

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 7 No. 2 2017

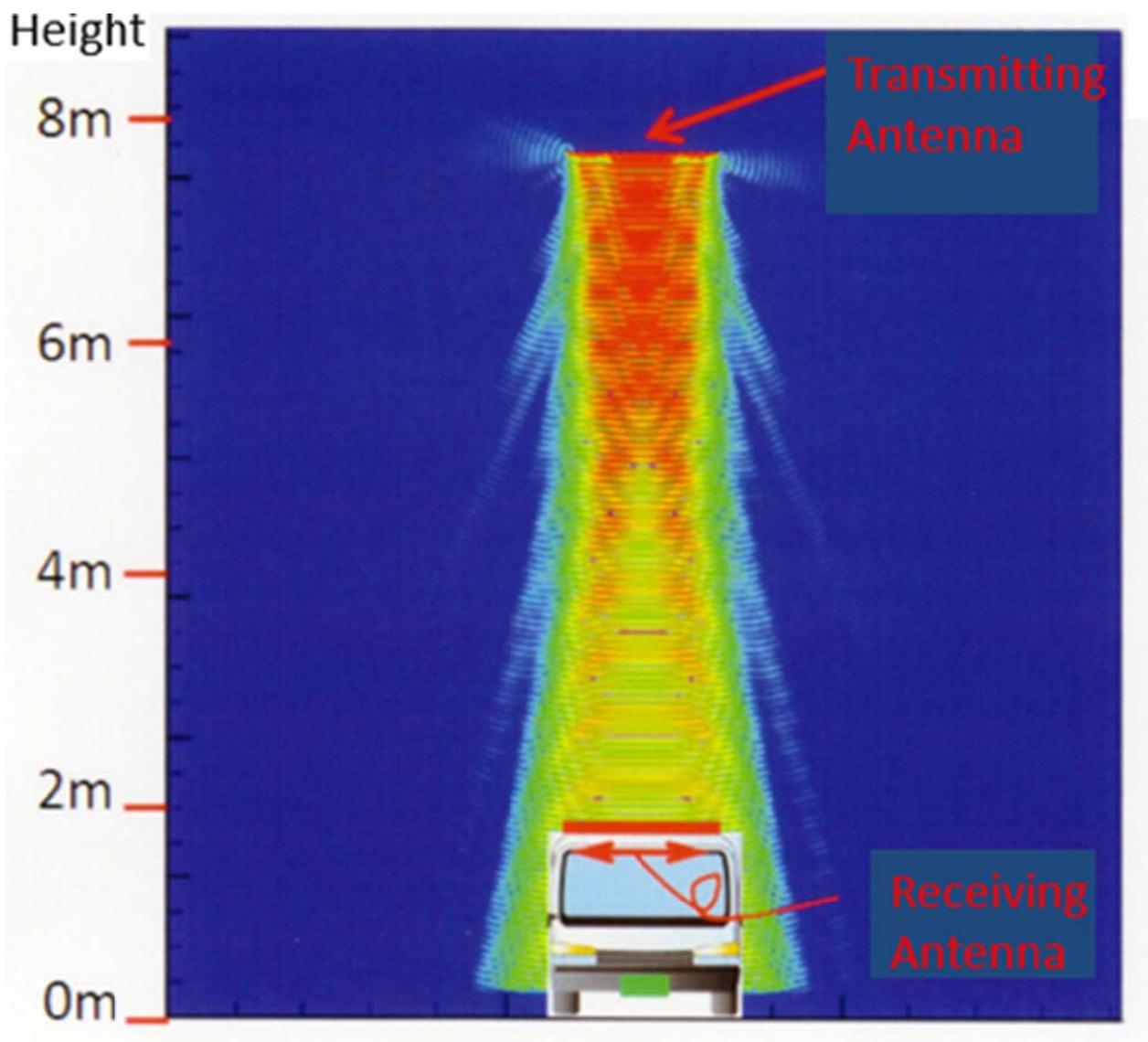
JSAE エンジンレビュー

特集：電動車両用の次世代充電インフラ

- ・非接触充電技術・標準化の現状
- ・走行中給電技術の展望
- ・電磁波による生体影響

連載：

- ・ガソリン筒内噴射の開発史(連載第 3 回) Bendix Electrojector の登場とその進化を中心に



公益社団法人 自動車技術会

コラム: ● 将来の自動車保有台数について思う:	1
Think about the number of vehicles owned in the future	
小池 誠(豊田中央研究所)	
Makoto KOIKE (TOYOTA CENTRAL R&D LABS., INC.)	
特集: 電動車両用の次世代充電インフラ	2
・非接触充電技術・標準化の現状	
Technical Progress and Standardization for Wireless Power Transfer of EV	
横井 行雄 (京都大学 生存圏研究所)	
Yukio YOKOI (Research Institute for Sustainable Humanospere, Kyoto University)	
・走行中給電技術の展望	8
The prospects of the Dynamic Charging Technology	
高橋 俊輔 (早稲田大学 環境総合研究センター)	
Shunsuke TAKAHASHI (Waseda University Environmental Research Institute)	
・電磁波による生体影響	17
Health Effects of Electromagnetic Fields	
宮越 順二 (京都大学 生存圏研究所)	
Junji MIYAKOSHI (Research Institute for Sustainable Humanospere, Kyoto University)	
<連載企画>	
・ガソリン筒内噴射の開発史(連載第 3 回)	25
Bendix Electrojector の登場とその進化を中心に	
The Technical History of Gasoline Direct Injection	
The Appearance of "Bendix Electrojector" and its Evolution -The 3rd serial article-	
調 尚孝 (株式会社日本自動車部品総合研究所)	
Naotaka SHIRABE (NIPPON SOKEN, INC.)	

■ JSAE エンジンレビュー編集委員会

委員長: 飯田 訓正 (慶應義塾大学)
副委員長: 村中 重夫 (元日産自動車)
幹事: 飯島 晃良 (日本大学)
委員: 遠藤 浩之 (三菱重工エンジン&ターボチャージャ)
大西 浩二 (日立オートモティブシステムズ)
金子 タカシ (JX エネルギー)
菊池 勉 (日産自動車)
小池 誠 (豊田中央研究所)
小酒 英範 (東京工業大学)
清水 健一 (元産業技術総合研究所)
下田 正敏 (日野自動車)
西川 雅浩 (堀場製作所)
野口 勝三 (本田技術研究所)
平井 洋 (日本自動車研究所)
山口 恭平 (自動車技術総合機構)
山崎 敏司 (編集)

発行所: 公益社団法人 自動車技術会
発行日: 2017 年 3 月 31 日
発行人: 石山 拓二 (京都大学)
〒102-0076 東京都千代田区五番町 10-2
電話: 03-3262-8211

ENGINE REVIEW
SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN
Vol. 7 No. 2 2017

●コラム

将来の自動車保有台数について思う

Think about the number of vehicles owned in the future



小池 誠

Makoto KOIKE

編集委員, 豊田中央研究所

TOYOTA CENTRAL R&D LABS., INC.

米国トランプ大統領が自動車生産について言及したこの機に自動車の生産量・普及状況に触れてみたい。ここに示すデータはJAMAやOICAなどが公開しているので、関心のある方は参照されたい。

米国における2015年度の生産、輸出、販売はそれぞれ1210万台、224万台、1750万台と報告されている。輸入は差し引き760万台強ということになる。生産、販売の世界一は既に中国に明け渡しているが、保有台数は2億6千万台と依然世界一である。

世界全体で見ると、自動車生産台数は2015年に9千万台を超え、保有台数は12億台を超えるに至っている。ちなみに最近10年間における保有台数の増加は、平均すると5千万台弱/年であるから、新車販売の半数程度の自動車が廃車されていることになる。世界人口は73億人であるから、平均すると約6人に1台の車が行き渡っている。国別にみると、アメリカは1.2人に1台と突出しているが、欧州・日本でも1.5~1.7人に1台である。ちなみに乗用車に限定すれば概略2人に1台となっている。これらOECD諸国では人数当たりの自動車台数はほぼ飽和しつつあり、充足の目安と考えられる。一方、中国は10人、インドは45人、アフリカ平均では22人に1台という普及状況である。

2050年の世界人口は90億人に達すると予想されている。自動車保有台数は、それまでに現在の2倍に相当する~25億台になると見込まれている。25億と言えば1950年の世界人口に匹敵する。ところが、2人に1台を充足レベルと考えると、潜在需要はさらにその2倍ある。そんなに生産できるかは別としても、世界何処に行っても日本や欧米とならぶ自動車利便性を享受しようと思えば、こういう数字に向かって進むことになる。

これは言わばBAU(business as usual)ケースである。将来はもう少し違っているかもしれない。エネルギーは大丈夫であろうか。現在、自動車が消費しているエネルギーは人類が消費するエネルギー全体の17%弱である。比率から見れば大きな数字ではないが、サステナブルな社会実現のために、エネルギー消費の抑制強化や化石燃料からリニューアブルエネルギーへの転換が求められている。そのため、エネルギーコストは高くなることが予想され、低消費エネルギーに向かう社会構造の中で、人の移動や物流への自動車の関わり方が変わる可能性がある。

そうでなくとも過去から少しずつ人は都市に集まりつつある。既に先進国では人口の70~80%が都市部で生活しており、新興国でもこの傾向が強まっている。2050年には人口の90%が都市部で生活するという予測もある。自動車は人とともにあるから、都市に自動車が集中する。今でも渋滞や駐車場不足がもたらす時間と経済的損失が問題となっている。欧州では渋滞による損失が1年1人平均100時間を超え、経済的損失は1000億円に上ると試算されている。

解決法の一つは、社会で車を共有化し、個人で車を所有しないことだという意見がある。働き方改革が進んで、入社・退社が自由になり、インターネットを利用した在宅勤務が普及すれば、少なくとも通勤のために車を所有する必要性は少なくなるであろう。カーシェアリングやシェアライディング、Uberのようなシステムが普及していくと、車は社会が提供するインフラの一つになる可能性がある。市場調査によれば、現時点ではユーザを含めてこのシステムの実用性は高くないとされているが、懸念されている若者の車離れがこのまま世代を超えて進むと車の所有に関する意識は変わるかもしれない。

自動車は人口と同じオーダーの数に近づいてきて、いよいよ数の問題を考えねばならないのではないだろうか。自由な移動と利便性を提供する自動車本来の役割は変わらないとしても、ここに述べたような、個人が所有するケースと社会インフラとして整備されるケースに分かれていくことが考えられる。多くの人が共有して使う車と個人で所有する車の指標は自ずと違っているはずである。何のための車か、誰が使う車か、突き詰めれば何のために車を作っているか改めて問われていないだろうか。

非接触充電技術・標準化の現状

Technical Progress and Standardization for Wireless Power Transfer of EV

横井 行雄

Yukio YOKOI

京都大学 生存圏研究所

Research Institute for Sustainable Humanospere, Kyoto University

1 はじめに

19世紀後半に電気自動車(EV)が発明されて以降、EVのブームは世界的にはカルフォルニア州の環境規制等が契機になるなど、これまでに何度もあった。日本でも戦後すぐのガソリン不足の時期、あるいは大気汚染が深刻化し、オイルショックも起きた70年代などにEVブームが起きてきたが、産業として成熟するには至らなかった。しかし2015年のフォルクスワーゲンによるディーゼル車の排出ガス不正の発覚を契機にして、欧州、米国において乗用車のEV化の大潮が巻き起こってきている。今回は中国における環境問題の深刻化、COP20での地球温暖化対策目標の日本をはじめとする世界主要国での批准、関連する環境規制の深化、加えて技術の発展からブームが一層加速すると考えられる。本稿では詳細に触れないが、その間の事情は、経産省の「EV/PHEVロードマップ報告書」¹⁾を参照されたい。一方でこれまでEV普及の深刻な隘路とされてきた課題の中で、航続距離の短さと搭載電池への充電時間の長さと共に、充電のためのケーブル・コネクタの操作性・安全性の確保・改善が指摘されている。本稿では、そのケーブル接続の課題を劇的に改善すると期待されている、非接触充電(ワイヤレス充電)技術とその標準化の現状に

ついて報告する。なお、日本では乗用車型のEVが主として話題になるが、欧州においてはe-mobilityとして、二輪車、大型の商用車、バス・トラックも電動化の主たる対象になっていることは注目に値する(図1)。

2 非接触充電(ワイヤレス充電)技術と市場動向

EVへのケーブル接続充電の課題を劇的に改善すると期待されている、非接触充電については、2007年のMITのチームによる2mの間隔での「磁界共鳴」方式の送電実証報告の位置づけが大きな契機になり、パワーエレクトロニクス、無線技術、物理的な共鳴現象の考え方等多くの専門分野にわたる横断的な理論研究・技術開発が行われてきた。その中で、当初あった用語の混乱も収まりつつある。2011年3月には「電気自動車のためのワイヤレス給電とインフラ構築」²⁾が発刊され、インフラ整備との関連が整理された。さらに2014年末に発刊された「ワイヤレス給電技術」に関する教科書³⁾では、「電磁界結合型」とされ「電磁誘導・共鳴送電の理論と応用」という副題がつけられ、電界、磁界を利用するワイヤレス給電技術がまとめられた。さらに2016年8月の「ワイヤレス電力伝送技術の研究開発と実用化の最前線」⁴⁾では対象にEVに限らない携帯電話なども含めて、技術方式としてマイクロ波方式を含む幅広い技術を網羅したものが発刊された。それらを踏まえ、本稿では以降「ワイヤレス給電」ないし「ワイヤレス充電」という用語を採用する。



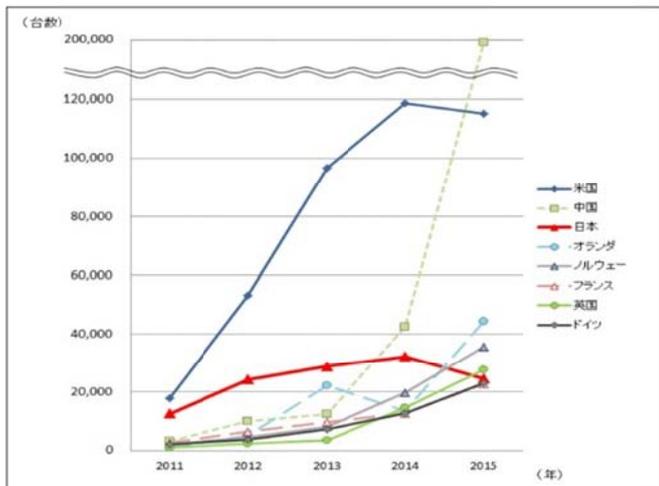
Fig 1 e-mobility の位置づけ

2.1. 世界のBEV・PHEV市場の動向

我が国が主要なBEV・PHEV市場の一つとなっていることに疑いはないが、米国や中国、一部の欧州諸国の伸びは著しく、欧州、米国を中心にBEV・PHEV化の波が押し寄せている。2015年にはTeslaがModel-Sを5万台販売しe-GolfはNorwayで1万台を出荷したと言われている。中国でも、新エネルギー車の2015年の販売台数は33万1092台と、日本のBEV・PHEV販売台数2万5328台の10倍を超

える台数を記録している。中国は、2020 年には 200 万台の目標を掲げており、2016 年の新エネ車販売は 60 万台を超えるものと予想される。中国は新エネ車を国家の重要政策として力を入れている(図 2)。一方で欧米の車メーカーは今後 7 年間で 40 モデルの BEV を、PHEV では 140 モデルを投入すると言われていて、今後 BEV・PHV の普及拡大に向けた世界的な競争の激化が予想される(図 3)。

及促進が主である。しかし最近、欧州でコンボ方式をベースに 350kW クラスの超急速充電インフラの検討の開始が報じられた。次の世代として公共交通の EV バス、EVトラック向けの適用などが視野に入ってきている。日本でもすでに各地で路線 EV バスが導入され運行している。これらは現状ではコネクタを用いる手動のコンダクティブ充電器が設置されているが、将来的には、自動充電が可能で利便性の高いワイヤレス給電が普及するものと考えられている。現状で 7.7kW クラスワイヤレス充電は国際標準化を経て EV への商用化が目前である。2016 年のパリモーターショーではベンツが Qualcomm 社の技術で PHEV の S550e にワイヤレス充電を世界初で搭載するとアナウンスした。一方でワイヤレス給電の大電力への適用は、人体防護および漏洩電磁界低減の課題を抱えており、一層の技術開発が求められている。他方、欧州の各都市では、自動給電ではあるが、接触式を用いる EV バスへの実証実験が試みられている。電磁界によるワイヤレス給電方式での走行中給電の実証評価も各地で開始されていて、各利用シーンでの棲み分けが行われることになるであろう。



出典:オランダ・ノルウェー・フランス・イギリス・ドイツ:European Alternative Fuel Observatory(EAFO)
中国・アメリカ・マークラインズ、日本:日本自動車工業会(JAMA)

Fig 2 各国の BEV・PHV の販売台数の推移¹⁾



出典:欧州の自動車メーカーは AVERE「European Alternative Fuels Observatory」
アジア及び米国の自動車メーカーは報道発表に基づき作成

Fig 3 主な BEV・PHV 市場投入実績と見通¹⁾

2.2. 充電インフラとワイヤレス給電の市場

EV 用の充電インフラの市場として現在は、BEV・PHEV のコネクタを用いるコンダクティブ充電が中心である。これらは、3.3kW ないし 7.7kW の AC 普通充電対応と、DC 急速充電対応の 50kW クラスの普

3 ワイヤレス給電の法制度と規則

ワイヤレス給電が、ケーブル・コネクタあるいはパンタグラフ等を使用するコンダクティブ充電(接触式)と決定的に異なる点は、エネルギー伝送に無線区間(エアギャップ)を有することである。電磁誘導を利用するトランスでは全体を金属で覆う(電磁シールド)こともできるが、EV のワイヤレス充電では間隔の広狭はあれ、むき出しのギャップ区間から電磁界を漏えいすることが避けられない。即ち無線通信などの世の中で運用中の電波利用のシステムと共存が求められることになる。このような利用シーンでは 1)利用周波数とエネルギー伝送方式の選定で商用化の際の課題内容が定まり、2)漏えい電磁界が他のシステムに与える影響評価・低減、3)人体・生体に対する影響の評価・低減、4)国内・国際制度との協調が課題となる(図4)。



Fig 4 EV ワイヤレス給電の課題

3.1. 日本国内での法制度・規則の整備

磁界を用いるワイヤレス給電は、通常の無線通信業務とは異なり、電磁的にエネルギーを伝送するものであり、情報を載せるための電波の変調を必要としない。法制度のなかでは、現状は高周波利用設備として扱われている⁶⁾。高周波利用設備は 10kHz 以上を規定している⁶⁾ので、10kHz 未満の利用は現行の規制対象外である。とはいえ、どの周波数を利用して放送等の他の無線業務に重大な影響を与えることは許されない。利用周波数の選定においてはこの点の配慮が重要である。この影響への配慮義務は利用周波数を生成、直流に復元するインバータ・コンバータから生ずる高調波等にも適用されるということの意味している。総務省はワイヤレス給電システムの簡便な制度化を目指して、2013 年 6 月からワイヤレス電力伝送作業班を設置し、EV を含む利用シーンにおける満たすべき技術的要件を検討し、2015 年 7 月に EV 向け技術基準について情報通信審議会答申を行った⁵⁾。それを受けて 2016 年 3 月総務省が関連規則を改正する省

令を公布し、高周波利用設備の型式指定による簡易な制度化への道が開かれた。EV へのワイヤレス給電の技術的条件は、利用周波数を 70kHz~90kHz とし、伝送電力 7.7kW クラスまでを対象として、利用周波数および利用周波数以外の周波数における漏えい電波の許容値を、10m 離れた地点における磁界強度で示された(図5、図6)。これを受けて、型式指定のための要件を定める電波法施行規則等の改正が 2016 年 3 月に行われた。

3.2. CISPR(国際無線障害特別委員会)における国際的検討⁷⁾

CISPR は無線障害の原因となる各種機器からの不要電波に関し、その許容値と測定法を国際的に合意することによって国際貿易を促進することを目的とするIEC(国際電気標準会議)の特別委員会である。ワイヤレス給電に関する許容値の国際的な検討は日本が主導して 2014 年から開始されている。国際的な協調を行うべく情報通信審議会答申の許容値を国際的に提案し、積極的に貢献している。

本報告(案)における電気自動車用WPTシステムの分類			
伝送電力7.7kWで、漏えい磁界強度68.4dBμA/m@10mとなるシステムを追加。			
本報告(案)での電気自動車用WPTシステムの分類	伝送電力	利用周波数における漏えい電波の許容値	利用周波数以外における漏えい電波の許容値
3 kWクラス(家庭用)	3.3 kW	68.4 dBμA/m@10m	CISPR 11 クラスB準拠 (2次~5次高調波部分のみ 10dB緩和等)
	7.7 kW		
7.7 kWクラス(公共用)	7.7 kW	72.5 dBμA/m@10m	

