

古紙パルプ需要の増加が地域内物流を通じて 環境に及ぼす影響に関する分析

川端宏紀¹・吉田登²・金子泰純³・日下正基⁴

¹学生会員 和歌山大学大学院博士前期課程 システム工学研究科 (〒640-8510 和歌山市栄谷 930 番地)

²正会員 博(工) 和歌山大学助教授 システム工学部 (〒640-8510 和歌山市栄谷 930 番地)

³正会員 修(工) 和歌山大学助教授 システム工学部 (〒640-8510 和歌山市栄谷 930 番地)

⁴正会員 博(工) 和歌山大学教授 システム工学部 (〒640-8510 和歌山市栄谷 930 番地)

近年、古紙パルプの需要が高まってきている。古紙パルプの需要がさらに増え続けると、製紙工場では古紙パルプを生産するために必要な脱墨設備の古紙パルプ生産能力を超えて、新たに脱墨設備の設置が必要となる。また、そこに投入される古紙は、必ずしも立地する地域内のみで確保できるものではないため、現在の古紙の都道府県間移出入量が増えることが予想される。本研究ではこのときに古紙の都道府県間移出入量がどのように変化し、それが環境に対してどのような影響を与えるかについて、特に原料古紙の発生場所から製紙工場までの輸送エネルギーの観点から分析し、古紙利用率の上昇が環境に及ぼす影響について考察する。

Key Words : *used paper pulp, energy consumption, transportation, deinking*

1. はじめに

近代製紙産業が始まって約 130 年経つが、我が国の製紙産業はその時代の製紙原料によって工場の立地を決める「資源立地型」であった。

洋紙の製造技術を取り入れた我が国の製紙産業は紙の需要の増加に伴い、それまで使っていた樫櫟や藁などの製紙原料が不足し、海外から木材を原料とする碎木パルプや亜硫酸パルプの製造技術を取り入れた。これにより国内の針葉樹林が製紙原料に使われるようになり、針葉樹林の豊富な北海道や樺太に製紙工場が建設されるようになっていった。

しかし、第二次大戦後樺太や満州等の外地工場や資産を全て失い、国内の資源だけでは戦後急速に増えた紙の需要を満たすことが出来なくなったためそれまで製紙原料には使われていなかった国内広葉樹が使われるようになり、パルプ製法も材種を選ばないクラフトパルプ法が採用されることになった。また同時に古紙の利用が一般化した。

その後、製紙原料は安価な外材が使われるようになり、

工場立地も「臨海型」に移行していった¹⁾。

そして、製紙原料の半分以上が古紙となった現在、各製紙会社は脱墨設備の導入を進め、需要に対応してきたが、それまでとは違い、すでに建設されている工場に脱墨設備を導入してきたため、都心から離れた工場では物流の面で都心に近い工場よりも多くのエネルギーを必要とする。

今後、古紙パルプの需要がさらに増え続けると、製紙工場では古紙パルプを生産するために必要な脱墨設備の古紙パルプ生産能力を超えて、新たに脱墨設備の設置が必要となる。また、そこに投入される古紙は、必ずしも立地する地域内のみで確保できるものではないため、現在の古紙の都道府県間移出入量が増えることが予想される。

そこで本研究では、古紙輸送エネルギー消費量を求めるために、各都道府県で発生する古紙の量と各都道府県で購入される古紙の量を求め、製紙原料用古紙の発生源から製紙工場までの輸送エネルギー量を推計した。また、古紙の都道府県間移出入量の変化が古紙原料の輸送エネルギー量にどのような影響を与えるかについて考察した。

