

インバータ駆動容量制御パッケージ形空調機

Capacity-Modulated Packaged Type Air Conditioners Equipped with an Inverter-driven Scroll Compressor

店舗やオフィスで使用されるパッケージ形空調機では、省エネルギー化、快適性向上が強く望まれている。このニーズに対して日立製作所は、スクロール圧縮機の回転数制御を行なう容量制御パッケージ形空調機を開発した。

本開発機の圧縮機定格回転数は4,250rpm、最小回転数は1,580rpm、最高回転数は5,100rpmである。

本開発機の年間のエネルギー消費効率は、往復動圧縮機を用いオンオフ制御する場合よりも約35%向上する。また、低回転数(2,050rpm)で運転する除湿機能により中間期の快適な空調を可能とし、また、低室外温度での暖房能力を向上し室温の立ち上がりを改善した。

これらの成果をもとに、昭和59年5月に販売を開始し、昭和60年4月には6機種を製品化した。

小国研作* Kensaku Oguni
原田文雄** Fumio Harada
堀内紀昭** Noriaki Horiuchi
加藤 喬** Takashi Katô

1 緒 言

店舗やオフィスなどで使用されるパッケージ形空調機では、省エネルギー化、省スペース化及び快適性向上が強く望まれている。これに対して日立製作所は、圧縮機、熱交換器の効率向上や冷凍サイクル、制御の改善を推進し¹⁾、特に圧縮機については、昭和58年に高効率スクロール圧縮機を実用化した²⁾。

スクロール圧縮機は、従来の往復動圧縮機に比べて体積で40%小形化され、全断熱効率が約10%向上されるなど優れた特性をもち、空調機の小形化、高効率化に大きく貢献している。

図1は、パッケージ形空調機のエネルギー消費効率EER (Energy Efficiency Ratio: 冷房能力/消費電力)とユニットの容積について業界全体の動向を示したものである。年々小形化と同時にEERが向上され、EERについては、各法律の省エネルギー化のガイドラインを超えていていることが分かる。しかし、一方ではEER向上、小形化とも限界に近づいていると言える。

機器が高効率化された現在、更に、省エネルギー化するには年間を通しての効率向上が必要であり、これには圧縮機の容量制御が有効である。

このような背景から日立製作所は、スクロール圧縮機をインバータで駆動する容量制御パッケージ形空調機を開発した。

スクロール圧縮機は、広い回転数域で高効率、低騒音であり、回転数制御に適した圧縮機である。本開発機の圧縮機の定格回転数は4,250rpm(駆動周波数75Hz)であり、最小回転数は1,580rpm(30Hz)、最高回転数は5,100rpm(90Hz)である。

本開発機の特長は、年間のエネルギー消費効率が、往復動圧縮機をオンオフ制御する空調機と比べて約35%高いことである。また、室内の温湿度変動が小さい快適な空調及び低回転数(2,050rpm)で運転される除湿運転により、中間期の快適な空調が可能となった。更に、圧縮機の高速化(5,100rpm)により、室外低温時の暖房能力を向上し、室内温度の立ち上がりを改善した。

