

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

(1) 荒漠地でのシステムの植林のための水・塩制御技術の開発に関する研究

成蹊大学 理工学部

小島紀徳

濱野裕之

金沢大学 工学部

川西琢也

〈研究協力者〉	オーストラリア国	Minesite Rehabilitation Services Pty Ltd	John Law
		Greening Australia, Western Australia	Tim Emmott
		Forest Products Commission	Richard Harper
			Liz Barbour
		Edith Cowan University	Adrienne Kinnear

平成15～19年度合計予算額 250,593千円

(うち、平成19年度予算額 54,820千円)

上記の合計予算額には、間接経費 57,827千円を含む

[要旨]

乾燥地植林で鍵となるのが、土壌改良技術開発や雨水の有効利用技術開発である。雨水を植林に有効利用するために中規模/広域流域の水収支を測定・解析し、中規模流域における最大表面流出率は19%と評価された。観測結果から独自の表面流出モデルを構築し、境界条件やパラメータ決定のプロセスを確立した。また水・塩挙動モデルを構築し、土壌表層の塩濃度予測結果から最適植林地選定への有益な情報提供を行うことができるようになった。

植林による炭素固定増加量の推定において、リターおよび土壌の炭素動態は無視し得ない。乾燥地特有の現象であるリター流出を現地で測定し、このメカニズムを組み込んだ林地単位での炭素動態モデルを構築した。各サイトにおけるリター流出率は59%、66%、75%（それぞれサイト2、7、12）となり、アカシア自然林では年間リターフォール量の6～7割がサイト外に流出していることがわかった。また炭素動態モデルの結果では、年間リターフォール量の約2/3、リター現存量の40%が裸地や塩湖へ流出していると推算された。

水収支バランスの回復を目指した半乾燥地の塩害地において、パイプ植林法の技術を開発した。パイプ植林は根域を制限し地表に集積した塩を回避し、早く根を垂直下方向に伸長させて、より深部の土壌水を利用することができるようになる。パイプ植林実験において *E. camaldulensis* のバイオマスが他樹種と比べて最も大きくなり、この植裁法に最も適した樹種であることが明らかとなった。*E. camaldulensis* は乾燥地の実験で深根性で成長が早く、炭素固定能力が高いことが明らかになっている。これらの結果から、*E. camaldulensis* は乾燥地だけでなく、塩害地での

植林樹種としても適していることが明らかとなった。

[キーワード] 荒漠地、水・塩収支、炭素動態解析、根域制御、塩回避

1. はじめに

植林は、様々な二酸化炭素問題対策技術の中でも、再生可能エネルギーへの完全転換までの間、最も信頼でき、後悔せず、低コストで規模が大きい技術として期待され、CDMあるいはJIの適用対象として海外植林事業を開始した企業も多い。しかし、全球的には今後さらに食料生産の重要性が増すと考えられ、農地との競合を避ける必要がある。さらに長期かつ大規模な対策を想定する際は、乾燥、塩害などのより悪い条件の地域に進行して行かざるを得ない。以上の背景の下、本研究の大目的は、農地としての用途がないあるいは生産性の低い（半）乾燥地あるいは農地としての生産性が低下した土地（以下、両者を併せて荒漠地と呼ぶ）を植林対象とした際の、システムの大規模植林のための基盤・応用技術の開発による吸収源の拡大である。さらに長期的には、農業生産との複合化・共存（アグロフォレストリー）あるいはエネルギー生産をも含めた、持続可能なシステム構築をめざすものである。

対象と考えられる地域は、塩害等が発生し農地として不適化したあるいはその可能性が懸念される地域等をも含めた広い意味の乾燥地（荒漠地）である。人為的造水を植林に用いることはエネルギー収支的には成立せず、従って少ない降雨量の下での広域での天水利用の最適化、広域水・塩移動の観点も含めた植林適地の選択、これによる吸収源拡大の実証が目的である。

2. 研究目的

厳しい環境下における植林の例が非常にまれであり、さらには土壌、生態、気象を含めた複合的な環境影響評価に立脚した最適対策技術の開発は皆無であることを鑑み、本サブテーマでは、システムの植林において、具体的な植林場所の選定、最適植林技術や最適樹種選択への指針を与えるための、水・塩条件に関する情報を提供する。

（1）広域水・塩移動解析モデルの開発および荒漠地における水収支測定と制御

植林対象地である乾燥地では、絶対降雨量が少なく、更に、主な降雨が乾燥地特有の集中降雨である事で土壌に浸透せずに地表を流れる表面流出による蒸発損失が大きい。そこで、乾燥地植林においては、植林利用可能水の確保が課題として挙げられる。その対策として、損失分として存在する表面流出水の有効利用が考えられている。

本研究では、植林利用可能水量の推定を精度の高い水収支測定により行う事、そして、対象地内の定量的な水・塩移動を把握するため、表面流出水に着目した水・塩移動モデルを開発し、植林利用可能水の水量・水質の観点から植林適正地の選定を行う事を目的とした。

(2) 荒漠地における土壤環境測定およびモデル化

1) 荒漠地におけるリター・土壤の炭素動態解析

樹木の枯死物である枯葉枯枝(リター)や土壤有機物は、植林を行った際の二次的な炭素プールとして大きく期待できる。また、リター・土壤は森林生態系内の栄養塩の循環においても重要な役割を果たしている。したがって、植林前後での正味の炭素固定量の評価のためには、植物成長のみならず、リター・土壤の炭素動態を把握することが望ましい。本研究では、現地生態系を対象として植物枯死以降の炭素動態について次の項目を検討した。①林地単位でのリター流出を組み込んだリター・土壤炭素動態モデルの構築および炭素動態の解析②林床におけるリター流出現象の実験的な解明③リター流出を組み込んだ、現地生態系全体の炭素動態解析のためのフレームワークの作成

2) 保水材を用いた土壤水分移動の制御方法に関する検討

乾燥地で植林を行なうには、少ない降雨水をいかに有効に利用するかが技術的な課題となる。降雨水を有効に利用する技術のひとつとして、保水材の利用が考えられる。現地試験においては、保水材を土壤に均等混入するよりは層として集中して投入するほうが、植物の成長に有効であるという結果が得られている。技術の確実な適用のためには、土壤への保水材の効果的な混入方法を明らかにする必要がある。本研究では、カラム実験を行い、様々な条件下での保水材の乾燥抑制効果について検討した。

(3) 実証植隣地の選定、植林、測定方法の検討による半乾燥地域への技術展開

1) 半乾燥地における新規植林方法と植林木の樹種特性

耕作地帯の塩害による荒廃地化は世界的な問題となっている。西オーストラリア州南部の小麦地帯でも急激に塩害が進行し、非常に深刻な問題である (Marcar 2004¹⁾)。塩害の主たる原因は原生植生であった森林を皆伐し、農地に転換したことによって、植物による水の利用量が減少し、水収支バランスが崩れたことによる。塩害化が生じた土地は事実上放棄され、有効な土地利用がされていない。塩害地への植林は炭素固定のみならず、水収支バランスの回復により土地の再利用を可能とする。土壤への塩集積は特に土壤表層において顕著にみられるため、このような塩害地に効率的に植林を行うためには、土壤の深い層の資源を植物に利用させることが重要である。この項では、塩害地において有効な植林技術として、土壤表層の根域をパイプで囲むことによって苗木を高塩濃度の土壤から回避し、速やかに根を垂直方向に伸長させる技術を開発することを目的とした。

2) 半乾燥植林地の水収支

前述のように地下水面上昇を抑制するためのアグロフォレストリーの導入が求められているが、どの樹種をどれだけ植えれば地下水を抑制できるか解明されていない。そこで、樹木の蒸散量や土壤水分および地下水の変化から、Wickepin対象地の水収支を観測し、現状の把握と、将来的な塩害回避に必要な植林面積の予想を行う

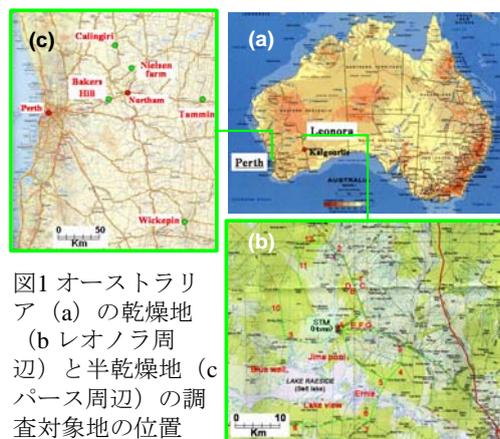


図1 オーストラリア (a) の乾燥地 (b) レオノラ周辺) と半乾燥地 (c) パース周辺) の調査対象地の位置

ことにした。なお、ここで実施されている植林は、持続的な農業生産のための塩害回避用植林が、炭素固定植林と両立できるという着想の元に実施されている。

3. 研究方法

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200 mm前後（Abe *et al.* 2003²⁾）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（図1(b)）。この地域にはハードパンと呼ばれる不透水層が表層10-20 cmの深さに存在し、植物の成長が著しく阻害されている。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。また図1(b)の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（表1）。これらの植林試験サイトには、集水技術（バンク造成）やハードパン破碎、土壌層厚み増加などの技術が導入されている（表2）。

表1 調査サイトの立地環境および植生

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 included plain	<i>A. aneura</i>
2B		wandarrrie grass
3	gently inclined plain with saline alluvium in lake system	<i>L. squamata</i> , <i>A. ramulosa</i> , <i>A. tetragonophylla</i>
4	uncised drainage zone with shallow red earth soil over hard pan	<i>A. aneura</i> , <i>Er. forrestii</i> , <i>A. tetragonophylla</i>
5	uncised 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. forrestii</i> , <i>A. aneura</i> , <i>A. craspedocarpa</i>
10	gently undulating sand plain with spinifex grassland	<i>A. aneura</i> , <i>A. coolgaradiensis</i> , <i>E. gonylocarpa</i> , <i>Spinifex</i>
11	alluvial plain with playas and circular drainage foci	<i>Er. globra</i> , <i>C. subspinescens</i>
12	gently inclined wash plain with occasional wandarrrie bank	<i>A. aneura</i> , Wandarrrie grass

A.=Acacia spp., C.=Cassia spp., E.=Eucalyptus spp., Er.=Erenophila spp., F.=Frankenia spp., G.=Grevillea spp., L.=Lawrencaia spp., M.=Melaleuca spp.

表2 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、ハードパン破碎	1998年7月	80
B	ハードパン破碎効果	ハードパン破碎、バンク造成（既設）	1999年7月	50
C	大規模集水、大規模植林	大規模バンク造成、貯水バンク造成、ハードパン破碎	1999年7月	700
D	異なる集水法	マイクロキャッチメント、ハードパン破碎	1999年7月	50
E	土壌厚さ効果	表土層厚の増加、バンク造成、バンクへの浸透促進	2000年9月	200
F	補間植林	疎林に格子状に植林	2001年5月	120
G	無機保水材の施用	焼成ポーキサイトの混入、異なる混入法	2001年5月	60
T	SiteCのコントロール	大規模バンク造成、貯水バンク造成、ハードパン破碎、施肥、灌水制御	2001年7月	250

主調査地との比較調査のために、パース近郊において年間降雨量の異なる5つの地域に調査地（Bakers hill、Calingiri、Tammin、Nielsen farm、Wickepin：図1(c)）を設けた。

Bakers hill・・・年降水量550mm。現状では塩害危険性は少ない（電気伝導度：EC = 0.99～2.3ms/s < 400ms/s）。土壌がA1～B1層までで約70センチあるため、植物が用意に利用できる土層は厚い。また排水条件も悪くは無かった。またほぼ中性。現状では大規模に植林展開しているわけではない。植栽樹木は*Eucalyptus camaldulensis* var. *Silverton*, *E. camaldulensis* var. *Lake Albacutya*, *E. camaldulensis* var. *Hindmarsh*, *E. camaldulensis* × *E. rudis* hybrid, *E. cladocalyx*, *E. polybractea*, *E. loxophleba* var. *lissophloia*, *Acacia acuminata*。

Calingiri・・・年降水量450mm。2区画植林区画を設置してあるが、こちらも大規模に植林展開

しているわけではない。土壌はA1～B1層までで約30 cmと浅く、50 cm前後に地下水面が観測された。ただし、現状では塩害危険性は少ない（電気伝導度：EC = 0.73～8.3 ms/s < 400ms/s）。土壌の浅いところでは酸性化が進み、地下水面付近は酸性土壌になっていた（PH<5）植栽樹木はBakers hillと同じである。

Tammin・・・年降水量350mm。2区画植林区画を設置。こちらも大規模に展開しているわけではない。土壌がA1～B1層までで約70 cmあるため、植物が用意に利用できる土層は厚い。また排水条件も悪くは無かった。表層から下層にしたがって酸性土壌からアルカリ性土壌になっている。2区画のうち片方は塩害危険性（電気伝導度：EC = 0.94～13.0 ms/s < 400ms/s）が少ないが、もう片方は塩害の危険性が高い（電気伝導度：EC = 4.88～39.5 ms/s < 400ms/s）。植栽樹種はBakers Hillのものに加えて、*Eucalyptus longicornus*、*Acacia lasiocalyx*である。

