

- 学位論文 -

電磁界共振結合を用いたワイヤレス電力伝送に関する研究

Research on Wireless Power Transfer Using Electromagnetic Resonant Coupling

居村 岳広

指導教官 堀 洋一 教授

東京大学大学院

工学系研究科 電気工学専攻

2009 年 12 月 15 日

要旨

この学位論文は新しいワイヤレス電力伝送方式である電磁界共振結合技術の理論の体系化と技術の確立を目的としている。本方式は従来では不可能であった数メートルの距離まで高効率でワイヤレス電力伝送を可能とする技術である。

近年ワイヤレス電力伝送が注目されている理由は主に2つある。一つ目は、携帯電話やノートパソコンなどのモバイル機器や電気自動車などの2次電池を搭載した電気機器や電動機器の普及である。2次電池搭載機器の電池切れや充電作業の煩わしさ回避のため、手軽に充電が可能なワイヤレス充電に注目が集まっている。二つ目は、ワイヤレス電力伝送技術における大エアギャップかつ高効率が達成された事による技術革新である。これにより、従来数 cm であったエアギャップが大きくなり、充電が可能な空間的範囲が圧倒的に広がった。この事により、いつでもどこでも手軽かつ勝手にワイヤレス自動充電という将来像が出来上がってきた。更に、充電を飛び越え、直接電気機器に給電する発想も生まれてきた。つまり、電気機器全てに対し直接電源からワイヤレス給電を行いそのまま使用するという方法であり、電気ケーブルが全てワイヤレス給電に置き換わる将来像である。通信における有線 LAN が無線 LAN に置き換わった事と同様の事が電力におけるワイヤレス化という形で実現されると思われる。このユビキタスエネルギー社会実現に向け、ワイヤレス電力伝送として技術的に必要不可欠な4大要素がある。大エアギャップ、高効率、位置ずれに強い、大電力の4点である。

従来のワイヤレス電力伝送は3方式あり、これら全ての技術では大きなエアギャップにおいて高効率で電力伝送を行なうことは不可能であった。非放射型の電磁誘導方式においては高効率であるがエアギャップが短く、位置ずれにも弱い。放射型のマイクロ波方式やレーザー方式においては、エアギャップは大きいが高効率である。以上のように、大エアギャップかつ高効率という特徴を兼ね備えたワイヤレス電力伝送方式がなかった。

このような現状の中、2006年に電磁界共振結合方式がMITから発表された。この現象は、光波を扱う光導波路や光ファイバ、通信の技術の中で使われているアンテナや共振器、従来の電磁誘導などの技術の延長上に位置付けられるが、大エアギャップかつ高効率のワイヤレス電力伝送技術として実証されるのは世界で初めてのことであった。実験においては、10MHzの周波数を使用し、エアギャップ1mを効率90%以上でワイヤレス電力伝送できることを実証した。理論的裏付けは結合モード理論によって行なわれており、現象自体の基礎的な理論説明がされている。しかしながら、アンテナ特性の検証や、一般的な電気回路の理論としての説明はされておらず、更なる現象の解明、より実用的な理論の確立とそこからの技術的発展が期待されていた。

これらの背景を踏まえ、本論文では電磁界共振結合技術の現象の解明と理論の体系化を通し、技術の確立を行なう。電磁界共振結合は共振を利用しているために非常に特徴的な動作をする。そこで、電磁界共振結合用のアンテナの提案を行なった上で、動作の確認を行った。電磁界共振結合は磁界共振結合と電界共振結合の総称である。磁界型と電界型の各々についてアンテナの提案をし、エアギャップや位置ずれの及ぼす影響を通して、基本的な電気的特性の検証を行った。また、共振が起こっているときのアンテナの動作を検証した。磁界型のアンテナとしてヘリカルアンテナとスパイラルアンテナを、電界型のアンテナとしてメアンダラインアンテナを提案し、磁界型アンテナと電界型アンテナの比較を行な

い、磁界共振結合と電界共振結合の対称性を確認した。

電磁界共振結合の現象は結合モード理論で理論的に説明はされているが、電気工学としては応用性に欠ける。そこで、アンテナのパラメータ設計や外部回路の設計のために、より一般的な電気回路理論で理論的に説明する。電磁界共振結合の現象を等価回路で定義し、定式化して、理論的に説明できることを示した。磁界共振結合と電界共振結合においては、結合が磁界か電界かによって等価回路における結合をあらわす成分が相互インダクタンスか相互キャパシタンスかに分けられる。よって、磁界共振結合と電界共振結合における等価回路を定義することを行った。等価回路理論の妥当性を電磁界解析と実験により確認し、その整合性を実証した。

電磁界共振結合を等価回路で記述できる事が立証されたことを受け、等価回路をもとにして議論をすることができる。そこで、等価回路をもとにして、オープンアンテナとショートアンテナという2つのアンテナタイプへの拡張、エアギャップと最大効率の関係式とその条件の導出、動作周波数のkHz~MHz~GHz 用への拡張、効率一定の証明、従来の電磁誘導との比較を行なった。

オープンアンテナとショートアンテナの実証により、アンテナの種類の拡張ができ、共振周波数を自在に調整できることを示した。エアギャップと最大効率の導出により、大きなエアギャップが高効率で実現できる条件を示し、理論的に本現象におけるエアギャップと効率の限界値を定義できることを示した。動作周波数を MHz 以外の kHz や GHz に拡張できることを示すことにより、パワーエレクトロニクス技術が使用できるため制御を大幅にかつ簡易に行うことができ、また通信との融合も可能になることを示した。また、周波数を選定することにより超小型機器から大型機器まで、電気機器の大小問わずワイヤレス充電できることを示した。電磁界共振結合の現象を等価回路化したことにより、このように多くの立証に貢献し、電磁界共振結合の可能性を大幅広げることが出来た。

以上の成果を踏まえ、現象解明のフェーズから実用システムへのフェーズへと移行した。例えば電気自動車の停車中のワイヤレス充電を考慮した場合、実用においては、エアギャップや位置ずれは頻繁に起こる。エアギャップや位置ずれの変化に対応するにはアンテナを電氣的に静的に使用するだけでは対応できないので、この問題に対処するために、制御を加えて電磁界共振結合をシステムとして動的に使用することを提案し、それにより常に最大効率で使用できることを目指した。

電磁界共振結合システムにおいて新しいシステムの提案を行った。アンテナの共振周波数に電源周波数を追従させる方式と電源周波数にアンテナの共振周波数をインピーダンスマッチングによって合わせる方式である。これら方式の基礎的な研究を行い、その実用性を実証することが出来た。

以上より、等価回路を用いて電磁界共振結合を理論的に体系化し、システム応用までの提案と検証を行い、その有効性を示すことが出来た。

目次

第 1 章	序論	1
1.1.	本論文の背景	4
1.1.1.	ワイヤレス電力伝送の分類と 4 方式	4
1.1.2.	電磁誘導方式	9
1.1.3.	電磁界共振結合方式	11
1.1.4.	マイクロ波方式	16
1.1.5.	レーザー方式	22
1.1.6.	電磁界共振結合によるワイヤレス電力伝送の将来像	23
1.1.7.	電気自動車におけるワイヤレス充電の必要性	27
1.2.	本論文における問題意識と研究目的	30
1.3.	本論文の構成	30
第 2 章	電磁界共振結合用アンテナの提案とその実現	31
2.1.	まえがき	31
2.2.	電磁界共振結合アンテナの解析手法と実験方法	31
2.2.1.	電磁界共振結合の概要	31
2.2.2.	電磁界解析	32
2.2.3.	モーメント法	33
2.2.4.	実験構成	36
2.3.	磁界共振結合アンテナ	39
2.3.1.	ヘリカルアンテナの提案	39
2.3.2.	ヘリカルアンテナの近傍電磁界	57
2.3.3.	スパイラルアンテナの提案	61
2.4.	電界共振結合アンテナ	65
2.4.1.	メアンダラインアンテナの提案	65
2.4.2.	メアンダラインアンテナの近傍電磁界	69
2.5.	あとがき	71
第 3 章	電磁界共振結合の等価回路化	72
3.1.	まえがき	72
3.2.	磁界共振結合の等価回路化	72
3.2.1.	等価回路電力伝送効率式の導出	72
3.2.2.	等価回路 f_m , f_e , L , C , L_m の算出方法	78
3.2.3.	実験結果, 電磁界解析, 等価回路の比較	80
3.3.	電界共振結合の等価回路化	81

3.3.1.	等価回路電力伝送効率式の導出	81
3.3.2.	等価回路 f_e , f_m , C , L , C_m の算出方法	82
3.3.3.	実験結果, 電磁界解析, 等価回路の比較	83
3.4.	あとがき	86
第 4 章	電磁界共振結合の等価回路からの発展	87
4.1.	まえがき	87
4.2.	オープン・ショート型ヘリカルアンテナの提案	87
4.2.1.	オープン型ヘリカルアンテナ	89
4.2.2.	ショート型ヘリカルアンテナ	92
4.2.3.	オープン型ヘリカルアンテナとコンデンサ	95
4.2.4.	ショート型ヘリカルアンテナとコンデンサ	98
4.2.5.	オープン型・ショート型ヘリカルアンテナとコンデンサの実証実験	103
4.2.6.	オープン型・ショート型ヘリカルアンテナのまとめ	106
4.3.	最大効率とエアギャップの理論限界	107
4.3.1.	電磁界共振結合の特徴の確認	107
4.3.2.	ノイマンの公式による相互インダクタンスとエアギャップ	109
4.3.3.	最大効率とエアギャップの理論限界の関係式	110
4.3.4.	複数ループによる最大効率とエアギャップの理論限界の再検証	115
4.3.5.	最大効率とエアギャップの理論限界のまとめ	119
4.4.	kHz~MHz~GHz への拡張	120
4.4.1.	電磁界共振結合の周波数拡張の意義	120
4.4.2.	kHz~MHz~GHz のアンテナ	121
4.4.3.	kHz~MHz~GHz への拡張のまとめ	128
4.5.	電力や損失に関わる考察.....	129
4.5.1.	効率一定の実証実験	129
4.5.2.	表皮効果と損失	132
4.5.3.	大電力と Q 値	137
4.5.4.	周波数と Q 値とスケール則	141
4.6.	非対称アンテナの提案	146
4.6.1.	非対称アンテナの等価回路による検討	147
4.6.2.	電気自動車用非対称ヘリカルアンテナの提案	149
4.7.	等価回路による電磁界共振結合と電磁誘導との比較検証	161
4.7.1.	送信アンテナと受信アンテナの共振周波数の関係	161
4.7.2.	力率補償	165
4.7.3.	等価回路による電磁界共振結合と電磁誘導との比較検証のまとめ.....	169
4.8.	あとがき	170

第 5 章	電磁界共振結合システム	171
5.1.	まえがき	171
5.2.	電磁界共振結合システムの必要性	171
5.2.1.	相互インダクタンスの変化	172
5.2.2.	負荷の変化	174
5.3.	最大効率追従制御の各種方式	176
5.3.1.	周波数追従方式の提案	176
5.3.2.	インピーダンスマッチング追従方式の提案	178
5.3.3.	スイッチング整合方式の提案	184
5.4.	最大効率追従制御の実験的検証	185
5.4.1.	周波数追従方式の実験的検証	185
5.4.2.	インピーダンスマッチング方式の実験的検証	188
5.5.	電気自動車へのワイヤレス充電模擬実験	191
5.6.	あとがき	193
第 6 章	結論	194
6.1.	まとめ	194
6.2.	今後の課題	195
謝 辞		196
付 録 A	近傍電磁界	197
付 録 B	共振周波数 $f_{01} \neq f_{02}$ の検証	198
付 録 C	ギャップ変化と Z_{01} 補償	217
付 録 D	負荷変化と Z_{01} 補償	226
付 録 E	伝送線路と入力インピーダンス	239
付 録 F	低周波と高周波の効率の定義の検証	240
付 録 G	単位変換	241
発 表 論 文 ・ 研 究 業 績		242
参 考 文 献		245

第1章 序論

ワイヤレス電力伝送とは、コイルやアンテナなどを使用して電磁エネルギーにより、電気コードなどの物理的接触を行わずに、非接触で電力を送ることである。

現在、電磁エネルギーのワイヤレスでの使用目的は、専ら情報伝達手段としての通信利用に限られており、通信分野でのワイヤレス技術は大いに発達している。一方、ワイヤレス電力伝送は通信と同時期に研究は始まったが、通信技術に比べ大きく遅れている。しかしながら、通信とワイヤレス電力伝送で使用される電磁エネルギーは、元を正せば同じ技術であり、通信目的に利用するか電力使用目的に利用するかの違いだけである。

そこで問題となるのが効率である。通信は -100dB （ $=1/1$ 億%）以上の減衰が許されるが、電力伝送では電気コードと対抗するには、電源から負荷までの効率で 80% （ $=-0.97\text{dB}$ ）もしくは 90% （ $=-0.46\text{dB}$ ）以上の効率が求められる。利便性という付加価値を考慮すれば、 90% 以上は必須ではないが、一般に 1dB の減衰（ $=79.4\%$ ）が許されないという厳しさがある^[1]。

ワイヤレス電力伝送そのものの概念は約 100 年前のニコラ・テスラ（Nikola Tesla）^[2]の時代から存在していた。電磁エネルギー利用にまつわる歴史を紐解くと、次のようになる。1831 年に電磁誘導の法則をマイケル・ファラデー（Michael Faraday）^[3]が発見し、1864 年にジェームズ・クラーク・マクスウェル（James Clerk Maxwell）^[4]が電磁波を理論的に示し^[5]、1881 年にハインリヒ・ルドルフ・ヘルツ（Heinrich Rudolf Hertz）^[6]が実験的に電磁波を示したことがワイヤレス電力伝送幕開けの背景にある（図 1.1）。

その後、電磁エネルギーを電力利用の目的としてワイヤレスで送るという研究がニコラ・テスラによって行われた。交流理論やテスラコイルで有名なテスラである（図 1.2）。これが、ワイヤレス電力伝送の歴史の幕開けとされている。彼の構想では、ウォーデンクリフ・タワー（Wardenclyffe Tower）、別名、テスラタワー（Tesla Tower）によって地球上の全ての場所に電力をワイヤレスで送るという計画であり、1901 年から 1917 年まで計画は進められたが、結局実現されなかった（図 1.3、図 1.4）^[7]。

