

|

(財)日本建設情報総合センター研究助成事業

三次元都市モデルの開発現状に関する調査、及び
GIS データとの整合性を考慮した三次元モデルの
構築・実証に関する研究報告書

平成 18 年 9 月

三次元都市モデルの開発現状に関する調査, 及び GIS データとの整合性を考慮した三次元モデルの構築・実証に関する研究報告書

目 次

1. はじめに	3
1.1 研究の背景と目的	3
1.2 三次元都市モデル作成の意義	4
2. 先端技術の動向 — 三次元都市モデル構築の手法	6
2.1 世界各都市における利用現況	6
2.2 三次元モデル構築の技法 —— 高さ情報と側面画像の取得	8
2.3 三次元モデル作成手法の変遷 I: CAD から GIS へ	13
2.4 三次元モデル作成手法の変遷 III: モデルのオンライン化	14
3. 三次元モデル開発の実情	17
3.1 世界主要都市における先端開発事例	17
3.2 東京: 多数の開発事例のある都市	18
3.3 ニューヨーク: 空間情報データベースモデルの開発	21
3.4 ロンドン中心部の都市景観のモデル化に関する試み	24
4. 三次元GIS都市モデルの構築	30
4.1 モデル作成の背景	30
4.2 三次元都市モデルの制作過程	32
4.3 時空間GIS都市モデル	35
5. おわりに	38
5.1 調査結果のまとめ	38
5.2 三次元モデル作成の課題	38
5.3 今後の展望—モデルの自動作成とオンライン配信	40
参考文献	41
Appendix A) 時空間モデルの作成について	42
Appendix B) ArcScene環境におけるテクスチャの反転問題について	44

1. はじめに

1.1 研究の背景と目的

近年、情報技術のハード・ソフト両面での発達に加えて、ライダー観測(LIDAR)技術の発達やGISデータの整備がすすみ、三次元都市モデル構築の環境が整ってきた。しかしながら、現在みられる三次元モデルの多くは、短期的な利用を目的として商業ベースで、あるいは試験的な意味で作成されていることが多く、異種ソフト間のデータ互換や相互利用への対応は、意外に遅れているのが実情である。とくに、CADを利用したプレゼンテーション機能にすぐれた建築モデルと、GISをもちいた空間属性データとの整合性には、大幅な改善の余地がある。また、さまざまな規格が混在する中、各業界や業者が独自でモデルやデータを整備しているため、それらを連結させて横断的に利用するのも現状では困難である。

都市空間を単に三次元表現したCADベースのデジタル建築モデルは、臨場感に富んでいるものの、GIS環境などに対応していないことが多く、せっかく作成しても、対象地域の地理データとの連携が困難で、FM/AM (Facility Management and Automated Management) や、都市交通網、都市インフラの計画・管理などの実務への転用に適しているとは言い難い。一方で、GISベースで開発される三次元モデルは、空間データを利用した解析機能にすぐれている半面、単純なブロックモデルがほとんどで、表現力に乏しい。

本研究の第一の目的は、三次元都市のデジタルモデル構築技術に関する各国での開発の現状を調査し、あわせてそれらのモデルのGIS環境における空間属性データとの互換性を検証することで、幅広い実務利用に耐える三次元都市モデル開発の方向性を定めることにある。具体的には、現在開発されている都市のさまざまな三次元モデルを類型化した上で、そこで利用されているさまざまな技術にも着目する。たとえば、二次元の電子地図情報と三次元のデジタルモデルの境界が、しだいに曖昧になりつつあるという仮説をたてて、これを検討する。同様に、開発の主眼が、従来のCADをもちいた建築モデルから、GIS技術をとり入れた空間情報モデルへ、さらにウェブ技術を用いたオンラインモデルへと、移行しつつある実態をあきらかにする。

本研究の第二の目的は、調査の結果を踏まえて、実際にGIS環境をもちいた三次元都市モデルを構築し、その実用性を検証することである。具体的には、ニューヨーク州バッファロー市の中心市街地を対象地域として、CADベースの都市モデルを構築してGIS環境内で稼動することで、双方のアプローチの融合の可能性や課題を検討する。さらに応用例として、同市の歴史的な景観を再現して、現況のモデルにいたるまでの都市景観の逐年変化を追えるような時空間都市モデルのプロトタイプを構築し、GIS環境での実装可能性を検討する。

1.2 三次元都市モデル作成の意義

三次元都市モデルの利用目的の一つに、都市環境をとりまくさまざまな意思決定プロセスの支援があげられる。これらのプロセスでは、まず課題抽出の段階で、情報収集と目標設定が、同時に並行しておこなわれる。つぎに、課題の分析をとおして、いくつかの計画案をあみだし、各代替案が当初の目標にかなうかどうかを評価する。そのうえで、計画案をひとつにしぼりこみ、これをさらに細かく練って、実行するというものである。このように定型化された計画プロセスが、さまざまなデザインおよび計画策定の過程でくりかえし利用され、それが積み重なって、全体としてひとつの都市計画の枠組みが形成される (Batty, 1979)。

通常、これらの計画は、行政判断によって計画が執行されたり、民間需要が生じた場合に具体化されるため、計画の各段階において、利権者や関係者に情報を伝達する必要がある。利権者が行政機関であれ、一般市民であれ、計画の成功への鍵は、計画案を明確に提示して、顧客の十分な理解を得ることだからである。また、都市デザインの場合、ある特定の専門家に依存するのではなく、計画のあらゆる過程で、専門家同士がアイデアを交換していくことが求められる。さらに、都市デザインにおける最終的な成果物は、視覚的な形をとるのが一般的であるため、その素案を伝える際には——たとえそのような視覚化手法が、機能的にも、社会的にも、実利上も、そして美的観点もふくめて、あらゆる側面から検討される必要があるろうとも——やはり、視覚情報を利用するのが、もっとも効果的である。都市デザインの分野における近年のめざましい技術開発の背景には、これらのさまざまな要因があると考えられる。

さて、このような視覚化技術は、デザインのあらゆる段階で利用されることから、その手法やモデルも、いくつかのグループに大別できる。たとえば、一部の専門家向けの視覚化作業 (*backward visualization*) が、データベースとリンクした視覚化ツールの開発や専門的な図案の作成をさすのに対して、前面で公開される視覚成果物 (*forward visualization*) のほうは、より一般的な観衆もしくは利権者一般への提供が前提となることから、情報量よりも外観上の美しさに重点がおかれることが多い。また、たとえ両者に対して、同じ手法がもちいられたとしても、実際に利用する際には、状況に応じて、細かく調整する必要がある(Battyら 1999)。

視覚化は、デザインや計画策定など、さまざまな意思決定プロセスのうちで、おそらくデジタル技術の影響が最も顕著にあらわれる部分であろう。デジタル情報が、無機質な数字から文字を経て、画像情報へと進化をとげた結果、いまやコンピュータの端末やネットワークへのアクセスの大半は、グラフィック情報に依存するにいたっており、すでに多数の視覚化作業用アプリケーションが開発されている。このように画像情報は、意思決定のあらゆる段階において、中心的な役割をはたすものであるが、その情報のほとんどがデジタルであることから、都市計画プロセス

や建築設計の際にも、それらの情報に付加価値を加えられるソフトウェアが重要になる。たとえば、GIS のような空間情報システムは、デザインの初期段階における対象地域の状況把握や、課題抽出のプロセスに欠かせない。空間データを加工して、解析・予測・最適化といった数学的処理をほどこすツールは、より大局的な問題解決や、代替案の作成・評価の際にも、重要な役割をはたす。また、GIS は、ほかにもクエリー機能や絞込み検索などの機能をあわせもち、デジタルツールとしてきわめて利用価値が高い。しかしながら、都市モデルの作成過程でデジタルツールがもっとも得意とするのは、やはりあたえられた情報から視覚的なモデルを作成する部分であり、双方の機能が補完しあってこそ、デジタル情報の真価が発揮される。

この視覚表現は、通常、地図や三次元モデルの形で実現されるが、利用価値の高いコンテンツを作成するためには、あらかじめその用途を明確にしておく必要がある。従来、これらのモデルは、具象的 (*iconic*) なモデルと、より抽象的 (*symbolic*) な数学・コンピュータモデルに大別されてきた (Lowry 1965)。今日のデジタル化時代にあつて、都市のコンピュータモデルは、数学的シミュレーションにもとづいて都市成長を追う抽象的なモデルではなく、都市景観の三次元表現をとおして、モデルを具象化する傾向を示しているといえる。本論であつかうモデルもまた、都市の成長や構造のシミュレーションではなく、もっぱら具体的な視覚表現によるものである。これらのモデルは、一見すると、単なる建築模型の電子版のようにもみえるが、実際には、デジタル情報にもとづいているため、各ポリゴンに属性値をあたえて、空間情報データベースを作成し、さまざまな分析や検索に役立てることができる。

いいかえれば、これらのモデルは、GIS 機能に加えて、三次元視覚機能を搭載したデザインツールとしての利用が可能であり、視覚化ツールとしての機能性がさらに向上すれば、最終的には、抽象的な数学モデルを変数として入力できるような総合視覚化パッケージの開発も期待できる (Teicholz, 2000)。

一般利用者のための展示モデルや、専門家グループ向けの作業モデルを提供する際の環境にも、同じような多様性がみられる。現在、一般に利用されている典型的なハードウェアとしては、デスクトップパソコン、ノート型パソコン、パームトップなどがあるが、すでに、WAP (Wireless Applications Protocol)規格の携帯電話をはじめとする各モバイルメディアの分野でも、二次元地図や擬似三次元データの提供がはじまっている。その一方で、四方の壁面に映像を投影して、仮想現実感をもたせる CAVE (Cave Automatic Virtual Environments)や Holobench など、高度な技術と設備を投入して、臨場感の高い空間を再現するハイエンドユーザー向けのシステムも、すでに一部で使用されている (Batty and Smith, 2001)。

2 先端技術の動向 — 三次元都市モデル構築の手法

2.1 世界各都市における利用現況

GIS の導入は、地図データや統計情報などの視覚表現の発達をうながし、さらに複雑な三次元表現への転機をもたらした。とくに三次元への拡張は、通常のハードウェア環境を利用して、複雑なポリゴン形状を描写できるようになったことや、デジタル写真を貼りこんだリアリティの高いモデルをつくれるようになった点で、大きなインパクトをもっている。これにくわえて、三次元環境をサポートするリモートセンシングデータが増加したことで、都市の三次元表現が、一段と身近な技術になりつつある。その一方でこれらの開発の副産物として、三次元描写にすぐれたシミュレーションゲームも、次々に開発されている。

ここでは、世界の主要都市を対象とした、三次元都市モデルの開発状況の調査結果を報告する。調査の内容は大略以下のとおりである。

まず、第一段階として、専門家を対象とした電子メール調査や、ウェブ検索、文献調査をとおして、63 件の大規模プロジェクトを特定した。このうち 38 件が、人口 100 万人以上の大都市を対象としており、中小都市の事例は、わずか 25 件にとどまった。また、対象都市の人口や予算規模が大きいほど、そのような視覚化プロジェクトが推進されている確率が高く、なかでも東京、ニューヨーク、ロサンゼルスに多数の事例が集中していた (Delaney 2000, Shiode 2001)。

調査の第二段階では、対象を 16 都市にしぼりこみ、各都市における主なモデル開発の事例を調査した。さらに第三段階として、先端事例の集中している 5 都市・地域 (東京、ニューヨーク・ワシントン、ロサンゼルス・サンフランシスコ、ベルリン、ヘルシンキ) を選択し、関係者の協力を得て、ヒヤリング調査をおこなった。

次項では、これらの事例の中から、東京、ニューヨーク、ロンドンの三都市に焦点をあてて、主だった事例をとりあげる。ロサンゼルス、ベルリン、ヘルシンキでも、それぞれに興味深いプロジェクトが進行してはいたものの、件数の少なさや先端性、機能性の観点から、ここでは割愛する。たとえば、カリフォルニア大学ロサンゼルス校の Jepson ら(1994)によるロサンゼルスダウンタウンの三次元モデルは、90 年代半ばに当時の最新の画像処理技術をもちいて作成された先駆的な試みとして知られているが、GIS 環境を取り入れてはいない。

これらの都市モデルの用途は、予想以上に多岐にわたるもので、新街区や建造物の景観評価などの都市デザイン利用は、むしろ少数にとどまった (Teicholz, 2000)。モデルの利用目的は、おおむね 次の 12 項目に大別できる。

三次元都市モデルの用途

- 都市計画 (Urban planning) — 主に都市デザインの場面で、景観や日照、特定の場所からの見晴らしなどを直感的に把握できる三次元表現手段としてもちいられる。この他、立地問題、地区計画、コミュニティ計画、市民参加の際の説明材料に提供される例もみられる。
- 建築デザイン (Architecture) — 都市計画と同様、立地やデザインの検討に利用されるほか、細かいスケールの建物美や周辺景観との調和の確認にも活用される。
- 都市基盤・公共施設 (Facilities and utilities management) — 上下水道、電力、ガスパイプライン、道路網、鉄道網など、各種基盤設備の保守管理。交通量をリアルタイムに把握したり、道路の交差を三次元的に表示する技術は、カーナビゲーションシステムにも利用される。
- 医療・緊急業務 (Emergency services) — 犯罪防止、災害対策、消火・救急時のアクセス経路などの確保。複雑な都市構造を把握して、目的地への最適到達路をみいだすことが鍵になる。建材や階高などの建物属性と、風力、波力などの自然条件を入力して、災害シミュレーションをおこなうものもこれにあたる。
- 通信業務 (Telecommunications) — 移動体通信の発信ステーションのエリアカバーや電波送信範囲の確認。とくに高層高密な中心市街地においては、移動体通信、固定電話ともに発信基地からの良好な電波受信の確保が重要になる。
- マーケティング (Marketing and economic development) — さまざまな商業・経済活動の商圈・需要分析。二次元および三次元モデルは、都市環境を視覚的に把握するのに適しており、特定のサービス業務に対する需要・顧客の所在の確認に役に立つ。
- 不動産分析 (Property analysis) — 商業・経済活動の分布とも関連するが、より広範な都市全体としての活動の広がり、周辺地区における空地状況、取引価格などをとらえて、不動産・地価を鑑定するもので、総合建設業、不動産業などにも需要がある。
- 電子商取引 (E-commerce) — いわゆる仮想都市と総称されるもので、電子決済機能のみに特化した平面的なものから、町並みのひろがりをあらわした完全な三次元モデルまで、さまざまな形態のオンラインショッピングモールがある。
- 環境 (Environment) — 二次元および三次元モデルによって、交通計画や開発計画に対する環境影響評価を表現したり、環境汚染の現状評価をおこなうもの。
- 教育・学習 (Education and learning) — さまざまなレベルのユーザーが、都市の機能について学習できるようなインターフェイスの開発。仮想都市の環境をもちいた遠隔教育システムの構想もある。
- 観光・娯楽 (Tourism and entertainment) — 観光資源の情報や所在地を表示したり、都市内の交通、宿泊ガイドなどにリンクすることで、旅行者に情報を分かりやすく提供する。
- 行政・自治体の案内 (City portals) — 都市情報の中枢へのアクセスポイントとしての二次元・三次元モデルの活用。地方自治体の業務内容をわかりやすくしめすことができる。

2.2 三次元モデル構築の技法 —— 高さ情報と側面画像の取得

さて、実際の事例を検討する前に、ここで三次元モデルの作成に利用される主な手法や技術についてまとめたい。モデル構築手法は、さまざまなマッピング技術によって確立されている。これらのオプションは、二次元の平面写真から三次元の細密モデルにいたるまで、モデルの中で使用されるポリゴンの複雑さによって、以下のように分類できる。

表1. ポリゴン形状の複雑さによる三次元モデルの分類

二次元デジタル地図およびデジタルオルソ画像	粗 (ポリゴン数の少ないモデル)
パノラマ画像とドレープ画像による 2.5 次元モデル	↓
建物形状をそのまま縦方向に延長したブロックモデル	↓
画像テクスチャを貼りこんだブロックモデル	↓
屋根形状を再現した建築モデル	↓
建物形状を忠実に再現した CAD モデル	細密 (ポリゴン数の多いモデル)

なかでも、ドレープ画像とパノラマ画像は、都市のモデリングと密接に関連したユニークな手法である。前者は、壁面最上部のピクセルを側面に流しこむもので、上空からのオルソ画像だけを手がかりにモデルを作成する際に、建物側面に擬似テクスチャを貼りこむのに使われる技法である。後者は、ある一地点からの画像情報を全方位にわたって取得して、連続画像を作成したもので、調査地域内の固定点からみた場合の三次元表示に適している。十分な数の撮影点を確保すれば、都市域をきわめて忠実に再現することができる上、通常の三次元 CAD モデルでははぶかれることが多い通行人、交通、標識などをふくめて、町並みをありのままに表現できる。

この手法をもちいて、ロンドン・ドックランズ再開発地区のカナリー・ワーフをパノラマモデルで再現したのが図 1 である (Smith, 2000)。なお、技術的には、多数のパノラマ画像を取得して、切れめのない都市の三次元モデルを作成することも可能ではあるが、非常に手間がかかるので、実用例はまだ少ない。調査の結果、わずかに、カナダのバンクーバー市内を対象としたパノラマ合成モデルが見つかったが、これもおよそ 20 点ほどの交差点からの画像を組み合わせ、小さなエリアを限定的にカバーしていたに過ぎなかった。

一方、広域画像を取得する技術の一つに、前述の LIDAR がある。地上計測と航空測量の両方が可能であるが、前者は主に詳細な建築モデルの作成に、後者はもっぱら小縮尺の都市モデル構築に利用される。また、航空 LIDAR 技術は、精度の高い DEM (Digital Elevation Model) の提供を目指して、GPS (Global Positioning System) と併用されることが多い。



図 1. ロンドン東部、カナリー・ワーフ広場にて: (左)パノラマ画像の展開図と、(右) 同天空図.