技術的条件として取りまとめ

Fig 5 EV 向け WPT システムの分類⁵⁾

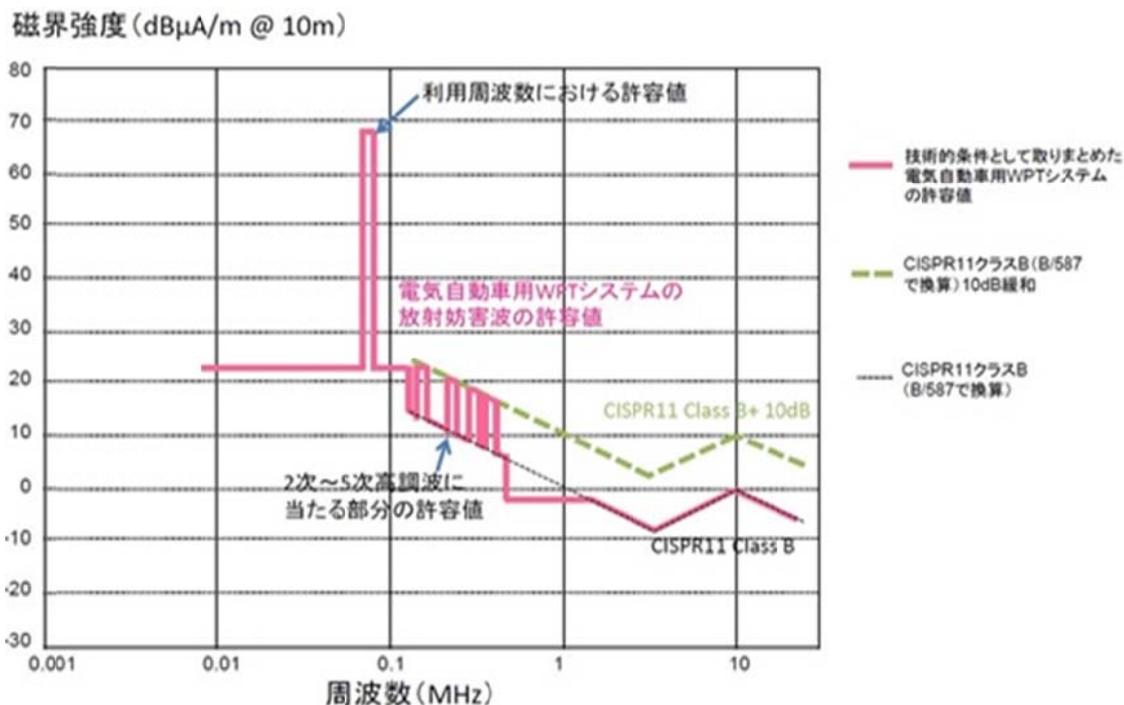


Fig 6 EV 用 WPT に適用される磁界強度基準⁵⁾

3.3. 利用周波数の選定; ITU, WRC での国際的検討

エネルギー伝送を行う周波数の選定は、伝送方式による高効率確保、システムコスト低減等の技術的な観点からは当然のこととして、他の電波利用システムとの共存が重要となる。情報通信審議会の答申では、当初 42kHz~148kHz の候補の中から、79kHz~90kHz を EV 用の利用周波数として選定した。この利用周波数について国際的な認知を得るために、ITU (国際通信連合) で勧告を出すべく努力が重ねられている。2015 年時点では PDNR (Preliminary Draft for New Recommendation, 新勧告のための予備草案) のレベルまできている。さらにはマイクロ波を用いるワイヤレス給電技術も検討の俎上に挙げられている。電波利用に関わる利用周波数の国際的な割り当ての議論は 4 年に一度の WRC (世界通信会議) で行われている。昨年の WRC15 においてワイヤレス電力伝送は ITU での緊急の研究テーマとされ WRC19 において報告されることとなった。日本は国際的な合意を得るためにアジアパシフィック地区の主管庁会合の AWG (Asia Pacific Telecommunity Wireless Group), あるいは標準化機関会合である日中韓の CJK (China, Japan, Korea) 会合等の場を積極的に利用して活動している。

3.4. 人体安全の側面

電磁波の人体(生体)への影響の評価、安全の確保は、国際非電離放射線防護委員会(ICNIRP)が時間変化する電界および磁界へのばく露制限に関するガイドラインの見直し(100kHz 以下の低周波領域を目的とした先行見直し)を 2010 年に公表している⁸⁾。日本でもこのガイドラインに沿って無線機器について電波防護指針を改定した。近傍電磁界からの人体の安全の評価は、電磁波の熱作用、刺激作用、接触電流による影響からなるが、周波数によって異なることが知られている。ガイドラインでは安全率を大きめにとっているため、より本質的には基本制限に立ち返って評価することが必要となる。EV 向けワイヤレス給電については、情報通信審議会答申の中でその適合性評価パターンが策定公表されている。また IEC の TC106(電界・磁界の人体への暴露の評価)での検討も開始されている。

4 EV 向けワイヤレス給電の国際標準化

国際的な商品である電気自動車(EV)では、世界共通の仕様で製造・流通させることが普及の為の重要な要件である。そのために求められる要件は1)人体安全・電波防護、2)漏えい電磁界の制限、3)給電制御、配置、4)製品固有の条件が挙げられる(図7)。

このうち3)は製品相互の接続・互換性の確保のために重要であ



Fig 7 標準化法制化の基本要件

る。4)は各社各装置の技術的な進歩を担保する競争的要件であり、標準化にはなじまない。ワイヤレス給電では給電インフラと受電側の搭載機器の相互接続に関わる基本要件の標準化が普及の為に必須である。エネルギー伝送の為のコイル方式、形状とかパワークラスとともに、安全を確保し確実に給電するための制御通信の標準化が重要である。これらの国際標準化は IEC/ISO をはじめとする複数の機関で国内・国際協調のもとで進められている(図8)。

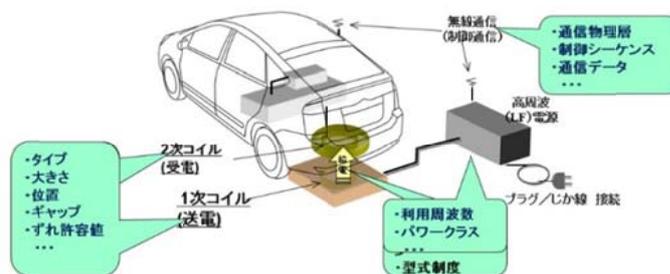


Fig 8 EV 向け WPT システムの標準化領域

現状ではパワークラスが 7.7kW クラスに焦点が絞られているが、22kW クラスへの標準化提案を欧州、韓国等が提起するなど大電力化の標準化を見据えた動きが活発化している⁹⁾。これらの事情は自動車技術ハンドブックにまとめられている¹⁰⁾。ワイヤレス充電の国際規格としては、IEC/TC69(電気自動車および電動産業車両(電力設備・インフラとサプライ要素部品が対象))が IEC61980(Electric vehicle wireless power transfer (WPT) systems)の制定をめざし、4 年越しの検討を踏まえて part1 の IS(International Standard)化を 2015 年に行った。引き続き part2,part3 の TS(Technical Specifications)化を念頭に edition1 の策定を準備している。ただ、コンダクティブ充電で起きたような、4 種ものコネクタ標準が並存するような事態を避けるべく、参加各機関が努力を重ねているが、利害が交錯し審議が遅延している

のが実情である。EVのワイヤレス給電システムを担当するIEC TC69に対し、車両を担当するISO/TC22(自動車)/SC37(電動車両(車両システムの構成要素としての部品を含む))ではほぼ同じペースで、ワイヤレス給電の車上側標準のISO19363をPAS(Publicly Available Specifications)として策定準備を進めている(表1)。

米国では、SAE(自動車技術会)とULが共同して、SAE J2954およびUL2750規格の制定を進めている。SAEではTIR(Technical Information Report)として2016年6月に公表し、給電方式間の相互接続性の評価試験を米国、欧州で実施している。ULは認証機関ではあるが、米国では安全面の規格化も担当する。この米国規格の検討とIEC、ISOでの検討は同時進行しており、もちろん、IEC/ISOはITU、CISPRとも密接に連携し実効的な規格になるべく努力を積み重ねている。

5 EV向けワイヤレス給電の今後の展開

乗用車向けBEV・PHEV向けのワイヤレス給電装置は国際標準の準備が整いつつあることを受けて、システム・車に搭載される受電部などの商品化が活発に進められている。国際標準化を視野に入れた送受電コイルでは、先行しているWitricityに対抗して、Qualcomm社がDD方式を、またドイツBombardier premove社もせり上がり方式を発表し製品化への準備を整え国際標準への採用を競い合っている(図10、図11)。2016年のパリでのモーターショーではQualcommがBenzのS550eにWPTシステムの搭載を世界初として発表した。さらに将来期待されている走行中給電ではKAIST(韓国科学技術院)が、バス、トラムなどでの実証を精力的に進めている。2013年7月に韓国のグミ市での商用走行を開始し先行している。欧州でのEVバスのワ

Table 1 EVワイヤレス給電国際標準化動向(2016年12月時点)

標準化機関等	規格名	活動状況
IEC TC69	IEC61980-1	一般要件(2015年7月IS済)、改訂版の準備中
	IEC61980-2	制御通信(2017年春TS予定)
	IEC61980-3	磁界方式(2017年春TS予定)
ISO TC22 SC37	ISO19363	車両側の安全・相互接続性(2017年1月PAS)
SAE	J2954	米国の車両側の規格(2016年5月末TIR発行、2018年規格化)
	J2847	車両とインフラの通信規格
UL	UL2750	米国NEC(National Electric Code)対応の安全規格

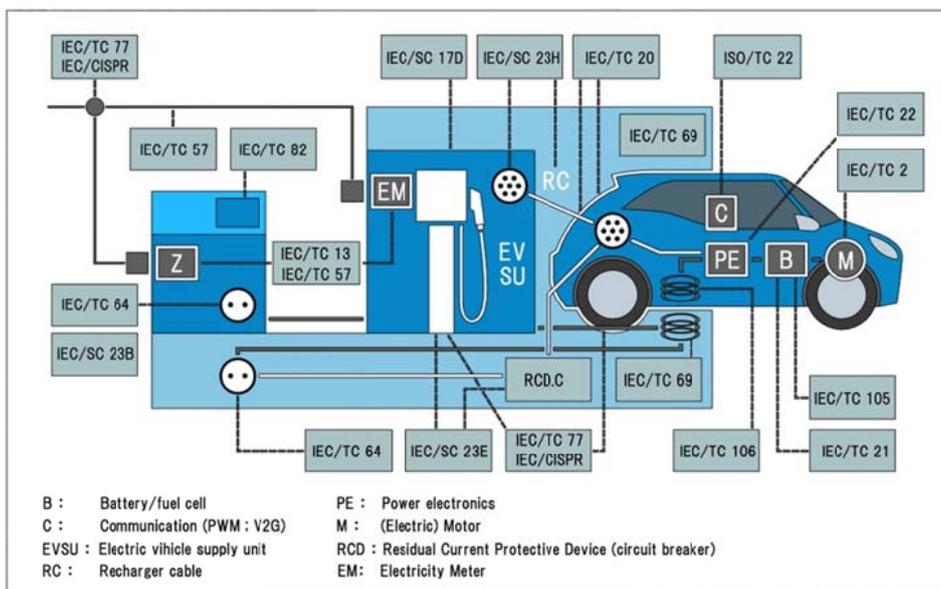


Fig 9 IECでのEV向け国際標準化分担



Fig 10 Qualcomm 社の WPT コイル製品群



Fig 11 Bombardier 社の車載 WPT コイル

ワイヤレス充電、商用運行では、ドイツの Braunschweig 市で Bombardier 社が 2015 年から EV バスの 200kW レベルの走行中充電の実証運行を開始している。英国でも Highway England から高速道路でのワイヤレス補充充電のシステムの計画が公表されている。EV 用のワイヤレス給電は 2006 年の MIT による磁界共鳴方式を用いた 2m のエアギャップでのエネルギー伝送の発表が契機となり本格化し、伝送ギャップが変動する乗用車型 EV への適用を強く促した。現在の国内制度見直し、国際標準化の焦点は、コンダクティブ充電での普通充電に対応する、7.7kW クラスであり、乗用車型 EV の国際標準に基づいた世界市場での拡大普及が期待される。一方で利用シーンは、バス、トラックさらにはトラムに至るまで、大電力かつ超急速充電への適用に広がっている。このシーンでは、日本では早稲田大学の試行・研究が際立っているが、海外では、韓国、欧州、米国、中国において、60kW、200kW 等の実証評価も盛んにおこなわれている。韓国の KAIST は 1 MW の計画まで公表している。大電力の試行においては、ワイヤレス給電と、他の自動化された接触式超急速充電とのシステム優位性の

検討が進められていくことになるであろう。すでに欧州では 350kW クラスの自動接触式超急速充電のバスが市街地を運行している。地球環境負荷軽減のために交通システムでの EV および e-mobility は重要な解決手段を提供する。電池および駆動モータシステムの一段の進展と相まって、ワイヤレス給電の重要性はますます増大すると考えられている。

【参考文献】

- 1) 経産省; EV・PHV ロードマップ検討会 報告書、2016 年 3 月 23 日
- 2) 監修; 堀洋一、横井行雄; 電気自動車のためのワイヤレス給電とインフラ構築、2011 年 3 月、CMC 出版
- 3) 監修; 篠原真毅; 電磁界結合型ワイヤレス給電技術、科学情報出版、2014 年 12 月
- 4) 監修; 篠原真毅; ワイヤレス電力伝送技術の研究開発と実用化の最前線、2016 年 8、CMC 出版
- 5) 総務省; 電気自動車用ワイヤレス電力伝送システムに関する技術的条件、国際無線障害特別委員会 (CISPR) の諸規格に関する情報通信審議会からの一部答申、2015 年 7 月 17 日
- 6) 久保田文人, “高周波利用設備・ISM 装置の規定と技術課題”, 電子情報通信学会誌, Vol.97, No.6, pp461, 2014.6
- 7) 総務省, “オタワ会議での審議結果”, 第 14 回電波利用環境委員会資料, 2014.1,
- 8) 総務省: (和訳抜粋) ICNIRP 声明 時間変化する電界および磁界へのばく露制限に関するガイドライン (1Hz から 100 kHz まで), 情報通信審議会 情報通信技術分科会 電波利用環境委員会 電波防護指針の在り方に関する検討作業班 (第 5 回) 配付資料 5-2 (2014)
- 9) 南方真人: EV/PHEV 用ワイヤレス給電システム国際標準化, OHM2015 年 5 月号 (2015)
- 10) 自動車技術ハンドブック第 7 分冊 設計「EV・ハイブリッド」編; 第 10 章、自動車技術会、2016 年 2 月
- 11) 横井行雄: 大電力化・走行中給電の実現に向けた国際・国内の状況, OHM, 2015 年 5 月号 (2015)
- 12) 横井行雄, “電気自動車用ワイヤレス充電-実証評価と標準化動向”, エネルギー総合工学, Vol.37, No.1, 2014.4
- 13) 横井行雄, “中国・欧州・日本の EV ワイヤレス充電事情”, Motor エレクトロニクス, No.6, 2017.1

走行中給電技術の展望

The prospects of the Dynamic Charging Technology

高橋 俊輔

Shunsuke TAKAHASHI

早稲田大学 環境総合研究センター

Waseda University Environmental Research Institute

1 EV への走行中ワイヤレス給電の必要性

EV の“電費”（単位電力量で走行可能な距離）は図1のように一般的には8~10km/kWh, 軽量化を進めた車種では12km/kWhになるが、車の販売価格に見合った搭載電池量を考えると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。Tesla などのように内燃機関車と同等の500km以上走れるEVはあるが、その“電費”を見てみると6km/kWhと最新の軽量化EVの1/2程度で、10年ほど前の第2次EV時代並の性能になってしまう。これは重い電池を多量に積んで走行距離を延ばしているためであって、CO₂削減を目指してのEV普及の点からは逆方向に行っていることになる。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、充電量からマイクロバスサイズか、大型バスの場合はプラグインハイブリッドバスを使用しての短距離ルート運用にならざるを得ない。

上記のようにEVがエンジン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。

高速道路を100km/hで走行中の4人乗り乗用車の動力は道路勾配が0%において15kW程度、マイクロバスで50kW程度、勾配が3%になるとそれぞれ30kW、95kW程度になると算定されることから、道路からの必要供給電力は重量車まで考えると10~200kW程度になると思われる。また車の最低地上高は軸距によって変わるが9~16cmで、市販大型トラックの実際の最低地上高は30cm程度である。図2にワイヤレス給電方式毎の伝送電力と伝送距離を示す。ここに走行中給電に求められる伝送電力10~200kWで伝送距離9~30cmの範囲を示すと、磁界結合型と呼ばれる電磁誘導式と磁界共振式で対応できることがわかる。ただ、条件によっては電波（マイクロ波）式や電界結合式でも走行中給電は可能である。なお、各ワイヤレス給電方式の詳細については紙面の関係で省略する。

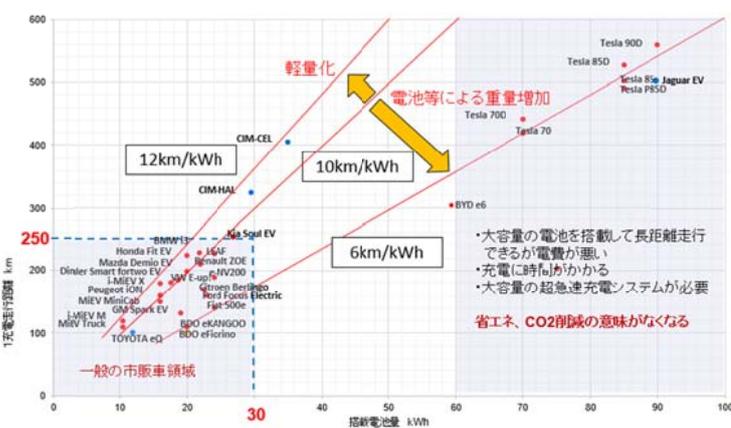


Fig 1 EVの電池搭載量と走行距離の関係

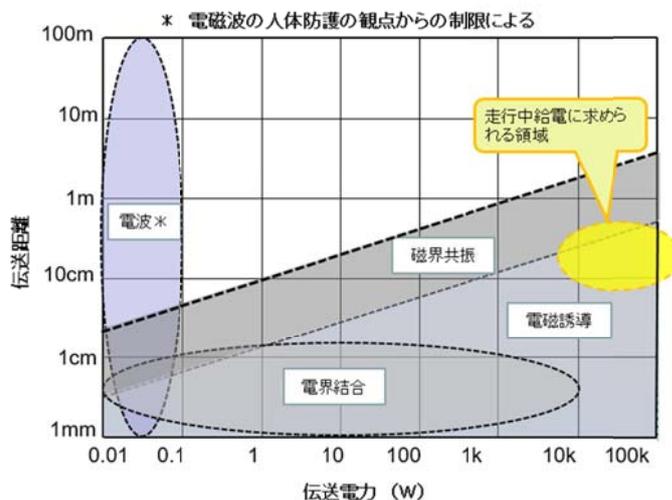


Fig 2 ワイヤレス給電方式の伝送電力と伝送距離

2 走行中ワイヤレス給電の変遷

電磁誘導式を含むワイヤレス給電には、静止型(図3 a)と移動型(図3 b)の2つの方式がある。静止型はヒゲ剃りなどの家電品やEV用として使われるように、給電中は送電コイルの直上にギャップを隔てて受電コイルを置いておく必要があり、移動体側に搭載した電池に電気エネルギーを充電する。移動型は、静止型の受電コイルのコアを取り去り、コイルをレール状に伸ばして給電線としたもので、ピックアップが給電線上にある限りは搬送車の移動中にも給電が可能である。ワイヤレス給電の当初の研究は、蓄電池の性能が低く大きく重いものであったためEVや搬送台車への走行中連続給電が主で、静止型はかなり後になって蓄電池性能の向上に伴い出現してくる。

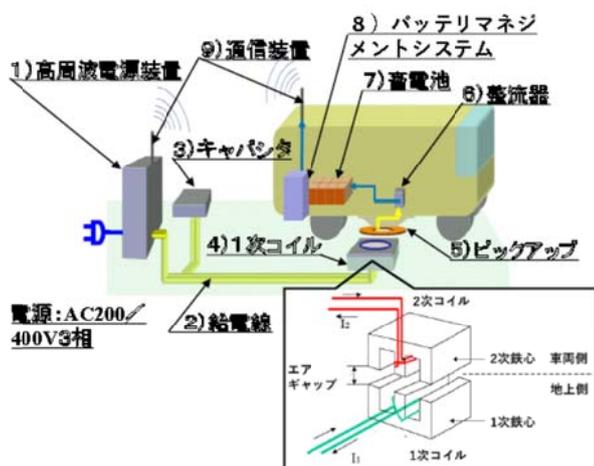


Fig 3a 静止型ワイヤレス給電システム

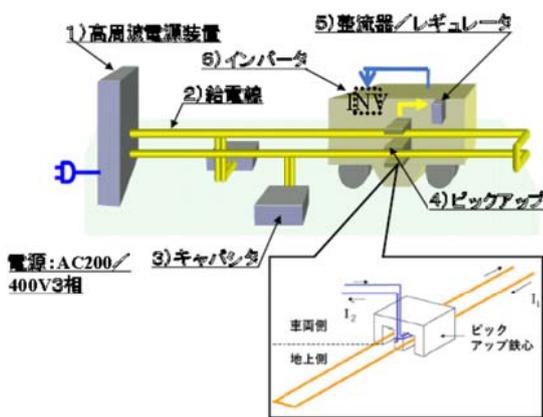


Fig 3b 移動型ワイヤレス給電システム

1978年、米国 Lawrence Berkeley Laboratory の J.G. Bolger らによって行われた EV 用電磁誘導式ワイヤレス給電システムの実験が走行中ワイヤレス給電開発の始まりと言える。20kW の出力を幅 60cm、長さ 1.52m のピックアップに伝送できたが、使用周波数が 180Hz と

