

他元素との関わりを考慮した日本における亜鉛の動的物質フロー分析モデルの構築

田林 洋*・醍醐 市朗*・松野 泰也*・足立 芳寛*

Development of a Dynamic Substance Flow Model of Zinc in Japan

Hiroshi TABAYASHI, Ichiro DAIGO, Yasunari MATSUNO and Yoshihiro ADACHI

Synopsis : In this paper, a dynamic substance flow model of zinc in Japan was conducted. Currently, 60% of zinc is consumed for galvanized steels (galvanized steel sheets and other galvanized steels), followed by brass in Japan. To analyze the substance flow of zinc in a dynamic way, the linkages of zinc with other substances were considered in this model. Furthermore, the dissipated zinc during the use phase was taken into account using the existing results of atmospheric exposure tests. At the end-of-products, most of zinc is recovered as steel scraps or copper alloy scraps. In the re-melting process in electric arc furnace (EAF) of steel, zinc is vaporized, separated from steel, and generated as EAF dust. So, zinc can come back into the zinc cycle again. On the other hand, when zinc is used in copper alloys, zinc is not recycled as zinc but mixed into copper cycle. The mass balances of zinc in the substance flow analysis were verified by comparing estimated values of the model with statistics and other estimation at the recovering processes of zinc. Using this model, in-use stock of zinc in Japan was estimated as approximately 330 kt in 2005, which was about five times as much as recovered zinc. The amounts of unrecovered zinc in 2005 were estimated as around 190 kt. Of these losses, 70% were unrecovered in the steel cycle, e.g. dissipated into environment as sacrificial materials or with uncollected steels. Finally, complete zinc flows in Japan were determined with the results of this model.

Key words : sacrificial materials; substance flow analysis; zinc cycle; dynamic model; in-use stock.

1. 緒言

亜鉛は、日本においては鉄、銅に次いで生産量が多く、重要な元素である¹⁾。また、亜鉛は亜鉛めっき鋼板、その他めっき、伸銅品など需要量のおよそ6割が他元素と随伴し、社会へと投入されている¹⁾。従って、亜鉛の社会での使用状況を把握し、リサイクル可能性を検討するためには、他元素との関わりを考慮する必要がある。

亜鉛について物質フローを分析した既存研究はいくつかある。Gordonら²⁾は、亜鉛の生産から廃棄までのプロセスを詳細に整理し、記述した。また、使用段階や廃棄段階における亜鉛の含有率についてまとめた。Spatariら³⁾は、ヨーロッパでの1年間の亜鉛のフローを詳細なプロセスに分解して作成した。特に廃棄段階においては、廃棄物を7種類に区分し、それぞれに含まれる亜鉛濃度を特定することにより、社会からの排出量を定量化した。回収される亜鉛の多くは、亜鉛板、製鋼ダスト、使用済み自動車から回収される亜鉛ダイカストの3つであるとしている。リサイクルならびに埋立については、使用済みとなった亜鉛のうち埋め立てられたものの割合を文献から得て、排出量のうち回収されるものと最終処分されるものを示した。また、

Graedelら⁴⁾は、世界を8地域に区分して、それぞれの地域における亜鉛の1年間のフローを作成した。また、世界各域における亜鉛のストック量を示している。Van Beersら^{5,6)}は、Spatariらと同様の方法を用いることで、オーストラリアにおける亜鉛の社会への蓄積量を、都市部、郊外、州、国の4つの階層に分けそれぞれ静的に算出している。しかしながら、日本に関して亜鉛の詳細な動的物質フロー分析 (substance flow analysis, SFA) を実施し、国内亜鉛蓄積量、将来の各年における排出推計を行った事例はない。

また、前述のように、多くの亜鉛が亜鉛めっき鋼板や黄銅として鉄や銅と随伴し消費されているため、鉄鋼材や銅素材など亜鉛とライフサイクルを共有する素材のフローが、亜鉛のSFAに大きな影響を与える。近年では、Spatariら⁷⁾、Mullerら⁸⁾、醍醐ら⁹⁾が鉄や銅の使用中の蓄積量に関して、醍醐ら¹⁰⁾、畑山ら¹¹⁾が鉄やアルミニウムの近未来の排出量の予測を、動的分析を用いて行っている。これら、亜鉛のライフサイクルに関わる素材の動的SFAにより得られた情報を活用し、亜鉛の社会への投入から、使用、廃棄に至るまでのフローをモデル化できると考えられる。

また、亜鉛の特徴の一つとして、亜鉛めっき鋼板、溶融亜鉛めっきなど、犠牲材として用いられることが挙げられ

平成20年4月15日受付 平成20年6月13日受理 (Received on Apr. 15, 2008; Accepted on June 13, 2008)

* 東京大学大学院工学系研究科マテリアル工学専攻 (Department of Materials Engineering, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo-ku Tokyo 113-8656)

