

－電気自動車(EV)に関する研究開発と今後の方向性－

VALUENEX 株式会社
〒116-0002 東京都文京区小日向 4-5-16
ツインヒルズ茗荷谷
TEL:03-6902-9834

*弊社では大規模データ解析の ASP サービス(TechRadar および DocRadar)ならびに技術調査業務を行っております。ご関心のある方は上記連絡先までご連絡ください。
*本レポートに記載した内容および図表の全ての著作権は VALUENEX 株式会社が保有します。無断転載は禁止いたします。

1. はじめに

今、自動車が大きな変革を迎えている。一つは自動運転であり、もう一つが自動車の電動化、いわゆる電気自動車 (EV) の推進である。とくに後者に関しては 2017 年に諸外国で EV 化を政策的に推し進める動きがあったことは記憶に新しい。例えばイギリスやフランスは 2040 年からガソリン車並びにディーゼル車の販売を禁止するとしている。ノルウェーやインドでは 2030 年から EV とハイブリッド車のみを販売するとしている。また中国は新エネルギー車ポイントを導入し、EV および PHEV 化の加速を促している。このような政策的な背景をもとに、EV の普及が今後急速に進むものと考えられる。

周知のとおり、EV は今に始まったものではない。例えば日本について見ると、2009 年には三菱自動車が「i-MiEV」の、2010 年には日産自動車が「リーフ」の量産製造を開始している。また米国に目を向けると 2003 年にはテスラが創業、2008 年には Roadster が発売されている。

すでに市場に出てから 10 年が経過する EV であるが、その間にどのような研究開発がなされてきたか、あるいは今後はどのような研究課題があるのかを明らかにするために、学術文献をリソースとして EV に関する研究開発動向を明らかにした。

EV に関する学術文献情報の収集にはエルゼビア出版が運営する学術文献データベース Scopus を利用し

た。Scopus は世界最大規模の学術文献データベースであり、工学や材料科学、計算科学あるいは社会科学など、様々な雑誌を収録しているため、広い観点での EV 研究開発の動向を知ることができる。

収集対象とした学術文献は、タイトル、要約あるいは検索キーワードに「electric vehicle」、「electric car」、「electrically powered vehicle」あるいは「electrically powered car」を含む査読付き雑誌とした。そのため、plug-in hybrid electric vehicle や hybrid electric vehicle も含まれている。該当する論文数は 2018 年 4 月の段階で 18755 件であった。

2. EV 関連研究のマクロ動向

上記条件に該当した EV 関連する研究論文発表数の年次推移を Fig.1 に、また国別論文件数を Fig.2 に示す。

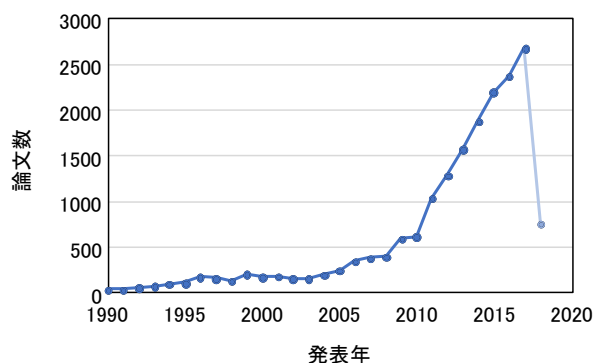


Fig.1 関連論文数の推移。

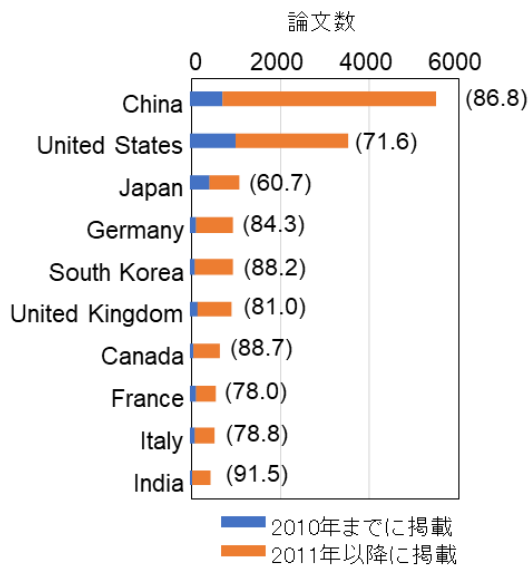


Fig. 2 EV 関連論文における主要国。

Fig.1に見られるように、EVの研究論文自体は2000年以前から存在しているが、その件数が急激に増加するのは2011年頃からである。主要な論文発表国は中国および米国が群を抜いており、これに日本、ドイツ、韓国が続いている。2011年以降の論文数の伸びを支えているのは中国と米国であり、とくに中国の論文数の

