

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：57501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03942

研究課題名(和文) 衝突系に発生する階段状カオス転移現象のメカニズム解明とその工学的応用

研究課題名(英文) Revealing the mechanism causing stepwise maximum bounce height changes in a collision system and its engineering application

研究代表者

軽部 周 (Karube, Shu)

大分工業高等専門学校・機械工学科・教授

研究者番号：70370054

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：衝突系の最も簡単なモデルであるバウンシングボール系について、振動板の振幅を一定に保ちながら振動数を増加させていくと、カオス的に動くボールの最大到達高さが階段状に増加する階段状カオス転移現象(ステップワイズ・クライシス)が発生する。本研究では、ボールの滞空時間が振動板の周期のほぼ整数倍になるときにカオス転移現象が発生することを数値計算と実験により発見した。また、別の衝突系である剛体架線-パンタグラフ系について同様の実験を行った。その結果、衝突体の最大変位は階段状に変化する傾向が見られた。一方で、全てがカオスの挙動であるバウンシングボール系に対し、周期的な挙動も発生しているなどの差異もみられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

殆どの機械装置は、部品と部品間に隙間が存在するため、衝突振動が発生しやすい。衝突振動による弊害として、例えば歯車の歯打ちによる騒音の発生、パンタグラフの離線現象などがある。本研究で対象とするバウンシングボール系は最も単純な衝突振動系であり、本系で発生する階段状カオス転移現象は他の機械系にも潜んでいる可能性が高い。階段状カオス転移現象は、一定の振幅の振動が急激に増加する現象であるため、本現象の発生メカニズムを解明することで、突発的に生じるように見える機械系の衝突振動を回避することが可能になると期待できる。

研究成果の概要(英文)：The bouncing ball system is a simple collision system. Previously, we studied the bouncing ball system numerically and experimentally, and discovered a new bifurcation structure in which the maximum height of the ball increases stepwise and non-smoothly when the frequency of the oscillating table is continuously increased, even though the bouncing ball is in a chaotic state.

In this study, we focused on the time interval between the takeoff and landing of the ball, and found that this bifurcation occurs when this interval and the vibration period of the table are nearly integer multiples.

In addition, we performed the same experiment as the bouncing ball system with another collision system that mimics the rigid overhead line and pantograph of a subway. As a result, we confirmed a stepwise increase trend similar to that of the bouncing ball system. However, there were some differences, such as not all of the generated vibrations being chaotic.

研究分野：機械力学

キーワード：衝突振動 カオス転移現象 分岐 バウンシングボール

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 駆動部, 摺動部を持つ殆どの機械装置には「ガタ」があり, 衝突現象が発生する. 例えば, 歯車の歯打ちによる騒音の発生, パンタグラフの離線による剛体架線の放電摩耗, 硬い路面を走行する農業機械の振動など, 衝突による問題は日常的に広く発生している.

(2) 衝突系の最も簡単なモデルにバウンスボール系がある. 周期振動する板の上で跳ねるボールの挙動はカオス的になることが古くから知られている.

(3) 申請者らは, バウンスボール系において振動板の振幅を一定に保ちながら振動数を増加させる掃引実験を行い, ボールの最大高さが階段状に増加する現象を発見した. 本研究ではこれを階段状カオス転移現象 (ステップワイズ・クライシス) と名付け, 国際学会誌 "Chaos" にて発表した.

2. 研究の目的

(1) ステップワイズ・クライシスのメカニズムを解明する. バウンスボール系を対象とする (研究の方法(1)-(4)).

(2) ステップワイズ・クライシスが機械システムに発生するか検討する. 剛体架線 - パンタグラフ系を対象とする. (研究の方法(5)).

3. 研究の方法

(1) バウンスボール系を用い, ステップワイズ・クライシスの挙動について, 実験, 数値計算の両面から調べる. 図1にバウンスボール実験装置を示す. 赤色の振動板の上にボールを置き, 振動板を加振機で上下振動させてボールの変位をレーザー変位センサで測定する.