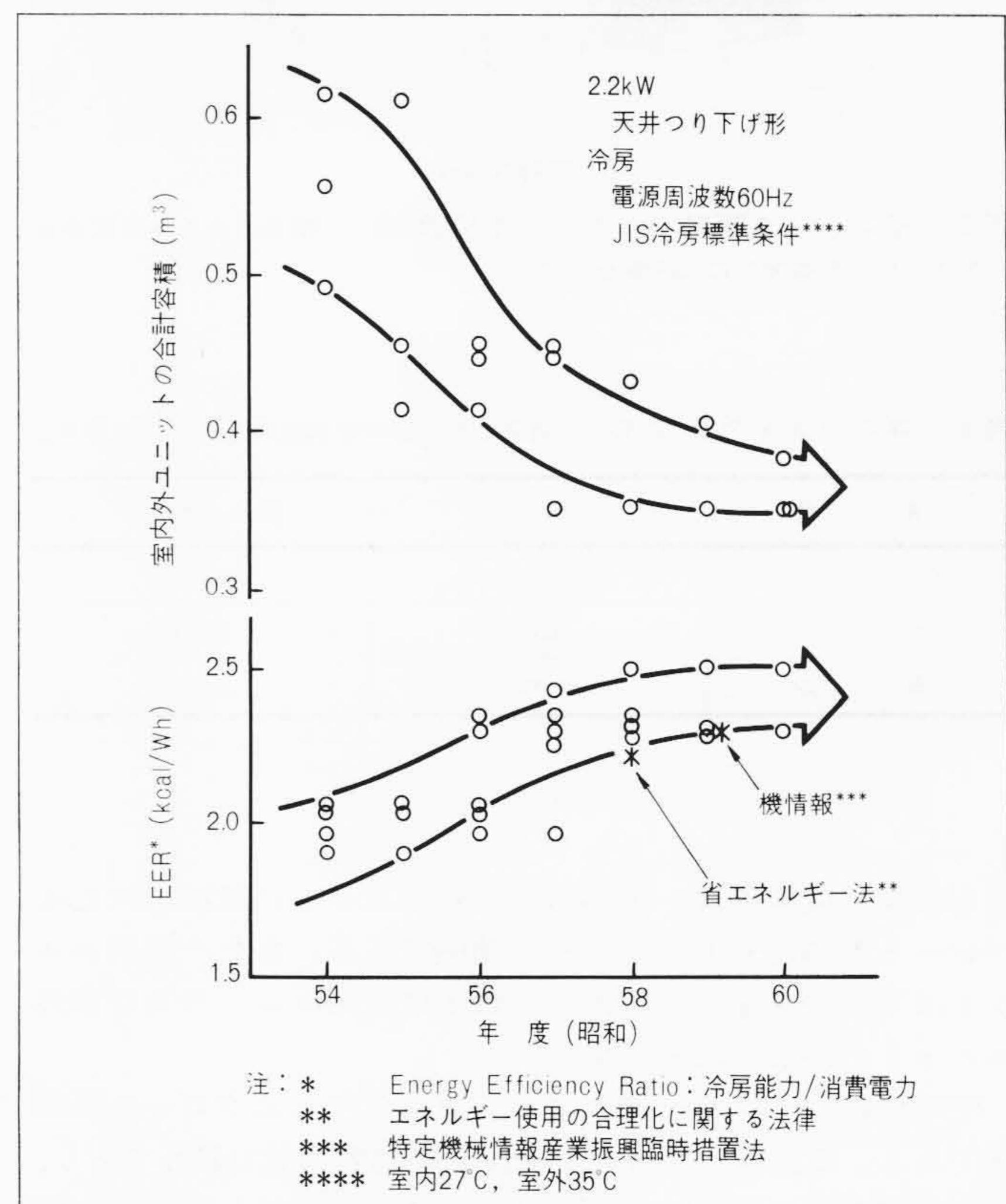
これらの成果をもとに、昭和59年5月に最高回転数4,250

rpmの3機種を製品化し、更に昭和60年4月には最高回転数5,100rpmの6機種を製品化した。

2 特長及び要素特性

2.1 特 長

図2に、開発した2.2kWインバータ駆動パッケージ形空調



* 日立製作所機械研究所 ** 日立製作所清水工場

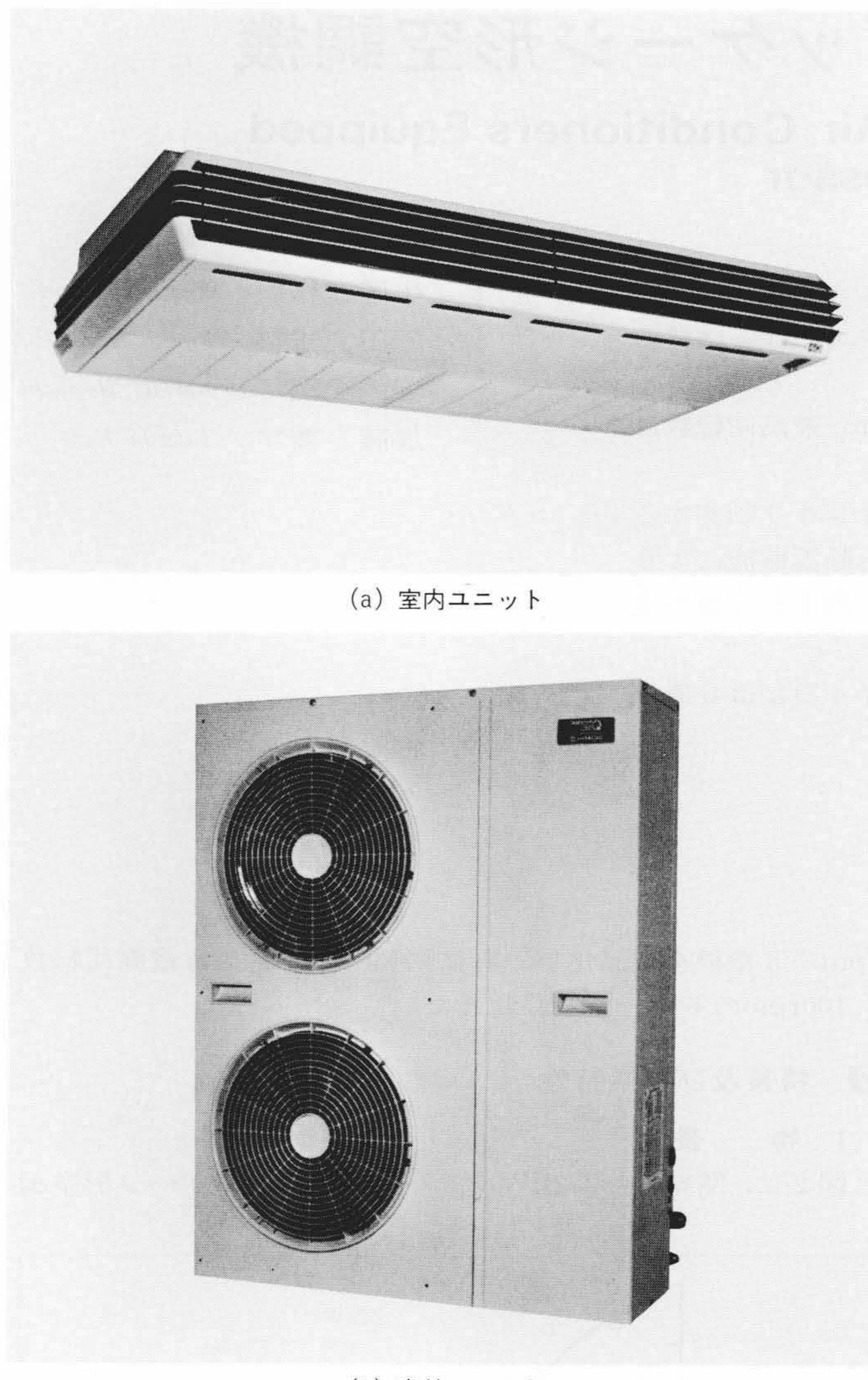


図2 インバータ駆動パッケージ形空調機 開発した2.2kW天井つり下げ形ヒートポンプ式空調機を示す。

表1 ユニットの外形寸法 開発した2.2kW空調機の外形寸法を示す。

項目	室内ユニット	室外ユニット
幅	1,265mm	850mm
奥行	625mm	285mm
高さ	220mm	1,075mm

機を示す。開発機は、圧縮機が室外ユニットに設けられたセパレート形のヒートポンプ式空調機である。また、室内ユニットは天井つり下げ形である。表1に室内ユニット及び室外ユニットの外形寸法を示す。

圧縮機は、インバータによって駆動されるスクロール圧縮機である。定格回転数は4,250rpm(駆動周波数75Hz)であり、最小回転数は1,580rpm(30Hz)、最高回転数は5,100rpm(90Hz)である。

本開発機の特長は、

(1) 往復動圧縮機を用いオンオフ制御を行なう従来空調機と比べて、年間のエネルギー消費効率APF(Annual Performance Factor)が約35%向上したこと。

- (2) 低回転数(2,050rpm)で運転する除湿運転により、中間期にも快適な空調が可能のこと。
 - (3) 室内の温湿度の変動が小さく快適なこと。
 - (4) 室外低温時の暖房能力を向上し、室内温度の立上りを改善したこと。
- などである。

2.2 スクロール圧縮機の特性

日立製作所は昭和58年にスクロール圧縮機を実用化したが、これは日立製作所独特の中間圧利用旋回スクロール支持方式と精密加工技術の確立によって実現できたものである。

図3にスクロール圧縮機の構造²⁾を示す。圧縮機構部は固定スクロール、旋回スクロール、オルダムリング、クランク軸、フレームなどから構成されている。中間圧利用旋回スクロール支持方式とは、圧縮行程中の中間圧のガスを背圧孔から背圧室に導き、背圧室のガス圧力によって旋回スクロールを支持する方式である。この方式により、広い圧力範囲で作動を安定化でき、また機械損失を小さくすることができた。

図3中の太い矢印線は冷媒ガスの流れを示す。冷媒は吸入管から吸い込まれ圧縮された後、吐出し室に吐出される。次にフレームの外周部の通路、電動機室を通って、吐出し管から外部に送られる。

次に図4に圧縮原理²⁾を示す。固定スクロール、旋回スクロールのラップ(渦巻要素)により圧縮室が形成され、旋回スクロールの円軌道運動により、圧縮室の容積が中心部に向かって縮小され冷媒が圧縮される。

スクロール圧縮機は次のような特長をもつ。

- (1) 高効率で信頼性が高い。

これは、圧縮室間のガスの漏れが少なく、吸入、吐出し弁が不要で流体損失が小さいこと、中間圧利用旋回スクロール支持方式のため機械損失が小さく、部品点数が少ないとことによる。

- (2) 圧縮行程が連続的であり低振動、低騒音である。

これらの特長は、回転数制御を行なう場合にも発揮される。

図5に、回転数と効率の関係をスクロール圧縮機と往復動圧縮機の場合について比較して示す。各効率はスクロール圧縮機の回転数4,250rpmの効率を100として比率で示している。スクロール圧縮機では、広い回転数範囲で往復動圧縮機と比べて高い効率が保たれている。特に高い回転数でも効率

