

# 構造形態解析手法を用いた建築デザイン

広島大学工学部（現 東京大学工学系研究科） 藤井大地

## 1. はじめに

建築を目指してくる学生の多くは、いわゆる構造設計で行われているような計画された建築物の部材の大きさや鉄筋の入れ方などを設計し、その安全性を構造計算によって実証するような仕事を夢みているのではなく、いわゆる建築家と呼ばれる人が設計するような人々に感動を与える建築物を設計したいと夢みている。しかし、筆者も含め大概の学生は、自分の才能に見切りを付けて、建築家になることを諦め、半分仕方なしに構造分野に入りこんでくる。したがって、もし大学において建築の構造分野がいわゆるデザインを行う建築と分離されたらどれだけの学生がその学科に入ってくるだろうか？ 筆者の想像するところ、とたんに土木や船舶・海洋学科等が抱えている問題が建築構造にも及ぶと考えられる。

したがって、建築の構造分野においてこれからの時代に必要なのは、単なる構造技術者の育成ではなく、構造設計家（Organic architect）<sup>1)</sup>の育成ではないだろうか。構造力学や計算力学を武器に、空間デザインや、柱、梁、インテリア等の形状デザインを行っていく分野があつてこそ、建築構造に魅力や夢を与えることができるのではないだろうか。

本研究は、以上のような動機から出発している。本報告では、平成9年度に建築鋼構造研究助成金を頂いてから、筆者が行った研究を順を追って紹介する。

## 2. 高層ビルの形態解析

まず、構造設計者が、単に柱や梁等の断面設計から一步踏み出すには、構造物や部材の形を設計するツールが必要であると思われる。筆者は、平成9年当時、高層ビルを薄肉はりに置換して解析する研究を行っていたので、まず、この研究を応用して高層ビルの最適形状を求めることからはじめてみた。また、単に形状だけではなく、ビル全体の剛性の分布も設計対象としてみた。図1は、純ラーメン構造の高層ビルの一構面を歪エネルギーの等価な板に置換し、これを薄肉はり理論にもとづく方法を用いて、体積一定の条件下で剛性の最大化を目的とした形状と板厚分布の最適化を行った結果を示している。外力は、固定・積載鉛直荷重とAi分布の水平荷重を加えている。なお、最適解では、

板厚の大きさの比をドット数で表示している。最適形状は、デザイン的なインパクトを与えるものではないが、図2に示すガウディーのサグラダ・ファミリアの塔形状に似通っているようにも見える。

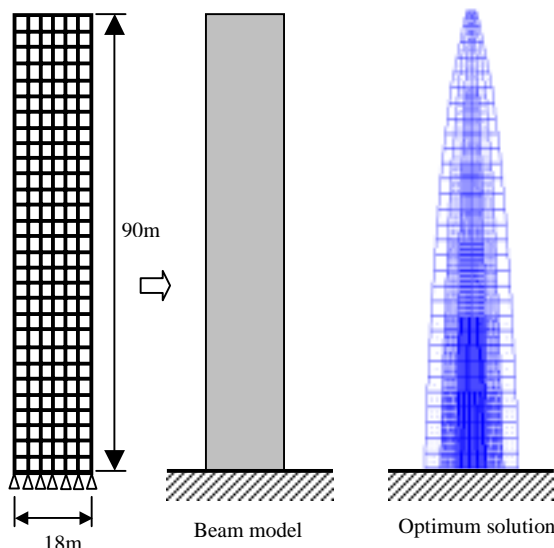


図1 高層ビルの形状と剛性分布の最適化<sup>3)</sup>



図2 サグラダ・ファミリア（アントニオ・ガウディー）

## 3. 連続体構造物の位相最適化

しかしながら、図1に示すような最適化手法では、図2に示すような迫力のある形態創生は望めそうにない。そこで、このような形態創生を可能にするものは、連続体の位相最適化ではないかと考え、近年欧米で盛んに研究されている位相最適化について研究をはじめ

た。幸いにも、本研究助成金をもって、平成 10 年 4 月から 1 年間、この分野の先駆者であるミシガン大学の菊池昇教授のもとで研究を行う機会に恵まれ、連続体の位相最適化について多くのことを学ぶことができた。これらの成果については、本年日本建築学会から出版予定の『構造形態解析の応用』にまとめているので参考にして頂きたい。ここではその一部を紹介する。

連続体構造物の位相最適化は、従来非常に難しいものとされていた。例えば、図 3 に示すように、最適化の過程で、最初 1 つだった内部の穴が二つになり、また三つになるというような位相が変化問題を有限要素法で解こうとすると、メッシュは常に切り直す必要があるし、また、穴の数が変わった場合の感度係数の計算が困難である。このような位相の最適化を、従来とまったく異なる発想で行おうとしたのが、数学者の Murat and Tartar であり、その考え方を工学の世界に橋渡ししたのが Bendsøe and Kikuchi<sup>4)</sup>である。

