

### 3. 2. 2 大規模数値解析結果の先端可視化技術の開発

#### (1) 業務の内容

##### (a) 業務の目的

地震被害評価は大規模数値解析の計算結果に基づくが、これには膨大な量の計算結果を効率的に可視化することが必須となる。3次元視とマルチスケールが可能な可視化を開発するとともに、応急評価に使えるよう高速処理も併せて実現する。

##### (b) 平成24年度業務目的

都市に関する地理情報システムのデータを利用することで、東京23区全体を対象とした地盤の都市モデルと構造の都市モデルを構築する。構造の都市モデルでは構造物一棟一棟をモデル化する。サブプロジェクト③と連携して、災害対応能力の向上に有効な可視化の方法について検討を開始する。

##### (c) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
東京工業大学情報理工学研究科	教授	廣瀬壮一	
東京工業大学建築物理研究センター	教授	坂田弘安	
東京工業大学建築物理研究センター	准教授	山田 哲	
東京工業大学総合理工学研究科	教授	山中浩明	
東京工業大学総合理工学研究科	教授	盛川 仁	

#### (2) 平成24年度の成果

##### (a) 業務の要約

- 1) 都市に関する地理情報システムのデータを利用することで、地盤の都市モデルを構築した。
- 2) 都市に関する地理情報システムのデータを利用することで、構造の都市モデルを構築した。この際、構造物一棟一棟をモデル化した。
- 3) 災害対応能力の向上に有効な可視化の方法について検討を開始した。
- 4) 東京23区全体を対象とした都市モデルを構築した。

##### (b) 業務の成果

###### 1) 地盤の都市モデルの構築

###### a) 背景

成層構造として仮定された地盤のボーリングデータを用いて数値解析用3次元地盤モデルを構築する手法を示す。なおソリッド要素有限要素法は複雑な幾何形状の取り扱いに優れており、また、トラクションフリーの境界条件を解析的に満足することから、四面体要素ないし立方体要素を用いて対象となる地盤を分割する。なお、解析対象となる地盤の領域は  $10^3 \times 10^3 \times 10^2$  m オーダ程度であり、数値解析の精度を数 Hz まで保障することを考えると、対応する空間分解能は  $10^{-1.0}$  m となる。この空間分解能より1オーダー小さい寸法の要素を使う必要があるため、地盤モデルの自由度は  $10^{7-8}$  程度となることが推定される。

上記のように推定された大自由度の3次元地盤モデルの構築には、人手を介さず、自動的に高品質の要素生成を可能とする手法が必要である。高品質とは要素のアスペクト比（四面体要素の場合、底面積の平方根と高さの比）が低いことを示している。アスペクト比が高いと要素が見かけ上、硬い挙動を示し、解析結果の精度を著しく損ねることがある。通常、人手を介した要素形状のチューニングにより高アスペクト比の要素を避ける。しかし、大規模モデルでは必要な人力が膨大となるため、高品質の素モデル構築のためにはさまざまな方法が研究されている（例えば、鈴木・他、2006<sup>1)</sup>）。

本研究では構造格子を使った要素生成の方法を利用する。解析対象の地盤モデルに対し、構造格子をバックグラウンドセルとして被せ、セル単位で要素生成を行う方法である。要素生成がセル単位となるため、必要な計算量は増えるものの、比較的容易に高品質の要素を自動生成することができる。周囲のセルの要素との接続を最小限とできるだけセル単位で独立した要素生成とすることで、高品質の要素を生成することの頑強性が向上する。同時にセル単位の独立処理は並列処理にも適しており、並列計算機を使えば計算量は増えても要素生成は高速化できる。

上述のように、要素の自動生成とは別に、解析結果の精度に影響する要素のアスペクト比にも特段の注意を払う必要がある。そもそも地層境界の位置は、計測・推定に伴う相応の誤差が含まれている。したがって、ボーリングデータが与える地層境界を正確に使うことを止めて計測・推定誤差の範囲内で地層境界をずらすことを認めれば、高アスペクト比の要素を排除することができる。すなわち、地層境界の位置を微調整することで要素アスペクト比を抑えるのである。

## b) 開発された要素生成の手法

本研究で開発した地盤要素生成の手法は、複雑な地殻構造内での線形地震波動場解析のために開発された手法（Ichimura *et al.*, 2009<sup>2)</sup>）を基にしている。地層の幾何形状をより忠実に取り込めるようにするとともに、地盤に必須の非線形波動場解析を効率的に行えるよう、要素寸法の最大値の制御を可能とした。さらに、従来の四面体一次要素を拡張し、四面体二次要素の生成も可能としている。特に、要素寸法の制御は重要な機能である。地殻の線形地震波動場を対象としていた従来の手法（Ichimura *et al.*, 2009<sup>2)</sup>）ではこの制御は必要ではなかった。しかし、地盤を対象とするため、基盤層は線形であるが軟弱層は線形から非線形に遷移するといった場合に応じられるよう、明示的に要素寸法を制御する必要がある。各層の物性及び非線形化の有無に対応した適切な寸法を決定する要素寸法の制御を導入することにより、効率的な3次元地盤モデルの生成が可能となったのである。

3次元地盤モデルの構築の具体的な手順を以下に示す。

- i) 対象周波数に対応した空間分解能 $ds$ を設定する。バックグラウンドセルを3次元地盤モデルの対象領域をカバーするように被せる。構造格子は $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向についてそれぞれ $n_x$ 、 $n_y$ 、 $n_z$ 個ずつ生成する。作成したバックグラウンドセルと、各地層の標高を図1a)に示す。
- ii) 生成したセルの内、地表面や境界面を含まないセルは、何ら処理を施さず、立方体要素とする。地表面・境界面を含むものは必要な処理を加える。セルが地表面ないし境界面と交差する場合、セルには、地表面ないし境界面と交差する辺が最大で4つあることになる。セル辺上の4つの交点と、セルの8つの頂点を用いて四面体要素を生成する。要素生成にはデローニ分割を用いる。この方法によりセル間で整合性のとれた要素がセル単位で生成される。他のセルの分割を考慮することなく、セル単位で独立に分割できることが利点である。辺上の4つの交点とそれぞれの交点から最も近い8つの頂点の距離が小さい場合、アスペクト比の大きい要素が生成される可能性

がある。このため、交点と頂点の距離に閾値を設け、距離が閾値より小さい場合は、地表面・境界面の形状の近似を行う。最大の近似誤差が小さくなるよう、セルの辺上の交点を以下のように近似する。

$$z_s' = \begin{cases} z_s - h & h \leq 0.125ds, \\ z_s + 0.25 ds & 0.125ds < h \leq 0.250ds, \\ z_s & 0.250ds < h \leq 0.500ds, \\ z_s - h + 0.75ds & 0.500ds < h \leq 0.750ds, \\ z_s - h + ds & 0.750ds < h \leq 1.000ds. \end{cases}$$