アレクサンダー・グラハム・ベル（Alexander Graham Bell）による電話の発明が 1876 年であり、トーマス・アルバ・エジソン（Thomas Alva Edison）の電球発明が 1878 年である。通信の利用がテスラタワー建設の 25 年前、エジソンの電球発明がテスラタワー建設の 23 年前であることを考えると、電磁エネルギーをワイヤレスで使用するという概念は電磁エネルギー使用初期から存在してきたことになる。それ以降、電磁誘導やマイクロ波などの方式で電力伝送技術の技術開発は進んできたが、研究段階であったり、機械的には接触型であったり、エアギャップが僅か数 cm 程度である一部の特化した製品のみに使われる技術であった。

しかしながら、ここ数年、モバイル機器や電磁界共振結合現象の出現も相成って、ワイヤレス電力伝送の技術的発展と社会的需要が急激に加速している。今までの状況と違うのは、大エアギャップかつ高効率を実現させる技術の台頭と、それを基にした需要が生まれていることである。本章では、“1.1 本論文の背景”でこれら背景を述べ、“1.2 本論文における問題意識と研究目的”でワイヤレス電力伝送における課題を取り上げ、研究の目的を示し、最後に“1.3 本論文の構成”で本論文の概要を述べる。

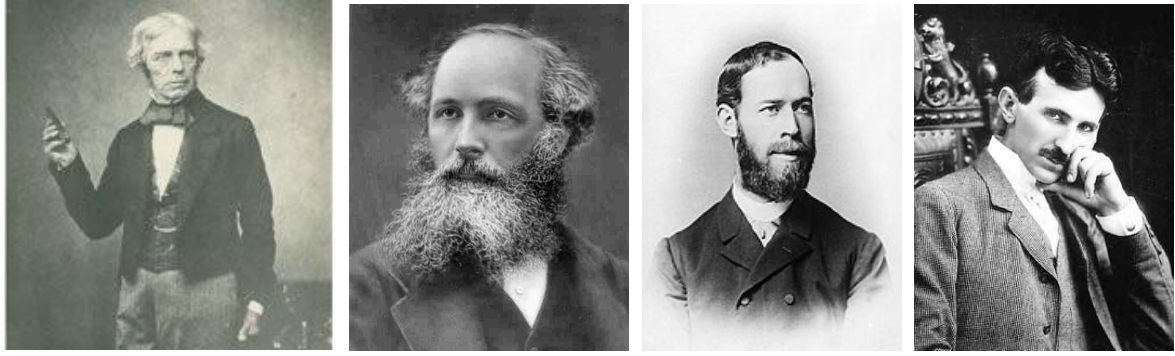


図 1.1 ファラデー^[3], マクスウェル^[4], ヘルツ^[6], テスラ^[2]

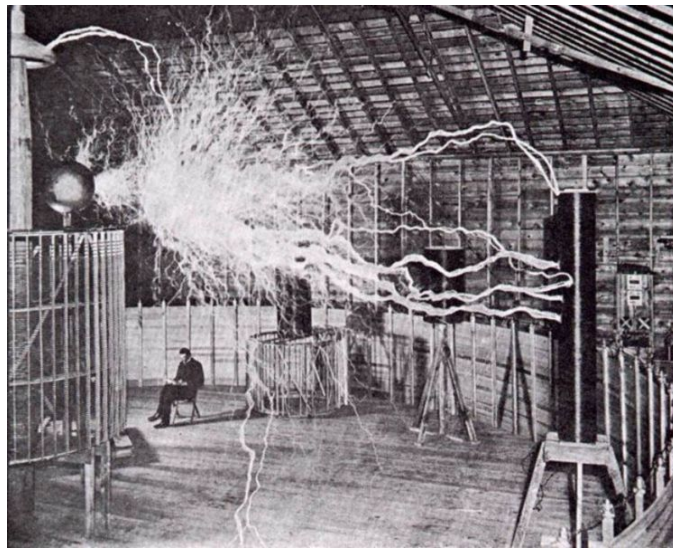


図 1.2 交流の安全性をアピールするニコラ・テスラ

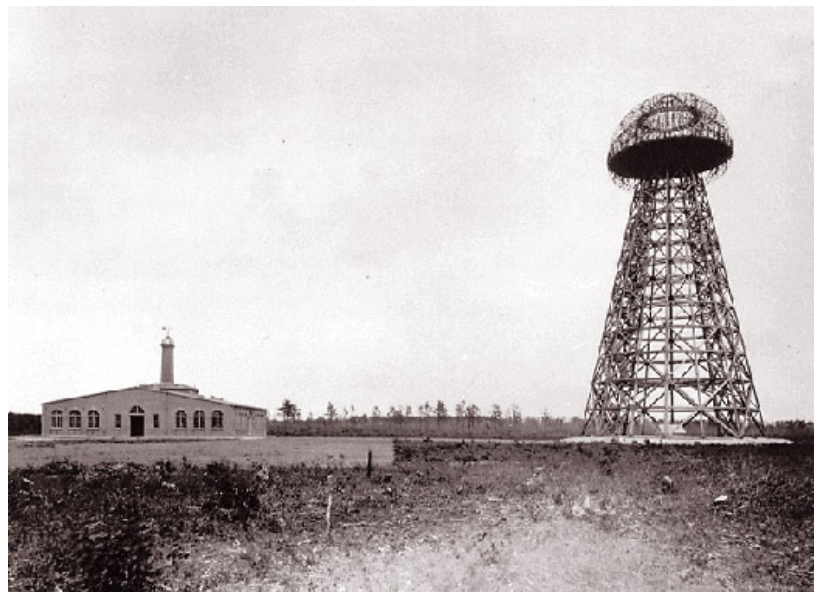
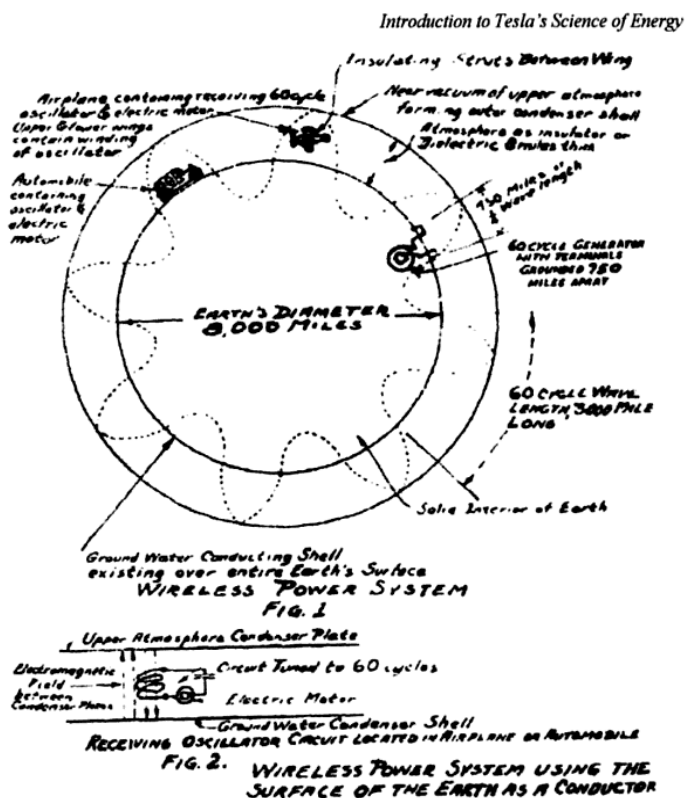


図 1.3 ウォーデンクリフ・タワー, 別名テスラタワー(1901-1917)^[7]



SKETCH A.

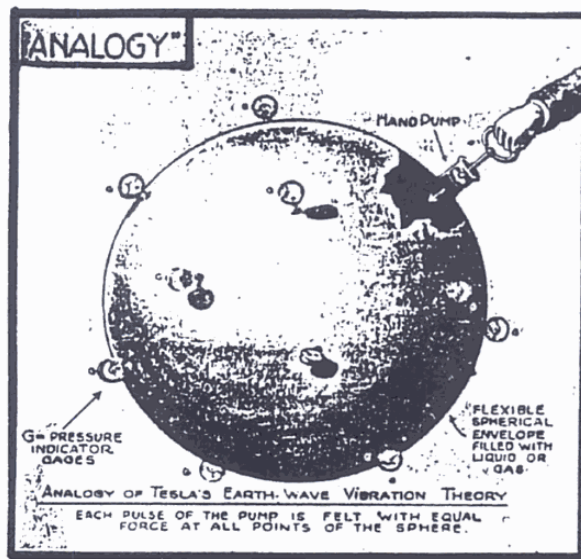
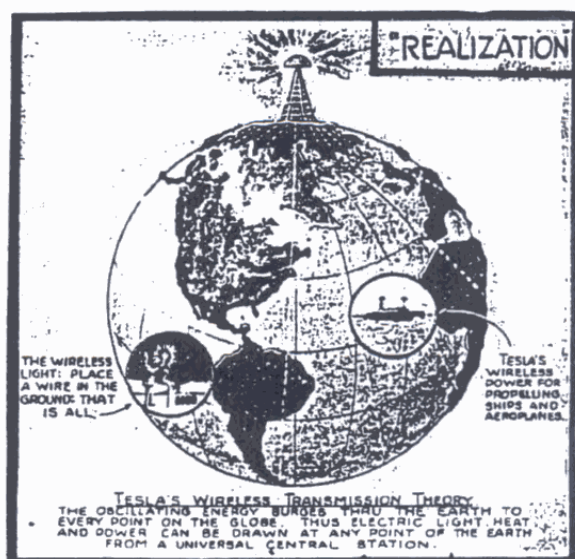


図 1.4 地球上全てにワイヤレスで電力を送るニコラ・テスラによる概念図 [7]

1.1 本論文の背景

近年、僅か数年の間において急速にワイヤレス電力伝送の注目が高まっている。このことに関しては主に2つの原因がある。

一つ目は、携帯電話やノートパソコンなどのモバイル機器や電気自動車などの2次電池を搭載した電気機器や電動機器の普及である。リチウムイオン電池技術の確立で、2次電池のエネルギー密度向上により、様々な機器で使われるようになった。一方で、リチウムイオン電池だけでは必ずしも必要十分なエネルギー密度を確保できないことにより、2次電池搭載機器に頻繁に起こる電池切れや毎日の充電作業の煩わしさが目に付くようになった。そこで、手軽に充電が可能なワイヤレス充電に注目が集まっている。

二つ目は、新たに出現した電磁界共振結合（電磁共鳴）方式によって、大エアギャップかつ高効率が達成された事によるワイヤレス電力伝送技術における技術革新である。これにより、従来数 cm であったエアギャップが大きくなり、充電が可能な空間的範囲が圧倒的に広くなり、ワイヤレス電力伝送の電気機器への適応範囲や使用方法が広がった。エアギャップの大きさに対する常識が変化し、更なる需要を呼び、いつでもどこでも手軽かつ勝手にワイヤレス自動充電という将来像が出来上がってきた。更に、充電を飛び越え、直接電気機器に給電する発想も生まれてきた。つまり、電気機器全てに対し直接電源からワイヤレス給電を行いそのまま使用するという発想である。別の見方をすると、電気ケーブルが全てワイヤレス給電に置き換わる将来像であり、ユビキタスエネルギー社会といえる。通信における有線 LAN が無線 LAN に置き換わった事と同様の事が電力におけるワイヤレス化という形で実現されると思われる。このユビキタスエネルギー社会実現に向け、ワイヤレス電力伝送として技術的に必要不可欠な4大要素がある。大エアギャップ、高効率、位置ずれに強い事、大電力の4点である。

本節では、このワイヤレス電力伝送における技術的背景と社会的需要について述べる。技術的背景としては、“1.1.1 ワイヤレス電力伝送の分類と4方式”において、ワイヤレス電力伝送の全方式を4つに分類化し、各々について“1.1.2 電磁誘導方式”、“1.1.3 電磁界共振結合方式”、“1.1.4 マイクロ波方式”、“1.1.5 レーザー方式”として述べる。社会的需要としては、電磁界共振結合によってもたらされる全般的な需要や将来像を“1.1.6 電磁界共振結合によるワイヤレス電力伝送の将来像”に示し、更に、本技術がライフスタイルそのものを変えるような好例として、電気自動車とワイヤレス充電に関し、“1.1.7 電気自動車におけるワイヤレス電力伝送の必要性”に示す。

1.1.1 ワイヤレス電力伝送の分類と4方式

ワイヤレス電力伝送は大きく2つに分けられ、非放射タイプと放射タイプに分けられる。非放射タイプには電磁誘導と電磁界共振結合が属し、放射タイプにはマイクロ波方式とレーザー方式が属す。そこで、まず非放射と放射、近傍界と遠方界について述べ、その後にワイヤレス4方式の分類について述べる。

非放射と放射

放射型と非放射型について、エネルギー保存の関係から検証する。エネルギー保存の関係を式(1.1), 放射界の概念図を図 1.5, 非放射界の概念図を図 1.6 に示す。波源のエネルギーはポインティングベクトルとして遠方に飛んでいくエネルギーと、アンテナ近傍に蓄積される磁気エネルギーと電気エネルギーの総和とオーム損などの損失に分けられる。非放射型はこのアンテナ近傍に蓄積される磁気エネルギーや電気エネルギーを電力伝送に使用していると考えられる。

$$-\frac{1}{2}\mathbf{J}^*\mathbf{E} = \frac{1}{2}\nabla(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) + j\frac{1}{2}\omega(\mu\mathbf{H}\mathbf{H} - \varepsilon\mathbf{E}\mathbf{E}) + \frac{1}{2}\sigma\mathbf{E}\mathbf{E}^* \quad (1.1)$$