う低周波であったため伝送効率は非常に低く、エアギャップも 1 インチと短く、当初考えていた走行中給電の実現は難しく、室内での台上試験のみで終わった(図4)¹⁾。

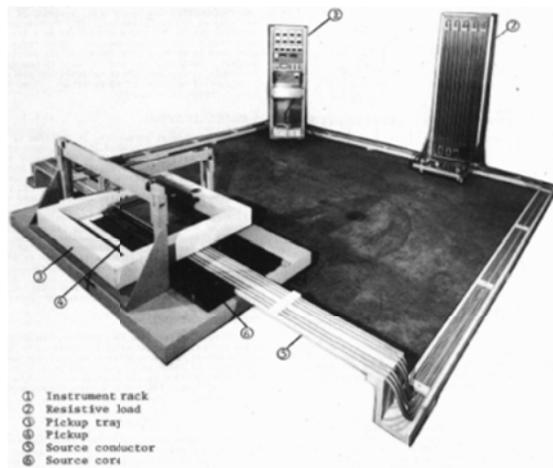


Fig 4 Bolger による実験システム

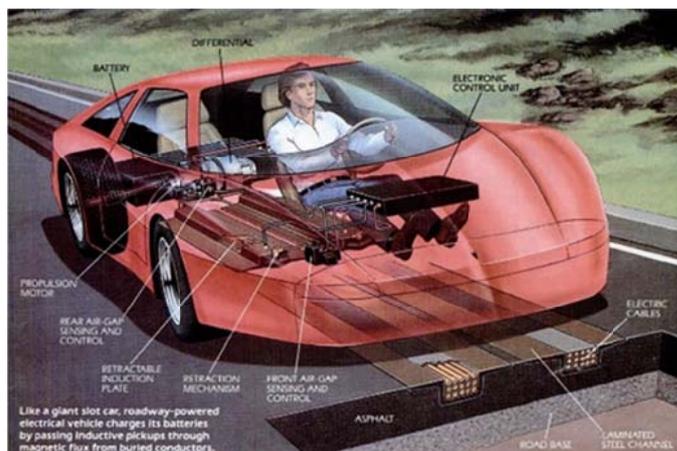


Fig 5 近未来の走行中給電EVの記事

実際に使われた最初のもは 1980 年代に米国で行われた PATH (Partners for Advanced Transit and Highway) プロジェクトでの 400 フィートのテストコースのうち 200 フィートにわたる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実験システムである。これは 1986 年に米国の K.Lashkari らが発表した道路に埋設した給電線からEVに走行中給電するシステム²⁾を使ったもので、道路に 1m 間隔で埋め込んだ 2本の 1.8cm 径アルミニウム給電線からの周波数 400Hz を用いた電磁誘導により、走行中の 7.7m 長ミニバスの底面に設置された幅 1m、長さ 4.4m で 545kg もの重量のある受電モジュールで受けることにより、エアギャップ 3 インチで 6~10kW の電力を受電でき、図5のように当時の技術雑誌に近未来のEVに燃料補給できる道が近づいていると紹介された³⁾。可聴域にあるシステムのバス内外での騒音は 40dBA と日常生活において非常に静かと言われるレベルであつ

た。しかし、共振回路、特に1次側について十分な検討がなされていなかったため、漏れインダクタンスにより電源力率が悪く効率が60%以下であったこと、地上から25cm高さでのコイルからの漏れ磁束密度が車内で $40\mu\text{T}$ 、車外で $1,500\mu\text{T}$ 、1m高さでもそれぞれ $2.5\mu\text{T}$ 、 $100\mu\text{T}$ と大きく実用には至らなかった。ちなみに1998年に制定された国際非電離放射線防護委員会(ICNIRP)における時間的に変化する電界及び磁界への公衆の曝露に関する磁束密度のガイドライン値は、 $f=25\sim 800\text{Hz}$ の周波数範囲では $50/f(\mu\text{T})$ と規定されているので、 400Hz では $0.125\mu\text{T}$ でしかなく、今ではとても許容できるレベルではなかった。なお、コイルの位置ずれを補正するために、車両側に油圧式ピックアップ支持装置が搭載されていて、地面に埋め込まれた信号線からの信号をトレースして、左右方向20cm、上下方向10cm動かすことができ、最適位置の25mm以内になるよう位置合わせをしているシステムであった⁴⁾。この結果から、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。

鉄道車両や航空機のメーカーのBombardierは、ドイツVahle社の電磁誘導式ワイヤレス給電システム、CPSに自社開発のPRIMOVE Technologyと呼ぶスイッチング技術を織り込んだ走行中給電システムを、2012年にFlanders' DRIVE research projectにおいてベルギーLommel市の0.62kmの道路に125mにわたって埋め込んで自社のMITRAC e-busへの走行中給電実証を行った。10kVの商用電源ラインから高周波電源装置により出力200kW、周波数20kHzにして送電コイルに供給、 $2\text{m}\times 1\text{m}$ サイズの受電コイルで80kWを受電、60kWhの搭載電池を充電した。地上の送電コイルは車体長より短い8.1m長さに区切られ、車両が上に来た送電コイルにだけ電流を流すPRIMOVE技術で電磁波の影響を最小限化していて、磁束密度はEU基準に適合している。各々の送電コイルの脇に沿って車両検知線を



Fig 6 コンクリート舗装路の埋設システム

設置し、コイルへの給電のスイッチングタイミング信号を送出している(図6)。実用化を目指し、送電コイルを埋設した道路の舗装材の効果を見るために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⁵⁾。

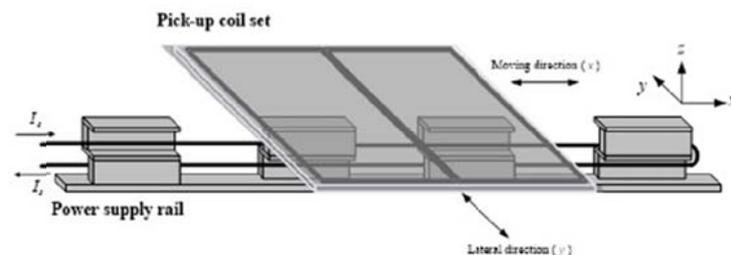


Fig 7 KAISTのS字型コア

韓国科学技術院(KAIST: Korea Advanced Institute of Science and Technology)は2009年以来、電磁誘導式のOLEV(On-Line Electric Vehicle)と呼ぶ走行中給電システムについて研究を進め、Segment methodと呼んでいるPRIMOVE技術に似たコイルのスイッチングにより電磁放射を少なくしたシステムを開発し、キャンパス内シャトル用のEVバスやYeosu(麗水)市でのExpo 2012でEVバスに搭載して実績を積み、これらをベースに2013年7月からDaejeon(大田)市の東90kmにあるGumi(亀尾)市で24km長の試験運用を開始した。ルートの両端のターミナルで静止中充電、途中の4か所それぞれ36mの走行中給電を行うものである。周波数20kHz、出力200kWのインバータからの電力を幅80cmの送電コイルから送電し、20cmギャップを通して容量20kW、サイズ $170\text{cm}\times 80\text{cm}$ の受電コイル5台で最大100kWを受電するもので、総合効率は約82%である。しかし、運行距離24kmのうちの僅か144mの間で走行中給電を行っているのみで、走行に必要な電力量の大部分は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。開発中の第4世代のシステムは送電コイル設置時間の短縮と建設コストを下げるため、図7のようにS字コアにして給電線を直線的に配置することで、同一ギャップ(20cm)での効率が80%とやや低くはなるものの、道路の開削幅を10cmほどに削減し、同時に電磁波漏洩量を従来の1/5以下にできた⁶⁾。

2013年、東亜道路工業は日産自動車と共同で給電コイル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し、KAIST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⁷⁾。

道路表層と基層は舗装打ち替え等のメンテナンスで、掘削埋め戻

しが路盤以下の層よりも頻りに繰り返される。そのため、送電コイルを表層や基層に埋設すると、送電コイルの管理に必要な経費がメンテナンスコストを押し上げる。2013年、国土技術政策総合研究所は大型模型での検討結果から、図8のように送電コイル埋め込み深さは道路メンテナンスの点から最低0.6m、できれば1mと結論づけた⁸⁾が、このギャップで電力電送を確保するのは至難である。

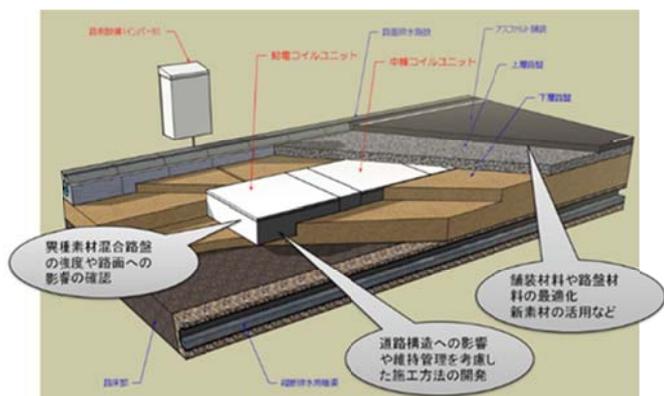


Fig 8 国総研による送電コイル埋設道



Fig 9 Utah 州立大学の走行中給電バス

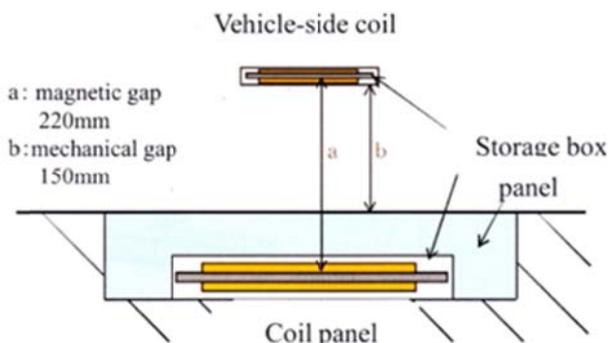


Fig 10 NEXCO 総研による送電コイル構造

2015年に米国 Utah 州立大学は、キャンパス内に送電コイルと道路構造をした長径500フィート、短径300フィートのオーバル形の試験

道路を設置し、図9のような走行中ワイヤレス給電電気バスと道路設備それぞれの経過観察を行っている。1/4マイルのテストコースに120フィート×2の走行中充電コースを設置し、周波数20kHz、最大25kWを8インチギャップにおいて効率85%で送電でき、最適点から6インチ離れても定格出力を維持できる。送電コイル構造は静止型と同じものを間隔をおいて並べ、車の進行に従いスイッチング回路で切り替えるシステムにしている⁹⁾。

2016年、高速道路総合技術研究所は路面表面近くに送電コイルを配置するため、図10のようにコイルを入れレジンで空間を満たした収納箱を組み込んだコンクリートパネルを路盤の上に置き、周囲もコンクリートを打設する方式を発表している。実験の結果、耐荷重と基準値($\mu 80 \geq 35$)を超えるすべり抵抗を持つコンクリート材料として超速硬ポリマーセメントモルタルを選定している。送電コイル構造はUtah 州立大学と同じように静止型を並べ、スイッチング回路で切り替えるシステムにしている¹⁰⁾。

Scania とスウェーデン王立研究所は、2016年6月からスウェーデン南部の Södertälje においてワイヤレス充電式プラグインハイブリッドバスの運行を開始した。実コンディションでのシステム検証が目的で、本運行に先立って実験された大型電動トラックに搭載された受電コイルは1m×2mの大きさと、出力が140kWから200kW、ギャップは30cm以上、効率は80~90%であった(図11)¹¹⁾。



Fig 11 Scania の走行中給電トラック

フランスの Satory 試験場で FABRIC が Vedecom と Qualcomm と一緒に2016年10月から実験開始したプロジェクトがあり、2017年春に結果が公表される見込みである。3相200kVAの商用電源から85kHzで100kWの電力が100mのテストコースに印加され、定常で60km/h(最高90km/h以上)で走る2台のEVに50kWずつ供給される。車検知のトリガーにより静止スイッチが送電コイルを切り替えるシステ

ムである¹²⁾¹³⁾。



Fig 12 英国の Electric Highways 構想図

公共の場での走行中給電実証計画が発表されながら、その後計画が進んでいないプロジェクトを以下に述べる。

英国政府は 2015 年 8 月に、252 ページの走行中給電に関する feasibility study 結果を公開すると共に、図 12 のように主要幹線道路に走行しながら充電が可能な EV 専用レーンを設ける Electric Highways の実験計画を発表し、試験道路システムを開発したい事業者に入札を求めた。英国運輸省は今後 5 年間で 5 億ポンドの予算を充てるとし、試験用充電レーンは早ければ 2015 年内にも着工、試験期間は 18 か月を予定していた。20cm ほどのギャップで給電する磁界共振式で、送電コイルの埋設工事に特殊な重機は使わず、既存のトレンチ掘削作業車や鉄道敷設用車両を利用して工事費のコストダウンを図っている¹⁴⁾。事業者が全て決まった時に、試験計画の詳細を公表するとしていたが、計画は延期になり、主体的役割を担う HIGHWAY ENGLAND はこのプロジェクトから降り、研究は THE UK Traffic Research Laboratory (TRL) にて実施されるとのことになった。

2013 年 9 月にスペインのアンダルシアエネルギー省が Malaga 市において電動バスへの走行中給電、静止中充電などの各種充電システムの検証を行う Project Victoria を実施すると発表した。コンソーシアムとしてはアンダルシアエネルギー省が 3.7 百万ユーロ (5 億円) の補助を行い、Malaga 市、大手エネルギー会社の Endesa、情報通信プロバイダーの ISOTROL と運用を行う Empresa Malagueña de Transportes それにデータ解析をする Malaga 大学が組み、2014 年末から 5km のルートで 21 ヶ月間運用することになっていたが、現在も実施されておらず計画のみで終わったものと思われる。充電システムとしては接触式充電 (夜間充電) 1 カ所、静止型ワイヤレス充電 2 カ所、走行中ワイヤレス給電 1 カ所を設置し、走行中給電システムは図 13 に示すようにコンバータ部が 25kW で 2 つの送電コイルに切り替えて

給電するインバータ部が 10kW なので、走行に必要な電力を供給するには小さいと思われる¹⁵⁾。

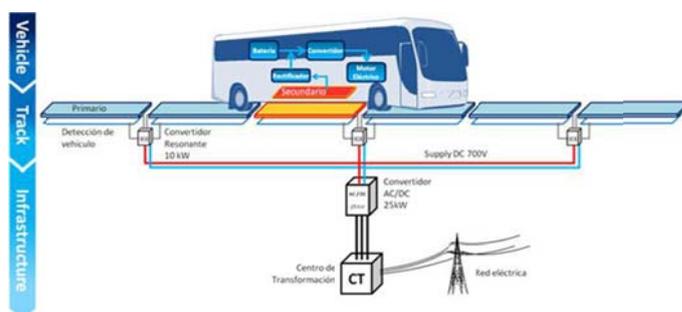


Fig 13 Malaga 市の Project Victoria 構想図

イタリアの Torino 市で Politecnico di Torino と CRF は周波数 150kHz 出力 20kW で 200m のテストコースで、また同市で SAET が 10~150kHz の間の共振周波数で 50m のテストコースで走行中給電の実証を計画しているが、開始したという話がない¹²⁾。

その他にもいろいろなプロジェクトが計画されているが、なかなか実現していない。それは 4 項に述べる課題がクリアされないためと思われる。

3 その他の走行中ワイヤレス給電システム

1) 接触式走行中給電

ワイヤレス給電ではないが、パンタグラフなどによる接触式走行中給電システムの最新動向を述べておく。

パンタグラフ接触式は電車やトロリーバスで古くから見られるが、2016 年 6 月にスウェーデン中部の Gävle 市で片側 2 車線の公道のうち外側の 1 車線の上部に電力を供給する 2km の架線が張られ Scania 製ハイブリッドトラックによる運用が始まった (図 14)。パンタグ



Fig 14 Scania の接触式走行中給電



Fig 15 Volvo の Slide In システム

ラフが架線から外れると、トラックは容量 5kWh のリチウムイオン電池蓄電池に充電した電力を使いながら最長 3km の走行が可能で、それ以降は通常のエンジンによるハイブリット走行となる。電力関連の技術は Siemens が開発した¹⁶⁾。

また、2013 年 5 月、Volvo がスウェーデンの Gothenburg 近くのテストコースで、400m の長さで道路に敷設した給電線から電動トラックへ接触給電する Slide In というシステムのデモを公開した(図 15)。これは 2003 年、フランス Bordeaux 市の LRT に採用された Alstom の子会社、Innorail が開発した「地表集電方式」と同じ、区間毎に給電ゾーンを区切って車が居ない所では給電しない方式を採用していて、地上敷設されていても感電しないシステムになっている¹⁷⁾。

2) 電界結合式走行中給電

送電側と受電側の LC 共振器間の「磁界」エネルギーを媒介にした磁界結合式ワイヤレス電力伝送が可能であれば、送電側と受電側にそれぞれ電極を設置し、電極が近接したときに発生する「電界」のエネルギーを媒介にした電界結合式ワイヤレス電力伝送もまた成り立つ。

電流により磁界を作らねばならない磁界結合式に対し、電界結合式は電界を利用するため電極間に電圧を印加するだけで良く、またフェライトコアやリッツ線コイルを用いないため、機器の重さやコストを低減できる。出力が大きな機器に対しても、接触させる面積を広げるだけで対応できる利点もあるが、共振回路の Q に応じて接合容量およびインダクタンスに高い電圧が印加されるので、空気中への放電を避けるために電界強度に上限が存在する。その結果、静電エネルギーは数 J/m³ 程度であり、小型車が対象になると思われる。電界結合の電極間はコンデンサと同じなので、磁界に比べて一様電界は比較的实现し易く、水平方向の位置ずれに対応しやすいが、送受電間の電極を近づける必要がある。また、送受電電極間の容量はギャップ

状態によって変化するので、共振条件を維持するためには、発信周波数またはインダクタンスを調整しなければならない課題もある。



Fig 16 豊橋技科大の電界結合式走行中給電

豊橋技術科学大学は、その課題を解決するため誘電体であるタイヤやアスファルトを利用し、路面下の電極板と 10cm のアスファルトを通しタイヤ内のスチールベルト間でキャパシタンスを形成、キャパシタンスを通して電極板とスチールベルト間に流れる高周波電流で電力伝送するシステムを開発した。周波数は MHz 帯で電極板～タイヤ間の伝送効率率は 70%程度である。2016 年 3 月に豊橋技術科学大学のキャンパス内において周波数 13.56MHz で出力 5kW を送電し、電池を搭載していないトヨタ車体のコムスを 10km/h の速度で走らせることに成功した(図 16)。ただ、車軸や地中電極の絶縁と雨に対する安全性検討はこれからである¹⁸⁾。

3) 無線(マイクロ波)式走行中給電

遠方にまで伝搬する電磁波を利用するのが無線式であるが、使用周波数は 2.45GHz などのマイクロ波帯が多く、送電されたマイクロ波電力をレクテナ(rectenna; rectifying antenna の略)と呼ばれる格子状に配置されたアンテナエレメントで受けたマイクロ波エネルギーを、順方向電圧降下が少ないショットキーバリアダイオードなどで直接、直流に変換することで電力伝送ができる。

無線式には、フェーズドアレイアンテナによる複数のアンテナ素子から放射されるマイクロ波の振幅と位相を制御、空間合成して任意のビーム形状を形成できる機能と、受電側からのマイクロ波ビームの送電方向を示す案内信号により任意の方向にビームを向けられる機能がある。この任意のビーム方向を制御できる機能を使用すると、図 17a)に示す照明灯のように設置したマイクロ波送電アンテナから走行中のトラックの動きに合わせてトラックの上部に連続して給電でき、

