

超音波映像装置と X 線 CT 装置を用いた非破壊検査の事例解析

古屋雅章・吉村千秋・布施嘉裕

An Example Analysis of Non-Destructive Inspection using a X-ray CT Scanner and a Scanning Acoustic Tomograph

Masaaki FURUYA, Chiaki YOSHIMURA and Yoshihiro FUSE

要 約

電子部品やプラスチック製品を対象に、平成 21 年度に導入した超音波映像装置と X 線 CT 装置を用いて非破壊検査を行い、その解析結果の信頼性向上に向け、解析結果のデータベース化、他の検査との比較、電子部品の信頼性試験と組み合わせた非破壊検査による故障解析を行った。その結果、各種なサンプルを超音波映像装置と X 線 CT 装置を用いて検査するとともに、得られた解析情報をデータベース化したことにより、検査事例の蓄積を図ることができた。他の破壊検査との比較については、精密測定機を用いた実測による加工溝深さなど、寸法精度の確認を行ったが、実測の寸法と同程度の寸法を得ることができた。信頼性試験と組み合わせた電子部品の故障解析については、電子部品であるアルミ電解コンデンサに信頼性試験を行った結果、すべての故障項目において劣化を確認した。また、故障項目のうち、静電容量はサンプルの全て、損失角の正接においては 75% の故障を確認した。X 線 CT 装置を使用した解析を行った結果、素子の直径が膨張していることを確認することができた。

1. 緒 言

電子部品やプラスチック等の内部欠陥を非破壊で検査したいとの要望が多く、平成 17 年度に導入したマイクロフォーカス X 線透視装置の利用頻度が多くなっている。その一方で、本装置では検査できなかった事例や 3 次元画像での確認を求められるようになってきている。これらの要望に対応するため、平成 21 年度に超音波映像装置と X 線 CT 装置を導入したが、材質や検査条件、欠陥の観察部位等によって、どちらの装置が観察に適しているかといった比較情報が少なく、また、電子部品等においては特性劣化の故障主要因を非破壊検査によって解析したいとの要望が多い。

そこで上記の 2 種類の非破壊検査装置を用いて、解析結果の信頼性向上に向け、解析結果のデータベース化、他の検査との比較、電子部品の信頼性試験と組み合わせた非破壊検査による故障解析を行った。

2. 実験方法

2-1 研究概要

本研究の目的を達成するために、以下の内容について検討を行った。

- (1) 解析結果のデータベース化
- (2) 非破壊検査と破壊検査と寸法測定における比較
- (3) 故障しやすい電子部品を作為的に劣化させて、故障の進行状況などを把握し、特性劣化の要因を解析する



図 1 超音波映像装置の外観

表 1 超音波映像装置の仕様

最大探傷周波数	300MHz	
最小スキャンピッチ	1μm	
有効スキャンエリア	X	350mm
	Y	320mm
	Z	50mm+150mm*
解像度	0.5μm	

* マニュアル操作

2-2 超音波映像装置について

超音波映像装置とは、超音波の反射や透過の性質を利用して、試料内部の状態を映像として表示する装置である。セン

サ（探触子）を走査して、受信した超音波波形から映像化し、欠陥や密度変化を観察することができる。

当センターで導入した超音波映像装置は、Insight 製 Insight-300 である。本装置の外観を図 1 に、主な仕様を表 1 に示す。

2-3 X 線 CT 装置について

X 線は波長の短い電磁波の一種で、物質を透過する性質をもつ。物質を透過する過程で減衰するため、透過した X 線量の強度によってコントラスト画像が得られる。平成 17 年度に導入した島津製作所製マイクロフォーカス X 線透視装置 SMX-160GT は、表 2 に示すとおり、空間分解能が $1\mu\text{m}$ であり、超微細部の接合状態や断線、接触を非破壊で検査することができる。

X 線 CT 装置は、この X 線透視装置と 2 つのオプションユニット（Volume-CT ユニット以下 VCT、Plane-CT ユニット以下 PCT）で構成される。外観を図 2 に、各オプションユニットの主な仕様を表 3 に示す。これを用いることで今まで二次元でしか見えなかった透視画像を、三次元的な立体画像として表示できる。