波源の電力 = ポインティングベクトル + {(蓄積される磁気エネルギー) - (蓄積される電気エネルギー)} + オーム損

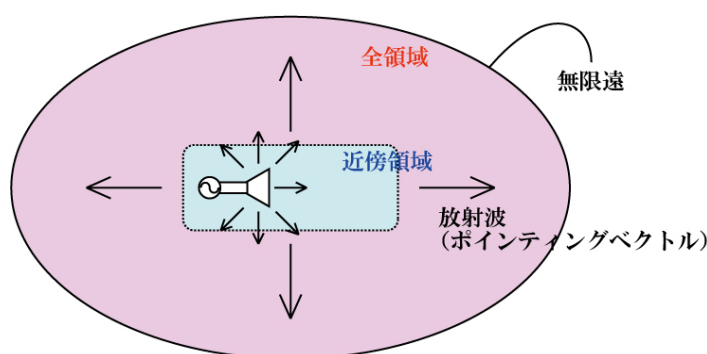


図 1.5 放射界の概念図

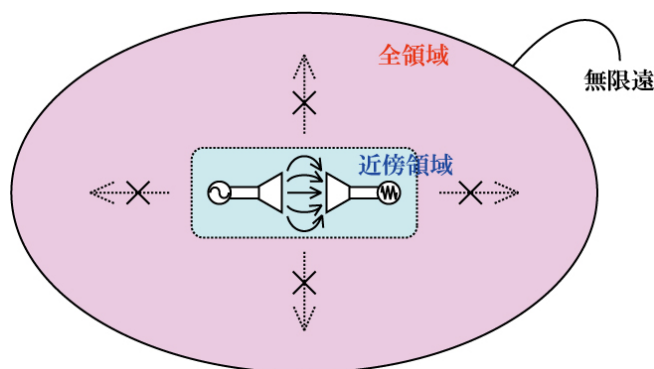


図 1.6 非放射界の概念図

電気双極子モデル

電磁エネルギーの近傍界から遠方界までの推移を電気双極子モデル図 1.7 で検証する。電気双極子から発生する電磁界の電界と磁界はマクスウェルの方程式から式(1.2)～(1.7)で表される。 $1/r^3$, $1/r^2$, $1/r$ の項は、それぞれ準静界、誘導電磁界、放射界と呼ばれる。通信用の一般的なアンテナは、減衰が小さく遠方まで届く、 $1/r$ で表される放射界のみを考えればよく、式(1.3)と式(1.7)の $1/r$ の項を使用し、 $\mathbf{E}_\theta \times \mathbf{H}_\phi$ のポインティングベクトルでエネルギーの流れを考え、遠方では、 $E_\theta / H_\phi = \eta = 120\pi \approx 377[\Omega]$ となる。通常の電磁誘導に関する項は、式(1.7)の第2項目がビオサバルの法則になっており、これを使用する

(式(1.8))。近傍界と遠方界の定義は諸説あるが、一般には電気双極子において、 $1/r^3$, $1/r^2$, $1/r$ の各項の振幅が一致する距離である、 $\lambda/2\pi$ が境界とされている (図 1.8)。13.56MHz の場合、 $\lambda/2\pi \approx 3.52\text{m}$ 、100kHz の場合、 $\lambda/2\pi \approx 477\text{m}$ であり、電磁界共振結合や電磁誘導はそれよりも近い距離での電力伝送となる。そのため、結合における電力伝送は、 $1/r^3$, $1/r^2$ で表される項が関与していると思われ、準静界や、誘導電磁界で表される領域が非放射型の電力伝送において重要な研究対象となる。一方、非放射型の電力伝送も、EMI 対策としては、放射界の研究も等しく重要である。

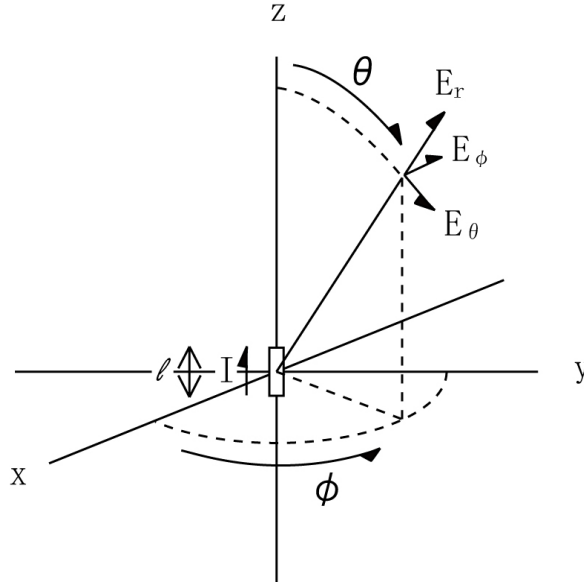


図 1.7 電気双極子と極座標表示

$$E_r = \frac{\eta(I)}{2\pi} \left(\frac{1}{r^2} + \frac{1}{jkr^3} \right) \cos\theta \cdot e^{-jkr} \quad (1.2)$$

$$E_\theta = j \frac{\eta(I)}{2\lambda} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{jkr^2} - \frac{1}{k^2 r^3} \right) \sin\theta \cdot e^{-jkr} \quad (1.3)$$

$$E_\phi = 0 \quad (1.4)$$

$$H_r = 0 \quad (1.5)$$

$$H_\theta = 0 \quad (1.6)$$

$$H_\phi = j \frac{(I)}{2\lambda} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{jkr^2} \right) \sin\theta \cdot e^{-jkr} \quad (1.7)$$

$$j \frac{(I)}{2\lambda} \frac{1}{jkr^2} \sin\theta \cdot e^{-jkr} = \frac{(I)}{4\pi r^2} \sin\theta \cdot e^{-jkr} \quad (1.8)$$

$$\left(\because \eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \approx 120\pi \right)$$

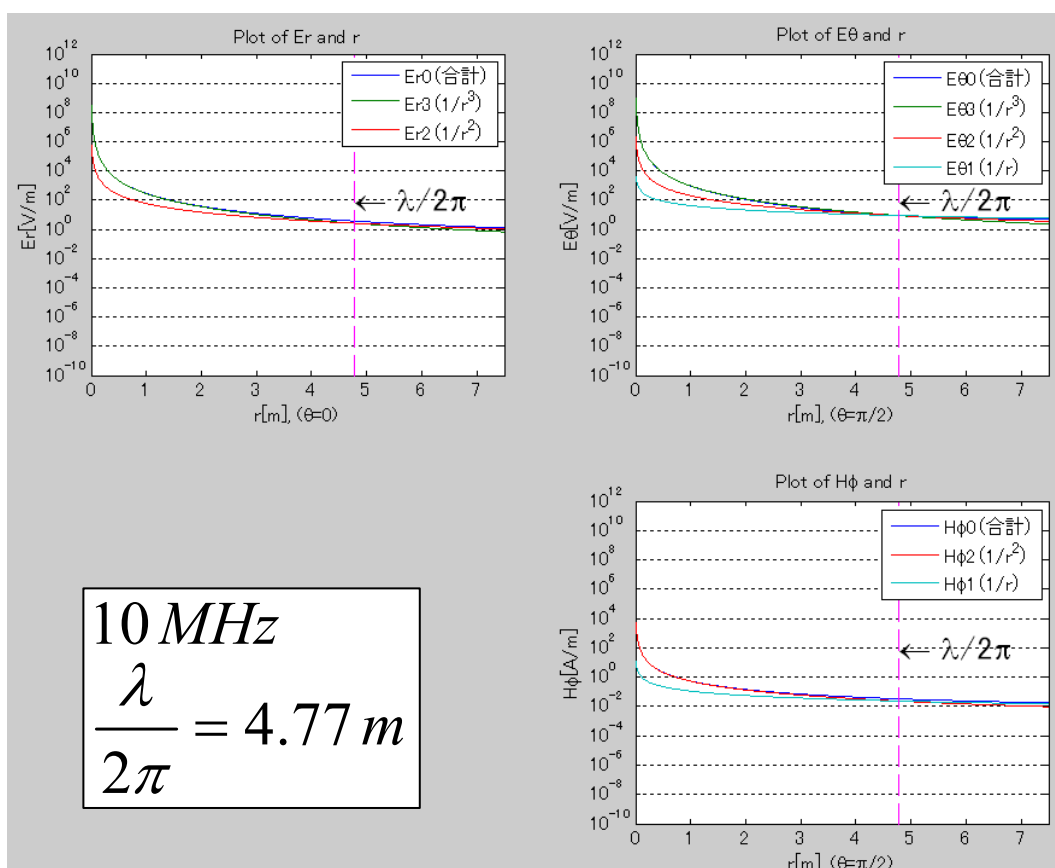


図 1.8 電気双極子と近傍界

ワイヤレス電力伝送 4 方式

従来、ワイヤレス電力伝送は3方式に分類されており、電磁誘導方式、マイクロ波方式、レーザー方式の3種類とされてきた。しかしながら、“1.1.3 電磁界共振結合方式”で解説する電磁界共振結合方式の出現により、現在では、全4方式として分類されている。その分類も研究が進展するに従い変遷を辿っている。本研究を始めた初期の頃である2007当時における全4方式のワイヤレス電力伝送の動作周波数と放射、非放射の関係を図1.9に示す。非放射型の電力伝送はkHzやMHz程度の低い周波数で使用され、放射型の電力伝送はGHzやTHz程度の高い周波数で使用される。

電磁誘導方式はkHzにおいて研究がなされており、非放射型である。電磁界共振結合はMHzの非放射型の電力伝送として発表された。一方、GHzでは通信で使われるマイクロ波工学の延長としてワイヤレス電力伝送が研究されているので放射型である。レーザー方式も同様に放射型である。周波数が低いと波長が長いため、電磁場や電磁界として結合し電力を伝えるので、非放射型の電力伝送が可能である。一方、周波数が高いほど波長が短くなり、アンテナなどの装置は小型になるため、高い周波数では大きなエアギャップを結合によって得る事が難しいので、放射によって電力を伝える。

この様に、2007年当時は、電磁誘導はkHz、電磁界共振結合はMHz、マイクロ波電力伝送はGHz、レーザー電力伝送はTHzと使用周波数ごとにきれいに分類されていた。しかしながら、本稿で後述する研究成果を含めると、現時点での分類は図1.10となり、MHz以外のkHzやGHzでの使用も可能である事がわかってきた（“4.4 kHz～MHz～GHz への拡張”参照）。

放射型のワイヤレス電力伝送方式であるマイクロ波とレーザーは数km以上の電力伝送が可能である

が効率が小さい、一方、非放射型の電磁誘導はギャップは短いが高効率という特徴を持っている。そして、もう一つの放射型の電磁界共振結合はエアギャップも大きく効率も高いという特徴を持っている。エアギャップ、効率、位置ずれ、電力の大きさについてまとめた表を表 1.1 に示す。現時点でワイヤレス電力伝送に必要とされる大エアギャップ、高効率をとともに実現できる方式は電磁界共振結合のみである。

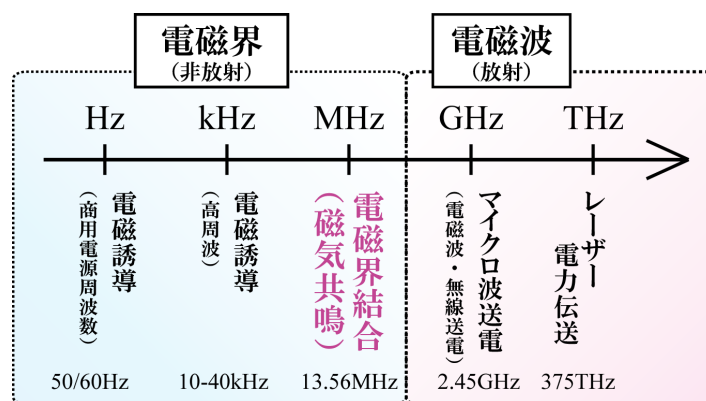


図 1.9 周波数軸から見たワイヤレス電力伝送技術の分類（2007 年当時）

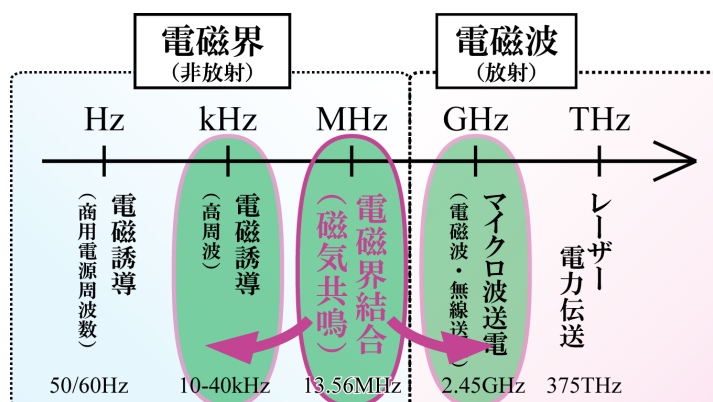


図 1.10 本研究成果を含めた周波数軸から見たワイヤレス電力伝送技術の分類（2009 年現在）

表 1.1 ワイヤレス電力伝送 4 方式の特徴

	Gap	Efficiency	Displacement	Power
Electromagnetic induction (kHz)	~20cm	over 90%	poor	Excellent
Electromagnetic resonant coupling (MHz)	~10m	over 90%	Excellent	Excellent
Maicrowave power transmission (GHz)	km	less 54%	fair	fair
Laser power transmission (THz)	km	less 50%	fair	fair

他にも、接触式でマイクロ波を使用した方式、エバネッセント波を利用した方式がある。いずれも技術的に電磁エネルギーを使用しているので類似の技術ではあるが、物理的接触があり、エアギャップが稼げないという理由で本論文の範囲外とする。

1.1.2 電磁誘導方式

電磁誘導方式について述べる。電磁誘導方式は非放射型であり、現在唯一実用化されているワイヤレス電力伝送方式である。原理は変圧器の原理と同じで、一次側のコイルに流れる電流が作り出す磁束が2次側のコイルに交鎖して起電力を生じ2次側のコイルに電流が流れることにより電力が伝わる。その際、磁束密度を大きくするために透磁率の高い鉄心が使われる。電磁誘導は、非放射型であり、磁界による結合なので、ギャップは短いものの、電界を使用しないので誘電損がなく、水分を含むものへのワイヤレス電力伝送が可能である。そのため、水槽内や体内のペースメーカーへの電力伝送も可能である[8]。

電磁誘導の現象自体は古くから研究されているが、ワイヤレス電力伝送としては、インバータの発達と共に1980年代半ばから本格的な研究が始まった[9]。一般に、動作周波数は商用周波数の50/60Hzではなく、インバータを使用し10~40kHzまで周波数を上げて動作させている。

電磁誘導方式は一般に効率は90%以上の高効率で、数kW~数百kWまで電力伝送が実現されているが、エアギャップは数cm程度であり(図1.11)、場合によっては電気的には非接触であっても、機械的に接触している[10]~[13]。そのため、用途は、携帯電話への非接触充電[14][15]、髭剃りへの非接触充電[16]、机の上のノートPCへの非接触充電[17]、搬送機などのレーンを使用した機器への非接触充電[18]に限られている。

