

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 2 日現在

機関番号：13904
研究種目：基盤研究(C) (一般)
研究期間：2017～2019
課題番号：17K06384
研究課題名(和文) 一般化kQ規範とハミルトニアンアルゴリズムによるワイヤレス結合器設計法の構築

研究課題名(英文) Wireless Coupler Design Theory Establishment Exploiting Generalized kQ Criterion and Hamiltonian Algorithm

研究代表者
大平 孝(OHIRA, Takashi)
豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30395066
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)：ハミルトニアン演算により高速パラメータスイープが実現できたことで電極寸法、材料特性(誘電率、誘電正接)など多変数から最適値を求められるようになった。これにより、電極設計の際に、どのパラメータがボトルネックになるかを明らかになった。国内外の大学や企業で用いられている探索アルゴリズムとしてランダム法や最急勾配法に比べて、本研究で得られた成果はランダムプロセスを伴わず、かつ、大域的に探索できるという点で国際的に見ても独創的に位置づけられる。本研究により得られた理論により、初めてkQ積による最大効率試算値に損失を考慮できるようになった。これにより電力伝送効率の解析精度が大きく向上した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
ハミルトニアン演算により、高速パラメータスイープが実現できたことで電極寸法、材料特性(誘電率、誘電正接)など多変数から最適値を求められるようになった。これにより、電極設計の際に、どのパラメータがボトルネックになるかを明らかにしやすくなった。本提案方式は他の手法と比べて探索時間が短く、局所解に陥らない。加えて、乱数を用いないため再現性があることから、学術研究に適した方式と言える。本研究により得られた理論により、初めてkQ積による最大効率試算値に損失を考慮できるようになった。これにより電力伝送効率の解析精度が大きく向上した。今後のワイヤレス給電システムの設計に与えるインパクトが大きい。

研究成果の概要(英文)：We have developed a Hamiltonian algorithm, which enables us to rapidly sweep the variable for parameter optimization in wireless coupler's electrode dimensions, material characteristics (relative permittivity and dielectric loss tangent), and other multiple indexes. Using this result, we clarified which factor dominates the system performance in the electrode design process. In comparison to conventional algorithms currently used in other overseas and domestic organizations, the algorithm developed in this study is advantageous because we can explore the possible solution without resorting to random numbers while preventing the risk of falling into any local minimum or maximum. This outcome contributes to the accurate prediction of power transfer efficiencies of wireless power transfer systems.

研究分野：ワイヤレス電力伝送

キーワード：ワイヤレス電力伝送 ワイヤレス結合器 最適化 ハミルトニアンアルゴリズム

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ワイヤレス電力伝送は、放送・通信に続く大きなワイヤレス市場の第三の矢として、モバイル機器、電気自動車、医療(人体)、産業機械など数多くの分野で活躍が期待できる。そのような要望に応えるため、多様なシチュエーションで高効率電力伝送を達成するワイヤレス電力伝送システムの実現は急務である。

ワイヤレス電力伝送の電力伝送方式には電界方式と磁界方式がある。しかし、ワイヤレス電力伝送の研究報告の9割以上が磁界方式である[1][2]。その理由として、MITにより磁界を用いた数m級の長距離電力伝送の報告が大きなインパクトを与えたこと[1]、電界方式と磁界方式の適切な選択方法がないこと(電界方式と磁界方式の特徴理解があいまい)、電界方式の設計法がないこと、があげられる。

MITを始めとする米国の大学と企業が磁界方式に関する多くの主要特許を保有している。もし我が国が磁界方式のみを実用化すると、米国へ多大なライセンス料を支払うこととなる。電界と磁界の双対性を考えると、磁界で実現可能なことは電界でも実現できるはずである。また、電界は誘電体に、磁界は磁性体の影響を受ける。磁界方式は結合器の距離変化に強く、電界方式は結合器の横ズレに強い。つまり、電界方式と磁界方式は相補性が期待でき、それぞれに適する応用先があると考えられる。電界方式と磁界方式が両輪となり、ワイヤレス電力伝送システムの応用範囲が広がるのが望ましい。しかし、電界方式、磁界方式共に、これまでいくつかの構成例が報告されているものの、幅広い一般的設計法が完成されたとは言えない。

2. 研究の目的

本研究では電界方式と磁界方式のメリットとデメリットを定量的に明らかにし、最適な選択方法を示すとともに、コイル・平板電極・レール結合・車輪結合などあらゆる構造を包含する高効率なワイヤレス結合器の汎用的設計手法を確立することを目的とする。これによりワイヤレス電力伝送の応用範囲が飛躍的に広がる。

