

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560348

研究課題名(和文)人体衝撃緩和のためのエレベータ非常止め装置に関する研究

研究課題名(英文)A study of elevator emergency stop device for softning impact force on passengers

研究代表者

中川 聡子(Nakagawa, Toshiko)

東京都市大学・工学部・教授

研究者番号：70134898

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：従来のエレベータ非常止め装置の動きを模擬するシミュレータをACサーボで構築し、小型実験装置を製作した。次にEダンパを製作し、そのコイル電流を制御し、Eダンパの減衰比が可変となることを実測した。これを基に非線形制御系を設計、実機仕様でのシミュレーションを行い、大きな衝撃緩和効果が得られることを確認した。さらに、小型実験装置を用い、パッシブ制御での非常停止模擬実験を行った結果、従来の非常止め装置に比べ大きな衝撃緩和効果が確認された。

研究成果の概要(英文)：The results of our study are as follows;

(1) We have made up a small sized test rig which consists of the proposed E-damper, a spring, an elevator cage and a servo system having the motion of conventional emergency stop device. (2) The damping characteristics of the E-damper filled with MR fluid controlled by coil current have been measured and we have confirmed the controllability of E-damper. Based on these characteristics, a non-linear compensator is designed and we have confirmed the effectiveness of softening the impact force on elevator passengers via digital simulations using parameters of actual elevator. (3) We have carried out many experiments to verify the effects for damping the impact force by using the small sized test rig.

研究分野：Electrical Engineering

キーワード：Elevator Emergency Stop Device Reliance and Safety MR fluid damper Control of impact force

1 . 研究開始当初の背景

目覚ましい経済発展を背景に超高層ビルの建設ラッシュが続く。これらのビルには高速で安全なエレベータが求められているが、エレベータの高速化により、システムを構成する電気・機械要素に過大な負担がかかり、このことがエレベータの異常運転を発生させる背景となっている。

エレベータの不調から生じる種々の事故から乗客を守るためには、何重もの安全装置が必要であるが、その中の一つに、事故時に乗客が乗るかご部を一定減速度範囲で停止させる役割を持つ非常止め装置がある。しかし現状の装置では停止直前に大きな減速度が発生し、乗客がけがを負う事例がしばしば報告されている[5章の〔著書〕～参照]。

確実に非常止め装置が働いて停止すること、一方、かご部の減速度ピークを抑えて乗客に過大な衝撃が加わらないこと、この一見背反する条件を満たす人にやさしいエレベータ非常止め装置が必要である。

2 . 研究の目的

本研究では、機械摩擦力によってかごを停止させる従来の「非常止め装置」に、エレベータ非常停止用制御ダンパ(以後、Eダンパと呼ぶ)を挿入した新しい装置を提案し、人体衝撃緩和の観点から安心安全なエレベータシステムを構築することを目的とする。

この目的達成のため、非常止め装置機械ブレーキ部には従来通りの「確実な停止」を、Eダンパにはリアルタイムの制御によって乗客に加わる衝撃が緩和されることを求める。さらに「対ひとシステム」において、仮に停電して制御が不能になっても、提案システムではパッシブなバネ・ダンパ系として安定性が補償される点が特長である。

そこで、研究期間3年で達成すべき課題として申請書に記載した7項を以下に再掲する。

- (1)人が受ける衝撃力と負傷との関係を定量的に評価する
- (2)エレベータの非常停止を模擬する小型実験装置を製作する
- (3)本研究で提案した衝撃緩和のための磁性流体封入ダンパ(Eダンパ)の設計を行う
- (4)Eダンパの製作、Eダンパの減衰特性測定、およびその制御性を確認する
- (5)小型実験装置へのEダンパ実装と制御系の設計法の提案を行う
- (6)エレベータ非常停止模擬実験による衝撃緩和データを検証する
- (7)計算機シミュレーション結果と比較し、提案システムの有効性を検証する

3 . 研究の方法

研究期間3年で行う本申請テーマの研究方法は以下のとおりである。

- (1)「エレベータの非常止め装置性能基準」等の調査
- (2)小型実験装置の製作

- (3)Eダンパの製作および「コイル電流対減衰比特性」の試験(バネ・ダンパ系の減衰振動応答より把握)

- (4)非線形特性を有するEダンパの制御系設計法の提案(実際の非常止め装置のブレーキ特性から周波数重み関数を指定し、これにより拡大系を構成してMatlab, Simulinkを用い、補償器を設計)