伸びは著しい。Fig.2には2010年以前と2011年以降の比率、ならびにそのパーセンテージを括弧内に示しているが、中国は2011年以降の論文比率が86.8%と非常に高くなっている。一方で、日本は他国よりも2011年以降の論文数比率が低くなっている。実際に日本の論文数増加は2012年頃で頭打ちとなっている。

3. EV 関連論文のクラスター解析

EV に関連する研究の全体像を俯瞰するため、収集した学術文献のクラスター解析を行った。解析には論文のタイトルおよび要約を用いた。クラスター解析では解析対象とする文書情報の特徴量を評価し、文書相互の類似度に基づき可視化している。クラスター解析結果を Fig. 3 に示す。

図ではクラスターが密集している周囲を赤の破線で、また共通する内容を持つ領域を青の実線で囲っているが、これはおおよその研究領域を識別するためのアイキャッチである。

EV に関連する研究は、大きく分けて3つの領域からなる。一つは蓄電に関する領域であり、主にリチウムイオン電池に係る研究である。内容としては、電池

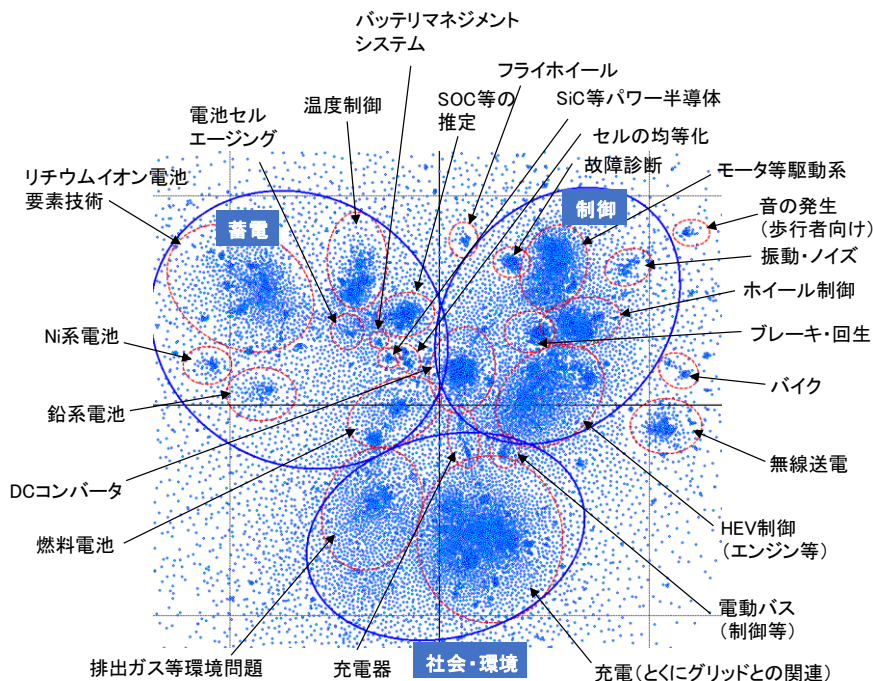


Fig. 3 EV 関連論文のクラスター解析結果。

そのもの（正極や負極、電解質など）、温度制御、電池状態推定、セルの均等化などが含まれている。制御領域においてはモータ等の駆動系、ホイール制御やブレーキ・回生といった基本要素のほか、HEVの制御や振動・ノイズに係る研究、故障診断などが見られる。また社会・環境においては、とくにグリッドとの関連での充電に関する研究や排出ガスの問題などが取り上げられている。そのほか、大領域には含まれないが、無線送電に関する研究や歩行者に知らせることを目的とした音の発生に関する研究なども見られる。

EVに関する研究開発がどのように推移してきたかを、クラスター解析を用いて可視化した結果を Fig.4 に示す。図では1999年以降の論文を5年間隔で集計し、論文の集積度合い（密度）に応じ最も高いところを赤で、順次黄色、緑、青の順で示している。

