国産普通・小型乗用車の車体軽量化における適用材料の研究*

(第2報, 包絡解析法による次世代車体への適用材料の研究)

栗原 雄毅^{*1}, 荒川 雅生^{*2}, 萩原 一郎^{*3}

Optimum Material in Body Weight Reduction for Domestic Passenger Car (2nd Report, Selection of Applicable Material for Future Automotive Body Using Data Envelopment Analysis)

Yuki KURIHARA, Masao ARAKAWA and Ichiro HAGIWARA^{*4}^{*4} Tokyo Institute of Technology, 2-12-1, O-okayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552 Japan

In case of the substantial weight reduction of a passenger car, it is inevitable to reduce the weight of its body structure to a great extent. As the body structure has been rationalized by using computer aided engineering to a considerable extent, it will be necessary to switch the body material from steel to lightweight material. Aluminum, a typical one of the lightweight materials, having been said most suitable alternative, it hasn't been recognized to be one because of its economics. In this paper; we show numerically that partial aluminumization of the steel body to 2% extent of the proposed vehicle weight is superior to steel one in customer satisfactory efficiency through the extensive use of Data Envelopment Analysis.

Key Words: Automobile, Transportation Engineering, Numerical Analysis, Material Design, Data Envelopment Analysis, Weight Reduction, Passenger Car, Automotive Body, Vehicle Specific Gravity

1. 緒 言

前報⁽¹⁾で述べたように、京都会議で合意した温暖化ガス削減を実現するために、自動車業界ではより一層の燃費向上が求められており、そのためには軽量化を推し進めることが必要とされている。これに関しては、将来どの時点でどのレベルまで進めるかが、経営資源を配分するうえで重要となるが、どのレベルかを示す軽量化進捗度については、車両比重の概念を導入して定量的に示されている^{(2),(3)}。

車両比重の概念を発展させた部品比重を用いて、車両構成上軽量化のポテンシャルが最も高い部品は車体であることを示されている(図1)⁽⁴⁾。したがって軽量化ポテンシャルの点から車体の軽量化を進めることが、車両の軽量化の推進上欠かせないこととなっている。その上、鉄鋼主体で構成されている車体における構造解析は近年目覚しく進行した結果、車体構造そのものの合理化はあまり望めなくなっている。その結果車体軽量化の鍵を握るものは車体のアルミニウム化であると指摘されている。本報ではこれを検証すべく次世代車体用材料の最適化解析を行う。前報では、自動車に用いられる材料の利用度、価格などの諸パラメータを将来において予測する手法の説明を行った。本報では、アルミニウム化をどの程度促進することが将来の自動車の開発においてもっとも効率的であるかを判断するための指標の提示とその計算方法について説明し、アルミニウム化促進の妥当性を定量的に検討することを目的とする。

Fig. 1 History of part specific gravity of domestic Passenger car

* 原稿受付 1998 年 12 月 10 日。

^{*1} 正員, 高田工業(株) (☎ 231-0081 横浜市中区豊浦町 2-3)。

^{*2} 正員, 香川大学工学部 (☎ 760-8526 高松市幸町 1-1)。

^{*3} 正員, 東京工業大学工学部 (☎ 152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)。

E-mail: y-kurihara@takada-kogyo.co.jp

第1段階としてアルミニウム材料のリサイクル可能性及びリサイクルも含めた形での市場への安定供給性について分析する。つぎに材料の機械的な性質から車体の軽量化がどのレベルまで図られるのかを検討する。これらのプロセスを通過した場合でも、すぐさまこの材料で車体の生産が進行する保証はない。なぜならこれまで長い間鉄鋼材料で生産してきたがゆえ、新たな材料での車体の設計技術・生産技術が確立されているかを分析する必要がある。これらの分析結果、車体のアルミニウム化はおおむね可能であることが示されている^{(6)~(16)}。

第2段階として、上記の条件に適合する材料を用いれば物理的にはアルミニウム車体の設計、生産は可能となるが、顧客が商品価値を認め適切な販価で購入するかといった乗用車市場への適合性（経済性）は必ずしも保証されない。そこで次に市場に対する適合性を見るために包絡解析法を用いて明らかにする。

2. 次世代車体材料の最適化解析

2.1 包絡解析法 本章では、次世代車体用材料として、鉄鋼材料とアルミニウム合金材料とに絞って以下に包絡解析法を使用して両材料が次世代車体材料としての適合性検討を行う。解析を行うに当たり包絡解析法の概要を述べる⁽¹⁶⁾。

一般に事業体の活動は資源を投入して便益を産出する変換過程と見ることができる。その場合

産出／投入

という比を用いて、その変換過程の効率性を測定するのが比例尺度である。つぎに包絡解析法を用いて行われている事業体の経営効率または活動の効率という概念を応用して、上記の課題の解決を行う。包絡解析法では分析対象をDMU(Decision Making Unit)という。いま n 個の事業体または活動があるととして、これらに $DMU_1, DMU_2, \dots, DMU_n$ と番号を付ける。

つぎに各活動に共通した入力項目と出力項目を選ぶ。一般的な選択法としては次のような方針を採る。

- ①入力項目、出力項目ともに数値データが準備できていること。
- 原則として全活動についてその値は正であること。
- ②入力項目、出力項目の選定に当たっては、観察すべき入力対出力の効率性の特徴を良く表しているものを選ぶ。
- ③原則として出力を得るための入力に関していえば小さいものほど好ましく、ある入力による出力に関しては大きいものほど好ましい状態にあるものとする。
- ④入力項目、出力項目の数値の単位は、例えば人数、金額、面積、台数などがある。

