日本機械学会論文集(C 編)
66 巻 641 号(2000-1)

論文 No. 99-0408

振動と回転の運動変換機構*
(第1報，試作した振動回転子の運動特性)

中野　健[*1]，佐藤勇一[*1]
後藤孔明[*2]，二瓶泰治[*3]

A Motion Transformation Mechanism from Oscillation to Rotation
(1st Report, Characteristics of an Oscillatable-Rotor)

Ken NAKANO[*4], Yuichi SATO,
Komei GOTO and Yasuharu NIHEI

[*4] *Saitama University, Dept. of Mechanical Engineering,*
255 Shimo-ookubo, Urawa Saitama, 338-8570 Japan

This paper describes experimental and analytical investigation on an asymmetric top with three legs (called "oscillatable-rotor") which shows a preference for rotation in one direction. Motion starting with a given initial zenith angle has been experimentally observed to evaluate the characteristics of the oscillatable-rotor. It has been clarified that the oscillatable-rotor transforms oscillation induced by initial potential energy to counterclockwise rotation. Analytical results based on a rigid body model of the oscillatable-rotor agree well with experimental results not only qualitatively but also quantitatively. The mechanism of motion transformation is also discussed.

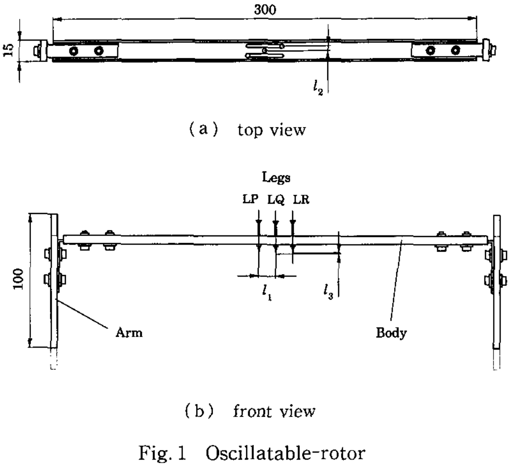
***Key Words*:** Mechanism, Rigid Body, Asymmetric Top, Vibration, Oscillation, Rotation, Unidirectional Spin, Energy Transformation, Euler's Equation

1. 緒　　言

振動現象はいたるところに存在する．自動車や工作機械のような人工物の振動はもちろん，地震や海面波などの自然現象にも多く見られる．一般に力学的な振動現象は敬遠されることが多いが，もしもそれが回転運動に変換されれば，電気エネルギーとして回収するなど，有効な利用方法があると考えられる．

ところで，「セルトの石」として知られる物体がある(1)~(3)．代表的な形状は，回転楕円体を長手方向に切断したような船底形で，物体の慣性主軸が曲面の対称軸とわずかにずれたものである．例えばあるものは，曲面側を下にして床面に置き，上から見て時計まわりに回転させると，すぐに短軸まわりの激しい振動が発生して回転速度が落ちた後，やがてその振動は収まり，物体は反時計まわりに回転を始める．その物体をはじめから反時計まわりに回転させた場合には反転は生じないので，セルトの石には振動エネルギーを一方向の回転エネルギーに変換する力学的な機構が潜んでいるといえる．

本研究では，このような運動変換機構の解明と利用を目的とし，セルトの石と同様の特性を有する3本脚の非対称こま(以後「振動回転子」と呼ぶ)を試作して，その運動を実験的および解析的に検討した．その結果，振動回転子の運動特性が明らかになったので，以下に報告する．



(a) top view

(b) front view

Fig. 1 Oscillatable-rotor

* 原稿受付　1999年3月31日．
[*1] 正員，埼玉大学工学部(〒338-8570 浦和市下大久保255)．
[*2] 学生員，埼玉大学学生．
[*3] 埼玉大学大学院．
E-mail: ken@mech.saitama-u.ac.jp

