

仮想エネルギーの概念を用いた物質フロー分析

Material Flow Analysis Using a Concept of Virtual Energy

山本博巳^{*}・矢田尚^{**}・中村正和^{***}・山地憲治^{****}
Hiromi Yamamoto Takashi Yada Masakazu Nakamura Kenji Yamaji

(原稿受付日 2009 年 4 月 23 日, 受理日 2009 年 12 月 9 日)

Material flow analysis (MFA) is a method for analyzing the relationship between economies and environmental issues. MFA is usually on the basis of weight unit. However, materials have a strong relationship with energy. Therefore, we intend to improve MFA by introducing the viewpoint of energy. In this study we define a concept of virtual energy of each material. Using the concept of the virtual energy, we evaluate the virtual energy intensity of fuels, major materials (such as steel, aluminum, copper, plastics, rubber, and glass), and automobiles that represent complicated goods. We calculate the virtual energy intensity of not only new goods but also wastes and used goods such as steel scrap and used cars. We also evaluated the virtual energy flow of the major goods including the wastes and the used goods between Japan and abroad. We consider the concept of the virtual energy is a powerful tool for energy flow analysis including wastes and used goods.

1. はじめに

温室効果ガスによる地球温暖化のような地球規模のものから、廃棄物排出による埋め立て処分場の不足のような地域規模のものまで、現在生じている環境問題の多くは、大量生産・大量消費・大量廃棄型の社会経済活動のあり方と結びついている。

このような大量の物質フローに特徴付けられた環境問題を解決するためには、従来のような対症療法的な方法では十分ではなく、自然活動と人間活動の間、あるいは人間活動の内部で生じる物質フローを、俯瞰（ふかん）的に把握する手法が必要となる。

産業エコロジーと呼ばれる学問領域は、人類と環境の関係を改善し、循環型の社会システムを実現することを目指すために、産業活動に伴う物質やエネルギーのフロー、それらのフローが環境に及ぼす作用、社会や政治経済が資源の利用に及ぼす影響を扱う¹⁾。産業エコロジーの中の主要分野である物質フロー分析(MFA: Material Flow Analysis)は、原材料やエネルギー資源、生産プロセスで生じる副産物、さらには廃棄物や汚染物質までも含めた物質全般を対象とし、対象システムに投入された物質、そこから排出された物質、さらに内部で循環利用された物質すべてを体系的に捉える

* 東京大学新領域創成科学研究科先端エネルギー工学専攻、財団法人電力中央研究所社会経済研究所
〒277-8583 千葉県柏市柏の葉 5-1-5

E-mail : yamamoto@yamaji.t.u-tokyo.ac.jp

**国際石油開発帝石株式会社国内事業本部、元東京大学工学系研究科電気系工学専攻
〒945-5411 新潟県長岡市来迎寺原 2943

E-mail : takashi.yada@inpex.co.jp

*** 株式会社日鉄技術情報センター調査研究事業部
108-0074 東京都港区高輪 3-25-23

E-mail : nakamuram@jatis.jp

****東京大学工学系研究科電気系工学専攻
〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

E-mail : yamaji@yamaji.t.u-tokyo.ac.jp

²⁾ MFA の例として、共通の指標を用いて各国の自然環境から経済活動への資源投入フロー比較した分析や^{3) 4)}、再生資源の大輸入国である中国と輸出国である日本に注目しながらアジアにおける再生資源の物質フローを定量化した分析が知られている⁵⁾⁶⁾。

物質フロー分析(MFA)の多くは重量で評価するが、重量以外の視点からの MFA の例として、仮想投入水量という考え方が知られている⁷⁾。仮想投入水量とは、仮に食料や工業製品を消費国(輸入国)側で仮に作ったら必要となる水資源量のことである。

本研究の目的は、物質フロー分析(MFA)にエネルギーの視点を組み合わせて、MFA を拡張することである。エネルギーと物質フローの間には強い関連性がある。石油などの化石資源だけでなく、バイオマス残渣や廃プラスチックなどの廃棄物も、エネルギー供給資源となる。一方で、鉄やアルミニウムなどの金属資源のように、熱などのエネルギーを供給可能だと認識されにくい物質もある。しかし、そういった物質についても、生産・加工・消費といった物質フローに伴う投入エネルギーを考えることができる。

本研究においては、仮想水投入水量の概念⁷⁾に触発された「仮想エネルギー」という概念を次節で定義する。わが国の金属および自動車などの貿易フローをエネルギーの視点からまとめる。

2. 仮想エネルギーによる物質フロー分析

2.1 仮想エネルギーの定義

本論文では、「仮想エネルギー」を以下のように定義する。

a) (新品(バージン品)の仮想エネルギー) あるプロセスにおいて、投入物質の持つ仮想エネルギーとプロセスの投入エネルギーの合計が、生産物質の持つ仮想エネルギーと等

しいと定義する(図1)。ただし、自然状態(採掘前の段階)における一次資源の仮想エネルギーは、酸化反応で発生するエネルギー量(高位発熱量)とする。自然状態におけるエネルギー資源以外の一次鉱石資源の仮想エネルギーは原則的にゼロとする。エネルギー資源以外にも、食料・木材などの一次資源の仮想エネルギーは正の値となる。

b) (リサイクルする廃棄品の仮想エネルギー) 定義 a) をリサイクルプロセスへ拡張する。まず、新品と再生品の品質が同じであれば同一の仮想エネルギーを持つと仮定する。新品と品質が異なる再生品は、再生品を新品の品質にするために必要な仮想エネルギーの差があると仮定する。次に、生産物質の持つ仮想エネルギーから、プロセスの投入エネルギーを差し引いた値を、投入物質(廃棄品)の持つ仮想エネルギーと定義する(2.3節参照)。

さらに、物質の仮想エネルギーは、仮想内部エネルギーと仮想外部エネルギーから構成されるとし、以下のように定義した。

c) 仮想内部エネルギーとは、対象物質と対象物質の安定酸化物との間の化学エンタルピーの差と定義する。仮想外部エネルギーとは、仮想エネルギーと仮想内部エネルギーの差と定義する。

d) (リサイクルしない廃棄品の仮想エネルギー) リサイクルしない廃棄品の仮想エネルギーは、廃棄品の仮想内部エネルギーから廃棄プロセスの投入エネルギーを差し引いた値と定義する。

e) (中古品の仮想エネルギー) さらに定義を拡張して、中古品の仮想エネルギーを、新品の仮想エネルギーと廃棄品の仮想エネルギーの間にある値と定義する(2.4節参照)。

