

車両用空調装置のモニタリングに関する研究



後迫 直樹****



浜田 和気***



大瀧 紘介**



横倉 晃*



杉浦 芳光*

車両のメンテナンスを走行距離や使用時間に基づいた検査から各機器の状態に基づいた検査（Condition Based Maintenance: CBM）とすることにより、車両の信頼性向上とメンテナンスコストの削減が期待できる。

本研究では、鉄道車両用空調装置の状態をリアルタイムでモニタリングし、機器の劣化状態・故障予兆を把握、個々の空調装置の状態に応じたメンテナンスの時期と内容を決定・実施することを最終目的に、CBM実現のために鉄道車両用空調装置のモニタリングに関する基礎研究として、試験台試験により機器の故障や劣化状態を模擬した稼動試験を行い、モニタリングに適切な測定項目について選定を行った。

●キーワード：空調装置、モニタリング、CBM、故障予兆、劣化把握

1. はじめに

鉄道車両用空調装置のメンテナンスにおいては、空調装置の性能の低下傾向が把握できていないため、劣化状態に関わらず走行距離・使用時間に基づく修繕が行われている。また、部品単位での故障予兆の診断が不十分であるため、熱交換器や冷媒圧縮機など主要部品の突発的な不具合も課題となっている。

そこで、車両用空調装置の冷凍サイクルの状態をモニタリングし、取得したデータから定量的な指標で劣化状態・故障予兆を把握することにより、メンテナンスに反映させる方法の検討を行った。本研究では、主要サービス機器である空調装置の不具合が重大な輸送障害に直結する首都圏内の通勤電車（209系およびE231系）用の空調装置（AU720型およびAU726型）を対象に試験台試験を実施した。

2. 開発の概要

AU720型およびAU726型空調装置について、劣化状態・故障予兆を捉えるためにはどの項目をモニタリングするのが最も有効であるかを検証することを目的に、試験台試験（空調性能試験室に空調装置単体を設置し、稼動させ各種データを取得）を行った。試験方法は、空調装置に対して故障や劣化を模擬した仮設を施し、得られた各種データから劣化状態・故障予兆を捉えることとした。

なお、試験は、廃車発生品のAU720型およびAU726型空調装置を用いて、東日本トランスポート株式会社埼玉工場内の空調性能試験室で実施した。各空調装置の仕様を表1に、外観を図1、図2に示す。

表1 空調装置仕様

項目	AU720	AU726
搭載車両	209系	E231系
定格冷房能力	42,000 kcal/h	50,000 kcal/h
定格暖房能力	—	5,160 kcal/h
循環風量	110 m ³ /min	120 m ³ /min
冷媒	R22	R407C
圧縮機	レシプロ×2	スクロール×2、ロータリ×2
室外送風機	軸流式×1	軸流式×2
室内送風機	遠心式×1	多翼式×1
室外熱交換器	2	2
室内熱交換器	2	2



図1 AU720型空調装置



図2 AU726型空調装置

3. 試験台試験の実施

3.1 劣化状態・故障予兆の要因と試験条件

空調装置で想定される主な劣化状態・故障予兆の要因に対し、試験台試験で実際に模擬を行う試験条件を定めた。試験条件は、ほぼ同様と考えられる劣化状態・故障予兆の要因を集約し、6項目に整理した。なお、室内・室外熱交換器の汚損と室内・室外送風機の風量低下の同時発生も考えられるため、室内・室外熱交換器塞ぎ試験も実施することとした。劣化状態・故障要因と試験条件の関係を図3に示す。

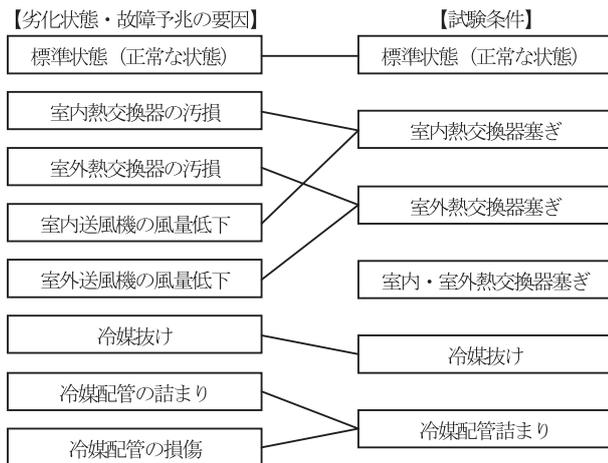


図3 劣化状態・故障予兆の要因と試験条件

また、試験台試験は外気温度が一定の下で実施することとし、3段階の温度区分にて行った。なお、空調装置の性能試験を行う際の外気温度はJIS規格で33℃と定められているので、これを基準とした。試験条件と外気温度の区分を表2に示す。