上記の n 個の活動それぞれについて比例尺度で効率性を測定していくが、対象となっている活動を代表的に記号 O とし DMU_0 と書くことにする。比例尺度で効率を評価する場合、データの次元やオーダの違いを考慮しなくてもよいという特徴があり、入力項目出力項目について無次元化の必要はない。以下の記号 O は $1, 2, \dots, n$ のいずれかを指すものとする。

解析をするに当たり、まず入力データ $(x_1, x_2, \dots, x_m)$ と出力データ $(y_1, y_2, \dots, y_s)$ に未知のウェイトを掛けて加えることにより、仮想的入力と仮想的出力を作る。

仮想的入力 $=v_1x_{10}+v_2x_{20}+\dots+v_mx_{m0}$

仮想的出力 $=u_1y_{10}+u_2y_{20}+\dots+u_sy_{s0}$

仮想的入力についているウェイト $v_i (i=1, 2, \dots, m)$ と仮想的出力についている $u_r (r=1, 2, \dots, s)$ は、その値を次の分数計画問題を解くことにより定める。この分数計画問題はCCRモデル(Charnes-Cooper-Rhodesモデル)と呼ばれる。

目的関数

$$\max \theta = (u_1y_{10}+u_2y_{20}+\dots+u_sy_{s0}) / (v_1x_{10}+v_2x_{20}+\dots+v_mx_{m0}) \quad (1)$$

制約式

$$(u_1y_{1j}+\dots+u_sy_{sj}) / (v_1x_{1j}+\dots+v_mx_{mj}) \leq 1 \quad (j=1, \dots, n) \quad (2)$$

$$u_1, u_2, \dots, u_s \geq 0 \quad (3)$$

$$v_1, v_2, \dots, v_m \geq 0 \quad (4)$$

この制約式の意味は、ウェイト v_i, u_r による仮想的入力と仮想的出力による比をすべての活動について1以下に抑えるということである。

ここで最大化するように線形計画法を用いて最適ウェイトを決定する。したがって最適値は高々1である。このウェイトは対象とする活動ごとに異なる値を取り、その活動にとって最も有利となるように線形計画法の解として決められる。

実際にCCRモデルを解く際には、式(1)の分母が1となるような等式制約を設定し、式(2)の分母を移行して線形計画法に変換した後に、双対問題を考慮し、双対問題を解くことになる。詳しい式変形は文献(16)を参照されたい。最終的な双対問題は以下になる。

$$\text{Max } \theta \quad (5)$$

Subject to

$$\theta x_0 - \sum \lambda_j x_j \geq 0 \quad (6)$$

$$y_0 - \sum \lambda_j y_j \geq 0 \quad (7)$$

$$\lambda_j \geq 0 \quad (8)$$

ここで、 λ はラグランジュ乗数である。つぎに目的関数の最大値が1である活動をD効率であるという。D効率である活動の点を図示化し結んだ線を効率のフロンティアと呼ぶ。目的関数値が1未満のものはD非効率である。このような取り扱いからこの目的関数はD効率と呼ばれる。図2に1入力2出力のモデルについて効率の求め方、ラグランジュ乗数の意味などを簡単に示す。図中A～Eによって構成される折れ線が効率のフロンティアをあらわし、ユニットFの優位集合はBとCである。さらに、G点はFに関する優位集合BとCのラグランジュ乗数をそれぞれのデータに乗じて足しあわせることによってめられる点である。

Fig. 2 Explanation of DEA

2. 2 包絡解析法における目的関数の構成 新車開発に当たり留意することは、車両重量をできるだけ軽くしつつ、一方では車両の基本性能つまり走行性能、衝突などに対する安全性、地球環境を維持改善するためにもガソリンをできるだけ消費しないといった環境性能など多くの顧客の要求性能と車両販売価格とのバランスを高いレベルで成立させることである。これらの内容に適合するように以下に目的関数を構成する。

このような狙いに適う目的関数は、車両の顧客に対する満足度を示す指標と基本的には考えられる。ここでは、この車両の顧客に対する満足度を顧客満足率と呼称する。

D 効率

= 顧客満足率

= Σ 出力する項目 / Σ 入力する項目

= (投入する資金・重量が車両性能、地球環境等に付与するもの) / (車両製作に投入する資金・重量)

= (走行性能 + 安全性能 + 環境性能 + ...) / (車両重量 + 車両販売価 + ...)

分母は入力する項目として投入資金と投入重量とで構成する。投入資金としては車両が販売されるまでに必要とする資金を全部積み上げたと考えられる車両販売価とし、重量としては、軽量化の対象とならない乗員は含めない場合に使用される車両重量を使用する。

分子を構成する車両性能の中身としては、走行性能、安全性能および環境性能以外にも快適性能など多くの性能があるが、顧客満足率をみる基本性能としては、これらも3つの性能で代表されるものと仮定する。走行性能は走る・曲がる・止まるの3性能から構成されるが、走る性能を代表性能とし主要なものである加速性能を取り上げる。つぎに安全性能を代表するものとしては、衝突性能とし、この性能の裏付けとなる必要な車体の潰れストロークを確保するのに必要な車両外形寸法を取り上げる。一方環境性能としては、炭酸ガスも含めた各種排出ガス量、廃車時のリサイクル率および車両を構成する有害物質質量などが考えられるが、ここでは排出ガス量を代表性能とし、これに直接繋がる燃費（ここでは60km/hの定地走行燃費を取り上げる。）とする。

前述の加速性能については、一般にエンジンの馬力当たりの車両重量が、車両の動力性能の善し悪しを表す指標としてしばしば使用されており、この数値は小さいほど優れている。した

ってここでは、エンジンの馬力あたりの車両重量を使用するものとし、動力性能は最小化項目に入れる。その結果最終的に顧客満足率の式は以下のように表される。

顧客満足率

= (車両燃費 + 車両体積) / (車両重量 + エンジン馬力当たりの車両重量 + 車両販売価)