本目的を

(1)任意構造の結合器の形状最適化を可能とする「一般化 kQ 規範」

(2)ランダム性に頼らない純演繹的手法でありながら局所解に落ちない「ハミルトニアン演算」
解探索アルゴリズム

を組み合わせることで達成する。

ある条件においてどちらの方式を選択すべきか判断するため、申請者が新たに提唱した、「一般化 kQ 積」[4]による評価を提案する。 kQ 積は結合器の最も重要な指標である、結合器の最大の効率(最大効率)の計算式である。従来の kQ 積は簡単な磁界方式の結合器の最大効率しか計算できないため、両方式の比較はできない。一般化 kQ 積はあらゆる結合器の最大効率を算出できるため、これを用いて両方式の最大効率を比較する。

最適な結合方式(電界方式と磁界方式)の選択を実現するため、両方式の優位な領域・特徴を定量的に明らかにする。具体的には、結合器間の距離、横ズレ、サイズなどの物理的なパラメータと最大効率の関係を示す。これらを全て可変として全探索にて最適解を見つけ出すには天文学的計算時間を要することになる。そこで高速探索手法が必要となる。本研究では、乱数を全く用いない完全な演繹的手法でありながら、局所解に落ちることがないハミルトニアン演算による高速解析を実現する。

3. 研究の方法

平成 29 年度：

電界方式の結合器電極の設計法を考案する。具体的には、様々な幾何学的構造の送受電電極を電磁界解析する。各電極形状の特性を解析する。(最大効率の周波数特性、最大効率の電極の横ズレ耐性、最大効率の縦ズレ耐性など)。さらに、電極形状の寸法と最大効率の関係を示す。各形状の最大効率が極大となる寸法を示す。効率が極大となる寸法探索の高速化のため、ハミルトニアン演算による探索を実施する、

平成 30 年度以降：

拡張 kQ 積を用いて多方面から電界方式と磁界方式を比較する。結合器の縦ズレ、横ズレ、結合器の小型化、金属筐体への封入などが最大効率に与える影響を比較する。さらに、各方式の安全性について、同じ大きさの結合器から放射される電磁界の強さや、結合器内への異物挿入を検証する。

4. 研究成果

(1) 研究の主な成果

ハミルトニアン演算による最適電極形状探索プログラムを実装し、解析実施した。一例として、図1に示す電極形状を対象とし、電極間幅 x_1 と電極幅 x_2 を変数として最大 k を探索した。図2に探索軌跡を示す。赤四角の点が最大 k となる点である。本解析軌跡は、最大値付近にプロット(探索点)が偏っており、最大値付近を重点的に探索することで効率よく最大値を発見するハミルトニアン演算の特徴がよく現れている。

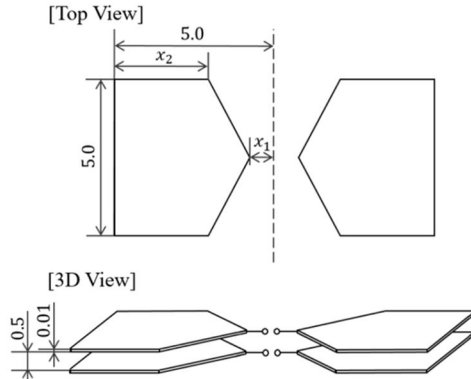


図1 電極間幅 x_1 と電極幅 x_2 を変数とした電極モデル

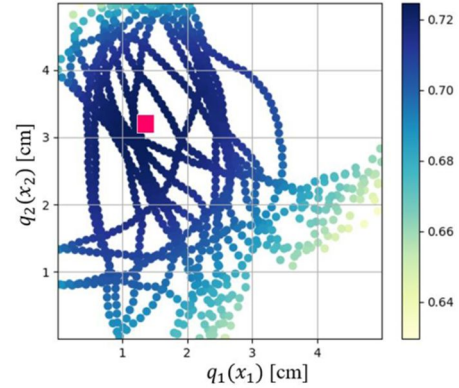


図2 最大 k を得る x_1, x_2 の探索結果 (赤が最大 k)

ハミルトニアン演算による探索とモンテカルロ法による探索を比較した。図3に両方式による探索軌跡における結合係数 k の出現頻度を示す。モンテカルロ法と比較し、ハミルトニアン演算は最大 k に近いパラメータを重点的に探索できるという優位性が示された。

