上質紙のLCA：ライフサイクル・インベントリー*

三菱製紙株式会社 総合研究所 桂 徹
 八戸工場 庭田 博章
 東海大学 工学研究科 中澤 克仁, 片山 恵一
 東京大学 生産技術研究所 坂村 博康, 安井 至

A Life Cycle Assessment of Woodfree Printing Paper Life Cycle Inventory

Toru Katsura and Hiroaki Niwata
 Mitsubishi Paper Mills, Ltd., Research
 Center and Hachinohe Mill

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

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

桂 徹

庭田博章

中澤克仁

片山恵一

坂村博康

安井 至

Life cycle inventory of woodfree printing paper was investigated to establish the methodology and to evaluate the environmental effects. The major conclusions are as follows :

- (1) Calculation of CO₂ emitted from biomass separately from that emitted from fossil fuel allowed identifying the effect of afforestation and fiber recycle on CO₂ emission.
- (2) Papermaking process, as is the process predominantly using the energy from coal/oil boilers, showed largest emission of fossil fuel origin CO₂. Wood chip transportation by ship showed largest emission of SO_x.
- (3) Simulated increase of deinked pulp usage shows little change of total CO₂ emission, but, on the other hand, shows increase in CO₂ emission of fossil fuel origin.

*本報告の一部は第66回紙パルプ研究発表会で発表した。

(4) Above mentioned increase in CO₂ emission of fossil fuel origin could be reduced burning the part of waste fibers in high efficiency boiler to generate energy.

(5) The method for evaluating afforestation and for allocating boiler energy, and ancillaries data collection would be the subjects for the future study.

Keywords : LCA, Life cycle inventory, Woodfree printing paper, CO₂ emission, Thermal recycle

分類 : X₃ 大気, S₄ 非塗工印刷用紙, G₁ 古紙パルプ一般

1. 緒 言

環境に対する世の中の関心が高まるに従って、製品が環境に及ぼす影響を「LCA（ライフサイクル・アセスメント）」により定量化したいとの要望が増えつつある。しかし、LCAの手法自体はまだ開発途上にあり、平成10年10月に発足した国家プロジェクト「製品等ライフサイクル環境影響評価技術開発」で手法の開発やデータベースの作成などが5年計画で進められている段階にある。

紙のLCAは、飲料容器や複写機LCAの一部分として紙のユーザーの立場から行われているが^{1),2)}、製紙メーカーによる検討はほとんど行われて来なかった。本研究は、先進の欧米の例^{3),4)}も参考に上質紙のLCAを行い、手法を確立するとともに「環境に配慮した製品」の開発に役立てることを目指した。本報告では、インベントリーの結果を中心に、植林や古紙パルプが環境に及ぼす影響についても言及した。

2. 前提条件

- ・機能単位：対象は、上質系の古紙パルプ（DIP）とLBKPを含有する上質紙（坪量64 g/m²）とした。機能単位は上質紙1,000 kg（絶乾重量）である。
- ・システムの境界：システムは植林に始まりパルプ・

紙の製造を経て、廃棄までとした。海外材は、オーストラリア南部に植林した広葉樹（ユーカリ）を10年で伐採するものとした。国内材（混合広葉樹材）の場合は、植林後35年で伐採するものとした。パルプと紙の製造は三菱製紙㈱八戸工場で行うものとした。なお、製造に係わる機械の製造、建物の建築、土地の利用が環境に及ぼす影響、及び肥料、添加薬品、燃料の製造が環境に与える影響については考慮しなかった。廃棄に関しては、印刷用紙の古紙回収率（1998年：31.3%）から30%が再利用され、残りは廃棄されると仮定した。古紙入り上質紙が書籍等の形で長期保存される量は少ないと考えられる。なお、都内から八戸への古紙の輸送は鉄道輸送とした。

- ・対象としたプロセス：図1には上質紙の製造プロセスを示す。海外及び国内での植林（Stage 0）、木材の伐採・チップ化（Stage 1）、パルプ製造（Stage 2）、紙製造（Stage 3）、製品の包装・輸送・使用（Stage 4）、廃棄（Stage 5）、古紙回収（Stage 6）の各段階から成り立っている。
- ・取り上げた環境負荷項目：地球温暖化への影響を評価するため、CO₂、SO_x等の大気への排出を中心に考えた。
- ・配分の考え方：工場においては、エネルギー、排水、

