研究論文

傾斜マイクロ構造設計による材料機能化

高野 直樹^{*1}, 座 古 勝^{*1}, 中川 雅也^{*2}

(1999年4月5日受付)

Design of Graded Microstructures of Functional Material

Naoki TAKANO,^{*1} Masaru ZAKO^{*1} and Masaya NAKAGAWA^{*2}

(Received April 5, 1999)

This paper proposes a novel design methodology of graded microstructures of functional composites for the emergence of macroscopic function. Micro-macro correlation is analyzed by the homogenization theory. That is, the homogenized properties such as elastic moduli and coefficients of thermal expansion and thermal conductivity are calculated for arbitrary complex microstructures. Then, the functional composites with graded microstructures can be replaced by a homogenized model. Also because it is impossible to design all of the numerous graded microstructures, a discretized model is adopted. To determine the optimum graded arrangement of the microstructures in the discretized model, the genetic algorithm is adopted in this paper. Next, the design of continuously graded microstructures is completed using a feature-based 3D-CAD system. In addition, a solid model is produced by the stereolithography to help the understanding of the designed complex microstructures. Brief description of the formulation of the homogenization method for heat conduction and thermal stress problems are shown. An example of the design of a plate with graded microstructures in its thickness direction to control the macroscopic temperature distribution, thermal strain distribution and deflection is shown.

1. 緒 言

人間の骨は複雑なマイクロ構造よりなる多孔質体であるが、外側がポロシティの低い緻密骨で内側がポロシティの高い海綿骨よりなっており¹⁻³⁾, ポロシティが変化した層状構造, 換言すれば傾斜マイクロ構造をとっている。自然界に存在する素材のみならず, 人工血管のような人工材でも同様な層状の傾斜マイクロ構造をとることにより²⁾, 高い機能を発揮している。これらは一例であるが, 本研究では, このような構造体を傾斜マイクロ構造と名付け, 一般的な傾斜マイクロ構造の設計手法を提案するものである。

傾斜マイクロ構造設計の目的は材料の機能化である。材

料は構造体を形成するためのものであり, 機能はマクロに与えられる場合が一般である。そこで, ミクロとマクロというはるかにかけ離れたスケール間の架け渡しが必要になり, これが可能な手法として均質化法⁴⁻⁶⁾による数値解析が近年注目されている。均質化法は, 任意の複雑なマイクロ構造を有する複合材料に対し, 等価なマクロな物性値を厳密に計算できるほか, ミクロ構造における応力などを計算できるという利点を有する。著者らはこれまでに均質化法を繊維・編物複合材料の応力解析⁷⁾やモールドイング解析⁸⁾などに適用してきた。この他に, 均質化法の有効利用法として注目されるのがマイクロ構造設計である⁹⁾。

これまでに, 均質化法によるマイクロ構造設計として, 応力-ひずみマトリックス¹⁰⁾や線膨張係数¹¹⁾を規定し, ミクロ構造のトポロジー・寸法を設計し, ピエゾ素子開発¹²⁾などを旨とした研究がある。本研究では, トポロジーは与えられるものとし寸法のみを設計するが, これまでの研究では単一のマイクロ構造を考えていたのに対し, 本研究では上記のように無数のマイクロ構造が複雑に傾斜した機能材料を考える。

^{*1} 大阪大学大学院工学研究科生産科学専攻 (565-0871 吹田市山田丘 2-1)
Department of Manufacturing Science, Osaka University, 2-1 Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

^{*2} 大阪大学大学院学生
Graduate Student, Graduate School, Osaka University

2. 設計手法の概要

まず、マイクロ構造は非常に複雑なものを想定する。設計変数はマイクロ構造の寸法とし、トポロジーは与えるものとする。ミクロスケールは寸法で定義するのではなく、マクロな構造体中に含まれるマイクロ構造の数が多数（無数）である場合、マイクロ-マクロのスケールがかけ離れた場合を考える。この場合、多数のマイクロ構造が傾斜しているならば、それを一つずつ設計（決定）することは不可能であるため、多数のマイクロ構造の内のいくつかを取り出し、すなわち離散的なマイクロ構造の最適設計を第1ステップとする。

