

# オイルレスインピーダンスボンドの 構造設計に対する評価法

潮見 俊輔\* 進藤 卓朗\* 神谷 剛志\*  
佐藤 輝空\*\* 往古 直之\*\*

Evaluation Method of Structural Design of Impedance Bonds Molded by Resin

Shunsuke SHIOMI Takuro SHINDO Tsuyoshi KAMIYA  
Terutaka SATO Naoyuki OKO

Thermal effects on signalling field devices, such as high air temperature, intense sunlight, and Joule heat by return currents, can be tested independently. However, it has been difficult to evaluate the effects by multiple sources of heat. Therefore, failures of signalling field devices occasionally have occurred relating heat, such as a deformation of a structure by heat. To reduce such failures, we developed a method for evaluating thermal effects for impedance bonds using a computer simulation of heat-stress analysis. We also proposed a method for evaluating thermal effects for impedance bonds by combination of analytical and experimental methods.

キーワード：インピーダンスボンド，熱応力解析，帰線電流，温度上昇，性能試験方法

## 1. はじめに

鉄道沿線に設置される信号機器は、日射や風雨に暴露される環境の下で、十数年から数十年の長期にわたり使用される。このような信号機器のうち、調整や点検のために内部構造の状態調査を必要としない「メンテナンスフリー」の機器は、一度、製造時に筐体内部に機器を収容した以降は、原則、蓋やカバー等がかけられることはない。このような機器は内部の状態を目視で確認して状態の変化を知得することや、処置を行うことが困難なため、耐用寿命に到達するまで健全な状態が維持できるように、設計段階から考慮することが特に重要である。

屋外に設置する信号機器の構造設計においては、動作や運搬に耐える強度を有し、かつ鉄道沿線における振動や衝撃、温度変化、水分などの使用環境に耐えることが求められる。前者に対しては強度計算やCAE（Computer Aided Engineering）ソフトウェアによる構造解析が、後者に対してはJIS規格等に基づく耐環境性に関する試験が検証ツールとして用いられてきた。しかし、いずれの手法についても、解析や検証時の前提条件と実稼働時の条件が異なると、解析・検証結果が実際の状態とは乖離することになる。そのため、機器の構造設計の評価においては、対象の機器が使用される環境についてその実態を把握しておくことが重要である。

鉄道総研では、信号機器の使用環境の把握、および使

用環境に即した寿命や性能の評価法に関する研究開発を進めている。これまでに、信号機器室内で用いる電子機器<sup>1)</sup>、屋外設置の電子機器<sup>2)</sup>を対象とした温湿度環境の把握と寿命評価手法に関する提案や、信号機器が受ける振動に関する実態調査結果等<sup>3)</sup>の報告を行ってきた。本研究では、信号機器の耐環境性の評価手法に関する研究開発の一環として、屋外設置の信号機器における気温や日射による温度変化、および機器の内部発熱が、機器の筐体・蓋などの変形に与える影響に関して、試験や解析に基づき評価する手法の検討を行った。本報では、軌道回路機器の一つであるオイルレスインピーダンスボンド（以下、オイルレスZB）を対象として、試験手法と解析手法を検討した結果を述べる。また、設計・開発段階において筐体などの変形に対する熱の影響を評価する手法を提案する。

## 2. オイルレスZBとその構造

### 2.1 オイルレスZBの概要

インピーダンスボンドは、変圧器の一種であり、軌道回路境界に設置してレールを流れる信号電流と帰線電流を分離する役割を持つ。インピーダンスボンドの構成を図1に示す。帰線電流は一次引出線から1次コイルを経て中性端子に流れる。また、列車検知に用いる信号電流は1次コイルから2次コイル（あるいはその逆）に伝わる。コイルと鉄心から構成されたインピーダンスボンドは、帰線電流の通電によりコイルが発熱するが、コイルを浸漬する絶縁材料や筐体を介して外部に放熱される。

