

## 撃心原理を応用した衝撃低減方法の基礎検討

田上 将治\*1, 五百井 清\*2

### Basic Discussion of the Shock Reduction Technique Based on Principle of Center of Percussion

Masaharu TAGAMI\*1, Kiyoshi IOI\*2

Various type impact and vibration isolation devices have been widely used to protect the objects particularly in the field of medical, biology, or any precision industries. These devices are mainly composed of the spring, damper and actuator. This paper proposes another new simpler method to insulate the impact disturbance by using the principle of center of percussion.

When the plane rigid body is forced impulsively, the instant stationary point must be on the plane rigid body. This instant stationary point is called "center of percussion". This paper shows the basic equations, simulation and the several experimental results to realize the impact insulator using center of percussion.

Keywords: Center of Percussion, Shock Reduction, Impact Test

#### 1. はじめに

精密機器、バイオや製薬などの分野では外部からの衝撃や振動を嫌う対象を扱うことが多い。このような対象に対しては、ばね、ダンパを利用した緩衝装置やアクティブ振動制御装置などが対策として用いられてきた<sup>①</sup>。これらの装置は振動絶縁の機能も持ち、様々な形式のものが利用されているが、衝撃的な外力の遮断については“撃心”を利用した手法も考えられる<sup>②</sup>。剛体の平面運動において、剛体が衝撃力を受けて運動するとき、衝撃の瞬間に限ると、剛体上には静止している点が現れる。この点が撃心で、衝撃の瞬間における並進運動による速度成分と回転運動による速度成分が相殺されることで生じる。この現象はスポーツでも重要で野球バットの特性評価などでも注目されている<sup>③</sup>。後述するように撃心点では、衝撃の瞬間における衝撃力の伝達が遮断される。

本研究ではこの撃心の原理を衝撃絶縁の手段として活用することを目的に、基礎的な事項の整理と実験による検証を行った。具体的には撃心レバーと呼ぶ杓子形の対

象物を軸受で回転支持し、これに振り子式のハンマーで打撃して衝撃力を加え、その時、軸受に生じる拘束力を計測している。回転支持部の先に衝撃絶縁の対象が連結される想定である。打撃位置をいくつかの条件で変更したシミュレーションや実験を行い、打撃位置による衝撃伝達の変化を明らかにしている。

#### 2. 実験装置

本研究で用いた実験装置の外観写真を図1に示す。本実験装置は計測対象である撃心レバー、打撃用の振り子ハンマー、6軸力センサ (WEF-6A200-4-RC5 とアナログ変換ユニット DAIF-1000 とともにワコーテック製)、半導体3軸加速度センサ (KXSC7-2050) などで構成される。撃心レバーの詳細形状は図2に示すとおりで、長手方向の左側に撃心レバーを回転支持するための軸受が設けられ、支柱を介して台座上の6軸力センサに固定されている。撃心レバーに作用する衝撃力は、この軸受に生じる拘束力によって別の系へと伝達されていく。この拘束力

原稿受付 2016年5月10日

\*1 近畿大学工学部 ロボティクス学科 講師, 次世代基盤技術研究所 講師 (〒739-2116 東広島市高屋うめの辺1番)

E-mail tagami@hiro.kindai.ac.jp

\*2 近畿大学理工学部 機械工学科 教授 (〒577-8502 大阪府東大阪市小若江3-4-1)

E-mail ioi@mech.kindai.ac.jp

連絡先: 田上将治 (研究代表者)