る。亜鉛は、製品での使用中（社会での蓄積から）に一部が環境へ散逸するので、それらのフローに関してもSFAに取り入れる必要がある。亜鉛めっきの犠牲的な散逸量の計測は、海外ではKarlen¹²⁾がスウェーデンにおいて亜鉛めっき鋼板の暴露試験を行っているほか、国内でも多くの地域で暴露試験が行われている¹³⁻¹⁷⁾。しかしながら、亜鉛めっきの使用段階での犠牲的な散逸について定量化したSFAはほとんどない。

そこで、本研究では、亜鉛めっきの使用段階での犠牲的な散逸を含めた、他元素との関わりを考慮した日本における亜鉛の動的物質フロー分析モデルの構築を目的とする。具体的には、亜鉛の消費先として最も多い鋼材と銅との関わりを考慮した。

2. 亜鉛の物質フロー

2.1 日本における亜鉛の物質フロー図

本研究で考慮したフローの概要図をFig. 1に示す。以下、プロセスごとに詳細に述べる。本研究では、フローを生産、亜鉛加工、製品加工、使用、廃棄処理（リサイクル）の大きく5つに分けて分析した。使用段階では、投入から排出されるまでを動的に分析をし、蓄積量について考慮した。ただし、本研究では亜鉛金属の原料としての回収という視点から蓄積量を考慮するので、以下に述べる、伸銅品、無機薬品、亜鉛板、その他用途については需要量を考慮したが、蓄積量には計上しなかった。また、亜鉛は地金の用途として、めっき鋼材や黄銅に用いられ、それら素材が、電気機械や自動車などの最終製品に組み込まれる。本研究で

は、亜鉛地金の消費先の区分を“用途”とし、亜鉛を含む素材の消費先を“使途”として区別した。さらに、本研究において示す亜鉛量は、全て亜鉛純分である。

2.2 生産

亜鉛は、鉛やカドミウムを含む鉱石から、乾式法や湿式法により得られる。乾式法では、ISP (Imperial Smelting Process) により蒸留亜鉛を得るが、亜鉛の純度を上げるためにさらに精留することで精留亜鉛が得られる。湿式法では、硫酸により浸出したのち、電気分解により電気亜鉛が得られる。また、めっき工程などの加工段階から発生するスクラップを再溶解することで再生亜鉛が得られる。蒸留亜鉛、精留亜鉛、電気亜鉛、再生亜鉛の生産量は、統計¹⁾から得られる。また、それら亜鉛地金の需要量が、亜鉛めっき鋼板、その他めっき、亜鉛ダイカスト、伸銅品、無機薬品、亜鉛板の別に得られる¹⁾。

2.3 加工

2.3.1 亜鉛加工

亜鉛めっき鋼板、その他めっきでの亜鉛の消費量のうち、めっき工程での歩留まりは、ヒアリングからそれぞれ92%、70%とした。亜鉛めっき鋼板におけるめっき工程から発生するスクラップは、鉄とアルミを少量含む金属亜鉛であるため、すべて再生亜鉛の原料になるものとした。その他めっき鋼材におけるめっき工程から発生するスクラップは、亜鉛純分のうち半分が酸化物となったトップドロス、のこり半分が鉄を含むボトムドロスとして発生するものとし、ボトムドロスは再生亜鉛の原料となるものとした。トップドロスは、酸化物として亜鉛華などの無機薬品の原料となることも多いが、本研究では、金属としての亜鉛回

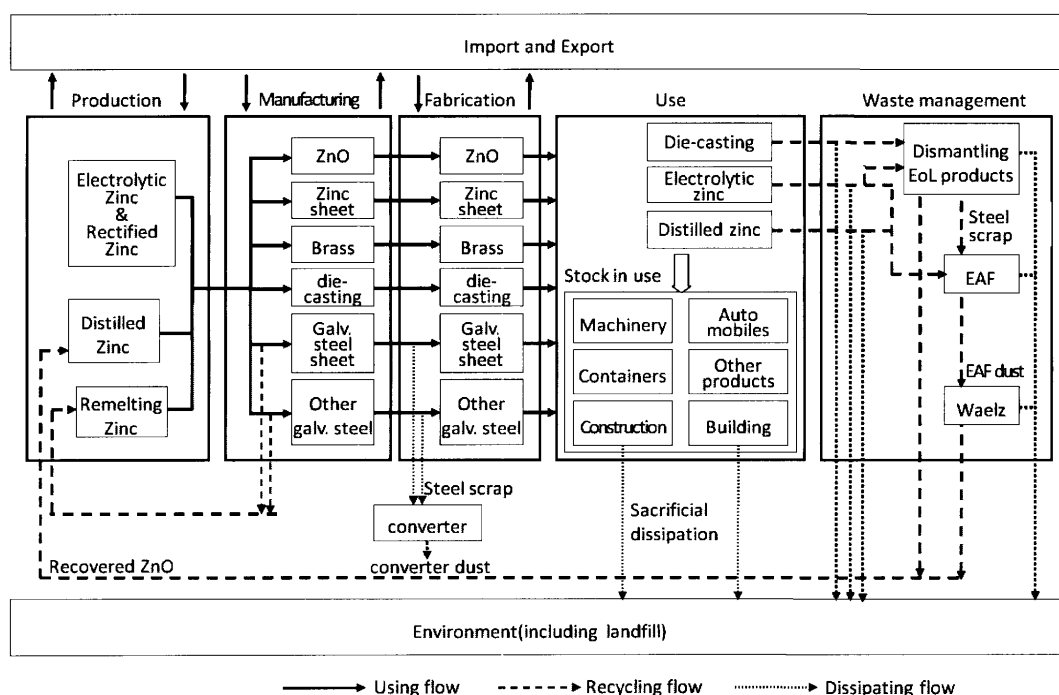


Fig. 1. Substance flow model of zinc.

