

令和元年5月19日現在

機関番号：14303

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18186

研究課題名(和文)地震時におけるエレベーターロープの自己給電式アクティブ振動制御

研究課題名(英文) Self-powered vibration control for elevator ropes during an earthquake

研究代表者

三浦 奈々子(MIURA, NANAOKO)

京都工芸繊維大学・機械工学系・助教

研究者番号：80735340

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：現在、地震後の避難の際にエレベータを使用することはできないが、高齢化や建物の高層化により、今後「エレベータを使用した避難」が必要と考えられる。本研究では、エレベータを使用した地震時の避難について検討し、巨大地震直後にエレベータの機能を維持するため、および、余震を含む中小地震時にエレベータを稼動し避難に用いることを可能とするための、エレベーターロープの張力を制御することによる振動制御を開発した。さらに、地震の速報として速度応答スペクトルを活用し、その指定領域の面積の時間変動により地震の特性を制御に反映する可変振動制御を提案し、有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では「避難にエレベータを活用する」避難安全対策を地震時に拡張するための技術を提案した。高齢者や障害者が超高層建物から避難する際に階段を使うのは相当数の介助者が必要であり、現実的ではない。また、マンションの場合、しばらく復旧の目処がつかない場合には生活自体が困難となり、避難所の設置や救援活動等経済的な損失も大きくなる。本研究で得られた成果は、エレベーターロープの地震応答を低減させることにより地震後のエレベータの機能維持を達成し、地震後の速やかな復旧、さらに地震中の避難(エレベータ稼動)に貢献するものである。

研究成果の概要(英文)：Although elevators can not be used during an earthquake in Japan, it becomes more important challenge to use them for evacuation from a vibrating high-rise building. In this study, an active vibration control of a time-varying elevator system for evacuation during an earthquake is proposed.

The proposed active vibration control device is installed at the compensating sheave. When an elevator car moves upward or downward, the active device can add tension on elevator ropes depending on mode responses of each rope. The control method is also based on big data about an earthquake early warning. The control system changes parameters by calculating area of the velocity response spectrum as an earthquake early warning. The effectiveness of the proposed control is verified by numerical simulations.

研究分野：振動制御

キーワード：エレベータ ロープスウェイ 振動制御 地震応答

## 様式 C-19, F-19-1, Z-19, CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、地震によりエレベータが停止・損傷する事例が多く報告されている。消火・救援活動や高齢者・障害者等の避難のため、また、高層階の住民の生活に支障をきたさないためにも、地震後のエレベータの機能維持は重要といえる。特に超高層建物では建物の固有周期とエレベータロープの固有周期が低次モードで近接するため、エレベータロープが振動しやすい。エレベータの昇降路内には、かご室の昇降に伴って移動する主ロープ、コンペンロープ等の長尺物がある。これら長尺物には通常ガイドがなく、平常時でも多少は振動しているが、地震時には建物の振動により大きく振動することがある。これはロープスウェイ問題と呼ばれている。この振動が大きくなると、昇降路のレールブラケットや昇降路内設置機器の取り付け金具等の突出物に長尺物が接触し引っ掛かる被害が発生する。2004年の新潟県中越地震では震源地から約200km離れた東京都内の高層および超高層建物においてエレベータロープが長周期地震動と共振し数分間揺れ、昇降路内の機器に絡まる等の不具合を発生させ、復旧にかなりの時間を要した。また、2011年の東北地方太平洋沖地震においても、震源から遠く離れた大阪湾岸の超高層ビルが地震動と共振し、エレベータをはじめ大きな被害を受けた。さらに2015年の小笠原諸島西方沖地震では、関東を中心に高層建物で13,000台以上のエレベータが停止した。このように、地震後のエレベータの速やかな再稼働、復旧時間の短縮や地震時損傷の低減という面から、エレベータロープの振動を効果的に抑制する必要がある。

