

MFAにおける誤差の取扱い方法と 誤差最小化法による使用済み家電のフロー推計

田崎智宏¹・大迫政浩²・森口祐一³

¹正会員 博(学術) (独) 国立環境研究所 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)
E-mail: tasaki.tomohiro@nies.go.jp

^{2,3}正会員 工博 (独) 国立環境研究所 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

本報告では、MFA(物質フロー解析)におけるフローの誤差の取扱い方法を表記法、逐次補正法、一括補正法の3つに分類し、その特徴と得失を整理した。このうち、一括補正法については、計算ソフトGAMSを用いてその計算アルゴリズムを確立するとともに、家電リサイクル法施行後における使用済み家電四品目のフローについて推計を行った。その結果、家電リサイクル法施行後では、国内使用済み家電四品目の総台数のうち、約50%が家電再商品化施設でリサイクルされ、約30%が産業廃棄物処理業者による処理・資源化、約20%が中古品などとして輸出されているという推算結果となった。

Key Words: MFA (Material Flow Analysis), Estimation of material flows, Error of surveyed flow data, Minimization of error, Waste electrical home appliances

1. はじめに

物質フロー解析(MFA)の基本原理の一つは、物質の収支を合わせることにある。しかし、実際にフローの調査を行うと様々な誤差が伴い、必ずしも物質の収支を合わせることができない。特に静脈産業に係るフロー調査では、1)調査対象となる処理業者等の母集団を把握できず、調査の代表性を確保することが困難なこと、2)調査対象である処理業者等自ら自身に関わるフロー量を正確に把握していないことが多いこと等の理由から、誤差を適切に取り扱う必要性が高い。

そこで、本研究では、MFAにおけるフローの誤差の取扱い方法を3つに分類し、その特徴と得失を整理するとともに、そのなかでも方法論の確立が未熟な一類型についてのフロー推計手法を開発・確立し、使用済み家電のフロー推計に適用した。

る方法が逐次補正法である。一方、後者は、全体の誤差を最小化するという最適条件等をもとにデータを補正して一括して確定する方法である。逐次補正法の補正順序には、a)信頼度の高いと考えられるデータから補正を行っていく、b)フローの流れに沿って上流側あるいは下流側から補正を行っていく、c)補正者が任意に決めるといった方法を考えることができる。また、その補正ルールとしては、i)不突合分をフロー量・割合に応じて比例配分・比例控除する(つまり、判明量を100%として計算)、ii)不突合分を均等配分・均等控除する方法、iii)その他の任意に行うといったものを考えることがで

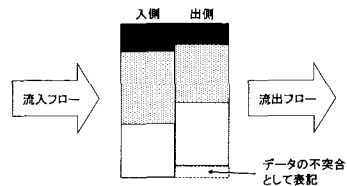


図-1 表記法による誤差の取扱い

2. MFAにおけるフローの誤差の取扱い方法

誤差の取扱い方法を、(1)表記法、(2)逐次補正法、(3)一括補正法の3種類に分類した。表記法は、図-1のように統計上の不突合として処理し、補正を行わない方法である。これに対して、逐次補正法と一括補正法は、共に物質収支を合わせるように補正を行うものであり、前者は、図-2のようなフローに対して、例えばアルファベット順に、順次、個別箇所ごとに誤差を補正・確定す

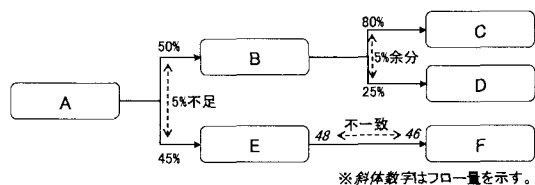


図-2 誤差を伴うフローシステム

きる。

これら3種類の誤差の取扱い方法の長所と短所を表-1に示す。それぞれに一長一短あり、目的に応じて使い分けることが重要であろう。特に、補正を行う場合には、事前に想定するフローの繋がりやストックの存在が適切でなければ(すなわち、事前に描くフロー図が正確でなければ)、誤ったフロー図で補正を行うことになり、かえって誤差が増す可能性もあるので注意が必要である。