このような計測モデルは、都市平面図から取り出した建物形状の情報と、広域航空画像データなどの高さデータを組み合わせて作成するのが一般的である。LIDAR 計測によって得られた広域デジタルデータに、二次元の建物平面形状を重ねあわせて、用途別に空間属性を付与するのは、比較的単純な GIS 操作だけで可能である。これを GIS 情報の高さデータと照合することで、大規模な都市モデルが容易に構築できる (図 2 参照)。なお、これらの広域画像から自動的に建物形状を抜き出して、三次元モデルを構築する技術も現在開発がすすめられている。データの中のノイズの処理が困難で、実用に耐えるものはまだ少ないが、このようなモデルの自動生成技術が確立されるのも時間の問題と思われる。

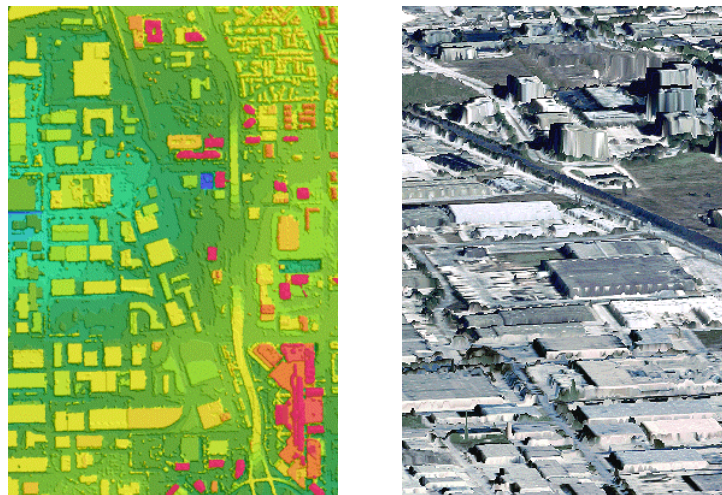


図 2. LIDAR 技術を利用した都市モデル (<http://www.globalgeodata.com/bldgdata.html>).

このほか、プリズムブロックモデル(図 3a 参照) と呼ばれるタイプのモデルがあるが、建物のテクスチャを一切はぶいているので、臨場感にとぼしい。これは、上空のほぼ垂直の角度から撮影した航空写真から建物をおこすため、建物側面の壁面情報がほとんど得られないことに起因している。ドレープ処理をほどこすことで、擬似的な色合いを持たせることはできるが、個々の建物の側面を再現するには、やはり斜め方向、もしくは地上レベルから撮影した画像が必要になる。大都市中心部での低空飛行や、地上情報が切れ目なく得られるような高層建築群へのアクセスには、おのずと限界があることから、地上レベルから撮影した写真やビデオ映像が採用されることが多い。しかし、この手法にも、さまざまな路上障害物によって、建物情報が十分に確保できないといった問題があり、同じ場所を二方向から撮影して、情報を補うなどの工夫がとられている。図 3(b)では、この方式をもちいて、ロンドン市内のピカデリーサーカスを再現している。

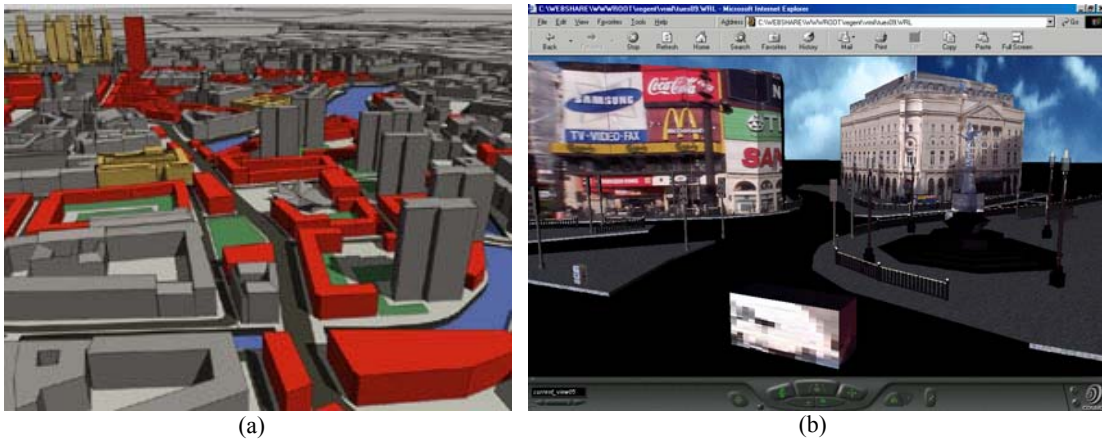


図 3. 航空写真を利用したモデル: (a)LIDAR 技術をもちいたベルリンのモデル、(b) 地上レベルから撮影した画像を貼りこんだロンドン、ピカデリーサーカスのモデル。

また、最近では、測量技術そのものも、以前の測地・測量手法にくらべて、格段に進歩しており、三次元形状をはるかに効率的に再現できるようになっている。単一の建物ないし近隣住区の精密なモデルも、航空測量と地上計測のデータを照合させながら、きわめて短時間で作成できる。先端事例の中には、自動検索機能をもちいて、重なり合う複数の画像の中から、一致する点、辺、地域の位置情報を特定し、あらかじめ登録された建物形状の категорияに自動的に分類して、可能な三次元形状の選択肢を提示するものもある。しかしながら、歴史的建造物が林立しているような複雑な形状の街区は、限られた選択肢にあてはまらないため、依然として、手作業による入力に依存せざるを得ない。したがって、現在のところ、最先端の技術をもってしても、屋根形状などの詳細に関しては、手作業が不可欠である (図 4 参照)。

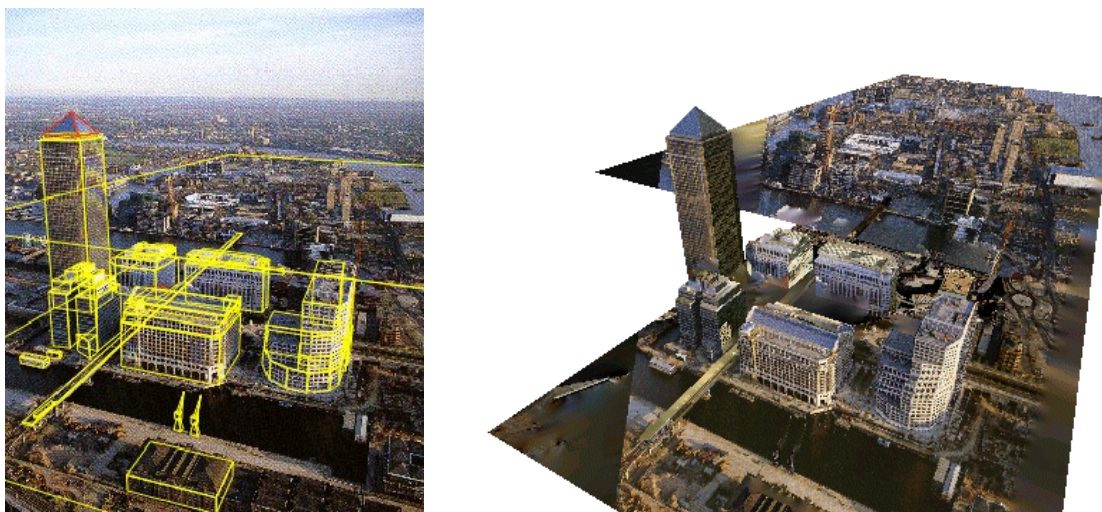


図 4. ロンドン、カナリー・ワーク地区のモデル. プリズム・モデルの屋根形状を加工している様子.

個別の建物の精緻な CAD モデルは、往々にして、上空からの計測データと地上レベルからの計測結果を照合しながら再現される。モデルの構成要素は、アオリ効果や撮影角度などの影響を除去したデジタル・オルソ画像から、建築ディテールの詳細にいたるまで、多岐にわたる。このようなデータを建築設計事務所に提供する測量会社は、多数あるが、都市の全域にわたって、そのような詳細なモデルを構築しようとするれば、データのコストが非常に高つく（図 5 参照）。

これに対して、二次元の平面図のみから、三次元形状をおこすタイプのモデルも開発されている。これらのモデルは、GIS ソフトの延長として開発されたものが多い。デスクトップ GIS の ArcView の拡張機能である 3D analyst は、その好例である。このモデルの利点は、三次元環境でも GIS 機能がそのまま利用できることで、平面図の属性データを三次元空間にとりこめる。また、三次元のモデルを直接作成するのにくらべて、集計の容易な二次元図をベースにしてモデルを構築するため、広範囲をカバーする際にも適している。

GIS 系モデルの大半は、建物側面に関する詳細な記述こそもないが、用途によっては、十分に需要をみたしている。たとえば、広範囲にわたってブロックモデルを作成したり、おおざっぱな日照量を計算する場合が、これに該当する。図 6 は、このようなモデルを小さな行政単位にあてはめた実用例で、ロンドン中心部およびドックランズ・ドッグズ島再開発地区 (Isle of Dogs) の丁目レベルの人口分布を示している。



図 5. Terrestrial Photogrammetry 社の建築 CAD モデル (<http://www.asfound.com/>).

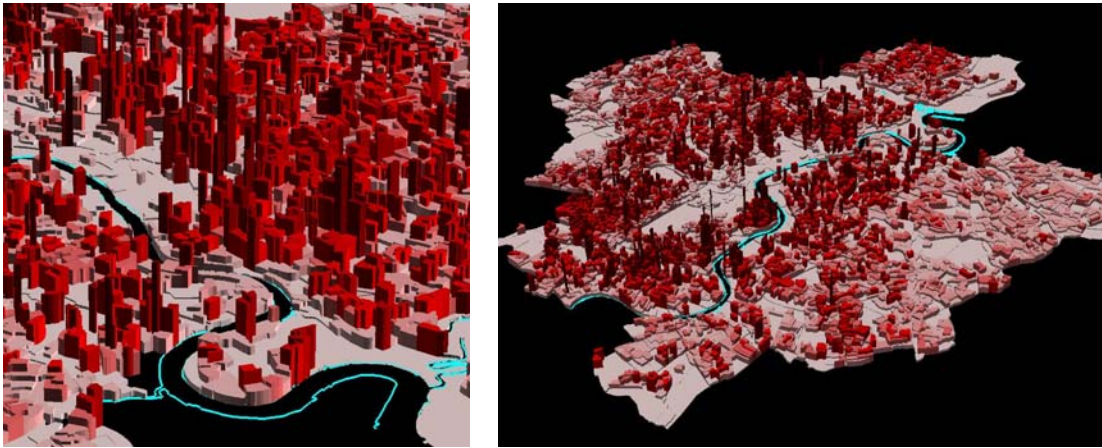


図 6. 三次元 GIS——ドックランズ地区およびロンドン中心部全域の人口分布.

このほかに、あらかじめ他のソフトで作成した三次元モデルを、GIS と連動させようとする試みもある。たとえば、後述のニューヨーク・マンハッタン地区の事例では、CAD 系のソフトによって生成されたモデルに、基本的な GIS 機能を付加しているため、双方の特徴を兼ね備えたものになっている。図 6 のロンドンの例のような抽象的なモデルとは異なり、各敷地単位でデータを集計しているため、建物情報が取得できるほか、簡単なレンダリング処理をほどこすことも可能である。

2.3 三次元モデル作成手法の変遷 I: CAD から GIS へ

従来の CAD ソフトをもちいたデザイン手法では、モデルの精度や細かい表面形状の仕上げなどの細部にこだわる傾向があったのに対して、最近では、空間情報解析や GIS をもちいた分析技術が主流になりつつある。これは、検索結果の三次元表示など、クエリー機能への需要が高まりつつある現状において、単なる建築モデルのデジタル版ではなく、GIS と同様の機能をもつ三次元の計画・解析ツールが求められていることのあらわれといえる。また、地勢・測地工学 (*geomatic engineering*) の発展をうけて、リモートセンシングによるデータ取得技術や、新たな表現手法にもとづいたレンダリング技術も普及しつつあることから、そのような GIS ベースのモデル構築に必要な技術やデータが増えてきており、モデル構築の環境が整ってきた (Fuchs, 1996)。さらに、音声や文字テロップなどのマルチメディアを併用して、インターネットでコンテンツを提供する試みもあり、従来の建築模型的なモデルとは、本質的に異なる方向がしめされている。

モデル開発に要するコストや時間の面でも、大幅な改善がみられる。これまで、CAD タイプのモデルの多くは、膨大な量の手作業入力と修正の積み重ねによって作成されていたため、精度の高いモデルができる反面、コストの削減が困難であった。しかしながら、最近になって、写真をはりこむレンダリング技術や、航空写真でとらえた壁面最上部のピクセルを下まで流し込むいわば 2.5 次元のドレープ画像モデル (*2.5D image draping*) などのデジタルマッピングの新技术が採用されるようになり、ポリゴン数の削減と形状の簡素化が可能になった。こうした一連の技術開発によって、モデルの精度とコストにも選択肢がふえて、二次元および三次元のコンピュータモデルを需要に見合った精度で作成できるようになった。

データ取得の技術開発も、日進月歩の勢いですすんでおり、新しいレンダリング手法とあいまって、モデル開発の一層の推進に貢献している。とくに、リモートセンシング技術の発達によって、イメージ生成とモデル作成の自動化が可能になったことは、大きな成果といえる。LIDAR (*Light Detection And Ranging*) 技術——低空や地上レベルから、レーザー波を照射して、レンズ内の各点までの距離を探索する手法——を中心としたさまざまなリモートセンシングの手法は、短時間で都市のブロックモデルを生成するのに適しており、大規模モデルの開発に幅広く利用されている (Morgan, 2000)。実際、後述するプロジェクト事例の多くは、いずれも何らかの形で、これらの技術・手法をとりいれている。

