研究論文

JSD 学会誌 システムダイナミックス No.8 2009

SD による鉄鋼のマテリアルフロー解析

Material flow analysis for steel with system dynamics

重野芳人（Yoshihito Shigeno）
東北大学大学院国際文化研究科
shigeno@intcul.tohoku.ac.jp

Abstract：
Material flow analysis is widely used in the social science for analysis of environmental or economical issues because it provides a basis for the statistics in the flow of products from their resource to waste. Generally, the material flow consists of flow and stock and flow has a delay due to the life time distributions of the individual products. The present author has proposed the component of the SD model based on PBM and suggested the combined SD components is applicable to the more complex flow. In this study, an application of the combination of the SD components to steel is shown. It constitutes various products with different life time distributions and is associated with the feedback due to recycling of waste steel as scrap. The result shows the applicability of the combined SD model to the highly complex material flow.

キーワード：システムダイナミックス, SD, マテリアルフロー, 鋼, スクラップ, 寿命分布, リサイクル

要旨：マテリアルフローの解析は経済、環境問題を始めとする社会科学研究に基盤的な役割を果たすため、原料から最終製品、廃棄に至る統計的研究が広く行われている。この場合、市場から流出するフローは製品の寿命分布に基づく遅れを伴うため、解析には通常、PBM を使用する。しかし、多種多様な製品のフローが結び付き、かつリサイクルのようなフィードバックを伴う循環流を内包する複雑なフローの場合は、各製品のフローを PBM に基づくシステム・ダイナミックス(SD)を用いてコンポーネント化し、流れの形態に応じそれを組み合わせた SD モデルにより、解析の効率化を図ることが有用である。筆者はコンポーネントとなる SD モデルを提案しており、本研究はそれらを組み合わせたモデルの複雑なフローへの応用例として、鋼のマテリアルフローを取り上げた。鋼は社会的基盤的材料であり、また使用済みの鋼であるスクラップは循環利用されている。本研究では鋼を使用する製品を土木、建築、自動車、船舶、産業・電気・家庭用機械の 5 つの産業分野に区分し、それぞれに於ける社会寿命をワイブル分布で近似し寿命分布とした。モデルによる推定と統計データが一致する傾向を示すことから、複雑なマテリアルフローに対して本研究で提案する SD によるモデルの適用可能性を示唆した。

１．はじめに

筆者ら[1]はこれまで寿命分布を伴うフローに対して SD を用いたポピュレーションバランスモデル(PBM)のコンポーネント (APPENDIX1 参照)を提案した。更にこれを使用することにより、任意の寿命分布を有する耐久消費財のストックやフローを組み合わせたモデルの構成方法も示した。マテリアルフロー解析は社会科学や工学分野の研究の基礎となる重要な分野であり、特に最近では環境問題では益々その重要性が増している。SD は複雑な現象の解析をその分野の専門家以外でも容易に使用でき、複雑なシステムでも解析可能な道具として活用する点に価値があると考えられる。マテリアルフロー解析は必ずしも工業製品に限定されないが、本稿は日本国内での鋼のフローをモデルにした場合への適用例を示した。スクラップの寿命分布を考慮したマテリアルフローに関する研究はこれまでも行われてきている[2] [3] [4]が、リサイクルのフローは考慮されていない。本方法はリサイクル等の循環流を含む場合特にも容易に適用可能であるという特徴を有する。

２． 鉄鋼のマテリアルフロー

図１にはその概念図を示す。高炉から供給される銑鉄(鋼の原料となる炭素を 4 %以上含有する鉄)は転炉(BOF)で炭素濃度を 1%以下にまで減少させることにより、鋼となり、後に示す電気炉からのスクラップを原料とする鋼と併せ、図 2 に示す 17 の各産業分野に分配される(2007 年統計) [5] [6]。モデルでは以下に述べるように産業

分野を主要 5 分野に集約した。図 2 の分野のうち、その他建設用は建築と土木に均等に分配し、産業機械用、電気機械用、家庭用業務用機器のそれぞれの分野は産業・電気・家庭用機械用として 1 分野にまとめた。販売業者向は 70%が土木建築用なのでその分を土木と建築に均等に分配し、残りの 30%をその他の 3 業種に均等に分配した。輸出は鋼材の輸出に含め、最終的に土木、建築、自動車、船舶、電気・機械　に集約した。

