

解説

機械の CAE におけるコンピュータグラフィックス†



平野 徹††

1. はじめに

機械製品の研究・開発・設計においては、各種のシミュレーションが行われる^{1)~3)}。製品開発を前提とすると、その構造の細部にわたる違いが解析結果として定量的に評価できなければならない。現実の製品形状にできるかぎり近いモデルで考えると、境界条件や材料物性などに現れる非線形性が問題となる。工業製品は本質的に3次元構造をもつものであり、そのモデリングと解析には多大の時間を必要とする。さらに、物理現象は多くの場合過渡的なものである。したがって、解析結果の出力データは膨大なものとなり、大局的・直観的認識がもはや不可能である。ここに、コンピュータグラフィックス (CG) の技術を応用した製品モデリング (product modeling) や解析結果の可視化 (visualization) が必要とされるわけである。ここでは、機械製品の開発プロセスに従って、幾何モデルの構築とそれを統一的に利用するシミュレーション環境、および試作段階 (prototyping) での実験データ処理をとおして共通に使用されるユーザ・インターフェースとしての CG について述べる。

近年、CG を利用した可視化の有効性・重要性が認識されてきている。McCormick らはこれを ViSC (Visualization in Scientific Computing) と名づけて、体系的研究の必要性を説いている⁴⁾。そこで取り扱うデータは記号・構造的データと画像・信号的データに分類され、それらのデータに対する4つの操作を定義している (図-1 参照)。本稿で述べる機械の CAE における CG の応用例はこれらのほとんどを含んでいる。以下、製品モデリングにおける構造データの生成と表示、デザイン・シミュレーションにおける画像合成 (image synthesis) や画像処理 (image processing) の利用、さらにエンジニアリング・シミュレーションにおける種々の数値演算 (scientific computing) や画

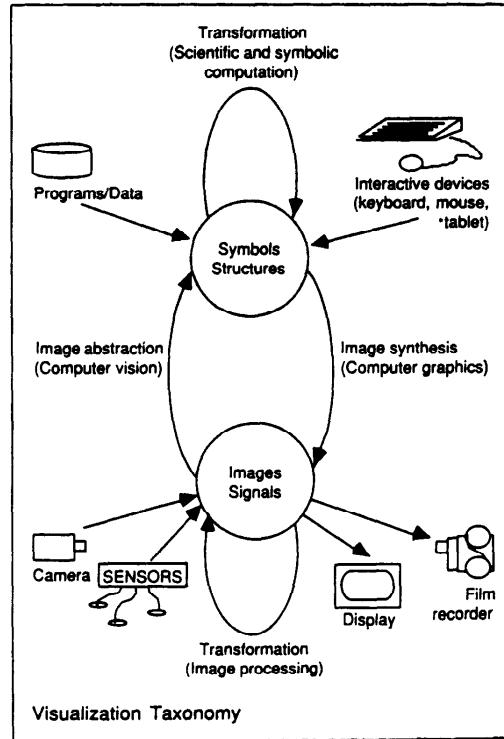


図-1 可視化データの分類⁴⁾

像合成の利用例を示す。なお、表示技法の詳細な説明は他解説に譲る。

2. 製品モデリング

機械の CAE (M-CAE) とは、製品開発の一連の流れである概念設計・詳細設計から試作・試験にわたるすべてのプロセスを包含し、一貫したデータ構造 (3次元) でシステム化したものといえる。ここでは、まず設計対象である部品・製品などの3次元オブジェクトを計算機中にデータ入力するために、ソリッド・モデルを用いる。ここで定義された幾何データを、以降の意匠評価、流れ解析や構造解析などのエンジニアリ

† Computer Graphics Applications in Mechanical CAE by Tohru HIRANO (CAE Center, Daikin Industries Ltd.).