さらに、これらのモデルを表示する方法そのものも変わりつつある。具体的には、パソコンやワークステーション上で作動するさまざまな CAD および GIS パッケージが市場に出回ったことで、モデルをユーザーの欲するスケールで表示したり、インターネットを介してサーバー上のモデル

データを利用したりといった使い方ができるようになった。とくに、VRML (Virtual Reality Modeling Language)や Web3D のようなネットワークベースの三次元視覚化技術は、近年急速に普及しつつある。Planet9 社が作成している多数の都市のモデルも、すべてこの技術を応用している (<http://www.planet9.com/>)。このほか、さまざまなアニメーションや写真情報・文字情報とリンクしたマルチメディア表示をサポートする環境も、ソフトレベルで整備がすすんでいる。

以上のことから、本論でとりあげる各都市モデルは、それぞれ以下の四項目に関連していると考えられる。

- 二次元・三次元の CAD や GIS、マルチメディアソフトなど、専用ツールの利用
- 地域レベルから細密街区にいたるまでのさまざまなスケールでの空間抽出
- 細かい手作業入力や、LIDAR をもちいた自動取得などによるデータ作成
- デスクトップマシンからインターネットにいたるまでのさまざまなモデル供給方法

2.4 三次元モデル作成手法の変遷III:モデルのオンライン化

三次元都市モデルの作成手法をみると、前出のような CAD から GIS への推移は、90 年代半ばごろから顕著になってきている。これに加えて、近年、三次元モデルのオンライン利用と、それに関連する技術やサービスが急激に増えている。これら一連の技術は WebMapping の一部である。

WebMapping 技術そのものは、鉄道路線図や、道路網の情報を元に、オンラインで経路探索を行なうサービスに端を発すると考えてよいが、近年、これに三次元都市モデルを加えたものも増えている。インターネット検索サービス業者の Google 社の開発した Google Earth もその一例で、すでに米国ではテレビのニュース報道の際に、実際の写真の入手が困難な環境(戦闘状態にあるイラクの地方など)を表示する際に使われている。

Google Earth は、単に三次元モデルをオンラインで配信するだけでなく、ユーザーが独自の GIS データを重ね合わせて表示することが可能である(図7の例では、土地利用による色分け区分のレイヤが示されている)。このように、ユーザーが、三次元モデルの環境上に、テキストや画像などのデータをリンクして、ほかのユーザーと共有できることから、オンラインでの計画策定、意思決定支援目的での利用を試みた例もみられる。



図 7. Google Earth の一例 (<http://www.portlandmaps.com/google.cfm>)

三次元環境での利用を前提とした Web mapping 技術の例では、このほか、Yahoo 社による Yahoo Maps、Microsoft 社の Live Local (図 8 参照) などがあるほか、Podcasts、Blogs といった、個人ユーザーによるデータ配信、情報交換の場でも、新しい技術や新モデルが次々に開発・投入されている。しかしながら、これらの技術が本格的に使われ始めたのは、2005 年に入ってからのもので、現在、オンラインサービス・ソフトウェアの大手各社が技術開発とシェア確保にしのぎを削っている状況である。したがって、いまだ技術標準、やマーケットを独占するような規格はみえてきていない。また、実際の三次元都市モデルの開発コストを削減するため、Google 社を中心に、既存のさまざまな三次元都市モデルの提供をよびかけたり、使用契約を結ぶ動きがでてきている。たとえば、ロンドン大学 高等空間解析センターが中心となって制作しているバーチャルロンドンモデルなども、Google Earth 環境上でロンドンの三次元モデルとして利用されることが最近決まった。

これらのオンラインモデルの最大の利点は、同一環境をほかのユーザーとリアルタイムに共有できることにあり、とくにユーザーが情報を追加していく機能を確保することで、さまざまな用途への転用可能性も広がっている。その一方で、これまでさまざまな環境で開発されてきた主要都市の三次元都市モデルをそのままオンラインで使うため、同じ Google Earth 内でも、都市によって、モデルの解像度、情報の正確さ、新しさなどがまちまちで、モデルの信頼性は高くない。

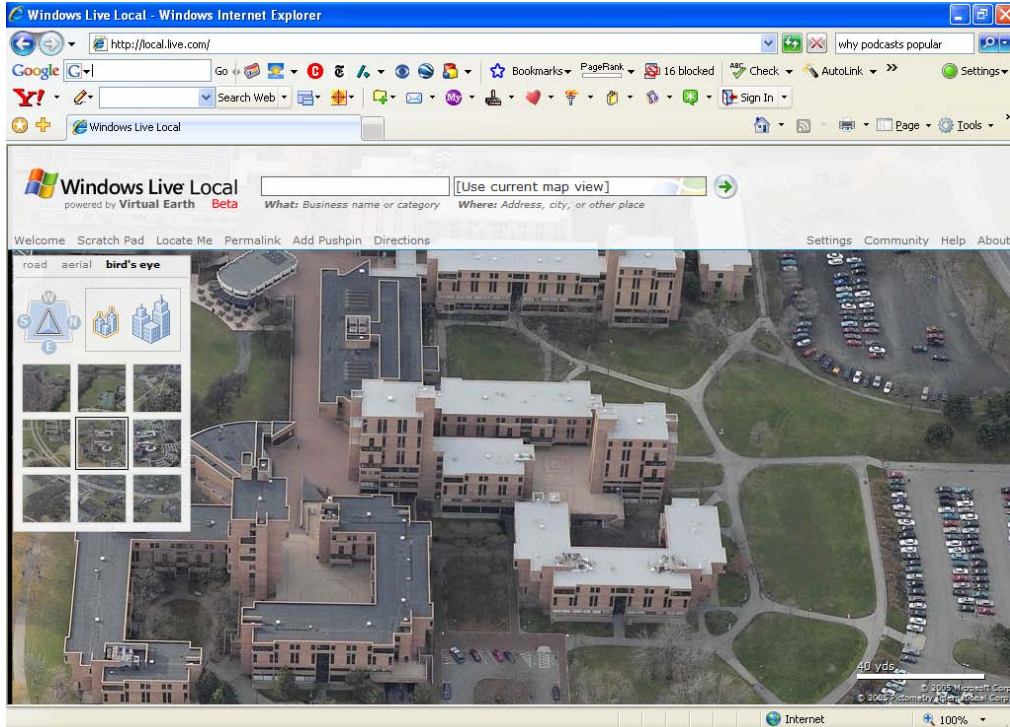


図 8. Microsoft 社提供の Live Local。斜め方向から撮影した航空写真を利用して、三次元の臨場感をだしている。

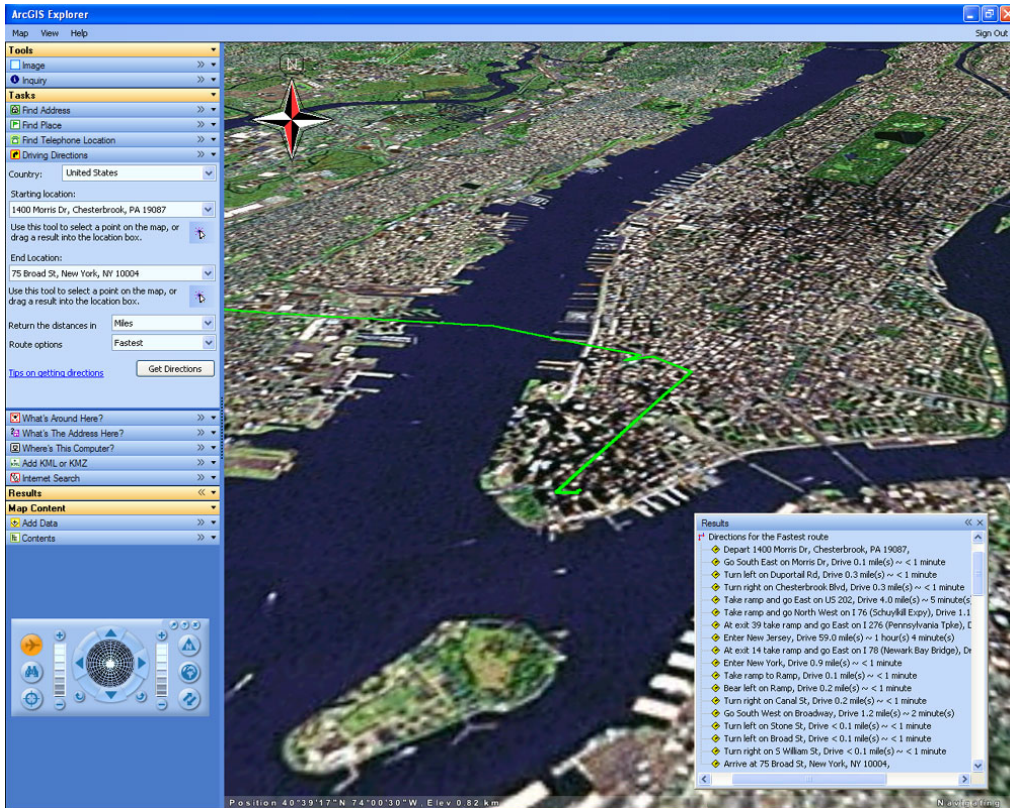


図 9. ESRI 社提供の ArcGIS Explorer。GIS ソフトウェア会社の開発になるだけあって、クエリー等、機能は充実。

また、オンラインでの配信を目的とするため、データの大きさにも制約があり、モデルのテクスチャなどの解像度は決して高くない。このため、町並みの詳しい景観評価や、建物のデザイン計画をおこなうには適さない。

たとえば、図9は、ESRI社の開発したArcGIS Explorerのイメージであるが、町並みが解像度の低い衛星写真のデータで再現されていることが歴然としている。このモデルの主眼は、精緻な建築モデルを作成することではなく、従来のようなさまざまなGIS機能を備えた三次元モデルを提供することであり、開発目的は達せられているが、ユーザーが位置の特定に困るほど解像度が低い場合、モデルとしての実用性が問われる。

3. 三次元モデル開発の実情

3.1 世界主要都市における先端開発事例

本章では、世界主要都市における三次元モデル開発の実情を調査した結果をもとに、東京、ニューヨーク、ロンドンの三都市における事例を報告する。調査を開始して、すぐにあきらかになったのは、三次元都市モデルへのアプローチが多様なことで、業界標準が確立されていない実態が浮き彫りになった。また、ESRI社のArcGIS9.1など、一部のGISパッケージの三次元への機能拡張をのぞいては、多目的ソフトウェアも、ほとんど開発されていなかった。もともと、ニューヨークやロサンゼルスのように、大規模モデルが多数開発されている都市では、自社開発のソフトを統合して、多目的化に対応させようとする動きも若干みられた。この中には、今後のさらなる拡張性を前提として開発されたものも多く、特定の業務や特定の都市モデルの枠をこえて、活用できる可能性を秘めている。

次に注目すべきは、オルソ画像が普及していたことと、高さデータの取得に、LIDARシステムが使われるようになったことであろう。実際、われわれが調査したモデルの大半が、高さデータの取得と記述をなかば自動的に処理しており、手作業はほとんどなかった。これらのモデルの作成には、さまざまな測量技術が利用されるが、それらの技術の一層の発達により、最終的には、データ入力からモデル作成までの全行程が自動化できるものと考えられる。

モデル開発のもうひとつの興味深い特徴として、木造模型の利用があげられる。たとえば、ロンドン市 (City of London) は、1:1,000 スケールの精巧な都市模型を所有しており、これまで経済開発課が中心となって、各国へ搬送して展示してきた。これは、航空写真などにくらべてボリューム感のある模型のほうが訴求力をもっていると判断したためで、現在も基本的には、模型を主体とした展示のみを企画している。これに対して、たとえばエルサレムでは、市当局が、従来

型のスケール模型と、デジタル模型の両方を作成・管理しており、開発案を検討する際などにも、双方を同時にもちいて、シミュレーションに役立てている。また、六本木ヒルズ開発事業を行なった東京の森ビルは、さまざまな都市や街区の 1:1,000 スケール模型を作成するかたわら、これをビデオカメラでとらえ、スクリーンに投影して、デジタル映像化を試みるアプローチをとっている。さらに、英国リバプール市では、既存の模型の写真をもとに、市街中心部の詳細なデジタルモデルを作成する計画がすすめられており、デジタル測量のプロセスをはぶいた点で、注目に値する (Padmore, 2000)。ほかにも、デジタル技術をもちいた三次元プロジェクトで、模型の重要さを強調するものは多い。これは、模型をデジタルモデルと関連づけることで、ユーザーがモデルとインタラクティブに接し、ボリュームをより感覚的に把握できるからだと思われる。

3.2 東京：多数の開発事例のある都市

世界中で多数の三次元モデルが開発されているなかで、どれか一点だけモデルをあげるとき、先駆的な試みという点で、カリフォルニア大学ロサンゼルス校のモデルを推す声は、いまなお根強い (Liggett and Jepson, 1995; Jepson, 2000)。しかしながら、調査の中で、とくにすぐれた開発事例が集中する都市として浮かび上がってきたのは、東京とニューヨークの二大都市であった。ニューヨークでは、合計 4 件の大規模プロジェクトが確認された(うち 1 件は、商業ベースで開発されている他の 3 件のモデルを市当局が統合開発しているもの)に対して、東京では、大小とりまぜて 15 近くものモデル開発・三次元モデル研究が確認された。東京は、全体の市街地面積が大きいと、それぞれのモデルのスケールや対象地域もまちまちで、競合するというよりも、全容のみえない大海の中で、個別に開発がすすめられているという印象を受けた。われわれの調査では、この中から、相対的にスケールや予算規模の大きなモデル開発を取り上げた。

東京の三次元モデルの開発にたずさわる関係者は、おもに以下の四つの立場にわけられる。各市区町村および地方自治体、電力・通信事業者などの都市基盤設備関連分野、建設・建築事務所およびデザイン業者、そして、測量会社・コンサルタントおよび学術団体である。

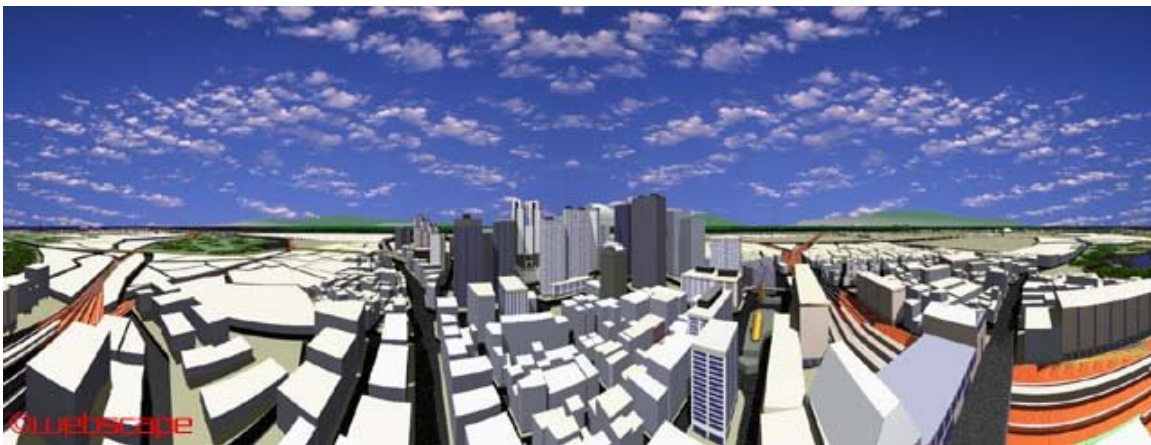
たとえば、アジア航測では、自社取得した航空測量データと、自社開発の専用ソフトをもちいて、大東京圏全体を網羅するモデルを構築している (図 10a 参照)。同社のモデルは、専用のインターフェイスをもつ GIS パッケージをとおして、多機能検索をおこなったり、さまざまなシミュレーション用に加工できるほか、景観評価や通信事業での発信ステーションの立地分析、交通分析などの分野でも利用されている。アプリケーションとしては、非常に豊かな GIS 機能をもっているが、専用開発のソフトに依存するため、用途に応じてモデルを加工する必要がある。

同じく東京の CAD センターは、東京や横浜をふくむ多数の大都市と、その中心市街地を対象に、数々の VR アプリケーションやモデルを開発してきた実績をもつ。モデルの多くは、住宅・都市整備公団をはじめ、多くの公共および大規模開発事業のデザイン現場で使用されたもので、CG パースも VR モデルも、非常に詳細かつ洗練されたものであった。またモデルを表示しながら、植栽を変更したり、歩行者、車両等を半自動的に動かすといった属性値の動的な変更が可能で、建築・都市デザインのプロセスにおける景観検討の材料としては、世界でももっともすぐれたモデルの一つである。しかしながら、特定の地域を対象とした防災シミュレーションモデル (図 10b 参照) や再開発計画など、各モデルの用途が具体的で、特定の利用目的を前提に開発されているため、必要以上の空間情報は入力されておらず、一般的な GIS 機能の利用は、限定されている。



(a)

(b)



(c)

図 10. 東京の事例より. (a) アジア航測、(b) CAD センター、(c) Webscape 社のモデル.

