OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	ハイブリッド型システムの総合最適性と方式転換に関する研究（ビークルにおけるライフサイクル最適性と先導設計を事例として）
Author(s)	藤田, 喜久雄; 柴, 紳司
Citation	日本機械学会論文集 C編. 2002, 68(665), p. 339-347
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/3468
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

日本機械学会論文集 (C 編)
68 巻 665 号 (2002-1)

論文 No. 01-0518

ハイブリッド型システムの総合最適性と方式転換に関する研究
(ビークルにおけるライフサイクル最適性と先導設計を事例として)*

藤田 喜久雄*1, 柴 紳司*2

A Study on Integrated Optimality and Optimal Structure Changeover of Hybrid Systems
(An Investigation into Life-Cycle Optimality and Leading Design of Vehicles) *

Kikuo FUJITA*3 and Shinji SHIBA

*3 *Dept. of Computer-Controlled Mechanical Systems, Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan*

This paper investigates the integrated optimality and optimal structure changeover of hybrid-type systems. The environmental issue on the earth forces engineering design to configure new machines or equipments to reduce energy consumption or carbon dioxide gas release. While there are a few successful design implementations, it is essential to establish rational design scenario or methodology to accelerate a new design paradigm. This paper demonstrates the importance of system-based design and system-level optimality, which are accessed with any mathematical means, with an example of leading design of vehicles toward life-cycle optimality. After providing general conception, the system structure of vehicles are compared among gasoline internal combustion engine vehicle, THS-type hybrid electric vehicle and genuine electric vehicle in the aspects of fuel economy, total cost and life-cycle-based environmental impact. Furthermore, the influences of battery performance progress and the external changes such as environment taxation system or fuel price on the system structure optimality are outlined as examples of the utility of system-based optimal design methodology.

Key Words : Design Engineering, Systems Engineering, Leading Design, Environmentally-Conscious Design, Hybrid Systems, Optimal Design, Vehicle Design, Life-Cycle Assessment

1 緒 言

環境問題やエネルギー問題が広く認識されるに至って，地球環境や省資源に配慮した機械や製品が具体化され始めるとともに，そのような動向を理論的に後押しするための方法論も構築されつつある．ハイブリッド方式による自動車 (Hybrid Electric Vehicle, HEV) の登場(1)やライフサイクルアセスメント (Life Cycle Assessment, LCA) の展開(2)はそれらの具体例である．システムのハイブリッド化や総合評価の導入はさらに加速されるべきものであるが，それらに伴って設計対象となるシステムは複雑化するとともに，評価内容もより広範な視点に基づく必要がある．これに対して，中島ら(3)は新規なシステムの開発に当っては要素技術の開発に対してシステム設計を先行させることにより前者の達成目標を事前に明確化することの重要性を指摘して先導設計を提唱しているが，それ自体は一般的な機械や製品についても展開されるべきものである．

* 原稿受付 2001 年 4 月 26 日
*1 正員, 大阪大学大学院工学研究科 (〒 565-0871 吹田市山田丘 2-1).
*2 トヨタ自動車 (研究当時：大阪大学大学院工学研究科).
Email: fujita@mech.eng.osaka-u.ac.jp

本研究は，以上のことを踏まえて，ハイブリッド型システムの最適設計問題を取り上げ，システム方式が総合最適性に及ぼす影響の様相を抽出し，機械や装置の設計計画に向けての指針となすことを目的とする．具体的には，まず，抽象度を高めて，一般的な機械システムにおけるハイブリッド化の意味を論じ，その最適設計問題における典型的な状況を抽出する．続いて，ビークルの先導設計を事例として取り上げ，要素技術の展開や LCA がもたらすガソリン自動車・ハイブリッド自動車・電気自動車という 3 方式の間での最適性に対する影響を検討することによって，典型的な状況を例示する．それによって，環境問題を考慮した機械や装置の設計におけるシステムズアプローチ(4)(5)の意義と有用性を改めて明確にする．

2 ハイブリッド型システム論

2.1 ハイブリッド型エネルギーシステムにみるカスケード性

エネルギーが機械や装置を駆動する上での根幹であることは言うまでもない．その源は自然界にあり，利用に当っては何らかの手段を通じて使用地に移送し目的に適合した形態に変換することが行わ

れる．この状況は電力を例に挙げれば理解しやすい．環境問題のもとで論じられるいわゆるライフサイクルは，製品や機械の側から見たそれらのライフサイクルを指す場合が多いが，それらの駆動に用いられるエネルギーに着目すれば，エネルギーのライフサイクルも同様の考慮対象となる．例えば，発電におけるコンバインドサイクルはタービンを駆動した後の燃焼ガスを蒸気発生に用いるものであり，コージェネレーション[(6)]も発電に用いた後のエネルギーを他の目的に展開するものである．これらは，ライフサイクルの各時点における品位に応じた利用を重ね合わせることによって，つまり，カスケード化によって，エネルギーの利用効率を向上させようとするものである．

2.2 ビークルにおけるカスケード性 自動車・バス・トラックなどのいわゆるビークルにおけるエネルギー利用についても上記と同等の解釈を行うことができる．例えば，エネルギー源としてのガソリンの利用はビークル特有の移動目的に適合するための手段であり，また，内燃機関の動力特性を必要な動力特性に適合させる上での変速機構も不可欠なシステム要素であるが，これらはカスケード利用の構成要素となっている．また，環境問題の視点から注目を集めているHEVについても，システム全体をメカニズムに依らない変速機構であるとみたり，制動エネルギーの回生による運動エネルギーのカスケード化利用とみたりすれば，同様の視点を構成することができる．

