自励オンオフ駆動による衝撃を含む振動 (第2報)*

—消費パワーによる動作条件の評価—

小 泉 邦 雄** 伊 藤 良 直*** 佐々木 基文†
 岩 城 敏 博† 岡 部 佐 規一†† 横 山 恭 男†††

Impact Vibration with ON-OFF Self Excitation (2nd Report)
 —Estimation of Drive Condition Based on Energy Dissipation per Unity Time—

Kunio KOIZUMI, Yoshinao ITOH, Motofumi SASAKI, Toshihiro IWAKI,
 Sakiichi OKABE and Yasuo YOKOYAMA

Static force to an actuator is switched by a microcomputer in which displacement of an impactor is compared with on-off positions stored and decides on-off timing of the excitation. The switching causes self-excited impact vibration by rectangular pulsive force train. The paper presents estimation of drive condition for the steady-state motion by energy supplied dissipation per unity time, the power dissipation, for comparison of the motions having a different period. The optimum bipolar drive condition by the power estimation is available in the case that both the switch on position for the pull up force and the switch off position for the pull down force agree with impact position, in addition that the pull down force is acted in the moment of cut of the pull up force. In other words, the power is minimized by bang-bang drive. In the case of unipolar drive by the pull down force, there is not the practical condition, because the duration of force decreases to infinity and the force level increases to infinity. Hence it is reasonable that the force level is selected as high as possible and its corresponding duration of the pull down force is determined.

Key words: self-excited vibration, impact vibration, on-off drive control

1. 緒 言

衝撃力は、作用時間が短く、かつ大きなレベルのパルス力になる特徴を有する。この特徴を活かして、加工や部品の結合技術によく用いられている。特に組立技術における部品の押込み、位置決めでは、部品位置の微小な調節が容易にでき、極めて効果的である。

この衝撃を繰り返して発生させれば、1回の衝撃による仕事量がわずかであっても、短時間のうちに大きな仕事量を得ることができる。従来、このような衝撃を繰り返す振動を発生させる強制は、交流電磁石のように、商用電源の直接利用によって駆動源が簡単になることから、調和力の場合が多い。

衝撃現象は、たとえ衝撃速度が同じでも、衝撃部分の諸物性の微小な変化によって離脱速度が毎回微妙に変動するために、定常運動を乱す。このじょう乱による定常運動からのずれが時間と共に減少すれば、その運動は安定である。調和強制のように運動状態に無関係に一定周期で時間変動する通常の強制振動では、定常運動が安定持続する駆動条件は、かなり限定される。

衝撃を含む振動を工学的に応用する場合、均一で変動のない衝撃速度と繰返し周期が要求されるので、この安定運動が制限される難点を解決するために、強制が運動の乱れを減少するように時間変動する自励的なオンオフ駆動制御方式が開発され、通常の衝突では必ず安定になることが明らかにされた¹⁾。そして駆動条件が1運動周期内の消費エネルギーで評価されて、エ

ネルギーの小さくなる最適駆動条件が求められた²⁾。

このような自励的な駆動方法の例は他に見当たらないようであるが、階段を跳ね飛びながら降りる質点の運動³⁾は、調和力を作用させなくとも、階段のステップ高さ分の位置エネルギーが次のステップ位置間で供給されて、ステップと定常的に衝撃を繰り返す運動を生ずるので、類似の自励駆動と考えられる。

本報では、1自由度振動系の衝撃体とこれに対向して剛に固定した被衝撃体で構成される系の定常運動を、ある衝撃強さが得られるときの単位時間当たりに消費されるエネルギー、すなわち消費パワーで評価して、パワーが小さくなる最適駆動条件を明らかにした。

2. 記 号

m : 衝撃体質量, k : 支持ばねこわさ, c : 粘性減衰係数, $n = \sqrt{k/m}$, $\varepsilon = c/2m$, $v = \sqrt{n^2 - \varepsilon^2}$, t : 衝撃体の衝撃位置からの離脱時を原点とする時間, T : 衝撃アイドル時間, t_w : 衝撃時間, $T' = T + t_w$: 定常運動周期, t_i : 駆動力オンオフ時間, t_p : ピーク変位時間, $x_i(t)$ ($i=1\sim5$): 衝撃体の静的平衡位置を原点とした変位, $a_i = x_i(t_i)$ ($i=1\sim4$): 駆動力オンオフ位置, a : 衝撃位置, $\dot{x}_i = dx_i/dt$: 速度, $u = \dot{x}_1(0)$: 衝撃位置からの離脱速度, $v = \dot{x}_5(T)$: 衝撃速度, $\dot{a}_i = \dot{x}_i(t_i)$: 駆動力オンオフ位置の速度, F_1 : 引上げ駆動力レベル, F_2 : 引下げ駆動力レベル, p_w : 消費パワーとして、次の無次元量を定義する。