それぞれの産業の市場に投入された鋼はそれぞれの寿命分布に従い、その市場からスクラップとして排出される。スクラップには加工スクラップと市場スクラップの 2 種類があり[2] [3]、前者は各生産現場で切りくず等となり発生するため、不純物をほとんど含まず、再度電気炉に鋼の原料として投入される。一方市場スクラップは各産業分野の廃棄物から発生するため発生量も多いため、本研究では市場スクラップを対象とし、単にスクラップと称する。我が国ではスクラップの約 90%が回収される。そのうち 32%がプレススクラップなどの形態で輸出され、残りのスクラップは電気炉で再度熔解され鋼の原料となる。ただしスクラップ由来の鋼は例えば自動車

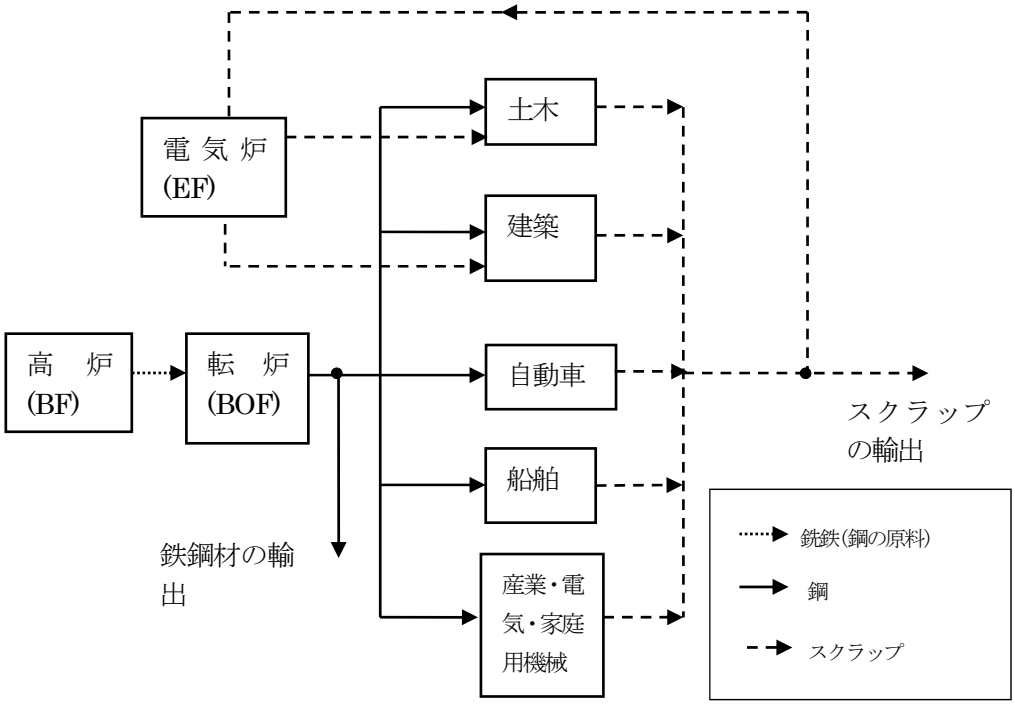

図 1　鋼のマテリアルフロー

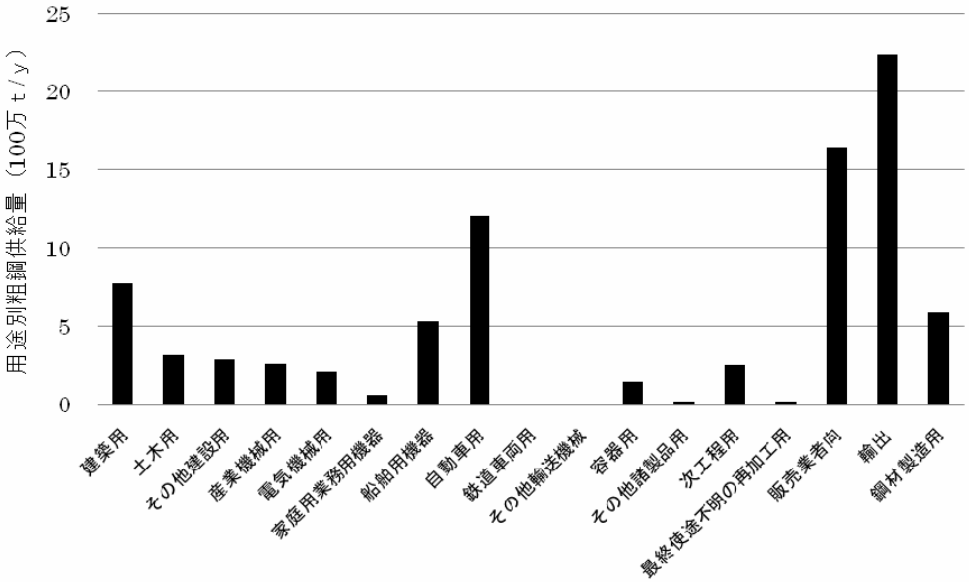

図 2　各産業（用途）別粗鋼供給量

用薄板のメッキに使用された Zn や Cu 等様々な不純物を含むため、自動車用高級鋼としては使用できず、主に土木、建築材の原料となる鋼として使用される。従って、図 1 のマテリアルフローのスクラップリサイクルの矢印(波線)は土木と建築市場にのみ向かう。このため、土木、建築分野では鋼のインプットがスクラップのアウトプットにより決定されるというフィードバックの関係がある。鉄

