

## 機構解析のカーエレクトロニクス機器への適用

Application of Multi-body Simulation to the Mechanism of Car Electronics Products

萩原 純夫

Sumio Hagiwara

**要 旨** 機構解析をカーエレクトロニクス機器の機構部の動作シミュレーションに適用した。定電圧駆動された小型モータによる駆動機構やウォームギアによる減速機構をモデル化する手法を開発した。機構部のガタや摩擦，部品の弾性を考慮することにより，計算値と実測値が一致するようになってきた。

**Summary** Multi-body simulation has been applied to the mechanism of car electronics products. Simulation techniques for a mechanism driven by a small electric motor were applied to a constant voltage and a reduction gear that consists of a worm wheel was developed. Considering the effects of slack and friction of the mechanism and the flexibility of parts, we were able to achieve a simulation result in agreement with the measured one.

**キーワード**： 機構解析，ADMS，動作シミュレーション，駆動機構，バーチャルプロトタイピング

### 1. まえがき

機構解析はmulti-body simulationと呼ばれ，いわゆる質点系の力学の問題を解く解析である。機構解析を行うための汎用のコンピュータ・ソフトウェアの中でも代表的な存在である米国MDI社のADAMSは，自動車会社をはじめとする多くの企業で利用されている最も著名なソフトウェアの一つである。

機械系の動作を質点系の問題としてモデル化し，機構解析ソフトにより系の非線形運動方程式を組立て，それを解くことにより機械系の動作を予測評価することができる。機構解析により得られた各部の変位や力の情報を，従来から行われているFEMを用いた部品単体の応力解析における境界条件として用いれば，試作前により現実に近い評価を行うことができる。

近年製造業においては3次元CADやCAEを活用し，開発期間短縮，コスト削減，品質向上を達成しようという動きが活発である。CAE先進企業においてはコンピュータ上のモデルをコンピュータ上で組立て，各種評価を行うことにより試作回数を大幅に削減している。このような手法はバーチャルプロトタイピングなどと呼ばれる。機構解析による動きのシミュレーションは進展しつつある3次元CAD化とあいまって，将来のバーチャルプロトタイピング環境実現へ向かって必須な解析技術である。

従来カーエレクトロニクス機器における機構部分は，カセットメカやCDメカなどの記録メディアを駆動する部分に限られていた。しかし，機器の複合化が進み，限られたスペースに多くの機能を盛り込むため前面グリルを開閉させたり，TVディスプレイを格納させたりするといった動きを持つ製

品が増えてきており、機構解析を適用し、試作前に動作を評価することが望まれる。筆者らは約3年ほど前より機構解析ソフトウェアADAMSを導入し、製品設計への適用を検討してきたが、ようやく実用的な解析が行えるようになってきたので報告する。

## 2. 機構解析ソフトウェア ADAMS の概要

機構解析は解析対象となる機構を質点系の問題としてモデル化し、解析する。ADAMSでは構成する各部品をパート(PART)と呼び、通常剛体として取り扱う。材料の弾性が無視できない場合には、FEM解析による固有値解析の結果を利用して弾性体として取り扱うことができるオプションもある。部品内の注目すべき特定な部位の位置や向きを表すため、パート内にマーカ(Marker)と呼ばれる局所座標系を定義する。マーカの原点の移動量は注

目部位の変位を表し、マーカのXYZ各軸の原点を中心とした回転は注目部位の回転を表す。軸受け、ピン・スロット機構、カム機構など部品間の動きの幾何学的な拘束は、マーカ変位間の幾何学的な拘束条件として、また部品間の接触やバネなどの力は作用点と反作用点に取り付けられたマーカ間に働く力としてモデル化され、運動方程式に組み込まれる。

図1はピストン、シリンダ、コンロッド、クランクシャフトおよびクランク軸受けからなるエンジンの模型である。ピストンの頂部に力が加わった時にこの機械系がどのように振る舞うかを解析する場合を考えてみよう。