ここで、ある程度の領域を代表するマイクロ構造を取り出し、均質化してマクロに取り扱うことができれば、計算は容易になる。そこで、上述の複雑なマイクロ構造を扱うという前提から、均質化法を採用する。なお、最適化手法としては、遺伝的アルゴリズムを採用した。

次に、離散的に設計した傾斜マイクロ構造から、連続的に傾斜したマイクロ構造に還元する。上記の通りトポロジーは与える、すなわち固定されているとしたので、フィーチャベースの3次元CADとの相性がよいことに気づく。離散的なマイクロ構造群の間を補間することにより、傾斜マイクロ構造設計を完成させる。

加えて、CADで設計を完成させるならば、計算機上で設計された解は、光造形により実体モデルとして、より理解しやすい形で示すことが可能になる。

Fig. 1 Schematic flow of the design method.

以上が設計手法の主要なコンセプトであり、これをFig. 1に示す。マクロ機能発現のためにマイクロ構造を設計するという一般的なマイクロ-マクロ連成問題を極めて効率的に扱うことができる。詳細は4章の具体的な設計例に沿って述べる。

3. 均質化法の概要と最適設計手法

3.1 均質化法の定式化の概要

上述の通り、多数（無数）のマイクロ構造よりなるマクロ構造を考える。ここで、Fig. 2に示すようにマイクロ構造は周期的に配列しているものと仮定する。単位マイクロ構造をユニットセルとよぶことにする。マクロスケール x とミクロスケール y を考える。マクロ構造とユニットセルの代表寸法をそれぞれ L, l とすれば、スケール比は $\varepsilon = l/L \ll 1$ となり、

$$y = x/\varepsilon \quad (1)$$

と表される。

熱伝導問題と熱応力問題に対し、マイクロ構造の影響を考慮して支配方程式を記述するとそれぞれ(2)式、(3)式となる。ただし、以下の式はテンソルの総和規約にしたがう。

$$\int_{\Omega} K_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \frac{\partial \delta T}{\partial x_i} d\Omega = \int_{\Omega} f \delta T d\Omega + \int_{\Gamma_h} h \delta T d\Gamma \quad \forall \delta T \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} E_{ijkl} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} \frac{\partial \delta u_i}{\partial x_j} d\Omega &= \int_{\Omega} b_i \delta u_i d\Omega + \int_{\Gamma_t} t_i \delta u_i d\Gamma \\ &+ \int_{\Omega} E_{ijkl} \alpha_{kl} (T - T_0) \frac{\partial \delta u_i}{\partial x_j} d\Omega \quad \forall \delta u_i \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 K_{ij} と E_{ijkl} は熱伝導テンソルと弾性テンソル、 α_{ij} は線膨張係数であり、 f と h は内部発熱率と熱流束、 b_i と t_i は物体力と表面力である。 K_{ij} と E_{ijkl} はミクロな不均質性を反映したものであり、周期関数である。 T_0 は初期温度である。

さて、求めるべき温度、変位はFig. 2のようなミク

Fig. 2 Definition of macroscale and microscale.

ロスケールにおける不均質性を考慮すれば、マルチスケール法により (4) 式, (5) 式のように漸近展開式で記述できる。

$$T(x, y) = T^0(x) + \varepsilon T^1(x, y) \quad (4)$$

$$u_i(x, y) = u_i^0(x) + \varepsilon u_i^1(x, y) \quad (5)$$

ここに、 T^0 と u_i^0 はマクロな温度と変位、 T^1 と u_i^1 はミクロな温度と変位である。マクロな量はマクロスケール x のみの関数となる⁴⁻⁶⁾。式 (4), (5) を支配方程式に代入し、整理する。さらに周期関数 ψ に対し、次式の平均化定理⁴⁻⁶⁾を用い、 $\varepsilon \rightarrow 0$ の極限をとる。ただし、ユニットセルの体積を $|Y|$ とする。

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_{\Omega} \psi \left(\frac{x}{\varepsilon} \right) d\Omega = \int_{\Omega} \frac{1}{|Y|} \int_Y \psi(y) dY d\Omega \quad (6)$$

