

空調技術の最新動向

Latest Trends in Air-Conditioning Technology

本郷 一郎 温品 治信 平山 卓也

■ HONGO Ichiro ■ NUKUSHINA Harunobu ■ HIRAYAMA Takuya

空調分野は電力需要の大きな部分を占めており、近年の省エネの必要性からいっそうの高効率化が求められている。このような状況のなか、空調機に用いられているヒートポンプ技術が、高効率を期待できることから世界的に注目を集めている。欧州では再生可能エネルギー利用技術として定義され、空調だけでなく給湯などの分野でも製品が開発されている。

東芝キャリア(株)は、コンプレッサ、インバータ、及び冷凍サイクル技術をコア技術として研究開発を行い、省エネ性の高い空調機器を商品化してきた。今後も高効率な製品開発に注力していく。

High-efficiency air-conditioning technology has become increasingly necessary for energy conservation because air conditioners account for a significant portion of electric power demand. Heat pump technology, which is defined as renewable energy in Europe, is attracting worldwide attention from an energy-saving standpoint and is being applied not only to air-conditioning systems but also hot-water supply systems.

With these trends as a background, Toshiba Carrier Corporation has been focusing on research and development of core technologies including air-conditioner compressors, inverters, and refrigerating cycles, and releasing high-energy-saving products. We are making continuous efforts to develop highly efficient air-conditioning systems.

エアコン技術の変遷と 東芝の取組み

東芝は、1980年12月に世界で初めてインバータエアコンを商品化して以来、エアコンのインバータ化を推進してきた。

インバータ制御のエアコンは、運転開始時にはコンプレッサを高速で運転することで大能力が得られ、設定温度に近づくと低速での連続運転を行うため、快適な空間が得られるばかりではなく、熱交換器が相対的に大きくなる効果などにより、大きな省エネ性能が得られるというメリットがある。

また、空調機に用いられているヒートポンプ技術は、一次燃料を直接燃焼させる場合と異なり、冷凍サイクル中の冷媒ガスの膨張と圧縮に伴う相変化熱を利用するもので、非常に高い成績係数COP (Coefficient of Performance) (囲み記事参照) が得られ、家庭用エアコンの最新機種RAS-28IPDRでは冷暖定格平均COPは5.44、ビル用マルチエアコン8馬力(HP)クラスでは4.11を達成している。

このためインバータヒートポンプは、世界的にエネルギー需要の大きな暖房・給湯用途を中心に省エネの切り札としての期待が高まっており、2008年12月に欧州議会で採択された再生可能エネルギー指令案の中でも、空気熱利用のヒートポンプは再生可能エネルギー利用技術として定義されている。

一方、エアコンに対する省エネ規制は1999年4月改正の省エネ法「エネルギーの使用の合理化に関する法律」から定められ、2006年4月改正の省エネ法では定格COP評価に代わり、通年期間エネルギー消費効率APF (Annual Performance Factor) (囲み記事参照) が評価基準として採用された。また、冷媒に関しても、従来用いられていたHCFC (ハイドロクロロフルオロカーボン) 冷媒 (R-22) はオゾン層破壊係数が高く、オゾン層を破壊しないHFC (ハイドロフルオロカーボン) 冷媒への切替えが求められていたが、東芝キャリア(株)は、1998年1月商品化の家庭用エアコンにおいて、業界に先駆けてHFC冷媒 (R410A) を採用し、順次搭載機種を拡大してきた。

HCFC冷媒からHFC冷媒への転換は、当初家庭用エアコンでは高圧のR410A、業務用エアコンでは低圧のR407Cを採用する方針でスタートしたが、当社は、家庭用エアコンの省エネ性の高さから業務用エアコン (店舗オフィス用エアコン、ビル用マルチエアコン) にもR410Aを採用し、省エネ化を推進してきた。また、空調機だけでなく、業務用冷凍機、家庭用や業務用給湯システム、及び温水暖房システムへの展開を行っている。

更には、セントラル空調方式を採用しているビル・産業用の大規模施設の熱源機にもR410A搭載のモジュール方式のヒートポンプチラーを開発し、燃焼式の熱源機に代わる高効率システム化を推進している。

HFC冷媒は温暖化係数が高く、温暖化係数の低い冷媒 (自然冷媒など) の研究が進められているが、自然冷媒として候補に挙げられるアンモニア、炭化水素、二酸化炭素 (CO₂) には各々、毒性、強燃性、高圧で低効率という問題があり、安全性や省エネ性 (ライフサイクルにおけるエネルギー使用量) の観点か

