

平成30年6月19日現在

機関番号：32629

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2013～2017

課題番号：25304004

研究課題名(和文) 水資源利用最適化を考慮した乾燥地大規模バイオマス生産手法の開発と実用化

研究課題名(英文) Investigation for development and practical realization of large-scale biomass production method in arid areas with considering optimization of water usage

研究代表者

菅沼 秀樹 (SUGANUMA, Hideki)

成蹊大学・理工学部・客員研究員

研究者番号：90447235

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：本実験により、ハードパン破碎植林手法による温暖化対策植林は、完全天水依存条件下で成立することが確認された。よって西豪州のWilunaハードパンが分布する広大な地域にて温暖化対策植林が実用化でき、莫大なCO₂の吸収・固定ポテンシャルが期待される。
また観測データとシミュレーションにより、植林区画の最適設計検討が可能となり、格子状の植林樹木配置と横長の矩形区画が表面流出水の捕集に有利であることが判明した。現段階では中間的な成果のため、植林区画の最適設計は今後の検討が必要である。

研究成果の概要(英文)： From obtained results of these experimentation, afforestation for carbon mitigation using hardpan-blasting method was confirmed to succeeded under complete rain-fed condition. And thus, this type of afforestation method can be applicable to whole area where Wiluna hardpan distributes, and then a huge CO₂ mitigation potential of this afforestation method became promising.

Based on the observation data and simulation results, optimization of afforestation plot layout became available, and then 2 main points were revealed. Horizontally long rectangular shape and grid tree planting pattern had advantage on surface runoff-water collection. Since present results were intermediate, further studies on optimization of afforestation plot layout should be necessary.

研究分野：乾燥地工学および森林生態学

キーワード：温暖化緩和策(バイオマス利用) 植林による二酸化炭素吸収・固定 ウォーターハーベスティング
ハードパン破碎植林手法 完全天水依存条件下での植林実証 Eucalyptus camaldulensis 植林区画の最適設計 環境技術

1 . 研究開始当初の背景

1999 年より西豪州 Leonora 近郊の Sturt Meadows を研究対象地として、土地利用・水利用の競合の少ない土地での温暖化対策植林をコンセプトに、植林実験を実施してきた (Yamada *et al.*, 2003). その結果、植物の根の成長を阻害している Wiluna ハードパンを破碎してウォーターハーベスティングを施工する (ハードパン破碎植林手法) ことで、 *Eucalyptus camaldulensis* が高い成長速度と生存率を保てたことが判明した (Shiono *et al.*, 2007). また自然植生調査より、研究対象地域の *E. camaldulensis* 林が最大で 100 ~ 150 Mg ha⁻¹ に達していることが判明し (Suganuma *et al.*, 2006), 高い炭素固定及びバイオマス生産ポテンシャルが期待されている。

しかし、この植林手法を実用化して西豪州の乾燥地全域に普及させるにあたり、上述の *E. camaldulensis* が高い成長速度と生存率を保てた原因が、ハードパン破碎手法にあって集水した天水のみでこの状況が達成されたのか、それともハードパンを破碎したことによって深い地下水を利用できるようになったことにあるのか判明していないことが、実用化の障害となっている。これまで植林樹木の水源に関し様々な検討を実施したが (例えば小島ほか, 2003 ; 塩野ほか, 2007), 天水依存か地下水依存かは明確化されていない。

さらに、集水面積と利用可能な表面流出水の量及び植林樹木の水利用効率 (Water Use Efficiency: WUE) の関係性が不明なため、研究対象地での植林区画の最適設計、または研究対象地以外の地域での炭素固定・バイオマス生産ポテンシャルの推定ができず、こちらも実用化の障害となっている。

2 . 研究の目的

そこで本研究では、人為的に完全天水依存条件を設定した植林試験地を造成し (2013 年 8 ~ 9 月), ハードパン破碎植林手法による *E. camaldulensis* 植林の再現実験を行うと共に、降雨、表面流出水量、土壌水分量、樹液流量の観測を実施した (2013 年 9 月 ~ 2018 年 3 月). また、収集データを基に植林区画の設計のシミュレーションを実施した。

