

特別寄稿 エコ未来型電気自動車の試作と性能評価試験*

—駆動用SAZZチョップパとKAST-EV-Kana—

Prototype of future ECO-EV and its performance test —SAZZ chopper for EV power train and KAST-EV-KANA—

河村 篤男
Atsuo KAWAMURA

1. エコ未来型電気自動車の提案と実現

神奈川科学技術アカデミー (KAST) の神奈川産学公プロジェクトとして、2008年4月から2011年3月まで遂行された“次世代パワーエレクトロニクス”プロジェクトは、大きく2つのサブプロジェクトから構成される。その1つである研究テーマI：“エコ未来型電気自動車の提案と実現”と題して、横浜国大の河村（今回の著者）がリーダーを担当したので、主としてその成果を中心にエコ電気自動車Kanaに関して概説する。

電気自動車（以下、EVと略すことにする）の駆動システム（以下、パワートレインと呼ぶ）は、内燃機関のそれに比べると、非常に簡単である。つまり、バッテリー、インバータ、モータ、変速ギア、車輪により、電気エネルギーは運動エネルギーに変換され、車を駆動する。インホールモータを用いる場合は、さらに、簡単となり、変速ギアは使わない。内燃機関では実現できなくて、EVのみで実現可能な現象は、エネルギーの回生という点である。坂道を下る場合や速度を減速する場合は、車の位置エネルギーや運動エネルギーを、モータを発電機として用いてインバータを介してバッテリーに電気エネルギーを蓄積する。逆に、登坂や加速時にはその電気エネルギーを運動エネルギーへ再利用できる。このようなエネルギー変換に伴う損失が限りなくゼロであれば、いわゆる航続距離は伸びる。

日本では、2011年4月以降の販売車はJC08走行モードによる燃費値の表示が義務付けられた。JC08モードは比較的都市内走行パターンを反映しているといわれているが、現実の燃費と車メーカーの公表する燃費にはかなりの隔たりがあるように感じている方も多いと思われる。ただ、測定方法は各種規格で決められている（たとえば、TRIAS）ので、この規格を修正しないと、経験している燃費との差は縮まらないが、各国でこの

規格の見直しの努力は続いている。なお、モード走行の燃費を測定するには、シャーシダイナモといって、車の走行抵抗を完全に模擬できる電気電子装置の上に試験車を乗せて車体を固定し、車輪だけが回転するように配置する。さらに、その全車輪は、一種の回転ドラムと接しており、実際の走行抵抗（ころがり摩擦や空気抵抗など）と同じ値を受けて回転するような状況を作り出している。この状況は、実際に車を走らせているような状況と見なすことができ、かつ、この状況は再現性があるので、この装置を用いて、走行距離や消費燃料などを測定する。

上述の著者らのプロジェクトでは、EVのパワートレインとして高効率高電力密度の直列チョップパを採用するパワートレインを提案し、そのメリットは、従来のパワートレインと比べて、JC08などのモード走行の場合は1充電走行距離がある程度伸びると主張している。以下では、ソフトスイッチングを利用したSAZZ-1チョップパ（4象限）を用いたパワートレインについて紹介する。

（チョップパ：直流の電圧を別の電圧へ効率よく変換する回路の総称で、電圧を増加するものを昇圧チョップパ、電圧を下げるものを降圧チョップパと呼ぶ。）

2. SAZZチョップパ回路とその展開としての4象限チョップパSAZZ-1

Fig. 1に、チョップパの基本回路の分類を示す。入力電圧 V_{in} と出力電圧 V_{out} の大きさの関係と直流電流の供給方向の極性により、4種類に分類できる。Fig. 1(a)は $V_{out} > V_{in}$, $I_d > 0$ の1象限において、入力から出力へ昇圧して電力を供給できる1象限チョップパ、Fig. 1(b)は同様に、 $V_{out} > V_{in}$, $I_d < 0$ の1象限において、入力から出力へ降圧して電力を供給できる1象限チョップパ、Fig. 1(c)は $V_{out} > V_{in}$, $I_d > 0$, $I_d < 0$ の2象限において、双方向に電力を供給できる2象限チョップパ、Fig. 1(d)は