図 2 X 線 CT 装置の外観

表 2 マイクロフォーカス X 線透視装置の仕様

焦点サイズ	$1\mu\text{m}$
最大管電圧	160kV
倍率	5~2400 倍
受光部傾動	最大 60 度

表 3 X 線 CT 装置の仕様

VCT	搭載可能 試料寸法	$50 \times 100 \times 3\text{mm}$ $\phi 30 \times 25\text{mm}$
	最大重量	100g
	撮像視野	$\phi 2 \sim \phi 30\text{mm}$
	PCT	搭載可能 試料寸法
最大重量		500g
撮像視野		$\phi 2 \sim \phi 10\text{mm}$

3. 結果のデータベース化

センター内の Web サーバにて、「非破壊検査・観察事例集」のサイトを開設した。図 3 にサイトのトップページを示す。データベースは企業の技術支援により得られた事例(非公開)と予めセンターでサンプルを用意し得られた事例(公開)とに区別した。データベースに登録された一例を以下で述べる。図 4 に故障した PC 用液晶ディスプレイ用ドライバー回路の基板を、図 5 に電解コンデンサを示す。このコンデンサは外観上明らかに膨張しており、静電容量は正常値 $100\mu\text{F}$ に対し、 $32\mu\text{F}$ であった電解コンデンサを X 線 CT 装置で解析した結果を図 6 に示す。図 6 から下部のゴムパッキングが脱着、素子が外部と接触し、上部が膨張していることがわかった。これは、使用温度が高温になったことあるいは、回路の動作中に何らかの形で定格以上の電圧が印加されたにより内部の電解液が気化して、容器の内圧が上昇し、膨張したと推測される。



図 3 データベース



図 4 液晶ディスプレイ用ドライバー回路基板



図5 電解コンデンサ

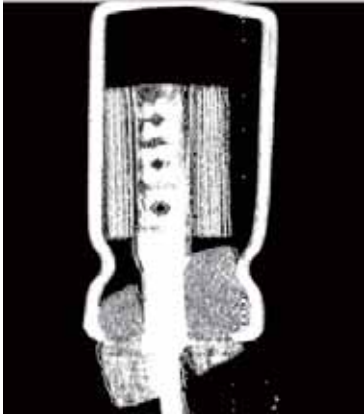


図6 X線CT解析結果

4. 他の検査方法との比較

4-1 超音波映像装置を用いた溝形状の測定精度

精密測定器を用いて実測した結果と超音波映像装置を用いて寸法を測定した結果を比較し、精度確認を行った。フライス盤を使用して図7に示すようにアルミブロックに表面から深さ0.5mm、幅4mmの溝を加工してサンプルを作製し、超音波映像装置によるCスキャンと超精密表面形状・あらさ測定機（ミットヨ社製 フォームトレーサエクストリーム CS-H5000CNC）で測定を行った。

