

無線給電による車室内センシング

Wireless Power Transfer to Sensors within Vehicle Cabin

高野 豊久*
Toyohisa Takano

山岸 傑
Suguru Yamagishi

桑山 一郎
Ichirou Kuwayama

伊東 健治
Kenji Itoh

車の自動運転化、電動化に伴い、車内搭載センサ数の増加が予想されている。各センサへの動作電力を有線で供給する場合、電源・通信ケーブルによるコスト、重量増が実用化の課題となる。今回、我々は各センサの動作電力をマイクロ波で供給する空間伝送方式で、無線給電の検討を行った。送信周波数920MHz、送信電力1Wの無線給電により、ヘッドレストに内蔵した温度センサが30秒間隔で動作することを確認した。また、車室内の電界強度分布をシミュレーションで計算し、車室内の大部分の領域で、上記センサが動作可能な電界強度が得られることを確認した。

With the advancement of autonomous driving and vehicle electrification, the number of onboard sensors is expected to increase. Powering each sensor via wired connections can lead to increased costs and weight due to power and communication cables. This paper investigates wireless power transmission using a spatial transmission method to supply power to each sensor. We confirmed that a temperature sensor embedded in the headrest could operate at 30-second intervals using wireless power transmission at a transmission frequency of 920 MHz and a transmission power of 1W. In addition, we simulated the distribution of electric field intensity inside the vehicle cabin and confirmed that the electric field intensity required for the sensor to operate could be achieved in most areas of the cabin.

キーワード：無線給電、レクテナ、配線レス、小型

1. 緒言

車の自動運転化、電動化に伴い、車室空間の居住性向上が望まれている。居住性向上のためには車室内の状態をリアルタイムに正確に把握する必要があり、温度、湿度、照度等の各種センサが多数設置されることが想定される。各センサの動作電力を有線で供給する場合、電源と各センサを接続するケーブルが多数設置されるため、ケーブルコスト増、重量増や、センサの位置変更や追加が行えないことが課題となる。それに対し、センサの動作電力を無線で供給する無線給電センサの場合、各センサ毎への接続ケーブルが不要となるため、コスト及び重量を削減できる。さらに、センサの位置変更や後付けが容易となり拡張性の観点からも好ましい。

無線電力伝送方式には電磁界誘導方式、電界結合方式、マイクロ波を用いた空間伝送方式（電磁波方式）等がある⁽¹⁾。電磁界誘導方式、電界結合方式は伝送効率が良いものの、

伝送距離が短く、車室内の各センサ毎への電力送信源が必要となる。今回、電波を利用することで伝送距離が長くなり、一つの送信源で複数センサへ給電することが可能な、マイクロ波を用いた空間伝送方式で検討を行った（図1）。

2. 無線給電システムの構成

空間伝送型ワイヤレス電力伝送システムで920MHz、2.4GHz、5.7GHzの3つの送信周波数帯の電波が認められている⁽²⁾。今回検討を行った無線給電センサへのシステムの構成を図2に示す。今回の検討では、送信周波数は遮蔽物の裏にまで電波が回り込みやすく、RFID^{*1}でも使用されている920MHzを選定した。送信電力、送信アンテナ利得

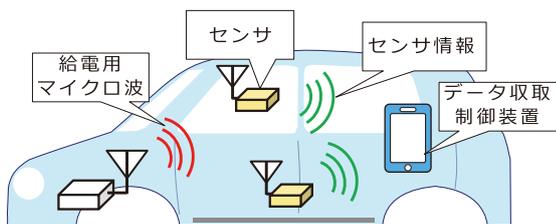


図1 空間伝送方式によるセンサへの給電

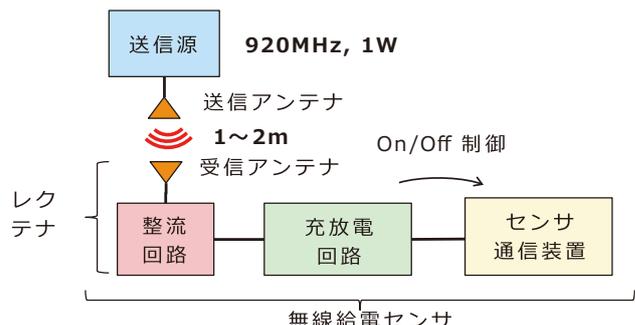


図2 システム構成図

はそれぞれ空間伝送型ワイヤレス伝送システムで許容上限の1W, 6dBiとした。乗用車の車室内を想定すると、送受信距離の最大は約2mとなる。この場合、受信アンテナが受信できる電力は100μW程度の微小電力となる。このような微弱な高周波電力を直流電力に変換するためには、受信アンテナと整流回路から構成される高効率なレクテナ^{※2}が求められる。