2.3 ハイブリッド化とシステム方式の転換可能性

上記のカスケード化を目指したハイブリッド化は，いくつかの意味を含んでいる．エネルギーの有効利用という視点に立てば，機能を達成する上では冗長なサブシステム群を用意しておいて，それらをそれぞれの効率の優れた範囲で使い分けようとするものであることから，運用における高効率を期待することができる．その反面，明らかにシステムの構成は肥大化していて，カスケード化におけるバランスが崩れれば，過剰な機能要素を内在していることになって，システム構成についての最適性は低下することもある．つまり，システムの構成と運用の間にはトレードオフの関係があって，例えば，外的な要因が変化すれば，システムの最適な方式が変化する可能性もある．

以上の内容を一般化すれば，システムのハイブリッド化にはいわゆる「好適方式」[(7)]が存在することになる．したがって，優れたシステムを構成するためには，方式選定・システム設計・要素設計のすべての観点から設計を考える必要がある．しかしながら，現状での環境問題を考慮した設計展開においては，ややもすれば要素レベルの検討に留まっている場合も多く，システムという観点のもとで各種の要因を結び付けて設計を進めようとする視点が乏しいようである．

3 ハイブリッド型システムの総合最適性

3.1 システム設計問題の一般化 前節での視点を一般的に論じるには，設計対象のシステムとしての抽象化が不可欠である．数理的な立場に基づけば，その設計問題は以下の最適化問題として把握することができる．

$$\left.\begin{array}{rl} \text{find} & \boldsymbol{x} \\ \text{that minimizes} & f(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{p}) \\ \text{subject to} & \boldsymbol{x} \in \mathit{Feasible}(\boldsymbol{p}) \end{array}\right\} \quad (1)$$

ここで，$\boldsymbol{x}$ は設計変数，$\boldsymbol{p}$ は設計パラメータ，f は目的関数，*Feasible* は実行可能領域である．

これに対して，ハイブリッド型システムは複数のサブシステムから構成されるものであるため，$\boldsymbol{x}$ がサブシステムごとに $\boldsymbol{x}_s$ ($s = 1, 2, \cdots, N_s$) に分割できるものとし，加えて，それぞれに固有な要素技術のレベルを $\boldsymbol{e}_s$ ($s = 1, 2, \cdots, N_s$) と表せば，式 (1) は以下のように書き直すことができる．

$$\left.\begin{array}{rl} \text{find} & \boldsymbol{x} = \left\{ {\boldsymbol{x}_1}^T, {\boldsymbol{x}_2}^T, \cdots, {\boldsymbol{x}_{N_s}}^T \right\}^T \\ \text{that minimizes} & f(\boldsymbol{y}_1, \boldsymbol{y}_2, \cdots, \boldsymbol{y}_{N_s}, \boldsymbol{p}) \\ \text{subject to} & \boldsymbol{y}_s = \boldsymbol{f}_s(\boldsymbol{x}_s, \boldsymbol{e}_s, \overline{\boldsymbol{y}_s}, \boldsymbol{p}) \\ & \qquad (s = 1, 2, \cdots, N_s) \\ & \boldsymbol{x} \in \mathit{Feasible}(\boldsymbol{p}) \end{array}\right\} \quad (2)$$

ここで，$\overline{\boldsymbol{y}_s}$ は $\bigcup_{i \neq s} \boldsymbol{y}_i$ であり，サブシステム s への他のサブシステムからの入力を意味している．

式 (2) の形式は，サブシステム $\boldsymbol{x}_{s_1}$ の内容に依存してサブシステム $\boldsymbol{x}_{s_2}$ の最適性が変化することを意味しており，各サブシステムの内容をそれぞれに独立して決定したのでは全体としての優れた設計解を得られないことを意味している．言い換えれば，ハイブリッド型システムの設計はシステムズアプローチのなかでも数理計画法による最適設計に依らざるを得ないということになる．

3.2 総合最適性に向けての評価指標の拡大

数理計画法により何らかの設計解を確定させるには目的関数 $f(\cdot)$ を具体的に定める必要がある．旧来からの最適設計においては性能指標や初期システムコストなどを用いることが多かったが，環境問題のもとでは評価対象を拡大する必要がある．そもそも LCA は対象のライフサイクルにおけるすべての局面におけるコストや影響を総合的に評価しようとするもの

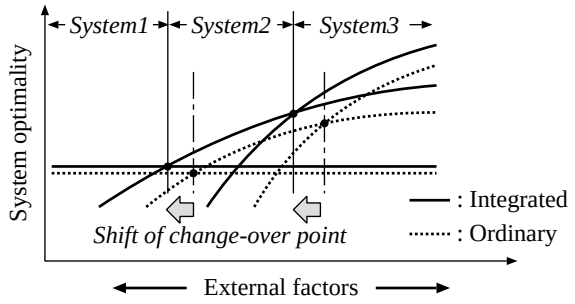


Fig. 1 Optimality changeover of system structure and influence of optimality measures

である[(2)]が，LCA を抽象的にとらえれば，評価対象の局面を単一のものから一連のものへと総合化するものとすることができる．それらの局面を p ($p = 1, 2, \cdots, N_p$) とし，旧来の設計が $f_{\hat{p}}(\cdot)$ $(\hat{p} \in \{p\})$ のもとで行われていたとすれば，総合最適性に向けての設計は $\sum_{p=1}^{N_p} f_p(\cdot)$ のもとで行われる必要がある．