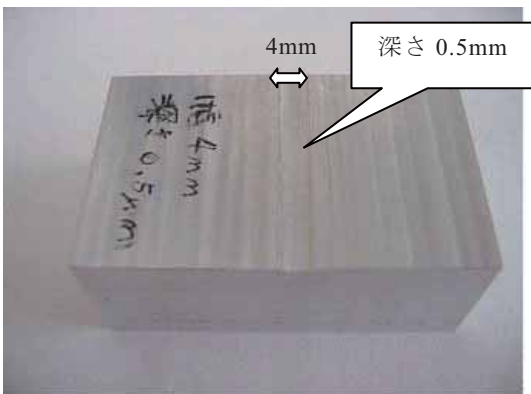


図7 測定サンプル

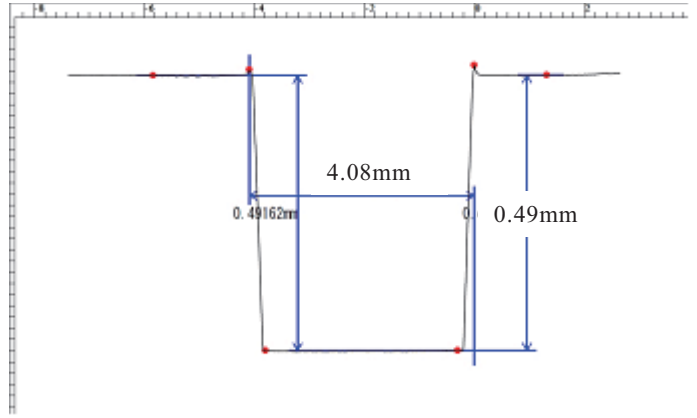


図8 超精密表面形状・あらさ測定機測定結果

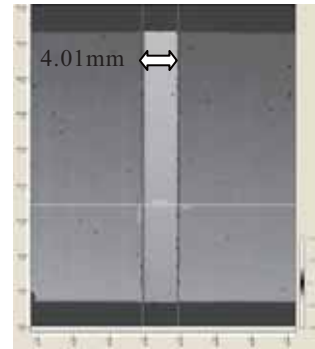


図9 Cスキャン画像



図10 表面のAスコープ

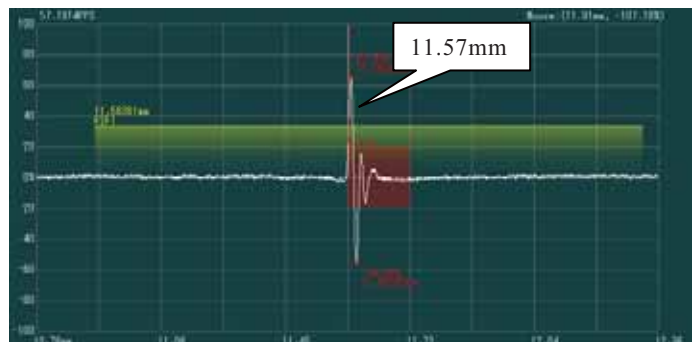


図11 溝面のAスコープ

図8に超精密表面形状・あらさ測定機で測定した結果を示す。図から加工幅は4.08mm、深さは0.49mmであった。

次に超音波映像装置によるCスキャン画像の結果を図9に、表面と溝面のAスコープ結果をそれぞれ図10、図11に示す。加工深さは送信された超音波信号が水を通過し、表面にある

アルミブロックで反射して受信部に到達するので、表面と溝面との表面エコーの差から求めた。超音波映像装置で寸法を測定した場合、図9から加工幅は4.01mm、図10、図11から深さ0.50mmであった。超精密表面形状・あらさ測定機による測定結果を基準として考えると、超音波映像装置による測定結果は、基準値に対して同程度の寸法を得ることが出来た。図9よりCスキャン画像による加工幅の測定において超音波映像装置は信号が乱反射し受信できないエッジ部分の映像化が難しいため、正確な精度を求めることは難しいが、同程度の寸法を測定できた。以上の点から、本研究ではアルミニウムの溝加工サンプルの寸法（溝深さ）測定を行ったが、既知の材質の内部寸法も測定することが可能であると考えられる。

4-2 超音波映像装置を用いた寸法測定精度

実測と超音波映像装置による寸法の比較を確認するため、図12に示すBGA型LSI内部のチップ寸法を測定した。図12に測定に使用したBGAを示す。超音波映像装置で測定後、開封試験を行い、内部のチップを露出した（図13）。そのチップをビデオマイクロ装置（オムロン社製 VC3500）と工具顕微鏡（カール・ツァイス・イエナ社製 ZKM-260D 型）により、観察と寸法測定を行った。