一方、森ビルでは、前述のとおり、従来型の模型とデジタルモデルを組み合わせたユニークなアプローチをとっている。具体的には、1:1,000 スケールのブロックモデルに画像を貼りこんだものをビデオカメラでとらえ、これを三面のスクリーンに投影するというもので、模型の実在感がそのまま体感できるという利点をもつ反面、携帯性に欠けることと、空間情報データベース技術への拡張性に欠けるという問題があった。

森ビルが手がけた1:1,000スケールモデルの中には、東京都千代田区全域、ニューヨーク・マンハッタン中心部、横浜みなとみらい 21 地区、上海中心部などもふくまれる。これらのモデルの多くは、すでに多くの開発事業などの検討材料として利用されている。また、ウェブ配信やCD-ROM メディアの配布により、これらのモデルを紹介したり、建築模型の型紙を公開して、ユーザー自らが、紙工作で模型を再現するオプションを提供している。同社によれば、情報・デジタル技術の発達は、コスト削減と作業時間の短縮の点から、VR モデルの開発のみならず、物理模型の制作にも貢献しているという。

公的機関の関係する事例も、数例ある。たとえば、総務省では、GIS 構築のための情報通信技術の研究開発事業を、NTT データコミュニケーションズに委託している。現在、全国から三市町村をモデル地区に選定し、航空および地上レベルから取得したデータをもとにモデルを作成して、データ獲得・処理方法やデータ精度の検証にあたっている。将来的には、全国各都市の三次元モデルの構築を目指している。また、経済産業省の次世代 GIS モデル事業では、中日本航空の開発によるデジタル航空写真から三次元モデルを自動生成する 3D Map System、とくに消防活動支援システムの開発プロジェクトなど、幅広い GIS モデルの開発を支援している。

地方自治体レベルでの三次元モデルへの取り組みは、まだ本格化しておらず、東京都も体系的な GIS データを独自に取得・管理しているものの、いまだ二次元的な利用を前提としている。横浜市でも、公的予算による三次元モデルの整備がおこわれていないのは同様であったが、携帯端末をもちいた市民参加型のモニター実験など、ユニークな試みが目をひいた。

東京をモデルとする三次元プロジェクトは、このほかにも多数あるが、大半は、CAD モデルに近く、空間情報の利用には適していない。たとえば、Planet9 社の西新宿モデルや、Superscape 規格をもちいた渋谷西口モデルなど、街区レベルのオンラインモデルも多数作成されているが、いずれも Web3D などの言語で記述された観賞用モデルで、属性データは、一切もたない。一方、デジタル設計の代表格としては、Webscape 社によるパノラマ画像やクイックタイムムービー画像をもちいた新宿モデルがあげられる (図 10c 参照)。これらのアプリケーションは、開発手法やコンセプトも非常に多様で、ここで逐一あげることはさしひかえる。

3.3 ニューヨーク：空間情報データベースモデルの開発

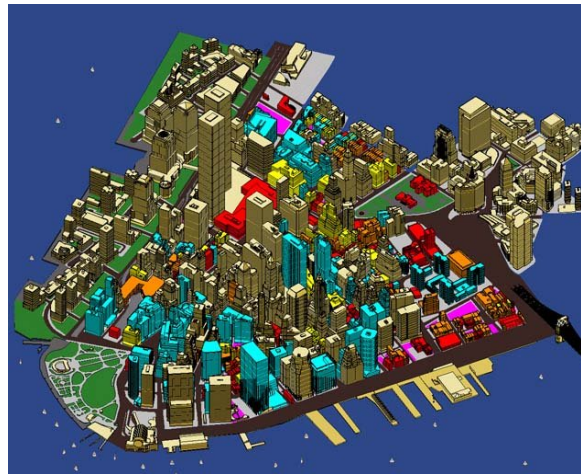
ニューヨークを対象とする 4 件の開発事例は、東京のモデルにくらべると、手法にばらつきが少なく、いずれも強力な GIS 機能に裏うちされている。それぞれ複合検索機能を持ち、街の三次元構造をとらえたモデルばかりである。ニューヨーク市情報通信部 (DOITT: Department of Information Technology and Telecommunications) は、環境保護から犯罪防止にいたるまで、GIS および空間情報データシステムを幅広く活用している。同局によるモデル開発事業の主眼は、各部局およびユーザーの利用に耐えるような充実した機能をもつ GIS 環境を開発することであり、市全域の GIS データを網羅している。ここで、特筆すべきことは、DOITT が、三次元アプリケーションに関して、ニューヨーク市当局の中で主導的な立場をとっており、また、民間三業者とも密接に連携をとっていることである。なお、9 月 11 日のワールドトレードセンターを舞台としたテロ事件の際は、この三次元モデルをベースに、市内の避難・誘導経路、復旧計画の一部が練られたとされるが、実際には、実用性が低く、ボランティアの学生やデザイナーたちによる入りに助けられて、かろうじてデータのアップデートが行なわれたようで、三次元都市モデルの危機管理目的の運用には、まだ障壁があると考えられる。

ニューヨークの三次元モデルを手がける三業者は、たがいに類似のアプローチをとってはいないものの、それぞれモデルを独自開発している。Analytical Surveys Inc (ASI) は、大手の航空測量・GIS・測地測量会社で、過去 5 年余にわたって、ニューヨーク市環境保護部 (New York City Department of Environmental Protection) に GIS とオルソ画像を提供してきた実績をもつ。この事業の副産物が、マンハッタン地区の一部を対象とした三次元モデルの開発である。このモデルは、GIS データの作成過程で取得したそれぞれの建物の高さ情報と、オルソ画像を組み合わせ、ArcView の 3d Analyst によって作成されている。モデル自体は、現段階では、ASI 社の宣伝に使われているだけで、NYCDEP には採用されていないが、将来的には、さまざまな都市関連サービス業者からの需要をくみとって、市街地モデルを開発する計画を立てている。

Environmental Simulation Center (ESC) 社は、New School of Social Research を母体とする民間の研究機関で、やはり、さまざまな専用ソフトをもちいて、二次元および三次元の GIS モデルを開発し、市当局に提供している。同社作成のマンハッタンモデルの当初の開発目的は、商業用途地域の中から、住居への転用が可能な延床面積を特定し、これを抽出することであった。しかしながら、同社の最近のモデルは、もっぱら計画建造物が計画対象地域の景観になじむかどうかを確認して、計画プロセスを改善することに傾注しており、三次元モデルをとおして、計画・デザインの間における活発な議論と市民参加の機会を提供する方向に力を注いでいる。



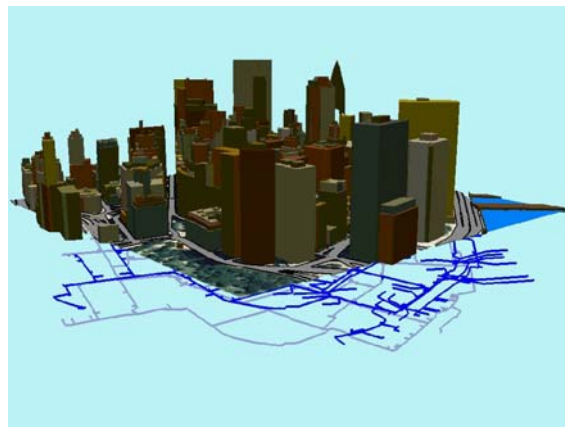
(a)



(b)



(c)



(d)

図 11. ニューヨークモデル: (a) UDS モデル. マンハッタン地区における商業ビルの床面積による塗り分け、(b) ESC のモデルで、同様に床面積による塗り分け表示をしたところ、(c) ASI モデル. オルソ画像をドレープ処理して、三次元ブロックモデルに貼りこんだもの、(d) 同 ASI モデルで、地下レベルの都市基盤ネットワークを表示したところ。

ESC のモデル化手法は、もっぱら、敷地選定とデザイン修正の際のコミュニティ計画支援ツールとしての利用を前提としたものである。実際に、同社のモデルの多くは、それぞれインタラクティブなデザインツールとして提供され、デザイン修正のプロセスを一般公開することで、計画への市民参加をうながす材料としてもちいられている。ESC は、自社のモデルを「利用者が即座に溶けこみ、自然にその中で動きまわられるような環境」と位置づけており、さらにまた、その三次元インターフェイスを予測モデルとリンクさせることで、近隣住区の経年変化の予測にも活用できるとしている。同社の CommunityViz プロジェクトは、三次元モデルに、エージェントベースの

離散数学モデルを導入したシミュレーションで、バーモント州にある人口約 1,000 人の小都市 Ascutney を対象に、ケーススタディを展開している。エージェントモデルで、一人一人の経済的、社会的な変化を再現することで、民族構成比や税金、人口増減などに関する町全体の詳細な将来像を予測している (ESC, 2003)。

同じく、民間三社の一つである Urban Data Solutions (UDS)社のモデルは、外観上も、機能面でも、ESC モデルをさらに上回るものであった。同社は、1997 年にベンチャー企業としてスタートして以来、急成長を重ねて、現在では、アメリカを中心とした各都市の三次元 GIS および CAD コンテンツを幅広く提供するにいたっている。さらに、同社は、マンハッタン、シカゴ、ワシントンDCの各都市の詳細な三次元モデルを商業開発して、この分野では、先駆的ともいえる事業活動を展開してきた。

UDS は、Skidmore、Owings、Merrill など、1970 年代後半に CAD およびフライ・スルーモデルを開発した CAD 業者、とくに建築 CAD の訓練を積んだ人材が中心になって設立された (Deken, 1983)。いまや、都市モデルの需要・顧客は、当時とまったく異なっており、移動体通信のマーケットにおける都市域でのアンテナ設置のための視界領域分析が、モデル開発の大きな原動力になっている。この他にも、さまざまな需要が介在して、モデル開発の技術がみがかれてきた。そのなかには、開発業者に対して、設計段階のオフィスビル内のある特定のオフィスからの眺望を三次元モデルで再現するといったものもふくまれている。新聞社やその他のマスメディアからの需要もすくなくない (たとえば、ニューヨークタイムズ社提供の三次元地図や、ニューヨーク証券取引所周辺のフライ・スルーモデルなどがこれにあたる)。しかしながら、UDS モデルの中心的なアプリケーションは、いまなお、顧客の需要にかかわらず、モデルをとおして、大縮尺でのディテールに対応し、細部にわたる情報を提供することにある。これには、予定建築物をふくむ周辺景観と、そこからの眺望の確認、不動産データの運用、多数階にまたがる高層建築の運営なども含まれる。移動体通信の分野で利用される視界分析や、日影斜線などの GIS 分析手法への対応も同様である。

このように、東京のケースと同様、各社のモデルの利用・応用範囲は、非常に広範にわたっている。図 11 は、各社のモデルの一例を示したものである。

3.4 ロンドン中心部の都市景観のモデル化に関する試み

東京、ニューヨークの二都市にくらべて、後発の感のあるロンドンにおいても、三次元モデルの開発が確認された。現在、ロンドンでは、少なくとも 6 件の三次元都市モデル開発のプロジェクトが確認されている。そのほとんどが、政府・自治体による援助・協力は得ておらず、公的利用の目途もたっていない。むしろ、これらのプロジェクトは、三次元モデルの作成が、技術的に実現可能であることを示す例示的な色彩が強く、そのため、ロンドンの街全体をカバーするモデルはいまだ存在しない。また、そのすべてが市民団体や、政治家、政策決定者による鑑賞のためのツールである。いいかえれば、専門家によるデザインや計画の検討材料として開発されたものはひとつもなく、さらに、ニューヨークや東京、ロサンゼルスのような洗練されたモデルは皆無に等しい。モデル開発の手法もまちまちで、Planet9 (<http://www.planet9.com/>) 社が社内開発をすすめているモデルや、セガ・ドリームキャストのメトロポリス・ストリートレーサー(*Metropolis Street Racer*)というゲーム用に Bizarre Creations 社が開発したウェストミンスター周辺地区のモデルなど、汎用性・互換性に欠けるものが大半である。

なお、本題からはいささかはずれるが、レーシングゲームに代表されるゲームソフトは、これらの開発の原動力の多様性をみる格好の材料である。たとえば、メトロポリス・ストリートレーサーは、市販のレーシングゲームであるが、写実性の高い詳細なモデルを採用している点で、注目に値する。図 12 は、臨場感に富んだゲーム環境を示す好例である。消費者のリアルな環境への欲求が、ゲームコンソールの演算処理能力の向上をうながし、業界内での熾烈な競争をあおった結果、ゲーム業界は、いまや建築・構造モデルの先端の一角を担うまでになっている。



図 12. メトロポリス・ストリートレーサーのロンドンのシーンより。

シカゴやグラスゴー、ロサンゼルスなどで、古くから三次元モデルの開発が研究されてきたのに対して、ロンドンのモデルの歴史は比較的浅く、デジタルモデルが登場したのは、1990 年代半ば以降のことであった。そして、その利用技術は、今日にいたるもまちまちである。たとえば、Miller-Hare 社は、建築デザインの分野では、高品質のモデルを提供して、開発許可の取得や、開発事業の宣伝に貢献することがいられているが、三次元 GIS そのものに焦点をあてた開発ではない。もっとも、同社では、過去 20 年間にわたって、ロンドン市 (City of London) の援助を受けて、モデルの描写力に応じて、自ら定めた七段階の等級区分にまたがるモデルを開発してきた背景があり、年を追うに連れて、次第に精緻なものへとモデルを改善していった様子がわかる。

モデルの等級区分	モデルの内容
A	窓枠形状までふくむ詳細かつ精緻な建築モデル
B	1:100 スケールの建築測量相当の詳細なモデル
C	垂直方向を詳細に再現したモデル
D	垂直方向の主だった特徴をとらえたモデル
E	詳しい建物外形をとらえて引き伸ばしたモデル
F	オルソ画像を加えたブロックモデル
G	プリズムブロックモデル- マスモデル

同社の手法をみると、はじめに、ロンドンの市街地を街区ごとに区分し、英国国土地理院 (Ordnance Survey) 発行の 1:1,250 スケールの平面図から建物外形をとりだし、これに航空測量による高さ情報を加えて、上記スケールの G に相当するブロックモデルを作成している。これをベースにして、次第に改良を重ねていった結果、いまや、同社のモデルの大部分が、A ないし B の区分に属するにいたっている。同社のモデルは、Navisworks (<http://www.navisworks.com/>) という名称のパッケージにまとめられており、モデルの各バージョンを閲覧できるようになっている。ただし、図 13 の例からもわかるとおり、精緻なモデルである一方、まったくといってよいほど、表面情報が欠落している。



図 13. Miller-Hare によるロンドンモデルの俯瞰図.

