

(25) 機械構造物の設計の自動化

THE AUTOMATIC DESIGN SYSTEM OF MECHANICAL STRUCTURES

廣安 知之*

山川 宏**

Tomoyuki HIROYASU Hiroshi YAMAKAWA

Because of the rapid progress of the computers, the structural design methods with the computers become the powerful tool to the designers. There a lot of studies to determine the shapes or the topologies of the structures. However the most studies described that the topology determination system and the shape determination system separately. In this study, it is pointed out that the topology and shape determination system should be integrated. The problems are also classified when the topology determination and the shape determination systems are integrated. Then the three important points are cleared. At first, the choice of the reference functions are very important. The reference functions in the upper flow of the design process and the reference functions in the lower flow should be different. Secondly, the system should be repeated between the topology and shape determination systems. Finally, after the topology optimization system, it is better to find some candidates for the structures. From these discussions, the new approach is suggested. Through the numerical examples which modeled the escalators, the problems are reconfirmed and the new approach is discussed.

Key Words : integrated structural optimization, shape and topology optimization

1. 緒言

機械構造の設計の流れを大別すると、まず設計要求の把握に始まり、概念設計、基本設計、詳細設計、生産設計などにわけられるであろう。この一連の流れの中で概念設計などは設計の上流部、詳細設計などは設計の下流部に位置すると言えよう。近年、コンピュータによる数値計算機の性能は飛躍的に向上し、これにより、コンピュータは設計者を支援するツールとしてより容易にしかも安価で利用できるようになってきた。

更にコンピュータの性能の向上により、設計者への支援方法もしいだいに変化してきている。まず、Computer Aided Drawing (CAD) と呼ばれる技術によってコンピュータによる図面の作成がより効率的に迅速に行えるようになってきた。またそれは2次元から3次元に広がり特に効果を発揮している。また、コンピュータの処理速度が更に向上すると設計者が行っていた作業のうち、いくつかの部分でコンピュータが処理出来るようになってきた。有限要素法などによる数値解析はグラフィック表示の手法の充実などにより、実験、解析につづく第3の手法として日常的な設計業務に使われるようになってきた。また、この有限要素法などの数値解析も複数回行うことが現実に可能となると、これまでに提案されている数理計画法の最適化手法等により、実際に形状などの設計パラメータなどの決定を自動化することが可能となってきており、最適設計手法として実用的な汎用のソフトウェアもいくつかみられる⁽¹⁾。

最近ではそれに引き続いて概念設計の領域において特に設計者が新規の設計を開発する際の支援ツールとしてコンピュータの活用に関する研究が盛んに行われてきている。感性を設計に取り入れる試み⁽²⁾や、構造のトポロジー決定問題⁽³⁾がそれにあたるであろう。元来、トポロジー決定のような問題は人間の経験や勘によって主に決定されてきたが、先に述べたようなコンピュータの

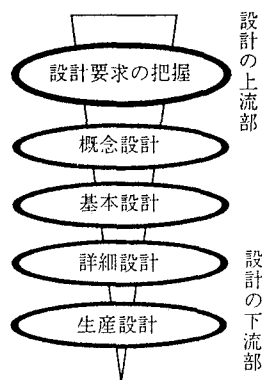
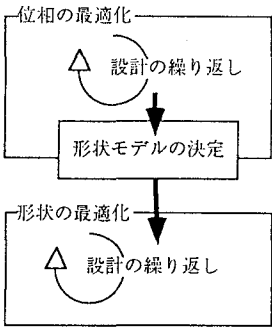


図1：設計の流れ

* 早稲田大学大学院 理工学研究科 (〒169 新宿区大久保3-4-1 e-mail: tomo@yamakawa.mech.waseda.ac.jp)

** 工博 早稲田大学教授 理工学部機械工学科 (〒169 新宿区大久保3-4-1 e-mail: tomo@yamakawa.mech.waseda.ac.jp)

発達により、遺伝的アルゴリズムを利用した方法⁽⁴⁾や、均質化法⁽⁵⁾といった概念設計の中でも使用可能な最適化手法を利用した手法が提案されてきている。また、それに伴い、この位相決定システムと形状決定システムとをリンクさせ設計の中流から下流にかけて自動的に設計を行うシステムの構築も提案されている⁽⁶⁾(図2)。しかしながら、現在のところ開発されている位相最適化システムはコンピュータにより最適な位相を決定できるツールというよりも設計者が得られる解からさらに今までの経験などを生かして位相を決定するといったような設計者を支援するツールとして利用する方が効果的であろうと考えられる。



