設計支援システムの軌跡*

コンピュータグラフィックスから知的設計へ

岡田久豊**

History of Computer Aided Design System / Hisatoyo OKADA

Key words: computer aided design system, computer graphics, CAD, concurrent engineering, solid modeling, virtual engineering, intelligent design

1. はじめに

設計支援システムの発展の歴史は製造業の発展とともにあった。1960年代のコンピュータグラフィックス、CADおよびNCの発祥の時点から先進企業における先駆けとしての技術開発を経て1980年代の高度成長期にはそのシステムとしての製品化が進み一般普及期を迎えた。初めは設計活動を作業レベルで効率化させる目的で始まり、徐々に製品開発活動におけるコンカレントエンジニアリングを支援する業務基盤としての地位を確保した。1990年代に入ってソリッドモデリング技術が確立されるとともに設計支援システムの守備範囲の一層の広がりが見られるようになり、特にデジタルモックアップ技術の適用はボーイング社に代表される航空機業界やクライスラー社など自動車業界において採用され、製品開発プロセスの全体像を実物による試作・評価のプロセスからデジタル情報によるバーチャルエンジニアリングへと塗り替えようとしている。

21世紀は製造業を取り巻く環境が一段と厳しさを増すことが予想される。例えば顧客の視点での商品企画の徹底、多品種かつ少量化の進行、商品の更なる高機能化または新機能の追求、およびさらに厳しい開発期間短縮要求などである。設計支援システムは設計の単なる方法論にとどまらず、設計スキルやノウハウのベースとなって新しい世紀の問題解決の切札になると考えられる。

本稿ではまず前半において設計支援システムの歴史を振り返り、その中での主要な技術を確認する。次に後半で現

状での先進技術と事例を研究することによって21世紀に向けての飛躍を予測する。

2. 設計支援システムの軌跡の概観

今日の設計支援システムの概念が確立されるまでの道のりを4段階に分けてとらえることができる。基本技術研究の段階、先進企業でのコンセプト確立段階、パッケージ化による普及の段階を経て現在の先進企業におけるインテグレーションの段階に至っている。

2.1 基本技術研究の段階

1960年代にコンピュータの科学技術分野への応用が始まると同時に設計支援システムとしての利用技術の研究が開始されている。コンピュータで何ができるのか、設計活動においてどのような支援が有効であるのかという原点での研究が行われた。

コンピュータ本体はすでにFORTRANコンパイラが開発されバッチ処理の科学技術計算において活躍していたが、グラフィックディスプレイを介した図形対話（マン・マシンコミュニケーション）技術は未開発であった。1963年にMITのI. E. SutherlandによってSKETCHPADシステムの研究成果¹⁾が発表され、1964年にはGM社でDACシステム²⁾、1966年にはIBMが2250型ディスプレイシステムを製品化した。一方、数値制御工作機械（NC）では1952年にMITにおいて3次元フライス盤が誕生している。NCの自動プログラミング言語APTの開発がイリノイ大学で進み、1960年にはAPT IIIが同時3軸制御機能のレベルに達した。工業ロボットの誕生は1970年ころまで待つことになる。CADやNCに欠くことのできない自由曲面理論に関して1967年にCoonsの曲面理論³⁾が、また今日のCADにおいて重要な位置を占めているソリッドモデリングに関しては1972年にBraidの研究⁴⁾が

* 原稿受付 平成10年10月12日

** 日本アイ・ビー・エム(株)（東京都中央区日本橋箱崎町19-21）
1965年横浜国立大学工学部電気工学科卒。同年日本アイ・ビー・エム(株)入社、設計支援システムの開発と普及活動を担当。1990年よりコンサルティング事業部、商品開発プロセス改革をテーマにコンサルティング活動を展開中

図1 設計支援システムの軌跡

発表されている。有限要素法による構造解析では1970年にNASTRANが公開されている。このように1970年前後までには今日の設計支援システムの中核となる技術が出そろっている。

