代替的なリサイクル技術の資源循環効果の評価 —木材資源の水平循環とカスケード循環の比較—

藤井 実¹・長澤 恵美里²・橋本 禅³・藤田 壮³

¹国立環境研究所 循環型社会・廃棄物研究センター（〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2）

E-mail: fujii@nies.go.jp

²東洋大学大学院 工学研究科 環境・デザイン専攻（〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100）

³国立環境研究所 アジア自然共生研究グループ（〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2）

木材の用途の一つである紙について、水平リサイクルとカスケードリサイクルの効果を、CO₂排出量を評価対象として検討を行った。古紙の水平リサイクルには再生紙としての利用、カスケードリサイクルには発電をシナリオとして想定した。このとき、木材のバイオマス発電もシステム境界内に含めることにより、バイオマス燃焼時のCO₂排出のカウント方法の違いに影響されることなく、両リサイクル手法間の相対的な比較を行うことができる。CO₂排出量の評価結果の大小は、木材がライフサイクルにおいてどのような製品（機能）をどれだけ提供するかに依存して変化することが示された。

Key Words : wood resource, paper, horizontal recycling, cascade recycling, carbon dioxide

1. はじめに

循環型社会の形成に向けて様々なリサイクルの取り組みが行われている。リサイクルにはペットボトルのbottle to bottleのケミカルリサイクルのように、元と同じ製品に戻る水平リサイクルと、使用済み製品を異なる製品や化学原料として利用したり、あるいはエネルギー回収を行ったりするような、カスケードリサイクルとが存在する。資源を繰り返し利用する観点からは、水平リサイクルが望ましいとされる¹⁾が、一方で品質面から元の製品に戻すことが難しい場合や、元とは異なる製品に対する需要が大きい場合には、カスケードリサイクルが選択される。また、水平リサイクルにおいて資源を繰り返し利用することの効果について、評価基準が必ずしも定まっていない^{2,3)}。本論文では水平リサイクルとカスケードリサイクルの効果を、木材の利用先の一つである紙について、CO₂排出量を評価項目として検討を行う。紙パルプ産業は国内製造業のエネルギー消費の約6%を占め、国内のエネルギー消費全体に対しては約3%を占めている⁴⁾。

紙は製造時にエネルギーを消費するとともに、それ自身も発熱量を持っており、燃焼によってCO₂を排出する。リサイクル効果の評価に際しては、プラスチックと類似の特徴が現れることになる。図-1に紙（上級印刷紙、

古紙配合率0%）の製造エネルギー⁵⁾と紙の発熱量（紙の種類によって異なるため、文献値⁶⁾等を参考に仮定）について示した。また、プラスチックの代表的な樹脂として、ポリエチレンテレフタレート（PET）及びポリプロピレン（PP）についても、製造エネルギー⁷⁾と発熱量⁸⁾を示した。カスケードリサイクルの典型例の1つである発電や熱回収などのエネルギー回収では、素材の持つ燃焼熱のみが利用されることになる。一方素材として再利用するマテリアルリサイクルや一部のケミカルリサイクルでは、製造原料の他に製造エネルギーも節約することが

図-1 紙・プラスチックの発熱量と製造エネルギー

可能である。リサイクルによる資源の節約効果を測る際には、代替率⁹⁾や性能比¹⁰⁾などで表される、再生素材1kgが新規素材何kgと置き換わるかという点が重要であるが、特に元と同じ用途に利用する水平リサイクルの場合、再生素材が新規素材と同等に使用されるため、節約の効果が大きくなる。紙の場合、発熱量に比べて製造に要するエネルギーが大きい。このため潜在的にはエネルギー回収よりは、紙として繰り返し利用できる水平リサイクルの方が、エネルギー消費の面で有利になりやすい。しかし後述するように、古紙のリサイクルには多量のエネルギーを消費するため、水平リサイクルが必ずしも有利とはなくなっている。

