

林業作業におけるエネルギー投入量とCO₂排出量

一三雅透・岩岡正博・峰松浩彦 (東農工大院)・内山研史 ((社) 林業機械化協会)・
安田幸治 (東農工大)・中澤昌彦 (森林総研)

要旨:本研究では、林業作業におけるエネルギー投入量とCO₂排出量を推定することを目的として、全国の林業事業者へアンケート調査を行った。アンケート項目は、林内作業時のエネルギー投入量に関する、作業量、労働投入量、使用機械、燃料消費量と、通勤時のエネルギー投入量に関する、作業別の通勤距離と通勤車の延べ台数、さらに運材作業時のエネルギー投入量に関する、主伐、間伐時の搬出材積、運材距離、燃料消費量とした。エネルギー投入量とCO₂排出量は、燃料油脂等使用量に、使用燃料のエネルギー原単位とCO₂排出係数を乗じて算出した。また、作業モデルとして地帯え1回、植付け1回、下刈り7回、除伐2回、枝打ち3回、間伐2回、主伐1回を想定して、木材生産作業全体のエネルギー投入量とCO₂排出量とを算出した結果、エネルギー投入量は平均79.5 GJ/ha、CO₂排出量は5440 kg-CO₂/haであった。エネルギー投入量、CO₂排出量とも、林内作業が4割を、運材作業が3割を占めており、通勤が2割を占めていた。

キーワード: 林業作業 エネルギー投入量 CO₂排出量 アンケート 林業機械

I はじめに

地球温暖化対策において、森林はCO₂吸収源として期待されている。また、森林から得られる資源を木材として使用すればCO₂ストックとして働き、バイオエネルギーとして使用すれば大気中のCO₂量に影響を与えないカーボンニュートラルな代替燃料として働く。一方木材生産作業では、作業効率を上げるために機械を使用し、燃料を消費してCO₂を排出している。したがって上記のCO₂吸収源、ストック、化石燃料代替効果の評価には、木材生産のCO₂排出量の把握が必要である。

木材生産のCO₂排出量に関する研究は海外で進んでおり、スウェーデンでは国全体にわたってCO₂排出量の地域間比較(1)が可能なまでになっている。一方国内では9道県にまたがるエネルギー投入量調査(6)が行われたことがあるが、20年前のことで機械化の状況が現在とは異なっているため、現代に適用するのは難しい。最近も国内の林業作業のCO₂排出量に関する研究が行われているが(7,10)、まだ地域内の調査にとどまっており、日本全体で地域間の比較ができる段階には至っていない。

そこで、日本全体の木材生産のCO₂収支の標準値や地域差を明らかにすることを目的として、まずはアンケート調査を行って、各林業作業の燃料消費量の現状を明らかにする。この結果を用いて、単位作業量当たりのエネルギー投入量とCO₂排出量を算出し、各作業のエネルギー消費量とCO₂排出量を比較する。

II エネルギー投入量とCO₂排出量の算出方法

エネルギー投入量とCO₂排出量は、作業時、運材時、通勤時にわけて算出する。

作業時の単位面積当たりのエネルギー投入量 E (MJ/ha)、運材時のエネルギー投入量 T_e (MJ/m³/km)、通勤時のエネルギー投入量 C_e (MJ/ha/km)は、次式を用いて求める。

$$E = [F_g \times e_g + F_l \times e_l + (O_e + O_c + O_g) \times e_s] / S \quad (1)$$

$$T_e = (E \times S) / (V \times L) \quad (2)$$

$$C_e = (n \times L \times e_l) / (f \times S) \quad (3)$$

ここで、作業面積 S (ha)、ガソリン消費量 F_g (L)、軽油消費量 F_l (L)、エンジンオイル消費量 O_e (L)、チェーンオイル消費量 O_c (L)、グリス消費量 O_g (L)、ガソリンのエネルギー原単位 e_g (MJ/L)、軽油のエネルギー原単位 e_l (MJ/L)、潤滑油のエネルギー原単位 e_s (MJ/L)、運材材積 V (m³)、往復の走行距離 L (km)、通勤車両の延べ台数 n (台)、通勤車両の燃料消費率 f (km/L)とする。

作業時の単位面積当たりのCO₂排出量 G (kg-CO₂/ha)、運材時の単位材積距離当たりのCO₂排出量 T_g (kg-CO₂/m³/km)、通勤時の単位面積距離当たりのCO₂排出量 C_g (kg-CO₂/ha/km)は、次式を用いて算出する。

$$G = [F_g \times g_g + F_l \times g_l + (O_e + O_c + O_g) \times g_s] / S \quad (4)$$