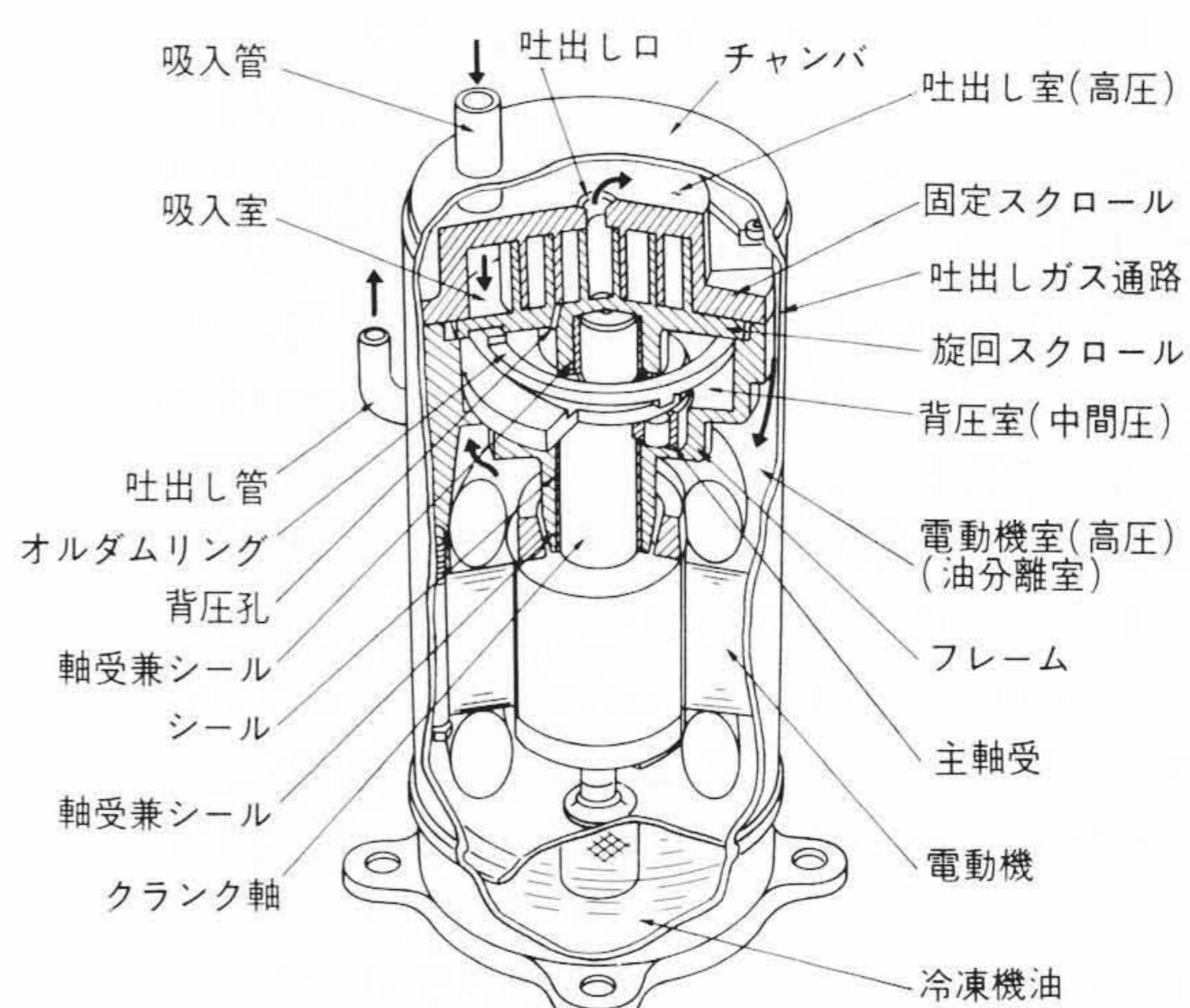


図3 スクロール圧縮機の構造 圧縮機構部は、固定スクロール、旋回スクロール、フレーム、オルダムリング及びクランク軸から成る。冷媒は太い矢印線方向に流れる。

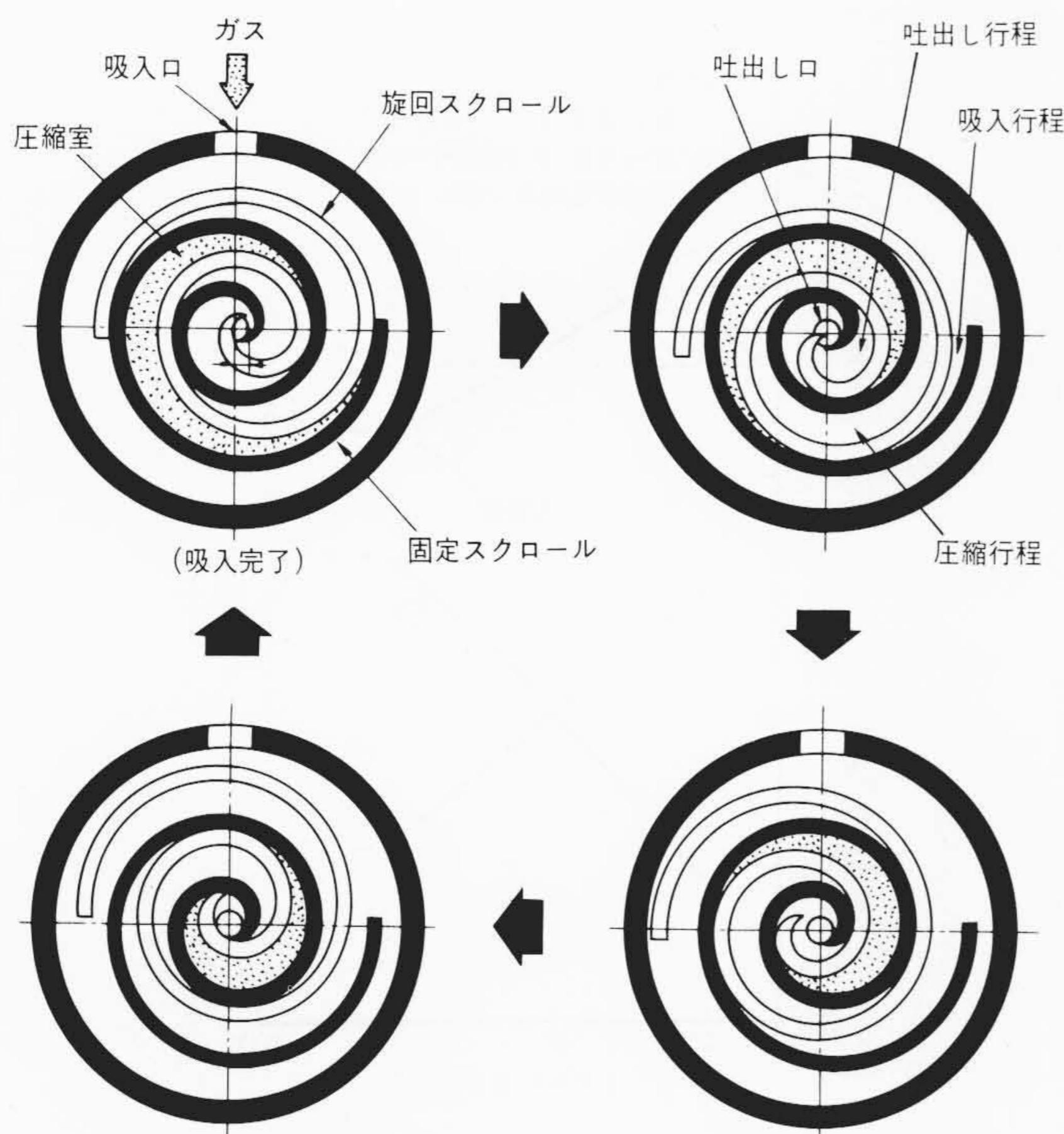


図4 スクロール圧縮機の圧縮原理 固定スクロール、旋回スクロールにより圧縮室が形成され、中心部に向かって圧縮室が縮小される。

が保たれることから、高速化による室外低温時の暖房能力向上に有効である。

次に回転数と騒音の関係を図6に示す。スクロール圧縮機は、回転数の広い範囲で低騒音であり、特に高い回転数域では往復動圧縮機に比べて大幅に低騒音化される。

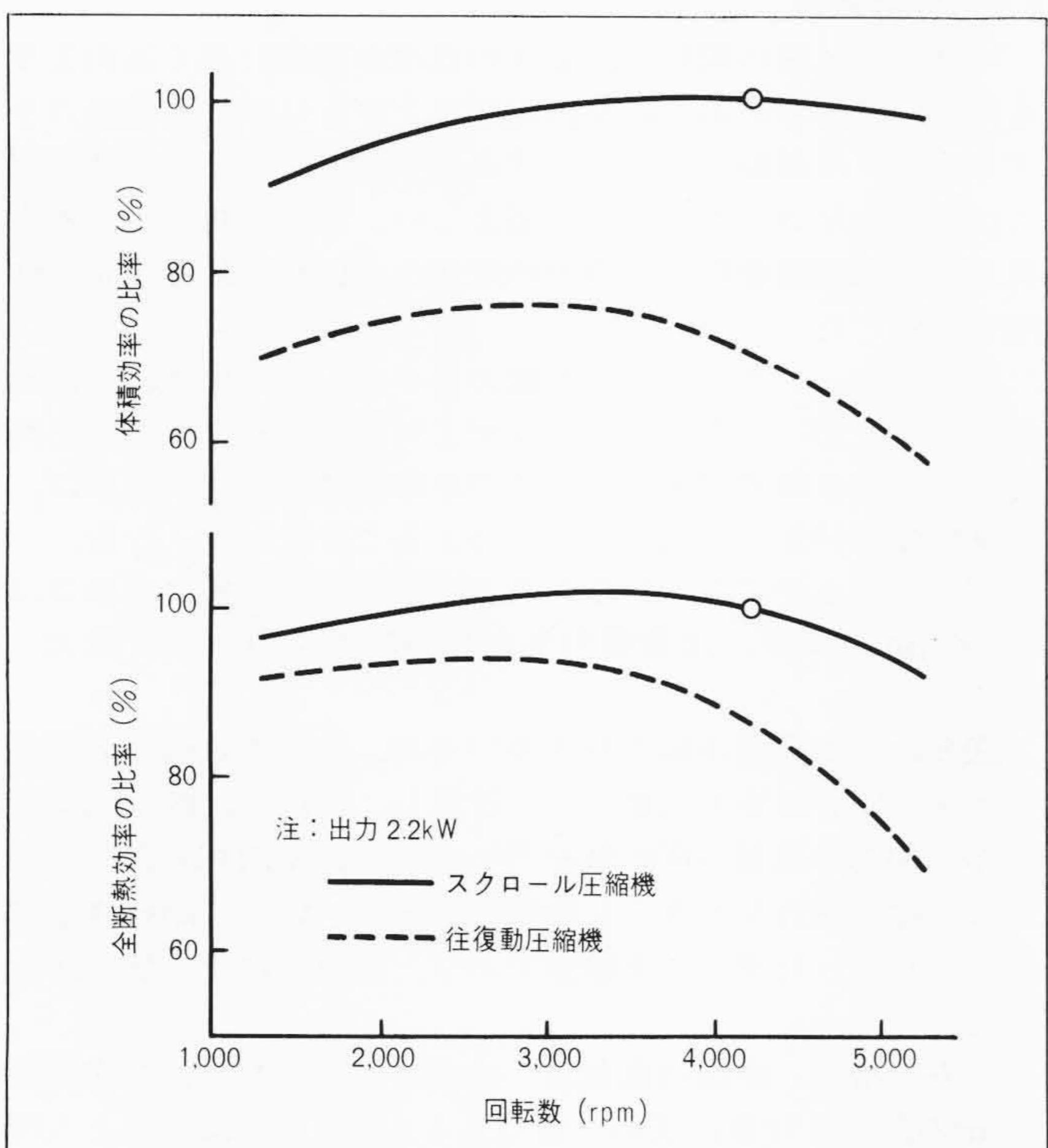


図5 回転数と効率の関係 回転数4,250rpmでのスクロール圧縮機の効率を100とし、日立製作所往復動圧縮機の効率と比較した。スクロール圧縮機の効率は、広い回転数範囲で高い。

2.3 制御法

表2にインバータの仕様を示す。最高出力電流は16A、出力周波数は30Hzから90Hzまでである。

次に図7に空調機全体の制御のブロック構成を示す。マイクロコンピュータが、室内ユニット、室外ユニット及びインバータ部に設けられている。リモートコントロールスイッチからの起動、停止などの指令を室内のマイクロコンピュータが受けて、プログラムに従って表示指令や室内送風機制御、その他の指令が出される。また、駆動周波数、四方弁、室外送風機の制御信号が室外のマイクロコンピュータに伝送される。室外のマイクロコンピュータは、プログラムに従ってインバータへの信号伝送、保護信号の室内への伝送を行なう。

室内温度制御は次のように行なわれる。圧縮機の駆動周波数は、室内温度と設定値の差及び室内温度の変化速度をもとに演算される。また、駆動周波数の指令が30Hz以下の場合には、圧縮機が停止され、室内温度と設定値の差が0.7K以上となると再起動される。なお、駆動周波数は制御の行ないやすさから4Hz刻みで指令されるが、4Hz刻みでも、十分にきめ細かい室内温度制御が可能である。

