

1 森林生態系を対象とした温室効果ガス吸収固定化技術の開発と評価

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

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

独立行政法人森林総合研究所	森林植生研究領域	田内裕之
	北海道支所	宇都木玄
筑波大学		安部征雄
	生命環境科学研究科	藤村達人
三重大学	生物資源学部	斉藤昌宏

<研究協力者>	独立行政法人森林総合研究所	森林植生研究領域	河原崎里子
			相川真一
	筑波大学	北アフリカ研究センター	菅沼秀樹

平成15～19年度合計予算額 44,400千円

(うち、平成19年度予算額 4,000千円)

上記の合計予算額には、間接経費 10,247千円を含む

[要旨]

オーストラリアの炭素固定植林のために、郷土樹種を対象として、耐乾性、耐塩性が高く、成長が早い樹種の探索を行った。その結果、植栽方法や初期灌水方法によって違いはあったが、*Eucalyptus camaldulensis* var. *Silverton*の生存率が最も高く、成長も早いことが示された。ハードパン破碎を実施した*Eucalyptus camaldulensis*の植林が乾燥地で有効なことが5年間の観測から示された。

次に降水量の異なる地域に植林した*E. camaldulensis*の単葉光合成生理特性 (V_{cmax} 、 J_{max} 、 R_d 、 m 、 G_{smin}) を明らかにし、モデルを用いた解析から、*E. camaldulensis*の光合成速度の日変化を精度良く表現することが可能となった。その結果、相互被陰や土壌水分の争奪を少なくした措置が適切である事が示唆され、また植栽場所に応じた植栽間隔と葉面積指数のコントロールが最大の生産量を得るための有効な植林技術であることが示唆された。なお、この*Eucalyptus camaldulensis* var. *Silverton*が他の*Eucalyptus*樹種や*E. camaldulensis*のエコタイプに比べて成長量が著しく劣ることは無い事から、西オーストラリア全般で植栽可能であると考えられた。

最後に、リモートセンシングを利用して植林木の成長量と自然林の成長量から、広域に植林展開した場合に計上可能な炭素量を試算した。その結果、植林期間を長く取ることによって最大で植林可能面積が約197,000 km²となり計上可能な炭素が2800-3200 kt-Cとなった。ただし、水収支などさらに検討すべき課題が残されている。

[キーワード] 耐乾性樹種、植林方法、光合成、ベースライン、リモートセンシング

1. はじめに

西オーストラリア州南部の海岸沿いに小麦地帯“wheat belt”と呼ばれる世界でも有数の穀倉地帯が広がる。ここはかつて*Eucalyptus* spp. の大森林であったが、ヨーロッパ人の入植に伴い、伐採され農地への転換が図られた。常緑樹林から一年生草木群落へと植生が改変されたことによって、土地単位面積当たりの蒸散量は激減し、地下水位は上昇した。逆に、土壌表面からの蒸発量は増加した。これらにより、地表面に塩集積が起こり、一方、植物の根域では灌水が起こっている。過剰な塩は植物の生理機能に異常をきたし、灌水は根の酸素不足を引き起こす。この減少を塩害salinityと呼ぶ。塩害は塩集積と灌水が、微地形により複合的に起こっている。塩害農地の面積はオーストラリア全土で急増している。特に、西オーストラリア州では塩害面積の増加が著しく、深刻な問題である。植林することによって上昇した地下水位を低下させ、地表面からの直接の蒸発を押さえ、リターによる土壌の改善が期待される。しかし、植林は、農業生産と競合しない、放棄のうちとなった劣悪な条件の土地に行くことが求められる。内陸乾燥地で確立してきた植林技術を小麦地帯塩害地域へ延用する可能性を探った。持続可能な農地の形成や塩害化の進行に伴う地下水の水質の悪化を食い止める、本来世界的に見ても生物多様性の高い地域であったが農地への転換による固体群存続が困難になった種を森林再生によって回復する、と行った副次的な効果が期待できる。

荒漠地への植林技術の開発として、これまで我々は研究対象値としてオーストラリア大陸内陸部の乾燥地を調査地としてきた。ここでは土壌層は薄く、その下に非常に固いハードパンという岩盤上の土層がある。このハードパン層の下には適量の地下水が存在するが、植物の根は地下水に到達することができない。植物の根が利用できる空間はハードパン上の薄い土壌層のみであり、また、利用可能な水資源は、時折の、しかも不確実な周期で振る雨のみである。雨水が土壌に保持されている時間は短い、我々はハードパンの破碎によって、根が利用できる空間を確保して地下水への到達を可能にする、地下水を汲み上げ適切なスケジュールでドリップ灌漑を行う、雨水の保持時間をできるだけ延長するような土壌を用いたりバンク（保水のための土塁）を築いたりする、という技術を単独ないし組み合わせることによって、成功速度が大きく炭素固定能力の高い*Eucalyptus camaldulensis* var. *Silverton*を中心に、これまで荒漠し樹木の生育が困難であった場所への植林を可能にできた。なお、今後特に断りなく*Eucalyptus camaldulensis*と記載した場合、var. *Silverton*のエコタイプを示す。

2. 研究目的

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

1) 樹種選択・植林方法

オーストラリアは全体に乾燥した大陸であり、特殊な分化をした植物が多く。生態系の攪乱に

配慮し、外来種の導入は厳しく制限されている。このため、郷土樹種を対象として、耐乾性、耐塩性が高く、成長が早い樹種を植栽する必要がある。また、乾燥地への植栽例は少ないため、選定された樹種の植林技術についても改善する必要がある。オーストラリアの乾燥地に広く分布している *Eucalyptus* 属、*Casuarina* 属および *Acacia* 属を対象に樹種選択と植林技術の検討を行うこととした。

西オーストラリア州レオノラに造成されている植林サイトC、Tの植栽木を対象に、成長経過とともに植林方法、灌水方法、樹種ごとの成長特性を解析し、最終的には植栽された樹種の成長量を評価することにより、乾燥地・半乾燥地に適した植林樹種を選択し、それらの樹種の植林システムを改善・確立する。一方、現地に広く生育するアカシア類について、育苗方法を確立するため、発芽試験と栽培実験を行い、発芽と根茎の初期成長特性を明らかにする。このような植林システムを確立・普及することによって、未利用乾燥地において炭素固定量を増大させることを目的とする。

2) 環境条件影響評価

オーストラリア西部内陸部（降水量200 mm）から、パース周辺の海岸部（降水量500 mm）まで降雨量が連続的に増大し、それに伴い植栽樹木の成長量や水分消費量が変化すると考えられる。内陸部に自生する *Eucalyptus camaldulensis* は耐乾性・耐塩性が高いことが知られる。しかしこの樹種を広域にわたる植栽木として選択する上で、水分条件対してどのような形態的・生理的適応を示し、また適応の結果、生理的機能が成長量にどのような影響を及ぼすかという点について、他樹種との比較検討から科学的根拠を示すことが必要である。本章では環境条件の異なる3地域に生育する *E. camaldulensis* の単葉光合成生理特性を明らかにし、モデルを用いた解析から、*E. camaldulensis* を植栽できる土壤水分条件及び植栽密度の指標を提示する。また比較的降水量が多く、塩害の発生する沿岸部における他樹種との混植試験から、*E. camaldulensis* の沿岸部での植栽の可能性を考察する。

(2) 荒漠地植林再生バイオマスの広域変動判定技術の確立に関する研究

温暖化対策植林としての新規植林・再植林 (A/R) による炭素固定量は、UNFCCC (2006¹⁾) によると、現実吸収量 (Actual net greenhouse gas removals by sinks; A) からベースライン純吸収量 (Baseline net greenhouse gas removals by sinks; B) とリーケージ (Leakage; L) を除した値である純人為的吸収量 (Net anthropogenic greenhouse gas removals by sinks; An) として (1) 式のように計算される。

$$An = A - B - L \cdots (1)$$

この中で、Aは植林木による炭素吸収、すなわち植林木のバイオマス量となり、植林区画のバイオマス変化の実測もしくは予測から求められる。Lは実際の植林活動が始まってから決まるので、ここでは議論しない。Bは調査対象地の土地利用形態によって決定する。よって、乾燥地植林による純人為的吸収量を求める方法を確定するために、ベースライン純吸収量(以下ベースライン)

の推定手法の検討する必要がある。本対象地でのベースラインは土地利用形態が放牧地なため、自然植生の炭素変化を予測することになる。

ただし、ベースラインはUNFCCC (2006¹⁾) によるとプロジェクト・バウンダリー内の5つの炭素プール(地上部バイオマス、地下部バイオマス、落葉・落枝、枯死木および土壌炭素)の変化を予測せねばならない。ここでは落葉・落枝、枯死木および土壌炭素に関しては他のパートで述べたため、ここでは地上部バイオマス、地下部バイオマスの2つの変化を予測することにした。

地上部および地下部のバイオマスの変化は林分の年成長量となり、生態学的モデルによって(2)式にて表される。

$$SG = Ph - Rp - Lf - Db \dots (2)$$

SGが林分の年成長量、Phが総光合成量、Rpが植物体呼吸量、Lfがリター量、Dbが枯死個体量である。光合成量は葉面積指数(LAI: Leaf Area Index)に関係することが広く報告されている(Myneni *et al.*, 1992²⁾; Rochette *et al.*, 1995³⁾; Campbell *et al.*, 2001⁴⁾)。また、植物体呼吸量はバイオマスに関係することが自明の理である(e.g. Friend *et al.*, 1997⁵⁾)。さらにSTM対象地では、リター量がバイオマスに線形比例(山田, 2004⁶⁾)する。Suganuma *et al.* (2006⁷⁾)での解析結果によると、*A. aneura*林分のバイオマスは林冠閉鎖度(CC: Canopy Coverage)から高精度で推定可能であり、LAIは林冠閉鎖度に単純な関数で変換可能であった。このことから、枯死量をランダム発生もしくは定数と仮定すると、(2)式は林冠閉鎖度を変数とした関数に単純化可能と予想された。そこで本研究では、林冠閉鎖度をパラメータとしてベースライン予測を実施し、An(純人為的吸収量)を予測することを目的とした。

3. 研究方法

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

1) 樹種選択・植林方法

西オーストラリア州レオノラに位置するSturt Meadows Station (28° 34' S, 121° 00' E)に造成された植林地を利用した。本地域の平均年降水量は約220mm、年間可能蒸発散量は約3400mm、年平均気温は20.9°Cである。植林地付近は、かつての過伐採と過放牧によって植生が衰退し、浸食された土壌は15cm~20cmと薄く、透水性、保水性は低い。さらに土壌層下にハードパンが存在している。サイトCとサイトTでは7m間隔でハードパンを破碎した42の植栽孔を1セットとし、その周囲に集水用のポンドバンクを造成した。サイトCでは12のポンドを、サイトTでは7つのポンドを造成し、その周囲をさらに集水バンクで囲った。サイトC・ポンド5の植栽孔はハードパンを貫通しておらず、他の11ポンドでは植栽孔はハードパンを貫通している。1999年7月に*Acacia aneura*, *Eucalyptus camaldulensis*, *Casuarina obesa*など8樹種を植栽した。その後は植栽木の根元に月2回の灌水を継続した(Kojima *et al.*, 2006⁸⁾)。植栽木の成長はおおよそ半年毎に行い、67ヶ月間の成長経過を記録し、比較解析した。サイトTでは2001年7月に苗木を植栽した。但し、ポンド4は植栽密度が2倍になっている。植栽木には灌水期間と灌水頻度を違えた4つの灌水方法(IP-0~3)を実施した。IP-0は月1回の頻度で1年間、IP-1は3ヶ月間、IP-2とIP-3は3年