図12 BGA サンプル

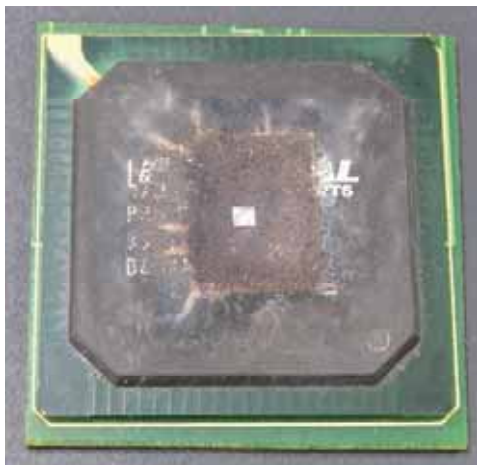


図13 開封試験後

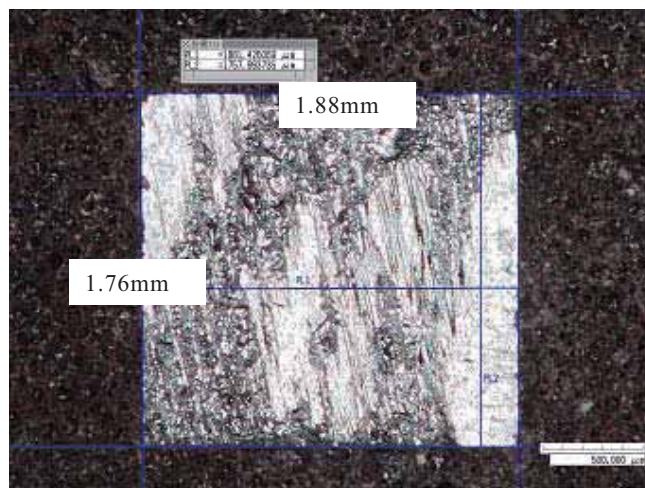


図14 ビデオマイクロ装置による観察結果

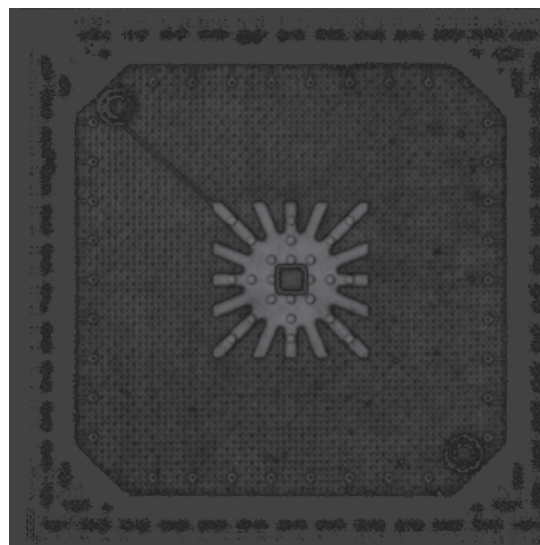


図15 超音波映像装置による観察結果（全体像）

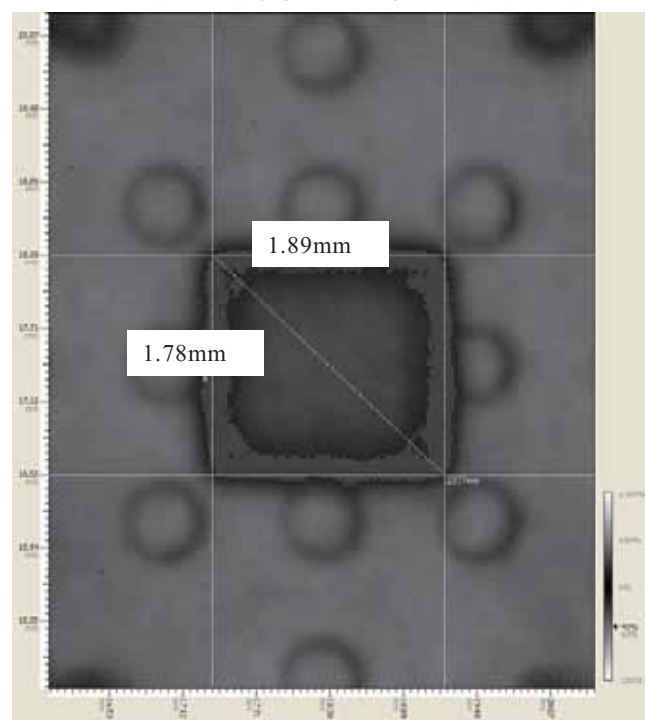


図16 超音波映像装置による観察結果（拡大図）

図 14 にビデオマイクロ装置による観察測定結果を示す。ビデオマイクロで測定した寸法は、チップ部分の長辺が 1.88mm、短辺 1.76mm、また、工具顕微鏡を用いた測定結果からチップ部分の長辺が 1.88mm、短辺 1.76mm であった。一方、サンプル破壊前に超音波映像装置によって寸法測定を行った結果を図 15、図 16 に示す。図 16 から超音波映像装置から求めたチップ部分の長辺は 1.89mm、短辺は 1.78mm であった。工具顕微鏡で測定した結果を基準として考えると、超音波映像装置による測定とサンプルを破壊しての実測とほぼ同程度であった。しかし、図 14 と、図 16 を比較すると、超音波映像装置による映像はエッジの部分は映像化することができなかった。これは、超音波映像装置は信号が乱反射し受信できないエッジ部分の映像化が難しいためである。以上のことから、超音波映像装置を使用して高精度な寸法測定を行うことは難しいが、外部から見えない内部形状において、目安程度の寸法測定は可能であることを確認した。

