

線形・非線形構造解析 — ADAMS編 (三角カムの機構解析) —

北陸ポリテクカレッジ 生産技術科
(北陸職業能力開発大学校)

雇用・能力開発機構本部

増川 一郎
原 裕之

1. はじめに

CAEは、形状モデルの利用法により二種類に大別できる。1つは形状モデルを直接処理するものと、もう1つは性能に関連する現象の数理モデルを解析し形状モデルと結びつける方法のものがある。

物体の運動をシミュレーションする機構解析プログラムは、形状を直接処理することを基本とする。部品間の干渉や振動の発生により、製品が要求される機能あるいは性能を満足するかどうか、コンピュータ内で仮想実験を繰り返すことにより製品開発期間の短縮やコストを削減することを目的とする。

当校においても機構解析の重要性を認識し、メカニズムや機構問題に幅広く対応できるように機構解析におけるモデル化から、解析結果を正しく評価し適用できることを目的としたカリキュラムを計画・実施している。

本報では、機構解析プログラムであるADAMSの取り扱いを修得するうで行った三角カムの機構解析事例を紹介するとともに、機構解析の特徴、解析機能、解析条件の設定ポイント、今後の課題等について報告する。

2. ADAMSの特徴

ADAMSは、米国Mechanical Dynamics, INC. (MDI) が開発した。自動車、航空機、建設機械、電機関係などのさまざまな分野で利用され機構設計における“動き”のシミュレーションに利用されて

いる。

モデラーにより現存するモデルまたは設計案から、部品をジョイント、モーション、バネ、力などの要素で結合し、構成している解析モデルを作成し必要な物理特性値を入力する。そして、ソルバーによる運動方程式の自動作成とマトリクス化の後、時間ステップでの非線形解析計算を実行する。その後、ポストプロセッサによるアニメーション表示と任意点の変位、速度、加速度、反力などをグラフ出力することが可能であり、製品の“動き”を数値により評価を行える機能を持つ。有限要素法解析に見られる有限要素メッシュによる要素分割を必要とせず、モデルを構成する部品はすべて剛体として扱い部品の弾性変形を考慮しないなどの特徴があるほか、解析結果と実験による実測値を比較検証するためのインターフェースをも備えている。

3. 使用機器

ADAMSは、UNIXおよびWindows/NTのOS上で稼働する。機構解析などの複雑で大規模な計算を実行するためには、計算時間やメモリなどより多くのコンピュータ資源を必要とする。一方、解析に要する計算時間の短縮や解析精度の向上の要求はますます厳しくなっており、解析計算時の安定性・信頼性も同様に要求される。

表1には、ADAMSを使用して行った三角カムの機構解析の各作業に対し使用するソフトウェアおよびハードウェアを示す。

表1 機構解析環境

ハードウェア	
本体	HP9000/C200
	SPEC int95 : 14.3
	SPEC fp95 : 21.4
メモリ	128MB
ハードディスク	内蔵SCSI9GB 外付SCSI4GB
モニタ	21インチ
グラフィクス	OpenGL
ソフトウェア	
OS	HP-UX 10.20
モデラー	ADAMS/View Ver 9.0.4
ソルバー	ADAMS/Solver Ver 9.0.4
ポストプロセッサー	ADAMS/View Ver 9.0.4

4. 解析問題

解析の問題は、三角カムの機構解析を例とする。

ADAMSは、カム機構をモデル化できカムの運動に伴うフォロアの動きを解析できるため、ADAMSの操作法の修得とパラメータに対するシステムの感度や出力を確認することを目的としてこの解析問題に取り組んだ。実際の解析内容は、三角カムが一回転するときの回転角とフォロアの変位との関係を求めることにする。図1には、今回の解析問題で取り上げた実際の三角カム機構モデルを示し、図2には、三角カムの寸法を示す。

