

電車やバスのつり手と固定パイプとの乾性摩擦により発生するきしり音について

横井 雅之[†], 中井 幹雄^{††}

Dry Friction Sound between Train and Bus Hand Straps and Fixed Metal Pipe

YOKOI Masayuki[†], NAKAI Mikio^{††}

Abstract

Trains and buses are equipped with hand straps for passengers to hold and prevent accidents when the vehicles are moving. Standing passengers hold straps hanging from metal pipe for support in crowded public transport. During a train run, a passenger's weight moves, causing straps to rub with the pipe they are looped around. In this case, a "creaking sound" occurs. This sound causes passengers to experience "unpleasantness" in crowded confines. We experimented using actual straps and pipes for detailed analysis. Sound of frictional contact between strap belt and pipe simulated from dynamic responses of a non-linear system was analyzed, and the following results were obtained. (1) This "creaking noise" is similar to an impulsive sound. It is generated from stick-slip motion between strap and pipe. (2) Its frequency is dominated by the natural frequency of the strap and the pipe tested.

Key Words: Creaking noise, Friction, Non-linear vibration, Strap

キーワード：きしり音、摩擦、非線形振動、つり手

[†] 大阪産業大学 名誉教授

^{††} 元京都大学大学院 工学研究科 准教授

草稿提出日 10月15日

最終原稿提出日 11月9日

1. 緒 言

列車やバスに装備されているつり手**は急発進時、急制動時およびカーブ走行時に乗客が転倒することを防止するため日本では積極的に導入されている。図1 (a)は電車の車内の様子、図1 (b)にはバスの車内の様子を示す。これらの図に示すように、つり手は車両に平行な2本の横棒（固定パイプ）にぶら下がっていることが多い。とくにカーブ走行中に乗客の体重が移動して、つり手と横棒との摩擦によって、きしり音と呼ばれる摩擦音が発生する。この音は不連続で耳障りな音であり、乗客には不快感が残る。



(a) 電車の車内



(b) バスの車内

図1 電車やバスのつり手

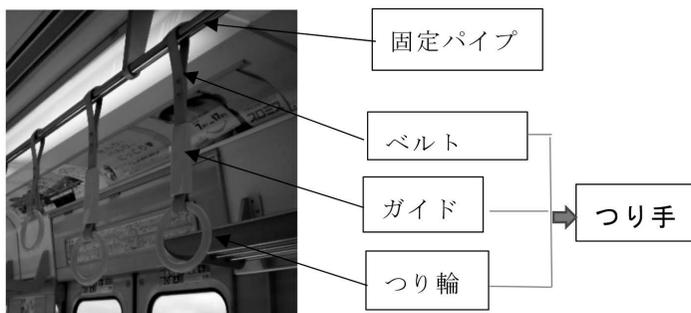


図2 電車に装着されているつり手

図2は電車に装着されているつり手である。図には各部の名称も併せて示した。図3はきしり音発生時のつり手と乗客の手の動きを表している。乗客の体重移動により、つり手とパイプが往復摩擦運動して、ギーギーというきしり音が発生する。発生するきしり音は以下の2種類と思われる。(1) ベルトとパイプの摩擦により発生する。(2) ベルトとつり輪の摩擦により発生する。(1)の音は発生する周波数も約900Hzで音圧レベルも高いが(2)の音は約200Hzで音圧レベルも低いので、ここでは(1)のベルトとパイプの摩擦により発生するきしり音に

** 一般的には「つり革」とも呼ばれているが、正式名称は「つり手」とされている。これは、昔はベルトに革を使用したためにこの名称がついたと思われる。現在ではベルトはほとんどがプラスチック製である⁽¹⁾。

ついて検討した。きしり音はつり手をパイプに対して前後に動かすときにベルトとパイプの摩擦により発生する。一般につり手を持つときの動作を考えると、列車やバスの動揺に対して、数回つり手を往復させることが多い。したがって、きしり音はある程度連続して発生することが多い。