\* 信号技術研究部 信号システム研究室

\*\* 元 信号技術研究部 信号システム研究室

インピーダンスボンドは、絶縁材料の種類により、湿式、乾式に分類される。絶縁油を用いたものを湿式、これに対して絶縁性の充填材を用いたものを乾式と言う。乾式のインピーダンスボンドはオイルレス ZB と呼ばれる。オイルレス ZB は、絶縁油の管理や交換などの作業を省力化でき、火災などへの配慮が不要で、そして軽量であるという利点を有しており、1990 年代に実用化されて以来、多くの箇所で使用されている。

## 2.2 オイルレス ZB の構造

オイルレス ZB は、図 1 に示したように、金属製の筐体の内部にコイルと鉄心、引出線用の端子などの構成部品が収容される。製造時は筐体内部に機器を収容した上で蓋を閉じてボルトで固定する。絶縁性の充填材は蓋に設けた開口部から注入して内部に充填する。コイルや鉄心、端子などは充填材に覆われるため、製造後は点検等のために蓋を開閉することはない。そのため、水分の侵入を防止する目的で筐体と蓋の接合部や蓋を固定するボルトの周囲にシール材が塗布される。シール材の種類や塗布方法、厚さなどはオイルレス ZB の種類や部位によって異なる。

なお、軌道回路の構成によっては共振コンデンサを接続する場合があります。コンデンサを収容する場所が蓋や筐体内に設けられている。軌道回路により共振コンデンサの要否が異なり、また、定期的な外観検査を行う必要があるため、コンデンサが収容されている部分のみ小蓋等で開閉が可能な構造となっている。

## 2.3 オイルレス ZB の故障と水分の浸入

オイルレス ZB の一部において、内部の配線や端子等の腐食や破断、絶縁性能の低下による軌道回路の不正落下が発生している状況である。

軌道回路故障や絶縁低下により交換されたオイルレス ZB の内部において、水分の付着や筐体内側に浸透した水分の痕跡が確認されている。水分が浸入した後の腐食や破断、絶縁低下に至るメカニズムは、個々の製品により異なっているが、内部への水分の浸入の痕跡が残っていることが故障機器に共通する特徴の一つとなっている。

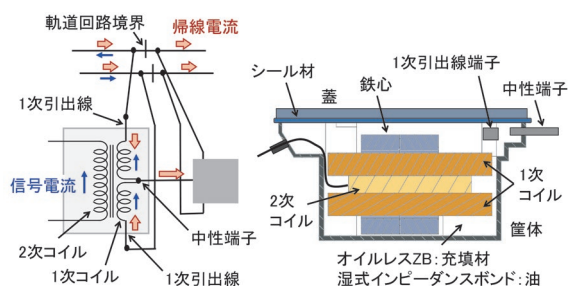


図1 インピーダンスボンドの構成と構造の概略

## 2.4 水分浸入と想定される原因

オイルレス ZB の水分の浸入は、筐体や蓋に破損や損傷がない健全な機器においても発生している。そのため、筐体と蓋の間や、中性点や1次引出線と筐体の間、およびケーブルの引出口などの部材間の接合部位が水分の浸入経路として考えられる。

しかし、オイルレス ZB は JIS E 3018 (インピーダンスボンド-性能試験方法)<sup>4)</sup> において、JIS E 3017 (鉄道信号保安部品-防水試験方法)<sup>5)</sup> の噴水試験を実施することが規定されている。そのため、オイルレス ZB は製造段階において、屋外の降雨環境下で使用することを前提とした防水性能を有していると考えられる。このことから内部への水分浸入は、① JIS E 3017 が定めている試験条件の想定を超えた環境での使用、②稼働中の状態変化による防水性の喪失のいずれか、もしくは両方を原因としたことが想定される。

そこで、オイルレス ZB の水分浸入の想定原因①について、オイルレス ZB 周辺の水位を観測し、接合部付近までの水没の有無を調査した。また、想定原因②について、帰線電流の通電や日射による温度変化の実態を調査した上で、熱による筐体・蓋の変形への影響を試験と解析の両面から検討した。