鋼統計で通常使用される”粗鋼”は転炉と電気炉の両方から供給される鋼の総称であり、鉄鋼の統計資料としてはこの粗鋼量が通常使用される。5 分野に絞った場合の各産業へ供給される粗鋼割合を図 3 の円グラフに示す。

3．SD モデル

図 4A に本研究で使用した SD モデルのメインのパイプダイアグラムを示す。図 4B には鉄鋼のストックを求めるパイプダイアグラムを、図 4C には電気炉へ投入するスクラップ量とスクラップの輸出量を求めるパイプダイアグラムを示す。図 4B と 4C は図 4A 中に示した場合、矢印が交錯し、図が煩雑になり過ぎるため、それぞれを独立して別の図に示した。

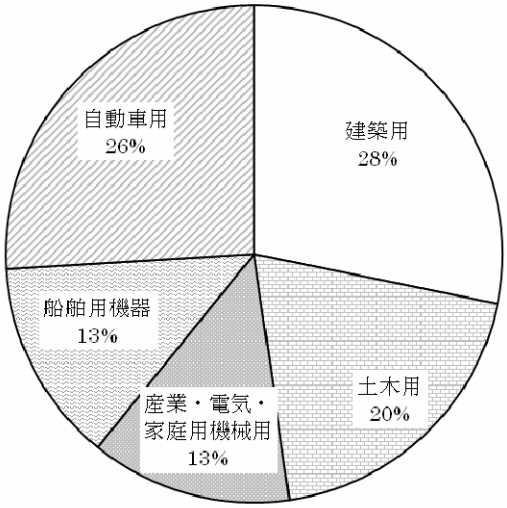

図 3　業種別粗鋼供給割合

寿命分布を伴うフローの SD モデルコンポーネントを土木、建築、自動車、船舶、電気・機械製品の 5 つの産業分野に適用し、それぞれのコンポーネントを図 4A の各フレーム中に示す。

図 1 または図 4A において電気炉へのインプットは転炉からの鋼とスクラップの合計であり、国内循環スクラップが次第に増大すれば、粗鋼の需要が一定である限り、土木と建築産業へ供給される粗鋼に占める電炉鋼の割合が次第に増大し、転炉からの鋼は減少する関係にある。この収支関係は式 1 で示され、この式から建築と土木産業それぞれへの転炉鋼の供給割合は式 2 で示される。自動車、船舶、産業・電気・家庭用機械への供給は転炉鋼のみであるが、その供給割合は x_i の変化を考慮した式 3 で示される。

