

廃棄物報告排出量と産業統計量に基づく アジア諸国の廃棄物発生量に関する研究

佐々木 努¹・松岡 譲²・藤原 健史²

¹正会員 工修 京都大学大学院工学研究科 都市環境工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)
現 (株)日本総合研究所 研究事業本部 (〒542-0081 大阪市中央区南船場3-10-19)
E-mail:sasaki.tsutomu@jri.co.jp

²正会員 工博 京都大学大学院工学研究科 都市環境工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)
E-mail:matsuoka@athehost.env.kyoto-u.ac.jp
E-mail: takeshi@env.kyoto-u.ac.jp

アジアの発展途上国では廃棄物発生量が急増しており、適正な廃棄物対策が求められている。しかし対策のもととなる各産業部門や家庭部門からの廃棄物発生量やリサイクル量については、実態が掴めていないのが現状である。そこで本研究では、報告書や論文等から得られる限られた廃棄物報告排出量と、産業連関表を含む各種産業統計量を基にして、アジア諸国の廃棄物発生量とリサイクル量を推計する手法を提案するとともに、推計したアジアの廃棄物発生量とリサイクル量について考察する。

Key Words : waste generation, waste recycling, Asian countries, estimation method, material flow, industrial statistic, Input-Output tables

1. はじめに

近年のアジア地域における経済発展は著しい。さらに、人口増加、急激な都市化、生活水準の向上、産業構造の変化によって、アジア地域も日本と同様、「大量生産、大量消費、大量廃棄」の時代を迎えようとしている。

アジア地域の廃棄物問題に注目すると、発生、収集、処理、処分の各段階で、さまざまな問題を抱えている。例えば、厨芥やプラスチックなど、ライフスタイル変化と関連したごみ成分の増加、不定期な収集を原因とする家庭ごみの路上放置、オーブندانピングに伴う衛生問題とメタンガス発生による地球温暖化問題、都市部での立地困難による処分場の逼迫、スカベンジャーによる資源回収体制の改善後に起こる福祉問題などである。

アジア地域の現在および将来の廃棄物問題を解決し、持続可能な社会を構築するためには、廃棄物発生量やリサイクル量などを把握し、それを分析・評価することが必要である。しかし現在のところ、廃棄物発生量やリサイクル量の実態データの整備はほとんどなされていない。

世界の廃棄物問題に関連した研究として、左ら¹⁾は、中国北京市において 2020 年までに必要となる都市生活廃棄物処理施設とその投資額を算定した。森口ら²⁾は食料、木材、金属、化石燃料の各資源の貿易データから世界のマテリアルフローを推計した。田中ら³⁾は、GDP と廃棄物発生量・処理レベルの関係をj用いて、2050 年に

おける全世界の廃棄物の発生量とその処理費用の将来予測を行った。寺園ら⁴⁾は国際的な資源循環の構造を明らかにし、アジア地域の廃棄物に関する情報収集を行った。

このように、アジア地域の廃棄物発生、処理・処分、リサイクルの定量化についての研究は、1 都市に限っての調査や、経済指標との関係を利用した推計、特定の廃棄物に絞った発生量調査、貿易データに基づいた世界の財の移動などであり、それぞれの切り口では有効な知見が見出されているが、世界全域において、産業や家庭から排出される複数の廃棄物種についての発生量やリサイクル量を同時に推計した研究は見あたらない。

本研究では、数が限られている廃棄物発生量やリサイクル量の報告値を有効に生かし、比較的整備されている貿易統計や生産統計、そして国内、国間の産業連関表を用い、国別の産業・家庭部門の物質入出力関係に基づいて、廃棄物発生量とリサイクル量を推計する手法を提案する。そして、本手法をアジア地域を中心に世界に適用し、アジア各国の廃棄物発生量とリサイクル量を推計するとともに、その結果について考察する。

2. 廃棄物発生量推計モデルの概要

(1) 用語の定義と使用するデータ

a) 物質

本研究では、物のフローを財のフローとしてではなく、

財に含まれる特定の物質のフローとして表す。この「物質」を使って物の循環を表現する必要から、「物質」は廃棄物と対をなすものとする。部門から排出される廃棄物の一部はそのまま、あるいは資源化处理を経て、財（製造原料）となることから、廃棄物を原料に戻したときの物が、ここでいう「物質」である。物質の量を「物質質量」と定義する。

b) 廃棄物量とリサイクル量

「廃棄物」を各部門からのアウトプットのうち生産物を除いたものと定義し、廃棄物の量のことを「廃棄物量」と表現する。また、「リサイクル物」を廃棄物のうち資源化されていずれかの部門に投入されるものと定義し、リサイクル物の量を「リサイクル量」と表現する。さらに、「廃棄物」から「リサイクル物」を除いたもの、すなわち処理・処分される廃棄物を「処理処分廃棄物」と表し、その量を「廃棄物処理処分量」と表現する。

c) 一般廃棄物と産業廃棄物、家庭廃棄物

本研究では、産業部門から排出された廃棄物を「産業廃棄物」、最終消費部門から排出された廃棄物を「一般廃棄物」、家庭部門（民生部門）から排出された廃棄物を「家庭廃棄物」と定める。

d) GTAP 産業連関表

米国パーデュー大学は、78 の国・地域、57 の産業部門からなる産業連関表（以下、IO 表と表現する）を備えた国際貿易モデル GTAP（Global Trade and Production）を開発した。このモデルから得られた IO 表を用いることで、貨幣単位で国際間の財やサービスの流れを把握することができる。本研究ではこの IO 表(1997 年)を、モデル推計の基本データとして用いる。

d) 生産量

国別・製品別の生産量データ（物量）として、国連の工業統計を用いる。各生産量をそれに含まれる物質の量へと変換し、本研究の地域区分・部門分類ごとに統合して、地域別、部門別に産出される物質質量データとする。

