

203 汎用構造最適設計システムの開発について

Development of General Structure Optimal Design System

○機正 趙 希祿 (株) 富士テクニカルリサーチ 中村 和彦 (株) 富士テクニカルリサーチ
遠藤 正司 (株) 富士テクニカルリサーチ 名取 孝 (株) 富士テクニカルリサーチ
原田 隆 (株) 富士テクニカルリサーチ

Xilu ZHAO, Fuji Technical Research Inc.
Kazuhiko NAKAMURA, Fuji Technical Research Inc.
Masashi ENDOU, Fuji Technical Research Inc.
Takashi NATORI, Fuji Technical Research Inc.
Takashi HARADA, Fuji Technical Research Inc.

In this paper, it deals with the structure optimization problem of a parts level, and it inquired for the static analysis and vibration characteristic problem. It performed examination detailed about the problem that exists in case it develops the application software for structure optimization, and also it gives approaches. Moreover, to two examples of application, it performs optimization of the weight, stiffness, stress, and vibration characteristic of structure, and it verified the validity of each approach by those results.

Key Words: Optimal Design, Structural Optimization, Constraint Optimization,
Basis Vector Method, Shape Optimization, Structural Design

一、はしがき

近年、産業界の各分野における構造最適化に関する研究には目覚ましいものがあり、数多くの研究成果が論文や著書にまとめられてある^{[1]~[2]}。構造最適化は、従来の FEM 構造解析と最適化手法を組合せ、設計上の諸条件を考慮した最適な構造をコンピュータ数値計算で得ることができる。従来、設計者の経験や勘をもとに行ってきた設計改良の繰返し作業をコンピュータで計算することによって実施し、設計品質の向上と設計期間の短縮および設計コストの削減が実現できる。しかし、構造最適化に関する研究の大半は大学の研究室あるいは研究論文の段階に止まっており、構造設計者の立場から、シンプルな概念をもち手軽に使用できる、そして実務設計に役立つ構造最適化ソフトは、きわめて少ないのは現状である。

このような現状を踏まえて、本報告では、幅広い設計分野でよく見られている小規模かつ多品種、いわゆる「部品レベルの構造最適化問題」に着目して、静解析と振動固有値問題を中心とする構造最適化専用ソフトを開発する際によく見られる問題点を扱い、詳細な検討を行ったうえで、それぞれ解決策を与える。また、二つの応用例に対し、構造重量の最小化、剛性の最大化、応力集中の最小化や振動特性の最適化などのを行い、それらの結果により、本報告に適用した各手法の有効性と妥当性を検証した。

二、最適化問題の設定

本報告に扱う構造最適設計の対象は下記のようにまとめられる。

目的関数：構造重量の最小化
構造剛性の最大化
応力集中の最小化
固有振動数の最適化
ひずみエネルギーの最適化

設計変数：板厚
構造形状（ベースベクトル係数）

制約条件：構造重量
変形（たわみ、変位）
応力（Misess 応力）
固有振動数

構造解析：静荷重弾性解析
振動固有値解析

要素種類：平面要素
三次元シェル要素
三次元ソリッド要素

具体的な構造条件と設計要求に対して、以上の機能項目からいくつかを選択し最適化問題を構成することができる。最適化手法は、比較的安定な収束特性をもつ、且つ経験係数（ペナルティ係数や拡張ラグランジュ変数など）を持たない逐次二次計画法と逐次線形計画法を利用する。

三、構造最適設計システム構成

構造最適設計システムを大きく分けると、プリプロセッサ、最適設計ソルバー、ポストプロセッサ、FEM 解析ソルバー、感度解析ソルバーと最適化手法ライブラリーから構成している。具体的には図 1 に示す。

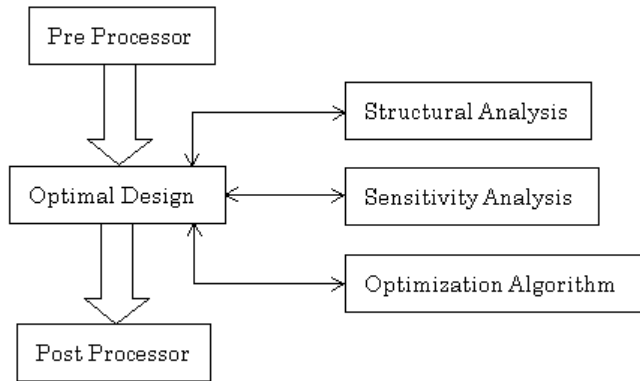


Fig.1 Structural Optimization System

図中より、プリプロセッサでは構造解析モデルを作成し、拘束や荷重など解析条件を設定する。最適設計ソルバーでは、繰返し FEM 解析ソルバー、感度解析ソルバーと最適化手法モジュールをコールし、最適性条件を満足するまで設計変更を行う。ポストプロセッサでは、最適化結果の表示、整理、確認、評価などの作業を行う。

