

リード線の断線解析および加速試験の検討

TOA株式会社
品質保証室
山田 朗博

製品の内部に使用しているリード線が断線しているのが見つかったのを機会に断線メカニズムを検討し、原因を明確にするとともに発生状況の全体像を把握した。また、断線メカニズムが腐食を基にしたものであったので、評価試験は単に高温高湿の環境に放置するのではなく、腐食を考えた加速試験を試みた。その結果から加速係数を求め、加速モデルを考察したので、その事例を紹介する。

1. 目的、背景

当社の製品の内部に使用しているリード線が、市場で腐食断線する事例が発生した。

製品は高温高湿の環境になり得る場所に設置されていたことから、市場での環境を試験条件として再現し、加速試験で腐食断線させることができれば、高温高湿での環境でも故障しにくい製品づくりに反映させることができるようになり、ひいては部品や構造の選定の基準とすることができるようになる。

そこで、リード線の腐食断線の要因を解析し、断線メカニズムを推定した。それに基づいて関連する腐食要因を調査し、温湿度加速試験を行い、加速試験の結果と市場での故障実績をワイブル確率紙で比較することにより、加速が成り立つことを確認した。また加速試験の結果から加速係数を求めるとともに加速モデルを考察した。

2. 腐食部分の表面観察と成分分析

まず初めに、故障した製品の腐食部分の表面を観察した後に元素分析を行い、考えられる要素の調査を行った。

2.1 腐食部分の表面観察

腐食に関連する部品を写真2-1aと写真2-1bに示す。写真2-1aの薄青色の傘状のものを部品A、写真2-1bに示した黒い部位を部品Bと呼ぶことにする。部品Aは紙類、部品Bはゴム系接着剤である。

また、断線している箇所を観察するため部品Bを溶剤で溶かして、内部にあるリード線の表面観察を行った結果を写真2-1cに示す。この写真から分かるように、部品Aと部品Bがリード線に接触している領域のみが、赤く変色した腐食生成物を観察することができた。また部品Bと接触していないリード線の外側境界は黒変していた。



写真2-1a 部品A

写真2-1b 部品B



写真2-1c リード線の表面観察

2.2 腐食部分の元素分析

腐食原因を調べるために腐食部の元素分析を行った。写真2-2に腐食部分やその近傍と関連付けて結果を示す。

す。写真2-2右側の図から分かるように腐食生成物が凹凸に成長している領域から、塩素、硫黄が検出された。また写真2-2左側の図から分かるように腐食部近傍(部品Bと接触していない外側)の黒変部も同様に、塩素と硫黄が検出された。黒変部は表面が凹凸するような変化はないが、薄く腐食しているものと推測される。

この結果から硫黄イオンと塩素イオンを発生する要因が近くにある部品Aか部品Bのどちらか、もしくは両方が関与している可能性が予想された。

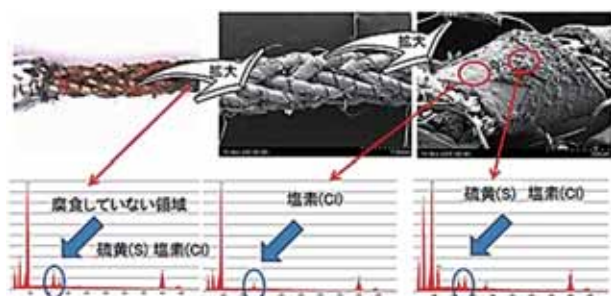


写真2-2 腐食部分と近傍の元素分析

2.3 使用部品の元素分析

腐食部付近に使っている部品について腐食要因を調べた。写真2-3に使用部品の写真と元素分析の結果を示す。部品Aからは硫黄が、部品Bからは塩素が、それぞれ検出された。

