日本機械学会論文集(A編)
66巻641号(2000-1)

論文 No. 99-0199

自動車衝突安全設計における補強部材の多目的最適化*

于　　強*1, 矢島秀起*2, 吉本　毅*3
白鳥正樹*1, 本山恵一*4

Multi Objective Optimization of Reinforced Members for Crash Safety Design of Automobiles

Qiang YU*5, Hideoki YAJIMA, Takeshi YOSHIMOTO,
Masaki SHIRATORI and Keiichi MOTOYAMA

*5 Yokohama National University, Dept. of Mechanical Engineering,
Tokiwadai 79-5 Hodogaya-ku Yokohama Kanagawa, 240-8501 Japan

CAE technology has been widely applied for the crash safety design of vehicles. Nevertheless, the optimum design approach has not been completed for the crash behavior of the vehicles because of the non-linearity of the dynamic problem. The authors have proposed a Statistical Design Support System (SDSS), and brought forward that the SDSS is one of the available optimal approaches for the nonlinear and dynamic problems such as the vehicles crashing. In this study, the SDSS was applied for the multi-objective optimization design of the main reinforced members of a vehicle. The thickness of each member was chosen as the design variables, and the total weight and the deformation of the cabin as the multi-objection functions. It was shown that the SDSS could satisfactorily be used as a practical multi-objective optimization design tool for the crash safety design of vehicles, and the design cycle could be significantly cut down using SDSS.

Key Words: Statistical Design Support System, Multi Objective Optimization, Crash Safety Design, Non-Linear Problem, Crashworthiness

1. 緒言

CAE 解析は、衝突現象のような複雑な非線形問題に対して高精度でシミュレーションができるようになり新製品の開発期間の短縮に大きく貢献している。これまでのCAE ツールの開発は、試作品の挙動をいかにシミュレーションするかに重点が置かれている。すなわち、設計要因および使用条件の入力に対して、その設計での挙動特性値が得られるだけである。しかし、設計ではある使用条件において評価特性値を改善するための設計要因とその組み合わせを決定する必要がある。さらに、設計者には決められた開発期間の中で新製品を完成させるだけでなく、制限された期間内に評価特性値を最適化することも求められている。結果として効率的な設計支援システムや最適化システムはそのような要求に応えるために必要不可欠になってきている。しかしながら、数学的である最適化手法はまだ実際の衝突問題に対して対応しきれていない部分が多い。その上、自動車のような複雑な問題の最適化は重量や安全性だけではなく、コストやリサイクル性などにも実行されなくてはならない。それゆえに、多目的最適化や多峰性問題に適用できる最適化設計システムを開発することが要求されている。柏村が提案している統計的設計支援システム(SDSS)[1][2]は非線形問題を始めとして様々な設計問題に対して効率よく扱えることができるシステムである。本研究では、自動車の衝突安全性に対する多目的最適化設計の複雑な問題においてSDSS を適用し、きわめて複雑な設計問題における SDSS の有効性を確認するとともに、自動車衝突安全設計の効率的な多目的最適化手法を確立することを目的とする。

自動車の開発において衝突時の乗員生存空間の確保はとても重要である。この点に注目して、設計要因をフロン

* 原稿受付　1999年2月22日.
*1 正員, 横浜国立大学工学部 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5).
*2 正員, 横浜国立大学大学院, (株)本田技術研究所和光基礎技術研究センター (〒351-0193 和光市中央1-4-1).
*3 横浜国立大学大学院.
*4 正員, メカニカル・ダイナミックス・ジャパン(株) (〒160-0023 東京都新宿区西新宿3-8-4).
E-mail: Qiang@swan.me.ynu.ac.jp

トとキャビンに使われている補強部材の板厚として、評価特性値にキャビン変形量と重量を選んだ。そして、SDSSを用いることによって、設計要因の影響度解析を定量的かつ、効率的に行うことができ、これらの結果から評価関数の推定式を得ることができる。この推定式を基に重量とキャビン変形量を同時に扱った多目的最適化設計を行う。