## 3. オイルレス ZB の使用環境調査

### 3.1 オイルレス ZB 周辺の水位変化

オイルレス ZB の耐水性能の前提である、水没がない使用環境での使用について、その実態を調査した。一般的な施工状態のオイルレス ZB のうち、故障や絶縁低下が確認された箇所を中心とする 12 箇所の近傍に水位の計測装置を設置して無人観測を行った (図 2)<sup>6)</sup>。2021 年 3 月から 2022 年 3 月にかけて観測を行い、最大水位と蓋と筐体の接合面の位置関係について調査した。

測定結果の例として、ある地点における測定箇所近傍のアメダス 1 時間降水量、および水位 (筐体と蓋の接合面からの相対位置) を図 3 に示す。計測期間中には 41mm/h を超える大雨も観測されたが、筐体と蓋の接合面に至る水位上昇は観測されなかった。インピーダンスボンドは、建築限界に支障しないよう低所に施工される場合があるが、施工や降雨等による水没が発生する可能

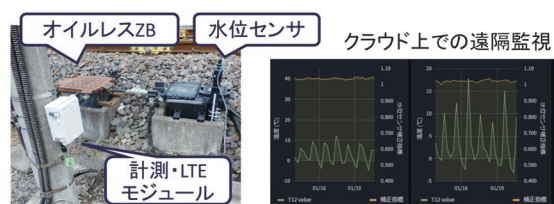


図2 オイルレス ZB 周辺の水位自動計測

性は極めて低いことが確認された。

### 3.2 帰線電流の調査

オイルレス ZB は、稼働時に内部の 1 次コイルに通電する帰線電流により、コイルや鉄心等の発熱によって温度が上昇する。営業線における帰線電流の測定結果に基づいて、一般的な使用環境を想定した試験条件（帰線電流の大きさ、連続通電時間、および通電間隔）を設定し、通電時の温度変化の傾向を試験により確認した。

直流電化区間の変電所吸上付近に設置されたオイルレス ZB（定格電流 1000A）における帰線電流の測定結果を図 4 に示す。なお、図 4 は中性点を流れる電流で示しており、中性点電流の定格は 2000A である。測定は旅客電車と電気機関車による貨物列車に対して実施し、電車で電流最大値 1240A、最大持続時間 95 秒、貨物列車で最大 1830A、連続 46 秒程度の帰線電流の通電が観測された。

### 3.3 通電による温度上昇

オイルレス ZB の温度変化と帰線電流の通電の関係について調査を行うため、電源装置を用いて帰線電流に相当する電流を通電してオイルレス ZB 内外の温度を計測する試験を実施した。測定項目と試験条件を表 1 に示す。

測定結果として、中性点に 1000A（定格の 1/2）および 2000A（定格）の電流を通電し、列車走行を模擬した断続的な通電を行ったとき（試験①）の 1 時間あたりのコイル上面の温度変化を図 5 に示す。列車走行を模擬して 2000A の電流を断続的に通電したとき、2 分毎に

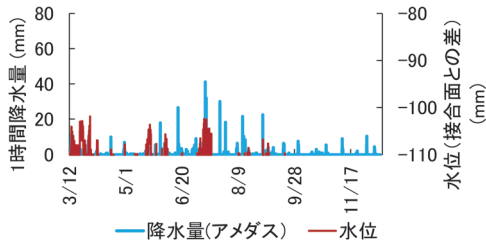
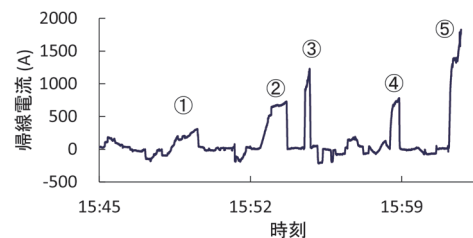


