

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

- 川崎市の温暖化緩和策としての可能性探索 -

Potential of biomass fuel supply for large-scale biomass power generation plant of next generation
-Investigation for carbon mitigation alternative for 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。この実現には 2 種のボトルネック課題があり、それらはバイオマス燃料の安定調達とバイオマス発電炉の大規模化・高効率化である。本研究ではこのうち燃料の安定調達の可能性について、オーストラリアの乾燥地を用いた大規模植林によるバイオマス供給ポテンシャルを推定し、検討した。その結果、植林面積を拡大することによって本市臨海部の発電所全てをカーボンニュートラル化する以上のバイオマス供給ポテンシャルが示された（最大で 1.4 億 t／年）。今後は推定結果の具体化に向けた実現可能性調査などが求められる。

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⁻² 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のためには、2050 年までに社会の低炭素化ではなく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 CO₂ 換算で約 2,350 万 t-CO₂ (2014 年改訂値) となっており⁶⁾、一人当たりの排出量は約 16 t-CO₂/年である。川崎市の臨海部には発電所が多く集積しており、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%に過ぎず、現状ではほとんどが化石燃料による発電となっている。よって、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

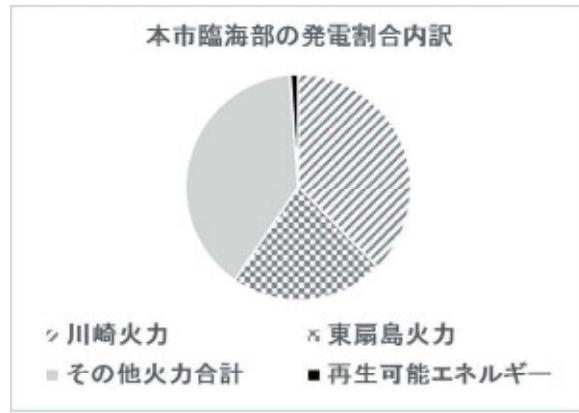


図 1 本市臨海部の発電量（合計 650 万 kW）。川崎エコ テックニュースレター⁷⁾を基に著者作成

化対策推進基本計画⁵⁾に必要であると考えられる。

発電のカーボンニュートラル化については IPCC の緩和策として積極的に議論され、バイオマス発電や CCS 付加バイオエネルギー発電 (Bio-Energy with Carbon Capture and Storage: BECCS) の重要性について強調されている⁸⁾。しかしながら、バイオマス発電は大量のバイオマス燃料調達がボトルネックとなっており、現状では小規模のバイオマス専焼発電施設が稼働しているが大規模化を模索している途中であり^{9), 10)}、大規模なバイオマス専焼発電の実例は少ない。例えば本市内の代表的なカーボンニュートラル発電所である川崎バイオマス発電株式会社の事例では、3.3 万 kW クラスの発電所の運転に年間約 18 万 t のバイオマス供給が必要である¹¹⁾。林野庁の我が国の森林面積（約 2,500 万 ha）と蓄積材積量（約

49 億 m³) の状況¹²⁾、および一般的な木材の密度が 0.4~0.6 t/m³ である¹³⁾ ことから簡易的に木材の密度を 0.5 t/m³ と設定すると、日本の平均的な森林のバイオマス現存量が約 100 t/ha となる。これらのことから、年間 18 万 t のバイオマスを得るためにには、本市の宮前区と同等の面積の森林伐採が必要となる。仮に臨海部の総発電量の約 60% を占める川崎火力発電所（発電規模本市 1 位）と東扇島発電所（発電規模本市 2 位）の計 540 万 kW⁷⁾ をカーボンニュートラル化すると仮定すると、年間約 3,000 万 t のバイオマス=約 3,000 km² の森林伐採が必要となり（本市面積の 20 倍以上）、我が国の中でバイオマス原料を調達することは国土保全の観点から非常に難しい。実際に日本国内のバイオマスエネルギー供給ポテンシャルは日本の一次エネルギーの 3% 程度と小さく¹⁴⁾、国内での開発余地は少ない。現状では小規模発電所ですからバイオマス集荷の競合による資源不足が指摘されている^{15), 16), 17)}。よって発電のバイオマス原料は、必然的に海外調達を視野に入れる必要がある。

