

# 滑走艇の斜航時横ポーポイジングに関する基礎的研究 (第2報)

## - 横ポーポイジングのシミュレーション - \*1

正会員片山 徹 \*2, 学生会員手嶋 晃 \*2, 正会員池田 良穂 \*2

### A Study on Transverse Porpoising of a Planing Craft in Drifting Motion (2nd Report) - Simulation Method of Transverse Porpoising -

By Toru KATAYAMA (*Member*), Akira TESHIMA (*Student Member*)  
and Yoshiho IKEDA (*Member*)

Following the first report in which the characteristics of transverse porpoising of a drifting planing craft in calm water were experimentally shown and the mechanism of transverse porpoising was clarified, a computer program is developed to simulate the transverse porpoising. It is confirmed that the simulated results are in fairly good agreement with experimental ones. Using the simulation program, the effects of location of center of gravity on the transverse porpoising are investigated. The results suggest that reduction of transverse porpoising can be achieved by moving the center of gravity forward or upward. This fact is also confirmed by experiments. Although the transverse porpoising is a coupling motion among roll, pitch and heave motion, it is experimentally and numerically confirmed that only roll and heave motions play important roles in occurrence of the transverse porpoising.

**Keywords :** *High-Speed, Planing Craft, Stability, Transverse Porpoising, Drift*

## 1. 緒言

本研究の目的は、高速旋回時の横流れに伴って突然に生じる横ポーポイジングについて実験的および理論的に調査し、その発生メカニズムを明らかにすることである。

第1報<sup>1)</sup>では、上下揺れ、縦揺れおよび横揺れを自由にした模型船を用いて、横流れ角を伴う高速定常旋回時を想定した斜航状態において横ポーポイジングの計測を行うとともに、この運動の特徴について調査した。その結果、横流れ角の小さい場合には安定した姿勢での航走、横流れ角が大きくなるに従い小振幅の横ポーポイジングが発生し、さらに横流れ角が大きくなると上下揺れ、縦揺れ、横揺れの大振幅の横ポーポイジングが発生することを確認した。さらに、横ポーポイジング発生時の復原力(姿勢に依存する流体力)を計測し、横ポーポイジング発生と復原力の関係につい

て考察し、上下揺れと縦揺れおよび上下揺れと横揺れの連成復原力係数は、それぞれお互いに異符号となっており、計測された横ポーポイジングの発生原因は、復原力係数行列に連成をもつ多自由度振動系における自励振動<sup>2)</sup>である可能性を示した。

本報はその第2報として、横ポーポイジングのシミュレーションプログラムを開発するとともに、第1報で用いた供試模型 Fig.1 に対し、本報で開発したシミュレーション計算および新たな模型試験を行い、横ポーポイジングの発生限界に及ばず船体重心位置および連成運動の影響について調査した結果について報告する。

## 2. 横ポーポイジングのシミュレーション

### 2.1 シミュレーションの概要

本研究では、第1報で詳述した横ポーポイジング計測実験の状態に合わせて、上下揺れおよび重心回りの縦揺れと横揺れを自由とした3自由度の運動方程式を用いたシミュレーションプログラムを作成した。

まず、上下揺れの運動方程式は、Fig.2に示す座標系

\*1 平成13年11月16日造船三学会秋季連合大会において講演、原稿受付 平成13年11月30日

\*2 大阪府立大学大学院工学研究科

の原点を静止時の重心位置に持ち、船体の前進運動と共に平行移動し回転しない座標系  $O-XYZ$  で考える。そのときの船体重心位置の上下揺れ変位を  $z$  とすると、上下揺れの運動方程式は次式で表せる。

$$m\ddot{z} = F_z - mg \quad (1)$$

ここで、 $m$  は船体質量、 $F_z$  は流体から受ける鉛直方向の力、 $g$  は重力加速度である。

横揺れと縦揺れの運動方程式は、Fig.2に示す座標原点を船体重心位置に持ち、船体に完全に固定された座標系  $o-xyz$  で考える。ここで、 $o-xyz$  系での横揺れおよび縦揺れの角速度を  $p, q$  とすれば横揺れと縦揺れの運動方程式は次式で表される。

