

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月23日現在

機関番号：12401
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2009～2011
 課題番号：21560290
 研究課題名（和文）理想変圧器特性を持つ電気自動車用小型非接触給電装置
 研究課題名（英文）Compact Contactless Power Transfer Systems for Electric Vehicles with Ideal Transformer Characteristics
 研究代表者
 阿部 茂（ABE SHIGERU）
 埼玉大学・大学院理工学研究科・教授
 研究者番号：70375583

研究成果の概要（和文）：

電気自動車用非接触給電トランスとして、従来の円形コア片側巻方式に比べ、大幅に小型軽量で左右の位置ずれに強いH型コア両側巻方式を開発した。普通充電用 1.5kW トランスと共に、これと互換性のある急速充電用 10kW トランスも開発した。一次直列二次並列コンデンサ方式で鉄損を無視した場合のトランス効率 η がコイルの Q と結合係数 k で簡単な式で表されることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

Contactless power transfer systems for electric vehicles are required to have high efficiency, a large air gap, good tolerance to misalignment in the lateral direction, and be compact and lightweight. A new 1.5 kW transformer has been developed to satisfy these criteria using a novel H-shaped core. A 10 kW transformer compatible with 1.5 kW transformer is also developed. The efficiency is shown by a simple equation using the windings' Q and the coupling factor k .

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2009年度 | 1,500,000 | 450,000 | 1,950,000 |
| 2010年度 | 1,500,000 | 450,000 | 1,950,000 |
| 2011年度 | 479,640 | 150,000 | 629,640 |
| 総計 | 3,479,640 | 1,050,000 | 4,529,640 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学、電力変換、電気機器

キーワード：電気機器、非接触給電

1. 研究開始当初の背景

地球環境問題や石油価格の高騰により、家庭やスタンドでバッテリーに充電するプラグインハイブリッド自動車や電気自動車が現実のものとなってきた。現在は電気ケーブルとプラグで車に給電する方式であるが、利便性、安全性、保守容易性を考えると、将来は図1の非接触給電方式が有望である。

(1) 電気自動車用非接触給電装置は Auckland 大および同大と技術提携した独 Wampfler 社が開発した円形コア片側巻コイル方式しかなく、日本では昭和飛行機を中心

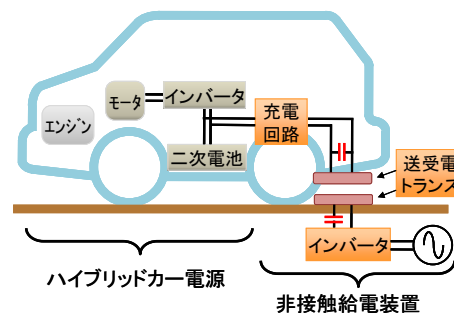


図1 自動車用非接触給電方式

としたグループが同方式をベースに高性能化、小型化をめざして研究開発していた。
 (2) 研究代表者は、乗用車用には大幅な小型化が必要と考え、磁界構造が同方式と全く異なる角形コア両側巻コイル方式を考案した。

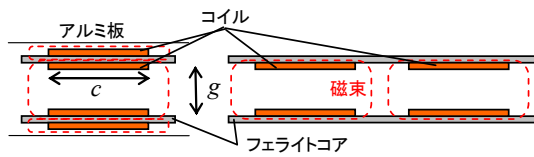


図2 両側巻コイル(左)と片側巻コイル(右)

(3) また Auckland 大は非接触給電に必須な共振コンデンサ方式として、一次並列二次並列コンデンサ方式 (P P 方式) を主に採用していた。
 (4) これに対し研究代表者は、一次直列二次直列コンデンサ方式 (S P 方式) の方が、その理想変圧器特性とブリッジ型インバータとの接続容易性から、より実用的であると考え、電気学会論文誌等で発表していた。

