

## 林地残材の現地チップ化システムの経済性・エネルギー収支比(EPR)の検討

道総研林業試験場

酒井 明香・八坂 通泰  
渡辺一郎

## はじめに

未利用の木質バイオマスが再生可能な資源として期待を集めるようになって、既に十余年が経過した。木質バイオマスの中で最も賦存量の多い林地残材は、集荷コストや運搬コストの高さから、当初なかなか普及が進まなかった。その後、建設廃材の減少や灯油価格の高騰を受けて、徐々に流通量を伸ばしている。現在、道内において上川地方や胆振地方を中心に年間約 6 万 7 千 m<sup>3</sup> の流通量があり(4)、さらに北海道森林づくり基本計画では、平成 29 年度までに林地残材を中心とした木質バイオマスの利用目標値を 256 万 m<sup>3</sup> と設定している(4)。

ところで現在、林地残材の利用は熟利用、つまり燃料としての“エネルギー需要”が大半である。林地残材をその需要地で燃料として使うまでには、必ず機械や運搬車両を用いる。そのため、林地残材をエネルギーとして利用するにはある程度の化石燃料の使用が避けられないことになる。

ここで、よく議論になるのが「利用できるエネルギーよりも、林地残材の調達や加工に必要なエネルギーの方が大きいのではないか」ということである。日本エネルギー学会をはじめ、エネルギー関連分野では、調達・加工に必要なエネルギーと実際に利用できるエネルギーの収支について、多くの研究蓄積がある。その代表的な指標のひとつにエネルギー収支比(Energy Profit Ratio: EPR)がある。

EPR は、エネルギーの効率性や環境性を考える上で非常にわかりやすく有益な指標であるが、これまで、林地残材のエネルギー利用はコスト面を中心に論じられることが多く(6)、EPR の視点から論じた文献は非常に少ない。

そこで本稿は、林地残材のエネルギー利用にあたり、コストと並ぶ重要な指標である EPR を用いて、経済性とエネルギー効率の両方を検討することを目的とする。具体的には、林地残材の集荷・チップ化・運搬を実施した二つの事例(皆伐と未利用間伐)を通して比較を行う。なお、以下より林地残材を“残材”と略記する。

## EPR について

EPR は、環境指標の一種である。1980 年代にニューヨーク大学のホール博士が使用したのが始まりとされ、現在では、もったいない学会 EPR 部会や北大サステナビリティ研究会等で積極的に普及されている指標である(2,7)。改めて EPR を定義すると以下ようになる。

$$EPR = (\text{社会に生み出されるエネルギー}) / (\text{そのエネルギーを得るために投入されるエネルギーの総和})$$

この比がもしも 1 を下回ったら、そのエネルギーを得ようとする行為(たとえば林地残材を集めてチップ化

して運ぶような活動)はエネルギーの無駄であることになる。このように、ある活動の EPR を求めてエネルギーの収支から見た是非を判断し、その活動の優位性や技術的に解決すべき課題を明らかにするための分析を EPR 分析と呼ぶ(1)。

EPR 分析は、エネルギーの出入りに着目したライフサイクルアセスメント(LCA in Energy)の一形態とされる。

EPR 分析は 4 段階のステップで実施される(表-1)

表-1 EPR 分析の手順

	内容	備考
ステップ1	評価範囲の決定	
ステップ2	必要な装置の確認	装置=機械・車両・建築物など出力エネルギーの生産に必要なものの総称(人間の労働力を除く)
ステップ3	各装置の入力エネルギーの計算	装置の製造エネルギー・稼働エネルギー・輸送エネルギー・組み立てや補修にかかるエネルギー等
ステップ4	出力エネルギーの計算	最終的に得られるエネルギーのカロリー計算

ステップ1では、EPR の評価範囲を決める。ステップ2では、必要な装置の確認を行う。ここで“装置”とは、評価範囲で登場する機械や車両、建築物などの総称である。ステップ3では、おのおのの装置ごとに入力エネルギーを計算し、その総和を導く。入力エネルギーは製造エネルギーと稼働エネルギーの和である。製造エネルギーとは、その装置をつくるのに費やしたエネルギーであり、稼働エネルギーとは、その装置を動かすのに費やしたエネルギーである。それに装置や人員の輸送、装置の現地組み立てや補修等にかかったエネルギーも加算される。ステップ4では、「社会に生み出されるエネルギー」を式に代入し、EPR 値を導く。例えばガソリンの EPR を出す時はガソリンの、風力発電の EPR を出す時は風力によって生み出された電力のエネルギーを式に代入することになる。EPR が 1 より安定的に大きいかどうかをここで判断する。

