

Title	自動車のライフサイクルアセスメント
Sub Title	
Author	松橋, 隆治(Matsuhashi, Ryuji) 管, 幹雄(Kan, Mikio) 吉岡, 完治(Yoshioka, Kanji) 正田, 浩一(Hikita, Koichi) 吉田, 芳邦(Yoshida, Yoshikuni) 石谷, 久(Ishitani, Hisashi)
Publisher	慶應義塾大学産業研究所
Publication year	1998
Jtitle	KEO discussion paper. G : 『アジア地域における経済および環境の相互依存と環境保全に関する学際的研究』(KEO discussion paper. G : "Inter-disciplinary studies for sustainable development in Asian countries"). No.G-8
JaLC DOI	
Abstract	概要エネルギー資源の超長期にわたる利用形態を考える上で、最も重要な概念は「持続可能性」ということである。これは、資源の有限性と環境問題を考慮に入れた上で、将来の人類の厚生を妨げることなく、現在の人類の厚生を保証しうる資源の利用をおこなうというものである。本稿においては、資源、環境の持続可能性について論じた後、資源利用システムの耐用年数の変化率より持続可能限界の概念を提案した。さらに、実際のエネルギー資源、鉱物資源、環境排出物について、持続可能性を定量的に評価した。これによると、特にエネルギー資源およびCO2などの環境排出物が持続不可能な状態にあると判定された。次に、システム連関分析によるLCA手法の枠組みについて述べた。さらに、このLCA手法の適用対象として、ガソリン乗用車(GV)と電気自動車(EV)を取り上げ、その評価をおこなった。この結果、両者の製造、走行を含めたライフサイクルCO2発生量が算定され、走行モードによる相違も示された。これより、長期的な持続可能性を維持するためのEV技術開発の方向性およびGVとEVの使い分けに関する示唆が得られた。今後は持続可能なシステム実現のための評価手法としてのLCA手法を完成させるとともに、EVを含む新技術の分析も併せて進めていく予定である。
Notes	表紙上部に"日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業複合領域「アジア地域の環境保全」"の表示あり
Genre	Technical Report
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AA12113622-00000008-0001

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

自動車のライフサイクルアセスメント

松 橋 隆 治
菅 岡 幹 雄
吉 田 完 治
足 田 浩 一
吉 田 芳 邦
石 谷 久

No.G-8

学振未来 WG2-3

自動車のライフサイクルアセスメント

松橋隆治, 菅幹雄, 吉岡完治, 疋田浩一, 吉田芳邦, 石谷久
1998年3月

キーワード

ライフサイクルアセスメント (LCA) ; 持続可能限界; CO₂放出; ガソリン車 (GV) ; 電気自動車 (EV) ; 産業連関表分析.

概要

エネルギー資源の超長期にわたる利用形態を考える上で、最も重要な概念は「持続可能性」ということである。これは、資源の有限性と環境問題を考慮に入れた上で、将来の人類の厚生を妨げることなく、現在の人類の厚生を保障する資源の利用をおこなうというものである。

本稿においては、資源、環境の持続可能性について論じた後、資源利用システムの耐用年数の変化率より持続可能限界の概念を提案した。さらに、実際のエネルギー資源、鉱物資源、環境排出物について、持続可能性を定量的に評価した。これによると、特にエネルギー資源およびCO₂などの環境排出物が持続不可能な状態にあると判定された。

次に、システム連関分析によるLCA手法の枠組みについて述べた。さらに、このLCA手法の適用対象として、ガソリン乗用車 (GV) と電気自動車 (EV) を取り上げ、その評価をおこなった。この結果、両者の製造、走行を含めたライフサイクルCO₂発生量が算定され、走行モードによる相違も示された。これより、長期的な持続可能性を維持するためのEV技術開発の方向性およびGVとEVの使い分けに関する示唆が得られた。今後は持続可能なシステム実現のための評価手法としてのLCA手法を完成させるとともに、EVを含む新技術の分析も併せて進めていく予定である。

自動車のライフサイクルアセスメント

松橋隆治[†], 疋田浩一[†], 吉田芳邦[†], 石谷久[†], 菅幹雄[‡], 吉岡完治^{††}

1998年3月

1. はじめに

エネルギー資源の超長期にわたる利用形態を考える上で、最も重要な概念は「持続可能性」ということである。これは、資源の有限性と環境問題を考慮に入れた上で、将来の人類の厚生を妨げることなく、現在の人類の厚生を保証しうる資源の利用をおこなうというものである。エネルギー経済の分野で持続可能な発展を論ずる場合、通常再生不能資源から再生可能資源への長期的移行という形で論じられる。

しかし、工学的観点からは上のような再生可能資源と再生不能資源の区別には問題点がある。それは、現状の再生可能資源利用技術の設備製造には、再生不能資源の投入が不可欠であるという点である。著者等は、エネルギー収支分析の概念に基づいて様々な技術の評価をおこなってきた。この中には、太陽光発電、風力発電などの典型的な再生可能資源利用技術も含まれるが、分析の結果、設備建設時に相当量の化石燃料が投入されていることを定量的に確認した。そこで、再生不能資源との比較のため、設備建設のために要するエネルギーと燃料としてのエネルギーの双方を加味した統合エネルギー収支の概念を導入した。⁽²⁾ この指標によると、再生可能資源と再生不能資源の利用技術の間には本質的な相違はなく、再生可能資源利用技術は再生不能資源の有効利用を図るための技術であるといえる。

そこで、この持続可能性を判定する新たな定義付けが必要である。以下では、この定義をおこなうために、まず統合収支の概念とそのトータルシステム内での算定につきみていくこととする。

2. 資源・エネルギーのシステムとその持続可能性

2.1 持続可能な発展の動学的考察

本節では、動学的側面から持続可能な資源利用についての示唆を得る。このため、資源利用による便益を定量化するが、ここでの便益とは、資源の提供するサービス（照明による明るさ、乗用車による人の移動、冷暖房による快適さ）によるものであり、一次資源の消費そのものによるのではない。すなわち、効用を表す関数 u は、ライフサイクル効率を用いて、一次資源消費ではなく、最終消費に基づく関数で表現する必要がある。すなわち、エネルギーシステムのライフサイクル統合収支 μ を用いて、以下の導出をおこなう。

R を（単一の）資源の残存量、その時間微分 $\times (-1)$ を生産量として定式化する。 u は最終エネルギーとしての消費量を表し、 α はライフサイクル効率の改善率を表す。