なお、定義 a) は、ライフサイクルエネルギー分析における内包エネルギー(embodied energy)の定義とほぼ同じである⁸⁾。定義 b) から e) の拡張により、中古品や廃棄品の仮想エネルギーを評価することに本研究の独自性がある。リサイクルプロセスに対して、ライフサイクルエネルギー分析ではそのエネルギー投入量を計算するが⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾¹³⁾、仮想エネルギー分析では新品と再生品の品質が同じであれば同一の仮想エネルギーを持つとの仮定より、再生品の仮想エネルギーからプロセスエネルギー投入量を引いたものを廃棄品の仮想エネルギーとする。仮想エネルギーは定義 a) から e) の定義から組み立てた、自然状態(採掘前)の一次鉱物資源の仮想エネルギーをゼロ基準としたときの、仮想的(バーチャル)なエネルギーであり、投入エネルギーの総量を求めるライフサイクルエネルギー分析とは概念が異なる。

そして、「仮想エネルギー原単位」を、単位重量(あるいはエネルギー資源の単位仮想内部エネルギー)あたりの仮想エネルギーと定義する。

また、仮想エネルギーはフローにのみ着目した概念で、

投入物に製造設備などは含まない。本論文では、エネルギー資源としては化石燃料だけを対象としたが、仮想エネルギーの概念を核燃料等の化学燃料以外にも拡張可能である。

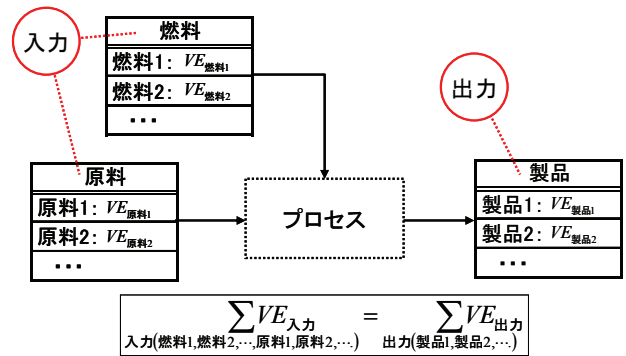


図1 仮想エネルギー量の設定方法 概念図^{a)}

a) VE_i : 物質 i の持つ仮想エネルギー量 (i : 燃料・原料・製品)。

2.2 燃料と電力の仮想エネルギー原単位

本研究で設定した、化石燃料と主な石油化学製品の原単位を図2にまとめる。データの制約のため、LPGの原単位は石油精製を経て生産されるLPGの原単位を用いている。また、電力の仮想エネルギー原単位は、図2及び文献¹⁴⁾の事業用発電部門における火力燃料消費と火力発電電力量を用いて、9.65MJ/kWhと設定した。

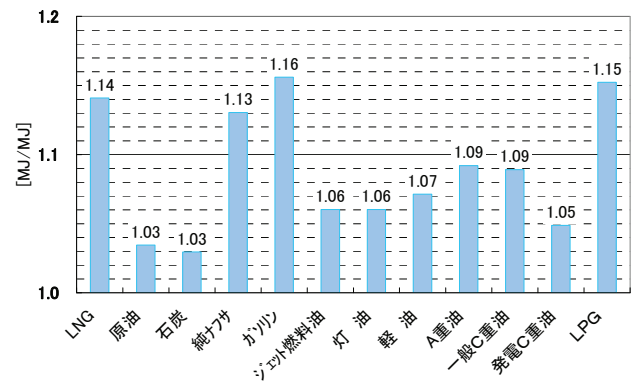


図2 主な燃料の仮想エネルギー原単位[MJ/MJ]^{a)}

a) 文献¹⁴⁾等のデータより著者らが作成。仮想内部エネルギーは1.0、それ以外が仮想外部エネルギー。

2.3 素材の仮想エネルギー原単位

ここでの素材とは、鉄などの金属製品やプラスチックなどの化学工業製品を指す。本節では、素材として鉄、アルミ、銅、プラスチック、ゴム、ガラスを取り上げる。

新品の素材の原単位は、その製造プロセスにおける原料や燃料の消費量から設定する。また、廃棄された素材については、その再利用プロセスを考慮して原単位を設定する。

製造プロセスとしては、各素材で代表的な方法を選択する。しかし、廃棄品の再利用プロセスには様々な方法が存在し、熱回収やカスケードリサイクルなど、マテリアルリサイクル以外の方法も数多く実施されている。本研究では、

金属についてはマテリアルリサイクル、金属以外の素材については熱回収を想定する。リサイクルしない廃棄品の仮想エネルギー原単位は、本研究では熱回収プロセスへの投入エネルギーを考慮しないので、仮想内部エネルギー原単位と同一となる(2.1節定義d)参照)。

(1) 鉄

鉄鋼生産プロセスには高炉一貫型と電炉型の2種類を考える(図3)。高炉一貫型では、鉄鉱石を輸入し、高炉で還元して銑鉄にし、転炉で精錬して粗鋼(転炉鋼)にする。電炉型では、廃棄品である鉄屑を電炉で精錬して粗鋼(電炉鋼)にする。粗鋼は、圧延工程を経て棒や板などの鉄鋼材となる。