3.3 外的要因の変化と最適方式の転換可能性

以上のようにして対象システムの内容がモデル化され評価指標も定まれば，特定の状況のもとでの最適設計を行えるようになる．このときの特定の状況とは，式 (2) の形式のもとでは $\boldsymbol{e}_s$ や $\boldsymbol{p}$ を意味する．システム設計の視点に立てばそれらは外的な要因となることから，数理的な手法で最適な設計を求めることを前提とした場合には，それらの要因の影響を上位レベルにおいて別途，検討する必要も生じる．例えば，ある要素技術レベル $\boldsymbol{e}_{s_1}$ の変化は対応するサブシステムの内容 $\boldsymbol{x}_{s_1}$ に影響を及ぼすのみならず，サブシステム間の相互作用を通じて他のサブシステムの内容 $\boldsymbol{x}_{s_2}$ にも影響を及ぼすことになる．これについても数理計画法を基盤としたシステムレベルでの検討を行う必要がある．

図 1は数理的な最適設計によって得られる最適性とその上位に位置する外的要因の影響を模式化したものであり，横軸は何らかの要因の変化を，縦軸は何らかの指標のもとでの最適性を意味している．好適方式という概念[(7)]が示すように，すべての状況に対して万能的に最適なシステム方式が存在することは期待できないことから，要素技術が展開したり，使用環境が変化したりした場合には，それに応じたシステム方式に転換する必要がある．図は，さらに，単一指標のもとでの設計と総合指標のもとでの設計とでは方式転換のタイミングが異なってくることを示している．

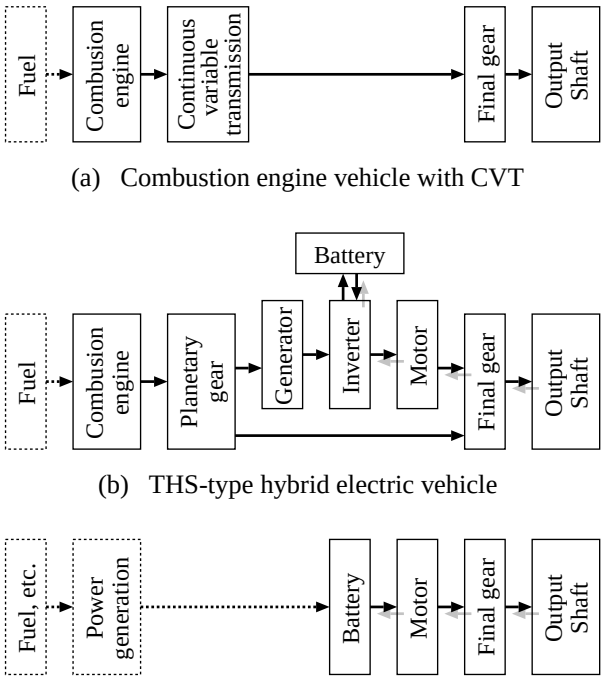


Fig. 2 System structure of vehicles

4 ビークルのモデリングと最適設計法

4.1 ビークルのシステム方式 前節までの内容を具体的に展開するに当って，HEV の市場展開が始まったビークルをハイブリッド型システムの具体例として取り上げることにする．さらに，競合するシステム方式として以下の 3 つを考える (図 2).

ガソリン自動車 (GV) … 一般的なガソリンエンジンによる自動車．なお，トランスミッションには比較的高効率が期待できる CVT (Continuous Variable Transmission) 方式を想定する．

THS 方式ハイブリッド自動車 (HEV) … ガソリン自動車と電気自動車とのハイブリッド化による HEV．ここでは，各種方式の中から THS 方式[(8)]を取り上げる．

電気自動車 (EV) … 外部電源からバッテリに充電した電力のみによって駆動される自動車．なお，現状ではその用途は限定的である．

4.2 ハイブリッド型ビークルの走行モデリング

最適設計を基盤とした分析を展開するに先立ち，3 方式のなかでも，GV と EV の両者の内容を含む HEV についてのモデリングの概要を以下に示しておく．

THS 方式 HEV は，HEV の中でもガソリンエンジンの出力を遊星歯車を用いて充電のための発電機と駆動のための出力軸 (モータ軸でもある) に分配する独特

のものであり[8]，シリーズ型 HEV とパラレル型 HEV の優れた点を併せ持っている．その特性を解析するにあたっては，それぞれのサブシステムについてマクロな動特性モデルを構成し，一連の連立常微分方程式を数値計算によって解くことにする．例えば，エンジンについては[9]，エンジン回転軸についての慣性モーメントを J_E [kgm^2]，角速度を ω_E [rad/s]，燃焼による出力を P_{fu} [W]，エンジン内での摩擦損失を R_E [W]，エンジン軸出力を $T_{E,out}$ [Nm] とするとき，以下の微分方程式によってモデル化する．

$$J_E \frac{d\omega_E}{dt} = \frac{1}{\omega_E}\left(P_{fu} - R_E\right) - T_{E,out} \qquad (3)$$

このとき，P_{fu} は，吸入空気量を Q_E [m^3/s]，空気の密度を γ_a [kg/m^3]，燃料の低発熱量を H_u [J/kg]，理論熱効率を η_{th}，理論空燃比 A/F のもと，$P_{fu} = \dfrac{Q_E\,\gamma_a\,H_u\,\eta_{th}}{A/F}$ により与えられるものとする．なお Q_E はスロットル開度率・ストローク容積などから算出する．また，R_E は，エンジンの排気量を V_S [L] とするとき，$R_E = 5.0\,V_S$ で与えられるものとする．