なお、現在の国際的な燃料単位はジュール(J)を用いているが、EPR の先行研究のほとんどはカロリー(Cal)を用いていることから(2,7,9)、本稿でもそれを踏襲する。

## 試験の概要

試験地は、皆伐後の土場に集積した残材を利用対象にした皆伐試験地と、切捨て間伐後の林内に残された残材を利用対象にした切捨て間伐試験地の 2 箇所を設定した。以下、2つの試験地について説明する。

## 1. 皆伐試験地と機械作業システム

皆伐試験地は、むかわ町穂別字似湾の一般民有林に設定し 2010 年 1 月より試験を実施した。以下に試験地の概要を示す(表-2)。

表一2 皆伐試験地の概要

試験地	むかわ町穂別字似湾 一般民有林
樹種・林齢等	カラマツ 51-53年生
立木材積	254.4m <sup>3</sup> /ha
直径・樹高	平均胸高直径 36cm, 平均樹高 28m
伐区面積	7.22ha
伐採方法	皆伐
傾斜	0度~15度
残材発生量	43.2tf/ha (土場計測: 湿潤含水率 40%)

皆伐試験地では“集中土場方式”を採用した。集中土場方式とは、複数の土場のうち、もっとも広い土場にチップパー機をはじめとした重機を置き、そこで残材をチップ化する。ここでの残材は、用材・パルプが採材された後の残渣である“土場残材”(追い上げ材や末木)である。残材がなくなれば、周辺の土場に集積した残材を随時運搬し(=場内運搬)チップ化作業を進める

皆伐試験地の機械作業システムを図-1に示した。作業班員数は4名で重機4台と運搬車2台を乗り換えつつ実施した。内訳は残材投入用のグラップルローダと移動式チップパーで1名(移動式チップパーはリモコンによる自動運転)、残材集荷用のグラップルローダが1名、チップバケットとチップ専用運搬車(以下運搬車)が2名である。



写真-1 チップヤードとチップバケット (皆伐試験地: むかわ町)

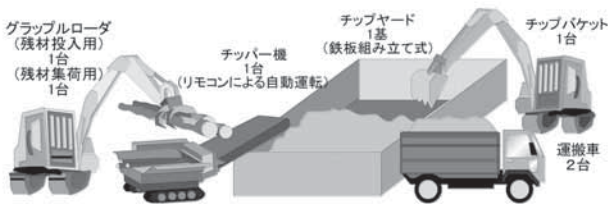


図-1 皆伐区の機械作業システム

移動式チップパーは日立建機製 ZR120HC(以下ZR120HC)を使用した。ZR120HCの最大処理径は26cm程度で、横入れ式の移動式チップパーとしては中型のクラスである。ZR120HCはベルトコンベアが短く、チップの吹き出し口のアタッチメントのない機種であり、運搬車にチップを直接投入するのが困難である。そこで、一旦チップヤードに貯めたチップをチップバケットですくって運搬車に移すという作業システムとした(写真-1)。チップヤードは側面と床面を鉄板で囲って作られており、チップに土砂が混入するのを防ぐという役割がある。

2. 切捨て間伐試験地と機械作業システム

切捨て試験地は、由仁町字川端の道有林内に設定し2008年11月より試験を実施した。以下に試験地の概要を示す(表一3)。

表一3 切捨て間伐試験地の概要

試験地	由仁町字川端 道有林
樹種・林齢等	アカエゾマツ 30年生
立木材積	221.6m <sup>3</sup> /ha
直径・樹高	平均胸高直径 15.9cm, 平均樹高 12m
伐区面積	7.50ha
伐採方法	切り捨て間伐(列状: 1伐3残)
傾斜	0度~20度
残材発生量	97.0 tf/ha (土場計測: 湿潤含水率 30%)

当試験地は水源かん養保安林に指定されており、伐採材積が制限されているため、残材の集荷のために新たな作業路をつけることは難しかった。また、地盤が軟らかく、列幅の狭い箇所では重機での作業が困難であった。そのため、残材の集荷が可能であった範囲は伐区全体の7分の1である約1haに限られた。切り捨て間伐試験地の残材集荷範囲を図-2に示す。