4-3 X線CT装置と破壊検査の寸法精度

電解コンデンサを対象として内部のタブ端子の寸法をマイクロメータによる実測と X 線 CT 装置による測定について比較検証した。実測はコンデンサを分解し、タブ端子の厚さをマイクロメータにて測定した。図 17 にマイクロメータ（ミットヨ社製 MDE-25MJ）による実測の様子を、図 18 に X 線 CT 装置から得られた画像より求めた寸法の結果を示す。実測からタブ端子の厚さは 0.36mm、X 線 CT 装置による寸法測定は、0.35mm であった。測定結果から 0.01mm 程度の差と微少な差であることが確認でき、X 線 CT 装置による測定は、内部形状を測定する場合に、有効な手法であることが確認できた。また、前述の超音波映像装置と違い、X 線 CT 装置では X 線を透過して画像化するので、エッジ部分の映像化も可能であることが分かった。



図 17 マイクロメータによる測定

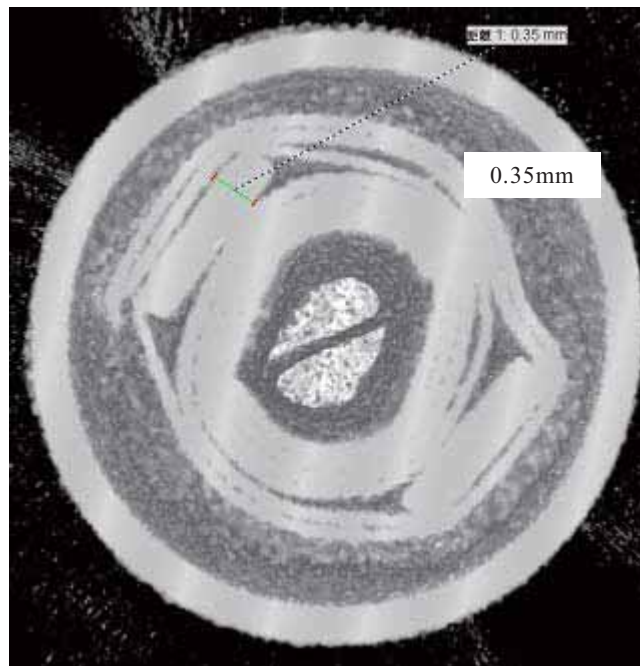


図 18 X線CT装置による観察

5. 信頼性試験と組み合わせた電子部品の故障解析

5-1 コンデンサの信頼性試験

電子部品の中で、電解コンデンサは特に故障しやすい部品であり、独立行政法人製品評価技術基盤機構によると、平成 8 年度（1996 年度）以降のコンデンサ関係の事故は 742 件にのぼっており、死亡事故や火災等も発生している。¹⁾

また、事故を起こした製品も、エアコンやテレビ、洗濯機等の白物家電から、パソコン、玩具等多岐に渡っている。

火災発生事故原因は、

- * コンデンサに製造不良があったために、運転中の振動や熱等の影響によって絶縁劣化して短絡し、発煙・出火
- * コンデンサの製造不良により、コンデンサ内部の酸化が進行し、規定以上の電気抵抗が生じ、これに伴い発熱し、発煙・発火
- * 電源ユニット基板上の電解コンデンサが劣化することによって、電源ユニット基板に異常な電流が流れ異常発熱したため、基板の炭化と近傍の樹脂製外殻が変色・変形などが挙げられる。

そこで、電解コンデンサに対して恒温恒湿槽内に高温無負荷で長時間放置し、電気的特性が劣化したサンプルについて、その内部接合状態を評価するために X 線 CT 装置を用いて三次元の内部形状データを取得した。そのデータに欠陥部が観察できた場合は、その欠陥部の生成現象について考察を行った。電解コンデンサは日本ケミコン製 ESMG160ELL470ME11D を使用した。製品の主な仕様は表 4 のとおりである。高温無負荷特性は 85°C において無負荷で 2000 時間放置後、表 5 の特性を満足する事になっている。²⁾

表4 電解コンデンサの仕様

温度範囲	-40~85[°C]
定格電圧	16 [Vdc]
静電容量	47 [μF]

表5 高温無負荷特性

静電容量	47±20%[μF]
損失角の正接[tanδ]	< 0.2
漏れ電流	< 22.56 [μF]

