# 要素技術を用いた砂漠化防止の試み

## ── 西オーストラリアにおける展開事例 ──

石川祐一＊・青木卓也＊＊・松本聰＊＊
（＊秋田県立大学生物資源科学部，＊＊東京大学大学院農学生命科学研究科）

**摘　要**

砂漠化で代表される土壌の疲弊は乾燥地・半乾燥地を中心に世界的規模で進行している。砂漠化という言葉から連想されるような植生の減少・消失ばかりでなく、肥沃度の低下や塩類集積などの土壌荒廃を伴うことが多い。植生の減少に対する早急な対策が求められているが、これらの土壌荒廃に対しても留意することが必要である。現在日豪共同による「環境修復と乾燥地農法の確立に関するプロジェクト(Developing Environmental Rehabilitation and Arid Farming Systems; DERAFS)」が西オーストラリアで進行中である。植生回復および作物生産の基本的な要因に関わる既存の要素技術を組み合わせ、体系的な植生回復技術を提案することを目的としている。植物・土壌・水資源という３つの観点から次のような結果が得られた。(1)植物に関しては、塩水灌漑による選抜試験によって初期の植生回復に有効な強耐塩性樹木５種が選抜された。また、商業的価値の高いsandalwood(*Santalum spicatum*)が植物遺体の薫蒸水によって著しく発芽促進されることが示された。(2)土壌に関しては、塩類土壌の改善方法として耐塩性植物(*Atriplex* sp.)への塩吸収によって根圏域の塩分環境が改善されることが示された。さらに耐塩性植物に非耐塩性植物を随伴させる植栽法(コンパニオンプラント法)によって非耐塩性植物の導入が可能になることが示された。また、家畜排泄物を主成分としたコンポストポットの添加によって、植物の成長が著しく促進された。(3)水資源に関しては、太陽熱を利用した簡易な浄水装置によって良質な水資源を創出することが可能であり、保水材・マルチによる節水灌漑技術を組み合わせることで植生の回復に利用できることが示された。

以上の結果を鑑み、体系的な植生回復・作物生産技術を提案した。このモデルプランは汎用性が高く、今後西オーストラリア以外にも展開されることが期待される。

**キーワード**：砂漠化防止、耐塩性植物、西オーストラリア、水資源、要素技術

## １．はじめに

1994年６月に砂漠化対処条約が採択され、日本も1998年12月に条約を締結した。当該国政府機関・研究施設ばかりでなく、地球的規模の環境問題として一層の国際的な協力活動を推進していくことが必要である。

国土の大部分が乾燥・半乾燥地域に属するオーストラリア、特に西オーストラリアでも砂漠化の進行は顕著であり、その対策が求められている。西オーストラリアの砂漠化の特徴として次の２点が挙げられる。

１)金・マンガンなどの鉱業が盛んであり、特に露天掘りによって植生の完全な破壊・表層土壌の攪乱が引き起こされること。

２)特に内陸部では降水量が少なく、大河川が存在しないため、塩類の溶脱が未熟である。そのため、土壌表層への塩類化を引き起こしやすいこと。

オーストラリア政府は廃鉱になった鉱山跡地の植生回復を義務づけており、また世界的に希有な生物資源を保護するために生態学的なアプローチによる植生回復が行われてきた。

一方、日本では、1980年代から砂漠化防止に有効と考えられる様々な技術が提案されてきた。水資源開発・効率的利用法、土壌の肥沃性維持・増進技術、栽培技術など多岐に渡るこれらの技術をライブラリー化したものは要素技術と呼ばれている[1]。要素技術の多くは国内でのモデル実験にとどまり海外での実証例は多くはなかった。

このような背景から西オーストラリアをモデル地域とした日豪共同の環境修復と乾燥地農法の確立に関するプロジェクト（Developing Environmental Rehabilitation and Arid Farming Systems; DERAFS)が行われている[2]。本報ではこのプロジェクトの概要および現在まで得られた成果について報告する。

表1　表層土壌の理化学性

| 測定項目<br>採取深度 | 土性 | pH<br>$H_2O$抽出 | EC<br>$dS \cdot m^{-1}$ | CEC<br>$cmol(+) \cdot kg^{-1}$ | $P_2O_5$<br>$mg \cdot kg^{-1}$ | Total N<br>% | Total C<br>% | C/N |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0－5cm | 砂壌土 | 7.8 | 3.5 | 6.2 | 6.1 | 0.03 | 0.23 | 8.0 |
| 5－10cm | 砂壌土 | 8.1 | 2.1 | 5.4 | 8.8 | 0.02 | 0.17 | 9.3 |