(2) 国・地域区分、財・部門分類、廃棄物種、物質種

本研究では、国・地域ごと、産業部門ごと、廃棄物種類ごとの廃棄物発生量とリサイクル量を推計する「廃棄

物発生量推計モデル」を提案する。モデルの適用先はアジア地域を中心とし、国・地域区分、財・部門分類、廃棄物種を表-1 のように定める。また 1 部門からは 1 つの財が生産されると仮定している。推計年は 1997 年の単年とする。

3. 廃棄物発生量推計モデル

(1) 概要

a) 全体の推計フロー

廃棄物発生量およびリサイクル量の推計フローを図-1 に示す。まず、マネーターームである GTAP の IO 表を物量換算して物量 IO 表を準備する。このとき、後述する「物質密度」の概念を導入して物量に変換する。次に、各財・部門における収支条件や貿易のバランスを考慮する物質収支調整計算を行う。このとき、貿易統計や生産統計量から得た財の物量、および廃棄物排出量やリサイクル量の報告値を導入する。この計算によって物質密度が推計され、国・地域別、財・部門別の廃棄物量やリサイクル量が求まる。

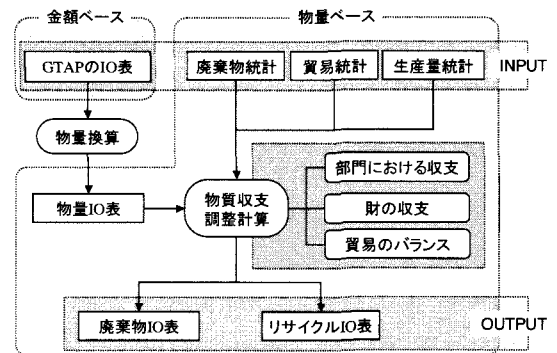


図-1 廃棄物発生量推計モデルの概要

b) 物質収支調整計算

物質収支調整計算とは、マネーターームの収支と各物質のマテリアルタームの収支が整合するように金額と物質量の関係を調整する作業である。このとき、中村太陽ら⁹⁾が導入した「物質密度」の概念を導入する。すなわち、地域 r における金額一単位あたりの財 i に含まれる物質 m の重量を「物質密度」 $d_{m,r,i}$ と定義し、この物質密度で金額と物質量の関係を表す。各物質に関して、地域 r ごと、物質 m ごと、財 i ごとの最適解 $d_{m,r,i}$ を収支式より求めることが、収支調整作業の中心である。

1 地域内の物質入出力のモデルを図-2 に示す。図は地域 r におけるお金と物質の流れを示している。赤矢印は GTAP の金額データから求まる製品中の物質の流れ、黒矢印は原料、廃棄物、リサイクル物としての物質の流れ

表-1 地域区分、財・部門分類、廃棄物種、および物質の定義

地域区分	財・部門分類	廃棄物種	物質
日本	農林水産業	廃プラスチック	プラスチック
中国	鉱業	紙くず	紙
香港	飲食・タバコ	木くず	木
台湾	繊維	繊維くず	繊維
韓国	木・製紙・パルプ	有機物	有機物
シンガポール	石油・石炭	ゴムくず	ゴム
タイ	化学	鉄くず	鉄
マレーシア	産業	非鉄くず	非鉄金属
フィリピン	鉄鋼	廃ガラス	ガラス
インドネシア	非鉄金属	上野	上野
その他アジア	金属製品	建設廃棄物	建設材料
オーストラリア・NZ	輸送機械	その他	その他
米国・カナダ	電気機器		
中南米	機械		
欧州	その他製造		
アフリカ	電気・ガス・水道		
その他	建設		

* NZ とは、ニュージーランドを表す

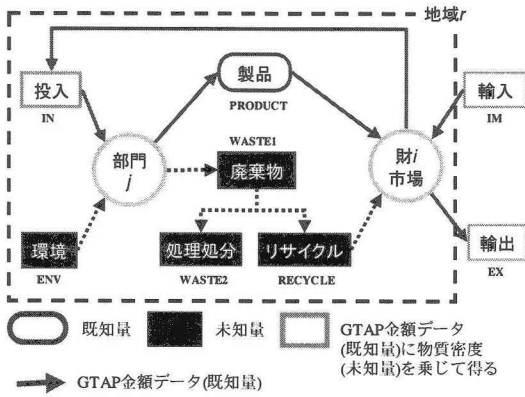


図2 物質についての収支計算

を表す。製品中の物量は工業統計などから求め、輸入量、輸出量、部門への投入量は GTAP の IO 表より推定する。物質収支は、(1)部門 j における収支、(2)財 i の市場における収支、(3)貿易に関する収支、の3つに注目し、それぞれにおける物質のインフローとアウトフローの収支を定式化する。部門 j は、産業部門を表すだけでなく、製品の産出と環境からの投入をゼロとすることにより家庭部門も表す。