一方、エアギャップを大きくすることを目指している研究もある。近年、やや大型の直径約800mmのコイルで、エアギャップ10cm、効率95%以上を達成している(図1.13)[19][20]。論文発表されていないがEVS24(The 24th International Electric Vehicle Symposium)において20cmのエアギャップを達成した展示が行なわれているなど、大きなアンテナを使用してエアギャップを大きくすることを達成している。

電磁誘導方式では結合係数を大きくするためにフェライトを利用している。また、コイルの位置が数cmずれた際に結合が少しでも弱くなると効率が急激に悪化するという欠点がある。また、フェライトの効果で、鉄損は非常に低く抑えられる。一方、巻き線に使われる銅線はリッツ線を使用し表皮効果を抑えてはいるが、鉄損に比べて、銅損の方が大きく損失の主な原因になることが報告されている[19]。

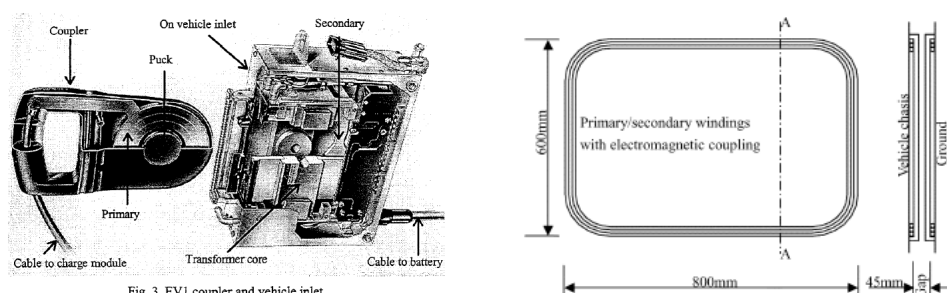


図 1.11 電磁誘導方式による近距離電力伝送，エアギャップ 10cm 以下[10]~[13]

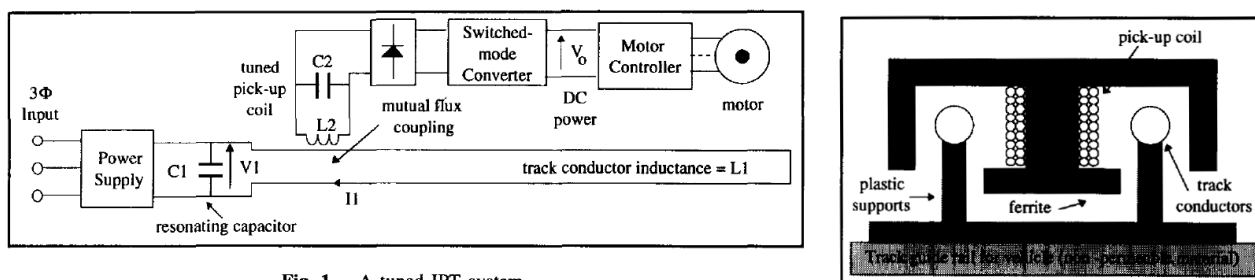


Fig. 1 - A tuned IPT system.

図 1.12 レーン状の電磁誘導方式[18]



図 1.13 IPS (Inductive Power Supply) ^{[19][20]}

電磁誘導方式は磁界によって出来る結合である相互インダクタンスによって電力伝送を行なっている。ワイヤレスで使用する目的であっても、原理は変圧器と同じであり、変圧器設計の発想から始まっていると考えられる。そのため、結合係数を $k=1$ になるべく近づけるため、 $k=0.99$ 以上という値が設計指標となる。ワイヤレス電力伝送を考えた場合は、どうしても $k=0.3\sim0.9$ などの低い値になる。そのため、フェライトなどで結合係数を $k=1$ に近づける工夫が必要とされる^[20]。

一方、フェライトとコイルによって増加したインダクタンスは回路全体としては、誘導性リアクタンスを増やしてしまい、力率を低下させる。そのため、C 補償を行いコンデンサを挿入することによって容量性リアクタンスを増加し、回路全体のリアクタンスを 0 にして力率を改善してきた^[21]。

コンデンサを送信側直列、受信側並列に挿入した時の回路を図 1.14 に示す。このように C 補償の方法はコイルとコンデンサの組み合わせで決定され、図 1.15 に示すように大きく 9 方式にわけられ、現在も研究が続けられている^{[13],[21]-[23]}。

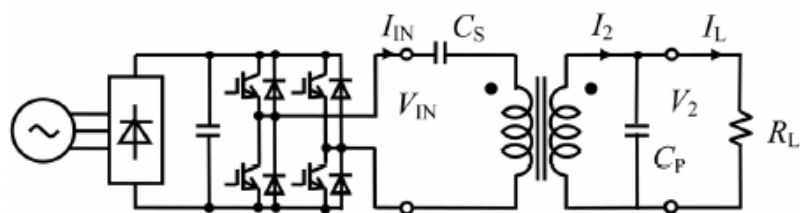


図 1.14 送信側直列共振と受信側並列共振方式の電磁誘導システム^[22]

Secondary \ Primary				
	Uncompensated	Series compensated	Parallel compensated	
Uncompensated				
Series compensated				
Parallel compensated				

図 1.15 コイルとコンデンサの組み合わせ（黒塗り長方形：コイル）^[21]

1.1.3 電磁界共振結合方式

電磁界共振結合方式について述べる。この方式は、新しいワイヤレス電力伝送方式として 2006 年に MIT (Massachusetts Institute of Technology) から WiTricity (Wireless Electricity の造語) という名で、非放射型の電磁界共振結合 (電磁共鳴) 技術として発表された^{[24][25]}。2 つの共振コイル間において、距離 1m で効率約 90%，また、距離 2m で効率約 45～50% かつ 60W をワイヤレスで電力伝送できることを示した。実験に使用した送受信共振コイルは半径 30cm、5.25 巻であり、周波数は約 10MHz である (図 1.16, 図 1.17)。アンテナ構成図 1.18 に示すように、電源からの電力を 1 ループコイルを使用して送信側の共振コイルに給電し、送信用共振コイルから受信用共振コイルにワイヤレス電力伝送を行なっている。この送信用共振コイルと受信用共振コイルでの効率を評価している。更に、受信用共振コイルから、負荷を接続した 1 ループコイルへ電力を伝えて、負荷によって電力を消費している。図 1.16 での負荷は電球である。電源効率が悪いため、全体での効率は 15% 程度である。

翌年、2008 年に Intel から送受で大きさが異なるアンテナを使用した WREL (Wireless Resonant Energy Link) (図 1.19) ^[26]が発表され、同年、装置は大型であるが Nevada Lightning Laboratory からテスラコイルを使用し 5m の距離を 800W で電力伝送を行なった実験も発表された (図 1.20) ^[27]。



図 1.16 エアギャップ 2m において 60W 電力伝送した時の実験風景^[24]

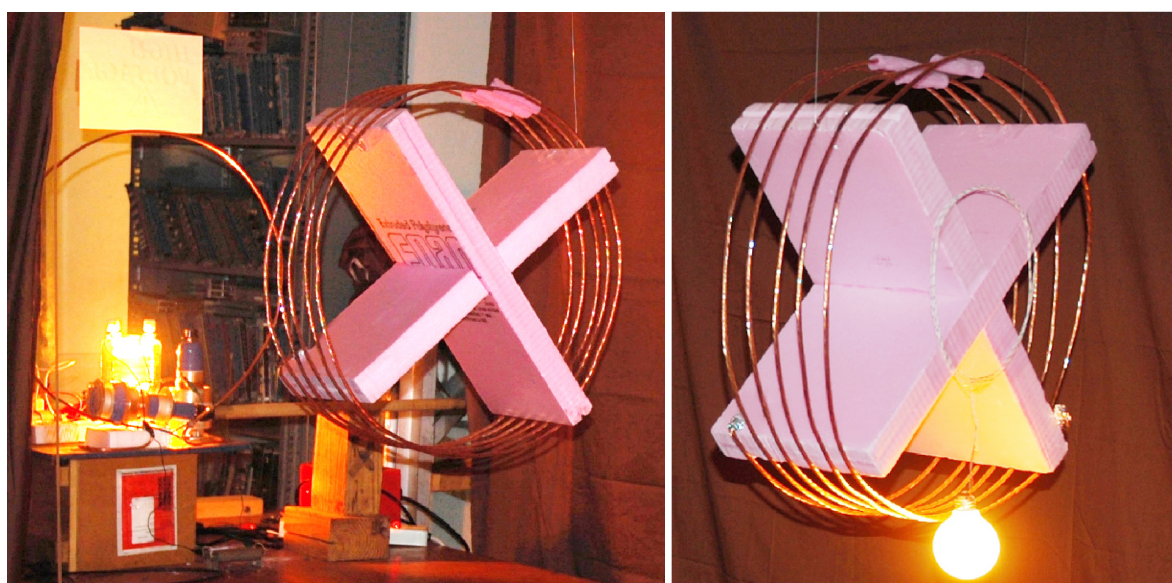


図 1.17 送信側コイルと受信側コイルの拡大図^[24]

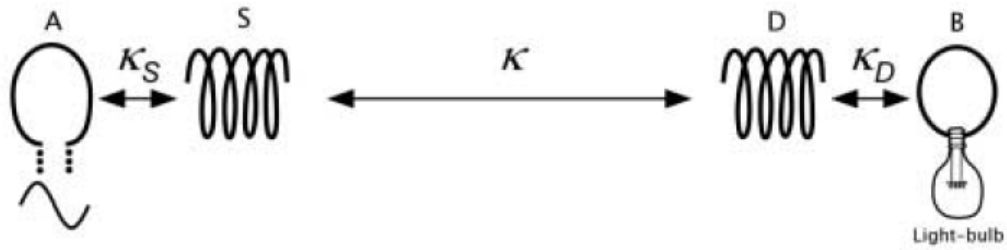


図 1.18 磁界共振結合の実験構成^[24]

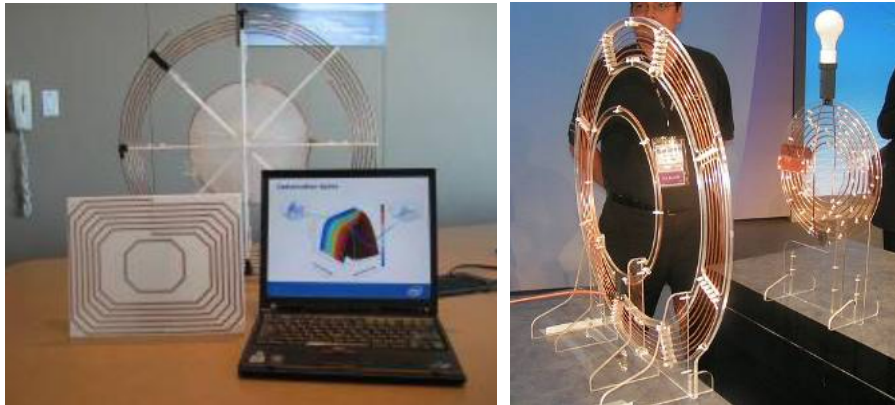


図 1.19 WREL @Intel Developer Forum (IDF)^[26]

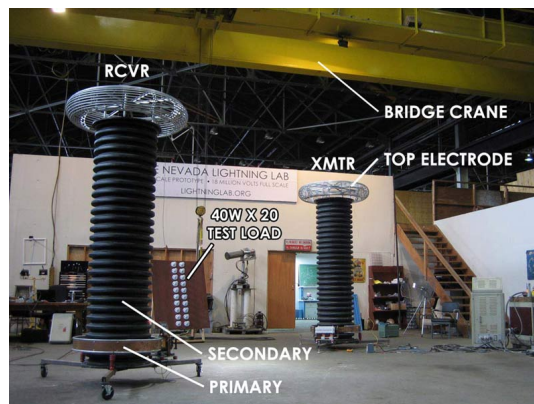


図 1.20 Nevada Lightning Laboratory^[27]

従来のワイヤレス電力伝送方式において、非放射型では電磁誘導方式、放射型ではマイクロ波方式とレーザー方式があったが、この電磁界共振結合技術ほどに高効率、大エアギャップ長、大電力の3点をバランス良く兼ね備えた方式はなかった。本方式は、電磁波を放射しない非放射型の電力伝送であり、電磁界の結合によって電力伝送を行なう。磁界結合と電界結合の2つの方式があり、電界結合は誘電損が生じるが、磁界結合は誘電損が生じないので、人体への吸収がなく、非常に有望なワイヤレス電力伝送方式である。

結合モード理論

本技術を発表した MIT から、一通りの原理に関し文献[24][25]によって説明されている。電界型として誘電体円板共振器（図 1.21）、磁界型として共振コイル（図 1.18～図 1.24）の説明がされている。ここでは本現象を近接場のエバネッセントテールを利用した共鳴現象として捉え、結合モード理論を使って説明が行なわれている。

結合モード理論は光導波路の光方向性結合器などで使われている理論であり、2つのモード間の結合を示している^[28]。結合モード理論は具体的な構造を与えなくても近似解を求める事ができ、共鳴に関わる多くの現象や問題に適応できる。

図 1.18 における S は送信側共振コイル、D は受信側共振コイルを示している。式(1.9)(1.10)に結合モード方程式を示す。定性的に結合モード理論を述べると、固有振動を持った一方（送信側）の波動 a_1 が、同じ固有振動を持つもう一方（受信側）に波動 a_2 を伝える事が示せる。損失が無く、固有振動の周波数が同じである場合は 100%のエネルギーが伝わる。

