

■ 研究論文 ■

飲料用自動販売機のエネルギー消費量と二酸化炭素排出量 及びその対策に関する評価

Life Cycle Energy Usage and CO₂ Emissions by Beverage Vending Machines, and Evaluation of Their Reform Measures

乙 間 末 広*・森 保 文**
Suehiro Otoma Yasuhumi Mori
(原稿受付1997年7月2日, 受理日12月16日)

Abstract

We performed a case study on beverage vending machines, considered to be one kind of energy-intensive appliance, and analyzed present life cycle energy usage. For calculating the energy needed for processing and assembling the parts and products involved in composite products like vending machines, we introduced parameters showing the proportions of energy used in processing and assembly in relation to energy for producing materials, and proposed a method for estimation through approximation. We further used case studies to examine this method's applicability, and determined the energy consumption entailed by the processes of producing and using vending machines.

In addition, we used estimates based on experimental observations and a model to investigate in detail the present energy consumption of vending machines, and to identify ways of conserving energy and investigate their energy-saving efficacy when used. An energy savings of about 50% per machine seems possible. We also estimated the potential for reducing CO₂ emissions by increasing the use of energy-saving vending machines.

1. はじめに

わが国においては、第一次石油ショック以降、産業部門からのCO₂排出量は技術革新により横這いあるいは減少傾向にあるが、民生部門からの排出量はその後も着実に伸びている。この分野における有効かつ早急な対策の実施がなければ、今後もこの傾向は拡大的に継続するものと予想され、民生分野における対策技術の開発および普及が急務である。

本研究では、エネルギー多消費型の民生製品で、電力の総使用量が大型原子力発電所1基に相当すると言われている飲料用自動販売機を対象にケーススタディーを実施する。その過程で、自動販売機のような複合製品の組立・加工エネルギーを簡便に推算する手法を提案するとともに、自動販売機の現状のエネルギー消費量を試験運転とモデル計算による推定から詳細に検討を加え、省エネルギー策の抽出とその採用による省エネルギー効果を検討する。また、省エネルギー自動販

売機の普及に伴うCO₂排出量の低減ポテンシャルについても推定する。

2. 自動販売機の現況

1995年現在、飲料用自動販売機（清涼飲料、乳飲料、コーヒー、酒・ビール）は年間約34万台出荷され、合計で約254万台普及¹⁾しており、国民50人に1台の割合である。平均消費電力をある飲料販売会社の調査値の平均値である8.2kWh/日/台（342Wに相当）とすると、年間総消費電力量は 7.6×10^9 kWh/年となり、これは日本の消費電力量の1.07%に相当する。これに伴うCO₂排出量は0.897Mt-C/年（0.118kg-C/kWh）であり、日本全体のCO₂排出量はほぼ320Mt-C/年であるから、これは0.28%を占める。また、自動販売機の一台中当たりの使用時最大電力を中程度のサイズである500Wと仮定すると、コンプレッサーが一斉に稼働すると思われる真夏の自動販売機全体のピーク電力は1.27百万kWに達し、これは大型原子力発電所1基に相当する。

* 国立環境研究所 社会環境システム部資源管理研究室長

** " " " 主任研究員

〒305-0053 茨城県つくば市小野川16-2

1996年第12回エネルギーシステム・経済コンファレンスにて一部発表

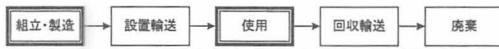


図-1 自動販売機のライフサイクル

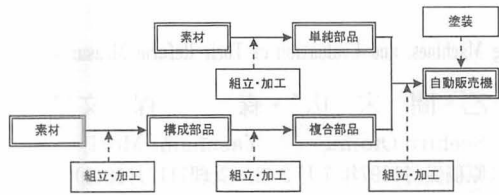


図-2 自動販売機の組立・製造までのフロー

自動販売機のライフサイクルの概略は図-1のようである。本研究では、中でもエネルギー消費にとって重要と思われる組立・製造段階と使用段階について検討した。前者におけるエネルギー消費については、主に部品の詳細な積み上げから求め、後者については、多様な条件下での試験運転により観測した。なお、ここでの組立・製造段階には素材製造をも含んでいる。

