

# 分岐型サスペンション構造への運動方程式等価回路モデルの応用

非会員 三田 信<sup>\*a)</sup> 非会員 丸山 智史<sup>\*\*</sup>  
正員 藤田 博之<sup>\*\*</sup> 正員 年吉 洋<sup>\*\*</sup>

## An Equivalent Circuit for Equation-of-Motion Solver Applied to Branched Suspension Structures

Makoto Mita<sup>\*a)</sup>, Non-member, Satoshi Maruyama<sup>\*\*</sup>, Non-member, Hiroyuki Fujita<sup>\*\*</sup>, Member, Hiroshi Toshiyoshi<sup>\*\*</sup>, Member

(2011年9月23日受付, 2011年12月10日再受付)

A newly developed multi-physics simulation tool for MEMS (microelectromechanical systems) has been applied to a branched suspension structure to study the versatility of analysis. More than two suspension modules or actuator modules can be connected to a mass module that solves the equation of motion without modifying the internal equivalent circuit module, thanks to the carefully designed signal handling method, where displacement and velocity are interpreted as voltage while mechanical force as electrical current. A 4-bit microelectromechanical digital-to-analog converter of displacement has been modeled as a verification to reproduce the micromechanical behavior.

キーワード: 静電駆動, 等価回路モデル, マイクロアクチュエータ

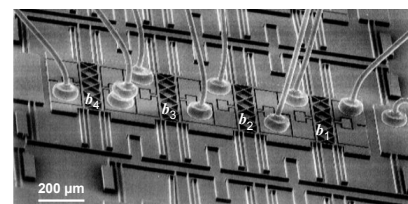
Keywords: electrostatic drive, equivalent circuit model, micro actuator

### 1. はじめに

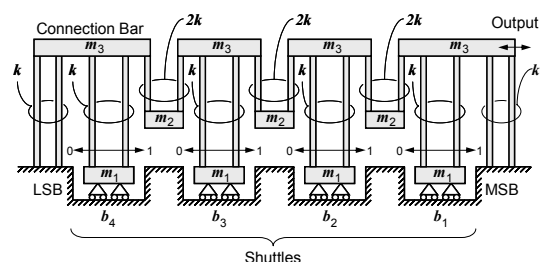
集積化 MEMS 技術の進展に伴い, 電気回路解析に基づいた MEMS 等価回路モデリング手法の研究が進んでいる<sup>(1)</sup>。著者らはこれまでに, 電気回路シミュレータ上で力学系の運動方程式を解くアナログ計算機を構築し, それを MEMS アクチュエータの動作解析に応用する方法を報告した<sup>(2)</sup>。本解析手法では, 質量, バネ・ダンパ, アクチュエータ等の要素部品を独立した等価回路モジュールで表現する手法をとった。その結果, 質量に相当する部品に新たにバネやアクチュエータを分岐接続する場合でも, 他の要素部品モジュールの内部等価回路を変更することなく, 回路シミュレータ上でモジュールを電氣的に並列接続するだけで, 変位の伝達と発生力・復元力の合力を表現できる。これらの特徴が顕著に表れる例として, 静電ヒステリシスを応用したサスペンションネットワーク型の MEMS アクチュエータ構造をモデル化したので, その方法と結果を報告する。

### 2. 分岐型サスペンション構造

(2-1) MEMDAC 図1に, デジタル変位入力をアナログ変位出力に変換する 4-bit MEMDAC (Micro Electro Mechanical Digital to Analog Converter) 機構<sup>(3)</sup>の電子顕微鏡写真と構造説明図を示す。この機構は, ファブリ・ペロ干渉計のキャピティ長制御等の用途向けに開発したものである。電気回路の R-2R 型デジタル-アナログ変換器の機械版として, プルイン変位を発生する 4 個の静電アクチュエータをばね定数  $k$  と  $2k$  のサスペンションで結合した。



(a) SEM image of 4-bit MEMDAC



(b)  $k$ - $2k$  Suspension network half model for 4-bit MEMDAC

Fig. 1. Structure of 4-bit MEMDAC

a) Correspondence to: Makoto Mita. E-mail: mita@isas.jaxa.jp

\* 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所  
〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1  
Institute of Space and Astronautical Science,  
Japan Aerospace Exploration Agency  
3-1-1, Yoshino-dai, Chuo-ku, Sagami-hara-shi, Kanagawa  
252-5210, Japan

\*\* 東京大学 生産技術研究所  
〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1  
Institute of Industrial Science, The University of Tokyo  
4-6-1, Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8505, Japan

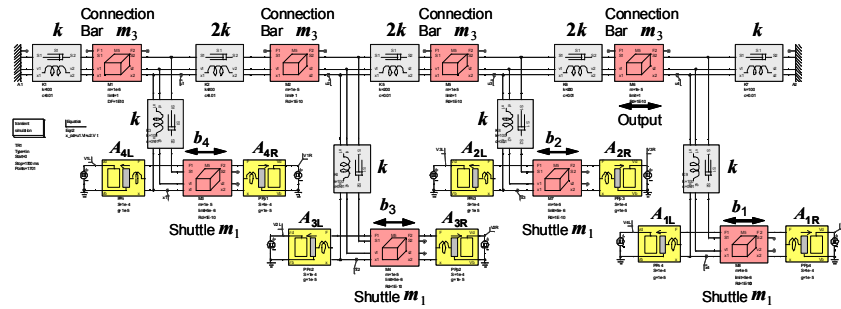


Fig. 2. Equivalent circuit model for 4-bit MEMDAC

サスペンションと質量, 駆動機構が一直線上に並んだ通常の静電アクチュエータのモデルとは異なり, 本構造では静電駆動シャトルの左右に平行平板型アクチュエータ電極を分散配置した。また, 各ビット間の連結バー (Connection Bar) からは, ばね定数  $k$ ,  $2k$  のサスペンションが分岐している。この構造の等価回路解析モデルを図 2 に示す。ここで,  $m_1$ ,  $m_3$  で表されるモジュールは, 外力をもとに質点の速度, 変位を計算する運動方程式ソルバーである。図 2 の 8 個の運動方程式ソルバーは, 構造計算に合計 8 個の連立方程式を要することを示している。なお, 解析を簡単にするために, 図 1(b) 中の  $m_2$  で表された質量を無視した。