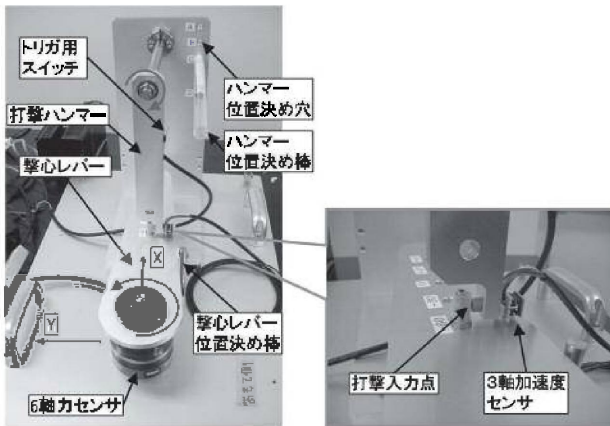


図1 実験装置の外観写真

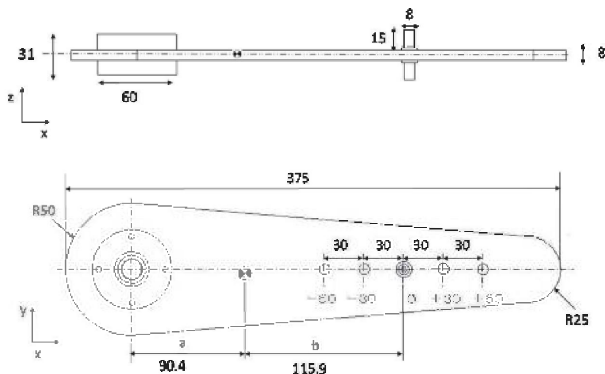


図2 撃心レバーの外形状

は支柱を介して 6 軸力センサにて計測することができるため、この計測値から衝撃入力がかどの程度伝達されるかを調べることができる。撃心レバーへの衝撃入力は、撃心レバー上のピンまたは撃心レバー自体の側面部に向けて、打撃用ハンマーを軸周りに振り下ろしてぶつけることで与える。図 2 に示す様にピンは撃心の条件を満たす位置を中心にしてそこから長手方向にそれぞれ $\pm 30\text{mm}$ 、 $\pm 60\text{mm}$  離れた位置の計 5 カ所に配置できる。中心となる穴は撃心条件である下式を満たす<sup>4)</sup>。

$$I = Mab \quad (1)$$

ここで、 $I$ は対象剛体の重心回りの慣性モーメント、 $M$ は質量、 $a$ 、 $b$ はそれぞれ対象剛体の重心から撃心位置、衝撃入力点までの距離を表す。以降の議論のために撃心条件を満たす穴の位置を 0、 $+30\text{mm}$  と $+60\text{mm}$  離れた穴をそれぞれ $+30$ 、 $+60$  と表記し、 $-30\text{mm}$  と $-60\text{mm}$  のそれをそれぞれ $-30$ 、 $-60$  と表記する (図 2 参照)。