### 2. 研究の目的

現在、地震後の避難の際にエレベータを使用することはできないが、高齢化や建物の高層化により、今後必要と考えられる「エレベータを使用した避難」についての学術的知見を深めることは重要である。このため本研究では、エレベータを使用した地震後の避難について検討し、地震直後にエレベータの機能を維持するためのエレベータの地震対策を目的とする。エレベータ機能の維持のために、本研究では緊急地震速報や国内に多く設置された加速度計のネットワーク（ビッグデータ）を活用したエレベータロープの振動制御を提案する。

### 3. 研究の方法

本研究はMATLABを用いたシミュレーションにより行う。

振動対策としてはA.エネルギーの流入を減らす対策とB.エネルギーの散逸を増やす対策が考えられる。本研究ではAについてエレベータロープの共振回避を、Bについてエレベータロープの振動制御を考えた。すなわち、A.構造からのアプローチとB.制御からのアプローチを考える。本研究では既存のエレベータで行える振動対策として、A.構造からのアプローチにより、どこまで安全性を確保できるかを確認した。そして、パッシブな対策で防ぎきれない応答を低減させるためにB.制御からのアプローチを考えた。ただしB.制御からのアプローチのみでエレベータの安全性を確保できるとは考えておらず、そのため本研究ではA.構造からのアプローチとB.制御からのアプローチ、さらにそれを統合したアプローチにより実施した。

#### 平成28年度

まず、エレベータを地震後の避難に利用できない理由の調査および利用可能となる条件の抽出として、具体的な要因となる振動箇所や閾値等を文献やヒアリングにより調査した。

次に、超高層建物とエレベータの解析モデルの作成を行った。実際の建物やエレベータを用いて実験を行い、モデルを構築することは難しいため、既往研究を参考に、抽出した条件（振動箇所）をうまく表すことのできるモデルを制御方法ごとに選択し、エレベータ用に立式した。

エレベータの振動対策計画の立案（パッシブの場合）に加えて、アクティブ制御の場合についての検討を行った。なお、制御位置はロープ下端の滑車であるコンペンシーブ（変位制御および張力制御）とした。

#### 平成29年度

かご室位置について、“地震動の特性ごとに適切なかご位置を抽出する”方向性から、“かご室位置の変化に逐次対応できる”ように設計方針を改めた。かご室位置を固定とせず可変とした場合について検討するために、各かご室位置でのロープの振動特性（固有振動数および振動形状）を明らかにした。

エレベータシステムにおける物理的制約およびエネルギー回生の制約の調査・制御理論の構築・検証解析について、制振装置の導入に関する制約条件を抽出し、制御力はコンペンシーブに加える張力に限定した。制御の方向性を2分化し、(A)制御の高性能化および(B)省エネルギーと低コスト化の2種類の検討を進めた。

#### 平成30年度

かご室から上端の滑車までのメインロープと、かご室から下端の滑車までのコンペンロープの振動制御についてA.構造とB.制御の両面からアプローチした。

かご室の位置により、2つのロープの長さが変動するため、それぞれのロープの固有周期も変動する。前年度までにアクティブ制御には、コンペンロープ下端に設置された滑車を下方に引き、張力を加える制御器を用いることとしたが、この付加張力によりさらにロープの振動特

性が変化する。この特性変動について、正弦波を用いた解析により定量的に分析し、張力付加が有効となる条件を抽出した。

建物が受ける地震動の特性（卓越周期が長周期か短周期か）により、励起されるロープの振動モードが異なる。そのため、地震動の特性に対応させるべく、制御パラメータの最適化を行った。また、昇降開始時のロープ振動の位相（初期条件の一つ）が各種ロープの最大振動振幅に影響を与えるかを、入力振動数ごとに確認した。地震動の特性による制御パラメータの切り替え方法については、昇降中のエレベータモデルを用いた場合、非線形性や励起されるモードの多様さの影響を考える必要があるため、議論をシンプルにするべく、ロープと同じく長周期の1自由度振動体を対象として制御の提案を行った。

#### 4. 研究成果

本研究では、超高層建物における避難にエレベータを活用するための振動制御方法を示した。当初、地震中は昇降停止し、地震後の避難のための制御を考えていたが、地震（建物が被害を受けるレベルの地震は除く）中に避難活動を開始できることが、長周期揺れの継続時間の長さや余震の多さを考えた場合重要と考え、研究期間中に制御対象を拡大し、制御方法を提案した。

