資源循環再利用計画のための方法論的研究

第4報：古紙回収再利用システムの 動的モデルによる将来予測

吉田 総夫^{*1}, 大野 弘^{*2}, 梶原 惇^{*3}
橋本 伊織^{*4}, 塩谷 捨明^{*4}, 高松武一郎^{*4}

Process System Approaches for Resources Recycling in Pulp and Paper Industries

4th Report : Dynamic Simulation of Waste Paper Recycling System

*Fusao Yoshida^{*1}, Hiromu Ohno^{*2}, Atsushi Kajihara^{*3}, Iori Hashimoto^{*4},
Suteaki Shioya^{*4} and Takeichiro Takamatsu^{*4}*

A dynamic model of the national level was developed in the 1st report so as to simulate the behaviour of the waste paper recycling system and to clarify the real issue in this system. In this report, the dynamic simulation on the future trend of waste paper recycling and utilization is carried out based on the developed model and at the same time, the policy that will be the most promising in order to promote the waste paper recycling is made clear.

The following practical measures for the reconciliation of the problem of future waste paper supply and requirement are considered :

- (i) To increase the collection of waste paper by steadily rising the price of waste paper ;
- (ii) To increase the recovery rate by consolidating the structure of the waste paper collection system ;
- (iii) To compensate for the domestic shortage of waste paper by importing it from abroad ;
- (iv) To decrease the paper production at the manufacturer by importing paper and board from abroad.

Then, the forecasting of the future trend ranging over from 1979 to 2001 A. D. is performed by carrying out the quantitative assessment for these four measures. As a result, it is concluded that the most effective and desirable countermeasure for overcoming the anticipated shortage of waste paper supply in the future is to increase the recovery rate of waste paper up to 60% by revising and consolidating the collection sector.

*1 大阪府立工業技術研究所 Osaka Prefectural Industrial Research Institute
*2 神戸大学工学部 Department of Chemical Engineering, Kobe University
*3 大阪府立産業能率研究所 Osaka Prefectural Institute for Industrial Management
*4 京都大学工学部 Department of Chemical Engineering, Kyoto University

1. 結 言

第1報¹⁾では、わが国における古紙回収再利用システムの動的モデルの構築方法を明らかにし、そのモデルを用いて過去10年間(1969～1978年)のシミュレーションを行い、計算結果と入手可能な実データとが良好な一致をみたことについて述べた。このことから、我々は、構築された動的モデルが、ほぼ現状の古紙回収再利用システムの表現として、妥当であると考えた。このようなモデル構築による分析の方法は、ロビンソンが述べているように²⁾、一つの問題について不必要な細部はすべて切り捨て、真に本質にかかわる要素を抽出し、その間の相互作用を分析しようとするもので、選出された経済主体とその行動様式とが大体において、現実に対応しているときには、モデルを操作して導き出される関係によって問題の解明に光をあてることができる。しかし、モデルに取り入れられなかった要素で、実際には重要なものがあって、モデルから得られた結論が現実の状況に適用できないという危険が常に存在することは言うまでもない。特に、過去のデータと現状分析によって導き出されたモデルが、現状あるいは、短期予測問題を解明するのに有効であっても長期的な将来予測をするに当っては、多くの問題がある。そのうち、最も大きな問題点は、古紙回収再利用システムの構造が根本的に変動する場合であって、現状では重要な要素でなく無視されていても、将来ともそうであろうとは限らないことである。もちろん、そのような要素の存在が予測される場合には、前もって、これらの要素をモデルの中に組み込むことは可能である。しかし、要素間の相互関係が現状とは根本的に変化する場合には、将来予測のための多くの仮説的なモデルをあらためて構築することが必要である。次の問題点は、仮に将来とも、現状とは大きくシステムの特性が変わらないものとしても、所与条件として与えられるべき外生変数自体の将来予測値がどの程度信頼性があるかということにある。従って、モデルのシミュレーションから結果が導き出されても、外生変数の信頼度の範囲内でしか信頼性がないということになる。このような問題があるにもかかわらず、第1報で示したような定式化された数学モデルを用いて将来動向の予測を行うことの有効性は、モデルの助けをかりて、問題のあるべき姿に定量的に容易に接近できることである。言いかえれば、我々の構築した数学モデルには、記述的なモデルに比べて次のような特徴を有する。第1に、我々が設定したすべての仮定が厳密な形で書かれているため、すべての人の吟味と批判を受け

