木質材料に使われる接着剤のインベントリ分析*¹

澤田幸伸*^{2,3}, 安藤恵介*², 服部順昭*², 田村靖夫*⁴

Inventory Analysis of Adhesives Used for Wood Based Materials*¹

Yukinobu SAWADA*^{2,3}, Keisuke ANDO*²,
Nobuaki HATTORI*² and Yasuo TAMURA*⁴

Five popular adhesives of urea resin (UF), melamine-urea cocondensed resin (MUF), phenol resin (PF), phenol-resorcinol resin (PRF), and aqueous polymer isocyanate (API) for wood based materials were analyzed by the inventory analysis. It was calculated that energy consumption and emissions of CO₂, NO_x and SO_x for production of 1 kg resin using unit processes from oil drilling for material's production to resin production. It became clear that MUF and PRF consumed the largest amount of energy and exhausted maximum amount of SO_x among five adhesives. On the other hand, UF consumed the least energy and exhausted minimum SO_x which are equivalent to the range of 57 and 67 percents of those of MUF and PRF, respectively. PF and API were recognized to be medium ones among five adhesives analyzed. CO₂ and NO_x emissions of API were remarkably large in such a condition that these amounts were more than six times as long as other resins.

It was highly recommended that environmental loads of an adhesive should be judged by not the weight unit but the functional unit in case of life cycle assessment of wood based materials.

Keywords: inventory analysis, formaldehyde resin, phenol resin, resorcinol resin, aqueous polymer isocyanate.

木質材料に使われる主な接着剤 5 種類〔ユリア樹脂接着剤 (UF), メラミン・ユリア共縮合樹脂接着剤 (MUF), フェノール樹脂接着剤 (PF), レゾルシノール樹脂接着剤 (PRF), 水性高分子イソシアネート系接着剤 (API)〕のインベントリ分析を行った。接着剤 1 kg の製造に必要な資源の調達から原料の製造と輸送, 接着剤製造までのエネルギー消費量, CO₂ 排出量, NO_x 排出量, SO_x 排出量を算出した。その結果, MUF と PRF は共にエネルギー消費量と SO_x 排出量が最も多く, UF のそれらは両者の 57~67% と最も少なくなることが分かった。API と PF は両者の中間的な値となった。API の CO₂ と NO_x の排出量は, 最も少ない UF の 6 倍以上と, 顕著に多かった。

今回得られた重量単位による接着剤の環境負荷量は, これによって接着剤の環境負荷に対する優劣を判断するのではなく, 木質材料の機能単位を揃えた上での判断に供するためのものである。

*¹ Received July 30, 2005 ; Accepted December 26, 2005. 本論文の一部は第53回日本木材学会大会 (2003年 3 月, 福岡) で発表した。

*² 東京農工大学大学院農学教育部 Graduate School of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology, Fuchu 183-8509

*³ Present address : 大建工業(株)開発研究所 Research and Development Center, Daiken Corp., Okayama 702-8045

*⁴ 前秋田県立大学 Former Akita Prefectural University, Noshiro 016-0876

1. 緒 言

製品の環境負荷量を評価する方法としてライフサイクルアセスメント（以下、LCA という）が注目されるようになり、様々な製品や原材料の環境負荷量を求めるインベントリが実施されてきた。ところが、金属やプラスチックなどに比べて、環境に優しいと言われている木質材料や木質製品に関するインベントリはほとんど行われておらず、定量的な評価が望まれている¹⁻³⁾。

木質材料の LCA を行うには、その原材料調達から製造、廃棄に至る全ての工程を調べなければならない。しかし、海上輸送で消費される重油、製造装置を稼働するための電力、乾燥に使われる燃料（木材チップや重油）などの排出原単位は公表されているものの、木材や接着剤の排出原単位は整備されていない。それ故、接着剤の原単位には代替樹脂のそれを用いざるを得ないことになり、木質材料の環境負荷評価が十分に行えない状況にある。

そこで、木質材料に広く使われているホルムアルデヒド系接着剤 4 種類〔ユリア樹脂接着剤（UF）、メラミン・ユリア共縮合樹脂接着剤（MUF）、フェノール樹脂接着剤（PF）、レゾルシノール樹脂接着剤（PRF）〕と、ホルムアルデヒド問題とその規制から近年生産量が増加している水性高分子イソシアネート系接着剤（API）を対象として、接着剤 1 kg の製造に必要な資源の調達から原料の製造と輸送、接着剤製造までのインプットとアウトプットを調べ、接着剤の環境負荷量を算出した。接着剤の呼称については以後上記の略称を用いることにする。