- (5)小型模擬実験装置および実機ベースでの計算機シミュレーションにより、提案制御法の効果を検証(小型実験装置による検証実験では、各種センサおよび高応答電源、ならびにLabviewおよびpcを使用。計算機シミュレーションでは、Matlab・Simulinkを使用)

4 . 研究成果

- (1) 模擬実験装置製作と系のモデル化

実験装置製作(研究手法3-(2)に対応)

図1および図2に、制作した小型模擬実験装置の概観を示す。図1はエレベータ非常止め装置のブレーキ力を模擬するシミュレータである。誘導モータとインバータおよびボールねじ機構を採用した上下直動系で、図3に示す実際の非常止め装置の動きを再現するための装置である。実際に当研究室で再現した波形を図4に示す。[5章の〔雑誌論文〕、および〔学会発表〕参照]

また図2に示す実験装置には、本研究で提案した磁性流体(MRF)封入Eダンパがバネと共に挿入されている。

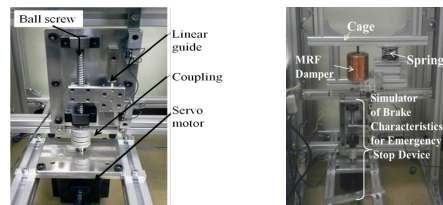


図1 制作した非常停止装置 図2 制作したエレベータ非常停止ブレーキ特性シミュレータ

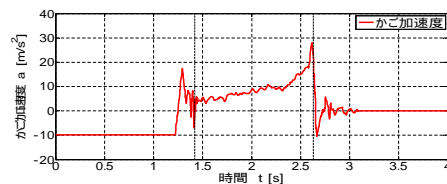


図3 エレベータ非常停止ブレーキ特性(実機実測)

社団法人 日本エレベータ協会:“JEAS-AS17(改正 06-10)”,  
日本エレベータ協会標準, (2008)より引用

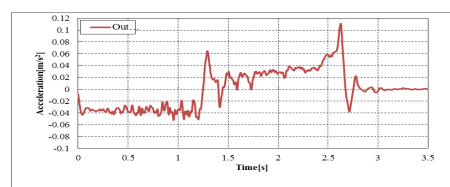


図4 制作したシミュレータから実際に得たエレベータ非常停止特性の実測値(減速度)

Eダンパの特性(研究手法3-(3)に対応)  
 MRF封入Eダンパが、外周に巻いたコイルの電流によって確実にMRFの粘性が変化し、バネ・ダンパ系の減衰比特性が制御されることを検証した結果が図5である。これはMRFを封入したシリンダの周囲に巻いたコイルの層数に対し減衰比を測定したものである。1(msec)程度で粘性変化するMRFを使用していることから、10msec程度の制御性が見込める系であると考えられ、当研究グループで製作したEダンパは、図より減衰比0.2~0.8近い値の範囲で制御可能であることが確認できた。[5章の〔雑誌論文〕参照]

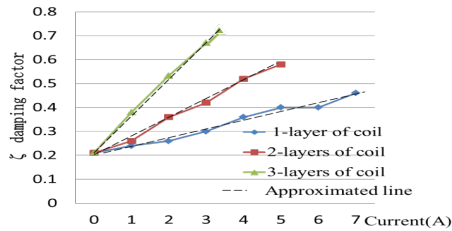


図5 製作したMRF封入Eダンパのコイル電流 - ダンピング比特性

#### エレベータ非常止め装置のモデル化

図6に研究対象とするエレベータモデルの概要を示す。(a)図は従来型のエレベータ非常停止時の挙動を示している。乗客の乗るエレベータかごの異常速度での昇降やかご釣りワイヤが切断した際に、非常止め装置の機械ブレーキが作動する状況を示している。一方、(b)図は本研究で提案したバネ・制御Eダンパ一体型の非常止め装置である。かご部や非常止め装置部に加速度センサ等を取り付けた装置である。

(b)図に示したモデルの運動方程式から、あるべきEダンパ(MRF封入ダンパ)の減衰比をリアルタイムで制御するため、図5を用いてコイルに流す電流をリアルタイムで制御する。コイル電流によって制御された入力(減衰係数)Uは、以下の(1)(2)式で表される。

$$U = - \begin{pmatrix} \dot{x}_2 - \dot{x}_1 & -\dot{x}_2 - \dot{x}_1 & 0 & 0 & -\dot{x}_2 - \dot{x}_1 & 0 \end{pmatrix} P x_e \quad (1)$$

$$P A + A^T P + \frac{1}{\gamma^2} P B_1 B_1^T P + C_1^T C_1 + \varepsilon I = 0 \quad (2)$$

