整合操作に着目した企画設計 CAD の開発研究

ON THE DEVELOPMENT OF SCHEMATIC DESIGN CAD THAT SUPPORTS ADJUSTMENT OPERATIONS AMONG MULTIPLE REPRESENTATION MODELS

下川 雄一*, 両角 光男**, 位寄 和久**, 本間 里見***

*Yuichi SHIMOKAWA, Mitsuo MOROZUMI, Kazuhisa IKI
and Riken HONMA*

Designers generally develop their designs as processes of adjusting and reconciling design decisions explored using various types of representation models that were developed, in parallel fashion, to study varying subjects such as space planning, building bulk, or structural system.

Though the most CAD allow users to define multiple representation models, they have lacked utilities that support adjusting operations among them.

It is the objective of this study to propose a model of design process and a prototype CAD for schematic design stage.

Reviewing a case study, the authors assessed the advantages of the system use and subjects for the future studies.

Keywords: CAD, Modeling, Design thinking, Adjustment operation, Design process model

CAD, モデリング, 設計思考, 整合操作, 設計プロセスモデル

1. 研究の目的と方法

これまで国内外の研究者が「建築設計者の思考プロセスに馴染む道具の開発」に取り組んできた。とりわけ3次元モデリング機能を持つCAD（以下、CADと略す）は、物体の形状を直接定義できる上、図面システムにおける記述調整の煩雑さや記述内容の不整合を回避できるため、重要なテーマとなっている。しかし、曖昧なイメージを徐々に具体化し建築モデルを定義していく企画設計段階の道具としては、未だ検討すべき課題が残されている。

企画設計段階の作業を観察すると、設計者は建築の平面、外形、構造など、複数の観点から目的に応じた表現形式のモデルを並列的に定義^{注1)}、徐々に擦り合わせ（以下、「整合操作」と呼ぶ）ながら設計案をまとめていくことが多い。例えば長倉は、先ず平面計画を検討し、次に立面・断面図を使って高さを検討、次いで3次元モデルを使って空間や建築形態を検討するのが代表的な設計手順の一つと述べている^{注1)}。筆者らが国内外の設計事務所を対象に設計手順やCADの利用状況を訪問調査した際には、複数の観点から幾つかのモデルを定義しながら並列的に検討を進めているのが何れの事務所でも観察された^{注2)}。ところが一組の3次元モデルを定義することを前提にした在来CADでは、複数の観点からの検討を独立して行うことが困難である。これが逆に、特定の観点からの決定を保留し

たまま作業を進める等の企画設計の過程に求められる定義の柔軟さを奪い、3次元モデルの活用を制約してきたことも否定できない^{注3)}。市販のCADでも目的に応じたモデルを並列的に定義できるが、相互にデータを連携させたり、異なるモデルを確実に擦り合わせていく機能が未発達である。

本研究の目的は、複数のモデル間の整合操作に着目した企画設計支援CADを開発することである。手順として、先ず筆者らの研究室で行った設計プロセスの事例を分析し、整合操作による企画設計の作業モデル^{注4)}を提案する。次に、在来CADの限界と整備すべき機能や、「モデル空間」「プランフェース/セクションフェース」から成る作業環境の仕様を提案する。最後に試作システムでは、在来CADに比べ設計案の検討や代案の定義が容易になることを示し、提案したシステムの仕様・機能の有効性を検証する。

2. 既往の関連研究

設計思考に対応したCADの機能・仕様を提案した研究には、主としてシステムが扱う設計案の記述モデルに関する研究と、記述したモデルの編集操作機能に関する研究がある。前者については、先ず、建築の部材構成や空間構成の基本型を記述するモデル（意味モデル）の研究がある。CADにモデルを参照させることにより、設

* 金沢工業大学環境・土木・建築系 助手・工修

** 熊本大学工学部環境システム工学科 教授・工博

*** 熊本大学工学部環境システム工学科 助手

Instructor, Kanazawa Institute of Technology, M. Eng.

Prof., Dept. of Architecture and Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kumamoto University, Dr. Eng.

Instructor, Dept. of Architecture and Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kumamoto University

計画の定義や評価の作業を効率化したり、企画段階の検討事項を基本設計や生産設計など後段の作業に的確に伝達するなどが狙いである。企業や渡辺らがそれぞれの枠組みに従ってモデルを提案し、CADを試作した⁵⁾。最近では各種団体の国際協力によってIFCやSTEP等、モデルの標準化が検討されている。これらの研究は建築として具体的に定義された段階の記述に主眼が置かれており、設計者の曖昧なイメージを具体的な建築モデルに置き換えていく過程の記述に関する検討が不足している。これに対し藤原ら²⁾は、イメージが具体化する過程で抽象度の異なる2次元や3次元の中間モデルが存在することを示した。また西郷ら³⁾は設計者の描いたスケッチの分析を基に、企画設計段階で少なくとも3群7タイプの間接モデルが使われることを示し、CADが扱うべき意味モデルの特徴とその操作性を提案した。

