

燃料林としての広葉樹林の再生について

早田 健治
Soda Kenji
(森林部門・林業)



昨年に引き続き、今年の夏はさらに、本当に暑い。いろいろな意味で戦後 80 年続いた「日本と世界」が大きな転換点にあることを感じさせる。地球という限られた空間で生きてきた我々とその子孫が、今後とも平和に暮らしていくためには何が必要なのか？

今年 5 月に、2022～2023 年度に実施した広葉樹林の活用のためのプロジェクトの成果を報告書としてようやくとりまとめることができた。森林は、国土の 68%を占める我が国にとって重要な資源であり、その環境的重要性も含めて今後の活用が課題である。今回は、この報告書のダイジェストを示し、そのきっかけとしたい。

1 はじめに

NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）の助成を受けて一般社団法人徳島地域エネルギーが実施した「可搬チッパ・コンテナ乾燥機とバイオマスボイラを組合せた広葉樹林の燃料利用実証事業」に 2022～2023 年度の 2 カ年にわたり主任研究員として関わることになり、燃料用チップ生産に関わる多くの知見を得ることができた。

化石燃料の大半を輸入にたよるわが国では、国内で循環再生利用が可能な木質バイオマスにもっと目を向けるべきだと考えるが、残念ながら木質バイオマス利用が先発している欧州に比べてあまり進んでいとはいえない。

木質バイオマスはすでにドイツ、オーストリア等では民生用エネルギーとして定着しており、大きめの家では、地下室等にチップボイラーと燃料庫を持つものが多い。また、集合住宅や集落では、全戸をまかなく規模の温水ボイラーを設置し、温水パイプを道路地下等に整備し、温水を循環させ、各家庭では熱交換器により、暖房や給湯に熱を使用している。

ちなみにオーストリアバイオマス連盟は次のように述べている。「1990～2021 年の間にオーストリアの総エネルギー消費量に占めるバイオエネルギーの割合は、同期間にオーストリアのエネルギー消費量が 36%増加したにもかかわらず、9.1%から 17.3%に増加した。バイオマスの総使用量は現在、1990 年の 2.5 倍以上に達している。オーストリアは 2020 年までに総エネルギーミックスの 34%を再生可能エネルギーで占める目標があったが、パンデミック中の原油消費量の減少により、実績は 36.5%と上回った。しかし、バイオマスエネルギーがなければ、再生可能エネルギーの割合は 15%程度まで低下したと考えられる。バイオマスエネルギーなしでは原子力と化石燃料からの脱却は不可能であることは明らかである。2021 年には、オーストリアのバイオマス量の 83%が森林セクターから供給され、

残りは農業部門と廃棄物部門から供給された。バイオマスの潜在能力が継続的に活用されれば、オーストリアのバイオマス利用は 2030 年までにさらに 38% 増加する可能性がある。バイオマスはオーストリア国内で最も重要なエネルギー源へと発展しており、中期的には石油と天然ガスを追い抜くと考えられる。」

木質バイオマスは、単位重量あたり熱量が石油等に比べ低く、高温が必要な高圧蒸気タービンを使用する発電等には向かない。しかし、単にお湯を沸かしたり、暖房を行ったりするだけの 100°C 以下の低温利用には十分に使用できる。実は、民生エネルギーの半分以上は暖房、給湯等の低温利用であり、この分野への木質バイオマスエネルギーの活用が期待されている。

この 2 年間の調査活動では、現在の石油価格に対し、十分に対抗できるコストで、燃料チップの生産、製造が可能であることを示唆する多くの実証データを得ることができた。今後、これをベースに国内の木質バイオマスエネルギーの活用が加速することを期待せずにはいられない。

