

資源有効利用度及び経済性からみた カスケードリサイクルの評価に関する研究

田畑智博¹・辻岡信也²・森杉雅史³・井村秀文⁴

¹ 学生会員 工修 名古屋大学大学院 環境学研究科都市環境学専攻 (〒464-8603 名古屋市中種区不老町)

² 工修 福井県庁 (〒910-8580 福井県福井市大手3丁目17の1)

³ 正会員 工博 名古屋大学助手 環境学研究科都市環境学専攻 (〒464-8603 名古屋市中種区不老町)

⁴ 正会員 工博 名古屋大学教授 環境学研究科都市環境学専攻 (〒464-8603 名古屋市中種区不老町)

資源有効利用度を向上させる手段として、カスケードリサイクルが注目されている。現状の廃棄物処理でもカスケードリサイクルは実施されているが、必ずしもその有効性を十分に活かしていない。本研究ではカスケードリサイクルを考慮した紙資源のリサイクルシステムをモデル化し、資源有効利用度及び経済性からみたカスケードリサイクル実施の有効性について評価した。その結果、カスケードリサイクルの実施は資源有効利用度及び経済性の向上において有効であるが、現状のリサイクルシステムは最適であるとはいえず、その改善が見込まれることが明らかとなった。

Key Words: cascade recycling, resource utilization, resource productivity, cost efficiency

1. 始めに

循環型社会の構築においては、廃棄物の発生抑制を実施するとともに、再資源化の実施により資源を徹底的に有効利用することで、資源有効利用度の向上を図ることが重要である。資源有効利用度を向上させる方法として、資源の質に見合った形態に段階的にリサイクルするという、資源のカスケードリサイクルが注目されている。

一般に資源はリサイクルされるごとにその品質が低下し、寿命がきた時点で最終処分される。カスケードリサイクルによる資源有効利用度の向上を図る尺度として、Sirkin ら¹⁾やFraanje²⁾は資源の質、利用回数、消費率、回収率を、Yamashita ら³⁾は、資源の質と利用回数を評価指標として用いることを提案している。また永田ら⁴⁾は PET ボトルから水切り袋へカスケードリサイクルについて LCA により有効性を評価しており、カスケードリサイクルに関する研究は幾らか見受けられる。しかしながら、カスケードリサイクルの有効性を評価するうえでは、資源有効利用度をただ向上させるということだけではなく、コストや採算性といった経済性などといった観点からも評価を行う必要がある。

一方、紙資源は製品に対するリサイクル材の利用割合が高く、例えば新聞古紙をダンボールに再生するという、古紙の紙製品への品種配分が、他資源に比べて進んでいるといえる。このようなデータは他資源に比べて豊富なことから、紙資源はカスケードリサイクルの評価事例として有用である。しかし現状のリサイクルシステムにおける古紙の紙製品への品種配分が、資源有効利用度や経済性からみて有効であるかは

明らかではない。また 2000 年に本格施行された容器包装リサイクル法により紙資源の回収量はこれまで以上に増えると予想される。そのため、古紙の紙製品への品種配分を資源有効利用及び経済性の面から最適化することで、現状よりもカスケードリサイクル実施の有効性を高めることが可能であり、またこれにより、更によりよいリサイクルシステムの構築が可能ではないかと考えられる。

以上のことから本研究では、紙資源のリサイクルシステムについてモデリングを行い、古紙から紙製品への品種配分を考慮したカスケードリサイクルの実施について、資源有効利用度及び経済性からその有効性を定量的に評価するとともに、更なる有効性の向上について検討することを目的とする。カスケードリサイクルの有効性を評価するための手法として、本研究では資源有効利用度及び経済性に関する指標を提案するとともに、これらを用いてシナリオ分析による紙資源リサイクルシステムの比較評価を行う。また古紙回収率の変化が古紙の紙製品への品種配分に及ぼす影響について分析し、より効率的なリサイクルシステムのあり方について考察を行う。

本研究のフローを図-1 に示す。先ず、紙資源のリサイクルシステムについて、モデリングを行う。第二に、リサイクルシステムのモデルからカスケードリサイクルの定式化を行うとともに、資源有効利用度及び経済性に関するカスケードリサイクルの評価指標を作成する。第三に、紙資源のリサイクルを実施する仮想地域を設定し、リサイクル量の最大化及び利益の最大化を考慮したシナリオを作成するとともに、シナリオ分析に

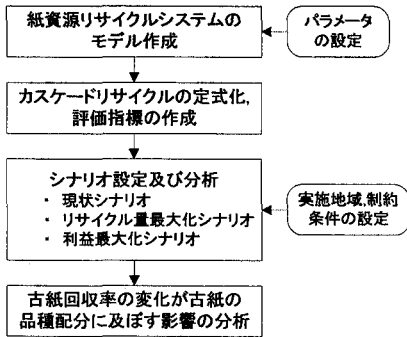


図-1 研究のフロー

表-1 紙製品と古紙の品種分類		
	紙製品	古紙
紙	新聞紙	上白・カード
	印刷・情報用紙	特白・中白・白マニラ
	包装用紙	模造・色上
	衛生用紙	新聞古紙
	雑種紙	雑誌
板紙	段ボール原紙	切付・中質反古
	紙器用板紙	茶模造
	雑板紙	段ボール
		台紙・地券