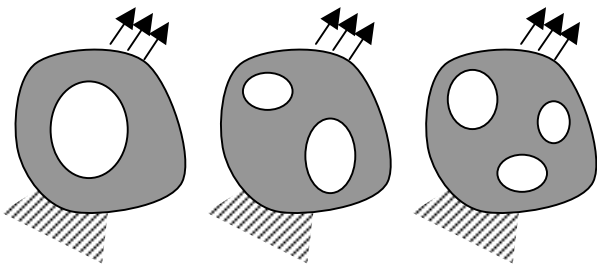


図 3 連続体構造物の位相最適化

菊池らの考え方を端的に言うと、従来の形状・位相の最適化は、境界の形状を変化させるものであったが、新しい考え方は、設計対象を包含する領域を考え、その領域内の材料の有無を設計変数とするものである。すなわち、そこに材料があれば 1、なければ 0 というような関数を導入して最適化を行えば、図 3 のように穴の数がいくら増えても容易に解くことができる。しかし、一般に材料の有無 (0 と 1) を定める離散的な問題は、微分不可能問題となり、従来の感度係数を利用する最適化手法を用いることができない。そこで導入されたのが均質化法の考え方である。すなわち、材料が 0 の状態をミクロ的に穴が大きく空いた多孔質材料と考え、また、材料が 1 の状態をミクロ的に穴が詰まった状態と考えて、複合材料の解析分野で発展してきた均質化法の理論を適用すれば、材料の有無問題を微分可能問題に変換することができる。

そこで、菊池らは、図 4 に示すような長方形の穴を有する多孔質材料を考え、この穴の大きさと角度を設

計変数とする最適化問題を定式化し、これによって連続体構造物の最適な形状と位相を同時に求める方法を提案した。この方法は均質化設計法 (Homogenization Design Method, HDM) と呼ばれ、機械系の分野では、すでに機械部品等の形状・位相設計に実際に用いられている。

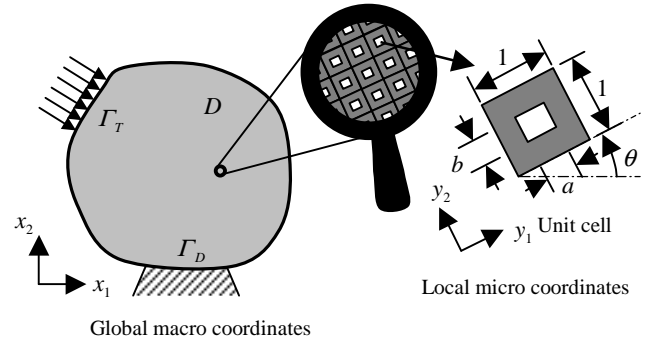


図 4 均質化設計法による位相最適化

#### 4. シェル構造の位相最適化

ところで、建築構造物で最も構造美を表現できるのはシェル構造であると思われる。そこで、ミシガン大学では、まず、シェル構造の曲面形状とシェル面内の位相を同時に最適化する研究を行った。

図 5 ~ 図 7 は、その解析例を示したものである<sup>6)</sup>。図 5 は、解析モデルを示し、図 6 は、曲面形状は変化させずに面内の最適位相を求めたものである。また、図 7 は、曲面形状と面内位相を同時に最適化したものである。図より、どちらも鮮明な位相が得られていることがわかる。実は、このような位相が求まるまでには、かなりの悪戦苦闘があった。この悪戦苦闘の成果は文献 5) にまとめているが、綺麗なトポロジーを得るためには、それなりの技術が必要となる。

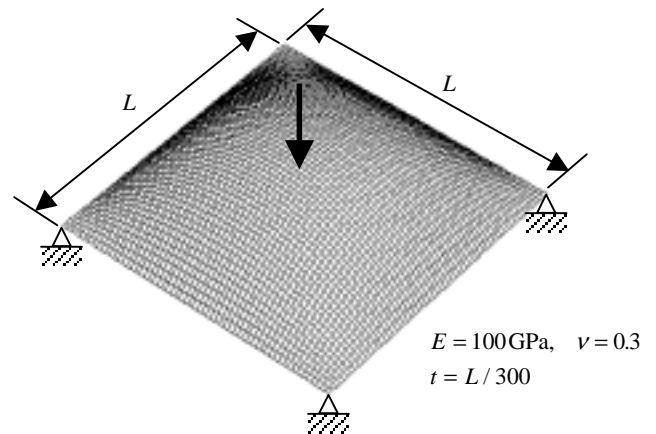


図 5 シェル構造の拡張された解析領域と諸条件



図6 シェル構造の位相最適化の結果(曲面形状は初期形状に固定)