通常の自動販売機は700近い部品からできており、その多くは下請け工場で生産されている。それらを大別すると、素材を加工しただけの部品（単純部品）と部品自体が複数の部品から構成されている部品（複合部品）から構成される。その概要を図-2に示す。自動販売機の場合、複合部品には、コンプレッサ、蒸発機、モーター、基板類、電球類が該当する。

3. 組立・製造段階

3.1 素材製造のためのエネルギー消費量とCO₂排出量

自動販売機の素材構成については、実際に製品を分解して、素材別の重量を測定することで把握した。素材の分類は、既存の研究において、製造に係るエネルギー消費原単位（エネルギー集約度）、CO₂排出原単位（CO₂集約度）が把握されているレベルとした。コンプレッサ、モータ等、複数の部品から構成されている部品（複合部品）については、部品単位とし、部品全体の重量として把握した。

既存の研究^{2~5)}から収集した鉄鋼、樹脂材料等の製造原単位の中から、その前提条件を考慮したうえで、素材製造に伴うエネルギー消費原単位、CO₂排出原単位を、抽出・整理し、素材重量を掛けることによって、素材製造時に必要となるエネルギー消費量とCO₂排出量を算出した。なお、原単位が不明な素材や材料構成が不明な部品については、計算上、類似と思われる素材のデータあるいはその組み合わせを適用した。図-3

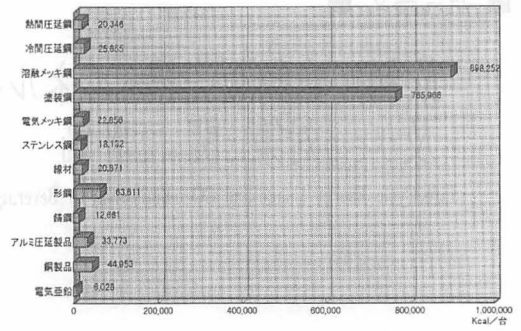


図-3 金属類の素材別エネルギー消費量

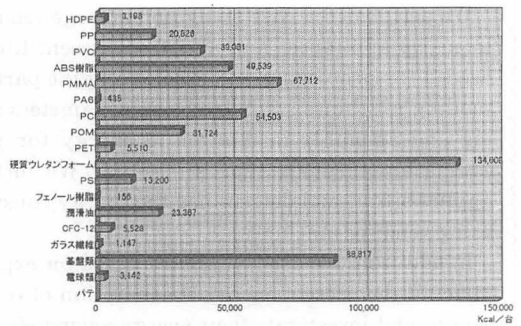


図-4 樹脂類・その他の素材別エネルギー消費量

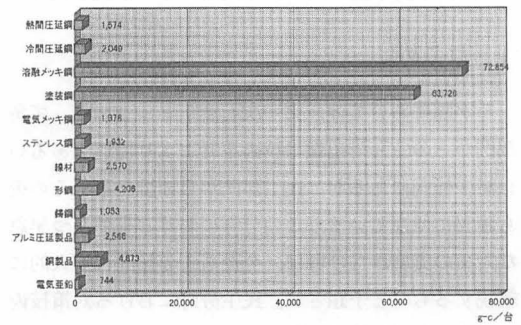


図-5 金属類の素材別二酸化炭素排出量

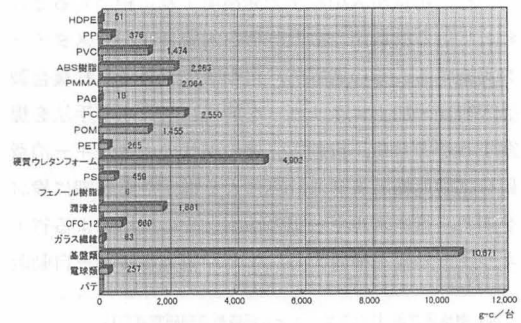


図-6 樹脂類・その他の素材別二酸化炭素排出量

～6に結果を図示する。なお、塗装鋼製造時の塗装については素材生産過程に含み、後述の塗装加工エネルギーには成形後の塗装のみを考慮している。

エネルギー消費量では、溶融メッキ鋼、塗装鋼、硬質ウレタンフォーム、基板類、PMMA、形鋼、PC、ABS等の順、CO₂排出量では、溶融メッキ鋼、塗装鋼、基板類、硬質ウレタンフォーム、銅製品、形鋼、線材、PC等の順となっている。鉄鋼関連が大きな割合を占めるのは、使用重量が多いためである。一方、ここでは示していないが、基板類の重量は全体の約0.45%であるが、エネルギー消費量では3.58%、CO₂排出量では5.63%にもなり、基板類がエネルギー集約型の部品であることがわかる。