ここで $z_s$ と $z_s'$ は近似の前と後での交点である。そして $h$ は次式で定義される0から $ds$ の値である。

$$h = \text{mod}(z_s - z_b, ds)$$

なお $z_b$ はバックグラウンドセルの底面の $z$ 座標である。 $\text{mod}(a, b)$ は $a$ を $b$ で割った余りである。交点の位置を変えることは地表面や境界面の形状を変えることになるので、注意が必要である。図2に近似の概念図を示す。図2左端にセルの辺と地表面・境界面の交点が $h \leq 0.125ds$ の範囲にある場合の近似の例を示す。本研究の手法では地層境界の近似の誤差は $0.125ds$ 以下となる。なお、従来の手法 (Ichimura *et al.*, 2009<sup>2)</sup>) では地層境界の近似の誤差は $0.25ds$ 以下であり、近似誤差が半分になったという意味で、倍程度忠実に幾何形状を表していることになる。上述のように、四面体要素と立方体要素は近似された地表面・境界面とバックグラウンド構造格子に基づいて格子単位で生成される。近似した後の地表面・境界面と、生成した四面体要素と立方体要素を図1b)に示す。

- iii) 材料特性が均質な部分、すなわち、立方体要素の部分では、立方体要素のサイズを大きくすることができる。実際には、数値解が収束する範囲で自由度を少なくすることを目標とする。具体的には立方体要素を $v$ 倍まで大きくする。ここで $v$ は2のべき乗 ( $v = 2^i$ ,  $i$ は自然数) であり、

$$vds \leq \frac{v_s}{p f_{max}} c_i$$

を満たす最大の値とする。ここで $v_s$ 、 $p$ 、 $f_{max}$ 、 $c_i$ は、それぞれ、せん断波速度、一波長あたりの要素数、解析対象とする周波数の最大値、各層で設定する最大要素サイズをコントロールする係数を示す (図1c)参照)。各層で独立に $c_i$ を設定することにより、非線形化する層ではより細かい要素を、線形のままの層では粗い要素を生成することが可能となった。これは、非線形波動場計算を行う効率的な3次元地盤モデルである。なお従来の方法 (Ichimura *et al.*, 2009<sup>2)</sup>) では $c_i$ が全て1だったため、非線形化する層にあわせて要素を生成すると、線形のままの層の要素が不必要に細かくなりすぎることになる。これは非効率な3次元地盤モデルとなる。

- iv) 要素寸法が異なる立方体要素の周辺では要素が不整合となる。この不整合を解消するため、要素寸法の異なる立方体要素をつなげる四面体要素をデローニ分割により生成する (図1d)参照)。  
v) 生成されている立方体要素をデローニ分割によって四面体要素に分割する。四面体二次要素を使用する場合、四面体各辺の midpoint に新たな節点を生成し、四面体二次要素を生成する (図1e)参照)。

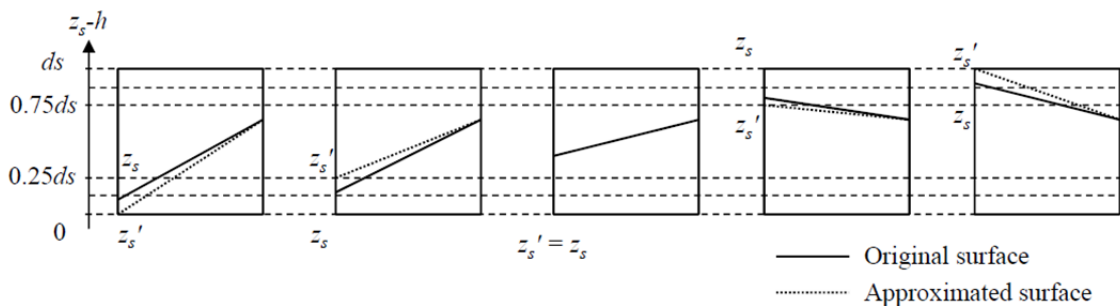
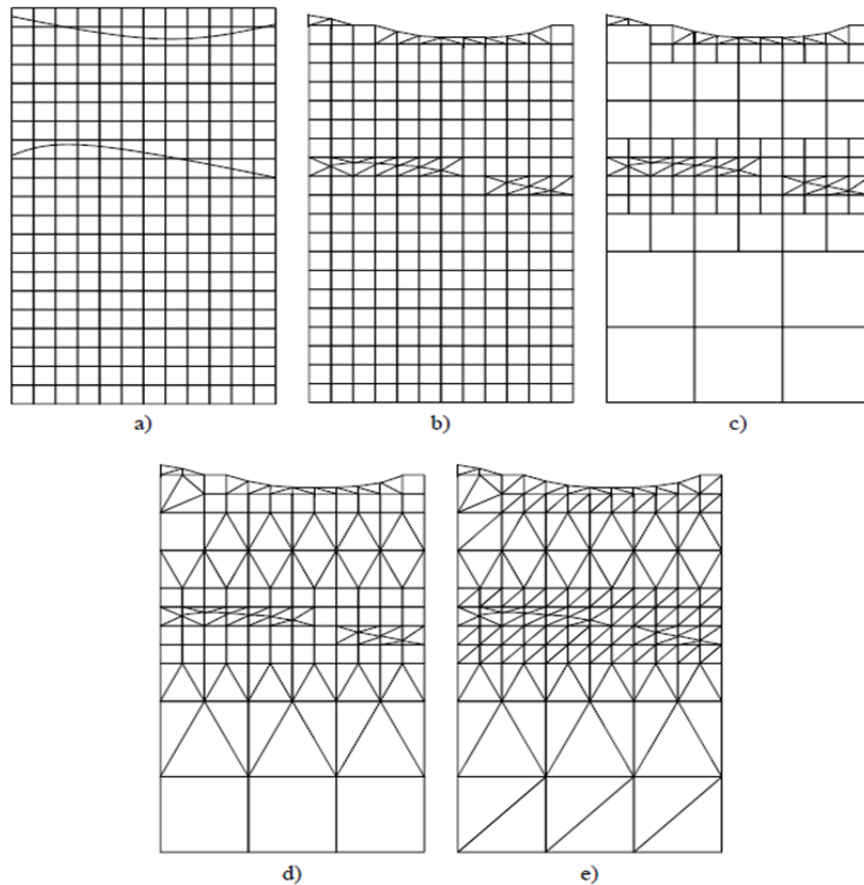


図2 要素生成の際の地層境界の近似方法

## 2) 構造の都市モデルの構築

### a) 背景

都市の建物一棟一棟を対象とする地震応答解析用のモデルは、地理情報システム（Geographical Information System、GIS）に蓄積された建物の形状データから自動構築される。なお、地震応答解析には単純な手法から高度な手法まで多様であり、一つの建物に対し、GISの形状データから解析手法にあった多様な解析モデルが自動構築されることになる。地震応答の解析手法そのものは十分成熟している。しかし、都市内にある10万から100万のオーダーの全建物に対し、GISのデータを使って自動構築された解析モデルが一定の信頼度を確保することは決して容易ではない。

