

通勤ラッシュ時の冷房能力を改善した 車両用空調システム

Air-Conditioning System with Improved Cooling Capacity for Rush-Hour Commuter Trains

笹井 雄太 雨宮 靖佳

■ SASAI Yuuta ■ AMEMIYA Yasuyoshi

首都圏を中心に通勤ラッシュ時の乗車率が大幅に増え、空調装置を定格能力の限界まで駆動させても車内の温度が上昇する場合があります、更なる冷房能力の向上が必要となっている。

東芝キャリア(株)は、このようなニーズに応えるために、省スペースで省エネ仕様の車両用空調システムを開発した。現状の空調装置の外形スペース内に設置でき、冷房能力を約40%以上向上できる。更に低騒音化、低振動化に加え、車内温度、乗車率、及びドア開閉信号で空調システムを制御し、快適な車内環境を実現できる。

Train boarding rates during commuter rush hours have significantly increased in metropolitan areas. The air temperature inside trains often becomes high at such times, despite the operation of air conditioners at full power. As a result, there is growing demand for air-conditioning systems with higher cooling capacity that can provide a comfortable environment during rush hours.

Toshiba Carrier Corporation has newly developed an air-conditioning system that offers both comfort and energy saving by improving the cooling capacity by about 40% and controlling the air temperature using data such as the boarding rate and door opening and closing signals. In addition to low input power, low noise, and low vibration, the new air-conditioning system also achieves space saving and can be mounted on the existing space when replacing an existing system.

1 まえがき

車両用空調システムは国内鉄道でほぼ100%に近い普及率であり、車両の空調サービスが不可欠な時代となっている。また、首都圏を中心に通勤ラッシュ時の乗車率が大幅に上がっており、空調装置が定格能力の限界まで動作しても満員電車内の温度が上昇する場合があるため、いっそうの冷房能力の向上が求められている。更に、空調システムに対しては、信頼性の向上は言うまでもなく、省エネや快適性、及び新冷媒への切替えも要求されている。

しかし、新冷媒化や冷房能力アップに伴う熱交換器の容量拡大と入力電力(以下、入力と略記)の増加を懸念しなければならない。一方、既存車両への搭載となるため、空調装置のスペースと入力値が制限されてしまい二律背反となっている。

東芝キャリア(株)は、このような問題を解決するために、省スペースで省エネ仕様の新空調システムを開発した。

ここでは、この新空調システムの概要と特長などについて述べる。

2 東京地下鉄(株)丸ノ内線の現状と課題

東京地下鉄(株)丸ノ内線は、荻窪～池袋間の全長24.2kmを約50分で結ぶ路線で、通勤ラッシュ時には一部区間で乗車率が定員の200%を超えている。

車体は18(長さ)×2.8(幅)mと小さく、乗客負荷変動が車内の温度変化に直接影響する路線である。閑散時に十分冷えていても、通勤時間帯に車内の温度が上昇する問題を抱えており、ラッシュ時にはいっそうの冷房能力の向上が望まれている。

丸ノ内線は、東京地下鉄(株)のほかの路線に比較して車両限界高さが500mm以上低く、空調装置が車両の屋根に埋め込まれた構造になっている。そのため、空調装置の冷房能力を向上させるにしても装置のスペースを広げることは困難である。また、冷房能力の向上に伴い入力が増加し、現在使用している補助電源装置の電源容量は不足する。このような状況を打開するための技術的課題は次のとおりである。

- (1) 冷房能力の向上 通勤ラッシュ時に必要な冷房能力を発揮する冷凍サイクルの開発
- (2) 新冷媒への対応 オゾン破壊係数ゼロの代替冷媒(R-407c)採用による冷凍サイクルの開発と、代替冷媒の使用で熱交換器の大容量化やドライヤの変更などサイクル部品の見直し
- (3) 省エネ 現状の補助電源装置の電源容量を超過しない空調装置への入力抑制技術と、コンプレッサの運転台数を制限する制御技術の開発
- (4) 省スペース 構造が車体の屋根に埋め込む方式であり、空調装置本体のスペースが限られているため、空調装置を小型化し求められる冷房能力を発揮させる技術の開発