図2は機構解析を行うためのモデルである。クランク軸受けとシリンダは空間に固定され動かないものとして扱う。これらの動かない部品をひと

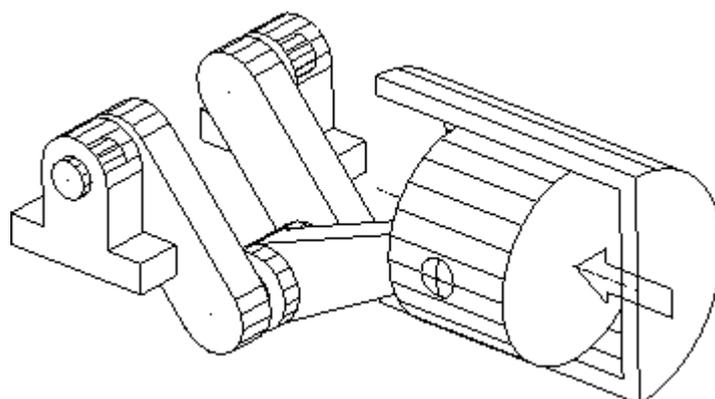


図1 エンジン模型

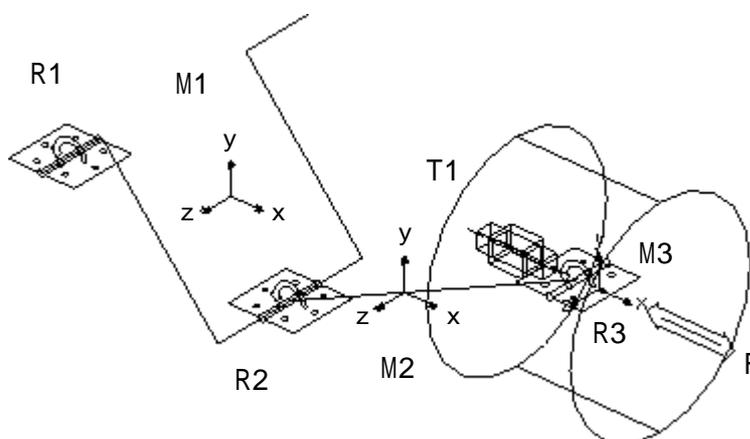


図2 エンジン模型の機構解析モデル

まとめにしてグラウンドパートと呼ぶ。空間内で動くピストン, コンロッド, およびクランクシャフトの3個の部品をそれぞれパートとして定義する。動的な解析を行うので, これらのパートには質量と慣性モーメントを定義しなければならないが, グラウンドパートは動かないので質量や慣性モーメントは必要ない。マーカM1, M2およびM3はそれぞれクランクシャフト, コンロッド, およびピストンの重心位置をあらわすマーカである。XYZ各軸は慣性モーメントの主軸を表しているわけではないが, この各軸を基準に慣性モーメントを定義する。質量および慣性モーメントは三次元CADにより形状が定義されていれば簡単に求められる。

R1はクランクシャフトの軸受けをモデル化した回転ジョイントで1軸回りの回転自由度のみを許す拘束である。クランクシャフトは剛体なので回転ジョイントによる拘束は片側のみあればよい。R2はコンロッドとクランク, R3はコンロッドとピストンピンとの結合部をモデル化した回転ジョイントである。T1はピストンがシリンダ内を往復する状態をモデル化した並進ジョイントで1直線上の運動のみを許す拘束である。Fはピストン頂部に加わる並進力である。

機構解析ではこのように質点系をパート(PART), 拘束(CONSTRAINT), 力(FORCE)の3つのカテゴリに分けられる機械要素を使用してモデル化するだけでよく, 運動方程式を立てるなど高度な作業は不要である。運動方程式は機構解析ソフトウェアにより自動的に作成され, 時間に関する積分が行なわれるので, 系の時刻歴応答が簡単に得られる。結果は数値や各種グラフだけでなく, 三次元のアニメーションなども得られ, 動作を理解しやすい。