そこで、本研究ではこの位相最適化システムを新しい設計を開発するツールとして捉えた場合に、位相最適と形状最適化システムをリンクして設計中流部から下流部にかけてコンピュータによる機械構造の設計の最適化による支援システムを構築する際に生じる問題点を整理し、今後どのような問題を解決しなければいけないかを検討する。また、汎用のソフトウェアを使って数値計算によりこれらを検討する。

2. 位相決定システムと形状決定システムとの統合の際に生じる問題点

設計全体を一連の流れと考えるならば設計要求や概念設計などは設計の上流部に位置し、詳細設計などは設計の下流部に位置するといえるであろう。機械構造の設計を行う際にはさまざまなパラメータを決定しなければならないが、設計要求を満たすようにどのような要素をどのように配置するか、あるいは連続体構造の中でいかに空隙を作り軽量化するかといった問題は広く位相決定問題と呼ばれ、概念設計などの設計上流部に位置する問題と言えよう。それに対して位相が決定された後にその形状を決定する問題は形状決定問題と呼ばれ設計の下流部に位置すると言えよう。近年ではこれらの両方の問題に対していくつもの研究が見られる。以下にはそれら位相最適化システムと形状最適化システムをリンクして設計の中流部から設計の下流部にかけて設計を最適化し設計者を支援する際に生じる問題点を整理し、検討する。

2.1 基準関数の検討の必要性 機械構造を設計するには多くの場合、従来の構造もしくは初期構造から改良を繰り返して最終的な構造を決定する。その設計手法には満足化設計や最適設計など数々あるが、いずれの場合にも構造の特性を示し、改良されたかどうかの判断の基準となる関数、すなわち基準関数が必要となる。表1に示すように設計が設計の上流から下流へと移っていく中で設計者が特に着目すべき点は変化していくものと考えられる。設計の下流部では比較的その設計の仕様が厳しいのでおのずと使用すべき基準関数も決まってくるであろう。それに対して設計の上流部では設計の自由度が大きいのでそこで使用する基準関数は構造の全体を表すような大局的な情報でかつ構造の特性を複数表せるような関数が望まれるであろう。すなわち、図1に示したような設計の流れの中で、各設計段階に適した基準関数を選択することが望まれ、設計の上流部では特にこの基準関数の検討が必要であると考えられる。例えば、筆者らは一連の研究⁽⁷⁾、⁽⁸⁾、⁽⁹⁾で設計の上流部ではロバスト性を考慮することで有利な構造を設計できると考えいくつかの基準関数の検討を行っている。

表1：設計の際に着目する点

設計の上流部	感性 ロバスト性 機能性 その他
設計の下流部	応力 変位 振動 生産コスト その他

2.2 位相の候補の生成の必要性 いかに設計環境を詳細に規定しても位相決定後、形状決定を行うと位相を決定した前提条件が変化してしまう可能性がある。よって、位相決定を行うシステムにより位相を決定してしまうのではなく、複数の位相の候補を作成し、形状決定のシステムによって形状決定を行いながら、候補を絞り込む必要があると考えられる。また、多様な候補を生成するには位相決定の際に設定しなければ

ならないパラメータにも多様性を与えることが望ましい。

2.3 位相最適と形状最適の繰り返しの必要性 前節でも述べたとおり、位相はある条件下で決定されるが位相決定後、形状を決定するシステムを構築する場合には、形状決定ルーチンの際に位相決定条件が崩れてしまう場合がある。また、2.1で検討したように、設計段階によって適切な基準関数の選択が必要であると考えられる。ある段階での構造の決定はその段階だけでは決定できず、少し下流の段階に進んで決定し、また上流にもどり再検討をするといった図3に示すようなフィードバック構造を含んだシステムの構築が望まれる。