Wickepin・・・年降水量350mm。全部で20区画の植林区画を設置し、大規模に植林展開をし、土壌水分や地下水面の広域でのモニタリングをしている。20区画のうち7区画は本プロジェクトによって設定され、13区画はForest Product Commission (FPC)、Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO) と西オーストラリア (WA) 大学によって設置されたものである (Archibald *et al.* 2004³⁾)。土壌は場所によって大きく異なり、標高が比較的低い場所は電気伝導度が高く（電気伝導度：EC = 0.35～4.8 ms/s < 400ms/s (藤野2007⁴⁾) 地下水面も浅い。標高が比較的高いところは電気伝導度が低く（電気伝導度：EC = 0.05～0.42 ms/s < 400ms/s (藤野2007⁴⁾) 地下水面も深い。植林地の表層は砂質やシルト質であるが、50cm以下は固い粘土層が広がっている。植栽樹種は、*Eucalyptus camaldulensis*、*E. globulus*、*E. occidentalis*、*E. sargentii*、*E. loxophleba*、*E. salmonphloia*、*E. wandoo*、*E. rudis*、*E. kondininensis*、*Pinus pinaster*、*P. radiata*、*Acacia saligna*、*Casuarina obesa*。この中でも *E. globulus* と *E. occidentalis* と *Pinus pinaster* に重点をおいて調査している。

これらの比較調査地では、あらかじめ植林されていた樹木の生長測定、土壌水分、地下水位等の測定を行い、異なる環境条件が樹木成長に及ぼす影響の把握、塩害の発生に関する調査を主な目的とする。

(1) 広域水・塩移動解析モデルの開発および荒漠地における水収支測定と制御

1) 中規模流域水収支測定

図2にSturt Meadows付近の5×4 km四方の中規模閉鎖流域を示す。Sturt Meadowsでは、平均傾斜が1m/kmにも満たない乾燥地特有の緩やかな傾斜地が多くみられ、研究対象流域を選択する事が困難である。その中で、5×4 km流域で降った雨水のほとんどが最終的に到達

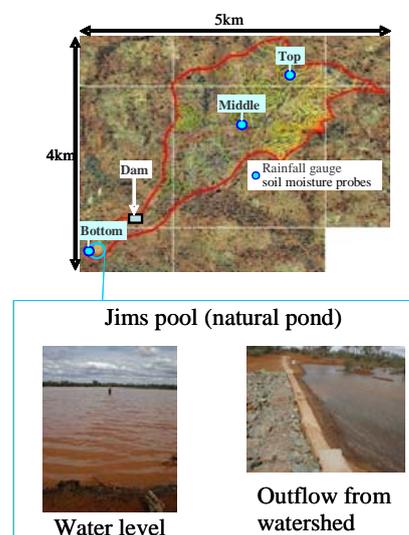


図2 中規模流域 (Sturt Meadows) の地形、雨量計と土壌水分センサーの設置位置、およびJims poolの水位計とダムの外観

するJims poolと呼ばれる場所がある。対象地で水収支がとれる貴重な流域であるJims pool流域を、精度の高い水収支測定および水移動モデルの開発・検証を行う中域の対象地として選んだ。また、Jims poolでは集水量が大きくなるとDam付近で流出してしまう事も報告されている。中域閉鎖領域の標高データはKevron社より購入した1メッシュが10×10 mのデータを用いて分水嶺を決定した。この流域内でTop、Middle、Bottomの三箇所に降雨計CEM-TBRG（クリマテック社）、集水地であるJim's poolに水位計Model 6541（Unidata Pty Ltd）を設置し、降雨と水位の実測を得た。また、集水地付近の標高から水位[m]－貯水量[m³]の関係式を作成し、各降雨に対する貯水量、すなわち、最大植林利用可能水量の推定を行った。さらに大きな降雨では流域からの雨水の流出がみられるため、その出口に堰を設け流域からの流失量を測定した。以上の測定から中域閉鎖領域での水収支測定を行った。

2) 中規模閉鎖流域でのパラメータの検証

本モデル（図3）は、大きく分けて、降雨後の段階を浸透・蒸発・表面流出の三段階に分けて考えている。降雨が起こって雨水が土壌に浸透し、浸透しきれない水は土壌表層で液面蒸発を起こし、または表層に水が存在しない場合には土壌蒸発が起こる。浸透・蒸発後に残留した水は表面流出し、標高の高いところから低い所に流れていく。

① 浸透

Cylinder intake rate法による実測データ（濱野ら2001⁵⁾）を用いてPhilip式により土壌浸透速度式（式1）を作成した。

$$i = 1.24 \times 10^{-3} + 0.02 / (2 \times t^{1/2}) \dots \text{(式1)}$$

i : 浸透速度 [m/s]、 t : 浸透時間 [s]

また、Cylinder intake rate法により推定した浸透速度 (i) は、通常の降雨浸透より速い事が報告 (Rao, 1998⁶⁾) されているため、モデル中では、浸透補正係数 (PR) を用いて、実浸透速度 = i / PR として補正を行った。

② 蒸発

液面蒸発には実測のPan蒸発速度 (7.94×10^{-8} m/s) を、土壌蒸発にはMillyモデル (Milly, 1984⁷⁾) の蒸発時間 [s] に対する土壌蒸発速度推定式 (式2) を用いた。

$$y = -10^{-22} t^3 + 3 \times 10^{-16} t^2 + 10^{-9} t \dots \text{(式2)}$$

y : 土壌蒸発速度 [m/s]、 t : 土壌蒸発時間 [s]

③ 表面流出

表面流出速度式には、Manning式 (式3) (岩佐1979⁸⁾) を用いた。

$$v = 1/n \times R^{2/3} \times I^{1/2} \dots \text{(式3)}$$

v : 流速 [m/s]、 n : 粗度係数、 I : 底勾配 [m/m]、 R : 径深 [m]

Manning式の粗度係数 n は壁面の粗さを表す経験的な値である。

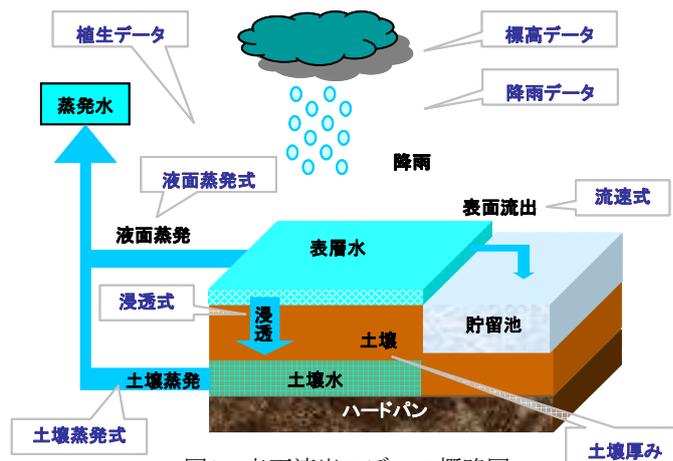


図3 表面流出モデルの概略図

中規模閉鎖流域では、a. フィッティングパラメータ（粗度係数[n]・浸透補正係数[PR]）、b. 最適計算時間単位（Time step）、c. メッシュサイズの検証を行った。標高データはaのパラメータ決定のみ最も精度の高い10m meshを使用し、それ以外は、10m mesh dataから作成した20、50、100m meshデータを用いて検証した。a-cの検証は、集水地の貯水量を用いて、実測とシミュレーション結果を比較した。

メッシュサイズの検証は計算時間を短縮させる事が目的であるが、メッシュが大きくなるほどデータ量が少なくなり、微小な標高差を表す事ができなくなる。そこで、大きなメッシュで計算を行う場合には、表面流出水の多くがクリークに集まることを表すために集約率（式4）を導入して、a-cの方法と同様に検証した。

$$\text{集約率} = 1 - \exp(-L \times C \times I \times \Delta t) \dots \text{(式4)}$$

L : フィッティングパラメータ [m/s]、 I : 傾斜 [m/m]、 Δt : Time step [s]

C : 集約能（拡大メッシュ中で集約を示す最小メッシュの割合）

集約率とは、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ためのもので、クリークに集まった水は、実際には浸透や蒸発がほとんどない内に集水地に流れ込むため、浸透・蒸発はないものとした。

3) 広域水収支測定

対象地Sturt Meadowsは四方を山に囲まれており、大雨が降ると雨水がしばしば表面流出を起こして塩湖へと流入する。この約100km四方の対象地で表面流出率を調査するために、塩湖内で水収支を計測することで表面流出の推定を試みた。測定機器は、塩湖への流入

量（表面流出水量）を測定するための水位計をBlue well、Lake viewに、塩湖からの流出量を把握するための流量計をErnieに設置した（図4）。対象地全域の面積は3247.8 km²、塩湖面積は103.46 km²とした。またKevron社から 10×10 m の標高データを購入し標高と水位の関係を求めた。地形情報のデータの解析にはERDAS IMAGIN 8.7 を用いた。



図4 塩湖に設置された水位計 (Bluewell, Lake View)と流量計(Ernie)の外観

(2) 荒漠地における土壌環境測定およびモデル化

1) 荒漠地におけるリター・土壌の炭素動態解析

図5に解析に用いたモデルの概念図を示す。本モデルでは、炭素の蓄積場所として、地上部植物体（WP、kg-C m⁻²）、リター（WL、kg-C m⁻²）、土壌（WS、kg-C m⁻²）の3つのコンパートメントを考えた。また、リター部は、リターの種類および分解性の難易に応じて4つのサブコンパートメントを設けた。コンパートメント間の炭素フラックスとしては、純一次生産量（NPP、kg-C m⁻² yr⁻¹）、リターフール量（LF、kg-C m⁻² yr⁻¹）、リター分解量（LD、kg-C m⁻² yr⁻¹）、Runoffや風などの物理的要因によるリター流出量（LR、kg-C m⁻² yr⁻¹）、土壌炭素無機化量（HR、kg-C m⁻² yr⁻¹）を考えた。本モデル

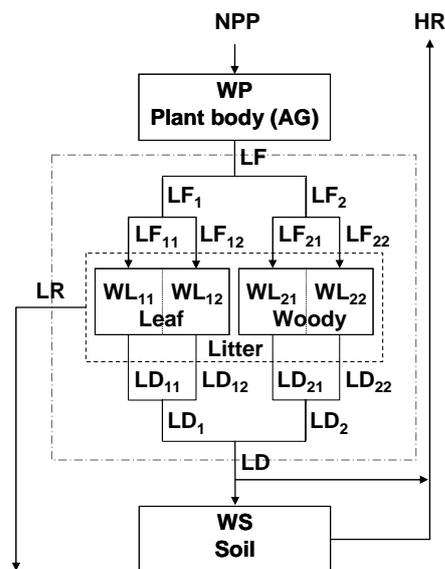


図5 炭素動態モデルの概念図

ルは、植物の枯死以降の炭素動態をモデル化するものである。図5に示すモデルを現地の優占種であるアカシアの中間林 (Site 2)、密林 (Site 7)、疎林 (Site 12) の3サイトに適用した。林間閉鎖度は、それぞれ、0.74、0.84、0.16である。解析には現地で実測された地上部植物体現存量、リター現存量、リターフォール速度定数、リターフォール量中の葉のリターの割合およびリター分解速度を用いた。

リターの流出現象は、着色した葉100枚、枝10本を1 m四方のコドラート内にランダムに配置し、区画内の残存数の経時変化より観測した。コドラートの設置場所は、樹木付近で林床にリターが多く存在するところ (Plot DL)、樹木付近でリターが少ないところ (Plot SL)、リターがほとんど存在しない裸地 (Plot BS) の3地点とした。また、林地以外での炭素動態把握のために、裸地において土壌炭素蓄積量を測定し、リターの一部が流入すると考えられる塩湖においては、有機物分解の結果である土壌呼吸を測定した。

2) 保水材を用いた土壌水分移動の制御方法に関する検討

土壌として豊浦砂、保水材として団粒構造を持つ鹿沼土 (3-4 mm) を用いた。土壌カラムには、内径8 cm、外径8.8 cm、高さ40 cmの亚克力製パイプを用いた。土壌と保水材は、炉乾燥

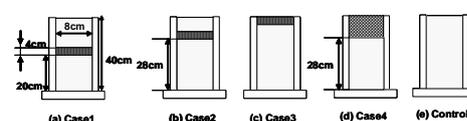


図6 保水材の混入位置

(105°Cで24hr 乾燥) したものを使用し、カラムへの投入量は土壌2650 g、保水材53 gとした。保水材の混入方法は、図6に示すように、カラムの上から16~20cmの位置に混入したもの (Case1)、8~12 cmの位置に混入したもの (Case2)、0~4 cmの位置に混入したもの (Case3)、0~12 cmの位置に土壌と保水材を均等混入したもの (Case4) の4つと保水材を未混入のもの (Control) の5つとした (Case1、2、3は、土壌層と保水材層の厚さが土壌:保水材=9:1となるように設定)。これらの土壌カラムに、水を供給し、その重量の経時変化を実験室内にて測定した。水の供給量は、160 ml、80 ml、40 mlとした。

