

未利用森林バイオマスの破碎作業の生産性を最適化する土場残材の山の大きさ

An optimum size of slash pile for the grinding of unutilized forest biomass

吉岡拓如*1・櫻井倫*2・亀山翔平*3・井上公基*1・Bruce Hartsough*4

Takuyuki YOSHIOKA*1, Rin SAKURAI*2, Shohei KAMEYAMA*3, Koki INOUE*1, Bruce HARTSOUGH*4

*1 日本大学生物資源科学部

*1 College of Bioresource Sciences, Nihon University, Fujisawa, Kanagawa 252-0880, Japan

*2 宮崎大学農学部

*2 Faculty of Agriculture, University of Miyazaki, Miyazaki 889-2192, Japan

*3 日本大学大学院生物資源科学研究科

*3 Graduate School of Bioresource Sciences, Nihon University, Fujisawa, Kanagawa 252-0880, Japan

*4 カリフォルニア大学デイビス校生物・農業工学科

*4 Department of Biological and Agricultural Engineering., University of California, Davis, Davis, CA 95616, USA

要旨：既報において筆者らは、林道端土場に集積された林地残材をグラップルローダとグラインダにより破碎する作業の時間観測を行い、大きさの異なる3つの土場残材の山の破碎作業の生産性を算出した。その結果、山のサイズ小(林道に対する間口15 m×林道からの奥行20 m×高さ4 m)が21.73全乾トン/時、サイズ中(同24 m×30 m×4 m)が30.65全乾トン/時、サイズ大(同30 m×35 m×4 m)が24.49全乾トン/時であったことから、破碎作業を想定した場合の土場残材の山には、大きすぎず小さすぎず、適切なサイズが存在することが示唆された。そこで本研究では、グラップルローダとグラインダを組み合わせた破碎作業をモデル化することにより、土場残材の山の適切なサイズを検討した。モデルより算出された生産性は、サイズ小が 21.78 ± 0.70 全乾トン/時、サイズ中が 31.17 ± 0.75 全乾トン/時、サイズ大が 24.27 ± 0.38 全乾トン/時となったことから、概ね再現性のあるモデルを構築できたと考えられた。このモデルによる生産性は、土場面積710 m²における山の破碎作業が最も高く、31.24全乾トン/時であった。

キーワード：土場残材, チップ化, グラップルローダ, グラインダ, シミュレーション

Abstract: The previous study by authors investigated processing the woody biomass waste piles for use as fuel instead of burning them. At each landing slash pile location, a 132 kW grapple excavator was used to transfer the piles into a 522 kW horizontal grinder. Three piles, *i.e.*, 'Small (Length: 20 m; Width: 15 m; Height: 4 m),' 'Medium (L: 30 m; W: 24 m; H: 4 m),' and 'Large (L: 35 m; W: 30 m; H: 4 m)' piles, were ground and the operations were time-studied. As a result, grinding the 'Medium' pile was found to be the most productive, 30.65 BDT/PMH₀, thereby suggesting that there might be an optimum size of slash pile for a grinding operation. This study discussed that by modeling the excavator and grinder operations. The constructed model was considered to well replicate the actual operations. Based on the modeling, the productivity of grinding at the landing area of 710 m² of slash pile location was estimated to be 31.24 BDT/PMH₀, which was the most productive.

Key-word: slash pile, grinding operation, grapple excavator, horizontal grinder, simulation

I はじめに

2012年に運用がはじまった再生可能エネルギーによる電力の固定価格買取制度(FIT)において、製材工場等残材や輸入材などの一般木材よりも高額な買取価格が設定されたことから、間伐材や林地残材といった未利用木材が燃料の発電所の建設計画・稼働開始が進んでいる。「木

質バイオマスエネルギー利用動向調査」によれば、2015年には117万全乾トンの「間伐材・林地残材等」を原料とした木材チップがエネルギーとして利用された(3)。2017年2月末時点での未利用木材によるバイオマス発電のFITの認定状況は、稼働件数が38(総発電容量297 MW)、認定件数が89(同436 MW)である(6)。間伐材や

