたフラックス観測によりその炭素吸収能力を明らかにする。また、より広域の異なる植生での炭素吸収能力を推定するために、小型飛行機を利用したフラックス観測も行った。

測定対象となるユーカリ林は、Site 1Cを含むクリーク沿いに存在する。そのユーカリ林内に観測用のタワーを建てた。タワー周囲の平均樹高は約14mであり、タワーの高さ（測定位置の高さ）はその約2倍の26mとした。タワー上端に、大気中のCO<sub>2</sub>、水蒸気濃度を測定するためのオープン

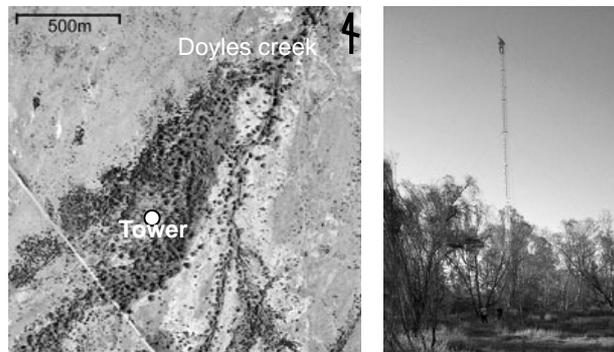


図 3-3-6 フラックス観測地(左)と観測用タワー(右)

ポンパスガスアナライザー (LI7500, Li-Cor Inc.) を設置し、またその隣に3成分超音波風速計 (Model 81000, YOUNG) を設置した (傾きは約1度)。両者の測定中心の距離は50cmとした。地上に設置されたソーラーパネルと大容量バッテリーにより電力を供給し、無人でも連続で測定できるようにしてある。両測定機器からの信号は地上に置かれたデータロガー (CR23X, Campbell Scientific, Inc.) により10Hz

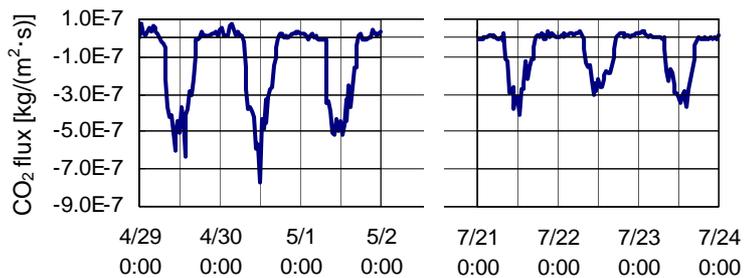


図 3-3-7 二酸化炭素フラックスの日変化

のサンプリングレートで記録される。記録されたデータは30分を1 runとし、ロガー内部のプログラムにより平均値、共分散などが計算され、30分毎のフラックス値が計算される。ロガー内のデータは出張時に回収するか、もしくは日本から携帯モデムを介した遠隔通信により回収する。現地滞在時はロガーにPCを接続し、生データの回収も行った。

図3-3-7に結果の一部を示す。これはWPL密度補正後の二酸化炭素フラックスである。負の値は下方へのフラックス、すなわち森林による吸収を表す。昼間の森林による吸収と夜間の呼吸による放出が見られる。2003年4月末の方が7月よりも昼間の下向きの二酸化炭素フラックスが大きい。2003年4月5日の約25mmの降雨により土壌水分が増加したが、その後まとまった降雨が無く土壌は徐々に乾燥していったことが、タワーから50m離れた位置での土壌水分測定結果から確認されている。このことから、4月の方が土壌水分条件が良く、また日射量も多いため、光合成速度が高かったことが予想され、それがフラックスの結果に反映されたと考えられる。

図3-3-8に測定結果から計算した炭素フラックスの日積算量の季節変化を示す。4月末から7月にかけて森林生態系が吸収した日積算炭素量が減少していく傾向にあったことが分かる。これも前述の土壌水分の変化、日射量の減少に対応していると考えられる。森林生態系の年間の炭素吸収量を推定するにはデータ不足であるが、この4ヶ月間の平均日積算炭素フラックス、 $0.00028 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ を用いて年間の炭素吸収量を推定したところ、 $0.1 \text{ kg}/\text{m}^2$ という値を得た。炭素固定能力は、乾燥地の場合には特に土壌水分に影響を受け、現地のユーカリ林は水条件が良好な時は熱帯雨林並みの炭素固定能力を有するが、通年では農耕地に近い値を示す。

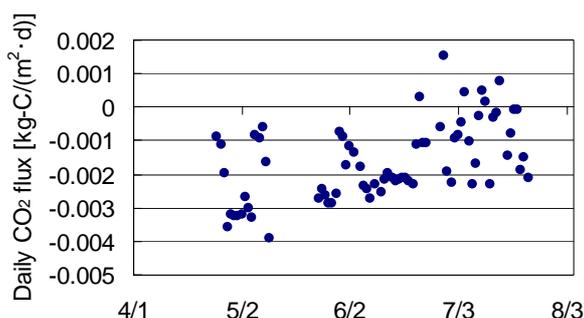


図 3-3-8 日積算炭素フラックスの季節変化



図 3-3-9 フラックス測定用小型飛行機

表 3-3-4 フラックス測定値の比較

	CO2 flux [ $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ]		Temperature. [ $^{\circ}\text{C}$ ]	
	Tower	Aircraft	Tower	Aircraft
Site C	-1.4~-2.3	-3.0~-3.6	13.1~20.3	22.0~28.2
Doyles creek	-6.7~-13.2	-8.9~-14.1	13.4~15.7	20.6~24.1

植生でも測定を行う必要がある。しかし、全ての植生にタワーを建て、測定機器を設置するのは不可能である。そこで、図3-3-9に示すような小型飛行機を用いたフラックス測定法を検討した。表3-3-4にタワーと小型飛行機での測定値の比較を示すが、タワーの方がフラックスの値が若干小さいものの、ほぼ同程度の値が得られており、小型飛行機によるフラックス測定が可能であることが分かった。これにより、複数の異なる植生においてもフラックスを測定することが出来、対象乾燥地全域での炭素吸収能力を推定することが出来る。

### 3. 3. 5 研究成果の今後期待される効果

乾燥地における最も重要な水資源である降雨データを、80年以上にわたる経年変化という観点から評価した結果、短期間では傾向が見えないデータも、統計的に処理するとある傾向が見られる。このような統計数値を用いることにより、期待される降水量、表面流出の発生確率を予想することができ、さらには植林による炭素固定量の予測と結びつけることが可能となる。また、降雨の周期性の把握は、植林実施時期の決定にとって重要な情報であり、最適な時期の選択は乾燥地緑化をより成功に近づけると期待される。

地上部からの水蒸気フラックスが大気気象に与える影響は、あくまでシミュレーションから求められたものであり、またこれを実証することは難しいものの、植林の副次的効果と持続可能性を示唆するものであり、今後の大規模植林推進に向けてのポテンシャルを高めるものとして活用したい。

陸域生態系の炭素吸収能力を推定する試みは現在世界中で行われており、いくつかのフラックス観測ネットワークが構築されている。本プロジェクトのフラックス観測データもオーストラリアのフラックスネットワークの一部組み込まれる予定であり、乾燥地での実測値として貴重である。

### 3. 4 全体システム構築グループ

#### 3. 4. 1 植林試験結果

本研究プロジェクトでは乾燥地に適した新規な緑化方法を提案するために、これまでに8つの植林サイトを設け、植林試験を行った（表3-4-1）。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、降雨時の表面流出捕集のためのバンク造成、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検討した（SiteE）。その他、供給水量と樹木成長の関係把握のための試験（SiteA）、現有の環境を利用し投入エネルギーを最小限にすることを旨とした補間植林試験（SiteF）、新規無機保水材として提案された焼成ポーキサイトの実証試験（SiteG）も行った。

ここではSiteA、C、Eについて詳しく説明し、各植林試験から得られた主要な結果について述べる。

#### SiteA

このサイトでは供給水量と樹木の成長速度の関係を明らかにすることを目的としている。まず植栽土壌深さ確保のためにハードパンの破壊、土壌の掘り返しを行った。この時の破碎は極小規模であり、ハードパンを貫通するものではない。図3-4-1に示すような配置で合計約90本の苗を約4.5m間隔で植栽した。植栽した主な樹種は、*Eucalyptus camaldulensis*、*Eucalyptus. torquata*及び*Casuarina obesa*である。灌水頻度が2週間に一度、1、3、6ヶ月に一度及び無灌水まで5段階に設定した。3ヶ月に一度の毎木調査によって成長を観測した。

図3-4-2に*E. camaldulensis*と*C. obesa*について各灌水頻度区画における一本当たりの平均乾燥重量変化を示す。灌水頻度の高い2週間区画、1ヶ月区画を比較すると、

表 3-4-1 植林サイトのコンセプトと導入技術

Site	Concept	導入技術	試験開始	植林本数
A	異なる水条件 (灌水頻度)	灌水制御	1998.7	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	1999.7	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	1999.7	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	1999.7	50
		ハードパン破碎		
E	土壌厚さ効果	表土層厚の増加	2000.9	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	2001.5	120
G	無機保水材の 施用	焼成ポーキサイトの混入	2001.5	60
		異なる混入法		
T	SiteCのコン トロール	大規模バンク造成	2001.7	250
		貯水バンク造成		
		ハードパン破碎		
		施肥		
		灌水制御		

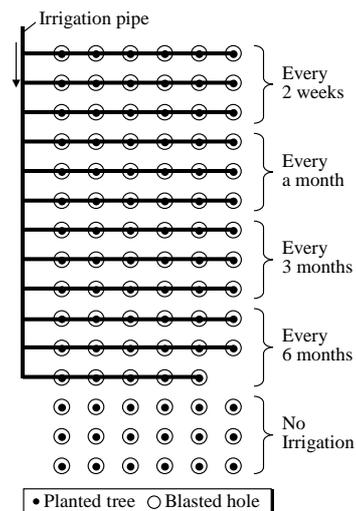


図 3-4-1 SiteA レイアウト

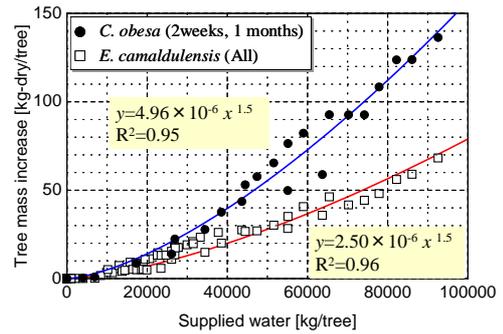
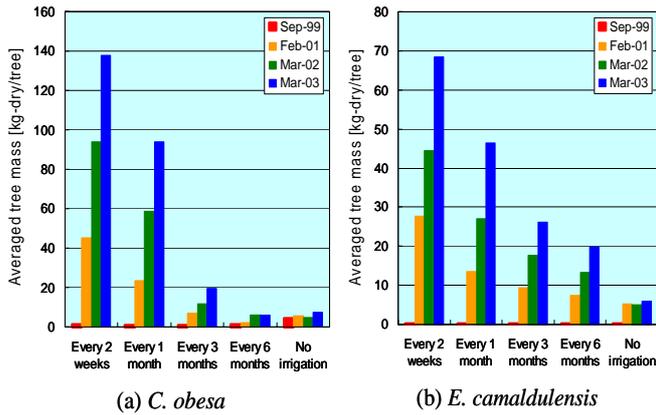


図 3-4-2 各灌水頻度区画における乾燥重量変化

図 3-4-3 供給水量と成長量の関係

*C. obesa*の成長が速い。しかし、*C. obesa*は3ヶ月区画では成長量が急に小さくなる。*C. obesa*は供給水量が十分な時は*E. camaldulensis*の2倍の炭素固定能力を有するが乾燥にはそれ程強くない。一方、*E. camaldulensis*は灌水頻度が少なくてもそれに見合った成長が可能で、乾燥に強いと言える。

図3-4-3は試験開始からの総供給水量（灌水量+降水量）と1本当たりの平均重量増加量の関係を示す。ここで、*C. obesa*については2週間区画及び1ヶ月区画のデータのみを用いた。両者とも成長量と供給水量の間に高い相関が見られ、その関係は3/2乗の曲線により高い精度で近似することが出来た。

### SiteC

このサイトは東から西へ下る緩やかな斜面上にあり、北と南を走る二本のワジに挟まれた流水域にある。羊の放牧により貧植生化し、浸食された土壌表面には所々ハードパンの露出が見える。表土層は概ね15~20cmと薄く、土壌の保水性、透水性は低い。

図3-4-4にSiteCのレイアウトを示す。まず降雨の流出を防ぐために、約600m×400mの範囲を1.5m高のバンクで囲った。その上流部はサイト上流からの表面流出水を取りこむためにV字に形成し、その流入量把握のために量水設備を設置した。図に示すように、内側には12個の桶形の貯水バンク（40m×50m）を全体

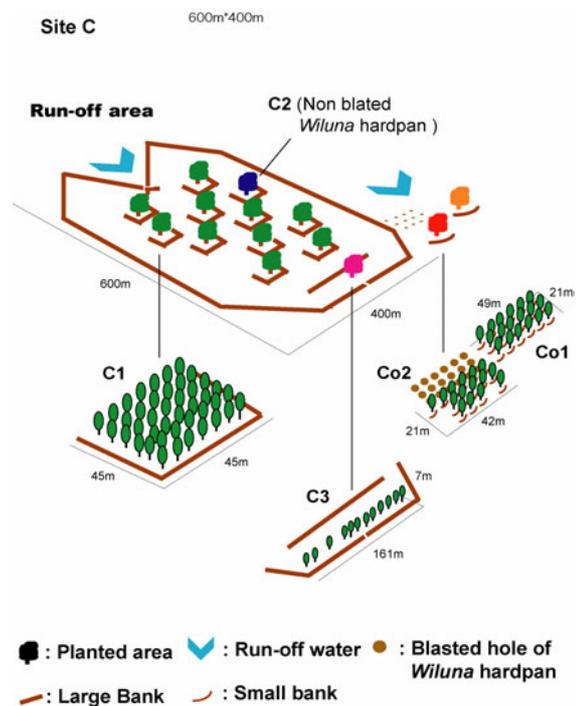


図 3-4-4 SiteC 植林レイアウト

として千鳥模様になるよう等高線に沿って造成した。最下流部にはバンク外への排

出口を設け、水量把握のための量水設備を設置した。

植栽は個々の貯水バンクで囲われた領域(Pondと呼ぶ)で行った。植栽に先立ち、Pond5を除く11のPond(C1)で、7m間隔の格子状に爆薬によるハードパンの破碎を行った。破碎後の土礫を除去し土壌表面を整地し、その後破碎によって形成された穴に苗(若木)を植栽した。Pond5(C2)では、ハードパン破碎効果を確認するために、破碎を行わず植栽のみを行った。植栽された樹種は、*E. camaldulensis*、*C. obesa*、*A. aneura*など計11種である。またサイト近くに井戸を掘削し、風車及びポンプを使用して地下水を汲み上げ灌漑に利用した。植栽苗の活着を促進する目的で、降雨状況にもよるが、1ヶ月ごとに全苗に灌漑を行った。

