

インドネシアにおける木材伐出・加工における エネルギーフロー解析

吉田貴紘・今富裕樹^{*1}・田中良明・外崎真理雄・藤間 剛・山本幸一^{*2}・中村松三^{*3}

1. はじめに

インドネシアは国土の約6割が森林と言われている。しかし天然林を中心にその減少が著しいため、既存の人工林（産業植林）の効率的な活用が求められている。2004年までに認可された産業植林面積は4,069,489 haに達しており、中でもアカシアマンギウム（*Acacia mangium*）は植栽樹種として広く採用され、主にパルプ、製材向けに利用されている。また収穫施業時に発生する残材は地域住民にとっての貴重な燃料となっている。燃料としての木質バイオマスの直接利用はインドネシアにおける一次エネルギーの35%前後を占めるとされ、着実な増加が見込まれている¹⁾。今後木質バイオマスを有効活用するためには、人工林における現状の物質・エネルギーフローを解析し、より効率的な利活用システムを設計する必要がある。本研究では早生樹人工林と木材加工工場からの物質（素材・製品）生産およびエネルギー消費に関する解析を行ったので報告する。

2. 調査方法

調査の対象は2カ所の人工林植林地と5カ所の木材加工工場である。人工林植林地は、ジャワ島ボゴール郊外にある国営企業体P社（面積5,000 ha、伐採量14,000 m³/年）と、スマトラ島中部にある民間企

業M社（面積193,500 ha、伐採量2,200,000 m³/年）の2カ所である。いずれもアカシアマンギウム（以下アカシア）を植林している。丸太用途はP社では製材用、M社では主にパルプ用で一部製材用である。木材加工工場は合板2工場、建材1工場、製材2工場、取扱樹種、規模および設備が異なる（詳細は3.2で述べる）。

伐採時の物質（素材）生産、エネルギー消費フローは、収穫施業地で作業工程の現地調査を行い、伐期ごとの素材生産量、端材等の林内放置量、林業機械の燃料消費量等から解析した。なお林内放置量は素材生産量に含めなかった。木材加工工場における物質（製品）生産、エネルギー消費フローは、工場における聞き取り調査を行い、原木取扱量、歩留まり、燃料消費、電力消費量等から解析した。計算にあたり、木材は製材、合板、建材ともに、容積密度0.5 t/m³、炭素含量50%とした。また使用燃料は軽油換算とし、軽油1L当たりの総発熱量は38.2 MJ/Lとした。なお木屑を燃料に利用した場合はエネルギー消費量として計上しなかった。電力量1 kWh当たりの軽油相当消費量はインドネシアの最近の発電量構成²⁾をもとに0.25 Lとした。

3. 結果と考察

3.1 木材伐出における素材・エネルギーフロー

(1) P植林地

Takahiro Yoshida, Yuki Imatomi, Yoshiaki Tanaka, Mario Tonosaki, Takeshi Toma, Koichi Yamamoto and Shozo Nakamura : Energy Flow Analysis on Logging and Processing of Plantation Wood in Indonesia

(独)森林総合研究所 (*¹ 現所属, 森林総合研究所四国支所, *² 現所属, 森林総合研究所東北支所, *³ 現所属, 森林総合研究所九州支所)

【施業概要】主に製材用としてアカシアを植林している。写真1に育苗施設、6年生林分、集積場を示す。育苗では土、牛糞、肥料の入ったポットが用いられ、播種3週間後にNPKが施肥される。苗木は3ヶ月間育苗場において育てられた後山出しされる。山出し時の苗高は約30cmに達する。

造林時の地拵えは人力により鎌で行われる。植付けも人力により鋤を使用して行われる。植栽本数は約1,600本/ha（2m×3mに1本植え付け）で20%程度他樹種も混植している。下刈りは人力により鎌で行われる。下刈り回数は年間に2回実施される。ローテーションは8～10年で、この間に間伐が3回実施される（基本的に植栽後3年、5年、7年目に実施）。間伐率は第1回目が50%，第2回目および第3回目は25%程度である。

伐採搬出にあたっては伐木・造材にチェーンソーが使用されているが、その他はほとんどが人力により作業がなされている。伐木・造材はチェーンソーオペレータとヘルパーの2名が一組になって作業する。搬出（伐採地点から林道端まで）は人力により

3～5名一組になって作業する。径10cm以上のものが搬出の対象となり、それ以下の材は地元住民の燃料向けとして利用される。積込も人力にて3～5名/組になって作業する。木材輸送（伐採現場から貯木場まで）はトラックが用いられ、運転手1名により実施される。トラック1回の輸送当たりの積載量は約5m³/台である。

