

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20310099

研究課題名(和文) 昇降機・遊戯機械の予見保全のための構造健全性監視システムの開発

研究課題名(英文) Development of the structural health monitoring system for initial damage identification 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

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ト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。

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.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2009年度	3,200,000	960,000	4,160,000
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
総計	10,100,000	3,030,000	13,130,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：社会・安全システム・社会システム工学・安全システム

キーワード：①安全システム、②構造健全性、③予見保全、④遠隔監視

## 1. 研究開始当初の背景

近年、建築物の高層化や公共施設のバリアフリー化に伴って昇降機の設置台数は1980年代～90年代に増加の一途を辿り、図1に示すように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、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。

## 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健全性評価システム」を開発することでこれらの安全性・信頼性向上を目指すものである。「構造健全性判断基準の定量化」については、昇降機の運用時の材料劣化、腐食、摺動部摩耗や締結部弛緩の許容量について、固体伝達波等から特徴抽出して得られる新たな物理量を定義し、健全性判断基準について分析し、定期点検での的確な業務方法を提示する。また、「常時の保守点検を支援する健全性評価システム」の開発では、定期検査での予見が難しく、短期間に進行する材料劣化や異常摩耗、締結部弛緩などを検知する構造健全性評価システムの構築と実証実験を行い、保守点検の自動化を検討する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 昇降機ワイヤーロープの損傷検知試験

エレベータに用いられる鋼製ワイヤーロープは、軸となる繊維心にストランドという素線を撚り合わせたものを、さらにn本撚り合わせてできている。これをnストランドのワイヤーロープといい、エレベータでは一般的にn=6~8のものが使われている。損傷検知実験では図1右のように直径0.6mmの素線24本を1ストランドとし、これを6ストランドより合わせたワイヤーロープを用い、このワイヤーロープに切り込みを入れた試験体と、図1左のように素線が解けた状態を想定し、10mm程度の短い素線を埋め込んだものの2つの試験体を利用し損傷検知試験を試みた。

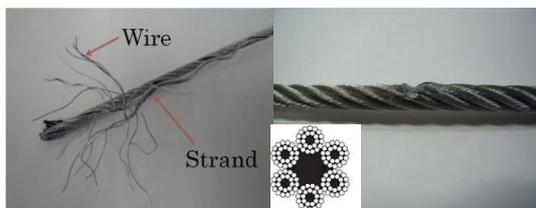


図1 鋼製ワイヤーロープ

まず、自走式検査機器を利用してロープに生じた損傷による応答加速度変動と共に、傷や錆によって生ずる漏洩磁束をワイヤーロープテストで計測し、それらの測定データに対し、信号処理を施して異常判断の可否を調べた。信号処理手法としては、周波数毎のパワースペクトルを分析する際に用いるFFT(高速フーリエ変換)と、マザーウェーブレットと呼ばれる短い波形を拡大や縮小・平行移動させることで波形を表現するウェーブレット変換の双方で検討した。図2に応答加速度(a)と漏洩磁束強度(b)の計測結果を示す。図2より応答加速度の測定データ(元波形)からは、直接、素線破断や解けは検出し難いが、漏洩磁束強度からは素線破断や錆

の発生部分についてもスペクトルの明確な変動が認められる。

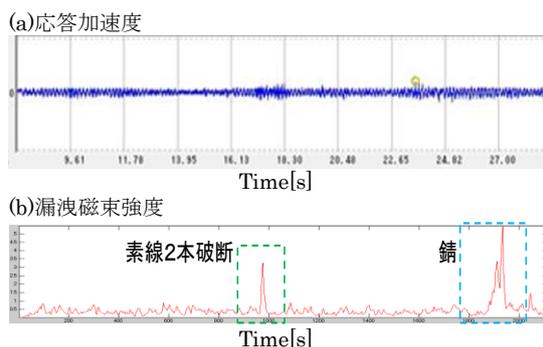


図2 応答加速度と漏洩磁束強度の時刻歴応答

#### (2) 信号処理手法

図2(a)の応答加速度の原波形では、損傷の有無、損傷箇所の同定が難しい状態である。そこで、3の信号処理手法により、応答加速度によるワイヤーロープの損傷検知の可能性について検討した。最初に計測した応答加速度データにおいて、損傷部分通過の際にスペクトル変動が確認された箇所に離散フーリエ変換を適用して周波数分析を実施し、損傷深さ0mm, 0.9mm, 1.5mm, 1.8mmの試験体において、応答振動の主要な周波数帯域として測定された20Hzまでを拡大して、図3に示すヒストグラムに取り纏めた。