レクテナを構成するアンテナと整流回路は一般的に個別に設計され、アンテナと整流回路のインピーダンスは50Ωに設定される⁽³⁾。アンテナ及び整流回路を個別に最適化設計、評価できる反面、アンテナと整流回路の間に50Ωへの整合回路が必要となるため、整合回路内の損失等により変換効率が低下する。

これに対し、アンテナの出力端に整流用ダイオードを直接接続し、全体で共振させることにより、整合回路が不要な構成のレクテナが研究されている⁽⁴⁾。また、整流用ダイオードと整合するアンテナを小型化するために、インピーダンス変成トランスを設けたレクテナも研究されている⁽⁵⁾。車室内ではレクテナが設置可能なスペースが限られるため、今回検討した無線給電システムでは、より小型な寸法でレクテナが構成できるインピーダンス変成トランス付き微小ループアンテナを用いたレクテナを採用した。

また、レクテナ受信電力が100μW程度であるのに対し、センサ及びセンサ情報を送信する通信装置（2.4GHz近距離無線通信）の消費電力は数mWと大きいため、センサ及び通信装置は連続動作できない。本検討では、センサ及び通信装置が動作可能な電力量に充電するまでセンサ及び通信装置を休止、充電完了するとセンサ及び通信装置を動作させる充放電回路を構成し、**図2**のようにレクテナとセンサ及び通信装置の間に挿入した。

2-1 レクテナ

文献4の手法で設計した微小ループアンテナを用いたレクテナの構成を**図3**に示す。整流回路の整流方式は全波整流とし、整流ダイオードはSkyworks製SMS7630を採用した。アンテナ及び整流回路のインピーダンス $Z_r = 4k\Omega$ 、負荷抵抗 $R_r = 7k\Omega$ の時に、レクテナの変換効率（レクテナの出力電力/入力電力）が最大となるため、インピーダンス4kΩの微小ループアンテナを設計した。今回設計した微小ループアンテナの寸法はΦ74mm（0.23波長）で、50Ω設計の一般的なダイポールアンテナ（0.5波長）より小型であるが、車室内への設置自由度を向上させるためには、アンテナを更に小型化することが好ましい。

そこで文献5の手法でインピーダンス変成トランス付き微小ループアンテナを用いたレクテナを設計した。微小ループアンテナはループ外径を小さく、ループ幅を細くするとインピーダンスが高くなる。そのため、**図3**で設計した微小ループアンテナより小型のアンテナの場合、アンテナインピーダンスが整流回路インピーダンスより高くなり、整流回路とは直接整合できない。そこで、インピーダンス変成付き微小ループアンテナを用いたレクテナは、**図4**のように

アンテナと整流回路の間にキャパシタ C_s を接続した構成となる。等価回路を**図5**に示す。微小ループアンテナは微小ループアンテナに誘起された電圧 V_a 、抵抗 R_a 、インダクタ L_a の直列接続で表現される。微小ループアンテナに発生した電圧 V_c はキャパシタ C_s により分圧され、整流回路に印加される電圧 V_r は V_c の $1/n$ 倍（ $n = 1/(1+2Cr/Cs)$ ）となる。これはアンテナと整流回路の間に変成比 $n^2 : 1$ のインピーダンス変成トランスを挿入したことと同等の効果である。本構成を用いることにより、整流回路と整合するアンテナのインピーダンスを**図3**で設計した場合より n^2 倍に高くすることができるため、アンテナを更に小型化することが可能である。アンテナインピーダンスを高くするほどアンテナの小型化が可能である一方、アンテナが受信可能な電力は減少する。今回はアンテナ小型化と受信電力減少のバランスをとり、インピーダンス変成比を9 : 1（ $n = 3$ ）としてレクテナを設計・試作した。

