

(9) 立体トラス構造の対話型最適設計における対話プロセスについての一考察

STUDY ON INTERACTIVE PROCESS IN INTERACTIVE OPTIMAL DESIGN FOR 3-DIMENSIONAL TRUSS STRUCTURE

長屋秀和*・香月智**・諏訪政雄***

Hidekazu NAGAYA, Satoshi KATSUKI, Masao SUWA

- * 防衛大学校 理工学研究科学生 (〒239-8686 横須賀市走水1-10-20)
 ** 工博 防衛大学校助教授 土木工学科 (〒239-8686 横須賀市走水1-10-20)
 *** 工修 中部電力㈱ 電力技術研究所 (〒459-8522 名古屋市緑区大高町)

This paper discusses the interactive process effect on the optimal design convergence process and/or results in the interactive optimal design for the 3-dimensional truss structure. The optimal design procedure discussed herein is the interactive optimal design procedure using genetic algorithm proposed authors previously. Three different interactive processes, i.e., shape optimization after member optimized, member optimization after shape optimized, and simultaneously optimization, are compared with each other. The process in which shape is optimized in advance to the member optimization obtained the adequate design results from the viewpoint of designer's satisfaction. The other processes don't necessarily get the adequate design results, due to the computational effort limitation and so on.

Key Words: interactive process, genetic algorithm, 3-dimension, truss structure

1. はじめに

土木構造物の設計では、JIS 規格などにより定められた規格品を用いることが多く、設計変数を離散値として取り扱う方が望ましい。遺伝的アルゴリズムは離散変数の組合せ最適化問題を取扱えるので、既成形鋼によって作られる鉄塔構造の最適化問題に適している^{1),2),3)}。著者らは、関数化することが困難な設計要求を設計者が自主判断する対話プロセスを導入することによって、柔軟に設計要求に対応することができる遺伝的アルゴリズムを用いた対話型最適設計法について検討している^{4),5),6)}。本研究は、先に提案した平面トラスの最適設計手法を立体トラス構造に拡張することを試みたものであり、併せて、構造の相関性を保つための工夫と設計プロセスの違いによる設計値への影響についても検討したものである。

2. 立体トラス構造の対話型設計法

本研究の順解析部分は、立体骨組構造の弾性マトリクス構造解析法を用いる。提案する対話型最適設計法とは、これをベースとして仮定された骨組形状と断面に対して断面力や変形を求める順解析プロセスと、得られた順解析結果に対して断面力や変形量および総鋼材量の希望値を示し、その希望値に対して最も近い解を得られる順解

析用入力データを遺伝的アルゴリズムによって探索する逆解析プロセスを設計者の判断を交えながら繰り返す手法である。図-1に提案手法のシステム構成と設計計算の流れを示す。この際、希望値への要求の強さや大小関係を表-1のような9種類の文字記号によって表す。次に、骨組構造の設計においては、形状の対称性など、同

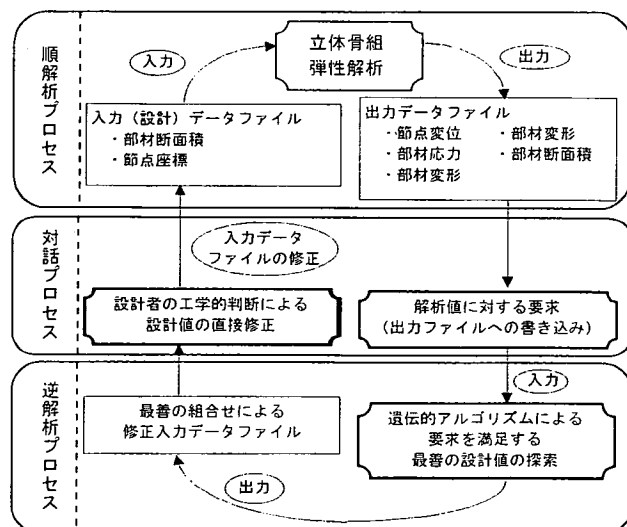
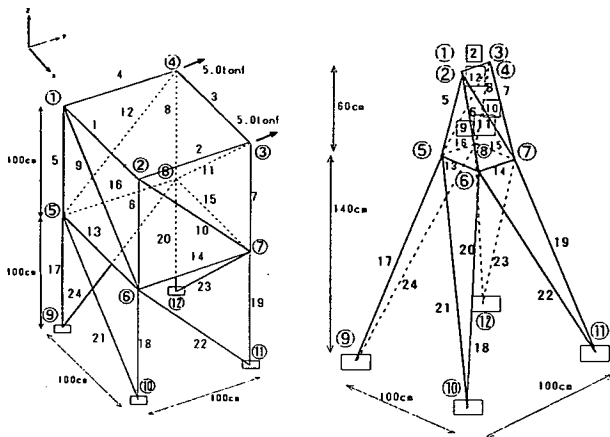