表2 試験条件と外気温度条件

試験条件		外気温度条件[℃]		
1	標準状態（正常な状態）	33	38	43
2	室内熱交換器塞ぎ			
3	室外熱交換器塞ぎ			
4	室内・室外熱交換器塞ぎ			
5	冷媒抜け			
6	冷媒配管詰まり			

3.2 測定項目

試験台試験で測定した項目を表3に示す。圧縮機・送風機の動作状態の確認は電流値、冷凍サイクルの状態の確認は冷媒温度と圧力、熱交換器の状態の確認は通過空気温度、回転機の機械的な状態の確認は振動値をそれぞれ測定することとした。

以上の項目を計測するため、空調装置1台当たり18ヶ所の部位を対象に測定を行うこととした。冷凍サイクルはAU720型が2系統、AU726型が4系統（同等の系統が2つずつあるため、測定対象は2系統とした）となるため、センサの総数はそれぞれ34点となった。測定項目とセンサ種類について表3に示す。

3.3 試験方法

室内・室外熱交換器塞ぎ試験（表2：試験条件2、3、4）では、熱交換器の性能低下の割合を25%から50%と仮定し、熱交換器の表面を面積比で25%および50%を板で塞いだ。熱交換器が汚損した状態と送風機の風量低下を模擬した状

表3 測定項目とセンサ種類

No.	測定項目	センサ種類	
1	室外送風機電流値	クランプメータ	
2	室内送風機電流値		
3	圧縮機電流値		
4	圧縮機吸込圧力	冷媒圧力	圧力センサ
5	圧縮機吐出圧力	冷媒圧力	
6	室内熱交換器吸込温度（リターン口温度）	空気温度	温湿度センサ
7	室内熱交換器吸込湿度（リターン口湿度）	空気湿度	
8	室内熱交換器通過温度	空気温度	熱電対
9	室内熱交換器通過湿度	空気湿度	
10	室外熱交換器吸込温度	空気温度	
11	室外熱交換器吐出温度	空気温度	
12	圧縮機吸込温度	冷媒温度	
13	圧縮機吐出温度	冷媒温度	
14	室外熱交換器入口温度	冷媒温度	
15	室外熱交換器出口温度	冷媒温度	
16	室内熱交換器入口温度（ディストリビュータ温度）	冷媒温度	振動計
17	室内熱交換器出口温度	冷媒温度	
18	圧縮機振動		

態を図4に示す。

冷媒抜け試験（表2：試験条件5）では、冷凍サイクルに封入されている冷媒を300gから1000gの範囲で段階的に抜き取り冷媒抜けの状態を模擬した。

冷媒配管詰まり試験（表2：試験条件6）では、キャピラリチューブ4本中、1本および2本の配管部分をプライヤで潰し、配管詰まりと配管損傷の状態を模擬した。キャピラリチューブとは膨張弁のことであり、冷凍サイクルの膨張工程で冷媒圧力が高圧から低圧（気体から液体）に変化する部分である。配管の曲がりや詰まりの起こりやすい箇所となる。その状態を図5に示す。

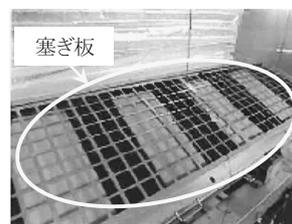


図4 熱交換器塞ぎ状態



図5 配管を潰した状態

3.4 データの整理方法

試験台試験の運転方法は、空調装置運転開始→アンロード運転→フルロード運転→アンロード運転→運転終了の順で稼働させた。

フルロード運転時間は、試験室温度が空調設定値に冷却され十分に安定するまでの時間（約60分間）とし、データサン

プリング間隔は0.5sとした。取得した測定データはデータロガーへ蓄積した。

測定データについては、フルロード運転中の安定領域の中から試験室温度が安定した後半の部分（約30分間）を抽出し整理を行った。取得データの一例として、標準状態（試験状態1）の場合の圧縮機吐出圧力のグラフを図6、7に示す。