ることができる。第2に、これらの仮定が吟味され、論議されることによって、さらにモデルが修正され、それが、システムの将来動向に対してもつ意味を計算によって跡づけることができることである³⁾。

わが国においては、将来、紙需要の増大に伴って、原料資源としての古紙需要の急激な増加が当然予想されうる。そして、現在、それに見合うだけの古紙が果して今後とも供給しうるものかという懸念がしばしば表明されている。このような問題の解決策として、次のような方法が考えられる。

- (1) 古紙価格を安定的に上昇させることによって、古紙の集荷増を図る。
- (2) 古紙回収体制を整備し、回収率の上昇を図ることによって古紙回収量を増加させる。
- (3) 古紙を輸入し、国内の古紙供給不足を海外の古紙で手当する。
- (4) 紙製品の輸入量を増加させ、国内紙生産量の一部を負担させることによって古紙不足を生じさせないようにする。

これらの古紙不足対策がどの程度の有効性を持っているのかを検討したり、これらの方策を実施したときに生じるであろうと予測される諸々の問題、例えば、環境への影響等を評価する必要がある。そのためには、定量的に古紙需給の将来動向を予測し、その結果に検討を加えなければならない。

本報では、このような観点から、数学モデルを用いて、これらの問題に対して回答を与えようとするものである。製紙メーカーの古紙使用量や古紙在庫量等の将来動向と上述の4つの対策を実施したときに予測される古紙回収量や回収業者の古紙在庫量およびごみとして排出される紙廃棄物量の変動傾向を算出して、それらの結果を考察する。将来動向の予測期間は1979年から2001年までとする。

2. 所与条件の将来動向の予測

2.1 紙生産量予測に関わる外生変数

Case A

Case Aとして外生変数である g_1 (実質国民総支出)、 g_2 (実質民間設備投資)の値は、1979年から1989年の10年間については日経 NEED TS/II マクロ経済分析システムモデルによって予測された年間経済成長率⁴⁾を用い、1990年以降は単純に年間経済成長率を2%と仮定した。 g_1 、 g_2 および対前年増加率の値を表1に示す。ここで1979～1989年の期間は、景気変動の将来動向を考慮したものであり、年次ごとに異なった値をとっている。それらの平均年間成長率は、 g_1 につ

Table 1 Estimated values of g_1 and g_2 in case A

year	g_1	Δg_1	g_2	Δg_2
1979	11.83	5.97	2.005	9.75
1980	12.35	4.40	2.116	5.54
1981	13.06	5.75	2.241	5.91
1982	13.59	4.06	2.362	5.40
1983	14.30	5.22	2.490	5.42
1984	15.18	6.15	2.658	6.75
1985	15.74	3.69	2.790	4.97
1986	16.56	5.21	2.898	3.87
1987	17.56	6.04	3.081	6.31
1988	18.56	5.69	3.250	5.49
1989	19.56	5.39	3.378	3.94
1990	19.95	2.00	3.446	2.00
1992	20.76	2.00	3.585	2.00
1994	21.60	2.00	3.730	2.00
1996	22.47	2.00	3.880	2.00
1998	23.38	2.00	4.037	2.00
2000	24.32	2.00	4.200	2.00

($g_1, g_2 : 10^{13}$ yen/year)($\Delta g_1, \Delta g_2 : \text{Percent changes from previous year}$)

(At market price in calendar year of 1970)

いては5.16%, g_2 については5.35%である。これに対して1990年以降は景気動向の予測について、あまりにも不確実な要素が多すぎるため一律な成長率を与えた。ここで仮定した g_1, g_2 の値を用いて求めた各年次の洋紙 (x_{21}), 板紙 (x_{22}) の国内需要量ならびに国内紙需要量 ($x_{17}=x_{21}+x_{22}$), 実質紙輸出量 (x_{18}), メーカー紙生産計画量 (x_{23}) とそれらの対前年増加率の推定計算値を表2に示す。なお x_{18} については実質紙輸出率を2.4%と仮定した。

Case B

第2報⁵⁾でメーカー紙生産量 (z_1), ならびにメーカー古紙使用量 (z_7) について1956年から1978年までの23年間にわたる月間時系列データの解析を行い、その中で、長期変動を表現する数学モデルとしてロジスティック曲線で次のような式を得た。

$$z_1(t) = \frac{2,000}{1 + (5.5)(0.988)^t} \quad (10^3 \text{ ton/month}) \quad (1)$$

$$z_7(t) = \frac{1,000}{1 + (14.5)(0.988)^t} \quad (10^3 \text{ ton/month}) \quad (2)$$

