

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：33910

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26420325

研究課題名(和文) 同軸型POFを用いた光回転コネクタ構成法およびその応用に関する研究

研究課題名(英文) Study on construction of optical rotary link joint adopting coaxial type POF and its application for various area

研究代表者

川島 信 (KAWASHIMA, Makoto)

中部大学・工学部・教授

研究者番号：80340199

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：回転体間に高速双方向デジタルリンク機能並びに固定側から回転体側への電力伝送機能を付与する光回転コネクタの研究を推進した。双方向デジタルリンクの形成には同軸型プラスチックファイバ(同軸型POF)を、電力伝送には無線電力伝送を適用して、最終的に伝送速度2Gb/s、伝送電力量8Wの性能を有する光回転コネクタの実現性、ならびに同コネクタの外形寸法を直径20mm、長さ80mm以下で実現できることを明らかにした。さらに、回転コネクタの応用領域は映像モニタ・監視及び電力伝送が必須となるロボットの関節部分、電気自動車、その他各種工作機械等、極めて幅広い領域への応用が可能であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We've been promoted researches on optical rotary link joint that provides a high-speed bi-directional digital link between mutually rotating objects and power transfer function from the fixed side to the rotating part. Coaxial type plastic optical fiber (POF) is used for forming a optical bi-directional digital link, and wireless power transmission scheme is applied for electric power transmission. As a result, the feasibility of optical rotary link joint with characteristic of transmission speed 2 Gb / s and transmission power 8 W with the diameter and length of the connector size can be realized with less than 20 mm and 80 mm respectively. Furthermore, it was revealed that the application area of the optical rotary link joint can be applied to an extremely wide range such as flexible arms of robot, electric cars and other various machine tools where video monitoring / sensing and power transmission are indispensable.

研究分野：通信工学

キーワード：回転コネクタ 光回転リンクコネクタ 光回転リンクジョイント マルチコアプラスチックファイバ 同軸型プラスチックファイバー 高速双方向デジタル伝送方式 アイダイアグラム 無線電力伝送

1. 研究開始当初の背景

自動車、ロボット、医療機器、航空宇宙、セキュリティ産業等を中心として、相互に回転する物体間を双方向高速デジタルリンクで結合すると共に回転体側への電力供給機能を有する「回転コネクタ」に対するニーズが10年程前から高まっていた。これに対して摺動子構造、微小鏡構造等、電磁結合電力伝送等を応用した多種・多様な回転コネクタが提案・商品化されたが、いずれもデジタル伝送特性並びに耐久性、実装寸法等に難のあることが判明していた。

本研究では、デジタル伝送系に新提案の同軸構造光ファイバを適用することにより回転体間双方向デジタル伝送を可能とし、さらに無線電力伝送方式を組み合わせることによって、前述の要求を満たす「光回転コネクタ」を提案、研究を推進した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、回転体間に高速双方向のデジタルリンク機能並びに電力伝送機能を付与するための「光回転コネクタ」について設計法を確立すると共に、試作等を通してデジタル伝送特性、電力伝送特性を明らかにすることである。さらに回転コネクタに対する大きな需要に配慮し、コンパクト実装、また製造の容易化や信頼度の向上のためのシンプル構造化についても研究を進める。

3. 研究の方法

(1) 基本機能に関する要求条件

前項で述べた各適用領域からの要求条件を満足する回転コネクタの概念を図1に示す。この回転コネクタに対する機能条件は概ね以下のように整理できる。

回転速度に依らず、安定した双方向非同期デジタル高速伝送が可能なること。方向別に伝送速度が異なっても良いが、基本的に双方向伝送機能を搭載することが必須条件となる。

静止体側から回転体側に対して電力伝送が可能なること。センサ系への給電、駆動モータ等への電源供給を行う。

可能な限り、小型、軽量であること。

特に、の機能条件を満足するためには光通信方式の導入による双方向光デジタルリンクの実現が不可欠であり、以後、本報告書では、この回転コネクタを「光回転リンクジョイント (RLJ; Rotary Link Joint)」と呼称し、略称を光 RLJ とする。