間半の灌水を継続した。ただし、IP-2は植栽から2年半後に、IP-3は1年後に灌水頻度を月1回から2ヶ月に1回に減らした。全植栽本数235本のうち解析対象とした樹種は*Eucalyptus*属4樹種と*Casuarina*属2樹種の合計211本である。植栽から2年間は約3ヶ月おきに毎木調査を行い、それ以後はおよそ半年おきに行った。両サイトとも植栽木の成長に関する測定項目は、樹高、0.3 m高幹周囲長、樹冠幅（2方向）である。これらの測定値をもとにアロメトリー式により、個体ごとのバイオマスを算出した。

乾燥地に生育するマメ科樹種の多くはそのまま播種しても発芽しない。このため、さまざまな前処理が提案されている。2004年12月頃および2005年12月頃にパース近郊で採取された*Acacia acuminata*、*A. aneura*、*A. lasiocalyx*および*A. saligna*の4樹種の種子を対象とし発芽前処理の効果を検討した。20粒の種子を1セットとし、次のような発芽前処理を行った。①川砂に混ぜて攪拌し種皮を傷つける、②爪切りで一部を切除する、③熱湯で1分間煮沸する、④熱湯で10分間煮沸する、⑤熱湯に浸けて放置する、計5処理と対照（無処理）である。処理後、水道水に48時間浸して吸水させ、重量変化を求めた。吸水後の種子は水に浸した濾紙を敷いたシャーレに播種し、25°C/30°Cに温度設定をしたインキュベーターに設置した。発芽の判定は幼根が屈地性を示した時とし、発芽経過を調べた。試験期間は20日間あるいは30日間とし、2004年採種の種子については貯蔵期間17ヶ月と20ヶ月の2回、2005年の種子は貯蔵期間7ヶ月と10ヶ月の2回、計4回の発芽試験を行った。

一般に乾燥地の植物は地下部の水源を利用するため、深く長い根系を発達させる。しかし、現地に最も広く生育している*A. aneura*はハードパンの上に存在する浅い土壌に根を広げているため、外観的には浅根性となっている。根系が持つ本来の生育特性を把握するため、栽培実験を行った。根系の水平・垂直方向の成長がわかるように箱形（内寸：縦30 cm、横41.4 cm、幅9 cm）と筒形（同：直径10 cm、長さ50 cm）の2タイプの容器を各60個、計120個作成した。通気性や保水性が優れている鹿沼土の細粒を容器に詰め、発芽前処理を施した種子を2007年8月28日に播種した。播種後、10日間は2日に1回の頻度で灌水を行い、その後、灌水方法を降雨型と地下水型の2通りに分けて灌水した。降雨型は箱型に500 ml、筒型に250 mlの水を1週間に2回の頻度で上から灌水した。地下水型は水を入れた受け皿に容器を置き、常に容器が3~5 cmの高さまで水に浸るよう設置した。2~3週間ごとに4処理各5個体、計20個体を掘り出し、成長量を測定した。苗を地上部と地下部（根系）に切り分け、それぞれを恒温乾燥器80°Cで3日間乾燥させた。播種6週間後からは、地下部を10 cmごとに切り分け、それらも同様に乾燥させた。地上部と地下部の垂直伸長量、乾燥重量、10 cmごとの根の乾燥重量とそこから派生する側根の水平方向伸長量を測定した。なお、実験期間中、各4処理の1容器のみに水分センサーを使用して、各容器の表層・中層・深層の土壌の体積含水比と実験場所2箇所の温度を測定した。

2) 環境条件影響評価

西オーストラリア内陸部（Leonora地区：年間降水量200mm）にある自然植生サイト（SiteLP）の*Eucalyptus camaldulensis*（ここではエコタイプ*E. camaldulensis Siverton*を意味し、他の

エコタイプの場合はその旨タイプ名を付記する)、その近隣にあり土木工学的手法(Kojima *et al.* 2006⁸⁾)を用いた植栽サイト(SiteC)に204本 ha⁻¹で植栽された*E. camaldulensis*、パース近郊 Calingiriサイト(年間降水量が450 mm)に1660本ha⁻¹で植栽された*E. camaldulensis*を材料として用いた。各サイトの土壌窒素濃度は0.11%未満と低かった。各サイトにおける光合成測定は、Li-6400携帯型光合成蒸散測定装置(Li-Cor Inc. USA)を用い、夏季および冬季におこなった。測定項目はA-Ciカーブ(光合成—細胞内CO₂濃度関係曲線)、及び光合成蒸散速度の日変化である。A-Ciカーブ測定温度は25度とし、データより*V*_{max}(最大カルボキシレーション速度)と*J*_{max}(最大電子伝達速度)を計算し(Farquhar *et al.*, 1980⁹⁾)、また日の出前のガス交換速度を*R*_n(夜間の葉呼吸速度)とした。これらの結果をAmthor(1994¹⁰⁾)モデルおよびBall *et al.* (1987¹¹⁾)モデルと組み合わせ、光合成モデルを作成した。Ball *et al.* (1987¹¹⁾)のモデルにおける気孔コンダクタンス(*G*_s)と光合成の関係を以下のようにパラメタライズした。

$$G_s = m \cdot A_n \cdot \frac{Rh}{C_s} + G_s \text{ min}$$

(3)

*m*と*G*_sminは定数、*A*_nは純光合成速度、*Rh*は葉表面の気孔内部に対する相対湿度、*C*_sは葉表面のCO₂濃度である。光合成日変化の測定では夜明け前の葉内水ポテンシャル(ψ_{pd} : Mpa)をプレッシャーチャンバー法で測定した。サンプル葉を実験室に持ち帰り、窒素濃度(*N*_m:%)をBARIOMAX N/Canalyzer (Elemental Inc. GER)で測定し、また単位葉面積当たりの重量(LMA: g m⁻²)を測定した。

SiteC及びCalingiriに植栽された*E. camaldulensis*について、胸高直径(地上130cm)を測定する毎木調査を毎年行い、Suganuma *et al.* (2006⁷⁾)によるアロメトリー式からバイオマスを推定した。期末の幹枝バイオマスから期首幹枝バイオマスを減じ、1年当たりの幹枝バイオマス増加量を定量化した。

西オーストラリアの沿岸部に降水量500 mmのBakersHill、450 mmのCalingiri、350 mmのTamminという3箇所の試験地を設定した。Calingiri及びTamminではプロットが緩やかな斜面にあるため、上部サイト(High)と下部サイト(Low)を設置した。これら合計5つのサイトに*E. camaldulensis*、*E. camaldulensis* var. *Hindmarsh*、*E. camaldulensis* var. *Lake Albacutya*、*E. cladocalyx*、*E. ludis*と*E. camaldulensis*のHYBRID、*E. loxophleba* var. *lissophloia*、*E. polybractea*、*Acacia acuminata*各樹種の苗を10本ずつ植栽し、樹高成長量及び枯死率を調査した。ここでは2004年8月から2007年2月まで約2.6年の成長量と枯死率を解析した。尚HYBRIDは2005年7月に植栽されたため植栽後約1.7年間の解析結果である。樹高成長量は調査期間の樹高成長量を年平均した値(平均樹高成長量: cm year⁻¹)と、年間の樹高成長のRGR(樹高成長RGR)を計算した。尚、平均値の比較はANOVAでおこない、SEは標準誤差(図中エラーバー)である。

(2) 荒漠地植林再生バイオマスの広域変動判定技術の確立に関する研究

A(現実吸収量)を求めるために植林区画の毎木調査を、B(ベースライン純吸収量)予測のた

めに基礎データとして自然林の毎木調査を実施した。前者は1年ごと、後者は数年ごとに実施したが、成長量の平均を出すために、最初と最後の調査結果のみを使用した。なお、調査はプロジェクト開始以前から行われていたため、成長量計算にはプロジェクト以前のデータも使用している。プロジェクト期間中に植林地は22区画、自然植生は45区画調査してあるが、植林調査区画の中で代表的な12区画を植林方法と植林面積の統一性の観点から（植林方法についてはShiono *et al.* (2007¹²) 参照）、自然植生区画の中で代表的な12区画を植生分布の観点から選定した（菅沼ら (2006a¹³) より *A. aneura* 林分が植生の95%以上）。これら24区画の樹木のサイズ（樹高・樹冠・幹周囲長）反復測定した。測定結果より表 1のアロメトリー式（Suganuma *et al.* (2006⁷) およびShiono *et al.* (2007¹²) を改良）を用いて、樹木のバイオマスを計算し、観測期間で除して植林区画、自然植生区画の年成長量を求めた。そして植林区画の成長量の平均値と標準偏差から *A* を求めた。

林冠閉鎖度による自然林分の年成長量予測可能性を検討するために、*X* を林冠閉鎖度に設定して回帰分析を行った。回帰関数は *X* がゼロに漸近するときに *Y* も0に漸近する関係が本予測モデルにふさわしいと考え、線形・累乗・二次関数を用いた。各関数の係数は *t* 検定によって優位性を検定した。また、決定係数とRMSE（Root Mean Square Error）からモデルの当てはまりのよさを検討した。以下この関数をベースライン推定式と呼ぶ。

検討によって得られた関数の中で有意な関数と、林冠閉鎖度分布（菅沼ら、2006b¹⁴）を利用することによって、調査対象地の *B*（ベースライン純吸収量）予測値を求めた。林冠閉鎖度分布（菅沼ら、2006b¹⁴）は、デジタル化した航空写真を用いて判別分析の手法を用いて樹木の林冠部分を識別し、林冠閉鎖度を計算したものである。

計算された *A*（現実吸収量）と予測された *B*（ベースライン純吸収量）および、調査対象地内の

表1. バイオマス計算に使用したアロメトリー式一覧

Species	Equation Number	Dependent variable		Independent variable		Coefficient		R square	RMSE	n
		Y (kg)	X (unit)	a	b					
<i>Acacia aneura</i>	A(I)	$Ws + Wb$	DBH^2 (m ²)	5255.4	1.084	0.992	15.4	15		
	A(II)	WI	DBH^2 (m ²)	77.6	0.676	0.914	1.13	15		
	A(III)	$Ws + Wb$	Cpa (m ²)	1.44	1.442	0.962	25.7	11		
	A(IV)	WI	Cpa (m ²)	0.53	0.847	0.982	1.89	15		
	A(V)	$Ws + Wb$	H (m)	0.55	2.570	0.725	79.50	17		
	A(VI)	WI	H (m)	0.17	1.855	0.651	6.00	17		
	A(VII)	Wr	$Wabove$ (kg)	0.40	1	N/A	N/A	2		
<i>Casuarina spp.</i>	C(I)	$Ws + Wb$	$D_{0.3}^2$ (m ²)	10545.7	1.395	0.990	15.50	10		
	C(II)	WI	$D_{0.3}^2$ (m ²)	606.1	1.011	0.963	3.80	10		
	C(III)	$Ws + Wb$	H (m)	0.034	3.632	0.878	23.50	10		
	C(IV)	WI	H (m)	0.084	2.473	0.754	5.80	10		
	C(V)	Wr	$Wabove$ (kg)	0.72	1	N/A	N/A	1		
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	E(I)	$Ws + Wb$	DBH^2 (m ²)	6212.9	1.188	0.990	92.6	11		
	E(II)	WI	DBH^2 (m ²)	189.2	0.812	0.991	2.80	10		
	E(III)	$Ws + Wb$	$D_{0.3}^2$ (m ²)	4801.2	1.300	0.988	164.80	11		
	E(IV)	WI	$D_{0.3}^2$ (m ²)	143.7	0.869	0.993	3.40	11		
	E(V)	$Ws + Wb$	H (m)	0.016	3.854	0.930	194.80	11		
	E(VI)	WI	H (m)	0.035	2.513	0.890	13.10	11		
	E(VII)	Wr	$Wabove$ (kg)	0.72	1	N/A	N/A	3		
other species	O(I)	$Ws + Wb$	Cpa (m ²)	1.38	1.211	0.959	12.6	11		
	O(II)	WI	Cpa (m ²)	0.22	0.900	0.903	1.82	10		
	O(III)	Wr	$Wabove$ (kg)	0.27	1	N/A	N/A	9		