$x = F_1/F_2$: 駆動力比, $h = \varepsilon/n$: 減衰比, $\alpha = u/(-v)$: 衝撃の速度係数, $N = vT/2\pi$: 衝撃アイドル時間, $\tau = t/T$, $\tau_i = t_i/T$, $\tau_w = t_w/T$, $\tau_p = t_p/T$, $X_i(\tau) = x_i/(-v \cdot 2\pi/n)$, $A_i = a_i/(-v \cdot 2\pi/n)$, $A = a/(-v \cdot 2\pi/n)$, $A_w = X(\tau_p) - A$: 振幅, $\dot{X} = \dot{x}(\tau)/(-v)$, $F_{1,2} = F_{1,2}/\{-mv/(2\pi/n)\}$, $\tau_{12} = \tau_2 - \tau_1$: F_1 の作用時間, $\tau_{34} = \tau_4 - \tau_3$: F_2 の作用時間, $P = p_w/$

* 原稿受付 平成5年12月22日

** 正 会 員 富山大学工学部 (富山市五福3190)

*** 住友重機械工業(株) (千葉市稲毛区長沼原町)

† 富山大学工学部

†† 正 会 員 金沢大学工学部 (金沢市小立野2-40-20)

††† 正 会 員 石川工業高等専門学校 (石川県河北郡津幡町北中条)

Fig. 1 Model and its steady-state motion

$\{(mv^2/2)/(2\pi/n)\}$: 消費パワー

3. パワー特性

定常的に衝撃を繰り返す振動は、専ら発生する衝撃的な力を利用される。このため、ある質量の衝撃体が衝撃直前に所要の速度 v に達していなければならない。

図1に示すように、定常運動が生じているとき、衝撃体が a から離脱上昇して a_1 に達したら F_1 がオンして a_2 でオフされ、次に a_3 に達したら F_2 がオンし、 a_4 に下降したらオフされている。したがって衝撃体は、自動的に駆動される。このような定常状態を表すために、5つの部分線形解 x_i を $t=0, t_i, T$ の条件で接続すると、ある運動周期 T で衝撃速度 v の運動が得られるために必要な a, a_i および F_2 が決まる¹⁾。消費エネルギー評価の場合²⁾は k を変えて T を固定したが、本報では T を変えるので、前報と逆にする。ある n の系で所要の v は、一般に複数の条件 (N, A, A_i, F_2) で得られる。これらの条件を入出力エネルギーについて評価する。

衝撃で得られる仕事能力に対するエネルギー消費の評価には、衝撃で仕事をするを考慮すれば、

- (1) ある強さの衝撃を1回生ずるために必要な1周期中の消費エネルギー
- (2) 仕事をする速さを考慮に入れて、単位時間に可能な仕事量、すなわち単位時間内に生ずる衝撃の強さを累積したある値に対応するエネルギー消費量

の二つがあり、前報²⁾では、(1)の1周期について評価した。この場合は、運動周期を固定して考えている。固定とは、任意に与えられて一定ではないので、周期が変わっても1運動周期で考えるという意味である。したがってこの場合の繰返し衝撃を生ずる定常運動の比較は、異なる周期中のエネルギー消費で考えていることになり、ある強さの1衝撃を得るためにエネルギーの少なくなる条件が検討された。

本報では、衝突のような $tw=0$ の場合を考え、単位時間内に(2)のある衝撃速度の衝撃累積量を得るために必要な単位時間内のエネルギーで評価する。ここではこれをパワーと呼ぶ。パワーは仕事をする速さを考えに入れて単位時間で考えており、ある振動系の異なる周期の運動を比較して、同じ累積仕事量を得るのに平均エネルギー消費を少なくする条件が検討できる。