このような状況はPETのbottle to bottleのケミカルリサイクルとも類似している。PETはPPと比較すると、燃焼熱に対する製造エネルギーの割合が相対的に大きい。従ってエネルギー回収よりもPETとしてリサイクルすることに潜在的な優位性が高い。しかし、ケミカルリサイクルにはPETの製造エネルギーに匹敵するエネルギーを消費する⁹⁾ため、リサイクルによる節約効果は原料分程度にとどまっている。

紙の製造を新規パルプから製造する場合と、古紙を用いて製造する場合について、ライフサイクルにおけるインベントリの収集及び分析が行われている^{3, 11-13)}。新規パルプから製造する場合木材チップを消費するが、パルプ製造のためのエネルギーの一部が、工程で木材チップから抽出される黒液などで賄われるため、化石燃料の消費が抑制される。一方、古紙のリサイクルは森林資源の節約にはなるものの、パルプの製造工程において化石燃料を使用するため、新規に製造する場合に比べて化石燃料の使用量が増加することになることが、海外の事例においても指摘されている¹⁴⁾。そのような構造を反映して、古紙をリサイクルする方がCO₂の排出量は増加する結果が導かれている⁹⁾。しかしこの結果は、木材を燃焼した際に生成するCO₂は、森林が生育する際に一旦吸収されたカーボンニュートラルなものであるとして、排出量を計上していないためである。

木材などのバイオマス資源が燃焼した際にカーボンニュートラルの扱いとすることはこれまで一般的に行われてきているものの、それに対してCO₂は森林が成長した時点で吸収をカウントし、バイオマスが燃焼した際には排出としてカウントすべきとの主張もある¹⁵⁾。従って、新規パルプからの紙製造と古紙リサイクルによる紙製造に伴うCO₂排出量の大小は、バイオマス起源のCO₂のカウント方法によって変化する可能性がある。本論文では、このような観点も考慮した上で、古紙の水平リサイクル、カスケードリサイクルについて検討を行う。

2. 方法

(1) 水平リサイクルとカスケードリサイクルの比較方法

ペットボトルのリサイクルを事例にして、繰り返し同じ用途に利用する水平リサイクルと、他の用途に利用するカスケードリサイクルにおいて、CO₂排出量の削減効果を比較する際には、繰り返し利用する回数によらず、リサイクル1回当たりの削減効果で比較すればよいことが示されている³⁾。古紙のリサイクルについても同様の理屈が当てはまるが、ここでは簡単なフロー図を用いて定性的にその意味を説明する。図-2は、ある新規資源について、それを利用して製造される製品（機能）とともに示したものである。論点を明確にするため、副原料やプロセスエネルギーの投入、使用済み製品の回収率などについては議論の対象外とした。図-2 (a)に示すように、新規資源を素材として複数回利用するリサイクル（シナリオ2a）は、素材としては1度しか利用せず、その後はエネルギー回収によるカスケードリサイクルを行う場合（シナリオ1a）に比べて、提供できる機能数の点で有利である。水平リサイクルや、あるいは素材として再生するマテリアルリサイクルが支持される根拠であると考えられる。一方、仮に再生素材に需要が存在しないのであれば、繰り返し利用の効果は得られない。反対に需要の存在するものであれば、シナリオ1aにおいても製品需要を満たした上で比較を行わなくてはならない。そこで図-2 (b)に示すように、シナリオ1bでは新規資源2単位を用いて新規素材2単位を製造し、シナリオ2bと提供される素材の単位数を合わせて比較を行う必要がある。このとき使用済み素材のカスケードリサイクルによって生産

(a)

★提供する機能数の点で、繰り返しリサイクルが有利

(b)