図 3 水位と降水量の測定結果



	旅客電車 力行①	旅客電車 力行②	旅客電車 力行③	貨物列車 力行④	貨物列車 力行⑤
最大値 (A)	313.8	732.0	1239.2	782.4	1830.4
平均値 (A)	158.4	491.7	837.9	610.6	1074.7
持続時間 (s)	95.6	81.6	19.0	28.5	46.2

図 4 帰線電流の測定例

45 秒間通電する試番で 1 時間あたり 9.2℃、6 分毎に 135 秒間通電する試番で 1 時間あたり 11.7℃上昇することを確認した。

また、定格の 1.5 倍の電流（中性点に 3000A）を 1 時間通電後に定格電流（同 2000A）を 2 時間通電したのちに帰線電流を通電した場合（試験②）と、同様に計 3 時間通電後に定格電流の 1.5 倍の電流を 1 時間通電する JIS E 3018 に定める温度上昇試験と同様の条件の試験（試験③）を実施したときの主要部の温度変化を図 6 に示す。コイル上面の温度が最も高温となり、試験②で 230 分経過時に 66.8℃まで上昇した。また、試験③では試験終了時に 94.9℃まで上昇した。試験③が最も過酷な条件であることから、帰線電流の通電に伴う温度上昇に関する影響の判断に JIS E 3018 の温度上昇試験を用いることができることが示された。

### 3.4 外部受熱による温度上昇と変形

オイルレス ZB の屋外への設置に伴う温度上昇について、2022 年の夏季にオイルレス ZB を屋外に設置し、帰線電流を通電しない状態での、日射や気温の上昇に対する各部の温度、および筐体・蓋間の変形量との関係を調査した。表 2 に試験条件を示す。

表 1 通電試験の測定項目と試験条件

試験回路	JIS E 3018:2001 温度上昇試験に準じる
供試体	直流電化区間用 商用 1000A（熱電対内蔵）
主な測定項目	内部温度（コイル、鉄心表面、樹脂内など 12箇所）、外部温度（筐体、蓋など）
試験① 帰線電流 相当の条件	電流（中性点） 1000Aおよび2000A 通電時間と 連続通電時間 2分毎45秒、4分毎45秒、 4分毎90秒、6分毎135秒
試験② 温度 上昇+帰線電流	電流（中性点）3000A 1時間通電→ 2000A 2時間以上通電→ 1000A 4分毎45秒間通電（1時間実施）
試験③ JIS 温度上昇試験	電流（中性点）3000A 1時間通電→ 2000A 2時間以上通電→ 3000A 1時間通電

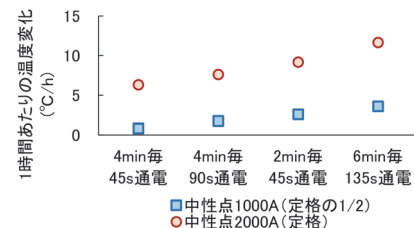


図 5 コイル上面の 1 時間あたり温度変化と通電条件

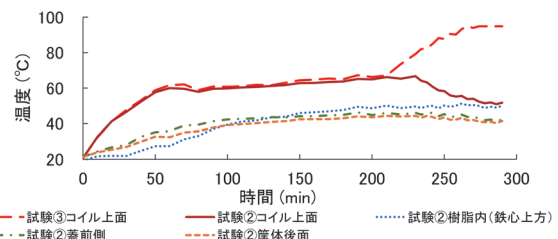


図 6 試験②、試験③時の各部温度

図7にインピーダンスボンドを設置したビニールハウスの温度と日射量の日平均値に対する各部の温度に関する関係を示す。オイルレス ZB の筐体表面や各部の温度は、周囲の温度上昇と日射の双方に影響を受け、特に日射が十分な夏季の日中においては、筐体や蓋、コイルの温度が上昇した。試験期間中の最高温度はそれぞれ 53.4℃、61.5℃、54.2℃であった。一方、日射がない雨天の日は日中の温度上昇が小さく、蓋の温度上昇は3℃～10℃、コイルの温度上昇は3℃～8℃程度に留まった。

