

平成 19 年度 高知大学農学部学部長裁量経費 成果報告書

課題名: ビニールハウスにおける木質チップボイラの燃焼実験と加
温作物への効果: 林地残材の収集・運搬・自然乾燥・チッ
プ化を経てボイラへの供給までの一連の工程に関するシス
テム分析

森林科学科 鈴木保志

暖地フィールドサイエンス教育研究センター 山根信三

暖地農学科 宮内樹代史

目次

成果概要	iii
I. はじめに	1
II. 方法	3
1. 木質バイオマス燃料の供給システム	3
1) システムの想定	3
2) 経費分析	6
2. 木質バイオマス加温装置の実証試験	9
1) 木質ペレットバーナの性能	9
2) ハウスの加温状況と作物の生育	11
III. 結果と考察	14
1. 木質バイオマス燃料の供給経費	14
2. 木質バイオマス加温装置の実証試験	16
1) バーナの燃料別燃焼温度	16
2) ハウス加温状況	18
3) 作物の生育	22
3. 木質バイオマス加温装置の収支	24
IV. おわりに	25
引用文献	30

図表

図-1. 県内の木質バイオマス利用の動向	2
図-2. 木質チップ利用の場合の想定システムの流れ	4
図-3. 想定地域における地点間の位置関係	5
図-4. 木質チップ利用の場合の想定供給システムの工程要素	6
図-5. チップの二次運搬に関する試験	8
図-6. 木質ペレットバーナ	10
図-7. 実証試験を行った園芸ハウス	13
図-8. 残材材積 m^3 あたりシステム別経費	14
図-9. kWh あたりシステム別経費の比較	15
図-10. ペレットバーナの炎の平均温度	17
図-11. 木質ペレットハウス, 石油暖房ハウスおよび外気温の変化	18
図-12. 培地温度の変化	19
図-13. 加温装置の投資回収期間	24
図-14. 木質チップおよび木質ペレットのエネルギー効率	26
図-15. 素材生産団体の例	29
表-1. 試験ハウスの概況	11
表-2. 各ボイラの稼働状況	20
表-3. 暖房コストの試算例	21
表-4. 残材供給量の試算	28

成果概要

要旨

高知県の基幹産業である施設園芸で用いられている加温装置の燃料を化石燃料から木質バイオマスに代替する目的で、木質バイオマス加温装置の実証試験と木質バイオマス供給システムの経費分析を行った。木質ペレットバーナを用いた加温装置は、針葉樹・広葉樹・竹を材料とするペレットで目標燃焼温度を達成することができた。ただし径の細かい竹ペレットでは燃焼温度がやや低く、また竹では残灰量が多いことから何らかの対策は必要と考えられた。園芸ハウスの加温状況は良好で、ランニングコストは重油を用いた場合よりも十分低いことも確認できた。林地残材の収集からチップ化、自然乾燥を経て園芸ハウス脇のサイロへの供給システムについては、想定した代替案のいずれも熱量換算でA重油以下の経費となった。木質ペレットのランニングコストは木質チップより高めになるものの加温装置の価格が低いことから、現状では木質ペレット用装置が有利といえる。

キーワード：加温装置，供給システム，施設園芸，木質バイオマス，林地残材

学会等における発表

1. 高知メカトロ交流フォーラム 2008
2. H19 年度バイオマス等未活用エネルギー実証試験補助事業報告書（相愛）
3. 第 119 回日本森林学会大会(2008 年 3 月；於東京農工大学)
4. 農業生産技術管理学会（予定）
5. IUFRO All-D3-Conference “Pathways to Environmentally Sound Technologies for Natural Resource Use” (2008 年 6 月， 札幌； 予定)

交付金額

500 千円

I. はじめに

高知県ではこれまで、中山間地域の発展と二酸化炭素排出削減対策のため、県の基幹産業である施設園芸の加温燃料を重油から木質バイオマスに変えようという目的で研究が行なわれてきた(鈴木, 2004 ; 高知県, 2004, 2005)。この事業では、間伐により発生する林地残材を収集してチップ化しこれを木質チップボイラの燃料とすることで、加温ハウスの重油ボイラを代替する計画である。事業の一部として、専用の木質チップボイラの研究開発も進められてきた。

県内の施設園芸での A 重油消費は年間 11 万キロリットルほどで、県内消費の約半分とされている。これは CO₂ 消費にすると県内総排出量の 3~5%に相当する(高知県, 2004 ; 相愛, 2007)。施設園芸自体は、フードマイレージといった考え方からはエネルギー消費等の観点から批判的な見解を持たれることもあるが、国産野菜の通年確保といった食料安全上の観点からは農業の中でも重要な意義を持っている。また、残材の有効利用は林業への付加価値付与となり、農業における化石燃料代替エネルギーの利用は自然エネルギーへの転換としてこれからの農業基盤を強化することとなる。こうした技術を高知大学農学部における実証研究で確立させることは、地域貢献を通じた農学部の発展につながる。

本研究の当初計画は、高知県が開発した木質チップボイラを本学(農学部)のビニールハウスに設置して作物への加温効果の実証試験を実施し、あわせて林地残材の収集から運搬および自然乾燥とチップ化を経てボイラへの供給までの一連の工程を連続して実際に行いシステム上の問題点と経費等の分析を行うというものであった。高知県が開発した木質チップボイラを本学(農学部)のビニールハウスに設置することの利用申請(平成 19 年度第 1 回教授会了承済)、関連する設置経費と燃料を県の負担とする予算化、および木質チップボイラの燃焼実験と加温作物への効果に関する高知県との共同研究契約の締結等を研究実施に関わる準備として学部長裁量経費の採択以前に進めてきた。

しかし、学部長裁量経費の採択後、県開発のボイラについては問題が発生して開発が中止されることとなった。これは、燃焼炉につかわれているステンレス鋼の関係で、どうし

でも 6 価クロムが基準値以上発生してしまったことが原因である。このため、農学部で試験を行なうという計画はできなくなったが、高知県立森林技術センターおよび高知県工業技術センターの仲介を得て、園芸ハウス加温用木質ペレットバーナを開発中の県内企業(株式会社 相愛)と協力して芸西村の民有園芸ハウスにおいて実証試験を行うこととした。研究の材料については当初計画とは変わるものになったが、地域貢献という面での研究の方向性については一貫している。

ここで、最近の高知県内の木質バイオマス利用の動向について簡単に触れておく(図-1)。NEDO 事業が採択された仁淀川町では、残材を集めて残材からの木質ペレットの製造を開始しており、作られたペレットは町内の施設等で使用されている。梶原町でも木質ペレット工場が新設され、稼動初年度となる平成 20 年度は計画生産量 600 トンであるが、数年で年 1800 トンまで増産される予定である。また、県内メーカーの土佐テックでは、中～小型のペレタイザを自社開発して販売しており、学生寮などがある明德義塾に作ったペレットの納入も行っている。須崎市では以前から須崎燃料が木質ペレットを生産・販売していたが、その利用については最近大手メーカーの木質ペレット加温器を導入した農家が出てきている。このように、県内の木質バイオマス利用の動向としては、木質ペレットに関するものが増えてきているという状況である。

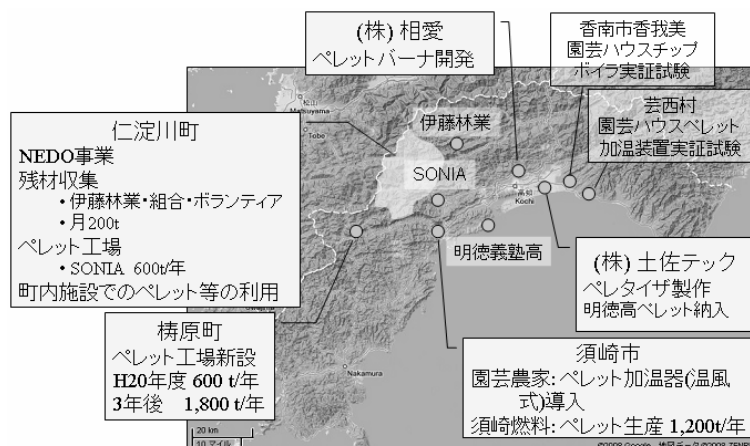


図-1. 県内の木質バイオマス利用の動向

注) 図は Google マップ(<http://maps.google.co.jp/>)を加工。

II. 方法

1. 木質バイオマス燃料の供給システム

1) システムの想定

木質バイオマス燃料の供給システムでは、まず木質チップ利用の場合として、林地での用材生産に伴って発生する土場残材をチップ化して木質チップ加温装置を備えた園芸ハウスに供給するシステムを想定した。残材は丸太形状のもののみを対象とし、枝葉を含む梢端部の残材は収集の対象外とした。