★需要一定の条件下で機能単位を揃えたと、繰り返しリサイクルが有利とは限らない

素材の需要が2単位、熱・電力の需要が2単位の場合

図-2 水平リサイクルの効果とカスケードリサイクルとの比較

される熱・電力の生産数量を合わせるためには、シナリオ2bには新規資源から熱・電力を製造するプロセスが必要であり、これを加えている。シナリオ1b、2bの比較では、新規資源の投入単位数と、得られる素材や熱・電力などの機能群の単位数は同じであり、水平リサイクルを行う2bに特別な優位性がある訳ではない。繰り返し利用の有無やその回数だけでは、リサイクルの効果は議論できないことを示している。ただし熱・電力の製造に使用する新規資源は、素材製造に用いる資源とは異なるものでもよく、新規資源に希少性がある場合には、水平リサイクルが有効であると言える。重要なのは図-2で議論の対象としている水平リサイクルの有無ではなく、議論の対象外とした製造やリサイクルのためのエネルギー投入、収率などであり、これらは循環資源の物理・化学的な特性と、その用途との組み合わせによって大きく左右される部分である。これらの点について、具体的な評価事例を用いて検討を行う。

(2) 評価対象事例

木材から製造した新規紙が使用済みとなった古紙を、再生紙として水平リサイクルする場合と、発電を行うカスケードリサイクルに用いる場合とにおけるCO₂排出量を比較する。再生紙の品質が新規紙と異なる場合には厳密な意味では水平リサイクルとは呼べないが、ここでは再生紙も新規紙と同じ用途に利用可能である場合を仮定し、水平リサイクルの範疇であるものとする。ただし、古紙のリサイクルは繊維の劣化を伴うために、繰り返しサイクル可能な回数には限度がある。前述のように、水平リサイクルとカスケードリサイクルの効果の比較は、図-2 (b)に合ったシステム境界の下に行われるべきである。これを評価事例に当てはめたものを図-3に示す。定性的・概念的なフロー図であり、定量的に機能単位を合わせた比較シナリオについては後に記載する。木材には植林・育林や伐採などのプロセスも含むものとする。シナリオ1がカスケードリサイクル、シナリオ2が水平リサイクルに該当する。電力調整は、シナリオ間で過不足す

る電力を公共電力などにより調整することを意味する。これまでの古紙リサイクルの評価例^{5, 11-13)}では、システム境界1aもしくは1bに相当する部分までが評価範囲となっている。再生紙が新規紙よりもCO₂排出量が多くなるのは、システム境界1aによる評価の結果である。一方、シナリオ2における電力生産は、必ずしも木材を原料とする必要はない。この場合、システム境界1bとシステム境界2の間には本質的な差がないことになる。しかし木材を発電原料とし、シナリオ間の木材使用量を等量にするシナリオとすることで、木材燃焼時にカーボンニュートラルであることによる、CO₂ゼロカウントの与える影響がシナリオ間で相殺されるため、比較結果がより普遍性を持つことになる。地球温暖化やエネルギー資源の枯渇への対処の観点から、持続可能な状態で森林資源を積極活用することが求められており¹⁰⁾、古紙のリサイクルについても、木材の有効利用の観点で評価を行うことに一定の意義があると考えられる。

(3) 評価対象範囲と評価シナリオ

新規紙及び再生紙の製造に関わるインベントリは、日本製紙連合会の報告書⁹⁾に記載のもののうち、上級印刷紙、再生上質紙（古紙利用率75.9%）のデータを使用する。このデータ範囲は、図には明示していないが、植林・育林、輸送、パルプ化、抄紙、古紙回収、古紙のパルプ化までが含まれており、製品である紙の流通・使用段階や廃棄処理については含まれていない。この結果が古紙を再生紙あるいはRPF（後述）に利用するシナリオにおける回収率は71.5%¹⁷⁾とし、それ以外のシナリオでは可燃ごみとして100%回収され、焼却発電に利用されるものとする。焼却発電の発電効率は10%を基本とする。RPFは、古紙と廃プラスチックを主原料とした固形燃料で、一般ごみを固形燃料化したRDFに比べて発熱量が石炭程度と高く、塩素の混入も軽微であるためボイラーへの腐食の影響もほとんどない燃料であるとされる¹⁸⁾。RPFの製造にはエネルギー消費によって0.08kg-CO₂/kg程度のCO₂排出を伴い¹⁹⁾、これは石炭火力発電の発電効率を2%程度押し下げる分量に相当する。ここではRPF化も含めたRPF発電の総合効率が32%であるとして評価を行う。可燃ごみとしての収集に伴うCO₂排出は、市区町村の世帯密度と面積によって変動する¹⁹⁾。ここでは収集部分の差異が結果に影響するのを避けるため、古紙回収と同じCO₂排出原単位をシナリオとして設定する。グリッドシティーモデルを用いたモデル計算¹⁹⁾の結果から、想定するCO₂排出原単位は、週3回の可燃ごみとして収集を行った場合、（世帯密度[世帯/km²]、面積[km²]）の組み合わせでは、概ね（100, 100）、（400, 150）、（1000, 170）、（4000, 190）などの市区町村における収集に相