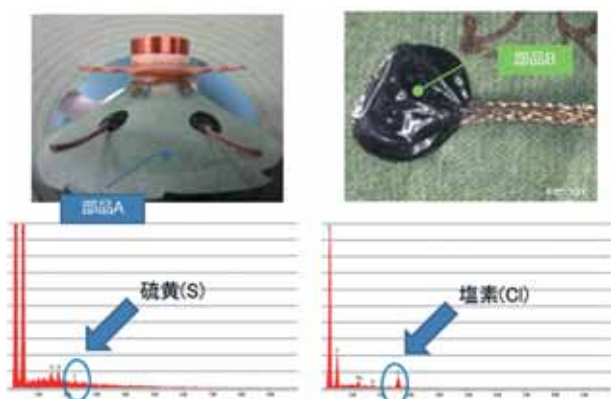


写真2-3 使用部品の元素分析

2.4 表面観察、元素分析のまとめ

表面観察の結果から、部品Aと部品Bが接触している領域でのみでリード線が赤く腐食していることが分かった。

腐食部と部品から塩素と硫黄が検出されたことから、

リード線の腐食にはこれらの元素が関係していると推察できる。

これらの結果から腐食生成物は塩化銅や硫酸銅(あるいは硫化銅)、酸化銅などの生成が考えられるが、部品Bの下では赤く腐食していたこと、凹凸に大きく腐食しているところの分析チャート(写真2-2右)では酸素のピークが高いことから、酸化第一銅ではないかと推測した。

3. 腐食メカニズムの推定

3.1 考えられる腐食メカニズム

部品Bの下では赤色だから酸化第一銅、部品B接触部の近傍では黒色だから酸化第二銅と思われる銅腐食生成物が観察された。これの生成要因は次のように考えられる。

湿式腐食を考える場合、水溶液中の反応と考えるとイオン性物質が溶け込んでいると腐食電流がよく流れることで腐食が大きく進むことが知られている。特に塩化物イオンは電気陰性度が高く金属をイオン化させやすいため腐食速度を助長する。今回の場合も腐食箇所すべてから塩化物イオンが検出されており大きく寄与したものと推察できる。

また部品B下では結露中なので反応は大きく進んだが溶存酸素の影響でしか酸化が進まなく酸化第一銅が生成し、部品B接触部近傍では水分が少ないため腐食量は少ないが空気中のため酸化第二銅が生成したものと推察できる。

3.2 市場での故障日数とワイブル分布

市場での発生状況の評価するため、故障に至った日数を集めてワイブル解析を行った。表3-2に市場での故障日数を示す。この表をもとに、故障した製品が製造されたロットの生産台数を母数としてワイブル確率紙を用いた解析を行った。図3-2にその結果のプロット線図を示す。形状パラメータ m は4.4、尺度パラメータ η は8,228日であった。

表3-2 市場での故障日数

サンプル	故障日数	サンプル	故障日数	サンプル	故障日数	サンプル	故障日数
No.1	1,035日	No.5	1,037日	No.9	1,420日	No.13	1,410日
No.2	895日	No.6	1,025日	No.10	1,188日	No.14	1,345日
No.3	1,089日	No.7	1,207日	No.11	1,212日	No.15	1,055日
No.4	1,433日	No.8	1,453日	No.12	1,370日	No.16	1,957日

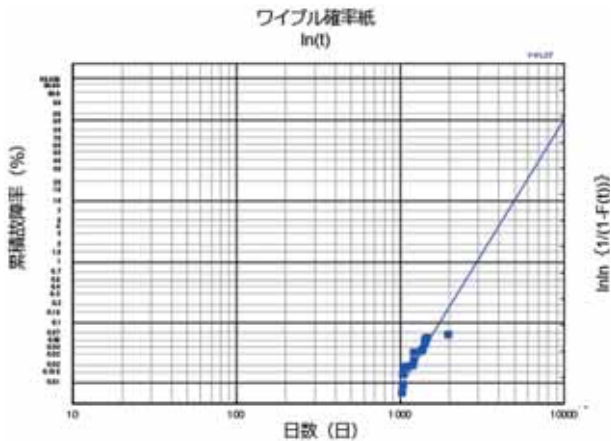


図3-2 市場故障のデータ解析

形状パラメータが4.4であったことから故障増加型の摩耗劣化故障と言えるため、寿命との関連を調べた。この製品の当社で定義している寿命6年(2,190日)に対して、ワイブル確率紙解析結果によると累積故障率が1%のところは8年(2,920日)に該当することが分かった。また、ワイブル確率紙によると、メジアン寿命(累積故障率が50%となる寿命)は約8,000日(約22年)であることが分かった。