(3) 実証植隣地の選定、植林、測定方法の検討による半乾燥地域への技術展開

1) 半乾燥地における新規植林方法と植林木の樹種特性

植物の地下部が利用可能な空間と、植物の成長速度の関係を明らかにするための実験を行った。効率の良い育苗を行うためには、短期間の育苗で土壌深部の水を利用可能となるように植物の根系が深根性であることが望ましく、また、根の垂直分布量が深いところで多くなることも望ましい。そこで栽培実験により、①根域制御の強度による成長量の比較、②樹種間での地上部、地下部の成長パターンの比較、③根域空間の制御による根量の可塑的変化の定量を行った。

① に関しては、土壌中における根系の発達方向を制限することは、同時に植物の成長速度を抑制する可能性があるため、植物の成長を阻害しないように環境制限の強度を配慮する必要がある。そこで、適切な環境制限の強度を解明するため、直径の異なるパイプ (直径30 cm、10 cm、長さ100 cm) に土を詰め、*Eucalyptus camaldulensis*、*Acacia lasiocalyx*を2005年5月より栽培した。灌水は播種後、1ヶ月目までは毎日2回、以降は1週間に1回の頻度で行った。灌水量はΦ30cm処理個体には4.5L、Φ10 cm処理個体には0.5 Lを毎回灌水した。施肥は液体濃縮肥料のハ

イポネックス (N:P:K=6:10:5) (株式会社ハイポネックスジャパン) を1000倍希釈したものを灌水の代わりにΦ30 cm処理個体には4.5 L、Φ10 cm処理個体には0.5 Lを14日おきに与えた。栽培実験開始からおよそ3ヶ月間樹高を追跡的に測定した。さらに2006年には、3種 (*E. camaldulensis*, *P. radiata*, *Casuarina obesa*) において、前年より小さいパイプ径 (直径: 10cm、5cm、2.5cm) を用いて、より低コストで効率的な苗木生産技術を開発するための栽培実験を行った。栽培期間は2006年7月6日から約4ヶ月間、灌水は日射量が多く気温が高い7、8月には1日2回、9月以降は1日1回行った。

② に関しては、3種 (*E. camaldulensis*, *P. radiata*, *Casuarina obesa*) において、透明な面のある根箱で個体を栽培し、地上部、地下部の伸長速度を直接観察した。栽培期間は2006年5月から約8ヶ月間、灌水は日射量が多く気温が高い7、8月には1日2回、9月以降は1日1回行った。

③ については、直径30 cm長さ2 mのパイプを栽培用ポットとして用いて、その中に直径10 cmで長さ50 cm、100 cmのパイプを地表面の高さに埋め込んだもの (根域制御処理) と、何も埋め込まないもの (コントロール) を設定し、2種 (*E. camaldulensis*, *E. sargentii*) の成長を比較した。栽培個体には適宜灌水施肥を行いながら、成長を観察した。栽培個体は250日後に刈り取りを行い、地上部および地下部の各深さのバイオマスを明らかにした。

2) 半乾燥植林地の水収支

研究対象地は、半乾燥地である西オーストラリア州Wickepin (年間平均降水量: 350mm (Archibald *et al.* 2004³⁾) のKen Martin農場 (図7) である。対象地でアグロフォレストリーを行う際、降雨に対する表面流出水の割合を求めることが必要となる。そこで、本研究では表面流出水の集水域をERDASで想定し (図8)、クリークに流量計 (Dataflow Model 392 Capacitance Probes) を設置して集水域の降雨量と表面流出量を経時測定した。またDepartment of Agriculture and FoodのWickepin Station (南緯32.53度、東経117.46度) における降雨dataから、2002/1/1から2002/12/31の期間における流域内降雨量を求めた。

また効率的に地下水位を低下させるためには、高い蒸散能と炭素固定能を持つ成長速度の速い樹種の選定が必要となる。本サイトには主に *Pinus radiata*, *Eucalyptus sargentii*, *Eucalyptus globulus*, *Eucalyptus occidentalis* の4樹種が植林されており (Archibald *et al.* 2004³⁾)、定期的な毎木調査と、TDP (Thermal Dissipation Probe) による経時的な樹液流量測定を行った。本サイトの植林本数や面積の聞き取り調査も行い、TDP測定結果から植林サイト全体の蒸散量も

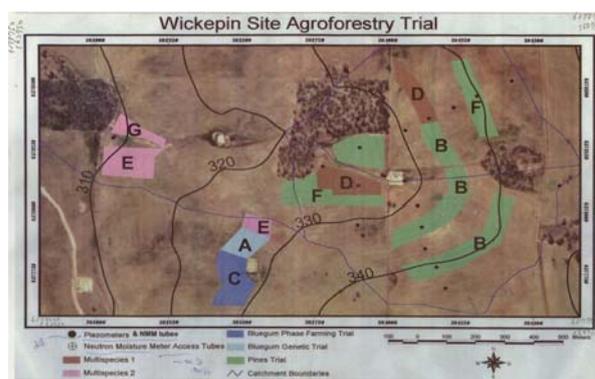


図7 Wickepin Ken Martin農場

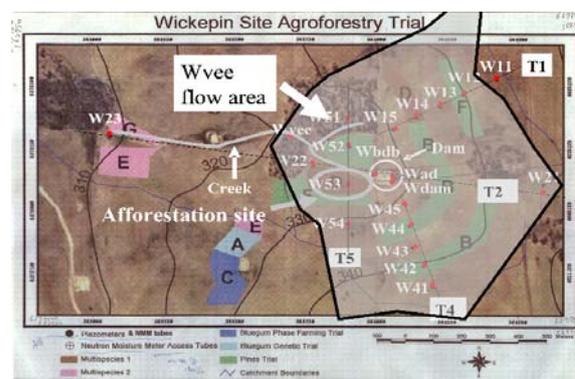


図8 ERDASにより決定した集水域

評価した。本研究はこれらのデータの解析を基に流域内水収支の現状を求め、植林効果の評価を行った。

4. 結果・考察

(1) 広域水・塩移動解析モデルの開発および荒漠地における水収支測定と制御

1) 中規模流域水収支測定

集水地水位から推定した貯水量の増加分は、対象流域で土壌に浸透せずに集水地に流れ込んでくる表面流出水と考え、以下の計算式(式5)より、対象地における降雨量-表面流出率の関係を図9に示した。解析データから貯水量が多く流出が生じていると判断されたデータを除去し、降雨量に対する表面流出水の関係式(式6)を作成した。また、観測された最大表面流出率は、19% (総降雨量27.5 mm) であり、植林利用可能となる表面流出水は、最大で降雨の19%程度であると推定された。

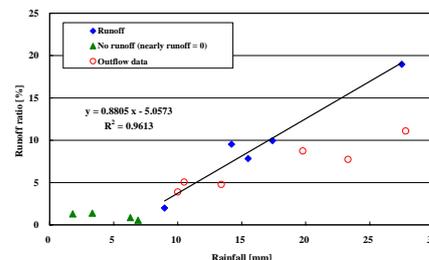


図9 STM中規模流域における降雨量と表面流出の関係

$$\text{runoff ratio [\%]} = \frac{\text{commulative water volume at Jims pool [m}^3\text{]}}{\text{all rainwater in middle scale area [m}^3\text{]}} \times 100 \quad \dots \text{(式5)}$$

$$\text{Runoff ratio [\%]} = 0.880 \times \text{Rainfall [mm]} - 5.06 \quad \dots \text{(式6)}$$

2) 中規模閉鎖流域でのパラメータの検証

① フィッティングパラメータの検討

本研究の水移動モデルには、Manning式中の粗度係数 (n) と、浸透速度式を補正する浸透補正係数 (PR) の2つのフィッティングパラメータがある。そこで、片方のパラメータを定数として、もう一方を変化させ、それぞれのパラメータが貯水量に対する影響を確認した。

図10(a)に、 $PR=9.0$ 、 n を変数とした結果を、(b)に $n=0.015$ 、 PR を変数とした結果を示す。(a)では n が大きくなると貯水量の増加が遅くなり、最終貯水量が減少した。図10(b)では、貯水量の増加は変化せず、 PR が大きくなると最終貯水量が増加した。

これらの結果から、パラメータの決定には、 n を貯水量の増加時で決定した後、 PR を最終貯水量によって決定する方法がよいという結論に至った。

各降雨日データでパラメータ決定を行った結果、 $n = 0.015$ と決定されたが、 PR は一定値を定める事ができなかった。これは、Damにおける貯水地からの流出や乾燥地特有の局地的な降雨により $5 \times 4 \text{ km}$ という流域内でも降雨量のばらつきが出てしまった事が原因であると考えられる。そのため、貯水地からの流出がなく、

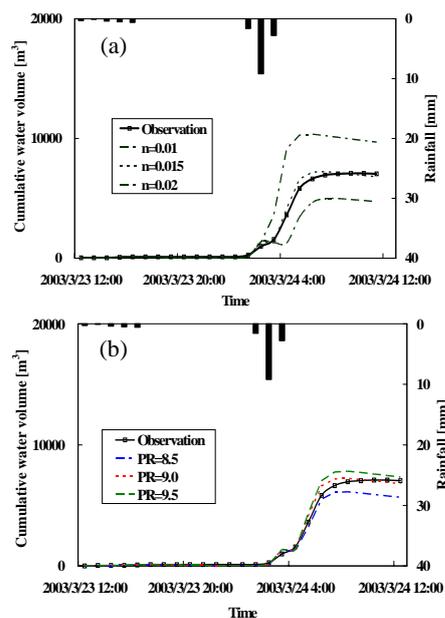


図10 (a) n が貯水量へ与える影響 (b) PR が貯水量へ与える影響

降雨データが3箇所で一様に取れている03. 3. 23のデータで決められた $PR = 9.0$ を、対象地付近で使用する一般値として決定した。

② Time step

①で決定したパラメータを使用し、03. 3. 23のデータでTime stepの影響を調べた。10、 20、 50、 100m meshのそれぞれでTime stepを変化させた。その結果、Time stepを大きくしていくと計算時間は短縮されるが、降雨後の貯水量増加のタイミングが遅れてしまう事が分かった。これは、流速がいくら速くとも水が移動できる最速距離が1 mesh / time stepに制限されてしまうためだと考えられる。そこで、各メッシュサイズで貯水量増加のタイミングが遅れないような最適Time stepを決定し、結果を表3に示した。

表3 各メッシュサイズにおける最適time step

mesh size [m]	10	20	50	100
time steps [s]	1	1-2	10	60

③ メッシュサイズ

03. 3. 23の降雨データを用い、パラメータおよびTime stepを一定にして、メッシュサイズ (10、 20、 50、 100m mesh) の影響を調べた。その結果、図11のように10、 20m meshのデータでは、貯水量の変化に大きな差が見られなかったが、50、 100m meshのデータでは、実測よりも貯水量がかなり小さくなってしまった。この原因は、メッシュサイズを大きくすると細かい標高差を表現できず、雨水がクリークを流れていく現象を表現できない事が考えられる。

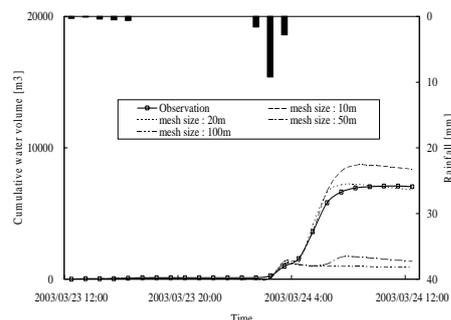


図11 メッシュサイズによる影響

④ 集約率

③の結果を受けて、集約率の導入について検討した。①で決定した $n = 0.015$ 、 $PR = 9.0$ 、Time stepは1sという条件で、メッシュサイズの影響が出ない20 mと影響が出る100 m meshの結果を比較した。図12に集約率 (conc.) を導入した結果を示す。集約率を導入することで100 m meshの貯水量を20 m meshの結果にほぼ近似させる事ができるようになり、集約率を導入する有効性が確認された。

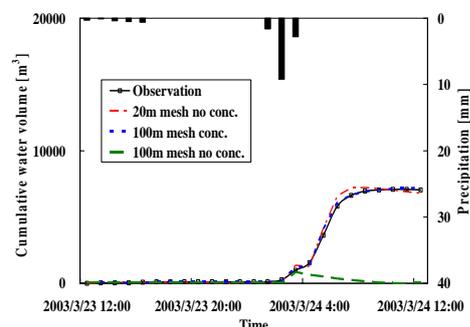


図12 集約率導入による影響

3) 広域水収支測定

2003年1月から2004年12月のBlue well (塩湖水位)、Lake view (塩湖水位)、Ernie (塩湖出口流量) における測定データを図13に示す。水位の測定は測定地点に1000mmの穴を掘って、測定装置を設置している。しかし、塩湖の土壌は毛細管現象によって地下水から上がってきた水で常に飽和した状態にあり、降雨があっても水は浸透しないため測定箇所周辺の水が流れこんでしまう。よって1000 mm以下は正しい塩湖水位として表すことができないため基準水位を1000 mmとし、基

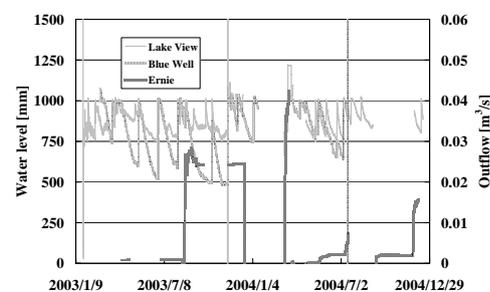


図13 広域水収支測定 (2003.1-2004.12)