*2011年8月10日 原稿受理

4象限すべての方向に自由に電力を供給できる4象限チョッパである。本稿で述べるソフトスイッチング動作するSAZZ (Snubber Assisted Zero Voltage and Zero Current Transition Chopperの略) 方式は主にこのチョッパ基本回路に組み合わせて展開可能である。

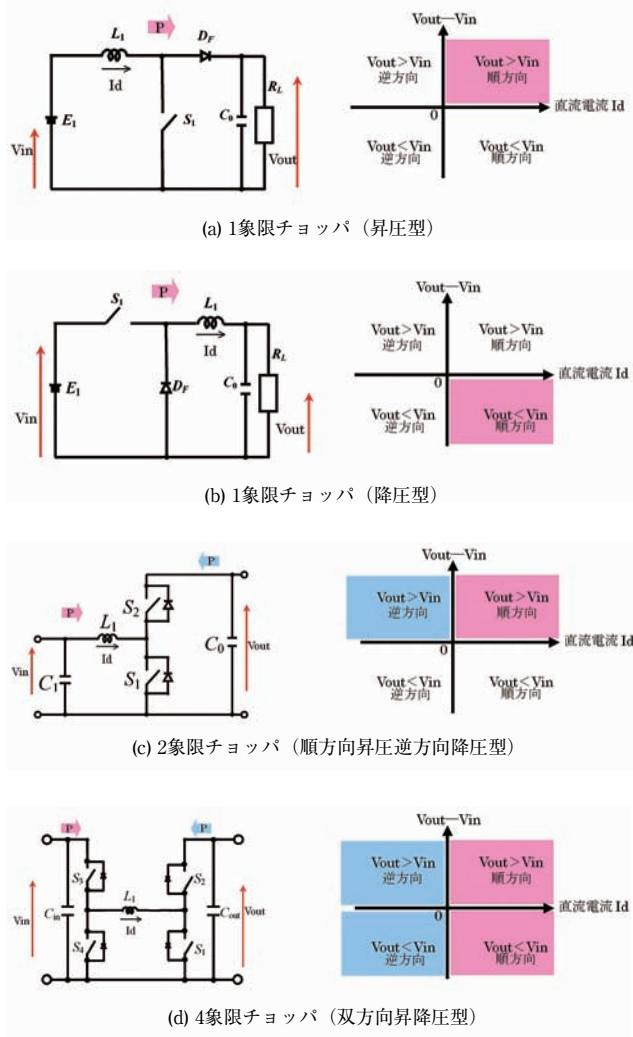


Fig. 1 チョッパ基本回路の分類

Fig. 2に昇圧型SAZZチョッパ回路構成を示す^{1) 2)}。このSAZZ回路の特徴は、ダイオード D_5 の逆回復電流を補助スイッチ S_2 で抜き取り、零電流ターンオンスイッチングを行い、かつ、スナバ回路によるゼロ電圧ターンオフスイッチングを行うことにより、デバイスストレスが少なく、高効率なソフトスイッチング動作が可能となることにある。Fig. 3にIGBTを用いて試作した基本昇圧型SAZZチョッパを示す。Fig. 4に示すように、実験を行なった25kHzのスイッチング周波数で99%程度の変換効率が報告されている³⁾。

