

「資源循環・エネルギーミニマム型システム技術」

平成10年度採択研究代表者

山田 興一

(信州大学繊維学部 教授)

「乾燥地植林による炭素固定システムの構築」

1. 研究実施の概要

未利用乾燥地大規模植林による持続可能な炭素固定システムの確立を目的とし、西オーストラリアLeonora近郊の乾燥地（平均年間降水量：216 mm）を研究対象地として、土壌物性、樹木特性、水環境、気象に関する基礎データを取得し、土壌、樹木、大気を統合した緑化シミュレータの構築を行うとともに、対象乾燥地に適した緑化技術を提案し、実際に植林試験を行うことにより、その評価を行ってきた。

今年度は、緑化シミュレータをより現実に即したものに改良するため、各種樹木特性をより詳細に測定、検討した。生態系の炭素収支を把握するために地上での各種測定を行うと共に、小型航空機、タワーを用いた上空での炭素フラックス観測を行った。また、対象地における可能炭素固定速度の推定に向け、利用可能水量、広域水移動、植林可能地域などを明らかにするための各種測定、モデルの構築に着手した。

2. 研究実施内容

(1) 全体システム構築グループ

新規植林技術の提案、実証、全体システムの構築、炭素固定ポテンシャルの推定を目指し、今年度は以下のように研究を行った。

植林サイト（Site A～G, T）では樹木成長、土壌水分、気象環境などを継続的に測定した。Site Dでは、灌水を停止することによる樹木成長への影響を調べ、樹種によりその影響が異なることを確認した。樹種によっては既に灌水に頼らず自立できるものが確認された。Site Eでは、20 mm程度の降雨後、近隣からの流入水がバンクによりうまく貯留され、その際植栽エリアでもあるバンクには浸透促進技術（スリット付パイプ、トレンチ）により貯留された水が深部に浸透していることが確認された。Site Tでは、植林から1年の活着期間を経て、Pondにより灌水頻度を変更し成長速度との関係を検討する実験段階に入った。また同サイトのPond 2では、極度の乾燥の中、無灌水にもかかわらず、植栽苗は順調な成長を遂げており、種の出自、植栽前の苗の生育環境による耐乾性の違いが示唆されるとともに、ハードパン破碎が小さな苗に対しても有効であることが確認された。

緑化シミュレータについては、土壌、植生グループにより蓄積された土壌特性、樹木

特性を随時反映し、より現実に即したモデルへの改良を行うと共に、浸潤、蒸発の異なるタイムスケールの現象に対応できるようアルゴリズムを改良し、計算の高速化を行った。これにより、従来より100~200倍の高速化が可能になり、樹木成長などさらに遅い過程を同時に扱うことが可能になった。

また今年度は、Site Cに10 mの高さの、SiteLP近くのユーカリ林内に25 mの高さのタワーを建て、樹冠上方でのCO₂、水蒸気フラックスの観測を開始した。また、小型航空機によるフラックス測定の結果と比較するとともに、植生グループ、土壌グループが行っている光合成速度、土壌呼吸速度などの結果とあわせて、生態系の正味の炭素固定速度を把握する。

現地の降雨流出率を把握するために、昨年度塩湖内に設置した水位計、流出計によりデータを蓄積すると共に、今年度は小流域でより正確に水収支を把握するために、長さ5 km程度の上流域を有する天然の溜池に、水位計、流出水量を把握するための堰、流量計の設置を行った。データの蓄積により流出率が明らかになることにより、対象地での利用可能水量の算出が可能になり、また土壌グループで作成している流出モデルに反映することにより、植林可能地域の選定が行えるようになる。

降雨量の異なるEsperance地区の調査サイトにおいて樹木成長と降雨量の間関係を把握し、Leonora近郊の調査地での結果と比較を行った。その際、塩害、湛水害の影響を検討し、幅広い環境条件下における炭素固定速度の把握を行った。

(2) 土壌システム研究グループ

乾燥地における効果的植林のためには、土壌環境の改善、特に植物にとっての水条件の改善が必要であり、特に本研究グループが提案したハードパンの破碎についてはその有効性が実証サイトの樹木成長からも明らかにされてきた。