* この研究は、学術振興会未来開拓技術研究推進事業「アジア地域の環境保全」Work Group2 における共同研究としておこなわれた。

[†] 東京大学大学院工学系研究科, [‡] 東海大学教養学部, ^{††} 慶応義塾大学産業研究所

$$\dot{R} = -\frac{u}{\mu} = -\frac{u}{\mu_0 \exp(\alpha t)}$$

$$I = \int_0^\infty [\pi\{u(t)\} \exp(-\gamma t)] dt \rightarrow \max. \quad (1)$$

$$R_0 \geq R(t) \geq 0 \quad (0 \leq t \leq \infty)$$

ここで、 γ は割引率を示し、関数 π はエネルギーの消費によって得られる便益を示す。ここでは、限界効用が低減することを考慮して以下のように表現する。

$$\pi\{u(t)\} = \{u(t)\}^\omega = \{(-\dot{R})\mu_0 \exp(\alpha t)\}^\omega \quad (2)$$

$$0 < \omega < 1$$

(1), (2)式より変分法におけるオイラー方程式を用いて(3)式が導かれる。

$$\frac{\dot{R}}{R} = \frac{\alpha\omega - \gamma}{1 - \omega} \quad (3)$$

ゆえに、(3)式が成り立つ。

$$R = A \exp\left(-\frac{\gamma - \alpha\omega}{1 - \omega} t\right) \quad (4)$$

(4)式から、ある時点での時刻 t における資源の耐用年数 R/P を算定してみると、(5)式のように γ 、 α 、 ω 一定の条件下で定数を取ることが分かる。

$$\frac{R}{P} = \frac{R}{(-\dot{R})} = \frac{1 - \omega}{\gamma - \alpha\omega} = \text{constant} \quad (5)$$

また(2), (4)式より、(6), (7)式が導かれる。

$$u(t) = A\mu_0 \left(\frac{\gamma - \alpha\omega}{1 - \omega}\right) \exp\left\{\left(\frac{\alpha - \gamma}{1 - \omega}\right)t\right\} \quad (6)$$

$$\pi\{u(t)\} = A^\omega \mu_0^\omega \left(\frac{\gamma - \alpha\omega}{1 - \omega}\right)^\omega \exp\left\{\omega \left(\frac{\alpha - \gamma}{1 - \omega}\right)t\right\} \quad (7)$$

これより、以下の点が示唆される。

- 有限の資源の最適消費パターンは、 γ 、 α 、 ω 一定の条件下で一定の耐用年数を持つ。
- ただし、どの耐用年数 (R/P) で消費をおこなうかは、割引率 γ 、ライフサイクル効率の改善率 α 、効用のパラメータ ω によって決定される。特に γ が大きいほど R/P の小さい (初期の最終消費量の大きい) 地点で消費を開始し、急速に消費量を減少させるものとなる。
- 有限の資源に基づく最終消費エネルギーおよび効用の減少は、技術開発によるライフサイクル効率の改善 (年率 α) により抑えることができる。 $\alpha > \gamma$ の場合には、エネルギー最終需要 u および便益 π は時間とともに増加する。

ここでの分析により、動学的に最適な資源利用の性質が明らかになった。しかし重要なことは、実際の資源が、上の最適な消費パターンとどの程度乖離しているかを明らかにし、これを持続可能な利用に近づけるための技術開発への指標を得ることである。そこで、次節では、実資源のデータと技術開発の位置づけについて考察する。

2.2 資源、環境の持続可能限界の定量的考察

本節では、前節までで定義したライフサイクル「統合収支」 μ を用いてエネルギーを含む主要な資源および CO_2 などの環境排出物に関する持続可能性を定義する。具体的には、2.1 節で定義したように、最適な資源利用パスの指標として、資源、環境の耐用年数 (R/P) を評価し、現在の技術や需要の変化率により耐用年数が

低下しないこと、すなわち、(8)式を持続可能な条件とする。

R_0 : 初期時点での当該資源の埋蔵量、 r : 探査、採掘技術の向上による R_0 の増加率、 μ_0 : 初期時点での当該資源のライフサイクル統合収支、 a : μ の年上昇率、 s : 当該資源の他の資源による年代替率、 C_0 : 初期時点での当該資源のリサイクル率。(ただし、エネルギー資源の場合はリサイクルは不可能であり、カスケードニング率を示す。) c : C_0 の上昇率、 P_0 : 初期時点での当該資源の生産量、 D_0 : 初期時点での当該資源の最終需要、 β : D_0 の年増加率

資源の耐用年数、 $f(R, P)=R \cdot P$ として関数 f の変化率より以下のように持続可能条件が算定される。

$$\frac{\partial f}{\partial a} = \frac{\mu_0 R_0}{D_0} \left\{ \frac{a+r+s-\beta}{1-C_0} + \frac{C_0 c}{(1-C_0)^2} \right\} - 1 \geq 0 \quad (8)$$

$$a+r+s-\beta + \frac{C_0 c}{(1-C_0)} \geq \frac{D_0}{\mu_0 R_0} (1-C_0) = \frac{P_0}{R_0} \quad (9)$$

$$a+r+s + \frac{C_0 c}{(1-C_0)} = \alpha \text{ とおくと}$$

$$\alpha - \beta \geq \frac{P_0}{R_0} \quad (10)$$

(9)式の条件は再生不能資源を念頭においているが、再生可能資源でも本質的には同じ条件となる。(ただし、ここではバタムのようなストック系の再生可能資源を念頭におく。太陽光発電システム、風力発電システムなどのフロー系の再生可能エネルギーは枯渇を考慮する必要がないので、これらのシステムについては、再生不能資源の投入のみを考慮する。) 再生可能資源の持続可能条件は(9)式における r を再生可能資源のストック総量に対する再生率と解釈し直す必要がある。環境排出物もこれを特殊な「負の資源」と解釈し、最大許容蓄積量を資源量 R_0 とし、環境による吸収率 c の分だけ、大気中蓄積量が減少したと解釈すれば、資源の持続可能性条件と等しい。

以上より、再生不能資源、再生可能資源、環境排出物の持続可能条件が本質的に類似したものであることが分かる。すなわち、埋蔵量の増加率あるいは資源の再生率(r)、技術による統合収支の改善率(a)、他の資源による代替率(s)、リサイクル(カスケード)率とその改善率で決定される左辺第5項($C_0 c / (1-C_0)$)の和 α から、最終需要の増加率 β を減じた値が、当該資源の可採年数の逆数以上であれば、その需給システムは持続可能である。これにより、資源の有効利用技術や有効採掘技術、リサイクル率の向上技術などを普及させた場合に、持続可能性の向上にどの程度貢献するかを算定できる。

この概念に従い、さまざまな資源の持続可能性条件を以下に図示する。図1は(10)式で計算された持続可能限界を実線で記し、それに対する各資源利用状況をプロットしたものである。算定のための前提条件は紙面の関係で文献(2)に譲る。ただし、図中の CO_2 とは、 CO_2 放出量を大気中残留率に応じて補正し、負の資源としての持続可能限界と現状値を求めたものである。資源量に相当する大気中の許容濃度増加分については、産業革命以前の280 ppmの2倍とし算定している。

エネルギー資源の潜在持続可能性に関しては、特に石油、天然ガスが最近10年間の確認埋蔵量の増加もあり持続可能と判定されているが、潜在持続可能性では石炭を除き持続不可能と判定され、全体的に乖離度が高くなっている。ただし、ウランは軽水炉の利用のみを前提とした場合は持続不可能と判定されるが、高速増殖炉などの技術的、社会的問題が解決され、その世界的普及が進めば持続可能性が大幅に改善される。

