

# 鉄道車両用空調装置の技術動向

Technology Trend of Air Conditioning System for Railway Car

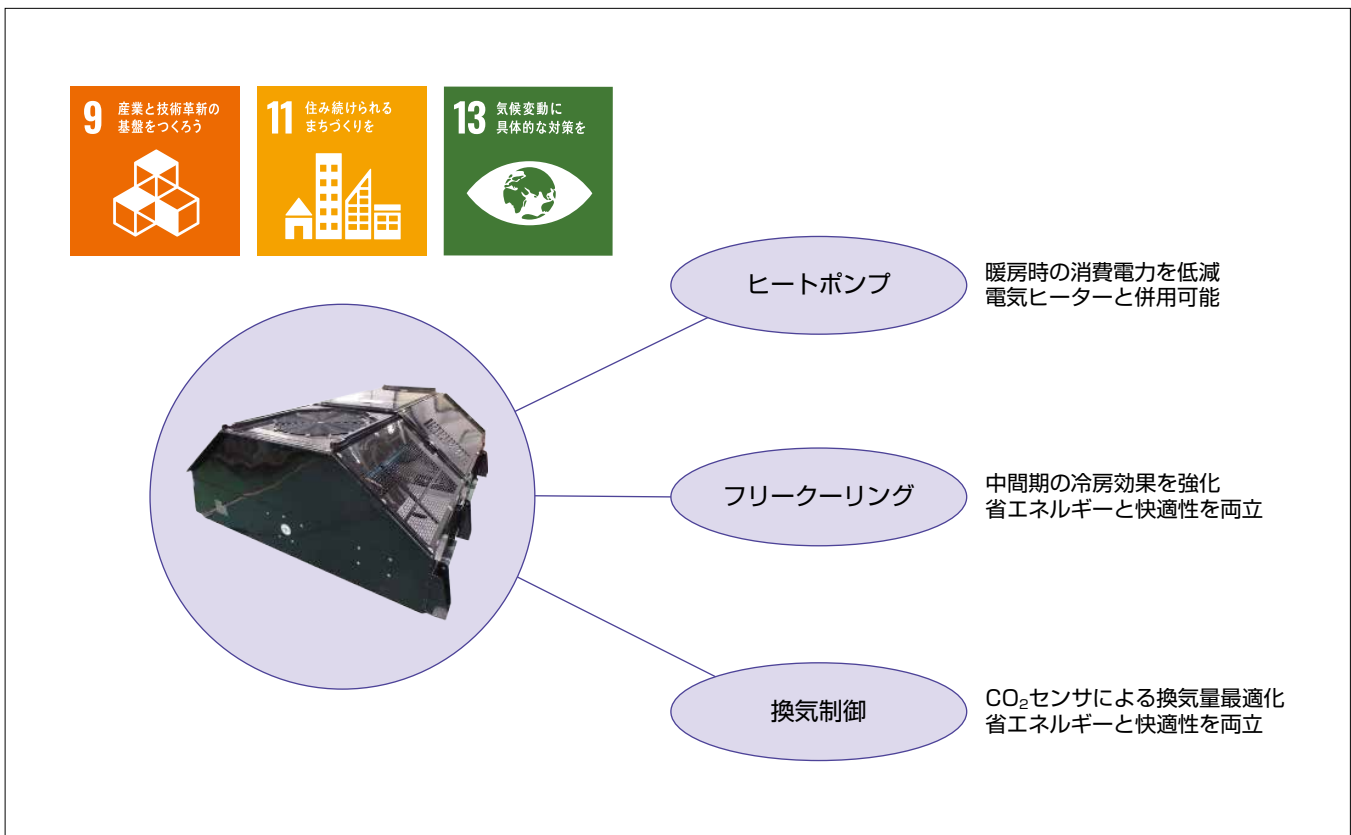
## 要旨

日本国内での鉄道車両の冷房化率は100%に近く、空調装置は鉄道車両に欠くことができないサービス機器になっており、昨今の地球温暖化の影響、車内の快適性に対する要求の高まりを受け、世界的にも鉄道車両の冷房化は拡大している。冷房化の拡大とともに、快適性に対する要求も高まっており、空調装置についても高性能化が進んでいるが、同時に消費電力の増加を抑制し、環境負荷を低減することが求められている。

三菱電機は以前から鉄道車両用の空調装置で、快適性の向上だけでなく、省エネルギー技術の適用による環境負荷の低減に取り組んでいる。快適性と省エネルギー性能は往々にして相反するため、長期的には年間を通した消費電