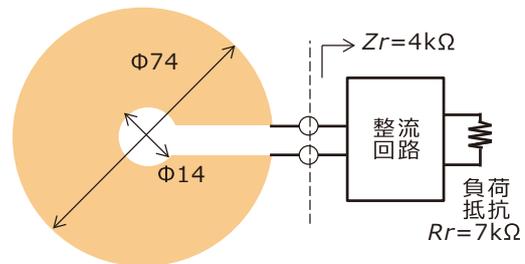


図3 微小ループアンテナを用いたレクテナの構成

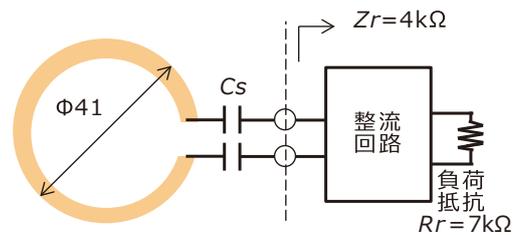


図4 インピーダンス変成トランス付き微小ループアンテナを用いたレクテナの構成

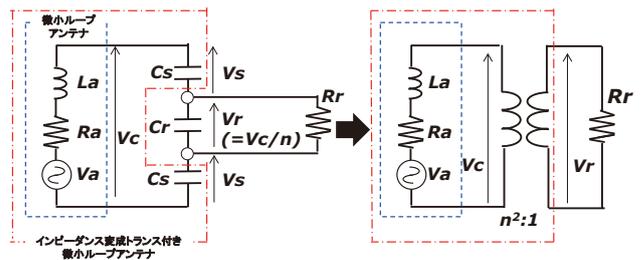


図5 インピーダンス変成トランス付き微小ループアンテナを用いたレクテナの等価回路

設計したインピーダンス変成トランス付き微小ループアンテナの外径は $\Phi 41\text{mm}$ (0.13波長)である。図3で設計したレクテナと比較して、インピーダンス変成トランスを用いることによりループ外径比約0.55倍(面積比約0.3倍)の小型寸法でレクテナを構成できる。

レクテナ試作機の外観を写真1に示す。プリント基板(Megtron7, $t=0.2\text{mm}$)の表面に微小ループアンテナを作成し、裏面に整流回路を実装した。送信源から1mの位置にレクテナ試作機を設置し、レクテナに負荷抵抗 $R_l=7\text{k}\Omega$ を接続したときのレクテナ出力電圧を測定した(図6)。出力電圧は920MHzで最大となり、後段の充放電回路を駆動するために必要な最低電圧0.5V以上が得られる周波数

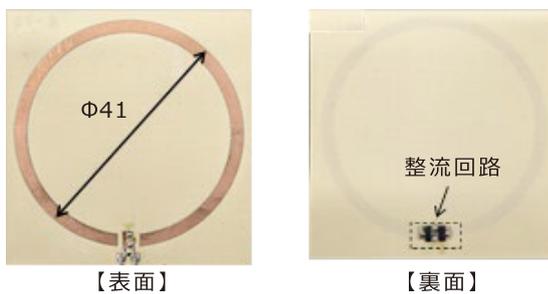


写真1 レクテナ試作機外観

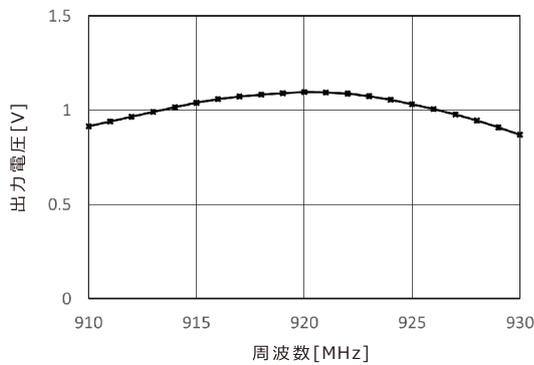


図6 レクテナ出力電圧

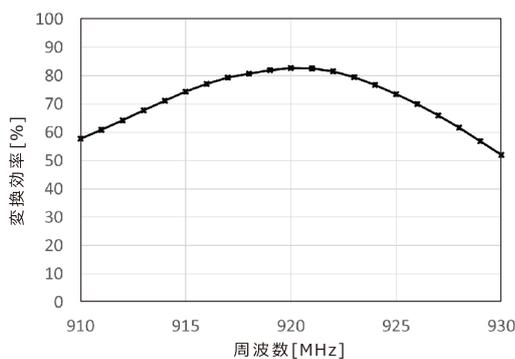


図7 レクテナ変換効率

帯域も20MHz以上の広帯域で安定した特性が得られている。また、レクテナ変換効率は920MHzで80%以上であることを確認した(図7)。

2-2 充放電回路

レクテナ受信電力が100 μW 程度の微小電力に対して、センサ及びセンサ情報を送信する通信装置の消費電力は数mWと大きく、センサ及び通信装置は連続して動作できない。そのため、センサ及び通信装置が動作可能な電力量に充電するまでセンサ及び通信装置を休止、充電完了するとセンサ及び通信装置を動作させる充放電回路をレクテナとセンサ及び通信装置の間に設置する必要がある(図2)。