2.2 先進企業でのコンセプト確立段階

1960年代の後半から1970年代の前半にかけてこれらの技術の組合せとして先進企業による産業界での応用が始まる。GM社のCADANCEシステムは自動車の車体開発を目指したものでワイヤフレームとサーフェスモデルを中心とした3次元CADシステムであった。その後汎用システムとして普及したロッキード社のCADAMシステムはCADANCEとは対照的に2次元の製図システムであった。またマクドネル/ダグラス社のCADDシステムは航空機の基本設計を支援する設計検討特化型の高度な機能を備えたシステムであった。また上記の先進企業のCADシステムはNC機能も兼ね備えており図形対話型のCAM機能をサポートした。またGM社では言語型のINCAシステムを開発してプレス金型のNC加工に利用した。

GMのシステム化のコンセプトは“Clay to Die”であり、意匠設計からプレス金型の加工に至る部門をまたがった車体部品開発の一連の活動を一貫処理することをねらいとした。以後プレス部品に関するベストプラクティスとして他社から参照される。反面エンジンやミッションなどの機械加工部品の設計支援は含まれておらず、それらの本格的な支援はソリッドモデリングの発展に待つことになる。

またこれらのシステムに刺激を受けて日本でも日産自動車、東洋工業などがCADシステムの自社開発を手がけた。またNCシステムも日産自動車、トヨタ自工、東洋工業などで並行して実現されている。自動車以外の先進企業でも造船、重工、建設などの分野での設計支援システムの開発が行われた。当時世界的に圧倒的な強みを持っていた造船業界では日本鋼管のNASDシステムなどで基本設計、フェアリング、構造設計、部材設計、NC工作情報の生成などの機能を持つ船殻一貫システムが開発された。

2.3 パッケージ化による普及の段階

1980年代に入って設計支援システムはパッケージの時代へと変わってゆく。先進企業で自社開発されたシステムが外販されるようになったものが多い。先のロッキード社のCADAMはその一例である。CADAMは1974年ころからまず米国ノースロップ社、フランスのダッソー社、日本でも三菱重工業など同業他社がユーザとなったが、システムのコンセプトが製図機能を中心としており非常に汎用性に富んでいたために1977年にIBMを通じて販売されるようになり、製造業、建設業において広く普及してゆくこととなった。同様なパッケージとしてダッソー社の3次元システムCATIAが外販されるようになったのが1981年である。ベジエ曲面による3次元サーフェスとCSGのソリッド機能を提供した。

米国のSDRC社は1967年に設立された設計・解析および実験分野のコンサルティング会社であったが、構造解析

分野での新しいアプローチ，すなわちCAEのコンセプトを提唱し，パッケージとしてI-DEASを1970年代の初期に提供を始めた。GM社などでのコンサルティング活動をととして実験データの解析，振動，ノイズ解析などを得意分野とした。設計の初期段階において十分な解析とシミュレーションを実施することによってトータルな設計の最適化を図るCAEの考え方は，CADとCAMが設計活動の生産性向上の観点からの設計支援システムであるのに対して性能・品質の面での設計支援であり，この関係は今日に至っても変わっていない。システムとしてはフレーム解析，有限要素解析，プリプロセサ，ポストプロセサなどがあり，モーダル解析分野ではビルディングブロックアプローチなどを有していた。

1990年代に入ってソリッドモデリングが定着しはじめると，それまでは板物の部品の適用に偏っていた3次元での設計支援システムの適用が機構部品をカバーできるようになった。そのために製品全体を3次元でモデルリングできるようになり，従来の設計情報のマスタであった図面（CADの浸透とともにCADの図面データがマスタとされていた）に取って代わって3次元モデルを設計活動のマスタとすることが可能となった。

2.4 先進企業におけるインテグレーションの段階

1986年から始まったボーイング社の777型旅客機の開発で全面的な3次元モデリングとデジタルモックアップが採用されたのを皮切りに設計支援システムは設計チーム間でのリアルタイムでの情報共有のコンセプトを追求する段階に入る。デジタルモックアップによる主として構造と形状のインテグレーションが中心となり，その周辺に機能，性能，品質，人間工学などの評価の支援のためのCAE分野のインテグレーションおよびCAMや工程設計，設備設計など生産技術面でのインテグレーションが始まっている。