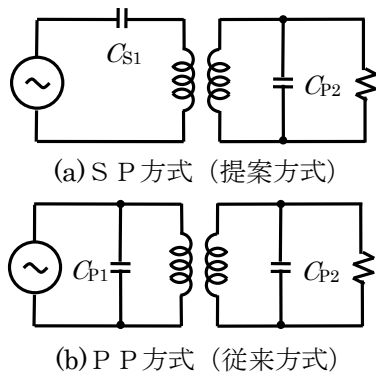


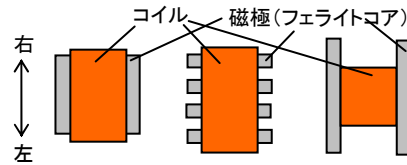
図3 S P方式とP P方式

2. 研究の目的

- (1) 電気自動車用では
- ①大きなギャップでも小型軽量化が可能で、
 - ②駐車時に大きな左右位置ずれを許容し、
 - ③高効率な方式が必須である。
- このため角形コア両側巻方式とこの新磁界構造を更に発展させた方式を研究し、電気自動車に最適な非接触給電装置を開発する。
- (2) 角形コア両側巻方式のトランス形状・巻数・電源周波数の最適化を研究する。
 - (3) より大きな位置ずれを許容するコア方式を研究する。
 - (4) 普通充電 1.5kW・倍速充電 3kW に加えて急速充電 10kW のトランスを研究開発し、その課題を明らかにする。
 - (5) 大きなギャップ長変動を許容するインバータ電源や二次電池充電回路を含む全体回路システムを研究する。

3. 研究の方法

(1) 角形コア両側巻方式の磁界構造 (コアと巻線構造) の最適化



(a) 角形 (b)すのこ型 (c) H型

図4 両側巻のコアの進化

角形コア両側巻コイル方式では、磁極が左右方向に長いほど、左右の位置ずれ許容範囲が大きくなり、コイルは短いほど軽量になるので、図4の(a)角形から(b)すのこ型を経て(c)のH型コアが最適と予想し、H型コア両側巻方式を中心に研究を進めた。

(2) 給電効率の理論とそれに基づくトランス設計法の構築

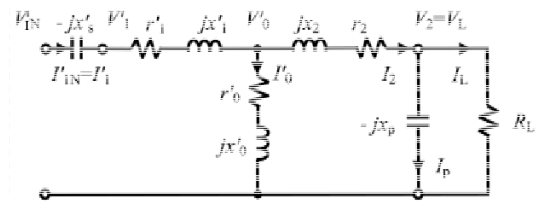


図5 S P方式の詳細等価回路

S P方式では二次側並列コンデンサ C_p は、電源周波数で非接触給電トランスの二次側自己リアクタンス L_2 と共振する値に定め、一次側直列コンデンサ C_s はインバータの出力力率が1になるように定める。このようにすると理想変圧器特性が成り立ち、鉄損を無視した場合 ($r_0=0$) には、給電効率 η は抵抗負荷 R_L の値が R_{Lmax} のときに、最大効率 η_{max} となることが研究代表者によって明らかにされていた。

$$R_{max} = \frac{x_0}{a^2} \sqrt{\frac{r_1}{r_2}} \quad \eta_{max} = \frac{1}{1 + \frac{2}{x_0} \sqrt{r_1 r_2}} \quad \dots(1)$$

磁気共鳴方式で良く用いられるコイルの Q と結合係数 k による S P 方式の効率式を導出し、トランス設計法を構築することにした。

(3) 普通充電用/倍速充電用と相互利用可能な急速充電用トランスの設計・製作・検証

現在のケーブルとプラグによる方式では普通充電と急速充電は別方式で利用者に極めて不便である。非接触給電では設計次第で普通充電トランスと急速充電トランスとの互換性を確保し、相互利用可能にできる可能性がある。急速充電トランスの設計では普通充電トランスと互換性を確保するための設計条件を明らかにすることをめざした。

(4) インバータ方式、二次電池充電方式を含む全体回路構成の最適化と充電制御方式

非接触給電システムはできるだけ高効率であることが望ましい。インバータや整流器も、より高効率な方式を追求することとした。

二次電池の充電では定電流充電から最終段階で定電圧充電に切り替える定電流定電圧充電方式が一般に採用される。非接触給電の場合も同じ充電方式で二次電池を充電できることを示すことにした。