図8に示す後部コンデンサ箱付近 A 点の筐体・蓋間の上下方向の相対変位（以下 A 点相対変位、正の値は筐体・蓋間のすき間の拡大を示す）と晴天日の各部の温度の時間推移を図9に示す。朝6時ころより熱容量の小さい蓋が日射を直接受けることで温度が上昇し、熱容量が比較的大きい筐体や内部の温度が時間遅れをもって上昇する傾向を示した。また、A 点相対変位は、蓋の温度上昇が先行する朝に減少（蓋が筐体のすき間が縮小）したのち、筐体の温度上昇と共に増加（蓋と筐体のすき間が拡大）に転じた。朝に対して日中の A 点相対変位は 0.5mm 以上増加しすき間が拡大しており、外部から水分が浸入するのに十分な幅のすき間が生じたといえる。このように、オイルレス ZB に対する日射や気温上

昇が筐体・蓋の変形に影響することが確認された。

## 4. 熱による筐体・蓋の変形への影響

### 4.1 熱応力解析によるオイルレス ZB 変形の評価

帰線電流の通電によるコイルの発熱、および気温上昇や日射による筐体や蓋の温度上昇にともない、オイルレス ZB の筐体・蓋に変形が生じ、A 点相対変位が拡大することを3章に述べた試験により確認した。オイルレス ZB の筐体・蓋の変形に対する熱の影響やその程度は、オイルレス ZB の筐体や蓋、内部に収容されるコイル、鉄心等の機器、および充填材などの寸法、形状や材料特性によって異なる。

ここでは、このようなオイルレス ZB の温度に対する筐体・蓋の変形、および設計や材料特性との関係を設計段階で評価する手法としての有限要素法による熱応力解析の適用性について、オイルレス ZB のモデルを作製して解析し、実験結果と比較することで評価を行った。

### 4.2 モデルおよび解析条件

解析に用いたオイルレス ZB のモデルの筐体および蓋の外観は図8に示したとおりである。アルミニウム製の筐体と蓋、銅製のコイル、鉄心、および中性点と1次端子から構成され、蓋を閉じた状態の内部にエポキシ樹脂を充填した構造とした。底部を除く筐体表面、蓋の表面、およびコイル表面を熱源として設定し、各部の温度を表

表2 屋外試験の試験条件

試験場所	鉄道総研 国立研究所 仮設ビニールハウス内
試験期間	2022年7月12日～12月3日
供試体	オイルレスZB (DC商用1000A)
測定項目	ハウス室温, ZB温度(内部・外部), 筐体・蓋変位, 照度
最高気温	38.4℃ (府中アメダス, 8月2日)