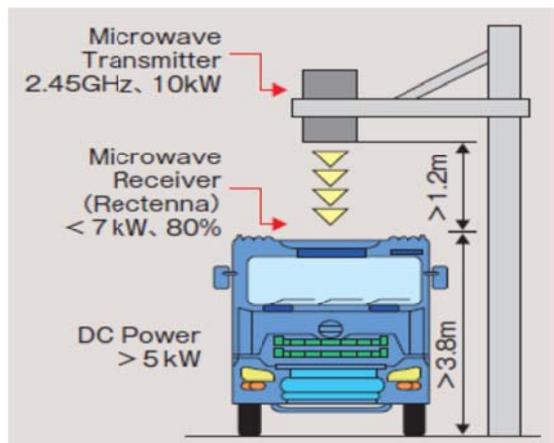


Fig 17a マイクロ波式走行中給電システムの構成図

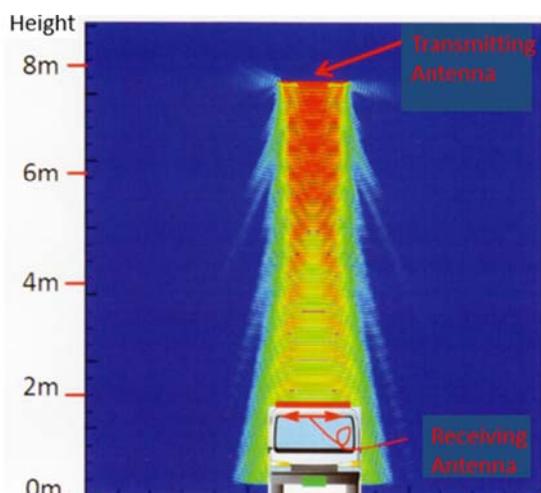


Fig 17b ビーム形状

ビーム形状も任意に絞れることで、図 17b)に示すようにレクテナの上にだけビームを絞って当てるシステムを構築できる。これにより電磁界結合式の走行中給電で給電コイルを道路上に設置する際の問題点を克服できる可能性がある。しかし、非常に高い高周波を扱うためデバイス損失が大きく全体効率が低い課題と、人体への電磁放射の安全性検証の問題があり、まだ電波暗室内でのレベルである¹⁹⁾²⁰⁾。

4 走行中ワイヤレス給電の課題

1) 電磁放射

ワイヤレス給電はエネルギー供給のために必要なワイヤの制約から解放されるメリットの反面、空間に放出される電磁界のエネルギーによる電磁環境が他のシステムに影響を及ぼす可能性が存在するため、電磁両立性(EMC)の確立(特にエミッションが規定条件範囲であること)が課題である。EMC は狭義には無線通信や電子機器への

干渉の問題であるが、広義には人体への影響の問題も含まれる。

静止中の充電では送受電コイルをしっかりと正対させると車体がシールドになって、外部への電磁放射を殆ど問題のないレベルに落とせるが、走行中給電では送電コイルの上を車体が移動しシールド効果が期待できない。PATH プロジェクトでは車体寸法に対して非常に長いアンテナ状のコイルであったため非常に大きな電磁漏洩があった。そこで PRIMOVE Technology や Segment method では送電コイルを短く分割し、スイッチング制御により車体の下にあるコイルだけに通电するシステムが考案された。しかしながら、Bombardier の送電コイル長さは 8.1m で車体長 12m より短くなっているが、この上を 100km/h で通過するには 0.3 秒ほどしか掛からない。スイッチング制御回路の応答時間等を考えると、次のコイルくらいは同時に通电しておく必要が考えられる。このような場合には車体が載っていないコイルからの電磁漏洩が発生する。

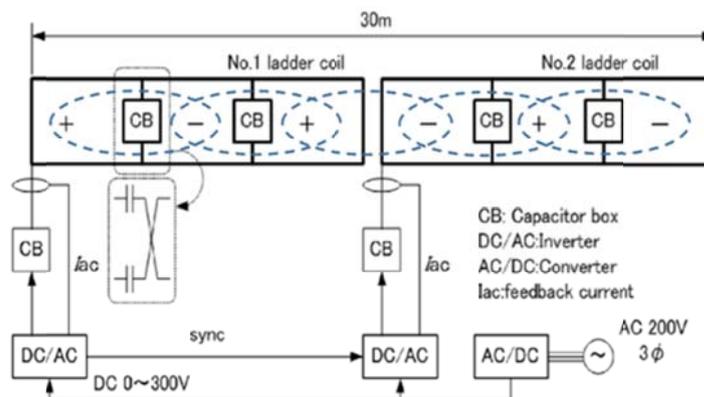


Fig 18 昭和飛行機工業の送電コイル構成図

これを解消する目的で昭和飛行機工業は、図 18 に示すように長いコイルを偶数回 5m ほどの区間毎に 180° 折り曲げることにより隣り合うコイルに互いに逆方向の磁束を発生させ、遠方から見ると互いに打ち消しあって電磁漏洩が少なくなる方法を開発した²¹⁾。

一方、走行中給電においても不要放射電磁界を計測する必要があるが、従来の電波暗室やオープンサイトでの測定法は 10m 法(供試体から 10m の地点で測定する方法)を基準に作られているため、車両を走行させながらの測定は困難である。新しい測定方法の確立、規格化が必要とされている²²⁾。

2) 道路上設置

公道上にワイヤレス給電の送電コイルを設置するにあたって、EV について、5,000 ± 250N の耐荷重性能と、8 ± 2 km/h の試験車両速度とする規格化が IEC61980 の Part3 で進められている²³⁾。一方、バスではまだ使用周波数帯をどうするかという入りの段階で、耐荷重等の議論には至っていない。そこで、国内では、コイル全面を樹脂コンクリートで覆うなどして、T10 クラス対応、すなわち軸重 10 トン、輪重 5 トンに道路の傾斜による偏りを考慮して 6 トン以上の耐荷重対策を施したコイルとしている。欧州では IPT Technology 社も Bombardier 社も同様の 6 トン以上の耐荷重としているが、中国 ZTE 社は T25 クラスの適用で 13 トンの耐荷重にしている。

しかしながら、これらは静止中給電において車が低速で送電コイル上に乗り上げることを想定している場合で、走行中給電では他の重量車での動荷重、段差がある場合には衝撃荷重、ブレーキング時を含む耐摩耗性、スリップ特性などの規定が求められる。

アスファルト舗装の一般的な施工は碎石を転圧後、150°C 前後のアスファルトを引き均し、130~140°C 前後の状態で片道 8~11 回の初期転圧をし、100~120°C 前後の状態で片道 3 回の 2 次転圧のあと 80°C 前後で片道 3 回程度の仕上げ転圧をしている。送電コイルをア

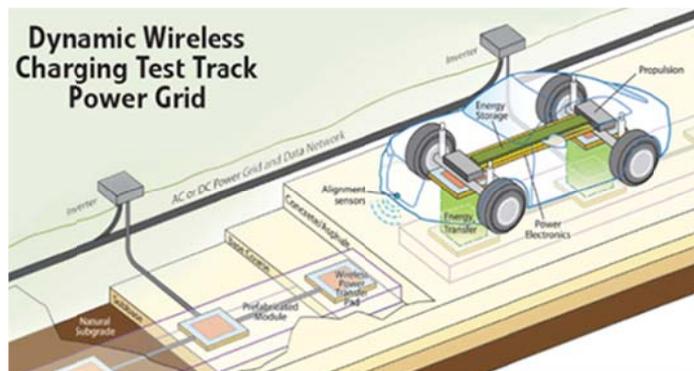


Fig 19 Utah 州立大学での道路構造

スファルト内に設置するとこの熱と転圧に耐えねばならない。そこで高速道路総合技術研究所は送電コイルを入れた収納箱を組み込んだコンクリートパネルを路盤の上に置き、周囲もコンクリートを打設する方式を発表している。しかしながら、最近の高速道路もハイドロプレーン現象による事故の減少に効果のある通水性アスファルト舗装が一般的に実施されているため、コンクリート被覆コイルとの経年性不陸による段差発生の問題がある。コイルと道路舗装材との間には無収縮モルタルを流し込んで不陸や剥がれが起きないようにしているが、直線では踏み付け荷重で無収縮モルタルにひび割れ等が発生し易くなるので、新たな工法が必要と考えられる。Utah 州立大学では、図 19 のような送電コイルと道路構造の走行中給電システムを試験道路に設置して電気バスを運用し、道路設備の経過状態を観察している²⁴⁾。

3) 正着性

ワイヤレス給電では送受電コイル間に位置ズレがあると、出力および効率の低下、電磁漏洩の増加と言った問題があり、特に走行中給電では送電コイル上に正確にトレースして走行しないと受電できず、途中で電欠を引き起こすことにもなる。静止中充電と同じように車体搭載カメラと画像処理でコイル位置あるいはラインをトレースする、あるいは図 20 のように準天頂衛星により精度補完された GPS を使った位置制御などが考えられているが²⁵⁾、今、自動車会社が熱心に取り組んでいる自動運転技術が実用化されれば、一気に解決される可能性がある。

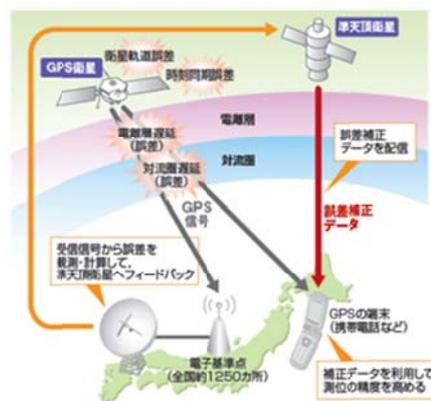


Fig 20 準天頂衛星による GPS 補完

以上のようにコイル構造の最適化で電磁漏洩が押さえられるようになり、コイルの埋設についてもいろいろな技術が検討・開発されつつある。また、受電コイルが地上コイルからずれると受電できなくなる問題も今、自動車会社が熱心に取り組んでいる自動運転技術が実用

化されれば、近い将来にハイウェイのワイヤレス給電レーンにおいて走行しながら給電を受ける EV を見ることができ、EV の進展を大きく加速させることであろう。

【参考文献または URL】

- 1) J.G. Bolger et al.: Inductive Power Coupling for an Electric Highway system ,28th IEEE Vehicular Technology Conference (1978)
- 2) K. Lashkari et al.: Inductive Power Transfer to an Electric Vehicle, Proc.8th Int. Electric Vehicle Symp.1986, pp.258-267(1986)
- 3) Popular Mechanics, 'Tech Update: Juiced-up roads to power Electric Cars'. Hearst Magazines, August 1990, Vol.167, Nr 8, page 17
- 4) PATH University of California Berkeley : "Roadway Powered Electric Vehicle Project Track Construction and Testing Program Phase 3D Final Report" California PATH Research Paper UCB-ITS-PRR-94-07, ISSN 10551425(1994)
- 5) C. Koebel : PRIMOVE-Inductive Power Transfer for Public Transportation , ETEV2012 Session2.3(2012)
- 6) C.Rim :The Development and Deployment of On-Line Electric Vehicles(OLEV),IEEE ECCE2013 SS3.2(2013)
- 7) 青木和直他 : 道路舗装の歴史と最新技術, 自動車技術, Vol.67, No.10, pp.29-36, (2012)
- 8) <http://www.nilim.go.jp/lab/qbg/bunya/foundation/wtps.html>
- 9) Z. Pantic : Review of Recent Advances in Dynamic and Omnidirectional Wireless Power Transfer, IEEE Industry Applications Society 2016, pp.27-36, (2016)
- 10) 神谷恵三他: 走行中非接触給電システム送電コイルの道路敷設技術開発, 自動車技術会, 2016 年春季大会学術講演会資料, pp.347-351, (2016)
- 11) D. Naberezhnykh : Latest Developments in Wireless Power Transfer for EVs, European Electric Vehicle Congress, (2015)
- 12) Y. Damousis: Dynamic charging for more efficient FEVs: The FABRIC project, UNPLUGGED Final Event, 26-03-2015
- 13) K. Nahrstedt : Electric Vehicles and Their Impact on Trustworthy Power Grid Informatics, University of Illinois, (2015)
- 14) <https://www.gov.uk/government/news/off-road-trials-for-electric-highways-technology>
- 15) <http://www.endesa.com/en/saladeprensa/noticias/wireless-en-route-charging-electric-buses>
- 16) <https://www.scania.com/group/en/worlds-first-electric-road-opens-in-sweden/>
- 17) <http://www.businessinsider.com/volvos-electric-road-for-charging-cars-2013-6>
- 18) 日本経済新聞電子版: EV の屋外走行中給電、豊橋技科大が実験に成功, 2016/3/23 6:00
- 19) 外村博史: マイクロ波方式のワイヤレス給電、商用車への適用の可能性, 自動車技術会ワイヤレス電力伝送技術委員会資料, 05-10-2012
- 20) 篠原真毅: A new microwave power supply system, 第3回マイクロ波無線送受電技術ビジネス化推進勉強会, 01-12-2016
- 21) 望月正志ほか: 2kW 走行中給電装置の開発, 自動車技術会 2015 年春季学術講演会フォーラム資料, 20-05-2015
- 22) 花澤理宏: ワイヤレス給電技術の実用化に向けた UL Japan の取り組み, 自動車技術会ワイヤレス電力伝送技術委員会資料, 09-12-2016
- 23) ELECTRIC VEHICLE WIRELESS POWER TRANSFER (WPT) SYSTEMS - Part 3: Specific requirements for the magnetic field wireless power transfer systems: IEC/TS 61980-3 /Ed.1, 2015/8/21
- 24) Charles Morris: Utah State University builds a dynamic wireless charging test track, Charged, (2015)
- 25) <http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/COLUMN/20090202/323987/>
- 26) KAIST OLEV Brochure 2010ver

電磁波による生体影響

Health Effects of Electromagnetic Fields

宮越 順二

Junji MIYAKOSHI

京都大学 生存圏研究所

Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

1 はじめに

二十世紀末から今世紀に入って、我々の生活環境には電磁波があふれるように飛び交っている。特に、世界中で携帯電話や無線LANの利用、携帯電話基地局の新設などが急速に進展したことが主な要因となっている。その他、高圧送電線、家庭内の電化製品、医療現場での電磁波、空港のセキュリティーチェックなどがある。さらに自動車の非接触充電を含む、電波によるワイヤレス給電(無線エネルギー伝送)の急速な普及が近い将来に予想される。近未来社会では、人が生活する上で、定常磁場、低周波、中間周波、高周波、さらにミリ波やテラヘルツ波など、多種多様な電磁環境は、ますます増加の一途をたどるであろう。電離放射線(極めて高い周波数の電磁波で、電離能力を持つ X 線やガンマ線)と同様に、電磁環境は目に見えないこともあり、このような背景から、電磁波の健康への影響について不安を抱いている人が多いのも事実である。低周波やマイクロ波の健康影響については、本格的な研究の歴史は放射線に比べれば非常に浅い。ここでは、国内外における非電離の電磁波生体影響研究の現状ならびに世界保健機関(WHO)や国際がん研究機関(IARC)をはじめとした国際機関の健康への評価をまとめる。電磁波の生体影響を科学的に正しく理解することに主眼をおくが、まだまだ未解明な

部分も多く残されている。日々の生活の中で、環境因子としての電磁波、特に、これまでに国際的に健康評価が実施された、極低周波(Extremely low frequency electromagnetic fields :ELF)と高周波(Radiofrequency electromagnetic fields :RF)について、その概要を述べる。さらに、電気自動車のワイヤレス給電技術の普及に向けて行わなければならない人体影響に関する安全性評価について、簡単に触れる。なお、定常磁場、商用周波を含む低周波や高周波の生体影響に関する詳細は、すでに刊行されている資料を参照されたい¹⁻⁵⁾。

2 歴史的背景

電磁波と健康に関する歴史的背景については、まず最初に、1979年に米国の疫学者が、高圧送電線の近くに住む子供の白血病発生率が高いことを発表したことが始まりである⁶⁾。その後、1990年代からこれまでに、非電離の電磁波の健康への影響について、国際的に研究や活発な議論が行われてきた。電磁波の発生源として、我々が現在から将来にかけて生活環境の中で曝される可能性が高いのは、医療、通信、家電、運輸など、幅広い周波数領域に渡っている。図.1は、非電離から電離までを含む周波数帯別にみた生活環境における電磁波発生源の例を示す。

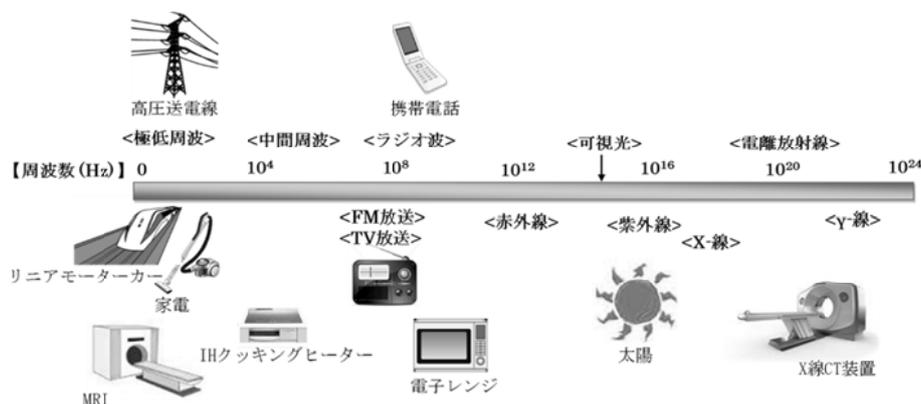


Fig 1 生活環境における周波数別電磁波発生源の例

以下に、これまでの電磁波と健康に関する研究やその評価の現状を紹介する。

3 電磁波の生体影響に関する評価研究

3.1. 概要

これまでに知られている非電離の電磁波に関する生体影響研究の成果としては、おおむね 100kHz の周波数で区切っている。ほぼ 100kHz より低周波帯では「刺激作用」、それより高周波帯では「熱作用」のあることが知られている。極低周波電磁波の細胞や動物レベルの生物学的研究結果では、生活環境レベル(おおむね 1 μ T, マイクロテスラ以下)では影響がなく、この数万倍(磁束密度で数mT)を超えると影響が出始めると考えられている。多くの電磁波生体影響研究に用いられている磁束密度は、居住環境における影響を主眼にしているため、そのばく露レベルは非常に低いものである。そのため、細胞や動物に対する顕著な影響が認められないのは当然かも知れない。

高周波については、強力なマイクロ波は、人体への発熱作用を利用した、がん治療、リュウマチや神経痛の理学療法など、臨床医学で応用されている。ただ、生活環境レベルのマイクロ波については、研究実績が少なく、不明な点が多かった。前述したように、1990 年後半からこれまでの十数年の間に、世界中の国々で携帯電話は急速に普及した。当初から、携帯電話は人の脳に近付けて使用するものであり、マイクロ波の影響として、脳腫瘍をはじめ、脳への影響として不

安視されるようになっていた。さらに、熱以外の、いわゆる「非熱作用」の有無について議論が高まり、特に子供への影響が問題視されてきた。

電磁波の生体影響を研究する主な手法としては、(1) ヒトの疫学研究やヒトのボランティア研究、(2) 動物実験研究、および(3) 細胞実験研究がある(表 1)。

また、研究の対象(ヒト、動物、および細胞)の違いで優劣はつけられないが、ヒトへの影響評価を行う場合、疫学(ヒト)研究→実験動物研究→細胞実験研究の順で結果の重みづけが高くなっている。一方、結果の精度や再現性については、細胞実験研究→実験動物研究→疫学研究の順で高く評価される。また、一般的に研究期間の長さもこの順で長くなる。ゲノムプロジェクトが十数年前に完了し、近年、DNA や遺伝子を標的とした研究が急速に発展している。そのため、以前に比べ、細胞研究の重みが大きくなりつつあると考えられる。

表 2 に、細胞レベル、動物レベルからヒト個体を対象として、これまで研究が行われてきている電磁波生体影響の主な評価指標をまとめた。研究内容の多くは、電磁波による発がん性への影響を評価することに主眼がおかれている。しかしながら、近年、細胞研究では免疫応答やストレス応答、アポトーシス(細胞が損傷したとき、生体に影響を及ぼさないように自滅すること)などの機能的側面からの研究も注目され始めている。疫学研究では、発がん以外のアルツハイマー症なども対象とし、評価指標が広がりつつある。

Table 1 電磁波生体影響研究の代表的な方法

疫学研究	ヒトを対象とした、電磁波と健康(主に発がん)の調査
動物研究	マウスやラットなどの動物を対象とした、電磁波による生体影響評価実験
細胞研究	ヒトやネズミなどの細胞を用いた、電磁波による影響評価のための細胞や遺伝子レベルの実験

研究分類	対象 Table 2	電磁波生体影響の主な評価指標 研究内容
細胞実験研究	細胞	細胞増殖, DNA 合成, 染色体異常, 姉妹染色分体異常, 小核形成, DNA 鎖切断, 遺伝子発現, シグナル伝達, イオンチャンネル, 突然変異, トランスフォーメーション, 細胞分化誘導, 細胞周期, アポトーシス, 免疫応答など
動物実験研究	実験動物 (ラット, マウスなど)	発がん(リンパ腫, 白血病, 脳腫瘍, 皮膚がん, 乳腺腫瘍, 肝臓がんなど), 生殖や発育(着床率, 胎仔体重, 奇形発生など), 行動異常, メラトニンを主とした神経内分泌, 免疫機能, 血液脳関門(BBB)など
疫学研究	ヒト	発がんやがん死亡(脳腫瘍, 小児および成人白血病, 乳がん, メラノーマ, リンパ腫など), 生殖能力, 自然流産, アルツハイマー症など
人体影響	ヒト	心理的・生理的影響(疲労, 頭痛, 不安感, 睡眠不足, 脳波, 心電図, 記憶力など), メラトニンを主とした神経内分泌, 免疫機能など

