

# 振動したボルト上のナットの振る舞い Behavior of Nuts on Vibrating Bolt

佐藤 凜 坂本 啓尚 渡辺 大智 佐藤 大知 奥村 海斗 島崎 海 北岡 実乃理  
Rin Sato, Keisyo Sakamoto, Daichi Watanabe, Daichi Sato, Kaito Okumura, Kai Shimasaki, Minori Kitaoka

The purpose of our study was to verify whether beat phenomenon appears on rigid materials. More data on its regularity was collected, based on the previous research. Consequently, it was confirmed that beats are transmitted to rigid materials as well. In addition, the movement of the nut by beat could be also confirmed. In conclusion, the movement of the nut was related to beats because the nut was likely to stay at the point three-eighths from the bottom of the bolt.

## 1. はじめに

私たちは、振動スピーカーを用いたうなりの可視化の研究とそれから派生したボルト上のナット振動現象の不思議に迫った。

振動スピーカーとは、音を発する振動子と音を拡大するコーン紙からなる通常のスピーカーとは異なり、振動子のみで構成されたものである(図.1)。

また、うなりとはわずかに振動数の異なる二つの音波による合成波のことで、その振動数は元の二つの波の振動数の差に等しくなる。

本来なら、うなりはオシロスコープなどの解析装置や解析ソフトを用いなければ目で見ることにはできない。先輩たちは振動スピーカーとポリプロピレンのシート片を用いたうなりの可視化の方法を発見した(図.2)。これは2つの振動スピーカーの振動数をわずかに変えてうなりをつくり出し、ポリプロピレンシートに伝えるとシート片がうなりと同期して振動するというものである。私たちはこれを受け継ぎよりくわしくうなりを可視化する2つの方法を模索した。

1つ目は水滴落下振動法である(図.3)。落下周期のわずかに異なる2本のビュレットから水滴を落とし水面にできた波の干渉をうなりに見立てて可視化を試みた。しかしビュレットから狙った周期で水滴を落とすのが難しく断念した。

2つ目は振動スピーカー水面振動法である。竹串を組み合わせてうなり合成装置を作成し上端の2か所から振動数のわずかに異なる音を水面に伝えて波形を観察した(図.4)。こちらの実験も水面に振動を伝えるのが難しかった。水面波におけるうなりの可視化は難しく、断念した。

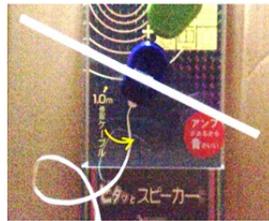


図.1 振動スピーカー



図.2 シート片を振動スピーカーどうしに挟むとうなりが観測された。



図.3 水滴落下振動では可視化できず。

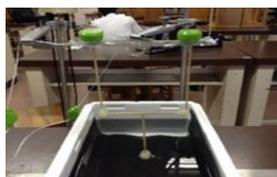


図.4

次に、私たちは、うなりの実験中に見つけていたボルト上でのナット振動現象から、剛体上でもうなりが生成できないかと考え、実験と考察を行った。

## 2. 方法

### 実験①

ボルト(40mm)を10mmずつの4等分にして印をつけ、ナットを取り付ける初期位置を「上(上から10mm)・中(上から

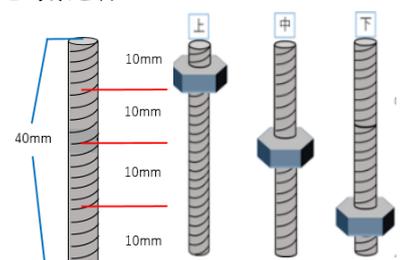


図.5 ボルト上のナット

20mm)・下(上から30mm)」に限定する(図.4)。ボルトの両端に振動数の異なる振動スピーカーを設置し、次のようなうなりの振動を流す。

$f_1$ の振動数を50Hzから1050Hzまで100Hzごとに増加させる。 $f_2$ を $f_1+3\text{Hz}$ にする。 $+3\text{Hz}$ としたのは、予備実験において最も顕著にナットの振動が見られたため、うなりの周波数を3Hzに固定することにした。