チップ化を行う場所としては、山土場、平地の中間土場、あるいは専用工場を想定した。山土場では牽引式小型チップパ(TOKO150；森口ら，2004b)を、中間土場では自走式中型チップパ(CAT BC1800 AM；秦野ら，2005；秦野，2007；鈴木ら，2007)を、専用工場では定置式大型チップパ(CKS UTC6053N；森口ら，2004b)を用いるものとした。また、発生直後の残材はドライベースで82%(82%db)前後の含水率を有する(森口ら，2004b)が、エネルギー効率を高めるために50%dbまで自然乾燥を施すものとした。

チップ化の場所と自然乾燥を施す場所の組み合わせで、6種類のシステムを想定した(図-2)。①では、山で発生した土場残材を生状態でチップ化し、中間土場に運んでチップ状態で自然乾燥させた後、園芸ハウスに供給する。木質チップは積み上げると表層から5cm程度までしか自然乾燥がすすまないが、定期的な攪拌を施すことにより乾燥がすすむ(宮田ら，2008)。①のシステムでは定期的にバケットトラクタでチップの山を移動させることにより攪拌乾燥を施すものとした。

②のシステムでは、丸太形状の残材を中間土場か専用工場に運んで丸太状態で自然乾燥させた後にチップ化を行う。中間土場を使用するものを②-1、専用工場を使用するものを②-2とした。丸太形状の残材は、標高の低い土場に放置されると3ヶ月程度で含水率50%dbまで乾燥する(宮田ら，2006)。

③のシステムは、山土場で丸太を自然乾燥させた後に山土場でチップ化するものである。残材は標高の高い林内では放置しても自然乾燥は進まない(森口ら，2004a；宮田ら，2006)

が、標高 400m 程度以下で風通しがよければ乾燥する(田中ら, 2008)。このことから、条件が適するところでは山土場自然乾燥も適用可能と考えた。

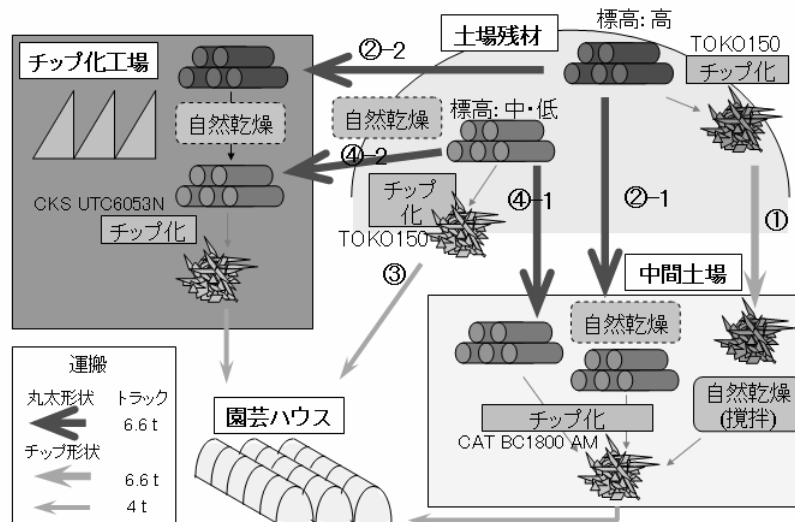


図-2. 木質チップ利用の場合の想定システムの流れ

注) 生材含水率は 82%(ドライベース; db)から自然乾燥(約 3 ヶ月)後 50%db とする。標高中(400m 程度)以下で風通しがよければ林内でも自然乾燥が期待できる(田中ら, 2008)ものとした。園芸ハウスへは道幅の関係から 4t トラックで運搬するものとした。4t トラックはクレーン付でのフレコン使用(又はパネルダンプ)を想定した。

④は、山土場で乾燥させた残材丸太を、中間土場(④-1)あるいは工場(④-2)でチップ化するシステムである。

残材あるいはチップの運搬は、山土場から中間土場あるいは工場までは大型トラック(積載重量 6.6t; 森口ら, 2004b)で運ぶものとした。ただし、チップ化された後は、いずれのシステムにおいても容積 1m³のフレコンバッグに詰めてクレーン付 4t トラックで運搬し、園芸ハウス脇のサイロに投入するものとした。これは、農道の広さから大型トラックによるチップ供給は難しいためである。

燃料として木質ペレットを用いる場合は、システム⑤としてペレットは業者から購入し

てハウス脇のサイロに供給することを想定した。購入先は、県内(⑤-1)あるいは県外(⑤-2)の業者とし、サイロへの供給では木質チップの場合と同様に容積 1m³のフレコンバッグとクレーン付 4t トラックを用いるものとした。

木質バイオマスの供給システムは、物部川流域を想定した(図-3)。残材は香美市香北町の物部川北岸に広がる施業団地(五百蔵・赤塚山・谷相)の山土場で発生するものとし、中間土場は同町小川にある森林組合の土場を想定した。専用工場は高知市仁井田の工業団地内とし、園芸ハウスは香南市香我美町下分とした。県内業者のペレットは須崎市の工場渡しで購入し、県外業者のペレットは運搬費込みで園芸ハウス付近まで納入される(聞き取りによる)ものとした。運搬距離は、山土場と中間土場の間が 11km, 中間土場とハウスの間が 17km, 山土場から工場へは 35km, 工場からハウスへは 21km である。山土場からハウスに直送する場合の距離は 25km となる。また、県内のペレット工場からハウスまでの距離は 62km である。

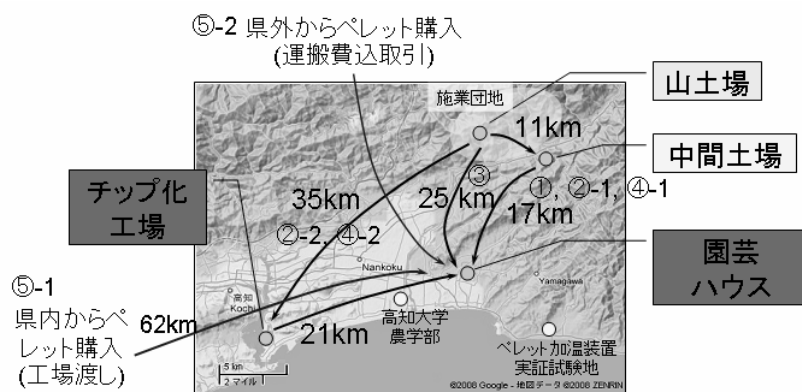


図-3. 想定地域における地点間の位置関係

注) ①山土場チップ化・中間土場チップ乾燥, ②-1 中間土場丸太乾燥・チップ化, ②-2 工場丸太乾燥・チップ化, ③ 山土場丸太乾燥・チップ化(直接供給), ④-1 山土場丸太乾燥・中間土場チップ化, ④-2 山土場丸太乾燥・工場チップ化, ⑤-1 県内ペレット, ⑤-2 県外ペレット。

2) 経費分析

木質バイオマスの供給経費については、積込、運搬、チップ化、自然乾燥等の工程要素(図-4)別にまず残材丸太材積あたりの経費を算出した。これら工程要素のうち、チップの積込・運搬(二次運搬あるいはチップ供給)以外については、これまでの研究成果(高知県, 2004, 2005; 森口, 2004; 森口ら, 2004b; 秦野ら, 2007; 秦野, 2007; 後藤・鈴木, 2007; 宮田ら, 2008)を用いて経費を算出した。ただし、使用する機械の燃料(軽油)価格については、昨今の原油高から、数年前に算出した機械の時間費用では過少となる可能性が高いため、2007年の取引価格の平均値(石油情報センター, 2008b; 消費税分も考慮)を用いることとし、改めて機械の時間費用の算出を行った。以下、工程別に詳細を記す。



図-4. 木質チップ利用の場合の想定供給システムの工程要素

注) ①山土場チップ化・中間土場チップ乾燥, ②-1 中間土場丸太乾燥・チップ化, ②-2 工場丸太乾燥・チップ化, ③ 山土場丸太乾燥・チップ化(直接供給), ④-1 山土場丸太乾燥・中間土場チップ化, ④-2 山土場丸太乾燥・工場チップ化。

