設計変数間の依存関係を反映したハイブリッドメタ戦略による
スポット溶接位置の最適化*長谷川 浩志^{*1}, 佐々木 寛人^{*2}
上原 広靖^{*3}, 川面 恵司^{*4}The Hybrid Meta-heuristics by Reflecting Recognition of
Dependence Relation among Design Variables for
the Optimization of Spot Weld PositionsHiroshi HASEGAWA^{*5}, Hiroto SASAKI,
Hiroyasu UEHARA and Keishi KAWAMO^{*5} Faculty of Systems Engineering, Shibaura Institute of Technology,
307 Fukasaku, Minuma-ku, Saitama-shi, Saitama, 337-8570 Japan

The digital engineering is considered as a powerful technology for improving the competitive power of products. Especially the optimal design is an important technology for it. The products, which have the competitive power, usually have core technologies in the design and manufacturing fields. The spot weld technology, such as positions and number of spot welds on white-body, indicates the technological level of automotive company. This technology is typical core technology. Authors proposed a new hybrid meta-heuristic method by reflecting recognition of dependence relation among design variables automatically. The proposed method was applied to some benchmark functions to check its performance, and was confirmed that it improved an amount of computational cost and convergence up to the optimal solution. In this paper, authors apply the proposed method for an estimation of it to the optimization of spot welding positions which is an actual engineering problem. The effectiveness of the proposed method is discussed through the optimization of spot weld positions for application of engineering problems.

Key Words: Automotive Design, Spot Weld, Finite Element Method, Multi-peak Optimization, Genetic Algorithm, Simulated Annealing, Meta-heuristics, Direct Search Method, Design of Experiment

1. はじめに

最適設計は、デジタルエンジニアリングの分野における重要技術である。特に工学分野の最適設計は、機械構造の寸法、材質、取り付け位置等、一般に設計変数が離散的整数で定義された最適化問題が多い。このような問題への有力なアプローチとして GA^{(1),(2)}等のメタ戦略が注目されている。筆者らも機械構造物の位相最適化^{(3)~(6)}, General-purposed Optimization Engine (GOE)の開発、GOE の最適設計への適用を通してその有効性を確認している^{(6),(7)}。ただ、最適解へ安定的に収束させるためには、膨大な計算コストを必要とするため、大域的探索と局所的探索をうまく組み合わせたハイブリッド戦略が必要であり、様々な方法が提案されている。現在、最も有名な戦略は、大域的探索を行う GA と局所的探索を行う SA⁽⁸⁾を組み合わせたものである。例えば、先駆的な研究として S. W. Mahfoud と D. E. Goldberg により

1992 年に提案された Parallel Recombinative SA (PRSA)がある。これは、GA の選択処理に SA を利用する戦略である⁽⁹⁾。上原らは、SA のメトロポリスループを GA のエリート戦略内にて利用する戦略を提案し、その戦略を様々なベンチマーク問題に適用し、その有効性を報告している⁽¹⁰⁾。これらの戦略は、一般的にハイブリッド GA と呼ばれるものである。一方、SA をベースにしたハイブリッド戦略では、廣安らが Parallel SA using Genetic Crossover (PSA/GAc)を提案し、その有効性を報告している⁽¹¹⁾。ハイブリッド GA やハイブリッド SA は、確率的探索手法をベースにしているため、局所的探索だけでなく大域的探索についても優れた探索手法と言われている。しかし、文献(10)では、様々なベンチマークテストの結果、局所探索の部分を担当する SA がうまく作用しない場合があることがわかった。これは、この手法が確率的探索手法を採用していることから、設計変数値の更新に確率の変動が伴い、そのため最適解近傍での局所的探索がうまく機能していないことが原因と考えられる。

筆者らは、文献(10)のように従来苦手としていた最適解近傍の探索のために、新たに設計変数間の依存関係を

* 原稿受付 2005 年 12 月 2 日。

^{*1} 正員、芝浦工業大学システム工学部 (☎ 337-8570) さいたま市見沼区深作 307)。^{*2} 東日本電信電話(株) [元：芝浦工業大学大学院]。^{*3} ベンタックス(株) (☎ 174-8639 東京都板橋区前野町 2-36-9)。^{*4} 正員、(株)テクノインテリジェンス (☎ 202-0004 西東京市下保谷 5-5-14-101)。

