

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23310114

研究課題名(和文)昇降機・遊戯機械における事故抑制のための構造健全性評価システムの開発

研究課題名(英文)Development of the structural health monitoring system for prevention of the accident of an elevator and the amusement machine

研究代表者

青木 義男 (AOKI, Yoshio)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：30184047

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,300,000円、(間接経費) 3,090,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は現行の昇降機・遊戯機械の定期検査制度における課題となっている初期損傷検知が可能な構造健全性監視システムを開発するために、加速度センサとワイヤーロープテスタを用いた損傷検知実験を行い、特徴量抽出のための適切な信号処理手法や機械学習による認知判断の可能性を検討し、応答加速度や漏洩磁束強度の測定値から、ワイヤーロープの初期損傷である素線切れや錆の発生を、高い精度で検知可能であることを検証した。また、実際の遊戯施設軌道での車輜走行時に発生する動的応答から軌道支持構造体の構造健全性評価を行い、実験結果から適切なセンサデバイスと信号処理方法について言及した。

研究成果の概要(英文)：This study aimed to develop for the structural health monitoring system which can detected invisible initial damage for an elevator and the amusement machine. The experiment of initial damage detection by using an acceleration sensor and the wire rope tester was executed, then, an appropriate signal processing for the feature extraction method and the damage identification by the machine learning were examined. From measurements of the response acceleration and leakage flux, the initial damage and rust of the wire rope was proven to be able to detect by high accuracy.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・社会システム工学・安全システム

キーワード：安全システム 構造健全性評価 予見保全 遠隔監視 特徴抽出 機械学習

## 1. 研究開始当初の背景

近年、建築物の高層化や娯楽施設の多様化に伴って昇降機・遊戯機械の設置台数は1980年代～90年代に増加の一途を辿り、エレベータの保守台数は100万台に近づいている。また、これらの機械装置の高速化・多様化に伴って、構造や制御方式も複雑化し、駅舎や歩道橋など公共の場所への設置も増えていることから設置後の安全管理や保守点検が担う役割が大変重要になってきている。ところが、昨今、定期検査が法制化されていない歩道橋設置昇降機での主索ストランド破断事故例など、昇降機での保守点検の不備による挟まれ死亡事故や落下事故、遊戯機械の強度部材折損による死亡事故など、重大な事例を含めた事故・故障が年間1000件近く発生しており、安全性能確保のための技術目標の確立と共に、安全性能評価法や維持保全技術の開発が緊急の課題となっている。国土交通省は、このような事態に鑑み平成19年に「建築設備等の安全性能確保のための制御システム等の設計・維持保全」に関する総合技術開発プロジェクトを立ち上げ、昇降機・遊戯機械の事故事例原因分析、リスク評価と安全性能の分類・水準の明確化、確立されている安全技術を分析し、その成果を建築事故ナレッジベースの整備充実や建築基準法施行令の改正・告示にも反映させている。しかし、適正な安全性能評価法の確立や維持保全技術の開発には至っていない。

研究代表者の青木は、1993年より(財)日本建築センターの昇降機・遊戯施設性能評価委員を務め、2007年から国土交通省社会資本整備審議会建築分科会専門委員として昇降機・遊戯機械の事故事例・原因の分析を行っているが、最近の昇降機・遊戯機械の高速化・高性能化の裏側で、複雑になった制御システムのリスク評価と共に、現行法令で定められた定期検査報告制度(6か月～1年間隔)による維持保全の不完全さが主要因となった事故事例が多く見受けられている。

現状の定期検査報告制度の問題点は、

(1)定期検査の業務標準、JISの検査標準などの検査基準の建築基準法上の位置付けの不明確さと判断基準の曖昧さ(検査資格者のスキルに個人差をもたらす)

(2)検査対象部品の材料劣化進行の程度に関する判断基準の不明確さ

(3)検査対象部品の摩耗や弛緩の程度に関する判断基準の不明確さ

であり、法令改正を伴う部分の短期間の是正は困難であろう。従って、保守・定期検査以外でも予見保全を可能とし、現状の検査基準で判断の難しい構造健全性評価に対する支援技術・システムの開発が急務である。

## 2. 研究の目的

本研究は現行の昇降機・遊戯機械の定期検査制度における緊急課題と考えられる「構造健全性判断基準の定量化」を実施し、「常時の保守点検を支援する構造健全性評価システム」を開発することでこれらの機械システムの安全性・信頼性の向上を目指すものである。

