

下敷変形時の発生音に関する研究

愛媛県立松山南高等学校 第3学年 堀川 睦
細田 豊晴 大野 好翔
水本 知希 橘 拓海
指導者 川井 亮祐

1. 研究の背景及び目的

下敷を湾曲させると「ボワッ」という音が鳴る。我々は、この音が発生する理由と発生音の振動数が変化する理由に疑問を持った。そこで、下敷が変形する際の音波の発生要因、振動数の決定条件、振動数変化の理論の解明を目的とし、研究を始めた。

下敷を手で持ち揺らす運動は、固体の運動として捉えることができる。そこで、固体の振動理論として一般に使用されている梁(図1)の固有振動数の理論式¹⁾(式(1))に適用できると考え、発生音の振動数に関する考察に用いた。

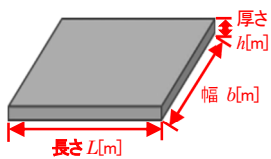


図1 梁
長辺を「長さ」、短辺を「幅」と定義した。

$$f = \frac{\lambda^2 h}{4\pi L^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho}} \quad (1)$$

f[Hz]:固有振動数 λ:固定方法、振動状態による定数
h[m]:梁の厚さ L[m]:梁の長さ E[Pa]:ヤング率 ρ[kg/m³]:密度
(鈴木ら(1989)より)

2. [観察] 現象の解析

(1) 方法

下敷(材質:PVC、長さ 450 mm×幅 300 mm×厚さ 1.5 mm)を両手で持ち揺らすことで音を発生させ、その様子を動画として収録した。下敷の形状をコマ送りにして解析し、発生音の音波強度及び振動数を測定するために、音波について、高速フーリエ変換による解析(以下、FFT解析)を行った。

(2) 結果と考察

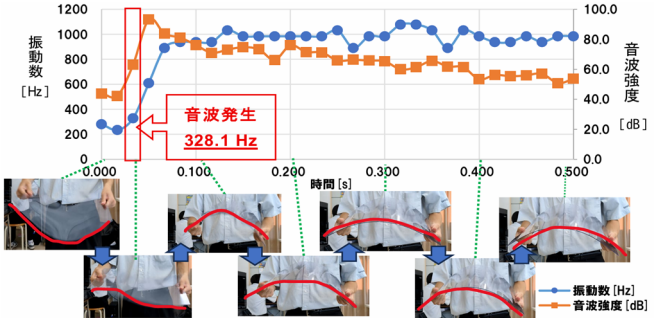


図2 観察の結果

図2より、図3のように下敷の湾曲する向きが変わる瞬間に音波が発生した。これは、変形時に復元力により生じた位置エネルギーが、平らな形状になることで、運動エネルギーや音の生成要因である微細振動のエネルギーに変換されたためだと考えられる。また、下敷の湾曲曲率が大きくなるにつれて振動数が上昇することが分かった。

さらに、下敷に加えている力は板面に垂直な方向である。そこで、我々は梁の振動のうち横振動に従った音波が観測されと考え、理論値を算出したところ(表1)、音波発生時の振動数(328.1 Hz)

が基本振動付近(3倍振動まで)の理論値よりもはるかに大きいことが分かった。

表1 理論式により求めた理論値²⁾

	λの値	理論値[Hz]
基本振動	4.730	10.25
2倍振動	7.853	28.26
3倍振動	10.996	55.40

観察の考察、梁の理論式から以下の3つの仮説を立てた。

- ① 複雑な振動が発生するため、理論値より実験値ははるかに大きい。
- ② 発生音の振動数は、厚さに比例し、長さの2乗に反比例し、幅に依存しない。
- ③ 下敷の変形により、下敷にかかる応力が大きくなり、振動数が大きくなる。

これら3つの仮説を検証するために、以下に示す手順で実験を行った。

3. 研究方法

(1) 実験1

下敷(材質:PVC、長さ 450 mm×幅 300 mm×厚さ 1.0 mm)が平らな形状の条件で、モード周波数解析を3Dモデリングソフト「AUTODESK Fusion」で実行した。また、振動スピーカーで下敷に音波発生時の振動数を与え、得られたクラドニ図形とモード周波数解析の結果を比較した。

