物の循環を含むサプライチェーンのシミュレーションによる
多面的評価*村山 長^{*1}, 畠中伸也^{*2}, 橋本雅文^{*3}
江口 透^{*4}, 大場史憲^{*4}

Simulation-based Evaluation of Forward and Reverse Supply Chain

Takeshi MURAYAMA^{*5}, Shinya HATAKENAKA, Masafumi HASHIMOTO,
Toru EGUCHI and Fuminori OBA^{*5} Faculty of Dentistry, Hiroshima University,
1-2-3 Kasumi, Minami-ku, Hiroshima-shi, Hiroshima, 734-8553 Japan

This paper proposes a simulation-based approach to the evaluation of a forward and reverse supply chain which includes dismantlers and recyclers as well as manufacturers and distributors. This approach evaluates a supply chain from two viewpoints: environmental load; and economical aspect (cost, benefit, and profitability) of every company's business included in the supply chain. To evaluate it, the approach models and simulates the material and money flows between the components (such as companies and consumers) of the supply chain. The simulation reveals: whether each of the companies' businesses is profitable; how heavy the environmental load is; whether the capacity of each company or factory is enough; and how much capacity of a factory is required if it is planned to be built and its capacity has not been determined.

Key Words: Supply Chain, Life Cycle Engineering, Life Cycle Design, Recycling, Reuse, Life Cycle Assessment, Life Cycle Costing, Simulation, Cost/Benefit Analysis

1. 緒 論

現在の国際的なメガコンペティションの時代に対処するため、資材調達から生産・物流・販売に至るサプライチェーンを国境を越えて最適に設計・管理することが求められている。これまで、この最適性の評価基準としてサプライチェーンによって生み出される価値の最大化や費用の最小化が用いられることが多かったが、最近では、ISO14000、環境法、企業や消費者の環境に対する意識の高まりなどから、サプライチェーン全体が環境に与える影響を考慮に入れる必要性が出てきた。さらに、最近では、takeback 法や循環型社会の必要性から、資材調達から販売に至る順工程だけでなく、製品を使用した後のリサイクルやリユースといった逆工程も含めたサプライチェーン（以下では、統合サプライチェーンと呼ぶ）を対象に、最適な設計・管理を行なう必要も認識されている。

本論文では、このような統合サプライチェーンを

設計するための評価方法を提案する。この方法では、統合サプライチェーンにわたる物と金銭の流れをシミュレーションすると共に、物の流れによって引き起こされる環境負荷（環境に与える影響）を調べることににより、統合サプライチェーンを経済性と環境負荷の両面から評価する。また、本論文では、応用例として、この方法を製品の分解工場の配置計画に適用した例も示す。

なお、関連する研究として、一階層^①のサプライチェーンのシミュレーションの研究がある。しかし、この研究では、本研究で扱う逆工程やサプライチェーンが及ぼす環境負荷を考えていない。また、梅田ら^②、下村ら^③や高田ら^④のライフサイクルシミュレーションの研究も関連研究として挙げるができる。また、Jiang と Shu らのリマニュファクチャリングの研究^⑤もライフサイクルシミュレーションの研究と考えることができる。これらの研究では、製品のライフサイクルに渡る物の流れをシミュレーションしているが、本研究のようなサプライチェーンやそれに含まれる企業を評価するものではない。また、筆者らもこれまでライフサイクルシミュレーションの研究^{⑥⑦}を行ってきたが、本研究は筆者らのこれまでの研究の拡張であ

* 原稿受付 2005 年 3 月 17 日。

^{*1} 正員、広島大学歯学部 (〒734-8553 広島市南区霞 1-2-3)。^{*2} 広島大学大学院工学研究科 [現: 松下電器産業(株)]。^{*3} 正員、同志社大学工学部 (〒610-0321 京田辺市多々羅都谷 1-3)。^{*4} 正員、広島大学工学研究科 (〒739-8527 広島市鏡山 1-4 1)。