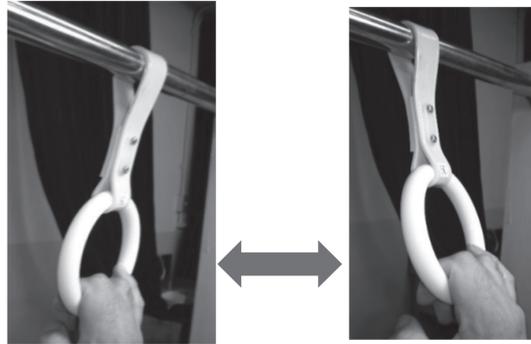


図3 きしり音発生時のつり手と手の動き

図4には連続して発生した場合の音圧波形とその周波数分析結果を示す。波形は衝撃音によく似ており、その周波数は変動するが約900Hz付近にピークがある。

本研究では、この“きしり音”について、実際の列車に使用されているつり手を入手し、実際に使用されているパイプと同じ仕様のパイプを組み合わせた実験装置を製作し、つり手の長さ、つり手にかかる荷重、パイプ長さなどを種々変更した実験から、きしり音の発生メカニズムを解明することを目的とした。

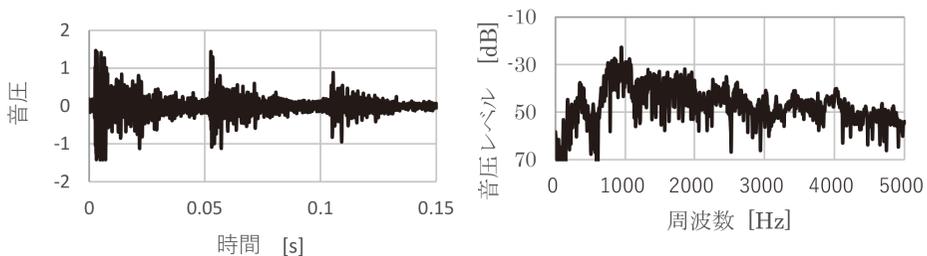


図4 きしり音の音圧波形と周波数分析結果
(つり手はSC、パイプ長さは500mm、荷重は19.6N)

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

図5に実験装置を示す。パイプと鋼のアンクルを用いて、電車のつり手とパイプと支柱を模した。使用したパイプは実際の電車で使用されているのと同等の直径25mm、肉厚3mmで表面はステンレスで被覆されている。パイプは長さが800mm、500mmおよび300mmの3種類使

用した。つり手（つり輪とベルト）も実際の電車で使用されているものを使用した。つり手は図6に示すようにベルト長さの異なる3種類を用いた。つり手にかかる荷重はウエイトを用いた。つり手の動きに対して、ウエイトも一緒に追従できるようにした。パイプを固定する支柱は断面100mm×50mm、厚さ5mm、長さ800mmのミゾ型鋼と断面100mm×50mm、厚さ5mm、長さ600mmのミゾ型鋼の組み合わせで製作した。

