

設計技術シリーズ

電界磁界結合型 ワイヤレス給電技術

■ 電磁誘導・共鳴送電の理論と応用 ■

[監修] 京都大学 篠原 真毅

科学情報出版株式会社

電界磁界結合型 ワイヤレス給電技術

—電磁誘導・共鳴送電の理論と応用—

監修 京都大学

篠原 真毅

著 京都大学
(株)リユーテック
東北大学
東京大学
名古屋工業大学
名古屋工業大学名誉教授
東京大学
東京大学
(株)村田製作所
(株)村田製作所
東北大学
仙台高等専門学校
豊橋技術科学大学
千葉大学
(株)NTT ドコモ
早稲田大学
(株)イー・クロス・エイチ
信州大学
京都大学
(公社)自動車技術会

篠原 真毅
栗井 郁雄
松本 英敏
居村 岳広
平山 裕
稲垣 直樹
川原 圭博
成未 義哲
細谷 達也
市川 敬一
陳 強
袁 巧微
大平 孝
関屋 大雄
竹野 和彦
高橋 俊輔
原川 健一
田代 晋久
宮越 順二
横井 行雄

著者紹介

篠原 真毅 (しのはら なおき)

(第1章)

京都大学生存圏研究所教授。

平3 京都大・工・電子卒。平5 京都大大学院工学研究科修士課程修了。平8 同大大学院工学研究科博士課程修了(京大工博)。同年・同大超高層電波研究センター助手、平22 同大生存圏研究所教授。主として宇宙太陽発電所と無線電力伝送に関する研究に従事。IEEE、URSI、電子情報通信学会会員。IEEE Microwave Theory and Techniques Society (MTTS) Technical Committee 26 (Wireless Power Transfer and Conversion) Member。電子情報通信学会無線電力伝送研究会委員長。電磁波エネルギー応用学会理事。ワイヤレス電力伝送実用化コンソーシアム代表。ワイヤレスパワーマネージメントコンソーシアム代表他。

粟井 郁雄 (あわい いくお)

(第2章、第11章7節)

昭38 年京大・工・電子卒。昭43 同大学院博士課程了、工博。京大助手、(株)ユニデン技師長、山口大教授、龍谷大教授を歴任、現在(株)リユーテック代表取締役。マイクロ波フィルタ、人工誘電体、ワイヤレス給電の研究開発に従事。電子情報通信学会フェロー、IEEE Life Fellow。

松本 英敏 (まつき ひでとし)

(第3章1-4節)

東北大学大学院医工学研究科教授。

1980 年東北大学大学院工学研究科電気及通信工学専攻博士課程後期3年の課程修了(工学博士)。1980 年東北大学工学部助手。1985 年助教授。1998 年大学院教授。生体電磁工学、磁気応用工学に関する研究に従事。2011 ~ 2014 年医工学研究科長。2010 ~ 2011 年電気学会基礎・材料・共通部門長。2011 ~ 2012 年日本磁気学会会長。

居村 岳広 (いむら たけひろ)

(第3章5節)

東京大学大学院新領域創成科学研究科助教。

2005 年3 月上智大学理工学部電気電子工学科卒業。2007 年3 月東京大学大学院工学系研究科電子工学専攻修士課程修了。2010 年3 月同大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士後期課程修了。

平山 裕 (ひらやま ひろし)

(第4章1節)

名古屋工業大学大学院工学研究科准教授。

1998 年電気通信大学電気通信学部卒業。2003 年電気通信大学電気通信学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。2003 年名古屋工業大学工学研究科助手。2007 年名古屋工業大学工学研究科助教。2013 年名古屋工業大学工学研究科准教授。マイクロ波工学・環境電磁工学・アンテナ工学・無線電力伝送工学の研究に従事。電子情報通信学会、IEEE 会員。



稲垣 直樹 (いながき なおき)

(第4章 2-5節)

名古屋工業大学名誉教授。

昭和37年東工大・理工・電気B卒、昭和42年同大大学院博士課程了、博士(工学)。同年同大助手、昭和45年名工大助教授、昭和59年同教授、平成15年南山大教授。平成22年同大定年退職。昭和54年～55年米国オハイオ州立大エレクトロサイエンス研究所客員研究員(文部省在外研究員)。電波工学の教育・研究に従事。電子情報通信学会より昭和39年稲田賞、昭和49年論文賞、昭和58年業績賞を各受賞。平成1年IEEE APS Tokyo Chapter Chair、平成18年～19年IEEE APS Nagoya Chapterの初代Chair。電子情報通信学会フェロー、IEEE Life Fellow。

川原 圭博 (かわはら よしひろ)

(第5章)

東京大学准教授。

2005年東京大学博士課程修了。博士(情報理工学)。現在東京大学准教授。2011年ジョージア工科大学客員研究員、2013年マサチューセッツ工科大学客員講師。ユビキタスコンピューティングおよび無線電力伝送の研究に従事。

成末 義哲 (なるすえ よしあき)

(第5章)

1989年生。2014年東京大学大学院情報理工学系研究科修士課程修了。同年同研究科博士課程に進学、日本学術振興会特別研究員。室内給電無線化の研究に従事。原島博学術奨励賞など受賞。IEEE、電子情報通信学会、情報処理学会各会員。

細谷 達也 (ほそたに たつや)

(第6章、第10章)

1995年(株)村田製作所入社、現在に至る。博士(工学)。2007年より同志社大学大学院客員教授。主に、高性能電力変換装置の開発設計に従事。ワイヤレス給電システムの研究開発を推進。ワイヤレス・パワー・マネジメント・コンソーシアム副代表。電子情報通信学会、電気学会、パワエレ学会、自動車技術会委員。