E-mail: murayatk@hiroshima-u.ac.jp

Fig. 1 Supply chain model

る。これまでの筆者らの研究との大きな違いはサプライチェーンの各構成要素（企業や消費者など）の地理上の位置を考慮に入れた点である。これによる効果については、2.2節で説明する。

2. サプライチェーンモデル

2.1 モデルの概要

シミュレーションに用いるサプライチェーンのモデルは、図1のように、サプライチェーンの構成要素（企業、工場、製品の消費地、最終処分場など）ごとにモジュール化されており、モデルには構成要素内および構成要素間の物の流れ（Material flow）と金銭の流れ（Money flow）、およびこれらの流れの管理（Flow control）がカラーペトリネットにより表現されている。この表現方法は既報の方法^{4,5}と同じである。以下では、その概要を述べる。

図1のように、モデルはプレース、トークン、トランジションから構成され、これらの持つ意味はMaterial flow, Money flow, Flow controlによってそれぞれ異なる。

Material flow では、プレースは物の状態を表し、プレース内のトークンはその状態に物（部品や製品など）が存在することを表している。トランジションは「加工する」などの状態間の遷移を表し、遷移に要する時間（加工時間など）と発火規則（状態遷移を起こす条件など）がこれに記述される。状態が遷移することを発火するといひ、発火が起るとトークンが移動する。たとえば、図1でトランジション t_1 が発火すると、このトランジションの右側のプレースにあるトークンがトランジションの左側のプレースに移動する。

これは、そのトークンを表す物が右側のプレースの示す状態から左側のプレースの示す状態に遷移したことを表す。このような発火を次々と起こすことにより、サプライチェーンにわたる物の流れをシミュレーションできる。

Money flow では、プレースは収支に関わるデータの種類（収入データ、支出データ）を表し、トークンにはその金額が記述される。トランジションは「支払う」などの金銭データの処理を表す。サプライチェーンの構成要素間の金銭の受け渡しは、金額が記述されたトークンの移動によりシミュレーションできる。

Flow control では、プレースは在庫管理などのために必要なデータの種類を表し、トークンにはそのデータの内容（在庫量や納入量など）が記述される。トランジションは「発注する」などのデータ処理を表す。サプライチェーンの構成要素間の物の流れやそれに伴う金銭の受け渡しは、この「発注する」などのトランジションの発火に伴って起こる。

2.2 追加情報

今回、新たに以下の情報もモデルで扱うようにした。

- 1) サプライチェーンの各構成要素の地理上の位置
- 2) サプライチェーンの構成要素のキャパシティ（たとえば、工場の場合、月当たりの最大処理能力）
- 3) 各地域における労働コスト、地代などのコスト
- 4) 製品の消費地の人口

以上のうち、1)の位置を考慮に入れることにより、地域環境問題（各地域での廃棄物の量など）を地球環境問題（地球温暖化など）と区別し、地域環境問題についてはサプライチェーンの各構成要素がそれが存在する地域でどの程度影響を及ぼすかを把握できるようになる。さらに、サプライチェーンの構成要素間の距離をこの位置情報を基に算出でき、また、その距離を用いて物の輸送に要する時間とコストも計算できるようになる。

また、2)の各構成要素のキャパシティを考慮に入れてシミュレーションすることにより、各構成要素でそのキャパシティを超える処理要求が起らないかが分かる。なお、ある工場を新規に建設するような場合は、予めそのキャパシティを設定するのではなく、シミュレーションによりその工場の適切なキャパシティを決定することになる。これについては、4章でその例を示す。

Fig. 2 Modeling by the building block method

Fig. 3 An example of window when an operator selects some modules

また、3)により、地域によるコストの相違を考慮できる。さらに、4)の製品の消費地の人口を扱うことにより、都市の人口による製品の需要量の相違を考慮に入れることができる。現在のところ人口が100万人以上の主要都市でのみ製品の需要があるものとしている。

3. モデリングとシミュレーション

3.1 モデリング

モデリング方法は既報の方法⁷⁻¹¹⁾とほぼ同じであり、図2のように、ビルディングブロック法によりモデリングを行なう。すなわち、予めサプライチェーンの構成要素の種類(素材製造工場、部品製造工場、製品製造工場、流通会社、製品の消費地、集荷場、分解