(2) 物質収支の定式化

a) 部門 j における物質収支

地域 r の部門 j へのインフローは国内財と輸入財及び環境から取り込まれるものであり、アウトフローは国内生産財と廃棄物である。これを財や廃棄物中の物質 m について定式化すると式(3)のようになる。この左辺第 1, 2 項は、それぞれ式(1), (2)で表されるように、投入される国内財と輸入財に含まれる物質 m の重量を表す。燃料として含まれ使用後に大気に放散してしまう量は、 $N_{r,i,j}$ を用いてあらかじめ除いている。また、環境から直接採取する物質重量と、生産財中の物質重量、廃棄物中の物質重量を式中で表し、残渣項を $er_j_{m,r,j}$ としている。式(4)は、廃棄物中の物質重量、リサイクル財中の物質重量および処理・処分廃棄物中の物質重量の関係を表している。

$$MAT_d_{m,r,j} = \sum_i (VDFM_{r,i,j} d_{m,r,i} N_{r,i,j}) \quad (1)$$

$$MAT_i_{m,r,j} = \sum_i (VIFM_{r,i,j} d_{m,r,i} N_{r,i,j}) \quad (2)$$

$$MAT_d_{m,r,j} + MAT_i_{m,r,j} + ENV_{m,r,j} = PRODUCT_{m,r,j} + WASTE1_{m,r,j} + er_j_{m,r,j} \quad (3)$$

$$WASTE1_{m,r,j} = WASTE2_{m,r,j} + RECYCLE1_{m,r,j} \quad (4)$$

$VDFM_{r,i,j}$: 地域 r における国内財 i の部門 j への財の投

入額

$VIFM_{r,i,j}$: 地域 r における輸入財 i の部門 j への財の投

入額

$d_{m,r,j}$: 地域 r の財 i に含まれる物質 m の物質密度

$MAT_d_{m,r,j}$: 地域 r の部門 j に投入される国内財に含まれる物質 m の量

$MAT_i_{m,r,j}$: 地域 r の部門 j に投入される輸入財に含まれる物質 m の量

$N_{r,i,j}$: 地域 r の部門 j に投入される財 i に占める非燃料割合 (重量基準)

$ENV_{m,r,j}$: 地域 r の部門 j が環境中から取り込む物質 m の量

$PRODUCT_{m,r,j}$: 地域 r の部門 j から産出される財に含まれる物質 m の量

$RECYCLE1_{m,r,j}$: 地域 r の部門 j から発生するリサイクル物に含まれる物質 m の量

$WASTE1_{m,r,j}$: 地域 r の部門 j で発生する廃棄物 m の量

$WASTE2_{m,r,j}$: 地域 r の部門 j で発生する処理処分廃棄物 m の量

$er_j_{m,r,j}$: 地域 r の部門 j の物質 m についての収支の誤差項

b) 財 i 市場における物質収支

地域 r における財 i 市場へのインフローは国内生産財とリサイクル財及び輸入財、アウトフローは国内投入財と輸出財である。これらの収支条件から式(7)のように定式化する。

$$IM_{m,r,i} = \sum_s (VIMS_{r,i,s} d_{m,s,i}) \quad (4)$$

$$EX_{m,r,i} = \sum_s (VXMD_{r,i,s} d_{m,r,i}) \quad (5)$$

$$IN_{m,r,i} = \sum_j \{ (VDFM_{r,i,j} + VIFM_{r,i,j}) d_{m,r,i} \} \quad (6)$$

$$PRODUCT_{m,r,i} + RECYCLE2_{m,r,i} + IM_{m,r,i} = EX_{m,r,i} + IN_{m,r,i} + er_i_{m,r,i} \quad (7)$$

$IM_{m,r,i}$: 地域 r の財 i の市場に持ち込まれる輸入財に含まれる物質 m の量

$EX_{m,r,i}$: 地域 r の財 i の市場から持ち出される輸出財に含まれる物質 m の量

$IN_{m,r,i}$: 地域 r の財 i の市場から持ち出される国内投入財に含まれる物質 m の量

$VIMS_{r,i,s}$: 地域 r が地域 s から輸入した財 i の輸入額

$VXMD_{r,i,s}$: 地域 r で産出された財 i の地域 s への輸出額

$RECYCLE2_{m,r,i}$: 地域 r のリサイクル財 i に含まれる物質 m の量

c) リサイクル財の設定

廃棄物の種類と再生利用用途との対応から、リサイクル可能物 $RECYCLE1_{m,r,j}$ とリサイクル財 $RECYCLE2_{m,r,i}$ との関係を式(8)のように定義した。ここで、 $\delta_{m,j}$ は廃棄物の種類(m)と再生利用用途(j)との対応を表すパラメータであり、表-2に示すような値として設定した。例えば、様々な部門で排出された木くずや紙くずのリサイクル可能物は、木・製紙・パルプ部門へと投入され、そこでリサイクル財に再生されるということを表している。リサイクル財は、様々な部門の投入財として利用される。

$$\sum_i (\delta_{m,i} RECYCLE2_{m,r,i}) = \sum_j (\delta_{m,j} RECYCLE1_{m,r,j}) \quad (8)$$

表-2 廃棄物の種類と再生利用用途との対応

再生利用用途 (部門 j) 廃棄物種類 (物質 m)	農 林 水 産 業	鉱 業	繊 維	木 ・ 製 紙 ・ パ ル プ	石 油 ・ 石 炭	化 学	窯 業	鉄 鋼	非 鉄 金 属	建 設
廃プラスチック	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
紙くず	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
木くず	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
繊維くず	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
有機物	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ゴムくず	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
鉄くず	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
非鉄くず	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
廃ガラス	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
土砂	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
建設廃棄物	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
その他	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0

d) 財 i の産出量に関する式

国連の工業統計により得られた生産量と、GTAP の金額データから計算して得られる製品の生産量との関係を式(9)に示す。

$$PRODUCT_{m,r,j} = VOM_{r,j} \cdot d_{m,r,j} + er_{-p_{m,r,j}} \quad (9)$$

$VOM_{r,j}$: 国連の工業統計により得られた地域 r における財 i の産出額

$er_{-p_{m,r,j}}$: 地域 r で産出される財 i に含まれる物質 m に関する計算値と工業統計値との誤差項

e) 貿易量に関する式

GTAP の金額データにおける貿易量の整合性を式(10)で表現する。また、森口³⁾による貿易統計との整合を定式化したものを式(11)に示す。ただし、式(11)では鉄と非鉄の貿易統計量のみを扱った。

$$\sum_s (VIMS_{r,i,s} \cdot d_{m,s,i}) = \sum_r (VXMD_{r,i,s} \cdot d_{m,r,i}) + er_{-t_{m,r,i}} \quad (10)$$

$$TRADE_{m,r,s} = \sum_i (VXMD_{r,i,s} \cdot d_{m,r,i}) + er_{-x_{m,r,s}} \quad (11)$$