市川 敬一 (いちかわ けいいち)

(第6章)

1998年(株)村田製作所に入社。高周波モジュール商品の研究開発に従事。現在、ワイヤレス電力伝送モジュールの研究開発に従事。

陳 強 (ちん きょう)

(第7章)

東北大学大学院工学研究科通信工学専攻電磁波工学分野教授。

平成6年東北大学博士後期課程修了。博士(工学)。現在東北大学大学院工学研究科通信工学専攻電磁波工学分野教授。専門は電磁波工学。IEICE、IEEE会員。

袁 巧微 (えん ちゃおうえい)

(第7章)

仙台高等専門学校教授。

中国出身、1990年東北大学に留学、現在国立仙台高等専門学校教授。専門分野は電磁波工学・アンテナ工学。電子情報通信学会、アメリカIEEE学会所属。2009年喜安善市賞受賞。無線電力伝送研専研究会幹事。

大平 孝 (おおひら たかし)

(第8章、第11章3節)

豊橋技術科学大学大学院教授。

1983年大阪大学博士課程了。工博。NTTにて通信衛星の設計を担当。2005年ATR波動工学研究所長。IEEE Distinguished Lecturer. IEEE Fellow. IEICE Fellow.

関屋 大雄 (せきや ひろお)

(第9章)

千葉大学大学院融合科学研究科准教授。

平成13年慶應義塾大学大学院理工学研究科電気工学専攻修了。博士(工学)。主として電力増幅器、共振型コンバータに関する研究に従事。IEEE、電子情報通信学会シニア会員。

竹野 和彦 (たけの かずひこ)

(第11章1節)

NTTドコモ先進技術研究所環境技術研究グループ。

1990年九州大学大学院修了、NTT入社、1998年NTTドコモ転籍、現在に至る(工学博士)。情報通信用エネルギー技術、リチウムイオン電池管理技術、ワイヤレス給電技術が専門。電子情報通信学会会員。

高橋 俊輔 (たかはし しゅんすけ)

(第11章2節)

早稲田大学環境総合研究センター。

1972年早稲田大学大学院理工学研究科卒。1972年三井造船(株)入社船舶設計、水中ロボット、メカトロ機器開発に従事、2003年退職。2003年早稲田大学環境総合研究センター参与、電動バス開発に従事。2012年より客員上級研究員として非接触給電研究の学生指導、現在に至る。2003年昭和飛行機工業(株)入社。EV、非接触給電開発に従事。2013年退職。自動車技術会ワイヤレス電力伝送技術委員会幹事。

原川 健一 (はらかわ けんいち)

(第11章4、5節)

2013年にExH(イククロスエイチ)設立。竹中工務店技術研究所で2009年に電界結合送電に成功。現在は、新会社で電界結合電力伝送技術を用いた産業機器の製品化を目指している。



田代 晋久 (たしろ くにひさ)

(第 11 章 6 節)

信州大学学術研究院工学系准教授。

九州大学大学院総理工助手、信州大学工学部助教を経て 2012 年より准教授。研究分野は磁気応用工学で、主に微弱磁界計測技術とその応用に関する研究。IEEE 学会会員、AEM 学会会員、電気学会上級会員。信州大学 SDTC 運営委員、ワイヤレス電力伝送実用化コンソーシアム学識委員、3G シールドアライアンス会員メンバー。

宮越 順二 (みやこし じゅんじ)

(第 12 章)

京都大学生存圏研究所特定教授。

1981 年大阪市立大学大学院医学研究科修了 (医学博士)。1996 年京都大学大学院医学研究科助教授。2002 年弘前大学医学部教授。2010 年現職就任。専門は、電磁波生命科学、放射線基礎医学。国際がん研究機関 (IARC) 「ELF・RF 発がん性評価委員」。世界保健機関 (WHO) — ELF 環境保健クライテリア・タスク会議メンバー。国際非電離放射線防護委員会 (ICNIRP) 常設委員 (SC II)。国際生体電磁気学会 (Bioelectromagnetics Society) 理事。総務省「生体電磁影響に関する検討会・委員」。公益法人日本アイソトープ協会理事。放射線安全管理部会部会長。日本磁気科学会副会長など歴任。

横井 行雄 (よこい ゆきお)

(第 13 章)

(公社)自動車技術会ワイヤレス給電システム技術部門委員会幹事 (2012 年～)。

京都大学生存圏研究所研究員 (2014 年～)。

1969 年日本無線株式会社入社。2004 年長野日本無線 (株) 移籍。2011 年退任。ワイヤレス給電技術、信号処理技術、電子航法・GPS ナビゲーション技術。自動車技術会、電子情報通信学会会員。1971 年に日本で初めて FFT 信号処理装置を実用化、その後ロラン C など電子航法装置の実用化を行い、船舶・漁業の安全・効率化に貢献。1990 年以降世界初の車載 GPS 受信機の実用化、小型化を実現し、車載位置情報の普及に貢献。2007 年からは磁界共鳴方式等のワイヤレス給電の産業化に尽力。

目 次

第1章 はじめに

第2章 共鳴(共振)送電の基礎理論

2.1 共鳴送電システムの構成	11
2.1.1 共鳴送電の原理	11
2.1.2 電源・伝送路・負荷	15
2.2 結合モード理論による共振器結合の解析	17
2.2.1 モード展開	18
2.2.2 結合モード方程式の導出	22
2.2.3 結合モード方程式の解法	26
2.2.4 結合モード理論の有効性	31
2.3 磁界結合および電界結合の特徴	35
2.3.1 磁界／電界結合の制御	35
2.3.2 磁界結合共振器の応用原理	37
2.3.3 電界結合共振器の応用原理	42
2.4 WPT理論とフィルタ理論	46
2.4.1 WPT システム設計理論とその問題点	47
2.4.2 フィルタ設計理論とその問題点	52