上記の実験下でのナットの様子を記述する。なお、2回目以降の実験では1回目の実験でナットの動きが比較的顕著に見られた振動数( $f_1=250\sim 550\text{Hz}$ )のみ実験を重ねることとした。

### 実験②

ボルトに取り付けたナットの初期位置は上端に設定する(実験①で最も顕著にナットに動きがみられたことから)。Generate(発振装置)を用いて作成したうなり{ $f_1(\text{Hz})=290$ ,  $f_2(\text{Hz})=290\sim 295$ }をボルトに取り付けた振動スピーカーで伝え、音の波形・振動数(Hz)・音の強さ(dB)を、音声分析ソフトPraatを用いて測定する。またボルトの上部を0mmとして(図.6)振動させたときのナットの動きを観察し、そのときの音の波形と照らし合わせながら、ナット回転現象の考察を行う。

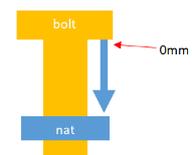


図.6 ナットの位置関係

実験装置は、PC から振動スピーカーの水平距離 30cm、水平面からマイクの高さ 21.5cm、マイクと振動スピーカーは水平面になるように設置している(図.7)。

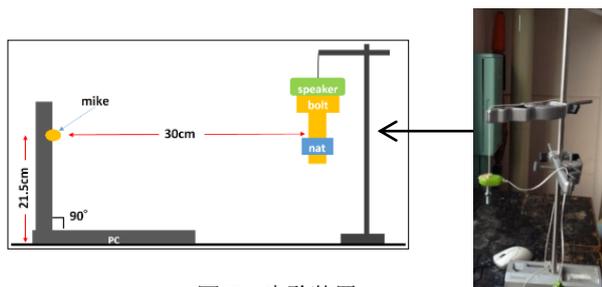


図.7 実験装置

図8のGenerate(発振装置)は周波数発信器として、正弦波、三角波、方形波、段階波などの波形で音を出力させることができる。音設定メニューで音の出力情報(波形・振動数)を設定し、うなりを起こすこともできる。



図.8 Generato

Praat(プラート, オランダ語で「話」の意)は音声学における音声分析用のフリーソフトウェア(アムステルダム大学 Paul Boersma 氏と David Weenink 氏によって開発された。)である。単純な音声分析だけでなく、音声合成、音声を提示する実験、簡単な統計分析なども可能である。このため、言語音の研究には必要不可欠なソフトとなっている。また、このソフトにはスクリプト機能も付いており、工夫次第でややこしい大量の処理を容易に行うことができる。

図9はPraatによって実験②で分析された音(上図は波形, 下図青線は振動数 [Hz], 下図緑線は音の強さ [dB]) である。

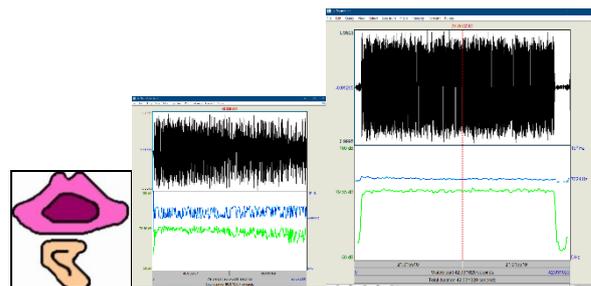


図.9 Praat

### 3. 結果

#### 実験①

	F1	F2	N	ナットの様子(左から上・中・下)		
1回目	50	53	3	静止	静止	静止
	150	153	3	下降	振動している	静止
	250	253	3	激しく下降	下降・動きは顕著	元の位置に留まる
	350	353	3	激しく下降・真ん中で減速	激しく下降	留まろうとする
	450	453	3	激しく下降・真ん中で減速	下降・留まろうとする	ゆっくり下降
	550	553	3	下降	少しずつ下降・留まらない	静止
	660	653	3	ゆっくり下降	振動する	振動する
	750	753	3	少しずつ下降 5/8 の位置で静止	静止	静止
	850	853	3	5/8 に向かう	静止	静止
	950	953	3	下降	静止	静止
1050	1053	3	下降	静止	静止	