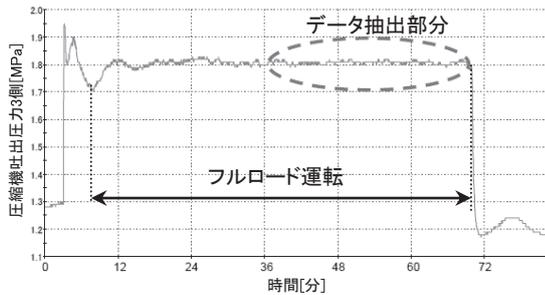


図6 圧縮機吐出圧力（3側）（外気33℃）

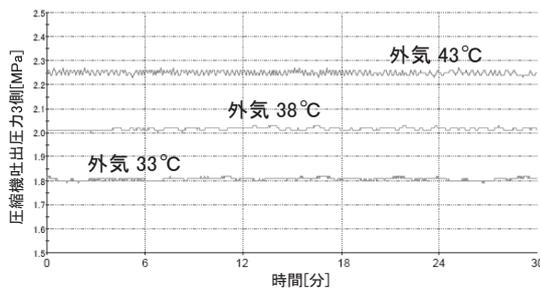


図7 圧縮機吐出圧力（3側）温度比較

4. 試験結果

4.1 試験条件に対する結果

4.1.1 標準試験（正常な状態）（試験条件1）

外気温度が上昇すると、圧縮機電流値、圧縮機吐出・吸込圧力、室外熱交換器通過温度、室外熱交換器吸込温度、室外熱交換器出口温度の値が上昇した。一般的には、外気温度上昇に伴って熱交換器の効率が低下するため、室外熱交換器通過温度、室外熱交換器出口温度、圧縮機電流値が上昇し、それに伴い凝縮させるための圧力も高くなり、圧縮機吐出・吸込圧力および圧縮機吐出温度が上昇する。

4.1.2 室内熱交換器塞ぎ試験（試験条件2）

室内熱交換器を板で塞いだ結果、圧縮機吐出温度が上昇傾向を示した。これは、室内熱交換器が汚れた場合熱交換器の効率が低下するため、圧縮機吐出温度は増加し、圧縮機吸込圧力が低下傾向を示すためと考えられる。ただし、配管に霜付き起こり易くなるため、その場合は圧縮機吸込圧力、室内熱交換器通過温度、圧縮機吸込温度、室内熱交換器出口温度の他、圧縮機吐出温度が概ね低下傾向を示した。

一例として、配管に霜付きが起きた場合の外気温度33℃標準試験を100とした時の圧縮機吸込圧力と圧縮機吐出温度の変化率を図8に示す。

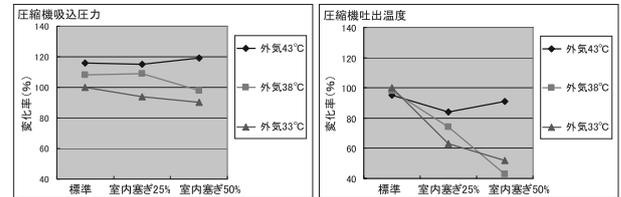


図8 圧縮機吸込圧力、圧縮機吐出温度の変化率

4.1.3 室外熱交換器塞ぎ試験（試験条件3）

室外熱交換器を板で塞いだ結果、圧縮機吸込圧力が低下し、圧縮機吸込・吐出温度が上昇、室内熱交換器の通過温度・出口温度が上昇する傾向を示した。これは、室外熱交換器が汚れた場合は効率が低下するため、室外熱交換器（凝縮工程）出口温度が上昇、それに従い凝縮させるための圧力も高くなり、圧縮機吐出・吸込圧力や圧縮機吐出温度が上昇するためと考えられる。また、外気温度が上昇した時と同じ傾向であるため、外気温度上昇時との見極めが難しい。

一例として、外気温度33℃標準試験を100とした場合の圧縮機吸込圧力と圧縮機吐出温度の変化率を図9に示す。

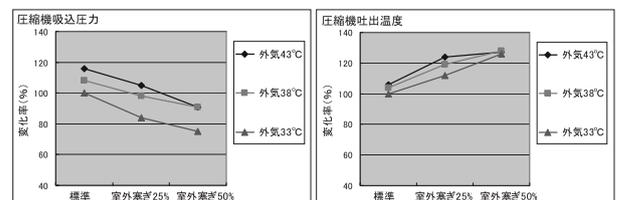


図9 圧縮機吸込圧力、圧縮機吐出温度の変化率

4.1.4 室内・室外熱交換器塞ぎ試験（試験条件4）

室内・室外熱交換器の両方を板で塞いだ場合、室内熱交換器塞ぎ試験と室外熱交換器塞ぎ試験の2条件を足し合わせた結果となった。但し、圧縮機吸込温度はこの傾向から外れた。これは温度低下量が霜付きに近い状態になったためと推測される。

4.1.5 冷媒抜き試験（試験条件5）

冷媒量が減少するに連れ、圧縮機吐出・吸込圧力が低下し、室内熱交換器通過温度と圧縮機吸込温度が上昇した。これは、冷媒量が減少した場合、圧縮機吐出・吸込圧力が低下し、特に室内側の熱交換が十分に行われなくなるため、室内熱交換器通過温度と圧縮機吸込温度が上昇するためと考えられる。