ここで(1)式中のPは、(2)式のリッカチ方程式の解である。[詳細については、5章の〔雑誌論文〕、および〔学会発表〕参照]

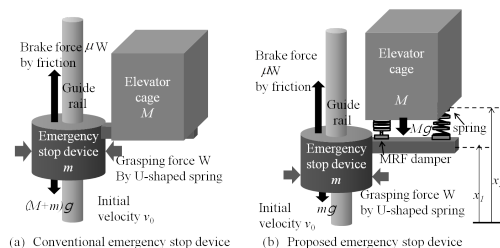


図6 非常止め装置(従来型と提案型)

なお本システムは、通常定数であるダンピング係数自体が制御変数となる強い非線形システムであるため、汎用的な制御理論が使用できない。したがって本研究では(1)式の制御入力の提案を行ったものである。

#### (2) 実エレベータ系における解析と評価 (研究手法3-(4)に対応)

1章に記載したように、乗客の命綱たるエレベータ非常止め装置が、停止直前の過大な減速度ピークにより、乗客に骨折などの重傷を負わせる原因となっている。本研究の課題として、国際的な安全基準に準拠した非常停止特性を達成すること、また「対ひとシステム」の観点から乗客への衝撃(減速度)は国際基準の如何に関わらず抑制されるべきことから、提案システムが具備すべき特性を以下にまとめる。(研究手法3-(1)に対応)

- ( )乗客への衝撃を緩和するため、エレベータ非常止め装置作動時の減速度ピークはできる限り抑制する
- ( )乗客数が少ない場合、非常停止時の衝撃(減速度)が過大化するため、これを可能な限り抑制する
- ( )非常停止装置が設定速度より低速で作動してしまった場合、非常停止時の衝撃(減速度)が過大化するとされ、これを可能な限り抑制する
- ( )定員乗車時において、停止までの平均減速度を0.2~1G以内(エレベータ非常止め装置の国際EN規格)とする
- ( )減速度ピーク波形において、2.5Gを超える時間幅が40msec以下とする(エレベータバッファ装置におけるEN規格。本研究対象のEダンパは、非常止め装置であると同時にバッファ装置としても機能できるため、本規定も制御指針として採用)

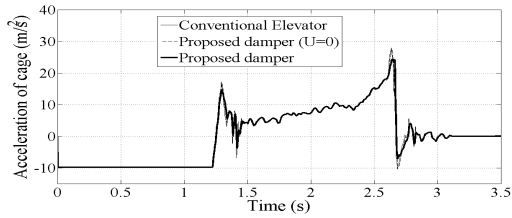
#### Eダンパによる衝撃緩和効果の検証

本研究で提案した制御Eダンパにより、上記( )( )について評価するため、エレベータ実機の緒元を用いてシミュレーションを行った結果を図7に示す。また比較のために、制御を行わないMRFダンパ(コイル電流ゼロ)を挿入した場合の特性も併せてシミュレーションした。図7(a)(b)より、乗客人数の多寡にかかわらず停止時の減速度ピークが抑制されていることが確認される。

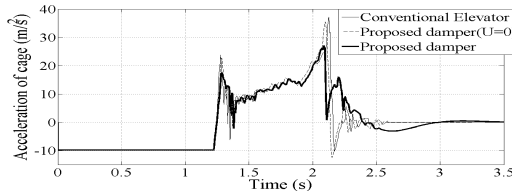
図8は、この時の非常止め装置の降下距離を示したものである。Eダンパを付加した方が、従来の非常止め装置に比べ若干とはいえ、短い距離で停止できることが確認された。また図9は、その際の制御量Uの値である。

以上のように本研究で提案したEダンパにより、非常停止時の衝撃を十分緩和していることが確認できた。[詳細は5章の〔雑誌論文〕参照]

次に、本研究で提案した制御Eダンパにより、上記( )( )について評価するため、エレベータ実機の緒元を用いてシミュレーション

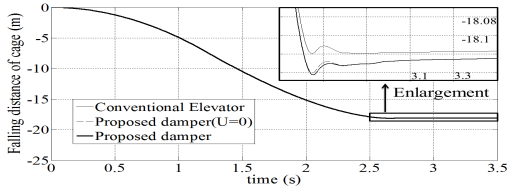


(a) 定員乗客時

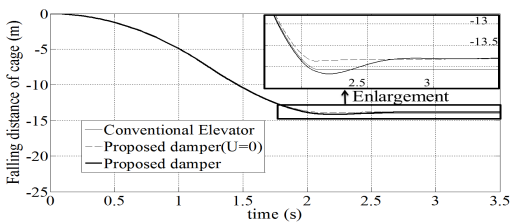


(b) 一人乗り時

図7 非常停止時の減速度  
(従来型, パッシブダンパ, 提案制御)