$$I_{xx}\dot{p} - I_{xy}pq = G_x \quad (2)$$

$$I_{yy}\dot{q} - I_{yx}p^2 = G_y \quad (3)$$

ここで、 $I_{xx}$  および  $I_{yy}$  は  $x$  軸と  $y$  軸回りの慣性モーメント、 $I_{xy}$  および  $I_{yx}$  は慣性乗積を示し、右辺は流体から受ける船体固定座標系軸回りのモーメントを示す。ただし、本研究で対象とする滑走艇では、慣性主軸と重心位置との距離が比較的近いため左辺第2項は左辺第1項に比べて小さく、簡単のために無視することとする。

なお、横揺れおよび縦揺れの変位は、 $O-XYZ$  系に対する  $o-xyz$  系の向きを表すオイラー角  $E(\phi, \theta, \psi)$ <sup>3)</sup> を用いて、横揺れ角  $\phi$ 、縦揺れ角  $\theta$  として表すこととした。(2)(3) 式中の  $o-xyz$  系における横揺れおよび縦揺れの角速度  $p, q$  と、オイラー角で表される横揺れおよび縦揺れの変位  $\phi, \theta$  の間には、船首揺れの運動が拘束されている状態では次式の関係がある(詳述は付録参照)。

$$\dot{\phi} = p \quad (4)$$

$$\dot{\theta} = q \cos \phi \quad (5)$$

なお、前述の運動方程式(1)~(3)を解くにあたっては、4次のRunge-Kutta法を用い、時間領域での運動を求めた。

## 2.2 運動方程式中流体力の決定

(1)~(3)の各運動方程式中の流体から受ける力およびモーメントは、1)各瞬間の船体姿勢に依存する力、2)加速度および角加速度に比例する力、3)各瞬間の速度および角速度に比例する力に分けて考える。

1)の流体力には第1報<sup>1)</sup>において詳述した復原力の計測値を用いることとした。2)の流体力と3)の流体力はいわゆる付加質量力および減衰力であるが、第1報で述べたように斜航時横ポーポイジング発生時

には、船体が大きく横傾斜し、上下揺れ、横揺れ、縦揺れの大振幅運動を生じるため、この流体力の理論推定および実験計測は困難である。そこで、まず2)の付加質量力に関しては、大振幅の横ポーポイジング発生時の上下揺れ、縦揺れおよび横揺れの運動周期(第1報<sup>1)</sup>中Fig.8より約0.38秒)がそれぞれの固有周期であると仮定し、慣性力係数に含めた形で定義することとした。以上の仮定により、それぞれの係数を  $a_{33}=1.01$ 、 $a_{44}=0.0031$ 、 $a_{55}=0.0165$  と決定した。次に、3)の流体力については、著者らが先の論文<sup>4),5)</sup>で示した直進時の滑走艇に働く流体力に関する実験値( $B_{33}=14$ 、 $B_{44}=0.1$ 、 $B_{55}=0.9$ 、 $B_{35}=4$ 、 $B_{53}=-1.7$ )を初期値として、大振幅の横ポーポイジングの計測結果(後述のFig.4)とシミュレーション結果を比較検討しながら感度解析的にチューニングし適当な値を決定した結果、それぞれ  $B_{33}=19.2$ 、 $B_{44}=0.024$ 、 $B_{55}=0.25$ 、 $B_{35}=0.7$ 、 $B_{53}=-0.4$ 、 $B_{45}=0.004$  (その他の係数は0)となった。

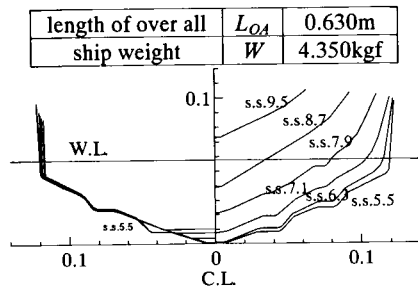


Fig. 1 Body plan of the model.