2. 研究の方法

(1) 研究の進め方

本研究の分析フローを図-1に示す。また本研究では『古紙統計年報』²⁾のデータを基に研究を進めるため、『古紙統計年報』で示されている地域区分を表-1に示す。

(2) 各種基礎データの推計

a) 都道府県別古紙発生量の推計

『古紙統計年報』の地域別古紙発生量(図-2)から都道府県別古紙発生量を推計するために、『古紙統計年報』と各都道府県で発行されている『廃棄物実態調査報告書』³⁾および『産業廃棄物実態調査報告書』⁴⁾を用いた。『廃棄物実態調査』による資源化量と『古紙統計年報』による地域別古紙発生量は一致しない。これは『廃棄物実態調査』では市町村が直接あるいは間接的に関与したものについてアンケート調査及び既存資料により推計されたためと考えられる。そこで、今回は『古紙統計年報』の地域別古紙発生量をベースとし、『廃棄物実態調査』で把握しきれていない『古紙統計年報』との差については『廃棄物実態調査』における地域内都道府県の資源化量の比率によって配分した。

b) 都道府県別古紙受入量の推計

『古紙統計年報』の地域別古紙受入量(図-3)から、都道府県別古紙受入量を推計するために、『古紙統計年報』、『紙パルプ企業・工場データブック』⁵⁾を用いた。都道府県別受入量の推計は『古紙統計年報』の地域別受入量をもとに、各都道府県の古紙パルプ製造設備の能力比を掛け合わせて推計した。

c) 都道府県間移出入量の推計

都道府県間移出入量を推計するために『古紙統計年報』、『全国貨物純流動調査報告書(以下物流センサスという)』⁶⁾a)で求めた都道府県別古紙発生量、b)で求めた都道府県別古紙受入量を用いた。『古紙統計年報』では古紙品種別地域間移出入量は掲載されているが(表-2)、都道府県別での掲載はされていない。

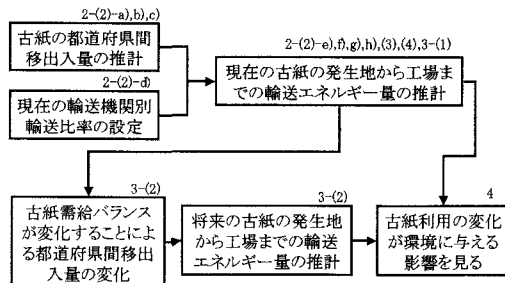


図-1 研究の進め方

表-1 地域区分

地域区分	対象地域(域内都道府県)
北海道	北海道
東北	青森、岩手、宮城、秋田、山形、福島
関東	東京、千葉、神奈川、埼玉、群馬、栃木、茨城
甲信越	山梨、長野、新潟(工場所在地は関東に属す)
静岡	静岡
中部	愛知、岐阜、三重
北陸	富山、石川、福井
近畿	滋賀、京都、大阪、兵庫、奈良、和歌山
中国	鳥取、島根、岡山、広島、山口
四国	徳島、香川、愛媛、高知
九州	福岡、長崎、佐賀、熊本、大分、宮崎、鹿児島、沖縄

