はじめての

精密工学

CAD/CAE/CAM/CAT 通論 (1)

An Introduction of Outline of CAD/CAE/CAM/CAT (1)/Kiwamu KASE

(独)理化学研究所 加瀬 究

1. はじめに

工場で大量生産する製品の部品の想定した際に、通常は設計、解析（試験）、（部品の）加工、組み立て、検査の工程をたどり世の中に出回ることになる。その各工程に対応した、計算機援用（Computer Aided）ツールとして、CAD（Computer Aided Design）、CAE（Computer Aided Engineering）、CAM（Computer Aided Manufacturing）、CAT（Computer Aided Testing）が広く世に知られている。本稿では3回にわたり、初学者向けに、全工程を通したイメージが思い浮かべられることを目指して、各項目を「狭く、浅く」概説してゆく。

2. 生産支援ツールとしての CAx

かつての製図図面（2次元）を中心とした、設計/製作/検査の一連の作業から、3次元の形状モデルを中心としたデータの流れに支えられた製造が主流となりつつある。自動車からデジタルカメラまで3次元CADなしでの設計はあり得ないのが実情である。生産活動自体は大きくは自動（機械）化の方向と、情報化の方向の二つに沿って進化してきたといえる。前者は、人が手で行っていた加工の工作機械への置き換えが最たる例であり、後者は、それらを支えるためのCAD/CAM、2次元の紙媒体である図面から3次元データ化、生産に必要な情報そのものを各工程へ、そして企業間にわたり伝えてゆこうと現在も進化している。CAx（xはワイルドカードでDやMなどが入る）は自動化（Computer Automated）ではなく、計算機の助けを借りて、人が行っていた作業の定型化やその結果を情報化することにより、設計、物理的な実験、加工（準備）、検査での各作業を早くし、繰り返し可能にして、より広く伝達/再利用できることに重きを置く。

製造におけるCAxの各要素間の関係としては、CADを用いて設計し、設計結果であるCADデータをもとにして、実験/試験の代わりである各種シミュレーション（CAE）が行われ、それにより設計にフィードバックされ、設計変更後、やはりCADデータを基にしてCAMによりNC（Numerical Control）工作機械への指令（工具の移動経路）が作成され部品加工がなされる。加工された部品はまたCADデータに基づいて接触および非接触式の座標測定機の測定子を制御するための指令をCATにより生

成する。CATは現在ではCADデータと測定結果の比較や、現物から計測し結果をCADにするリバースエンジニアリングまで含むようになってきている。このようにCADデータは全工程においてわたってゆくところが他の要素と異なる。

3. 関連する用語（概念）

情報化が進むにつれて、実際にモノを作らなくとも事前に性能や加工性などの検討、計画ができるようになってきた。「仮想生産（Virtual Manufacturing）」や「デジタルモックアップ（DMU）」などの概念の登場である。仮想生産は工場全体のモデルを計算機内に構築し、工作機械の稼働率や材料、部品の流れを模擬する（図1）のに対し、DMUは組立品が対象で、例えばエンジンルーム内の各部品が互いに干渉しないか、メンテナンスのために手や工具が入り、作業できる隙間があるかなどの検討を実際を作る前からモデルを仮想的に組み合わせてできるものである。

従来の図面と現物が中心であった生産では、設計が完了して図面ができなければ、そのあとの試作、試験や加工の準備検討できないなど、前の工程が完了しないと次の工程に移れなかったが、情報化により初期の段階でのモデルができれば、同時に強度の見積もり（CAE）や、加工準備（CAM）が開始できる「コンカレント（concurrent/simultaneous、どちらも「同時に」の意味）エンジニアリング」（図2のCE）や、実際に作ってみてから生じるであ

図1 仮想生産の例：レイアウトの検討（DELMIA, (株)ファソテック HP から）

製品開発工程と期間
(従来とコンカレントエンジニアリングとの違い)

図2 コンカレントエンジニアリング (甲南大学 長坂悦敬)

ろうさまざまな問題、課題を事前に検討できる「フロントローディング」などの言葉は現在でも重要である。

関連する用語としては、「PDM (Product Data Management)」、PLM (Product Lifecycle Management)と SCM (Supply Chain Management) などがある。PDM が主に工場内で、製品の企画から設計、製造といった各工程のさまざまな情報の一元管理が目的だが、図面をキーとして、CAD モデルもしくは Viewer (曲面を主体とする 3 次元 CAD とは異なり、安価でポリゴンを主体とした高速表示が可能、編集ができないのが元々の違いであったが、いまでは CAD との境界がなくなりつつある) と部品表などがリンクするような間接的な PDM が実現しており、後述するが「3 次元単独図」が再び一元管理を目指しつつある。この PDM を工場外、つまり出荷後のメンテナンスから廃棄まで管理しようという概念が PLM である。こちらはさらに野心的な取り組み (標語に近い) で、まだ実現しているという段階ではない。