残材収集工程については、通常の伐出作業において作業道上まで集材された全木材をプロセッサ造材したときに発生する丸太形状の残材を収集するものとした。全木材の作業道上までの集材経費は、用材の素材生産において負担されると考え、経費には計上しない。なお、丸太形状の残材を効率的に収集するためには、造材作業時に用材用丸太と区分し道

端にまとめて仕分けをしておく必要がある。対象地域における列状間伐作業(2003年11月～12月実施)においてこの仕分け作業を実施した結果、本来プロセッサが遊んでいる時間となる集材作業の待ち時間に、この作業は余裕を持って実施可能であることが明らかになっている(森口, 2004)。すなわち、残材収集のために残材の仕分け作業を行っても伐出作業を遅延させることはなく、余分な経費は発生しない。ただし、プロセッサの燃料消費は純粹な待ちの状態と仕分け作業を行う場合とでは差があることが考えられるが、今回の経費分析では仕分け作業の経費は計上しないこととした。

道端に仕分けられた残材をトラックに積み込む作業の経費計算については、対象地域においてグラップルを用いていくつかの条件を設定して実施した試験(2004年10～11月, 2006年3月および10月)の結果から、道端に散在する残材の山を1人の作業員がグラップルと4tトラック(ダンプ式車両に鉄網のパネル加工を施したもの)を移動させながら積み込む方式の平均工期を用いることとした(秦野, 2007; 後藤・鈴木, 2007)。調査では積込対象は4tトラックであったが、6.6tトラックを運搬に用いる場合も積込工期は同様であると仮定した。6.6tトラックの運搬経費は、2002年11月に施業団地と専用工場で実施した調査における聞き取り結果(森口ら, 2004b)から、業者への委託経費として算出した。

チップ化の経費は、山土場における牽引式小型チップ(TOKO150)と専用工場における定置式大型チップ(CKS UTC6053N)については2002年11月に実施した調査結果(森口ら, 2004b)から、また中間土場における自走式中型チップ(CAT BC1800 AM)については2004年11月に施業団地で発生した残材を高知県立森林技術センターでチップ化した調査での結果(秦野ら, 2005; 秦野, 2007; 鈴木ら, 2007)から、燃料価格の上昇を考慮して求めた。ただし大型チップの損燃料については、工場内の残材運搬に用いる機械(フォークリフト, バケットトラクタ, グラップル)と搬送機械も含めた年間費用として得られた値であるため、機械の本体価格に比例するものとして配分した燃料費に対して価格の上昇分を加えることとした。

自然乾燥については、丸太形状の残材を放置乾燥する場合には経費はかからないものと

した。ただし、実際には用地の使用や残材の移動等に関して、ある程度の経費が発生することが考えられる。①のシステムにおけるチップの攪拌乾燥では、中間土場で山状に積み上げられたチップを定期的にバケットトラクタで移動させることで攪拌を施す想定とした。含水率 82%db から 50%db まで乾燥させるために必要な攪拌の回数は、週 1 回を 10 回程度と見積もられる(宮田ら, 2008)が、実際にこの規模での検証は行っていない。そこで、含水率 82%db と 50%db のチップの熱量換算での価格差を、この乾燥措置に施すことが可能な経費として見積もることとした。なお宮田ら(2008)の試算では 100%db と 50%db の差額は 233 円/チップ層積 m^3 で、これはバケットトラクタによる攪拌 14 回分に相当する。

チップの二次運搬工程は、過去の調査(高知県, 2005)では経費の試算までは行われていないが、特にフレコンバッグからサイロへの投入作業が非常に時間のかかる結果となっていた。そこで、この工程については改善した作業方法を用いて今回新たに調査を実施することとした。すなわち、専用工場においてチップのフレコンバッグへの詰込、フレコンバッグの 4t トラックへの積込、および 4t トラックのクレーンを用いてのフレコンバッグからのサイロへの投入、の 3 種類の作業について工期調査を実施した。フレコンバッグからのサイロへの投入については、実際のサイロへの投入ではないが、工場内の敷地でサイロに相当する高さを設定して試験作業を実施した(図-5)。



図-5. チップの二次運搬に関する試験

注) 左: フレコン詰込試験(金属製漏斗を使用), 右: サイロ投入(高さを合わせて想定, 詰込時に底の締結方法を簡略化)。

なお、材の全乾比重はスギ(0.311 ; 森口ら, 2004b)とヒノキ(0.410 ; 宮田ら, 2006)が 2:1 程度の割合で混ざっているものと考え 0.377 とした。また、チップにした場合の層積の増加率(実材積 1 に対するチップ層積の比)は 2.18 とした(森口ら, 2004b)。

2. 木質バイオマス加温装置の実証試験

1) 木質ペレットバーナの性能

木質ペレットバーナの基本性能として、燃焼温度についての試験を行った(小松, 2008)。木質ペレットは材料別に分類されるが、バーナの燃焼温度試験では、市販されている針葉樹ホワイトペレットの他に、広葉樹および竹を材料とするペレットも燃料として使用した。現在里山地域における管理されていない竹林の拡大が問題となっている(後藤・鈴木, 2007)が、竹林を有効に管理する手段の一つとして、竹材を資源として活用することがあげられる。高知県内では、旧春野町がバイオマスタウン構想の一部として町内の放置竹林を間伐し、伐採した竹材をフローリング材やバイオマスガス変換の原料として活用することを計画している。フローリング材の加工の過程ではかんな屑等が発生するため、木質ペレットの場合と同様に今後安価なペレットの原料として利用されることが考えられる。

燃焼試験用のペレットは以下のようにして調達した。まず、竹を原料とするものについては、2007年10月に旧春野町内の竹資源利用協力竹林からモウソウチクを伐採し、近辺の土場において旧春野町所有の竹チップパ(コマツゼノア SR3000)によりチップに粉砕した。このチップを高知大学農学部構内に運搬し、10月16日から11月13日まで天日干しにより自然乾燥させた。すなわち、天気の良いときにはブルーシート上にチップを攪拌し薄く広げ、夜間や降雨時にはブルーシートで覆って水の混入を防いだ。11月13日に篩い分けをして径の大きなチップを取り除き、以降12月25日までは屋内で保管した。この措置により、含水率は123%dbから15%dbまで低下した。

篩い分けでは5mm目と1mm目の篩いを用いて粒径(呼び径)1mm以下のチップのみを得ることを試みたが量的に少なかった。このため、2回目の篩い分けで残留したチップを、

コーヒーマルを用いてさらに粉碎(ミル挽き)した。ミル挽き後のチップをさらに 1mm 目の篩いで篩い分けし、残留分(竹ミル挽き)と通過分(竹パウダー)に分けた。竹パウダーについては、乾燥機を使用してペレット化に適する含水率 16~18%db まで乾燥させた。これら 2 種類の材料を、小型ペレタイザ(チヨダマシンナリー FMP-180N)を用いて直径 8mm のペレットに加工した。

この他、竹をフローリング材に加工する際にできるかな屑(高知市仁井田のコスモ工房より提供)と広葉樹チップ(相愛より提供)を材料としたペレットを、中型ペレタイザを用いて作成した(新興工機 TS-220 ; 愛媛県大洲市の堀川建設に依頼)。竹かな屑ペレット、広葉樹ペレットいずれも直径は 8mm である。また、一般に流通している針葉樹ホワイトペレットは(株)銘建のものを用いた(直径 7mm)。

燃焼温度試験は、木質ペレット加温装置のバーナ部分のみ(図-6)を用いて行った。それぞれの種類のペレットについて、燃焼時間は 60 分、ペレット投入量は 250g 毎 75 秒(バーナの最適投入量)とし(燃焼総量各 11,750g)、送風量についてはバーナのファンの空気取り込み口の幅を固定した。試験では、炉から出る炎の温度(投入回毎)に加え、燃焼後の灰分およびクリンカ(ペレットが高温で融解し燃え残ったもの)の量を計測した。