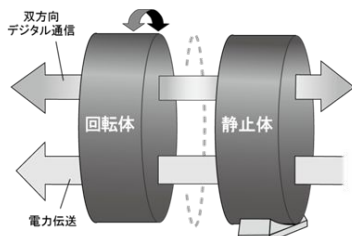


図1. 光回転コネクタの機能条件

(2) 基本性能に関する要求条件

光 RLJ の性能に関する要求条件は、適用領域、要求性能等から以下の通りとなる。

通信速度に対する要求条件は適用領域によって低速(数 kb/s)から、高速(数 Gb/s)まで様々であり、特定のビットレートに依存しないビットレートフリーであることが望ましい。一例として、監視カメラで無圧縮のフルハイビジョン画像の伝送を想定した場合、約 1.5Gb/s のデジタル伝送を実現する必要がある。

通信形態は非同期双方向通信の実現が不可欠の条件となる。これは回転体側および静止体側のシステム動作が非同期関係にあっても光 RLJ を適用可能とするためである。

電力伝送は回転体側の装置がセンサやマイクロプロセッサであれば数 W 程度で十分であると推定されるが、本研究では光 RLJ の実装規模圧縮を念頭に置き、5 W 程度を目標とする。

光 RLJ の自動車タイヤ部分への適用などを考慮すると高速回転に耐える必要があり、高速回転時においても、情報/電力伝送に劣化が生じないことが求められる。

外形寸法はより小型であることが望ましく、各種ロボットの指関節への適用などを考慮すると外径は 10mm 以下とする必要がある。

光 RLJ に対するこれらの要求性能を整理し、表1に示す。

表1. 光 RLJ に対する要求性能

機能	性能条件値
通信速度	Bit rate free (当面の目標 2Gb/s)
通信形態	非同期双方向通信
電力伝送	5 ~ 10W
回転速度	約 300rpm
外形寸法	10mm × 80mm 以下

(3) 光回転リンクジョイントの構成法

光 RLJ の基本構造

前節で述べた光 RLJ に対する要求条件を満足するためには、従来の回転コネクタに関する構成概念を抜本的に変更する必要がある。

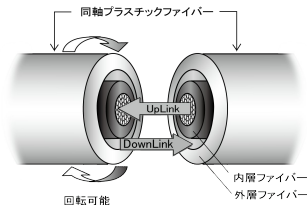


図2. 同軸型 POF による相対回転可能な双方向デジタル通信系の形成

本研究では、新たに同軸型のマルチコアプラスチックファイバ (Plastic Optical Fiber; 以下、POF と略称) を導入することを提案する。同軸マルチコア POF を用いた基本

的なデジタル双方向通信系の構成概念を図 2 に示す。間隙を設けて 2 本の同軸マルチコア POF を突合せることにより、この間隙を空間伝搬する双方向光通信系が形成される。突合わせた両 POF が相互に回転しても、その幾何学的相対位置は不変であるため、高精度な情報伝送系を構築することが可能となる。

#### 同軸マルチコア POF の概要

種々の同軸マルチコア POF が製品化されている。光 RLJ に適用可能なマルチコア POF の概要は以下の通りである。

##### (A) マルチコア POF の特徴

マルチコア POF のコア材にはポリメタクリル酸メチル樹脂 (Poly Methyl Methacrylate, 以下 PMMA) が用いられているが、PMMA は光 RLJ を構築する上で重要となる以下の長所を備えている。

- (a) 良好な光伝送特性
- (b) 高い可撓性ならびに切削加工性
- (c) 安価

##### (B) 同軸マルチコア POF の構造と特性

光 RLJ に用いる同軸マルチコア POF の構造を図 3 に示す。

同軸マルチコア POF は内層、外層から成る同軸構造の POF から構成されており、その中間層にはナイロンを用いた遮蔽層を設けている。内層径は 400  $\mu\text{m}$ 、最外径は 1mm である。光 RLJ に適用する場合には、ファイバ端面の高精度研磨が必須となるが、同軸光 POF は外形寸法が大きく材料も比較的柔らかいため、研磨加工は比較的容易である。