鉄鋼関連品の仮想エネルギー原単位の設定方法の概要は以下の通りである(図3)。

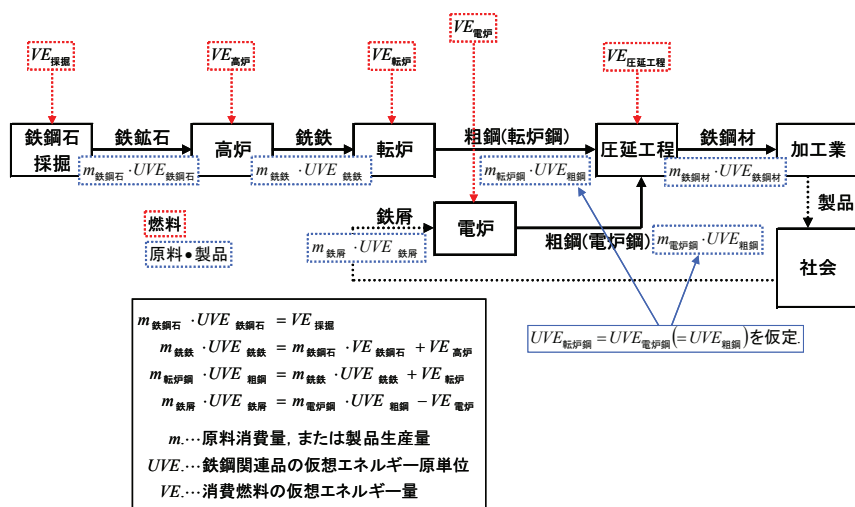


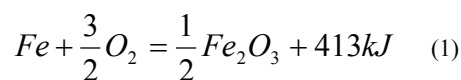
図3 鉄鋼関連品の仮想エネルギー原単位の設定方法の概要

まず鉄鉱石の採掘と輸送のプロセスにおける入出力インベントリ¹⁵⁾より、鉄鉱石の仮想エネルギー原単位を0.88MJ/kg(0.02TOE/t)と設定する。続いて、高炉一貫型プロセスの入出力を考慮して、銑鉄・粗鋼・鉄鋼材の仮想エネルギー原単位を設定する。粗鋼(電炉鋼)と粗鋼(転炉鋼)の仮想エネルギー原単位を同一とする。ここでの電炉鋼は、銅など不純物の含有率の低い鉄屑を使用した高品質の電炉鋼を想定する。転炉鋼と電炉鋼は、製品の成分・性能が同じであれば、加工工程において同等に取り扱われ、市場においても区別されない。銅など不純物の含有率の高い鉄屑のリサイクルを含めた、鉄鋼関連品の品質を考慮した分析は今後の課題とする。2.1節定義b)の廃棄品の仮想エネルギーの定義に従い、粗鋼の原単位から電炉型プロセスにおけるエネルギー消費量を差し引いて、鉄屑の仮想エネルギー原単位を設定する。本分析では、電炉型プロセスのエネルギー消費量は、電炉におけるエネルギー消費量だけを含み、鉄屑の回収や輸送プロセスのエネルギー消費量を含まない。各プロセスでの入出力データとして、燃料消費量には文献¹⁶⁾のデータを、原料消費量と製品生産量には文献¹⁷⁾内の2004年度データを使用する。ただし、鉄鋼生産プロセスで

発生する副生ガス(コークス炉ガスなど)は、プロセスをさかのぼり、燃料(2.2節参照)に換算して原単位を設定した(付録参照)。

製鉄プロセスにおける入出力インベントリの例として、高炉における例を表1に示す。燃料消費量は、高位発熱量表示で1151.7PJ、仮想エネルギー表示で1334.0PJとなる。仮想エネルギーは入力と出力がバランスする(図1参照)ので、式(2)が成立し、銑鉄の原単位は17.4MJ/kg(0.42TOE/t)と設定される(図4)。

また、仮想内部エネルギー原単位を鉄の酸化反応の熱化学方程式(1)から設定する。換算すると0.18 TOE/tになる。



(2) アルミニウム

アルミニウム生産プロセスには、鉱石からの生産と屑からの生産の2種類がある(図5)。鉱石からの生産では、ボーキサイトが精錬されアルミナとなり、さらに電気分解を経て地金となる。地金は圧延工程を経て鋼材となる。一方、屑からの生産では、廃棄品であるアルミニウム屑が溶解工程を経て地金となる。

鉄の場合と同様にして、鉱石からの生産における各プロセスでの入出力から、ボーキサイト・アルミナ・地金・半製品の原単位を設定した。さらに、溶解工程でのエネルギー消費量分を地金から差し引くことでアルミニウム屑の原単位を設定した。ただし、日本ではボーキサイトから新地金を生産することは少なく、日本で消費される地金の殆どは輸入新地金と再生地金が占めている。このため、地金の原単位の設定では輸入新地金を想定した。各プロセスでの燃料消費量、原料消費量、製品生産量の入出力データとして文献^{18),19)}を使用した。

表1 高炉における入出力インベントリと銑鉄の原単位

原料	入力		出力 製品 銑鉄
	燃料 (高位発熱量)	仮想エネルギー	
鉄鋼石	(PJ)	PJ	Mton
120.6	1151.7	1334.0	82.9

$$120.6 \times UVE_{鉄鋼石} + 1334.0 = 82.9 \times UVE_{銑鉄} \quad (2)$$

$$UVE_{鉄鋼石} = 0.88$$

UVE_i : 物質*i*の原単位。ここでの単位は[PJ/Mton]。

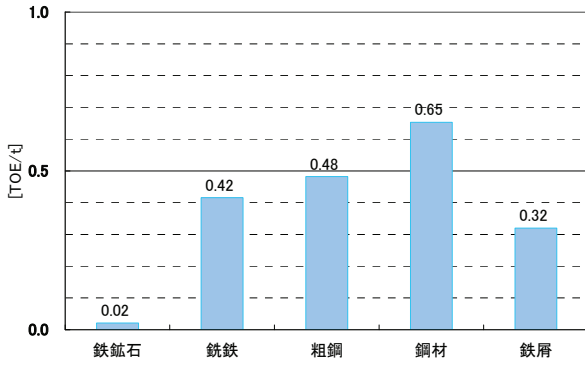


図 4 鉄鋼関連品の仮想エネルギー原単位(TOE/t)^{a)}

a) 鉄鉱石の仮想内部エネルギーはゼロ，式(1)より鉄鉱石以外の仮想内部エネルギー原単位は0.18TOE/tになる．ただし1TOE = 41.86GJで換算．

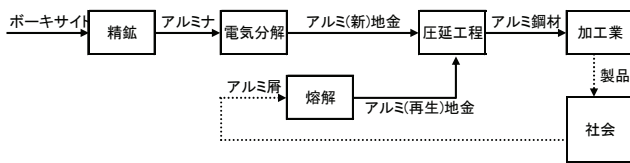


図 5 アルミニウム生産プロセスのフロー

図 6 にアルミニウム関連品の仮想エネルギー原単位をまとめた．アルミ関連品では，鋼材でも屑でも，鉄関連品に比べてかなり大きな原単位となっている．

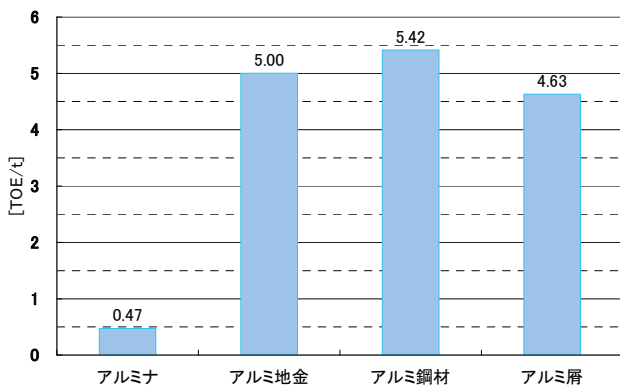


図 6 アルミニウム関連品の仮想エネルギー原単位(TOE/t)^{a)}

a) アルミナの仮想内部エネルギーはゼロ，Al と Al_2O_3 の酸化反応式よりアルミナ以外の仮想内部エネルギー原単位は0.74TOE/tになる．

(3) 銅

日本では，乾式精錬と呼ばれる方法で電気銅が生産されている．まず，原料となる銅精鉱(主成分 $CuFeS_2$)をマット(主成分 Cu_2S-FeS)に転換し，転炉で精製して粗銅にする．次に，粗銅の成分を精製炉で成分調整して陽極銅とし，電気分解により電気銅を生産する．さらに，電気銅は加工されて銅線や伸銅品として使用される(図 7)．