†† ダイキン工業(株) CAE センター

ング・シミュレーション、図面作成や NC シミュレーションなどに統一的に利用してゆく。このようなモデリングのプロセスにおいても、CG を用いた会話的インタフェースが必須である。

3次元モデリングを行うことの有効性は、特に空間配置を決定する必要がある場合に大きい。図-2 [1141 頁掲載] は、空調機の室外機を 3次元でモデリングし、シェーディング表示した例である。図に示すように、ファン・グリルなどの意匠的評価と同時に、圧縮機・配管系の空間配置の検討も可能となる。これによって、複雑な 3次元配管系の干渉チェックが視覚的に行え、製品外形の小形化・コンパクト化のために役立つ。また、ここで作成された配管などの 3次元幾何データは、後に示す振動・構造解析などのエンジニアリング・シミュレーションに対して共通に利用できるために、データベースの統合化も計れる。図-3 [1141 頁掲載] は、圧縮機コンポーネントのソリッド・モデルをシェーディング表示したものである。図では、ケーシングを半透明表示することによって外形と同時に内部構造も認識できる。このように、複雑な 3次元形状を直観的に認識するためにはシェーディング表示が最適である。さらに、ソリッド・モデルを用いると質量や慣性モーメントなどのマスプロパティを容易に求めることができ、振動シミュレーションの高精度化が達成できる。

3. デザイン・シミュレーション

近年、多様化した消費者ニーズへの強力な対応策として、意匠設計が新製品開発のステージにおいて商品戦略上大変重要な位置づけを与えられている。家電製品から自動車まで、その形状の感性的美しさと同時に機能的優秀さ（自動車ボディの空力性能など）をも要求されている。店舗やオフィスなどさまざまな空間に設置される空調設備も、内装とのバランスを重視した意匠設計を行うと同時に室内気流の最適化をも考慮した設計が行われている⁹⁾。このために CG 技術を利用した意匠設計・評価システムが開発されている。これは、CAD システムやソリッド・モデルによって作成された 3次元オブジェクトと、アイデア・スケッチ、写真をスキャナなどで取り込んだ画像データを画像合成し、ディスプレイ上でカラー・シミュレーションや単純な変形、配置換えなどを行うものである。また、3次元データの場合には、ディスプレイのローカル座標変換機能で視点位置の変更が行える。

図-4 [1142 頁掲載] は、喫茶店内部のインテリアを 3次元モデリングし、CG 表示したものである。照明器具や空調機室内機（天井埋込型）のデザインや配置が設置環境と調和するかどうかを視覚的に評価できる。3次元データの作成はまだ手間がかかるため、窓外の風景は写真データやペイント・システムによるピクセル・データを画像合成することによって省力化している⁹⁾。

製品のカラー・バリエーション評価をモックアップの段階で行うには、多数のモックアップを作成する必要がある。これに対して、上述のシステムを用いれば、一つだけモックアップを作成しこれを写真データとして取り込めば自由にカラー・シミュレーションが可能となり、モックアップ作成の期間短縮とコスト低減になる。図-5 [1142 頁掲載] は、家庭用セラミック・ヒータのカラー・シミュレーションをこの方法で行った例である。一つのデザイン案をもとに作成されたモックアップを写真に撮り、スキャナで画像データとして取り込み、ディスプレイ上で三つ並行にコピー配置し、それぞれ異なった色相に変化させカラー・シミュレーションを行った。ここでは、原写真データ中の変更すべき色の領域を自動認識し、陰影情報を保持したまま色相を変化させている⁹⁾。

4. エンジニアリング・シミュレーション

M-CAE におけるエンジニアリング・シミュレーションの役割は、製品を開発する過程でそれを試作・製造する前にモデリングし、その機能を評価することにある。したがってシミュレーションの内容は、対象とする製品の機能に関連したさまざまな物理現象を解析・評価することになる。たとえば、ロボットの機能評価においては動作シミュレーションが中心になり、空調機の機能評価においては熱流体解析が必須となる。一方、構造設計においては、製品の種別によらず構造力学・振動工学シミュレーションなどの共通技術課題を取り扱う。ここでは、それらのエンジニアリング・シミュレーションのための会話的データ作成や解析結果の可視化に CG を利用した例を紹介する。

4.1 熱流体解析

機械工学のあらゆる分野に流れの現象はつきものである。この流れの現象を取り扱う手法として、最近の計算機技術の発達とともに実用化されてきた計算流体力学 (CFD) がある。現実の製品や環境は幾何学的形状が非常に複雑なものであり、それらを忠実に表現す