##### 制御用の振動解析モデル

Fig. 1(a)に示す黒線部分が、本研究で振動制御の対象とした箇所である。変位制御のためのコンペンシーブの水平および鉛直移動を表現するモデル（徳市 洗希, 三浦 奈々子, 曾根 彰, 水平・鉛直方向振動を評価可能なエレベータロープモデルの構築, 第25回交通・物流部門大会 (TRANSLOG 2016), Paper No. 2104, pp. 1-10, 2016.) および、かご室の昇降中の張力制御のためのモデル Fig. 1(b) を定式化した。

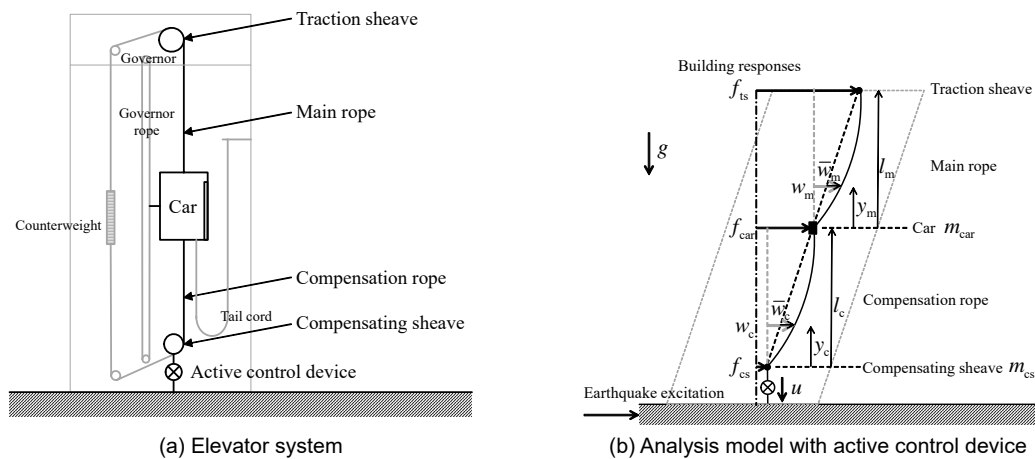


Fig.1 Rope model with an active control device

##### 振動制御

かご室位置の変化に対応するため、制御則を最適レギュレータから、システムの非線形性に対応できる制御則へ変更した。ロープのモード応答に基づくフィードバック制御を提案し、制御性能について評価を行った。評価用のモデルは5次とし、制御考慮次数3で十分に振動応答を抑えることができることを示した。

また、張力付加による制御を行った場合、エネルギー（加えた力と時間で評価）について一定張力入力と比較して大幅な削減ができ、かつ、低コスト化を考え、フィードバックする物理量をかご室の運動（かご室の位置と絶対加速度）のみに制限したコンペンロープの振動制御方法を提案した（例えば Fig. 2, Fig. 3）。

一定の付加張力がエレベータのメインロープとコンペンロープの振動に与える影響を示した（例えば Fig. 4, Fig. 5）。定常応答に関して、メインロープについては、かご室の質量が本論で検討した制御入力と比較して大きいので、制御入力の共振振動数への影響は小さく、定常応答振幅に対する影響が大きい。一方でコンペンロープの固有振動数は制御入力と正の相関があるため、制御入力により共振を回避できる可能性がある。ただし、かご室が高層部にある場合には複数の固有振動数が近接するため、張力付加による共振が起きる可能性を考慮する必要がある。したがって地震時のエレベータ運行のためのアクティブ制御力の算出において、エレベータの運行上既知であるかご室位置を変数の1つとすることで、振動特性がおおよそ把握でき、センサ数を減らせる可能性が高い。