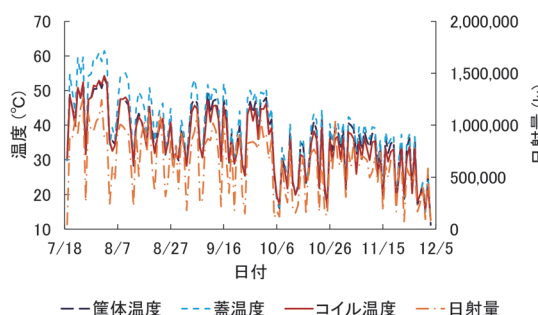


図7 オイルレス ZB の各部最高温度と日射量の推移

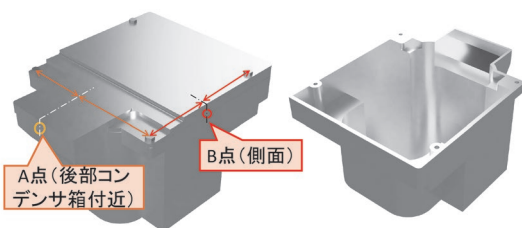


図8 筐体・蓋の相対変位測定点と解析モデルの外観

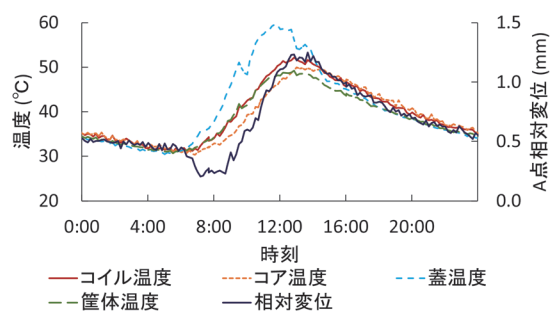


図9 オイルレス ZB の各部温度と A 点相対変位 (2022年8月3日, 晴天)

表3 解析条件 (温度, 充填材の線膨張係数)

条件名称	温度 (°C)			充填材 線膨張係数 (10 <sup>-6</sup> /°C)
	蓋	筐体	コイル	
温度同一	20, 30, 40, …, 80			39.8
コイル高温	0		80	
	20		40, 60, 80	
	40		60, 80	
	60		80	
蓋・筐体高温	40, 60, 80		20	
	60, 80		40	
	80		60	
蓋に温度差	40		30	
	80		70	
	20		70	
充填材膨張大		80		

3に示す値に設定した状態を解析した（初期温度20℃）。また、充填材に一般的なエポキシ樹脂の線膨張係数をを用いた場合と、膨張しやすい材料の使用を想定し線膨張係数を1.2倍とした場合についてそれぞれ解析を行った。

表4に解析における各部の材料特性とその他の条件を示す。線膨張係数を1.2倍としたエポキシ樹脂を除いた各部の材料特性については、一般的に用いられている値のものを使用した。解析にはAutodesk NASTRAN Solverを用い、内部のコイルや鉄心等と充填材の間は接着、筐体や蓋と充填材、筐体と蓋の間は一部を除いて相互に接触する面として扱い、接触する程度の変形が生じた場合はペナルティ法により外力を与えることとした。

### 4.3 解析結果

解析結果の例として、筐体、蓋、コイルの各部を80℃に設定したときの各部の上下方向の変形量を図10に示す。線膨張係数が高い充填材の膨張によりアルミ製の蓋や筐体を内部から押し広げる力が作用し、蓋中央部が上に大きく変形した。筐体と蓋の接合面付近の蓋の変形はボルトで固定されている部分で小さく、ボルトから離れた位置で上に大きく変形した。また、解析を行ったモデルでは、後部のコンデンサ箱付近の蓋の変形量が筐体の変形量に比べて大きいいため、蓋と筐体の間にすき間が生じた。

温度を変化させた場合の解析結果として、図9中のA点（コンデンサ箱付近）およびB点（側面）における蓋と筐体のすき間を解析結果から算出した。蓋と筐体、コイルの温度を50℃に設定したときのA点相対変位 $L_i$

表4 解析条件（材料特性, その他）

材料特性	部位	使用材料	線膨張係数 ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )
	蓋, 筐体	アルミニウム	23.6
コイル	銅	16.7	
コア	鋼	12.0	
端子類	真鍮	20.5	
ねじ類	ステンレス鋼	10.4	
充填材	エポキシ樹脂	39.8	
ソフトウェア	Solver	Autodesk NASTRAN	
	プリ・ポスト	Autodesk Fusion360	
モデル	メッシュ	ノード数	366,618
		要素数	217,989

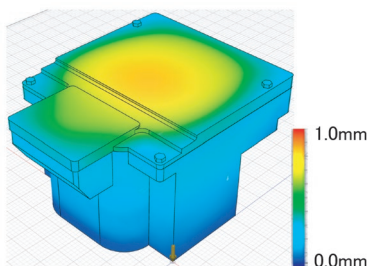


図10 解析結果例（各部80℃, 上下方向変形量）

を基準とした場合の、各解析結果における相対変位 $L_i$ の相対値 $L_i/L_{50}$ （以下、相対すき間）を算出した。A点の相対すき間を表5に示す。筐体、蓋およびコイルの温度上昇にともない、A点の相対すき間は温度とともに拡大する傾向を示した。また、B点の相対すき間は温度が同一である50℃の場合で21.2%、80℃の場合で166.4%であり、いずれもA点に比べ相対すき間が小さい。また、線膨張係数の高い充填材において相対すき間が大きくなることが確認された。