ここで、 $t=0$ は1956年1月を表わす。

Case B として(1), (2)式を用いた場合について考察する。(1)式より x_{17}, x_{18}, x_{23} とそれらの対前年増加率の計算した値を表3に示す。

産業構造審議会の「80年代の紙パルプ産業ビジョン」(中間報告)⁶⁾によれば国内紙需要量は85年度約2,200万t, 90年度で2,700万t弱の予測であり、数量ベースで3.5%の伸びとなっている。この内訳としては輸入188万t, 輸出75万tで紙生産量は2,565万tである。この結果とCase A, Bとを比較するとCase Aでは、過去的高度経済成長の影響を反映して、国内紙需要量は、85年次で約2,500万t, 90年次で約3,100万tと非常に大きな値となっている。他方、Case Bでは1979年次は実績に比べて160万t多いものの、趨勢として需要量の頭打ちを予想しているため、

Table 2 Estimated values of x_i and Δx_i ($i=17, 18, 21, 22, 23$) calculated by g_1 and g_2 in case A

year	x_{17}	Δx_{17}	x_{18}	x_{21}	Δx_{21}	x_{22}	Δx_{22}	x_{23}
1979	17,747	7.56	436	9,817	4.84	7,930	11.13	18,183
1980	18,724	5.51	460	10,288	4.80	8,436	6.38	19,185
1981	19,887	6.21	489	10,875	5.71	9,012	6.83	20,376
1982	20,934	5.26	515	11,372	4.56	9,562	6.11	21,449
1983	22,117	5.65	544	11,965	5.22	10,151	6.16	22,660
1984	23,642	6.90	581	12,721	6.31	10,922	7.59	24,224
1985	24,775	4.79	609	13,254	4.19	11,521	5.49	25,384
1986	25,884	4.48	637	13,856	4.55	12,028	4.40	26,521
1987	27,567	6.50	678	14,698	6.08	12,869	6.99	28,245
1988	29,160	5.78	717	15,511	5.53	13,649	6.06	29,877
1989	30,489	4.56	750	16,238	4.69	14,252	4.41	31,239
1990	31,123	2.08	765	16,559	1.98	14,563	2.19	31,888
1992	32,426	2.07	797	17,221	1.98	15,205	2.18	33,223
1994	33,782	2.07	831	17,909	1.98	15,873	2.17	34,612
1996	35,192	2.07	865	18,624	1.98	16,568	2.16	36,058
1998	36,660	2.06	901	19,369	1.98	17,291	2.16	37,561
2000	38,187	2.06	939	20,144	1.98	18,043	2.15	39,126

(x_i : 10^3 ton/year)(Δx_i : Percent changes from previous year)($\Delta x_{17} = \Delta x_{18} = \Delta x_{23}$)

85年次で2,170万t, 90年次で2,250万tとほとんど横ばい傾向を示す結果となっている。つまり, 中間報告の予測値は, Case AとCase Bの中間的な値をとっており, Case Aは楽観的な見通しであり, Case Bは厳しい見通しを反映した値であると考えられる。

2.2 その他の外生変数とパラメータ

(1) 紙生産季節指数(p_1), 紙消費季節指数(p_2)については $p_1=p_2=100$ とする。つまり, 本研究では, 諸変数の長期変動傾向を予測することが目的なので, 季節変数の影響を考慮する必要はないものと見なした。

(2) 同様に卸売物価指数(g_3)についても $g_3=100$ とする。この結果, 古紙価格についてインフレーション等の影響は考慮されない。なお, 実質古紙価格 g_4 は1979年1月で $g_4=13$ (円/kg)と仮定した。この値を名目古紙価格に換算すると24.7(円/kg)となる。実際には, 1978年度中は古紙価格は低迷しており, 古新聞ではば16.5(円/kg), 段ボール屑で18.0(円/kg)(東

京地区近郊メーカー工場価格)前後と仮定より相当低い値を示しているが, 一応適正価格の目安として現状より高めの価格を仮定した。

(3) p_i ($i=3\sim 14$) (回帰係数, 歩留り, 時定数), k_j ($j=2\sim 5$) (在庫率), k_6 (回収業の在庫調整係数)の値は1978年次と同じ値を用いた。(数値については第1報参照)

