

小規模木質 CHP の事業性と GHG 削減効果の評価 —和歌山の施設園芸を対象として—

和歌山大学 佐々木 嶺*
和歌山大学 吉田 登

要旨

本研究では、未だ木質バイオマス発電の導入がない和歌山県を対象として、小規模木質 CHP の事業性と GHG 削減効果の評価を行った。まず、小規模木質 CHP は水分率の安定した高質な燃料が必要とされるため発電廃熱を木質燃料の乾燥に用いることを想定して必要熱量を推計した。ついで、残った排熱を和歌山の一次産業として特徴的な施設園芸に供給することを想定し、既往研究の暖房熱量試算ツールを参考に県内の複数地域における施設園芸での必要熱量を試算した。これをもとに売熱価格等の条件を設定し、IRR 等を指標として小規模木質 CHP における事業性評価を行った。また小規模木質 CHP による化石燃料代替を考え GHG 削減効果を算出した。分析の結果、事業性における設備の初期投資額、燃料価格、売熱価格等の影響が大きいことが定量的に明らかとなった。小規模木質 CHP の GHG 削減効果における特徴について考察した。

Estimation of business potential of small-scale woodchip CHP and GHG reduction effect
- A case study of greenhouse horticulture in Wakayama facilities -

Wakayama University Ryo Sasaki[✉]
Wakayama University Noboru Yoshida

Abstract

In this study, we evaluated project feasibility of small scale wood CHP business and its GHG reduction effects in Wakayama prefecture where there was no wood biomass power generation yet. First, since small-scale woody CHPs require high-quality fuel with stable moisture content, we estimate the necessary calorific value assuming that waste heat from power generation can be used for drying woody fuel. Second, assuming that the remaining waste heat is supplied to the facility horticulture characteristic of Wakayama's primary industry, we calculated the heat demand in the facility gardening in multiple areas in the prefecture with reference to the heating demand calculation tool developed in a previous study. Based on this, we set conditions such as heat price, and evaluated the project feasibility in small scale wood CHP with IRR etc. as an indicator. In addition, GHG reduction effect was calculated considering substitution of fossil fuel by small scale wood CHP. As a result of the analysis, it was quantitatively revealed that the effects of initial investment amount, fuel price, heat price etc. of facilities in business performance were comparatively large. Furthermore, the characteristics of the small-scale wood CHP were discussed in terms of regional GHG reduction effect.

小規模木質 CHP の事業性と GHG 削減効果の評価 —和歌山の施設園芸を対象として—

和歌山大学 佐々木 嶺*
和歌山大学 吉田 登

1. はじめに

近年、低炭素社会の実現に向け、地域の木材資源を有効活用する木質バイオマス発電が注目されている。2012年に再生エネルギーの固定価格買取制度（FIT：Feed in Tariff）が施行されて以降、全国でバイオマス発電所の建設が進んだ。FIT 施行初期の木質バイオマス発電の発電方式は蒸気タービンが主流であった。蒸気タービン方式は、規模が大きくなればなるほど発電効率が上昇するため事業採算性が高まる。一般的に事業採算性の観点からは、発電出力 5,000 [kW]以上を確保することが望ましいため、大規模な発電所の建設が進んだ。しかし、大規模な発電所は多量に燃料を確保する必要があり、発電事業間で燃料の取り合いが起り、事業者によっては事業計画に沿った燃料を調達できず、発電所の稼働を休止や規模を縮小するという問題が発生した。2015年に FIT が改正され、小規模分散の木質バイオマス発電の普及促進や未利用間伐材などの利用を促進する観点から、未利用間伐材を利用した発電出力 2,000 [kW]未満の小規模な発電を対象に 40 [円/kWh]のプレミアム単価が設定された。これに伴い未利用間伐材を用いた小規模分散での木質バイオマス発電の導入を促進させるために支援する制度が整った。小規模な木質バイオマス発電では、蒸気タービン発電の発電効率が低下するため、発電方式の歴史では蒸気タービン発電に比べ新しいガス化方式を採用することが多い。ガス化方式は、従来の同規模の蒸気タービン方式と比べ発電効率が大幅に改善する。しかし、まだ十分とはいいがたく売電事業のみでは採算をとるのが難しい。その点、発電の際に生じる排熱も利用する熱電併給システム（CHP：Combined Heat and Power）は売電事業に加え売熱事業による収益率の改善が見込めるので注目を浴びているが国内の導入事例は多くはない。これに対して、ドイツやオーストリアでは、小規模木質バイオマス CHP システムを導入する事例が拡大している。近年、少数ではあるが、こうした欧州型の小規模木質バイオマス CHP システムを国内で実現しようとする先進事例が存在する。地域の木質バイオマス資源の利活用とともに、地域外からの化石エネルギー供給に依存する一次産業に熱供給すれば低炭素化に大きく貢献できる地域システムを実現することが可能となる。そうした一次産業への熱供給を想定した小規模木質 CHP システムでの事業性を定量的に評価した研究は多くない。