つぎに顧客満足率を具体的に求める。まず入力データと出力データとしてここでは次のように作成する。すなわち1977年、1980年、1983年、1986年1989年および1992年まで15年間の代表的な国産普通・小型乗用車(ここではP社製とQ社製の車両から抽出する。)から、1車種当たり燃費の最も良い車両(車両優、または(s)と呼称)と燃費の最も悪い車両(車両劣、または(i)と呼称)を対で、偏りなく合計144車種を抽出した。これらの車種を対象として線形計画法のシンプレックス法⁽¹⁸⁾を用いてD効率を解析する。

入力および出力データは「自動車ガイドブック」の1977年版、1980年版、1983年版、1986年版、1989年版および1992年版から得られたものをさらに加工したものであるが、それぞれ表1にその一部を示す⁽¹⁷⁾。

3. 車体のアルミニウム化に関する有効性検証

前述の入力および出力データからシンプレックス法を用いてパソコンによる解析結果の一部を表2に示す。なお、表2、表5の「優位集合とその関係」の欄で第1項は車両番号、矢印で示す第2項はラグランジュ乗数をそれぞれ示す。表2の分析から次のことがいえる。

1977年から1992年に至る国産普通・小型乗用車144車種から、D効率=1となる効率的フロンティアにいる車種は小型車から普通車に至る次の13車種である。これをクラス別にみるとB車などの超小型車が約39%を占めこれに次ぐC車などのクラスを含めると約54%を占める。軽量化の視点から車両重量で見ると、630kgfの軽い車両から1690kgfの重い車両まで分布しており、平均車両重量は1000kgfである。軽量・安価がゆえに良燃費の特性を有する超小型車クラスからD=1.0の車両が約半数を超しているが、他の小型車、普通車からも約半数が出現していることが特徴である。

Table 1 Data of Domestic Passenger Car for Data Envelopment Analysis

Vehicle No.	Vehicle Name	Vehicle Wt.(tonf)	Fuel Consumption (km/liter)	Vehicle Vol.(m ³)	Wt./Eng. Power(kgf/ps)	Price/Wt.(Yen/gf)
...	...	...	...	...	...	...
107	89B Car(s)	0.67	27.7	8.128	12.88	1.05
108	89B Car(i)	0.72	23.4	8.128	13.84	1.27
109	89C Car(s)	0.92	26.3	9.483	10.82	1.23
110	89C Car(i)	1.18	17.7	9.84	12.1	1.33
...	...	...	...	...	...	...
120	89G Car(s)	0.75	29	8.324	9.146	1.25
121	89G Car(i)	0.79	27.5	8.324	7.181	1.51
122	89J Car(s)	0.96	27.5	9.567	9.216	1.22
123	89J Car(i)	1.02	23	9.216	7.35	1.46
...	...	...	...	...	...	...