力は並進力以外にトルクあるいは並進力とトルクをひとまとめにした一般力を加えることができる。力の各成分は任意の関数式で与えることができ, しかもユーザファンクションと呼ばれるC言語あるいはFORTRAN言語によるサブプログラムとして定義することもできるので, ADAMSが標準に持っている機械要素以外にも種々な機械要素を

ユーザが定義して使用できる。このような拡張性はADAMSの随所で利用できるようになっており, これと一連のコマンド操作をプログラム化するマクロ機能を活用すれば, いろいろな機構への応用が可能である。

3. カーエレクトロニクス製品への適用  
機構解析をカーエレクトロニクス製品に適用する場合, 対象となる機構には,

- ・ディスクローディング機構
- ・ディスクオートチェンジャ機構
- ・光ピックアップ位置決め機構
- ・TVモニタの電動格納機構機構
- ・LCDモニタ部, ディスプレイパネル部の電動開閉機構

などが考えられる。また, これらの機構の特徴として,

- ・小型DCモータが動力源
- ・モータ直結のウォームギアの後, 平歯車, 数段の減速ギアによる駆動
- ・部品は軸受け等を持たない平板部品が多く, ガタつきを考慮することが必要
- ・滑り接触運動部が多く, 摩擦の影響が大きいなどが挙げられる。

これらの特徴を考慮した解析を行えるようにADAMSで不足している機能を開発した。

### 3.1 小型DCモータ駆動部のモデル化

モータのロータを剛体として定義し, 回転ジョイントによりベースに固定する。モータを電気機械系の変換器と考えると駆動電流は次の式で与えられる。

$$\text{駆動電流} = \frac{\text{駆動電圧} - \text{力係数} \times \text{回転数}}{\text{巻抵抗線}}$$

駆動電流は系の状態変数として定義し, 系の運動方程式と連立させる。この駆動電流を用いて,

$$\text{駆動トルク} = \text{力係数} \times \text{駆動電流}$$

なるトルクをロータに加えれば, モータの特性を機構解析モデルの中に組み込むことができる。力係数や巻線抵抗などはモータ特性のグラフから簡単

に抽出できるようにADAMSのマクロを作成し、組み込んだ。

### 3.2 ウォームギアのモデル化

ウォームギアとウォームホイール間の動力伝達では摩擦の影響を無視できない。ギアの歯の接触点はウォームホイールの回転と共に不連続に移動していくが、カプラと呼ばれる複数の運動間の一次結合条件を定義する機能を使い、回転運動を平面運動に展開すれば、一本の傾斜した直線状のガイドの中をピンが、ガタと摩擦を伴いながら運動する問題に変換することができる。ADAMS上での定義は大変面倒であるが、マクロを使用し、ウォームギアの進み角やピッチ円半径といった設計パラメータから簡単に定義できるようにした。

### 3.3 接触要素

図3は長円形のガイド穴の中を円柱状のピンが動くピンスロット機構である。多くのガイド形状は図面化しやすいように円弧と直線の組み合わせが主体であるが、ピンの動きはガイド平面上の二次元運動ばかりではなく、ピンの軸方向の運動やこじる動きもあるので、3次元の接触問題として解析できるようにしておく必要がある。ピンの軸が円弧平面と直交しない場合、接触点の計算は円と楕円の交点を求める必要があるが、円と楕円の交点は解析的には求まらない。ピンの軸の傾きが小さい場合に限定すれば球と円筒による近似ができる。こじりが問題になる場合は球2個で近似することにした。