※other species *Acacia ramlosa*, *A. tetragonophylla*, *Eremophila forestii*, *E. macmilliana*, *Lawrencia squamata*

林分バイオマス分布 (菅沼ら、2006b¹⁴⁾) から、 An (純人為的吸収量) と植林展開可能面積を予測した。林分バイオマス分布を使用したのは、本研究で用いた植林手法は植林候補地を皆伐しなくてはならないからである。なお、この計算は植林期間を5~20年として設定した。さらに、炭素換算係数を0.477に設定した (Yamada *et al.*、1999¹⁵⁾)。

最後に、本研究対象地と同一の生態系区分となっているMurchison生態領域 (Environment Australia、2000¹⁶⁾) での植林展開可能性を推察した。Murchison生態領域内のアカシア天然林における植林展開可能面積割合が、研究対象地のそれと同一と仮定を置き、 An (純人為的吸収量) と植林展開可能面積を予測した。上記仮定は、研究対象地がNational Land and Water Resources Audit (2000¹⁷⁾) の植生図にてアカシア天然林に分類されていたことを根拠にしている。なお、植林期間は20年とし、同じく炭素換算係数0.477を使用した。

4. 結果・考察

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

1999年7月にサイトCに植栽された8種のうち、生存率と成長が良好であった樹種は*A. aneura*、*E. salbulis*、*E. camaldulensis*および*C. obesa*であった。*C. obesa*を除く3樹種について、植栽孔がハードパンを貫通しているか否かにより生存率を比較し、表2に示した (Shiono *et al.*、2007¹²⁾)。サンプル数にバラツキがあるが、いずれの樹種も植栽孔がハードパンを貫通している場合に生存率が高い。

また、植栽から67ヶ月後の成長をバイオマスで比較すると、図1のようになっている。ここで

のバイオマスは、それぞれの樹種1個体あたりの地上部バイオマスの平均値である。植栽孔がハードパンを貫通している場合に成長が良く、特に成長の良い *E. camaldulensis* においてその差は顕著と

表2. ハードパン破碎の有無と3樹種の生存率

Species	Plot	Monitoring trees [no.]	Dead trees [no.]						From August 1999 to March 2005	
			0-12 months	13-24 months	25-36 months	37-48 months	49-60 months	61-67 months	Survived trees [no.]	Survival rate [%]*
<i>A. aneura</i>	Nonblasted	3	2	0	0	0	0	0	1	33
	Blasted	33	7	0	0	0	0	0	26	79
<i>E. salubris</i>	Nonblasted	6	4	0	0	0	0	0	2	33
	Blasted	31	4	0	0	0	0	0	27	87
<i>E. camaldulensis</i>	Nonblasted	10	1	1	0	0	0	0	8	80
	Blasted	3	0	0	0	0	0	0	3	100

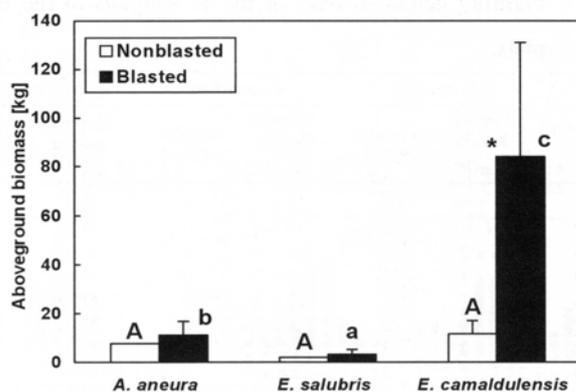


図1. ハードパン破碎の有無と3樹種の生存率

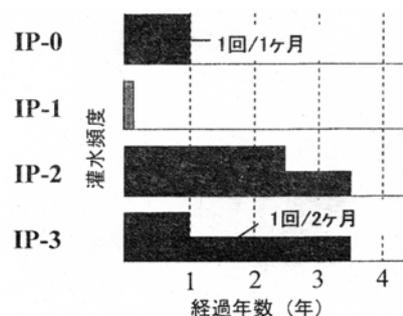


図2. 灌水制御パターン

なった。同程度の大きさの孔を開けたとしても、ハードパンを貫通していないと、大きな植木鉢に植栽されている状態となり、植栽木の根系が利用できる範囲が限られてしまう。このため、特に雨が少ない乾燥期にはより乾燥し、逆に雨期に一時的に多量の雨が降ると、植栽孔が冠水し、根系の呼吸が妨げられることが推測された。

また、サイトCの植栽結果から、本来植栽不可能であった土壌の浅い場所であっても、ハードパン破碎によってできた植栽孔に耐乾性の高い樹種を植栽すれば成林する可能性が高いことが明らかとなった。特に成長が大きかった樹種は *E. camaldulensis* と *C. obesa* であった。さらに初期灌水は不可欠であるが、灌水をいつまで行えばよいかを検討する必要があることがわかった。

以上の結果を考慮して2000年9月にサイトTの植栽を行った。植栽した樹種は、*Eucalyptus* 属6樹種、*Casuarina* 属2樹種、*Acacia* 属3樹種の3属12樹種である。これらの樹種はすべて植林地周辺に自生しているものから選定した。植栽個体数の多い樹種は、*E. camaldulensis*、*E. macranda*、

E. woodwardii、*E. torquata*、*C. obesa*、*C. cunninghamiana*の6樹種である。また、本サイトでは、灌水頻度と期間を検討することを主な目的とした。IP-0からIP-3までの4タイプの灌水パターンを図2に示した。

植栽本数が十分な*Eucalyptus*属4種と*Casuarina*属2種の生存率と成長量の関係を図3に示した。

*Eucalyptus*属4樹種を比較すると、*E. camaldulensis*が*E. macranda*、*E. torquata*、*E. woodwardii*に比べ著しく成長がよく生存率も高かった。*Casuarina*属2樹種では、*C. obesa*と*C. cunninghamiana*の2樹種の生存率が高かったが成長量では

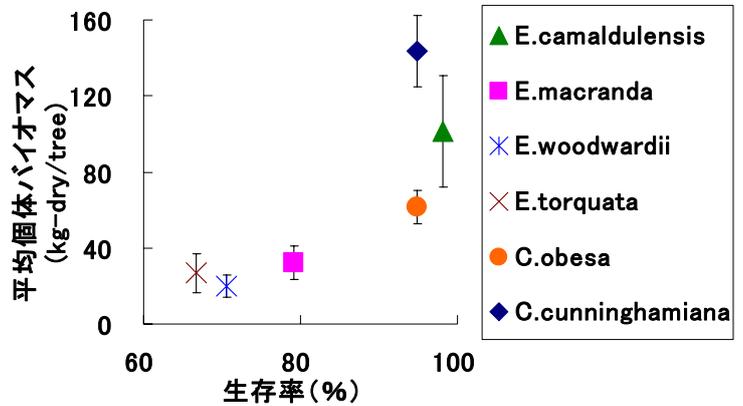


図3. 植栽5年後の生存率と成長量

cunninghamiana が著しく大きかった。先行しているサイトCと共通する*E. camaldulensis*の成長を比較すると、サイトCでは植栽後5年半で約80 kgであるのに対し、サイトTでは5年後で約100 kgとより大きいことがわかる。

一方、*E. camaldulensis*と*C. cunninghamiana*ではともに最も多く灌水を施したIP-2（灌水期間3年半）において最大成長を示したものの、灌水パターンに対する成長の反応が異なっていた

(図4、図5)。*E. camaldulensis*の植栽5年後の成長量は、IP-2>IP-1>IP-0>IP-3の順で大きく、灌水量に応じてバイオマスが増大する傾向はみられなかった。また、ほぼ無灌水のIP-1ではIP-2に比べ給水量（降雨量を換算し、灌水量と合計した）に対するバイオマス増加量が大きくなった。一方、*C. cunninghamiana*は、

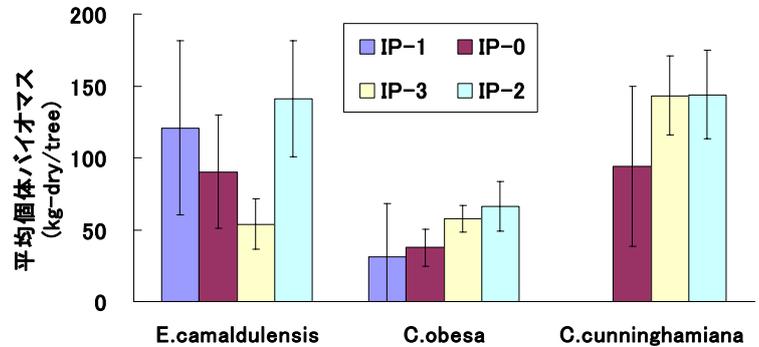


図4. 灌水制御パターン別、5年後の成長量

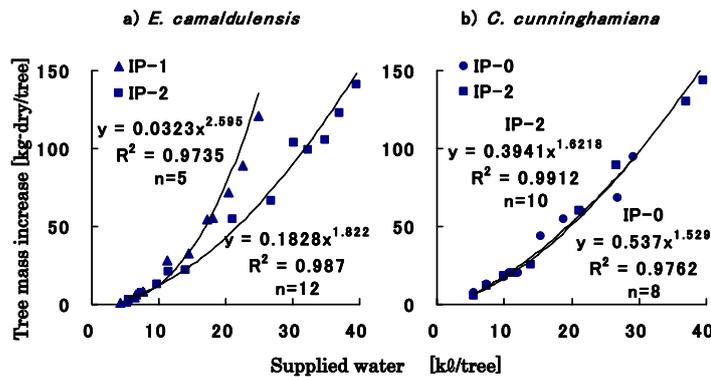


図5. 異なる灌水パターンによる給水量と成長バイオマス増加量の関係灌水パターンは図2を参照

灌水量および給水量に応じてバイオマスが増大する傾向を示した。植栽5年後の成長量は、IP-2 ≧ IP-3 > IP-0 となり、IP-2はIP-0（灌水期間1年）の約1.5倍のバイオマスの増大があった。またIP-0とIP-2では、灌水方法にかかわらず給水量に応じて一定の成長曲線を示した。これらの傾向は*C. obesa*でより顕著に見られた。これら2属間の灌水量に対する成長の違いは、ハードパン破碎に伴い地下水吸収が可能な状態で、根系の発達の違いに関係していると考えられる。

*Acacia*属4樹種の種子を20粒1セットとし、処理前の重量と吸水後の重量から、吸水による重量増加率を求めた。閣下を図6に示す。どの樹種においても吸水前重量の250%前後で最大になった。処理法によって吸水による重量増加率は異なり、吸水量が多いほど発芽率は高くなる傾向を示した。発芽の経過（発芽勢）を比較すると、*A. aneura*は播種後3日間前後の早期に一斉に発芽し、それ以外の3樹種は播種後10～15日間ほどで徐々に発芽していく傾向が認められた。処理方法による発芽勢の違いはみられなかった。*A. acuminata*、*A. aneura*、*A. lasiocalyx*の発芽率は75%以上になったが、*A. saligna*は最も高い場合でも発芽率50%程度であり、0%の場合もあった。また、処理方法では処理③は*A. acuminata*、*A. aneura*、*A. lasiocalyx*の3樹種で高い発芽率を示したが、処理①、対照はどの樹種でも発芽率が低くなった。吸水による重量増加率と発芽率が相関関係を示したこと、前処理法によって重量増加率、発芽率が異なることから、適切な前処理は種皮の通水性を好転させ、それによって発芽を促進すること、吸水可能な種子の割合が高くなり、それに伴い発芽率も高くなることが明らかとなった（図7、表3）。