収はされていないものとした。亜鉛ダイカストに消費される亜鉛について、ヒアリングから加工スクラップは発生しないものと仮定し、使用済みの製品からのみ亜鉛回収されているとした。本研究では、伸銅品へ消費される亜鉛は、大半は黄銅（真鍮）に、一部は青銅鑄物などのその他の銅合金に用いられる。銅合金の製造工程から発生するスクラップは、銅合金として発生するため、銅サイクルの中で循環する。従って本研究では、伸銅品に用いられた亜鉛は、亜鉛金属として回収されないものとした。無機薬品は、亜鉛華などの酸化亜鉛としての用途が多く、酸化物は自動車用タイヤへの添加など消散的な用途が多く、使用後に亜鉛サイクルに戻ってこないことから、本研究では消費後のフローについては考慮していない。亜鉛板は、電池の極として用いられるが、消費量も多くないことから、加工工程から発生するスクラップはないものと仮定し、蓄積量にも計上しなかった。

2・3・2 製品加工

亜鉛加工プロセスにおいて素材として生産されたものは、製品加工プロセスにおいて最終製品の部品となるために加工し、組み立てられる。その加工プロセスにおいて発生する金属スクラップは、一般的には、加工スクラップと呼ばれ、再溶解により容易にリサイクルできる。本研究では、金属亜鉛の原料となり得る加工スクラップとして、亜鉛ダイカスト、亜鉛めっき鋼板、その他めっきから発生する加工スクラップを考慮した。亜鉛ダイカストについては、ヒアリングから製品の歩留まりは100%に近いと得たため、本研究では加工スクラップは発生しないと仮定した。

亜鉛めっき鋼板ならびにその他めっきから発生する加工スクラップは、鉄鋼スクラップとして回収されている。それら鉄鋼のスクラップは、転炉への投入、電炉への投入、自社内利用が考えられるが、本研究では全て転炉へと投入されると仮定した。転炉へと投入された亜鉛は、製鋼、製鉄ダストとして発生する。発生した製鋼、製鉄ダストの処理により亜鉛が回収されることはないと推測し、鉄鋼スクラップからの亜鉛回収は、本研究では考慮しないこととした。しかしながら、これらの仮定について、ヒアリングなどを通じて実情を正確に把握する必要があるが、今後の課題として残される。

2・3・3 最終用途別投入量

本研究では、動的に亜鉛の蓄積量と排出量の算出を行った。動的分析を行うために、最終用途別に製品寿命分布を設定した。最終用途別の亜鉛の社会への投入量を以下のように算出した。まず、各用途別の需要量に既述の歩留まりを乗じることで、亜鉛の最終製品での消費量を用途別に算出した。そして、用途ごとに最終用途区分へと配分することで最終用途別の消費量を求めた。これに加工スクラップ率を乗じることで加工スクラップ量を求め、加工スクラップ量を消費量から減じることで、最終用途別の投入量を求

めた。最終用途区分の配分方法は用途ごとに異なるため、用途別に詳述する。

亜鉛めっき鋼板およびその他めっき用途の亜鉛は、社会では鉄鋼材として利用される。そこで、これら二つの用途については、既往研究¹⁹⁾から得られる鉄鋼材の最終用途区分を適用した。加工スクラップ発生率¹⁸⁾や寿命分布¹⁹⁾も既往研究と同一とした。

亜鉛めっき鋼板用途については、消費量に鉄鋼用途別受注月報²⁰⁾から得られる亜鉛めっき鋼板の全受注量に対する各用途の受注割合を乗じることで、最終用途別の消費量を求めた。その際、鉄鋼用途別受注月報の統計項目と本研究で用いる鉄鋼材の最終用途区分との対応は、既往研究と同様とした¹⁹⁾。ここで、亜鉛めっき鋼板の全受注量には、最終用途が不明なシャー・スリット業及び販売業者用途は除いた。また、鉄鋼用途別受注統計月報には、1980年以降のデータしか存在しないため、1979年以前の用途別受注割合は1980年と同一とした。

その他めっき用途については、消費量に溶融亜鉛めっき生産実績²¹⁾から得られる、その他めっきの全生産量に対する用途別の生産割合を乗じることで、最終用途別の消費量を求めた。経済産業省統計局によると、“その他めっき用途”とはめっき鋼板用途以外のすべての亜鉛めっき鋼材用途を指している。そのため、本用途の最終用途への配分には、溶融めっきの生産実績を用いた。溶融亜鉛めっきの用途別生産量は、1979年以前のデータが存在しないため、1979年以前の用途別生産割合は80年と同一とした。その際の統計項目と最終用途の対応をTable 1に示す。