2. 調 査

インベントリ分析の対象とした接着剤は、4 種類のホルムアルデヒド系接着剤（UF、MUF、PF、PRF）と API である。用いた接着剤の原料とその配合量は、原則として接着剤メーカーで 1975 年から 1995 年まで採用されていた処方箋に従ったが、文献⁴⁻⁶⁾ による値も一部で参照した。接着剤反応時の電力と熱の使用量は、接着剤メーカーへの聞き取り調査により、代表値を算出して用いた。

接着剤は木質材料にとっては原料の一つであり、その用途によって用いられる接着剤の種類や濃度、増量剤の量といった配合、さらには塗布量が異なるため、ここでは、固形分ではなく水溶液ベースの接着剤 1 kg のメーカーにおける製造までを調査範囲とした。なお、固形分の割合と原料並びに消費エネルギーを分けて示したので、接着剤製造を木質材料製造現場で行う場合にもこれらのデータが活用できるよう配慮した。環境負荷項目は、すべての原材料について統一する必要があることから、エネルギー消費量、CO₂ 排出量、NO_x 排出量、SO_x 排出量の 4 種類とした。

対象とした 5 種類の接着剤の原料および電力の排出原単位を Table 1 にまとめた。ホルムアルデヒドや炭酸ナトリウム、アンモニア、水酸化ナトリウム、ポリビニルアルコール（以下、PVA という）、パラホルムアルデヒドは水溶液で用いられているが、その濃度は様々であったので、水溶液で表示されている原単位を固形分に換算し、ここでの原単位とした。スチレンブタジエンラバー（以下、SBR という）についても、ラテックスではなく固形分の原単位とし

Table 1. Energy consumption and emission per unit used in this paper.

Material	Unit	Energy consumption (MJ)	CO ₂ emission (kg-CO ₂)	NO _x emission (g-NO _x)	SO _x emission (g-SO _x)
Electricity ⁷⁾	kWh	7.64E+00	4.32E-01	2.72E-01	3.70E-01
LPG ⁷⁾	kg	4.64E+01	3.34E+00	1.90E-03	3.00E-03
Urea ⁸⁾	kg	2.45E+01	2.75E-01	4.96E-01	5.80E-01
Melamine ⁸⁾	kg	5.13E+01	7.85E-01	1.44E+00	1.20E+00
Phenol ⁷⁾	kg	5.27E+01	9.61E-01	1.80E+00	1.40E+00
Resorcinol ⁹⁾	kg	8.75E+01	2.77E+00	5.69E+00	2.68E+00
Formaldehyde ⁷⁾	kg	3.34E+01	-3.38E-02	-3.92E-01	1.85E+00
Paraformaldehyde ⁹⁾	kg	5.37E+01	2.30E+00	4.66E+00	3.19E+00
Methanol ⁷⁾	kg	3.26E+01	2.11E-01	2.61E-01	1.80E+00
Sodium hydroxide ⁷⁾	kg	4.59E+00	5.73E-01	4.83E-01	1.00E+00
Ammonia ⁷⁾	kg	3.82E+01	1.45E-01	1.90E-01	8.12E-01
Polyvinylalcohol ⁹⁾	kg	6.67E-01	3.30E+00	3.29E+00	1.04E+00
MDI ⁷⁾	kg	5.82E+01	1.40E+00	1.90E+00	2.10E+00
SBR ⁷⁾	kg	9.28E+01	3.31E+00	6.56E+00	2.90E+00

た。レゾルシノール、パラホルムアルデヒド、PVAの原単位は産業技術総合研究所 LCA 研究センターの資料を用いた。電力の排出原単位は、電力会社により発電事情が異なることと接着剤の生産地域が限定できないことから、受電端における 1 kW 使用時の日本平均排出原単位を用いた。

ホルムアルデヒドと水酸化ナトリウムについては、製造時に蒸気や水素ガスが副産物として発生し、それらは別の製品の製造に使用されることから、その分の負荷量を控除した原単位となっている。例えば、Table 1 で、ホルムアルデヒド製造における CO₂

や NO_x の排出量が負になっているのは、このためである。なお、控除分がどの程度になるかを知るために、副産物の配分を考慮しない原単位も求めた。

3. 結果と考察

3.1 接着剤のインベントリ

接着剤を水溶液ベースで 1 kg 製造するまでに消費したエネルギー量と環境負荷量並びに項目毎の総和に占める百分率を、原料別投入量と共に、Table 2-6 に示した。表中の環境負荷量は、原料の投入量に Table 1 の原単位を乗じて算出した値である。ギ

Table 2. Inventory analysis to produce 1kg of urea resin (UF).

