

乾燥地におけるバイオマス生産用植林実験とその再現実験について

- 川崎市の将来的なバイオマス発電用燃料調達のために -

Results of afforestation experiment for biomass production and its reproductive experiment

-Fuel procurement for future biomass power generation in Kawasaki City-

菅沼 秀樹

Hideki SUGANUMA

要旨

世界的に高まる脱炭素社会への潮流を踏まえ、本市の地球温暖化対策推進基本計画では 2050 年の長期目標は国の目標に準拠した 80%以上の温室効果ガス削減目標設定を想定している。この目標達成に向けた方法の1つとしてカーボンニュートラル発電であるバイオマス専焼発電が考えられる。この実現のボトルネック課題の一つがバイオマス燃料の安定調達である。既報では前者のポテンシャルについて試算を行ったが、本研究では最新のデータに基づくバイオマス生産量の推定、および再現実験によるバイオマス生産手法としての乾燥地植林の妥当性・汎用性の検証を実施した。約 20 年に渡る観測結果によって *Eucalyptus camaldulensis* が乾燥地植林に最適な植林樹種であることが判明すると共に、確実性の高いバイオマス生産速度(約 2 t/ha/年)とバイオマス生産量(40 t/ha)の値を得ることができた。また再現実験により植林手法の汎用性が担保された。最後に既報のバイオマス供給ポテンシャルが最大で 1.26 億 t/年 (196 TWh 発電量相当: 発電効率 30%) に修正された。

キーワード: 温暖化緩和策、バイオマス燃料の安定調達、*Eucalyptus camaldulensis*、乾燥地大規模植林

Key words: Carbon mitigation, Stable supply of biomass fuel, *Eucalyptus camaldulensis*, Large-scale arid land afforestation

1 緒言

2015 年の全世界の化石燃料燃焼に伴う CO₂ 排出量が約 32 Gt-CO₂ と非常に多く、1990 年から 57%も増加していると報告されている¹⁾。また 2015 年 12 月に COP21 にて締結されたパリ協定²⁾により、世界中が IPCC 第 5 次評価報告書 (AR5) の要約³⁾に記載されている Representative Concentration Pathway (RCP) 2.6 シナリオ達成に向けて動き出す機運が高まり、2016 年 11 月にパリ協定は発効され、2018 年 12 月にはそのルールブックも一部を除き合意に至った。RCP 2.6 シナリオとは、2100 年に産業革命以降の温度上昇を 2℃未満に抑えるために、大気中の CO₂ 濃度を 430 ppm 未満に抑える(≒大気放射強度 2.6 W/m 未満)シナリオである³⁾ため、一般的に 2℃目標とも呼ばれる。このシナリオの達成には、2050 年までに社会の脱炭素化が必要になるとされている⁴⁾。

このような世界的な流れの中で本市では地球温暖化対策推進基本計画⁵⁾を策定し、2030 年度に 1990 年比 30%以上の温室効果ガス排出削減を掲げ、2050 年の長期目標は国の目標に準拠した 80%以上の削減目標設定を想定している。近年の本市の温室効果ガス排出量は漸減しているが CO₂ 換算で約 2,350 万 t-CO₂ (2014 年改訂値)⁶⁾と依然多い。本市の臨海部には発電所が多く集積してこの地域の発電能力は約 630 万 kW と莫大であり、本市の世帯数の 20 倍を超える電力を賄うポテンシャルを有している⁷⁾。図 1 に示すように臨海部の再生可能エネルギー由来のカーボンニュートラル電力は 1.1%に過ぎないため、現状では化石燃料由来の発電および各部門の電

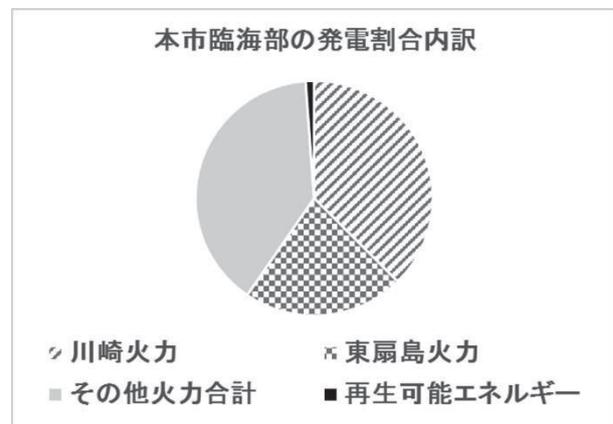


図 1 本市臨海部の発電量 (合計 650 万 KW)。川崎エコテックニュースレター⁷⁾を基に著者作成

力消費に伴う CO₂ 排出量が、本市 CO₂ 排出量を高止まりさせている原因の一つであると考えられる。本市臨海部の発電設備をカーボンニュートラル化することは、地球温暖化対策推進基本計画⁵⁾の達成に大きく貢献すると考えられる。

既報⁸⁾ではバイオマス発電用の燃料供給について、豪州乾燥地植林による供給ポテンシャルを推定した結果、本市臨海部の発電設備を全てカーボンニュートラル化するのに十分な燃料を確保できることを示したが、それは比較的短期間の観測結果に基づく試算であった。

