

車両床下機器箱内への水蒸気流入に関する実験的検証

門脇 悟志* (鉄道総合技術研究所)

田中 大希 (東日本旅客鉄道)

Experimental and verification of water vapor inflow into underfloor equipment box of rolling stock

Satoshi Kadowaki*, (Railway Technical Research Institute)

Daiki Tanaka, (East Japan Railway Company)

The equipment box with dew condensation had low contact pressure between main box and the inspection cover. In a stationary test, we confirmed that the amount of water vapor in the box with low contact pressure increased by 44% in 3 hours, and the water vapor flowed into the box. Therefore, we increased the contact pressure of the entire box to 0.5 MPa or more, and as a result of the same test, the increase rate of water vapor inside the box was reduced by 30%.

キーワード：結露，機器箱，水蒸気

(Dew condensation, Equipment box, Water vapor)

1. はじめに

冬季に寒暖差の大きい線区を走行する新幹線車両の一部の床下機器箱内において、結露発生に起因すると推定される水滴付着や痕跡が確認されている⁽¹⁾。結露は、機器箱内の電気回路の短絡や導通不良など故障の原因となり⁽²⁾、安定輸送の弊害となることからその発生を防ぐ必要がある。

これまで筆者らは、機器箱内における結露発生現象解明のために、2019年度および2020年度の冬季2期間に亘り、新幹線車両の主変換装置（以下、CIと略記）箱内環境を実測し測定結果の分析を行った。その結果、①箱内の結露は、箱内水蒸気量の高い状態でかつ外気で箱が急激に冷やされることにより発生していると考えられること、②箱内水蒸気量は、微小な隙間を有すると考えられる箱のみ、坑内温度が沿線温度よりも高い長大トンネル内や、暖房が効いた在線時間の長い車両所留置中に顕著に増加していること等が確認された⁽³⁾。

本稿では、現車試験で同形式車両かつ同型のCIにおいて、結露が発生した箱と、結露が発生しなかった箱の箱内環境の測定例に示すとともに、両者の箱の差異について現車で実測した結果について述べる。そして、この差異を再現した検証用機器箱ミニモデルを用いた定置試験において、結露発生の要因となる箱外から箱内への水蒸気流入について実験的に検証したので報告する。

2. 現車試験結果

〈2・1〉 測定概況 これまで実施した冬季2期間に亘る

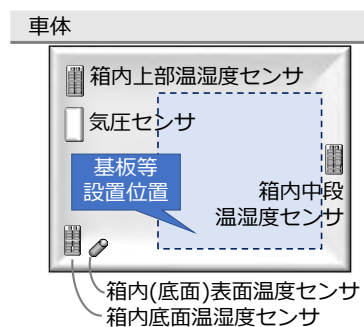


図1 箱内環境測定箇所

現車試験では、新幹線複数編成のCI6箱に計測器を仮設し、図1に示す箱内雰囲気温度、湿度3箇所、箱内表面温度、箱内気圧等の推移を継続的に測定するとともに、車上モニターデータ等を併用して時刻、地点等の詳細な分析を実施した。

ここで、箱内底面雰囲気温度 T [°C]、同相対湿度 H [%RH] (実測値) とすると、Tetensの近似式(1)より飽和水蒸気圧 $e_s(T)$ [hPa]、さらに式(2)で現在の水蒸気圧 $e(T)$ [hPa]、式(3)で露点 T_d [°C]が算出できる。本稿では、箱内底面表面温度 T_f [°C] (実測値) が露点 T_d を下回った場合、箱内で結露発生したと判断する。また、箱内水蒸気量(容積絶対湿度) $a(T)$ [g/m³] は式(4)で算出する。

$$e_s(T) = 6.1078 \times 10^{7.5T/(T+237.3)} \quad \dots\dots(1)$$

$$e(T) = e_s(T) \times \frac{H}{100} \quad \dots\dots(2)$$

$$T_d = 237.3 \times \log \left(\frac{e(T)}{6.1078} \right) / \left\{ 7.5 \times \log 10 + \log \left(\frac{6.1078}{e(T)} \right) \right\} \quad \dots\dots(3)$$

$$a(T) = 217 \times \frac{e_s(T)}{T + 273.15} \times \frac{H}{100} \quad \dots\dots(4)$$