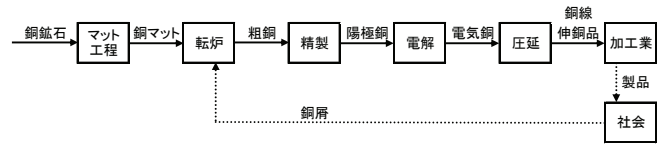


図 7 銅生産プロセスの概要

銅生産には，鉄鋼生産における電炉のように，銅屑を主な原料として使用する工程が存在しない．銅屑はその品位によって消費される工程が変わり，圧延工程で電気銅と同じように使用されることもある．したがって，品位によって，銅屑の仮想エネルギー原単位は大きく変化する．今回は，次節で廃棄自動車を扱うことから，銅屑としては廃棄自動車から回収されるような品位の低いものを想定し，その仮想エネルギー原単位を銅マットと同じと想定した．

入出力データとしては，銅鉱石の輸入プロセス(採掘～輸送)については文献¹⁵⁾を，国内での電気銅生産プロセス(転炉～電解)については文献²⁰⁾を用いた．なお，文献²⁰⁾では銅マットや粗銅の生産プロセスで併産される硫酸にも入力量を配分しているが，ここでは全てを銅マットと粗銅に振り分けた．データの制約のため，今回は圧延工程の投入エネルギーについては考慮せず，銅線・伸銅品の仮想エネルギー原単位は電気銅と同じとした．分析結果を図 8 にまとめた．

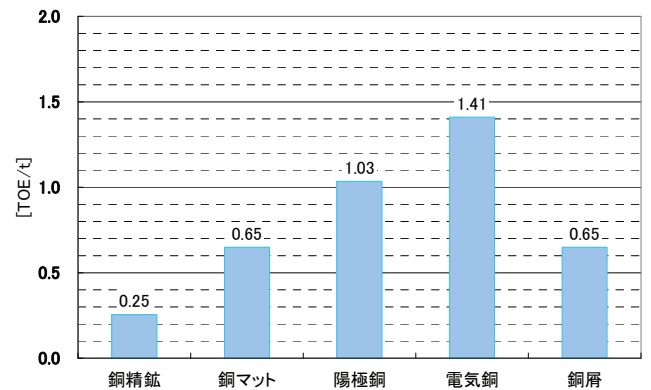


図 8 銅関連品の仮想エネルギー原単位(TOE/t)^{a)}

a) 基準となる銅精鉱($CuFeS_2$)と銅の間の反応熱のデータが得られなかったため，銅関連品の仮想内部エネルギー原単位は表示しない．

(4) プラスチック

本項では，汎用プラスチック(ポリプロピレン，高密度ポリエチレン，低密度ポリエチレン，ボトル用 PET，ポリスチレン，ポリ塩化ビニル)を対象とし，そのペレットの仮想エネルギー原単位を設定した．

プラスチック新品については，生産プロセスにおける燃料と原料の消費量から設定した¹⁵⁾(図 9)．また，廃棄品については，前述のように熱回収を想定して，その高位発熱量

から設定した。樹脂屑(廃プラスチック)は様々な品目の混合物として回収されると考え、各品目の高位発熱量ではなく、樹脂屑の平均発熱量 8700kcal/kg(36.4MJ/kg)²¹⁾を樹脂屑の仮想エネルギー原単位とした(図9)。

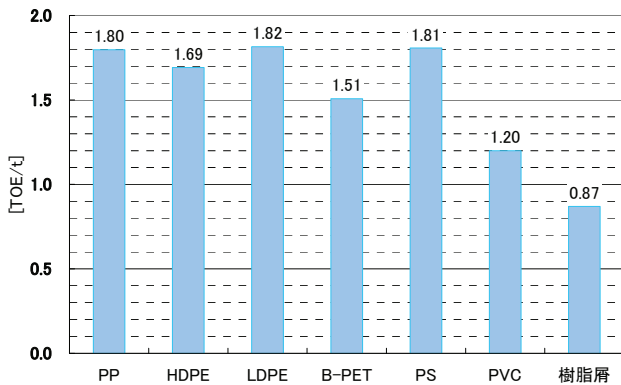


図9 プラスチックの仮想エネルギー原単位(TOE/t)^{a)}

a) プラスチック平均の仮想内部エネルギーは、樹脂屑(廃プラスチック)の仮想エネルギー(0.87 TOE/t)と等しい。

(5) その他の素材(ゴム, ガラス)

ゴムとガラスについても仮想エネルギー原単位を設定した。ゴムとしては、スチレン・ブタジエンゴム(SBR)を、ガラスについては板ガラスを、それぞれ想定した。文献¹⁵⁾のインベントリを用いて、仮想エネルギー原単位は、ゴムで76.2 MJ/kg(1.82TOE/t)、板ガラスで18.8MJ/kg(0.45TOE/t)とした。

ゴム屑は熱回収を想定し、仮想エネルギー原単位は20.9MJ/kg(0.50TOE/t)となる。また、板ガラスは熱回収することは無いため、仮想エネルギー原単位はゼロとした。

2.4 自動車の仮想エネルギー原単位

素材を複合した商品の代表として、自動車を対象に仮想エネルギー原単位を求めた。

自動車の製造プロセスは図10に示すように、部品を製造する外製工程と車体を組み立てる内製工程からなる。これら2つの工程へ投入される素材と燃料の仮想エネルギー量の和が、新車の仮想エネルギー量となる。しかし、自動車は数万点の部品からなる非常に複雑な製品であるため、部品1つ1つを詳しく調べ、それらを積み上げることで自動車の原単位を設定することは難しい。そこで本研究では、素材投入については自動車構成材料で設定し、燃料投入については文献²²⁾に倣って各種統計データから推定した。

(1)乗用車

対象とする乗用車は、文献²³⁾で取り上げられているもので、1992年の車名別新車販売状況と自動車諸元表から平均的普通乗用車として設定されている。その仕様は4ドア、セダンタイプ、ガソリンエンジン、FF(フロントエンジン・

フロントドライブ)、AT(オートマチックトランスミッション)で、総重量は1190kgである。自動車製造における物質フローを図11に示す。対象車1台あたりの(A+B+C+D)を知ることが目的となる。素材としては、前節で仮想エネルギー原単位を求めた、鉄、アルミニウム、銅、プラスチック、ゴム、ガラスを対象とした。