これにより得られる式から、適当な仮想変位を選択するなどにより、ミクロ方程式とマクロ方程式に分離できる。まず、熱伝導問題については、ミクロ方程式 (7) とマクロ方程式 (8) が導かれる。式 (7) を周期境界条件の下に解くことにより、不均質材の熱伝導テンソルのミスマッチにより生じるミクロ構造における熱伝導の特性を得ることができる。

$$\int_Y K_{ip} \frac{\partial \phi^j}{\partial y_p} \frac{\partial \delta T^1}{\partial y_i} dY = \int_Y K_{ij} \frac{\partial \delta T^1}{\partial y_i} dY \quad \forall \delta T^1 \quad (7)$$

$$\int_{\Omega} K_{ij}^H \frac{\partial T^0}{\partial x_j} \frac{\partial \delta T^0}{\partial x_i} d\Omega = \int_{\Omega} f^H \delta T^0 d\Omega + \int_{\Gamma_n} h \delta T^0 d\Gamma \quad \forall \delta T^0 \quad (8)$$

ここで、均質化された熱伝導テンソル K_{ij}^H と均質化された内部発熱量 f^H が以下のように導出される。

$$K_{ij}^H = \frac{1}{|Y|} \int_Y \left(K_{ij} - K_{ip} \frac{\partial \phi^j}{\partial y_p} \right) dY \quad (9)$$

$$f^H = \frac{1}{|Y|} \int_Y f dY \quad (10)$$

また、熱応力問題については、ミクロ方程式 (11) および (12) とマクロ方程式 (12) が導かれる。式 (11) は不均質材の弾性テンソルのミスマッチにより生じるミクロ変形の特性を、式 (12) は同様に線膨張係数のミスマッチにより生じる変形特性を得るためのものである。

$$\int_Y E_{ijmn} \frac{\partial \chi_m^{kl}}{\partial y_n} \frac{\partial \delta u_i^1}{\partial y_j} dY = \int_Y E_{ijkl} \frac{\partial \delta u_i^1}{\partial y_j} dY \quad \forall \delta u_i^1 \quad (11)$$

$$\int_Y E_{ijkl} \frac{\partial \varphi_k}{\partial y_l} \frac{\partial \delta u_i^1}{\partial y_j} dY = \int_Y E_{ijkl} \alpha_{kl} \frac{\partial \delta u_i^1}{\partial y_j} dY \quad \forall \delta u_i^1 \quad (12)$$

$$\int_{\Omega} E_{ijkl}^H \frac{\partial u_i^0}{\partial x_l} \frac{\partial \delta u_i^0}{\partial x_j} d\Omega = \int_{\Omega} b_i^H \delta u_i^0 d\Omega + \int_{\Gamma_t} t_i \delta u_i^0 d\Gamma \quad (11)$$

$$+ \int_{\Omega} E_{ijkl}^H \alpha_{kl}^H (T^0 - T_0) \frac{\partial \delta u_i^0}{\partial x_j} d\Omega \quad \forall \delta u_i^0 \quad (13)$$

式 (13) の記述において、均質化された弾性テンソル E_{ijkl}^H と均質化された線膨張係数 α_{ij}^H 、および均質化された物体力 b_i^H が以下のように導出される。ただし、 C_{ijpq}^H を均質化された弾性テンソルから求められる均質化されたコンプライアンスとする。

$$E_{ijkl}^H = \frac{1}{|Y|} \int_Y \left(E_{ijkl} - E_{ijmn} \frac{\partial \chi_m^{kl}}{\partial y_n} \right) dY \quad (14)$$

$$\alpha_{ij}^H = C_{ijpq}^H \frac{1}{|Y|} \int_Y E_{pqkl} \left(\alpha_{kl} - \frac{\partial \varphi_k}{\partial y_l} \right) dY \quad (15)$$

$$b_i^H = \frac{1}{|Y|} \int_Y b_i dY \quad (16)$$

なお、本研究では扱わないが、ミクロ構造における応力も設計時の評価関数に加えることができ、次式より計算される。

$$\sigma_{ij} = \left(E_{ijkl} - E_{ijmn} \frac{\partial \chi_m^{kl}}{\partial y_n} \right) \frac{\partial u_k^0}{\partial x_l} - E_{ijkl} \left(\alpha_{kl} - \frac{\partial \varphi_k}{\partial y_l} \right) (T^0 - T_0) \quad (17)$$