乾燥地の植林実験において長期の観測は次の 3 つの理由によって短期観測と比較して非常に重要である。1 番目の理由は気象条件、特に降雨が乾燥地では非常に大き

な変動をもつことである⁹⁾。仮に炭素固定ポテンシャルがこのような大きな変動を持つ気象条件下での観測結果に基づいて推定された場合、そのデータは長期間では過大推定もしくは過少推定になる可能性が高い。2番目の理由は木本植物の一般的な成長傾向である。通常樹木の成長速度は樹齢とともにシグモイドカーブに沿って変化し、その傾向は樹種によって異なる^{10), 11)}。よって短期観測のデータに基づく推定は、同様に過大評価または過小評価の原因となる可能性がある。3番目の理由は、一般的に乾燥地の炭素固定速度が非常に小さい値なことである。例えば土壌炭素を短期間で測定すると、絶対値が小さいためエラーの原因となる¹²⁾。つまり、植林実験において短期間の観測はデータの信頼性が比較的低いと考えられる。そこで本研究では、2018年9月に計測した最新の植林データを基に、2000年～2018年の長期間に渡るデータを基にバイオマス生産量の推定を行い、推定値の確実性の向上を試みた。

また既報⁸⁾で用いた Yamada *et al.*¹³⁾ の植林手法は Wiluna ハードパン¹⁴⁾ を破碎して植林実験を行っていたため、植林区画の下に分布する地下水に依存してたまたま成功したのではないかとの指摘があり、植林技術の汎用性(広域展開可能性)に疑問が呈されていた。そこで、これまでにボーリング調査で地下水が無いことが確認されている別の場所に実験区画を設置し、2013年から再現実験を行ってきた。本研究では2019年2月に計測した最新の再現実験データを基に、地下水に依存しない乾燥地植生の成長観測結果を通して、乾燥地植林技術の汎用性を証明することを試みた。

2 研究手法

2.1. 研究対象地

研究対象地は Sturt Meadows (120°58' E, 28°40' S) で、西オーストラリアの州都パースから北東約 600 km に位置する。オーストラリアの気象局の 100 年以上の観測データに基づくと、年降水量は約 220 mm (標準偏差 106.3 mm) で乾燥地に分類される。この地域は IBRA¹⁵⁾ では Murchison 生物地理区に分類される。National Land and Water Resources Audit¹⁶⁾ の報告では、Sturt Meadows の主な土地被覆はアカシア疎林、*Eremophilla* 属など小さな灌木を含むアカシア灌木林と裸地の混合植生となる。Murchison の主な土地利用形態は牛もしくは羊の粗放的な放牧である。放牧圧は牛 0.7 AE/km²、羊 6.0 DSE/km² である¹⁷⁾。AE は牛 1 頭あたり 400 kg 換算の放牧頭数を表し、DSE は羊 1 頭あたり 45 kg 換算の放牧頭数を表す。この数値で示されているように、植林を実施したとしても土地利用の競合は起こりにくい上に、放牧と植生の親和性は非常に高い。

2.2. 植林実験

本研究の植林実験サイト(東経 121°0'50'', 南緯 28°35'20'')は Yamada *et al.*¹³⁾ によって造成され、乾

燥地環境下での炭素緩和および炭素動態を研究する一連の広範囲な研究のうちの一つである¹⁸⁾。本調査地は降雨傾向、太陽放射強度、Wiluna ハードパンの存在などの点で豪州内陸部の典型的な乾燥地環境であり、土木作業技術に対する土地所有者の理解もあって選択された¹⁸⁾。

1999 年 7 月の植林開始前には、土地は傾斜が約 0.5% の裸地であった。表層の土は Red brown sandy loam または Reddish brown sandy loam であり¹⁹⁾、深さは 15～20 cm 程度、その下に 7～10 m の厚く硬い Wiluna ハードパン¹⁴⁾ が存在している。このハードパン層と浅い土壌がこの土地の植生の成長を抑制していた。ハードパンは根を通さない土層で根の生育範囲を制限するとされ²⁰⁾、また植林樹木の成長も制限する²¹⁾。Wiluna ハードパンは土層に分類される¹⁴⁾が、岩盤のように硬いため重機を利用しても砕くことは容易ではない。

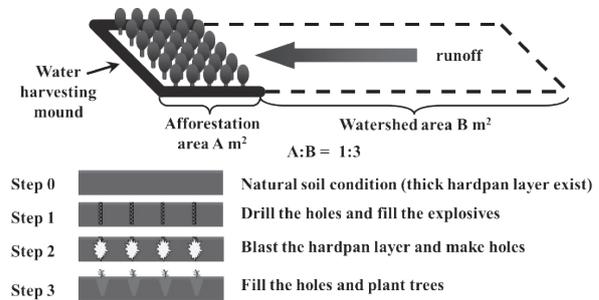


図2 植林実験区画の設計

図2に示すように、植林区画はおよそ幅 50 m 長さ 40 m で設計され、11 区画がフィールドでできる限りの正確性で等高線に沿って造成され、できる限り植林区画上部で発生したシート状の表面流出水を各植林区画で取り込めるようになっている。各植林区画を大きな盛り土で囲む一般的なウォーターハーベスティング手法と Yamada *et al.*¹³⁾ によって開発されたハードパン破碎手法の組み合わせである。ウォーターハーベスティングは乾燥地・半乾燥地で作物や植生を育てるのに一般的な手法である²²⁾。ハードパンの破碎は、露天掘り鉱山で一般的に使われている掘削機械を用いて深さ 3.5 m (この実験区画の Wiluna ハードパンの厚みの約半分) の穴を 7 m おきに掘削。これも露天掘り鉱山で一般的に使われているアンホ (Ammonium Nitrate Fuel Oil: ANFO) 爆薬を掘削した穴に詰めて、それを信管を使って発破した。この手順ですり鉢状の穴が形成されるため、ブルドーザーを使ってハードパンを破碎したものと土で埋めた。1 穴に 1 本の割合で樹木の苗を植える想定である。この植林手法では、植林樹木を植える植林区画と表面流出水が発生する集水区画の土地利用面積割合は平均で 1:3 に設定されているが、フィールドでの正確な割合は不明であり 1:2～1:4 のばらつきがある。各植林区画の情報は表 1 にまとめた。