第3章 電磁誘導方式の理論

3.1 はじめに	63
3.2 電磁誘導の基礎	63
3.2.1 マックスウェルの方程式	63
3.2.2 エネルギーと電磁波伝播	65
3.2.3 ファラデーの電磁誘導則	67

3.3 高結合電磁誘導方式	71
3.3.1 電圧源励磁の磁心と磁束	71
3.3.2 変圧器等価回路	73
3.3.3 伝送効率	76
3.4 低結合型電磁誘導方式	78
3.4.1 最大効率条件	78
3.4.2 漏れリアクタンス補償法	79
3.4.3 低結合型における電力伝送機構	81
3.5 低結合型電磁誘導方式Ⅱ	83
3.5.1 磁界共振結合の等価回路	83
3.5.2 電圧・電流による入出力の特性式	84
3.5.3 入出力電圧・電流の設計	86
3.5.4 端子間電圧計	88
3.5.5 高周波電源	88
3.5.6 大電力用送受電コイル	89
3.5.7 実験例	90

第4章 磁界共鳴(共振)方式の理論

4.1 概論	93
4.1.1 はじめに	93
4.1.2 結合共振型ワイヤレス給電技術の分類	93
4.1.3 結合共振型ワイヤレス給電のモデルによる各方式の説明	95
4.1.4 インピーダンス整合から見た結合共振型ワイヤレス給電	100
4.2 電磁誘導から共鳴(共振)送電へ	103
4.2.1 方形コイルによる誘導方式の例	103
4.2.2 方形コイルによる共鳴方式の例	110
4.2.3 電力波と散乱行列による電力伝送効率の表現	115
4.3 電氣的超小形自己共振構造の4周波数と共鳴方式の原理	117
4.3.1 偶奇解析と4周波数	118

4.3.2 閉路構造の例	119
4.3.3 開路構造の例	121
4.4 等価回路と影像インピーダンス	122
4.4.1 等価回路	122
4.4.2 影像インピーダンスのパターン	127
4.5 共鳴方式ワイヤレス給電系の設計例	130

第5章 磁界共鳴(共振)結合を用いた マルチホップ型ワイヤレス給電技術

5.1 マルチホップ型ワイヤレス給電における伝送効率低下	140
5.2 帯域通過フィルタ(BPF)理論を応用した設計手法	141
5.3 ホップ数に関する拡張性を有した設計手法	144
5.4 スイッチング電源を用いたシステムへの応用	150

第6章 電界共鳴(共振)方式の理論

6.1 電界共鳴方式ワイヤレス給電システム	155
6.1.1 電界結合型の基本構成	155
6.1.2 電界共鳴ワイヤレス給電システムの構成	157
6.2 電界共鳴ワイヤレス給電の等価回路	158
6.2.1 電界結合における等価回路	158
6.2.2 電界共鳴ワイヤレス給電システムのF行列共鳴解析	160
6.3 電界共鳴ワイヤレス給電システムの応用例	164
6.3.1 電界結合型ワイヤレス電力伝送モジュール	164
6.3.2 タブレット端末製品への組込み試作例	164
6.3.3 電磁干渉ノイズの測定	166

第7章 近傍界によるワイヤレス給電用アンテナの理論

7.1	ワイヤレス給電用アンテナの設計法の基本概要	171
7.2	インピーダンス整合条件と無線電力伝送効率の定式化	173
7.3	アンテナと電力伝送効率との関係	176
7.3.1	アンテナのモデル	177
7.3.2	インピーダンス整合時の電力伝送効率	178
7.3.3	整合回路の電気損失を考慮した電力伝送効率	181
7.4	まとめ	183

第8章 電力伝送系の基本理論

8.1	はじめに	187
8.2	電力伝送系の2ポートモデル	187
8.3	入出力同時共役整合	189
8.4	最大効率	190
8.5	効率角と効率正接	192
8.6	むすび	193

第9章 ワイヤレス給電の電源と負荷

9.1	共振型コンバータ	200
9.2	DC-ACインバータ	201
9.2.1	D級インバータ	202
9.2.2	E級インバータ	204
9.3	整流器	207
9.3.1	D級整流器	208
9.3.2	E級整流器	211
9.4	E ² 級DC-DCコンバータとその設計指針	213
9.5	E ² 級DC-DCコンバータを用いたワイヤレス給電システム	217

9.5.1	トランスの損失	219
9.5.2	E級インバータからみた整流器側の等価抵抗	220
9.5.3	電力伝送効率の近似表現	221
9.5.4	電力伝送効率向上のために	222
9.5.5	具体的設計例	225
9.6	むすび	227

第10章 高周波パワーエレクトロニクス

10.1	高周波パワーエレクトロニクスとワイヤレス給電	235
10.1.1	高速化と高周波化の違い	237
10.1.2	パワーエレクトロニクスとスイッチング技術	239
10.1.3	スイッチングコンバータにおける電力損失	241
10.2	ソフトスイッチング	244
10.2.1	ソフトスイッチングと最適ZVS動作	244
10.2.2	ZVS動作のD級インバータとE級インバータの比較	247
10.3	直流共鳴方式ワイヤレス給電	248
10.3.1	直流共鳴方式とMIT方式	248
10.3.2	直流共鳴方式とインピーダンス整合	249
10.3.3	直流共鳴方式のシステム構成	251
10.4	直流共鳴方式ワイヤレス給電の解析	253
10.4.1	周期状態区分法	253
10.4.2	常微分状態方程式による回路解析	254
10.4.3	複エネルギー回路による過渡現象解析	257
10.4.4	共鳴フィールドの周波数領域解析	259
10.5	共鳴システムの統一的設計法と10MHz級実験	262
10.5.1	共鳴システムの統一的設計法(MRA/HRA/FRA)	262
10.5.2	入力インピーダンスと電圧利得の解析	263
10.5.3	結合係数 k による位置ずれと傾きに対する解析	266
10.5.4	GaN FETを用いた10MHz級動作実験	267
10.5.5	共鳴フィールドの実証実験	270