Site Cでは、水、塩類、炭素収支など複合的な面からハードパン破碎の効果を評価した。ハードパン破碎穴における土壌基礎物性を測定した結果、土壌の嵩密度は3年前の破碎前の土壌とほぼ等しく、これは灌水や雨水などの浸透に伴い土壌が締め固まったためと推測された。現時点におけるハードパンの破碎効果は、根域の拡張とハードパン破碎片の局在による土壌内マルチ効果であると推定された。集水バンク内側の集水域、Pond内側の植栽域で土壌中の塩類濃度を測定した結果、集水バンク出口付近では、Pondに捕集されずに流出した水が溜まるため土壌中塩類濃度が著しく高く、塩類集積の傾向が認められた。植栽域は集水域よりも塩類濃度が高く、ハードパンを破碎していない植栽域ではより顕著であった。また植栽域において裸地部と樹木根元を比較すると、Naを除いて栄養塩濃度は根元で低かった。これは樹木が根元土壌から栄養塩を吸収したためであり、ハードパンを破碎していない植栽域では根元土壌の塩類濃度はより低かった。これらのことから、ハードパンの破碎は捕集された水がもたらす塩類の集積を抑制し、また樹木への栄養供給源を拡大する効果を有することが明らかになった。さらに、植栽域内で土壌呼吸測定を行った結果、ハードパン破碎を行っている樹木の根元では土壌呼吸速度が大きく、樹木から離れるに従い呼吸速度は低下した。根元の高い呼吸速度は多分に根の呼吸を含んでいると考え

られる。植林サイトでの正味の炭素固定速度を把握する際、この根元での大きな炭素放出を考慮に入れる必要があることが分かった。

この他、土壤環境の改善を行ったSite Eでの栄養塩収支を見るため、土壤サンプルを採取し、EC・pH・可給態リン酸濃度の測定を行った。今後、CEC(交換態陽イオン)、土壤中栄養分などを明らかにし、適切な施肥による持続可能な植林を行う為の土壤管理法を提案する。また、Site Eにおいて、降雨後に集水域に貯留した水量の変化を測定した。これにより、集水バンク効果の定量的評価、および設計に関する提案が可能になると考えられる。

複数のサイトにおいて、TDR水分計を用い約3年に渡り土壤水分の観測を行った。そのデータをより実用性のあるものにするため、各センサー近くにおける土壤を用いてキャリブレーションを実施した。これまで、各サイトの土壤水分環境の違いを数値計算により推定してきたが、実測に基づくさらに詳細な評価が可能となった。今後、降雨と土壤水分環境およびその季節変化、土壤水分と植物生理等の関係がより明らかになると期待される。また、マイクロライシメータを用いた土壤の蒸発速度測定を実施した結果、土壤が水で飽和している時の蒸発速度は同日の可能蒸発散量とほぼ等しい速度となった。含水率の低下に伴い、蒸発速度は指数関数的に低下した。可能蒸発散量に対する実蒸発量の比と土壤含水率の関係を得ることにより、簡易的に土壤含水率変化を予測することが可能になった。

広域水収支解析については、限られた水量を植林に最も有効に用いることを目的とし、独自のモデル開発を進めてきた。昨年度までの結果より、クリークによる集水効果が表面流出に大きな影響を与えていることが推測されていたが、今年度はそのクリークの影響をモデル化し、検討を行った。その結果、クリークによる集水効果、浸透速度、土壤深さが、雨水の分配およびその経時変化に大きく影響することが明らかになった。特に山頂付近においては、土壤侵食により土壤層が薄く、ほとんどの雨水が土壤浸透することなくクリークに集約し、塩湖への流出量を増大させていることが推定された。

(3) 植生システム研究グループ

リモートセンシング解析の精度を向上させるために林分データの追加調査を行った。その結果、林冠被覆率と林分バイオマスとの間に高い相関が認められ、リモートセンシング解析により林分バイオマスを高い精度で求めることが可能となった。また、植生調査、土壤浸透試験、その他の土壤調査を実施した結果、土壤表層の透水性とバイオマス間の正の相関や、ハードパン深さとバイオマスとの関係等が明らかとなった。これらの調査は航空写真と対比させて実施しており、調査地全域のゾーニングにとって有益なデータを得ることが出来た。