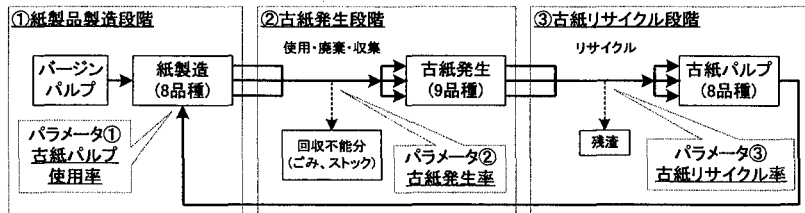


図-2 紙資源のリサイクルシステム

より現状シナリオとの比較評価を行う。最後に、シナリオ分析の結果を踏まえ、古紙回収率の変化が古紙の品種配分に及ぼす影響について分析を行う。

2. 紙資源リサイクルシステムのモデル作成

2.1. リサイクルシステム

本研究で対象とする紙製品と古紙の品種分類を表-1に⁵⁾、紙資源のリサイクルシステムを図-2に示す。紙資源のフローは①紙製品製造段階、②古紙発生段階、③古紙リサイクル段階、の三段階に分割した。なお、今回はリサイクルシステム内での紙製品や古紙の収集量やリサイクル量などがどのように変化するかを対象としたために、バージンパルプは系外から投入されるが、紙製品や古紙の輸出入分については考慮しなかった。また在庫分に関しても考慮していない。以下に各段階について説明する。

1) 紙製品製造段階

紙製品はバージンパルプと古紙からリサイクルされた古紙パルプにより製造される。ここで各品種の紙製品の製造時に、古紙パルプがバージンパルプに対してどの位の割合で利用されるかを、古紙パルプ利用率として与える。

品種 x の紙製品の製造量は、バージンパルプと品種 x の紙製品に使用される古紙パルプの使用量を足すことで算出される。

$$P_x = M_v + M_x \quad (1)$$

古紙パルプの使用量が既知でバージンパルプの使用量

が未知の場合、バージンパルプの使用量は古紙パルプの使用割合の逆数を掛けることで算出する。

$$P_x = \frac{1}{\eta_x} M_x \quad (2)$$

但し、 P_x : 品種 x の紙製品の製造量[t]、 M_v : バージンパルプ使用量[t]、 M_x : 品種 x の紙製品に使用する古紙パルプ使用量[t]、 η_x : 品種 x の紙製品への古紙パルプ使用率[-]。

2) 古紙発生段階

紙製品は使用後に廃棄、回収され、回収不能分(家庭内などでのストックやごみとして発生)を除いたものが古紙として発生することになる。ここでどの品種の紙製品がどの位の割合でどの品種の古紙として発生するかを、古紙発生率として与える。

品種 y の古紙の発生量は、品種 x の紙製品製造量に古紙発生率を掛け合わせ、全品種について足し合わせることで算出される。

$$W_y = \sum_{x=1}^8 s_{y,x} P_x \quad (3)$$

上式で $s_{y,x}$ は、品種 x の紙製品から品種 y の古紙への発生率を表す。品種 x の紙製品について、古紙発生率の合計値は、品種 x の紙製品からの古紙回収率と等価である。

$$S_x = \sum_{y=1}^9 s_{y,x} \quad (4)$$

但し, W_y : 品種 y の古紙発生量[t], s_{yx} : 品種 x の紙製品から品種 y の古紙への古紙発生率[-], S_x : 品種 x の紙製品からの古紙回収率[-].

3) 古紙リサイクル段階

古紙はリサイクルされて、各品種の紙製品製造に使用するための古紙パルプとなる。ここでどの品種の古紙がどの位の割合でどの品種の紙製品に使用される古紙パルプとなるかを、古紙リサイクル率として与える。

品種 x の紙製品に使用される古紙パルプ量は、品種 y の古紙発生量に古紙リサイクル率を掛け合わせ、全品種について足し合わせることで算出される。

$$M_x = \sum_{y=1}^9 r_{x,y} W_y \quad (5)$$

但し, r_{xy} : 品種 y の古紙から品種 x の紙製品への古紙リサイクル率[-].

4) 経済性評価

紙資源リサイクルシステムの経済性評価として、ここでは紙製品の販売により得られる利益を評価対象とする。但し、製造した紙製品はすべて売却されるものとする。また紙製品製造、リサイクルなどに関わる施設建設、設備償却費、人件費などは考慮しない。

品種 x の紙製品の製造、販売により得られる利益は、販売額から紙製品製造時及び古紙収集時の費用を引くことで算出される。

$$B_x = \frac{1}{\eta_x} v_x M_x - \left(C_{pv} M_v + \sum_{y=1}^9 C_{py} W_y \right) - \frac{D}{F} C_f \quad (6)$$

$$D = \xi \sqrt{A} \left(\frac{W_y}{q} + f \sqrt{N} \right) \quad (7)$$

但し, B_x : 品種 x の紙製品の利益[円], v_x : 品種 x の紙製品の販売単価[円/t], C_{pv} : パージンパルプ購入単価[円/t], C_{py} : 古紙 y の購入単価[円/t], D : 収集距離[km], F : 収集車燃費[円/ℓ], C_f : 軽油単価[円/ℓ], ξ : 補正係数[-], A : 可住地面積[km²], q : 最大積載量[t], f : 収集回数[回], N : ステーション数[数].