E-mail: h-hase@sic.shibaura-it.ac.jp

認識・反映する決定論的手法を導入し、局所的探索能力を改善した多峰性の整数最適化問題に対するハイブリッドメタ戦略の手法を提案した。この手法を用いて、文献(13)により4種類の多峰性関数でかつ、設計変数の依存関係を含んだベンチマーク関数を用いて、本手法の有用性について数値実験を行った。その結果、4種類のベンチマーク関数にて100%の確率で最適解を得ることができ、さらに、Rastrigin 関数と Griewank 関数を用いて、本手法と PSA/GAc⁽¹¹⁾, PSAS⁽¹²⁾ を比較した結果、計算コスト、安定性の面で両手法よりも優れた結果が得られた⁽¹³⁾。

本論文では、ベンチマーク関数のみで評価を行っていたハイブリッドメタ戦略を工学的問題に適用すべく、自動車のコア技術であるスポット溶接位置の最適化問題に適用した。その結果、実際の問題に対しても、本手法の有用性が得られたので本論文にて報告をする。

2. ハイブリッドメタ戦略について

2. 1 最適化問題の定式化

本戦略における最適化問題を以下のように定義する。

$$\text{設計変数 ; } X_i = (x_i^1, \dots, x_i^n) \quad (1)$$

$$\text{目的関数 ; } F_i(X_i) = f_i(X_i) + \gamma P_i(X_i) \rightarrow \text{Max} \quad (2)$$

$$\text{ペナルティ関数 ; } P_i(X_i) = \sum_{j=1}^M \left\{ \max \left(\frac{\text{Weight}_j}{\text{Scale}_j} g_{i,j}(X_i), 0 \right) \right\} \quad (3)$$

$$\text{制約条件 ; } g_{i,j}(X_i) \leq 0 \quad j=1,2,\dots,M \quad (4)$$

$$\text{範囲制約 ; } X_i^{LB} \leq X_i \leq X_i^{UB} \quad (5)$$

但し、 i は繰り返し番号、 n は設計変数の番号、 γ はペナルティ係数、 M は制約条件数、 Weight_j は重み、 Scale_j はスケール、 X_i^{LB} は設計変数の下限値、 X_i^{UB} は設計変数の上限値である。

2. 2 ハイブリッドメタ戦略

筆者らが開発したハイブリッドメタ戦略は、最適解を探索する能力として、3つの探索能力を戦略として有する方法である。これらの能力は、①複合探索能力(Multi search ability, MSA)、②局所的探索能力(Local search ability, LSA)、③最適解近傍探索能力(Neighborhood optimal search ability, NOSA)である。各能力を実現するためのフェーズについては次節にて述べる。

つぎに、ハイブリッドメタ戦略の探索プロセスについて述べる。本探索プロセスでは、図1に示すようにMSAの戦略にてプロセス全体を大域的に制御する。この戦略にGAを用いる。つぎに、LSAにより、探索のための設計変数の自己更新プロセスを制御する。この制御には、SAのメトロポリスループの受理判定を用いる。図1に示すように、MSAとLSAのハイブリッド戦略により満足解が得られる。さらに、SAの温度が最小値に達した時点で、LSAからNOSAの決定論的手法を用いて、最適解近傍探索を実施する。このとき、LSAにて試行錯誤により記録された設計変数間の依存関係をNOSAの探索プロセスにて認識・反映させる。MSAとNOSAのハイブリッド戦略により、最終的に最適解が得られる。

Fig. 1 hybrid meta-heuristics method process

2. 3 MSAのためのGA

最適化問題の設計変数は、図2のように染色体に設計変数の整数値を用いて表現される。本論文では、GAの個体数を20個体とし、選択・淘汰にはルーレット戦略を用いる。なお、選択確率は $P_s=1.0$ 、交差については2つの個体をランダムに親として選択し、子孫を生成する。交差は、図2のように設計変数間でのみ行う。交差確率は $P_c=0.2$ とする。最良な個体を次世代に残すためにエリート戦略を用いる。ただし、突然変異については行わない。

	x_1	x_2	x_3	x_n
Individual A	512	512	512	509
Individual B	512	516	512	512
Crossover				
Individual A	512	516	512	509
Individual B	512	512	512	512

Fig. 2 crossover

2. 4 LSAのためのSA

LSAのフェーズでは、設計変数の自己更新プロセスにSAを用いる。SAのプロセスは、生成・受理判定・冷却

の3つのプロセスである。

2. 4. 1 生成

生成プロセスは、次式によって現在の探索点 X_i から、新たな近傍点 X_{i+1} を生成する。

$$X_{i+1} = \begin{cases} X_i + \text{Sign}(y_i) \cdot SP_0 & \text{if } GP_i = 1 \\ X_i + \text{Sign}(y_i) \cdot GP_i \cdot MR \cdot NR_i & \text{if } 0 < GP_i < 1 \end{cases} \quad (6)$$