上記の実験・シミュレーションにより、以下のことを明確化することを目的とする。

- ・ハードパン破碎植林手法によって植林された *E. camaldulensis* が完全天水依存条件下で生存及び成長可能かどうか
- ・ハードパン破碎植林手法の必要性
- ・降雨と表面流出量の関係性
- ・ *E. camaldulensis* の WUE
- ・植林区画の最適設計

3 . 研究の方法

Yamada *et al.* (2003) の既存植林試験地の近傍に、2013 年 8 月 ~ 9 月に植林実験区画を図 1 のように造成した。ハードパン破碎手法は Yamada *et al.* (2003) とほぼ同様の手法で

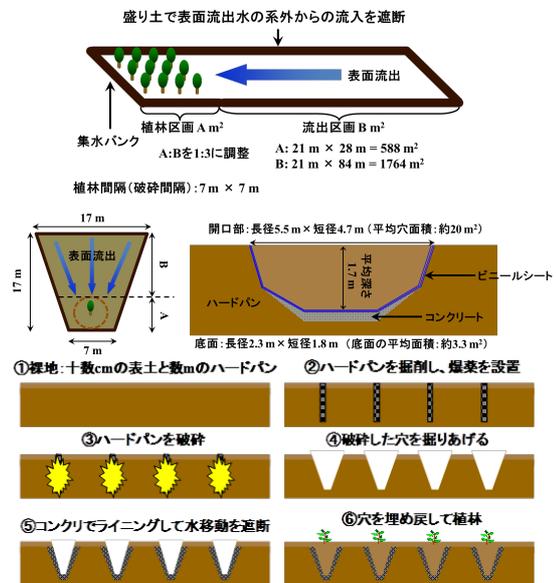


図 1 . 対照群 , 処理群 1 ・ 2 の区画設計

実施した。対照群 (Control) として Yamada *et al.* (2003) と全く同様の植林手法を採った区画を造成すると共に、ハードパンを破碎せずウォーターハーベスティングのみ施工した区画 (処理群 1) を設定した。ハードパンを破碎した穴を重機で掘りあげ、厚手のビニールシートを 2 重に穴に敷き詰めた上で穴の底を強化コンクリートで完全に塞ぎ、地下水の植林穴への流入を完全に遮断することで完全天水依存条件を担保した。そして穴を埋め戻してウォーターハーベスティングを施工した (処理群 2) . 対照群と処理群 1 の比較にて「ハードパン破碎植林手法の必要性」が、対照群と処理群 2 の比較にて「ハードパン破碎植林手法によって植林された *E. camaldulensis* が完全天水依存条件下で生存及び成長可能かどうか」が検証可能である。

処理群 2 の施工の際に、一部の植林穴の中に鉛直深さごとに土壌水分センサー (ECHO2 センサー) を設置し、降雨後に植林穴に供給される水量および、蒸発散によって失われる土壌水分量のモニタリングを可能とした。

植林区画の施工後、1 穴に 1 本の *E. camaldulensis* の苗木 (樹高約 1.5 m) を植えた。植林初期は根の活着のための灌水が必須であるため、20 mm 降雨に相当する 1 本当たり 200 L の灌水を植林直後に供給し、3 ヶ月間に 10 mm 降雨に相当する 100 L の灌水を 2 回供給した。その後の水供給は降雨のみである。2013 年 11 月 30 日 ~ 2018 年 3 月 7 日の植林樹木の生存率及び成長量のモニタリングを実施した。

ユーカリは遺伝子型や産地 (Provenance) によって成長傾向が異なるとされている (Marcar *et al.*, 1995) が、本実験開始までに入手可能な苗木が限られていたため、これらの調整は行われていない。

表面流出量の推定は、図 2 のような計測区画を処理群 2 の近傍に設置した。降雨計は

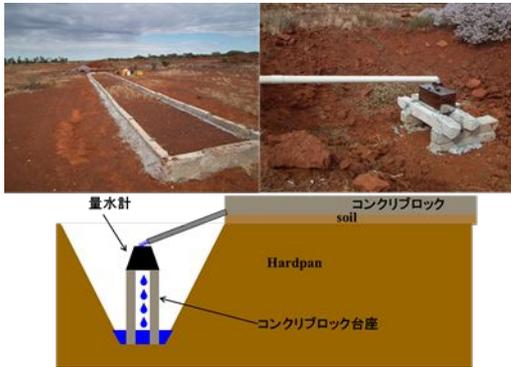


図 2. 表面流出率計測区画

DAVIS instruments 製の Rain Collector II (7852M) 流量計はウイジン製の転倒ます型量水計 (UIZ-TB500) を利用した。両者から得られたデータを用いて、この植林区画の降雨に対する表面流出率を計算した。

