

物質ストック勘定の枠組み —経済圏に蓄積する物質の潜在廃棄物および 都市鉱山としての評価に向けて—

橋本 征二¹・醍醐 市朗²・村上 進亮³・松八重 一代⁴・布施 正暁⁵・
中島 謙一⁶・小口 正弘⁷・谷川 寛樹⁸・田崎 智宏⁹・山末 英嗣¹⁰・
梅澤 修¹¹

¹(独)国立環境研究所主任研究員 循環型社会・廃棄物研究センター (〒305-8506 つくば市小野川16-2)
E-mail:hashimoto.seiji@nies.go.jp

²(国)東京大学大学院助教 工学研究科 (〒113-8656 文京区本郷7-3-1)

³(国)東京大学大学院講師 工学研究科 (〒113-8656 文京区本郷7-3-1)

⁴(国)東北大学大学院助教 環境科学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻青葉6-6-20)

⁵(独)産業技術総合研究所研究員 安全科学研究部門 (〒305-8569 茨城県つくば市小野川16-1)

⁶(独)国立環境研究所特別研究員 循環型社会・廃棄物研究センター (〒305-8506 つくば市小野川16-2)

⁷(独)国立環境研究所ポスドクフェロー 循環型社会・廃棄物研究センター (同上)

⁸正会員 (国)和歌山大学准教授 システム工学部 (〒640-8510 和歌山市栄谷930)

⁹(独)国立環境研究所主任研究員 循環型社会・廃棄物研究センター (〒305-8506 つくば市小野川16-2)

¹⁰(国)京都大学大学院助教 エネルギー科学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

¹¹(国)横浜国立大学大学院教授 工学研究院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

経済社会にストックされた物質の将来の排出フローを正確に見積もり、将来の廃棄物管理・資源再活用に役立てるには、ストックされた物質に関する情報が必要不可欠である。本稿は、物質ストックを把握する体系について検討し以下を提示したものである。1) 物質ストックにはいくつかの種類があるが、上記の目的に照らしたとき「製品（在庫、備蓄、使用中の最終製品、冬眠中の使用済み製品）」「管理された埋立地の廃棄物」「散逸した物質」のストックを整合的に把握する必要がある。2) これらの物質ストックに関して、廃棄物管理のための分類表、資源再活用のための分類表を提示した。後者は天然鉱物資源の分類表と整合的なものであり、様々な物質ストックを資源として包括的に見ることに役立つものと考えられる。

Key Words : *Economy-Wide Material Flow Accounts (EW-MFA), Integrated Environmental and Economic Accounting (SEEA), resource categorization, McKelvey diagram.*

1. はじめに

大量の物質フローに特徴づけられた今日の経済社会と環境問題の関わりを分析する上では、Material Flow Accounts/Analysis (MFA)と呼ばれる手法が有益である。このうち、国レベルのMFA (Economy-Wide MFA: EW-MFA)については、世界資源研究所による国際共同研究^{1,2)}以来、欧州ではEurostat³⁾によりEW-MFAのガイドが作成され、EU域内の各国でEW-MFAが実施されるようになってきている。日本では、環境白書や循環白書にEW-MFAの情報が掲載され、EW-MFAをもとにした数値目標が循環型社会形成推進基本計画において採用されている。

EW-MFAにおいて、経済社会への物質のインプットと

経済社会からの物質のアウトプットの差はNet Additions to Stock (NAS)と称されている。これまでにEW-MFAを実施した全ての国においてNASが報告されている⁴⁾ことから分かるように、我々の経済社会における物理的なストックは増加し続けていると考えられている。

このようにして我々の経済社会にストックされた物質は、将来発生するであろう廃棄物もしくは二次資源の予備軍と言える。「潜在廃棄物」あるいは「都市鉱山」⁵⁾という呼称は、このことを端的に表すものであろう。しかし、EW-MFAでストックと計算される物質は、すべて廃棄物もしくは二次資源として発生するであろうか。これらのうち、どのくらいが廃棄物管理を必要とし、あるいは資源として再活用が可能なのであろうか。ストック