		Quantity	Unit	Energy consumption: (MJ) (%)		CO ₂ emission (kg-CO ₂) (%)		NO _x emission (g-NO _x) (%)		SO _x emission (g-SO _x) (%)	
Material	Urea	2.67E-01	kg	6.55E+00	39	7.35E-02	43	1.33E-01	101	1.55E-01	23
	Formaldehyde ^{a)}	6.89E-01	kg	8.52E+00	50	-8.62E-03	-5	-9.99E-02	-76	4.72E-01	69
	Melamine	2.62E-02	kg	1.35E+00	8	2.06E-02	12	3.77E-02	29	3.15E-02	5
	Sodium hydroxide ^{b)}	3.93E-03	kg	5.96E-03	0	7.43E-04	0	6.27E-04	0	1.30E-03	0
	Ammonia ^{c)}	3.77E-03	kg	3.60E-02	0	1.37E-04	0	1.79E-04	0	7.66E-04	0
	Polyvinylalcohol	1.57E-02	kg	1.05E-02	0	5.19E-02	30	5.18E-02	40	1.63E-02	2
	Formic acid ^{d)}	2.10E-03	kg	-	-	-	-	-	-	-	-
Energy	Electricity	2.86E-02	kWh	2.18E-01	1	1.23E-02	7	7.78E-03	6	1.06E-02	2
	LPG	6.00E-03	kg	2.78E-01	2	2.00E-02	12	1.14E-05	0	1.80E-05	0
Sum		(Solid content 50.5%)		1.70E+01	100	1.71E-01	100	1.31E-01	100	6.87E-01	100

a) 37% aqueous solution

b) 33% aqueous solution

c) 25% aqueous solution

d) 11.7% aqueous solution

Table 3. Inventory analysis to produce 1kg of melamine-urea cocondensed resin (MUF).

		Quantity	Unit	Energy consumption: (MJ) (%)		CO ₂ emission (kg-CO ₂) (%)		NO _x emission (g-NO _x) (%)		SO _x emission (g-SO _x) (%)	
Material	Melamine	2.06E-01	kg	1.06E+01	40	1.62E-01	48	2.96E-01	60	2.47E-01	24
	Urea	1.01E-01	kg	2.48E+00	10	2.79E-02	8	5.03E-02	10	5.88E-02	6
	Formaldehyde ^{a)}	5.10E-01	kg	6.31E+00	24	-6.38E-03	-2	-7.40E-02	-15	3.49E-01	34
	Paraformaldehyde ^{e)}	4.82E-02	kg	2.07E+00	8	8.86E-02	27	1.80E-01	36	1.23E-01	12
	Methanol	1.28E-01	kg	4.17E+00	16	2.70E-02	8	3.34E-02	7	2.30E-01	23
	Sodium hydroxide ^{f)}	1.86E-04	kg	8.54E-07	0	1.07E-07	0	8.99E-08	0	1.86E-07	0
	Ammonia ^{g)}	1.32E-03	kg	1.41E-02	0	5.33E-05	0	7.00E-05	0	2.99E-04	0
	Formic acid ^{h)}	1.08E-03	kg	-	-	-	-	-	-	-	-
	Sodium carbonate ⁱ⁾	3.31E-03	kg	-	-	-	-	-	-	-	-
	Polyvinylalcohol	7.44E-04	kg	4.97E-04	0	2.46E-03	1	2.45E-03	0	7.72E-04	0
Energy	Electricity	2.86E-02	kWh	2.18E-01	1	1.23E-02	4	7.78E-03	2	1.06E-02	1
	LPG	6.00E-03	kg	2.78E-01	1	2.00E-02	6	1.14E-05	0	1.80E-05	0
Sum		(Solid content 55.8%)		2.61E+01	100	3.34E-01	100	4.96E-01	100	1.02E+00	100

a) 37% aqueous solution

e) 80% aqueous solution

f) 0.1% aqueous solution

g) 28% aqueous solution

h) 0.12% aqueous solution

i) 0.19% aqueous solution

Table 4. Inventory analysis to produce 1kg of phenol resin (PF).