$$V_B x_i + V_s \beta_i = (V_B + V_S \beta_i)\alpha_i \tag{1}$$

V_B ：転炉からの鋼の供給量

V_s ：電気炉からのスクラップの供給量

β_i ：i 産業で転炉に投入する毎年のスクラップ量の比

α_i ：図 3 に示す各産業別粗鋼供給量の比

添え字の i は次の各産業を示す。A:建築　C：土木：Au　V:船舶　M：産業・電気・家電

ただし、x_i ：建築と土木産業への毎年の転炉鋼の供給割合であり、$i = A, C$

$$x_i = \alpha_i + (\alpha_i - 1)V_S \beta_i / V_B \tag{2}$$

x_j ：自動車、船舶、産業・電気・仮定産業への毎年の転炉鋼の供給割合

$$x_j = \alpha_j / (x_A + x_C + \alpha_{Au} + \alpha_V + \alpha_M) \tag{3}$$

$j = Au, V, M$

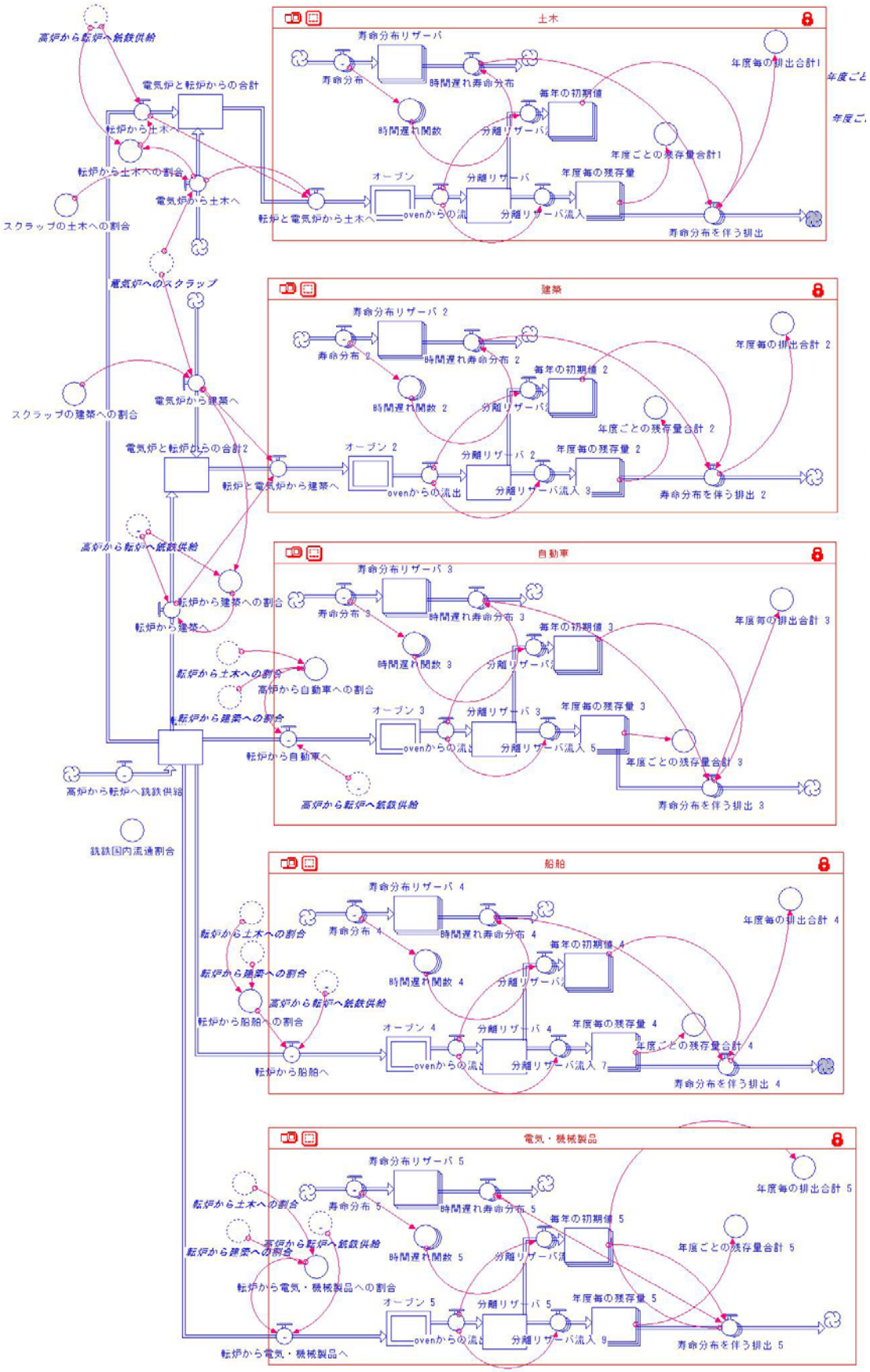

図 4A 鋼の各産業分野への分配を示すパイプダイアグラム

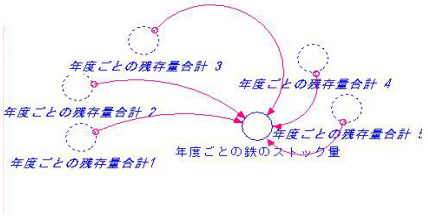

図 4B　鉄鋼のストックを求めるパイプダイアグラム

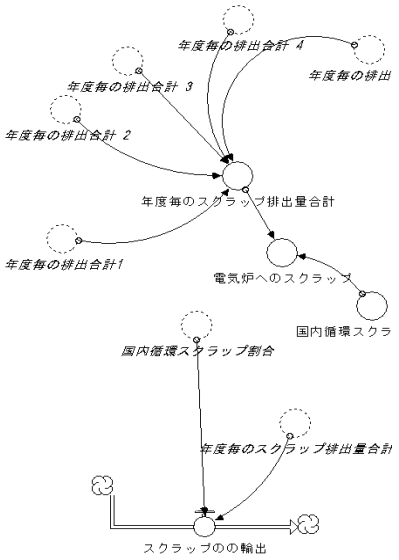