〈2・2〉 結露発生有無による箱内環境の違い 一例として、図 2 に測定第 1 編成の機器箱で結露発生条件 $T_f < T_d$ (結露フラグ) が多く発生した列車の箱内環境の推移を示す。図中の「T」は全長 8km 超のトンネルである。結露フラグ発生のタイミングに着目すると、車両所出区後とこれらトンネル退出後に多く発生していることがわかる。例えば、T②のトンネルでは、トンネルを進むにつれて坑内温度が上昇し、それに連動して箱内(底面)表面温度が先に上昇する。数分遅れて箱内底面雰囲気温度、湿度が上昇し、箱内水蒸気量、露点も上昇する。トンネル退出後、箱内表面温度 T_f は外の冷気によって急激に低下するが、箱内水蒸気量の低下はさらに遅れるため、露点 T_d もすぐには低下せず、結露フラグ $T_f < T_d$ に達する。このような挙動は、T②トンネルよりも小幅であるものの、他のトンネルでも同様の傾向を確認することができる。すなわち、新幹線床下機器箱の結露は、箱内水蒸気量が多い状態で、外気で箱が急激に冷やされることにより発生していると考えられる。

機器箱の個体差を検証するために、同一形式かつ同型の機器箱で測定第 1 編成、測定第 2 編成それぞれが同じ運用に入り、かつ外気温度と天候が同等の条件となった冬季 1 日の箱内環境推移を評価した。ここで、沿線外気温度と気圧は、当該列車の運行実績を参照し、同列車の駅停車時または通過時刻における近傍気象台アメダスデータとした。

図 3(a)が測定第 1 編成、図 3(b)が測定第 2 編成の箱内環境測定結果と沿線環境を示している。ここでは式(4)により算出した箱内水蒸気量も併記している。第 1 編成、第 2 編成とも水蒸気量は、箱内温度に依存して変化する傾向が認められるが、第 2 編成に対して第 1 編成の水蒸気量変化が顕著である。特に、第 1 編成の水蒸気量は 15 時台から 16 時台にかけて急増している。これは、折り返し整備のため、車両所内の暖房が効いた建屋内に入庫したタイミングであることを運用実績と時刻歴から確認した。また、14 時前後、18 時前後にも水蒸気量の増加が認められるが、これは長大トンネルを走行していたタイミングである。同一形式の機器箱であっても、箱内環境に大きな差異が生じていること

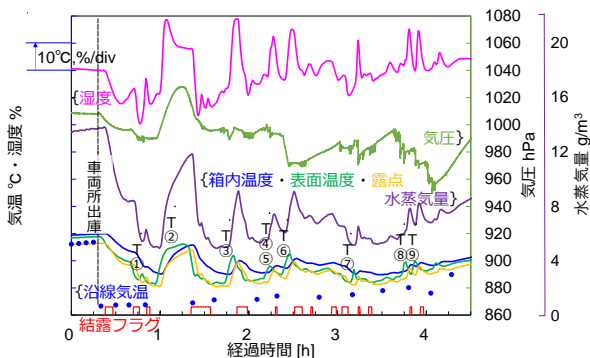
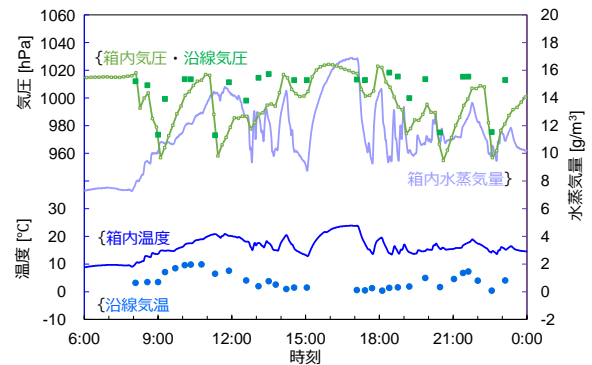
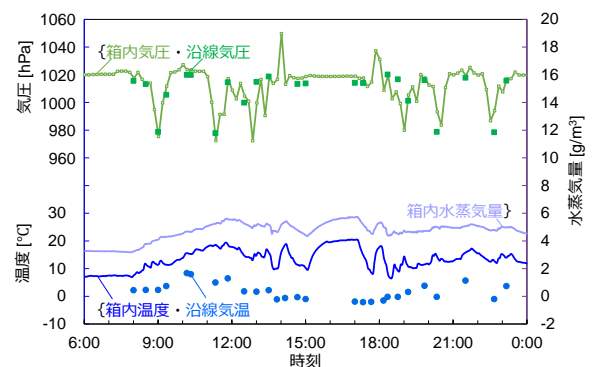