4. 研究成果

(1) 小型軽量で左右の位置ずれ許容範囲の大きなH型コア両側巻普通充電用 1.5kW/3kW 非接触給電トランス

ギャップ長 70mm で 1.5kW 普通充電と 3kW 倍速充電が可能なH型トランスの仕様を図6に、外形を図7に示す。図8の回路での給電実験結果を図9に示す。図9の第1列はギャップ長 70mm で位置ずれのない標準状態、第2列は前後位置ずれ 45mm、第3列は左右位置ずれ 150mm での 1.5kW 給電、第4列は標準状態での 3kW 給電の結果である。トランスの効率は標準状態で 95%、最大の位置ずれでも 93%と高効率であることが分かる。

| | | |
|---------------------------|--------------|--------|
| Rated power | 1.5kW | |
| Gap length | 70±30mm | |
| Tolerance to Misalignment | x | ±45mm |
| | y | ±150mm |
| Size | 240×300×40mm | |
| Aluminum sheet | 400×600×1mm | |
| Weight of secondary | 3.9kg | |
| Litz wire | 0.1mmφ×800 | |
| Winding | Primary | 3p×20T |
| | Secondary | 9p×6T |

図6 1.5kW/3kW H型トランスの仕様

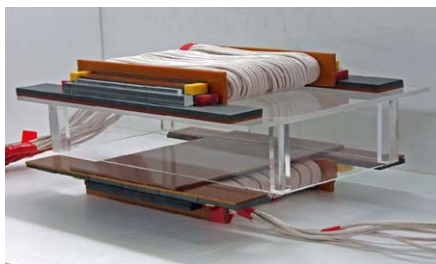
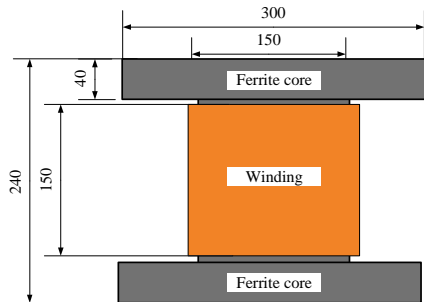


図7 1.5kW/3kW H型トランスの外形

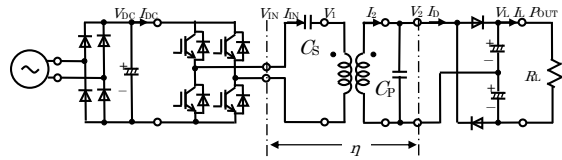


図8 実験回路

| Type | H-shaped core | | | |
|--------------------|---------------|------|------|------|
| f_0 [kHz] | 30 | | | |
| gap [mm] | 70 | | | |
| x [mm] | 0 | 45 | 0 | 0 ** |
| y [mm] | 0 | 0 | 150 | 0 |
| R_l [Ω] | 80 | | | |
| V_{IN} [V] | 168 | 143 | 128 | 226 |
| V_S [V] | 128 | 129 | 129 | 182 |
| V_L [V]* | 346 | 346 | 346 | 491 |
| P_{OUT} [W] | 1507 | 1503 | 1506 | 3060 |
| η [%] | 94.9 | 93.7 | 93.0 | 94.7 |
| B_2 [T] | 0.21 | 0.21 | 0.22 | 0.29 |
| C_s [μ F] | 0.189 | | | |
| C_p [μ F] | 1.91 | | | |

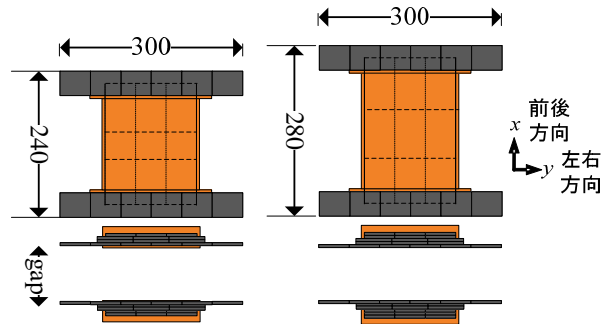
* V_L is the output voltage value of rectifier.