また、木質バイオマス発電では、木質バイオマスを直接燃焼することによって生じる二酸化炭素（CO₂）は再び森林によって吸収されることで大気中の CO₂濃度を増減に寄与しない。これをカーボンニュートラルといいその概念に従うと燃焼に伴う CO₂排出量はカウントされない。しかし、木質バイオマスを燃焼させる木質バイオマス発電所までには、山側から間伐材の搬出、加工・発電などのそれぞれのサイト間における輸送および木質燃料の製造等のプロセスで化石燃料が消費されることになるため、ライフサイクルアセスメント（LCA：Life Cycle Assessment）手法を用いた分析が不可欠である。木質バイオマス発電に関する LCA 研究については木質燃料の製造、従来型の大規模発電所の主流である蒸気タービン方式での CHP システムに注目したものはあるが、木質燃料の製造も含めた小規模な木質 CHP システムを対象とする研究はない。

一方で、和歌山県は、県土の 77%が森林で大きなポテンシャルを有する地域であるが、いまだ木質バイオマス発電または熱電併給システムの導入事例はない。但し、木質バイオマス発電の事業計画はいくつか存在

するが、その多くは間伐材を主燃料としたものでない。加えて、すべての事業計画は小規模木質 CHP システムを採用したものではない。中山間地を多く抱える和歌山県では、今後一次産業への熱供給を想定した小規模木質 CHP システムの導入を検討する余地があると考えられる。

本研究では、和歌山県にて木質バイオマスを利用した小規模ガス化熱電併給システムを導入する際の事業性を分析し、特に小規模木質ガス化で重要となる木質燃料乾燥等の取り扱いを含め、事業性に影響を及ぼす要因を抽出することを目的とする。熱供給先としては、和歌山県内での山間部や農山漁村などに多く存在する施設園芸を対象とする。さらに木材の搬出から燃料製造、CHP による電力・熱供給のシステムを LCA 手法を用いて環境負荷を定量的に評価することで、既存の電力供給・熱供給システムと比較した小規模な木質 CHP の GHG 削減効果を分析する。

2. 研究方法

まず、国内での導入事例[1]より、欧州型を採用した 2 つの代表的な小規模木質 CHP システムの導入事例を取りあげて、それぞれのコスト構造・エネルギー構造を分析する。想定する欧州型の小規模木質 CHP システムには、発電規模や木質バイオマス燃料種ごとにいくつかの型式が存在する。ここでは、木質原料の種類より木質チップ利用、木質ペレット利用の 2 種類のシステムを設定する。木質チップ利用のシステム (Volter 社, ダウンドラフト型) では、外部から約 35~45%の含水率の木質チップを購入し、CHP システムのガス化炉に投入する際に、自らの燃焼ガスから得た熱を用い木質チップを約 15%の含水率まで乾燥することで、システムのエネルギー効率を向上させている。これに対して、木質ペレット利用のシステム (Burkhardt 社, アップドラフト型) では、高品質のペレット燃料を要するが良質で安定しているため、ガス化剤や生成ガス条件の高度な制御が可能である。それぞれのシステムは国内ですでに安定稼働しており先進的な取組事例[2]として注目されている。