一方、英国建築協会(Architecture Foundation)のHayes Davidsonらによるモデルは、数々の都市平面図や建築パースをちりばめているため、非常に印象的である。このモデルは、London Interactiveという名称で知られており、「... 航空測量データからロンドンのマルチ・レイヤー図面を作成、これを建築協会の都市デザイン・建築計画データベースにリンクして、過去、現在、そして未来の開発計画の表示を可能にしている。このモデルをとおして、一般市民、プランナーおよび政策決定者に、ロンドンの町並みの移り変わりを、実感として把握してもらうとともに、現代の主な変革をモデルの形で記録できる。London Interactiveは、新建築に焦点をあてた ‘New London Architecture’ と、ロンドン市内の50件を越す大規模プロジェクトをまとめたLondon 2000のふたつのレイヤーで構成されている。これは、完成予想モデルを現況写真の上に重ねあわせて、馴染みあるロンドンの風景が、どのように変わるかを視覚的にあらわしたものである。さらに、デジタルビデオ映像やアニメーションの利用によって、市内の建設・計画中の建築物を鮮やかに表現している(<http://www.architecturefoundation.org.uk/project2a.htm>より)。」

上記のロンドンを対象とした各三次元都市モデルは、そのほとんどが空間情報とリンクされていなかった。そのため、簡単な解析機能はあっても、基本的には、CAD と写真測量の技術を結びつけたモデルばかりであった。これに対して、ロンドン大学高等空間解析センターで開発されているバーチャル・ロンドン(Virtual London)プロジェクトは、三次元のひろがりに対応した GIS モデルの開発を目指しており、GIS にもとづく強固なデータベースを構築したうえで、パノラマ画像やテクスチャ貼りこみによる高速な CAD モデル作成など、各種モデル手法に柔軟に対応したものをづくりだすことで、二通りのアプローチをとっている。ひとつは、最新のネットワーク技術をも

ちいて、空間情報や、マルチメディア、三次元コンテンツをインターネット上で展開するもの、もう一方は、従来の手法をもちいて、既存の二次元 GIS ソフトに、三次元の拡張機能を付加するものである。最初のアプローチでは、三次元空間を把握するためのさまざまな分析手法を独自に開発する必要があるのに対し、後者の場合は、既存の GIS の分析機能をそのまま援用できることから、より専門的な利用に適したモデルの開発が期待できる。

バーチャルロンドン I

バーチャルロンドンの最初のプロトタイプモデルは、ArcIMS サーバーソフトをもちいて、ロンドン中心部のデータをインターネットを介して提供するものである。ロンドンを対象とした三次元モデルとしては、これまでも、IMS モデルの開発された実績はあるが、ロンドンの観光案内や環境汚染問題など、特定のテーマをあつかったものがほとんどであった (Doyle, Dodge, and Smith, 1998)。このモデルは、ポリゴン情報 (*geometry*)から地理情報(*geography*)にいたるまで、いくつかの属性データのレイヤーをもつほか、国土数値データのような小縮尺データから、英国土地地理院(Ordnance Survey)などから入手した宅地区画レベルの細密データにいたるまで、数段階のスケールから構成されている。これらの一連のポリゴンデータや空間データは、もっぱらラスター形式のデータで記述されているが、システム全体としては、クエリー検索の機能をもたせることを念頭においている。とくに、IMS(Internet Map Server)を利用することで、一定の制約のもとではあるが、クエリー機能のカスタマイズが可能となる。また、このモデルは、インターネットを介して、一般のユーザーが利用できるようなインタラクティブなインターフェイス環境を提供している。インターフェイスを工夫することで、モデルが二次元平面地図であると、三次元モデルであるとかかわらず、同一のインターフェイスを、一般の利用者は展示モデルとして利用し、専門家は作業モデルとして利用することが可能であり、モデルの用途が広がると考えられる。

ここでもちいられているデータは、IMS に入れる前に、あらかじめ各専用ソフトをもちいて前処理が施されているため、マップサーバー自体は、建物の高さ情報から CAD モデルを生成するといった三次元モデルの作成そのものの処理にはたずさわっていない。三次元化の処理には、CAD パッケージソフトの Canoma が、またネットワークでのコンテンツの配信には MetaStream がつかわれており、マップサーバーは、CAD モデルのなかの各オブジェクトにあてがわれたコード番号を管理する役目を果たしている。したがって、これらのオブジェクトに変更を加える際には、CAD ソフトのインターフェイスをもちいて行い、その変更の情報がマップサーバーのデータベースに登録されるという形をとっている。Canoma ソフトは、一枚の写真からエッジを検出する

などして、ベクトルモデルを作成できるツールで、各オブジェクトを動かしたり、サイズを変更することが容易におこなえる。Canoma ソフトをもちいた例は、図 4 のカナリー・ワーフのモデルでも示されている。

CAD モデルは、パノラマ画像ともリンクされていて、モデル内で選択した視点からみた回転画像が同時にみられるようになっている (図 14 参照)。図 14 では、マップサーバーは、左上部のウィンドウに、CAD モデル——この例では、ウェストミンスター宮殿(すなわち国会議事堂)を表示している——は、右上部のウィンドウに、それぞれ表示されており、当該地区のパノラマ画像が右下に表示されている。ユーザーは、下方に並んでいるボタンをもちいて、各ウィンドウ内を移動したり、モデルを拡大したりといったナビゲーション制御がおこなえる。また、検索機能をもちいて、建物を特定したり、あらかじめ IMS サーバーに登録された属性値の組み合わせを表示することもできるようになっている。専門家の利用する作業モデルよりも、観光案内的な色彩の強いものに仕上がっているが、二次元および三次元の地理情報検索機能の利用によって、展示モデルとしては、十分に実用に耐えるものになっている。

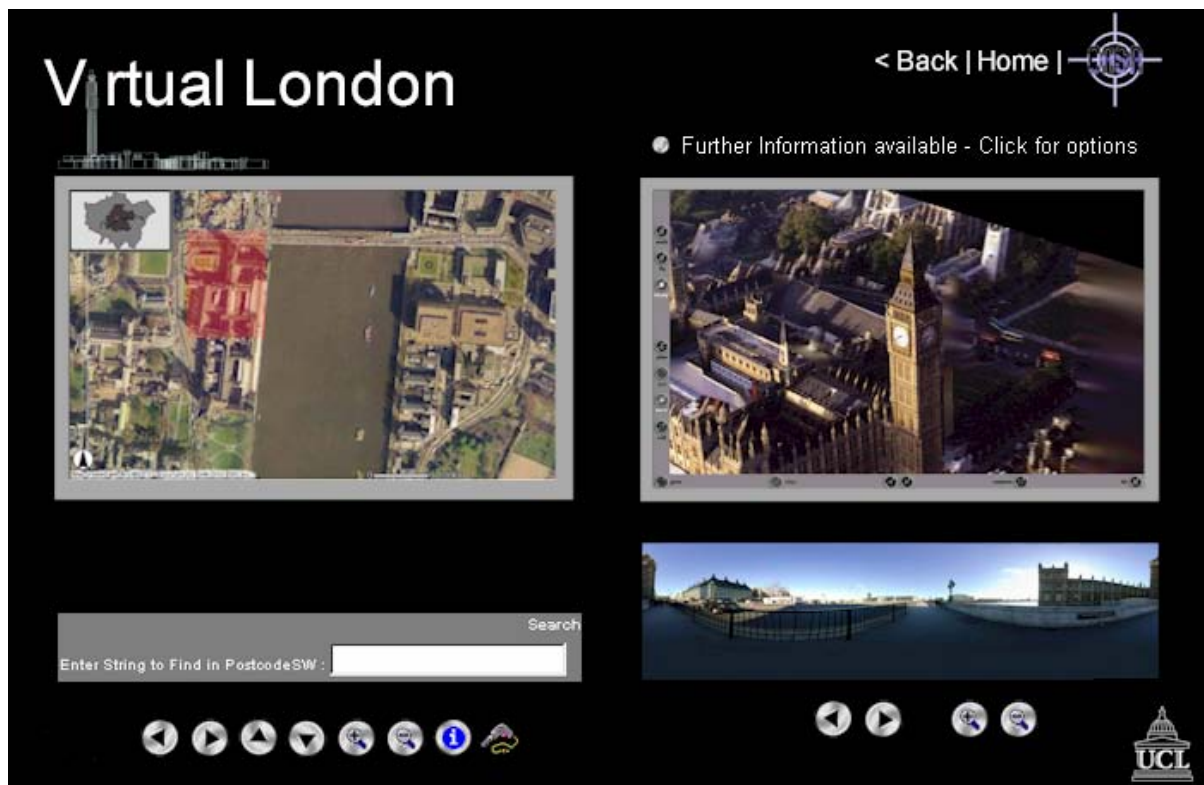


図 14. インターネット GIS、CAD、パノラマ画像を統合したバーチャルロンドンのプロトタイプ。

バーチャルロンドン II: デスクトップ GIS 環境を利用した三次元モデルの表示

二番目のアプローチは、より伝統的な手法にもとづくもので、モデル全体を ArcGIS ソフトの中で構築する方法をとっている。LIDAR データから高さ情報を抽出して、GIS 環境にとりこむことは、比較的容易であり、このモデルも、英国国立リモートセンシングセンターがロンドン市に提供しているデータをもちいて、作成されている。GIS ベースのモデルであるため、建造物以外にも、国鉄・地下鉄網をカバーする新しいデータレイヤーなどが付加されており、駅間距離や駅勢圏の検索表示が可能である。このような距離検索や適合範囲を問うクエリー検索は、とくに高密度な大都市内の三次元空間における交通・通信の問題を考える際に欠かせない機能であり、前出のニューヨークの三件の事例も、このような利用を想定して、データベースを構築していた。

ただし、ArcGIS そのものは、一般的な GIS ソフトであり、建築モデルの作成を主眼においてはなないため、バーチャルロンドンの三次元モデルの制作過程をみても、実際には、まず建築データを SketchUp という簡易 CAD ソフトで構築し、これを ArcGIS 環境に読み込んだ上で、GIS モデルとして構築する方法をとっている。この際、LIDAR データとの整合性や、テクスチャの貼り込みなど、モデルの精度を保つためには、まだ自動化できない部分が多く、現在では、モデル開発に多大な人的コストがかかっている。

バーチャルロンドンプロジェクトでは、現在もなお、プロタイプモデルを開発中であるため、完成した成果をみることはできなかったが、さまざまなメディアやデータにもとづくシステムを構築することで、多様なモデルの作成が可能になったことはあきらかである。

また、すでに広くもちいられているさまざまな手法にくわえて、さらなる新技術の開発がすすめられていることが調査の過程で判明した。とくにオンラインでの三次元モデルの共有化と、その多目的利用の進捗状況はまさしく日進月歩であり、その意味からも、現在、世界中で展開しつつある三次元モデルの多様性は、われわれの想像を超えるものであるといえる。

4. 三次元GIS都市モデルの構築

4.1 モデル作成の背景

東京、ニューヨーク、ロンドンで、現在行なわれているプロジェクトの総括をもとに、研究の第二段階では、ケーススタディとして、三次元GIS環境において、都市モデルを構築した。現在行なわれているプロジェクトをレビューした結果、CADとGISの垣根が曖昧になりつつある一方で、実際に両方にまたがって作成・利用されるモデルが少なかったことから、ケーススタディの第一の主眼として、



て、CADベースの建築モデルと、GISデータの併用の可能性を探ることをめざした。

さらに、これまで開発されている三次元都市モデルのほとんどが単一時点のみの再現を目的としており、都市の成長や、経年変化を記述できないことから、ケーススタディの主眼の二点目として、GIS環境をもちいた時空間モデル作成の可能性を検討した—ただし、立命館大学のグループが作成しているバーチャル京都モデルは、複数時点の京都の姿を再現して、歴史的な景観を評価したり、町家の空間分布の変遷を追う研究にもちいられている(矢野他 2006)。

ケーススタディの対象となったニューヨーク州バッファロー市は、エリー湖東岸のナイアガラ瀑布近くに位置する人口32万人の地方都市である(ナイアガラ周辺地区を含めた大バッファロー圏の人口は2005年現在で112万人)。19世紀当時は、水運と水力を利用した製鉄業や林業、カナダとの貿易などで栄え、米国有数の富豪の集う町として知られたことから、歴史的建造物も多く、建築家Frank Lloyd Wrightの設計になる建築の数も、シカゴに次いで二番目に多い。しかしながら、20世紀後半に入って、産業の衰退と郊外化がすすむにつれ、中心市街地が空洞化し、町並みも大きく変わった。このケーススタディでは、バッファロー市庁舎周辺の中心市街地における町並みの変遷を、三次元GIS都市モデルをもちいて再現した。

モデルの作成にあたって用いたデータは、以下のとおりである。

- (1) 平面データ: 敷地別のGIS属性データ、測量写真 (歴史的写真—図15参照)
- (2) 高さデータ: LIDARデータ、Sanborn社火災保険データ (歴史的データ—図16参照)
- (3) 表面データ: 建物の側面写真の撮影、Sanborn社火災保険データ (建材データ)



図15. 1927年当時のバッファロー市中心部の模様を写した航空写真。

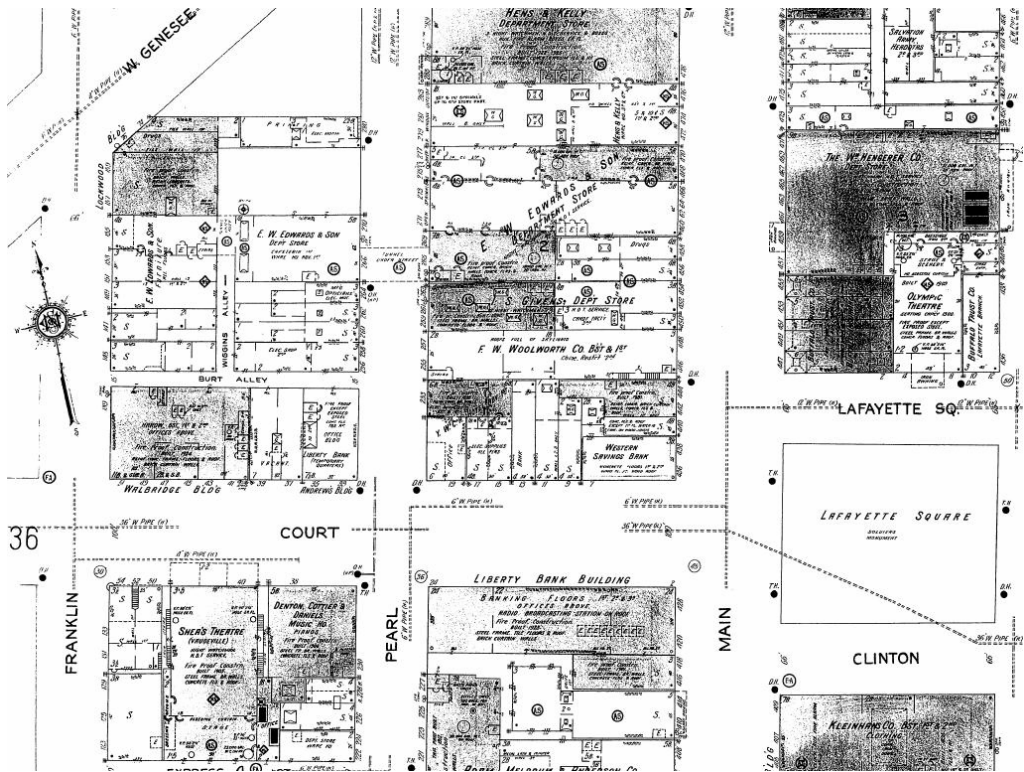


図16. 1925年当時のバッファロー市中心部の建物情報を記録したSanBorn社の火災保険地図。

4.2 三次元都市モデルの制作過程

作業の工程としては、まずGISデータをベースに、各年度の測量写真を確認しながら、建築外形を確保し、その後、LIDARデータをもちいて、建物に高さを与えた。ただし、時代をさかのぼって、古い建物を再現するようになるにつれ、航空写真を直接手でなぞったり、現存する当時の火災保険地図を実際に読みながら、高さ情報を入力していく必要がでて、作業は難航した。たとえば、1920年代までさかのぼった場合、建築データがデジタルな形で存在しないため、図15、16にあるような航空写真や、火災保険データをもとに、建物の外形や高さを入力していった。