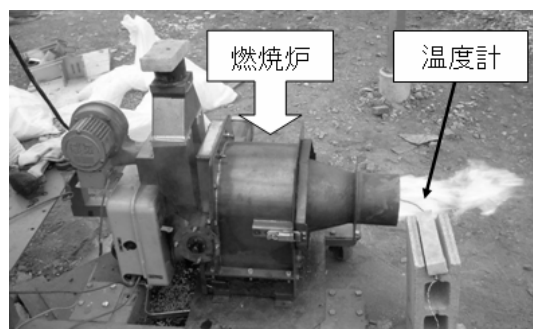


図-6. 木質ペレットバーナ

注) 燃焼温度の計測実験はバーナ部分のみを用いて行った。

2) ハウスの加温状況と作物の生育

本項目では、施設園芸用加温装置として期待されている木質バイオマスボイラを営農中ハウスに導入し、その暖房能力とコストパフォーマンスについて明らかにすることを目的として実験を行った。従来の重油ボイラと比較検討し、同等レベルの暖房能力が実証されれば、カーボンニュートラルの点から木質バイオマスボイラの優位性が示され、普及・導入の上での有用なデータとなるものと考えられる。

2)-1. 方法

高知県安芸郡芸西村西分、久保浩計氏ピーマン栽培ハウスに設置された、木質ペレットボイラ（バーナ：㈱相愛製，熱交換器：㈱昭和産業製 KT-300）の稼働中の特性について、2007年12月から2008年2月にわたって調査した。

2)-2. 試験ハウスのボイラ設置状況

表-1 にボイラ設置ハウスの概況を示す。試験用ハウスには、木質ペレットボイラ1台の他に、既設の重油ボイラが設置してあり、これを補助用ボイラとして用いた。また、温度設定は16:30～20:00まで20℃，20:00～5:00が19℃，5:00～7:00が18℃であった。対照区として、隣接ハウス（栽培面積：30a）に設置した重油ボイラ2台についての稼働状況も調査した。

表-1. 試験ハウスの概況

項目	概要	
ハウス構造	AP 2連棟	
面積	734m ²	(間口 7.2m × 51m × 2 棟)
外張	PO フィルム	(0.15mm 厚)
内張	農ビフィルム	(0.075mm 厚)
栽培作物	赤ピーマン	(品種: 'トサヒメ-R')
栽植密度	926 株/10a	

2)-3. 測定項目

実験用ハウスおよび対照ハウスにおいて、①ハウス内気温・湿度、②外気温・湿度、③培地の温度、④各ボイラ稼働時間、⑤木質ペレット消費量、⑥重油消費量の各項目を調査した。温湿度については、温湿度データロガー（エスペック、RS-12）を用いて、林らの指針 1))にしたがって、連棟ハウス内平面を田の字に 4 区分した対角の 2 区の中心部 1.5m の地点を測定した。また、温湿度測定点近傍の培地に、地温センサー（KN ラボラトリー、サーモクロン G タイプ）を表土より 5cm の深さに埋設し、培地温度を測定した。ボイラの稼働時間は、それぞれクランプセンサー（HIOKI, 3067）、電圧ロガー（Easy Log, EL-USB）を用いてモニタリングした。測定記録間隔は培地温を除き 1 分とし、培地温は 10 分とした。これらの測定項目は 1～2 週間ごとに現地でデータの回収を行い、PC に取り込み保存した。ペレット消費量および重油消費量については別途記録した。

2)-4. ボイラシステムの評価手法

各ハウスの温湿度および培地温データから、設定温度の維持、作物（ピーマン）に対する影響の有無等を検証する。また、各ボイラの暖房負荷、燃料消費量、コストについて計算し、定量的な評価データとする。試験ハウスおよび対照ハウスの暖房コストは、単位面積あたりの数値として正規化し、木質バイオマスボイラシステムの有用性について検討した。

また、2008 年 4 月 2 日に設置ハウスを訪問し、久保氏から加温装置を用いた営農について聞き取りを行った(図-7)。なお、木質ペレットバーナは試作品としての価格が約 100 万円、ペレットサイロとペレットの搬送装置の価格が設置費込みで約 70 万円であることから、従来品の重油用熱交換器があればヒータ部分を交換することにより 170 万円の追加投資で燃料を木質ペレットに転換できることになる。木質ペレットを燃料とする園芸ハウス用加温装置には市販されているものも数機種あるが、出力 58～174kW で価格は 1 式 200～550 万円である(相愛, 2007)。



図-7. 実証試験を行った園芸ハウス

III. 結果と考察

1. 木質バイオマス燃料の供給経費

システム別経費を残材の材積あたりとして算出すると、総経費は6千円～8千円/実材積 m^3 程度となった(図-8)。内訳を見ると、チップ供給が4千円/実材積 m^3 程度とやむをえないことではあるが2次運搬に経費がかかっていることがわかる。最も総経費が低いのは③の山土場で乾燥させた後にその場でチップ化するもので6,154円/実材積 m^3 であった。その他は7,303(④-2)～7,843(②-1)円/実材積 m^3 と大きな差はない。③は山土場からの直接供給になるため、運搬はすべて4tトラックとなるものの1次運搬がないことが有利な点となっている。ただし、フレコンへの詰込作業は専用工場で行った功程調査の結果を用いている。山土場で同様の作業を行うためには、適当な空間とフォークリフト等の機械の搬入が必要になるため、実際にはやや多めの経費がかかるものと考えられる。

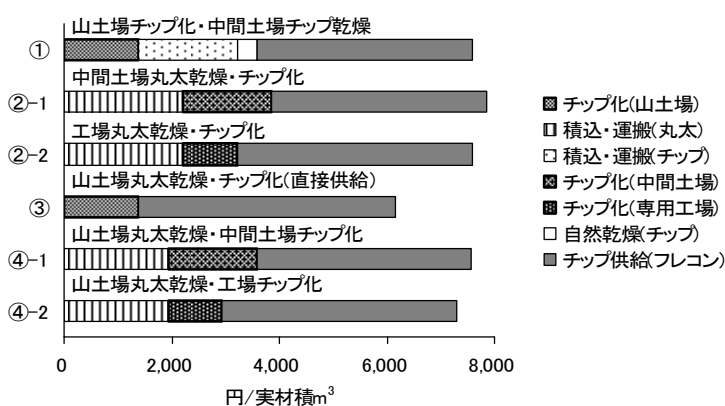


図-8. 残材材積 m^3 あたりシステム別経費

関連研究では、岩手県の結果(佐々木, 2006a, 2006b)では m^3 あたり7千円～1万円と本研究の結果よりもやや高くなっているが、これには3千円の原木代が含まれている。これを除くと4千～7千円となり、本研究の方がやや高くなる。

今回新たに調査を行ったチップ供給工程については、フレコン1袋(チップ層積 $1m^3$)あたりに要した詰込・積込・投入時間はそれぞれ2分54秒、5分11秒、3分36秒で合計は

11分42秒であった。以前行った高知県(2005)による結果では投入のみでチップ層積1m³あたり約14分かかっていたが、これは主にフレコンの底を開放してもチップがすぐには排出されなかったことによる。今回はフレコンを底部全開放型にし、また詰込前に行うフレコン底部の締結も簡略化して開放されやすいようにしたため、このように工期を向上させることができたが、全体の経費構成をみるとそれでもチップ供給には経費がかかっていると見える。なお、サイロにダンプ投入ができるものとする(三好・市原、未発表データ)、4千円/実材積m³程度かかっているチップ供給の部分がおおむね半分くらいになり、全体として2千円/実材積m³程度安くなるが、サイロをダンプ投入に対応させるためには相応の費用が必要となる。

図-8の結果を自然乾燥後のチップ重量当たりになると10.9~13.9円/kgとなる。自然乾燥を施さないものとする9.0~11.4円/kgとなり、一見自然乾燥をしないほうが経費は安くなるように見えるが、意味のある比較にするためには木質バイオマスの発熱量あたりにして比較する必要がある。そこで、経費をバイオマスの熱量当たりとして、kWhあたりの値にすると図-9のようになる。ただし、木材の有効熱量を19.2MJ/全乾kg、25℃での水の蒸発熱を2.45MJ/kgとした(Sundberg and Silversides, 1996)。