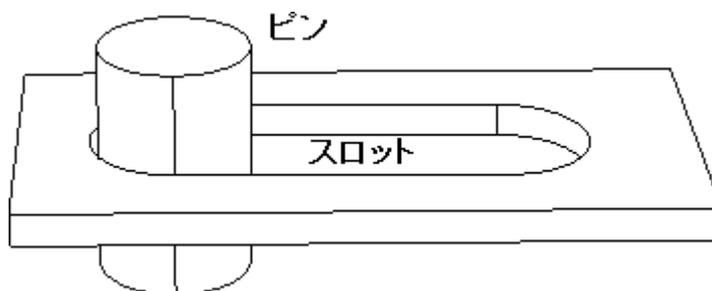


図3 典型的なピンスロット機構

現時点で開発されている三次元の接触要素は

- ・球と凹円筒，凸円筒，平面，直線
- ・点と凹円筒，凸円筒，平面

である。これらの接触要素はFORTRANサブプログラムによる一般力として作成されており、球の半径や円筒の曲率などのパラメータはADAMSのマクロとGUIを利用して形状データを画面上でピックアップするだけで簡単に入力できるようにした。

### 3.4 部品の弾性の考慮

樹脂製部品や薄い板の曲げなどが起こる場合では部品を剛体として扱っていると解析結果が実際と一致しない場合もある。ADAMSには有限要素法による固有モード解析結果を利用して部品を弾性体として扱えるようになっているオプションがあるが、我々の使用している固有モード解析プログラムの結果を取り込むインターフェースが製品としてまだ販売されていない。そこで部品をいくつかのパートに分けその間をバネで結合するという方法により近似した。バネの固さは有限要素法による応力解析の結果を使用した。

## 4. 解析事例

### 4.1 オーディオ・ビデオ・ナビゲーション

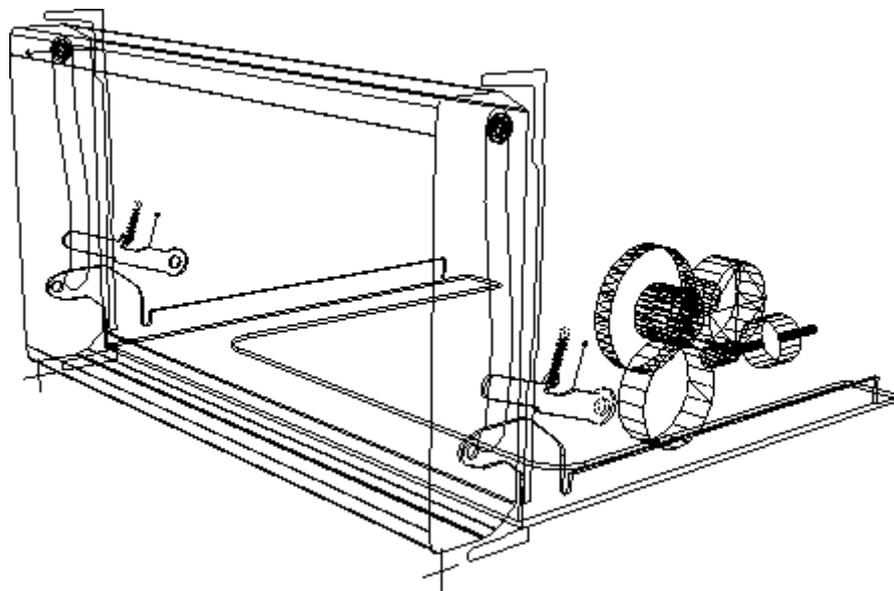
#### 一体機モニタ部の電動開閉機構

図4はオーディオ・ビデオ・ナビゲーション一体機モニタ部の電動開閉機構の動作をシミュレーションしたものである。図4(a)はモニタ部が閉じている状態を、図4(b)はモニタ部が開いた状態を