2 統計的設計支援システムと多目的最適化

2.1 統計的設計支援システム 図1に示すように、統計的設計支援システム(SDSS)は影響度解析、再解析、ばらつきの評価、ロバスト性解析、最適化、信頼性の評価、感度解析の7つから構成されている。このシステムの基本概念は影響度解析から成っている。そしてそれは、評価特性値に対する設計要因の影響を構造解析と実験計画法とを組み合わせることで定量的に評価できる。また、構造解析の結果に対して分散分析を行うことで、評価特性値と設計変数との相関関係が簡単な推定式という形で与えられる。これによって最適化計算などのさまざまな解析に対してこの推定式を軸に展開していくことができる。さらに、このシステムにおいて構造解析が他の機能から独立しているため、非線形問題の最適化計算も既存のCAE環境で実行できる。詳細は、文献(1)と(2)を詳細されたい。

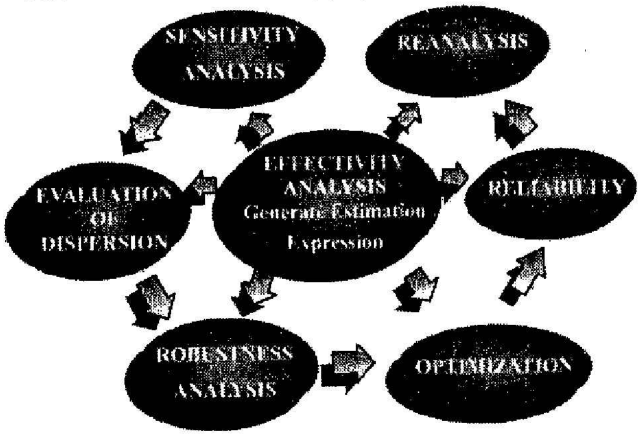


Fig.1 Concept of Statistical Design Support System

2.2 多目的最適化設計 最適設計を行う際、複雑なシステムに対して複数の評価特性値が存在し競合しているにもかかわらず、今まではそれらの中から一つだけ目的関数に設定し、それ以外のものは制約関数に設定して扱ってきた。しかし、複数の評価特性値が競合している場合、現実の設計問題として、重量や、その商品の性能、安全性、リサイクル性などのさまざまな評価特性値に対して唯一つの目的関数だけ最適化をしようとしても、他の評価関数の影響を受けるためなかなか満足する解にならないが、これを同時に目的関数として扱うことによって、すなわち、多目的最適化問題として扱うことによって最も満足する解を得ることができる。

多目的最適化問題では各目的関数間にトレードオフ関係が存在するため、すべての目的関数を同時に最小化するような解は一般には存在しない。したがって、ある目的関数をそれ以上改善するには他を犠牲にしなければならない。このようにあるレベルまで改善された解の組み合わせをパレート解という。一般にパレート解は唯一つではなく、ある集合となって現れるため、決定解は通常新しくある価値判断を導入することによって、これらのパレート解の中から一つ選ばれる。実際には、この新しい価値基準として設計者の価値判断がとられる。ゆえに、多目的問題は設計者の価値判断の情報をどのように取り入れるかによっていくつかのアプローチが可能となる。本研究で提案している SDSS では最適計算などが設計変数で表した評価特性の近似推定式を用いて行われているため、ほとんどのパレート解を決定するアプローチを簡単に取り入れることが可能である。

多目的最適化問題の定式化は、式(1)で表される。

$$\text{Objective function}: |f_1(x), f_2(x), f_3(x), \cdots, f_i(x)| \longrightarrow \text{minimum} \quad (1)$$

$$\text{Constraints}: g_i(x) \geqq 0 \qquad (i=1,2,3,\cdots,k)$$
$$\vdots$$
$$h_i(x)=0 \qquad (i=1,2,3,\cdots,m)$$
$$\vdots$$

ここでは、すでにSDSSに取り入れた2つのアプローチについて簡単に説明する。

2.2.1 重み付け問題

重み付け問題の定式化は、式(2)で表される。

$$\text{Objective function}: F = w_1 f_1(x) + w_2 f_2(x) + w_3 f_3(x) + \cdots + w_i f_i(x) \longrightarrow \text{minimum} \quad (2)$$
$$(w_1 + w_2 + \cdots + w_i = 1)$$

$$\text{Constraints}: g_i(x) \geqq 0 \qquad (i=1,2,3,\cdots,k)$$
$$\vdots$$
$$h_i(x)=0 \qquad (i=1,2,3,\cdots,m)$$
$$\vdots$$