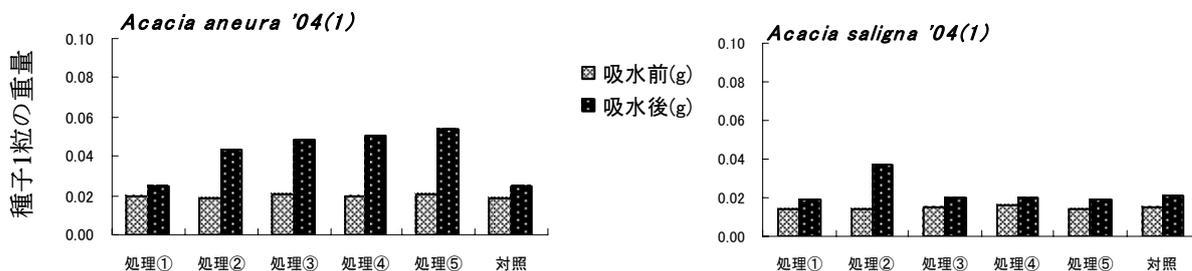


図6. 発芽処理による吸水前後の種子重量変化 (*A. aneura*と*A. saligna*)

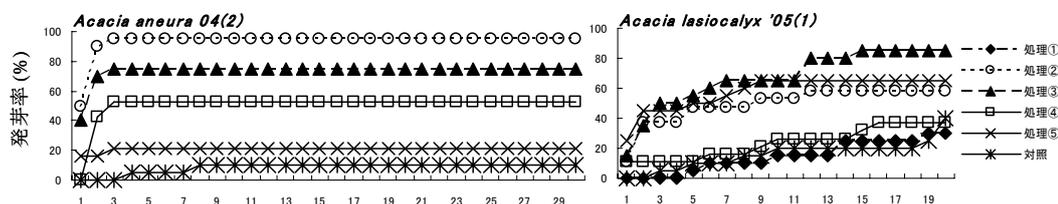


図7. 発芽率の経日変化 (*A. aneura*と*A. saligna*)

現地オーストラリアでは一般的に煮沸する方法(処理③)が行われているが、本研究でも*A. saligna*を除いては高い発芽率を示した。本実験では、一部を切除する方法(処理②)も高い発芽率を示した。この処理方法は*A. aneura*では適した処理の一つとされているが、それ以外の樹種に対しても有効であることが示された。熱湯で10分間煮沸する方法(処理④)では吸水は充分行わ

れるが発芽率は低い。この原因としては、処理中に高温により種子が発芽能力を失うことが推測される。*A. acuminata*、*A. aneura*の通常発芽率はそれぞれ30%、30~77%とされている。本研究では処理②、③などの処理を行うとさらに高い発芽率を示した。一般に発芽率75~90%を発芽率が高い

表3. 種子の発芽処理法と発芽率 (%)

採種時期	発芽試験時期	貯蔵期間(月)	樹種	処理①	処理②	処理③	処理④	処理⑤	対照
2005年12月	2006年7月~8月	7	<i>Acacia acuminata</i> '05(1)	15	75	84	58	80	5
			<i>Acacia lasiocalyx</i> '05(1)	30	58	85	37	65	40
			<i>Acacia saligna</i> '05(1)	0	47	0	0	0	0
	2006年9月~11月	10	<i>Acacia acuminata</i> '05(2)		80	95	75	70	20
			<i>Acacia lasiocalyx</i> '05(2)		60	55	10	35	30
			<i>Acacia saligna</i> '05(2)		58	0	5	0	0
2004年12月	2006年5月~6月	17	<i>Acacia acuminata</i> '04(1)	25	90	75	60	60	10
			<i>Acacia lasiocalyx</i> '04(1)	15	85	85	20	70	10
			<i>Acacia saligna</i> '04(1)	20	35	0	10	0	5
			<i>Acacia aneura</i> '04(1)	10	40	85	30	30	0
	2006年8月~9月	20	<i>Acacia acuminata</i> '04(2)		100	80	20	65	15
			<i>Acacia lasiocalyx</i> '04(2)		100	85	35	60	15
			<i>Acacia saligna</i>						
			<i>Acacia aneura</i>						

* 太字は75%以上の発芽率
 種子の保存期間は発芽試験の処理①~対照まで全て終了とみなすので、育苗あるいは直播き造林の際にこれら前処理②あるいは③を適用することが推奨される。*A. lasiocalyx*も同様である。これに対して、*A. saligna*の通常発芽率は55~90%とされているが本研究では58% (処理②) が最高で0%の場合もあり大幅に低い発芽率となった。一般に行われている種子を煮沸する方法(処理③)や熱湯に浸す方法(処理⑤)においても発芽率は低かった。種子が100年間休眠できることから成熟に時間がかかり、今回使用した採取後約20ヶ月という貯蔵期間では未成熟な種子が多いこと、あるいは種子の休眠が深く、今回の前処理法は休眠打破に最適ではなかったことが原因と考えられる。

*A. aneura*の根系は容器・灌水に関係なく播種6週間後には、容器底まで主根を伸長させた。また、播種8週目以降の地下部の伸長量は、容器・灌水に関係なく一定もしくはやや減少した。1個体あたりの成長経過を乾燥重量変化として図8に示した。8週間目までは地下部・地上部ともに容器・灌水に関係なく順調に成長した。しかし、12週目以降は筒形・箱形ともに、降雨型では成長が停滞・減少した。一方、地下水型では成長が増加し、灌水方法の違いにより成長に差が生じた。筒形の地下部10 cmごとの乾燥重量を図9に示す、6週間後あたりから、容器底と地表面近く

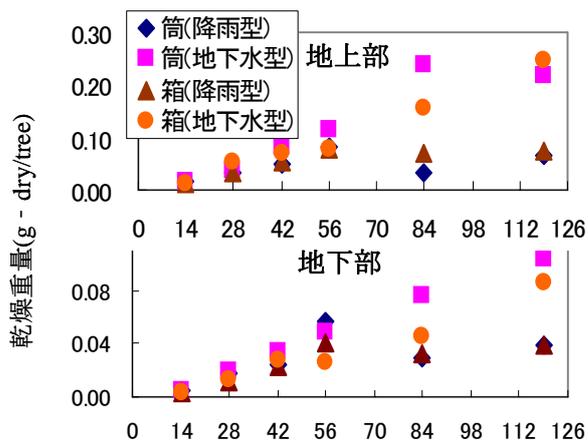


図 8. 平均個体乾燥重量の経日変化. 上図、下図の各点は 2~3 個体の平均値

の乾重が増加した。これは地下水型において顕著に見られる。さらに、箱形の灌水方法においても同様のことがいえた。

地下部伸長量の経日変化と10cmごとの乾燥重量変化(図9)および4処理とも主根を容器底まで伸張させたことから、根系の特性の一つとして深根性を持つと考えられる。しかし、播種8週目以降は筒形・箱形ともに地下部の伸長量が伸び悩んでおり、これは容器底に主根が達したことで、主根の伸びが抑制され、側根の発達を促進させたことによると推測される。特に地下水型のように常に水分がある状態では、その部分で側根の発達を増大し、水分吸収能力を高める。これが地上部の成長増加の一因となり、地表面近くの根系の乾重が著しく増加した原因だと推測される。

深層の土壌体積含水比 (m^3/m^3) の平均値は、筒形降雨型は0.25で、地下水型は0.42と高く、また、表層は降雨型では平均0.15、地下水型では平均0.23であった。

また、箱形降雨型は、表層から深層まで一貫して、土壌体積含水比は平均0.10で、地下水型は同様に平均0.21であった。灌水別に見ると、降雨型の筒形は表層が、箱形は各層ともに含水比が低かった。地下水型は、鹿沼土が下から水を吸収し吸い上げるため、中層から表層は常に一定な値で湿った状態であった。筒形降雨型の深層には、箱形地下水型と同等の含水比が確認されたにも関わらず、その成長量が12週目以降で減少したのは、表層が地下水型に比べて乾燥していたためだと推測される。一方、地下水型は表層においても常に湿っていたため、乾燥状態になることがなく、根の成長が抑制されなかったと推測される。

乾燥地での育苗方法の一つに、本実験の地下水型と似た手法が試みられている。今回の実験でも、灌水方法は地上部の成長が良く、根系の発達も大きい地下水型が適しており、容器による成長量には、さほど大きな差は生じていなかった。乾燥地植林および直播造林においては、乾期までに地下水利用が可能となる根系の伸長が必要であり、今後は、有効とされる筒形地下水型における、筒の長さや容器底の設定、土壌の種類に関する実験を進めていくことが課題となる。

2) 環境条件影響評価

環境条件の異なる3試験区において葉内の窒素濃度 ($\text{Nm}\%$) に差異は認められず ($P>0.1$)、平均1.5%であった(図10)。一方単位葉面積当たりの重量 (LMA: gm^{-2}) はSiteCで有意に大きく ($P<0.01$)、その結果単位葉面積当たりの窒素量 (Na gm^{-2}) がSiteCで有意に大きくなった ($P<0.01$) (図11)。 V_{max} は光が十分に照射された時の光合成速度に相関する値である。各サイト間の V_{max} には有意差がなく ($P>0.1$)、平均で $77.4 \pm \text{SE } 2.1 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ であった(図12)。 *E. camaldulensis*の V_{max} を約60種の既存の木本樹種の V_{max} と比較検討したところ、最大値の86%に位置することがわかった。SiteCでは Na が大きいにも関わらず V_{max} が他サイトとほぼ同一であることは、*E.*

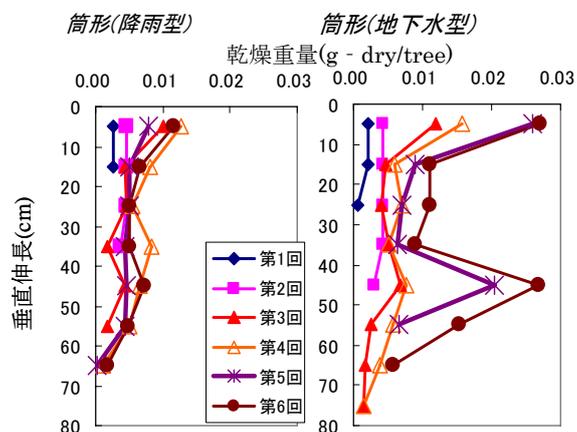


図9. 地下部10cmごとの平均個体乾燥重

*camaldulensis*の V_{max} が木本植物の中で最大値に近いことが一因であると考えられる。 J_{max} は光量が十分に照射されていない時の光合成速度を規定する値(光-光合成曲線の初期勾配にも影響する値)である。この J_{max} 、 R_d ともにサイト間での差異が認められず ($P>0.1$)、平均値はそれぞれ $120.0 \pm SE 2.9 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、 $1.25 \pm SE 0.09 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ であった(図13、14)。*E. camaldulensis*の J_{max} を約60種既存の木本樹種の J_{max} と比較検討したところ、最大値の54%に位置することがわか

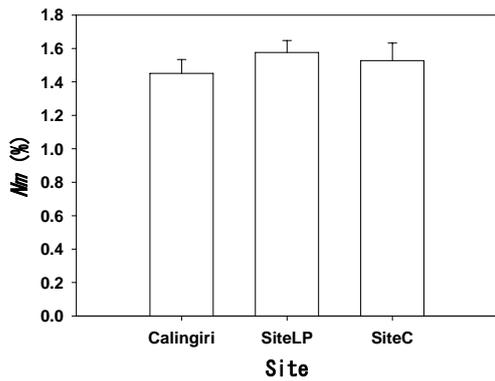


図10. 各試験地における*E. camaldulensis*の葉内窒素濃度

(Nm)

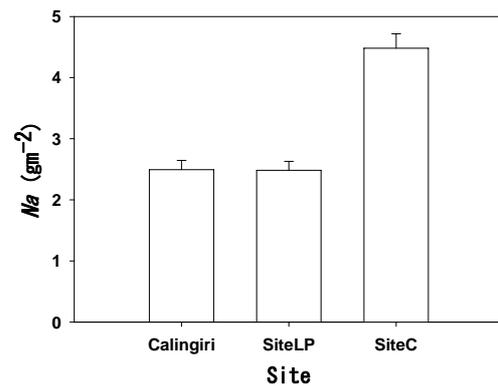


図11. 各試験地における*E. camaldulensis*の葉内窒素量(Na)