力量の評価で、快適性と省エネルギー性を両立させることが重要である。温熱的な快適性は定量的な評価が難しいが、居室内の快適性指標である“予測温冷感申告(PMV)”と“予測不快者率(PPD)”を用いた快適性評価による車内環境改善に取り組んでいる。また、快適性と年間消費電力の削減を両立するために、ヒートポンプ、フリークーリング、CO<sub>2</sub>センサを用いた換気量制御を組み合わせ、年間消費電力量を20%以上削減できることを検証した。

さらに、昨今の新型コロナウイルス感染症の世界的な流行によって、換気的重要性が見直されているが、当社は今後、換気機能の強化など安心して利用できる車内環境を提供できる空調装置の開発を進める。



## 鉄道車両用空調装置の外観と省エネルギー技術

鉄道車両用空調装置の高性能化に伴い、エネルギー効率を向上させて環境負荷を低減することが求められる。当社は空調装置の使用される条件に適したヒートポンプ、フリークーリング、換気制御の技術で年間の消費電力を最適化し、環境負荷の低減に取り組んでいる。省エネルギー技術と快適性向上技術の開発によって鉄道車両の快適な環境を提供するとともに環境負荷の低減に貢献し、国連SDGs(Sustainable Development Goals)の目標9、11、13の達成に貢献していく。

## 1. ま え が き

日本国内での鉄道車両の冷房化率は100%に近く、空調装置は鉄道車両の輸送サービスで欠くことができない装置である。昨今の地球温暖化の影響、車内の快適性に対する要求の高まりを受けて、鉄道インフラが急速に整備されつつある東南アジアの新興国だけでなく、欧州のような比較的冷涼な地域であっても、鉄道車両の冷房化が広がっている。快適性に対する要求に応えるため、空調装置の大容量化、高性能化が進んでいるが、同時に消費電力の増加を抑制し、環境負荷を低減することが必須の課題になっている。このような背景から、当社は車内の温熱的な快適性の向上だけでなく、省エネルギー技術の開発、メンテナンスの省力化に取り組んでいる。

温熱的な快適性は人それぞれ感じ方が異なり、快適性に対する要望は千差万別である。快適性と省エネルギー性能は相反することが多く、年間を通した消費電力量の評価の下で、快適性と省エネルギー性を両立させることが重要である。

本稿では、予測温冷感申告(Predicted Mean Vote : PMV)と予測不快者率(Predicted Percentage of Dissatisfied : PPD)を用いて車内の快適性数値化して評価した事例、欧州向けの空調装置に搭載されている省エネルギー技術と年間消費電力量の最適化に関する事例を取り上げ、当社の技術動向について述べる。

## 2. 車内の快適性評価

年間を通して快適な温熱環境を提供することは、空調装置メーカーにとって重要な課題である。温熱的な快適性を評価する指標として不快指数がよく知られているが、乗客の温熱的な快適性は、周囲の気温、湿度、風速などの物理的な要因だけでなく、活動量や着衣量など人的な要因にも影響される。これら人的な要因を加味した快適性指標として、1970年にP.O.Fangerによって提案されたPMV及びPPDが一般的に知られ、その定義はISO7730 : 2005にも規定されている。

この章では、車両で計測された温度などの物理量からPMVとPPDを算出し、快適性を評価した事例について述べる。

PMVとPPDは式(1)と式(2)のように定義される<sup>(1)</sup>。

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028)L \dots\dots\dots (1)$$

$$PPD = 100 - 95e^{-0.03353PMV^4 + 0.2179PMV^2} \dots\dots\dots (2)$$

ここでMは人体の代謝量(W/m<sup>2</sup>)で58.15×MET(Metabolic rate)値で表され、Lは人体の熱負荷(W/m<sup>2</sup>)を表し、人体

の代謝と、放射、着衣表面での熱伝達、発汗や呼気に含まれる水蒸気による不感蒸泄(ふかんじょうせつ)、呼吸による放熱の総和で表される。PMVの計算結果は-3~+3の数値で表され、0になるとき、人体での発熱と放熱の収支が平衡状態で、熱的に最も快適な状態とされ、値が低いほど寒く感じ、高いほど暑く感じると評価する。また、PMVが0のとき、不快と感じる人の割合であるPPDは最小値の5%になる。