一方，エンジンにおける総燃料消費量 F_c [kg] は次式により計算する．

$$F_c = \int \frac{Q_E\,\gamma_a}{A/F}\,dt \qquad (4)$$

発電機については[10]，まず，次式により入力動力 P_{Gin} [W] から内部発熱による損失と慣性項を差し引いたものを発電動力 P_{mG} [W] とする．

$$m_G\,{r_G}^2\,\frac{d\omega_G}{dt} = \frac{P_{Gin}}{\omega_G} - \mu_G\,\omega_G - \frac{P_{mG}}{\omega_G} \qquad (5)$$

ここで，m_G はコイルの質量 [kg]，r_G は回転子の半径 [m]，ω_G は軸の角速度を [rad/s]，μ_G は内部発熱についての係数 [Ws^2] である．その上で，P_{mG} から内部抵抗 R_G [Ω] による損失 ${i_G}^2 R_G$ を差し引くことにより，発電電力 P_G [W] を求める．ただし，i_G は発電機発生電流 [A] である．

モータについては，基本的には発電機と同様のモデルを用いるものとするが，モータ駆動についてのモデルと制動時における回生についてのモデルとを使い分ける必要がある．

バッテリーについては，流体と電気回路とのアナロジのもとで，図 3に示す流体力学的 2 タンクモデル[11]を用いて，充放電特性を考慮したモデルとする．このモデルでは，バッテリーの出力電圧 V_B [V] は出口 O での圧力 P_O，出力電流 I_B [A] は出口 O で流量 $A_O v_O$ に対応し，容量 [Ws] はタンク A の容積に換算されており，小さなタンク B が出口 O と大きなタンク A の間に存在することによって，瞬間的に出力を増減できないバッテリーの振舞いを表現している．

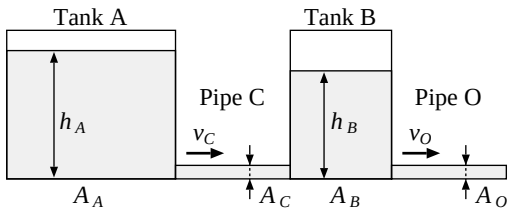


Fig. 3 Two-tank model for battery behavior

以上のほか，インバータについては一定レベルの損失を考慮し，遊星歯車や最終出力軸については慣性モーメントを考慮する．制御系については文献[12]の記述を参考に構成し，運転者の挙動については目標速度に対する PI 制御としてモデル化する．

最終的にビークルの走行速度 V [m/s] は次式によりモデル化できる[9]．

$$(1+\varphi)M\frac{dV}{dt} = \frac{T_{out}}{\frac{D}{2}} - \left(\mu_r M + \mu_A A V^2\right) g \qquad (6)$$

なお，M はビークルの総質量 [kg]，φ はバネ下質量係数，T_{out} は最終出力軸における出力トルク [Nm]，D はタイヤ有効径 [m]，μ_r は転がり抵抗係数，μ_A は空気抵抗係数 [kgs^2/m^4]，A はビークルの全面投影面積 [m^2]，g は重力加速度 [m/s^2] である．

GV と EV についてのモデルは，それぞれ，以上の HEV についてのモデルに含まれるサブシステムの内容をほぼそのまま流用することにより構成する．また，居住空間や操縦安定系などについては，現行の標準的な GV のものをすべてについて共通的に用いる．

4.3 LCA の方法 ビークルの設計における総合指標としては，今後の環境問題を踏まえて，LCA を想定する．LCA の方法についてはそれ自体が未だに構築の途上にあるというのが現状であり[1]，本研究での目的は，LCA のもとでの最適なシステムを確定させることではなく，システム的な視点のもとでの最適設計における総合評価の意義を明示することにある．これらのことから，ライフサイクルにおける各種の局面が粗く「素材製造」・「車両製造」・「走行」・「廃棄」の 4 つから構成されるものとし，それぞれにおけるCO_2排出量の総和により評価を行うものとする．3.2項の意味においては，4 つのうち，走行における排出量は $f_{\hat{p}}(\cdot)$ の一例に相当し，総排出量は $\sum_{p=1}^{N_p} f_p(\cdot)$ に相当する．

CO_2排出量の内訳はそれぞれを以下のように算出

する．素材製造時の排出量は，単位素材量あたりのCO_2排出量を想定した上で，現行の標準的なGVの素材構成を基準としてそれぞれのサブシステムのサイズの増減に対応して各素材量が増減するものとして算出する．車両製造時の排出量についても，現行の標準的なGVにおける排出量に対してシステムの規模や方式の違いによる特有部品などを考慮して算出する．走行については，生涯総走行距離を10年間で10·15モードにおける走行パターンの繰返しによる100,000 kmとした上で必要エネルギー量に基づいて排出量を算出する．EVにおける電力に関しては，日本における平均的な供給源配分に従って必要エネルギー量の背後にあるCO_2排出量を算出する．廃棄時の排出量については素材製造時や車両製造時と同様の方法で算出する．

4.4 最適設計法　図1の状況における最適性についてのシナリオを合理的に評価するためには，個別状況のそれぞれにおいて最適なシステムを想定する必要がある．それについては以上のモデリングのもとでそれぞれに以下に示す最適設計を行う．

(1) 設計変数　設計変数には，4.2項に示したモデリングの内容に対応させて，各サブシステムのサイズなどを設定する．HEVの場合には，エンジンの排気量・発電機の最大容量・モーターの最大出力・遊星歯車におけるサンギアおよびリングギアの半径・バッテリーの最大出力レベル・燃料容量(EVの場合はバッテリー容量)・最終減速比に関する合計8個の変数を考える．GVやEVの場合にはこれらの中から存在しないサブシステムについての変数を除外する．なお，バッテリーについては，本来は特定のセルを並列や直列に並べて構成するため，その諸元は基本量の整数倍の値を取ることになるが，ここでは，簡便のため，任意の実数値を取ることができるものとする．

(2) 目的関数　以下の3つの目的関数を想定した上で，それぞれのもとでの最適なシステム構成を相互に比較することにする．

(i) 10·15モードにおける走行経済性 [km/¥].
(ii) ビークルの初期費用と前述の生涯総走行のもとでの総運用費との合計による総費用 [¥].
(iii) 前項のLCAによる総CO_2排出量 [ton-CO_2].