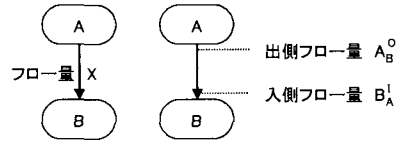


図-3 フロー計測の模式図

表-1 3種類の誤差の取扱い方法の長所と短所

	長所	短所
表記法	元データと誤差分が明らか。下手な補正でデータがゆがむことがない。	不明分が残り、収支が合わない。複雑なフロー系では表記が分かりにくくなる。
逐次補正法	収支が合う。補正方法が簡便。	補正順序に恣意性が残る。信頼度の極端に低いデータがあると補正することがかえって誤差を増す可能性がある。ループするフローがあると繰り返し計算が必要となり、適用しにくい。
一括補正法	収支が合う。ループするフローがあっても計算可能。補正順序の問題がない。補正の程度が分かることがデータの見直しに役立つ。	特別な計算プログラムが必要。信頼度の極端に低いデータがあると補正することがかえって誤差を増す可能性がある。

(図-4中の矢印)。また、各行・各列の総和はノードの入側もしくは出側のフロー総量となり、これが一致する必要がある。一方、フローの絶対量ではなくフローの割合でも二段組みのフロー表を記述できる。この場合、各行の総和は100%になる必要がある。推計においては、フロー量は物質収支をとるために必要であり、一方、静脈産業に係るフロー調査では調査データからフロー割合を求め拡大推計を行うのが通常であるから、双方を用いる必要がある。なお、収支の不突合に関しては、産業連関表の作成においても同様の不突合を解決する計算方法が考案されている。しかし、これらは基本的に1枚の表の収支整合性を図るものであり、本研究で取り扱う量と割合の両方の表の収支を整合させる方法とは異なるものである。

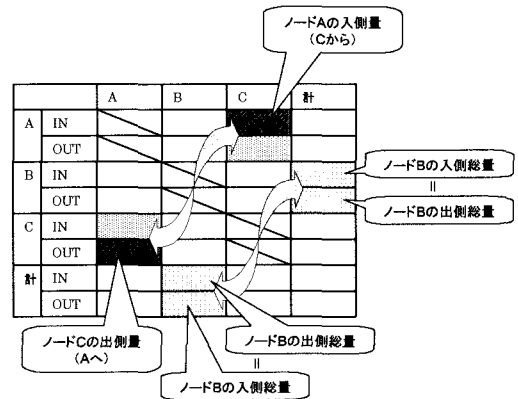


図-4 二段組みのフロー表

3. 誤差最小化法による使用済み家電四品目のフロー推計

前節で検討した3種類の誤差の取扱い方法のうち、一括補正法については、特別な計算が必要となる。筆者らは、その方法論の確立を試みてきた⁹⁾が完成にいたっていなかった。そこで、本節では、この計算アルゴリズムを確立し、使用済み家電のフロー推計に本手法を適用した結果を示す。

(1) 基本原理¹⁾

図-3に示したようにAの出側のフロー量 A_{Bj}^O とBの入側のフロー量 B_{Ai}^I が一致しない場合には、誤差項 e を導入し、 $X = A_B^O + e_{AB}^O = B_A^I + e_{BA}^I$ を満たすように誤差項を調整するのが本手法の基本原理解である。同様に、あるノードAにおける入側フロー総量と出側フロー総量が一致するように誤差項を調整する。

ここで、全体のフローを体系的に記述するために、図-4に示す二段組みのフロー表を用いることにした。フロー量を想定した場合、二段組みのフロー表では、対角成分の上下転置項目どうしの値が等しくなる必要がある