Fig.1 Life cycle flow of woodfree paper

Table 1 Estimation of data uncertainty

		Origin of data	Generation of data	Type of data
Afforestation : overseas	CO ₂ bound	2	3	3
	Energy	2	2	2
Harvesting : overseas	Harvesting energy	1	2	2
	Transport energy	1	2	1
Chip production	Process energy	1	1	2
	Transport energy	3	2	1
Afforestation : Japan	CO ₂ bound	2	3	3
	Energy	2	2	2
Harvesting : Japan	Harvesting energy	1	1	2
	Transport energy	1	2	1
Chip production	Process energy	1	1	2
	Transport energy	3	2	1
Pulp production	Raw materials	1	2	2
	Production energy	1	1	2
	Chemicals	1	1	2
	Water	1	1	1
	Water emissions	1	1	1
Recovery boiler	Steam	1	1	1
	Electric power	1	1	1
	Air emissions	1	1	1
Paper production	Raw materials	1	2	2
	Production energy	1	2	2
	Chemicals	1	1	2
	Water	1	1	1
	Water emissions	1	1	1
Product distribution	Energy	3	2	1
DIP production	Collection energy	3	2	1
	Raw material	1	2	2
	Production energy	1	2	2
	Chemicals	1	2	2
	Water	1	1	1
	Water emissions	1	1	1
Oil/coal boiler	Oil/coal ratio	1	2	1
	Steam	1	2	2
	Electric power	1	2	2
	Air emissions	1	1	1
Waste	Incineration %	3	3	3
	Transportation energy	3	2	1
	Air emission	3	2	1
	Ashes	3	2	1

Indicators)

1 : Own value
 2 : Literature
 3 : Others

1 : Measured
 2 : Calculated
 3 : Estimated

1 : Mean of values
 2 : Single value
 3 : Others

排気、廃棄物について工程毎の分離測定が困難な場合もある。このような場合には、生産量や使用量に応じた負荷の配分を行った。また、回収再利用される古紙への負荷配分は行わなかった。

3. データの特性

インベントリーに使用した各データの出所、種類(測定値、計算値、その他)、タイプ(平均値、代表値、

Fig.2 Emission of CO₂ at different stages of life cycle

Fig.3 Emission of SO_x at different stages of life cycle

その他)について整理を行った(表1)。各製造工程の設定値あるいは測定データが得られる場合は、それらを基に必要な値を求めた。工場では、上質紙以外に塗工紙や板紙等多くの品種を生産しているため、工程の平均的な測定値から計算で求めた値も含まれている。また、平均値を求められるほど多くのデータが得られない場合には、代表的な値を使用した。チップや製品の輸送に関するデータは、プラスチック処理促進協会⁵⁾、運輸省⁶⁾等のデータを基に算出した値である。また、CO₂排出量については、環境庁⁷⁾の係数を用いて計算した。

三菱製紙株八戸工場の上質紙製造プロセスをモデルにしたが、上記の事情により現実のデータと一致しない場合も存在する。

4. 結果と考察

4.1 ライフサイクル各段階での排出量

図2には上質紙を製造する際、植林から廃棄に至る各段階で排出されるCO₂排出量を示す。CO₂排出量は化石燃料由来とバイオマス由来に分けて算出した。木材は生長に伴って大気中のCO₂を吸収するため、木材には燃焼による排出量に相当するCO₂が固定されていると考えられる。同様に、古紙パルプにも相当量のCO₂が固定されていると考えられる。これらの値を固定分とし、負のバイオマス由来CO₂排出量と

して表示し、植林や古紙パルプ利用の意義を明確にしようと試みた。

パルプ製造時に排出されるCO₂のほとんどはバイオマス由来である。黒液燃焼により必要なエネルギーが賄われている結果である。紙およびDIP製造時のエネルギーは、石炭/重油ボイラーによる発電と蒸気によるため、化石燃料由来のCO₂排出量が多くなっている。廃棄時のバイオマス由来のCO₂排出量はパルプ製造時について大きい。古紙の焼却処理により紙の形で固定されていたCO₂が再び環境に戻る結果である。ライフサイクル全体のCO₂排出量を合計すると、バイオマス由来のCO₂排出量が植林等による固定分ではほぼ帳消しにされる結果、化石燃料由来のCO₂排出量が残ることになる。

図3にはライフサイクルでのSO_x排出量についての結果を示す。SO_x排出量はチップ船での輸送時が最も多く、チップ製造、製品輸送の順であった。紙パルプの製造工程では排煙脱硫装置による処理が行われているが、船舶等の輸送機関では排気の処理が行われていないことを反映している。図4はNO_x排出量の結果である。パルプ製造と紙製造工程からの排出量が多い。回収ボイラーあるいは石炭/重油ボイラーに起因している。