本研究で使用した植林樹木は次の 10 種で、全て Murchison 生物地理区と Coolgardie 生物地理区の郷土樹

表1 各植林区画の情報

Afforestation methods	Afforestation area [ha]	Planted tree number [trees]	Stand density [trees ha ⁻¹]
Water harvesting Hardpan blasting	0.26	42	162
	0.26	42	161
	0.22	39	178
	0.25	42	171
	0.23	42	184
	0.24	42	175
	0.21	41	191
	0.21	42	199
	0.25	42	168
	0.26	48	182
	0.25	48	189

Mean stand density of main method is 178 trees ha⁻¹ (about 7.5 m spacing)
Established year of the afforestation plots was August 1999

種である (*Acacia aneura* Benth., *A. tetragonophylla* F. Muell., *Casuarina obesa* Miq., *Eucalyptus camaldulensis* Dehn., *E. campaspe* S. Moore, *E. griffithsii* Maiden, *E. lesouefii* Maiden, *E.*

salubris F. Muell., *E. stricklandii* Maiden, *E. torquata* Luehm.)。これらの樹種の中で *A. aneura* は研究対象地の自然林に多く見られ、*C. obesa* と *E. camaldulensis* は研究対象地のワジ沿いに見られるため、この3樹種の苗木の数は他の樹種と比較して多く植えられている。各植林区画は複数樹種によって構成され、樹種はランダム配置で植えられている。樹木の苗木は約 7 m 間隔の各破砕穴に 1 本ずつ植えられた。

苗木の植樹は 1999 年 8 月で、付近の地下水を汲み上げて 1999 年 8 月から 2005 年 3 月までに断続的に灌水された。灌水は 1 回 5-7 mm 降雨相当量の水を、1999 年 8 月から 2001 年 2 月までは気象状況を鑑みながら最大で月 4 回、2001 年 3 月から 2004 年 3 月までは月 1 回、2004 年 4 月から 2005 年 3 月までは 2 カ月に 1 回供給した。2005 年 4 月からは植林樹木は完全に天水依存状態 (降雨のみの水供給) で生育している。本研究期間中の灌水量と降雨データは表 2 にまとめた。

表2 観測期間中の供給水量 (降雨および灌水)

	1999/Aug/5 2000/Jun/21	2000/Jun/22 2001/Jun/21	2001/Jun/22 2002/Sep/18	2002/Sep/19 2003/Sep/1	2003/Sep/2 2006/Sep/7	2006/Sep/8 2007/Aug/24	2007/Aug/25 2008/Aug/30	2008/Aug/31 2009/Aug/27	2009/Aug/28 2010/Sep/17	2010/Sep/18 2012/Sep/11	2012/Sep/12 2013/Sep/4	2013/Sep/5 2015/Sep/17	2015/Sep/18 2018/Sep/16
Measurement duration [months]	10.5	12.0	14.3	11.5	36.2	11.6	12.2	11.8	12.7	23.8	11.8	24.4	35.9
Total rainfall [mm]	421	247	259	357	778	235	133	180	232	692	222	615	873
Total irrigation [mm]	66	127	106	77	80	0	0	0	0	0	0	0	0
1 year equivalent rainfall [mm year ⁻¹]	482	247	217	372	258	244	131	183	219	349	227	302	292
1 year equivalent rainfall with irrigation [mm year ⁻¹]	557	374	306	452	285	244	131	183	219	349	227	302	292

*Total irrigated water amount (mm equivalent) was calculated from estimated supplied water amount (m³), which was estimated using mean supplied water per tree (m³/h) and irrigation length (h), and tree planting spacing (7 m × 7 m)

表3 生存率 50%以上を示した樹種のバイオマス推定式 (アロメトリー式)

