

# IESO 法を用いた建築構造デザインの創生

## CREATION OF ARCHITECTURAL STRUCTURE DESIGN USING IESO METHOD

渡部桃子\*

*Momoko WATANABE*

Recently, buildings are starting to be constructed by 3D printer. In the near future, if such technology progress, buildings with various forms will be developed. On the other hand, topology optimization method has high compatibility with digital fabrication technology, and this method is adaptive for creating new morphology of buildings. Therefore, in this paper, we try to create building structures using topology optimization method. Improved Evolutionary Structural Optimization (IESO) method is used for the topology optimization. In this paper, we create a design competition plan using IESO method, and the application possibility to building design is verified.

**Keywords** : *Topology optimization, ESO method, Computational Morphogenesis, Architectural design, Design competition*

位相最適化, ESO 法, 構造形態創生, 建築デザイン, 設計コンペティション

### 1. はじめに

近年、解析技術や生産技術等が発達し、様々な形態の建築物が造られるようになってきている。その中でも、TOD'S 表参道ビルやせんだいメディアテークのように生物を模倣した建築デザインが注目されている。また、植物の優れた環境適応能力を模倣する技術はバイオミメティクスと呼ばれ、工学分野への応用が進められている<sup>1)2)</sup>。一方、位相最適化手法は、骨や樹木などの自然形態を模倣できる形態創生技術の一つとして注目されている<sup>3)</sup>。このような背景から、新内ら<sup>4)5)</sup>は、位相最適化手法を建築分野のバイオミメティクスに応用して、建築物の構造形態を創生する方法を提案している。一般に樹木等の植物は、種が落ちた環境に応じて根を張り、生き抜くために最適な形態を作り上げる。建築物の構造デザインを考える上で、このような植物の自然形態は重要なヒントになりうる。新内ら<sup>4)5)</sup>が提案している位相最適化手法は、与えられた設計領域の中で、力学的に不要と思われる部分を削り取ることで形態を創生するもので、得られる形態は樹木の枝や根を連想させるものとなる。

一方、このような方法で創生された構造デザインが、実際の建築物として成立するためには、意匠設計者がその創生に関わり、意匠設計者の感性がその構造デザインに反映されることが必要である<sup>6)</sup>。

そこで本研究では、意匠設計者の観点からこのような形態創生ツールを使用し、いくつかのコンペティション設計案を作成することで、意匠設計者の設計ツールとしての有効性を検討する。

本論文では、このような試みの一例として、空間制約条件、荷重条件、支持条件の与え方によって、意匠設計者の感性を構造デザインに反映させることを考える。本論文で用いる位相最適化手法では、直方体の固定設計領域をボクセル（細かい直方体要素）で分割し、各ボクセル密度の有無で構造形態を表現するため、あらかじめ密度が0に固定された空間を設定することは容易である。したがって、意匠設計者が、設計領域内に独自の空間制約を与えることで、意匠設計者の感性を反映させた構造形態を生み出すことが可能である。また、本手法で得られる形態は、鉛直荷重と水平荷重のバランスによっても変化する。構造設計者からすれば、荷重の与え方は安全性の観点からある一定のルールのもとに決められるが、意匠設計者からすれば、荷重の与え方もデザインを決める上での一つのパラメータとなりえる。さらに、文献5)にも示しているとおり、本手法では基礎（支持点）の配置によっても多様な形態が得られる。また、基礎の形態はフラットである必要はなく、傾斜した基礎から構造形態を創生することも可能である。そこで本論文では、このような上部

構造の支持条件の操作についても、意匠設計者の感性を反映させるものとなりえることを検証する。

以下、本論文2章では、本論文で用いる IESO 法の概要を示す。3章では、IESO 法を用いて作成した傾斜地盤上の建築物の構造形態を示す。4章では、IESO 法を用いて作成した設計コンペティション案を示す。5章では、3章、4章の応用的な建築デザイン例を示す。最終6章では、以上をまとめ結論を導く。

## 2. IESO 法の概要

本論文に用いる位相最適化手法では、物体領域を包含する直方体固定設計領域（各辺の長さ： $L_x, L_y, L_z$ ）を考え、これを均等な直方体要素（voxel）で分割する（各辺の有限要素分割数： $n_x, n_y, n_z$ ）。そして、実際の物体領域はボクセルの材料密度の有無（0/1）によって与える。この時、直方体要素（voxel 要素）の各辺の長さ  $l_x, l_y, l_z$  は、 $l_x = L_x/n_x$ 、 $l_y = L_y/n_y$ 、 $l_z = L_z/n_z$  となる。