GIS の形状データは画像として表示されるためのデータ構造を持っている。具体的には、多角形の集合として建物の床形状が記述されている (図3 参照)。多角形の集合から建物の各階の幾何形状を抽出する際、「どの多角形とどの多角形が隣り合っているか」といった接続情報があると抽出は正確に行える。しかし、画像として表示するためには接続情報は無用であり、事実、GIS のデータには接続情報が含まれていない。点・線分・面のデジタル情報の分析・操作を研究する計算幾何の分野でも、接続情報がない多角形の集合を扱う事例は限られており、多角形の集合のみから正確な建物幾何形状の抽出は未開拓の分野であると考えられる。

接続情報がない GIS のデータの特徴とは別に、GIS のデータが対象とする建築建物の形状そのものは多様である。勿論、多くの建物形状は四角形や四角形の組み合わせとして解釈できるが、三角形や円弧を使うような例外となる建物もある。高度な地震応答解析手法を適用する際、高度な解析モデルが必要となり、複雑な形状を忠実に反映した解析モデルの自動構築が必要となる。建築建物と同様、橋梁のような土木構造物も、構造自体は単純な線形であるが、橋脚・支承・橋桁、その部材は複雑な形状を持つ。高度な地震応答解析手法のためのモデルの自動構築には、複雑な幾何形状の取り扱いが共通の課題となる。

上記を背景とし、本研究は、複雑な幾何形状を忠実に取り込む地震応答解析モデルの自動構築手法の開発を目的とする。都市内の全建物を扱うため、開発する自動構築手法は高い堅牢性を持つことが必須である。このため、テンプレートフィッティングという方法論を導入する。通常、2次元多角形の集合のデータからその接続状態を分析して接続情報を推定し、推定された接続情報から幾何形状を抽出する方法論がとられる。この方法論では、複雑な形状に対応する例外処理が多くなる他、GIS データの誤差により、自動構築の堅牢性を向上することは難しい。テンプレートフィッティングでは、多角形の集合を Boolean の2次元格子に投影したグリッドを利用する (図4 参照)。あらかじめ多様な建物形状に対応した Boolean のグリッドのテンプレートを多数準備し、対象とする建物の GIS データから作られたグリッドが最も近いテンプレートを選択し、このテンプレートの建物形状を使うのである。多角形の接続情報は不要であり、テンプレートのフィッティングの程度から変換の成功の度合いを判断することができる。

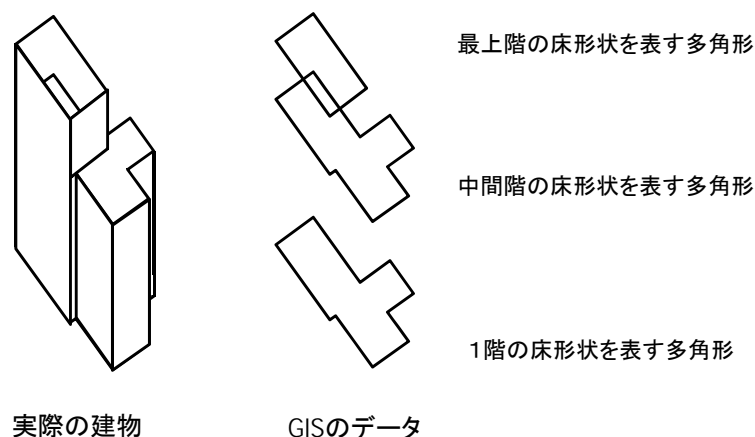


図3 本研究で用いた GIS の建築建物データ

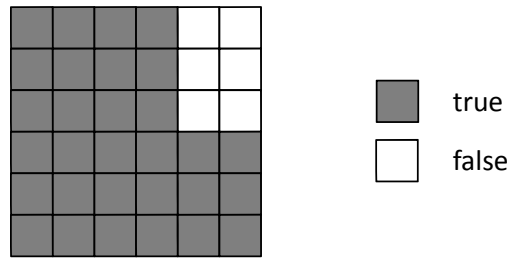


図4 Boolean のグリッド

#### b) 地震応答解析用構造モデルの自動構築

地震応答解析用の構造モデルは多岐多様にわたるが、大きく次のように分類できる (図5 参照)。

- ・ 階毎の質量と階の間の剛性を使った質点系モデル
- ・ 柱・壁・スラブの部材モデルを使った構造モデル
- ・ 構造要素やソリッド要素を使った詳細な有限要素法モデル

GIS には、建物の外部形状のみがデータとして含まれており、例えば、階の床形状を多角形として取り出すことができるが、内部の構造データは勿論、木造・S 造・RC 造等といった構造形式をデータとして持つ GIS は公開されていない。

GIS のデータは地図情報であるため、CAD (Computer Aided Design) のデータ構造に準拠し、図示に適した構造を持っている。このため、建物の GIS データは、3 次元の点座標が並んだ多角形の集合となっている。質点系モデルはさておき、構造モデルや有限要素法モデルを構築する場合、多角形の集合を判読し、スラブとなる床の形そのものの他、床内での柱・壁の位置や形に関する情報を抽出することが必要となる。特に、複雑な構造の建物では一つの床が複数の多角形に分解されている場合があり、接続情報が GIS データに含まれていないことは、多角形の集合から床形状を判読することを難しくする。

接続情報がない多角形を処理して床形状を判読するような汎用技術が計算幾何に開発されていないこととは別に、GIS に蓄積された建物の床形状を表す多角形の集合には次の 2 つの問題点がある (図6 参照)。

- ・ 計測誤差に起因する困難さ：GIS に含まれる多角形の頂点の座標は、実際の建物の形状を計測することで得られている。したがって頂点の座標には計測誤差が含まれてしまう。この結果、本来は隣接する二つの多角形が離れる場合や、重なり合う場合もある。これは接続情報の推定を格段に難しくする。
- ・ 付帯設備に起因する困難さ：近年の GIS には、渡り廊下や広告等のような建物の付帯設備のデータも含まれている。地震応答解析の対象とはならない付帯設備は除外しなければならない。付帯設備も多角形として与えられるため、複数の多角形の接続情報を推定した上で、付帯設備であることを判定し、除外するという処理が必要となる。