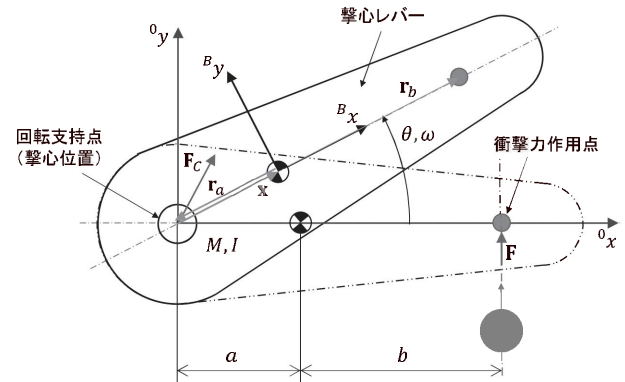


図3. 実験装置の物理モデル

### 3. モデル導出とシミュレーション

実験装置の物理モデルを図 3 に示す。この図より撃心レバーの運動方程式と回転支持部である軸受が受ける拘束力は次式で与えられる。

$$(I + Ma^2)\ddot{\theta} = f(a + b)\cos\theta \quad (2)$$

$$f_{cx} = Ma(\ddot{\theta}\sin\theta + \dot{\theta}^2\cos\theta) \quad (3)$$

$$f_{cy} = -Ma(\ddot{\theta}\cos\theta - \dot{\theta}^2\sin\theta) \quad (4)$$

ここで上式中の記号の定義は以下の通りである。

$I$  : 撃心レバーの重心回りの慣性モーメント

$M$  : 撃心レバーの質量       $\theta$  : 撃心レバーの回転角

$f$  : 衝撃力

$f_{cx}, f_{cy}$  : 軸受から受ける拘束力の $x$ 軸、 $y$ 軸成分

$a$  : 撃心レバー重心から撃心 (回転支持点) までの距離

$b$  : 撃心レバー重心から衝撃力作用点までの距離

式(2)~(4)で与えられるモデルを Matlab/Simulink に実装し、適当な入力と初期条件の下で撃心レバーの角加速度、角速度、回転角度を 60 秒間シミュレーションした。さらに求めた上記の物理量を式(3)、式(4)に与えて、軸受の拘束力を求めた。シミュレーションでは、 $b$ の値を実験と対応するように変化させて、その時の $f_{cy}$ の変化を実験と比較した。入力には図 4 に示す波高値1N、期間10ms のパルス状の入力を時刻 1 秒の時に与えた。実験時の実際の入力は不明で、上記とは異なると思われるが、 $b$ の違いに応じた $f_{cy}$ の変化の傾向は、入力にかかわらず議論できるためこのような扱いとした。

シミュレーションの結果を図 5 に示す。さらに衝撃が入力された時刻近辺での拡大図を図 6 に示す。これらのシミュレーション結果より以下のことが分かる。

A)  $I = Mab$ という撃心条件を満たす穴位置 0 の場合は、

$f_{cy}$ はゼロとなり衝撃力の影響が抑えられている。

- B)  $\pm 60\text{mm}$ の時の $f_{cy}$ と $\pm 30\text{mm}$ の時の $f_{cy}$ を比較すると前者の方がその絶対値が大きく、撃心条件を満たす位置から離れるほど衝撃の瞬間に軸受が受ける衝撃力の影響は大きくなる。
- C)  $+60\text{mm}$ と $-60\text{mm}$ あるいは $+30\text{mm}$ と $-30\text{mm}$ での $f_{cy}$ の値を比較すると、大きさは同じで符号が異なる上下対称の結果となっている。

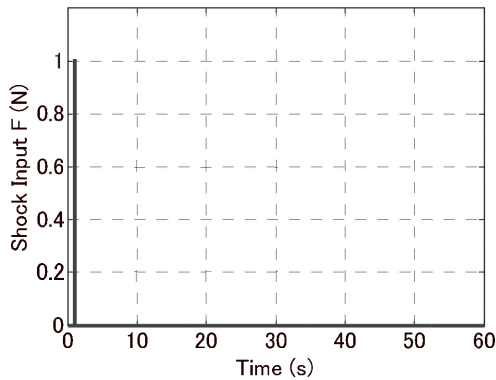


図 4. シミュレーションに用いた衝撃入力

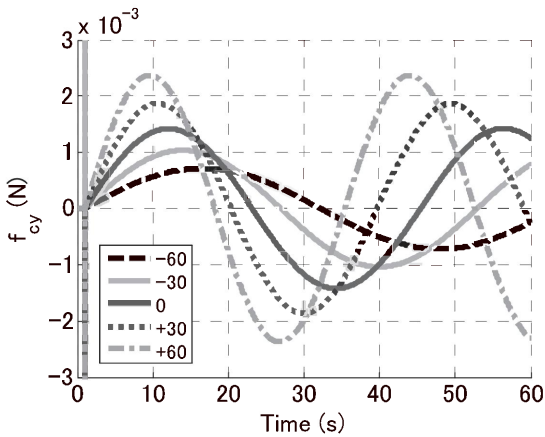


図 5.  $f_{cy}$ の時刻歴応答シミュレーションの結果

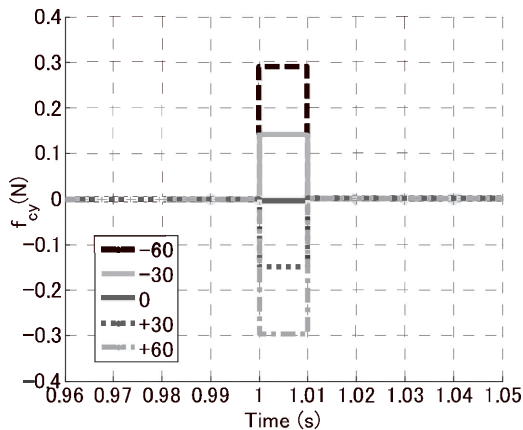


図 6. 図 5 の衝撃時点近傍の拡大表示

- D)  $+60\text{mm}$ ,  $+30\text{mm}$ と $-60\text{mm}$ ,  $-30\text{mm}$ での $f_{cy}$ を比較すると前者では負値となり、後者は正値となっている。以上の結果について簡単な考察を行う。式(2)を $\theta$ について解き、式(4)に代入して以下の結果を得る。