(a) 定員乗客時



(b) 一人乗り時

図8 非常停止時の降下距離  
(従来型, パッシブダンパ, 提案制御)

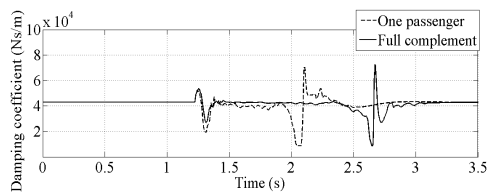


図9 Eダンパ制御による減衰比の変化  
(定員乗客時と一人乗り時)

シミュレーションを行った結果を図10に示す。ここでシミュレーションの条件として、エレベータシステムにおいて一般的に設定される動作開始速度(11.6m/s)より低速(6m/s)で作動した場合を想定した。図より、減速度がEダンパによって抑制されていることが確認される。

一般にエレベータの非常停止の設定速度が誤作動によって早まると(低速のうちに作動してしまった場合),比較的短時間ではあ

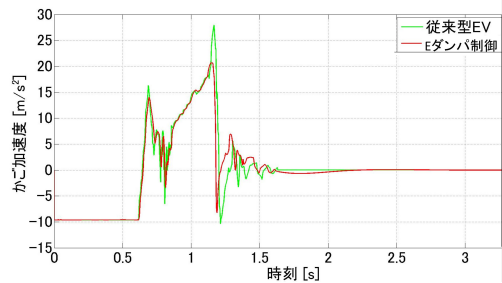


図10 低速作動時の非常停止時の減速度  
(従来型, パッシブダンパ, 提案制御)

るが大きな減速度の波動が一気に乗客に作用することが問題視されてきた。この問題の解決に本Eダンパが寄与できることが確認された。

減速度ピーク・平均減速度・2.5G 減速度の時間幅から見る制御効果の総括

本研究で提案した制御Eダンパにより、前記( )~( )について総合的に評価するため、エレベータ実機の緒元を用いてシミュレーションを行った結果を図11,12,13に示す。本シミュレーションに際しては、国際規格などが制定されている定員時で制御系を設計したものをC-1コントローラと、また非常に大きな減速度を受ける乗客が1名の場合で最適設計したものをC-2コントローラと名付け、区別している。さらに比較の為、従来型の非常止め装置の結果も併記している。

図11は、非常止装置が作動した後の、かご部における最大減速度の値を、乗客人数に対してプロットしたものである。従来型の非常止め装置に比べ、大幅に衝撃力が緩和されることが確認できる。(前記( ))( )対応)

図12は、非常止装置が作動した後の、非常止め装置停止までのかご部減速度の平均値を乗客人数に対してプロットしたものである。従来型の非常止め装置に比べ、大幅に衝撃力が緩和される結果が得られている。従来型の非常止め装置に比べEN規格をクリアできる乗客人数の幅が、Eダンパの効果で広がっていることが確認できる。(前記( ))( )対応)

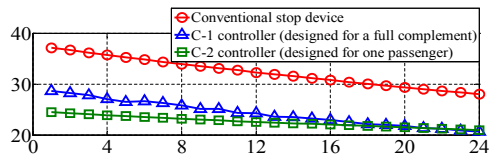


図11 乗客数に対する減速度最大ピーク値

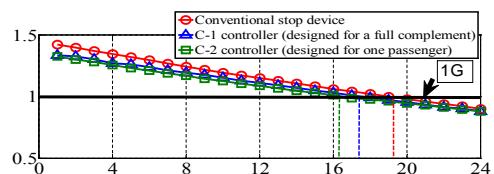


図12 乗客数に対する平均減速度の評価

図 13 は、非常止装置が作動した後、2.5G 以上の過大な減速度が加わる時間幅を、乗客人数に対してプロットしたものである。従来型の非常止め装置に比べ、特に C-2 コントローラを採用した E ダンパでは、過大な減速度の加わる時間幅が 40msec を超えることはないことが確認できる。(前記( ) ( ) 対応) [詳細は 5 章の〔学会発表〕 参照]