バッファロー市は、19世紀から今日にいたるまでの時代による都市景観の変遷が激しかったこともあり、ダウンタウンにおける各建造物の竣工年度、取り壊し年度や、それぞれの外形の形状を特定することが困難であった。そのため、本研究では、町並みに大きな変化のあった三つの時代に着目し、それぞれの時代について、二時点の三次元モデルを作成した(図17参照)。

- (1) 1880～1920年代: 高密かつ装飾の多い歴史的建築群
- (2) 1930～1960年代: 歴史的建造物の破壊と、駐車場および直線的建築物の増加
- (3) 1970～2000年代: 一街区全体にまたがる大型建築 (スーパーブロック) の増加。

図 21(a)～(c)は、1927 年、1951 年、2005 年の各時点の町並みを三次元表示したものである。このように本研究では、複数時点の三次元モデルを作成して、それらのレイヤーを併用することで、時空間モデルを構築した。

なお、GIS環境上で、 x , y , z の三空間次元に加えて、時間軸方向の t 次元をダイナミックに扱える真の意味での動的な時空間都市モデルを構築するには、各建築物に時間の属性値を与えて、クエリーの対象として検索できるようにする必要がある。この方法を用いて、三次元モデルを構築した場合のフレームワークとインターフェイスについて、Appendix A で詳述した。



図 17. バッファロー市の時代変遷. (a) 1880～1920 年代: 高密かつ装飾の多い歴史的建築群, (b) 1930～1960 年代: 歴史的建造物の破壊と、駐車場および直線的建築物の増加, (c) 1970～2000 年代: 一街区全体にまたがる大型建築(スーパーブロック)の増加。

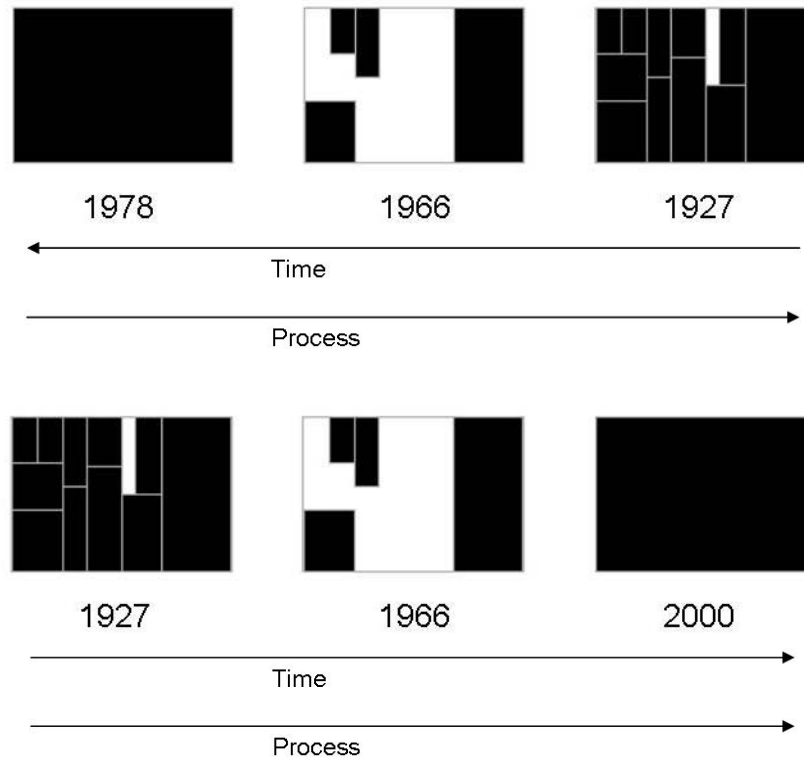


図 18. 三次元モデル作成の際の作成時系列の方向.

複数時点の都市モデルを作成する場合、一部の建物が時代を超えて残されていることから、各時点のモデルを逐一作成するのではなく、他の時点のモデルをベースにして、修正していくほうが効率的である。図 18 は、時代をさかのぼってモデル構築していく場合と、時代を下っていく場合の時系列を示している。バッファロー市の場合、時代を経るにしたがって、建物が少しずつ取り壊されていき、次第に大型のものに変わっていったことから、作成する順序としては、時代をくだるほうが効率的といえる。その一方で、時代をさかのぼっていけば、最新の空間データからはじめるため、高い精度で都市モデルを構築し、それを他の時代のモデルに活用することができるという利点がある。本研究では、19 世紀以降という比較的限られた時期を対象としたため、時代をくだってモデルを作成していったが、より歴史の古い都市の場合は、順序を逆にすることも検討に値する。

次に、このようにして作成された建物群を、geo-reference して、GIS 環境での利用を可能にした。また、GIS データに階高および高さ情報を保存し、クエリーの対象となるようにした。用いたソフトウェアは、以下の四種類である。

三次元 GIS 都市モデル作成に用いられたソフトウェア

- (1) AutoCAD: 航空写真の読み込み、建物外形の作成と加工
- (2) SketchUp: 建築モデルの加工、テクスチャの貼り込みと GIS 環境対応
- (3) ArcGIS: 3次元建築モデルの GIS データとの統合
- (4) PhotoShop: 画像・テクスチャの加工処理

まず、詳細な建築モデルを作成するのに適した高機能の AutoCAD と、ArcGIS やオンラインモデルへの変換機能にすぐれた SketchUp を併用することで、CAD ベースの三次元都市モデルを作成した。その際、主だった建物の表面に、テクスチャ写真を貼り込んで、モデルの臨場感を高めた。なお、テクスチャファイルを貼りこむ方向によっては、画像の反転問題 (Backface) が生じることがある。この問題については、Appendix B を参照されたい。作成された都市モデルを ArcGIS に読み込むことで、GIS 環境に対応させられる上、既存の GIS データとつなぎあわせることで、GIS ベースの三次元都市モデルを作成することができた。入手できたバッファロー市の GIS データは、建物ではなく、各敷地ごとに属性が与えられているものであったため、各建物に敷地 ID (Land Parcel ID) をマッチングさせる手続きが必要となった。したがって、単一敷地内に複数の建物があった場合は、それら全てが同じ属性値を共有した。

各ソフトウェアの機能について詳述することは避けるが、SketchUp で加工した三次元モデルを ArcGIS に読み込んだ際に以下の問題が生じたため、ここで述べる。

(1) 建物の消滅

ArcGIS に建物群を読み込んだ際、いくつかの建物ポリゴンが消滅した。CAD モデルを確認したところ、じつは建物データにエラーがあって、本来重複しないはずの建物同士が重複していた場合に、その重複部分に新たなポリゴンが生成されてしまい、この新しいポリゴンとの干渉が、もともとの建物の読み込みを阻止していたことが分かった (図 19 参照)。この問題を解決するには、建物外形および建物の位置同定の精度をあげて、重複をなくす必要がある。

(2) 建物テクスチャの消滅

ArcGIS に建物群を読み込んだ際のもう一つの問題として、建物表面に貼りこんだテクスチャファイルの一部が消滅するという現象があった。これは、画像ファイルが負方向 (Backface) を向いているためであり、画像を反転させて新たに貼りなおす必要がある。詳細については、Appendix B を参照されたい。

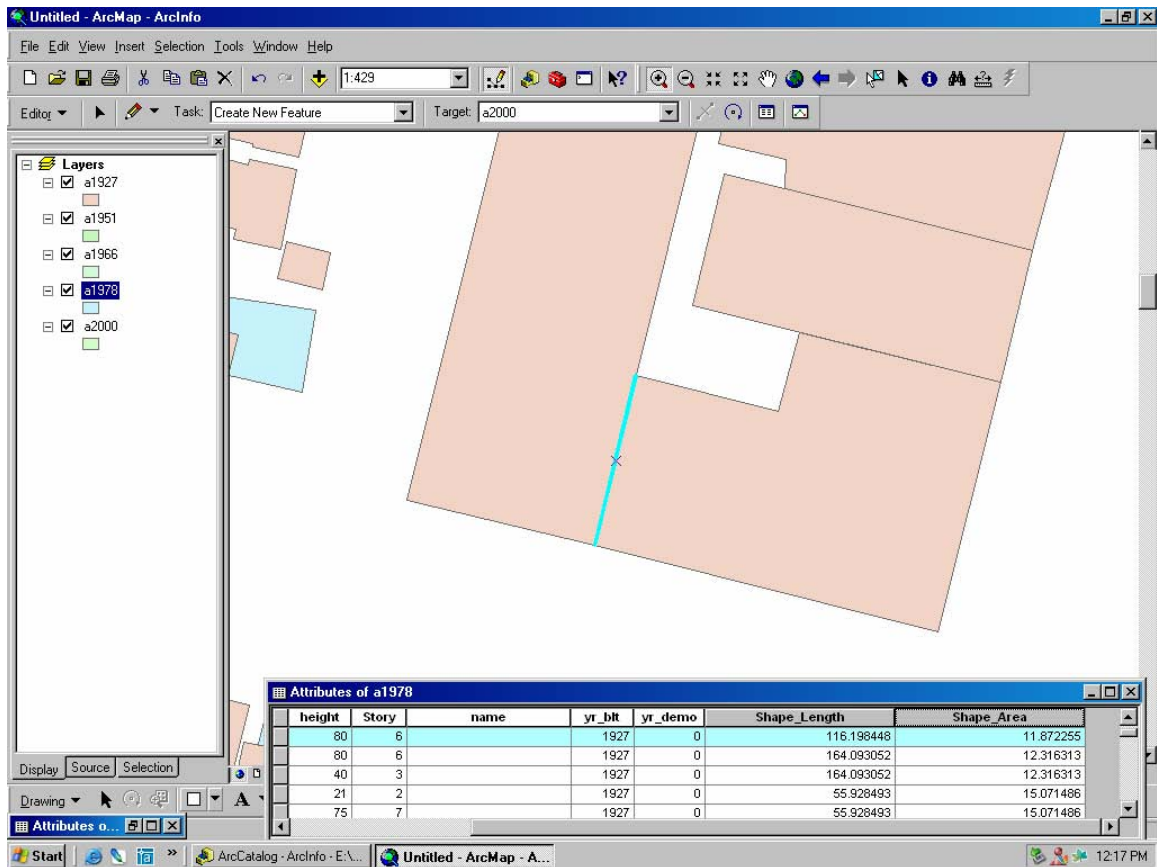


図 19. 建物ポリゴンの重複があった場合、重複部分が新たなポリゴンとして自動的に認識されてしまう。

4.3 時空間GIS都市モデル

前述の手続きを経て、三次元都市モデルを作成した結果、図 20、21 のようなモデルが得られた。図 20 は、ニューヨーク州バッファロー市の中心市街地を対象とした三次元都市モデルを実際に GIS 環境上で稼働している様子である。各建造物が三次元オブジェクトとして属性値をもち、検索できる。同様に図 21 は、ニューヨーク州バッファロー市の中心市街地を対象とした三次元 GIS 都市モデルを表しているが、異なる時点のレイヤーを作成することで、都市景観の移り変わりを GIS 環境上で表現した。図 21(a) は、1927 年時点、同(b)が 1951 年時点、そして同(c)が 2005 年現在の景観をあらわしている。また、図 21(d)は、2005 年現在の市庁舎周辺地域の景観を示したもので、建造物の表面に、実際に現地で撮影した写真のテクスチャが用いられている様子が分かる。