具体的な分析方法については、Volter 社のシステムでは、チップ利用の際の乾燥に必要な熱量を推計し、燃焼ガスから回収された熱を用い発電サイト内にてチップを乾燥させる工程を考慮し、残りの熱を全量供給できると仮定する。乾燥に必要な熱量の推計方法は参考文献[3,4]の原料チップの乾燥に必要な熱量の計算式に従った。Burkhardt 社のシステムでは、発生した熱はすべて供給できると仮定する。

熱の供給先として取り扱う施設園芸は、気象条件が異なると熱需要も異なるために地域別熱需要を推計する。その際に高山らの暖房熱量試算ツール[5]を用いる。

3. 事業性評価

それぞれの小規模木質 CHP での事業性を評価するために、内部収益率 (IRR : Internal Rate of Return) をもとめる。IRR の求め方は次式 (1) のとおりである。事業性評価の前提条件と IRR の分析結果を表 1 に示す。Volter 社の CHP システムを 4 機併設することで Burkhardt 社の CHP システムとは送電出力をおおよそ同規模とし比較が容易となるように調節した。それぞれ年稼働日数[2]は 325 日と 320 日で、稼働停止期間はメンテナンスを行っているものとする。売電単価は FIT 認定を想定して 40 [円/kW]とした。売熱単価は国内導入事例と過去 5 年間 (2013 年~2017 年) の重油平均価格 68.5 [円/L]を参考に 8.0 円とした。

$$\text{イニシャルコスト} - \sum_{n=0}^k \frac{An}{(1+r)^n} = 0 \quad (\text{式 1})$$

An : n 年に受け取るキャッシュフロー [円] n : 投資年数 r : 割引率 [%]

推計の結果、木質チップの乾燥に必要な熱量は、Volter 社の CHP システムから供給される発熱量の約 5 分の 1 となった。それぞれの CHP システムを比較すると Volter 社は Burkhardt 社に比べ発電量あたりの発

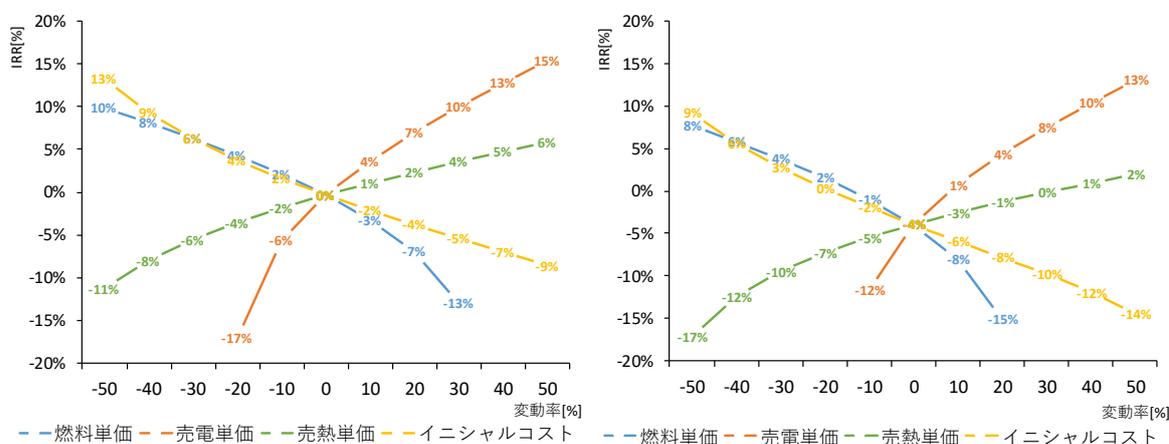
熱量が大きいことがわかる。

IRR の分析結果はそれぞれ 0%と-4%となった。Volter 社の CHP システムは、燃料の乾燥に一部の熱を供給したとしても Brukhardt 社の CHP システムの約 1.2 倍の熱を供給することが可能である。売電収入が多くなることが影響し IRR が高い値を示した。