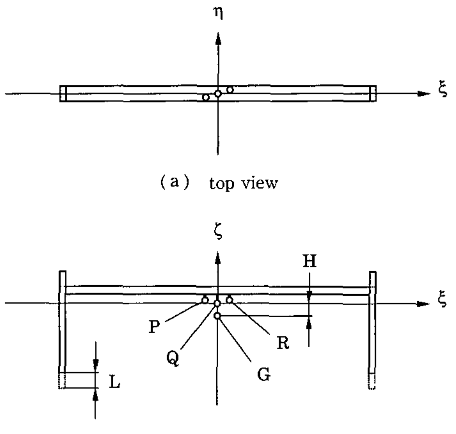


Fig. 2 Coordinate system

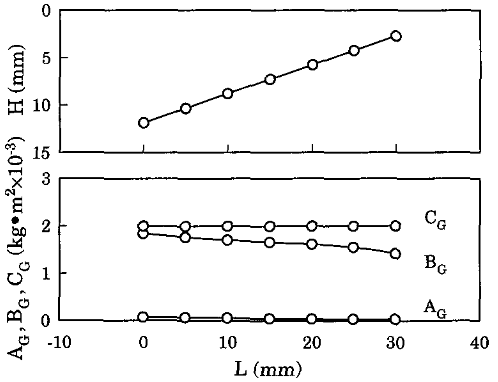


Fig. 3 Experimental results of H, A_G, B_G and C_G versus L

2. 振動回転子

2・1 構造 試作した振動回転子の概略図を図1に示す．振動回転子は，長さ 300 mm の細長い胴部，胴部の中央に取付けられた先端のとがった3本の脚，および胴部の両端に取付けられた長さ 100 mm の2本の腕からなる．胴部および腕はアルミニウム製，脚は鉄鋼製で，総質量は 104.2 g である．

上から見ると，3本の脚 LP, LQ, LR は等間隔で直線上に並んでおり，胴部の中心に LQ が位置する．ここで，図1中 l_1=10.0 mm, l_2=4.5 mm であり，上から見て3本の脚は，胴部の長手方向に対して反時計方向に傾いて並んでいる．また，中央の脚 LQ は，外側2本の脚 LP, LR よりも l_3=0.3 mm 長い．以後，脚 LP, LQ, LR の先端点を，点 P, Q, R と呼ぶ．

腕の質量は各 16.1 g で，取付ボルトにより上下に移動させ，取付位置を変えることができる．ここで，図2に示すように，最下端取付位置を基準とした腕の取付位置を，鉛直上向きを正として L とする．

L を変えることで，振動回転子の重心位置および慣性モーメントが変化する．その測定結果を図3に示す．ただし，点 Q から重心 G までの距離を，下向きを正として H とした．また，振動回転子に固定した座標系 $\xi\eta\zeta$ として，胴部長手方向に ξ 軸，腕の長手方向上向きに ζ 軸，それらと垂直に η 軸をとるとき，重心 G を通り，ξ, η, ζ 軸に平行な軸まわりの慣性モーメントをそれぞれ A_G, B_G, C_G とした．

図3よりわかるように，L が増加すると H は減少し，重心位置は上に移動する．ただし，$L \leq 30$ mm のとき $H>0$ であり，重心 G はつねに点 Q の下側にある．慣性モーメントは，η 軸まわりの B_G と ζ 軸まわりの C_G が同程度で，ξ 軸まわりの A_G は，それらの数%程度と小さい．また，L の変化に対して C_G は不変で，A_G および B_G は，L の増加に伴い減少する．

2・2 基本的な運動特性 鉄鋼製の円柱台の水平な上面に振動回転子の脚 LQ を乗せると，その対称な構造により，胴部を水平に保って安定に平衡する．そこに初期角速度を与え，上から見て反時計まわりに回転させた場合には，脚と台との摩擦や空気抵抗などによりエネルギーが散逸して停止するまで，回転方向を変えることはない．一方，時計まわりに回転させた場合には，外側の脚 LP または LR と台との接触により，主として ξ 軸まわりの振動が発生して，回転速度が減少し，やがてその振動は収まるとともに，与えられた回転方向とは逆の反時計まわりに回転する．

3. 実験

振動回転子の運動特性を定量的に評価するために，以下の実験を行った．振動回転子に初期角速度を精度よく与えることは難しいので，初期角速度は零とし，平衡位置から ξ 軸まわりに振動回転子を傾けて，図4に示すような初期天頂角 θ_0 を与えた．ただし，図4中の z 軸は空間固定で，鉛直上向きを正としてある．はじめ台上面に点 P が接するように支持し，時刻零で支持を取去った後の振動回転子の運動を観察した．

ここで，図4に示すように，台上面に空間固定座標軸 x, y をとり，時刻零における ξ 軸(ξ_0)の xy 平面の正射影と，時刻 t における ξ 軸(ξ)の xy 平面への正射影とのなす角を回転角 β とする．ただし β は，上から見て反時計まわりを正とする．実験では，L および θ_0 をパラメータとして，β に及ぼす影響を調べた．β および接地している脚(以後「軸脚」と呼ぶ)の切り替わりの測定には，CCD カメラを用いて振動回