** Values when 3kW feeding power.

図9 実験結果

(2) 普通充電トランスと互換性のあるH型コア両側巻急速充電用 10kW 非接触給電トランス

ギャップ長 70mm で 10kW 急速充電が可能なH型トランスの外形を図10に示す。10kW トランスは(1)で述べた 1.5KW トランスとの互換性を考慮して、磁極寸法と磁極間隔をほぼ合わせ、一次二次巻数 N_1, N_2 を同一にした。



(a) 1.5kW トランスの外寸 (b) 10kW トランスの外寸

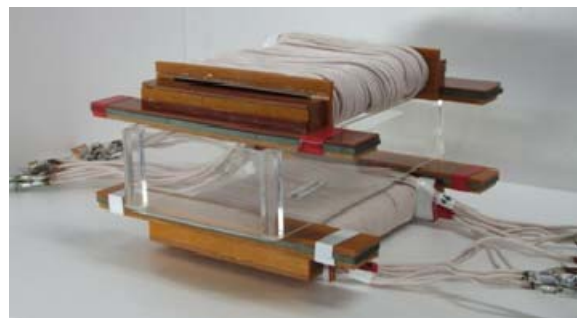


図10 10kW トランスの外形

| Rated power | | 1.5kW | 10kW |
|---------------------------|--------------------|-------------------|------|
| | | η [%] | |
| Standard position | | 94.9 | 94.7 |
| Gap alteration | Average (30~100mm) | 94.5 | 94.5 |
| | 100mm | 93.1 | 92.6 |
| Tolerance to Misalignment | x | Average (0~60mm) | 94.0 |
| | | 60mm | 92.6 |
| | y | Average (0~150mm) | 94.0 |
| | | 150mm | 93.0 |

図 1 1 1.5kW と 10kW トランスの給電効率

| Transformer | Primary | for 1.5kW | for 10kW |
|---------------------------|--------------------|------------------|-----------|
| | Secondary | for 10kW | for 1.5kW |
| Rated power | | 1.5kW | |
| | | η [%] | |
| Standard position | | 94.8 | 94.7 |
| Gap alteration | Average (30~100mm) | 94.8 | 94.3 |
| | 100mm | 93.0 | 93.0 |
| Tolerance to Misalignment | x | Average (0~40mm) | 94.6 |
| | | 40mm | 94.1 |
| | y | Average (0~40mm) | 94.4 |
| | | 150mm | 93.4 |

図 1 2 トランスの一次二次交換時の効率

このように設計、製作した 10kW トランスの給電効率を図 1 1 に示す。また 1.5kW 用と 10kW 用の一次側あるいは二次側を取り換えて 1.5kW 給電を行った場合の効率を図 1 2 に示す。一次側と二次側を交換してもほぼ同じ効率が得られることから、両トランス間に互換性のあることが分かる。

(3) 非接触給電の最大効率の結合係数 k とコイルの Q による表現

非接触給電において、鉄損を無視した場合、トランス効率 η をコイルの Q と結合係数 k で簡単な式で表現できると便利である。

コイルの Q を (2) 式で定義し、(3) 式を用いると、(1) 式は (4) 式に変形できる。

$$Q_1 = \frac{\omega_0 L_1}{r_1}, \quad Q_2 = \frac{\omega_0 L_2}{r_2}, \quad k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \dots (2)$$

$$\frac{1}{k^2} \frac{Q_2}{Q_1} \gg 1 \dots (3)$$

$$R_{LmaxSP} = \frac{r_2 Q_2}{k} \sqrt{\frac{Q_2}{Q_1}} \quad \eta_{maxSP} = \frac{1}{1 + \frac{2}{k} \sqrt{\frac{1}{Q_1 Q_2}}} \dots (4)$$

非接触給電では Q_1 と Q_2 は数 100 程度でほぼ値が等しいので、 k が 0.3 程度以下であれば (3) 式は成り立つ。(4) 式より最大効率は k と Q だけで表され、効率を上げるには k と Q を大きくするだけでよいことが分かった。

(4) 非接触給電の二次電圧制御法とこれを用いた二次電池の充電

自動車用非接触給電では、トランスのギャップ長変動と前後左右の位置ずれによる結合係数 k の変化が避けられず、一次電圧が一定でも二次電圧が変化する。一次直列二次並列コンデンサ方式は、理想変圧器特性を持つため、二次電圧 V_2 はインバータ出力電圧 V_{IN} を巻数比 a と結合係数 k で割った値となる。

$$V_2 = V_{IN} / (ak) \quad \dots (5)$$

二次側に既知の値の抵抗を一時的に接続し一次側の電圧と電流を測定すれば k を推定できる。この k と (5) 式を用いて一次電圧 V_{IN} を調整すれば、 k が変化しても二次電圧 V_2 をほぼ一定に保つことができることを示した。