(4) Case Aでは表2に示したように, 1979年から1989年までの10年間で紙の生産量の予測が1.72倍になっているので, k_7 (メーカー紙出荷量の予測調整係数)は $(k_7)^{120/p_{14}}=1.72$ より $k_7=1.00906$ となる。同様に1990年から2000年の期間は, $k_7=1.00342$ となる。

Case Bでは1979年から2000年までの21年間で紙生産量は1.18倍であり, $k_7=1.00134$ となる。

3. シミュレーション

Table 3 Estimated values of x_i and Δx_i ($i=17, 18, 23$) calculated by Eq. (1) in case B

year	x_{17}	x_{18}	x_{23}	Δx_i
1979	19,616	482	20,099	2.53
1980	20,056	493	20,549	2.24
1981	20,453	503	20,956	1.98
1982	20,809	512	21,320	1.74
1983	21,127	520	21,646	1.53
1984	21,410	526	21,936	1.34
1985	21,661	533	22,194	1.17
1986	21,883	538	22,421	1.03
1987	22,079	543	22,622	0.90
1988	22,251	547	22,799	0.78
1989	22,403	551	22,954	0.68
1990	22,535	554	23,089	0.59
1992	22,752	559	23,312	0.45
1994	22,918	564	23,481	0.34
1996	23,043	567	23,610	0.25
1998	23,138	569	23,707	0.19
2000	23,209	571	23,780	0.14

(x_i : 10^3 ton/year)(Δx_i : Percent changes from previous year)

将来動向の予測をシミュレーションするに当って、次のような仮定を Case A, B について考えた。

3.1 Case A

Case A について、次のように 4 通りの場合を考えた。

Case A-I

(1) 回収率 s の上限を 50% とする。つまり

$$s \leq 50(\%)$$

(2) 実質紙輸出率は現状のままとする。つまり

$$k_1 = 0.024$$

(3) 実質古紙価格動向 g_4 は 5 通りの場合を仮定する。

ここで、 $t=0$ は 1979 年 1 月で、月間単位である。

(No. 1) g_4 は 1979 年以後一定である。つまり

$$g_4 = 13 \quad (3)_1$$

(No. 2) g_4 は 20 年間で 2 倍になる。つまり

$$g_4 = 13(1+t/240) \quad (3)_2$$

(No. 3) g_4 は 10 年間で 2 倍、20 年間で 3 倍になる。

$$g_4 = 13(1+t/120) \quad (3)_3$$

(No. 4) g_4 は 5 年間で 2 倍、10 年間で 3 倍になる。

$$\text{つまり, } g_4 = 13(1+t/60) \quad (3)_4$$

(No. 5) g_4 は 20 年間で 1/3 倍になる。つまり、

$$g_4 = 13(1-2/3 \cdot t/240) \quad (3)_5$$

(4) 古紙混入率については技術的な制限はないものとし、過去の動向から次のように仮定した。

洋紙への古紙混入率 g_5 は年間 0.8% 伸びるとして、

$$g_5 = 0.183 + (0.008/12) \cdot t \quad (4)_1$$

板紙への古紙混入率 g_6 は年間 0.52% 伸びるとして、

$$g_6 = 0.736 + (0.0052/12) \cdot t \quad (4)_2$$

これから、1990 年では $g_5=0.271$ 、 $g_6=0.793$ 、2000 年では $g_5=0.351$ 、 $g_6=0.845$ となるが、これらの値は、紙・パルプ技術予測研究会の技術予測値⁷⁾に比較して、妥当な仮定と考えられる。

Case A-II

(1) 実質紙輸出率は現状のままで $k_1 = 0.024$ とする。

(2) 実質古紙価格 g_4 は 20 年間で 2 倍とする。Case A-I の No. 2 と同じ仮定である。

(3) 古紙回収率 s の上限を次のように仮定する。

(No. 2) $s \leq 50$ (%) (1979~2001 年)

(No. 6) $s \leq 50$ (%) (1979~1984 年)

$s \leq 55$ (%) (1985~2001 年)

つまり, 1985 年段階で古紙回収体制が整備されて, 回収率の上限が 55% まで上昇したものと仮定した。なお回収率そのものは, 直ちに 55% まで上昇するわけではない。