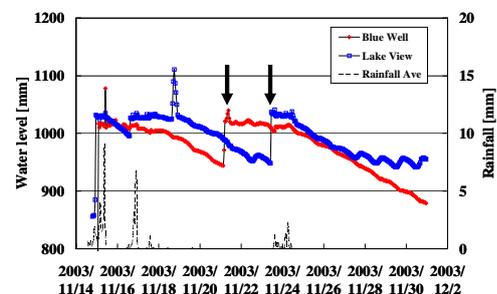


図14 広域水収支測定 (2003.11)

準水位以上を塩湖水位として扱うことにした。

表面流出の解析には水位が1000 mm 以上でかつ、3つの測定装置が同時に作動した2003年11月のデータを使用した。降雨量はSturt Meadows Station の各地にある降雨計から得られたデータの平均値を使用した。対象地平均降雨量は、2003. 11. 14 13:00~17 18:00 までの78時間に降った総降雨量57. 46 mmを使用した。図14に示す。矢印は表面流出によって塩湖の水面が上昇したときのデータ点を示している。水位の値は上昇してから一定になったときの平均値を使用した。Blue wellが1019. 18 mm、Lake viewが1031. 58 mmであったが同時期に10. 62 mmの降雨があるので、その分を差し引き1020. 96 mmとした。塩湖全水位をBlue wellとLake viewを平均して1020. 07 mmとした。塩湖面積は20 mメッシュのDEMから、雨が降った面積のデータは100 mメッシュのDEMから、GISソフトであるERDAS IMAGINEを使用してそれぞれ求めた。流域の決定には塩湖の出口流量を計測しているErnieから流域界を形成するように求めた。塩湖面積は103. 46km²、降雨面積は3247. 8km²であった(図15)。以上の解析により表面流出率を式7により求めた。

表面流出率

$$= (\text{塩湖面積} \times \text{塩湖上昇水位}) / (\text{降雨面積} \times \text{総降雨量}) \quad \dots \text{(式7)}$$

$$= (103. 46\text{km}^2 \times 20. 07\text{mm}) / (3247. 8\text{km}^2 \times 57. 46\text{mm}) = 0. 0111 (= 1. 11\%)$$

よって2003. 11のデータから得られた表面流出率は1. 11%であった。

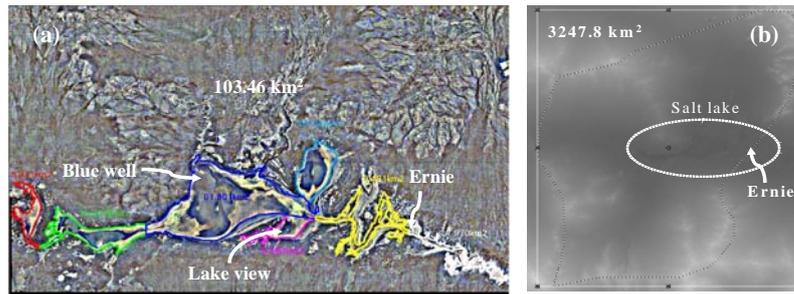


図15 (a)塩湖面積 (b)降雨面積

更に、広域流域における塩移動を考える上で、図16で示したような水年齢というものを考案した。水年齢とは、降雨後の表面流出水に地表面から塩が溶け出して、表面流出水の含塩量が地表面の接触時間に対して増加する事を計算で表したものであり、表面流出水の水質評価を行う。最終的には、本モデルによって、水量・水質の双方から表面流出水の有効利用を考えた植林地選定を行う事が考えられている。

約100km四方の流域において水年齢モデルを採用して計算した、降雨2週間後の最大表層水量を図17(a)に、最大水年齢の分布を図17(b)に示す。水は2週間で完全に土壌表層からなくなると仮定し、この期間で計算を行った。流域の中央には塩湖があり、色が濃いほど水量、水年齢が高いことをあらわす。

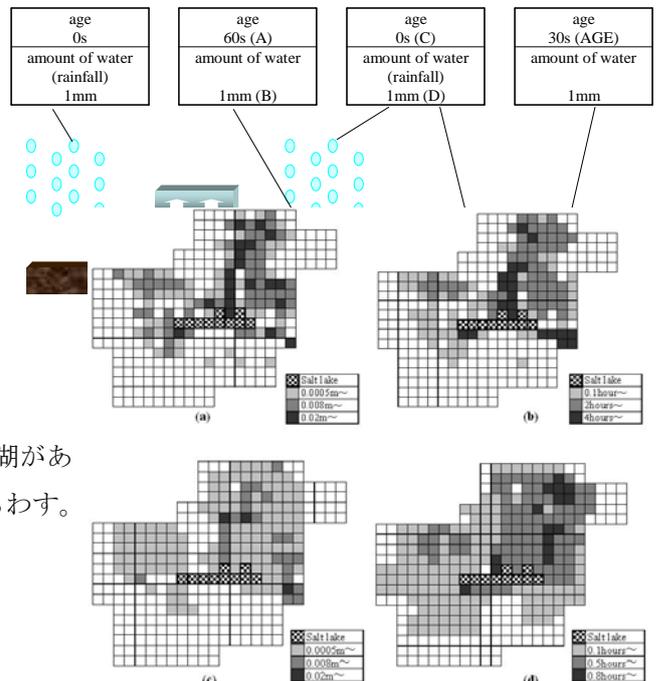


図17 水・塩収支モデルの結果 (a)最大表層水量 (b)表層水の水年齢 (c)クリーク水の最大水量 (d)クリーク水の水年齢

図17(a) (b)から、表層水が多い地域は水年齢も高い値を示している。これらの地域は比較的、対象地内でも標高が低く傾斜も緩やかであるため水がたまり易く、塩濃度も高い計算結果となった。しかし水年齢が低く水量が多い地域もあり、これらの場所が植林に向いていると考えられる。

同様に降雨2週間後のクリーク水(集約水)の最大水量と水年齢の値を求めた(図17(c) (d))。表層水は比較的短時間でクリークに集まり流出するため、クリーク水は表層水よりも水年齢の値が低い傾向にあった。しかし山地から雨水がクリークに流入する場所ではクリーク水の水年齢は高い。これは表面流出水が傾斜地土壌から塩を溶出して流入するためである。

① 植林に有効な水の選定

水収支・塩収支の基礎的モデルを用いて以下のような対策技術をモデル上で行った。まず植林箇所は植生が少ない場所と仮定し、全体の約18%を占める植生の乏しい地域である林冠閉鎖度が1-2の場所を選定し、その箇所の全体として表面流出対策を行うこととした。対策方法は1メッシュ(5km四方)に於いて水をせき止めることを想定し、今回は植林に用いるべき水の種類(表面流出水・クリーク水)および利用可能量を明らかにするため、流出水の50、100%分せき止めた場合の、対象地全域における水収支の変化を評価した。

表面流出水は最終的に塩湖に到達するので、塩湖に到達した水量をRunoff量(表面流出量)として評価した。ここで、各降水量に対する塩湖への表面流出量を計算した。

図18は、表面流出対策を行ったときの各降雨量における表面流出量を表す。対策施工箇所に流入してきたクリーク水をせき止めた場合、表面流出量が大きく減少している。一方、表層水は対策施工箇所に流入してきた全てをせき止めても、対象地全域における水収支に与える影響は小さい。表層水とクリーク水の各メッシュにおける最大水量はほとんど変わらないが、クリーク水は流速が速いため、流れる総量は表層水よりもクリーク水のほうが多くなると考えられる。対策実施により獲得が期待される流出水量の観点より、クリーク水を植林に用いることが有効であるといえる。また、クリーク水は水年齢も若く、塩濃度が低いことから、植林に適していると考えられる。

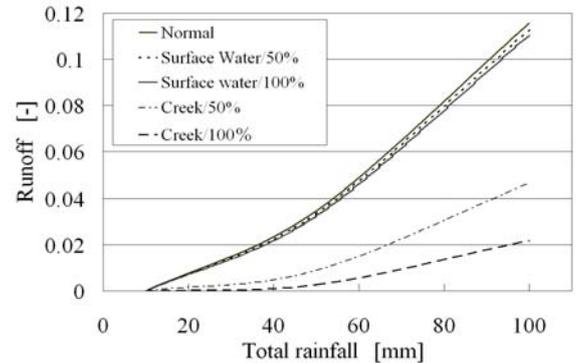


図18 Effect of control of runoff water on water balance

広域水収支モデル・水年齢モデルは検証および改良の余地がある技術である。しかし上記のような知見は得られており、この技術は広域流域の水・塩収支を解明するために有益な技術であることが分かった。この技術を発展させることにより、今後、より精度の高い知見が得られることが期待される。

(2) 荒漠地における土壌環境測定およびモデル化

1) 荒漠地におけるリター・土壌

の炭素動態解析

解析の対象とした自然林は十

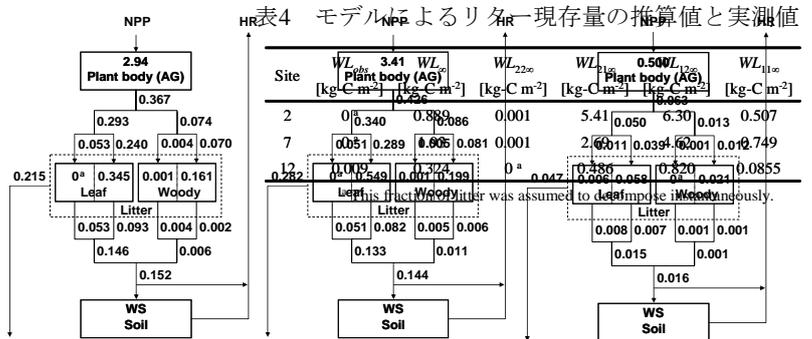


図19 モデルによる炭素収支の推算結果 (Box: kg-Cm² Flow: kg-C m² yr⁻¹)

分に成熟していると考えられるため、解析は定常状態を仮定して行った。リター炭素動態に関するパラメータのうち、リターフォール量、リター分解量は実測されており、リター流出を考慮しない場合におけるリター現存量がモデルにより推算可能である。そこで、実測されたリターフォール量、リター分解量から予測されるリター現存量 (WL_{∞}) と、実測されたリター現存量 (WL_{obs}) とを比較した。表4に推算結果を示す。推算の結果、実測されたリター現存量は、リターフォール量、リター分解量から予測された値に比較して1/6~1/12低いことがわかった。したがって、対象としたサイトでは、地表上のリターが分解以外のプロセス、すなわち、風やRunoffなどの物理的要因によって流出している可能性があることがわかった。そこで、モデルにリター流出パラメータを組み込み、リター流出量を推算した。

図19に、各サイトにおける炭素収支の推算結果を示す。図中の四角で囲った部分の値は各コンパートメントにおける炭素蓄積量[kg-Cm^{-2}]を表しており、矢印の部分の値は炭素フラックス [$\text{kg-Cm}^{-2}\text{yr}^{-1}$]を表している。図19より、サイト2では、樹木から年間0.367 kg-Cm^{-2} がリターとして地表上に供給されるが、そのうちの半分以上である0.215 kg-Cm^{-2} が分解されずに流出していることがわかった。また、サイト7、12においても、年間リターフォール量のうち、その半分以上が分解されずに流出していることがわかった。

表5に推算により得られた各サイトにおけるリター流出速度定数 (k_{run}) とリター流出率 (LR/LF) を示す。表5より、各サイトにおけるリター流出率 (LR/LF) は、サイト2では

表5 リター流出速度定数(k_{run})とリター流出率(LR/LF)の推算結果

Site	k_{run} [yr^{-1}]	LF [$\text{kg-C m}^{-2}\text{yr}^{-1}$]	LR [$\text{kg-C m}^{-2}\text{yr}^{-1}$]	LR/LF ₁ [-]	LR/LF ₂ [-]	LR/LF [-]	WL _∞ ^(run) [kg-C m^{-2}]
2	0.425	0.367	0.215	0.50	0.92	0.59	0.507
7	0.377	0.426	0.282	0.61	0.87	0.66	0.748
12	0.550	0.063	0.047	0.71	0.92	0.75	0.0855

59%、サイト7では66%、サイト12では75%となった。すなわち、調査対象地におけるアカシア自然林サイトでは年間リターフォール量のうち6~7割程度のリターが風、Runoffなどの物理的要因によりサイト外に流出していることがわかった。また、リター流出速度定数 (k_{run}) をサイトごとに比較すると、密林 (サイト7)、半密林 (サイト2)、疎林 (サイト12) の順に大きくなり、リター流出速度は林間閉鎖度と密接に関係することが示唆された。このような物理的要因によるリターの流出は、各サイトのみならず対象地全体の炭素循環、栄養塩の循環に大きく影響を及ぼしていると考えられる。したがって、疎林が多い乾燥地の炭素動態を解析するには、このようなリターの流出現象を考慮した解析手法が必要である。

リター流出量の推算精度向上のためには、乾燥地でのリター流出現象について基礎的なデータを収集する必要がある。そこで、現地のリター流出の実態を把握するために、モデルを適用したアカシアの中間林 (Site 2)、密林 (Site 7)、疎林 (Site 12) の3サイトでリター流出試験を行った。