各フローのデータの取得状況を表2に示す。素材分(A+B)については文献²³⁾の対象車1台あたりの構成素材量を、内製工程燃料分(D)については文献¹⁵⁾の対象車1台あたりの燃料消費量を用いた。実際の完成車の素材量と、その生産に必要な素材量(図11のA+B)は、自動車内生および自動車外生工程における不良品や加工ロスなどの工程ロスのため一致しないと考えられる。本研究では、工程ロスに関するデータが得られなかったため、工程ロス分を考慮していない。外製工程燃料分(C)については、外製工程が多数の企業からなるプロセスであるため、まとまったデータがなく、本論文で業界全体の燃料消費量を推計した(後述)。そして、(業界全体の内製工程の燃料消費量) : (業界全体の外製工程での燃料消費量) = (一台あたりの内製工程の燃料消費量) : (一台あたりの外製工程の燃料消費量) の仮定を置くことで、対象車1台あたりの外製工程燃料分(C)を推定した。

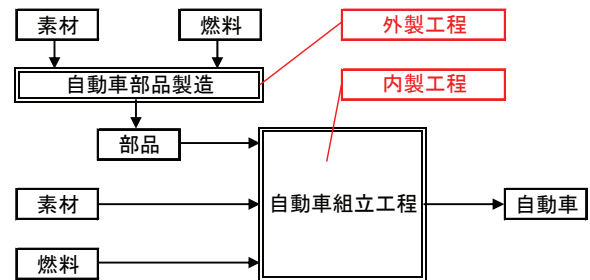


図10 自動車の製造プロセス概要

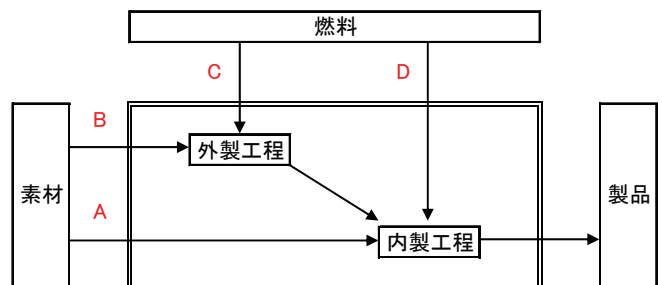


図11 自動車の製造プロセスにおける物質フロー

対象車の素材別構成重量とその仮想エネルギー量を表3に示す。プラスチック類は全てポリプロピレンとして、ゴム類は全てSBR(スチレンブタジエンゴム)として仮想エネルギー量を計上した。

内製工程における対象車1台あたりの各種燃料消費量とそれらの仮想エネルギー量を表4に示す。外製工程における燃料消費量の推定結果を表5に示す。表5ではまず、文

献²⁴⁾から自動車製造に関連する業界を抽出した。今回は、「自動車・同付属品製造業(#311)」、「自動車タイヤ・チューブ製造業(#231)」、「板ガラス製造業(#2512)」、「蓄電池製造業(#3091)」の4産業を選択した。次に、各業界に寄与率を設定して、各業界の自動車製造に関わる分の燃料消費量を推定した。寄与率とは、各業界の燃料消費量のうちどれぐらいが自動車部品製造に使用されたかを表す値であり、「自動車・同付属品製造業(#311)」と「自動車タイヤ・チューブ製造業(#231)」では全ての製品が自動車向けであるとして100%、「板ガラス製造業(#2512)」では文献²²⁾より40%、「蓄電池製造業(#3091)」は電池業界の自動車向け比率(金額ベース)より13%とした²⁵⁾。さらに、各業界の自動車製造に関わる分の燃料消費量と、内製工程業界の燃料消費量との比率を用いて、対象車1台あたりの各業界燃料消費量を推定した。内製工程における燃料消費量については、1台あたりは表4の値を用い、業界全体分は自工会13社の合計燃料消費量(1990年実績)から省エネルギー²⁶⁾を考慮して設定した。

整理すると、乗用車の仮想エネルギー量は、素材分で50.0GJ(1.19TOE)、内製工程燃料分で12.5GJ(0.30TOE)、外製工程燃料分で21.4GJ(0.51TOE)、合計で83.8GJ(2.00TOE)となる。およそ1トンの乗用車は、石油2トンに相当する仮想エネルギー量を持つことが分かる。

表2 自動車の製造における入力データの状況^{注)}

	1台分		業界全体分	
	データ状況	文献	データ状況	文献
A+B	○	(a)	×	-
C	×	-	△	(c)
D	○	(b)	○	(d)

注)文献の対応は(a):文献²³⁾、(b):文献¹⁵⁾、(c):文献²⁴⁾、(d):文献²²⁾である。○はデータあり、×はデータなし、△はまとまったデータが無いいため本論文中で推計を示す。

(2) その他の車種

バス、トラックについても、最も一般的だと考えられる車両を想定し、仮想エネルギー量を設定した。

合計すると、トラックの仮想エネルギー量は258.2GJ(6.17TOE)、バスの仮想エネルギー量は174.3GJ(4.16TOE)である(図12)。

(3)新車のまとめ

(1)と(2)で得られた各車種の仮想エネルギー原単位を図12にまとめる。構成素材の約7割を占める鉄の仮想エネルギー量が大きい。外製工程は中小工場の部品製造プロセスが主体であり、大工場の組み立てプロセス主体の内製工程に比べて、消費エネルギーが大きいことが想像される。外製工程の燃料消費量は、詳細なデータが無いため、その精

度は他の値に比べてかなり低いことに留意が必要である。

表3 対象車1台あたりの素材別構成重量と仮想エネルギー量^{a)}

素材	構成素材の重量		仮想エネルギー原単位 MJ/kg	構成素材の仮想エネルギー量	
	kg	%-w		GJ	%-J
高炉鉄	12.8	1.1	17.4	0.2	0.4
鉄屑	76.8	6.5	13.4	1.0	2.1
鉄鋼製品	737.2	62.0	27.3	20.1	40.2
アルミ地金	72.6	6.1	209.4	15.2	30.4
電気銅	17.6	1.5	59.0	1.0	2.1
鉛地金	7.5	0.6	24.3	0.2	0.4
亜鉛地金	6.4	0.5	39.6	0.3	0.5
PUR	15.9	1.3	75.2	1.2	2.4
PVC	17.0	1.4	75.2	1.3	2.6
PE	8.7	0.7	75.2	0.7	1.3
ABS	7.4	0.6	75.2	0.6	1.1
PP	44.8	3.8	75.2	3.4	6.7
PA	7.8	0.7	75.2	0.6	1.2
その他熱可塑性樹脂	0.0	0.0	75.2	0.0	0.0
その他熱硬化性樹脂	0.0	0.0	75.2	0.0	0.0
塗料・接着剤	16.5	1.4	0.0	0.0	0.0
ゴム類	47.5	4.0	76.2	3.6	7.2
ガラス類	36.7	3.1	18.8	0.7	1.4
繊維類	29.1	2.4	0.0	0.0	0.0
オイル類	13.7	1.2	0.0	0.0	0.0
水系液類	13.4	1.1	0.0	0.0	0.0
代替フロン	0.7	0.1	0.0	0.0	0.0
木材	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
不明	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
合計	1190.0	100.0	-	50.0	100.0

