新製品への代替を考慮した家電製品の廃棄台数予測

山末英嗣¹ 中島謙一² 奥村英之¹ 石原慶一¹

¹京都大学大学院エネルギー科学研究科

²東北大学大学院環境科学研究科

J. Japan Inst. Metals, Vol. 70, No. 8 (2006), pp. 611-614

© 2006 The Japan Institute of Metals

Estimation of the Number of Discarded Home Electric Appliances Considering New Alternative Products

Eiji Yamasue¹, Kenichi Nakajima², Hideyuki Okumura¹ and Keiichi N. Ishihara¹

¹Graduate School of Energy Science, Kyoto University, Kyoto 606-8501

²Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University, Sendai 980-8579

The number of discarded home electric appliances CRT TV (CRT), liquid-crystal display TV (LCD), plasma display panel TV (PDP), refrigerator, air conditioner, washing machine, microwave oven, cleaner, video cassette recorder (VCR) and (DVD) has been estimated using a population balance model. For the estimations of CRT and VCR, the effects of alternative products (LCD and PDP, and DVD, respectively) were considered. The increasing rates of the estimated number of the discarded refrigerator, the washing machine and the cleaner from 2000 to 2020 were within 5%, while those of air conditioner and microwave oven were more than 30%. The estimated number of shipped CRT and VCR were in good agreement with those of statistic values, indicating the reasonability of the estimated number of discarded LCD, PDP and DVD. As an application of the estimated data, the amount of indium included in the discarded display panel of LCD and PDP was calculated.

(Received April 12, 2006; Accepted May 29, 2006)

Keywords: discarded electric home appliance, population balance model, recycle, social dissipation

1. 緒 言

家電リサイクル法の施行3年後の2003年度において、全国380カ所の指定取引場所で引き取られた廃家電4品目(テレビ, 冷蔵庫, エアコン, 洗濯機)は約1046万台であった。これらは家電リサイクルプラントに搬入後99.8%がリサイクル処理され, 鉄, 銅, アルミニウム, ガラスなどが有価物として回収され, 再商品化率は法定の基準値を大きく上回るテレビ78%, 冷蔵庫63%, エアコン81%, 洗濯機65%であった¹⁾。

しかし, 家電製品には上記のベースメタルだけでなく多種にわたる希少元素(レアメタル)が含まれており, 現在のリサイクルプロセスではこれらのレアメタルは再生金属中に希薄に分散され, 有効にリサイクルされていない場合がほとんどである。この原因の一つとして, 家電製品は消費財と異なり平均製品寿命が10年程度と長く, また特に近年は家電製品の多様化が進んだことにより廃棄台数の予測が困難となり, リサイクル計画や適正処分計画が適正に立てられにくくなっていることが挙げられる。一例として, 2000年以降に普及し始めた液晶テレビ(LCD)やプラズマディスプレイテレビ(PDP)は, 2011年7月のアナログ放送の終了とあいまって, 急速な出荷台数の伸びを示している一方, ブラウン管テレビ(CRT)は代替効果により出荷台数が激減している。ま

た, DVDとビデオカセットレコーダ(VCR)の関係も同様である²⁾。

廃家電製品の発生台数は, 家電製品協会³⁾, 経済産業省⁴⁾, 日本電機工業界⁵⁾が予測しているが, それぞれ1998年, 2002年, 2003年までしか行っていない。田崎ら⁶⁾は2020年まで予測を行っているが, LCDやDVDによる代替を考慮していない。また, 産業構造審議会環境部会⁷⁾では, LCDとPDPについて2007年まで廃棄台数予測を行っているが, 基となるデータとして2001年度の出荷台数の実績データしか使用していない。

以上より, 本研究では, 従来行われてきたCRT, 冷蔵庫, エアコン, 洗濯機, 掃除機, 電子レンジ, VCRの7品目の廃棄台数予測に加え, LCD, PDP, DVDの3品目を追加した計10品目の廃棄台数予測を行うことを目的とする。なお, 本論文では, (1)新たな対象品目の追加, および(2)技術変化(LCD, PDP, DVDへの代替)を反映させることで再推計されたデータの応用に焦点を当てており, 後者では得られたデータを用いて家電製品に含まれるインジウムをレアメタルの例としてあげ, その市中拡散量の推計例を提示する。

