

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 18 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26281032

研究課題名(和文)ワイヤレス共鳴送電から発生する電磁波環境の安全性評価

研究課題名(英文) Safety assessment of the environmental electromagnetic fields emitted from wireless resonance transmission

研究代表者

宮越 順二 (Miyakoshi, Junji)

京都大学・生存圏研究所・特任教授

研究者番号：70121572

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,100,000円

研究成果の概要(和文)：400kHz帯域の磁界共鳴送電下における細胞影響評価を行うため、共鳴送電コイル製作に取り組んだ。幅5mm×厚さ0.4mmの被覆平角銅線を用い、22巻のスパイラル型コイルを選定し、送電側および受電側コイル双方を2層構造とした。送電側コイルへの給電は、積層したコイルのそれぞれの端部に接続する直接給電方式とした。この磁界共鳴送電コイルの特性をネットワークアナライザを用いて計測し、共振周波数は422kHz、伝送効率は65%超であることを確認した。また、電磁界シミュレータを用い、送受電コイル間中央の磁界強度が480～560A/mと、ICNIRPガイドライン(職業ばく露)80A/mの6倍超と推定した。

研究成果の概要(英文)：In order to evaluate the cellular effects under the magnetic field resonance transmission at the 400 kHz band, we had worked on resonant power transmission coil production. Covered rectangular copper wire was used with a width of 5 mm and a thickness of 0.4 mm. Both the power transmitting side and the power receiving side coil were made as a two-layer structure. Power feeding to the power transmission side coil was made by a direct feeding method connected to the respective ends of the laminated coils. The characteristics of this magnetic field resonance power transmission coil were measured using a network analyzer. From this result, we confirmed that the resonance frequency was 422 kHz and the transmission efficiency was over 65%. In addition, we had estimated that the magnetic field intensity at the center between transmitting and receiving coils was 480 to 560 A / m, which is more than 6 times the ICNIRP guidelines of 80 A / m, using the electromagnetic field simulator

研究分野：環境学

キーワード：電磁波影響評価 共鳴送電 ワイヤレスエネルギー伝送 発がん性 細胞機能

### 1. 研究開始当初の背景

近年、家庭内やオフィス内で用いる電化製品の増加に伴い、電源コードレス化の観点から無線電力供給技術の実用化が期待されている。従来の無線電力供給技術としては、電磁誘導方式、マイクロ波送電方式、レーザー送電方式といった技術がある。電磁誘導方式の場合、コードレス電話の充電器などで既に実用化されているものの、ごく近い距離でしか電力供給できないことや送電側と受電側の位置あわせの必要である。また、マイクロ波送電方式、レーザー送電方式の場合、送電側と受電側の精細な位置あわせの必要性に加えて、容易に伝送が遮断される、これらの方式は伝送効率に課題が残ることなどの理由から、電化製品の電源コードレス化に対する実用化には不向きであった。

このような状況において、2006年に提案された共鳴送電方式は、コイルとコンデンサを共振器として用い、送電側回路と受電側回路双方の共振による電磁結合を原理とする無線電力供給技術であり、高効率で数 cm から数 m の伝送の可能性を有する。この利点から、国内外において実用化に向けた技術開発が進められており、近い将来、電化製品の電源コードレス化への適用をはじめ、電気自動車への駐車中、走行中の充電への適用が期待されている。

一方、生活環境における電磁波の利用に伴い、電磁波の生体に対する影響について、発がんをはじめとして、社会的な不安が生じ、国際的にも議論が活発に行われている。共鳴送電によるエネルギー伝送から発生する電磁環境の生体に対する安全性について、概念を図1に示す。生体影響評価の中でも、細胞生物学的影響評価は、疫学研究や動物研究に比べて、比較的安価で、国際的にも盛んに行われている。特に、がんの誘発に結びつくと考えられている細胞生物学的指標（遺伝毒性の指標）について検討されている。遺伝毒性の指標には、小核形成、DNA鎖切断、突然変異誘発などがある。また、高周波電波が細胞の諸機能へ影響を与えている可能性として熱ショックタンパクを代表とするストレスタンパクの発現に関して研究が行われている。