3.2. 疫学研究

疫学研究は、細胞や動物実験に比べて、ヒトのデータという意味で一般社会に対する結果の影響力は大きいものがある。しかしながら、その反面、我々人間はいろいろな環境で生活しており、研究の主題となる因子について純粋に調査することは不可能であり、結果を左右しかねない集団の選別方法や他の影響因子(選択バイアスや交絡因子という)が統計的評価を狂わす可能性は排除できない。前述したように、極低周波の発がん影響を初めて指摘したのは、1979年の疫学研究報告である。その後、国際的な議論が高まる中、1990年代には、欧米で数多くの極低周波に関する疫学研究が実施された⁷⁾。2000年に入って、我が国でも国立環境研究所のとりまとめで、この分野の疫学研究が初めて行われた⁸⁾。

極低周波(正確には ELF 磁場)と小児白血病の発生について、9カ国のプール分析(同じ目的を持った複数の疫学研究結果を総合的に分析する手法)結果は、 $0.4\mu\text{T}$ 未滿(ほぼ99.2%の家庭が対象となる)の生活環境に住んでいる子供の極低周波磁場ばく露と白血病発生リスクとの間には関連性がなく、「影響なし」と考えられる。しかしながら、居住環境の低周波磁場レベルが $0.4\mu\text{T}$ 以上の場合(約0.8%の子供が対象となる)、白血病の相対リスクがほぼ2倍に増加し、これら疫学研究のプール分析の結果では、統計的な有意性があることを示している⁹⁾。我が国での疫学研究結果もほぼ同じような傾向を示している⁸⁾。なお、小児の他のがんや成人のがんに関する疫学研究結果からは、低周波電磁波の「影響はない(関連性が認められない)」と考えられている。疫学研究での低周波磁場による小児白血病増加という結果について、これまでのところその生物学的な作用機構は明らかではなく、また、前述した、疫学研究結果の精度を下げる選択バイアスや交絡因子の可能性も完全には否定できないと考えられている。

IARC や WHO の極低周波に関する評価後、極低周波磁場ばく露と小児白血病発生リスクに関して、新たなプール分析の研究報告がなされた¹¹⁾。このプール分析は、電磁波環境測定の正確度を重視した七つのグループの疫学研究を対象としている。また、前述した我が国の疫学研究結果も含まれている。結論としては、Ahlbomらのまとめた9カ国のプール分析結果と大きな差はなく、後述する WHO の発がん性評価や環境保健クライテリアで総合的にまとめた評価を変更するものではないと述べられている。

一方、携帯電話を対象としたマイクロ波に関する疫学研究も、国際的に活発に行われてきた。大がかりな研究として、IARC がとりまとめる形で、日本、イギリス、スウェーデンなど13カ国(ただし米国は不参加)が参加して「The INTERPHONE Study」として行われた。種々の脳

腫瘍を疾患対象として、症例-対照研究(case-control study)で実施された。IARC では参加国全ての研究をとりまとめ、本国際共同研究の最終結論の概要を2010年5月にプレスリリースの形で発表した¹²⁾。結果をまとめると、(1)定常的携帯電話の使用者の神経膠腫と髄膜腫でオッズ比(OR:この例では、携帯電話非使用者の脳腫瘍発症確率に対する携帯電話使用者の発症確率の比)がやや低下した。(2)10年以上長期使用者についての、ORの上昇は観察されていない。(3)1640時間以上の累積長時間通話者で、神経膠腫のORが1.40(95%信頼区間:1.03~1.89)とわずかな増加を示した。結論として「10年以上の長期使用者に対する携帯電話使用による脳腫瘍(神経膠腫と髄膜腫)の上昇はないと考えられる。観察されたORの低下や、累積長時間通話者のORの上昇、その他、携帯使用側頭葉での神経膠腫の上昇など、因果関係の正確な解釈は難しい。」と述べている。

その他、多くの疫学研究で、発がん増加を示す証拠は見つかっていない。しかし、スウェーデンでの疫学プール分析に見られるように、2000時間を超える通話者は、神経膠腫が3倍になるという報告¹⁴⁾や、我が国の疫学研究で、1日20分以上の通話を超える場合に、聴神経腫瘍の増加を示唆する報告¹⁵⁾がある。なお、職業的なマイクロ波ばく露と脳腫瘍、白血病、リンパ腫などのがん、ラジオやテレビの電波塔、基地局などからの送信電波と発がん性については、明確な証拠は見つかっていない。子供の携帯電話使用と発がんに関する疫学研究は、Cefalo(デンマーク等3カ国が参加)とMobiKids(日本を含む15カ国が参加)の二つのプロジェクトが行われてきた。Cefaloのプロジェクトは研究が終了し、子供への統計的に有意な影響は認められていない¹⁶⁾。MobiKids研究¹⁰⁾は、2014年1月から、現在、EUのGERoNiMOプロジェクト(Generalized EMF research using novel methods. An integrated approach: from research to risk assessment and support to risk management.)と命名変更し、2018年までの5年間で、新しい大型研究を推進している。このプロジェクトは、これまでの疫学研究のみならず、実験では動物研究、細胞・分子レベルの研究も行っている。さらに、リスクマネジメントやコミュニケーションまでワークパッケージに含まれている。周波数領域も中間周波数帯が加わるなど、非常に幅広い研究計画となっている¹⁷⁾。

3.3. 動物実験

極低周波の電磁波生体影響評価として、マウスやラットを用いた動物実験での検証が1990年代を中心として、数多く進められてきた。多くの動物実験研究では、そのほとんどが発がんへの影響を検討するものであったが、その他、生殖に関するもの(胎仔の発育や催奇形性について)、神経系に関するもの(行動や感覚機能について)や免

疫機能に関するものも行われてきた。もし、極低周波ばく露が発がん過程に影響を及ぼしているとするれば、正常な細胞をがん化細胞へと変化させるのか(イニシエーション)、イニシエーションを受けた細胞が極低周波ばく露により更に悪性腫瘍形成を促進させるのか(プロモーション)、または、その両方とも関与するのか、大きな議論であった。検討された極低周波の磁束密度は数 μT から1mTまで幅広く行われ、結果として、ごく一部の研究において、極低周波ばく露により白血病や乳腺腫瘍の増加を認める報告はあったが、ほとんどの研究では、発がん影響はないという陰性結果であった¹⁸⁾。発がん以外の研究(生殖、行動、免疫など)に関する結果も同様で、ほとんどの報告がいわゆる「影響なし」であった。従って、これまで行われてきた動物実験からの検証において、明確な極低周波の影響は見られておらず、「影響あり」とする十分な証拠はない。

一方、高周波について、1997年にトランスジェニックマウスを用いて、電波のばく露により白血病が増加するという報告があり¹⁹⁾、2000年代に入り高周波電波の発がんへの影響評価はさらに活発に行われてきた。欧米や我が国を中心として動物実験研究が推進された。これまでの研究報告からは、2年間の長期ばく露、発がんしやすい動物を用いた研究で、ほとんどの結果はマイクロ波の影響を認めていない²⁰⁾。ただ、複合的発がん研究(化学物質とマイクロ波)では、発がんの増加が複数報告されている²¹⁻²³⁾。

2016年6月に米国から大規模な動物実験研究の中間報告²⁴⁾が、BioEM2016(ケント、ベルギー)の学会中に行われた。それは、National Institute of Health (NIH, 米国国立衛生研究所)のNational Toxicological Program (NTP) 研究の一つとして実施されている。中間報告の研究結果概要は以下の通りである。(1)寿命: 電波ばく露群の方が、コントロール群より、寿命が延びる傾向がある。(2)脳腫瘍: ばく露によりオスのラットで増加している(GSM(第2世代(2G)規格の通信方式の1つ)ではすべてのばく露、CDMA(第3世代(3G)規格の通信方式の1つ)では6W/kgのみ)。(3)心臓シュワンノーマ(心臓原発性の神経鞘腫、シュワン細胞の腫瘍): SAR(specific absorption rate; 比吸収率; 電波により生体の単位重量あたりに吸収されるエネルギーをW/kgで示したもの)依存的($\sim 6\text{W/kg}$)に、オスのラットにおいて、GSM, CDMAともに増加している。(4)メスのラットについて: すべてのばく露による、脳、心臓への影響は認められていない。中間報告書には未記載であるが、(5)細胞の遺伝毒性について: 脳細胞のコメットアッセイ(DNA鎖切断)試験では、SAR依存的に増加している。しかし、赤血球細胞の小核形成(細胞核フラグメントの分離)試験では、影響なしである。これはNIHの研究であり、権威が高く、国際的な影響は極めて大きい。しかし、現時点で中間報告であり、今後の研究の

進展について注視してゆく必要がある。

3.4. 細胞実験

細胞(分子・遺伝子レベルを含む)を対象とした電磁波影響研究は、世界各国で活発に行われてきている。数多くの論文発表があり、ここでは紙面の関係上、詳細は関連資料を参照されたい¹⁻⁵⁾。研究の多くは発がんとの関連性から、細胞の遺伝毒性(小核形成、DNA損傷、染色体異常、突然変異など)や機能的変化としての遺伝子発現(がん遺伝子、熱ショックタンパクを主体としたストレスタンパク発現など)に対する電磁波の影響検証が行われている。図2には染色体の分離、フラグメント形成や切断により生じる小核形成の一例を示す。細胞分裂期の2核細胞時に、核から分離した染色体断片(DNA)が小核として現れる。

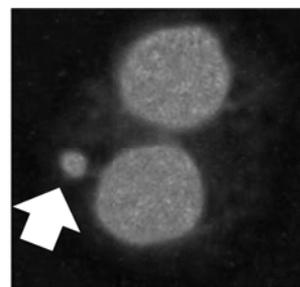


Fig 2 小核形成の例(矢印が小核)

生活環境レベル(おおむね $1\mu\text{T}$ 以下)の低周波については、初期の研究で陽性と報告された研究結果も、その後の研究で再現性に乏しく、「影響なし」または検出ができないほど極めて小さいものと考えられている¹⁸⁾。

携帯電話や基地局から発生する高周波についても、2000年以降、EU、米国、日本、韓国などで多くの研究が実施されてきた。これまでの研究成果から、細胞の遺伝毒性(発がん性に関与)については、電波による熱効果のないレベルでは、多くの報告は高周波の影響に否定的である。一方、細胞の代謝機能による産物の一つとして熱ショックタンパクに注目した研究が行われている。電波による非熱的な作用としてある種の熱ショックタンパク(たとえばHSP-27)産生が増加するという報告がある²⁵⁾。このことは携帯電話や基地局からの電波の生体影響を肯定的に捉える研究結果として、再現実験が行われている。この結果は、多くの研究室で確認されたものでなく、また、否定的な報告もあり、現時点では、科学的に明確な結論は出されていない。このように細胞を用いた研究は、遺伝毒性試験や非遺伝毒性試験(免疫機能、遺伝子発現(RNA、タンパク)、細胞情報伝達、酸化ストレス、アポトーシス、増殖能力など)で、一部の論文で“陽性”を示す

結果があるものの、発熱のない条件で、マイクロ波の作用機構として明確な証拠は得られていない²⁰⁾。

4 国際がん研究機関(IARC)や世界保健機関(WHO)の評価と動向

1990年以降、国際的に電磁波の健康影響に関する議論が高まる中、WHOは、1996年に国際電磁波プロジェクト(International EMF Project)を立ち上げた²⁶⁾。国際電磁波プロジェクトは、WHOの組織として、電離放射線の健康影響を担当する部署に所属している。また、このプロジェクトはシンポジウムやワークショップなどの開催をはじめとして、その時々における生体影響評価の現状報告や取り組むべき課題の提案などを行ってきた。

極低周波電磁波の発がん性評価については、IARC(リヨン、フランス)で2001年に評価会議が開催された。最初に特記すべきことは、IARCの発がん性評価は、発がんの定性的性質を評価する(単に証拠の強さを示す)ものであって、どの程度の発がん影響があるかという発がん性を定量化するものではない。この点をよく理解しないと、一般人のうちに誤解を与えかねない報道になることがある。

簡単にまとめると以下ようになる。(1)極低周波(ELF)磁場の発がん影響評価として「グループ2B」(発がん性があるかも知れない)と分類した。(2)この「グループ2B」の根拠として、疫学研究によりELF磁場が小児白血病の増加を示唆していることをあげている。グループ2Bの根拠としては、やはり疫学研究結果が大きく影響していた。なお詳細はIARCモノグラフ80巻を参照されたい¹⁸⁾。

その後、2005年にWHOは、がん以外の影響も含めてELF電磁波の生体影響評価を行うタスク会議を開催した。この会議は環境保健クライテリア(EHC: Environmental Health Criteria)を作成するためのもので、Web公表²⁷⁾は2007年6月、さらに2008年2月に刊行本として出版された²⁸⁾。全519ページの大作である。

マイクロ波については、2011年5月に、IARCで発がん性評価会議が開催された。評価会議に参加した15カ国30名のワーキンググループメンバーの結論は以下のとおりである。(1)疫学研究の評価:これまでの研究結果を総合すると、上述した一部の“陽性結果”を判断材料の基礎として、ワーキンググループは、「限定的証拠(Limited evidence in humans)」と評価した。(2)実験動物研究の評価:これまでの研究結果を総合すると、陰性の結果が多いものの、上述した一部の複合的発がん研究の“陽性結果”は発がんの証拠として認められ、ワーキンググループは、「限定的証拠(Limited evidence in experimental animals)」と評価した。(3)細胞実験研究の評価:一部の論文で“陽性”を示す結果があるものの、ワーキンググループの総合的判断として、「発がんメカニズムについては、弱い証拠(Weak

mechanistic evidence)」として評価した。(4)総合評価:ヒトの疫学研究および実験動物の発がん研究について、それぞれ「限定的証拠」と評価した。細胞研究などの「メカニズムとしての弱い証拠」も含めて、ワーキンググループのマイクロ波発がん性総合評価は、「グループ2B(Possibly carcinogenic to humans)(発がん性があるかもしれない)」と決定した。

今回のマイクロ波に関する「2B」の評価は、あくまで、携帯電話からの電磁波と脳腫瘍との関係を「限定的な証拠」として認めたものである。この結果は評価速報として、その概要が報告されている²⁰⁾。詳細は、モノグラフ102巻として、2013年に出版された²⁹⁾。なお、モノグラフ102巻が発刊されたとほぼ同時に、この評価委員の座長やIARC関係者らが、携帯電話の発がん性評価に関する独自のコメントを発表した³⁰⁾。今後も十分な情報を継続して社会へ発信することが重要であると述べている。

IARCがこれまでに発がん性を評価してきた、生活や労働環境の中の化学物質、電磁波、嗜好品、飲食(料)物、薬、労働環境、大気環境など、998項目に達している³¹⁾。(2016年10月現在)発がん性を評価・分類された各分類グループにおける該当総数とそれらの代表例を表3に示す。

WHOはIARCのマイクロ波発がん性評価を受けて、発がん以外の健康影響を含めた総合評価、環境保健クライテリア(Environmental Health Criteria:EHC)作成作業を2017年以降に予定している。WHOは、2014年9月30日に、EHCのドラフト³²⁾を公開し、同年12月15日まで、パブリックコメントを求めた。全14章からなっているが、ドラフトは第2章から第12章までが公開された。EHCについては、第1章(要約や推奨研究)、第13章(健康リスク評価)および第14章(防護対策)が重要であり、パブリックコメントの対応を含めて、タスク会議での結論を待たねばならない。

また、欧州委員会から要請された、新興および新規に同定される健康リスクに関する委員会(Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risk:SCENIHR)が2015年1月に、電磁界ばく露の健康影響の可能性に関する科学的意見(Opinion on Potential health effects of exposure to electromagnetic fields(EMF))を発表した³³⁾。RF電磁波に関する健康影響のまとめを要約すると、以下の通りである。

- ・ 疫学研究結果については、脳腫瘍のリスク上昇について、十分なエビデンスを示していない。頭頸部の他のがんや小児がんを含む他の悪性疾患のリスク上昇を示していない。
- ・ 初期の研究結果は、携帯電話のヘビーユーザーにおいて、神経膠腫および聴神経鞘腫のリスク増加の問題を提起した。直近の

Table 3 IARCによる発がん性の分類・評価とその代表例

分類	これまでの評価結果の例[998種]
グループ 1: 発がん性がある	アルコール飲料, 喫煙, 受動喫煙, 無煙たばこ, 電離放射線(全種類), 太陽光, 紫外線(波長 100~400nm), 紫外線を照射する日焼け装置, アスベスト(全形態), カドミウム及びカドミウム化合物, アフラトキシン 35, ベンゼン, ホルムアルデヒド, ディーゼルエンジン排ガス, トリクロロエチレン 37, 屋外大気汚染, 粒子状物質など [合計 119 種]
グループ 2A: おそらく発がん性がある	アクリルアミド 38, 無機鉛化合物, 熱いマテ茶, 日内リズムを乱す交代制勤務, マリア, テトラクロロエチレン 37, 木材などのバイオマス燃料の室内での燃焼, 赤肉(牛・豚・羊などの肉)など [合計 81 種]
グループ 2B: 発がん性があるかもしれない	鉛, 重油, ガソリン, コーヒー39, 漬物, メチル水銀化合物, クロロホルム, 超低周波磁場, ガソリンエンジン排ガス, 高周波電磁波(ワイヤレス式電話からのものを含む)など [合計 292 種]
グループ 3: 発がん性を分類できない	静電場, 静磁場, 超低周波電場, 蛍光灯, 原油, 軽油, カフェイン, お茶, マテ茶, 水銀及び無機水銀化合物, 有機鉛化合物, など [合計 505 種]
グループ 4: おそらく発がん性はない	カプロラクタム 40 [1 種]

コホート研究(ここでは携帯電話の使用頻度と脳腫瘍の発症率について、長期にわたる数十年単位で調査する前向き疫学手法)および発症率の時間に依存した研究によると、神経膠腫のリスク上昇の証拠は弱まっている。聴神経鞘腫とRFばく露の関連の可能性については未解決である。

- RFばく露が、覚醒時および睡眠時の脳電図(EEG)に影響するかもしれない結果が、最近の研究でさらに立証されている。ただ、小さな生理学的変化の生物学的意味は不明である。
- RFばく露がヒトの認知機能に影響を及ぼすという証拠はない。
- 現行のばく露限度値を下回るRFばく露レベルによる生殖および発達への有害な影響はない、と結論した先のSCENIHR意見書内容は、最近の研究データを含めても、この評価結果に変更はない。

5 電磁過敏症

マスコミなどでは、いわゆる「電磁波過敏症」と称しているが、正確には、WHOは「電氣的(電磁)過敏症(EHS: electrical hypersensitivity)」と呼んでいる。微弱な電磁波に曝されると、皮膚症状(発赤, 灼熱感など)や自律神経系症状(頭痛, 疲労感, めまい, 吐き気など)が現れる。原因と考えられる電磁波に、特別な周波数帯はなく、低周波でも高周波でも起こりうるらしい。WHOは、2004年に、

チェコのプラハ市でEHSのワークショップを開催した。また、WHOは電磁過敏症に関するファクトシートを発表している³⁴⁾。EHSは化学物質過敏症(いわゆるシックハウス症候群など)とは異なると考えられている。また、自覚症状を持つ「患者」に盲検法(患者はいつ電磁波に曝されたかわからない)でその因果関係が調査されてきたが、これまでのところ電磁波との関連性は全く認められていない。現時点でEHSに関する科学的データから、WHOは電磁波の影響としては否定の立場をとっている。しかし、特に、重篤な自覚症状を訴える人もいるので、科学的証拠の有無の追求や医療でのケアは行わねばならないと考える。

6 電磁波の生体影響とリスクコミュニケーション

上述のように、現代社会はいたるところで電気をエネルギーとして動いており、さらに情報通信をはじめ、生活環境における多種多様な電磁波利用の役割は極めて大きく、この流れは、将来にかけてますます加速してゆくものと考えられる。利便性が高くなる一方で、電磁波に対する危惧、特に健康への影響について不安を抱く人々が多いことも事実である。ここで取り上げた電磁波は、低周波や高周波で、電離能力もなく、一般的に「放射線」といわれている電離能力のあるエックス線やガンマ線とは異なる電磁波である。エネルギー面からいえば、細胞のDNAを直接傷つけることは考えにくいところだが、一般

社会における「電磁波」ということばは、「放射線」と同じように受け止められているようにも思われる。関係省庁(経済産業省, 総務省, 環境省など)やその関連機関では, ホームページを利用するなど一般の人々への周知に努力している³⁵⁻³⁹⁾。生体影響研究を進めつつ, このように電磁波と健康の理解にはリスクコミュニケーションも重要な役割を果たしている。

