

未利用資源の供給実証等試験検討業務 報告書

平成 29 年 3 月



一般社団法人 長野県農協地域開発機構

目 次

1. 事業の背景・目的、概要	1
2. 町内の未利用資源の搬出・燃料加工に係る実証調査	3
2.1. 町内の未利用資源の搬出実証調査.....	3
2.2. 広葉樹林地残材の破碎試験	27

1. 事業の背景・目的、概要

(1) 背景・目的

- ・ 森林は、木材生産のほかにも地球温暖化防止や水土保全等の多面的機能、癒しやすさなどの場の提供などの多くの機能を発揮して我々の社会を支えている。わが国は、国土の約6割を森林が占めており、豊富な木質資源を有している。わが国の有する貴重な資源であるこれらの森林資源を最大限に活用できる仕組みが求められている。
- ・ 特に、地産地消型により、これまで域外から調達していた財・サービスを地域内の生産物等に置き換えることで、地域に新たな雇用と産業を生みつつ地域の環境保全や活性化にもつなげていく取り組みが注目されている。
- ・ 信濃町は、森林面積が町域の約7割を占め、信越五岳に囲まれた緑豊かな自然環境を有している。これらの資源を小規模バイオマス発電等の木質バイオマスエネルギー利用に供給するシステムの構築を目指す。



図 1 本事業の概念図

(2) 概要

目的

- ・ 町内の 森林施業により発生している地残材等の未利用バイオマス資源を有効活するための実証試験を実施し、当該地域における木質バイオマス燃料の製造・供給について検討 する ことを目的 とする。

業務内容

- ・ 町内の未利用資源の搬出・燃料加工に係る実証調査として、本町内の未利用木質バイオマス資源（針葉樹及び広葉樹）を効率的に搬出するシステムの検討を行う。
- ・ また、小規模バイオマス発電システムでの利用を想定した木質バイオマス燃料への調製・加工の実証調査及び調達に係る調査・検討を行う。
- ・ 生産量及びコスト並びに製品の品質等の検証。

2. 町内の未利用資源の搬出・燃料加工に係る実証調査

2.1. 町内の未利用資源の搬出実証調査

(1) 試験の概要

目的等

- ・ 昨年度は、従来型のチェーンソーを用いた人力および、フェラバンチャザウルスやメンジムックを用いた機械による積雪期の広葉樹伐採の生産性等を取りまとめた。この結果、
 - 伐木工程においては、人力伐木に比べ機械伐木の方が、生産性は明らかに高く、安全性も担保できた。
 - 造材生産性においては、枝ぶりが大きく不定型な広葉樹では機械造材は困難であり、特にフェラバンチャザウルスでは枝払い等の人力による造材補助作業が多く必要であったため、生産性は変わらない、またはむしろ低くなる可能性が示唆された。
 - 作業システム全体では、メンジムック>フェラバンチャザウルス>人力の順に労働生産性は高くなったものの、人力作業と機械作業の労働生産性に大きな差は認められなかったが、野外作業時間が人力作業に比べ機械作業では半分以下となるなど安全性面を高く評価できた。という結果が得られた。
- ・ 一方、各機械設備の適用特性については、
 - メンジムックは、野外作業時間がほとんど発生しないため安全性が最も高く、生産性も高いため、積雪期の広葉樹伐採において有効であるとしたが、機械が高価であるため、実際に導入するには困難である。
 - フェラバンチャザウルスは、国産エクスカベータのアタッチメントとしてバケットおよびグラップル機構を備えて多工程の処理が可能であり、汎用性が高く安価で導入しやすい。ただし、昨年度は準備および試験期間が十分に取れず、新しい機械に不慣れな部分があり、当日の作業を試行錯誤しながら進めざるを得なかったことも影響して、機械能力の最大カット径より早く伐木径に限界が生じ、特に堅いナラ類に対して人力補助作業を多く必要としたことから、実証の積み重ねと作業の工夫を今後の課題とした。という結果となった。
- ・ そこで今年度は、昨年度に残された課題を解決するため、広葉樹伐採の実証を積み重ねることとし、汎用性の高いフェラバンチャザウルスを使った伐木手法を検討し、広葉樹伐採の生産性の向上を試みた。なお、今年度は、非積雪期のデータ取得を予定していたが、試験数日前に降雪があり、積雪期の試験となってしまったが、結果として昨年度からのデータの積み重ねという位置づけがより明確なものとなった。

試験地の概要

- ・ 試験地は、昨年度の試験場所に隣接する山林の、信濃町の野尻長範山内の 2.90ha の事業地内（図 2）に試験地（図 3）を設定した。事業地は、国道 18 号から約 2km 舗装道路を入ったところにあり、昨年度の事業地と隣接している。
- ・ 森林簿によるとナラ類が 80%、その他広葉樹が 20%の 67 年生の天然生林である。なお、昨年度の試験地である舗装道路から近い三角形の飛び地を土場（図 4）として使用した。昨年度の事業による末木枝条が林地残材として舗装道路の脇に積み上げられており、後述するがこれを広葉樹林地残材の破碎試験の一部に使用した。
- ・ 伐採前の降雪前（図 5）と降雪後（図 6）の試験地の様子を示す。枝振りの大きい広葉樹だけでなく、小さな雑木、枯れ木が点在しているのが分かる。
- ・ 今年度は、昨年度の試験地と隣接しているため、同様の林分であるとみなし、試験地内の事前の林分調査を実施しなかった。昨年度の林分調査の結果として、樹種構成を表 1 に示す。胸高直径が 10cm 以上のものを伐採の対象とした。また、樹高は樹種ごとに標準木を選定し、図 7 のとおり樹高と胸高直径の関係式を導出して全体を推定した。
- ・ 試験地内の立木 125 本の内、本数で約 4 割をコナラが占めており、平均幹材積も 0.74m³/本と他樹種に比べ比較的大きいため、全体の蓄積（幹材積）74.7m³の 5 割以上を占めていた。次いでイタヤカエデやクリ、サクラの本数が多かった。一方、本数は少ないがホオノキやシラカンバ、ハリギリは幹材積の大きい立木が存在していた。試験地全体として、立木密度 568 本/ha、蓄積 339m³/ha の広葉樹林分であった。なお、森林簿上では蓄積が 122m³/ha となっている。