Table 2 Results of data envelopment analysis

No.	Wt	Po	Pr	Fc	Vol	D eff	W(Wt)Wt	W(Po)Po	W(Pr)Pr	W(Fc)Fc	W(Vol)Vol	Superior Group and its relation
1	0.775	11.39	1.02	21	7.747	0.882	6.45E-01	2.43E-02	3.30E-01	0.00E+00	8.82E-01	17->0.174,23->0.172,107->0.541
2	0.81	10.13	1.12	19	7.747	0.835	6.56E-01	3.15E-02	3.13E-01	0.00E+00	8.35E-01	17->0.422,57->0.213,107->0.251
15	0.795	12.42	1.01	24	7.8	0.879	6.13E-01	0.00E+00	3.88E-01	2.67E-02	8.52E-01	23->0.153,107->0.417,147->0.336
16	0.795	12.42	0.9	20	7.8	0.913	6.40E-01	0.00E+00	3.61E-01	2.33E-02	8.90E-01	23->0.363,107->0.237,147->0.244
17	0.815	7.19	0.94	23	8.769	1	0.00E+00	2.64E-01	7.36E-01	1.19E-01	8.82E-01	
18	0.91	10.39	1.1	19.5	8.769	0.879	6.67E-01	1.95E-02	3.14E-01	0.00E+00	8.79E-01	17->0.586,23->0.135,107->0.270
19	0.945	9.64	1.15	19	9.584	0.925	6.86E-01	2.69E-02	2.87E-01	0.00E+00	9.25E-01	17->0.915,57->0.029,107->0.159
20	0.995	9.915	1.19	17.5	9.584	0.884	6.71E-01	1.71E-02	3.12E-01	0.00E+00	8.84E-01	17->0.950,23->0.009,107->0.142
21	1	11.36	0.945	18.5	9.622	0.962	0.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	1.64E-01	7.99E-01	23->0.771,107->0.024,147->0.173
22	1.015	10.36	1.09	15	9.622	0.898	6.93E-01	1.81E-02	2.89E-01	0.00E+00	8.98E-01	17->0.487,23->0.434,107->0.091
23	1.045	10.66	0.98	17.5	10.63	1	0.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	
24	1.215	9	1.57	13	10.97	0.915	3.28E-01	5.44E-01	1.28E-01	0.00E+00	9.15E-01	17->0.604,73->0.479,100->0.055
25	1.425	11.4	1.42	14	11.41	0.845	0.00E+00	3.97E-01	6.03E-01	0.00E+00	8.45E-01	17->1.127,23->0.144
26	1.49	11.03	1.7	10.5	11.63	0.82	0.00E+00	6.66E-01	3.34E-01	0.00E+00	8.20E-01	17->21.574,136->1.114,137->0.068
53	1.085	8.037	1.44	17.5	9.65	0.898	3.27E-01	5.42E-01	1.31E-01	0.00E+00	8.98E-01	17->0.519,73->0.377,100->0.100
55	0.63	11.05	1.33	31.1	7.932	1	6.09E-01	3.91E-01	0.00E+00	2.25E-01	7.75E-01	
56	0.665	11.66	1.29	25.4	8.23	0.983	8.84E-01	1.14E-01	1.40E-03	0.00E+00	9.83E-01	55->0.437,57->0.001,81->0.581
57	0.77	10.27	1.29	25.8	9.426	1	6.14E-01	3.15E-02	3.54E-01	0.00E+00	1.00E+00	
58	0.83	9.76	1.29	22	9.426	0.969	6.71E-01	3.29E-01	0.00E+00	0.00E+00	9.69E-01	17->0.345,57->0.679
69	0.76	10.27	1.39	23.5	7.878	0.856	6.69E-01	3.31E-01	0.00E+00	1.55E-01	7.01E-01	55->0.139,57->0.632,147->0.099
70	0.84	11.2	1.078	26	9.363	0.994	6.52E-01	2.23E-02	3.26E-01	0.00E+00	9.94E-01	17->0.418,23->0.146,107->0.510
71	0.89	10.72	1.382	22.4	9.363	0.89	6.66E-01	3.35E-01	0.00E+00	0.00E+00	8.90E-01	17->0.278,57->0.734
72	0.935	11.2	1.45	26.5	9.961	0.903	6.67E-01	3.33E-01	0.00E+00	0.00E+00	9.03E-01	17->0.312,57->0.767
73	1.165	7.28	1.57	18.2	10.58	1	3.30E-01	5.06E-01	1.65E-01	0.00E+00	1.00E+00	
74	1.245	7.78	1.89	18	11.25	0.977	3.49E-01	4.91E-01	1.60E-01	0.00E+00	9.77E-01	73->0.660,100->0.321,137->0.063
75	1.28	8.87	1.84	17	11.25	0.909	3.35E-01	5.20E-01	1.45E-01	0.00E+00	9.09E-01	17->0.329,73->0.526,100->0.253
76	1.395	9.62	1.73	16.5	11.18	0.855	0.00E+00	6.31E-01	3.70E-01	0.00E+00	8.55E-01	17->0.018,136->0.838,137->0.270
77	1.495	8.52	2.44	16.3	11.87	0.886	3.60E-01	4.62E-01	1.78E-01	0.00E+00	8.86E-01	73->0.102,100->0.516,137->0.459
78	1.235	9.88	2.02	19	10.74	0.833	6.97E-01	3.03E-01	0.00E+00	0.00E+00	8.33E-01	17->0.794,100->0.341
79	1.255	7.71	2	16.5	10.74	0.926	3.49E-01	4.83E-01	1.68E-01	0.00E+00	9.26E-01	73->0.412,100->0.431,137->0.145
81	0.65	11.4	1.18	29.9	8.182	1	6.27E-01	2.85E-01	8.84E-02	1.95E-01	8.05E-01	
82	0.71	10.4	1.38	25.5	8.182	0.933	6.51E-01	3.49E-01	0.00E+00	1.75E-01	7.58E-01	55->0.330,57->0.589,147->0.002
88	1.39	8.17	1.82	17.8	10.98	0.909	0.00E+00	5.79E-01	4.21E-01	0.00E+00	9.10E-01	107->0.028,136->0.491,137->0.559
89	1.42	7.88	2.03	16.9	11.29	0.919	3.73E-01	4.66E-01	1.61E-01	0.00E+00	9.19E-01	73->0.498,100->0.080,137->0.464
90	1.37	6.95	2.62	15.5	11.79	1	4.50E-01	5.50E-01	0.00E+00	4.48E-02	9.55E-01	
91	1.315	9.068	2.02	17.8	10.53	0.822	3.32E-01	5.14E-01	1.54E-01	0.00E+00	8.22E-01	17->0.258,73->0.368,100->0.394
99	1.13	7.06	1.92	19.8	9.662	0.928	3.14E-01	6.86E-01	0.00E+00	2.04E-01	7.24E-01	100->0.297,136->0.409,144->0.191
100	1.12	7.4	2.13	19.5	11.07	1	7.36E-01	2.64E-01	0.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	
101	1.37	11.2	1.34	18.2	10.98	0.848	0.00E+00	4.06E-01	5.94E-01	0.00E+00	8.48E-01	17->0.943,23->0.254
102	1.36	12.95	1.75	17	11.29	0.755	7.16E-01	2.84E-01	0.00E+00	0.00E+00	7.55E-01	17->1.065,57->0.207
103	1.52	8	2.52	16.5	11.87	0.902	3.75E-01	4.56E-01	1.68E-01	0.00E+00	9.02E-01	100->0.518,137->0.312,144->0.215
104	1.18	9.07	1.66	19	10.75	0.894	3.18E-01	5.47E-01	1.35E-01	0.00E+00	8.94E-01	17->0.671,73->0.175,100->0.272
105	1.23	7.687	2.22	17.5	10.75	0.917	3.39E-01	4.77E-01	1.85E-01	0.00E+00	9.17E-01	73->0.015,100->0.799,137->0.157
107	0.67	12.88	1.05	27.7	8.128	1	5.95E-01	0.00E+00	4.05E-01	3.55E-01	6.46E-01	
108	0.72	13.84	1.27	23.4	8.128	0.904	7.40E-01	0.00E+00	2.60E-01	0.00E+00	9.04E-01	81->0.793,107->0.201
118	1.67	6.54	2.82	16.1	11.94	0.985	0.00E+00	1.00E+00	0.00E+00	4.07E-01	5.78E-01	121->0.148,144->0.860
120	0.75	9.146	1.25	29	8.324	0.976	6.91E-01	3.09E-01	0.00E+00	2.00E-01	7.76E-01	55->0.259,57->0.147,147->0.592
121	0.79	7.181	1.51	27.5	8.324	1	0.00E+00	1.00E+00	0.00E+00	6.33E-01	3.67E-01	
122	0.96	9.216	1.22	27.5	9.567	0.914	7.02E-01	2.96E-01	2.12E-03	1.19E-01	7.96E-01	17->0.644,57->0.128,121->0.086,147->0.243
133	0.75	12.93	1.08	29	8.341	0.955	6.15E-01	0.00E+00	3.85E-01	3.43E-01	6.12E-01	81->0.134,107->0.530,147->0.356
134	0.82	10.37	1.56	24.5	8.345	0.856	6.83E-01	3.17E-01	0.00E+00	1.53E-01	7.03E-01	55->0.028,57->0.671,147->0.218
135	1.08	10.21	1.67	19.7	9.759	0.824	7.17E-01	2.83E-01	0.00E+00	0.00E+00	8.24E-01	17->0.939,57->0.162
136	0.96	7.714	1.13	27.7	9.759	1	2.63E-01	7.37E-01	0.00E+00	2.80E-01	7.20E-01	
137	1.37	6.523	1.97	17.7	11.08	1	0.00E+00	5.04E-01	4.96E-01	0.00E+00	1.00E+00	
138	1.15	9.2	1.47	23.2	10.92	0.923	3.15E-01	5.64E-01	1.21E-01	0.00E+00	9.23E-01	17->0.867,73->0.206,100->0.102
142	1.68	6.588	2.58	16.2	11.7	0.969	0.00E+00	1.00E+00	0.00E+00	4.07E-01	5.62E-01	73->0.113,121->0.168,144->0.826
143	1.83	6.777	3.42	12.5	12.59	0.933	0.00E+00	1.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	9.33E-01	73->0.585,121->1.647,144->1.011
144	1.69	6.259	2.58	14	12.46	1	0.00E+00	4.52E-01	5.48E-01	0.00E+00	1.00E+00	
147	0.77	7.7	0.89	29	8.258	1	6.22E-01	2.93E-02	3.49E-01	1.00E+00	0.00E+00	
148	0.92	9.48	1.26	25.1	8.378	0.822	6.87E-01	3.11E-01	2.23E-03	1.11E-01	7.11E-01	17->0.308,57->0.236,121->0.113,147->0.304
149	1.01	9.61	1.38	27.5	9.929	0.9	7.03E-01	2.94E-01	2.28E-03	1.13E-01	7.87E-01	17->0.743,57->0.165,121->0.212,147->0.011
157	1.67	6.42	3	14	12.52	1	5.40E-01	4.60E-01	0.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	90->0.125,144->0.887
158	1.81	6.96	3.37	13.1	12.61	0.929	5.40E-01	4.60E-01	0.00E+00	0.00E+00	9.29E-01	90->0.127,144->0.892