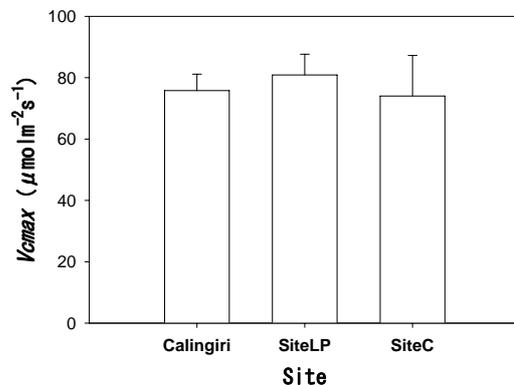


図12. 各試験地における*E. camaldulensis*の最大カルボキ

酸化速度(Vmax)

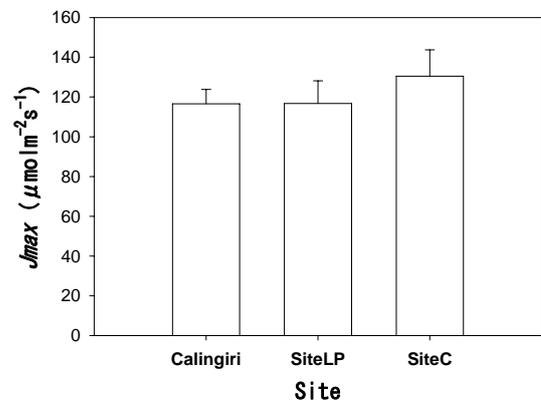


図13. 各試験地における*E. camaldulensis*の最大電子伝達速

度(Jmax)

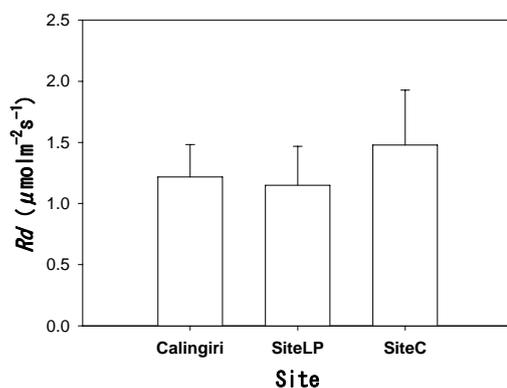


図14. 各試験地における*E. camaldulensis*の暗呼吸速度

(Rd)

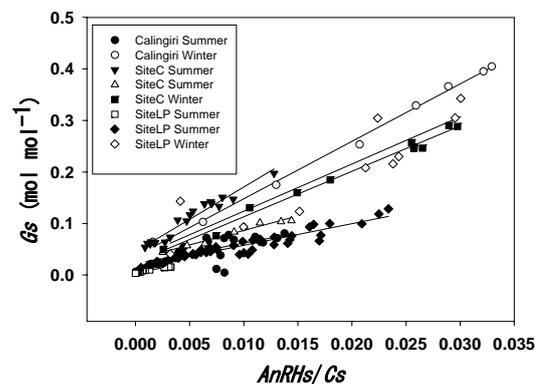


図15. 各試験サイトの*E. camaldulensis*における本文中(3)

式の関係

った。木本樹種の中で比較した場合 J_{max} に比べて V_{cmax} が他樹種より大きいことは、*E. camaldulensis* がより強光下でより多くの光合成生産物を獲得できるように適応していると考えられる。ここまで明らかな事は、*E. camaldulensis* の光合成能力（ポテンシャル）は植栽地の環境条件に大きく影響されず、強光下での光合成能力が大きいことである。

気孔コンダクタンスと光合成の関係は試験地や季節で大きく変化した（図15）、(3) 式の係数である m と G_{smin} は、測定日早朝の葉内水ポテンシャル (ψ_{pd}) の低下（より乾燥する）と共に減少し、この関係は各サイト観測結果を込みにして単一の関数で表すことができた（図16）。早朝の葉内水ポテンシャルが土壌中の水ポテンシャル (ψ_{Soil}) と平衡であると考えた場合、 ψ_{Soil} の季節変化や分布から光合成速度と気孔コンダクタンスの関係を定量化できると考えられた。

これらの結果から V_{cmax} 、 J_{max} 、 R_d 、 m 、 G_{smin} を基本パラメータとした光合成モデルを作成した。前3者は *E. camaldulensis* の測定平均値を入力し、後2者は土壌中の水分ポテンシャルから推定できる。作成した光合成モデルは、光（光合成有効放射）、湿度、温度、大気 CO_2 濃度を環境条件とし、 $V_{cmax} \cdot J_{max} \cdot R_d$ を光合成能力として入力する。モデル構造は、葉温をパラメータとして光合成能力と環境条件から実現可能な光合成速度を求め、(3) 式で G_s を計算する。さらに G_s と葉温から推定されるエネルギー量（葉面潜熱+顕熱+葉面長波放射）が葉面への太陽放射と長波エネルギーとつりあう葉温を推定する形式である。このモデルによって光合成速度の日変化を精度良く表現することが可能となった（図17）。

モデルによって光 $1500 \mu mol m^{-2} s^{-1}$ 、気温25度、相対湿度を20%、40%、80%と変化させた場合の純光合成速度 (P_n) を計算した。その結果、 P_n は早朝の土壌中水ポテンシャル (ψ_{Soild}) が -1.5 Mpa 付近まで急速に減少し、その後の ψ_{Soil} の低下と共に緩やかに減少した。 -1.5 Mpa は一般的に永久萎凋点と言われる値である。さらに P_n は ψ_{Soild} が -3 Mpa 以下かつ相対湿度が20%という乾燥した状態でも、最大の P_n 値の2割程度の値を保っていた。従って年間を通じて最低 ψ_{Soil} が -3 Mpa 程度の立地環境条件においても、*E. camaldulensis* の単葉の光合成生産量は確保され、高橋ら（2008¹⁸⁾ の苗木を用いた実験と同様

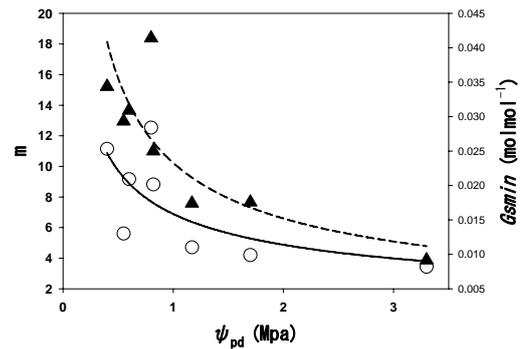


図16. *E. camaldulensis* における本文中(3)式のパラメータ m 及び G_{smin} と葉内水ポテンシャル (ψ_{pd}) の関係

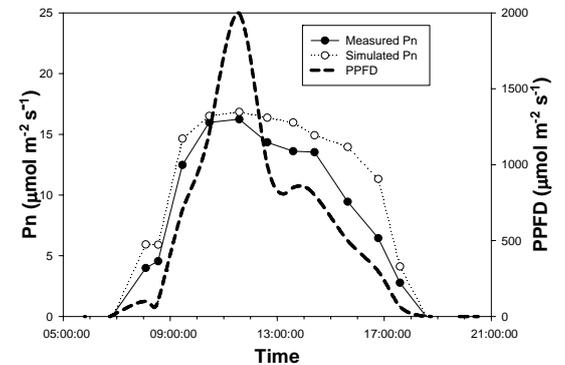


図17. モデルによる光合成速度 (P_n) の日変化の再現。

な結果である。しかし個体の維持と成長を考えた場合、最低でも -1.5 Mpa 程度の $\phi \text{ Soil}$ を確保できる立地が成長に望ましいであろう。

各サイトに生育する*E. camaldulensis*の成長量を調査した結果、SiteLP（自然植生サイト、立木密度 256 ha^{-1} ）での生産量（幹枝のバイオマス増加量）は $1\sim 2 \text{ Mgha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ であるのに対し、ハードパン破碎とバンク造成を併用した植栽地であるSiteCの場合（降水量 500 mmyr^{-1} 相当、植栽密度 204 ha^{-1} 、6年生）、同生産量は $4.5 \pm 0.32 \text{ Mgha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ （LAI=0.5程度）と見込むことができた。したがって乾燥地においても土壌改良等により最大で $5 \text{ Mgha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ の幹枝の生産目標値が設定可能であることがわかる。一方Calingiriの植栽サイト（降水量 450 mmyr^{-1} 植栽密度 1667 ha^{-1} 、6年生）の同生産量は $5.3 \pm 1.19 \text{ Mgha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ （LAI = 1程度）であり、SiteCと同程度であった。SiteCの水分条件は降水量換算で 500 mmyr^{-1} であり、Calingiriと同程度と考えられる。このことはSiteCにおける植栽本数を増やし、葉面積指数（LAI）を1まで増大させたとしても、生産量の著しい増が望めないことを示唆する。前述したように*E. camaldulensis*は光要求性が非常に高い（ V_{max} が大きく、 J_{max} は中庸）樹種であり、葉による相互被陰は光合成生産量を減少させる大きな要因と考えられる。また植栽本数の増大による根系での水分争奪、葉面積指数の増加による蒸散量の増大なども、乾燥地での生産性向上にマイナス要因であると考えられる。従って乾燥地における*E. camaldulensis*の植栽方法を考える場合、相互被陰や土壌水分の争奪を少なくした疎植が適切である事が示唆され、また植栽場所に応じた植栽間隔と葉面積指数のコントロールが最大の生産量を得るための有効な植林技術となろう。

西オーストラリア沿岸部のサイトでは、Bakers Hill、Calingiri、Tamminの順で塩濃度（EC値）が大きくなり、地表面より50 cm深のEC値はCalingiri Lowサイトで 20 mSm^{-1} 、Tammin Highサイトで 46 mSm^{-1} と非常に高い値であった。*E. camaldulensis*の樹高生長量はBakers Hillで大きく、Calingiri Highサイト、Calingiri Lowサイトと続き、TamminではHighサイト、Lowサイトとも小さかった（図18）。測定した全樹種に対し、降水量と塩濃度を独立変数とした重回帰モデルで樹高成長RGRを説明した結果、*E. camaldulensis* Lake Albacutyaの1樹種のみが降水量、塩濃度共に有意な偏回帰係数が得られた。一方*E. camaldulensis*は降水量のみに有意な偏回帰係数を得る事ができ、*E. camaldulensis*の樹高成長量

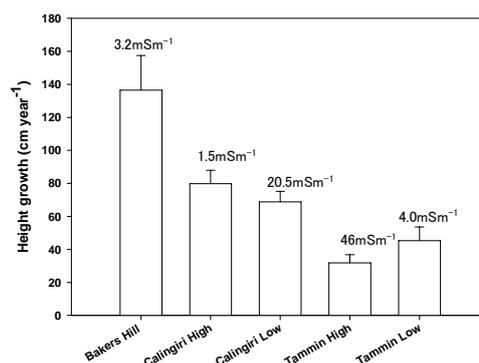


図18. 西オーストラリア沿岸部5サイトにおける*E. camaldulensis*の年間樹高成長量(Height growth)。図中の数字は、地中50cmでのEC値である。

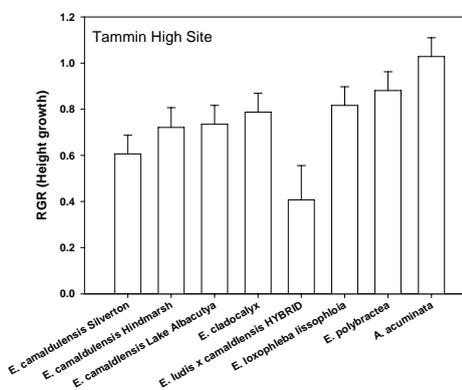


図19. 最も高塩濃度サイト(46 mSm^{-1} Tammin Highサイト)における*E. camaldulensis*を含む各樹種の樹高相対成長率(RGR)の比較。*E. camaldulensis* Silvertonは、本文中の