$er_{-t_{m,r,s}}$: 地域 r に輸出入される財 i に含まれる物質 m についての収支の誤差項

$TRADE_{m,r,s}$: 統計から得られる地域 r から地域 s に輸出される物質 m の量

$er_{-x_{m,r,s}}$: 統計から得られる地域 r から地域 s に輸出される物質 m の量と計算により求めた貿易量との誤差項

(3) 制約条件

収集したデータから廃棄物発生量とリサイクル量に関する報告値の有無を整理し、以下の制約条件を設定する。

種々の報告書、論文、インターネット等で廃棄物量とリサイクル量について調査した結果を表3、表4に表す。地域区分、財・部門分類、廃棄物種の分類について、完全に適合した報告値があるときこれを「完全既知」と呼び、「○」の記号で表す。廃棄物量やリサイクル量の報告値は、一部の物質、あるいは一部の部門の発生量だけが明らかであることが多い。さらに、1つの地域区分について数都市の発生量だけが報告されているなど、実際の発生量よりも小さい場合がある。このような報告値を「一部既知」と呼び、「△」の記号で表す。「×」の記号は報告値が見つからなかったことを表す。

廃棄物発生量の報告値は、日本、中国⁶⁾、欧州以外の国々についてほとんど得られておらず、また、リサイクル量については日本と中国以外の国々でほとんど得られなかった。

a) 廃棄物量またはリサイクル量の完全既知の扱い

完全既知の報告値があるときは、それを等号制約条件として定式化する。本研究で報告値として完全既知であったデータは、(1)日本における部門ごとの廃棄物量、(2)日本における部門ごとのリサイクル量、(3)各地域における家庭部門からの廃棄物量、(4)その他(1)と(2)以外の○印で示した量、である。

b) 廃棄物またはリサイクル統計量の一部既知の扱い

表3と表4の△印をつけた一部既知の報告値については、式(12)から式(15)のように、計算値が報告値以上となるような不等号制約条件として表す。

$$WS_{r,j} \leq \sum_m WASTE_{m,r,j} \quad (12)$$

$$WM_{m,r} \leq \sum_j WASTE_{m,r,j} \quad (13)$$

$$RS_{r,j} \leq \sum_m RECYCLE_{m,r,j} \quad (14)$$

$$RM_{m,r} \leq \sum_j RECYCLE_{m,r,j} \quad (15)$$

表3 各地域・各部門・各物質ごとの廃棄物排出量データ

の有無 (○完全既知, △一部既知, ×未知)

a)国別, 部門別データ

	農林水産業	食品・タバコ	繊維	木・製紙・バルブ	石油・石炭	化学	窯業	鉄鋼	金属製品	輸送機械	電気機器	その他製造	電気・ガス・水道	建設	卸売・小売	運輸・通信	その他サービス	住居	公共サービス	家庭
日本	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
中国	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
香港	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
台湾	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
韓国	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
シンガポール	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
タイ	○	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○
マレーシア	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○
フィリピン	○	×	△	×	△	×	×	×	×	△	△	△	×	×	×	×	×	×	×	○
インドネシア	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○
その他アジア	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○
オーストラリア・NZ	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○
米国・カナダ	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○
中南米	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○
欧州	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
アフリカ	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○
その他	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○

表4 各地域・各部門・各物質ごとのリサイクル量データの

有無 (○完全既知, △一部既知, ×未知)

a)国別, 部門別データ

	農林水産業	食品・タバコ	繊維	木・製紙・バルブ	石油・石炭	化学	窯業	鉄鋼	金属製品	輸送機械	電気機器	その他製造	電気・ガス・水道	建設	卸売・小売	運輸・通信	その他サービス	住居	公共サービス	家庭
日本	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
中国	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
香港	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
台湾	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
韓国	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○
シンガポール	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
タイ	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○
マレーシア	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
フィリピン	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
インドネシア	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
その他アジア	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
オーストラリア・NZ	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○
米国・カナダ	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○
中南米	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○
欧州	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○
アフリカ	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○
その他	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○

b)国別, 廃棄物種別データ

	廃プラスチック	紙くず	木くず	有機物	繊維くず	ゴムくず	鉄くず	非鉄くず	廃ガラス	建設廃棄物	その他
日本	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
中国	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
香港	△	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
台湾	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
韓国	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
シンガポール	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
タイ	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
マレーシア	△	△	×	×	×	×	×	×	×	×	×
フィリピン	△	△	×	×	×	×	×	×	×	×	×
インドネシア	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
その他アジア	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
オーストラリア・NZ	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
米国・カナダ	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
中南米	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
欧州	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
アフリカ	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
その他	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△

b)国別, 廃棄物種別データ

	廃プラスチック	紙くず	木くず	有機物	繊維くず	ゴムくず	鉄くず	非鉄くず	廃ガラス	建設廃棄物	その他
日本	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
中国	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
香港	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
台湾	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
韓国	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
シンガポール	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
タイ	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
マレーシア	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
フィリピン	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
インドネシア	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
その他アジア	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
オーストラリア・NZ	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
米国・カナダ	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
中南米	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
欧州	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
アフリカ	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
その他	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×