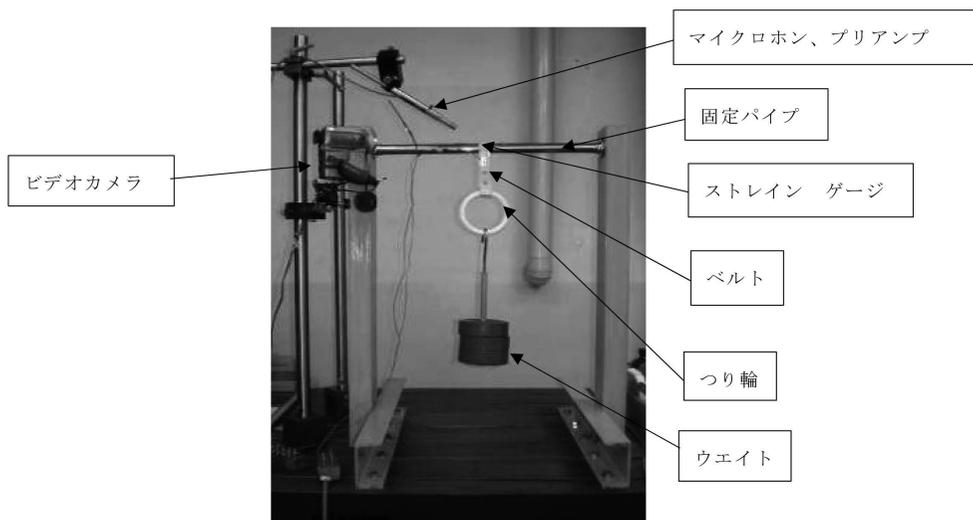


図5 実験装置

つり輪は、ポリカーボネート製で外径115mm、太さ15mmである。ベルトは塩化ビニール製で長さはSAが265mm、SBが235mm、SCが140mmである。SAおよびSBはベルトがふらつかなないようにプラスチック製のガイドが取り付けられている。なお、図で示されている留め金の位置までの長さLaは3種類ともほぼ同じ長さ120mmである。

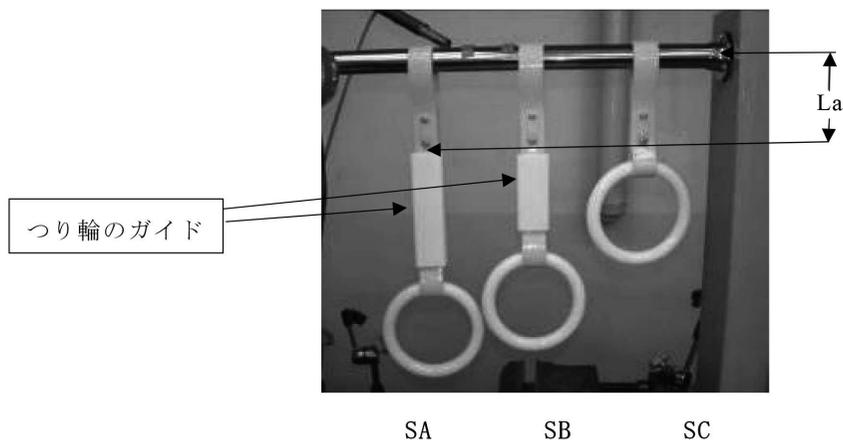


図6 実験に使用した3種類のつり手

2.2 実験方法

音圧はマイクロホン (B&K4165)、プリアンプ (B&K2669)、測定用アンプ (B&K2610) を用いて測定した。マイクロホンはつり手とパイプの接触点より約100mmの位置にセットした。ベルトとパイプとの間に作用する摩擦力の変化はベルト表面に貼ったひずみゲージと動ひずみアンプAS2101 (NEC製) により測定した。また、パイプの横振動はパイプの半径方向に取り付けた小型・軽量 (約0.5g) の加速度ピックアップ (B&K4374) により測定した。これらのデータは、FFTアナライザCF5220 (小野測器製) により解析された。つり手のゆれる様子はビデオカメラ SONY HDR-XR520V (SONY製) を使用した。つり手にかかる荷重は、図5に示すようにウエイトを用いて行った^{(2)、(3)}。

3. 実験結果

つり手のきしり音は図4に示すように何回か連続して発生することが多い。ここでは、きしり音の特性を詳しく調べるために“きしり音”発生時の音圧波形および周波数分析結果を図7に示す。パイプ長さ500mm、使用したつり手はSC、荷重は39.2Nである。音圧波形より、きしり音は衝撃的なインパルス波形であることがわかる。主なピーク周波数は約850Hzであるが、いくつかのピークが存在する。図8に音圧波形およびベルトに貼ったひずみゲージによるつり手の長手方向変位波形を示す。ベルトのひずみ波形からわかるように、約2秒間隔で周期的な波形が現れている。この周期がつり手を前後にゆすって1往復する時間である。音圧波形とベルトのひずみ波形を比較すると、きしり音はつり手を前後にゆすって1往復する間に複数回発生することがわかった。音はまさしく“きしる”感じで音圧レベルも比較的大きい。