なお，10·15モードの走行パターンは市街走行に相当する部分と専用道走行に相当する部分から構成されるが，HEVの場合，そのままでは前者で放電した電力を後者で充電することになるため，それぞれの部分で独立して放充電量がバランスするように制約条件を加味した上で燃費を算出する．また，燃料単価は100 ¥/L とし，電力単価は家庭用深夜電力を参考に5.93 ¥/kWh とする．(ii)における初期費用は，LCAにおけるCO_2排出量を算出する場合と同様，各サブシステムのコストがそれぞれのサイズに比例するものとした上でそれらの総和として算出する．

上記の各指標は3.2項の意味においては，(i)は運用のみを，(ii)はそれに加えて初期コストを，(iii)はそれらを包括したすべてを評価するものに相当する．前述のLCAの視点からは，(ii)の総和は費用についてのものとなっているが，(iii)はCO_2排出量についてのものとなっている．

(3) 制約条件　上記の各目的関数に加えて，システムとしての実現性を確かなものにするために，ビークルに求められる各種の機能に対応させた以下の制約条件を考慮する．

- 140 km/hの最高速度が達成できること．
- 発進加速性能として，0 km/hから30 km/hへの加速に要する時間が4秒以下であること．
- 追い越し加速性能として，50 km/hから80 km/hへの加速に要する時間が8秒以下であること．
- 10·15モードにおける走行パターンを繰返して合計400 kmを無補給で走行できること．

なお，最後の条件に関して，EVにおいては，バッテリー質量の関係上，無補給長距離走行が容易ではないことから，200 km, 100 kmの場合をあわせて検討する．以下ではそれらの各検討事例をEV400, EV200, EV100と標記する．

(4) 数理計画法　以上のようにして構成される最適設計の問題はいずれも制約条件付きの非線形計画問題となり，4.3項のモデリングや評価法がいずれもマクロなものであることから，計画問題の数理的な性質も比較的スムーズなものであることが期待できる．したがって，最適設計のための数理計画法としては，逐次2次計画法(SQP)を用いることにする．

5 ビークルの先導設計についての検討事例

5.1 キーテクノロジーとしてのバッテリ性能の向上可能性　各ビークルのシステム構造は図2に示したとおりであるが，それらのなかからいわゆる好適方式が確定する際には，各要素技術についての動向，また，化石燃料の残存埋蔵量やそれに起因する燃料コスト，環境税や炭素税に代表される税制などの社会状況についての環境要因が作用する．これらのなかでも前者に属するバッテリーは，古くからの技術ではあるものの，その必要性は最近になって急速に拡大してきており，今後の技術展開には大きな期待がもたれている[13]．他の要素は，その状況と比較すれば，相対的に

は飽和状態に近いとみることもできる．

以上のことから，本研究では，バッテリ性能をビークルにおけるキーテクノロジーとして位置付け，その単位質量あたりのエネルギー密度を式 (2) における $\boldsymbol{e}_s$ として取り上げて，図 1に示した状況を分析するに当っての横軸として考える．なお，単位質量あたりの出力密度 B_{pd} [W/kg] は，鉛蓄電池からニッケル水素電池を経てリチウムイオン電池に至る技術展開の傾向[(14)]を踏まえて，エネルギー密度 B_{ed} [Wh/kg] に対して $B_{pd} = 29.197\ B_{ed}^{0.6892}$ という関係で向上するものとする．総費用を目的関数とする場合におけるバッテリーのコストに関しては，単位質量当りのコストが一定であると仮定し，高密度化に伴って単位出力当りのコストが低下するという条件を想定する．

5.2 燃費・総費用・CO_2排出量による各評価

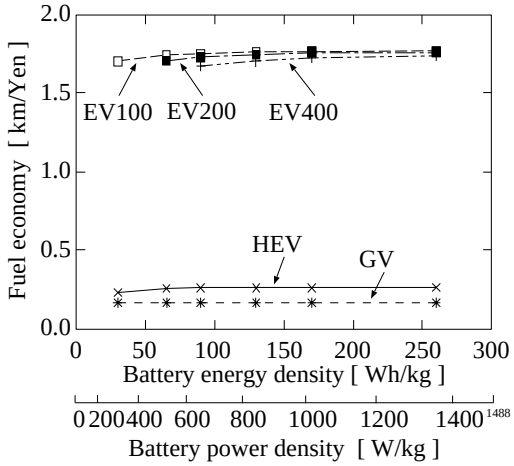
図 4はバッテリー性能の向上に対して GV・ HEV・ EV400・ EV200・ EV100 間の最適性が転換する様子を，燃費・総費用・CO_2排出量のそれぞれを指標とした場合について，示したものである． GV の場合，そのシステム性能はバッテリー性能の向上とは無関係であるため，各図において性能レベルは水平線として表されている．また， EV については，バッテリー性能が低い場合には 400 km の無補給走行が不可能となっている．なお，現状のバッテリー性能はおよそ 65 Wh/kg 辺りである．