但し、 y は $y_i \in [-1, 1]$ の一様乱数、 SP_0 は最小ステップ幅、 GP_i は生成確率関数、 MR は設計変数の最大範囲、 NR_i は近傍率である。式 (6) で使われる生成確率関数を次に示す。

$$GP_i \in \begin{cases} 0 & \text{if } 0 \leq U_i < 0.4 \\ [0,1] & \text{if } 0.4 \leq U_i < 0.7 \\ 1 & \text{if } 0.7 \leq U_i \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

但し、 U は $U_i \in [0, 1]$ の一様乱数である。これにより、大まかな探索（最大ステップ幅を用いた場合）と詳細な探索（最小ステップ幅を用いた場合）を切り替えて実行できる。

2. 4. 2 近傍幅

ここでは、冷却スケジュールを用いて近傍幅をコントロールする方法を導入する。近傍幅をコントロールする式を式(8)に示す。

$$NR_i = \left\{ 1 - \alpha \left(1 - \frac{T_i}{T_0} \right) \right\} NR_0 \quad (8)$$

但し、 T_i は温度、 T_0 は初期温度、 α は温度係数、 NR_0 は初期近傍率である。本論文では、 $NR_0=0.1$ とする。

2. 4. 3 独立と依存の関係

本論文で取り扱う最適化問題は設計変数が依存関係にある多峰性問題を想定しており、新たに設計変数の独立・依存関係を反映する手法を考案した。この手法は、式 (9) により設計変数値を変更する設計変数の数をランダムに決定する。つまり、 $SD_i=1$ ならば独立関係であると定義し、一つの任意の設計変数を、 $SD_i=2$ ならば依存関係であると定義し、二つの任意の設計変数を同時に、式 (6) により変える。

$$SD_i = \begin{cases} 1 & \text{if } 0 \leq U_i < 0.5 \\ 2 & \text{if } 0.5 \leq U_i < 1.0 \end{cases} \quad (9)$$

但し、 SD_i は選択される設計変数の数、 U は $U_i \in [0, 1]$ の

一様乱数である。

2. 4. 4 受審判定

受審判定は、現在の探索点 X_i から新しい近傍点 X_{i+1} に推移させるか否かを判断するプロセスである。受審判定は次式で定義される。

$$A(\Delta E, T_i) = \begin{cases} 1 & \text{if } E_{i+1} \geq E_i \\ e^{-\Delta E/T_i} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

但し、 E_i は目的関数 $F_i(X_i)$ 、 ΔE はエネルギーの差分 $\Delta E = E_i - E_{i+1}$ 、 T_i は温度である。最適化の初期プロセスでは、改悪方向への推移を許容するが後半のプロセスでは冷却スケジュールにより温度が小さくなるため、改悪方向への推移は却下される。

2. 4. 5 冷却スケジュール

SA の温度は、式(11)の冷却スケジュールに則って GA の世代ごとに温度を変更する。

$$T_{i+1} = \gamma T_i \quad (11)$$

但し、 γ は冷却率、 T_i は温度である。本論文では、初期温度 $T_0=10.0$ 、冷却率 $\gamma=0.95$ 、終点温度 $T_{end}=0.1$ として冷却スケジュールを作成する。

2. 5 NOSA の直接探索

NOSA のフェーズでは、設計変数の自己変更プロセスに決定論的手法をベースとした直接探索プロセス (Direct search process, DSP) を導入する。DSP のステート図を図3に示す。このプロセスは生成、受審判定、ステップ幅変更の3つのプロセスにより構成される。

Fig. 3 state chart of DSP

2. 5. 1 生成

生成プロセスでは、次式によって現在の探索点 X_i から新しい近傍点 X_{i+1} を生成する。

$$X_{i+1} = X_i + SP_i \quad (12)$$

このステップ幅 SP_i は、図 4 に示すアクティビティ図により変更される。

Fig. 4 activity chart for changing step size

2. 5. 2 独立と依存の関係

設計変数の独立・依存の関係、つまり $SD_i=1$, $SD_i=2$ は、それぞれの繰り返して式 (13) を使って更新される。式 (13) を次に示す。

$$SD_i = \begin{cases} 1 & \text{if } 0 \leq U_i < AD_1 / (AD_1 + AD_2) \\ 2 & \text{if } AD_1 / (AD_1 + AD_2) \leq U_i < 1.0 \end{cases} \quad (13)$$