四、感度解析法

感度解析は、構造解析結果で表される目的関数や制約条件の設計変数に関する偏微分を求める。すなわち設計変数の変更が目的関数や制約条件（設計応答）に与える影響度を定量的に計算する。

本報告では、システムの汎用性を考慮するため、設計変数の種類と設計応答により、差分法と直接微分法を適用した。

五、形状最適化のベースベクトル法

形状最適化問題では、形状の変更を表現するため直接に節点座標を設計変数にする方法はよく使われている。しかし、それを実際の構造最適化問題に適用する際に、変数のグルーピングや解析メッシュのリメッシングなどの問題があるため、なかなか扱いにくく応用するには難しい傾向が見られる。

本報告の形状最適化問題には、ベースベクトル法を適用した。ベースベクトル法は一つの設計変数で複数の節点を同時にコントロールできるところに特長があり、従来の各節点座標値を直接設計変数として用いる代わりに、あるまとまった節点グループの移動を一つの形状変化のパターンとみなし、一つの形状設計変数で対応させる。そして、いくつかの形状変化パターンを定義して、最終的な最

適に形状を得るための形状変化の基本形状として利用するものである^{[3]~[4]}。

計算中、解析モデルの形状変更部分の節点座標をまとめて一つのベクトルで表す。幾つかの形状変更が可能なパターンに分けて、このようなベクトル、いわゆるベースベクトルをそれぞれ作成する。作成されたベクトルは線形空間の一组基底ベクトルとなる。

実際の最適化計算では、各基本形状にそれぞれ連続的な重み係数をかけて組合せることにより、無数な構造形状を形成することができる。

六、最適化適用例

適用例 1．携帯電話フロント部の板厚最適化

図 2 は携帯電話フロント部の構造である。両端で支持して、図示の位置で荷重をかける。解析メッシュは節点数が 6385、三次元シェル要素が 6301(四角形 5501、三角形 809)である。最適化の設計変数は各部位の肉厚で 15 個とする。制約条件は番号ボタン周辺、機能ボタン周辺および左右側面の最大応力が許容値以下とする。

1. 重量最小化 最適化計算は 4 回繰返し計算で収束し最適解を得た。最適化前後の重量と応力の変化は図 3 ~ 図 4 に示す。初期構造より最適構造は重量が 7.18% 減少し、応力はすべて許容範囲以内に抑え、最大応力が 8.81% 減少した。