この結果では，CO_2排出量に基づけば，ほぼバッテリー性能に関わりなく， EV が優れていて， HEV がそれに次ぎ， GV が最も劣るとなっている．また，燃費についても同様の傾向が認められる．一方，総費用に基づけば， GV が優位であるものの， EV の短い走行距離を認れば方式転換の可能性もあることになる．

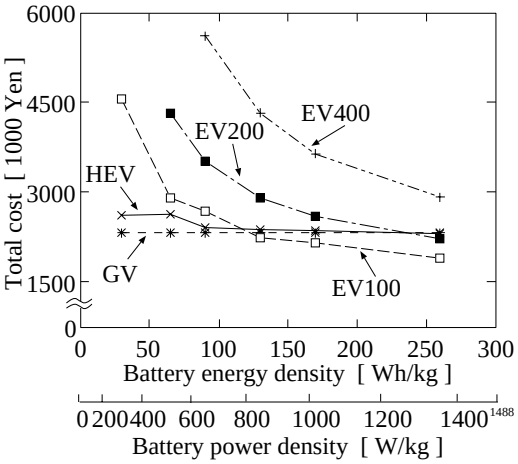
5.3 システムサイズと環境影響の変化

図 5と図 6は，図 4のなかでもCO_2排出量を指標とした場合に，各サブシステムのサイズと車両の総質量，ならびにライフサイクルの 4 つの局面毎のCO_2排出量のバッテリー性能の向上に対する変化を示したものである．まず， (b) から (d) の各図における各サブシステムサイズの連けいした変化を踏まえれば，数理計画法に基づいたシステムレベルでの最適設計の必要性を確認することができる．

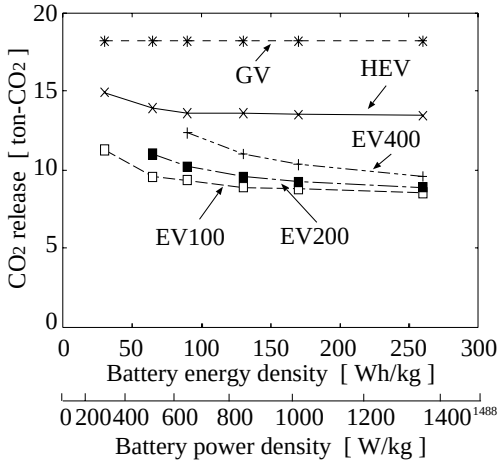
HEV に着目した場合，バッテリー性能が現状レベルよりも低い場合には車両質量を抑えるために少なめのバッテリーを搭載する傾向があることに対して，性能が現状レベルを越えれば燃費を優れたものにするために多めのバッテリーが搭載される傾向を確認することができる．モータとエンジンについては，バッテリー