また、以上の偏微分方程式は、有限要素法により空間離散化を行うことにより数値的に解くことができる。

3.2 ミクロ-マクロ相関性のデータベース

均質化法を用いれば、任意の複雑なミクロ構造を有する複合材料について、均質化された縦弾性係数、横弾性係数、ポアソン比、線膨張係数、熱伝導率がそれぞれ計算できる。これらをあらかじめ計算し、データベース化し、次の最適化の計算の中で参照することになれば、ミクロ-マクロ相関を考慮した設計問題も、ミクロ解析とマクロ解析に分離することができる。この流れを Fig. 3 に示す。最適化手法とマクロ解析については後述する。

データベース作成は具体的に以下の手順により行う。2章で述べた通り、本研究ではミクロ構造のトポロジーが与えられた時にミクロ構造の寸法を設計変数としている。この時、設計変数のとり得る値の範囲が決まれば、その範囲内で離散的にいくつかの設計変数の値を決める。複数の設計変数がある場合、すべてのとり得る設計変数の組合せについて均質化法による計算を行う。なお、有限要素分割を容易にするために、本研究では、与えられたトポロジーに対し、自動要素分割プログラムを作成した。

また、データベースは原則的に離散的な情報から構築され、設計変数であるミクロ構造の寸法も離散的なものとしている。この設計変数をできる限り連続的な値の集合とするには、多くの均質化法による解析を行う必要が

Fig. 3 Flowchart of micro-macro coupled design procedure.

一般にはあるが、そのかわりに均質化された特性値を適当な近似関数で補間することも可能である。ただし近似関数が多項式とした場合、その次数は仮定する必要がある。例えば、実際の発泡材を例にとり、発泡率を種々に変化させて傾斜マイクロ構造を形成するとすれば、数種の代表的な発泡率に対するマイクロ構造の観察から設計変数となるマイクロ構造の寸法を同定し、数値モデル化する。観察を行わなかった発泡率に対するマイクロ構造は、線形補間により寸法を仮定し、種々の離散的な設計変数の値について均質化法による解析を行う。さらに、上記と同様に、均質化された特性値にも補間を施せば、製造をある程度考慮した設計も可能となる。

データベースが構築されれば、所望のマクロ機能が変った場合には最適化の手順の中で目的関数を変えるだけでよく、特に最近注目されている多目的（機能）を実現するような最適設計にも便利である。

3.3 最適化手法と3次元CAD

最適設計の手順において重要な点は、多数の傾斜マイクロ構造の内のいくつかを取り出し、離散的なマイクロ構造の最適設計を行った後に、連続的に傾斜したマイクロ構造に復元するという二段階で設計を行うということである。

前半の離散的なマイクロ構造の設計では、上記のマイクロマクロ相関性のデータベースより、最適な特性を有するマイクロ構造を選択すればよい。したがって、この最適設計問題を組合せ問題ととらえ、遺伝的アルゴリズム(GA)を適用する。遺伝的アルゴリズムは、多峰性の非線形問題にも適用が比較的容易であるとされており、設計変数の数が増えた場合にも、多種多様なマクロ機能の要求に対する設計問題の求解法として便利な手法である。近年、遺伝的アルゴリズムに関する研究が多数見られ、手法の改良などが行われているが、本研究においては、Goldbergらの再生、交叉、突然変異という基本的な手法とパラメータ設定^{13,14)}を用いた。

後半の連続的な傾斜マイクロ構造の設計には、いくつかの手段が考えられる。離散的に決定されたマイクロ構造の間を数理的に連続傾斜マイクロ構造に復元することも可能であろうが、将来的には製造上の制約条件が設計の中に取り込まれる必要があると考え、本論文では、ゆるやかなシステム化を図るにとどめ、具体的にはフィーチャベースの3次元CADを用いた手作業で行うこととした。上記の制約条件は、遺伝的アルゴリズムによりマイクロ構造を選択する際に、隣り合う離散的なマイクロ構造同士の関係を制約すると同時に、その間を連続的なマイクロ構造に復元する際にも課されるものである。手作業とはいえ、フィーチャベースの3次元CADでは、トポロジーが同じで寸法のみが異なる場合、単位マイクロ構造を一つのフィーチャとして定義しておけば、傾斜マイクロ構造はフィーチャの関係を定義するだけでデータ構築が可能であり、極めて簡単な作業ですむ。フィーチャの関係の定義を数理的に行うことも可能であり、柔軟な設計システムが構築できる。

4. 設計例

4.1 問題設定

発現させたい機能の与え方として最も一般的なのは、所望のマクロな機能を規定することである。そこで、本論文では一例として、板の表面と裏面の温度に差がある場合のそり変形の抑制という熱変形問題を考える。均質材料、あるいは単一の均質マイクロ構造からなる板では、

Fig. 4 Unit cell of microstructure.