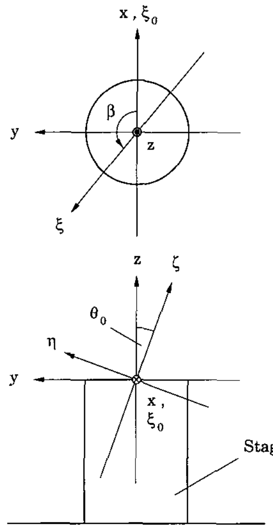


Fig. 4　Initial zenith angle θ_0 and rotation angle β

転子の運動を撮影し，得られた画像を解析した．

4. 解　　析

本解析では，振動回転子を剛体とみなし，軸脚先端点と台上面との接触点は運動の固定点として，すべりや跳躍はないものとした．また，摩擦および空気抵抗による減衰は無視した．このとき，剛体固定座標系 $\xi\eta\zeta$ の原点を軸脚の先端点にとると，振動回転子の運動方程式は次のように書ける．

$$\delta \boldsymbol{L}/\delta t+\boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{L}=\boldsymbol{N} \qquad (1)$$

ここで，$\boldsymbol{L}$ は軸脚先端点まわりの振動回転子の角運動量，$\boldsymbol{\omega}$ は空間固定座標系 xyz に対する剛体固定座標系 $\xi\eta\zeta$ の角速度を表す．式(1)の左辺第1項は，剛体固定座標系における $\boldsymbol{L}$ の時間微分を意味する．右辺の $\boldsymbol{N}$ は軸脚先端点まわりの重力によるトルクを表し，軸脚がそれぞれの場合について，次のように表される．

（i）軸脚が LP の場合

$$\boldsymbol{N}=-Mg\boldsymbol{r}_{PG}\times\boldsymbol{e}_z \qquad (2)$$

（ii）軸脚が LQ の場合

$$\boldsymbol{N}=-Mg\boldsymbol{r}_{QG}\times\boldsymbol{e}_z \qquad (3)$$

（iii）軸脚が LR の場合

$$\boldsymbol{N}=-Mg\boldsymbol{r}_{RG}\times\boldsymbol{e}_z \qquad (4)$$

ここで，M は振動回転子の質量，g は重力加速度，$\boldsymbol{e}_z$ は z 軸正方向にとった単位ベクトルを表す．

また，角運動量 $\boldsymbol{L}$ は慣性テンソル $\boldsymbol{I}$ を用いて

$$\boldsymbol{L}=\boldsymbol{I}\boldsymbol{\omega} \qquad (5)$$

と書ける．ただし，剛体固定座標系における $\boldsymbol{I}$ の成分は，軸脚がそれぞれの場合について次のようになる．

（i）軸脚が LP の場合（$\boldsymbol{I}=\boldsymbol{I}_P$）

$$\begin{aligned}
I_{\xi\xi}&=A_G+M\{l_2^2+(l_3+H)^2\}\\
I_{\eta\eta}&=B_G+M\{l_1^2+(l_3+H)^2\}\\
I_{\zeta\zeta}&=C_G+M(l_1^2+l_2^2)\\
I_{\eta\zeta}&=I_{\zeta\eta}=Ml_2(l_3+H)\\
I_{\zeta\xi}&=I_{\xi\zeta}=Ml_1(l_3+H)\\
I_{\xi\eta}&=I_{\eta\xi}=-Ml_1l_2
\end{aligned} \qquad (6)$$

（ii）軸脚が LQ の場合（$\boldsymbol{I}=\boldsymbol{I}_Q$）

$$\begin{aligned}
&I_{\xi\xi}=A_G+MH^2,\ I_{\eta\eta}=B_G+MH^2,\ I_{\zeta\zeta}=C_G\\
&I_{\eta\zeta}=I_{\zeta\eta}=0,\ I_{\zeta\xi}=I_{\xi\zeta}=0,\ I_{\xi\eta}=I_{\eta\xi}=0
\end{aligned} \qquad (7)$$

（iii）軸脚が LR の場合（$\boldsymbol{I}=\boldsymbol{I}_R$）

$$\begin{aligned}
I_{\xi\xi}&=A_G+M\{l_2^2+(l_3+H)^2\}\\
I_{\eta\eta}&=B_G+M\{l_1^2+(l_3+H)^2\}\\
I_{\zeta\zeta}&=C_G+M(l_1^2+l_2^2)\\
I_{\eta\zeta}&=I_{\zeta\eta}=-Ml_2(l_3+H)\\
I_{\zeta\xi}&=I_{\xi\zeta}=-Ml_1(l_3+H)\\
I_{\xi\eta}&=I_{\eta\xi}=-Ml_1l_2
\end{aligned} \qquad (8)$$