## 2．プロジェクトおよびサイトの概要

DERAFSは1995年に開始された。推進体制としては、日本側が東京大学、国際環境研究協会、オーストラリア側がカーティン工科大学および地域開発政府機関のゴールドフィールド・エスペランス開発公社である。

実証圃場は、西オーストラリア州内陸に位置するカルグーリー・ボールダー市郊外のクンダナ金鉱山敷地内に設営した。すでに採鉱が中止された露天堀採掘鉱の埋め立て地であり、数年が経過している。そのため土壌は完全に攪乱された状態で土層は不明瞭であり、深度によりやや粒度の差異が見られた[3)]。

表層土の理化学性を表1に示す。表層土の電気伝導度(EC)は平均2 dS/mと高く、10 dS/mを越えた地点も見られた。また土壌有機物に乏しく、肥沃性が低いことが分かる。そこで、このような土壌特性を念頭に置き「植物」「土壌」「水」という植生回復・生物生産に関する基本的な技術について検討し、これらの技術を体系化し回復技術として提案することをプロジェクトの目的とした(図1)。以下、それぞれの成果について述べる。

## 3．有用植物の検索

### 3.1　耐塩性植物の検索

西オーストラリア州内では、州農業省、州土地保全局らによって土壌・植生調査が全土に渡り精力的に行われている[4)5)]。これらを参考に圃場周辺で行った植生調査からもっともよく観察される樹木種4種、灌木種10種、および花卉・野菜9種を候補として、発芽試験・定植を行い、発芽率・活着率を測定した。

発芽試験は種子をシャーレの中で4週間、保温静置し、その間の発芽した種子の割合を発芽率とした。

育苗は寒冷紗を張ったシェードハウスの中で行った。375 mL容の角形プラスチックポットに砂質土：シルト質土＝1:1混合物を培土として詰め、ポット表面をバーミュキュライトで覆土した。育苗中は日中2時間おきに6回、1回あたり7～8 mmをスプリンクラーで散水した。灌漑水には、市内の処理水(TDS：500～1,000 ppm)を用いた。

発芽後約1週間後に間引きを行い、4ヶ月後に定植を行った。塩水(TDS約0.4%)を5 mm/day灌漑した。灌木は2ヶ月後、花卉・野菜は1ヶ月後に最初の成育調査を行い、その時点まで生存していた苗数と定植数の比を活着率とした。

選抜した植物種およびその発芽率、活着率を表2に示した[6)]。

樹木種の発芽率は*Acacia* spp.が90%以上と高かった。*Eucalyptus*属の種子は非常に小さく(0.5 mm以下)、計測するのが困難なため、単位重量(g)当たりの発芽数として算出したが、実用的に十分な発芽数が得られた。

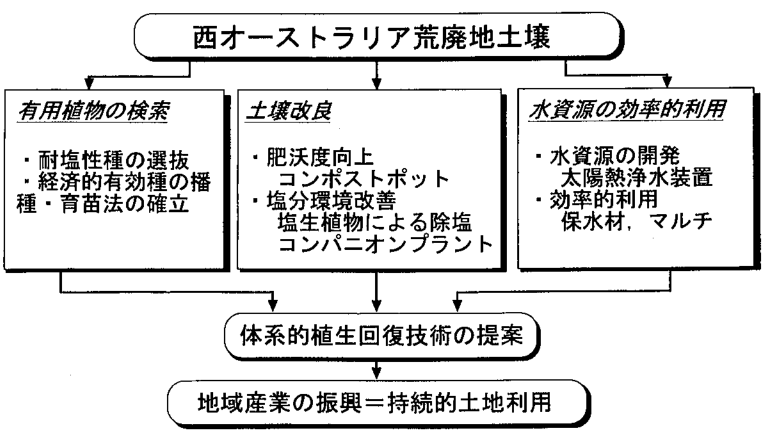


図1　プロジェクトの概要

表２　供試植物種とそれらの発芽率・活着率[6)]