3 新空調システム

3.1 空調システムの構成

車両用空調システムの構成を図1に示す。このシステムは、車体両端の屋根上に搭載された温度センサ内蔵の空調装置、天井内に搭載のラインフローファン^(注1)、片端の壁面に搭載された空調制御装置と湿度センサ、床下に設置されている応荷重センサ、及び運転台上に搭載されている空調操作スイッチで構成されている。

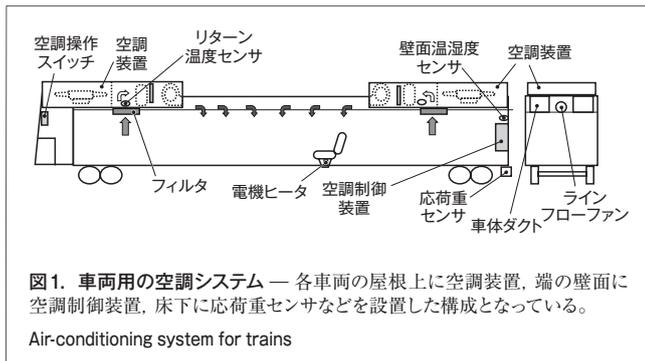


図1. 車両用の空調システム — 各車両の屋根上に空調装置、端の壁面に空調制御装置、床下に応荷重センサなどを設置した構成となっている。

3.2 新空調システムの特長

新空調システムの特長は以下のとおりである。

- (1) 冷房能力の向上 現行の空調装置の外形スペース内で、現行装置に比べて冷房能力を40%以上向上させている。通勤時間帯の30%増という高負荷に対して、十分な冷房能力を実現した。
- (2) 低入力化 冷房能力の向上によるコンプレッサの大容量化に伴い、空調装置の総合入力は通常70%増となるが、高効率コンプレッサの採用などで42%増程度に抑え、省エネ化を実現した。
空調制御として、限られた車両電源容量の超過を避けるために、伝送情報及び総合電流監視による空調装置の運転制限制御も取り入れた。
- (3) 省スペース 同等クラスの冷房能力の空調装置に比べ約60%の省スペース化を実現した。
- (4) 低騒音・低振動化 コンプレッサの車両端側の配置や低振動で低騒音の機器の採用により、車両評価で従来の空調装置と同等の車内騒音、及び同等以下の振動を実現した。

3.3 空調装置の改善内容

3.3.1 構成 空調装置の外観を図2に、その仕様を表1に示す。コンプレッサ室はコンプレッサと圧力スイッチ、室外部は室外熱交換器と室外送風機、室内部は室内熱交換器、室内送風機、及び分電箱で構成されている。

(注1) 車内の天井の中央に沿って埋め込まれている横流タイプの送風機。

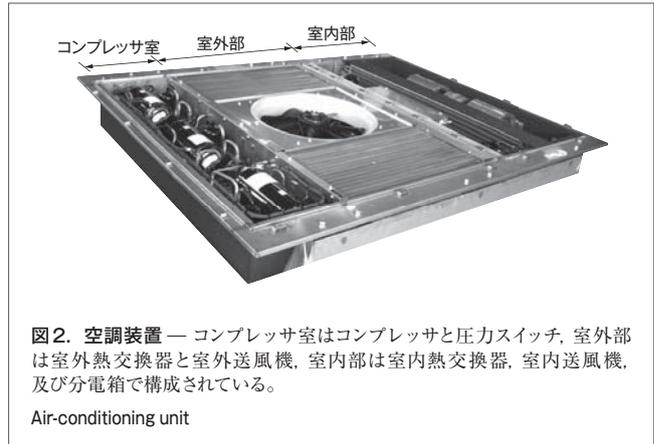


図2. 空調装置 — コンプレッサ室はコンプレッサと圧力スイッチ、室外部は室外熱交換器と室外送風機、室内部は室内熱交換器、室内送風機、及び分電箱で構成されている。