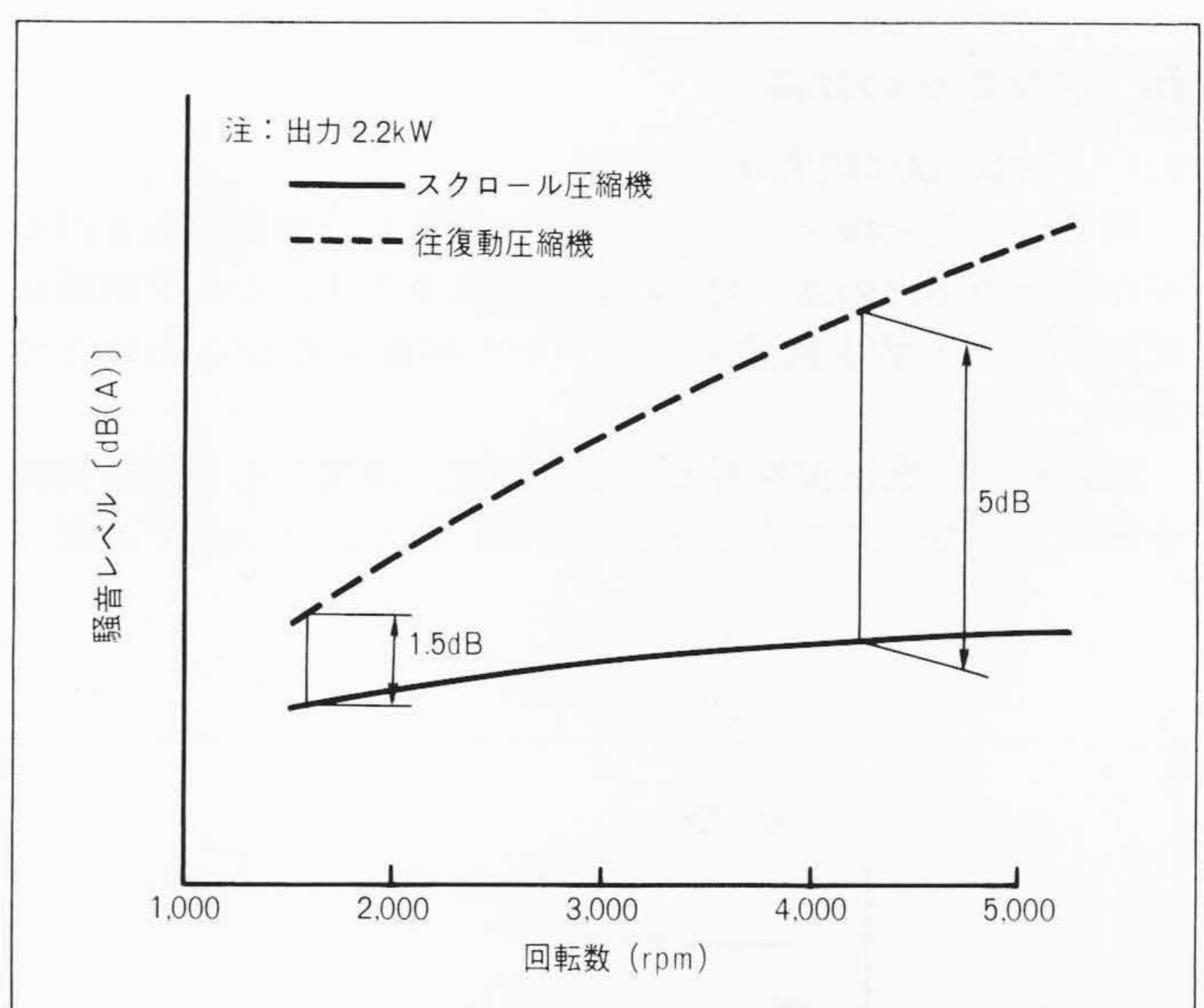


図6 回転数と騒音の関係 日立製作所のスクロール圧縮機、往復動圧縮機について騒音差を示す。高い回転数域で差が顕著である。

表2 インバータの仕様 定格周波数は75Hzである。

項目	仕 様
入力電源	3相200V, 50/60Hz
最高出力電流	1.6A
制御方式	正弦波PWM
出力周波数	30~90Hz
出力電圧	(200V)
周波数 (Hz)	0~80

注：略語説明 PWM (Pulse Width Modulation)

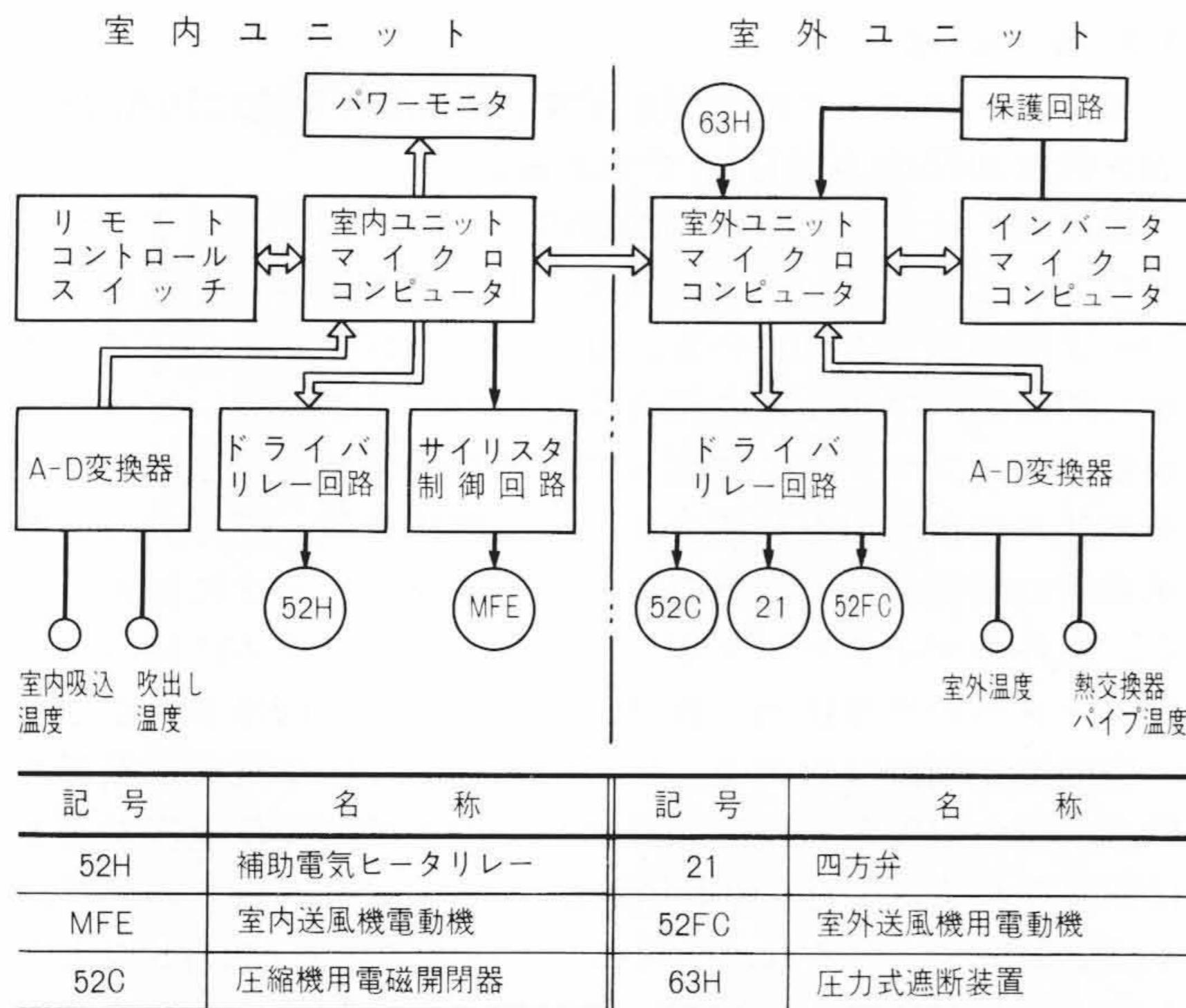


図 7 制御のブロック構成 室内ユニット用、室外ユニット用及びインバータ用の3個のマイクロコンピュータを用いている。

3 容量制御の効果

3.1 室内の温湿度変化

図8に、開発機をモデルルームに設置し、冷房運転を行なった場合の室内的温湿度の時間的変化を示す。なお、破線は圧縮機の回転数を固定し、オンオフ制御を行なった場合である。