モデルの編集操作機能に関する研究については、無重力の世界で粘土を加工するような操作性の高いシステムを提案したKurmann⁴⁾やMatthews⁵⁾が新しい。これらは建築外形や建築部材の形状を定義する道具としては興味深い、平面計画を試行錯誤する機能については特に考慮されていない。Mitchell⁶⁾はトップ・ダウンと呼ぶ平面や立面のスケッチ・システムを提案した。図形制御枠(以下、制御枠と呼ぶ)内に任意の図形を定義すると、制御枠の大きさの変更に伴って内部の図形も自動的に変形する機能、制御枠内の図形を他の図形と置換する機能、制御枠を再分割する機能を備えており、トップダウン的に平面や立面を試行錯誤することができる。またBonn⁷⁾は3次元図形を置換しながら段階的に詳細な3次元モデルを定義していくシステムを提案した。現実にはトップダウン的な手順だけで設計が進むことは希で、これらのシステムで扱える設計案には制限があるが、置換操作自体は抽象度の異なる中間モデルを組み合わせながら案を具体化するための機能として意義深い。

一方、平面計画を支援するシステムの機能に関しては、高本⁸⁾が線分の接続関係や位置関係を逐次CADに認識させることにより、部分的な設計変更に対して、通り芯と壁、柱、開口部など設計者が意図した建築部材の位置関係や接続関係に従って関連部分の図面を自動修正するシステムを提案した。またBranko⁹⁾は、通り芯を描き、その交点を手がかりに平面・立面・断面を記述すると、通り芯の移動・回転に応じて関連する図面の一部が自動修正されるシステムを提案した。更に、両角ら¹⁰⁾は西郷やミッチェルの研究に対応する形で、スケッチ・システムを試作した。空間の境界を表す線分を適宜入力していき、閉じた領域が形成された段階でその領域を部屋や床などの空間要素としてシステムに認識させる方法で、それ以降における編集操作の対話性を高めた。更に、空間の境界線上に建築部材を代表する直方体の制御枠を配置し、制御枠内に任意の3次元図形を定義すると、平面計画の変更に応じて制御枠やその中の部材の位置や大きさも自動調整するという機能が組み込まれている。高本やBranko等が提案する通り芯を手がかりにした操作の導入が課題となっていた。下川ら¹¹⁾は、通り芯や制御枠、置換操作等の考え方を3次元に展開した構造計画検討システム¹²⁾を提案した。3次元空間に任意に配置した通り芯の交点を手がかりに部材配置線を定義し、その部材配置線に沿って部材のボリュームを表す制御枠を配置する。更に、制御枠内に任意の形状を持つ部材を定義し、それらを置換しながら段階的に軸組形式あるいは壁式の構造モデルを定義

するシステムである。通り芯の移動に応じて部材の接続関係を保ちながら形状や大きさを自動調整したり、制御枠を分割しながら部材の詳細を定義することができ、部材配置線方向の長さについて制御枠の固定部分と可変部分を指定する機能も提案している。このように、平面、外形、構造など目的別の設計案検討システムは幾つか提案されてきた。しかし、複数の記述モデルを参照しながらデータを連携させたり、異なる記述モデルを確実に擦り合わせて行くような機能が未発達である。

3. 整合操作の繰り返しによる設計案検討の作業モデル

筆者らが大学の研究室内で実施した2つの設計競技の作業手順は必ずしも特殊ではないとの仮定の下に、作業内容を分析し¹³⁾、並列的に複数の記述モデルを検討しながら進む設計案検討過程の特徴と、並列的であるが故に必要な各種モデル間の整合操作の特徴を考察する。以降、平面計画、外形デザイン、構造計画の検討のために定義されたモデルをそれぞれ平面モデル、外形モデル、構造モデルと呼ぶ。また、記述モデル間の整合性確認のために記述される断面図を断面モデルと呼ぶ。

3.1 整合操作に着目した設計事例分析

[事例1: 日仏文化会館設計競技応募案の設計過程(1990)]¹⁴⁾

前半は外形モデルと平面モデルを並行して作成しながら検討を進め、後半は両者に対して構造的な検討を加える形で設計が進んだ。表1は大まかな作業の流れである。図1の(a)~(d)はそれぞれ表1の②、③、④、⑥の段階で作成されたモデルの例である。

[事例2: 国立国会図書館関西館設計競技応募案の設計過程(1996)]

機能的な要求が複雑であり、設計規模も大きかったことから、表2

表1 事例1における設計の流れ

- ①所要室の直方体モデルを積み上げながら建物規模を確認。
- ②建築外形イメージの検討。扇形の全体形の中央にドーム型のホールを収めることを決定。ホールの大きさ、建物の要求規模、街区形状、隣接建物の形状、周囲の眺望点からの眺めなどを手がかりに外形を検討した。
- ③建物外形モデルとドーム型ホールの外形モデルを用いて各階の床形状を割り出し、それぞれに対し機能単位の配置や動線を検討。
- ④動線計画を考慮し、外形案を変更。(ファサード部分の曲面の分割、階段・エレベータシャフトの追加など)
- ⑤構造計画の検討と平面計画の具体化。
- ⑥円形ホールの構造と内部デザインの具体化。ドーム構造の仕組みを単線と円柱で表現し、検討。ドームの各階床の間に設けた吹き抜けイメージの確認。
- ⑦外形デザインを洗練する過程で平面計画の修正。
- ⑧要求図である平面図、立面図、断面図の仕上げ。

図1 事例1における記述モデル

に示すように担当を分け、それぞれの検討を同時進行させながら、徐々に設計案を調整してまとめていった。設計の初期段階では「上空に浮いた閲覧部門」と「地下書庫」、その間に挟まれた巨大な広場が共通のイメージとして固まっており(図2の(a)), いかにしてそれぞれに要求機能を収めるかが焦点となった。表3はモデル間の調整作業を含めた設計過程の概要である。図2の(b)~(e)はそれぞれ表3の③, ④, ⑦, ⑩の段階で作成された記述モデルやその整合操作の状態を表したものである。表4は記述モデル間の主な整合操作を作業の目的別に分類したものである。