IRR に影響を及ぼす諸要因（燃料単価・売電価格・売熱価格・イニシャルコスト）を変動させた場合の IRR の変化を図 1 に示す。それぞれの CHP システムの IRR の変化の構造は類似している。費用面では燃料単価の影響が大きく、収益面では売電単価の変化による影響が大きいことが読み取れる。

表 1 CHP システムの仕様と IRR の分析結果[2,3,4,6,7,8,9,10]

メーカー			Volter	Brukhardt
燃料の種類			木質チップ	木質ペレット
設備基本情報	発電出力	[kW]	175	165
	内部消費	[kW]	18	8
	送電端出力	[kW]	158	157
	熱出力	[kW]	400	260
	年間稼働時間	[h]	7,800	7,680
	燃料消費量	[kg/h]	136	110
	年間燃料消費量	[t]	1,058	845
燃料	燃料単価	[万円/t]	1.38	3.50
	年間燃料調達量	[t]	2,115	845
	燃料乾燥処理費	[円/kg]	2.4	0.0
	灰分率	[%]	2.5	2.5
租税	固定資産税率	[%]	1.4	1.4
	法人事業税率	[%]	4.0	4.0
イニシャルコスト	機器費	[万円]	16,000	19,250
	建屋・サイロ	[万円]	4,000	1,000
	小計	[万円]	20,000	20,250
ランニングコスト	燃料費	[万円]	2,919	2,957
	メンテナンス費	[万円]	800	660
	維持管理費	[万円]	744	740
	産業廃棄物処分費	[万円]	26	21
	減価償却費	[万円]	900	911
	小計	[万円]	5,389	5,289
	単価	売電単価	[円/kWh]	40
	売熱単価	[円/kWh]	8	8
収入	売電収入	[万円]	4,917	4,823
	売熱収入	[万円]	1,628	1,278
	年間収支	[万円]	1,156	812
事業性評価	投資回収年数	[年]	17	25
	IRR	[%]	0%	-4%



(左図：Volter／右図：Brukhardt)

図 1 各要因が IRR に及ぼす影響

4. GHG 削減効果の推計

LCA 手法を用いて評価するシステム境界を図 2 に示す。なお、本研究で取り扱うシステムは、国内で導入され稼働実績が確認できる Volter 社（燃料：木質チップ）と Brukhardt 社（燃料：木質ペレット）の 2 種類とする。木質燃料の原料である未利用間伐材の搬出、燃料製造、燃料の運搬、燃料の投入によるエネルギー

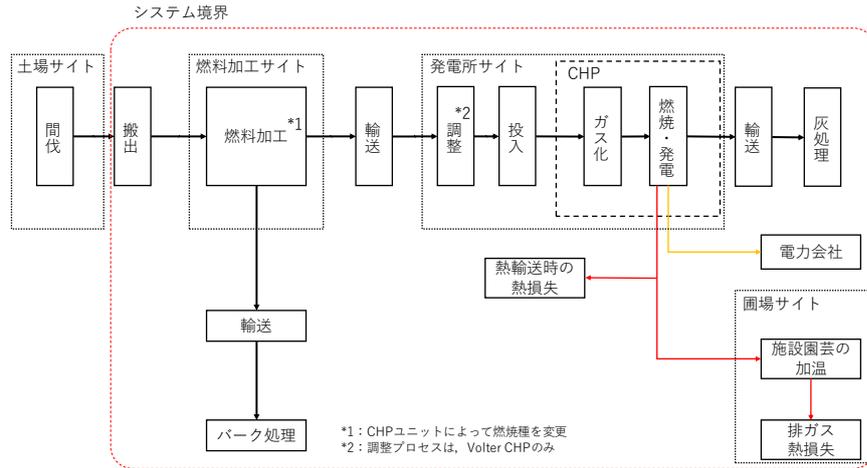


図2 本研究における LCA 評価のシステム境界

ギーの調達を経て廃棄物の処理までを評価範囲とする。未利用の間伐材の搬出については、間伐材発生場所から燃料製造サイトまでの輸送プロセスとした。但し、機械製造・建設は評価範囲の対象外とした。