ボクセルを用いた応力解析の方法（voxel 有限要素法）は、文献9)に示すものにしたがう。また、IESO 法による位相最適化では、ボクセル解析のメリットを生かすため、最適化の過程でリメッシュは行わず、存在要素の密度を1、除去要素の密度を0とすることで各ステップの物体領域を定義する。

IESO 法では、要素除去に関しては、拡張 ESO 法<sup>7)</sup>のルールを用いる。ただし、要素除去の指標として BESO 法<sup>8)</sup>で用いられているひずみエネルギー感度を用いる。したがって、要素除去のルールは次式となる。

$$\rho_i = 0 \quad \text{if} \quad \alpha_i < X_{cr} \quad ; i=1, \dots, N_L \quad (1)$$

ここに、 $\rho_i$ 、 $\alpha_i$  は  $i$  番目要素の密度（0 or 1）とひずみエネルギー<sup>9)</sup>、 $N_L$  は残存要素数、 $X_{cr}$  は閾値で、次式で定義される。

$$X_{cr} = \alpha_{av} - \eta \cdot \phi \quad (2)$$

ただし、 $\alpha_{av}$  と  $\phi$  は残存要素のひずみエネルギーの平均値と偏差平均であり、次式から計算される。

$$\alpha_{av} = \frac{1}{N_L} \sum_{i=1}^{N_L} \alpha_i \quad \phi = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_L} (\alpha_i - \alpha_{av})^2}{N_L}} \quad (3)$$

ここに、 $\eta$  は要素の除去量を制御する制御変数である。ただし、IESO 法では、BESO 法と同様に各ステップの要素除去率を与え、近似的にこの要素除去率となる  $\eta$  をプログラム内で自動計算する。すなわち、この除去率を  $\lambda$  とすると、IESO 法の第  $k$  ステップの目標除去要素数  $N_r^{(k)}$  は、次式で計算される。

$$N_r^{(k)} = \begin{cases} \lambda N_L^{(k-1)} & \text{if } (1-\lambda)N_L^{(k-1)} \geq \bar{N}_L \\ N_L^{(k-1)} - \bar{N}_L & \text{if } (1-\lambda)N_L^{(k-1)} < \bar{N}_L \end{cases} \quad (4)$$

ここに、 $N_L^{(k-1)}$  は  $(k-1)$  ステップの残存要素数、 $\bar{N}_L$  は残存要素数の制約値（下限値）である。次に、(1)式で除去される要素数が、(4)式の  $N_r^{(k)}$  に近くなる  $\eta^{(k)}$ （第  $k$  ステップ(2)式の  $\eta$ ）をプログラム内で自動計算する<sup>5)</sup>。

一方、(1)式の  $\alpha_i$  は、次のように求められる<sup>5,8)</sup>。まず、次式により要素のひずみエネルギー  $\alpha_i^e$  が計算される。

$$\alpha_i^e = (1/2) \mathbf{d}_i^T \mathbf{K}_i \mathbf{d}_i \quad (5)$$

ただし、 $\mathbf{K}_i, \mathbf{d}_i$  は要素  $i$  の剛性マトリクスと節点変位ベクトルを表す。次に次式により節点  $j$  のひずみエネルギーが計算される。

$$\alpha_j^n = \left( \sum_{i=1}^{M^n} \alpha_i^e \right) / M^e \quad (6)$$

ここに、 $\alpha_j^n$  は節点  $j$  のひずみエネルギー、 $M^e$  は節点  $j$  に繋がる要素数を表す。そして、(1)式の  $\alpha_i$  は次式から計算される。

$$\alpha_i = \left( \sum_{j=1}^{M^n} w(r_{ij}) \alpha_j^n \right) / \sum_{j=1}^{M^n} w(r_{ij}) \quad (7)$$