COPとAPF

COP

COPは、冷暖房能力を消費電力で除した数値で表され、入力は何倍の能力を出力しているかを表す。省エネの規制値としては、1999年時点でのトップの製品の数値(冷房定格と暖房定格のCOP値の平均値)を基準値とし、2004年度(一部は2007年度)に各メーカーの出荷加重平均がこの値をクリ

表A. 家庭用エアコンのCOP基準値

定格冷房能力(kW)	2.5以下	3.2以下	4.0以下	7.1以下
基準値	5.27	4.90	3.65	3.17

* 4.0 kW超7.1 kW以下の基準値は2007年度から適用

アしないとイケないというもので、家庭用エアコンの基準値は表Aのとおりであった。

APF

APFは、年間を通じてエアコンを使用したとき、1年間に必要な冷暖房能力を、1年間でエアコンが消費する電力量(期間消費電力量)で除した数値で表され、より実使用に近い評価になり、この値が大きいほど省エネ性が高いと言える。東京地区にある木造建物の南向きの洋室で、暖房期間が10月28日～4月14日、冷房期間が6月2日～9月21日、1日の使用時間が

6:00～24:00の18時間において、外気温度が16℃以下のときに暖房が必要、24℃以上のときに冷房が必要と規定され、外気温度に応じて必要な空調能力が異なるため、外気温度分布から性能を計算して求めると表Bのようになる。

表B. エアコンのAPF基準値

定格冷房能力(kW)		3.2以下	4.0以下
基準値	寸法規定*	5.8	4.9
	寸法フリー	6.6	6.0

* 1: 省エネ法でトップランナー方式により規定される基準値

* 2: 室内機の寸法が幅800 mm以下、かつ高さ295 mm以下

ら、空調用としてまだ採用に至る冷媒がないというのが現状である。現在、冷媒充てん量の少ない冷蔵庫用に炭化水素が、また、低温の水から一気に高温の湯を作るヒートポンプ給湯用にHFC冷媒と同等の性能が期待できるCO₂が実用化されている。

一方、機器単品での性能向上だけでなく、特にビル用マルチエアコンを中心として集中制御又はネットワーク制御による空調管理やエネルギー管理のニーズも高まっており、当社ではオープンプロトコルであるBACnetTM(注1)やLONWORKS[®](注2)に対応した機器、及びタッチパネル方式の空調管理システムや遠隔監視機器を開発してきた。また、2008年には、ユーザーのパソコンで空調機を管理できるWeb対応空調コントローラを開発した。更に、省エネ以外にも、家庭用エアコンを中心として再熱方式の除湿機能、電気集じん方式の空気清浄機能、換気機能、及びエアフィルタの自動清掃機能を開発し、快適性とメンテナンス性の向上も図っている。

空調機の省エネには各要素の効率化が必要である。熱交換器においては、アルミニウムフィン高性能スリット、伝熱管の高性能化や細径化、円弧型の熱交換器を開発し、小型・高性能化を図ってきた。室内・室外送風機についても、新翼

形状の開発により騒音を低減し送風効率を向上させ、大風量化による冷凍サイクルの効率向上と合わせて省エネを推進してきた。特にシステムの消費電力の80%を占めるコンプレッサとそれを駆動するインバータ制御技術については、当社のコア技術として様々な開発を推進し、業界を大幅にリードする製品を“インバータ&グリーン戦略”と称して展開してきた(図1)。

このため国内では、(財)省エネセンターの「省エネ大賞」を1993年に受賞したのを皮切りに、1999年からは11年連続で通算22回受賞してきた。また、インバータエアコンの開発は、2008年に電気学会の電気技術顕彰「電気の礎」を受賞した。以下に、主要技術であるコンプレッサとインバータの開発成果について述べる。