2 実証試験地の概要

今回の実証事業では、兵庫県の協力を得て、同県所有の宝塚新都市県有環境林をフィールドして活用させていただいた。この地域は、神戸市、大阪市から近く、輸送コストの点でアドバンテージがあり、通勤も可能であることから、未利用の森林を新たな雇用創出の場と位置づけることもできる。また、地形は私が暮らす四国に比べると圧倒的になだらかで、稜線との標高差も少なく、既設県道、市道等が充実しており、低成本で作業路網の開設が可能である。

また、長年放置された元薪炭林を伐採し、更新することは、直接的な木質バイオマスによる、化石燃料等の削減に加えて、森林の炭酸ガス吸収能力の向上に加えて、森林の管理レベルの向上による様々な森林の公益的機能の高度発揮が期待できると考える。

森林簿によると、宝塚新都市県有環境林の林種構成は、その 93% 以上が天然林、齡級配置では、50 年生以上が 85% となっている。ただし、実際に山を検分すると、南側の新名神高速道路周辺の地味は非常に悪く、北に行くほど森林の状況は良くなってくる。ただし、地味以外にも、作業道進入地点の状況、傾斜、周辺の人家の状況、土場の確保等の条件があり、地元の了解も得て、最終的に玉瀬 1 クラスターを実証試験地として決定した。

3 試験方法

燃料材生産システムとは何だろうか？ 全く手つかずの森林を前にして、これから我々は何を調べて実績報告として取りまとめたらよいのか？ この地域には、林業の担い手は皆無である。薪炭材の時代には、多くの人々が山に関わっていたと思われるが、現在は誰も山に向き合っていない。しかし、地球温暖化の時代、今後確実にこの資源を有効に活用していく必要がある。そして多分そこに登場するのは、最初は、それほど技術的には最先端ではない、ただ山に興味がある人たち。現状では、林業のプロは高い高性能林業機械の償却に手一杯であり、率先して収益性の低い広葉樹と向き合うとは到底思えない。

今回の調査事業の手法は、

- ① 作業道を開設する。
- ② 作業道の上下に幅 5~20m、長さ 50m 程度の短冊状の伐区を設定し、道上の伐区の木は上方に、道下の伐区の木は下方に伐採する。

- ③ 一定期間葉枯らし乾燥し、重量を減少させる。
 - ④ 乾燥した全木材を、根元にワイヤーをかけ、フェラバンチャーザウルス附属の単胴ウインチで道まで引きずり出す。
 - ⑤ 全木のままフォワーダに積載し土場まで搬出する。
 - ⑥ 土場に設置した移動式チッパーでチップ化し、乾燥機構を備えたコンテナ（Kantainer®（極東開発工業登録商標）以下「カンテナ」という。）に吹き込む。
 - ⑦ 「カンテナ」をフックロールトラックにセットし、需要先のチップボイラーに輸送する。
- という一貫システムである。

これにより、従来のシステムでは発生していた現場での造材、原木の積み込み、チップ工場へのトラック輸送、工場での原木積み卸し作業がなくなり、生産の効率化が期待できる。

また、伐採については、当初計画では万一更新が不調の場合でも森林のダメージを最小限にするため伐区の幅を 5m としたが、その後の経過を見ると更新上特に問題がないことが見通せたため、後半は伐区の幅をより作業がしやすい 10~15m としている。これについては、2024 年度以降も更新調査を続けており、その結果で環境的にも作業的にも適正な伐採幅が決まってくると考える。

4 調査手法及び広葉樹材積の推計について

(1)調査手法

調査手法としては、伐採、搬出、運材の 3 工程に分けて、作業の開始時刻及び終了時刻から作業時間を把握し、作業日ごとに記録していった。この記録は、2 年間のすべての作業日で行われ、結果として作業道支障木を含めたすべての作業の時間データ、伐採木の樹種、胸高直径データを取得することができた。

(2)広葉樹材積の推計

生産工程について検討を加える前にひとつ課題を整理する必要がある。針葉樹の場合はほぼ樹形がそろい、主軸もはっきりしているため、円錐やナイロイドをベースにした計測式が多数研究されており、幹材積表も精度のよいものが調製されている。