表5 各部門から発生する主な廃棄物とリサイクル可能物の種類

	廃棄物																リサイクル																			
	農林水産業	食品・タバコ	繊維	木・製紙・パルプ	石油・石炭	化学	窯業	鉄鋼	非鉄	金属製品	輸送機械	電気機器	その他製造	電気・ガス・水道	建設	卸売・小売	運輸・通信	農林水産業	食品・タバコ	繊維	木・製紙・パルプ	石油・石炭	化学	窯業	鉄鋼	非鉄	金属製品	輸送機械	電気機器	その他製造	電気・ガス・水道	建設	卸売・小売	運輸・通信	サービス	
廃プラスチック					○								○	○						○			○	○						○			○	○	○	
紙くず																				○										○						
木くず				○																											○					
有機物	○	○																	○																	
ゴムくず																																				
鉄くず								○		○	○		○													○		○	○	○	○	○				○
非鉄くず								○	○	○	○															○		○	○	○	○					○
廃ガラス													○																				○			
土砂		○	○	○	○			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
建設廃棄物																																				
その他																																				
シェア	90	90	90	80	85	85	85	80	75	85	85	85	70	80	80	85	85	75	80	80	80	90	90	63	75	90	80	73	85	80	90	80	85	85	75	

$WS_{r,j}$: 地域 r における部門 j からの廃棄物発生量
 $WM_{m,r}$: 地域 r から排出される廃棄物 m の発生量
 $RS_{r,j}$: 地域 r における部門 j からのリサイクル量
 $RM_{m,r}$: 地域 r でリサイクルされる物質 m の量

c) 部門ごとの廃棄物とリサイクル財に関する制約条件

部門から発生する主な廃棄物種の割合は、国や地域が異なっても、それほど変化しないと仮定する。すなわち、製造プロセスや家計は、国や地域によって大きく変わらないという前提を設ける。同様に、各部門から発生するリサイクル可能物の割合も大きく変わらないと仮定する。

各部門から発生する主な廃棄物とリサイクル可能物の種類についての設定を表5に示す。主な廃棄物種の割合として「シェア」の考え方を導入する。シェアとは、表5の各部門について、印をつけた物質（廃棄物、リサイクル可能物）の合計量がその部門から排出される廃棄物（リサイクル可能物）の総量に対して何%以上であるかを設定する値である。たとえば「食品・タバコ業から発生する廃棄物のうち90%以上は有機物と土砂である」というように設定する。ここで、国や地域による差を表現するため、不等号制約条件によって定式化する。またシェアの数値は、三菱総合研究所⁷⁾の報告で示された廃棄物種（リサイクル可能物種）の分布から計算し、本研究では安全側を想定してその値より一律5%小さい値に設定した。食品・タバコ業の例について、シェアの制約式を式(16)に示す。式中の“org”，“sil”，“fod”は、それぞれ有機物、土砂、食品部門を表している。

$$WASTE1_{org,r,fod} + WASTE1_{sil,r,fod} \geq 0.9 \cdot \left(\sum_m WASTE1_{m,r,fod} \right) \quad (16)$$

(4) 目的関数

式(17)に示すように、誤差項の絶対値重み付き総和を目的関数 *object* とし、これを最小化するように物質密度をはじめ、種々の未知変数を求めた。最適化計算は、以上の式を GAMS21.4 を用いて LP 問題としてプログラム化し、ソルバー Cplex を用いて求解した。このとき、部門と市場において物質収支を合わせること、産業統計や貿易データとの整合性をとることよりも優先させ、何度かの試行錯誤を行った結果、重み係数 α , β , γ , δ , ε を $\alpha = \beta = 1$, $\gamma = \delta = \varepsilon = 0.01$ と設定した。

$$object = \sum_m \sum_r \sum_s \sum_j \left\{ \alpha \cdot |er_{-j,m,r,j}| + \beta \cdot |er_{-i,m,r,s}| + \gamma \cdot |er_{-p,m,r,j}| + \delta \cdot |er_{-t,m,r,s}| + \varepsilon \cdot |er_{-x,m,r,s}| \right\} \rightarrow \min \quad (17)$$

4. 結果と考察

(1) 廃棄物

a) 総括

地域別・部門別の廃棄物量の推計結果を図3に示す。全世界で1997年の1年間に発生した廃棄物発生量は約131億トンであり、その内訳は一般廃棄物が約10億トン、産業廃棄物が約121億トンであった。吉澤と田中らの研究³⁾では、世界の廃棄物発生量は約120億トン、そのうち都市廃棄物が16億トンと推計しており、これらの値と比較的近い値となった。地域別の発生量では欧州が約21%で最も大きく、日本は全体の約4%、中国が約16%となり、日本と中国を除く東・東南アジアの発生量は全体の約4%に過ぎなかった。東南アジア諸国の廃棄物の発生量の増加率は大きい、総量はそれほど大きい値ではないことが分かった。

また、廃棄物の処理処分量を図4に示す。全世界で約117億トンの廃棄物が処理・処分されていることが分かった。アジアの発展途上国で農林水産業廃棄物の処理・処分の割合が小さいのは、それらの廃棄物がリサイクルにまわる率が高いためである。