しかしながら現状のバイオマス原料供給体制を考慮すると、バイオマス原料を新しく調達する技術開発が必要と考えられる。例えば、世界の木質ペレットの流通量が 2015 年現在で年間 2,800 万 t¹⁸⁾ であり、上述のバイオマス燃料必要量未満である。また既に利用可能な技術で植林を実施する場合には、植林と農業の土地利用の競合^{19), 20)}、特に食糧生産との土地利用の競合²¹⁾ が問題となる。既存の液体バイオ燃料生産が自然環境破壊や食糧生産の圧迫の上で成り立ってきた現状^{9), 22)} を考慮すると、バイオマス発電用のバイオマス調達は、食糧生産と競合しない新技術によってなされるべきである。その対象地域の一つとしてスケールメリットを活かせる乾燥地・半乾燥地が挙げられる²²⁾。

そこで本研究では、新しい木質バイオマス調達先とみなされているオーストラリア⁹⁾ の乾燥地で、新しい植林技術開発を長年実践している事例^{22), 23)} を用いて、川崎市の臨海部の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検討する。

2 研究手法

2.1. バイオマス生産ポテンシャル推定

参考事例とする研究対象地は 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 IBRA²⁴⁾ では Murchison 生物地理領域に分類される。National Land and Water Resources Audit²⁵⁾ の報告では、Sturt Meadows の主な土地被覆はアカシア疎林、*Eremophilla* 種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²⁶⁾。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、放牧と植林の親和性は非常に高い。

Yamada *et al.*²³⁾ はこの地域で植物の成長を阻害している Wiluna ハードパン²⁷⁾ を破碎し、雨水を集水して植物の成長を促すウォーター・ハーベスティング²⁸⁾ を組み合わせる技術を開発したことにより、植林を成功させた。成功した植林実験において最も高い生産性を示した樹種が、*Eucalyutops camaldulensis* という郷土樹種であった²⁹⁾。この植林技術によって図 2 に示すような裸地をユーカリの森林に変えることが可能となると推定された²⁹⁾。また、Yamada *et al.*²³⁾ の植林手法は再現実験にも成功しており³⁰⁾、頑健性のある植林手法であることが証明されている（図 3）。



図 2 乾燥地植林のコンセプト



図 3 再現実験区画（植林後 5.5 年）2018 年 3 月撮影

本研究では、植林樹木の 10 年以上の継続観測結果およびバイオマス推定式を用いて計算したバイオマス成長速度推定結果³¹⁾ から、バイオマス燃料として伐採可能な量を 2.35 t/ha/年と仮定した結果と、広域での植林展開可能性についての検討結果³²⁾ 等を用いて、バイオマス生産量を推定した。なお、植林から伐採までの期間（伐期）は 20 年および 30 年を想定した。

2.2. バイオマス専焼発電ポテンシャルの推定

現状で国内外で稼働中のバイオマス専焼発電施設は化石燃料のそれと比較すると小規模であり、大型化を実現するための技術開発が進行中である¹⁰⁾。なぜならば、一般的に小規模な発電施設では発電効率が悪く、大型化すればするほど発電効率は上がるからである³³⁾。さらに、発電量に対する建設コストも低下するため³³⁾、バイオマス発電設備の大規模化が望まれる。

しかし現状で報告されている効率の良いバイオマス発電の効率は30%前後であるため^{13), 33)}、単純化のために本研究で想定する発電効率は30%と設定した。なお本研究で想定している *Eucalyptus camaldulensis* の燃焼熱の報告は無いため、その代替としてユーカリ類の乾燥バイオマス基準での高位発熱量 18.7 MJ kg⁻¹ を用いて *E. camaldulensis* の燃焼熱を計算した³⁴⁾。