後で述べるように、SDSSでは式(2)に示す関数 $f, g, h,$ が予め影響度解析のプロセスで簡単な近似多項式で表されているため、式(2)で定義した最適問題は非常に簡単な最適計算のアルゴリズムで解くことができる。ただし、この重み付け問題は複数ある目的関数にそれぞれ重み w_i を付けて一つの関数にすることで単一目的問題に帰着している。ただ一つの関数にするといってもそれぞれの目的関数が、同じオーダーであるとは限らない。例えば実際の設計現場でこれらの目的関数が、重量であったり変位であったりとさまざまである。それらを十分考慮した上で重みを付けていかなければならない。

2.2.2 優先順位問題（多段階最適構造設計手法[3]）

r個ある目的関数がいかなる犠牲を払っても満足しなければならない要求目標l個と変更される可能性がある希求目標 m 個とに分けられ、また、それぞれの目的関数の優先順位が明らかになっている場合の問題を考える。また、それぞれの目的関数について最低限達成されるべき水準を設定する。

要求水準ベクトル　$F^t=(F_1^t, F_2^t, \cdots, F_l^t)$
希求水準ベクトル　$f^t=(f_1^t, f_2^t, \cdots, f_m^t)$

最初に最も順位の高い要求目標 $F_1(x)$に対して下記に示すような単一目的最適化問題を設定して最適値F_1^*を得る。

$$\begin{cases} \text{Objective function}: F_1(x) \longrightarrow \text{minimum} \\ \text{Constraints}: F_i(x) \leqq F_i^t \quad (i=2,3,\cdots,l) \\ \qquad\qquad f_i(x) \leqq f_i^t \quad (i=1,2,\cdots,m) \end{cases} \tag{3-1}$$

$F_1^* > F_1^t$のとき、希求水準f^tの設定を緩和してやり直す。改悪許容限度として偏差$\Delta_1 (0 \leqq \Delta_1 \leqq F_1^t - F_1^*)$を設定して次に順位の高い要求目標に対する目的関数 $F_2(x)$に対して最小値F_2^*を得る。

$$\begin{cases} \text{Objective function}: F_2(x) \longrightarrow \text{minimum} \\ \text{Constraints}: F_1(x) \leqq F_1^* + \Delta_1 \quad (0 \leqq \Delta_1 \leqq F_1^t - F_1^*) \\ \qquad\qquad F_i(x) \leqq F_i^t \quad (i=3,4,\cdots,l) \\ \qquad\qquad f_i(x) \leqq f_i^t \quad (i=1,2,\cdots,m) \end{cases} \tag{3-2}$$

$F_2^* > F_2^t$のときは、やはりf^tの設定を緩和して再実行する。

同様に、$3 \leqq p \leqq l$に対して順に最小値を得る。

$$\begin{cases} \text{Objective function}: F_p(x) \longrightarrow \text{minimum} \\ \text{Constraints}: F_k(x) \leqq F_k^* + \Delta_k \quad (0 \leqq \Delta_k \leqq F_k^t - F_k^*) \\ \qquad\qquad (k=1,2,\cdots,p-1) \\ \qquad\qquad F_i(x) \leqq F_i^t \quad (i=p+1,p+2,\cdots,l) \\ \qquad\qquad f_i(x) \leqq f_i^t \quad (i=1,2,\cdots,m) \end{cases} \tag{3-3}$$

$F_p^* > F_p^t$のときは、f^tの設定を緩和して再実行する。希求目標についても同様に繰り返す。また、統計的設計支援システムは最適計算を繰り返すこの多段階最適構造設計手法においても、一般の数理計画法を用いて容易に解析を行うことができる。