CO_2 は上述したように負の資源と考え、その大気中残留率を考慮して補正している。 CO_2 の乖離度は、許容濃度増加分の設定に依存するため不確実性が高いものの、天然ガスの潜在乖離度と同程度であり、石炭の潜在乖離度より高い。

本章の結果をまとめると、現在の資源利用システムを持続可能限界上に引き上げるため、ライフサイクル効率の改善度合いが大きい技術を開発する必要がある。また、効率改善を促す経済方策も場合によっては必要であり、経済と技術の両面からのアプローチが持続可能なエネルギー利用の必須条件である。

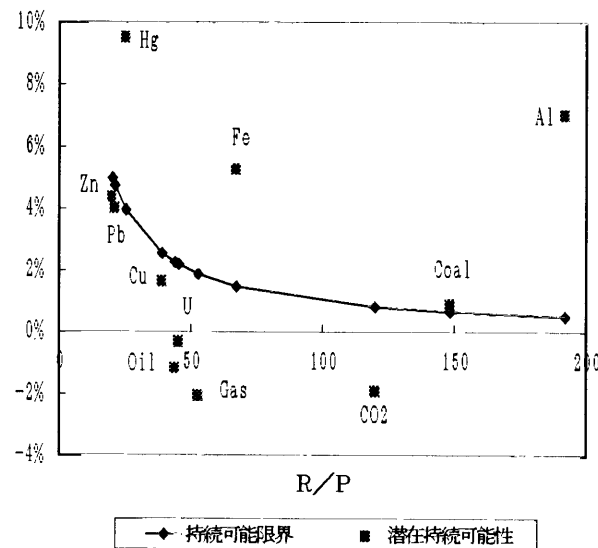


図1. 各資源の潜在持続可能性

3. LCA手法の一般化—廃棄物、副産物を含むモデル表現—

LCAのインベントリ分析において、最も基本的な手法は積み上げ法である。積み上げ法とは、評価対象となるシステム内の各々のプロセスにおける資源投入および生産物、副産物、排出物をリストアップし、プロセス間のリンクを考慮して文字通り積み上げる方法である。積み上げ法においては、プロセス間のリンクが複雑になった場合の波及の追跡が繁雑になり、結合生産やリサイクルが生じた場合の複数の産物に対する資源投入や排出の割り当てが適切に行われない可能性がある。

著者らは、上記の問題を克服するため、LCAのためのシステム連関モデルを開発し、積み上げ法の抱える波及追跡の繁雑さを解消すると共に、システム内の連関を考慮したB I配分法を提案した。⁽¹⁾以下では、分析すべきシステムの各プロセスの入出力から、システム全体の入出力を算定するシステム連関分析の基本的方法について述べる。

文献(2)において著者らは、以下のようなシステム表現により、(産業連関分析における)ONE PROCESS-ONE PRODUCTの原則を拡張したLCAのためのフレームワークを構築した。

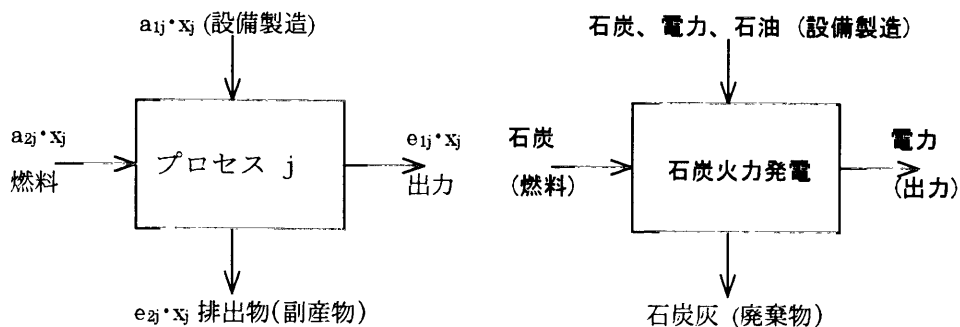


図2. プラントの入出力のモデル化の概念

図2より、プロセス j の活動 x_j に必要な全ての入力は下のようなベクトル形式で表される。

$$x_j \mathbf{a}_j = x_j \begin{pmatrix} a_{1j} \\ \vdots \\ a_{ij} \\ \vdots \\ a_{nj} \end{pmatrix} \quad (11)$$

したがって、全てのプラントの全ての出力に必要な全ての入力は次式のように表される。

$$\sum_{j=1}^n x_j \mathbf{a}_j = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \vdots & a_{2j} & \vdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nj} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_j \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \mathbf{A} \mathbf{x} \quad (12)$$

一方、当該プロセス（プラント）からの主産物、副産物または排出物については、中間投入と同様に以下のような数学表現を取る。ここで、いわゆる産業連関分析と本分析との概念の相違が明らかになる。上記のように、LCAにおいては、単一のプロセスから生じる複数の産物および排出物を評価に含め、複数の産物間の資源投入や環境排出の配分をおこなう必要がある。ところが、産業連関分析は、ONE PROCESS-ONE PRODUCT の原則で構成されており、副産物はマイナス投入方式による特殊な扱いを受けている。多様なシステムに対応するLCA分析をおこなうためには、この原則を崩すことが必要である。そこで、(12)、(13)式のベクトル $\mathbf{x}$ は、物質ではなく、プロセスであることを明示し、 $\mathbf{A}\mathbf{x}$ および $\mathbf{E}\mathbf{x}$ は各プロセスに投入もしくは産出される物質であることを明示する。これにより、(13)式に単一のプロセスからの複数の産出物または排出物（ex. CO₂, NO_x, SO_x, 重金属）を含めることができる。

$$\sum_{j=1}^n x_j \mathbf{e}_j = \begin{pmatrix} e_{11} & \cdots & e_{1j} & \cdots & e_{1n} \\ e_{21} & \vdots & e_{2j} & \vdots & e_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e_{n1} & \cdots & e_{nj} & \cdots & e_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_j \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \mathbf{E} \mathbf{x} \quad (13)$$

これらの結果から(14)式が得られる。

$$\mathbf{E} \mathbf{x} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{f} \quad (14)$$

$$\mathbf{x} = (\mathbf{E} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{f} \quad (15)$$

上の方程式のように、システムの状態が一意に定まる場合は、資源消費、環境排出の最終製品への割り当ては容易に決定できる。しかし、文献(2)で述べたように、結合生産やリサイクルがシステム内部に存在し、システムの解が一意に決定されない場合には、供給 $\geq$ 需要という定義から(16)式が得られる。この場合、(16)式の条件だけでは、プロセスベクトル $\mathbf{x}$ を決定することはできない。

$$Ex \geq Ax + f$$

$E - A = B$ とおくと、

$$Bx \geq f$$

(16)