Species	Equation Number	Dependent variable Y (kg)	Independent variable X (unit)	Coefficient				Significant	F	R ²	RMSE (kg)	n	
				a	S.E.	Significant	T						b
<i>Acacia aneura</i>	A(I)	Ws + Wb	D0.3 ² (m ²)	6461	1241.8	<0.01	1.221	0.041	<0.01	<0.01	0.983	40.9	17
	A(II)	Wl	D0.3 ² (m ²)	118	36.2	<0.01	0.815	0.066	<0.01	<0.01	0.912	4.0	17
	A(III)	Ws + Wb	Cpa (m ²)	1.442	0.065	<0.01	1.442	0.219	<0.01	<0.01	0.982	28.6	11
	A(IV)	Wl	Cpa (m ²)	0.526	0.094	<0.01	0.847	0.080	<0.01	<0.01	0.895	1.9	15
	A(V)	Wr	Wabove (kg)	0.402	N/A	N/A	1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	2
<i>Casuarina</i> sp.	C(I)	Ws + Wb	D0.3 ² (m ²)	8836	1973.2	<0.01	1.352	0.050	<0.01	<0.01	0.988	33.3	11
	C(II)	Wl	D0.3 ² (m ²)	325	144.4	<0.05	0.897	0.094	<0.01	<0.01	0.909	8.2	11
	C(III)	Ws + Wb	Cpa × H (m ²)	0.224	0.045	<0.01	1.248	0.050	<0.01	<0.01	0.987	35.8	10
	C(IV)	Wl	Cpa (m ²)	0.795	0.322	<0.05	1.082	0.178	<0.01	<0.01	0.821	11.5	10
	C(V)	Wr	Wabove (kg)	0.471	N/A	N/A	1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	E(I)	Ws + Wb	D0.3 ² (m ²)	3855	672.1	<0.01	1.258	0.040	<0.01	<0.01	0.992	32.3	10
	E(II)	Wl	D0.3 ² (m ²)	159	15.4	<0.01	0.889	0.022	<0.01	<0.01	0.995	1.7	10
	E(III)	Ws + Wb	Cpa × H (m ²)	0.153	0.036	<0.01	1.243	0.049	<0.01	<0.01	0.986	80.7	11
	E(IV)	Wl	Cpa (m ²)	0.601	0.013	<0.01	1	N/A	N/A	<0.01	0.995	2.8	11
	E(V)	Wr	Wabove (kg)	0.718	N/A	N/A	1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	3

Ws, Wb, Wl, Wr, Wabove, Cpa, H, RMSE and n denote stem biomass, branch biomass, leaf biomass, root biomass, above-ground biomass, crown projection area, tree height, root mean squared error and destructive tree sample number, respectively.

2.3. 解析手法

植林樹木を 2000 年 6 月から 2018 年 9 月にかけて測定した。生存している全ての樹木に対して樹高を測定し、加えて小型樹木に対しては樹冠の幅を、大きな樹木に対しては 0.3 m 高さの直径を測定した。

植林区画に植えた 428 本のデータを用いて乾燥地植林に最適な植林樹種の選抜を行った。第一段階の選抜として、2015 年 9 月の生存率が 50%未満の樹種を排除した。第二段階として、生存率 50%以上の 3 樹種 (3.1. 節で後述) に対して個体サイズからバイオマスを計算するため

のアロメトリー式を作成し(表3)、植林樹種ごとにバイオマス平均値(kg/tree)を計算した。第三段階として生存率およびバイオマス平均値に対して、下記の統計検定を用いて乾燥地植林に最適な植林樹種を選抜した。

統計解析には2種の多重比較検定を利用した。一つ目は検定力の低下を避けるために、チューキーの母平均検定(以後T1検定と呼ぶ)を用いて、分散分析の後にパラメトリックの全群比較を実施した。もう一つは同様に検定力の低下を避けるために、チューキーの母比率検定(全群比較)(以後T2検定と呼ぶ)を実施した。統計解析はデータの関係上2015年のデータ(つまり植林後16年)を用いて実施した。2015年の生存率が50%以上の3樹種に対して平均バイオマスをT1検定で、生存率をT2検定でランク付けして乾燥地植林に最適な植林樹種の選定を行った。

2.4. バイオマス燃料生産量推定

本研究では単一樹種で構成された植林区画が存在しないため、それぞれの植林樹種と植林手法による区画バイオマス(t/ha)および区画成長速度(t/ha/年)が計算できない。その代わりに、我々は推定区画バイオマス(t/ha)と推定成長速度(t/ha/年)の2種の変数を導入し、区画バイオマス(t/ha)および区画成長速度(t/ha/年)を間接的に計算できるようにした。推定区画バイオマスは下記の式1で計算した。

$$PB = TB \times SR \times D \times CF \quad \text{式 1}$$

PB , TB , SR および D はそれぞれ推定区画バイオマス(t/ha)、平均バイオマス(kg/tree)、生存率、平均立木密度(tree/ha)を表す。 CF は質量の単位換算係数である(1Mg/1000kg)。

推定成長速度は下記の式2で計算した。

$$PGR = (PB_{N+1} - PB_N) / L \quad \text{式 2}$$

PGR , PB_N , PB_{N+1} , L はそれぞれ推定成長速度(t/ha/年)、 N 回目測定時の推定区画バイオマス(t/ha)、 $N+1$ 回目測定時の推定区画バイオマス(t/ha)と測定期間(年)である。この推定成長速度は年平均成長速度(MAI: t/ha/年)と同等の値である。

ここで求めた PGR の値のうち前述の統計検定にて最適と判断された植林樹木に対し、バイオマス燃料に使用可能な幹と枝のバイオマスの値から、バイオマス燃料生産量の推定を行った。バイオマス燃料生産量の推定は2000年~2018年の値を用いて計算した。

2.5. 植林再現実験

これまでにボーリング調査で地下水が無いことが確認されている別の場所にYamada *et al.*¹³⁾と同様の手法でハードパンを破碎して植林区画を設置した。1穴に1本の*E. camaldulensis*の苗木(樹高約1.5m)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、20mm降雨に相当する1本当たり200Lの灌水を植林直後に供給し、3ヶ月間に10mm降雨に相当する100Lの灌水を2回供給した。その後の水供給はなく、完全天水依存