計算の簡単化のため、紙製品、パージンパルプ及び古紙パルプ製造時のエネルギー購入費などは、それぞれの購入単価に内包されているものと仮定した。製造される紙製品の品種によらず、パージンパルプの原料単価は一定である。

古紙収集時の輸送距離は、石川⁹⁾が開発したグリッドシティーモデルを用いて推計を試みる。グリッドシティーモデルは一般廃棄物収集時の輸送距離の推計を行うものであるが、古紙収集及び輸送は、ステーションごとで収集を行い処理施設へ輸送するという一般廃棄物の場合とほぼ同様であると考えられることから、本研究ではこのモデルを採用した。

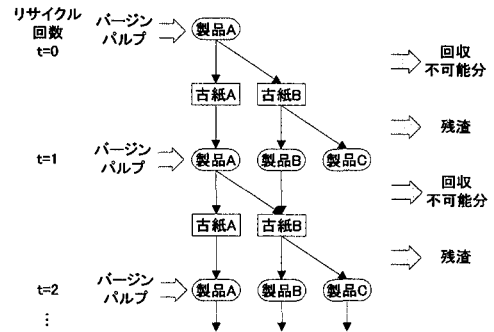


図-3 紙資源のカスケードリサイクル

2.2. カスケードリサイクル

カスケードリサイクルを実施した際の古紙の紙製品への品種配分は、図-3 のような流れになると考えられる。紙資源のカスケードリサイクルの評価指標についてはリサイクルシステムのモデルを踏まえ、資源有効利用度及び経済性それぞれについて作成を行う。但し、資源の質の劣化を定量化することは困難であるため、ここでは古紙のリサイクル回数ごとに古紙の回収不可能分や残渣を考慮した上で、次期紙製品の製造に利用される古紙パルプ量がどのように変化するかということのカスケードリサイクルとして捉えた。資源有効利用度についてはカスケードリサイクル実施による紙製品製造量に対する古紙パルプ利用量の割合を、経済性についてはコストに対する利益の割合によりそれぞれ評価を行う。また初期の紙製品の製造は、パージン資源のみで行うものと仮定する。

1) 資源有効利用度

資源有効利用度については、式(2)、式(3)、式(5)を組み合わせることで表現する。初期紙製品製造時($t=0$)、リサイクルの実施時($t \geq 1$)とでは、紙製品製造量は次式で表される。

$$[P_x]_{t=0} = [M_v]_{t=0} \quad (8)$$

$$[P_x]_{t \geq 1} = \frac{1}{\eta_x} \sum_{y=1}^9 \left\{ r_{x,y} \sum_{x=1}^8 (\delta_{x,y} s_{y,x} [P_x]_{t-1}) \right\} \quad (9)$$

カスケードリサイクルを T 回まで繰り返し実施した場合の、紙製品製造量の合計は次式で表される。

$$[P_x]_T = [P_x]_0 + \sum_{t=1}^T [P_x]_t \quad (10)$$

ここで δ_{xy} は各紙製品が古紙として回収される際の収集頻度関数である。紙製品はその消費後に廃棄される期間が品種により異なることで、品種ごとの収集方法も異なる(収集車のサイズや回収方法など)。故に、これらが古紙として収集されるまでの期間を設定する必要がある。本来は紙製品の品種ごとの使用期間を特定すべきであるが、実際には困難である。そのためどの品種の紙製品が、例えばある品種の古紙が

週1回収集・リサイクルされる場合は奇数、週2回収集・リサイクルされる場合は偶数と設定する。これにより、リサイクル回数が奇数($\sigma_{x,t}=0$)のときと偶数($\sigma_{x,t}=1$)のときとで、収集及びリサイクルの対象となる紙製品の種類が異なることになる。

$$\delta_{x,t} = \begin{cases} 0 & (t = \text{odd}) \\ 1 & (t = \text{even}) \end{cases} \quad (11)$$

カスケードリサイクル実施による資源有効利用度は、次式のように定式化する。

$$I_p = \frac{[P_x]_T}{[M_v]_T} \quad (12)$$

これはT回のリサイクルの実施により、投入したバージンパルプ使用量の合計に対する紙製品製造量の合計の割合で表現される。カスケードリサイクル実施によるバージンパルプ投入量よりも紙製品製造量が多ければ資源有効利用度は高くなり、逆ならば資源有効利用度は低くなる。

但し、 t, T : リサイクル回数、 $\delta_{x,t}$: 収集頻度関数[-]、 I_p : 資源有効利用度[-]。

2) 経済性

経済性については、式(3)、式(6)、式(10)を組み合わせることによって表現する(但し、ここではリサイクル実施により得られる利益を対象とするため、初期紙製品製造時の利益及びコストは考慮しない)。カスケードリサイクル実施時の紙製品製造時の利益は次式で表される。

$$[B_x]_{t \geq 1} = \{v_x - (1 - \eta_x)cp_x\}[P_x]_{t \geq 1} - \sum_{y=1}^9 \left\{ cp_y \sum_{x=1}^8 (\delta_{x,t} s_{y,x} [P_x]_{t-1}) \right\} - \frac{D_t}{F} Cf \quad (13)$$

$$D_t = \xi \sqrt{A} \left(\frac{1}{q} \sum_{x=1}^8 \delta_{x,t} s_{y,x} [P_x]_{t-1} + f \sqrt{N} \right) \quad (14)$$

カスケードリサイクルをT回まで繰り返し実施した場合の、利益の合計は次式で表される。

$$[B_x]_T = \sum_{t=1}^T [B_x]_t \quad (15)$$

カスケードリサイクル実施による経済性は、次式のように定式化する。

$$I_b = \frac{[B_x]_T}{[C_x]_T} \quad (16)$$

これはT回のリサイクルの実施による、コストの合計に対する利益の合計の割合で表現される。カスケードリサイクル実施によるコストよりも利益が高ければ経済性は高くなり、逆ならば経済性は低くなる。

但し、 I_b : 経済性[-]、 C_x : 品種xの紙製品のコスト[円]。

表-2 古紙パルプ利用率、古紙回収率、販売額

	古紙パルプ 利用率 [-]	古紙回収率 [-]	販売額 [千円/t]
新聞紙	0.67	0.68	115
印刷・情報用紙	0.23	0.57	108
包装用紙	0.04	0.30	108
衛生用紙	0.55	0	170
雑種紙	0.01	0.017	228
紙器用板紙	0.89	0.22	97
段ボール	0.99	0.86	42
雑板紙	0.93	0.21	78