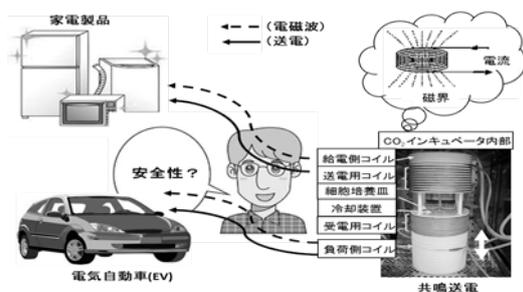


図1 共鳴送電によるエネルギー伝送から発生する電磁波の生体に対する安全性は？

### 2. 研究の目的

電化製品や電気自動車への無線電力供給技術として、共鳴送電をはじめ実用化がせまっている。しかしながら次世代の送電技術であるワイヤレス共鳴送電により生ずる電磁環境の生体影響評価はほとんど行われていない。このような背景から、平成23年度～平成25年度の3年間、10MHz帯の共鳴送電環境ばく露装置を製作し、細胞基本動態および遺伝毒性を中心として影響を検索してきた。本研究課題では、10MHz帯域共鳴送電で発生する電磁環境による細胞機能への影響を検索する。400kHz帯の電磁環境を細胞にばく露可能な装置を作製する。400kHz帯における発がん評価として、遺伝毒性への影響を検索する。400kHz帯電磁環境の細胞機能評価として、ストレスタンパクを中心として遺伝子発現への影響を検索し、共鳴送電の実用化に用いる2つの周波数帯において、安全性評価を行うことを目的とした。

### 3. 研究の方法

①製作した10MHz帯共鳴送電環境ばく露装置を用いて、遺伝毒性評価から、小核形成試験ならびにコメットアッセイ、HPRT突然変異誘発試験を行った。

②製作した10MHz帯共鳴送電環境ばく露装置を用いて、細胞機能への影響評価として、ストレスタンパクを中心とした遺伝子発現への影響を評価した。

③電磁環境評価および生体への安全性評価実験に用いることを視野に入れて、400kHz帯における共振周波数をもち、共鳴送電が実際に可能で、電磁環境が国際非電離放射線防護委員会の定めるガイドライン値（職業ばく露、80A/m）の数倍以上を目指して装置設計に取り組んだ。具体的には、10MHz帯共鳴送電環境ばく露装置で採用したヘリカルコイルタイプから検討を開始し、コイル半径、コイルピッチ、巻き数などをパラメータとして有限要素法解析により最適な形状推定を目指した。途中、コイルサイズが大きくなることから新たに大サイズのCO<sub>2</sub>インキュベータを導入し、解析により設計を継続した。

### 4. 研究成果

#### ①細胞遺伝毒性評価結果

細胞の遺伝毒性指標として、国際的にも代表的に用いられる小核形成試験ならびにDNA鎖切断の有無を解析するコメットアッセイ、さらにHPRT突然変異誘発試験を行った。細胞はヒト退治肺由来繊維芽細胞(WI38VA13 subcloned 2RA)を用いた。

図2に2時間培養を行った細胞における小核形成試験の結果、図3に24時間培養を行った細胞における小核形成試験の結果を示す。左から共鳴送電ばく露装置で培養した細胞における結果、比較対照としたCO<sub>2</sub>インキュベータで培養した細胞における結果、ポジティブコントロール用にプレオマイシンを処理

した細胞における結果を示す。縦軸は細胞1,000個中の小核を生じた細胞数を示している。これらの試験結果は独立3回の繰り返し評価を実施して得られた平均値±標準偏差であらわしている。

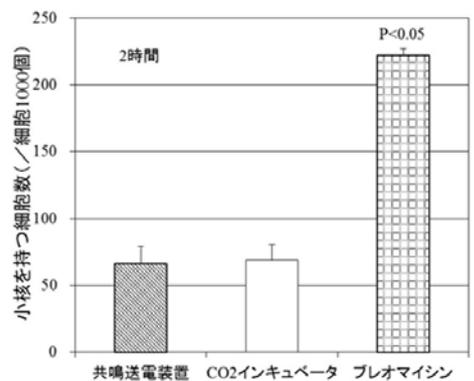


図2 小核形成試験結果 (2時間)