の状態(降雨のみの水供給)で生育している。

再現実験の植林区画は、流出区画も含めて盛土で囲い、外部との水移動を完全に遮断した。これによって、植林樹木を植える植林区画と表面流出水が発生する集水区画の土地利用面積割合が正確に1:3に設定されると共に、地下水・外部からの水供給が完全に断たれ、独立した状態(完全天水依存状況)が担保された。

2013年9月から2019年2月の観測結果およびアロメトリー式(表3)から、生存率とバイオマス量の経時変化を確認し、地下水に寄らず完全天水依存状況下でも植林によるバイオマス生産が可能であることを確認した。

3. 結果と考察

3.1. 最適な植林樹種の選定

図3の結果より、*Acacia aneura*, *Casuarina obesa*, *Eucalyptus camaldulensis*以外の7樹種は2015年の生存率が50%未満であるため、乾燥地の長期植林に不適であると判断された。図3は植えられた10樹種の生存率の減少傾向および年換算の供給水量(灌水量と降雨量の合計値)の1999年~2018年の推移を表したものである。

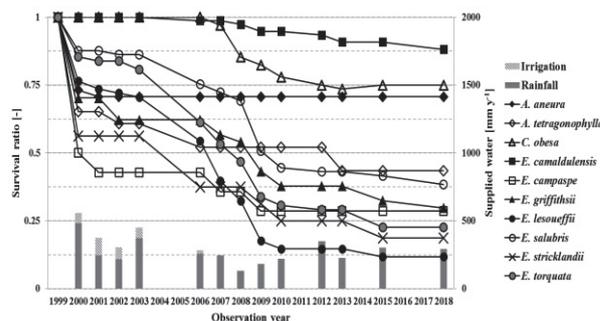


図3 植林樹木の生存率と供給水量の推移

2004、2005、2011、2014、2016、2017年は樹木の測定を行っていない。図3中の年換算供給水量の値は、前回の測定日からその時の測定日の間に供給された水量を示す。例えば2006年のグラフの値は2003年の毎木調査後から2006年の毎木調査の間の降雨量(778mm)と灌水量(80mm)の合計値を、測定期間(3.02年)で割った年換算の値が示されている。よって1999、2004、2005、2011、2014、2016、2017年は降雨がなかったわけではなく、情報が測定を行った年に集約されているだけである。*E. camaldulensis*と*C. obesa*以外の樹種は活着が悪く、灌水をしていたにもかかわらず2000年の生存率が50~88%であった。*E. camaldulensis*, *C. obesa*, *A. aneura*と*E. stricklandii*以外の樹種はその後の灌水期間中も生存率を漸減させている。そして2005年の灌水停止と2007年および2008年の連続した干ばつで*A. aneura*は生存率を保ち、*E. camaldulensis*と*A. tetragonophylla*は多少生存率が低下した。それとは対照的に、残りの7樹種はこの期間に大きく生存率を低下させた。そして2015年

9月時点で生存率50%以上の樹種は *A. aneura*、*C. obesa* と *E. camaldulensis* の3樹種だけとなった。

植林区画 11 区画内の *A. aneura*、*C. obesa* と *E. camaldulensis* の平均バイオマス (kg/tree) および生存率の変化を図4に示す。図4の結果により、生存率および平均バイオマスの観点から *E. camaldulensis* が優れた樹種であると判断された。図中のアルファベットは2015年測定時点の生存率および平均バイオマスの有意差を表す。例えばaは統計的に最も低いランクであり、cは最も高いランクである。

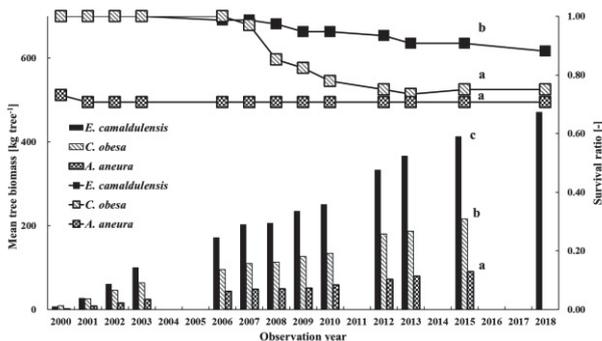


図4 生存率50%以上の樹種の生存率と平均バイオマスの推移および多重比較結果

図3および図4に示されるように、*E. camaldulensis* は2015年に有意に高い生存率(91%)と平均バイオマス(413 kg/tree)を示していた。*C. obesa*は図4中の3樹種の中で2番目に高い生存率(75%)と平均バイオマス(217 kg/tree)であったが、*E. camaldulensis*と比較して平均バイオマスは有意に低く約半分であり、生存率も有意に低かった。*A. aneura*は図4の3樹種の中で1番低い生存率(71%)と平均バイオマス(91 kg/tree)であり、*E. camaldulensis*と比較して明らかに劣っていた。