但し、 U_i は $U_i \in [0, 1]$ の一様乱数、 AD_1 は受理判定にて受理された $SD_i=1$ の総数、 AD_2 は受理判定にて受理された $SD_i=2$ の総数である。LSA のフェーズでは、 SD_i は式 (9) によってランダムに決定され、受理された SD_i が記録される。この記録は、NOSA のフェーズにて学習された知識として式 (13) に反映される。DSP では、新しい近傍点 X_{i+1} の適応度 $F_{i+1}(X_{i+1})$ が現在の探索点 X_i の適応度 $F_i(X_i)$ よりも高いとき、現在の探索点 X_i から新しい近傍点 X_{i+1} への推移を受理する。このプロセスが繰り返され、探索点は最適解に近づいていく。

3. スポット溶接位置の最適化問題

工学分野への応用として、自動車のフロントフェンダ部のスポット溶接位置最適化を行う。この最適化問題は、フロントフェンダのパネル部の最大応力とスポット溶接位置にかかる軸力のせん断成分を制約条件とし、スポット溶接位置の数を最小にする問題である。

3. 1 有限要素モデル

フロントフェンダ部を有限要素によりモデル化したものを図 5 (a), (b) に、解析条件を図 5 (c) に示す。また、溶接ナゲット部は図 6 に示すように、パネル要素とビー

ム要素でモデリングした⁽¹⁴⁾。ビーム要素の断面形状は、半径 5.0mm の中実円形断面とした。この有限要素モデルの解析には、NASTRAN を用いる。また、溶接点の初期配置を図 7 に示す。溶接点はそれぞれ $Weld_1$, $Weld_2$, ... $Weld_{15}$ というように番号を割り付けた。

Fig. 5 FEM model and analysis condition

Fig. 6 detail model of spot weld point

Fig. 7 initial allocation of spot weld points

3. 2 最適化問題の定式化

本最適化問題の定式化を行う。設計変数、目的関数、修正目的関数、ペナルティ関数、制約条件、範囲制約を次に示す。

$$\text{設計変数; } A_i = \beta \cdot X_i^{\text{Gene}}, \quad (14)$$

$$A_i = (a_i^1, \dots, a_i^{15}), \quad (15)$$

$$a_i^k = \begin{cases} 0 & \text{if } 0 \leq a_i^k \leq 10, \\ a_i^k & \text{if } 10 < a_i^k \leq 102.4, \end{cases} \quad (16)$$

$$Weld_k \in \begin{cases} 0 & \text{if } a_i^k = 0, \\ 1 & \text{if } a_i^k > 0, \end{cases} \quad (17)$$

$$\text{目的関数； } F_i = -f_i \rightarrow \text{Max}, \quad (18)$$

修正目的関数；

$$f_i = \sum_{k=1}^{15} \text{Weld}_k + \gamma \sum_{j=1}^2 \{\max(g_{i,j}, 0)\} \quad (19)$$

制約条件；

$$g_{i,1} = \begin{cases} 0 & \text{if } S_{\max} \leq S_a, \\ \frac{S_{\max}}{S_a} & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (20)$$

$$g_{i,2} = \sum_{k=1}^{15} g_{i,2}^k \quad (21)$$

$$g_{i,2}^k = \begin{cases} 0 & \text{if } \tau_i^k \leq \tau_a, \\ \frac{\tau_i^k}{\tau_a} & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (22)$$

$$S_a = 225.5 [\text{MPa}], \quad \tau_a = 212.0 [\text{N}] \quad (23)$$

$$\text{範囲制約； } 0 \leq X_i^{\text{Gene}} \leq 1024, \quad (24)$$

$$X_i^{\text{Gene}} = (x_i^1, \dots, x_i^{15}) \quad (25)$$

但し、 A_i はスポット溶接点の断面積、 β はコーディング係数、 X_i^{Gene} は遺伝子にコーディングされた設計変数、 $S_{\max}$ はパネル部の最大応力、 S_a は同許容応力、 τ_i^k はスポット溶接点にかかる軸力のせん断成分、 τ_a は軸力の許容せん断成分、 Weld_k は k 番目のスポット溶接点の有無を示し、 γ はペナルティ係数である。今回、 $\beta=0.1$ 、 $\gamma=2.0$ に設定する。