された物質の将来の排出フローを正確に見積もり、将来の廃棄物管理・資源再活用に役立てるには、ストックされた物質に関する情報が必要不可欠である。

本稿は、既存のマクロな物質フロー勘定の体系を、物質ストックを把握する観点から検討し直し、Material Stock Accounts (MSA)の体系について検討したものである。具体的には、既存の体系や研究をもとに物質ストックの種類について包括的に検討するとともに、資源採取以降の物質ストックを把握する意義と目的について検討し、これに照らして、廃棄物管理のための物質ストックの分類表、資源再活用のための分類表を提示した。後者は天然鉱物資源の分類表と整合的なものであり、様々な物質ストックを資源として包括的に見ることに役立つものと考えている。

2. 物質ストックの種類及び経済圏と環境圏の境界

物質ストックを把握するにあたっては、その対象を明確にすることが必要である。ここではまず、EurostatのEW-MFA³⁾および国連のSystem of Integrated Environmental and Economic Accounting (SEEA)⁴⁾の枠組みにおける物質ストックの取り扱いについてレビューし、その後、物質ストックに関する既存研究も参照して、物質ストックの種類及び経済圏と環境圏の境界について検討する。

EW-MFA、SEEAの枠組みは、いずれも国連のSystem of National Accounts (SNA)⁵⁾の枠組みがそのベースとなっている。まず、EW-MFAにおいて、経済圏における物質ストックとは以下のようなものである。

- ✓ Stocks of materials that belong to the economy are mainly man-made fixed assets as defined in the national accounts such as infrastructures, buildings, vehicles and machinery as well as inventories of finished products. Durable goods purchased by households for final consumption are not considered fixed assets in the national accounts but should be included in EW-MFA. (para. 3.15)

また、いくつか境界線上にあるものについて、説明がなされている。すなわち、人体や家畜は原則経済圏に含まれるが、勘定の実務上はストックに変化なしと仮定できること(para. 3.16)、森林と農作物はこれを経済圏として取り扱うと植物の代謝を考慮しなければならないため環境圏として取り扱うこと(para. 3.19)、また、埋立廃棄物については環境圏とするが、実施者の選択で管理された埋立廃棄物を経済圏に含めてもよいこと(para. 3.20, 3.17)などである。

さて、SEEAの勘定システムは大きく4つのカテゴリで構成されているが、本稿の検討課題に関連するのは、

Category 1: Physical and hybrid flow accountsとCategory 2: Asset accounts in physical and monetary termsである。

まず、physical and hybrid flow accountsにおいては、環境圏から経済圏へのフローとして、天然資源(Natural resources: mineral, energy resources, water, soil and biological resources)と生態系投入(Ecosystem inputs: the water and other natural inputs (e.g. nutrients, carbon dioxide) required by plants and animals for growth, and the oxygen necessary for combustion)の2つが挙げられている(para. 3.38)。ここで、天然資源に含まれる生物資源(biological resources)は栽培・飼養・養殖されていないもの(non-cultivated)と栽培・飼養・養殖されたもの(cultivated)とで明確に区別される(Annex 1 and 2)。後者については、その生産のために生態系投入が用いられることになるが、この生態系投入の計算が難しいことも同時に指摘している(para. 3.174)。このため、EW-MFAでは、前述のように森林と農作物を環境圏の一部として取り扱うこととしている。また、埋立廃棄物については、管理された埋立廃棄物を経済圏の一部として取り扱っている(para. 3.49)。経済圏と環境圏の分けられ目は、管理されているかいないかである。もっとも、国の状況によって実務上は様々な課題があり、廃棄物の埋立をもって環境圏への排出としてもよいとしている(para. 3.69, 3.70)。

SNAとの整合性、また経済社会と環境との関係を記述するという観点からは、概念的にはSEEAにおける経済圏と環境圏の境界の考え方が妥当であろう。

次に、SEEAのasset accounts in physical and monetary termsである。SEEAはSNAのassetを拡張する形でenvironmental assetを定義している。

- ✓ For the SEEA, the asset boundary of the SNA is expanded to cover all environmental entities which are of interest and measurable. The environmental assets covered by the SEEA are grouped into the following broad categories: Natural resources (Mineral and energy resources; Soil resources; Water resources; Biological resources); Land and associated surface water; Ecosystems. (para. 2.125)

本稿では物質的なassetのみを考えるが、ここで天然資源(natural resources)と呼んでいるものは、その多くが環境圏に存在するものである。つまり、SEEAにおいては、環境圏における物質ストックも把握していることになる。