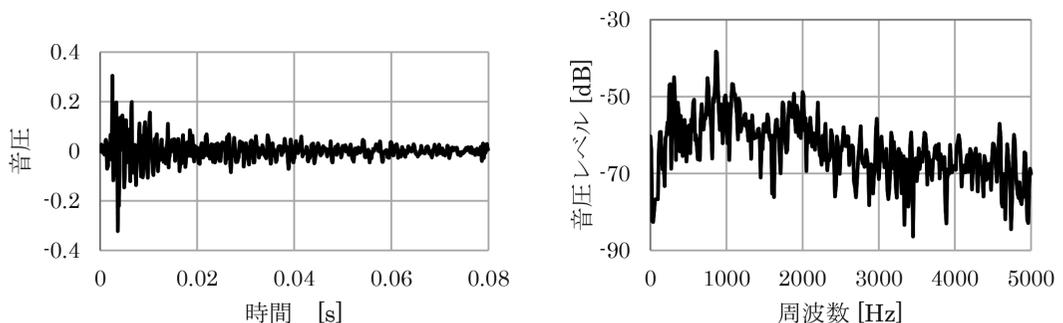


図7 きしり音の音圧波形と周波数分析結果 (つり手SC使用)

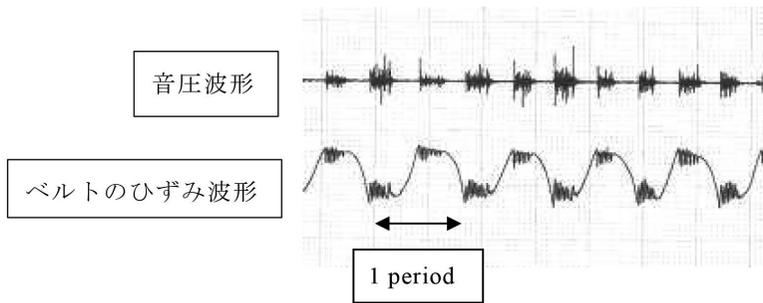


図8 ベルトに発生する音圧波形とひずみ波形

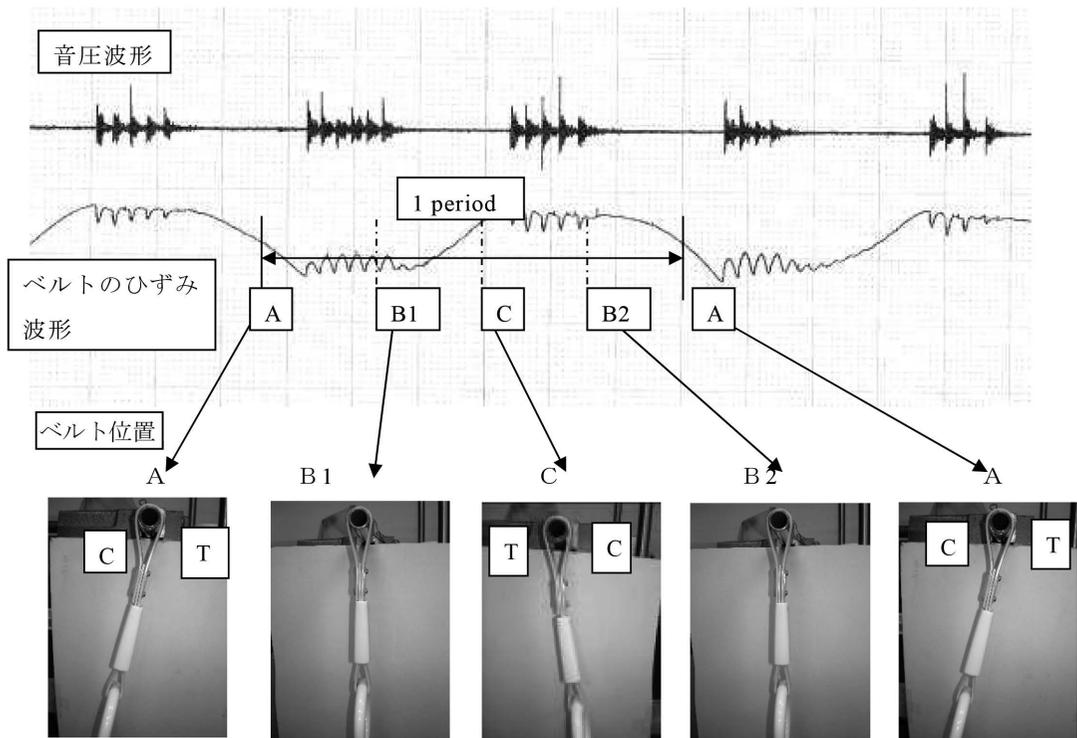


図9 つり手が1往復する間の音圧波形とベルトのひずみ波形の詳細（横から見た図）
 (C：ベルトの圧縮側、T：ベルトの引張側)

図9は音圧波形およびベルトのひずみ波形について時間軸を拡大したものである。また、下部にはつり手が前後に1周する間のベルトとパイプ断面の写真も併せて示す。つり手1周期にわたってベルトとパイプの関係が時刻A、B1、C、B2、Aと示されている。CおよびTはそれぞれベルトの圧縮側、引張側を表している。AからAにわたる1周期の写真から、きしり音は時刻B1とB2で発生しており、これはそれぞれつり手が真下を向いている状態であることがわかる。