Notes: Wt: vehicle weight, Po: vehicle weight/ engine power, Pr: price/vehicle weight, Fc: Fuel Consumption D eff: D efficiency, W(Wt)Wt: Weight for Wt, W(Po)Po: Weight for Po, W(Pr)Pr: Weight for Pr, W(Fc)Fc: Weight for Fc, W(Vol)Vol: Weight for Vol

23 番	…1977 年 A 車優 (車両重量: 1045kgf)
55 番	…1983 年 B 車優 (車両重量: 630kgf)
57 番	…1983 年 C 車優 (車両重量: 770kgf)
73 番	…1983 年 D 車優 (車両重量: 1165kgf)
81 番	…1986 年 B 車優 (車両重量: 650kgf)
90 番	…1986 年 F 車優 (車両重量: 1370kgf)
100 番	…1986 年 A 車優 (車両重量: 1120kgf)
107 番	…1989 年 B 車優 (車両重量: 670kgf)
121 番	…1989 年 G 車劣 (車両重量: 790kgf)
136 番	…1992 年 C 車優 (車両重量: 960kgf)
137 番	…1992 年 H 車優 (車両重量: 1370kgf)
144 番	…1992 年 I 車優 (車両重量: 1690kgf)
147 番	…1992 年 G 車優 (車両重量: 770 kgf)

D 効率=1 となる車両について年代別にみると、1977 年車が 1 台、1980 年車は 0 台、1983 年車は 3 台、1986 年車は 3 台、1989 年車は 2 台、および 1992 年車は 4 台となっている。この結果から 1992 年の 1 年分において D 効率=1 となる車両数を 1977 年の対応するものと比較すると 4 倍となっている。また、各年における全車両の D 効率の算術平均は、1977 年が 0.899、1980 年が 0.906、1983 年が 0.922、1986 年が 0.920、1989 年が 0.916 および 1992 年が 0.925 となる。これらの平均は幾分凹凸はあるが、年の経過とともに増大しており顧客満足率は向上している。

国産普通・小型乗用車 144 車種の中で、D 効率=1 となる車両は前述の 13 車種である。つぎに表 4 において、D 効率<1 を示す車種の優位集合に D 効率=1 の車種がどのくらいの頻度で出現するかの観点から、D 効率=1 を示す車種を評価すると次のようになる。以下の車種において末尾の百分率表示は、優位集合に出現する車両の総数のうち、当該車両が出現する数 (頻度数) の百分率である。

- ①136 番…1992 年 C 車優…18.1%
- ②147 番…1992 年 G 車優…17.1%
- ③ 57 番…1983 年 C 車優…14.5%
- ④ 23 番…1977 年 A 車優…11.0%
- ⑤100 番…1986 年 A 車優…9.6%

この中で 136 番 C 車優は、表 2 で優位集合欄に表されたラグランジェ乗数が 0.5 を超えるものが半分以上を占め、18.1%を占める他の車両から近い位置で優位集合に立っていることを示している。