2.3. パラメータ設定

紙資源リサイクルシステムのモデルで用いるパラメータについて以下に示す。なお本来はパラメータの使用年度は統一すべきであるが、データの制約上年度の異なるデータを用いた。

・古紙パルプ使用率(表-2)

古紙パルプ使用率は、紙製品への古紙パルプの使用割合を表す。これは2001年における紙製品製造時の古紙パルプ利用率を使用した⁷⁾。

・古紙発生率(表-3)

古紙発生率は、どの品種の紙製品がどのくらいの割合でどの品種の古紙として発生するかを表す。これはどの種類の紙製品が消費後にどの種類の古紙として発生するかを参考文献より推計するとともに、表-2の2000年における古紙回収率を組み合わせて推計した^{8,9)}。例えば紙製品の「段ボール」は消費後にその86%が「段ボール原紙」として発生すると推計される。しかし紙製品の種類によっては、消費後に複数の種類の古紙として発生しているものもあり、それぞれの古紙発生率は不明である。この場合は、その品種の紙製品の古紙回収率を、発生する古紙の種類で按分することで推計した。

・古紙リサイクル率(表-4)

古紙リサイクル率は、どの品種の古紙がどのくらいの割合でどの品種の紙製品に使用される古紙パルプとなるかを表す。これは2001年における古紙消費原単位を古紙リサイクル率として使用した⁷⁾。表中の値はどの品種の古紙が、どの品種の紙製品として消費されるかという割合を表している。厳密には古紙のリサイクル率を表していないが、大江¹⁰⁾はこれに相当するものとして差し支えないとしており、本研究ではこれを適用するものとした。

・紙製品販売額(表-2)

品種別の紙製品の1t当りの販売額は、2001年における紙製品の販売金額を出荷量で割ることにより推計した¹⁰⁾。

・バージンパルプ、古紙購入単価(表-5)

バージンパルプの1t当りの購入単価は2001年の製紙パルプ市況より推計した¹⁰⁾。古紙の1t当りの購入単価は2001年の古紙市況より推計した⁷⁾。但し、切付・中更反古、茶模造、台紙・地券については、新聞古紙の購入単価と同じであると仮定した。

表-3 古紙発生率

	上白・カード	特白・中白・ 白マニラ	模造・色上	茶模造紙	切付・中更反 古	新聞古紙	雑誌	段ボール原 紙	台紙・地券
新聞紙	0.0041	0.0041	0.0041	0	0.0041	0.66	0.0041	0	0
印刷・情報用紙	0.11	0.11	0.11	0	0.11	0	0.11	0	0
包装用紙	0.022	0.022	0.022	0.18	0.022	0	0.022	0	0
雑種紙	0.0034	0.0034	0.0034	0	0.0034	0	0.0034	0	0
紙器用板紙	0.00047	0.00047	0.00047	0	0.00047	0	0.00047	0	0.22
段ボール	0	0	0	0	0	0	0	0.86	0
雑板紙	0	0	0	0	0	0	0	0	0.21

単位: [-]

表-4 古紙リサイクル率

	新聞紙	印刷・情報 用紙	包装用紙	衛生用紙	雑種紙	紙器用板 紙	段ボール	雑板紙
上白・カード	0	0	0	1.17×10^{-2}	5.00×10^{-4}	1.09×10^{-2}	4.17×10^{-3}	1.41×10^{-2}
特白・中白・白マニラ	0	1.20×10^{-3}	3.00×10^{-4}	0	0	1.32×10^{-2}	2.88×10^{-3}	9.25×10^{-3}
模造・色上	2.40×10^{-3}	4.66×10^{-2}	0	5.30×10^{-1}	0	1.03×10^{-1}	8.40×10^{-3}	2.38×10^{-2}
茶模造紙	0	0	1.62×10^{-2}	0	0	0	1.97×10^{-2}	1.84×10^{-2}
切付・中更反古	0	1.81×10^{-2}	2.80×10^{-3}	0	0	3.55×10^{-2}	4.29×10^{-4}	1.25×10^{-2}
新聞古紙	6.42×10^{-1}	1.47×10^{-1}	2.41×10^{-2}	3.50×10^{-3}	1.80×10^{-3}	1.02×10^{-1}	6.06×10^{-3}	1.07×10^{-1}
雑誌	2.79×10^{-2}	1.24×10^{-2}	0	0	3.80×10^{-3}	4.78×10^{-1}	1.31×10^{-2}	2.24×10^{-1}
段ボール原紙	0	0	0	0	3.90×10^{-3}	7.08×10^{-2}	7.85×10^{-1}	4.27×10^{-1}
台紙・地券	0	0	0	0	0	7.35×10^{-2}	3.25×10^{-2}	9.16×10^{-2}

単位: [-]

3. リサイクルシステムのシナリオ分析

3.1. シナリオ設定

前項で作成した紙資源リサイクルシステムのモデルにおいてカスケードリサイクルを実施した際には、古紙の紙製品への品種配分を変化させることが資源有効利用度及び経済性に大きく影響を及ぼすことが考えられる。ここで古紙の品種配分を変化させるパラメータとして、古紙発生率及び古紙リサイクル率が考えられる。古紙リサイクル率を固定した場合に、古紙のリサイクル量及び次期の紙製品製造量が定まり、これに伴い紙製品消費後の古紙発生量も定まる。この中で品種別の紙製品の古紙発生割合が変化することにより、結果的に古紙リサイクル量も変化することになる。ここで、品種全体での古紙リサイクル量の最大化が誘発されるためには、古紙発生率がどのように変化すべきかという観点から、今回は古紙発生率を操作変数とした。目的変数としては、全体での古紙パルプリサイクル量ないしは販売総額を用いることで、また制約条件を古紙回収率の限界値より設定することで、最適化問題を定式化する。また、古紙発生率の決定には古紙の質に依存する部分が大きいが、データ制約から古紙発生率の技術的制約は、今回は考慮しなかった。各シナリオでの品種別の古紙発生率の解析は、GAMS 言語を用いて行った。