両システムを1年間稼働させた場合に伴う燃料及びその原料である未利用間伐材の物量、バーク・灰といった廃棄物の物量、それらを製造、処理するために必要なエネルギー量、搬出・燃料・廃棄物の運搬するためのトラックの走行距離を表2に示す。年間燃料投入量から CHP システムの稼働に必要な未利用間伐材の搬出量を推計した。燃料製造過程における燃料の歩留まりはそれぞれ木質チップ 82.6%[11]、木質ペレット 80%[12] とする。丸太の剥皮作業は人力で行うものとする。なお、この作業に必要なエネルギーは多量に消費しないため、GHG 排出量の算定結果に大きな影響を及ぼさないものとし算定しない。剥皮後発生するバークは廃棄物処理場まで運搬し、焼却処分されるものとする。木質チップの製造過程はチップパーによる破碎を想定する。水分量の調整は発電所サイトに運搬した後にいき、CHP ユニットから排出される熱を利用して水分量を調整するものとする。木質ペレットの製造過程は一次破碎・二次破碎・ペレタ

表2 CHP システム稼働に伴う物質の物量、製造エネルギー、搬出・運搬の走行距離

メーカー	単位	Vollter (4 ユニット併設) 木質チップ	Brukhaardt (1 ユニット) 木質ペレット	
燃料の種類	年間発電量	[MWh/y]	1,229	1,206
	年間発熱量	[MWh/y]	3,117	1,997
	熱導管の損失量	[MWh/y]	623	399
	年間熱供給可能量	[MWh/y]	2,007	1,597
	木材乾燥に供給する熱量	[MWh/y]	487	-
	熱供給時の熱損失量	[MWh/y]	401	319
	熱道管の熱損失率	[%]	20	20
	ボイラ効率 (加温)	[%]	80	80
	CHP システム稼働に伴う物量	未利用間伐材搬出量	[t/y]	2,177
燃料製造量		[t/y]	1,798	1,521
燃料製造量 (乾燥後)		[t/y]	1,058	845
バーク発生量		[t/y]	379	380
灰発生量		[t/y]	26	21
歩留まり		[%]	83	80
灰分率		[%]	3	3
燃料製造過程に伴うエネルギー量	木材破碎に伴う電力消費量	[MWh/y]	-	44
	木材破碎に伴う重油消費量	[MWh/y]	10	8
	木材乾燥に伴う電力消費量	[MWh/y]	172	-
	燃料成型に伴う電力消費量	[MWh/y]	-	93
トラック走行距離	原木搬出	[km/y]	40,815	35,640
	燃料運搬	[km/y]	33,714	15,840
	灰の運搬	[km/y]	992	792
	バークの運搬	[km/y]	14,204	14,256

表3 年間 GHG 排出量の推計結果

項目	単位	Volter	Brukhardt
原木搬出に伴う GHG 排出量	[t-CO ₂ /y]	15.0	13.1
木材破砕(重油)に伴う GHG 排出量	[t-CO ₂ /y]	2.6	2.1
木材破砕(電力)に伴う GHG 排出量	[t-CO ₂ /y]	-	20.8
木材乾燥(電力)に伴う GHG 排出量	[t-CO ₂ /y]	82.2	-
燃料成型に伴う GHG 排出量	[t-CO ₂ /y]	-	44.5
燃料運搬に伴う GHG 排出量	[t-CO ₂ /y]	12.4	5.8
灰運搬に伴う GHG 排出量	[t-CO ₂ /y]	0.4	0.3
灰処理に伴う GHG 排出量	[t-CO ₂ /y]	1.0	0.8
バーク運搬に伴う GHG 排出量	[t-CO ₂ /y]	5.2	5.2
バーク処理に伴う GHG 排出量	[t-CO ₂ /y]	12.7	12.7
合計	[t-CO ₂ /y]	131.4	105.4