さらに、既存のMFA研究で物質ストックを推計したものの中には、天然資源以外の環境圏における物質を勘定しているものがある。すなわち、現時点で資源と呼ぶには品位が低すぎる地殻中の元素や、一度環境圏から経済圏に取り込まれ、再び環境中に散逸した元素を含んでいるものがある⁶⁾。

以上をまとめると、物質ストックには図-1に示すような種類があると考えられる。このうち、「利用不可能な

物質」「天然資源(栽培・飼養・養殖された生物資源を除く)と生態系」「散逸した物質」は環境圏に、「栽培・飼養・養殖された生物資源」「人体」「製品」「管理された埋立地の廃棄物」は経済圏に属している。なお、「製品」には、在庫、備蓄、使用中の最終製品、冬眠中の使用済み製品のすべてを含めている。ここで、冬眠中の使用済み製品とは、使用済みであるが捨てられないままの状態にある製品のことであり、家の中で眠っている使用済み携帯電話などが相当する。なお、右端と左端の違いは一度経済圏を通過しているかしていないかであり、本質的には環境において同じものとみなし得る。

また、これらの物質ストックのうちEW-MFAが対象としている範囲は、概念的には「飼養・養殖された生物資源(動物)」から「製品」もしくは「管理された埋立地の廃棄物」までであるが、実務的には「製品」のみが対象になっていると考えられる。実際、EurostatのEW-MFAガイド³⁾に示されているストックの勘定表(Account 6)には、「製品」に相当する項目しか挙げられていない。また、SEEAのphysical and hybrid flow accountsが対象とする範囲は、経済圏に相当する範囲であり、SEEAのEnvironmental asset accountsが対象とする範囲は、天然資源(飼養・養殖された生物資源を含む)と生態系の範囲である。

本稿では、SEEAのEnvironmental asset accountsが対象とする範囲に「利用不可能な物質」を加えた範囲を上流側の物質ストック勘定(Primary Material Stock Accounts)、「製品」から「散逸した物質」までを下流側の物質ストック勘定(Secondary Material Stock Accounts)と呼ぶこととする。

本稿の関心は下流側の物質ストックにあるが、以下では、これらを把握する意義と目的について整理し、その意義と目的に照らして、物質ストックの分類を検討する。

3. 下流側の物質ストックを把握する意義と目的

冒頭に述べたように、我々の経済社会にストックされた物質は、潜在的な廃棄物であり、また、潜在的な資源である。今後増加することが指摘されているストック起源の廃棄物を適正に管理し、また、経済社会にストックされた物質を再び資源として有効に活用するためには、具体的にどのような物質がどのような形態でどの程度我々の経済社会にストックされ、将来にわたって廃棄物や二次資源として発生し、また、どのくらいが廃棄物管理を必要とし、あるいは資源としての再活用が可能なのかを明らかにすることが必要である。近年、様々な物質や製品を対象に、その経済社会におけるストック量(やストックからの廃棄量)を推計した研究が発表されてきているが(紙面の都合で引用略)、こうした研究の目的も、将来発生する廃棄物もしくは二次資源の量を把握し、将来における廃棄物の管理や資源の再活用に役立てることにある。廃棄物管理に役立てるには、図-1における「製品」の把握が有効であるし、資源再活用に役立てるには下流側の物質ストック全体の把握が有効である。「散逸した物質」の把握は資源ロスの検討につながる。

下流側の物質ストックの把握は、直接的には以上のような目的に有効であるが、同時に、これらの物質ストックの把握が、物質フローに関する情報の矛盾を見いだす場合がある。静態情報としての物質ストックは、動態情報としての物質フローによって引き起こされた状態変化の結果であるため、物質ストックに関する情報を得ることで、物質フローに関する情報から抜け落ちた視点が提供される場合がある。これによって我々の経済社会における物質代謝がより正しく理解されることになる。ストックとフローに関する情報の整合性を検討することで、

