

電機製品の構造信頼性を支える 材料強度加速評価技術

越前谷大介*
澤田祐子*
安藤順昭*

Accelerated Evaluation Technologies of Material Strength for Electric Industrial Products to Support Structural Reliability
Daisuke Echizenya, Yuko Sawada, Nobuaki Ando

要旨

自動車へのモータ採用に代表されるように、電機製品の適用範囲は拡大が続いており、運用条件や環境条件が多様化する中で、一層の品質確保が求められている。

製品に求められる使用期間で性能を発揮し続けるためには、材料強度に対して適切な構造設計を行うことが重要である。しかし、多くの材料では長期使用で強度が低下するため、劣化現象を明らかにし、開発設計時に事前評価を行う必要がある。

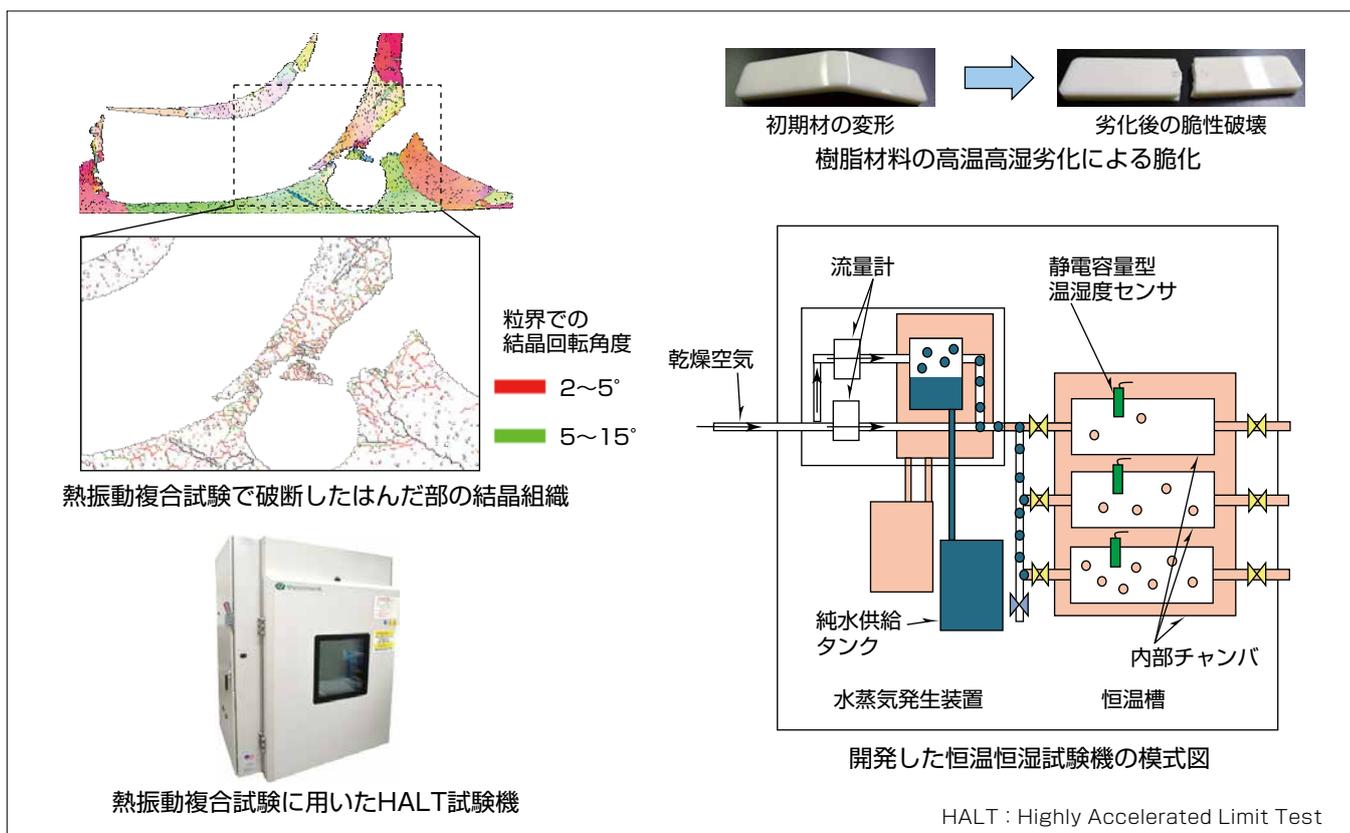
特に、実機で強度劣化を発生させて影響を確認する加速試験は、製品寿命の定量化と想定外不良の市場流出防止に有効である。