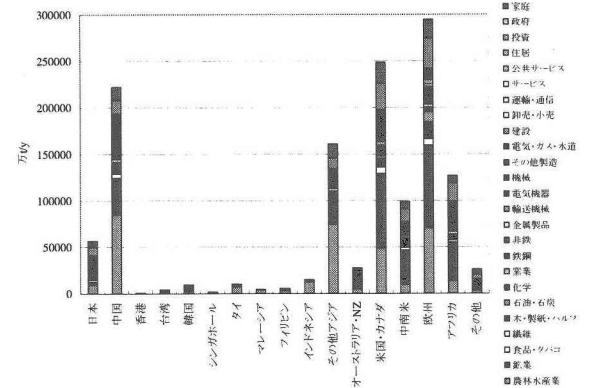


図3 国・地域別、部門別の廃棄物量

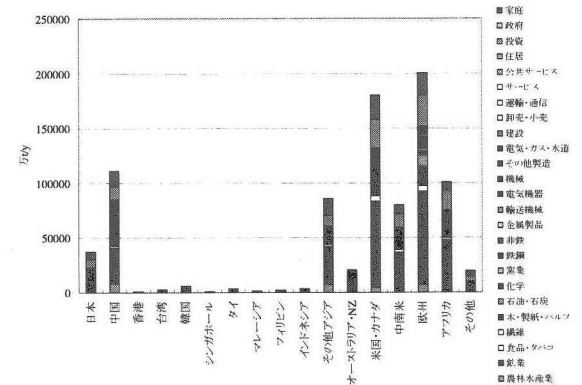


図4 国・地域別、部門別の廃棄物処理処分量

b) 部門別発生量

各地域の廃棄物総量に対する各部門からの発生量の割合を図-5に示す。産業廃棄物のうち、農林水産業と鉱業由来の廃棄物が大きな割合を示し、全体の57%を占めた。オーストラリア・NZ、米国・カナダ、中南米、欧州、アフリカなど鉱業が発達した地域では鉱業由来の廃棄物量が多くなった。また、中国と東南アジア諸国では農林水産業廃棄物が全体の50~90%を占め、排出される廃棄物の大半を占めることも明らかとなった。さらに、これらの地域では家庭からの廃棄物の割合が大きい傾向が見られた。

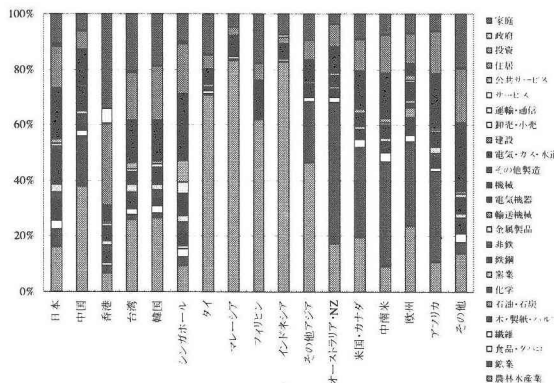


図-5 国・地域別、部門別の廃棄物処理処分量の分布

c) 発生特性

各国・地域の廃棄物の発生特性をまとめると、経済発展が進んでいる国は、地下資源が豊かで鉱業が発展しているグループ(1)、地下資源が少ないグループ(2)、の二つに分類できた。グループ(1)にはオーストラリア・NZ、米国・カナダ、欧州が含まれ、鉱業からの廃棄物が最も大きい割合を占めた。また、グループ(2)には、日本・台湾・韓国・シンガポールが含まれ、全て日本と似た発生構造を持つことが分かった。発展途上国は一つのグループにまとめることができた。このグループは、農林水産業廃棄物が大半を占め、工業廃棄物が少なく、家庭系廃棄物の割合が大きくなる傾向があった。ただし、発展途上国でも中南米やアフリカなどの地下資源が豊富な地域はグループ(1)と同じ傾向を持つことが分かった。

d) 一人当たり廃棄物発生量

一人当たりの廃棄物発生量を求めて地域間の比較を行った。廃棄物量を用いて算出した一人当たりの廃棄物の発生量を図-6に示す。また、アジア地域のみ抜粋したものを図-7に示す。オーストラリア・NZと米国・カナダの発生量が多く、この主な要因は鉱業廃棄物であると考えられる。また、アジア地域では香港を除いた国において農業廃棄物が大半を占めていた。表-6に、廃棄物量全

体での一人当たり発生量と、農林水産業廃棄物と鉱業廃棄物を除いた量で算出した一人当たり発生量を表す。オーストラリア・NZや米国・カナダの一人当たり発生量は、鉱業廃棄物以外の部門からの発生量も大きかった。

先進国・地域における一人当たりの年間廃棄物発生量は3トンを超えており、発展途上国・地域はいずれもそれより小さい値となった。マレーシアやタイは、韓国や台湾と同等かそれ以上の発生量であるが、その大半は農林水産業廃棄物によるものである。したがって、韓国や台湾に比べて工業化が進んでいないことが現れている。

なお、本研究で示した一人当たり廃棄物発生量は、それぞれの国・地域の全人口によって算出した「国・地域平均値」である。アジア地域では都市部と農村部で廃棄物の発生量に大きな差があり、大都市の北京や上海、バンコク、クアラルンプール、ジャカルタ、マニラなどではそのような傾向が当てはまらない。