3. 2 整合操作による設計過程モデル

上記2つの設計事例の観察結果から、並列的に進む作業手順の特徴と各モデル間の整合操作の主な内容を抽出整理した。

[並列的モデリング作業]

a) 最終的なモデルの精度や記述内容は必ずしも一定していないが、西郷の研究を参考に、取りあえず外形、平面計画、構造の三つの観点に関する次の事項を定義する作業と想定した^{注9)}。

- ・ 建物のボリューム、外形、仕上げ
- ・ 通り芯配置、床の形状・配置、階高
- ・ 部屋や通路など空間単位の2次元3次元的形状・配置、動線
- ・ 建築部材やその開口部などの形状・配置・仕上げ
- ・ 構造方式、構造体の基本寸法、構造部材の形状・配置など

b) 上記を定義するに当たって外形、平面計画、構造の各観点からそれぞれに適した表現の記述モデルを使って並列的に作業が進み、モデル間の整合性を検討する過程で断面モデルが用いられる。また各モデルでは西郷が指摘したように抽象的な表現から具象的な表現へと段階的に中間モデルが置き換えられていく。

c) 動線計画など機能的な検討は、形が正確に表現され、柱などの立体要素が表示を遮ることのない床の正投影画面で行われる。一方、上下階の繋がりを確認する場合、各階のスラブだけを上下に重ねて配置し、等角投影視点で作業することが多い。

d) 外形モデルと構造モデルは基本的に3次元モデルとして作成される。特に、外形モデルは建物全体を表す抽象的なボリュームモデルとして表現され、構造モデルは通り芯や応力線、単純な幾何立体の集合として表現され、徐々に複雑な形状に置き換えられる。[モデル間の整合操作]

検討内容の大きな流れとしては外形→平面計画→構造、平面計画→外形→構造の2種類が代表的であるが、いずれにしてもその移行の過程で次のような整合操作が必要となる。

e) 各階床レベルで外形モデルの断面形状を表す図形(以下、断面図形と呼ぶ)を取り出し、それを基に平面モデルの外形を定めたり、高さ検討のため垂直方向の断面図形を取り出したりする。

図2 事例2における記述モデル

表2 事例2における作業分担

検討内容	モデル	検討内容	モデル
閲覧関係部分の平面と断面(地上1~4階)	2次元モデル	外形	3次元モデル
書庫部分の平面(地下3~4階)	2次元モデル	コア	3次元モデル
事務諸室部分の平面と断面(地下1~2階)	2次元モデル	外溝	2次元モデル

表3 事例2における整合操作に着目した設計の流れ

①上空部、地下部の大きな所要室ボリューム配分を決定。
②手書きスケッチで上空部の平面外形を決定。並行して、地下書庫の平面外形および基準寸法を独自に決定。
③上空部分の仮の床形状を定義し、機能配置や動線計画を検討。その後、床形状をもとに3次元の外形モデルを作成する。
④上空部の外形の上下左右各面に曲面が用いられたため、断面モデルから平面で利用可能な床の範囲を割り出し、各階床形状を変更。
⑤上空部の平面で定義された通り芯を手掛かりに、3次元モデルを作成しながら上空部とそれを支えるコアの構造計画を検討。
⑥構造解析の結果とコア周りの動線計画(階段とエレベータ)を考慮し、柱のスパンを変更。それに伴い上空部と地下書庫で割割、コアの位置を調整。更に通り芯を手掛かりに外形と構造モデルを再定義。
⑦上空部と地下部で、搬送装置、吹き抜け、エレベータの位置を繰り返し確認しながら計画を詰める。
⑧地下1階と外溝で、来館者、VIP、搬入の動線を調整。
⑨面積計算の手違いによる地下書庫の基準寸法変更。これに伴って上空部のスパンを一部変更し、更に外形と構造モデルを調整。
⑩構造体に筋かいを追加。断面図を描き、各階の床レベルにおける動線への影響を確認し、平面計画を調整。
⑪上空平面を微調整しながら外形との整合性を繰り返し確認。
⑫提出用各種モデルの仕上げ。

表4 事例2における整合操作の事例

タイプA: 設計変更に伴う最新データの伝達
①スパンの変更。新しい通り芯のデータが配られる。関連するモデルでは新しい通り芯に合わせて調整を行う。各階平面モデルは標準のコマンドで修正し、構造や外形モデルはその通り芯に合わせて作り直す場合が多かった。
②各階平面の変更。平面モデル間で、垂直動線や吹き抜け、コア出入口、建物の外形など、該当部分のデータを受け渡し、それぞれでモデルの位置合わせ、及び調整を行う。
タイプB: モデルの新規作成及び更新
③三次元の構造モデル作成。平面モデル中の通り芯や建物の外形線を構造担当者へ受け渡し、それらを基に3次元の構造モデルを作成する。
④三次元の外形モデルの作成。平面モデルから通り芯や外形線を、断面から外形線を受け取り、それらを組み合わせながら外形モデルを作成。
⑤平面モデル作成。三次元の構造モデルの柱・梁・筋かいなどを2次元モデルに投影する。断面線や見え掛け線を取り出して平面担当に受け渡し、平面モデルや断面モデル上に配置する。
⑥断面モデル作成。地下部分は平面モデルから通り芯や壁の位置を割り出しながら作成。地上部分は3次元の構造モデルから部材の断面線を取り出し、平面と突き合わせながら作成。
タイプC: モデル相互の整合性の確認
⑦三次元の構造モデルの平面モデルへの影響を確認するために、部材モデルの断面線を取り出し、平面モデルと重ねてみる。
⑧平面モデルを上下階同士で重ね合わせ、垂直動線や吹き抜け、搬送装置の位置・形状の調整を行う。また、機能ボリュームのやり取りによる面積の調整。
⑨外溝モデルと事務諸室平面モデルを重ね合わせて、搬入路やエントランスの位置・形状の擦り合わせ。
⑩平面モデルと断面モデルを上下に位置合わせして併置し、断面モデルから高さ方向の情報を取得する。