(1)「構造健全性判断基準の定量化」については、昇降機・遊戯機械の運用時の材料劣化の程度、内部損傷や変形の許容量、摺動部の摩耗や締結部の弛緩の程度について、金属内部の空間磁場ベクトルや、固体伝達波より特徴抽出して得られる新たな物理量を用いて、構造安全指標となる判断基準値について分析・調査し、検査資格者の定期点検に際して、より適切な業務方法や保守保全に対する判断基準を提示することを第一の研究課題とする。本研究グループでは、これまでにフレーム締結構造の部材に生じた亀裂損傷や締結部ボルトの緩みを加速度やひずみ応答信号によって精度良く検知する新たな健全性評価手法や、金属主索ストランドの破断や腐食を磁束強度変動から検知し、強度低下の度合いを判断する手法の提案を行い、個体伝達波や磁束強度変動が構造健全性評価に適切な物理量であることを検証してきた。昇降機・遊戯機械についても多くが締結部や可動部・摺動部を有するフレーム構造や吊下げ構造であるため、提案手法で用いた離散ウェーブレット変換による信号処理やコヒーレンス評価が有効と考えられる。

(2)「常時の保守点検を支援する健全性評価システム」の開発では、間欠的な定期検査での予見が難しく、短期間に段階的に進行する材料劣化や異常摩耗、締結部損傷などの進行を検知し、保全の必要性を判断する構造健全性評価システムの構築と実証実験を行い、検知精度と汎用性の高い保守保全支援の実現を第二の研究課題とする。前述の固体伝達波や空間磁場ベクトルから得られた情報を基に、初期的な材料劣化、異常摩耗、締結部弛緩や損傷を検知する認知判断手法には、不全原因や部位の高精度な特定と同時に、保守の緊急性の判断も求められる。そのため本研究では、構造モデル逆同定型の局所フレキシビリティ法を用いた不全部位検知システムを構築し、不全原因や部位の特定精度を検証する。また、保守の緊急性の判断については、学習型で汎化性が高く、認知判断精度にも優れたサポートベクターレグレーションを応用した保守緊急性識別システムを構築し、既存の認知判断システムとの比較と共に識別精度向上について検討する。本研究グループでは既往研究において、固体伝達波や磁束強度変動によるフレーム構造や吊下げ構造の健全

性評価にこれらの手法が特に有用であることを示している。

以上の2つ研究課題を解明し、検査資格者の支援が可能な「構造健全性評価システム」の開発を行い、昇降機・遊戯機械の安全性・信頼性の向上に寄与することを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究は現行の昇降機・遊戯機械の定期検査制度における緊急課題である「構造健全性判断基準の定量化」に関し、運用時の材料劣化の程度、内部損傷や変形の許容量、摺動部の摩耗や締結部の弛緩の程度について、固体伝達波より特徴抽出して得られる新たな応答物理量を定義して、構造安全指標となる判断基準値について分析・調査し、検査資格者の定期点検に際したよりの確な業務方法を提示することを第一の研究課題とする。また、「常時の保守点検を支援する健全性評価システム」を開発するために、測定された応答物理量に、新たな構造特性逆解析手法や認知判断手法を適用し、構造不全要因、部位や程度の特特定と共に、保守緊急性の判断能力について検証を行い、健全性評価システムのプロトタイプモデルを構築することを第二の研究課題とする。これらの研究課題解明を通じて、昇降機・遊戯機械の安全性・信頼性の向上に寄与するものである。

#### (1) 「構造健全性判断基準の定量化」

研究代表者は、10年以上に渡って行ってきた昇降機・遊戯施設の個別性能評定と製造認証の実績ならびに、国土交通省社会資本整備審議会建築分科会での事故要因の分析結果を踏まえ、昇降機・遊戯機械の構造健全性評価に関する基本的な考え方を取り纏めている。この中で、現行制度による昇降機検査資格者による定期検査において、昇降機主索ストランドの内部損傷や腐食の検知、昇降機のブレーキパットや綱車ロープ溝の摩耗、レールブラケットの強度低下やその結合部の緩みなどが、また遊戯機械では軌道走行を伴う場合の荷重支持部材や締結要素の強度低下や摩耗について、健全性判断基準が検査者で統一されていないことが明らかとなっている。本研究グループでは、小型軽量で実装し易く安価な計測器を用いた新たな検査方法と、支持部材の亀裂や締結部の弛緩に起因する応答信号変動の傾向について検討してきており、実構造への適用可能性が高いことを実証している。また、現行の打撃診断と同様の方法で構造健全性を評価する際に、コヒーレンス評価を併用することで、摩耗や弛緩についての診断精度を向上させる手法も提案しており、検査資格者による評価結果のバラツキの低減が期待できる。