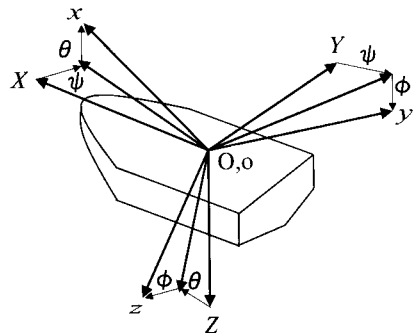


Fig. 2 Schematic drawing of coordinates system.

### 2.3 シミュレーションと実験結果の比較

一例として横ポーポイジングが発生している場合のシミュレーション結果をFig.3に示す。同図は、横流れ角は30deg., 重心位置は後述のTable 1中Condition 1での結果である。同状態での、実験計測結果をFig.4に示す。両図の比較より、シミュレーション結果は実験結果と上下揺れおよび横揺れ振幅および運動周期について良い一致を示している。

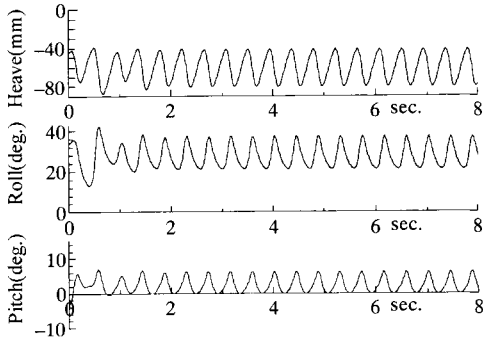


Fig. 3 Simulated time histories of motions ( $F_n=2.0$ ,  $\beta=30\text{deg.}$ , Condition 1).

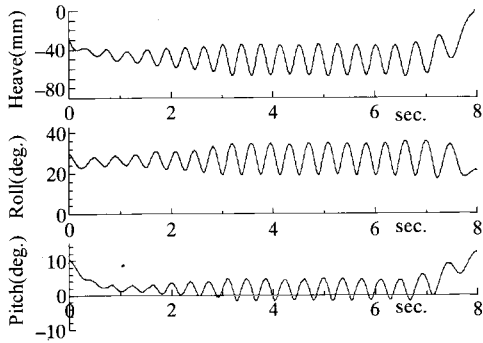


Fig. 4 Measured time histories of motions ( $F_n=2.0$ ,  $\beta=30\text{deg.}$ , Condition 1).

### 3. 重心位置および連成運動が横ポーポイジングの発生に与える影響

#### 3.1 重心位置が横ポーポイジングに与える影響

まず、大振幅の横ポーポイジングが発生する状態を基準として、重心高さおよび前後位置を変化させた横ポーポイジング計測実験を行った。なお、実験で変化した重心位置をTable 1に示す。

重心位置を変化させて行った全ての実験状態について、重心位置と上下揺れ振幅の関係を整理した結果をFig.5に示す。なお、図中の原点は、Table 1中のCondition 1である。また、円の大きさは運動振幅を表しており、Fig.4の運動振幅に対する比として示している。同図より、横ポーポイジングが発生する状態において、重心位置を高くするもしくは前方に移動させることで運動振幅が小さくなるのがわかる。

Table 1 Location of the center of gravity.

Condition	KG(m)	LCG from transom(m)
1	0.072	0.231
2	0.066	0.231
3	0.087	0.231
4	0.092	0.231
5	0.072	0.222
6	0.072	0.267
7	0.072	0.274

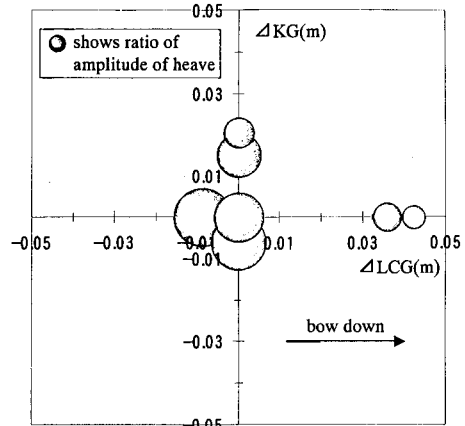


Fig. 5 Measured heave amplitudes for various positions of the center of gravity ( $F_n=2.0$ ,  $\beta=30\text{deg.}$ ).