工場、リサイクル工場、最終処分場)ごとにモジュールの候補を用意しておき、その中からモジュールを選択し結合することにより、モデルを構築する。

既報の方法と異なる点は、各構成要素の種類に対して複数の候補を選択できる点である。たとえば、ある部品の製造工場として複数の工場を選択できる。この場合、選択した複数の候補に部品の発注量を配分する必要があるが、ここでは、オペレータが各候補に対する配分割合を決めることにした。

また、今回、新たに、モデリング時に図3に示すようなウインドウを表示するようにした。これにより、オペレータは、モジュールの各候補の位置、キャパシティ、扱っている商品の単価、などの情報を参照して、モジュールを選択できる。この図で、左側の黒い部分が選択されたモジュールを表す。モジュールの選択が終わると、オペレータが各モジュールを接続し、モデルを完成させる。また、各モジュールの地理上の位置を基に、サプライチェーンの構成要素間の輸送距離が自動的に計算される。ただし、ここでは構成要素間の直線距離を輸送距離とした。さらに、この輸送距離を用いて、輸送時間(=輸送距離×単位距離当たりの輸送時間)、1回当たりの輸送コスト(=輸送距離×単位距離当たりの輸送コスト)が計算され、輸送のモジュールにこれらの情報が追加される。

3.2 シミュレーション

シミュレーション方法も既報の方法⁷⁻¹¹⁾と基本的には同じであり、物や金銭を表すトークン(図1の黒丸)をモデル上で次々と動かすことにより物と金銭の流れをシミュレーションする。

このシミュレーション中に、物の流れに伴って発生する環境負荷も計算するが、この方法も既報^{8,10)}の方法と同じである。これは、モデルのMaterial flow部でトランジションが発火し、物を表すトークンが移動するごとに、その移動を表す状態遷移に伴う環境負荷をLCA(Life Cycle Assessment)の手法により計算するものである。図4に、部品の加工を例にした、シミュレーション中の計算の概要を示す。トランジション(図4では部品の加工を表すMachining)が発火すると、トランジションに記述されたデータ(加工の種類、加工時間など、トランジションによって異なる)と分析用データベースをもとに、発火(物の状態遷移)に伴う環境への排出物の量と投入資源の量が計算される。この計算は、トランジションが発火する(図4では部品が加工される)たびに行われるが、その結果はCO₂やNO_xなどの項目別に積算され、一定時間ごと

Fig. 4 LCA during Simulation

に、その時間までの積算値が項目別に結果ファイルに記録される。そしてこの結果ファイルを基に環境負荷を計算する。本研究では、環境負荷として Ecoindicator point¹³⁾を計算している。

また、サプライチェーンを経済面で評価するため、シミュレーション中に以下に示す売上、支出の計算がモジュールごとに既報⁹⁾の方法で行われる。

(1) 物の売上に伴う売上と支出：モジュール間で物の受け渡しがある毎に、そのモジュールが得る売上や支払う費用が計算される。

(2) 部品などの処理費用：製造などの処理に関連するトランジション（図4の machining など）が発火すると、処理量と単位処理コストから処理費用が算出される。

(3) 固定費用：1ヶ月おきに1ヶ月分の固定費用（人件費を含む）がモジュールの支出額に追加される。

(4) 材料などの保管費：倉庫を表すプレースを持つ保管量のデータをもとに月ごとの保管費が計算される。

これらの売上、費用はモジュールごとに記録され、これらを基にそのモジュールの利益が計算される。

以上のように、シミュレーション方法は既報の方法とほとんど同じであるが、既報の方法と異なる点は、都市ごとに人口の相違を考慮に入れて製品の需要を与える点である。その方法を以下に示す。まず、シミュレーションを始める前に、オペレータが各期（たとえば一ヶ月）ごとに販売率 λ （単位期間当たりの製品の販売個数）を設定する。次に各都市 i ($i=1,2,\dots,N$)の人口 P を基に、各都市 i における販売率 λ_i を次式で決定する。

$$\lambda_i = \frac{\lambda \cdot P_i}{\sum_{i=1}^N P_i} \quad (1)$$

シミュレーション中は、各都市 i ごとにその都市の販売率 λ_i に基づいて指数乱数（確率密度関数は $\lambda_i \exp(-\lambda_i t)$ ）を発生させ、それをその都市において製品が購入される時間間隔¹²⁾とする。