また、形状決定の過程において、図4に示すような形状決定の際にも位相が変化させることを可能にするような設計方法も必要であろう。

2.4 まとめ 以上の点を整理してまとめると位相と形状の統合的な決定システムの一例として図5のようなシステムが考えられる。

ここで図2と大きく異なる点は位相の決定ルーチンにより候補をいくつか作成することを念頭におく点、位相、形状の決定を何度か繰り返す点、その繰り返す中で設計者が考慮して基準関数とその設計の段階にあったように変更していく点である。

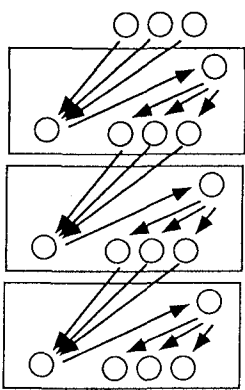


図3：フィードバック構造を含んだシステム



図4：形状決定過程での位相の変化

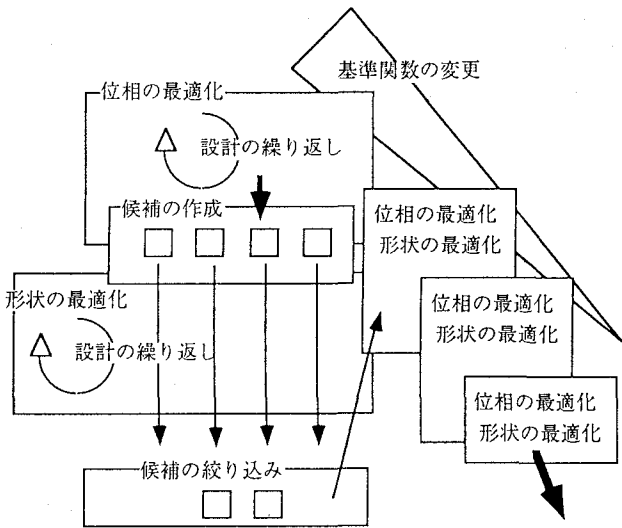


図5：位相・形状決定システムのリンク

3. 数値計算例

前章で示した問題点を候補生成の問題を中心に以下のような簡単な数値計算例で示す。図6のような2次元の設計領域に対して分布荷重と節点拘束を考慮している。これはエスカレータを極端にモデル化したもの

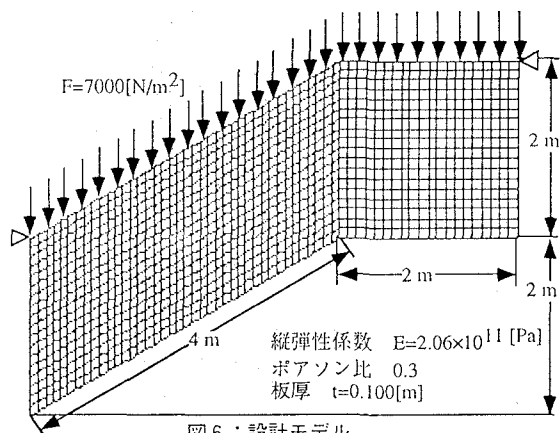


図6：設計モデル

である。エスカレータの構造は主にトラスまたはラーメン構造となっており、従来からの構造の設計改良を繰り返すことによって得られているが、近年、製造過程で必要な熟練者の減少や個々の部品の高性能化によって位相の段階からの設計の再検討が望まれている。まず、設計領域内で位相最適化を行い、ラーメン構造の設計の候補を提示する。それに対して形状最適化を行い、どの候補が有効であるかを検討する。また、これらの最適化の際には汎用のアプリケーションを使用した。位相の候補の生成の際にはOptishape（クイント社）を、形状決定の際にはGenesis（VMA社）を使用した。

3. 1 候補の生成 Optishapeは均質化法⁽⁵⁾により構造の位相を決定するソフトウェアである。均質化法は目的関数を構造の弾性ひずみエネルギー、制約条件に質量を与えることで各要素の密度を最適化することができる。設計者は制約条件（例えば初期質量の30%以内にする）を与えて密度の小さい要素を削除することで位相の候補を得る。

弾性ひずみエネルギーはそれを最小化することで外力に対してロバスト性も向上するので設計の上流で使用する基準関数として適当であると考えられる⁽⁸⁾。

図7は全質量に対する制約条件を変えた時に得られた結果である。これからわかるように制約条件の値によって詳細の部分では得られた位相が異なっていることがわかる。この数値計算は非常に簡単な例であったので更に複雑な場合には多様性が増すとも思われる。また、この結果から、たとえばトラスまたはラーメン構造を得たい場合に、候補に多様性を与えるには、目的関数や制約条件の値にも多様性を与え、設計者が候補を生成する必要があることもわかる。