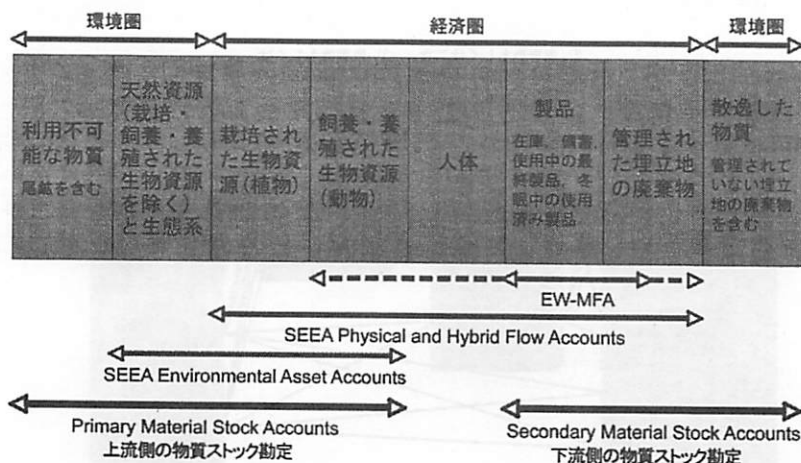


図-1 物質ストックの種類

例えば、建設物に関して、建築物の解体廃棄物の統計値が過小推計となっている可能性や、廃棄物として回収されずに解体現場に残置される物質が存在する可能性が指摘されている⁹⁾¹⁰⁾。また、鉄に関して、推計される老廃鉄スクラップの排出量と統計で捉えられている老廃鉄スクラップの回収量の差が冬眠中の使用済み製品や使用済み製品の輸出になっている可能性が指摘されている¹¹⁾¹²⁾。このような未回収物質は、EW-MFAでは結果的にストックとして扱われることになってしまうが、実態としては環境へ排出された、もしくは輸出されたと考える方が適切な場合も多いであろう。このような観点からは、図-1の下流側の3つの物質ストックを整合的に把握することが有益である。もちろん、これらの整合的な把握は、将来の廃棄物管理や資源再活用に物質ストックに関する情報を役立てるという最初の目的にも貢献する。

4. 下流側の物質ストックの分類

(1) 下流側の物質ストックの分類の視点

ここでは、物質ストックの情報を将来の廃棄物管理や資源再活用に役立てるという意義と目的に照らして、下流側の物質ストックの分類について検討する。

まず、将来において廃棄物管理の対象となるのは「製品」であるが、この分類の視点としては以下のようなものが考えられる。

- 1) どのような物質がどのような製品の形態でストックされているか。
- 2) その物質もしくは製品は、廃棄物もしくは二次資源として発生するか。
- 3) その物質もしくは製品が廃棄物もしくは二次資源として発生する場合、発生するのはいつか。

4) その物質もしくは製品の再活用の可能性はどのくらいか。

また、将来における資源再活用については、「管理された埋立地の廃棄物」及び「散逸した物質」も含め、以下のような分類の視点が考えられよう。

1) どのような物質がどのような形態でストックされているか。

4) その物質の再活用の可能性はどのくらいか。

まず、1)1)の物質の種類とその存在形態は、どのような廃棄物管理が必要で、もしくはどのような資源回収が可能で、また、誰が廃棄物管理もしくは資源回収を担当するのか、という点で重要な情報であり、最も基本的な分類の視点であると考えられる。例えば、「製品」については、図-2に示すような存在形態の分類が考えられる。

次に、2)廃棄物もしくは二次資源としての発生可能性は、経済圏に投入されたとしても、全ての物質が廃棄物や二次資源として発生するわけではないことを反映するための分類である。廃棄物もしくは二次資源として発生する可能性が低い物質には、潜在散逸物(使用中もしくは使用済み後に散逸してしまうもの)、散逸の利用物(使用形態がそもそも散逸的であるもの)、永久構造物(使用済みとなる可能性が低いもの)などがある¹³⁾。図-2に示すように、全ての物質が両方の可能性を持っている。

3)廃棄物もしくは二次資源となる時期は、廃棄物管理が必要となる、もしくは資源として再活用が可能となるのはいつかという分類の視点である。例えば、「製品」のストックを都市鉱山と考えたとき、これら全てが今すぐ資源として利用可能なわけではない。ほとんどの「製品」は使用中であり、これが廃棄される状態になったときに初めて資源として再活用可能となるのである。これについては、例えば図-2に示すような分類が考えられる。

