

信号用電子機器の温度環境改善に関する検討

進藤 卓朗* 藤田 浩由 神谷 剛志 高崎 建 一色 竜杜 (鉄道総合技術研究所)

A Study on Improving the Temperature Environment for Signalling Electronic Equipment

Takuro Shindo*, Hiroyuki Fujita, Tsuyoshi Kamiya, Ken Takasaki, Ryuto Isshiki (Railway Technical Research Institute)

There has been a strong need for a lifetime extension of signalling equipment in hopes of reducing replacement costs. The practical life of signalling electronic equipment depends on the temperature of some components and the solder joints with the substrate, thus it is possible to prolong the lifetime by improving the using environment. In this paper, we tested a material that suppresses the temperature rise inside the box caused by the sunlight on it, and verified the effect of suppressing the temperature rise outdoors. In addition, based on the suppressing effect, we reported the effect of extending the life of electronic equipment along the railway line.

キーワード：信号用電子機器，電子部品，延命対策

(Keywords, Signalling Electronic Equipment, Electronic Part, Lifetime Prolonging Measure)

1. はじめに

鉄道信号設備は、列車の安全・安定運行を確保するための設備として、沿線に広く導入されている。また、信号設備においてはリレー制御による継電機器から電子機器への置換えにより、高機能化および小型化が実現されている。一方で、電子機器は機器ごとに動作環境や設置環境が異なるため、劣化傾向の把握が困難な場合が多く、導入された電子機器の更新時期の適切な設定が課題となっている。特に昨今の半導体不足を背景とした供給性の課題や、更新にかかるライフサイクルコスト低減の期待から、信号用電子機器の長寿命化に対して高いニーズが存在している。

これまでに著者らは、機器室等の屋内ならびに屋外の鉄道沿線環境に設置されている信号用電子機器について、使用環境に応じた摩耗故障期の故障率を算出する寿命評価手法の開発を行った⁽¹⁾⁽²⁾。本寿命評価手法において、信号用電子機器の耐用寿命は、搭載されている電子部品や基板とのはんだ接合部の寿命に依存していること、さらにこれらは周囲温度に影響されることが示されており、屋外の設置環境を改善することで設置機器の長寿命化を図ることができると考えられる。

本稿では、踏切制御用の器具箱（以下、制御子箱）に対して、直射日光による箱内の温度上昇を抑制する対策を施工し、屋外試験により箱内の温度上昇抑制効果を検証した。さらに、対策による箱内温度の上昇抑制効果から沿線電子機器の延命効果を検討した内容を報告する。

2. 試験概要

信号用電子機器は複数の基板から構成されており、故障としては部品故障、基板故障、はんだ接合部故障の3つに大別できる。過去の鉄道事業者や著者らの調査により、アルミ電解コンデンサなどの有寿命部品の劣化やはんだクラックなどが故障として確認された。また、沿線に設置された電子機器の寿命に影響する要因としては温度が支配的であった⁽²⁾。

そこで、信号用電子機器の温度環境改善を目的として、制御子箱に対して温度対策を施工したものを屋外環境に設置し、箱内温度を測定する試験を2022年9月29日から10月4日で実施した。制御子箱は、鉄道事業者において一般的に用いられる直射日光を防ぐ遮蔽板付きの器具箱（寸法：500×430×535mm）を用いた。試験にあたっての共通条件として、制御子箱内に電子機器等は収めず空箱の状態とし、底部に設けられているケーブル配線用の貫通穴は沿線での使用環境と同様にシーラーで塞ぎ密閉状態とした。用意した8つの制御子箱の各条件は以下のとおりである。

- ① 無施工 北向き
- ② 無施工 南向き
- ③ 高日射反射率塗料
- ④ 放射冷却塗料(箱本体+遮蔽板)
- ⑤ 放射冷却塗料(扉+遮蔽板)
- ⑥ 放射冷却フィルム(箱本体+遮蔽板)
- ⑦ 放射冷却フィルム(扉+遮蔽板)
- ⑧ ヒートシンク

