「次の欲しい」を先取りし、新たな価値を創造する ～IPMSM 開発の経緯と PE 学会に期待すること～

ダイキン工業株式会社

大山 和伸

(大山様には、平成 26 年 12 月 20 日 第 206 回定例研究会においてご講演いただきました)

「次の欲しい」を先取りし、新たな価値を創造する ～IPMSM 開発の経緯と PE 学会に期待すること～

大山 和伸*

Create New Value by Anticipating the Future Needs of Customers

- Expectation for the Evolution of the Japan Institute of Power Electronics -

Kazunobu Ohyama*

キーワード：パワーエレクトロニクス，IPMSM，埋込磁石同期モータ，希土類磁石

Keywords：Power Electronics, IPMSM, Interior Permanent Magnet Synchronous Motors, Rare Earth Magnet

1. パワーエレクトロニクス学会とのかかわり

私の最初の学会発表の場は，1981 年 2 月京都で開催された電気学会半導体電力変換研究会であった。この研究会は当学会（当時はパワー・エレクトロニクス研究会）が共催し，今では 50 件近くの論文が集まる年初の大きな研究会になっている。34 年近く前のことではあるが，活発な質疑があったことを記憶している。また，少し捻った質問もあり，柔らかな雰囲気があったように思う。この背景には，パワー・エレクトロニクス研究会立ち上げの一つの理由に，せっかく 1 日かけて出かけて行った東京での電気学会の研究会で全く質問が出ず残念な思いをし，当初より指定討論者制を導入したことを後に聞き，納得した。また，1986 年 2 月にダイキン工業に入社する際には，パワー・エレクトロニクス研究会講演論文集の会員名簿を頼りにした。

1990 年には評議員としてパワー・エレクトロニクス研究会の運営にかかわり始めた。最も印象深かったのは 1991 年 11 月 19 日から活動を開始した PE 研運営強化検討委員会である。会費がどのような目的で，何に，どれだけ使われているかを全て明らかにし，効率化するところは効率化，強化すべきところは強化する意思を委員会全員が共有化した取り組みが出来たように思う。

その後，2005 年より 2 年間，第 15 代会長を務めることになった。2005 年 4 月 23 日に中央電気倶楽部で開催した総会の第一議題が「学会事務センター破産に至る経緯と新業務委託先選定について」である。PE 研運営強化の一環で，1993 年より会員管理関係の事務と受付・窓口業務を委託するこ

とにした日本学会事務センターが破産し，学会運営の積立金が前年度の 2,077,400 円から 0 となる厳しいスタートであった。幸いなことに，2005 年 1 月末から 2007 年 3 月末にかけての会員数の変化は 449 名から 464 名へと微増すると共に，積立金も最低限の運営が可能な 100 万円まで増やせた。さらに，図 1 に見るように，2005 年度（H17 年度）主催行事への参加者数も大きく伸ばすことができた。

図 1 主催行事の参加者数と定例研究会の発表件数推移

出典：大山和伸：「パワーエレクトロニクス学会 2005 年度会誌発行にあたって」パワーエレクトロニクス学会誌 Vol.31, pp.1, 2006 年

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jipe2003/31/0/31_0_1/_pdf

この厳しい中で学会の活力を示す主催行事への参加者数が増えた背景には，電気学会や IEEE とは異なるパワーエレクトロニクス学会の良さが有るからだと思う。当時，その良さを，2005 年度会誌の巻頭に以下のように述べた[1]。

パワーエレクトロニクスは周辺技術との新たな連携を強め，また，若手技術者が活躍してきた分野であり，そのことが発展を支えてきました。今後とも，本会の特徴である，

1) 専門分野を細分化せずパワーエレクトロニクス全般を一堂に会して議論できる

* ダイキン工業株式会社
〒525-8526 滋賀県草津市岡本町大谷 1000-2
Daikin Industries, Ltd.
1000-2 Ohtani, Okamoto-cho, Kusatsu-shi, Shiga, 525-8526

を定着，発展させるよう学会として努力していきます。会
員の皆様方の，一層のご支援をよろしくお願いいたします。

2. 新たな技術分野への挑戦

件名	電気学会「半導体電力変換研究会」	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> 昭和57年 11月10日 第10回 山口大学 </div>
日時	1989年1月28日(土) 10:30 ~ 16:45	
場所	関西大学 大学院学会	