#### (2) 「常時の保守点検を支援する構造健全性

評価システム」

本研究グループでは、これまでの基礎研究の中でフレーム締結構造や昇降機用主索ストランドの健全性評価システムを考案し、フレーム締結ボルトの弛緩状況や、主索ストランドの損傷位置と程度などの検知が行えることを明らかにしている。このシステムは圧電ポリマセンサ、MEMS加速度センサや磁気センサなどを搭載し、計測した固体伝達波や空間磁気ベクトルの応答変動幅や変動周波数帯、コヒーレンス変動などをモニタリングすることで、締結構造の疲労亀裂や弛緩状況、主索ストランドの内部損傷などを検知し、検査者に周知するものである。

昇降機や遊戯機械においても、稼働時に生ずる固体伝達波は、様々な構造特性変動に係わる応答信号が合成されたものであり、不具合発生時やその予兆となる特徴信号抽出ができれば、超音波探傷や磁粉探傷で判明し難い部位や溶接部損傷、締結部や軌道アンカーの弛緩なども検知できる可能性が高い。また、本研究グループが開発する主索ストランド健全性評価システムは、検出困難な内部疲労損傷や異常摩耗も検知可能と目されており、昇降機や遊戯機械の定期検査を支援する技術として、構造的な不具合による事故や故障の低減が期待できる。さらに、構造不全要因の推定についても、本研究グループによって、フレーム締結構造の健全性評価に用いた局所フレキシビリティ法とサポートベクターレグレッションが有効であることが検証されており、これらの手法が同様の構造形態からなる昇降機や遊戯機械の構造健全性評価に適用可能と考えている。

### 4. 研究成果

(1) 遊戯施設構造躯体の設計基準を検討する目的として、コースターの動的応答を把握するため、ピエゾ変位センサと3軸加速度センサにより、振動を測定した。計測施設は下記の通りである。

・神奈川県横浜市金沢区八景島・八景島シーパラダイス・サーフコースター（ジェットコースター）

所要時間：約3分

最高時速：75km/h、全長：1,271m、最高部：44m、最大勾配：45度、海上突出部：85m、アップダウン：20カ所、水平旋回部：3カ所  
定員：24名（4人乗り×6両）

乗車制限：身長120cm以上および65才未満の方は利用可能

計測に用いたピエゾ変位センサおよび加速度センサの取付けは、マグネット等を利用して取付け、取付け位置は、最終旋回後の降下部のコースターレール支えパイプ部（図1）と、その脇のコースター支柱部の2箇所を取

付け同時刻のデータを取得した．比較のための加速度センサも同様の位置に取り付けた．



図1 ピエゾ変位センサ取付の一例

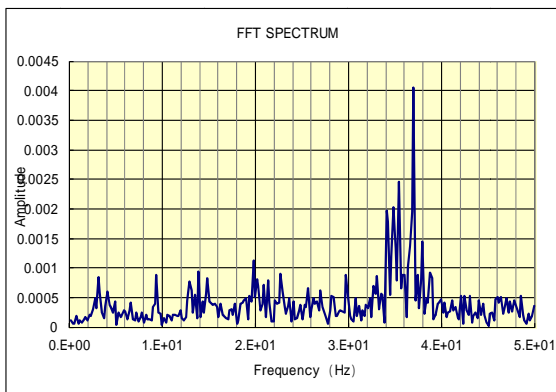


図2 加速度センサ計測結果

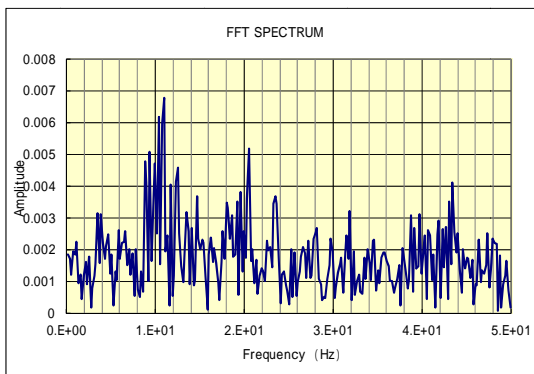


図3 ピエゾ変位センサ計測結果

図2と図3はコースター走行時にレールと支柱で計測された動的応答の周波数応答特性の一例である．両図を比較すると，加速度センサよりもpiezoelectric変位センサの出力感度が大きく，個体伝達波に多くの卓越周波数が存在することが分かる．加速度センサのデータは低周波領域で感度が低く変位波の卓越領域でpiezoelectric変位センサが有利であることがわかる．特に離れた場所からの個体伝達波に対しては，40Hz前後での出力がほぼ同様であるが，それ以下の周波数での検出感度が変位センサ優位であることが分かる．また，乗物が近傍を通過した時の応答波形からは加