以上の実験結果を踏まえて、Condition 1を基準として、重心位置を上下および前後に移動させた状態でのシミュレーションを行った。このシミュレーション計算においては、重心位置の移動に伴う復原力の変化<sup>1)</sup>のみを考慮することとし、減衰力および慣性力などの状態においても同じ値とした。Fig.6に、上下揺れ振幅の結果を示す。なお、同図中の×は横ポーポイジングが発生しなかったことを示している。シミュレーション結果からも、実験結果と同様に大振幅の横ポーポイジングが発生する状態から、重心位置を前方に移動するもしくは高くすることで横ポーポイジングが治まる結果が得られた。

以上の結果より、実験で計測された重心位置の変化に伴う横ポーポイジングの振幅の変化は、主として重心移動に伴って、上下揺れ、横揺れおよび縦揺れの復原力が変化させられたためであることが、実験およびシミュレーションによって確認できた。

### 3.2 連成運動が横ポーポイジングに与える影響

前報<sup>1)</sup>において、上下揺れと縦揺れおよび上下揺れと横揺れの連成復原力係数は、それぞれお互いに異符号となっており、計測された横ポーポイジングの発生原因が、復原力係数行列に連成をもつ多自由度振動系における自励振動であることを指摘した。

しかし、横ポーポイジングの発生原因が、上下揺れと縦揺れの連成復原力にあるのか、上下揺れと横揺れの連成復原力にあるのか、もしくはその両方なのかについては判断ができなかった。そこでここでは、どの連成運動が横ポーポイジングの発生の主要因なのかを調査することとした。

実験では、横ポーポイジングが発生するCondition 1において縦揺れまたは横揺れを固定して（上下揺れと横揺れまたは上下揺れと縦揺れの2自由度の状態）曳航し、そのときの運動を計測することとした。なお、固定した姿勢は横ポーポイジング発生時の時間平均姿勢とした。Fig.7に縦揺れを固定した状態での、運動計測結果を示す。同図では、Fig.4に比べ上下揺れ、横揺れ共にその振幅が大きくなっていることがわかる。一方、Fig.8に示す横揺れを固定した場合には、上下揺れおよび縦揺れは治まり、安定した状態で航走する事がわかった。以上の実験結果より、横ポーポイジングの発生においては、上下揺れと横揺れの連成が重要であることがわかった。

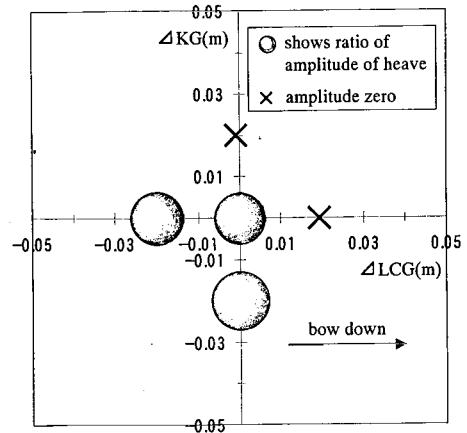


Fig. 6 Simulated heave amplitudes for various positions of the center of gravity ( $F_n=2.0$ ,  $\beta=30\text{deg.}$ ).

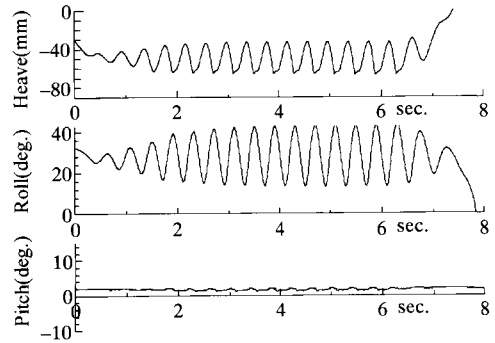


Fig. 7 Measured time histories of motions under pitch fixed condition ( $F_n=2.0$ ,  $\beta=30\text{deg.}$ , Condition 1).