ただし、 $M^n$  は要素  $i$  の要素中心から影響半径  $r_{\min}$  の球体内に含まれる節点数、 $r_{ij}$  は要素  $i$  の中心から節点  $j$  までの距離、 $w(r_{ij})$  は要素中心からの距離に比例する重みで、次式で定義される。

$$w(r_{ij}) = r_{\min} - r_{ij} \quad (j=1, 2, \dots, M^n) \quad (8)$$

以上の解析では、有限要素解析に必要なデータとして、固定設計領域の大きさ ( $L_x, L_y, L_z$ )、分割数 ( $n_x, n_y, n_z$ )、ヤング係数、ポアソン比、境界条件、荷重条件がある。また、最適化計算に必要なデータとして、(8)式の影響半径  $r_{\min}$ （実際には、 $r_{\min} = b_r \cdot l_x$  として  $l_x$  の倍数  $b_r$ （影響半径倍率）で与える）、(4)式の残存要素数の下限値  $\bar{N}_L$ （実際には、目標体積比  $\bar{V}_r = \bar{N}_L / (n_x \cdot n_y \cdot n_z)$  で与える）、除去率  $\lambda$ （残存要素数に対する1ステップの除去率）がある。固定設計領域内に空間や固定領域を設定する場合は、設計対象から除外する要素の番号・密度情報（0/1）を入力する必要がある。また、本解析法では、除去率  $\lambda$  を 0.05~0.1 程度で解析した方がシンプルで自然な形態が得られる。しかし、収束解はやや荒削り的な部分が見られる場合があるため、得られた解の仕上を行うアルゴリズムを付加している<sup>5)</sup>。この仕上アルゴリズムでは、まず、IESO 法の収束解を読み込み、この解から CA 法のルール<sup>9)</sup>にもとづいて全要素の5%程度の要素を付加し、今度は、除去率を0.01程度として再び IESO 法で目的の要素数まで要素を除去する<sup>5)</sup>。なお、この仕上アルゴリズムでは、位相の変化はほとんど見られない。

## 3. 傾斜地に立つ建築物の構造形態スタディ

まず、IESO 法を用いて、設計コンペティション等でよく見られる傾斜地に建つ建物の構造形態について解析を行った。ここでは、Fig.1 に示すような立方体の固定設計領域（要素分割数：100×100×100）に傾斜地盤と床スラブおよび屋根スラブを設定し、傾斜地盤から床スラブおよび屋根スラブを支える構造形態の創生を試みた。ただし、各スラブには鉛直等分布荷重を与え、傾斜角度が大きいものは片持スラブとして解析を行った。

Fig.2 は、解析結果（透視図と側面図と床スラブの下と床スラブと屋根スラブの間の断面）を示す。ただし、最適化のパラメータである目標体積比  $\bar{V}_r$  は図中に示し、影響半径倍率  $b_r$  は 3.0、除去率  $\lambda$  は 0.05 としている。なお、全ての傾斜地盤の空間領域（地盤と床スラブを除く空間）において設計対象要素の最終残存要素数（構造体の要素数）を 12600 と統一するよう目標体積比  $\bar{V}_r$  をそれぞれに与えている。Fig.2 からわかるように、どの場合も、自然の樹木等がスラブを支えるような有機的な構造形態が得られることがわかる。

また、Fig.4は、傾斜30°の場合の床スラブの下と床スラブと屋根スラブの間の断面を示したものであるが、基礎と床スラブの間は、壁のような柱になっているのに対して、床スラブと屋根スラブの間には、人が通れる適度な空間が確保されている。これは、樹木の下部が太く上部で枝分かれしていく形態に類似しており興味深い。

Fig.3は、地盤傾斜30°の結果を実際の傾斜地にレイアウトしたイメージを示している。このように、IESO法で得られた形態は、自然の風景によく溶け込んでいるように思われる。