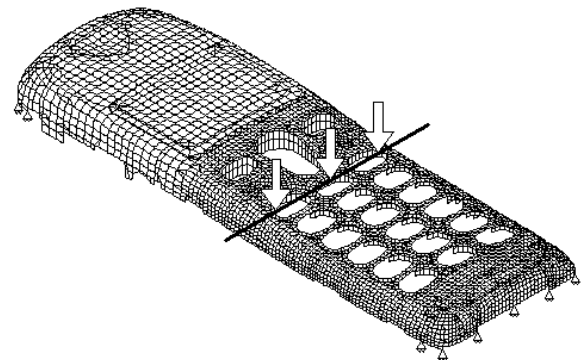


Fig.2. The Front Case of Portable telephone

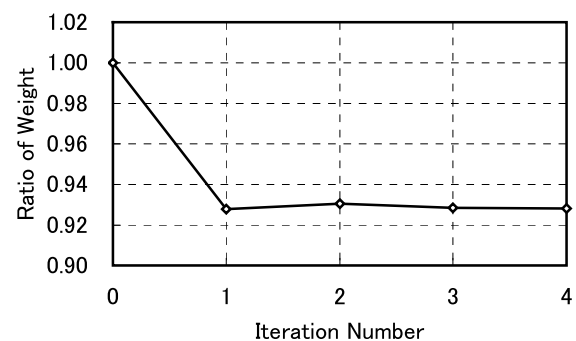


Fig.3 Change of Structural Weight

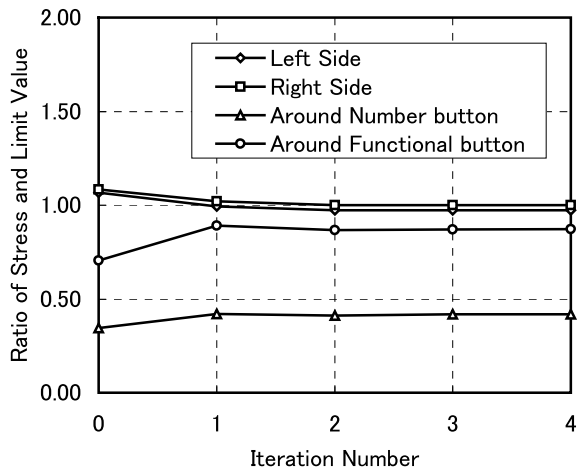


Fig.4 Change of Maximum Stress at Each Part

2. 剛性最大化 計算は3回繰返し計算で収束し最適解 (図5～図6)を得た。初期構造の重量を維持した上で最大変位と応力はそれぞれ9.95%と6.52%減少した。

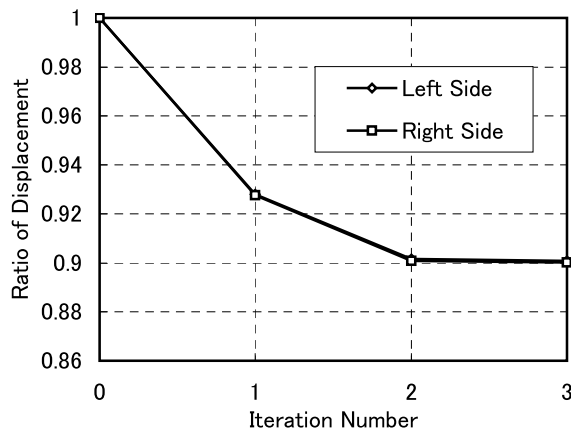


Fig.5 Change of Objective Displacements

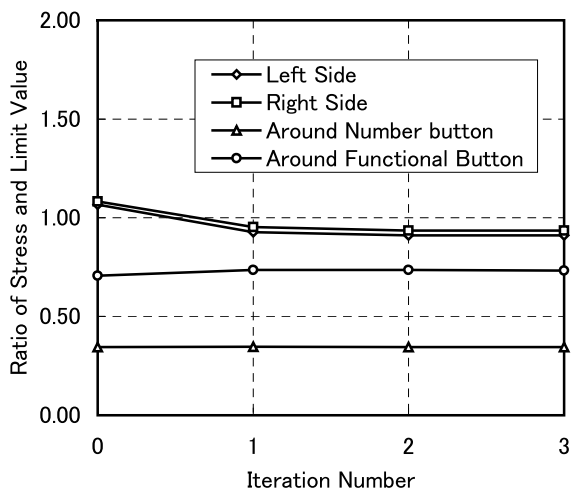


Fig.6 Change of Maximum Stress at Each Part

3. 応力集中の最小化 計算は5回繰返し計算で収束し最適解 (図7～図8)を得た。構造の重量を維持した上で6つの応力集中点の応力がすべて14%ほど減少した。

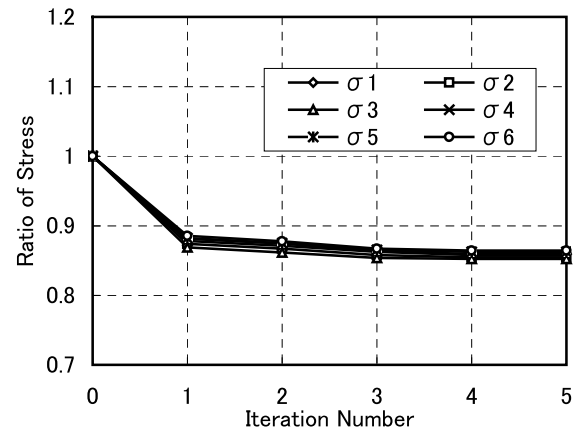


Fig.7 Change of Objective Stresses

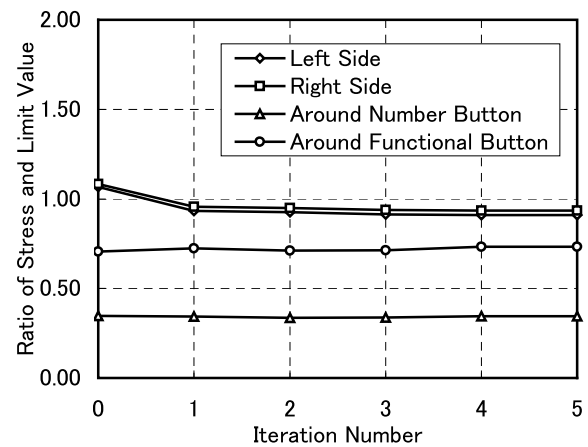


Fig.8 Change of Maximum Stress at Each Part

適用例2. 三次元箱型の板組立て構造の振動特性最適化