図-3 古紙の水平リサイクルとカスケードリサイクルの比較

図4 比較評価シナリオ

当している。シナリオ2に付随する木材の発電については、関東近郊のバイオマス発電所の操業データ（150t/day, 98.4MWh/day）を参考に、送電端における発

電量が0.656kWh/kg-木材である場合を基本に設定する。この発電量は、木材の発熱量として木屑、林地残材などが含水率15%である場合の発熱量である、15.6MJ/kg¹⁹を想定した場合、約15%の送電端効率に相当する。また、シナリオ間で電力量を統一するための調整電力としては、RPFがセメント工場や火力発電施設において石炭の代わりに利用されるケースが多いことから、石炭火力発電を想定する。石炭の発熱量及び採掘過程を含めたCO₂排出量^{7, 21)}と発電端効率35%の想定から、0.96kg-CO₂/kWhのCO₂排出原単位を用いる。

評価するシナリオ群は図-4に示す以下の4つの組み合わせである。いずれのシナリオにおいても、再生紙を含めた紙の生産量及び、木材の使用量が共通である。尚、電力調整はシステム境界1b及びシステム境界2において必要で、それぞれ異なる値となるが、図にはシステム境界2に対応する電力調整のみを記載した。

- ・シナリオ1-Aと2-A：分別回収しない紙は、焼却発電される場合を想定。
- ・シナリオ1-Bと2-B：1-Bでは新規紙を、2-Bでは再生紙をそれぞれ分別回収して、RPF発電に利用する場合を想定。
- ・シナリオ1-Cと2-C：シナリオ1-Cは電力調整分を除いて1-Aと共通。シナリオ2-Cは2-Aから、バイオマス発電の効率を仮想的に25%まで上昇させた場合を想定。
- ・シナリオ1-Dと2-D：シナリオ1-Dは電力調整分を除いて1-Bと共通。シナリオ2-Dは1-DとのCO₂排出量が等しくなるように、バイオマス発電の発電効率を設定したもの。

3. 結果と考察

図-5に、各シナリオにおけるCO₂排出量を、システム境界1aの範囲内のCO₂排出量（凡例の境界1）と、システム境界2に広げた排出量（凡例の境界1と境界2の合計）に分けて棒グラフに示した。また、シナリオ2からシナリオ1の排出量を引き算した値を併記した。図-5はバイオマス起源のCO₂排出量をカウントしていない結果であるが、引き算した値では前述のように木材の燃焼によるCO₂排出は相殺されるため、カウント方法の影響を受けない。

シナリオ1-Aと2-Aの比較では、前述のようにシステム境界1aの範囲では再生紙に水平リサイクルするシナリオの方が、CO₂排出量が多い。しかし、ごみ焼却発電とバイオマス発電を含めた比較においては、CO₂排出量は逆転し、水平リサイクルを行う方が有利であるとの結論が導かれ得ることを示している。一方で、木材を一旦紙にしてこれをRPFとして効果的に発電に利用するパスは、