図1は実測結果から算出されたPMVとPPDの推移を示す。ここで図1中のCLO値(Clothing level)は着衣量、MET値は乗客の活動量を表す。計測は中間期の冷房運転を想定した状況で実施し、隣り合う2両の車両に、異なる冷房能力制御段数の空調装置が搭載された状態で実施した。冷房能力制御を実施しない空調装置が搭載された車両では、PMVが0以下で推移し、冷房運転時の冷え込みが大きく、寒く感じる傾向が現れている。その際、PPDも10%程度まで上昇し不快と感じる人の割合が増えることが示されている。一方で、冷房能力制御を実施した場合、PMVは-0.2~+0.1で推移し、PPDも最小値の5%付近で推移し、過渡的な状態でおおむね快適な状態を保てていると考えられる。

2020年7月に発行された鉄道車両での車内の快適性を規定したISO19659-2 : 2020でも、PMV及びPPDに基づいて適正な温度・湿度の範囲が推奨・規格化されている。PMV及びPPDの数値と体感的な評価が一致するかは更なる検証が必要であるが、PMV及びPPDによる快適性の評価は、鉄道車両車内の快適性を評価する上でも有効と考えられ、今後の空調装置の設計でもこれら快適性指標を有効に活用する。

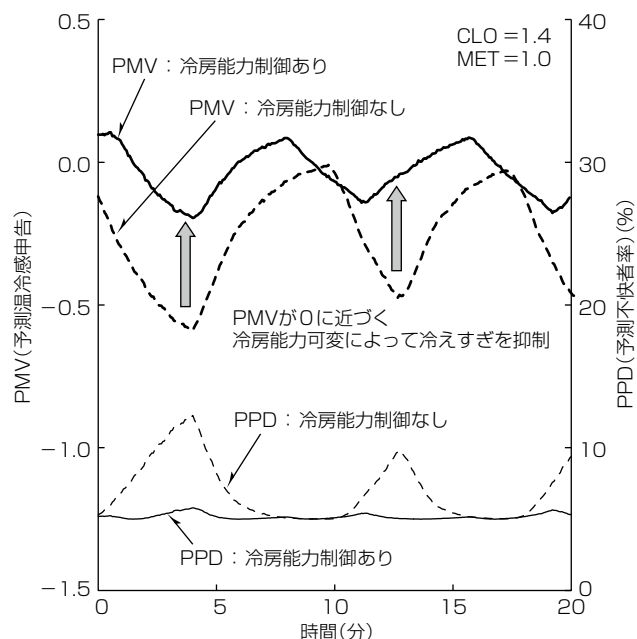


図1. PMV及びPPDの推移

### 3. 年間消費電力量の最適化

首都圏の通勤車両用空調装置に求められる冷房能力は、従来48kW/両程度が一般的であったが、昨今は高性能化が進み58kW/両に増加している。空調装置の高性能化とともに、消費電力も増大しており快適性と省エネルギー性能の両立が重要である。家庭用及び業務用空調装置では、JIS C9612:2013に基づくAPF(Annual Performance Factor)から算出された期間消費電力量で年間を通じた省エネルギー性能を評価するのが一般的であるが、このような考え方は、鉄道車両用途ではまだまだ普及していない。空調装置の年間消費電力量は、搭載される車両の種類と走行路線や運用形態によって変化すると考えられ、その条件を一意的に決定することは困難である。しかしながら、年間を通じた消費電力量は、車両寿命での空調装置のライフサイクルコストに影響を与えるため、今後、空調装置の省エネルギー性能を評価する上でますます重要な項目になると予想される。ここでは、欧州向けの空調装置で、年間の消費電力量を最適化するために導入した省エネルギー技術を述べるとともに、それらの省エネルギー技術を用いて年間の消費電力量を見積もった事例について述べる。

表1に示す空調装置運転条件は、2016年の第11回世界鉄道研究会議で提唱された空調装置の年間消費電力量を算出及び計測するための試験条件であり、特にドイツの鉄道では空調装置の年間消費電力量を比較的高い精度で見積もることができることと報告されている<sup>(2)</sup>。

表1の条件は、冬季の暖房から夏季の冷房まで六つの運転条件と、年間の空調装置運転時間で構成される。条件1と条件2では暖房運転、条件3と条件4では、外気温度の低い中間期であるものの乗車率が高いことから、能力を絞った冷房運転、条件5と条件6では、夏季の冷房運転になる。条件1から4は、年間に発生する時間が長いことから、これらの条件下で効率的に空調装置を運転することが、年間の消費電力量を最適化する上で重要であると予想される。

そこで、空調装置を設計する上で、冬季の消費電力を抑制するために外気-6℃まで運転可能なヒートポンプを導入した。図2に示すとおり、ヒートポンプは四方弁で冷媒の流れを変更することで実現できる。電気ヒーターによる

