非木材パルプ及び古紙パルプを配合した上質紙の ライフサイクルインベントリー分析*

東海大学 工学研究科 中澤 克仁, 片山 恵一
三菱製紙株式会社 総合研究所 桂 徹
東京大学 生産技術研究所 坂村 博康, 安井 至

Life Cycle Inventory of Woodfree Paper Containing Nonwood Pulp or Deinked Pulp

Katsuhito Nakazawa and Keiichi Katayama
Graduate School of Engineering,
Tokai University

Toru Katsura
Mitsubishi Paper Mills, Ltd. Research Center

Hiroyasu Sakamura and Itaru Yasui
Institute of Industrial Science,
University of Tokyo

中澤克仁

片山恵一

桂 徹

坂村博康

安井 至

Life cycle environmental loads for woodfree paper containing nonwood pulp or deinked pulp were investigated (Environmental loads : CO₂, SO_x, NO_x, and incineration ash). In this study, inventory data concerning wood pulp and deinked pulp were collected at Mitsubishi paper mill in Hachinohe. With regard to the inventory for nonwood pulp, data for bagasse pulp produced in Colombia and data for kenaf pulp produced in Japan were used. Environmental loads for woodfree paper made from the mixture of wood pulp and nonwood pulp or deinked pulp was compared with those for woodfree paper made from 100% wood pulp.

CO₂ emission for life cycle of woodfree paper containing bagasse pulp (except CO₂ emission from the pith burning) was as large as that of woodfree paper made from 100% wood pulp, because the pith contained in bagasse may be regarded as the agricultural by-product. Since kenaf pulp was produced at

*本報告の一部は第 67 回紙パルプ研究発表会で発表した。

the small pulping plant that has no energy recovery system from black liquor, CO₂ emission for wood-free paper containing kenaf pulp was larger than that of other kinds of woodfree paper. In case of deinked pulp, the increase in content of deinked pulp in woodfree paper increased the consumption of fossil fuel, resulted in the increase of CO₂ emission from fossil fuel. SO_x emission for woodfree paper containing deinked pulp was smaller than that of other kinds of woodfree paper. There were observed little differences in NO_x emission for these four kinds of woodfree paper. Incineration ash emission for wood-free paper was almost caused by coal used in the process of the woodfree paper production and by waste paper burning in the incineration process.

For more detailed study, it is desirable to analyze a life cycle inventory by taking the land use for wood afforestation or non-wood cultivation and the value of agricultural by-products into account.

Keywords : Life cycle inventory, Woodfree paper, Bagasse pulp, Kenaf pulp, Deinked pulp

分類 : X₂ 紙パルプ産業環境一般, G₁ 古紙一般, H₁ 非木材パルプの製造一般

1. 緒 言

これまで消費者の製品購入における選択肢として、その製品の機能、形体や価格などが重視されてきた。これらに加え、近年では地球環境を配慮した製品や省エネルギーを考慮した製品も購入時の選択肢の一つとして取り入れられるようになってきた。このように、徐々に社会や市民の環境への意識が広がる傾向を示しているなかで、製造者側が環境負荷の低い製品を開発し、その評価を公表した上で販売することも同時に重要となってきた。その中でも紙製品については、記録媒体や容器・包装材等で企業や家庭での使用頻度が高く、多種にわたり利用されていることから、今後さらに製品として環境負荷を意識したものが求められてくると思われる。特に、紙の大部分は木材を主原料としており、紙の使用量増加が森林破壊や木材資源枯渇の直接的な原因となっているというイメージがある。それに対応して、古紙配合率の高い再生紙や木材パルプ代替としての非木材パルプを配合した紙の使用が森林資源の保全に役立ち、地球温暖化の抑制に貢献しているというイメージが広がっている。また、紙製品は再生可能資源である木材を使用していることから、資源消費の観点から比較した場合、飲料容器のような用途では石油原料製品よりも環境負荷が低いと評価する考え方もある¹⁾。しかし、このような紙製品の環境負荷を定量的に分析した研究は、現段階ではあまり行われていない^{2)~4)}。

そこで、古紙パルプ (DIP) や非木材パルプであるバガスパルプおよびケナフパルプを配合した紙製品のライフサイクルにわたる環境負荷を定量的かつ総合的に評価するために、ライフサイクルアセスメント (LCA) 手法を用いて^{5)~7)}、木材・非木材の植林・伐

採からチップ化、パルプ製造、紙製造、廃棄・リサイクルまでの上質紙の全工程における環境負荷の調査を行った。

これまでに、三菱製紙(株)八戸工場をモデルとして⁸⁾、木材パルプに対して古紙パルプ配合率を変化させた上質紙のライフサイクルインベントリー (LCI) 分析を行い、古紙配合率を高くすることは、化石燃料起源の CO₂ を増加させるという結果を得ている⁹⁾¹⁰⁾。本研究では、非木材パルプとして南米・コロンビア産バガスパルプおよび北関東栽培ケナフパルプを配合した上質紙の LCI 分析を行い、前報告で得られた古紙パルプを配合した上質紙の LCI 分析結果と合わせて、木材パルプ 100% で作られた上質紙との環境負荷の比較を試みた。

2. 範囲と前提条件

2.1 機能単位

研究対象とした紙製品は上質紙 (坪量 64 g/m²) とした。上質紙を構成するパルプの配合比率は、木材パルプ 75% と古紙パルプ (DIP)、あるいは非木材パルプ (バガスパルプ、ケナフパルプ) をそれぞれ 25% 配合したものを基準とした。機能単位は上質紙 1,000 kg (絶乾重量) とした。