表1. 空調装置の仕様

Specifications of air-conditioning unit

項目	仕様	
方式	屋根上セミ集中式	
冷房能力	23.3 kW	
電源	主回路	三相 200 V 60 Hz
	制御回路	単相 200 V 60 Hz
標準入力	9.6 kVA	
循環風量	33 m ³ /min	
コンプレッサ	横型ツインロータリ 3台	
室内送風機	モータ直結両軸多翼式 1台	
室外送風機	モータ直結軸流式 1台	

3.3.2 冷房能力の向上 冷房能力を40%向上させるため、高出力コンプレッサの採用とともに、冷凍サイクルシミュレーションによる熱交換器とサイクル配管の適正な設計を行った。これにより、同等の冷房能力クラスの熱交換器に比べ、室内熱交換器を約94%、室外熱交換器を約80%の大きさに縮小できた。

3.3.3 入力の低減 空調装置の入力低減について高効率コンプレッサの採用とサイクル圧力の低減で、同等の冷房能力クラスの空調装置に比べて約83.5%の入力低減を実現した。コンプレッサは、寸法の最適化と精密加工技術による機械効率の向上及び、最適な巻線仕様と巻線加工技術の向上でモータ効率を改善した。サイクル圧力の低減はコンプレッサの入力低減に効果がある。低背化送風機や薄型熱交換器を採用して風量を確保することで、サイクル圧力の低減を実現した(図3)。

- (1) 室外送風機の風量確保 狭い空間では送風機の通風抵抗が大きくなる。この問題を解決するため、通常6極又は8極に対して4極モータの送風機を採用した。それに伴いモータ出力が大きくなるが、スペース確保のためアウトロータ型モータ^(注2)の送風機を採用し、薄くしてスペース内への搭載を可能にした。通風抵抗について

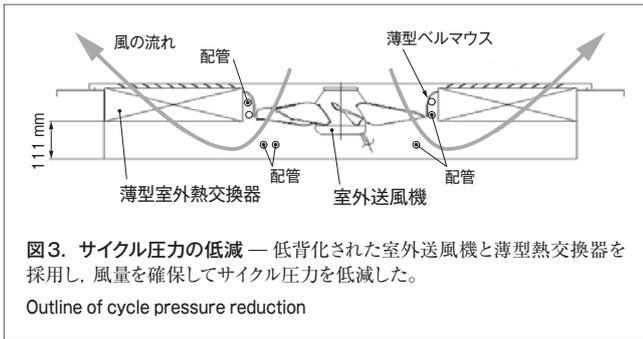
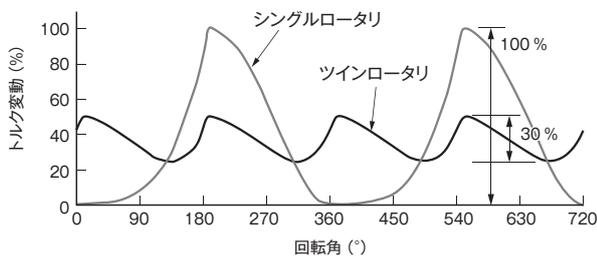


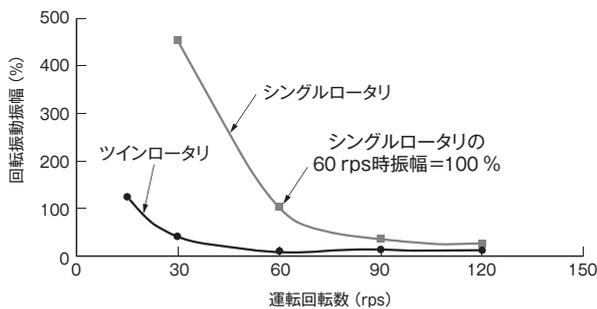
図3. サイクル圧力の低減 — 低背化された室外送風機と薄型熱交換器を採用し、風量を確保してサイクル圧力を低減した。
Outline of cycle pressure reduction