表2には、三角カムの回転に伴うフォロアの動作と変位の一覧を示す。

5. 解析の詳細

5.1 解析作業の流れ

解析の作業では、3種類のソフトウェアを駆使し作業を進める。図3に、ADAMSを使用している機構解析作業の流れを示す。

5.2 モデラー

機構解析モデルの作成では、ADAMS/Viewを使用し、①部品の作成（カム形状、フォロア形状、質

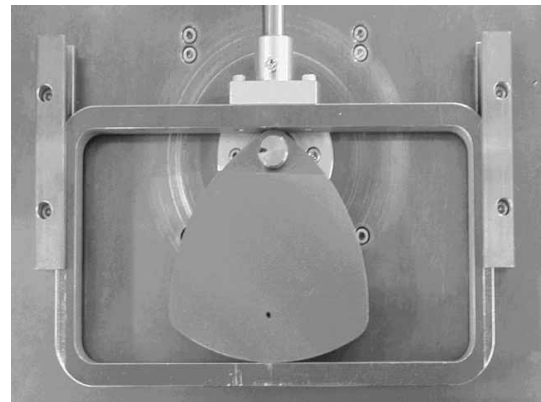


図1 既存の三角カム機構

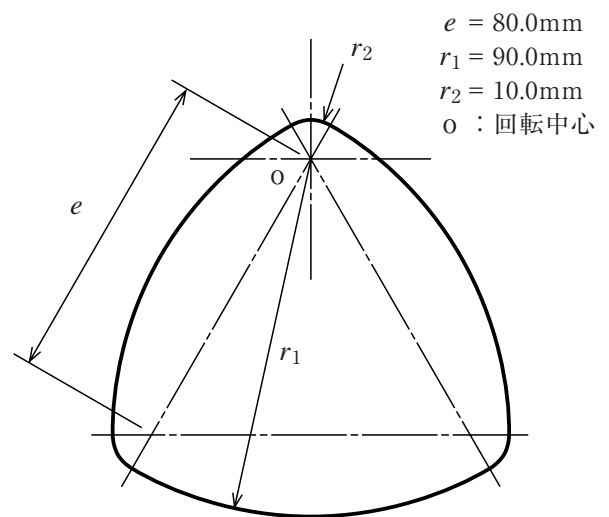


図2 三角カムの寸法

表2 カムの回転角度とフォロアの動作と変位

カム 回転角	フォロア	
	動作	変位
$0^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$	停止	$s=r_2$
$30^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$	上昇	$s=r_2-e\cos(\theta-30^\circ)$
$90^\circ \leq \theta \leq 150^\circ$	上昇	$s=r_1+e\sin(\theta-60^\circ)$
$150^\circ \leq \theta \leq 210^\circ$	停止	$s=r_1$
$210^\circ \leq \theta \leq 270^\circ$	下降	$s=r_1+e\sin(\theta-60^\circ)$
$270^\circ \leq \theta \leq 330^\circ$	下降	$s=r_2-e\cos(\theta-30^\circ)$
$330^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$	停止	$s=r_2$

量、重心、慣性モーメントなど)、②拘束の設定(並進ジョイント、回転ジョイント)、③強制変位の設定(回転モーション)、④力要素の設定(バネ要素、重力)、⑤接触の定義(カム-カム接触)の手順で作業を進める。