図9に示す構造は13枚の板から構成される。構造最適化の目的は、最低次の固有振動数を16.0Hzに近づけるような構造を求める。

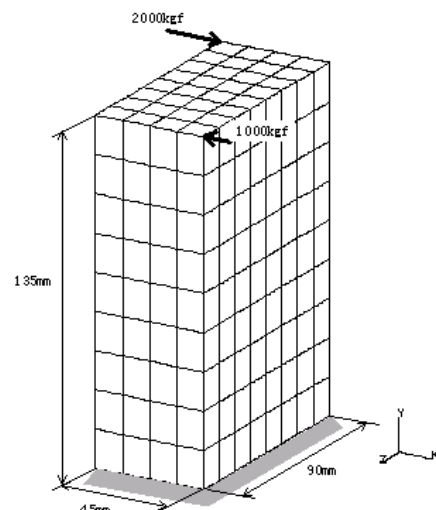
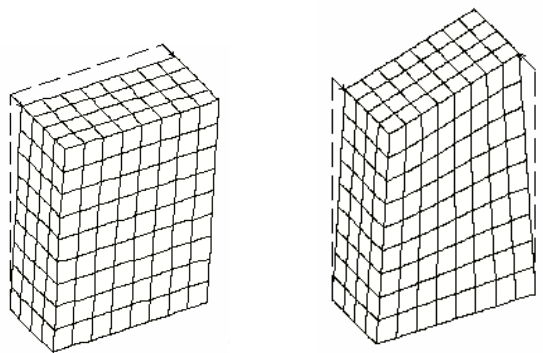


Fig.9 Load and constraints on the original structure

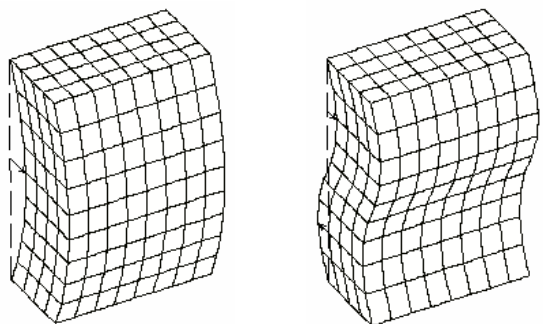
最適化の設計変数は、13枚の板の厚さと図10に示した6つのベシスベクトルの重み係数とし、さらにこの2種類の変数を合わせた19個の設計変数に対して、それぞれ下限値と上限値の側面制約条件を考慮する。

静的な荷重は図9に示すように上コーナで対向の平行荷重1000kgfと2000kgfがかかり、静的制約条件として荷重点Aの荷重方向の撓み $\leq 0.15\text{mm}$ 、荷重点AとCの荷重方向の相対変位 $\leq 0.05\text{mm}$ 、節点AとBの縦方向の相対変位 $\leq 0.05\text{mm}$ 、荷重点A周辺のMises応力 $\leq 15.0\text{kg/mm}^2$ とする。一方、動的な制約条件として、2次振動数を25.0~30.0Hzの範囲以内にセットし、また、周波数34.0Hzと44.0Hzの周期外力を受ける可能性があると考え、25.0Hz $\leq$ 2次固有振動数 $\leq$ 30.0Hz、3次固有振動数 $\leq$ 32.0Hz、4次固有振動数 $\geq$ 36.0Hz、5次固有振動数 $\leq$ 42.0Hz、6次固有振動数 $\geq$ 46.0Hzとする。また、構造全体の重量 $\leq 2.0\text{kg}$ の制約条件を付加した。