② 内容]]

◎ PM形アブラシレスDCモータの脱炭制御法による出力特性の比較 (土防府大)

モータタイプ 炭素整流子	脱炭機 $\phi 1(L_1, L_2)$	半炭機 $\phi 1(L_1, L_2)$	脱炭機 $\phi 1(L_1, L_2)$
磁気槽構造
↓	(B型)	↑	↑

磁気槽構造: 永久磁石
 ↓
 全形に依る
 ↳ 通電起電力 → 空速時電圧 → インバータ容量大

インバータ容量小、磁石への浸透作用大... 高効率
 高効率

最適な組合せが特徴を明確化

図 2 が、その時の共催研究会への出張報告書である。トルク特性とインバータ容量に着目し、大阪府大の発表[2]を深く理解しようとしていた様子が伺える。逆突極機 (IPMSM) は小型化可能でイナーシャが小さく、かつ、リラクタンストルクの併用で高トルクなモータだから、加減速特性に優れるサーボ用途に適したモータになり得るとの認識が多かったように思う。一方、私はその後、モータの巻数を増やせば少ない電流で高トルクだから高効率、モータの巻数を減らさなくても弱め磁束制御で高速回転可能だから高暖房能力、インバータ容量が小さいので低コスト、と一つの技術で複数のニーズに対応できるモータであると解釈した。1990 年 12 月から今に続く大阪府大との産学協同研究と、1996 年 3 月に世界初の量産を開始した省電力ルームエアコン、さらに、多くの用途での実用化の広がりを見ると、この解釈は正しかったと思う。

イ・テクノサービスが発行する MoDE (Motor Design Engineering) Vol.04 に投稿した。MoDE は廃刊となり入手することが出来ないため、以下そのままの記事を掲載する。

1990年、当時の新入社員山際と2人で2つの新しいモータの試作を始めた。何もかもが新たな挑戦という強みと、完成後の価値に対する信念を持って、大学の先生方から絶大なる支援を得た。ひとつは、大阪府立大の武田先生・森本先生と取り組んだIPMモータ、もうひとつは、長岡技科大の故高橋先生との超高速SPMモータである。どちらも、次なる時代の要請と予測した省エネに対する要求が何年経っても陳腐化しないよう、原理原則から超高効率になる

ところで、表題はダイキン工業の経営理念の一番目の項目「社会動向の変化に対する鋭いウォッチングによって、お客様自身も気づいていない“次の欲求”や“夢”を見つけ出し、具体化することが、私たちの使命であり存立基盤です。(中略)お客様に新鮮な驚きと満足を提供し続けます。」のヘッドラインである。モータ開発を振り返ると、まさにこの言葉の重要性を感じる。顕在化した短期の成果を重視しては、短命の技術しか出来ない。社会動向レベルでの「次の欲しい」を企業と大学が共有できて始めて、息の長い新たな価値を生む技術が創造できるのではないかと思う。

当時を振り返ると、

- ・社会動向レベルでの次なるニーズが、省エネだと確信できたこと。
- ・自分が得意とするインバータだけに拘っていは、超省エネが達成できないと考えたこと。

図4 圧縮機駆動用 PM モータ構造（ダイキン工業）の変遷

出展：浅野能成，荒木辰太郎，山際昭雄，大山和伸：「エアコン用モータにおける重希土類使用量の変遷と将来に向けた取り組み」電気学会 モータドライブ・回転機・自動車合同研究会資料，MD-14-074 あるいは RM-14-037 あるいは VT-14-009，2014年7月

- ・原理原則から超省エネとなる本物の技術を指向したこと。
- ・世界中の技術論文を調査し，IPMSM が省エネと快適性を両立できる技術だと予測したこと。
- ・大阪府大の先生方および住友特殊金属の技術者と，オープンな研究開発ができたこと。
- ・産学協同 1 号機の試作結果を早い段階で学会発表し[3]，IPMSM 高効率化の可能性を広く示したことで，様々な情報が集まってくるようになったこと。