一例として、外気温度33℃標準試験を100とした場合の圧縮機吐出圧力と圧縮機吸込温度の変化率を図10に示す。

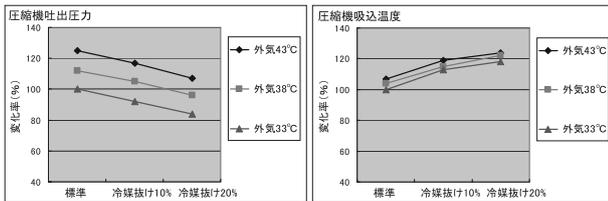


図10 圧縮機吐出圧力、圧縮機吸込温度の変化率

4.1.6 冷媒配管詰まり試験（試験条件6）

キャピラリチューブ部分を潰したサイクルは、圧縮機吸込圧力が低下し、圧縮機吸込温度と室内熱交換器通過温度はほぼ一定となった。

一例として、外気温度33℃標準試験を100とした場合の圧縮機吸込圧力と圧縮機吸込温度の変化率を図11に示す。

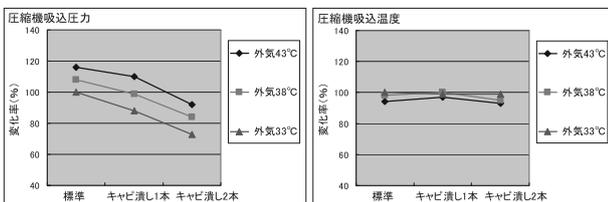


図11 圧縮機吸込圧力、圧縮機吸込温度の変化率

4.2 モニタリング項目の選定

試験台試験から得られた結果を、AU720型とAU726型空調装置それぞれについてまとめ、モニタリングに適切な測定項目の選定を行った。その結果を表4に示す。測定項目の選定にあたっては、①測定値の変化が大きい、②他の測定項目の測定値と同じ傾向ではない（同傾向のものは集約する）ことを条件とした。

表4 モニタリング項目の有効性評価

No.	測定項目	有効性
1	室外送風機電流値	
2	室内送風機電流値	
3	圧縮機電流値	
4	圧縮機吸込圧力	冷媒圧力 ○
5	圧縮機吐出圧力	冷媒圧力 ○
6	室内熱交換器吸込温度（リターン口温度）	空気温度
7	室内熱交換器吸込湿度（リターン口湿度）	空気湿度
8	室内熱交換器通過温度	空気温度
9	室内熱交換器通過湿度	空気湿度
10	室外熱交換器吸込温度	空気温度 ○
11	室外熱交換器吐出温度	空気温度
12	圧縮機吸込温度	冷媒温度 ○
13	圧縮機吐出温度	冷媒温度 ○
14	室外熱交換器入口温度	冷媒温度
15	室外熱交換器出口温度	冷媒温度
16	室内熱交換器入口温度（ディストリビュータ温度）	冷媒温度
17	室内熱交換器出口温度	冷媒温度
18	圧縮機振動	

その結果、劣化状態・故障予兆を判断するために最も有効と考えられる測定項目は、①圧縮機吸込圧力、②圧縮機吐出圧力、③圧縮機吸込温度、④圧縮機吐出温度の4項目となった。また、現車では試験台試験のように外気温度が一定条件ではないことから、数値の変化が外気空気温度の影響によるものであるかどうか識別するため、⑤室外熱交換器吸込温度についても測定が必要である。

なお、AU726型空調装置では①・②・④の各項目を保護動作の基準として、また、⑤を温度調節制御のためとして測定している。

また、AU720型空調装置とAU726型の試験結果を比較すると、変化の傾向は同一であるものの、AU726型の方が測定値の変化量が小さかった。これは、AU726型の方が空調としての能力が高く（表1参照）、性能に余裕があるためであると考えられる。さらに、冷凍サイクルと熱交換器の接続方法が異なっており、AU726型では片側の冷凍サイクルに異常があっても、もう一方が補う働きをする構造になっているためと考えられる。

5. まとめ

AU720型およびAU726型空調装置の試験台試験の結果から、次の知見が得られた。

- 劣化状態・故障予兆を判断するために有効であると考えられるモニタリング項目は表4のとおりとなる。
- AU720型とAU726型では、試験条件から受ける影響はほぼ同じ傾向となる。
これは、基本構造が同じ空調装置では、能力に寄らず劣化状態・故障予兆を示す数値変化の傾向がほぼ同じであるということである。このことから、空調装置の故障・劣化状態を判定するために適切なモニタリング項目は共通にできると考えられる。
- AU726型の方が試験条件に対する数値の変化量が小さい。

これは、能力の大きい空調装置では劣化状態・故障予兆を示す数値変化量が小さいということであり、正常な稼動状態のデータとの見極めが難しくなる。

今後は、営業運転中の空調装置のデータ収集を行い、外気温度上昇や、冷房負荷の変化に対する測定データへの影響を把握するとともに、データ数を増やし精度を向上させモニタリングの有効性の検証を行っていきたい。