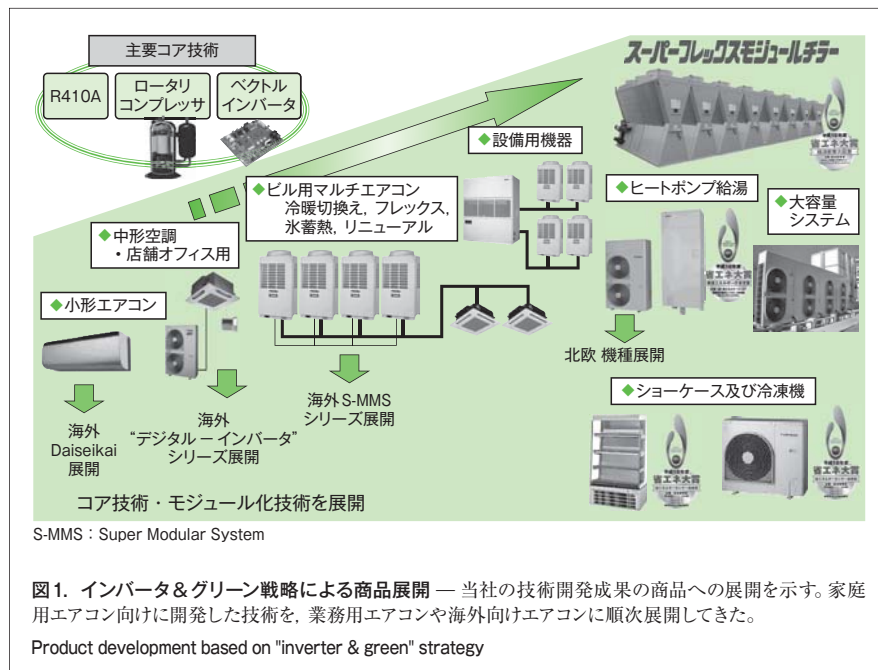


図1. インバータ&グリーン戦略による商品展開 — 当社の技術開発成果の商品への展開を示す。家庭用エアコン向けに開発した技術を、業務用エアコンや海外向けエアコンに順次展開してきた。

Product development based on "inverter & green" strategy

(注1) BACnetは、ASHRAE(米国冷暖房空調工業会)の登録商標。

(注2) LONWORKSは、Echelon Corporationの商標。

コンプレッサ

■省エネ技術開発

ロータリコンプレッサは、クランク軸に取り付けられた回転ピストンがシリンダ内壁に密接して偏心回転し、シリンダとピストンで形成される空間を高压側と低压側に仕切る羽根（ベーン）が、ばねとガス圧によりピストン外周に押し付けられた状態でシリンダの溝内を往復運動する構造で、空調用途ではたいへん高効率なコンプレッサである。特に、二つのシリンダを持ち、位相を180°ずらしたツインロータリコンプレッサは、トルク変動を大幅に低減でき、低速回転から高速回転に至るまで低振動及び高効率で運転できるという特長があり、当社の主力となっている。

当社は、1998年に業界に先駆けて、このツインロータリコンプレッサをR410A冷媒対応とし、家庭用エアコン向けに商品化した⁽¹⁾。HFC冷媒のR410Aは、動作圧力が高く潤滑性も劣るため、コンプレッサの開発にあたり冷媒漏れ損失の低減としゅう動部の信頼性確保を目的として、排除容積の適正化、デッドボリュームの最小化、ローラ形状の変更、及び部品のクリアランス精度向上と変形防止を行い、また、軸受混合潤滑解析⁽²⁾などのシミュレーションを実施し、性能と信頼性の両立を実現した。

その後、性能向上のための開発を継続するとともに、能力や使用範囲の拡大を図り、2001年には業務エアコン用、2002年には給湯暖房機用、2004年にはホテル空調用（横型）、2005年にはショーケース用のロータリコンプレッサを順次開発し（図2）、各システムの省エネ性向上に寄与してきた。更に、2009年には家庭用給湯機向けに、R410Aより高压となるCO₂冷媒対応のコンプレッサを開発した。

一方、コンプレッサモータにはブラシレス直流モータを採用しているが、磁石の形状・配置とスリット形状の最適化、ステータ巻線の分布巻きから集中巻きへの変更、及びフェライト磁石から強磁



図2. R410A冷媒対応ツインロータリコンプレッサのラインアップー エアコン用途から給湯暖房機やショーケース用途まで、R410A冷媒に対応した幅広いラインアップにより、各システムの省エネ性向上に寄与してきた。

Lineup of rotary compressors using R410A refrigerant

性の希土類磁石への変更などの施策により、限られたスペース内でのモータの小型化と省エネ化を推進してきた。また、2007年には、モータコアのスロット部とコイルの絶縁に薄膜フィルムを用いる方式を開発し、リサイクルが技術的に困難であった樹脂成形絶縁材の使用量を24%低減した。

■APF向上技術

製品のAPFの向上には、特に運転頻度の高い中間能力域の性能向上が不可欠である。これに対し当社は、排除容積の最適化に加え、モータ巻線の直巻・高密度化により、中間能力域での効率が最大化するようにチューニングを施している。また、いっそうの高効率化のため、2007年には、機械部の構造を大幅に見直した1サクショントツインロータリコンプレッサを商品化した⁽³⁾（図3）。