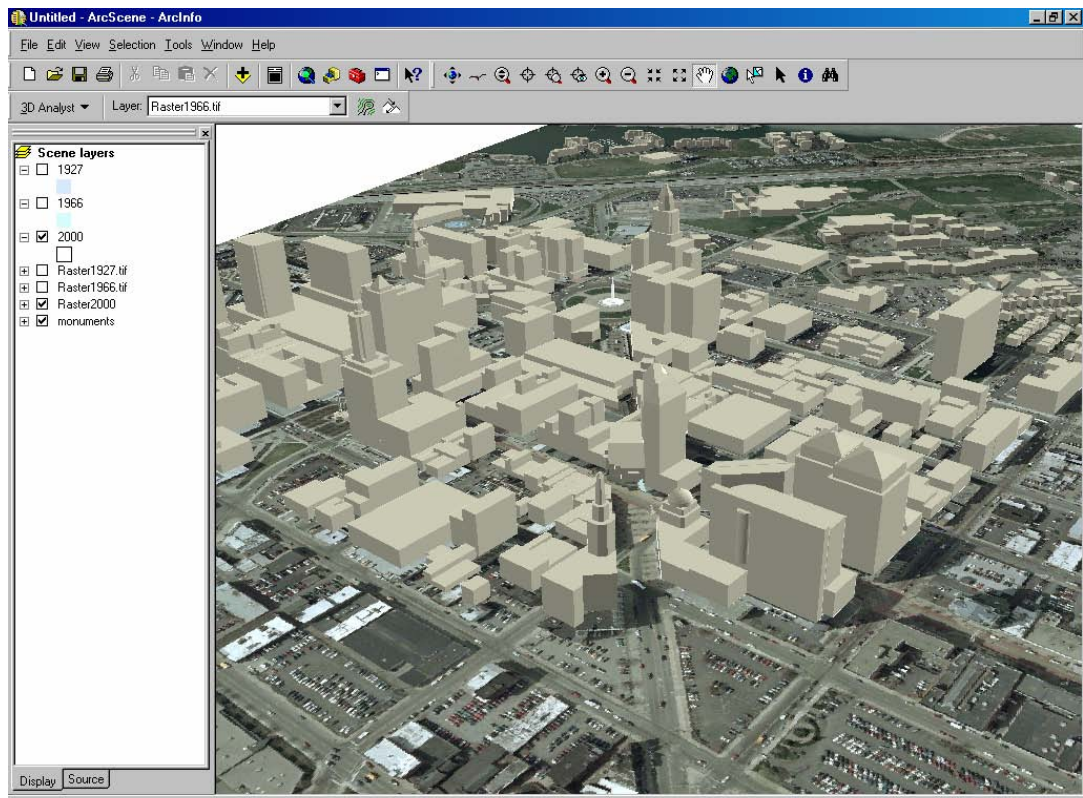
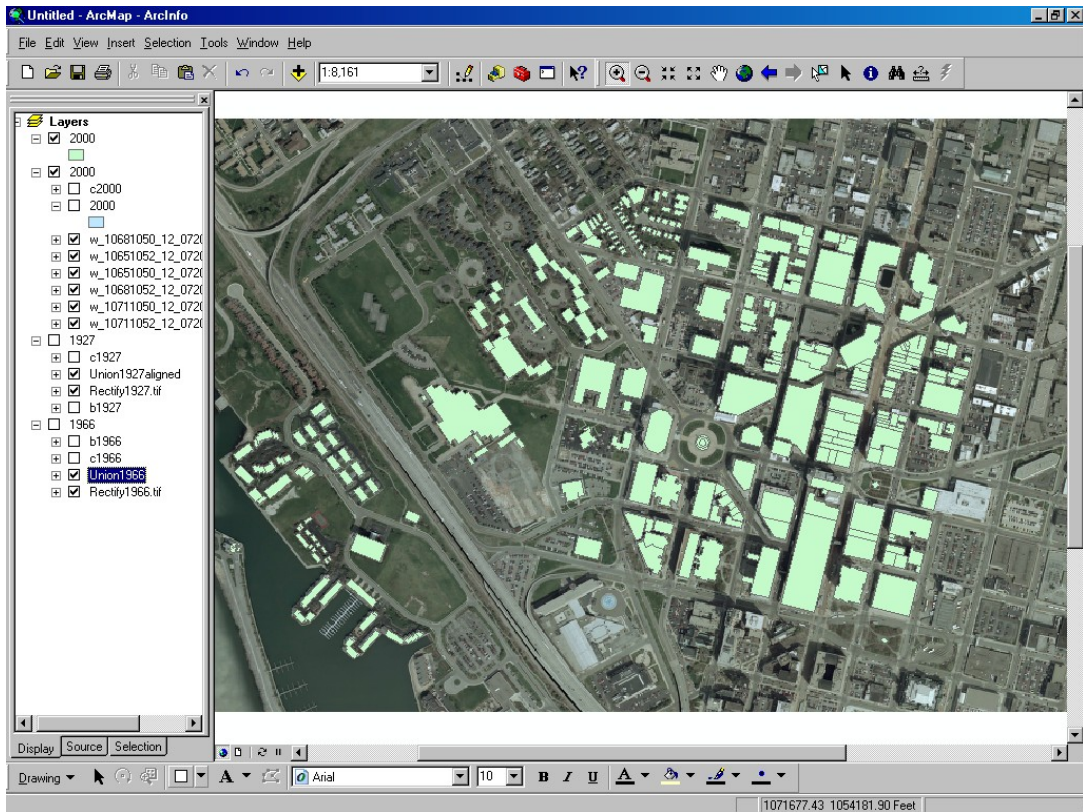
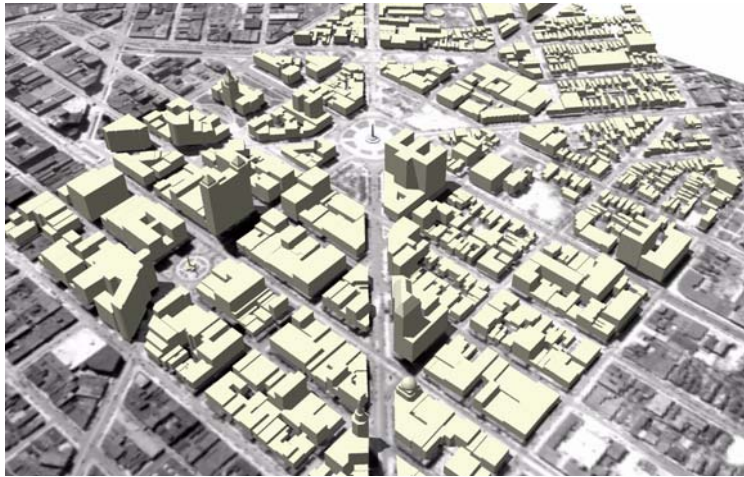
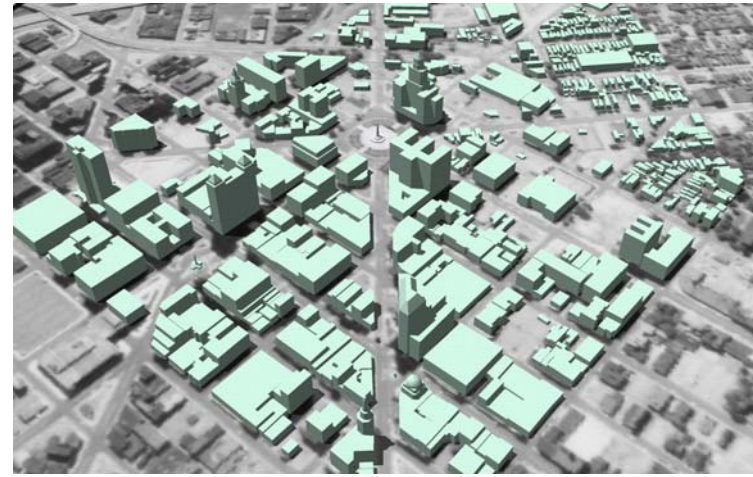


図 20. ニューヨーク州バッファロー市の中心市街地を対象とした三次元都市モデルを GIS 環境上で稼働している様子。各建造物が三次元オブジェクトとして属性値をもち、検索できる。



(a)



(b)



(c)



(d)

図 21. ニューヨーク州バッファロー市の中心市街地を対象とした三次元 GIS 都市モデル:(a) 1927 年時点、(b) 1951 年時点、および(c) 2005 年現在の景観と、(d) 2005 年現在の市庁舎周辺地域の景観。建造物の表面には、実際に現地で撮影した写真のテクスチャが用いられている。

5 おわりに

5.1 調査結果のまとめ

本研究では、世界主要都市における三次元の都市モデル開発の現状を調査した。その結果、東京、ニューヨーク、ロンドンの三都市を中心にさまざまな三次元モデルが開発されている現状が明らかになった。その背景には、三次元モデルの幅広い用途とそれに伴う需要の増加があるとともに、モデル作成にデータの供給が増えているなど、三次元都市モデル開発の環境が整ってきていることがあげられる。

三次元都市モデルを構築するための技術にも進歩がみられた。従来のモデルは、CADベースの建築モデルと、GISベースの解析モデルに明確に区分することが可能で、その用途によって、モデルの性格がはっきり分かれた。しかしながら、最近開発されているモデルの中には、双方の用途を見据えて、より精巧かつ解析機能をもつモデルの開発も進められており、CADモデルとGISモデルの間に、明確な境界がなくなりつつあるといえる。

さらに、Web Mappingに代表されるインターネット・ウェブ技術の進歩により、三次元モデルをオンラインで共有する動きもさかんになってきている。オンライン三次元モデルの開発は、NASAの開発したWorldWindや、Google社のGoogleEarthなど、最近5年間に登場した技術やモデルに依存している。最近では、Microsoft社やAmazon社など、ソフトウェア、ネットビジネスの大手各社も参入して、オンラインマッピング技術の確立に努めているため、いまだ業界の標準規格は定まっていないが、現段階では、利用者の数、データの量とも、GoogleEarthが先行している。

以上の調査で得られた知見をもとに、研究の第二段階では、実際に三次元都市モデルを構築して、CADとGISを組み合わせた三次元モデルを作成するとともに、時空間に着目したモデルの構築を試みた。ケーススタディの対象都市は、ニューヨーク州バッファロー市で、CADベースで作成したモデルをGIS環境に読み込んで、既存のGISデータと結合させることで、その中心市街地の町並みを表現するとともに、検索・解析に耐えるモデルを作成した。さらに、複数時点のモデルを作成することで、時空間都市モデルのプロトタイプを提案した。

5.2 三次元モデル作成の課題

三次元モデルの作成を行なう過程で、以下の課題が浮き彫りになった。

- (1) 現況データの入手: 三次元都市モデルを作成する場合、敷地ベースの属性値などが入ったGISデータおよび建物形状のほか、高さ情報と建物表面のテクスチャ情報が必要となる。とくにテクスチャについては、対象地域の広さに応じて、直接現地に赴いて撮影することになるが、植栽や塀などの障害物によって建物の下部分が隠されていることがあるほか、接道面の一方からの撮影の場合、建物の残り3方向の情報を取得するのが困難である。このため、

ケーススタディでは、一方向から建物上階部分の画像データを取得し、これを残りの部分にも用いたが、必ずしも正確とはいえない。近年、Microsoft社が試験的に運用しているLive Local (<http://local.live.com/>) のように傾斜をつけた衛星写真を公開する試みもなされていることから、今後、このようなデータの利用も可能になってくるものと思われる。なお、本研究を実施した時点では、Live Localの画像データは、解像度が低く、三次元都市モデル上での使用に耐えなかった。

- (2) 歴史データの入手: 三次元都市モデルを利用して、歴史的な町並みを再現する場合、そもそもデータ自体が存在していない恐れがある。たとえば、20世紀初頭の都市データを考えると、平面図や航空写真を手がかりに、建物の外形を類推することはできるものの、一部の著名な建造物以外は高さ情報が保存されていないことが多いため、信頼性のある三次元モデルを作成するのは困難である。建物表面のテクスチャなどの記録も不完全なことから、当時の様子を再現するにも限界がある。さらに、歴史的建造物などの場合、装飾の施された複雑な外形・屋根形状を持つことが多く、忠実に再現できない。幸い、バッファロー市の中心市街地については、火災保険業者のSanBorn社が19世紀末より独自に作成・更新していた建物データを入手して、建物高度や建材の情報を入手することができたが、他の都市を再現する場合に、データが取得できない恐れがある。
- (3) GIS環境への読み込み: 本研究では、三次元都市モデルを作成する過程で、まずCADソフトを用いて、臨場感のあるモデルを作成したのち、GIS環境に読み込んで、GISデータと結合させた。CADソフトウェアは、作成されたモデルのGIS上での利用を前提として設計されていないため、データの受け渡しの際に、いくつか不備が生じた。たとえば、建物の三次元ポリゴンが一部消滅する問題(これは、複数の建物が重なっていた場合に発生する症状)や、建物表面に貼りこんだテクスチャファイルが一部表示されない問題(これは、テクスチャファイルが正方向に貼られておらず、反転していたことに起因)などがあり、いずれも最終的には、手作業での確認・修正を要した。これらの確認作業は、非常に時間をとる一方、原理的には比較的自動化の容易なものなので、三次元モデルの利用が今後増えれば、将来的には、GISパッケージのほうで修正機能を拡張することも考えられるし、簡単なプラグインを書いて、パッチをあてがうことで、解決することも可能と思われる。
- (4) 時空間モデルの作成: 本研究ではプロトタイプを作成するにとどまったが、実際に複数時点のモデルを開発する場合、異なる時点間で、建物の位置や形状がずれることがあった。とくに時間をさかのぼって、歴史的な町並みを再現する場合、正確な建物形状や位置を確認することが困難で、現在の町の様子を手がかりにしながら、すでに取り壊された建物の位置の同定や階高の予想を行なう作業を強いられた。残念ながら、この作業は、時間をとるばかりでなく、さまざまな要因を勘案しながら行なう必要があるため、自動化は当面期待できない。

5.3 今後の展望—モデルの自動作成とオンライン配信

現在、三次元都市モデルの開発は、空間情報データベースとリモート・センシング技術の二つの要素に依存しているといっても過言ではない。近い将来、双方の技術が融合して、リモートセンシング画像を取得すると同時に、データを現場で処理して、リアルタイムで三次元モデルが自動生成できるようになる可能性は十分にある。むしろ、昨今のいちじるしい技術革新をみるに、そのような機能が実現するのは、時間の問題と思われるが、そのような自動化がさまざまなアプリケーションの機能拡張や専門家の使用に耐えるものを提供できるかどうかは、現段階ではまだ不透明である。その観点からは、特殊な機能の活用や需要は、今後も個別に対応していく必要があると思われる。

また、パッケージソフトは、使い勝手の向上の観点から、より標準的なモデルを、より簡単に作成できるような方向に進化していくであろうと思われる。これは、ある意味では、ArcGIS などの市販の GIS パッケージへの機能拡張ないしプラグインとしてすでに開発されているものに近い。しかしながら、より専門性の高い Multigen Paradigm などのパッケージをもちいるケースでも、関連ソフトの普及と良質のリモートセンシングデータの増加により、モデリングの手間が短縮されることが期待される (Snyder and Jepson, 1999)。

オンラインでのモデル提供も今後ますます盛んになっていくものと思われる。現在、Google Earth が事実上の標準になりつつあるが、ほかに使いやすい標準的なインターフェイスが開発されれば、業界の標準規格がそちらに定まる可能性は十分にある。実際、近年のオンライン都市モデルの発達は驚くばかりで、ユーザーにモデルとのまったく新しい接し方を提供しており、市民参加や、オンラインでの意思決定をきわめて身近なものにする可能性を秘めている。

さらに、都市モデルの三次元化と GIS 上での実装が可能になりつつある現在、三次元都市モデルを時空間的に扱える動的なモデルの開発も今後強く望まれるものと考えられる。これは、都市景観の経年変化を表示するなどの歴史的目的での利用のほか、シナリオベースで、都市の将来像を表現したりするうえでも大きく貢献すると思われる。残念ながら、現在、市販されているツールやソフトウェアを組み合わせただけでは、このような都市モデルを作成できず、本研究でも、プロトタイプとして、独自の時空間モデルとそのインターフェイスを開発した。時空間的な解析機能は、三次元都市モデルに限らず、今後の GIS に欠かせない機能であると予想されることから、オンライン機能の拡充とともに、その本格的な開発が待たれる。

参考文献

- Batty, M. (1979) On Planning Processes, in B. G. Goodall and A. M. Kirby (Editors) **Resources and Planning**, Pergamon Press, Oxford, UK, pp. 17-45.
- Batty, M., and Smith, A. (2001) Virtuality and Cities: Definitions, Geographies, Designs, in P. F. Fisher, and D. B. Unwin (Editors) **Virtual Reality in Geography** Taylor and Francis, London, forthcoming.
- Batty, M., Dodge, M., Doyle, S., and Smith, A. (1998) Modelling Virtual Environments, in P. Longley, S. Brooks, R. McDonnell, and B. Macmillan (Editors) **Geocomputation: A Primer**, John Wiley and Sons, Chichester, UK, pp. 139-161.
- Batty, M., Dodge, M., Jiang, B., and Smith, A. (1999) Geographical Information Systems and Urban Design, in J. Stillwell, S. Geertman, and S. Openshaw (Editors) **Geographical Information and Planning**, Springer, Heidelberg, Germany, pp. 43-65.
- Day, A. (1994) From Map to Model, **Design Studies**, **15**, 366-384.
- Deken, J. (1983) **Computer Images: State of the Art**, Thames and Hudson, London.
- Delaney, B. (2000) Visualization in Urban Planning: They Didn't Build LA in a Day, **IEEE Computer Graphics and Applications**, May/June 2000, 10-16.
- Doyle, S., Dodge, M., and Smith, A. (1998) The Potential of Web Based Mapping and Virtual Reality Technologies for Modeling Urban Environments, **Computers, Environments and Urban Systems**, **22**, 137 – 155.
- ESC (2003) Combining 3D modeling with GIS, Environmental Simulation Center, New York (<http://www.wenet.net/~shprice/Kwart1.htm>).
- Fuchs, C (1996) OEEPE Study on 3D-City Models, **Proceedings of the Workshop on 3D-City Models**, OEEPE (Organisation Europeenne d'Etudes Photogrammetriques Experimentales), Institute for Photogrammetry, University of Bonn, Bonn, Germany, 37 pp. (with appendices).
- Gilder, G. (2000) **Telecosm: How Infinite Bandwidth Will Revolutionize Our World**, The Free Press, New York.
- Jepson, W. (2006) A Real-Time Visualization System for Large Scale Urban Environments, School of Architecture, UCLA, Los Angeles, CA (<http://www.aud.ucla.edu/~bill/UST.html>).
- Leavitt, N. (1999) Online 3D: Still Waiting After All These Years, **Computer**, July 1999, 4-7.
- Liggett, R. and Jepson, W. (1995) An Integrated Environment for Urban Simulation, **Environment and Planning B**, **22**, 291-302.
- Lowry, I. S. (1965) A Short Course in Model Design, **Journal of the American Institute of Planners**, **31**, 158-166.
- Morgan, B. A. (2000) **Evaluation of LIDAR Data for 3D-City Modelling**, MSc Thesis in Remote Sensing, Department of Geomatic Engineering, University College, London.
- Padmore, K. (2000) **The Liverpool Project**, The Centre for Virtual Environments, University of Salford, Manchester, UK.
- Smith, A. (2000) Shared Architecture: Rapid-Modeling Techniques for Distribution via On-Line Multi User Environments, **Arcadia**, **19**, 1, in press.
- Smith, S. (1999) Urban Simulation: Cities of the Future, **A/E/C/Systems** (Architecture, Engineering, and Construction Automation), Summer, 1999 available at <http://www.caenet.com/aec/articles/993feature1.html>.
- Snyder, L., and Jepson, W.(1999) Real-Time Visual Simulation as an Interactive Design Tool, **ACADIA 99 Conference Proceedings**, Snowbird Utah, October 28-31, pp. 356-357.
- Teicholz, N. (2000) Shaping Cities: Pixels to Bricks, **The New York Times**, Technology Circuits, Thursday, December 16, 1999.
- 矢野桂司、磯田 弦、中谷友樹他(2006)「歴史都市京都のバーチャル時・空間の構築」, **E-Journal GEO**, 12-21.