(2) 振動テーブルとボールの接触パターンを分類し, 分岐時に特有のパターンがあるか調べる.

(3) 実験データからボールの滞空時間中の振動板の振動回数 $\beta = f \cdot (t_b - t_a)$ を調べる. $t = t_a$ はボールと振動板が衝突する時間, $t = t_b$ は $t = t_a$ の次にボールと振動板が衝突する時間である. また, 同じ時系列データ内における β の最大値を $\beta_{\max} = f \cdot (T_b - T_a)$ とする. T_a , T_b は, 各々ボールの最大変位が発生する直前と直後の時間である.

(4) 振動板の変位振幅を変更し, ステップワイズ・クライシスの変化を大域的に観察する.

(5) 剛体架線-パンタグラフ系の衝突モデル装置を用い, ステップワイズ・クライシスが機械装置上に発生するかについて実験的に検討する. 図2に剛体架線 - パンタグラフ実験装置を示す. 加振機でナイロン棒を水平方向に振動させ, ばねのついた衝突体(Mass)に衝突させる装置である. 振幅一定状態で振動数を変化させる掃引実験を行い, 装置上にステップワイズ・クライシスが発生するかを確認する.

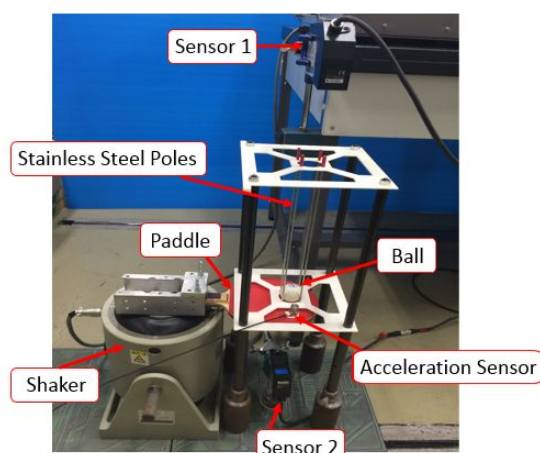


図1 バウンスボール実験装置

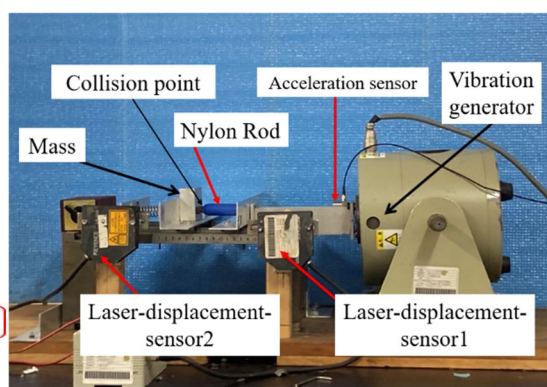


図2 剛体架線 - パンタグラフ実験装置

4. 研究成果

(1) バウンスボール実験装置を用い, 振動板の振幅を一定 ($A_0 = 1.0 \text{ mm}$) とし, ボール滞空時間中の振動板の振動回数最大値 β_{\max} について調べた結果を図3に示す. 横軸は振動板の振動数 $f[\text{Hz}]$ である. 図3から, 分岐が発生するときの β_{\max} の値は整数値に近いことを確認した.

(2) 図4に,図3の f_3^+ に対応する $f=24.6\text{ Hz}$ における時系列波形を示す. 最大変位 MaxHeight_3^+ が生じる2つ前の bounce_3 で $\beta=f\cdot(t_b^3-t_a^3)=3.00$ となりほぼ整数値をとる. 他の分岐点 f_4^+, f_5^+, f_6^+ についても, 最大変位発生時の1~2回前に β の値が4.00, 5.06, 6.07となった. 以上から, ステップワイズ・クライシスが発生する直前に $\beta=k+\varepsilon$ (k は整数, ε は微小な正の実数)となる bounce_k が存在することを確認した. 本実験では, ε は0.07以下であった. 以上から, ステップワイズ・クライシスにおける分岐の発生は, 当初予測していた振動板とボールの接触する位置(接触パターン)に依存するのではなく, ボールが振動板に衝突する間隔が振動板の周期の整数倍となることに依存すると考えられる.