温度による特性劣化はアレニウスの法則により、10°C半減則で部品の寿命が減少することが知られており、試験時間短縮のために本研究では 105°Cで高温無負荷試験を行った。はじめに試験前の電解コンデンサの電気的特性を測定した。その後、恒温恒湿槽（エスペック社製 PR-2KPH）を用いて、高温無負荷試験を実施し、開始後 250 時間、500 時間、750 時間、1000 時間、1500 時間、2500 時間、4000 時間程度において、サンプル 20 個の電気的特性を測定した。電気的特性としては、静電容量、損失角の正接、及び漏れ電流について測定した。測定に使用した計測器は、静電容量と損失角の正接は LCRメータ（エヌエフ回路設計ブロック社製 2M2353）を用い、また、漏れ電流はマルチチャンネルソースメジャーユニット（横河電機社製 GS820）を使用した。サンプルの測定結果と表5の耐久性を比較し、特性を満足できなかったサンプルをX線CT装置で観察した。

5-2 信頼性試験と組み合わせた電子部品の故障解析

前項で述べたとおり高温無負荷による劣化試験を実施し、故障状態の解析を行った。故障はメーカ（日本ケミコン）が規定している以下の定義とした。

■性能劣化

- ・ 静電容量変化率：規格値の±20%以内を満たさない
- ・ 損失角の正接：規格値の 200%以下を満たさない
- ・ 漏れ電流：規格値以下

■外観

- ・ 膨張
- ・ 液漏れ
- ・ 破裂
- ・ その他、外観に異常が起きたとき

信頼性試験の結果について下記に述べる。

劣化試験時間を横軸として、静電容量の変化を図19に、損失角の正接の変化を図20に、漏れ電流の変化を図21にそれぞれ示す。4000時間経過後の各項目（静電容量、損失角の正接、漏れ電流）の平均値を試験前の平均値と比較した結果、静電容量は 45.86μF→31.28μF（適性値 37.6μF以上）となり、すべてのサンプルにおいて劣化が確認され、