(No. 7) $s \leq 50$ (%) (1979~1984 年)

$s \leq 55$ (%) (1985~1990 年)

$s \leq 55 + 0.5(T-11)$

(1990~2000 年)

ここで, $T=0$ は 1979 年で年間単位である。

つまり, 1985 年で 55% に上がり, さらに 1990 年以後は年間 0.5% の伸びで上昇するものと考えた。2000 年では回収率の上限値は 60% となる。

Case A-III

(1) k_1, g_4 については, Case A-II と同じとする。

(2) 古紙回収率の上限は, Case A-I と同じで $s \leq 50$ (%) とする。

(3) 古紙輸入政策として回収業者の在庫率 ($=y_4/z_6$) に着目する。回収業者の在庫率が 0.15(月) 以下になると, メーカーは, メーカー古紙購入予定量 (x_{16}) の $a\%$ 輸入することとする。 a の値は, 次の 4 つを仮定した。

(No. 2) $a=0$ (%)

(No. 8) $a=2.5$ (%)

(No. 9) $a=5.0$ (%)

(No. 10) $a=7.5$ (%)

Case A-IV

(1) k_1, g_4, s の上限については, Case A-III と同じとする。

(2) 「80年代の紙パルプ産業ビジョン」⁶⁾ で述べられているように, 紙製品輸入の拡大は避けることのできない一つの流れとして予想されているため, 紙製品の輸入が行われた場合について考察する。輸入の増加率は一律と仮定する。

(No. 2) 現状のままで, $k_1=0.024$

(No. 11) 10 年後の 1989 年次で実質紙輸入率が 3% となったとする。つまり,

$$k_1 = 0.024 - (0.054/10) \times T \quad (5)_1$$

Fig. 1 Forecasting of y_4, z_5 and z_6 in case A-I.

これは, 輸出率が変らないとすれば, 年間 0.54% の輸入増加率を意味している。

(No. 12) 10 年後で実質紙輸入率は 5% となる。

つまり, $k_1 = 0.024 - (0.074/10) \times T \quad (5)_2$

(No. 13) 10 年後で実質紙輸入率は 7% となる。

つまり, $k_1 = 0.024 - (0.094/10) \times T \quad (5)_3$

これらのケースについての意味は次の通りである。

Case A-I では, 回収率に 50% という限界値が存在する場合に, 増大する紙需要の予想に対する古紙供給量への古紙価格動向 (g_4) の影響を明らかにする。

Case A-II では, 回収率の上限値が変化した場合に, 古紙供給動向にどのような影響があるかを考察する。

Case A-III では, 将来予想される古紙不足の場合に, そのひとつの対策として古紙輸入がどの程度効果があるかを検討する。Case A-IV では古紙輸入の代りに紙の輸入を行った場合, 古紙需給関係にどのような影響を与えるかを考察する。

3.2 Case B

Case B についても, Case A と基本的に同じ仮定で行うが, Case B における紙需要量の将来予測値が Case A に比べてそれほど大きくないため, Case A-I に対応する次の場合のみについて検討した。

(1) s の上限, k_1 については, (Case A-I と同様に,

$$s \leq 50(\%), k_1 = 0.024$$

(2) 実質古紙価格動向 g_4 , Case A-I における No. 1, 2, 3, 5 の 4 通りの場合について考察する。

(No. 14) g_4 は 1979 年以後一定である。

(No. 15) g_4 は 20 年間で 2 倍になる。

(No. 16) g_4 は 10 年間で 2 倍, 20 年間で 3 倍にな

る。

(No. 17) g_4 は 20 年間で 1/3 倍になる。
なお、古紙混入率の代りに、メーカー古紙使用量 (z_7) として (2) 式を直接用いるので、 g_5 、 g_6 の仮定は不必要となる。