今回設計した充放電回路の概略構成及び動作を図8、9に示す。充放電回路へ入力された電力は、センサ及び通信装置が動作可能な所定電力までバッテリー(BAT)に充電する。所定電力に相当する電圧までバッテリー端子電圧が上昇すると、電圧比較器がタイマICを起動し、センサ及び通信装置を設定時間間隔で動作させる。バッテリー端子電圧が所定電圧以下まで下がると、タイマICが停止し、センサ及び通信装置が動作可能な電力までバッテリーを充電する動作となる。

充放電回路試作機に電源を接続し、動作確認を実施した。バッテリー端子電圧が所定電圧まで上昇すると、センサ及び通信装置が動作し、センサ測定データが通信装置から送信されていることを受信端末で確認した。

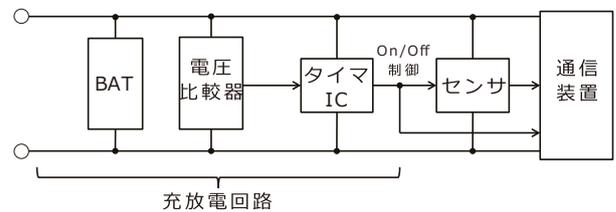


図8 充放電回路構成

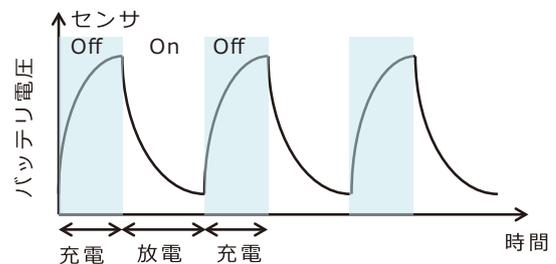


図9 充放電回路動作

3. 無線給電システムの車載検討

今回、乗用車の車室内の温度制御システムをユースケースに想定し、無線給電システムの車載検討を実施した。温度管理システムで各座席位置での温度をリアルタイムに測定し、エアコン温度制御を最適化することにより、各座席での快適性が向上すると共に、エアコン消費電力低減による燃費、電費の向上が期待できる。

3-1 無線給電センサ設置位置

温度制御システムで各座席の温度測定を実施する位置の検討を行った。頭部が温度の不快感を感じやすいため、各座席の頭部付近を温度測定位置とし、エアコン温度制御する方式を想定した。頭部付近の温度を測定するために、無線給電温度センサはヘッドレストへ内蔵とした。