同図より20Hzまでの各周波数において、損傷によって加速度スペクトルの顕著な変動が確認されるのは、5~8Hzである。またこれ以外にも15Hz付近でパワースペクトルが大きく見られるが、これは損傷深さによる変化が少なく、またモータ振動のみのデータと比較したところ、自走型検査機器の駆動モータの振動成分であることが確認されたため、5~8Hzの加速度変動に注目すれば損傷が検知できる可能性がある。

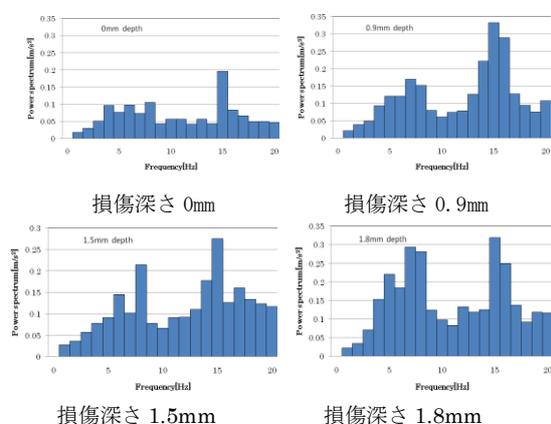


図3 FFT変換結果

次に、同様の応答加速度をウェーブレット

変換して帯域分析した結果を図4に示す。ここで、一番上のsが原波形で、a8、d8~d1がウェーブレット変換した結果であり、下側が高周波領域の分析結果で、上にいくほど低周波領域の分析結果となる。図4より5~8Hzが含まれているd7(4~8Hz)の周波数帯域をみると右側の領域に一段と大きい波形が確認できるが、他の周波数帯域にはあまり変化は認められない。また、図5は損傷のないワイヤーロープのd7帯域の結果と図4のd7帯域を比較したものであるが、図5下の赤丸部分のスペクトル強度が顕著に大きいことが分かる。素線破断が1本でも存在する場合はどれも0.2m/s<sup>2</sup>を超える応答加速度が検出できた。つまり今回のエレベータモデルの構造ヘルスマonitoringに関する健全性判断の閾値は0.2m/s<sup>2</sup>程度と推定される。但し、この健全性評価が利用できるのは、等速運動時の場合に限定され、自走式の計測機器の加速減速時にも、図5左の赤丸のように応答加速度が閾値を超えている。これでは損傷による応答振動がその加速減速の影響に埋もれてしまう可能性がある。