圧縮機回転数制御を行なうと、温度、湿度ともその変動幅を極めて小さくできることが分かる。また、オンオフ運転で

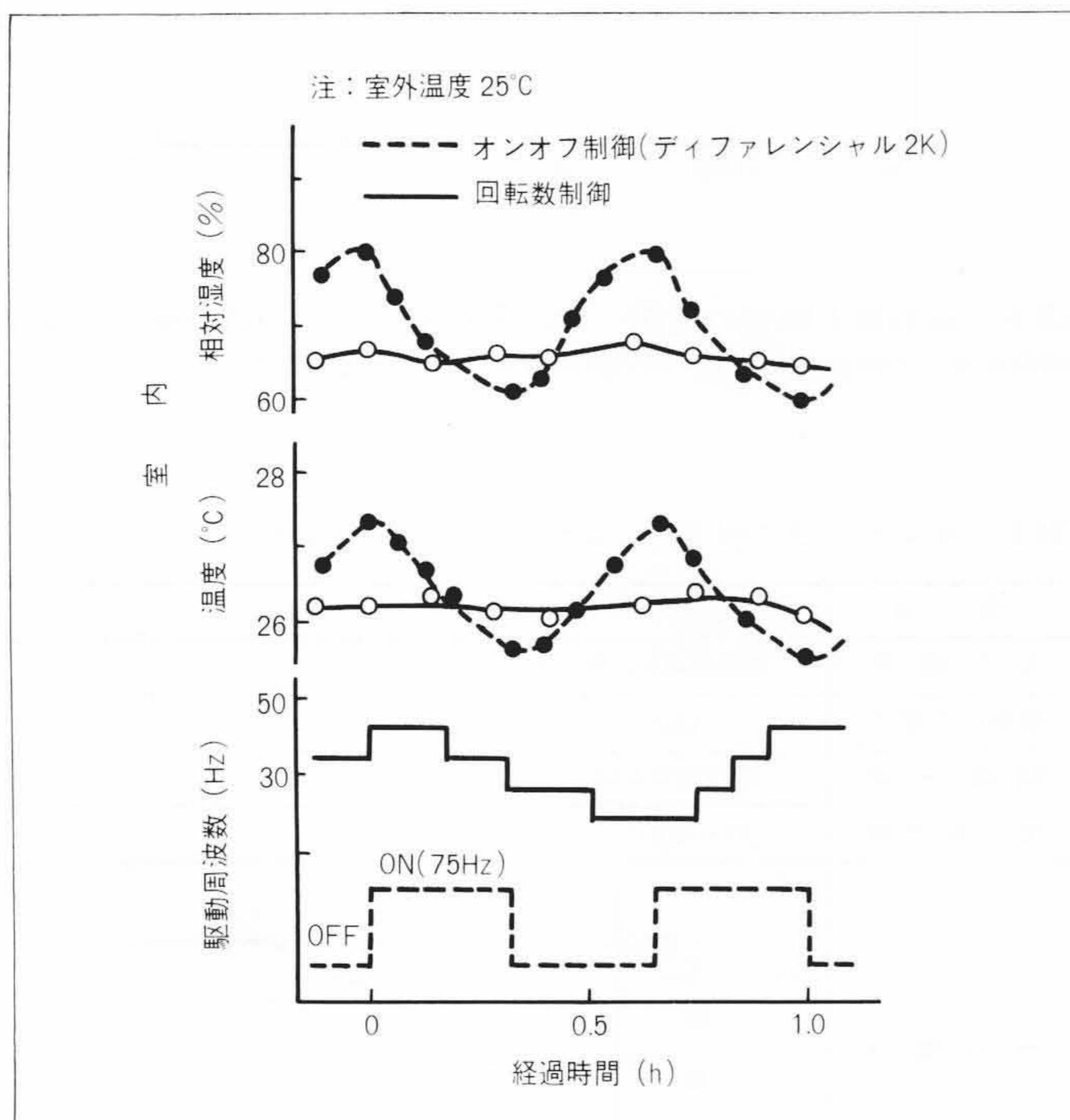


図8 室内温度制御の状況 オンオフ制御例は、駆動周波数を75Hzで固定しディファレンシャル2Kとして実験したものである。回転数制御により室内的温湿度変動を小さくできる。オンオフ制御では、圧縮機が停止されると湿度が非常に高くなる。

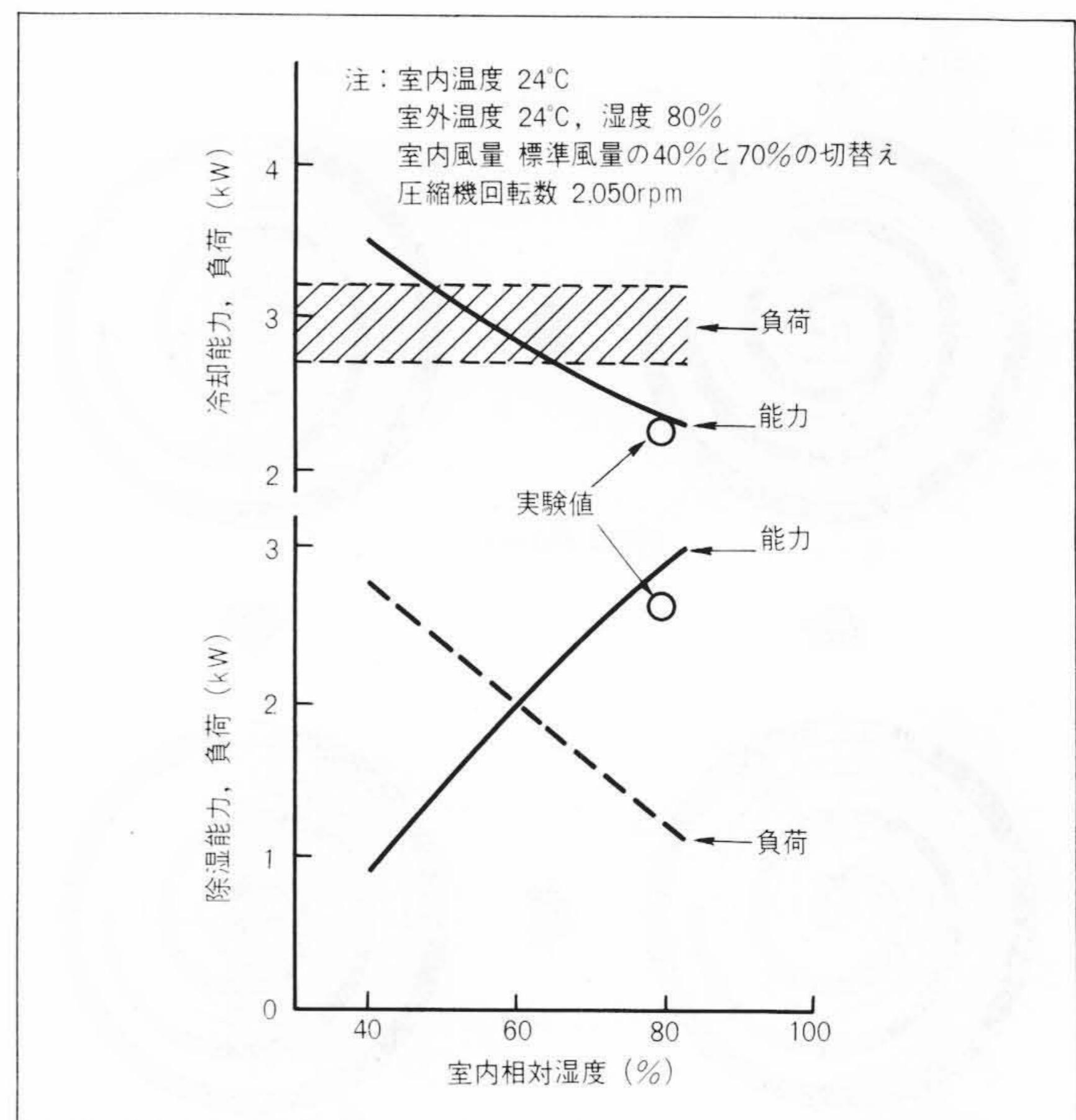


図9 除湿運転の特性 実線は能力の計算値で、室内風量が標準風量の40%と70%の場合の平均値を示す。破線は負荷の計算値であり、○印は風量の切替えを行なった場合の実験値である。湿度が高いと除湿優先の特性となる。

は圧縮機が停止されると湿度が非常に高くなり、むし暑い状態となる。これは、圧縮機が停止されると除湿能力がなくなるとの合わせ、運転中に熱交換器表面に付着した水滴が再蒸発するためである。

以上のように、回転数制御を行なうことによって、室内的温湿度の変動が小さい快適な空調が可能である。

3.2 除湿運転

中間期特に梅雨期には、室外の湿度が非常に高く室内湿度も高くなりがちである。室内湿度を下げるには、除湿能力を大きくし、冷却能力を小さくする必要がある。また、消費電力はできるだけ小さいことが望ましい。これに対して、室内風量と圧縮機回転数の組合せの最適化を図り、除湿優先の機能を実現した。

除湿能力を大きくし、冷却能力を小さくするには、室内風量をできるだけ小さくするほうがよいが、室内全域に風を到達させるには限界がある。そこで本除湿運転の室内風量は、標準風量の40%と70%とを切り替えることにした。なお、この切替えは1分ごとに行なわれる。また、圧縮機の回転数は2,050rpmであり、消費電力当たりの除湿能力がほぼ最大となる。

図9に、本除湿運転の特性及び冷却、除湿の負荷の計算値を示す。能力は定常状態として計算し、同図では標準風量の40%と70%の風量の平均値を示している。室内相対湿度が高いほど除湿能力が大きく、冷却能力は小さい。○印は風量切替えを行なった場合の実験値であり、計算値に近い値が得られた。