地震動のスペクトルを用いた面積計算 (Fig. 6) から制御力を切り替える方法により、制御対象物の応答によらない切り替え制御を実現した。

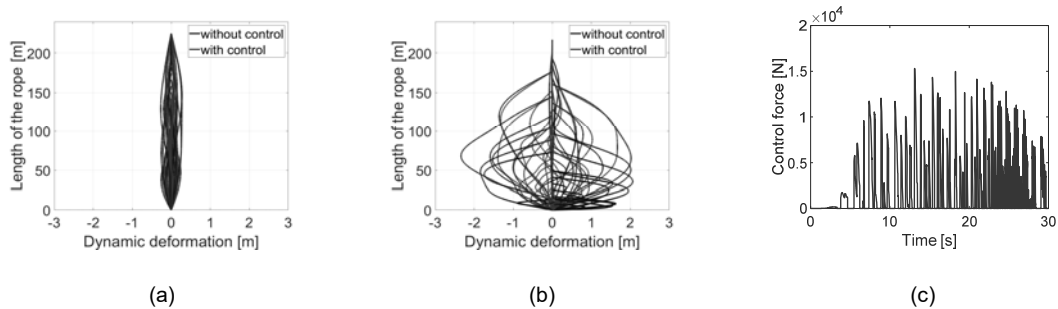


Fig. 2 (a) Dynamic deformation of the compensation rope,  
 (b) Dynamic deformation of the main rope, and (c) The control force.  
 (In the case where the elevator car is moving upward)

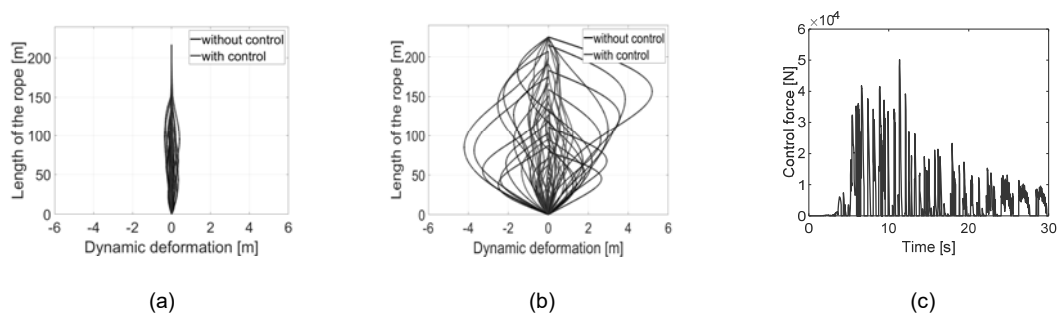
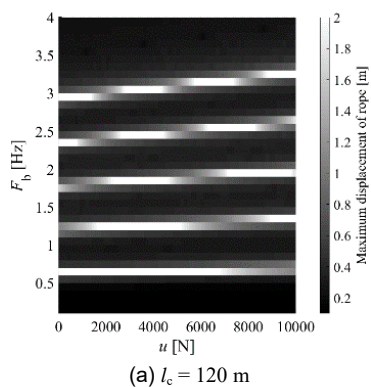
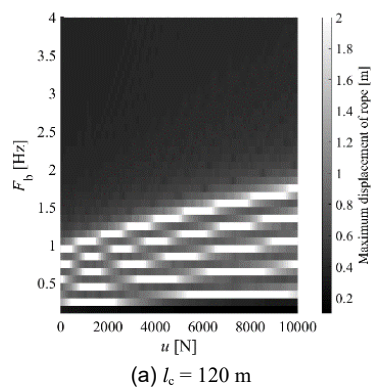


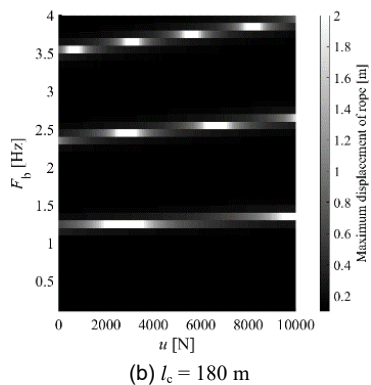
Fig. 3 (a) Dynamic deformation of the compensation rope,  
 (b) Dynamic deformation of the main rope, and (c) The control force.  
 (In the case where the elevator car is moving downward)