これら両者が製品 (Product) を対象にしているのに対し、今度は工場に入ってくるまでの部品、材料の流れを追うのが SCM であり、近年の地球規模 (global) での部品調達において、災害による材料、部品の供給停止で思わぬ製品不足につながったことは記憶に新しいことである。

次章から個々の要素について述べてゆく。その最初に来るのが、その後の工程で何度も参照される CAD である。

4. C A D

CAD には 2 種類あって、2 次元 CAD と 3 次元 CAD で内部も使い方も全く違うものと思ったほうがよい (図3)。2 次元 CAD の方は図面をそのまま電子化したもので、内部のデータのもち方も基本的には点と線 (曲線も含む) および寸法や注記なので異なるソフト間の変換もあり問題ない。それに比べて 3 次元 CAD は、その内部のデータのもち方はこの後に述べるが、あまり簡単でなく、使われ方も第一に回転していろいろな角度から見る事ができるというのが最も重要な機能である。また 3 次元 CAD で特徴的なのが、設計以外の工程での使われ方のほ

CAD (Computer Aided Design の種類)

- 2 次元 CAD
 - 図面の電子化
 - 加工や測定への指示書
 - Drawing Tool (線と点)
- 3 次元 CAD
 - 可視化/表示 (Viewer として)
 - 曲面→3D CAM の基データ
 - メッシュ生成→CAE の基データ
 - 試作 (Rapid Prototyping) に使える
 - 製品情報 (Product Model) 保持→PIM
 - 寸法, 公差, 組立て品/部品, (材料, 履歴, スケジュール, PDM, ERP, SCM, ...)

図3 2 次元 CAD と 3 次元 CAD

図4 形状モデルの進化

うが主となっている点である。

3 次元 CAD のコアとなるのが形状モデルで、その進化を振り返ってみると、図4にあるようにワイヤーフレーム (wireframe 針金細工)、それに障子を貼ったようなサーフェス (surface すなわち表面で、曲面である) そしてサーフェスをすべて覆ってできるソリッドモデルが最新の形態である。ソリッドモデルは、サーフェスモデルと違って内部が詰まった固体 (solid) として表現できるものである。現在主流のソリッドモデルは大きく CSG (Constructive Solid Geometry 簡単なソリッドで構成されたもの) と B-Rep. (Boundary Representation 境界表現) の二つに分かれる (図5)。CSG はプリミティブとよばれる球や箱や円筒などの簡単なソリッド要素をいくつか組み合わせ、その履歴 (順番) を覚えておくことにより表現されるものである。一方 B-Rep はサーフェスモデルで用いられている曲面、曲線、点などの幾何情報に加えて位相情報という隣接関係をいれることにより閉じて囲まれた領域を立体として表現するもので、現在もっとも多くの 3 次元 CAD に取り入れられている方法である。これは図5の右にあるように皮であるサーフェスをいくつかの部分に分け、それらすべてで囲まれた立体 (3 次元) を表現するために、隣接するサーフェス (2 次元) 同士の ID をその交線にあたる稜線 (1 次元) を介して管理するという階層的なやり方で実現している。

図5 ソリッドモデルの種類

図6 境界表現は位相幾何学と微分幾何学で成り立っている

図6が境界表現の内部表現である。具体的な位置や形をあらわす幾何情報と、立体の構造をあらわす位相情報とを別々にしたことが境界表現の優れた点で、二重構造を採用しているため局所的に形や位置が変わっても立体の構造(穴や分岐など)が変わらなければ位相情報は変えなくてよく、少ない情報で非常に高い形状表現の自由度を有している。幾何情報自体は計算機の中では浮動小数点と式で管理されていることから数値誤差に弱く、回転など移動でその位置は変わってゆくので位置(幾何)情報のみでは面や稜線が互いに一致しているかが保証されないが、位相情報は基本的にID番号とリンクという整数の世界なので非常に頑健だからである。したがって移動したり、直角な角に丸みをつけるフィレットなど部分的に形状を変えたり(局所変形)しても立体の構造は全く変化しない。一方、穴をあけたり、立体を足したり引いたりする集合演算(ブーリアン演算ともいう。これができるのがソリッドモデル)という操作では境界表現が裏目に出る。交線計算などの収束計算はうまくいくという保証はないなど、数値的に不安定な幾何計算の結果を使って位相情報を書き換えてゆく作業は実は綱渡りに近い作業であるといえる。集合演算の計算途中で落ちたり失敗することがあるのは単なるバグだけのせいではなく、理論的に危ないことをやっているからであり、それでもうまくいくのはアルゴリズムの方でカバーし

JAMA: Japan Automobile Manufacturers Association Inc.
JAPIA: Japan Auto Parts Industries Association Inc.