各段階でのスラッジや紙の焼却灰とボイラーの石炭灰の発生量をそれぞれ示した(図5)。焼却灰として

Fig.4 Emission of NO_x at different stages of life cycle

Fig. 5 Ash at different stages of life cycle

Fig. 6 (A) CO₂ emission at different DIP content
DIP Yield : 75% Fig. 6 (B) CO₂ emission at different DIP content
DIP Yield : 50%

は廃棄した紙からの発生量が最も多いが、製造工程では DIP 工程が多い。上質系古紙は填料や顔料を含むため、古紙パルプとして繊維分を回収する際に約 25% がスラッジとして排出されるためこのような結果になった。石炭灰は原料炭の種類により異なるが、原料の十数%と発生量は多い。電力消費量に比例し、紙製造工程で多くなっている。これらの灰についてはセメント原料として有効利用が図られているため、環境に直接及ぼす影響は少ないと思われる。

4.2 古紙パルプの配合率と排出量

上記のインベントリーデータを利用して、上質紙への古紙パルプの配合率が環境に及ぼす影響を試算した。

古紙パルプとして、通常の製造条件（収率 75%）および収率 50% まで精製したパルプを設定した。通常古紙パルプでは 50% 以上の高配合率になると強度等の品質の低下が著しい¹⁰⁾ため、収率 50% まで精製し微細物を減少させたパルプを用いることが好ましい¹¹⁾とされている。

図 6 (A, B) には CO₂ 排出量の結果を示す。CO₂ は化石燃料由来とバイオマス由来の排出量に分けて計算し、木材や古紙への固定分は含めていない。通常の製造条件のパルプの場合（図 6 (A)）は、化石燃料とバイオマス由来の合計の CO₂ 排出量は、古紙パルプ配合率の増加に伴って減少するが、収率 50% まで

精製したパルプを用いた場合(図6(B))には、この排出量はほとんど減少しないことが認められる。いずれの場合も、化石燃料由来のCO₂排出量は、古紙パルプ配合率が増加すると増大する傾向にある。古紙配合率が増加すると、木材パルプの量が減少するため、回収ボイラーで発生させるエネルギーが減少すること、古紙パルプ製造には化石燃料エネルギーを使用せざるを得ないことによる。

SO_xとNO_xの排出量は古紙パルプ配合率が増加すると減少する傾向にある(図7)。前述のようにSO_xは、木材チップ船での輸送時に多く発生する。古紙パルプの配合率が増すと、その影響が相対的に小さくなるためである。

Fig.7 SO_x, NO_x emissions at different DIP content

4.3 古紙のサーマルリサイクル

品質を維持しつつ古紙パルプの配合率を増すためには、精製した古紙パルプを用いる必要があり、エネルギーの消費量は増大する。化石燃料の消費量を増大させずに古紙を有効利用するため、古紙の一部を製紙工場で燃料として使用することが提案されている¹⁰⁾。図8は、図1の廃棄物処理で焼却—熱回収されている古紙(廃棄古紙の35%)を鉄道で八戸に運び、工場の高効率ボイラーで燃焼させ、古紙パルプ製造に必要なエネルギーを発生させると仮定し、ライフサイクル各段階のCO₂排出量を試算した結果である。古紙パルプ製造時の化石燃料由来のCO₂排出量がゼロになるとともに、余剰のエネルギーを紙製造に回すことが出来、全体として化石燃料由来のCO₂排出量を約15%減少させることが可能になる。

4.4 インベントリーの留意点

本研究では上質紙のLCAを行う過程で手法についても検討を行い、いくつかの留意点を抽出した。

植林：木材としてCO₂が固定される段階を入れるため、システム境界を植林から始めた。植林の期間は海外材では10年程度と短い、国内材では約35年と長期に渡るため、境界内に含めるか否かについては議論が分かれる。また、現実には使用する木材全てが経過の明らかな植林木とは限らない。

ボイラー：製紙工場のボイラーでは蒸気発生と発電

Fig.8 Emission of CO₂ at different stages of life cycle
Thermal recycle of 35% waste paper

を同時に行っている。ボイラーで発生する蒸気/電力の比率と製造工程で使用する蒸気/電力の比率は通常異なる。本報告では使用するエネルギー量に応じた負荷の配分を行った。回収ボイラー、石炭/重油ボイラーが混在する中での負荷配分の方法を決めておく必要がある。

薬品類：今回は補充薬品および添加薬品等の製造に関する環境負荷を考慮しなかった。個々の薬品についての正確なデータを得るためには、関連業界の協力を得て、製紙用薬品に関するLCAのデータベースを作る必要がある。