一方、冷却、除湿の負荷は、冷暖房負荷計算により床面積60m²の部屋を対象に求めた値である。除湿負荷は換気と人間の体表面から放出される水分によるものである。室内湿度が高いほど除湿負荷が小さいのは、室内外の絶対湿度差が小さくなり換気による除湿負荷が小さくなるためである。

本除湿運転により、室内湿度が高い場合には、冷却能力を負荷より小さくし、除湿能力を負荷より大きくすることができる。したがって、室内の温度を下げないで湿度を下げることが可能であり、中間期の快適性を向上することができる。

図10は、ある事務所での実際の運転例を表わしたもので、除湿運転の機能が十分に発揮されていることが分かる。

以上のように本除湿運転は、圧縮機を低回転数で運転する特徴をもち、回転数制御により実現できた新しい機能と言える。

3.3 室外低温時の暖房能力向上

開発機では、圧縮機の最高回転数を5,100rpm(駆動周波数90Hz)に上げ、室外低温時の暖房能力を向上した。

図11に、圧縮機の回転数が4,250rpmと5,100rpmの場合について暖房能力の比較を示す。室外温度が0°Cでは、回転数を5,100rpmとすることにより暖房能力を約12%向上できる

ことが分かる。室内温度の立上り改善効果を確認するため、実際の事務所(床面積30m²)で実験を行なった。室外温度は-3~0°Cであった。この結果、室内温度を0°Cから21°Cに上げる時間は、圧縮機回転数が4,250rpmの場合約24分、5,100rpmの場合約18分であり、室内温度立上り改善に有効であることが分かった。

3.4 省エネルギー効果

3.4.1 APFによる評価法

従来、空調機の効率評価には、図1に示したようなJIS標準条件での冷房のEERが用いられていた。しかし、実際に空調機が運転される条件は種々変化する。このことから年間を通してエネルギー消費効率APFによる効率評価が行なわれるようになった。

APFは基本的には、

$$APF = \frac{\text{冷房、暖房の各期間の合計負荷}}{\text{冷房、暖房の各期間の合計消費電力}} \quad \dots(1)$$

で表わされる。

このAPF算出の一つの方法として、アメリカのDOE(Department of Energy)が提案した方法³⁾があり、ここでは、この方法を回転数制御を行なう場合にも拡張し、適用した。このDOE提案の方法によるAPFは、冷房だけを例にとれば次式で表わされる。

$$APF = \frac{\sum_j \frac{n_j}{N} \cdot BL(T_j)}{\sum_j \frac{n_j}{N} \cdot \frac{X(T_j)}{PLF(X)} \cdot E(T_j)} \quad \dots(2)$$

ここに T_j : 室外温度[ある温度刻み(2K)で与える。]

$BL(T_j)$: 温度 T_j での負荷(kW)

$E(T_j)$: 温度 T_j での消費電力(kW)

$X(T_j)$: 運転率

$\frac{n_j}{N}$: 温度 T_j の出現時間比率

N : 冷房を行なう合計時間(h)

n_j : 温度 T_j が出現する時間の合計(h)

$$PLF(X) = 1 - C_D (1 - X(T_j)) \quad (\text{Partial Load Factor})$$

C_D : 圧縮機のオンオフに伴う損失係数=0.25

すなわち、ある室外温度ごとに負荷、消費電力を求め、室外温度の出現時間比率によって重み付けをした負荷の合計と消費電力の合計からAPFを求める方法である。

ここで、 C_D の説明にあるオンオフによる損失とは、一つには、圧縮機が停止されている間の室内送風機や制御回路の消費電力に起因し、また、圧縮機の起動後冷凍サイクル内の冷媒分配が定常状態になるまでの効率の悪さに起因するものである。圧縮機がオンオフする状態での平均のEERと定常状態でのEERの比は、 C_D を用いて次式で与えられる。

$$\frac{\text{平均のEER}}{\text{定常状態のEER}} = 1 - C_D (1 - X) \quad \dots(3)$$

3.4.2 計算例

開発機の省エネルギー効果を明らかにするため、比較対象として、往復動圧縮機を用いオンオフ制御を行なう従来の空調機を想定する。従来機の圧縮機回転数は3,470rpm(駆動周波数60Hz)である。圧縮機以外の要素は開発機と同じとした。

次にAPFの計算に必要な冷暖房負荷は、動的負荷計算法を用いたシミュレータ⁴⁾により計算された。この結果は室外温度でまとめられ平均値が用いられた。計算対象とした部屋は床面積60m²の一般事務所であり、また気象データとして東京のデータを用いた。