亜鉛ダイカスト用途については、亜鉛ダイカスト用途の消費量に、機械統計年報²²⁾から得られる亜鉛ダイカストの全生産量に対する最終用途別の生産割合を乗じることで算出した。最終用途区分は、亜鉛めっき鋼板、その他めっきと同一とした。なお、加工スクラップ発生率については、前述のように0%とした。寿命分布は、ダイカストの最終用途の5割以上が自動車であることから、ダイカスト製品もその多くが鉄鋼材と共に使用されていると考え、鉄鋼材と同一とした。統計項目と最終用途区分の対応をTable 2に示す。

また、最終製品の輸出入が行われることで、間接的に金属亜鉛が輸出入されることになる。本研究では、ヒアリングから得られた鉄鋼製品の輸出入量から、最終用途別の生産量に対する輸出入割合を算出し、これを最終用途別の亜鉛投入量に乗じることで間接的に輸出入された亜鉛量を推算し、投入量から控除した。

2・4 使用

2・4・1 犠牲による散逸

亜鉛めっき鋼板、及び、溶融亜鉛めっきはその使用中に犠牲材としての散逸が起きる。本研究では、橋梁や屋根など、めっきの散逸が起こる最終用途として土木と建築を想

定し、それらの用途以外については、散逸しないものとした。その散逸量は、暴露試験の結果などから、使用される環境によって大きく異なることが分かっている¹³⁻¹⁷⁾。本研究では、めっき材の多くが都市部で使用されていると考え、その設置時のめっき量を 550 g/m^2 と仮定することで、投入量に対する散逸割合を仮定した。Table 3に既存の屋外暴露試験の結果¹³⁻¹⁷⁾と、それに対応する散逸割合を示す。

2・4・2 動的分析

社会へ投入された製品は社会へと蓄積され、その寿命を終えると使用済み製品として排出される。また、めっき製品に使用された亜鉛は使用中に犠牲材として環境へと散逸

Table 1. Corresponding end-use category with statistical categories in Hot dip galvanized steel.

Application	Hot dip galvanizing products in statistics ²¹⁾	
	1980~1995	1996~2006
Construction	Copper pipe	Copper pipe
	Road	Road
	Construction equipment	Construction equipment
	Grating/Lath	Grating
	Electric machine	Electric power equipment
	Electric power equipment	—
Buildings	Buildings/conservatory	Buildings
Machines	Ships	Ships
	Cooling and heating	—
	Ferrule	Ferrule
	Rail vehicles	Rail vehicles
Passenger vehicles	Ferrule	Ferrule
Trucks	Ferrule	Ferrule
Containers	—	—
Other products	Steel products	Steel products
	Other products	Fastener
	—	Other products

Table 2. Corresponding end-use category with statistical categories in die casting.

Application	Zinc alloys die casting in statistics ²²⁾
Construction	—
Buildings	—
Machines	General machinery, Electrical machinery, Motor cycle
Passenger vehicles	Automobiles
Trucks	Automobiles
Containers	—
Other products	Other products

Table 3. Runoff rate of zinc.

	Number of samples	Runoff rate obtained in previous studies ($\text{g/m}^2/\text{year}$)	Estimated runoff rate used in this study ($\text{wt}\%/\text{year}$)
Inland areas	21	12.5	2.27
Coast areas	11	22.9	4.2

する。製品として排出される亜鉛の量を動的分析 (Population Balance Model: PBM)²³⁾により導出した。PBMでは、ある年の排出量は、過去各年の用途別投入量に寿命分布関数を乗じることで算出される。本研究では、投入年から排出年までの間にめっきにより犠牲散逸した量を排出量から差し引いた。寿命分布に用いられる各数値は既往研究のものを引用した²³⁾。例えば平均寿命については、土木は34.5年、建築は28.9年、機械及びその他は12.1年、自動車及びトラックについては経年の変化を考慮した。そして、当該年に排出される量を用途別に計算しその総和を取ることで、社会から使用済み製品として排出される亜鉛の総量を推計した。そして、ある年の亜鉛の社会への投入量から、同年の排出量を減じ、更にそれまでにめっきとして犠牲散逸した量を減じることで、1年間の社会への蓄積増分を推計した。それら過去から毎年分を積算することで、それまでに社会に蓄積された亜鉛量を推計した。

2・5 廃棄 (リサイクル)

排出量に最終用途別の回収率を乗じることで、亜鉛の回収量を算出した。この最終用途別の回収率は、既往の鉄鋼製品の研究結果を用いた¹⁹⁾。電炉で処理され、ダストとして捕集された亜鉛は、一部回収されずに埋め立てられるものもあるが、多くはダスト処理工程を経て、地金の原料となる。本研究における地金原料のリサイクルフローでの亜鉛の損失率を既往研究から得、プロセスごとに^{24,25)} Table 4にまとめた。

3. 結果及び考察

3・1 分析結果

原料として回収可能な亜鉛の社会への蓄積量を推計した結果をFig. 2に示す。その総量は、2006年では330万t程度と推算された。これは、亜鉛の原料として回収され得る用途である、亜鉛めっき鋼板、その他めっき、亜鉛ダイカスト用途を合わせた総需要量のおよそ7倍である。用途別にみると、1990年代まではすべての用途において増加傾向にあったが、近年では、90年代以降土木用途、機械用途の蓄積量が減少傾向にある。土木用途の亜鉛生産量は、1990年ごろから減少しており、蓄積量の減少を招いている。なお、土木用途の平均寿命が35年程度と設定しているため排出量はまだ増加傾向にある。日本の人口²⁶⁾一人当たりの蓄積量を算出すると、2006年では $26\text{ kg}/\text{人}$ と推算

Table 4. Loss of zinc at the recycling processes.