定常運動の1周期間に供給、すなわち消費されるエネルギー

Fig. 2 Stable region on damping ratio-coefficient of restitution plane

を考え、それを運動周期で除して単位時間のエネルギー、すなわちパワーを得る。

定常状態ゆえ、衝撃体が1周期内で消費した粘性減衰と衝撃による消費エネルギーは、供給エネルギーに等しい。衝撃による消費エネルギーは、衝突のように衝撃時間中に駆動力を作用させないならば、衝撃体が衝撃の瞬間に保持していた運動エネルギーの内、衝撃中に失った分である。衝突のように衝撃でエネルギーを失って、はねかえり係数となる衝撃の速度係数 α が1を越えない場合には、粘性減衰は小さい方がよいが、衝撃時間中に駆動力を作用させるような場合には、速度係数が1以上になり得る。そのときには運動を安定に持続させるために粘性減衰が必要になり、安定性の解析結果¹⁾を本報で用いるパラメータに変換すると、安定のために必要な減衰比の条件は

$$h > \sqrt{\frac{(\ln \alpha)^2}{(2\pi N)^2 + (\ln \alpha)^2}}, \quad (\alpha \geq 1) \quad (1)$$

および $0 \leq \alpha < 1$ の通常の衝突では、 h の値によらず無条件に安定である。図2に安定条件を示す。実線以上で安定となる。 N が大きく α が1に近いほど減衰を小さくできる。一点鎖線は $N \rightarrow 1$ の安定境界を示し、これ以下では安定にはならない。

単位時間内に衝撃体に与えられたエネルギーは、その間に駆動力がなした仕事に等しいので、パワーに関して次式が成り立つ。

$$p_w = \frac{F_1(a_2 - a_1) - F_2(a_4 - a_3)}{T} \quad (2)$$

これを無次元量で表すと次式となる。

$$P = 2F_2 \left(\frac{2\pi}{nT} \right) \cdot \{x(A_2 - A_1) - (A_4 - A_3)\} \\ = 2F_2 \{x(A_2 - A_1) - (A_4 - A_3)\} \frac{\sqrt{1-h^2}}{N} \quad (3)$$

図3のように t_3-N 平面上で P と F_2 の等高線図を考える。太線が P 、細線が F_2 の等高線である。前報では、エネルギー線は一方に流れ、ある t_3 に対して等高値が1値であるが²⁾、本報のパワー線は2値をとる。そして同図(b)のように P が極小となる渦を生ずることが特徴である。破線は $F_2 \rightarrow \infty$ となる限界を表しており、この線より N の小さい範囲でなければ $F_2 > 0$ とならず、図1のような駆動力の作用パターンにならない。細い一点鎖線は $A=0$ の条件を表しており、この線より N の大きい範囲でなければ $A \leq 0$ とならず、停止時に衝撃体

 Fig. 3 Contour maps of excitation force level and energy dissipation per unit time on τ_3 - N plane

が衝撃位置の被衝撃面に押し付けられてすぎまがあかないので、実用上都合が悪い。したがってこの2線が示す上下限を考慮して P を考察する。

F_2 の等高線は、無減衰で引下げ駆動力のみのとき、 $\tau_3=0.5$ に関して対称となる¹⁾。 $\tau_3=0.5$ で、次式

$$F_2 = 2\pi(1-\alpha) \cdot \cot\left(\frac{\pi N}{2}\right) \quad (4)$$

となり、 N について単調に変化する。 $N \rightarrow 0$ では $A \rightarrow \infty$ となり、衝撃体が被衝撃面で上方に押し上げられるので、駆動力レベルは、面への押付け力に逆らって衝撃を発生するために $F_2 \rightarrow \infty$ となる。 $N \rightarrow 1$ では共振に近づくので $F_2 \rightarrow 0$ となる。

同図 (a) は引上げ駆動力の無い $\kappa=0$ のユニポーラ駆動の場合である。定常運動のためには F_{2min} 以上の駆動力レベルが必要であり、 $\tau_3 \rightarrow 0$ では引下げ駆動力が衝撃体の上昇を妨げて所要の衝撃速度に達せさせるために、また $\tau_3 \rightarrow 1$ では引下げ駆動力の作用時間 τ_{34} が 0 に近づくために、ともに $F_2 \rightarrow \infty$ となる。