しかし、広葉樹の場合は、これらの資料がほとんどなく、かつ、樹形も不整で、枝と幹が区別できないものも多い。当初は、樹木を円錐とみなし、胸高直径を底面直径、樹高を高さとする円錐の体積に、胸高直径と胸高(1.4m)から末口二乗法で計算した丸太材積を加えた簡易式を作り、それを材積としていたが、どうしても材積が過小になる傾向があった。

このため、別の推計方法として、2023 年 4 月から 12 月まで計 178 本の原木について、全木の胸高直径、樹高（伐採木長）、重量を、チップ化前に測定し、さらに、その原木を切削したチップを容積のわかったバケツに取り、その重量を計測し、チップのかさ単位重量を計算した上で、チップ化倍率 2.5 で割り戻して材積とした。また、チップの一部をサンプルとして絶乾法により含水率の測定を行った。

この調査結果から生産工程調査の基礎となる原木材積は簡易式の計算材積の 1.6 倍（1.6 ≈ 3.9/2.5）として計算している。

(3)玉瀬 1 クラスターの広葉樹林の樹木の現況について

今回の調査では伐採木計 1763 本について樹種及び胸高直径等のデータを収集した。

樹種別本数では、ソヨゴ、コナラが多く、ソヨゴが31%、コナラが28%を占め、全本数の約6割となった。また、チップ生産上最も重要な材積については、コナラが40%、ソヨゴが18%、以下樹種不明17%、アカマツ11%、ヤマザクラ4%となった。

樹種不明が多いのは、落葉期の伐採では樹種の特定が困難であったため、不明としたものであり、特殊な木が生えているわけではなく、樹種についてはこの地域に自生する樹種のほとんどを網羅していると考える。

さらに、その樹種の総材積を本数で割った立木1本当たり平均材積をみると、1本だけ大木があったイヌエンジュを含め、ヤマザクラ、アカマツ、タカノツメ、クリ、コナラ、タムシバ等が上位を占めた。また、ソヨゴ、カキノキ、リョウブ等にも比較的大きな個体がみられた。

反対にヒサカキ、アセビ等は、最大でも胸高直径10cmを超えるような個体はみられず、後の施業に当たっては、大径木になる可能性が少ないのでこれらの樹種を積極的に排除し、種間競争を緩和するとともに、養分や水分を大径木に集中させることができ、燃料林としての有効活用につながるのではないかと考える。

5 調査結果

(1)作業道開設作業

作業道の開設方法は、まず、ハンドレベルで簡易測量を行い、岩盤、急傾斜地等施工が困難な箇所を避けながら、縦断勾配10%程度を目安に路面高さに杭と目印テープを設置し、その高さを目安にフェラバンチャーザウルスで掘削作業を行った。幅員は2.5mを標準とし、軽トラックが安全に走行できることを基本に施工した。

当初は開設予定地に密生している灌木等を事前に刈り払いを行っていたが、小灌木であればフェラバンチャーザウルスのグラップルで除去可能なことがわかり、後半では、事前刈り払いを省略した。採用した表土ブロック工法は、路体谷側にバケットで表土を積み重ねる平坦地を転圧してつくり、そこに、開設予定地斜面の表土を置き、転圧して積み重ねていくもので、少量づつの転圧により、強固な路体が得られるとともに、表土内の埋土種子、小灌木等からの法面の早期緑化安定が期待できる。

また、路面排水は長期的な作業道の利用には最も重要で、施工後も雨が降ると現地を確認し、路面水が連續して流れる箇所を掘削し、素掘りの横断側溝を施工した。常水がなくとも、雨天時に水が集中する箇所には、穴あきポリパイプ暗渠を設置した。