(2) 推計手法のアルゴリズム

以上の前提のもとにすれば、推計手法のアルゴリズムは(1)式の非線形計画問題を解くことと同義である。

$$\text{最小化 } z = \sum_{ij^*} (e_{ij^*}^I)^2 + \sum_{ij^*} (e_{ij^*}^O)^2 \quad \text{ここで、 } e_{ij^*} = R_{ij} - r_{ij}$$

$$\text{条件 } \sum_j R_{ij}^I = 100\%, \quad \sum_j R_{ij}^O = 100\%$$

$$F_{ij}^I = F_{ji}^O \quad \text{ただし、 } i \neq j \quad (1)$$

$$\sum_j F_{ij}^I = \sum_j F_{ij}^O$$

$$R_{ij} = F_{ij} / \sum_j F_{ij}$$

ここで、 R_{ij} はフロー割合表の値 (0~100%), F_{ij} はフロー量表の値 (正の値) であり、大文字と小文字はそれぞれ最適化条件での値と入力データの値、右肩の 1 と 0 はそれぞれ入側の値と出側の値 (記載なき場合には双方の場合に当てはまる)、添字の i と j はそれぞれ行と列 (図-4 の A, B, C...) を意味する。また、 ij^* は入力データの存在する行列の組合せの集合を意味する。1~3 番目の制約条件が、それぞれ、各ノードの出側ならびに入側のフロー割合の和が 100% となること、各フローの両端の量が一致すること、各ノードの出側と入側のフロー量が一致することを示している。

本研究では、この非線形計画問題を計算ソフト GAMS でプログラムを組み、ソルバーに CONOPT2 を用いて最適解を求めた。入力データは、各種文献^{20~21)}から得た。なお、家電リサイクル施設での処理量や国内使用済み台数などの確実あるいは計算の前提となるフロー量情報がある場合には、その変数を一定値で固定するという制約条件を加えた。その計算アルゴリズムの概要は以下のとおりである。

- 1) フロー図のノード数 (フロー表の行列数) とノード間に存在するフローを決定して、フロー表の形式を確定する (存在しないフローは 0 で固定)。
- 2) 調査データをフロー表に記入する (記入したフローのデータが ij^* となる)。
- 3) 各ノードの取扱量で調査データが得られなかった値