図7 CADデータ品質の後工程へ及ぼす影響(JAMA PDQ PRビデオV1.0より)

ている点が多い。このCADでも特に境界表現の弱点が後工程に及ぼす問題を取り上げたのが「PDQ (Product Data Quality)」であり、データの量と種類が最も大きい自動車業界で問題となり、取り上げられた。次章ではそれについて述べる。

5. P D Q 活動

前章で述べたように3次元CADが境界表現に立脚している以上、原理的に避けられないデータの品質の不安定さがあることから、運用でカバーしようというPDQ (Product Data Quality) 活動が、(社)日本自動車工業会(JAMA)、(社)日本自動車部品工業会(JAPIA)を中心に精力的に行われた。図7に示すように、CADデータの品質がその後の各工程でネックとなっており、CADベンダに任せるだけでなく、モデリングの段階で注意するようにとの意識改革が始まりであった。

図7中では、設計段階が終わったCADデータが、前章で述べた位相情報の欠落等の理由で本来つながっているべきところに隙間ができるなどして、その後のCAEでの解析用のメッシュ(後述)が生成できない。あるいはそのあとのDMUやRP(Rapid Prototyping 迅速試作)やその後のCAM(後述)の段階でも不具合を生じている状態を示している。これについては2回目のCAEとのインターフェースでもとりあげる予定である。

データ品質の問題に起因するコストを業界全体で調査した結果(図8)多大な損失であることが分かり関係者に大きな衝撃を与えた。この図にあるように自動車メーカは「車体メーカ」(電気関連だと「セットメーカ」で構図は同じである)であり、「1次サプライヤ」、「2次サプライヤ以降」、「金型メーカ」と異なる企業間で、2章でのべたSCMを通して情報と部品のやり取りを(国内だけでなく海外も含めて)日々行っている。その際の「情報」の代表がCADデータなので、その品質が悪いと、結局受け取り側で(データの)作り直し(モノの作り直しはもっとかかる!)など積み上げの結果が甚大となるのである。

PDQ活動では図9のようにモデリングの不具合の分類、

図8 CAD データ品質による自動車業界での損失 (JAMA PDQ PR ビデオ V2.0 より)

用語の統一から、その対策 (PDQ チェッカなどのツールやモデリングの工夫) まで提案し、CAD ベンダとの地道な努力によりかなりの成果が上がっている。図9中の「オフセット」と「抜き勾配」については3回目のCAMの章で金型製作と絡めて説明する。また図7～9で紹介したビデオは http://www.jama.or.jp/cgi-bin/pdq/download_pdq.cgi からダウンロード可能である。

6. RP (Rapid Prototyping)

ここで RP について簡単に説明する。詳細は2006年のVol. 72, No. 12の中川威雄先生が書かれた「はじめての精密工学 ラピッドプロトタイピング」を参照されたい。RPは、実際の加工工程で部品を作り出す前に、主に形状確認のために実体化する技術で、その方式は金属を焼結するものから、紙や木を切りぬいて積層させるものまでであるが、最も多く使われているのは光造形法である (図7のRP)。レーザー光が当たったところのみ硬化する光硬化性樹脂を使い、レーザープリンタのように、2次元で輪郭 (およびその中を塗りつぶす場合も) を描くと、2次元の形が実体を伴って生じ、それを高さを変えて一層ごとに行うことにより立体ができてくることから、積層造形法ともいわれる。その造形法に対応してソフトウェア側でも曲面からなるCADモデルをいったん三角形の集まりとして近似変換し、それらを水平方向にスライスしながら輪郭データを生成する過程が必要となり、そのための三角形からなるファイルであるSTL (Stereo Lithography 立体の積層) がRPのみならず、CAMやCG (Computer Graphics)、CAD間でもデータのやり取りに使われるようになった。

レーザープリンタの代わりにインクジェット式のプリンタを使って、光硬化性の代わりに片栗粉や石膏のような粉末に置き換えて同様に積層造形を行うとカラーの造形物を作ることでもでき (図10)、あわせて「3D プリンタ」とい

		PDQ不具合項目				
		隙間	折れ	微小要素	縮退	自己干渉
CAD操作	面張り				●	●
	フィレット	●	●	●	●	●
	オフセット	●				●
	ブーリアン		●	●		
	抜き勾配	●		●		

図9 モデリングの不具合 (JAMA PDQ PR ビデオ V2.0 より)

図10 カラーのRP (3D System Z コーポレーションのHPから)

われるようになった。

RPは一部の焼結タイプを除き、実際に使用する部品とは材料が異なるために、あくまでも試作品として、見た目、触感、使い勝手を確認するためのものである。それでもなぜ重要かといえば、3回目のCAMの章でも述べるが、実部品を作り出すには金型を加工してからの大量生産が前提であるため、手間と時間 (もちろんお金) がかかり、個人で一品だけの実物をつくる (これは企業内でも試作段階では同じ) のは現実的にはほとんど無理といわれていた。それに対し、RPはCADからほぼ全自動で実体ができ上がるので、導入当初は一晩かかっていたも当時からrapid (迅速) と名前がついたのはそのためである。

紙面の都合で、第1回目はここまでとし、続く第2回目で、CADから他工程に渡す際のファイルの種類 (ネイティブ、IGES、STEP) について述べ、CAEへと続けてゆく予定である。