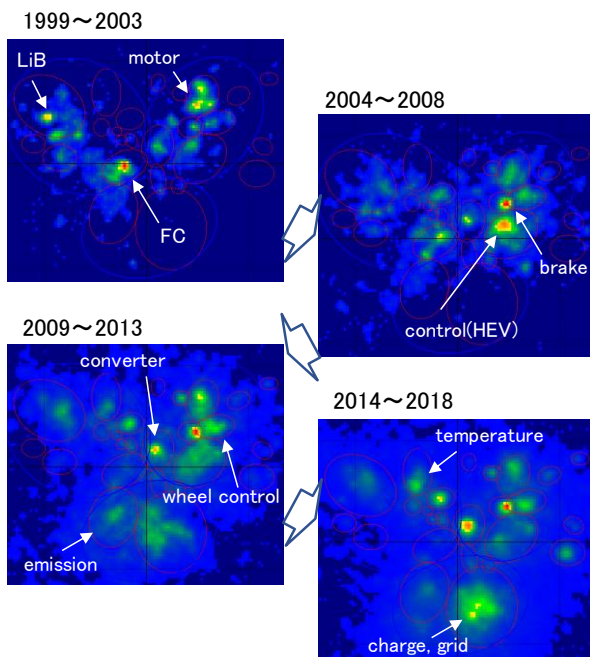


Fig4 EV 関連研究の年次推移。

1999年から2003年の期間について見ると、主要な研究領域としてはリチウムイオン電池（LiB）、燃料電池（FC）およびモータといったEVの基本要素に関する研究が主流であった。その後、2004年から2008年の期間では、制御に関する領域に研究が集中し始める。とくにHEVの制御戦略や回生ブレーキに係る研究が多く行われるようになって来た。2009年から

2013年の期間になると研究領域は制御および社会・環境の領域に広がり始める。排出に関連する研究としては、例えば新エネルギー自動車の排出削減効果に関するLCAに基づく評価などが行われている。

2014年以降になると、グリッドと充電といった観点からの研究が急速に増加している。これは例えば民間の電気自動車の需要に対する市街地公衆充電ネットワークの充足度に関する包括的なシミュレーションおよび評価方法などである。なお、テクノロジーの観点からは、温度制御やコンバータに関する研究も活発に行われている。温度制御に関しては、EVにおけるモータ冷却システムデザインやLiBのEV応用における熱発生シミュレーションなどが研究されている。ここで注意したいのは、LiBやコンバータなどの要素技術はEVとの共起としての研究量の変化であるということである。Fig.4に示したLiB研究の推移を見ると、あたかもLiB研究はピークを過ぎているかのように見えるが、実際にはEVと共にLiB研究は全体のわずか4%程度（Scopusによるarticleを対象とした検索結果）に過ぎず、またLiBそのものに関する研究は2017年でも増加の一途をたどっている。

EV研究における主要国上位3カ国の国別注力領域を可視化し、その特徴を明らかにした。結果を Fig.5 に示す。図では国ごとに最も密度が高い領域を赤で示している。

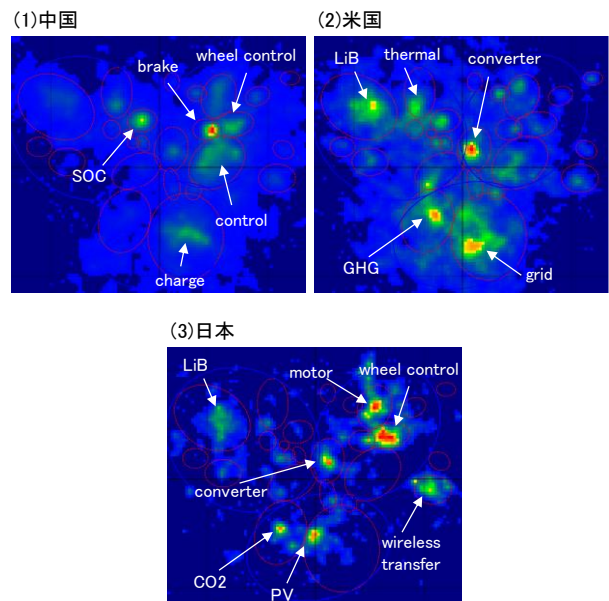


Fig5 主要3カ国の研究領域。

(1) 中国

中国のEV研究数は他国より特に多く、主要な研究領域に広く分布している。特に制御系に関する研究の比率が高く、そのなかでも回生ブレーキに関する研究が多い。また充電やグリッドに関連する研究も盛んに行われている。逆に研究が少ないのは燃料電池に関する研究である。