$$f_{cy} = -Ma \left( \frac{f(a+b) \cos \theta}{I + Ma^2} \cos \theta - \dot{\theta}^2 \sin \theta \right) \quad (5)$$

衝撃の瞬間において $\theta$ はほぼゼロであることを考えると、以下の結果が得られる。

$$f_{cy} = \frac{I - Mab}{I + Ma^2} f \quad (6)$$

上式は衝撃の瞬間において、衝撃力 $f$ の影響がどの程度 $f_{cy}$ に現れるかを表している。この式より $I = Mab$ を満たす場合は、 $f$ の影響は $f_{cy}$ には現れないことが分かる。また、 $b$ を変数にとり $(I - Mab)/(I + Ma^2)$ をグラフ表示すると、一次関数であるため図 7 に示す様に直線となる。この図より $b_{COP}$  (図 2 の 0 の位置に相当する $b$ の値)を中心にして、 $b$ の値に応じて $f_{cy}$ が発生し、符号変化も生じることが分かる。上述の A)~D)の結果は以上のことから裏付けられる。

#### 4. 実験検証

前節のシミュレーション結果を 2 章で述べた装置を用いて実験にて検証した。実験条件などを以下に示す。

- ・ 打撃位置はピンではなく撃心レバー側面で、図 2 に示した各ピン位置を真下 (図 2 でいう Y 軸負方向) に移動させた位置を振り子ハンマーで打撃した。
- ・ 撃心レバーと振り子ハンマーは、位置決め治具により再現性よく所定の位置に位置決めされる。
- ・ 振り子の位置は初期角度の大きい順に A~D の 4 段階に合わせる事ができ、今回は C 位置とした。

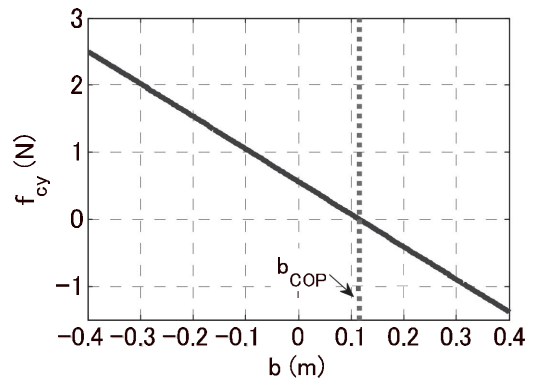


図 7.  $b$ と $f_{cy}$ の関係

- ・ 打撃によって生じる拘束力は 6 軸力センサで計測し、分解能 16bit, 周期 0.1ms の条件で収録した。
- ・ 振り子を上記の位置から手放すと同時に収録開始トリガーとなるイッチが ON し、収録が開始される。

得られた実験結果を図 8 に示す。今回の実験では、振り子ハンマーが打撃を与えた直後の拘束力に注目している。この点に留意して図 8 は衝撃時点の時刻近傍のみを表示した。図中の矢印で示したピークが打撃直後の最初の拘束力のピーク値で、この値を読み取って棒グラフとして表現したものが図 9 である。また、図 10 は図 6 のシミュレーション結果を図 9 と同様に棒グラフ表示したものである。二つの結果を比較すると、 $f_{cy}$  の絶対的な値は 3 章で述べた理由により異なるが、その傾向はよく似ていることが分かる。特に  $b$  の変化に応じた  $f_{cy}$  の大きさや符号変化の傾向はよく一致しており撃心による衝撃絶縁効果も確認できる。以上のことから 3 章での議論の妥当性や撃心による衝撃絶縁効果の有用性が確認できた。