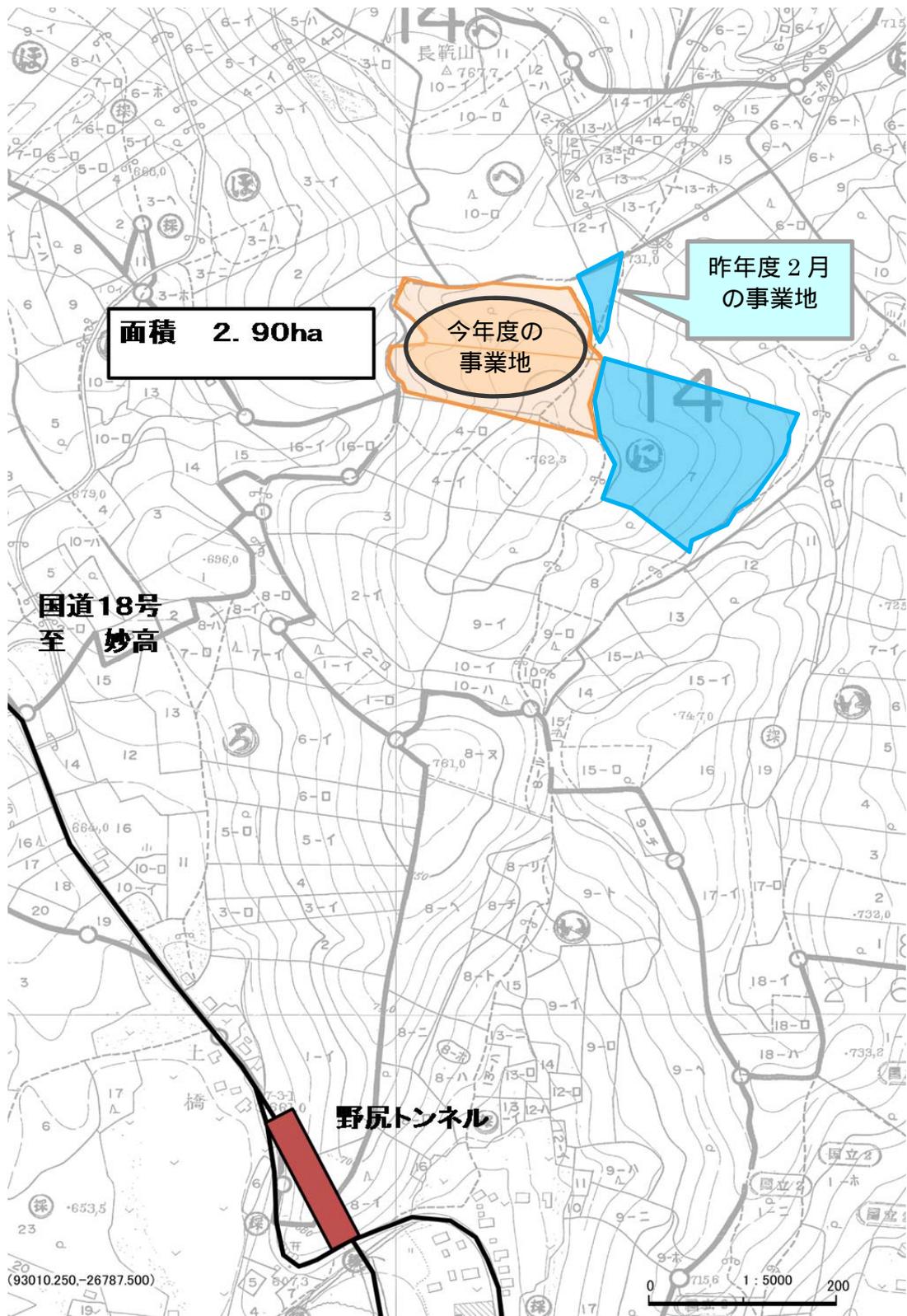


図 2 事業地

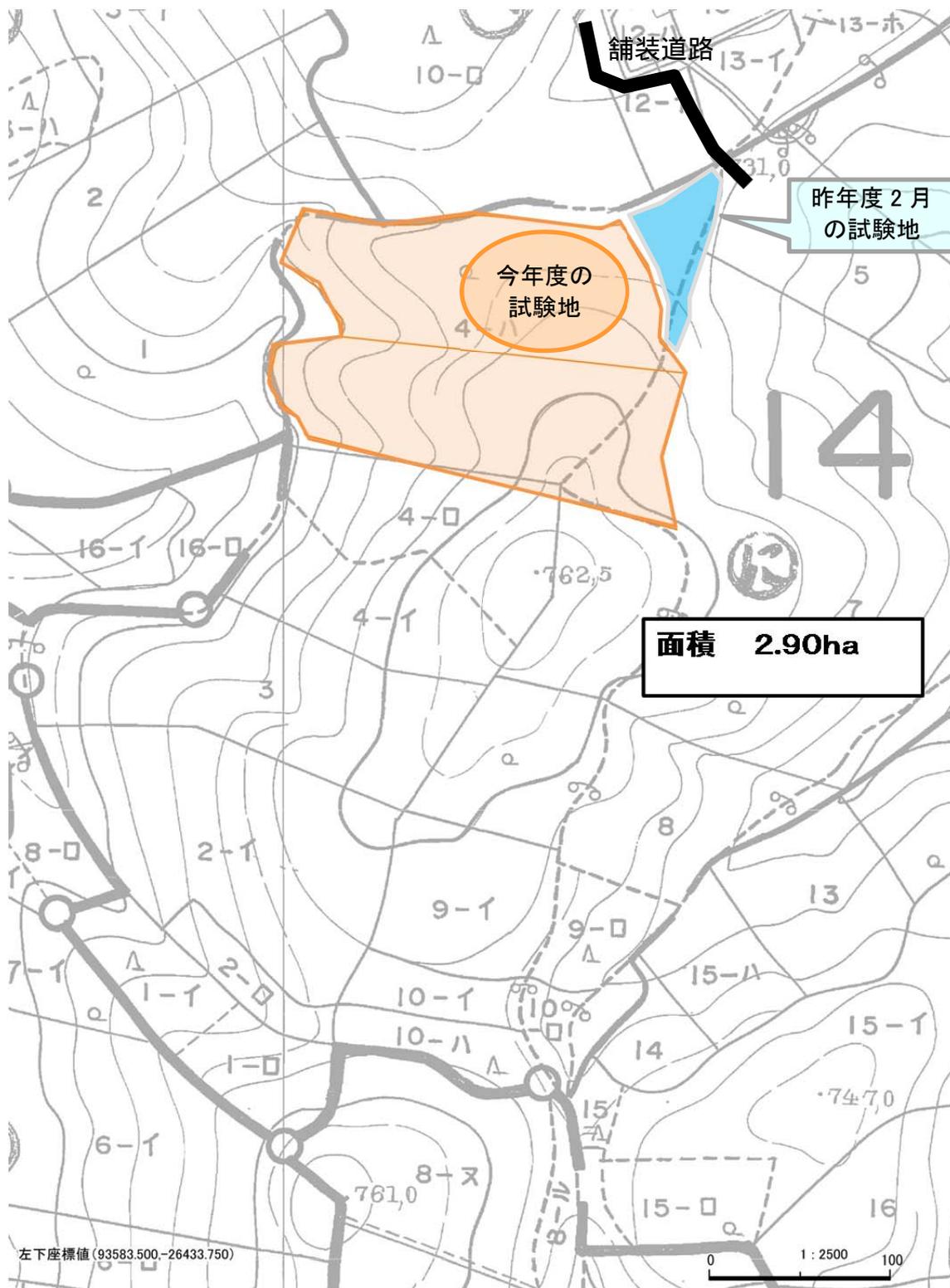


図 3 試験地



図 4 土場（昨年度の試験地内、手前舗装道路）



図 5 降雪前の伐採前の試験地



図 6 降雪後の伐採前の試験地

表 1 隣接地の樹種構成（昨年度試験地結果）

樹種	本数 (本)	平均胸高 直径(cm)	平均樹高 (m)	平均幹材積 (m ³ /本)	幹材積 (m ³)
コナラ	53	30.9	21.1	0.74	39.3
イタヤカエデ	13	23.0	16.8	0.43	5.6
クリ	13	28.3	20.6	0.60	7.8
サクラ	12	26.8	18.1	0.56	6.7
広a	8	13.5	11.6	0.08	0.6
ホオノキ	8	31.4	22.8	0.85	6.8
広b	8	19.8	16.0	0.28	2.2
シラカンバ	5	29.6	20.5	0.65	3.3
ケヤキ	3	15.2	11.9	0.10	0.3
クルミ	1	23.4	21.4	0.42	0.4
ハリギリ	1	42.3	26.4	1.63	1.6
総計	125	27.2	19.3	0.60	74.7

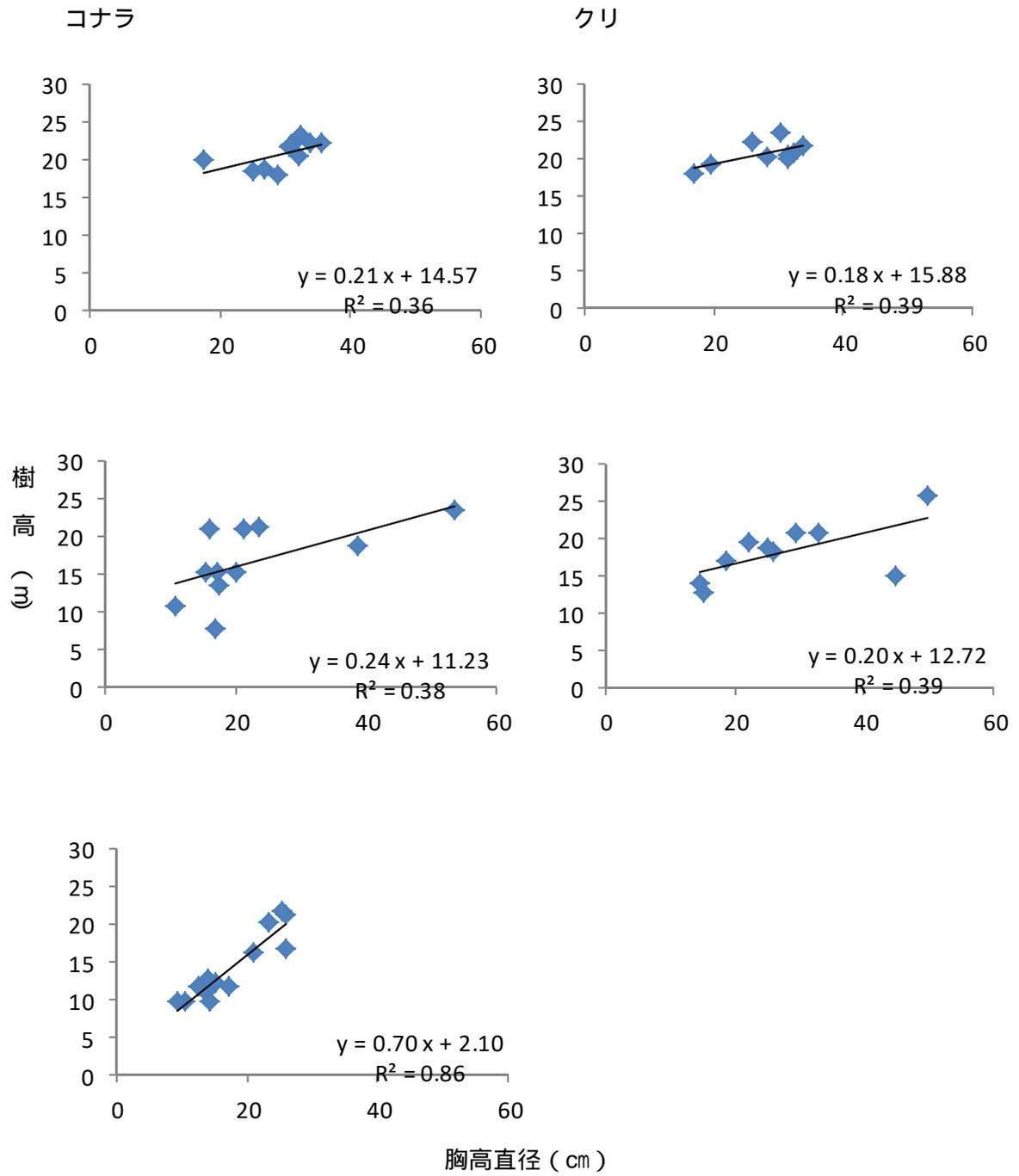


図 7 樹種ごとの樹高と胸高直径の関係

試験方法

- ・ 本試験地において、広葉樹の皆伐・破砕作業を 2016/12/12～15 の 4 日間にわたって実施した。試験方法は、先述したように事前に林分調査を実施できなかったため、伐木する直前にナンバリングし、樹種の判別および胸高直径の計測を行った。その後、伐木から木寄せ、集木、造材、用材のはい積み、末木枝条の破砕までの各工程をビデオ観測し、広葉樹伐採の作業時間分析を行った。また、土場にて用材の検知や破砕チップの質量計測等を行い、作業時間分析の結果と合わせて広葉樹伐採の生産性等を求めた。
- ・ 適用した機械は、昨年度と同様に、広葉樹資源の低コスト搬出技術や冬期の低コスト搬出技術の開発を想定して、伐木工程に国産のエクスカベータ + 松本システムエンジニアリング社製のフェラバンチャザウルスロボを用いた。昨年度はベースマシンのエクスカベータにバケット容量 0.5m³ (新 JIS) の住友建機社製エクスカベータ SH135 にフェラバンチャザウルスロボ MSE-45FGZX を搭載したが、今年度は同容量のキャタピラー社製エクスカベータ CAT314CCR (図 8) を使用したため、アタッチメントとの相性の問題から一回り大きい MSE-55FGZX (図 9) を搭載した。使用した伐木機械の主な諸元を表 2 に示す。MSE-55FGZX は、MSE-45FGZX に比べ機械諸元はほとんど変わらないが、機械メーカーの説明によるとローテータが強化されており、質量が 1,090kg から 1,270kg に増加している。ベースマシンは、アタッチメントが要求する使用圧力、流量ともに十分に満たしていた。

なお、フェラバンチャザウルスロボの選定理由について、国内で開発された先進的なアタッチメントであり、冬期の伐採に欠かすことのできない根掘り(雪かき)が可能なバケットに伐木と造材が可能なフェラバンチャ機構および材を把持するグラップル機構が搭載されていることが挙げられ、効率的かつ安全に伐採作業を進めることが期待できるためである。
- ・ 造材工程においては、国産のイワフジ社製エクスカベータ CT-500B (図 10) に同社製プロセッサ GP-532 (図 11) を搭載した造材機械を使用してフェラバンチャザウルスとの比較を行った。
- ・ また、各工程において補助的作業にミニグラップルローダ(クボタ社製エクスカベータ KX-57 + 南星社製グラップル BHS10M-3-A) (図 12) を使用した。

表 2 使用した伐木機械の主な諸元

ベースマシン	型式	314CCR GMZ-T5Bブレード仕様
	運転質量(kg)	14,400
	バケット容量(新JIS)(m ³)	0.50
	エンジン定格出力(kw/min ⁻¹)	67/1,950
	リリーフバルブ設定圧(作業機)(MPa)	29.9
	ハイドロリックオイル容量(全量)(L)	120
アタッチメント	型式	MSE-55FGZX
	適用機種	15~16ton
	バケット容量(m ³)	0.40
	カット最大寸法(mm)	300~400
	搦力(フォーク先端)(kN)	29.0
	最大開口幅(mm)	1,045
	バケット幅(mm)	903
	回転速度(rpm)	12
	カッター使用圧力(MPa)	27.4~31.4(木材の種類による)
	使用流量(L/min)	110~130
	電圧(DC)(V)	24
	質量(kg)	1,270