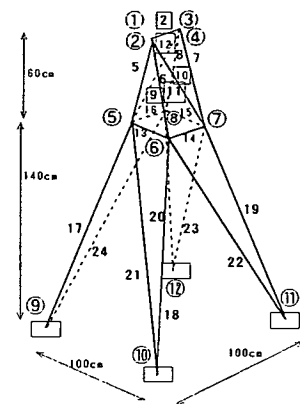
図-1 GAを用いた対話型最適設計のシステム構成

表－１ 要求区分と記号

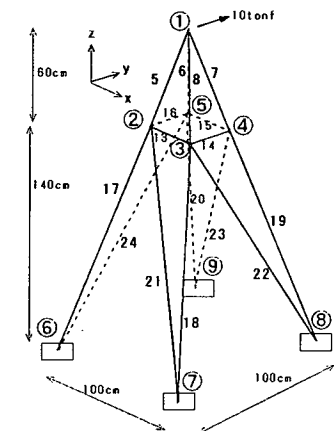
記号	要求区分
SE	要求値付近であることを‘強く’要求
SL	要求値より小さい値でかつ要求値付近であることを‘強く’要求
SG	要求値より大きい値でかつ要求値付近であることを‘強く’要求
HE	要求値付近であることを‘望む’
HL	要求値より小さい値でかつ要求値付近であることを‘望む’
HG	要求値より大きい値でかつ要求値付近であることを‘望む’
GT	要求値より小さくならないことを‘望む’
LT	要求値より大きくならないことを‘望む’
空白	希望なし



図－４ 24部材トラス

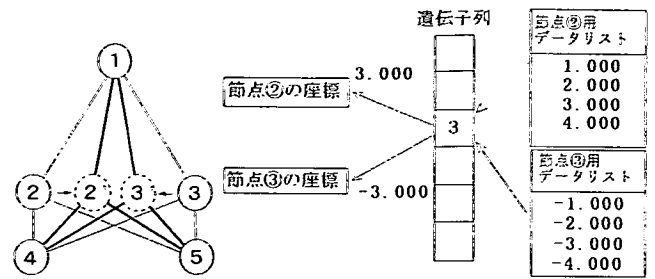


図－５ GAによる推薦値



図－６ 設計者による修正設計

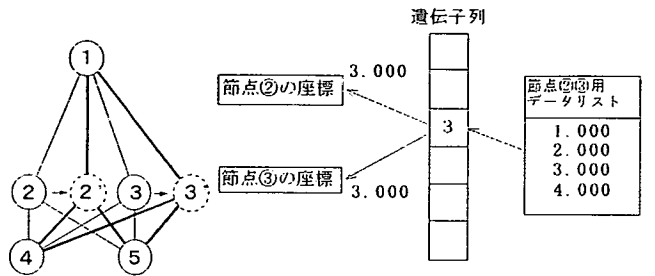
一変量ではないが互いに相関性を保ちながらその設計変量を決定することを必要とする場合がある。本研究では、この操作を2変数を決定する遺伝子番号を同一にした上で、変数の参照リストを別にする方法を提案する。例えば、図－2 (a) に示すような骨組構造の形状を左右対称に保持したい場合、節点②と③の位置座標は正負逆符号で同一絶対量だけ変化させる必要がある。この場合、図－2 (b) に示すように節点②と③の変位量を決定する遺伝子を同一にした上で正負逆符号を持つ変数リストを関連づけることによって可能となる。一方、図－3 (a) のように多数の設計変数を同一設計値にする場合には、図－3