3.2 加工・組立のためのエネルギー消費量とCO₂排出量

自動販売機のような複合製品には大小数多くの部品が使われており、積み上げによって厳密に実施する場合はこれらの部品を一つずつ漏れなく追跡しなければならない。部品に係わるエネルギー消費量は部品を構成する素材の生産に必要なエネルギーと部品を組立て加工（ここでは輸送等を含む）するのに必要なエネルギーの和として推計できる。前者の素材生産に必要なエネルギーは、前節で記述したように、最終製品の素材構成重量と既存原単位データから比較的容易に計算できるが、後者の組立・加工エネルギーについては個々に調査する方法が一般に採用されている。複合製品を対象とする場合、この調査を多数必要とするうえ、納入業者など他の事業体の生産方法を詳細に調べる必要があり、現実的にはほぼ不可能に近い。そこで、複合製品の部品をも含めた組立・加工エネルギーを製品の

素材構成重量から推定する下記のような実用的な方法⁶⁾を考案し適用した。

自動販売機のような複合製品を構成する部品のうち、あるものはそれ自体が複合製品であり、複数の加工・組立工程を経て製造されている。部品・中間部品の生産に伴うエネルギー消費量又はCO₂排出量は以下の三つに分けることができる。(1) 製品に含まれる素材を生産するのに要した量。(2) 製品に含まれず、廃棄物となった素材を生産するのに要した量。(3) 部品の加工・組立のために要した量。ここでは、製品に含まれる素材重量をベースに解析する方法を提案し、適用しようとしていることから、(1)に対する(2)+(3)の比率を「加工・組立比」と定義する。

複合製品を構成する部品iの素材の製造に伴うエネルギー消費量又はCO₂排出量をMiとすると、複合製品の製造に伴うエネルギー消費量又はCO₂排出量Pは次式により表せる。

$$P = \sum_{i=1}^n \{M_i \times (1 + PAR_{i1}) \times (1 + PAR_{i2}) \times \dots \times (1 + PAR_{im})\}$$

ただし、PAR_{ij}はi部品のj加工・組立工程の加工・組立比であり、工程数mは部品iによって異なる。

加工・組立比の算定にあたっては、代表的な工程について、下請け部品工場およびメーカーの組立工場の協力を得て、用役量や廃棄物量に関するデータを収集し、推定した。表1はそれらをまとめたものである。塗装工程を除いて、調査した範囲の加工・組立比はほぼ同じ値(0.0～0.1)となった。自動販売機のような多くの部品を有する製品について、関連する全ての加工・組立比を求めることは不可能であることから、本研究では、塗装工程を除く部品の加工・組立工程における

表1 調査工場におけるエネルギー消費量の内訳（素材製造エネルギーも含む）

単位：上段Mcal/台 下段kg-C/台

	製品素材	組立・加工	輸送	廃棄物	加工・組立比
塗装 (A社)	0.0 (塗料)	307.5 (塗装)	0.0	—	12,708
	0.0	17.5	0.0	—	13,952
板金 (B社)	347.0 (鋼板)	49.3 (板金)	2.1	—	0.1
	26.2	2.6	0.2	—	0.1
樹脂成形 (C社)	122.1 (樹脂)	0.5 (成形)	0.4	—	0.0
	9.2	0.0	0.0	—	0.0
配線類 (D社)	46.2	5.1 (加工)	0.1	0.1	0.1
	9.3	0.2	0.0	0.0	0.1
製品組立 (E社)	—	64.2 (組立)	5.4	0.6	—
	—	3.2	0.4	0.1	—

注) 輸送については、トラックに10t積載して100km輸送すると仮定し、燃料をガソリン、燃費を5km/lとして計算した。

表2 製品組立製造ステージにおけるエネルギー消費量とCO₂排出量

		エネルギー消費量 Mcal/台	CO ₂ 排出量 kg-C/台	備 考
単純部品	素 材	2,226.580	166.230	図-3~6
	加 工	222.658	16.623	素材の0.1倍
複合部品	素 材	249.018	23.240	図-4, 6
	組立加工	52.294	4.880	素材の0.21倍
塗 装	素 材	0.024	0.001	表1, 塗装
	加工組立	307.524	17.530	
製 品 組 立		70.163	3.654	表1, 製品組立
合 計		3,128.261	232.157	
合	素 材	2,475.622	189.470	
	加工組立	652.639	42.687	