7 電気自動車の非接触充電・給電の普及に向けての人体影響に関する安全性評価

現在は, 環境因子の安全性に関して, 常に社会的注目を浴びている。新しい電波利用技術の普及についても, 生体影響評価が十分に行われ, 安全性が確認されていることが前提条件となる。上述したように, 電磁波(場)という観点からは, 商用周波の ELF と高周波の RF (数百 MHz~2.4GHz)については, 国際的評価はほぼ完了している。電気自動車のワイヤレス電力伝送(WPT)システムに関しては, 一例として 80kHz 前後の周波数を想定しており, この周波数帯はこれまでに行われた生体影響研究が極めて少ない。さらに, 多くの人(少なくとも1~10万人, それ以上)に対してのばく露経験もなく, この周波数帯での対象となる疾患を想定した疫学研究は不可能であると考えられる。

最初のステップとしては, 電気自動車の WPT システムを想定したばく露評価, 適合性確認(方法も含めて)を行わなければならない⁴⁰⁾。停車中の電気自動車への充電は人が立ち入る可能性がある距離(人体接近距離, 20cmと想定している)における人体, 走行中の WPT による給電については, 車内での人体, それぞれに対するばく露評価と適合性確認が必要となる。生体影響評価研究としては, ばく露評価による強度レベルを基準として, 細胞と実験動物を対象とした研究が主体となるであろう。さらに, 体内植え込み医療機器に対する影響評価も行わなければならない。このように, 電気自動車の非接触充電・給電の普及に向けては, 電波防護指針を遵守していることはもちろんだが, その安全性を担保するための医学・生物学領域における影響評価研究も重要な位置を占めるものと考えられる。

8 おわりに

電磁波生命科学は, その主たる目標の一つとしては, 科学的に信頼のおける研究成果から, 電磁波の生体影響を正当に評価することにある。その一方, 環境レベルをはるかに超えた磁束密度での生体, 細胞や高分子重合体などの電磁波応答研究の成果も本分野の将来への発展につながる重要なものである。これらの成果は, 電磁波の線量-効果関係(現在のところ, 低周波の場合, 線量を磁束密度や誘

導電流, 高周波の場合, 線量を電波のエネルギー比吸収率としており, さらにばく露時間も因子として加えている)に基づいたしきい値の推定を可能とする。

携帯電話をはじめとして, ワイヤレス給電の分野でも, 工学的技術の進歩は目を見張るものがある。その一方, 電磁波は新しい環境因子として, 社会的に注目されることも考えておかなければならない。電気自動車のワイヤレス給電システム(走行中も含む)など, 非接触エネルギー伝送技術をはじめとして, 近い将来の電磁波利用は高まるばかりである。このように増加の一途をたどる将来の電磁環境を考えると, 電磁波の安全性を科学的なデータから判断するため, 未解明な部分については, 生命科学の先端技術を駆使して, 研究を推進してゆく必要があると考える。

【参考文献】

- 1) 宮越順二(編者): 電磁場生命科学. 京都大学学術出版会, 2005
- 2) Kato M (Ed.): Electromagnetics in Biology. Springer, Japan, 2006
- 3) James C. Lin (Ed.): Health Effects of Cell Phone Radiation. Advances in Electromagnetic Fields in Living Systems Vol. 5, Springer, New York, 2009
- 4) 篠原直毅(監修), 宮越順二(共著): ワイヤレス送電技術の最前線, エレクトロニクスシリーズ, シーエムシー出版, 2011
- 5) Miyakoshi J.: Cellular and Molecular Responses to Radio-Frequency Electromagnetic Fields. Proceedings of the IEEE. Vol.101: 1494-1502 June 2013
- 6) Wertheimer N, et al: Electrical wiring configurations and childhood cancer. Am J Epidemiol 109: 273-284, 1979
- 7) Kheifets L, et al: Review; Childhood Leukemia and EMF: Review of the Epidemiologic Evidence. Bioelectromagnetics Supplement 7: S51-S59, 2005
- 8) Kabuto M, et al: Childhood leukemia and magnetic fields in Japan: a case-control study of childhood leukemia and residential power-frequency magnetic fields in Japan. Int J Cancer 119: 643-650, 2006
- 9) Ahlbom A, et al: A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukaemia. Br J Cancer 83: 692-698, 2000
- 10) <http://www.crealradiation.com/index.php/en/mobi-kids-home>
- 11) Kheifets L, Ahlbom A, Crespi CM, Draper G, haghara J, Lowenthal RM, mezei G, Oksuzyan S, Schüz J, Swanson J, et al: Pooled analysis of recent studies on magnetic fields and

- childhood leukaemia. *Br J Cancer* 103: 1128–1135, 2010
- 12) INTERPHONESTUDY
(http://www.iarc.fr/en/media-centre/pr/2010/pdfs/pr200_E.pdf#search='IARCWHO Press Release No. 200')
- 13) Cardis E, et al.: Risk of brain tumours in relation to estimated RF dose from mobile phones – results from five Interphone countries. *Occup Env Med*, published online June 9. DOI:10.1136/oemed-2011-100155, 2011
- 14) Hardell L, et al.: Pooled analysis of case-control studies on malignant brain tumours and the use of mobile and cordless phones including living and deceased subjects. *Int J Oncol*, 38: 1465–74, 2011
- 15) Sato Y, et al.: A case-case study of mobile phone use and acoustic neuroma risk in Japan. *Bioelectromagnetics*, 32: 85–93, 2011
- 16) Aydin D.: Mobile Phone Use and Brain Tumors in Children and Adolescents: A Multicenter Case-Control Study. *Natl Cancer Inst*, 103: 1–13, 2011
- 17) GERoNiMOProject
(<http://www.crealradiation.com/index.php/en/geronimo-home>)
- 18) IARC Monograph on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Vol. 80, Part 1, Static and Extremely Low-frequency Electromagnetic Fields. 2002
- 19) Repacholi MH, et al: Lymphomas in E-Pim1 transgenic mice exposed to pulsed 900 MHz electromagnetic fields. *Radiat Res* 147: 631–640, 1997
- 20) News: Carcinogenicity of Radiofrequency electromagnetic fields, The Lancet Oncology (online June 22, 2011) *Lancet Oncology*. Volume 12, Issue 7, Pages 624 – 626
- 21) Szmigielski S, et al: Accelerated development of spontaneous and benzopyrene-induced skin cancer in mice exposed to 2450-MHz microwave radiation. *Bioelectromagnetics*, 3: 179–191, 1982.
- 22) Tillmann T.: Indication of cocarcinogenic potential of chronic UMTS-modulated radiofrequency exposure in an ethylnitrosoures mouse model. *Int. J. Radiat. Biol.*, 86: 529–541, 2010.
- 23) Heikkinen P, et al: No effects of radiofrequency radiation on 3-chloro-4-(dichloromethyl)-5-hydroxy-2(5H)-franoone-induce d tumorigenesis in female Wister rats. *Radiat. Res.*, 166: 397–408. 2006
- 24) <http://dx.doi.org/10.1101/055699>
- 25) Leszczynski D., et al: Non-thermal activation of the hsp27/p38MAPK stress pathway by mobile phone radiation in human endothelial cells: molecular mechanism for cancer- and blood-brain barrier-related effects. *Differentiation* 70: 120–129, 2002.
- 26) <http://www.who.int/peh-emf/project/en/>
- 27) http://www.who.int/peh-emf/publications/elf_ehc/en/index.html
- 28) WHO: Extremely Low Frequency Fields–Environmental Health Criteria N° 238–, 2008
- 29) IARC Working Group: Non-Ionizing Radiation, Part 2: Radiofrequency Electromagnetic Fields. Vol. 102, IARC Monographs on The Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2013
- 30) Samet JM., et al: Mobile Phones and Cancer –Next Steps After the 2011 IARC Review-. *Epidemiology*, 25: 23–27, 2014
- 31) <http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/>
- 32) http://www.who.int/peh-emf/research/rf_ehc_page/en/
- 33) http://ec.europa.eu/health/scientific_committees/emerging/opinions/index_en.htm
- 34) <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs296/en/index.html>
- 35) <http://www.tele.soumu.go.jp/j/ele/index.htm>
- 36) http://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/sangyo/electric/detail/setsubi_denjikai.html
- 37) <http://www.env.go.jp/chemi/electric/index.html>
- 38) <http://www.iee.or.jp>
- 39) <http://www.ieice.org/jpn/>
- 40) 和氣加奈子: ワイヤレス電力伝送システムに対する人体防護を考慮した技術基準について, 第2回人体の電磁界ばく露評価研究会, NICT/EMC-net, 首都大学東京秋葉原サテライトキャンパス, (2015)

ガソリン筒内噴射の開発史

(連載第 3 回) Bendix Electrojector の登場とその進化を中心に

The Technical History of Gasoline Direct Injection

The Appearance of "Bendix Electrojector" and its Evolution -The 3rd serial article-

調 尚孝

株式会社 日本自動車部品総合研究所

Naotaka SHIRABE

NIPPON SOKEN, INC.

8. 前史:ソレノイドの燃料噴射弁への適用

銅線をコイル状に巻き、中に鉄心を入れコイルに通電すると鉄心は他の磁性金属を吸引するというソレノイド(電磁石)の原理は誰でも知っており、現在様々な工業用途に使われている。この電気-機械仕事変換を燃料供給装置の一部、特に弁機構に使用するという発想は技術者として当然の着想と思われる。1913年、アメリカの Thomas T. Gaff がまず電磁弁を燃料系に使う特許を出願したといわれているが、その構造は定かでない。その後のことになるが、アメリカのカリフォルニア州 Oakland にかけて Atlas Imperial(1916年創立)⁵⁸⁾ というディーゼルエンジンの製造会社があった。この Atlas Imperial 社の Brooks Walker と Harry E. Kennedy という技術者が 1933年、(記録に残るものとして)初めてディーゼルエンジン用にソレノイドを燃料噴射弁に適用し、電磁弁(電磁式燃料噴射弁)という概念を作り上げた(米国特許⁵⁹⁾)。この電磁弁を Fig.37 に示す。これが燃料噴射に採用された電磁弁の原点と思われる。これまで油圧とスプリングの力だけで開閉していたノズルが電気的信号で(外部から自在に)開閉制御できるようになったのである。これを当時実に、ディーゼルコモンレール式の噴射弁として使ったとの記述がある⁶⁰⁾。この Kennedy らの電磁弁構造は当時としては極めて先進的で、既にステータコアを積層化して渦電流損を抑制した構造を取っており、0.05inch(1.27mm)のストロークで弁を高速に開閉できたとのことである。

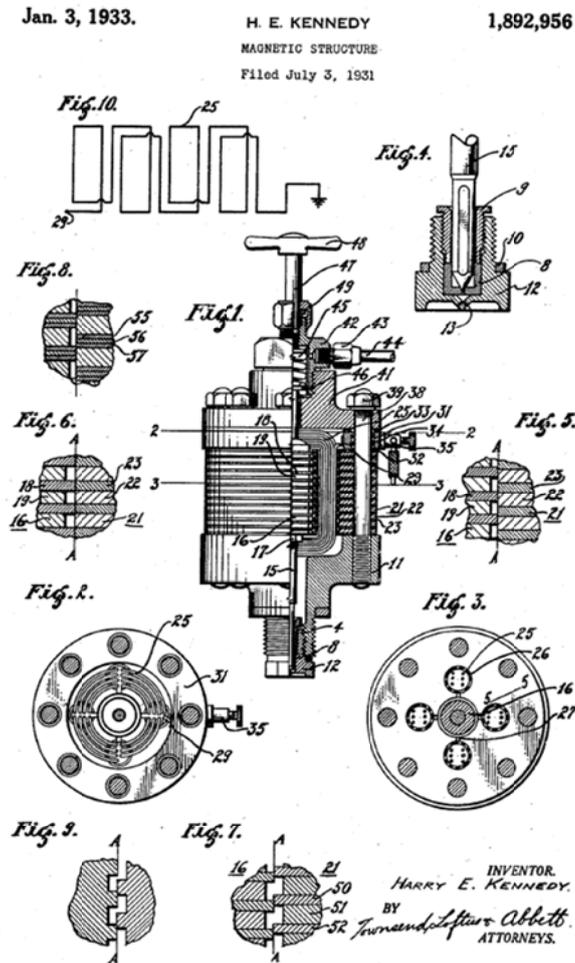


Fig. 37 Magnetically Actuated Nozzle (Atlas-Imperial) by H.E.Kennedy (US Patent No. 1,892,956)

9. Bendix 社の Electrojector の登場

9.1. Bendix の SAE 発表(1957 年)とそのシステムの作動

本節は吸気管噴射の話であり、本稿の主旨から一見外れるように思われるかもしれないが、後の筒内噴射も含めた電子制御噴射装置全体の進化にとって重要な位置づけとなるトピックであるため、あえて説明を加え紙数を割くことにした。

1957 年に Bendix 社の技術者 Sutton らが SAE に“Electrojector”に関する論文^{61),62)}を提出し、この論文は当時のガソリン噴射装置開発者たちの間で一大センセーションを巻き起こしたことは既に述べた。この技術内容について以降解説する。棚澤泰先生の書かれたシステム図(Fig.38⁶³⁾)が参考になる。現在の燃料噴射に関わる技術者なら Fig.38 をひと目みて気づくと思うが、スピードデンシティ方式の電子制御式燃料噴射装置の基本骨格が 1957 年当時で既に出来上がっていたことが分かる。なお、SAE Paper⁶¹⁾では著者である Sutton らの所属会社名が Bendix Aviation Corporation となっており、この開発は航空機用燃料供給系開発部門の技術者が担当していたことがうかがえる。ドイツで航空機技術が自動車に降りて初の筒内噴射搭載エンジンが実用化されたと同様、米国でも航空機における燃料噴射技術が自動車に降りてきたのである。当時の Bendix 社の Electrojector 技術の基盤として 4.2 節で解説した航空機用の Bendix-Stromberg Pressure Carburetor(噴射気化器)があったことは言うまでもない。

まず、Fig.38 でシステムの作動を詳細に説明する⁶³⁾。ガソリンは燃料タンク 8、ポンプ 7、フィルター 5、絞り 9 を経由して常に 20psi(約 1.5 気圧)位の圧力を持って循環し続ける。ソレノイド電磁弁 10 のコイル 11 に矩形型の電圧信号を入力して電流が流れると、磁気作用によって、針弁 13 は上に吸上げられ、ノズル 14 から、吸気弁 41 に向かって、ガソリン 15 を噴射する。ガソリンは吸気弁のヘッドに衝突して微粒化する。噴射量は電流の流れている時間、言い換えると矩形波の幅を加減して行い、幅が広ければ噴射量は多くなる。矩形波の周期は点火用の分配器と同軸についている回転式断続器(triggering selector)11 によって制御される。噴射する時期になると断続器の回路が閉じて、パルス電流を発生する。このパルスが 2 から変調器(modulator)に入ると、規則正しい周期と幅を持つ矩形波に直され、さらに機関の運転状態を検出する部分(sensor)からの信号を 4 から受けて幅を変化し、電流の強さ、すなわち矩形波の高さも一定値まで増幅されて、ソレノイド 11 を通り、電磁弁 10 の開いている時間を制御する。始動時に、濃い混合気を供給するためには検出用の抵抗 33 が働く。すなわち始動用ボタンを押すと、コイル 36 に電池から電流が流れ、軟鉄棒 35 はコイル 36 中に吸込まれ、抵抗のアームは時計方向にまわって抵抗を増す。抵抗が増すと、矩形波の幅が広くなり、ガソリンの噴射量を増す。34 はバイ・メタル製の平スプリングで、暑い時は中に巻き込むので抵抗は少なくなり、寒い時には逆に抵抗が大きくなる。38 は微速空転用の抵抗で絞り弁 40 と連動し、絞り弁が閉じている状態では抵抗は大きくなる。抵抗 32 は加速時に濃い混合気を供給するためのもので、絞り弁を急に開いて加速しようとする時、吸気管内の圧力は増し、空気室 28 内の圧力もこれに等しくなる。ただし空気室 26 内の圧力は絞り 31 があるため、すぐには高くならず少し遅れる。そのためダイヤフラム 27 は、スプリング 25 に反抗して上がり、電気接点 30 と 29 がはなれるため、抵抗 32 が入り、抵抗が大きくなる。したがってガソリン噴射量が増す。抵抗 21 は吸気管内圧力によるスピードデンシティ空燃比制御を行なわせるもので、空気室 22 中の圧力が上がると、ピストン 23 が下がり、アームは時計方向に回されて抵抗が増す。24 のタップは、機関がある程度以上に減速する時は噴射を休止して、燃料カットを図るためのものである。抵抗 18 は高度調節(高地補正)用で、ベローズ 20 中に一定気圧の気体をつめておき、外気圧が下がるとアーム 19 があがって抵抗 18 は少なくなる。

以上がシステムの作動説明だが、前出の Sutton らの論文⁶¹⁾ではシステムの基本機能として(1)燃料系統、(2)インジェクションコントローラ(噴射時期の規正とその各気筒への分配を行う)、(3)吸入負圧検出器、(4)エレクトロニックモジュレータ、その他に分けて解説している。以下、前述の部分と一部重複するところもあるが、Sutton らの SAE 論文原文⁶¹⁾を基に(1)~(4)について概説する。図は JAN P. NORBYE の書籍⁶⁴⁾から引用した。現在のポート噴射システムの原形(原点)はまさしくここにあった。

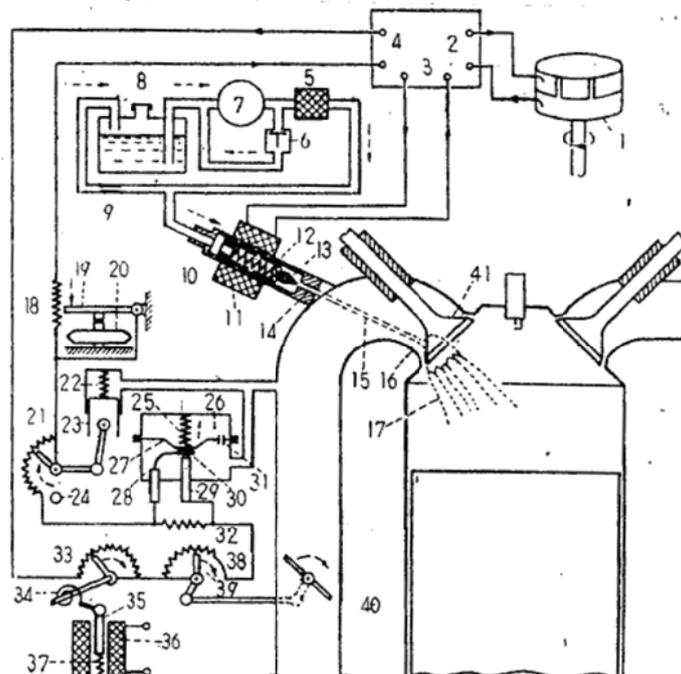


Fig. 38 “Bendix ELECTROJECTOR” Manifold Injection System

(1) 燃料系統

Fig.39 は基本的な燃料系統を示している。燃料は燃料タンクよりフィードポンプによって汲み上げられる。フィードポンプは電氣的に駆動され、エンジンの各気筒にあるインジェクタに通ずるパイプ内の圧力を $20 \pm 1/2$ psi に保っている。このフィードポンプは噴射する燃料を計量するわけではない。フィードポンプとインジェクタの間には燃料フィルターがある。燃料の濾過程度は $20 \mu m$ で良い。と云うのは燃料系統には機械的に滑動する精密嵌合部分がないからである。今までの経路によると、燃料は吸入バルブの頭に向けて噴射させるのが一番良好な結果になることが判明している。この場合に吸入管壁面に湿りが最小になるからである。燃料がオイルタンクへ帰る回路は燃料回路中より空気及び燃料蒸気を追い出す作用を受たせるためにもうけてある。燃料系統はボンネット内の高温にさらされたり、エンジン停止中パイプに燃料がなくなったりすることがあっても、現在まで空気や燃料蒸気によってエンジン不調になったことはない。ソレノイドインジェクタは Fig.40 に示されている。燃料はインジェクタの頭部から入り、コアの孔を通り、インジェクタのパイプがバルブシートからはなれて開くと、下部の噴口から噴射される。このソレノイド・インジェクタは、数多い実験の後に始めて、高速でも作動が確実に噴射に変動なく、消費馬力も低い、適当な値段のものが出来上がったのである。ソレノイド・インジェクタはこの噴射系に用いられている他の装置と同様に、気化器とは、全く違った新しいもので、現在でも尚、製作の簡易化と性能向上を期するために絶えざる改良が加えられている

(2) インジェクションコントローラ(噴射開始時期の制御ならびに各気筒への配分を行う部分)

