

令和元年6月13日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05859

研究課題名(和文)地震時のエレベータ・ロープ揺れ抑制手法の開発

研究課題名(英文) Development of restraint method for elevator rope sway at the time of an earthquake

研究代表者

木村 弘之 (KIMURA, Hiroyuki)

富山大学・大学院理工学研究部(工学)・教授

研究者番号：50579315

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：動吸振器を用いロープ張力を変動させることで、ロープの横揺れを低減できると、またその最適パラメータの選定方法を示した。

ロープ揺れを抑制するための変位拘束部材を有するロープの周波数応答特性を数値解析により求めた。また、対応する自由振動についての理論解を求め、共振振動数が固有振動数と良く一致すること、振動モードが類似していることを明らかにした。

変位拘束部材の影響をより正確に評価するため、ロープの曲げ剛性、粘性減衰、構造減衰を同定する方法を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

変位拘束部材を有するロープの振動解析をする際に、幾何学的に非線形なロープの自由振動を線形の強制振動に置き換えて理論解析する方法を示す等、学術的意義がある一方で、閉じ込め事故の防止やエレベータ復旧時間の大幅な短縮等に应用でき、高層ビルを利用または居住している人の安全性や地震後の利便性を高めることができるという社会的意義がある。

研究成果の概要(英文)：A method to reduce the rope sway is proposed by using dynamic damper. Rope lateral vibration is controlled by fluctuating rope tension using up-and-down motion of this dynamic damper. The method to determine the optimal parameter of this dynamic damper is also shown.

Finite difference analysis of the rope vibration with vibration suppressor is performed to obtain the frequency response curves. Resonance frequencies obtained by the finite difference analyses are in good agreement with the natural frequencies for the free vibration. Vibration modes obtained by the finite difference analyses are similar to that for the free vibration.

To estimate influence of the vibration suppressor more correctly, a method to identify the flexural rigidity, the viscous damping and the structural damping of the rope is indicated.

研究分野：機械力学

キーワード：エレベータ・ロープ ロープスウェイ 変位拘束部材 動吸振器 周波数応答特性

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

政府中央防災会議が公表した「首都直下型地震被害想定」では、停止エレベータが 30 万台、エレベータ閉じ込め者が 12,500 人とされている。さらに、救助や復旧の遅れにより、閉じ込めが長時間に及ぶ可能性も指摘されている。特に、高層ビルや超高層ビルに設置されるエレベータにおいては、地震時の建物揺れにより増加するロープ変位の抑制が課題となっている。大地震時には、作業員による点検を要するエレベータの停止台数が増加することが予想される。

振動低減法のひとつに動吸振器があり、通常の振動系に対しては動作原理や最適値はすでに明らかにされている。しかし、エレベータ・ロープでは動吸振器の振動によりロープ張力が変動するため、動吸振器についての従来の設計手法は適用できない。このようなロープ横振動を動吸振器の上下動による張力変動を利用して抑制する方法については、ほとんど研究されていない。

これまでに上下方向に振動する動吸振器を取り付けることで、ロープ張力を変動させロープの横揺れを半減できることは数値解析で明らかにしている。しかし、単純に動吸振器を付けただけではロープが回転運動するため、ロープ張力が変動せず効果がないことがモデル実験で明らかとなっている。

一方、変位拘束部材を用いることでロープ揺れを抑制する方法について差分法による数値解析を行っており、振動抑制効果があることも明らかになっている。しかし、変位拘束部材の設置場所には制約があるため、図 1 における面内（左右方向）振動は抑制できるものの、面外（紙面に直交する方向）振動は抑制できない。

そこで、これまでに得られた知見をもとに、上記の動吸振器と変位拘束部材による振動抑制方法を組み合わせることで、面内振動、面外振動を同時に抑制することを思い立ち本研究を開始した。

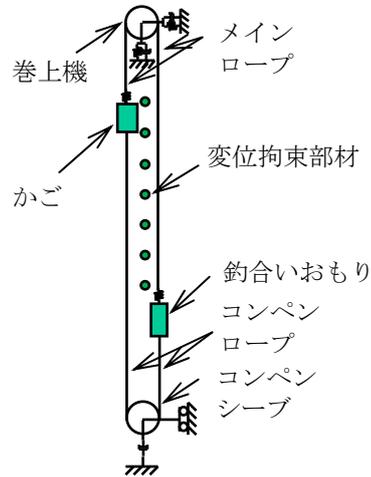


図 1 エレベータ・ロープの構成

2. 研究の目的

本研究では、①地震時のエレベータ・ロープの揺れを動吸振器と変位拘束部材とを併用して抑制する手法を開発し、②理論解析、数値解析およびモデル実験によってその動作原理、妥当性や効果を検証することを目的とする。