### 4.4 熱による変形とその影響因子

解析と実験による温度変化に対する傾向について比較を行うため、各部の温度が50℃のときのA点の筐体と蓋の相対すき間の解析結果、または50℃に最も近いときの実験結果を基準とした各温度の相対すき間を算出した結果を図11に示す。実験結果と解析結果からそれぞれ得た相対すき間は、温度の上昇にともない増加する同様の傾向を示した。

また、表5の解析結果から、蓋・筐体に対してコイルが高温となる場合には筐体と蓋の相対すき間が増加し、筐体・コイルに対して蓋が高温となる場合には筐体と蓋の相対すき間が減少する傾向となる。これらの傾向につ

表5 解析結果（A点の相対すき間 $L_i/L_{50}$ ）

条件名称	温度 $^{\circ}\text{C}$			充填材	相対すき間 $L_i/L_{50} \times 100$			
	蓋	筐体	コイル					
温度同一				通常	20	0.0		
					30	11.4		
					40	66.2		
					50	100.0		
					60	196.8		
					70	326.4		
					80	389.6		
					コイル高温			0
20	40	3.4						
	60	19.7						
40	80	599.0						
	60	111.1						
蓋・筐体高温			20	80				212.6
				60				270.0
				40				80
					60	45.7		
				80	40	140.3		
					60	111.8		
蓋に温度差			40	80	234.3			
				80	294.9			
				40	28.6			
				80	273.7			
モデル温度差			20	70	265.2			
				70				
充填材膨張大		80	膨張大	841.1				

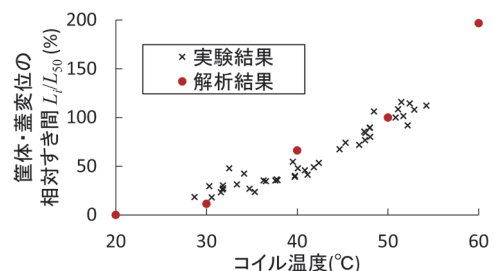


図11 解析結果と実験結果の比較

いても、屋外試験等で確認された傾向と同様である。

このように、オイルレス ZB の内部の発熱、外部からの受熱による温度上昇が筐体・蓋の変形に影響し、変形状態は温度が上昇する部位により異なる。また、変形の様子は形状や使用材料にも影響を受けるため、変形量が最大となる各部位の温度条件は特定されない。そのため、特に構造や材料などを大きく変更する場合には、帰線電流の通電によりコイルが温度上昇した状態、日射や気温による筐体や蓋の温度上昇した状態、これらが複合した状態のそれぞれに対して筐体・蓋の変形に関する評価を行うことが必要であるといえる。

## 5. 設計・開発時の評価

屋外に設置し、かつ構造の変形が機能や耐久性に影響を与える可能性がある機器に対しては、設計時や開発時に評価を行い適切な対策をとることが必要である。評価において着目すべき箇所や尺度は機器により異なるが、オイルレス ZB の場合は、外観検査で知得が困難な内部への水分浸入に影響する、筐体・蓋の変形について評価を行うことが必要である。評価にあたっては、水分浸入を防ぐ役割を有するシール材の変形特性とすき間の変化量の実験や解析の結果から、設計や改良の結果、現行機器における防水対策の妥当性を判断することができる。