(a) Comparison with fuel economy

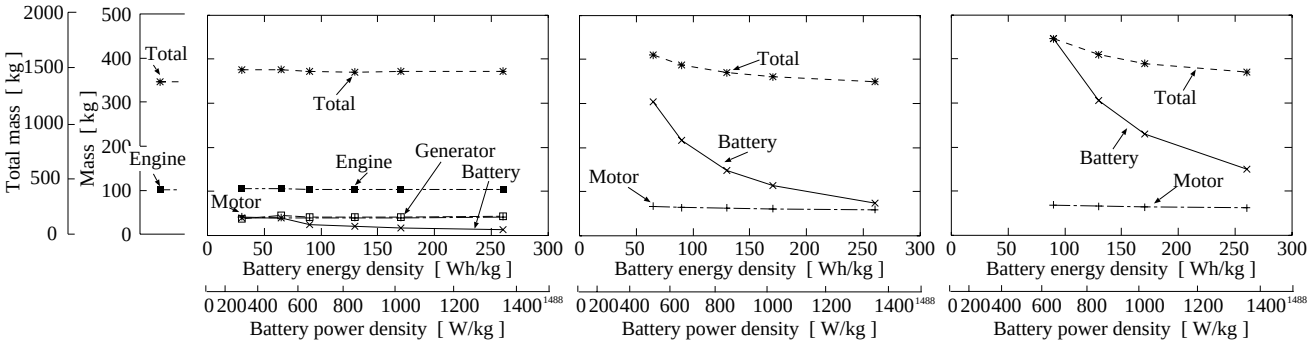


(b) Comparison with total cost



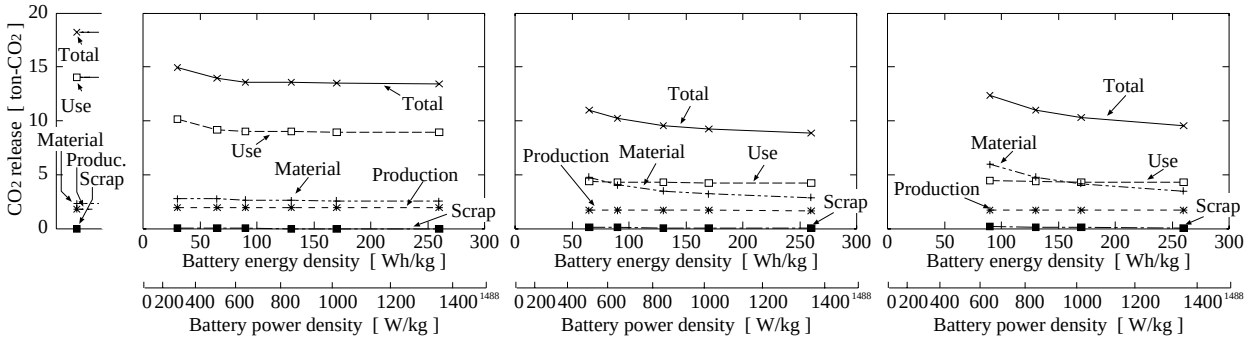
(c) Comparison with LCA measure

Fig. 4 Comparison of system optimality across different types of vehicles



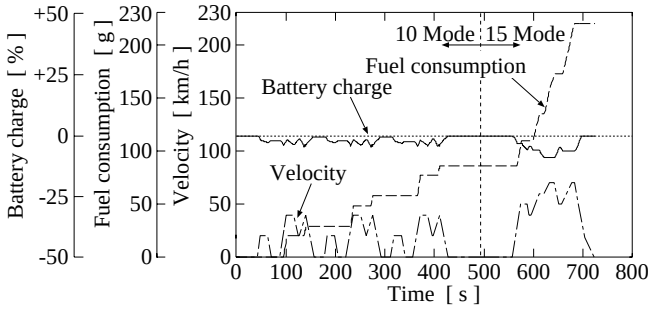
(a) GV (b) HEV (c) EV200 (d) EV400

Fig. 5 Comparison of subsystem sizes and vehicle total mass

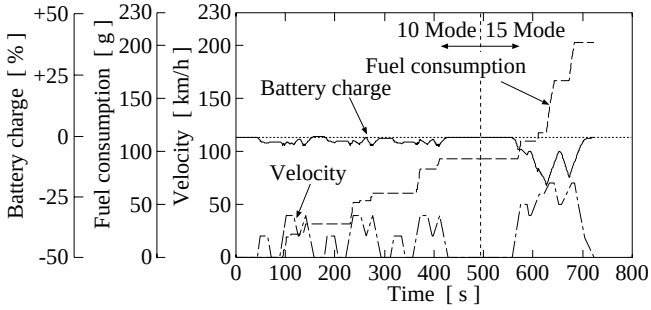


(a) GV (b) HEV (c) EV200 (d) EV400

Fig. 6 Comparison of CO_2 release in respective phases



(a) when battery energy density is 30 Wh/kg



(b) when battery energy density is 90 Wh/kg

Fig. 7 Typical operation modes of HEV

の軽量化に伴う総質量の低減により，若干の小型化が確認できる．ただ，モータは運転モードのうち低速域を担うことから，その程度はエンジンよりも小さい．図 7は以上の傾向の背後にある 10·15 モード走行時のサブシステムの稼働パターンの変化を示したものであり，バッテリー性能が 30 Wh/kg の場合と 90 Wh/kg の場合のものを比較している．両者の相違点のうち最も特徴的である部分は，15 モードにおける 60 km/h から 70 km/h の加速時において，前者ではバッテリーからの放電がなくエンジンにより駆動が行われている一方で，後者ではバッテリーからの放電が行われていてモータにより駆動が行われている点にある．この相違が燃料使用量の相違となっている．

EV においては，単位質量当りのエネルギー密度が向上すれば，同一質量のバッテリーで長距離走行が可能になり，また，単位質量当りの出力密度が向上すれば，同一質量のバッテリーのもとで最高速や加速性能の向上が期待できる．これに対応して，図 5の結果では，無補給での走行距離についての制約条件のもと，高密度化に伴ってバッテリーの軽量化が可能になって

いる．モータのサイズについては，加速性能についての制約条件のもと，バッテリーの軽量化に伴う総質量の低減に対応した小型化の傾向が確認できる．

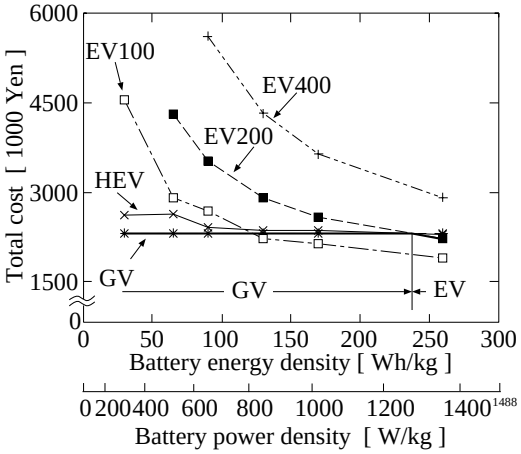
5.4 方式転換に向けての可能なシナリオを求めて

前出の図 4の結果は図 1に示したような方式転換の可能性を示すものではない．本研究では，その原因がビークルにおける利用者個人からみた費用と社会的費用[15]とが同時に存在していることを踏まえていないためであると考え，ビークルそのものは社会的費用に対応するCO_2排出量を指標として最適に設計される一方で，利用者はその設計結果についての総費用に基づいてビークルを選択するというシナリオを想定し，バッテリー性能の向上とシステム方式の転換との関係を再検討することにする．さらに，社会的費用の視点に立てば，社会的費用を個人の費用に転嫁するための炭素税に相当するものとして，燃料単価が 150 ¥/L になった場合の状況をも想定することにする．