2.3 統計的設計支援システムにおける多目的最適化

一般に最適化計算は目的関数を最小にするための設計要因を決めるプロセスで、いわゆる逆問題の代表例である。そのために、この逆問題を解くためにイタレーション計算をする必要がある。多目的最適化問題となると、いくつかの目的関数が存在するため、その最適解を求めるアルゴリズムが非常に難しいものになる。さらに、目的関数と設計要因間の物理関係は非線形性のある動的なものとなるとこのような逆問題をうまく解く手法の確立は想像する以上に困難な作業であり、未だに報告された実例は少ない。しかし、SDSS では、問題の難易度に関わらず、まず、評価関数（目的関数）に対する設計要因の影響度解析を行い、その結果の分散分析に基づいて評価関数の近似推定式を作成する。これまでのプロセスは設計要因から評価関数を求めるものであり、順問題である。そのため、少数の解析回数で問題を解析することができる。さらに、目的関数が多数存在する問題である多目的最適問題ではこの影響度解析で同時に複数の評価関数の近似推定式を作成できる場合が多いため、必ずしも単一目的問題より解析回数が増えることはない。そして、これらの評価目的関数の推定式を一度求めれば、式(2),(3)に示す多目的最適化の繰り返し計算は全て簡単な近似推定式で行われるため、パソコンで処理できる作業である。これによって重み付け手法と多段階最適構造設計手法を SDSS に取り込むことが容易であると言える。ここでは最適化計算を行うアルゴリズムとして、Sequential Quadratic Programming (SQP)を使用している。

3 自動車衝突安全設計における多目的最適化

3.1 解析モデル　米国道路交通安全局(NHTSA)で公開されている正面衝突のセダンモデルを一部改良して使用した。モデル全体の節点数は約 51,200、要素数は約 37,000 である。解析計算には EWS 上で市販の衝突解析ソフト PAM-CRASH を用いた。解析モデルを図２に示す。時速56km/hでデフォーマブルバリアへのオフセット衝突を想定したもので衝突から 150msec 後までの解析計算を行なうこととした。

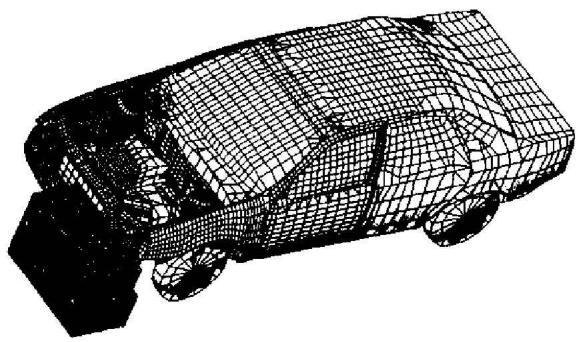


Fig.2　FEM model of offset crash

3.2 影響度解析 衝突時の乗員の傷害を大きく低減する部材としてフロントとキャビン周りから設計要因 11 部材の板厚を選択、グループ化し図 3 に示す。すべて要因のグループに表 1 のような水準を設定し、直交表 L18 ($2^1 \times 3^7$)に割り付けを行なった。

また、すべての水準値はそれぞれの設計要因の上限値で正規化したものである。直交表の組み合わせ通りに解析を行い、特性値であるToe-Boardの進入量($Y_{Toe\text{-}Board}$)、A-C pillar間の変位($Y_{A\text{-}C\ pillar}$)と選択した11部材の重量(Y_{Weight})を抽出し、図4に示す。したがって、2種類の評価特性値、および、車体の重量は同じ計算プロセスで評価することができる。

X_1 *Rail inner*
Rail outer
X_2 *Front floor upper*
X_3 *Hinge pillar inner*
Hinge pillar outer
X_4 *Rail front floor pan*
X_5 *Rocker rain forcement*
Rocker inner
Rocker outer
X_6 *Engine cradle-left*
Engine cradle-right

Table1. Levels of factors

	Level 1	Level 2	Level 3
All Factor	0.5	0.75	1.00

Table 2 Result of Crash Analysis

Analysis Number	Weight of Discussed[kg]	A-C pillar [m]	Toe-Board [m]
1	23.18	0.0496	0.123
2	30.53	0.0303	0.091
3	37.87	0.0214	0.081
4	32.25	0.0397	0.104
5	34.39	0.0245	0.092
6	35.52	0.0272	0.096
7	38.62	0.0285	0.092
8	41.63	0.0288	0.085
9	35.85	0.0242	0.091
10	32.34	0.0331	0.073
11	31.55	0.0340	0.113
12	27.68	0.0320	0.095
13	35.20	0.0374	0.092
14	33.78	0.0256	0.083
15	34.87	0.0309	0.103
16	39.04	0.0244	0.068
17	35.80	0.0309	0.112
18	41.26	0.0325	0.089