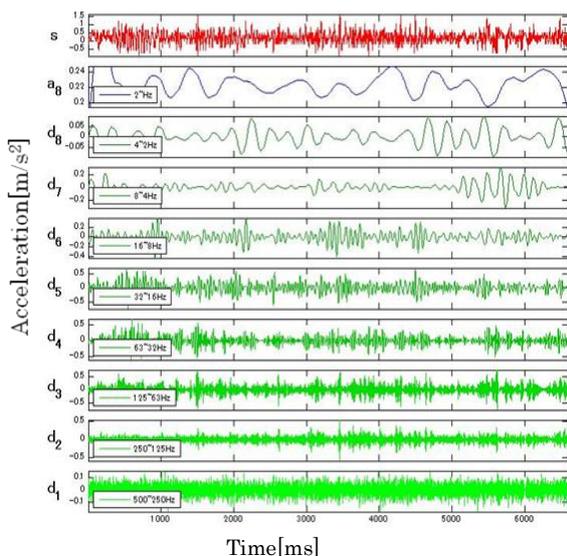


図4 ウェーブレット変換結果

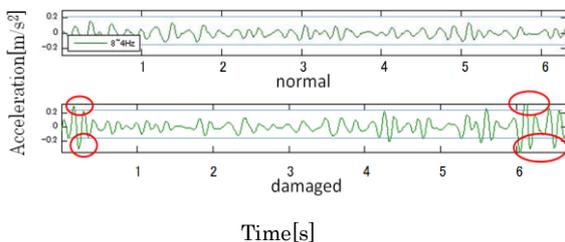


図5 ウェーブレット変換による健全時と異常時の比較

以上より、実際の昇降機で応答加速度による構造健全性評価を行う場合には、設置条件等によって異なる健全時の応答加速度を基準にし、初期損傷個所での加速度変動の特徴信

号と閾値を規定することでワイヤーロープの損傷検知が可能と考えられる。

#### 4. 研究成果

##### (1) 漏洩磁束強度によるワイヤーロープの健全性評価

ワイヤーロープテストは、図6右に示すように素線破断部や変質部において発生する微小な漏洩磁束を高精度に検知する測定機器であるため、前述のように僅かな損傷や錆の発生箇所でも明確な漏洩磁束強度の変動が確認できる。漏洩磁束強度の測定データをウェーブレット変換した結果を図7に示すが、最も低い周波数帯域(a4: 130Hz以下)に顕著なパワースペクトルの変動が認められており、変動幅の違いで素線破断と錆発生との相違も認識できる可能性がある。そこで、漏洩磁束強度と素線破断本数の関係を調べるため、初期的損傷に相当する素線破断本数0~5本までのワイヤーロープのパワースペクトルを測定した結果を図8に示す。この結果より、破断した素線の本数に応じて漏洩磁束強度が比例的に増大することが分かる。また、漏洩磁束強度のデータをウェーブレット変換した後の周波数帯域130Hz以下のスペクトルの変動量と変動域の幅については、素線破断と錆部分のより明確に認識できることも判明した。続いて、漏洩磁束強度とワイヤーロープ強度の関係を検証するため、素線破断を有するワイヤーロープの引張試験を行い、引張破断強度の変化を検証した。図9はワイヤーロープ引張試験結果の一例であるが、1ストランド(素線24本)の半数以上の素線が破断するとワイヤーロープの強度が20%程度低下することが確認された。これらの結果を元にワイヤーロープの引張強度低下率と漏洩磁束強度の関係を検証した。この結果、漏洩磁束強度はワイヤーロープの素線破断本数と共に比例的に増大するが、初期損傷の範囲(素線切れ1~5本程度)では引張強度の低下は顕著ではない。しかし、素線破断本数が10本近くなると引張強度は徐々に低下し、図10に示すように9本から15本程度では、概ね直線比例的な引張強度の低下を示しており、測定された漏洩磁束強度の測定値から大よその引張強度低下率を推定できる可能性を示唆した。