(a) 相関処理構造

(b) 相関処理データ構造

図－２ 相関性処理



(a) グループ処理構造

(b) グループ処理データ構造

図－３ グループ処理

(b) に示すように、同一遺伝子と同一データリストを共有することによってグルーピング処理ができる。

3. 設計計算例と考察

3.1 基本例題

提案する対話型設計法により、図－4 に示す2層24部材骨組構造の上部に、水平方向に5tonf×2の荷重を受ける構造の設計を行った。目的を最小重量設計とし、制約条件として各部材の許容応力を引張側に1600kgf/cm²、圧縮側を座屈応力とした。第1段階設計は、設計変数として節点①～④をx, y 軸方向にそれぞれ±0.5m(10cm 刻み)、節点⑤～⑧をx, y, z 軸方向にそれぞれ±0.5m(10cm 刻み)移動する範囲の形状最適化を行った。なお、構造物は対称性を保持するように条件を与えた。GAによる逆解析の推薦値を図－5 に示す。推薦値では、節点①と②が重なるため部材6と9は並列部材となる。このように、形状の変更では重複部材がいくつか生ずる場合がある。この状態を概観すると、節点①②③④はまとめた方が良いものと判断されるので、対話プロセスにおいて図－5 中で□で囲った部材を取除いて図－6 に示すような16部材トラス構造に変更した。第2段階は部材断面について既成鋼6種類による設計を行った。図－7 には図－4 で示す初期状態での各部材ごとの鋼材量および応力分布を示す。初期状態では、幾何形状の均整がとれているので鋼材量の分布はほぼ均等であるが、応力分布では許容応力を大きく下回る部材が多く、鋼材量に余裕があることが伺える。図－8 には図－5 に示すGAによる推薦値の鋼材量および応力分布を示す。この場合には下層の各部材の鋼材量が多くなり、上

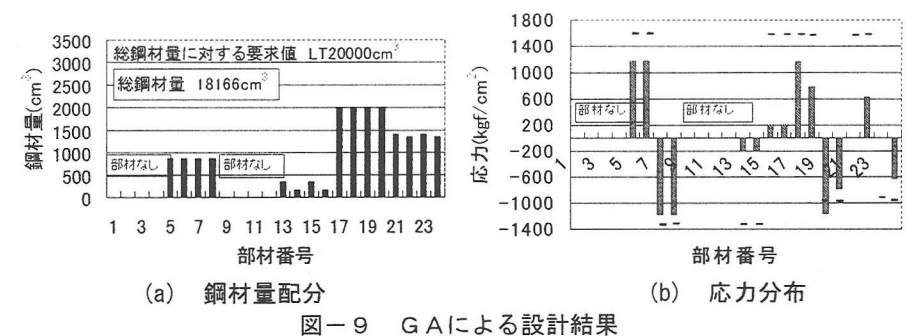
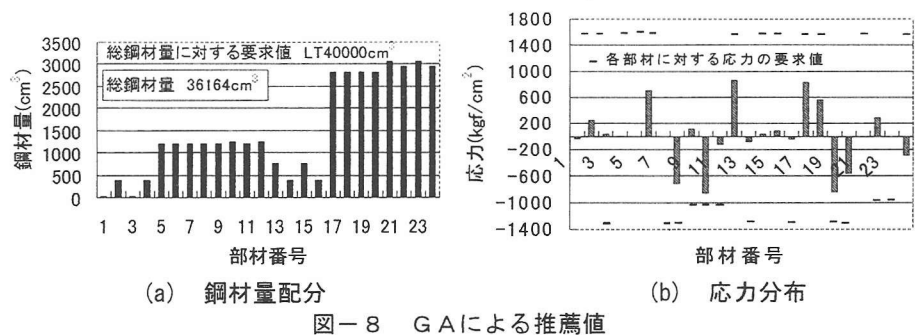
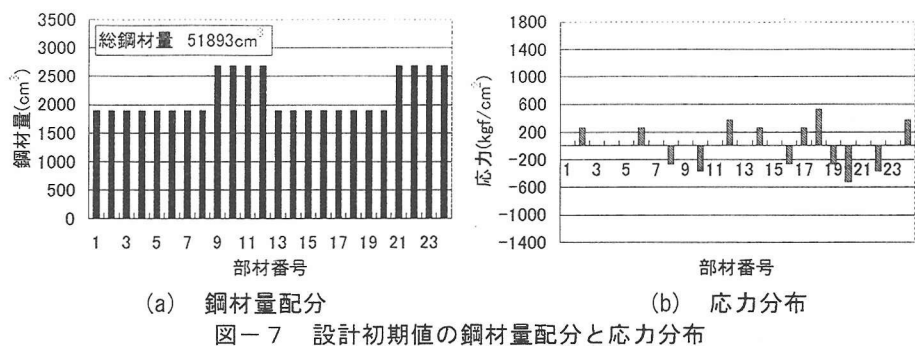