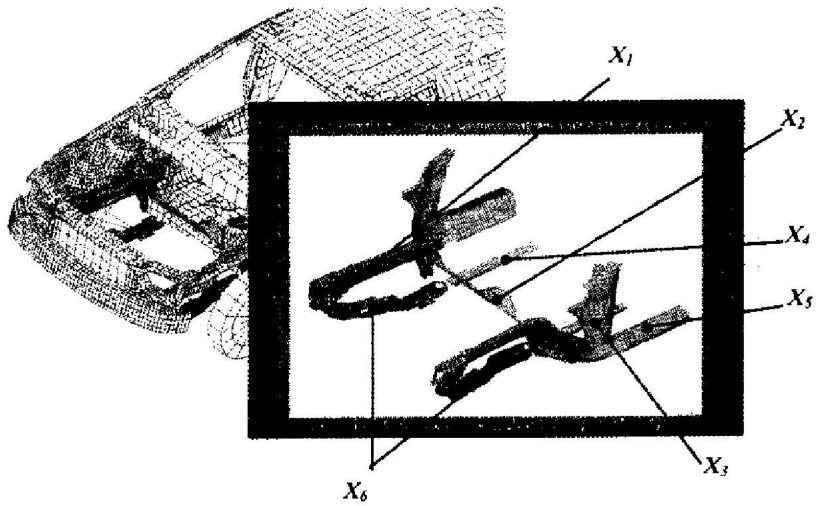


Fig.3 Analytical model and design factors

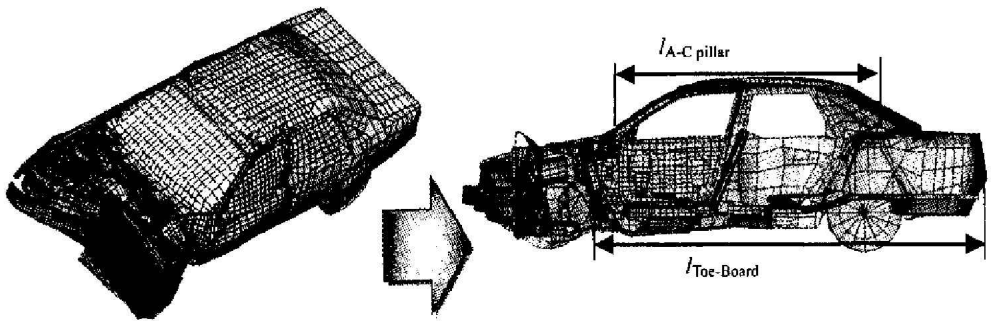


Fig.4 Analytical results

解析結果を表2に示す。そして、この結果に基づいて評価特性値に対する設計変数の影響度の分散分析を行った。その結果の一例を表3に示す。この分散分析の結果を用いて有意であると判断した次数の項を使い評価特性値の推定式を立てた。SDSSでは直交表にしたがって調べられた設計変数の影響度が全て直交している特性を利用して、分散分析の結果に基づいてChebyshevの直交多項式で近似推定式を求めている。この方法によって、それぞれの設計変数の影響度のみではなく、設計変数間の交互作用も定量的に評価することを可能としている。以上のことから得られた評価特性値の推定式を式(4), (5), (6) 又、推定式と特性値を比較したグラフを図5, 図6, 図7に示す。

Table 3 Variance analysis of A-C pillar

FACTOR		SUM OF SQUARE	EGREE OF REEDOM	VARIANCE	F RATIO		EFFECTIVE RATIO(%)
X_1	1	8.00E-05	1	8.00E-05	1.18E+01	**	9.66
	2	2.40E-08	0	2.40E-08	0.00E+00		0
X_2	1	1.65E-04	1	1.65E-04	2.44E+01	**	20.89
	2	2.96E-05	1	2.96E-05	4.37E+00	*	3.01
X_3	1	1.98E-04	1	1.98E-04	2.92E+01	**	25.22
	2	9.03E-09	0	9.03E-09	0.00E+00		0
X_4	1	5.61E-05	1	5.61E-05	8.28E+00	**	6.51
	2	3.08E-07	0	3.08E-07	0.00E+00		0
X_5	1	1.49E-04	1	1.49E-04	2.20E+01	**	18.79
	2	2.89E-08	0	2.89E-08	0.00E+00		0
X_6	1	1.51E-05	1	1.51E-05	2.22E+00		1.09
	2	4.12E-06	1	4.12E-06	6.08E-01		0
ERROR	1	6.10E-05	9	6.77E-06			14.8
TOTAL		7.58E-04	17				100