2~3ヶ月毎に毎木調査を行うとともに、土壌水分測定、樹液流速測定も行っている。また、サイト内に気象観測設備を設置し、気温、湿度、日射量、風速、風向、パン蒸発量、降雨量の観測も行った。

植林開始から4年が経過し、植林樹木は順調な成長を遂げている。大きいものは樹高が10mを超え、空中写真でも認識できるようになってきた(写真3-4-1)。外側バンク内のバイオマスは3年半で20倍以上になり、まだ成長途上にある(図3-4-5)。

を続けている。ほぼ同じ水条件で生育しているが、成長速度は樹種によって異なり、*E. camaldulensis*、*C. obesa*、*A. aneura*の順に成長速度が大きかった(図3-4-6)。導入した土壌改良技術、集水技術の有効性が実証された。ハードパン破碎を行わなかったPond5とそれ以外のPondでは、*E. camaldulensis*については成長速度が大きく異なり、ハードパン破碎の効果が顕著であったが、*A. aneura*については、Pond5の方が成長は遅いものの、それほど顕著



写真 3-4-1 植林開始 3 年半後の SiteC

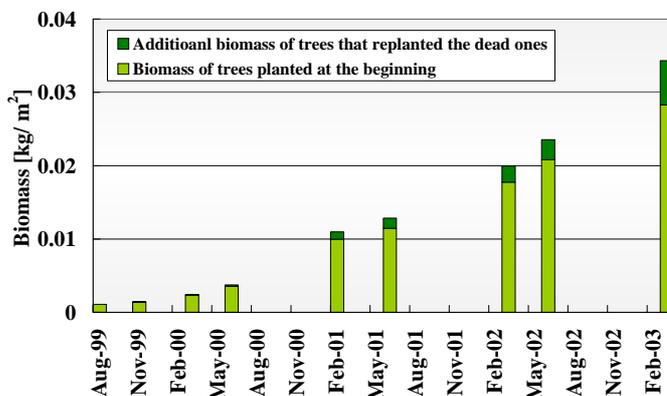


図 3-4-5 SiteC(外側バンク内)のバイオマス変化

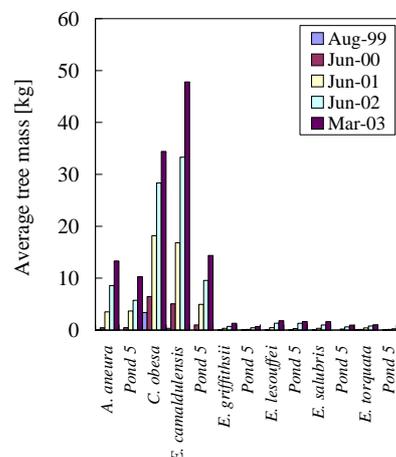


図 3-4-6 樹種別バイオマス変化

な差ではなかった。

前述のSiteAの結果では、灌水頻度が高い（1ヶ月に1度以上）場合、*C. obesa*は*E. camaldulensis*の約2倍の成長速度を示したが、SiteCでは灌水頻度が1ヶ月毎にも関わらず、*E. camaldulensis*の方が成長速度は大きい。写真3-4-2

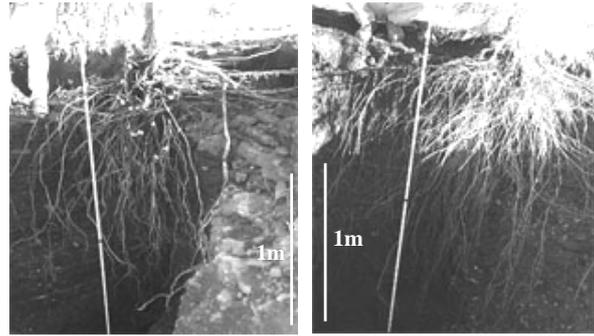


写真3-4-2 植林樹木の根の様子 (SiteC, 2001.7)  
(左; *E. camaldulensis*、右; *C. obesa*)

は試験開始2年後の*E. camaldulensis*と*C. obesa*の根の写真である。この時の両者の樹高はそれぞれ4.6m、4.3mであった。*E. camaldulensis*は根元から太さ数cmの太い根が枝分かれしながら長く伸びており、深さ方向には3m以上に達していた。一方、*C. obesa*の根は太さ1cm未満の細い根が根元から放射状に多数伸びており、深さ2mまでの範囲内に集中していた。この根の展開パターンの違いから、SiteCのようにハードパンを貫通した場合、*E. camaldulensis*は根を伸ばし、より深層の土壤水を獲得できるが、*C. obesa*は深さ2m以上に浸透した水分を吸水することが出来ないと予想される。SiteAのハードパン破碎はその上部のみの破壊で、貫通するものではなかった。そのため、供給された水は深層に逃げることなく滞留し、*C. obesa*がより高い効率で吸収したものと考えられる。

また、ハードパン下には粘土分を含んだ土層も確認されており、破碎によって根がその土層に到達することにより、水条件だけでなく、利用できる栄養塩量が増加するという点もハードパン破碎がもたらす利点の一つである。さらに、根掘調査から横方向に伸びた根が、破碎により形成されたハードパンの亀裂に入り込んでおり、このこともハードパン破碎が樹木成長にとって有効であることを裏付けていた。

今後さらに観測を継続し、植林樹木が持続的な成長を遂げるか確認する必要があるが、植栽後の初期育成に関して、対象乾燥地の緑化に適した樹種選択、土壤改良技術、集水技術及びそれらを統合した緑化手法の一つを開発することが出来た。

### SiteE

対象乾燥地には、表土層の下に岩盤層を有する地域も存在する。そのような地域ではハードパンの場合のように破碎により地下の土壤領域を拡大することは出来ない。そのため、表土を厚くし樹木が生育できる土壤層を確保することを考えた。

SiteEとして選ばれた土地は表土の厚さが20cm程度しかなく、背の低いブッシュと草が散在するだけの乏しい植生であった。その薄い表土を剥ぎ取り、剥ぎ取った土を下流側に盛りバンクを造成した。剥ぎ取られた場所は岩盤が露出し、降水が浸透することなく下流のバンクへ向かうと予測した。この降水と上流からの流出水が

バンクに浸透し、バンク上に植栽された樹木によって成長に利用されるはずである。

図3-4-7にSiteEに造成したバンクのレイアウトを示す。薄灰色部分の表土を利用し、下流側（図の上側）に等高線に沿って植栽用のバンクを造成した。また流出を防ぐために東西

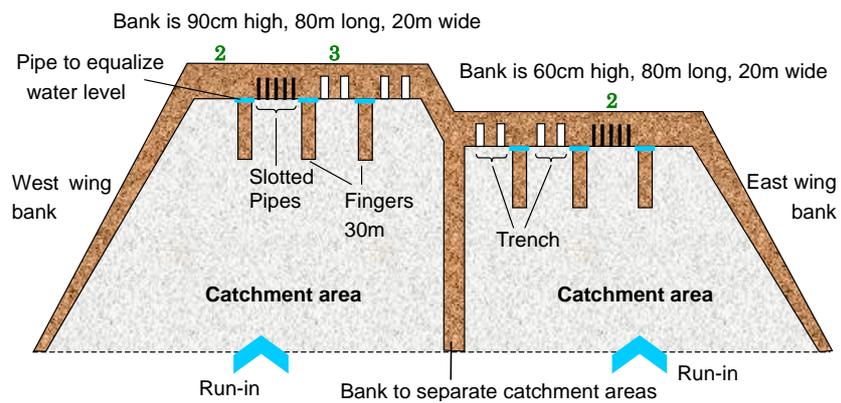


図 3-4-7 SiteE のバンクレイアウト

のウィングバンクを造成した。土壌厚さが樹木成長に及ぼす効果を検討するために、西側の植栽バンクの高さを90cm、東側を60cmに設定した。植栽バンクの幅は両側とも20mである。中央に南北に伸びたバンクにより二分割されており、それぞれはフィンガーバンクにより分けられた4つの個別のポンドを有している。このポンドでは、植栽バンク内への水の浸透を促進するための浸透法を導入した。その一つは、側面に多数のスロットを有したパイプであり、バンク内底部に埋設し、バンク後方まで水を誘導する。もう一つは浸透面積を増加するためのトレンチ（堀）である。そして導入した手法により、浸透技術なし（normal bank）、パイプ埋設（pipe bank）、トレンチ掘削（trench bank）の3区画に区分した。2002年4月から2003年3月まで計5回の毎木調査を行った。また、東西両バンクにおいて異なる浸透法を有する区画で土壌含水率の測定も行った。

写真3-4-3は試験開始約2年半後のSiteEの様子である。左は東側60cmバンクの全景、右は中央のバンク上の植栽樹木である。まだ周囲のブッシュよりも小さいものの、植栽樹木の成長は順調で、空中写真でも確認できるようになった。

最も植林本数の多いAcacia属の測定結果から、浸透法の効果、バンク厚さの効果を検討した。図3-4-8に各区画に植栽された苗木一本当たりの平均乾燥重量の変化



写真 3-4-3 植林開始 2 年半後の SiteE (左;東側 60cm バンク、右;センターバンク)

を示す。この結果から、成長量はpipe bankで最も大きく、次いでtrench bank、最後にnormal bankとなった。pipe bankとnormal bankでは、平均重量は約2倍異なった。この結果は水の浸透促進技術の有効性を示している。事実、降雨後、catchment areaに水が溜まっている時に各区画でバンク表面を掘り下げたところ、pipe bank、trench bankでは植栽バンク後部近くまで水が浸透していたが、normal bankでは10mも浸透していなかった。トレンチはパイプ同様浸透促進には効果があったが、形態上蒸発面が増加するため、蒸発が早いと予想される。

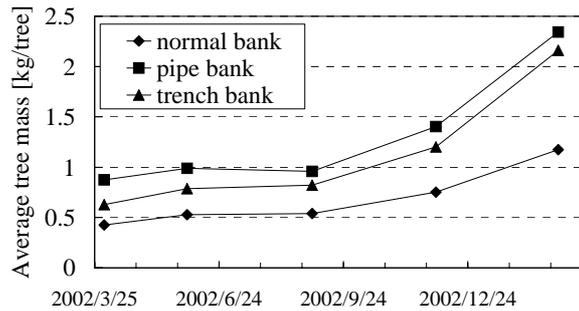


図 3-4-8 異なる浸透法区画のバイオマス変化

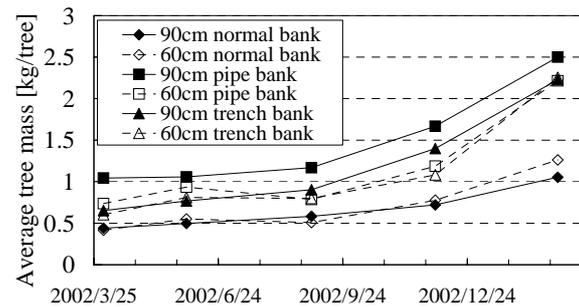


図 3-4-9 厚さの異なるバンクのバイオマス変化

そのためpipe bankに比べて成長量が小さくなったと考えられた。

図3-4-9にバンク厚さ別の樹木成長について示す。normal bankとtrench bankではバンクの厚さによる差があまり見られなかったが、pipe bankでは60cmバンクよりも90cmバンクで成長量が大きかった。90cmバンクの方がより長い時間水分を保持できたためであると考えられるが、バンクの厚さの違いに見合った成長量の違いであるかさらに検討する必要がある。

SiteEでは植栽後の1年間灌水を実施したが、その後は一切行っていない。しかし、SiteCよりは成長速度は小さいが、降雨と獲得した流出水のみで植栽苗は順調に成長を続けている。この方法も対象乾燥地の緑化手法の一つとして有効であることが実証された。

以上のように、対象地である西オーストラリアの乾燥地の環境を踏まえ、それに適した集水技術及び新規な土壌改良技術を提案し、その有効性を実証することが出来た。樹種選択、最適植栽法については次節でさらに詳細に述べる。

また、得られた供給水量と成長速度の関係は、炭素固定ポテンシャル推定、LCAによる炭素固定効率算出の基礎データとなる。さらに、観測している気象条件、土壌水分変化を元に緑化シミュレータによる炭素固定速度の計算が、また実測の成長速度との比較によりその妥当性の検証も行うことが可能になった。

### 3. 4. 2 植栽に好適な樹種選定と育成方法

森林育成を成功させるためには、植栽樹種の生理生態的特性を十分に理解してその種が持つ成長能力を生かすことが重要である。ここでは、本地域における炭素固定増大に有効な樹種選定を行い、その植栽方法や初期の育成方法について考察してみた。植栽に用いた樹種はAcacia属、Eucalyptus属、Casuarina属の高木種11種である中でも、種子や苗木の確保が容易な自生種3種（*Acacia aneura*, *Eucalyptus camaldulensis*, *Casuarina obesa*）を対象に、それらの樹種特性をまとめた(表3-4-2)。

*A. aneura*は、試験対象地域に最も広く分布する樹種である。根は浅根性（深さ約20-30cm）で、広く水平方向に伸びる。天然生木の成長は、降雨に大きく依存しており、まとまった降雨後に肥大成長を始める。乾燥が続くと幹の収縮が起こり成長に至らないが長期間乾燥に耐えて生存できる。植栽地においては、水供給が成長に対して非常に効果的であるが、発芽後の初期成長が遅く、植栽後の活着率(生残率)が低いという育成上の欠点があるので植栽樹種としては不相当と判断した。

*E. camaldulensis*はワジ沿いのハードパンのない場所に生育している。この地域ではもっとも大きくなり成長も旺盛で、降雨にかかわらず連続的な肥大成長を示すことが多い。それは、この樹種の根が深根性であるからである。自生立地はハードパンがない場所であり、根は深さ3m以上に達する。その深さには降雨にあまり影響を受けない地下水由来の水分が存在し、*E. camaldulensis*はそれを利用して無降雨期にも成長が可能である。*C. obesa*は多少の起伏があるような、ハードパンがあまり発達していないと考えられる立地に自生している。根はやや深根性で1-2mに達し、成長は自然状態でも比較的早いと考えられる

植栽試験においても、これらの特性をより具体的に反映する結果が得られており（前節参照）、炭素固定増大を目的にした植栽樹種には、*E. camaldulensis*と*C. obesa*が、好適であると判断した。この2種間には、前節で述べたような水分に対する成長特性の違いがあることから、植栽場所の立地と樹種に応じて効果的な育成法をとる必要がある（表3-4-3）。