2.2 システム境界

本報の対象範囲 (システム境界) は、植林・栽培 (Stage 0) からチップ・脱ビス化 (Stage 1-1~1-3)、パルプ製造 (Stage 2-1~2-4)、紙製造 (Stage 3)、流通・使用 (Stage 4)、廃棄 (Stage 5)、古紙回収 (Stage 6) までとした (図 1)。前報告における対象範囲の他に、非木材植物の栽培 (Stage 0)、収穫・加工 (Stage 1-2, 1-3)、パルプ製造 (Stage 2-2, 2-3) の工程を追加導入した。

Fig. 1 Life cycle flow of woodfree paper containing each pulp

バグスパルプのインベントリーは、南米・コロンビアで栽培したサトウキビの絞り滓（バガス）を脱ビス化後ソーダ蒸解し、船で三菱製紙(株)八戸工場に運び、上質紙に配合するという現行のシナリオをもとに分析を行った。

ケナフパルプのインベントリーについても、北関東で栽培したケナフを(株)東邦特殊パルプ小山工場でパルプ化後、黒液とパルプを三菱製紙(株)八戸工場に運び、パルプは上質紙に配合するというシナリオをもとに分析を行った。なお、このケナフパルプのシナリオは、国内における人為的な栽培かつ小規模工場での非木材パルプ生産を行う一試行例とする見方が適当であると考えられる。

2.3 シナリオ設定

各ステージにおけるシナリオ設定の詳細を以下に述べる。

Stage 0: 植林・栽培

植林・栽培ステージでは、国内および海外（オーストラリア・タスマニア州）での植林とバガス（コロンビア）やケナフ（国内）の栽培を対象とし、植林・栽培に使用される重機に係わる環境負荷と肥料の散布を算出した。また、植林・栽培の成長過程ではCO₂が固定されることも考慮して、「環境活動評価プログラム案について（環境庁）」を参考にしてCO₂固定分を換算した¹¹⁾。DIPについても同様に、配合しているパルプに相当するCO₂固定分を算出した。

また、経済価値が類似した複数の製品を生産する場合には、一般的に製品の質量を基準に負荷の配分が行われている。しかし農産廃棄物であるバガスの場合は、バガスの経済価値が砂糖の約1/10と大きく異なっていることから、バガスの植林・栽培ステージにおける

環境負荷に対しては経済価値を基準に配分する方が適当と考え、バガスと砂糖の環境負荷配分を1対9とした¹²⁾。

Stage 1: チップ化・脱ビス化

Stage 1-1: 木材チップ化

木材チップ化ステージでは、国内および海外（オーストラリア・タスマニア州）での木材伐採とチップ化作業を対象とした。伐採作業、チップ工場への輸送（10 tトラックに9 t積載して100 km運搬）、チップ化作業に係わる環境負荷を算出した。オーストラリアでの電力消費については、100%水力発電供給によるものとした¹³⁾。

Stage 1-2: バガス脱ビス化

バガス脱ビスステージでは、コロンビアでのバガスの脱ビス作業を対象とした。ビスとは、サトウキビの茎に含まれる柔細胞で、パルプや紙の生産あるいは紙の特性の面で好まれず、パルプ化に使用される薬品を節約するためにも脱ビスが行われる¹⁴⁾。収穫されたバガスのパルプ工場へ輸送（10 tトラックに6 t積載して40 km運搬）、脱ビス化作業（脱ビス率31.6%）に係わる環境負荷を算出した。また、分別回収されたビスについては、熱回収（電力）を伴う焼却処理が行われていることから、熱回収プロセスもインベントリー対象範囲とした。コロンビアの電力構成は、65.4%水力発電、34.6%火力発電（石炭）とした¹³⁾。

Stage 1-3: ケナフチップ化

ケナフチップ化ステージでは、北関東でのケナフのチップ化作業を対象とした。収穫されたケナフのチップ化工場への輸送（10 tトラックに3 t積載して100 km運搬）、チップ化作業に係わる環境負荷も算出した。

Stage 2: パルプ製造

Stage 2-1: 木材パルプ製造

木材パルプ製造ステージでは、国内およびオーストラリアでチップ化された木材からのパルプ製造を対象とした。国内チップのトラック輸送（10tトラックに7t積載して100km運搬）、オーストラリアチップの船輸送（40,000t船に38,000t積載して6,960km運搬）、パルプ製造（パルプ化率52%）に係わる環境負荷を算出した。パルプ製造工程では重油の他に、回収ボイラーで黒液燃焼から発生する蒸気と電力もエネルギー源としている。廃水処理後に排出される汚泥については、焼却処理が行われていることから、この部分もインベントリー対象範囲とした。

Stage 2-2: バガスパルプ製造

バガスパルプ製造ステージでは、コロンビアで脱皮されたバガスのパルプ製造を対象とした。コロンビアでのバガスパルプの製造（パルプ化率47.2%）、パルプ（10%水分のドライシート）のコロンビアから国内への船輸送（45,000t船に42,750t積載して15,040km運搬）に係わる環境負荷を算出した。バガスパルプ製造工程においても、重油と購入電力の他に、回収ボイラーでの黒液燃焼から発生する蒸気と電力もエネルギー源としている。パルプ製造工程で排出される石灰泥についてもインベントリー対象範囲とした。

Stage 2-3: ケナフパルプ製造

ここでは、チップ化されたケナフからのパルプ製造を対象とした。チップ化されたケナフのパルプ工場への輸送（10tトラックに5t積載して70km運搬）、パルプ製造（パルプ化率40.0%）、ケナフパルプ（10%水分のドライシート）および黒液の八戸工場への輸送（10tトラックに9t積載して600km運搬）に係わる環境負荷を算出した。ケナフパルプ工場は小規模であるため、パルプ製造工程で黒液をエネルギー源として賄うことができず、LPGと購入電力を製造エネルギーとして使用している。ケナフ黒液は35%濃度で八戸工場へ輸送され、製紙工程で濃縮されてエネルギー源として使用している。ケナフパルプ製造工程で排出されるリジェクトについては、近郊農地へ輸送された後、堆肥化されている。この輸送に係わる環境負荷はインベントリー対象範囲としたが、堆肥化に係わる環境負荷は除外した。