図 2 測定第 1 編成の結露フラグ発生状況



(a) 測定第 1 編成 (結露発生した箱)



(b) 測定第 2 編成 (結露未発生箱)

図 3 結露発生有無による箱内環境の差異

(同一運用で外気温度、天候同等の冬季 1 日の比較)

が確認された。

〈2・3〉 点検蓋の接触圧力測定結果 現車で箱内環境測定を実施した新幹線車両の機器箱は、上部 2 箇所 of フックと下部 3 箇所の締付金具により、点検蓋の開閉及び脱着が可能でかつ密閉性を有する構造である。密閉性確保のためのパッキンは、車両の機器箱本体側にのみ有し、点検蓋側にはない。

今回は、点検蓋と機器箱本体間の接触状態の差異に着目して、接触圧測定を実施した。点検蓋の締め方は、現場での作業実態に即して行った。また、作業の都合で上下左右 4 辺同時測定ではなく、左右側面のみ同時、上下は別々に各箱 2 回測定した。

図 4(a)は測定第 1 編成、図 4(b)は測定第 2 編成の点検蓋と機器箱本体間を閉扉し感圧帯 0.5~2.5[MPa]の感圧シートを挟み各編成の箱本体パッキンと点検蓋間について 2 分間加圧し、数値化した結果である。測定第 1 編成では上部と左右には赤いラインが認められず、ほぼ 0.5MPa 未満であるのに対し、測定第 2 編成では上下左右の四辺とも 0.5MPa 以上の連続した赤いラインが確認でき、両者には明らかな差が確認された。これより冬季の現車における機器箱内結露発生有無と、点検蓋と機器箱本体の接触状態との間に関係性が

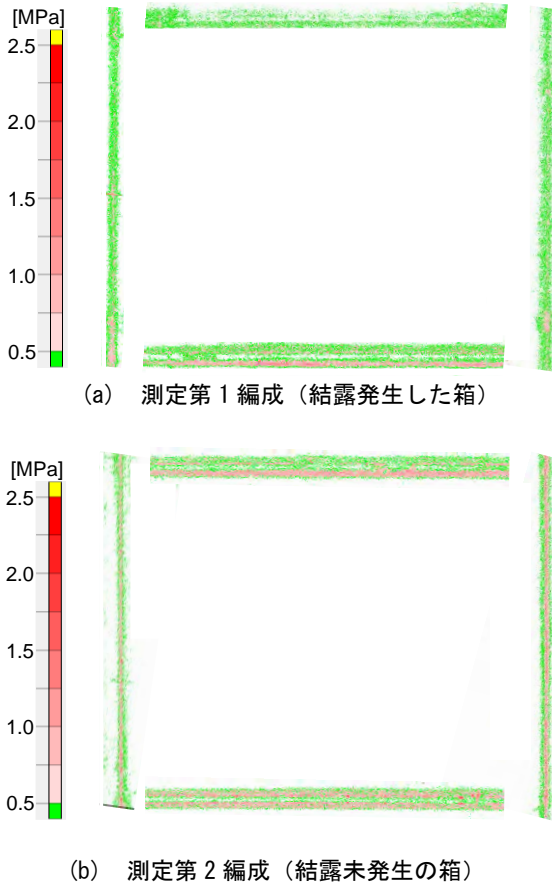


図 4 点検蓋と機器箱本体間の接触圧力分布

あることが示唆される。なお、四隅についても測定を試みたが、シートが巻き込まれ正しく測定することはできなかった。

3. 定置試験結果

〈3・1〉 検証用機器箱 A の概要 現車に搭載された機器箱において、任意の箱外環境条件を作り出し、各種試験等を実施することは難しい。そこで、鉄道総研が保有する恒温恒湿槽に格納可能な表 1 に示す水蒸気流入検証用の機器箱 A を製作した。

ここで製作した検証用機器箱は、現車の CI 測定区画に対

表 1 水蒸気流入検証用の機器箱 A の仕様

寸法	幅	280 mm
	高さ	365 mm
	奥行	266 mm
重量		15.5 kg
板厚		3.2 mm
締付金具		下部 2 点
パッキン		箱本体側のみ