クリーク付近に存在する齢の異なる様々なユーカリ稚樹群落に着目し、伐倒調査により現存量を把握するとともに、毎木調査を行い、群落全体の諸量を推定した。その結果、ほぼ5年ごとにユーカリの稚樹群が発生しており、最近三十数年近くまで遡ることが出来た。5年ごとの連年成長を比べると、最初の5年で約20 t/haの現存量があることから、年間で約1.5~2 t/haの炭素固定速度を有することが分かった。30年を経ると最終的には成

長量は限界点に達するが、平均年炭素固定速度は約0.4 t/haで安定することが分かった。また、5年に数回程度のフラッドにより供給される栄養塩類と水資源と、ユーカリによる消費のバランスが局所的に成り立っていることが推測され、立地条件に応じた生物学的な限界値があることが示唆された。

A. aneura、*E. camaldulensis*、*C. obesa*について幹肥大成長様式のパターン測定を行った結果、*E. camaldulensis*は乾燥期間においても成長を続けており、この種がより深根性で、地下水域の水分を利用できることが示唆された。植栽地においても、活着を促す初期灌水をうまくコントロールできれば、その後は無灌水でも肥大成長を続けられることが分かった。一方*A. aneura*は浅根性で植栽後の管理が難しく、また成長が非常に遅いことから本プロジェクトにおける目的樹種としては不適であり、*C. obesa*は両種の間中間的な特徴を示すが、適正な灌水により大きな肥大成長が可能であることが分かった。

*E. camaldulensis*及び*A. aneura*について、樹木の炭素放出過程の一つである幹呼吸を測定した。*E. camaldulensis*の幹呼吸速度は、年間を通じて*A. aneura*より明らかに高かった。また両樹種とも呼吸速度は温度と共に上昇した。温度の関数として幹呼吸速度を推定する場合、*E. camaldulensis*では年間を通じて同一式で推定可能であるが、*A. aneura*は乾季と雨季で異なる推定式を用いる必要があることが分かった。しかし非常に強い乾燥条件下では両樹種とも温度によらず呼吸速度が低下する場合が認められた。

この他、リター量と樹木地上部現存量との関係を得ることが出来た。また安定同位体分析により樹木の水源が樹種により異なることを明らかにした。さらに樹木成長と樹液流量から、また、樹液中の栄養塩濃度の測定により、単位固定炭素量あたりの必要水量の推定を行った。

(4) 大気システム研究グループ

大規模植林が気象に与える影響解明・予測を目的とし、緑化に伴う気象変化を予測するモデルの開発を中心に研究を行った。

昨年度までに行ったメソスケールモデルによる計算の結果、午後に降水が期待される場合に、前日に灌水を行うことにより、灌水量の倍に相当する降水の増大が可能であることが示唆された。より効率的、実用的な提案をするためには、さらに詳細かつ精密なフィールド測定、各プロセスの解明が必要となる。そこで今年度は雲の生成および降雨のプロセス等の解明を目的として研究を行った。灌水前、太陽に熱された土壌表面付近の気温は急速に上昇し、低圧区域が生成する。ここに灌水を行うと、熱され蒸発した水分により大気の湿度は上昇し、そのため気温は下がる。冷たく湿った空気は低圧区域を動かし、大気の鉛直方向の循環を引き起こす。灌水前後で大気の流れは大きく変化し、灌水が上昇気流を引き起こす重要な役割を果たすことが明らかになった。

また、水供給量を増大する案の一つとして、地表に設置した太陽熱吸収体を用いて上昇気流を生成させ、対流性降雨を促進することが考えられている。その基礎データを得る

べく、熱対流による上昇気流生成シミュレーションを可能とするモデル開発に取り組んだ。昨年度までに、実際の大気の状態である温度・密度成層の存在を前提としたシミュレーションモデルを確立した。今年度はさらに熱吸収体から大気への伝熱量を定量的に求める手法を追加した。また大気の比熱を温度の関数で表現することで、より現実的なモデルとすることが出来た。結果として、熱吸収体サイズと上昇気流の到達高度の相関関係が得られたが、さらに到達高度の判定基準の検討が必要であることが分かった。そこで水粒子の成長に着目した方法を利用して、人工降雨に必要な熱吸収体サイズと温度の基準を求めることができた。