また、表 2 のように得られた結果から重みに意味を持つ D 効率<1 のものの重みを見ると、それぞれ軽量化を目的としたものに関しては軽量化に関する重みが高くなっており (No.56)、また、大きさを志向したものには大きさに関する重みが高くなっており (No.143)、これは、経験値とよく一致しており、データ包絡分析による解析の妥当性の一端を示すものである。

つぎに顧客満足率の面から見ると、最も高い値を示している車種を輩出している B 車、G 車という超小型車を抽出し、この中に車体のアルミニウム化の経済性検討を行うため、アルミニウム材料構成率 (本報では車両構成材料の重量百分率を構成率

と呼称する。) 将来予測に基づき、構成率を変化させた三つの仮想車両の組み込みを行い D 効率を解析する。

具体的に述べるとベースとなる車両として 1992 年 B 車優 (車番:133) を選択し、1997 年 B 車優の材料構成は 1997 年の国産普通・小型乗用車の材料構成データを使用して予測する。前報⁽¹⁾で記述したように国産普通・小型乗用車のアルミニウム構成率に関していえば、1997 年の予測値は 7.97%である (表 3)。

次にこの予測値であるアルミニウム 7.97%を基準に車体のアルミニウム化を、現状維持とした場合、加速した場合および減速した場合の 3 ケースについて考える。すなわち、車体のアルミニウム化を想定して、アルミニウムの構成率をそれぞれ 2%増減し、かつ、その分普通鋼鋼材の構成率を 2%ずつ同時に減増させることにより、次の 3 台の仮想車両を作成し D 効率を解析する。

現状維持の場合…アルミニウム構成率(7.97+0)%、材料構成は表 5、車番 171。

加速の場合…アルミニウム構成率(7.97+2)%、材料構成は表 5、車番 172。

減速の場合…アルミニウム構成率(7.97-2)%、材料構成は表 5、車番 170。

ここで仮想車両の入出力データの作成に使用したアルミニウム構成率の増減に用いた 2%の選択理由について述べる。1992 年の B 車優の車両重量は 820kgf、B 車劣の車両重量は 750kgf である。2%の値は車両重量に換算すると 15~16.4kgf となる。アルミニウム化を加速する場合、この規模の重量で車体外板のアルミニウム化をはかると、ボンネット、フロントフェンダーおよびトランクリッドがほぼ可能な重量となる。またこの範囲で行う車体のアルミニウム化は、現行の設計技術・生産技術等に対応可能な範囲と考えられる。逆にアルミニウム化を減速する場合は、例えば、既存のアルミニウム製シリンダーブロックがある場合は、これを鋳鋼製に戻すことを意味する。

次に仮想車両の入力/出力データを以下のように作成する。

①車両重量 (単位: tonf)

1997 年 B 車優の車両重量を W_{1997} すると W_{1997} は次式で求められる。

$$W_{1997} = (\rho_{1997} / \rho_{1992}) * (V_{1997} / V_{1992}) * W_{1992}$$

1997 年 B 車優車両体積予測値は、1977 年から 1992 年までの B 車優車両の近似曲線解析から求める。この解析の結果を図 3 に示す。また車両比重の予測値は前報の近似曲線解析で予測した値を使用する^{(1) (19)}。

②車両重量/エンジン馬力 (単位: kgf/ps)

1997 年の B 車優に関する車両重量/エンジン馬力の値は、1977 年から 1992 年までの B 車優の車両重量/エンジン馬力の値を近似曲線解析することにより求める (図 4)。この図から求められた 1997 年の車両重量/エンジン馬力の値を基準として、仮想車両のこの値は、仮想車両の車両重量に比例すると仮定し算出する。

Fig. 3 Prediction of Volume of B(s)

Fig. 4 Prediction of Vehicle engine/engine power of B(s)

③車両販売/車両重量（単位：円/gf）

アルミニウム構成率 7.9%の仮想車両（車番：171）の構成率は表3に表示されている。これを基準に、アルミニウム構成率 5.97%, 9.97% とした仮想車両の材料構成表をそれぞれ表5に示す。次にこれらの材料構成表を鉄鋼，アルミ地金，プラスチックおよびその他材料に4分類する。4分類された素材の kgf 当たりの価格，およびこれらの材料で作

られた製品価格を表4に示す^{(20)~(22)}。なお1997年の材料価格は1980年から1992年までのものを近似曲線解析により求めたものである。最終的に仮想車両単位重量当たりの販売価格は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \text{仮想車両販売} &= (\Sigma 1997 \text{ 年仮想車両製品価格} / \Sigma 1992 \text{ 年} \\ &\quad \text{B車優製品価格}) * 1992 \text{ 年 B車優販売価格} \\ &= (\Sigma 1997 \text{ 年仮想車両製品価格} / \Sigma 1992 \text{ 年 B} \\ &\quad \text{車優製品価格}) * 1.08 \end{aligned}$$

④車両燃費（単位：km/l）

まず1997年のB車優の車両燃費は、1977年から1992年までのB車優の燃費を近似曲線解析することにより予測する（図4）。前述の通り車両の燃費構成要因は種々あるが、ここでは車両重量の変化のみを反映する。すなわち車両燃費を算出するシミュレーションの結果導かれた値として、車両重量が1%減少すると、燃費は平均して0.8%改善するとの結果⁽²⁴⁾を使用して仮想車両の燃費を算出する。また、ここで仮想車両の車両重量は①車両重量で導かれた値を使用する。

Fig. 5 Prediction of fuel consumption of B(s)