第11章 ワイヤレス給電の応用

11.1 携帯電話への応用	275
11.1.1 適用の背景	275
11.1.2 電磁誘導型のワイヤレス給電に関して	276
11.1.3 試作機の電力変換効率の測定結果	281
11.1.4 評価結果の考察	283
11.2 電気自動車への応用I	290
11.2.1 EV用ワイヤレス給電方式の開発動向	290
11.2.2 公共交通自動車へのワイヤレス給電の開発動向	294
11.2.3 EVでの今後の展開	297
11.3 電気自動車への応用II	301
11.3.1 電化道路電気自動車 (EVER)	301
11.3.2 インフラからの走行中給電	302
11.3.3 ホイール経由のワイヤレス電力伝送 (V-WPT)	303
11.3.4 乗用車用タイヤによる給電実験	304
11.4 産業機器 (回転系・スライド系) への応用	308
11.4.1 電界結合方式	308
11.4.2 既存の回転系への電力供給方法と問題点	310
11.4.3 電界結合方式による回転系への電力伝送	312
11.4.4 既存のスライド系への電力供給方法と問題点	313
11.4.5 スリット付同軸線路の原理	314
11.4.6 電界結合方式によるスライド系への電力伝送 I	316
11.4.7 電界結合方式によるスライド系への電力伝送 II	317
11.4.8 スライド系での電力伝送の実証	319
11.4.9 まとめ	320
11.5 建物への応用	321
11.5.1 建物における残念な現実	321
11.5.2 ロボットが生かせる建物 (少子高齢化対策としてのロボット活用)	323

11.5.3	あるべき建物の姿	324
11.5.4	バス型給電方式（非接触給電・通信統合回線）	324
11.5.5	フリーポジション給電方式	327
11.5.6	展開イメージ	329
11.5.7	世の中の動向	330
11.5.8	まとめ	331
11.6	環境磁界発電	333
11.6.1	一様磁界発生コイル	333
11.6.2	磁界発電モジュール	335
11.6.3	磁束収束技術	337
11.6.4	信州大学環境磁界発電プロジェクト	339
11.7	新しい応用	341
11.7.1	隔壁給電	341
11.7.2	水中給電	349
11.7.3	ディスクリピータの応用	354

第12章 電磁波の安全性

12.1	歴史的背景	365
12.2	電磁波の健康影響に関する評価研究	366
12.2.1	概要	366
12.2.2	疫学研究	369
12.2.3	動物実験	371
12.2.4	細胞実験	372
12.3	国際がん研究機関 (IARC) や世界保健機関 (WHO) の評価と動向	373
12.4	電磁過敏症	376
12.5	電磁波の生体影響とリスクコミュニケーション	377
12.6	おわりに	378

第13章 ワイヤレス給電の歴史と標準化動向

13.1	ワイヤレス給電の歴史	385
13.1.1	TESLA の送電タワーの時代	385
13.1.2	電気自動車の歴史；4次におよぶEVブーム	386
13.1.3	MITによる磁界共鳴の衝撃	388
13.1.4	Toyota Priusの実証評価	389
13.2	標準化の意義	391
13.2.1	標準化の4つの側面	391
13.2.2	標準と基準、法制度との関連	392
13.2.3	商用化のためのロードマップ	395
13.3	国際標準の意義と状況	396
13.3.1	製品の標準；機器安全性と相互接続性	396
13.3.2	IECとISO、ITU、CISPR、ICNIRP	397
13.3.3	IECとISO標準のレベルとEVでの分担範囲	398
13.3.4	ワイヤレス給電の国際標準化・規格化	400
13.4	不要輻射 漏えい電磁界の基準；CISPR	403
13.5	日中韓地域標準化活動	405
13.6	日本国内の標準化	407
13.7	今後のEV向けワイヤレス給電標準化の進み方	408
13.8	ビジネス面における標準化一スタンダードバトル	409

11.2 電気自動車への応用 I

近年、現実味を増しつつあった化石燃料資源枯渇の問題はシェールガス・オイルの開発で一息ついた感があるが、地球温暖化や大気汚染の問題は COP19 で示された気温や海面上昇だけでなく、年々酷くなる中国の PM2.5 の問題のように今や待ったなしの状況である。それに対処すべく自動車メーカーからは従来の内燃機関に代わるクリーンかつ脱石油燃料の電気自動車 (EV) や電気バス、プラグイン・ハイブリッド車 (PHEV) が発売されているが、電池とその充電の性能が満足できるレベルまで到達できておらず、本格的な普及には未だ至っていない。EV の普及には充電システムの普及が不可欠であるが、現在広く使われている接触式充電システムにはいくつかの課題があり、それを解決する手段として安全、容易に充電できる各種ワイヤレス給電システムの開発が進んでいる。

ワイヤレス給電システムにも標準化や電磁波放射規制などいくつか課題はあるが、EV に搭載して実証試験を行い、課題解決に向けた動きが活発化している。そこで公共交通用自動車を含む EV へのワイヤレス給電の開発動向と実証試験の動向、今後の方向性について述べる。

11.2.1 EV 用ワイヤレス給電方式の開発動向

現在、実際の EV 用に開発されているワイヤレス給電方式は①電磁誘導式、②無線 (マイクロ波) 式、③磁界共鳴式の 3 方式である。その原理等は他章に譲るとして、ここでは広く実際に使われている電磁誘導式を中心に近年増えてきた磁界共鳴式を含めた開発動向を示す。