図20に各サイトにおける葉と枝の残存率の経時変化を示す。図20より、サイト7のプロットSLの枝を除くすべてのプロットで葉と枝の流出が観測され、リター

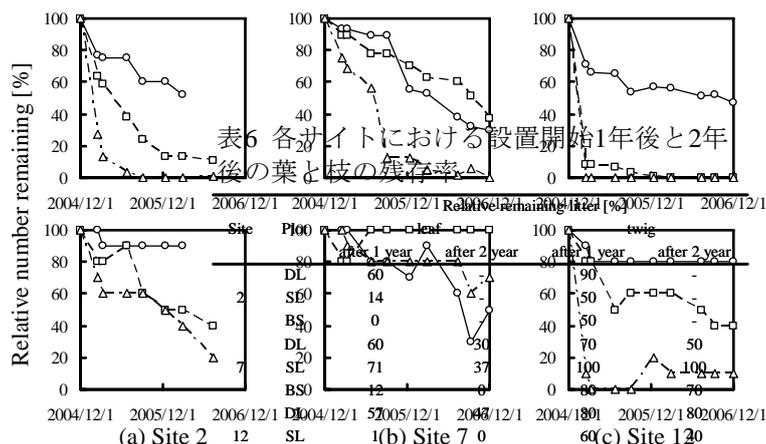


図20 各プロットにおける葉と枝の残存率の経時変化 (○: リターが多い地点 (Plot DL), □: リター量が少ない地点 (Plot SL), △: リターがほとんど存在しない地点 (Plot BS))

一が流出していることが実験的に明らかとなった。表6に各サイトにおける1年後と2年後の葉と枝の残存率を示す。1年後の葉の残存率は、サイト2が0～60%、サイト7が12～71%、サイト12が0～57%、1年後の枝の残存率は、サイト2が50～90%、サイト7が70～100%、サイト12が20～80%であった。枝は葉に比較して流出しにくいことがわかった。

リター流出速度はプロット、サイトによって様々であった。疎林であるサイト12の裸地 (Plot BS) が最も流出速度が速く、設置開始から80日後にはすべての葉がコドラートから流出し、枝についても90%が流出した (表6)。その一方で、密林であるサイト7のプロットSLでは、設置開始から2年経過後もすべての枝がコドラート内に残存していた。各サイトにおける葉と枝の残存率の経時変化をプロットごとに比較すると、密林であるサイト7を除いては、林床にリター量が多いプロットDL、リター量が少ないプロットSL、裸地であるプロットBSの順に流出速度が速くなる傾向にあった。すなわち、各プロットのリターの流出速度は、土壌表層のリター量を反映していることがわかった。

サイトごとに比較すると、プロットSL、BSは、サイトの林間閉鎖度が高くなるにつれ、リター流出速度が遅くなる傾向にあったが、プロットDLはサイト間の違いが見られなかった。林間閉鎖度は地表が樹冠に覆われている割合であり、高いほど風の抵抗が大きくなる。したがって、林間閉鎖度が高くなるにつれてプロットSL、BSのリター流出速度が遅くなったのは、流出要因である風への抵抗作用が大きくなったためであると考えられる。一方で、根元に近い箇所に設置したプロットDLでは、風への抵抗作用がサイト間によって差がないと考えられる。また、これらの結果は、先ほどのモデルによる解析結果と一致している。

これまでに、林地単位でのリター・土壌炭素動態についてはほぼ明らかとなったが、対象地全体の炭素動態解明のためには、林地全体からのリター流出量、流出したリターのその後について把握することが必要である。そこで、林地以外の炭素動態把握のために、裸地において土壌炭素蓄積量を測定し、リターの一部が流入すると考えられる塩湖においては、有機物分解の結果である土壌呼吸を測定した。また、これまでの調査結果に基づき対象地全体での炭素収支の推算を試みた。

調査の結果、林地における表層1 mまでの土壌の炭素蓄積量(無機炭素を含む)は、樹木の約5倍(5.1Mt-C)であるが、流出したリターの一部が流入すると考えられる裸地においても、3.5Mt-C(表層1 m、無機炭素を含む)が土壌に蓄積しており、林地土壌と同様、炭素プールとして大きな役割を果たしていると考えられた。一方で、表面流出水とともにリターの一部が流れ込むと考えられる塩湖では、局所的に二酸化炭素の20倍の温室効果をもつメタンの発生を確認した。以上のように、リターの流出は、林地だけでなく、流出先である裸地、塩湖の土壌炭素動態にも大きく影響を及ぼしていると考えられる。そこで、リター流出の影響を組み込んだ現地生態系全体の炭素動態解析のためのフレームワークを作成し、炭素収支の推算を試みた。

図21に、対象地における炭素収支の推算結果を示す。図21より、林地からは、年間リターフォール量のおおよそ2/3、リター現存量の40%のリターが裸地や塩湖へ流出していることが推算された。現状では、

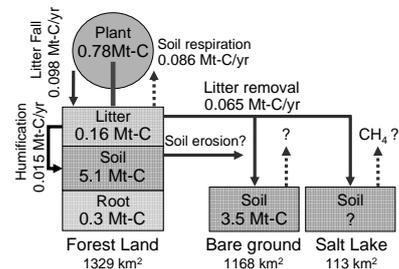


図21 現地生態系全体の炭素動態解析のためのフレームワーク

リター現存量、土壌炭素量のデータ数が少なく、また、塩湖や裸地へ行き着く過程でトラップされる流出したリターを加味していないなど、推算結果にはある程度の幅を含んでいる。推算精度向上のためには林地から裸地、塩湖いたるまでの炭素動態や、裸地、塩湖での更なる調査、解析が必要であろう。

2) 保水材を用いた土壌水分移動の制御方法に関する検討

図22に、体積含水比の経時変化を示す。水の投入量は、(a)が40 ml、(b)が80 ml、(c)が160 mlであり、それぞれ、(a)は8 mm、(b)は16 mm、(c)は32 mmの降雨イベントに相当している。

図22より、初期の土壌の含水量変化は、土壌への保水材の混入方法、投入水量によらず一定となっており、初期の乾燥においては恒率乾燥が生じていることがわかった。また、いずれの混入方法、投入水量においても、ある程度の時間経過後には、乾燥速度が指数的に減少していく減率乾燥を示すことがわかった。

初期乾燥（恒率乾燥）以降において、投入水量40ml、80mlでは、保水材混入法による保水量の経時変化の違いは、減率乾燥期間の初期にのみ確認できたが、20日経過後には、違いは見られなかった。一方で、160 mlの場合では、Case2（深さ8～12 cmの位置に混入したもの）、Case4（0～12 cmの位置に土壌と保水材を均等混入したもの）

の、Case3（深さ0～4 cmに混入したもの）、Case1（深さ16～20 cmの位置に混入したもの）の順に保水量が高かった。以上より、保水材を均一に混入するよりも、ある程度の土壌深さに集中的に投入するほうが乾燥抑制に効果があることがわかった。また、集中的に保水材を投入した場合でも、投入した深さによっては、乾燥抑制効果に差があることがわかった。

これは、恒率乾燥の速度は、降雨強度によらないので、降雨が少量の場合、保水材の位置によっては、保水材に十分に水が入るまでにほとんどの水が蒸発してしまうためであると考えられる。

したがって、保水材の投入に関しては、期待される降雨強度において、第1に保水材の位置まで水分が十分にいきわたること、第2に、保水材に水が入った場合に、蒸発抑制効果が十分にあること、の2つを考える必要がある。

実際の適用には、少量の降雨でも保水材に十分な水がいきわたるために、保水材の上の土壌の透水性を改良すること、保水材からの水分放出抑制のためには、保水材をまとまった層として設置し、周辺土壌への水分の拡散を抑制することが有効であると考えられる。後者の知見はフィールドでの結果と一致する。

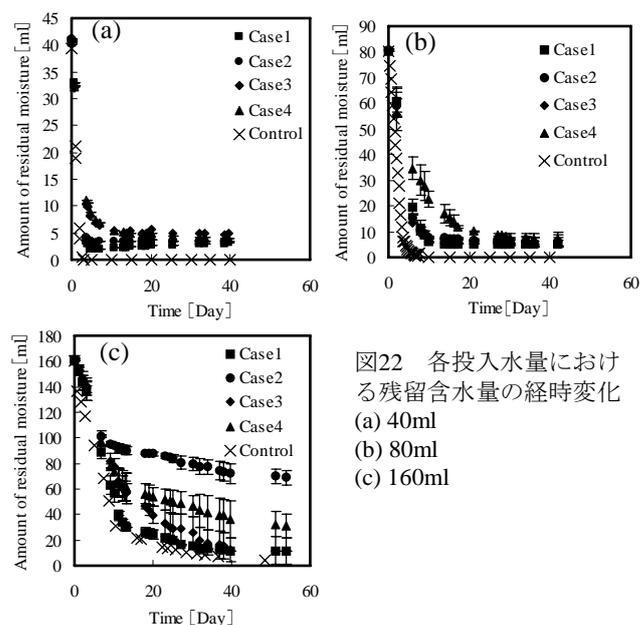


図22 各投入水量における残留含水量の経時変化
(a) 40ml
(b) 80ml
(c) 160ml

(3) 実証植隣地の選定、植林、測定方法の検討による半乾燥地域への技術展開

1) 半乾燥地における新規植林方法と植林木の樹種特性

① 浅根性樹種と深根性樹種の成長量の比較

*Acacia lasiocalyx*の成長は細い、直径10 cmのパイプで有意に阻害された(図23、 $p < 0.05$ ANOVA)。一方、*E. camaldulensis*ではパイプの太さは成長に有意な影響を及ぼしていなかった($p > 0.05$ ANOVA)。このことから根域の制御による個体成長速度の抑制は樹種に依存することが示唆され、根域制限によってストレス回避能力を付加した苗木育成には、*Eucalyptus camaldulensis*のような根域制御によって成長の抑制が起こりにくい樹種を利用すべきであると考えられた。

また、より強度の根域制御条件下(パイプ直径: 10 cm、5 cm、2.5 cm、長さ100 cm)における栽培実験の結果、播種後約4ヶ月目のバイオマス(乾燥重量)は*E. camaldulensis*では直径10 cmのパイプが5 cm、2.5 cmと比べて有意に大きいこと(図24、Tukey-Kramer test、 $p < 0.05$)、他の2種の成長量はパイプ径に有意な影響を受けないこと($p > 0.05$ ANOVA)が明らかになった。また、全処理間で比較すると、播種後約4ヶ月目のバイオマスは直径10 cmのパイプで生育させた*E.*

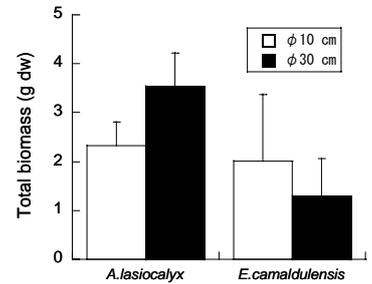


図23 根域制御の強度(φ10cm、30cm)による、成長量の比較

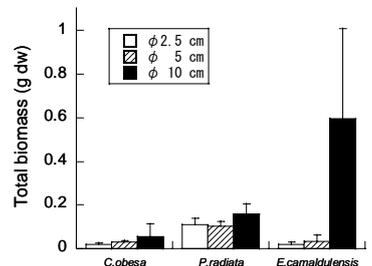


図24 根域制御の強度(φ2.5cm、5cm、10cm)による、成長量の比較

*camaldulensis*が 0.60 ± 0.41 gと最も大きく、同じく10 cmパイプで生育させた*P. radiata*、*C. obesa*のそれぞれ2.8倍、10.9倍のバイオマスを示した。これらの結果から、最も成長が速い*E. camaldulensis*を育苗する際に最適なパイプ径は10 cmであり、*Pinus radiata*、*Casuarina obesa*はバイオマスの成長速度で*E. camaldulensis*に劣るものの、より細いパイプを用いた省力的な育苗が可能であることが分かった。ただし、*C. obesa*は*P. radiata*と比べて根深度、およびバイオマスの成長速度が小さいため、細いパイプを用いた育苗には*P. radiata*がより有効であることが明らかになった。

② 深根性樹種間での成長パターンの比較

栽培個体の地上部、地下部の成長パターンは種によって異なっていたが、どの種も地下部の成長が地上部の成長を上回っていた(図25)。また、どの種も地上部の成長速度は50日程度の短い期間で減速したのに対して、地下部は100日前後のより長い期間、高い成長速度を維持していた。種間で比較すると、*E. camaldulensis*は最も地下部成長を優先させていた。播種207日目の*E. camaldulensis*の地上部(幹)長は2.0 cmであったのに対して、地下部(根)深度は56.0 cmと非常に大きく、著しく地下部の伸長に偏った成長パターンを示した。一方、*C. obesa*は3種の中で最も地上部成長を優先させる成長パターンを示した。播種207日目の*C. obesa*の茎長は6.7 cm、根深度は17.6 cmであり、その成