次に、同軸マルチコア POF の特性についてその主要特性を述べる。同軸マルチコア POF の外径寸法等を含めた仕様並びに特性を表 2 に示す。

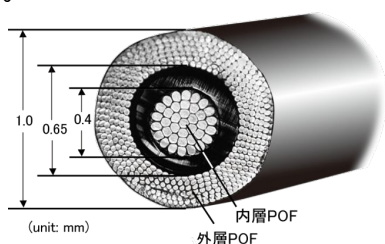


図 3. 同軸マルチコア POF の構造・寸法

表 2. マルチコア POF の主要仕様・特性

項目	内層 POF	外層 POF
コア材	PMMA	PMMA
クラッド材	フッ素化ポリマー	フッ素化ポリマー
被覆材	ナイロン 12	-
コア数	37	500
開口数	0.6	0.5
内径	400 $\pm$ 20 $\mu\text{m}$	650 $\mu\text{m}$
外径	600 $\pm$ 20 $\mu\text{m}$	1000 $\mu\text{m}$
耐熱温度	-45 ~ 85	-45 ~ 85

内外層コア・クラッド共に素材は同一であり、それぞれ、37 本、500 本のプラスチックファイバコアから成っている。内層ファイ

バの開口数が若干大きいことに留意する必要がある。さらに、使用環境温度が摂氏 85 度以下に限定されることについても注意せねばならない。

#### 同軸マルチコア POF を用いた光回転リンクジョイントの構成

##### (A) 光 RLJ の基本構成

同軸マルチコア POF を切断し、端面研磨を行った後、両者を突合せることにより、双方向のデジタルリンクが形成でき、両者は互いに回転しても、双方向伝送特性は変わらない。この原理を応用した光 RLJ の基本構成を図 4 に示す。

光 RLJ の重要な機能として、電力伝送機能があり、図 4 は固定されている静止体側から回転体側への電力伝送機能の概念も含めている。

光 RLJ へのデジタル信号インターフェースは、伝送特性を保证するため、外部接続機器とは電気信号で受け渡しをし、光 RLJ において E/O、O/E 変換を行う構成をとる。電力伝送機能に関しては、電気接点を主とする伝送、インバータによる伝送、光によるパワー伝送などを横断的に比較検討して決定をした。本研究では後述のように、最終的には確実に電力伝送可能な無線電力伝送方式を採用した。

##### (B) 光 RLJ カップリング部の構成

図 4 の基本構成図において、その中心部に配置されるのは光 RLJ の心臓部ともいえるカップリング部である。カップリング部は回転体 - 静止体相互間に双方向デジタル光リンクならびに、電力伝送系を形成している。その基本構成を図 5 に示す。まず、デジタル通信系は、図 5 に示すごとく、2 本の同軸マル

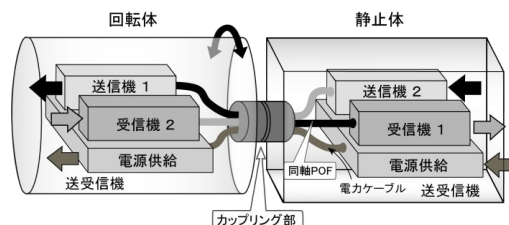


図 4. 光 RLJ の基本構成図

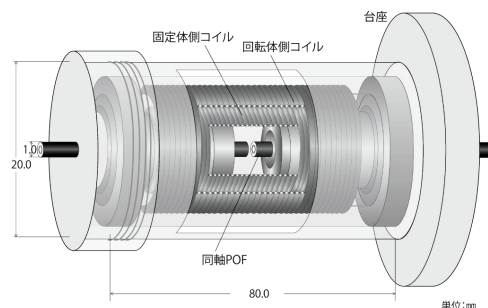


図 5. 光 RLJ カップリング部の構造

チコア POF を一定の間隙を設けて固定配置し、精密級ベアリングを用いることにより、両者が互いに回転しても幾何学的相対位置関係が変化しないように、両 POF を保持する構造を採っている。これによって両 POF 間の間隙は後述の最適間隔に維持・固定されると共に

POF 端面の相対位置は回転時においても常に一定となる。

次に光 RLJ の電力伝送機能実現法について述べる。研究当初はカップリング部の光通信系の周囲に (i) 摺動子による電力伝送、(ii) 導電性布材による電力伝送、(iii) 導電グリース (CNT 等) + ベアリングによる電力伝送などを試みた。本助成申請時には (iii) による方法が有望として、高導電性グリースの開発と共に研究を推進した。しかし、上記電力伝送方式は何れもオーミック接触を基本とするもので、回転に伴って生じる雑音が、光 RLJ を使用する環境では無視し得ないことが判明し採用不可とした。