これにより、①動吸振器および変位拘束部材の最適設計条件の把握、②ロープ揺れ量の低減、③閉じ込め事故の防止や④エレベータ復旧時間の大幅な短縮等に応用でき、高層ビルを利用または居住している人の安全性や地震後の利便性を高めることができるという社会的意義がある。

3. 研究の方法

(1) 動吸振器等による振動抑制

①数値解析

ロープを弦でモデル化し差分法により数値解析を行う。ロープ下端の上下動は、ロープが伸び縮みしないと仮定して算出する。また、動吸振器は 1 自由度系でモデル化し、Newmark $\beta$  法により時刻歴応答解析を行う。

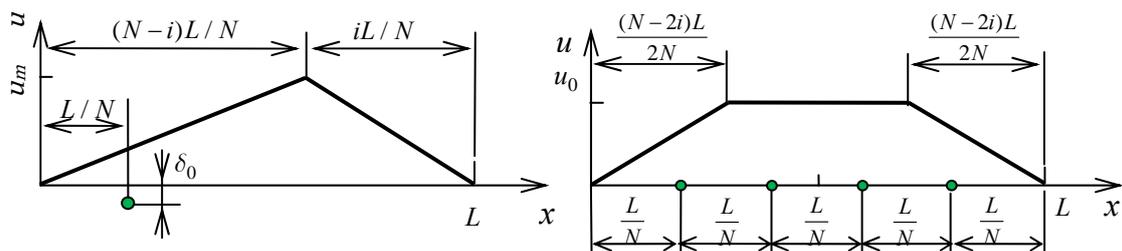
②モデル実験

ロープ下端の釣合いおもり部分に動吸振器（先端に質量を付加した片持ちはり）を配置し、ロープ上端を正弦波加振する。

(2) 変位拘束部材による振動抑制

①ロープの自由振動についての理論解析

まず、ロープ中の波の伝播特性から、変位拘束部材に作用する荷重波形を同定する。次に、この荷重がロープに作用する強制振動と考えることで、幾何学的に非線形な自由振動の問題を線形な強制振動の問題に置き換えて解く。



(a) 1 個の変位拘束部材

(b) 均等配置

図 2 変位拘束部材を有するロープの自由振動解析モデル

②ロープの強制振動についての数値解析

ロープの両端または片側を正弦波加振した場合の周波数応答を差分法による数値解析により求め、共振点および共振点での振動モードを調査する。この共振点での振動特性を自由振動時の振動特性と比較検討する。

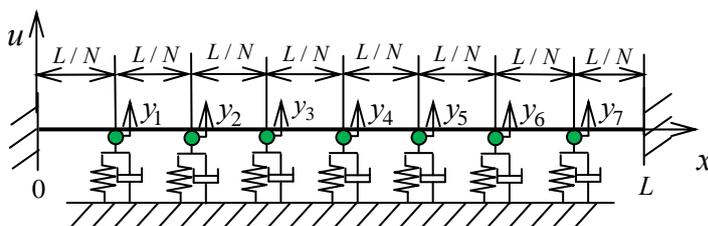


図3 数値解析モデル

③ロープの振動パラメータ取得のためのモデル実験

ロープの振動解析をより正確に行うため、変位拘束部材がある場合、ない場合のロープの自由振動実験とロープの曲げ剛性、粘性減衰、構造減衰を考慮した数値解析を行い、振動パラメータ（ロープの曲げ剛性、粘性減衰、構造減衰）を同定する。

4. 研究成果

(1) 動吸振器等による振動抑制

上下方向に振動する動吸振器を釣合いおもりに取り付けたり、釣合いおもりそのものをばねを介してロープに接続することで、ロープ張力を変動させ、ロープの横揺れを1/2程度まで低減できることを数値解析及びモデル実験により確認した。ロープ自体に減衰があるため、動吸振器の定点理論のように周波数応答が2点を通るのではなく、2点付近を通ることも数値解析により確認した。また、定点理論と同様の手順で最適値が求められることを示した。