図7 シェル構造の位相最適化の結果(曲面形状も同時に最適化)

しかし、意外であったことは、この方法は従来の最小重量設計問題に比較して非常に計算効率が良い。これは、感度係数の計算にその秘密がある。実は、菊池らが最適化問題の目的関数に用いている外力仕事量(コンプライアンス:剛性最大化の指標)の感度係数は非常に高速に計算できるのである(文献5)参照。

このようなツールを用いれば、境界条件や荷重条件を変えることで、様々な形態を作り出すことができる。したがって、このようなツールは学生のデザイン感覚を養うことに利用できると思われる。

### 5. グランドストラクチャー法による位相最適化

ところで、実際の建築構造物の多くは、柱、梁、ブレース等の一次元部材で構成されている。このため、図6,7のような形態は、さらに一次元部材に置き直す必要がある。したがって、建築分野では、最初から一次元部材を用いる最適化手法の適用も考えられる。

図8~10は、グランドストラクチャー法と呼ばれる解析法によって、ビル構面、およびシェル構造の位相最適化を行った例を示している<sup>7)</sup>。この方法は、節点の配置を与え、可能性のある節点間の要素をすべて考えて、要素断面積を設計変数として不必要な要素を除いてゆく方法である。この方法は、以前から研究され

ていた方法であるが、最小重量設計問題として定式化すると感度係数の計算に膨大な時間がかかるため、最近では、菊池らのように重量制約下でコンプライアンスを最小化する問題として解かれるようになった。さらに、筆者らは、従来トラス構造として解かれていたこの方法を、剛接、半剛接も取り扱えるように拡張した。このような方法も形態創成のツールとして利用できると思われる。

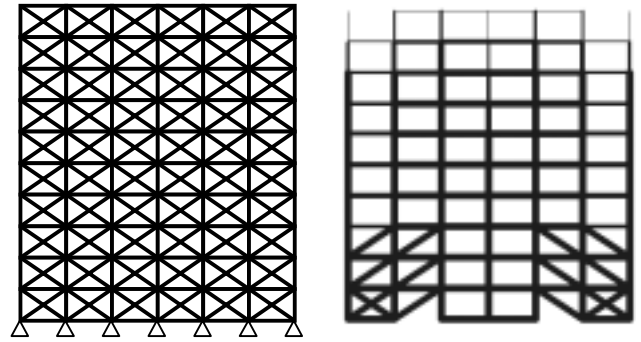


図8 グランドストラクチャー法に位相最適化解析例(1)

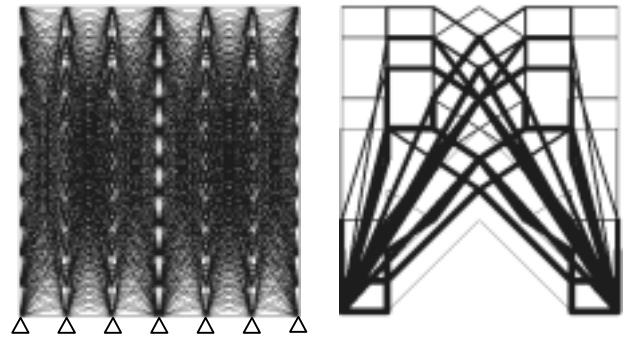


図9 グランドストラクチャー法に位相最適化解析例(2)

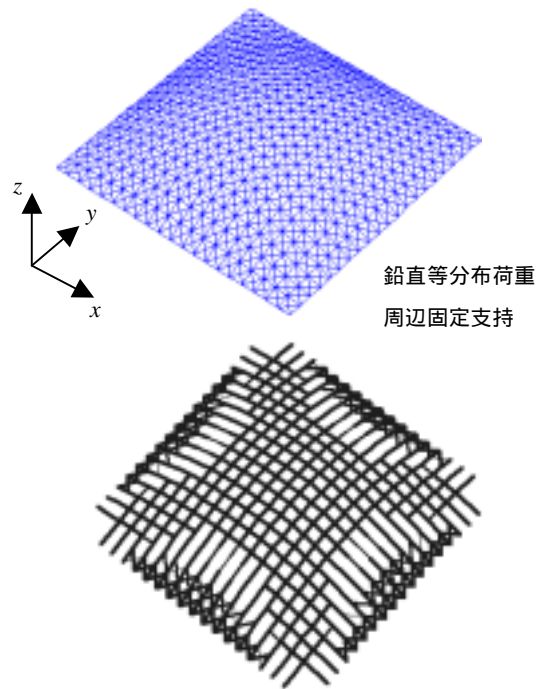


図10 グランドストラクチャー法に位相最適化解析例(3)