デジタルモックアップは設計活動のマスタ情報となっている3次元モデルをリアルタイムで完成形状にアセンブリーし，関係者がいつも最新の仮想試作機として利用できる状態を作りながら設計を進める方式をさす。設計チームは個々の担当装置，部位のみならず常にデジタルモックアップを参照しながら製品全体を視野に入れて設計作業を実施する。いわゆるデザイン・イン・コンテキストと言われる考え方である。ボーイング社を始めとする航空機業界が先導し，クライスラー社など自動車会社が追随して実用期を迎えている。

CAE分野のインテグレーションでは単なる解析計算からバーチャルプロトタイピングに向けて発展している。デジタルモックアップ自身は形状と構造を表現しバーチャルプロトタイピングではその強度，剛性，振動衝突特性，機構特性，各種性能，耐久性，品質，操作性など主として物理的特性をモデル化しシミュレーションによる評価

を実施する。デジタルモックアップまたはマスタ化された3次元モデルを入力情報として有効利用する。歴史の最も古い構造解析の分野では有限要素法解析のための要素分割処理の自動化が進み，専門家でなくとも実施できる状態になった。機構特性では単なるリンク機構解析から多体系の動特性を評価できるメカニカルシステムシミュレーションへと高度化が起きている。フォード社などではフルビークルシミュレーション，すなわち車両レベルでの適用が実現している。構造評価および機構評価のバーチャルプロトタイピングの大きな可能性を示している。CAEの分野を全般的に見るとその対象分野は広くかつそれぞれの分野ごとに深化されつつある。

生産準備分野においてはNCの分野でソリッドモデルベースの支援が可能になったことによって樹脂部品や鋳物部品に関する適用が進んだ。工程設計，設備設計などの支援システムの普及は設計支援システムに比べて一般的に遅れている。設計段階でデジタルモックアップまでインテグレーションの進んでいる企業でもこの分野の設計支援システムの適用レベルは低い。製品開発プロセスをトータルで考えると工程設計，設備設計におけるボトルネックが顕在化しつつある。その中にあってロボットのオフラインティーチング支援に関しては，上流の設計段階のソリッドモデリングとデジタルモックアップの実用化によって普及が進んできている部分である。このようにデジタルモックアップによる上流段階のインテグレーションを足がかりとして，さらに生産技術面でのインテグレーションを目指すのが先進各社の動向である。

3. 21世紀に向けての先進技術

3.1 デジタルモックアップ

クライスラー社ではデジタルモックアップを“A Design Process which Assembles CAD Models of Released Geometry and Provides Real-Time Visualization and Evaluation of the Total Vehicle System”と定義している。従来は試作車を組立てて評価していたものを管理状態におかれた3次元CADのアセンブリーモデルで設計・評価を行い，開発・設計の広範囲の組織の間で開発の全期間を通じてマスタデータとして活用を図りメンテナンスしてゆく設計手法ととらえることができる。

航空機，自動車，鉄道車両など大規模な製品の開発においてデジタルモックアップの適用が進んでいる。試作して評価する従来の開発プロセスに代えて，仮想試作によってより多くの代案をより短期間で評価するとともに多岐にわたる設計活動の基幹となるデータとしてその利用を図ってゆくことを目指している。

デジタルモックアップを先行して定着化させたのはボーイング社を始めとする航空機産業である⁵⁾⁶⁾。欧米の航空機メーカーで多くの実績の報告があり，航空機産業全体

としての基本的な開発プロセスになっているといえる。自動車ではクライスラー社が本格適用段階に入っており、すでにいくつもの車両開発プロジェクトをデジタルモックアッププロセスで完了しており⁷⁾、最近ではエンジン開発プロジェクトへも適用されている⁸⁾。鉄道車両では川崎重工業⁹⁾のほか、ヨーロッパの車両各社で適用が始まっている。また造船業でも「製品モデル」の考え方として応用されている¹⁰⁾。