Fig. 5 Transition of accumulated profit (=sales - costs) in a disassembly company

Fig. 6 Transition of environmental load

3.3 シミュレーションの出力

シミュレーションの結果として、以下の情報を出力できる。

(1) サプライチェーンに含まれる各会社の売上、コスト、利益（＝売上－コスト）、およびそれらの時間に伴う変化。コストは3.2節で示した(1)～(4)の項目毎に出力できる。

(2) 環境負荷 (Ecoindicator point)、項目（図4のCO₂、NO_xや図7のBOD（水質汚染）など）毎の環境負荷、およびこれらの工程（輸送、部品製造など）毎の内訳。さらに、これらの時間に伴う変化。

(3) 県別、地方別の地域環境問題に対する環境負荷および項目毎の環境負荷。

(4) 各会社で処理される部品や製品の数（単位期間毎に出力）。

図5、6、7に出力結果の例を示す。ただし、この結果は、製造会社、製品の消費地（人口100万人以上の都市）、分解会社、リサイクル会社、および流通会社からなるサプライチェーンを対象にシミュレーションを行なった結果であり、このサプライチェーンの製

Fig. 8 Factories included in the supply chain

造会社、分解会社、リサイクル会社の地理上の位置は図8のとおりである。図5は(1)のうちの利益の時間変化の出力例である。ただし、これは利益の積算の変化を示しており、この図のような利益変化をグラフ化することにより、“分解会社は10ヶ月頃から黒字に転じる”と言ったようなことが把握できるようになる。また、図6は(2)のうちの環境負荷の時間変化の出力例である。なお、この図で環境負荷が変動しているのは、製品の製造が連続的に行なわれるのではなく、在庫がある値を下回った時にある量だけ製造するためである。図6のような出力により、“1年半頃からリサイクルの効果により環境負荷が下がる”といったようなことも把握できるようになる。なお、これは、1年半頃から使用済みになる製品が増加し、それをリサイクルすることにより得られる再生材を活用することにより、資源の消費が減少したためである。また、本手法ではサプライチェーンの構成要素の地理上の位置を考慮に入れているため、地域環境問題を地球環境問題と区別

Fig. 9 Sites proposed for disassembly factories

して出力でき、図7のように、地域環境問題（図7ではBOD）については各構成要素が地域でどの程度影響を及ぼすかを把握できる。

4. 分解工場の配置計画への応用

ここではサプライチェーンの構成要素のうち分解工場以外は決定済みとし、新たに分解工場を建設する場合を対象にシミュレーションを行なった。分解工場以外の構成要素は3.3節の例と同じに設定した。今、

これらのうちのいくつかの場所に建設するものとする。ここでは、以下の3つの場合に対してサプライチェーンのシミュレーションを行なった。

Case1: 分解工場をBの場所のみに建設する場合

Case2: 分解工場をBおよびCに建設する場合

Case3: 分解工場をA、B、Cの3ヶ所に建設する場合。

また、各都市で排出される使用済み製品はその都市に最も近い分解工場に運搬されるものとした。

以上の3つのCaseに対してそれぞれモデルを作成し、物と金銭の流れのシミュレーションを行なった。その結果、各Caseにおける各分解工場に要求されるキャパシティは表1～3のようになった。このキャパシティは、分解工場で各期間に処理される使用済み製品数（3.3節で示した出力(4)により得られる数）の最大値である。また、このキャパシティを基に建設コストと地代を計算した。その結果も表1～3に示している。ただし、単位面積当たりの地代は建設候補地によ

Table 1 The capacity, construction cost, and land rent for Case1

Case1	Site B	Total
Capacity(maximum quantity/month)	1,695	1,695
Construction cost(yen)	9,780,778	9,780,778
Land rent(yen/month)	199,519	199,519