①, ②は他の制御子箱の対策効果を検証するための対比条件として設置した。③の高日射反射率塗料とは, JIS K5675 (屋根用高日射反射率塗料) で規格化された, 近赤外線領域の光を高いレベルで反射する特性を持つ塗料である。通常の塗料と比べ, 光の吸収を抑えることができるため直射日光による温度上昇が抑制可能である。条件④-⑦に使用した放射冷却材料は「放射冷却現象」を引き起こす材料である。放射冷却現象とは, 熱を大気の高透過率が高い波長帯 8-13 μm (大気の窓) を通じて宇宙空間に放出することであり⁹⁾, 素材の温度を日中外気よりも低下させることができる。放射冷却材料については, 施工面積の差による温度上昇抑制効果を検証するため, 遮蔽板と扉だけでなく箱本体の上面と側面に施工した試番についても実施した。⑧のヒートシンクについては箱内部の熱を外に放出する目的で箱の上面と側面に合計 6 つを熱抵抗の低いシリコン接着剤で接着した。本試験には ABL Components 製 (寸法: 200×100×15mm, 熱抵抗値 0.48°C/W) を使用した。表 1 に高日射反射率塗料と放射冷却材料の仕様を示す。

試験風景を図 2, サーモカメラによる画像を図 3 に示す。試験は鉄道総研所内の実験棟屋上にて実施した。地面の温度分布を一定にするためにブルーシートを設置した。また, 沿線の設置環境に近づけるために, 風通しの良いケースの上に制御子箱を設置して高さを調節した。設置方向は②以外は扉が真北基準で南向きになるよう調節した。箱内温度と外気温は T&D 製のおんどとり (サンプリング: 5 分, 誤

表 1 各温度上昇対策材料の仕様

Table 1 Average temperature difference of each railway level crossing control box with no construction (top level).

材料	メーカー	日射反射率 [%]	放射発散度 [W/m^2]
高日射反射率塗料	スズカ ファイブ	88	—
放射冷却塗料	Radi-Cool	86	100
放射冷却フィルム	Radi-Cool	83	110



図 1 制御子箱の設置環境

Fig. 1. Appearance with a railway level crossing control box installed



図 2 総研所内での試験風景

Fig. 2. Outdoor temperature measurement test scene at the RTRI.

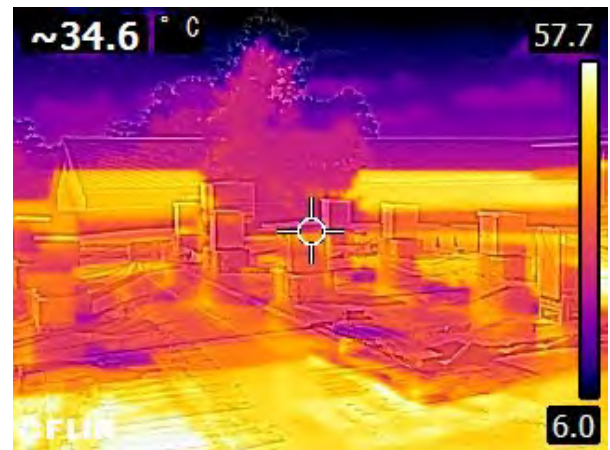


図 3 試験風景のサーモカメラ画像

Fig. 3. Thermal camera image of test scene.

差: $\pm 0.3^\circ\text{C}$) を制御子箱の上下段と百葉箱内に設置することで測定した。百葉箱に設置したおんどとりについては照度センサを設置し, 照度と紫外線照度から, 直射日光の有無を確認した。

3. 試験結果

〈3-1〉 晴れ・風が弱い日 図 4 に 2022 年 10 月 3 日における気温と箱内上段の温度, 図 5 に気温と箱内下段の温度を示す。2022 年 10 月 3 日の天気は気象庁データによれば, 鉄道総研から最も近い観測点である「府中」では 10 時から 13 時まで日射があるとされている。百葉箱の照度センサからも同様の結果が得られた。

図 4, 5 より, 上下段で比較すると, 無施工の箱とヒートシンクを施工した箱では上段の温度が高いことがわかる。これは遮蔽板が温められたことで, 遮蔽版天井と箱本体の上面との間で暖かい空気が滞留し, 箱本体の上部が温められたためと考えられる。他の制御子箱では上段と下段の温度に大きな差は見られなかった。時間ごとに見ていくと, 太陽が出ていない早朝と夜では箱内温度に大きな差はなく, いずれの箱も外気温と同程度の温度であった。対策ごとに見ていくと, 太陽光による温度上昇を抑制効果が最も大きかったのは放射冷却フィルムであり, 次に放射冷却