これらのことから、*E. camaldulensis*が乾燥地植林に最適な樹種であることが判明した。*E. camaldulensis*の耐乾性および耐湛水性²³⁾を考慮すると、この樹種はハードパン破碎と一般的なウォーターハーベスティングの組み合わせである本実験の植林手法に合致したと考えられる。乾燥地では特に降雨において気象の激しい変動が起こり⁹⁾、1999年8月から2018年9月の我々の実験期間の間でも非常に激しい降雨と長期の干ばつが発生した。例えば2007年と2008年の年降水量が表2に示されているようにそれぞれ133 mm/年、188 mm/年であったが、*E. camaldulensis*だけが生存率を高いまま維持した。またウォーターハーベスティング用の大きな集水マウンドに植林区画が囲われているため、短期集中降雨によって一時的に湛水害が誘発される。しかしながら *E. camaldulensis* の耐湛水性によって、突発的で一時的な湛水害に対応する優位性があったと考えられる。よって、活着が良く耐乾性と湛水性を併せ持つ *E. camaldulensis* の性質を考慮すると、この樹種が乾燥地植林の最適樹種

であると考えられた。

*E. camaldulensis*は研究対象地の郷土樹種であり、自然植生として河畔で繁茂している²⁴⁾。またこの樹種はユーカリ属の中で最も広範囲に分布しており、乾燥地・半乾燥地の典型で散発的な水利用しかできない少雨地域で優占的に成長できる^{23), 25)}。よって植林による周辺環境に及ぼす影響を最小限に抑える意味でも *E. camaldulensis* は最適な乾燥地植林樹種であると考えられた。

3.2. バイオマス燃料生産量推定

最適な植林樹種と判定された *E. camaldulensis* の2018年9月の観測結果では、図4に示されるように生存率は88%と若干低下したが、平均バイオマスは472 kg/treeと順調に成長していた。このバイオマスのうち、バイオマス発電用の燃料となる幹と枝の部分は251 kg/treeとなった。

得られたデータを式1および式2に当てはめることで、バイオマス生産速度が求められた。代入した値および計算した値は以下のとおりである。TB: 2000年が2.4 kg/tree、2018年が251 kg/tree、SR: 2000年が1.0、2018年が0.88、D: 178 trees/ha、PB₂₀₀₀: 0.4 t/ha (2000年の値)、PB₂₀₁₈: 40.0 t/ha (2018年の値)、L: 18.25年、PGR: 2.17 t/ha/年。また、植林の各期間で計算した成長速度の値と生存率の推移を図5に示す。図5は根と葉を含めた全体のバイオマス成長速度が示されているが、このうちバイオマス燃料になる幹と枝は53%である。ここから、本植林実験によって *E. camaldulensis* は非常に高いバイオマス成長速度を有していることが分かる。ただし、近年は成長速度の鈍化があるように見られる。一般的に樹木成長傾向は幼年期と老年期の成長が低く、青年期の成長が早く一定値であるという樹齢に依存したシグモイドカーブを示す成長傾向が観測されるものである¹⁰⁾。ユーカリの成長速度は樹齢12~20年で成長のピークをむかえる¹¹⁾との報告もあることから、今後継続観測を続け、成長のピークが何処にあるのか明らかにする必要がある。そして成長のピークとバイオマス生産量のバランスから適切な伐期を20年に固定せずに柔軟に設定する必要がある。

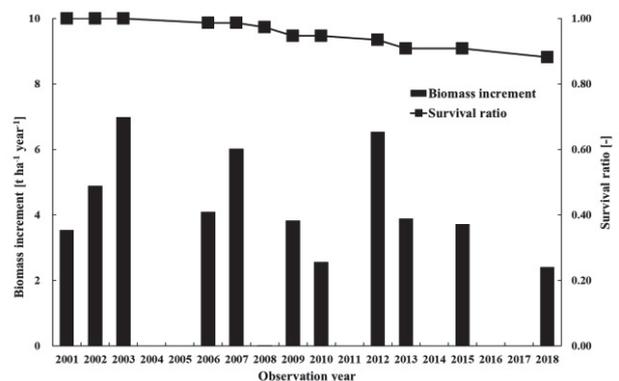


図5 *E. camaldulensis*の生存率と成長速度の推移

推定された成長速度の値を利用すると、伐採損失を10%と仮定したとしても、植林後20年間で約40 t/haのバイオマス燃料を得ることが可能になると推定できた。なお伐採期間を20年間としたのは、UNFCCC²⁶⁾において材木やバイオ燃料用に伐採を行う短期間の植林の炭素固定量を推定する期間を20年間と設定していたからである。今後の観測においてこれ以上の成長速度の大幅な低減が観測されなければ、伐採期間を20年以上に設定することも可能であり、逆に上述したように成長のピークが20年より前に現れれば、伐採期間を20年末満に設定することも可能である。

一般的に乾燥地の植生は低い成長速度を有している(1 t/ha/年未満)^{27), 28)}ので、根まで含めた4.0 t/ha/年の成長速度の推定値は典型的な乾燥地植生から見て非常に大きな値である。*E. camaldulensis*はオーストラリアでは早生樹種に分類される²³⁾。オーストラリアの乾燥地・半乾燥地の自然植生もしくは植林の成長速度^{25), 27), 28), 29)}と比較すると、本研究で推定された推定成長速度は速いか同等と考えられる。