電力伝送に伴う雑音発生を克服する電力伝送方式として、無線電力伝送の導入を試みた。図 5 に示す光 RLJ 光通信系の周囲に電力伝送用の同軸結合コイルを配置し、外層、内層を各々送電、受電モジュールに接続する。送受電モジュールには ELEKTOR 社の [160119 Wireless Power Converter] を採用した。同モジュールは、発振周波数 100kHz、40W の連続電力伝送を可能とする。電力伝送用の結合コイルは 24  $\mu$ H、高い高周波特性を有することが要求されたため、本研究では素銅線径、撚り数を変え、100kHz 近傍で高周波特性の異なる 10 種類のリッツ線を室内試作し、伝送可能電力量、コイル温度上昇量を中心に評価することにより最適仕様を見出すこととした。最も良い特性を示した試作リッツ線の仕様を表 3 に示す。

表 3 無線電力伝送用結合コイルの仕様

項目	仕様・特性	記事	
導体構成	7本撚りリッツ線	研究室試作	
結合コイル特性	素線の線径	0.2 mm	
	リッツ線線径	0.6 mm	
	インダクタンス	送電側	24.0 $\mu$ H
		受電側	24.0 $\mu$ H
	巻き数	送電側	167回
受電側		94回	
最大送電電力	8.04 w	コイル温度: 最大56°C (室温: 24°C)	

#### 4. 研究成果

##### (1) 同軸マルチコア POF による双方向デジタル伝送系の諸特性

本研究では、2本の同軸マルチコア POF を突合せの構造のデジタル伝送系に関する諸特性について実測並びに理論解析により明らかにし、両特性に良い一致が見られることを確認した。

##### (2) 同軸マルチコア POF の幾何学的相対位置と伝送特性の関係

光 RLJ は突合せた同軸マルチコア POF 間を光信号が空間伝播して対向する POF へと伝搬することにより、双方向デジタルリンクを形成させている。即ち、対向する同軸マルチコア POF の端面の相対位置の偏位は、光信号の POF 端面での反射損失、或いは空間伝搬長による損失増大などを生じ、伝送特性を劣化させる。しかし、製造時偏差、運用時の劣化、

経年変化等によって、この相対位置の変化は不可避であり、これら偏位・変化の許容量の明確化は大変重要となる。

伝送損失増大要因となる突合せ POF の相対位置パラメータとして、間隙長、軸ずれ、角度ずれがあげられる。図 6 は、これら各パラメータを説明するものであり、間隙、軸ずれ、角度ずれは、それぞれ、突合せの POF 間の長手方向間隙長、光軸の平行ずれ、光軸の角度偏移を表している。

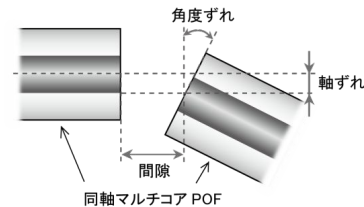
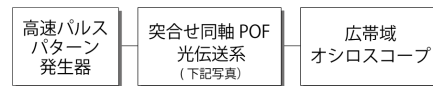
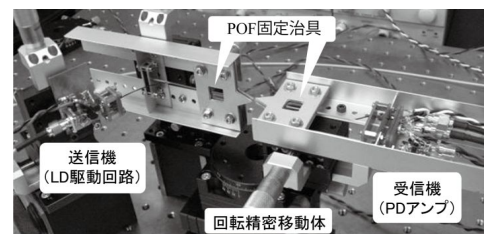


図 6. 同軸マルチコア POF の相対位置偏位

これら、相対位置の偏位に起因する光伝送損失特性を測定した。測定系の構成を図 7 に示す。伝送損失評価は時間領域で行い、偏位ゼロ値における損失値を 0dB と規定した。図 7 b) に示す如く、パーニヤ計測可能な可動ステージを用いて同軸マルチコア POF に対し、図 6 に示す偏位を精密に与え、偏位量と光伝送損失の関係を実測した。