電気・電子工業では一般的に小型の製品であるため小規模のアセンブリーモデルとして非常に多くの適用事例が発表されている。IBM でも Note PC への適用などを公表している。

最近の先進適用事例—クライスラー社¹¹⁾

クライスラー社においてごく最近の適用事例が公表されている。同社のフルサイズセダン 1998 年型コンコルドとイントレピッド (図 2)、および 1999 年型 300 M と LHS の全面的なデジタルプロセス採用による開発である。デジタルプロセスでは車両レベルのデジタルモックアップの作成、その可視化とウォークスルー、アニメーション、干渉検討、はめ合い検討、アセンブリーシミュレーション、車両構成検討などの支援が実施された。デジタルモックアップの構成部品として 5 000 の「デジタルパーツ」が作成され、設計検討作業が実施された。紙の図面は省略され、クレイモデルは減らされた。デジタルモックアップの全面採用でプロジェクト参加者全員のリアルタイムでの情報共有が行われた。デジタルモックアップを中心とした開発プロセスの成功要因はいかに素早く問題点の可視化ができるかにある。多くの検討ミーティングはプロジェクトでデジタルモックアップの映像を対話的に写しながら実施され、問題点の多くはその場で解決を見る。従来は 12 週間かけて実機を試作して初めて解決されるのが普通であった。クライスラー社では今後のすべてのプロジェクトにデジタルモックアップ方式を採用する方針である。およそ 1 500 か所の干渉、はめ合い、および各種の不具合が実試作に至る前に解消された。開発期間は従来の 39 か月から 31 か月に短縮されたが、デジタルモックアップの存在がもっとも貢献度が大きかった。またパワートレイン搭載は非常に多くの干渉などの問題を抱えたまま行われるのが普通であったため、従来 1993 年の LH では 3 週間を要していたが、今回は初回の試みで組付けができてしまった。これはデジタルモックアップ上で仮想的に搭載検討を実施することによって問題点の事前解決が図られるようになったからである。

3.2 メカニカルシステムシミュレーションとバーチャルプロトタイピング

機械システムをコンポーネント単位で扱う構造解析からこれをシステム全体でとらえる多体系の動力学解析、すなわちメカニカルシステムシミュレーションへと深化が著し

図 2 クライスラー 1998 Dodge Intrepid のデジタルモックアップ

いものがある。デジタルモックアップが部品レベルの単体のモデリングから出発してその集合のアセンブリーモデリングへと発展したのに対応して、CAE の分野においても単体の構造解析から多体系のマルチボディへと同様の発展をたどっている。その代表的なシステムである MDI 社の ADAMS にその軌跡を見てみると、まず Multibody Dynamics の研究が 1970 年代から行われ、1977 年にミシガン大学において汎用プログラムとして製品化された。当初は自動車業界、航空宇宙産業などで使用されていたが、現在では一般機械、電機、鉄道、バイオメカニクスなど多くの分野へと利用が広がっている。シミュレーションモデルをコンピュータの中での仮想の試作機とする考え方、すなわちバーチャルプロトタイピングの考え方へと発展している。デジタルモックアップの 3 次元アセンブリーモデルを作成、メカニズムとしての機構属性モデリング、Euler-Lagrange の運動方程式などの作成 (内部処理) などにより解析計算を実施する。キネマティック解析、静的釣合い解析、動解析などが実施され、結果がグラフやアニメーションで表示される。最近の発展としては機構の種別ごとのテンプレートの確立、適用分野ごとのナレッジの蓄積とシステムへの機能としての組込み、グラフィカルなユーザインタフェースの整備、結果のアニメーション表示およびコンピュータ自身の性能向上によるシミュレーションの精度向上などが挙げられる。

設計作業の CAD 化、デジタルモックアップ化が進んでも試験・評価の活動が依然として従来手順である実物の試作とその評価が中心のままであると、大局的に見た設計活動は依然としてボトルネックが残されたままとなる。バーチャルプロトタイピングにおいてはこの点に焦点を当てる。実物試作と評価をシミュレーションモデルと評価ツールにできる限り置き換えて期間短縮と設計品質の向上を図る。この分野においては最終的には試験評価も含めた設計最適化プロセスが実施されている。田口メソッドによる実験評価・最適化の考え方は有名であるが、フォード社では設計支援ツールを前提としたバーチャルプロトタイプ

©IBM Japan Ltd.