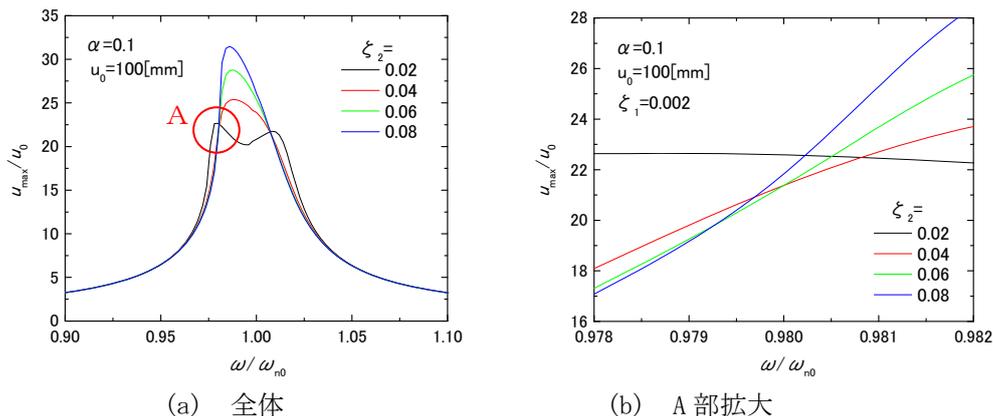


図4 動吸振器を用いた場合の周波数応答特性

(2) 変位拘束部材による振動抑制

変位拘束部材は、ロープの固有振動数を変化させることで、建物との共振を防ぐために用いられる。

①変位拘束部材を有するロープの自由振動についての理論解

ロープ全長の1/Nの位置に1個の変位拘束部材を配置した場合、均等に配置した場合のロープの固有振動数が次式で表されることを明らかにした。

$$f_n = \frac{N^2}{N^2 - (N-i)(1-i\alpha)} f_{n0} \quad (i=1,2,\dots,N-1) \quad (1)$$