まず、図12に室外温度の出現時間比率と冷暖房負荷を示す。

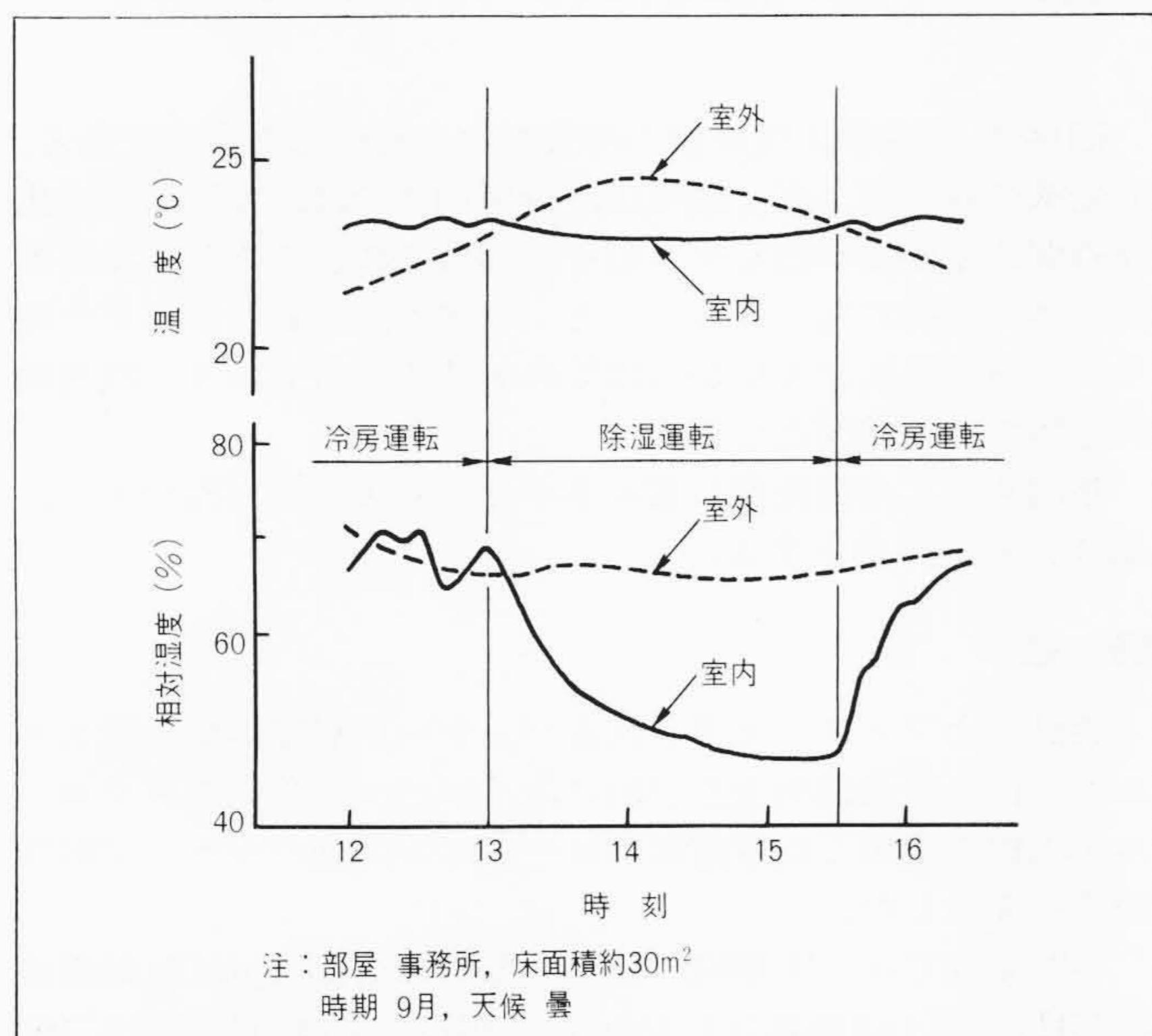


図10 除湿運転の効果例 除湿運転により、室内の温度は低下させずに湿度を低下させることができる。

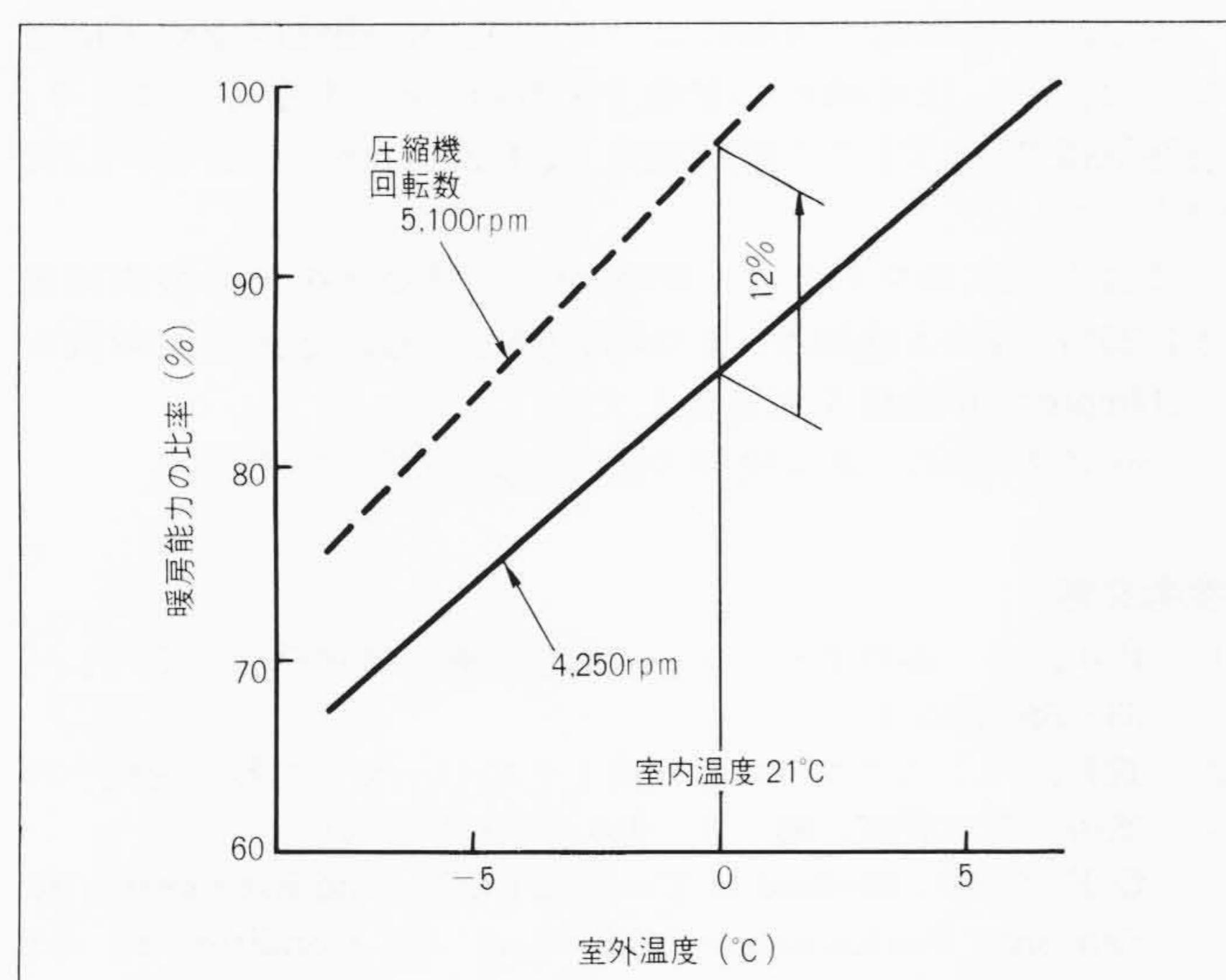


図11 暖房能力向上効果 圧縮機回転数が4,250rpmで、室外温度が7°Cの場合を100として能力を示す。回転数を4,250rpmから5,100rpmに上げることによって、室外温度0°Cで暖房能力を12%向上できる。

出現時間比率が最も高い室外温度は、冷房では25°C、暖房では9°Cである。

次に図13に、室外温度と能力、EER及び負荷の関係を冷房を例にとり示す。能力と負荷は室外温度35°Cで一致する。

回転数制御を行なう開発機の場合、冷房能力は太い実線のように変化する。すなわち、室外温度が27°Cから35°Cの間では負荷に応じて回転数が制御され、27°Cより低いと圧縮機回転数が一定(1,580rpm)でオンオフされる。EERも室外温度に対して太い実線のように変化する。室外温度が27°C以上では圧縮機が連続運転され、定常状態のEERとなるが、27°Cより低いと圧縮機がオンオフされるため、回転数が1,580rpmのEERより低い値となる。

開発機のEERは、オンオフ制御される従来機の場合と比べると、室外温度が低い領域で大幅に向上することが分かる。

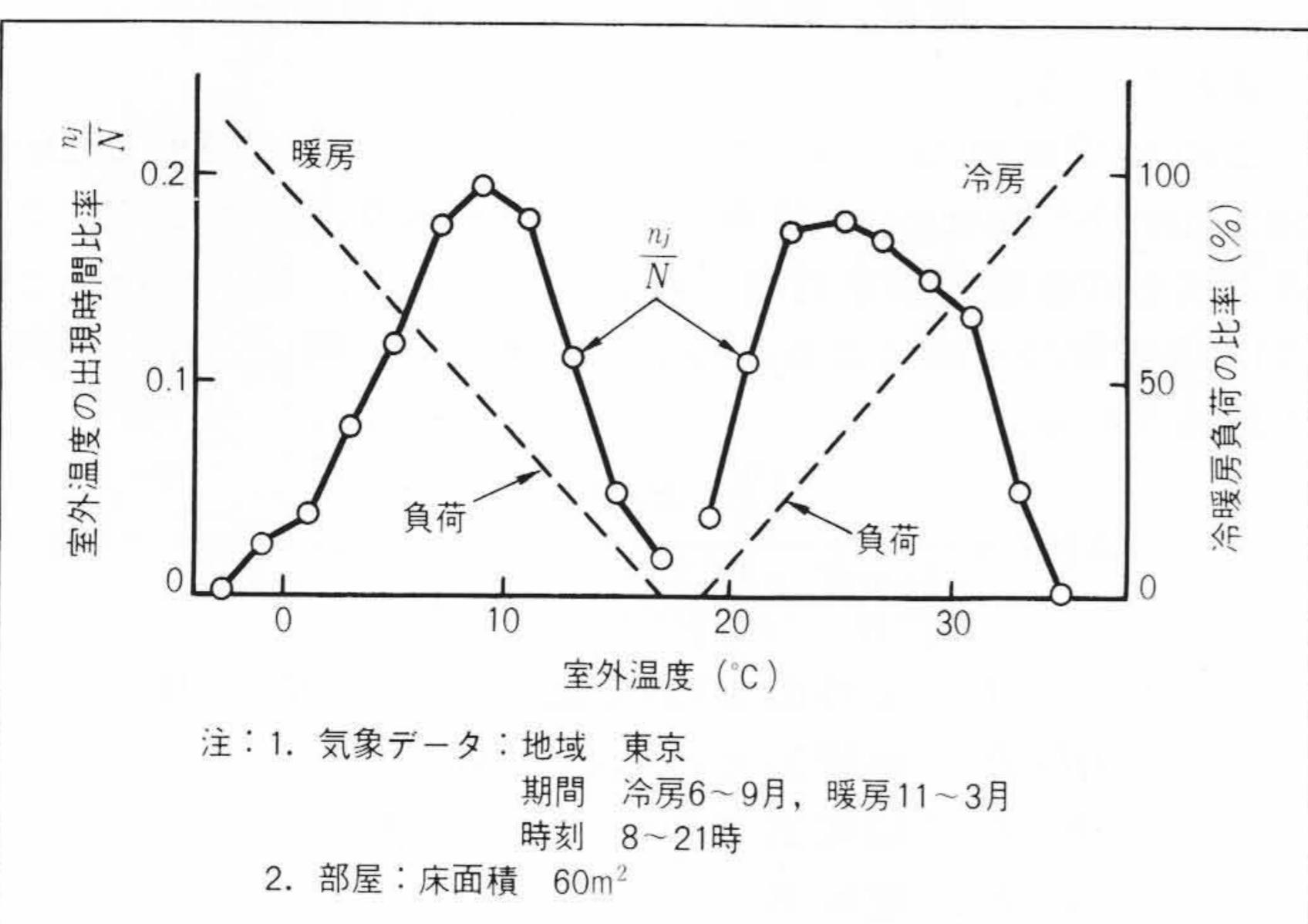


図12 室外温度の出現時間比率と負荷 気象データは、1961年から1970年の10年間の平均値である。負荷は、室外温度35°Cの冷房負荷を100として比率で示している。