このように、システム内部に代替性があり、システムの解が一意に決定されない場合においても、(14)式に対し、 $cx \rightarrow \min.(\max.)$ を目的関数として最適化することにより解 x が一意に定まる。

この最適基底を B_0 とすると、

$$x = B_0^{-1}f$$

$$x_j = B_0^{-1}f_1 + \cdots + B_0^{-1}f_i + \cdots + B_0^{-1}f_m f_m \quad (17)$$

$$\frac{\partial y_k}{\partial f_i} = \sum_{j=1}^m \left(E_{kj} \times B^{-1}_{ji} \right) \quad (18)$$

$$BI = E \times B_0^{-1} \quad (19)$$

すなわち、システム内部に代替性が存在する場合でも、何らかの評価基準によりシステムの状態が決定されれば、このときの最適基底逆行列を用いて、資源消費、環境排出を各製品に分配することができる。例えば、上のベクトル y の i 行目が CO_2 であり、最終需要ベクトル f の j 行目が乗用車であるとする。(19)式右辺の第 ij 成分は、乗用車の単位需要当たり、誘発される直接、間接の CO_2 放出である。したがって、この値を乗用車の CO_2 に関するライフサイクル放出量と考えることができる。その他の資源消費に関しても同様に評価することができる。この配分原理を限界配分とよぶことにする。

ところで、一般的にLCAをおこなう場合は、数十～数百種類におよぶ排出物を列挙し、これを持ってLCAとする傾向が見られる。これらの排出物の中には、地球環境関連の排出物だけでなく、重金属、有機塩素、その他の微量化学物質などが含まれる。こうしたLCAにおいては、上述してきたプロセス間の無限波及が考慮されず、限られたプロセスにおいて多様な排出物のインベントリを作成するケースが多いため、インベントリの精度が問題となる。重金属やダイオキシンなどによる汚染が緊急かつ重要な問題であることは論を待たないが、同時にLCAによってこうした排出物を評価すべきか否かについては、慎重な議論が必要である。上述の微量化学物質の生態系に及ぼす影響は、排出のされ方や、周囲の地質、水環境などによって異なる。したがって、例えば飲料容器のLCAに上記の微量化学物質を含めることの意義が問題になるのである。著者らは、こうした微量化学物質に対しては、LCAによるよりも、むしろ工場立地地点における規制などにより対処すべきであると考えている。プロセス間の複雑な波及を考慮して、新製品や新技術の環境評価をおこなうLCAの対象としては、排出地点や周囲の環境に影響されない温室効果ガスや資源・エネルギー消費などが適している。我々は、LCAに含めるべき項目とその限界をよく吟味するべきである。

また、LCAのいわゆる影響評価・改善評価についても問題点がある。例えば、典型的な影響評価としては、インベントリで評価された排出項目に、スイスのエコファクターなどで定義されている値で、重み付けして足し合わせるといった手法が取られる。地球環境関連の排出物と、微量化学物質など生態系や人体への生理学的影響をおよぼす物質を一次元の尺度に換算することが第一の問題である。上述した論点から、著者らは、本論文においては、地球環境関連の排出物と資源消費をLCA評価項目とする。次に、重みそのものにも問題がある。例えば、資源消費に関する各資源の重みには、その耐用年数(RP)の逆数がしばしば採用される。しかし、2章で示したように、耐用年数が小さくても、枯渇の危険性の低いものもあれば、耐用年数が大きくても危険性の高い資源もある。(図1)したがって、著者らは、地球環境関連の排出物および資源消費について、2章の分析を基にした評価をおこなうことを考えている。すなわち、新技術ないしは新プロセスをトータルシステム内に導入することによる資源・環境排出物の持続可能性の改善度を評価指標とするのである。この意味で、既存の製品や技術(プロセス)の環境負荷については、(17)

式による限界配分指標を用い、新製品や新技術（プロセス）の導入効果については、以下に示す限界改善指標を用いることを提案する。

いま、トータルシステム内に、新プロセス $\mathbf{b}_j$ を微小単位 θ だけ導入する場合を想定する。プロセス $\mathbf{b}_j$ に対する排出行列 E の j 列目の列ベクトルを $\mathbf{e}_j$ とする。このときの、元のプロセスベクトル $\mathbf{x}$ とプロダクトベクトル $\mathbf{y}$ の変化量は以下ようになる。

$$\begin{aligned} B_0 \mathbf{x} &= f \\ B_0 (\mathbf{x} + \Delta \mathbf{x}) + \theta \mathbf{b}_j &= f \\ \Delta \mathbf{x} &= -\theta B_0^{-1} \mathbf{b}_j \\ \Delta \mathbf{y} &= -\theta E B_0^{-1} \mathbf{b}_j + \theta \mathbf{e}_j \end{aligned} \quad (20)$$

すなわち、新プロセス $\mathbf{b}_j$ を単位当り導入したときの、改善量は $E B_0^{-1} \mathbf{b}_j + \mathbf{e}_j$ で表され、これを限界改善指標と呼ぶことにする。また、(20)式の $\Delta \mathbf{y}$ の中、第 i 成分 Δy_i がCO₂の限界改善指標だとすると、 $\Delta y_i / y_i$ はCO₂に関する持続可能性の改善率を表す。これを限界持続可能性改善率と呼ぶこととし、次章の分析で用いる。

4. GV（ガソリン自動車）、EV（電気自動車）の走行時における比較分析

本章においては、ガソリン車と電気自動車のライフサイクルエネルギー消費量、CO₂放出量を比較する。このために、走行時、製造時各々のエネルギー投入を評価し、ここからライフサイクル消費量への波及を算定する。

4.1 自動車に働く走行抵抗

自動車が走行中に受ける抵抗は、転がり抵抗と空気抵抗の他に、走行中常に加・減速が繰り返されることや坂道での走行が行われることなどから、さらに加速抵抗と勾配抵抗を加えて取り扱う。

転がり抵抗は、車輪が路面を転がる際に受ける抵抗で、これにはタイヤや路面の変形、路面の凹凸による衝撃、タイヤと路面との間の滑りなどが影響する。転がり抵抗を R_{roll} [kgf]とすると、

$$R_{roll} = \mu W g \quad (21)$$

ただし、 μ : 転がり抵抗係数、 W : 車両総重量[kg]、 g : 重力加速度[m/s²]。

空気抵抗 R_{air} [kgf]は、車体表面の摩擦抵抗と形状抵抗成分とから成り、次式で表される。

$$R_{air} = C_D \frac{\rho}{2} A v_a^2 \quad (22)$$

ただし、 C_D : 空気抵抗係数、 ρ : 空気密度[kgs²/m³]（1気圧15℃のとき、 $\rho = \frac{1}{8}$ [kgs²/m³]）,

A : 車体の前面投影面積[m²]、 v_a : 車体の対空速度[m/s]。

加速抵抗は、自動車を加、減速するときに加わる慣性力を抵抗として扱ったときの値であり、自動車の加速度を α [m/s²]とすると、加速抵抗 R_α [kgf]は次式で表される。

$$R\alpha = \phi W\alpha \quad (23)$$

ただし、 ϕ : 回転部分による見かけの重量増加係数、 W : 車両総重量[kg]。

勾配抵抗または登坂抵抗 R_s [kgf]は、車両が勾配を昇降するときの抵抗で、上りの場合、

$$R_s = Wg \sin \theta \cong Wg \tan \theta \quad (24)$$

ただし、 θ : 坂道の傾斜角、 W : 車両総重量[kg]、 g : 重力加速度[m/s²]。

全走行抵抗を R [kgf]とすると、式(21)～(24)より

$$\begin{aligned} R &= R_{roll} + R_{air} + R\alpha + R_s \\ &= \mu Wg + C_D \frac{\rho}{2} A v_a^2 + \phi W\alpha + Wg \sin \theta \end{aligned} \quad (25)$$