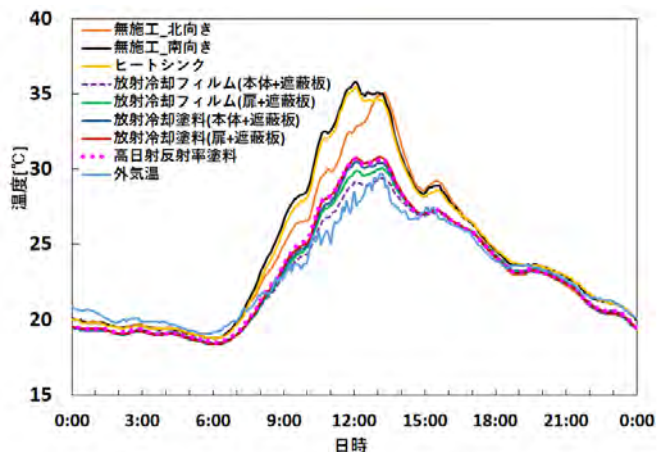


図 4 10/3 における各制御子箱内の上段温度

Fig. 4. Temperature at the top level in each railway level crossing control box at 10/3.

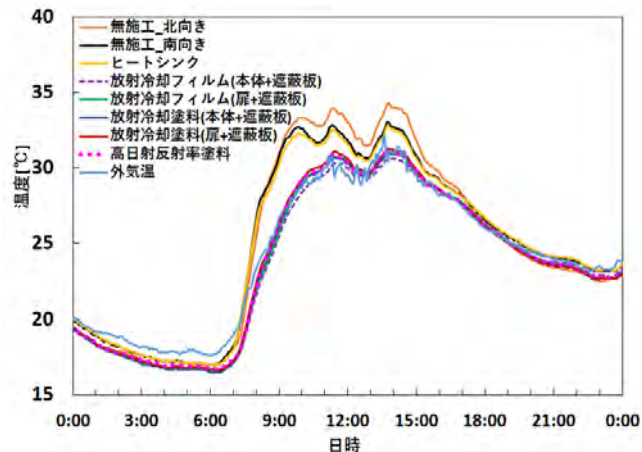


図 6 10/4 における各制御子箱内の上段温度

Fig. 6. Temperature at the top level in each railway level crossing control box at 10/4.

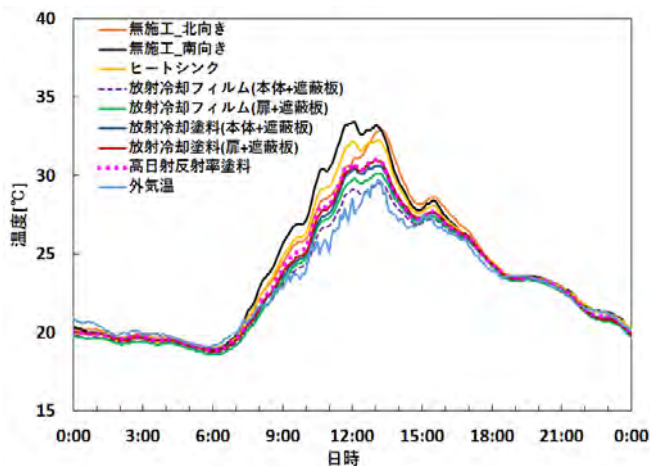


図 5 10/3 における各制御子箱内の下段温度

Fig. 5. Temperature at the bottom in each railway level crossing control box at 10/3.

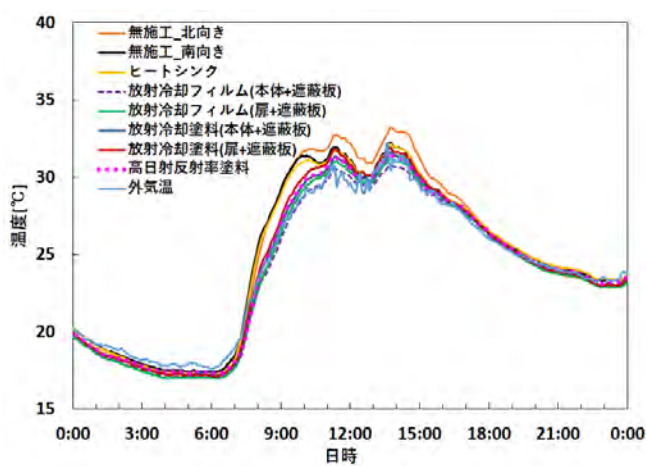


図 7 10/4 における各制御子箱内の下段温度

Fig. 7. Temperature at the bottom in each railway level crossing control box at 10/4.