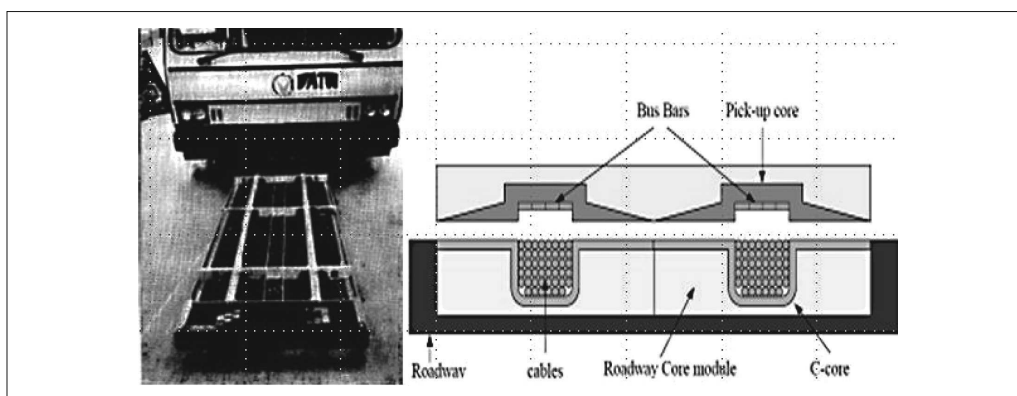
電磁誘導式は 1831 年に英国の Michael Faraday が見出したファラデーの電磁誘導法則の原理に基づくもので、EV 等の移動体関連の研究は海外では 1986 年 Lashkari らが EV への給電システム [1]、1993 年には Green らが移動型の基本となるシステム [2] を発表、1995 年には Klontz らが鉱山機械への応用 [3] を提案した。国内では 2002 年に湯村らはエレベータへの給電 [4] を発表、2008 年に紙屋らは EV への充電システム [5] を、2010 年に保田らも EV 用ワイヤレス充電システム [6] を発表している。これらの研究の結果、現在では微小電力から数百 kW 以上の電力を、数 mm から 10cm 以上のギャップを隔てて 90% 以上の総合効率で、ワ

イヤレス給電ができるようになっている。

実際に使われた最初のものは1980年代に米国で行われたPATH (Partner for Advanced Transit and Highways) プロジェクトでの道路下に埋め込んだ給電線から電磁誘導電力を受電するシステムである。これは図 11.15 のように道路に 1m 間隔で埋め込まれた2本のケーブルからの高周波電力を、走行中のミニバスの底面に設置された幅 1m、長さ 4.3m のコイルで受けることにより、エアギャップ 7cm で 6~10kW の電力を効率 60% で受電できたが、コイルからの漏れ磁束が大きく実用にはならなかった [7]。

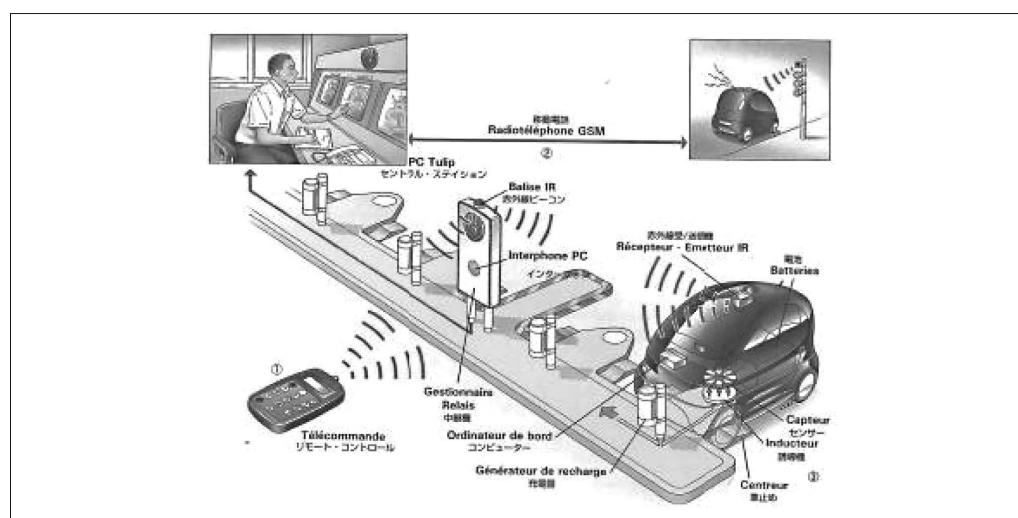
1995 年フランスの Tulip (Transport Urban, Individuel et Public) 計画において、Peugeot Citroën SA 社が発案したワイヤレス給電システム付きの EV を用いた実証試験が実施された。図 11.16 に示すように地上に設置した送電コイル上に EV が跨り、車両底部の受電コイルとの間で給電すると共に、通信システムで充電制御を行うと言う、現在のものとはほとんど変わらないワイヤレス給電システムが採用されたが、出力 6kW と小電力のため充電に時間がかかり、公共用としては課題があった [8]。

現在、開発中の普通乗用車用のものとしては、ニューヨークモーターショー 2012 で日産自動車が出力 3.3kW で 150mm のギャップを隔て 80~90% の効率で送電できるものを 2014 年頃にインフィニティへの標準搭載を目指すと発表し、パイオニアは出力 3kW、ギャップ 100mm、周