図-5 シナリオ間のCO2排出量とその差の比較

木材をそのまま発電に利用する場合に比べて、紙の需要が大きくまた紙を代替し得る他の競合資源も少ないことから、経済的により成立し易いとも考えられる。このような状況を踏まえて比較評価を行ったのがシナリオ1-Bと2-Bであり、この場合にはカスケードリサイクルの方がCO₂排出量削減の観点で有利となる。反対に、発電施設の大型化や技術改善などによって、バイオマス発電における発電効率が高められる可能性も想定される。このケースに対応するのがシナリオ1-Cと2-Cの比較である。バイオマス発電の発電効率が高まるほど、水平リサイクルを含めて木材を複数回利用し、節減された木材を発電に用いるシナリオ2が、CO₂排出量の削減に対してより有利となる。シナリオ1-Dと2-Dの比較は、RPF発電を導入した上で、両シナリオにおけるCO₂排出量がちょうど等しくなる発電効率(24.5%)で、バイオマス発電が運転された場合であり、この条件が対象とした事例におけるCO₂排出削減の有利・不利の分岐点となる。

本論文では、製紙プロセスについては既存の報告値を採用しているため、固定化された原単位としての扱いとなっており、システム境界1aへの入出力の変化が製紙プロセスに与える影響については不明である。紙製造工程で使用する化石燃料の一部は、廃プラスチックや廃木材などの廃棄物系の燃料で置き換えることも可能であり、

図-6 水平リサイクルとカスケードリサイクル(焼却発電)のCO₂削減効果の優位性分岐ライン

これによってCO₂排出量の見積もりも変動し得る。このため、報告書の結果は、その後の廃棄物資源の利用促進等により、現在の紙製造の平均的な姿を示していない可能性もある。しかし、このような燃料はセメント製造など他の産業でも需要があるため、ここでは議論の対象としていない。本研究では、システム境界1の境界外の諸条件を変化させることによって、製紙プロセスの位置付けを相対的に変化させ、それによって従来の評価とは結果やその解釈が変わり得ることを示している。図-6は、例えばごみ焼却発電の効率は施設によって様々であることを踏まえ、ごみ焼却発電の発電効率及び、バイオマス発電の発電効率を可変パラメータとして、シナリオ2からシナリオ1のCO₂排出量を引いた値を図示したものである。図中の太い実線が、両シナリオ間のCO₂排出量の大小関係が逆転する境界線である。これらの結果から、古紙の水平リサイクル、カスケードリサイクルの評価結果には、システム境界のとり方やシナリオの設定が大きく影響することが分かる。

本論文で設定した複数のシナリオは、紙としての利用、更にその再生紙への転換やエネルギー回収、またバイオマス発電による木材の直接燃焼など、木材をそのライフサイクルにおいてどのような用途(機能)に順次、あるいは一度限り利用することが、CO₂排出量削減の観点で有利であるかを検討するために作成したものであると考えることができる。木材の効率的な利用には素材の持つ特性をなるべく少ないエネルギー投入で最大限有効利用することが重要であり、その利用の全体像を俯瞰した評価の視点が重要であると考えられる。

4. おわりに

木材の用途の一つである紙について、水平リサイクルである再生紙へのリサイクルと、カスケードリサイクルである発電利用の効果を、CO₂排出量を評価対象として検討を行った。このとき、木材のバイオマス発電もシステム境界内に含めたシナリオとすることで、バイオマス燃焼時のCO₂排出をゼロカウントとするか否かの取り扱い方法の違いによらず、両リサイクル手法間の相対的な比較を行うことができる。CO₂排出量の評価結果の大小は、木材がライフサイクルにおいてどのような製品(機能)をどれだけ提供するかによって依存して変化することが示された。