ここで，軸脚が LQ の場合の慣性乗積は，十分小さいとして無視した．

軸脚の切り替わりは，軸脚以外の2本の脚のうち，どちらかの先端点の z 座標が零になったとき，瞬間的に起こるとした．例えば，はじめ軸脚が LP のとき，振動回転子は点 P を固定点として運動を続け，ある時刻に点 Q の z 座標が零になると，その瞬間に点 P と台上面との拘束は解放されて，その後の運動の固定点は点 Q になるとした．

また，軸脚が切り替わるとき，新しい軸脚は台上面との衝突による撃力を受ける．例えば，軸脚が LP から LQ に替わるとき，点 Q には台上面から上向きの撃力が作用する．ただし，この撃力は衝突の前後で点 Q まわりの角運動量に影響を及ぼさないことから，軸脚の切り替わりは点 Q まわりの角運動量を保存するように起こるとした．このことをそれぞれの場合について定式化すると，次のように表される．

（i）軸脚が LP から LQ に替わる場合

$$\boldsymbol{I}_Q\boldsymbol{\omega}'=\boldsymbol{I}_G\boldsymbol{\omega}+M\boldsymbol{r}_{QG}\times(\boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{r}_{PG}) \qquad (9)$$

（ii）軸脚が LQ から LR に替わる場合

$$\boldsymbol{I}_R\boldsymbol{\omega}'=\boldsymbol{I}_G\boldsymbol{\omega}+M\boldsymbol{r}_{RG}\times(\boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{r}_{QG}) \qquad (10)$$

（iii）軸脚が LR から LQ に替わる場合

$$\boldsymbol{I}_Q\boldsymbol{\omega}'=\boldsymbol{I}_G\boldsymbol{\omega}+M\boldsymbol{r}_{QG}\times(\boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{r}_{RG}) \qquad (11)$$

（iv）軸脚が LQ から LP に替わる場合

$$\boldsymbol{I}_P\boldsymbol{\omega}'=\boldsymbol{I}_G\boldsymbol{\omega}+M\boldsymbol{r}_{PG}\times(\boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{r}_{QG}) \qquad (12)$$

ここで，衝突直前の角速度を $\boldsymbol{\omega}$，衝突直後の角速度を $\boldsymbol{\omega}'$ とした．また，$\boldsymbol{I}_G$ は重心 G まわりの慣性テンソルを表し，その成分は次のようになる．

$$I_{\xi\xi}=A_G,\ I_{\eta\eta}=B_G,\ I_{\zeta\zeta}=C_G \qquad \cdots\cdots(13)$$
$$I_{\eta\zeta}=I_{\zeta\eta}=0,\ I_{\zeta\xi}=I_{\xi\zeta}=0,\ I_{\xi\eta}=I_{\eta\xi}=0$$

本解析では，空間固定座標系に対する剛体固定座標系の向きを，オイラー角 θ, φ, ϕ を用いて表した．これら3個の変数について式(1)を数値積分し，時刻歴応答を求めた．ただし，オイラー角と角速度の関係は

$$\omega_\xi=(d\theta/dt)\sin\phi-(d\varphi/dt)\sin\theta\cos\phi$$
$$\omega_\eta=(d\theta/dt)\cos\phi+(d\varphi/dt)\sin\theta\sin\phi \qquad \cdots(14)$$
$$\omega_\zeta=(d\varphi/dt)\cos\theta+(d\phi/dt)$$

である．計算では，質量および慣性モーメント，脚の先端点および重心の位置に関する値は，実験系の値を用いた．

5. 結　　果

5·1 回転角　振動回転子が運動を開始してから5秒までの β の変化について，実験結果と計算結果をまとめたものを図5に示す．ただし，$L=0$ mm とし，θ_0 を 5°～20° で変化させた．

丸印で示した実験結果を見ると，運動開始後1秒では，β に顕著な変化は現れないが，その後 β は時間とともに増加する．これは，θ_0 を与えることによって系に蓄えられた初期位置エネルギーが，上から見て反時計まわりの回転エネルギーに変換されたことを示している．また，同じ時刻での値を比較すると，θ_0 が大きいほど，β は大きい関係にある．