3.3 腐食のメカニズムと要因

次に、腐食のメカニズムについて考察する。2.2項、2.3項の分析をもとに試験計画として考えなければならないメカニズムは、以下の2つが考えられる。

- (1) 昼夜の温湿度サイクルで発生する結露による腐食
- (2) 持続する高温高湿による腐食

一方で、これらのメカニズムによって腐食を引き越しやすい要因としては、以下の①から④が考えられる。

- ① 露点による結露
- ② 腐食を引き起こしやすい要因(呼吸作用)
- ③ 腐食を引き起こしやすい要因(毛細管凝縮)
- ④ 腐食を引き起こしやすい要因(腐食イオンの拡散防止)

3.4 露点による結露

図3-4^[1]に露点による結露の説明を示す。絶対湿度が変わらない環境で温度が下がり続け、露点を下回ると結露し始める。また温度上昇時は気体中の湿度が上昇す

るため、露点となる低温物体があるとそこに結露が発生する。

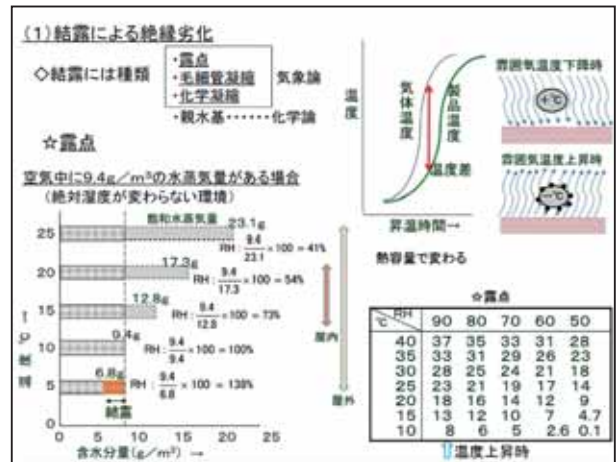


図3-4 露点による結露

3.5 腐食を引き起こしやすい要因(呼吸作用)

図3-5^[2]に腐食を引き起こしやすい要因(呼吸作用)を示す。リード線の固定構造から、リード線の線束内に湿気が入りやすいことや、温湿度サイクルでリード線の内部に湿気が溜まりやすいことが考えられる。リード線の隙間が狭い(小さな孔である)ことから、リード線内で結露した水分が蒸発することなく、リード線内で結露し続けることになる。

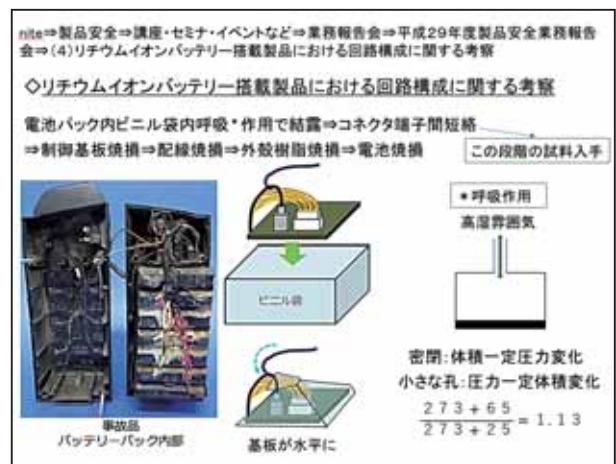


図3-5 呼吸作用

3.6 腐食を引き起こしやすい要因(毛細管凝縮)

図3-6^[1]に腐食を引き起こしやすい要因(毛細管凝縮)を示す。リード線の構造は、複数本の中心糸(綿繊維)に銅箔をスパイラルにラッピングした素線を、複数

本、複数束でロープ撚りさせた構成である。綿繊維は、12～15μm程度の太さを有する繊維状組織ではあるが、その繊維と繊維との隙間はもっと狭くなり、湿度さえあれば結露し、しかも多湿であるほど大量に結露するため危険である。すなわち、この凝縮作用により結露のしやすさがあると言える。