〔図 11.15〕 PATH プロジェクトでのコイル構造

波数 85kHz で効率 85% のものをプリント基板コイルで実現し、2012 年には実運用に向け金属や生物といった異物がコイル間に入ったことを検知する機能を搭載している [9]。パナソニックも ITS2013 でギャップ 100mm、周波数 85kHz で 3kW 出力のシステムを発表している。海外ではフランクフルトモーターショー 2011 で Audi 社が Audi Wireless Charging というシステム名で出力 3.6kW のものを A2 Concept に搭載、SEW-EURODRIVE 社が出力 3kW、効率 90% 以上のもの [10] を、2012 年に Vahle 社が出力 3.6kW、効率 90% 以上のもの [11] を発表している。2013 年 Volvo 社は C30 Electric に対して 1 次コイル出力を 20kW にして急速充電用として使えるものを発表している [12]。米国では 2012 年 Qualcomm Halo 社がコイル間の許容位置ずれ 15~20cm で送電効率が 80~85% で出力 3.3kW のもの、大型車や商用車向けの 7kW、急速充電用の 20kW という 3 種のシステムを発表していて、当初の周波数は 40kHz であったが、今後は 85kHz にするとしている [13]。2013 年に Evatran 社が Bosch ASS 社と組んで米国で日産リーフや、GM 社の Chevrolet Volt を対象にした出力 3.3kW、ギャップ 7~15cm、効率 91.7% の Plugless L2 Electric Vehicle Charging System を 3000US\$ という安さで発売、Bosch ASS が車両搭載の作業を行う [14]。



〔図 11.16〕 Tulip 計画でのワイヤレス給電システム

グローバルな EV 用途へのワイヤレス給電システムでは仕様の標準化が必要であり、上記のような動きを受けて IEC / ISO を中心に日米欧で標準化が進められていて、周波数はほぼ 85kHz 帯に絞られ、その他のものも 2015 年にはまとまる可能性がある。

それに先駆けて Qualcomm Halo 社は、London 市内の East London Tech City で 2012 年 7 月から 2 年間、Lancia 社 Delta E-4 や Renault 社 Fluence EV、Citroën 社の小型 EV を使い電磁誘導式ワイヤレス給電システムの商用化を目指して図 11.17 のようにスマート EV シティ実証試験を行っている。ドライバーが駐車場の所定の位置に駐車すると、システム側で位置を合わせ、最適な充電状況を作り出せる技術を使っていて、コイル間の距離が離れていた場合でも効率よく電力を伝達できる [15]。

MIT が開発した磁界共鳴式ワイヤレス給電技術の商業化を目的に 2007 年に設立されたベンチャー企業の米国 WiTricity 社は、周波数 145kHz、ギャップ 20cm、効率 90% で 3.3kW を伝送できる製品化を進めていて、Delphi 社やトヨタ、IHI、三菱自動車など多くの会社と技術提携している。IHI はギャップ 180mm、水平方向位置ずれ $\pm 200\text{mm}$ で 85% の効率を持つ 3.3kW 出力ものを三菱自動車 iMiEV に搭載したり、Peugeot の ION に搭載して実証試験を行っている [16]。

国内でも CEATEC2012 において TDK は独自に出力 3kW、ギャップ 15~20cm、効率 80~90%、位置ずれが 20cm 以下であれば充電可能と言うシステムを Chevrolet Volt に搭載した。2013 年に住友電工がソレノ



〔図 11.17〕 ロンドン市内での実証試験の状況

イド型コイルでギャップ $140\text{mm} \pm 30\text{mm}$ 、周波数 85kHz で 10cm 程度の位置ずれロバスト性を持つ 3kW 出力のものを発表している [17]。

トヨタ自動車は、PHEV や EV など電気を使う車両向けの周波数 85kHz 、出力 2kW のワイヤレス充電システムを開発、2014 年 2 月から愛知県内の PHEV 所有者の自宅などで 3 台の車両を使い 1 年間の実証実験を開始した。電磁波による周辺機器などへの影響抑制、送電側コイルは車両の乗り上げに耐えられる構造にするなど実用化を視野に入れた設計を施すとともに、最適な車両の位置合わせをガイドするために、駐車場に設置した送電側コイルの位置をナビ画面に表示する駐車支援機能も盛り込んだ。これらによる充電システムの満足度や利便性、駐車的位置ずれ量の分布、充電頻度などを検証し、ワイヤレス充電システムの実用化に向けた技術開発に生かす計画である [18]。

11.2.2 公共交通自動車へのワイヤレス給電の開発動向

公共交通自動車で EV 化されているものはタクシーと小型バスである。EV タクシーは数も少なくワイヤレス給電搭載の例はないが、小型電動バスには搭載例が多い。小型バス用 30kW の大電力のものはドイツ Wampfler 社（現在は Conductix-Wampfler 社）の第 1 世代の Inductive Power Transfer (IPT) があり、欧州では 2002 年からイタリアの Turin 市などの電気バス用として数十台が採用され、日本でも日野自動車の IPT ハイブリッドバスや早稲田大学の先進電動マイクロバス (WEB) などに採用され、充電操作が安全、容易なワイヤレス給電を使って短いサイクルで充電を行うことにより、必要最小限の小さな電池でも走行距離を確保しつつ、少ない初期投資と、車両重量が軽くなることでの省エネと Well to Wheel ベースの CO_2 排出量の減少が確認できている [19]。

そこで、早稲田大学は昭和飛行機工業らとともに、電動バス用 Inductive Power Supply system (IPS) を 2005 年から 4 年間、新エネルギー・産業技術総合研究開発機構 (NEDO) の委託を受けて開発した。IPT と同じ 30kW 、 22kHz の仕様で開発した IPS は、コイル形状やリッツケーブルなどの最適化により、コイル間ギャップを 50mm から 100mm に増加、商用電源から電池までの総合効率を 86% から 92% に改善した。また、