Table3 Material Composition for 3 Virtual Cars

Raw Material Name	Estimated mass % of a specified material making up the 1997 Japanese compact & midsize passenger car (normal)	In case of deceleration of Aluminum for left estimation (Aluminum poor)	In case of acceleration of Aluminum for left estimation (Aluminum rich)
Pig iron	1.858	1.858	1.858
General steel stock	53.013	55.013	51.013
Special steel stock	15.454	15.454	15.454
Electric copper	1.34	1.34	1.34
Lead ingot	0.313	0.313	0.313
Zinc ingot	0.283	0.283	0.283
Aluminum ingot	7.971	5.971	9.971
Other non ferrous	0.284	0.284	0.284
Phenol resin	0.039	0.039	0.039
Polyurethane resin	1.105	1.105	1.105
Polyvinyl chloride resin	0.518	0.518	0.518
Polyethylene resin	0.205	0.205	0.205
Polypropylene resin	3.11	3.11	3.11
Other synthetic resins	0.782	0.782	0.782
ABS resin	0.665	0.665	0.665
total-of high performance resins	1.311	1.311	1.311
Paint	1.428	1.428	1.428
Rubber	2.964	2.964	2.964
Glass	2.406	2.406	2.406
Fiber	0.929	0.929	0.929
Wood	0.421	0.421	0.421
Others	3.601	3.601	3.601
Total	100	100	100

これらの仮想車両の入力，出力データを超小型車群の中に導入し，D 効率を解析した結果を表5に示す。この結果の分析から次のことがいえる。

1977年から1992年までの144車両の顧客満足率解析においてD効率=1となった55番1983年B車優，81番1986年B車優，107番1989年B車優，121番1989年G車劣，147番1992年G車優の5車種に加え，95番1986年G車劣，車体のアルミニウム化を加速した場合の仮想車両(172番)が加わり，新たな優位集合を形成する。95番1986年G車劣の出現は，前回のD効率解析では57番1983年C車優が優位集合に立っていたが，今回超小型車のみ解析で外れたためと考えられる。また，172番の仮想車両は，これまでにない新しいタイプの車両として評価されたものと考えられる。

車体のアルミニウム化を加速した場合，現状維持とした場合および減速した場合における3種類の仮想車両のD効率(顧客満足率)は以下ようになる。

- 170番 車体のアルミニウム化を減速した仮想車両のD効率=0.9978
- 171番 車体のアルミニウム化を現状維持とした仮想車両のD効率=0.9988
- 172番 車体のアルミニウム化を加速した仮想車両のD効率=1.000

この結果，現状に比べ車体のアルミニウム化を加速することが，D効率の向上へ繋がる事が表5から定量的に示された。

Table 4 Raw material cost and product price

year	Cost of cold rolled sheet(A)	Price of steel product (A)*2	Cost of aluminum ingot(B)	Price of aluminum product (B)*2	Cost of polypropylene resine(C)	Price of polypropylene resine(C) (C)*2.5	Price of other materials (A)*4
1980	87	174	511	1022	284	710	348
1983	92	184	514	1028	247	617.5	368
1986	97	194	511	1022	220	550	388
1989	100	200	366	732	206	515	400
1992	98	196	220	440	196	490	392
.....							
1997	85	170	272	544	131	327.5	340

Table 5 Results of data envelopment analysis

No.	Wt	Po	Pr	Fc	Vol	D eff	W(Wt) Wt	W(Po) Po	W(Pr) Pr	W(Fc) Fc	W(Vol) Vol	Superior Group and its relation
1	0.775	11.39	1.02	21	7.747	0.8867	6.01E-01	0.00E+00	3.99E-01	0.00E+00	8.87E-01	107->0.400,147->0.545
2	0.81	10.13	1.12	19	7.747	0.8431	7.22E-01	2.52E-01	2.62E-02	0.00E+00	8.43E-01	81->0.348,95->0.012,147->0.582
15	0.795	12.42	1.01	24	7.8	0.8826	6.09E-01	0.00E+00	3.91E-01	0.00E+00	8.83E-01	107->0.292,147->0.657
16	0.795	12.42	0.9	20	7.8	0.934	0.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	0.00E+00	9.34E-01	107->0.015,147->0.945
28	0.805	11.5	1.14	24	8.426	0.9077	6.62E-01	6.71E-02	2.71E-01	0.00E+00	9.08E-01	81->0.241,107->0.316,147->0.471
29	0.835	10.4	1.18	19.5	8.68	0.9166	7.23E-01	2.51E-01	2.68E-02	0.00E+00	9.17E-01	81->0.379,95->0.072,147->0.606
41	0.72	10	1.15	27	7.79	0.9241	7.00E-01	2.71E-01	2.93E-02	0.00E+00	9.24E-01	81->0.518,95->0.148,147->0.285
42	0.695	9.65	1.13	25	7.74	0.9508	7.00E-01	2.71E-01	2.98E-02	0.00E+00	9.51E-01	81->0.511,95->0.189,147->0.245
55	0.63	11.05	1.33	31.1	7.932	1						
56	0.665	11.66	1.29	25.4	8.23	0.9832	6.80E-01	3.18E-01	1.31E-03	0.00E+00	9.83E-01	55->0.437,81->0.582,95->0.001
68	0.745	9.43	1.39	29	7.878	0.9315	5.30E-01	4.70E-01	0.00E+00	9.32E-01	0.00E+00	55->0.388,147->0.584
69	0.76	10.27	1.39	23.5	7.878	0.8884	7.34E-01	2.65E-01	1.33E-03	0.00E+00	8.88E-01	55->0.059,81->0.391,95->0.519
81	0.65	11.4	1.18	29.9	8.182	1						
82	0.71	10.4	1.38	25.5	8.182	0.9661	7.18E-01	2.81E-01	1.38E-03	0.00E+00	9.66E-01	55->0.479,81->0.160,95->0.379
94	0.72	9.13	1.33	29	8.118	0.9875	7.06E-01	2.94E-01	0.00E+00	9.19E-02	8.96E-01	55->0.386,95->0.217,147->0.400
95	0.74	7.74	1.34	25	8.118	1						
107	0.67	12.88	1.05	27.7	8.128	1						
108	0.72	13.84	1.27	23.4	8.128	0.9036	7.40E-01	0.00E+00	2.60E-01	0.00E+00	9.04E-01	81->0.793,107->0.201
120	0.75	9.146	1.25	29	8.324	0.9809	7.14E-01	2.86E-01	0.00E+00	8.92E-02	8.92E-01	55->0.314,95->0.357,147->0.355
121	0.79	7.181	1.51	27.5	8.324	1						
133	0.75	12.93	1.08	29	8.341	0.9517	5.87E-01	0.00E+00	4.13E-01	7.90E-02	8.73E-01	107->0.532,147->0.150,172->0.333
134	0.82	10.37	1.56	24.5	8.345	0.8872	7.47E-01	2.52E-01	1.41E-03	0.00E+00	8.87E-01	55->0.352,81->0.004,95->0.679
147	0.77	7.7	0.89	29	8.258	1						
148	0.92	9.48	1.26	25.1	8.378	0.8401	7.56E-01	2.17E-01	2.71E-02	0.00E+00	8.40E-01	81->0.026,95->0.318,147->0.676
170	0.752	12.96	0.95	28.9	8.33	0.9978	6.10E-01	0.00E+00	3.90E-01	0.00E+00	9.99E-01	107->0.300,147->0.714
171	0.739	12.73	0.98	29.4	8.33	0.9988	6.07E-01	0.00E+00	3.93E-01	8.39E-02	9.16E-01	107->0.179,147->0.377,172->0.452
172	0.726	12.51	1.01	29.8	8.33	1						