| | 植物種 | 発芽率(%) | 活着率(%) |
|---|---|---|---|
| 樹木種 | *Acacia craspedocarpa* | 92.0 | 39.6 |
| | *Acacia acuminata* | 89.0 | 87.1 |
| | *Eucalyptus torquata* | 120(本/g) | 6.3 |
| | *Eucalyptus salubris* | 354(本/g) | 82.3 |
| 灌木種 | *Atriplex bunburyana* | 4.5 | 1.0 |
| | *Atriplex vesicaria* | 66.8 | 96.0 |
| | *Cralystylis subspinescens* | 4.4 | 0.0 |
| | *Dodonea lobulata* | 14.5 | 0.0 |
| | *Frankenia* sp | 3.5 | 86.7 |
| | *Maireana brevifolia* | 30.5 | 69.4 |
| | *Maireana georgei* | 79.0 | 0.0 |
| | *Senna artemesioides* ssp. *artemesioides* | 46.5 | 7.6 |
| | *Senna artemesioides* ssp. *filifolia* | 46.0 | 9.9 |
| | *Senna artemesioides* ssp. *sturtii* | 56.5 | 10.2 |
| 花卉・野菜類等 | Petunia | 10.5 | 0.0 |
| | Onion | 98.7 | 39.0 |
| | Baby Corn | 97.8 | 30.2 |
| | Carrot | 98.0 | 5.7 |
| | Gazania | 99.0 | 71.6 |
| | Chrysanthemum | 93.0 | 2.0 |
| | Sorghum | 98.5 | 2.0 |
| | Tomato | 99.0 | 31.3 |
| | Melon | 99.0 | 1.0 |

灌木種は*Maireana georgei*を除き、70%以下であった。花卉・野菜類はpetuniaを除き、90%以上と非常に高い発芽率を示した。種の採取時期、気候状況によって発芽率が大きく変動することがあり、そのためにも発芽試験が必要不可欠であると考えられる。

一方、活着率をみると、高木種では、*Acacia acuminata*、*Eucalyptus salubris*、灌木種については*Atriplex vesicaria*、*Maireana brevifolia*、*Frankenia* sp. の活着率が70%以上と高い値だったのに比較して、*Acacia craspedocarpa*、*Eucalyptus torquata*、および上述３種以外の灌木種の活着率は低い値であった。これらの樹種は前の３種ほど耐塩性が強くはなく、移植および灌漑水中の塩分ストレスで多くの苗が枯死してしまったと考えられる。また、花卉野菜類はgazaniaが70％を越えた以外は、30％以下であった。

活着率の良好だったこれら樹木２種、灌木３種は、塩水灌漑という非常にストレスのかかった状態でも活着・成育が可能であり、耐塩性に優れていると考えられる。特に灌木種は初期成育も速くパイオニアプラントとして初期の植物の導入、つまり植生の回復・表土の固定、被覆に優れた樹種であるといえる。

### 3.2　経済的有効種の播種・育苗法の確立

前項のパイオニアプラントに加えて、産業振興に役立つような経済種も選抜していくことが、地場産業の発展のためには必要である。

そこで、このような経済種の候補としてsandalwood(和名:ビャクダン、*Santalum spicatum*)を挙げた。sandalwoodは芳香性に優れ、薬品や香料、装飾品の原料としての利用価値が高い。アジア諸国への輸出は19世紀初頭から行われてきたが、乱開発によってその数は激減し、現在では州政府による保護の下でのみ伐採が行われている。現在の伐採量と現存量から試算した結果、伐採可能な年数は約60年と考えられており[7)]、植林は早急な課題である。

オーストラリアに自生するsandalwoodは６種存在するが、このうち育林に成功しているのは商業的な価値の劣る*S. lanceolatum*である。より商業的価値の高い*S. spicatum*、*S. album*については、*S.album*は育苗・育林が実証段階に入った[8)]が、*S.spicatum*の育苗法については全く確立されていない。そこで、*S. spicatum*の育苗・育林のための基礎実験として播種法の検討を行った。

播種前処理として、表皮の研磨(scarify)、植物遺体の薫蒸水処理(smoke water[9)])を施した後、発芽試験(n=100)を行った。発芽率の経時変化を図２に示した。