Masayuki HIFUMI, Masahiro IWAOKA, Hirohiko MINEMATSU, Koji YASUDA (Tokyo Univ. of Agric. And Technol., Saiwai-cho3-5-8Fuchu Tokyo 183-8509) Kenji UCHIYAMA (Forestry Mechanization., Koraku1-7-12Bunkyo Tokyo 112-0004), and Masahiko NAKAZAWA (For. and Forest Prod. Res.Inst., Ibaraki, 305-8687) Amount of energy consumption and CO₂ exhaust in forestry working

$$T_g = (G \times S) / (V \times L) \quad (5)$$

$$C_g = (n \times L \times g_i) / (f \times S) \quad (6)$$

ここで、ガソリンのCO₂排出係数 g_g (kg-CO₂/L), 軽油のCO₂排出係数 g_l (kg-CO₂/L), 潤滑油のCO₂排出係数 g_o (kg-CO₂/L) とする。

各エネルギー原単位 e_g, e_l, e_o と、CO₂排出係数 g_g, g_l, g_o は、環境省(3)の値(表-1)を用いる。

III 調査方法

調査は、記名式のアンケート調査で行う。調査対象は、過去に行われた林業機械に関するアンケート調査に回答をいただいた294事業体とし、対象とする作業は、地拵え、植付け、下刈り、除伐、枝打ち、間伐、主伐とする。調査項目は、作業地の概要、林内作業に関する項目、運材作業に関する項目、通勤に関する項目の4種類に分類する(表-2)。

IV 結果

アンケート回答事業体数は43で、回収率は約15%と少なく、農林業センサス2005年の地域別事業体数と比較すると偏りもあったが、全ての地域から回答が得られた。また、事業体の規模も作業員数5人以下から31人以上と様々な大きさの事業体から回答があった。

地拵え作業については、回答があった21事業体のうち6事業体から複数の回答があり31事例が得られ、刈払機、チェーンソー、グラブローダ、バックホウ、グラブ付バックホウが使用されていた。エネルギー投入量は平均2,860 MJ/ha、標準偏差2,535 MJ/haで、最頻値が1,000~2,000 MJ/haであるのに対して、投入量が多い事例が多い(図-1)。このうち6,000 MJ/ha以上の事例は、伐採前植生が天然林であり、人工林やその他の雑木林・草地と比較して、雑草木等の処理が多くなりエネルギー投入量が大きくなったと考えられる。

植付け作業については、5事業体からそれぞれ1事例の回答があり5事例が得られ、刈払機、チェーンソー、小型運搬車、軽トラックが使用されていた。エネルギー投入量は、平均307 MJ/ha、標準偏差187 MJ/haであった(図-2)。図中600 MJ/ha以上の事例は、刈払機とチェーンソーを用いており、地拵えから植付けまでの期間が、他の事例(50日未満)に比べ90日と長かったことから、雑草木が繁茂し、再度地拵えのような作業が必要となり、エネルギー投入量が増加したと考えられる。

下刈り作業については、回答があった20事業体のうち10事業体から複数の回答があり40事例が得られ、刈払機のみ使用されていた。エネルギー投入量は、平均517 MJ/ha、

標準偏差271 MJ/haであり、1事例を除いて林齢が若いほどエネルギー投入量の上限が大きくなる傾向がみられた(図-3)。

除伐作業は、20事業体のうち7事業体から複数の回答があり30事例が得られ、チェーンソー、刈払機が使用されていた。エネルギー投入量は、平均853 MJ/ha、標準偏差504 MJ/haで、最頻値500~1,000 MJ/haに対して投入量の大きい事例が多いが、1,500 MJ/ha以上となったのは、平均標高105~205 mと低標高の事例であった(図-4)。これは、低標高地において植物の生育が良く、除伐作業量が多くなるためと考えられた。

枝打作業については、回答があった8事業体のうち3事業体から複数の回答があり12事例が得られ、高枝カッター、枝打ちロボット、トップハンドルチェーンソーが使用されていた。エネルギー投入量は、平均841 MJ/ha、標準偏差489 MJ/haであり、事例による投入量の差が大きい分布であるが、1,250 MJ/ha以上となったのは、斜面方位が南東斜面の事例(図-5)であり、光環境が良く、枝が良く発達してエネルギー投入量が大きくなったと考えられた。