(2) 実験2

図4のように下敷(材質:PVC、長さ 450 mm×幅 300 mm×厚さ 1.5 mm)を輪の長さを一定(750 mm)にしたテープで固定した。テープを切った際に生じる空中での下敷の変形運動の様子を動画として収録した。その際の下敷の形状と発生音の振動数に着目し、解析した。また、モード周波数解析を行い、下敷の振動分布を分析した。

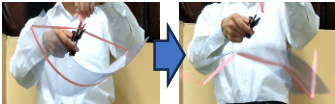


図4 実験2・3の様子

(3) 実験3

異なる長さ、幅、厚さの下敷を図4のように空中で運動させた際の動画を収録し、発生音の振動数を解析した。

(4) 実験4

図5の装置で下敷(材質:PVC、長さ 450 mm×幅 300 mm×厚さ 1.5 mm)を固定し、湾曲させた状態で叩いた際の発生音を収録した。下敷を曲げた際の横幅をX、その際の高さをYとし、曲率Y/Xの値を変化させた。収録した音波は、FFT解析を行った。

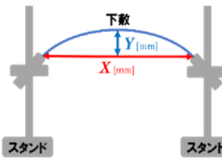


図5 実験4装置図

4. 結果と考察

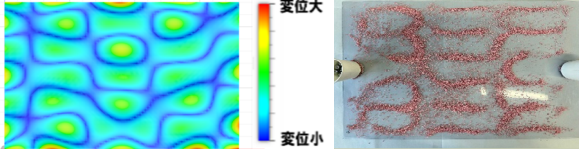


図6 モード周波数解析とクラドニ図形

(左)モード周波数解析(344.2 Hz)、(右)クラドニ図形(与えた振動数:344.2 Hz)

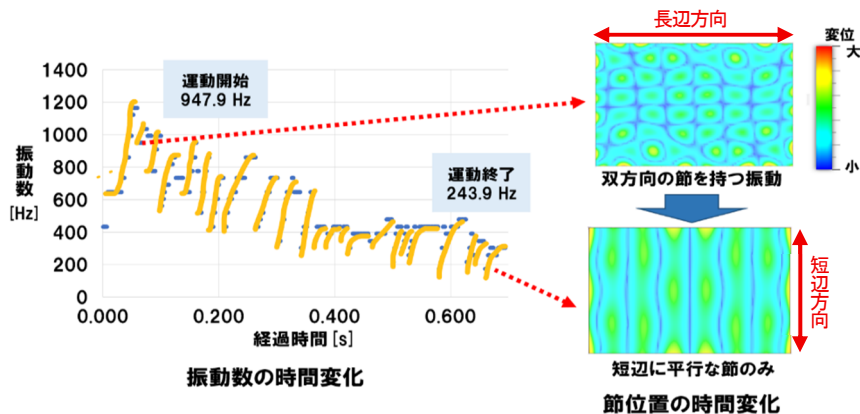


図8 空飛ぶ下敷現象の全貌（実験2の結果）

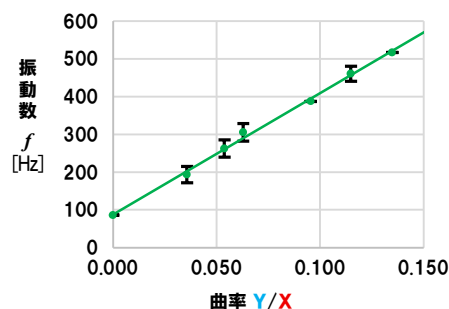


図12 振動数と曲率の関係(N=10)
エラーバーは標準偏差を表す。

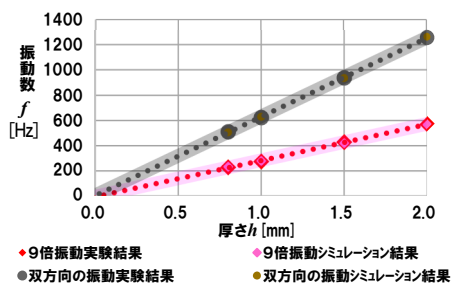


図9 振動数と厚さの関係
(材質PVC、長さ450mm、幅300mm)

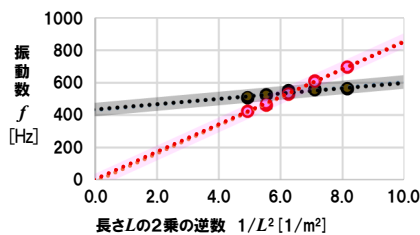


図10 振動数と長さの関係
(材質PVC、幅300mm、厚さ1.5mm)