また、研究対象地の特性に合わせた表面流出水の水移動シミュレーションモデルを長年開発してきている (Yokohagi *et al.*, 2014)。このモデルは、マニング式を基にした表面流出モデル、ホートン式を基にした土壌浸透式、観測値を基にした土壌面 / 水面蒸発式から構成され、実測の 1 分間降雨量を入力値として、任意の空間解像度で地表面起伏と土壌深さを設定してシミュレーション可能。なお観測データにあわせて粗度係数と浸透補正係数を調整することで、現実の水移動の再現に成功している (Yokohagi *et al.*, 2014)。

このモデルを用いて、1 m の空間解像度で Yamada *et al.* (2003) の代表的な植林区画 (傾斜: 0.5%) の標準的な 1 区画 (50 m × 50 m) と流出面積 (50 m × 150 m) をモデル上で再現し、植林穴の配置による表面流出水の捕集量の違いについて検討し、植林区画の最適設計を検討した。なお、モデル上の植樹穴は 4 m × 4 m の大きさで周囲より 0.1 m 凹ませている。土壌深さは植樹穴は便宜上 1 m、それ以外の土地は実測値平均に基づき 0.15 m に設定した。また、土壌浸透速度式は植樹穴は森林での実測値に基づく浸透速度式を、それ以外の土地は裸地での実測に基づく浸透速度式を当てはめている。

次に、植林樹木が Granier 式樹液流センサーを充分設置可能な大きさに成長するのを待ってから、センサーの設置を行った。Granier 式樹液流センサーは自作し、データロガーは日本環境計測社製の MIJ-01 を利用した。2015 年 9 月 ~ 2018 年 3 月まで樹液流の計測を実施した (計 6 個体)。

4. 研究成果

2013 年 11 月 30 日の初回モニタリング時に、処理群 1 の植林樹木は合計 40 mm の降雨に相当する水が供給されていたにもかかわらず全滅していた。その反面、対照群及び処理群 2 は 80% 以上の生存率を保持していた。このことから西豪州乾燥地での植林では、ウォータ

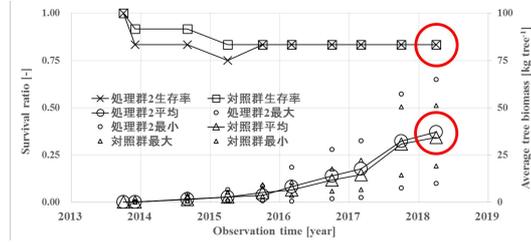


図 3 対照群および処理群 2 の *E. camaldulensis* の生存率およびバイオマスの推移

ーハーベスティングのみでは樹木が生存できず、ハードパン破砕技術の適用は必須であることが判明した。

次に対照群及び処理群 2 の生存率と平均バイオマスの推移を図 3 に示す。処理群 2 の方がデータのばらつきが大きいですが、両者ともにほぼ同じ値で推移した。このことからハードパン破砕手法による *E. camaldulensis* 植林は、完全天水依存条件下で実現可能であることが判明した。よって地下水の有無にかかわらず、西豪州の同様の気候帯で Wiluna ハードパンが分布する全ての領域に当該植林手法の展開が可能であり、莫大な炭素固定・バイオマス生産ポテンシャルが期待される。

次に降雨と表面流出率の関係性であるが、以下の 2 点について判明した。1 点目は、6 mm/event 未満の降雨では、表面流出がほぼ発生せず、発生したとしても 1% 程度であることが判明した。2 点目は表面流出の発生した降雨 (10.2 ~ 34.6 mm/event) では、降雨量に対して平均 18.1% の表面流出の発生が観測された (12.9 ~ 22.7%)。本実験期間中には多くの降雨イベントが観測されたが、計測機器の水没や落葉・土のつまりによって、観測に失敗する事例も多数発生したため、一部のデータは利用不可能となった。