また、本研究にて得られたバイオマス生産量の推定値は、実現可能性の高い値である。2018年9月に観測時点で植林後19年が経過しているため、植林後20年間のバイオマス生産量の推定値は、実現可能性が非常に高い。また、研究対象地内のワジ沿いの非常に条件の良い土地では、100 t/ha以上の天然林(*E. camaldulensis*の閉鎖林)が観測され、その立木密度は172~455 trees/ha²⁴⁾と、植林実験区画の値(平均178 trees/ha、161~199 trees/ha)と近い値である。よって、約40 t/haの燃料用バイオマス生産量(根や葉も含めて約80 t/haのバイオマス)は、研究対象地のポテンシャルとして十分に達成可能な値の範囲内であると考えられる。このことから、Yamada *et al.*¹³⁾のハードパン破碎とウォーターハーベスティングを組み合わせた植林区画を造成し、*E. camaldulensis*の苗木を植えれば、バイオマス生産用の乾燥地植林が充分成立すると判断できる。

本研究で推定された値を用いて既報⁸⁾で推定されたMurchison生物地理区、年降水量200~300 mmの地域で植林を展開した場合の20年伐期でのバイオマス生産量および発電ポテンシャルが、それぞれ960万 t/年及び15.0 TWh/年、1.26憶 t/年及び196 TWh/年と推定された。上述の通り、既報よりもこの値の方が確度の高いデータとなっている。

3.3. 再現実験結果

図6に示すように、2013年8月~2019年2月(5.5年間)に観測した再現実験区画の*E. camaldulensis*も高い生存率と成長を示した。ただし図4の植林実験では再現実験の時よりも大きな苗木を植えた上に初期の約5年間は灌水も行っていたため、完全天水依存状態で経過観察をしている再現実験区画の成長速度は1 t/ha/年前後と低い値を示している。しかしながら、2017年3月~9

月にかけては4.7 t/ha/年と図6で示された年成長速度に近い値を示すなど、順調に成長している。一般的に樹木成長傾向は幼年期と老年期の成長が低く、青年期の成長が速く一定値であるという樹木の成長傾向が観測されること¹⁰⁾を鑑みると、小さい苗木が植えられた再現実験区画の植林樹木は未だ幼年期であると考えられる。幼年期であるとはいえ、図7に示されるように植林樹木はすでに大きく成長し、平均バイオマス約40 kg/tree、区画バイオマス約7 t/haにまで到達している。

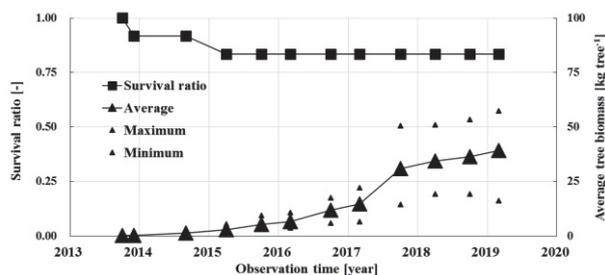


図6 再現実験区画の植林樹木(*E. camaldulensis*)の生存率と平均バイオマスの推移



図7 植林再現実験区画の写真(2019年2月撮影)

植林樹木が幼年期であるとはいえ、地下水の存在しない場所で実施した再現実験によって得られた結果では、植林樹木(*E. camaldulensis*)が高い生存率を示した。このことから地下水や灌水に依存せず、降雨のみが唯一の水供給源である完全天水依存状況下でも植林によるバイオマス生産が可能であることを確認できたため、Yamada *et al.*¹³⁾の植林手法の再現性及び汎用性を担保できると考えられた。このことから、既報⁸⁾で仮定した植林手法のMurchison生物地理区および年降水量200~300 mmの地域への広域展開による大規模バイオマス生産の実現可能性が高まった。

4 結言

乾燥地植林実験区画の最新の長期観測データに基づき、非常に実現可能性の高い燃料用のバイオマス生産ポテン

シャル (約 40 t/ha) を求めることができた。また、そのバイオマス燃料生産用植林に最適な樹種 (*E. camaldulensis*) の選定を実施できた。さらに再現実験によって、乾燥地植林手法の再現性及び汎用性を担保することができ、植林の広域展開による大規模バイオマス生産の実現可能性が高くなった。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 25304004 及び 16H02764, Endeavour Research Fellowship 2015 program (オーストラリア教育省), NEDO (乾燥地を利用した大規模バイオマス生産・収集システムの研究開発), 三井物産環境基金 (平成 20~22 年度), 環境省・地球環境研究総合推進費 (GHG-SSCP S2-1a), 科学技術振興機構 CREST プロジェクト (平成 10 年度採択研究課題) の支援を受けて実施された。ここに謝意を表す。