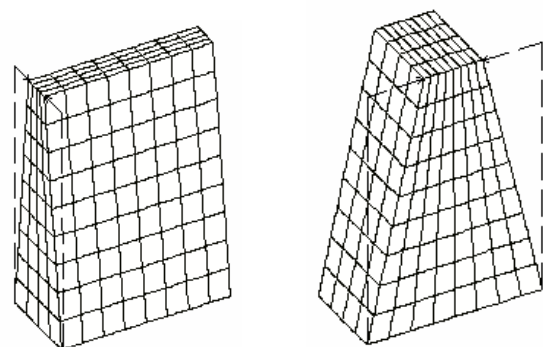
(a). Basis Vector 1

(b). Basis Vector 2



(c). Basis Vector 3

(d). Basis Vector 4



(e). Basis Vector 5

(f). Basis Vector 6

Fig.10 Basis Vector 1~6

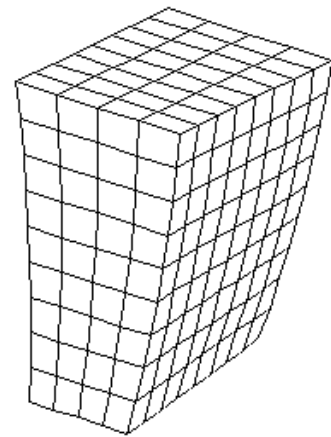


Fig.11 Optimized Structure Shape

以上の設定した最適化条件に基づき最適化計算は13回繰り返し計算を経て収束し最適解を得た。

最適化の目的値にする1次振動数が理想値16.0Hzと5桁まで一致した周波数を与える構造の形状を図11に示し、最適化前後における構造重量および各制約条件の変化をそれぞれ図12~図15に示す。