次にシミュレーションモデルによる植林区画の最適設計であるが、様々な降雨パターンによって結果が異なることが判明し、現在も計算結果を精査・検討中である。一例を図 4 に示す。上図が降雨量 13.4 mm/event の結果。

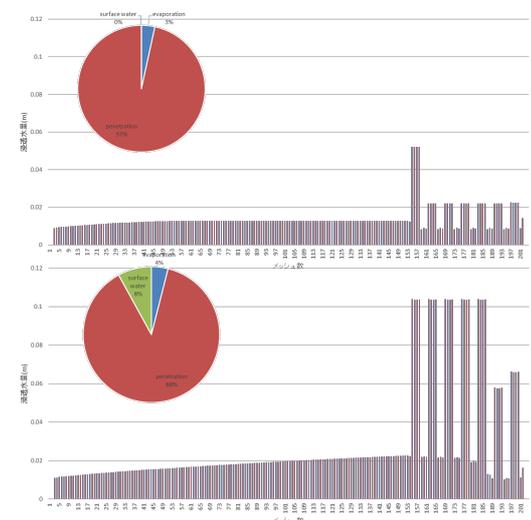


図 4. 植林穴への表面流出供給量

下図が降雨量 26.4 mm/event の結果である。降雨量が少ないときおよび降雨強度が弱いときは、植林穴の上流側のみに表面流出水が供給され、下流側にはあまり捕集されなかった。降雨量が多くなると、より多くの植林穴に表面流出水が捕集されるが、下流側は相対的に捕集される水量が少なかった。ただし、降雨強度が高い雨やより多量の雨が降った場合には、下流側の植林穴の方が集水バンクによって表面流出水が溜められるため、上流側よりも多くの水が捕集された。しかし、その場合には蒸発による損失割合も大きくなるため、植林区画の構造を正方形から長方形に変更する必要がある、集水バンクが不要な可能性も示唆された。今後もより多くのデータに基づいた検討が必要である。

また、植林穴の配置の検討も実施したが、配置の変更による植林穴への表面流出水の捕集量に大きな違いは無いことが分かった。このことから、植林穴の配置は現状の格子状で問題ないことが判明した。

最後に樹液流センサーと土壌水分センサーの観測結果に基づく WUE の計算だが、植林樹木が樹液流センサーを設置可能な大きさに成長するまでに時間を要したこと、観測機器の故障などにより解析に十分な観測結果が得られなかった。限定された結果から推定した WUE は 1~2 kg-biomass/Mg-water であったが、正確な値は不明であり、今後も継続観測が必要と考えられた。ただし土壌水分センサーの計測結果から、ハードパン破碎植林手法によって造成された植林穴は、地中に多くの表面流出水を長期間貯留可能であることを示し、これが乾燥地で *Eucalyptus camaldulensis* の生存・生育を可能にしていると考えられた。具体的には、植林穴は深さ 1.5~2 m 程度の円錐台形状の 10~30 m³ であり、この空間で 3~10 m³ の降雨を土壌水分として貯留可能である(具体的な数値は精査中)。ただし、地中の空間が小さい穴の植林樹木は枯死していた。なお、乾燥地で砂質やシルト質の深い土壌は、降雨や表面流出を長期間貯留することが可能であることが示されており(Saito *et al.*, 2006)、本実験ではフィールドスケールでそれを実証した。

< 引用文献 >

- Yamada K. *et al.*. Restructuring and afforestation of hardpan area to sequester carbon. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Vol. 36, 2003, pp. 328-332.
- Shiono K. *et al.*. Growth and survival of arid land forestation species (*Acacia aneura*, *Eucalyptus camaldulensis* and *E. salubris*) with hardpan blasting. *Journal of Arid Land Studies*, Vol. 17, No. 1, 2007, pp. 11-22.
- Suganuma H. *et al.*. Stand biomass estimation method by canopy coverage for application to remote sensing in an arid area of Western Australia. *Forest Ecology and Management*,

Vol. 222, 2006, pp. 75-87.