上記の熱環境下では、表面と裏面の熱ひずみのミスマッチにより板は必ずそる。しかし、板厚方向にマイクロ構造を傾斜させ、温度場と熱ひずみ場を制御し、板厚方向に一樣な熱ひずみ場とすることができれば、板そり変形は抑制される。これは温度分布のある板のそり変形抑制に対する一つの解を与える。板厚方向にマイクロ構造を制御することにより、熱伝導率と線膨張係数を適切に傾斜させることになる。勿論こうした解は、この問題設定に対する一つの解を与えるだけであり、線膨張係数が零という材料を使うなど、ほかの設計指針はあり得る。しかしながら、設計変数そのものであるマイクロ構造の寸法にのみ注目するのではなく、最適化の手順の中では間接的な量である熱伝導率と線膨張係数、あるいは温度場と熱ひずみ場という実質的な量に注目して設計することが重要であることを述べる。

複雑なマイクロ構造のユニットセルのトポロジーの一例として、Fig. 4に示す多孔質体を想定する。ユニットセルの体積を一定とし、設計変数は図中の A と L の二つとした。多孔質体の代表例である発泡材の中には、ポアソン比が負であるものなど興味ある機能を有する材料が報告されている^{1,15)}。Fig. 4のモデルは、生体力学の分野で海綿骨のモデルとして提案されたもの¹⁾に類似の例題とした。

また、マイクロ構造とマクロ構造のスケール差は次のように設定した。マクロ構造の代表寸法である板厚を 10 mm とし、マイクロ構造は板厚方向に傾斜しつつ 50 個配列するものとした。

Fig. 5 Calculated homogenized coefficient of thermal expansion by the homogenization method.

なお、このような熱環境下における機能材料として、熱応力緩和型傾斜機能材料に関する研究がこれまで多数なされてきた^{16~19)}。これらの研究では、金属とセラミックス粉末の配合比を板厚方向に変化させ焼結により材料を作製していたが、この場合は単純な複合則や等価介在物理論による設計が可能である。しかし、より一般的な複雑なマイクロ構造を扱うにはこれらの理論は不十分であるため、本研究では均質化法を用いる。特に多孔質体については、均質化法以外の手法では上下限を予測できる程度であった¹⁵⁾。また、最適設計を行う手順の中で材料構成を変えるたびに、温度分布とひずみ・応力分布を計算する、すなわち熱伝導解析と熱変形・応力解析を行う必要がある。したがって、一般的なマイクロマクロ連成を考慮した設計は、計算負荷が大きくなるという問題点があるが、本研究で提案する設計手法では、以下のようにマイクロ解析とマクロ解析を分離することにより、計算負荷を軽減している。

4.2 均質化法によるマイクロマクロ相関性の予測

Fig. 4のマイクロ構造に対し、設計変数である二つの寸法を変化させた場合の均質化された熱伝導率と線膨張係数を計算し、マイクロマクロ相関性を表す材料データベースとする。計算結果の内、線膨張係数の結果のみをFig. 5に示す。なお、素材の物性値としてエポキシ樹脂の値を用いた。図中の寸法は、式(1)により定義される正規化されたミクロスケールでの値を示している。前述の通り、ユニットセルの体積を一定とした場合に二つの設計変数となる寸法がとり得る寸法の範囲で22通りの組合せについてすべて均質化法による解析を行った。寸法の変化に対し、マクロな線膨張係数の変化が非線形であることがわかり、複雑なマイクロ構造の設計の難しさ

がわかる。逆に、このようにマイクロ-マクロの相関に非線形性があるような場合には、発現される機能の幅が広くなったり、新しい機能の発現が期待できるとも言える。この点は、これまでの体積含有率を変数とした複合則に基づく傾斜機能材料の設計とは違う。

4.3 離散モデルによる最適設計

前述のように板厚方向に50個傾斜されて並んでいるとしたが、Fig. 6に示すようにその内の10個のみを遺伝的アルゴリズムにより決定することにする。今回は板厚方向のみの物理量の変化を考えればよいように設定したので1次元問題となるが、将来的には2次元的に傾斜した構造へと発展させることも可能である。既に計算済の非線形材料データベースから、熱伝導率と線膨張係数の組を選択する。