- f) 機能単位のボリュームモデルを積み上げ、外形モデルとの干渉関係を確認する。
- g) 同一または類似の構成を持つ平面モデルが複数階定義されている場合、設計変更に対しては特定部分のモデルを複写する等により各階を修正する。単純だが、煩雑な作業であることが多い。
- h) 各階の平面モデルで定義された通り芯や外形モデルから取り出した断面図形を手掛かりにしながら構造モデルを定義する。
- i) 各階の平面モデルや外形モデル、構造モデルなど複数のモデルが定義された状態で、原点や座標軸を合わせながら相互に重ね合わせたり、横に並べたりしながら全体の関係を検討する。
- j) 構造モデルの断面図形を取り出し、平面モデルに重ね合わせ、動線や間取りへの影響を確認する。
- k) 平面モデルと構造モデルとの調整は通り芯を手掛かりに進める。各階の平面モデル間でも通り芯を手掛かりに調整することが多い。
- 1) 外形モデル・構造モデルと平面モデルを再調整する際には、外形モデルと構造モデルの断面図形の取り出しと平面モデルへの重ね合わせが繰り返し行われる。

4. 整合操作における在来CADの問題点

事例2の観察を基に、市販の汎用的なCADを利用して整合操作する場合の主要な問題点を以下に挙げる。

- 1) 断面図形の管理操作: e), j), l)などの整合操作に対し、任意に設定した平面でソリッドモデルの断面形状を図形として取り出す機能を持つCAD¹⁰⁾は幾つかある。しかし、断面図形を定義後、一群の図形として表示制御、編集制御するためには、画層の新規定義、現在層の変更、複数の命令の実行とパラメータ入力を一定の手順で繰り返す必要があり、煩雑でミスを犯しやすい。
- 2) モデル相互の相対位置関係の視覚表示: 複数の平面モデルや断面モデルを定義する場合、各モデルは建物全体に対する定義位置が決定されているにもかかわらず、「1階平面」、「A-A'断面」等のように記号で整理されるに止まり、各モデルの相対的位置関係を視覚的に確認する機能が無い。
- 3) モデルの重ね合わせや定義位置の調整: i)の整合操作のように複数の図形群の一括移動を汎用CAD上で行うには、画層の制御、図形の選択と移動など複数の命令の実行とパラメータ入力を一定の手順で繰り返しながら作業する必要がある。特に、平面モデルや外形モデルなどの各モデルに複数の画層が定義されている場合、特定の図形をモデル間で複写したり、代案を作成したりすると画層管理が更に複雑になる。
- 4) 複数の平面(断面)モデルの一括処理: g)の整合操作のように、上下階のモデルを一括して修正するような場合があるが、そのような作業を支援する機能が無い。
- 5) 通り芯によるモデル間の調整の問題: 整合操作のh), k)のように、各モデル間の調整は通り芯の位置調整により進められていたが、個々のモデルにおいて通り芯とその他の図形要素の関係性をシステムが保持していないため、通り芯の位置を変更する度に関連部分のモデルを再定義する必要が生じた。既往研究の項で述べたような、通り芯の編集に伴って、それを参照して配置されている空間要素や柱や梁などの図形要素群の寸法や位置を自動的に調整してくれるような機能が必要である。

5. 整合操作支援CADシステムの仕様

3や4で述べた作業モデル及び在来CADの問題点を踏まえ、整合操作を支援するCADシステムの基本仕様について検討した。当面、平面モデル、構造モデル、外形モデル、断面モデルによる整合操作を想定し、その概要を述べる(表5)。

(1) モデルの定義空間

- ① モデル空間: モデル空間は外形モデルと構造モデルの3次元モデルを定義するための空間である。また、モデル空間内に後述する方法で平面モデルや断面モデルを定義することができる。代案の検討用など、1つのファイル(ワールド座標空間)内に複数のモデル空間を定義できる。各モデル空間はCAD本来のワールド座標空間(以下、W空間と呼ぶ)内の任意の位置に定義することができ、モデル空間の基準面(XY平面)はW空間内に長方形の枠¹¹⁾で表示される。また、その枠の頂点の1つがモデル空間の基準点となる。カーソルで枠、あるいはモデル空間名を表すラベル¹²⁾を指示することにより、モデル空間全体の表示状態(表示・非表示)を切り替えたり、ドラッグ操作によりW空間の任意の位置にモデル全体を一括して移動できる。

- ② 作業平面: プランフェース(PF), セクションフェース(SF): PF/SFは平面モデルや断面モデルを定義したり、モデル空間に定義された外形モデルや構造モデルの断面図形(平面も含む)を取り出すための平面である。PFはモデル空間のXY平面に対し平行で任意の高さに定義し、SFはモデル空間に対し垂直に定義する(図3)。PFやSFはいずれかのモデル空間内で定義されるものとし、対応する位置に長方形の枠で表示される¹³⁾。また、その枠の左下の頂点が其々のPF/SFの基準点となる。PF/SFの枠をカーソルで指示することによって編集可能モデルを指示したり、表示状態を切替えたり、また枠のドラッグ操作によりそれぞれに定義されたモデルをW空間の任意の位置に移動できる。