このため、建物の GIS に特化した床形状の判読技術が必要となる。

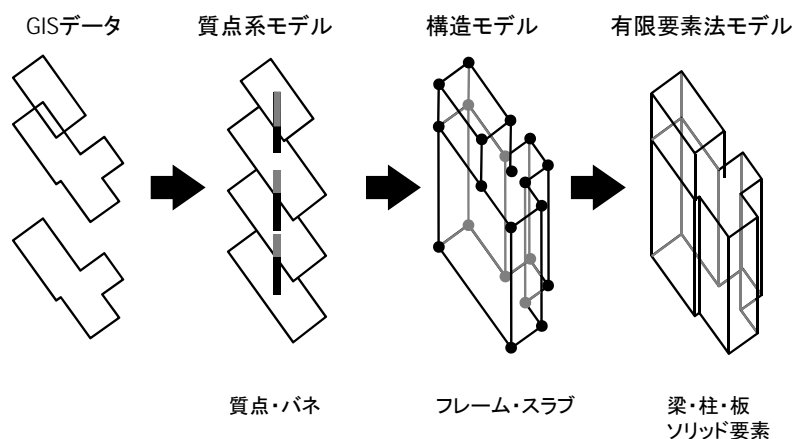


図5 地震応答解析の構造モデル

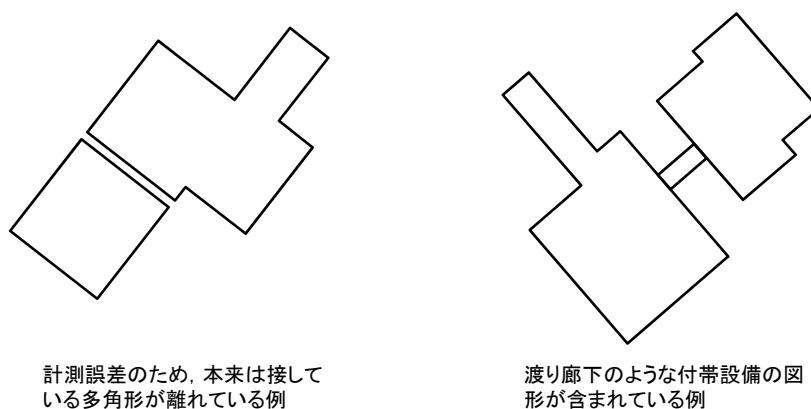


図6 GISに蓄積された多角形の集合の問題点

### c) 形状判読のためのテンプレートフィッティング

都市には多数の建物があるため、構造モデルの自動構築判読には高い堅牢性が必要である。しかし、複雑な構造の建物に対し、GISに蓄積された複数の多角形のデータから各階の床形状を判読することは容易ではなく、堅牢性の確保は難しい。なお、堅牢性には次の二つの意味がある。

- ・モデル構築のために床形状を正しく判読するという堅牢性
- ・床形状の判読に失敗したことを正しく判断する堅牢性

この二つの堅牢性の向上を考慮するため、多角形の持つ多点情報を使った形状判読の替りに、複数の多角形を平面に投影して作られるグリッド情報を使った床形状の判読を試みる。前述のように、平面を格子に分け、多角形の内部にある格子点とそうでない格子点に区別したものがグリッド情報である。内部にあるかないかは false と true のいずれかの Boolean によって簡単に表すことができる。Boolean を使ったグリッド情報を B-Grid と称することにする。

B-Grid を使うと床形状の判読にテンプレートを利用できる。テンプレートとは、四角形や凸型等、あらかじめ準備した形状に対応した B-Grid である。2つの B-Grid の類似度  $S$  は一致した格子点の数として簡単に定義できる。すなわち

$$S = \{\text{一致した false と true の数}\}$$

したがって、対象とする床に対し、準備したテンプレート全てと $S$ を計算し、 $S$ が最も高いテンプレートに対応する形状が床形状に最も近いことになる。これが床形状判読のためのテンプレートフィッティングである。

テンプレートフィッティングでは、十分高い $S$ が得られた場合、床形状を正しく判読したことになる。なお、**B-Grid** はグリッド情報であるため、小さい格子寸法を使うと、より正確に判読できることになる。また、できるだけ多くのテンプレートを準備しておけば $S$ が高いテンプレートを選ぶ可能性は高くなる。テンプレートフィッティングによる床形状の正しい判読に関する堅牢性は高いと考えられる。

テンプレートフィッティングは最も高い $S$ を持つテンプレートを選ぶが、選ばれたテンプレートが床形状に近いとは必ずしも限らない。これは最も高い $S$ の値が小さい場合であり、対象とする床形状に近いテンプレートがなかった場合である。したがってあらかじめ閾値を設定し、最も高い $S$ が設定したこの値以下となる場合、床形状の判読に失敗したと判断できる。テンプレートフィッティングでは、床形状の判読失敗を正しく判断する堅牢性も高いと考えられる。

#### d) テンプレートフィッティングのアルゴリズム

テンプレートフィッティングは床形状の判読であり、これは、一つの床を表すと考えられる複数の多角形に対し、最も適当なテンプレートから推定される床形状を決定することである。テンプレートは建築建物のさまざまな床形状に対応した **B-Grid** である。なお、高度な地震応答解析モデルでは、柱・壁の数や位置を推定することも必要になる。テンプレートは、形状のみならず、対象とする床に対して妥当と判断される柱・壁の情報を含むことも可能である。

本研究では、建物の床形状のテンプレートの形として、長方形、L字型、凸型の3種類を設定する（図7参照）。テンプレートに使う **B-Grid** のグリッド全体の寸法を一辺1の正方形とする。後述するように回転等の変換を使うため、長方形の形は正方形の一種類となる。一方、L字型と凸型にはさまざまな形がある。図7に示すように、L字型は一点、凸型は二点を指定することで、全ての形を表すことができる。グリッドの寸法を小さくするとテンプレートの数は多くなり、より精緻な床形状の判読が可能となる。例えばL字型の場合、グリッドの寸法を0.2とすると16通り、0.1とすると81通りのテンプレートとなる。

あらかじめ作成されたテンプレートを使うと、テンプレートフィッティングの手順は次のように整理される（図8参照）。

- i) 多角形の集合に対し、全体が正方形に最も近くなるよう、回転・収縮変換を行う。
- ii) 変換された多角形の周の情報を使って塗りつぶしを行い、**B-Grid** を作る。
- iii) 全てのテンプレートの類似度を計算し、類似度が最も高いテンプレートを選ぶ。
- iv) 類似度が閾値を超えた場合、テンプレートに対応する形状を設定する。越えなかった場合、判読失敗と判断する。
- v) 多角形の集合に対して行われた変換の逆を行い、床形状を決定する。

多角形の周の情報を使った塗りつぶしに関しては、既にさまざまなアルゴリズムが開発されている。類似度を使った判定も、**B-Grid** が **Boolean** の集合であるため簡単である。したがって、この手順に対応するアルゴリズムは、第一の手順である図形の変換を除き、特に難しいものではない。