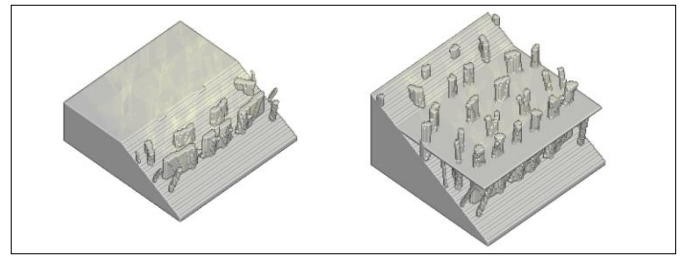


Fig.4 傾斜30°の解析結果の各スラブ下の断面図

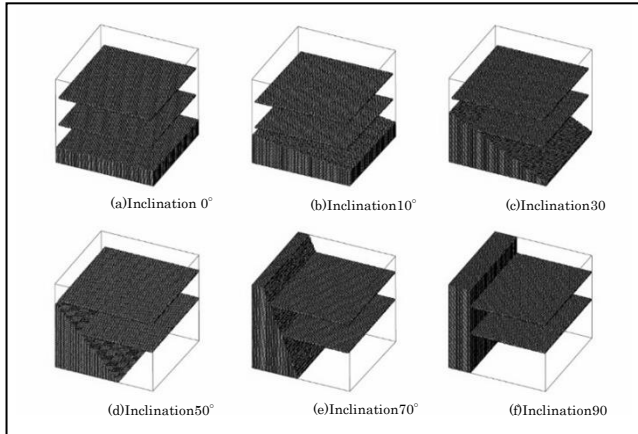


Fig.1 解析を行う傾斜地盤の種類

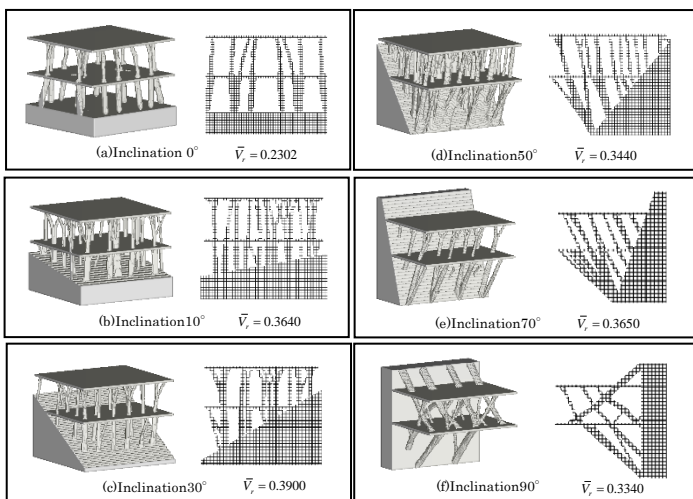


Fig.2 IESO法を使用した解析結果



Fig.3 傾斜地に解析結果を用いたイメージパース

#### 4. 固定設計領域と水平力と支持位置を用いたコンペティションの応用

次に、IESO法による構造形態創生法を実際の設計アイデアコンペティションに用いた例を示す。設計コンペティションは、2017年の日本建築学会設計競技で、テーマは「地域の素材から立ち現れる建築」である。筆者は、地域として広島を選択し、敷地をFig.5に示す広島県広島市中区の旧市民球場とした。そして、約70年前の原子力爆弾投下から復興を成しえた人々の思いを引き継ぐものとして南北につながるアーティストや建築家たちが残した軸線を意識した作品にすること、戦後復興を成し遂げた人々の生き様を、樹木の成長で表現し、自然の力が人工的なスラブを押し上げるようなイメージの建物にすることなどをコンセプトとして設定した。

以上のコンセプトのもとに、Fig.6に示すようなダイアグラムを考えた。まず、建物1階は、通り抜けが可能な通路とし、歩行者と自転車使用者の動線を分けた。また、2階以上は、様々なイベントが同時開催できるような空間とし、互いのイベントを見渡せるようなスラブの配置を設定した。また、Fig.7は、プランの立面図を示すが、エレベータや吹き抜けの縦動線も確保している。

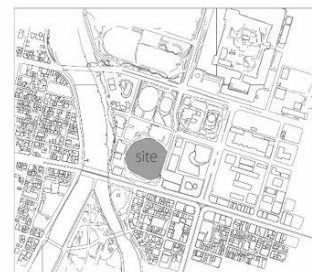


Fig.5 敷地計画

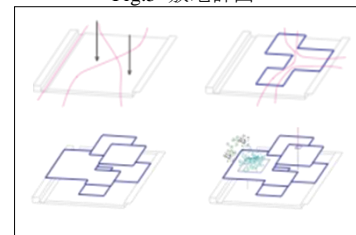


Fig.6 ダイアグラム

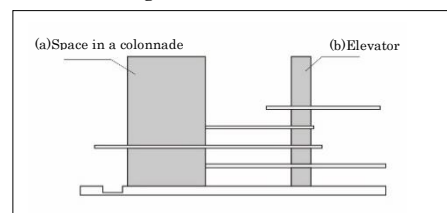


Fig.7 断面図

以上の計画のもとに、直方体の固定設計領域（要素分割数：100×100×50）を設定し、基礎スラブおよび各床スラブを密度1、自転車用通路、吹き抜け、エレベータ空間を密度0に固定した。

まず、Fig.9とFig.10は、Fig.8に示すように、1階柱脚の支持位置を規定しない場合と規定する場合のスタディの結果を示したものである。ただし、Fig.8の黒塗りの部分は空間規定を示している。また、Fig.8の左図では、これ以外の基礎スラブ節点は全方向固定条件となっており、右図では、白塗りの四角部分の節点のみが全方向固定条件となっている。また、荷重は、各床スラブ上面に等分布の鉛直荷重と鉛直荷重の0.2倍の双方向の水平荷重（地震力）を加えている。Fig.9とFig.10を比較すると、Fig.9では、1階に壁が形成され、人の通り道としては適切ではないのに対して、Fig.10では、その問題点が解消されていることがわかる。