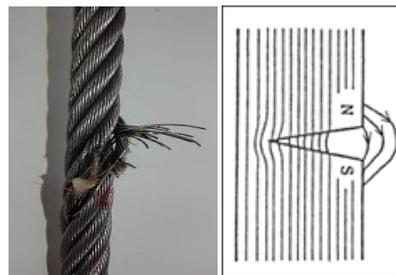


図6 ロープ素線破断と漏洩磁束の流れ

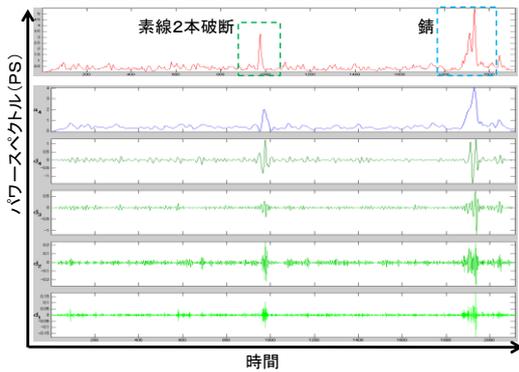


図7 漏洩磁束強度のウェーブレット変換結果

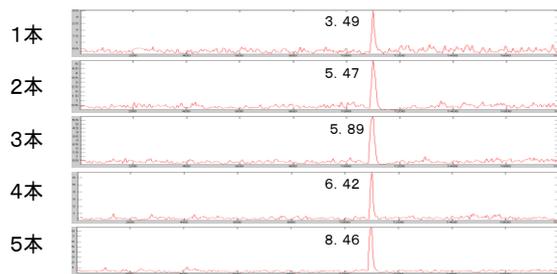


図8 素線切れの本数と漏洩磁束強度の関係

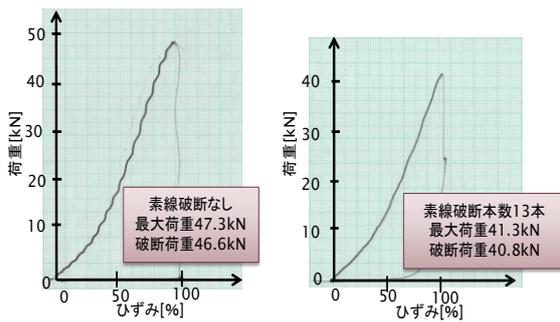


図9 ワイヤロープ引張試験結果

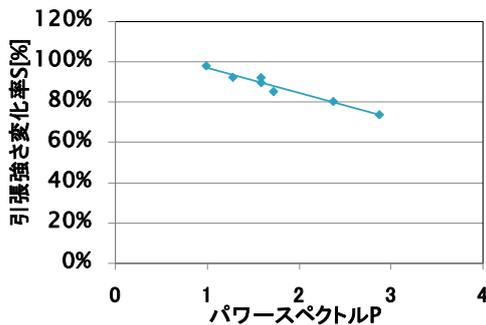
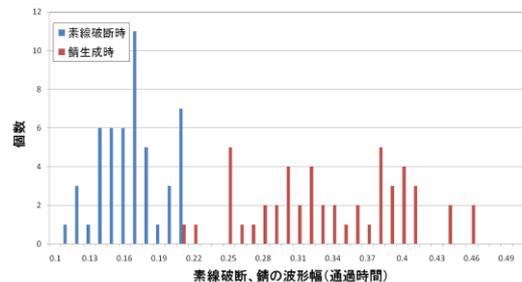


図10 ワイヤロープ引張強度低下率と漏洩磁束強度の関係

(2)ニューラルネットによるワイヤロープの損傷検知

鋼製ワイヤロープの初期損傷検知実験により、ワイヤロープセンサーによる漏洩

磁束強度測定値から初期的素線切れのみならず、錆の発生部分を検出できる可能性が認められた。そこで、初期的損傷に相当する素線切れ1～5本と、錆発生の場合分けの自動認識の可能性を検討するため、ニューラルネットワークによる損傷検知と認知判断を試みた。図11は漏洩磁束強度の変動幅を特徴量として場合分けしたヒストグラムであるが、素線破断(左側分布)と錆発生部位(右側分布)が概ね判別可能であることが分かる。また、図8の結果からは漏洩磁束強度の変動量から、素線切れ本数の場合分けも可能性と考えられる。機械学習に用いたニューラルネットワークは、図12に示すように入力層に漏洩磁束強度(パワースペクトル)の変動量と変動幅を入力すると、出力層に素線切れと錆発生の場合分けと素線切れの場合はその本数を出力する2層構造で中間層10ニューロンの基本的な階層型とした。学習データは、初期の素線切れ(0～5本)と錆を発生させた7種類の試験片において計測した50回の漏洩磁束強度のデータのうちの40個を用い、素線切れなら「0」、錆発生ならば「1」を出力し、素線切れならばその本数「0～5」を出力するようプログラムを構成した。表1は学習させたニューラルネットに、測定データの残り10個の変動量と変動幅を入力し損傷推定



実験結果における素線破断、錆の波形幅(通過時間)のヒストグラム

図11 素線破断と錆発生の特徴抽出例

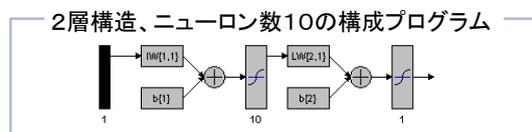


図12 階層型ニューラルネットワークの構成

表1 ニューラルネットによる素線破断推定結果

各40個の波形のPS最大値の平均値	学習後の出力値ごとの入力値の平均値	破断本数
0.979	0.982	0
3.486	3.297	1
4.820	4.968	2
6.390	6.268	3
6.455	8.262	4
8.391	9.039	5

を実施した結果であるが、表中2列目の出力値からも分かるように素線切れの本数もほとんど正確に推定していることが分かる。

以上、鋼製ワイヤーロープの予見保全を可能とするために、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としての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。

#### 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15件)

- ①青木義男、遊戯機械の信頼性と安全性について、日本信頼性学会誌「信頼性」、査読有、Vol. 32、No. 8、2010、pp. 516-521
- ②Goichi Ben, Yoshio Aoki, Nao Sugimoto, Development of Simulation Technology for Impact Behavior of CFRP/Al Alloy Hybrid Beams in Side Collision of Automobiles, Advanced Composite Materials, 査読有、Vol. 19, No. 4, 2010, pp. 363-379.
- ③Hyoung-Soo Kim, Yoshio Aoki, Goichi Ben, Impact Behavior of CFRP Tubes for Full-lap Collision of Automobiles, Journal of JSEM, 査読有、Vol. 10, Special Issue, 2010, pp. 180-185.
- ④Hiroshi MOCHIZUKI, Sei TAKAHASHI, Hideo NAKAMURA, Satoshi NISHIDA, Minoru SANNO, Ryo ISHIKAWA, Development of CDMA-QAM Rail Transmission Device for Railway Signaling, Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics, 査読有、vol. 3, no. 1, 2010, pp. 358-371
- ⑤Hiroshi MOCHIZUKI, Sei TAKAHASHI, Hideo NAKAMURA, Satoshi NISHIDA, Minoru SANNO, Ryo ISHIKAWA, Development of CDMA-QAM Rail Transmission Device for Railway Signaling, Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics, 査読有、vol. 3, no. 1, 2010, pp. 358-371
- ⑥Yoshio Aoki, Hyoung-Soo Kim, Goichi Ben, Impact strength and response behaviour of CFRP guarder belt for side collision of automobiles, International Journal of Crashworthiness, 査読有、Vol. 14, Issue. 5, 2009, pp. 469-476
- ⑦青木義男、邊吾一、金炯秀、田畑昭久、自動車側面衝突のためのCFRP衝撃緩和ベルトの衝撃応答特性、日本機械学会論文集 A 編、査読有、Vol. 75、No. 758、2009、