林地残材をエネルギー利用するためには、エネルギー変換の際にはチップの状態にしておく必要があり、今後、林道端土場あるいは発電所のストックヤードに間伐材や林地残材を集めて大きな「山」をつくり、チップまたはグラインダで集中的に粉砕・破砕する事例は確実に増えていくであろう。

一般論として、1箇所の土場に集められた残材の量が多いほど「規模の経済」が作用して、システムとしての粉砕・破砕作業の効率が高くなることが期待できる。一方、筆者らは米国において、「フューエルリダクション」と呼ばれる山火事のリスクを減らすための施業の一環で林道端土場に集積されたパイル(=林地残材の山)を、グラップルローダとグラインダにより破砕する作業の時間観測を実施した。調査では、グラップルローダが残材を投入するためにパイルとグラインダの間を行き来する光景が散見され、このことがシステムの生産性に悪影響をおよぼすことが懸念された。そこで大中小3つのパイルを抽出し、破砕作業の生産性を求めたところ、サイズ中が最も高くなったことから、破砕作業を想定した場合の土場残材の山には、大きすぎず小さすぎず、適切なサイズが存在すると考えられた(8)。

本研究は、既報(8)で得られた要素作業時間の集計結果をもとに、グラップルローダがパイルから残材をつかみ出し、グラインダのコンベヤへ投入する作業のシミュレーションモデルを構築し、グラップルローダとグラインダを組み合わせた破砕作業を再現することで、その生産性を最適化する土場残材の山の大きさを求めることを目的とする。森林作業のモデル化に関する既往の研究には、林業機械の要素作業ごとに近似式を求め、要素作業間の遷移確率をもとにそれらを積み上げることでサイクルタイムや生産性を算出したものとして、ハーベスタに関する IWAOKA *et al.*の研究(1)、タワーヤード等に関する櫻井らの研究(4)がある。また、機械作業のサイクルタイムについて理論式を構築し、システムダイナミクスの手法にもとづいてシステム全体の生産性を予測したものとして仁多見(2)、杉本ら(5)、YOSHIMURA and HARTSOUGH(7)の研究がある。本研究では、要素作業時間の集計結果にもとづいてグラップルローダの作業モデルを構築するために、IWAOKA *et al.*(1)、櫻井ら(4)が用いた手法にない解析を進めるものとした。

II 材料と方法

1. 作業時間観測 イズ小(林道に対する間口 15 m × 林道からの奥行 20 m × 高さ 4 m, パイルの質量 51.41 全乾トン)、中(同 24 m × 30 m × 4 m, 122.66 全乾トン)、

大(同 30 m × 35 m × 4 m, 173.38 全乾トン)の3つのパイルに対して、グラップルローダ(Link-Belt 社製 290LX, エンジン出力 132 kW)が残材をつかみ出し、グラインダ(Bandit 社製 Beast3680, エンジン出力 522 kW)へ投入する作業の時間観測を行った(8)。要素作業は、「把持・旋回」、「解放・空旋回」、「移動しながら把持・旋回」、「移動しながら解放・空旋回」、つかんだ材の投入を容易にするための「ふるい落とし」、グラインダが材を呑み込むまでの「待機」、枝張り等の原因により、グラインダが材をスムーズに呑み込めない場合の「押し込み」、パイルの山が小さくなり材が散在した状態になってしまった際に、材をまとめ直す「材整理」の8つに区分した。なお、土場には残材のほか機械の占有スペース等が必要となるが、ここで各パイルの土場を長方形と仮定して単位面積あたりの残材量を求めると、小が 0.171 全乾トン/m²、中が 0.170 全乾トン/m²、大が 0.166 全乾トン/m²となり、パイル間で残材量に偏りはないものと考えられた。このことをもって、土場に集積された残材の量を土場面積で表現するというのが本研究の立場である。