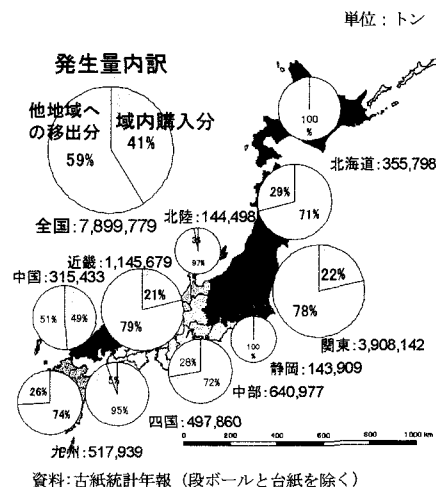


図-2 地域別古紙発生量内訳

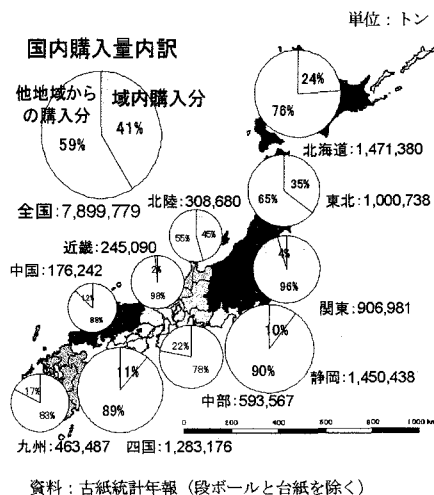


図-3 地域別古紙受入量

表-2 古紙の地域間移出入量

	単位：千トン										
	北海道	東北	関東	静岡	中部	北陸	近畿	中国	四国	九州	発生量
北海道	356	0	0	0	0	0	0	0	0	0	356
東北	143	355	0	0	0	0	0	0	0	0	498
関東	881	640	852	1174	19	56	0	0	283	3	3908
甲信越	0	6	18	6	19	32	0	0	0	0	81
静岡	0	0	0	144	0	0	0	0	0	0	144
中部	10	0	6	73	464	34	3	0	50	1	641
北陸	0	0	0	0	4	140	0	0	0	0	144
近畿	81	0	31	53	88	46	241	15	561	29	1146
中国	0	0	0	0	0	0	1	155	120	39	315
四国	0	0	0	0	0	0	0	0	140	7	149
九州	0	0	0	0	0	0	0	6	128	384	518
購入量	1471	1001	907	1450	594	309	245	176	1283	463	7900

資料：古紙統計年報（段ボールと台紙を除く）

そこで都道府県間の貨物流動が調査されている『物流センサス』を用いた。しかし、『物流センサス』では古紙単独の移出入量は推計されていないので、古紙が含まれている「その他くずもの」のデータを代用した。「その他くずもの」には古紙のほか、木屑、ゴム屑、繊維屑が含まれている。また、『物流センサス』では1年である3日間の調査しかされていないため、『古紙統計年報』では地域間移出入が行われているのにもかかわらず、『物流センサス』では都道府県間移出入が全く行われていないという矛盾が生じる。これに該当する福井県、佐賀県については「その他くずもの」を含む「特殊品」のデータを用いて推計した。

d) 輸送手段の設定

製紙原料用古紙の輸送手段を設定するために『物流センサス』を用いた。『物流センサス』では大きく分けて鉄道、トラック、海運、航空、その他の5項目に分けて47都道府県について品別、品種ごとの発着量がそれぞれ推計されていた。古紙を含む「その他くずもの」の輸送手段は全体で鉄道が0.1%、トラックが95.3%、海運が4.6%で航空とその他はそれぞれ0%であった。31の都道府県でトラックによる輸送が100%であったが、トラック以外の輸送手段を多く用いていた都道府県上位3道県は右表のとおりである（表-3、表-4）

e) 輸送距離の推計

輸送距離を推計するために各都道府県の古紙発生地から輸送エネルギー調査対象地域までの距離について地図ソフトをもとに推計した。ここで古紙発生地は各都道府県の県庁所在地とし、着は対象地域の生産額からみて代表的な製紙工場地点とした。

f) 輸送機関別燃料消費効率

各輸送機関における燃料消費効率（1トンの貨物を1キロメートル運ぶのに必要な燃料の量）を求めるために『交通経済統計要覧』⁷⁾、『運輸関係エネルギー要覧』⁸⁾、『総合エネルギー統計』⁹⁾を用いた。