(2) 米国

米国の場合、EV関連全体に研究が広がっているが、比較的蓄電と社会・環境に論文が多い。その中でも特にコンバータ、LiB、グリッド関連研究および温室効果ガスに係る研究が多くなっている。相対的に比率が低いのはホイール制御や回生ブレーキなどである。

(3) 日本

日本に関しては、特に多いのがホイール制御やモータ、コンバータなどの制御に関わる領域とLiB、そして太陽光発電に関する研究である。また無線給電に関する研究の比率も高くなっている。なお、無線給電に関する研究数が最も多いのは中国であり、次いで日本となっている。

Fig.5 に示した結果は投稿先雑誌の質に関わらないものであり、例えば国内雑誌なども含まれている。そこで、雑誌の評価指標のひとつであるSNIP値(2014年版)を用いてフィルタリングした。SNIP値は分野間の違いを補正した評価指標であり、広範な研究領域の評価には適した指標である。結果をFig.6a~dにまとめる。

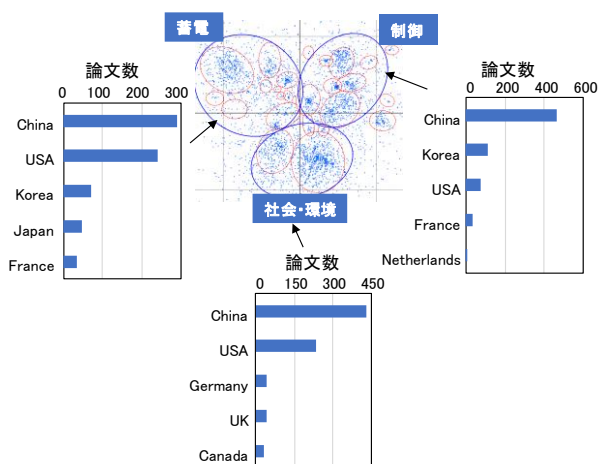


Fig.6b 大領域別の主要なプレイヤー(SNIP 値 1 以上 2 未満)。

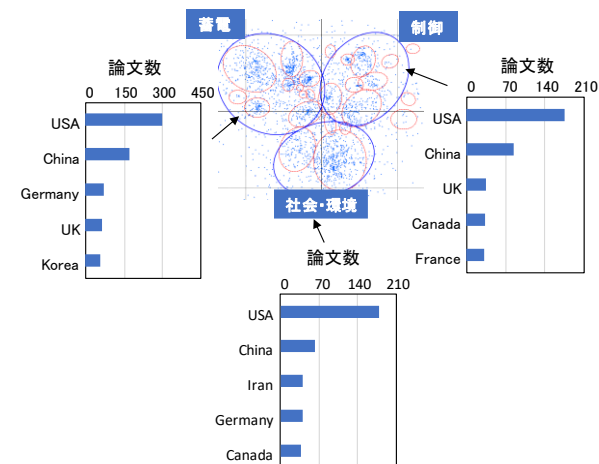


Fig.6c 大領域別の主要なプレイヤー(SNIP 値 2 以上 3 未満)。

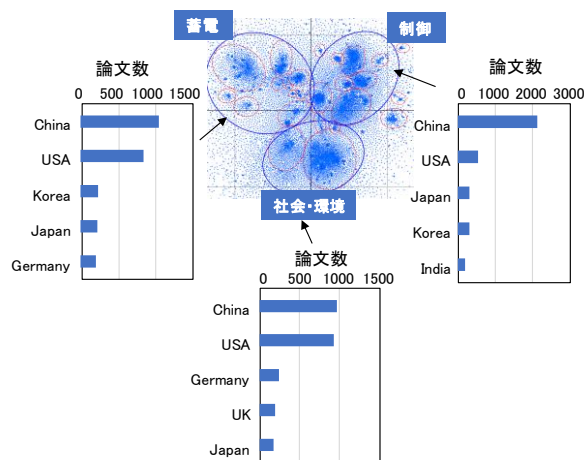


Fig.6a 大領域別の主要なプレイヤー(SNIP 値によるフィルタなし)。

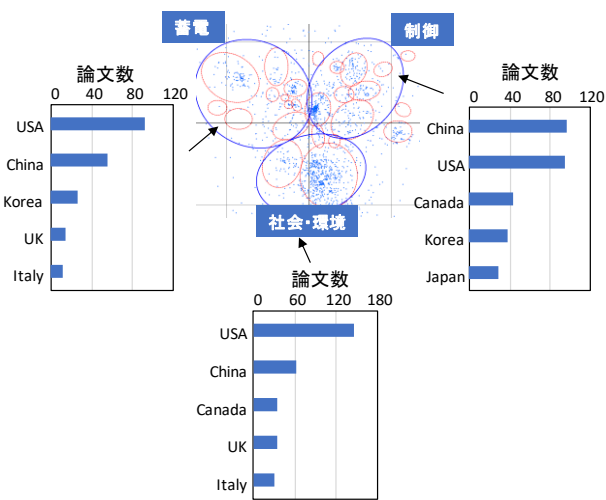


Fig.6d 大領域別の主要なプレイヤー(SNIP 値 3 以上)。

図に見られるように、SNIP 値が高くなるにつれ、米国の論文比率が高くなり、とくに人の目に触れやすい著名な雑誌では、米国発の論文が存在感を示すようになる。ただし中国に関しても決してレベルが低いわけではない。逆に論文数で 3 位に位置する日本が、SNIP 値が高くなるとドイツやイギリス、韓国などに論文数で劣っているケースが散見される。