上記燃焼熱と発電効率およびバイオマス供給量から、算出されるバイオマス専焼発電ポテンシャルを計算した。

3 結果

研究対象地での Yamada *et al.*²³⁾ の植林手法による20年間および30年間の単位面積当たりの発電用のバイオマス生産量は、それぞれ47 t/ha、71 t/haと推定された。また、研究対象地の約2,300 km²の中でCO₂収支の観点から植林が可能と判断された面積が2,160 km²となつたため³²⁾、対象地全体での20年間および30年間のバイオマス生産ポテンシャルはそれぞれ約1,000万tおよび1,500万tとなった。

上記生産バイオマスから推定される発電量は20年伐期で15.6 TWh、30年伐期で23.4 TWhとなった。

4 考察

一般的に乾燥地のバイオマス生産速度は1t/ha/年未満と低い³⁵⁾ため、本研究で利用したバイオマス生産速度2.35 t/ha/年³¹⁾は充分大きいと考えられる。しかしながら、本市面積の約15倍の植林面積を利用したにもかかわらず、これらのバイオマスから推定される発電量は最大で23.4 TWhとなった。これは1TWh/年未満となるため、メンテナンス期間を考慮せず定格出力から単純計算した発電量が、川崎火力発電所が約30 TWh/年、東扇島発電所が17.5 TWh/年と想定されることと比較すると、これらの発電所をカーボンニュートラル化するためには、植林面積をもっと増やす必要があると考えられた。

Yamada *et al.*²³⁾の植林実験地域はIBRA²⁴⁾ではMurchison生物地理領域に分類される。この領域内の全てにWilunaハードパンが分布し²⁷⁾、気象・土壤・植生・土地利用の条件が領域内で非常に類似した環境条件となっている。そのため、このMurchison全域でYamada *et al.*²³⁾の植林手法を土地利用の競合を避けながら展開できることを考えられる。Murchisonは研究対象地Sturt meadowsの面積の約91倍であるため、バイオマス生産ポ

テンシャルも同様に約91倍になると推定され、約1,000万t/年になると計算された³²⁾。

年間1,000万tのバイオマス生産量は、20年伐期で10.4 TWh/年、30年伐期で15.6 TWh/年の発電量相当となり、30年伐期の設定であれば東扇島発電所と同等規模のバイオマス発電設備を稼働させることができると考えられた。東扇島発電所の臨海部の発電能力に占める割合は約22%となるため、非常に強力な温暖化緩和策になると考えられた。

しかしながら本市では地球温暖化対策推進基本計画で想定している削減目標は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⁵⁾。これらの目標達成のためには、上述の西オーストラリアのMurchison全域での植林だけでは達成することが不可能である。この問題点の解決策としては2種の方法が考えられる。1つ目はさらなる植林対象地の拡大、2つ目は発電効率の向上である。なお、2つ目の発電効率の向上については2種の方法があり、バイオマス専焼発電設備の大型化による発電効率の向上と、既存の高効率石炭火力発電に設備付加を行って石炭混焼発電することである。本考察ではそれぞれのポテンシャルを示すと共に、現状の問題点を提示する。

オーストラリアで乾燥地植林が可能な地域は、上述のMurchisonに限らない。研究対象地およびMurchisonと類似の環境条件であれば、Yamada *et al.*²³⁾の植林手法を拡大できる可能性がある。例えば研究対象地と同じ年降水量(200~300 mm)の地域である。オーストラリア国内で年降水量200~300 mmの地域は、Murchisonの約13倍の面積(オーストラリア大陸の約3割の面積)である³⁶⁾。これらのこと考慮すると、バイオマス生産ポテンシャルは年間1000万tから年間約1.4億tと非常に莫大なものとなる。図4に植林対象地の拡大に伴うバイオマス生産量の劇的な増加を示す。実数軸だと研究対象地のみのバイオマス生産量が図示できないため、あえて対数軸にしている。これだけのバイオマス生産が可能とすれば、本市臨海部の発電容量の80%をバイオマス専焼発