図に示す一点鎖線の Q_1 - Q_2 線は、与えられた F_2 において $A \leq 0$ の領域内でパワーが最小になる条件を示す。この線は、ある F_2 の等高線に接する P の等高線の接点における F_2 を、点 Q_1 の極小値 F_{2min} から大きくしていったときの軌跡であり、 N の変化が小さい特徴がある。 P には極小となる渦が $\tau_3 > \tau_4$ に流れてしまっていて現れず、 $\tau_3 \rightarrow \tau_4=1$ 上の点 Q_2 で P_{min} となる。ある F_2 において P が最も小さくなる条件は F_2 と P の等高線の接点を求めればよいが、この接点の軌跡である Q_1 - Q_2 線上を、 P がより小さくなる条件をたどると、 $\tau_3 \rightarrow 1$ の点 Q_2 に達する。そのとき $F_2 \rightarrow \infty$ となるので、非現実的な条件である。従ってユニポーラ駆動の場合には、発生可能な駆動力レベルより F_2 の値を決めれば、 Q_1 - Q_2 線上で、点 Q_2 よりも τ_3 の小さな条件を選ぶことになる。

$\kappa=0$, $\tau_4=1$ で減衰が小さく、 h と τ_{34} が同次の微小量のとき、 Cf_i , Ca_i , Cp_i を α と N を含む係数として

$$P \doteq \frac{1-\alpha^2}{N} + Cp_1 \cdot \tau_{34} + Cp_2 \cdot h + \frac{Cp_3 \cdot h^2}{\tau_{34}} \quad (5)$$

$$F_2 \doteq \frac{1-\alpha}{N} + Cf_1 \cdot \tau_{34} + Cf_2 \cdot h \quad (6)$$

$$A \doteq \frac{\alpha}{2\pi} \cdot \cot \pi N + Ca_1 \cdot \tau_{34} + Ca_2 \cdot h \quad (7)$$

となる。 $\tau_{34} \rightarrow 0$ 、したがって同時に $h \rightarrow 0$ となると、 P は、式 (5) より第1項が支配的となるが、 $N \rightarrow 1$ で第4項が増大傾向を持つために、 $\tau_{34} \rightarrow 0$ で $0.5 < N < 1$ の範囲に極小値 P_{min} を有する。 $\tau_{34} \rightarrow 0$ で、 $F_2 \rightarrow \infty$ およびこのとき $N=0.5$ で α にかかわらず $A=0$ になるとみなせる。ゆえに P_{min} では $A < 0$ となり、都合がよい。

同図 (b) は、引上げ駆動力を加えたバイポーラ駆動の場合である。 F_2 の等高線は、 $\kappa=0$ の場合と同様に極小値 F_{2min} を有するが、駆動力レベルを上げると両端に接する。その N ではそれ以上のレベルで定常運動にならず、さらにレベルが上がると定常運動とならない N の範囲が広がり、 τ_3 の両端で等高線が途切れる。また P の等高線にも極小値 P_{min} が現れる。したがって極小値 F_{2min} の点 Q_1 から F_2 を大きくすると、ある F_2 において P が最も小さくなる Q_1 - Q_2 線上を P が減少してゆき、極小値 P_{min} の点 Q_2 で最も小さくなる。それ以上に F_2 を大きくすることは無意味である。この Q_1 - Q_2 線上では N の値の変化が小さく、減衰が増すと、この線が下がって N の値が減少する傾向を示す。

本解析では、駆動力をオンオフする位置 A_i をパラメータとせず、0 から 1 の変域の τ_i を用いており、 τ_i で間接的に A_i を表している。この4つの τ_i の値は、 P が小さくなるように決めたい。本駆動方式の基本である $\kappa=0$ の引下げ駆動力によるユニポーラ駆動を考えて、まず τ_4 を決める。その次に性能改善のために $\kappa > 1$ として、引上げ駆動力を追加して τ_1 を決める。これらの結果の下で、 τ_2 と τ_3 を決める。

図4に、図3の Q_1 - Q_2 線に沿った P の変化を F_2 の等高線で示す。上端の一点鎖線は点 Q_1 である F_{2min} 、下端の破線は点 Q_2 である P_{min} を表す。同図 (a) は $\kappa=0$ の場合である。図3 (a) に示したように、 $\tau_3 \rightarrow \tau_4=1$ の点 Q_2 で P_{min} となるので、破線で示した P_{min} 線では $F_2 \rightarrow \infty$ となる。ある F_2 で、 τ_4 を1から小さくして衝撃時から前へずらすと、 P が増大する。このとき P_{min} も増大するので、 $\tau_4=1$ となる $A_4=A$ として引下げ駆動力オフ位置を衝撃を加える位置に設定すると、 τ_4 に対して P を必ず最小にできる。