図10に時刻B1およびB2における音圧とベルトのひずみ波形の拡大図を示す。図10 (a)

は圧縮力が、図10 (b) は引張力がそれぞれベルトに作用するときの音圧およびベルトのひずみ波形である。この図からベルトのひずみの波形には明らかにstick-slip振動が発生していることがわかる。つり手がstickしているときはきしり音のレベルは小さい。しかし、slipを始めると音圧は急激に増大し、きしり音が発生する。この波形からきしり音はつり手とパイプの間のstick-slip運動により発生することがわかる。

きしり音の発生メカニズムを明らかにするために、実験結果より得られたきしり音の周波数と種々の荷重、パイプの長さおよびつり手の長さなどについての関係を求めた。

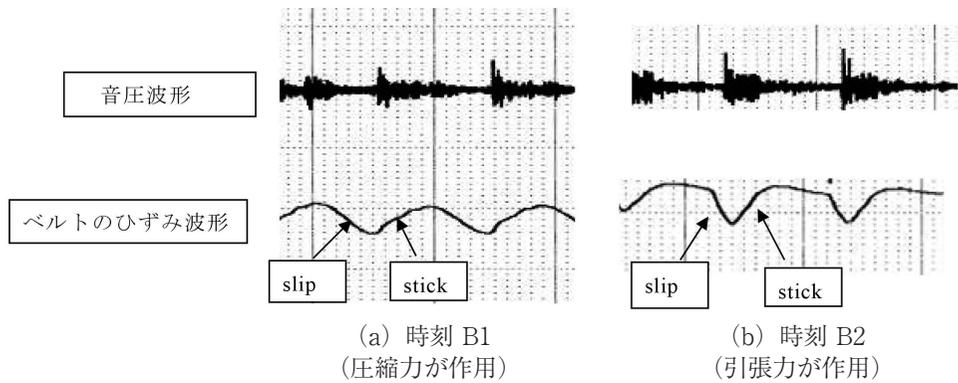
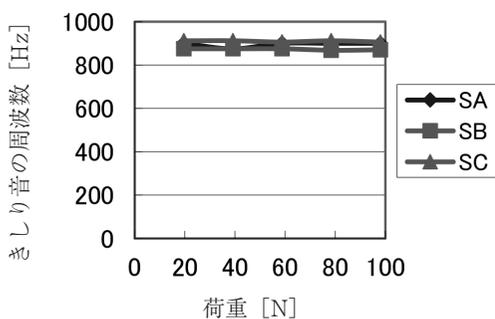