(3) 分岐点の前後の衝突波形を観察すると, 分岐直前では, ボールが最大変位に到達する頻度が高く, 分岐後は到達頻度が低いことを確認した. 上記(1)~(3)の実験結果は, 数値計算でも同様の結果が得られることを確認した.

(4) バウンスボール実験装置を用い, 振動板の一定振幅 A_0 [mm] の値を変更して掃引実験を行った. これにより, ステップワイズ・クライシスの特徴である階段状分岐点の発生位置が変わることを確認した. 振幅 A_0 を増加させると, ボールの最大高さが増加し, 同じ振動数の範囲で分岐の発生回数が増える傾向が確認できた.

(5) バウンスボール実験装置を用い, 振動板の振動数を一定 ($f=25.0\text{ Hz}$) にし, 振幅 A_0 を変化させる実験を行った. その結果, 振幅を一定にしたときと類似した階段状の分岐現象が発生することを確認した. 更に分岐点が発生する間隔がほぼ一定であることを確認した. 一方, 振動テーブルの加速度を一定にして振動数を変化させた実験を行った結果, 分岐は発生しないことを確認した. 上記(3)~(4)の実験結果は, 数値シミュレーションでも同様の結果が得られることを確認した.

(6) 剛体架線 - パンタグラフ実験装置を用い, 加振機の振動数を増加させる掃引実験を行った. 図6に結果を示す. 図中の x_1 は加振機の振幅, x_2 は衝突体の振幅で, いずれもピークピーク値である. 図6から, ステップワイズ・クライシスに類似した階段状の分岐現象が $f=22.5\text{ Hz}, 33\text{ Hz}$ の二点で観測できる. 特に $f=33\text{ Hz}$ における分岐については, 分岐以降の質量体の振幅がほぼ一定であること, $f=35.5\text{ Hz}$ における質量の挙動がカオス的であることが図7(c)の位相面軌道より確認できることから, ステップワイズ・クライシスとの類似点が多いと考えられる. 一方, $f=22.5\text{ Hz}$ における分岐については, $f=30\sim 33\text{ Hz}$ の間で衝突体の振幅が単調減少していること, 図7の位相面軌道(a)より $f=28\text{ Hz}$ の挙動が周期的であることから, カオス遷移現象であるステップワイズ・クライシスとは異なる傾向を示している. 一方, 数値シミュレーションから, ばね剛性などのパラメータを変えることで, ステップワイズ・クライシスと同様の分岐現象が本系にも発生する可能性を示す結果が得られている. 今後, 質量やばね剛性がステップワイズ・クライシスに与える影響について更に研究を進め, 両者の関係を明らかにする必要がある.

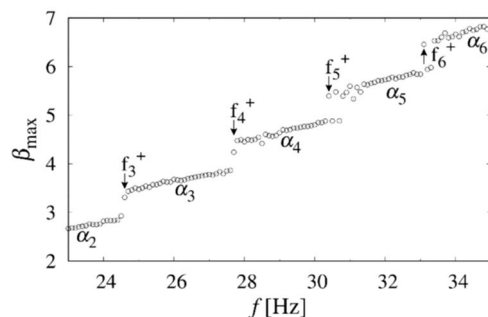


図3 加振振動数 f と β_{max} の関係
(バウンスボール実験装置)