a) 文献²³⁾および本論文中の推計から作成。

表4 内製工程における、対象車1台あたりの各種燃料消費量その仮想エネルギー量^{a)}

品目	固有単位	原単位		内製工程燃料消費量			
		発熱量 MJ/固有単位	仮想エネルギー MJ/MJ	1037kg乗用車1台あたり		1190kg乗用車1台あたり	
				固有単位	発熱量換算(GJ)	発熱量換算(GJ)	仮想エネルギー換算(GJ)
一般炭	kg	26.6	1.03	25.82	0.69	0.79	0.81
コークス	kg	30.1	1.21	3.04	0.09	0.10	0.13
ガソリン	l	34.6	1.16	2.03	0.07	0.08	0.09
灯油	l	36.7	1.06	6.80	0.25	0.29	0.30
軽油	l	38.2	1.07	0.01	0.00	0.00	0.00
A重油	l	39.1	1.09	34.16	1.34	1.53	1.67
LPG	kg	50.2	1.15	17.92	0.90	1.03	1.19
都市ガス	Nm3	41.1	1.14	14.96	0.61	0.71	0.81
電力	kWh	8.95	1.08	675.63	6.05	6.94	7.48
合計				-	10.00	11.47	12.48

a) 文献¹⁵⁾および本論文中の推計から作成。

また、本研究の仮想エネルギーとは定義が異なるため直接比較できないが、参考のために乗用車のライフサイクルエネルギー投入の結果を紹介する。ガソリン乗用車の製造エネルギー投入量の例としては、1台あたり、素材0.80TOE、加工0.48TOE(車重1280kg)¹⁷⁾;素材1.12TOE、加工0.48TOE(車重1160kg)¹⁸⁾;素材1.72TOE、加工0.95TOE(車重1532kg)¹⁹⁾などがある。加工エネルギーのばらつきが大きい、理由は分析対象範囲の違いであろうと言われている¹³⁾。本研究の数値は、単位車重で補正すれば文献¹⁹⁾に近い値である。

2.5 廃車の仮想エネルギー

廃車の仮想エネルギー量は、廃棄後回収される素材層の

仮想エネルギー量の和から、その処理工程で消費される燃料の仮想エネルギー量を引くことで設定した。廃車についても、乗用車、バス、トラックの3車種を想定した。回収される素材量は、乗用車については文献²³⁾のデータを用い、バスとトラックについては乗用車と同じ回収率を適用して設定した。また、回収工程での燃料消費量はデータが入手できないためゼロとした。分析結果を図13に示しておく。

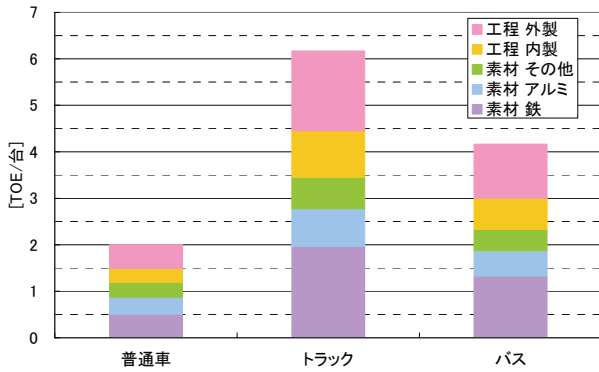


図12 新車の仮想エネルギー(1台あたり)

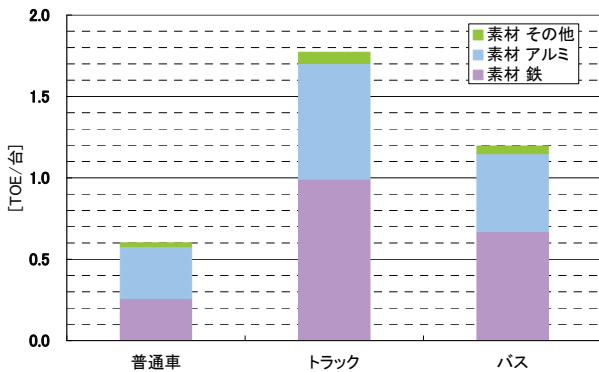


図13 廃車の仮想エネルギー(1台あたり)

(3) 輸出中古車の仮想エネルギー

中古車の仮想エネルギー量の設定方法の概念図を図14に示す。2.1の定義e)に基づき、新車が耐用年数を経て廃車になる間に、仮想エネルギー量が減少すると考える。減少

速度については様々な考え方が考えられるが、ここでは一例として、時間に対して線形に減少すると仮定する。これにより市中ストックの仮想エネルギー量を表現することもできる。

次節で輸出中古車の仮想エネルギー量を評価するため、平均的な中古車の仮想エネルギー量を計算する。耐用年数には平均使用年数(初期登録してから廃棄するまでの年数)を、使用年数には中古車として輸出できる範囲の使用年数を、それぞれ用いた(表6)。中古車の仮想エネルギー量は、乗用車で57.4GJ(1.37TOE)、トラックで130.0GJ(3.12TOE)、バスで108.1GJ(2.58TOE)となる。