式(1.9)(1.10)は、波の振幅 a と単位時間あたりの結合係数 κ 式(1.11)(1.12)と（時間の概念を除いた） Q 値の逆数 Γ の式(1.13)で構成されている。 Q 値は単位時間当たりのエネルギーの保持と損失の割合を表している。エネルギーの伝達がこれらの式で表せる。共鳴現象を引き起こす時、2つの物質は共振状態になり、その時の共振周波数における効率は式(1.15)で表せられる。そこで、結合が損失より非常に強い状態を保てる（ $\kappa/\Gamma \gg 1$ ）の状態を強結合レジームと呼び、その状態であれば、高効率の電力伝送が可能である。図 1.16 の時の実験結果とあわせて図 1.24 に示す。そのため、アンテナの Q 値を高めることが重要である。そこで、 κ/Γ を計算すると式(1.16)となり、結合係数 k と Q 値の積になる。結合が小さくても単位時間当たりの損失に対するエネルギーの比である Q 値が高ければ、高効率の電力伝送が可能という事である。この様に、一通りの理論は説明されているが、回路設計の観点からは、より容易に扱える結合モード理論以外での理論計算が望まれる。

$$\frac{da_1}{dt} = -i(\omega_1 - i\Gamma_1)a_1 + i\kappa a_2 \quad (1.9)$$

$$\frac{da_2}{dt} = -i(\omega_2 - i\Gamma_2)a_2 + i\kappa a_1 \quad (1.10)$$

$$\kappa = \frac{\omega_1}{2} \cdot \frac{\int d^3r \varepsilon_2(r) E_2^*(r) E_1(r)}{\int d^3r \varepsilon(r) |E_1(r)|^2} \quad (1.11)$$

$$k = \frac{2\kappa}{\omega} \quad (1.12)$$

$$Q = \frac{\omega}{2\Gamma} \quad (1.13)$$

$$\Gamma = \frac{R_0 + R_r}{2L} \quad (1.14)$$

$$\eta = \frac{\Gamma_W |a_D|^2}{\Gamma_S |a_S|^2 + (\Gamma_D + \Gamma_W) |a_D|^2} = \frac{\frac{\Gamma_W}{\Gamma_D} \frac{\kappa^2}{\Gamma_S \Gamma_D}}{\left[\left(1 + \frac{\Gamma_W}{\Gamma_D} \right) \frac{\kappa^2}{\Gamma_S \Gamma_D} \right] + \left[\left(1 + \frac{\Gamma_W}{\Gamma_D} \right)^2 \right]} \quad (1.15)$$

$$\frac{\kappa}{\Gamma} = \frac{\frac{k\omega}{2}}{\frac{\omega}{2Q}} = kQ = k \frac{\omega L}{R_0 + R_r} \quad (1.16)$$

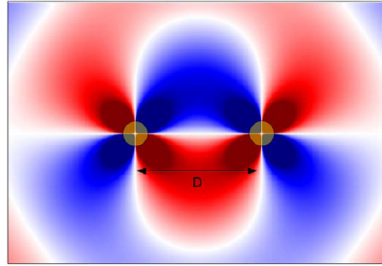


図 1.21 電界共振結合^[25]

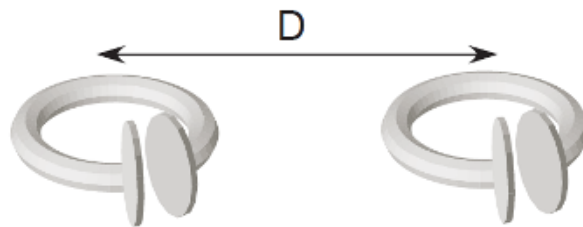


図 1.22 磁界共振結合の解析モデル^[25]

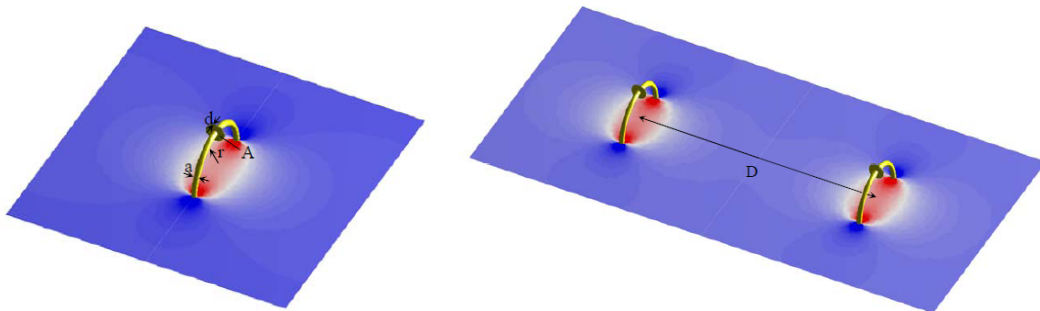


図 1.23 磁界共振結合^[25]

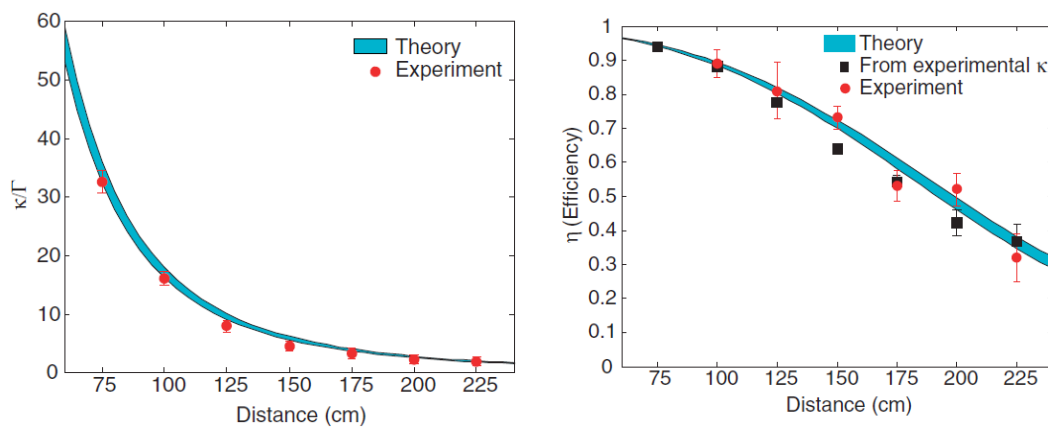


図 1.24 強結合レジーム κ/Γ と電力伝送効率 η ^[24]

国内動向と最近の動向

論文発表はないものの、今年 2009 年に入って電磁界共振結合に関する発表が 3 件ほどなされている。原理の詳細は 3 件とも公にしていらないが、昭和飛行機工業からは 2009 年 7 月に電磁誘導方式の延長技術として、エアギャップが大きくなる技術が発表されており、長野日本無線からは 2009 年 8 月にコイルの位置や個数が変わっても高効率の電力伝送が出来る技術が発表され、SONY からは 2009 年 10 月にレピーターデバイスを送受信アンテナ間に入れると遠くまで高効率で電力伝送ができる技術の発表がなされた。このように、今年に入ってますます電磁界共振結合への注目度が高まっている。



図 1.25 昭和飛行機工業，エアギャップ 60cm^[29]

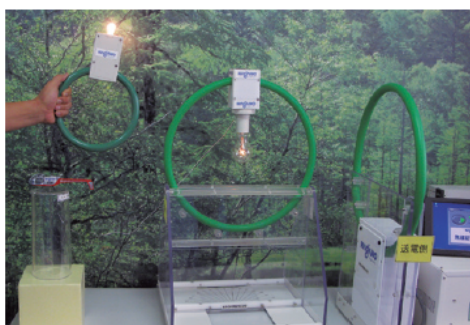


図 1.26 長野日本無線，エアギャップ 40cm，伝送効率 95%，30W，10cm 程度の位置ずれを許容^[30]

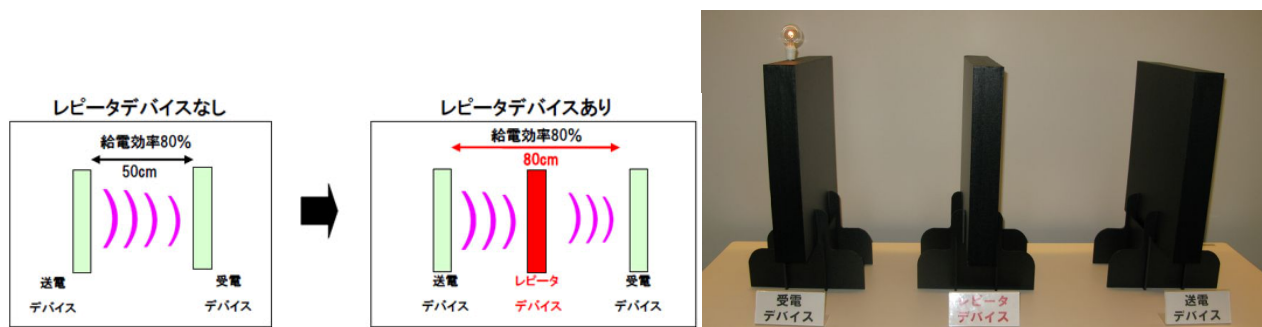


図 1.27 SONY，エアギャップ 50cm，送受信デバイス間効率約 80%，整流回路込みで約 60%^[29]

1.1.4 マイクロ波方式

マイクロ波電力伝送方式（MPT: Microwave power transfer）について述べる。MPT 方式は電磁波であるマイクロ波を利用した電力伝送である。マイクロ波は通信技術の要であり、携帯電話の通話における通信時の電波や電子レンジの加熱などに使われている。MPT 方式はアメリカのブラウン氏（William C. Brown）を中心に 1960 年代から研究が始まった。世界初のレクテナを図 1.28 に示す^[31]。出力電力 7W で変換効率は 40% である。また、MPT 初期である 1963 年のマイクロ波電力伝送のデモ実験の様子を図 1.29 に示す^[32]。マグネトロンから 400W 出力し、103W を DC で受電した。距離は 18 フィート (5.49m)、レクテナ変換効率は 51% であり、DC-to-RF を除く全体の効率は 26% である。

MPT は (i) 直流をマイクロ波へ変換 DC-to-RF (ii) マイクロ波を送信アンテナで放射 (iii) 受信アンテナで受信かつ整流 RF-to-DC という一連の作業が必要である。(iii) にあたる部分では、レクテナ (Rectenna) が使用される。レクテナは、Rectifying と Antenna の造語であり、その名の通り、アンテナと整流器を組み合わせたものである。回路に対して波長の長さが無視できないので、アンテナと整流器だけでなくフィルター含めた回路設計が必要である (図 1.30) ^{[33][34]}。また、MPT は他のワイヤレス電力伝送方式と違い GHz という高い周波数で動作するので、全ての回路において厳密なインピーダンスマッチングが重要となる。

マイクロ波電力伝送は、電磁波をエネルギー電力伝送で使用するもので、放射型の電力伝送方式である。そのため、電磁波の拡散と減衰を抑える必要があるが、電力伝送距離は通信と同じく非常に長い。

電磁波は、遠方界 ($\lambda/2\pi$ 以上) ではポインティングベクトルで表される通り、放射界として扱えるので、磁界と電界が直行し、平面波として電磁波が送られる。一方、近傍界 ($\lambda/2\pi$ 以下) でマイクロ波電力伝送を行なうと、準静界や誘導界を扱う必要があり、アンテナ間の相互インピーダンスが無視できない。

マイクロ波電力伝送は、通信と干渉を防ぐために周波数は ISM バンド (産業科学医療用バンド) を使用する。そこで、周波数は 2.45GHz もしくは 5.8GHz で動作させる。近年はアンテナを小型化しビームを絞るために 5.8GHz の研究が盛んに行なわれている。

電磁波を用いて電力伝送を行なうため、通信と違い電力の損失に関して非常に厳しい条件が課せられる。通信の場合、送信アンテナから放射した電力は受信アンテナに到達するまで 100 億分の 1 以下まで減衰しても情報が伝わる。つまり 99.9% 以上の電力損失が許される。しかしながら、ワイヤレス電力伝送という観点から見ると、損失は限りなく抑える必要がある。現在の所、DC-to-DC の電力伝送効率の歴代記録は 1975 年に達成した 54% である^[35]。その際、電力伝送距離は 1.7m、周波数は 2.4469GHz、DC-to-RF が 68.87%、RF-to-DC が 78.67%、送られた電力は 495.62W である^{[33][36]}。

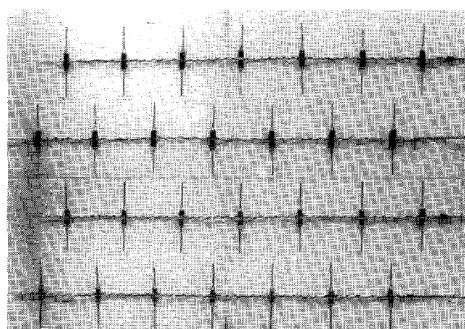
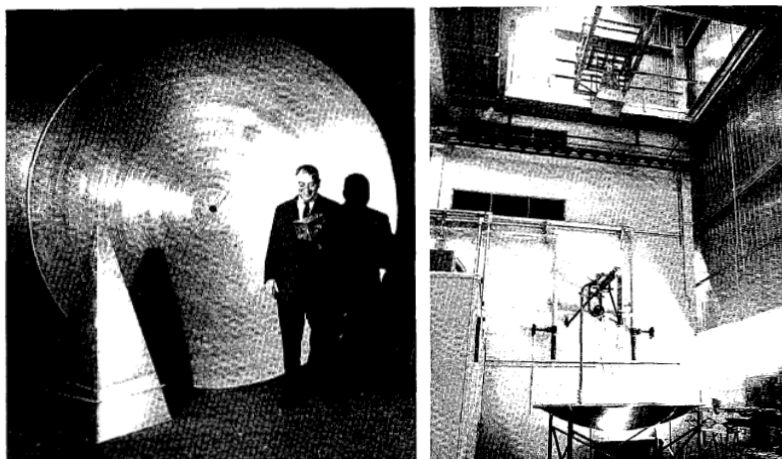
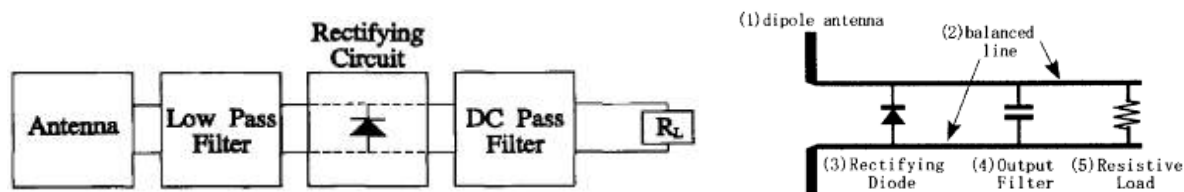


図 1.28 世界初のレクテナ, 1967 年^[31]

図 1.29 マイクロ波電力伝送デモ実験，全体効率 26%，2.45GHz^[32]図 1.30 レクテナの回路構成^[33]