次に、Fig.11はFig.8の1階柱脚の支持点を規定したモデルで、水平荷重の割合を鉛直荷重の1倍にした場合の結果を示す。

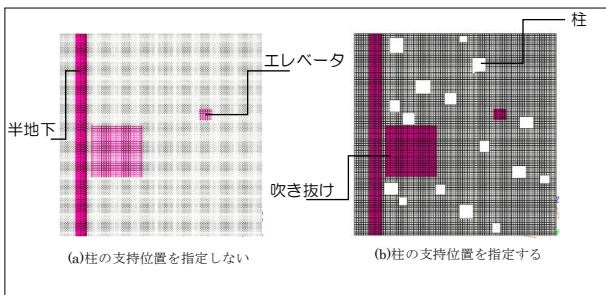


Fig.8 1階柱脚の計画

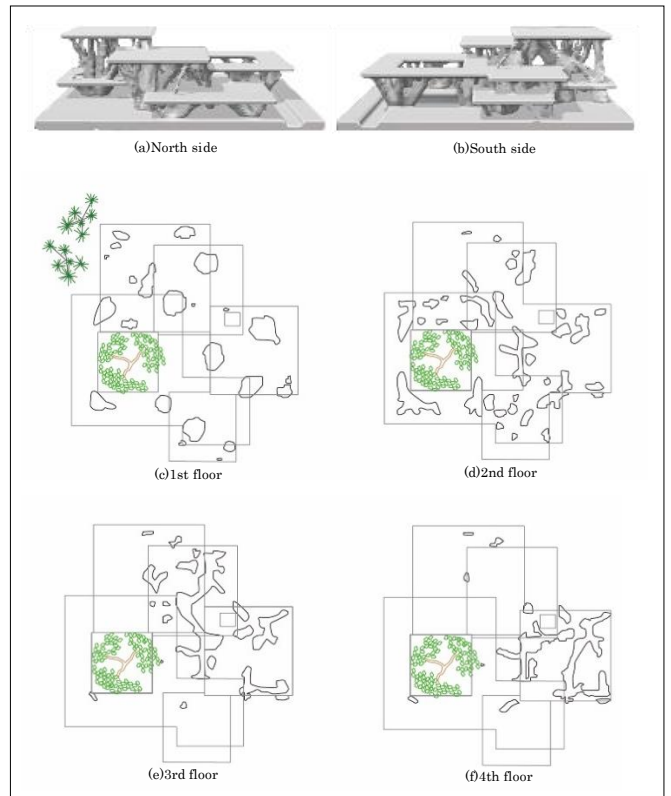


Fig.10 柱脚支持点を規定する場合の解析結果

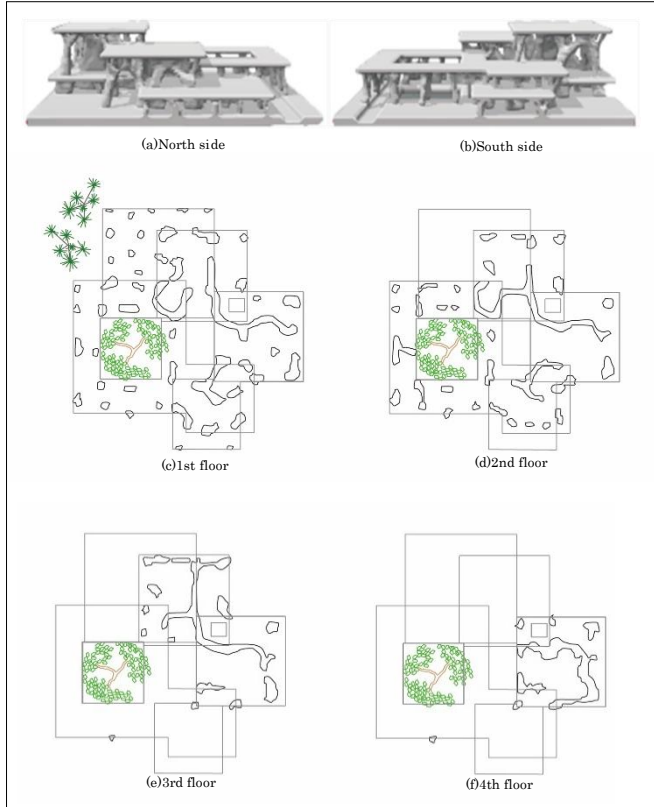


Fig.9 柱脚支持点を規定しない場合の解析結果

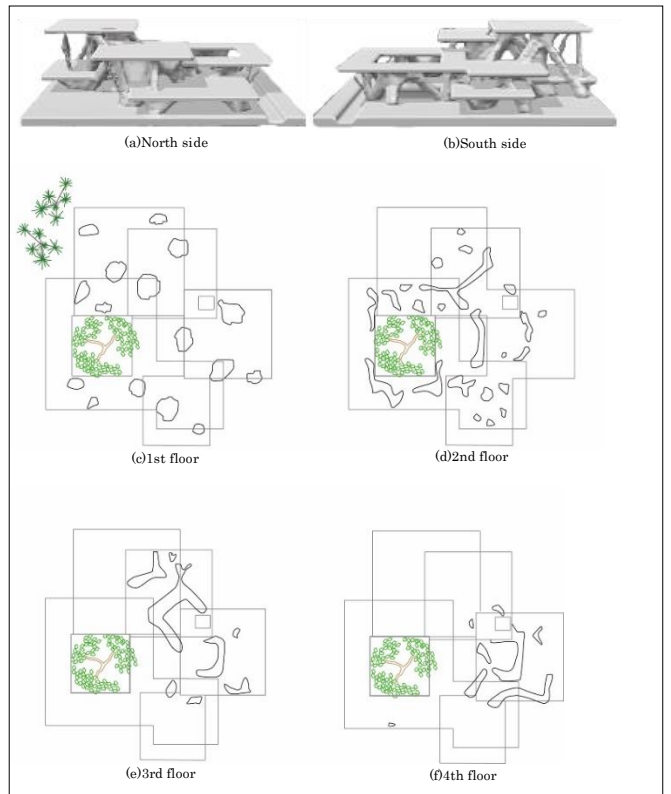


Fig.11 Fig.10の水平荷重を5倍にした解析結果

Fig.10とFig.11を比較すると、地震力が大きくなると、2階から4階にかけて壁（面的な柱）が目視から多くなることが分かり、視界



の抜けが悪くなる傾向が見られた。今回のプランは、イベント会場ということで、できるだけオープンな形態が望ましいと考え、Fig.10のモデルを採用することとした。なお、用途によっては閉鎖空間が望ましい場合もあるため、地震力の大きさは壁の大きさのコントロールにも利用可能であることがわかった。