以上の調査から伐採～運材施業の投下労働力は、延べ391.8人/haと算出された。また各工程における作業工期（作業能率）は伐木：180本/人，伐木造材：7.5m³/人，人力集積：3.75m³/人，積込：3.75m³/人，輸送：15m³/人となった。

【物質フロー】図1にP植林地における物質フローを示す。計算にあたり間伐及び主伐においては、文献³⁾の調査資料をもとに当該年度の予想される収穫木の立木材積を求め、それに間伐本数、主伐本数を乗じるとともに、利用率（間伐は0.7，主伐0.8とした）を乗ずることによりha当たりの材積を計算した。また第1回間伐は切り捨て間伐として全て林内に放置されるとみなした。



写真1 P植林地（a：育苗施設 b：6年生林分 c：集積場）

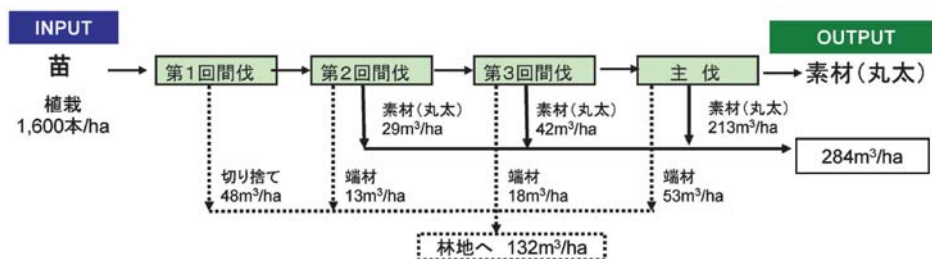


図1 P植林地における物質フロー

その結果、丸太生産は伐期全体で 284 m³/ha と求められ、うち第 2 回目間伐で 29 m³/ha、第 3 回目間伐で 42 m³/ha、主伐で 213 m³/ha となった。一方で林内放置される端材は合計 132 m³/ha で、第 1、2、3 回目間伐および主伐においてそれぞれ 48 m³/ha、13 m³/ha、18 m³/ha、53 m³/ha 発生すると推計された。なおこの他に枝条・葉なども発生するが今回の

表 1 P 植林地におけるエネルギー消費量

工程	エネルギー消費量 (MJ/ha)	工程別エネルギー消費比率 (%)	
苗木運搬	81	0.4	
1 回目間伐 伐木	1,000	5.1	
2 回目間伐	伐木造材	435	2.2
	輸送	1,490	7.6
3 回目間伐	伐木造材	614	3.1
	輸送	2,108	10.7
主伐	伐木造材	3,167	16.1
	輸送	10,819	54.9
計	19,714	100	

物質フローには含まれていない。

【エネルギーフロー】図 1 の各フローにおける消費エネルギーを表 1 にまとめる。主伐のエネルギー消費量が全体の 70% を占め、中でも輸送時の消費量が大きいことがわかる。また、単位材積当たりのエネルギー消費量は 69.1 MJ/m³ と求められ、木材の有するエネルギー (10 GJ/m³ と仮定) の 0.7% に相当した。

(2) M 植林地

【施業概要】写真 2 に植付、伐木・造材、集材、積み込みの様子を示す。植栽本数の約 95% がアカシアで占められており、ローテーションは 9 年である。育苗方法はまず砂床に種子を蒔き発芽させる。播種 1 週間後、発芽苗は土、バークを入れたポットに移される。苗木は約 3 ヶ月経過後、苗高 80 cm 程度になった時点で植林地へ出荷される。

造林は最初の地拵のみ農用トラクタで行われ、それ以降は人力により鎌で行われる。植付けも人力により鋤で行われる。植付けは 3 m 四方の面積に 1 本、20 cm × 20 cm × 20 cm の穴を鋤で掘って植え付けられる (ha 当たりの植栽本数は 1,100 本)。植付け



写真 2 M 植林地 (a: 植付 b: 伐木・造材 c: フォワーダ集材 d: 林道端での積み込み)