図 4C　電気炉へ挿入するスクラップ量とスクラップ量の輸出を求めるパイプダイアグラム

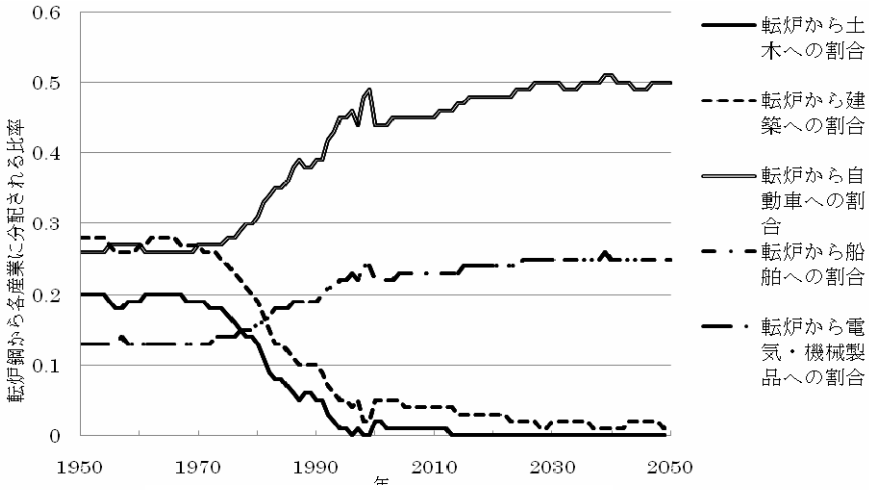

図 5　転炉鋼から各産業に分配される比率

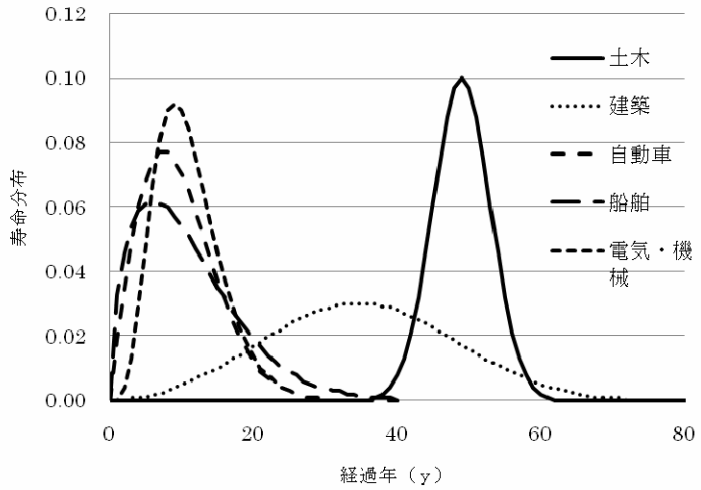

図 6　各産業別耐久消費材の寿命分布

実際に x_i と x_j の変化は図 4A の”転炉から各業種への割合”と表記されている変数として計算され、それを実際に示したのが図 5 である。これに示すように、2000 年には土木、建築の場合、転炉鋼の割合が非常に少なく、原料はほとんどが電気炉からのスクラップを原料としていることがわかる。逆にそれ以外の産業への転炉鋼の割合は急激に増大する。

また各コンポーネントで計算に使用された各産業の製品や建造物の寿命分布を一括して図 6 に示した この図で土木は道路等も含む土木建設物の一般を示し[7]、必ずしも鋼が主体の鉄橋等ではないが、これらのインフラも社会的寿命は同じと仮定した。建築物は鉄筋コンクリート住宅[8]、自動車は排気量 1500cc 以上の一般乗用車[7]を代表としてそれぞれの寿命分布のデーターを使用した。また船舶は鋼鉄船だけではなく、一般的な船舶[7]で代用しため、木造船等も含んでいる。電気・機械・家庭用機械は寿命が余りに多種多様であり、ここではエアコンの寿命分布[9]で代用した。当然ながら土木建造