図 8 キャタピラー社製 CAT314CCR



図 9 松本システムエンジニアリング社製 MSE-55FGZX



図 10 イワフジ社製 CT-500B



図 11 イワフジ社製 GP-532



図 12 グラップルローダ

(2) 試験結果

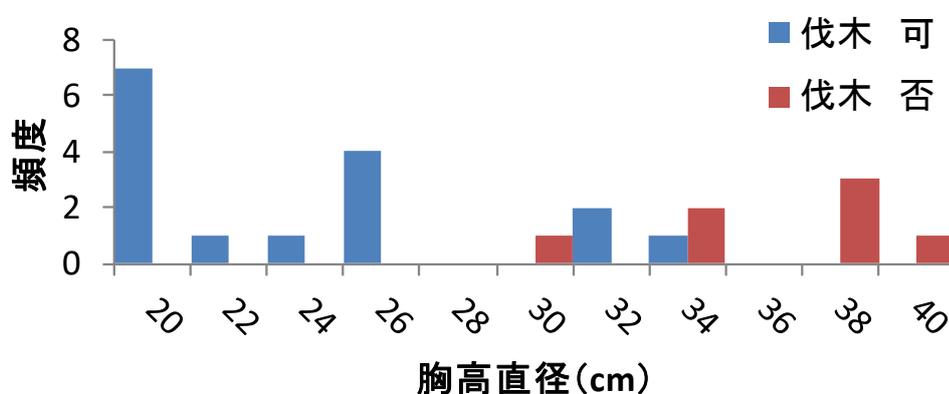
フェラバンチャザウルスによる伐木工程

- ・ 昨年度の試験結果から、従来のチェーンソーを用いた人力による伐木工程において、野外作業が多く、安全性の確保が必要であることを確認した。
そこで機械による伐木作業を実施したが、フェラバンチャザウルスは特に堅いナラ類に対して最大伐倒径が小さく、本試験地では比較的大径の広葉樹が多かったため、人力伐木を多くせざるを得なかったことを問題点として挙げた。
ただし、国産エクスカベータのアタッチメントとして多工程の処理が可能で汎用性あり、作業の安全性面からも広葉樹伐採への有効性が認められるため、本年度はフェラバンチャザウルスによる伐木手法を検討し、安全性を損なわず生産性の向上を試みた。具体的には、カッターによる1回での切断には胸高直径で約30cmまでが限界であったが、メーカーや実際の使用者へのヒアリング調査の結果から、カッターの先で少しずつ切り進めて切断する伐木手法があることを発見し、これを実証することとした。
- ・ コナラ11本、カエデ3本、カンバ、サクラ、ハンノキ各1本の計17本、14.5m³を伐採対象とし、平均幹材積は0.85m³、平均胸高直径は32.8cmであった。このうち、1本は立木同士が近接しすぎてヘッドを押し当てられなかったため人力伐木となったが、16本を機械伐木することができた。
昨年度の結果と合わせて、フェラバンチャザウルスによる伐木の可否と胸高直径の関係を図13に示す。データ数は昨年度より少ないが、複数回カッターで切断する新しい伐木手法により、フェラバンチャザウルスによる機械伐木の限界が30cm程度であったのを解消した。
フェラバンチャザウルスを用いた機械伐木における総作業時間は6,020秒、生産性は8.6m³/時となり、昨年度の生産性7.5m³/時に比べ15%増となった。昨年度の伐採木の平均胸高直径が26.2cmであり細かったことや積雪量が多かったことなど異なる作業条件の影響も含むが、伐木手法が改善され人力作業を大きく削減できたことにより、安全性および生産性をともに向上することができた。
- ・ フェラバンチャザウルスを用いた機械伐木における要素作業ごとの時間割合を図14に示す。「機械移動」、ヘッドを立木に当てる「アーム」、「機械伐木」、「木寄せ」、バケットで根掘り等をする「機械付帯」、伐木補助や立木の押し倒しをする「グラップル」、作業者が機械から降りて林内を移動する「人移動」、作業者が人力で根掘りや伐倒方向の確認、雑木の刈払いなどをする「人付帯」、「受け口」、「追い口」、機械で根掘りや伐木補助、木寄せを行う「グラップル」、の各要素作業に区分した。
なお、本年度の作業手法では「グラップル」作業は必要としなかった。
1本あたりの伐木作業時間は354.1秒/本であり、伐採木が太かったため昨年度の288.3秒/本から増加したものの、作業者が野外で行う「人移動」から「追い口」までの人力

作業が昨年度は全体の 24%であったのが、本年度は 6%と大きく削減することができ、機械伐木による作業環境の改善効果がより明確に認められた。

しかし、図 15 にあるように少しずつカッターで切り進めていくため、全てを切断するまえに倒伏が開始されることになり、特に大径木において上方に裂けあがり、1 番玉を傷つけて価値を損なってしまう可能性があるという新たな問題が発生した。

昨年度



今年度

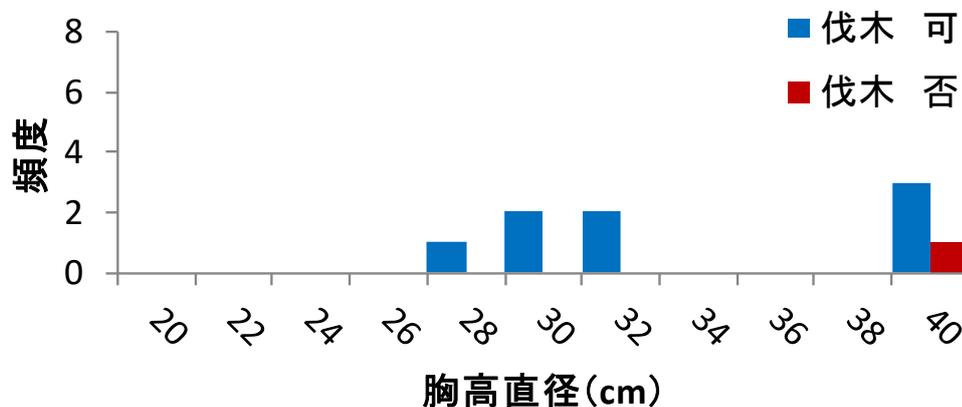
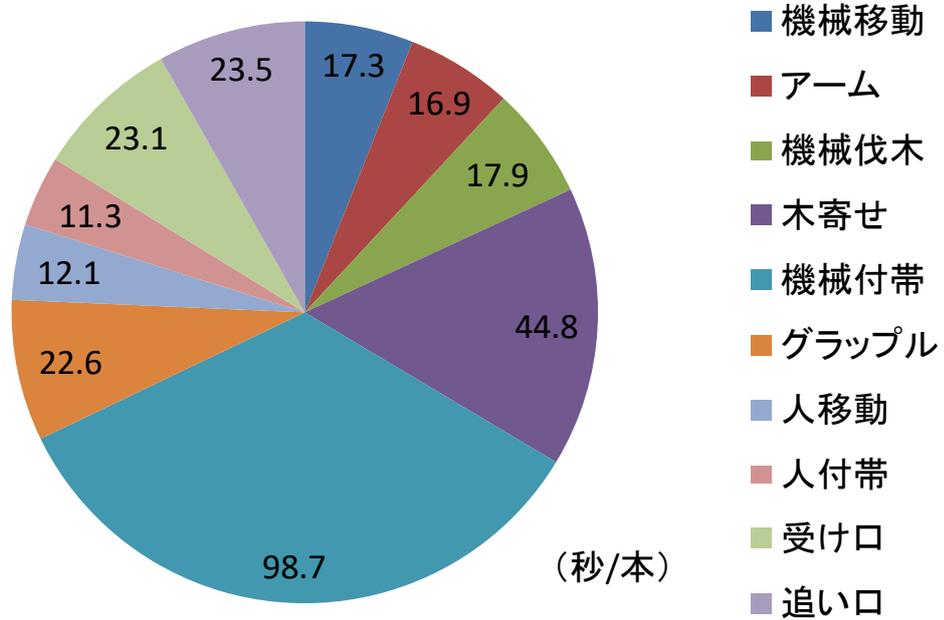


図 13 フェラバンチャザウルスによる伐木の可否と胸高直径の関係

昨年度



今年度

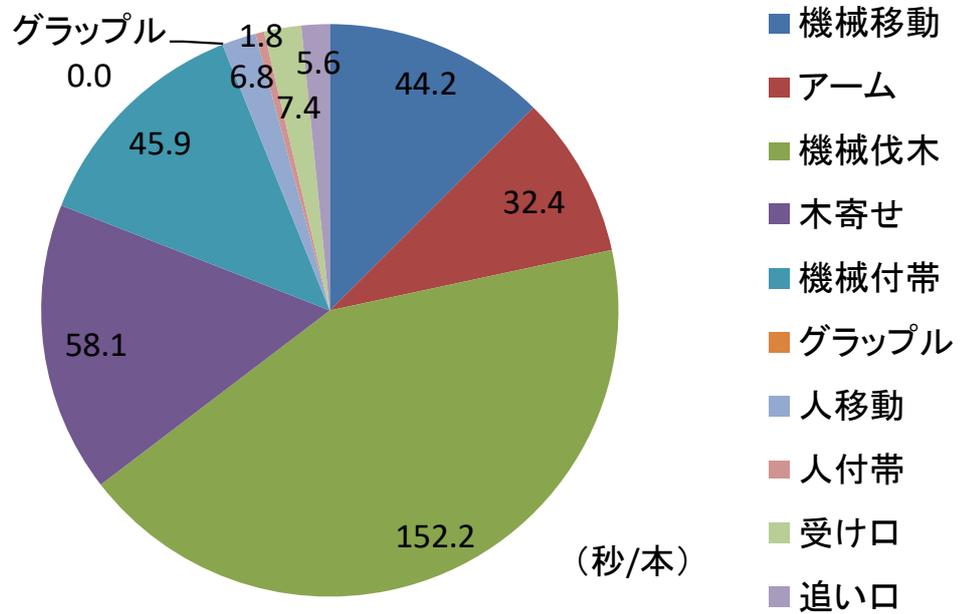


図 14 フェラバンチャザウルスによる要素作業ごとの時間割合



図 15 裂け上がった切り株

フェラバンチャザウルスによる伐木作業さらなる改善

から、伐木手法を工夫することにより、人力作業を大きく削減して安全性および生産性をともに向上することができたが、一方で木が裂けあがり、1番玉の価値を損なってしまう可能性があるという新たな問題が発生した。

そこで、現場オペレータから、事前にチェーンソーによって受け口を作成して芯抜きし、フェラバンチャザウルスで追い口を入れるという新しい作業手法（図 16）の提案があった。これを実施した結果、図 17 にあるように、十分にツルが効き、大きく裂けあがることなく、安全に伐木することができた。

コナラ 5 本、カエデ 5 本、カンバ、ミズナラ、サクラ、その他広葉樹（オオバボダイジュと思われた）各 1 本の計 14 本、 11.4m^3 を伐採対象とし、平均幹材積は 0.81m^3 、平均胸高直径は 31.2cm であったが、すべてを機械伐木することができた（図 18）。新しい伐木手法による機械伐木における総作業時間は 7,225 秒、生産性は $5.7\text{m}^3/\text{時}$ となった。要素作業ごとの作業時間は図 19 の通りとなり、1 本あたりの伐木作業時間は 516.1 秒/本、作業者が野外で行う人力作業が全体の 43% を占めた。

オペレータによる野外作業時間が増加してしまうが、最後の倒伏作業は機械で実施するため、安全性への影響は限定できる。生産性は昨年度並みか、少し落ちる程度になってしまうが、商品価値の高い一番玉への損傷を抑えることができ、収益性は確保できると予想される。

また、今回は試験的に新しい伐木手法を実施したため、一本ごとにオペレータが野外に出て受け口作成の作業等を行ったことから、人移動時間が大幅に増加した。先行してある程度まとめて受け口のみを作成を進めるなどの工夫を行えば、生産性の向上が可能であると考えられる。

今後はさらに新しい伐木手法の実証を積み重ねることによって、機械のみで伐木するか、チェーンソーによる人力作業を行うか、径や樹種によって最適な伐木手法を選択する判断基準の作成が必要である。