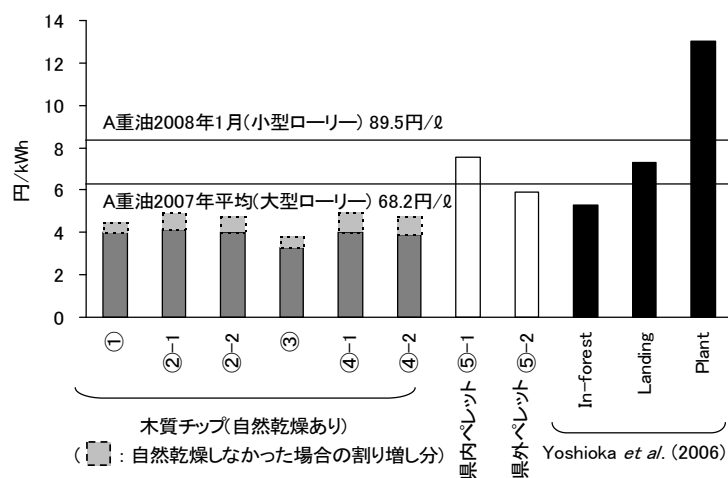


図-9. kWhあたりシステム別経費の比較

図-9 の左 6 系列の棒グラフがチップの結果で、3.27～4.17 円/kWh となっている。各棒グラフの上部にある点線枠部分は自然乾燥を行わなかった場合の割り増し分である。自然乾燥を行わないと、熱量あたり経費では 1～2 割(0.59～0.89 円/kWh)高くなる。

白はペレットの場合で、県内ペレットは工場渡しで 30 円/kg であるのに対し県外ペレットは単価が安くサイロ付近までの運搬費込みで 27 円/kg であるため、前者の 7.54 円/kWh に対し後者は 5.88 円/kWh と 2 割以上安くなっている。なお、県内ペレットの場合、工場からの運搬(4t トラック使用)とサイロへの投入までの経費が 5.45 円/kg、県外ペレットの場合サイロへの投入費用 0.66 円/kg が加えられている。なお、ペレットの発熱量は 4.7 kWh/kg とした(ペレットクラブ, 2004)。

図-9 には A 重油の価格もあわせて示した。下側の線は大型ローリーで取引される産業用 A 重油価格の 2007 年の平均値(石油情報センター, 2008a ; 消費税を加えて 68.2 円/リットル)の熱量換算価格(6.28 円/kWh)で、チップと県外ペレットはこれより下であるが県内ペレットはこの価格を上回っている(A 重油の熱量は 39.1MJ/リットルとした ; 資源エネルギー庁, 2001)。上側の線は小型ローリーで取引される 2008 年 1 月時点での価格(石油情報センター, 2008c ; 消費税を加えて 89.5 円/リットル)で、これが実際に農家の支払う価格に相当する。熱量換算で 8.24 円/kWh であり、県内ペレットも最近の高値ならば小売重油に対して有利ということになる。

関連研究として、林地残材を収集して木質バイオマスとして供給する費用を熱量当たり価格まで算出している Yoshioka *et al.* (2006)の結果を図-9 の右 3 系列に示した。この研究では全木材を利用する想定となっており、チップ化を行う場所により 3 つの方式が提示されているが、林内でチップ化する”In-forest”が今回の結果に近い値となっている。

2. 木質バイオマス加温装置の実証試験

1) バーナの燃料別燃焼温度

燃焼温度の試験の結果、すべての燃料について平均温度は目標温度である 800℃を超える結果となった(図-10)。針葉樹ホワイトペレットが 944℃と最も高く、以下広葉樹ペレツ

ト(917°C), 竹かんな屑ペレット(915°C), 竹ミル挽きペレット(908°C), 竹パウダーペレット(843°C)の順となった。有効計測回数は, ペレットが硬すぎたために途中で供給ができなくなった竹かんな屑ペレット($n = 12$)以外は 36 回であった。有意差を検定すると, 竹パウダーペレットのみ他よりも有意に平均温度が低かった(Tukey test, $P < 0.05$)。

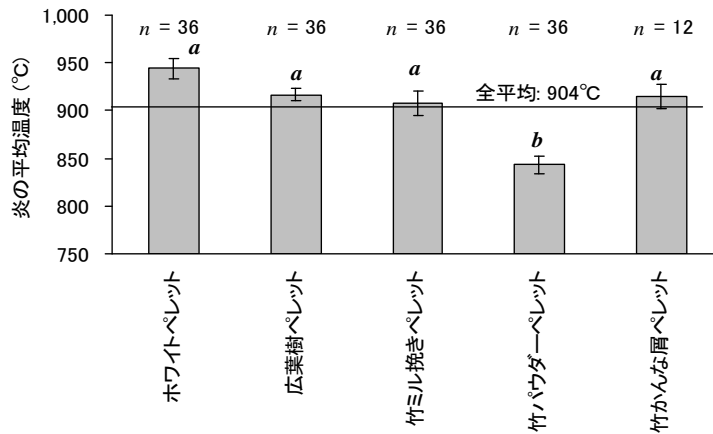


図-10. ペレットバーナの炎の平均温度

注) 縦棒は±SE, アルファベットは有意差を示す(Tukey test, $P < 0.05$). 目標温度は 800°C。

11,750g を燃焼させた後の残灰量は針葉樹ホワイトペレットで最も少なく 26g(クリンカは 0g), 広葉樹ペレットも 45g(クリンカ 8g)ほぼ同様であった。竹を原料とするペレットは残灰量・クリンカ量ともに多く, 竹パウダーペレットはそれぞれ 182g と 56g, 竹ミル挽きペレットは 132g と 39g であった(竹かんな屑ペレットは途中で中止したため計測値なし)。竹で灰・クリンカともに多いのは, 成分の関係もあるが, 特にクリンカは火を消す際に炉内の温度が下がって形成されることから, 炎の平均温度が低いことも影響していることが考えられる。

このようにバーナの基本性能である炎の温度については目標性能を確保できていることが確認できた。現在市販されているホワイトペレット(樹皮なし)が, 燃料としては温度も高く残灰量も少ないことから最も適した燃料と言える。広葉樹ペレットについては残灰量

がややホワイトペレットよりも多いが、特に問題なく使用できるものと考えられる。竹を材料とするペレットについては、残灰量と炉のメンテナンス時に障害となるクリンカの量が多いため何らかの対策は必要と考えられるが、燃料としては十分可能性があると言える。

2) ハウス加温状況

2)-1. ハウス内外気温の変化

図-11 に外気温、実験ハウスおよび対照ハウス内気温の変化の一例（2007/11/30～2007/12/4）を示す。この期間では、両ハウス内気温とも昼間約 30℃まで上昇し、外気温に対して 10℃程度高かった。夜間は設定温度付近を維持し、問題なく暖房が行われていることが確認できた。また、湿度についても両ハウスに大きな差はなかった。測定期間において、外気との温度差は最大 17℃程度であり、木質ペレットボイラの能力範囲である 15℃をやや超過しているものの、重油バーナとほぼ同等であるものと考えられる。

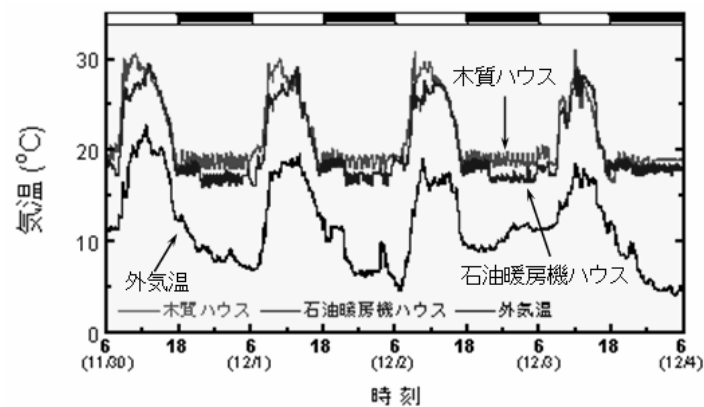


図-11. 木質ペレットハウス、石油暖房ハウスおよび外気温の変化

2)-2. ハウス内外気温の変化

図-12 に同期間中の培地温度の変化を示す。培地温度についても気温と同様、木質ハウスと石油ハウスにおける大きな差はなく、むしろ木質ハウスのほうが 2～3℃高いこともあった。このことから、木質ペレットボイラの稼動において、ピーマンの生育に与える温度の影響はないものと考えられる。木質ハウスの培地温が高い理由としては、地温センサー