が塩濃度より降水量に強く影響される可能性が示唆された。

成長量が著しいBakersHillにおいては各樹種の樹高成長RGRの樹種間差が認められず($P>0.3$)、死亡率も小さかった(10%未満)。平均樹高成長量は*E. camaldulensis* Lake Albacutya、*E. camaldulensis* Hindmarsh、*E. cladocalyx*、*E. camaldulensis*が大きかった。RGRがすべての樹種で同様なことを考えると、平均樹高成長量の大きい4樹種は今後も他の樹種よりも樹高成長量が大きくなると予想される。

成長量が最も劣り塩濃度が最も高いTammin Highサイトでは、*A. acuminata*と*E. polybractea*の樹高成長RGRが高かった(図19)。*E. camaldulensis*の樹高成長RGRは、他の*E. camaldulensis*と同じであるが、*A. acuminata*と*E. polybractea*に比べて有意に小さかった。しかし*E. camaldulensis*の死亡率は0%であった。

*E. camaldulensis*は他のエコタイプやEucalyptus属樹種に比べて内陸部に分布するタイプの樹木である。この樹種がEC値 46mSm^{-1} まで成長可能であり、雨量の多い沿岸部でも他のEucalyptus樹種や*E. camaldulensis*のエコタイプに比べて成長量が著しく劣ることは無いことから、*E. camaldulensis*は西オーストラリア全般で植栽可能であると考えられる。また樹種選択が可能であれば、沿岸部では*E. camaldulensis* Lake Albacutya、*E. camaldulensis* Hindmarshといったエコタイプ及び*E. cladocalyx*の植栽も有望であろう。

(2) 荒漠地植林再生バイオマスの広域変動判定技術の確立に関する研究

植林地12区画および自然植生12区画の毎木調査結果から求められた林分パラメータと年成長量を表3、表4に示す。表3より植林地の年成長量が平均 $2.19 \pm 1.25 \text{ Mgha}^{-1}\text{y}^{-1}$ で求められた。これに植林展開面積をかけたものが、現実吸収量(A)となる。この値は他の植林地(Forrester *et al.*、2004¹⁹)；Stape *et al.*、2004²⁰)と比較して非常に小さい値であるが、降水量100 mm当りに換算すれば本プロジェクトの年成長量が $0.4\sim 1.6 \text{ Mgha}^{-1}$ が、他の熱帯のプロジェクトが $0.4\sim 1.6 \text{ Mgha}^{-1}$ であったため、本プロジェクトで対象とした植林方法はまったく遜色の無い手法であった。また、自然植生12区画の年成長量は $-0.3\sim 4.44 \text{ Mgha}^{-1}\text{y}^{-1}$ までと大きく変動した。これらの値は東オーストラリア半乾燥地の年成長量(Burrows *et al.*、2002²¹)とほぼ同じ範囲にあったが、平均値は乾燥地である本研究対象地の方が下回っていた。

このデータを下に林冠閉鎖度(CC)と年成長量の回帰分析を行った結果を表5および図20に示す。表4より年成長量にマイナスの値が出たため、回帰関数にて累乗関数が使用不能となったため、線形関数と二次関数のみ回帰関数として使用した。この中では二次関数によるベースライン推定式のRMSEが低く抑えられるとともに、決定係数(R^2)が唯一0.8を超えた。他の関数形でも、回帰係数の全てが有意と判定されたため、どのベースライン推定式も使用可能となった。よってこの回帰分析によって、本研究対象地のベースライン分布を林冠閉鎖度をパラメータとした単純な推定式で表せることが判明した。また、サンプル数が少ないために決定的なことは議論できないが、ベースライン推定式は二次関数が最適であることが分かった。

次に、表5の二次関数によるベースライン推定式を林冠閉鎖度分布(菅沼ら、2006b¹⁴)に当て

はめて、研究対象地のベースライン分布を求めたものが図21である。図21は林冠閉鎖度0.01ごとに増加するバイオマス量 (Mgy⁻¹) を表している。これによって、調査対象地のベースライン純吸収量 (B) を求めることができた。

次に、表3にて求められた現実吸収量 (A) と、図21に求められたベースライン純吸収量 (B) と、(菅沼ら、2006b¹⁴⁾) によって計算された現状の林分バイオマス分布 (B' と定義) から、植林展開可能面積と純人為的吸収量 (An) を求めた結果を表6に示す。この結果より、短期的なカーボンクレジットを稼ぐことは非常に難しいが、20年程度の長期間の植林期間を想定すれば、単位面積当たり豪州温帯林の約1/3程度の炭素量 (Dixon *et al.*、1994²²⁾) をカーボンクレジットとして計上できることが分かった。また、このままの割合で仮に50年間の植林期間を想定すれば、豪州温帯林程度の吸収量として計上できることが分かった。

最後に、本研究対象地と同一の生態系区分となっているMurchison生態領域 (Environment Australia、2000¹⁶⁾) での植林展開可能性を推察した結果を以下に示す。適応可能面積が約197,000 km²となり2800-3200 kt-Cの炭素量を吸収量として計上できることが分かった。よって、オーストラリア政府と日本政府の間で実施するJI植林に大きなポテンシャルがあることが示された。

このように乾燥地大規模植林による炭素固定量の予測ができたが、実際の植林展開には、水収

表3. 植林地12区画の毎木調査結果と年成長量

Sub-site number	Stand biomass [Mg ha ⁻¹]						Stand growth [Mg ha ⁻¹ year ⁻¹]	Plot area [ha]	Stand density [n ha ⁻¹]
	1 st census			2 nd census					
	Stem & Branch	Leaf	Root	Stem & Branch	Leaf	Root			
1	0.13	0.07	0.11	4.26	0.88	3.17	1.96	0.24	173
2	0.16	0.08	0.13	3.91	0.80	3.05	1.82	0.24	177
3	0.16	0.08	0.14	3.01	0.70	2.31	1.38	0.20	197
4	0.12	0.06	0.10	4.09	0.79	3.08	1.88	0.22	194
6	0.16	0.09	0.14	6.96	1.16	5.35	3.21	0.19	226
7	0.17	0.08	0.15	4.29	0.79	3.31	1.96	0.21	196
8	0.07	0.05	0.07	3.87	0.81	3.07	1.85	0.19	212
9	0.12	0.07	0.11	7.53	1.18	5.69	3.46	0.17	248
10	0.11	0.06	0.10	5.44	0.94	4.02	2.49	0.22	194
11	0.17	0.09	0.15	4.74	0.91	3.54	2.16	0.23	205
12	0.09	0.05	0.08	4.24	0.76	3.26	1.97	0.23	213

表4. 自然植生12区画の毎木調査結果と年成長量

Site number	Canopy Coverage [m ² m ⁻²]	Stand Basal Area [m ² ha ⁻¹]	Leaf Area Index [m ² m ⁻²]	Stand biomass [Mg ha ⁻¹]						Mean Annual Increment [Mg ha ⁻¹ year ⁻¹]	Plot area [ha]	Census date	
				1 st census			2 nd census					1 st	2 nd
				Stem & Branch	Leaf	Root	Stem & Branch	Leaf	Root				
S1	0.84	11.38	1.46	49.8	4.8	20.7	65.4	5.7	27.3	2.78	0.04	1997 Nov.	2006 Feb.
S2	0.83	10.32	1.66	44.0	5.4	19.6	56.6	6.3	25.0	4.44	0.09	2002 Dec.	2007 Mar.
S3	0.69	9.24	1.22	41.7	4.0	18.0	44.5	3.9	19.2	0.87	0.40	2002 Jul.	2007 Feb.
S4	0.62	8.98	1.17	41.3	3.8	18.1	44.0	4.2	19.0	1.07	0.25	2003 Jul.	2007 Mar.
S5	0.42	5.64	0.99	24.2	3.2	11.0	24.1	3.3	10.9	-0.06	0.25	2003 Jul.	2007 Feb.
S6	0.37	3.40	0.57	19.6	1.9	8.2	20.9	2.0	8.7	0.97	0.25	2005 Mar.	2007 Feb.
S7	0.31	1.82	0.42	12.0	1.4	4.9	12.2	1.3	4.8	0.02	0.40	1999 Jun.	2002 Dec.
S8	0.30	4.85	0.40	20.9	1.3	8.5	21.0	1.4	8.6	0.02	0.10	1998 Apr.	2006 Feb.
S9	0.27	2.82	0.38	11.6	1.2	4.9	14.6	1.5	5.9	1.00	0.25	2002 Dec.	2007 Feb.
S10	0.23	2.73	0.42	10.1	1.4	5.4	9.6	1.3	4.8	-0.30	0.40	1999 Jun.	2002 Nov.
S11	0.16	2.29	0.37	11.5	1.2	5.1	11.0	1.3	4.9	-0.15	0.25	2002 Nov.	2007 Mar.
S12	0.09	0.26	0.13	3.3	0.4	1.4	4.3	0.6	1.7	0.34	0.25	2002 Nov.	2007 Mar.

表5. 自然植生12区画の林冠閉鎖度と年成長量の回帰分析結果

Dependent variable Y (unit)	Independent variable X (unit)	Equation Number	Regression model	Coefficient						Significant F	R square	RMSE	n
				a	SE	Significant T	b	SE	Significant T				
Mean Annual Increment (Mg ha ⁻¹ year ⁻¹)	CC (m ² m ⁻²)	(E1)	Linear (Y = aX + b)	2.691	0.570	<0.01	N/S	N/S	>0.05	<0.01	0.669	1.02	12
		(E2)	Quadratic (Y = aX ² + b)	4.236	0.618	<0.01	N/S	N/S	>0.05	<0.01	0.810	0.77	12

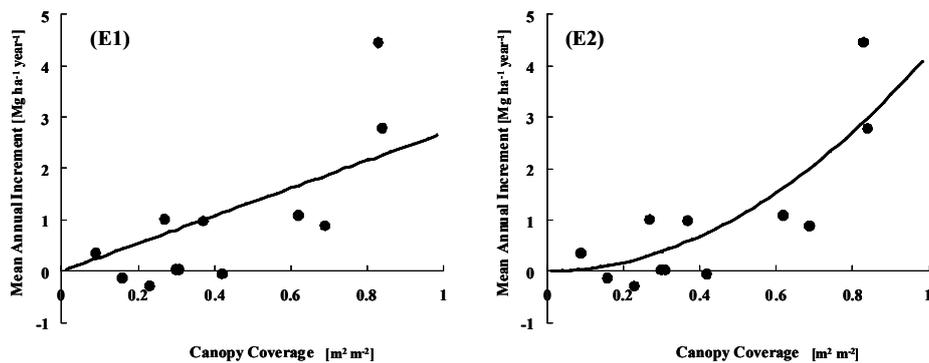


図20. 自然植生12区画の林冠閉鎖度と年成長量の回帰分析結果の散布図

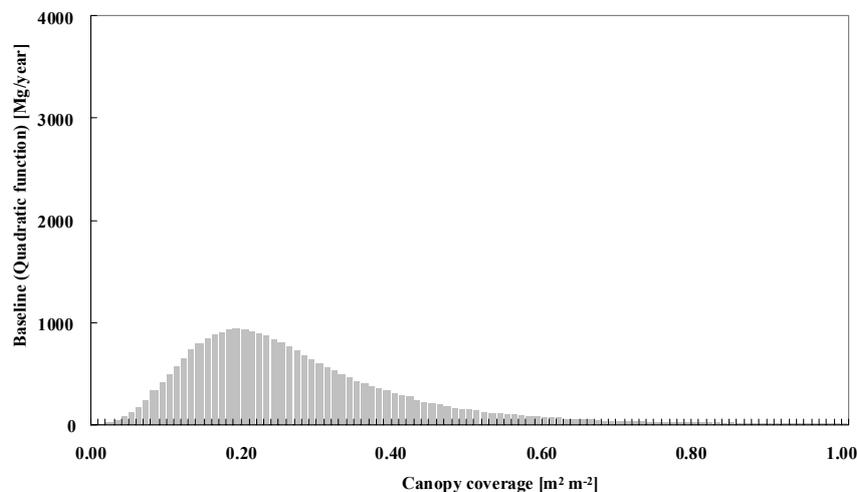


図21. ベースライン分布推定結果

表6. 研究対象地の植林展開可能面積と予測炭素固定量

CCml				Applicable area [km ²]				Sequestrated carbon potential by afforestation [kt-C]			
5 years	10 years	15 years	20 years	5 years	10 years	15 years	20 years	5 years	10 years	15 years	20 years
0.15	0.25	0.32	0.37	1850	2385	2515	2557	582.9	1695.8	2943.4	4225.2
				70.9%	91.4%	96.4%	98.0%				