図 16 チェーンソーによる受け口の作成と芯抜き



図 17 チェーンソー補助による機械伐木後の切断面

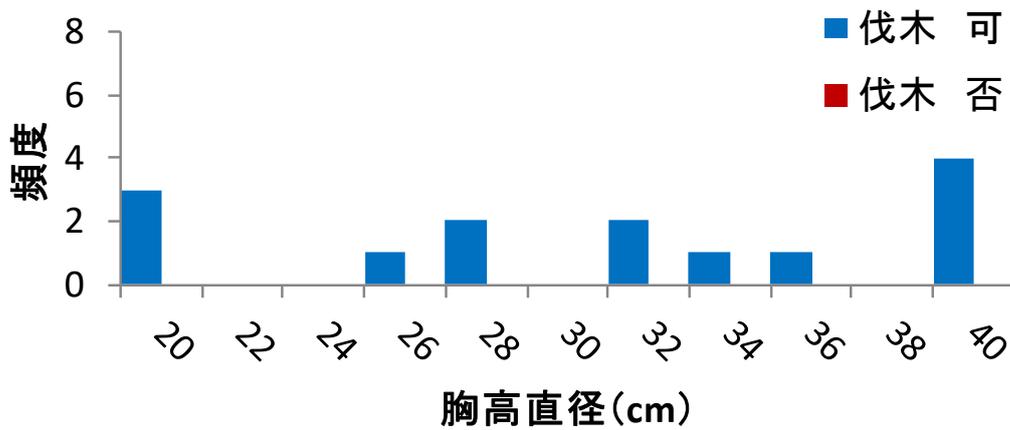


図 18 新しい伐木手法による伐木の可否と胸高直径の関係

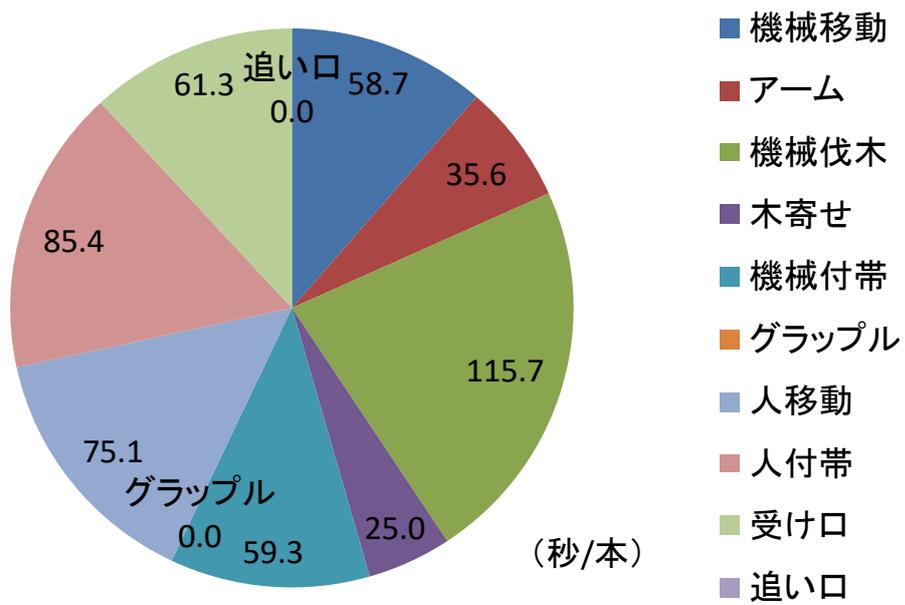


図 19 新しい伐木手法による要素作業ごとの時間割合

フェラバンチャザウルスによる造材工程

- ・ フェラバンチャザウルスを用いた造材工程について、 の伐採木 17 本をフェラバンチャザウルスにより集木し、作業しやすいポイントで造材・極積みを行った。立木時位置および造材・極積みの作業ポイントを図 20 に示す。立木 NO. 1~17 が該当し、集木した距離は 40~100m であった。図 21 のように、集木時に伐採木を移動しやすいようにフェラバンチャザウルスで枝払いしてほぼ全幹の状態にしたため、集木作業時間は 10,950 秒と多く時間がかかり、集木生産性は 4.8m³/時であった。
- ・ 造材材積は 7.1m³ であり、伐木材積は 14.5m³ であったので素材歩留まりは約 50% であった。造材作業時間は、15,118 秒であり、造材生産性は 1.7.m³/時であった。フェラバンチャザウルスを用いた機械造材における要素作業ごとの作業時間を図 22 に示す。フェラバンチャザウルスによる「機械造材」、チェーンソーによる「手造材」、木寄せや枝払い、はい積みをする「グラップル」の各要素作業に区分した。1 本あたりの造材作業時間は、782.9 秒/本であり、このうち作業者が野外で行う「手造材」の人力作業が 72.4 秒/本と全体の 1 割未満となった。今年度はできる限り機械で作業を行うようにと指示した結果であるが、機械による作業環境の改善効果がより顕著に認められた一方、生産性としては昨年度の結果 2.9m³/時より下げる結果となった。

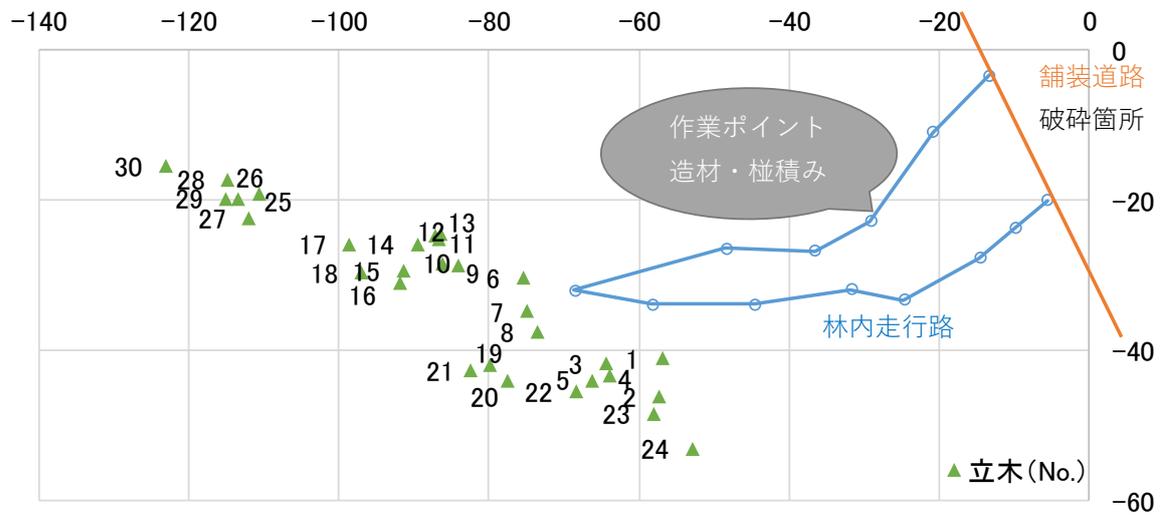
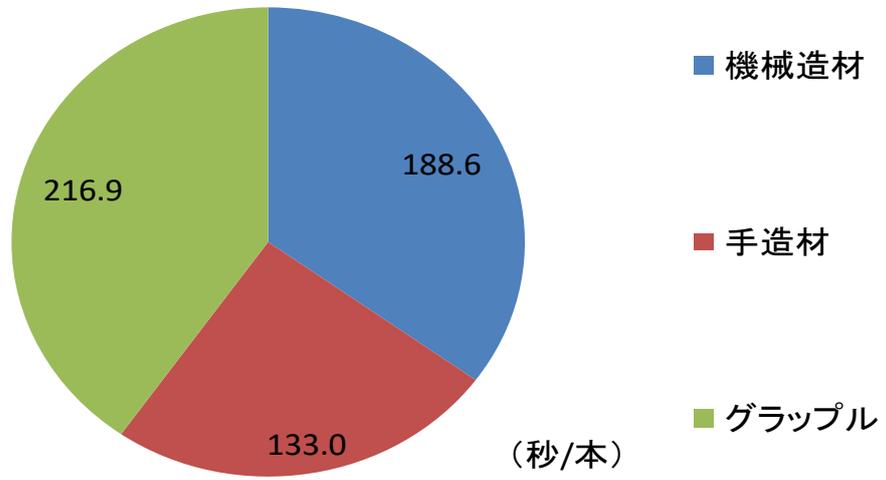


図 20 立木時位置および造材・極積みの作業ポイント



図 21 フェラバンチャザウルスによる集木作業

昨年度



今年度

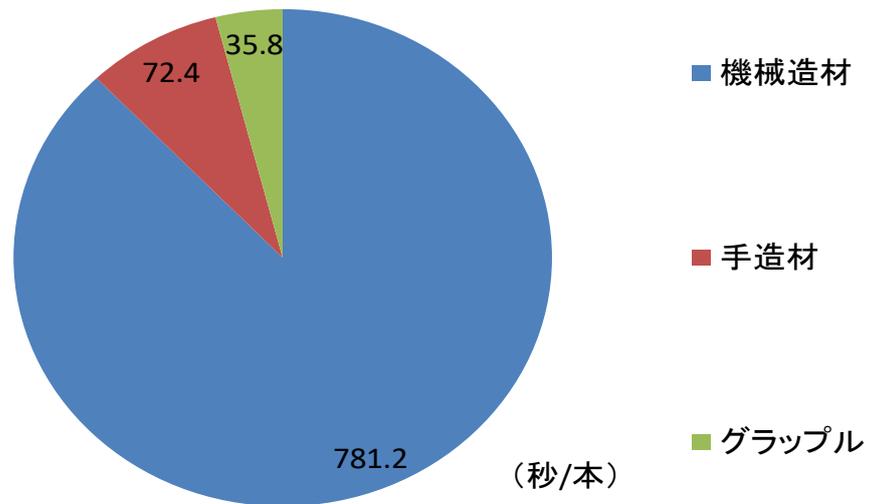


図 22 フェラバンチャザウルスを用いた機械造材における要素作業ごとの作業時間

プロセッサによる造材工程

- ・ フェラバンチャザウルスによる造材工程は、枝ぶりが大きく不定形な広葉樹の造材は困難であることが今年度も確認された。比較のために、一般的に国内で使用されているプロセッサ (CT-500B + GP-532) を用いて造材し、フェラバンチャザウルスとの比較を行った。
- ・ と同様に、プロセッサで造材する前に、フェラバンチャザウルスで作業しやすいポイントまで適宜枝払いをしながら集木した。集木したのは、立木 No.18 ~ 25 の 8 本、8.0m³ である。集木作業時間は 6,860 秒であり、集木生産性は 4.2m³/時であった。
- ・ 造材材積は 5.4m³ であり、素材歩留まりは 68% であった。造材作業時間は 4,140 秒であり、造材生産性は 4.7m³/時となった。プロセッサを用いた機械造材における要素作業ごとの時間割合を図 23 に示す。なお、すべてプロセッサを用いて作業を行ったため、グラップルローダによる補助作業はなかった。1 本あたりの造材作業時間は 517.5 秒/本であり、このうち作業者が野外で行う「手造材」の人力作業が全体の 14% となった。人力作業がわずかに増加するものの、専用の造材機械を用いることで生産性は大きく改善された。