- ③ 画層定義: モデル空間, PF, SFそれぞれに複数の画層を定義できる。各画層はCADの基本機能で個別に操作できるが、枠

図3 1組のモデル空間、PF/SFの定義例

例えばこの図では、モデル空間2の枠からラベルを指示すれば、画層1, 2, 3, 4のモデルを、またPF2の枠を指示すれば、画層3と4のモデルを一括して処理することができる。

図4 モデル空間、PF/SF、及び画層の構成

を指示することにより、モデル空間やP F、S Fを単位に画層の表示状態を一括して処理できる。(図4)

(2) 各モデルの定義・編集支援機能

④ 平面モデル/断面モデル：両角らが提案したシステム^{※10)}に通
り芯による図形制御機能を組み込んだものとし、作業はP FやS
F上で行う。通り芯、部屋等の空間単位や、床等の外形線を用い
ながら定義する。平面モデルでは通り芯を編集することによって
空間オブジェクトの形状、面積情報、通り芯上に配置されている
壁や柱などの物的要素の位置や寸法が自動的に更新される。また、
各階の平面モデルは高さの情報を保持しており、作業平面上の各
要素を壁、柱などの高さを持つ建築部材モデルに置換しながら層
単位の3次元モデルを構築していけるものとする。

⑤ 外形モデル：曲面や不整形な建築形態を扱えるように、様々な
3次元形状を定義・編集できる必要がある。

⑥ 構造モデル：下川らが提案したシステム^{※11)}の考え方を採用す
る。具体的には、通り芯、部材配置線、ボリュームモデル、オリ
ジナル・モデルという4つのレベルのオブジェクトで順次構造体
を定義する。通り芯を編集することによって、その上に配置され
ている部材配置線、ボリュームモデル、オリジナルモデルの位置
や寸法が自動的に編集される。

⑦ 論理演算可能な記述モデル：平面、断面、外形、構造の各モデ
ルは、任意の作業平面の位置で断面図形を取り出したり、他のモ
デルとの干渉チェックのため、論理演算できる必要がある。

(3) 整合操作支援機能

⑧ 複数モデルの重ね合わせ/並列配置表示：モデル空間やP F/S
Fの基準点を合わせて異なるモデルを重ね合わせたり、枠をドラ
ッグして横に並べたりしながら調整作業を進めることができる。

⑨ 断面図形取り出し：P FやS Fを定義し、断面図形の取り出し
命令を実行すると、モデル空間内の任意の断面図形がそのP F/
S F上に取り出される。この時、断面図形を格納するための画層
がP F(S F)の下位に自動的に定義される。断面取り出しの対象
となるモデルが複数の画層に分かれている場合、画層も複数定
義され、断面図形はそれぞれ対応する画層に格納される。(図5)

⑩ モデルの複写：モデル空間同士、P F/S F同士で指示したモ
デルを自由に複写できる^{※14)}。また、P FやS F全体を他のモデル
空間に複写することもできる。この際、対応する画層も自動的に
定義される。代案を生成したり、モデルを新規作成するための手
掛かりにしたり、異なるモデル同士で調整を行う場合に用いる。

⑪ 干渉チェック：P FやS F上に定義された平面モデルや断面モ
デル、外形モデルや構造モデルなどを重ね合わせた際に、任意の
モデル同士の干渉した部分(交差した部分)、あるいははみ出した
部分を取り出し、表示することができる。

⑫ 通り芯によるモデル間の調整^{※15)}：複数のモデル空間やP Fに
渡って、対応する複数の通り芯を順次選択した後、一括して編集
することができる。例えば、上下階の関連部分を一括して等量だ
け変形させたりすることができる。