設置付近のマルチ被覆が影響を与えたものと思われる。

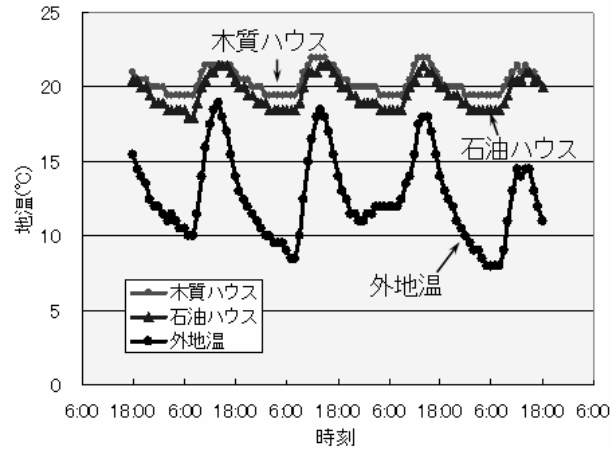


図-12. 培地温度の変化

2)-3. ボイラの稼働状況

表-2 に 2007/12/19～26 および 2008/1/18～24 の各ボイラの稼働状況を示す。重油ボイラ 1 の稼働時間は 2 に比して短かった。カバーする範囲が相違するものの、重油ボイラハウスにおいては、ボイラ 2 が主体的に稼働し、ボイラ 1 は従属的に稼働したものと推察される。また、木質ボイラについては、重油ボイラ 2 とほぼ同等の稼働時間となった。暖房面積の違いから稼働時の条件も異なるが、稼働時間から見た場合においても、重油ボイラに比して劣ることはないと考えられる。尚、この期間中の暖房デGREEアワーは 2042.4°C h となった。

表-2. 各ボイラの稼働状況

Date	重油 1	重油 2	木質
2007/12/19	9:54	11:01	13:39
12/20	10:17	10:14	10:42
12/21	4:58	6:00	5:14
12/22	3:57	5:31	5:02
12/23	5:05	6:21	5:58
12/24	6:23	8:21	7:32
12/25	6:20	7:36	7:23
12/26	7:24	10:20	9:53
2008/1/18	8:14	12:57	12:35
1/19	7:01	11:04	10:38
1/20	8:56	8:48	9:34
1/21	10:32	14:05	13:48
1/22	8:27	8:51	10:04
1/23	8:29	10:53	11:35
1/24	12:24	15:55	14:36
合計	118:21	147:57	148:13

2)-3. 暖房コストの試算

期間中の燃料消費量から、暖房コストを試算したところ、表-3 に示すとおりとなった。この項では、重油価格 90 円/リットル、ペレット価格 35 円/kg として試算した。発熱量からペレットの場合 2 倍程度の燃料消費となることは知られているが、現行価格が維持されれば、ランニングコスト的には見合うものと考えられる。

表-3. 暖房コストの試算例

	重油 2	重油 2	木質
稼働時間	118:21	147:57	148:13
燃料消費量	5532 L		1904 kg
ハウス面積	3000 m ²		734 m ²
面積当たり	1.84 L/m ²		2.61kg/m ²
燃料単価	90 円		35 円
暖房コスト	166 円/m ²		91 円/m ²

2)-4. 燃焼ガスの利用について

ハウス外に排出される燃焼ガスについては、分析の結果、人体に影響を及ぼす有害ガスは認められず、ハウス内へ循環させての利用が可能と考えられる。植物の光合成有効時間帯に炭酸ガスを効率的に施用することができれば、収量増が期待されるだけでなく、園芸施設からの温室効果ガス排出の削減にも寄与するものである。

2)-5. 結論

本実験において、木質ペレットボイラ導入ハウス内の環境計測を行い、隣接の重油ボイラハウスと比較したところ、以下の点が明らかとなった。

- 1) ハウス内気温は設定温度付近（18℃前後）を維持することができた。
- 2) 重油ボイラと比較して、同等の加温性能を示した。
- 3) 単位面積あたりの暖房コストは、重油ボイラを上回る結果となった。
- 4) 燃焼ガスをハウス内へ循環させることにより、炭酸ガス施用に利用できるものと考えられる。

以上のことから、木質ペレットボイラは、石油代替の新エネルギー利用ハウス加温システムとして有用であることが確認された。

2)-6. 参考文献

- (1) 林真紀夫，施設園芸における石油使用量の調査，平成 18 年度知識集約型産業創造対策事業－農業における省資源・脱石油の推進－報告書，PP.3～13，2007
- (2) 高市益行・川嶋浩樹，わが国における暖房燃料必要量の地域差と年次変動の実態解明および解析・表示ツールの構築，平成 18 年度知識集約型産業創造対策事業－農業における省資源・脱石油の推進－報告書，PP.56～60，2007

3) 作物の生育

この項では，チップボイラ導入ハウスにおける聞き取り結果から，農作物(赤ピーマン)の成育と収量に関する所見について記す。

チップボイラ設置圃場における平成 19 年度末までのピーマンの坪当たり累計収量は，約 21 kg であり，地区平均の 12kg を大きく上回る成果が得られた。この要因としては，主に以下の 2 つのことが考えられた。

第一は，加温機（チップボイラ）の温度設定の違いがあげられる。原油高のあおりを受けて，一般の重油加温機使用の生産者が，燃料高のためにピーマン栽培にとっての理想の夜温を設定することが極めて困難な状況であったのに対し，チップボイラは，比較的燃料代が安いとため，理想の夜温を維持することが可能であった点である。特に果実を収穫物とする果菜類にとっては，昼間の光合成で得られた同化産物を効率よく収穫の目的とする果実の方へ転流させることが肝要であり，そのためには前夜温を高めに維持する必要がある。これがチップボイラでは重油との燃料代の差額分を上乗せ加温代に当てることができて十分な夜温を確保することができた（チップボイラは地区の重油ボイラー使用生産圃場の平均的溫度設定より，前夜温が 1～2 度高く設定されていた）結果，果実の肥大が促進され，収量増につながったものと考えられた。

第二は，チップボイラのトラブルに起因するもので，燃焼室のクラックから炭酸ガスが排出されたことである。この排出量は，一時的にバーナが不着火を起こす程のもので，7,000～8,000ppm もの高濃度であったらしい。通常，温室内では，冬期，換気不足による日中

の炭酸ガス濃度の低下が光合成の限定要因となるため、炭酸ガス施肥は、その改善のための有効な手段として一部では積極的に導入が図られている。従って、今回の事故は、継続的な不着火とはならず、偶発的に炭酸ガスの供給に寄与し、その結果、光合成による物質生産が高まったと考えられた。

以上の理由により当該圃場ではピーマンの成育と収量が増大したものと考えられた。しかし、3月末時点での植物体の生育状況は決して良好なものではなく、病害、特にうどんこ病の発生が甚大で、植物体に精気が無く、いわゆる「なり疲れ」の状態で収穫末期、引き上げ前の様相を呈していた。一般には3月期頃より日射量の増加とともに収量が、急増するものであるが、当該圃場はそれが保証できる状況では無く、樹勢の回復に多少時間がかかるように思われた。ただし、これは冬期の生産物価格が高い時に計画的に高めの温度管理をして増産した結果だとすれば、一つの戦略でもあり、チップボイラ加温によってそれが可能になったとも言える。バーナ燃焼室からの偶発的な炭酸ガス発生効果については、クラックの原因は解明して改善を図り、計画的に燃焼室排気ガスからの炭酸ガスを取り出す工夫ができれば低コストでの炭酸ガス施肥の有効な手段となることが示唆された。

3. 木質バイオマス加温装置の収支

以上の結果から、木質バイオマスのランニングコストは重油よりも安いと言える。しかし、木質バイオマス用加温装置を導入する立場からは、加温装置を含めた総支出として有利かどうか重要である。ここでは加温装置を導入した場合の投資を何年で回収できるかについて試算を行ってみる。

加温装置一式の価格は、ペレット用は200万円とする。チップ用は、木質バイオマス利用の先進県である岩手県において開発され2005年に市販されている岩手式木質バイオマスボイラの価格(盛岡タイムス, 2005))を参考に1,100万円とする。園芸ハウス10aあたりにおけるA重油消費量は、ナス6kl, ミョウガ11.4kl, ピーマン16.2klとされている(相愛, 2007)。そこで、加温装置1台の年間A重油使用量を15klとし、試算した供給システムでチップ、ペレットいずれも最も安い方式について年間の燃料費の重油との差額を求めると、チップで80.9万円、ペレットで38.3万円となる。

すると、加温装置への投資の回収にはペレットで5年、チップで14年かかることになる(図-13; ただし利率は考慮していない)。チップの方がペレットより総額で安くなるのは22年目以降であるため、耐用年数を考えると現状ではまず木質ペレット用の加温装置を導入するのが有利と言える。