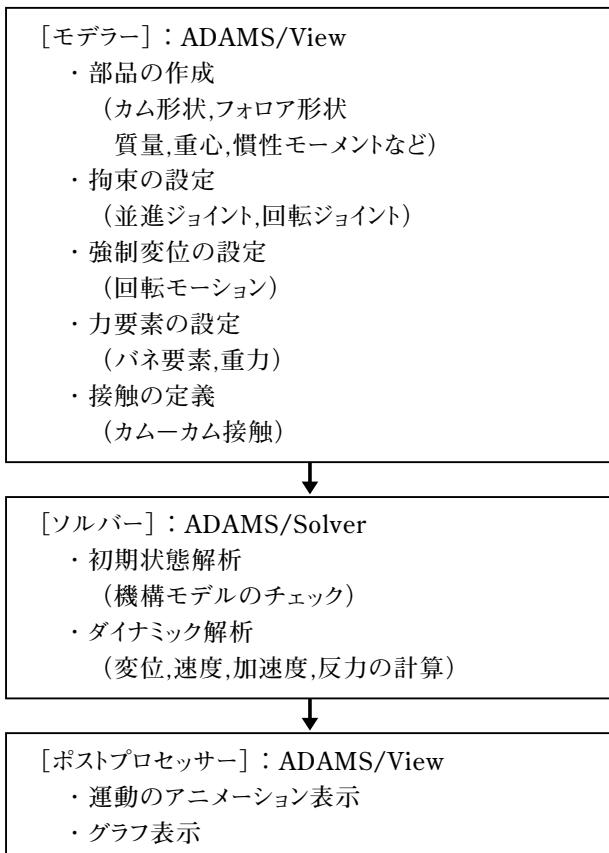


図3 解析作業の流れ

部品の作成では、ADAMSの持っているモデラー機能により作業を進める。Geometry（3次元形状）を作成すると、質量、重心位置、慣性モーメントを自動的に計算を行い、Part（Geometry + 質量特性 + Marker）を作り出す。すなわち、ADAMSで定義される部品はすべて質量特性を持つことになり、ADAMSによる解析計算の際には、形状そのものではなくPartの物理的な情報が重要視される。

Partには、グラウンドパート、剛体パートなどがある。通常、作業空間は、質量特性を持たず動くことがないグラウンドパートとして設定される。剛体パートは、質量特性を持ち動くことができるパートである。通常の部品は、剛体パートとして定義され2つ以上のパート同士をブーリアン演算することにより1つのパートへと構築することが可能である。実際の部品のモデリングでは、ADAMSの備えているモデラーの機能不足が目につき、3次元CADを使っている者にとっては物足りない状態である。

Table Editor for Points on .cam1_take

	Loc_X	Loc_Y	Loc_Z
POINT_1	5.0	8.660254	-10.0
POINT_2	2.58819	9.659258	-10.0
POINT_3	0.0	10.0	-10.0
POINT_4	-2.58819	9.659258	-10.0
POINT_5	-5.0	8.660254	-10.0
POINT_6	-23.63961	-5.642422	-10.0
POINT_7	-37.94229	-24.28203	-10.0
POINT_8	-46.93332	-45.98832	-10.0
POINT_9	-50.0	-69.28203	-10.0
POINT_10	-49.65926	-71.87022	-10.0
POINT_11	-48.66025	-74.28203	-10.0
POINT_12	-47.07107	-76.3531	-10.0
POINT_13	-45.0	-77.94229	-10.0
POINT_14	-23.29371	-86.9332	-10.0
POINT_15	0.0	-90.0	-10.0
POINT_16	23.29371	-86.9332	-10.0
POINT_17	45.0	-77.94229	-10.0
POINT_18	47.07107	-76.3531	-10.0
POINT_19	48.66025	-74.28203	-10.0
POINT_20	49.65926	-71.87022	-10.0
POINT_21	50.0	-69.28203	-10.0
POINT_22	46.93332	-45.98832	-10.0
POINT_23	37.94229	-24.28203	-10.0
POINT_24	23.63961	-5.642422	-10.0
POINT_25	-70.0	20.0	-10.0
POINT_26	70.0	20.0	-10.0

Parts Markers Points Joints Forces Motions Variables Anything

図4 三角カムの構成ポイント

単純な円柱や球、直方体の組み合わせならば問題はないが、スプラインコマンドで作成する自由曲線を持つ部品で接触を伴う場合などでは、部品間の接触を定義するためにあらかじめ形状を構成するポイントの座標データを調べておく必要がある。図4には、三角カムを構成するポイントデータを示す。

拘束の設定では、パート間の接続方法および許容される相対的な動き方を定義する。2つのパート間もしくは、1つのパートとグラウンドの間に作用し、回転ジョイント（ヒンジなど）、並進ジョイント（継手）などがある。今回の問題では、カムの回転中心への回転ジョイントの設定およびフォロアの往復直線運動を規制する並進ジョイントを設定する。

モデルを駆動する強制変位も拘束の1つであり、回転モーション、並進モーションがあり、運動を表現するために、位置や速度、加速度による関数表現を用いる。実際の回転モーションの運動を定義するために使用した関数を式（1）に示す。

$$F(\text{time}) = 30d \times \text{time} \quad (1)$$

この関数は、最も簡単な関数の設定であり1秒間に30度カムを回転させる設定となる。

また、接触の定義も拘束の1つでありパートが互いに接触した場合の反作用を定義する。カムとフォロアの接触の定義方法は、最も注意をすべき事項であり、この設定に誤りがあると解析計算がエラーを起こしてしまい作業が先に進まない状態となる。ADAMSで接触を定義する場合には、決められた約束事がありそれを忠実に守らなければならない、その約束事として、①接触の定義に使用するものはカーブでなければならないこと、②使用するカーブはパートに属していなければならないこと、③使用するカーブは1本のカーブで構成すること、④カムに属するカーブとフォロアに属するカーブは同一平面上にななければならないことなどがある。