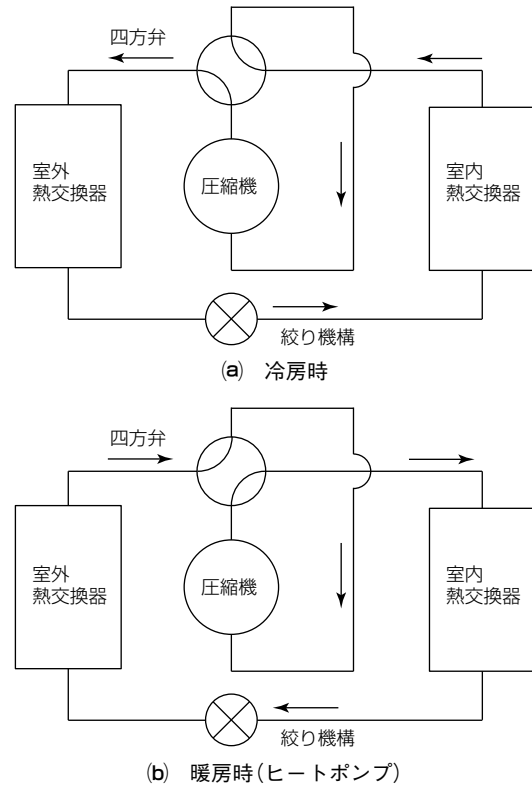


図2. 冷凍サイクル

暖房よりエネルギー効率に優れる一方で、低外気でのヒートポンプ運転は、室外熱交換器の着霜によって効率が低下するという課題がある。当該空調装置では、熱交換器サイズと絞り機構の最適化によって、外気が-6℃まで効率が大きく低下することなく安定してヒートポンプ運転を継続できる空調装置を実現した。

条件3及び4の中間期の条件では、高い乗車率によって車内の熱負荷が高く、外気温度が車内温度よりも低いにもかかわらず冷房運転が必要になる。このような低外気温度での冷房運転は、鉄道車両のような大量輸送機関で特徴的な運転モードである。このような条件下では、外気を積極的に取り込んで、冷房効果を補填するフリークーリングを実施することによって、圧縮機運転時間を低減し、エネルギー消費の大幅な削減が可能になる。図3の概念図で示すとおり、フリークーリングを実施する際は、空調装置内に取り付けられたダンパで車内空気の循環量を抑制し、循環風が全て新鮮外気になる。また、取り込む新鮮外気の風量に併せて、排気風量を可変させ車内の圧力を調整している。

従来、空調装置の換気運転では、外気温度と乗車率に応じて換気量を変更する制御が一般的であったが、当該空調装置では、空調装置内に設置したCO<sub>2</sub>センサによって客室内のCO<sub>2</sub>濃度を計測し、乗車率によらず車内のCO<sub>2</sub>濃度を一定に保つよう外気の取り込み量を制御している。CO<sub>2</sub>センサには検出値のドリフトが少なく、長期にわたって安定的な検出が可能な非分散型赤外線吸収法(Non-Disper-

表1. 年間消費電力量算出のための空調装置運転条件

条件	1	2	3	4	5	6
外気温度(℃)	-5	0	10	15	25	35
外気湿度(%)	82	85	82	75	45	41
日射負荷(kW/m <sup>2</sup> )	146	85	136	219	496	555
乗車率(%)	20	50	100	50	50	100
年間の空調装置運転時間(h/年)	1,396	1,182	1,563	1,083	864	138