引用文献

- 1) IEA/OECD : CO₂ emissions from fuel combustion highlights 2015 edition, IEA publications, Paris. p.152 (2017)
- 2) United Nations : Paris Agreement, United Nations (2015)
- 3) IPCC : Summary for Policymakers. In: [Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Farahani, E., Kadner, S., Seyboth, K., Adler, A., Baum, I., Brunner, S., Eickemeier, P., Kriemann, B., Savolainen, J., Schlömer, S., von Stechow, C., Zwickel, T., Minx, J.C. (eds.)] : Climate Change 2014, Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA (2014)
- 4) Schellnhuber, H.J. : After Paris: Climate challenge revisited, ISAP 2016, P-1 Keynote, 2016. 07. 12, Yokohama (2016)
- 5) 川崎市: 川崎市地球温暖化対策推進基本計画~CCかわさきエコ暮らし・未来へつなげる 30 プラン~, 川崎市 (2018)
- 6) 川崎市: 川崎市温室効果ガス排出量 (2013 年度確定値、2014 年度改定値、2015 年度暫定値) の推計結果について、川崎市 (2018)
- 7) 川崎市経済労働局国際経済推進室: 川崎エコテックニュースレター Vol. 3、川崎市 (2016)
- 8) 菅沼秀樹: 大規模バイオマス専焼発電の将来的な燃料調達可能性について. 川崎市環境総合研究所年報第 6 号 (通巻第 45 号)、95-100 (2018)
- 9) Thomas D.S.G.: Large-scale controls and variability in drylands. In Thomas D.S.G. (Eds.), Arid zone geomorphology: process, form and change in drylands. Wiley-Blackwell, 3-16 (2011)
- 10) Grierson P.F., Adams M.A., Attiwill P.M.: Estimates of carbon storage in the above-ground biomass of Victoria's forests. Australian Journal of Botany, Vol. 40, 631-640 (1992)
- 11) West P.W., Mattay J.P.: Yield prediction models and comparative growth rate for 6 eucalypt species. Australian Forestry, Vol. 56, 211-225 (1993)
- 12) Smith P.: How long before a change in soil organic carbon can be detected? Global Change Biology, Vol. 10, 1878-1883 (2004)
- 13) Yamada, K., Kojima, T., Abe, Y., Saito, M., Egashira, Y., Takahashi, N., Tahara, K., Law, J.: Restructuring and afforestation of hardpan area to sequester carbon, J. Chem. Eng. Jpn., Vol. 36, 328-332 (2003)
- 14) Bettenay, E., Churchward, H.M.: Morphology and stratigraphic relationships of the Wiluna hardpan in arid Western Australia, J. Geol. Soc. Aust., Vol. 21, 73-80 (1974)
- 15) Environment Australia: Revision of the Interim Bio-geographic Regionalisation of Australia (IBRA) and the development of version 5.1. Summary report, Department of Environment and Heritage, Canberra (2000)
- 16) National Land and Water Resources Audit: Australia's native vegetation - A summary of the national land and water resources audit's Australian native vegetation assessment 2001, Commonwealth of Australia (2002)
- 17) Fisher, A., Hunt, L., James, C., Landsberg, J., Phelps, D., Smyth, A., Watson, I.: Review of total grazing pressure management issues and priorities for biodiversity conservation in rangelands: A resource to aid NRN planning. Desert Knowledge CRC Project Report No. 3. Desert Knowledge of CRC and Tropical Savannas Management CRC, Alice Springs (2004)
- 18) 山田興一: 乾燥地植林による炭素固定システムの構築. 科学技術振興機構 (編), 戦略的創造研究推進事業平成 10 年度採択研究課題研究終了報告書-資源循環・エネルギーミニマム型システム技術. CREST, JST, 東京, 355-455 (2004).
- 19) 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土層構造解析. 農業土木学会論文集, Vol. 69 (6), 739-746

- (2001)
- 20) Hingston F.J., Galbraith J.H., Dimmock G.M.: Application of the process-based model BIOMASS to *Eucalyptus globulus* subsp. *globulus* plantations on exfarmland in south western Australia I. Water use by trees and assessing risk of losses due to drought. *For. Ecol. Manage.*, Vol. 106, 141-156 (1998)
- 21) Pracilio G., Smettem K.R.J., Bennett D., Harper R.J., Adams M.L.: Site assessment of a woody crop where a shallow hardpan soil layer constrained plant growth. *Plant Soil*, Vol. 288, 113-125 (2006)
- 22) Boers Th.M., Ben-Asher J.: A review of rainwater harvesting. *Agricultural Water Management*, Vol. 5, 145-158 (1982)
- 23) Marcar N., Crawford D., Leppert P.M., Jovanovic T., Floyd R., Farrow R.: Trees for saltland, a guide to selecting native species for Australia. CSIRO Division of Forestry, Canberra(1995)
- 24) Suganuma H., Abe Y., Taniguchi M., Tanouchi H., Utsugi H., Kojima T., Yamada K.: Stand biomass estimation method by canopy coverage for application to remote sensing in an arid area of Western Australia. *For. Ecol. Manage.*, Vol. 222, 75-87 (2006)
- 25) Barton C.V.M., Montagu K.D.: Effect of spacing and water availability on root:shoot ratio in *Eucalyptus camaldulensis*. *Forest Ecology and Management*, Vol. 221, 52-62 (2006)
- 26) UNFCCC: 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-. UNFCCC (2006)
- 27) Commonwealth of Australia: National Inventory Report 2012 Volume 2 - The Australian Government Submission to the United Nations Framework Convention on Climate Change Australian National Greenhouse Accounts-. The Commonwealth of Australia (2014)
- 28) Witt G.B., Noël M.V., Bird M.I., Beeton R.J.S. (Bob), Menzies N.W.: Carbon sequestration and biodiversity restoration potential of semi-arid mulga lands of Australia interpreted from long-term grazing exclosures. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, Vol. 141, 108-118 (2011)
- 29) Burrows W.H., Henry B.K., Back P.V., Hoffmann M.B., Tait L.J., Anderson E.R., Menke N., Danaher T., Carter J., McKeon G.M.: Growth and carbon stock change in eucalypt woodlands in northeast Australia: ecological and greenhouse sink implications. *Global Change Biol.*, Vol. 8, 769-784 (2002)