今回の問題では、使用する三角カムの形状が複数の円弧より構成されており、1本のカーブとして設定を行うためにはスプラインコマンドを使用してカーブを定義する必要がある。そのため、三角カムを構成するポイント情報をもとにスプラインコマンドにより、カムパートに接触を定義するカーブを付加する。この操作は、解析モデルの作成のうち最も厄介でありまた重要な作業となる。モデル中に含まれるカーブは密度を持っておらず質量特性が計算できないため、パーツに属さないカーブが存在した場合には解析計算時にエラーを起こしてしまう。また、不必要なカーブを削除した場合にも、カーブの属性情報がモデルの中に残ったままになってしまい、形状の削除とともに明示的に属性情報をも削除しなければ解析計算時にエラーを起こしてしまう。ADAMSを使用し始めた当初は、上記事項に関して理解しなかったため頻りにエラーを起こし、またエラーメッセージが英語であったため理解に苦しみ対処方法がわからず困り果てた場面もあった。図5には、カムとフォロアのカーブによる接触の定義を行う様子を示す。

力要素の設定では、物体間に力を発生させる定義を行う。スプリングやブッシュのような弾性結合は力要素となり関数式を利用して直接物体に作用させる。

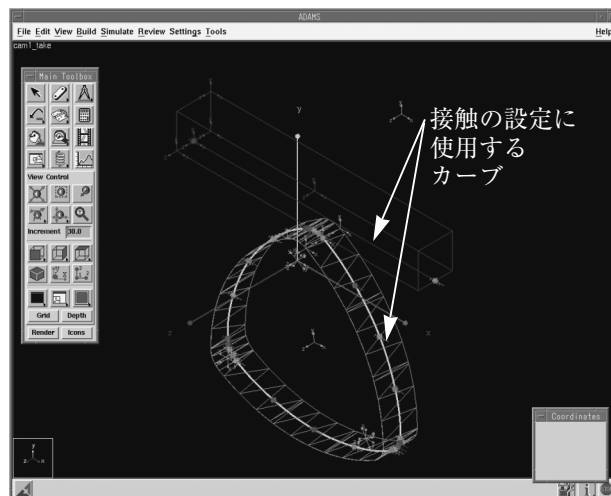


図5 接触の定義

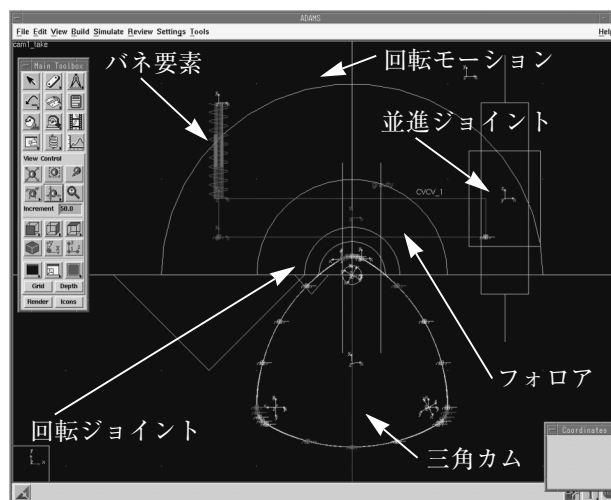


図6 三角カム機構解析モデル

今回の問題では、フォロアが重力による落下とカムとの接触によりフォロアがはじき飛ばされることがないように動きを規制する目的としてバネ要素を設定する。図6には、ADAMS/Viewのモデラー機能を使用しすべてのパラメータ設定後の三角カム機構解析モデルを示す。

5.3 ソルバー

ADAMSの備えているソルバーは、数種類の機構解析計算を実行することができる。①静解析や動解析に先立って実行され機構解析モデルに矛盾が無いかどうか、構成する部品の位置や速度が拘束方程式を満たすかどうか判断する初期状態解析、②運動を生じさせる力に無関係な機構モデルの動作にだけ関