4. 結果と考察

図 1 は、Case A-I の回収率の上限を 50 %とした場合に、古紙価格を安定的に上昇させた時 (No. 2~4)、あるいは下げた時 (No. 5) のシミュレーション結果を示す。この図から古紙の需給変動や紙廃棄物排出量の傾向が容易に見てとれる。この図は、古紙価格をいかに上昇させても古紙供給が古紙需要に追いつかなくなり、回収業古紙在庫量 (y_4) が零になる時期が早晚訪れることを示している。その時期は、現状価格の維持 (No. 1) の 1986 年 5 月から、価格が 5 年間で 2 倍になる場合 (No. 4) の 1987 年 12 月までであり、条件が大きく変わってもそれほど期間が開いていない。No. 4 について言えば、古紙価格の上昇に伴って、初期では回収量の増加と回収率の上昇が見られ、その結果、古紙供給が古紙需要を上回り、古紙在庫量は増加しつづける。けれども、1984 年 4 月で回収率が上限の 50 %に達する (図 1 の z_9 と z_5 の曲線の一致する点) と、その後は古紙供給と古紙需要が逆転し、在庫調整が行われているにもかかわらず、古紙在庫量は急激に減少していく。また、回収量の増加とともに紙廃棄物量 (z_9) も増大しつづけることがわかる。

図 2 は、Case A-I のメーカー古紙在庫量 (y_5) の変動推移のシミュレーション結果で、 y_4 と同様な推移をたどるが、 y_4 よりもピークの時期は遅れている。なお、 y_4 が零になった時期以後の計算結果は、実際上意味をなさないもので、破線で示している。また、メーカー古紙購入量 (z_6) は、 z_5 とほとんど同じ値である。

図 3 は、Case A-I~A-IV に共通な諸変数のシミュレーション結果であり、これらの変数は、古紙価格、回収率の上限値、古紙輸入政策等の条件変更に対して影響を受けない。 y_1 (メーカー紙在庫量)、 z_1 (メーカー紙生産量)、 z_8 (メーカーパルプ使用量) は Case A-I~A-III で共通な値であり [他に z_2 (メーカー紙出荷量)、 z_7 (メーカー古紙使用量)、 z_{10} (実質紙輸出货量) も同様である)、 y_2 (卸売紙在庫量)、 y_3 (消費者

Fig. 2 Forecasting of y_5 and z_6 in case A-I.

Fig. 3 Forecasting of y_1 , y_2 , y_3 , z_1 , z_4 and z_8 in case A.

紙滞留量)、 z_4 (消費者紙処分量) は Case A-I~A-IV において共通な値である、他に z_3 (消費者紙消費量) も同様である。ここでは、No. 4 の場合を示しているため、 y_4 (No. 4) が零になった時期から破線となっている。図 3 から次のことがわかる。増加傾向は y_3 が最も大きく、次いで z_1 、 z_4 、 y_1 がほぼ同じ大きさであり、 z_8 が最も小さい。また、1979 年から 2001 年までの期間で z_8 が約 1.6 倍となっているのに対して、他の変数の値は約 2.0~2.4 倍になっている。これは、古紙混入率の増加に伴って、メーカー古紙使用量 (z_7) が上記の期間で約 2.9 倍 (68 万 t/月~199 万 t/月) と増えたため、パルプ使用量が相対的に減少したためである。

図 4 は、Case A-II の古紙回収体制を整備して、

回収率の上限を上げた時のシミュレーション結果を示す。この場合には、回収率の上限を55%まで高めると古紙不足は1994年10月まで起こらないし(No. 6), さらに上限値を漸次60%まで上昇させれば2001年まで古紙不足が生じない(No. 7)ことが予測される。その上、紙廃棄物量も**Case A-I**に比べて、その増加傾向が小さいことがわかる。No. 6では、回収率は1984年7月で50%になり、その後漸増しながら1992年7月に上限値である55%に達する。回収率が上限値に達した後は、古紙の需給バランスが崩れて、 y_4 は急激に零に近づく。他方、No. 7では、その後も回収率が上昇するため、古紙不足は生じないものの回収率は、1999年7月で60%に達することになる(図10参照)。

図5は、**Case A-III**の古紙の国内供給不足を海外におおぎ、古紙を輸入した場合の影響を見たものである。図からわかるように、古紙の供給不足が生じる時期は輸入によって当然伸びるものの、在庫量の変動が激しく、そのうえ、紙廃棄物量(z_9)も**Case A-I**と同様に増加する(z_1 の値は、No. 8, 9, 10ともNo. 2と同じであって、1979年で77万t/月、2001年1月で162万t/月である)。古紙輸入の開始時期は、1986年4月であるが、その後、在庫量が激しく変動するのは、輸入を行う月と行わない月があるためである。輸入量は、No. 8では3~5万t/月であり、No. 9では6~10万t/月、No. 10では10~15万t/月と各々において増加傾向にある。しかし、このような大量の古紙輸入を行うことは国際的な古紙市場に大きな影響を与え、多くの問題を発生させる恐れがあり、また、安定供給が将来にわたって保障されることも期待できない。そのうえ、国内における紙廃棄物量の増加も著しく、このことを併せ考えれば、古紙不足の解消を海外におおぐことは望ましいこととは思われない。