二次電池の充電には定電流定電圧充電方式が一般的である。二次側に降圧チョップを用いた図 1 3 の回路で二次電池の充電実験を行った。図 1 4 はその時の充電電流 (赤) と充電電力 (青) の変化を示したものである。定電流充電時の非接触充電の効率は 87% 程度であったが、定電圧充電の終わりになると給電電力が 1/10 に下がるため効率が 35% まで低下した。

非接触給電による二次電池の充電に問題がないこと、また、非接触給電では給電電力による給電効率の変化に注意が必要であることを明らかにした。

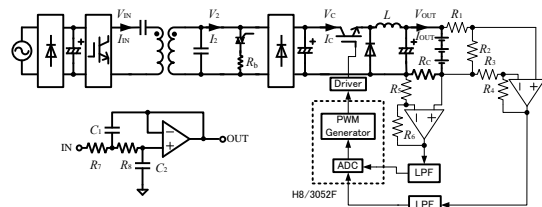


図 1 3 充電制御回路

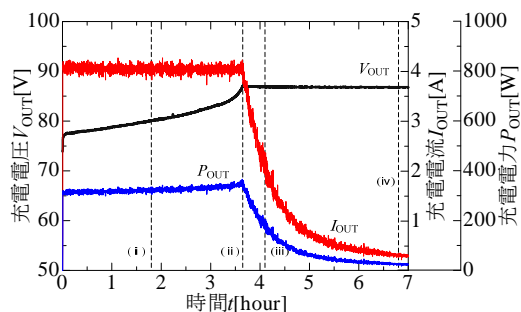


図 1 4 充電実験結果

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6件)

- ① 遠井敬大、金子裕良、阿部 茂、非接触給電の最大効率の結合係数 k とコイルの Q による表現、電気学会論文誌D、査読有、Vol.132、No.1、pp.123-124、(2012)
- ② 千明将人、長塚 裕一、金子裕良、阿部 茂、保田富夫、鈴木 明、電気自動車用非接触給電トランスの新コア構造と鉄損のモデル化、電気学会論文誌D、査読有、Vol.132、No.1、pp.9-16、(2012)
- ③ M. Chigira, Y. Nagatsuka, Y. Kaneko, S. Abe, T. Yasuda, A. Suzuki, Small-Size Light-Weight Transformer with New Core Structure for Contactless Electric Vehicle Power Transfer System、IEEE ECCE2011、査読有、p260-266、(2011)
- ④ Y. Nagatsuka, S. Noguchi, Y. Kaneko, S. Abe, T. Yasuda, K. Ida, A. Suzuki, R. Yamanouchi, Contactless Power Transfer System for Electric Vehicle Battery Charger、EVS-25 Shenzhen China、査読有、Nov. 5-9、(2010)
- ⑤ Y. Nagatsuka, N. Ehara, Y. Kaneko, S. Abe, T. Yasuda, Compact Contactless Power Transfer System for Electric Vehicles、IEEE IPEC2010、査読有、p807-813、(2010)
- ⑥ 金子裕良、江原夏樹、岩田卓也、阿部 茂、保田富夫、井田和彦、電気自動車用非接触給電装置のトランス巻線方式による特性比較、電気学会論文誌D、査読有、Vol. 130、No. 6、pp. 734-741、(2010)

[学会発表] (計10件)

- ① 菅野勇一、三田祐輔、金子裕良、阿部 茂、保田富夫、鈴木 明、電気自動車用非接触給電装置のサーチコイルを用いた給電可能位置判定法、電気学会半導体電力変換研究会、SPC-12-007、(2012. 1. 27)、大阪大学
- ② 望月大樹、渡辺 宏、金子裕良、阿部 茂、双方向非接触給電の基礎検討、電気学会半導体電力変換研究会、SPC-11-180、(2011. 12. 1)、名古屋大学
- ③ 阿部 茂、金子裕良、電気自動車用非接触給電の技術動向、平成 23 年電気学会産業応用部門大会 JIASC2011、2-S11-6、pp II 205-II 210、(2011. 9. 7)、琉球大学
- ④ 高梨浩也、山中智裕、千明将人、金子裕良、阿部 茂、保田富夫、鈴木 明、倍速充電可能な電気自動車用小型非接触給電トランス、平成 23 年電気学会産業応用部門大会 JIASC2011、2-12、pp II 413-II 416、(2011. 9. 6)、琉球大学
- ⑤ 山中智裕、野口真伍、金子裕良、阿部 茂、