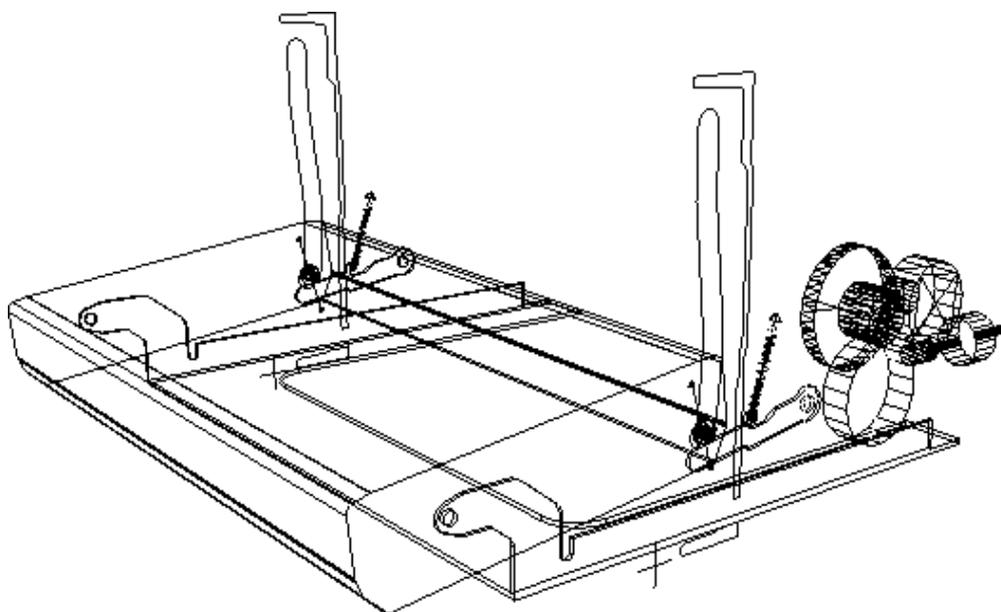
示している。

モニタの上部の左右にはローラが取り付けられており、それぞれ左右のガイドの中を動く。モニタ下部には駆動用のフレームが取り付けられている。

フレームとモニタの接合部は回転ジョイントにより結合されている。フレームはシャーシに取り付けられたレールに沿って前後に動く。モータの回転はウォームギアおよび平歯車2段により減速され



(a) モニタ部が閉じている状態



(b) モニタ部が開いている状態

図4 AVN モニタ部の電動開閉機構

た後、アイドルギアがフレームに取り付けられたラックギアを前後に駆動する。各部の摩擦やガタはできる限り考慮に入れた。モニタ部の左右のねじれを考慮するためローラ軸はバネを介してモニタに取り付けられており、バネの係数はFEMによる応力解析で求めた値を使用した。

図5は駆動モータの動作電流をグラフにしたもので図5(a)がオープン動作時、図5(b)がクローズ動作時のものである。それぞれ、左が実測値、右が計算値である。縦軸が電流値、横軸は時間である。動作時間や電流値はほぼ一致している。クローズ時の電流の振動する様子はタイミングが少しずれているが、計算結果にもあらわれている。これはモニター部の質量と重力の影響をキャンセルするために取り付けられているバネとの共振によるもので、ローラがガイドの中で前後方向にガタつきながら動作していることが計算から分かった。またクローズ時の電流値が途中から減少していくのは、モニター部のねじれにより生じるフレームとレール間の摩擦力がレバーの後退によって減少するためであることが分かった。

#### 4.2 ディスクローディング機構

図6はディスクローディング機構の一部でディスク搬送用のローラを上下動させる機構の解析モデルである。

モータ電流の計算結果を図7に示す。上段が実測値で下段が計算値、横軸が時間である。メカニズムの途中にあるラックギアとピニオンギアをかみ合わせることで動作を始めるようになっており、下段の横軸の目盛りで0のところから動作をはじめ。動作直後の電流波形が異なっているが、動作時間と電流値はほぼ一致している。ディスクローディング機構では一つのモータで複雑な動作をさせている。この機種ではこのモータの動力を途中の平歯車で分割し、搬送用のゴムローラを回転させる動作などもさせている。ゴムローラによる搬送部分はシミュレーション上難しいが、近い将来解析できるようにして、ディスクローディング機構全体をシミュレーションしたいと考えている。