2. 解 析 方 法

2.1 ポピュレーションバランスモデル

本研究では田崎ら⁶⁾の提案したポピュレーションバランス

モデルを応用し、出荷台数、保有台数、使用年数分布から将来の廃家電製品の発生台数予測を行った。すなわち t 年度の出荷台数 P_t から t 年度の廃棄台数 W_t を差し引いたものは t 年度中の保有台数の増加分と一致するため、次のような関係が成立する。

$$P_t - W_t = N_t - N_{t-1} \quad (1)$$

ただし、 N_t および N_{t-1} はそれぞれ t 年度と $(t-1)$ 年度の国内保有台数である。

t 年度における国内保有台数 N_t は t 年度における世帯あたりの保有台数 n_t と世帯数 H_t の積として式(2)のように表すことができる。

$$N_t = n_t \times H_t \quad (2)$$

さらに n_t はロジスティック関数を用いて式(3)のように表すことができる。

$$n_t = \frac{n_{\max}}{1 + A \exp \{-B(t - t_0)\}} \quad (3)$$

ここで、 $n_{\max}$ は世帯あたりの最大保有台数、 t_0 は基準年度、 A, B は定数である。本研究では t_0, A, B をパラメータとし、過去の世帯あたりの保有台数データ^{2,8)}から回帰分析により決定した。また、世帯数データは国勢調査⁹⁾の値を使い、将来の世帯数については国立社会保障・人口問題研究所の推計値¹⁰⁾を用いた。

一方、廃棄台数 W_t は、様々な部品の寿命関数として用いられるワイブル分布関数¹¹⁾を用いて推計した。すなわちある製品が生産されて i 年後に廃棄される確率を f_i とすると、 t 年度の廃棄台数 W_t は

$$W_t = \sum_{i=1} (P_{(t-i)} \times f_i) \quad (4)$$

と表すことができる。本研究では、出荷台数データは家電産業ハンドブックの値²⁾を用い、寿命分布は家電製品消費者使用実態調査結果¹²⁾をワイブル累積分布関数で回帰分析し、その結果からワイブル分布関数を決定した。

したがって、式(2)と式(4)を式(1)に代入することにより t 年度の出荷台数を決定することが可能となる。 t 年度の出荷台数が分かると、その値を基に $(t+1)$ 年度の廃棄台数を決定することができ、さらに $(t+1)$ 年度と t 年度の国内保有台数の値から、 $(t+1)$ 年度の出荷台数が決定できる。本研究ではこの計算を繰り返し、出荷台数データが存在する年度については計算結果と統計値の整合性を検討し、大きな誤差が発生した場合は文献値や関数近似の吟味を行った。特に国内保有台数に関しては、式(2)で用いる世帯数が非常に大きいことから世帯あたりの保有台数データの僅かな変化が大きな変化として現れる。そのため、特に世帯あたりの保有台数データ、およびそのロジスティック関数による推測値については注意深く検討した。また、データ3点の移動平均を用いることでデータの平滑化も行った。推算値と統計値に大きな差が見られなくなった場合、そのデータを基に2025年までの出荷台数、廃棄台数を算出した。

2.2 CRT, LCD, PDP, VCR, DVD の廃棄台数の予測方法

冷蔵庫、エアコン、洗濯機、掃除機、電子レンジについては上記の手法で廃棄台数を推定できるが、CRT や VCR は

近年それぞれ LCD と PDP, DVD への代替を考慮する必要がある。そこで本研究では、以下のような仮定を用いて推測を行った。

仮定1 LCD, PDP の寿命関数は CRT と同じとした。
(VCR と DVD も同様)

仮定2 LCD と PDP の世帯あたりの保有台数についてロジスティック関数で近似を行う際、LCD と PDP の最大保有台数 ($n_{\max(\text{LCD})}$, $n_{\max(\text{PDP})}$) の合計値は、LCD, PDP が存在しないとして推計した CRT の最大保有台数 (=2.52) に一致するとした。(VCR と DVD も同様) ただし $n_{\max(\text{LCD})}$ と $n_{\max(\text{PDP})}$ の比は2005年度の保有台数比と同じになるとした。すなわち、 $n_{\max(\text{LCD})} = 2.2$, $n_{\max(\text{PDP})} = 0.32$ とした。