**(2・2) 解析モジュール間の信号伝達方法** 本解析の運動方程式ソルバーは, ニュートン (N) 表示の外力をアンペア (A) 単位の電流値として受け取り, 計算結果の速度 (m/s) と変位 (m) を定電圧源の電圧 (V) として出力している<sup>(1)</sup>。また, 図 2 の  $k$ ,  $2k$  で示されたサスペンションでは, 電圧値として受け取った速度と変位から, それぞれ粘性抵抗とバネの復元力を計算し, それらの和の値を定電流源の電流として出力する。さらに,  $A_{1R}$ ,  $A_{2L}$  等で表されたアクチュエータモデルでは, 差動の駆動電圧入力 (V) と電圧表示のアクチュエータ変位から平行平板間の静電駆動力を計算して, これを定電流源からの電流として出力している。

このことから, 連結バーを表す運動方程式ソルバー  $m_3$  に 2 個のサスペンション・モジュール  $k$ ,  $2k$  を並列接続した場合でも, 速度と変位を両者に等しく定電圧として伝達可能である。また, サスペンションが並列接続であることから, それらの反作用力は, モジュール外で足し算回路等を使わずに, 単純に結線を介した電流和として受け取ることができる。同様の議論が, 運動方程式ソルバー  $m_1$  に接続したアクチュエータモデル  $A_{1R}$ ,  $A_{2L}$  等に対しても成り立つ。よって, 電圧による速度・変位の受け渡しと電流による力の受け渡しに基づく本解析手法は, 分岐を伴う一般的なサスペンション・アクチュエータのネットワーク構造に対しても応用可能であることが分かる。

**(2・3) 解析結果** 図 3 に, 4 ビット MEMDAC 構造の出力端に発生する変位出力の過渡応答解析結果を示す。各入力ビット ( $b_1, \dots, b_4$ ) には, その左右のアクチュエータのどちらか片方のみをプルイン駆動する電圧を与えている。また, 左右のプルイン状態をそれぞれ 0 と 1 で表したとき, 系全体では 0000 から 1111 まで状態変化するように駆動電圧

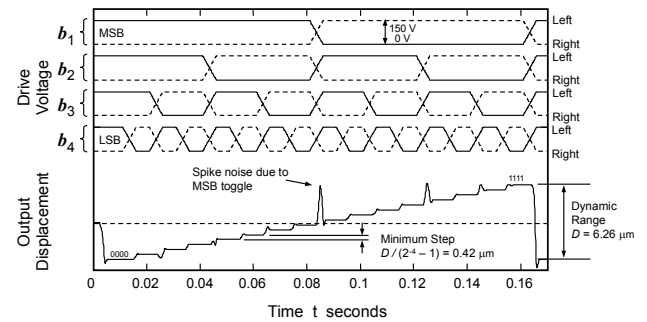


Fig. 3. 4-bit MEMDAC simulation result

のシーケンスを組んだ。この結果, 各静電駆動シャトルのデジタル変位を入力として, それらをバイナリ重み付けしたアナログ変換変位が発生する様子を確認できた。この結果は, 実際に製作したデバイスの実験結果<sup>(3)</sup>の傾向を再現できている。さらに, 実デバイスのスタティック特性の測定では確認できなかった過渡現象として, 全入力ビットが反転する 0111→1000 の瞬間には 1111 の状態を擬するスパイク状の出力エラーが発生する様子が見られる。この現象は, 静電駆動ヒステリシスによる各ビットの変位発生タイミングの差と, 出力端に最も近い MSB (Most Significant Bit) の  $b_1$  の変化が他よりも速く出力端に伝達されることに起因するものと考えられる。

### 3. おわりに

本研究では, 電気回路シミュレータ上で動作する力学系の運動方程式ソルバーを用いて, 分岐サスペンション型の静電マイクロアクチュエータ機構の動作解析が可能であることを示した。本手法は, アクチュエータ駆動用の電気回路系との統合解析にも展開可能であり, 複雑な MEMS 構造の駆動電圧タイミング設計に有効な手法である。

## 文 献

- (1) N. Fujiwara, K. Asami, Y. Iriye, T. Koike, T. Tsuchiya, and G. Hashiguchi : "Development and Experimental Validation of Automatic Conversion Procedure from Mechanical to Electrical Connection for MEMS Equivalent Circuit", *IEEJ Trans.*, Vol.4, pp.352-357 (2009)
- (2) M. Mita, S. Maruyama, Y. Yi, K. Takahashi, H. Fujita, and H. Toshiyoshi : "Multi-Physics Analysis for Micro Electromechanical Systems Based on Electrical Circuit Simulator", *IEEJ Trans. on Electrical and Electronic Eng.*, Vol.6, No.2, pp.180-189 (2011)
- (3) H. Toshiyoshi, D. Kobayashi, M. Mita, G. Hashiguchi, H. Fujita, J. Endo, and Y. Wada : "Microelectromechanical Digital-to-Analog Converter of Displacement for Step Motion Actuators", *J. Microelectromechanicals.*, Vol.9, pp.218-225 (2000)