上記のように、多角形の集合の変換では、回転・収縮が使われる。回転は、多角形の辺の内、グリッドの横軸となるように決定する。収縮は、回転された図形が辺長 1 の正方形に最も近くなるよう、横軸と縦軸の方向の割合を変えて収縮する。なお、テンプレートの数を最少とするため、テンプレートのフィッティングの際には、多角形の集合から作られた B-Grid に対し回転・鏡像変換を加える。回転は 90 度毎の 4 つ、鏡像は縦軸に関するもので、計 8 つの B-Grid が派生的に作られることになる (図 9 参照)。テンプレートの数を 8 倍にするよりも、多角形の集合から作られる B-Grid から 8 つの B-Grid を作るほうが、メモリの節約となることは明らかである。

単純な床形状でない限り、テンプレートに対応する形状が、元の多角形の集合が表す形状とは完全に一致することはない。実際、長方形、L 字型、凸型の全ての場合において、テンプレートの形状の頂点の座標は、元の多角形の頂点の座標とは異なる。この誤差は小さい寸法のグリッドを使うことで小さくできる。しかし、判読された床形状から構築される地震応答解析モデルに、大きな誤差をもたらさない

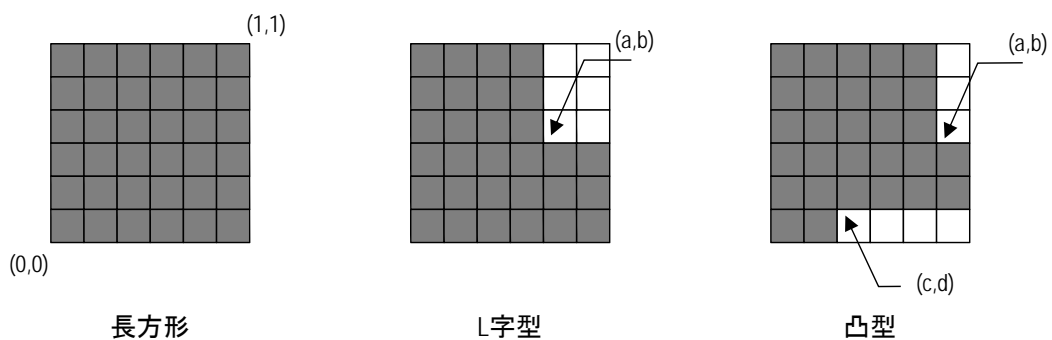


図 7 テンプレートのために準備された形

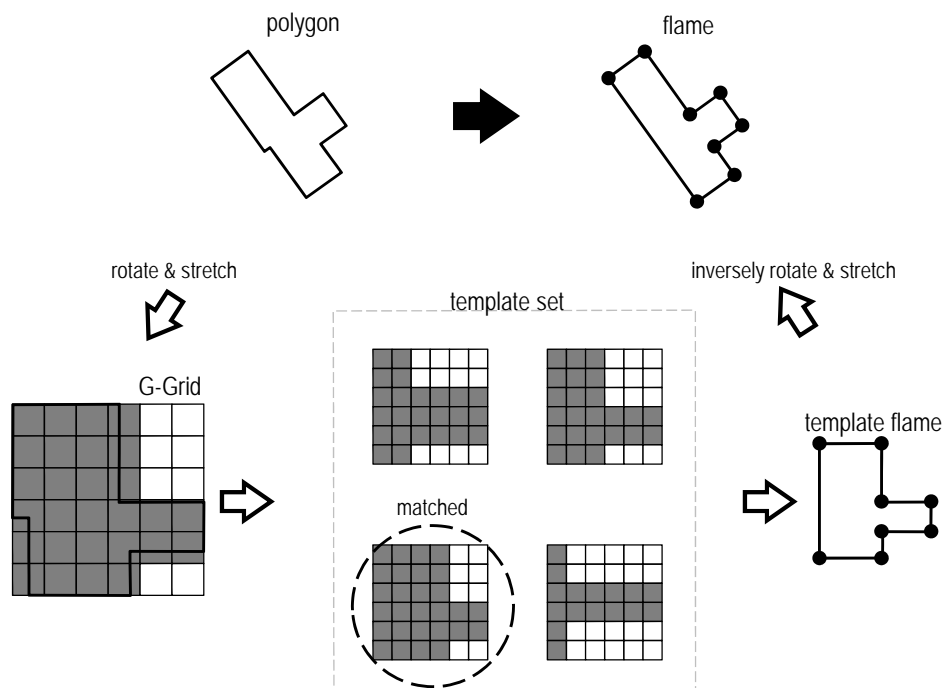


図 8 テンプレートフィッティングの手順

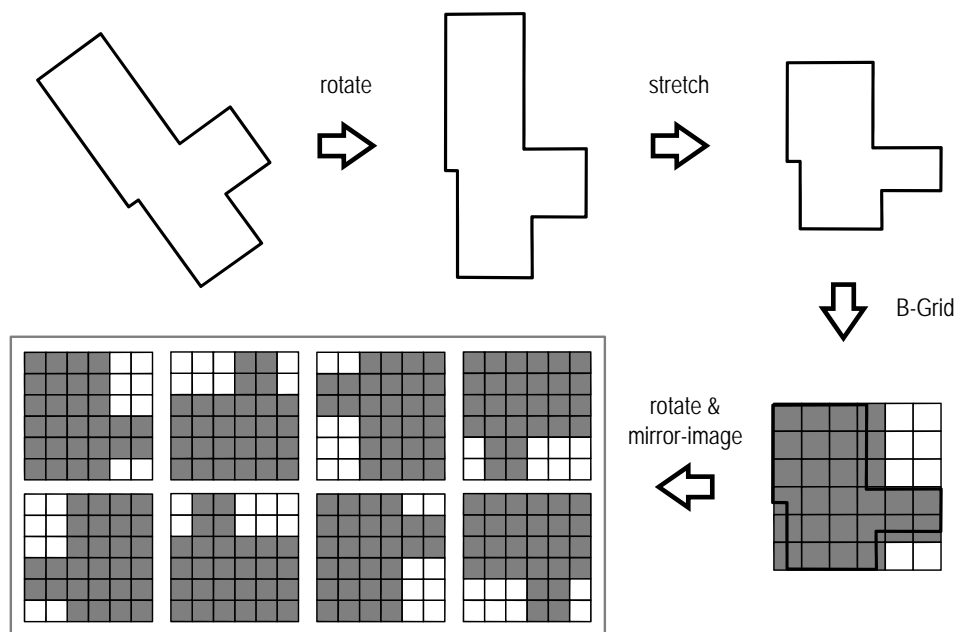


図9 多角形の図形変換と B-Grid の図形変換

限り、図形の誤差は許容できると考えられる。例えば、質点系モデルの場合、テンプレートフィッティングによって判読された床形状の面積に対し、実際の床形状との誤差が 1%以下であれば、床面積に起因する質量の誤差は 1 以下になる。この質量の誤差は十分許容できると考えられる。