動力伝達装置の伝達効率を η_t 、ギア比を i とすると、全抵抗が R [kgf]の自動車を速度 v [m/s]で走らせる際に要する走行所要動力 N_e [W]は、

$$N_e = \frac{Rv}{\eta_t} \quad (26)$$

また、機関の所要トルク T_e [kgf・m]は、タイヤの有効半径を r [m]とすると次のようになる。

$$T_e = \frac{Rr}{i \eta_t} \quad (27)$$

一方、車速 v [m/s]の時のエンジン回転数 n [rps]は

$$n = \frac{vi}{2\pi r} \quad (28)$$

(26)～(28)式より(29)式が成り立つ。

$$N_e = 2\pi T_e n \quad (29)$$

4.2 自動車スペックの設定

本研究で仮定したガソリン乗用自動車及び電気乗用自動車の推進装置の性能を表1に示す。電気乗用自動車に関しては、モーター1個を後輪駆動用に組み込むものとする。

表1. 推進装置の性能

	GV	EV
出力 (kW)	100	80
排気量 (cc)	2000	—

両車に共通の主要諸元表を表2に示す。

表 2. GV 及び EV に共通の主要諸元表

	GV	EV
前面投影面積 (m ²)	1.98	1.98
空気抵抗係数	0.34	0.34
転がり抵抗係数	0.01	0.01
タイヤ有効半径 (m)	0.292	0.292
動力伝達効率	0.90	0.90

電気乗用自動車のモーター及び電池の主要諸元表は表 3 の通りである。

ガソリン乗用自動車のエンジン特性シミュレータについては、この自動車が搭載するエンジンの出力特性マップに基づいて構成されている。

また、電気乗用自動車については、この自動車が搭載するモーターの出力特性及び、電池の諸特性に基づいて構成されている。

表 3. EV 固有のスペック

	鉛酸電池	リチウムイオン電池
電池重量 (kg)	480	348
電池出力密度 (W/kg)	120	120
電池エネルギー密度 (Wh/kg)	37.5	100
電池充放電効率 (%)	80.0	95.5
モーター出力 (kW)	80	80
トルク定数 (N/A)	0.97	0.97

4.3 燃料消費量の計算

本節においては、前節までの前提条件に基づき、いくつかの典型的な走行パターンに対する燃料消費量を評価した。走行パターンとしては、40km 定速走行、10.15 モード走行、都内の実走行モードの各々を想定した。40km 定速走行については説明を要しないが、10.15 モードについては、以下に簡単な説明を付す。都内の実走行モードについては、文献(3)を参照されたい。

10.15 モードとは、10 モードに高速道路を想定した走行パターンを加え、現実の都市内走行にさらに近づけることを目的としたものを 10.15 モードと呼ぶ。現在では、10 モードに変わり、燃費評価の際の標準として用いられることが多い。

図 7 から分かるように、10 モードの走行パターンを三度繰り返した後、高速道路に乗ることを想定して最高 70 km/h まで加速することが特徴である。1 サイクルの所要時間は 660 秒である。

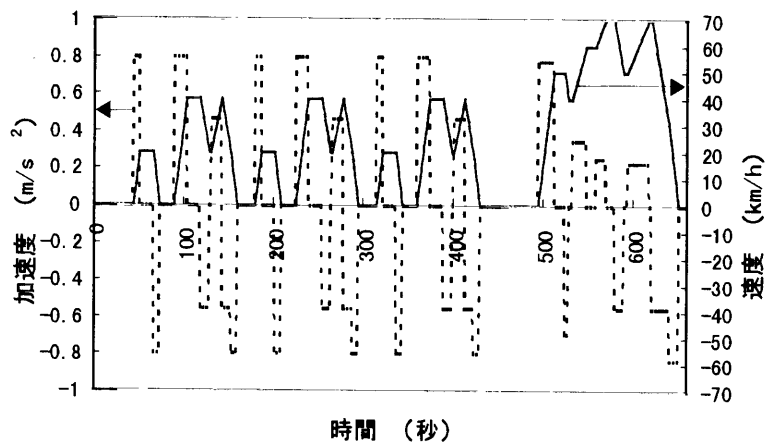


図7. 10.15 モード走行サイクル

J I S規格で定められている試験条件のうち、シミュレータ内では以下の条件を用いている。

- ・試験路は、平らで、かつ水平な直線舗装路を仮定
- ・試験自動車の質量は、空車状態の自動車に2人の人員（人員1人の質量は55kgとする）が乗車した質量とする。

4.4 燃料消費量の計算結果

前節までの条件に基づき、以下の仮定をおいて、ガソリン乗用車と電気自動車について走行シミュレーションをおこなった。

- (1) シミュレーションは 10.15 モード走行、40km 定速走行、都内の実走行モードのそれぞれについておこない、各走行モードにおけるエネルギー消費量をガソリン乗用車と電気自動車で比較した。
- (2) 車体の重量に関するデータは、A社の普通乗用車（2000cc）を基本とした。すなわち、ガソリン車については、この乗用車の車重および形状に関するデータを用いてシミュレーションをおこない、電気自動車については、この車両から内燃機関に関する部分を取り除き、電池、モータ（1個）、制御機器を搭載するものとして車重を推定した。（また、J I S規定により 55 k g の人を二人乗せるものとした。）
- (3) 電池については、今回は実用性を重視して鉛酸電池と革新技術としてのリチウムイオン電池を用いることとした。電池のパラメータおよび積載重量については、表3に示した鉛酸電池のデータを用いた。

4.5 GV およびEV の走行時消費エネルギー

GV と EV のライフサイクルでのエネルギー消費を比較するために、まず本節では需要端でのエネルギー消費を算定した。EV の受電端電力の算出には、電池の充放電効率と、充電器（商用電源から直交変換を行うもの）の効率を考慮する必要がある。これらを考慮した算定結果を表4（エネルギー消費量）および表5（航続距離）に示す。