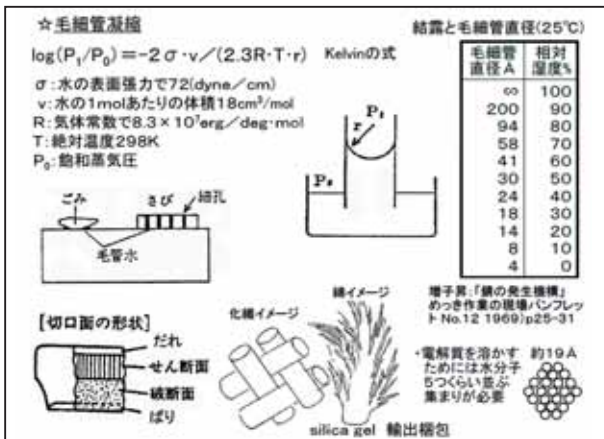


図3-6 毛細管凝縮

3.7 腐食を引き起こしやすくする要因(腐食イオンの拡散防止)

図3-7^[3]に腐食を引き起こしやすくする要因(腐食イオンの拡散防止)を示す。試験中に腐食イオンを拡散させないためのチャンバー内の風を避ける方法である。一般的に恒温槽内は、温湿度を一定に保つために内部の空気を循環させる目的で風が吹いている。この循環風によって、部品Bから発生した腐食イオンが四方八方に拡散されてしまっ腐食する箇所からなくなり、腐食が促進されない恐れがある。

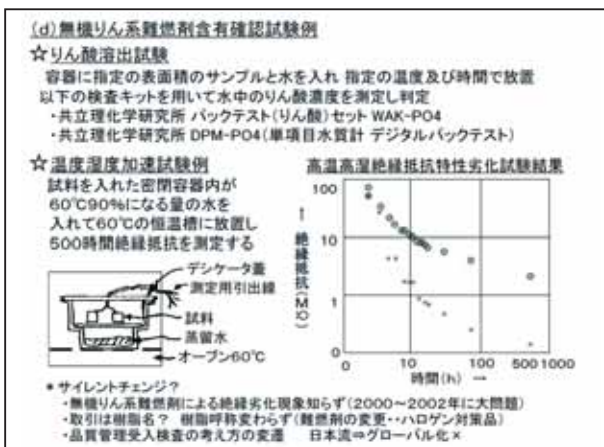


図3-7 腐食イオンの拡散防止

4. 加速試験

4.1 温湿度サイクル起因の結露による腐食試験

腐食を促進させる方法としていろいろ考えられるが、まず初めに、昼夜の温湿度サイクルで発生する結露により腐食が再現するかどうかを試した。試験方法、条件については、次の通りである。

- ・温度、湿度:70℃ / 90% ⇄ 5℃の温度サイクル試験
- ・動作:定格で動作状態
- ・期間:1ヶ月(720時間)

試験の結果、錆びや断線は発生せず、再現させることはできなかった。その要因として考えられるのは、今回の試験対象であるリード線と部品Bの熱容量が小さいこと、また接触面積が小さいために、温湿度サイクルによる結露があまり発生しなかったことが考えられる。それに加えて、3.7項で説明したチャンバー内の風により「腐食イオンが拡散した」可能性が考えられる。

4.2 持続する高温高湿による腐食試験

そこで、循環風による腐食イオンの拡散を防止する高温高湿環境での試験を試した。試験条件としては、次の通りである。

- ・試料をセットした試料台を設置したポリプロピレンのケース内の底に適量の水を入れ、恒湿状態となるようにセットしてチャンバー内に設置した。
- ・温度、湿度:85℃、90%

写真4-2a、4-2bにセットアップの様子を示す。



写真4-2a セットアップ



写真4-2b セットアップ(拡大)

この試験では、500時間前後から腐食が発生しはじめたのが確認され、さらに試験を続けると1,000時間前後で4つの試料すべてが断線に至った。写真4-3に加速試験後の部品Bが接触していた領域の表面を観察した写真を示す。市場での故障と同じような赤く腐食する現象を再現させることができた。