τ_1 については、図4 (b) のように、 $\kappa=0$ の場合である $\tau_1=\tau_2$ から、 τ_1 を前にずらしてバイポーラ駆動として引上げ駆動力作用時間 τ_{12} を長くしてゆく。前報では $\tau_1 \rightarrow 0$ でエネルギーが単調に減少したが、本報の場合には、ある F_2 で P が減少するの

Fig. 4 Change of power dissipation with switching times

Fig. 5 Contour map of the minimum power dissipation and its drive force level

は、 F_2 が小さい場合に限られるが、ある P の値に対しては、 $\tau_1 \rightarrow 0$ ほど F_2 が小さくなる利点があり、実用を考慮してパワーに加えて駆動力レベルを見合いにすると、 $\tau_1 = 0$ となる $A_1 = A$ として、引上げ駆動力オン位置を離脱する位置に設定するのが有利である。図 3 (a) の点 Q_2 に対応する $\tau_1 = 0$ のときの $P_{\min}$ における F_2 の値を越える F_2 に対しては、破線で示した $P_{\min}$ 線上の交点より小さな τ_1 は取れない。 $P_{\min}$ 線では $\tau_1 \rightarrow \tau_2$ ほど P が減少するが、 F_2 が急増して、 P が最小になる $\tau_1 = \tau_2$ では $F_2 \rightarrow \infty$ となり、実用上問題がある。ゆえにこれ以後は、 $\tau_1 = 0$ 、 $\tau_4 = 1$ 、すなわち $A_1 = A$ 、 $A_4 = A$ にとる。

図 5 は、 $A \leq 0$ の領域内で、ある F_2 のときに P が極小になる条件である図 3 の Q_1 - Q_2 線についての P と F_2 の等高線図である。太実線は P 、細実線は F_2 を表し、二点鎖線は図 3 の点 Q_1 ($F_{2\min}$)、破線は点 Q_2 ($P_{\min}$)、一点鎖線は $\tau_2 = \tau_3$ および点線は $A = 0$ の条件を表す。

前報のエネルギー評価では、エネルギーの小さくなる条件付近の広い τ_3 の範囲で $A = 0$ であったが、本報では、 $P_{\min}$ の渦が $A < 0$ に生ずることが多く、 τ_2 が大きくなり、 P が減少する

Fig. 6 Comparison of waveforms in steady-state

と $A \rightarrow 0$ となって $A = 0$ の限界が出る。ある τ_2 の値のときの P は $F_{2\min}$ で最も大きくなり、 τ_2 について単調に変化して $x = 0$ である点 Q_1 よりも $\tau_2 = \tau_3$ の点 O_1 で極大となるが、 F_2 は極小になる。ここから F_2 の増大とともに P が小さくなり、二方に分かれて一方は $P_{\min}$ 線上の点 Q_2 で、他方は $A = 0$ 線で切られるために点 O_p で極小になる。この 2 点の内、点 Q_2 の方が P は小さいが、前述のごとく、 $\tau_3 \rightarrow \tau_4$ のゆえに $\tau_{34} \rightarrow 0$ かつ $F_2 \rightarrow \infty$ となる難点がある。したがって点 O_p を最適駆動条件とする。このときの P の値 P_{opt} は点 Q_2 よりも約 8% 大きい程度である。前述のように、ユニポーラ駆動では、 P が多少小さくなくても駆動源を考慮して妥当な駆動力レベルにおける Q_1 - Q_2 線上の駆動条件を選ぶのが現実的である。

バイポーラ駆動では、 $P_{\min}$ ではない図 5 の点 O_p の最適駆動条件を用いるのがよく、このとき前報と同じく $\tau_2 = \tau_3$ 、 $A = 0$ となる。これはエネルギー、パワーいずれの評価でも、基本的には同じ性質の条件となるので、実用に際して矛盾を生ぜず、好都合である。