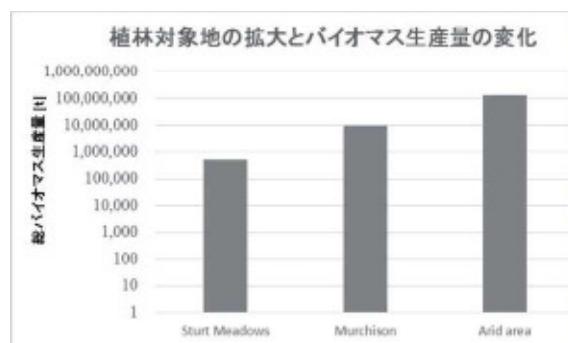


図4 植林対象地の拡大とバイオマス生産量の変化(30年間)

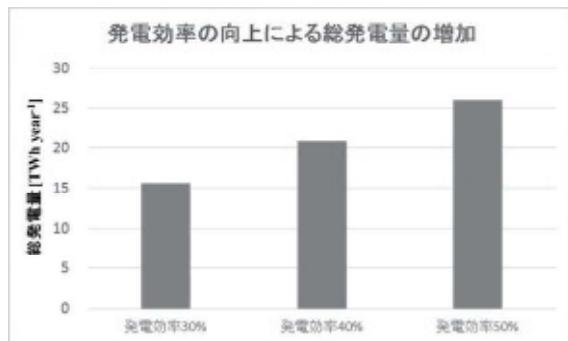


図5 バイオマス供給ポテンシャル 1000 万 t／年における発電効率の向上による総発電量の増加

電所で代替してカーボンニュートラル化することが可能となるため、本市の地球温暖化対策推進基本計画⁵⁾の長期目標で想定されている 80%以上の削減が達成可能と考えられる。

植林面積の拡大によって本市の地球温暖化対策推進基本計画⁵⁾の長期目標達成のための充分なバイオマス供給ポテンシャルが推定されたが、現状ではまだ問題点が残っている。1点目は想定した植林可能性のある領域での実現可能性調査が必要な点である。菅沼ら³⁰⁾によって研究対象地での実現可能性調査は終了しているが、Murchison および年降水量 200～300 mm の地域での実現可能性調査が未実施である。2点目は FIT 認証取得のために燃料の大量安定調達の証明が必要となる¹⁰⁾ 上に、事業の継続性担保の観点から広範囲での実現可能性調査が必要とされている。また、バイオマス燃料は広域収集と長距離輸送が必要なため、このようなバイオマスの収集・運搬の過程で CO₂ が排出されるため、結果バイオマス発電所での正味の CO₂ 削減量が減るというデメリットがある^{9), 10)}。よって、LCA 解析等によって事業化の前に調達バイオマスが充分に温室効果ガス削減に貢献するかどうか検証する必要がある。その反面バイオマスは他の再生可能エネルギーと異なり備蓄が可能であるため、バイオマス発電はベースロード電源としての役割を果たせる重要な電源である¹⁰⁾。

2つ目の可能性である発電効率の向上であるが、現状のバイオマス専焼発電の発電効率は化石燃料のそれと比較して低いため^{10), 33)}、この発電効率が向上されれば発電に必要なバイオマス燃料が少なくなり、結果として植林必要面積の削減や燃料運搬のための CO₂ 排出量の低減に貢献する。例えば、図5および図6に示したように、バイオマス調達量が固定されていたとしても、発電効率の向上によって総発電量が劇的に増加する。例えば東扇島発電所と同等規模のバイオマス専焼発電設備を稼働させるには、発電効率 30%では 30 年伐期が必要であるが、発電効率 50%では 20 年伐期でも余力が生まれる。このように、バイオマス専焼発電設備の発電効率の高効率化は非常に重要な意味を持つ。だからこそ、世界中が大型の