Fig.12は、Fig.10の解析結果をもとに作成した、建築物のイメージ図を示している。図に示すように、文献3)に示されるせんだいメディアテークやフィレンツェ新駅コンペティション案に共通するような有機的な柱を有する構造が得られていることがわかる。したがって、実際の建築構造の造り方については、これらの建物の構造形式が参考にできるものと思われる。



Fig.12 解析結果のイメージパース

5. 傾斜地に立つ建築の応用

3章、4章のスタディを応用して、これまでにあまり見られない新しい建築構造形態を創生し、設計することを試みた。用途は多くのコンペティション案等で傾斜地に提案されるツリーハウスとする。また、フラットな地盤と傾斜地ではどのような形態の違いが出るのかを比較した。ただし、スラブの配置とスラブに加わる荷重は同じとし、荷重は鉛直等分布荷重とその0.2倍の水平荷重を双方向に加えている。それぞれのモデルの目標体積 $V$ は図中に示す。なお、影響半径倍率 $b$ は3.0、除去率 $\lambda$ は0.05としている。ツリーハウスは4つの箱型のコテージとし、直方体の固定設計領域を20m×20m×10mとし、ボクセル分割数を100×100×50分割とする。

Fig.13は、ツリーハウスの全体パースと寸法、および箱形コテージの配置を示す。Fig.14は水平地盤での解析結果、Fig.15には傾斜地での解析結果を示す。また、それぞれ上にはツリーハウスの1階柱脚の支持位置、下にはその解析結果を示す。