るためには強力なモデリング・ツールが必要となる。著者らは、室内空調の気流シミュレーションなどにおいて、3次元 Navier-Stokes 方程式を数値的に解き、その結果を3次元CGによって動的表示するシステムを開発している⁷⁾⁻⁹⁾。さらに汎用のCFDソルバ用に、ソリッド・モデラによって作成されたオブジェクトの幾何形状データを用いて解析空間の格子点分割を会話的に行うシステムを開発している^{10),11)}。これは、ソリッド・モデラによってモデリングされた自由曲面を含む物体の表面データを取り込み、それを空間中の障害物として認識して解析格子を生成するものである。同時に、境界上のセルを同定し任意の精度で流体占有率・開口率を計算する。

図-6 [1142頁掲載]は、ソリッド・モデラによって形状定義されたフィン付VLSIを含むプリント基板の形状データを取り込んで、メッシュ・ジェネレータによって直交格子を生成したものである^{11),12)}。このように複雑な形状を含む場合の解析格子生成においては、固体領域判定と流体占有率の計算は本メッシュ・ジェネレータがなければ不可能である。このようにして得られた解析データを用いて、有限体積法(FVM)によって強制空冷シミュレーションを行った結果を図-7 [1142頁掲載]に示す^{11),12)}。図では、VLSIを含むプリント基板のソリッド・モデルを用いたシェーディング表示の上に、冷却空気の流れをベクトル表示で、また空気温度のカラー・フリンジを半透明表示し

ている。本解析に用いた格子点数は $37 \times 34 \times 15 = 18,870$ であり、4,000サイクルの計算をミニ・スーパーコンピュータFPS 264 (38 MFLOP8)を用いて、CPUタイム106時間を要した。

次に、各階設置形個別空調システムの室外ユニットが、隣接するビル間の狭い空間に向けて多数設置された場合の、排気熱により生じられる壁面での熱対流をシミュレーションした例を示す¹³⁾。図-8(a)に解析モデルを示す。10階建のビルが5m離れて隣接している空間に、階当たり3台の室外ユニットが設置されている。図-8(b)は解析格子の様子を示す。格子点数は、 $140 \times 68 \times 14 = 133,280$ であり、室外ユニット吹き出し口近傍では格子を集中させている。本解析は1ケース当たり4,000サイクルの計算を、スーパーコンピュータVP 400を用いてCPUタイム13時間を要している。図-9,10 [1142頁掲載]は解析結果の3次元CG表示例である¹³⁾。図-9は室外機吹き出し口近傍における3次元等温度コンタ面を示している。中央の室外機の高い領域からの排気が、両脇の室外機からの排気と比べて温度が広がっているのが分かる。図-10は中央垂直断面での温度分布をカラー・フリンジ表示したものである。上層階にゆくほど排気温度が上昇し、熱対流の影響が明確に現れている。このようにして、現実には測定不可能な物理現象がシミュレーション可能となり、製品の設置条件に対する保証範囲を精度よく限定できるようになった。ここに示した計算機支援流れ