宇宙・飛翔体

マイクロ波電力伝送は圧倒的に電力伝送距離が長く，宇宙利用や飛翔体への適応が可能である。宇宙太陽光発電衛星（SPS: Solar Power Satellite）の構想は古く，1968年にピーター・グレイザー（Peter. E. Glaser）により提唱された^[37]。静止衛星軌道（36,000km 上空）に直径 6km の太陽光発電衛星によって太陽光を電力に変換し，直径 2km の送信アンテナで地上に電力を送り，地上側で直径 3km の受信アンテナで受け取る構想である（図 1.31）。地上に比べ 10 倍の太陽光エネルギーを活用できる。以後，アメリカでは NASA（米国航空宇宙局）が，日本では ISAS（宇宙科学研究所），現 JAXA（宇宙航空研究開発機構）が中心となって研究を進めている。しかしながら，現段階においては宇宙－地上間での SPS 実験は困難なため，要素技術の検証や地上での固定点間実験で検証されることが多い。昨年，アメリカの National Space Society（米国宇宙協会）と Managed Energy Technologies 社が中心となり SSP(Space Solar Power)に関する地上実験を行っている^[38]。

一方，飛翔体程度の高さであれば，実証実験が可能であり，マイクロ波電力伝送の研究初期から行なわれている。図 1.32 にブラウン氏によって 1964 年に行われた，デモ実験としては世界初のヘリコプターへの電力伝送を示す。ヘリコプターへワイヤレス電力伝送を行ない，風雨の中 10 時間，50 フィート（＝15.2m）の高さでホバリングするデモ実験を行なった（図 1.32）^[31]。飛翔体に関しては，日本でも成層圏無線中継システムの一環として，1987 年に日本では初となる小型飛行機へのマイクロ波電力伝送が行なわれ，約 30 秒間，400m の飛行に成功した（図 1.33）^[39]。

日本の最新動向としては飛行船による実験が 2009 年 3 月 10 日に行なわれた。そこではマイクロ波電力伝送に特有の技術である，フェイズドアレーとレトロディレクティブという 2 つの技術が使われてい

る。空から電力を地上に下ろす世界初のシステムを実証実験している。これは、被災地への電力供給手段や携帯電話充電システムを想定している（図 1.34）^[40]。

フェイズドアレーアンテナは2つのアンテナの位相をずらす事によって、アンテナから放射されるビームの向きを変化させ、フェイズドアレーアンテナとして動作させ、ビームを走査する（図 1.34, 図 1.35）。一方、レトロディレクティブ方式は、地上の受信したい対象物から始めパイロット信号を送ってもらい、その信号を使い、送られて来た方向に電力を送るビーム制御方式である。送られて来た電波をアレーアンテナで受信すると波源からの行路差によって、2つのアンテナ間で位相差が生じる。送信時には、その位相共役の信号を送信すると到来方向にビームを向かせる事が出来る（図 1.36）^[41], ^[42]。MPT方式は、放射波を利用しているため、ビームの向きを振るといふ、ダイナミックな方法をとる事が出来る。

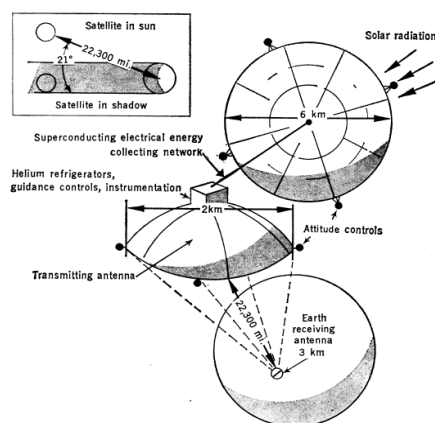


図 1.31 SPS 構想^[38]

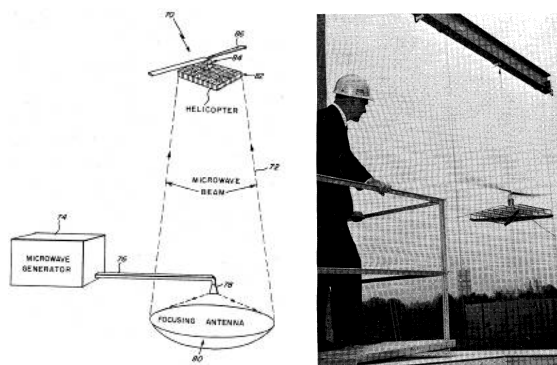


図 1.32 ヘリコプターへのワイヤレス給電, 1964.10.28^[31]



図 1.33 日本初の飛翔体へのマイクロ波電力伝送, MILAX(Microwave Lifted Airplane eXperiment), 1987^[39]

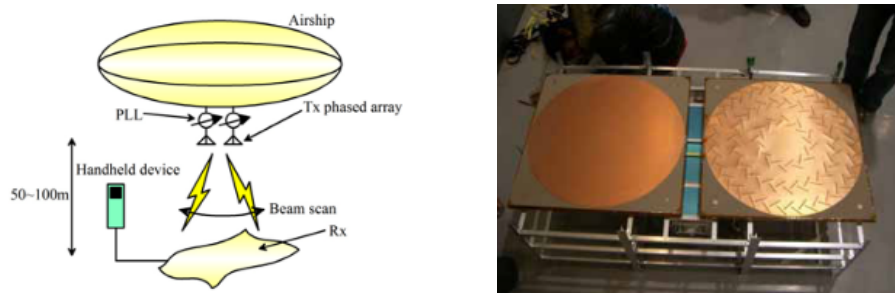


図 1.34 飛行船によるユビキタス電源構想と搭載された RLSA (Radial Line Slot Antenna)^[40]

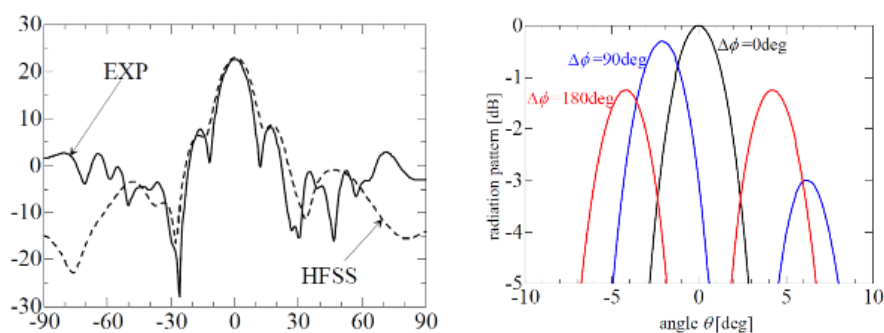


図 1.35 フェーズドアレーアンテナによる放射パターン^[40]

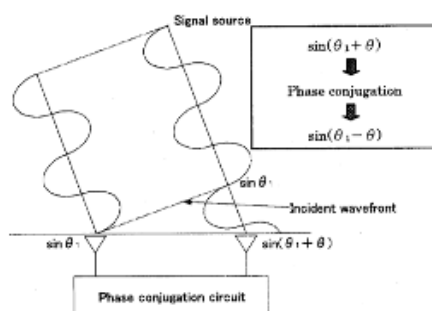


図 1.36 レトロディレクティブの概形図^[41]

地上応用と電気自動車への充電

世界初の固定間電力伝送は 1975 年に Goldstone で行なわれ、1.54km の距離の電力伝送を成功させた。450kW の送信に対し 30kW の受電をしており、効率 82.5% のレクテナを使用している。全体効率約 6.7% と見積もられている (図 1.37) ^[31]。昨年海外で行なわれた大規模な実験は、SSP(Space Solar Power)に関する技術の発展のため、2008 年 5 月に長距離の電力伝送を目的に地上実験が行なわれ、マウイ島ーハワイ島間、148km の電力伝送に成功した^[38]。20W の電力を送った事が発表された。



図 1.37 1975 NASA JPL Goldstone でのワイヤレス送電のデモ実験^[31]



図 1.38 Managed Energy Technologies LLC, National Space Society^[38]

固定点間よりさらに近い距離での MPT の応用として電気自動車への充電実験が行われている（図 1.39）^[43]。MPT 方式は原理的に電力伝送距離が近くても遠くても使用出来る強みがある。但し、電気自動車へのワイヤレス充電は非常に近い距離での MPT による電力伝送であり、エアギャップ 20cm 以下に対し、2.45GHz（波長 12.25cm）のため、 $\lambda/2$ の周期性を持って大きく効率が変化している事が、HFSS による解析結果と実験結果からわかる。この様に、近距離での使用は新たな課題が生じている。

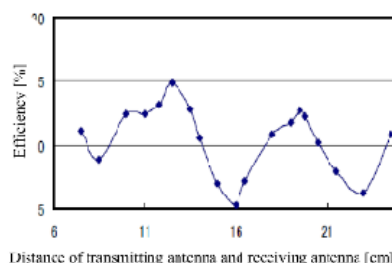
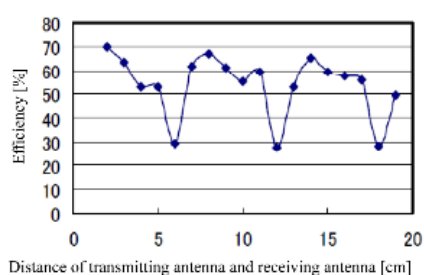


図 1.39 電気自動車へのマイクロ波充電と電磁界解析 HFSS と実験結果^[43]

エネルギーハーベスティング

MPT 方式の新たな動きとして、エネルギーハーベスティングがある。大きな電力を送って使用するのではなく、私たちの生活の中にある微弱なエネルギーを掻き集めて使用するという発想である。エネルギーハーベスティングは電磁波以外にもあり、熱ではゼーベック素子を使用したり、振動では人や物の動きから圧電素子により回収したりする方法もある幅広い技術をさす。エネルギーハーベスティングの概念に先駆けて、室内に積極的にエネルギーを満たすという方法が 2004 年に発表されている^[44]。近年、低消費電力マイコンの出現により、テレビ用の電磁波（VHF, UHF）をテレビ塔から 4.1km 離れた位置で広帯域対数周期アンテナによって $60\mu\text{W}$ 受信し、1.9V までパワーハーベスター回路によって昇圧して使用することによって実現したエネルギーハーベスティング技術の報告がある。図 1.41 にパワーハーベスター回路と受信した電力によって動作した温度計を示す^[45]。

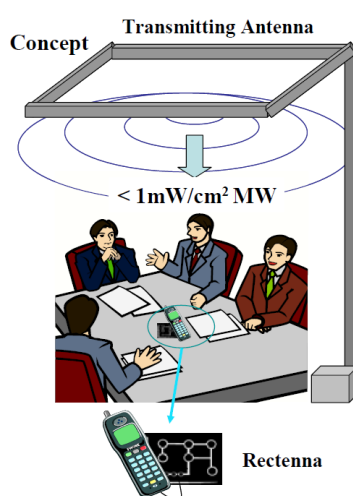


図 1.40 部屋をマイクロ波で満たす無線電力空間^[44]

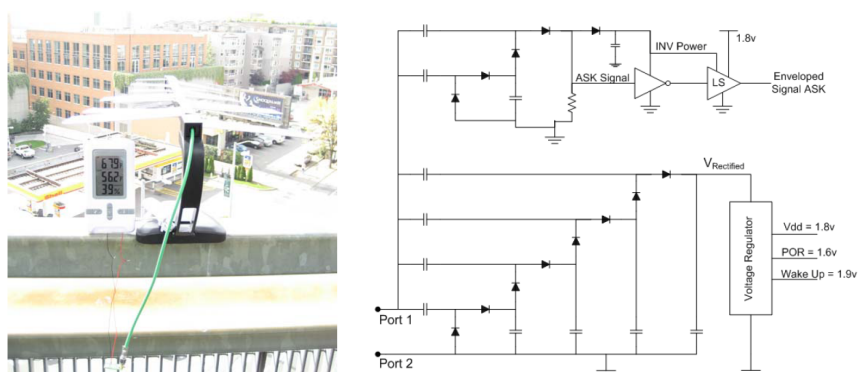


図 1.41 アンテナと温度計，エネルギーハーベスティング回路^[45]

1.1.5 レーザー方式

レーザー電力伝送方式について述べる。レーザー電力伝送方式は電磁波ではあるが技術的には光として扱われる。つまり、コヒーレントな光（レーザー）を使い電力を送り、太陽電池パネルによって電力を受信する。そのため、レーザー発生装置の効率と、空間での減衰量、太陽光パネルの変換効率で、全体の効率が決定される。800nm（=375THz）での GaAs 系太陽光パネル単体での特性評価を行っており、45%に近い効率が得られる事が示されている（図 1.42）^[46]。

電力伝送距離は、大気による減衰に影響するが 2003 年 12 月にハワイのラナイ島において 12km の電力伝送に成功しており、長距離の電力伝送が可能である事が示されている^[47]。応用先としては、災害時の中継基地のための飛翔体への電力伝送（図 1.43）や月面におけるクレータ内の影となる場所で直接太陽の光を受けられない所で作業するローバーへの電力伝送（図 1.44）などがある^[47]。宇宙では、ローバーは太陽光パネルが必ず搭載されるのでそのまま使用することが出来る。また、レーザー電力伝送の場合、肉眼でレーザーを確認できるので、視覚的にビームの向きや動作状況を確認しやすいメリットがある。

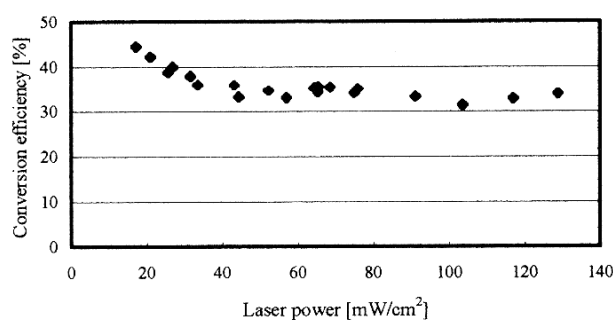


図 1.42 ローバーへのレーザー電力伝送実験結果^[46]



図 1.43 太陽電池を搭載したカイトプレーンとヘリコプター^[47]

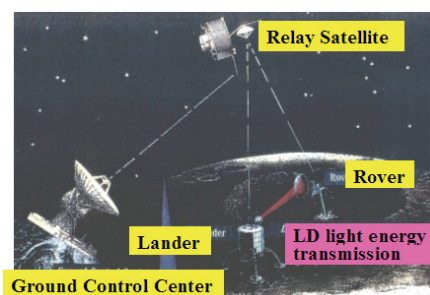


図 1.44 月面の氷探索のためのローバーへのレーザー電力伝送のコンセプト^[47]