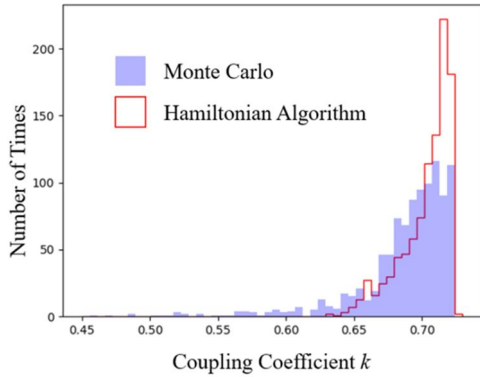


図3 ハミルトニアン演算とモンテカルロ法の探索軌跡における k の出現頻度

本研究で導出したハミルトニアン方程式

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{q}}{dt} &= \left(\frac{\gamma}{m} \|\mathbf{p}\|^{2(\gamma-1)} \right) \mathbf{p}, \\ \left\| \frac{d\mathbf{q}}{dt} \right\| &= \frac{\gamma}{m} \|\mathbf{p}\|^{2\gamma-1} \\ \|\mathbf{p}\| &= 2m(E - V(\mathbf{q}))^{\frac{1}{2\gamma}} \end{aligned}$$

拡張 kQ 積(式(1))により求められるWPTシステムの最大効率は整合回路損失を含まないため、試算効率と実測効率に乖離があることが課題であった。そこで、拡張 kQ 積の式を改良し、整合回路損失を考慮した効率を試算できる式(7)を新たに提案した。

中間変数 η_{MC1}, η_{MC2} は整合回路の効率を表し、式(5)で示される。式(5)の第2項、第3項は整合回路の変換インピーダンスおよび整合回路の素子損失(直列素子の無負荷 $Q: Q_X$ 、並列素子の無負荷 $Q: Q_B$)で決定される。

$$\eta_{\max} = \frac{\rho - 1}{\rho + 1} \quad (1)$$

$$\rho = \sqrt{1 + (kQ)^2} \quad (2)$$

$$kQ = \frac{|z_{21}|}{\sqrt{|R|}} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Z} &= \begin{pmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{pmatrix} + j \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} \\ x_{21} & x_{22} \end{pmatrix} \\ &= \mathbf{R} + j\mathbf{X} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\eta_{MC1} = 1 - \frac{|\tan \theta_1 + \tan \phi|}{Q_B} - \frac{|\tan \theta_2 - \tan \phi|}{Q_X} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \theta_1 &= \arg Z_{cp1} \\ \theta_2 &= \arg Z_s \\ \cos^2 \phi &= \Re[Z_{cp1}] \Re[Z_s^{-1}] \end{aligned} \right\} \Re[Z_{cp1}] < 50\Omega \text{の時}$$

$$\left. \begin{aligned} \theta_1 &= \arg Z_s \\ \theta_2 &= \arg Z_{cp1} \\ \cos^2 \phi &= \Re[Z_s] \Re[Z_{cp1}^{-1}] \end{aligned} \right\} \Re[Z_{cp1}] > 50\Omega \text{の時}$$

$$\eta_{MCs} = \eta_{MC1} \cdot \eta_{MC2} \quad (6)$$

$$\eta_{total} = \eta_{MCs} \cdot \eta_{max} = \eta_{MC1} \cdot \eta_{max} \cdot \eta_{MC2} \quad (7)$$

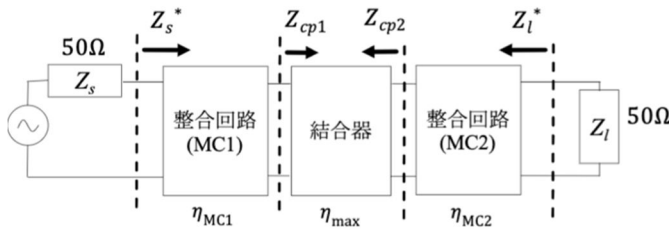


図4 設計パラメータと評価値の関係

整合回路損失を含んだ拡張 kQ 積 (式(7)) の有効性をシミュレーションにて検証した。図5に示す電界結合器において、結合器単体の最大効率 η_{max} と整合回路損失を含めた最大効率試算値 η_{total} 、整合回路を実際に付与した時の効率 η を図6に示す。 η_{max} および η の比較より、整合回路の損失により、総効率 η は η_{max} との乖離が生じることが示された。式(7)により計算される η_{total} と η を比較するとよく一致しており、式(7)により、整合回路の損失を含めた効率を試算できることが示された。