		Quantity	Unit	Energy consumption: (MJ) (%)		CO ₂ emission (kg - CO ₂) (%)		NOx emission (g - NOx) (%)		SOx emission (g - SOx) (%)	
Material	Phenol	2.99E-01	kg	1.57E+01	70	2.87E-01	81	5.38E-01	105	4.18E-01	50
	Formaldehyde ^{a)}	4.75E-01	kg	5.88E+00	26	-5.94E-03	-2	-6.89E-02	-13	3.25E-01	39
	Sodium hydroxide ^{b)}	2.26E-01	kg	3.42E-01	2	4.27E-02	12	3.60E-02	7	7.46E-02	9
Energy	Electricity	2.86E-02	kWh	2.18E-01	1	1.23E-02	3	7.78E-03	2	1.06E-02	1
	LPG	6.00E-03	kg	2.78E-01	1	2.00E-02	6	1.14E-05	0	1.80E-05	0
Sum		(Solid content 48.1%)		2.25E+01	100	3.56E-01	100	5.13E-01	100	8.28E-01	100

a) 37% aqueous solution

b) 33% aqueous solution

Table 5. Inventory analysis to produce 1 kg of phenol-resorcinol resin (PRF).

		Quantity	Unit	Energy consumption: (MJ) (%)		CO ₂ emission (kg - CO ₂) (%)		NOx emission (g - NOx) (%)		SOx emission (g - SOx) (%)	
Material	Phenol	9.50 E-02	kg	5.01 E+00	17	9.13 E-02	14	1.71 E-01	14	1.33 E-01	13
	Resorcinol	1.90E-01	kg	1.66E+01	57	5.26E-01	78	1.08E+00	86	5.09E-01	48
	Formaldehyde ^{j)}	2.62E-01	kg	3.52E+00	12	-3.56E-03	-1	-4.13E-02	-3	1.95E-01	18
	Methanol	1.14E-01	kg	3.71E+00	13	2.40E-02	4	2.97E-02	2	2.05E-01	19
	Sodium hydroxide ^{b)}	2.47E-02	kg	3.74E-02	0	4.67E-03	1	3.94E-03	0	8.15E-03	1
	Furfuryl alcohol	1.04E-02	kg	—	—	—	—	—	—	—	—
Energy	Electricity	2.86E-02	kWh	2.18E-01	1	1.23E-02	2	7.78E-03	1	1.06E-02	1
	LPG	6.00E-03	kg	2.78E-01	1	2.00E-02	3	1.14E-05	0	1.80E-05	0
Sum		(Solid content 54.0%)		2.94E+01	100	6.75E-01	100	1.25E+00	100	1.06E+00	100

j) 40.2% aqueous solution

b) 33% aqueous solution

Table 6. Inventory analysis to product 1 kg of aqueous polymer isocyanate (API).

		Quantity	Unit	Energy consumption: (MJ) (%)		CO ₂ emission (kg - CO ₂) (%)		NOx emission (g - NOx) (%)		SOx emission (g - SOx) (%)	
Material	Polyvinylalcohol ^{b)}	5.75E-01	kg	3.84E-02	0	1.90E-01	20	1.89E-01	12	5.96E-02	7
	SBR	1.72E-01	kg	1.60E+01	70	5.71E-01	60	1.13E+00	74	5.00E-01	63
	Calcium carbonate	1.44E-01	kg	—	—	—	—	—	—	—	—
	MDI	1.09E-01	kg	6.35E+00	28	1.53E-01	16	2.07E-01	14	2.29E-01	29
Energy	Electricity	2.86E-02	kWh	2.18E-01	1	1.23E-02	1	7.78E-03	1	1.06E-02	1
	LPG	6.00E-03	kg	2.78E-01	1	2.00E-02	2	1.14E-05	0	1.80E-05	0
Sum		(Solid content 50.0%)		2.29E+01	100	9.46 E-01	100	1.54E+00	100	7.99E-01	100

k) 10% aqueous solution

酸, 炭酸ナトリウム, 炭酸カルシウム, フルフルアルコールについては, その排出原単位が得られなかったもので, その分の環境負荷量を過小評価していることになる。

ホルムアルデヒド系接着剤の環境負荷量は, 何れも投入量の多い主原料と排出原単位の大きい原料による負荷量が大きく影響していることが分かる。すなわち, UF や MUF, PF では尿素やホルムアルデヒド, メラミン, フェノールといった主原料と PVA やバラホルムアルデヒドといった排出原単位の大きい原料による負荷量が大きいことが分かっ

た。一方, API では, SBR による負荷量がおおよそ 7 割近くとなった。

主原料製造までに要するエネルギー消費量や環境負荷量は, データベースを遡って調べたところ, それらの原料を製造する際に用いられる主原料に大きく影響されること, その主原料のエネルギー消費量や環境負荷量は最終的には原油の採掘と精製であることが分かった。主原料以外に投入される原料は, pH の調整剤, 付加・縮合反応を促進する硬化剤, 接着剤の保存性, 仮接着性の向上など接着剤の性能を高める添加剤である。これらの負荷量は主原料に