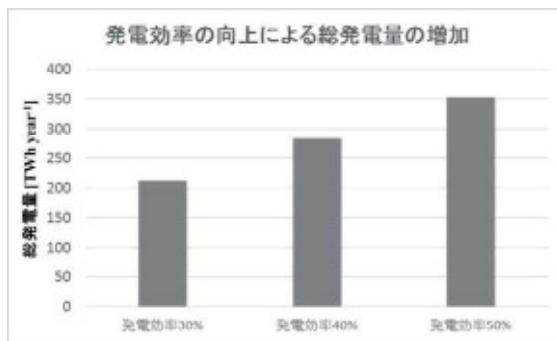


図6 バイオマス供給ポテンシャル 1.4 億t／年における発電効率の向上による総発電量の増加

高効率バイオマス専焼発電炉の開発を模索している¹⁰⁾。

バイオマス専焼発電所を一から建設することに比べ、大規模で発電効率の高い石炭火力発電所でのバイオマス混焼またはバイオマス燃料への転換が、比較的容易に発電効率を向上させる方法となる¹⁰⁾。バイオマス混焼発電のメリットは、既存の大型石炭火力発電所は発電効率が 40%以上と高いため（例 44%³³⁾）、容易に発電効率を向上でき、さらに既存施設の流用で短期間で発電開始が可能であることである。デメリットは、現状の石炭火力発電（微粉炭）設備をそのまま流用するだけでは、バイオマス混入率が 1～3%程度と低く¹⁰⁾、実証実験レベルでもせいぜい 10%程度である¹⁰⁾。ただし、バイオマス専用の破碎機の増設を実施すれば、このデメリットはある程度解決可能である¹⁰⁾。

次にバイオマス燃料の転換例として、イギリスの Drax 発電所が 180 万 kW の石炭火力発電ユニットを 100%バイオマス燃料（木質ペレット）に変換することによって年間約 700 万 t の燃料調達で運転可能となっている³⁷⁾。同出力の発電ユニットが川崎バイオマス発電所¹¹⁾と同等の低い発電効率だと仮定した場合に年間約 1,000 万 t ものバイオマス燃料が必要であるため、この例では燃料調達量を約 30%削減できたこととなる。よってこの例に示されるような石炭火力発電ユニットのバイオマス専焼ユニットへの換装は、大きな効果が期待される。

なお、バイオマス発電所の稼働可能時期については留意しなくてはならない。乾燥地植林によるバイオマス生産は最短でも 20 年かかるため、2030 年の削減目標には貢献できず、必然的に 2050 年の長期目標へのコミットのみ可能となる点を留意すべきである。

また、バイオマスは発電以外の用途に利用可能である。例えば第 2 世代バイオ燃料（セルロース系エタノール）の原料としても利用可能であり、発電に限らず本市の新産業創出に貢献する可能性も考えられる。

5 結言

本市臨海部の発電を、カーボンニュートラル化するポテンシャルが示された。その実現には 2 つのボトルネック

ク課題を克服する必要がある。1つ目は大規模乾燥地植林の広域での実現可能性であり、本研究によって実現可能性が高いことが示された。2つ目は本検討課題ではないが、大規模バイオマス専焼発電炉の開発である。この2種のボトルネック課題を克服すれば、本市の地球温暖化対策推進基本計画の温室効果ガス削減目標⁵⁾を達成できると考えられる。