する場合、部品の位置や相対位置が時刻歴で規定されることにより、残りの部品の位置、速度、加速度の時刻歴を代数方程式で解くことによって求めるキネマティック解析、③外力の作用する機構モデルの運動を取り扱う場合の、ある時刻における部品に位置が力により決定されるものが機構モデル内に含まれる問題を解くダイナミック解析などがある。

今回の解析問題では、三角カムの回転運動に伴うフォロアの追従する運動を解析することを目的としている。そこで、解析を始める前段階で機構モデルに矛盾や誤りが含まれていないかどうか、また、フォロアが重力により画面下方向（Y軸）に落下する状態と落下したフォロアが三角カムに接触しフォロアの落下が停止すること、およびフォロアに設定した並進拘束とバネ要素が正しく動作する様子を初期状態解析する。

初期状態解析の実行後、ダイナミック解析の計算を実行する。今回の解析問題では、三角カムが1秒間に30度回転をするモーシヨンの関数を定義しているため、三角カムが1回転するために必要なシミュレーション時間を12秒に設定する。また、解析計算を行うためのステップ数を500に設定して計算精度を向上させ、接触を伴う問題の計算に対応している。

図7には、初期状態解析実行後のカムとフォロアの釣り合い状態を示す。また、図8には、ダイナミック解析により解析計算後のアニメーション表示によるカムとフォロアの運動の様子を示す。

5.4 ポストプロセッサー

解析結果の表示は、ポストプロセッサーのADAMS/Viewを使用して行う。通常の有限要素法解析と違い、ソルバーによる解析計算と同時にモデルの運動のアニメーション表示を行うため、ポストプロセッサーの機能なのか、ソルバーの機能なのか判断に迷う。

アニメーション表示により、目的とする機構の機能が満足しているかどうか視覚的に評価できるほか、グラフ表示により数値による評価も可能となる。このグラフ機能には、実際に行った実験データや計算で求められたデータを読み込み、同じグラフ上で

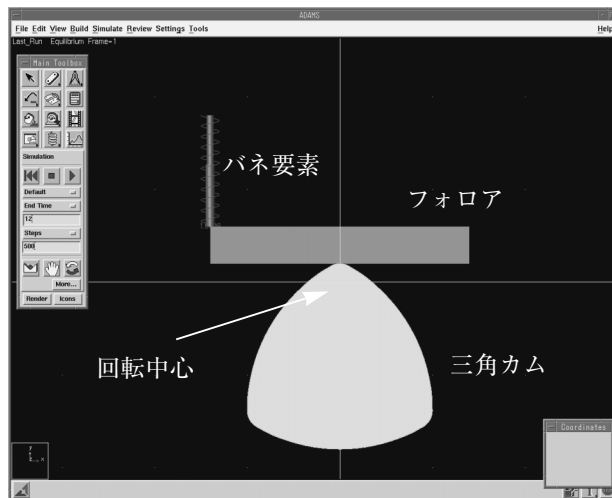


図7 初期状態解析

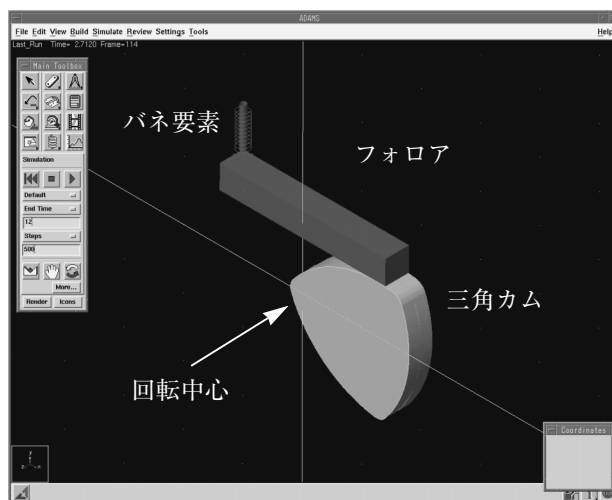


図8 解析計算後のアニメーション表示

表示ができADAMSでの解析結果と比較することが可能である。そして、このとき使用するデータはASCII形式のフォーマットで保存されている必要がある。

今回の解析問題では、三角カムの回転運動に伴うフォロアの追従する運動を解析することを目的としており、具体的には、三角カムが1回転する間にフォロアの上下運動すなわちY方向の変位を求めている。