この新コンプレッサは、シリンダの厚みを従来より15%薄くすることで、ガスの漏れ流路幅及び軸に掛かるガス負荷力を小さくし、漏れ損失と軸細径化によるしゅう動損失の低減を可能にした。また、仕切板に設けられた吸込ポートから上下のシリンダに交互に吸い込ませる構造をとることで、吸込脈動を低減し、吸込ロスと騒音の低減にも効果が得られている。これらに加え、吐出ポート形状の最適化なども含め、この新コンプレッサの搭載により、同能力クラスの従

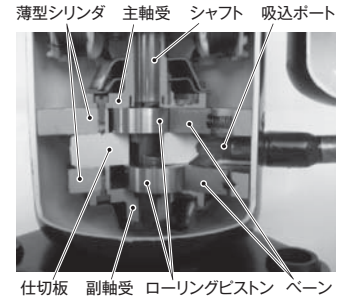


図3. 1サクショントツインロータリコンプレッサー従来ツインロータリの構造を大幅に見直し、シリンダの薄型化と仕切板の吸込分岐構造を採用することで、性能の向上及び騒音の低減を実現した。

Cross-sectional view of one-suction type twin rotary compressor

来製品に対しAPFを約6%向上させることができた。

■可変気筒（デュアル）技術

近年、省エネに配慮した高断熱で高気密の居住空間が増加しており、設定温度付近の微小能力域での運転時間が極めて長くなる傾向にある。微小能力域においては、インバータ制御であっても断続運転を余儀なくされ、省エネ性や快適性を損ねるため、コンプレッサの最小能力域の拡大が求められている。

これに対し当社は、APFや最大能力を犠牲にすることなく最小能力域を拡大する方法として、独自技術である可変気筒（デュアル）システムを開発し⁽⁴⁾、2008年からルームエアコン“大清快™”に搭載している。このシステムは、シリンダを二つ持つツインロータリならではの技術で、通常は休筒側シリンダ室には吸込ガスが導入され、ベーンが背面と先端面との差圧でローリングピストンに押し付けられることにより圧縮室が形成され、2シリンダで運転される（図4）。

一方、微小能力運転時には、切替弁により休筒側シリンダ室に吐出圧力の冷媒ガスを導入することで、ベーンに働く差圧をキャンセルし、ベーンを背部にある磁石で保持する。そのため圧縮室は形成されず、1シリンダ運転が可能になる。この方式により、最小能力を1/2に

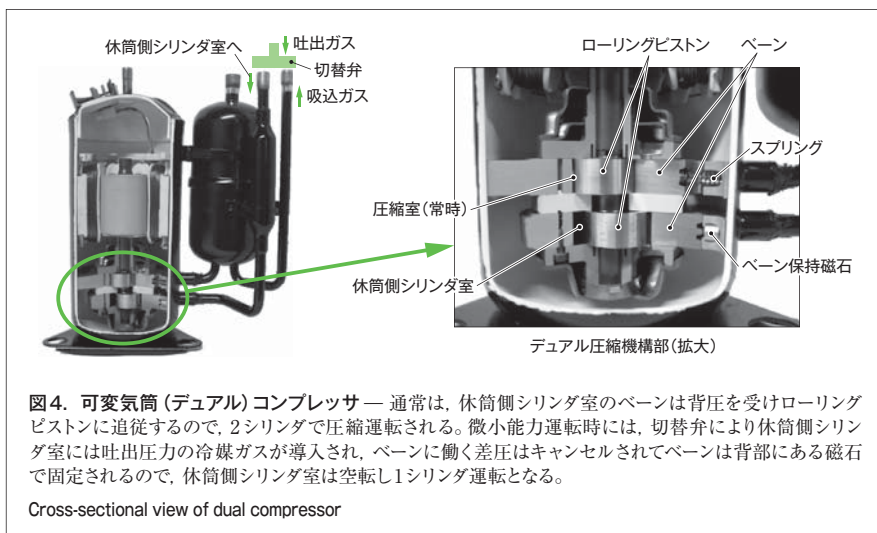


図4. 可変気筒(デュアル)コンプレッサ — 通常は、休筒側シリンダ室のベーンは背圧を受けローリングピistonに追従するので、2シリンダで圧縮運転される。微小能力運転時には、切替弁により休筒側シリンダ室には吐出圧力の冷媒ガスが導入され、ベーンに働く差圧はキャンセルされてベーンは背部にある磁石で固定されるので、休筒側シリンダ室は空転し1シリンダ運転となる。