加工・組立比を一定値Kであると仮定し、次式により複合製品の製造に伴うエネルギー消費量又はCO₂排出量Pを算出した。

$$P = \sum_{i=1}^n [M_i \times (1+K)^m]$$

表1の結果から、Kの値としては、塗装と製品組立については表にある値をそのまま使用し、他についてはほぼ同じ値であることから0.1を採用した。

さらに、単純部品については素材から1回の加工工程を、複合部品については部品によって多様であるが、ここでは簡単に素材から2回の加工・組立工程を経るものと仮定した。その結果を表2に示す。自動販売機のオーバオールな加工・組立比は、エネルギー消費量については0.26で、CO₂排出量については0.23となった。なお、筆者らがごみ焼却場で実施した同様の調査⁷⁾では加工・組立比の平均的な値は0.5であった。加工・組立比は業種によって異なると考えられる。今後、業種毎の加工・組立比が明らかになりデータベース化されるなら、ここでの手法はさらに適用し易くなり、各種の推算が一段と容易になることが期待される。

4. 使用段階

自動販売機の使用(供用)時のエネルギー消費は電力のみであり、耐用期間や冷凍機などの使用部品の仕

表3 評価対象とした自動販売機の仕様

設置場所	屋内	総合定格消費電力	603W
周囲温度	24℃	圧縮機定格入力	361W
庫内温度	5℃	運転率	40%
庫内構成	C-C-C	凝縮器側ファンモータ	39W
電 源	100V, 50Hz	蒸発器側ファンモータ	53W
総合定格電流	8.2A	蛍光灯29W×3, 42W×1	129W
平均消費電力	340W	DC電源(コインメカ等)	21W

様からエネルギー消費の概要は推測できる。本研究で評価対象とした自動販売機は平成7年時点で最も普及していた機種の一つで、表3のような仕様を持つ3冷却庫室タイプであり、平均消費電力及び圧縮機の運転率は実績値である。

業界の統計では自動販売機の平均耐用年数は7年強であるが、都市部では3~5年で新規の機種に交換されている。ここでは耐用年数を7.5年として、平均消費電力から、自動販売機の使用ステージにおける消費電力量を求めると、

消費電力量

$$= \text{平均消費電力} \times 24 \text{時間} / \text{日} \times 365 \text{日} / \text{年} \times \text{耐用年数}$$

$$= 342 \text{W} \times 24 \text{h} / \text{day} \times 365 \text{day} / \text{year} \times 7.5 \text{year}$$

$$= 22.5 \times 10^3 \text{kWh}$$

となる。電源構成、発電効率を考慮し、1kWhあたりの平均一次エネルギー使用量(2.25Mcal/kWh)、CO₂排出原単位(0.118kg-C/kWh)を消費電力量に乗じて、製品使用段階におけるエネルギー消費量およびCO₂排出量を求めると、それぞれ50.6×10³Mcalおよび2.65×10³kg-Cとなる。

5. 組立・製造段階と使用段階の比較

素材製造、製品組立製造、製品使用の各段階におけるエネルギー消費量、CO₂排出量を表4に整理する。自動販売機の場合、製品の耐用年数が7.5年と長いいため、全消費量、全排出量に占める割合は、製品使用段階において高い。

表4 各段階におけるエネルギー消費量、CO₂排出量の比較

	単位	素材製造	製品組立製造	製品使用	合 計
エネルギー消費量	Mcal (%)	2,476 (4.6)	653 (1.2)	50,556 (94.2)	53,685 (100.0)
CO ₂ 排出量	kg-C (%)	189 (6.6)	43 (1.5)	2,651 (92.0)	2,883 (100.0)

素材製造を含む組立・製造段階と使用段階とのエネルギー消費量の比はほぼ1:16であり、CO₂排出量ではほぼ1:11.5である。使用時の省エネルギー対策の重要性がうかがわれる。ちなみに、自動販売機の価格と7.5年間の電気料金の比はほぼ1:1.0~1.2である。