実線で示した同図の計算結果は，実験結果とよく一致している．両者の間の定量的な差は，計算において，摩擦および空気抵抗による減衰を無視したこと，軸脚先端点と台上面との接触点を運動の固定点としたことなどによると考えられる．

図5における β の変化率を見るために，時間に関する β の1階微分 $d\beta/dt$ を示したものが図6である．

丸印で示した実験結果を見ると，$d\beta/dt$ は時間とともに増加し，運動開始後約3秒で一定の値に達している．すなわち，回転エネルギーへの変換は，約3秒でほぼ完了したことになる．また，θ_0 が大きいほど，$d\beta/dt$ は高い値に達している．

実線で示した同図の計算結果は，軸脚の切り替わり時に発生する撃力の作用により，鋸歯状になっている．しかし全体としては，$d\beta/dt$ は時間とともに増加し，約3秒後には，θ_0 ごとに決まる一定値に達している．時間変化の細部については実験結果と計算結果を比較することはできないが，全体として見れば，両者にはよい一致が見られる．

いくつかの L と θ_0 の組合せについて，一定の回転速度に達したとみなせる5秒後の $d\beta/dt$ をまとめたものを図7に示す．

図7より，L が一定ならば θ_0 が大きいほど，θ_0 が一定ならば L が小さいほど，$d\beta/dt$ は大きいことがわかる．L が小さいほど H が大きいことから，これらの傾向は初期位置エネルギーの大きさと対応しており，初期位置エネルギーが大きいほど $d\beta/dt$ が大きく，最終的に得られる回転エネルギーが大きい関係にある．

丸印で示した実験結果と実線で示した計算結果との間には，定性的なよい一致が見られる．また，初期位置エネルギーが小さい $\theta_0=5°$を除けば，両者は定量的

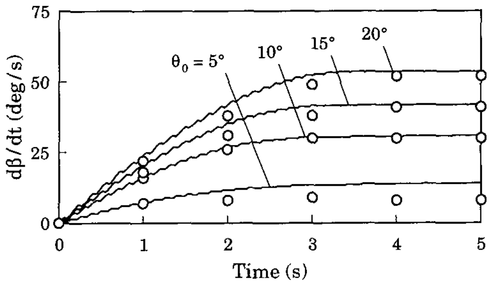


Fig. 6　Rotation velocity $d\beta/dt$ versus time ($L=0$ mm)；○：experimental results，—：calculated results

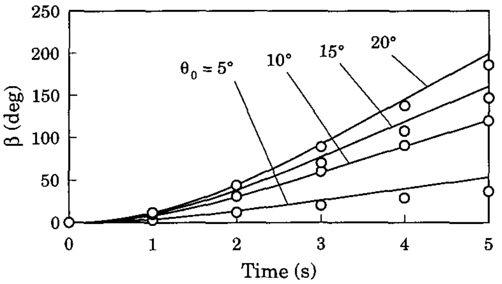


Fig. 5　Rotation angle β versus time ($L=0$ mm)；○：experimental results，—：calculated results

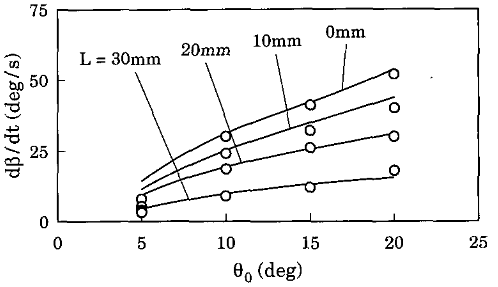


Fig. 7　Rotation velocity $d\beta/dt$ at $t=5$ s；○：experimental results，—：calculated results

にもよく一致している．

5・2 エネルギー変換率　系に与えられる初期位置エネルギーを E_0，最終的に得られる回転エネルギーを E_∞ とするとき，

$$E_0 = Mg(H + l_2 \sin \theta_0 - (l_3 + H)\cos \theta_0) \cdots\cdots (15)$$

$$E_\infty = C_G (d\beta/dt)_\infty^2 / 2 \cdots\cdots (16)$$

によって両者を評価し，エネルギー変換率 E_∞/E_0 を計算した．その結果を図8に示す．ただし，式(16)中の $(d\beta/dt)_\infty$ としては，$d\beta/dt$ が一定値をとる運動開始後5秒での値を用いた．