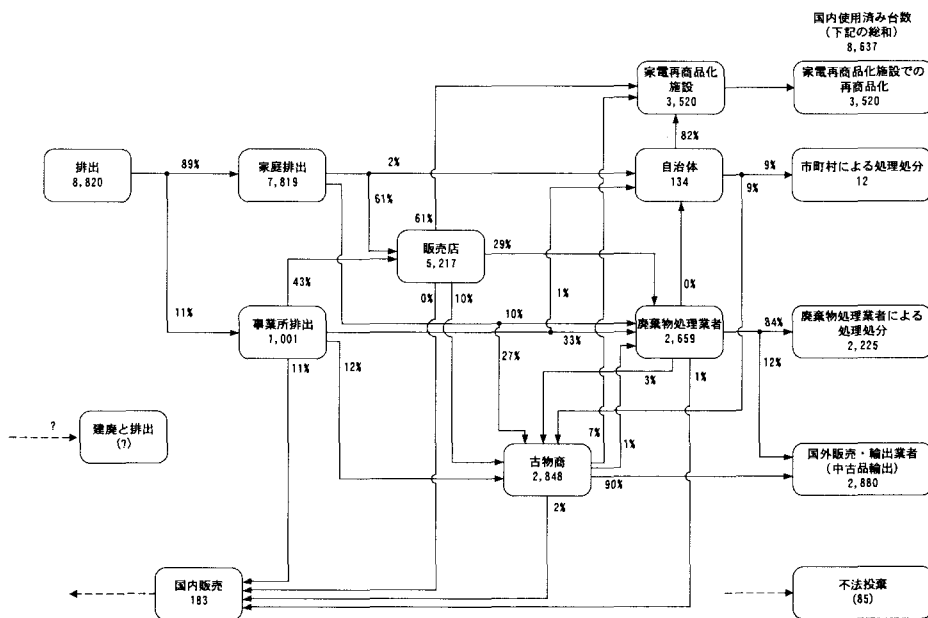
については、仮設定した値 (正の値) を記入する (計算には影響)。

- 4) 2) と 3) で記入した各ノードの取扱量とフロー割合の積で求められるフロー量 ((1) 式の最後の条件より) をフロー量表に記入する。
- 5) 記入されたフロー量について、対角成分上下転置項目が空欄の場合には、同じフロー量を記入する。
- 6) 制約条件の追加を行う。今回の計算においては、終点ノードのうち国内販売を除くノードの取扱量の合計が国内使用済み台数を示すので、これを一定値で固定した。また、家電リサイクル法施行後の家電リサイクル施設での処理量と自治体の取扱量は確定されたフロー量であるので、これを一定値で固定した。
- 7) 2) で入力した ij^* のデータに誤差項を加減し、誤差の二乗和が最小となるようにキャリブレーションを実施する (つまり、(1) 式を解く)。
- 8) 全てのフロー割合とフロー量が計算されたか、制約条件に異常がないかの確認を行い、終了。

なお、(1) 式の最小化条件式の誤差項 e にデータの信頼度に応じた重み付け係数を乗して計算を行えば、データごとの誤差の大きさの違いを考慮することができる。

(3) 推計結果

推計された使用済み家電四品目の法施行前後のフローのうち、法施行後の結果を図-5~図-8 に示す。



※フロー割合は各ノードからのアウトプット割合の比率を示す (各ノード毎に合計100%となる)。「建廃と排出」、「不法投棄」については、フローの起点は不明 (使用済み台数の内数として表示)。

図-5 使用済みテレビのフロー推計結果 (平成13~15年度の各種データより推計: 単位 千台)

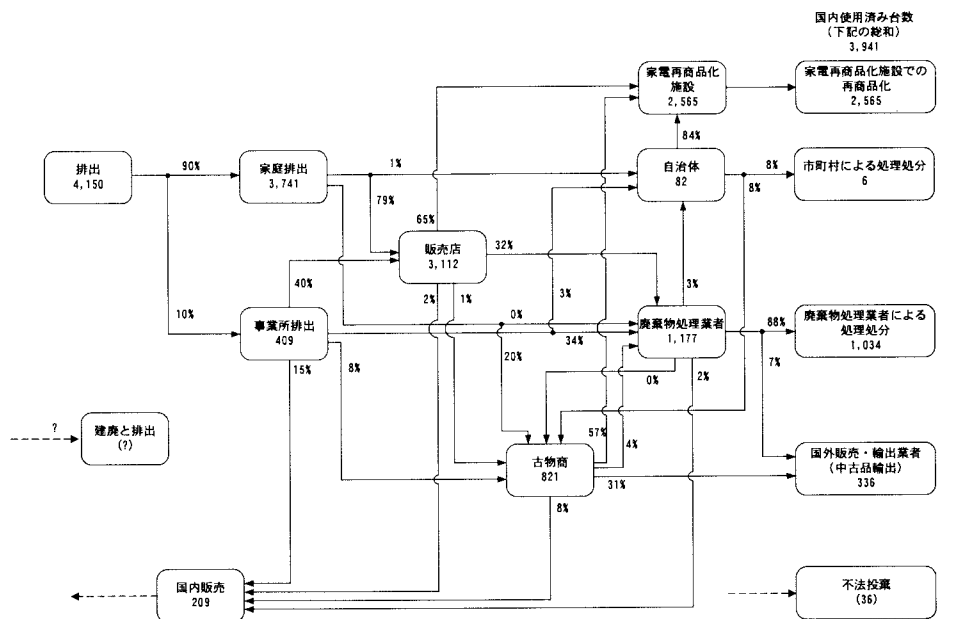


図-6 使用済み冷蔵庫のフロー推計結果 (平成13~15年度の各種データより推計: 単位 千台)