#### e) 計算例

テンプレートフィッティングの実行の最初のステップはテンプレートの自動構築である。より詳細に形状判読を行うためにはグリッドの寸法が小さい B-Grid を使うことが良いが、この場合にはテンプレートの数が多くなるため、自動構築できることが重要となる。なお、グリッドの寸法に応じてテンプレートの数が増えるのは、L字型と凸型の場合であり、長方形は一つのテンプレートで良い。また L字型の場合、グリッド寸法の逆数である辺当たりのグリッド数の 2 乗に比例してテンプレートの数が増える場、凸型の場合、4 乗に比例することになる。本研究ではグリッド寸法を 0.2 とした。すなわち正方形領域を 5×5 に分割した。約 1,000 の建物の床形状に対応する多角形の集合に対し、長方形・L字型・凸型の 3 つの形のテンプレートフィッティングを行った。床形状の判読に成功した例を図 10 に示す。元の多角形の周が黒線、テンプレートフィッティングで選択された形状が灰色の領域で表されている。多角形が単一で長方形の場合、回転・縮小によって正方形の B-Grid のテンプレートが選択され、床形状は逆の回転・縮小の逆によって変換される長方形となる。図 10 の floor shape 1 に示すように、長方形の場合、正しく床形状が判読されていることがわかる。L字型の場合、回転・縮小によって変換された B-Grid から、90 度毎の回転変換と鏡像変換の組み合わせによる 8 つの B-Grid が派生する。類似度が最も高いテンプレートが選択され、回転・鏡像変換の逆と回転・縮小変換の逆によって、床形状が選択される。図 10 の floor shape 2~5 は L字型のテンプレートを使って正しく床形状が判読された例である。同様に図 10 の floor shape 6 は凸型のテンプレートを使って正しく床形状が変換された例である。

テンプレートフィッティングの判読に失敗した例を図 11 に示す。なお類似度の閾値を 21 とした。図 11 の floor shape 1 は、本来は L字型が判読されるべきであるが、長方形として判読された例である。こ

これはグリッド寸法が大きいいため長方形が判読されたのであり、グリッド寸法を例えば 0.1 とすれば L 字型と判読されると考えられる。図 11 の floor shape 2~4 は複雑な多角形が単純な L 字型と判断された例である。長方形・L 字型・凸型以外の図形に対応したテンプレートを導入することで正しく判読できる例である。勿論、floor shape 4 は極めて複雑であるため、これに正確に対応する図形をテンプレートに含めると、膨大な数のテンプレートが必要となるため検討が必要である。10 角形となる図 11 の floor shape 3 の形程度がテンプレートに入れる図形の限界とも考えられる。この場合、図 11 の floor shape 4 の判読には目視が必要となるかもしれない。図 11 の floor shape 5 と 6 は曲線や斜め線が含まれる場合である。

図 12 にテンプレートフィッティングを適用して自動構築された構造モデルの集合である都市モデルを示す。図 10 と図 11 と同様、黒線が元の GIS にある建物の多角形データであり、灰色で塗りつぶされた領域が構造モデルである。図 12 には真上からみた平面図と鳥瞰図を示している。利用した GIS は実際の都市のデータである。テンプレートの数が十分ではないため床形状の判読に失敗した建物も含まれているが、概ね、構造物一棟一棟の構造モデルの自動構築に成功していることがわかる。

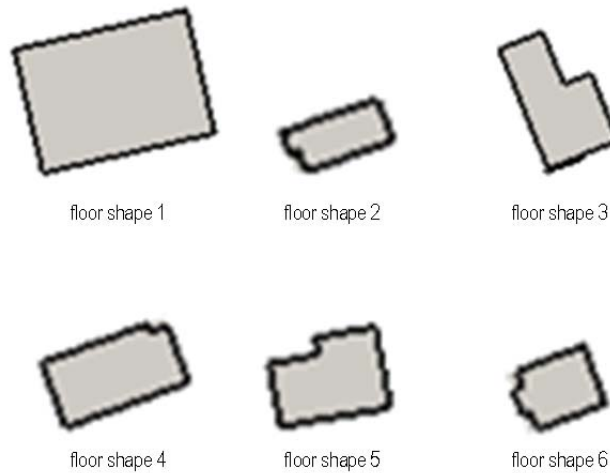


図 10 床形状の判読に成功した多角形

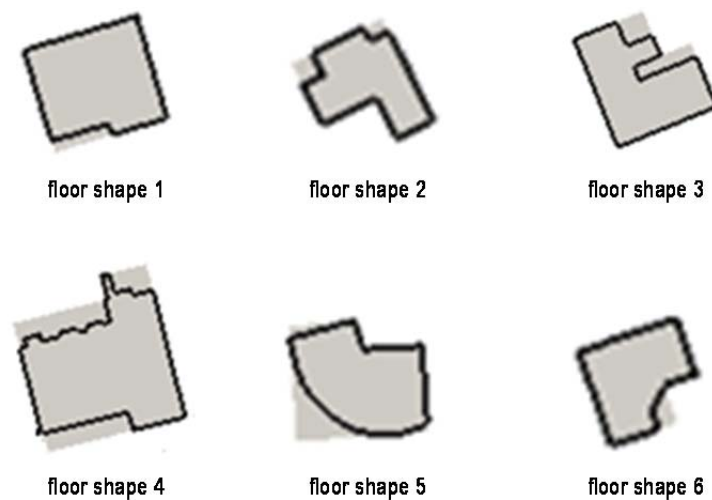
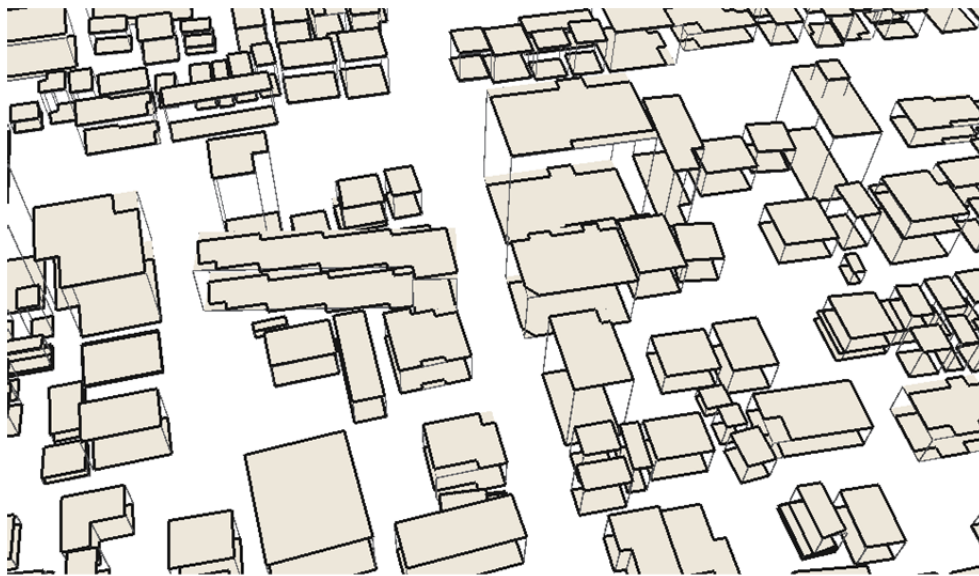