図6, 7は**Case A-IV**の紙製品の輸入が行われた場合の影響を見たものである。この場合、**Case A-II**, **A-III**と比べると、 y_2 , y_3 , z_4 (図3参照), および z_3 の国内紙消費量に関する変数は同じ推移を示すが、メーカー紙生産量(z_1)が紙製品の輸入によって減少するため、上記以外の変数は、異なった値をとる。表4に計算値の一例を1990年, 2001年について示す。No. 13について見ると、実質紙輸入量($-z_{10}$)は、

Fig. 4 Forecasting of y_4 , z_5 and z_9 in case A-II.

Fig. 5 Forecasting of y_4 , z_5 and z_9 in case A-III.

1990年では19万t/月(z_1 に対する比率は8.0%), 2001年では50万t/月(18.3%)と増加しているため、メーカー古紙使用量(z_7), メーカーパルプ使用量(z_8)は、**Case A-II**, **A-IV**に比べて大幅に減っている。特に、 z_8 はほとんど横ばい傾向になっている(図7)。他方、古紙回収量(z_5)は、1990年では最も小さい。そのため、紙廃棄物量(z_9)は、逆に最も大きくなっている(図10の回収率の比較図参照)。また、 y_4 が零になる時点は紙製品の輸入率が大きくなるほど先に延ばされており、No. 13では2001年まで古紙不足が生じないことがわかる。しかし、この場合も**Case A-IV**と同様に紙廃棄物量の増加はまぬがれない。

図8, 9は、**Case A**に比べて国内紙需要量が大幅に低い場合を予想した**Case B**についてのシミュレ

Table 4 Comparison of estimated values of No. 7, No. 10 and No. 13 (10⁴ ton month)

Year (Jan.)	z_1		z_{10}		z_5		z_7		z_8		z_9	
	1990	2001	1990	2001	1990	2001	1990	2001	1990	2001	1990	2001
Case A-II (No. 7)	265	333	6.4	8.0	135	194	137	197	145	159	119	124
Case A-III (No. 10)	265	333	6.4	8.0	127	159	137	197	145	159	127	159
Case A-IV (No. 13)	240	275	-19.1	-50.2	123	159	124	163	131	131	131	159

Fig. 6 Forecasting of y_4 , z_5 and z_9 in case A-IV. Fig. 7 Forecasting of y_1 , z_1 , z_6 and z_8 in case A-IV.

ーション結果である。図8と図1, 図9と図3との比較よりわかるように、**Case B**では y_4 , y_5 を除いた y_i ($i=1\sim5$), z_j ($j=1\sim10$) の諸変数は、ゆるやかな増加傾向を示す。そのため、**Case A-I** に比べて、 y_4 が零になる時点は大幅に延び、古紙価格が1999年と同じ値を維持する場合の No. 14 (**Case A-I** の No. 1 に対応する) でも1999年まで古紙不足が生じない結果になっている。

図10は **Case A, B** の代表的な例について、回収率の推移を比較したものである。なお、**Case A-I** は **A-IV** とほとんど同じ傾向を示す（そのうち、No. 2, 8, 9, 10 は同じ値となる）。

以上 シミュレーション結果より、将来予想される古紙の供給不足に対する最も有効かつ望ましい対策

は,

(1) 国内紙需要量の増加が将来にわたって予想される **Case A** のような場合には、回収体制を整備して、回収率の上限を 60% にまで高めることである。

(2) 国内紙需要量の増加が現状よりもそれほど大きく期待できない **Case B** のような場合には、回収率の上限が 50% までであれば、古紙価格を安定的に上昇するだけで良い。と考えられる。古紙輸入や紙製品の輸入による古紙不足対策は一時的には、有効であっても、長期的には必ずしも望ましいとは言えない。