Process	Unit: %	
	Loss	Residual zinc
Vaporization process in EAF	0	100
Unrecovered dust(Landfill as EAF dust)	35	65
The Waelz process	6	59

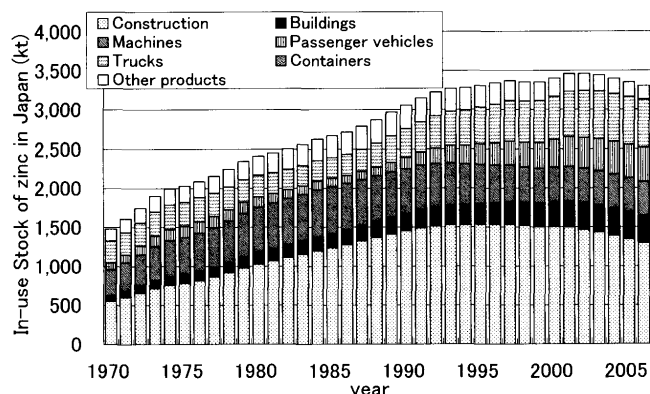


Fig. 2. Stock in use of zinc as die casting, galvanized steel sheets and other galvanized steel.

された。この結果を、van Beersらのオーストラリアにおける推算結果⁶⁾である205 kg／人と比較すると、大きく異なった。これは、蓄積量の定義の差異が原因であると考えられる。本研究では、回収可能な亜鉛の量を蓄積量として算出しているが、van Beersらの研究では、回収可能性を区別せず投入量全てを蓄積量として算出している。これにより、van Beersらの推計では亜鉛めっきの犠牲材としての散逸量が蓄積量から減じられていないため、本研究の結果と比較して蓄積量が大きく推計されたと考えられる。

次に、EAFダストから回収された亜鉛金属量の推計値を経年で示したものをFig. 3に示す。1980年代までは増加傾向にあるが、その後はその増加傾向は緩やかになり、近年では減少傾向である。総量は、12万t程度を推移している。80年代までは生産量の増加がそのまま回収量の増加へと反映されている。近年では、平均寿命の長い土木、建築用途からの亜鉛排出量が減少しており、また全体としての生産量も減少してきているため、社会からの亜鉛の排出量の減少傾向は続き、それにより今後も回収量は減少し続けると考えられる。用途別にみると、近年では、自動車やトラック用途からの回収量が増加傾向にあり、5割以上を占めている。その一方で、機械用途からの回収量は減少傾向にある。また、土木、建築用途からの回収量は、相対的に少ない。近年亜鉛めっき鋼板の自動車用途の需要量が増えており、それが回収量に反映されていることが考えられる。機械用途は、間接輸出が多く、国内の回収量が減少していると考えられる。土木、建築用途は、亜鉛めっきの犠牲散逸により、投入量に対して30%程度しか社会に蓄積されず、さらに回収率も低いために回収量が相対的に少なくなっていると考えられる。

犠牲散逸を含む亜鉛の各プロセスでの損失量を2005年の結果としてTable 5に示す。回収されなかった亜鉛は、合計19万t程度と推算され、その7割程度が、めっきとしての犠牲散逸と使用済みの鉄鋼製品の未回収分、すなわち鉄の循環の中で失われていると推算された。すなわち、亜鉛の循環性を高めるためには、めっきの散逸量を減じ、鉄

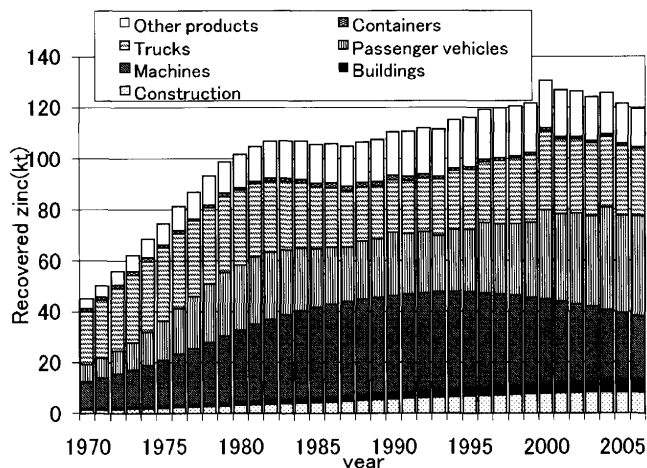


Fig. 3. Recoverd zinc in Japan.