##### a) 伝送特性測定系の構成



##### b) POF 微小偏位機構と伝送特性測定系

図 7. 同軸マルチコア POF 伝送特性測定

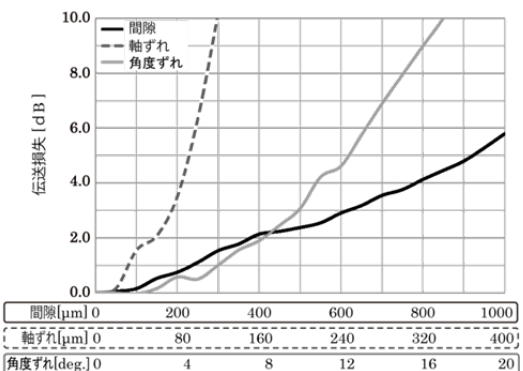


図 8. 同軸マルチコア POF の相対位置偏位と伝送損失の関係

図7の伝送特性測定系による測定結果を図8に示す。同図の測定結果から、3劣化要因の中では、軸ずれが最も支配的な伝送損失増大要因となることが判明した。また、角度ずれも $10^\circ$ 付近から3dBの損失となることが明らかである。さらに、間隙長は最も許容範囲が広いことが裏付けられた。

これらの実測結果から、表1に示した同軸マルチコアPOFを用いて光RLJを構築する場合、軸ずれを $80\mu\text{m}$ 以下、角度ずれは $10$ 度以内、間隙長は垂直端面研磨であれば $600\mu\text{m}$ 以下とする必要のあることが明確化された。

### (3) 幾何学的相対位置と層間干渉特性

同軸マルチコアPOFは内外層の2層から成っており、同層同士の光伝搬によって双方向デジタル通信を行う。しかし、2本の同軸マルチコアPOFを突き合わせる構造では、両者間に間隙は必須となり、他層への光漏洩伝搬が避けられない。双方向デジタル伝送において、他層への光信号の干渉は、光信号を出力するLDの発振動作不安定や波形歪み等の発生の原因となり好ましくない。層間における光の干渉発生状況を図9に示す。また、同軸マルチコアPOF間の間隙距離と干渉量の関係の実測結果を図10に示す。測定は、干渉を受ける側のデジタル伝送信号受端における受信信号の符号間干渉の増大量を評価したものである。

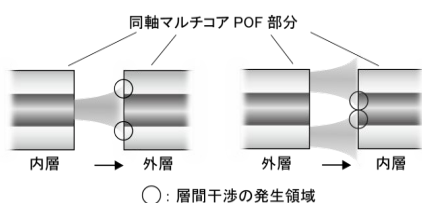


図9. 光信号の層間干渉

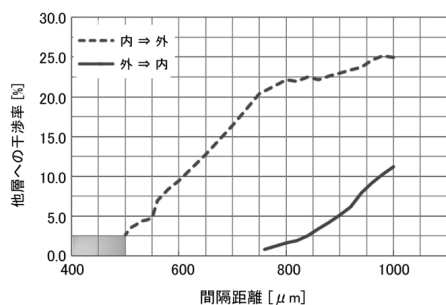


図10. 同軸マルチコアPOF間隙距離と層間光干渉特性

図10の実測結果は、内層から外層への干渉がその逆の関係に比べ極めて大きくなることを示している。外層から内層への干渉はPOF外に放射される信号光が多く、理想的に干渉が減少する。また、3.研究の方法(3)節で述べたとおり、POFの開口数が内層と外層とで異なるが、開口数の大きい内層POFの光ビームの拡大による効果も大きく貢献していると推定される。

図10の実測結果から間隙距離が $600\mu\text{m}$ 以下であれば干渉量は10%以下に抑えられることが分かる。

### (4) デジタル伝送特性

同軸マルチコアPOFの伝送損失特性に特段の問題が生じていないことを踏まえ、最も重要となる高速デジタル伝送実験を行った。

伝送速度として、フルハイビジョンの監視モニタのシリアル出力データ(HD-SDI信号)伝送速度、 $1.5\text{Gb/s}$ を当面の目標とした。

同軸マルチコアPOF間の間隙は $300\mu\text{m}$ 、伝送試験系列はPRBS31段、伝送速度は $1.0\text{Gb/s}$ 、 $1.5\text{Gb/s}$ の2種類の試験信号を用いた。