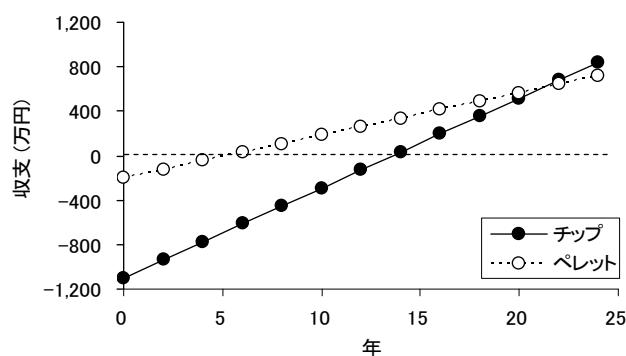


図-13. 加温装置の投資回収期間

注) 利率は考慮していない。

IV. おわりに

本研究により、園芸ハウスの加温装置用燃料として木質バイオマスを用いて重油燃料を代替することの有効性を示すことができた。高知県が普及を目指して開発していた園芸ハウス用の木質チップボイラは今のところ実用に至っていないが、木質ペレット用の加温装置については県内企業が開発した製品が実用段階に入っている。県内での木質バイオマス利用の動向も、木質ペレット工場が新設されるなど、ペレット利用には追い風という状況になってきている。

ただし、ペレットには使い勝手の面など有利な点も多いが、需要が多くなると安価な減量である製材により発生するおが屑が不足することが考えられる。県内で新設された木質ペレット工場におけるように、ペレットを残材から粉砕して作るとなると経費のみならずエネルギー効率が悪くなることが懸念される。そこで、最後に木質ペレットのエネルギー効率と県内における残材木質バイオマスの供給量に関してふれておきたい。

Forsberg (2000)は、北欧において枝条付き残材(バンドリング材)あるいは除間伐材をチップ化あるいはペレット化して燃焼させ電力を作る想定でエネルギー効率等を試算している。図-14の左5系列がその結果で、1(Bales), 2(Pellets), 3(Tree sections)は残材を1500km船で運んだ先で燃焼発電、4(El-export)と5(Domestic)は地域内で燃焼させる想定である。棒グラフと左軸は1000の出力あたりに要した入力エネルギー(kWh/MWh; 入力以上の出力を得るためには1000以上である必要がある)であり、2のペレットで特に高くなっている。棒グラフの斜線が電力分、灰色が燃料分を示しているが、1(Bales)のバンドリング材燃焼と2(Pellets)の燃料の差は、主として乾燥に用いられるエネルギーである。電力の差がペレットを作るためにチップより余分に必要な粉砕エネルギーである。三角と右軸で示された値は、入力に対して何倍の出力が得られるかを意味するエネルギー効率(Energy Profit Ratio, EPR; 入力以上の出力を得るためには1以上でなければならない)であるが、2のペレットは1.7と非常に低い値になっている。なお、Forsberg (2000)ではチップの含水率(すなわち残材の含水率)は82%dbと本研究の設定と同じであり、ペレットの含水率は

11%db となっている。

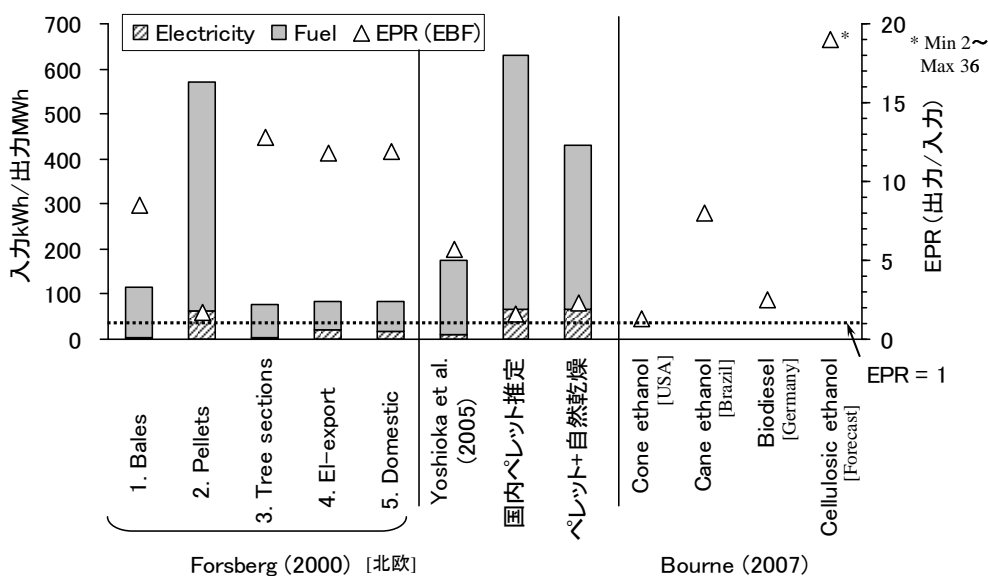


図-14. 木質チップおよび木質ペレットのエネルギー効率

図-14 中央の 3 系列は、Yoshioka *et al.* (2006)と同様の条件(図-9 の”In-forest”方式)で試算された Yoshioka *et al.* (2005)によるエネルギー効率である。この結果は今回試算した本研究における結果に近い条件と思われるが、国内でチップを燃焼利用すると EPR は 5.7 と見積もられている。収集・運搬に Yoshioka *et al.* (2005)の値を用いて国内で残材からペレットを作る場合を推定した結果が「国内ペレット推定」で、EPR は 1.6 になる。ただし、自然乾燥を施したとすると(「ペレット+自然乾燥」), EPR は 2.3 になる。このとき、自然乾燥により 50%db まで残材の含水率は低下し、その分乾燥に用いられるエネルギーが節約できるものとした。

なお、図-14 の右 4 系列はバイオ燃料の EPR である(Bourne, 2007)。アメリカで機械化農業により生産されるトウモロコシから作られるエタノールの EPR は 1.3 と非常に低い。ブラジルでほとんど人力により栽培・収穫されるサトウキビから作られるエタノールの EPR は高く 8 である。ドイツで作られるバイオディーゼルは EPR 2.5 である。残材を粉碎

してペレットを製造するとアメリカのトウモロコシから作られるエタノール程度の EPR であるが、自然乾燥を施すとバイオディーゼル並みになると予想される。一番右の系列は開発中の技術であるセルロース変換によるエタノールで、推定される EPR は 2~36 と大きな幅がある。

次に、園芸ハウス加温用の燃料としてどのくらいの残材が必要となるかについて考えてみる。芸西村，安芸市，高知県での施設園芸加温燃料の消費量はそれぞれ年間 6,500kℓ，10,000kℓ，112,000kℓとなっている(相愛，2007)。市町村単位で 1 万 kℓ/年程度，全県ではおよそその 10 倍程度である。これらすべてが A 重油と仮定すると，同等の熱量を得るために必要なペレットの量は芸西村と安芸市で 20t/年程度，全県では 250t/年程度と見込まれる(表-4)。このペレット量に相当する残材の材積は，芸西村，安芸市，高知県でそれぞれ 36 千 m³/年，55 千 m³/年，614 千 m³/年となる。地域内あるいは県内に存在する森林の成長量に比較するとこれらは十分余裕のある値であるが，実際に経済的に残材として利用できるのは用材としての素材を生産したときに付随して道端に発生する残材である。素材生産量とそれに付随して発生する残材の量の関係については，条件にもよるが県内の素材生産事業体を対象にしたこれまでの調査結果の平均としては，おおむね 1m³の素材生産について 0.15m³の残材が発生するとされている(嵯峨山ら，2008)。これにもとづいて，36~614 千 m³の残材を得るために必要な素材生産量を算出すると，235~4,041 千 m³となる(表-4)。表-4の「生残材」，「自然乾燥材」は木質チップを利用するものとしてペレット同様に必要な供給量を試算したもので，前者は乾燥させない生チップの場合，後者は 50%db まで自然乾燥させる場合である。ペレットよりも発熱量が低いため，1.05~1.24 倍の値となる。

ペレットの場合の全県対象の 4,041 千 m³という素材生産量は，2005 年度の国内丸太生産量 16,166 千 m³(林野庁，2007)の約 1/4 に相当することから，現状では県内の施設園芸用化石燃料のすべてを木質バイオマス燃料に転換することは難しいといえる。県内の素材生産団体のうち，素材生産量の概数がわかるものについて例を挙げると，現業作業員 15