開設作業は、掘削機能以外に、グラップル機能、伐採機能を兼ね備えたフェラバンチャーザウルスにより行っており、従来のバックホウ+チェンソーによる作業に比べ、相当の効率化が図られていると考える。また、一部区間については、基岩の破碎が必要となったため、ブレーカーを剪定枝用小型グラップルに架装し作業を行った。作業道は、恒久的施設と位置づけられ、伐採を行った後の更新作業、保育作業、森林被害の防除作業、その他管理作業等を効率的に行うためにも不可欠である。

作業道の開設工程は、平均で17.5m/日となり、当初計画の10m/日を大幅に上回った。

(2)伐採作業

伐採はチェンソーにより行った。なお、集材を円滑に行うため、下げ荷集材の場合は上向き、揚げ荷集材の場合は下向きに行った。上向き伐採の場合は、ワイヤー等で牽引して伐採方向を規制する必要があり伐採の工程は低くなる。ただし、伐採方向がしっかりと定ま

るため、危険性は減少し経験の浅い作業者でも安全に作業を行うことができた。

伐採は、基本的に作業道に直交する幅 5~15m × 50m の伐区を設定し、伐区と次の伐区の間には幅 15m の保残帯を設け、万一更新がすみやかに行われない場合でも、森林の公益的機能が維持されるよう配慮した。現況を見ると、伐区には、新たな萌芽の発生が多数見られており、裸地化の可能性はきわめて低いと考える。

また、伐区には、ヒサカキを中心とした灌木が密生している箇所が多く、この場合は、事前に刈り払い機を使用して灌木類を除伐しないと作業すらできない。現状ではやむを得ないが、将来の更新においては、ある程度の大きさに成長する樹種が優占するよう、育成段階での森林管理に配慮する必要がある。

伐採工程は、下向き伐採では単木材積が大きくなるほどあがっていくのに対し、上向き伐採ではあまり変化が見られない。生産工程は平均で 6.62m³/日と低くなった。これは、上向き伐採の影響が大きいが、下向き伐採に限れば、単木材積 0.05m³/本以上の木であれば、40m³/人日程度の生産性が期待できる。

今後の改善の方向としては、上向き伐採を避け、下あるいは斜め下方向への伐採を行うことが考えられる。これは、伐区幅を 10~15m 程度に拡大することにより実現する。広葉樹は、箒状の樹形をしているため、枝先の柔軟性が高く、元口にワイヤーをかけて牽引すれば、容易に方向転換が可能である。また、針葉樹に比べ、急斜面で材が滑落する恐れも少ない。

今回伐採した合計 1763 本を分析すると、単木材積 0.05m³ 以上の木が本数で 51%、材積で 84% を占めている。おり、工程調査のデータ自体が平均単木材積であることも考慮すると、伐区幅を拡大し、下向き伐採を行うことが、工程改善に大きく寄与する可能性が示唆される。

(3) 現場乾燥（葉枯らし）

葉枯らし乾燥とは、木を伐採した際、造材することなく、葉をつけた全木のまま現場で自然乾燥させる方法で、

- ① 原木の含水率が下がり、追加乾燥せずそのまま燃焼できるチップの生産が可能になる。
- ② 原木が軽量化し搬出が容易になる。
- ③ 葉や小枝が林地に残置され、林地の地味の保全が図られる。
- ④ 伐採から搬出までの時間調整ができるため、結果的に伐採木のストックが可能になり、急な需要にも対応できる。

といったメリットがある。しかし、広葉樹の葉枯らしに関するデータはほとんどなく、まずは、実態を調査する必要があった。なお、葉枯らしについては、別項で詳述する。

(4) 搬出（集材・運材）作業

集材は、フェラバンチャーザウルスに付属する単胴ワインチによる地引で行った。ワインチの牽引力は十分で、胸高直径 30cm を超えるような大木でも安定的に搬出することができた。しかし、50m の距離を人力でフックを引っ張りながら上下することはきわめて重労働かつ非効率である。このため、2023 年度の搬出作業の一部については、フォワーダのワインチに 6.3mm 径のワイヤーを装着し、荷掛け地点に滑車を設置し、フェラバンチャーのワインチのフックを荷掛け地点まで引き寄せる方法を試行的に実施した。これにより、明ら