表1. 調査地周辺に自生する主な高木種の生理生態的特性

種名	生育立地	樹型	根	成長速度	耐乾性
<i>Acacia aneura</i>	平坦地に広く分布。ハードパンがある場所でも生育。	初期に叢生型をとることが多い。樹高 10m 以下。	浅根性 0.2-0.3m	遅い	強い
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	ワジ沿いに分布。ハードパンのない平坦地。	大きくなるとやや幹が曲がる。樹高 20m 以上に達する。萌芽能力が高い。	深根性 2-3m	速い	やや弱い
<i>Casuarina obesa</i>	ワジに近い場所。やや地形が起伏した場所。	針葉樹。樹冠型はやや円錐形。幹は通直で樹高 20m 以下。	やや深根性 1-2m	速い	やや弱い

表 3-4-3 植栽好適樹種の初期育成方法

種名	灌水タイプ	植栽立地	育成方法
<b><i>Eucalyptus camaldulensis</i></b>			
	無灌水	地下水由来の水分が深さ1m以下で確保できる場所。ワジ沿いなどハードパンのない場所。	降雨期に植栽し乾燥期までに活着させる。降雨後無降雨期間が長い場合は活着が困難なので、リスクを伴う。
	成長初期まで (約6-12ヶ月)	ハードパン破碎。地下水由来の水分が深さ3m以下で確保できる場所。	灌 waters は、それを止めた場合でも成長を続けることが確認された時点まで。灌水頻度や量は徐々に少なくすることが出来る
	連続灌水 (数年以上)	ハードパン破碎。	長期間定期的な灌水が可能なら最大成長を示す。
<b><i>Casuarina obesa</i></b>			
	無灌水	地下水由来の水分が深さ1m以下で確保できる場所。ワジ沿いなどハードパンのない場所。	植栽直後には灌水の必要性が高い。同一立地なら、 <i>E. camaldulensis</i> 植栽が有利。
	成長初期まで (約6-12ヶ月)	ハードパン破碎。地下水由来の水分が1-2m以下で確保できる場所。	灌水期間は、供給を止めた場合でも成長を続けることが確認した時点まで。 <i>E. camaldulensis</i> 植栽が有利。
	連続灌水 (数年以上)	ハードパンが深さ1-2mの場所。	ハードパン上で、灌水した水分を有効に利用させる。 <i>E. camaldulensis</i> より、成長が上回る可能性が高い。

*E. camaldulensis*はより深根性であり、早期に自然水が得られる深さまで根を伸長させることが肝要である。植栽サイトでの実験より、ハードパンを破碎して植栽したものは、多くが灌水停止後も成長可能なことが解っている。そのため、*E. camaldulensis*が自生するワジ沿い以外では、ハードパン破碎後植栽+活着までの灌水という育成法が基本となる。*C. obesa*はより浅根性であるため、自然水の位置が深い場合は、*E. camaldulensis*より育成管理が難しく成長量も劣る。しかし、同量の水分供給が得られる場合は*C. obesa*の成長量が勝ることから、表土層の厚さが十分かつ2m以内であり、根域に水分を連続供給できる場合は、*C. obesa*を植栽する方が水利用効率の面で有利であると考えられる。この樹種に対しては、バンクの集水による水供給も効果的であるが、持続的に水分を供給できない場合が多いので、補助的手段として利用するのが適切だと考えられた。

本研究では、水分管理が成長にもっとも大きな影響を与えることがわかり、樹種ごとの植栽方法や植栽後活着・成長を始めるまでの初期育成方法をほぼ確立することが出来た。しかしながら、加齢による成長速度の変化など、長期にわたる変化がわかっていない。今後は、植栽後数年以上たった後の植栽木の成長や立地条件の変化をモニタリングしながら、森林形成にいたるまでの育成方法を確立していかねばならない。

### 3. 4. 3 緑化シミュレータプラットフォームの構築

緑化が行われるプロセスを理解するために、降雨や灌水による植物の生長過程のシミュレータを作成する。炭素固定におけるシミュレータの利用目的として、現象の再現と予測のための利用、研究のための分析ツールとしての利用が考えられる。

また、このシミュレータによる検討の結果を公開するだけでなく、シミュレータそのものを公開し、緑化対象地に応じたシミュレーションによる検討を行えるようにする。異なる緑化対象地でも、同じシミュレータを用いた結果であれば比較・類推が容易となり、緑化技術評価のプラットフォームとして活用できると期待される。

#### シミュレータの構造

乾燥地緑化において水が第一の制限要因となることを考慮して、土壌への水の供給から植生による炭素固定に至る水の移動を対象としたシミュレータを設計した(図3-4-10)。乾燥地にある水は、大気、地表、土壌、植物体内、そして地下の5つの場所にある水に分類できるとし、相互の移動過程を考慮した。植物に吸収され、蒸散する水の量に応じて光合成による炭素固定が起こるとし、植物の生長モデルと組み合わせて固定量を求めることとなる。

今回のシミュレーションでは実験地の土壌の比較的浅い場所(数十cm~数m)に不透水層があることから、地下水系をシミュレーションから除いた。また、大気中の水分についての情報は湿度と降水量として実測の値を用いることにし、これもシミュレーションから切り離れた。さらに、灌水中、または降雨が起きている間の液体水の移動が激しい期間(降雨期間)と、水蒸気移動により土壌の乾燥が進む期間とを区別して取り扱った。降雨期間は比較的短時間であると予測されるので、この間の光合成や植生成長は無視し、乾燥期間のみで扱っている。

シミュレータの内部的な構造を図3-4-11に示す。大きく土壌の水分分布を計算する部分と植物を扱う部分とに分かれている。土壌のシミュレータでは、降雨期間はInfiltration simulator、乾燥期間はEvaporation simulatorと区別するが、基本的には同じもので、後者では液体水、水蒸気の移動を扱うのに対し、前者は水蒸気移動を無視して簡略化し、一方で地表水位の変化を計算するWater surface simulationユニットと組み合わせる。シミュレータ全体の時間刻みはこの土壌の計算で決まる。

また、植生に関しては蒸散速度を計算するPlant water simulation、Photosynthesis simulationの二つユニットが気孔の開度を通じて結びつけられている。光合成によ

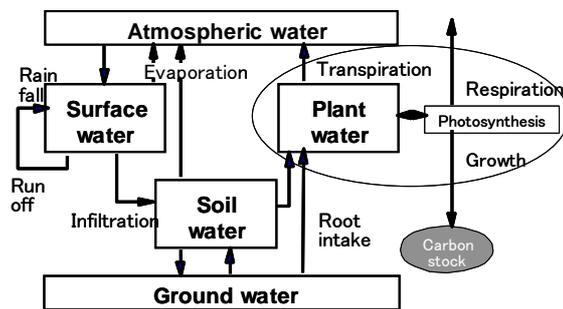


図 3-4-10 乾燥地における水収支のモデル

る一次生産をもとにした植物の生長モデルである Plant growth simulation によって最終的な炭素固定量が計算される。土壌の水条件の変化に植生は十分早く追随すると考え、植物の成長以外には、植生モデル固有の時間変化過程の計算は行っていない。植生を扱う部分は土壌水分のシミュレーションのサブルーチンとして扱われる。

### 土壌中の水移動シミュレーション

降雨期間の土壌中の水分移動については液体水の移動のみを考慮し、ダルシーの法則を拡散方程式に類似した形式に変形した以下の式を離散化して解いた。

$$C \frac{\partial \varphi_m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial \varphi_m}{\partial z} \right) + \frac{\partial K}{\partial z} \quad (1)$$

ここで  $t$  は時間、 $z$  は垂直下方向を正にとった空間座標、 $\varphi_m$  は水のマトリックポテンシャル、 $K$  は透水係数  $C$  は  $\theta_l$  を液体水の土壌体積に対する分率であるとして  $C \equiv \frac{d\theta_l}{d\varphi_m}$  と定義される。

乾燥期間のシミュレーションでは植生による水の吸収と、水蒸気による水の移動を考慮している。水蒸気の移動に関しては水蒸気分率の勾配に応じた拡散による移動を考慮するが、土壌の液体水と水蒸気が平衡に達すると仮定しているため、実質的には(1)を修正した一変数の基礎式で対応できる。

土壌物性、特に  $\varphi_m$  と  $\theta_l$  との関係を与える水分特性曲線と不飽和での透水係数  $K$  の  $\varphi_m$  への依存性は対象とする土壌によって様々な値をとり、また複数のモデルが提案されている。このため、土壌物性が差分化された基礎式を計算するメインのルーチンとは別のプログラム単位として、いろいろな実装が可能となるように構成した。具体的にはJava言語のInterfaceで定義した土壌物性によってメインルーチンを記述し、そのInterfaceを実装したクラスとして各種モデルを作成し、クラスに与えるパラメータの違いによって各モデル内での土壌物性の違いを表現している。

### 植生のモデル

植生のモデルのうち、蒸散と光合成を扱うモデルは上記の土壌水分の計算におけ

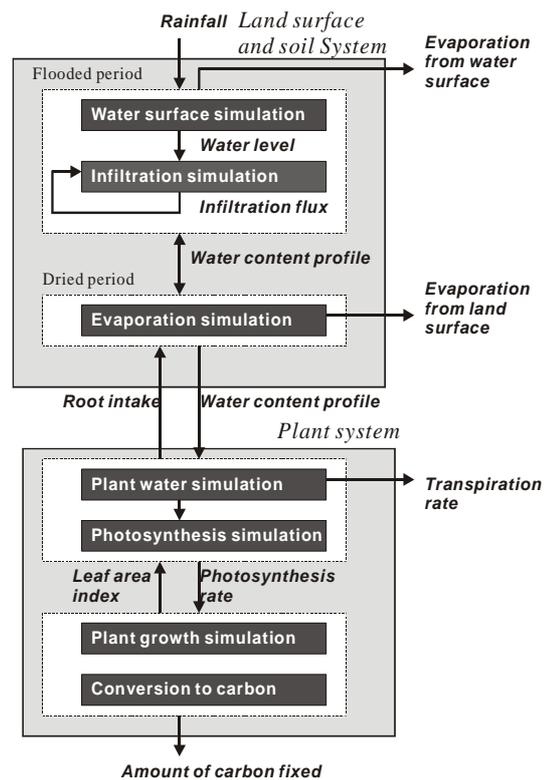


図 3-4-11 植林シミュレータの構成要素とデータフロー

るサブルーチンとして扱っている。土壌の水分分率が与えられたとき、それに応じて気孔の開度が増える。気孔は水の蒸散の経路であると同時に光合成に用いられるCO<sub>2</sub>の経路ともなっているため、この気孔の開閉によって水分とCO<sub>2</sub>とが関係づけられることになる。また、水蒸気の蒸散に応じて土壌の水分が減少するので、その寄与を土壌水移動のシミュレータに反映させている。

成長モデルでは、CO<sub>2</sub>に伴う一次生産に応じた成長をモデル化して組み入れる。成長が起こる事によって葉面積が増えるなどの変化が起こるので、時間に応じた変化を計算する必要があるが、この計算の時間刻みは先の土壌水分の計算における時間刻みとは別に設定している。

### シミュレーション結果

Site Cで植林実験を対象とした計算結果を図3-4-12、3-4-13に示す。

Site Cには、前後左右7m間隔で*Acacia aneura*などの樹木が植林されており、植栽後初期は約一週間に一度の灌水が行われた。ここでの計算では、灌水量をポンプ性能と樹木本数から推算して灌水量200mmとした。植林時点で7cm（重量換算して0.011kg）の*Acacia aneura*の幼木が成長する過程を計算した。気温、湿度、風速、光強度に関しては計算した期間における平均値を実測データから計算し利用した。

図3-4-12に土壌含水率の計算結果を示す。灌水に対応して周期的に浸潤と乾燥が繰り返されているが、地表から乾燥して行く様子が計算、実験ともに現れており、

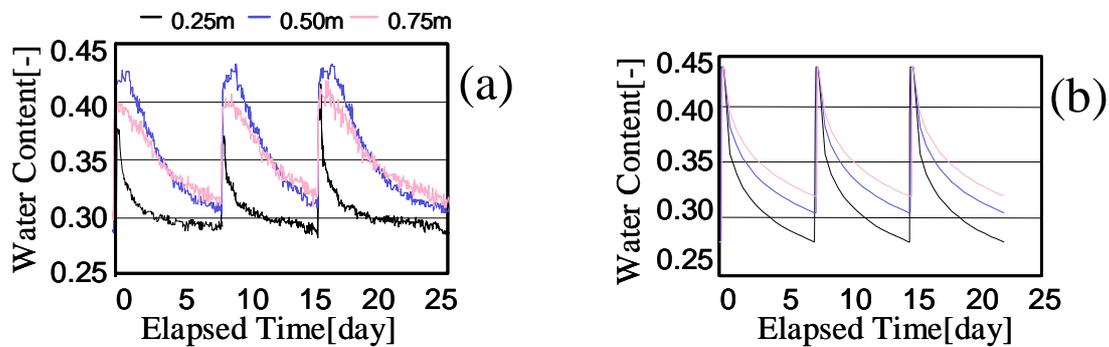


図 3-4-12 土壌水分の経時変化. 実測値(a)とシミュレーション結果(b)

両者の一致は比較的良好である。

次に樹木重量の変化を図3-4-13に示す。光合成によって固定された炭素の一定の割合が植物体として固定されるという、単純化された成長モデルを仮定し、光合成に対する成長の効率をパラメータとして成長の様子を計算した。実測値(図中の実線)との比較より、成長効率は約7%と見積もられる。

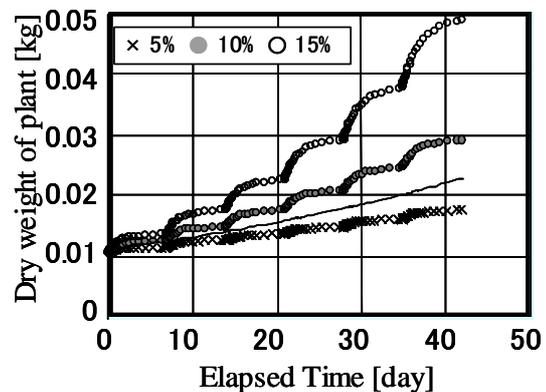


図 3-4-13 樹木の重量増加のシミュレーション結果. 実線は実測データの内挿値

## プラットフォームとしての実装

上記のようなシミュレータを用いた検討と同様の計算がいろいろな場所を対象に行えるよう、シミュレータそのものを公開することを試みた。従来、シミュレータの公開はプログラムのソースコード、実行形式ファイルの配布などが行われてきたが、ここでは、サービスのみをネットワーク経由で利用させる形態で、インターフェイスとしてWEBを利用するWEBアプリケーションとしての実装を行った。