Table 5. Loss of zinc in 2005.

	Loss(kt)	Loss(%)
Sacrifice	94	52
Unrecoverd steel products	38	21
Landfilled EAF dust	42	23
Loss in the Waelz process	8	4
Total	182	100

鋼材としての回収率を上昇させることが望まれる。また、めっきとしての犠牲散逸量のほとんどは土木用途の亜鉛であると推算された。

3・2 モデルの検証

本モデルでは多くの推算を行っているが、その推算値を検証することで、本モデルの妥当性を確認した。亜鉛のリサイクルは、Fig. 1に示すように、めっきの歩留まりから生じるドロスを回収し再生亜鉛の原料とするフローと、最終製品の解体工程からのダイカストスクラップの回収や電炉からのダストの回収と処理の後、地金の原料とするフローが存在する。そこで、それぞれのリサイクル原料としての回収量を需要量からモデルにより推算した結果と、消費された原料の量として把握されている統計値とを比較した。

3・2・1 再生亜鉛原料回収プロセス

再生亜鉛の原料となる亜鉛量は、Fig. 1に示す再生亜鉛プロセスへの投入量である。本モデルから導出される推計再生亜鉛量は、めっき工程から発生するスクラップ量の合計とした。一方で、経済産業省による統計値¹⁾として、再生亜鉛の生産量が得られるため、Fig. 4に、統計値と推計値を1980年から2006年まで比較した結果を示した。1990年前後や2000年から2005年の間でよく一致している。その他の年も、上下にズレのばらつきはあるものの、比較的統計値との一致が見られた。ただし、再生亜鉛は生産量で

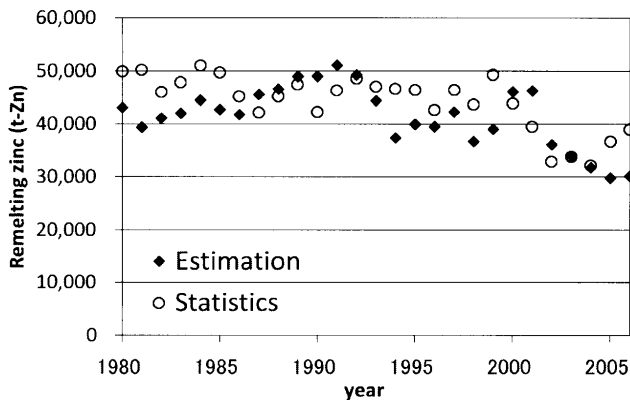


Fig. 4. Comparison between statistical and estimated remelting zinc.

あり、推算値は原料の投入量であるが、比較においては再生亜鉛の生産プロセスの歩留まりを100%と仮定している。そのため、両者に若干のずれが生じている可能性がある。

3・2・2 亜鉛地金原料回収プロセス

Fig. 1における電炉へ投入された亜鉛量と、Waelzプロセスからのアウトプットに含まれる亜鉛量、それぞれの本モデルによる推算値について、他のデータと比較することで検証した。まず、電炉へ投入された亜鉛量の検証には、電炉ダストの発生量とダスト中の亜鉛濃度から推計される亜鉛量を用いた。資料²⁷⁾から、電炉鋼1tあたりに約15kgのダストが発生することがわかっている。また、電炉ダストに含まれる亜鉛の含有率は、文献から亜鉛の日本の代表的なWaelzプロセスの操業所である曹鉄メタルと住友金属鉱山四阪工場の実績値をTable 6に示すサンプル値を得て^{28,29)}、そのうち曹鉄メタルのダスト成分値である29%を代表値として用いた。両者の値を過去10年に渡って比較した結果をFig. 5に示す。10年間に渡って数値に大きな乖離は見られなかった。次に、Waelzプロセスからのアウトプットに含まれる亜鉛量の検証方法とその結果を示す。Waelzプロセスを経て処理された亜鉛は、蒸留亜鉛の原料となる。生産統計¹⁾における「蒸留亜鉛」項目の小項目である「その他原料」が、ほぼ電炉ダストから回収処理された亜鉛である²⁴⁾ことがわかっている。そこで、本研究で推算されたWaelzプロセスのアウトプットに含まれる亜鉛量と、統計値との比較を行った。両者の値を過去10年間に渡って比較した結果をFig. 6に示す。推算値の方が僅かに大きいものの統計値と推算値に大きな乖離は見られなかった。これらから、本研究における仮定の下では、亜鉛回収量に関する推計は概ね妥当であったといえる。これらの推算では、加工スクラップに付随する亜鉛を考慮に入れておらず、また鋼材の回収率やダストの回収率を一定と置いた。従って、推計値に不確実性が含まれるため、今後の研究の発展が望まれる。

また、これらとは別の検証手段として、電炉からのアウ

Table 6. Composition of EAF Dust.