171番の仮想車両(アルミニウム化現状維持型)の優位集合には，表5から3車種が出現するが，一番近い車種が172番の仮想車両(アルミニウム化加速型)である。これより171番の仮想車両はさらなるアルミニウム化を指向しているといえる。一方，170番の仮想車両(アルミニウム化減速型：アルミニウム構成率5.97%)の優位集合には表5から2車種出現するが，

1番近いものは147番の車両(1992年G車優：アルミニウム構成率6%)を示し，アルミニウム構成率も含めた両車両の近い関係を裏付けている。

車体の軽量化をはかるため更なる車体のアルミニウム化が必要となるが，将来どのレベルまで車体のアルミニウム化が可能とされるかについては，今後の課題である。

4. 結 言

国産普通・小型乗用車の包絡解析法による顧客満足率の解析から以下のことが示された。

- 1) 顧客満足率に優れた車両は超小型車クラスに多く 54%程度を占め、これより大きい小型車から普通車に至るクラスの車両が残り占める。すなわち、小さい車両で顧客満足率に優れたものが多いが、大きな車両でも顧客満足率に優れたものが存在する。
- 2) 1977 年から 1992 年まで、年ごとに全車両の顧客満足率の算術平均をとると概ね年ごとに増加の傾向を示し、新しい車両ほど顧客満足率が高い。
- 3) 車両重量の 2% の範囲で、1997 年の鋼板車体の外板の一部をアルミニウム製とし軽量化を図ることは、販価も含めた顧客満足率の点から合理的であるとの数理的根拠を示した。将来どのレベルまで車体のアルミニウム化が可能とされるかの検討は今後の課題である。

文 献

- 1) 栗原ほか, 国産普通・小型乗用車の車体軽量化における適用材料の研究（第1報, 国産普通・小型乗用車の軽量化進行度の予測手法）機論, A 編, 65-637, (1999), 1881-1887.
- 2) 栗原, 機論, A 編, 61-583, (1955), 668-673.
- 3) Kurihara, Y. JSME, Int. J. Series A, Vol.38No.4, (1995), 487-492.
- 4) 栗原, 精密工学会誌, 60-7(1994), 942.
- 5) 日野, 機械学会講習会教材, (1992 年), 14.
- 6) 鉦物, 1975 年 10 月号.
- 7) 世界大百科事典, 第 9 巻, 平凡社, (1981 年 4 月) 481.
- 8) 藤崎ほか, 機械学会第 2 回交通・物流部門大会論文集, (1993 年) 436-439.
- 9) Komatsu, Y., SAE 910548 (1991).
- 10) Audi A8 広報資料 (1994 年)
- 11) 工藤ほか, 自動車技術会主催 (1994 年) 59-63.
- 12) 宮岡ほか, 形技術, 7 巻 4 号, (1992 年) 37.
- 13) 宮川ほか, プレス技術, 29 巻 4 号, (1991 年) 54.
- 14) 中里ほか, 溶接技術, 1991 年 3 月号, 68.
- 15) 栗原, 機械の研究, 45-5, (1993), 43-49.
- 16) 刀根, 経営効率の測定と改善—包絡解析法 DEA による—日科技連一, 15-55.
- 17) 自動車工業振興会, 自動車ガイドブック (1977 年～1992 年)
- 18) 刀根, 増補オペレーションリサーチ読本, 日本評論社 (1994 年), 15-35.
- 19) 角, 技術者のための EXCEL 活用法, (1996), CQ 出版社, 94-103.
- 20) 下川ほか, 自動車技術 33 巻 8 号 (1979), 639-640.
- 21) 通産省大臣官房調査統計部編集, 資源統計年報 (1973 年～1996 年)

- 22) 通産省大臣官房調査統計部エネルギー統計調査室編集, 化学工業統計年報 (1973 年～1996 年)
- 23) 栗原ほか, 日産技報, 29, 21.