5. 結 言

古紙パルプを含む上質紙について植林から廃棄に至るライフサイクル・インベントリーを試み、以下の結果を得た。

(1) CO₂量を化石燃料由来とバイオマス由来の排出量および木材や紙に固定された量に分けて解析することにより、CO₂排出量に対する植林や古紙の役割を明らかにすることが出来た。

(2) 紙の全ライフサイクルでの、化石燃料に由来するCO₂排出量は紙製造工程が最も多かった。SO_x排出量の場合は、チップ輸送時の排出量が最も多かった。これは、紙の製造工程では排煙脱硫装置による処理が行われているが、船舶等の輸送機関では排気の処理が行われていないことによる。

(3) 古紙パルプ配合率の影響についてシミュレーションを行った結果、配合率が増加すると、化石燃料とバイオマス由来の合計CO₂排出量は減少する傾向にあった。ただし、古紙パルプ高配合に伴う品質低下を防止する目的で、収率50%まで精製した古紙パルプを用いると、配合率が増加しても合計のCO₂排出量

は減少しなかった。いずれの場合も化石燃料由来のCO₂排出量は古紙パルプ配合率と共に増加する傾向にあった。

(4) 回収した古紙の一部分をサーマルリサイクルすることにより、古紙パルプ製造に伴う化石燃料使用量の増加を抑えうることが明らかになった。

(5) インベントリー実施上の課題として、植林の取扱い方法、ボイラーで発生するエネルギーの配分方法、製紙用薬品製造時の環境負荷データの整備等がある。前二者については、今後製紙業界の統一見解が出れば、見直す可能性がある。

引用文献

- 1) 環境庁企画調整局環境研究技術課監修：ライフサイクルインベントリー分析の手引き，化学工業日報社，1999
 - 2) 砂金光記，大村光正，藤田滋，中谷真紀子：第80回電子写真学会研究討論会予稿集。電子写真学会，1997，p 69
 - 3) Hedenburg, O. Jacobson, B. B., Pajula, T., et al. : SCAN Forskrappport 682, Nordpap, Oslo, 1997
 - 4) Vizcarra, A., Lo, V., Bicho, P. A. and Watson, P. A. : TAPPI J. 82 (2) 115 (1999)
 - 5) 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，プラスチック処理促進協会，1993
 - 6) 平成8年度版運輸関係エネルギー要覧，運輸省，1996
 - 7) 二酸化炭素排出量調査報告書，環境庁，1992
 - 8) 中島繁男：紙パ技協誌 49 (2) 215 (1995)
 - 9) Mcbridge, D. : Pulp & Paper 71 (12) 69 (1997)
 - 10) 野間俊哉：紙パ技協誌 53 (1) 83 (1999)
- (受理：'99.12.10)

乾燥工程における紙の寸法安定性の改善（第2報）

—動的拘束乾燥による収縮とカール特性—

三菱重工業株式会社 広島研究所 久野廣明, 蓮池牧雄, 真田 晃, 横尾和俊
 三菱重工業株式会社 紙・印刷機械事業部 大平和仁

実機ドライヤでは、カンバスによる面圧拘束、オープンドロ部でのテンション拘束、バキュームロール上での真空拘束が連続的にかつ高速で繰り返されることにより、紙の寸法安定性に係る性質の多くが決定される。本研究では実機の乾燥工程を模擬した動的拘束乾燥実験装置を製作し、各拘束の組み合わせによる拘束力および拘束率と乾燥収縮率の関連を把握するとともに、表裏乾燥順序や表裏乾燥負荷をかえることでカールの特徴的な挙動を明かにした。乾燥過程の拘束率と加熱温度は収縮率に著しい影響を与え、機械抄きの紙を使った実験では、拘束率が87%のときのCD収縮率は、無拘束乾燥と比較して36%減の3.4%となり、また加熱表面温度を60℃から100℃に上げることで、CD収縮率を2%まで低減できることがわかった。一方、オープンドロ部での乾燥は幅方向に不均一な収縮プロファイルを与えるが、FEMによる乾燥過程の応力解析から、その原因は端部ほど収縮に対し抗力となる応力レベルが低くなるためと考えられた。また、ドライヤ形式の主流となりつつある単段式ドライヤの場合、カールの傾向は紙の表裏を反転乾燥する際の含水率と、どちらの面から最初に乾燥するかで異なる。片面乾燥においては、クリティカル含水率と定義される33~34%近傍の含水率で表裏を反転すれば、両面交互乾燥と同等のカール値が得られることが明らかになるなど乾燥過程における寸法安定性改善のためのいくつかの有効な知見が得られた。

(本文 74 ページ)