仮定3 ある年度における CRT と LCD と PDP の出荷台数の合計は、LCD と PDP が現れなかったとしたときの CRT の出荷台数と同じになるとした。すなわち、まず LCD と PDP を考慮しない場合の CRT の出荷台数を導出し、その後、仮定1と2から推算した LCD と PDP の出荷台数の合計を差し引くことで CRT 出荷台数とした。この値が負になった年度以降の CRT 出荷台数は0とした。(VCR と DVD も同様)

なお、現在 DVD には DVD プレーヤ、DVD レコーダ、HDD/DVD レコーダなどが存在するが、全て同一のものとして取り扱った。

3. 結果および考察

3.1 冷蔵庫、エアコン、洗濯機、掃除機、電子レンジの推計結果

Fig. 1 に上記の手法によって求めた結果の代表例として、電子レンジの出荷台数および廃棄台数の予測結果を示す。電子レンジの出荷台数の統計値と推算値は比較的良好一致を示していることが分かる。他の4品目についても同程度のよい一致が見られた。Fig. 2 に冷蔵庫、エアコン、洗濯機、掃除機、電子レンジの廃棄台数予測結果をまとめたものを示す。図中には、田崎ら⁶⁾による2000年度と2020年度の推定値も示している。冷蔵庫、洗濯機、掃除機については田崎らの推定値と本研究の推定値は良好一致を示した。一方、エアコンは2000年度の推計値が、電子レンジについては2000年度と2020年度の推計値が、最大30~40%程度の差が見られた。これは、田崎らは1998年度までの統計値を基に推定を行っているが、本研究では2005年度までの統計値を基にしていることが原因と考えられる。すなわち、冷蔵庫、洗濯機、掃除機の保有台数は1998年度においてはほぼ飽和状態にあり²⁾、それまでのデータを用いて推計を行ったとしても誤差は発生しにくい。エアコンと電子レンジの保有台数は同時期においても増加傾向にあり、推計に誤差が生じたものと考えられる。

2000年度を基準として2025年までの廃棄台数の変化を見ると、エアコンが約136%、電子レンジが約129%の増加率となり、今後、エアコンと電子レンジのリサイクルや適正処分をより重点的に計画する必要があると考えられる。ま

Fig. 1 The estimated number of shipped or discarded microwave oven.

Fig. 2 The estimated number of discarded refrigerator, air conditioner, washing machine, microwave oven, cleaner. The solid marks indicate the reported values.

Fig. 3 The predicted number of shipped or discarded CRT, LCD and PDP compared with the previous report.

た、各家電製品の平均重量を用いて廃棄重量を推算すると、冷蔵庫がもっとも重く約 40 万トン、次にエアコンで約 32 万トンとなり、廃棄重量の観点からは冷蔵庫とエアコンをより重要な対象にすべきであると考えられる。

ただし、家電製品には、レアメタルといった稀少添加材料が利用されている。今後は、量的な観点のみならず質的な観点を考慮したリサイクルの検討・評価が必要となると考えられる。この『資源の質』を考慮するための資源指標としては、関与物質総量(TMR: Total Materials Requirement)¹³⁾や資源枯渇係数¹⁴⁾などの指標がある。これら資源の質を考慮した解析結果に関しては、別報にて報告する。

3.2 CRT, LCD, PDP の推計結果

Fig. 3 に CRT, LCD, PDP の出荷台数(統計値)、出荷台数(推算値)、廃棄台数(推算値)を示す。図には田崎ら⁶⁾による CRT の廃棄台数予測結果も示している。出荷台数の推算値は、LCD, PDP とともに統計値と良い一致を示している。CRT の出荷台数は、「LCD と PDP の出荷台数の合計値が CRT の出荷台数の減少台数になる」と仮定して推算しているが、これが統計値と良い一致を示していることから、消費者は既設の CRT に加えて LCD や PDP を購入するのではなく、CRT を購入する代わりに LCD や PDP を購入していると推察できる。また、「LCD と PDP の最大保有台数の合計が、LCD と PDP が存在しないと仮定したときの CRT の最大保有台数の値に等しい」とした仮定も非現実的なものではなく、2020～2025 年には、映像表示機器の総保有台数がそれほど変わることなく、従来の CRT が LCD や PDP に代替された生活が予測される。ここで、LCD の出荷台数の推算値に着目すると、2011～13 年にかけて最大値を迎えており、2011 年 7 月のアナログ放送終了の時期に重なっている。これは技術革新による LCD の低価格化なども理由として考えられるが、ロジスティック関数で分析する限り、LCD 市場がアナログ放送の終了に影響を受けていること示唆しているように思われる。