表4 出力 1kWh あたりの GHG 排出量

項目	単位	Volter	Brukhardt
電力供給量	[MWh/y]	1,229	1,206
熱供給量	[MWh/y]	2,007	1,597
GHG 排出量	[t/y]	131	105
GHG 排出量(電気 1kwh あたり)	[kg/kwh]	0.107	0.087
GHG 排出量(熱量 1kwh あたり)	[kg/kwh]	0.065	0.066
GHG 排出量(重油 1L あたり)	[kg/L]	0.711	0.716
GHG 排出量(熱電 1kWh あたり)	[kg/kwh]	0.041	0.038
GHG 削減量(熱電 1kWh あたり)	[kg/kWh]	0.707	0.710
GHG 削減量(電気 1kWh あたり)	[kg/kWh]	0.372	0.392
GHG 削減量(熱量 1kWh あたり)	[kg/kWh]	0.216	0.203
GHG 削減量(重油 1L あたり)	[kg/L]	2.209	2.204

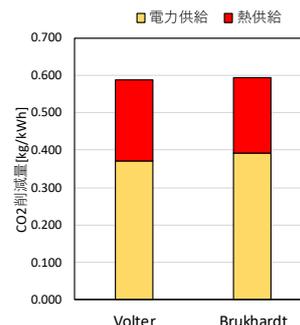


図3 GHG削減量の推計結果

イザーによる成型とする。水分量の調整は剥皮後、天然乾燥により行うものとする。未利用間伐材の搬出、燃料の運搬、バーク・灰の運搬は2tトラック(積載率75%)を想定した。CHPシステムから排出される灰は、廃棄物処理場まで運搬され埋立処理されるものと

する。未利用間伐材の収集範囲を燃料である木材の収集範囲は燃料製造サイトより半径25km圏内、燃料製造サイトから発電サイトまでの距離は25km、燃料製造サイトおよび発電サイトから廃棄物処理場までの距離は50kmとそれぞれ設定した。Volter社のCHPシステムは発電サイトまで輸送する燃料量が多いため、燃料運搬の走行距離がBrukhardt社のCHPシステムと比べ約2倍となっている。

搬出・燃料加工・CHP稼働・輸送・廃棄物処理それぞれのプロセスで年間排出される活動量に一般社団法人産業環境管理協会が公開しているカーボンフットプリントコミュニケーションプログラムの基本データベース[13]を乗じて、GHG排出量を算出した(表3)。Volter社のCHPシステムがBrukhardt社のシステムより1年間に排出するGHG排出量が多いことが分析の結果から得られた。

熱電併給(CHP)・電力供給・熱供給それぞれの出力1kWhあたりのGHG削減量を表4に示す。それぞれのシステム稼働時のGHG排出量の合計値を出力されるエネルギー量で除算しとめた。CHPシステム全体のGHG削減量はほぼ同等な結果があらわれた。電力供給のみではBrukhardt社システム、熱供給のみではVolter社のシステムがやや優位な結果が得られた。

5. 施設園芸への熱供給の可能性

和歌山県内の施設園芸で栽培されている主用作物10種[14]について年間加温に必要な熱量を推計した(図4)。加温期間が長かつ設定温度も高いバラが最も必要熱量が多いことが得られた。地点ごとで比較すると年間平均気温が低い高野山地点において最も必要熱量が多いことが得られた。熱需給だけを見れば、それぞれのCHPシステムともに、1[ha]以上の大規模な施設園芸の熱需要を満たす可能性があることが明らかとなった。