SNIP 値が 3 以上の雑誌で構成されている主要な研究領域を見ると、蓄電領域では LiB 電極および SOC 推定に関連する研究が多く、雑誌としては前者では Accounts Chem. Res. (SNIP : 4.774)、Adv. Mater. (SNIP : 3.786)、Nature Mater. (SNIP : 9.62) などが、後者では Appl. Ener. (SNIP : 3.146) がとくに多くなっている。制御領域に関しては DC コンバータに関する研究領域に集中している。当該領域では IEEE Trans. Power Electronics (SNIP : 4.129) への投稿が多い。社会・環境領域に関しては、グリッド関連研究にブロードに研究が分布している。投稿先雑誌としては IEEE Trans. Smart Grid (SNIP : 3.351) と Appl. Ener.が多くなっている。

4. エマージングな研究領域

EV に関連する研究において、近年論文数が増加傾向にある領域をクラスター解析結果から抽出した。抽出に当たっては、SNIP 値が 1 以上の雑誌に限定した。結果を Fig.6 に示す。図中、赤の四角で示した領域が、2017 年に論文数のピークがあり、かつ 2014 年以降の論文数の伸びがプラスの条件に合致した領域である。また図中に示した折れ線グラフは、条件に合致した領域内での論文数推移である。

エマージングな研究領域候補は制御ならびに社会・環境領域に多くなっていることが分かる。またエマージングな領域は、赤の楕円で示した主要な密集領域(既に研究蓄積が進んだ領域)の周縁部に出ているケースが多い。なお、繰り返しになるが、蓄電領域、とくに LiB に関しエマージングな領域が現れていないことについては、本解析が EV との共起のみを対象としており電池そのものの研究状況を示しているわけではない点に注意が必要である。