一方、電機性能と製品コストの両面からの要求によって、使用される材料は多種多様になっており、加速試験条件の

見極めが重要となっている。また、求められる使用期間が長期化する傾向がある中で加速試験も長期化しており、開発期間への影響を無視できない。

今回、電気製品で必須な構造材料であるはんだと樹脂材料の材料強度加速評価技術を開発した。

はんだに対しては、高速なヒートサイクル(H/C)とランダム振動を加えることができるHALT試験機による熱振動複合試験で加速評価する技術を開発した。樹脂材料に対しては、150℃までの温度範囲で、大気圧下で空気と水蒸気を混合して広い湿度条件を網羅する恒温恒湿試験機を開発し、高温高湿による強度低下を対象にした加速評価技術を開発した。



加速評価設備と破壊現象

はんだの強度加速評価では、HALT試験機を用いて熱振動複合試験を行った。破壊として顕在化する前にH/Cによる結晶の細分化が起きる。樹脂材料は高温高湿環境で劣化すると脆化(ぜいか)し割れてしまう。樹脂材料の強度加速評価用に開発した恒温恒湿試験機は水蒸気発生装置と恒温槽を分離し、100℃以上でも湿度コントロールを可能にしている。

1. ま え が き

電機製品の適用範囲拡大に伴い、以前よりも厳しい使用環境や稼働寿命の長期化といった、品質への要求も拡大している。性能を発揮し続けるためには構造的な破壊を避けなければならない、材料強度に対して適切な構造設計を行うことが重要である。しかし、多くの材料では強度が長期使用で低下するため、劣化現象を明らかにし、開発設計時に事前評価を行う必要がある。特に、実機で強度劣化を発生させ影響を確認する加速試験は、製品寿命の定量化と想定外不良の市場流出防止で有効な試験である。一方、電機性能と製品コストの両面からの要求によって、使用される材料は多種多様になっており、加速試験条件の見極めが重要になっている。また、求められる使用期間が長期化する傾向がある中で、加速試験も長期化しており、開発期間への影響が無視できない。そのため、材料強度の劣化現象を解明し、加速評価する技術の開発を実施している。

従来主体的な構造材料である金属材料の強度評価を進めてきたが、本稿では、電機製品で必須な構造材料となっている、はんだと樹脂材料の材料強度加速評価技術について述べる。

2. はんだの熱サイクル寿命の加速評価

2.1 はんだ接続部の熱サイクル寿命

はんだ接続は、電子部品の接続として最も一般的な方法であるが、電機製品の利用による自己発熱等を起因とするヒートサイクル(H/C)によって、有限な寿命で破壊することが知られている。これは、接続されている部品の熱変形量差がはんだ部分に繰り返し加わることで、疲労破壊が発生するためである。

はんだ接続部は、製品内に多数存在することもあり、最終的な評価として実機によるH/C試験が実施されているが、製品寿命が長くなるにつれて、その試験期間は数か月に及ぶようになってきている。今回、H/C試験の短時間化を目的として、HALT試験機による熱振動複合試験を行った。HALT試験機は、本来は製品の限界環境を確認するために開発された装置⁽¹⁾で、高速なH/Cとランダム振動を加えることができる。