2回目以降は1回目でナットの動きが顕著に見られたため、f1=250~550, f2=253~553において実験を行った。

	F1	F2	N	ナットの様子(左から上・中・下)		
2回目	250	253	3	激しく回転	上下運動を繰り返して止まる	とどまる
	350	353	3	ゆっくり回転降下し続ける	ゆっくり回転真ん中より下で留まる	3/8 の位置で留まる
	450	453	3	ゆっくりと回転し一番下まで行った	ゆっくりと回転し一番下まで行った下に行くほど回転が遅くなった	ゆっくりと回転し一番下まで行った
	550	553	3	ゆっくりと下降し 5/8	少し下降して小刻みに振動した	少し下降して静止

	F1	F2	N	ナットの様子(左から上・中・下)		
3回目	250	253	3	真ん中で上下を繰り返す	3/8 の位置で止まる	とどまる
	350	353	3	3/8 で留まる	3/8 で留まる	3/8 で留まる
	450	453	3	激しく回転し一番下まで行った	激しく回転し一番下まで行った	3/8 で留まる
	550	553	3	ゆっくりと下降し 5/8 の位置で静止	静止と下降を繰り返しながら 3/8 の位置で静止した	動かず静止

	F1	F2	N	ナットの様子(左から上・中・下)		
4回目	250	253	3	激しく回転 下まで降りきる	激しく上下し 3/8 で留まる	激しく回転し 3/8 で留まる
	350	353	3	ゆっくり回転し止まる	3/8 で留まる	回転がともゆるく 3/8 で留まる
	450	453	3	ゆっくりと回転し一番下まで行った	ゆっくりと回転して 3/8 で静止	3/8 の位置で静止
	550	553	3	ゆっくりと回転し 3/8 の位置で静止	ゆっくり回転して 3/8 で留まる	少し下降して静止

実験②

初期位置上	f1	f2	N	ナットの様子
1回目	290	290	0	上下運動を繰り返して真ん中で留まる
	290	291	1	うなりと同期して振動音真ん中で留まる
	290	292	2	激しく下降し真ん中で上下しながら留まる傾向がある
	290	293	3	激しく最下限まで下降する
	290	294	4	激しく最下限まで下降する
	290	295	5	激しく下降し真ん中で上下しながら留まる傾向がある

初期位置上	f1	f2	N	ナットの様子
2回目	290	290	0	最初細やかに上下・途中から激しく降下
	290	291	1	真ん中で留まる
	290	292	2	激しく上昇し上で留まる
	290	293	3	激しく最下限まで下降する
	290	294	4	上昇しつつ上下し 9mm の場所で留まる
	290	295	5	激しく下降し真ん中で上下しながら 21mm の位置で留まる

初期位置上	f1	f2	N	ナットの様子
3回目	290	290	0	激しく降下し真ん中で留まる
	290	291	1	真ん中で留まる振れ無し
	290	292	2	激しく上昇し 3mm の位置で留まる
	290	293	3	23mm の位置で留まる
	290	294	4	上昇しつつ上下し 14mm の場所で留まる
	290	295	5	激しく下降し真ん中で上下しながら 21mm の位置で留まる