を行う労働者の労働負担を平準化するために植付け穴掘は交代で実施される。植栽木1本当たり87.5gの肥料が穴の底に投入される。

伐採（伐木造材及び集積）はチェーンソーオペレータ1名、補助者3名の合計4名/組で実施されている。チェーンソーオペレータが列に対して少し斜め方向に伐倒し、直ちに測尺手が一定の長さごとに印をつけた後オペレータが玉切りを行う。その後補助者により材が人力で束状に集積される。材は末口径8cm以上のものをパルプ材として収穫し、それ未満の材や梢端部は根株近くに敷かれる。これら末木枝条や小径材が敷かれた箇所がフォワーダの走行部となる。集材は8~10トンクラスのフォワーダにより行われる。フォワーダは伐採地点から集材し、林道端へ集積させる。林内ではフォワーダは林内放置材（末木枝条）上を走行する。トラックへの積込はグラップルを装備しているエクスカバータにより行われる。輸送（林道端からパルプ工場まで）はトラックやトレーラトラックで行われている。これら車両にはヘビークラス、ミドルクラス、スモールクラスの3種類があり、1車当たりの積載量はヘビークラスでは35~45m³、ミドルクラスでは25~30m³、スモールクラスでは8m³程度である。

以上より伐採～運材施業において必要とされる投下労働力は93.5人/haと推計された。中でも9年目収穫時における投下労働力が全投下労働力の約60%を占めていた。また前述のP植林地に比べ全体の投下労働力が1/3程度と少なかった。

【物質フロー】図2にM植林地における物質フローを示す。計算にあたり立木材積の80%がパルプ材として利用されるものとした。その結果ha当たり200

m³の素材（丸太）がパルプ材として生産され、放置される材は50m³と推定された。このほか枝条・葉なども発生するが今回のフローには含まれていない。

【エネルギーフロー】図2の物質フローに基づく消費エネルギーを表2にまとめる。全体では42,058MJ/haのエネルギーが消費され、輸送時のエネルギー消費割合が極めて高く全体の約8割を占めていた。これは平均輸送距離が60kmであることに起因している（P植林地では16km）。また単位収穫材積当たりに必要なエネルギー消費量は210.3MJ/m³と求められ、木材の有するエネルギーの0.5%に相当した。

3.2 木材加工工場におけるフロー

表3に調査対象の木材加工工場における生産規模、取り扱い樹種を示す。工場A, Bは合板を生産し、Cは建材、D, Eは製材品を生産している。工場A, B, Cは乾燥機を設置し、燃料に石油のほか木屑、石炭（B工場）も用いている。工場Bは自家発電設備（2,500kW）を導入し、電力は全て自給している。D, Eは小規模業者で、帯鋸以外の加工機械はない。また取り扱い樹種は各工場さまざまである。

表2 M植林地におけるエネルギー消費量

工程	エネルギー消費量 (MJ/ha)	工程別エネルギー消費比率 (%)
苗木運搬	141	0.3
伐木造材	2,785	6.6
集材	3,102	7.4
積込	1,650	3.9
輸送	34,380	81.7
計	42,058	100

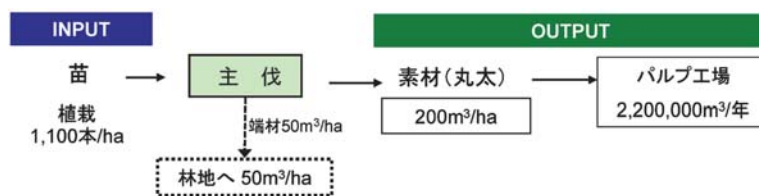


図2 M植林地における物質フロー

表 3 木材加工工場における生産規模と取り扱い樹種

工場	主な取り扱い樹種	主製品	原木処理量 (月間 m ³)	製品生産量 (月間 m ³)	歩留まり	乾燥設備	自家発電 設備
A	メランティ (<i>Shorea spp.</i>) ファルカタ (<i>Paraserianthes falcataria</i>)	合板	20,000	10,000	50%	有	無
B	メランティ (<i>Shorea spp.</i>) ファルカタ (<i>Paraserianthes falcataria</i>) アカシア (<i>Acacia mangium</i>)	合板	12,000	7,200	60%	有	有
C	メランティ (<i>Shorea spp.</i>) ファルカタ (<i>Paraserianthes falcataria</i>) メルクシマツ (<i>Pinus merkusii</i>) グメリナ (<i>Gmelina arborea</i>)	建材	9,900	4,000	40%	有	無
D	メランティ (<i>Shorea spp.</i>) ファルカタ (<i>Paraserianthes falcataria</i>) メルクシマツ (<i>Pinus merkusii</i>) グメリナ (<i>Gmelina arborea</i>)	製材	1,250	800	64%	無	無
E	アルビジア (<i>Albizia falcataria</i>)	製材	1,500	600	40%	無	無