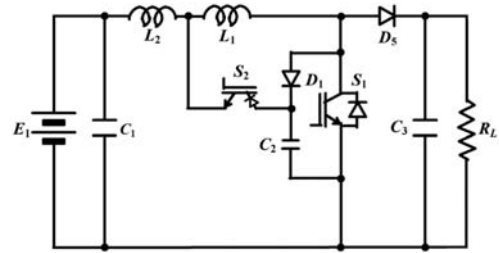


Fig. 2 SAZZチョッパの基本回路

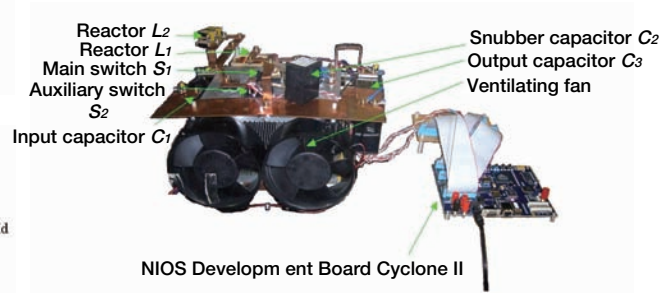


Fig. 3 IGBTを用いた実験試作SAZZチョッパ

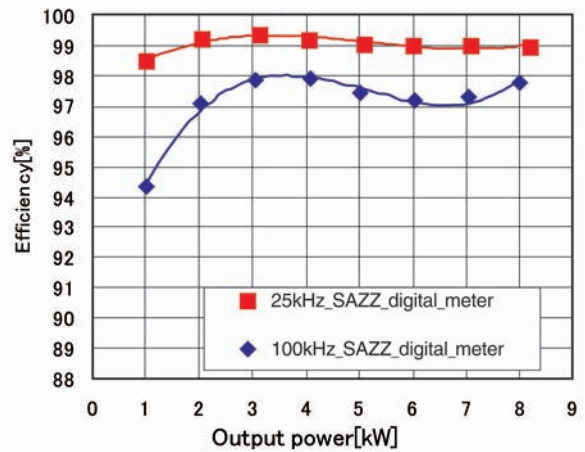


Fig. 4 IGBT実験試作SAZZチョッパの効率

一般にこの昇圧チョッパと降圧チョッパを組み合わせることで電力の流れる方向が双方向となるように構成した双方向昇降圧チョッパが自動車用途では多く用いられる。これを4象限(双方向昇降圧可能)へ発展させたものの回路として、高効率化と小型化を図るために、MOSFETを用いた4象限SAZZチョッパの回路構成をFig. 5に示している。MOSFETの場合、チョッパ動作時に出力ダイオード側のMOSFETを同期整流を用いることにより導通損失を低減可能である。また、Fig. 6のように、冷却用のブスバーを間に挟みこんだサンドウィッチ構造で隙間を極力なくした立方体構造に近づけることにより、電力密度を向上させることが可能である。外形175 mm x 105 mm x 40 mm=0.735Litterで、

30kW出力が可能であり、電力密度は40kW/l、効率はFig. 7に示すように99%を達成している⁴⁾。

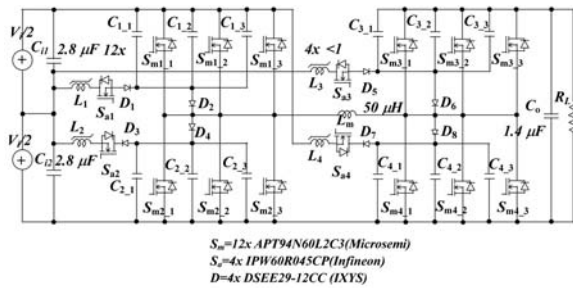
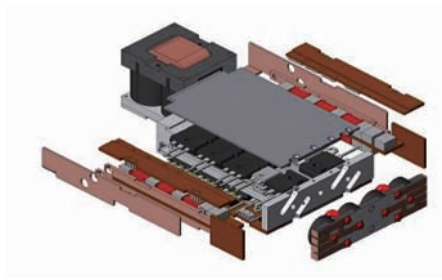
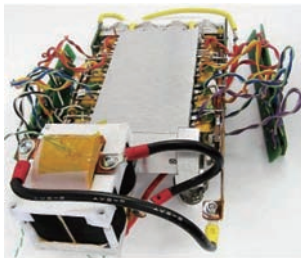