3. 3 溶接位置と評価特性に対する検討

本問題の性質を分析するにあたり、溶接位置と評価特性について検討を行う。この検討を行うにあたり実験計画法の直交表を用いて検討する。制御因子と評価特性値は次のように定義する。

$$\text{制御因子； } \text{Weld}_k \in [0,1], \quad 0=\text{なし}, \quad 1=\text{あり} \quad (26)$$

$$\text{評価特性値； } S_{\max}, \quad \tau_{\max} \quad (27)$$

但し、 $\tau_{\max}$ はスポット溶接点群にかかる軸力のせん断成分の最大値とする。なお、直交表は2水準系の $L16(2^{15})$ を用い、制御因子間の交互作用は考慮しない。

3. 3. 1 実験結果の考察

実験計画法により得られた結果を図8と図9に示す。また、分散分析の結果を表1と表2に示す。図8は、制

御因子と評価特性に対する主効果図、図9は、評価特性に対する制御因子の交互作用図である。なお、線分の長さは特性に対する寄与度の大きさを示し、線分の左端点は制御因子0（溶接なし）、右端点は制御因子1（溶接あり）の場合の値となる。図9の交互作用図の横軸ラベルは、Weld A-Weld B の関係を溶接位置の番号を用いてA-Bと記述している。

図8を見ると、評価特性である $S_{\max}$ と $\tau_{\max}$ に対する溶接点の有無の効果を示す主効果が交差していることがわかる。そこで、最も主効果の大きい14番目の位置の Weld_{14} を取り上げ考察する。14番目の溶接位置に溶接を行わない場合には、図中に示すように $S_{\max}$ が急激に増大するが $\tau_{\max}$ については減少する。逆に溶接を行うと $S_{\max}$ が減少し $\tau_{\max}$ は増大する。この傾向は、 $S_{\max}$ がほぼ変化しない3, 4, 5番目の溶接位置を除いて、ほぼ全ての溶接位置にて現れている。つまり、 $S_{\max}$ と $\tau_{\max}$ の評価特性値間に相関関係があることがわかる。

つぎに、図9では表1と表2の分散分析の結果から各評価特性値に対して寄与度が大きいもの（上位5位まで）について、その溶接位置間に交互作用が存在するかどうか検討を行う。図9を見ると、 $\tau_{\max}$ ではすべての溶接位置にて交互作用が発生している。また、 $S_{\max}$ では3番目と8番目の溶接点と11番目と14番目の溶接点の間では交互作用が存在しないが、それ以外の溶接点間では交互作用が発生していることがわかる。

Fig. 8 main effect

Fig. 9 interaction effect

Table 1 ANOVA of maximum share component of axial force

Source	dof	SS	V	F	SS'	p(%)
Weld14	1	23346.88	23346.88	76.17922	23040.4	37.17639
Weld1	1	8886.062	8886.062	28.9946	8579.589	13.84343
Weld3	1	8865.765	8865.765	28.92837	8559.292	13.81068
Weld15	1	5082.948	5082.948	16.5853	4776.475	7.706986
Weld2	1	4934.777	4934.777	16.10183	4628.304	7.467908
Weld9	1	4320.245	4320.245	14.09666	4013.772	6.476343
Weld12	1	4067.449	4067.449	13.33706	3780.976	6.100719
Weld11	1	192.3741	192.3741	POOLED		
Weld10	1	688.2075	688.2075	POOLED		
Weld8	1	135.3622	135.3622	POOLED		
Weld7	1	403.2628	403.2628	POOLED		
Weld6	1	224.3232	224.3232	POOLED		
Weld5	1	152.5923	152.5923	POOLED		
Weld4	1	453.8329	453.8329	POOLED		
Weld13	1	201.8293	201.8293	POOLED		
epool	8	2451.784				
etotal	8	2451.784	306.473	7.417553		
Total	15	61975.91	4131.727	100		