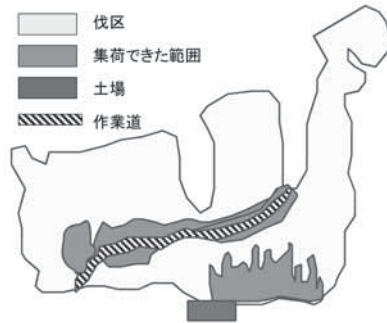


図-2 切捨て間伐試験地の残材集荷可能範囲

切捨て間伐試験地では、材の搬出を伴わないため土場が設定されなかった。そのため現地チップ化の作業スペースを新たに設定した。この作業は残材の集荷に先だって、トラクタ1台で5日かけて実施された。

当試験地の残材は、立木の伐倒後に枝を落とし、長さ1m程度に刻まれた短幹材である。枝を落とされ長さ約1mに刻まれた状態で林内にある。これを重機で集荷し、土場に集めてからチップ化する必要がある。そのため、皆伐試験地よりも工程数が多くなる。

機械作業システムを図-3に示した。作業班員数・重機の台数は、まず残材集荷用のグラップルローダと土場までの搬出用キャリアダンプが各1台(1名で2台を乗り換えながら実施)。土場では、残材投入用のグラップルローダと移動式チップパーで1名(移動式チップパーはリモコンによる自動運転)、チップバケット(運搬車のドライバーが兼ねる)、運搬車(以下運搬車)2名の合計4名、重機5台と運搬車2台で実施した。

移動式チップパーは、皆伐試験地と同様のZR120HCを使用し、鉄板製のチップヤードも同様に作成した。

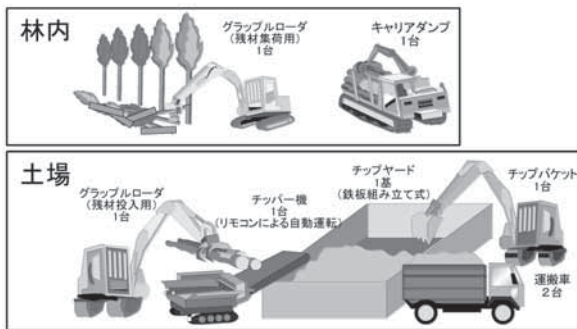


図-3 切り捨て間伐試験地の機械作業システム

両試験区は、どちらも山土場に移動式チップパーを搬入し、残材を現地にてチップ化するシステムを採用した。生産された残材チップは 50km 離れた利用施設に運搬する。それまでの各工程の生産性や要したエネルギー（軽油消費量やガソリン消費量）を記録する。残材チップの重量については、チップ化し利用施設まで運搬し、施設内で湿潤含水率が 25%程度に落ちるまで保管した後、重量を計測する。

最終的には経済性(ここでは残材チップ生重 1t あたり総費用)とエネルギー収支比について両試験地を比較する。なお、両試験地は同じ素材生産業者・同じオペレーターによって実施されることを付記する。

**試験の結果・考察**

**1. 経済性(生重1tあたり生産費)**

両試験区の生重 1t あたり生産費の結果について表-4 に示す。両試験区とも、片道 50km のチップ運搬を想定したが、作業開始の時点でストックヤードに貯留されたチップ量により、一日に 3 往復できる場合と 4 往復できる場合があったため、運搬費に幅ができた。一日に 4 往復できる場合は運搬費は 1,900 円/t で、皆伐試験地の総費用は約 10,000 円/t、切り捨て間伐試験地は約 21,000 円/t となった。後者は、林内から残材を土場に集めるまでに延べ 27 日を要し、その費用(=集荷費)が高価となった。

表-4 各試験地の生産費の比較

■皆伐試験地	チップ化費	8,600 円/t
	運搬費	1,900~2,800 円/t
	合計	10,500 円/t (最安)
■切り捨て間伐試験地	集荷費	9,800 円/t
	チップ化費	9,600 円/t
	運搬費	1,900~2,800 円/t
	合計	21,300 円/t (最安)
備考	・労働生産性は一日 6 時間労働として計算 ・オペレータ賃金・作業員賃金とも 15,000 円 ・土場作設費はのぞく ・付帯人件費率・諸経費率は見込まず	

この結果は、現行のカラマツチップ材（山棒・剥皮・チップ工場サイロ下仕切り）が 1m<sup>3</sup>あたり 5,400 円(3)であることを考えると非常に高価である。

木質バイオマスの中で、木質ペレットは灯油と競合し、チップはA重油と競合すると言われる。そこで、チップをA重油の代替ととらえ、2010年1月の北海道地区平均A重油価格 67 円と比較してみる。ただしチップはトンで、A重油はリットルで表されるため、1Gcal を得るのに必要な価格に換算する。