支・土壌型・種の多様性について考慮する必要があると考える。よって、今後の研究によって、今回試算した植林展開可能面積のうち実際に何%が水収支・土壌型・種の多様性の観点から利用可能であるが調べる必要があると考えられた。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

- ・乾燥地であっても、樹木が必要とする水分を十分に吸収できる根域を確保すれば、生育は可能である。
- ・ハードパン破碎、初期灌水、ハードニングは植林木の生存・成長に効果的である。
- ・*E. camaldulensis*、*C. cunninghamiana*、*C. obesa*が生存率、成長量とも大きく、乾燥地に植林する樹種として有望である。
- ・乾燥地に生育する*Acacia*属樹種の発芽には、熱湯に1分間漬ける前処理が適している。
- ・*Acacia*属の根系の成長は早く、地下からの灌水法が成長促進に効果がある。
- ・*E. camaldulensis*の光合成には高い光要求性（高い V_{cmax} ）を示すことが明らかになった。
- ・*E. camaldulensis*は少なくとも-1.5 Mpaの土壌中水ポテンシャル条件で生育可能であり、この値は草本植物の永久萎凋点以下である。

- ・年間降水量が500 mm以下の地域では、*E. camaldulensis*の植栽密度は200本ha⁻¹程度が適切である。
- ・*E. camaldulensis*は年間降水量350-500 mm以上、塩濃度45 mSm⁻¹の立地においても他のEucalyptus属や*E. camaldulensis*のエコタイプと同様に成長できることから、乾燥地を含めた広域にわたる植栽樹木として有望である。
- ・西豪州乾燥地域での自然植生（木本植物）の成長傾向を明らかにした。
- ・推定の難しいベースライン純吸収量について、簡易推定式を作成した。
- ・西豪州乾燥地における植林展開可能面積と炭素固定量を数値的な根拠を持って予測した。

(2) 地球環境政策への貢献

- ・乾燥地・半乾燥地への植林技術、特に郷土樹種による植林技術が改善されたことにより、これらの地域および半乾燥地に広がる荒廃地などに科学的な根拠を基に植林を行うことが可能になり、炭素排出権取引を念頭に入れた炭素吸収・固定を目的とした植林を行う目処がついた。
- ・炭素固定植林好適樹種の生理生態的特性を明らかにし、その適応域や効率的な植林技術を開発し、広域的か普遍的に利用できる手法を示した。
- ・オーストラリアと日本の間で将来的に乾燥地を利用した大規模JI（共同実施）植林が実施された場合の予想炭素クレジットを試算した。

6. 引用文献

- (1) Guideline for completing CDM-AR-PDD and CDM-AR-NM. -Clean development mechanism guidelines for completing the project design document for A/R (CDM-AR-PDD), the proposed new methodology for A/R: Baseline and monitoring (CDM-AR-NM) version 4- United Nation Framework Convention on Climate Change, 53p (2006) UNFCCC.
- (2) R. B. Myneni, B. D. Ganapol, G. Asrar: Remote Sens. Environ. 42, 217-238 (1992) "Remote sensing of vegetation canopy photosynthetic and stomatal conductance efficiencies"
- (3) P. Rochette, R. L. Desjardins, E. Pattey, R. Lessard: Agronomy J. 87, 22-28 (1995) "Crop net carbon dioxide exchange rate and radiation use efficiency in soybean"
- (4) C. S. Campbell, J. L. Heilman, K. J. McInnes, L. T. Wilson, J. C. Medley, G. Wu, D. R. Cobos: Agric. For. Meteorol. 110, 45-54 (2001) "Seasonal variation in radiation use efficiency of irrigated rice"
- (5) A. D. Friend, A. K. Stevens, R. G. Knox, M. G. R. Gannell: Ecol. Model. 95, 249-287 (1997) "A process-based terrestrial biosphere model of ecosystem dynamics (Hybrid v3.0)"
- (6) 乾燥地植林による炭素固定システムの構築, 戦略的創造研究推進事業 平成10年度採択研究課題 終了報告書. 367-455 (2004) 「乾燥地植林による炭素固定システムの構築 (山田興一)」

- (7) H. Suganuma, Y. Abe, M. Taniguchi, H. Tanouchi, H. Utsugi, T. Kojima, K. Yamada: For. Ecol. Manage. 222, 75-87 (2006) "Stand biomass estimation method by canopy coverage for application to remote sensing in an arid area of Western Australia"
- (8) T. Kojima, H. Hamano, Y. Abe, H. Tanouchi, Y. Egashira, M. Saito, J. Low, N. Takahashi and K. Yamada: J. Arid Land Studies, 16, 167-174 (2006) "Basic data of research project on large scale afforestation of arid land for carbon fixation near Leonora in Western Australia"
- (9) G. D. Farquhar, S von Caemmerer and J. A. Berry: Planta, 149, 78-90 (1980) "A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species"
- (10) J. S. Amthor: Photosynthesis Res., 39, 321-350 (1996) "Scaling CO₂-photosynthesis relationships from the leaf to the canopy"
- (11) J. T. Ball, L. E. Woodrow and J. A. Berry: In Progress in photosynthesis Research (eds. I. Biggins), 24, 221-224 (1987) "A modeling predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis"
- (12) K. Shiono, Y. Abe, H. Tanouchi, H. Utsugi, N. Takahashi, H. Hamano, T. Kojima and K. Yamada: J. Arid Land Studies, 17-1, 11-22 (2007) "Growth and Survival of Arid Land Forestation Species (*Acacia aneura*, *Eucalyptus camaldulensis* and *E. salubris*) with Hardpan Blasting"
- (13) 菅沼秀樹, 長谷修平, 安部征雄, 田内裕之, 小島紀徳, 山田興一: 日本リモートセンシング学会誌, 26, 95-106 (2006a) 「植生指数と植生分類を組み合わせた乾燥地林分バイオマス推定手法の有効性の検討」
- (14) 菅沼秀樹, 安部征雄, 谷口雅彦, 山田興一: 写真測量とリモートセンシング, 45-3, 12-23. (2006b) 「乾燥地におけるデジタル航空写真解析による林分バイオマス推定手法の検証」
- (15) K. Yamada, T. Kojima, Y. Abe, A. Williams and J. Law: J. Arid Land Stud. 9, 143-151 (1999) "Carbon sequestration in an arid environment near Leonora, Western Australia"
- (16) Revision of the Interim Biogeographic Regionalisation of Australia (IBRA) and the development of version 5.1. Summary report. 37pp, (2001) Environment Australia.
- (17) Australia's native vegetation-A summary of the national land and water resources audit's Australian native vegetation assessment 2001-. 27pp, (2002) National Land and Water Resources Audit.
- (18) 高橋伸英, 藤原尚, 小林敦, 福長博, 岩崎博, 小島紀徳, 山田興一: 沙漠研究, 17, 157-165 (2008) 「*Eucalyptus camaldulensis*の生育限界水分条件」
- (19) D. I. Forrester, J. Bauhus, P. Khanna: For. Ecol. Manage. 193, 81-95 (2004) "Growth dynamics in a mixed-species plantation of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*"
- (20) J. L. Stape, M. G. Ryan, D. Binkley: For. Ecol. Manage. 193, 219-234 (2004) "Testing the utility of the 3-PG model for growth of *Eucalyptus grandis* x *urophylla* with natural

and manipulated supplies of water and nutrients.”

- (21) W.H. Burrows, B.K. Henry, P.V. Back, M.B. Hoffman, L.J. Tait, E.R. Anderson, N. Menke, T. Danaher, J.O. Carter, G.M. McKeon: *Global Change Biology*, 8, 764-784 (2002) “Growth and carbon stock change in eucalypt woodlands in northeastern Australia: ecological and greenhouse sink implications”
- (22) R.K. Dixon, S. Brown, R.A. Houghton, A.M. Solomon, M.C. Trexler and J. Wisniewski: *Science*, 263, 185-190 (1994) “Carbon pools and flux of global forest ecosystems”

7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

〈論文（査読あり）〉

- 1) Y. Abe, M. Taniguchi, H. Suganuma, M. Saito, T. Kojima, Y. Egashira, Y. Yamamoto and K. Yamada: *J. Chem. Eng. Jpn.*, 36-4, 376-382 (2003) “Comparative analysis between biomass and topographic features in an arid land, Western Australia”
- 2) 安田 裕, 川戸 渉, 安部征雄, 山田興一: *沙漠研究*, 13-2, 131-138 (2003) 「乾燥地月降雨量時系列と海水面温度, 南方振動及び太陽黒点周期変動との関係について」
- 3) Y. Abe, M. Taniguchi, T. Saito, M. Saito, M. Owada, K. Yamada: *Arid Land Geography*, 26-S, 159-162 (2003) “Comparison of two methods to estimate biomass using Landsat TM in arid Western Australia”
- 4) T. Saito, Y. Abe, H. Yasuda, T. Kojima, K. Yamada: *Arid Land Geography*, 26-S, 233-236 (2003) “Runoff Water Collection and Evaporation Control By Highly Permeable Ditch”
- 5) K. Shiono, Y. Kanri, Y. Abe, H. Tanouchi, T. Kojima, K. Yamada: *J. Arid Land Studies*, 14-S, 207-210 (2004) “Stand Growth Estimation of Representative Plant Communities in Arid Land of Western Australia”
- 6) H. Suganuma, Y. Abe, M. Taniguchi, M. Saito, K. Yamada: *J. Arid Land Studies*, 14-S, 85-88 (2004) “Fundamental Research on Detection of Stand Biomass Change in an Arid Rangeland”
- 7) 田内裕之, 宇都木玄, 濱野裕之, 高橋伸英, 安部征雄, 山田興一: *日本林学会関東支部大会発表論文集*, 55, 131-132 (2004) 「肥大か膨張かー精密デンドロメータによる乾燥地樹木の成長動態解析からー」
- 8) S. Kawarasaki, S. Kaneoya, H. Tanouchi, H. Hamano, T. Kojima and K. Yamada: *J. Arid Land Studies*, 15-4, 235-238 (2006) “Effect of temperature and light on germination of 12 afforested trees in South Western Australia”