Table 2 ANOVA of maximum stress

Source	dof	SS	V	F	SS'	p(%)
Weld14	1	40.03093	40.03093	816.4495	39.9819	54.24786
Weld9	1	8.228292	8.228292	167.8199	8.179262	11.09771
Weld8	1	6.643506	6.643506	135.4974	6.594476	8.947454
Weld10	1	6.02457	6.02457	122.8739	5.97554	8.107676
Weld11	1	2.428922	2.428922	49.53901	2.379892	3.229062
Weld1	1	2.305842	2.305842	47.02873	2.256812	3.062066
Weld12	1	2.269542	2.269542	46.28838	2.220512	3.012814
Weld15	1	2.036329	2.036329	41.53188	1.987298	2.696388
Weld13	1	1.495729	1.495729	30.50609	1.446698	1.962896
Weld6	1	1.185921	1.185921	24.18741	1.13689	1.542545
Weld7	1	0.85655	0.85655	17.46974	0.80752	1.095651
Weld5	1	0.000121	0.000121	POOLED		
Weld4	1	0.076729	0.076729	POOLED		
Weld3	1	0.054756	0.054756	POOLED		
Weld2	1	0.064516	0.064516	POOLED		
epool	4	0.196122				
etotal	4	0.196122	0.049031	0.997877		
Total	15	73.70226	4.913484	100		

3. 3. 2 まとめ

実験計画法を用いて、最適化問題の設計変数となる溶接位置と制約条件となる評価特性の関係について検討を行った。その結果、本問題は、設計変数間に依存関係があり、制約条件となる評価特性間に相関関係がある複雑な最適化問題であることがわかった。以上のことから、筆者らが開発したハイブリッドメタ戦略を適用し、本戦略の性能を検証するための工学分野の応用問題として好ましい問題であると言える。

3. 4 最適化問題の検討

3. 4. 1 最適化計算

ここでは、本戦略を用いて打ち切り世代を 200 世代と設定し、最適化計算を実施する。この最適化プロセスでのエリート個体の適応度とペナルティ関数の推移を図 10 に示す。図中の Maximum が目的関数値となり、Penalty がペナルティ関数値となる。

この図を見ると、世代数が 7 世代付近まではスポット溶接数が多く、修正目的関数の値もペナルティ項を含んだ値となっている。このことから、制約条件外の設計空間内を広く探索していることがわかる。そして、世代数が 8 世代目に達したときに制約条件を満たすエリート個体が現れ、9 世代目にてスポット溶接位置の最適

配置が得られ、打ち切り世代までエリート個体が最適配置を保持して推移する。

Fig. 10 history of optimization process

3. 4. 2 最適配置

ここでは、得られた最適配置と初期配置（全ビーム要素の断面形状を半径 $r=5.0\text{mm}$ 、断面積 $A=79.0\text{mm}^2$ とする）の軸力せん断成分を用いて、最適解の妥当性を検討する。図 11 には、得られたスポット溶接位置の最適配置を示し、図 12 にその応力分布を示す。表 3 には、最適配置における全ビーム要素の断面積 A を示し、表 4 に初期配置におけるビーム要素の軸力せん断成分 τ を示す。

Fig. 11 the optimal solution

Fig. 12 von-mises stress distribution

まず、表 4 をみると初期配置では、2~8 番目の溶接点を受ける軸力が小さいことがわかる。つまり、これらのスポット溶接点は溶接を行わなくてもよいと推測できる。また、フロントストラット部に入力された変位荷重の影響を受ける 9 番目の近傍と A ビラー部の拘束端である 14 番目の近傍、ねじり変形の変位荷重を与えたノーズ周辺部の 1 番目の近傍のスポット溶接点に特に力が加わっている。このため、これらの位置には溶接点が必要となると思われる。よって、2 番目から 8 番目付近の溶接点を大きく省き、1 番目、9 番目、14 番目の近傍を固定するようなスポット溶接配置が望ましいといえる。

最適配置では、図 1 1 と表 3 より 2 番目から 5 番目までのスポット溶接点をまとめて取り除き、1 番目、9 番目、14 番目の近傍に溶接点を配置した形態であることがわかる。また、図 1 2 から溶接ライン上の四角で囲まれた部分に応力が高く分布していることがわかる。この部分は、それぞれ 1 番目、9 番目、14 番目の溶接点の近傍である。さらに、2 番目から 5 番目の近傍に相当する部分では、応力が低く分布していることも確認できる。

以上、得られた最適配置は、初期配置の軸力せん断成分を用いた検討とほぼ同じであることから、妥当な最適解であるといえる。

Table 3 cross section of optimal position

Weld No.	1	2	3	4	5	6	7	8
$A[\text{mm}^2]$	80.5	0	0	0	0	36.5	0	0
	9	10	11	12	13	14	15	
	93.0	58.4	0	43.2	0	33.0	0	

Table 4 share component of axial forces of initial position

Weld No.	1	2	3	4	5	6	7	8
$r[\text{N}]$	200.5	3.0	11.1	16.6	17.1	2.4	8.5	26.9
	9	10	11	12	13	14	15	
	77.8	45.7	59.5	24.0	58.5	215.5	151.1	