丸印で示した実験結果と実線で示した計算結果とを比較すると，$\theta_0=5°$ を除けば，両者の間にはよい一致が見られる．$\theta_0=5°$ における両者の差は，図7におけるわずかな差が，式(15)，(16)を用いてエネルギーの比に変換する際，拡大して現れたものである．

$\theta_0=5°$ を除いて考えると，エネルギー変換率に及ぼす θ_0 の影響は小さく，L が一定ならば，エネルギー変換率はほぼ一定値をとることがわかる．一方，エネルギー変換率に及ぼす L の影響は大きく，$L=0$ mm のとき約0.42のエネルギー変換率は，L の増加とともに減少し，$L=30$ mm のとき約0.05となった．

解析では，摩擦や空気抵抗によるエネルギー損失を考慮していないにもかかわらず，図8の計算値は1とはなっていない．これは，軸脚先端点と台上面との接触点を運動の固定点とし，角運動量を保存するように軸脚の切り替わりが生じるとするとき，エネルギーを同時に保存することができないためである．振動回転子の運動におけるエネルギー損失は，主に軸脚と台との衝突によるものと考えられる．

5・3 軸脚の切り替わり　$L=0$ mm，$\theta_0=20°$ の場合について，軸脚の接地時間をまとめたものが図9である．ここで，軸脚が LP-LQ-LR-LQ-LP-LQ-……と順次切り替わるとき，LP-LQ-LR-LQ と連続する4本の軸脚の接地時間を合わせて1サイクルとし，棒グラフで下から上に積み上げて表示した．またここでは，LQ を軸脚として0.4秒以上運動した時点でエネルギー変換はほぼ完了したものとみなし，表示を打ち切ってある．

実験結果を示す図9(a)に着目すると，サイクル数が増すに従って，両端の脚 LP，LR の接地時間は減少し，中央の脚 LQ の接地時間は増加している．これは，初期位置エネルギーによって発生した振動が回転運動に変換されることにより，その振幅が減少する過程（後に計算結果を図13(a)に示す）を表している．また，1サイクルに要する時間に着目すると，10サイクル目まではサイクル数の増加とともに減少傾向にあるが，それ以後は LQ の接地時間の増加にともない，急激に増加している．

図9(a)と同条件における計算結果を同様にまとめたものが図9(b)である．図9に表示されたサイクル数は，実験結果よりも計算結果のほうが1サイクル分多いという違いはあるが，計算結果は上記のような実験結果の傾向をよく表している．

6. 考　　察

以上に示した実験結果と計算結果との比較から，本解析モデルは，振動回転子の運動の本質をとらえていると考えられる．そこで以下では，解析を中心に，振

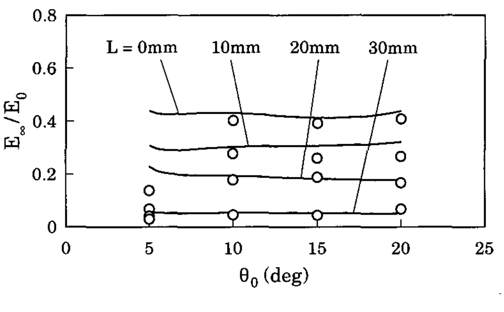
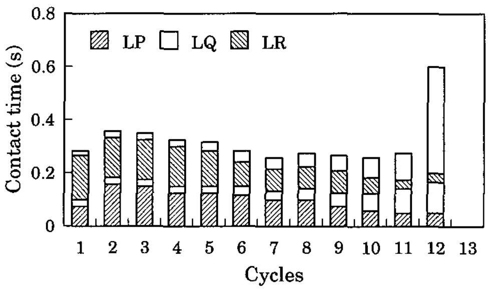
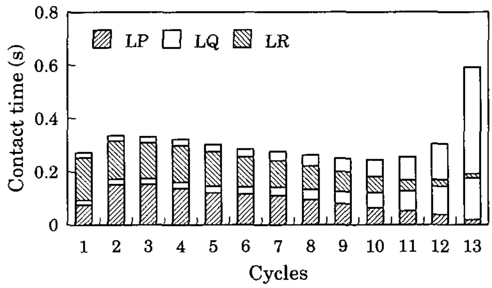


Fig. 8　Energy transformation efficiency ; $L=0$ mm, $\theta_0=20°$, ○ : experimental results, — : calculated results



(a)　Experimental results



(b)　Calculated results

Fig. 9　Exchange of standing legs ($L=0$ mm, $\theta_0=20°$)