$$f_n = \frac{2N}{N+1} f_{n0} \quad (2)$$

ただし、 $f_{n0}$ は変位拘束部材がない場合の固有振動数、 $\alpha$  ( $=\delta_0/u_{max}$ ) である。

また、得られた振動モードの一例を図5に示す。

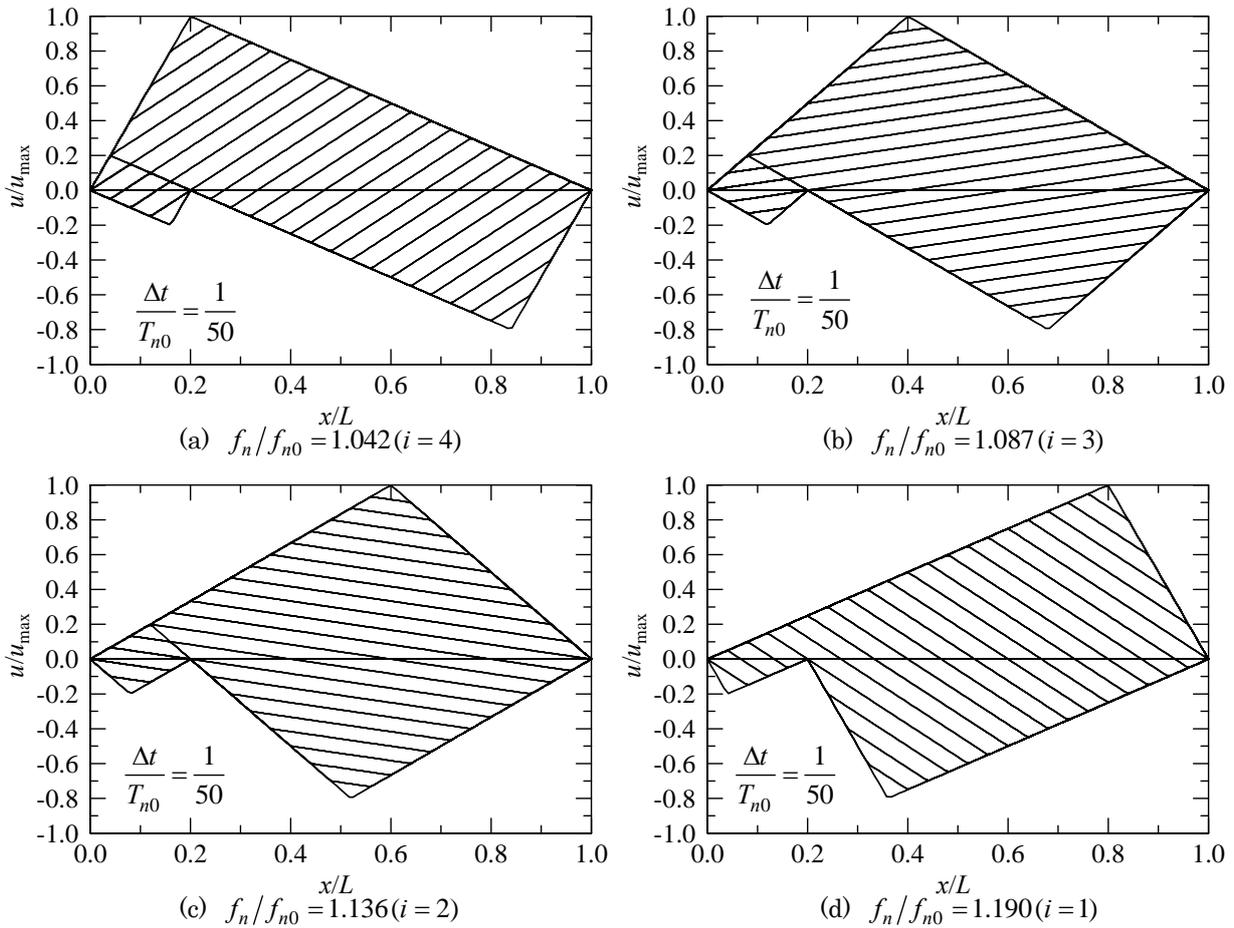


図5  $L/N$ の位置に1個の変位拘束部材を有するロープの振動モード ( $N=5$ )

②変位拘束部材を有するロープの周波数応答特性 (数値解析結果)

ロープ全長の  $1/N$  の位置に1個の変位拘束部材を設置した場合の周波数応答特性と共振点での振動モードの一例を図6、図7に示す。共振振動数は自由振動時の固有振動数と良く一致していること、変位拘束部材がない場合の固有振動数よりも高い側に大きく移動しており、振動抑制効果があることが分かる。また、各共振点での振動モードは自由振動時の振動モードと類似していることが分かる。

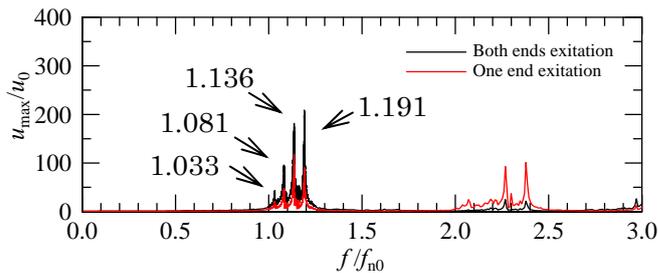
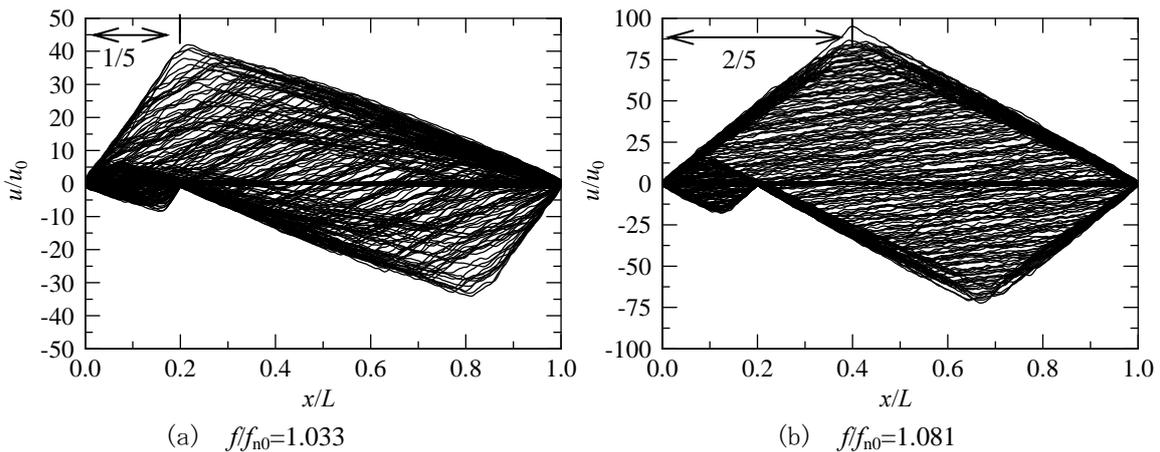