$$Y_{\text{Toe-Board}}=|\Delta l_{\text{Toe-Board}}|=0.22+0.042X_1-0.037X_1^2+0.087X_2-0.057X_2^2-0.118X_3+0.043X_3^2-0.103X_4+0.056X_4^2-0.203X_5+0.124X_5^2+0.043X_6-0.026X_6^2 \quad \text{[m]} \ (4)$$

$$Y_{\text{A-C pillar}}=|\Delta l_{\text{A-C pillar}}|=0.107-0.0103X_1-0.0801X_2+0.0435X_2^2-0.0163X_3-0.00865X_4-0.0141X_5-0.0199X_6+0.0162X_6^2 \text{[m]} \ (5)$$

$$Y_{\text{weight}}=3.315+9.626X_1+4.481X_1^2+7.500X_2-2.241X_2^2+12.26X_3-2.241X_3^2-4.212X_4+4.483X_4^2-0.949X_5+4.483X_5^2+11.97X_6-2.242X_6^2 \quad \text{[kg]} \ (6)$$

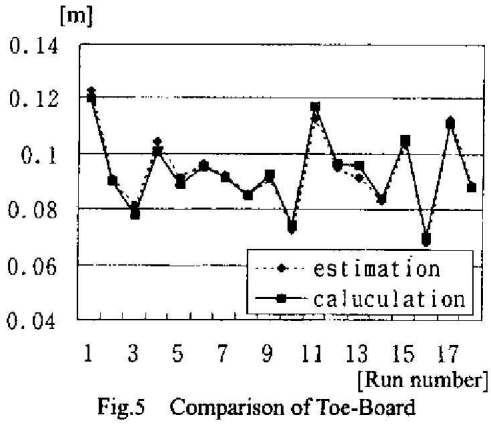


Fig.5 Comparison of Toe-Board

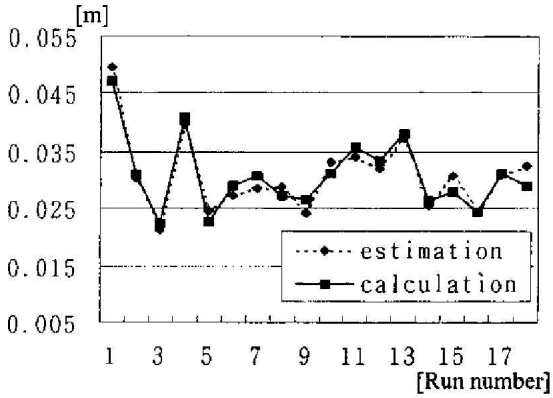


Fig.6 Comparison of A-C pillar

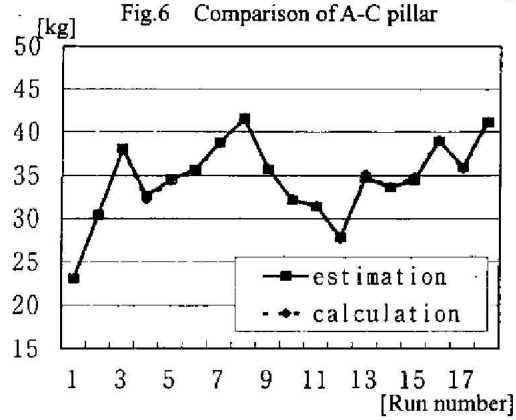


Fig.7 Comparison of Weight of Discussed Members

表 3 に表されている分散分析よって得られた推定式の精度は良い精度が得られた。A-C pillar の変位量と Toe-Board の進入量において、推定値と計算値とでの最大誤差が、希求水準に対してそれぞれ、9.9%, 4.1%,であり、重量については 1%以下であった。これらの推定式を用いて自動車衝突安全設計の補強部材の多目的最適化を行う。

3.3 多目的最適化

3.3.1 問題設定 多目的最適化問題を以下のように設定した。

Objective function: $\{Y_{\text{weight}}, Y_{\text{Toe-Board}}, Y_{\text{A-Cpillar}}\} \longrightarrow$ minimum