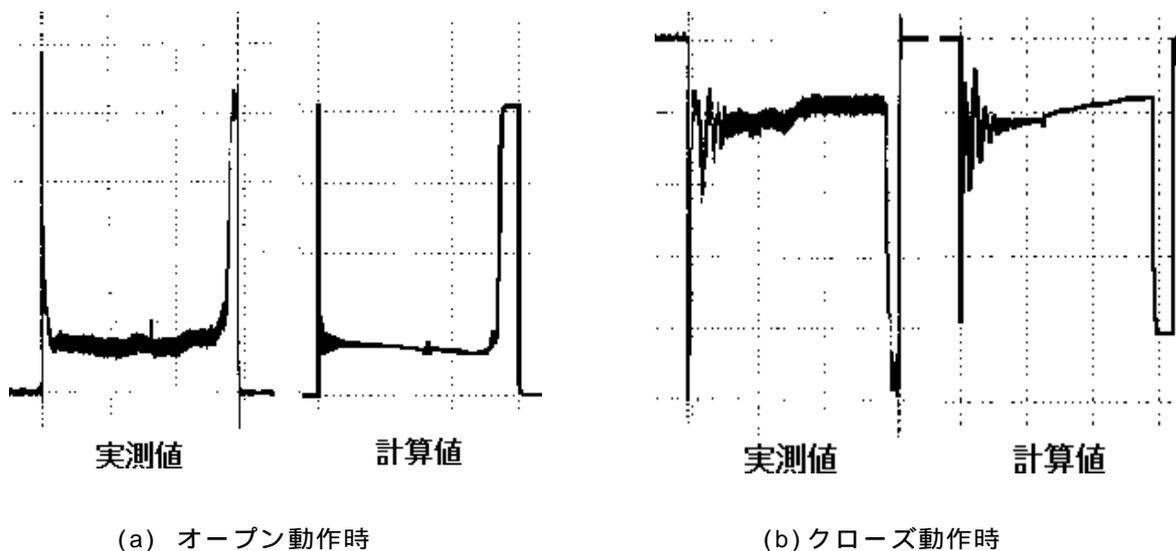


図5 駆動モータの動作電流

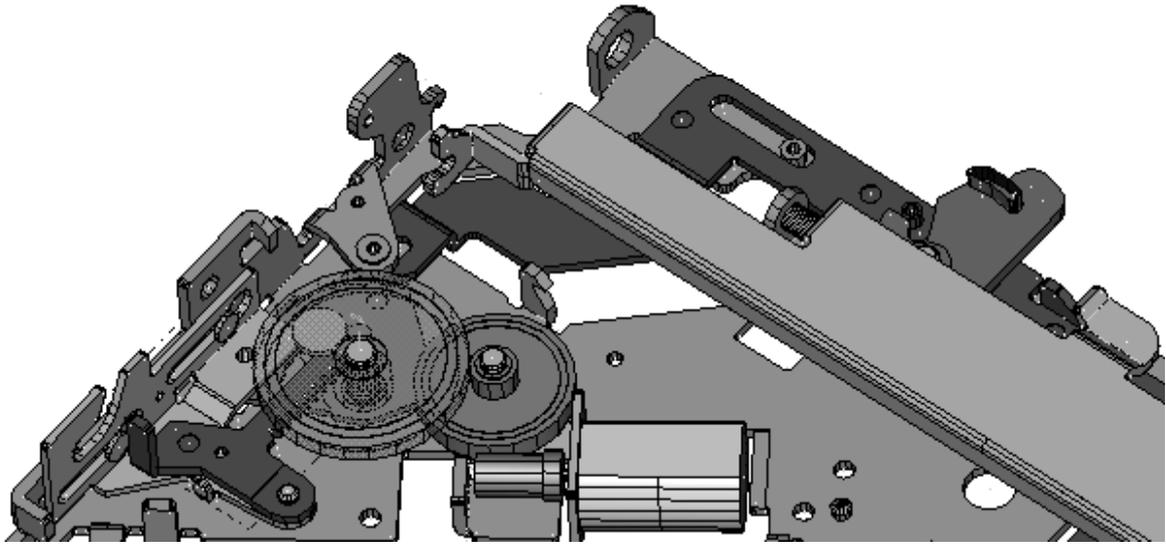
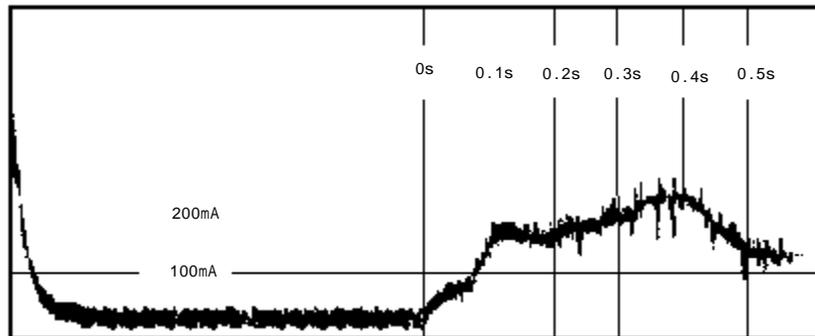
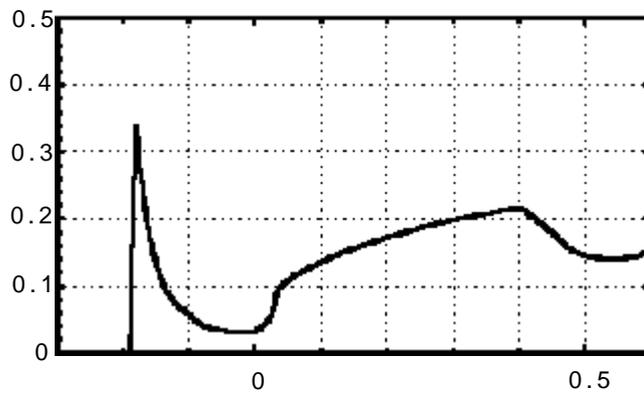


図6 ディスクローディング機構の一部



(a)実測値



(b)計算値

図7 モーターの駆動電流

## 5. まとめ

機構解析ソフトウェアADAMSを導入し、カーエレクトロニクス機器の機構部の動作予測に適用した。小型DCモータによる駆動部分やウォームギアによる減速機構のモデル化手法を開発し、モータを定電圧駆動した時の動作を予測できるようにした。機構部のガタや摩擦をモデル化するためのFORTRANサブプログラムを開発しADAMSをカスタマイズすることにより実測に近い計算結果を得られるようになった。

今後の課題としてはディスクローディング機構全体をシミュレーションできるように、三次元の接触要素ライブラリを充実させることやゴムローラによりディスクを搬送する部分をモデル化する手法を開発することが必要である。また、部品の変形を考慮するオプションを導入し、より現実に近いシミュレーションを行う必要もある。摩擦係数をはじめとする各種パラメータの決定方法など、解析ノウハウの蓄積と一層の解析精度向上も課題である。究極の目標は、拡大しつつある三次元設計とあいまってバーチャルプロトタイピングを実現し、設計期間を短縮することである。

## 6. 謝辞

解析実施にあたり部品形状データや実測結果を提供していただいた、MEC技術統括部第三商品開発部、第二技術部の関係各位に感謝します。

### 参考文献

- 1) Mechanical Dynamics, Inc.,  
"An Overview of How to Use ADAMS/Solver"

### 筆者

萩原 純夫(はぎわら すみお)

- a . MEC川越事業所技術統括部技術課
- b . 1973年4月1日
- c . 1973年音響研究所にてハイポリマー素子、ポリマーグラファイト振動板等、電気音響変換機の研究開発に従事。  
1982年よりCAD、CAE関連業務に従事、現在に至る。
- d . 子供のころから模型作りが好きでした。現在、会社のワークステーション上で業務としてバーチャルの模型作りを楽しんでいます。