図 6 に、図 5 の点 Q_1 と Q_2 、 $\tau_2 = 0.2$ のこれに対応する点 Q'_1 と Q'_2 および点 O_1 と O_p における波形を示す。時間軸に対する絶対的な比較には τ に N を乗ずればよく、これらすべての衝撃速度は同じである。しかし τ に N を乗じて P の小さくなる点 Q_2 の衝撃速度が一見小さいように感じられるが、ユニポーラ駆動のために衝撃直前まで自由振動していて衝撃直前の速度は所定の衝撃速度の 1/3 程度に小さく、瞬間的に無限大の引下げ駆動力を作用させて所定の衝撃速度を得ている。最適駆動条件の点 O_p では、前報よりも $\tau_2 (= \tau_3)$ がより 1 に近づき、 F_2 も大きくなる。このため、引上げ駆動力 F_1 を長く作用させて衝撃体を引き上げ、ばねに蓄えた弾性エネルギーの放出によって速度に付加して、引下げ駆動力 F_2 で衝撃前に加速する傾向が強くなる。

図 7 は x を変えた場合の P_{opt} およびそのときの駆動力レベルと振幅を示す。 $x \rightarrow 0$ で $P_{\min}$ が小さくなるが、 x を大きくし

Fig. 7 Change with the power and its corresponding force levels and amplitude with force level ratio in the optimum condition

でも P と A_w の増大は10%程度に過ぎない。そして F_1 はほとんど変わらず F_2 が小さくなる。パワーを重視するならば、 $\kappa \rightarrow 0$ が有利であるが、 $F_2 \rightarrow \infty$ ゆえ、駆動源の出力範囲を考慮して可能な限り小さな κ を選ぶとよいのは、前報と同じ傾向である。

4. 実験

動電型加振機をアクチュエータとした基礎実験装置²⁾を用いて実験を行った。 a_i, a および F_i は、予備的な駆動実験で求めた α を用いた理論値より定める。差動トランスで検出した衝撃体の変位をマイクロコンピュータで認識し、設定位置 a_i に変位してきた瞬間を判断して駆動力をオンオフする。

図8は、停止から1回のバイポーラ始動力の作用で定常運動に入っている運動例である。定常運動となる衝撃位置で所定の衝撃速度が得られるような始動力レベルを与えれば、最初の衝撃から定常状態に入ることができる。このような過渡特性の良さが、外乱の影響の吸収による良好な運動の安定性ととも、この駆動方式の特長であり、実用上好都合である。図9には、図3の P_{min} のときの N から決まる周期 T となる条件での P_{min} 、 F_2 および A_w の値の変化を κ について示す。 κ が大きくなるほど、わずかに T は短くなる。 F_2 は、所要の v と T で決まる設定値であるが、得られた運動の v と T のずれより、 F_2 に理論値との差が出る。

このほかの数多くの実験結果も、ここに示した実験例と同程度に理論解析と一致した。

5. 結 言

設定位置で静的力をオンオフする自励的な駆動で生ずる衝撃を含む振動を、パワーで評価した結果、

- (1) 極小条件は、ユニポーラ駆動、バイポーラ駆動とも、衝撃位置が静止時の衝撃体先端から下がった位置の範囲に存在する。

が消費エネルギー評価と大きく異なる点であり、最小条件は次の3点が消費エネルギー最小の条件と同じになり、評価によって条件が相反しない利点がある。

- (2) 引下げ駆動力オフ時間を衝撃開始時間に、引上げ駆動

Fig. 8 Inducement to steady-state impact vibrating motions (in experiment)

Fig. 9 Change of the minimum power and its corresponding force level with force level ratio (in experiment)

力オン時間を離脱時に一致させる。

- (3) 引下げ駆動力のみの駆動ではインパルス駆動に近づけ、バイポーラ駆動では、引上げ駆動力オフの瞬間に引下げ駆動力をオンする。
- (4) いずれの駆動も衝撃位置を静止時の衝撃体先端位置に一致させる。

最後に、近似式等の理論展開の方針および考察を始めとして、本研究に対して終始適切な指導を賜りました東京大学名誉教授神保泰雄先生に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 小泉邦雄, 横山恭男: 自励間欠駆動制御振動パンチプレス (第1報) ——基礎解析と駆動力の考察, 精密工学会誌, 56, 8 (1990) 1417.
- 2) 小泉邦雄, 佐々木基文, 岩城敏博, 岡部佐規一, 横山恭男: 自励オンオフ駆動による衝撃を含む振動 (第1報) ——エネルギーによる動作条件の評価, 精密工学会誌, 58, 6 (1992) 1011.
- 3) A. E. Kobrinskij: Die Dynamik der Maschinen und Systeme mit Vibroschlagwirkung, VDI-Ber., 127, (1969) 99.