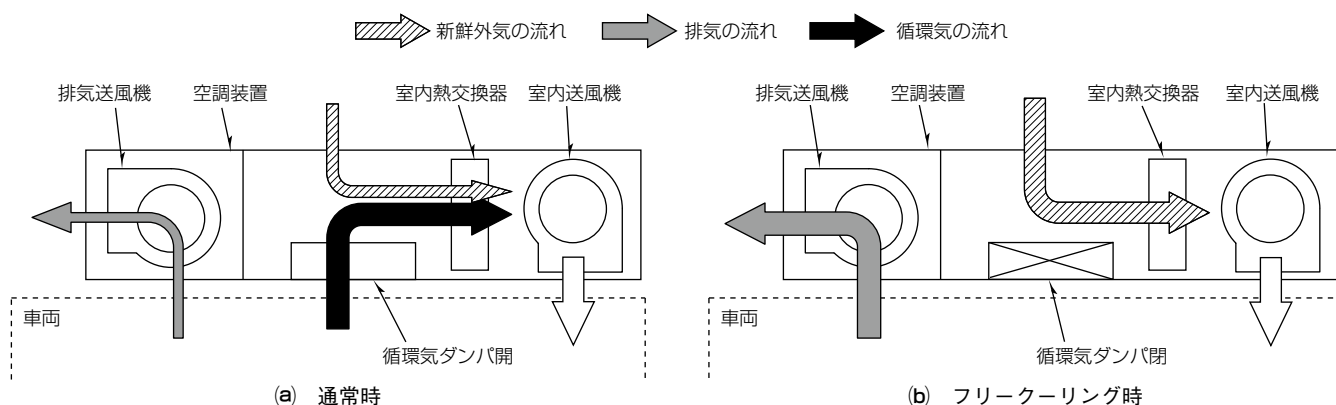


図3. フリークーリングの概念図

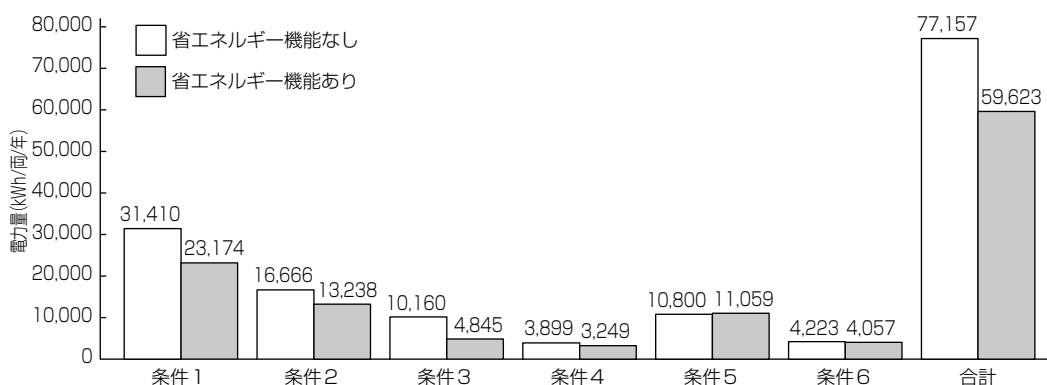


図4. 消費電力量の測定結果

sive InfRared : NDIR)方式のセンサを採用した。可変速の室内送風機とダンパによって、外気量を空調装置一台当たり  $0 \text{ m}^3/\text{h}$  から  $2,500 \text{ m}^3/\text{h}$  まで可変できる VAV (Variable Air Volume) 方式との組合せによって、年間を通して  $\text{CO}_2$  濃度を含めた車内空気質と省エネルギー性能の両立を図っている。

これらの年間消費電力量削減を目的とした機能の効果を検証するため、空調装置が車両に搭載された状態で実施された環境試験で、表1の各条件を模擬し、ヒートポンプ及びフリークーリングの省エネルギー機能を実装した場合と実装しない場合で消費電力量を比較し、これらの機能の効果を検証した。図4に試験の結果を示す。

条件1と2では、ヒートポンプによって消費電力量をそれぞれ20%以上削減できることが確認された。条件3では、フリークーリングの効果が大きく、この条件下では、消費電力量を半減できることを実証した。条件1から6までの合計で、年間の消費電力量で年間消費電力量の約20%に相当する年間  $17,500 \text{ kWh}/\text{両}$  の削減が可能になり、これは  $\text{CO}_2$  の削減量で年間約  $5.3 \text{ トン}/\text{両}$  に相当する。

## 4. むすび

鉄道車両用空調装置の高性能化に伴い、快適性と省エネ

ルギー性能を両立させながら、環境負荷を低減することは、今後ますます重要になると考えられる。本稿では、年間消費電力量の低減に寄与する技術とその実施例について述べたが、冷凍サイクルに使用する圧縮機、熱交換器、送風機などの主要機器の高効率化にも引き続き取り組む。既存の空調装置には温暖化係数 (Global Warming Potential : GWP) の高い HFC (ハイドロフルオロカーボン) が使用されているが、2016年に採択されたモントリオール議定書のキガリ改正のフェーズダウンに対応した温暖化対策の一環として、低GWP冷媒の検討・開発にも取り組む。

昨今の新型コロナウイルス感染症の世界的な流行によって、鉄道車両でも感染症対策の一環として換気の重要性が見直されている。換気機能の強化に取り組みつつ、今後も安心して利用できる車内環境の創出のため、空調装置内部の衛生性と車内空気質の向上に取り組み、多様化する快適性に対する市場ニーズに沿った製品開発を進める。

## 参考文献

- (1) ISO7730:2005 : Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria
- (2) Tim Berlitz, et al. : Duty cycle for Air Conditioning Systems of Railway Rolling Stock, 11th World Congress on Railway Research (WCRR) (2016)