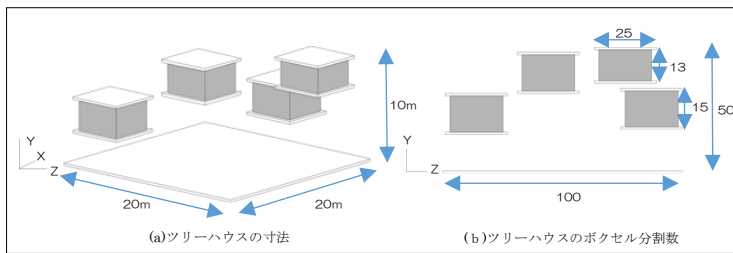


Fig.13 ツリーハウスの寸法とボクセル分割数

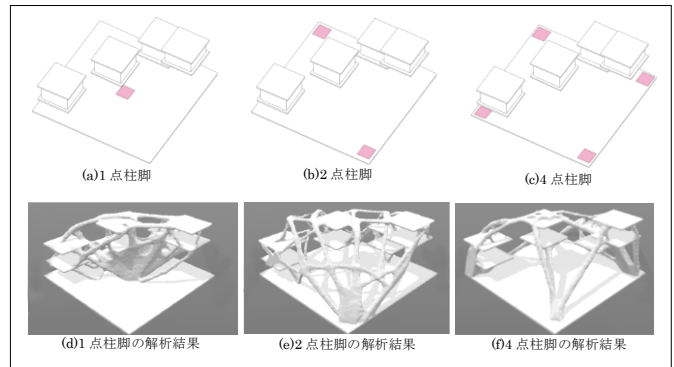


Fig.14 水平地盤での解析結果

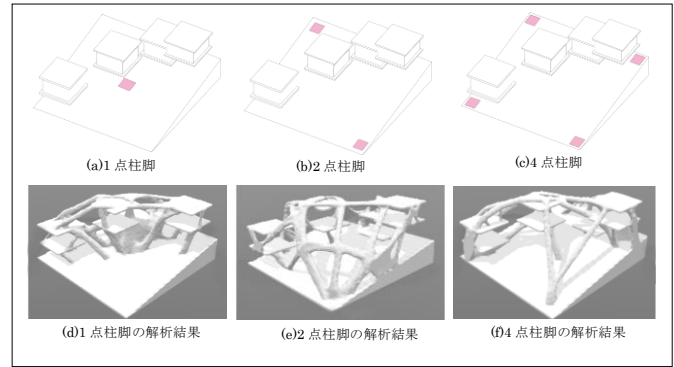


Fig.15 傾斜地盤での解析結果

どの結果も水平地盤よりも傾斜地盤の方が水平力に耐えるために構造体が太くなっており、2点柱脚は支持が2点にもかかわらず、スラブ下から構造体が見られる。

Fig.15に示した傾斜地の2点で柱脚を支持した解析結果が、シェル構造のような形態となり、森の中に包み込まれるような建築になると期待できる。そこで、これからコンペ等で提案できるようイメージパースを作成した。Fig.16は平面図、Fig.17は断面図を示す。また、Fig.18は下から見上げたパース、Fig.19は全体パースを示す。ただし、Fig.18では、傾斜地盤面を除いている。これらの図より、本創生例は、山間部のコテージとして、背景の自然とよくマッチしていることがわかる。

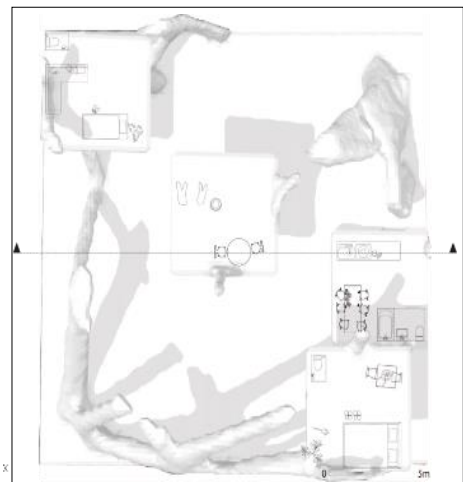


Fig.16 2点柱脚の平面図

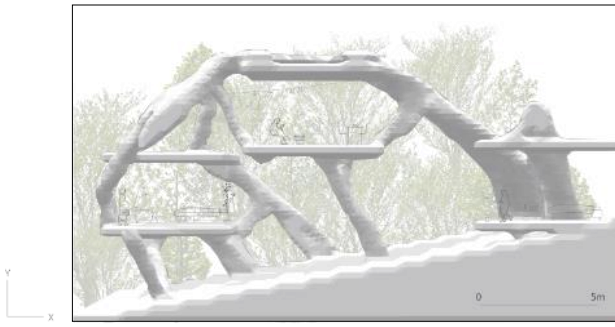


Fig17 2点柱脚の断面図



Fig18 見上げたパース



Fig19 ツリーハウス全体パース

## 6. まとめ

本論文では、IESO法による位相最適化ツールを利用して設計コンペの構造形態を創生し、意匠設計者の観点から、本手法の有効性を検討した。その結果、以下のような知見が得られた。