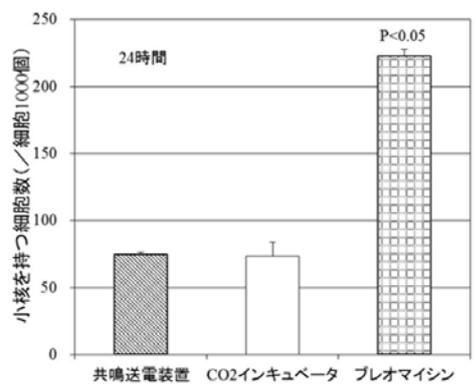


図3 小核形成試験結果 (24時間)

これら小核試験の結果から、共鳴送電ばく露装置で培養した細胞における小核発生頻度と、比較対象用のCO2インキュベータで培養した細胞の結果に優位な差異は見られなかった。

同様に、図4、5にコメットアッセイの結果を示す。左から共鳴送電ばく露装置で培養した細胞における結果、比較対照としたCO2インキュベータで培養した細胞における結果、ポジティブコントロール用にプレオマイシンを処理した細胞における結果を示す。

電気泳動において、DNA核(ヘッド)から流出した損傷DNAはプラス側に引き寄せられて流れていき、長いテイルを引く。コメットアッセイの評価には、全体の蛍光輝度値に対するテイル部分の蛍光輝度値の比×テイル長さで計算されるテイルモーメントを用いており、縦軸に示している。

これらの試験結果は独立3回の繰り返し評価を実施して得られた平均値±標準偏差であらわしている。

これらコメットアッセイの結果から、共鳴送電ばく露装置で培養した細胞における小核発生頻度と、比較対象用のCO2インキュベ

ータで培養した細胞の結果に優位な差異は見られなかった

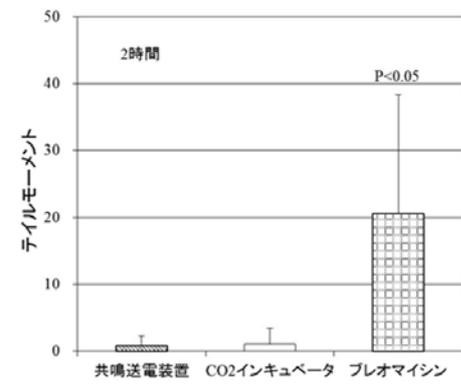


図4 コメットアッセイ結果 (2時間)

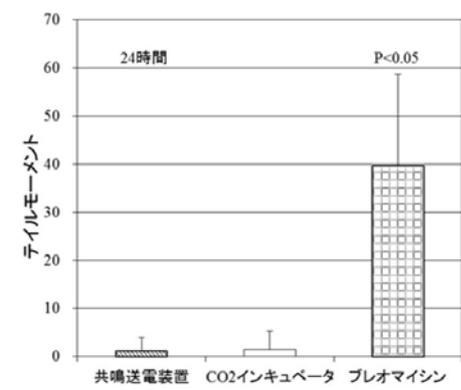


図5 コメットアッセイ結果 (24時間)

続いて、図6、7にHPRT突然変異誘発試験の結果を示す。縦軸は突然変異頻度を示している。これら突然変異誘発試験の結果からも、共鳴送電ばく露装置で培養した細胞における小核発生頻度と、比較対象用のCO2インキュベータで培養した細胞の結果に優位な差異は見られなかった。

以上の結果から、共鳴送電ばく露による細胞遺伝毒性への有意な影響は観察されなかった。

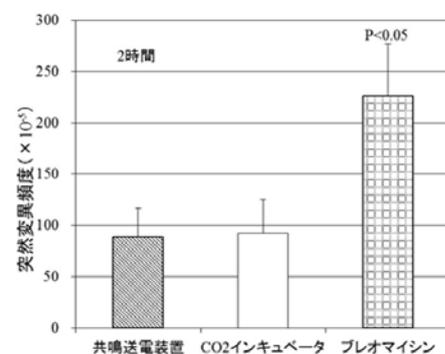


図6 突然変異誘発試験結果 (2時間)