比べ相対的に小さいが、メラミンやPVAは排出原単位が大きく、接着剤全体の環境負荷量にある程度影響することになる。

3.2 接着剤の比較

Fig. 1 にエネルギー消費量と環境負荷量を接着剤別に比較した。これより、エネルギー消費量については、PRF と MUF が最も大きく、次に PF と API が続き、UF が、PRF の約 6 割程度と、最も小さかった。CO₂ 排出量については、API の負荷量が他の接着剤に比べて著しく多く、以下、PRF, PF, MUF, UF の順で小さくなった。NO_x 排出量については、CO₂ 排出量と同様の傾向となった。SO_x 排出量は、PRF と MUF が大きく、PF, API, UF の順に小さくなった。この傾向は、エネルギー消費量と似ているが、接着剤間の差はエネルギー消費量のそれと比べて小さかった。

副産物製造に伴う環境負荷量を主産物、すなわち接着剤原料に負担すると、エネルギー消費量や環境負荷量は Fig. 2 のようになった。これより、ホルム

アルデヒドと水酸化ナトリウムを原料として用いる接着剤の負荷量が若干大きくなることが分かる。しかしながら、Fig. 1 における接着剤間の負荷量が入れ替わるほど大きな差は出なかったことから、接着剤製造の原単位としては、どちらを採用しても影響は少ないと考える。ここでは、用途は不明であるが、副産物の環境負荷量をそれを用いる製品に負担させる Fig. 1, すなわち Table 2-6 の結果を原単位として用いることを推奨する。

3.3 感度分析

MUF と PRF については、それぞれ M/U 比, P/R 比の異なる製品が使い分けられている。実際に用いられている比の範囲で変化させて感度分析を行った結果、Figs. 3, 4 のようになった。M/U 比や P/R 比を変えると、エネルギー消費量や環境負荷量は変わるが、他の接着剤との間で消費量が逆転するほど大きな変化は見られなかった。よって、環境負荷量で見た接着剤の位置付けは基本的には接着剤の種類によって決まることが分かった。

4. 結 論

木質材料に用いられている 5 種類の接着剤の原料採取から製造までの環境負荷量を算出した。その結果、エネルギー消費量と SO_x 排出量は MUF と PRF が同程度で最も多く、次に API と PF が続き、UF の排出量は MUF や PRF の 57~66% と最も少なかった。CO₂ と NO_x の排出量は、API が、最も少ない

Fig. 1. Energy consumption and emissions for all resins.

Fig. 2. Energy consumption and emissions for all resins when eliminating by-products.

Fig. 3. Sensitivity analyses of energy consumption and CO₂ emission for different M/U ratios of MUF.

Fig. 4. Sensitivity analyses of energy consumption and CO₂ emission for different P/R ratios of PRF.

UF の 6 倍以上と、著しく大きく、ホルムアルデヒド対策に使われ始めた接着剤は環境負荷量の点から問題のあることが分かった。

インベントリ分析より、接着剤の環境負荷量は主原料と排出原単位の大きい原料に起因することが分かった。さらに、MUF と PRF における M/U 比や P/R 比を実用範囲で変えると、環境負荷量は、接着剤の順位が逆転するほど大きく変動することはないものの、1～2 割程度と無視できないほど変化することが感度分析より分かったので、環境負荷量を低減するには、主原料の配合比にも配慮する必要のあることが分かった。

今回得られた接着剤の環境負荷量は単位重量当たりのものであり、この結果により接着剤の環境負荷に対する優劣を比較することはできない。すなわち、接着剤は中間製品であることから、機能単位を揃えた木質材料について、増量剤や硬化剤などの添加物の評価も加えて、環境負荷量を比較すべきであり、ここでは、そのための汎用性を持たせた木質材料用

接着剤の原単位を求めたものである。

文 献

- 1) 沖 慶雄：木材工業 **53**(1), 7-13 (1998).
- 2) 沖 慶雄：日本接着学会誌 **32**(11), 432-436 (1996).
- 3) 富田文一郎：木材研究・資料 No. 35, 1-9 (1999).
- 4) 田村靖夫, 宮崎泰顕：木材工業 **25**(4), 155-159 (1970).
- 5) 田村靖夫, 宮崎泰顕：木材工業 **25**(4), 215-219 (1970).
- 6) “接着ハンドブック”, 日本接着学会編, 日刊工業新聞社, 東京, 1996, pp. 355-373, 396-415.
- 7) (社)産業環境管理協会調査企画部：“JEMAI-LCA Ver. 1.1.6”, 東京, 2003.
- 8) “内外化学品資料2001年版”, CMC 出版編, シーエムシー, 東京, 2002.
- 9) (独)産業技術総合研究所 LCA 研究センター資料.