塗料、高日射反射率塗料、ヒートシンクという結果であった。放射冷却材料については扉だけでなく本体にも施工することで温度上昇抑制効果が大きくなるという結果が得られた。

〈3・2〉 晴れ・風が強い日 図 6 に 2022 年 10 月 4 日における気温と箱内上段の温度，図 7 に気温と箱内下段の温度を示す。2022 年 10 月 4 日の天気は気象庁データによれば、府中では 7 時から 15 時まで概ね日射があるとされており、百葉箱に設置した照度計も同様である。

4 日は 3 日より気温が高い結果となっているが、制御子箱の温度は 3 日より低くなっている。これは本体と遮蔽板の間の暖かい空気が風によって換気され、温度上昇を抑制していると考えられる。3 日の日中の平均風速 1.8m/s (1 時間当たりの平均最大風速 3.7m/s) であるが、4 日の日中の平均風速は 3.6m/s (1 時間当たりの平均最大風速 5.5m/s) であった。そのため、4 日の結果は 3 日より各制御子箱の温度差が小さくなったと考えられる。高日射反射率塗料と

放射冷却材料については制御子箱の温度が外気温と同程度となっており、未施工の制御子箱についても 3 日より気温との差は小さくなっている。

4. 箱内環境改善による効果

〈4・1〉 試験結果の定量化 3 章の試験結果について、定量的に評価をするため、対策未施工の②と各制御子箱の温度の差分を取り、温度上昇抑制効果について検証する。表 2～5 に 1 日の平均温度と最高温度それぞれについて差分を取った結果を示す。すべての日において⑥の放射冷却フィルムの施工が最も温度上昇抑制効果が大きく、上段での平均温度では 3.2℃、最大温度では 8.2℃の温度上昇を抑制できる結果となった。最も温度上昇抑制効果が小さかったのは⑧のヒートシンクである。温度上昇抑制効果が小さい理由としては、遮蔽板と本体の間の空気の温度が高く、本体との温度差が小さかったことが考えられる。制御子箱に踏切

表 2 各制御子箱の無施工との平均温度差(上段)

Table 2 Average temperature difference of each railway level crossing control box with no construction (top level).

試験日	9/29	9/30	10/1	10/2	10/3	10/4
③	-1.4	-2.2	-2.0	-2.4	-1.4	-1.1
④	-1.5	-2.3	-2.2	-2.6	-1.5	-1.2
⑤	-1.4	-2.1	-2.1	-2.3	-1.4	-1.1
⑥	-1.6	-2.7	-2.7	-3.2	-1.7	-1.3
⑦	-1.5	-2.4	-2.4	-2.8	-1.6	-1.2
⑧	-0.1	-0.1	-0.2	-0.2	-0.1	-0.1

表 3 各制御子箱の無施工との平均温度差(下段)

Table 3 Average temperature difference of each railway level crossing control box with unmeasured (bottom).

試験日	9/29	9/30	10/1	10/2	10/3	10/4
③	-0.7	-1.1	-0.8	-1.0	-0.7	-0.9
④	-0.7	-1.2	-1.0	-1.2	-0.9	-1.0
⑤	-0.6	-1.1	-1.0	-1.2	-0.8	-0.9
⑥	-1.0	-1.7	-1.6	-1.9	-1.3	-1.3
⑦	-0.9	-1.5	-1.5	-1.6	-1.1	-1.2
⑧	-0.4	-0.9	-0.6	-0.5	-0.4	-0.1

制御子を設置して動作させた場合は本体内部の温度が上昇するため、放熱効果を発揮することができるのではないかと考える。

〈4・2〉ケーススタディ 本節では、制御子箱への温度対策施工による踏切制御子の延命時間を試算したケーススタディ結果について述べる。踏切制御子に実装されている有寿命部品として代表的なものにアルミ電解コンデンサがあり、信頼性試験データがメーカーから公表されている。信頼性試験データから実際の使用環境下での故障時間を算出することが可能である⁽⁴⁾。式 (1) にアルミ電解コンデンサの代表的な加速モデルである 10°C^2 倍則 (アレニウス則の近似) を示す。

$$L_1 = L_0 \cdot 2^{\left(\frac{T_0 - T_1}{10}\right)} \quad (1)$$

ここで L は故障時間、 T は絶対温度である。添え字の 1 は使用環境条件、0 は試験環境条件を示す。

例えば、信頼性試験データとして、加熱時間：1000h、加熱温度：105°C、試料数：6 個のアルミ電解コンデンサを用いた場合、使用環境として、部品発熱：+10°C、制御子箱平均温度：気温+5°Cとしたときに累積故障確率 0.1% (1000 個中 1 個が故障する) に至る時間は 4.0 年と算出できる。

