

# 2405 ベントビームアクチュエータのパルス駆動による消費エネルギー効率の向上

## Energy Efficiency of Pulse Driven Bent-Beam Electrothermal Actuators

正 ○島村 佳伸 (静岡大・工) Kabir Udeshi (ミシガン大・工)  
 Long Que (アルゴンヌ国立研究所) Jaehyun Park (ミシガン大・工)  
 Yogesh B. Gianchandani (ミシガン大・工)

Yoshinobu SHIMAMURA, Shizuoka Univesiry, 3-5-1 Johoku, Hamamatsu, Shizuoka  
 Kabir Udeshi, University of Michigan  
 Long Que, Argonne National Laboratory  
 Jaehyun Park, University of Michigan  
 Yogesh B. Gianchandani, University of Michigan

This paper investigates the dynamics of bent-beam electrothermal actuators and their use in impact actuation of bi-stable switch, and in particular the issue of energy efficiency achieved by temporal variations in electrical drive signals. A transient thermal model of an actuator beam shows that the uniformity of temperature profile is greater when activating with short electrical pulses, which results in larger achievable displacements and forces. A transient analysis by FEM reveals that using a train of pulses, referred to as a burst pulse, for activation achieves significant impact forces due to high velocities at the point of impact.

**Key words:** Bent-beam electrothermal actuator, Bi-stable switch, Pulse and burst drive, Energy efficiency

### 1. 緒言

ベントビームアクチュエータは、ジュール熱により大きな面内変位あるいは力を得ることができるが、その消費電力は大きい<sup>1-3)</sup>。双安定スイッチの駆動部にベントビームアクチュエータを適用した場合<sup>4,5)</sup> (Fig.1 参照), ベントビームアクチュエータの駆動電圧波形として、長パルスより短パルス、短パルスよりバースト波の入力の方がより効率がよいことが実験的に知られている<sup>6)</sup>が、その理由について明らかにされていない。そこで本研究では、一次近似モデルによる非定常熱伝導解析及び有限要素法によるベントビームアクチュエータの過渡応答シミュレーションを実施し、その原因を検討した。

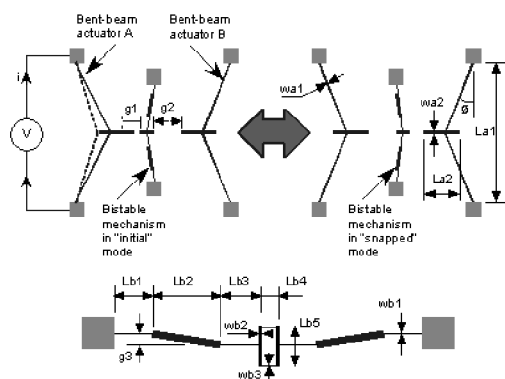


Fig.1 Schematic of the bi-stable switch with bent-beam actuators.

### 2. 1次元非定常熱伝導解析

まず、パルス波入力時のパルス長の影響を調べるために、

ベントビームを一次元はりとして見なした非定常熱伝導解析を実施した(Fig.2 参照). ここではりの熱伝導に関して、電気抵抗の温度依存性は無く、固定端において温度一定とし、はりの上面および側面からの空気への熱伝達は無視できるとした。はりの下面から基板へは空気層を通して熱が伝わるものとし、簡単のため伝熱方法は熱伝達と仮定した。その等価熱伝達係数については、大気中での定常駆動の実験結果から推定した。解析手法には差分法を用いた。解析に用いたパラメータを Table.1 に示す。

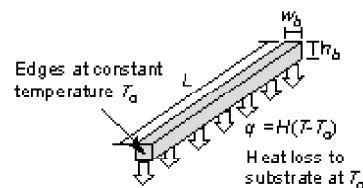


Fig.2 Model for transient-thermal analysis of bent-beam actuator

Table1 Parameters for finite difference method

Parameter	Value	Units
Thermal diffusivity	$\alpha$	$1.14 \times 10^8$ $\mu\text{m}^2/\text{s}$
Specific heat	$c_p$	$3.86 \times 10^{14}$ $\text{pJ}/\text{kg}/\text{K}$
Density	$\rho$	$8.90 \times 10^{-15}$ $\text{Kg}/\mu\text{m}^3$
Joule heat	$q$	$2.70 \times 10^6$ $\text{pW}/\mu\text{m}^3$
Heat transfer coefficient	$H$	$6.00 \times 10^4$ $\text{pW}/\mu\text{m}/\text{K}$
Width	$w_b$	10 $\mu\text{m}$
Height	$h_b$	27 $\mu\text{m}$
Length	$L$	3000 $\mu\text{m}$

はりの各位置での温度の時間的变化を Fig.3 に示す。パルス電圧入力後 5ms 程度で定常状態に達するが、このときの温度分布は放物線状である。それに対し、非定常状態時の温度分布ははり全長にわたってほぼ一定である。ベントビームアクチュエータの駆動の観点からは、はりの温度は一定であることが望ましいことから、パルス幅を短くして、高電圧で駆動することがエネルギー効率上好ましいことがわかる。また実用上は、この高電圧短パルス駆動の方が動作時間を短くできるという利点もある。