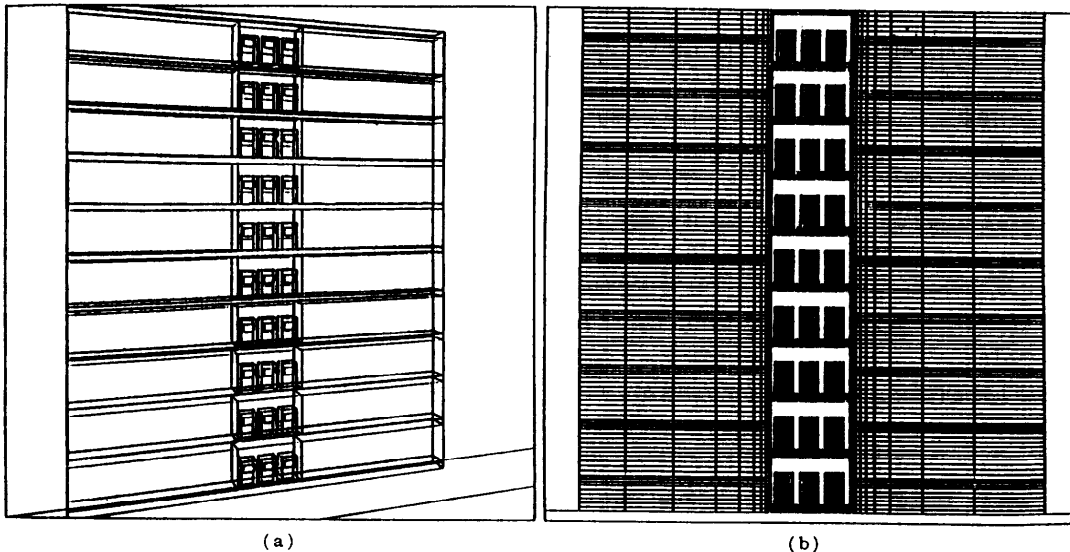


図-8 室外機排気流シミュレーション・モデル¹³⁾

の可視化 (Computer Aided Flow Visualization) によって得られる情報は、製品設計はもとより販売支援のためにも大変有効である。

4.2 振動・構造解析

構造設計のステージでは従来よりさまざまな解析・シミュレーションが行われてきている。図-2 に示した空調機室外機のソリッド・モデルには、圧縮機やファンモータなどの回転機械が含まれている。これらの回転機械の構造設計においては、振動特性の把握と変更が重要な課題となる。たとえば、ファンモータ・ケーシングの有限要素法 (FEM) 解析モデルを作成し、振動解析を行った結果の第一次固有モードを図-11 [1143 頁掲載] に示す。この図は、振動モードのローカル・アニメーションにおける 1 シーンである。図中の右に示されたシェーディング表示アニメーションは、複雑な振動モード形を直観的に把握するために効果的である。その上、本来の構造設計の目的である振動特性の改善のための指針を得るためにも大変有効である。図中の左に示されたワイヤ・フレーム表示は、実物の振動特性をモーダル実験解析システム¹⁴⁾を用いて測定したデータである。実測データは FEM 解析データと比較してはるかに少ない自由度であるため、図に示すワイヤ・フレーム表示アニメーションが用いられる。いずれにしても、実験および解析データを統合的に CG 表示することで、試作段階での設計評価を有効に行うことが可能となる。

3次元グラフィック端末機のローカル機能を用いたデータ入力法の例として、図-12 [1143 頁掲載] に配管設計解析システムを示す¹⁵⁾。このシステムでは、3次元配管形状を直接会話的に構成するために、3次元空間中で任意に回転移動可能な作業平面を用意している。配管設計における主要な評価項目は、配管同士の干渉チェックと振動特性評価である。干渉問題は配管形状定義と同時にディスプレイ上で確認できるが、振動特性評価のためには固有値解析を行わなければならない。さらに、解析の結果ある振動モードが加振力の周波数成分に近接している場合に、形状変更を行う必要がある。このとき、形状変更 (配管の局部的な長さの変更など) の固有振動数低減・上昇に対する感度 (sensitivity) を求めることによって、試行シミュレーションの回数を大幅に低減することができる¹⁵⁾。さらに、曲管部分にはシェル要素を用いた詳細モデル化を施すことによって、複雑な応力分布も精度よく求めることが可能となる。図-13 [1143 頁掲載] に、前述の

配管形状の第2次固有モードにおける曲管部応力分布をカラー・フリッジ表示した例を示す。

4.3 音響解析

構造系の振動は、しばしば空気の振動である音響放射を誘起し、騒音発生として製品の価値を損うことが多い。音響問題を取り扱う場合、機器の内部音場解析と外部音場解析ではその目的が異なる。内部音場解析では、機器内部の空洞共鳴周波数を求めることによって、回転系に起因する以外の振動源の同定を行うことになる。図-14 [1143 頁掲載] は、空調機用圧縮機の構成要素であるアキュムレータ内部の空洞共鳴モードを、境界要素法 (BEM) によって解析し CG を用いて可視化した例である¹⁷⁾。第3次空洞共鳴モードの空間音圧分布がカラー・フリッジ表示されているが、円周方向と高さ方向モードが連成した3次元音圧分布の様子がよく理解できる。