して容積が約 4 分の 1 となるサイズである。そのため、定置試験で取得される絶対値や時間応答性について、完全に等価な評価することは難しい。一方、機器箱本体側のみパッキンを有し、点検蓋側にはパッキンのない箱構造は、現車と全く同じであり、箱内への水蒸気流入要因の検証は可能と考える。現車の機器箱における箱内結露は、前章で示したように箱内水蒸気量が高い状態で、箱が外気で急激に冷やされることにより発生していたことを踏まえ、箱内への水蒸気流入に着目した定置試験を実施する。そこで、この機器箱に対して測定第 1 編成の機器箱で測定された点検蓋と機器箱本体間の接触圧力と同程度である 0.5MPa 未満となるように、点検蓋フックの下側リベット部にスペーサを挿入することで 1.6mm 浮かせ、点検蓋上方が手前に反るように加工した (図 5)。図 6 は、この状態における感圧シートによる測定結果であり、想定通り左右側面上方の接触圧力が低くなっていることを確認できる。

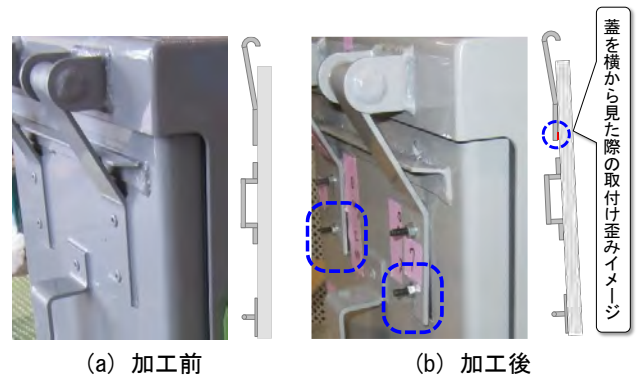


図 5 点検蓋の低接触圧化加工

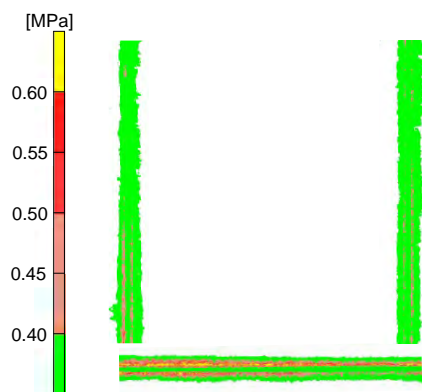


図 6 検証用機器箱 A の点検蓋と機器箱間の接触圧分布

〈3・2〉 検証用機器箱 A の試験結果 定置検証試験では、箱内結露の発生要因となる箱外から流入する箱内水蒸気量変化に主眼を置いた試験を実施した。冬季の現車試験で水蒸気量の増加が認められた箱外環境 20℃, 70%を恒温