時期を定めて継続的に噴射する方式を採用している。標準のエンジンディストリビューターにインジェクションコントローラとロータ(回転子)とが付け加えられた。それらのものはディストリビューターの架台と標準のイグニッションディストリビューター・キャップとの間にサンドウィッチ式に挿入されている。インジェクションコントローラの中には一対のブレーカーポイントとディストリビューティング・コミテーターとがあり、コミテーターには各ソレノイドインジェクタに対応する部分がある。ブレーカーは、通常の点火用ポイントを動かせるカムで動かされる。従ってエンジンが2回転する間に、インジェクター・ブレーカーポイントは、エンジンシリンダー数と同じ回数だけ断続する。ブレーカーポイントが接続される毎に、電流パルスが発生される引き金の役目を果たす(電流パルスの立ち上がり時期を規正する。)衝撃信号がエレクトロニックモジュレータに伝わる。その後変形された信号がインジェクションコントローラのセレクトラ部に返信され、電流パルスはちょうど噴射順序に当たっているインジェクタに分配される。Fig.41 はエレクトロニックモジュレータとインジェクションコントローラとがこの噴射系中にどんな風に配置されているかを示すものである。インジェクションコントローラを通じてエンジンの回転数、噴射時期が感受され、パルス電流が正しい時期に個々のインジェクタに分配されるのである。コミテーターセグメントは噴射系の電気回路を断続することがないし、ブレーカーポイントより伝えられる電氣的エネルギーも小さいので、インジェクションコントローラの寿命は相当長いものだと言って差支えない。ディストリビューターを少し変えるだけで、エンジンの駆動方式にエレクトロインジェクタを採用することが出来る。

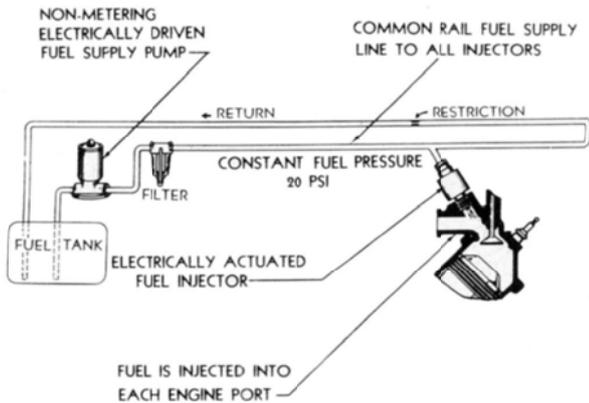


Fig. 39 Bendix Electrojector system featured timed injection into intake ports with a 20-psi common rail fuel line

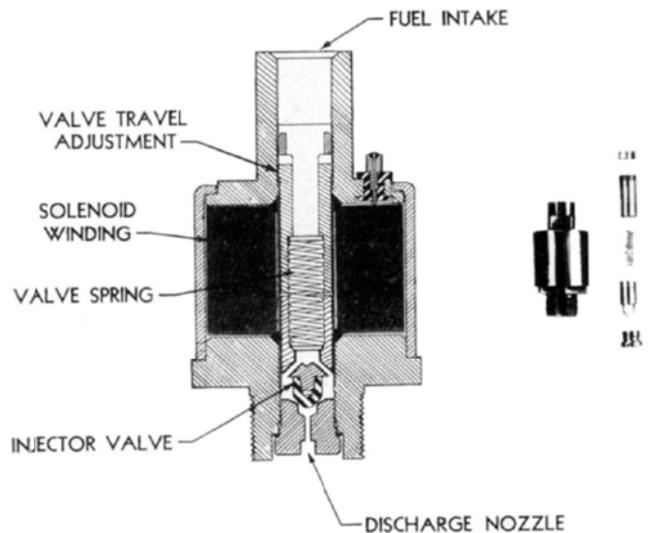


Fig. 40 Electrojector included a valve operated by a solenoid according to electronic signals. Fuel entered at the top end and was discharged in spray form from the nozzle at the bottom

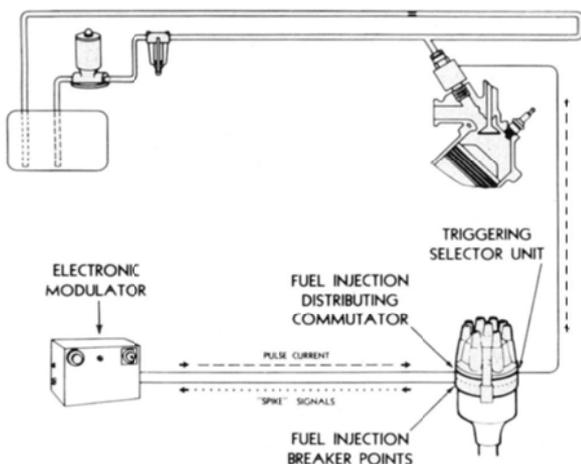


Fig. 41 Timing Pulse are sent to the injectors from the triggering selector unit (assembled as a part of the normal ignition distributor). Opening duration is determined by the electronic modulator in accordance with speed and load(manifold pressure)

(3) エレクトロニックモジュレータ

エレクトロニックモジュレータすなわち「頭脳箱」の第一番の作用は、インジェクションコントローラより伝えられるスパイクシグナル(短い信号)を、ある標準の幅をもった電流パルスに変えることである。エンジンの各部に取り付けられている検出装置からエンジンの運転状態に応じて発せられる信号も、同様にエレクトロニックモジュレータに入って来る。外から入ってきたこれらの信号はエレクトロニックモジュレータ中の標準幅電流パルスを送る回路中に加え合わされ、標準幅の電流パルスがエンジンの状態に合うように修正される。修正された電流パルスはインジェクションコントローラ中のセクタ部に伝えられ、そこからちょうど噴射時期に当たっているインジェクターに電流パルスを送ることになる。その機能は、真空管を使わないので、トランジスタによって行わせる(Fig.42)というのは、真空管と違って、加熱時間がいらず、電池から消費する電流が極めて小さいからである。(但し、初期試作品には真空管を用いていた。)

(4) 吸入負圧検出部

標準型だがもっと大きな絞り弁がエンジンへの気流を調整するのに用いられる。絞り弁筐に吸入負圧検出部があつて、信号をエレクトロニックモジュレータに送っている。信号はエンジンに送り込まれる空気密度の相対値を示すものである。Fig.43はその略図で、吸入管負圧検出部の作用を説明している。その傍らに絞り弁筐の写りが載せてある。実際の抵抗特性はエンジンの構造並びに型式が変わって来るであろう。原理としては、この検出部は、他のすべての検出部と同様に、ソレノイドインジェクタに伝えられる電流パルスの幅を調整する基本回路の抵抗を増しているのであつて、検出回路の抵抗が増すとパルスの幅が大きくなり、従ってインジェクタが開いている時間が長くなり、噴射量が増す事になる。

その他、SAE Paper⁶¹⁾では「加速時の過剰燃料の取扱い」、「アイドル時の過剰燃料の取扱い」及び「冷間時始動時の制御」について解説がなされている。

日本では Bendix 社のこの基本特許が昭和 33 年(1958 年)に公告⁶⁵⁾されており、前出 Sutton らが出願者となっている。この特許における代表的な図を Fig.44 に示す。

次節でガソリンエンジンで重要となる供給燃料の基本的な制御方法について解説する。ガソリンエンジンでは、目標とする空燃比を設定して吸入した空気量に見合う燃料量を供給するという考えから空燃比制御方法と言うこともできる。

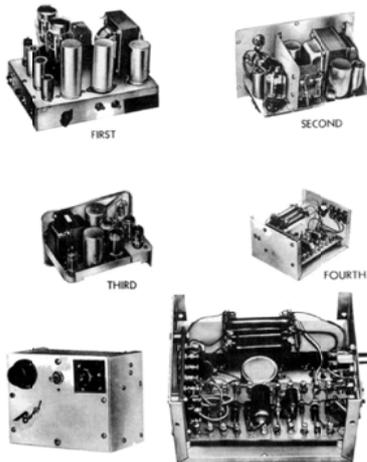


Fig. 42 Four generation of electronic modulator were built and tested before the first production unit was developed. Bendix began with vacuum tubes, which needed time for warmup before they could be brought into function. Size came down progressively. The final version is not shown to the same scale as its predecessors, but corresponds closely with the dimension of the fourth generation unit

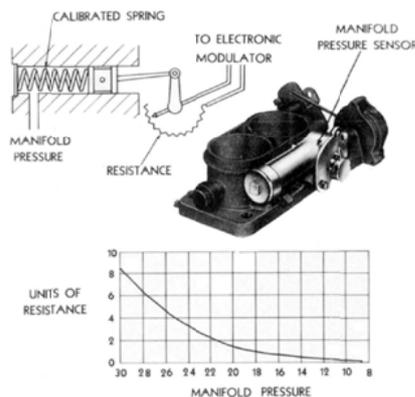


Fig. 43 The manifold pressure sensor worked with a spring-loaded diaphragm whose motions were relayed by a crank mechanism that enabled a transducer to send quantified signals to the modulator.

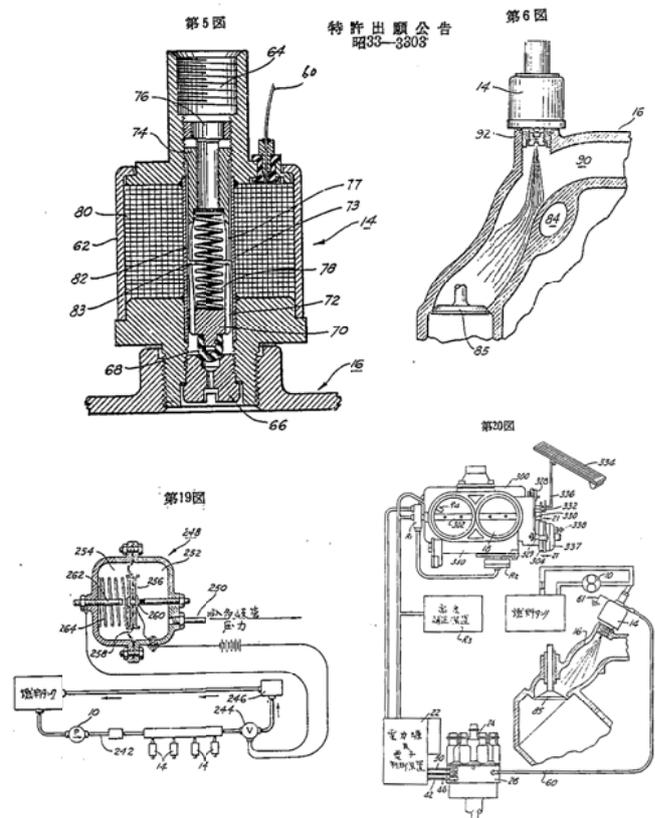


Fig. 44 Figures from the Japanese Examined Patent Publication (No.Shouwa33-3303) applied by Bendix

9.2. 空燃比制御方法の基本的な考え方

ガソリンエンジンへの燃料供給量の制御方法には大きく次の3つの考え方がある。

- (1) マスフローコントロール方式 (Mass Flow Control)
- (2) スピード デンシティ コントロール方式 (Speed Density Control)
- (3) スロットル スピード コントロール方式 (Throttle Speed Control)

概念図を Fig.45 に示す⁶⁶⁾。以下それぞれ解説する。

(1) マスフロー コントロール方式

吸入空気量を直接計測する方式で、毎時の吸入空気量(質量)を Q 、エンジン回転数を N とした時、エンジン1回転あたりの吸入空気量は Q/N となり、この時要求燃料噴射量(質量)を q 、所定の空燃比を λ とすると、 $q = 1/\lambda \cdot Q/N$ となる。これが基本制御式である。吸入空気量を検出する流量センサが必要となる。マスフローとは吸入空気の質量流量を意味する。のちにこの考え方でシステムを実用化した Bosch 社の L-Jetronic(1974) や K-Jetronic(1973)はこのマスフロー方式である。(L は Luftmengen: 空気計測, K は Kontinuierliche Einspritzung: 連続噴射を意味する)

(2) スピード デンシティ コントロール方式

吸気管圧力 p を計測する方式で、空気の比重を γ_a 、空気温度を T_a 、気筒数を n 、気筒容積を V 、容積効率を η_v とすると 4 サイクル機関では $Q/N = n \cdot \eta_v \cdot V \cdot \gamma_a / 2$ となり、一方 $\eta_v \approx k_1(p/T_a)$ であるから、 $Q \approx k_2 \cdot (p/T_a) \cdot \gamma_a \cdot N$ となる(k_1, k_2 は定数)。この式に N と γ_a が含まれるのでスピードデンシティと呼ばれる所以である。吸入空気量は吸気管圧力 p に比例したもとなる。実際には燃料噴射量 q は吸気管圧力 p とエンジン回転数 N の基本関数と考えて負荷に応じて p と N のマップを作って燃料噴射量の制御を行う。吸気管圧力を検出するセンサが必要となる。ちなみにこれは 1978 年に GM によって実用化された世界初の点火時期電子進角制御方式である MISAR(Microprocessed Sensing and Automatic Regulation)⁶⁷⁾も同じ考え方を採用している。この方式は先に述べた Bendix Ejectorjet やその後実用化された Bosch 社の D-Jetronic(1967)に採用されている。(D は Druckmengen: 圧力計測を意味する) また古くは先の章で述べた Messerschmitt DB エンジンに搭載された筒内噴射装置の燃料制御もスピードデンシティコントロール方式であった。

(3) スロットル スピード コントロール方式

スロットル弁開度 α (角度) が吸入空気量に比例するという考えから、燃料噴射量を α と N と関数として制御する方法である。 αN (アルファ・エヌ) 方式という言い方もする。最も単純な方式ではあるがスロットル弁開度と吸入空気量の関係はリニアではなく、小開度の時は吸入空気量に敏感で大開度では鈍感であるため制御が難しい。スロットル開度を直接検出することから過渡の制御レスポンスに優れレースで使用されたことはあるが、この方式で実用化された例はない。

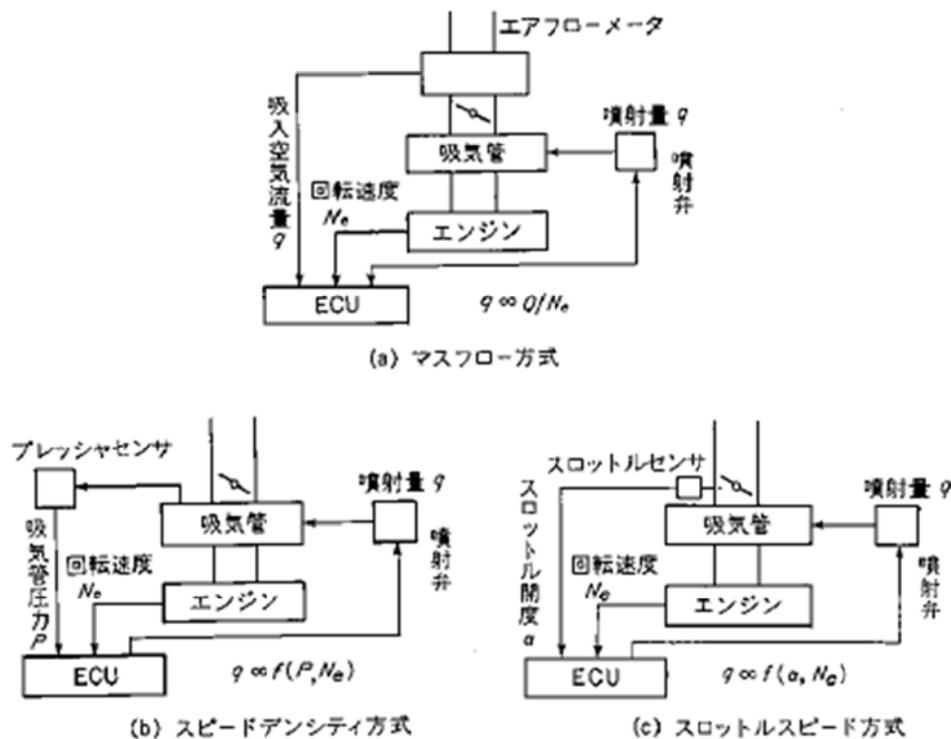


Fig. 45 Three Ways to control Air-Fuel Ratio in gasoline engine

9.3. Bendix Electrojector のその後

これまでの解説で明らかなように Electrojector やそれを構成する部品やシステムは、現在のポート噴射システムのほぼ基本骨格をなすものであった。Bendix 社は 1957 年にこのシステムを公表して Chrysler の Plymouth Dodge, DESolo に搭載することを発表した⁶⁸⁾。その後 1958 年にオプション設定で 300 台ほど販売されたとの記述があるがそれ以降発売されることはなかった⁶⁹⁾。その理由はなぜであろうか？ Electrojector とそのシステムの技術的なレベルは当時としては決して低くなく、Bendix 社は気化器を意識してか「エンジンの設計変更を最小限に」ということを標榜した。そのことも技術的に重要なことであるがやはり信頼性やコストの問題もあったのかもしれない。Electrojector システムが不調でリコールされたという記述⁶⁸⁾もありそうしたことが要因かもしれない。だが、ひと言で言えば「早すぎた」ということではないだろうか？ 電子制御化しても気化器よりかなり高価で気化器と同等かそれより少しエンジンの性能向上が得られることにどれだけの価値が認められたのであろうか？ このあたりは技術者がよく陥りやすい自己満足の世界で、社会や顧客はその時それを求めていたのだろうか？ 加えて 1957 年の発表当時に自動車にトランジスタを使用するという信頼性面の抵抗感があったものと推定する。1947 年に Shockley らがトランジスタを発明して高価ながらも民生用に使われつつあったが、1957 年時点でこれを自動車に使うということは大きな冒険であったと思われる。

しかしながら、Bendix 社の特許はその後基本中の基本として効力を発揮し、そのライセンスはその後の燃料噴射装置サプライヤに大きな影響を与えてきた。一点だけ Bendix 社が標榜しなかったことが「空燃比制御性の良さ」である。吸入空気量を制度良く検出し、燃料噴射量を噴射期間で制御し空燃比制御精度を確保するというのを、気化器では多大な工数をかけて燃料通路に設けた多数のオリフィスの径を(カン・コツで)選択してベンチュリから吸い出される燃料量の変えることになる。「エンジンの設計変更を最小限に」ということ以上にこの「空燃比制御性の良さ」に目を付けたのが欧州の燃料噴射の雄 Bosch 社であった。しかし彼らのシステムの実用化までさらに 10 年の歳月が必要であった。

9.4. Bosch による電子制御式吸気管噴射システムの実用化⁷⁰⁾

この動きの起源は米国カリフォルニア州の空にある。既に 1943 年にはロサンゼルスでスモッグの発生が社会問題化していた。1952 年にはカリフォルニア工科大学教授がこのスモッグの原因は自動車排出ガス(特に排気中の NO₂ と炭化水素)が紫外線(太陽光)により光化学反応を起こすことにあり、その結果人体や植物に有害影響をもたらすと指摘した。

Bosch は自動車排出ガスをクリーンにしてカリフォルニアに青い空を取り戻すには、「空燃比制御性の良い」電子制御式燃料噴射装置がかならず必要になる時代がやってくると考えたのである。Bosch は Bendix からライセンス供与を受け、Electrojector 発表から 5 年後の 1962 年、電子制御式燃料噴射装置の開発をスタートさせた。その頃の社会の動きは 1960 年カリフォルニア州で自動車汚染規制法が成立(施行 1965 年 7 月)し、1965 年には連邦政府として大気浄化法(Clean Air Act)が加えられ 1968 年式の新車から連邦統一の排出ガス規制が適用されることになる。ガソリン噴射への期待はもはやエンジン性能向上でなく排気中の有害成分の低減に向けられ、そのためには気化器からのコスト上昇を容認するという土壌が整ったのである。

Bosch はついに 1967 年、商品名 Jetronic(当初は D-が付いていなかったが、その後いろんな方式が派生したので識別するためにのちに D-Jetronic となる)を発表し、VW1600 LE/TLE(対米仕様で 1968 年モデルとして開発されたもの)に電子制御式燃料噴射装置を搭載することになる⁷¹⁾。少量販売で世界初は前述 Chrysler 車の Electrojector だが、量産されたものとしてはこの VW 車が世界初の電子制御式燃料噴射装置搭載車両である(Fig.46)⁷²⁾。当時の Bosch 技報を基にこのシステムの概要を示す(Fig.47)⁷³⁾。システムを構成する機械部品を Fig.48 に示す。なかでも主要部品である吸気圧センサ、インジェクタ及び燃料ポンプをそれぞれ Fig.49, Fig.50 及び Fig.51 に示す。燃料ポンプの図のみ JAN P. NORBYE の書籍⁶⁴⁾から引用した。これらは現在量産されている部品では大幅な小型簡素化・低コスト化されているが、当時はサイズがかなり大きく構成部品点数も多かったのである。その中で、Bosch のインジェクタは Bendix の Electrojector から進化が見られる。Electrojector から進化したというインジェクタの発明性は Bosch 社の H.Knapp 博士によると、噴射量(静的)を規定するノズルの部分とノズルの動きを規定するソレノイドの部分機能を分離して設計構成し、両者を組み合わせた時に部品寸法バラツキを吸収・調整する機構にしたこと、最後にスプリングの荷重調整で噴射量(動的)を規定するようにしたことにある⁷⁴⁾。



Fig. 46 VW1600 LE/TLE presented in the 1967 International Motor Show (IAA) in Frankfurt, Germany

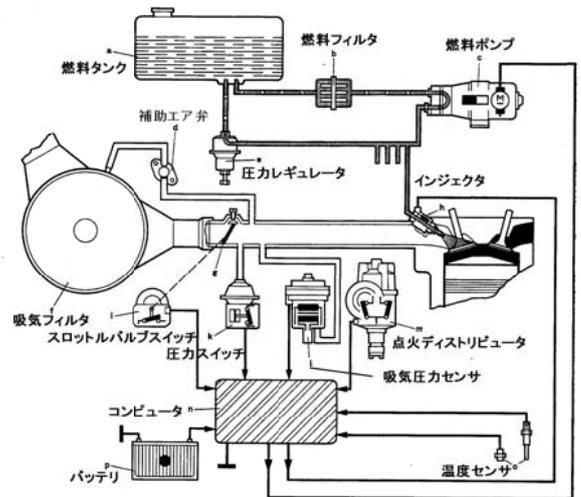


Bild 1: Prinzip der elektronisch gesteuerten Einspritzanlage. a = Kraftstoffbehälter; b = Kraftstofffilter; c = Kraftstoffpumpe; d = Zusatzluftschieber; e = Kraftstoffdruckregler; f = Luftfilter; g = Drosselklappe; h = Einspritzventil; i = Drosselklappenschalter; k = Druckfühler; l = Druckfühler; m = Zündverteiler mit Impulsauslöser; n = elektronisches Steuergest; o = Temperaturfühler; p = Batterie.