かに荷掛け手の身体的疲労は大幅に減少したが、フォワーダのウィンチにリモコン機能がないため、地形条件によっては必ずしも行程改善につながらなかった。

2024年度エネルギーの森事業では、フェラバンチャーにリモコンウィンチを追加装備することが予定されており、これにより工程が改善されることを期待している。

集材された材は、魚谷鉄工製全木集材型フォワーダ AK-33型により、作業道を通じて土場まで搬出される。原木は樹高7~15m程度が大半で、基本的に全木状態で根元を前にしてフォワーダに積み込むが、長過ぎで、曲線通過に支障がある場合は、チェンソーで切断・分割して積載した。チップ材の場合、長さや枝の有無に制限がないため、必要最小限の造材でフォワーダ輸送できるため、効率の改善に大きく寄与できると考える。土場までの平均搬出距離は既設道部分を含め400mで、サイクルタイムは約1時間となった。

搬出伐採の生産工程は集材6.10m³/日、運材11.99m³/日であった。

(5)チップ化作業

搬出された材は土場に留置した移動式チッパーで、チッパーの近くに集積した材を小型グラップルで、元口からチッパーに投入する。処理可能な直径は30cm程度で、それより大きな材は、割るなどの前処理が必要になる。ただし、元口から投入すれば、ほとんどの材は、根元から梢端部まで一度で処理が可能である。できあがったチップは、排出塔から「カンテナ」に向けて吹き出される。

生産工程は、1時間4~7m³、1日当たり24~42m³/日であった。

(6)チップ輸送作業

生産されたチップは、需要先ボイラー又は追加乾燥施設に輸送する必要がある。これには、フックロールトラック及び「カンテナ」を使用することにより、チップ生産現場から需要先等まで合理的な輸送体制を構築できた。

6 葉枯らし乾燥について

(1)サンプル木による定期含水率調査

原木の含水率は、燃料チップの品質に大きな影響を与え、生産工程とリンクした、最適の乾燥期間を設定する必要がある。このため、搬出した原木から、調査木を抽出し、長期にわたる含水率の変化を測定し、最適な伐採時期、乾燥期間を探ることにした。

調査木には、樹種と伐採年月日を表示したラベルをつけて、土場にならべ、毎月木口と木口から20~30cm程度の位置から円盤を採取し、乾燥前重量と、乾燥機で24時間105°C乾燥させた後の絶乾重量を量り、その差を含水率(ドライベース)として記録した。

結果としては、全般に含水率低下がみられたが、樹種により、コナラ、ヤマザクラなど比較的乾きにくいもの、ソヨゴ、リョウブ、ヤマボウシなど、乾きやすいものに傾向がわかった。ただし、広葉樹の属性については、現段階ではまだデータ数がなく、さらに調査結果を積み重ねて検証する必要がある。

(2)部位別の含水率の変化

試供木から元口から2mごとに円盤を採取し、その含水率を測定した。その結果、伐採面(元口)以外は、どの高さでもあまり含水率が変化していないことがわかった。樹木の乾燥は、直接的な表面からの乾燥と、導管を通じた水分の排出の2つおりが考えられ、木口の伐採面からの水分排出は大きいが、木全体を乾燥させるには、導管を通じた乾燥がより重要であり、ここに葉枯らし乾燥の意義があると考えられる。

(3)木口の含水率の変化

すべての調査木で、測定開始後 50 日以内で木口含水率の急激な低下がみられ、大気に接する表面積が大きくなると、一気に含水率が下がる可能性があることが示唆される。また、この含水率の低下は季節を問わず起こっているが、特に夏～秋の低下が大きいように見受けられる。

(4)木口から 20cm 位置の含水率の変化

木口では、表面からの蒸発量が多く全体の含水率変化を把握するには問題があると考え、より実態に近い含水率把握の方法として、木口を避けて表面が出ていない部分からサンプルを採取し、検討することとした。