2次側コイルの重量や厚みを半分にするなど小型、軽量化がはかられている [20]。その後、コイル間ギャップを 140mm に増加することで、図 11.18 のように地面と面一に埋め込み、長野市で 2014 年 2 月までの 3 年間、2 台の WEB 電動バスを用いて日本初の有料実証運用試験を実施した。運用が始まってワイヤレス給電装置設置許可が総務省から下りるまでの半月間、車外に出て接触式充電システムで重くて堅いケーブルをハンドリングしながらコネクタの脱着を繰り返した運転手からは、雨や寒い雪の中でも 1 次コイルの上にバスを止め、室内でタッチパネルを押すだけで給電の ON/OFF ができる利便性が高く評価された [21]。

海外では 2014 年 1 月、三井物産は Arup 社と組んで英国 Milton Keynes 市の 1 路線、全 8 台のバスをワイヤレス給電式のバスに置き換えて毎日 17 時間、計 5 年間運行し、商業化に向けたデータの蓄積を行うことになった。ワイヤレス給電システムとしては 2012 年にオランダの S-Hertogenbosch 市内の電動バス向けに第 2 世代 IPT を開発、搭載した Conductix-Wampfler 社から独立した IPT Technology 社の出力 120kW、周波数 20kHz の IPT を 2 ヶ所のターミナルに設置してバスを充電し、片道約 30km の路線を走らせるシステムになっている。しかしながらコイル間ギャップが 50mm 程度と小さく、Turin 市の場合と同じように充電時に懸架装置を使って車両側の 2 次コイルを図 11.19 のように 1 次コイルの上に降ろすシステムを採っている。これには高価な懸架装置を車両台数用意する必要がある、コイルの昇降に大事な電池のエネルギーを



〔図 11.18〕 地面に埋め込まれた 1 次コイルと電動バス



〔図 11.19〕 2次コイルを地上コイル上に降ろしての充電状況



〔図 11.20〕 配送車向けの送受電コイル

消費する、コイルの昇降時間により充電時間が短くなる、機械的な懸架装置のメンテナンス費用がかかるなどの課題があり、前記長野プロジェクトのWEBのようにコイル間ギャップを大きくし懸架装置をなくす方向が望ましい[22]。

バスではないがデンソーは経済産業省の「次世代エネルギー、社会システム実証プロジェクト」の一環として2014年2月から12月までセブンイレブン豊田市上野町店での集配作業の間に、駐車スペースに設置した4.5kWの送電コイルからヤマト運輸の配送車の床下に搭載した受電コイルにギャップ250～300mm、効率85%でワイヤレス送電をし、集配作業などの間に配送車がアイドリングストップしていても、配送車の電動式冷凍機を駆動できるようにした(図11.20)。周波数は実証期間が短いため総務省への設置申請が不要な9.5kHzにしている[23]。

11.2.3 EV での今後の展開

EV の電費は一般的には 8~10km/kWh なので、電池搭載量を考えると 1 充電走行距離は 250km 程度が経済的限界となり、長距離走行では頻繁な急速充電が必要となる。また、バスにおいてはターミナルやバス停で停車中に充電するシステムでは短時間充電になるため、充電量から WEB シリーズのようなマイクロバスサイズか、大型バスの場合は IPS ハイブリッドバスのような PHEV を使用しての短距離ルート運用にならざるを得ない。EV が内燃機関自動車と同等の航続距離とエネルギー充填速度を実現するには、未だかなりの時間がかかりそうである。これは長距離走行を実現するだけの高エネルギー密度と超急速充電性能を持った蓄電池が開発途上のためである。そこで、EV や大型電動バスを長距離走行させる究極の充電機能は充電のために停止せずに必要なエネルギーを常時受け取れる走行中給電となる。

最初の走行中給電は前記の PATH プロジェクトであるが、その結果からその後の走行中給電の実証試験では電磁波漏洩の抑制が最大の課題となり、いろいろな方式が採られている。

Bombardier 社は 2010 年に Augsburg 市で走行に成功した LRT で実証された車体下のコイルにだけ通電する電磁誘導式ワイヤレス給電方式 PRIMOVE technology を応用して、2011 年から Flanders' DRIVE research project としてベルギー Lommel 市内の 0.6km の試験道路で電気バスによる実証を行った。電源は 10kV の高圧ラインから高周波電源装置により周波数 20kHz、出力 200kW にして供給、受電コイルサイズは長さ 3.6m、電動バス搭載電池容量は 60kWh である。実用化を目指し、1 次コイルを埋設した道路の舗装材もコンクリートとアスファルトをそれぞれ敷き詰めて実験を行った [24]。

韓国科学技術院 (KAIST) は、2009 年にキャンパスで電磁誘導式の走行中給電の公開実験を行い、Seoul 市公園や Yeosu (麗水) 市の Expo2012 でデモ走行を行った。周波数 20kHz、出力 200kW のインバータから送電し、17cm のギャップを介して 15kW の受電コイル 3 台で受電し、総合効率は 76% である。当初の給電線は PATH プロジェクトのように 1 本の連続し



〔図 11.21〕 Gumi 市での走行中給電バス

たケーブルで、電磁波漏洩が懸念されていたが、その後、KAIST が Segment Method と呼んでいる PRIMOVE 技術に似たスイッチングシステムを採用、Gumi（亀尾）市で 2013 年 7 月から図 11.21 のように実用運行を行っている。しかし運行距離 24km のうちの 500m×6 ケ所の 3km の間で走行中給電を行っているが、走行に必要な充電量の大部分は 2 箇所のターミナルでの静止中充電というのが実情である [25]。