2. グラップルローダ作業のモデル化 作業については、要素作業の組み合わせにより表現した。観測された要素作業時間の分布から理論式を求め、乱数を理論式に代入することで要素作業時間を推定するものとした。なお理論式は、櫻井ら(4)にない対数正規分布にしたがうものとして近似した。またグラップルローダ作業は、要素作業の流れのなかに分岐を多く含み複雑である。このためシミュレーションでは、観測された作業連結強度より各要素作業への遷移確率を定め、これにしたがって次の要素作業を決定した。

III 結果

1. 破砕作業の生産性 上時間観測により得られた要素作業時間の集計結果から、「材整理」を除く7つの要素作業は、パイル間の作業時間の平均値に有意な差は見られなかった(一元配置の分散分析, 有意水準 5%)。一方「材整理」は、パイルサイズが大きくなると平均時間も長くなった。つまり、作業が進み残材が散らかったら「材整理」により材をグラインダの近くにまとめ直すことで、移動しながら行う要素作業の作業時間が土場面積の影響を受けずに済むと解釈できる。面積あたりで見ても、「材整理」の時間・回数とも土場面積が大きくなると増加した(8)。これは、パイルサイズが小さいうちは旋回・空旋回主体で材整理を行っていたものが、パイルが大きくなるにしたがい移動しながら旋回・空旋回の頻度が高くなり、結果的に面積あたり作業時間の掛かり増しが生じて

しまったことに一因があると考えられる。

要素作業時間の合計を1全乾トンあたりに換算すると、サイズ中のパイルを破碎した際の所要時間が最も短く、これを単位時間あたりで見ると 30.65 全乾トン/時の生産性となり、サイズ大(24.49 全乾トン/時)やサイズ小(21.73 全乾トン/時)のパイルよりも高くなった。1 全乾トンあたりの材整理時間は小が 1.01 秒/全乾トン、中が 8.61 秒/全乾トン、大が 39.3 秒/全乾トンであり、やはりパイルサイズが大きいほど長くなった。ここで土場面積を $x(m^2)$ 、1 全乾トンあたり材整理時間を $y(秒/全乾トン)$ とすると、(1)式で表現できる($r^2=0.9992$)。

$$y=0.2397\exp(0.004889x) \quad (1)$$

パイルの質量を「把持・旋回」と「移動しながら把持・旋回」の回数の合計で除した 1 把持あたりの残材量は、小が 0.138 全乾トン/回、中が 0.212 全乾トン/回、大が 0.208 全乾トン/回であった。1 把持あたり残材量を z (全乾トン/回)として、 z を土場面積 $x(m^2)$ に対して、

$$z=-2.489 \times 10^{-7}x^2+4.292 \times 10^{-4}x+3.184 \times 10^{-2} \quad (2)$$

で近似した($r^2=1.000$)。「材整理」をほとんど行わなかったサイズ小と比較して、中と大の数値が高くなったことから、土場面積が大きいほど「材整理」を数多く行うことでまとまった量の残材をつかむ頻度が高くなり、結果的に 1 把持あたりの残材量が多くなったと解釈でき、生産性を高めることに寄与すると考えられた。一方、「材整理」は作業が進み材が散らかってしまった際に 1 箇所を集め直す作業を意味するため、パイルが大きすぎると材整理に時間がかかりすぎてしまい、全体の作業能率の低下につながる、すなわちサイズ小とサイズ大の間に最適な大きさのパイルが存在することが推察された。

2. シミュレーションモデルの構築 上述のとおり「材整理」以外の 7 つの要素作業は、その平均時間がパイルの大きさに影響されなかったことから、3 箇所のパイルで観測されたものを集約するとともに、ある要素作業から次の要素作業へ移行する確率を意味する遷移確率を求めた(図-1)。また各要素作業の観測時間の分布を対数正規分布にあてはめ、適合度のカイ二乗検定を行ったところ、いずれも 5%有意で適合性が棄却されなかったため、これらを要素作業時間の予測式とした(表-1)。