図 11 床形状の判読に失敗した多角形



平面図



鳥瞰図

図 12 テンプレートフィッティングによって自動構築された都市モデル

### 3) 可視化の方法の検討

#### a) 背景

本プロジェクトは、東京 23 区全体を対象として、空間的に異なる地震動と構造物一棟一棟の地震応答に相当する大規模数値解析による解析結果を効率的に可視化することを最終目標としている。したがって、東京 23 区全体を対象とする地表面の地形データ(地表面を覆う三角形要素の各節点上に与えられた標高データ(スカラー))と 200 万戸以上の構造物一棟一棟の構造物データ(三角形要素の各節点上に設定された 3 次元変位ベクトルデータ)を効率的に可視化する必要がある。

そのような大規模数値解析で得られる膨大な量の計算結果を災害対応能力の向上に資するために、サブプロジェクト③と連携して有効な可視化の手法について検討した。その結果、以下の 3 点が重要な要素であるとの結論を得た。

- i) 高速可視化 — 大規模数値解析の計算結果を 10 分～60 分程度で可視化
- ii) 3 次元可視化 — 立体視できる可視化から、大規模数値解析の 3 次元データを利用した視座を自由に換えられる可視化
- iii) マルチスケール可視化 — 広域の全般的な地震動分布や被害分布を可視化するとともに、局所的な領域に対して詳細な地震動や地震応答の可視化

例えば、図 13 は可視化のイメージ図であるが、部分的な領域の拡大や 3 次元表示を高速に可視化する技術を開発する必要がある。

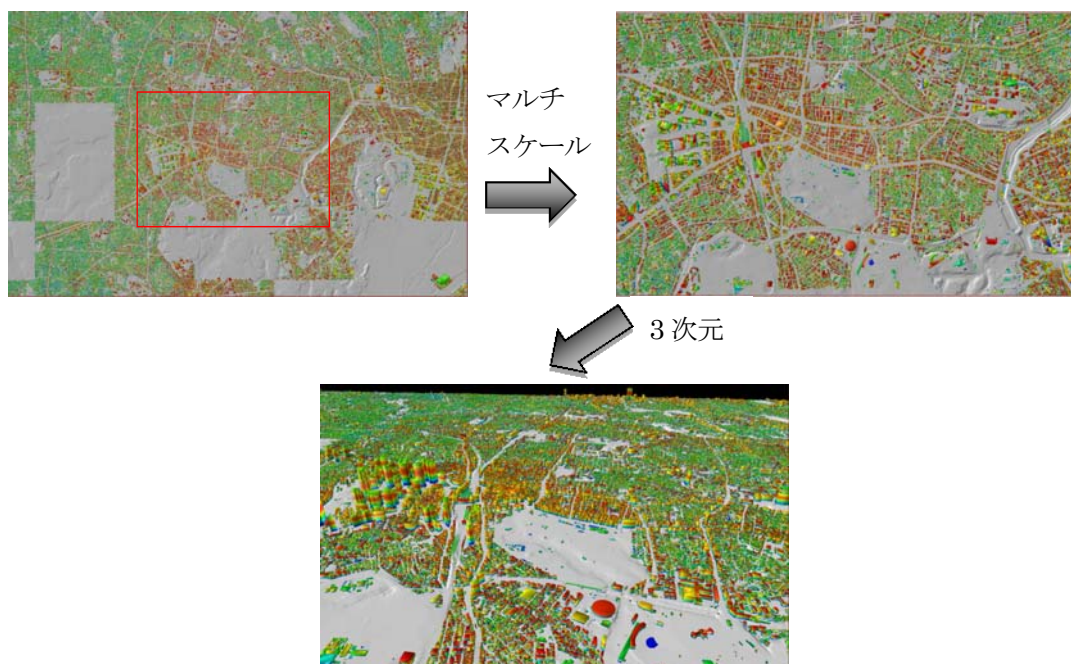


図 13 先端可視化技術のイメージ図

#### b) 基本可視化モジュール

可視化において用いるソフトウェア環境は AVS/Express Version 8.0 である。そこで、上記の i)～iii)の要素に対応して、AVS/Express 用の基本的な 3 つの新たな可視化モジュールを作成した。

i) 高速可視化のためのモジュール Read\_Disp\_Cash

大規模な時系列変位データのキャッシュ読み込みを行うためのモジュールである。通常、データが大規模化すると、1ステップの読み込みに時間がかかり、ステップ間の移動と可視化をスムーズに行うことができない。このモジュールは、マシンのメモリが許せば現在のステップの前後数ステップのデータを同時に読み込み、キャッシュする。ステップの移動には、既に読み込まれているメモリ間の移動を行う。また、別スレッドで、不要となったデータを開放し、必要なステップを読み込みながら、常に現在のステップの前後ステップをキャッシュする。

また、Read\_Disp\_Cash では、読み込み(キャッシュ)と同時に、描画に必要な変位データの RGB 変換、法線生成、変形図を作成する。さらに、Vertex Array Object(VAO)と呼ばれる描画方法で三角形の描画処理を行い、より高速な大規模時系列変位データの再生を実現している。

ii) 3次元可視化のためのモジュール Direct\_Tri\_Render

入力された三角形メッシュデータから、節点データの RGB 変換、法線生成、三角形ポリゴン情報を生成し、Vertex Array Object(VAO)による三角形の描画処理を行う。入力データから、直接 OpenGL 関数を呼び出すので、入力データが変更された場合により高速に三角形の描画が可能である。なお、本モジュールは非構造格子型の三角形要素に対応しており、一般的な構造モデルの3次元可視化に適応するものである。

iii) マルチスケール可視化のためのモジュール ZoomBox

このモジュールは、ビューワの表示に対して、ラバーバンドによるマウス操作で、選択された領域を拡大表示するものである。"Uviewer3D"モジュールなどのビューワモジュールの下に接続して利用する。