図9には、ADAMSのグラフ機能を使用して作成したカムの回転角度とフォロアのY方向変位の関係を示す。このグラフの横軸は時間であり、縦軸は変位となっている。横軸は、三角カムが1回転するために所用した回転開始時から回転終了時の12秒間を

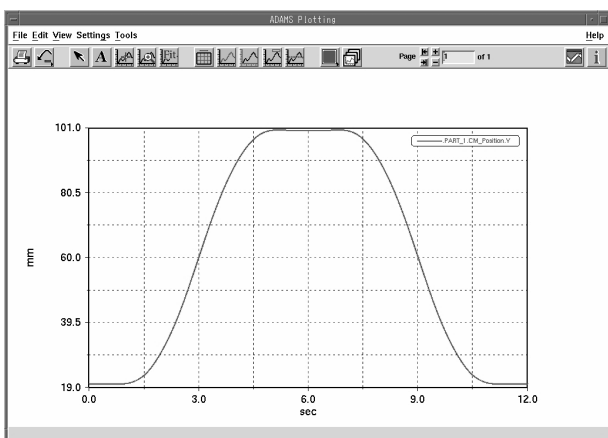


図9 カムの回転角度とフォロアの変位の関係

プロットしており、時間1秒につき30度カムが回転している様子を示す。

グラフの縦軸は、フォロアがカムに追従して移動したフォロアの重心点のY座標位置を示している。したがって縦軸の示す19.0～101.0mmの値は、フォロアの重心のY座標値であり三角カムの回転中心を座標原点とする。フォロアのY方向変位量はこの値をもとに求め直す必要がある。

6. まとめ

本報では、ADAMSを使用している三角カムの機構解析例について報告した。今回の解析例では、カムとフォロアの接触の定義を行ううえで、機構解析モデルの作成とパラメータの設定および関数の設定方法に注目し作業を進めた。

当初、ADAMSの操作の不慣れと設定パラメータの難しさから、幾度となく解析モデルの作り直しを行わなければならない状態に陥ってしまい、また、修得すべき関数の作成の難しさから思うように作業が進まなかった。

解析作業を滞らせた原因として、ADAMSが解析計算を実行する前にモデル全体をチェックし、拘束やパラメータに誤りがないか確認する初期状態解析などや、機構モデル完成後の動作を確認するためのダイナミック解析時などにエラーがあった場合、計算をストップしエラーメッセージを返してくれるが、英語に不慣れな筆者などはその内容が理解でき

ず何がエラーを出す原因なのか、どのように対処すればよいのか途方に暮れてしまうことがしばしばあった。また別の要因として、導入教育時に使用したテキストや解析練習問題に記述していないパラメータの設定やADAMSの約束などがあったこと、マニュアルが英語であり翻訳に手間取ったことなどやどうにか日本語に訳したとしてもその記述してある内容が専門的かつ高度な内容であり理解に苦しんだことなどが原因としてあげられる。

今回行った三角カムの機構解析問題では、接触を扱う部分が非線形計算となり接触の定義方法がADAMSの決められた約束事に従わなければ解析計算がエラーを起こしてしまう問題などがあった。しかし、適切なパラメータの設定次第では、非常に精度よく機構の運動の予測が可能となり、設計・開発段階での問題点の洗い出しなどが可能となる。今後は、このような解析ツールを活用しての製品設計・開発手法や教育手法が数多く導入されると考える。

今後の課題として、①機構解析ソフトウェアの大規模コンピュータ・コードを使いこなせる能力、②機構解析の基本となる理論の修得、③機構のモデル化から解析結果の評価と適用、に関して段階的に学習できる体制を整える必要があること、そして、高度な機構解析を担当する人材の確保と教育があげられる。

<参考文献>

- 1) 株電通国際情報サービス：『ADAMS9.0.4 操作マニュアル』。
- 2) 株電通国際情報サービス：『ADAMS9.0.4 例題集』。
- 3) 株電通国際情報サービス：『ADAMS9.1 入門セミナー』。
- 4) 雨宮好文他：『CAD/CAM/CAE入門』、オーム社。
- 5) E. J. ハウグ：『コンピュータを利用した機構解析の基本』、大河出版。
- 6) 『機械技術者のための3次元CAD, CAE導入・活用ガイド』、日刊工業新聞社。