一方「材整理」は、観測回数が少なく、また前後の要素作業との明確な関係性は見出されなかった。しかし、作業の流れのなかで確実に行われる要素作業であるため、その合計時間を予測式をもとに推定するものとした。土場面積と 1 全乾トンあたり材整理時間の関係を示した(1)式に、土場残材量を乗じたものが合計時間となる。

モデルにおいてはシミュレーション開始時点でのパ

イルの質量を設定し、「把持・旋回」より作業を開始するものとした。「把持・旋回」または「移動しながら把持・旋回」の際にパイルから残材をつかみ出し、つかみ出した後のパイルの質量が 0 を下回ったら次の要素作業は「解放・空旋回」、これが終わった時点で作業を終了し、材整理時間を加えることにより、総所要時間を算出した。なお、1 把持あたり残材量は(2)式による。

		後続要素作業						
		把持・旋回	解放・空旋回	ふるい落とし	待機	押し込み	移動しながら把持・旋回	移動しながら解放・空旋回
先行要素作業	把持・旋回	0.002	0.714	0.033	0.039	0.163	0.037	0.012
	解放・空旋回	0.816	0.004	0.001	0.052	0.077	0.003	0.048
	ふるい落とし	0.931	0.034	0	0	0.017	0.017	0
	待機	0.167	0.602	0	0	0.210	0	0.022
	押し込み	0.004	0.923	0	0.038	0.019	0.002	0.015
	移動しながら把持・旋回	0.427	0.373	0	0.093	0.093	0	0.013
	移動しながら解放・空旋回	0.719	0.223	0	0.008	0.017	0.033	0

図-1 要素作業の遷移確率行列

Fig. 1 Transition probability matrix of element operations of the grapple excavator

表-1 各要素作業時間の予測式

Table 1 Theoretical formula of the element operations time

要素作業	予測式
把持・旋回	$e^{N(2.140, 0.485)}$
解放・空旋回	$e^{N(2.023, 0.370)}$
ふるい落とし	$e^{N(1.825, 0.383)}$
待機	$e^{N(2.625, 0.800)}$
押し込み	$e^{N(1.819, 0.539)}$
移動しながら把持・旋回	$e^{N(1.987, 0.363)}$
移動しながら解放・空旋回	$e^{N(2.153, 0.530)}$

ただし、 $N(m, \sigma)$ は、平均 m 、標準偏差 σ の正規乱数を与える演算子

IV 考察

1. モデルの再現性の検証 はじめに作業時間観測より得られた生産性と、モデルによる計算値とを比較することにより、構築したモデルの再現性を検証することを目的として、パイル小、中、大それぞれに対して、1,000 回ずつくり返し計算を行った(表-2)。観測値と、計算値の平均値を比較すると、最大で 1.7%過大(サイズ中)となった。また、計算値の平均値に対する標準偏差の割合を見ると、最も高い値でもサイズ小の 3.2%(=0.70÷21.78

×100)であった。以上より、概ね再現性のあるモデルを構築できたと考えられた。

2. 土場残材の山の最適な大きさ 破碎作業の生産性を最適化する土場残材の山の大きさをシミュレーションモデルより求めるために、ここでは土場面積に着目した。サイズ小とサイズ大の間に最適な大きさのパイルが存在すると考えられたため、土場面積を 300 m² から 1,050 m² まで 10 m² ずつ増やしながら、各面積において 1,000 回ずつくり返し計算を行い全体の作業時間を求め、その平均値より生産性を算出した。作業時間観測においてパイル間で残材量に偏りがなかったことから、ここでは 3 箇所のパイルの加重平均値である 0.168 全乾トン/m² を土場面積に乘じ、これを各面積における残材量とした。