図6 周波数応答特性 ( $N=5$ )



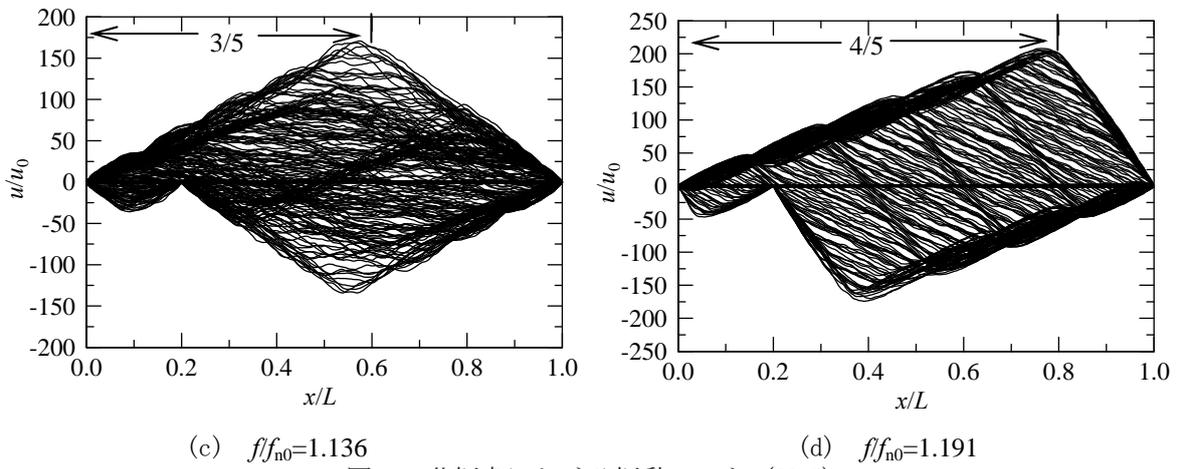


図7 共振点における振動モード (N=5)

③ロープの振動パラメータ

変位拘束部材がない場合、ある場合の自由振動波形データを取得し、その固有周期が一致するようにロープの曲げ剛性を同定する。次に、自由振動波形（数値解析結果）が実験結果と一致するように粘性減衰、構造減衰を同定する。同定した結果の一例を図8に示す。実験結果と良く一致することを確認した。

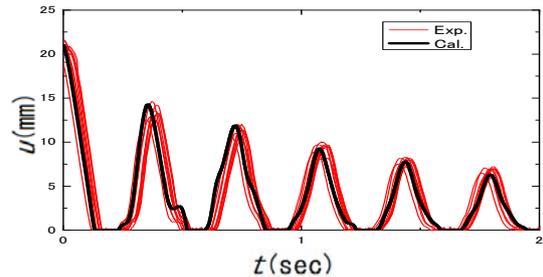


図8 ロープの自由振動波形の一例 (変位拘束部材あり)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計11件)