これらの条件下で測定したデジタル伝送信号の受信波形のアイダイアグラムを図11に示す。 $1.0\text{Gb/s}$ 伝送では伝送系の帯域も十分確保されていることがうかがえる。リタイミング機能を搭載しない2R伝送形式であることから $1.5\text{Gb/s}$ 伝送時のジッター特性が若干劣化しているが、基本的には十分なアイオープニング特性が得られていると評価できる。

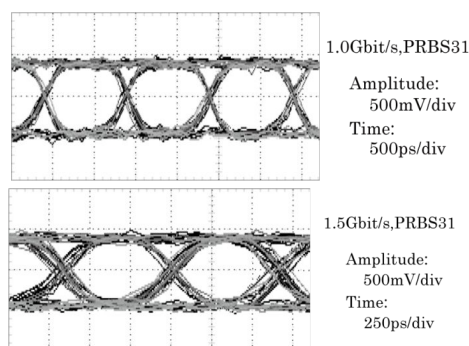
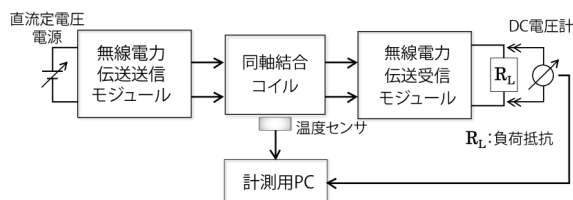


図11. 同軸マルチコアPOF伝送における受信アイダイアグラム

### (5) 電力伝送特性

室内試作による7本撚りリッツ線を用いた同軸型結合コイルを作成、ELEKTOR社の[160119 Wireless Power Converter]と接続して無線電力伝送系を構築し、その電力伝送特性を測定した。電力伝送特性測定系の構成



を図12に示す。

### 図12. 光RLJの無線電力伝送特性測定系

光RLJでは、送電電力量と共に、電力伝送系の温度上昇が課題となる。RLJの電力伝送効率が低い場合、カップリング部において消費される電力は熱に変換されることとなり、カップリング部の温度上昇を招く。RLJの中心部を占める通信用同軸マルチコアPOFが85

度以上の温度に達する事態では、同 POF 材の変形若しくは溶融を引き起こし、光伝送特性が著しく劣化する。従って、高効率の電力伝送技術の適用が必須となる。

図 12 に示す電力伝送特性測定系により、前述の表 3 に示した通り、8.0Wの電力を光 RLJ の固定体側から回転体側に無線電力伝送できることが明らかとなった。最大電力伝送時の結合コイルの温度上昇が 56 に留まる（実験環境温度 24 ）ことが判明した。

これらの検討結果から、光 RLJ の電力伝送に関する初期目標が達成されたことが明らかとなった。

#### （6）研究結果のまとめ

光 RLJ のカップリング部の基本構造、双方向デジタル伝送特性並びに電力伝送特性について本研究の成果を述べた。本研究により、表 1 に示した光 RLJ に対する要求条件について概ね満足する結論を得た。現時点では、RLJ の長さが実効 80mm を超える可能性が否めない。電力伝送系構成法について更なる研究を推進する必要がある。光 RLJ のカップリング部の実装規模が外径 10mm、長さ 50mm までに縮小されれば、産業用ロボットやヒューマノイドの指・肘関節、ヒンジへの適用が視野に入る状況となって、極めて広範に及ぶ適用範囲への応用が可能となる。

#### 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）

#### [産業財産権]

取得状況（計 2 件）

名称：回転光リンクジョイント  
発明者：佐生誠司、川島信  
権利者：旭化成イーマテリアルズ株式会社、  
学校法人中部大学  
種類：特許  
番号：ZL201080038720.7  
取得年月日：平成 27 年 9 月 2 日  
国内外の別： 国外（中国）

名称：回転光リンクジョイント  
発明者：佐生誠司、川島信  
権利者：旭化成イーマテリアルズ株式会社、  
学校法人中部大学  
種類：特許  
番号：US8983246  
取得年月日：平成 27 年 3 月 17 日  
国内外の別： 国外（米国）

#### 6．研究組織

##### (1)研究代表者

川島 信（KAWASHIMA, Makoto）  
中部大学・工学部・教授  
研究者番号：80340199