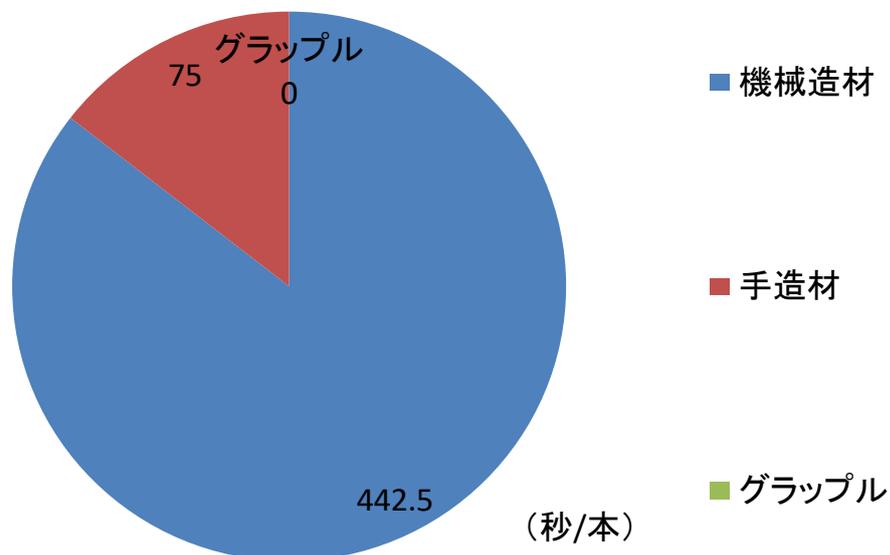


図 23 プロセッサを用いた機械造材における要素作業ごとの作業時間

実証作業結果の総括

- ・ コスト計算の諸指標は「機械化のマネジメント」（全国林業改良普及協会 2001）に基づいて表 3 の通りに設定した。人件費は一律 2,500 円/時とし、機械搬送費等の間接費は含めていない。また、フェラバンチャザウルスは新しい機械で諸指標が不明のため、同社製ザウルスロボ（グラップル付きバケット）の数値を適用した。これまでの試験結果から、広葉樹伐採の生産性とコストを表 4 に取りまとめた。

各作業システムには使用した主な機械のみを記載しており、実際にはチェーンソーとグラップルによる作業補助が含まれている。作業条件として積雪、林分、地形に区分して各作業システムの生産性とコストを求めた。また、取得していないデータ等は、それぞれ適した数値で補った。平坦地の集木の生産性等は、今年度の結果しかないためこれを用いたが、生産性が低く、全体のコストの大部分を占めた。集木にスキッド等の専用機械を導入するか、集木をあまり必要としない道路近隣での林分に限定するなど、伐木から集木までの作業手順を再検討する必要がある。

 - 平坦地では従来型の チェーンソー+グラップルが生産性は低いものの、機械費が安く、コストとしては最も安くなったが、多雪期や大径の林分であると、人力による野外作業であるため作業の安全性や労働環境に問題が生じる。
 - 安全性等を考慮すると機械作業が望ましく、雪かき等の付帯作業も可能なフェラバンチャザウルスが適しているが、システム と にある通り、この機械は枝ぶりが大きく不定形な広葉樹の造材が不得手であるため、生産性が低くコスト高になってしまう。
 - そこでシステム にある通り、造材工程に造材専用機械であるプロセッサを使用すると生産性が向上し、コストが低下する。
 - さらに、造材工程は作業のしやすい作業ポイントで実施すれば野外作業の危険性が限定できるため、チェーンソーによる手造材を行うとすると生産性は少し低下するもののさらにコストを下げることができる。
- ・ 積雪が少または無い場合には、すべての工程をエクスカベータベースのハーベスタで機械作業ができ、生産性も最も高くなると予測される。広葉樹伐採に適したハーベスタヘッドでの実証試験が望まれる。
- ・ 一方、傾斜地では、タワーヤード等集材機械による集木が必要となり、架設・撤去にも作業時間を要するため生産性は最も低くなるが、今年度は平坦地においても集木工程に多くの時間を要してしまったため、比較的高いコストとなった。集材機械にスイングヤードやウィンチ付きグラップル等汎用機械を用いれば、生産性の向上とコストの削減が期待される。

表 3 コスト計算の諸指標

機械	固定費(円/時)	変動費(円/時)	人件費(円/時)	合計(円/時)
チェーンソー	69	371	2,500	2,940
フェラバンチャザウルス	4,596	2,978	2,500	10,074
グナップルローダ	1,481	981	2,500	4,962
ハーベスタ	5,548	4,036	2,500	12,083
プロセッサ	3,741	2,653	2,500	8,894
タワーヤード	4,365	2,069	2,500	8,934

表 4 生産性のまとめ

作業システム	作業条件			伐木		集木		造材		システム全体	
	積雪	林分	地形	生産性 m ³ /人時	コスト 円/m ³						
①チェーンソー+グナップル	有	大径	平坦	4.5	752	2.6	6,829	3.6	2,208	6.7	9,789
②フェラバンチャザウルス	有	小径	平坦	8.6	2,048	2.6	6,829	2.8	6,194	7.0	15,071
③フェラバンチャザウルス	有	大径	平坦	5.7	3,106	2.6	6,829	1.7	4,619	5.2	20,301
④フェラバンチャザウルス+ プロセッサ	有	大径	平坦	5.7	3,106	2.6	6,829	4.7	3,254	7.7	13,189
⑤フェラバンチャザウルス+ チェーンソー+グナップル	有	大径	平坦	5.7	3,106	2.6	6,829	3.6	2,208	7.1	12,144
⑥ハーベスタ	無	大径	平坦	9.4	2,312	2.6	6,829	4.7	4,612	8.5	13,752
⑦チェーンソー+タワー ヤード+グナップル	無	大径	傾斜	4.7	712	0.8	6,655	3.2	2,469	3.4	9,835

2.2. 広葉樹林地残材の破碎試験

(1) 試験方法等

概要

- ・ 広葉樹から用材、薪材、パルプ材を採ったあとの残りの部分（図 24）は林地残材として林地に放置される。この林地残材を木質バイオマスとして有効に利用するため、林地残材のチップ化工程の生産性および生産されたチップの粒径分布などの品質を調査した。
- ・ また、林内で林地残材を放置することによる含水率の低下を期待し、伐採直後に発生した林地残材（以下、生残材）のほかに、平成 28 年 2 月初旬の伐採により発生し、その後平成 28 年 12 月中旬まで約 5 か月間放置した林地残材（以下、放置残材）を試験に使用し、含水率を測定した。



図 24 林地残材

ロータリースクリーンを用いたチップの選別

- ・ 調査はチップによるチップ化と同時にロータリースクリーンを用いてチップの大きさによる選別を行った。今回使用したチップは、横から林地残材を投入（横投入式）し、切削刃が取り付けられた回転ドラムでチップ化（ドラム切削式）し、シュートで排出するタイプである（図 25、表 5）。
- ・ 横投入式とドラム切削式の組み合わせは多くの移動式チップに採用されており、回転ドラムの負荷と連動して林地残材等の破碎物の送り速度をコントロールすることで均質なチップを生産しやすいという特徴がある。またシュート式はコンベア式と異なり、容易にチップの排出高さが得られ、排出方向も変えることができ、散布も可能であるという特徴がある。
- ・ なお、本チップにはスクリーンは搭載されていない。またロータリースクリーンは、上部スクリーンと下部スクリーンの2種類の穴径のスクリーンによりチップから排出された木質チップを機械力で揺すりながらふるい分ける装置である（図 26、表 6）。上部スクリーンを通過できない大きさのものはオーバーサイズとして図 26 に示すの方向に排出され、また上部スクリーンを通過したもので、下部スクリーンを通過できないものは に排出される。上部、下部ともに通過したものは に排出される。したがって、大きすぎるオーバーサイズのチップは へ、細かすぎるチップダストは へ排出され、目的の大きさのものだけが排出口 から取り出すことができるようになっている。

今回は、上部スクリーンに φ70mm 丸穴、下部スクリーンに φ40mm 丸穴を装着した。ロータリースクリーンで選別されたそれぞれのチップは容量 1 m³ のフレキシブルコンテナバッグ（以下、フレコン）に入るようセットした。なお、チップへの林地残材の投入はグラブ（KX-57、0.2m³クラス、グラブヘッドは BHS10M3-A）で行った。



図 25 切削式チップパ

表 5 切削式チップパの諸元

機種名: ウッドハッカーDynamic D465W (けん引式・横投入・ドラム切削・シュート排出)	
寸法 (mm)	全長6420×全幅2250×全高2100(排出シュート高除く)
排出シュート高 (mm)	4300
質量 (kg)	6200
エンジン型式	CAT C6.6
エンジン最大出力 (kW)	132 kW
投入開口部 (mm)	幅380×高560
ナイフ数 (枚)	4
スクリーン	なし

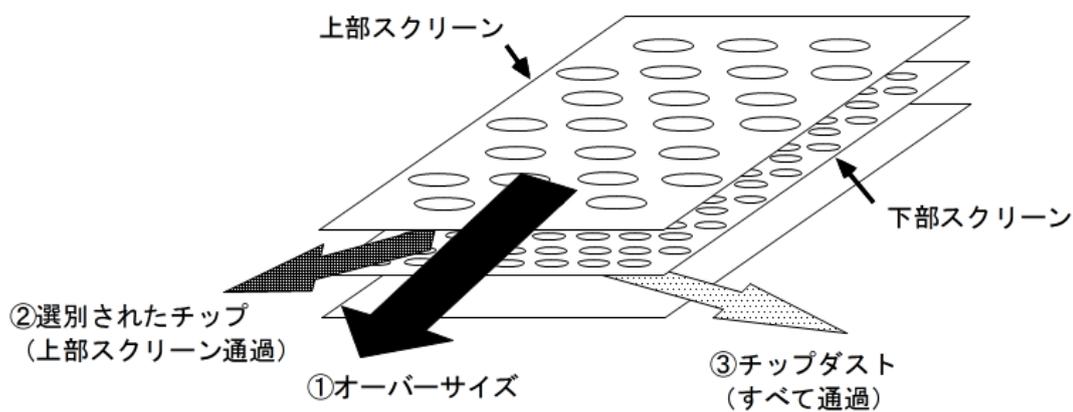


図 26 ロータリースクリーン

表 6 ロータリースクリーンの諸元

機種名 : MRS-36 (自走・揺動式)	
寸法 (mm)	全長6100×全幅2600 (格納時2430) ×全高2700
質量(kg)	7400
エンジン型式	クボタV3307-DI-T
エンジン最大出力(kW)	54.0
スクリーン面サイズ(mm)	1700×3700

- ・ それぞれのフレコンからチップのサンプルを採取し、含水率の測定および粒度分布を分析した。JIS Z 2101 木材の試験方法に基づき、乾燥前質量と全乾乾燥後の質量を測定し、含水率を求めた。含水率は乾量基準および湿量基準の両者を求めた。なお、乾量基準は乾燥前と全乾後の質量差を全乾後の質量で割った百分率（以下、単位を d.b.% と表記）、湿量基準は乾燥前と全乾後の質量差を乾燥前の質量で割った百分率（以下、単位を w.b.% と表記）である。
- ・ チップダストについては微粉が混じっているため、個々のチップを測定することは困難であることから、JIS Z 8801-1 金属製ふるい - 第 1 部：金属製網ふるいを満たす試験用ふるい、およびふるい震盪器を用いて JIS Z 8815 ふるい分け試験方法通則に示される機械ふるい分けの方法で分級した（図 27）。
- ・ ふるい目開き 16mm、8mm、4mm、2mm、1mm、0.5mm、0.25mm の金属製網ふるいを積み重ね、10 分のふるい分け後、各ふるいを通過したチップの質量を測定し、分析した。オーバーサイズのチップ、選別されたチップおよびチップダストのうち 16mm 以上および 8mm 以上 16mm 未満のチップについては長辺、短辺、厚さおよび質量を測定した。長辺、短辺、厚さについては最大になる部分の長さとした（図 28）。また、長辺長さを短辺長さで割り、長短比を求め、チップの形状を表す指標として用いた。なお、長短比は値が 1 に近いほど正方形に近い形を、値が大きいほどピン形状に近いことを示す。