シミュレーション結果を示した図-2 において、土場面積 710 m² の場合の生産性が最も高く、31.24 全乾トン/時となった。しかしながら 690 m²(31.21 全乾トン/時)から 730 m²(31.20 全乾トン/時)までの間は、その差はわずかであり、また各面積における計算結果にも幅があることから、あくまで 1,000 回のくり返し計算の平均値を比較したものである点に留意する必要がある。

表-2 観測値と計算値の比較

Table 2 Comparison between the monitored and estimated productivities

パイル	観測値			生産性 (全乾トン/時)
	土場面積 (m ²)	残材量 (全乾トン)		
小	300		51.41	21.73
中	720		122.66	30.65
大	1050		173.78	24.49

パイル	計算値			観測値に対する 平均値の割合(%)
	計算回数 (回)	平均値±標準偏差 (全乾トン/時)		
小	1000	21.78±0.70		100.2
中	1000	31.17±0.75		101.7
大	1000	24.27±0.38		99.10

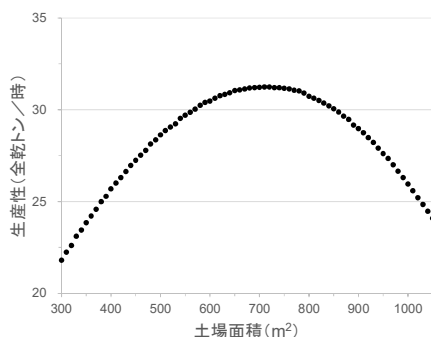


図-2 土場面積と破碎作業の生産性の関係

Fig. 2 Relationship between the area of landing slash pile location and the estimated productivity of grinding

V おわりに

本研究において、グラップルローダとグラインダを組み合わせた破碎作業を再現したシミュレーションモデルを構築することにより、その生産性を最適化する土場残材の山の大きさを、土場面積で表現することができた。ただし、モデルの汎用性ということになると、たとえば土場の形状(林道に対する間口と林道からの奥行との比率)は考慮していない点、1 全乾トンあたり材整理時間と 1 把持あたり残材量の理論式はともに 3 つのサンプルから近似している点、破碎作業に適した大きさの土場残材の山といっても、使用機械によってケースバイケースであり状況は異なる点などについて検証を行い、モデルの精度を高めることが求められよう。

謝辞 本研究は著者の 1 人の吉岡が、平成 24 年度日本大学海外派遣研究員(長期)によりカリフォルニア大学デビス校生物・農業工学科に在籍した際に調査を行い、著者間の議論により結果を取りまとめたものである。またその取りまとめにあたっては、JSPS 科研費(課題番号: 24580213, 15H04508)の支援を受けた。

引用文献

- (1) IWAOKA, M. *et al.* (1999) Performance of small harvester head in a thinning operation. *J. For. Res.* **4**: 195-200.
- (2) 仁多見俊夫 (2006) システムダイナミクスによる素材生産作業システムのモデル化とシステム工期表. *森利誌* **20**: 281-284.
- (3) 林野庁編 (2017) 平成 29 年版森林・林業白書. 林野庁, 東京: 236 pp.
- (4) 櫻井倫ら (1999) タワーヤーダ・プロセッサ・フォワーダ形集運材作業システムのシミュレーションによる検討. *東大演報* **102**: 113-132.
- (5) 杉本和也ら (2010) システムダイナミクスによる連携集材作業の検討. *森利誌* **25**: 5-14.
- (6) 泊みゆき編 (2017) バイオマス白書 2017. バイオマス産業社会ネットワーク, 柏: 28 pp.
- (7) YOSHIMURA, T., HARTSOUGH, B. (2007) Conceptual evaluation of harvesting systems for fuel reduction and biomass collection on steep terrain using system dynamics. *Proc. of International Mountain Logging and 13th Pacific Northwest Skyline Symposium*, 94-102.
- (8) 吉岡拓如ら (2017) カリフォルニア州における未利用森林バイオマスの破碎作業に関する一考察—土場残材の大きさとグラインダの生産性の関係—. *森利誌* **32**: 143-148.