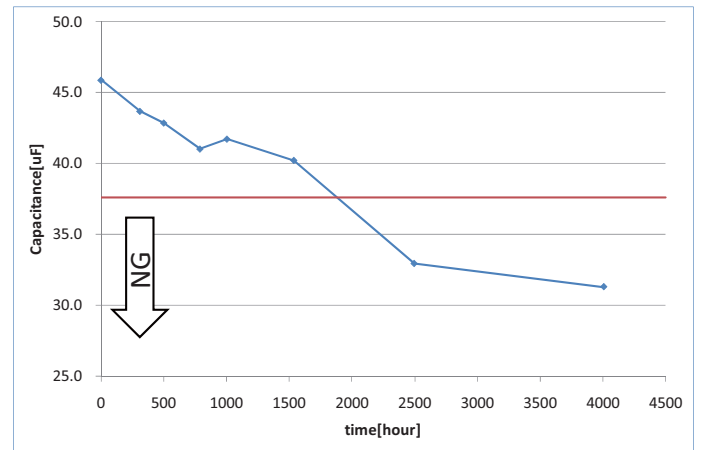


図19 静電容量の変化

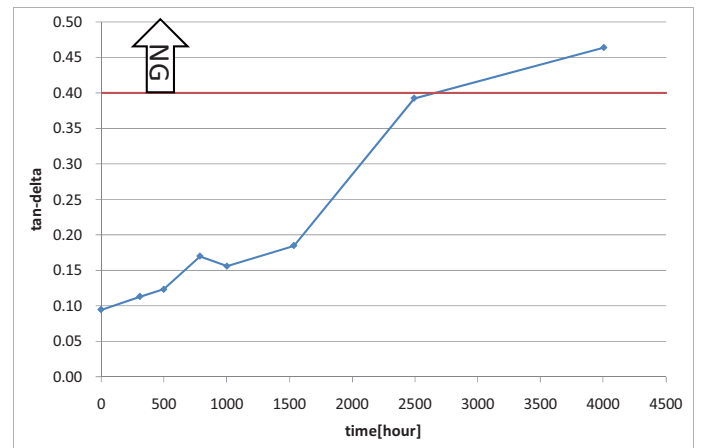


図20 損失角の正接の変化

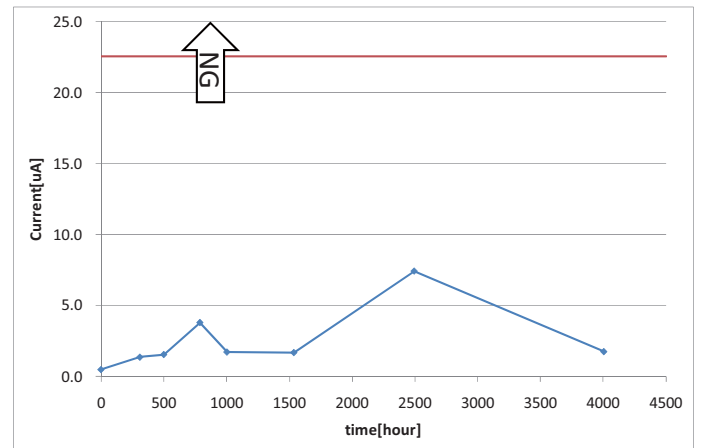


図21 漏れ電流の変化

損失角の正接は 0.0945→0.4636（適性値 0.4 以下）であり、サンプルの 75%において適性値以上の劣化が確認された。また、漏れ電流は 0.4μA→1.7369μA（適性値 22.56μA 以下）であり、全てのサンプルにおいて劣化は確認されなかった。

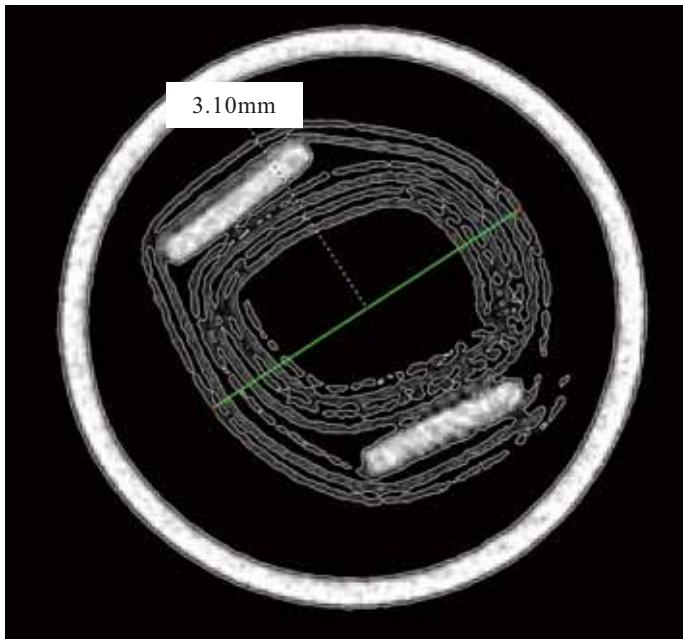


図 22 試験前のコンデンサ

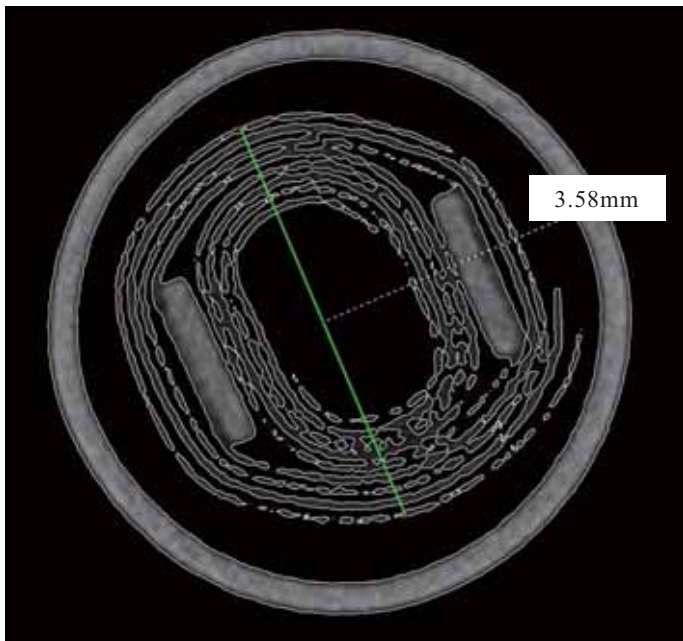


図 23 信頼性試験 4000 時間後のコンデンサ

試験前のコンデンサと高温無負荷試験 4000 時間経過後のコンデンサを、X 線 CT 装置を使用して、内部素子の外形寸法を測定し、比較を行った。図 22 に試験前のコンデンサを、図 23 に信頼性試験 4000 時間後のコンデンサの X 線 CT スキャンの結果を示す。