3. 4. 3 実用性の検討

(1) 応力解析の検討

本項では、最適配置の実用性について検討する。本戦略では、設計変数を溶接点の断面積としているため、最適解の断面積は小数点以下 1 桁の連続値をとる。しかし、スポット溶接では細かく半径を指定して溶接を行うことは困難であるため、このままでは実用的な最適配置が得られたとは言えない。筆者らは、溶接点断面形状の半径が mm 単位の離散値で得られれば、本戦略から得られた最適配置が実用であると考えた。そこで、最適配置でのスポット溶接点の断面積から逆算した半径を四捨五入して離散値とし、その値を用いて応力解析を実施した。本検討では、離散化する前の最適配置の解析結果（以降では、OR ケースと呼ぶ）と離散化した半径を用いた最適配置の解析結果（以降では、OD ケースと呼ぶ）を比較した。表 5 には、各ケースの溶接点の断面積 A 、断面半径 r をそれぞれ示した。また、これらを用いて構造解析を実施した結果である各スポット溶接点にかかる軸力のせん断成分を表 6 に示し、軸力のせん断成分と応力値の最大値を表 7 に示した。

表 6 と表 7 の結果から、OD ケースについても軸力のせん断成分と応力に対する制約条件を全て満たしていることがわかる。さらに、初期配置と最適配置におけるフロントストラット部とノーズ部の拘束点反力について確認をする。OR、OD ケースともにフロントストラ

ット部の拘束点反力は、1.1%減少し、ノーズ部の拘束点反力は、0.5%減少している。本最適配置は、応力や軸力のせん断成分に対する制約条件を全て満足していることから、この程度の減少率であれば初期配置と同等の剛性を最適配置は維持しているといえる。以上のことから、離散化した半径を用いた最適配置を実用的観点から利用しても問題ないことがわかった。

Table 5 dispersion of cross section

Weld _n		1	6	9	10	12	14
OR	$\frac{A}{[mm^2]}$	80.5	36.5	93	58.4	43.2	33
	$\frac{r}{[mm]}$	5.062	3.409	5.441	4.312	3.708	3.241
OD	$\frac{r}{[mm]}$	5	3	5	4	4	3
	$\frac{A}{[mm^2]}$	78.54	28.274	78.54	50.265	50.265	28.274

Table 6 share component of axial forces

Weld _n		1	6	9	10	12	14
OR	τ [N]	201.317	0.270	95.291	26.430	11.189	205.393
OD	τ [N]	199.217	0.461	95.372	26.429	11.210	198.097

Table 7 maximum stress and share component of axial force

	$\tau_{\max}$ [N]	$S_{\max}$ [MPa]
OR	205.393	225.400
OD	199.217	225.500

(2) 固有値解析の検討

つぎに、固有値解析を実施してフロントフェンダ部の剛性について検討を行う。本検討では、初期配置のケース（以降では、ID ケース）、OR ケース、および OD ケースの 3 ケースを取り上げる。固有値解析は、1 0 次のモード数まで計算する。この結果を表 8 に示す。表 8 には、それぞれの固有振動数と ID ケースの固有振動数との誤差率、および平均誤差率を示す。

表 8 の ID ケースの固有振動数との平均誤差率を見ると、OR ケースの場合と OD ケースの場合の両ケースにおいて、ほぼ同じ誤差率になっていることがわかる。さらに、各モードの誤差率を比較しても、両者に大差がないことがわかる。固有モードのモード形状についても同じである。このことから、ID ケースの剛性と同等の剛性が OR ケースおよび OD ケースの最適配置でも得られていることがわかる。

Table 8 comparison of frequencies

Mode No.	Frequencies [Hz]			Error	
	ID	OR	OD	ID-OR	ID-OD
1	32.012	32.007	32.007	0.018%	0.017%
2	54.396	54.390	54.393	0.011%	0.005%
3	67.165	67.152	67.152	0.020%	0.020%
4	124.689	124.277	124.310	0.332%	0.305%
5	156.067	156.055	156.050	0.008%	0.011%
6	160.017	159.848	159.840	0.105%	0.111%
7	165.874	165.736	165.730	0.083%	0.087%
8	184.985	184.881	184.880	0.057%	0.057%
9	194.369	194.067	194.060	0.156%	0.159%
10	198.871	198.868	198.870	0.002%	0.000%
Ave.				0.080%	0.077%