写真4-3 加速試験後のリード線の表面観察

4.3 加速試験の結果とワイブル分布

加速試験の結果、腐食断線発生以下の4つの試験データが得られた。

- ・試験品① 1,102時間
- ・試験品② 1,102時間
- ・試験品③ 893時間
- ・試験品④ 1,544時間

この試験データを用いてワイブル確率紙で解析した。市場データと加速試験データのプロット線図を図4-3に示す。赤線が加速試験で求めたものである。形状パラメータ m は4.1、尺度パラメータ η は53日であった。

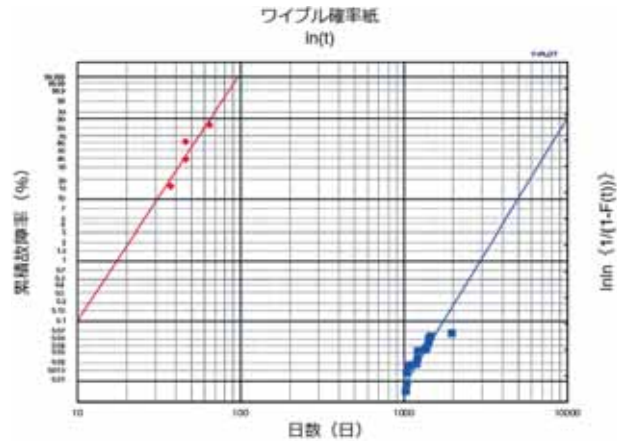


図4-3 市場データと加速試験のデータ解析

4.4 加速係数と加速モデル

4.3項のワイブル確率紙の通り、市場故障のプロット線図と比較して、市場故障の形状パラメータ m が4.4、加速試験の形状パラメータ m が4.1で、ほぼ同じであったことから、今回の試験は加速が成り立っていると言えることができる。

また市場故障、加速試験それぞれの尺度パラメータより、加速係数は $8,228(\text{日})/53(\text{日}) \approx 155$ 倍となる。

今回、加速試験が成功した理由として、腐食断線のような故障メカニズムは、試料が毛細管凝縮する構造の影響もあるが、腐食イオンが拡散しないように工夫した高湿度の条件を作ることができたことが、再現に必要な条件であったと言える。

最初に試した温湿度サイクル試験では、この腐食イオンが拡散しない工夫ができていなかったために、再現しなかったものと推測している。

次は、加速モデルについて考察する。

一般的に温湿度環境の加速モデルは、温度ストレスと湿度ストレスの組合せになるが、温度は一般にアレニウスの反応論モデルが用いられるので湿度ストレス $H(\text{humi})$ との組合せで(4-4a)式のようにになっている。

$$L \propto \exp \frac{E_a}{kT} \cdot H(\text{humi}) \quad (4-4a)$$

一方の湿度ストレスは、絶対湿度から見ると温度と相対湿度が図4-4のように1対1ではない形で組み合わせられているために、言い換えると、違う温度、違う相対湿度で、同じ絶対湿度になる組合せがあるために、その関係

を表するのが難しい側面がある。

絶対湿度 (g/m ³)									
RH °C	100	90	85	80	70	60	50	40	30
100	598	538	508	479	419	369	299	239	180
90	424	381	360	339	296	251	212	169	127
85	352	317	299	282	246	211	176	141	106
80	293	264	249	235	205	176	147	117	87.9
70	198	178	168	158	139	119	99.0	79.2	59.4
60	130	117	110	104	91.0	78.0	65.0	52.0	39.0
50	83.0	74.7	70.6	66.4	58.1	49.8	41.5	33.2	24.9
40	51.2	46.1	43.5	41.0	35.8	30.7	25.6	20.5	15.4
30	30.4	27.4	25.8	24.3	21.3	18.2	15.2	12.2	9.12
25	23.0	20.7	19.6	18.4	16.1	13.8	11.5	9.20	6.90
20	17.3	15.6	14.7	13.8	12.1	10.4	8.65	6.92	5.19
15	12.9	11.6	10.9	10.3	9.00	7.71	6.43	5.14	3.86
10	9.42	8.47	8.01	7.52	6.58	5.65	4.70	3.76	2.82
0	4.85	4.37	4.12	3.88	3.40	2.91	2.43	1.94	1.46