Stage 2-4: DIP 製造

ここでは、回収された古紙からDIP（古紙パルプ）の製造を対象とした。回収された古紙の八戸工場への貨車輸送（600km運搬）、DIP製造（パルプ化率74.7%）に係わる環境負荷を算出した。DIP製造エネ

ルギーは、重油・石炭ボイラーからの蒸気と電力を使用し、不足分を購入電力で補った。DIP製造工程で排出されるリジェクトについては焼却処理が行われており、この部分もインベントリー対象範囲とした。

Stage 3: 上質紙製造

ここでは、パルプ化された木材および非木材から上質紙の製造を対象とした。パルプの流送および離解、上質紙の製造（歩留まり99.0%）に係わる環境負荷を算出した。上質紙製造のエネルギーは、重油・石炭ボイラーからの蒸気と電力を使用した。ただし、ケナフパルプから上質紙を製造する場合は、パルプ工程で発生する黒液燃焼エネルギーを利用し、不足分を重油・石炭ボイラーで補った。上質紙製造工程で排出されるリジェクトについては焼却処理が行われおり、この部分もインベントリー対象範囲とした。

Stage 4: 流通・使用

ここでは、製造された上質紙の流通・使用を対象としている。製造された上質紙の包装、ユーザーまでのトラック輸送（10tトラックに9t積載して700km運搬）、貨車輸送（700km運搬）、船輸送（1,000km運搬）に係わる環境負荷を算出した。トラック輸送、貨車輸送、船輸送は、それぞれ30%, 30%, 40%の割合で行われており、輸送に係わる環境負荷をこの配分で換算した。また、上質紙使用プロセスに係わる環境負荷については、明確かつ詳細なデータが得られなかったため、本研究では除外した。上質紙の包装紙については、廃棄された後、焼却処理が行われるものとし、この部分もインベントリー対象範囲とした。

Stage 5: 廃棄

ここでは、使用済み上質紙の廃棄処理を対象としている。使用された上質紙は、70%が廃棄処分され、残りの30%が古紙回収（Stage 6）されるものとした。また、使用済み上質紙の熱回収を伴う焼却処理と最終処分場への輸送（4tトラックに3t積載して100km運搬）・埋め立て重機使用、熱回収の無い焼却処理と最終処分場への輸送（4tトラックに3t積載して100km運搬）・埋め立て重機使用、最終処分場への輸送（4tトラックに3t積載して100km運搬）と焼却処理を行わない埋め立て処理に係わる環境負荷を算出した。熱回収を伴う焼却処理、熱回収の無い焼却処理、焼却処理を行わない埋め立て処理は、「ライフサイクルインベントリー分析の手引き」を参考に、それぞれ35%, 50%, 15%に配分して換算した¹⁵⁾。熱回収については効率10%とし、焼却処理では、助燃剤の重油、都市ガス、炉運転での消費する電力をエネルギー消費とした。上質紙の焼却による残灰率は11.3%とした。

Stage 6：古紙回収

ここでは、使用済み上質紙（30％）の回収を対象とした。使用済み上質紙（古紙）の古紙問屋への輸送（4 tトラックに3 t積載して100 km運搬）に係わる環境負荷を算出した。

2.4 排出原単位

本研究で使用したエネルギー種類別排出原単位（石炭、C重油、軽油、LPG、日本国内電力、コロンビア電力、都市ガス、黒液）と輸送排出原単位（船輸送、トラック輸送）を表1および表2に示した^{15)~18)}。また、各種パルプの上質紙製造までに係わるデータ（Stage 0~Stage 3）を表3に、製造した上質紙の流通から廃棄までに係わるデータ（Stage 4~Stage 6）を表4に示した。

2.5 環境負荷項目

本研究では、地球温暖化または酸性雨の起因となる大気汚染物質（CO₂、SO_x、NO_x）を中心に、製造・焼却工程等で排出される焼却灰等の無機物排出量を環境負荷項目の対象とした。

3. 植林・栽培条件

本研究で検討した各種パルプに関する植物の栽培地、

栽培時の土地利用形態、単位面積当たりの収穫量、栽培や収穫時のエネルギー、肥料の投入量、輸送手段と距離等を表5に示した。

木材と非木材（草本）の植林・栽培条件の大きな違いは、その土地利用形態にあると考えられる。森林と非木材植物の農地では、様々な点で環境に及ぼす影響が異なるものと思われ、これらをインベントリー分析に反映させることは難しい。最近の印刷用紙に関する海外のLCA報告では、(1)生物種の多様性、(2)生態系の維持、(3)土壌や水源の保全の観点から土地利用の影響を定量化する試みも行われており、農地より森林の方が、環境に与える負荷が少ないという結果が報告されている¹⁹⁾。しかし本研究では土地利用の影響に対するデータ収集は困難と考え、対象範囲外とした。

ケナフの単位面積当たりの収量は、国内で試験的に栽培された際のデータであることから、海外の半分程度の収量になっている²⁰⁾。また、ケナフは人為的な栽培方法で行っており、したがって重機等の使用による環境負荷は無いものとした。

バガスの肥料量は、主に砂糖を収穫することを目的に散布されている。したがってサトウキビ生産物の経済価値に応じて肥料量を配分した場合、バガスに対す

Table 1 Emission unit of energy consumption in this LCI

	Coal (/kg)	Heavy oil (/kg)	Light oil (/kg)	LPG (/kg)
CO ₂ (kg)	2.585	2.941	2.644	3.007
SO _x (kg)	0.0120	0.0103	0.0076	0.0001
NO _x (kg)	0.0030	0.0027	0.0028	0.00005