表6 想定する耐用年数と使用年数 (単位:年)^{a)}

	乗用車	トラック	バス
耐用年数	11.1	11.5	15.0
使用年数	5.0	8.0	8.0

a) 耐用年数は文献²⁷⁾と使用年数は文献²⁸⁾

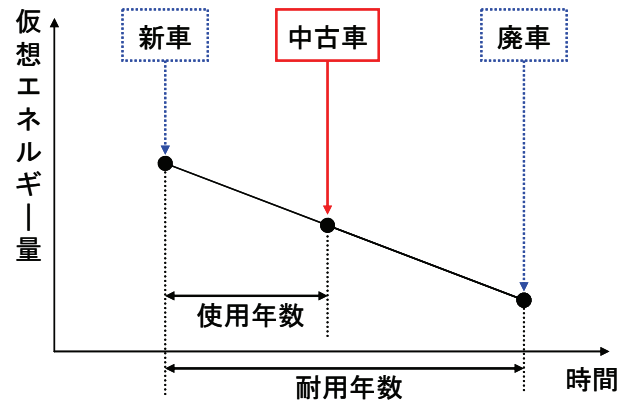


図14 新車、中古車、廃車の仮想エネルギー量の関係

a) 仮想エネルギーの減少に関して、本研究では一例として使用年数に対して線形の仮定をした。

3. 日本の貿易に関する分析

2節で定義した仮想エネルギー原単位を用いて、2006年における鉄とアルミニウム(図15)と自動車(図16)の貿易量を示した。

表5 外製工程における燃料消費量とその仮想エネルギー量

データ元	工程	業界全体の燃料消費	自動車産業への寄与	自動車産業での燃料消費	自工会に対する割合	対象車1台あたりの燃料消費		記号
		発熱量換算 PJ	%	発熱量換算 PJ		発熱量換算 GJ	仮想エネルギー量換算 GJ	
自工会	内製工程	114.73	100	114.73	1.00	11.47	12.49	①
石油等消費構造統計	311 自動車・同付属品製造	279.36	100	279.36	2.43	27.92	30.50	②
	231 タイヤ・チューブ製造	27.90	100	27.90	0.24	2.79	3.02	③
	2512 板ガラス加工	4.17	40	1.67	0.01	0.17	0.18	④
	3091 蓄電池製造	10.18	13	1.37	0.01	0.14	0.15	⑤
外製工程燃料分(=②+③+④+⑤-①)						19.54	21.36	

注)内製工程における対象車1台あたりの燃料消費量は、表の値と高位発熱量は一致するが、仮想エネルギー量は一致しない。これは、消費燃料種の比率が業界全体と対象車1台あたりで異なるからである。

鉄の貿易に伴う仮想エネルギー量は、輸出で 24.5MTOE、輸入で 7.5MTOE となる。ネット輸出入で、鉄に伴って 17.1MTOE の仮想エネルギーが輸出されていることになる。鉄屑に注目してみると、ネット輸出入で 2.4MTOE が輸出されており、鉄のネット輸出量の 14.0%を占めている。

アルミニウムの貿易に伴う仮想エネルギー量は、輸出で 2.3MTOE、輸入で 17.3MTOE となる。ネット輸出入では、アルミニウムに伴って 15.0MTOE の仮想エネルギーが輸入されていることになる。アルミニウム屑に注目してみると、ネット輸出入では 0.17MTOE が輸入されているが、鉄の場合とは異なり、アルミニウムの純輸入量 1.1%を占めるにとどまっている。

自動車の貿易に伴う仮想エネルギー量は、輸出で 16.4MTOE、輸入で 1.3MTOE となっている。ネット輸出入では、15.1MTOE の仮想エネルギー量が輸出されている。ネット輸出量の内訳は、乗用車 10.1MTOE、トラック・バス 3.9MTOE、中古車 1.1MTOE と、66.9%を乗用車が占める。

日本および主要国の貿易に関しては、重量を対象とする評価⁵⁾⁶⁾や CO₂ を対象とする評価²⁹⁾³⁰⁾³¹⁾の事例があるが、本研究との比較として参考になる鉄・アルミ・自動車のエネルギーを明示した事例は知られていない。

4. まとめと今後の課題

本研究では、物質フロー分析にエネルギーの視点を取り入れるための手法の 1 つとして、仮想エネルギーという概念を考案し、実際に分析を行った。燃料、主要素材(鉄、アルミ、銅、プラスチック、ゴム、ガラス)、複雑な製品の代表例として自動車を対象とした。

考案した仮想エネルギーという概念を用いることで、鉄や自動車など新品の物質の仮想エネルギーだけでなく、廃品・中古品の仮想エネルギーを定量化した。

この手法を用いて、鉄くず、中古車等を含めて、主要素材と自動車の仮想エネルギーの輸出入量を求めた。

今後は、仮想エネルギーによる物質フロー分析の対象範囲を広げるとともに、エクセルギーを用いた物質フロー分析を実施していく計画である。

付録 鉄鋼生産プロセスの副生ガスと燃料消費の対応

鉄鋼生産プロセスの副生ガスと燃料消費を対応づけする(表 7)¹⁴⁾。副生ガスの仮想エネルギー原単位(単位 MJ/MJ)は、実エネルギーあたりの仮想エネルギーとする。便宜上、すでに原単位を設定したエネルギー資源を一般燃料と呼ぶ。

まず、鉄鋼コークス部門の純転換と自家消費を合計する。鉄鋼コークス部門の自家用電力と産業用蒸気を、自家用発電鉄鋼部門と産業用蒸気鉄鋼部門の値を用いて変換する。次に、鉄鋼系ガス部門を、高炉ガスと転炉ガスの転換効率

を等しい(仮想エネルギー原単位も等しい)と仮定して、高炉ガス分と転炉ガス分に分割する。鉄鋼コークス部門における高炉ガスと転炉ガスを一般燃料とコークスに変換する。電炉ガスはオイルコークス(原単位 1.03MJ/MJ)に変換される¹⁴⁾。ただし、鉄鋼コークス部門における電炉ガスは本部門の投入エネルギーの 0.001%以下で、本部門の検討結果には影響しない。ここまでの、鉄鋼コークス部門が一般燃料、コークス、コークス炉ガスにより表されることになる。

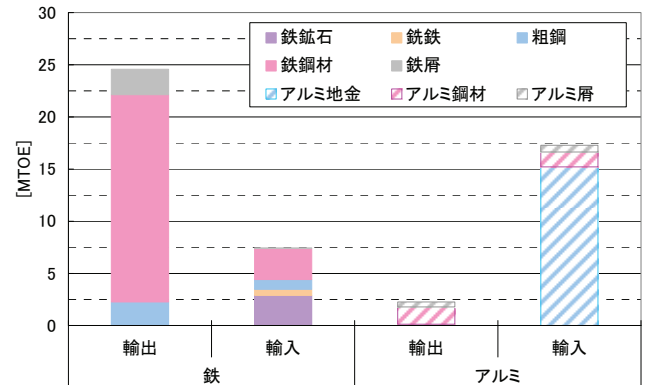


図 15 鉄とアルミの貿易に伴う仮想エネルギー量(2006 年)

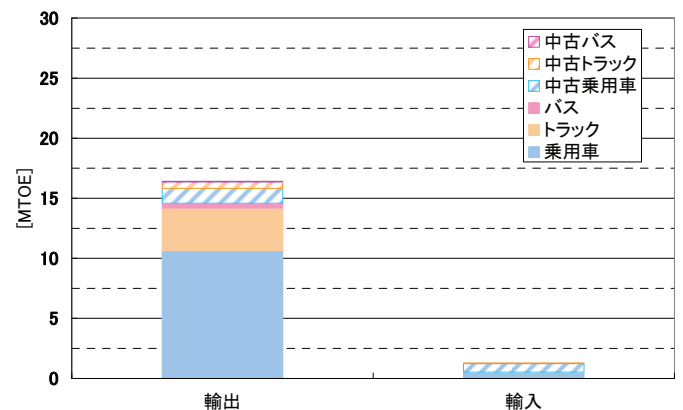


図 16 自動車の貿易に伴う仮想エネルギー量(2006 年)