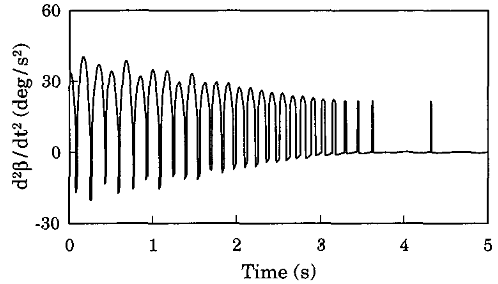


Fig. 10 Angular acceleration $d^2\beta/dt^2$ versus time ($L=$ 0 mm, $\theta_0=20°$, calculated results)

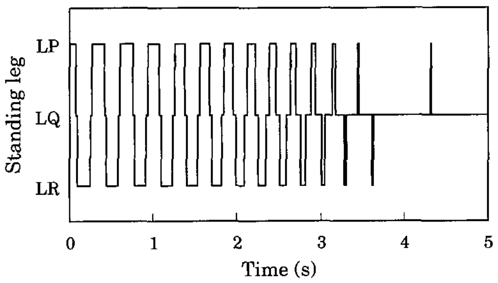


Fig. 11 Standing leg versus time ($L=0$ mm, $\theta_0=20°$, calculated results)

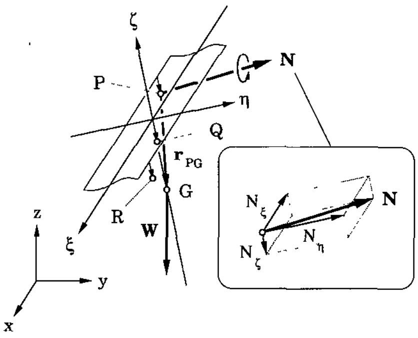
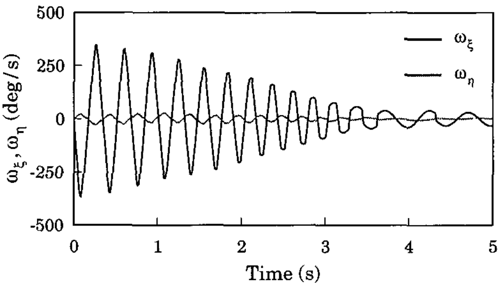
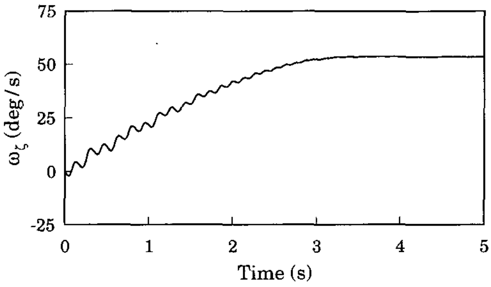


Fig. 12 Torque by the gravity (standing leg : *LP*)



(a) ω_ξ and ω_η versus time



(b) ω_ζ versus time

Fig. 13 Angular velocity versus time ($L=0$ mm, $\theta_0=20°$, calculated results)

動回転子の運動変換のメカニズムを考察する．

まず，運動開始から回転角 β を増加させる作用がどのように働くかを調べるために，$L=0$ mm，$\theta_0=20°$の場合について，時間に関する β の2階微分 $d^2\beta/dt^2$ を計算した．その結果を図10に示す．また，同条件下における軸脚の切り替わりを図11に示す．

両図を比較することにより，軸脚が外側の脚 LP または LR のとき，おおむね $d^2\beta/dt^2>0$ であり，β の正方向，すなわち上から見て反時計まわりに振動回転子が加速されることがわかる．また，振動回転子が静止状態にある時刻零においても $d^2\beta/dt^2>0$ であることから，この角加速度の発生原因は，重力によるトルクにあると考えられる．

時刻零での軸脚先端点まわりの重力によるトルクの模式図を図12に示す．ここで，軸脚 LP の先端点 P が台上面と接しており，重力 $\boldsymbol{W}$ は重心 G から鉛直下向きに作用している．重力によるトルク $\boldsymbol{N}$ は，位置ベクトル $\boldsymbol{r}_{PG}$ と重力 $\boldsymbol{W}$ とのベクトル積で与えられることから，水平面内に存在する．