表-3 輸送機関別輸送量上位3道県（鉄道順）

	鉄道	海運	陸運
秋田	13.8%	0.0%	86.2%
福岡	0.6%	0.0%	99.4%
北海道	0.4%	40.4%	59.3%

表-4 輸送機関別輸送量上位3道県（海運順）

	鉄道	海運	陸運
北海道	0.4%	40.4%	59.3%
宮崎	0.0%	37.3%	62.7%
兵庫	0.0%	36.3%	63.7%

g) エネルギー源別発熱量

各種輸送機関で用いられる燃料の発熱量について、エネルギー源別発熱量を調べるために『総合エネルギー統計』を用いた。

h) 二酸化炭素排出量の推計

各輸送機関で用いられる二酸化炭素排出量について、エネルギー源別二酸化炭素排出量を調べるために『総合エネルギー統計』を用いた。

(3) 輸送エネルギーの推計

輸送エネルギーの推計には以下の式を用いて計算を行った。

$$E = C \times W \times L \times \eta$$

但し E：古紙発生地から製紙工場までの輸送エネルギー消費量（MJ）、C：エネルギー源別発熱量（MJ/KI）、W：輸送重量（t）、L：輸送距離（km）、 η ：燃料消費効率（kl/t・km）。

輸送機関ごとにそれぞれ発生地から製紙工場までの輸送エネルギー消費量を計算し、その合計をその地域における古紙輸送エネルギー消費量とした。

(4) 古紙輸送時の二酸化炭素排出量の推計

二酸化炭素排出量の推計には以下の式を用いて計算を行った。

$$D=E \times M$$

但し D：古紙発生地から製紙工場までの古紙輸送時の二酸化炭素排出量 (Kg-CO₂)，M：エネルギー源別二酸化炭素排出係数 (Kg-CO₂/MJ)。

3. 結果

(1) 現在の地域別輸送エネルギー消費量および二酸化炭素排出量

現在の各地域における古紙輸送エネルギー消費量、および二酸化炭素排出量は表-5、表-6のとおりである。

古紙を多く購入している道県での古紙輸送エネルギー消費量が多いのは当然であるが、同規模の古紙を購入している北海道と静岡では約2倍のエネルギー消費の差が生じている。これは、古紙が大規模に発生する首都圏からの距離の差にかかわっていると考えられる。

一方、エネルギー消費原単位(1トンの古紙を製紙工場まで輸送するために必要なエネルギー量)は26.4MJ/tから131.8MJ/tとなっておりこれは古紙再生促進センター¹⁰⁾や古紙リサイクル推進検討会¹¹⁾が試算した紙1トンのライフサイクルエネルギーに対して1%~4%を占める。また、エネルギー消費原単位の地域別大きさをしてみると、関東、近畿が約26.0MJ/tであったのに対し、北海道、北陸、四国、九州では100.0MJ/tを大きく超える値となっていた。これは、域内購入量の割合が少ないことと域外購入時における輸送距離が多いことに関係すると考えられる。よって、域内古紙発生量が少ないのにもかかわらず、古紙購入量が多く、域外から多量に古紙を購入しなければならない北海道地域での輸送エネルギー消費量は多くなる。

(2) 現在の地域別古紙発生量及び購入量を維持したまま最適な古紙分配を行った時の輸送エネルギー消費量

現在の古紙輸送システムは、エネルギー消費からみて必ずしもよい輸送システムではないと考えられる。その理由として一部ではあるが長距離から古紙を購入している例があるからである。

そこで現段階で考えられる最適な輸送分配を線形計画法を用いて求め、それを元に古紙輸送エネルギーを推計

表-5 地域別エネルギー消費量

地域	工場所在 都道府県	都道府県別 古紙購入量 (t)	エネルギー消費 量(MJ)	エネルギー 消費原単位 (MJ/t)
北海道	北海道	1,471,380	1939609016	1318
東北	青森県	46,763	42468004	908
関東	東京都	147,579	39020956	264
北陸	富山県	201,672	215735295	1070
静岡	静岡県	1,450,438	1070213566	738
中部	愛知県	372,080	191561203	515
近畿	大阪府	138,423	37294304	269
中国	広島県	54,782	33732504	616
四国	愛媛県	1,237,423	1561210381	1262
九州	熊本県	157,433	200056521	1271
全国		5277971	5330901752	1010