- ① 藤谷 高寛, 木村 弘之, 1 個の変位拘束部材を有するエレベータ・ロープの振動解析, 日本機械学会論文集, 査読有, 84-864(2018-8), DOI:10.1299/transjsme.18-00048.
- ② 藤谷 高寛, 木村 弘之, 変位拘束部材をロープから離して両端部付近以外に設置した場合のエレベータ・ロープの自由振動, 日本機械学会論文集, 査読有, 84-859(2018-3), DOI:10.1299/transjsme.17-00515.
- ③ 木村 弘之, 藤谷 高寛, 両端部付近を除き変位拘束部材を有するエレベータ・ロープの自由振動, 日本機械学会論文集, 査読有, 83-853(2017-9), DOI:10.1299/transjsme.17-00205.
- ④ 藤谷 高寛, 木村 弘之, 両端から全長の 1/N の位置に変位拘束部材を有する弦の自由振動 (N が奇数, 弦と変位拘束部材との間にギャップがある場合), 日本機械学会論文集, 査読有, 83-846(2017-2), DOI:10.1299/transjsme.16-00504.
- ⑤ 藤谷 高寛, 木村 弘之, 両端から全長の 1/N の位置に変位拘束部材を有する弦の自由振動 (N が偶数, 弦と変位拘束部材との間にギャップがある場合), 日本機械学会論文集, 査読有, 83-845(2017-1), DOI:10.1299/transjsme.16-00478.
- ⑥ H. Kimura and T. Fujitani, Free vibration analysis of string with vibration suppressors located in center part of string, Bulletin of the JSME, Mechanical Engineering Journal, 査読有, 3-6(2016-12), DOI:10.1299/mej.16-00426.
- ⑦ 木村 弘之, 両端から全長の 1/N の位置に変位拘束部材を有する弦の自由振動 (N が奇数の場合), 日本機械学会論文集, 査読有, 82-838(2016-6), DOI:10.1299/transjsme.16-00086.
- ⑧ 木村 弘之, 滝前祐紀, 全長の 1/N の位置に変位拘束部材を有する弦の自由振動 (N が奇数の場合), 日本機械学会論文集, 査読有, 82-838(2016-6), DOI:10.1299/transjsme.16-00035.
- ⑨ 木村 弘之, 中央に変位拘束部材を有する弦の自由振動 (弦と変位拘束部材との間にギャップがある場合), 日本機械学会論文集, 査読有, 82-837(2016-5), DOI:10.1299/transjsme.15-00535.
- ⑩ 木村 弘之, 全長の 1/N の位置に変位拘束部材を有する弦の自由振動 (N が偶数の場合), 日本機械学会論文集, 査読有, 82-835(2016-3), DOI:10.1299/transjsme.15-00531.
- ⑪ H. Kimura, Free vibration analysis of a string with vibration suppressor (When the position of vibration suppressor is opposite to the pulled position), Bulletin of the JSME, Mechanical Engineering Journal, 査読有, 3-1(2016-2), DOI:10.1299/mej.15-00554.

[学会発表] (計20件)

- ① 木村 弘之, 神谷 昌史, 変位拘束部材を有するエレベータ・ロープの振動解析 (変位拘束部材が両端部付近を除き均等に配置された場合), 日本機械学会 (昇降機・遊戯施設等の最近の