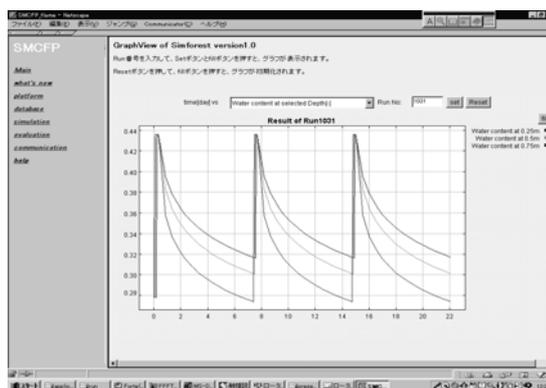


図 3-4-14 WEB アプリケーションの計算画面

図3-4-14は、WEBでの上述のシミュレータのスクリーンショットである。

WEBを利用した計算の実行は比較的容易であった。ただし、すべての計算をサーバー側で処理するため、多数の計算が集中すると計算が滞るケースもあった。

### まとめと今後の展開

乾燥地緑化技術を評価するプラットフォームとして、植生を含めた乾燥地のシミュレーションの作成を試みた。Leonra地区の状況に特化したバージョンを実装し、現地で取得されたデータによるシミュレーション計算が可能になった。今後、他の乾燥地や乾燥地以外の場所へも適用可能な様に、シミュレーションの要素を増やしていくことが望ましい。

また、WEBアプリケーションとして実装することで簡単にシミュレーションを行う事ができるようになった。今後、本格的な公開にむけて計算の分散処理の仕組みなどを工夫することが期待される。

## 3. 4. 4 炭素固定効率と炭素固定ポテンシャル

### 炭素固定効率

本プロジェクトは地球温暖化の抑制に寄与できる緑化システムの構築を目指しており、真の炭素固定、すなわち植林に伴い排出されるCO<sub>2</sub>よりも固定量が上回らなければならない。ここでは、LCA手法を用い、植林作業に伴い投入されるエネルギーや資材からのCO<sub>2</sub>排出量を算出し、期待できる固定量と比較することで、本プロジェクトで提案する植林法の有用性を定量的に求めた。

評価対象となる植林法は、SiteC及びSiteEで用いられた植林法である。SiteC及びSiteEの植林に際して実際に使用した機器類及び輸送に使用した燃料、セメント、灌漑用配管等の容量及び重量を実測した。その結果を元に、投入されたエネルギー、

素材使用量を計算し、素材起因のCO<sub>2</sub>排出量をNIRE-LCA Ver.3を用いて算出した。それを基礎データとして、想定する植林シナリオに応じてエネルギー投入量、素材使用量を計算しなおし、排出量を算出した。

実際に対象乾燥地で実施した植林はあくまで試験であり、植林密度も小さく、また樹種も複数のもものが植えられている。そこで次のような植林を行う場合を想定した。SiteCのタイプの植林では、用いる樹種は*Eucalyptus camaldulensis*のみとし、SiteCのバンク内側面積14,000m<sup>2</sup>に、SiteAと同等の4.5m間隔で計7,000本植えるとした。SiteEタイプでは、用いる樹種は*Casuarina obesa*とし、実際のSiteEの面積45,000m<sup>2</sup>の3分の2を集水エリアとし、その表層土壌を3分の1の面積に盛り、厚さが3倍（60cm）の植栽用バンクを造成し、そこに4.5m間隔で750本植栽するとした。

その植林パターンに応じて、各投入エネルギー量、素材使用量を、実測値から次のように修正した。ハードパン破碎時に使用する爆薬は、爆薬の埋め方などを改良することにより、1本当たりの使用量が3分の1になるとした（現在は爆薬のエネルギーの1%しか破碎に利用されていない）。植栽本数の増加に伴いDiesel油使用量は2倍になるとした。また、灌水用に敷設されるポリパイプは植栽本数分増加し、それ以外の素材使用量は実測の値と変わらないとした。

それらの仮定を用い、各植林法の炭素排出量は表のように計算され、SiteCタイプでは27 t-C、SiteEタイプでは2.5 t-Cとなった。

一方、炭素固定量の推定には、*E. camaldulensis*については現在既に樹高10mに達している植林樹木の炭素固定量を、*C. obesa*については樹高8mになることを期待し、その樹木の炭素固定量を代表値として用いた。計算された一本あたりの炭素量は表に示される通りであり、その値を用いて炭素固定効率を計算したところ、SiteCタイプでは32倍、SiteEタイプでは49倍となった。樹木の炭素固定量の決定は、植林シナリオに関わってお

り、成熟し樹木の重量が定常になった時点で考えるか、ある大きさになった時点でバイオマスエネルギーとしてなど他の利用に供するのにもよってくる。しかし、実際に現在までに成長した植林樹木の値を使っても両方で

表 3-4-4 緑化に伴う炭素排出量と炭素固定効率

		Site C		Site E	
Planted species		<i>Eucalyptus camaldulensis</i>		<i>Casuarina obesa</i>	
Tree number [trees]		7,000		750	
Site area [m <sup>2</sup> ]		140,000		45,000	
Emission					
Material	Amount	CO <sub>2</sub> emission [t-C]	Amount	CO <sub>2</sub> emission [t-C]	
Diesel oil [kl]	11	8.2	1.2	0.92	
Explosives [t]	25	5.8	-	-	
Cement [t]	5.0	1.0	-	-	
Poly pipe [t]	30	10	2.0	0.69	
PVC pipe [t]	-	-	0.65	0.17	
Fencing [t]	3.5	1.2	1.9	0.68	
Total		27		2.5	
Fixation					
Mass of tree [kg-C/tree]		120		160	
Fixed carbon [t-C]		840		120	
Fixation/Emission		32		49	

少なくとも約40倍の固定効率があり、本プロジェクトで提案した植林法が炭素固定の目的において有効であることが分かった。

また、SiteCタイプにおいて、樹木が利用する水を全て地下水の灌漑により賄うとし、地下水の汲み上げにポンプを使用すると仮定すると、ポンプの消費燃料からの炭素、地下水中に含有される炭素の放出により、その固定効率は3程度まで低下する。固定効率を上げるためには、ポンプの使用を避ける必要があるのは言うまでもない。また地下水中の炭素の放出も場合によっては炭素固定効率に大きく影響を及ぼし、その大量使用は効率を下げることに注意しなければならない。

### 炭素固定ポテンシャル

本プロジェクトの最終的な目標は、植林を中心とした陸上生態系の積極的な利用により全球的な炭素固定速度を増加することであり、その炭素固定ポテンシャルを推定することである。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、まずは対象地で得られたデータから、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。

年間降水量200~300mmの地域（西オーストラリアで $1.1 \times 10^6 \text{km}^2$ の面積）で降雨量（代表値を200mmとする）の30%が利用可能であるとし、それを1000mm相当に植林地に集約する。植林樹種は*E. camaldulensis*もしくは*C. obesa*のどちらかとし、その平均の成長速度を用いて計算を行った場合、約0.3億t-C/yの炭素固定速度になると計算された。また、年間降水量300mm~600mm（代表値を500mmとする）の地域（西オーストラリアで $5.4 \times 10^5 \text{km}^2$ の面積）で、その20%を植林に利用したとすると、同様に実測の成長速度を用いて、0.2億t-C/yの炭素固定ポテンシャルとなり、西オーストラリア全体では0.5億t-C/yと推定された。この数字は日本全体のCO<sub>2</sub>発生量の十数%となる。また、西オーストラリアの人口はオーストラリア全人口の1割に過ぎないが、オーストラリア全体でのCO<sub>2</sub>発生量の半分以上が固定できることになる。

### 3. 4. 5 研究成果の今後期待される効果

乾燥地植林を扱うプラットフォームとして、植生成長のシミュレーションとそのWebアプリケーションとしての実装を行った。

森林のシミュレーションモデルはD.B.BotkinらによるJABOWAモデルを初めとして多数のモデルが作成されているが、本研究でのシミュレータは乾燥地を対象としている点がユニークであるといえる。今後、水が支配因子となる状況から光、そ

の他の因子で制限される状況までを連続的に扱えるようモデルを拡張し、既存のシミュレータとの比較や、結果の交換を行えるように展開することが期待される。それによって、プラットフォームとして高い利用価値をもたせることができよう。

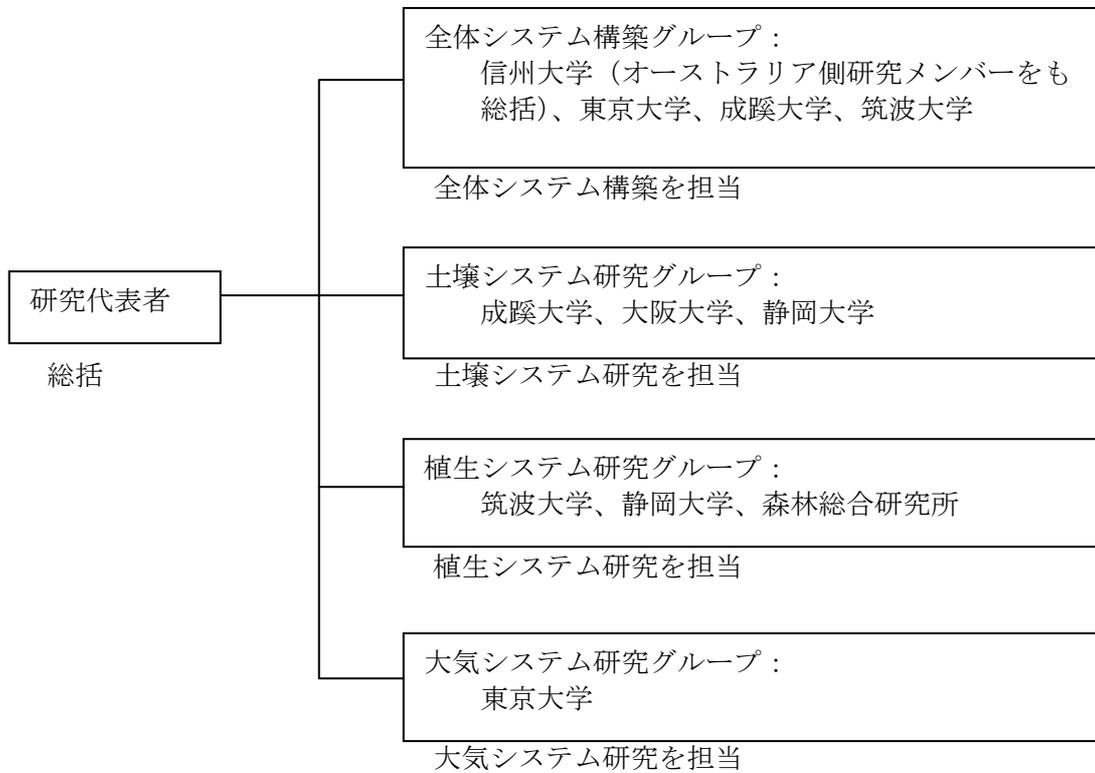
また、たとえば、森林で固定された炭素の固定年数を求めるシミュレータ（オランダWageningen 大学等によるCASFOR-IIプロジェクトなど）の様に、今回作成したシミュレータと相互補完的に使用できるプログラムとの連携も期待できる。実際、オランダWageningen 大学等によるCASFOR-IIプロジェクトの様に、プラットフォームとしての利用を前提に公開しているシミュレータもあり、Webを通じての連携を含めていろいろな形態での利用が考えられる。ケースもある。（ただし、これはWebでの利用を前提としたものはないが。）

LCA評価評価に関しては、今回のように実績に基づく評価例は少ないと思われ、その意味で希少であると自負できる。希少な結果は今後のLCA評価進展の、「標準値」としての役割を担うことになるが、しかしながら今後の修正も必要なことは言うまでもない。

本研究の規模は、まだまだ真の広域にまで展開されたとはいえないものの、広域への展開の一つの手法論が示されたものと考えられる。これも、様々な分野の研究者が集まり、目的を明確化した上で各自が持つバックグラウンドを生かしてきた成果の一つと考えられる。今後の学際的研究の一つの手法論を提示できたものと考えており、地球環境分野はもちろんのこと、様々な研究分野にも発展展開されるものと期待される。

#### 4. 研究実施体制

##### (1) 体制



## (2)メンバー表

## 研究グループ名：全体システム構築グループ

氏名	所属	役職	担当する研究項目	参加時期	備考
○山田 興一	信州大学繊維学部	教授	総括	平成10年10月～ 平成15年11月	
石谷 久	慶應義塾大学政策・メディア研究科	教授	調整、エネルギーシステム	平成10年10月～ 平成15年11月	
山地 憲治	東京大学大学院新領域創成科学研究科	教授		平成10年10月～ 平成15年11月	
山浦 逸雄	信州大学繊維学部	教授		平成11年4月～ 平成15年11月	
新井 親夫	信州大学繊維学部	助教授	モデルの現地適用	平成10年10月～ 平成15年11月	
安田 裕	筑波大学農林工学系	助教授		平成12年4月～ 平成14年3月	
藤巻 晴行	筑波大学農林工学系	講師		平成14年1月～ 平成15年11月	
鈴木 純	信州大学農学部	助教授		平成13年7月～ 平成15年11月	
温 慶茹	東京工業大学大学院総合理工学研究科	助教授		平成12年4月～ 平成15年11月	
上宮 成之	成蹊大学工学部	助手		平成10年10月～ 平成12年3月	
福長 博	信州大学繊維学部	助手		平成11年4月～ 平成15年11月	
田原 聖隆	産業技術総合研究所	研究員	エネルギーシステム	平成10年10月～ 平成15年11月	平成11年4月～ 平成12年3月CREST研究員
高橋 伸英	派遣先	CREST研究員	総合モデルの構築	平成11年4月～ 平成15年11月	
濱野 裕之	派遣先	CREST研究員	広域モデル、調整補佐	平成12年4月～ 平成15年11月	平成14年4月～CREST研究員
西入 千尋	派遣先	研究補助員		平成11年11月～ 平成13年3月	
尾鷲 聡子	派遣先	研究補助員		平成13年4月～ 平成15年11月	
久保 武隼	派遣先	研究補助員		平成12年4月～ 平成15年7月	
石井 裕美子	派遣先	研究補助員		平成12年4月～ 平成15年7月	
足立 真記子	派遣先	研究補助員		平成14年5月～ 平成14年9月	
永井 由美子	派遣先	研究補助員		平成15年9月～ 平成15年11月	