Table 2 The capacities, construction costs, and land rents for Case2

Case2	Site B	Site C	Total
Capacity(maximum quantity/month)	719	976	1,695
Construction cost(yen)	5,877,333	6,903,445	12,780,778
Land rent(yen/month)	101,933	127,586	229,519

Table 3 The capacities, construction costs, and land rents for Case3

Case3	Site A	Site B	Site C	Total
Capacity(maximum quantity/month)	218	501	976	1,695
Construction cost(yen)	3,874,778	5,002,555	6,903,445	15,780,778
Land rent(yen/month)	51,869	80,064	127,586	259,519

Table 4 Total balance in every case after 3 years (yen)

	Case1	Case2	Case3
Sales through 3 years	87,347,260	91,200,440	91,010,460
Depreciation for 3 years	2,934,233	3,834,233	4,734,233
Land rent through 3 years	7,182,684	8,262,684	9,342,684
Transportation cost through 3 years	10,907,770	5,064,230	3,444,140
Fixed cost including personnel cost through 3 years	28,001,221	32,243,015	36,012,450
Storage cost through 3 years	8,999,512	6,615,099	3,068,580
Other costs through 3 years	23,006,131	23,016,982	22,414,326
Total balance after 3 years	6,315,709	12,164,197	11,994,047

り異なるように設定し、土地はレンタルを想定した。これらの表より建設コストと地代だけを見た場合、分解工場の数が多いほど費用がかかることが分かる。

分解工場の3年間の操業で得られる売上と必要なコストをシミュレーションにより求めた結果を表4に示す。この表4で、減価償却費 (Depreciation) と地代は表1～3をもとに、また、それ以外の項目は3.3節で示した出力(1)により得られる。なお、減価償却費は、設備の耐用年数を10年とし、建設コストをもと

に定額法により計算した。また、この表でその他のコスト (Other costs) は、使用済み製品の引き取り費用と処理費用の合計である。この表で、“経理担当者を各工場に置く必要があるため工場の数が増えると人件費が増える”ことや、“工場数が少ないと処理待ちの使用済み製品が増え、使用済み製品の保管のために借用する倉庫数が増える”などの理由から、人件費を含む固定費や保管費用がCaseにより異なってくる。また、この表より、先の建設コストや地代とは逆に、分解工場が多い方が消費地からの輸送距離が短くなるため輸送コストが低くなることが分かる。全てのコストを売上から差し引くと、3年間の操業ではCase2が経済面では最適であることが表4より分かる。

また、図10に各Caseにおける利益の積算の変化を示す。この図から、いずれのCaseも1年2ヶ月頃から黒字に転じることが分かる。また、ほとんどの期間でCase2が他のCaseより良いことが分かる。

図11に各Caseのサプライチェーンが及ぼす環境負荷 (Ecoindicator point) の工程毎の内訳 (3.3節で示した出力(2)を元に作成したグラフ) を示す。この図より、Case1が他のケースより環境負荷が大きいことが分かる。これは分解工場の数が少ないため、他のケー

Fig. 10 Transition of accumulated profit (=sales - costs) in a disassembly company

Fig. 11 Environmental load given by the supply chains

Fig. 12 Transition of environment load

Fig. 13 Regional environmental load at each site

スより消費地から分解工場までの輸送距離が長くなり、それに伴う環境負荷が大きくなったためである。なお、ここでは製品の組立と分解は手作業を想定したため、それらに伴う環境負荷は0となっている。

図12に時間に伴う環境負荷の変化を示す。3.3節で述べた理由によりかなりの変動はあるが、ほとんどの期間でCase1の環境負荷が他のCaseのものより大きいことが分かる。