州土地保全局で行われている粗放的な播種試験による発芽率が20%程度[10)]だったのに比べて、薫

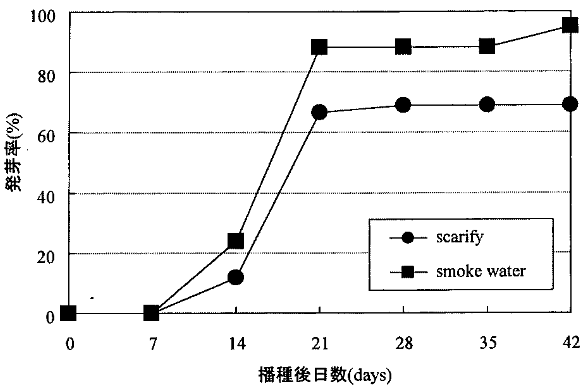


図２　*Santalum spicatum* 発芽率の変化

薫水処理、研磨処理による発芽率は播種後６週間でそれぞれ94%、70%と高い値を示した。山火事による植生遷移からオーストラリアの植物が煙によって休眠打破される可能性が指摘され、薫蒸水による発芽促進が多くの種に対して行われているが[9]、sandalwoodの発芽促進が確認されたのは本研究が初めてである。

今後、宿主植物の選抜・定植法についてさらに検討し、人工育林法の確立を目指す予定である。

## ４．土壌改良

### 4.1　塩分環境改善

塩類化した土壌の改善方法として、植物体を用いる方法を検討した。3.1で検討した*A. vesicaria*、*M. brevifolia*および実験開始後圃場内に自生した耐塩性植物３種（*Atriplex lindleyi*、*A. codonocarpa*、*Halosarcia* sp.）の葉中のナトリウム濃度および乾重量を測定した結果を表３に、*A. lindleyi*の根圏域土壌の電気伝導度（EC、1:5水抽出）を図３に示した[3]。

葉中のナトリウム濃度および乾重量から概算した一植物体当たりの塩吸収量は最大の*A. lindleyi*で44.6 gとなり、また根圏域土壌ではECが有意に低下したことから、これらの植物の周囲では塩分環境の改善が進んでいることが示された。

さらに、耐塩性植物を非耐塩性植物に随伴して定植するコンパニオンプラント法[6]により、*Acacia craspedocarpa*、*Ac. jenera*を*A. lindleyi*の根圏域に灌水条件下で定植した結果（n=15）を図４に示した。いずれの種も*A. lindleyi*の存在下で高い活着率を示し、その効果は半年に渡って持続した。上述の除塩により塩分環境が改善されたことに加えて、幼苗には強いストレスとなる風・日射を和らげる遮蔽効果があったと考えられる。

このように植物によって除塩を行うことは可能であり、特に非耐塩性樹木の定植には効果が高かった。このことは、従来のように予め除塩した後に、植栽するというプロセスをある程度簡略化でき、非耐塩性植物の導入をより容易にできる可

表３　耐塩性植物葉中のナトリウム含量および塩吸収量

| | n | Na(%) | 生重量(g) | 乾重量(g) | 塩吸収量(g Na·plant-1) |
|---|---|---|---|---|---|
| ***A.codonocarpa*** | 21 | 12.2±3.41$^{b}$ | 190±91.7$^{b}$ | 109±64.7$^{b}$ | 13.0±0.77$^{b}$ |
| ***A.Lindleyi*** | 20 | 13.8±1.88$^{ab}$ | 706±381$^{a}$ | 326±185$^{a}$ | 44.6±26.4$^{a}$ |
| ***A.vesicaria*** | 10 | 13.4±1.79$^{ab}$ | － | － | － |
| ***Halosarcia*** **sp.** | 5 | 8.68±6.03$^{c}$ | 242±201$^{b}$ | 66.3±58.7$^{b}$ | 4.96±3.90$^{b}$ |
| ***M. brevifolia*** | 4 | 15.4±3.47$^{a}$ | 127±129$^{b}$ | 28.3±37.6$^{b}$ | 5.20±7.65$^{b}$ |