2.2 サンプルと試験方法

評価したはんだ接続部は、SOP(Small Outline Package)部品と基板を接合したSn(スズ)-3.0Ag(銀)-0.5Cu(銅)はんだである。HALT試験機を用いてこの基板にH/Cと振動負荷を重畳させた熱振動複合試験を行った。また比較のため汎用H/C試験機を用いたH/C試験と、HALT試験機を用いたH/C試験を行った。表1に各試験条件を示す。H/Cは温度範囲-40~125℃とし、周期30min/cycとした。熱振動複合試験の熱負荷は温度範囲-100~120℃、周期

表 1. 試験条件

	熱負荷		振動負荷
	温度範囲(℃)	周期(min/cyc)	加速度(Grms)
H/C試験(汎用H/C試験機)	-40~125	30	-
H/C試験(HALT試験機)	-100~120	9	-
熱振動複合試験			40

9 min/cycとし、重畳させる振動負荷は装置の設定値として40Grmsとした。HALT試験機を用いたH/C試験では熱振動複合試験の熱負荷条件だけにした。50cycごとにサンプルを試験機から取り出し、SOPパッケージのはんだ接続部の破壊を確認した。

2.3 試験結果

汎用H/C試験機を用いたH/C試験では1,600cyc、HALT試験機を用いたH/C試験では800cyc、熱振動複合試験では200cycではんだ接続部が破断した。各試験後、はんだ接続部の断面観察及びEBSD(Electron Back Scattered Diffraction Pattern)解析を行った。図1にはんだ接続部断面の逆極点図マップを示す。図1(b)、同図(c)、同図(d)に示すように熱負荷をかけた三つの試験では、はんだ接続部にクラックがある。汎用H/C試験機及びHALT試験機を用いたH/C試験では、H/Cによるはんだ組織の結晶細分化が確認でき、同様の現象が再現されていると判断できる。熱振動複合試験ではH/C試験に比べて結晶細分化が明確ではないが、図2に示すように、結晶粒界を確認すると、結晶細分化が進んでいるのが確認され、場所と形状はH/C試験と同等であった。これらの結果から、HALT試験機を用いたH/C試験及び熱振動複合試験では、汎用H/C試験機を用いたH/C試験での破壊を評価可能と考えられる。

汎用H/C試験機を用いたH/C試験の試験時間は800hであるのに対して、HALT試験機を用いたH/C試験では120h、熱振動複合試験では30hとなり、それぞれ6.7倍、27倍試験時間を短縮できた。また、この試験結果から振動が複合される環境ではH/C疲労寿命が低下することが示されており、振動レベルの影響を検証することで、実製品の使用環境に対して新たな設計指標を得ることができた⁽²⁾。

3. 樹脂材料の高温高湿強度低下の加速評価

3.1 樹脂材料の高温高湿強度低下

樹脂材料は成形加工の容易さから低コストであり、また基本的に電気絶縁性を持つことから、多くの電機製品では必須の構造材料となっている。多種多様な材料が開発されている中で、環境規制対応等、競争力のある材料の活用が求められている。一方、化学構造上、温度や湿度、紫外線、溶剤等によって分解や溶融を起こすことから、長期使用では材料劣化の影響を考慮する必要があり、新材料採用のリスクとなっている。