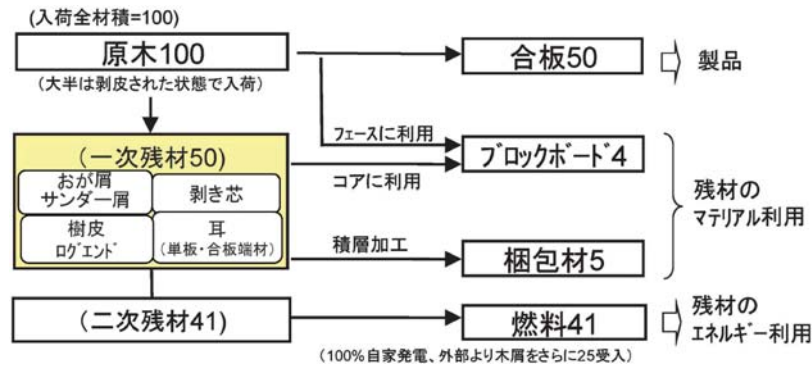


図 3 工場 B における物質フロー

図 3 に工場 B における物質フローを示す。なおここでは木材のフローを述べることで接着剤など他の投入物のフローは省略する。まず原木丸太はロータリーレースで単板にされた後、大部分は合板に加工され、一部はブロックボードの表層材として利用される。残材はおが屑、剥き芯、端材などからなるが、これらはまずブロックボードのコア材として加工される。残りは積層加工され梱包材として利用される。マテリアル利用に向かない残材(全体の 40%程度)は燃料となる。この工場では自家発電施設を

設けて熱・電力を全て自給している。ただ自給のために外部より燃料(石炭、木屑)を購入している。

図 4 に各工場における物質・エネルギー消費フローを示す。工場 A では燃料として用いた後も 3 割程度の残材が発生し、大部分は外部へ販売されているが、未利用分も存在する。工場 B では前出のように残材は全量自家発電施設で燃焼されているが、燃料不足のため外部より木屑、石炭を調達している。なお石炭(褐炭)の発熱量を 22.7MJ/kg として計算している。工場 C では約 4 割が製品となる一

方、約5割が人工乾燥用ボイラーの燃料に消費され、残り1割が残材として発生する。残材は一部外部に販売されている。ボイラーの燃料消費量が比較的多いので、ボイラー効率の改善により利用可能な残材を増やせると考えられる。工場Dは乾燥設備をもたないため残材は全て外販の対象となるが、実際

は一部廃棄処分されているという。工場Eも工場Dと同様乾燥設備を持たないため大量の残材が発生する。背板は地元住民に引き取られているが樹皮とおが屑はほとんど未利用で工場内に山積みされていた。ペレット製造やおが炭化などの有効な利活用方法が求められる。