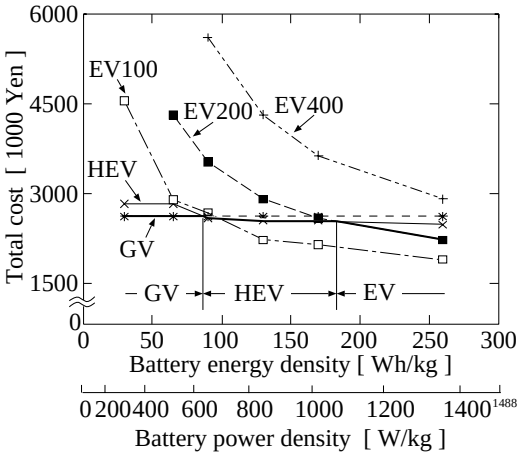
図 8は以上のシナリオのもとでの検討を展開したものである．なお，EV については，EV400 は他方式との競合性に乏しく，EV100 は実用性に欠くことから，EV200 に着目するものとする．図中 (a) は図 4の (c) に示した結果に対して燃料単価が 100 ¥/L の場合の総費用を比較したものであり，(b) は同じく 150 ¥/L の場合の総費用を比較したものである．(c) はそれらの結果が導く方式転換点とそれらのもとでのCO_2排出量の削減状況を示したものである．(c) の内容は，炭素税の導入を考えなければ，相当にバッテリー性能が向上しない限り GV から他の方式への転換が期待できない一方で，炭素税の導入を考えれば，HEV という方式を経ながら EV に至る過程を通じて一層の排出量削減の可能性も存在し得ることを意図している．

5.5 実用的な事前評価に向けて

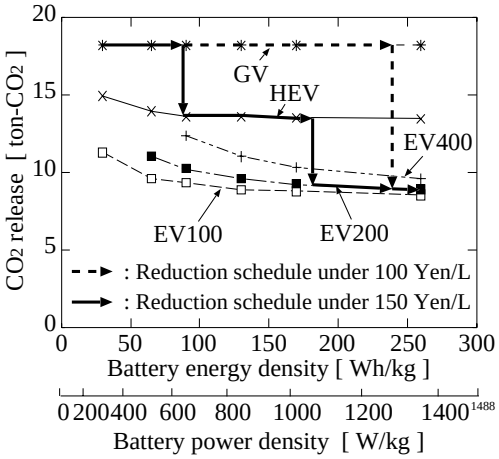
未来のビークルは，バッテリー性能による方式転換の例を踏まえるまでもなく，技術展開の途上にあり，加えて，燃料電池の可能性[16]はさらに新たな展開をもたらすものであろう．それに向けての先導設計[3]の重要性は言うまでもないが，本研究での内容は，それをハイブリッド型ビークルにおいて展開し，具体的な意義を例示したものである．これを実用的な先導設計へと発展させるには，バッテリー性能の向上のみならず，各種のインフラの整備や実際の税制などを含めた社会システムとの関連性や，ビークルの開発設計に要する期間の長さや個別ビークルの社会における寿命の長さとの関係などをも含めた，シナリオの策定やそのもとでのより総合的な検討を含めていく必要があるものと考えられる．



(a) Comparison with total cost for 100 ¥/L fuel price



(b) Comparison with total cost for 150 ¥/L fuel price



(c) Comparison of CO_2 release reduction

Fig. 8 A scenario toward system structure changeover

6 結 言

本研究では，ハイブリッド型システムの先導設計を総合指標のもとでの最適設計に基づいて行う方法を，ビークルにおける方式転換についての検討を引きながら，展開した．ここでの評価結果そのものは用いたモデルの簡便さや前提としたデータへの依存性に起因して厳密さには不足するものの，展開した方法論がある種の様相を捕らえていることは明らかであり，ライフサイクルを総合的に考えて複雑な機械や装置を設計する場合にはシステムレベルでの数理的な検討が不可欠であることを改めて示唆している．

文 献

(1) 特集: 自動車の LCA, エンジンテクノロジー, Vol. 2, No. 6, (2000), pp. 4-27, 山海堂.
(2) 足立, エントロピーアセスメント入門, (1998), オーム社.
(3) 浅井・村上・中島, マイクロ人工衛星の先導設計, 日本機械学会 第 5 回設計工学・システム部門講演会 講演論文集, No. 95-24, (1995), pp. 144-147.
(4) フォレスター, インダストリアル・ダイナミックス, (1971), 紀伊國屋書店.
(5) メドウズ・ほか, 成長の限界, (1972), ダイヤモンド社.
(6) 伊東・横山, コージェネレーションの最適計画, (1990), 産業図書.
(7) 赤木, 技術の発達における規模の法則と設計シンセシス (規模の理論の紹介とその設計への展開), 日本機械学会 第 9 回設計工学・システム部門講演会 講演論文集, No. 99-27, (1999), pp. A-31–A-36.
(8) 阿部・ほか 5 名, トヨタ ハイブリッド システムの開発, *TOYOTA Technical Review*, Vol. 42, No. 2, (1997), pp. 50-55.
(9) 自動車技術ハンドブック第 1 巻 – 基礎・理論編 –, (1990), 自動車技術会.
(10) 西村・ほか 3 名, 電気機器学, (1998), pp. 8-11, オーム社.
(11) Leontopoulos, C., Etemad, M. R., Pullen, K. R. and Lamperth, M. U., Hybrid Vehicle Simulation for a Turbogenerator-Based Power-Train, *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers*, Vol. 212, Part. D, (1998), pp. 357-368.
(12) 佐々木, トヨタプリウスにおけるハイブリッド機構と制御, 計測制御学会関西支部メカトロニクス・コントロール研究会 第 3 回資料, (1999).
(13) 逢坂 (編), キーテクノロジー電池, (1996), 丸善.
(14) 森田, 情報技術を支える高性能蓄電池, 大阪大学工業会会誌テクノネット, No. 511, (2001), pp. 14-17.
(15) 宇沢, 自動車の社会的費用, (1974), 岩波新書 B47.
(16) 清水・平田, 燃料電池とは何か — 水素エネルギーが拓く新世紀, (2000), NHK ブック 905.