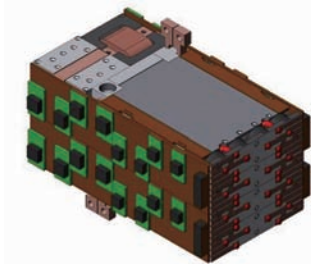
Fig. 5 MOSFETによる4象限SAZZチョッパ回路



(a) 3D model of single phase module



(b) Prototype of single converter module



(c) 3D model of complete converter



(d) Integration of two converter modules into single converter structure

Fig. 6 MOSFETによる実験試作4象限SAZZチョッパの構造

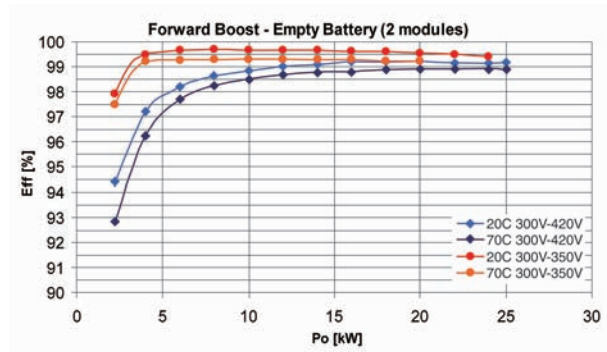


Fig. 7 水冷40kW/Litter MOSFET実験試作4象限SAZZチョッパの効率

また、IGBTを用いた4象限SAZZチョッパの回路構成をFig. 8に示してあり、SAZZ-1チョッパと呼んでいる⁵⁾。左右対称であるので、回路は見かけほど複雑ではない。Fig. 9にSAZZ-1の外観を示す。このSAZZ-1は、実際に車載用として開発され、耐圧試験、保護連動試験、温度上昇試験等の車載に必要な各種企業試験を合格した、実用化に最も近い4象限SAZZチョッパである。Fig. 10に30[kW]過負荷試験結果(順方向昇圧)を、Fig. 11に抜粋した効率測定データを示した。入力電圧291V、出力電圧410V、出力30kWで効率98%程度を示している。

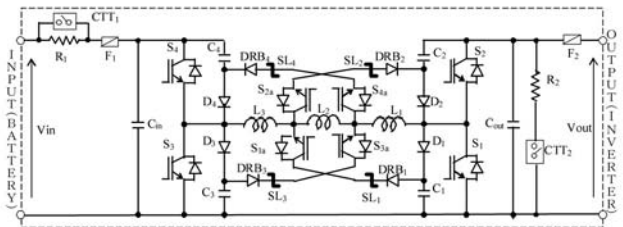


Fig. 8 双方向昇降SAZZ-1チョッパの回路図



Fig. 9 4象限SAZZ-1チョッパの外観

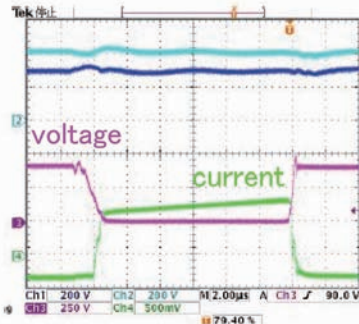


Fig. 10 4象限SAZZ-1チョップアの30 [kW] 過負荷試験結果 (順方向昇圧)