- 技術と進歩) 講演論文集, No.18-114 (2019-1), pp. 39-44.
- ② 神谷 昌史, 木村 弘之, 変位拘束部材を有するエレベータ・ロープの振動解析 (変位拘束部材が均等に配置された場合), 日本機械学会第 27 回交通物流部門大会講演論文集, No.18-83 (2018-12), (USB 論文集, 論文 No. 2503).
  - ③ 辻 聖也, 木村 弘之, 変位拘束部材を有するロープの自由振動に及ぼす曲げ剛性・構造減衰の影響, 日本機械学会北陸信越支部第 55 期総会・講演会講演論文集, No. 187-1 (2018-3). (USB 論文集, 論文 No. G042)
  - ④ 神谷 昌史, 藤谷 高寛, 木村 弘之, 変位拘束部材を有するエレベータ・ロープの強制振動 (変位拘束部材が均等に配置された場合), 日本機械学会北陸信越支部第 55 期総会・講演会講演論文集, No. 187-1 (2018-3). (USB 論文集, 論文 No. G041)
  - ⑤ 木村 弘之, 藤谷 高寛, 1 個の変位拘束部材を有するエレベータ・ロープの強制振動, 日本機械学会 (昇降機・遊戯施設等の最近の技術と進歩) 講演論文集, No. 17-87 (2018-1), pp. 21-26.
  - ⑥ 藤谷 高寛, 木村 弘之, 変位拘束部材を有するエレベータ・ロープの強制振動, 日本機械学会山梨講演会 2017 講演論文集, No. 170-3 (2017-10), pp. 131-132. (CD 論文集, 論文 No. 601)
  - ⑦ 松田 健吾, 殿村 菜々子, 木村 弘之, 動吸振器を用いたエレベータ・ロープの横振動抑制, 日本機械学会北陸信越支部第 54 期総会・講演会講演論文集, No. 177-1 (2017-3). (USB 論文集, 論文 No. K043)
  - ⑧ 五十里 健人, 木村 弘之, 釣合いおもりの上下動による張力変動を利用したエレベータ・ロープの横振動抑制, 日本機械学会北陸信越支部第 54 期総会・講演会講演論文集, No. 177-1 (2017-3). (USB 論文集, 論文 No. K042)
  - ⑨ 藤谷 高寛, 木村 弘之, 両端部付近を除き変位拘束部材を有する弦の自由振動 (全長を  $N$  等分 ( $=p+q+p$ ) し, 弦と変位拘束部材との間にギャップがある場合), 日本機械学会北陸信越支部第 54 期総会・講演会講演論文集, No. 177-1 (2017-3). (USB 論文集, 論文 No. K041)
  - ⑩ 辻 聖也, 五十里 健人, 木村 弘之, 釣合いおもりの上下動による張力変動を利用したエレベータ・ロープの横振動抑制, 日本機械学会北陸信越支部学生会 第 46 回学生員卒業研究発表講演会講演論文集, (2017-3). (USB 論文集, 論文 No. 144)
  - ⑪ 木村 弘之, 藤谷 高寛, 両端部付近を除き変位拘束部材を有するエレベータ・ロープの自由振動 (全長を  $N$  等分 ( $=p+q+p$ ) し, 変位拘束部材が無い領域  $p$  が奇数の場合), 日本機械学会 (昇降機・遊戯施設等の最近の技術と進歩) 講演論文集, No. 16-90 (2017-1), pp. 31-36.
  - ⑫ 藤谷 高寛, 木村 弘之, 両端部付近を除き変位拘束部材を有するエレベータ・ロープの自由振動 (全長を  $N$  等分 ( $=p+q+p$ ) し, 変位拘束部材が無い領域  $p$  が偶数の場合), 日本機械学会第 25 回交通物流部門大会講演論文集, No. 16-36 (2016-12), (CD 論文集, 論文 No. 2103)
  - ⑬ 藤谷 高寛, 木村 弘之, 両端から全長  $1/N$  の位置に変位拘束部材を有する弦の自由振動 ( $N$  が奇数, 弦と変位拘束部材との間にギャップがある場合), 日本機械学会山梨講演会 2016 講演論文集, No. 160-3 (2016-10), pp. 163-164. (CD 論文集, 論文 No. 601)
  - ⑭ 藤谷 高寛, 木村 弘之, 両端から全長  $1/N$  の位置に変位拘束部材を有する弦の自由振動 ( $N$  が偶数, 弦と変位拘束部材との間にギャップがある場合), 日本機械学会 2016 年度年次大会講演論文集, No. 16-1 (2016-9), (CD 論文集, 論文 No. G1000802)
  - ⑮ 藤谷 高寛, 木村 弘之, 両端から全長  $1/N$  の位置に変位拘束部材を有する弦の自由振動 ( $N$  が偶数, 弦と変位拘束部材との間にギャップがない場合), 日本機械学会 Dynamics & Design Conference 2016, No. 16-15, (2016-8), (USB 論文集, 論文 No. 128)
  - ⑯ 藤谷 高寛, 木村 弘之, 両端から全長の  $1/N$  の位置に変位拘束部材を 1 つずつ有する弦の自由振動, 日本機械学会北陸信越支部学生会 第 45 回学生員卒業研究発表講演会講演論文集, (2016-3). (USB 論文集, 論文 No. 0)
  - ⑰ 木村 弘之, 両端から  $1/N$  の位置に変位拘束部材を有するエレベータ・ロープの自由振動 ( $N$  が奇数の場合), 日本機械学会 (昇降機・遊戯施設等の最近の技術と進歩) 講演論文集, No. 15-96 (2016-1), pp. 19-24.
  - ⑱ 木村 弘之, 滝前 祐紀, 全長の  $1/N$  の位置に変位拘束部材を有する弦の自由振動 ( $N$  が奇数の場合), 日本機械学会第 24 回交通物流部門大会講演論文集, No. 15-63 (2015-12), pp. 1-8. (CD 論文集, 論文 No. 1315)
  - ⑲ 木村 弘之, 全長の  $1/N$  の位置に変位拘束部材を有する弦の自由振動 ( $N$  が偶数の場合), 日本機械学会 2015 年度年次大会講演論文集, No. 15-1 (2015-9), pp. 1-4. (CD 論文集, 論文 No. G1000304)
  - ⑳ 木村 弘之, 中央に変位拘束部材を有する弦の自由振動 (弦と変位拘束部材との間にギャップがある場合), 日本機械学会 Dynamics & design Conference 2015, No. 15-7, (2015-8), (USB 論文集, 論文 No. 153)

[その他]

ホームページ等

<http://enghp.eng.u-toyama.ac.jp/labs/me06/>

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。