	Electricity-Japan (/kWh)	Electricity-Colombia (/kWh)	Town gas (/m ³)	Black liquor (/kg)
CO ₂ (kg)	0.381	0.309	2.141	1.184
SO _x (kg)	0.0002	0.0008	0.0007	—
NO _x (kg)	0.0003	0.0004	0.0035	—

Table 2 Emission units of transport in this LCI

	40,000t-Ship(Australia)	45,000t-Ship(Colombia)	10t-Truck(100km)	4 t-Truck(100 km)
Heavy oil(kg)	8.321×10 ⁵	1.771×10 ⁶	0	0
Light oil(kg)	0	0	23.71	15.09
CO ₂ (kg)	2.68×10 ⁶	5.70×10 ⁵	74.2	47.2
SO _x (kg)	8.574×10 ³	1.825×10 ⁴	0.091	0.056
NO _x (kg)	2.250×10 ³	4.790×10 ³	0.229	0.145

Table 3 Data of energy and ash for each pulp (Stage 0 ~Stage 3)

Stage	Energy and Ash	Wood pulp (Japan)	Wood pulp (Australia)	Bagasse pulp	Kenaf pulp	DIP
Stage 0	CO ₂ bound	1,650 (kg/t-wood)	1,650 (kg/t-wood)	1,650 (kg/t-sugar cane)	1,650 (kg/t-kenaf)	1,650 (kg/t-DIP)
	Light oil (afforestation and cultivation)	0.033 (kg/t-wood)	0.142 (kg/t-wood)	6.7 (kg/t-sugar cane)	0	—
Stage 1-1	Light oil (felling)	11.36 (kg/t-wood)	9.64 (kg/t-wood)	—	—	—
	Light oil (wood transport)	2.63 (kg/t-wood)	2.63 (kg/t-wood)	—	—	—
Stage 1-2	Electricity (chipping)	12.0 (kWh/t-wood chip)	10.0 (kWh/t-wood chip)	—	—	—
	Light oil (bagasse transport)	—	—	1.58 (kg/t-bagasse)	—	—
Stage 1-3	Electricity (chipping)	—	—	25.0 (kWh/t-bagasse)	—	—
	Ash (pith burning)	—	—	0.01 (kg/kg-pith)	—	—
Stage 2-1	Light oil (Kenaf transport)	—	—	—	7.90 (kg/t-kenaf)	—
	Electricity (chipping)	—	—	—	49.7 (kWh/t-kenaf chip)	—
Stage 2-2	Light oil (chip transport)	3.39 (kg/t-wood chip)	—	—	—	—
	Heavy oil (chip transport)	—	21.9 (kg/t-wood chip)	—	—	—
Stage 2-3	Heavy oil (pulp)	38.35 (kg/t-wood pulp)	38.35 (kg/t-wood pulp)	—	—	—
	Black liquor (pulp)	1.74 (kg/kg-wood pulp)	1.74 (kg/kg-wood pulp)	—	—	—
Stage 2-4	Electricity (wastewater treatment)	0.066 (kWh/kg-water)	0.066 (kWh/kg-water)	—	—	—
	Ash (incineration)	0.3 (kg/kg-sludge)	0.3 (kg/kg-sludge)	—	—	—
Stage 3	Electricity (pulp)	—	79.13 (kWh/t-bagasse pulp)	—	—	—
	Heavy oil (pulp)	—	13.0 (kg/t-bagasse pulp)	—	—	—
Stage 3	Black liquor (pulp)	—	1.68 (kg/kg-bagasse pulp)	—	—	—
	Electricity (wastewater treatment)	—	0.066 (kWh/kg-water)	—	—	—
Stage 3	Ash (incineration)	—	0.9 (kg/kg-sludge)	—	—	—
	Heavy oil (pulp transport)	—	41.43 (kg/t-bagasse pulp)	—	—	—
Stage 3	Light oil (Kenaf transport)	—	—	—	3.32 (kg/t-kenaf chip)	—
	Electricity (pulp)	—	—	—	1,249 (kWh/t-kenaf pulp)	—
Stage 3	LPG (pulp)	—	—	—	867 (kg/t-kenaf pulp)	—
	Electricity (wastewater treatment)	—	—	—	0.066 (kWh/t-water)	—
Stage 3	Light oil (sludge transport)	—	—	—	0.5 (kg/t-sludge)	—
	Light oil (pulp transport)	—	—	—	15.8 (kg/t-kenaf pulp)	—
Stage 3	Light oil (black liquor transport)	—	—	—	15.8 (kg/t-black liquor)	—
	Electricity (waste/paper transport)	—	—	—	—	31.47 (kWh/t-waste paper)
Stage 3	Electricity (pulp)	—	—	—	—	5.53 (kWh/t-DIP)
	Heavy oil (pulp)	—	—	—	—	38.1 (kg/t-DIP)
Stage 3	Coal (pulp)	—	—	—	—	296.0 (kg/t-DIP)
	Coal ash (pulp)	—	—	—	—	155 (kg/t-coal)
Stage 3	Electricity (wastewater treatment)	—	—	—	—	0.066 (kWh/t-water)
	Ash (incineration)	—	—	—	—	0.3 (kg/kg-sludge)
Stage 3	Electricity (pulp preparing)	9.0 (kWh/t-pulp)	9.0 (kWh/t-pulp)	20.0 (kWh/t-pulp)	20.0 (kWh/t-pulp)	9.0 (kWh/t-pulp)
	Heavy oil (paper production)	72.2 (kg/t-paper)	72.2 (kg/t-paper)	72.2 (kg/t-paper)	21.2 (kg/t-paper)	72.2 (kg/t-paper)
Stage 3	Coal (paper production)	569.2 (kg/t-paper)	569.2 (kg/t-paper)	569.2 (kg/t-paper)	166.8 (kg/t-paper)	569.2 (kg/t-paper)
	Black liquor (paper production)	0	0	0	1.45 (kg/t-paper)	0
Stage 3	Coal ash (paper production)	155 (kg/t-coal)	155 (kg/t-coal)	155 (kg/t-coal)	155 (kg/t-coal)	155 (kg/t-coal)
	Electricity (wastewater treatment)	0.066 (kWh/kg-water)	0.066 (kWh/kg-water)	0.066 (kWh/kg-water)	0.066 (kWh/kg-water)	0.066 (kWh/kg-water)
Stage 3	Ash (incineration)	0.3 (kg/kg-sludge)	0.3 (kg/kg-sludge)	0.3 (kg/kg-sludge)	0.3 (kg/kg-sludge)	0.3 (kg/kg-sludge)