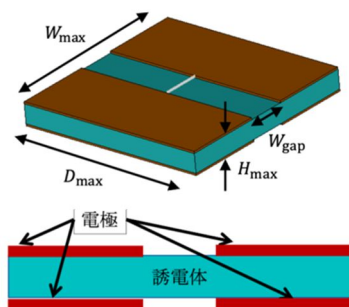


図5 電界結合器解析モデル

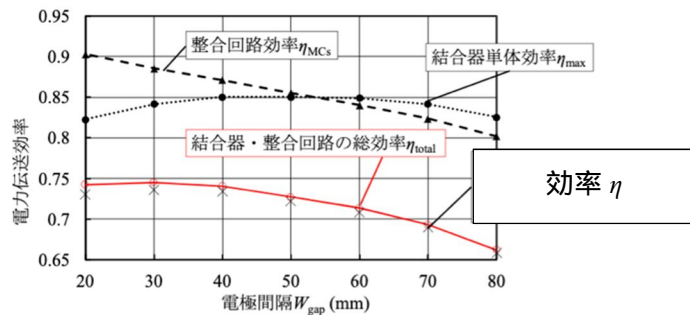


図6 従来の kQ 積 (η_{max}) と損失を考慮した試算値 (η_{total}) の比較

(2) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

ハミルトニアン演算により、高速パラメータスイープが実現できたことで電極寸法、材料特性(誘電率、誘電正接)など多変数から最適値を求められるようになった。これにより、電極設計の際に、どのパラメータがボトルネックになるかを明らかにしやすくなった。国内外の大学や企業では探索アルゴリズムとしてランダム法や最急勾配法を用いている。ランダム法では探索時間がかかる、再現性がない、最急勾配法では局所解に陥る。その意味で、本研究で得られた成果は国際的に見ても独創的に位置づけられる。

本研究により得られた理論により、初めて kQ 積による最大効率試算値に損失を考慮できるようになった。これにより電力伝送効率の解析精度が大きく向上した。今後のワイヤレス給電システムの設計に与えるインパクトが大きい。

(3) 今後の展望

本研究室は 企業と共同で工場内の運搬システム 内閣府 SIP プロジェクト (ドローンへのワイヤレス給電) 愛知県知の拠点重点研究プロジェクト (GaN 半導体ワイヤレス給電) を通じて社会実装実験を進めている。本研究で開発した電極の最適形状探索手法を導入し、効率的な送受電電極設計に生かす。