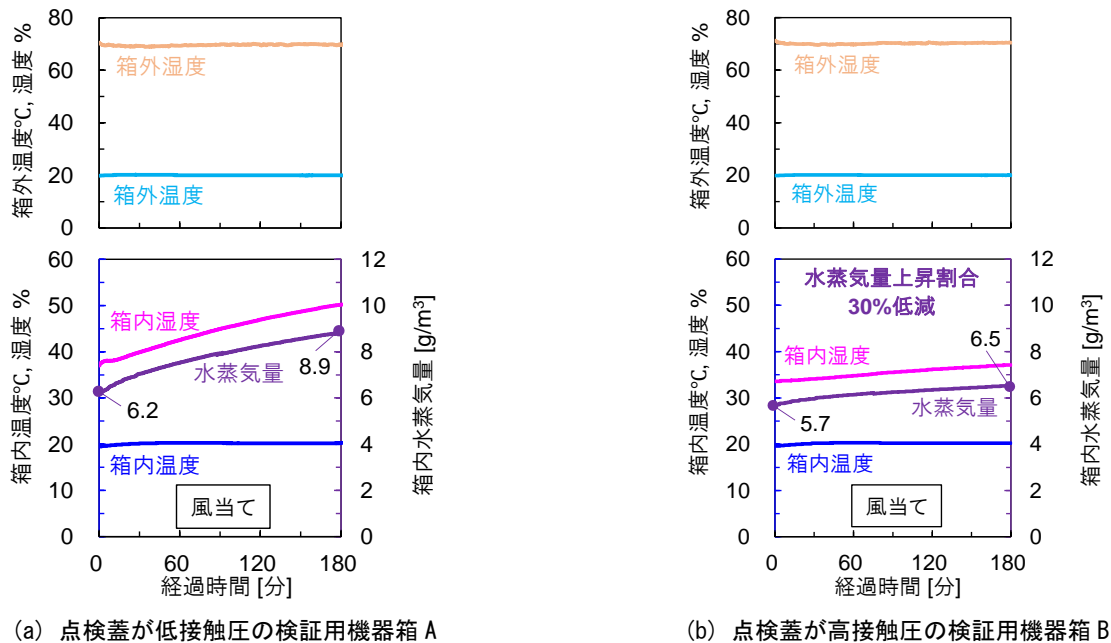


図 7 定置試験による箱内水蒸気量等の変化

恒湿槽で再現し、かつ CI の強制冷却風を点検蓋周りで実測した風速 1m/s の風を箱に当てた。図 7(a)が試験結果であり、開始時 6.2[g/m³]だった箱内水蒸気量は、180 分経過時には 8.9[g/m³] へと 44%上昇し、箱内へ流入することを確認した。

〈3・3〉 検証用機器箱 B の概要 大幅な箱構造変更を伴わず、点検蓋と機器箱全体の接触むらを抑えて均一な接触圧を確保するために、締付金具を左右側面にも追設した検証用機器箱 B を製作した。この機器箱 B にも図 5 と全く同じ加工を施し、感圧シートで接触圧測定と数値化を実施した。図 8 が検証用機器箱 B の点検蓋と機器箱本体間の接触圧力分布である。検証用機器箱 A の分布の図 6 と比べて、左右上方にまで圧力が印加されていることを確認できる。製作精度が悪い機器箱であったとしても、左右に締付金具を追設するだけで、均一な接触圧を得られることがわかる。

〈3・4〉 検証用機器箱 B の試験結果 図 7(b)は、検証用

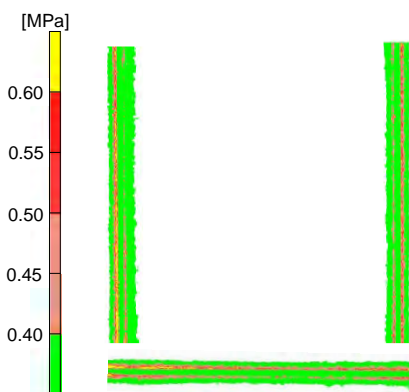


図 8 検証用機器箱 B の点検蓋と機器箱間の接触圧分布

機器箱 B における図 7(a)と同条件での試験結果である。開始時 5.7 [g/m³]だった箱内水蒸気量は、180 分経過時でも 6.5[g/m³]と 14%上昇に留まり、図 7(a)に示す検証用機器箱 A と比べて箱内への流入を 30%低減できることが確認された。締付金具を左右に追設し、点検蓋と機器箱パッキン間の接触圧力を向上させることで、箱内結露発生要因である箱外から箱内への水蒸気流入を効果的に抑制できることを確認した。

4. まとめ

新幹線床下機器箱で結露発生要因となる箱内への水蒸気流入について、定置検証試験を行い、以下の知見を得た。

- i. 点検蓋と機器箱間の接触圧を現車で結露が発生した箱と同程度の 0.5MPa 未滿となるように調整した検証用機器箱 A で、箱内水蒸気量は 3 時間で 44%上昇し、箱外から箱内へ水蒸気が流入することを確認した
- ii. 点検蓋と機器箱間の接触圧を高める締付金具を左右にも追設した検証用機器箱 B において、水蒸気流入割合を 30%低減できることを確認した。

今後は検証用機器箱と現車機器箱との対比や、現車で結露発生抑制効果の検証等に取り組んでいく。

文 献

- (1) 上東直孝・藤井義博・梅田啓：「新幹線車両の床下機器における結露対策の検討」, No.1205, 第 25 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集(J-RAIL2018), (2018)
- (2) 関西電子工業振興センター信頼性分科会 編：「故障をゼロにする信頼性技術」, pp.87-88, (1990)
- (3) 門脇悟志・八木聡一：「冬季における新幹線車両床下機器の箱内環境解析」, S-1-1, 第 27 回鉄道技術・政策連合シンポジウム(J-RAIL2020)講演論文集, (2020)