一方、外部音場解析では、機器からの音響放射を解析することによって騒音の空間分布を求め、吸音処理などの効果を評価する¹⁶⁾。騒音評価のための物理量には、音圧分布のはかに音響インテンシティ・ベクトルがある。これは、ある周波数での音響成分を定常振動する空気の粒子と考えて、その振動方向と強さをベクトル表示するものである。したがって、前述の流れの可視化 (CAFV) における CG 利用手法が適用できる。図-15 [1143 頁掲載] は、圧縮機アキュムレータの構造系振動 (1,056Hz) による音響放射を BEM で解析し、CG によって可視化した例である¹⁷⁾。ここでは、3次元等音圧コンタ面をカラー表示した例を示す。このようにして、複雑な音響放射パターンを予測・可視化できるため、遮音や吸音処理を施す場合の有効な指針を得ることができる。また、設計段階で騒音予測が可能となり、製品の品質向上が計れる。

4.4 塑性加工シミュレーション

機械製品や部品の製造においては、塑性加工プロセスが多数存在する。空調機の場合を例にとってみれば、外板パネルなどのプレス加工や銅配管の曲げ加工、熱交換器製造における銅管拡管加工などである。これらの加工条件の設定は、ほとんどの場合現場の熟練者の経験に依存して行われている。しかし、製品の信頼性を向上させるためにはこのプロセスで発生する残留歪などを正確に把握する必要がある。あるいは、生産技術的最適化を計るためにも、加工プロセスの定量的シミュレーションが必要である。このような塑性加工シミュレーションは、ほとんど材料非線形、幾何

学的非線形および接触や摩擦といった非線形境界条件が組み合わされた問題である。しかも、実際の加工対象は複雑な3次元形状をしている。したがって、前述の3次元流体解析と同様な取扱いが必要である。

図-16 [1144 頁掲載] は、空気熱交換器の製造過程において、銅管とアルミ・フィンを固着させるために行われる拡管加工をシミュレーションしたものである。図(a)に初期状態が表示されているが、FEM解析に用いた要素分割も示されている。解析対象は軸対称な形状であるが、銅管の塑性拡管後の薄肉化を評価する必要があるために、3次元ソリッド要素を用いて全体の1/18をモデル化した。ここでは、右端に見える鋼球の表面と中央の銅管内面、および銅管外面とアルミ・フィン内面の間に接触境界条件を設定している、ただし、初期状態ではお互いに離れている。図(b)に、加工途中の各部応力分布のカラー表示を示す。鋼球が銅管の内部に移動し銅管を拡管している様子がみて取れる。応力はテンソル量であるが、ここではMises応力と呼ばれるスカラー量に変換しその大きさをカラーで表示している(青→緑→赤の順に値が大きくなる)。銅管の拡管された部分は赤色で示され、塑性域に達していることが分かる。図(c)は加工終了時の応力分布である。塑性拡管後もアルミ・フィンはほぼ弾性域にとどまり、結果として銅管に対する圧着力が発生していることがうかがえる。このように、塑性加工シミュレーションにおいても、CGを用いた解析結果の可視化は現象を理解する上で大変有効である。

5. 今後の展望

M-CAEにおけるCG技術の応用に関して、著者らの研究を中心に解説した。そこでは、CG技術が独立に存在するのではなく、個々のモデリングやシミュレーション技術と一体となって初めて意味をもつことが理解していただけたと思う。今後は、表示すべき物理量(スカラー、ベクトル、テンソル)ごとに最適かつ汎用的な表現法が開発されてゆくだろう。特に、固体内部の応力分布や空間中の流れ分布を3次元的に補間表示するVolume Visualization⁹⁾に関する研究が急速に進展し、それをハードウェアで実現する装置も現れるであろう。

設計とは、与えられた拘束条件のもとで要求仕様を満足する最適解を求めるプロセスである。しかも機械設計においては形状設計が必須である。著者らは、このような設計過程を本質的に支援するものとして、