その中でも高温高湿での劣化については、実使用環境で

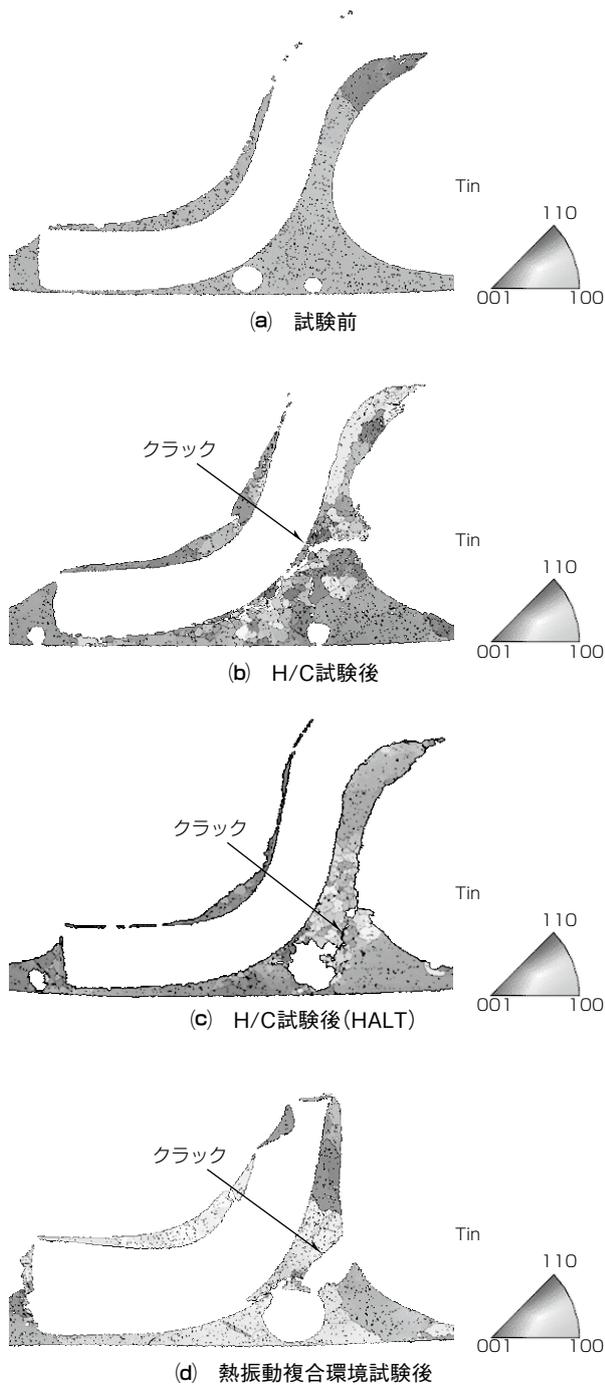


図1. SOPはんだ接合部の逆極点図方位マップ

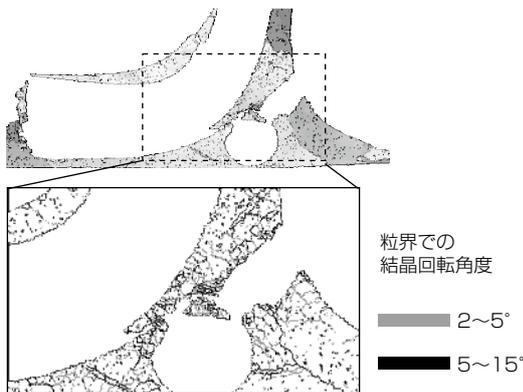


図2. 熱振動複合環境試験後はんだ接合部の結晶粒界マップ

避けることが難しく、試験期間も長期化の傾向がある。今回、材料強度の劣化という視点から、高温高湿劣化の加速評価技術の検討を行った。

3.2 温度と湿度による加速試験装置

温度と湿度による加速試験を行う装置には従来から、恒温恒湿試験機、PCT(Pressure Cocker Test)、HAST(Highly Accelerated temperature and humidity Stress Test)がある。図3に各装置が制御可能な温度と相対湿度の範囲を示す。一般的な恒温恒湿試験機では100℃前後の温度調節と湿度が低い状態をコントロールするのが難しい。そこで図の太線枠で示すような、150℃までの温度範囲で、大気圧下で空気と水蒸気を混合して広い湿度条件を網羅する恒温恒湿試験機を新しく開発した⁽³⁾。この装置は、水蒸気を発生させ、乾燥空気を混合して水蒸気量を調整する水蒸気発生装置と、恒温槽に内蔵されて水蒸気量が調整された空気を流し込むチャンバとで構成される。チャンバ内には乾燥空気だけを流すこともできるので、相対湿度(Rh)がほぼ0%の条件も実現できる。この装置と近年開発されたワイドレンジHASTによって温度と湿度の調整範囲を拡大して劣化現象を評価可能にした。