### (3) 小型模擬実験装置による実験 (研究手法 3-(5)に対応)

前項までの解析により、製作した E ダンパの減衰係数可変範囲を用いて、エレベータ実機緒元を用いた計算機シミュレーションを行うことにより、提案した E ダンパ制御手法が有効であることを確認できた。

そこで製作した小型模擬実験装置を用い、実験ベースで E ダンパの衝撃緩和検証を試みた。E ダンパを構成するシリンダ外周コイルの電流をパラメータとして、非常停止時の減速度特性をまとめたものが図 14 である。この実験では、先に製作したボールねじタイプのサーボシステムにより、従来の機械的非常停止装置の動きを印加し、乗客の乗る「かご部」での衝撃(加速度)を実測した。図 14(a)(b)(c)はそれぞれ、E ダンパのコイル電流が、0A, 5A, 10A のときの、乗客の乗る「かご部」での加速度特性の応答を示している。

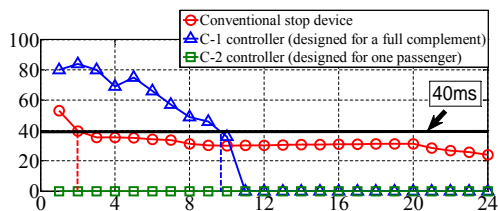


図 13 乗客数に対する減速度ピークにおける 2.5G の時間幅

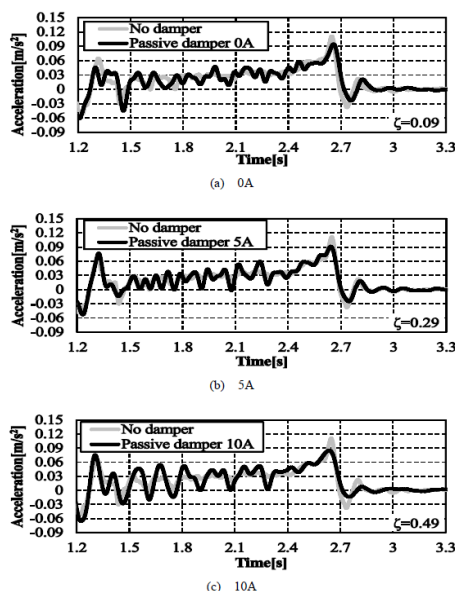


図 14 E ダンパの減衰比変化に対する減速度特性(実測)

業界で問題視されている非常停止直前での衝撃ピーク特性において、従来の非常止め装置での値を 100% とすると、0A でも E ダンパそのものの減衰効果で 17%、5A では 21%、10A では 24% 程度の衝撃緩和効果が計測された。これらはパッシブダンパとしての実験と見ることができるので、現状でも制御の効果により、図 7 (a) の計算機シミュレーション結果である 34% の緩和効果まで期待できる。E ダンパの効果をもっと把握するには、制御実験データが十分でないことから、更に制御実験を加え、本年度中に学会投稿を予定している。

### (4) まとめ

本稿では、E ダンパを搭載した新構成エレベータ非常止め装置とその制御則を提案し、小型模擬実験装置および計算機シミュレーションによって制御の効果について多角的に議論した。

各種の安全評価基準について制御効果を検証した結果、従来型と比較し、かごに発生する減速度の最大値を 24 名定員時に 25%、1 人乗客時に 34% 緩和することができた。また、エレベータ非常止め装置の安全基準である停止に至るまでの平均減速度について、従来型と比較し定員時に 2.2%、最少人数時に 6.9% 緩和することができた。また、エレベータかご落下時に機能するバッファ装置に課されている「2.5G 以上の減速度が 40ms 以上発生してはならない」という基準については、乗客が何人であっても本提案の装置においては基準を満たすことができた。

これらのことより機能性磁性流体(MRF)を用いた新しいエレベータ非常止め装置及び制御により、乗客定員時、少人数時共に大きな衝撃緩和効果が得られることが判明した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

T. Uchida, S. Sato, T. Nakagawa, "A Proposal of Control Method for an Elevator Emergency Stop Device with a Magnetic Rheological Fluid Damper", IEEE Trans. on Magnetics, Nov. 2014, Vol. 50, No. 11, ISSN 0018-9464, 4600404, (4p-length) (査読有り)

S. Matsumoto, Y. Arai, T. Nakagawa, "Non-Contact Conveyance Characteristics of a Magnetically Levitated Very Thin Steel Plate Following a LIM-Driven Cart", IEEE Trans. on Magnetics, Nov. 2014, Vol. 50, No. 11, ISSN 0018-9464, 8600304, (4p-length) (査読有り)