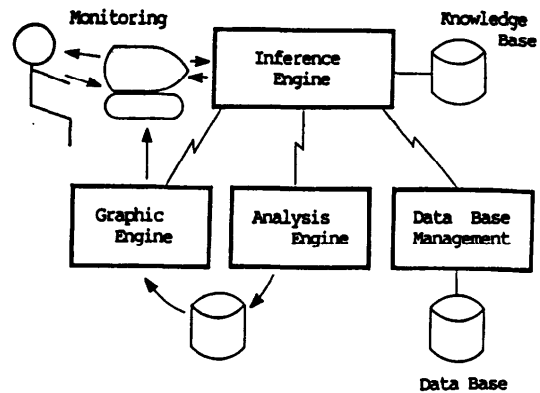


図-17 次世代 CAE エキスパート・システム¹¹⁾

図-17に示す次世代 CAE エキスパート・システム・アーキテクチャを提案している¹⁰⁾。そこに示されたごとく、CG技術は計算機システムと設計者との知的インタフェースを実現する手段の一つとして、より重要性を増してくるだろう。

参考文献

- 1) 平野 徹, 伊藤宏幸, 高島 純, 浜田恒彰, 住吉 幹一郎: 空調機の研究・開発における CAE アプローチ, PIXEL, No. 26, pp. 136-143 (1984).
- 2) 平野 徹: 機械の CAE におけるシミュレーション技術, 油圧と空気圧, Vol. 16, No. 6, pp. 35-43 (1985).
- 3) 相沢龍彦, 前川佳徳編: CAE 新製品開発・設計支援コンピュータ・ツール, 共立出版 (1988).
- 4) McCormick, B. H., DeFanti, T. A. and Brown, M. D. (ed.): Visualization in Scientific Computing, Comput. Graph., Vol. 21, No. 6 (1987).
- 5) Hirano, T.: Three Dimensional CAE Technology and Computer Graphics, Proc. I-DEAS User's Conf., pp. 51-61 (1986).
- 6) 平野 徹, 高島 純, 宮脇隆志: 意匠評価のためのカラー画像処理システムの開発, 情報処理学会第36回全国大会論文集, 4 V-1 (1988).
- 7) 平野 徹, 高島 純: 熱流体解析結果の三次元的動的表示法について, 第35回応用力学連合講演会予稿集, A 5 (1985).
- 8) 平野 徹: 空調における気流のシミュレーション, 計測自動制御学会第1回流体制御部会資料, pp. 13-19 (1986).
- 9) 平野 徹: エンジニアリング・シミュレーションとワークステーション, Computrol, No. 18, pp. 23-32 (1987).
- 10) 平野 徹, 李田淳一: 三次元流体解析用プリ・ポストプロセッサの開発, 第36回応用力学連合講演会予稿集, 139 B (1986).
- 11) 平野 徹, 李田淳一, 塩地純夫: 計算流体力学に

- おけるソリッド・モデリングの応用, NICOGR-APH '87 論文集, pp. 121-129 (1987).
- 12) Hirano, T.: Solid Modeling Applications in Computational Fluid Dynamics, Proc. I-DEAS User's Conf., pp. 169-179 (1987).
 - 13) 塩地純夫, 杵田淳一, 平野 徹, 楠本伸廣: 空調機室外機よりの排気流のシミュレーションによる可視化, 第 16 回流れの可視化シンポジウム (1988).
 - 14) 上岡 修, Monserez, G., 高山貢一, 浜田恒彰, 平野 徹: パーソナル・コンピュータによる 4ch モーダル解析システムの開発, 第 12 回構造工学における数値解析法シンポジウム (1988).
 - 15) Hamada, T., Hirano, T. and Fujiwara, M.: A Dynamic Analysis and Modeling System for 3-D Piping, Proc. 6 th IMAC, pp. 257-263 (1988).
 - 16) 伊藤宏幸, 平野 徹, 藤原正典: BEM による室内音響予測システム, 第 3 回境界要素法シンポジウム論文集, pp. 163-168 (1986).
 - 17) Okamoto, Y. and Itoh, H.: Analysis of a Three Dimensional Sound Field Using the Boundary Element Method and Sound Intensity Method, Proc. Inter-Noise '88 (1988).
 - 18) Hirano, T. and Yamada, T.: Multi-Paradigm Expert System Architecture based upon the Inverse Design Concept, Proc. Int. Workshop on Artif. Intell. for Industrial Applications, pp. 245-250 (1988).

(昭和 63 年 6 月 21 日受付)