間伐作業では、回答があった24事業体のうち12事業体から複数の回答があり50事例が得られ、チェーンソー、刈払機、グラブローダ、バックホウ、グラブ付バックホウ、プロセッサ、ブルドーザ、スイングヤード、タワーヤード、林内作業車、フォワーダが使用されていた。面積当たりのエネルギー投入量は、平均3,280 MJ/ha、標準偏差5,160 MJ/haであり、5,000 MJ/ha未満は切捨間伐が多く、10,000 MJ/ha以上は利用間伐のみであった(図-6)。また、利用間伐時に搬出された材積当たりのエネルギー投入量は、300 MJ/m³以下が多く、面積当たりのエネルギー投入量と比べて分布範囲が狭く、100~200 MJ/m³に最頻値があった(図-8)。間伐の場合、単位面積当たりの搬出する材積が事例により大きく異なることから、エネルギー投入量は面積よりも搬出材積当たりで考えるべきである。

主伐作業では、回答があった10事業体のうち4事業体から複数の回答があり16事例が得られ、チェーンソー、グラブローダ、バックホウ、プロセッサ、ハーベスタ、集材機、ラジキャリ、林内作業車、フォワーダ、4tダンプが使用されていた。面積当たりのエネルギー投入量は、平均17,400 MJ/ha、標準偏差16,200 MJ/haであり(図-7)、材積当たりのエネルギー投入量は150 MJ/m³以下が多く、間伐と比較して分布範囲が250 MJ/m³以下であることから材積当たりのエネルギー投入量は主伐のエネルギー効率が良いと考えられる(図-8,9)。

運材作業のエネルギー投入量は、間伐、主伐とも1事例を除き2 MJ/m³/km以下であった。2 MJ/m³/kmより大きい

事例は、単位距離当たりの燃料消費率が 0.5 km/L, 0.4 km/L と低かったことから、データの確認が必要である。

通勤時のエネルギー投入量の算出にあたって、通勤車の燃費はアンケート項目では設定していなかったが、1 事業者から通勤用ディーゼル車の燃費として 5.9 km/L との回答があったことからこの値を用いた。各作業の通勤時のエネルギー投入量は、労働投入量の多い主伐が一番大きく 260 MJ/ha/km で、他の作業と比べ 2~6.5 倍大きかった。

面積当たりの平均エネルギー投入量を比較すると、主伐が約 20,000 MJ なのに対して、間伐、地植えは約 3,000 MJ と 1 桁小さく、その他の作業は 300~900 MJ と、さらに 1 桁小さかった (図-10)。

ここで、筆者らが山梨県の 4 事業者へ聞き取り調査を行った結果を用いて、地植え 1 回、植付け 1 回、下刈り 7 回、除伐 2 回、枝打ち 3 回、間伐 2 回、主伐 1 回行う木材生産の作業モデルを想定し、主伐時の収穫量を 300 m³/ha と仮定し、間伐時収穫量、運材距離、通勤距離はそれぞれアンケート結果の平均値である 50m³/ha, 31km, 16km を用いて、通勤を含めた地植えから運材作業までの木材生産におけるエネルギー投入量と CO₂ 排出量を算出した結果、79.5 GJ/ha, 5440 kg-CO₂/ha であった。

この中で、運材と通勤の合計が半分以上を占めており (図-11)、これらの影響が大きいことがわかる。また、作業別では主伐が全体の半分を占めており (図-12)、最も影響が大きいことがわかる。

v 考察

ここで、算出した木材生産作業の CO₂ 排出量の位置づけについて考察する。このために木材の比重 0.38 t/m³ (5)、炭素含有係数 0.5 (7)、農作物の炭素含有係数 0.4 (9) として、CO₂ 固定量と CO₂ 排出量の比である CO₂ 効率と、両者の差である CO₂ 収支を他の作物 (ダイズ (2)、サトウキビ (4)、トウモロコシ (8)) と比較すると、CO₂ 効率は木材生産の方が 2 倍大きい (図-13) が、CO₂ 収支ではトウモロコシ、サトウキビが多いことがわかった (図-14)。しかし、バイオエネルギーとして利用する場合、トウモロコシやサトウキビはエタノール生成の工程でさらにエネルギーが投入され CO₂ が排出されるのに対し、木質バイオマスには直接燃やせるという利点があることから、実際の利用時には、両者の差は縮まることが期待できる。