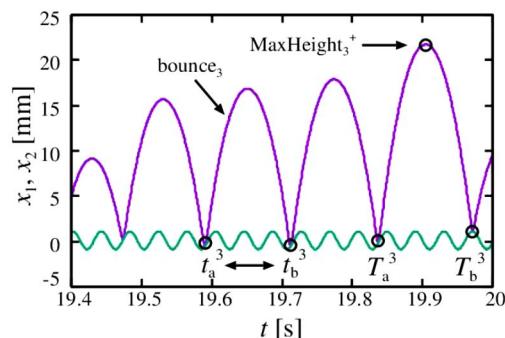


図4 最大変位発生時の衝突波形
(バウンスボール実験装置)

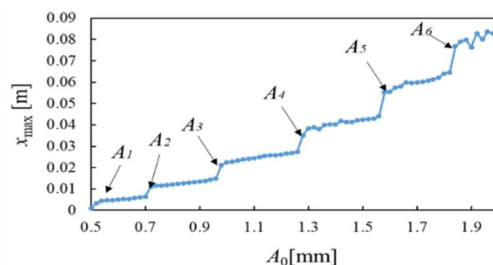


図5 振幅 A と最大変位 x_{max} の関係
(バウンスボール実験装置)

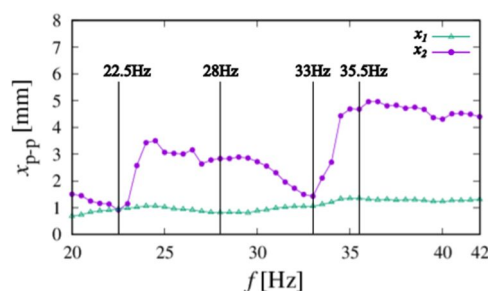


図6 振幅 A_0 と最大変位 x_{max} の関係
(剛体架線 - パンタグラフ実験装置)

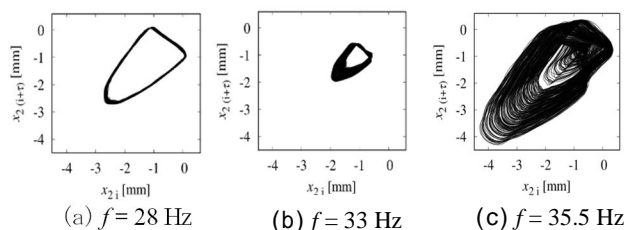


図7 位相面軌道

(剛体架線 - パンタグラフ実験装置)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Shu Karube, Yuki Uemura, Takuji Kousaka, Naohiko Inaba	4. 巻 12
2. 論文標題 Revealing the mechanism causing stepwise maximum bounce height changes in a bouncing ball system	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AIP ADVANCE	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0083804	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 上村悠貴, 軽部周, 高坂拓司, 稲葉直彦
2. 発表標題 バウンシングボール系に生じるカオス転移メカニズム
3. 学会等名 Dynamics & Design Conference 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上向井大輝, 軽部周, 高坂拓司
2. 発表標題 弾性支持された工具によるびびり振動の抑制
3. 学会等名 日本機械学会 2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 振動を利用した歯車加工法の開発 -工作物支持系のばね定数が表面粗さに与える影響-
2. 発表標題 清松東矢, 軽部周, 高坂拓司
3. 学会等名 2022年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長谷川陽仁, 上村悠貴, 軽部周, 高坂拓司
2. 発表標題 周期的な境界条件を有する機械振動系に発生する分岐現象
3. 学会等名 日本機械学会 2023 年度年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 川島拓海, 軽部周, 長谷川陽仁, 高坂拓司
2. 発表標題 間隙を有する一自由度衝突振動系の振動解析
3. 学会等名 日本機械学会九州学生会第55回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 長谷川陽仁, 軽部周, 上村悠貴, 高坂拓司
2. 発表標題 ばね要素を付加したバウンシングボール系の挙動解析
3. 学会等名 日本機械学会九州支部第77期総会・講演会講演論文集
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	高坂 拓司 (Kousaka Takuji)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	稲葉 直彦 (Inaba Naohiko)		
研究協力者	上村 悠貴 (Uemura Yuki)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関