図 27 ふるい震盪器と金属製網ふるい

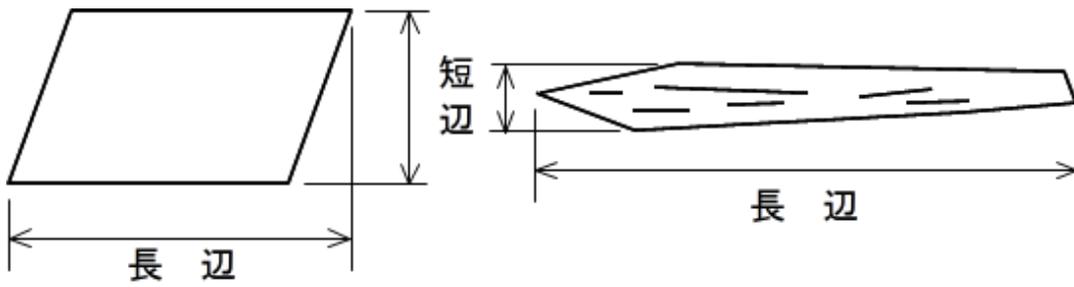


図 28 長辺と短辺

チップの生産性

- ・トラック（最大積載量 3550kg）に搭載したコンテナに、破碎したチップをチップから直接投入した（図 29）。
使用したチップおよびグラップルは前項で用いたものと同じである。トラックに搭載しているコンテナは内寸が長さ 3.4m×幅 2m×高さ 1.2m、容量は 8.16m³であった。空荷のトラックのタイヤが 4 枚の車両重量計（容量 49kN、5tf）の上にそれぞれ載るように設置し、車両重量計に接続したデータロガーで生産したチップの質量を 1 秒ごとに逐次記録した（図 30）。
同時に作業をビデオカメラで撮影し、後に作業時間を分析した。それぞれの機械の配置を図 31 に示す。
- ・放置残材はグラップルが移動しなければ届かない位置に置かれており、チップ化するためには残材の木寄せが必要であった。それに対し、生残材はグラップルが旋回するだけで届く位置にまであらかじめ木寄せされていた。なお、生残材のチップ化作業時はある程度の残材をチップのそばに仮置きし、そこからチップに投入する手順で作業を行った。また、放置残材時はチップのフィードテーブルの状況がグラップルから良く見えなかったため、生残材時にはそれを改善し、フィードテーブルが良く見える位置にグラップルを置いた。作業終了後、含水率測定および粒度分布の分析のため、チップのサンプルを採取した。また容積基準の生産性およびかさ密度を求めるため、チップの容積をコンテナ上面からの深さを数か所測定し、求めた。
- ・今回用いたチップは、燃料消費率をモニタに表示できる機能があるため、モニタ（図 32）をビデオカメラで撮影し、後にビデオ映像から 1 秒間隔でチップ化工程の燃料消費率を記録し、分析した。



図 29 チッパの生産性の測定



図 30 トラックと車両重量計の設置状況

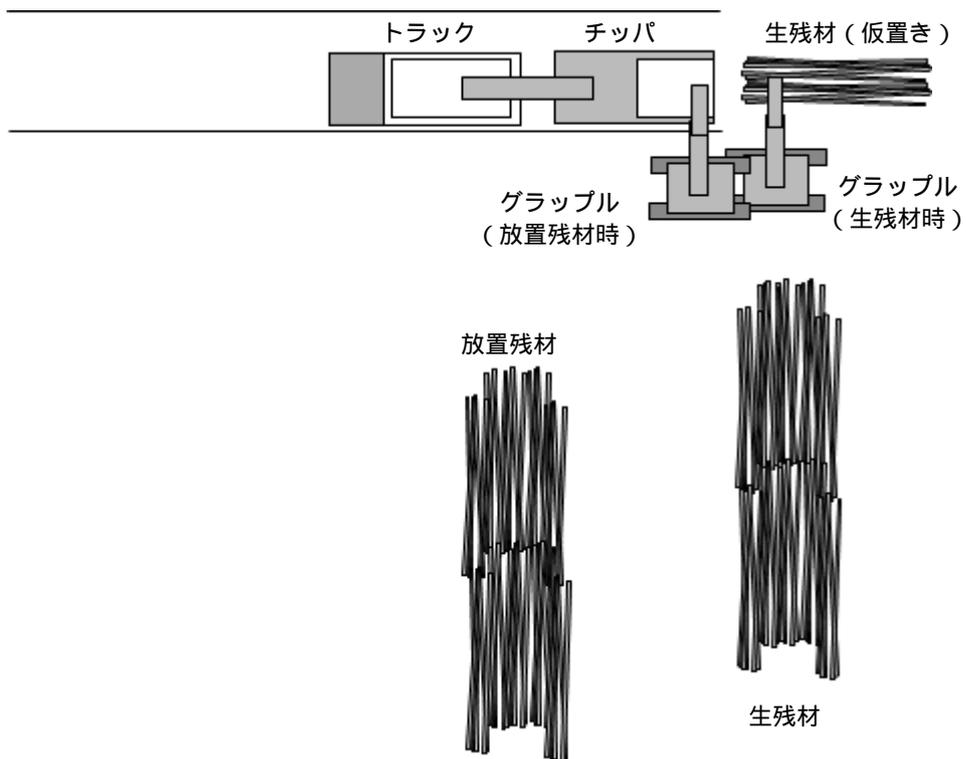


図 31 配置図

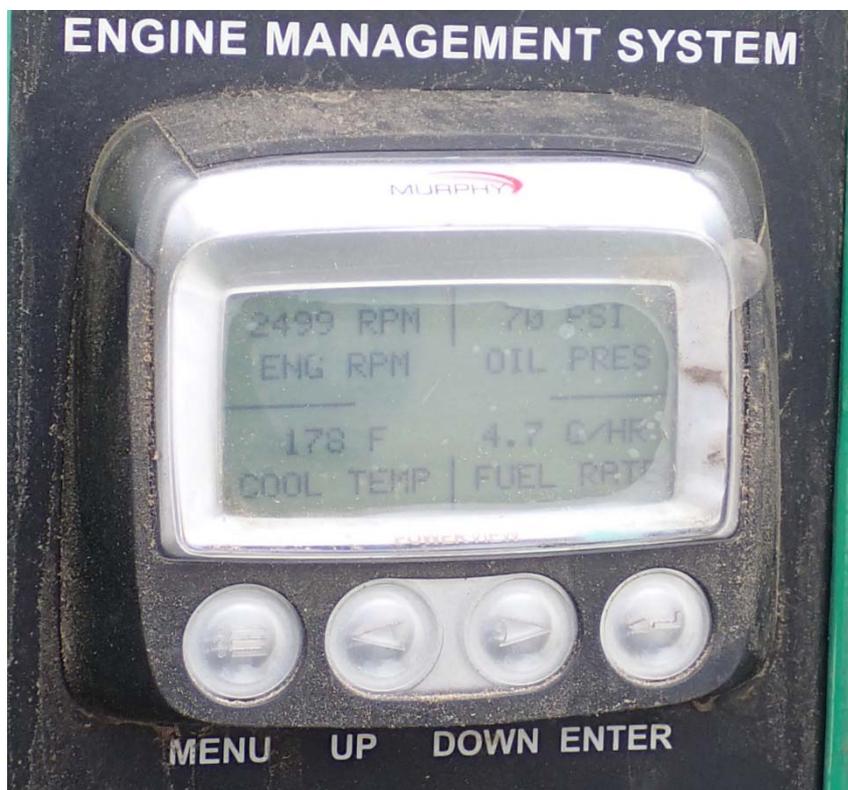


図 32 エンジン管理システムのモニタ

(2) 試験結果

ロータリースクリーンを用いたチップの選別

- ロータリースクリーンを用いたチップの大きさによる選別の結果、表 7 に示すように放置残材時、生残材時の両者とも 96%以上がチップダストに選別された。林地残材は細い枝部分が多く、また下部スクリーンの穴径が 40mm であったことから大部分がチップダストとして選別されたと考えられる。長辺長さはオーバーサイズチップでは最小でも 138mm と大きく、選別されたチップでも最小が 52mm であった。チップの取引で使われることが多い長さ 50mm 未満を基準として長辺長さ 50mm 未満、50mm 以上の質量基準での割合を確かめたところ、オーバーサイズチップおよび選別されたチップでは 50mm 以上が 100 質量% (以下、wt%と表記) であった。選別後のそれぞれのチップの長短比による分布を図 33 に示す。
- オーバーサイズチップは長短比 8 以上、すなわち長辺長さが短辺長さの 8 倍以上のものが 80.3wt%、4 以上 8 未満が 14.2wt%と長短比 4 以上が 94.5wt%を占めた。オーバーサイズチップはほとんどが細長い形状であることを示している。また選別されたチップは長短比 8 以上が 26.5wt%、4 以上 8 未満が 36.8wt%の計 63.3wt%と長い形状が比較的多いことを示した。それに対し、チップダストではふるい目開き 16mm 以上で長短比 4 以上が 26.8wt%、長短比 2 未満が 37.7wt%、またふるい目開き 8mm 以上 16mm 未満では長短比 4 以上が 5.9wt%、長短比 2 未満が 54.6wt%と長短比が小さい、つまり比較的正方形に近いものの割合が多くなった。長短比の平均は表 7 に示したようにオーバーサイズが最も大きく、チップダストが最も小さかった。

表 7 ロータリースクリーンによるチップの選別結果

	放置残材 割合 質量%	生残材 割合 質量%	長辺サイズ			長短比(長辺/短辺)		
			最大 mm	最小 mm	平均 mm	最大	最小	平均
オーバーサイズ 選別されたチップ	0.55	2.58	622.0	137.7	256.9	85.2	2.0	17.9
チップダスト	96.86	95.92	160.7	23.5	53.6	40.2	1.0	4.6