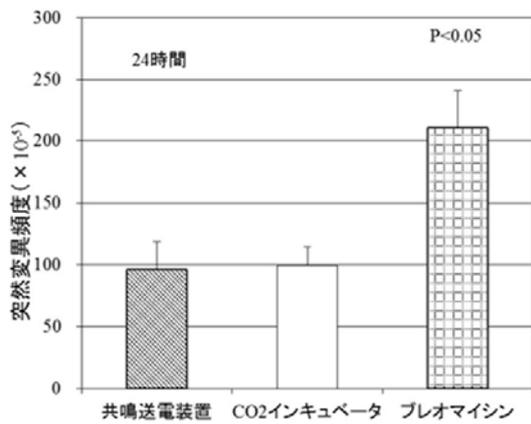


図7 突然変異誘発試験結果 (24時間)

②ストレスタンパク遺伝子発現影響評価  
電磁界・電磁波の細胞影響に関する多くの研究は発がんに着目しており、主に、2つの観点から研究が進められている。ひとつは前述した遺伝毒性に関する研究であり、もうひとつは細胞応答機能に関連する遺伝子発現のような非遺伝毒性を扱う研究である。このような遺伝子発現として特に熱ストレスに対する熱ショックたんぱく質 (Heat Shock Protein : HSP) を指標とし、共鳴送電の細胞影響評価に取り組んだ。細胞はヒト退治肺由来繊維芽細胞 (WI38VA13 subcloned 2RA) を用いた。

図7から図9に、熱ショックたんぱく質 HSP27, HSP70 および HSP90 についてのたんぱく質発現量評価結果を示す。左から、比較対照とした CO2 インキュベータで培養した細胞における結果、共鳴送電ばく露装置で培養した細胞における結果、ポジティブコントロールとして細胞培養温度 37°に対して 43°で熱ストレスを付与した細胞における結果である。これらの試験結果は独立3回の繰り返し評価を実施して得られた平均値±標準偏差であらわしている。