表4. 走行モード別エネルギー消費量の推定結果

	平均 車速 Km/h	GV [MJ/km]	EV (鉛酸) [MJ/km]	EV (リチウム イオン) [MJ/km]
実走行 モード	4.62	13.26	2.61	1.96
	8.35	7.81	2.29	1.71
	11.66	5.84	1.80	1.35
	14.63	4.82	1.55	1.16
	17.96	4.05	1.67	1.25
	18.47	3.96	1.80	1.34
	23.65	3.24	1.42	1.06
	28.50	2.76	1.36	1.01
	34.73	2.35	1.13	0.85
	44.34	1.88	0.84	0.63
10.15 モード	22.69	3.27	1.01	0.76
定速走行	40.00	1.96	0.36	0.28

表5. 走行モード別航続距離の推定結果

平均車速 Km/h	航続距離 EV (鉛酸) Km	航続距離 EV (リチウムイオン) km
4.62	37.22	83.57
8.35	42.50	95.79
11.66	54.02	121.44
14.63	62.57	140.58
17.96	58.27	131.35
18.47	54.13	122.23
23.65	68.50	154.12
28.50	71.64	161.57
34.73	86.08	193.49
44.34	116.04	259.46
22.69	96.53	215.68
40.00	266.89	576.11

5. GV と EV のライフサイクル CO₂ 排出量の比較

走行シミュレーションモデル計算結果に基づいて自動車のライフサイクル CO₂ 排出量の計算を行った。表6は走行モード別、平均車速別、GV・EV別、電池別走行1万kmあたりエネルギー消費量を示している。自動車の走行1万kmあたりで表示しているのは、後で自動車製造によるCO₂排出量とあわせて総合効果を計算するに際して、自動車の1年間の走行距離を1万kmと想定しているからである。実走行モードについては、平均車速が異なる10種類のモードおよび10.15モード、40km定速走行の結果が表示されている。

表6. 走行モード別、平均車速別、GV・EV別、
電池別 走行1万kmあたりエネルギー消費量

走行モード	平均 車速 Km/h	GV l	EV	
			鉛酸 電池使用 kWh	リチウムイオン 電池使用 kWh
実走行モード	4.6	3771	7254	5442
	8.3	2221	6353	4747
	11.7	1660	4998	3745
	14.6	1370	4315	3235
	18.0	1151	4634	3462
	18.5	1125	4988	3720
	23.6	921	3942	2950
	28.5	786	3769	2814
	34.7	668	3137	2350
	44.3	535	2327	1753
	44.3	535	2327	1753
10.15モード	22.7	930	2797	2108
定速走行	40.0	556	1012	789

1) 1cal=4.18605Jで換算している。

2) ガソリンは1l=8.4kcalで換算している。

3) 電力は1kWh=860kcalで換算している。

表7. 走行モード別、平均車速別、GV・EV別、
電池別走行1万kmあたりエネルギー消費金額

走行モード	平均 車速 Km/h	GV 万円	EV	
			鉛酸 電池使用 万円	リチウムイオン 電池使用 万円
実走行モード	4.6	33.9	14.2	10.6
	8.3	20.0	12.4	9.3
	11.7	14.9	9.8	7.3
	14.6	12.3	8.4	6.3
	18.0	10.4	9.1	6.8
	18.5	10.1	9.8	7.3
	23.6	8.3	7.7	5.8
	28.5	7.1	7.4	5.5
	34.7	6.0	6.1	4.6
	44.3	4.8	4.6	3.4
	44.3	4.8	4.6	3.4
10.15モード	22.7	8.4	5.5	4.1
定速走行	40.0	5.0	2.0	1.5

産業連関表を用いて、自動車走行のエネルギー消費による誘発計算を行うため、表6のエネルギー消費量に、エネルギー単位あたりの単価を乗じてエネルギー消費金額を計算した。表7は走行モード別、平均車速別、GV・EV別、電池別走行1万kmあたりエネルギー消費金額を示している。産業連関表の価格表示

には生産者価格表示と購入者価格表示がある。生産者価格表示は工場で出荷した段階の価格に相当する。購入者価格表示は生産者価格に商業マージン、国内運賃額が上乗せされたものである。表7におけるエネルギー消費金額は購入者価格で表示されている。

表7にもとづいて、産業連関表に基づく誘発計算を行った。表8は走行モード別、平均車速別、GV・EV別、電池別走行1万kmあたりCO₂排出量を示している。GVの走行によるCO₂排出の大部分は、走行時のガソリン燃焼によるものであるが、石油精製所でガソリン製造する際のCO₂排出が含まれている。EVの走行によるCO₂排出の大部分は、火力発電所でのCO₂排出である。

図8は、表8の結果のうち実走行モードについて、縦軸に走行1万kmあたりCO₂排出量、横軸に平均車速をとってプロットしたものである。

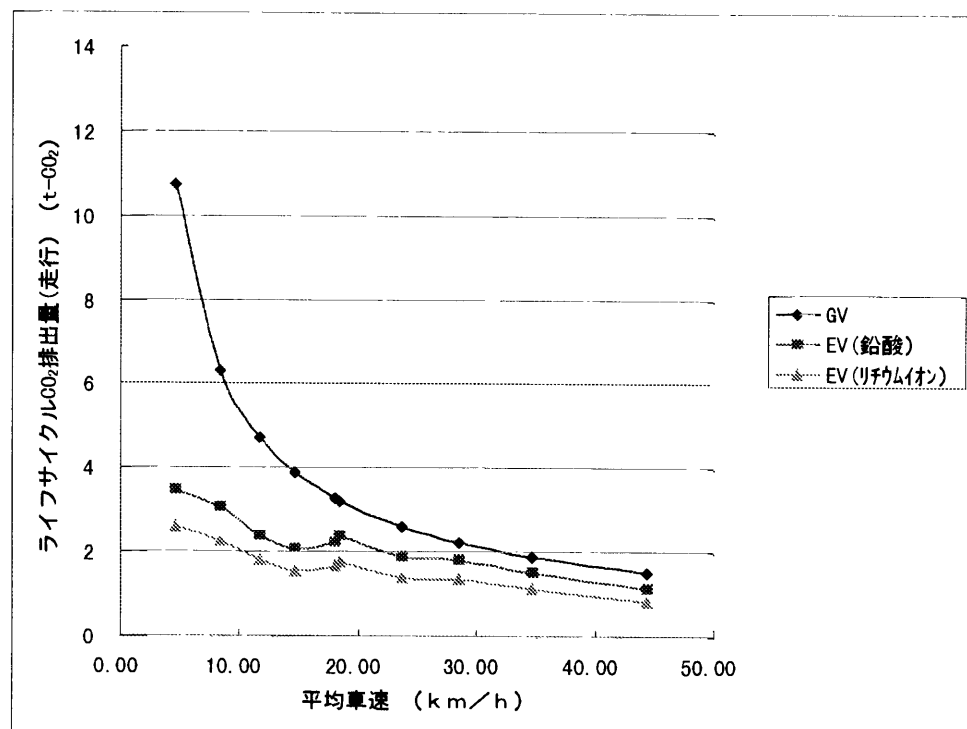


図8. 走行モード別、平均車速別、GV・EV別、電池別走行1万kmあたりCO₂排出量

図8から、GV、鉛酸電池使用EV、リチウムイオン電池使用EVの順でCO₂排出量が多いことが分かる。また平均車速が相対的に遅いケースの方が、GVとEVの差が大きい。すなわち、平均車速が遅い場所で運転するときは、EVはCO₂排出量が相対的に少ないことになる。