設定したシナリオは、①現状での古紙の品種配分、②古紙リサイクル量を最大化した場合、③利益を最大化した場合、の3種類である。以下に各シナリオ及び地域の設定について述べる。

1) シナリオ 0(現状シナリオ)

表-3の2000年における古紙発生率を、現状での古紙の品種配分とする。

2) シナリオ 1(リサイクル量最大化)

表-5 パーシジナルパルプ、古紙の購入単価

	購入単価
パーシジナルパルプ	66
古紙 上白カード	54
特白・中白・白マニラ	45
模造・色上	13
新聞古紙	10
雑誌	6
切付・中更反古	10
茶模造	10
段ボール原紙	9
台紙・地券	10

単位: [千円/t]

古紙の古紙パルプへのリサイクル量を最大化した際の古紙発生率を推計する。目的関数は次式となる。

$$\text{maximize} \quad \sum_{i=1}^k M_x \quad (17)$$

制約条件は以下のように設定する。ここで式(18)は品種 x の紙製品の品種 y の古紙への古紙発生率の合計値が品種 x の紙製品からの古紙回収率を超えないため、式(19)はある品種の古紙が極端に多く発生することを避けるための上限値の設定である。

$$\sum_{y=1}^9 s_{y,x} = S_x \quad (18)$$

$$\sum_{x=1}^8 s_{y,x} \leq 1.0 \quad (19)$$

3) シナリオ 2(利益最大化)

紙製品の製造、販売により得られる利益を最大化した際の

表-6 対象地域の設定

＜地域条件＞ 人口	2,200 [千人]
可住地面積	98,280 [km ²]
＜輸送条件＞ 軽油単価	81 [円/l]
・新聞紙,印刷・情報用紙,段ボール	
回収ステーション数	43 [台]
収集車最大積載量	8.8 [t]
収集車燃費	4 [km/l]
・包装用紙,雑種紙,紙器用板紙,雑板紙	
回収ステーション数	38,600 [台]
収集車最大積載量	2.0 [t]
収集車燃費	17 [km/l]

表-7 初期紙製品製造量及び収集頻度

	製造量 [t]	収集頻度
合計	510,000	-
新聞紙	57,490	まとまった量を収集するため,
印刷・情報用紙	185,450	大規模ステーションで,リサイクル
段ボール	16,700	回数が偶数の時に収集する
包装用紙	28,380	自治体のごみ収集業務と同様に,
雑種紙	177,680	小規模ステーションで毎回収集
紙器用板紙	11,460	する
雑板紙	15,740	
衛生用紙	17,100	収集しない

表-8 古紙発生率推計値

(a) シナリオ 1 (リサイクル量最大化)

	模造・色 上	新聞古紙	雑誌	段ボール 原紙
新聞紙	0	0.21	0	0.48
印刷・情報用紙	0	0.57	0	0
包装用紙	0.11	0	0.19	0
雑種紙	0.016	0	0	0.0012
紙器用板紙	0	0.078	0	0.14
段ボール	0	0	0.58	0.28
雑板紙	0.21	0	0	0

単位: [-]

(b) シナリオ 2 (利益最大化)

	模造・色 上	新聞古紙	雑誌	段ボール 原紙
新聞紙	0	0.48	0	0.21
印刷・情報用紙	0	0	0	0.57
包装用紙	0.19	0	0.11	0
雑種紙	0	0.0012	0.016	0
紙器用板紙	0	0.14	0	0.078
段ボール	0.58	0.28	0	0
雑板紙	0	0	0.21	0

単位: [-]

古紙発生率を推計する。目的関数は次式となる。

$$\text{maximize} \quad \sum_{i=1}^k B_x \quad (20)$$

制約条件はシナリオ 1 の場合と同じである。

4) 仮想地域の設定

図-2 の紙資源のリサイクルシステムが域内で完結する仮想地域を設定した。本研究で設定した仮想地域の地域特性及び古紙の輸送条件を表-6 に示す。地域内で発生する古紙は回収ステーションで回収され、そこからリサイクル施設へ輸送されるものと仮定する。ここで収集される紙製品の品種により回収ステーションや収集車の設定が異なっている。新聞紙、印刷・情報用紙、段ボールについては名古屋市の¹⁰⁾が実施している収集形態(大規模ステーションで回収)を採用した。また包装用紙、雑種紙、紙器用板紙、雑板紙については、小規模ステーション(1ステーション当りの対象人口は57人/台と設定)で回収されると想定した。

紙製品は消費後に収集されて古紙となるが、品種別の紙製品の収集頻度を表-7 に示す。品種別の紙製品製造量は、2001年の品種別紙製品生産量の割合より按分した¹⁰⁾。また収集頻度は、名古屋市のごみ収集スケジュール(新聞紙、雑誌、段ボールは月2回収集、紙製容器包装廃棄物は週1回)をもとに設定した¹⁰⁾。これにより新聞紙、印刷・情報用紙、段ボールはリサイクル回数が偶数の場合に収集、リサイクルを行うが、その他の品種の紙製品は毎回収集、リサイクルを行うとしている。衛生用紙は表-2より古紙回収率が0であるため、収集対象としない。補正係数は石川の研究より1.52を採用した⁹⁾。