## 5. まとめ

本報告書では力学でよく知られた撃心の原理を衝撃絶縁に応用するべく基本的な運動方程式、拘束力の関係式さらに実用上重要になるとと思われる寸法値と拘束力の関係を示した。また、実験にてこれらの結果が妥当であることも確認した。

現在の実験装置では撃心レバーは軸受にて回転支持されているだけの状態だが、実際の応用を考えた場合は、自重や初期姿勢を保持する必要が生じると思われる。また、振り子式ハンマーが与える衝撃力の推定も興味のある課題である。

今後は、姿勢保持機構を有した系での設計条件の検討や振り子式ハンマーが与える衝撃力の推定手法などについて明らかにしていきたい。

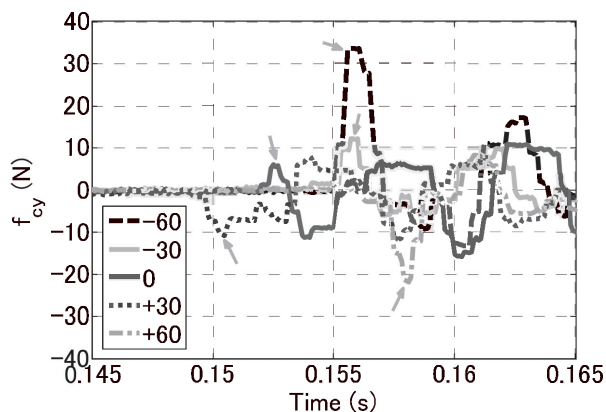


図 8. 衝撃応答実験の結果

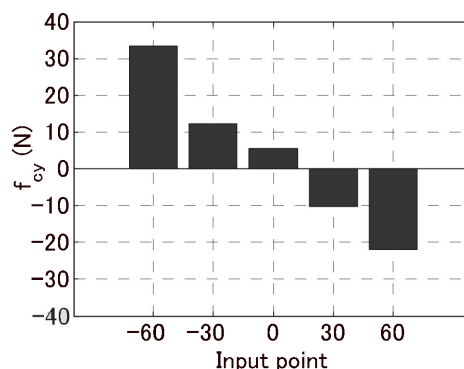


図 9. 衝撃応答実験での  $f_{cy}$  の最初のピーク値と入力点との関係

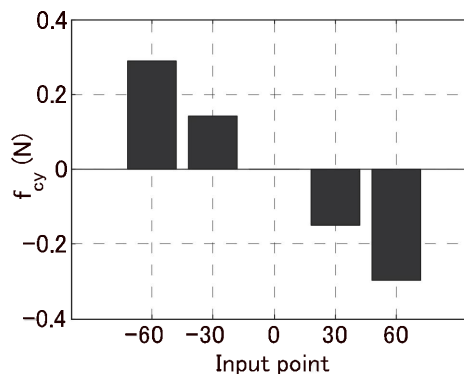


図 10. 衝撃応答シミュレーションでの  $f_{cy}$  の最初のピーク値と入力点との関係

## 謝辞

本研究は、特許機器株式会社の奨学寄付金により実施いたしました。研究にご協力頂きました青山技術開発副本部長をはじめ関係各位に感謝いたします。

また、本研究を実験の面で支えてくれた本学卒業生の藤田康太郎君にも感謝します。

## 参考文献

- (1) 大前力, 平井洋武, 涌井伸二, “情報システムにおける制御”, コロナ社, (1999), pp.193-200.
- (2) 五百井清, 須田敦, 山本昌彦, “低衝撃低振動台車を実現する能動制振キャスターの研究” 日本機械学会論文集(C編), 79 巻 808 号, (2013), pp.330-340.
- (3) 香川博ほか 6 名, “野球バットの打撃性能評価システムの製作とバット支持方法の選択” 日本機械学会論文集(C編), 77 巻 783 号, (2011), pp.259-267.
- (4) 小寺忠, 矢野澄雄, “演習で学ぶ機械力学”, 森北出版, (1994), pp.62-63.