表-6 地域別二酸化炭素排出量

地域	工場所在 都道府県	都道府県別 古紙購入量 (t)	二酸化 炭素排出量 (Kg-CO ₂)	二酸化炭素 排出原単位 (Kg-CO ₂ /t)
北海道	北海道	1,471,380	130274982	88.5
東北	青森県	46,763	2849603	60.9
関東	東京都	147,579	2618306	17.7
北陸	富山県	201,672	14475838	71.8
静岡	静岡県	1,450,438	71811330	49.5
中部	愛知県	372,080	12853757	34.5
近畿	大阪府	138,423	2502448	18.1
中国	広島県	54,782	2263451	41.3
四国	愛媛県	1,237,423	104756403	84.7
九州	熊本県	157,433	13423793	85.3
全国		5,277,971	357829911	67.8

した。

まず、全ての都道府県 $i=1,2,\dots,m$ に対して i 都道府県では a_i トンの古紙が発生しており、全ての都道府県 $j=1,2,\dots,n$ に対して j 都道府県では b_j トンの古紙を購入しているとする。

全ての $i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n$ に対して、発生地 i から購入地 j まで1単位の古紙を運ぶ距離を L (km) とすると、総輸送トンキロを最小化するためには各発生地から各購入地に何単位の古紙を輸送すべきか。それについて、発生地 i から購入地 j に運ぶ古紙重量を W_{ij} (t) と定義することで以下の式を用いて解くことができる。

$$\text{目的関数: } z = \min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n W_{ij} L_{ij} \quad (1)$$

$$\text{制約条件: } \sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n b_j \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n W_{ij} = a_i \quad (i=1,\dots,m) \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^m W_{ij} = b_j \quad (j=1,\dots,n) \quad (4)$$

$$W_{ij} \geq 0 \quad (i=1,\dots,m; j=1,\dots,n) \quad (5)$$

表一 線形計画法を用いて求めた古紙の地域間移出入量

単位：千トン

	北海道	東北	関東	静岡	中部	北陸	近畿	中国	四国	九州	発生量
北海道	356	0	0	0	0	0	0	0	0	0	356
東北	498	0	0	0	0	0	0	0	0	0	498
関東	618	1,001	907	1,307	0	76	0	0	0	0	3,908
甲信越	0	0	0	0	0	81	0	0	0	0	81
静岡	0	0	0	144	0	0	0	0	0	0	144
中部	0	0	0	0	594	7	40	0	0	0	641
北陸	0	0	0	0	0	144	0	0	0	0	144
近畿	0	0	0	0	0	0	205	0	941	0	1,146
中国	0	0	0	0	0	0	0	176	139	0	315
四国	0	0	0	0	0	0	0	0	149	0	149
九州	0	0	0	0	0	0	0	0	54	463	518
購入量	1,471	1,001	907	1,450	594	309	245	176	1,283	463	7,900

各制約条件の意味は、式(2)は発生量と購入量の一致、式(3)は発生地から輸送された古紙の総量が、その発生地調達可能な量と等しいこと、式(4)は購入地の需要は各発生地からその購入地に輸送された古紙の総量によって満たされていること、式(5)は輸送される古紙量の非負条件をそれぞれ意味している¹²⁾。

このような条件の下で求めた輸送量を地域ごとにまとめたものを表一に、そして、この時にかかる輸送エネルギー消費量について表二に示す。

まず、全国で見てみると現在と比べエネルギー消費量は約585百万MJ少なく、エネルギー消費原単位でも111MJ/t少なくなった。

次に地域別で見てみると、8つの地域でエネルギー消費量が減っていたが東北、近畿では増加する結果となっていた。

これは、表二、表一を見比べれば解るように域外からの購入量が大幅に増えたためである。

4. 考察

本研究では各都道府県で発生した古紙が製紙工場に運ばれる際、現在ではおおよそどれくらい輸送のためにエネルギーが使われているのかを推計し、また、輸送トンキロが最も少なくなる輸送が行われた場合の輸送エネルギー量を推計した。