図から信頼性試験 4000 時間後のコンデンサは試験前と比べて、素子の直径が 3.10mm から、3.58mm と膨張したことを確認した。

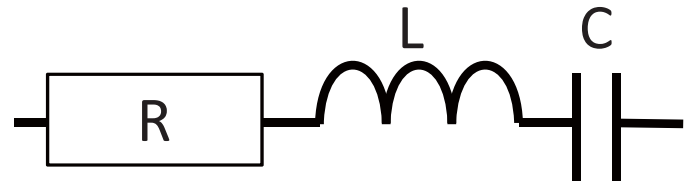


図 24 アルミ電解コンデンサの簡略化した等価回路 (R: 電解紙と電解液の抵抗, L: リードのインダクタンス, C: 陽極, 陰極箔の静電容量)

静電容量 C は

$$C = \epsilon \frac{S}{d}$$

(ϵ : 誘電率, S: 電極板面積, d: 電極間距離)

であるので、電極板面積 S が減少あるいは、電極板距離 d が増加した場合に静電容量 C が減少する。

これは、高温無負荷試験によりコンデンサ内部が高温になり素子の変形、酸化被膜の欠陥部の発生、内部の電解質溶液の蒸発等が起きたことが考えられる。高温無負荷試験の影響による実行面積の縮小 (S の減少)、ガス発生による電極板間距離の拡大 (d の増加) が起きたことが考えられる。

また、損失角の正接 $\tan \delta$ は

$$\tan \delta = \frac{R}{\frac{1}{\omega C}} = \omega CR$$

であるので、前述の素子の変形や内部の電解液の気化により電解紙が乾燥するので、図 24 に示すような電解紙と電解液の抵抗 R が増加したと考えられる。

以上の点から、恒温恒湿槽を使用した高温無負荷試験を行ったコンデンサは X 線 CT 装置を使用した解析結果から、素子の変形、膨張により、特性劣化が生じ、故障して行くのではないかと考えられる。本研究で実施した信頼性試験は経年劣化の加速試験であり、この結果から電解コンデンサを用いた電子基板を設計する際においては、電解コンデンサ周辺温度が上昇しない場所に配置をする必要があると考えられる。

6. 結 言

各種のサンプルを超音波映像装置と X 線 CT 装置を用いて解析し、その結果をデータベース化した。これにより、技術の蓄積を図ることができた。

他の破壊検査との比較については加工溝、IC チップの寸法、端子の厚さ寸法の比較を行ったが、超音波映像装置については、端部の映像化が不鮮明のため、正確な寸法を出すことは

難しいが、実測の寸法に近い精度を得ることができた。X線CT装置については、X線を透過して画像化するので、エッジ部分の映像化も可能であり、ICチップのような樹脂封入された内部の金属部分の寸法を求める場合等であれば、超音波映像装置と同等の精度を求められることがわかった。

信頼性試験と組み合わせた電子部品の故障解析については、電子部品である電解コンデンサの信頼性試験を行った結果、すべての故障項目において劣化を確認した。また、故障項目の内、静電容量はサンプルの全て、損失角の正接においては全サンプルの75%の故障を確認した。

X線CT装置を使用した解析を行った結果、素子の直径が膨張していることを確認した。このことから、恒温恒湿槽の試験によりコンデンサ内部が高温になり素子の変形、酸化被膜の欠陥部の発生、内部の電解質溶液の蒸発等が起き、コンデンサの電極板の面積が減少、電極板間距離の拡大により、連続して特性劣化が生じていくのではないかと考えられる。

今後は、解析データベースの充実を図るとともに、蓄積した技術、ノウハウを企業への技術支援に活用していく予定である。

なお、今回使用したマイクロフォーカスX線透視装置及び超音波映像装置、超精密表面形状・あらし測定機は、日本自転車振興会補助事業及び財団法人JKA公設工業試験研究所の設備拡充補助事業で導入されたものである。

参考文献

- 1) <http://www.nite.go.jp/>
- 2) <http://www.chemi-con.co.jp/catalog/pdf/al-j/al-sepa-j/004-lead/al-smg-j-100701.pdf>
- 3) 「非破壊試験技術総論」 社団法人日本非破壊検査協会
- 4) 永田伊佐也：アルミニウム乾式電解コンデンサ，日本蓄電器工業株式会社
- 5) 石黒輝雄，西村通喜，高尾清利：微細電子部品の信頼性向上に関する研究，山梨県富士工業技術センター研究報告，P.9-12(2005)
- 6) 布施嘉裕，西村通喜：マイクロフォーカスX線透視装置を用いたフリップチップ実装基板非破壊検査手法に関する研究，山梨県富士工業技術センター研究報告，P.29-32 (2006)