深沢 晋作	派遣先	研究補助員		平成14年2月～ 平成14年3月
米澤 亜紀子	派遣先	研究補助員		平成14年2月～ 平成14年3月
桧山 久美子	派遣先	研究補助員		平成14年2月～ 平成14年3月
及川 節子	派遣先	研究補助員		平成14年2月～ 平成14年3月
安楽 竜	信州大学大学院 工学系研究科	学生		平成12年4月～ 平成13年3月
小林 亮	信州大学大学院 工学系研究科	学生		平成12年4月～ 平成13年3月
寺西 望	信州大学大学院 工学系研究科	学生		平成12年4月～ 平成13年3月
中川 統之	信州大学大学院 工学系研究科	学生		平成12年4月～ 平成13年3月
広瀬 浩司	信州大学大学院 工学系研究科	学生		平成13年4月～ 平成14年3月
上村 豪幸	信州大学大学院 工学系研究科	学生		平成13年4月～ 平成14年3月
北原 弘道	信州大学大学院 工学系研究科	学生		平成13年4月～ 平成15年3月
小林 由佳	信州大学大学院 工学系研究科	学生		平成14年4月～ 平成15年11月
田中 基弘	信州大学大学院 工学系研究科	学生		平成14年4月～ 平成15年11月
藤原 尚	信州大学大学院 工学系研究科	学生		平成14年4月～ 平成15年11月
齋藤 史和	信州大学大学院 工学系研究科	学生		平成15年4月～ 平成15年11月
鶴川 正剛	信州大学大学院 工学系研究科	学生		平成15年4月～ 平成15年11月
田渕 尚一	信州大学大学院 農学研究科	学生		平成15年4月～ 平成15年11月
A. Williams	Curtin University	Professor	豪州乾燥地実地	平成10年10月～ 平成14年8月
S. Shea	CALM	E. Director		平成10年10月～ 平成11年3月

研究グループ名：土壌システム研究グループ

氏名	所属	役職	担当する研究項目	参加時期	備考
○小島 紀徳	成蹊大学工学部	教授	総括、モデル構築	平成10年10月～ 平成15年11月	
江頭 靖幸	大阪大学大学院 基礎工学研究科	助教授	水移動シミュレーション	平成10年10月～ 平成15年11月	
松田 智	静岡大学工学部	助教授	蒸発散シミュレーション	平成10年10月～ 平成15年11月	

松本 剛	成蹊大学工学部	研究員	平成12年4月～ 平成12年9月
S. Sinha	成蹊大学工学部	客員研究員	平成10年10月～ 平成12年3月
田中 淑子	成蹊大学大学院 工学研究科	学生	平成12年4月～ 平成14年3月
石田 丈介	成蹊大学大学院 工学研究科	学生	平成12年4月～ 平成14年3月
池田 裕弥	成蹊大学大学院 工学研究科	学生	平成13年4月～ 平成15年3月
朝賀 望	成蹊大学大学院 工学研究科	学生	平成14年4月～ 平成15年11月
斉藤 則子	成蹊大学大学院 工学研究科	学生	平成14年4月～ 平成15年11月
富井 大輔	大阪大学大学院 基礎工学研究科	学生	平成11年4月～ 平成13年3月
美奈 辰徳	大阪大学大学院 基礎工学研究科	学生	平成11年4月～ 平成12年3月
大澤 靖之	大阪大学大学院 基礎工学研究科	学生	平成12年4月～ 平成14年3月
石澤 愛子	大阪大学大学院 基礎工学研究科	学生	平成12年4月～ 平成14年3月
原 由之	大阪大学大学院 基礎工学研究科	学生	平成12年4月～ 平成13年3月
清水 啓右	大阪大学大学院 基礎工学研究科	学生	平成12年4月～ 平成13年3月
吉富 浩介	大阪大学大学院 基礎工学研究科	学生	平成14年4月～ 平成15年11月
龍井 英之	大阪大学大学院 基礎工学研究科	学生	平成15年4月～ 平成15年11月
柴田 美由紀	大阪大学大学院 基礎工学研究科	学生	平成15年4月～ 平成15年11月

研究グループ名：植生システム研究グループ

氏名	所属	役職	担当する研究項目	参加時期	備考
○安部 征雄	筑波大学農林工学系	教授	総括、樹種と水移動	平成10年10月～ 平成15年11月	
角張 嘉孝	静岡大学農学部	教授	実要水量計測	平成10年10月～ 平成15年11月	
斉藤 昌宏	森林総合研究所	領域長	樹種選択	平成10年10月～ 平成15年11月	

田内 裕之	森林総合研究所北海道支所	チーム長	平成11年4月～ 平成15年11月
宇都木 玄	森林総合研究所北海道支所	主任 研究官	平成12年4月～ 平成15年11月
加藤 茂	成蹊大学工学部	助手	平成14年4月～ 平成15年11月
齋藤 忠臣	筑波大学大学院農学研究科	学生	平成10年10月～ 平成15年11月
大和田 真弓	筑波大学大学院環境科学研究科	学生	平成10年10月～ 平成13年3月
内藤 大嗣	筑波大学大学院農学研究科	学生	平成10年10月～ 平成13年3月
小島 亜紀子	筑波大学大学院生命環境科学研究科	学生	平成12年4月～ 平成15年3月
谷口 雅彦	筑波大学大学院農学研究科	学生	平成12年4月～ 平成14年3月
劉 玉龍	筑波大学農林工学系	研究 留学生	平成12年4月～ 平成13年3月
崔 益斌	筑波大学大学院農学研究科	学生	平成13年4月～ 平成15年3月
菅沼 秀樹	筑波大学大学院生命環境科学研究科	学生	平成13年4月～ 平成15年11月
東理 裕	筑波大学大学院バイオシステム研究科	学生	平成13年4月～ 平成15年3月
木下 玄	筑波大学大学院バイオシステム研究科	学生	平成13年4月～ 平成15年3月
塩野 克宏	筑波大学大学院バイオシステム研究科	学生	平成14年4月～ 平成15年11月
田辺 喜良次	筑波大学大学院生命環境科学研究科	学生	平成14年4月～ 平成15年11月
安藤 義武	筑波大学大学院生命環境科学研究科	学生	平成15年4月～ 平成15年11月
井上 兼人	筑波大学大学院生命環境科学研究科	学生	平成15年4月～ 平成15年11月
中尾 昇平	筑波大学大学院生命環境科学研究科	学生	平成15年4月～ 平成15年11月
前原 一夫	筑波大学大学院バイオシステム研究科	学生	平成15年4月～ 平成15年11月
久保田 光政	岐阜大学連合農学研究科	学生	平成11年4月～ 平成15年11月
楢本 正明	岐阜大学連合農学研究科	学生	平成11年4月～ 平成15年11月
飯尾 淳弘	岐阜大学連合農学研究科	学生	平成11年4月～ 平成15年11月

尾高 尚子	静岡大学大学院農学研究科	学生		平成 11 年 4 月～ 平成 12 年 3 月
須藤 博	静岡大学大学院農学研究科	学生		平成 11 年 4 月～ 平成 12 年 3 月
高橋 拓磨	静岡大学大学院農学研究科	学生		平成 12 年 4 月～ 平成 13 年 3 月
大塚 紘平	静岡大学大学院農学研究科	学生		平成 13 年 4 月～ 平成 15 年 3 月
能勢 八千穂	静岡大学大学院農学研究科	学生		平成 13 年 4 月～ 平成 15 年 3 月
深沢 久和	静岡大学大学院農学研究科	学生		平成 13 年 4 月～ 平成 15 年 3 月
長谷 千明	静岡大学大学院農学研究科	学生		平成 14 年 4 月～ 平成 15 年 11 月
佐藤 向陽	静岡大学大学院農学研究科	学生		平成 15 年 4 月～ 平成 15 年 11 月
横山 憲	静岡大学大学院農学研究科	学生		平成 15 年 4 月～ 平成 15 年 11 月
尾籠 健一	東京大学大学院農学生命科学研究科	学生		平成 12 年 4 月～ 平成 14 年 3 月

研究グループ名：大気システム研究グループ

氏名	所属	役職	担当する研究項目	参加時期	備考
○小宮山 宏	東京大学大学院工学系研究科	教授		平成10年10月～ 平成15年11月	
山崎 章弘	東京大学大学院工学系研究科	助教授		平成10年10月～ 平成12年3月	
李 大寅	派遣先	CREST 研究員		平成10年10月～ 平成15年11月	平成13年10月～ CREST研究員

## 5. 研究期間中の主な活動

### (1) ワークショップ・シンポジウム等

年月日	名称	場所	参加人数	概要
平成11年 8月26日～27日	チーム内ミーティング	信州大学大 室農場	25名	今後の研究の進め方について
平成12年 9月15日～16日	チーム内ミーティング	成蹊大学箱 根寮	35名	研究の経過報告会
平成13年 5月28日	国際シンポジウム「大 規模植林と気象モデル 緑化は雨を降らせる か？」	東京大学	約60名	乾燥地での緑化研究のレ ポートと、専門家による気 象モデルの解説、その接点 から、緑化と気象に関する 討論
平成13年 9月29日	チーム内ミーティング	札幌	23名	研究の経過報告会
平成14年 5月12日	チーム内ミーティング	東京大学	10名	観測手法と現地への適用意 義についてDr. Hackerと討 論
平成14年 9月8日	チーム内ミーティング	信州大学	10名	調査進捗報告及び成果の論 文化について討論

“ワークショップ、シンポジウム、その他チーム内ミーティング（主なもの）を行った場合、月日、名称、場所、参加人数、目的や内容などをお書き下さい。”

(2) 招聘した研究者等

氏 名 (所属、役職)	招聘の目的	滞在先	滞在期間
HERTIG, Jacques-Andre (スイス国スイス連邦 工科大学 ローザン ヌ校 教授 )	国際シンポジウム「大規模植林と気象モデル 緑化は雨を降らせる か？」のパネルディスカ ションにおいて、パネ ラーとして参加してい ただく。また、シンポジ ウムでの日本の講演者 の研究機関において、追 加の議論をするため。	東京大学山上会館  東京大学大学院 工学系研究科  東京大学 気候システム研究セ ンター  国土交通省気象庁 気象研究所	H13. 5. 26～ H13. 5. 31
Goulpie Pascal (スイス国スイス連邦 工科大学 ローザン ヌ校 助手 )	国際シンポジウム「大規模植林と気象モデル 緑化は雨を降らせる か？」において、プレゼ ンテーションをしてい ただく。また、シンポジ ウムでの日本の講演者 の研究機関において、追 加の議論をするため。	東京大学山上会館  東京大学大学院 工学系研究科  東京大学 気候システム研究セ ンター  国土交通省気象庁 気象研究所	H13. 5. 26～ H13. 5. 31

## 6. 主な研究成果物、発表等

### (1) 論文発表 (英文 27 件、和文 23 件)

“著者、論文名、掲載誌 (巻、号、発行年) 等。”

1. 松本剛, 小島紀徳, 若林宏明: 「塩生植物を用いた広域沙漠緑化の最近の動向」, 沙漠研究(1999)
2. 松本剛, 小島紀徳, 若林宏明: 「塩生バイオマス栽培への適用を目的とした砂層中の横方向飽和浸透流解析・実験」, 沙漠研究(1999)
3. K. Yamada, T. Kojima, Y. Abe, A. Williams and J. Law; “Carbon Sequestration in an Arid Environmental Near Leonora, Western Australia” , Journal of Arid Land Studies (1999)
4. M. Taniguchi, Y. Abe, T. Kojima, M. Saito, K. Yamada, J. Law; “Estimating of present biomass in Leonora, Western Australia” , Journal of Arid Land Studies **10S**, 85-88 (2000.4)
5. H. Hamano, Y. Egashira and T. Kojima; “Numerical Prediction of Water Movement in Western Australian Soil for a Large Scale Afforestation” , Journal of Arid Land Studies **10S**, 25-28 (2000.4)
6. T. Matsumoto, S. Sinha, T. Kojima, S. Kato, H. Wakabayashi; “Studies of Salt and Water Movement of Saturated Soil with A New Method of Irrigation of Halophytes” , Journal of Arid Land Studies **10S**, 41-44 (2000.4)
7. Sangeeta Sinha, Tsuyoshi. Matsumoto, Hiroyuki Hamano, T. Kojima ; Salt and Water Movement in Desert Plantation: Effect of Distillate Water Produced By Recycled Waste, J. Arid Land Studies, **10S**, 49-52 (2000.4)
8. H. Hamano, Shigeru Kato, Tomohiro Shimizu, T. Kojima, K. Yamada ; A Study on Possibility of Bauxite Utilization to Improve Soil Properties for Afforestation of Arid Land, J. Arid Land Studies, **10S**, 81-84 (2000.4)
9. 松本剛, 田中淑子, 小島紀徳, 加藤茂, 齊藤昌宏, 安部征雄, 山田興一: 「西オーストラリア・レオノラ乾燥地域におけるCO<sub>2</sub>固定大規模植林技術の検討(1)塩と植生の関係」, 海水学会誌, **54** (3), 196-204(2000.6)
10. 濱野裕之, 江頭靖幸, 小島紀徳: 「豪州乾燥地の土壤中浸潤シミュレーション」, 化学工学論文集, **26**(4), 581-587(2000.7)
11. Sangeeta Sinha, Sanjay Kumar, H.Hamano, K.Tahara, And T.Kojima ; Conceptualization and Optimization of Solar Still Green House for Afforestation in Deserts, World Resources Review, **12**(3), 509-520 (2000.9)
12. 李大寅, 小宮山宏, 栗原和夫, 加藤康雄: "The Impact of Desert Afforestation on the Wether Modification in Western Australia in Summer", Journal of Arid Land Study,**10S**,13-16(2000)
13. 李大寅, 小宮山宏, 栗原和夫, 加藤康雄: "Case studies of the impact of landscape changes on wether modification in western Australia in summer", Journal Geophysical Research, **105**, 12303-12315(2000)
14. Sangeeta Sinha, Sanjay Kumar, T. Motsumoto and T. Kojima ; Application of System Identification Modeling To Solar Hybrid Systems for Predicting Radiation, Temperature and Load, Renewable Energy, **22**, 281-286 (2001.1)
15. 加藤茂, 濱野裕之, 上宮成之, 小島紀徳, 山田興一: 「焼成ボーキサイトの保水能評価」, 化学工学論文集, **27**(1), 50-56 (2001.1)
16. 李大寅, 小宮山宏: 「大規模緑化に伴う気象変化のシュミレーション」, ケミカルエンジニアリング, **46**, 108-117 (2001)
17. 安田 裕, 安部征雄, 山田興一: 「西オーストラリア州スタアトメドー地区における年降雨量時系列の周期変動について」, 沙漠研究, **11** (1) ,71-74 (2001)
18. 安部征雄, 齋藤忠臣, 内藤大嗣, 小島紀徳, 山田興一: 「西オーストラリアの乾燥地における土壌透水性と植物量の関係」, 沙漠研究, **11** (2), 131-140 (2001)
19. 濱野裕之, 田原聖隆, 小島紀徳, 山田興一: 「乾燥地における飽和透水係数の原位置測定および土層構造解析」, 農業土木学会論文集, **69** (6), 739-746 (216, 33-40) (2001)
20. S. Kumar, R. Datta, S. Sinha, T. Kojima, S. Katoh, M. Mohan; “Carbon Stock, Afforestation and Acidic deposition” , An Analysis of Inter-relation with Reference to Arid areas, Water, Air, and Soil Pollution,130: 1127-1132 (2001)
21. S. Sinha, T. Matsumoto, Y. Tanaka, J. Ishida, T. Kojima, S. Kumar; “Solar desalination of saline