また、植林地域における雲や雨などの短期的マイクロ物理過程から、オーストラリアまたは全球規模での長期的な影響までを予測・評価するために、マイクロからマクロの異なるスケールのモデル開発、各モデル間のインターフェース作成・結合に着手した。さらに研究対象地で測定した気象データを分析し、現地の特徴を生かした水資源の有効利用を提案する。

3. 研究実施体制

(1) 全体システム構築グループ

①研究分担グループ長：山田 興一（信州大学繊維学部 教授）

②研究項目

- ・総合モデルの構築
- ・モデルの現地適用（植林の実施）
- ・緑化シミュレータの構築
- ・炭素固定ポテンシャルの推定
- ・エネルギー評価

(2) 土壌システム研究グループ

①研究分担グループ長：小島 紀徳（成蹊大学工学部 教授）

②研究項目

- ・現地土壌物理性、化学性の把握
- ・土壌中水移動シミュレーションモデルの構築
- ・土壌中塩移動シミュレーションモデルの構築
- ・表面流出、広域水移動シミュレーションモデルの構築
- ・新規土壌改良法の提案

(3) 植生システム研究グループ

①研究分担グループ長：安部 征雄（筑波大学農林工学系 教授）

②研究項目

- ・現地植生量の把握（地上調査、衛星写真・空中写真解析）
- ・現地樹木の特性把握
- ・生態系炭素収支の把握

- ・実要水量計測
- ・樹種選択に関する情報収集

(4) 大気システム研究グループ

①研究分担グループ長：小宮山 宏（東京大学大学院工学系研究科 教授）

②研究項目

- ・気象データ解析
- ・大気シミュレーションモデルの構築
- ・気候変動予測
- ・新規降雨増大法の提案

4. 主な研究成果の発表（論文発表および特許出願）

(1) 論文発表

- 谷口雅彦、安部征雄、斉藤昌宏、大和田真弓、山田興一：南西オーストラリア乾燥地の代表的植生タイプにおける植物現存量の推定、森林立地、**44**（1）、21-29（2002）
- 濱野裕之、小島紀徳、安部征雄、山田興一：乾燥地土壌の水移動解析とその大規模植林への応用、沙漠研究、**12**（3）、127-140（2002）
- 齊藤忠臣、安部征雄、安田裕、山田興一：乾燥地植林のための高透水性溝による流出水捕集浸透促進と蒸発抑制、沙漠研究、**12**（3）、107-116（2002）
- 谷口雅彦、安部征雄、齊藤忠臣、斉藤昌弘、山田興一：西オーストラリア乾燥地における植物現存量の推定、沙漠研究、**12**（3）、141-150（2002）
- 安田裕、川戸渉、安部征雄、山田興一：西オーストラリア州スタアトメドー地区における植生指数時系列と降雨量時系列の関係について、沙漠研究、**12**（1）、27-30（2002）
- 谷口雅彦、安部征雄、菅沼秀樹、斉藤昌宏、山田興一：Landsatを利用した西オーストラリア乾燥地の植物現存量の推定、沙漠研究、**12**（2）、55-66（2002）9
- 李大寅、小宮山宏；オーストラリアにおける大規模緑化と降水量増大効果、化学工学論文集、**28**（4）、456-460（2002）
- 濱野裕之、田原聖隆、小島紀徳、山田興一：乾燥地における飽和透水係数の原位置測定および数値計算による測定精度評価；農業土木学会論文集、**218**、19-27（2002）
- Koichi Yamada, Toshinori Kojima, Yukuo Abe, Masahiro Saito, Yasuyuki Egashira, Nobuhide Takahashi, Kiyotaka Tahara, John Law : Restructuring and Afforestation of Hardpan Area to Sequester Carbon, J. Chem. Eng. Jpn., **36**(3)328-332(2003)

(2) 特許出願

H14年度特許出願件数：1件（研究期間累積件数：1件）