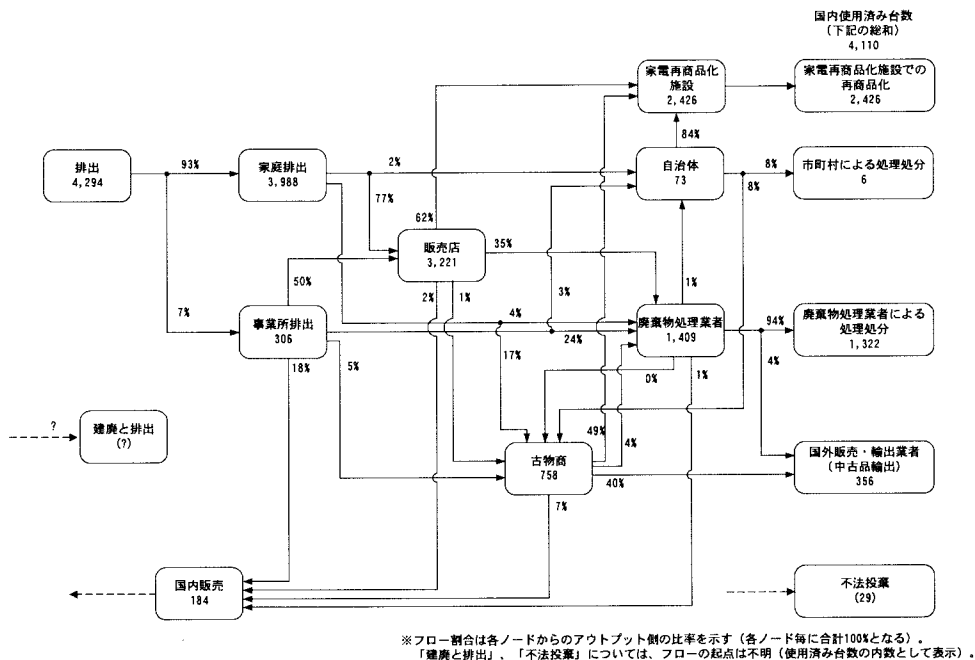
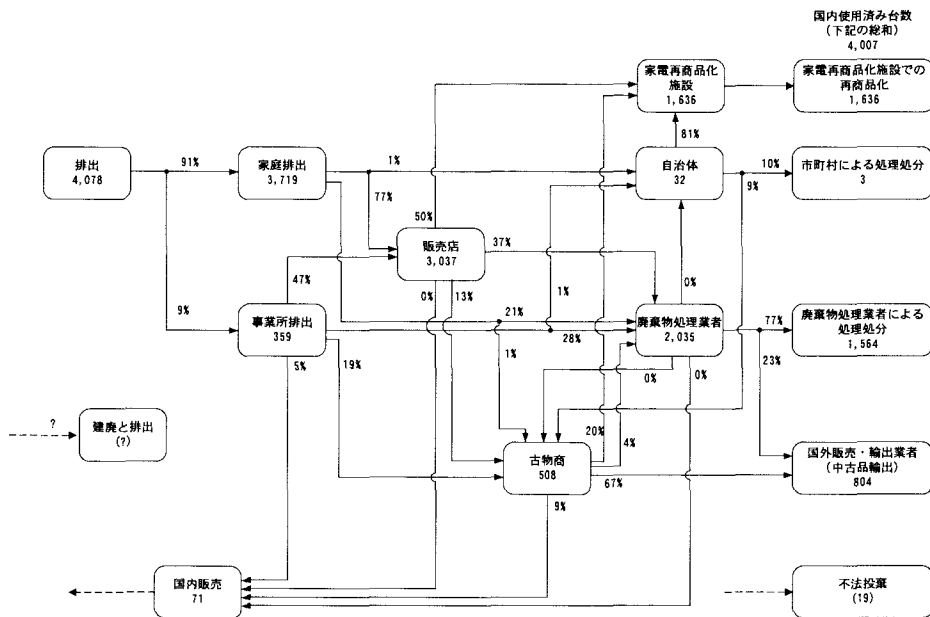


図-7 使用済み洗濯機のフロー推計結果 (平成13~15年度の各種データより推計: 単位 千台)



※フロー割合は各ノードからのアウトプット側の比率を示す(各ノード毎に合計100%となる)。
「建廃と排出」、「不法投棄」については、フローの起点は不明(使用済み台数の内数として表示)。

図-8 使用済みエアコンのフロー推計結果(平成13~15年度の各種データより推計:単位 千台)

表-2 家電リサイクル法施行前後における使用済み家電四品目のフロー推計結果の総括表(単位 千台)