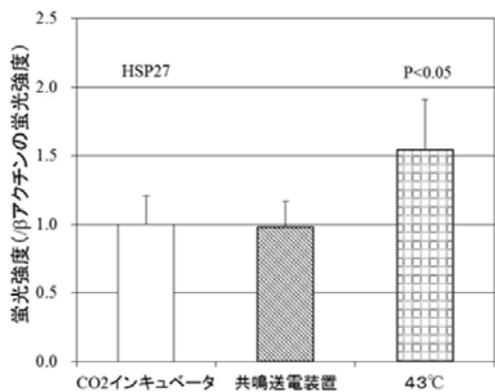


図8 HSP27 に対する影響評価結果

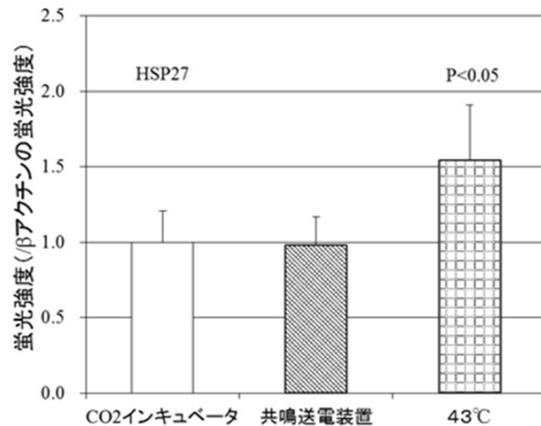


図9 HSP70 に対する影響評価結果

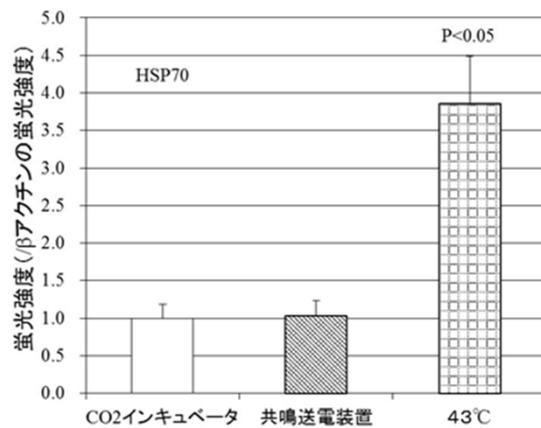


図10 HSP90 に対する影響評価結果

これら熱ショックたんぱく質発現量評価結果から、共鳴送電ばく露による遺伝子発現に対して有意な影響は観察されなかった

③400kHz帯共鳴送電ばく露装置の製作  
400kHz帯域の磁界共鳴送電下における細胞影響評価を行うため、磁界共鳴送電を行えるコイル群の製作に取り組んできた。過年度の10MHz帯の共鳴送電細胞ばく露装置の開発の際に採用した縦型ヘリカルタイプの構成により検討を開始し、電磁界シミュレータ HFSS を活用して検討を進めてきた。しかしながら、そのシミュレーションの結果から、400kHz帯域の自己共振周波数を達成するためにはコイル巻数が膨大となり、細胞影響評価を見据えて CO2 インキュベータ内に構築する関係上、その大サイズのインキュベータ (ヤマト科学、IT600、内寸法 609mm×426mm×514mm) を準備してもなおそのサイズに収めることは困難となり、結果、ヘリカルタイプからスパイラル型コイルに変更し、引き続き、シミュレーションに取り組んだ。

スパイラル型コイルにおいても同様に、巻数

の増加により 400kHz 帯域の自己共振周波数を得るためにはその巻数が膨大となること、また巻数の増加に伴う抵抗値の増加、ひいては特性の低下という課題の中、幅 5mm×厚さ 0.4mm の被覆平角銅線を用い、比較的巻き数を抑えた 22 巻のスパイラル型コイルを選定し、かつそのコイルを積層化させることで、共振周波数を低周波数側にシフトさせ、400kHz 帯域の自己共振周波数を実現することができた。送電側コイルへの給電は、積層したコイルのそれぞれの端部に接続する直接給電方式とし、同様に、受電側コイルから負荷への出力も直接引出方式としている。図 11 に 400kHz 帯域共鳴送電ばく露装置のコイル部を示す。

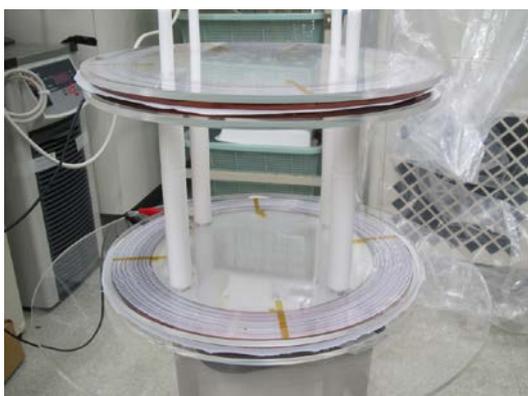


図 11 400kHz 帯域ばく露装置コイル部

この磁界共鳴送電コイルの特性を、ネットワークアナライザを用いて計測し、共振周波数は 422kHz、伝送効率率は 65%超であることを確認した。

また、電磁界シミュレータ HFSS を用い、送受電コイル間中央の磁界強度が 480～560A/m と、ICNIRP ガイドライン（職業ばく露）80A/m の 6 倍超と推定した。図 12 に解析モデル、図 13 にその磁界強度分布をそれぞれ示す。