CRT の廃棄台数に着目すると、2006 年以降減少に転じ、2025 年にはほぼ 0 に近い値となっている。ただし、実際には 2011 年以降のアナログ放送の終了に伴いデジタル放送非対応型 CRT の製品寿命は急速に短くなると考えられ、より

早い時期に廃棄台数が 0 になるものと考えられる。現在、CRT のブラウン管は手解体でパネル部とファンネル部に分離されてリサイクルされているが、国内のブラウン管生産量が激減しているため、今後の有効利用法が喫緊の課題となっている。現在、ブラウン管ガラスカレットについては、平成 16 年 5 月より、国内業界団体が作成したガイドライン¹⁵⁾に従って蛍光体等被覆物質が除去されたものについては、バーゼル国内法(特定有害廃棄物等の輸出入等の規制に関する法律)上の規制非対象物と整理されており¹⁶⁾、海外工場において水平リサイクルする道が開きつつある。しかし、これはブラウン管中に含まれている大量の資源を失うことを意味しており、他のリサイクル方法を検討する必要があると考えられる。

LCD や PDP の廃棄台数も急速に増加しており、2020 年には田崎ら⁶⁾が推算した CRT の廃棄台数に近い値の LCD が廃棄されることが分かる。LCD や PDP には有用資源が多く含まれているが、特に透明電極用に用いられているインジウムの回収は、シャープによる基礎技術の開発が報告されている¹⁷⁾が、現在は実証プラントで検証中の段階であり、早急に回収およびリサイクル手法を確立する必要があると考えられる。

3.3 VCR, DVD の推計結果

Fig. 4 に VCR, DVD の出荷台数(統計値)、出荷台数(推算値)、廃棄台数(推算値)を示す。図には田崎ら⁶⁾による VCR の廃棄台数予測結果も示している。VCR の推算においても CRT の場合と同じ仮定を用いているが、統計値と推算値が比較的良好一致を示した。すなわち、消費者は VCR を購入する代わりに DVD を購入し、2020～2025 年には、家庭内の録画機器の総保有台数がそれほど変わることなく、従来の VCR が DVD に代替されると推察される。

VCR の廃棄台数については、CRT の場合と同様の減少が見られ、DVD については大きな増加が見られた。今後、この状況を基にリサイクルや処分方法を検討する必要があると考えられるが、すでに述べたように DVD 機器には DVD プレーヤ、DVD レコーダ、HDD/DVD レコーダなど多様化が進んでいるため、より適切な計画を立てるためにはこれら個別の廃棄台数についての重要性が高くなると考えられる。

Fig. 4 The predicted number of shipped and discarded VCR and DVD compared with the previous report.

Fig. 5 The estimation of the dissipated amount of indium from LCD and PDP when discarded LCD and PDP are not recycled.

4. 廃棄台数の推算値の応用

すでに述べたとおり、家電製品の廃棄量推算値は、今後のリサイクルや適正処分をより計画的に遂行する上で重要なデータの一つになりうるが、特に近未来の課題となるレアメタルのリサイクル、社会蓄積、拡散を推算する上で重要な基礎データとなりうる。そこで、以下では廃棄されるLCDおよびPDPに含まれるインジウム量の推算を応用例の一つとして行った。推算に必要な液晶パネル中のインジウム量は15インチあたり1gという報告値を使った¹⁷⁾。また、LCDとPDPの液晶の平均サイズは家電製品協会のへのヒアリングを基にそれぞれ22インチ、39インチと仮定し、そこに含まれるインジウム量は面積比で増加するとした。

以上の条件の下、推算した廃LCD、廃PDPに含まれるインジウム量をFig. 5に示す。LCDやPDPがリサイクルされずに廃棄されるとインジウムは失われ、その量は年度を追う毎に急増し、2025年以降は年間35トン以上のインジウムが市中に拡散することが分かる。2004年度に国内で使用された透明電極用インジウム(純分)はPCや携帯電話用液晶パネルなどを全て含めて470トンとされており¹⁷⁾、その製品への歩留まりを3~5%とすると、14~24トンのインジウムが使用されていることになるが、20年後にはこの2倍程度のインジウムが毎年消失することになる。このことから液晶パネル中のインジウムについて、早急に回収およびリサイクル手法を確立する必要があることが分かる。