目的関数は前述の通り板厚方向の熱ひずみの分散とした。マイクロ構造を更新するたびに温度場、熱ひずみ場を計算し直す必要があるが、1次元問題であるので、理論的に温度場、熱ひずみ場を計算することができる。板厚方向を z とし、板厚 $l=50$ mm、10個に離散化した板厚方向の領域の番号を $n(1, 2, \dots, 10)$ とし、板の上下面の温度をそれぞれ373 K、298 Kとし、温度差 $\Delta T=75$ Kとする。データベース化されている均質化された熱伝導率 κ_n^H を用い、板厚方向の温度勾配が

$$\frac{dT}{dz} = -\frac{\Delta T}{\kappa_n^H l \sum_{n=1}^{10} \frac{1}{\kappa_n^H}} \quad (18)$$

のように解析的に求められ、これを積分すれば板厚方向の温度分布が得られる。さらにデータベース化されている均質化された線膨張係数 α_n^H を用いれば、板厚方向の熱ひずみ分布が得られる。これより、難解なマイクロマクロ連成問題も、次式に示すように熱ひずみの分散、

Fig. 6 Discretized modeling.

$V_{\text{thermal_strain}}$ というスカラ値を目的関数とするだけで、容易に最適設計することができる。

$$V_{\text{thermal_strain}} = \frac{1}{10} \sum_{n=1}^{10} (\epsilon_n^t - \bar{\epsilon}^t)^2 \quad (19)$$

ここに ϵ_n^t は領域 n の中央位置における熱ひずみ、 $\bar{\epsilon}^t$ は板厚方向の熱ひずみの平均を表す。式(18)、(19)の詳細は既報²⁰⁾を参照されたい。最終的に、最適化問題は以下のように記述できる。

$$\begin{aligned} &\text{Find} \quad \kappa_n^H, \alpha_n^H (n=1, 2, \dots, 10) \\ &\text{to minimize} \quad V_{\text{thermal_strain}} \end{aligned} \quad (20)$$

遺伝的アルゴリズムではfitnessとよばれる関数の最大化を行うため、fitness関数は熱ひずみの分散の逆数とした。また、遺伝的アルゴリズムにおけるコード化では、上述の22通りのマイクロ構造に0~21の番号をつけている。なお、個体数などのパラメータの設定については既報²⁰⁾に詳細に報告済みである。

得られた結果をFig. 7に示す。この時、Fig. 8に示すように、線膨張係数は高温側の面に近い側 (Fig. 7中の⑩) で低くなったが、熱伝導率との組合せとして決定されるので、温度場の分布はFig. 9に示す通り複雑になった。Fig. 9には参考として、単一の均質マイクロ構造からなる場合の線形な温度場をあわせて示している。熱ひ

Fig. 7 Designed discretized graded microstructures.

Fig. 8 Distribution of homogenized properties in the thickness direction.

Fig. 9 Temperature distribution in the thickness direction.

ずみ場は板厚方向にほぼ一様とすることができたので図は省略するが、検証のため行った有限要素解析によっても熱そりが抑制できたことを確認した。

4.4 CADによる連続的な傾斜マイクロ構造の設計

離散的に決定されたマイクロ構造群の間を補間し連続的な50個の傾斜マイクロ構造を完成させるために、フィーチャベースの3次元CADを用いた。Fig. 10に結果を示す。ここではマイクロ構造の寸法を線形補間して滑らかな変化を表現した。なお、Fig. 10の左側には傾斜マイクロ構造の4カ所について拡大図を示しているが、これらとFig. 7の離散化モデルとの対応は、下から、①の領域内、②から③への中間、④から⑤への中間、および、⑨の領域内、である。Fig. 7の計算された寸法をもつマイクロ構造は各領域の中央位置に一つだけ存在している。Fig. 7の離散モデルでは隣り合うマイクロ構造の違いが大きく見えた部位でも、Fig. 10に示すように連続モデル

Fig. 10 Finally designed continuously graded microstructures.