物の寿命が最大であり、建築して 50 年程度でピークがあり、次に建築物が 30 年ぐらいでピークとなる。それ以外はおおよそ 10 年以内にピークがあり、製品により寿命分布は大きく異なる。

４．計算結果および考察

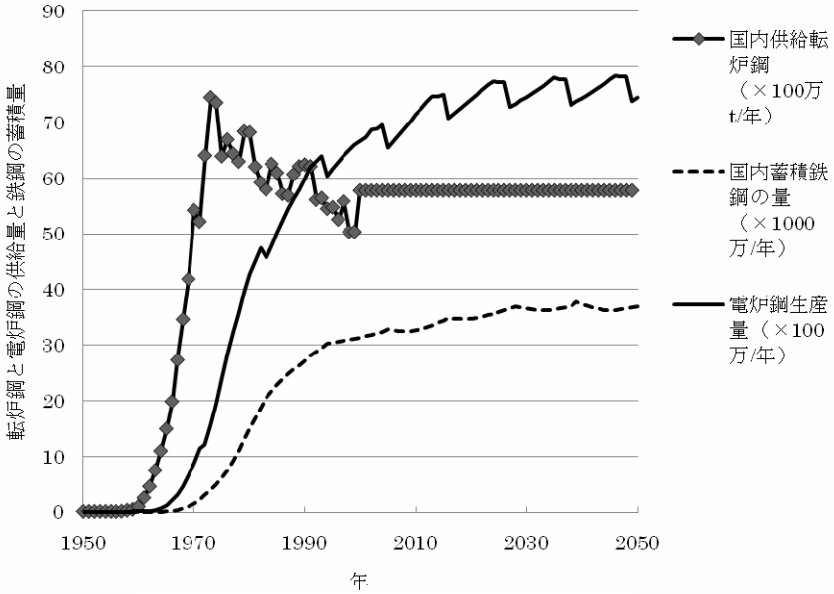

図７　転炉鋼と電気炉鋼の生産量と国内蓄積量

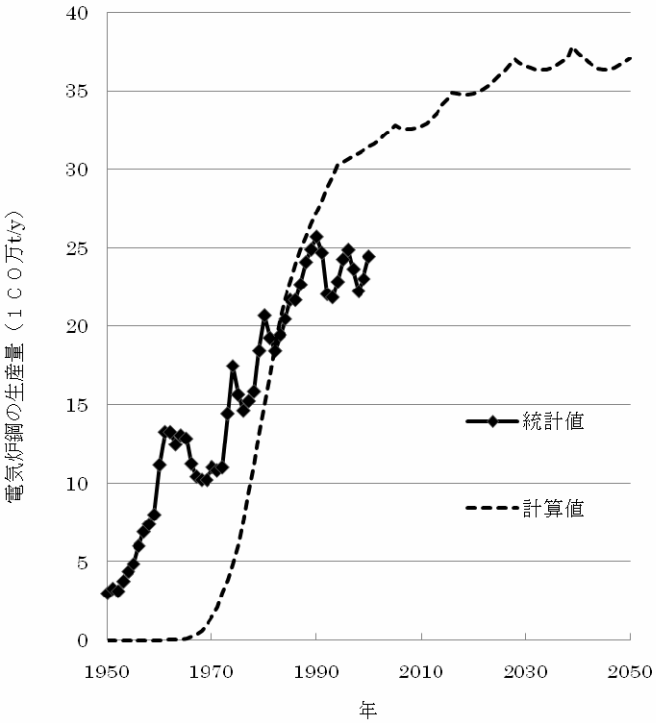

図８　電気炉鋼生産量の統計値と計算値の比較

図 7 には国内供給転炉鋼の統計データと電気炉鋼の生産量および国内蓄積鉄鋼量の計算結果を示す。

国内流通の転炉鋼の量は 1970 年をピークとして、年々減少しており、その一方国内への蓄積する鉄鋼ストックの量は現在も増加している。将来予想をするために 2000 年の転炉鋼の生産量が 2050 年まで一定と仮定した。その場合鉄鋼ストックは 2050 年頃にはほぼ一定になると予想される。一方スクラップを原料とする電炉鋼の生産量は 2000 年まで急激に増大するがその後増加のスピードは減少し、やはり 2050 頃には一定となる。これはスクラップも全てが国内を永遠に循環するわけではなく、海外に輸出される量が年々増大することも一因である。