3.3 強度低下加速試験結果

対象とする樹脂材料にはポリブチレンテレフタレート(PBT)を用いた。試験片を高温高湿環境で保持し、数時間から数十時間ごとに取り出し、3点曲げで強度試験を行った。図4に85℃ 33%Rhの条件に暴露した時間ごとの

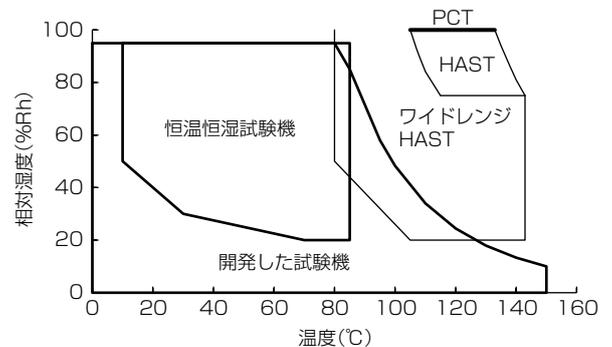


図3. 各種恒温恒湿試験装置の制御可能範囲

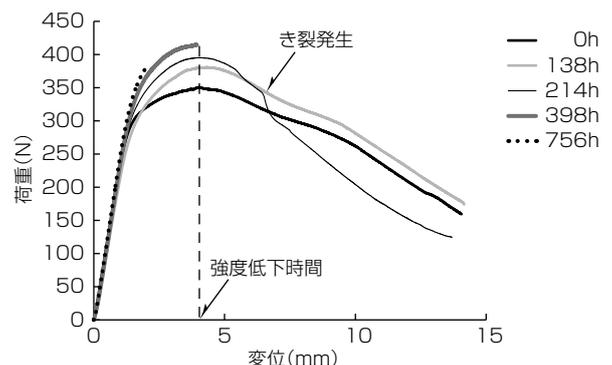


図4. 曲げ強度試験の荷重-変位関係

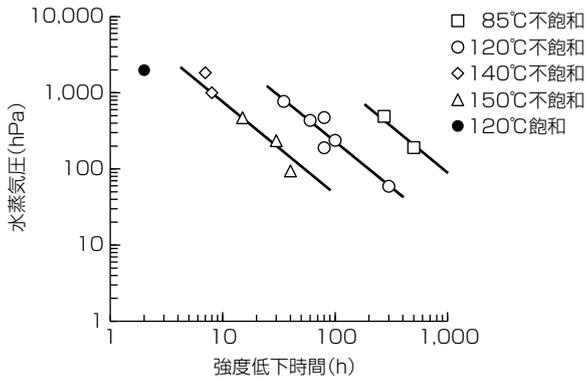


図5. 強度低下時間と水蒸気圧の関係

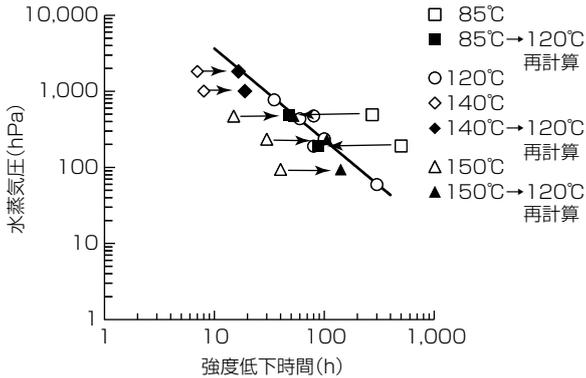


図6. 強度低下時間の120°C環境への再計算結果

荷重-変位関係を示す。初期の試験片は延性破壊を示しており、暴露当初は加熱によって結晶化が進むため最大荷重は増加する。その後、次第に加水分解による脆化が進行して最大変位が低下し、最終的には最大荷重が低下し始める。最大変位が最大荷重を示す変位まで低下した保持時間を強度低下時間と定義した。