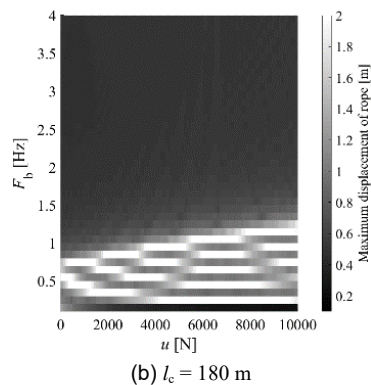
(a)  $l_c = 120$  m



(a)  $l_c = 120$  m



(b)  $l_c = 180$  m



(b)  $l_c = 180$  m

Fig.4 Steady responses of the main rope

Fig.5 Steady responses of the compensation rope

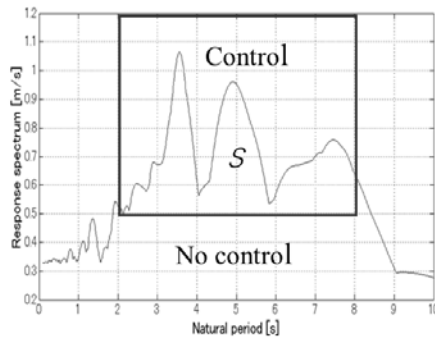


Fig.6 Area of velocity response spectrum

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計5件）

- ① Thuan Xuan Nguyen, Nanako Miura and Akira Sone, Analysis and Control of Compensation Rope Response in Elevator System with Time-Varying Length, Proceedings of the 2017 Asian Control Conference, 査読有, 2017, pp.905-910  
DOI:10.1109/ASCC.2017.8287291
- ② 三浦 奈々子, 曾根 彰, 振動する建物内を昇降するエレベータにおけるコンペンロープのかご室位置と加速度に基づいた張力付加によるアクティブ振動制御, 日本機械学会論文集, 査読有, Vol. 84, No. 864, 2018, pp. 1-15  
DOI:10.1299/transjsme.18-00108
- ③ Thuan Xuan Nguyen, Nanako Miura and Akira Sone, Analysis and Control of Vibration of Ropes in a High-Rise Elevator under Earthquake Excitation, Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 査読有, Vol. 18, No. 2, 2019, pp. 447-460  
DOI:10.1007/s11803-019-0514-9
- ④ 三浦 奈々子, 曾根 彰, 正弦波振動する建物内を昇降するエレベータのロープ振動と付加張力の関係（地震時にエレベータのかご室が昇降するためのアクティブ振動制御 その1）, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, Vol. 84, No. 761, 2019（印刷中）
- ⑤ Thuan Xuan Nguyen, Nanako Miura and Akira Sone, Optimal design of control device to reduce elevator ropes responses against earthquake excitation using genetic algorithms, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 査読有（印刷中）

〔学会発表〕（計3件）

- ① 徳市 洸希, 三浦 奈々子, 曾根 彰, 水平・鉛直方向振動を評価可能なエレベータロープモデルの構築, 第25回交通・物流部門大会（TRANSLOG 2016）, Paper No. 2104, pp. 1-10, 2016.
- ② 藤原右京, 三浦奈々子, 曾根彰: 地震の予測データを用いた免震構造物のアクティブ振動制御, 第15回日本地震工学シンポジウム, Paper No. G009-01-10, pp. 1681-1690, 2018. 12. 8.
- ③ 三浦奈々子, 地震時のエレベータ使用を目的としたエレベータロープの振動制御の基礎検討, 第19回システムインテグレーション部門講演会（SI2018）, Paper No. 1D4-08, pp. 1061-1065, 2018.

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

名称：  
 発明者：  
 権利者：  
 種類：  
 番号：  
 出願年：  
 国内外の別：

○取得状況（計0件）

名称：  
 発明者：

権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：  
ローマ字氏名：  
所属研究機関名：  
部局名：  
職名：  
研究者番号（8桁）：

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：  
ローマ字氏名：

※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。