	Zinc
Sotetsu Metal sample	29%
Sumitomo Metal Mining Shisaka Works sampleA	18%
Sumitomo Metal Mining Shisaka Works sampleB	22%
Sumitomo Metal Mining Shisaka Works sampleC	21%
Sumitomo Metal Mining Shisaka Works sampleD	37%

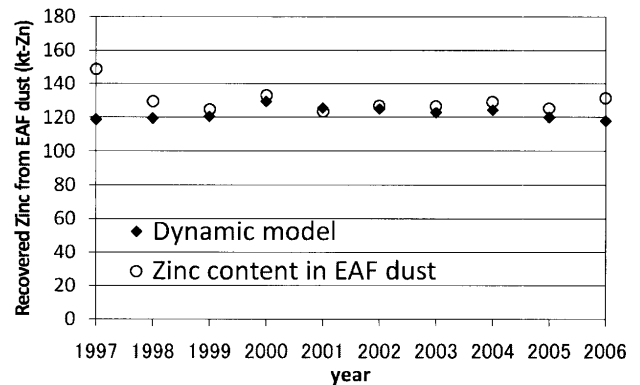


Fig. 5. Comparison between estimation in this study and another estimation.

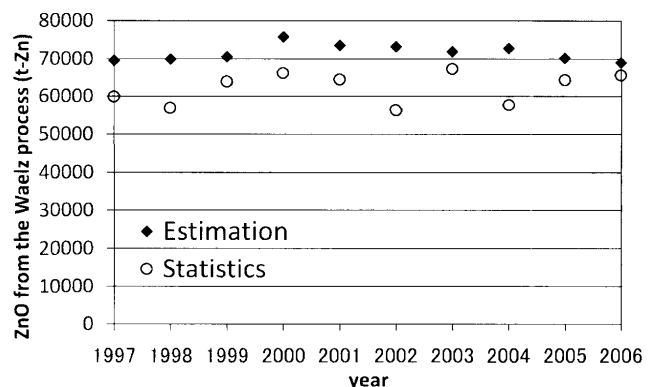


Fig. 6. Comparison between statistical and estimated zinc oxide from a Waelz process.

トプットに含まれる亜鉛量と解体工程から出るダイカストスクラップの合計と統計値¹⁾の「亜鉛の故またはくず」を比較することも考えられる。「亜鉛の故またはくず」とは、非鉄金属等需給月報記入要領³⁰⁾によると、亜鉛の含有率50%以上90%未満の亜鉛又は亜鉛合金の故・くず・滓及びこれらを流し替えたものとされている。しかし、故またはくず業者には零細企業が多く、統計範囲が全体を網羅できていない可能性があり²⁵⁾統計値そのものの誤差が大きいと考えられる。従って本研究では、この検証手段を用いなかった。

3・3 日本における亜鉛の物質フロー分析結果

最後に、本モデルの分析結果をFig. 7に示す。鉄や銅との関わりを考慮することで、亜鉛の社会への投入から、使用中、廃棄に至るまでのプロセスをモデル化し、分析することに成功した。亜鉛金属のリサイクルは、ドロス回収

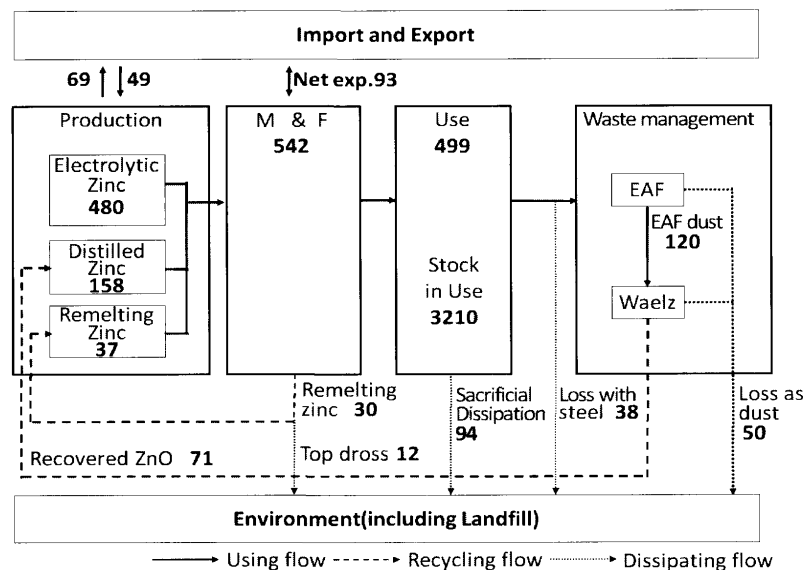


Fig. 7. Substance flow analysis of zinc in Japan in 2005. All units measured in thousand metric tons Zn per year.