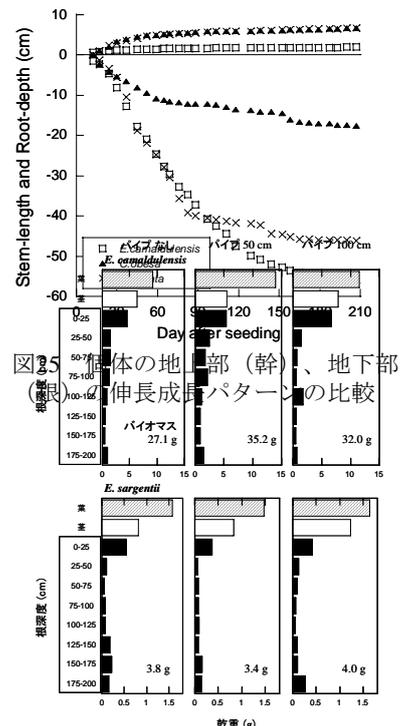


図25 栽培個体の地上部(幹)長、地下部(根)伸長成長パターンの比較

図26 根域制限パイプの長さを変えた場合の*E. camaldulensis*、*E. sargentii*の根の垂直分布。

長パターンは*E. camaldulensis*とは大きく異なっていた。また、*P. radiata*は播種207日目で茎長6.7 cm、根深度46.2 cmに達し、地上部・地下部どちらの成長量も大きいという成長パターンを示した。これらの結果から、*E. camaldulensis*や*P. radiata*は、地下部の成長速度が大きく、ストレス回避能力を有しており、パイプ苗木育成に適した樹種で有ることが解った。

③ 根域空間の制御による根量の可塑的変化の定量

3種で基本的な根系構造を比較すると*E. camaldulensis*が最も根量が豊富で、地上高が25 cmの時には主根長は200 cmに達していた(図26)。一方、*E. sargentii*は主根が細く、細根が表層に多かった。直径10 cmのパイプを用いて根域を制限した時に、根量の垂直方向の分布は、*E. sargentii*はももとの根量が乏しく、パイプ適用に伴った根量の目立った変化は無かった。*E. camaldulensis*の場合、表層(0-25 cm)の根量はパイプの有無や長さに影響されなかったが、長いパイプ(100 cm)を適用時に100 cm以深の根量が増大した。

以上の栽培実験の結果から、樹木が自ら持つ根系構造と人為制御による可塑性の程度が明らかになった。塩害疲弊農地を植林地としたときに、根域を制限し地表に集積した塩を回避することと、速く根を垂直方向に伸長させて、できるだけ深いところの土壤水を利用することは必須である。*E. camaldulensis*はこれまでの我々の乾燥地での研究から、深根性で成長が早く、炭素固定能力(バイオマス増加量)が高いことが明らかになってきている。同種は塩害地での根域制御パイプ植林においても、1) 直径10 cm、長さ100 cmのパイプで根域を制限したときも、直径30 cmのパイプを適用した時と同等のバイオマスを得ることができ、植林のコストを低減できる。2) その際に他の深根性樹種よりも大きなバイオマスを得られる。3) 根の垂直方向への伸長速度が速い。4) 根系の垂直方向への伸長を促進するための細いパイプの適用に対しても、根の垂直方向の分布に対して大きな可塑性を示し、深いところの根量を大きくできる。といった、ストレス回避能力を付加した苗木育成に適した性質を持つことが明らかになった。これらの結果から、*E. camaldulensis*は乾燥地だけではなく、塩害地での植林樹種としても適していることが明らかになった。

2) 半乾燥植林地の水収支

図27に2002年の累積降雨量と累積表面流出量の経時変化を示す。累積表面流出量は累積降雨量とともに増加しており、降雨量に対する表面流出の割合は7.05%であった。この値から植林利用可能水量と植林可能量の推定が可能となった。

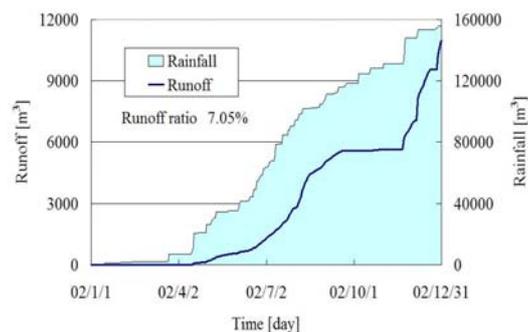


図27 累積降雨量と表面流出

図28に2002年の月別降水量と各樹種の平均蒸散量の変化を示す。また表7に各植林地におけるパラメータと推定年間蒸散量を示す。*E. sargentii*と*E. occidentalis*の蒸散量が比較的高い測定結果となった。とくに*E. sargentii*は4、5、9、10月といった春や秋に、*E. occidentalis*は1、2、11、12月といった夏に高い値を

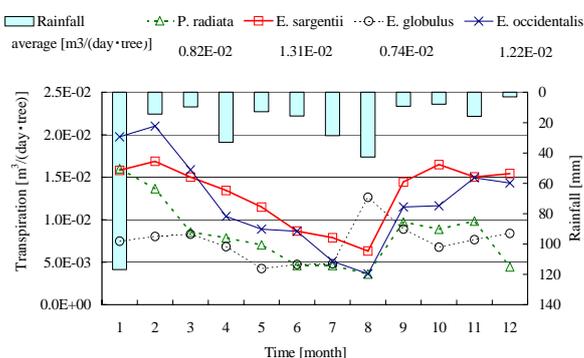


図28 降水量と各樹種の蒸散量の経時変化

示した。これら2樹種は蒸散能が高く、*E. sargentii* と *E. occidentalis* が地下水位低下に効果のある可能性を示せた。

図29に対象調査地である流域内の水収支を示す。流域への水のinputを降雨のみと仮定すると、植林木による蒸散のoutputは年間で降雨量の約40%を蒸散可能なことが明らかとなった。本研究結果は半乾燥地におけるアグロフォレストリー事業において、農地に利用できる水量や、植林による淡水害・塩害の進行抑止効果を議論する際の基礎データとなりうる。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

表7 植林サイトのパラメータと推定年間蒸散量

植林地番号	面積[m ²]	植林木数	解析手法	年間蒸散量[m ³]
A	11350			
B 3	12285	2289	実測本数より	6.89E+03
B 2	28400	3360	実測本数より	1.01E+04
B 1	36775	4095	実測本数より	1.23E+04
C	22230			
D-high	13710	1566	密度より	4.71E+03
D-low	18110	1474	実測本数より	4.43E+03
E 1	21385			
E 2	6505			
F-high	19920	2902	密度より	8.73E+03
F-low	22345	2136	実測本数より	6.43E+03
G	9110			
NO NAME	19020	3074	実測本数より	9.25E+03

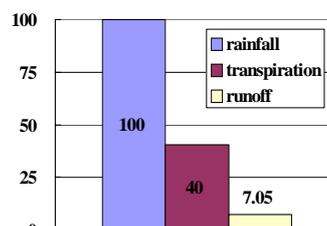


図29 本サイトにおける水収支の割合

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

(2) 地球環境政策への貢献

- ・ 荒漠地観測・解析データより、乾燥地・半乾燥地の植林計画に有益なパラメータを得ることができた。
- ・ 表面流出モデルを開発し、水年齢モデルの概念を確立したことで、広域の植林最適地選定への道筋をつけることができた。
- ・ 表面流出モデルの確立により、水・塩収支の観点から植林選定地選択を広範囲に行うことが

できるようになり、より効果的な植林によるCO₂固定に関する情報提供が可能となった。

- ・乾燥地でのリター流出プロセスとその影響が明らかになれば、リター流出防止などの技術的方策と組み合わせることで、乾燥地植林による炭素固定量の更なる増大のみならず、乾燥地の表層土壌の改善が期待できる。
- ・降雨水が最終的に塩湖から蒸発するような閉じた森林生態系における炭素循環の解明に指針を与えた。
- ・本研究成果をもとに、保水材を用いた植物成長促進技術について、より効果的な施工法・設計指針が提案できる。
- ・過度の土地利用により塩害が生じた荒廃地への植林技術を開発し、塩害地を炭素固定の場所として利用できるようにした（CDM植林技術開発）。

6. 引用文献

- (1) Trees for Saline Landscapes, 1-3 (2004) “1.1 Australia-wide perspective. (Marcar)”
- (2) Y. Abe, M. Taniguchi, T. Saito, M. Saito, M. Owada and K. Yamada: Arid Land Geography, 26, 159-162 (2003) “Comparison of two methods to estimate biomass using Landsat TM in arid Western Australia”
- (3) R. D. Archibald, R. J. Harper, J. E. D. Fox and R. P. Silberstein: Agroforestry Systems, 66-3, 191-204 (2004) “Tree performance and root zone salt accumulation in three dryland Australian plantations”
- (4) 藤野祐紀：成蹊大学理工学部応用科学化卒業論文（2007）「半乾燥地における植林場所の土壌科学性評価」
- (5) 濱野裕之，田原聖隆，小島紀徳，山田興一：農業土木学会論文集，216，33-40（2001）「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」
- (6) K. P. C. Rao, T. S. Steenhuis, A. L. Cogle, S. T. Srinivasan, D. F. Yule, G. D. Smith: Soil & Tillage Research, 48, 51-59 (1998) “Rainfall infiltration and runoff from an Alfisol in semi-arid tropical India. I. No-till systems”
- (7) P. C. D. Milly: WATER RESOURCES RESEARCH, 20-8, 1087-1098 (1984) “A Simulation Analysis of Thermal Effects on Evaporation From Soil”
- (8) 最新 河川工学（1979）：岩佐義明

7. 国際共同研究等の状況

本プロジェクトの特徴は、各調査地で有力なカウンターパートを有していることである。Sturt Meadowsでは、Minesite rehabilitation services Pty Ltd（代表者：John Law）に協力を仰いでおり、測定機器の設置、管理、植林地の管理さらには現地情報収集を委託している。本研究遂行上欠かせないカウンターパートである。

パース周辺での植林地、調査地の選定に関しては、Forest Products Commission（窓口：Dr.

Richard Harper, John Macgrath)、Green Australia (窓口: Tim Emmott) の協力を得ている。彼らとの協力により調査地での履歴記録を有する過去の植林樹木との比較も可能となる。この他、植林樹種の選定においてもForest products commissionのDr. Liz Barbourの寄与は多大である。今後の、現地調査で重要となるのは研究を支える環境作りであるが、Edith Cowan University (窓口: Associate professor Adrienne Kinnear) の協力により、共同研究のための部屋の提供や大学所有の分析機器の提供をして頂けることになっている。

この協力体制が可能となった背景には、西豪州における乾燥地 (200mm/y) での植林実績 (成功例) が非常に希であるという事実がある。そのため、上記カウンターパートは本プロジェクトとの協力により、乾燥地データとの比較が可能となるとの利益が得られる。実際、カウンターパートの何人かは本プロジェクトサイトでの測定を開始しており、相互乗り入れがされている。また、西豪州農林大臣政府関係者の視察も多い。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文 (査読あり)>

- 1) 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, 斉藤昌宏, 安部征雄, 高橋伸英, 山田興一: 水文・水資源学会誌, 16-5, 518-526 (2003) 「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」
- 2) S. Sinha, S. Kumar, T. Matsumoto, H. Hamano and T. Kojima: Arid Land Geography, 26-S, 66-71 (2003) “Salt and Water Movement in Standard Toyoura Sand: Theoretical Estimation and Experimental Evaluation”
- 3) S. Sinha, S. Kumar, K. Tahara and T. Kojima: Arid Land Geography, 26-S, 96-99 (2003) “GMS Application for Mapping Soil Profile, Hardpan Depth and Ground Water Movement for Afforestation in Arid Areas and Desert”
- 4) T. Kojima, J. Ishida, H. Hamano, K. Tahara and K. Yamada: Arid Land Geography, 26-S, 100-103 (2003) “Evaluation of Mixing Effects of Soil Conditioners under Dry Condition”
- 5) H. Hamano and T. Kojima: Arid Land Geography, 26-S, 226-229 (2003) “Water and Heat Balance Analysis in Bare Soil for a Large Scale Afforestation”
- 6) T. Saito, Y. Abe, H. Yasuda, T. Kojima and K. Yamada: Arid Land Geography, 26-S, 233-236 (2003) “Runoff Water Collection and Evaporation Control by means of Highly Permeable Ditch”
- 7) 加藤茂, 照井岳也, 藤重正洋, 上宮成之, 小島紀徳, 山田興一: Macro Review, 16-2, 3-12, (2004) 「無機保水材焼成ポー キサイトの肥料吸着と溶出」
- 8) N. Saito, S. Kato, T. Kojima, H. Hamano, K. Tahara, N. Takahashi and K. Yamada: J. Arid Land Studies, 14-S, 53-56 (2004) “Establishment of the Method to Estimate of

Water Requirement Per Unit Carbon Fixation of a Tree in Arid Land”