Cross-sectional view of dual compressor

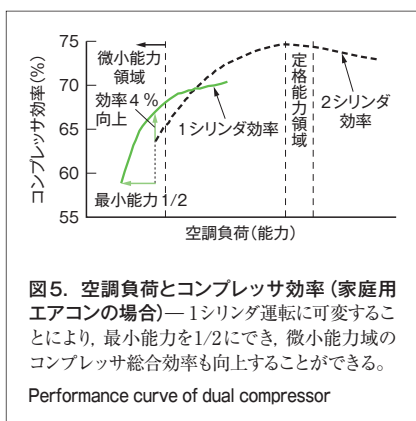


図5. 空調負荷とコンプレッサ効率(家庭用エアコンの場合) — 1シリンダ運転に可変することにより、最小能力を1/2にでき、微小能力域のコンプレッサ総合効率も向上することができる。

Performance curve of dual compressor

できると同時に微小能力域のコンプレッサ回転数を増大できるのでモータ効率が向上し、コンプレッサの総合効率を向上させることができる(図5)。

インバータ技術

東芝が1980年12月に世界で初めてインバータをコンプレッサの駆動に応用した業務用エアコンを商品化し、翌年に家庭用インバータエアコンを商品化して以来、一貫してインバータ技術の開発を推進しており、家庭用エアコンで量産化した開発技術を業務用に展開してきた。

エアコン用インバータの構成を図6に示す。インバータは商用電源から得た電力をコンプレッサモータと室外ファンモータのそれぞれに最適な交流電力へ変換しており、省エネを目的とした変換効率向上技術などのほか、環境に配慮

した制御アルゴリズムや回路方式の開発も積極的に推進している。これらの技術について次に述べる。

■省エネ技術

●APF向上技術

中間能力域で運転するときインバータでいちばん大きい損失を占めているのはコンプレッサモータ駆動インバータ部で、この損失には導通損失とスイッチング損失があり、導通損失のほうが大きい。この導通損失を低減すればインバータの効率を効果的に向上することができる。導通損失を低減するパワーデバイスには、スイッチング電源などで使用されているSuper-Junction構造の低ON抵

抗MOSFET(金属酸化物半導体型電界効果トランジスタ)のSJ-MOSFETがある。このSJ-MOSFETには内部寄生ダイオードの逆回復時間が遅く、モータなどの誘導負荷ではスイッチング損失が増えるという課題があり、誘導負荷の駆動に採用されていなかった。

この課題を、独自の駆動技術である“スマート・プレ・スイッチング™”(以下、S・P・Sと呼ぶ)により、低電圧電源から逆回復電流を注入することで、逆回復時間を短縮すると同時に逆回復損失を1/10以下に削減し、誘導負荷への適用を可能にした。このS・P・S回路は、SJ-MOSFETのゲートとソース間に低電圧電源を接続するので、3相ブリッジの下相は電源を共通化できるが、上相は各ソース電位が異なるため三つの独立した電源が必要で、回路が複雑になる欠点がある。エアコンのAPFは中間能力域の効率で決まり、このときのモータ巻線への印加電圧は低いので、波形合成の変調方式を下相の通電率を大きくした2相変調とし、下相にだけS・P・S回路を適用することで回路の複雑化を押しさえ、従来よりもインバータの効率を2~4%向上させた(図7)。

更に、このS・P・S回路をハイブリッドIC化し、3相ブリッジ回路と駆動回路をモジュール化することで、実装面積の低減と逆回復電流の経路の短縮による雑音

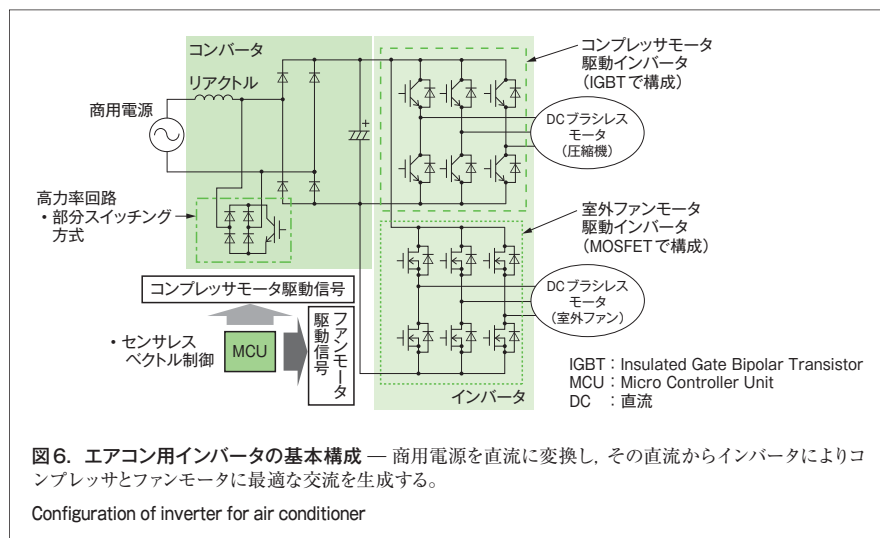
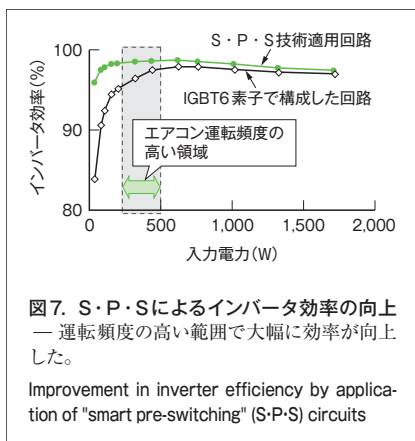