4. おわりに

本論文では、筆者らが開発したハイブリッドメタ戦略を実際の工学的問題であるスポット溶接位置の最適化問題に適用した。本最適化問題は、実験計画法による問題分析の結果、設計変数であるスポット溶接位置間の依存関係と制約条件となる「パネル部の最大応力」と「スポット溶接点群に発生する軸力のせん断成分の最大値」の間に相関関係がある複雑な最適化問題であることがわかった。この最適化問題を本戦略により最適化した結果、つぎのような結論を得た。

- (1) 設計変数間の依存関係を反映したハイブリッドメタ戦略を適用した結果、スポット溶接位置の最適配置が得られた。
- (2) 最適配置の実用性に対する検討を行うために、スポット溶接点の断面半径を離散値にて定義し、応力解析を実施した。その結果、本設計条件においても、最適化問題の制約条件を全て満足する結果が得られた。
- (3) 同条件にて、固有値解析を実施した。その結果、初期配置と同等の剛性を最適配置にて確保することができを確認した。

これらの結論から、筆者らが開発したハイブリッドメタ戦略は、実際の工学的問題に対しても有用な戦略であることがわかった。また、スポット溶接位置の最適化問題については、実用性の観点からも妥当な最適配置が得られることがわかった。

参考文献

- 1) Goldberg, D. E., Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley (1989).
- 2) Mitchell, M., An Introduction to Genetic Algorithms, MIT Press (1996).
- 3) Hasegawa, H. and Kawamo, K., A Method for the Shape and Topology Optimization of Mechanical Structures by Using Genetic Algorithm (Layout Optimization Method by Adoption of Removal and Addition parameters of Elements as Chromosomes), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 61 No. 581 (1995), pp. 183-190, (in Japanese).
- 4) Tsuruta, Y., Hasegawa, H. and Kawamo, K., A Method for the Shape and Topology Optimization of Mechanical Structures Using Genetic Algorithm (2nd Report, On Convergence of Solutions of Our Method by Adoption of Removal and Addition parameters of Elements as Chromosomes), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 63 No. 605 (1997), pp. 170-177, (in Japanese).
- 5) Tsuruta, Y., Suzuki, Y., Hasegawa, H. and Kawamo, K., A Method for the Shape and Topology Optimization of Mechanical Structures Using Genetic Algorithm, *JSME Centennial Grand Congress by the JSME International Symposium on OPID97* (1997), Paper #137.
- 6) Nishi, H., Okamoto, T. and Kawamo, K., Study on the Development of General-purpose Genetic Algorithm Engine, *Extend Abstracts of WCSMO-4* (2001), pp. 428-429.
- 7) Kawada, H., Uehara, H. and Kawamo, K., Development of General-purposed Optimization Engine and Test Run, *Journal of JSST*, Vol. 21 No. 4 (2003), pp. 280-288, (in Japanese).
- 8) Rosen, B. E. and Nakano, R., Simulated annealing - basics and recent topics on simulated annealing -, *Proceeding of JSAI*, Vol. 9 No. 3 (1994), (in Japanese).
- 9) Mahfoud, S. W., Goldberg, D. E., A genetic algorithm for parallel simulated annealing, *Parallel Problem Solving from Nature 2* (1992), pp. 301-310.
- 10) Uehara, H., Kawada, H. and Kawamo, K., Numerical Experiments on Optimal Points Searching Using Hybrid Method of Genetic Algorithm and Simulated Annealing, *52nd Japan National Congress for Theoretical and Applied Mechanics (NCTAM)* (2003), pp. 117-118, (in Japanese).
- 11) Hiroyasu, T., Miki, M. and Ogura, M., Parallel Simulated Annealing using Genetic Crossover, *Proceedings of the ISCA 13th International Conference on PDCS-2000* (2000).
- 12) Uehara, H., Study on Development of General-purposed Optimization Engine and its Performance Evaluation - The proposal of Parallel Simulated Annealing with Selection -, *M of Eng thesis, Div. of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, Shibaura Institute of Technology* (2004), (in Japanese).
- 13) Hasegawa, H., Yoshikawa, M., Uehara, H. and Kawamo, K., The Hybrid Meta-heuristics by Reflecting Recognition of Dependence Relation among Design Variables for The Integer Optimization of Multi-peak Problems, *Journal of JSST*, Vol. 25 No. 2 (2006), (in Japanese).
- 14) Rupp, A., Storzel, K., and Grubisic, V., Computer Aided Dimensioning of Spot-Welded Automotive Structures, *SAE TECHNICAL PAPER 95071* (1995).