次に自動車製造によるCO₂排出量を考える。EV製造によるCO₂排出を、①電池製造、②モータ製造、③電池、モータ以外の部品および車体製造に分けて計算を行う。鉛酸電池については電池製造に必要な原材料のデータが入手できたが、リチウムイオン電池については同様のものを入手できなかった。ここではリチウムイオン電池製造によるCO₂排出計算は今後の課題であるとし、鉛酸電池について計算を行った。その結果、EV1台あたりに必要な鉛酸電池の製造によるCO₂排出量は853.2kg-CO₂であることが分かった。

表8. 走行モード別、平均車速別、GV・EV別、
電池別 走行1万kmあたりCO₂排出量

走行モード	平均 車速 km/h	GV kg-CO ₂	EV	
			鉛酸 電池使用 kg-CO ₂	リチウムイオン 電池使用 kg-CO ₂
実走行モード	4.6	10744	3485	2614
	8.3	6328	3052	2281
	11.7	4729	2401	1799
	14.6	3904	2073	1554
	18.0	3278	2226	1663
	18.5	3207	2396	1787
	23.6	2624	1894	1418
	28.5	2240	1811	1352
	34.7	1903	1507	1129
	44.3	1525	1118	842
10.15モード	22.7	2650	1344	1013
定速走行	40.0	1585	486	379

表9. 走行モード別、平均車速別、鉛酸電池充電
1回あたり航続距離

走行モード	平均車速 Km/h	航続距離 Km
実走行モード	4.6	37.2
	8.3	42.5
	11.7	54.0
	14.6	62.6
	18.0	58.3
	18.5	54.1
	23.6	68.5
	28.5	71.6
	34.7	86.1
	44.3	116.0
10.15モード	22.7	96.5
定速走行	40.0	266.9

次に1年あたりに換算するため鉛酸電池の耐用年数をもとめた。鉛酸電池の耐用年数の計算方法は、表9に示された走行モード別、平均車速別、鉛酸電池充電1回あたり航続距離に基づいて行う。表9に示された電池充電1回あたり航続距離から耐用年数を以下の式によってもとめた。

$$\begin{aligned}
 (\text{耐用年数}) &= (\text{充電1回あたり航続距離}) \\
 &\times (\text{生涯充放電回数}) \\
 &\div (\text{年間走行距離})
 \end{aligned}$$

ここでは、生涯充放電回数（電池が充放電可能な回数）を358回、年間走行距離を1万kmと想定している。表10は以上のようにして計算した走行モード別、平均車速別鉛電池耐用年数を示している。表10の耐用

年数を用いて、電池製造によるCO₂排出量を1年あたりに換算した。その計算結果は表11に示されている。電池以外の部品および車体についてはすべて耐用年数を5年で計算した。また電池以外の製造によるCO₂排出については以下のような結果になった。まずモータ製造（EV1台あたり）によるCO₂排出量は想定して、30.12kg-CO₂である。電池、モータ以外の自動車部品、車体製造（EV1台あたり）によるCO₂排出量は734.86kg-CO₂である。そしてGV1台製造によるCO₂排出量は916.22kg-CO₂であった。これら製造時のCO₂負荷計算結果および走行時のCO₂負荷計算結果をまとめて総合効果を計算した。表12は走行モード別、平均車速別、GV・EV別1年あたりCO₂排出量（総合効果）を示している。また、これらを図9に示す。

表10. 走行モード別、平均車速別鉛電池耐用年数

走行モード	平均車速 km/h	耐用年数 年
実走行モード	4.6	1.33
	8.3	1.52
	11.7	1.93
	14.6	2.24
	18.0	2.08
	18.5	1.94
	23.6	2.45
	28.5	2.56
	34.7	3.08
	44.3	4.15
10.15モード	22.7	3.45
定速走行	40.0	9.54

- 1) 電池の生涯充放電回数358回を想定している。
- 2) 年間1万km走行した場合を想定している。

表11. 走行モード別、平均車速別、鉛酸電池製造による1年あたりCO₂排出

走行モード	平均車速 km/h	CO ₂ 排出量 kg-CO ₂
実走行モード	4.6	641
	8.3	562
	11.7	442
	14.6	381
	18.0	410
	18.5	441
	23.6	348
	28.5	333
	34.7	277
	44.3	206
10.15モード	22.7	247
定速走行	40.0	89

表12. 走行モード別、平均車速別、GV・EV別、
電池別1年あたりCO₂排出量(総合効果)

走行モード	平均車速 Km/h	GV Kg-CO ₂	EV 鉛酸電池使用 kg-CO ₂
実走行モード	4.6	11660	4891
	8.3	7245	4379
	11.7	5646	3608
	14.6	4820	3220
	18.0	4194	3401
	18.5	4123	3602
	23.6	3541	3007
	28.5	3156	2909
	34.7	2820	2549
	44.3	2442	2089
10.15モード	22.7	3566	2356
40km/h定速走行	40.0	2501	1340