参考文献

- 1) 産業構造審議会環境部会廃棄物・リサイクル小委員会：第4回製品3Rシステム高度化ワーキング・グループ資料, 2005

- 2) 鈴木 稔, 林 廣和 : 使用済ペットボトルのライフサイクル的分析と指標, 日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集, Vol. 2005, pp. 26-27, 2005
- 3) 藤井実, 橋本征二, 南齋規介, 村上進亮, 稲葉陸太, 大迫政浩, 森口祐一 : マテリアルリサイクルの評価方法の整理と評価事例, 日本 LCA 学会誌, Vol. 4, No. 1, pp. 78-88, 2008
- 4) 資源エネルギー庁 : エネルギー白書 2006 年版, 2006
- 5) 日本製紙連合会, 紙の LCI データ算定概要 (JLCA-LCA データベース), 2006
- 6) プラスチックごみの最適処理技術研究会編, 廃棄物処理実務シリーズ・実際知識編 2, プラスチックごみの減量化とリサイクル, 日報, 1995
- 7) JLCA-LCA データベース 2004 年度 2 版
- 8) プラスチック処理促進協会 : プラスチック廃棄物の処理・処分に関する LCA 調査研究報告書, 2001
- 9) 社団法人プラスチック処理促進協会, プラスチック製容器包装の処理に関するエコ効率分析, 2006
- 10) 藤井実, 橋本征二, 南齋規介, 村上進亮, 稲葉陸太, 森口祐一 : リサイクルの LCI 分析結果の表記法, 土木学会論文集, Vol. 63, No. 2, pp. 128-137, 2007
- 11) Dahlbo, H., Ollikainen, M., Peltola, S., Myllymaa, T., and Melanen, M. : Combining ecological and economic assessment of options for newspaper waste management, Resources Conservation & Recycling, Vol. 51, pp. 42-63, 2007
- 12) Schmidt, J. H., Holm, P., Merrild, A. and Christensen, P. : Life cycle assessment of the waste hierarchy - A Danish case study on waste paper, Waste Management, Vol. 27, pp. 1519-1530, 2007
- 13) Dias, A. C., Arroja, L. and Capela, I. : Life cycle assessment of printing and writing paper produced in Portugal, International Journal of LCA, Vol. 12, No. 7, pp. 521-528, 2007
- 14) Samakovlis, E. : The relation ship between waste paper and other inputs in the Swedish paper industry, Environmental and Resource Economics, Vol. 25, pp. 191-212, 2003
- 15) Rabl, A., Benoist, A., Dron, D., Peuportier, B., Spadaro, J. V. and Zoughaib, A. : How to account for CO₂ Emissions from biomass in an LCA, International Journal of LCA, Vol. 12, No. 5, pp. 281, 2007
- 16) 小木知子 : バイオマスエネルギー利用による CO₂ 削減効果, NIRE ニュース, Vol. 10, 1998
- 17) 環境省編, 平成 19 年版環境・循環型社会白書, 2007
- 18) 関勝四郎 : RPF の現状と日本 RPF 工業会の取り組み, 紙パルプ技術タイムズ, 2004 年 6 月号, pp. 37-41, 2004
- 19) 藤井実, 村上進亮, 南齋規介, 橋本征二, 森口祐一, 越川敏忠, 齋藤 聡 : 家庭系容器包装プラスチックごみの収集と運搬に関する評価モデル, 廃棄物学会論文誌, Vol. 17, No. 5, pp. 331-341, 2006
- 20) 財団法人新エネルギー財団, 新エネルギー等導入促進基礎調査～バイオマスエネルギーの実態等基礎調査～, 2001
- 21) 資源エネルギー庁長官官房総合政策課編 : 総合エネルギー統計平成 15 年度版, 通商産業研究社, 2005

EVALUATION ON THE EFFECT OF RESOURCE CIRCULATION BY AN ALTERNATIVE RECYCLING TECHNOLOGY - COMPARISON BETWEEN HORIZONTAL RECYCLING AND CASCADE RECYCLING OF WOOD RESOURCE -

Minoru FUJII, Emiri NAGASAWA, Tsuyoshi FUJITA and Shizuka HASHIMOTO

The purpose of this study is to evaluate the CO₂ reduction effect by a horizontal recycling and a cascade recycling of paper, which is one of the principal uses of wood resource. Production of recycled paper (horizontal recycling) and energy recovery by power generation (cascade recycling) were chosen as case studies. In order to evaluate the CO₂ reduction effect independently of the accounting method of biomass derived CO₂, biomass power generation was incorporated into the system boundary. The result showed that the CO₂ reduction effect varied by the range and quantity of functions provided during the life cycle of wood resource.