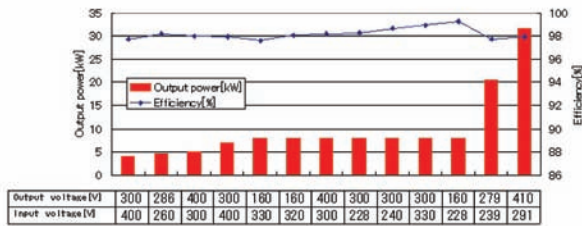


Fig. 11 SAZZ-1チョップアの実験結果-1

3. SAZZ-1チョップアの応用例：KAST-EV-Kana

SAZZ-1チョップアを車載用に開発したものの写真をFig. 12に示した⁴⁾。水冷方式であるが、パワー密度は2.2kw/lで、まだ、改良の余地が大きい。車載用途では幅広い電圧・電流領域で使用可能であることが求められ、難易度の高い設計が要求される。SAZZ回路は、補助スイッチ S_2 を主スイッチ S_1 よりわずかに前で時間差をつけてターンオンさせソフトスイッチングするが(先行時間と呼ぶ)、ソフトスイッチングの最適点が負荷変動に伴い変化するため、この時間差を可変時間制御則に従い最適に補正する先行時間可変制御を搭載して、幅広い運転範囲全域下で高効率に運転できるように制御したり、ソフトスイッチングとハードスイッチングを切り替えて力行・回生エネルギーをバッテリーから放電や充電して連続運転できるようにしたりする電力潮流制御が必要である。



Fig. 12 車載用SAZZ-1チョップアの外観

このような先行時間可変制御や電力潮流制御をマイコンで行なう車載用デジタル制御システムを搭載したチョップアを車載したものがKAST-EV-Kanaであり、そのパワートレインはFig. 13に示したように直列チョップア方式となっている。また、具体的な結線図はFig. 14に示した^{5) 6)}。直列チョップアが高効率小型軽量で、高信頼性が確保される場合は、直流電圧を可変させることにより、PAM動作によるインバータの高効率化、モータ効率の向上、バッテリーの放電による電圧低下の補償などの効果が期待される。その結果、チョップアがない場合よりも1充電走行距離が延びる。ただし、その効果は、チョップアの性能に大きく依存する。

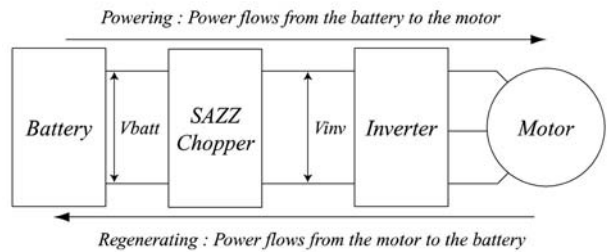


Fig. 13 直列チョップア駆動方式

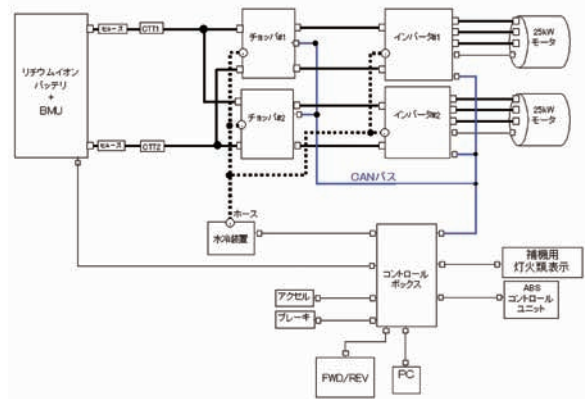


Fig. 14 KAST-EV制御システム

これを搭載したKAST-EV-Kanaのボンネット内部の写真をFig. 15に示した。20kwのインホイールモータ (IPSM) を前輪に2個、インバータ2個とSAZZ-1チョップア2個をフロントフード内正面に、SOC・各セル電圧・セル温度モニタリング付きの単セル80個直列の平均稼働電圧304V、約6.4kWhのリチウムバッテリーをドライバーシート背面下部、これらを車載系LANであるCAN (Controller Area Network) 通信で結び、統合的に制御保護監視するコントロールボックスをパッセンジャーシート前面、グローブボックス下部に搭載している。また、その外観はFig. 16に示した。詳細データは文献⁷⁾に譲るが、前書きで述べた、シャーシダ