**表中の数値は平均値±S.D. 異なるアルファベットは統計的に有意差（$p<0.05$）があることを示す**

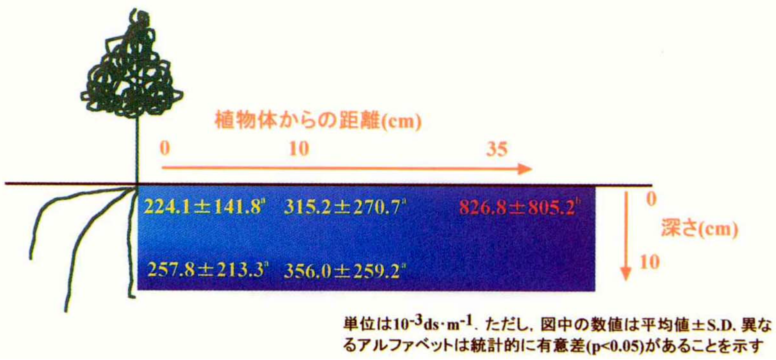


図３　植物根圏の塩の分布

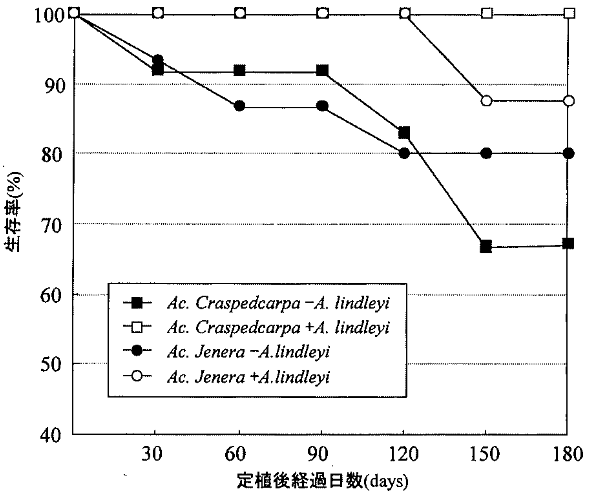


図 4　*A. lindleyi*の有無による*Ac. craspedocarpa*,*Ac. jenera*の生存率の変化

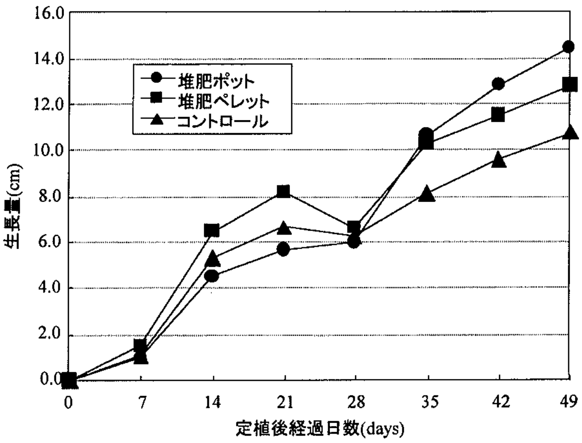


図 5　堆肥ポット・ペレットのインゲンに対する施用効果

能性を示している。

### 4.2　低肥沃性の改善

さらに土壌に関するもう一つの問題点である低肥沃性の改善も試みた。入手容易な有機物源として家畜糞尿が挙げられるが、今回は馬糞を用い、その効果的な投入方法を検討した。馬糞と小麦粉の 1 : 1 混合物 (3.8 gN相当) をポット型およびペレット型に成型し、土壌に埋設・混合した。栽培植物はインゲンを用い、圃場へ直接播種・灌水条件下 (n=10) で栽培した。

成長量の変化を図 5 に示した。栽培初期には堆肥ペレット施用区の成長が良好であったが、栽培後期には堆肥ポット施用区が最も良好な成育を示し、最終的に収穫が可能であったのは堆肥ポット区のみであった。

初期成育においてペレット状の方が有効であったのはポット状の施用ではポット内縁部に根が到達するまでに時間がかかり、不均一に混合したペレット状の方が植物への養分供給が容易であったと考えられる。栽培後期では根が十分に伸長したために、ポット施用区の方がより効率的に養分供給が行われ、さらにポット状の形状により保水力を高める効果もあったと考えられる。

このように有機物を植物根圏に集中的に投入することで、低肥沃度の土壌でも十分作物生産が可能であることが示された。

## 5. 水資源の効率的利用

### 5.1　太陽熱を利用した水資源の良質化

乾燥地域に属する西オーストラリアでは夏季の晴天日の日射量は24～28 MJ/$m^2$/dayに達する。得られる日射エネルギーは非常に大きなもので、この太陽光資源を淡水化に用いる方法について検討した。