- 9) T. Matsumoto, S. Kato, S. Sinha, Sanjay Kumar, Y. Abe, T. Kojima and K. Yamada: J. Arid Land Studies, 14-S, 147-150 (2004) “Estimation of Water Behavior for Afforestation in Desert of Western Australia using Stable Isotope Ratio Analysis”
- 10) T. Kojima, E. Komaki, K. Hayakawa, S. Kato and H. Hamano: J. Arid Land Studies, 14-S, 151-154 (2004) “Quantitative Evaluative of Artificial Aggregate Formation”
- 11) H. Hamano, J. Ishida, T. Kojima, Y. Abe, M. Saito, N. Takahashi and K. Yamada: J. Arid Land Studies, 14-S, 219-222 (2004) “Infiltration Properties of Arid Land with Various Conditions in Leonora, Western Australia”
- 12) T. Kojima, N. Asaka, J. Ishida, H. Hamano and K. Yamada: J. Arid Land Studies, 14-S, 223-226 (2004) “Development of a Model for Large Scale Water Balance in Arid Land”
- 13) T. Hirukawa, N. Asak, C. Naito, H. Hamano, T. Kojima and K. Yamada: Proceeding of the Fifth Asia Pacific Conference on Sustainable Energy and Environment Technologies, 13-18 (2005) “A modeling methodology of large scale water balance for selection of afforestation site”
- 14) T. Kojima, S. Kaneoya, E. Komaki, H. Hamano, S. Kato and M. Matsukata: Proceeding of the Fifth Asia Pacific Conference on Sustainable Energy and Environment Technologies, 145-149 (2005) “Evaluation of mixing effect of various zeolites on soil properties”
- 15) E. Komaki, S. Kato, H. Hamano and T. Kojima: Proceeding of the Fifth Asia Pacific Conference on Sustainable Energy and Environment Technologies, 179-184 (2005) “Long term variation in soil physical properties by artificial aggregate formation”
- 16) 小島紀徳, 古牧絵莉, 加藤茂, 濱野裕之: 農業土木学会論文集, 73-3, 231-236 (2005) 「人工的団粒形成土壌の物理性評価」
- 17) H. Hamano, N. Saito, T. Kojima, S. Kato, M. Saito, A. Kinnear and K. Yamada: J. Arid Land Studies, 15-4, 231-234 (2006) “Death of Trees in the Wheat Belt Western Australia: Identification of the Causes by Chemical Analysis of Soil”
- 18) A. Kinnerar, P. Curry, T. Kojima and K. Yamada: J. Arid Land Studies, 15-4, 239-242 (2006) “Soil Mites in Re-afforested, Semi-arid Landscapes in Western Australia”,
- 19) T. Matsumoto, S. Kato, T. Abe and T. Kojima: J. Arid Land Studies, 15-4, 243-246 (2006) “Estimation of Water Availability Condition for Afforestation in Desert of Western Australia using Carbon Stable Isotope Ratio Analysis”
- 20) T. Hirukawa, N. Asaka, H. Hamano, K. Yamada and T. Kojima: J. Arid Land Studies, 15-4, 247-250 (2006) “A Modeling Methodology of Large Scale Water Balance and Salt Accumulation for Afforestation in Arid Land”
- 21) E. Komaki, Y. Umezawa, S. Kato, H. Hamano and T. Kojima: J. Arid Land Studies, 15-4,

- 279-282 (2006) "Quantitative Evaluation of Soil Improvement by Using Leaves of *Eucalyptus Camaldulensis* as a Soil Conditioner"
- 22) S. Kumer, A. Yadav and T. Kojima: J. Arid Land Studies, 15-4, 283-286 (2006) "Development of GAMS Computer Model for Renewable Energy Mix Optimization to Meet Rural Needs in Arid Areas"
- 23) T. Matsumoto and T. Kojima: J. Arid Land Studies, 16-1, 53-59 (2006) "Simulations of salt accumulation at soil surface under different annual precipitation amounts in arid Leonora area, Western Australia"
- 24) S. Kumada, T. Kawamishi, Y. Hayashi, K. Ogomori, Y. Kobayashi, N. Takahashi, M. Saito, H. Hamano, T. Kojima and K. Yamada: J. of Ecotechnology Research, 12, 167-170 (2006) "Litter and Soil Carbon Dynamics Model in Arid Forest Ecosystems: Application to Sturt Meadows Experiments in Western Australia"
- 25) K. Toshinori, H. Hamano, Y. Abe, H. Tanouchi, Y. Egashira, M. Saito, J. Law, N. Takahashi and K. Yamada: J. Arid Land Studies, 16-3, 167-174 (2006) "Basic Data of Research Project on Large Scale Afforestation of Arid Land for Carbon Fixation near Leonora in Western Australia"
- 26) 小島紀徳, 斉藤則子, 田中淑子, 濱野裕之, 加藤茂, 田原聖隆, 高橋伸英, 山田興一: 水文・水資源学会誌, 20-4, 340-346 (2007) 「西オーストラリア乾燥地における *Eucalyptus camaldulensis* の樹液中塩類の挙動」
- 27) 濱野裕之, 斉藤則子, 加藤茂, 北原弘道, 高橋伸英, 山田興一, 小島紀徳: 水文・水資源学会誌, 21-1, 32-38 (2008) 「ハードパン破碎を伴う乾燥地植林における土壌化学性評価による持続可能性の検討」
- 28) 濱野裕之, 小島紀徳, 河原崎里子, 高橋伸英: 沙漠研究, 16-1, 31-38 (2008) 「乾燥地における焼成ボーキサイトの土壌改良材としての利用」
- 29) S. Kumada, T. Kawanishi, Y. Hayashi, K. Ogomori, Y. Kobayashi, N. Takahashi, M. Saito, H. Hamano, T. Kojima and K. Yamada: Ecological Modelling (2008) "Litter carbon dynamics analysis in forests in an arid ecosystem with a model incorporating the physical removal of litter" (In Press)

<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) 小島紀徳, 加藤茂, 國澤香織里, 青木淳: 月刊「水」, 48-10 (通算690号), 61-67 (2006) 「バイオマスとCO₂そして食料生産-荒漠地植林と輸送用液体燃料」

(2) 口頭発表 (学会)

- 1) T. Kojima (Keynote): Desert Technology 7 International Conference, 9-14th Nov., Jodhpur, India (2003) "Afforestation of Desert Region and Carbon Fixation"
- 2) T. Kojima, N. Asaka, J. Ishida, H. Hamano and K. Yamada: Desert Technology 7 International Conference, 9-14th Nov., Jodhpur, India (2003) "Development of a Model for Large Scale Water Balance in Arid Land"
- 3) T. Kojima, E. Komaki, K. Hayakawa, S. Kato and H. Hamano: Desert Technology 7 International Conference, 9-14th Nov., Jodhpur, India (2003) "Quantitative Evaluative of Artificial Aggregate Formation"
- 4) N. Saito, S. Kato, T. Kojima, H. Hamano, K. Tahara, N. Takahashi and K. Yamada: Desert Technology 7 International Conference, 9-14th Nov., Jodhpur, India (2003) "Establishment of the Method to Estimate of Water Requirement Per Unit Carbon Fixation of a Tree in Arid Land"
- 5) S. Sinha, Sanjay Kumar, S. Gyan and T. Kojima: Desert Technology 7 International Conference, 9-14th Nov., Jodhpur, India (2003) "Integrated Resource Management and Renewable Energy Base Modeling to Reduce Environmental Stress, Promote Conservation and Stop Mass Migration to Urban Slums from a Semi-arid Village"
- 6) T. Matsumoto, S. Kato, S. Sinha, Sanjay Kumar, Y. Abe, T. Kojima and K. Yamada: Desert Technology 7 International Conference, 9-14th Nov., Jodhpur, India (2003) "Estimation of Water Behavior for Afforestation in Desert of Western Australia using Stable Isotope Ratio Analysis"
- 7) H. Hamano, J. Ishida, T. Kojima, Y. Abe, M. Saito, N. Takahashi and K. Yamada: Desert Technology 7 International Conference, 9-14th Nov., Jodhpur, India (2003) "Infiltration Properties of Arid Land with Various Conditions in Leonora, Western Australia"
- 8) 齊藤則子, 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: 化学工学会第68年会, 3月23日-27日, 東京 (2003) 「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」
- 9) 高橋伸英, 濱野裕之, 小林由, 齊藤昌宏, 安部征雄, 小島紀徳, 山田興一: 日本沙漠学会第14回学術大会, 5月10日, 東京 (2003) 「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」
- 10) 朝賀望, 内藤千恵, 石田丈介, 小島紀徳, 濱野裕之, 山田興一: 日本沙漠学会第14回学術大会, 5月10日, 東京 (2003) 「乾燥地における広域水収支モデルの開発」
- 11) 齊藤則子, 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: 日本沙漠学会第14回学術大会, 5月10日, 東京 (2003) 「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」

- 12) 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: 日本沙漠学会第14回学術大会, 5月10日, 東京 (2003) 「西オーストラリア乾燥地植林の炭素収支比較」
- 13) 矢沢勇樹, 佐々木理, 山口達明, 山田興一, 小島紀徳, 篠塚利之: 化学工学会第36回秋季大会, 9月11日-13日, 仙台 (2003) 「土壌の吸湿特性に及ぼす腐植物質の影響」
- 14) 朝賀望, 内藤千恵, 石田丈介, 小島紀徳, 濱野裕之, 山田興一: 化学工学会第36回秋季大会, 9月11日-13日, 仙台 (2003) 「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」
- 15) 朝賀望, 内藤千恵, 濱野裕之, 山田興一, 小島紀徳: 日本沙漠学会第15回学術大会, 5月18日, 東京 (2004) 「広域水収支モデルを用いた植林利用可能水および植林最適地の選定」
- 16) 金親暁, 古牧絵莉, 濱野裕之, 加藤茂, 小島紀徳, 松方正彦: 化学工学会沖縄大会, 11月20日-22日, 沖縄 (2004) 「石炭灰ゼオライトの土壌改良材としての評価」
- 17) 日留川知彦, 内藤千恵, 朝賀望, 濱野裕之, 小島紀徳, 加藤茂, 山田興一: 化学工学会沖縄大会, 11月20日-22日, 沖縄 (2004) 「広域水・塩収支モデルを用いた乾燥地植林可能地の推定」
- 18) 杉山恩美, 熊田俊吾, 林良茂, 川西琢也: 平成16年度日本水環境学会中部支部学術集会, 11月1日, 石川 (2004) 「荒漠地植林のリター・土壌炭素動態モデル」 (ポスター発表)
- 19) T. Matsumoto and T. Kojima: 10th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering Congress, 17-21st Oct., Kitakyusyu, Japan (2004) "Prediction of Salt Movement of Soils in Arid Land"
- 20) N. Takahashi, D. Li, J. Hacker, T. Kojima, Y. Abe and K. Yamada: 10th the Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering (APCChE), 17-21st Oct., Kitakyushu, Japan (2004) "CO₂ flux over arid ecosystem in Western Australia"
- 21) K. Yamada: Carbon sequestration research in semi-arid Western Australia, 7-8th Feb. 2005, Rivervale, WA, Australia (2005) "CO₂ Sequestration by afforestation on arid land in Western Australia"
- 22) R. Harper: Carbon sequestration research in semi-arid Western Australia, 7-8th Feb. 2005, Rivervale, WA, Australia (2005) "Prospects for carbon sequestration in Western Australia"
- 23) Y. Egashira: Carbon sequestration research in semi-arid Western Australia, 8th Feb. 2005, Rivervale, WA, Australia (2005) "Construction of platform for quantitative analyses and evaluation"
- 24) A. Kinnear: Carbon sequestration research in semi-arid Western Australia, 7-8th Feb. 2005, Rivervale, WA, Australia (2005) "The contribution of soil faunal diversity to carbon entry and sequestration in soil carbon pools: emerging issues for system function and management"
- 25) P. Ritson: Carbon sequestration research in semi-arid Western Australia, 7-8th Feb.