保田富夫、鈴木 明、電気自動車の急速充電用非接触給電システム、平成 23 年電気学会産業応用部門大会 JIASC2011、2-11、pp II 407-II 412、(2011. 9. 6)、琉球大学

- ⑥ 千明将人、長塚裕一、金子裕良、阿部 茂、保田富夫、鈴木明、新コア構造による電気自動車用非接触給電トランスの小型軽量化、電気学会半導体変換研究会資料 SPC-11-048、pp. 139-144、(2011. 1. 22)、神戸ユニティー
- ⑦ 小林大樹、長塚裕一、金子裕良、阿部 茂、電気自動車用モジュール型非接触給電トランス、電気学会全国大会講演論文集 4-192、(2010. 3. 17)、明治大学
- ⑧ 長塚裕一、江原夏樹、金子裕良、阿部 茂、一次直列二次直列共振コンデンサを用いた非接触給電の給電効率、電気学会産業応用部門大会講演論文集 2-27、(2009. 8. 31)、三重大学
- ⑨ 岡本 堯、金子裕良、阿部 茂、保田富夫、井田和彦、自動車用非接触給電装置の二次電圧制御法、電気学会産業応用部門大会講演論文集 2-26、(2009. 8. 31)、三重大学
- ⑩ 江原夏樹、長塚裕一、金子裕良、阿部 茂、保田富夫、井田和彦、電気自動車用小型角形非接触給電トランス、電気学会産業応用部門大会講演論文集 2-25、(2009. 8. 31)、三重大学

[図書] (計1件)

- ① 阿部 茂、他、シーエムシー出版、電気自動車のためのワイヤレス給電とインフラ構築、pp. 56-657、(2011)

[産業財産権]

○出願状況 (計7件)

- ① 名称：移動体用非接触給電装置
発明者：阿部茂他
権利者：埼玉大学、テクノバ
種類：特許
番号：PCT2012/52970
出願年月日：2012年2月9日
国内外の別：国内、国外
- ② 名称：移動体用非接触給電装置
発明者：阿部茂他
権利者：埼玉大学、テクノバ、アイシンAW
種類：特許
番号：特願 2011-197461
出願年月日：2011年9月9日
国内外の別：国内
- ③ 名称：移動体用非接触給電装置
発明者：阿部茂他
権利者：埼玉大学、テクノバ、アイシンAW
種類：特許
番号：特願 2011-34916

出願年月日：2011年2月21日
国内外の別：国内

④ 名称：非接触給電装置
発明者：阿部茂他
権利者：埼玉大学、テクノバ、アイシンAW
種類：特許
番号：特願 2011-27548
出願年月日：2011年2月10日
国内外の別：国内

⑤ 名称：非接触給電システム
発明者：阿部茂他
権利者：埼玉大学、テクノバ、アイシンAW
種類：特許
番号：特願 2011-9299
出願年月日：2011年1月19日
国内外の別：国内

⑥ 名称：非接触給電装置
発明者：阿部茂他
権利者：埼玉大学、テクノバ
種類：特許
番号：特願 2009-194425
出願年月日：2009年8月25日
国内外の別：国内

⑦ 名称：非接触給電装置
発明者：阿部茂他
権利者：埼玉大学、(株)テクノバ
種類：特許
番号：特願 2009-194424
出願年月日：2009年8月25日
国内外の別：国内

○取得状況（計0件）

〔その他〕

ホームページ：

<http://akt.ees.saitama-u.ac.jp/>

全発表論文をダウンロード可能

6. 研究組織

(1) 研究代表者

阿部 茂 (ABE SHIGERU)
埼玉大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：70375583

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者

金子裕良 (KANEKO YASUYOSHI)
埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：10233892