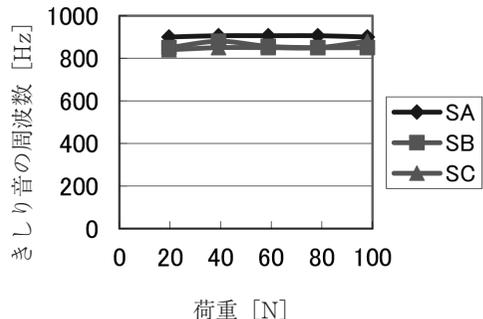
図10 stick-slip 振動の発生 (図9の拡大図)

3.1 つり手の種類、パイプ長さおよび荷重による比較

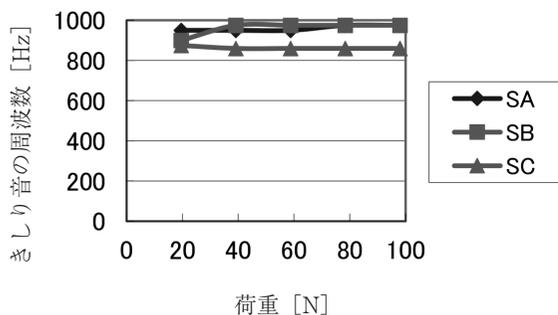
つり手は図6に示したベルト長さの異なる3種類を用いた。パイプ長さは300mm、500mmおよび800mmの3種類を用い、荷重はウエイトを変えて19.6Nから98Nまで5種類行った。図11にこれらの結果を示す。図にはパイプ長さごとにつり手SA、SBおよびSCについて荷重を19.6Nから98Nまで19.6Nごとに変化させたときの発生したきしり音の周波数を示してある。これより、パイプ長さ、つり手種類および荷重を変化させても発生するきしり音の周波数はほとんど変化しないことがわかった。



(a) パイプ長さ 800mm



(b) パイプ長さ 500mm



(c) パイプ長さ 300mm

図11 つり手の種類、パイプ長さおよび荷重を種々変えた場合のきしり音の周波数の変化

3.2 装置全体の固有振動数

3.1の実験結果より、きしり音の周波数にはつり手の種類、パイプ長さおよび荷重は影響しないことが分かった。ここでは、パイプ長さ、つり手種類および荷重を変えたときのパイプ支柱（A点、B点、C点）をテストハンマで打撃した時の打音の周波数を求めた。図12に実験装置における加振点（A～C）を示す。

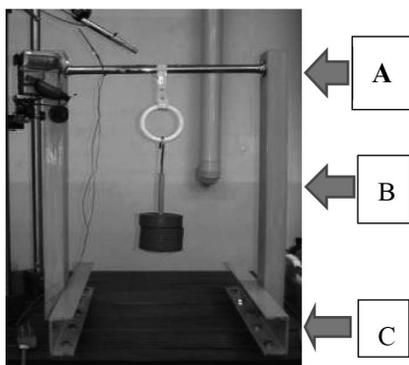


図12 打音による実験装置の周波数応答試験（打撃箇所はA点からC点）
（つり手SA、パイプ長さ800mm、荷重19.6N）

表1 打撃箇所による応答周波数の変化

打撃箇所	パイプ長さ [mm]		
	800	500	300
A点	975Hz	875Hz	900Hz
B点	875	875	875
C点	900	875	875

A点からC点まで打撃による加振結果を求めると、ほぼ同一で約850Hzから950Hzであった。したがって、発生機構として、両端固定または弾性支持のパイプの固有振動数も考えられるが、発生周波数がほぼ同じであることから「左側支持部+パイプ+右側支持部」を質量とする集中定数系モデルと思われる。

3.3 つり手のベルトとパイプの摩擦

つり手をパイプに取り付けて前後に摩擦させると、初めはこすれる小さな音しか発生しない。しばらく摩擦していると、やがて間欠的で“きしりような”音が発生する。さらに摩擦を続けると、つり手が手前から奥へ行って再び戻ってくる間（1周期と呼ぶ）に数回の“きしり音”が発生する。