5. ま と め

本研究ではCRT、冷蔵庫、エアコン、洗濯機、掃除機、電子レンジ、VCRの廃棄台数予測に加え、近年代替新製品として現れたLCD、PDP、DVDの廃棄台数予測をポピュレーションバランスモデルを用いて行うことを目的として研究を進めた。その結果、以下のことが明らかになった。

過去に推計例のあった冷蔵庫、エアコン、洗濯機、掃除機、電子レンジについては2005年度のデータを用いて再推計を行い、保有台数がほぼ飽和状態にある冷蔵庫、洗濯機、掃除機については過去の報告値と同程度であったが、世帯あたりの保有台数が増加傾向にあるエアコンと、電子レンジについては30~40%程度の相違が見られた。LCDとPDPの

推計に関しては、1.「LCD、PDPの寿命関数はCRTと同じになる」、2.「LCDとPDPの出荷台数の合計値がCRTの出荷台数の減少台数になる」および3.「LCDとPDPの最大保有台数の合計が、LCDとPDPが存在しないと仮定したときのCRTの最大保有台数の値に等しい」という仮定の下推計を行い、出荷台数の統計値と推測値の良好一致が見られた。VCRとDVDについても同じ仮定で推算を行ったところ、出荷台数の統計値と推測値に良好一致が見られた。また、CRTとVCRの廃棄台数に着目すると、それぞれ2006年度および2004年度以降減少に転じ、2025年度および2020年度にはほぼ0になることが分かった。また、LCDとPDPがリサイクルされずに廃棄されることにより回収できなくなるインジウム量を推算し、2025年以降は年間35トン以上のインジウムが市中に拡散することが分かった。

文 献

- 1) Ministry of the Environment: *Junkangata-Syakai-Hakusyo* (in Japanese) (2005).
- 2) Association for electric home appliances: *Kadensangyou Handbook 2005* (in Japanese) (2005).
- 3) Association for electric home appliances: *Haikadenseihin-hasseiryuu-no-yosokuchousakenkyuu-houkokusyo* (in Japanese) (1993).
- 4) Ministry of Economy, Trade and Industry: *Haikibutsutou-syori-saishigenka-suishin-jigyuu Houkokusyo* (in Japanese) (1998).
- 5) The Japan Electrical Manufacturers' Association: *2003nen-niitaru-kadenseihin-no-kokunaijuyuyosoku* (in Japanese) (1999).
- 6) T. Tasaki, M. Oguchi, T. Kameya and K. Urano: *Journal of the Japan Society of Waste Management Experts* **12**(2001) 49-58.
- 7) Industrial structure Council and Central Environment Council: *Dai-2kai-goudou-kaigi, Giji-shidai3-2* (in Japanese) (2002).
- 8) Agency for Natural Resources and Energy: *Denryoku jukyuu-no-gaiyou* (in Japanese) (Chuwa Printing, 1980-2000).
- 9) Statistics Bureau of Ministry of Internal Affairs and Communications: *Population Census* (in Japanese) (1980-2000).
- 10) National Institute of Population and Social Security Research: *Nihon-no-Setaisu-no-Syoursuisei* (in Japanese) (2005).
- 11) T. Honma: *Sugakuteiri Koushiki-syojiten* (in Japanese), (Seibunshinsya publishing, 1992) pp. 421-422.
- 12) Association for electric home appliances: *Kaden-seihin-syoushisya-shiyuu-jittai-chousa* (in Japanese) (2001).
- 13) K. Halada, K. Ijima, N. Katagiri and T. Okura: *J. Japan Inst. Metals* **65**(2001) 564-570.
- 14) Keiichi N. Ishihara and Eiji Yamasue: *Energy and Resources* (in Japanese) **24**(2003) 184-187.
- 15) Electric glass industry association and Association for electric home appliances: *Refined CRT caret no Hinshitsu Guideline* (2003).
- 16) Industrial Science and Technology Policy and Environment Bureau of Ministry of Economy, Trade and Industry: *Asia Recycle Saizensen*, Research Institute of Economy, Trade and Industry (2005).
- 17) JOGMEC: *Koubutsu-Shigen Material flow* (in Japanese) (2005).