表-3 グループ処理

節点移動量		部材断面積	
グループ番号	関連処理	グループ番号	グループ処理
1	①, ②, ③, ④	1	1, 2, 3, 4
2	⑤, ⑥, ⑦, ⑧	2	5, 6, 7, 8
		3	9, 10, 11, 12
		4	13, 14, 15, 16
		5	17, 18, 19, 20
		6	21, 22, 23, 24

伴って顕著に軽量化が図られていることがわかる。

3.2 設計プロセスが解に及ぼす影響

本研究のプログラムは、形状最適化と部材断面の最適化を同時に行うことができるが、両方を同時に行う場合、設計変数の組合せ総数が多くなることや、対話的に解の改良を進めることが難しくなる⁸⁾。そこで、同一の問題を①形状最適化と断面選択を同時に行う、②断面選択を先行させ、形状最適化を交互に行う、③形状最適化を先行させ、断面選択を交互に行う3種類の手法による対話型最適設計を行い、それぞれの特徴について検討する。設計対象とする構造は、図-10に示す24部材の立体トラス構造である。前述の問題とは異なり、荷重が3方向

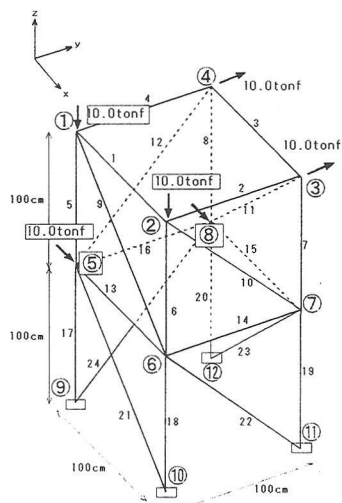
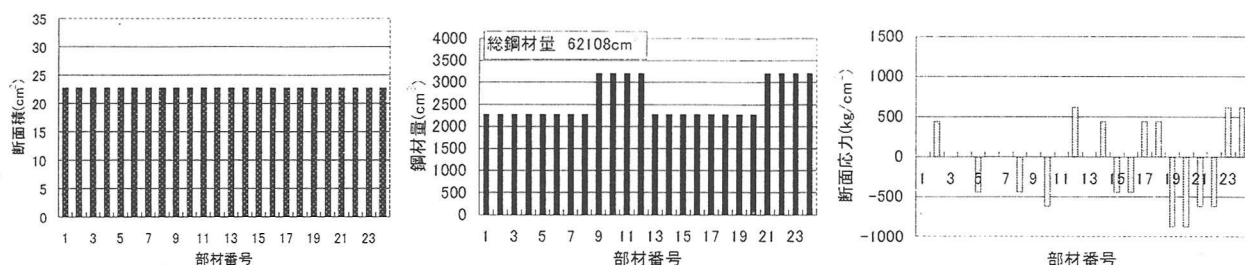


図-10 24部材立体骨組構造（初期値）

層の鋼材量が減少している。しかし、応力分布は初期状態のものよりも増加しており、各部材をより有効に使用していることがわかる。図-9には、第2段階目の設計結果を示す。各部材の応力が要求値にさらに近づいている。この結果、図-7, 8, 9の総鋼材量を見ると、 $5.2 \times 10^4 \text{ cm}^3 \rightarrow 3.6 \times 10^4 \text{ cm}^3 \rightarrow 1.8 \times 10^4 \text{ cm}^3$ と設計段階の進捗に