図6. エアコン用インバータの基本構成 — 商用電源を直流に変換し、その直流からインバータによりコンプレッサとファンモータに最適な交流を生成する。

Configuration of inverter for air conditioner



端子電圧の低減を実現した (図8)^{(5), (6)}。

● コンプレッサ最小運転範囲の拡大技術

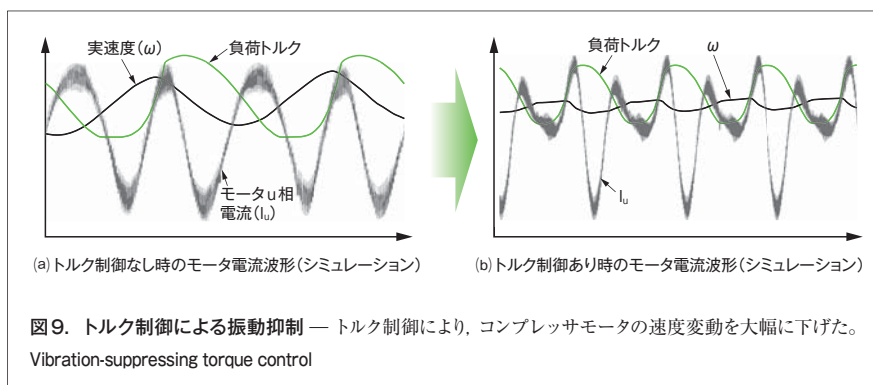
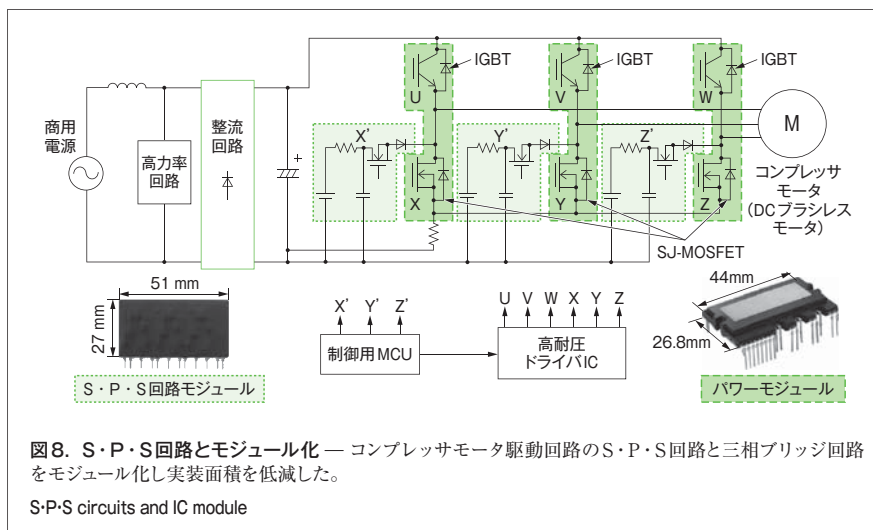
コンプレッサを断続で運転すると余分なエネルギーを消費するので、住宅の断熱性能向上に合わせ、エアコンの最小能力を下げ、連続運転範囲を広げることが求められている。コンプレッサの可変気筒技術により最小能力を従来の1/2にしたが、この1シリンダ運転ではモータ1回転中に負荷トルクが0から100%まで変化し、製品の振動が大きくなるという課題がある。コンプレッサモータの負荷トルクに合わせたトルク制御技術を開発し、回転数の変動を1/5に低減して振動を抑えることで最小運転可能範囲を広げ、45W入力時の空調能力200Wを実現した⁽⁵⁾。