Table 4 Data of energy and ash for woodfree paper (Stage 4 ~Stage 6)

Stage	Energy and Ash	Woodfree paper
Stage 4	Erectricity (packaging)	65.0 (kWh/t-woodfree paper)
	Light oil (products transport)	18.44 (kg/t-woodfree paper)
	Erectricity (products transport)	36.71 (kWh/t-woodfree paper)
	Heavy oil (products transport)	11.74 (kg/t-woodfree paper)
	Ash (packaging paper incineration)	0.02 (kg/kg-packaging paper)
Stage 5	Incineration (heat recovery)	
	Light oil (waste paper transport)	5.53 (kg/t-waste paper)
	Erectricity (waste paper incinerating)	12.59 (kWh/t-waste paper)
	Heavy oil (waste paper incinerating)	0.066 (kg/t-waste paper)
	Town gas (waste paper incinerating)	0.36 (m ³ /t-waste paper)
	Ash (waste paper incinerating)	0.113 (kg/kg-waste paper)
	Light oil (ash transport)	1.66 (kg/t-ash)
	Light oil (ash landfilling)	1.26 (kg/t-ash)
	Incineration (non-heat recovery)	
	Light oil (waste paper transport)	5.53 (kg/t-waste paper)
	Erectricity (waste paper incinerating)	12.59 (kWh/t-waste paper)
	Heavy oil (waste paper incinerating)	0.066 (kg/t-waste paper)
	Town gas (waste paper incinerating)	0.36 (m ³ /t-waste paper)
	Ash (waste paper incinerating)	0.113 (kg/kg-waste paper)
	Light oil (ash transport)	1.66 (kg/t-ash)
	Light oil (ash landfilling)	1.26 (kg/t-ash)
	Landfill	
	Light oil (waste paper transport)	7.19 (kg/t-waste paper)
	Light oil (waste paper landfilling)	1.26 (kg/t-waste paper)
Stage 6	Waste paper collection	
	Light oil (waste paper transport)	5.03 (kg/t-waste paper)

る施肥量は全体の約 1/10 になる。本研究では、経済価値に応じた配分を行うこととした。この方法により、インベントリー分析に農産廃棄物と栽培植物の違いを反映させていると考えた。

また、木材と非木材の生育期間（成長速度）とそれに伴う収穫量にはかなりの違いがあるが、これについてはインベントリー対象範囲外とした。

4. 結果と考察

4.1 各種パルプを配合した上質紙における CO₂ 排出量

木材パルプに古紙パルプ（DIP）、バガスパルプ、ケナフパルプをそれぞれ 25% 配合した上質紙、および木材パルプ 100% の上質紙の 4 種類について、化石燃料起源の CO₂ 排出量を調べた（図 2）。化石燃料起

Table 5 Data of cultivation and transportation for each pulp

	unit	Wood	Bagasse	Kenaf	DIP
Location (country)	—	Australia/Japan	Colombia	Japan	Japan
Land use	—	Forestry	Agriculture	Agriculture	—
Net yield	t/ha/year	12.5/4.2	11.7	6.2	—
Light oil for cultivation	l/t	0.171/0.04	6.7	0	—
Fertilizer	kg/t	1.59/0	3.75	16.1	—
Transport to pulp mill	km	6,960/100	40	70	600
Means of transport	—	Ship/Truck	Truck	Truck	Train
Transport to paper mill	km	0/0	15,040	600	0
Means of transport	—	—	Ship	Truck	—

Fig. 2 CO₂ emission from fossil fuels use for woodfree paper containing each pulp (woodfree paper : 1,000 kg)

源のCO₂排出量は、木材パルプ<バガスパルプ<DIP<ケナフパルプの順で増加する結果が確認されたが、これらの差は著しく大きいものではなかった。各種パルプにおけるCO₂排出起因の大きな違いは、パルプ製造 (Stage 2-1~2-4) および紙製造 (Stage 3) でのエネルギー消費形式にあった。バガスパルプの場合、パルプ製造工程で回収ボイラーによるエネルギー (黒液) の熱回収が行われている。従って、化石燃料によるエネルギー消費量は少なく、CO₂排出量としては木材パルプよりも若干多い結果であった。それに対しケナフパルプの場合、小規模工場におけるパルプ製造の

ため黒液回収設備がなく、パルプ製造工程でのエネルギーをLPGで賄っていることからCO₂排出量が多い結果となった。しかし、パルプ製造工程で回収された黒液は、パルプ・紙一環工場 (三菱製紙(株)八戸工場) に運搬され、紙製造エネルギーとして利用されるため、紙製造工程での化石燃料消費量 (CO₂排出量) は減少する結果になった。DIPの場合は、パルプ製造工程における重油・石炭ボイラー使用のエネルギー消費が大きいため、黒液回収の可能な木材パルプやバガスパルプよりも化石燃料起源のCO₂排出量が多くなる結果が示された。