など，今でいうオープンイノベーションの取り組みを全て実行したからこそ，当社および私にとって新たな技術であった IPMSM の開発に成功したのだと思う。

3. 省エネモータ開発から学んだこと

〈3・1〉 重希土類使用量削減の必要性 その後，年間電気代削減競争やトップラランナー方式の省エネ規制を経て，日本のインバータエアコンの高効率化が急進展した。さらに，希土類磁石 IPMSM が様々な省エネ商品に搭載され，日本の強み技術に位置付けられるようになった。

一方，周知のように，2010 年の尖閣諸島問題に端を発し，2011 年に希土類元素の市場価格が高騰し，日本が得意とする省エネモータの将来が危惧される事態となった。冷静に見ると，重希土類元素の耐熱特性の良さに頼ったモータ設計を続けていると，重希土類元素の市場価格高騰はいずれ起こる問題であったように思う。

エアコンを例にとると，日本のルームエアコン市場が年間 700～800 万台で推移する中，新興国を中心に世界市場は 9,000 万台規模に急拡大している。地球温暖化の問題を考えると，30%超の省エネを達成できるエアコンへの希土類磁石 IPMSM の適用を推進すべきである。この結果，グローバルに希土類磁石 IPMSM が普及すると，今の十倍規模で希少資源を使うことになり，資源高騰は避けられない。

ここで，希土類磁石 IPMSM 搭載商品拡大の経緯を振り返り，省エネモータ開発から学んだことを述べる。

〈3・2〉 モータ構造と重希土類使用量の変遷 図4に，ダイキン工業の圧縮機駆動用 PM モータの変遷を示す[4]。また，図5には，冷房定格能力 4.0kW のルームエアコンの圧縮機駆動用 IPMSM の重希土類使用量の推移を示す。

1990 年代後半トップラランナー方式の省エネ規制により，IPMSM 搭載商品の拡大が急務となった。搭載商品を拡大するには，磁石重量を減らし低コスト化しなければならない。一方，省エネ性を高めるためには，主磁束量を減らすことはできない。当時，重希土類原料価格が下落傾向にあった。このため，Dy を増やして保磁力を上げ，表面積は減らさず磁石厚を薄くする方向に開発が進んだ。この結果，図5の2001年に見るように重希土類の使用量が増加した。

2000 年代半ばには，トップラランナー方式の基準が冷房定格 COP から，通年エネルギー消費効率 APF に変更されることになった。APF はエアコン使用時に発生頻度の高い中間

図5 圧縮機駆動用 IPMSM（ダイキン工業）における重希土類使用量の推移

冷房定格能力 4.0kW ルームエアコンの圧縮機駆動用 IPMSM

性能を重視するため、モータの部分負荷効率を上げなければならない。このため、集中巻の採用や磁石表面積を増やして銅損を減らす方向に開発が向かった。同時に、低コスト化のために積厚を下げたが、低積厚化に起因する減磁耐力向上の必要性から、磁石重量の増加とともに重希土類の使用量も増えた。

2009年には、さらなる高効率化を目的として、重希土類使用量を6割削減したネオジム磁石を世界で初めてIPMSMに採用した。粒界拡散法により残留磁束密度が11%向上し、保磁力の分布を克服する構造の採用で、APF 1.5%の向上に成功した[5]。これにより、IPMSMの初期段階から続いていた重希土類の使用量増加に歯止めをかけ、他用途に先駆けて高効率化と省Dyを両立した。その後、周知のように、2011年には希土類元素の市場価格が高騰し、図4に見るように、低コスト化を目的として省Dy磁石をほぼ全ての商品に搭載するようになった。

〈3・3〉 グローバル視点の重要性 ここで、注目すべきことは、希土類元素の市場価格が高騰する前、2009年に省Dyモータを商品化したことである。2008年信越化学の技術者と議論したのは、以下のようなことであった。

- ・Nd(軽希土類)やDy(重希土類)が多くあったため、磁石用途への供給量が増え、低コスト化が進んだ。
- ・しかし、軽希土類と重希土類の地表付近に存在する割合を考えると、重希土類7%は使いすぎである。
- ・資源バランスを考えると、重希土類を半減しなければならない。さらに、中国への偏在を考えると0にすべき。
- ・有望な技術として粒界拡散法がある。しかも、重希土類が少ないため、磁力が強くなる。
- ・でも、工程が増えるためコスト高。さらに、保磁力が均一でないため、減磁しない設計に新たな解釈が必要。