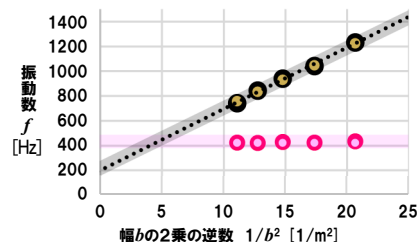


図11 振動数と幅の関係
(材質PVC、長さ450mm、厚さ1.5mm)

図9～図11はそれぞれN=10、各図中のハイライトは、それぞれ運動開始直後・運動終了直前を表す。

(1) 音波の発生要因について（仮説①）

厚さ1.0mmの下敷（他の条件は観察と同じ）を手で持って揺らしたところ、音波は340Hz付近で発生することが分かった。そこで、実験1では振動数が340Hz付近の下敷の振動を解析した。その結果（図6）、モード周波数解析とクラドニ図形で同様な模様

が現れた。図6・図7より、音波の発生要因となる振動の節は変形運動の節と同じ位置に存在している。つまり、変形運動の節が振動モードに影響していることは明らかである。以上より、発生音の振動モードは、下敷の変形運動から影響を受けることが分かる。



図7 下敷の変形の様子

(2) 振動数の決定条件について（仮説②）

実験2では、運動開始時の固定の影響を一定にするとともに、両端を自由にした条件における振動数の性質をとらえた。テープを切ると、空中で「ポワポワ」と運動を繰り返す。私たちはこの現象を「空飛ぶ下敷現象」と名付けた。

実験2の結果（図8）、運動開始直後から運動終了直前にかけて、振動数が段階を追って小さくなった。また、運動開始直後には双方向の節を持つ複雑な振動をしていたが、運動終了直前には短辺に平行な節のみを持つ単純な振動に変化した。

これは、運動開始後にテープの固定がなくなること（図4）や、下敷の変形運動（図7）が下敷の振動分布の影響により、時間の経過に伴い長辺方向の節が消失したと考えられる（図8（右））。ゆえに、下敷の両端を持って揺らすことで音を発生させる一般的な状況であったとしても、両端を持つことで、下敷の長辺方向に節を生じさせ、高次の振動モードで振動する可能性がある。

実験3では、この現象の性質を利用して、運動開始直後の条件と、運動終了直前の条件の2通りについて解析を行った。結果を図9～図11に示す。運動終了直前の条件では仮説通り、発生音の振動数は、厚さに比例し、長さの2乗に反比例し、幅に依存しなかった。しかし、運動開始直後の条件では、発生音の振動数は厚さに比例し

たが、長さ・幅とはそれぞれの2乗の逆数と一次関数関係となった。この傾向の変化は、運動開始直後における下敷の短辺方向の振動によるものだと考えられる。つまり、下敷の長辺方向の節の存在が、理論式における横振動よりも、高次の振動モードを引き起こし、発生音の振動数が梁の理論式に従わなくなると考えられる。

(3) 振動数変化の理論について（仮説③）

実験4の結果（図12）から、下敷の曲率を大きくするほど、発生音の振動数が増大することが分かる。一般に、応力はヤング率とひずみの積で表されることから、曲率と応力是对応していると言える。つまり、発生音の振動数は、下敷に生じている応力が大きいほど上昇することが分かる。また、実験2においても、運動開始直後の振動数が大きい要因の1つに、テープでの固定により生じる応力の影響がある可能性がある。

5. 謝辞

本研究を進めるにあたり、指導教諭である川井 亮祐先生には、研究の着想から、調査、論文執筆まで多くのご指導をいただきました。また、愛媛県立松山南高等学校の多くの先生方にご助言を賜りました。さらには、本校自然科学部の皆さんには、実験環境の整備等、多くのご支援をいただきました。この場をお借りして感謝申し上げます。

6. 参考文献

- 1) 鈴木浩平、西田公至、丸山晃市、渡辺武(1989)。「機械工学のための振動・音響学」．サイエンス社
- 2) ムラタソフトウェア株式会社(2019)．「片持ち梁の共振周波数解析」．https://www.muratasoftware.com/fwp/wp-content/uploads/2019/05/190507_片持ち梁の共振周波数.pdf．2025年8月20日