VI おわりに

本研究では、各作業のエネルギー投入量と CO₂ 排出量を算出し、エネルギー投入量、CO₂ 排出量の多い作業を明らかにするとともに、木材生産作業全体のエネルギー投入量、CO₂ 排出量を推定して、他の作物と比較した。その結果、木質バイオマスのエネルギー利用の可能性を示せた。

今後、投入量と排出量に影響を与える要因や、地域差を明らかにするためには、作業ごとのさらなる分析が必要である。なお、お忙しい中、アンケートに回答をいただいた 43 事業体に感謝を表す。

引用文献

- (1) BERG, S. and LINDHOLM, E. L. (2005) Energy use and environmental impacts of forest operations in Sweden. *J Cleaner Prod* 13 : 33-42.
- (2) 石川雅紀 (1999) 実践 LCA—ISO14040 対応 (266pp., サイエンスフォーラム, 東京)
- (3) 環境省. 事業者からの温室効果ガス排出量算定方法ガイドライン (試案 ver.1.6). オンライン.
- (4) (http://www.env.go.jp/earth/ondanka/santeiho/guide/pdf/6/mat_01.pdf). 2007/8/14.
- (5) 小林久 (2006) ブラジルにおける燃料エタノールの生産・利用の現状と評価—LCA 手法によるサトウキビからの燃料エタノールの well-to-wheel 評価. *農土誌* 74 (10) : 35~40
- (6) 森林総合研究所 (2004) 木材工業ハンドブック (1221pp., 丸善, 東京)
- (7) 森林総合研究所 (1994) 木材資源利用ライフサイクルの現状と課題. (森林総研研究会報告 12, 134pp., 森林総研, 茨城) 7~48.
- (8) 能本美穂・吉本敦・柳原和宏 (2005) 木材生産を通じた炭素の収支分析-福岡県八女地域を事例として. *日林誌* 87 (4) : 313~322.
- (9) 農業環境技術研究所 (2003) 環境影響評価のためのライフサイクルアセスメント手法の開発研究成果報告書 (97pp., 農業環境技術研究所, 茨城)
- (10) 農業環境技術研究所 (2003) 環境影響評価のためのライフサイクルアセスメント手法の開発研究成果報告書別冊 (52pp., 農業環境技術研究所, 茨城)
- (11) 東京産木材による木造住宅の LCA 調査実行委員会 (2004) 東京産木材による木造住宅の LCA 調査報告書 (42pp., 東京都農林水産振興財団, 東京)

表-1. エネルギー原単位と CO₂ 排出係数

油種	エネルギー原単位 (MJ/L)	CO ₂ 排出係数 (kg-CO ₂ /L)
ガソリン	34.6	2.32
軽油	38.2	2.62
潤滑油	40.2	2.83

* 事業者からの温室効果ガス排出量算定方法ガイドライン(試案 ver.1.6)

表-2. 調査項目

作業地概要	作業時の燃料消費量	運材時の燃料消費量	通勤時の燃料消費量
林小班名	使用機械種	搬出した丸太材積 (m ³)	通勤距離 (km)
作業面積 (ha)	機械台数 (台)	トラックの車名	通勤車の台数 (台)
作業日数 (日)	使用燃料種名	トラックの運材距離 (km)	
人工数 (人日)	使用燃料量 (L)	総運材回数 (回)	
	使用油脂名	使用燃料種	
	使用油脂量 (L)	使用燃料量 (L)	