⑬ モデル作成のためのオブジェクト変換：外形モデルから取り出
した断面図形を平面モデルや構造モデル用の通り芯に変換できる。

6. システムの試作

外形1と外形2という2つのモデルの断面図形をPF1の作業平面で取り出すと、画層2と画層3の2つの画層が自動的に定義され、それぞれ対応する断面線が格納される。

図5 外形モデルと平面モデルの重ね合わせ作業の模式図

表5 整合操作支援企画設計CADの基本仕様

1. モデルの定義空間	○
(1) モデル専用作業空間	○
① 異なるモデルの個別定義、分離、一体化	○
② モデル単位の表示切り替え、移動の一括処理	○
(2) 作業平面	○
① プランフェース (P F)、セクションフェース (S F)	○
② 各階毎の平面モデルの一括表示切り替え、移動	○
③ 断面図形取り出しとその後の一括表示切り替え、移動	○
(3) 画層定義	○
① モデル空間、P F/S F毎の画層定義	○
② モデル空間、P F/S F毎の画層の一括操作	○
2. モデル作成支援環境	○
(1) 平面モデル	○
① 複数階の並列デザイン	○
・ P F間での通り芯の一括操作	○
② 通り芯制御	○
・ 通り芯の編集による空間オブジェクトの変形	○
③ 面積管理	○
④ 空間を単位にしたモデリング操作	○
⑤ 外形・構造から取り出した断面形との干渉チェック	△
⑥ スラブや柱、壁などの3次元オブジェクトの配置	△
(2) 断面モデル	○
① 通り芯制御	×
② 同一モデル空間内に定義済みのP Fの自動位置表示	○
(3) 構造モデル	○
① 具象度のレベルに応じたクラス階層	○
・ 通り芯→部材線→ボリュームモデル→オリジナルモデル	○
② 通り芯の編集によるモデルの変形	○
・ 通り芯の編集によるボリュームモデルの自動調整 (1軸方向)	○
・ 可変部分と固定部分の指定	○
③ 部材線の定義	○
④ ボリュームモデルとオリジナルモデル	○
・ 置き換え操作によるオリジナル部材の定義	○
⑤ P F/S Fによる断面図形の取り出し	○
・ ボリュームモデルとオリジナルモデルのみ	○
(4) 外形モデル	○
① 外形イメージモデル	○
・ 全体形状、棟、外装など	○
② 建築形態規制モデル (斜線制限モデル)	○
③ P F/S Fによる断面図形の取り出し	○
(5) 論理演算可能な記述モデル	○
① 各モデルから論理演算可能なモデルへの置き換え	△
3. 整合操作支援機能	○
① 複数モデルの重ね合わせ・並列表示	○
・ 枠を指示して移動	○
・ P F/S Fのモデル空間に対する自動位置合わせ	○
② 断面図形の取り出し	○
・ 外形モデルからの断面図形取り出し	○
・ 構造モデルからの断面図形取り出し	○
・ 平面モデルからは3次元のオブジェクトが配置されている場合に限り断面図形取り出しが可能	○
③ モデルの複写	○
・ モデル空間相互、P F/S F相互でのモデルの複写	○
・ モデル空間相互でのP F/S F全体の複写	○
④ 干渉チェック	○
・ 交差部分のチェック、はみ出し部分のチェック	○
⑤ 通り芯操作によるモデル間の調整	○
・ 複数のP F内の通り芯の一括操作 (移動、回転)	○
⑥ モデル作成のためのオブジェクト変換	○
・ 外形モデルから取り出した断面図形の通り芯への変換	○

※○はプロトタイプシステムで開発済みのもの、△は一部機能しているもの、×は今後開発予定の機能を表す。

上記仕様に基づき、整合操作を支援する3次元CADシステムのプロトタイプを試作した。システムはAutoCAD R14Jのカスタマイズ環境を利用して開発した。開発言語はAutoCAD上で稼動するインタプリタ言語であるAutoLispを使用した。平面計画を支援する機能は両角らが開発したシステムに通リ芯の生成・編集機能を組み込んだものを構築、これを利用した。構造計画を支援する機能は下川らが開発済みのシステムに、部材のボリューム・モデルや個別に形状をデザインした部材モデル（オリジナル・モデル）の断面図形を取り出す機能を追加したものを利用した。外形検討を支援する機能はAutoCADの持つソリッドモデリング環境を利用した。その他、新たに次の機能を開発した。番号は前章の仕様の番号と対応する。

- 1) モデル空間と作業平面（P F，S F）の定義機能（①，②）
- 2) モデル空間とP F / S Fに合わせた画層管理機能（③）
- 3) 構造、平面モデルから論理演算可能なモデルへの置換機能（⑦）
- 4) 複数モデルの重ね合わせ / 並列表示機能（⑧）
- 5) P F，S Fを利用した断面図形の一括取り出し機能（⑨）
- 6) モデル空間とP F / S Fを利用したモデルの複写機能（⑩）
- 7) 3) と連動した異なるモデル間の干渉チェック機能（⑪）
- 8) 断面図形から通リ芯への変換機能（⑬）

7. ケーススタディとシステムの評価

試作したシステムの有効性を確かめるため、4階建て商業ビル設計のケーススタディを行った。図6はその主な過程を示している。

ケーススタディではPentium200MHzのCPU、メモリ64MBのDOS/V機を使用した。図6の⑩で構造モデルの断面図形を1層分取り出すのに25秒かかったが、他の部分では待つという感じはなく、実用可能な環境が実現できた。以下に、試行を依頼した設計者の意見を含め、システムの評価を各段階毎に述べる。

- 1) ③～④の断面図形取り出しから面積確認へ至る過程では作業性が格段に向上した。表6の(a)と(b)を比較すると、合計のステップ数は半分以上に減少しており、煩雑な画層操作も省略されたことが分かる。1つの階（P F）でもステップ数は半減しており、各階の処理を考えるとその効果は大きい。また、P FやS Fの枠で平面モデルや断面モデルの位置を表示したことで、3次元モデルに対する面の定義位置が確認し易くなった。
- 2) ⑤～⑥で、P Fの枠をドラッグして平面モデルを並列に表示したり、アクソメ画面で重ねて上下階の繋がりを確認したりする一連の操作は、発想と一致して便利である。また、複数階の通リ芯の一括編集機能により、平面モデル修正の作業効率が向上した。
- 3) アクソメあるいは透視図視点で表示した3次元モデルでは断面形状が捉えにくかった。⑧のように、S Fの導入で3次元モデルの任意の断面を容易に確認できるようになり、平面モデルとの関係も容易に読み取れるため、断面形状の編集作業が容易になった。
- 4) ⑨～⑩では、平面モデルや断面モデルで作成した通リ芯を複写して3次元的な構造部材の定義に利用できるため、構造検討への展開が容易である。
- 5) ⑪のように部材の断面図形が画面上に複数存在する場合でも、その断面図形を取り出したP Fの枠を指示して一括して動かせるので、平面モデルとの重ね合わせが簡単に行えた。
- 6) 全体的には、外形モデル、平面モデル、構造モデルを独立して