T. Nakagawa, K. Suzuki, A. Haga, "Make-up of a Simulator having the Same Brake Characteristics as Actual Elevator Emergency Stop Device", International Journal of ICEMS, Vol. 2, No. 4, pp. 454 ~

459, Dec. 2013 (査読有り)

F. Kubota, S. Matsumoto, Y. Arai, T. Nakagawa, "Control Techniques of Levitation and Guidance for Processing and Carrying Thin Steel Plates", Proc. of IECON 2013 IEEE, 39th Annual Conference of the IEEE, ISBN:978-1-4799-0223-1, pp.3437-3442, Nov. 2013 (査読有り)

R. Morisawa, T. Nakagawa, "Experiments and Simulations of Transportation by LIM for Magnetically Levitated Steel Plates", DS3G5-12, 1-5p, Proc. of ICEMS, ISBN 978-4-88686-077-4, Oct. 2012 (査読有り)

Y. Nagano, T. Nakagawa, K. Suzuki, "A Basic Study for an Elevator Emergency Stop Device Utilizing M. R. Fluid", DS3G3-6, 1-4p, Proc. of ICEMS, ISBN 978-4-88686-077-4, Oct. 2012 (査読有り)

[学会発表](計10件)

S. Shunsuke, T. Uchida, T. Nakagawa, "Comparison of Characteristics between an Elevator Emergency Stop Device with a Magneto Rheological Fluid Damper and a Conventional Device", IEEE International Conference of InterMag, May 2017, Beijing (China)

O. Suzuki, D. Nagashima, K. Nishimura, T. Nakagawa, "Study of Magnetic Levitation for a 0.18-mm-thick Steel Plate by Adopting Twisting-mode Control", IEEE International Conference of InterMag, May 2017, Beijing (China)

早川, 内田, 佐藤, 中川, 「エレベータ小型模擬装置のシステム構築および特性改善に関する研究」, 電磁力関連ダイナミクスシンポジウム, 予稿集(4p-length), 2017年5月, ハウステンボス, 長崎  
荒井, 西村, 中川, 「薄鋼板磁気浮上システムにおけるギャップ信号オブザーバの動作確認」電磁力関連ダイナミクスシンポジウム, 予稿集(4p-length), 2017年5月, ハウステンボス, 長崎

K. Matsumori, T. Nakagawa, "Transport Experiments of Automatic Gantry Crane Operation by Linear Induction Motor", 174-175p, Proc. of APSAEM, July 2014, Taichung (Republic of China)

T. Nakagawa, "Control Techniques of Levitation and Guidance for Processing and Conveying Thin Steel Plates", 3rd SIIT seminar, May 2014, (タイタマサート大学との国際交流プログラム), 依頼講演, 東京都市大学, 東京

S. Matsumoto, Y. Arai, T. Nakagawa, "Non-Contact Levitation and Conveyance Characteristics of a Thin Steel Plate Magnetically Levitated by a LIM-Driven

Cart", IEEE Proc. of INTERMAG, 3258-3260p, May 2014, Dresden (Germany)

T. Uchida, S. Sato, T. Nakagawa, "A Proposal of Control Method for an Elevator Emergency Stop Device with a Magnetic Rheological Fluid Damper", IEEE Proc. of INTERMAG, 3417-3419p, May 2014, Dresden (Germany)

A. Haga, T. Nakagawa, "Make-up of a Simulator having the Same Brake Characteristics as Actual Elevator Emergency Stop Device", Proc. of ICEMS, ISBN: 978-1-4799-1447-0, Oct. 2013, Busan (Korea)

R. Morisawa, T. Nakagawa, "A Study on Propulsion System with LIM in Processing Magnetically Levitated Steel Plates", Proc. of INTERMAG, HR-08, June 2012, Vancouver (Canada)

[図書](計3件)

社会資本整備審議会昇降機等事故調査部会(委員として), 「東京都内エスカレーター事故報告書」1-38p, 国土交通省公文書, H27年1月

社会資本整備審議会昇降機等事故調査部会(委員として), 「栃木県内エレベータ事故調査報告書」, 1-20p, 国土交通省公文書, H27年1月

社会資本整備審議会昇降機等事故調査部会(委員として), 「神奈川県内コースター事故調査報告書」, 1-26p, 国土交通省公文書, H27年3月

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中川 聡子(Nakagawa, Toshiko)  
東京都市大学・工学部・教授  
研究者番号: 70134898