参考までに海外から原料チップを輸入する際の輸送エネルギー量がある。砂金光記ほかによる研究¹³⁾によると、その値は約1950MJ/tであった。

つまり、原料輸送エネルギーの部分で考えると木材チップと比べ古紙の輸送のほうが、環境負荷が少ないという結果になった。また、今回は既設の脱墨設備を受入量制約条件とした推計であるため、今後の設備投資に伴い輸送エネルギーは変化する可能性がある。

表二 地域別エネルギー消費量

地域	工場所在 都道府県	都道府県別 古紙購入量 (t)	エネルギー消費 量(MJ)	エネルギー 消費原単位 (MJ/t)
北海道	北海道	1471380	1854235097	1260
東北	青森県	46763	92835097	1985
関東	東京都	147579	39020915	264
北陸	富山県	201671	213548312	1059
静岡	静岡県	1450438	1030666487	711
中部	愛知県	372080	70735063	190
近畿	大阪府	138423	45481606	329
中国	広島県	54782	7019917	128
四国	愛媛県	1237422	1313065327	1061
九州	熊本県	157433	79240381	503
全国		5277971	4745848201	899

製紙工程(パルプ化工程および抄紙工程)で木材チップを原料とする新生紙より多くの化石燃料を使用する再生紙は、さらに原料調達部分などでエネルギー消費量の削減が課題である。

参考文献

- 1) 高橋彰司：2004 知っておきたい紙バの実際、紙業タイムス社、pp.8-11、2004
- 2) 古紙再生促進センター：古紙統計年報、財団法人古紙再生促進センター、2004
- 3) 都道府県廃棄物実態調査報告書、各都道府県、1993-2001
- 4) 都道府県産業廃棄物実態調査報告書、各都道府県、1993-2002
- 5) 高橋彰司：紙パルプ企業・工場データブック 2004、紙業タイムス社、2003
- 6) 根本二郎：全国貨物純流動調査(物流センサス)、財団法人運輸政策研究機構、1997、2002
- 7) 国土交通省総合政策局情報管理部：交通経済統計要覧(平成13年度版)、財団法人運輸政策研究機構、2002
- 8) 運輸省運輸政策局情報管理部：運輸関係エネルギー要覧(平成11年度版)、大蔵省印刷局、2000
- 9) 資源エネルギー庁長官官房企画調査課：総合エネルギー

- 統計 平成 13 年度版, 通商産業研究社, 2002
- 10) 古紙再生促進センター: 古紙利用と環境影響に係る調査報告書, 財団法人古紙再生促進センター, 2001
- 11) 古紙リサイクル推進検討会: 今後の古紙リサイクルの向上に向けて報告書, 2000
- 12) 伊理正夫, 今野浩, 刀根薫: 最適化ハンドブック, 朝倉書店, pp72-73, 1995
- 13) 砂金光記, 大村光正, 藤田滋, 中谷真紀子: コピー用紙の LCA, <http://www.ricoh.co.jp/ecology/history/pdf/lca.pdf>

AN ANALYSIS OF ENVIRONMENTAL IMPACTS OF INCREASING USED PAPER PULP THROUGH THE DISTRIBUTION BETWEEN REGIONS

Hiroki KAWABATA, Noboru YOSHIDA, Hirozumi KANEKO, Masaki KUSAKA

The demand of used paper pulp has been increasing in recent years. When the demand of used paper pulp continues increasing further, installation of deinking equipment is newly needed in a paper mill exceeding the used paper pulp productive capacity of deinking equipment required in order to produce used paper pulp. Moreover, this would charge the amount of all-prefectures shipment of the present used paper. This paper attempts to analyze the environmental impacts of increasing used paper pulp through the distribution between regions, from the view point of energy consumption for the transportation from the generating place of used papers to paper mills.