さらに詳細な検討を行うため、木材パルプ、バガスパルプおよびケナフパルプの各種絶乾パルプ1,000 kg について、植林・栽培からパルプ製造・輸送までの各工程で排出される化石燃料起源のCO₂排出量を調査した(図3)。まず、木材パルプのシナリオでは、国内とタスマニアでチップ化された後、八戸工場に運搬されてパルプ製造される。それに対して、バガスパルプは、コロンビアでパルプ製造されて八戸工場に運搬されるシナリオ、ケナフパルプは、北関東(株)東邦

特殊パルプ小山工場)でパルプ製造されて八戸工場へ運搬されるシナリオであった。したがって、それぞれ製造場所や輸送条件が異なっていたが、黒液回収設備の整っていない小規模工場で行われるケナフパルプ製造工程以外は、これらシナリオによるCO₂排出量の差は比較的小さいかった。

4.2 各種パルプを配合した上質紙における

SO_x, NO_x 排出量

木材パルプに古紙パルプ(DIP), バガスパルプ、

Fig. 3 CO₂ emission from fossil fuels use for each pulp production (pulp : 1,000 kg)

Fig. 4 SO_x emission for woodfree paper containing each pulp (woodfree paper : 1,000 kg)

ケナフパルプをそれぞれ25% 配合した上質紙、および木材パルプ100%の上質紙の4種類について、SO_x排出量を調査した(図4)。SO_x排出量は、DIP<木材パルプ<バガスパルプ<ケナフパルプの順に大きくなる結果となり、CO₂排出量結果の場合と同様に、パルプ製造(Stage 2-1~Stage 2-4)でのエネルギー消費によるSO_x排出量が多いことが確認された。各種パルプにおけるSO_x排出起因の詳細を調べるために、木材パルプ、バガスパルプおよびケナフパルプの

各種絶乾パルプ1,000 kgについても、植林・栽培からパルプ製造・輸送までの各工程で排出されるSO_x排出量を調査した(図5)。前報で木材パルプについては、チップ輸送時における船からのSO_x排出量が多いことを報告した。バガスパルプについても同様に、パルプ輸送時における船からのSO_x排出量が多いことが確認された。それに対しケナフパルプでは、小規模工場におけるパルプ製造のため化石燃料消費量が大きく、そのことがパルプ製造(Stage 2-3)でSO_x排

Fig. 5 SO_x emission for each pulp production (pulp : 1,000 kg)

Fig. 6 NO_x emission for woodfree paper containing each pulp (woodfree paper : 1,000 kg)

出量の多い原因であると確認された。

さらに、木材パルプに古紙パルプ (DIP)、バガスパルプおよびケナフパルプをそれぞれ 25% 配合した上質紙、および木材パルプ 100% の上質紙の 4 種類について、NO_x 排出量についても調査した (図 6)。NO_x 排出量は、木材パルプ<バガスパルプ<DIP<ケナフパルプの順に大きくなる結果となり、上述した CO₂ や SO_x の結果と同様に、パルプ製造 (Stage 2-1~Stage 2-4) や紙製造 (Stage 3) でのエネルギー消費

による NO_x 排出量多いことが確認されたが、各パルプ種による NO_x 排出量の差は小さかった。また、木材パルプ、バガスパルプおよびケナフパルプの各種絶乾パルプ 1,000 kg について、植林・栽培からパルプ製造・輸送までの各工程で排出される NO_x 排出量を調査した (図 7)。ここでも上述した CO₂ や SO_x の結果と同様に、小規模工場におけるパルプ製造によるエネルギー消費が多くなり、NO_x 排出量が木材パルプやバガスパルプよりも増大する結果となった。

Fig. 7 NO_x emission for each pulp production (pulp : 1,000 kg)

Fig. 8 Ash emission for woodfree paper containing each pulp (woodfree paper : 1,000 kg)

4.3 各種パルプを配合した上質紙における無機物排出量

木材パルプに古紙パルプ (DIP)、バガスパルプ、ケナフパルプをそれぞれ 25% 配合した上質紙、および木材パルプ 100% の上質紙の 4 種類における焼却灰等の無機物排出量について比較を試みた (図 8)。各工程について比較すると、紙製造 (Stage 3) と使用

済みの紙を焼却処理した際の焼却灰 (Stage 5) が多いことが確認された。紙製造工程で多く排出される焼却灰の起因は、エネルギー源として使用する石炭の石炭灰であった。各種パルプ製造工程における焼却灰の排出量起因を比較した場合、DIP ではスラッジ焼却による焼却灰であるのに対し、バガスパルプでは蒸解薬品回収時に排出された石灰泥であった。ケナフパルプ

Fig. 9 Relationship between DIP content and CO₂ emission (woodfree paper : 1,000 kg)

Fig. 10 Relationship between bagasse pulp content and CO₂ emission (woodfree paper : 1,000 kg)

Fig. 11 Relationship between kenaf pulp content and CO₂ emission (woodfree paper : 1,000 kg)

の場合は大量の木材パルプ黒液に混合して黒液からのエネルギー回収処理を行っているため、シリカ成分の影響が軽減され、焼却灰排出量の増加はほとんど認められなかった。

4.4 各種パルプの配合率とCO₂排出量の関係

DIP, バガスパルプあるいはケナフパルプを配合した上質紙において、各種パルプ配合率とそれに伴うCO₂排出量の変化について算出した(図9, 10, 11)。ここでのCO₂排出量は、化石燃料起源により排出されるものと、黒液等のバイオマス起源により排出されるものに別けて算出した。また、植林・栽培の成長過程ではCO₂が固定されることを考慮し、木材や非木材の焼却時に排出されるCO₂をその固定分として換算し、負の排出量として別に表示した。DIPについても、パルプ分自体から排出されるCO₂を換算し、CO₂固定分として換算した。したがって、これらのCO₂固定分は、黒液などのバイオマス起源により排出されるCO₂と打ち消し合う関係になると考えられる。