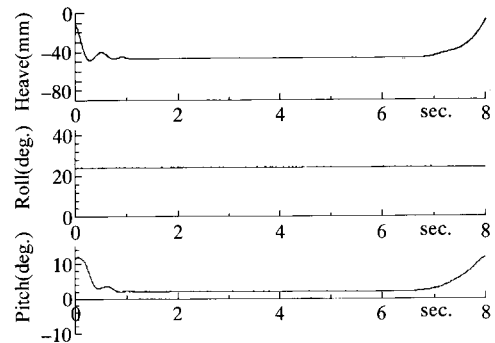


Fig. 8 Measured time histories of motions under roll fixed condition ( $F_n=2.0$ ,  $\beta=30\text{deg.}$ , Condition 1).

次に、シミュレーションを基に横ポーポイジングの発生を抑制する方法を考えた。実際の航走状態においては、実験のように横揺れおよび縦揺れの運動を拘束することはできないので、運動制御装置等により横揺れまたは縦揺れの減衰力を増加させた状態を考えることとした。なおシミュレーションでは、Condition 1（重心位置のみならず慣性力、減衰力も含む）を基準として、横揺れもしくは縦揺れ減衰力を系統的に変化させて計算を行い、横揺れもしくは縦揺れが治まるまで減衰力を増加させた。

シミュレーション結果をFig.9,10に示す。横揺れ減衰力の増加に対しては、横ポーポイジングの振幅は敏感に反応し、Condition 1での減衰力を2倍程度とすることで完全に運動が発生しなくなることがわかった。一方、縦揺れ減衰力を増加させた場合には、縦揺れは小さくなるものの、上下揺れおよび横揺れは小さくならず若干ではあるが大きくなる結果が得られた。（なお、縦揺れ減衰力増加時のシミュレーション結果については付録に詳述する。）

#### 4. 結言

横ポーポイジングのシミュレーションプログラムを作成し、重心位置および連成運動の横ポーポイジングの発生に及ぼす影響について調査した結果以下の結論が得られた。

1. 船体の重心位置を高くする、もしくは前方に移動することで、横ポーポイジングの振幅を抑えることができる。
2. 重心位置の変化に伴う横ポーポイジングの振幅の変化は、主として重心移動に伴って上下揺れ、横揺れおよび縦揺れの復原力が変化させられたためであることが、シミュレーションにより確認された。
3. 横ポーポイジング発生の主たる原因は、上下揺れと横揺れの復原力に連成を持つ自励振動である。
4. したがって、横揺れ減衰力の増加および横揺れ制御等による横揺れ振幅の抑制により効果的に横ポーポイジングを軽減させることができる。

#### 謝辞

最後に、本研究には科学研究費補助金(13750852)を受けたことを付記し関係各位に御礼申し上げます。また、貴重なご意見を賜りました川崎重工業(株)神竹幹夫氏、池淵哲朗氏ならびに梶正和氏に心から感謝の意を表します。

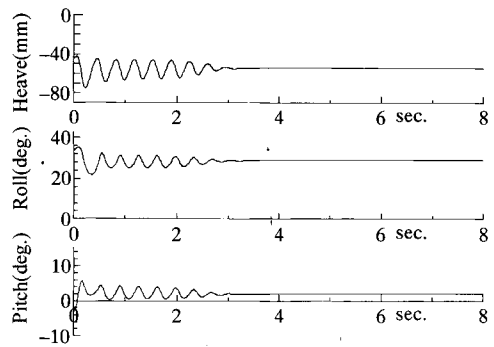


Fig. 9 Simulated time histories of motions at increasing the roll damping twice ( $F_n=2.0$ ,  $\beta=30\text{deg.}$ ).

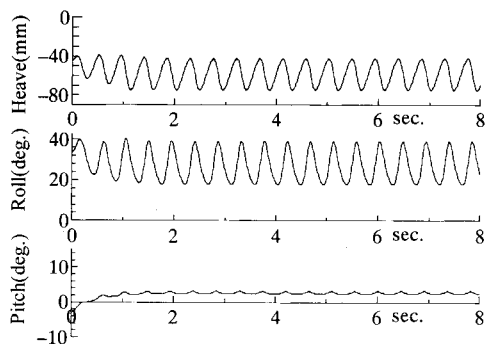


Fig. 10 Simulated time histories of motions at increasing the pitch damping 10 times ( $F_n=2.0$ ,  $\beta=30\text{deg.}$ ).