Constraints : $0.5 \leqq X_i \leqq 1 \quad (i=1,2,\cdots,6)$

重量付け手法と多段階最適構造設計手法の両方を SDSS に取り込むことによって簡単に最適化問題に適用できるようになっている。今回、多段階最適構造設計手法を用いた SDSS による多目的最適化問題へのアプローチを示す。

3.3.2 最適化計算 目的関数に優先順位があるため、重量を一位、A-C pillar の変形量を二位に、そして、Toe-Board の後退量を三位とした。今回、各目的関数は変更の可能性がある希求目標に設定する。ここで、各目的関数の最低限達成されるべき希求水準を設定する。

$Y^{\text{e}}_{\text{weight}}=32.0\text{kg}$, $Y^{\text{e}}_{\text{A-C pillar}}=0.0350\text{m}$, $Y^{\text{e}}_{\text{Toe-Board}}=0.10\text{m}$

そして、優先順位の高いものから最適化計算を行う。最適化計算には SQP を使用する。

The first step

Objective function : $Y_{weight} \longrightarrow$ minimum

Constraints : $Y_{A\text{-}C\ pillar} \leqq 0.0350$, $Y_{Toe\text{-}Board} \leqq 0.10$,

$0.5 \leqq X_i \leqq 1$ $(i=1,2,\cdots,6)$

第一段階で得られた最適解 Y^*を表 4 に示す。次に得られた最適解に偏差Δ($\Delta=|Y^*-Y'|/2$)を与えて最適計算を行う。

The second step

Objective function : $Y_{A\text{-}C\ pillar} \longrightarrow$ minimum

Constraints : $Y_{Toe\text{-}Board} \leqq 0.10$,

$Y_{weight} \leqq 26.24+2.88$,

$0.5 \leqq X_i \leqq 1$ $(i=1,2,\cdots,6)$

The third step

Objective function : $Y_{Toe\text{-}Board} \longrightarrow$ minimum

Constraints : $Y_{weight} \leqq 26.24+2.88$,

$Y_{A\text{-}C\ pillar} \leqq 0.0273+0.0039$,

$0.5 \leqq X_i \leqq 1$ $(i=1,2,\cdots,6)$

第三段階によって得られた解が多目的最適解になる。以上によって得られた解を表 4, 表 5 に示す。また、各段階によって最適化されていく様子を図 8 に示す。縦軸は希求水準で割ることで正規化している。この縦軸に示す正規化された目的関数は、1 を越えると目的関数が希求水準を満たしていることになる。図 8 に示すように初期値では、$Y_{A\text{-}C\ pillar}$ $Y_{Toe\text{-}Board}$ が過剰設計であったため、重量は希求水準に満たしていない設計である。最適プロセスの進行にしたがって、step3 では、全ての目的関数が希求水準を満たしながらそれぞれ適切に満足される設計ができた。また、得られた最適解に対して再解析を行い、表 6 に示す。

Table 4 Optimal solution

	Weight	A-C pillar	Toe-Board
Initial	46.04kg	0.0198m	0.074m
First step	26.24kg	0.0349m	0.099m
Second step	28.92kg	0.0273m	0.100m
Third step	28.92kg	0.0311m	0.079m

Table 5 Optimal parameter

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
Initial	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Optimum	0.5	0.61	0.88	0.88	0.73	0.5

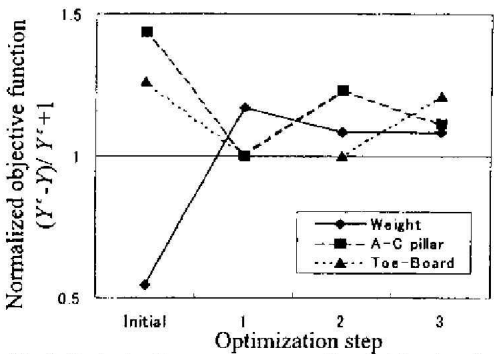


Fig.8 Optimization step vs normalized objective function

Table 6 Reanalysis solution

	Weight	A-C pillar	Toe-Board
Optimum	28.92	0.0311	0.079
Reanalysis	28.96	0.0278	0.085