- soil for afforestation in arid areas: numerical and experimental investigation” , *Energy Conversion and Management*, **43**, 15-31 (2002)
22. 宇都木玄, 田内裕之, 谷口雅彦, 齊藤昌宏, 安部征雄, 山田興一: 「単木状に成立する森林の光環境の推定」, *日本林学会北海道支部論文集*, **50**, 17-19 (2002)
  23. 田内裕之, 宇都木玄, 谷口雅彦, 安部征雄, 齊藤昌宏, 山田興一: 「単木状に生育する樹木のバイオマス推定」, *日本林学会北海道支部論文集*, **50**, 56-58 (2002)
  24. S. Sinha, T. Kojima, S. Kumar : “System identification process - An effective tool for material and energy conservation, renewable utilization and CO<sub>2</sub> mitigation” , *World Resources Review* (2002) 投稿中
  25. T. Kojima, Y. Tanaka, S. Katoh, K. Tahara, N. Takahashi and K. Yamada; “Estimation of water requirement per unit carbon fixed by Eucalyptus Camaldulensis in semi arid land of Western Australia” , *Science in China*, **45**, 142-147 (2002)
  26. J. Ishida, K. Tahara, H. Hamano, T. Kojima; “Evaluation of the Permeability and the Water Retention Capacity of Soil Mixed with Various Soil Conditioners” , *Science in China* (2001) 投稿中
  27. 谷口雅彦, 安部征雄, 齊藤昌宏, 大和田真弓, 山田興一: 「南西オーストラリア乾燥地の代表的植生タイプにおける植物現存量の推定」, *森林立地*, **44** (1), 21-29 (2002)
  28. 濱野裕之, 小島紀徳, 安部征雄, 山田興一: 「乾燥地土壌の水移動解析とその大規模植林への応用」, *沙漠研究*, **12** (3), 127-140 (2002)
  29. 齊藤忠臣, 安部征雄, 安田裕, 山田興一: 「乾燥地植林のための高透水性溝による流出水捕集浸透促進と蒸発抑制」, *沙漠研究*, **12** (3), 107-116 (2002)
  30. 谷口雅彦, 安部征雄, 齊藤忠臣, 齊藤昌宏, 山田興一: 「西オーストラリア乾燥地における植物現存量の推定」, *沙漠研究*, **12** (3), 141-150 (2002)
  31. 安田裕, 川戸渉, 安部征雄, 山田興一: 「西オーストラリア州スタアトメドー地区における植生指数時系列と降雨量時系列の関係について」, *沙漠研究*, **12** (1), 27-30 (2002)
  32. 谷口雅彦, 安部征雄, 菅沼秀樹, 齊藤昌宏, 山田興一: 「Landsatを利用した西オーストラリア乾燥地の植物現存量の推定」, *沙漠研究*, **12** (2), 55-66 (2002)
  33. 李大寅, 小宮山宏: 「オーストラリアにおける大規模緑化と降水量増大効果」, *化学工学論文集*, **28** (4), 456-460 (2002)
  34. 濱野裕之, 田原聖隆, 小島紀徳, 山田興一: 「乾燥地における飽和透水係数の原位置測定および数値計算による測定精度評価」, *農業土木学会論文集*, **218**, 19-27(2002)
  35. 小島紀徳, 石田丈介, 濱野裕之, 田原聖隆: 「保水材混合による土壌の透水性・保水性の変化」, *農業土木学会論文集*, **70** (3), 313-319 (2002)
  36. K. Yamada, T. Kojima, Y. Abe, M. Saito, Y. Egashira, N. Takahashi, K. Tahara, J. Law; “Restructuring and Afforestation of Hardpan Area to Sequester Carbon” , *J. Chem. Eng. Jpn.*, **36**(3)328-332(2003)
  37. Y. Egashira, D. Tomii, K. Ueyama, K. Yamada, T. Kojima, Y. Abe, M. Saito, N. Takahashi, and K. Tahara ; “Development of integrated simulator of water transport and plant growth as an evaluation tool of arid land afforestation for CO<sub>2</sub> fixation” , *J. Chem. Eng. Jpn.*, **36**(4), 383-390(2003)
  38. Y. Abe, M. Taniguchi, H. Suganuma, M. Saito, T. Kojima, Y. Egashira, Y. Yamamoto and K. Yamada; “Comparative Analysis between Biomass and Topographic Features in an Arid Land, Western Australia” , *J. Chem. Eng. Jpn.*, **36**(4), 376-382(2003)
  39. N. Takahashi, K. Tahara, H. Utsugi, T. Kojima, Y. Egashira, Y. Abe, M. Saito and K. Yamada; “Water Use Efficiency of Eucalyptus camaldulensis Growing in Arid Regions in Western Australia” , *J. Chem. Eng. Jpn.*, **36**(4), 391-400(2003)
  40. S. Sinha, Sanjay Kumar, T. Matsumoto, H. Hamano, T. Kojima : Salt and Water Movement in Standard Toyoura Sand: Theoretical Estimation and Experimental Evaluation, *Arid Land Geography*, **26**(S) , 66-71 (2003)
  41. S. Sinha, Sanjay Kumar, K. Tahara, T. Kojima : GMS Application for Mapping Soil Profile, Hardpan Depth and Ground Water Movement for Afforestation in Arid Areas and Desert, *Arid Land Geography*, **26**(S) , 96-99 (2003)
  42. H.HAMANO and T.KOJIMA : WATER AND HEAT BALANCE ANALYSIS IN BARE SOIL FOR A LARGE SCALE AFFORESTATION, *Arid Land Geography*, **26**(S) , 226-229 (2003)
  43. 齊藤忠臣, 安部征雄, 安田 裕, 小島紀徳、山田興一 ; “Runoff Water Collection and Evaporation Control By Highly Permeable Ditch” , *Arid Land Geography*, **26**(S) , 233-236(2003)

44. 安部征雄, 谷口雅彦, 齊藤忠臣, 齊藤昌宏, 大和田真弓, 山田興一; “Comparison of two methods to estimate biomass using Landsat TM in arid Western Australia”, *Arid Land Geography*, **26(S)**, 159-162(2003)
45. Toshinori KOJIMA, Josuke ISHIDA, Hiroyuki HAMANO, Kiyotaka TAHARA, Koichi YAMADA; “Evaluation of mixing effects of soil conditioners under dry condition”, *Arid Land Geography*, **26(S)**, 100-103 (2003)
46. 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、齊藤昌宏、安部征雄、高橋伸英、山田興一; 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, *水資源学会誌*, **16(5)**, 518-526 (2003)
47. 田内裕之, 宇都木玄, 濱野裕之, 高橋伸英, 安部征雄, 山田興一: 「肥大か膨張か—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—」, *日本林学会関東支部研究論文集*, 2004年1月発行予定
48. 安田裕, 川戸渉, 安部征雄, 山田興一: 「乾燥地月降雨量時系列と海面温度, 南方振動及び太陽黒点周期変動との関係について」, *沙漠研究*, **13(2)**, 131-138(2003)
49. K. Shiono, Y. Kanri, Y. Abe, H. Tanouchi, T. Kojima and K. Yamada; “Stand Growth Estimation of Representative Plant Communities in Arid Land of Western Australia”, *Journal of Arid Land Studies*, 2004年14Sに掲載予定
50. H. Suganuma, Y. Abe, M. Taniguchi, M. Saito and K. Yamada; “Fundamental Research on Detection of Stand Biomass Change in an Arid Rangeland”, *Journal of Arid Land Studies*, 2004年14Sに掲載予定

(2) 口頭発表 (内容が重複しているものは除く。国際学会発表を優先。)

“発表者 (所属)、タイトル、学会名、場所、月日等。”

① 招待、口頭講演 (国内 105 件、海外 20 件)

1. 角張嘉孝・久保田光政・韓慶民 (静岡大学)、佐野拓 (大成建設)、Mini-Pamを用いた乾燥地樹木の光合成診断、日本林学会、松山、4/4 (1999)
2. 久保田光政 (静岡大学)、R. Zimmermann, J. D. Teuhunen (バイロイト大学ドイツ)、角張嘉孝 (静岡大学)、Granier法による樹液流量の測定、4/4、松山、(1999)
3. 濱野裕之・加藤茂・清水智弘・小島紀徳 (成蹊大学)、山田興一 (信州大学)、焼成ボーキサイトの保水性・透水性、日本沙漠学会第10回学術大会、高知、5/22 (1999)
4. 松本剛・田中淑子・Sangeeta Sinha・加藤茂・上宮成之・小島紀徳 (成蹊大学)、沙漠地域における塩生植物栽培のための塩性土壌中の物質移動解析、第32回秋期大会化学工学会、金沢、9/26 (1999)
5. 本林徹司・松田智 (静岡大学)、大規模緑化のための土壌内水分移動解析、化学工学会第32回秋期大会、金沢、9/28 (1999)
6. 谷口雅彦・安部征雄 (筑波大学)、小島紀徳 (成蹊大学)、斎藤昌宏 (森林総研)、山田興一 (信州大学)、ジョン・ロー (MRS)、Estimation of Present Biomass in Leonora, Western Australia, *Desert Technology V, Reno, Nevada, U.S.A.*, 10/5 (1999)
7. Hiroyuki Hamano, Toshinori Kojima (Seikei Univ.), Yasuyuki Egashira (Osaka Univ.), Numerical prediction of water movement in Western Australia soil for large scale afforestation, *Desert Technology V, Reno, Nevada, U.S.A.*, 10/5(1999)
8. Tsuyoshi Matsumoto, Sangeeta Sinha, Toshinori Kojima, Shigeru Katoh (Seiki Univ.), Hiroaki Wakabayashi (Ryutsu Keizai Univ.), Studies of Salt and Water Movement of Saturated Soil with A New Method of Irrigation of Halophytes, *Desert Technology V, Reno, Nevada, U.S.A.*, 10/7(1999)
9. 斎藤昌宏 (森林総研)、安部征雄 (筑波大学)、山田興一 (信州大学)、小島紀徳 (成蹊大学)、西オーストラリア州レオノラの植生と土壌の概観、日本林学会第111回大会、神奈川、3/31~4/1 (2000)
10. 田原聖隆 (JST CREST研究員)、小島紀徳 (成蹊大学)、高橋伸英 (JST CREST研究員)、山田興一 (信州大学)、乾燥地樹種のリーフポテンシャルと土壌水分ポテンシャルの関係、化学工学会第65回年会、東京、3/29 (2000)
11. 李大寅・小宮山宏 (東京大学)、西オーストラリアにおける砂漠緑化に伴う気候の変化、

- 化学工学会第65回年会、東京、3/29 (2000)
12. 山田興一 (信州大学)、乾燥地緑化による炭素固定、化学工学会第65回年会、東京、3/29 (2000)
  13. 江頭靖幸・富井大輔・西山憲和・上山惟一 (大阪大学)、化学システムオペレーションとしての乾燥地緑化プロセス、化学工学会第65回年会、東京、3/29 (2000)
  14. 戦略的基礎研究「乾燥地植林による炭素固定システムの構築」プロジェクトチーム、乾燥地植林による炭素固定システムの構築、化学工学会第65回年会、東京、3/29 (2000)
  15. 田原聖隆 (JST CREST研究員)、田中淑子・小島紀徳 (成蹊大学)、高橋伸英 (JST CREST研究員)、山田興一 (信州大学)、乾燥地植林による炭素固定における水原単位の推定法、化学工学会第65回年会、東京、3/29 (2000)
  16. 斎藤忠臣・内藤大嗣・安部征雄・安田裕 (筑波大学)、田原聖隆 (JST CREST研究員)、表層土壌の浸透性とハードパン破壊による浸透性の変化、化学工学会第65回年会、東京、3/29 (2000)
  17. 谷口雅彦・大和田真弓・安部征雄 (筑波大学)、斎藤昌宏 (森林総研)、小島紀徳 (成蹊大学)、西オーストラリア州の乾燥地における植生別炭素固定量の推定、化学工学会第65回年会、東京、3/29 (2000)
  18. 大和田真弓・谷口雅彦・安部征雄・安田裕 (筑波大学)・山田興一 (信州大学)、衛星画像による西オーストラリア州レオノラの植生分布図の作成、化学工学会第65回年会、東京、3/29 (2000)
  19. 角張嘉孝・松田智 (静岡大学)、なぜ年間200mmの降水量でこれだけの現存量か? - 西豪州の樹木のCO<sub>2</sub>固定能力の実態 -、化学工学会第65回年会、東京、3/29 (2000)
  20. 田中淑子・松本剛・小島紀徳・加藤茂 (成蹊大学)、斎藤昌宏 (森林総研)、安部征雄 (筑波大学)、山田興一 (信州大学)、CO<sub>2</sub>固定大規模植林のための土壌環境からみた樹種選択に関する研究、化学工学会第65回年会、東京、3/29 (2000)
  21. 松本剛・Sangeeta Sinha・小島紀徳 (成蹊大学)、塩性土壌地域における塩生樹木育成のための土壌中の水・塩移動解析、化学工学会第65回年会、東京、3/29 (2000)
  22. 富井大輔・西山憲和・江頭靖幸・上山惟一 (大阪大学)、乾燥地における水管理を目的とした土壌水分蒸発現象の解析、化学工学会第65回年会、東京、3/29 (2000)
  23. 濱野裕之・小島紀徳 (成蹊大学)、豪州レオノラ地域における土壌中水・熱移動シミュレーション、化学工学会第65回年会、東京、3/29 (2000)
  24. 石田丈介・濱野裕之・上宮成之・小島紀徳 (成蹊大学)、田原聖隆 (JST CREST研究員)、乾燥地土壌への保水剤混合効果の評価、化学工学会第65回年会、東京、3/29 (2000)
  25. 新井親夫・松永さつき・福長博・山田興一 (信州大学)、高橋伸英 (JST CREST研究員)、焼成ボーキサイト内における水の拡散係数、化学工学会第65回年会、東京、3/29 (2000)
  26. 松田智・本林徹司 (静岡大学)、大規模緑化支援のための土壌水分移動解析(第2報)、化学工学会第65回年会、東京、3/29 (2000)
  27. 新井親夫・広瀬浩司・小林亮・福長博・山田興一 (信州大学)、高橋伸英 (JST CREST研究員)、小島紀徳 (成蹊大学)、焼成ボーキサイトを混入した模擬土壌の乾燥速度、化学工学会第65回年会、東京、3/29 (2000)
  28. 高橋伸英 (JST CREST研究員)・上村豪幸・新井親夫・山田興一 (信州大学)、田中淑子・小島紀徳 (成蹊大学)、田原聖隆 (JST CREST研究員)、乾燥地樹木および土壌における栄養塩組成の関係、化学工学会第65回年会、東京、3/29 (2000)
  29. 斎藤昌宏・田内裕之 (森林総研)、内藤大嗣・斎藤忠臣・安部征雄 (筑波大学)、西オーストラリア州レオノラ周辺の土壌層厚と植生量の関係、化学工学会第65回年会、東京、3/29 (2000)
  30. 久保田光政・榎本正明・角張嘉孝; 灌水前後におけるアカシアの樹液流量の変化について、日本沙漠学会第11回学術大会、東京、5/20-5/21(2000)
  31. 榎本正明・角張嘉孝・久保田光政; 灌水前後におけるアカシアの水ストレスと光合成速度の変化について、日本沙漠学会第11回学術大会、東京、5/20-5/21(2000)
  32. 角張嘉孝・佐藤紘子・山下秀康・久保田光政・榎本正明; 西オーストラリアレオノラ地区におけるユーカリ・アカシア林の物質生産-植物生態・生理学的アプローチから-、日本沙漠学会第11回学術大会、東京、5/20-5/21(2000)
  33. 久保田光政・榎本正明・角張嘉孝; 西オーストラリアのレオノラ地区における樹液流量の季節変化 アカシアとユーカリを中心に、日本沙漠学会第11回学術大会、東京、5/20-5/21(2000)
  34. 榎本正明・角張嘉孝・久保田光政; 西オーストラリアレオノラにおけるユーカリとアカ