速度センサでも多くの卓越周波数が検出されているが，piezoelectric変位センサの出力感度が4倍～5倍大きい．piezoelectric変位センサにおいて1Hz以下の低周波でも大きなピークが検出されていることが特徴的である．以上より，  
 ・変位波の卓越する低周波数域では圧電型加速度センサよりもpiezoelectric変位センサの感度が高く，大型構造物の特性変動を高精度で検出できる可能性を示した．  
 ・コースター構造躯体は乗物の走行加速度を中心に設計されており，軌道支持構造の動的応答から乗物の走行性能の変動についても監視できる可能性がある．  
 ・コースター構造躯体は軌道支持構造とそれを支える支柱で複雑に構成されているため，複数の固有振動数（固有モード）が存在し，複雑な周波数応答特性を示すが，乗物への乗客数影響などの定性的な変動は検出できる可能性を示した．

## (2)ワイヤーロープ自動点検機の開発

図4はGMRセンサーアレイシステムを搭載したプローブクライマー（2ユニット）である．このプローブクライマーを適正な速度で昇降させることにより，自立昇降による遠隔ワイヤーロープ健全性評価が実現できる．本実験は，5[m]のワイヤーロープに50cm間隔で3本・6本・9本・12本・15本の集中破断による素線破断を作成し，製作した自走式プローブクライマーを昇降させることで，損傷位置と損傷度合いが判断できるかを検証した．

図5は，昇降速度1.5[m/s]，サンプリング周波数500[Hz]のときの結果である．また，表1に昇降速度と測定条件に対する損傷検出の可否について示す．また，図6はワイヤーロープ内部（麻線と接触している素線の破断）に素線破断がある場合の測定結果であるが，従来のワイヤーロープセンサーでは検出困難であった内部素線破断についても漏洩磁束変動が観察され，検出が可能となっていることが分かる．



図4 自走式ワイヤー点検機の試作モデル

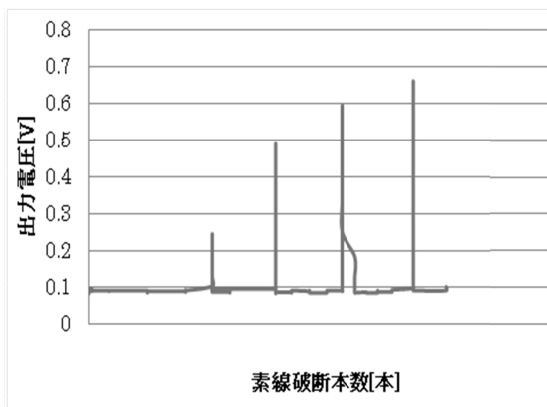


図5 漏洩磁束強度と素線破断本数の関係

表1 自動点検の可否に関する評価結果

	昇降速度 [m/s]	サンプリング周波数		
		500 [Hz]	1000 [Hz]	2000 [Hz]
外部素線破断	1.5 m/s	x	x	
内部素線破断	1.5 m/s			
片面摩耗	1.5 m/s	x	x	
全面摩耗	1.5 m/s	x	x	

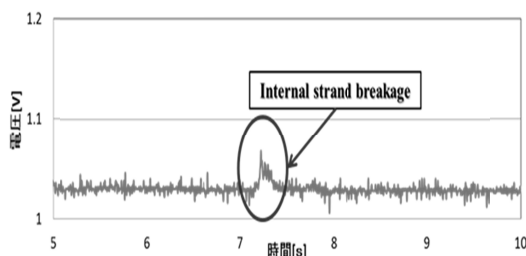


図6 内部素線破断の損傷検知結果

以上の結果から、探傷長さ損傷率を測定する為には 3 [mm] より細かいデータ取得間隔になる昇降速度とサンプリング周波数を選定する必要がある。また、3本の素線破断はデータ取得間隔 3 [mm] でも検知できなかったが、データ取得間隔を更に細くすることでの検知は可能になることが期待できる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 10 件)

Yoji Ishikawa, Tatsuhiro Tamura, Kiyotoshi Otsukat, Takaya Horiike, Takeo Iwaoka, Naoki Masui, Katsuya Hamachi, Satomi Katsuyamat, and Yoshio Aoki, "THE SPACE ELEVATOR CONSTRUCTION CONCEPT", Proceedings of the 64th International Astronautical Congress, 査読有, IAC-13-D4.3.7, Sept. 23-27, 2013, Beijing, China.