初期位置上	f1	f2	N	ナットの様子
4 回 目	290	290	0	真ん中で激しい特異な音と共に留まりボルトごと振動
	290	291	1	真ん中より下で留まる
	290	292	2	激しく上昇し 3mm の位置で留まる
	290	293	3	26mm の位置で留まる
	290	294	4	下降しつつ上下し 23mm の場所で留まる
	290	295	5	激しく下降し真ん中で上下しながら 25mm の位置で留まる

初期位置上	f1	f2	N	ナットの様子
5 回 目	290	290	0	真ん中で激しい特異な音とともに留まる ボルトごと振動
	290	291	1	真ん中より下で留まる
	290	292	2	激しく上昇し 3mm の位置で留まる
	290	293	3	26mm の位置で留まる
	290	294	4	下降しつつ上下し 23mm の場所で留まる
	290	295	5	激しく下降し真ん中で上下しながら 25mm の位置で留まる

#### 4. 考察

実験①において、ナットの最初の位置によって動き方に変化があったことから、うなりの腹や節が関係していると思われる。上部の時に移動速度が速くなり、特に、250～350Hzのときにナットの運動が激しくなった。この振動数域のみ詳しく実験を行ったところ、ボルト上の下から見て 3/8 地点で留まろうとする性質を示した。これはボルト上に生じた定常波の腹と節が影響し、腹と節での留まりやすさの違いがこのような性質を生み出したと考えられる。

実験②においては、全体的にうなりの振動数が大きくなるにつれて、ナットがより降下していることが分かる。対して、うなりの振動数が小さいときは、ナットは留まろうとする性質があることが分かった。このことから、うなりの振動数が大きくなるほど腹と節の間隔が狭まり、また、重力に逆らう摩擦力が減少し、ナットが降下すると考えられる。最下点まで降りずに、3/8 地点で留まった理由として、うなりがつくる定常波の影響の方が上回ったと推測した。更に、うなりの周波数が 3Hz のときに計測した音波の周波数が最も小刻みに変化していることから、3Hz の音波がボルト上のナットに最も効率よくエネルギーを伝達したと推測できる。身の周りのあらゆる場所に存在し得るということを示唆できた。これを利用すれば、振動で緩んでしまうナットを、振動を敢えて与えることで緩まないナットを開発することも期待できる。

今後の課題としては、ボルト上に発生したうなりの定常波が具体的にどのような波形を作り出しているかを解明したい。今、宇宙開発において宇宙エレベーターなどがよく話題に上がるが、近い将来我々にとって宇宙はごく身近な存在となっているかもしれない。その開発において大型の物資や機械を宇宙空間で輸送する機会も増えてくるだろう。しかし無重力空間は我々がいまだ体験した事のない別の世界と言っても過言ではない。大型の物

資や機械を輸送するのは困難を極めるだろう。しかし、もし剛体に伝わる定常波の性質を詳しく解明できたならば、それを利用してボルト上のナットに振動を伝えるだけで自由自在に動かすことが可能になる。これを実現することで、より安価で省エネルギーな宇宙空間の輸送手段としても我々の研究が応用できるのではないかと考える。

#### 5. 結論

振動数の異なる振動スピーカー2 つをボルトの両端に接触させると、ボルト上にあるナットがうなりに合わせて振動することが観測できた。これは、剛体上でもうなりが出現したことを意味する。先輩らが発見したプロピレンシートによるうなりの可視化に加え、剛体でも生成できたことから、うなり現象は、音の世界だけでなく、