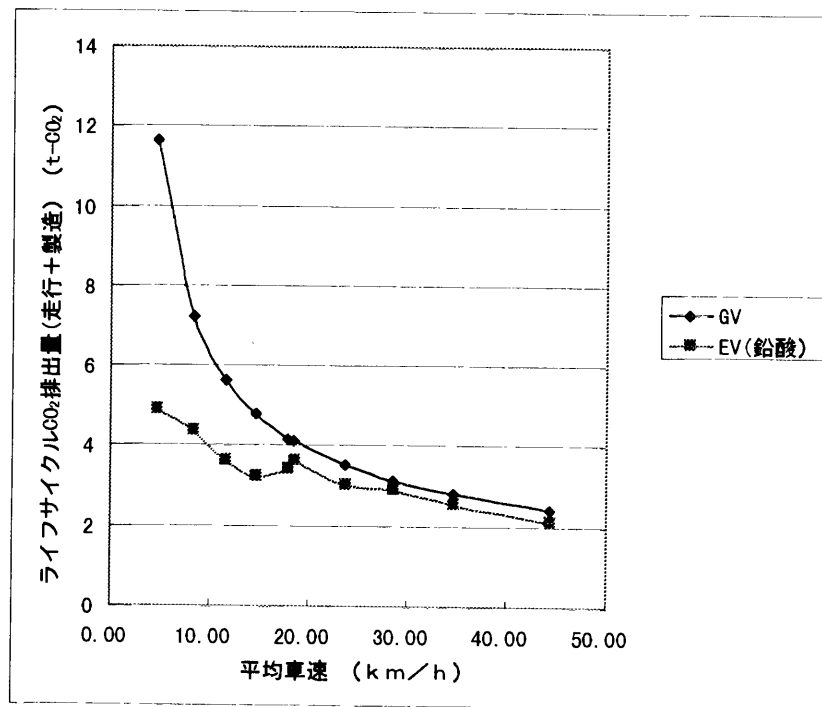


図9. GVとEVの平均車速別1年あたりCO₂排出量(総合効果)の比較結果

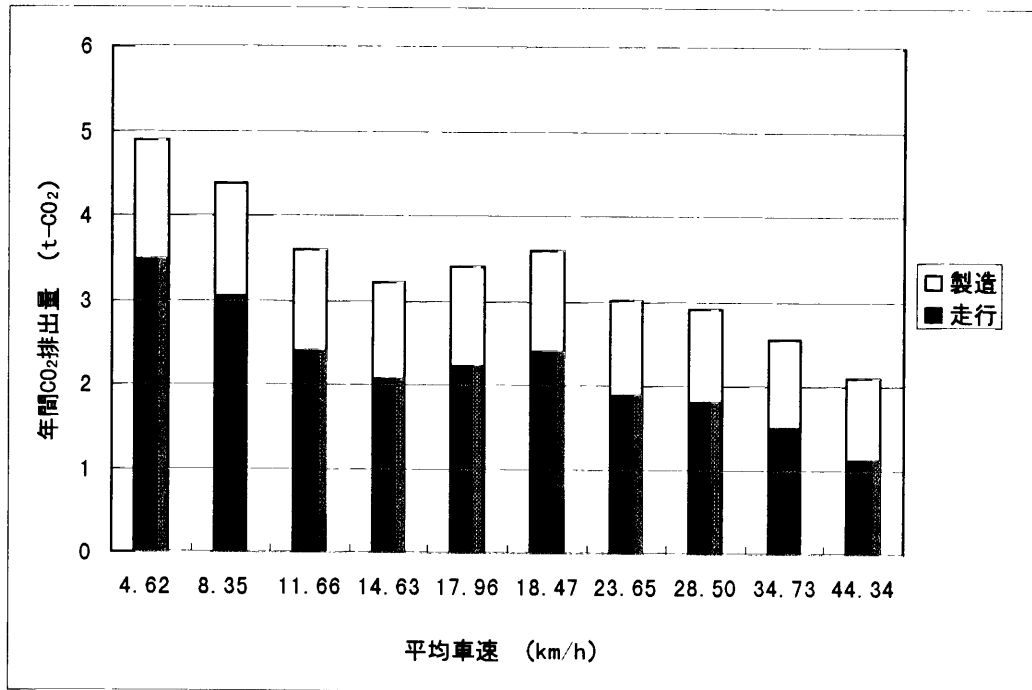


図 10. EV（鉛酸電池利用）における年間CO₂放出量に占める製造・走行の内訳

これらのLCA評価結果からさまざまな示唆が得られる。まず第一に、自動車走行時に起因するCO₂でも自動車の製造を含むCO₂でも（ここでの前提条件下では）電気自動車の方が発生量が少ないということである。次に、定量的には、渋滞が少なく、定速走行に近づくほど、両者の（特にガソリン車の）ライフサイクルCO₂発生量は小さくなるということである。このことは、電気自動車への代替ということだけでなく、新交通システムの導入などによる渋滞の緩和なども大きなCO₂削減効果があることを意味する。著者らは、これらの走行モード以外にも、様々な平均車速の実走行パターン下でのLCA比較をおこなっている。^③これによると、一般の実走行モードでは、平均車速が大きくなるほど電気自動車とガソリン車の差は小さくなる。これは、渋滞が激しく、加速、減速の多いモードでは、電気自動車の回生ブレーキが効果的であるためと考えられる。（いうまでもなく、定速ではエネルギー回生は不可能である。）したがって、渋滞の相対的に大きい都市と地方では電気自動車の優位性に大きな差があることになる。

したがって、交通システム全体としての効率改善または環境改善を図るためには、都市中心部での代替燃料車（ここでは電気自動車）と郊外における従来車を組み合わせて用いることも有望な方策と考えられる。また、EVに関しては、図10に示すように、平均車速が上がるほど、製造によるCO₂放出の割合が大きくなる。したがって、渋滞の少ない走行モードでライフサイクルCO₂を改善するためには、製造部分の考慮、特に電池の軽量化や寿命の改善などが重要な技術課題になると考えられる。

ここで、3章で示した持続可能性改善率を求めると、10.15modeで2.1%程度であり、図1と比較することにより相当の持続可能性改善効果が認められる。ただし、鉛酸電池EVの導入だけで、CO₂を持続可能限界上に引き上げるには不十分であり、リチウムイオン電池や燃料電池といった電池の改良などさらなる技術の導入が必要である。

さらに、EVに関しては、周知のように、加速性、航続距離など性能面で未だGVに劣る面があり、上述のように都市と郊外でEVとGVの使い分けをおこなう必要が有るであろう。また、ここではLCA評価のみで価格に関する議論をおこなっていない。EVがGVより相対的に高価であることからくる普及の問題点と消費者の選好については、文献(5)などを参照されたい。

6. まとめ

本稿においては、資源、環境の持続可能性について論じた後、資源利用システムの耐用年数の変化率より持続可能限界の概念を提案した。さらに、実際のエネルギー資源、鉱物資源、環境排出物について、持続可能性を定量的に評価した。これによると、特にエネルギー資源およびCO₂などの環境排出物が持続不可能な状態にあると判定された。

次に、システム連関分析によるLCA手法の枠組みについて述べた。さらに、このLCA手法の適用対象として、ガソリン乗用車（GV）と電気自動車（EV）を取り上げ、その評価をおこなった。この結果、両者の製造、走行を含めたライフサイクルCO₂発生量が算定され、走行モードによる相違も示された。これより、長期的な持続可能性を維持するためのEV技術開発の方向性およびGVとEVの使い分けに関する示唆が得られた。

今後は持続可能なシステム実現のための評価手法としてのLCA手法を完成させるとともに、EVを含む新技術の分析も併せて進めていく予定である。

<参考文献>

- 1) 吉岡, 石谷, 松橋, 「線形計画法を利用したライフサイクルアセスメント手法の研究」, シミュレーション, 15, 72-78 (1996)
- 2) 松橋, 疋田, 石谷, 「持続可能な超長期資源利用シナリオの検討」第11回エネルギーシステム経済コンファレンス(1995)
- 3) 工藤, 石谷, 松橋, 吉田, 小林, 盛田, 香月, 「交通流を考慮した環境改善効果に関する研究」, 第14回エネルギーシステム・経済コンファレンス(1998).
- 4) 松橋隆治, 「持続可能なエネルギーシステムのための技術開発と経済方策」, 平成9年度東京大学工学講座「21世紀の工学像を求めて」講演論文集, pp31-48(1997)
- 5) 塚田路治, 石谷久, 松橋隆治, 「ロジットモデルを用いた運輸部門のCO₂排出量低減策の分析」, シミュレーション vol. 15, No. 2(1996)