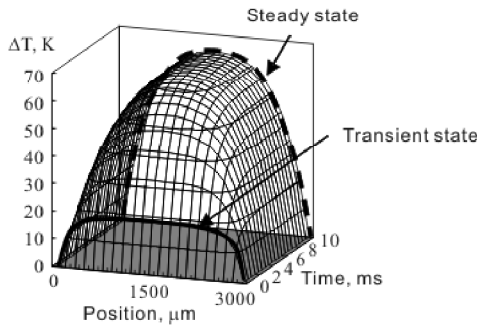


Fig.3 Temperature profile along with the length of the beam changing with time

3. 有限要素法による過渡応答解析

以上の考察からは、双安定スイッチの駆動に関して、バースト駆動がパルス駆動より効率が良いという実験結果を説明することはできない。これを説明するには、ベントビームアクチュエータ単体だけでなく、双安定スイッチのスイッチング機構をも考慮する必要がある。そこで、スイッチングに至るまでのベントビームアクチュエータの過渡応答を有限要素法を用いて解析し、その理由について検討した。解析に用いたモデルの寸法と材料定数を Table 2, 3 に示す。

Table 2 Dimension of actuators and bi-stable switch

Value(μm)		Value (μm)	
La1	3000	Lb4	25
La2	700	Lb5	130
wa1	10	wb1	3
wa2	20	wb2	5
g1	5	wb3	5
g2	60	θ(degrees)	3
g3	30		

Table 3 Material properties

Parameter	Value	Units
Young` modulus	11	GPa
Poisson`s ratio	0.33	
CTE	$16.8 \times 10^{-6}$	/K
Specific heat	386	J/kg/K
Density	89000	kgf/m <sup>3</sup>
Heat transfer coefficient	60000	W/m <sup>2</sup> /K
Electrical resistivity	$5 \times 10^8$	Ω-m

5ms の単一パルス電圧およびバースト電圧 (0.5ms, 10 サイ

クル) を印可したときのアクチュエータ先端速度を Fig.4 にしめす。双安定スイッチとの接触は、単一パルス電圧の場合は準静的であるが、バースト電圧の場合は 0.1m/s 以上の速度で衝突することがわかる。系のエネルギー平衡から、この速度は双安定スイッチをインパクト駆動するのに十分であることが分かっている。

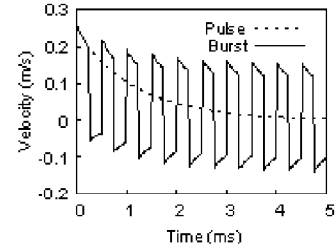


Fig.4 Impact velocity of the tip of bent-beam actuator

Fig.5 は 1~5ms の単一パルスおよびバースト電圧入力による双安定スイッチ駆動の消費エネルギーと、それに必要な電流をシミュレートした結果を示す。計算に際し、単一パルス電圧入力の場合、双安定スイッチは静的に駆動されるとし、バースト電圧入力の場合、双安定スイッチは衝突によって駆動されると仮定した。まず前節の考察どおり、パルス幅が短くなるにつれ消費エネルギーは線形に減少する。加えて、単一パルス電圧に比べ、バースト電圧の場合の消費エネルギーは 70%以下であり、いずれとも実験結果<sup>5)</sup>とよく一致している。また、バースト駆動に要する電流は単一パルス駆動に要する電流より 10%程度大きいだけですむことから、寄生抵抗によるエネルギー消費の増加は無視できる。以上より、ベントビームアクチュエータによる双安定スイッチの最適な駆動方法が、パルス幅の短いバースト電圧駆動であることを解析的に明らかにした。

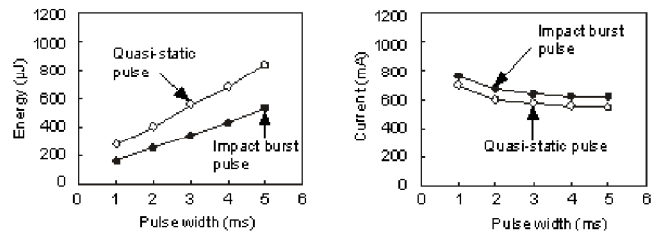


Fig.5 Consumed energy required current

結言省略

参考文献

- 1)L.Que, J.S.Park and Y.B.Gianchandani, Proc. IEEE Micro Electro Systems (MEMS), 1999, 32-35
- 2)L.Que, J.S.Park and Y.B.Gianchandani, J.Microelectomech.Syst., 10(2), 2001, 247-254.
- 3)藤田宏之, マイクロ・ナノマシン技術,工業調査会(2003) pp.210-214
- 4)L.Que, K.Udeshi, J.Park and Y.B.Gianchandani, Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2004, 797-800
- 5)L.Que, L.Otravec, A.D.Oliver and Y.B.Gianchandani, Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2001, 570-573