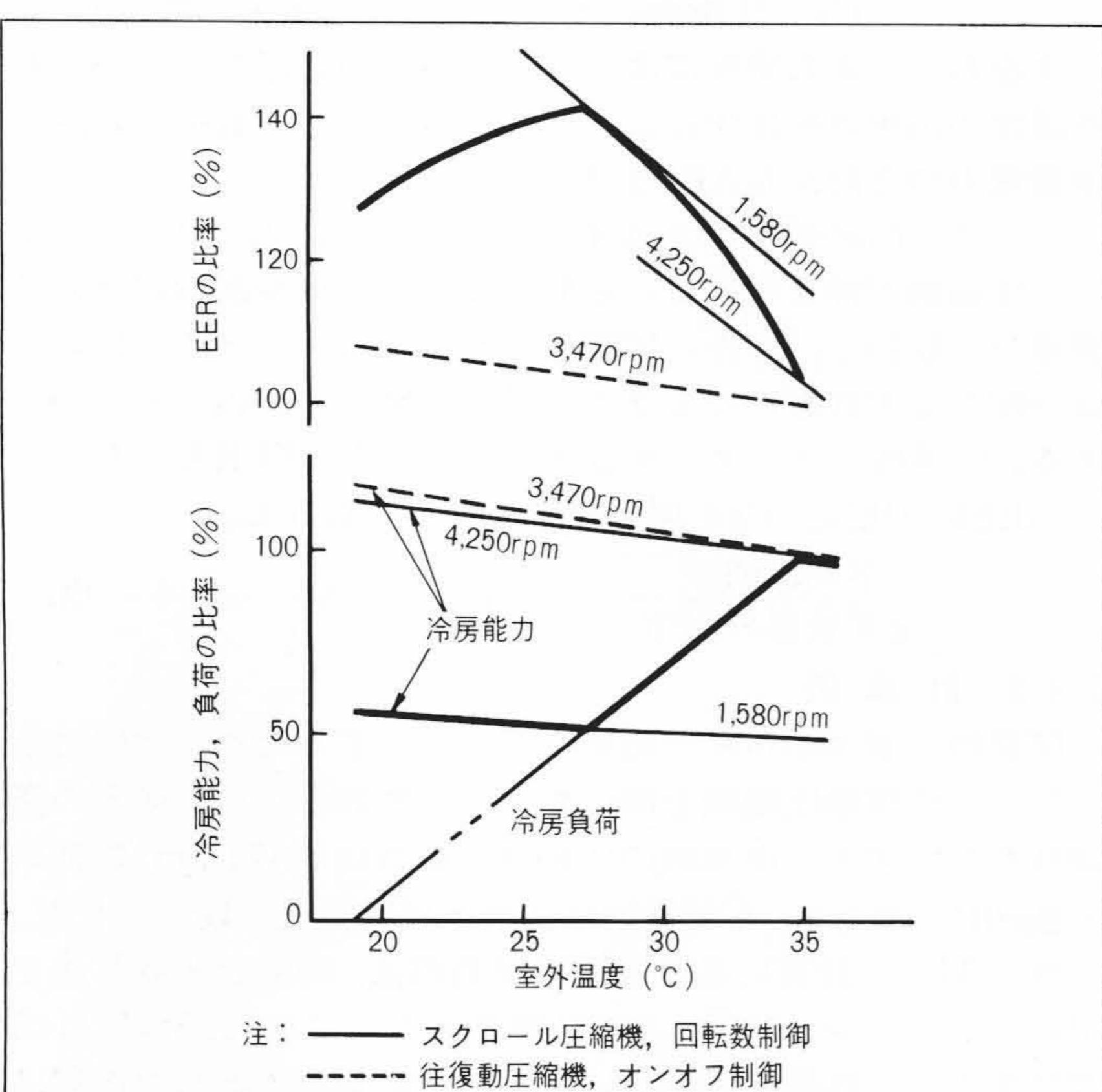


図13 室外温度と能力、EERの関係(冷房) (1)能力、EERは従来機の室外温度35°Cの値を100として比率で示している。(2)回転数制御を行なう場合の能力、EERは、太い実線のように外気温度に対して変化する。

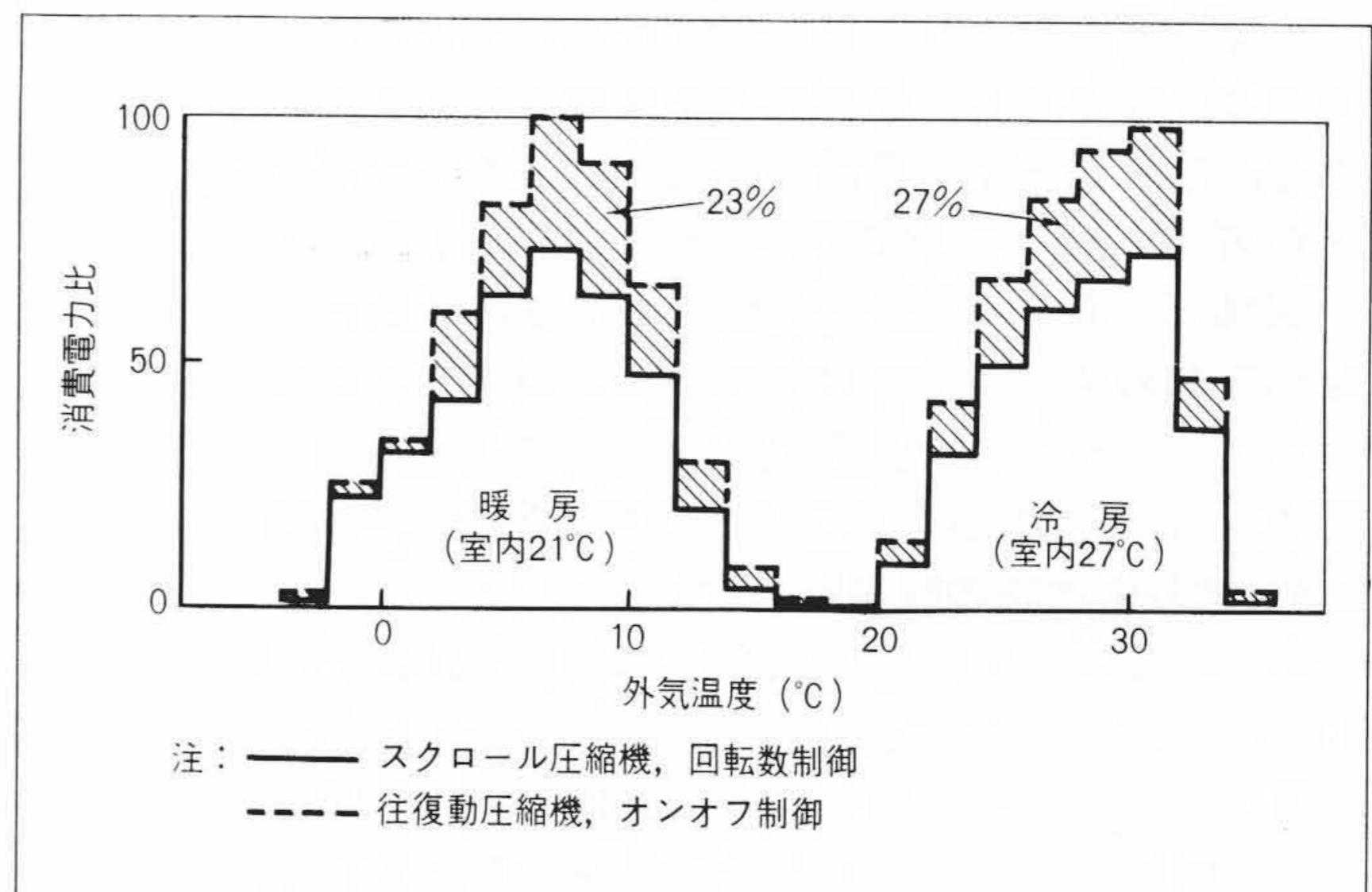


図14 省エネルギー効果 消費電力は、室外温度7°Cの消費電力を100として比率で示している。スクロール圧縮機の回転数制御を行なうことにより、往復動圧縮機のオンオフ制御を行なう場合より冷房で27%、暖房で23%の省エネルギーとなる。年間では26%省エネルギーとなりAPFは35%向上する。

図14は、開発機と従来機の消費電力を比較したものである。開発機の省エネルギー効果は、冷房期間では、室外温度の出現時間比率が高い25°Cから31°Cの領域で顕著であり、冷房期間全体では約27%となる。一方、暖房期間の省エネルギー効果は、室外温度が4°Cから12°Cの領域で顕著であり、暖房期間全体では約23%となる。

年間を通した開発機の省エネルギー効果は約26%であり、APFは約35%向上する。

4 結 言

店舗やオフィスで使用されるパッケージ形空調機の省エネルギー化と快適性向上を目的に、インバータ駆動のスクロール圧縮機を採用した容量制御ヒートポンプ式パッケージ形空調機を開発した。

本開発機では、圧縮機の定格回転数は4,250rpm(駆動周波数75Hz), 最小回転数は1,580rpm(30Hz), 最高回転数は5,100rpm(90Hz)である。

開発機の年間の省エネルギー効果を計算により求め、往復動圧縮機を用いたオノオフ制御する空調機と比べて年間のエネルギー消費効率が約35%向上することを明らかにした。

また、除湿機能の付加により中間期の快適性向上が可能となった。更に、圧縮機の回転数を5,100rpmとすることにより、室外低温時(0°C)での暖房能力を、4,250rpmの場合より12%向上した。

これらの成果をもとに、昭和59年5月に圧縮機の最高回転数4,250rpmの3機種を、また昭和60年4月には最高回転数が5,100rpmの6機種を製品化した。

今後の課題は、更に機種の拡充を図ることである。

参考文献

- 内川、外：高効率パッケージ形空調機、日立評論、62, 1, 65~68(昭55-1)
- 荒井、外：スクロール圧縮機とそのパッケージ形空調機への適用、日立評論、65, 6, 415~420(昭58-6)
- G. E. Kelly : Method of Testing, Rating and Estimating the Seasonal Performance of Central Air Conditioners and Heat Pumps Operating in the Cooling Mode : NBS, IR77-1271(1978)
- 西村、外：空調システムダイナミックシミュレータ“TACSS”，日立評論、62, 2, 47~52(昭55-2)