以上、ワイヤレス電力伝送の全4方式について述べた。電磁誘導方式は一番実用に近く、効率も高く、大電力を扱える。今後は、小型化と大エアギャップ化が課題である。

電磁界共振結合（電磁共鳴）方式は、現状ではアンテナ間での評価に留まっており、システム全体の効率の評価や向上が期待される。その際、数十 MHz という高周波において高効率で出力可能な電源設計に課題が残ると思われる。いずれにせよ、大エアギャップ、高効率、大電力を実現できる本方式は、今後の発展が期待されている。

マイクロ波電力伝送方式においては、遠距離と近距離によって技術的に違いがある。負荷変動によりレクテナの変換効率が変わるなど他にも課題があるが、大気によって減衰がほぼ無く、電離層を減衰なく通過できる電波の窓がある事を考えると衛星－地球間の電力伝送はマイクロ波が絶対的に有利である。また、圧倒的な電力伝送距離は非常に期待の持てる利点である。今後は、システム全体での効率改善が課題である。

レーザー電力伝送も、電力伝送距離は長く、マイクロ波同様の使用ができるが、視覚的にビームが確認できる利点があることや、太陽光パネルが必ず搭載されるローバーなどの宇宙利用において大いに期待される技術である。高効率化のためには、太陽電池の効率向上が必須である。

1.1.6 電磁界共振結合によるワイヤレス電力伝送の将来像

現在の状況を踏まえた上で、ワイヤレス電力伝送における2次電池への充電と、直接常時給電という2つの将来像、更には、特殊な状況下での使用について述べ、ワイヤレス電力伝送の需要と、ワイヤレス電力伝送技術がもたらす将来像に関して述べる。

2 次電池の普及とワイヤレス充電

現在において、ポータブルデバイスは我々の生活では必須の電気機器になっている。携帯電話は常時身につけており、外出時にノートパソコンを常備する人々も1割程になっている。アミューズメントとしても、電車内でのポータブルのゲーム機の使用も見慣れた光景になっている。また、walkman や iPod の様な mp3 プレーヤーや HDD プレーヤーに分類されるポータブルオーディオプレーヤーの利用者は更に多い。これらモバイル機器は当然ながら電気エネルギーを貯めておける2次電池が必須となる。エネルギー密度の高いリチウムイオン電池の技術確立によって、従来の電池に比べ非常に長い時間使用することができるようになっている。また、リチウムイオン電池では、エネルギー密度が高いため、電池自体の搭載容量を減らすことができ、重量と体積を減らすことも可能となった。それ故に、モバイル機器として使用できる最低限の電池の持ち具合と重さと大きさを実現できた。

一方で、手軽にモバイル機器を持ち運びができ、その利便性によって人々への普及がひと段落した現状において、モバイル機器の欠点も浮き彫りになってきた。それは、現在のリチウムイオン電池の限界である。モバイル機器は省エネ対策を講じており、mp3 プレーヤーや、ノートパソコンであれば1日もつタイプも出現してきたが、ほぼ毎日の充電を必要とし、毎日一度必ずプラグにつないで充電する必要がある。小型とはいえ、モバイル機器が数多くなってきた場合、非常に手間となる作業である。現在の一例を示すと、音楽プレーヤー、携帯ゲーム機、携帯電話、ノートパソコンをモバイル機器として使うと計4つも自宅に戻ってきってから、コンセントにつなぎ充電していることになる。

2次電池を搭載する機器は中型や大型の電動機器の電動自転車や電気自動車でも使われている。電動自転車や電気自動車においても必ずほぼ毎日の充電を必要とする。このような機器に対して、ワイヤレス充電は圧倒的に大きな利便性を持っており、毎日行う作業を軽減することができる。将来はワイヤレス充電を行う電源の半径約1m以内の場所にモバイル機器を置いておけば自動的に充電されると思われる(図1.45)。充電は勝手にされるので、充電行為自体を意識する必要もなくなる。これは、小型のモバイル機器に限らず、大型の電気自動車のような電動機器に対しても同様である。

ワイヤレス電力伝送の利点は自動充電だけでなく、他の技術との融合で新しいメリットを提供できる点にある。例えば、ワイヤレス自動充電と組み合わせる事により2次電池の搭載量を圧倒的に減らす事が出来る(図1.46)。方法としては、最小限の電池のみを搭載し、頻繁に自動でワイヤレス充電を行う事により、2次電池の搭載量を減らす事が出来る。電池は非常に高価であり、決して重量は軽くはない。電池の搭載量を減らせば、重量が軽くなり、価格も安くなる。非常に軽いノートパソコンや、低価格の電気自動車を提供する事が出来る。これは、重量や価格だけでなく資源保全の観点からも非常にメリットがある。

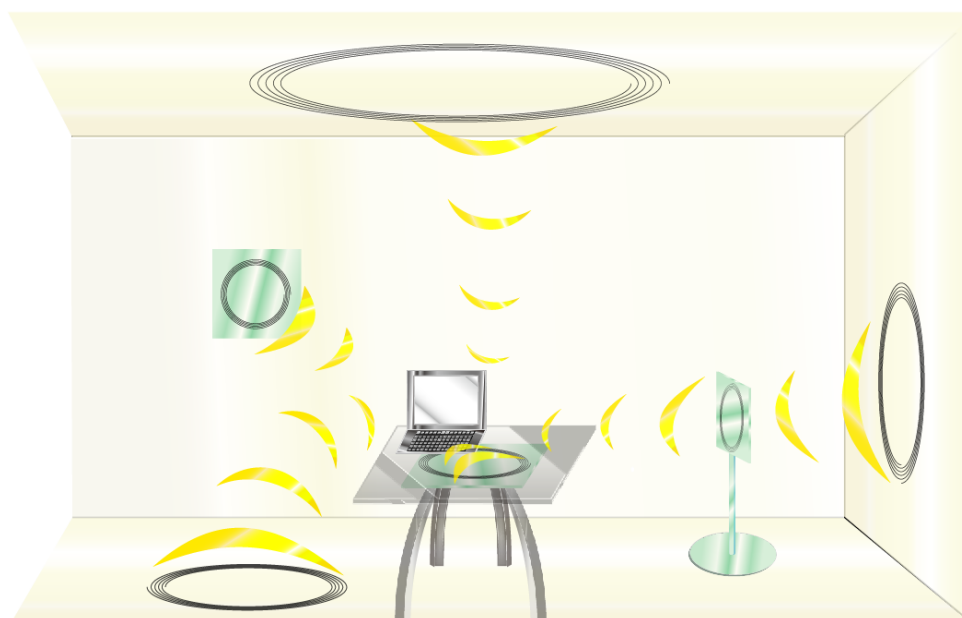


図 1.45 ワイヤレス自動充電における色々な給電方法

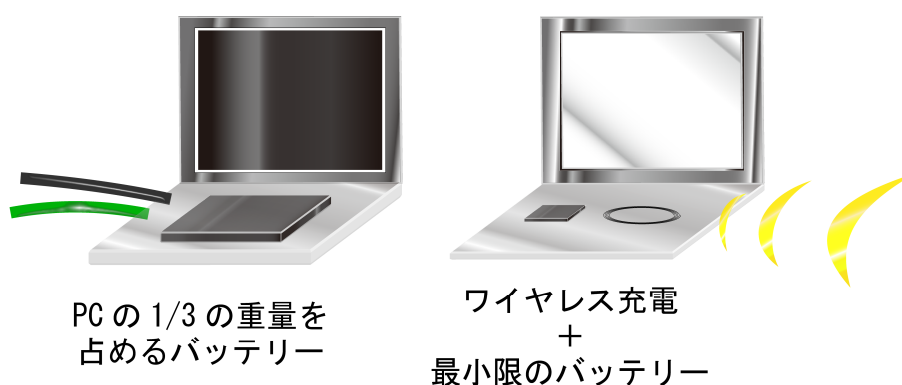


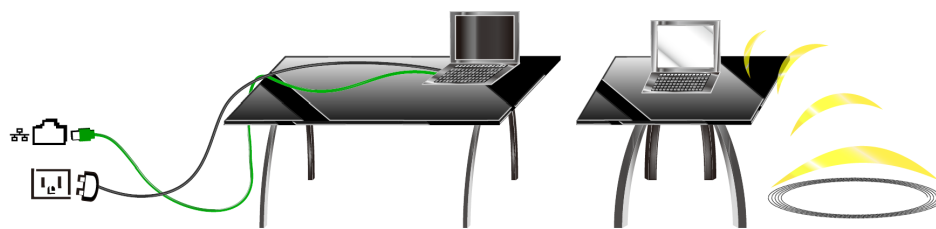
図 1.46 2次電池の軽量化

直接ワイヤレス給電

一方、エアギャップが数メートルまで達するという電磁界共振結合による技術革新により、今までにはないような大胆な発想が生まれ、多くの需要を呼んでいる。ワイヤレス電力伝送という言葉のとおり、全ての電気ケーブルをワイヤレス電力伝送で置き換えるという大胆な発想である。将来、多くの場面で使用される可能性がある事が知られるようになり、ビックビジネスが生まれるとみられている。一方で、具体的な電気機器やライフスタイルなどの提案は始まったばかりであり、今後、想像すらされていなかった様な家電や電気機器やライフスタイルを含めた提案がされると思われ、これからの発展に寄るところが多い。

ひとまず、本論文においては、現在までに提案されている代表的なものや、そこからの発展を記す。代表とされるのが宅内の家電すべてへの直接ワイヤレス給電である。これは、工場や公共機関などすべての建物に当てはまると思われる。全ての電気ケーブルをワイヤレス電力伝送でおきかえるという発想からすれば当然であるが、家庭内の電源ケーブルをなくし、様々な機器に直接給電する方法が考えられる(図 1.48, 図 1.49)。送信アンテナは天井や床や壁や机に組み込むことも、各部屋に電源ソースのような機器を置くことも考えられる。新しい方式である電磁界共振結合方式においても数メートル程度の距離が限界であるので、電源ソースから次の電源ソースまで電力を送る必要もあるが、これ自体もワイヤレスで行うことにより、宅内全てをコードレス化することが可能である。更に、スケール則を適応しこの考えを拡張すれば、大きな施設である工場や町そのものまで拡張することもできる。コードレス化の利点は利便性だけでなく景観の改善に寄与できることである。インテリアにおいても電気ケーブルがデザイン性を損ねており、美しいデザインの照明であっても、電気ケーブルが全てを台無しにしている。家電に関しても、同様である。夢のような話ではあるが、電柱間を這って繋がっている電線がなくなれば東京の空も広く美しくなるであろう。いずれにせよ、現時点では、宅内のコードを全てなくすということが大きな目標となっていると思われる(図 1.47)。一方、これは、電気機器内部においても適応できる概念であり、電気機器内の配線をなくすことも可能である。電気自動車内やノートパソコン内の配線、更に小さい場所ではLSI内におけるワイヤーボンディングなどの超微細な箇所でも適応できる。

更に、従来からワイヤレス電力伝送が得意としている用途としても、エアギャップが大きくなったことにより、更なる注目を浴びている。ワイヤレスで給電することが可能なので、一度密封した場所への給電が可能であるという性質がある。例えば、パイプ内や古墳などの密封した室内、または密封した箱の中への給電が可能である。特に水中への給電は、密封への給電が可能であるという特性だけでなく、ワイヤレス電力伝送ならではの感電がないという特性が成せる給電方法である。また、人体に埋め込まれたインプラントへの給電も可能とする。これもまた、密封への給電、水中への給電、人体への影響がないという3つの特徴がなせる業である。これにより、ペースメーカーや人工内耳や人口網膜や映像再生を可能とするコンタクトレンズ^[49]への給電を行なう事が出来る。これらは、数m程度のエアギャップが可能になれば、より利用価値が高まる。この様に、様々なシーンにおいてのワイヤレス電力伝送の実用化が見込まれ、期待されている。



ごちゃごちゃ。 スッキリ！

図 1.47 コードレスによる室内景観の改善



図 1.48 家電への一斉給電^[48]

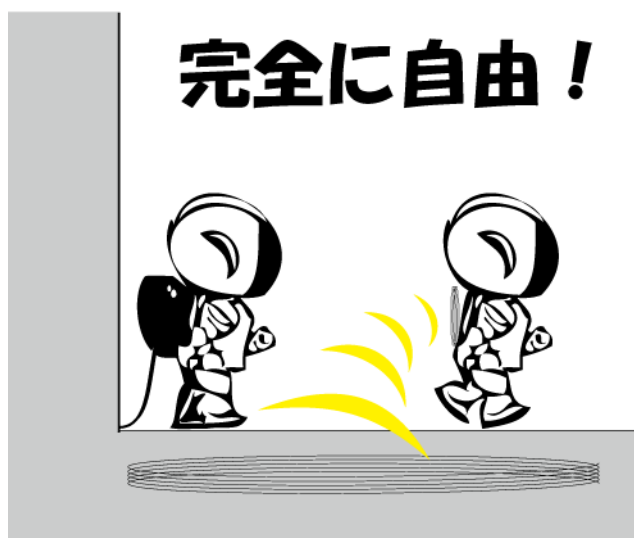


図 1.49 将来像の一例，ロボットへの給電

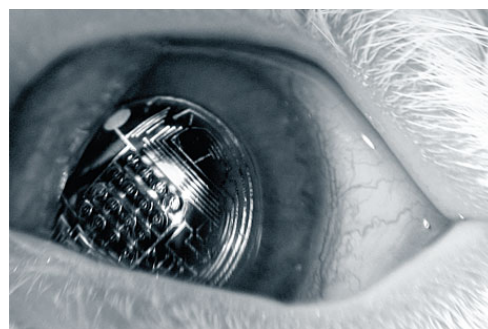
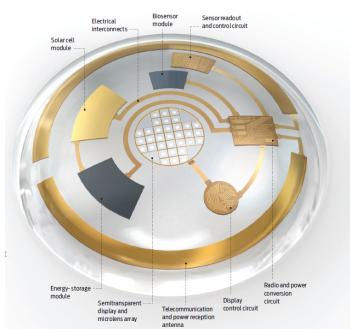


図 1.50 将来像の一例，次世代コンタクトレンズへのワイヤレス給電^[49]