pp. 1277-1283

⑧青木義男、昇降機等の安全性確保のための設計技術について、日本信頼性学会誌「信頼性」、査読有、Vol. 31、No. 6、2009年9月、pp. 420-426

⑨Xinhong Hei, 高橋聖、中村英夫、Modeling and analyzing Component-based Distributed Railway Interlocking System with Petri Nets、電気学会論文誌. D、産業応用部門誌、査読有、vol. 129, No. 5, 2009, pp. 455-461

⑩安澤卓也、望月寛、高橋聖、中村英夫、フェールセーフなリモートI/Oの構成方法、電子情報通信学会技術研究報告. SSS 安全性、査読有、Vol. 109, No. 43, 2009, pp. 9-12

⑪望月 寛、安澤卓也、高橋聖、中村英夫、系再構成機能を有するインターフェースボードの設計 (信頼性)、電子情報通信学会技術研究報告. R, 信頼性、査読有、Vol. 109, No. 161, 2009, pp. 7-10

⑫邊吾一、杉本直、青木義男、金炯秀、飯塚由佳、衝撃曲げ負荷を受けるアルミ合金/CFRPハイブリットビームの応答挙動、日本複合材料学会誌、査読有、34 巻 6 号、2008、pp. 211-218

⑬宇田川聡、天井治、長岡栄、高橋聖、中村英夫、自動位置情報伝送・監視機能の縦方向位置予測誤差分布 (測位・航法、及び一般)、電子情報通信学会技術研究報告. SANE, 宇宙・航行エレクトロニクス、査読有、Vol. 107, No. 442, 2008, pp. 129-134

⑭望月寛、高橋聖、中村英夫、系再構成機能を適用した分散制御システムに関する一検討、情報処理学会研究報告. EVA, システム評価、査読有、Vol. 2008, No. 30, 2008, pp. 13-18

⑮望月寛、ワジュジュ ヤニス、高橋聖、中村英夫、系再構成機能を適用した分散制御システムの設計、電子情報通信学会技術研究報告. R, 信頼性、査読有、Vol. 108, No. 125, 2008, pp. 25-28

[学会発表] (計5件)

①青木義男、【招待講演】「遊戯施設運用・保全情報共有化による安全安心の実質化と国際標準化への対応について」、日本工学アカデミー第6回安全工学フォーラム、招待講演、2011年3月9日、東京都千代田区、(財)鉄道弘済会・弘済会館

②青木義男、邊吾一、昇降機における自己抑制のための構造健全性評価システムの開発、文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業第3回地域連携研究プロジェクト研究発表講演会、2011年2月25日、千葉県習志野市、日本大学生産工学部

③青木義男、【招待講演】「世界のテーマパークの安全対策への取り組みと日本の今後」、国土交通省国土技術政策総合研究所シンポジウム、基調講演、2011年2月23日、大阪

府大阪市、ユニバーサルスタジオジャパン  
④青木義男、【招待講演】「交通・物流と国際  
標準化 ―昇降機・遊戯機械の場合―」、日  
本機械学会第 19 回交通物流部門大会、招待  
講演、2010 年 12 月 3 日、神奈川県川崎市、  
川崎市産業振興会館

⑤青木義男、熊田桂一、早瀬遼太、超軽量水  
上飛行機用 FRP フロートの動的応答の基礎研  
究、日本複合材料学会第 35 回複合材料シン  
ポジウム、2010 年 10 月 13 日～14 日、広島  
県広島市、広島県情報プラザ

〔その他〕

ホームページ等

[http://kenkyu-web.cin.nihon-u.ac.jp/Pro  
files/41/0004043/theses.html](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  
1 0 2 5 6 8 1 0

田畑 昭久 (TABATA AKIHISA)  
日本大学・理工学部・助教  
7 0 4 5 3 9 0 9