まず、DIPの場合は配合率が増加するに従い、化石燃料起源のCO₂排出量は増加する傾向が確認された。しかし同時に、木材パルプの配合率も下がることからバイオマス起源のCO₂排出量も減少し、全体としては、CO₂排出量が減少する結果となった。

これに対しバガスパルプの場合は、木材パルプに類似した製造工程であり、パルプ配合率の増加によって化石燃料起源のCO₂排出量の変化はほとんどみられなかった。また、バイオマス起源によるCO₂排出量

では、バガスに約30%含まれるビス(微細物)の焼却由来と黒液の燃焼由来が大きかった。仮にシナリオ設定でビスを砂糖生産の廃棄物として、脱ビスされたバガスからインベントリー対象範囲とした場合、ビス分のCO₂排出量が除外されることになり、バガスパルプの全体としてのCO₂排出量は、木材パルプのCO₂排出量とほとんど差がなくなることが推察できる。

ケナフパルプの場合は、小規模工場でのパルプ製造によるエネルギー消費量が大きいため、配合率の増加に従って化石燃料起源のCO₂排出量が増大する傾向が示された。

4.4 本LCI分析結果より得られた課題

木材パルプと非木材(バガス・ケナフ)パルプのインベントリー条件設定の違いは、1.土地の利用形態(木材は森林で生育に対し、非木材は農地で栽培)、2.生育期間(木材は約10年に対し、非木材は約1年)、3.肥料、除草剤、重機燃料等の投入量、4.農産廃棄物利用(非木材資源の約70%)などが挙げられる²¹⁾。本研究におけるインベントリー分析からは、木材パルプを配合した上質紙が大气汚染物質などの環境負荷としては小さい結果が得られた。しかし、非木材の特性としては、成長が早いことから短期間にパルプ原料を確保できることや、バガスやワラのように食糧生産の副産物を原料として使用できるところにある²²⁾。これらの明確なデータを収集することは困難と考え、イベントリーの対象範囲外とした。さらに精度の高いイベントリー分析を行うのであれば、今後調査する必要がある

と思われる。

本研究では上述した条件設定を除いて各種パルプを配合した上質紙 LCI 分析を行ったが、明確かつ有益な結果が得られたと考えている。DIP には森林資源の保全や古紙の有効利用などの利点が考えられる。しかし、本研究において DIP 配合率を高くすることは、パルプ製造工程における化石燃料使用量を増加させることでも示された。古紙配合率を高くすることは、環境負荷を低減させるものと考えられ、社会的にも推進されてきたが、今後、エネルギー消費等の観点から、古紙回収やその利用方法が検討されることを期待したい^{23)~25)}。次に、バガスパルプには農産廃棄物の利用という利点がある。しかし、これはサトウキビの収穫期や収穫量に係わるものであり、また気候等にも依存するため、供給安定性を考慮して利用していく必要があると思われる。また、ケナフパルプにはその土地の気候・風土にあった生育や短期収穫が可能などの利点がある。収穫-パルプ-紙製造を一貫したシステムで行うなどの工夫が必要かと思われる。

最後に、本研究は LCA 手法を用いて、各種パルプを配合した上質紙のインベントリー分析を行ってきた。しかし、これはあくまでも限定された前提条件やシナリオ設定で行われたものであり、これらの条件設定によっては、異なる結果が導き出される可能性もある。総合的な環境評価を行うのであれば、トレード・オフ、コスト、雇用形態なども組み入れて考える必要がある。また、本 LCI 分析から更に進んだ LCA 段階を踏むのであれば、環境影響評価（ライフサイクルインパクト評価）を検討することも必要である。

5. 結 言

古紙パルプあるいは非木材パルプ（バガスパルプ、ケナフパルプ）を配合した上質紙の LCI（ライフサイクルインベントリー）分析で環境負荷の比較を行い、以下のような結論を得た。

- (1) 各種パルプを 25% 配合した上質紙の化石燃料起源における CO₂ 排出から、木材パルプ<バガスパルプ<DIP<ケナフパルプの順で増加することが判った。とりわけ黒液回収設備のない小規模工場でパルプ製造を行うケナフパルプの排出量が多い結果であった。
- (2) 各種パルプ配合による上質紙の SO_x 排出量は、DIP<木材パルプ<バガスパルプ<ケナフパルプの順に大きく、木材パルプではチップ輸送、バガスパルプではパルプ輸送、ケナフパルプではパルプ製造工程での排出量が多い結果が得られた。NO_x 排出結果は、各種パルプ配合による大きな差はほとんど認められな

かった。

- (3) 各種パルプ配合による焼却灰等の無機物排出量は、上質紙製造と廃棄工程で大きく、パルプ製造工程では、DIP 製造時に排出されるスラッジ焼却灰、バガスパルプの薬品回収時に排出される石灰泥が大きかった。

- (4) 各種パルプの配合率とそれに伴う CO₂ 排出量の変化を分析した結果、DIP とケナフパルプでは配合率が増加するに従い、化石燃料起源の CO₂ 排出量が増加する傾向が確認された。バガスパルプでは、配合率の増加による CO₂ 排出量の変化はあまりみられなかった。