この場合でも、木口ほど明瞭ではないが、初期に急激な含水率の減少が見られる。この傾向は、調査日（伐採日）ベースで見ても大きく変わらず、含水率の変化については、今回の調査では、伐採時期、季節による変動はあまり見られなかった。

なお、標本木からの円盤採取による含水率調査では、個体差はあるものの、乾燥の遅いコナラ、サクラ類でもほとんどの木が、約半年でそのまま燃料として使える含水率 35%に達しており、比較的乾燥が早いソヨゴ、リョウブ等については約半年でさらに低い含水率 30%程度となり、1 年を経過すると含水率 20%以下の良質な燃料チップとなった。コナラ以外サンプル数が少なく、断定的なことはいえないが、伐採時期による差異は比較的少ないといえる。また、樹種ごとの差が大きい。

(5)チップ化サンプルによる調査

前述した広葉樹材積の推定のために作成したチップ化サンプルは、すべて、伐採日がわかった試験木で行っており、これからも、時間経過による含水率変化がわかる。

この調査では、すべての樹種が、約 1 年の乾燥で、良好な燃料チップになることが示唆されており、ソヨゴ等の乾きやすい樹種では、半年で含水率 30%以下のきわめて優良な燃料チップになる。また、コナラ等乾きにくい樹種でも、ほとんどの個体が半年で燃料チップとしての条件である含水率 35%以下をクリアしており、実用上は問題なく半年程度の葉枯らしで燃料チップとしての利用が可能であることが示唆される。

(6)全木重量の測定による含水率の変化

樹木全体の含水率の変化のデータを得るために、試しにフォワーダのグラップルで全木をつり上げ、吊りはかりでヤマザクラ、コナラ及びコナラの元玉の重量を定期的に測定し、その変化を記録した。

伐採から約 10 ヶ月の葉枯らしの結果、コナラは重量が 308.0kg→242.5kg、含水率が 47.2%→33.0%、ヤマザクラは重量が 347.5kg→260.7kg、含水率が 50.9%→34.6%に減少した。

しかし、コナラの丸太（元玉）については、ほとんど減少が見られなかった。

7 ランニングコストの算定

作業道開設

測量 16 時間 伐開 35 時間 開設 279 時間 合計 330 時間 換算 55 日

開設延長 807m 1 日当たり開設延長 14.7m/日

純 1 日当たり開設延長（開設作業のみ） 17.4m/日

フェラバンチャーザウルス損料 4,233 円/日 燃料費 4,126 円/日

人件費 15,000 円/日

開設 1m当たり費用 $4,233+4,126+15,000=23,359$ $23,359/17.4=1,342$ 円/m

山の 1ha 当たりの蓄積を 90m³ と仮定し、15m おきに幅 10m 長さ 50m の伐区を設定すると、作業道 100m の延長で上下計 8 つの伐区が設定できる。1 つの伐区の面積は 0.05ha であるから、作業道を 100m 開設して伐採できる面積は、 $0.05*8=0.4$ ha となり、搬出可能材積は 36m³ となる。ただし、作業道は直線でなく迂回しており、迂回率 0.7 を乗じて、伐採可能面積は 0.28ha、材積は 25m³ となる。作業道 1m の開設費用は 1,342 円であるから、この伐採に要する作業道経費は、134,200 円となる。従って 1m³ 当たりの作業道経費は、5,360 円となる。

償却期間を 5 年と仮定して m³ 当たり作業道開設費の 1/5 を作業道開設費として計上してみると 作業道開設費 5,360 円/m³ $5,360/5=1,072$ 円/m³ となる。