表-2 既製形鋼断面リスト

番号	断面積 (cm ²)
1	8.73
2	10.55
3	13.62
4	17.00
5	19.00
6	22.74
7	29.76
8	34.77



(a) 断面積分布

(b) 鋼材量分布

(c) 応力分布

図-11 初期状態

表-4 GA パラメータ (同時変更)

項 目		数値
節点位置候補数		1 1
部材断面候補数		8
基本線列人口サイズ		1 0 0
エリート人口サイズ		2 0
シミュレーション世代数		1 0 0
重要度関数の最大値		5. 0
交叉 確率	基本線列集団	3 0 %
	エリート線列集団	3 0 %
突然変異確率		1 0 %
ペナルティ係数 C	C_{SE}	1 0 0
	C_{SL}, C_{CL}	1 0 0 0 0
	C_{HE}	1
	C_{HL}, C_{HL}	1 0 0
標準化係数 S	応力 S_{STR}	1 0 0 0
	鋼材量 S_{VOL}	0. 1

表-5 GA パラメータ

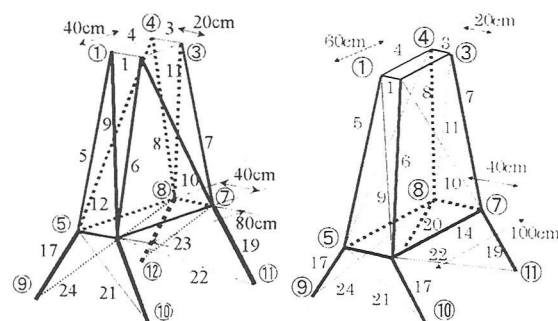
項 目		数値
節点位置候補数		1 1
部材断面候補数		8
基本線列人口サイズ		5 0
エリート人口サイズ		1 0
シミュレーション世代数		5 0
重要度関数の最大値		5. 0
交叉 確率	基本線列集団	3 0 %
	エリート線列集団	3 0 %
突然変異確率		1 0 %
ペナルティ係数 C	C_{SE}	1 0 0
	C_{SL}, C_{CL}	1 0 0 0 0
	C_{HE}	1
	C_{HL}, C_{HL}	1 0 0
標準化係数 S	応力 S_{STR}	1 0 0 0
	鋼材量 S_{VOL}	0. 1

から別々の場所に作用している。設計自由度としては、形状最適化では、節点①～④を x, y 軸方向に $\pm 0.5\text{m}$ (5 cm 刻み)、節点⑤～⑧は x, y, z 軸方向に $\pm 0.5\text{m}$ (5 cm 刻み)に変更できるものとし、部材断面は、表-2 に示す既製形鋼リストの 8 種類の中から選択できるものとした⁷⁾。ただし、形状の対称性を保つように部材や節点座標について表-3 に示すような相関性処理およびグルーピング処理をしている。また、前提として設計者は総鋼材量の減少を希望しており、副次的にバランスのとれた形状も望ましいと考えているものとする。さらに制約条件として、各部材の許容応力は引張側に 1500kgf/cm^2 、圧縮側に 1000kgf/cm^2 と仮定する。

いずれの過程を選択した場合にも、対話型設計の初期状態は、図-10 の形状とし、この状態での各部材の断面積分布は、図-11(a) に示すものである。また各部材の応力分布は、図-11(c) に示すようになっており、全ての部材が許容応力以内であるが、応力に余裕のある部材が多い。

(1) 形状最適化と断面選択を同時に行う場合

形状最適化と断面選択を同時に行う場合の GA パラメータを表-4 に示す。図-10 に対して、各部材の応力が許容応力以下であることおよび総鋼材量に $(LT)60000\text{cm}^3$ であることを要求すると、図-12(a) に示す推薦値が得られた。これに対して、応力が許容応力を超過したものお