上質紙の LCA：ライフサイクル・インベントリー

三菱製紙株式会社 総合研究所 桂 徹
 八戸工場 庭田 博章
 東海大学 工学研究科 中澤 克仁, 片山 恵一
 東京大学 生産技術研究所 坂村 博康, 安井 至

古紙パルプを含む上質紙について植林から廃棄に至るライフサイクル・インベントリーを試み、以下の結果を得た。

(1) CO₂量を化石燃料由来とバイオマス由来の排出量および木材や紙に固定された量に分けて解析することにより、CO₂排出量に対する植林や古紙の役割を明らかにすることが出来た。

(2) 紙の全ライフサイクルでの、化石燃料に由来するCO₂排出量は紙製造工程が最も多かった。SO_x排出量の場合は、チップ輸送時の排出量が最も多かった。これは、紙の製造工程では排煙脱硫装置による処理が行われているが、船舶等の輸送機関では排気の処理が行われていないことによる。

(3) 古紙パルプ配合率の影響についてシミュレーションを行った結果、配合率が増加すると、化石燃料とバイオマス由来の合計CO₂排出量は減少する傾向にあった。ただし、古紙パルプ高配合に伴う品質低下を防止する目的で、収率50%まで精製した古紙パルプを用いると、配合率が増加しても合計のCO₂排出量は減少しなかった。いずれの場合も化石燃料由来のCO₂排出量は古紙パルプ配合率と共に増加する傾向にあった。

(4) 回収した古紙の一部分をサーマルリサイクルすることにより、古紙パルプ製造に伴う化石燃料使用量の増加を抑えうることが明らかになった。

(5) 一連の検討を通じて、植林の取扱い方法、ボイラーで発生するエネルギーの配分方法、製紙用薬

品製造時の環境負荷データの整備等が今後の課題として明らかになった。

(本文 84 ページ)

ファインと紙力剤のリテンションに影響を及ぼす因子の解析

日本製紙株式会社 技術研究所 小野 裕司、宮西 孝則

抄紙機のウェットエンドにはパルプ由来のリグニン、ヘミセルロース、樹脂酸、脂肪酸、トリグリセリドなどのリテンション阻害物質が多量に存在し、リテンションの阻害要因になっていることが知られている。これらの阻害物質の指標として、ゼータ電位、電導度、全有機体炭素 (TOC)、カチオン要求量、UV 吸光度、濁度等があるが、統一した見解や普遍的な理論を導き出すには到っていない。そこで、ファイン系の量が多い GP を主体としたパルプに、硫酸バンドとカチオン PAM を使用したシングルポリマーシステムと pDADMAC とカチオン PAM を使用したデュアルカチオンシステムのモデル実験を行い、ファインリテンションと紙力剤定着率を最適化するウェットエンド指標を調査した。更に、Smoluchowski の perikinetic 式 (ブラウン運動による衝突) と orthokinetic 式 (シェアーによる衝突) から、乱流下における、凝結剤とアニオントラッシュ、及び繊維への衝突頻度を計算し、理論的な裏付けをした。

硫酸バンドを凝結剤として使用した場合にファインリテンションを最大にするには、ゼータ電位を約 -10 mV に近づけ、TOC や UV 吸光度、濁度を最小にすること、pDADMAC を凝結剤として使用した場合にファインリテンションを最大にするには、ゼータ電位を約 -10 mV に近づけ、TOC を最小にすることが重要であることが示された。衝突頻度の計算から、アルミニウムイオンはアニオントラッシュに吸着した後に繊維に吸着するが、pDADMAC は繊維に吸着した後にアニオントラッシュに吸着することが示された。この結果は本実験結果や Brouwer らの実験結果と一致した。この様に凝結剤の種類によってアニオントラッシュと繊維に対する衝突頻度が異なるために、ろ液のカチオン要求量を測定してもファインリテンションを最適化する指標にはならず、繊維の表面電荷密度を表現しているゼータ電位がファインリテンションを最適化する指標になるものと考えられる。

カチオン澱粉や PAM 系紙力剤の定着率を最適化する指標には、ゼータ電位ではなく、パルプ全体のカチオン要求量が指標になる。パルプ全体の電荷の $10\sim 20\%$ が中和されている場合にカチオン澱粉の定着率が最大になり、約 30% が中和されている場合に PAM 系紙力剤の定着率が最大になった。歩留向上剤は分子量が大きいため、パルプの最表面に吸着するのでファインリテンションを最適化するにはゼータ電位が指標と考えられる。それに対し、紙力剤は分子量が小さいために、フィブリル内部へも吸着するのでパルプ全体のカチオン要求量が紙力剤定着率を最適化する指標になるものと思われる。

(本文 92 ページ)