6. 自動販売機の省エネルギー対策とその効果

6.1 使用時のエネルギーの内訳

前章の検討から、自動販売機に関するCO₂排出量の

表5 自動販売機使用時の電力消費の内訳

要 因	コンプレッサによる排熱			付属機器
	内 部 モータ	伝 熱	気 密	
電力消費の割合	15%	22%	27%	36%

表6 自動販売機の省エネルギー対策と推定効果

分 野	対 策	推定効果
内 部 モータ	◎ コンプレッサ停止時には内部モータも停止する	9%
	○ 現在の内部モータを庫外に設置する	15%
伝 熱	◎ 断熱材を現場発泡にする	5%
	△ 断熱に真空パネルを使用する	15%
気 密	◎ 内箱を一体成形にする	3%
	○ 前面および取出口を気密度の高い設計にする	18%
照 明 等	◎ 過剰照明をなくす	8%
	○ 前面のデザイン、素材を工夫する	3%
そ の 他	◎ 高性能コンプレッサを使用する	13%

(注) 対策の実施し易さ ◎>○>△

削減には、使用時の省エネルギー対策が効果的であることがわかった。そこで、対策を検討するため、エネルギー消費の内訳を各種条件下での試験（計測）運転と自動販売機の設計仕様から推定した。

自動販売機の使用時には、大きく分けて、冷却目的のためのコンプレッサ、および照明・コインメカ等の付属機器に電力が消費される。さらに、コンプレッサは、内部モータからの発熱、および伝熱と気密漏れによる侵入熱の排除のために作動する。以下の方法によって、電力消費量をこれらの要因別に推定した。

- (1) 内部モータ：モータの実作動時間の計測
- (2) 伝熱：使用断熱材等の物性から計算
- (3) 気密：ビニールシート等による気密確保時の計測
- (4) 付属機器：機器の仕様から計算

推定結果は表5の通りである。付属機器の電力消費が最も多く、その大半が照明によるものである。また、コンプレッサ稼働の要因である熱源に卓越したものはなく、省エネルギーにはそれぞれの対策を組み合わせる必要がある。これらの結果と自動販売機製造メーカーの技術者へのヒヤリングをもとに、取りうる対策とその推定効果を表6に示す。ただし、推定効果は厳密な計算によるものではなく、表5を基に技術者と相談のうえ推測したもので、現状機種のエネルギー

消費量に対する割合で示してある。

6.2 省エネルギー機導入のシナリオと普及効果

現在の技術レベルと大幅なコストの増加を招かないことを前提として、表7のような省エネルギー対策を導入した2通りの機種をここでは想定した。ただし、高性能コンプレッサの使用効果は他の対策の効果と重複するため、前節の値よりも低く設定した。また、表中の省エネ効果は現状機種のエネルギー消費量に対する割合を示す。

省エネルギー機導入のシナリオとしては、新機種投入の初年度より年出荷台数の34万台すべてにケース1の機種が導入され、さらに4年目よりケース2の機種に切り替わるとした。図-7が計算した結果である。

自動販売機が完全にケース2の機種に置換されるのは、計算上では、10年後であるが、耐用年数に分布があることを考慮するともう少し遅れることになる。この結果によると、3年後には飲料用自動販売機全体

表7 想定した省エネルギー型飲料用自動販売機

ケース 1	
導入する対策	省エネ効果
・ 通常時のモータ停止	9%
・ 断熱材の現場発泡	5%
・ 内箱の一体成形	3%
・ 過剰照明の排除	8%
・ 高性能コンプレッサの使用	8%
合 計	33%
ケース 2	
導入する対策	省エネ効果
・ モータの庫外設置	15%
・ 断熱材の現場発泡	5%
・ 内箱の一体成形	3%
・ 前面及び取出口の気密設計	15%
・ 過剰照明の排除	8%
・ 高性能コンプレッサの使用	8%
合 計	54%

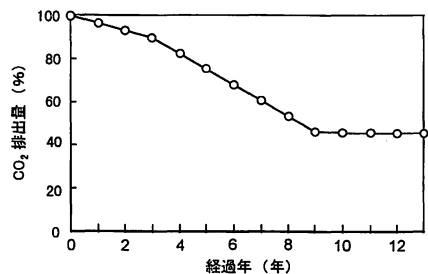


図-7 省エネルギー機種への普及に伴うCO₂排出量削減効果

で約20%の省エネルギーが達成され、ほぼ新機種に置換されているであろう10年後には54%の省エネルギーが見込める。これによって、日本全体のCO₂排出量の0.15%に相当する0.48Mt-C/年の削減が期待できる。