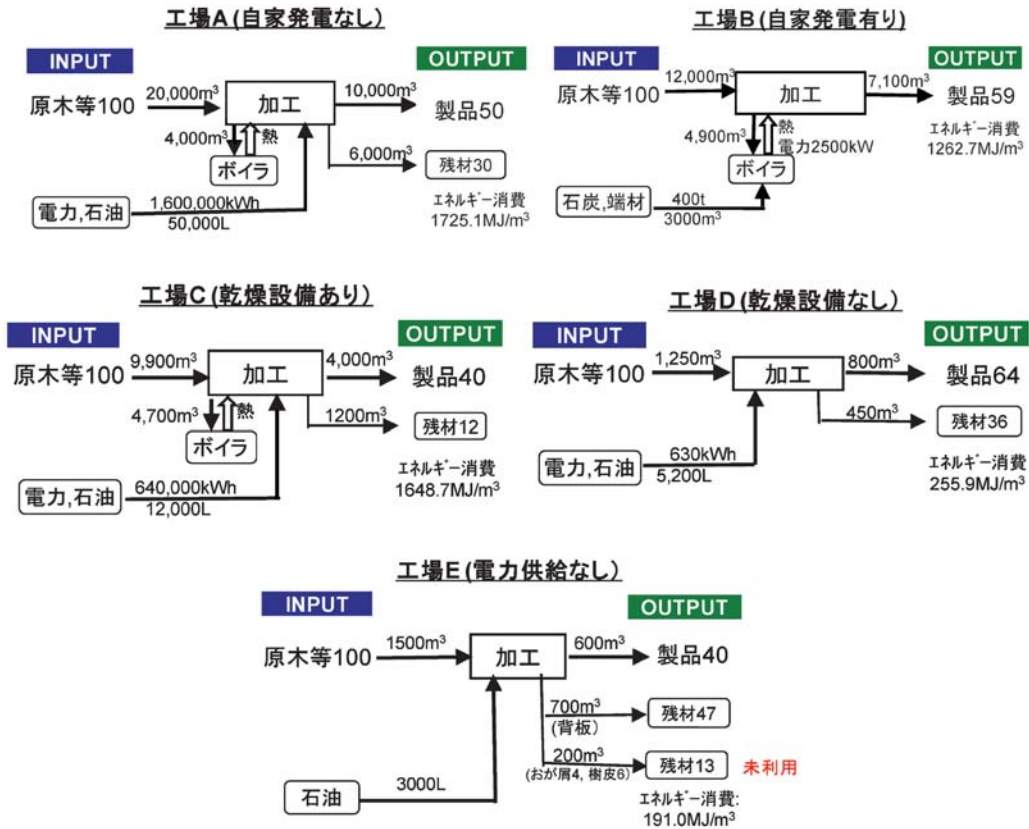


図4 木材加工工場の物質・エネルギーフロー

表4 木材加工, および伐採から加工までのエネルギー消費量 (石油, 電力消費量は月あたりの値)

工場	石油消費量 (軽油換算 kL)	電力消費量 (kWh)	加工工程のエネルギー消費量 (MJ/製品 m ³)	
			工場のみ	伐採込み
A	50	1,600,000	1725.1	1862.9-2146.7
B	238	1,200,000	1262.7	1377.6-1614.1
C	12	640,000	1648.7	1819.4-2170.5
D	5	630	255.9	363.8-585.5
E	3	0	191.0	363.8-718.4

表4に5工場に対する製品生産量およびエネルギー消費量をまとめる。加工時のエネルギー消費量は191~1,725 MJ/m³で、Aが最大でEが最小値を示し、A, B, CがD, Eに比べ1桁消費量が多いことがわかる。これはA, B, Cでは加工機械が多いことや乾燥設備を有するために、その分だけエネルギー消費量が大きくなったと考えられる。また工場Bの消費量がA, Cに比べて低いのは、外部からの電力購入がないためである。我が国において合板製造時のエネルギー消費量は1,400 MJ/m³と報告されている⁴⁾。従って本結果は0.88~1.23倍の範囲であり、著しい違いはみられないことがわかる。表4右端に伐採から製品生産に至るまでのエネルギー消費量を示す。これら値はP, M植林地における伐採搬出時のエネルギー消費量を加えることで求めた。その結果製品m³あたり364~2,147 MJと推定でき、木材の持つエネルギーの3.6~21.5%に相当した。

4. おわりに

本研究では早生樹人工林および木材加工工場からの物質(素材・製品)生産、エネルギー消費に関する解析を行った。その結果、伐採搬出に要するエネルギーは輸送工程が支配的で、今後は原木運搬に係るエネルギー消費量を精査する必要がある。木材加工におけるエネルギー消費は規模や設備によって

異なるものの、残材利用の自家発電設備の導入でエネルギー消費量を抑えられている結果が得られた。また小規模工場ほど残材の割合が高く、未利用材部が多くなる傾向がみられた。

今後は以上の解析結果をもとに、輸送工程・エネルギー変換機器の効率化、残材の新規活用方法の導入により、インドネシアにおけるより高効率な木質バイオマス利活用システムの設計を進めていく必要性を感じている。

本研究の実施にあたりご協力頂いた企業各位、および植林地調査でご協力・ご助言頂いたボゴール農科大学 Efi Yulianti Yovi 博士に深くお礼を申し上げます。

〔参考文献〕 1) Indonesia Energy Outlook and Statistics 2004, Pengkajian Energi, Universitas Indonesia (2004) 2) 日本ASEANセンターホームページ <http://www.asean.or.jp/invest/guide/indonesia/1-06.html> 3) Kiyoshi Miyakuni, Heriansyah, N.M. Heriyanto and Yoshiyuki Kiyono : Allometric Biomass Equations, Biomass Expansion Factors and Root-to-shoot Ratios of Planted Acacia mangium Willd. Forests in West Java, Indonesia, Journal of Forest Planning 10, 69-76 (2004) 4) 森林・木質資源利用先端技術推進協議会, 平成12-13年度林野庁委託事業「環境負荷低減手法確立調査」, 平成14年3月, 林野庁