4) 再活用の可能性は、資源回収の観点から重要な分

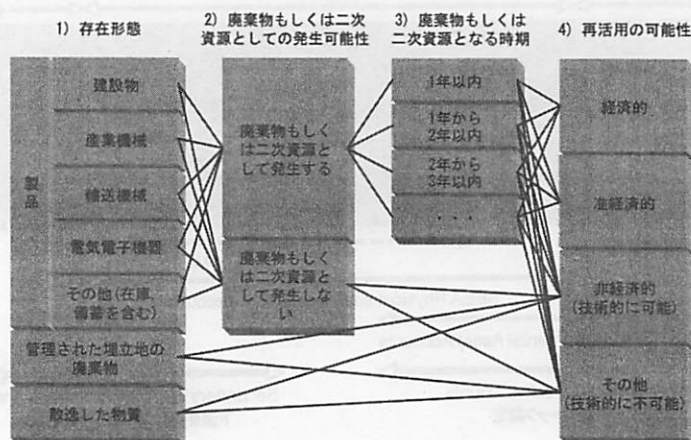


図-2 「製品」の分類の視点とそれらの対応関係

類の視点である。この可能性は資源回収の収益性により決まることが多いことから、例えば、図-2に示すような分類が考えられる。

なお、2)~4)の区分は、使用済み物質もしくは製品の処理・回収費用、二次資源価格、リサイクル制度などの要因に影響を受ける。したがって、定期的な見直しが必要となることは言うまでもない。

以下では、このような視点をもとに廃棄物管理に役立てるための「製品」の分類、資源の再活用に役立てるための下流側の物質ストックの分類を行う。

(2) 廃棄物管理に役立てるための製品の分類

廃棄物管理に役立てるための「製品」の分類は、図-3に示すように、どういう形態の物質もしくは製品がストックされ、廃棄物もしくは二次資源として発生する可能性があるのかを分類したものである。これは、誰がその物質もしくは製品の適正処理に責任をもつのか、どういう処理がどれだけ求められるのか、などを検討する際の出発点となるものである。

まず、この表は物質ごとに作成することを想定しており、これが「1)物質の種類」の視点に対応する。縦軸は、「1)存在形態」と「2)廃棄物もしくは二次資源としての発生可能性」の視点に相当し、まずは製品の種類で分けられ、さらに廃棄物もしくは二次資源として発生するものとしいないものに分けられる。横軸は、「3)廃棄物もしくは二次資源となる時期」の視点に相当し、1年以内に発生するものと発生しないと分けられる。廃棄物管理の観点でまず重要となるのは、1年以内の列に記載される数値であろう。1年以内ではない列には、将来において廃棄物もしくは二次資源として発生すると推計されるストックの量、および廃棄物としても二次資源としても発生しないと推計されるストックの量が記載される。

(3) 資源再活用に関与するための下流側の物質ストックの分類

下流側の物質ストックを都市鉱山と見立て、その再活用を考えると、通常の鉱物資源の分類は参考になる。本稿では、United State Geological Survey (USGS) のほか多く

3) 廃棄物もしくは二次資源となる時期

		製品	
		1年以内に発生する	1年以内には発生しない
1) 存在形態	建築物	発生する	発生しない
		発生しない	発生しない
2) 廃棄物もしくは二次資源としての発生可能性	産業機械	発生する	発生しない
		発生しない	発生しない
	輸送機械	発生する	発生しない
		発生しない	発生しない
	電気電子機器	発生する	発生しない
		発生しない	発生しない
	その他(在庫、備蓄を含む)	発生する	発生しない
		発生しない	発生しない

図-3 廃棄物管理に役立てるための製品の分類

3) 廃棄物もしくは二次資源となる時期

		製品		管理された埋立地の廃棄物	散逸した物質
		1年以内に発生する	1年以内には発生しない		
4) 再活用可能性	経済的	1年以内の二次リザーブ	将来の二次リザーブ		
	准経済的	1年以内の准二次リザーブ	将来の准二次リザーブ		
	非経済的(技術的に可能)	1年以内の非経済的二次資源	将来の非経済的二次資源	非経済的二次資源	非経済的二次資源
	その他(技術的に不可能)	回収不能物質	回収不能物質	回収不能物質	回収不能物質