(a) GA による推薦値

(b) 最終解

図-12 同時変更タイプ

よび上層と下層の角度変化を小さくするように、設計者が直接修正を加え、再度同じ条件により最適化を実施して得られた解が図-12(b) に示すものとなった。この解における各部材の断面積分布、鋼材量分布および応力分布を、図-13(a), (b), (c) に示す。これを、設計者が最終解として判断したのは、図-12(b) に示す状態で、応力に余裕のある部材を 1 ランク下のものに入れ替えると、許容応力を超過するためであり、いわゆる (局所的な) フルストレス状態となっているためである。この総鋼材量は 41210cm^3 となっており、初期状態より 34% ほど減少している。

(2) 断面選択先行タイプ

断面選択先行タイプでは、①断面選択→②形状最適化

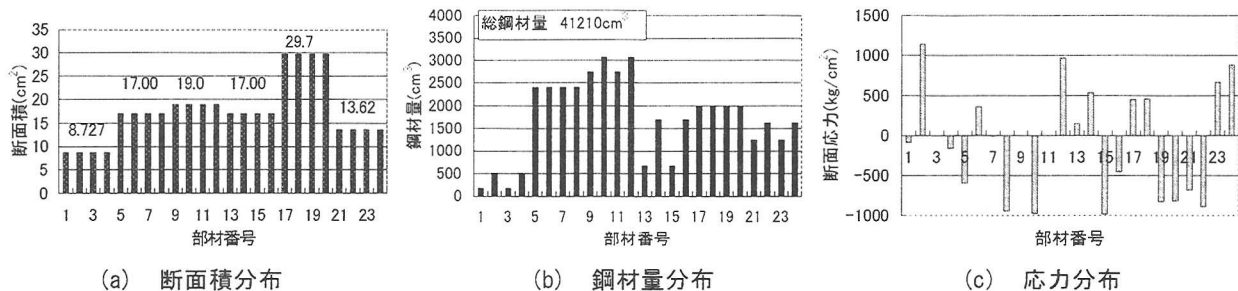


図-13 形状と断面の同時最適化

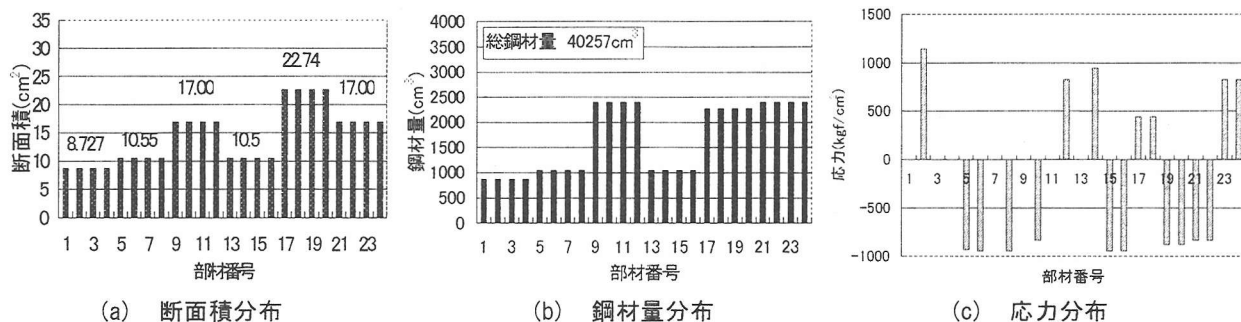


図-14 断面選択先行タイプ（断面選択後）

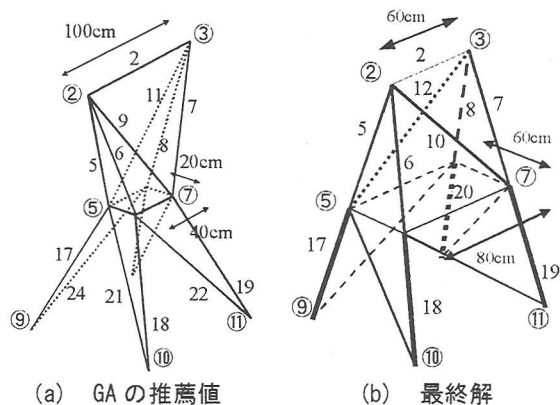
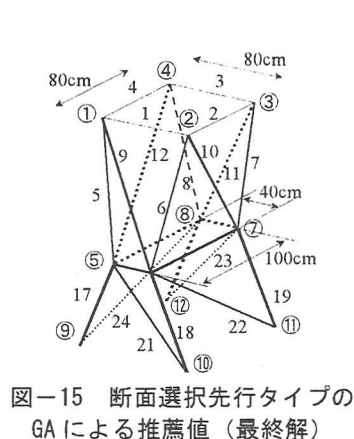