このように電磁誘導式の走行中給電では電磁波漏洩対策が最大の技術課題である。そこで昭和飛行機工業、東北大学、日産自動車のグループが NEDO の委託を受け 2009 年から 2013 年まで磁界共鳴式を用いた走行中給電に取り組み、電磁波漏洩を電波法の規定値内に抑えつつ出力 2kW、ギャップ 450mm、総合効率 77% で走行台車に給電しているが、構内での走行試験にとどまっている [26]。2013 年、東亜道路工業は日産自動車と共同で給電コイルを埋め込む部分の舗装用セメント材として、コイルや給電線が舗装工事の熱や圧力で破損しないように転圧作業が不要で弾力性のある特殊セメント材を開発、実証試験を行っている。これにより KAIST などの工法に比べ施工コストを 1/3 に抑えられるようになった [27]。

電磁誘導式と比較して利用する磁場がずっと弱い磁界共鳴式のワイヤレス給電技術は現状では課題も山積しているが、将来的にこの技術が確立すれば、EV の走行中給電が可能となる。ハイウェイのワイヤレス給

電レールにおいて走行しながら給電を受けることができるようになれば、EV の進展を大きく加速させることが可能となる。

参考文献

- [1] K.Lashkari,et al.: Inductive power transfer to an electric vehicle,Proc.8th Int. Electric Vehicle Symp.1986,pp.258-267 (1986)
- [2] A.W. Green, et al.: 10kHz inductively coupled power transfer-concept and control ,IEEE Power electronics and variable speed drives conference, PEVD, No.399, pp.694-699 (1994)
- [3] K.W.Klontz, et al.: Contactless power delivery system for mining applications, IEEE Trans. Ind.Applicat.Vol.31, pp.27-35 (1995)
- [4] 湯村敬ほか：ロープ式ダブルカーエレベータの基礎技術開発，日本機械学会，No.01-58，昇降機・遊戯施設等の最近の技術進歩講演会論文集，pp.21-24（2002）
- [5] 紙屋雄史ほか：電動車両用非接触給急速充電システム，電学誌，Vol.128，No.12，pp.804-807（2008）
- [6] 保田富夫ほか：電気自動車用非接触充電システム，自動車技術会春季学術講演会前刷集，No.52-10，20105120，pp.1-4（2010）
- [7] Adib Kanafani et al.: Status of Foreign Advanced Highway Technology, California PATH Research Paper, UCB-ITS-PRR-87-2(1987)
- [8] 高木啓：NCV21 21 世紀は超小型車の時代，カースタイリング別冊 Vol.139 1/2，pp.99-105（2000）
- [9] 漆畑栄一：EV・PHV 向けワイヤレス給電システムの概要・開発動向と今後の課題，電子情報通信学会，信学技報 WPT2012-24，pp.23-26（2012）
- [10] Mobilitat weitergedacht ,80Jahre Kompetenz in Antriebstechnik ,SEW_EU RODRIVE_brochure_17058406
- [11] F. Turki, et al.: Further Design Approaches of the Standardization : Inductive Charging of Electric Vehicles ,ETEV2012 Session3.2(2012)
- [12] Volvo Car Corporation participates in a project for the development of

- inductive charging for electric cars ,Volvo press release May 19,2011
- [13] G.Ombach : Wireless EV Charging, optimum operating frequency selection for power range 3.3 and 6.6kW ,SMIEEE ,VP Engineering(2013)
- [14] BOSCH-EvaTran Press release, <http://www.pluginnow.com/plugless> June 24,2013
- [15] <http://www.techradar.com/news/car-tech/wireless-electric-vehicle-charging-explained-1094646>
- [16] 徳良晋ほか：電気自動車向け非接触充電システムの開発，IHI 技報 Vol.53, No.2, pp.38-41 (2013)
- [17] 非接触給電システム，住友電気工業カタログ (16) Wireless Charging System
- [18] 非接触充電システムの概要，トヨタ自動車プレス発表資料 2014-2-13
- [19] 高橋俊輔ほか：非接触給電システム (IPS) の開発と将来性，自動車技術会シンポジウム論文集，No.16-07, pp.47-52 (2008)
- [20] 高橋俊輔ほか：EV へのワイヤレス給電の開発，エレクトロニクス実装学会，超高速高周波エレクトロニクス実装研究会，平成 22 年度第 3 回公開研究会論文集，Vol.10, No.3, pp.27-32 (2010)
- [21] 紙屋雄史ほか：短距離走行・高頻度充電コンセプトを採用した電動中型バスの設計・製作・性能評価，自動車技術会論文集，Vol.45, No.2, 20144280, pp.291-296 (2014)
- [22] <http://www.bbc.com/news/technology-25621426>
- [23] デンソー、非接触充電システムの実証実験を開始～非接触充電により商用車の車載冷凍機を駆動～，デンソープレス発表資料 2014-2-20
- [24] C. Koebel: PRIMOVE-Inductive Power Transfer for Public Transportation , ETEV2012 Session2.3(2012)
- [25] C.Rim:The Development and Deployment of On-Line Electric Vehicles(OLEV),IEEE ECCE2013 SS3.2(2013)
- [26] 望月正志ほか：走行中非接触給電装置の開発 (第 4 報)，自動車技術会 2013 年秋季学術講演会前刷集，53-20135710 (2013)
- [27] <http://kensetsunewspickup.blogspot.jp/2013/04/ev.html>

設計技術
シリーズ



9784904774281



1922054036004

ISBN978-4-904774-28-1

C2054 ¥3600E

定価(本体3,600円+税)

科学&技術
知見の泉

www.it-book.co.jp



Wireless
Power
Transfer

電界磁界結合型
ワイヤレス給電技術



科学&技術