1.1.7 電気自動車におけるワイヤレス電力伝送の必要性

次に、ワイヤレス電力伝送技術が他の技術と融合した時、ライフスタイルすら変えるほどのインパクトをもたらす事例として、電気自動車へのワイヤレス充電について述べる。

近年の地球温暖化の影響により、CO₂削減のため電気自動車の普及が望まれている。電気自動車は、ガソリンや軽油を使う内燃機関車に比べ、油田からタイヤまでの WELL to WHEEL (WTW) のエネルギー利用効率が高く、CO₂削減に大きく貢献できる。ガソリン車と違いエネルギー源が電気なので、太陽光発電や風力発電などで発電したクリーンエネルギーを直接電気エネルギーのまま使用できる(図 1.51)。

石油の利用率を見ると、国内石油需要の3割以上を自動車が占めており、ガソリン車に比べ3倍以上効率の良い電気自動車に全てのガソリン車などが置き換えれば、国内石油使用量を24%減らすという非常に大きな改善を行なう事が出来る。更に、石油を全く使わずに、全ての電力を太陽光発電などのクリーンエネルギーから得る事ができれば、国内石油需要の36.4%全てをなくすることができる(図 1.52)。

また、街中で CO₂ などの排気ガスを撒き散らかさずにすむので、健康にも良い(図 1.53)。他にも、冬季のガソリン車でのエアコン故障による一酸化炭素中毒死もゼロにできる。

特に、深夜電力を使用する事により、電気自動車は1円/1km程度であり、家計にもやさしい。石油情報センターの2009年12月14日現在のレギュラーガソリン1L当りの全国平均は126.3円である^[51]。1987年4月の調査開始以来の最高価格は、2008年8月4日の185.1円である。例えば、燃費20km/Lで走るガソリン車の場合、20km走行するには現在では約126円かかり、ガソリンが最高値を記録した時には約185円かかる。一方、電気自動車の場合は1円/km×20km=20円で走行する事が出来る。

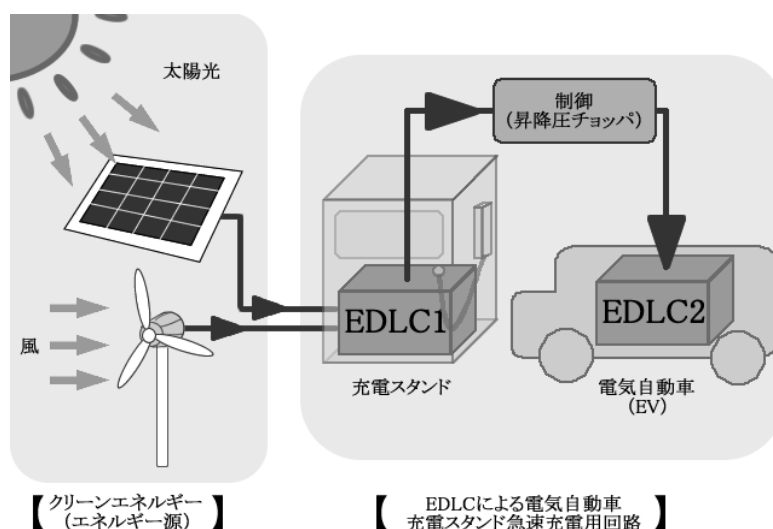


図 1.51 クリーンエネルギーと電気自動車^[50]

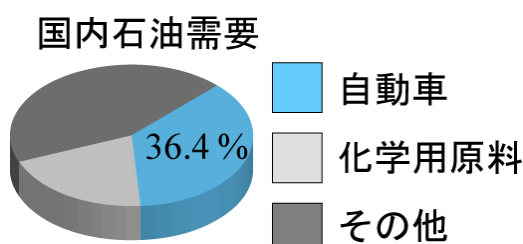


図 1.52 国内石油需要の割合（運輸・船舶除く自動車のみの占める割合、2007年度）

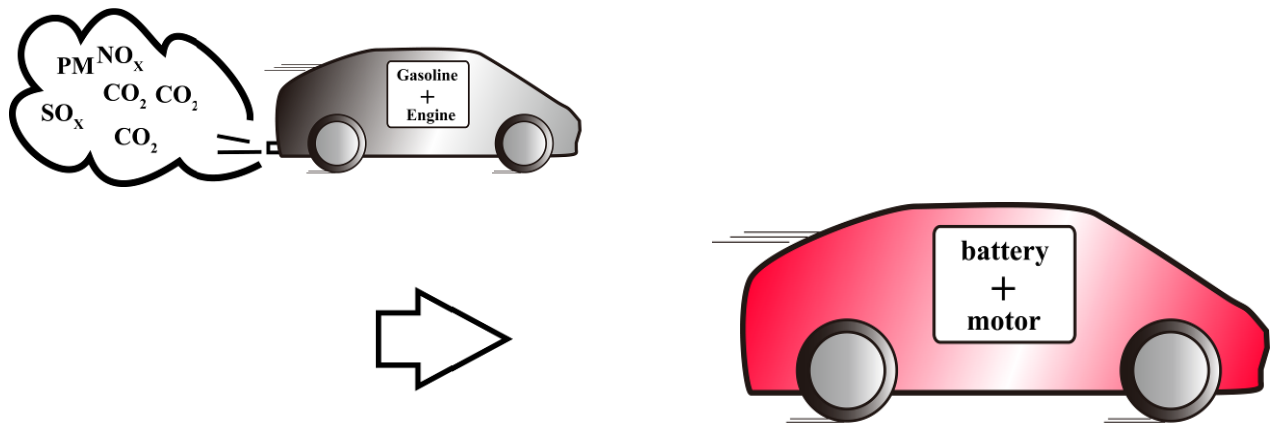


図 1.53 ガソリン車から電気自動車へ

この様に、環境にもやさしく、電費も安いなど多彩なメリットがある電気自動車は、2010年には三菱自動車から i-MiEV（アイ・ミーブ）、日産自動車からリーフ（LEAF）が一般向けに発売される予定である。販売価格は i-MiEV の場合 459 万円 9000 円であり、補助金によって 320 万 9000 円となる。2014 年には、200 万円を切りたいと社長が述べており、非常に期待が持てる産業になりつつある。

電気自動車のエネルギー源は石油ではなく、リチウムイオンなどの 2 次電池であり、電池のエネルギー密度向上が電気自動車の本格販売につながっている。一方、これ以上の電池のエネルギー密度向上は厳しいという見方が強い。i-MiEV とリーフの 1 充電当りの走行距離は 160km である。東京－大阪間が約 520km、東京－名古屋間が 360km である事を考えると、通常ガソリン車が 1 回の給油で 500km 以上走行可能である事実には到底及ばない。そのため、遠出の時にはサービスエリア（SA）などで、15 分や 30 分の急速充電を利用することになる。

この様に、電池のエネルギー密度は小さい。そのため、電気自動車は必ず 1 日 1 回程度の充電を必要とする。充電場所は自宅なので、ガソリンスタンドなどに行く必要が無く一見便利に見えるが、365 日毎日行なう充電作業は非常に煩わしい。帰宅後の充電作業において、買い物袋や、荷物を持っている場合には非常に不便である。冬の寒い日や夏の猛暑日にプラグを挿し込む作業は好まれるとは思いがたい。充電作業は充電用ケーブルを使用する。当然ながら、雨風にさらされるケーブルが綺麗とは言いがたい。雨の日の感電の危険性も懸念される。この様な不便というイメージはマイナスに働き、電気自動車普及の大きな歯止めになりかねない（図 1.54）。

そこで、自宅に帰宅し、車を駐車したら自動で充電してくれる、ワイヤレス自動充電システムが必要とされる（図 1.55）。このシステムの場合、車の所有者は何もする必要がなく、ただ自宅に駐車するだけである。これは電気自動車に大きな付加価値を加える。従来のガソリン車は給油のためにガソリンスタンドに行く必要があったが、電気自動車ではガソリンスタンドに行く必要が無く、充電作業も必要がないので、充電作業をするという意識からも解放される。電気自動車のような新しいライフスタイルを提供するに当たって、次世代の乗り物というイメージ像は何物にも変えがたい価値を有している。

自宅での充電が主になるが、ワイヤレス自動充電は石油と違い給油口を開いて充電する必要が無く、瞬時に充電作業をする事が出来る。そのため、極端な例としては電気自動車の 1 充電当りの走行距離が短い事を補うために、赤信号時に急速充電する事も可能であり、時間や場所を選ばずに充電する事が出来る（図 1.56）。将来的には、走行中におけるワイヤレス自動充電も研究されている（図 1.57）。

この様に、他の技術との親和性に優れているワイヤレス電力伝送技術は、本技術そのものでも魅力的

であるが、他の技術と融合する事により、人々のライフスタイルを変える可能性を秘めている。電気自動車へのワイヤレス充電は非常に良い好例である。



図 1.54 プラグによる手動充電

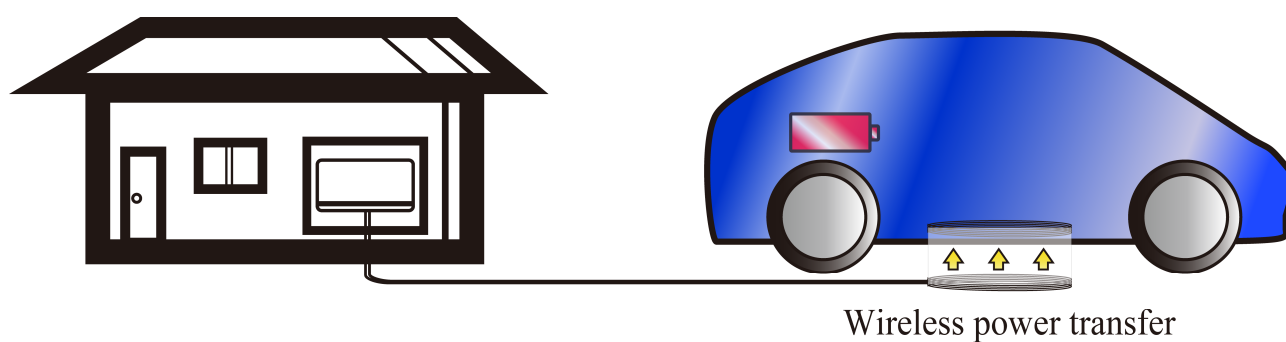


図 1.55 ワイヤレス自動充電

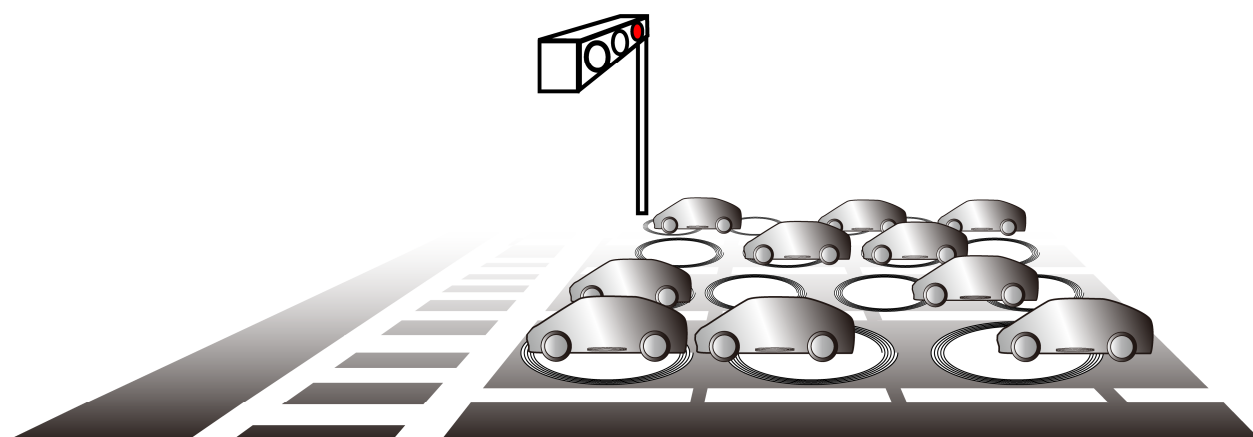


図 1.56 赤信号での一斉給電



図 1.57 高速道路における移動中のワイヤレス充電

1.2 本論文における問題意識と研究目的

前節にて、ワイヤレス電力伝送全4方式とワイヤレス電力伝送の需要を示した。これらから、ワイヤレス電力伝送においては、大エアギャップ、高効率、位置ずれへのロバスト性、大電力の4点が重要である事が分かる。そこで、それら4点全てを満たす可能性がある電磁界共振結合方式が有望であり、本論文の研究対象とする。一方、電磁界共振結合方式は2006年に研究が始まったばかりの技術であるので、現象の解明、理論の体系化など多くの課題がある。Q値が高いために実際に実用上現実的なワイヤレス電力伝送技術として使用できるかなど多くの疑問も残る。一方、電磁界共振結合技術は、電磁誘導や、アンテナ工学、共振器理論などにおいて多くの類似点もあり、その共通点や差異も明らかにする必要がある。

以上より、本論文は電磁界共振結合方式によるワイヤレス電力伝送方式の現象解明、理論体系化を行い、ワイヤレス電力伝送システムとして電磁界共振結合が有効である事を実証する。

1.3 本論文の構成

これらの背景を踏まえ、本論文では電磁界共振結合技術の現象の解明と理論の体系化を通し、技術の確立を行なう。そこで、本論文の構成を以下の様にする。

第2章では、電磁界共振結合用のアンテナの提案を行い、電磁界共振結合の特徴的な動作確認や現象を明らかにする。また、磁界共振結合と電界共振結合の各々の結合の種類について磁界型と電界型のアンテナを提案し、エアギャップや位置ずれの及ぼす影響を通して、基本的な電気的特性の検証を行う。磁界型アンテナと電界型アンテナの比較を行ない、磁界共振結合と電界共振結合の対称性を確認する。

第3章では、電磁界共振結合の現象を等価回路で定義し、定式化して、理論的に説明できることを示す。磁界共振結合と電界共振結合における等価回路を定義し、その正当性を実証する。

第4章では、等価回路をもとにして、オープンアンテナとショートアンテナという2つのアンテナタイプへの拡張、最大効率とエアギャップの理論限界式の導出、電磁界共振結合のkHz~MHz~GHzへの拡張、効率一定の証明、非対称アンテナの提案、従来の電磁誘導との比較を行う。

第5章では、電磁界共振結合をシステムとして動的に使用することを提案し、それにより常に最大効率で利用できることを示す。

第6章では、本論文の総括を行いまとめを述べる。

以上より、電磁界共振結合の現象を明らかにし、等価回路を用いて電磁界共振結合を定式化することで理論的に体系化し、システム応用までの提案と検証を行い、電磁界共振結合によるワイヤレス電力伝送の実現可能性を示す。