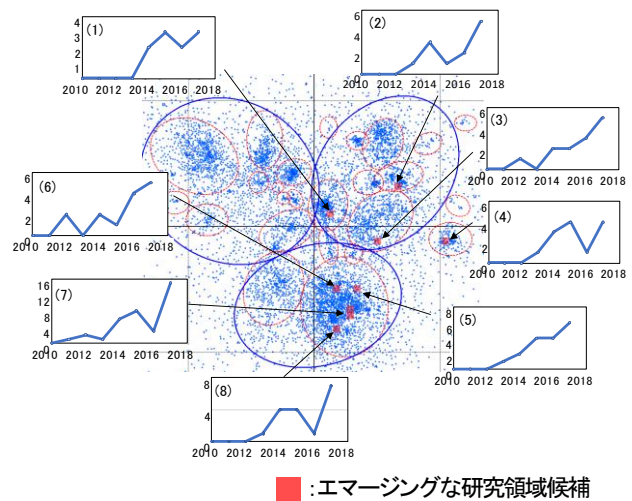


Fig. 7 エマージングな研究領域候補と論文数推移。

以下に各エマージングな研究領域の概略を記す。

- (1) 新規なコンバータ：EV 充電や V2G 応用のためのコンバータ。例えば bidirectional や superbuck コンバータなど。
- (2) 車両制御：例えば複数の個別制御されたパワートレインを持つ EV での制御、定常および過渡状態での車両応答制御など。
- (3) HEV、PHEV の最適化：予測制御、エネルギー管理戦略やパスプランニング。粒子群最適化およびその類似手法やニューラルネットワークを利用。
- (4) 無線送電：EV 無線充電システムにおける磁場とシールドや充電におけるフリーポジショニング、ロバストな無線電力伝送など。
- (5) 分散ネットワーク：家庭用低電圧ネットワークでの EV 充電の影響評価と制御分析のためのコンピューティング、配電システムの階層型エネルギー管理のためのマルチエージェントモデルなど。
- (6) マイクログリッド：マイクログリッドにおける EV と再生可能エネルギーの協調制御やマイクログリッド間での電力スケジューリングなど。
- (7) 充電インフラ：充電ステーションにおける最適充電スケジュール、課金システム、EV 所有者の運転および行動モデリングなど。
- (8) 経済性と制御：スマートマイクログリッドのコストおよび電力品質改善のための管理手法や分散型エネルギー資源と EV、およびグリッドの運用上の制約

と調整など。

エマージェンシー候補領域の概要から、幾つかの点で従来の自動車とは異なる点に気づく。ひとつはパワートレインが複数搭載されることによる制御の変化である。自動車は通常1つの内燃機関しか搭載していないことがほとんどであったが、電動化によって複数のパワートレインの搭載も視野に入れる必要がある。

もうひとつが電力網への影響であり、これは将来グリッドに再生可能エネルギーや蓄電池など様々な電源や負荷が連携された状態での制御に関するものである。従来、自動車はガソリンあるいは軽油をガソリンスタンドで供給するというクローズドな環境であったが、電力網に接続されることによって、大きな電力システムの一部として見なす必要が出てくる。

5. おわりに

EV に関連する研究について、学術文献をリソースとして広く情報収集を行い、クラスター解析を行うことで全体像を俯瞰した。

EV に関わる研究領域としては、大きく分けて蓄電、制御、および社会・環境に係る領域に広がっている。とくに近年では社会・環境に関わる研究が多くなる傾向が見られる。

主要な研究プレイヤーは中国、米国、日本であるが、中国および米国の論文数は他国を圧倒しており、EV 研究はこの二カ国が牽引しているのが現状である。とくに注目度の高い論文誌では米国の存在感は大きい。これに対し日本は研究開発という観点からは伸び悩んでいるといわざるを得ない。

EV に係る今後の研究トレンドとしては、個別車両レベルでは EV 特有な制御に関する研究が増加すると考えられる。実際にはコスト面などの問題があるため、従来どおりの単一パワートレインとなるかも知れないが、EV 特有の事象として気に留める必要がある。またこれに関連し、高効率なコンバータや無線給電などは今後も研究開発が進むものと考えられる。

また社会インフラとの関連で見た場合、EV の普及は電力網に対し大きな影響を与える可能性がある。これは風力や太陽光などの再生可能エネルギーの利用や

蓄電設備の利用などと相まって、問題を複雑化する可能性がある。政策的に見た場合、時間的猶予は 20 年程度であり、それまでに解決する必要がある課題である。制御ノウハウやシステムなどは将来的には Cyber-Physical Systems や Digital Twin といったコンセプトに基づくプラットフォームになっていくと考えられ、大きなビジネスチャンスになりうるのではないかと考えられるが、現状日本が当該分野で存在感を示せていないことは残念である。

(著者紹介)

本多克也：取締役兼研究開発本部長、博士（工学）
新技術事業団研究員、三菱総合研究所主任研究員を経て 2008 年より現職。専門領域：ナノテクノロジー・材料等の先端科学技術調査分析および海外の科学技術調査分析。