伐採

伐採総本数 975 本 伐採総材積 79m³ 延べ所要時間 72 時間 換算 12 日

1 日 1 人当たり伐採工程 6.58m³/人・日

チェンソー損料 67 円/日 燃料費 1,200 円/日 人件費 15,000 円/日

伐採 1m³ 当たり費用 $67+1,200+15,000=16,267$ 円 $16,267/6.58=2,472$ 円/m³

伐採（下向き伐採）

今回の調査では、伐区幅の関連から上向き伐採をせざるを得ない伐区が多く、伐採の工程が特に大きく低下した。伐採幅を広げると上向き伐採の必要がなくなり、伐採の工程は大きく改善する。伐採方向を下向きにした場合の工程を 40m³/人・日と想定すると、生産費は、次のとおりとなる。

1 日当たり伐採工程 40m³/日 1 人当たり伐採工程 40m³/人・日

チェンソー損料 67 円/日 燃料費 1,200 円/日 人件費 15,000 円/日

伐採 1 日当たり費用 $67+1,200+15,000=16,267$ 円

伐採 1m³ 当たり費用 $16,267/40=407$ 円/m³

搬出（集材）

搬出総本数 669 本 搬出総材積 53m³ 延べ所要時間 79 時間 換算 13.2 日

うち集材工程 52.1 時間 1 日当たり集材工程 6.10m³/人

1 人当たり集材工程 3.05m³/人/日

フェラバンチャーザウルス損料 4,233 円/日 燃料費 4,126 円/日

人件費 15,000 円/日

集材 1 日当たり費用 $4,233+4,126+15,000+15,000=38,359$ 円

集材 1m³ 当たり費用 $38,359/6.10=6,288$ 円/m³

搬出（運材）

搬出総本数 669 本 搬出総材積 53m³ 延べ所要時間 79 時間 換算 13.2 日

うち運材工程 26.5 時間 1 日当たり運材工程 11.99m³/人

1 人当たり集材工程 11.99m³/人/日

フォワーダ損料 3,533 円/日 燃料費 2,698 円/日 人件費 15,000 円/日

運材 1 日当たり費用 $3,533+2,698+15,000=21,228$ 円

運材 1m³ 当たり費用 $21,228/11.99=1,770$ 円/m³

搬出（総合）

搬出総本数 669 本 搬出総材積 53m³ 延べ所要時間 130 時間 換算 21.7 日

1 日当たり搬出（総合）工程 11.99m³/日

1 日 1 人当たり搬出（総合）工程 2.44m³/人・日

搬出 1m³ 当たり費用 6,288+1,770=8,058 円/m³

チッピング（原木換算）

1 日 1 人当たりチッピング工程 17.7m³/日 所要人員 1 名

チッパー損料 5,860 円/日 燃料費 5,730 円/日 人件費 15,000 円/日

チッピング 1 日当たり費用 5,860+5,730+15,000=26,590 円

チッピング 1m³ 当たり費用 26,590/17.7=1,502 円/m³

チップ輸送（推計値）10km 往復（7m³ 積載）

フックロールトラックによるチップの輸送は、当初計画では、「カンテナ」の容量に合わせて 1 回当たり 10m³ としていたが、使用しているトラックのスペック（車両総重量 8t 未満）に合わせ、運搬量は 7m³ とした。

今後のランニングコストの計算も運搬量を 7m³ として行なう。

1 日 1 人当たり輸送工程 21m³/日（チップ層積）3 往復 所要人員 1 名

トラック損料 2,777 円/日 燃料費 4,500 円/日 人件費 15,000 円/日

輸送 1 日当たり費用 2,777+4,500+15,000=22,277 円

輸送 1m³（チップ層積）当たり費用 22,277/21=1,061 円/m³

ただし、原木材積はチップ材積の 1/2.5 であるため、原木換算すると、
1,061*2.5=2,652 円/m³

8 効率的な燃料チップの製造方法の検討

（1）伐区幅の拡大による工程の改善

伐区幅は、当初は更新の状況が不確実であったため、最低幅の 5m としたが、その後の林床の植生の変化の状況を見たところ、伐区幅をある程度拡大しても、更新に支障がないことが推定された。このため、2022 年度後半からは、伐区幅を 10~15m に拡大した。