- シアの光合成特性、日本沙漠学会第11回学術大会、東京、5/20-5/21(2000)
35. 角張嘉孝; Arid-Land and Water Balances of Eucalyptus and Acacia Ecosystems at Sturt Meadows near Leonora, West-Australia Assessed with Experiments and Modeling、Water and Environment Resolving Conflicts in the Development of Drylands、Beer-Sheva、Israel、6/4-6/7(2000)
  36. 松本剛・田中淑子・加藤 茂・上宮成之・小島紀徳・齊藤昌宏・安部征雄・山田興一; 西オーストラリア・レオノラ乾燥塩性地におけるCO<sub>2</sub>固定大規模植林の可能性の検討、海水学会第51年会、早稲田、東京、6/7-6/9(2000)
  37. 濱野裕之・田原聖隆・松本 剛・小島紀徳・山田興一; 土壌基礎物性の測定および土壌水分移動モデルによるパラメータ解析、化学工学会、浜松、9/12-9/14(2000)
  38. 田原聖隆・小島紀徳・Law J.・安部征雄・高橋伸英・山田興一; 西オーストラリアにおける乾燥地植林のCO<sub>2</sub>収支、化学工学会、浜松、9/12-9/14(2000)
  39. 高橋伸英・上村豪幸・新井親夫・田原聖隆・田中淑子・小島紀徳・山田興一; 乾燥地樹木の栄養塩収支、化学工学会、浜松、9/12-9/14(2000)
  40. 小林亮、広瀬浩司、高橋伸英、新井親夫、小島紀徳、山田興一: 焼成ポーキサイトの混入による乾燥地土壌保水効果の評価、化学工学会、浜松、9/12-9/14(2000)
  41. Tadaomi Saito, Yukuo Abe, Hiroshi Yasuda, Koichi Yamada: Effect of water harvesting considering evaporation control in arid areas, The XIV memorial CIGR world congress 2000, つくば(2000)
  42. 角張嘉孝; Sap Flux Changes in *Acacia aneura* Trees after Irrigation in a Dry Season in Leonora, West-Australia, International Symposium; The 16th "Global Environment Tsukuba"、筑波、12/8(2000)
  43. 角張嘉孝; Seasonal Fluctuations of Sap Flux in *Eucalyptus camaldulensis* and *Acacia aneura* Trees in Leonora, West-Australia, International Symposium; The 16th "Global Environment Tsukuba"、筑波、12/8(2000)
  44. 角張嘉孝; Photosynthesis Changes in *Acacia aneura* Trees after Irrigation in a Dry Season in Leonora, West-Australia, International Symposium; The 16th "Global Environment Tsukuba"、筑波、12/8(2000)
  45. 角張嘉孝; Carbon Sequestration of Arid-Land Ecosystems at Leonora, West-Australia Assessed with Experiments and Modeling、International Symposium; The 16th "Global Environment Tsukuba"、筑波、12/8(2000)
  46. 角張嘉孝; Seasonal Fluctuations of Photosynthesis in *Eucalyptus camaldulensis* and *Acacia aneura* in Leonora, West-Australia, International Symposium; The 16th "Global Environment Tsukuba"、筑波、12/8(2000)
  47. 田中淑子、小島紀徳、田原聖隆、高橋伸英、山田興一; 炭素固定を目的とした乾燥地植林における水利用率の推定、化学工学会第66年会、広島、4/3 (2001)
  48. 広瀬浩司、小林亮、栗野浩幸、高橋伸英、新井親夫、小島紀徳、山田興一; 乾燥地土壌の保水性・透水性に関するポーキサイトの混入効果、化学工学会第66年会、広島、4/3 (2001)
  49. 加藤茂、照井岳也、上宮成之、小島紀徳、山田興一; 植物による焼成ポーキサイトの保水能評価、化学工学会第66年会、広島、4/3 (2001)
  50. 上村豪幸、高橋伸英、田原聖隆、田中淑子、小島紀徳、山田興一; 乾燥地土壌の栄養塩含有量と樹木の関係、日本沙漠学会第12回学術大会、千葉、5/20 (2001)
  51. 高橋伸英、田原聖隆、齋藤昌宏、安部征雄、小島紀徳、山田興一; 乾燥地における植林樹木の成長及び耐乾性に及ぼす灌水量の影響、日本沙漠学会第12回学術大会、千葉、5/20 (2001)
  52. 濱野裕之、田原聖隆、小島紀徳、山田興一; 乾燥地における野外飽和透水係数測定および土層構造解析、日本沙漠学会第12回学術大会、千葉、5/19 (2001)
  53. 石田丈介、濱野裕之、田原聖隆、小島紀徳、山田興一; 乾燥地土壌への保水剤混合効果の評価、日本沙漠学会第12回学術大会、千葉、5/20 (2001)
  54. 松本剛、加藤茂、岡田直紀、坪山良夫、齊藤昌宏、小島紀徳、山田興一; 西オーストラリア乾燥地に生育する *Eucalyptus camaldulensis* および *Acacia aneura* の水利用: 安定同位体分析による水源の推定、日本沙漠学会第12回学術大会、千葉、5/20 (2001)
  55. 角張嘉孝、久保田光政、榎本正明、飯尾淳弘、ツインマーマン、テンフネン、安部征雄、山田興一; Arid-Land Carbon and Water Balances of Natural Vegetation, West-Australia Assessed with an Eco-physiological Experiment and Modeling、Global Change Open Science

- Conference、アムステルダム、7/13 (2001)
56. 齊藤忠臣、安部征雄、安田 裕、小島紀徳、山田興一；Runoff Water Collection and Evaporation Control By Highly Permeable Ditch、DESERT TECHNOLOGY VI INTERNATIONAL CONFERENCE、中国 ウルムチ、9/18 (2001)
  57. 安部征雄、谷口雅彦、齊藤忠臣、齊藤昌宏、大和田真弓、山田興一、Comparison of two methods to estimate biomass using Landsat TM in arid Western Australia、DESERT TECHNOLOGY VI INTERNATIONAL CONFERENCE、中国 ウルムチ、9/18 (2001)
  58. 田原聖隆、小島紀徳、安部征雄、高橋伸英、山田興一；CO<sub>2</sub> balance of afforestation in Western Australia、DESERT TECHNOLOGY VI INTERNATIONAL CONFERENCE、中国 ウルムチ、9/18 (2001)
  59. 小島紀徳、田中淑子、加藤茂、田原聖隆、高橋伸英、山田興一；Estimation of water requirement per unit carbon fixed by Eucalyptus Camaldulensis in semi arid land of Western Australia、DESERT TECHNOLOGY VI INTERNATIONAL CONFERENCE、中国 ウルムチ、9/18 (2001)
  60. 山田興一、江頭靖幸、小島紀徳、齋藤昌宏、安部征雄；Conceptual modeling for prediction of plant growth/carbon stock rate through water balance analyses under dry condition、DESERT TECHNOLOGY VI INTERNATIONAL CONFERENCE、中国 ウルムチ、9/18 (2001)
  61. 濱野裕之、小島紀徳；WATER AND HEAT BALANCE ANALYSIS IN BARE SOIL FOR A LARGE SCALE AFFORESTATION、DESERT TECHNOLOGY VI INTERNATIONAL CONFERENCE、中国 ウルムチ、9/18 (2001)
  62. 乾燥地植林による炭素固定システムの構築プロジェクトチーム；西オーストラリアにおける乾燥地植林による炭素固定システムの構築、化学工学会第34回秋季大会、北海道、9/28-30 (2001)
  63. 江頭靖幸、上山惟一；乾燥地緑化技術評価のためのプラットフォーム利用法のシナリオ、化学工学会第34回秋季大会、北海道、9/28-30 (2001)
  64. 松田智、藤田晋作、藤倉光伸；実大気条件に近づけた上昇気流生成のシミュレーション、化学工学会第34回秋季大会、北海道、9/28-30 (2001)
  65. 李大寅、小宮山宏；砂漠緑化に伴う降雨の変化、化学工学会第34回秋季大会、北海道、9/28-30 (2001)
  66. 安田裕、安部征雄、川戸渉、木下玄、山田興一；半乾燥地における降雨特性の解析、化学工学会第34回秋季大会、北海道、9/28-30 (2001)
  67. 近藤知之、松田智；土壌内蒸発を考慮した土壌水分移動モデル、化学工学会第34回秋季大会、北海道、9/28-30 (2001)
  68. 齊藤忠臣、安部征雄、安田裕、小島紀徳、山田興一；高透水性溝による表面流出水捕集と蒸発抑制効果、化学工学会第34回秋季大会、北海道、9/28-30 (2001)
  69. 濱野裕之、小島紀徳、山田興一；乾燥地大規模植林を想定した土壌内水収支解析、化学工学会第34回秋季大会、北海道、9/28-30 (2001)
  70. 石田丈介、濱野裕之、田原聖隆、小島紀徳、山田興一；乾燥地土壌への保水剤混合効果の評価、化学工学会第34回秋季大会、北海道、9/28-30 (2001)
  71. 新井親夫、栗野浩幸、福長博、高橋伸英、山田興一；地中の近距離における水分分布の測定、化学工学会第34回秋季大会、北海道、9/28-30 (2001)
  72. 新井親夫、広瀬浩司、高橋伸英、福長博、山田興一；不均一土壌の乾燥過程における水分分布、化学工学会第34回秋季大会、北海道、9/28-30 (2001)
  73. 高橋伸英、田原聖隆、齊藤昌宏、安部征雄、小島紀徳、山田興一；乾燥地植林における初期灌水法の確立、化学工学会第34回秋季大会、北海道、9/28-30 (2001)
  74. 田中淑子、小島紀徳、加藤茂、田原聖隆、高橋伸英、山田興一；樹木の水利用効率変化に及ぼす生育環境の影響、化学工学会第34回秋季大会、北海道、9/28-30 (2001)
  75. 池田裕弥、松本剛、小島紀徳、加藤茂、岡田直紀、坪山良夫、齋藤昌宏、安部征雄、山田興一；西オーストラリア乾燥地における安定同位体による樹木の水源の推定、化学工学会第34回秋季大会、北海道、9/28-30 (2001)
  76. 田原聖隆、高橋伸英、小島紀徳、山田興一；乾燥地樹種の葉の水分ポテンシャルと樹液流速の関係、化学工学会第34回秋季大会、北海道、9/28-30 (2001)
  77. 角張嘉孝、久保田光政、植本正明、松田智；降水量年間200mmでユーカリとアカシアが生存できる理由－西豪州樹木のCO<sub>2</sub>固定能力－、化学工学会第34回秋季大会、北海道、9/28-30 (2001)