に還元されていることがわかる。

逆に言えば、Fig. 10のような傾斜マイクロ構造よりなる構造体は、本設計の逆の手順をたどり、均質化モデルとしてマクロ特性を予測することができる。

4.5 光造形による実体モデルの作成

Fig. 11に光造形法により作成した実体モデルの写真を示す。ソフト的にモデルの拡大・縮小が自在であり種々の寸法の実体モデルを作ることができ、手にとって見るのに便利であり、計算結果の3次元プロットであると言える。提案する設計手法はCADで最終的に完成させるものであるため、光造形による実体モデル作成は簡単かつ短時間に行うことができる。実体モデルを使って所望の機能が発現されるかどうかの機能評価が事前に行えるようにも発展できると考える。

5. 結 言

均質化法と遺伝的アルゴリズムを用いた数値解析手法とフィーチャベースの3次元CADを用いることにより、複雑な傾斜マイクロ構造の設計が可能となった。さらに光造形法により実体モデルを作成するという統合設計

Fig. 11 Solid model of graded microstructures.

システムを構築した。これは、任意のマイクロ構造が扱え、要求されるマクロ機能の種類によらない汎用的な設計手法である。特に、多数の傾斜マイクロ構造を、まず離散的ないくつかのマイクロ構造を最適設計した後に、CADにより連続的な傾斜マイクロ構造へと完成させるという点に特徴がある。例題として、熱伝導率と線膨張係数に注目し、温度場と熱ひずみ場の両者を設計対象とした熱変形問題を取り上げ、提案する設計手法の詳細と有効性を示した。今後、発泡材など実際的な材料設計への適用が期待される。

光造形による実体モデル作成にはデンケンエンジニアリング(株)のご協力を頂いたので深謝申し上げます。また、本研究は(財)倉田記念科学技術振興会の助成を受け実施したものであることを記し感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 大塚正久：セル構造体，内田老鶴圃，東京 (1993)。
- 2) 日本機械学会編：バイオメカニクス概説，オーム社，東京 (1993)。
- 3) 日本機械学会編：生体力学，オーム社，東京 (1991)。
- 4) J.L. Lions : *Some Methods in the Mathematical Analysis of Systems and Their Control*, Science Press, Beijing (1981)。
- 5) E. Sanchez-Palencia : *Non-homogeneous Media and Vibration Theory*, Springer-Verlag, Berlin (1980)。
- 6) J.M. Guedes & N. Kikuchi : *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.*, **83** (1990), 143-198。
- 7) N. Takano, Y. Uetsuji, Y. Kashiwagi & M. Zako : *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, **7**, 2 (1999), 207-231。
- 8) N. Takano, K. Terada, M. Zako & T. Yoshioka : Extended Abstracts of the First Asian-Australasian Conference on Composite Materials, Osaka (1998), Paper No. 219。
- 9) 高野直樹，座古 勝：計算工学，**1**, 4 (1996), 212-219。
- 10) O. Sigmund : *J. Intelligent Material Systems and Structures*, **5**, 6 (1994), 736-742。
- 11) O. Sigmund & S. Torquato : *J. Mech. Phys. Solids*, **45**, 6 (1997), 1037-1067。
- 12) E.C. Nelli Silva, J.S. Ono Fonseca & N. Kikuchi : *Computational Mechanics*, **19** (1997), 397-410。
- 13) D.E. Goldberg : *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison Wesley (1989)。
- 14) R. Tanase : Proc. Third International Conference on Genetic Algorithms, ed. by J.D. Schaffer, Morgan Kaufmann (1989), pp. 434-439。
- 15) N.C. Hilyard & A. Cunningham : *Low Density Cellular Plastics*, Chapman & Hall, London (1994)。
- 16) 未踏科学技術協会・傾斜機能材料研究会編：傾斜機能材料，工業調査会，東京 (1993)。
- 17) 日本学術振興会先端材料技術第156委員会編：材料システム学，共立出版，東京 (1997)。
- 18) 谷川義信，河村隆介：日本機械学会材料力学部門講演会講演論文集(A)，No. 940-37 (1994)，78-79。
- 19) 大多尾義弘，谷川義信：日本機械学会第72期通常総会講演会講演論文集(II)，No.95-1 (1995)，392-393。
- 20) N. Takano, M. Zako, M. Nakagawa & N. Takeda : *Materials Science Research International*, **4**, 3 (1998), 153-158。