引用文献

- 1) IEA/OECD : CO₂ emissions from fuel combustion highlights 2013 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) Smith, P., Bustamante, M., Ahammad, H., Clark, H., Dong, H., Elsiddig, E.A., Haberl, H., Harper, R.J., House, J., Jafari, M., Masera, O., Mbow, C., Ravindranath, N.H., Rice, C.E., Robledo Abad, C., Romanovskaya, A., Sperling, F., Tubiello, F.N.: Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). 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, 811-922(2014)
- 9) 泊みゆき:バイオマス白書2017. NPO法人バイオマス産業社会ネットワーク. <http://www.npobin.net/hakusho/2017/> (2018年7月30日アクセス) (2017)
- 10) NEDO:再生可能エネルギー技術白書第2版 再生可能エネルギー普及拡大に向けて克服すべき課題と処方箋、NEDO (2014)
- 11) 川崎バイオマス発電所:川崎バイオマス発電所の特徴、<https://www.kawasaki-biomass.jp/power-plant/> (2018年7月30日アクセス) (2018)
- 12) 林野庁:森林資源の現況 (平成24年3月31日現在) <http://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/genkyou/h24/index.html> (2018年7月30日アクセス) (2012)
- 13) 社団法人日本エネルギー学会編:バイオマッシュンドブック (第二版)、オーム社 (2009)
- 14) 経済産業省:総合資源エネルギー調査会新エネルギー一部会資料 (2009)
- 15) 安藤範親:未利用材の供給不足が懸念される木質バイオマス発電 - 地域別需給推計と展望 - 、農林金融、67, 364 - 378 (2014)
- 16) 松村幸彦:バイオマスFITを俯瞰する、日本エネルギー学会誌、94, 1174 - 1178 (2015)
- 17) 岩岡正博、小野梓、松本武:木質バイオマス発電の燃料はどのような形でどこから集められ足りているのか?、日本森林学会誌、99, 220 - 225 (2017)
- 18) World Bioenergy Association : WBA Global Bioenergy Statistics 2017(2017)
- 19) Burns K., Walker D., Hansard A. : Forest plantations on cleared agricultural land in Australia. A regional economic analysis, ABARE Research Report 99.11, Canberra, 227 pp(1999)
- 20) Kirschbaum, M.U.F. : What contribution can tree plantations make towards meeting Australia's commitments under the Kyoto Protocol?, Environmental Science and Policy, Vol. 3, pp. 83-90(2000)
- 21) Smith, P., Haberl, H., Popp, A., Erb, K.H., Lauk, C., Harper, R., Tubiello, F., de Siqueira Pinto, A., Jafari, M., Sohi, S., Masera, O., Böttcher, H., Berndes, G., Bustamante, M., Ahammad, H., Clark, H., Dong, H., Elsiddig, E.A., Mbow, C., Ravindranath, N.H., Rice, C.W., Robledo-Abad, C., Romanovskaya, A., Sperling, F., Herrero, M., House, J.I., Rose, S. : How much land based greenhouse gas mitigation can be achieved without compromising food security and

- environmental goals?, *Glob. Change Biol.*, Vol. 19, 2285–2302(2013)
- 22) 小島紀徳、江頭靖幸：沙漠を森に - 温暖化への処方箋 - 、コロナ社 (2011)
- 23) 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)
- 24) 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)
- 25) 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)
- 26) 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)
- 27) 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)
- 28) Boers, Th.M., Ben-Asher, J. : A review of rainwater harvesting, *Agricultural Water Management*, Vol. 5, 145–158 (1982)
- 29) Saganuma, H., Omori, T., Sato, N., Hamano, H., Takahashi, N., Utsugi, H., Kojima, T., Yamada, K. : Selection of appropriate planting method and tree species for arid land afforestation in Western Australia, *Journal of Arid Land Studies*, Vol. 23, No. 4, 193–198 (2014)
- 30) 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（ハードパン破碎手法）、日本沙漠学会第 29 回学術大会 0-06 (2018)
- 31) Saganuma, H., Utsugi, H., Takahashi, N., Tahara, K., Egashira, Y., Kojima, T. : Estimation of biomass and bio-fuel production potential by afforestation in arid area of the Murchison region, Western Australia, *Journal of Arid Land Studies*, Vol. 24, No. 1, 21–24(2014)
- 32) Saganuma, H., Utsugi, H., Takahashi, N., Sakai, Y., Egashira, Y., Harper, R., Kojima, T., Abe, Y., Yamada, K. : Carbon biosequestration potential using Eucalypts in arid areas in Western Australia, IUFRO Eucalypt Conference 2015, Zhanjiang, Guangdong, China, Oct. 21st to 24th, (2015)
- 33) 電力中央研究所：FIT導入に伴う国内バイオマス発電設備開発動向と石炭火力混焼発電への影響調査、電力中央研究所報告、調査報告 M13009 (2014)
- 34) Klass D.L. : Biomass for renewable energy, fuel and chemicals, Academic Press(1998).
- 35) 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)
- 36) Bureau of Meteorology : Average annual, seasonal and monthly rainfall, http://www.bom.gov.au/jsp/ncc/climate_averages/rainfall/index.jsp(2018年7月30日アクセス) (2016)
- 37) 相川高信：未利用バイオマス発電が直面するであろう課題：先行する欧州の経験からの考察、森林科学、Vol. 83, 20–23 (2018)