図-4 資源再活用に関与するための下流側の物質ストックの分類

の旧西側資源産出国が用いてきた鉱物資源の分類表¹⁴⁾⁹に整合させる形で、図4の分類表を作成した。鉱物資源の分類表は物質ごとに作成されており、図4も同じく物質ごとに作成することを想定している。これが「1)物質の種類」の視点に対応する。縦軸は「4)再活用の可能性」の視点に相当する。「1)存在形態」と「2)廃棄物もしくは二次資源としての発生可能性」の視点はこの表には現れないが、これらは「4)再活用の可能性」を検討する際に必要な情報であり、図3がこの表の縦軸を作成する際のベースとなる。横軸は3つのストックに分けられており、製品が「3)廃棄物もしくは二次資源となる時期」でさらに分けられている。製品はそのほとんどが使用中であり、一番左の列に記載される量だけが向こう1年に資源として再活用可能となる。ここでは、我々の知識が多く、収益性の高い二次資源を二次リザーブと呼んでいる。二次資源と一次資源の相違は、これをすぐに利用できるかどうかにあり、将来の二次リザーブがほとんどを占めることになる。なお、図3、図4の分類は、鉱物資源以外にも当てはめることが可能である。

5. おわりに

本稿では、既存の体系や研究をもとに物質ストックの種類について包括的に検討するとともに、資源採取以降の物質ストックを把握する意義と目的について検討し、これに照らして、廃棄物管理のための物質ストックの分類表、資源再活用のための分類表を提示した。後者は天然鉱物資源の分類表と整合的なものであり、様々な物質ストックを資源として包括的に見ることに役立つものと考えている。

現在、本稿で作成した分類表を実際に埋める作業を進めているところである。その結果については別途報告したい。

謝辞：本稿は、環境省廃棄物処理等科学研究費補助金(K1810, K1930, K2031)による成果の一部である。

参考文献

- 1) Adriaanse, A., et al.: Resource Flows. World Resource Institute, 1997.
- 2) Matthews, E., et al.: The Weight of Nations. World Resource Institute, 2000.
- 3) Eurostat: Economy-Wide Material Flow Accounts and Derived Indicators—A Methodological Guide. Eurostat, 2001.
- 4) Bringezu, S., et al.: Rationale for and interpretation of economy-wide materials flow analysis and derived indicators. *Journal of Industrial Ecology* 7(2), pp.43-64, 2003.
- 5) 南條道夫：都市鉱山開発，東北大学選鉱製錬研究所集報，Vol.43, No.2, pp.239-251, 1988.
- 6) United Nations: Integrated Environmental and Economic Accounting 2003, 2003.
- 7) United Nations: 1993 System of National Accounts, 1993.
- 8) Kapur, A., Graedel, T.E.: Copper mines above and below the ground. *Environmental Science and Technology* 40(10), pp.3135-3141, 2006.
- 9) 橋本征二，寺島泰：建築物解体廃棄物の発生予測，廃棄物学会論文誌，11(5)，pp.271-279，2000.
- 10) Hashimoto, S., et al.: Where will large amounts of materials accumulated within the economy go? *Waste Management* 27, pp.1725-1738, 2007.
- 11) Daigo, I., et al.: Accounting for steel stock in Japan. *ISIJ International* 47(7), pp.1064-1068, 2007.
- 12) Müller, D.B., et al.: Exploring the engine of anthropogenic iron cycles. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 103, pp.16111-16116, 2006.
- 13) Hashimoto, S., et al.: Framework for estimating potential and non-potential waste accumulated within the economy. *Waste Management*, submitted.
- 14) McKelvey, V.E., 1972. Mineral resource estimates and public policy. *American Scientist* 60(1), pp.32-40.
- 15) U.S. Bureau of Mines and U.S. Geological Survey, 1980. Principles of a Resource/Reserve Classification for Minerals. U.S. Geological Survey, Circular 831.

FRAMEWORK OF MATERIAL STOCK ACCOUNTS: TOWARD ASSESSMENT OF MATERIALS ACCUMULATED WITHIN THE ECONOMY

Seiji HASHIMOTO, Ichiro DAIGO, Shinsuke MURAKAMI, Kazuyo MATSUBAE, Masaaki FUSE, Ken-ichi NAKAJIMA, Masahiro OGUCHI, Hiroki TANIKAWA, Tomohiro TASAKI, Eiji YAMASUE, and Osamu UMEZAWA

The information about the materials in stock is vital for accurately estimating the future outflow of the materials currently stocked and for making use of the estimation in future waste management and resource reutilization. This study investigated a framework for capturing material stocks and drew the following conclusions: 1) "Products," "wastes in managed landfill sites," and "dissipated materials" need to be captured consistently for the purposes above; 2) Two kinds of classifications of these stocks were proposed for future waste management and resource reutilization, one of which is consistent with mineral resource classification: it is useful to see various material stocks as resources in a comprehensive way.