- 2005, Rivervale, WA, Australia (2005) "Growth, yield and carbon sequestration of *Pinus pinaster* in dryland Western Australia "
- 26) I. Dumbrel: Carbon sequestration research in semi-arid Western Australia, 7-8th Feb. 2005, Rivervale, WA, Australia (2005) "Productivity and water use of *Pinus pinaster* in south-west Western Australia "
- 27) T. Emmot: Carbon sequestration research in semi-arid Western Australia, 7-8th Feb. 2005, Rivervale, WA, Australia (2005) "Greening Australia Activities in Western Australia "
- 28) J. Law: Carbon sequestration research in semi-arid Western Australia, 7-8th Feb. 2005, Rivervale, WA, Australia (2005) "Application of the technologies to mine-site rehabilitation "
- 29) H. Hamano: Carbon sequestration research in semi-arid Western Australia, 7-8th Feb. 2005, Rivervale, WA, Australia (2005) "Flux data measurement by tower and aircraft/Water requirement for tree growth "
- 30) T. Kojima: Carbon sequestration research in semi-arid Western Australia, 7-8th Feb. 2005, Rivervale, WA, Australia (2005) "Large scale water and salt movement modeling in Sturt Meadows "
- 31) H. Hamano: Carbon sequestration research in semi-arid Western Australia, 7-8th Feb. 2005, Rivervale, WA, Australia (2005) "Introduction and future experimental plan "
- 32) L. Barbour: Carbon sequestration research in semi-arid Western Australia, 7-8th Feb. 2005, Rivervale, WA, Australia (2005) "Saline land and plant development "
- 33) K. Tomizawa: Carbon sequestration research in semi-arid Western Australia, 7-8th Feb. 2005, Rivervale, WA, Australia (2005) "Introduction of RITE afforestation project "
- 34) C. Miyake: Carbon sequestration research in semi-arid Western Australia, 7-8th Feb. 2005, Rivervale, WA, Australia (2005) "*Moringa Oleifera* Lam. (Horseradish tree) "
- 35) E. Komaki, S. Kato, H. Hamano and T. Kojima: The Fifth Asia Pacific Conference on Sustainable Energy and Environmental Technologies, APCSEET, 8-11th May, Wellington, New Zealand (2005) "LONG TIME VARIATION IN SOIL PHYSICAL PROPERTIES BY ARTIFICIAL AGGREGATE FORMATION"
- 36) T. Hirukawa, N. Asaka, C. Naito, H. Hamano, T. Kojima and K. Yamada: The Fifth Asia Pacific Conference on Sustainable Energy and Environmental Technologies, APCSEET, 8-11th May, Wellington, New Zealand (2005) "A MODELING METHODOLOGY OF LARGE SCALE WATER BALANCE FOR SELECTION OF AFFORESTATION SITE"
- 37) S. Kaneoya, E. Komaki, H. Hamano, S. Kato, T. Kojima and M. Matsukata: The Fifth Asia Pacific Conference on Sustainable Energy and Environmental Technologies, APCSEET, 8-11th May, Wellington, New Zealand (2005) "EVALUATION OF MIXING EFFECT OF VARIOUS

ZEOLITES ON SOIL PROPERTIES”

- 38) 小島紀徳：化学工学会第37回秋季大会(岡山大学)，9月16日，岡山，要旨集V213 (2005)「気候変動問題対策としての乾燥地植林」
- 39) T. Kawanishi, S. Kumada, Y. Hayashi, K. Ogomori, Y. Kobayashi, N. Takahashi, M. Saito, H. Hamano, T. Kojima and K. Yamada: 日本沙漠学会2005年度シンポジウム, 26th Aug., Toyama, Japan (2005) “Litter and Soil Carbon Dynamics Model in Arid Forest Ecosystems: Application to Sturt Meadows Experiments in Western Australia”
- 40) T. Kawanishi, S. Kumada, Y. Hayashi, K. Ogomori, Y. Kobayashi, N. Takahashi, M. Saito, H. Hamano, T. Kojima, and K. Yamada: Desert Technology VIII, Nov. 27 - Dec. 2, Nasu, Japan (2005) “Litter and soil carbon dynamics in arid forest ecosystems and its implication to carbon sequestration by arid land afforestation”
- 41) 杉山恩美, 熊田俊吾, 林良茂, 川西琢也：化学工学会第70年会, 5月23日, 愛知 (2005) 「荒漠地における植林の炭素動態モデル」
- 42) 熊田俊吾, 川西琢也, 林良茂：化学工学会第71年会, 5月28日-30日, Tokyo, Japan (2006) 「乾燥地におけるリター・土壌の炭素動態解析」
- 43) 斉藤則子, 濱野裕之, 加藤茂, 小島紀徳, 山田興一, 北原弘道, 高橋伸英：日本沙漠学会第17回学術大会, 5月27日-28日, Maebashi, Japan (2006) 「土壌改良を伴う乾燥地植林における土壌塩類濃度分布測定に基づく持続可能性の検討」
- 44) 濱野裕之, 日留川知彦, 小島紀徳, 山田興一：日本沙漠学会第17回学術大会, 5月27日-28日, Maebashi, Japan (2006) 「乾燥地植林のための表面流出モデル構築および広域展開手法の確立」
- 45) 橋本篤, 小西則, 江頭靖幸, 上山惟一, 小島紀徳, 山田興一：日本沙漠学会第17回学術大会, 5月27日-28日, Maebashi, Japan (2006) 「炭素アカウンティングシステムへのプロセススペースモデルの統合による乾燥地植林シミュレーターの開発」
- 46) T. Kojima, T. Hirukawa, N. Asaka, H. Hamano and K. Yamada: 11th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineers, APPChE, Congress, 585, 4, Kuala Lumpur, Malaysia (2006) “MODELING METHODOLOGY OF WATER BALANCE AND SALT ACCUMULATION IN DIFFERENT SCALE FOR AFFORESTATION IN ARID LAND”
- 47) S. Kaneoya, H. Hamano, E. Komaki, T. Kojima, S. Kato and M. Matsukata: 11th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineers, APPChE, Congress, 585, 4, Kuala Lumpur, Malaysia (2006) “EFFECTS OF ZEOLITES MIXED AS SOIL CONDITIONER ON SOIL PROPERTIES”
- 48) Y. EGASHIRA, H. HASHIMOTO, K. UEYAMA, H. UTSUGI, H. TANOUCHI, N. TAKAHASHI, S. KAWARASAKI, H. HAMANO, T. KOJIMA and K. YAMADA: International Conference on Ecological Modeling 2006, 28th Aug.-1st Sep., Yamaguchi, Japan, 2 (2006) “Development of Simulator for Tree Growth and for Carbon Fixation in Arid Conditions by Integration of Process Based Models into Carbon Accounting System”

- 49) S. Kumada, T. Kawanishi, Y. Hayashi, K. Ogomori, Y. Kobayashi, N. Takahashi, M. Saito, H. Hamano, T. Kojima and K. Yamada, International Conference on Ecological Modelling 2006, Aug. 28 – Sep. 1, Yamaguchi, Japan, 2pp. (2006) “Modeling litter and soil carbon dynamics in Arid land: Application to Sturt Meadows Experiments in Western Australia”
- 50) H. Hamano, T. Hirukawa, N. Asaka, K. Yamada and T. Kojima: International Conference on Ecological Modeling, ICEM2006, Yamaguchi, Japan, 2pp. (2006) “Construction of Runoff Model Predicting Large Scale Water Balance with Salt Accumulation for Large Scale Afforestation of Arid Land”
- 51) 小柳卓, 岩佐悠里子, 飯室淳, 日留川知彦, 濱野祐之, 小島紀徳, 山田興一: 化学工学会第37回秋季大会, 15-17th Sep., Okayama, Japan (2006) 「乾燥地植林のための広域展開を目的とした表面流出モデルの開発」
- 52) 金親暁, 鈴木絵里, 浜野裕之, 里川重夫, 小島紀徳, 松方正彦: 化学工学会第37回秋季大会, 15-17th Sep., Okayama, Japan (2006) 「形状の違うゼオライトの土壌改良材としての比較」
- 53) 小島紀徳: 第8回秋田エネルギー教育研究会講演会, 第12回石炭化学コロキウム, 9.22, 秋田 (2006) 「CO₂制約下でのエネルギー・地球環境戦略」
- 54) N. Takahashi, H. Tanouchi, H. Utsugi, S. Kawarazaki, H. Hamano, T. Kojima and K. Yamada: 6th International Workshop on Measuring Xylem Sap Flow and its Application to Plant Science, 27-30th Nov. Perth, Australia (2006) “Water use efficiency of native and planted trees in an arid region of Western Australia”
- 55) P. S. Vijayanand, S. Kato, S. Satokawa and T. Kojima: 6th ANQUE INTERNATIONAL CONGRESS OF CHEMISTRY “CHEMISTRY AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT”, Puerto de la Cruz, Tenerife, Spain, 5-7th Dec. (2006) “NOVEL BIODEGRADABLE GRAFT COPOLYMERS FROM BIOMASS: A RENEWABLE RESERVOIR TO SUPERABSORBENTS FOR ARID LAND AFFORESTATION”
- 56) S. Kumada, T. Kawanishi, Y. Hayashi, H. Hamano, S. Kawarasaki, N. Takahashi, Y. Egashira, H. Tanouchi, T. Kojima and K. Yamada: China-Japan Ecotechnology Seminar-2006, Shenyang, 23rd Oct., Shenyang, China (2006) “Litter removal patterns and potentials in an arid land forest ecosystem”
- 57) 山田興一, 小島紀徳, 安部征雄: 科学技術振興機構 産学錬成推進部 技術移転支援センター 新技術説明会科学技術振興機構 東京本部, 7.28, 東京 (2006) 「乾燥地植林のための土地改良方法 (特願2003-103345 特開2004-305098 PCT/JP2004/004619)」
- 58) 熊田俊吾, 川西琢也, 林良茂, 浜野裕之, 河原崎里子, 高橋伸英, 江頭靖幸, 田内裕之, 小島紀徳, 山田興一: 化学工学会第72年会, 京都, 19-21st Mar. (2007) 「西オーストラリア州レオノラ近郊の乾燥地林におけるリター流出挙動」
- 59) 平松享, 熊田俊吾, 林良茂, 川西琢也: 化学工学会第72年会, 京都, 19-21st Mar. (2007)

「乾燥地植林における保水材の混入による乾燥速度の抑制」

- 60) 河原崎里子、金親暁、相川真一、田内裕之、小島紀徳、山田興一：日本沙漠学会第18回大会，京都，5月19日-20日（2007）「西オーストラリア州塩害小麦地帯における植林木の耐塩性」
- 61) S. Kumada, T. Kawanishi, Y. Hayashi, H. Hamano, S. Kawarasaki, N. Takahashi, Y. Egashira, H. Tanouchi, T. Kojima, A., Kinnear and K. Yamada: 14th Asian Symposium on Ecotechnology, Suwon, Korea, 5-6th Oct. (2007) “Litter Removal Behavior by Natural Causes in Sturt Meadows in an arid region of Western Australia” (ポスター発表)
- 62) S. Kumada, T. Kawanishi, Y. Hayashi, H. Sukanuma, H. Hamano, S. Kawarasaki, N. Takahashi, Y. Egashira, H. Tanouchi, T. Kojima and K. Yamada: The 4th Joint China/Japan Chemical Engineering Symposium, Chengdu China, 20th Dec. (2007) “Modeling and Analyzing of Litter-Soil Carbon Dynamics in an Arid Land Forest Ecosystem” (ポスター発表)
- 63) Y. Oda, S. Kaneoya, H. Hamano, S. Aikawa, S. Kawarasaki, H. Tanouchi, T. Kojima, K. Yamada : The 14th Asian Symposium on Ecotechnology, Suwon, Korea, 5-6th Oct. (2007) “Development of sapling cultivation technology for afforestation of salt affected land.”
- 64) S. Kumada, T. Kawanishi, Y. Hayashi, H. Sukanuma, H. Hamano, T. Kojima and K. Yamada: The 2nd International Forum on Ecotechnology, Vildbjerg, Denmark, 10-15th Mar. (2008) “Analysis of Carbon Dynamics of an Arid Ecosystem in Sturt Meadows, Western Australia -Physical Removal of Litter and its Effect- “
- 65) 熊田俊吾，大園侑利，川西琢也，林良茂，菅沼秀樹，濱野裕之，小島紀徳，山田興一：化学工学会 第73年会，静岡（2008）「西オーストラリア州Sturt Meadowsに広がる乾燥地植生の炭素動態解析」
- 66) 大園侑利，熊田俊吾，川西琢也，林良茂，菅沼秀樹，濱野裕之，小島紀徳，山田興一：化学工学会 第73年会，浜松，3月17日-19日（2008）「西オーストラリア州レオノラ近郊の乾燥地における植生と土壌炭素の関係」
- 67) 平松享，熊田俊吾，林良茂，川西琢也：化学工学会 第73年会，浜松，3月17日-19日（2008）「乾燥地植林における保水材の混入位置による保水効果の差異の検討」

(3) 出願特許

- 1) 山田興一，小島紀徳，安部征雄：科学技術振興機構・産学錬成推進部・技術移転支援センター・新技術説明会科学技術振興機構；「乾燥地植林のための土地改良方法」国際特許以降手続き，特願2003-10334，特開2004-305098，PCT/JP2004/004619，2004.3.31

- 2) 山田興一, 小島紀徳, 安部征雄: 科学技術振興機構・産学錬成推進部・技術移転支援センター・新技術説明会科学技術振興機構;「乾燥地植林のための土地改良方法」特願2003-10334, 特開2004-305098, PCT/JP2004/004619, 2003. 4. 7

(4) シンポジウム、セミナーの開催 (主催のもの)

- 1) Workshop on carbon sequestration research in semi-arid Western Australia (7-8th Feb. 2005, FPC Cong. Center (Rivervale, Western Australia, Australia))
- 2) Desert Technology 8 International Conference (27th Nov. -2nd Dec. 2005, Hotel Epinard Nasu (Nasu, Japan), 74 persons)

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 小島紀徳: シリーズ・地球と人間の環境を考える-05「エネルギー」風と太陽へのソフトランディング, 204p (日本評論社 (2003))
- 2) 小島紀徳: エネルギー便覧 (資源編), 1. 総論編, pp. 3-44 (除く、4章) (日本エネルギー学会編, コロナ社 (2004))
- 3) 小島紀徳: NHK高校講座 理科総合A・B 「エネルギーを利用しつつも環境を守るには?」 (2003年12月3日, 5, 2004年4月6日, 5月27日, 12月1日, 12月3日, 2005年6月2日, 11月30日, 12月2日, 2006年6月9日放送, 「いつまで使える?化石燃料」の回で本プロジェクトによるオーストラリアの植林の映像を放映・取材, NHK)

(6) その他

特に記載すべき事項はない。