その結果、A重油は 7,300 円/Gcal であるのに対し、皆伐チップが 5,800 円/Gcal、切り捨てチップが 11,800 円/Gcal となった。この結果から、少なくとも原料調達費としては、皆伐チップはA重油より安いと言える。切り捨てチップは、原料調達の時点で既にA重油の 1.6 倍の費用がかかることになる。

なお、残材チップを実際に利用する際にはボイラーのメンテナンス費用や人件費が余計にかかるなど、ランニングコストは別に考慮すべき項目が多いことを付記する。

**2. EPR**

次に、両試験地での EPR について、EPR 分析の 4 段階のステップを順に追ってみる。

ステップ 1 <EPR の評価範囲の決定>では、皆伐試験地の方は土場残材のチップ化から利用施設に運搬するまでとなる。切り捨て間伐試験地の方は、林内から短幹材を集荷し、土場まで運び、チップ化して利用施設に運搬するまでとなる。

ステップ 2 <必要な装置の確認>では、両試験地で一部異なるが、図-2 と 3 で挙げた重機やヤードはすべて“装置”として評価の対象になる。ステップ 3 <装置ごとの入力エネルギー計算>では、その総和を導く。ここでは各装置の入力エネルギー=製造エネルギー+稼働エネルギーである。輸送エネルギーは重機運搬とオペレーターの通勤としてそれぞれ加える。

鉄板製ストックヤードの現地組み立てエネルギーは、残材集荷用グラブローダの稼働エネルギーに含めた。補修に関するエネルギーは本論では省略する。

なお、製造エネルギーに関しては、装置をまるまるその現場で消費してしまうわけではないため、稼働率を乗じる。ある現場における装置の製造エネルギーは以下の式で表せる。

$$\text{製造エネルギー} = \frac{\text{装置重量(t)} \times \text{原単位 (Gcal/t)} \times \text{現場での稼働時間 (h)}}{\text{装置の経済寿命(y)} \times \text{年間稼働時間(h/y)}}$$

同様に稼働エネルギーは、例えば軽油を燃料とする装置を想定すると、

$$\text{稼働エネルギー} = \text{現場での使用燃料(L)} \times \text{軽油原単位 (Gcal/L)}$$

となる。以上をふまえ、両試験地の各装置の入力エネルギーを計算すると表-5 のようになった。なお、ここでは、図-2 や 3 では省略した重機（土場の作設に使用したトラクタやオペレーターの通勤用乗用車など）も含めて入力エネルギーの総和を求めていることに留意する必要がある。

ステップ 4 <社会に生み出されるエネルギー計算>で

は、残材チップの燃焼カロリーを計算する。各試験地で得られた残材チップを、利用施設前で湿潤含水率 25%になるまで自然乾燥させた。皆伐チップは総量 205t、切捨て間伐チップは総量 68t となった。湿潤含水率 25%時の低位発熱量を 21.5Gcal と仮定すると、それぞれ 514.6Gcal、170.2Gcal の熱量が得られたことになる。

これらの結果を表-5 に整理した。それぞれの試験地における EPR は、

$$\text{皆伐試験地 EPR} = 514.6\text{Gcal} \div 82.2\text{Gcal} \approx 6.3$$

$$\text{切捨て間伐試験地 EPR} = 170.2\text{Gcal} \div 81.03\text{Gcal} \approx 2.1$$

という値が導き出された。すなわち、皆伐試験地で得られたエネルギーは費やしたエネルギーの 6.3 倍、切捨て間伐試験地は同様に 2.1 倍であり、ともに 1 を上回った。

表-5 各装置の製造・稼働エネルギー一覧

工程名	主な装置名	皆伐試験地		切り捨て間伐試験地		備考
		製造エネルギー	稼働エネルギー	製造エネルギー	稼働エネルギー	
集荷	グラブローダ	1.47	6.5	6.63	18.2	車両原単位はすべて 25.1Gcal/t を使用
	キャリアダンブ			2.36	1.67	
	チップ運搬車	チップ運搬に含める				
チップ化	チップパー機	6.25	20.15	3.04	6.81	灯油原単位はすべて 9.2Gcal/L を使用
	グラブローダ	3.59	8.18	4.13	5.71	
土場・ヤード作設(除雪含む)	ブルドーザー	0.97	2.51	1.21	1.36	9.2Gcal/L を使用
	鉄板	0.61		0.61		
	グラブローダ	チップ化に含める		チップ化に含める		
チップ運搬	チップバケット	0.87	1.32	0.54	0.83	ガソリン原単位はすべて 8.4Gcal/L を使用
	チップ運搬車	4.78	15.82	2.92	8.23	
通勤	乗用車	3.3	2.52	3.3	10.08	
重機運搬	11tトレーラー	1.93	1.47	1.93	1.47	
合計		23.77	58.47	26.67	54.36	
			82.24		81.03	