## 6. 3次元連続体の位相最適化

しかし、図2に示すようなガウディーのサグラダ・ファミリアのような形態を創生するには、以上のような手法の他に3次元要素を用いた位相最適化手法が必要である。また、相当に細かいメッシュ分割を行わなければ、滑らかな位相形状を得ることはできない。

図11,12は、1/4領域で、144000要素の要素密度を設計変数とした解析モデルと解析結果を示している<sup>8)</sup>。本解析の計算時間は、CPUがIntel Celeron 466MHzの通常のパソコンで約37時間であった。実は、この解析では、計算効率を上げるために、様々な工夫がなされている。まず、設計変数の多くなる均質化法の代わりに、要素密度を設計変数とする密度法を用い、連立方程式の解法には、反復解法である前処理付共役勾配法を用いている。また、メモリーを節約するために、全体剛性マトリックスは作らずに、ベクトル上で重ね合わせを行うElement by Element法を用いている。また、最適化手法には、収束の速い最適性規準法を用いている等である。

このような方法を用いれば、コンピュータの性能の向上に伴って、図2のような位相を求めることも夢ではない。

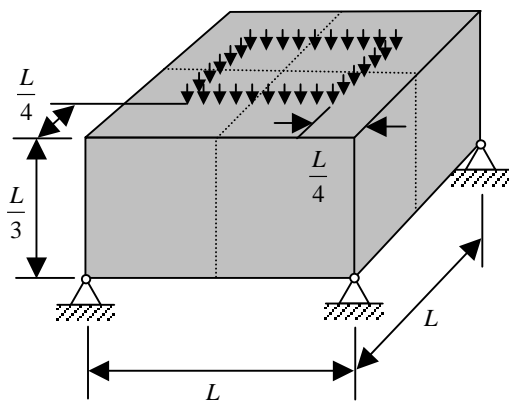


図11 3次元位相最適化解析モデル



図12 3次元位相最適化解析結果

## 7. まとめ

以上、本研究助成金を頂いてから現在までの研究の流れをまとめてみた。現時点では、ツールの開発に終始しており、このようなツールで、実際に建築家が設計するような形態を創成できるかどうかの検証はまだ行っていない。しかし、このような構造解析の手法により、建築物の形態の創成ができることには非常に魅力があり、これまでの建築構造学科になかった新しい分野になることを期待している。

最後に、本研究助成金をもとにした研究成果として、この他にも文献9)~11)もまとめることができた。ここに、記して深く感謝する次第である。

### 参考文献

- 1) 木村俊彦著：構造設計とは、鹿島出版会、1991
- 2) 半谷裕彦分担執筆：構造形態の解析と創生、日本建築学会、pp.1-5、1998
- 3) 藤井大地、藤谷義信：薄肉はり置換法による高層ビルの形状および剛性分布の最適化に関する研究、日本建築学会構造系論文集、No.510、pp.99-106、1998
- 4) Bendsoe, M.P. and Kikuchi, N.: Generating Optimal Topologies in Structural Design using a Homogenization Method, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, **71**, pp.197-224, 1988
- 5) 藤井大地、菊池昇：SLP法を用いたトポロジー最適化における数値的不安定の改善、日本建築学会構造系論文集、No.521、pp.65-72、1999.7
- 6) 藤井大地、菊池昇：均質化法によるシェル構造の形状とトポロジーの同時最適化、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-1、pp.383-384、1999
- 7) 藤井大地、松本慎也、藤谷義信、菊池昇：グランドストラクチャー法による骨組構造物の位相最適化、日本建築学会構造工学論文集、Vol.46B、2000
- 8) 藤井大地、鈴木克幸、大坪英臣：ボクセル有限要素法を用いた構造物の位相最適化、日本計算工学会論文集、Vol.2、2000（投稿中）
- 9) 藤井大地、江島晋、菊池昇：均質化設計法を用いた弾性変形機構の位相最適化、日本建築学会構造系論文集、No.528、pp.99-105、1999
- 10) D. Fujii, N. Kikuchi: Improvement of numerical instabilities in topology optimization using the SLP method, Structural Optimization 2000 (印刷中)
- 11) 藤井大地、藤谷義信、菊池昇：均質化法による複合材料ミクロ構造の最適設計、第24回複合材料シンポジウム講演要旨集、pp.85-86、1999（現在、同内容のfull paperをInternational Journal for Numerical Methods in Engineeringに投稿中）