図4-4 絶対湿度と温度と相対湿度の関係

そのため湿度の項については、相対湿度が使われたり、水蒸気圧が使われたり、以下の式のように色々な式が用いられている。

$$L \propto \exp \frac{E_a}{kT} \cdot \exp \left(\frac{1}{RH} \right) \quad (4-4b)$$

$$L \propto \exp \frac{E_a}{kT} \cdot 1/RH^4 \quad (4-4c)$$

$$L \propto \exp \frac{E_a}{kT} \cdot Vp^2 \quad (4-4d)$$

ただし RH:相対湿度 Vp:水蒸気圧

今回の例は腐食であるから、水分量に関係するので水蒸気圧か絶対湿度が考えられるが、半導体のように樹脂中を水分が拡散するようなメカニズムではないので絶対湿度を採用した。絶対湿度Vwとの関係とすると、以下の(4-4e)式のように考えた。

$$L \propto \exp \frac{E_a}{kT} \cdot Vw \quad (4-4e)$$

加速係数の内訳は、湿度一定で温度を変化させることや温度一定で湿度を変化させて考察することが必要だが、ここでは単純に今回得られたデータから考えてみることにする。

市場での環境を、25℃、60%と仮定すると、図4-4の絶対湿度の表から、25℃、60%のときの水分量13.8g/m³と、試験条件である85℃、90%のときの水分量317g/m³の違いは、317(g/m³)/13.8(g/m³)≒23.0倍となる。

今回の加速係数が155倍であることから、温度だけの加速は湿度量の違いを取り除くと、155倍/23倍≒6.7倍となる。その場合の活性化エネルギー Eaは、0.29eVとなる。

5. 総括

5.1 今後の課題

今回の試験は、温度、湿度を固定した試験しか実施できていない。絶対湿度量一定で温度変化させたり、温度一定で絶対湿度量を変化させたりして試験をすることで、湿度のみ、温度のみの加速性を確認することができ、温度、湿度がどのように腐食に関連しているのかを確認することができる。そのような試験手法を確立することが望まれる。

また、当社が保有する設備で試験をするという限定された条件で加速試験を試みたため、再現するまでに、1,000時間(40日前後)を超える時間を要したように試験時間が非常に長かった。より試験時間を短くするためには、例えばAir-HASTといったような、より高負荷の試験方法を確立することが望まれる。ただし、故障メカニズムが変わらないことが前提となることは言うまでもない。

5.2 まとめ

- ・腐食部分の表面観察と成分分析を行い、腐食断線の考えられる要素を調査した結果、部品Bに含まれる塩素イオンがリード線を腐食させていると推測した。
- ・腐食に関連するメカニズムと要因を調査し、温湿度加速試験を行った結果、市場と同じ腐食現象を再現させることができた。
- ・市場データと加速試験のデータをワイブル確率紙で解析を行い、加速が成り立つことを確認し、加速モデルを想定した。

今回の事例が、皆様の加速試験の一助になれば幸いです。

参考文献

- [1] 伊藤貞則、「製品安全技術講座」、安全安心な商品開発のための信頼性技術、pp.15、一般社団法人KEC関西電子工業振興センター、2020.
- [2] 伊藤貞則、「製品安全技術講座」、安全安心な商品開発のための信頼性技術、pp.33、一般社団法人KEC関西電子工業振興センター、2020.
- [3] 伊藤貞則、「製品安全技術講座」、安全安心な商品開発のための信頼性技術、pp.28、一般社団法人KEC関西電子工業振興センター、2020.



山田 朗博(やまだ あきひろ)

1992年 TOA株式会社 入社

1992年～2017年

特定小電力無線機器、セキュリティカメラシステム、健康モニタリング装置、防災用機器の開発業務、ならびに、社内EMC測定の設備管理や教育、対策支援に関する業務に従事

現在:信頼性に関する業務、ならびに、社内EMC測定の設備管理や教育、対策支援に関する業務に従事