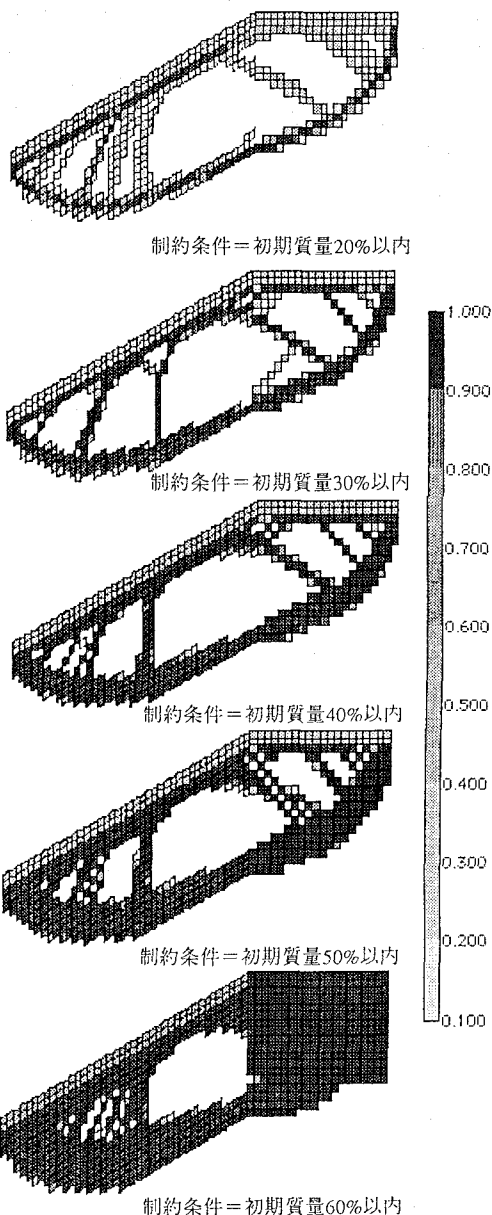


図7：位相決定結果

図7より図8のような二つの候補を作成する。

3. 2 形状の最適化

上記で得られた位相の候補に対して、各部材の断面積および位置を設計変数、制約条件として各設定のy座標の変位 ($-1.000\text{E-}5 < y < 1.000\text{E+}5$), 各部材の応力 ($-0.5000\text{E+}4 < \sigma < 0.5000\text{E+}4$), 目的関数を質量として形状の決定を行う. その際に汎用のソフトウェア Genesis を使用した.

得られた形状結果を図9に各値を初期形状と比較して表2に示す.

表 2：設計結果（候補 1）

	体積 m^3	最大変位 m	応力 Pa
初期形状	0.3071	-4.429×10^{-3}	-1.287×10^6
最適形状	10.67	-9.610×10^{-6}	-4.979×10^3

表 3：設計結果（候補 2）

	体積 m^3	最大変位 m	応力 Pa
初期形状	1.583	-1.227×10^{-3}	-8.063×10^5
最適形状	22.64	-8.237×10^{-7}	4.992×10^3

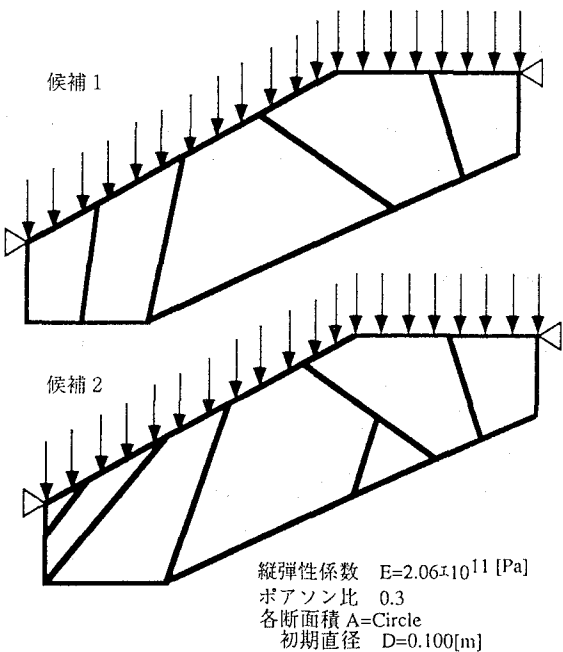


図 8：形状決定モデル

この結果、変位および応力の制約内で生産コストなどを考慮せず体積だけから決定するならば、候補1を選択することになる。更に設計が進展するにつれて基準関数を生産コストおよび座屈などその段階に適合するように設定することで構造が設計される。