- (5) 今後、土地利用形態や各種農産廃棄物の価値などを対象範囲に加えた上質紙のインベントリー分析を検討することで、更に精度の高い結果が得られると思われる。

引用文献

- 1) LCA 手法による容器間比較報告書、2000 年 5 月
- 2) 砂金光記、大村光正、藤田滋、中谷真紀子、コピー用紙の LCA、第 80 回電子写真学会討論会要旨集、P.69-72 (1997)
- 3) 岡田比斗志、繊維と工業 56 (4)118-122 (2000)
- 4) A Life Cycle Assessment of the production of a daily newspaper and a weekly magazine. A project of AXEL SPRINGER VERLAG AG, 1998
- 5) LCA 実務入門、社団法人産業環境管理協会、丸善株式会社
- 6) LCA のすべて-環境への負荷を評価する-、社団法人未踏科学技術協会・エコマテリアル研究会編、工業調査会
- 7) ライフサイクルアセスメントの実践-環境負荷低減を目指して-、環境庁規格調整局環境研究技術課監修、財団法人環境情報センター編
- 8) 工場紹介⁽⁶⁾ 三菱製紙(株)八戸工場、紙パ技協誌 47 (6) 749-757 (1993)
- 9) 桂徹、庭田博章、中澤克仁、坂村博康、安井至、上質紙の LCA：ライフサイクル・インベントリー、第 66 回紙パルプ研究発表会講演要旨集、p.174-177 (1999)
- 10) 桂徹、庭田博章、中澤克仁、片山恵一、坂村博康、安井至、上質紙の LCA：ライフサイクル・インベントリー、紙パ技協誌 54 (8) 1108-1115 (2000)
- 11) 二酸化炭素排出量調査報告書、環境庁、1992
- 12) Life Cycle Inventory Analysis User's Guide, American Forest & Paper Association, 1996,

- 13) 海外電気事業統計, 社団法人海外電力調査会, 1999
- 14) 吉村隆重, 望月美秀, 原敬志, 砂糖キビの絞りかすから生まれたバガス紙について, 紙パルプ技術タイムス 41 (7) 25-30 (1998)
- 15) ライフサイクルインベントリー分析の手引き, 1998年9月, 環境庁企画調整局環境研究技術課監修, 財団法人環境情報センター編
- 16) 包装廃棄物のリサイクルに関する定量的分析, 1995年3月, 包装廃棄のリサイクルに関する定量的分析研究会, 株式会社野村総合研究所編
- 17) プラスチック製品の使用量増加が地球環境に及ぼす影響評価報告書, 平成5年3月, 財団法人プラスチック処理促進協会編
- 18) 基礎素材のエネルギー解析調査報告書, 平成5年9月, 財団法人化学経済研究所編
- 19) LCA Graphic Paper and Print Products (Part 1), AXEL SPRINGER VERLAG AG, STORA and CANFOR, 1998
- 20) ケナフ等非木材繊維利用可能性調査報告書, 社団法人海外産業植林センター, 平成11年3月
- 21) Paavilainen, L. "European prospects for using non-wood fiber" 66 (6) 61-66 (1998)
- 22) Angelite Vizcarra, Victor Lo, Paul A. Bicho, Paul A. Watson, "A cradle-to-gate life cycle assessment straw pulp incorporation into telephone directory-grade paper", Tappi J. 82 (2) 115-122 (1999)
- 23) 加藤利雄, 古紙リサイクルの現状と問題点, 紙パ技協誌 51 (10) 1459-1469 (1997)
- 24) 高柳晴夫, 古紙利用促進のための提言, 紙パ技協誌 53 (4) 435-443 (1999)
- 25) 山本保, 古紙に関する最近の技術課題, 紙パ技協誌 53 (5) 554-563 (1999)

(受理: '00.12.20)

非木材パルプ及び古紙パルプを配合した上質紙の ライフサイクルインベントリー分析

東海大学 工学研究科 中澤 克仁、片山 恵一
三菱製紙株式会社 総合研究所 桂 徹
東京大学 生産技術研究所 坂村 博康、安井 至

非木材パルプおよび古紙パルプを配合した上質紙のライフサイクルにおける CO_2 、 SO_x 、 NO_x 、焼却灰のようなインベントリーにおける環境負荷を研究した。本研究において、木材パルプや古紙パルプに関するインベントリーデータは、三菱製紙八戸工場で収集された。非木材パルプに関するインベントリーデータは、コロンビアで製造されたバガスパルプのデータと日本国内で製造されたケナフパルプのデータが使用された。木材パルプに非木材パルプや古紙パルプを混合して作られた上質紙における環境負荷と、木材パルプ 100% から作られた環境負荷が比較された。

バガスパルプを配合した上質紙のライフサイクルにおける CO_2 排出量は、(ビスの焼却により排出される CO_2 排出量除けば) 100% 木材パルプから作られた上質紙のものと同等であった。ここでのビスは、農業生産物とされる場合もある。ケナフパルプは、黒液回収設備が整っていない小規模工場で製造されたため、ケナフパルプを配合した上質紙のライフサイクルにおける CO_2 排出量は、他種の上質紙のものよりも多かった。古紙パルプの場合、上質紙における古紙パルプ配合量を増加させることで、化石燃料使用が増加し、その結果 CO_2 排出量が増加した。 SO_x の排出については、古紙パルプを配合した上質紙における排出量が他のパルプの排出量よりも少なかった。 NO_x の排出については、パルプ種による排出量の差は小さかった。どの上質紙においても焼却灰の排出については、上質紙製造プロセスで使用される石炭からの石炭灰と、排紙の焼却処理プロセスからの焼却灰がほとんどであった。

今後さらに詳細な研究を行うために、植林・栽培における土地利用形態や農業廃棄物利用を考慮したインベントリー分析が望まれる。

(本文 102 ページ)