①モデル空間を定義する。モデル空間に敷地の画層を定義し、敷地情報を書き込む。

②同様にモデル空間に外形モデル用の画層を定義し、標準のソリッドモデリング機能で外形モデルを作成する。

③平面計画用に4層のP Fを定義する。それらのP Fで外形モデルの断面図形を取り出す。

④外形モデルの画層をOFFにする。断面図形を通り芯に変換するコマンドで通り芯を生成し、通り芯で閉じられた領域に面積情報を持つ空間単位図形と対応する床を定義する。

⑤複数階のP Fを左右に並べ、2階のP Fで部屋等を定義する。それらの図形を各階のP Fに複写したり、通り芯をまとめて操作したりしながら平面計画を進める。

⑥P Fを上下に重ねて上下階の繋がりを確認する。図は大まかな平面計画が固まった段階。アイソメ視点でも通り芯を動かすことができる。

⑦高さ方向の検討のために、垂直なS Fを定義し、断面図形を取り出す。

⑧⑦のS Fを取り出した図（P Fの位置が分かる）。4階の階高に問題があるため断面形状の修正作業をしている。この後、新しい断面図形を利用して外形モデルを定義し直した。

⑨平面で利用していた通り芯に加え、新たに定義したS Fから取り出した断面図形を通り芯に変換し、構造検討用の通り芯を定義する。

⑩通り芯の交点を参照しながら部材配置線を定義していく。図は部材配置線上に大まかなボリュームモデルを作成したところ。

⑪各階のP Fで構造体の断面図形を取り出す。平面のP Fを重ね合わせたところ、3階で通路とプレスの位置関係の問題があることに気付いた（Oで開った部分）。

⑫⑪の問題を解消するため、通路の形状を変更する。

図6 プロトタイプ・システムを用いたケーススタディの過程

表6 プロトタイプシステムと市販CADの作業ステップ数比較

(a)プロトタイプシステムによるコマンド実行リスト

①断面図形を取り出すためのPFを作成(4層分) NFACE,en,"plan","500","4","4000","pf1",bp,"pf2","pf3","pf4"<R>
②断面図形を取り出す(4層分) BSEC,pf1,pf2,pf3,pf4,en1,en2<R>
③断面図形を通り芯に変換(4層分) SEC2RL,"plan","1000",sec1-1,sec1-2,sec2-1,sec2-2,sec3-1,sec3-2,sec4-1<R>
④4層の通り芯で囲まれた領域をクリックし、空間オブジェクトを定義 SP,"zone",p1,bp<R>
⑤3,2,1層の順にアクティブなPFを変更し、④と同様に空間オブジェクトを定義 CHFACE,pf1<R>/SP,p1,p2<R>/CHFACE,pf2<R>/SP,p1,p2<R>/CHFACE,pf3<R>/SP,p1,p2<R>

(b)市販の汎用CAD^{*)}によるコマンド実行リスト

①画層を定義し、アクティブにする(1層用) -LAYER,"M","pf1"<R>
②断面図形を取り出すための面を作成(1層用) PLINE,p1,p2,p3,p4,"C"<R>
③断面図形を取り出すための面を作成(2,3,4層用) COPY,en,"M",bp,p1,p2,p3<R>
④各層用の画層を定義 -LAYER,"N","pf2","N","pf3","N","pf4",<R>
⑤面の位置で断面図形を取り出す(1層用) SECTION,en1,en2,"0",pf1<R>
⑥④⑤と同様に、2,3,4層の順にアクティブな画層を変更し、各層用の面の位置で断面図形を取り出す。 -LAYER,"S","pf2"<R>/SECTION,en1,en2,"0",pf2<R>/-LAYER,"S","pf3"<R>/SECTION,en1,en2,"0",pf3<R>/-LAYER,"S","pf4"<R>/SECTION,en1,en2,"0",pf4<R>
⑦断面図形のそれぞれの面積を確認する。 AREA,"0",sec1-1<R>/AREA,"0",sec1-2<R>/AREA,"0",sec2-1<R>/AREA,"0",sec2-2<R>/AREA,"0",sec3-1<R>/AREA,"0",sec3-2<R>/AREA,"0",sec4-1<R>

(a)のコマンドは全てオリジナル。","で区切られた最初のフィールドはコマンド名を、それに続くフィールドはオプション選択、図形指示、文字列入力など、行末の<R>はコマンド終了、/はコマンドの区切りをそれぞれ表す。 *1:AutoCAD R14J

作成できるため、整合性を取ることに拘束されて思考が中断しがちな従来の手法に比べ、自由にモデリングを進めることができた。

8. 結論

本研究では、整合操作による設計プロセスのモデルを定義し、モデル空間とPF/SF、及びそれらを利用した整合操作支援機能を構築した。ケーススタディとその評価を通して以下の知見を得た。

- (1) 検討内容に応じた複数のモデルを使って、並列的に作業を進めながら徐々に整合性を取っていくような設計方法を想定したシステムを提案し、その実用可能性を確認した。
- (2) 想定した設計方法が採用されるケースは多いと考えられ、今後多くの設計業務への活用が期待される。
- 一方、次のような点が今後の課題として挙げられる。
- (3) 平面モデルや構造モデルを定義するシステムは曲線の通り芯を扱えないので、作成できる建物の形に幾つか制限がある。
- (4) 断面図形取り出しの際に見え掛かり部分の投影図が取り出せないで、平面計画への影響を検討する際に情報不足である。