#### 6. 参考文献

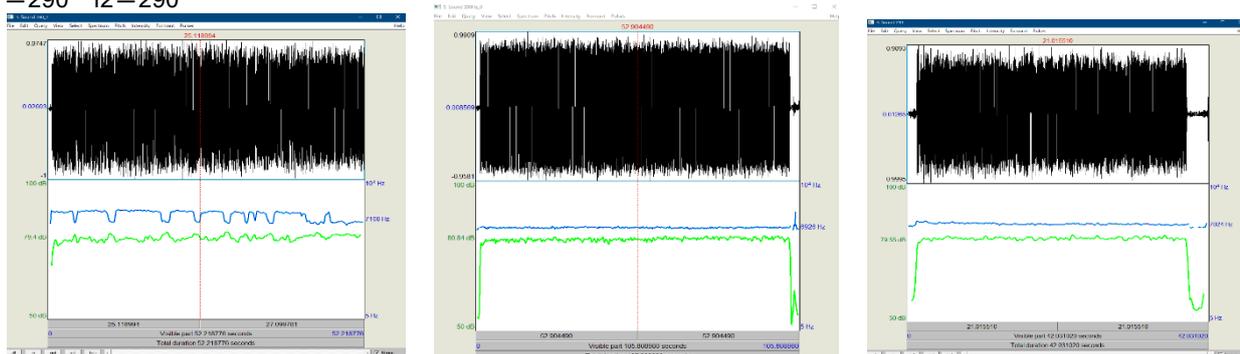
- [1] 「うなりの可視化と振動の記録～振動スピーカーによるしっぽ振り現象～」(2016.4 月-2017.3 月)宇土高等学校 SSH 成果研究発表会 SS コース前田ら他 4 名  
[2] 「振動スピーカーを用いたうなりの研究」(2017.4 月-2018.3 月)宇土高等学校 SSH 成果研究発表会 SS コース梅川ら他 4 名

#### 7. 謝辞

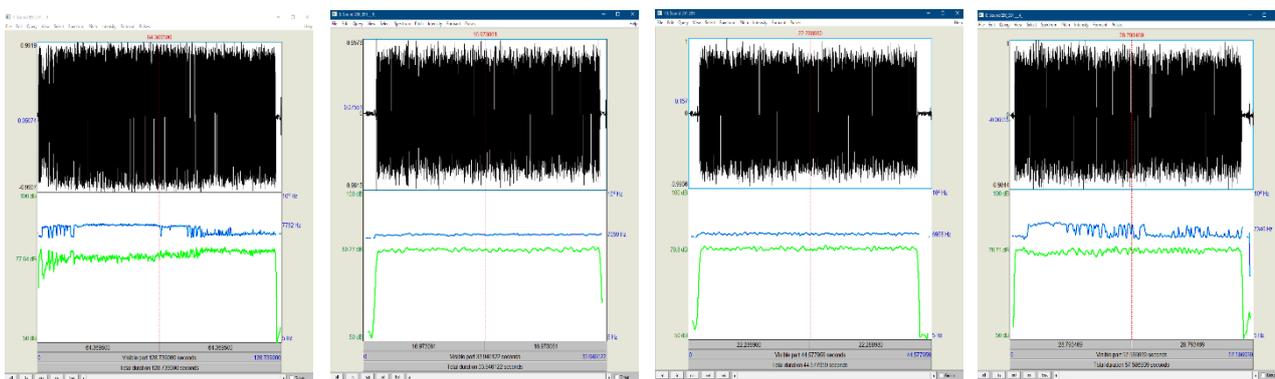
本研究を行うにあたって、ご指導ご助言をいただきました梶尾滝宏先生に深く感謝申し上げます