図13はつり手のベルトとパイプの摩擦によりきしり音が発生した時のベルトとパイプの接触面の写真である。図13（a）はベルトを少し持ち上げて、ベルト内側が少し見えるようにした状態である。図13（b）はベルトの内側に付着している摩耗粉によるベルトへの痕を示す。

これらより、きしり音の発生は、摩耗により摩耗粉が生成され摩擦係数が増大するためと思われる。



図13 つり手のベルトとパイプの摩擦によりきしり音が発生した時のベルトとパイプの接触面の写真およびベルトの内側に付着した摩耗粉による痕跡

4. 理論解析

3章の実験結果より、発生するきしり音の周波数はパイプ長さ、つり手種類、荷重などに関係なくほぼ同じであることから、パイプ質量などの影響が少ない「左側支持部+パイプ+右側支持部」という集中定数系モデルが考えられるのではないと思われる。図14にこのモデルを示す。支持部の質量は左右同じであるから $M_1=M_2=6700\text{g}$ 、パイプの質量 M_3 は長さにより異なるが300mmで480g、500mmで800g、800mmでは1280gである。

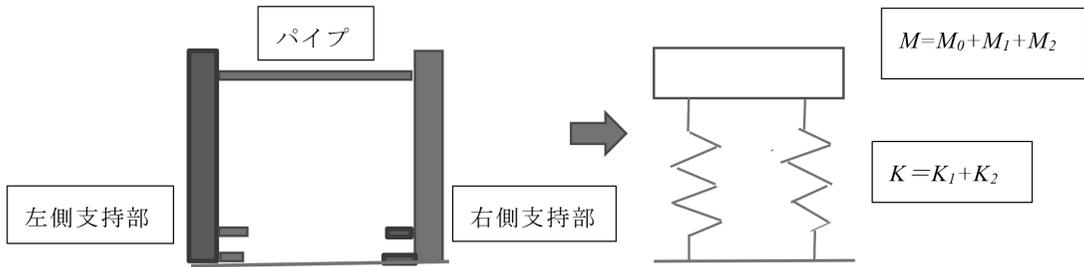


図14 理論的なモデル

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}}$$

M の値は13880g～14680g（パイプ長さ300mmから800mm）である。きしり音の周波数 f を900Hzとすると、 K の値は 4.4×10^8 [N/m] から 4.6×10^8 [N/m] となる。この K の値を代入して得られる周波数は870～917Hzとなる。この周波数はきしり音にほぼ近いので、このばね定数の値は図14のような比較的堅固な土台（定盤）などにボルト締めされたモデルに対する値としては有用であると考えられる。この値は文献⁽⁴⁾で得られた値が約 1.5×10^8 [N/m] であるので、ほぼ妥当な値と思われる。

5. 結 論

列車やバスに装着されているつり手とパイプの間に発生するきしり音について、実験装置を製作し、実際に使用されているつり手を用いて実験した結果、以下の結論が得られた。

- (1) 発生したきしり音はstick-slip振動による、物をはがすような衝撃を伴った音である。
- (2) きしり音の周波数はつり手の種類、パイプの長さおよびつり手にかかる荷重の影響は少なかった。
- (3) きしり音の周波数はパイプおよび支柱を含めた構造物による固有振動数で近似される。
- (4) きしり音はつり手のゆれの1周期において、つり手のパイプとの摩擦面における摩擦力の局所的な増加により、つり手の自励振動として発生する。

参考文献

- (1) 斎藤綾乃, 吊り手, RRR, Vol.69, No.12, 2012.12, pp.28-31.
- (2) M.Yokoi, T.Takahagi and M.Nakai, Rapsy noise induced in dry friction between a strap and a fixed pipe in train, INTER-NOISE 2009, CD-ROM

- (3) M.Yokoi,T.Takahagi and M.Nakai, Creaking noise induced in dry friction between a strap and a fixedpipe in train with theoretical analysis , INTER-NOISE 2010,CD-ROM
- (4) 野坂弥蔵, 林 隆一, 3トンエアハンマの防振基礎の振動,島根大学教育学部紀要, 14巻, 1980, pp.29-34.