- 9) H. Tanouchi, H. Utsugi, N. Takahashi, H. Hamano, S. Kawarasaki, T. Kojima and K. Yamada: Journal of Arid Land Studies, 15-4, 267-270 (2006) “Water Use Efficiency of Trees in Arid Lands: Plasticity to Water Conditions.”
- 10) 田内裕之、宇都木玄、濱野裕之、河原崎里子、高橋伸英、小島紀徳、山田興一：日本林学会 関東支部大会発表論文集、57 (2006) 「肥大動態から見た乾燥地樹木の水利用効率の評価」
- 11) H. Suganuma, Y. Abe, M. Taniguchi, H. Tanouchi, H. Utsugi, T. Kojima, K. Yamada: Forest Ecology and Management, 222, 75-87 (2006) “Stand biomass estimation method by canopy coverage for application to remote sensing in an arid area of Western Australia”
- 12) T. Saito, K. Maehara, H. Yasuda and Y. Abe: J. Arid Land Studies, 15-4, 379-382 (2006) “Experimental Study of Water Harvesting by Means of a Ditch Filled with Highly Permeable Material”
- 13) H. Suganuma, Y. Abe, H. Utsugi, H. Tanouchi, T. Kojima: J. Arid Land Studies, 15-4, 259-262 (2006) “Shrub-land biomass estimation method for application to remote sensing”
- 14) K. Shiono, H. Suganuma, Y. Abe, H. Tanouchi, H. Utsugi, M. Saito, N. Takahashi, T. Kojima, K. Yamada: J. Arid Land Studies, 15-4, 251-254 (2006) “Biomass growth estimation of an afforestation site and natural forests in an arid land of Western Australia”
- 15) H. Utsugi, H. Tanouchi, H. Hamano and N. Takahashi: J. Arid Land Studies, 15, 271-274 (2006) “The difference in leaf morphological and photosynthetic ability of *Eucalyptus camaldulensis* between natural growth and planted trees in desert western Australia”
- 16) 菅沼秀樹, 安部征雄, 谷口雅彦, 山田興一: 写真測量とリモートセンシング, 45-3, 12-23 (2006) 「乾燥地におけるデジタル航空写真解析による林分バイオマス推定手法の検証」
- 17) 菅沼秀樹, 長谷修平, 安部征雄, 田内裕之, 小島紀徳, 山田興一: 日本リモートセンシング学会誌, 26, 95-106 (2006) 「植生指数と植生分類を組み合わせた乾燥地林分バイオマス推定手法の有効性の検討」
- 18) 塩野克宏, 安部征雄, 河原崎里子, 濱野裕之, 田内裕之, 小島紀徳, 山田興一: 水文・水資源学会誌, 20-5, 409-423 (2007) 「酸素安定同位体分析によるハードパン破碎土壤に植林された樹木の水源深度の推定」
- 19) K. Shiono, Y. Abe, H. Tanouchi, H. Utsugi, N. Takahashi, H. Hamano, T. Kojima and K. Yamada: J. Arid Land Studies, 17-1, 11-22 (2007) “Growth and Survival of Arid Land Forestation Species (*Acacia aneura*, *Eucalyptus camaldulensis* and *E. salubris*) with Hardpan Blasting”
- 20) 田内裕之, 河原崎里子, 相川真一, 宇都木玄, 齋藤昌弘: 関東森林研究, 59, 153-154 (2007) 「荒漠地植林によるバイオマス生産の可能性」

<査読付論文に準ずる成果発表> (社会科学系の課題のみ記載可)

なし

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 安部征雄：科学，331-334，74-3（2003）「乾燥地植林の考え方と実現に向けての課題」
- 2) 田内裕之：森林科学，41，66-67（2004）「乾燥地の自然と緑化」
- 3) 宇都木玄，田内裕之：平成15年度森林総合研究所北海道支所年報，43-46，（2004）「乾燥地における植栽技術の向上と植林による炭素固定量の評価」
- 4) 宇都木玄，田内裕之，斉藤昌宏：北方林業，58，151-153（2004）「西オーストラリア半乾燥地における植林の試み Part1」
- 5) 宇都木玄，田内裕之，斉藤昌宏：北方林業，58，178-181（2004）「オーストラリア半乾燥地における植林の試み Part2」
- 6) 斉藤昌宏・平松直樹・河原崎里子・相川真一・宇都木玄・田内裕之：熱帯林業，70，23-30（2007）「早成樹種の成長量を最大にする造林方法（1）適地適木」
- 7) 斉藤昌宏・平松直樹・河原崎里子・相川真一・宇都木玄・田内裕之：海外の森林と林業，71，19-24（2008）「早成樹種の成長量を最大にする造林方法（2）密度と栽培期間」

(2) 口頭発表(学会)

- 1) 菅沼秀樹，安部征雄，谷口雅彦，斉藤昌弘，山田興一：第14回日本沙漠学会（2003）「乾燥地植物現存量の変動判定に関する基礎研究」
- 2) 塩野克宏，安部征雄，高橋伸英，斉藤昌弘，小島紀徳，山田興一：第14回日本沙漠学会（2003）「ウォーターハーベスティングが乾燥地の植栽樹木に与える影響」
- 3) K. Shiono, Y. Kanri, Y. Abe, H. Tanouchi, T. Kojima and K. Yamada: Desert Technology 7 International Conference, Jodpur, India, 2003, "Stand Growth Estimation of Representative Plant Communities in Arid Land of Western Australia"
- 4) H. Suganuma, Y. Abe, M. Taniguchi, M. Saito and K. Yamada: Desert Technology 7 International Conference, Jodpur, India, 2003, "Fundamental Research on Detection of Stand Biomass Change in an Arid Rangeland"
- 5) 齊藤忠臣，安部征雄，菅沼秀樹，田内裕之，山田興一：第15回日本沙漠学会（2004）「乾燥地における土壌透水性および土壌厚さの空間変動性」
- 6) K. Shiono, H. Suganuma, Y. Abe, H. Tanouchi, H. Utsugi, M. Saito, N. Takahashi, T. Kojima, K. Yamada: Desert Technology VIIIth conference, Nasu, Japan (2005) "Biomass growth estimation of an afforestation site and natural forests in an arid land of Western Australia"
- 7) H. Suganuma, Y. Abe, H. Utsugi, H. Tanouchi, T. Kojima: Desert Technology VIIIth conference, Nasu, Japan (2005) "Shrub-land biomass estimation method for application"

to remote sensing”

- 8) T. Saito, K. Maehara, H. Yasuda, Y. Abe: Desert Technology VIIIth conference, Nasu, Japan (2005) “Experimental study of water harvesting by means of a ditch filled with highly permeable material”
- 9) Y. Abe: Carbon sequestration research in semi-arid Western Australia, Rivervale, WA, Australia (2005) “Roots development by blasting hardpan/Large scale estimation methodology of biomass “
- 10) H. Utsugi: Carbon sequestration research in semi-arid Western Australia, Rivervale, WA, Australia (2005) “Transpiration and photosynthesis modeling of Eucalyptus camaldulensis/Estimation of leaf biomass “
- 11) S. Kawarasaki: Carbon sequestration research in semi-arid Western Australia, Rivervale, WA, Australia (2005) “List of measured data in Sturt Meadows Station “
- 12) H. Tanouchi, H. Utsugi, N. Takahashi, H. Hamano, S. Kawarasaki, T. Kojima, K. Yamada : The 8th International Conference on Desert Technology, Nasu, Japan (2005) “Water use efficiency of trees in arid lands: Plasticity to water conditions”
- 13) S. Kawarasaki, S. Kaneoya, H. Tanouchi, H. Hamano, T. Kojima, K. Yamada: The 8th International Conference on Desert Technology, Nasu, Japan (2005) “Effect of temperature and light on germination of 12 afforested trees in south Western Australia”
- 14) H. Utsugi, H. Tanouchi, H. Hamano and N. Takahashi: The 8th International Conference on Desert Technology, Nasu, Japan (2005) “The difference in leaf morphological and photosynthetic ability of Eucalyptus camaldulensis between natural growth and planted trees in desert Western Australia”
- 15) M. Saito, H. Tanouchi, T. Saito, D. Naito, Y. Abe, K. Yamada: The 8th International Conference on Desert Technology, Nasu, Japan (2005) “Vegetation limiting factors as salt accumulation and soil thickness in Leonora, Western Australia”
- 16) T. Saito, H. Yasuda, Y. Abe, H. Saganuma, T. Kojima, K. Yamada.: 8th international conference on development of drylands, Beijing, China (2006) “Application of vegetation information to estimation of soil characteristics in arid environment -Large-scale estimation of soil infiltration properties and soil layer thickness using vegetation information in Western Australia-”
- 17) 菅沼秀樹, 宇都木玄, 安部征雄, 小島紀徳, 山田興一: 日本沙漠学会第17回学術大会, 前橋 (2006) 「乾燥地の疎林における葉面積重 (LMA) と葉内窒素量の林分内変化」
- 18) 塩野克宏・安部征雄・河原崎里子・田内裕之・宇都木玄・小島紀徳・山田興一: 第17回日本沙漠学会学術大会, 前橋 (2006) 「安定同位体トレーサー法によるハードパン破碎植林木の水源推定」
- 19) 宇都木玄, 菅沼秀樹, 河原崎里子, 田内裕之: 第17回日本沙漠学会学術大会, 前橋 (2006)

「乾燥地における林冠内光環境条件の推定」

- 20) 河原崎里子, 濱野裕之, 齊藤則子, 田内裕之, 齊藤昌宏, 藤村達人, 安部征雄, 小島紀徳, 山田興一: 日本沙漠学会第17回学術大会, 前橋 (2006) 「西オーストラリア州南部小麦地帯の塩害地域における植林木の生育」
- 21) 宇都木玄, 田内裕之, 河原崎里子, 相川真一, 浜野裕之, 高橋伸英: 日本森林学会大会, 118, 東京 (2006) 「乾燥地における林冠内光環境条件の推定」
- 22) H. Suganuma, K. Shiono, Y. Abe, H. Tanouchi, T. Kojima and K. Yamada: Tunisia-Japan Symposium on Society, Science & Technology 7th edition, Sousse, Tunisia (2006)
“Evaluation of actual and potential biomass growth estimated by remotely sensed data in an arid land of Western Australia”
- 23) 宇都木玄, 田内裕之, 河原崎里子, 相川真一, 浜野裕之, 高橋伸英: 日本森林学会, 福岡 (2007)
「降水量の異なる地域で生育した*Eucalyptus camaldulensis*の光合成適応反応」
- 24) 宇都木玄, 田内裕之, 河原崎里子, 相川真一, 浜野裕之, 小島紀徳, 高橋伸英: 日本熱帯生態学会, 高知 (2007) 「西オーストラリア州の半乾燥地に生育する*E. camaldulensis* Silvertonの実生の成長特性について」
- 25) 長谷修平, 菅沼秀樹, 安部征雄, 小島紀徳, 山田興一: 日本沙漠学会第18回学術大会, 京都 (2007) 「多時期衛星画像による植生分類結果の検討」
- 26) 平松直樹・齋藤昌弘・高橋伸英・濱野裕之・小島紀徳・山田興一: 日本沙漠学会第18回学術大会, 京都 (2007) 「ハードパン破碎と初期灌水が乾燥地の植林樹木の生長に及ぼす影響」
- 27) 齊藤昌宏, 奥原紗織, 河原崎里子, 濱野裕之, 小島紀徳, 山田興一: 日本沙漠学会第18回学術大会, 京都 (2007) 「貯蔵期間と発芽前処理がアカシア属4種の発芽に与える効果」
- 28) 菅沼秀樹, 安部征雄, 長谷修平, 小島紀徳, 山田興一: 日本写真測量学会平成19年年度学術講演会, 横浜 (2007) 「西豪州乾燥地における植生分類結果の妥当性の検討」
- 29) H. Suganuma, Y. Abe, S. Nagatani, T. Kojima, K. Yamada: Tunisia-Japan Symposium on Society, Science & Technology 8th edition, Sousse, Tunisia (2007) “Validation of Land-use Classification Results-A Case Study in an Arid Land in Western Australia”
- 30) H. Tanouchi, S. Aikawa, S. Kawarasaki, H. Utsugi, H. Hamano, M. Saito, K. Adrienne, T. Kojima, K. Yamada: The14th Asian Symposium on Ecotechnology, Suwon, Korea (2007)
“Examination of biomass production by afforestation technologies in wasteland”
- 31) S. Aikawa, N. Takahashi, S. Kawarasaki, H. Hamano, Y. Egashira, H. Tanouchi, T. Kojima, K. Yamada: The14th Asian Symposium on Ecotechnology, Suwon, Korea (2007) “Experiment on sprout regeneration for dryland afforestation”

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

1) 田内裕之：日経新聞、3月30日掲載（2008）「最新技術を駆使した森林復元」

(6) その他

特に記載すべき事項はない。