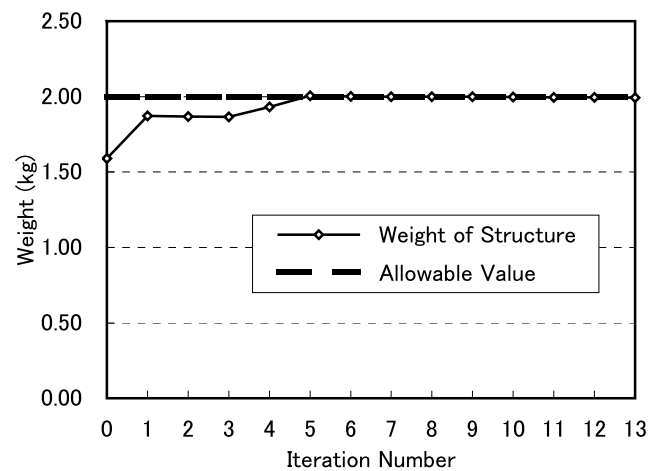


Fig.12 Change of Weight of Structure

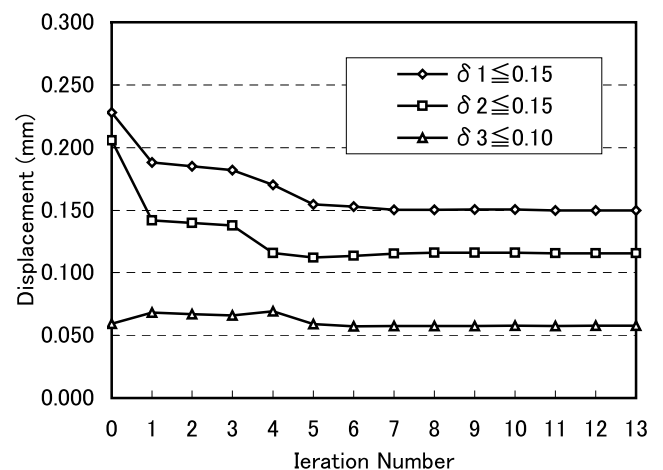


Fig.13 Change of Constrained Displacements

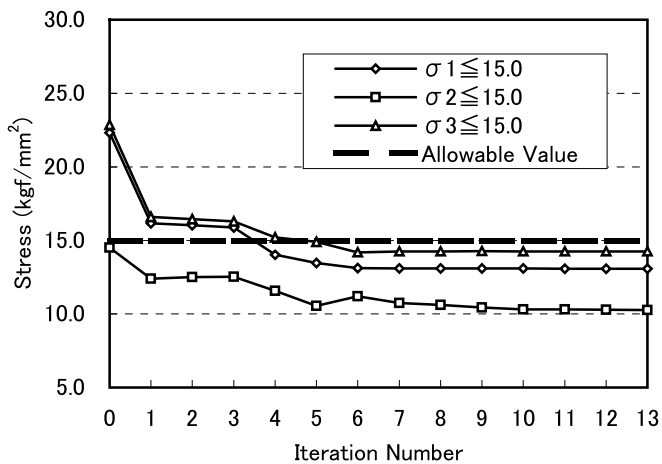


Fig.14 Change of Constrained Stresses

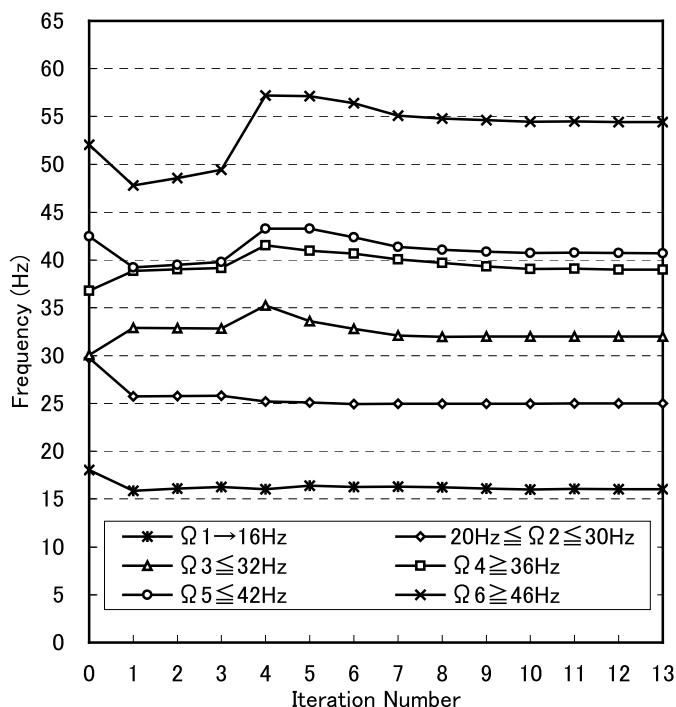


Fig.15 Change of Frequencies

図中により、初期構造での制約条件が許容値を超過している変位、応力と固有振動数があり、すなわち初期構造が設計要求を満足せず、構造の形状と板厚を適当に調整する必要がある。

一方、最適構造での制約条件はすべて許容範囲以内に収まり、また、構造の重量、変位、応力及び固有振動数がそれぞれ対応する許容値に到達し、さらに構造を変更する必要がないことが分かった。

本来、設計可能な領域における形状や板厚など無数の組合せが存在している中で、設計者の経験と勘をもとに設計改良を行ったことにより、最適設計値を見落とす可能性が大である。よって、本報告の構造最適化システムを用いることで、従来の製品構造をより最適設計値に近づけることが明かにした。

七、まとめ

1. 産業界における形状・板厚の最適化問題をターゲットとして、静解析と振動固有値問題を中心とする部品レベルの最適化専用システムを開発した。

2. 設計者が手軽に使用できるように、プリプロセッサ、最適設計ソルバー、ポストプロセッサ、構造解析ソルバー、感度解析ソルバーと最適化手法ライブラリーを一体化して一つのパッケージした。

3. システムの汎用性を考慮するため、設計変数の種類と設計応答により、差分法と直接微分法を適用した。

4. 構造形状最適化するには、ベーススペクトル手法を適用し、プリプロセッサではベーススペクトルの生成とチェック機能を追加した。

5. 携帯電話フロント部の板厚最適化と、三次元箱型板組立て構造の振動特性最適化の適用例を計算した結果によって、本システムの有効性を明かにした。

参考文献

- (1). 日本機械学会編、構造・材料の最適化設計、技報堂、1989
- (2). 萩原一郎、最適化手法の動向とこれからの方向について、振動騒音の最適化、自動車技術会・振動騒音の最適化ワーキンググループ、1998、p381-388
- (3). 趙希祿ほか、静的な制約条件をもつ三次元板・シェル構造の振動特性最適化、日本機械学会 D&D'99 講演論文集、1999、p 333-336
- (4). 趙希祿ほか、ベーススペクトル法を用いた三次元構造の形状最適設計、日本機械学会 D&D'99 講演論文集、1999、p 139-142