#### 参考文献

- 1) 片山徹, 手嶋晃, 池田良穂: 滑走艇の斜航時横ポーポイジングに関する基礎的研究(第1報) - 横ポーポイジングの発生と復原力特性 -, 関西造船協会論文集, 第236号, 2001, pp.181-190.
- 2) 中川憲治, 室津義定, 岩壺卓三: 工業振動学, 森北出版, 1986.
- 3) 加藤寛一郎, 大屋昭男, 柄沢研治: 航空機の運動方程式, 航空機力学入門, 第4版, 東京大学出版会, 1990, pp.1-22.
- 4) 池田良穂, 片山徹, 田嶋慎一郎: 高速滑走定の横揺れおよび上下揺れ減衰力の揚力成分の一推定法, 関西造船協会誌, 第229号, 1998, pp.105-110.
- 5) 片山徹, 池田良穂, 大塚耕司: 高速滑走艇の縦不安定現象に関する基礎的研究(第2報), 関西造船協会誌, 第227号, 1997, pp.71-78.

$$R = p \quad (16)$$

$$Q = q \cos \phi \quad (17)$$

### A 運動変位の算出

ここでは、上下揺れ、横揺れ、縦揺れの運動変位および角度の算出方法について詳述する。

座標系は、Fig.1に示す船体の重心位置に原点を持つ船体固定座標系および重心位置に原点を持つ空間固定座標系を考える。空間固定座標系  $(X, Y, Z)$  と船体固定座標系  $(x, y, z)$  の位置関係はオイラー角  $E(\phi, \theta, \psi)$ <sup>3)</sup> を用いて次式で表される。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = E(\phi, \theta, \psi) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (6)$$

ただし、オイラー角は以下の式で定義する。

$$E(\phi, \theta, \psi) = F(\phi) \cdot F(\theta) \cdot F(\psi) \quad (7)$$

$$F(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$F(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$F(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (10)$$

同様に空間固定座標系での速度  $(U, V, W)$  と船体固定座標系の速度  $(u, v, w)$ 、およびオイラー角の角速度  $(P, Q, R)$  と船体固定座標系の角速度  $(p, q, r)$  の関係は次式で表される。

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = E(\phi, \theta, \psi) \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$P = \dot{\phi} = p + q \sin \phi \tan \theta + r \cos \phi \tan \theta \quad (12)$$

$$Q = \dot{\theta} = q \cos \phi + r \sin \phi \quad (13)$$

$$R = \dot{\psi} = q \frac{\sin \phi}{\cos \theta} + r \frac{\cos \phi}{\cos \theta} \quad (14)$$

いま船体は、鉛直方向、重心周りの縦揺れおよび横揺れのみが自由であり、つまり空間固定座標系の速度  $U=0, V=0$ 、オイラー角およびその角速度  $\psi=0, R=0$ 、船体固定座標系の角速度  $r=0$ であることを考慮すると、以下の関係が得られる。

$$W = w \left\{ \cos \phi (\sin \theta + \cos \theta + \sin^2 \theta \frac{1}{\cos \phi \cos \theta}) \right\} \quad (15)$$

つまり、この関係式により船体固定座標系での速度および角速度が与えられれば空間固定座標系での上下揺れ速度およびオイラー角の角速度（横揺れおよび縦揺れ）が求まり、これを時間について積分することで、上下揺れの変位  $z$ 、横揺れ角  $\phi$  および縦揺れ角  $\theta$  が求まることとなる。

### B 縦揺れ減衰力増加時のシミュレーション結果について

縦揺れ減衰力を増加させても運動振幅が小さくならない理由をシミュレーションにより調査した。

たとえば、復原力にのみ連成をもつ自励振動においては一般に減衰力が増大すれば、運動振幅は小さくなるもしくは自励振動が発生しなくなることとなる。ところが、横ポーポージングのシミュレーションモデルにおいては縦揺れと上下揺れおよび横揺れとの間に連成減衰力が存在している。このため、縦揺れが抑制されると同時にこの連成減衰力がなくなることとなり、結果として残された上下揺れと横揺れの運動において減衰力が不足し運動振幅が若干ながら大きくなるものと考えられる。