K. Wakizaka, Y. Aoki, A. Tabata, G. Ben,

"Study on Dynamic Response of FRP Float for Light Seaplane", 査読有, Proceedings of the 19th International Conference on Composite Materials, July 28-Aug 2, 2013, Montreal, Canada

Kenichi Kurisaka, Takaaki Sakai, Hidemasa Yamano, Satoshi Fujita, "Development of Level-1 PSA Method for Sodium-Cooled Fast Reactor", Nuclear Engineering and Design, 査読有, Elsevier, 10.1016/j.nucengdes., 2013年8月

Guo Xie, Hiroshi Mochizuki, Sei Takahashi, Hideo Nakamura, "Research on Development of a Safe and Reliable Software System for Automatic Train Protection and Block System", 日本信頼性学会誌, 査読有, vol.35,no.1, pp.59-70, 2013

Takumi NAGATA, Akihisa TABATA, Yoshio AOKI, Goichi BEN, "Study on Dynamic Response of Fiber-Reinforced Plastic Float for Light Seaplane", Proceedings of the 9th Joint Canada-Japan Workshop on Composites, 査読有, J32, July, 2012

Kiyoshi Aida, Koutaro Kawamura, Yuichi Hiyoshi, Satoshi Fijita, Keisuke Minagawa, "Vibration Displacement Prediction Formulae for Boiler Structures Based on Energy Balance", Journal of System Design and Dynamics, The Japan Society of Mechanical Engineer, 査読有, Vol.6, No.5, pp.676-684, 2012年12月

Keisuke Minagawa, Satoshi Fujita, "Cumulative Damage Evaluation based on Energy Balance Equation", Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, 査読有, September, 2012

相田 清, 河村 幸太郎, 樋吉 佑一, 藤田 聡, 皆川 佳祐, "エネルギーの釣合いに基づくボイラ構造物の振動変位予測式", 日本機械学会論文集C編, 査読有, 78巻, 789号, pp.1771-1778, 2012年5月

Guo Xie, Xinhong Hei, Hiroshi Mochizuki, Sei Takahashi, Hideo Nakamura "Model Based Specification Validation for Automatic Train Protection and Block System", IEEE 7th International Conference on Computer Sciences and Convergence Information Technology, 査読有, CD-ROM, 2012

Guo Xie, Xinhong Hei, Hiroshi Mochizuki, Sei Takahashi, Hideo Nakamura, "Formal Analysis of Automatic Train Protection and Block System for Regional Line Using VDM++", International Journal of Railway, 査読有, vol.5,no.2, pp.65-70, 2012

〔学会発表〕(計 件)

〔図書〕(計2件)

青木義男, 自動車への適用事例から学ぶ  
「CFRP」の要素技術, 査読有, (株)情報機構,  
ISBN 978-4-86502-029-8, 2013年6月

Akihisa TABATA, Emiko HARA and Yoshio  
AOKI, Performance Evaluation of a Probe  
Climber for Maintaining Wire Rope,  
Interdisciplinary Mechatronics  
-Engineering Science and Research  
Development-, 査読有, Wiley (ISBN:  
9781848214187), pp.209-226, April, 2013

〔産業財産権〕

出願状況(計 件)

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

取得状況(計 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

<http://kenkyu-web.cin.nihon-u.ac.jp/Profiles/41/0004043/theses.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

青木 義男 (AOKI Yoshio)  
日本大学・理工学部・教授  
研究者番号: 3 0 1 8 4 0 4 7

### (3) 連携研究者

中村 英夫 (NAKAMURA Hideo)  
日本大学・理工学部・教授  
研究者番号: 0 0 2 6 7 0 1 4

高橋 聖 (TAKAHASHI Sei)  
日本大学・理工学部・准教授  
研究者番号: 1 0 2 5 6 8 1 0

田畑 昭久 (TABATA Akihisa)  
日本大学・理工学部・助教  
研究者番号: 7 0 4 5 3 9 0 9