78. 斉藤昌宏;乾燥地の植林技術と炭素固定量の評価、化学工学会第34回秋季大会、北海道、9/28-30 (2001)
79. 尾籠健一、斉藤昌宏、田内裕之、宇都木玄;西オーストラリア州レオノラ周辺における土壌呼吸速度、化学工学会第34回秋季大会、北海道、9/28-30 (2001)
80. 宇都木玄、谷口雅彦、田内裕之、斉藤昌宏;西オーストラリア州レオノラ周辺の乾燥地に成立する森林における林分密度と葉面積指数の関係、化学工学会第34回秋季大会、北海道、9/28-30 (2001)
81. 田内裕之、谷口雅彦、宇都木玄、斉藤昌宏、安部征雄;乾燥地における樹木葉量の推定、化学工学会第34回秋季大会、北海道、9/28-30 (2001)
82. 谷口雅彦、安部征雄、菅沼秀樹、斉藤昌宏、田内裕之、山田興一; Landsat TMを利用した西オーストラリア乾燥地の植物現存量分布の推定、化学工学会第34回秋季大会、北海道、9/28-30 (2001)
83. 菅沼秀樹、安部征雄、谷口雅彦、斉藤昌宏、山田興一; 航空写真による西オーストラリア州の乾燥地に於けるバイオマス分布の推定、化学工学会第34回秋季大会、北海道、9/28-30 (2001)
84. 宇都木玄、高橋伸英、田原聖隆、田内裕之、斉藤昌宏; 半乾燥地における3次元樹冠モデルを利用した生産量の推定、化学工学会第67年会、福岡、3/27-29 (2002)
85. 高橋伸英、田原聖隆、斉藤昌宏、安部征雄、小島紀徳、山田興一; 乾燥地植林における樹木成長と土壌改良効果、化学工学会第67年会、福岡、3/27-29 (2002)
86. 上村豪幸、北原弘道、高橋伸英、新井親夫、山田興一; 乾燥地樹木の栄養塩要求と土壌中含有量との関係、化学工学会第67年会、福岡、3/27-29 (2002)
87. M.,Naramoto, M. Kubota, (静岡大学農学部) J.Law and L.Hurst, (オーストラリア、植生リハビリセンター) K,Yamada (信州大学) Y. Kakubari (静岡大学農学部); Seasonal fluctuations of photosynthesis in *Eucalyptus camaldulensis* and *Acacia aneura* in Leonora, W-Australia Inter- Integration and regional researches to combat desertification -Present state and future prospect- The 16th global environment Tsukuba, 2002年2月、つくば (2002)
88. Y. Kakubari, M. Kubota, M.,Naramoto (静岡大学農学部) J. Tenhunen, (ドイツ連邦共和国、パイロイト大学) R.Zimmermann, (ドイツ連邦共和国、マックスプランク研究所) J.Law, L.Hurst (オーストラリア、植生リハビリセンター) K,Yamada (信州大学); Carbon Sequestration of Arid-Land Ecosystems at Leonora, West-Australia Assessed with Experiments and Modelling, Integration and regional researches to combat desertification -Present state and future prospect- The 16th global environment Tsukuba, 2002年2月、つくば (2002)
89. M.,Naramoto, M. Kubota, (静岡大学農学部) J.Law, L.Hurst, (オーストラリア、植生リハビリセンター) K,Yamada (信州大学) Y. Kakubari (静岡大学農学部); Photosynthesis changes in *Acacia aneura* trees after irrigation in a dry season in Leonora, West-Australia, Integration and regional researches to combat desertification -Present state and future prospect- The 16th global environment Tsukuba, 2002年2月、つくば (2002)
90. M. Kubota, M.,Naramoto (静岡大学農学部) J. Tenhunen, (ドイツ連邦共和国、パイロイト大学) R.Zimmermann, (ドイツ連邦共和国、マックスプランク研究所) J.Law, L.Hurst, (オーストラリア、植生リハビリセンター) K,Yamada (信州大学) and Y. Kakubari (静岡大学農学部); Seasonal fluctuations of sap flux in *Eucalyptus camaldulensis* and *Acacia aneura* trees in Leonora, West-Australia, Integration and regional researches to combat desertification -Present state and future prospect- The 16th global environment Tsukuba, 2002年2月、つくば (2002)
91. M. Kubota, M.,Naramoto, (静岡大学農学部) J. Tenhunen, (ドイツ連邦共和国、パイロイト大学) R.Zimmermann, (ドイツ連邦共和国、マックスプランク研究所) J.Law, L.Hurst, (オーストラリア、植生リハビリセンター) K,Yamada (信州大学) and Y. Kakubari (静岡大学農学部); Sap flux changes in *Acacia aneura* trees after irrigation in a dry Season in Leonora, West-Australia, Integration and regional researches to combat desertification -Present state and future prospect- The 16th global environment Tsukuba, 2002年2月、つくば (2002)
92. 濱野裕之、石田丈介、朝賀望、小島紀徳、山田興一; 広域水収支解析を目的とした表面流出モデルの構築、日本沙漠学会第13回学術大会、6/1-6/2、つくば (2002)
93. 濱野裕之、石田丈介、早川和樹、梅沢洋平、加藤茂、小島紀徳; 人工団粒形成の工学的評価、日本沙漠学会第13回学術大会、6/1-6/2、つくば (2002)
94. 束理裕、安部征雄、宇都木玄、菅沼秀樹、山田興一; 西オーストラリア州レオノラ地域の代表的植生タイプにおけるバイオマスの変化、日本沙漠学会第13回学術大会、6/1-6/2、つくば (2002)

95. 塩野克宏、安部征雄、高橋伸英、斉藤昌宏、山田興一：西豪州、レオノラでの乾燥地植林における植栽法と樹木成長の関係、日本沙漠学会第13回学術大会、6/1-6/2、つくば（2002）
96. 菅沼秀樹、谷口雅彦、安部征雄、斉藤昌宏、山田興一：航空写真を使用した乾燥地植物現存量推定法の提案、日本沙漠学会第13回学術大会、6/1-6/2、つくば（2002）
97. 田原聖隆、高橋伸英、宇都木玄、田中淑子、小島紀徳、山田興一：西オーストラリアにおける乾燥地樹木の水利用効率の推定、日本沙漠学会第13回学術大会、6/1-6/2、つくば（2002）
98. 高橋伸英、濱野裕之、田原聖隆、斉藤昌宏、安部征雄、小島紀徳、山田興一：西オーストラリア乾燥地における可能蒸発散量及び純一次生産量の推定、日本沙漠学会第13回学術大会、6/1-6/2、つくば（2002）
99. 山口達明、佐々木理、安部征雄、山田興一：オーストラリア乾燥地における土壌表面吸湿量変化の測定、日本沙漠学会第13回学術大会、6/1-6/2、つくば（2002）
100. 谷口雅彦、安部征雄、菅沼秀樹、田内裕之、山田興一：西オーストラリア州乾燥地における植物現存量と地形の関係、日本沙漠学会第13回学術大会、6/1-6/2、つくば（2002）
101. 山田興一、小島紀徳、安部征雄、斉藤昌宏、江頭靖幸、高橋伸英：豪州乾燥地植林による炭素固定、化学工学会鳥取大会、7/25-26、鳥取（2002）
102. 斉藤則子、田中淑子、加藤茂、小島紀徳、濱野裕之、高橋伸英、田原聖隆、山田興一：炭素固定を目的とした植林樹種選択のための水利用効率の推定、化学工学会第35回秋季大会、9/18-20、神戸（2002）
103. 池田裕弥、松本剛、小島紀徳、加藤茂、岡田直紀、坪山良夫、斉藤昌宏、安部征雄、山田興一：安定同位体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、化学工学会第35回秋季大会、9/18-20、神戸（2002）
104. 濱野裕之、高橋伸英、斉藤昌宏、江頭靖幸、安部征雄、小島紀徳、山田興一：乾燥地植林における表面流出水制御のためのバンク造成の最適化、化学工学会第35回秋季大会、9/18-20、神戸（2002）
105. 朝賀望、石田丈介、小島紀徳、濱野裕之、山田興一：乾燥地における広域水収支モデルの開発、化学工学会第35回秋季大会、9/18-20、神戸（2002）
106. Koichi Yamada, Toshinori Kojima, Yasuyuki Egashira, Yukuo Abe, Masahiro Saito, Katsuhiko Shiono, Nobuhide Takahashi : Possibility of CO<sub>2</sub> Fixation on Arid Land in Western Australia, 6<sup>th</sup> International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, Kyoto, Japan, 1-4 Oct. (2002)
107. 斉藤則子、田中淑子、加藤茂、小島紀徳、濱野裕之、田原聖隆、高橋伸英、山田興一：乾燥地植林における水原単位推定のための栄養塩挙動からの考察、化学工学会第68年会、3/23-25、東京（2003）
108. 北原弘道、高橋伸英、新井親夫、山田興一：乾燥地植林における水及び塩類収支、化学工学会第68年会、3/23-25、東京（2003）
109. Yoshitaka Kakubari : Assessment of greenhouse gas sequestration by natural vegetation in arid regions, Application of new technologies for improvement of desert environment, January 26-28, Kuwait (2003)
110. 高橋伸英、濱野裕之、小林由佳、新井親夫、斉藤昌宏、安部征雄、小島紀徳、山田興一：西オーストラリア乾燥地におけるAcacia aneuraのリター量と栄養塩循環、第14回日本沙漠学会学術大会、5/10-11、東京（2003）
111. 朝賀望、内藤千恵、石田丈介、小島紀徳、濱野裕之、山田興一：乾燥地における広域水収支モデルの開発、第14回日本沙漠学会学術大会、5/10-11、東京（2003）
112. 菅沼秀樹、安部征雄、谷口雅彦、斉藤昌宏、山田興一：乾燥地の植物現存量の変動判定に関する基礎研究、第14回日本沙漠学会学術大会、5/10-11、東京（2003）
113. 塩野克宏、安部征雄、高橋伸英、斉藤昌宏、小島紀徳、山田興一：ウォーターハベスティングが乾燥地の植栽樹木に与える影響、第14回日本沙漠学会学術大会、5/10-11、東京（2003）
114. 斎藤則子、田中淑子、加藤茂、小島紀徳、濱野裕之、田原聖隆、高橋伸英、山田興一：乾燥地における樹木の水原単位推定—栄養塩挙動からの考察、第14回日本沙漠学会学術大会、5/10-11、東京（2003）
115. 田原聖隆、小島紀徳、John Law、安部征雄、濱野裕之、高橋伸英、山田興一：西オーストラリア乾燥地植林の炭素収支比較、第14回日本沙漠学会学術大会、5/10-11、東京（2003）
116. 鶴川 正剛、高橋 伸英、新井 親夫、山田 興一；球状粒子充填層の水分特性曲線の

- 理論的推定、化学工学会第36回秋季大会、9/12-14、仙台（2003）
117. 朝賀望、内藤千恵、石田丈介、小島紀徳、濱野裕之、山田興一：広域水収支モデルを用いた水量および水質からの植林可能地の推定、化学工学会第36回秋季大会、9/12-14、仙台（2003）
  118. K. Shiono, Y. Kanri, Y. Abe, H. Tanouchi, T. Kojima and K. Yamada "StandGrowth Estimation of Representative Plant Communities in Arid Land of Western Australia", Desert Technology 7 International conference、インド、ジョドプール、11/10～14（2003）
  119. H. Suganuma, Y. Abe, M. Taniguchi, M. Saito and K. Yamada : "Fundamental Research on Detection of Stand Biomass Change in an Arid Rangeland", Desert Technology 7 International conference、インド、ジョドプール、11/10～14（2003）
  120. K. Yamada ; "Development of GHG Sink/Source Control Technologies through Conservation and Efficient Management of Terrestrial Ecosystems", インド、ジョドプール、11/10～14（2003）
  121. Toshinori Kojima ; "Afforestation of desert region and carbon fixation", インド、ジョドプール、11/10～14（2003）
  122. T. Matsumoto, S. Katoh, S. Sinha, S. Kumar, Y. Abe, T. Kojima and K. Yamada ; " Estimation of Water Behavior for Afforestation in Desert of Western Australia using Stable Isotope Ratio Analysis", インド、ジョドプール、11/10～14（2003）
  123. N. Saito, S. Katoh, T. Kojima, H. Hamano, K. Tahara, N. Takahashi and K. Yamada ; " Establishment of the Method to Estimate of Water Requirement Per Unit Carbon Fixation of a Tree in Arid Land", インド、ジョドプール、11/10～14（2003）
  124. T. Kojima, N. Asaka, J. Ishida, H. Hamano and K. Yamada ; " Development of a Model for Large Scale Water Balance in Arid Land", インド、ジョドプール、11/10～14（2003）
  125. H. Hamano, J. Ishida, T. Kojima, Y. Abe, M. Saito, N. Takahashi and K. Yamada ; " Infiltration properties of arid land with various conditions in Leonora, Western Australia", インド、ジョドプール、11/10～14（2003）

②ポスター発表（国内 件、海外 件）；なし

③プレス発表；なし

(3)特許出願（国内 1件、海外 0件）

“発明者、発明の名称、出願番号、出願日等。但し、出願予定の特許は含めないで下さい。”

① 国内

発明者：山田興一、小島紀徳、安部征雄

発明の名称：乾燥地植林のための土地改良法

出願人：科学技術振興事業団

出願日：平成15年4月7日

出願番号：特願2003-103345号

② 海外

なし

(4) 新聞報道等

① 新聞報道

- ・ 平成11年5月11日 東京新聞 夕刊 「豪州の荒地を緑の森にしよう  
(土地改良 ユーカリ育てCO<sub>2</sub>削減へ)」
- ・ 平成15年2月28日 科学新聞 「CO<sub>2</sub>固定システム構築へ 日豪共同でプロジェクト (科学技術振興事業団 戦略的創造研究推進事業 CREST研究成果から)」

② 受賞 ; なし

③ その他

- ・ 雑誌「Newton」2000年1月号 p. 26-27 「地球温暖化を防止する。」
- ・ 雑誌「受験Challenge」2002年9月号 p. 61 「地球温暖化対策を地球環境工学の立場から考える」

(5) その他特記事項

## 7. 結び

### (1) 研究活動について

明確な研究・開発目標を設定し、本プロジェクトを開始した。目標達成のためには学際的方法論が必要であった。また国外の辺鄙な場所に広大な実験地を設置したため、研究遂行のために多くの困難が予想された。

しかし、海外も含めた広範な研究分野の人たちと有機的に組織化し、円滑な情報交換、堅密な協力体制が維持されたため、設定目標がほぼ達成された。

今後は本成果をより具体的に、より広域に適用拡大するための研究を進める予定である。

### (2) 将来に向けての提案

#### ① 本研究に関する継続的予算制度

- 環境関連の研究はナノテクノロジー、バイオなどの研究分野と異なり、短期間に実用化に結びつけることができない場合が多い。JSTに研究継続のための予算制度もあるが、長期的な見方からの予算決定方式も考慮して欲しい。乾燥地緑化のように自然相手の研究は実験地の準備に多大な資金を要する。また実験を開始し、実際に植林したあと少なくとも10年間位は樹木成長速度、生態系変化、土壌構造変化、物質循環などを継続して観察する必要がある。このような観察が無いと研究成果の他の地域への応用が図れない。また、観察を継続するためには、実験地の継続的確保、維持管理も必要であり、そのための予算（本予算の数分の1でよい）が出れば研究成果の評価と共に成果の実用化が可能となる。
- 日本だけではなく多くの豪州、アラブ、アフリカなどの研究者が今回の研究成果に興味をもっている。今後の共同研究ファンド獲得、実用化に結びつけるために、豪州政府、日本政府ばかりではなく他国も含めた数多くの関係者の視察のための予算措置を講じていただきたい。

#### ② 実用化に向けた予算措置

- 今回の開発技術の一つである、ハードパン爆破による植林方法は対象地も広く、実用化の可能性が高い。実用化のためにはコストダウンが必要である。爆破方法改良によるコストダウンのための予算把握が望まれる。
- 既に提出した特許に基づく実証植林提案の公募と補助金制度の拡充が望まれる。

- 全球的 GIS 取得費用の予算化を行い、GIS データと今回得られた研究成果のデータに基づく植林対象可能地の選定を行い、本技術の適用拡大の検討を進める。
- ③ 国の政策など広く考えた要望
- オーストラリアは京都議定書の批准をしていない。しかし、今回開発された乾燥地緑化、農産物生産性と組み合わせた植林などを応用によるオーストラリアでの CO2 削減ポテンシャルは 10 億トン-C 以上の膨大なものになる。日本、オーストラリア間の気候変動に関する政策会議にこの具体的な研究例を出して貰いたい。このことを基に、オーストラリアでの批准促進と JI などの可能性の検討を希望する。
  - 同様に、本研究成果を国内に乾燥地を有する CDM 対象国にも提示し検討を依頼するとともに、人員（研究者）を派遣し、本技術の適用の可能性をより具体的に検討する。
  - CDM 対象地などでのこれまで植林などが実際に行われたことがある地域での植林後の経過を含め研究成果の評価を行うとともに、今回の研究成果を含めて植林による CO2 固定開発の現状を明確にして政策立案する。