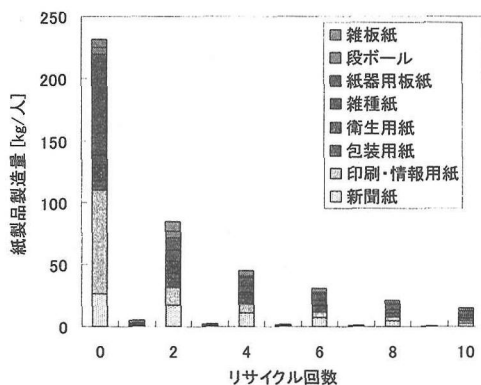
3.2. シナリオ分析の結果

1) 資源有効利用度

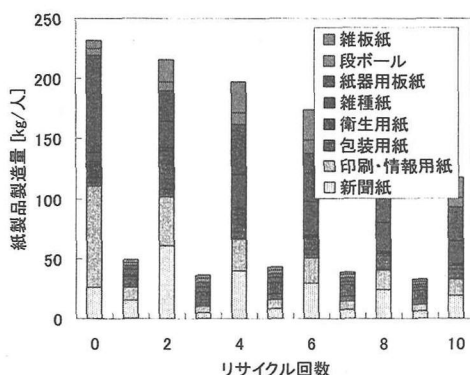
シナリオ 1 及びシナリオ 2 の古紙発生率の推計値を表-8 に示す。推計結果より幾つかの品種の古紙については発生率が0であったため、ここでは省いている。

リサイクルを10回行った場合の、リサイクル回数ごとの1人あたりの品種別紙製品製造量を図-4 に示す。新聞紙、印刷・情報用紙、段ボールは他品種の紙製品に比べて古紙としての発生率が高いため、リサイクル回数が偶数回と奇数回とで紙製品製造量に差が生じている。図-4 (a)のシナリオ 0 ではリサイクル回数ごとの紙製品製造量の減少率は速やかであるが、同図(b)のシナリオ 1 や同図(c)のシナリオ 2 の場合は、シナリオ 0 よりも比較的緩やかとなっている。例えばリサイクル回数2回目以降において、シナリオ 0 に比べてシナリオ 1 では新聞紙、印刷・情報用紙、包装用紙、雑板紙などの品種の生産割合が高くなっており、このような品種配分の変化に伴い古紙のリサイクル量が多くなったためであると考えられる。リサイクル回数10回までの紙製品製造量の合計値についても、シナリオ 1 はシナリオ 0 よりも約2.9倍高い値を示しており、品種配分の変化がリサイクル量の増加に寄与していることが示唆される。シナリオ 2 での製造量の合計値はシナリオ 1 よりも少ないものの、品種配分の違いによりシナリオ 0 よりも高い値となっていることがみてとれる。

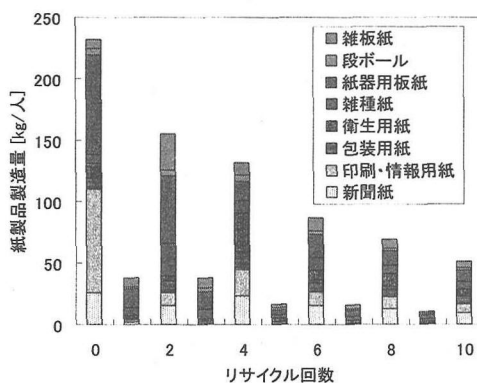
リサイクル回数ごとの各シナリオの資源有効利用度を図-5 に示す。リサイクル回数10回目において、シナリオ 1 とシナリオ 2 は、シナリオ 0 に比べて約1.3倍高い値を示しており、こ



(a) シナリオ 0 (現状)



(b) シナリオ 1 (リサイクル量最大化)



(c) シナリオ 2 (利益最大化)

図-4 リサイクル回数ごとの品種別の紙製品製造量

の結果からも、資源有効利用度を考慮した古紙の紙製品への品種配分を行うことによる効果は高いことが示唆される。シナリオ 1 は古紙のリサイクル量は多くなるが、紙製品の製造時にパージンパルプの利用量もこれに従い多くなるため、リサイクル回数ごとでシナリオ 2 のほうが高い値もしくは比較的

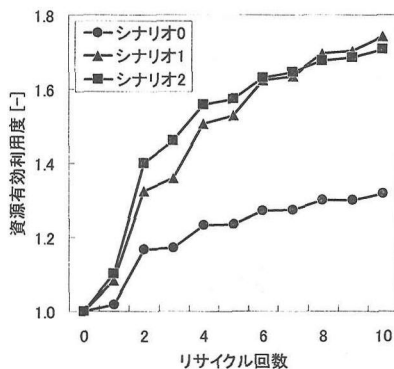


図-5 リサイクル回数ごとの資源有効利用度

同じ値となっている。

2) 経済性

各シナリオについての、リサイクル回数ごとの 1 人あたりの利益及びコストの合計を図-6 に示す。リサイクル回数ごとで利益及びコストの伸び率に差があるが、これは資源有効利用度の場合と同じく、リサイクル回数が偶数回と奇数回とで古紙の発生量が異なるためである。

図-6 (a) のシナリオ 0 について、紙製品販売により得られる利益は少なく、またリサイクル回数によってはコストが勝っている部分が多い。これは包装用紙、雑種紙、紙器用板紙、雑板紙は古紙としての発生量が少なく、設置数が多い小規模ステーションで回収するため輸送コストがかかるためである。またシナリオ 0 は他シナリオに比べて紙製品の製造量も少ないため、得られる利益は少ない。同図(b)のシナリオ 1 や同図(c)のシナリオ 2 の結果はシナリオ 0 よりもコストに対して得られる利益が多い。リサイクル 10 回目において、シナリオ 1 で得られる利益はシナリオ 0 に比べて約 3.4 倍、シナリオ 2 では約 2.2 倍大きい値を示している。なおシナリオ 2 で得られる利益よりもシナリオ 1 よりも多くなっているが、これはシナリオ 1 での紙製品製造量がシナリオ 2 よりも多いことに起因する。