コンプレッサの高性能化などに伴い、製造時のエネルギー消費が若干増大することも予想されるが、すでに説明したように、自動販売機の場合、使用時のエネルギー消費が圧倒的であり、省エネルギー対策の効果を損なうものとはならない。

7. 省エネルギー機器導入への課題

ここで提案している省エネルギー策の導入に関して、技術的な課題はそれほど大きなものではない。むしろ、経済的な側面が重要な課題といえる。

自動販売機の価格に対する使用時の電気料金の比は、加工・製造段階に対する使用段階のエネルギー消費量比ほど、大きくはない。しかし、なお電気料金の占める割合は大きく、製造段階での省エネルギー策への投資は、全体として十分見合うものと思われる。すなわち、自動販売機の場合は、トータルコストの削減がそのまま省エネルギー、CO₂排出量削減につながる事例である。にもかかわらず、比較的容易な策も講じられていないのが現状である。

自動販売機の維持管理会社（飲料の販売会社でもある）は製造業者に発注、購入し、設置場所提供者に謝礼を支払って飲料を販売している。ただし、通常は設置場所提供者が使用時の電気料金を支払っている。すなわち、自動販売機の購入価格と使用時の維持費を支払う主体が異なり、両者をトータルで最適化するメカニズムが今のところ存在していない。製造業者が販売価格の上昇を伴う対策を導入した場合、購入者である維持管理会社の直接の利益を損ない、その成果は製造業者にとって顧客でない設置場所提供者が受けることになる。この問題は維持管理会社と設置場所提供者の間で工夫すれば容易に解決することであり、今後、省エネルギー策が積極的に導入されることを期待したい。

8. まとめ

エネルギー多消費型の複合製品である自動販売機について、製造段階および使用段階のエネルギー消費量の解析を実施した。製造段階の解析では、加工・組立比の導入を提案し、適用した。従来、加工・組立に要するエネルギー消費量およびCO₂排出量は無視されるか、素材エネルギーあるいはCO₂の総量に一定の比を

かけて算出するなど、十分考慮されてこなかったが、ここでの提案は、比較的簡便でかつ製品の特性をより反映した推定が可能である。

使用段階については試験運転と設計仕様から電力消費量とその要因別内訳を推定した。その結果、製造段階に比べて、使用段階の電力消費量を低減することが特に重要であると確認された。要因別では、照明等の付属機器が最も多く電力を消費しているが、消費量の大半を占めるような卓越した要因はなく、決定的な1つの対策はない。しかし、個々の要因に対する対策を組み合わせることによって50%以上の省エネルギーが可能と推定された。

最後に、自動販売機の省エネルギー対策の導入とその効果について検討した。現在、飲料用自動販売機の稼働に伴うCO₂の排出量は日本全体の0.28%と推定できるが、省エネルギー機の普及により、その内の0.15%は低減の可能性がある。また、省エネルギー機の導入はトータルコストを削減する方向とも一致しており、経済的な観点からも推進されるべきもので、そのための課題にも言及した。

謝辞

本研究は、サンデン株式会社自販機開発部の全面的な協力なしには実施し得なかったものであり、ここに記してお礼申し上げます。

また、本研究は、環境庁地球環境研究総合推進費により実施された研究の成果である。

参考文献

- 1) サンデン株式会社自販機事業部：'97年度自動販売機プレゼンテーション資料（1996）。
- 2) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：(財)産業環境管理協会「エネルギー使用合理化手法国際調査」（1995）。
- 3) (財)化学経済研究所：基礎素材のエネルギー解析調査報告書（1993）。
- 4) (財)未踏科学技術協会：「環境負担性評価システム構築のための基礎調査研究」調査報告書別冊（1995）。
- 5) (財)国土開発技術研究センター：省資源・省エネルギー型国土建設技術の開発（建築委員会）報告書（1994）。
- 6) 森保文、乙間末広、中條寛：製品組立および加工に関わるエネルギー消費量/CO₂排出量の簡易算定法、第12回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集（1996）、297-302。
- 7) 森保文、乙間末広、近藤美則、鮫島良二、森本林：ごみ発電によるエネルギー回収およびCO₂排出量の削減効果の推定、エネルギー・資源、第15巻（1994）、73-80。