電気炉鋼の生産量は本モデルでの寿命分布を考慮した各産業のアウトプットの合計からスクラップの輸出を除いた量であり、モデル計算結果が反映される。そのため統計値とモデル計算結果の比較はモデルの妥当性を検討するための判断基準になりうる。図 8 には電気炉鋼の統計値と本モデルによる計算結果の比較を示している。ただし 1950 年以前の転炉鋼の生産量データはなく、この図には示していないがおよそ 1970 年までは転炉と平炉が併行して稼働しており、さらに本来 1949 年以前の第二次世界大戦以前に建設された土木建造物もスクラップとして徐々に排出されるため、電気炉統計データにはそれらが反映されている。一方モデルにはそれらは考慮していないため 1970 以前は統計量のほうが計算値よりも大きいが、両者は次第に接近し、1980～1990 年では両者は比較的よく一致する。このことから、本モデルは多くの仮定や簡略化をしているにもかかわらず、ある程度の計算精度を有しており、本モデルが実際の複雑なマテリアルフローへ適用される可能性を明らかにした。

５．結論

マテリアルフローは市場から流出する際、各製品の寿命分布に基づく遅れを伴う。多種多様な製品のフローが結び付き、さらにリサイクルのようなフィードバックを伴う循環流を内包する複雑なフローの場合は、各製品のフローをシステム・ダイナミックス(SD)を用いてコンポーネント化したものを、流れの形態に応じてそれを組み合わせ、解析の効率化を図ることが有用であると考えられる。本論文では鋼のマテリアルフローを例にとり解析を行い以下の結論を得た。

1. 筆者らはコンポーネントとなる SD モデルをこれまで提案しており、本論文ではその方法を鋼のマテリアルフローへ適用した場合を示した。鋼のフローは複雑であり、鋼を使用する製品（耐久消費財）の社会寿命は各産業毎に大きく異なる。また使用済みの鋼はスクラップとして循環利用される。本研究では鋼を使用する産業を土木、建築、自動車、船舶、電気機械製品の 5 つに区分集約し、解析した。

2. スクラップはそれを構成する鋼製品の社会寿命により決定される寿命分布に基づき市場から排出されるが、土木や建築分野ではスクラップが原料となり再度使用される。即ちこのようなフィードバックを有する製品の計算結果を統計値と比較することによりモデルの適用性が検証される。本研究結果は統計値と一致する傾向があり、本モデルが実際の複雑なマテリアルフローへ適用される可能性が明らかとなった。

本研究では SD を使用することによりマテリアルフローの柔軟かつ効率的な解析方法を提案した。本方法は寿命分布やリサイクルといった循環を伴うマテリアルフローの時間変化を評価することが可能なため、特に循環型社会に於ける種々の廃棄物のリサイクルに伴う経済コストや CO_2 排出量の時間変化の計算、あるいはリサイクル回数の増大に伴う不純物元素の蓄積といった複雑な問題にも容易に展開が可能である。

参考文献

[1]重野芳人，秦燕春：「寿命分布を伴うストックとフローへのシステムダイナミックスモデルの適用」，システムダイナミックス，No.7， pp.49-62， 2008

[2]林誠一，王城わかな，友田陽：「国内発生鉄スクラップの素性」， 鉄と鋼，vol.91，No1，pp.141-146，2005

[3]林誠一，王城わかな，友田陽：「電気炉における鉄スクラップ配合と生産鋼材の関係」， 鉄と鋼，vol.91，No1，pp.147-149，2005

[4]中島謙一，王城わかな，藤巻大輔，醍醐市朗：「我が国におけるスクラップフローの解析」， 鉄と鋼，vol.91，No1，pp.150-153，2005

[5]長期普通鋼用途別受注統計　輸出入統計/時系列：日刊鉄鋼新聞
http://www.japanmetaldaily.com/statistics/stdusageord/details/index.html

[6]社団法人日本鉄鋼連盟　用途別受注統計　http://www.jisf.or.jp/data/yoto/index.html

[7]内閣府　国民経済計算調査会議　第５回資本ストック検討委員会　OECD マニュアルに従った資本財の生存パターン等の暫定試算　http://www.esri.cao.go.jp/jp/sna/070627/stockgiji.html