結局、磁力の強さを前面に出し、この磁石でないと省エネトップのモータは実現できないと主張し、コスト高のまま世界初の商品化につなげた。また、これを広くPRすることで他社も採用し、低コスト化が進むことを期待して商品発売前に新聞発表した[6]。しかし、他社の追随はなく、Dy高騰後、やっと当初設置したラインがフル稼動し始めたと聞く。振り返ると、この問題を一企業の課題ではなく、グローバルな課題として早期に国レベルの問題にすることが出来ていれば、異なった展開があったように思う。

4. パワーエレクトロニクス学会に期待すること

冒頭で述べた1991年11月19日の第1回PE研運営強化検討委員会議事録を見ると、以下の発言がある。

電気学会産業応用部門と同じでは困ると思う。狭い範囲で質を上げるのは、電気学会の役目、この研究会の役割は、

- ①地域性の特色をどのように出すのか。
- ②他の学会が手を出さないような分野についての活動
- ③教育面

などが考えられる。

また、同様に本稿第1章で述べたように、2005年度会誌発行にあたって巻頭に以下を述べた。

- 1) パワーエレクトロニクスは周辺技術との新たな連携を強め、若手技術者が活躍してきた分野である。
- 2) 当学会には、専門分野を細分化せずパワーエレクトロニクス全般を一堂に会して議論できる良さがある。
- 3) 当学会12月の若手研究会には、自らが企画し参加する自分の意思で動く良さがある。

この良さが無くなり、電気学会と同じことをやるのでは意味が無い。産業応用部門は、技術委員会の改廃・名称変更、および、分野に跨る情報交換を活発に行うために複数の技術委員会での研究会共同開催を推進している。また、企業若手へのサービスを充実する取り組みも開始した。

パワーエレクトロニクス学会には、専門分野を細分化せず、また一つの分野に偏らず、大阪や京都まで1時間強で集まることのできる地の利を活かして、

- ・常に複数の技術領域から発表のある研究会の開催
- ・商品に使われている技術の紹介
- ・異分野、周辺技術の講演、交流の場の提供
- ・歴史文化に接して視野を広げる場の設定
- ・企業若手が自らの意思で企画し参加する研究会

などを期待したい。

(2014年12月20日発表)

文 献

- [1] 大山和伸：「パワーエレクトロニクス学会 2005 年度会誌発行にあたって」，パワーエレクトロニクス学会誌，Vol.31，pp.1，2006 年。
- [2] 森本茂雄，武田洋次，平紗多賀男：「PM 形ブラシレス DC モータの電流制御法による出力特性の比較」，電気学会半導体電力変換研究会資料，SPC-89-3，pp.19-28，1989 年。
- [3] 森本純司，森本茂雄，武田洋次，平紗多賀男，山際昭雄，大山和伸：「表面磁石および埋込磁石構造 PM モータの特性比較」，平成 4 年電気学会全国大会，701，1992 年。
- [4] 浅野能成，荒木辰太郎，山際昭雄，大山和伸：「エアコン用モータにおける重希土類使用量の変遷と将来に向けた取り組み」電気学会 モータドライブ・回転機・自動車合同研究会資料，MD-14-074 あるいは RM-14-037 あるいは VT-14-009，2014 年。
- [5] 上石田弘毅，富岡直人，井田一男，湯浅健一，片岡義博，山際昭雄，青田桂治：「新型 IPM モータ搭載高効率スイング型圧縮機の開発」，2010 年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集，D324，pp.D324-1～D324-4，2010 年。
- [6] 「希土類使用 6 割削減，ダイキン，需給逼迫に備え」，2009 年 8 月 29 日，日経 11 面，2009 年。

大山 和伸

1956 年 8 月 19 日生まれ。1979 年 3 月東京工業大学電気電子工学科卒業。1981 年 3 月東京工業大学大学院修士課程修了。同年 4 月名古屋工業大学電気工学科助手。1986 年 2 月ダイキン工業入社。現在、常務専任役員，モータ・インバータ担当。1998 年電気学会電気学術振興賞進歩賞，2003 年全国発明表彰発明賞受賞。2005・2006 年度パワーエレクトロニクス学会会長。2014・2015 年度電気学会産業応用部門長。パワーエレクトロニクス学会，電気学会，IEEE 会員。