Fig. 47 Bosch D-Jetronic System (1967)

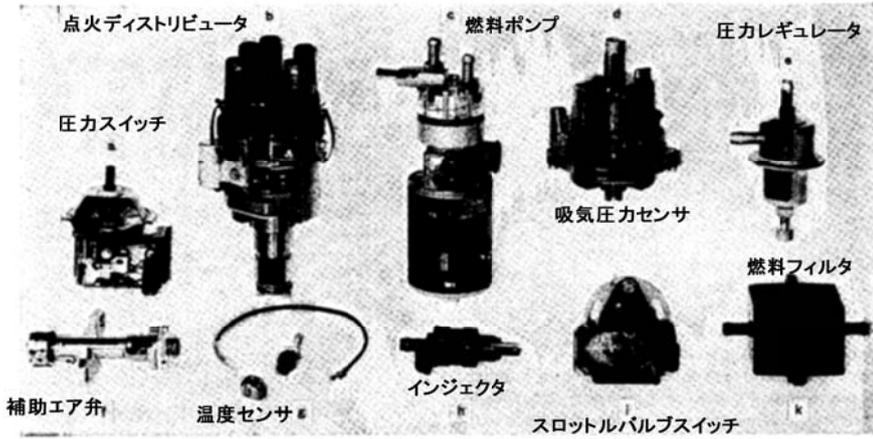


Bild 8: Einzelaggregate der elektronischen Einspritzanlage. a = Druckschalter; b = Zündverteiler mit Impulsauslöser; c = Kraftstoffpumpe; d = Druckfühler; e = Druckregler; f = Zusatzluftschieber; g = Temperaturfühler; h = Einspritzventil; i = Drosselklappenschalter; k = Kraftstofffilter.

Fig. 48 Mechanical Components for Bosch D-Jetronic System

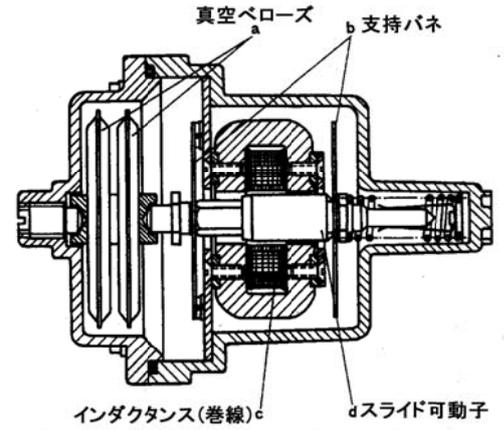


Bild 9: Saugrohrdruckfühler. a = Barometerdosen; b = Aufhängungsfedern; c = Induktivität; d = verschiebbarer Anker.

Fig. 49 Manifold Pressure Sensor for Bosch D-Jetronic System

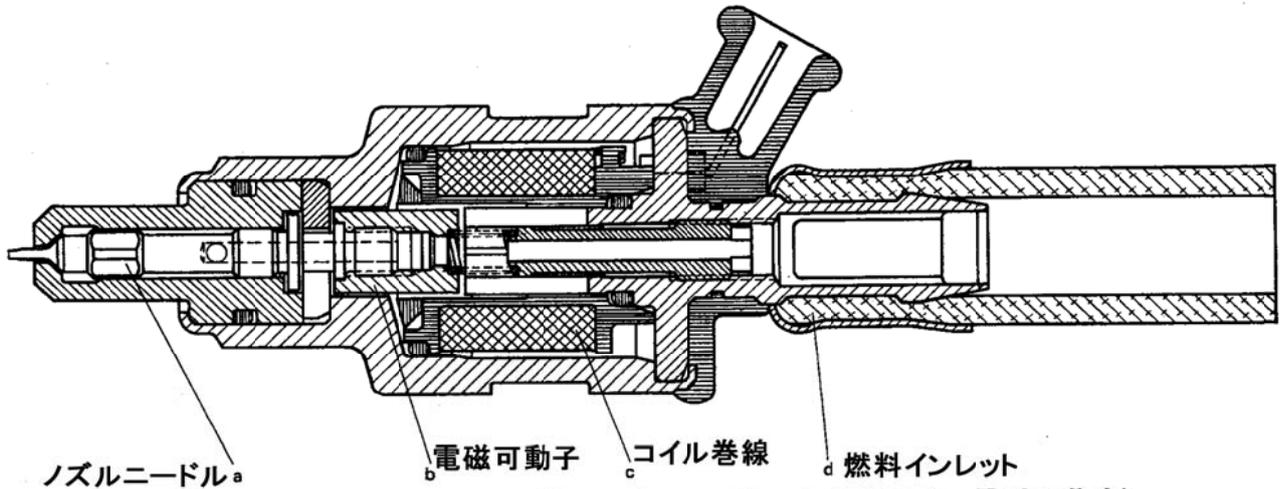
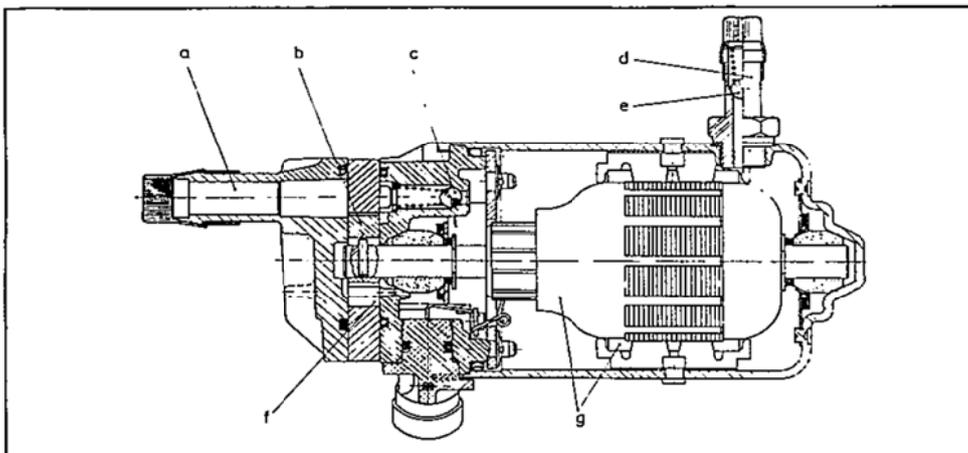


Bild 10: Einspritzventil. a = Düsenadel; b = Magnetanker; c = Magnetwicklung; d = Kraftstoffzuleitung.

Fig. 50 Fuel Injector for Bosch D-Jetronic System



Fuel pump for the D-Jetronic is a roller-cell pump with a cylindrical space in which an eccentrically mounted disc assures the pumping action and builds pressure in the fuel line. Its rotation produces periodic volume variations at the inlet and discharge ports, while the rollers are forced outward by centrifugal force and form a running seal. The rotor is driven by an electric motor. a-Fuel entry, b-Eccentric disc, c-Pressure limiter valve, d-Discharge port, e-No-return valve, f-Metal roller, g-Permanent magnet motor.

Fig. 51 Fuel Pump for Bosch D-Jetronic System

さて、VW1600 LE/TLEに採用されたD-Jetronicにおける燃料制御方法は、エンジン回転数と吸気管圧力(エンジン負荷と考えることもできる)の関数として燃料噴射量を規定し(スピードデンシティ方式)、空燃比を変えて得られるトルクと排気中のCO及び炭化水素の濃度の内、CO排出量のある量に抑えて適合したことが新しい点である。もちろん、エンジン自体の設計変更は基本的にはなく、インジェクタを吸気管に取り付ける改造だけで良かった。この噴射装置の装着性・搭載性と排出ガス適合の自由度という特徴によって、1969年には欧州の8つのモデル、Mercedes-Benz250CE, Mercedes-Benz280/300,Citroen DS21J,Opel Adm/Dipl.E,Volvo1800E,Saab99E,VW411E及びPorsche914がD-Jetronicを採用している。そのうち、CitroenとOpelを除いた6モデルは対米輸出を前提としている。さらに1970年には欧州で3モデル、1971年には6モデルが追加されるに至っている。日本では初めて1970年11月、いすゞ117クーペがBosch製D-Jetronicを搭載して発売されている。

Boschはさらに改良に改良を重ね、K-Jetronic(1973年)、L-Jetronic(1974年)等々なる商品を世に出していく。なお、K-Jetronicはマスフロー方式の機械式連続噴射(噴射弁は油圧で開閉する外開自動弁)である。なぜこの時期に機械式かというと自動車産業は当時で言えば機械工業の古くからの代表であり、新興電子産業とは別格という距離を置いていた。電子産業の部品を使うことに信頼性上の抵抗感があり、国により電子産業の発達程度の様々な欧州ではブラックボックスとしてのコンピュータは自動車のサービス体制も含めて課題が大きかった。そうした中、機械屋のこだわりとして生み出されたのがK-Jetronicであり一時期欧州ではかなり採用されていたが、電子制御の信頼性が認められ、実績が証明されていく中で、徐々に姿を消していくことになる。L-Jetronicは、マスフロー式の電子制御間欠噴射であり、吸気圧センサに代わって新たにエアフローセンサが開発されている(Fig.52)⁷⁵⁾。L-Jetronicはさらに排気O₂センサ(ラムダセンサ)と三元触媒を用いてフィードバック制御を導入し、排気有害成分の低減を格段に向上させた。並行してBoschは世界中の燃料噴射装置サプライヤにライセンス供与をしていく。日本のデンソーにおける1960年代初頭から1970年代末にかけてのガソリン噴射装置の技術開発史は文献⁷⁶⁾に紹介されている。

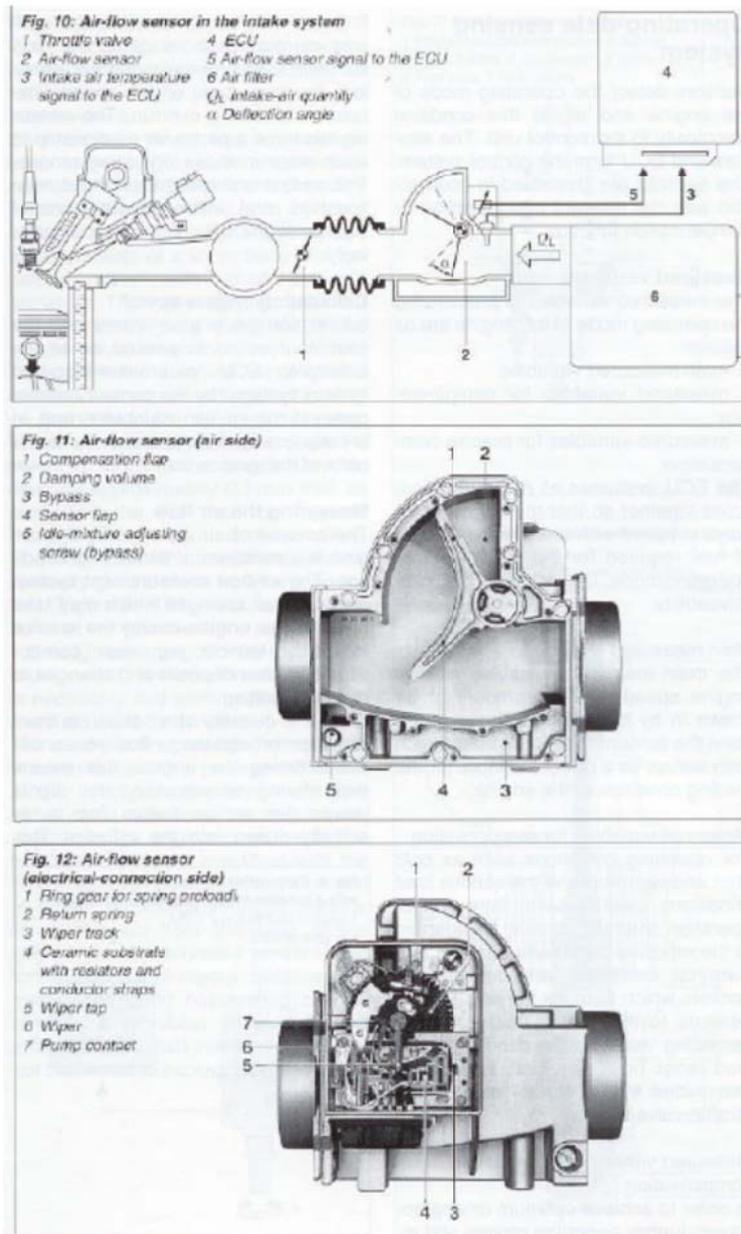


Fig. 52 Air-flow sensor for Bosch L-Jetronic System

9.5. 電子制御式ガソリン噴射装置普及の要因と意義⁷⁰⁾

これまで解説してきたガソリン噴射装置は、Bendix のコンセプトであるエンジンの設計変更は最小限で、エンジンからの駆動も必要とせず、センサ類はエンジンの周辺にある程度自由に配置できるようになっていた。気化器は吸気の絞りとなるため設置部分で圧力損失が発生するが、ガソリン噴射装置はこのようなこともなく、しかも排気有害成分の低減には気化器に比較して非常に適合が簡便であった。つまり使う側にとって非常に使いやすいという特徴を持っていた。これが商品として普及した要因の一つである。

また、米国での排気規制の追い風を受け VW 車に次いで自動車メーカ各社が相次いで採用に踏み切った。この時このガソリン噴射装置は、個々のエンジンの設計に特化したものではなく、機能別に分割された主要コンポーネント群はいわゆる標準化されたものであった。例えば、インジェクタは外観は同じだがエンジンの排気量に合わせて流量サイズの異なるものが何種類か用意された。インジェクタのデリバリパイプ側と吸気側のシール面の径と軸方向長さを合わせると、世界中のどのガソリン噴射エンジンにも互換性をもって搭載できるようになり、インジェクタのインターナショナルフィッティングが世界標準として定着していた。Bosch も含めてライセンスを受けた世界中の燃料装置サプライヤが、自動車メーカの個別の搭載要求を越えてこの標準品を世界中で大量生産するに至った。その中で、この技術に係わる機械技術者、電子技術者、制御技術者、生産技術者、材料技術者、品質保証技術者たちがどんどん増えていった。そして市場での実績も積上げ信頼性も向上し、やがてマイコンや LSI がシステムに使われるようになりシステムの性能改良・高機能化が図られ、同時にコストダウンも着実に進んでいった。これが商品として普及した二つ目の要因である。

さらに、二つ目の要因に関連して世界の大衆車 VW に電子制御式ガソリン噴射装置を搭載したという意味には、従来の機械式噴射が一部の高級車・スポーツ車専用で高コストのイメージがあったのに対し、これを払拭し他の自動車メーカが後続しやすい雰囲気を作り、この技術を世界中に定着させるという戦略があったものと考えられる。これが商品として普及した三つ目の要因である。

Bendix と Bosch が「死の谷」を越え、これに VW が協力し、彼らと後に続く世界中の燃料噴射装置サプライヤが競争しつつも一緒になって「ダーウィンの海」を泳ぎ渡り、電子制御式ガソリン噴射装置という技術がある意味商品としてコモディティ化したのである。

10. 第 3 回連載追記

本稿では、一見主旨と異なり電子制御式ガソリン噴射(吸気管噴射)の創世記から進化の過程の説明に紙数のほとんどを費やしたが、あえてその理由を述べる。Bendix の Electrojector 登場からほぼ 40 年後、Bosch の D-Jetronic から数えて 30 年後に日本で登場した世界初の電子制御式ガソリン筒内噴射は、これら吸気管噴射(のちにエンジンのベースが気化器エンジンから噴射専用のエンジンに代わる際、機関の応答性を向上し燃料ウエットを低減するためにより燃焼室に接近して噴射すること狙ってエンジンヘッドのポート部に噴射位置を取り「ポート噴射」になった)の発明と進化、普及(市場実績と低価格)がなければ、絶対に出現することは無かったといっても過言ではないからである。

1960 年代から 1970 年代にかけて、高圧の機械式ガソリン筒内噴射(多くは実験的にディーゼル用ジャーク式燃料噴射をガソリン用に改造したもの、あるいは 1950 年代半ば以降に市販された Mercedes-Benz300SL 搭載のガソリン噴射装置を流用したもの)を使って数多くの研究者によりいろいろなコンセプトの直噴層状給気(DISC: Direct Injection Stratified Charge)が試みられた。が、結果は死屍累々で一つとして実用化されたものはなかった。そして 1980 年代後半までガソリン筒内噴射はほとんど顧みられない時期を迎える。その間は、まさに吸気管(あるいはポート)への電子制御ガソリン噴射が着実に進化していた時期であった。

(第 4 回連載に続く)

第 4 回連載内容(予定)

- (1)直噴層状給気(DISC)に対する数多くの試み(1940 年代～1970 年代)
- (2)直噴 2 サイクルエンジンの開発熱(1980 年代後半～1990 年代半ば)
- (3)電子制御式筒内噴射の出現(1990 年代後半)

【参考文献】

- (58) Atlas-Imperial - Wikipedia
- (59) US Patent No.1,892,956
- (60) P.G.Burman, F.Deluka, Fuel Injection and Controls for internal combustion engines, American Bosch,p19,1962
- (61) Winkler, A. and Sutton, R., "ELECTROJECTOR-BENDIX ELECTRONIC FUEL INJECTION SYSTEM," SAE Technical Paper 570060, 1957
- (62) 塩崎真行, エレクトロニクスによってコントロールされるベンディックス燃料噴射装置,モーターファン,1957 年 12 月号,303-306, 三栄書房 61)の邦訳解説となっている
- (63) 棚沢泰,気化器とガソリン噴射装置, 社団法人自動車技術会 技術シリーズ No.1,p16,1957
- (64) JAN P. NORBYE, AUTOMOTIVE FUEL INJECTION SYSTEMS A TECHNICAL GUIDE,70-72,Motorbooks International Publisher &Whole Sales,1981
- (65) 特許出願公告 昭 33-3303
- (66) 藤沢英也,小林久徳, 電子制御ガソリン噴射 ,p9,山海堂,1897
- (67) Evernham, T. and Guetersloh, D., "MISAR-The Microprocessor Controlled Ignition System," SAE Technical Paper 780666
- (68) <http://www.allpar.com/cars/desoto/electrojector.html> このサイトの標題は” 1958 Chrysler-DeSoto Electrojector - World's First Electronic Fuel

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 7 No. 2 2017

Injection”であり, Electrojector を搭載した Chrysler 車が詳細に解説されている Electrojector のサービスマニュアルも掲載されている

<http://www.allpar.com/chrysler-literature/1958/Electrojector-fuel-injection-testing/index.php>

<http://www.allpar.com/history/desoto.html> には Electrojector システムリコールのことも書かれている

- (69) デンソー・トヨタ有志編, EFI 事始め, 1998 年
- (70) 9.4 節と 9.5 節は, 小林久徳氏の遺稿(未公表)を参考にした
- (71) ボッシュ・ジャパン ホームページ <http://www.bosch.co.jp/jp/press/group-0708-01.asp>
- (72) <http://www.invetr.com/automotive-industry/april-28th-2014> より写真引用
- (73) Guenter Bauman, Eine elektronisch gesteuerte Kraftstoffeinspritzung fuer Ottomotoren, Bosch Techn.Berichte2 -Heft3, 107-116, November 1967
- (74) 小川王幸, 東条重樹, 燃料噴射ノズルの現状と将来, 自動車技術, Vol.41, No.10, 1141-1149, 1987
- (75) Robert Bosch GmbH, Gasoline Fuel-Injection System L-Jetronic Technical Instruction Edition 95/96, 1995
- (76) 伊藤誠悟, 株式会社デンソー 電子制御式ガソリン噴射装置 (EFI) の開発・事業化, CASE#11-04 一橋大学イノベーション研究センター (2011/09/26) <http://pubs.iir.hit-u.ac.jp/admin/ja/pdfs/show/1252>