今後、上記のような課題を踏まえ、システムの試用と改良を繰り返ししながら、実用性を更に上げていきたい。

謝辞

(株)佐藤総合計画(元熊本大学大学院生)の浜田智紀氏には、システムの構想、開発において多大なご協力を頂いた。心より謝意を表したい。

注

- 1) 日本建築学会設計方法小委員会によって定義された設計プロセスモデル¹²⁾では、観点の代表例として「動線」、「平面型」、「規模」、「構造」、「設備」、「造形」が挙げられている。
- 2) アメリカの設計事務所5社、国内のゼネコン(設計部)2社、設計事務所4社を訪問し、アンケートとヒアリングによる調査を行った。

- 3) 山口は文13)の表-1等で、企画設計の特徴の一つとして、曖昧で粗い表現のモデルを使って試行錯誤しながら問題発見的に設計案をまとめて行くことを挙げている。
- 4) これは複数の設計者が使用する複数のCADシステムとの連携の問題とも考えられるが、通信の問題を含むことになるので、当面は一人のユーザが使用する1台のCADシステムの問題に限定して考える。
- 5) 三菱地所のDELTA、渡辺らのOAMS等の知識表現モデルの研究や、大成建設のLORANT、東京電力のAPLUS、長澤らのIBDS、フジタのCOMPASS等の建物モデルの統合化の研究が挙げられる。
- 6) 架構方式、部材寸法、部材形状の検討を段階的に支援する。応力解析などの力学的検討は扱っていない。
- 7) 設計過程や分析の詳細については文献14と文献15を参照。
- 8) 事例1では、AutoCAD GX-IIIと当研究室で当時開発が進められていたモデリングシステムを用い、事例2ではAutoCAD R13Jを用いた。
- 9) 設備や構造に関する技術的検討、積算などの作業も想定できるが、今回は取りあえず建築の物的形状の直接かかわる事項に限定して考えた。
- 10) AutoCADやFORM-Zでは「セクション」というツールが、MiniCADでは「切断面を生成」というツールが用意されている。
- 11) モデル空間の範囲(長方形)は定義時に対角点を指示して決定する。また、対角点を指示する際の1点目がモデル空間の基準点となる。
- 12) モデル空間の定義時にモデル空間の名称を任意に設定すると、その名称を表示した文字図形(ラベル)を任意に配置しておくことができる。モデル空間が複数重なっている場合はこのラベルでモデル空間を制御する。
- 13) SFの枠の水平長さはモデル空間との交差部分を示し、高さは利用者が任意に指定する。
- 14) 複写元と複写先のモデル空間の基準点が複写の際の基点と目的点となる。
- 15) 現段階では異なるモデル間の通り芯の連動は考慮していない。

参考文献

- 1) 長倉威彦他：現代建築の発想、丸善株式会社、1989、pp.252
- 2) 藤原篤、松本伸洋、川崎清：福井県立大学基本計画・基本設計(福井キャンパス)における合意形成のプロセス、日本建築学会計画系論文集第452号、1993.10、pp.85-94
- 3) 西郷正浩、ほか2名：3次元企画設計ツールのための空間記述モデルに関する研究、日本建築学会計画系論文集第499号、1997.9、pp.237-243
- 4) David Kurmann: SCULPTOR - How to Design Space?, CAADRIA98 Proceedings, 1998.4, pp.317-325
- 5) Kevin Matthews: A Model for Integrated Spatial and Structural Design of Buildings, CAADRIA98 Proceedings, 1998.4, pp.123-132
- 6) W. J. Mitchell, R. S. Liggett, Milton Tan: The Topdown system and its use in teaching -an exploration of Structured, Knowledge-Based Design-, ACADIA Workshop Proceedings, 1988, pp.251-262
- 7) Markus Bonn: Modeling Architectural Forms Through Replacement Operations, ACADIA89 Proceedings, pp.103-130
- 8) 高本孝頼：建築要素の関係設定に着目した知的CADの開発研究、熊本大学学位論文、1993.3
- 9) Branko Kolarevec: Relational Description of Shapes and Form Generation, CAADRIA97 Proceedings, 1997.4, pp.29-39
- 10) Mitsuo Morozumi, Yuichi Shimokawa, et al.: On the Development of 3-D Schematic Design System -Utilities for Planning Sketches and 3-D modeling-, CAADRIA96 Proceedings, 1996.4, pp.63-73
- 11) Yuichi Shimokawa, Mitsuo Morozumi, et al.: Replacement and Transformation as a key to Schematic Design Thinking -3-D Modeling System which Supports Design Thinking-, CAADRIA98 Proceedings, 1998.4, pp.365-374
- 12) 原広司、鈴木成文、服部孝生、太田利彦、守屋秀夫：建築学体系23 建築計画、彰国社、1982、pp.200-217
- 13) 山口重之：設計の流れとCAD/CG 建築CAD/CG活用ノウハウ、デルファイ研究所、1993、pp.8-11
- 14) 両角光男：建築設計の新しいかたち、丸善株式会社、1998
- 15) 下川雄一、両角光男、ほか6名：建築設計におけるデザインの整合操作の考察 -設計思考に対応したCADシステムの開発に関する研究-、建築学会研究報告九州支部、第37号・3計画系、pp.141~144、1998.3

(1998年7月10日原稿受理、1998年9月9日採用決定)