重力によるトルク N の3成分のうち，$N_\xi<0$ は ξ 軸まわりの角変位を減少させるように働くが，β の定義から明らかなように，ξ 軸まわり単独に回転を与えても，β は変化しない．β に影響を及ぼすのは η 軸または ζ 軸まわりの回転であり，図12のように η 軸，ζ 軸が xy 平面に対して上向きの場合には，これらの軸まわりの正回転は β を増加させる．よって，$N_\eta>0$ は β を増加させる作用，$N_\zeta<0$ は減少させる作用となり競合する．しかし，絶対値は N_η のほうが大きく，両軸まわりの慣性モーメント B_G，C_G は同程度であることから，結果的に η 軸まわりの作用が勝り，図10の時刻零における正の角加速度が現れたと考えられる．

しかし，振動回転子が最終的に得る回転運動は ζ 軸まわりの正回転であり，ξ 軸，η 軸まわりの運動は振動的となる．各軸まわりの運動を調べるために，図10と同条件における角速度 $\boldsymbol{\omega}$ を計算した結果が図13である．

図13(a)に示す ω_ξ, ω_η の変化より，ξ 軸，η 軸まわりの運動は振動的で，振幅はいずれも時間とともに減少することがわかる．これらの振動は，軸脚の切り替わりに基づくもので，軸脚が LP と LR の場合とで，N_ξ と N_η の符号が反転することによる．また，ξ 軸，η 軸まわりの二つの振動の振動数は一致しており，位相は逆の関係にあることがわかる．振幅については慣性モーメントの小さい ξ 軸まわりの振動の方が，η 軸まわりの振動の10倍以上と大きい．

一方，図13(b)に示す ω_ζ は，はじめ振動しながら増加し，次第に振動的挙動が減少して，約3秒後に一定値に漸近している．これを図13(a)と比較すると，ω_ξ および ω_η の振幅が減少するとき ω_ζ は増加していることから，このとき ξ 軸，η 軸まわりの振動エネルギーが ζ 軸まわりの回転エネルギーに変換されていることがわかる．また，ω_ζ が約3秒後に達する値は，図6に示した同条件における $d\beta/dt$ の値と一致しており，これが最終的に得られる回転運動である．

運動開始後約3秒間になされている振動から回転への運動変換は，次のように考えることができる．

剛体固定座標系 $\xi\eta\zeta$ の原点を重心 G にとり，N_ζ は微小として無視すると，運動方程式(1)より，$d\omega_\zeta/dt$ に関する次の方程式を得る．

$$C_G(d\omega_\zeta/dt)=(A_G-B_G)\omega_\xi\omega_\eta \quad\cdots\cdots(17)$$

ここで，$A_G<B_G$, $C_G>0$ の関係より，$\omega_\xi\omega_\eta<0$ のとき $d\omega_\zeta/dt>0$ となり，ω_ζ を増加させる正の角加速度が発生することになる．

先に図13(a)で示したように，運動開始後約3秒までは，ω_ξ と ω_η は振動的となる．また，両振動の振動数は等しく，位相は逆になることから，$\omega_\xi\omega_\eta<0$ の関係を満たす．よって，式(17)に従って $d\omega_\zeta/dt>0$ となり，振動回転子は ζ 軸まわりの正回転を得る．

以上の考察より，振動回転子の運動は，次のようにまとめることができる．まず，重力によるトルクの成分 N_ξ, N_η の作用によって，ξ 軸，η 軸まわりに振動が発生する．N_η には，軸脚が外側の脚 LP, LR のとき，回転角 β を直接増加させる効果もある．さらに，発生した二つの振動の振動数が一致し，位相が逆になることで，ζ 軸まわりに正の角加速度が発生する．この角加速度により，ξ 軸，η 軸まわりの振動が ζ 軸まわりの正回転に変換され，振動回転子は ζ 軸まわりに回転エネルギーを蓄える．

7. 結　　言

試作した振動回転子を対象として，実験的および解析的な検討を行った．その結果，試作した振動回転子は，初期位置エネルギーより発生する振動を，一方向の回転運動に変換する特性をもつことが明らかとなった．また，その運動変換は，二つの慣性主軸まわりに生じる振動の振動数が一致し，位相が逆となることで，残りの慣性主軸まわりに角加速度を発生させることによりなされることを示した．

このような機構を用いれば，通常は散逸させている振動エネルギーを回転エネルギーに変換して，そのいくらかを回収することが可能になると考えられる．次報では，振動回転子を用いたエネルギー回収について検討する．

文　　献

(1) Walker, G. T., *Q. J. Pure Appl. Math.*, 28(1896), 175.
(2) Walker, J., *Scientific American*, 241(1979), 144.
(3) Bondi, H., *Proc. Roy. Soc. Lond.*, A 405(1986), 265.