VPDM: virtual product development management
 PDM: product data management
 ERP: enterprise resource planning

図3 仮想設計・試作・生産をサポートする広義のPDMの考え方
 (米国 Gartner Group の PDM II ビジョン)

ングにおいて試験計画をより連続的な評価点をベースとした DOE (Design of Experiment) の手法¹²⁾を採用している。

このような性能評価の項目としては製品ごとに要求性能、要求品質があり、個別の評価支援システムが必要とされ、網羅的な普及にはまだ時間がかかるとみられる。

3.3 インテグレーションを支援する PDM

PDM (Product Data Management) の歴史を振り返るとその源を部品表システムに見ることが多い。最近これらに加えてデジタルモックアップによる開発設計活動を支援することを目的とした PDM の新しい方向性がとられている。米国のコンサルタント会社 Gartner Group の PDM II ビジョンにおける VPDM (Virtual Product Development Management) がその例である (図3)。仮想設計・試作・生産におけるデータのモデル化と管理およびプロセスの管理を目指す¹³⁾。

CAD 化の進行とともに開発活動において管理すべき情報が大幅に変わってきているのに、従来型の PDM システムではデジタルモックアップのデータ管理には向いていないなど追従できていなかった。仮想設計の環境では、図面は 3D モデルから投影作成され、部品表情報はデジタルモックアップの構成情報から変換して作成される。また評価検討情報はファンクショナルシミュレーションと対応している。VPDM はこの仮想設計の環境で新しくマスタ管理が必要となったデジタル情報を管理し、設計の上流段階から基幹情報として開発、設計、生産の間で共有化を図ってゆく考え方である。

PDM 先進企業においては製品情報に関して全社的な観点で一元管理するエンタプライズ PDM の考え方を実現しつつある。開発の上流段階から仮想試作の形でデータをとらえ、詳細設計段階で従来型の PDM で構成管理を始め、その後製品のライフサイクルで製品情報として管理してゆ

く。また製品のリリースとともに ERP ヘデータを渡す。このように製品情報の生成と利用およびメンテナンスを開発・生産の部門の壁を越えて一連の途切れることのないプロセスとしてとらえて完結させる。

3.4 最新の設計支援システム環境の例 (図4)

関連するツール群として通常の CAD システムおよび CAE 関連、デジタルファクトリー関連、CAM の関連のものに分類が可能である。製品全体の高速可視化のためのビジュアライザ (可視化ツール)、機構動特性の仮想試作・評価を行うツールとして ADAMS (Mechanical Dynamics Inc.) など多体系の動力学解析 (メカニカルシステムシミュレーション) ツール、人体モデルをベースに作業性や操作性の検討の支援を行うエルゴノミックシミュレーション、デジタルファクトリー関連ツールなどが存在している。

4. 21 世紀に向けての発展

1960 年代に始まり約 40 年を経過した設計支援システムの歴史であるが、これまでに 3 次元形状モデリングとデジタルモックアップが確立され次の世紀へ向けての基礎となった。今後この基礎の上により知的な支援に向けて次のような発展が予測される。

- デジタルモックアップの発展: 21 世紀の設計支援システムの基盤として形状モデルを中核としてバーチャルプロトタイプングモデルも表現できる発展が期待される。また生産技術支援システムとのインテグレーションも課題となる。一方利用範囲が広まるところからユーザインタフェースのシンプル化、大規模データの表示効率、ネットワークでの利用およびデータ交換の面での整備など多くの改善点が残されている。
- バーチャルプロトタイプングの発展: 一部構造解析、メカニカルシステムシミュレーション、衝突解析、計算流体力学などの分野での技術確立が見られるが、さらに多方面での深化が進み、技術開発、構想設計、詳細設計段階での実物試作への依存度の低下を見る。また企画段階でのバーチャルプロトタイプングによる市場クリニックなど商品企画や営業部門、サービス部門などでの新たな利用が起こる。
- 製品開発におけるナレッジマネジメント: PDM と開発関連企業のネットワークが急速に発展しており、開発情報、製品情報の生成、獲得、蓄積、再利用のライフサイクル利用の仕組みが確立されつつある。今後そのモデル化とコンテンツの充実と利用が本格的になってゆく。
- デジタルエンジニアリングオフィスの実現: 1990 年代はパーソナルコンピュータ普及の時期でもあった。この影響を受けて製品構成定義、コストエンジニアリング、プロジェクト管理、電子メールのサポートなど