● コンプレッサ最大運転範囲の拡大技術

APF向上技術として、コンプレッサのモータ巻線を中間能力の効率に最適化したことにより、モータの誘起電圧が従来の1.5倍と大幅に大きくなり、従来の制御方法では最高回転数が下がってエアコンの最大能力が低下するという課題があった。コンプレッサモータの制御にベクトル制御を採用し、リアルタイムに電流を制御して応答性を速くするとともに、モータの誘起電圧を制御することで、制御の安定性とエアコンの最大能力を確保した (図9)。

■ 環境対応技術

家庭用に限らず、業務用においても全消費電力に占めるエアコンの割合は大きい。すべてのエアコンをインバータ搭



載タイプに更新するとシステムの電源高調波が大きくなり、送配電機器やほかの機器へ悪影響を与えるので、電源高調波を低減する技術が重要となっている。

● 単相電源の高調波低減技術

一般家庭や小規模店舗用のエアコンは単相電源を使用しており、最大能力の小さいエアコンは、設置が容易なコンセントから電力を取り出している。コンセントは最大でも20Aの上限があり、電源高調波を低減すると同時に、いかに効率よく電力を取り出せるかが重要となる。コンセントから取り出せる有効電力 P_{in} は、(1)式で表せる。

$$P_{in} = V_{in} \times I_{in} \times \cos(\theta) \quad (1)$$

P_{in} : 入力有効電力,
 V_{in} : 入力電圧実効値,
 I_{in} : 入力電流実効値,
 θ : 電圧-電流位相差

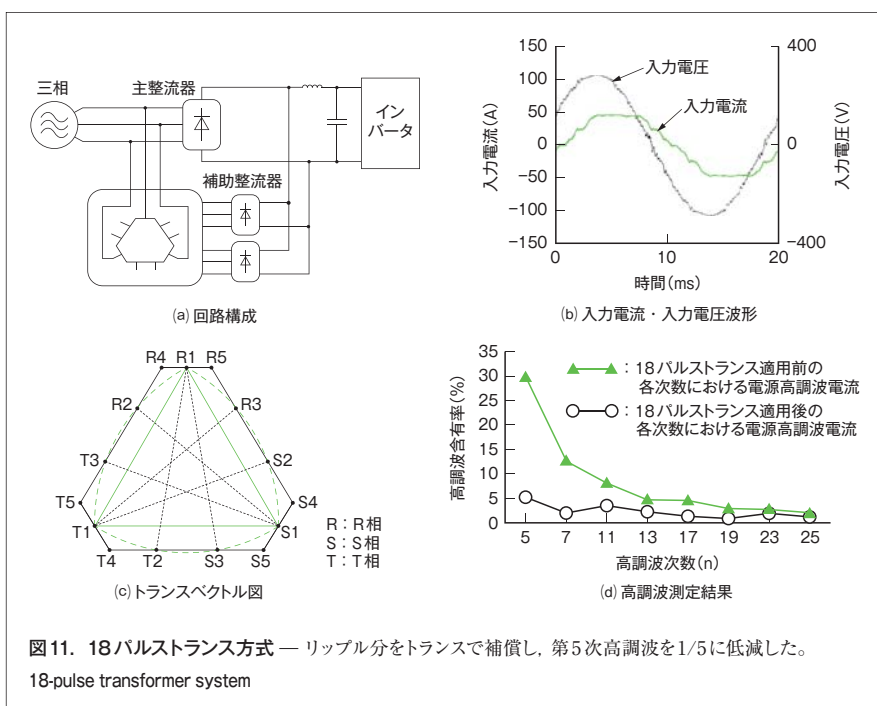
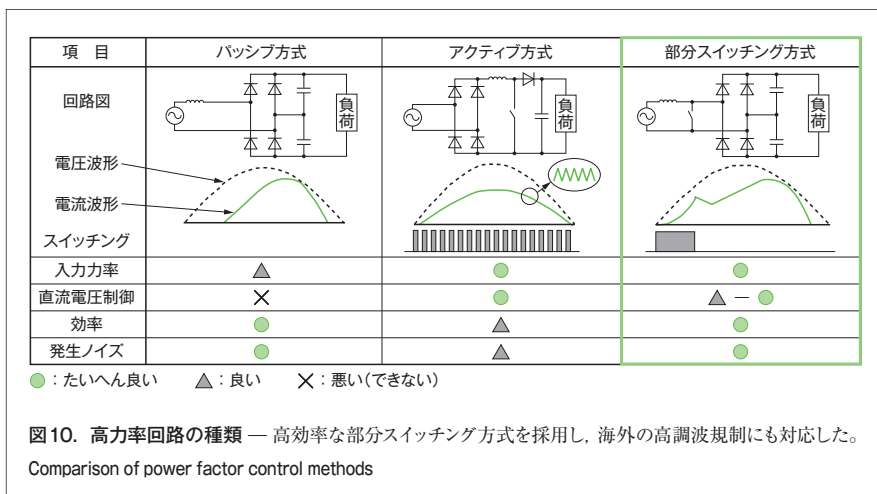
(1)式から、入力電流の位相を入力電