Appendix A) 時空間モデルの作成について

ケーススタディの目的の一つは、都市の三次元時空間モデルを作成することであった。一年間という限られた期間の中で、既存のプロジェクトのレビューをふまえて作成したため、本文中で報告したモデルについては、複数時点の景観をそれぞれの時点のレイヤーとして作成して、それらのレイヤーを併用するという手法をとった。しかしながら、この方法では、各レイヤーの基準となった年のみが正確に再現されるという問題があり、さらに長期間にわたる都市の変遷を細かくみよとする場合、前後との重複の多い多数のレイヤーを作成しなければならなくなるため、実用的とはいえない。本来、真の時空間モデルとは、三次元の空間に加えて、時間の次元が連続したひとつの次元として与えられるモデルのことであり、任意の時点における町並みを正確に再現できることや、町並みの経年変化が正確に記述できることが期待される。現在、市販されている GIS ソフトは、ほとんどが時間の次元を含んでいないが、時間要素を加えることは、原理的には困難ではない。そのような観点から、ここでは、GIS の特性を活かした真の時空間モデルを作成するためのフレームワークを述べる。

時空間ツールを作成する際の鍵は、各建物の発生（建設された年）、消滅（取り壊された年）時点が変数として与えられていることである。これらをそれぞれ独立の変数として扱うことで、時間モデルを構築し、各時点において存在する建物をクエリー表示することが可能となる。この変数により、建物一つ一つが、三次元オブジェクトとして、時空間クエリーの対象になる。クエリーの値として、特定の年号を与えることにより、母データの中から、その年以前に建造されており、かつその年以降に破壊された建物のみを抽出して、新たなレイヤーを作成することになる。

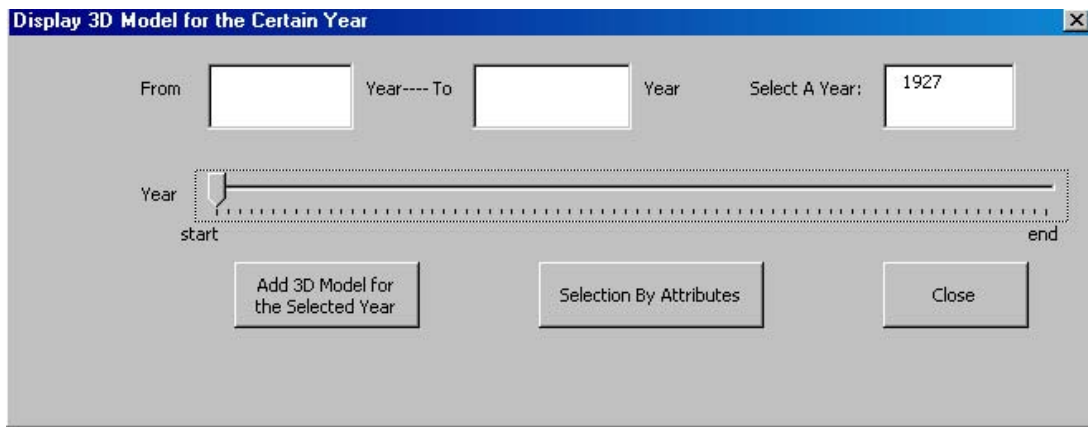
下の表は、それぞれクエリーをおこなう際のツールのインターフェイスの中で扱われる変数および関数を示したもので、プロトタイプを作成した際に実際に使用したものである。

表A1. 時空間モデルのツールメニューのコントロール関数の説明.

コントロール	関数	機能
Form1	frmSelectYear	選択された年における都市の景観を表示
Textbox1	txtStartYear	開始年(検索の対象とする最初の年を入力)
Textbox2	txtEndYear	終了年(検索の対象とする最後の年を入力)
Textbox3	txtYear	開始年度と終了年度の間の任意の年を表示
Slider	sldYear	開始年度と終了年度の間の任意の年を選択
Command1	cmdAddModel	選択された年の景観をレイヤとして作成・表示
Command2	cmdSelectionbyAttributes	属性値による建造物の検索
Command3	cmdClose	時空間モデルのツールメニュー終了

表A2. 時空間モデルのツールメニューのコントロール関数の説明.

コントロール	関数	機能
Form1	frmSelectionbyAttributes	属性値を用いた条件検索
Combobox	cboSearchLayer	検索対象となるレイヤの選択
Listbox1	lstField	レイヤ内の全てのフィールドの一覧
Listbox2	lstUniqueValues	フィールド内の固有値の一覧
Commandbutton1- Commandbutton10	cmdGreaterEqual, cmdLessEqual, cmdGreater, cmdLess, cmdEqual, cmdAnd, cmdIs, cmdLike, cmdOr, cmdNot	演算・論理オペレータ
Command11	cmdGetUniqueValues	固有値の取得
Command12	cmdApply	属性値による選択
Command13	cmdClose	終了
Textbox	txtSelectWhere	条件検索のためのテキストボックス



図A1. 時空間GISモデルのツールボックス。

図 A1 は、時空間モデルのツールボックスを示したものである。このインターフェイスでは、分析の対象として読み込む開始年と終了年を指定したり、特定の年の町並みを選択することができるほか、トグルバー(真ん中に配置された可変バー)で表示したい年を変えるのにあわせて、GIS 上で表示される建物が更新され、そのつど、レイヤーが動的に更新されるような仕組みになっている。

都市の時空間モデルは、既往研究や三次元モデルの開発現状をみるという本研究の本来の目的に沿って行なわれたレビューの中で、いまだ開発されていないことが明らかになったものであり、本研究の限られた時間の中では、真に動的な時空間モデルの作成までにはいたらなかった。しかしながら、ここで示したツールボックスを開発することで、プロトタイプ of 動作確認は無事終了し、その実現可能性が示された。

Appendix B) ArcScene 環境におけるテクスチャの反転問題について

SketchUp などの CAD ソフトで構築した三次元モデルの表面にテクスチャファイルを貼り込んだものを、ArcScene 環境に読み込むと、テクスチャが表示されなくなることがある。これは、画像ファイルのベクトルが逆転してしまっているためであり、BackFace(反転)問題として、CAD から VRML、Web3D などのオンライン三次元モデルに変換する際にも共通する問題である。

3D Buffalo モデルの作成を開始した時点で、単純なポリゴンを使って実験した際には、この問題が発生しなかったため、その後の制作過程でも、画像の向き(ベクトル)には、注意が払われなかった。しかしながら、実際に ArcScene に読み込む段階になって、表示されない画像があることが明らかになり、反転されてしまっているテクスチャを正方向に転換する必要が生じた。

SketchUp 環境では、通常、反転されている画像のある面は、青色で表示される(下図参照)ことから、青色の面にはりこまれている画像を正方向に転換していく作業があらたに加わった。また、青色表示されない場合でも、反転画像がはりこまれているケースがあり、その向きを判定するには、次ページの例のように、実際にテクスチャ情報を確認しなければならない。なお、ここでは、SketchUp をもちいた場合を前提に説明しているが、ほかの CAD ソフトから GIS 環境へデータを読み込む場合も、同様の問題が生じるものと思われる。

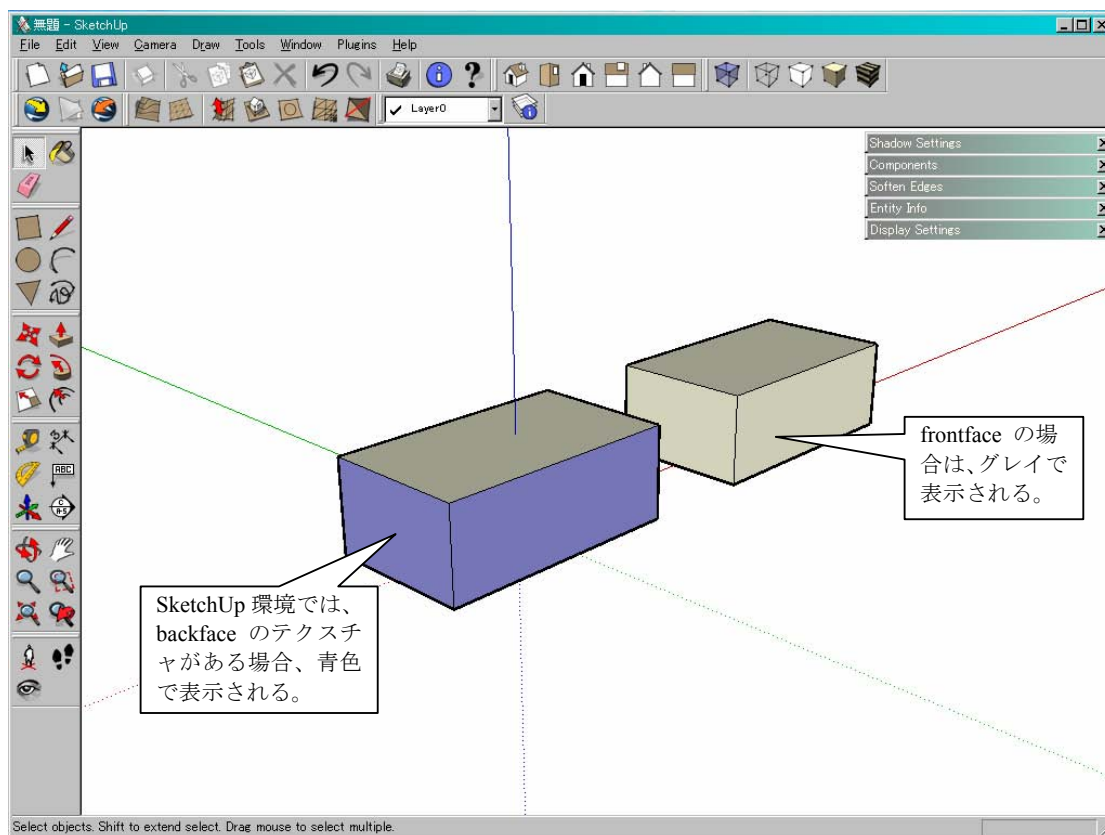


図 B1. SketchUp 環境では、Backface 画像のある面は、青色で表示されることが多い。

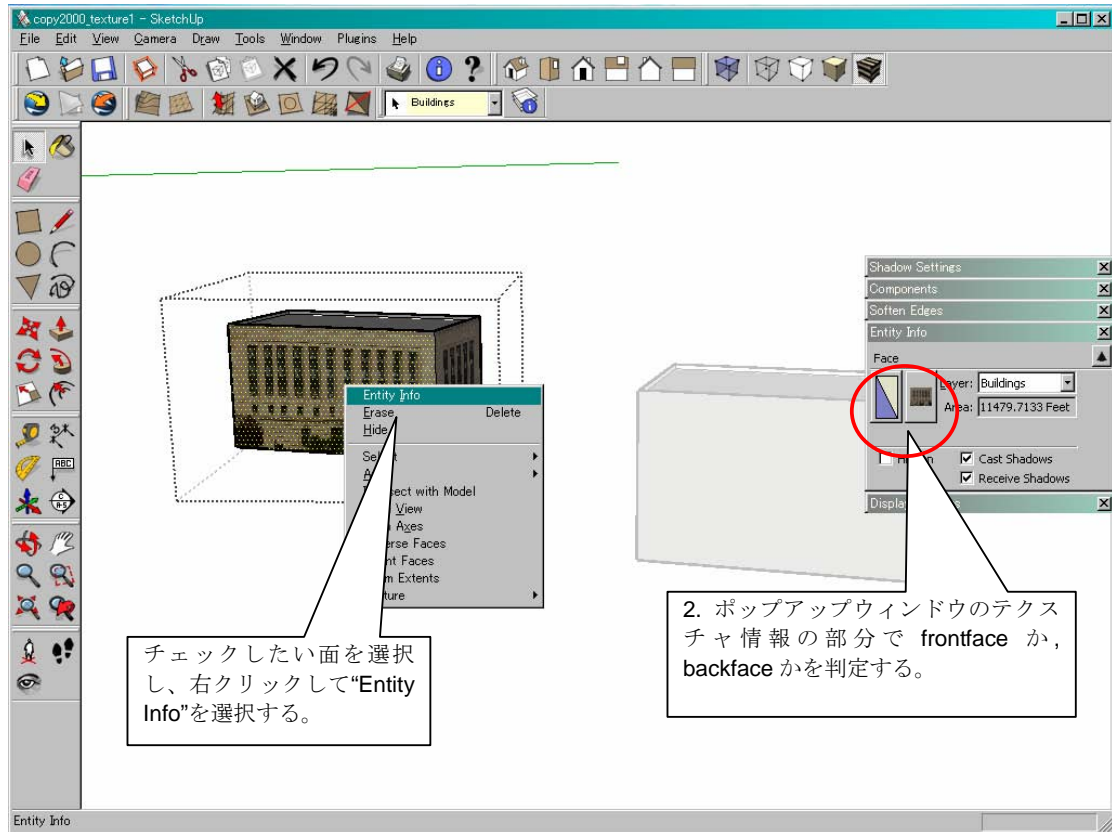


図 B2. 青色表示がなくとも、反転していることがあるので、GIS で読み込めない場合は、面の情報を実際に確認する。

なお、実際には、画像そのものを転換するのではなく、同じファイルを正方向のベクトルに沿って貼りなおしてやる必要があるため、画像の貼られる位置や縮尺などを再度調整しなければならない。たとえば、図 B3 は、テクスチャが正しくはれている例とずれている例を示しているが、単に画像を正方向に読み込みなおしただけでは、B3(b)の例のようにずれてしまうため、補正する必要がある。



図 B3. 建物表面のテクスチャ: (a) 正しく貼れている例と、(b) ずれてしまっている例。

謝辞

本研究をすすめるにあたって助成を受けました財団法人日本建設情報総合センター(JACIC)に心から感謝いたします。また、三次元都市モデル開発の現状調査、および三次元都市モデルの構築に携わったニューヨーク州立大学地理学部、建築・都市計画学部の学生諸君にも、ここに改めて謝意を表します。

助成研究者紹介

しおで なるしげ

塩出 徳成

現職：ニューヨーク州立大学地理学部助教授（Ph.D.）

主な著書：3D urban models: recent developments in the digital modelling of urban environments in three-dimensions. *GeoJournal* **52**(3): 263-269, 2001.

しおで し の

塩出 志乃

現職：東京大学空間情報科学研究センター研究員（工学博士）

主な著書：「GISで空間分析」6章：ネットワーク空間分析ソフトウェア「SANET」(共著)
(古今書院, pp.142-182, 2005)