表 7 鉄鋼生産に関わる部門と部門間での物質(燃料)収支^{a)}

コード	部門	石炭	コークス	コークス炉ガス	高炉ガス	転炉ガス	電炉ガス	その他燃料	自家用電力	産業用蒸気	電力
6580	鉄鋼 高炉型	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	鉄鋼 電炉型	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	鉄鋼 圧延工程	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2511	鉄鋼 純転換	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-
2915	コークス 自家消費	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2550	鉄鋼系ガス	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-
2720	電炉ガス	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-
2217	自家用発電:鉄鋼	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-
2307	産業用蒸気:鉄鋼	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+

a) マイナスは消費、プラスは生産。必ずしも符号は文献¹⁴⁾と一致しない。電力とは事業用発電部門からの供給分を指す。コード 6580 は副生ガスの用途として参考に示したもので、副生ガスの仮想エネルギー原単位はコード 2511 以下で計算される。

ここで、コークス炉ガスの原単位を石炭の原単位と等しいと仮定し、鉄鋼コークス製造からコークス炉ガス製造を仮想的に分離する(鉄鋼コークス部門のロスはすべてコークス製造へ計上する)。これから、コークス炉ガスの原単位は

1.03MJ/MJ, コークスの原単位は 1.21MJ/MJ と設定される。さらに、鉄鋼系ガス部門の高炉ガス分と転炉ガス分から、高炉ガスと転炉ガスの原単位を共に 1.16MJ/MJ と設定する。

参考文献

- 1) Robert U. Ayres; A handbook of industrial ecology, Edward Elgar, (2002).
- 2) 森口祐一, 橋本征二; 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3版, 国立環境研究所, (2006).
- 3) World Resource Institute; RESOURCE FLOWS: The material basis of industrial economies, (1997).
- 4) World Resource Institute; THE WAIGHT OF NATIONS: The material basis of industrial economies, (2002).
- 5) Atsushi Terazono et al.; Material cycles in Asia: especially the recycling loop between Japan and China, J Mater Cycles Waste Manag, (2004), 82-96.
- 6) Yuichi Moriguchi; Recycling and waste management from the viewpoint of material flow accounting, J. Mater Cycles Waste Manag. (1999), 2-9.
- 7) Taikan Oki et al.; Virtual water trade to Japan and in the world, Proceedings of the international expert meeting on virtual water trade, 12, (2003), 221-235.
- 8) Robert Constanza; Embodied energy and economic evaluation, Science, 210, (1980), 1219-1224.
- 9) 布施正暁他; 自動車リサイクルの産業連関分析, J. Life Cycle Assessment, Japan, 2 (2006), 65-72.
- 10) Osamu Kobayashi; Car life cycle inventory assessment, SAE Technical Paper, 971199 (1997).
- 11) John L. Sullivan and Jenny Hu; Life cycle energy analysis for automobile, SAE Technical Paper, 951829 (1995).
- 12) John L. Sullivan et al.; Life cycle inventory of a generic U.S. family sedan, SAE Technical Paper, 982160 (1998).
- 13) John L. Sullivan and Elisa Cobas-Flores; Full vehicle LCAs a review, SAE Technical Paper, 2001-01-3725 (2001).
- 14) 資源エネルギー庁; 2004 年度版エネルギーバランス表, <http://www.enecho.meti.go.jp/info/statistics/jukyu/result-2.htm> (アクセス日 2009/03/29).
- 15) (社)産業環境管理協会; JLCA-データベース第 2 版, (2004).
- 16) (株)みずほ情報総研; 輸送用燃料の Well-to-Wheel 評価 日本における輸送用燃料製造(Well-to-Tank)を中心とした温室効果ガス排出量に関する報告書, (2004).
- 17) (社)日本鉄鋼連盟; 鉄鋼統計要覧 2006, (2006).
- 18) (社)アルミニウム協会; アルミニウム LCI データ, <http://www.aluminum.or.jp/environment/index.html>(アクセス日 2009/03/29).
- 19) International Aluminum Institute; Life cycle assessment of aluminum: Inventory data for the worldwide primary aluminum industry, (2003), 14-18.
- 20) 成田暢彦ほか 4 名; 電気銅生産システムにおける CO₂ 排出のライフサイクルインベントリ分析, 資源と素材, Vol.117, (2001), 49-55.
- 21) (社)プラスチック処理促進協会; プラスチック廃棄物の処理・処分に関する LCA 調査研究報告書, (2001), 111.
- 22) 鈴木徹也; 運輸部門のエネルギー消費構造分析に基づく材料関連省エネルギー技術の効果に関する研究, 東京大学博士論文, (2007).
- 23) 船崎敦, 種田克典; 自動車 LCA のためのインベントリ作成の考え方(4) ライフサイクルにおける車両構成材料の物質フロー, 自動車研究, 第 23 巻第 10 号, (2001), 548-555.
- 24) 経済産業省経済産業政策局調査統計部編; 平成 13 年度石油等消費構造統計, 経済産業統計協会, (2001).
- 25) (社)電池工業会; 電池工業会ホームページ 統計データ「電池の総生産」, <http://www.baj.or.jp/statistics/01.html#2001>(アクセス日 2009/3/29).
- 26) (社)日本経済団体連合会; 温暖化対策環境自主行動計画 2006 年度フォローアップ結果概要版別紙「産業・エネルギー転換部門の業種別動向」, (2006), <http://www.keidanren.or.jp/japanese/policy/2005/086/index.html> (アクセス日 2009/03/29).
- 27) (社)日本自動車工業会; 日本自動車工業会ホームページ JAMA データベース, <http://jamaserv.jama.or.jp/newdb/index.html> http://www.jama.or.jp/industry/four_wheeled/four_wheeled_3.html (アクセス日 2009/03/29).
- 28) 寺園淳ほか 5 名, 平成 14 年度廃棄物処理等科学研究 研究報告書 アジア地域における資源循環・廃棄の構造解析, (2003), 81-87.
- 29) Christopher L. Weber and H. Scottmatthews; Embodied environmental emissions in U.S. international trade, Environ. Sci. Technol., 41, (2007), 4875-4881.
- 30) Glen P. Peters and Edgar G. Hertwich; CO₂ embodied in international trade with implications for global climate policy, Environmental Science & Technology, 42, (2008), 1401-1407.
- 31) Frank Ackerman et al.; The carbon content of Japan-US trade, 35, (2007), 4455-4462.