図 6　太陽熱を利用した浄水装置

淡水化装置を図 6 に示した。透明な屋根面を採光面とし、密閉した装置の中には原料水を入れた水盤を設置した。透明な屋根面を通過した太陽光によって原料水は加温・蒸発し、屋根面表面で凝結、側面に設置した樋に純水として回収される。同様の装置は多数考案されているが[11)]、採光透過面に親水性膜を用いた。水滴が屋根面表面から樋に集水される前に滴下することが少なくなり、採水量が大きくなることが期待される。

1997年12月～1998年 2 月の夏季に得られた 1 日あたりの採水量と日射量の関係を図 7 に示した。砂塵の被膜等フィルム表面の状態によりばらつきはあるものの要水量の最も大きい真夏に 2 - 4 L/$m^2$/dayの収量を得ることができた。

今回は 6 $m^2$という比較的小規模の装置でのモデル実験であり、この水量からは、飲料水・生活用水としての利用が最も効果的であると考えられる。しかしながら、装置の大型化あるいは装置を連結させることで設置面積を増大させ、特に有用な付加価値の高い樹木・作物に集中的に節水灌漑を行うことで、灌漑水としての利用も可能である

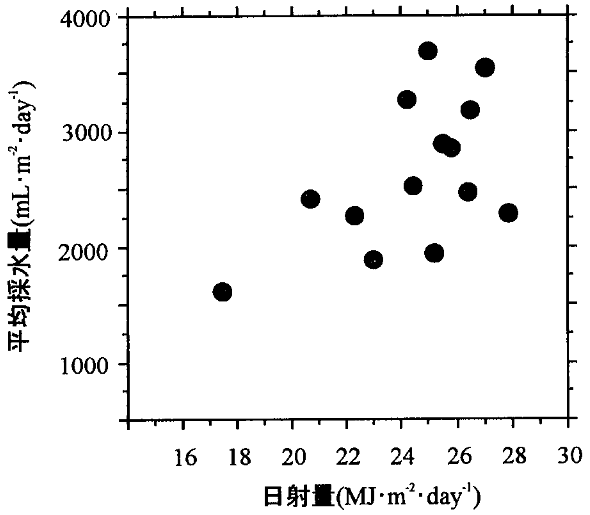


図7　回収された水量と全日射量の関係

と考えられる。

### 5.2　保水材およびマルチによる成育促進

次に水資源の効率的利用のために3.1で選抜された灌木3種(*A. vesicaria*、*M. brevifolia*、*Frankenia* sp.)に保水材(植物が吸水し易いよう吸水倍率を下げ、架橋体にN-ビニルアセトアミドを用いた耐候性ポリマー)、マルチ(バークによる被覆)を施用し、それらの成長促進効果を試験した。バイオマス体積(樹高×樹幅(広)×樹幅(狭))で表した結果(n=48)を表4に示した。

保水材施用による植物の成育促進は明らかであったが、マルチ施用は有意に成長を促進させるとはいえなかった。保水材による土壌水分の保持増強効果は働いているにも関わらず、マルチによる蒸発抑制効果が機能しなかったのは毛虫の誘因作用が考えられる。*M. brevifolia*で毛虫による虫害が発生したところから、施用時期について今後も検討する必要がある。