各シナリオについてのリサイクル回数ごとの経済性を図-7 に示す。リサイクル回数 10 回目において、シナリオ 1 はシナリオ 0 に比べて約 1.4 倍、シナリオ 2 は約 1.5 倍高い値を示している。シナリオ 0 について、リサイクル回数が 1 回目から 2 回目の間に経済性が急激に上昇するのは、1 回目において利益よりもコストのほうが高くなっているためである。またシナリオ 2 はリサイクル回数を増すごとに徐々に経済性は減少しているが、これは図-4(c) でみてわかるように、紙製品製造量が減少しているために得られる利益が減少しているためであると考えられる。結果としてはシナリオ 2 の経済性はシナリオ 0 やシナリオ 1 の場合と比べて高い値となっていることから、利益を考慮した古紙の紙製品への品種配分を行うことによる効果は高いことが示唆される。

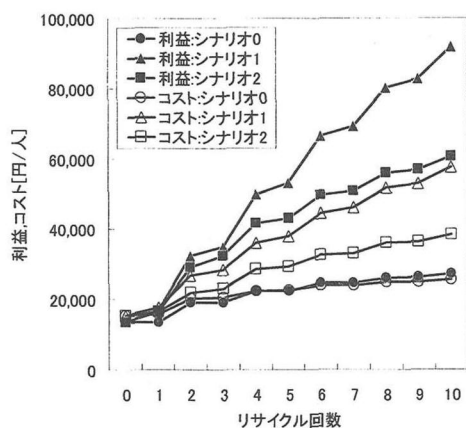


図-6 リサイクル回数ごとの利益及びコスト

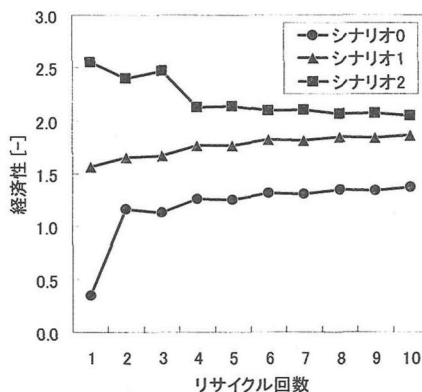


図-7 リサイクル回数ごとの経済性

表-9 限界古紙回収率

	古紙回収率
新聞紙	0.90
印刷・情報用紙	0.81
包装用紙	0.41
衛生用紙	0
雑種紙	0.019
紙器用板紙	0.38
段ボール	0.91
雑板紙	0.44

単位: [-]

表-10 古紙発生率推計値 (シナリオ1:リサイクル量最大化+限界古紙回収率使用)

	模造・色上	茶模造紙	新聞古紙	雑誌	段ボール	台紙・地券
	原紙					
新聞紙	0	0	0	0.082	0.82	0
印刷・情報用紙	0	0	0.81	0	0	0
包装用紙	0.28	0.12	0	0	0	0
雑種紙	0	0	0	0.0013	0	0.018
紙器用板紙	0	0	0.068	0.24	0.064	0
段ボール	0.39	0	0	0.52	0	0
雑板紙	0	0.43	0	0	0	0.0054

単位: [-]

4. 古紙回収率の変化が古紙の品種配分に及ぼす影響に関する分析

ここでは古紙回収量が多社会的な努力などにより向上した場合に、リサイクルによる古紙の紙製品への品種配分がどのように変化するかということについて検討した。先のシナリオ分析では古紙回収率は現状値を用いたが、ここでは(財)古紙再生促進センターが国内の紙製品の消費量や収集量、古紙の製紙原料としての利用可能量などより推計した「製紙原料として利用可能な理論的限界古紙回収率(表-9)」を用いた⁸⁾。前項のシナリオ1にこれを適用したものを、シナリオ1'として取り扱う。

シナリオ1'での古紙発生率の推計値を表-10に、リサイクル回数ごとの品種別紙製品製造量を図-8に示す。図-8の結果について、リサイクル2回目以降の紙製品製造量は初期製造量よりも大きくなっているが、紙製品の製造にはバージン紙を配合するという仮定から、バージン紙を追加した分だけ初期製造量よりも高くなっているためである。シナリオ1'の紙製品製造量は、図-4(a)のシナリオ1の結果と比べて高くなっており、古紙回収率の増加に伴う古紙リサイクル量の増加の効果をみることができる。また表-10のシナリオ1'の品種別の古紙発生率は、シナリオ1に比べて古紙として発生する品

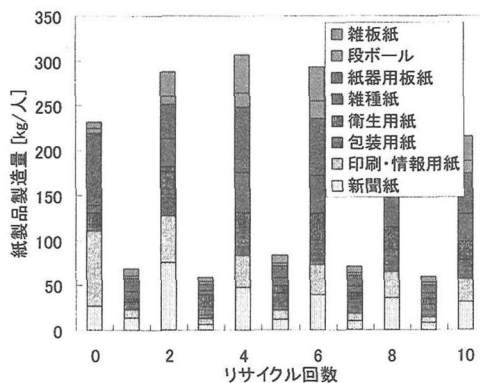


図-8 リサイクル回数ごとの紙製品製造量 (シナリオ1')