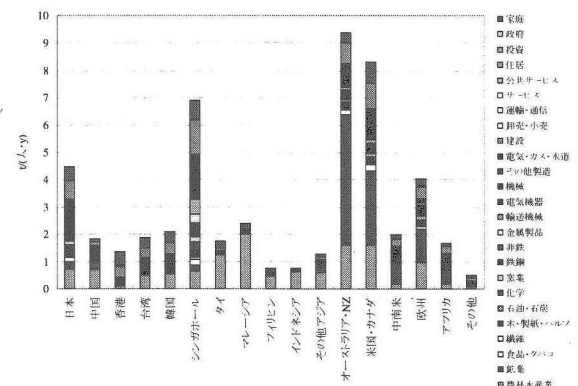


図-6 国・地域別、部門別の一人当たり廃棄物量

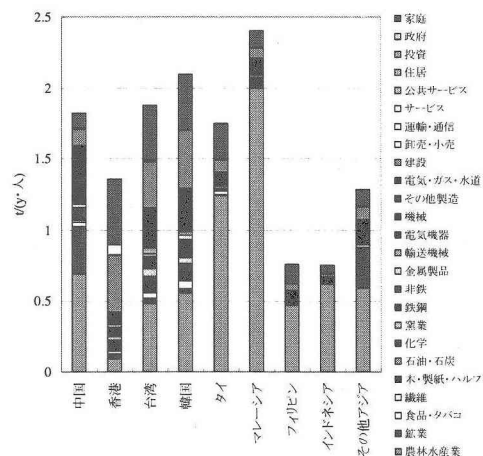


図-7 アジア地域の部門別の一人当たり廃棄物量

表-6 国・地域別、部門別の一人当たり廃棄物量

	日本	中国	香港	台湾	韓国	シンガポール	タイ	マレーシア	フィリピン
全体	4.48	1.82	1.36	1.87	2.09	6.90	1.75	2.40	0.76
農・鉱廃棄物を除く	3.48	0.80	1.23	1.35	1.50	6.04	0.50	0.39	0.28
	インドネシア	その他アジア	オーストラリア・NZ	米国・カナダ	中南米	欧州	アフリカ	その他	
全体	0.75	1.28	9.37	8.30	1.98	4.04	1.67	0.48	
農・鉱廃棄物を除く	0.13	0.41	3.00	3.98	1.05	1.86	0.95	0.40	

単位 t/(人・y)

d) 廃棄物の種類

図-8 に、全廃棄物に対する廃棄物種別の廃棄物発生量の割合を示した。ここでは、農業廃棄物由来の有機物の影響を避けるため、処理処分廃棄物量を用いて算出した。主要な廃棄物種は土砂、有機物、建設廃棄物であることが分かる。タイやマレーシア、フィリピンでは、有機物の割合が 80% を占める。グループ(1)とグループ(2)との間には明確な特徴の差は存在せず、土砂、有機物、建設廃棄物の 3 種で 80% を占めることが分かった。3 種以外の廃棄物種に関しては、地域による特性は特には見られなかった。

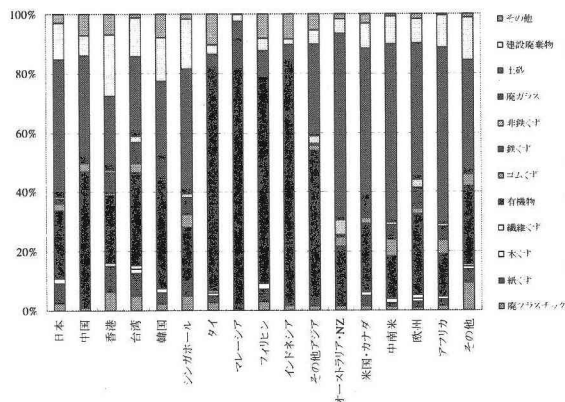


図-8 国・地域別、部門別の一人当たり廃棄物量

(2) リサイクル

a) 総括

世界全体でリサイクルされる量は、約 14 億トンであると推計された。各地域のリサイクル率（リサイクル量を廃棄物発生量で割ったもの）と定義し、廃棄物を、(1)全量を対象にしたもの、(2)農業廃棄物を除いたものを対象としたもの、(3)工業廃棄物のみを対象としたもの、(4)家庭廃棄物のみを対象としたもの、の 4 種類について表-7 に示した。(1)では比較的にリサイクルされている農業廃棄物を含むので各国・地域において大きな値を示した。特に、廃棄物に占める農業廃棄物の割合が大きいアジア諸国ではリサイクル率が大きく推計された。したがって、農業廃棄物を含まない、(2)～(4)までのリサイ

クル率で比較する必要がある。シンガポールと日本のリサイクル率が大きく、逆に東南アジア諸国・欧米諸国では小さい値となった。東南アジア諸国・欧米諸国のリサイクル率は、現状よりも小さく推計されていると考えられる。その理由は、リサイクル量は統計量が少なく精度が低かったためだと考えられる。特に東南アジア諸国においては、インフォーマルセクターが持ち込んだリサイクル財の流れが IO 表に計上されておらず、その分のリサイクル量が算出されていない、ことも理由として考えられる。

表-7 国・地域別のリサイクル率

	日本	中国	香港	台湾	韓国	シンガポール	タイ	マレーシア	フィリピン
全体	41	51	25	40	42	41	70	78	63
農業廃棄物を除く	28	27	20	23	24	37	20	16	20
工業廃棄物	27	28	22	22	24	36	31	17	25
家庭廃棄物	36	17	16	25	26	46	9	15	14
	インドネシア	その他アジア	オーストラリア・NZ	北米	中南米	欧州	アフリカ	その他	
全体	77	48	26	28	20	34	32	23	
農業廃棄物を除く	13	11	13	13	14	17	14	16	
工業廃棄物	17	11	11	14	13	15	13	18	
家庭廃棄物	8	9	47	8	27	37	31	11	

単位 %

b) 一人当たりリサイクル量

図-9 に部門別の一人当たりリサイクル量を示し、図-10 にアジア地域を抜粋したものを示した。また、農業廃棄物を除いたものを対象として、一人当たりリサイクル量を算出した。都市国家であるシンガポールを除くと、日本が最も一人当たりリサイクル量が多い。これは産業部門のリサイクル率が優れているためだと考えられる。また、欧州が米国・カナダやオーストラリア・NZ よりも小さくなったのは、工業設備の古い東欧諸国や旧ソ連が含まれるためと考えられる。東南アジア諸国は、一人当たりリサイクル量でも小さい値となった。上述したような理由によるものと考えられる。

また、すべての国・地域において、土砂のリサイクル量の割合が大きいことが分かった。これは、鉱業や建設から発生した土砂の埋め戻し量が多いためと考えられる。さらに、香港では木くず、台湾では繊維くず、マレーシアでは鉄くず、フィリピンでは紙くず、インドネシアでは有機物のそれぞれのリサイクル量が、他地域に比べて突出していた。これは、モデル計算による誤差だと考えられる。東南アジア諸国におけるリサイクル量の推計の精度は良くないと言える。