ケーススタディとして、温度上昇抑制対策として放射冷却フィルム (扉面+遮蔽板) を施工した場合の延命効果を算出する。2 章の各条件から放射冷却フィルム (扉面+遮蔽板) を選択した理由としては施工の簡易さが挙げられる。鉄道事業者が温度上昇抑制対策を実際に施工する際に、塗料を用いる場合は 2 または 3 種類の塗料について塗布と乾燥を繰り返す必要がある。放射冷却フィルムであれば片側が粘着面となっているため切断したものを制御子箱に貼り付けるだけでよい。しかし、箱本体に施工する場合は遮蔽板の分解が必要であり、一方で箱本体の代わりに扉に施工しても

表 4 各制御子箱の無施工との最大温度差(上段)

Table 4 Maximum temperature difference between each railway level crossing control box and unmeasured (top level).

試験日	9/29	9/30	10/1	10/2	10/3	10/4
③	-5.1	-6.2	-5.8	-6.3	-5.1	-1.8
④	-5.2	-6.4	-6.2	-6.4	-5.3	-1.9
⑤	-4.8	-5.7	-5.9	-5.8	-5	-1.7
⑥	-6.4	-7.9	-7.9	-8.2	-6.4	-2.4
⑦	-5.5	-6.7	-6.6	-6.8	-5.7	-1.8
⑧	-0.5	-0.4	-0.8	-0.5	-0.3	-0.2

表 5 各制御子箱の無施工との最大温度差(下段)

Table 5 Maximum temperature difference between each railway level crossing control box and unmeasured (bottom).

試験日	9/29	9/30	10/1	10/2	10/3	10/4
③	-2.1	-2.4	-2	-2.5	-2.4	-0.6
④	-2.3	-2.8	-2.5	-2.9	-2.8	-0.6
⑤	-2	-2.3	-2.6	-2.4	-2.4	-0.3
⑥	-3.6	-4.1	-4.2	-4.4	-3.9	-1.5
⑦	-2.8	-3.3	-3.4	-3.5	-3.3	-1
⑧	-0.4	-0.8	-1.4	-1.4	-1.2	-0.1

一定の効果が得られるため、沿線にすでに設置されているものに関しては扉と遮蔽板に施工するのが良いと考える。表 2 の未施工の制御子箱との箱内部の平均温度差は 6 日間の平均で -2.0°C であった。これが 1 年間継続すると仮定すると、制御子箱平均温度を気温+3°C と低減させることができ、累積故障確率 0.1% に至る時間を算出すると 4.6 年と求めることができた。例に挙げたアルミ電解コンデンサの累積故障確率 0.1% に至る時間を耐用寿命とした場合、寿命を 1.15 倍に延命する効果を試算することができた。

5. おわりに

本稿では、鉄道沿線環境に設置された信号用電子機器の使用環境改善を目指し、延命対策について検討した。制御子箱に対して、箱内の温度上昇を抑制する材料を施工し、屋外環境に設置し温度を測定した。測定結果から温度上昇抑制対策による信号用電子機器の長寿命化について検討した結果、放射冷却フィルムを制御子箱の扉と遮蔽板に施工することで、ケーススタディにおいてアルミ電解コンデンサでは寿命を 1.15 倍に延命する効果が期待できることが明らかとなった。今後は施工した材料の沿線環境における耐候性の調査や、制御子が稼働状態での温度上昇抑制効果を定量化し、実使用環境での延命効果について検討を進めることでライフサイクルコストの最適化を目指す。

文 献

- (1) 藤田浩由 他：電子運動装置の使用環境を考慮した寿命評価手法の開発、鉄道総研報告、Vol.32, No.5, pp.23-28, 2018
- (2) 国崎愛子 他：鉄道沿線信号設備における電子機器の寿命予測手法、鉄道総研報告、Vol.34, No.7, pp.11-16, 2020
- (3) A.P. Raman et al : Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight, Nature, Vol.515, pp.540-544, 2014
- (4) 藤田浩由 他、信号用電子機器の延命対策に関する定量評価手法、第 29 回鉄道技術連合シンポジウム、2022 (発表予定)