小島紀徳ほか。安定同位体比分析を用いた豪州乾燥地域における樹木の水源推定に関する研究。水文水資源学会誌, Vol. 16(5), 2003, 518-526.

塩野克宏ほか。酸素安定同位体分析によるハードパン破碎土壌に植林された樹木の水源深度の推定。水文水資源学会誌, Vol. 20(5), 2007, 409-423.

Marcar N. *et al.*. Trees for saltland, a guide to selecting native species for Australia. 1995, CSIRO Division of Forestry, Canberra

Yokohagi O. *et al.*. Effect of difference in vegetation type on runoff simulation results in arid land. *Journal of Arid Land Studies*, Vol. 24, No. 1, 2014, pp. 93-96.

Saito T. *et al.*. Experimental study of water harvesting by means of a ditch filled with highly permeable material. *Journal of Arid Land Studies*, Vol. 15 No. 4, 2006, pp.379-382.

5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計6件)

菅沼秀樹, 江頭靖幸, 宇都木玄, 高橋伸英, 酒井裕司, 田原聖隆, 小島紀徳, 安部征雄, 山田興一。エネルギー利用を目的とした乾燥地への大規模植林の可能性。日本エネルギー学会誌。査読無し。Vol. 95, 2016, pp. 938-943.

Tadaomi Saito, Hiroshi Yasuda, Hideki Suganuma, Koji Inosako, Yukuo Abe, Toshinori Kojima. Predicting soil infiltration and horizon thickness for a large-scale water balance model in an arid environment. *Water*, 査読有り。Vol. 96, No. 8, 2016. doi:10.3390/w8030096.

Toshinori Kojima, Osamu Yokohagi, Hideki Suganuma, Takuya Ito, Seiichi Suzuki. Site selection and environmental effect evaluation of large scale plantation using arid area runoff model. *Journal of Arid Land Studies*, 査読有り。Vol. 25, No. 3, 2015, pp.101-104.

Osamu Yokohagi, Toshinori Kojima, Hideki Suganuma, Tadaomi Saito. Effect of difference in vegetation type on runoff simulation results in arid land. *Journal of Arid Land Studies*. 査読有り。Vol. 24, No. 1, 2014, pp.93-96.

Hideki Suganuma, Hajime Utsugi, Nobuhide Takahashi, Kiyotaka Tahara, Yasuyuki Egashira, Toshinori Kojima. Estimation of biomass and bio-fuel production potential by afforestation in arid area of the Murchison region, Western Australia. *Journal of Arid Land Studies*. 査読有り。Vol. 24, No. 1, 2014, pp.21-24.

Hideki Suganuma, Toshiaki Omori, Nozomi Sato, Hiroyuki Hamano, Nobuhide Takahashi, Hajime Utsugi, Toshinori Kojima, Koichi Yamada. Selection of appropriate planting method and tree species for arid land

afforestation in Western Australia. Journal of Arid Land Studies. 査読有り . Vol. 23, No. 4, 2014, pp.193-198.

[学会発表](計12件)

菅沼秀樹, 宇都木玄, 江頭靖幸, 高橋伸英, 酒井裕司. 完全天水依存条件下での植林樹木の成長(ハードパン破碎植林手法). 日本沙漠学会第29回学術大会, 石巻専修大学, 2018年5月26~27日.

Takuya Ito, Hideki Suganuma, Ryota Asaoka, Kazuki Sugawara, Shigetu Kato, Seiichi Suzuki, Toshinori Kojima. Growth analysis of tree planted in dry area of Western Australia. Desert Technology 13, Pondicherry, India, March 12th - 16th, 2018.

Yuki Takahashi, Ryota Yui, Syusei Aiba, Kazuki Sugawara, Seiichi Suzuki, Takuya Ito, Seiichi Suzuki, Hideki Suganuma, Toshinori Kojima. Numerical analysis of water movement in arid land afforestation. Desert Technology 13, Pondicherry, India, March 12th - 16th, 2018.

菅沼秀樹, 星元樹, 高橋優樹, 宇都木玄, 高橋伸英, 江頭靖幸, 小島紀徳. 植林実験サイトでの流出率観測結果および最適設計の検討. 日本沙漠学会第28回学術大会. 千葉工業大学東京スカイツリータウンキャンパス, 2017年5月27-28日.