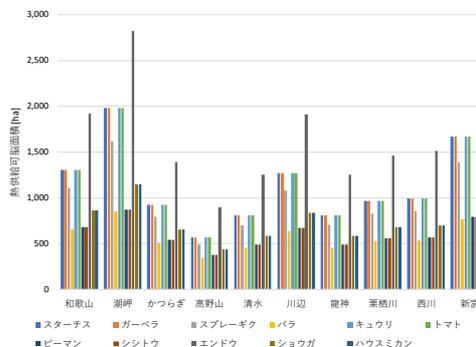


図4 地域別におけるCHPシステムで供給可能な施設園芸面積 (Volter社の場合)

6. まとめ

本研究では2種類のCHPシステムの事業性及びGHG削減効果を分析した。小規模な木質CHPシステムは現段階では採算をとるのが難しいと考えられる。しかし設備導入支援や燃料となる木質運搬補助事業などの要因により、イニシャルコストや燃料単価を抑えることができるのであれば事業として成立することは十分に考えられる。事業性においては、2社のシステムではVolter社のシステムが優位な結果が得られた。

2社のシステムともにGHG排出量の削減が可能なが分析の結果から得られた。CHPシステム(熱電)全体では、両社のシステムのGHG削減効果はほぼ同等であり、電力供給のみではBrukhardt社システム、熱供給のみではVolter社のシステムが優位な結果が得られた。

本研究の課題として、事業性評価の分析で土地代や系統への接続費用、熱導管の敷設などが考慮されていないことが挙げられる。チップはペレットに比べ、かさ密度が小さいために燃料の保管場所が拡大する傾向にあるため、取得する土地価格の単価によっては事業性評価に大きな影響を及ぼす可能性がある。また、燃料加工の際に生じるバークは焼却処分すると仮定しているが、バークボイラを導入し蒸気乾燥に用いることで、上流部で燃料の水分率を調整することによってライフサイクル全体でのGHG削減効果が期待できるため、こうした燃料加工サイトでの低炭素化設備導入も含めた分析は今後の課題としたい。

謝辞

本研究は八千代エンジニアリングからの委託研究の一部として実施されました。また、和歌山大学の研究支援員である平井千津子氏、中尾彰文氏、そして研究室卒生の野村亮太氏をはじめとする関係者の皆様には研究進行に多大なるご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- [1] 日本木質バイオマス協会：国内で販売されている小規模木質バイオマス発電機器の一覧，2018年。
- [2] 林野庁：木質バイオマス熱利用・熱電併給事例集3，2017年。
- [3] 寺澤眞：木材乾燥のすべて [改訂増補版]，2004年。
- [4] 森林総合研究所：木材工業ハンドブック 改訂4版 丸善，2004年。
- [5] 高市益行，川嶋浩樹，黒崎秀仁，安場健一郎：わが国各地における各種温室の暖房燃料消費量の試算ツール、職務作成プログラム，機構登録番号 機構-F02，2007年。
- [6] 駒田忠嗣：小規模木質コージェネレーションの概要と課題，バイオマス産業社会ネットワーク第162回研究会，2017年。
- [7] ボルタージャパン株式会社：CHP 排熱利用型木質チップ乾燥器の開発，2017年。
- [8] 株式会社森林環境リアライズ，富士通総研，環境エネルギー普及株式会社：木質バイオマスボイラー導入・運用にかかわる実務テキスト，2013年。
- [9] 臼杵市：臼杵市 木質バイオマス小型熱電併給システム導入計画策定調査 報告書 概要版，2017年。
- [10] 全国木質チップ工業連合会 木材チップ等原料転換型事業調査・分析事情報告書，2012年。
- [11] 古林敬顕，住友雄太，中田俊彦：木材加工における残材量の推計に基づく木材フロー図の作成，日本エネルギー学会誌，Vol.96，No.7，2017年。
- [12] 森林総合研究所：木質ペレット成型機構の解明，交付金プロジェクト研究成果28，2010年。
- [13] 一般社団法人産業環境管理協会：カーボンフットプリント制度施行事業 CO₂換算量共通原単位データベース ver.4.01 (国内データ)。
- [14] 和歌山県：和歌山の野菜・花き，2017年。