種が増加しているが、これに伴い紙製品の品種別の製造割合もシナリオ1の結果に比べて変化している。このため、古紙回収率の増加が古紙の紙製品への品種配分に影響を及ぼしたと考えられる。以上の結果より、古紙回収率の増加はリサイクル量の増加に繋がるため、社会や産業での更なるリサイクル材の利用促進が必要不可欠であると考えられるが、古紙から紙製品への品種配分が適正になされなければリサイク

ルは有効に行われないことから、回収量に合わせて適正な品種配分を検討することが重要であると示唆される。

5. 終わりに

本研究ではカスケードリサイクルを考慮した紙資源のリサイクルシステムをモデル化し、カスケードリサイクルの有効性を評価する指標を作成するとともに、資源有効利用度及び経済性からみたカスケードリサイクル実施の有効性について、シナリオ分析により評価及び検討を行った。以下に今回得られた知見を記す。

- 1) カスケードリサイクルを考慮した紙資源のリサイクルシステムをモデル化し、シナリオ分析を行った。これより古紙の紙製品への品種配分を最適化することにより、現状のリサイクルシステムよりもリサイクル量については最大で約2.9倍、利益については最大で約3.4倍の向上がみられた。
- 2) カスケードリサイクル実施の有効性を評価するため、資源有効利用度及び経済性に関する指標を提案した。シナリオ分析に適用した結果、リサイクル量増加を考慮したカスケードリサイクルの実施は資源有効利用度が約1.3倍、利益を考慮した場合は経済性が約1.5倍、現状のリサイクルシステムよりも高い値を示した。
- 3) 紙資源は他資源に比べてカスケードリサイクルが行われているが、資源有効利用度及び経済性からみて、現行のリサイクルシステムは合理的な品種配分が十分に行われていない。
- 4) 社会的な努力により古紙回収率を増加させることでリサイクル量を増加させることが可能であるが、回収量に合わせて適正な古紙の品種配分を検討する必要がある。

今回は古紙の紙製品への品種配分を変化させることで評価及び検討を行った。実社会において品種配分を変化させるためには、消費後の紙製品を質に合わせた品種の古紙への分別を徹底させることなどが重要であり、これには更なる社会的な分別、回収の努力を要するであろう。しかしながらカスケードリサイクルの有効性を評価するための指標を作成するとともに、資源有効利用度及び経済性からカスケードリサイクルの有効性を評価したのはユニークな試みであるといえる。

今後カスケードリサイクルは紙資源のみならず、多くの資源で実践されることが想定される。しかし単にカスケードリサイクルを実施するのではなく、資源有効利用度や経済性などをカスケードリサイクル実施の際の優先事項として捉え、体系的にこれを実施していくのが、循環型社会の実現を見据えた

リサイクルシステムの構築に求めらるものであろう。今回得られた結果は、今後このようなリサイクルシステムを構築する際に、基礎的且つ重要な知見を提供するものと考ええる。

今後検討すべき課題として、紙製品や古紙の質などの技術的制約をモデルに組み込むこと、感度解析により結果に大きな影響を及ぼすパラメータを検討すること、資源有効利用度、経済性以外にも環境影響などの他の要素を考慮すること、紙の品種ごとに消費から廃棄・収集までの時間軸や在庫を考慮したリサイクルシステムの動的評価を行うことなどが挙げられる。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金若手研究(B)「一般廃棄物処理システムにおける再資源化・管轄行政区広域化施策の評価に関する研究」の助成を受けました。また本論文を作成するにあたり、財団法人古紙再生促進センターより資料提供やヒアリング調査にご協力頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Sirkin, T, ten Houten, M: The Cascade Chain, Resources, Conservation and Recycling, Vol.11, pp.215-277, 1994.
- 2) Peter J. Fraanje: Cascading of pine wood, Resource, Conservation and Recycling, Vol.19, pp.21-28, 1997.
- 3) Yamashita, H, Kishino, H, Hanyu, K, Hayashi, C: Circulation indices: new tools for analyzing the structure of material cascades, Resource, Conservation and Recycling, Vol.28, pp.85-104, 2000.
- 4) 永田勝也, 前野智春, 代田和彦, 鶴間祐子: PET ボトルのLCA 評価について -水切り袋へのカスケードリサイクルに関する評価, 第8回日本機械学会環境工学総合シンポジウム講演論文集, pp.247-250, 1998.
- 5) 古紙再生促進センター:1997年古紙ハンドブック, 1998.
- 6) 石川雅紀: 家庭系一般廃棄物の分別収集の環境及び経済影響に関する理論的分析, 第2回エコバランス国際会議講演集(日本語版), 1996.
- 7) 古紙再生促進センター: 2001年版古紙統計年報, 2002.
- 8) 古紙再生促進センター: 古紙の回収限界に係る調査報告書, 2002.
- 9) 大江礼三郎: 古紙利用の課題, 紙・パ技協誌, Vol.46, No.12, pp.1485-1496, 1992.
- 10) 経済産業省経済産業政策局調査統計部編: 平成13年紙・パルプ統計年報, 2002.
- 11) 名古屋市: 資源とごみの分け方出し方, 2002.

**Study on the Evaluation of Cascade Recycle
by Effective Resource Utilization and Cost Efficiency**

Tomohiro TABATA, Shinya TUJIOKA, Masafumi MORISUGI and Hidehumi IMURA

A cascade recycling is a proper method to increase resource productivity. However, actual waste recycling system doesn't take advantage of this recycling. In this study, a model of a waste paper recycling system with the cascade recycling was proposed, and an evaluation of the effectively of the cascade recycling by the resource productivity and the economic efficiency on this model. As a result, the cascade recycling is effective about increasing of the productivity and the economic efficiency. The planner should take consideration of the resource productivity and the economic efficiency into the actual waste paper-recycling system.