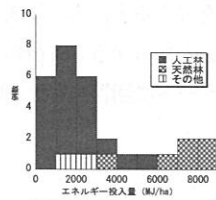


図-1. 地拵作業のエネルギー投入量

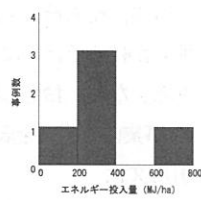


図-2. 植付作業のエネルギー投入量

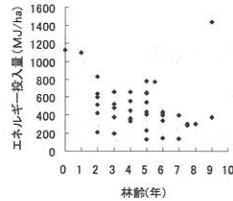


図-3. 下刈作業のエネルギー投入量と林齢との関係

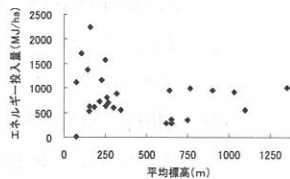


図-4. 除伐作業のエネルギー投入量と平均標高との関係

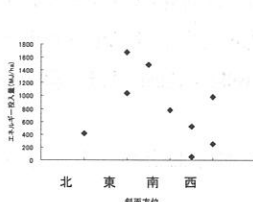


図-5. 枝打作業のエネルギー投入量と斜面方位との関係

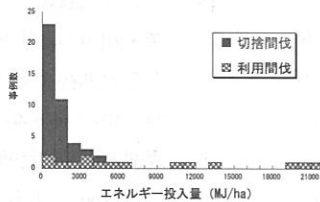


図-6. 間伐作業の間伐種別エネルギー投入量

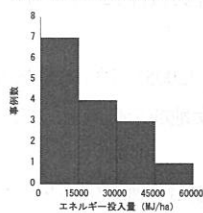


図-7. 主伐作業のエネルギー投入量

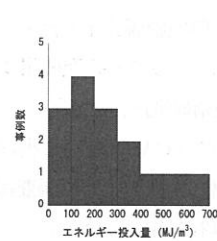


図-8. 利用間伐の出材量当たりエネルギー投入量

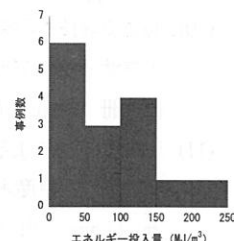


図-9. 主伐作業の出材量当たりエネルギー投入量

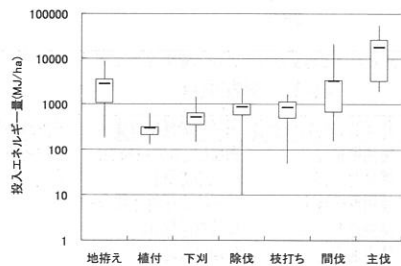


図-10. 作業別単位面積当たりエネルギー投入量

表-3. 木材生産におけるエネルギー投入量

作業	投入エネルギー量		
	作業時 MJ/ha	運搬時 MJ/km/m ²	通勤時 MJ/ha/km
地拵え	2.86E+03		1.37E+02
植付	3.07E+02		7.76E+01
下刈	5.17E+02		3.83E+01
除伐	8.53E+02		4.39E+01
枝打ち	8.41E+02		8.59E+01
間伐	3.28E+03	1.85E+00	5.00E+01
主伐	1.74E+04	2.44E+00	2.54E+02

表-4. 木材生産におけるCO₂排出量

作業	CO ₂ 排出量		
	作業時 kg-CO ₂ /ha	運搬時 kg-CO ₂ /km/m ²	通勤時 kg-CO ₂ /km/ha
地拵え	1.95E+02		9.43E+00
植付	2.08E+01		5.33E+00
下刈	3.47E+01		2.63E+00
除伐	5.78E+01		3.02E+00
枝打ち	5.66E+01		5.90E+00
間伐	2.25E+02	1.27E-01	3.44E+00
主伐	1.19E+03	1.68E-01	1.74E+01

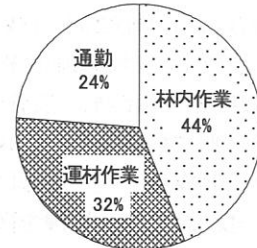


図-11. 林内作業、運材作業、通勤のCO₂排出量の比率

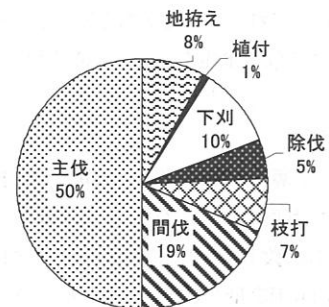


図-12. 作業別CO₂排出量比率

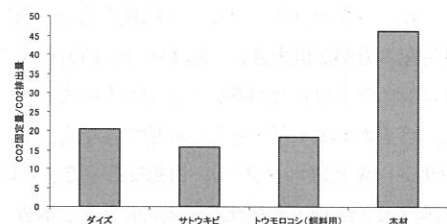


図-13. 作物別CO₂効率

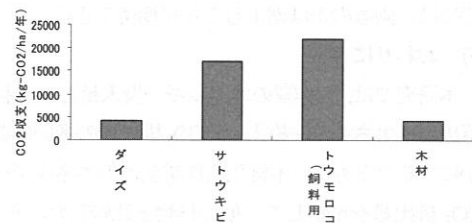


図-14. 作物別CO₂収支