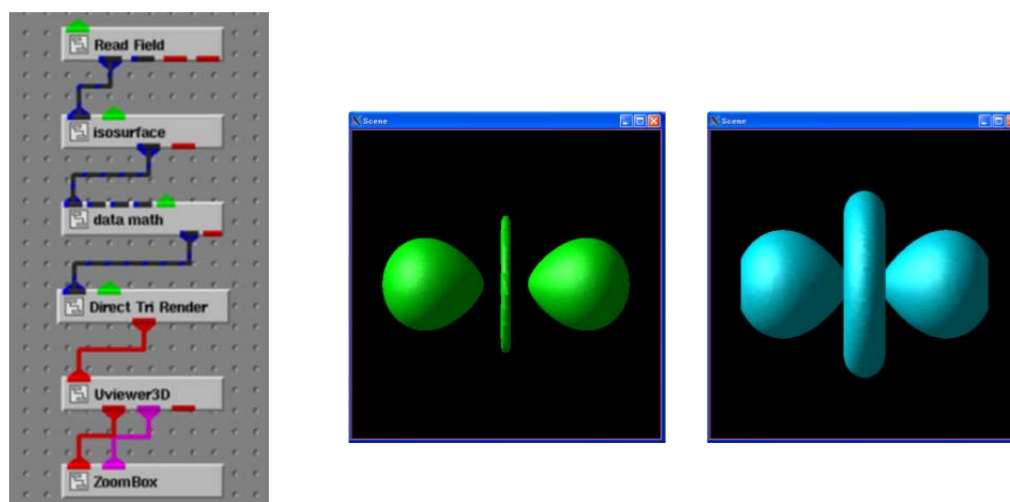


図 14 可視化モジュールの使用例

図 14 は、Direct\_Tri\_Render と ZoomBox のモジュールを用いた可視化例である。図 14 左図は用いたモジュールのネットワークを示している。Read\_Field モジュールでデータを読み込み、isosurface モジュールで等数値面(三角形要素)を生成させ、data\_math で節点データを float 型に変換し、Direct\_Tri\_Render モジュールで生成された三角形要素を描画している。図 14 中図は、あるポテンシャルの等数値面を Direct\_Tri\_Render モジュールで作成し 3 次元表示させた一例である。isosurface モジュールにおける iso\_level の値を変更すると、図 14 右図のように形状が変更された表示となっている。

#### 4) 東京 23 区全体を対象とした都市モデルを構築

前記の 1) 地盤の都市モデルの構築、2) 構造の都市モデルの構築、3) 可視化の方法の検討において開発した基礎技術を用いて、東京 23 区全体を対象とした都市モデルを構築した。その例を図 15 に示す。

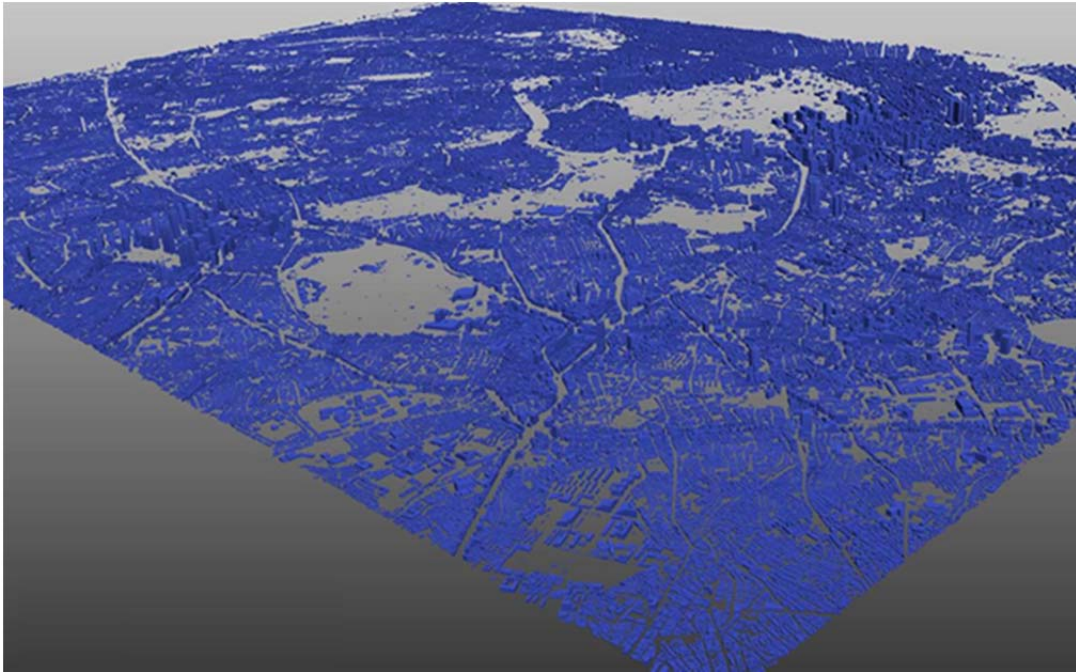


図 15 東京 23 区全体を対象とした 200 万棟弱の建物を含む都市モデルの例  
(東京湾上空から皇居方面に 23 区全体を俯瞰)

#### (c) 結論ならびに今後の課題

地盤の都市モデルの構築においては、今回開発した地盤要素生成手法を地理情報システムのデータに適用することによって、地点毎の平行成層 1 次元モデルであった従来の地盤の都市モデルに代わって、複雑な 3 次元地盤の都市モデルを構築した。

構造の都市モデルの構築においては、今回開発した地震応答解析用構造モデルの自動構築手法を地理情報システムの建物形状データに適用することによって、四角柱モデルからなっていた従来の構造の都市モデルに代わって、構造物一棟一棟に対する多面体モデルを構築した。

大規模数値解析結果の可視化の検討に関しては、サブプロジェクト③と連携して、災害対応能力の向上に有効な可視化の方法について検討を開始した。その結果、高速画像生成、3 次元、マルチスケールの 3 つの機能が大規模数値解析結果の可視化において重要であることがわかった。そのため、それらの 3 つの機能に対応する基本可視化モジュールを新たに作成した。

以上において開発した基礎技術を用いて、東京 23 区全体を対象とした都市モデルを構築した。

なお、今年度、都市モデルの可視化のために基盤となるべきクラスタ型計算機を整備し、都市モデルを用いた解析と可視化を可能とする環境を整えた。今後、今年度作成した基本可視化モジュールを用いて都市における地震被害の可視化に着手し、サブプロジェクト③との連携をさらに進めることで、より有用な可視化が実現できるようさらなる検討を行う。

(d) 引用文献

- 1) 例えば、鈴木克幸, 萩原世也, 長嶋利夫: メッシュフリー解析法, 丸善, 2006.
- 2) Ichimura, T., Hori, M., Bielak, J.: A Hybrid Multiresolution Meshing Technique for Finite element Three-Dimensional Earthquake Ground Motion Modeling in Basins Including Topography, Geophysical Journal International, 177, pp.1221-1232, 2009.

(e) 学会等発表実績

学会等における口頭・ポスター発表

なし

学会誌・雑誌等における論文掲載

なし

マスコミ等における報道・掲載

なし

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

名称	機能
基本可視化モジュール	大規模数値解析で得られる膨大な量の計算結果を可視化する AVS/Express 用のモジュール ((2)(b)3)b参照)

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成25年度業務計画案

平成24年度に開発した都市モデルを利用することで、東京23区全体を対象とした都市地震被害の先端可視化技術を開発する。サブプロジェクト③と連携して、災害対応能力の向上に有効な可視化の方法についての検討を継続する。