(a) ツインロータリコンプレッサの内部



(b) ツインロータリとシングルロータリのトルク変動比較 (計算値)



(c) ツインロータリとシングルロータリの回転振動振幅比較 (実測値)

図4. 横型ツインロータリコンプレッサ — 横型ツインロータリコンプレッサの採用で、シングルロータリコンプレッサと比較してトルク変動が約30%に小さくなり、圧縮振動も約10%に低減できた。

Horizontal type twin-rotary compressor

(注2) 回転子が外側にあり、その外周にプロペラファンが構成できるモータ。したがって、内側が回転子のインナーロータ型モータに比較して、プロペラファンの高さ分を低背化できる。

は、羽根幅の小さなプロペラファンを採用して底板とのスペースを確保し、FRP (Fiber Reinforced Plastics) 製ベルマウス^(注3)による最適形状と最適クリアランスで風量を確保した。

(2) 室外熱交換器の最適化 室外熱交換器を通過する風量が多いほどサイクル圧力は低下する。薄型の室外熱交換器の採用で通風のスペースを確保し、細径管の採用で熱交換器の通風抵抗と封入冷媒ガス量を低減した。

3.3.4 低騒音・低振動化 車両用の空調装置として、当社で初めての横型ツインロータリコンプレッサを採用し、車内の騒音と振動を低減した。ツインロータリコンプレッサでは、上下に180度対向した二つの圧縮部が回転することで、圧縮によるトルク変動が従来のシングルロータリコンプレッサと比較して約30%に小さくなり、また、回転振動振幅も1/10と大幅に低減できた(図4)。

3.3.5 保守業務の省力化 フラット形状のフィン仕様の熱交換器を採用して目詰まりを防止するとともに、洗浄性も向上させた。また、フィン表面の高耐食コーティング処理技術により腐食を防止し、能力低下も抑えた。

3.4 空調制御装置の改善内容

3.4.1 構成 空調制御装置の外観を図5に、その仕様を表2に示す。空調制御盤の上部に車体配線接続用のコネクタと端子台があり、端子台の下部に電流測定用のCT (Current Transformer: 計器用変流器) センサがある。また、配電機器のほかにマイコンユニットが内蔵され、制御回路以外に主回路も搭載されている。



図5. 空調制御装置 — マイコンユニットを内蔵し、中央のラインフローファン调速用トランスの上側にCTセンサが設置されている。

Air-conditioning control panel

(注3) プロペラファンにより吸い込まれる空気抵抗を抑えるため、プロペラファンの外周に沿って設けられたラッパ形状のリング。この位置や形状でプロペラファンの性能が左右される。

表2. 空調制御装置の仕様

Specifications of air-conditioning control panel

項目		仕様	
電源	主回路	三相	200 V 60 Hz (空調装置)
		単相	200 V 60 Hz (ラインフローファン)
	制御回路	単相	200 V 60 Hz
		直流	100 V
設置場所	車両片端の壁部		
機能	空調機器への電源供給と動作指令出力、ラインフローファン制御、ヒータ制御、各車との伝送		
伝送	30 mAカレントループ		
機能部品	マイコンユニット、電磁接触器、配線用遮断器、伝送用トランス、ラインフローファン調速用トランス		