4. 結言

位相最適化システムを設計者への支援ツールとして捉えた場合に、位相最適と形状最適化システムをリンクして設計中流部から下流部にかけてコンピュータにより機械構造の設計の自動化を行い設計者の支援システムを構築する際に生じる問題点を整理した。それによると

○各設計段階で適切な基準関数の選択が必要である。
特に設計の上流部では設計の自由度が大きいため使用する基準関数の検討が必要である。

○位相は一つ決定するのではなく、複数個の候補の生成が必要である。また、候補に多様性を持たせるためには位相決定に必要なパラメータの値にも多様性を与える必要があると考えられる。

○設計の流れの中である段階での構造の決定はその段階だけでは決定できず、少し下流の段階に進んで決定し、また上流にもどり再検討をするといったフィードバック構造を含んだシステムの構築が望まれる。更にこれらのことを簡単な数値計算例を通して検討を行った。

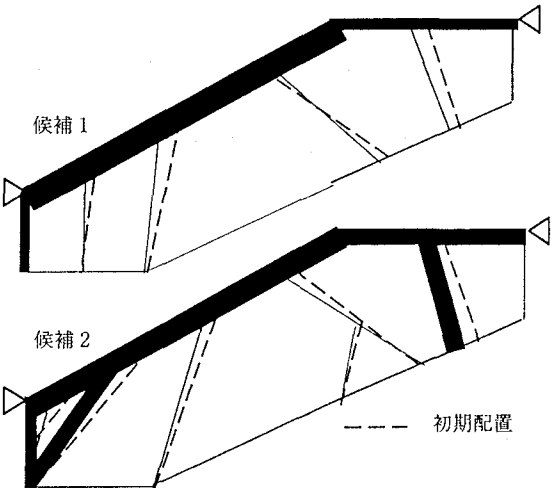


図 9：形状結果

謝辞

末筆ながら本研究を進めるにあたりソフトウェアの面でご教示を頂きました(株)くいんとの石井恵三氏、(株)アクシスの久保文男氏、NASAの三浦宏一博士の諸氏に感謝致します。

参考文献

- (1) Kodiyalam, S., Vanderplaats, G.N., and Miura, H. : Structural shape optimization with MSC/NASTRAN, Computers & Structures, Vol.40, No.4, 1991, pp821
- (2) 長町三生：感性工学，海文堂，1990
- (3) Kirsch, U. : Optimal topologies of structures, Applied Mechanics Review, Vol.42, No.8, 1989, pp223
- (4) 稲川智一，荒川雅生，山川宏：2次元構造物の遺伝的アルゴリズムを用いた最適トポロジに関する研究，日本機械学会論文集，Vol.61, No.587C, 1995, pp.2901
- (5) Suzuki, K. and Kikuchi, N. : A homogenization method for shape and topology optimization, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.93, No.3, 1991, pp291
- (6) Nagai, K., Igarashi, M., Gea, H.C., and Kikuchi, N. : Automotive application of integrated structural optimization, Proc. of ICES95, Vol. 1, 1995, pp223
- (7) 山川宏，宮下真：ロバスト構造に関する研究（第1報，ロバスト構造の概念とその設計方法），日本機械学会論文集，Vol.57, No.544C, 1991, pp.3913
- (8) 廣安知之，山川宏：ロバスト構造に関する研究（第2報，上流部の設計に対するロバスト構造問題の整理とその基準関数の検討），日本機械学会論文集，Vol.61, No.587A, 1995, pp.1669
- (9) 廣安知之，岡洋介，木村光宏，山川宏：ロバスト構造に関する研究（第3報，動的ロバスト構造の設計法とその検討），日本機械学会論文集，A編，掲載決定