<引用文献>

- [1] A. Kurs, et al., "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances," *Science*, vol.317, pp.83-86, June 2007.
- [2] J.T. Boys, et al., "The inductive power transfer story at the university of Auckland," *IEEE Circuit and Systems Magazine*, vol.15, pp.6-27, May 2015.
- [3] N. Shinohara, "Power without wires," *IEEE Microwave Magazine*, vol.12, pp.64-73, Dec. 2011.
- [4] T. Ohira, "What in the world is Q," *IEEE Microwave Magazine*, vol.17, pp.42-49, June 2016.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 大平 孝	4. 巻 102
2. 論文標題 今更ながらkって何	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電子情報通信学会誌	6. 最初と最後の頁 79-82
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Takashi Ohira	4. 巻 E101-C
2. 論文標題 Power transfer theory on linear passive two-port systems (invited)	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEICE Trans. Electron.	6. 最初と最後の頁 719-726
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transele.E101.C.719	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ohira Takashi	4. 巻 15
2. 論文標題 Power transfer efficiency formulation for reciprocal and non-reciprocal linear passive two-port systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEICE Electronics Express	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/elex.15.20171196	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 大平 孝	4. 巻 102
2. 論文標題 スミスチャートの縮尺とポアンカレ距離	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電子情報通信学会誌	6. 最初と最後の頁 359-361
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 大平 孝	4. 巻 102
2. 論文標題 回路図で理解する複比保存則	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電子情報通信学会誌	6. 最初と最後の頁 1061-1064
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計19件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 大平 孝
2. 発表標題 非相反素子を含む線形受動2ポート網における電力伝送効率の2パラメータ表現
3. 学会等名 電気・電子情報通信関係学会東海支部連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大平 孝
2. 発表標題 基調講演：電界結合ワイヤレス電力伝送
3. 学会等名 MWE2018 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大平 孝
2. 発表標題 一般化kQ積の理論とWPTへの応用
3. 学会等名 CEATEC Japan 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大平 孝
2. 発表標題 ワイヤレス結合の一般化kQ積とポアンカレ距離
3. 学会等名 自動車技術会2018年春季大会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大平 孝
2. 発表標題 電気自動車への走行中給電：成功の七秘訣
3. 学会等名 MWE2017（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大平孝
2. 発表標題 ゼロヘルツで心が共鳴する直流kQ理論
3. 学会等名 MWE2017（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 阿部晋士，坂井尚貴，大平 孝
2. 発表標題 拡張kQとkQ積の比較－平面コイルの送受間距離特性の解析－
3. 学会等名 2018年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 阿部晋士, 大平 孝
2. 発表標題 複素インピーダンスを実抵抗に変換するLC整合回路の最短ポアンカレ長さおよび電力効率
3. 学会等名 2019年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大平 孝
2. 発表標題 ドローン給電ステーション電界結合WPT理論
3. 学会等名 IEEE MTT-S Kansai Chapter Technical Workshop
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大平 孝, 坂井尚貴
2. 発表標題 近傍ダイポールアンテナ間のkQ積とポアンカレ距離
3. 学会等名 電子情報通信学会ワイヤレス電力伝送研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 馬場涼一, 山田恭平, 坂井尚貴, 大平 孝
2. 発表標題 インピーダンス整合回路の素子損失を考慮した結合器電力伝送効率の最大化
3. 学会等名 電子情報通信学会マイクロ波研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大平 孝
2. 発表標題 無損失イミタンス変換における不変量
3. 学会等名 電子情報通信学会ワイヤレス電力伝送研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 馬場涼一, 宜保遼大, 宮地啓輔, 阿部晋士, 磯谷庄一, 坂井尚貴, 大平 孝
2. 発表標題 柔軟電極による高kQ電界結合WPT無限軌道車模型走行中給電
3. 学会等名 電子情報通信学会ワイヤレス電力伝送研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 北岡 晃, 阿部晋士, 塚本悟司, 大平 孝
2. 発表標題 送受対称形電界・磁界結合器の寸法から求まるLC整合回路の最大電力効率
3. 学会等名 電子情報通信学会ワイヤレス電力伝送研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大平 孝
2. 発表標題 主幹線道路を電化して, どこまでも走り続けることのできる新しい電気自動車
3. 学会等名 無機マテリアル学会第137回学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hikaru KITAOKA, Shinji ABE, Satoshi TSUKAMOTO, Takashi OHIRA
2. 発表標題 Minimum Size Design of Capacitive Coupler for Wireless Power Transfer to Achieve Specified Power Efficiency
3. 学会等名 2019 Asian Wireless Power Transfer Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tsukasa YOSHIDA, Shinji ABE, Takashi OHIRA
2. 発表標題 Hamiltonian Approach to Electrode Shape Exploration of Strong Capacitive Couplers for Wireless Power Transfer
3. 学会等名 2019 Asian Wireless Power Transfer Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Ohira
2. 発表標題 Comfortable Gateway to the kQ Theory
3. 学会等名 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takashi Ohira
2. 発表標題 Dipole antenna pair revisited from kQ product and Poincare distance for wireless power transfer
3. 学会等名 IEEE Conference Antenna Measurement Applications (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

「寄稿」
・大平 孝 “ワイヤレス電力伝送,” 電波技術協会報 FORN, no.330, pp.46-49, Sep. 2019.
・大平 孝, “ワイヤレス電力伝送の基礎,” RFワールド, no.43, pp.17-29, Aug. 2018.
・大平 孝, “電化道路: 自動車の電動化に向けた走行中給電インフラ,” 高速道路と自動車, vol.61, no.2, pp.5-8, Feb. 2018.
・大平 孝, “ワイヤレス電力伝送の10年,” RFワールド, no.40, pp.42-51, Oct. 2017.

豊橋技術科学大学波動工学研究室

http://www.comm.ee.tut.ac.jp/we/ja/ach_iframe.html

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	坂井 尚貴 (Sakai Naoki) (10736177)	豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・助教 (13904)	2019/3 退
研究分担者	阿部 晋士 (Abe Shinji) (20847884)	豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・助手 (13904)	2019年5月24日分担者