Praat によるグラフ

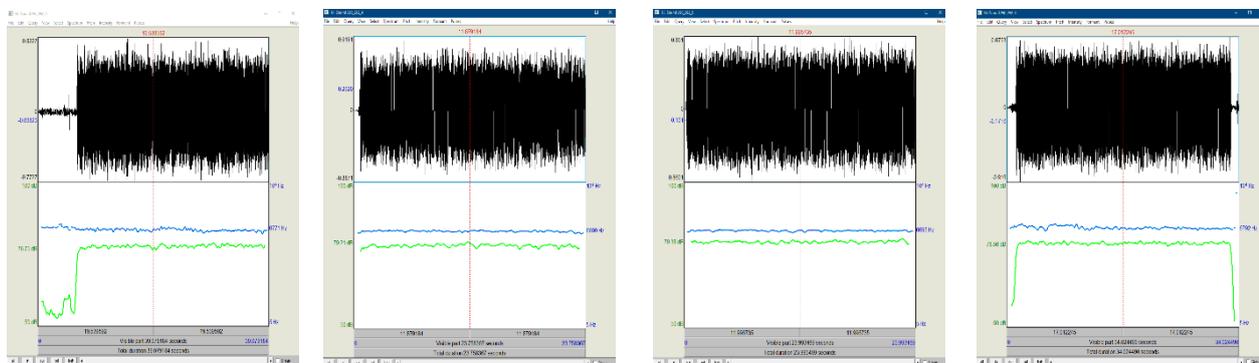
f1=290 f2=290



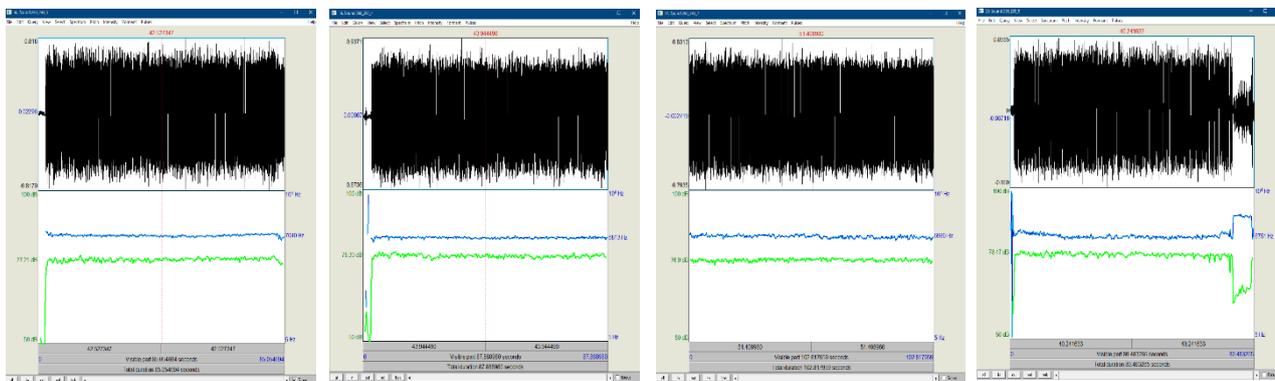
f1=290 f2=291



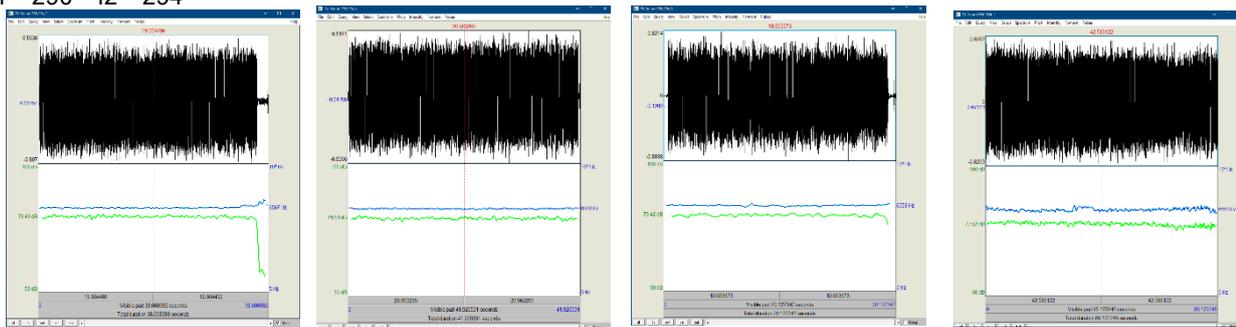
f1=290 f2=292



f1=290 f2=293



f1=290 f2=294



f1=290 f2=295