3.4.2 低入力化への支援制御 空調装置の能力向上に伴う入力の増加で、補助電源装置の電源容量はすべての空調装置の総合入力に対し不足している。この状況に対応するため、通勤ラッシュ時には限られた電源容量の範囲において、車両単位で100%運転を許可する制御を実現した。この制御では、100%運転の要求がある車両及び、各車両の乗車率と運転電流を車両間伝送で把握することで、各車両に対する100%運転の優先順位をつけて編成トータルの総合入力を電源容量以下に抑えている。各車両の総合電流は空調制御盤搭載のCTセンサで測定している。

3.4.3 保守業務の省力化 空調制御盤に搭載されたCTセンサによる故障判定機能を採用した。空調装置の送風機やコンプレッサなど各負荷を順次運転し、その運転電流値により早期に故障を判定している。また、全6車両間の伝送故障を判定する機能により保守性を高めている。更に、マイコンユニット内に動態記録を保存する機能で、動態記録により故障状態を確認できる。

3.4.4 汎用性 車内温度の設定値はもとより温度補正值、温度補正用のしきい値、各機器の故障判定のしきい値を変更できるようにし、路線に対する制御の最適調整を直接ユーザーである電鉄会社で実施できるようにすることで、汎用性を持たせた。

4 実車による効果の確認

冷房能力を向上させた新空調システムを地下鉄丸ノ内線の車両に搭載し、車内温度、電流値、及び騒音を測定した。

新空調システムを搭載した車両の数か所の断面で車内空気温度を測定した結果、現行システムに対し平均で約2℃低減できていることを確認できた。また、駅停車時の乗客の乗り降りやドア開閉時の車内温度の変化を測定した結果、冷却の応答性も改善できていることが確認できた(図6)。

入力については、空調制御装置の低入力化支援制御もあ

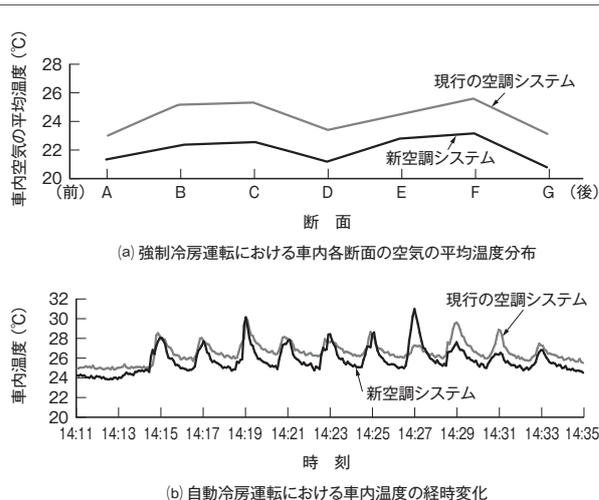


図6. 新空調システムの効果 — 新空調システムを搭載した車両の数か所の断面で車内空気温度を測定した結果、平均で約2℃低減できており、また、駅停車時の乗客の乗り降りやドア開閉時の車内温度の変化を測定した結果、冷却の応答性も改善できている。

Comparison of air-temperature measurement results for conventional and newly developed air-conditioning systems

り、限られた電源容量下で問題なく運用されている。また、振動及び騒音については現状レベル以下に抑えることができた。

5 あとがき

この新空調システムは、実車に搭載して評価した結果、通勤ラッシュ時の高負荷状態に対して十分能力を発揮していることが確認された。最新の空調装置と制御方法を導入することで、冷房能力が高く、省エネルギー性と省スペース性に優れた空調システムを開発した。

今後も、信頼性、省エネ、快適性などの更なる向上を目指し、車両用空調システムの開発を進めていく。



笹井 雄太 SASAI Yuuta
東芝キャリア(株) 技術本部 列車空調設計部。
車両空調装置の設計・開発に従事。
Toshiba Carrier Corp.



雨宮 靖佳 AMEMIYA Yasuyoshi
東芝キャリア(株) 技術本部 列車空調設計部参事。
車両空調システムの設計・開発に従事。
Toshiba Carrier Corp.