図 12 に設計段階での熱応力解析など CAE ソフトウェアの活用による検討と、製品化段階での各種試験による検証を組み合わせた評価フローを示す。熱応力解析

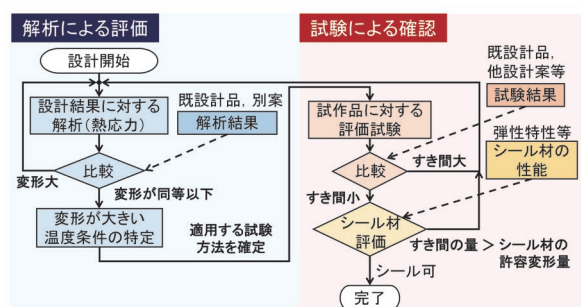


図 12 オイルレス ZB の熱影響の評価フロー

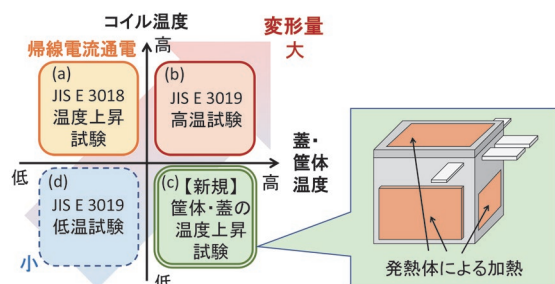


図 13 熱による変形の形態と対応する試験方法

は設計段階における解析において有用であるが、解析条件の設定次第で解析結果が左右され、実際の変形量とも一致しにくい場合がある。設計段階では、他の設計案や既設計品との比較により良否を判断する。

最終的には、実機試験により評価を行う。塗布したシール材の機能確認もあわせて実施し、最終的に設計等の結果を判断する。なお、実機試験においては、稼働状態や使用環境に即した温度等の条件の下での試験が重要である。オイルレス ZB については、4.4 節に述べた通り、内部の発熱と外部の受熱、および両者が複合した状態により変形状態が異なる。解析による事前評価を活用しながら、図 13 に示す各状態のうち変形が見込まれる条件での試験により評価を行うことが望まれる。

なお、コイルの温度上昇については、インピーダンスボンドの温度上昇試験<sup>4)</sup>、機器全体の温度上昇については信号機器の高温試験<sup>7)</sup>などの製品開発時に実施される試験において併せて検証することが可能である。筐体や蓋などの特定部位の温度上昇は、既存の試験方法による再現が困難である。熱応力解析により評価の実施が必要と判断された場合には、ヒータ等を用いて特定部位を加熱することで、実験的に検証することが可能である。

## 6. まとめ

屋外設置の信号機器における気温や日射による温度変化や機器の内部発熱が、機器の筐体・蓋の変形に与える影響について、オイルレス ZB を対象として試験、解析の両面から検討を行った。その結果、温度上昇による筐体・蓋の変形が発生し、温度の上昇部位によりその傾向が異なることを示した。また、筐体・蓋の変形に対する熱の影響を設計・開発段階にて評価するフローと試験手法を提案した。今後、防水対策の検討や新規設計時の評価等の支援に提案した手法を活用していく予定である。

## 謝辞

本研究における試験の実施にあたり、東日本旅客鉄道株式会社をはじめとする関係者には多大なご協力をいただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げる。

## 文献

- 1) 藤田浩由, 丹羽順一, 新井英樹: 電子連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, 藤田浩由, 野村拓也, 石井琢: 鉄道沿線信号設備における電子機器の寿命評価手法, 鉄道総研報告, Vol.34, No.7, pp.11-16, 2020

- 3) 押味良和, 潮見俊輔, 高崎建, 神谷剛志: 信号設備の振動環境下における振動加速度調査, 第29回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, No.S-7-4-4, pp.348-351, 2022
- 4) 日本産業規格: インピーダンスボンダー性能試験方法, JIS E 3018:2001
- 5) 日本産業規格: 鉄道信号保安部品一防水試験方法, JIS E 3017:2007
- 6) 佐藤輝空, 往古直之, 潮見俊輔: クラウドを利用した信号設備の環境情報の簡易計測, 第27回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, No.S-2-5-4, 2020
- 7) 日本産業規格: 鉄道信号保安部品の高温及び低温試験方法, JIS E 3019:2018