図-17 形状最適化先行タイプ

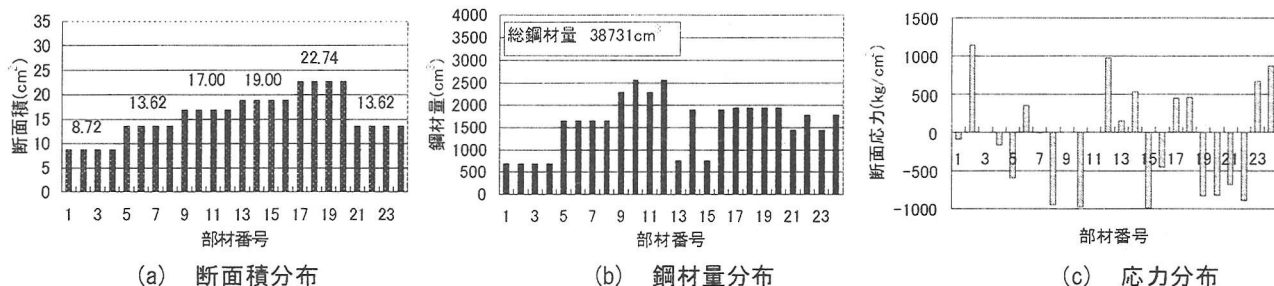


図-16 断面選択先行タイプ

→③対話的補正→④断面選択という順番に設計を行った。表-5にこの場合のGAパラメータを示す。ここで人口サイズと最終世代数が表-4のものよりも小さいのは、形状最適化と断面選択を同時に行う場合に比べ、各段階での設計変数が少ないことを考慮したためである。図-14には、第1段階として形状は初期状態のままで、各部材の断面選択を行った結果を示す。これより、形状は同じであっても、1～8、13～16の部材断面が目立って減

少するため、総鋼材量が40257cm³となり、約35%の減少となっている。次に、この断面は変化させずに形状最適化を行うと、図-15に示す最適形状がGAによって推薦される。このとき、部材8および15の応力が許容応力を超過したので、この形状において再度GAにより各部材の断面を選択させると、図-16に示すような各部材断面のものが最終解として得られた。しかしながら、この形状は決してバランスがよい形状