再解析の結果から、A-C pillar の変位量、Toe-Board の進入量の最適解と再解析を比較してみると、それぞれ、9.4%, 6%,の誤差がでた。これは先ほど求めた推定式が持つ誤差の分だけ結果に表れていると言える。また、今回はあまり見られなかったが構造解析の誤差もあり、それらを含めて 10%程度の誤差を予め考慮して設計を行う必要がある。

4 結言

統計的設計支援システム(SDSS)に重み付け手法と多段階最適構造設計手法との両方を組み込むことができ、多目的最適化問題への適用を示すことができた。今回、自動車の衝突のような複雑かつ、非線形性が強い現象に対して、SDSS を適用することで、自動車の衝突安全設計に対して補強部材の最適設計を多目的最適化問題として取り扱うことができ、実用的な多目的最適化手法の確立ができた。また、推定式による誤差や構造解析によるばらつきなどは、最適化をしていく上でとても影響が大きな要因である。これからはこの誤差やばらつきを制御した製品開発を目指し、誤差を定量的に評価していかなくてはならない。また、実際の設計から見れば、設計要因が板厚では設計自由度がどうしてもせまくなってしまい現場ではなかなか適用し難い。すなわち、構造・形状最適化を取り入れた、より自由度の広い情報を提供できるシステムが望まれている。SDSS においても工業的実用性のある最適化ツールとして今後の取り入れていく必要がある。

文献

(1) 柏村・白鳥・于, Computer Aided Optimum Design of Structures V, pp. 213-227, 1997.

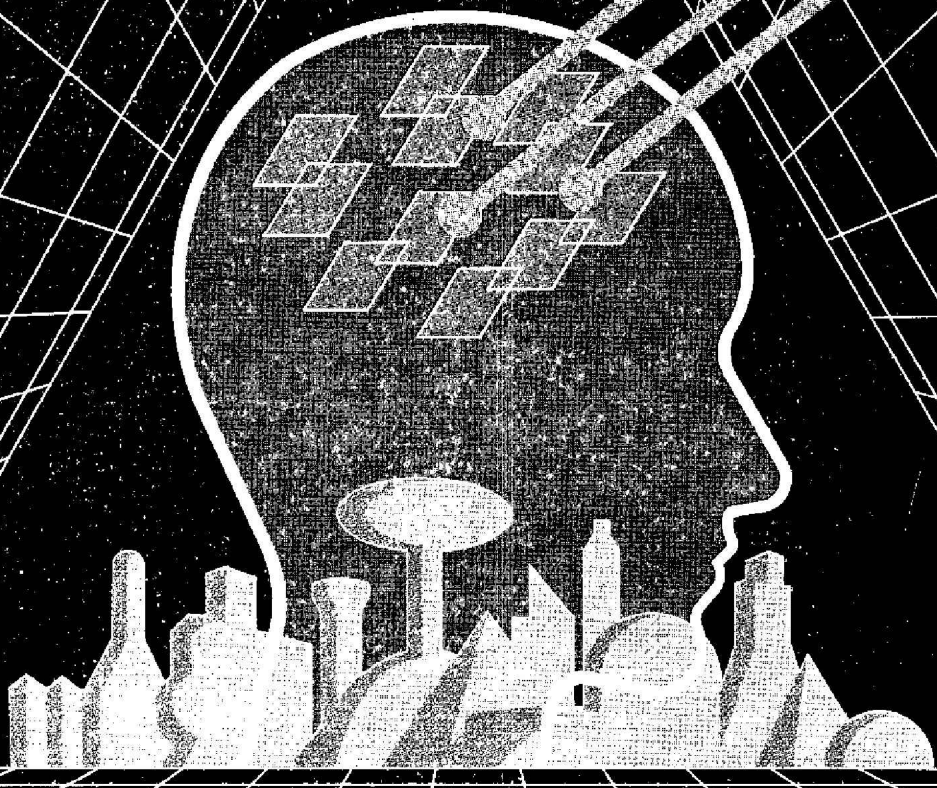
(2) 柏村・白鳥・于・国府田, 機論, 62-601,A(1996),2180.

(3) 松本・阿部・吉村, 機論, 56-531, A(1990), 2359.

(4) 田口, 実験計画法, 第 3 版, 上下, 1976, 丸善.

日本機械学会論文集

TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS



A 編

第66巻

平成12年1月

January 2000

日本機械学会