圧に近づけることが重要だとわかる。

この位相差を小さくする回路として高力率回路 (図10)⁽⁵⁾があり、従来はパッシブ方式かアクティブ方式が採用されていた。当社はその中間にあたる部分スイッチング方式を採用し、スイッチングパターンを最適化することで、効率とコストを両立させるだけでなく、海外の高調波規制にも対応した。

● 三相電源の高調波低減技術

大規模店舗などの高能力業務用エアコンは三相電源を使用しており、受電容量に応じて電源高調波の上限が規制されている。三相インバータでは、三相交流を全波整流してリップル分を含む直流へ変換し、電解コンデンサでリップル分を低減して直流電圧を得ている。このリップル分によるパルス状の電流が電源高調波の原因であるため、このリップル分トランスで補償する18パルス方式^(注3)を採用し、第5次高調波で



1/5と大幅に低減した(図11)⁽⁷⁾。

今後の展望と取組み

ヒートポンプ技術はCO₂排出量削減のキー技術として今後も発展を続け、従来の住環境を対象とした空調から、対物空調や給湯などほかの分野への拡大が期待されている。また、蓄熱技術との連携による排熱及び自然エネルギーの利用も求められており、建物の断熱性強化に

対応した低負荷連続運転時の省エネ化、空気湿度制御や換気との融合といった空質改善テーマなど、従来とは異なる取組みが必要な時機を迎えている。更に、温暖化係数の高いHFC冷媒に代わる次世代の新冷媒の研究も活発化している。

当社は、21世紀の環境創造企業になることをビジョンとして掲げているが、2009年が当社の富士事業所でエアコンの製造を開始して50周年にあたることから、50年先の未来を考える“仁王悟空

(注3) 18パルス方式

電源高調波を低減する三相電源の多重整流方式の一つで、巻線を工夫した三相トランスの出力を合成し、整流器で18相(18パルス)整流を行う方式。

(2059) プログラム”を立ち上げた。今後、空調機のいっそうの省エネ化と業務用や海外向けへの展開、及び使用範囲の拡大を推進していく。

文献

- (1) Sasahara, Y., et al. "Development of 2-Cylinder Rotary Compressor with R410A". Proc. 1998 PURDUE Compressor Tech. Conf. 1, 1998, p.447-452.
- (2) Hirayama, T., et al. "Numerical Analysis for Mixed Lubrication in Journal Bearings of Rotary Compressors". Proc. 2006 PURDUE Compressor Tech. Conf. 2006, C135-1 - C138-8. (CD-ROM).
- (3) Tominaga, T., et al. "Development of A High Efficiency 2-Cylinder Rotary Compressor For Annual Performance Factor". Proc. 2008 PURDUE Compressor Tech. Conf. 2008, 1325-1 - 1325-8. (CD-ROM).
- (4) 小野田 泉, ほか. 空調用デュアルステージコンプレッサ. 東芝レビュー. 59, 4, 2004, p.44-47.
- (5) 山梨 泰, ほか. "最新のエアコン用高効率インバータ技術". 第29回モータ技術シンポジウム. 幕張, 2009-04, 日本能率協会. 2009, E6-2-1 - E6-2-11.
- (6) 遠藤隆久, ほか. エアコン用インバータ装置の省エネ技術. 東芝レビュー. 61, 12, 2006, p.47-50.
- (7) 小林壮寛, ほか. "18パルス方式による三相高調波低減方法". 平成16年電気学会全国大会. 相模原, 2004-03, 電気学会. 2004, 第4分冊 p.51.



本郷 一郎
HONGO Ichiro

東芝キャリア(株) 技師長。空調機器の先行開発に従事。日本機械学会, 日本冷凍空調学会会員。
Toshiba Carrier Corp.



温品 治信
NUKUSHINA Harunobu

東芝キャリア(株) 技術本部 コアテクノロジーセンターグループ長。制御機器の先行開発に従事。電気学会会員。
Toshiba Carrier Corp.



平山 卓也
HIRAYAMA Takuya

東芝キャリア(株) 技術本部 コアテクノロジーセンター主務。コンプレッサの先行開発に従事。日本機械学会, 日本冷凍空調学会会員。
Toshiba Carrier Corp.