名程度でおおむね 11～15 千 m³/年程度(図-15 ; とされいほく, 2005 ; 竹添, 2006 ; 秦野, 2007)である。県内にある木質ペレット工場の生産量が 1,200～1,800t/年(図-1)程度であることから, 1 素材生産団体あたりペレット工場 1 箇所程度の残材発生量と見込まれる。ただし素材生産団体には残材収集にまわす労働力の余裕はあまりないと考えられることから, 仁淀川町などボランティアによる小規模残材収集の実績を上げている例もある(松崎, 私信)ものの, 木質バイオマスを組織的に利用するためには残材収集についても事業化を図る必要があるものと考えられる。

表-4. 残材供給量の試算

地域	換算対象	燃料	残材	素材
		(10 ³ t/年)	(10 ³ m ³ /年)	(10 ³ m ³ /年)
芸西村	ペレット	15	36	235
	生残材	30	44	291
	自然乾燥残材換算	21	38	247
安芸市	ペレット	23	55	361
	生残材	47	68	448
	自然乾燥残材換算	33	58	380
高知県	ペレット	259	614	4,041
	生残材	523	762	5,014
	自然乾燥残材換算	365	646	4,252

注) 2005 年度の国内丸太生産量は 16,166 千 m³(85%が針葉樹, 15%が広葉樹; 林野庁, 2007)



図-15. 素材生産団体の例

注) 図は Google マップ(<http://maps.google.co.jp/>)を加工。

本研究を進めるにあたり、以下の方々および団体の協力を得た：施設園芸脱石油イノベーション推進事業協議会、(株)相愛、高知県産業振興センター(当時)松崎武彦博士、高知県農業技術センター、高知県立森林技術センター、高知大学農学部、高知大学農学部林業工学研究室、日本施設園芸協会、春野町、丸和林業(アイウエオ順)。ここに記して謝意を表す。本研究は平成19年度高知大学農学部学部長裁量経費の支援を受けて行なわれた。

引用文献

- Bourne, J.K.Jr. (2007) Biofuels: Boon or bondoggle? National Geographic 212(4): 38-59.
- Forsberg, G. (2000) Biomass energy transport - Analysis of bioenergy transport chains using life cycle inventory method. Biomass and Bioenergy 19: 17-30.
- 後藤純一・鈴木保志 (2007) 森林において発生する未利用バイオマス資源の把握と収穫技術の開発による資源化. 76pp, 平成 16 年度～平成 18 年度科学研究費補助金(基盤研究 C)研究成果報告書(研究課題番号: 16580123).
- 秦野瑤子・後藤純一・宮田大輔・鈴木保志・山口達也・吉井二郎 (2005) 木質バイオマス利用のための中間土場における林地残材のチップ化. 日本森林学会学術講演集 116: 170.
- 秦野瑤子 (2007) 「現場ネットワーク」現地レポート 高知県のがんばる事業体-有限会社伊藤林業(素材生産業). 機械化林業 641: 17～21.
- 秦野瑤子 (2007) 木質バイオマスの収集とエネルギー利用に関する実証的研究. 114pp, 高知大学農学研究科修士論文.
- 株式会社 相愛 (2007) 未利用森林資源活用園芸用ビニール暖房用エネルギーの地産地消システム調査事業について. 11pp, 「施設園芸脱石油イノベーション事業」現地調査会配布資料, 株式会社 相愛, 高知.
- 株式会社 とされいほく (2005) 事業資料.
- 高知県 (2004) 平成 15 年度成果報告書 バイオマス等未活用エネルギー実証試験事業・同事業調査 バイオマス等未活用エネルギー実証試験事業調査 中山間地域における森林バイオマス資源の有効利用技術調査. 86pp, 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 東京.
- 高知県 (2005) 平成 16 年度成果報告書 バイオマス等未活用エネルギー実証試験事業・同事業調査 バイオマス等未活用エネルギー実証試験事業 中山間地域における森林バ

- バイオマス資源の有効利用技術開発事業. 21pp, 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 東京.
- 小松竜二 (2008) 竹ペレットの燃焼試験. 23pp, 高知大学農学部森林科学科卒業論文.
- 宮田大輔・鈴木保志・後藤純一 (2006) 林道端と舗装土場における林地残材の自然乾燥. 日本森林学会誌 88 : 245~253.
- 宮田大輔・鈴木保志・小畑篤史・後藤純一・板井拓司・政岡尚志・吉井二郎 (2008) 木質チップの自然乾燥における攪拌の効果. 日本森林学会誌 90 : 75~83.
- 森口敬太 (2004) 木質バイオマス資源の利用手法. 118pp, 高知大学農学研究科修士論文.
- 森口敬太・鈴木保志・後藤純一・稲月秀昭・白石祐治・山口達也・小原忠 (2004a) 林道端に集積されたスギ残材の含水率の経年変化. 日本林学会誌 86 : 93~97.
- 森口敬太・鈴木保志・後藤純一・稲月秀昭・山口達也・白石祐治・小原忠 (2004b) 林地残材を木質バイオマス燃料として利用する場合のチップ化と運搬コスト. 日本林学会誌 86 : 121~128.
- 盛岡タイムス (2005) 岩手型チップボイラーが完成 木質バイオマス燃料を利用. 2005年2月25日盛岡タイムス Web News (<http://www.morioka-times.com/news/0502/25/0502509.htm>, 2008年3月23日参照).
- ペレットクラブ (2004) 木質ペレットの価値. Web 資料(<http://www.pelletclub.jp/pellet/about.html>, 2008年3月22日参照).
- 林野庁 (2007) 平成19年版 森林・林業白書. 165pp, 日本林業協会, 東京.
- 嵯峨山正治・鈴木保志・後藤純一・山崎敏彦 (2008) 収入間伐時に土場に集積する端材量とその形状分布. 日本森林学会学術講演集 119 : 801.
- 佐々木誠一 (2006a) 燃料用チップはどれくらいで供給できるのか(その1). 機械化林業 630 : 7~12.
- 佐々木誠一 (2006b) 燃料用チップはどれくらいで供給できるのか(その2). 機械化林業 631 : 6~12.

資源エネルギー庁総合政策課 (2001) エネルギー源別発熱量表の改訂について (Web 資料 <http://www.meti.go.jp/kohosys/press/0001414/2/0330kakuho2.pdf>). 4pp, 資源エネルギー庁, 東京.

Sundberg, U. and Silversides, C.R. (1996) 森林生産のオペレーショナル・エフィシエンシー [理論と実践]. 神崎康一・沼田邦彦・鈴木保志訳, 477pp, 海青社, 大津.

鈴木保志 (2004) 中山間地域における森林バイオマス資源の有効利用に向けて—第 11 回 森林生産システム研究会報告—. 森林利用学会誌 19 : 171-174.

鈴木保志・宮田大輔・秦野瑤子・山口達也・吉井二郎・後藤純一 (2007) 林地残材丸太から切削式チップにより作られたチップの寸法分布と樹種および丸太形状との関係. 日本森林学会誌 89 : 92~101.

石油情報センター (2008a) A 重油(大型ローリー)納入価格調査結果推移表(平成 19 年). Web 資料(<http://oil-info.ieej.or.jp/price/data/Ajuyu.pdf>, 2008 年 3 月 21 日参照).

石油情報センター (2008b) 軽油インタンク納入価格調査結果推移表(平成 19 年). Web 資料(<http://oil-info.ieej.or.jp/price/data/sangyokeiyu.pdf>, 2008 年 3 月 21 日参照).

石油情報センター (2008c) 産業用価格・A 重油・月次調査 2008 年 1 月分 小型ローリー納入. Web 資料(http://oil-info.ieej.or.jp/price/price_sangyo_a_juuyu_getsuji.html, 2008 年 3 月 23 日参照).

竹添修 (2006) 香美森林組合における列状間伐の取り組みについて. 森林利用学会誌 21 : 21~24.

田中慧・後藤純一・鈴木保志 (2008) 林内における 1 m 長丸太の乾燥実験. 日本森林学会 学術講演集 119 : 392.

Yoshioka, T., Aruga, T., Nitami, T., Kobayashi, H. and Sakai, H. (2005) Energy and carbon dioxide (CO₂) balance of logging residues as alternative energy resources: system analysis based on the method of a life cycle inventory (LCI) analysis. *Journal of Forest Research* 10: 125-134.

Yoshioka, T., Aruga, K., Nitami, T., Sakai, S. and Kobayashi, H. (2006) A case study on the costs and the fuel consumption of harvesting, transporting, and chipping chains for logging residues in Japan. *Biomass and Bioenergy* 30: 342–348.