	テレビ			冷蔵庫			洗濯機		
	法施行前	法施行後	変化	法施行前	法施行後	変化	法施行前	法施行後	変化
排出	9,244	8,820	-424	4,562	4,150	-412	4,098	4,294	196
うち家庭排出	8,570	7,819	-751	3,932	3,741	-191	3,554	3,988	434
うち事業所排出	674	1,001	327	630	409	-221	544	306	-238
販売店	3,845	5,217	1,372	2,897	3,112	215	2,190	3,221	1,031
家電再商品化施設	-	3,520 (41%)	3,520	-	2,565 (65%)	2,565	-	2,426 (59%)	2,426
自治体	5,301	134	-5,167	1,809	82	-1,727	1,945	73	-1,872
うち処理処分	3,986 (44%)	12 (0%)	-3,974	1,427 (32%)	6 (0%)	-1,421	1,504 (38%)	6 (0%)	-1,498
廃棄物処理業	4,540	2,659	-1,881	3,106	1,177	-1,929	2,516	1,409	-1,107
うち処理処分	3,737 (42%)	2,225 (26%)	-1,512	2,707 (61%)	1,034 (26%)	-1,673	2,315 (59%)	1,322 (32%)	-993
古物商	868	2,848	1,980	254	821	567	251	758	507
国内販売	275	183	-92	132	209	77	156	184	28
国外販売・輸出業者	1,246 (13%)	2,880 (33%)	1,634	296 (6%)	336 (9%)	40	123 (3%)	356 (9%)	233

	エアコン			家電四品目計		
	法施行前	法施行後	変化	法施行前	法施行後	変化
排出	3,969	4,078	109	21,873	21,342	-531
うち家庭排出	3,444	3,719	275	19,500	19,267	-233
うち事業所排出	526	359	-167	2,374	2,075	-299
販売店	2,292	3,037	745	11,224	14,587	3,363
家電再商品化施設	-	1,636 (41%)	1,636	-	10,147 (49%)	10,147
自治体	1,750	32	-1,718	10,805	321	-10,484
うち処理処分	1,300 (34%)	3 (0%)	-1,297	8,217 (39%)	27 (0%)	-8,190
廃棄物処理業	2,302	2,035	-267	12,464	7,280	-5,184
うち処理処分	1,722 (45%)	1,564 (39%)	-158	10,481 (50%)	6,145 (30%)	-4,336
古物商	384	508	124	1,757	4,935	3,178
国内販売	137	71	-66	700	647	-53
国外販売・輸出業者	810 (21%)	804 (20%)	-6	2,475 (12%)	4,376 (21%)	1,901

括弧内の数字は、国内使用済み台数に占める割合を示す(四捨五入のため、総和が100%とならない場合がある)。

推計において、補正の対象となったデータは8つのいずれのケース(4品目×2時点)も37で、フロー割合が補正された誤差の二乗和は0.007~0.126となった。37のデータのうち、ほとんどがフロー割合で±5%以内の補正であったが、±5%ならびに±10%以上が補正されたものが、それぞれ1~9、0~4のデータ数があった。±10%以上の補正がされた主なデータは、法施行前においては廃棄物処理業への入側フロー(家庭からを除く)

であり、法施行後においては家庭からの出側フロー(販売店へのフローを除く)、販売店から家電再商品化施設と古物商への出側フローであった。廃棄物処理業ならびに古物商に係るフローの調査は難しく、元データの精度が低いことが推察されるため、比較的大きな補正がされたものと考えられる。

次に、使用済み家電四品目の法施行前後でのフローの変化を考察する。図-5~図-8の結果の総括表を表-2に

示す。

家電四品目全体の値をみると、法施行前では国内使用済み品の40%程度(約820万台)が自治体に処理されており、残りの50%程度(約1,050万台)と10%程度(約250万台)がそれぞれ産業廃棄物処理業者による処理・資源回収と中古品輸出がされていた推算結果となった。法施行後では、かつての自治体処理分をやや上回る台数(約1,010万台)が家電再商品化施設でのリサイクル分(50%程度)となり、産業廃棄物処理業者による処理・資源化の台数が減って30%程度(約610万台)、中古品輸出が増えて20%程度(約440万台)という推算結果となった。