する再生亜鉛の原料とするフローと、最終製品となった後、地金の原料とするフローの2種類が存在することがわかった。

4. 結論

日本国内の亜鉛の動的物質フロー分析を、鉄や銅などの他元素との関わりを考慮し構築した。その際、亜鉛の使用中的犠牲材としての散逸量についても考慮した。それにより、回収可能な亜鉛の蓄積量、排出量を算出することに成功した。その結果、亜鉛の原料として回収されなかった亜鉛は、2005年において合計19万t程度と推算され、その7割程度が鉄の循環の中で失われていると推算された。すなわち、亜鉛の循環性を高めるためには、めっきの散逸量を減じ、鉄鋼材としての回収率を上昇させることが望まれる。また、モデルの推算値について、統計値や他の推算方法と比較し検証した。その結果、両者の間に大きな乖離は見られなかった。しかしながら本研究では、加工スクラップに付随して発生した亜鉛は全て転炉へ投入されると仮定するなど、推算の前提条件について不確実性を残しているため、その点更なる検証が望まれる。

文 献

- 1) 経済産業省経済産業政策局調査統計部：鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計年報，経済産業統計協会，東京。
- 2) R.B.Gordon, T.E.Graedel, M.Bertram, K.Fuse, R.Lifset, H.Rechberger and S.Spatari: *Resour. Conserv. Recycl.*, **39** (2003), 107.
- 3) S.Spatari, M.Bertram, K.Fuse, T.E.Graedel and E.Shelov: *Resour. Conserv. Recycl.*, **39** (2003), 137.
- 4) T.E.Graedel, D.van Beers, M.Bertram, K.Fuse, R.B.Gordon, A.Gritsinin, E.M.Harper, A.Kapur, R.J.Klee, L.Memon and S.Spatari: *J. Ind. Ecol.*, **9** (2005), 67.
- 5) D.van Beers, M.Bertram, K.Fuse, S.Spatari and T.E.Graedel: *J. Master Cycles Waste Manag.*, **6** (2004), 125.
- 6) D.van Beers and T.E. Graedel: *J. Clean. Prod.*, **15** (2007), 849.
- 7) S.Spatari, M.Bertram, R.B.Gordon, K.Henderson and T.E.Graedel: *Ecol. Econ.*, **54** (2005) 37.
- 8) D.B.Muller, T.Wang, B.Dubal and T.E.Graedel: *Proc. the National Academy of Sciences of the United States of America*, **103** (2006), 16111.
- 9) I.Daigo, Y.Igarashi, Y.Matsuno and Y.Adachi: *ISIJ Int.* **47** (2007), 1064.
- 10) I.Daigo, D.Fujimaki, Y.Matsuno and Y.Adachi: *Tetsu-to-Hagané*, **91** (2005), 171.
- 11) H.Hatayama, H.Yamada, I.Daigo, Y.Matsuno and Y.Adachi: *Mater. Trans.*, **48** (2007), 2518.
- 12) C.Karlen, I.Odnevall Wallinder, D.Heijerick, C.Leygraf and C.R.Janssen: *Sci. Total Environ.*, **277** (2001), 169.
- 13) K.Yoshida, A.Suzuki and Y.Kitajima: *J. Surf. Finish. Soc. Jpn.*, **21** (1970), 430.
- 14) I.Matsushima: *J. Surf. Finish. Soc. Jpn.*, **31** (1980), 383.
- 15) Y.Togawa, K.Takahashi, T.Kanbe, S.Matsushita, K.Matsuo and T.Mishima: *J. Surf. Finish. Soc. Jpn.*, **32** (1981).
- 16) Y.Hoboh: *J. Surf. Finish. Soc. Jpn.*, **42** (1991), 160.
- 17) Web site of Japan Lead Zinc Development Association: <http://www.jlзда.gr.jp/mekki/pdf/youyuu.pdf>, Status: 2008/Apr/9
- 18) クォーターリーてつげん，社団法人日本鉄源協会編，社団法人鉄源協会，東京，**24** (2005), 19.
- 19) Y.Igarashi, E.Kakiuchi, I.Daigo, Y.Matsuno and Y.Adachi: *Tetsu-to-Hagané*, **93** (2007), 12.
- 20) 鉄鋼統計専門委員会：鉄鋼用途別受注統計月報 普通鋼，日本鉄鋼連盟，東京。
- 21) 日本鉱業協会 鉛亜鉛需要開発センター：鉛と亜鉛，東京。
- 22) 通商産業大臣官房調査統計部：機械統計年報，日本機械工業会，東京。
- 23) K.Yokota, Y.Matsuno, M.Yamashita and Y.Adachi: *Int. J. LCA*, **8** (2003), 129.
- 24) N.Narita, M.Sagisaka and A.Inaba: *Sigen-to-Sozai*, **116** (2000), 674.
- 25) 日本鉱業協会 鉛亜鉛需要開発センター：亜鉛ハンドブック，東京，(1982).
- 26) Web site of Statistics Bureau: <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?bid=000000090004&cycode=0>, States: 2008/Apr/9
- 27) 金属系材料研究開発センター：金属系二次資源有効活用部会調査報告書 環境の世紀に向けて，ゼロエミッション型製造プロセスの展望，東京，(1996), 121.
- 28) H.Sugimoto, H.Takizawa and H.Ueda: *J. MMIJ*, **123** (2007), 723.
- 29) K.Nagai, Y.Matsumoto and H.Watanabe: *J. MMIJ*, **123** (2007), 726.
- 30) 経済産業省資源エネルギー庁資源・燃料部鉱物資源課：非鉄金属等需給月報記入要領，東京，(2005), 2.