註1)「～に含める」という表現は、その工程が分離できなかったことを指す。全体としての製造・稼働エネルギーは別の工程で換算されているため、総入力エネルギーに影響は与えない

註2) 使用した原単位はすべて文献(2)(7)による

この値を、天野 (1) や土屋・天野 (9) を参考に他のエネルギー源の EPR と比較したのが表-6 である。皆伐試験地の 6.3 は木質ペレットを中心とする先行研究と同等か、

	エネルギー源	EPR
木質バイオマス	バイオエタノール(国産とうもろこし)	0.5~1.1
	木質ペレット①(群馬)	6.3
	木質ペレット②(伊達)	3.9
	木質ペレット③(足寄)	4.6
	林地残材チップ(群馬)	5.8
既存のエネルギー	石炭火力発電	6.6
	石油火力発電	7.9
	天然ガス	2.1
	中小発電	15.3
	地熱発電	6.6~6.8
	風力発電	3.9~9.8
	太陽光発電	0.9~2.0

やや高いことがわかった。また、切捨て間伐試験地の 2.1 は、天然ガスや太陽光発電と同等であることがわかった。

表-6 いろいろなエネルギー源の EPR 評価事例

まとめ：今後に向けて

本論では、経済性とエネルギー効率性の両面から、林地残材のエネルギー利用について検討した。

皆伐試験地においては、生重 1t あたり費用(工場前渡し)が 10,500 円(1Gcal あたり 5,600 円)であり、同時期の A 重油

価格を下回った。なおかつ EPR 値も 6.3 と 1 より十分大きかったため、林地残材の利用はエネルギー収支から見ても十分プラスであると考えられた。一方切り捨て間伐試験地においては、生重 1t あたり費用が同様に 21,300 円(1Gcal あたり 11,800 円)であり、A 重油の 1.6 倍の価格となった。EPR 値は 2.1 となり、皆伐試験地の 3 分の 1 となったものの 1 より上回った。

この 2 事例だけで“林地残材というエネルギー源”の評価を下すのは難しいが、とりあえず出発点として、皆伐・切捨て間伐の両方で EPR が 1 を上回った。

なお経済性を含めて総合的に考えると、切捨て間伐は搬出に費用がかかり、皆伐よりずっと効率が悪く、集荷の優先順位は低いと言える。

また機械作業システムに関して言えば、もしもコストが同程度であるなら、より EPR 値の高いシステムを採用すべきである。そのような視点から作業システムを見直すことは重要と思われる。

今後は、現場の条件を変え、EPR = 1 となるとききの運搬距離(限界運搬距離)や、同じ事業体の年間を通した EPR(年間 EPR)の導出など、より多くの検証を行う予定である。

本研究は、北海道水産林務部からの受託研究「林地残材の効率的な集荷システムづくりモデル事業」の一環として実施した(3,4)。調査に全面的にご協力いただいた(株)イワクラ、(株)小橋建設の皆様にご心よりお礼を申し上げる。

引用文献

- (1) 天野 (2008) 石油ピーク後のエネルギー EPR (エネルギー収支比) から資源の有効利用を考える - 愛智出版: p27-67 .
- (2) 北海道バイオマス検討会 (2010) 2009 年度報告書 : バイオマスエネルギーの収支比分析と道内の取組事例 : p1-68 .
- (3) 北海道水産林務部(2010)木材市況調査月報 9 月号 : p2-4.
- (4) 北海道水産林務部(2010)木質バイオマス利用のための林地残材集荷システム構築に向けて p1.
- (5) 北海道水産林務部 (2009) 林地残材の効率的な集荷システムづくりモデル事業報告書.
- (6) 北海道水産林務部 (2010) 林地残材の効率的な集荷システムづくりモデル事業報告書.
- (7) もったいない学会 EPR 部会 (2009) EPR 評価方法と評価事例集 2009 年度版 : p1-57.
- (8) 酒井明香 (2009), 林地残材の集荷・チップ化システムの現状と課題, 光珠内季報, Vol.156: p12-18.
- (9) 土屋・天野(2010) 木質ペレット製造のエネルギー収支分析 電力中央研究所報告 p1-17.