イナモを用いて国土交通省の公認の手法に従って、1充電走行距離を測定した。その結果、6.4kwhの電池容量で重量約870kg(2名乗車)で約85km程度走るのので、JC08モード交流電力消費率 [Wh/km] は、70代の前半となり、その逆数の燃費相当分は、約14.2km/kwhとなる。この値は、車重1トンクラスの車としては世界最高記録に匹敵すると思われる。諸元表は、河村研究室のHP⁷⁾に詳しい。なお、詳細は文献⁸⁾で公表される。

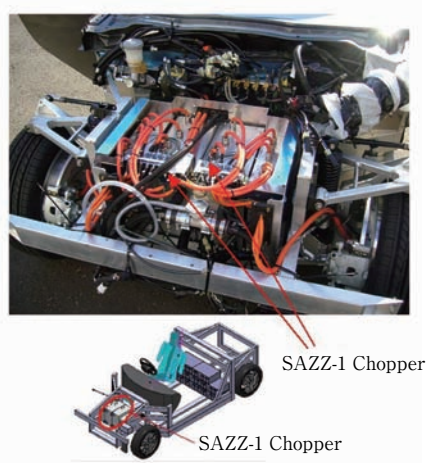


Fig. 15 SAZZ-1チョッパ搭載位置



Fig. 16 KAST-EV-Kanaの外観

4. まとめ

著者らが提案しているSAZZチョッパの基本特性およびそれを搭載したKAST-EV-Kanaに関して概説した。東日本大地震のあとで電力事情が大きく変化しているが、長期的視野に立てば、電気を利用した自動車の普及は省エネ効果が大きいので、地球温暖化問題の切り札になる点は疑いの余地はない。ハイブリッド車や電気自動車などの普及がますます進展することを期待したい。

なお、2章は弦田幸憲博士(横浜国大)の博士論文とその後の研究成果に関して執筆していただいたことを記して謝意を表したい。

<参考文献>

- 1) 弦田, 伊藤, 河村, 「SAZZチョッパ回路の提案および動作確認試験」, 電気学会全国大会, 2005年3月, 電気学会全国大会論文集, 4-045
- 2) Y. Tsuruta, Y. Ito, A. Kawamura, "A New Zero-Voltage-Zero-Current-Transition Chopper SAZZ for a FCEV Drive", IEEE-IECON05, Nov. 2005
- 3) Y. Tsuruta, M. Pavlovsky and A. Kawamura: "Very High Efficiency SAZZ Chopper Using High Speed IGBT", Proc. of 2009 IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2009), pp. 573-579, 2009.
- 4) M. Pavlovsky, Y. Tsuruta, A. Kawamura, "Bi-directional buck/boost dc-dc converter with ultra high efficiency based on improved SAZZ topology", *Proceedings of Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2009*, pp.1783-1790, 2009.
- 5) Y. Tsuruta, A. Kawamura, "Snubber Assisted Zero Voltage and Zero Current Transition Bilateral Buck and Boost Chopper for EV Drive Application and Test Evaluation at 25kW", IEEE Trans. IE Vol.56, No.1, pp.4 -11, 2009
- 6) Y. Tsuruta, M. Pavlovsky, G.Guidi, A. Kawamura, "Four quadrant SAZZ-1 Chopper for EV and HEV power train", ICPE-2011, pp.1016-1023, Korea, 2011
- 7) KAST (神奈川科学技術アカデミー)のHP http://www.newkast.or.jp/innovation/sangakukou/iv_PE.html または、河村研究室のHP:www.kawalab.dnj.ynu.ac.jp
- 8) A.Kawamura, G.Guidi, S.Tsutsuki, Y.Watanabe, Y.Tsuruta, "Experimental data analysis on total driving performance of series chopper based EV power train", IEEE-IECON2011, (to be published)

<著 者>



河村 篤男
(かわむらあつお)
横浜国立大学院工学研究院
教授

1981年東京大学博士課程修了（工学博士）。現在、横浜国立大学院工学研究院教授。主としてパワーエレクトロニクスの研究に従事。1988年IEEE/IAS論文誌論文賞，1996年電気学会論文賞など受賞，IEEE Fellow.