図5に、強度低下時間と水蒸気圧との関係を示す。一般的な恒温恒湿試験機を用いた85°C 85%Rhに対して、開発した恒温恒湿試験機による120°C環境では8倍、150°C環境では18倍の速さで同様の劣化が再現されており、試験時間を短縮できた。

温度ごとの試験データはそれぞれほぼ直線になった。そこでアレニウス型の式を用いて、強度低下時間を温度で加速した時間に整理し直した(式(1))。

$$L_{T_2} = L_{T_1} \times \exp \left\{ A \times \left(\frac{1}{(T_2 + 273.15)} - \frac{1}{(T_1 + 273.15)} \right) \right\} \dots\dots (1)$$

ここで T_1 は試験温度、 T_2 は整理し直す温度(°C)、 L_{T_1} は試験から求めた強度低下時間、 L_{T_2} は整理し直した時間である。定数 A はフィッティングによって求めた。図6に、各データを温度120°Cで整理し直した結果を示す。各温度のデータが一つの線上に配置され、温度と水蒸気圧から強度低下時間を推定できることが示された。図7には、現実的な利用環境として、式(1)から30°Cの強度低下時間予測線を示した。対象のPBTは30°Cでは10年(87,650h)以上の利用が可能と判断できる。また、一般的な恒温恒湿試験機

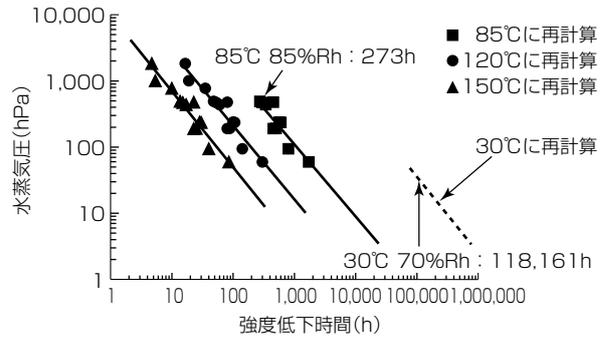


図7. 試験データと温度条件ごとの強度低下時間の予測線

による85°C 85%Rhでは30°C 70%Rhに対して430倍の加速となり、10年相当に約200時間の試験が必要と判断できる。

なお、結露が発生する飽和環境となるPCT試験結果については線に乗らず、劣化現象が異なることが示唆されており、樹脂材料の強度低下でも、結露は避けるべき環境であることが示された。

4. む す び

材料強度の劣化現象を解明して加速評価する技術として、はんだの熱サイクル寿命の加速評価と、樹脂材料の高温高湿強度低下の加速評価について述べた。

従来の試験に対して負荷を拡大させることで、加速評価が可能になった。また、加速評価の妥当性を検討する中で、熱サイクルについては振動の重畳効果、高温高湿劣化については温度と水蒸気圧での関係と、これまで明確ではなかった劣化現象が明らかになっている。加速評価技術の開発を通しての製品開発への知見が得られることは多く、今後も電機製品の競争力に直結する材料に対して継続的に技術開発を進めていく。

加速評価の目標として、製品が破壊するまで試験を行う、限界評価試験の実現が挙げられる。製品の破壊現象まで確認することで、想定外の不良モード流出を防ぐことを目的にしており、今後、複雑化を増す電機システムの評価でも重要な方法論になると考えられる。限界評価試験を進めることで革新的な電機システムについても安心・安全な市場投入を実現し、社会の持続的成長に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) IEC62506 Methods for product accelerated testing, Annex A, Highly accelerated limit test(HALT) (2013)
- (2) 大口健一, ほか: HALTを模擬した負荷下で2軸ラチェット変形を示す銅-はんだ接合体の疲労寿命評価, 機械学会年次大会予稿集, ID: J0450205 (2018)
- (3) 澤田祐子, ほか: 樹脂材料の強度低下予測(温度と湿度による加速評価), 日本機械学会論文集, 85, No.871, 18-00341 (2019)