ふるい目開き 16mm 超のチップのみを測定

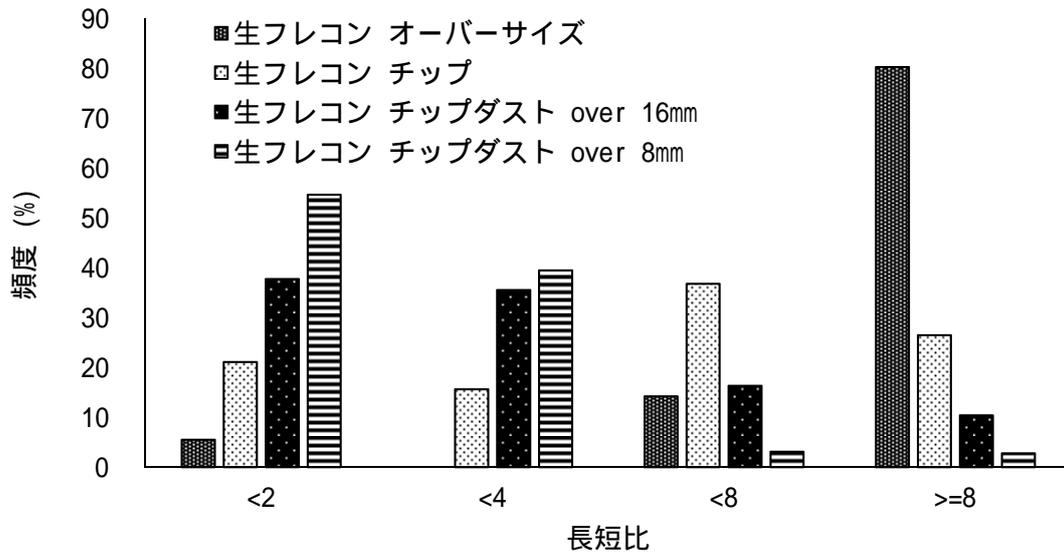


図 33 チップの長短比



図 34 ロータリースクリーンで選別後のそれぞれのチップ

- ・ チップダストをふるい震盪器を用いて分級した結果、図 35 のような粒度分布を示した。
- ・ 最も割合が高かった階級はふるい目開き 4mm 以上かつ 8mm 未満で 34.7wt%であった。16mm 以上は 11.7wt%、8mm 以上かつ 16mm 未満は 27.7wt%であった。4mm 未満の細かいチップは 25.9wt%であった。4mm 以上を利用する場合には 74.1wt%、8mm 以上を利用する場合には 39.4wt%を利用可能であることがわかった。長辺長さが 50mm 以上のチップは、ふるい目開き 16mm 以上で 43.2wt%、8mm 以上かつ 16mm 未満では 6.5wt%であった。したがってチップダスト全体で長さ 50mm 以上のチップは、目開き 16mm 以上で 5.1wt%、8mm 以上かつ 16mm 未満では 1.8wt%発生したと推察され、目開き 8mm 未満では長さ 50mm 以上のチップが発生しなかったと仮定すると、チップダスト全体では長さ 50mm 以上は 6.9wt%発生したと考えられる。
- ・ チップダストの含水率は放置残材が 68.2d.b.% (40.5w.b.%)、生残材が 78.2d.b.% (43.8w.b.%)であった。放置残材は 10.0d.b.% (3.4w.b.%)低かった。
- ・ 試験前、放置残材は雪に覆われていたため、グラブルを用いて残材を適度にふるって雪を落としてからチップへ投入したが、落とさきれず付着していた雪や水分が含水率の数値に影響した可能性が高く、放置乾燥による含水率の低下については結果を得ることができなかった。

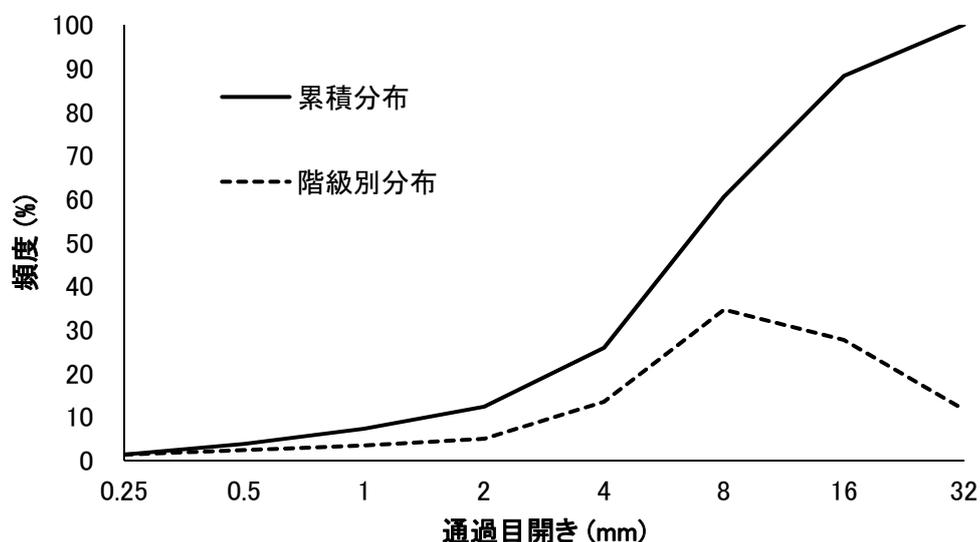


図 35 粒度分布

チップの生産性

- ・ 作業を撮影したビデオ映像から作業の時間分析を行い、生産性を求めた。生産性は、放置残材時が 1.9 乾燥トン/時 (3.3 生トン/時)、生残材時が 3.0 乾燥トン/時 (5.4 生トン/時) であった。
- ・ なお、コンテナ内数か所から採取したチップのサンプルから含水率を分析したところ、放置残材が 68.5d.b.% (40.7w.b.%)、生残材が 78.7d.b.% (44.1w.b.%) であった。
- ・ 放置残材時の生産性がかなり低くなったことから、グラブによる投入作業の要素作業を分析し、生産性低下の原因を探った。作業の要素は以下のように分類した。「移動」はグラブの自走時間、「つかみ・集積」はグラブによる残材のつかみ、残材の集積時間、「投入・投入補助」は投入のため残材をつかんで旋回、チップへの投入のほか、残材がチップへ入っていかないときの押し込み、残材がフィードテーブルから落ちそうになったときの支えなどの投入補助作業を含む時間、「空旋回」は残材をつかんでいない状態で旋回する時間、「様子見」はチップに残材が正常に入っていくかを見ている時間 (投入補助とは明確に異なり、グラブは空荷) とした。グラブの通り道の補修などチップ化に関係しない作業やチップ化に関係しない相談時間、中断時間、休憩時間は除外した。また、ほぼすべての作業は空旋回、投入、空旋回の繰り返しであるため、空旋回開始から次の残材を投入するための空旋回までを 1 サイクルとした。
- ・ 要素作業についての時間分析結果を図 36 に示す。放置残材時と生残材時の両者とも「投入・投入補助作業」が最も割合が高く、次に「つかみ・集積作業」であった。放置残材時は 1 サイクルあたり平均 76.3 秒、生残材時は平均 32.9 秒と放置残材時は倍以上の作業時間を要しており、また各々の要素作業時間も長い時間を要していた。「移動」に関しては放置残材の置き場所がチップから離れていたため、移動時間が増加したと考えられる。また、つかみ・集積作業の時間については放置残材時で時間経過とともに作業時間が増加していく傾向がみられた (図 37)。放置残材はチップと距離が離れた場所に置かれており、グラブの効率を上げるためにはある程度まとまった量の残材を運搬する必要があった。しかし時間経過とともに残材置き場の在庫が少なくなり、つかみ量を確保するために散らばった残材を集める作業が多く観測された。また、切削式のチップを用いたため、刃物の摩耗を避ける目的で泥がついていない残材を集積したことも作業時間の増加の要因になったと推察される。
- ・ なお、生残材は十分な量があったため、集積作業はほとんど発生しなかった。投入・投入補助作業では、時間経過との関係はみられなかった (図 38)。しかし、放置残材時はグラブの位置からチップのフィードテーブルの状況が見えづらかったため、投入に時間がかかった可能性が考えられる。また、放置残材時はグラブ走行が多

く発生したが、走行時の視界を確保するため、大きい角度で旋回していたことも掛かり増しの一つの要因になった可能性がある。

- ・ 破砕時間は、放置残材時は1サイクルあたり18.1秒/サイクル、生残材時は13.3秒/サイクルであった。放置残材時は44サイクルで1.8乾燥トンのチップを生産したことから、チップへの平均生産量は0.041乾燥トン/サイクルとなり、生残材時は53サイクルで1.5乾燥トンのチップを生産し、平均生産量は0.028乾燥トン/サイクルとなった。生残材時はチップへの1回の投入量が少なかったため、破砕時間も短くなったと考えられる。
- ・ なお、グラブルの作業時間のうち破砕時間の占める割合、すなわちチップの稼働率は放置残材時が23.8%、生残材時で38.2%であった。放置残材時はチップがいわゆる遊んでいる状態が長く、いかにチップの稼働率を上げるかが生産性向上の鍵になると考えられる。