品目別に見ると、法施行前においては、自治体処理の割合がテレビで比較的大きく、産業廃棄物処理業による処理・資源化の割合が冷蔵庫と洗濯機で比較的大きく、エアコンは中古品輸出の割合が比較的大きい結果となった。一方、法施行後では、冷蔵庫と洗濯機で家電再商品化施設でのリサイクルの割合が比較的大きく、かつ中古品輸出の割合が小さい一方で、テレビの中古品輸出の割合が比較的大きい結果となった。また、国内リユース(国内販売)の台数は品目によって法施行前後での増減が異なっていたが、7~28万台とその割合はあまり大きくないという結果となった。ただし、この値には一般世帯から一般世帯への直接譲渡(無償および有償)は含まれていないので、国内リユースはさらに大きな値となる。

4. おわりに

本研究で確立した手法によって、2.で提示した3つの誤差の取扱い方法のそれぞれで用いる手法が一通り利用

できるようになった。MFAにおいて不突合が生じた場合には、本稿で議論したそれぞれの方法の長所・短所を見極め、解析を行うことが望まれる。

参考文献

- 1) 田崎智宏, 大迫政浩, 森口祐一: 調査誤差を考慮した使用済み製品等の全体フローの推計方法. 第15回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp. 59-61, 2004.
- 2) (株)三菱総合研究所: 平成9年度通商産業省委託事業 廃棄物等処理再資源化推進事業(リサイクル対象製品実態調査)報告書. 平成10年3月, pp. 16-18, 1998.
- 3) (財)家電製品協会: 平成12年度通商産業省委託事業 廃棄物等処理再資源化推進(特定家庭用機器再商品化促進制度整備)報告書. 平成13年3月, pp. 46-53, 65, 2001.
- 4) (株)三菱総合研究所: 平成11年度通商産業省委託事業 環境問題対策調査等(廃棄物等処理再資源化推進)報告書. 平成12年3月, p. 16, 2000.
- 5) 環境省報道発表資料: 廃家電製品の不法投棄の状況について, 2002.6.12, 2003.7.17.
- 6) 財団法人廃棄物研究財団: 厚生科学研究費委託調査事業 平成12年度パソコン, 二次電池等のリサイクル技術に関する調査報告書. 平成13年3月.
- 7) (株)富士総合研究所: 平成15年度経済産業省委託事業 廃棄物等処理再資源化推進(家電製品等排出量予測調査)報告書. pp. 44, 47, 66, 93, 平成16年3月.
- 8) (株)富士総合研究所: 平成14年度経済産業省委託事業 廃棄物等処理再資源化推進(特定家庭用機器再商品化促進制度施行)報告書. p. 4-3, 平成15年3月.
- 9) 環境省・経済産業省報道発表資料(2003.5.12)家電メーカー各社による家電リサイクル実績の公表について
- 10) 環境省報道発表資料: 市区町村における家電リサイクル法への取組状況について, 2003.7.17.
- 11) 経済産業省: 平成13年度国土総合開発事業調整費 循環型社会の円滑な物流確保に資する交通体系整備方策調査報告書. p. 11, 平成14年3月.

TREATMENT OF DATA ERROR IN MFA AND A METHOD OF ESTIMATION OF ELECTRICAL HOME APPLIANCE FLOWS BY MINIMIZING ERROR

Tomohiro TASAKI, Masahiro Osako, Yuichi MORIGUCHI

This study examined three methods to treat the error of flow data in MFA (Material Flow Analysis), descriptive method, sequential correction method, and simultaneous correction method, clarifying the pros and cons of these three methods. The authors have considered a method fall under simultaneous correction method¹⁾; however, the method has not been established. This study therefore examined and established the method to estimate flows and minimize the error of flow data, and applied to estimation of flows of waste electrical home appliances in Japan. As a result of estimation, approximately 50% of all domestically-waste electrical home appliances were recycled, approximately 30% were dealt with at industrial waste treatment facilities to recover materials, and approximately 20% were exported as second-hand products.