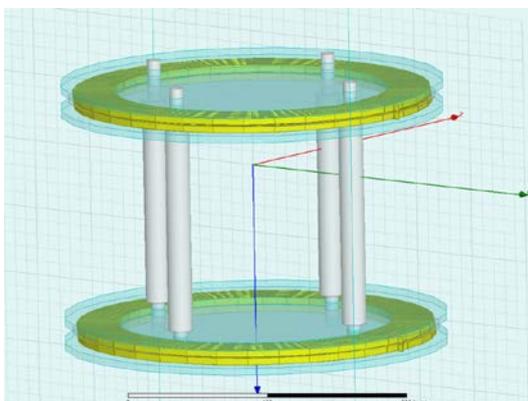
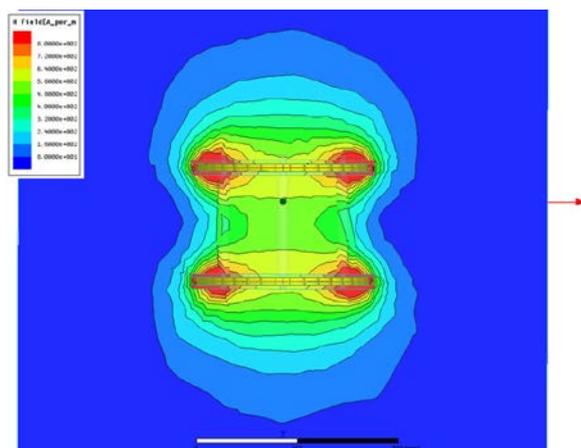


図 12 電磁界シミュレータ HFSS による解析モデル



コイル間中央部にて、480～560 A/m  
（ICNIRP 職業ばく露 80 A/m の 6 倍超）

図 13 HFSS による磁界強度分布

以上、400kHz 帯域の磁界共鳴送電下における細胞影響評価のために必要となる共鳴送電細胞ばく露装置の開発に取り組み、その主要部である磁界共鳴送電コイル部の開発を完了した。

#### 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 3 件）

- ① Kohei Mizuno, Junji Miyakoshi, Naoki Shinohara. In vitro exposure system using magnetic resonant coupling wireless power transfer. *Wireless Power Transfer*, 2014, 1, pp.97-107  
<https://www.cambridge.org/core/journals/wireless-power-transfer/article/in-vitro-exposure-system-using-magnetic-resonant-coupling-wireless-power-transfer/604546CFF890559022D9F2590AEEA5D8>
- ② Kohei Mizuno, Naoki Shinohara, Junji Miyakoshi. In Vitro Evaluation of Genotoxic Effects under Magnetic Resonant Coupling Wireless Power Transfer. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2015, 12, pp.3853-3863.  
<http://www.mdpi.com/1660-4601/12/4/3853>
- ③ Kohei Mizuno, Naoki Shinohara, Junji Miyakoshi. Expression of Heat Shock Proteins in Human Fibroblast Cells under Magnetic Resonant Coupling Wireless Power Transfer. *Energies* 2015, 8, pp.12020-12028.  
<http://www.mdpi.com/1996-1073/8/10/12020>

[学会発表] (計 3 件)

- ① Kohei Mizuno, Junji Miyakoshi, Naoki Shinohara, "Wireless power transfer using resonant coupling and in vitro study", 31th URSI General Assembly and Scientific Symposium, 16-23, August 2014, Beijing (International Convention Center, Beijing, China.)
- ② 水野公平, 宮越順二, 篠原真毅, "細胞研究のための新たな共鳴結合無線電力伝送システム", 電子情報通信学会第 21 回無線電力伝送時限研究専門委員会研究会, 2014 年 1 月 30 日~31 日, 佐賀 大学本庄キャンパス理工学部 6 号館 2 階多目的セミナー室
- ③ 宮越順二, 水野公平, 成田英二郎, 小山眞, 三谷友彦, 篠原真毅, "ワイヤレス共鳴送電の生体影響 評価~ばく露装置と細胞研究~", 電子情報通信学会総合大会, 2014 年 3 月 18 日~21 日, 新潟大学

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者 宮越順二 (MIYAKOSHI JUNJI)

京都大学・生存圏研究所・特任教授  
研究者番号: 70121572

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

・ 篠原真毅 (SHINOHARA NAOKI)

京都大学・生存圏研究所・教授  
研究者番号: 10283657

・ 三谷友彦 (MITANI TOMOHIKO)

京都大学・生存圏研究所・准教授  
研究者番号: 60362422

・ 小山眞 (KOYAMA SHIN)

京都大学・生存圏研究所・特任講師  
研究者番号: 10465487

(4) 研究協力者

なし