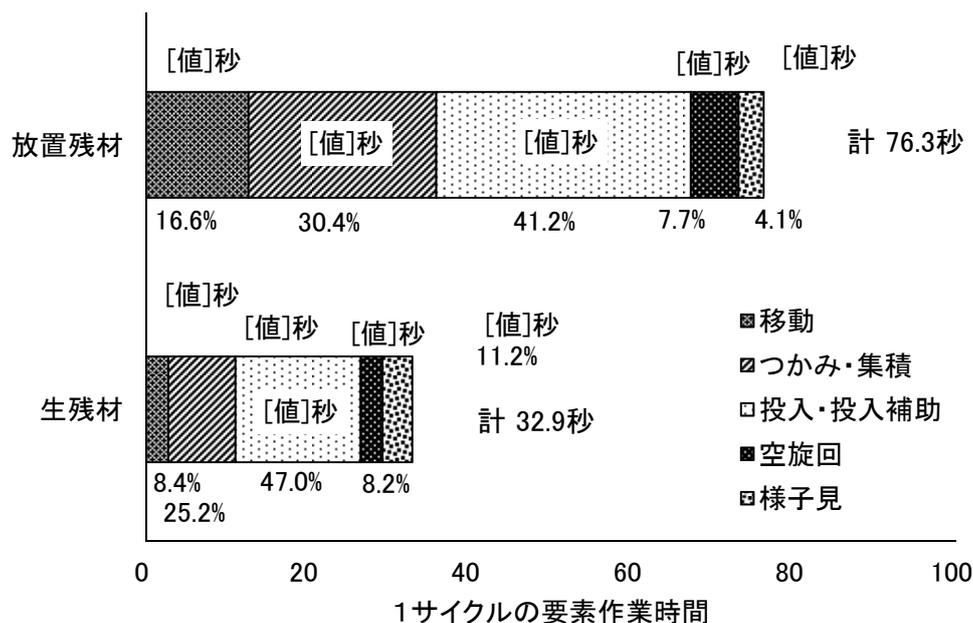


図 36 要素作業時間とその割合

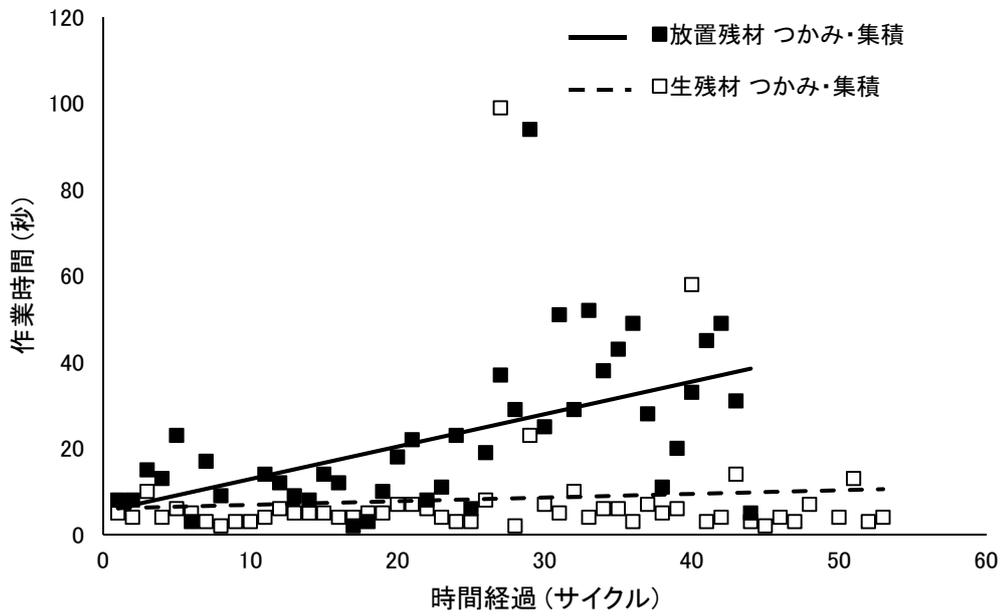


図 37 時間経過とつかみ・集積作業時間

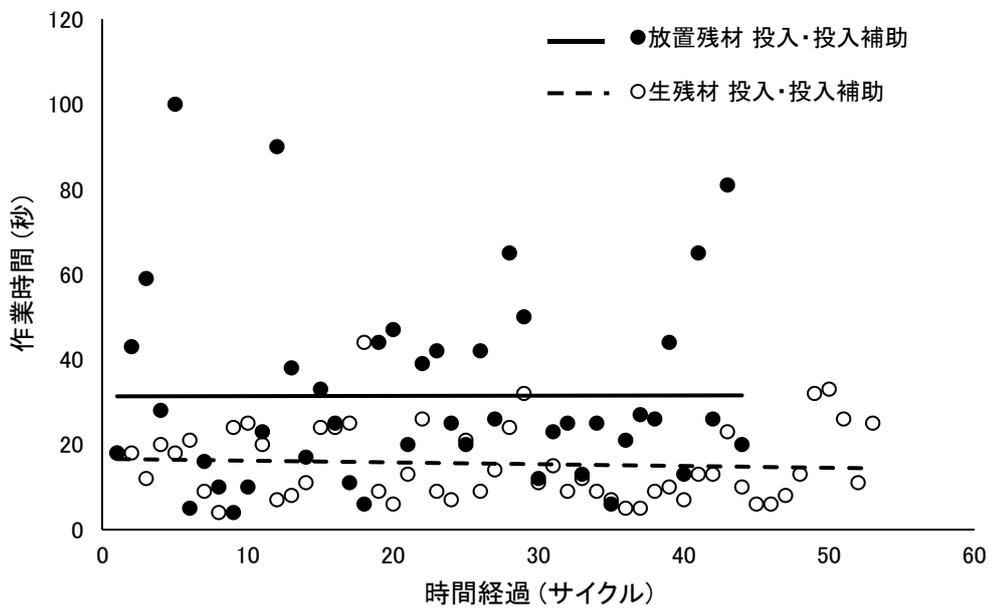


図 38 時間経過と投入・補助作業時間

- ・ チップ化後にチップの質量とコンテナ内のチップの容積を測定し、かさ密度を求めた。放置残材では 8.2m³ で 1.8 乾燥トン (3.0 生トン)、生残材では 6.6m³ で 1.5 乾燥トン (2.7 生トン) であった。したがって、かさ密度は放置残材で 0.22 乾燥トン/m³ (0.37 生トン/m³)、生残材で 0.23 乾燥トン/m³ (0.41 生トン/m³) と算出された。容量 8.16m³ のコンテナに満載したときのチップの質量は放置残材で 3.0 生トン、生残材で 3.3 生トンと試算され、トラックの最大積載量は 3.55 トンであることから満載でも運搬には問題ないと考えられる。
- ・ エンジン管理システムのモニタに表示される燃料消費率の単位は G/時 (ガロン/時) であるため、L/時 (リットル/時) に換算して分析した。分析の結果、放置残材、生残材をチップ化しているとき (以下、負荷時) の燃料消費率の平均はそれぞれ 22.9L/時、21.7L/時であった。また今回使用したチップに搭載されているエンジンは無負荷時に燃料噴射を抑える制御をしており、チップ化していないとき (以下、無負荷時) の燃料消費率は、放置残材時で 13.0L/時、生残材時で 12.9L/時であった。負荷時、無負荷時の両者とも放置残材時と生残材時の燃料消費に違いは見られなかった。グラブブルでの集積作業や投入作業を含めた作業全体の平均燃料消費率は放置残材で 15.6L/時 (96.4 g/kWh)、生残材で 17.8L/時 (110.3g/kWh) と生残材の方が大きくなった。生産したチップの単位質量あたりでは、放置残材が 4.8L/生トン (8.1L/乾燥トン)、生残材では 3.3L/生トン (5.9L/乾燥トン) と生残材の燃料消費率が小さくなった。なお、放置残材および生残材で、負荷時や無負荷時の燃料消費率に差がないのに対して、作業全体の平均燃料消費率で差が生じたのは、放置残材の作業では生残材の作業に比べて作業時間が長かったため、エンジンの無負荷状態の時間が長くなる、すなわち燃料消費が低く抑えられる時間が長くなり、作業全体の平均では燃料消費率が小さくなったものと考えられる。
- ・ そこで作業時間と平均燃料消費率の関係を確かめるため、今回得られた燃料消費率や作業時間などの数値を用いて、サイクルタイムと燃料消費率および生産性の関係を試算した。生残材の負荷時の燃料消費率を F_L (L/時)、生残材の無負荷時の燃料消費率を F_U (L/時)、負荷時の平均時間を T_L (秒)、サイクルタイムを T_C (秒) としたとき、作業時の時間あたりの平均燃料消費率 F_C (L/時) は、

$$F_C = \{F_L \times T_L + F_U \times (T_C - T_L)\} / T_C \quad \text{式(1)}$$

と表すことができる。

また、1 サイクルあたりの生産量 P_C (乾燥トン/サイクル) とサイクルタイム T_C (秒) より生産性 P (乾燥トン/時) は、

$$P = P_C / T_C \times 3600 \quad \text{式(2)}$$

で求められる。

生産したチップの単位質量あたりの燃料消費率 F_W (L/乾燥トン) は式(1)と式(2)から、

$$F_w = F_c / P$$

式(3)

で求めることができる。

- ・ 今回の試験結果より、 $F_L = 21.7$ L/時、 $F_U = 12.9$ L/時、 $T_L = 13.3$ 秒、また生残材を 53 サイクル投入、チップ化し、1.5 乾燥トンのチップを生産したことから、 P_c を 0.283 乾燥トンとし、式(1)、式(2)、式(3)からサイクルタイム T_c との関係は図 39 のようになり、サイクルタイムの増加とともに作業時の時間あたりの平均燃料消費率および生産性は徐々に下がり、単位質量あたりの燃料消費率は直線的に増加した。
- ・ 試算の結果、サイクルタイムを短縮することで単位質量あたりの燃料消費率を小さく抑えることができると示唆された。放置残材時は、チップのエンジンの稼働中に離れた場所にある残材を運搬したため、作業全体に占めるチップ化時間の割合が下がり、単位質量あたりの燃料消費率が上昇する要因となったと考えられる。長時間チップ化しないような作業、例えば残材の運搬作業などはチップのエンジンを停止する、投入予定の残材が少なくなったときはかき集めを行わない、チップの稼働中はなるべく大きな残材の山をつくり、サイクルタイムを短縮するため次々と投入するなど作業の工夫を行うことが必要であると考えられる。

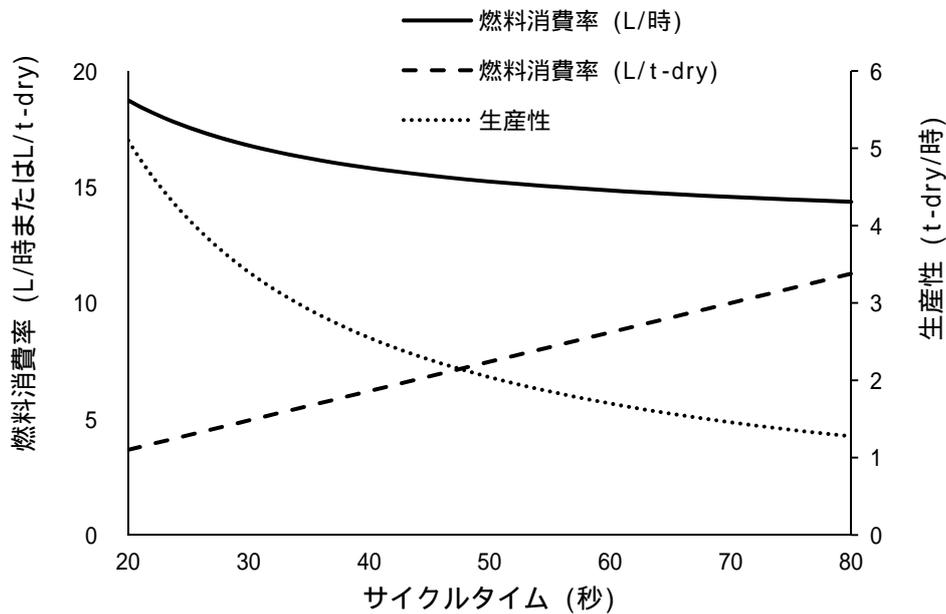


図 39 サイクルタイムと燃料消費率

チップの生産コスト

- ・ コスト試算に用いた各要素は、グラップルについては機械化のマネジメント（全国林業改良普及協会）、チップは建設機械等損料算定表（国土交通省）の木材破砕機を、ロータリースクリーンは振動スクリーン（自走式・3分別）を参考にした。なお、年間稼働時間は800時間、人件費は2,500円/時とした。
- ・ 試算されたチップ化工程のコストを表8に示す。ロータリースクリーンを使用した場合、ロータリースクリーンの機械費等の分だけコストが増加した。昨年度の林地残材のチップ化を行ったタブ型切削式チップ（40mmスクリーンを装着）では、生産性の平均が6.2生トン/時（3.6乾燥トン/時）と今回の結果とあまり変わらなかったが、同じコスト算定要素を用いて試算したところ、ロータリースクリーン使用時で6,883円/乾燥トン（3,981円/生トン）、ロータリースクリーンなしで4,609円/乾燥トン（2,666円/生トン）となり、今年度のチップを用いた場合、コストは高くなると試算された。
- ・ チップの年間稼働時間を240時間から1440時間で試算した結果を図40、図41に示す。年間稼働時間が増加するにしたがい、コストは大幅に低下すると試算された。
- ・ 表8に示したコストは年間稼働時間が800時間の場合であるが、例えば年240日、実稼働時間を1日6時間とした場合、年間稼働時間は1440時間となるが、そのときのコストは生残材時、ロータリースクリーン使用で4,072円/乾燥トン（2,279円/生トン）、ロータリースクリーンを使用しない場合で3,322円/乾燥トン（1,859円/生トン）と試算される。また、ふるい目開きを8mm以上40mm未満として選別した場合、粒径分布から歩留まりは50.8%となり、生産性は約半分に、チップ化工程のコストは約2倍になると試算された。歩留まりをよくするためには、チップ内部にスクリーンを装着できるチップを選択するなりして、粒径を調整できるようにする必要があると示唆される。
- ・ 昨年度の試験結果から、未利用材の資源量は123.0生トン/haと推定されている。このうち、本事業の目的とする8mm $D < 40$ mmのチップの割合は50.8%であるので、チップの生産量は62.5生トンと推定され、これを生産するための生産費は9,820円/生トンより約61.4万円/haと試算された。

表8 チップの生産コスト

	放置残材		生残材	
	使用	なし	使用	なし
ロータリースクリーン				
コスト（円/チップ m ³ ）	3,046	2,118	2,029	1,411
（円/生トン）	8,228	5,723	4,989	3,470
（円/乾燥トン）	13,855	9,637	8,913	6,200
8mm $D < 40$ mm 割合(%)	50.8		50.8	
8mm $D < 40$ mm の				
コスト（円/チップ m ³ ）	5,995		3,994	
（円/生トン）	16,196		9,820	
（円/乾燥トン）	27,273		17,546	