2章で要素試作を実施したレクテナ、充放電回路、及び温度センサ、通信装置を組み合わせた無線給電温度センサをヘッドレストに内蔵(写真2)し、動作確認を行った。動作

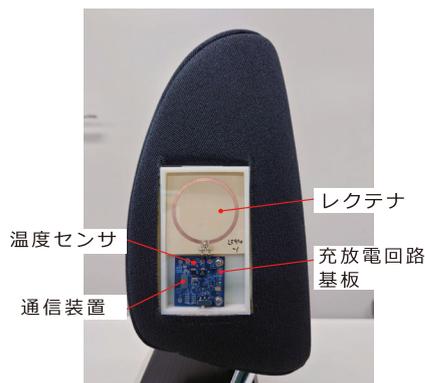


写真2 無線給電温度センサ（ヘッドレスト内蔵）

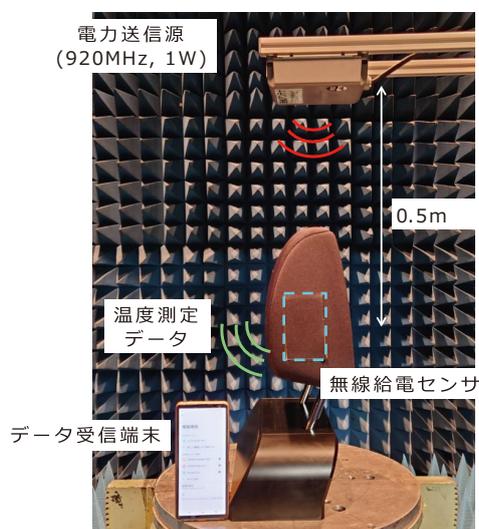


写真3 ヘッドレスト内蔵無線給電センサへの給電実験

確認の条件として、乗用車のルーフ中央部に電力送信源を設置した場合を想定した。この場合、電力送信源とヘッドレストの距離は約0.5mとなる。これを模擬した写真3の実験系で、実際に無線給電温度センサへ無線給電（920MHz, 1W）を行い、温度センサの測定データが約30秒間隔で送信されることを確認した。

3-2 送信アンテナ設置位置

電力送信源の送信アンテナ設置位置を決定するため、乗用車車室内の電界強度分布を、電磁界シミュレーションを用いて計算した。無線給電センサの設置位置であるヘッドレスト付近の電界強度が高く、車室内の電界強度が低い領域が少なくなるような送信アンテナ設置位置を求めた結果、送信アンテナ設置位置はルーフの略中央位置が最適となった。その時の電界強度分布を図10に示す。3-1節の無線給電実験で無線給電センサが動作する無線給電センサ周囲の電界強度は8V/mである。本電界強度分布図では、車室内の大部分の領域で8V/m以上の電界強度が得られており、前章で試作検証したセンサが車室内で動作可能であることをシミュレーションで確認した。

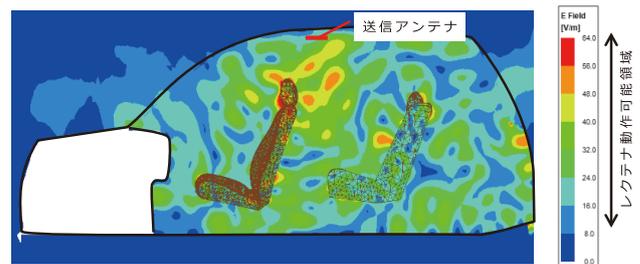


図10 車内電界強度分布図

4. 結 言

自動運転化に伴い、車室内へ多数設置されると想定されるセンサへの自由空間型無線電力伝送への検討を行った。送信周波数920MHz、送信電力1Wの無線給電により、ヘッドレストに内蔵した温度センサが30秒間隔で動作することを確認した。また、車室内の電界強度分布シミュレーションで車室内の大部分の領域において上記センサが動作可能な電界強度が得られることを確認した。

今後は実車搭載に向けて、ドア等の金属体に近接して設置できるレクテナの開発、レクテナのフレキシブル基板化や更なる小型化等によるレクテナ設置性向上の検討を行う。また実車搭載条件で無線電力センサの動作確認を行う。

用語集

※1 RFID

Radio Frequency Identification : 電波を用いて IC タグのデータを非接触で読み書きするシステム。棚卸やセルフレジシステム等で普及している。

※2 レクテナ (Rectenna)

整流器 (Rectifier) とアンテナ (antenna) を組み合わせ、アンテナ受信した電波を整流器で直流電流に変換するデバイス。Rectifying Antenna の略。

・Megtron はパナソニックホールディングス㈱の登録商標です。

参考文献

- (1) <https://www.rd.ntt/se/media/article/0023.html>
- (2) https://www.soumu.go.jp/main_content/000815076.pdf
- (3) 河合、篠原、三谷、「室内920MHz帯無線電力伝送システム用1mW級レクテナの開発」、信学技報、MW2021-71 (Nov. 2021)
- (4) S.Tsujita, K.Itoh, et.al., "920MHz band high sensitive rectenna with a small loop antenna," APMC2019
- (5) 村本、坂井、伊東、「インピーダンス変成微小ループアンテナを用いる920MHz帯レクテナ」、信学ソ大、C-2-16 (Sep. 2021)

執筆者

高野 豊久* : (株)オートネットワーク技術研究所
グループ長



山岸 傑 : (株)オートネットワーク技術研究所
部長



桑山 一郎 : (株)オートネットワーク技術研究所
主幹



伊東 健治 : 金沢工業大学 教授
博士 (工学)



* 主執筆者