5. さいごに

本研究では、観測数が限られている廃棄物発生量やリサイクル量の報告値を有効に生かし、貿易統計や生産統計、

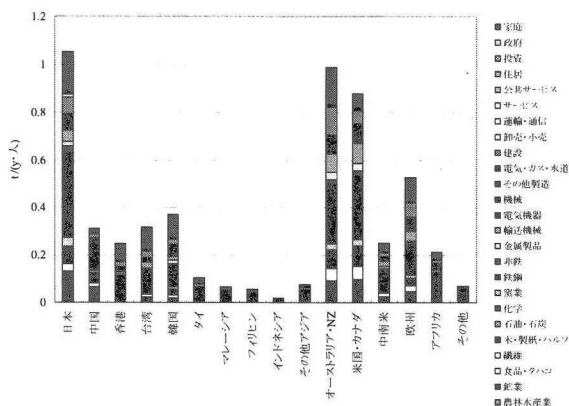


図9 国・地域別、部門別の一人当たりリサイクル量

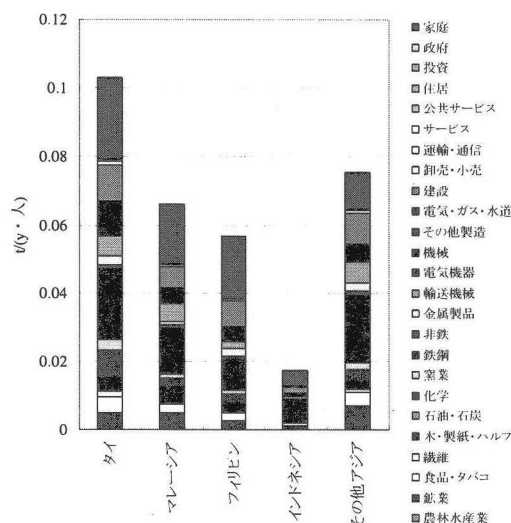


図10 アジア地域の部門別の一人当たりリサイクル量

そして国内、国間の産業連関表を用い、国別の産業・家庭部門の物質入出力関係に基づいて、廃棄物発生量とリサイクル量を推計する手法を提案した。物質密度の考え方を導入し、(1)部門 j における収支、(2)財 i の市場における収支、(3)貿易に関する収支、の3つに注目し、それぞれにおける物質のインフローとアウトフローの収支を定式化した。また、廃棄物排出量やリサイクル量の報告値の完備度によって、等号制約式や不等号制約式を設け、部門ごとの廃棄物種の排出割合やリサイクル財の使用割合

が国や地域によって変わらないと仮定し、それらの割合を不等号制約式として表した。

以上の推計法を用いて、アジア諸国の廃棄物排出量とリサイクル量を求めた結果、以下のことが分かった。

- 全世界で 1997 年の 1 年間に発生した廃棄物発生量は約 131 億トンであり、その内訳は一般廃棄物が約 10 億トン、産業廃棄物が約 121 億トンであった。また、処理・処分量は 117 億トンであった。
- 国・地域別、部門別の廃棄物発生量、廃棄物処理処分量、一人当たり廃棄物量を示すことができた。

本研究で提案したモデルは、物質収支においてストック量を考慮していないという課題を有している。また、水分量や非燃料率などの設定にも課題があると考えている。しかし、本研究で提案した手法は、新しい廃棄物排出量やリサイクル量の報告値が得られれば、それらを組み込み再計算すれば精度は向上する逐次改善型の方法であり、今後、廃棄物統計量の調査が進む発展途上国にとって、廃棄物量の現状推計あるいは将来予測のための強力なツールになるものと期待される。

参考文献

- 左建, 今井昇, 中山裕文, 松本亨, 井村秀文: 中国における都市生活廃棄物処理の需要の将来予測と整備戦略に関する研究, 環境システム研究論文集, Vol.29, 2001, pp273-281, 2001.
- 田中勝, 勝部公詩, 石坂薫, 高木真, 大久保賢治: 世界の都市ごみの排出量, 処理レベル, 処理費用の推定と予測, 都市清掃, 第 55 巻, 第 247 号, pp242-246, 2002.
- 森口祐一ら: マテリアルフローデータブック～日本を取りまく世界の資源フロー～(第 2 版), 国立環境研究所, 2003.
- 寺園淳ら: アジア地域における資源循環・廃棄の構造解析, 国立環境研究所, 2004.
- 中村太陽, 松岡譲, 藤原健史: 産業連関表などの経済・生産統計を用いたマテリアルフローとストックに関する解析手法の開発, 環境システム研究論文集, Vol.32, pp65-73, 2004.
- 中国環境統計年鑑: 1998.
- 三菱総合研究所: 循環型社会の構築のための基礎的情報収集整理業務(循環資源の発生量等に関する調査) 報告, 2001.

A STUDY ON SOLID WASTE GENERATION OF ASIAN COUNTRY USING REPORTED WASTE GENERATION DATA AND INDUSTRIAL STATISTIC

Tsutomu SASAKI, Yuzuru MATSUOKA and Takeshi FUJIWARA

In developing country in Asia, since the amount of waste generation has been increasing, adequate countermeasures of waste management are required. However, actual quantity of the waste generation and recycling which should be basic data for making the countermeasure has not been measured in many countries. In this study, we propose a method to estimate unknown quantity of waste generation and recycling using a limited number of reported waste data, various industrial statistic, and the input and output balance of the specified material of recyclable. This method was applied to estimate the waste generation and recycling of Asian country, and the results were analyzed and discussed.