高橋優樹, 三谷一太, 菅沼秀樹, 小島紀徳. 西豪州乾燥地植林法の選定のための実証植林サイト内を想定した局所水移動解析. 日本沙漠学会第27回学術大会. 鳥取大学乾燥地研究センター, 2016年5月28-29日.

三谷一太, 高橋優樹, 横佩おさむ, 菅沼秀樹, 小島紀徳. 乾燥地植林前後の水移動量評価予測に及ぼす降雨パターンの影響. 日本沙漠学会第27回学術大会. 鳥取大学乾燥地研究センター, 2016年5月28-29日.

Hideki Suganuma, Hajime Utsugi, Nobuhide Takahashi, Yuji Sakai, Yasuyuki Egashira, Richard Harper, Toshinori Kojima, Yukuo Abe, Koichi Yamada. Carbon biosequestration potential using Eucalypts in arid areas in Western Australia. IUFRO Eucalypt Conference 2015, Zhanjiang, Guangdong, China, Oct. 21st to 24th, 2015.

Toshinori Kojima, Osamu Yokohagi, Hideki Suganuma. Site selection and environmental effect evaluation of large scale plantation using arid area run off model. ICAL 2, Samarkand, Uzbekistan, September 10th to 14th, 2014.

菅沼秀樹, 宇都木玄, 高橋伸英, 田原聖隆, 江頭靖幸, 小島紀徳. ハードパン破碎手法が *Eucalyptus camaldulensis* の生存率におよぼす影響. 日本沙漠学会第25回学術大会, 東京都市大学, 2014年5月31-6月1日.

Hideki Suganuma, Hajime Utsugi, Nobuhide Takahashi, Kiyotaka Tahara, Yasuyuki Egashira, Toshinori Kojima. Estimation of

biomass production potential for bio-fuel by afforestation in arid area of Murchison region, Western Australia. DT11 international conference, 14-15, San Antonio, Texas, USA, November 19th to 22nd, 2013.

Hideki Suganuma, Toshiaki Omori, Nozomi Sato, Hiroyuki Hamano, Nobuhide Takahashi, Hajime Utsugi, Toshinori Kojima, Koichi Yamada. Selection of appropriate planting method and tree species for arid land afforestation in Western Australia. APCSEET 2013, B-01, Narita, Japan, July 5th to 8th, 2013.

菅沼秀樹, 田原聖隆, 江頭靖之, 小島紀徳. 西豪州 Murchison 地域での乾燥地植林によるバイオ燃料生産ポテンシャルの推定. 日本沙漠学会第24回学術大会, 広島大学, 2013年5月25-26日.

[その他]

(1)招待講演

森林総合研究所 研究セミナー「さまざまな気候帯における植林や森林の動態をめぐる最近の研究動向」にて「温暖化対策としての大規模植林における乾燥地域の重要性」と題して発表(2015年1月15日)

(2)シンポジウム

日本緑化工学会 乾燥地緑化研究部会 第21回公開シンポジウムにて「西豪州の温暖化対策植林と塩害・湛水害対策植林」と題し, 研究中間成果を公開(2016年1月24日)

6. 研究組織

(1)研究代表者

菅沼 秀樹 (SUGANUMA Hideki)
成蹊大学・理工学部・客員研究員
研究者番号: 90447235

(2)研究分担者

宇都木 玄 (UTSUGI Hajime)
国立研究開発法人 森林研究・整備機構・森林総合研究所・研究ディレクター
研究者番号: 40353601
高橋 伸英 (TAKAHASHI Nobuhide)
信州大学・学術研究院繊維学系・教授
研究者番号: 40377651

(3)連携研究者

江頭 靖幸 (EGASHIRA, Yasuyuki)
東京工科大学・工学部・教授
研究者番号: 70223633
田原 聖隆 (TAHARA, Kiyotaka)
国立研究開発法人 産業技術総合研究所・研究チーム長
研究者番号: 10344160

(4)研究協力者

HARPER J. Richard (HARPER J. Richard)
Murdoch 大学・獣医生命科学部・学部長