5. 結 論

本報では、第1報で展開したわが国の古紙回収再利用システムの動的モデルを用いて、将来の古紙不足に対する4つの解決策の定量的評価を行った。評価するに当たって、将来の国内紙需要量の予測が、産業構造審議会の「80年代の紙パルプ産業ビジョン」(中間報告)⁶⁾の予測値より、楽観的な見通しに立った **Case A** と厳しい見通しに立った **Case B** の2通りについて検討した。これらのシミュレーション結果から、4つの対策案として考えた(1)古紙価格を安定的に上昇させる。(2)古紙回収体制の整備によって回収率の上限を図る。(3)古紙を輸入する。(4)紙製品を輸入する。のなかで **Case A-II** の回収率の上限を高めることが最も望ましいことがわかった。

なお、本報で用いた数学モデルは、まだ改善の余地が残されており、次のような点について検討を進めている⁸⁾。

(1) 古紙価格(g_4)を外生変数として与えているが、本来、古紙価格は、古紙回収再利用システム内の紙、古紙、パルプの需給関係で決まるはずであり、外生変数としては、国際的な市場メカニズムで決定されるパルプ価格をとるのが適切である。このため、パルプ価格と古紙価格との関係を表す数学モデルを構築し、古紙価格を内生変数に変えた。(第5報参照)

(2) 外生変数である洋紙、板紙への古紙混入率(g_5 , g_6)は、古紙混入率(x_{14})を直接、パルプ価格、古紙価格、メーカー紙生産量と関係づけることによって不必要にした。(第5報参照)

(3) 古紙価格と回収率との関係は実際には非常に複雑であるが、ここでは

Fig. 8 Forecasting of y_4 , z_5 and z_9 in case B.

Fig. 9 Forecasting of y_1 , y_2 , y_3 , z_1 , z_4 and z_8 in case B.

$$z_5(t) = z_4(t) \{p_9 + p_{10}x_{20}(t)\} - k_6x_6$$

(第1報の(10)式参照)

としているため、古紙価格が下っても、在庫調整を行うこと(k_6x_6 の働き)によって、回収率自体はほとんど下降せず、むしろ、メーカー古紙使用量の上昇に伴って上昇するようなモデルになっている。このため、現状では妥当と考えられるが、将来にわたる予測では、検討の余地が残されている。つまり、回収量と古紙価格とのメカニズムに対する詳細な検討が必要である。

(4) このモデルでは、紙、古紙について、それぞれまとめて取扱っているが、実際には、古紙不足と言っても新聞古紙の不足が特に問題になることが多く、紙、古紙各々の品種別構成を検討することが必要になる。

(5) 古紙価格安定対策として、古紙備蓄を行った場合、どの程度の備蓄量が必要であり、また、古紙需給

Fig. 10 Comparison of recovery rate (s) in case A and B.

関係にどのような影響があるかを考察する必要がある。

文 献

- 1) 吉田総夫, 大野 弘, 梶原 惇, 石塚昌義, 橋本伊織, 塩谷捨明, 高松武一郎, 資源循環再利用計画のための方法論的研究—第1報 古紙回収再利用システムの動的モデル, 紙パ技協誌, Vol. 36, No. 4, pp. 357 (1981)
- 2) ジョーン・ロビンソン, ジョン・イトウエル著 宇沢弘文訳, ロビンソン現代経済学, 15頁, 75頁, 岩波書店 (1976)
- 3) D・H・メドウズ他著大来佐武郎監訳, 成長の限界, 7頁, ダイヤモンド社 (1972)
- 4) NIKKEI BUSINESS: 1979年9月24日号, 66頁
- 5) 大野 弘, 吉田総夫, 橋本伊織, 塩谷捨明, 高松武一郎, 第2報, 古紙回収再利用システムにおける時系データの変動分析, 紙パ技協誌投稿中, Vol. 36, No. 6, pp. 531 (1981)
- 6) 産業構造審議会, 紙パルプ部会, 需給企画小委員会: 原材料確保開発小委員会, 80年代の紙パルプ産業ビジョン (中間報告), 昭和55年8月
- 7) 紙・パルプ技術予測研究会編「紙・パルプ技術予測調査結果報告書」No. 1~6 (1979) および 1976年の予測調査結果 <古紙編> など
- 8) T. Takamatsu, I. Hashimoto, F. Yoshida and H. Ohno, "An assessment of the waste paper recycling system in Japan", Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering (APC ChE) 2nd Congress, Technical Papers on Chemical Engineering in Resource Development and Conservation, 93~99, Manila, Philippines, (1981)

(受理 56.3.20)