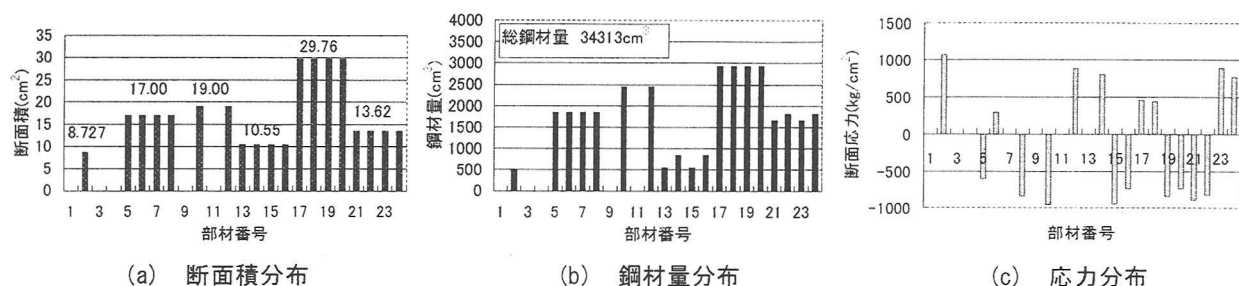


図-18 形状最適化先行タイプ

とは思われず、あまり満足のいくものではない。そこで、応力に対する要求を変更するなどの試行によって異なる解を得られるよう努力すると、逆に総鋼材量が増加し、改善された解を得ることができなかったため、この状態を断面選択先行タイプの最終解と判断した。もちろん、設計者の意志を対話プロセスに入れて直接形状を変更するならば、この結果が最終解となるものではない。しかし、図-16に見られるように、図-15の形状はあまりよい印象を覚えませんが、各部材の応力は許容応力度を満足しており、その総鋼材量においても、図-13に示した形状最適化と断面選択を同時に行なう場合よりも少ない38731cm³となっており、初期状態よりも38%の減少した解を得ることができている。

3) 形状最適化先行タイプ

形状最適化先行タイプでは、①形状最適化→②対話型補正→③断面選択→④形状最適化→⑤対話型補正→⑥断面選択という順序に設計を行った。GA パラメータについては表-5のものを用いた。図-17には、第1段階として部材断面は変化させず、形状最適化を行った結果を示す。これより、至近位置となった節点①②および節点③④を一つにまとめ、部材1, 3, 4, 9, 11を取り除いた形状に補正することにより、総鋼材量41605cm³となり、約33%の減少となっている。次にこの形状を変化させずに断面選択を行なうと、総鋼材量は38968cm³となった。そして再度形状最適化として、GAの推薦値に対して上層と下層の部材(例:部材7と19)が直線になるように修正を行い、さらに部材断面の選択を行うことにより図-18に示すような各部材断面のものが最終解として得られた。この総鋼材量は34313cm³と初期値よりも約45%減少している。また、この総鋼材量は、他の二つの手法のものに比して最も少なくなっており、その形状もバランスのとれたものとなっている。ちなみに、各部材についてフルストレス状態に最も近いものは断面選択先行タイプである。すなわち、フルストレス状態を優先して最適設計を行うことは、必ずしも最小重量設計を探索するのに適していないことがわかる。

4. まとめ

本研究では、著者らの提案するGAによる対話型最適設計手法を立体トラス構造へ拡張して、基本的な例題について、その適用性を検討した。その成果を要約すると以下のようになる。

- ① 対話型最適設計を立体トラス構造に適用することができた。
- ② 提案する手法では、遺伝子列とデータリストの組合せを複合化させることができるため、異データ間の相関性を考慮して選択組合せ問題を解くことができた。
- ③ 対話プロセスを活用することによって、柔軟に求める設計値を探索することができた。
- ④ 設計のプロセスとしては、形状最適化を先行させて断面選択操作を交互に繰り返す設計法がバランスの良い設計値を効率的に探索することができた。
- ⑤ 立体トラス構造は、局所的フルストレス状態の設計解が多数存在するため、適切な段階で設計者が適度な要求を対話的に与える手法が有効であることがわかった。

参考文献

- 1) 吉田均, 杉本博之: 遺伝的アルゴリズムの構造工学への応用, 森北出版, 1997.
- 2) 小林重信: 遺伝的アルゴリズムの現状と課題, 計測と制御 Vol.32, 1993.
- 3) 杉本博之, 鹿沓麗, 山本洋敬: 離散的構造最適設計のためのGAの信頼性向上に関する研究, 土木学会論文集, No.471/I-24, pp.67-76, 1993.
- 4) 香月智: GAによるトラス構造の対話型最適設計法に関する一考察, 第5回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集, 1997.
- 5) 長屋秀和, 黒木勇人, 香月智, 佐藤紘志, 松島学: 対話型トラス構造最適設計への遺伝的アルゴリズムの応用, 構造工学論文集 Vol.45, 1999.
- 6) 長屋秀和, 香月智, 佐藤紘志, 諏訪政雄: 遺伝的アルゴリズムを利用した立体骨組構造の最適設計, 第54回年次学術講演会講演概要集, 土木学会, 1999.
- 7) 等変山方鋼許容応力表, 日本鉄塔協会, 1995.
- 8) 山田善一編著: 構造工学シリーズ I 構造システムの最適化—理論と応用—, 土木学会, 1988.