図4 デジタルモックアップと関連する仮想試作・設計ツール群

CAD/CAM/CAE 以外の作業に関するデジタル化が急速に進行した。21 世紀に向けてこれらがデジタルエンジニアリングオフィスとして設計製図・形状モデリング・機能解析などの支援とインテグレーションされてゆく。

これらの設計支援システムに支えられて企業内外での開発活動のダイナミックな効率化が図られると考えられる。また製品開発ナレッジの蓄積によって商品企画のようなより創造的な分野の支援が可能となり、商品開発戦略、技術開発戦略、新分野開拓/参入戦略、パートナー戦略などにおいてもコアとなる仕組みになってゆくと考えられる。

5. おわりに

デジタルモックアップと PDM によるバーチャルエンジニアリングの考え方は 20 世紀から 21 世紀に受け渡される大きな成果であろう。最近話題となったチェスの世界チャンピオンとスーパーコンピュータとの対決において示されたような大量の情報とアルゴリズムの学習による意思決定支援の限りない可能性が 21 世紀においては設計支援の分野においてもいかに発揮されるに違いない。本稿では主としてシステムの機能面でその軌跡と 21 世紀に向けての方向性などを紹介したが、一方では開発プロセス自体も実機試作・評価中心のプロセスからデジタルモックアップやバーチャルプロトタイプングを駆使したバーチャルエンジニアリングへと大きな革新を求められているのも

事実である。欧米では 21 世紀の設計システムとそれを基にしたバーチャルエンジニアリングプロセスは社会基盤であるとの認識に立って企業、業界団体、学会、ベンダーが協力してその定義活動を展開しつつある。日本においてはこれらの活動が不足していると考える。精密工学会の活躍にも期待したい。

参考文献

- 1) I. E. Sutherland : Sketchpad: A Man-Machine Graphical Communication System, SJCC, (1963) 329.
- 2) E. Jack : A Laboratory for Study of Man-Machine Communication, FJCC 64 AFIP, (1964) 343.
- 3) S. A. Coons : Surface for Computer-Aided Design of Space Forms, Project MAC Report, MIT, (1967).
- 4) I. C. Braid and C. A. Lang : Computer-Aided Design of Mechanical Component with Volume Building Bricks, Computer Laboratory, University of Cambridge, (1972).
- 5) Boeing Rolls out 777 to Tentative Market, Aviation Week, Apr. (1994) reprint p. 1.
- 6) Boeing uses 100% 3-D Digital Design to Develop 777, Industry Week, (1996) reprint p. 1.
- 7) NEON A Shining Example of Design Efficiency, Computer Graphics World, Feb. (1994) reprint p. 1.
- 8) Chrysler's First Paperless Engine, Automotive Production, Dec. (1996) reprint p. 1.
- 9) 次世代新幹線の設計検討, 日経メカニカルデジタルファクトリー, (1996.10) 91.
- 10) Kawasaki Launches First Container Ship with TRIBON, KCS News, Nov. (1996) 1.
- 11) Chrysler Designs the First Paperless Cars, AIAG Actionline, Jan./Feb. (1998) 6.
- 12) G. B. Stevens, D. M. Peterson and U. Eichhorn : Optimization of Vehicle Dynamics through Statistically-Designed Experiments on Analytical Vehicle Models, 1997 ADAMS Users Conf. Proc., (1997).
- 13) 次世代の PDM ツール, 相次ぎ発表へ, 日経デジタルエンジニアリング, (1998.5) 22.