- (1) 基礎を傾斜させることで、自然の傾斜にマッチした建築デザインを創生できる。
- (2) 固定設計領域にあらかじめ空間等を設定することで、動線や室内空間の確保が可能である。
- (3) 地震荷重のコントロールにより、多様な形態を得ることができる。
- (4) 柱脚支持点の設定により、設計者の意図を反映させた多様な形態を創生することができる。

以上により、本手法は、空間制約、荷重条件、境界条件の与え方により、意匠設計者の感性や意図を容易に反映できることがわかった。したがって、このような位相最適化ツールを建築デザインのコンセプトを考える上で利用することは十分に可能であると思われる。

## 謝辞

本論文の解析例のモデル作成および結果の表示には、(株)くいととのVOXELCONを利用している。(株)くいとの石井恵三氏、月野誠氏、英山寛之氏に、研究室で開発したソフトとのデータリンクについて技術協力を得たことを感謝いたします。

## 参考文献

- 1) S. Reichert, T. Schwinn, R. Magna, F. Waimer, J. Knippers, A. Menges : Fibrous structures: An integrative approach to design computation, simulation and fabrication for lightweight, glass and carbon fibre composite structures in architecture based on biomimetic design principles, *Computer-Aided Design*, 52 (2014) 27-39
- 2) S. Reichert, A. Menges, D. Correa : Meteorosensitive architecture: Biomimetic building skins based on materially embedded and hygroscopically enabled responsiveness, *Computer-Aided Design*, 60 (2015) 50-69
- 3) Mutsuro Sasaki : Flux Structure, Toto Publishers, Jan., 2005  
佐々木睦朗：フラックス・ストラクチャー，TOTO出版，2005
- 4) Yohei Niiuchi, Shinya Matsumoto, Daiji Fujii : Topology optimization of 3D structures using Improved ESO method, *Journal of Structural and Construction Engineering, Transaction of AIJ*, Vol.81, No.723, 851-858, May, 2016.5  
新内洋平, 松本慎也, 藤井大地：改良型 ESO 法を用いた 3 次元構造物の位相最適化, 日本建築学会構造系論文集, Vol.81, No.723, pp.851-858, 2016.5
- 5) Yohei Niiuchi, Shinya Matsumoto, Daiji Fujii : Computational morphogenesis of building structures using IESO method - Natural shape of buildings which resist vertical and seismic load, *Journal of Structural and Construction Engineering, Transaction of AIJ*, Vol.82, No.731, 97-103, Jan., 2017  
新内洋平, 松本慎也, 藤井大地：IESO 法を用いた建築構造の形態創生 鉛直荷重と地震荷重に抵抗する建物の自然形態, 日本建築学会構造系論文集, Vol.82, No.731, pp.97-103, 2017.1
- 6) L. L. Beghini, A. Beghini, N. Katz, W. F. Baker, G. H. Paulino : Connecting architecture and engineering through structural topology optimization, *Engineering Structures*, Vol.59, pp.716-726, 2014
- 7) Hiroshi Ohmori and Chang Yu CHI : Structural form creation by Extended ESO method - Application to adaptive structures and shells -, *Journal of Structural and Construction Engineering, Transaction of AIJ*, No.552, 109-116, Feb., 2002  
大森博司, 崔昌禹：拡張 ESO 法による構造形態の創生—多目的適応構造とシェル構造への適用—, 日本建築学会構造系論文集, 第 552 号, pp.109-116, 2002.6
- 8) X. Huang, Y. M. Xie : Convergent and mesh-independent solutions for the bi-directional evolutionary structural optimization method, *Finite Elements in Analysis and Design* 43 (2007) 1039-1049
- 9) Daiji Fujii, Ryo Okabe, Masatoshi Manabe : Topology optimization of 3D structures using CA-ESO Method and voxel finite element method, *Journal of Structural and Construction Engineering, Transaction of AIJ*, Vol.79, No.703, 1279-1286, Sep., 2014  
藤井大地, 岡部 諒, 真鍋匡利：CA-ESO 法とボクセル有限要素法を用いた 3 次元構造物の位相最適化, 日本建築学科構造系論文集, Vol.79, No.703, pp.1279-1286, 2014.9
- 10) Y. M. Xie, G. P. Steven : *Evolutionary Structural Optimization*, Springer, 1997