伐区幅の拡大による工程改善の効果は、作業道下側の揚げ荷集材の伐区ではそれほど顕著でないが、伐区幅が 5m の場合、作業道上側の伐区では、樹木を強制的に上向きに伐倒し、元口を作業道側に揃えないと搬出が困難であったのに対し、伐区幅を拡大すると、上向き伐倒を行わなくとも、元口にワイヤーをかけて引っ張れば、伐区幅内で伐採木が回転し、支障なく搬出できる。このことにより、伐採の効率を大幅に改善することが期待できる。

（2）葉枯らしによる工程の改善

今回の調査では、搬出を重量のある生木状態で行っているが、葉枯らし乾燥が進むことにより重量の減少が期待でき、さらに、枝等の弾力性が減少し、簡単に折れるようになるため、搬出時の障害物に引っかかることが少なくなる。これが、どの程度生産工程に影響するかも、大いに期待している。

（3）チッピング工程の改善

今回の調査では、伐採木の乾燥の状況を調査する必要があり、搬出した木を一旦土場に仮置きし、後日、チップの乾燥調査に合わせてチッピングを行っていた。本来の事業的チッピングの場合、需要に応じて、リアルタイムで、山から搬出し、チッピングを行

い、速やかに需要先に納品するのが適当である。

山からフォワーダで搬出した木をそのままチッパーに投入すれば、積み卸しの手間がそのまま省されることになる。

(4) 計画的チップ供給による総合的改善

燃料チップの需要は、ある程度把握が可能であり、供給対象の施設が決まれば、計画的な作業が可能になる。計画的な生産であれば、さまざまな場面で効率的な人員配置ができ、工程改善が期待できる。

9 伐採跡地の更新について

今回の調査研究事業の目的は、国内で再生産が可能な再生可能エネルギーである木質チップを低コストで供給するためのシステムづくりであるが、そこには、重要な課題として、伐採利用された木材が、再び種子、苗木等から成長過程を経てよみがえり再生産される技術の確立がある。

しかし、天然更新のメカニズム自体は科学的に十分確立されたものではない。

このため、まずは、伐採跡地の変化を可視化するため、伐採搬出を行った箇所に、5m × 5m を基本とする調査コトロートを設置しその経過を観察することとした。

コトロートは、基本的に1伐区に2カ所以上設置することとし、現在までに30伐区のうち、9伐区に29カ所設置している。

調査は、現在までに2023年10月、2024年9月の2回行った。出現した木本種数は35種類で、うち高木性樹種が8種、樹高10m程度の中木性樹種が8種、ヒサカキ等の低木性樹種が19種となっている。

主要な高木性樹種としては、コナラ、ヤマザクラ、クリ等があげられる。中木性樹種としてはソヨゴ、イヌツゲ、タムシバ等があげられる。

樹種別本数では、2023年度調査ではヒサカキ306本、コナラ178本、ソヨゴ137本、2024年度調査ではヒサカキ193本、コナラ157本、ソヨゴ94本がベスト3となった。

今後の経過を見ないとわからないが、現状では、高木性樹種がha当たり1,000本以上発生しており、少なくとも裸地化の危険性は少ないとと思われる。今後も経過を観察しながら、適宜除伐を行い、高木性樹種を中心とした生産力の高い森林に誘導していきたいと考える。

10 おわりに

今回の調査では、燃料用チップの生産に関して多くの知見が得られた。この機会をえていただいた、NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）の関係各位、調査にご助言ご協力をいただいた兵庫県林務及び環境部局の各位、一般社団法人徳島地域エネルギーの各位、京都大学の長谷川尚史氏に深く感謝する。

なお、一般社団法人徳島地域エネルギーでは、さらにこの実証結果よりコスト削減を図るべく、2024年度以降も試験を継続して行っている。

この成果が活用され、一日も早く、木質バイオマスの熱利用が日本各地に広まることを期待する。