また、図13に、分解工場の建設候補地における地域環境問題に対する環境負荷（3.3節で示した出力③を元に作成したグラフ）を示す。このような地域環境問題に対する結果は、新規に工場を建設する場合、地域住民に対する地域環境への影響の説明のために用いることができると思われる。なお、図13で示した環境負荷は図11の環境負荷のうち分解工場が関係する部分を抜き出し、それを地域ごとに分けたものである。地域の条例などによりこの上限が規定されているような場合は、そのことを考慮に入れて図13をもとに工場の建設候補地を選択する必要がある。しかし、今回はこのような規定がないものとする、図11から

ら判断して、Case1の環境負荷が他より大きく、Case2とCase3の差は非常に小さいことから、Case2またはCase3が環境負荷の観点からは適切と判断できる。さらに、先に示した経済性も考慮に入れると、Case2が適切であるといえる。

なお、図10、12に示した利益や環境負荷の時間変化は、今回の分解工場の配置の決定には特に影響を与えないが、このような計画を行う人が時間変化を把握できることは3.3節で述べたように有用であると思われる。

5. 結 論

本報では、統合サプライチェーンを適切に設計するための評価方法を提案した。この方法は、統合サプライチェーンにわたる物と金銭の流れをシミュレーションすると共に、物の流れに伴う環境負荷を調べることにより、統合サプライチェーンを経済性と環境負荷の両面から評価するものである。また、本報では、この方法を応用することにより、製品の分解工場の配置とキャパシティを決定できることも示した。

なお、本手法では経済性と環境負荷を別々に評価したが、今後はこれらの評価を統合する指標を検討する必要がある。

参考文献

- (1) Ikai, Y., Goossenaerts, J., and Komoda, N., A simulation method for evaluating product family supply chain, *Proceedings of 7th International Conference on Emergent Technology and Factory Automation*, (1999), pp.1437-1441.
- (2) Nonomura, A., Tomiyama, T., and Umeda, Y., Life Cycle Simulation for Inverse Manufacturing, *Proceedings of 6th International Seminar on Life Cycle Engineering*, (1999), pp. 304-313.
- (3) Tanaka, G., Sakai, N., and Shimomura, Y., Development of Pluggable LCA System, *Proceedings of EcoDesign2003*, (2003), pp.687-691.
- (4) Takata, S., Kimura, T., Life Cycle Simulation System for Life Cycle Process Planning, *CIRP Annals* Vol.52, No.1, (2003), pp.37-40.
- (5) Jiang, Z., Shu, L., and Benhabib, B., Steady-State Reliability Analysis of Repairable Systems Subject to System Modifications, *Transactions of the ASME Journal of Mechanical Design*, Vol.121, No.4, (1999), pp.614-621.
- (6) Jiang, Z., Shu, L., and Benhabib, B., Reliability Analysis of Non-Constant-Size Part Populations in Design for Remanufacture,

Transactions of the ASME Journal of Mechanical Design, Vol.122, No.2, (2000), pp.172-178.

(7) Murayama, T., Hatakenaka, S., Namito, M., and Shu, L., Modeling and Simulation of Products' Life Cycles using Petri Nets, *International Journal of Japan Society for Precision Engineering*, Vol.33, No.4, (1999), pp. 373-375.

(8) Hatakenaka, S., Murayama, T., Narutaki, N., and Oba, F., Simulation-Based LCA, *Proceedings of The 4th International Conference on EcoBalance*, (2000), pp.157-160.

(9) Hatakenaka, S., Murayama, T., Narutaki, N., and Oba, F., Cost-benefit Analysis of Recycling by Life-cycle Simulation, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 67, No. 660, (2001), pp.338-344.

(10) Murayama, T., Hatakenaka, S., Narutaki, N., and Oba, F., Life Cycle Profitability Analysis and LCA by Simulating Material and Money Flows, *Proceedings of 2001 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment (ISEE2001)*, (2001), pp. 139-144.

(11) Murayama, T., Hatakenaka, S., Kaneko, M., Narutaki, N., and Oba, F., Simulation-based Evaluation of Supply Chains involving Reverse Logistics, *Proceedings of Design & Systems Conference '01*, No.01-35(2001-11), pp. 259-262.

(12) Sadamichi, H., Management Science, (1989), p.140, Ohmsha.

(13) <http://www.pre.nl/eeco-indicator99/>