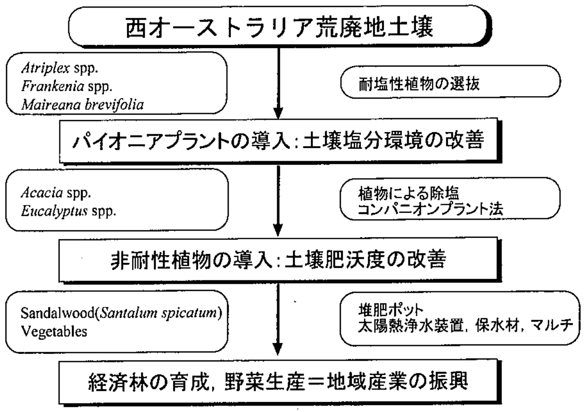


図8　植生回復モデルプラン

## 6．要素技術の体系化

上述してきた要素技術から考えられる体系的な植生回復・生物生産技術として、図8が考えられる。

1)まず、耐塩性植物を選抜・導入することで、土壌塩分環境の改善を行う。

2)その後、除塩・コンパニオンプラント法によって塩分感受性の植生を導入し、肥沃度の改善を図る。

3)さらに、経済林・野菜などの商業的価値のある植生の導入・作物生産には堆肥ポット、良質な水資源を集中的に導入するというものである。

このモデルプランは非常に汎用性が高いと考えられる。なぜなら、図中青色で示した代表的な植生は他の地域でも必ず該当する植生が考えられるし、経済種は現地のニーズに合ったものを選ぶことが可能である。また、図中赤色に示した要素技術は最先端の技術というものは少なく、他の地域でも保守管理が容易であり、加工の必要な堆肥ポット、薫蒸水、マルチ資材などは現地で入手可能で、技術転移が容易であるからである。

表4　各樹種に対する保水材、マルチの施用効果

| 植物種 | 処理 | 施用区($cm^3$) | 無施用区($cm^3$) |
|---|---|---|---|
| *A. vesicaria* | 保水材 | 122,000± 97,000** | 92,000±84,000 |
| | マルチ | 117,000±100,000 | 98,000±82,000 |
| *Frankenia* sp. | 保水材 | 8,150± 6,520** | 7,500± 4,700 |
| | マルチ | 7,990± 6,280 | 7,550± 5,000 |
| *M.brevifolia* | 保水材 | 91,700± 10,500** | 63,900±65,100 |
| | マルチ | 70,000± 84,000 | 84,000±91,000 |

ただし，表中の値は仮体積(平均値±S.D.) **: $p<0.01$

今後さらに異なる立地環境の下でこのモデルプランの再検討を行い、汎用性の高さを確認する必要がある。将来的には西オーストラリアのみならず、アフリカ諸国をはじめとする他の砂漠化進行地域にも展開することが期待される。

謝　辞

この研究は環境庁地球環境総合推進費によって行われた。この場を借りて関係諸氏に感謝いたします。

また、堆肥ポットの製作をご指導いただいた玉川学園大学小川人士講師に感謝いたします。

## 参考文献

1) (社)日本砂漠開発協会(1995)砂漠開発要素技術, 2 p.

2) Ishikawa, Y., M. Kubota, Y. Hiraga, Y. Taki, Y. Takagishi, Y. Yamaguchi, M. Ishikawa, R. Nakata, H. Miyamoto, and S. Matsumoto (1998) Developing environmental rehabilitation and arid farming systems: A research project in Kalgoorlie. 沙漠研究, 7 (S), 277-280.

3) 青木卓也, 松本聰(1999)西オーストラリア・カルグーリーにおける土壌改良, 植生回復. 沙漠研究, 9, 223-228.

4) Cunningham, G. M., W. E. Mulham, P. L. Milthorpe, and J. H. Leigh, (1981) *Plants of Western New South Wales*. Soil Conservation Service of NSW.

5) Pringle, H. J. R., A. M. E. Van Vreeswyk, and S. A. Gilligan, (1994) *An inventory and condition survey of rangelands in the North-Eastern Goldfields, Western Australia.* Western Australian Department of Agriculture, Technical Bulletin Number, 87.

6) 松本 聰(1999)塩性・低肥沃土壌の造成地における有用資源植物の導入とその生育特性. 環境技術, 28, 20-24.

7) McKinnell, F. H. (1990) Status of management and silviculture research on sandalwood in Western Australia and Indonesia. Proceedings of the Symposium on Sandalwood in the Pacific, 19-25.

8) Radomiljac, A. M., J. A. McComb, and S. R. Shea, (1998) Field establishment of *Santalum album* L. -the effect of the time of introduction of a pot host (*Alternanthera nana* R. Br.). *Forest Ecology and Management*, 111, 107-118.

9) Dixon, K. W., S. Roche, and J. S. Pate, (1995) The promotive effect of smoke derived form burnt native vegetation on seed germination of Western Australian plants. *Oecologia*, 101, 185-192.

10) Kealley, I. (1989) Fragrant Harvest. *Landscope*, Winter edition, 35-52.

11) 遠藤勲, 安部征雄, 小島紀徳 (編) (1998)沙漠工学. 森北出版, 115-119p.

(受付2000年1月11日、受理2000年8月21日)