[8]森口祐一等編　橋本征二分担執筆：「耐久財起源の循環資源の適正管理に関する研究」，平成 13～15 年度廃棄物処理等科学研究研究報告書，pp.54-73，2004

[9]足立芳寛，松野泰也，醍醐市朗，滝口博明：『環境システム工学』，東京大学出版会，p.165，2004

[10]Richmond, B. M.:『システム思考入門　Ｉ』，カットシステム，2004

Appendix

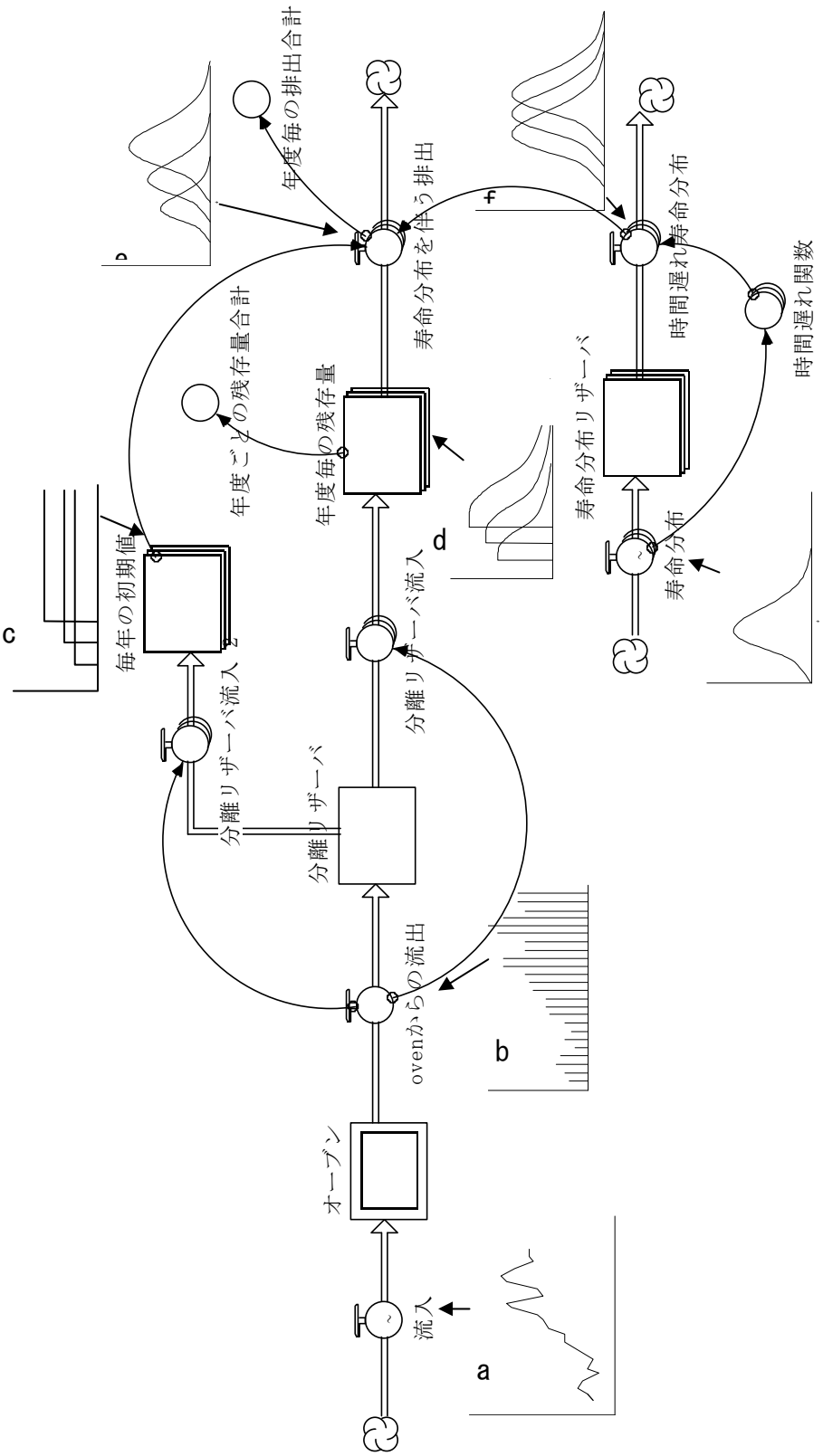

図 9 ポピュレーションバランスのアルゴリズムを記述するパイプダイアグラム
汎用 SD ソフト Stella/iThink を使用 [10]