



Title	マイカ／エポキシ絶縁の熱・機械疲労劣化
Author(s)	兼田, 吉治; 木村, 健
Citation	電気材料技術雑誌. 1993, 2, p. 33-38
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/81545
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

マイカ／エポキシ絶縁の熱・機械疲労劣化

兼 田 吉 治、木 村 健

三菱電機株式会社 中央研究所
尼崎市塚口本町 8 丁目 1 - 1

Mechanical Fatigue and Thermal Aging of Mica/Epoxy Insulation
Yoshiharu KANEDA and Ken KIMURA
Central Research Laboratory, Mitsubishi Electric Corporation
1-1, Tsukaguchi-Honmachi, 8-choume, Amagasaki, Hyogo, 661

Multistress aging phenomenon of mica/epoxy insulation is discussed in relation with residual breakdown voltage. Mechanical fatigue lowers ac breakdown voltage of mica insulation, while thermal aging has little influence. The mechanical fatigue is found to be expressed with three-dimensional graphs of residual breakdown voltage, bending strain ϵ and the number of repetition N . SEM pictures of aged mica insulations reveal structural differences of microscopic defects due to thermal aging and mechanical fatigue.

キーワード：高電圧回転機、絶縁材料、複合劣化、疲労劣化、劣化メカニズム

1. はじめに

高電圧回転機固定子コイル絶縁に合成レジンが適用されて以来30数年が経過している。この間に固定子コイル絶縁の絶縁診断の寿命評価方法について精力的に研究が進められて来ている。⁽¹⁾⁻⁽⁷⁾ 運転開始後20年以上経過した回転機が多くなって来ている近年は、寿命評価方法や劣化メカニズム解明への要求が高まって来ている。従来 $V-t$ 試験や熱劣化試験で検討されてきたが、劣化現象はブラックボックス的に取り扱われてきた。また、絶縁劣化メカニズムについても、実験結果に基づいた報告例は少ない。

筆者らは高圧回転機絶縁の信頼性や診断技術の向上を目的として、マイカ／エポキシ絶縁の劣化・破壊現象をミクロに観察し、残存破壊電圧との関係の検討を進めている。⁽⁸⁾⁻⁽¹²⁾

ここでは、固定子コイル絶縁であるマイカ／エポキシ絶縁に熱・機械ストレスを体系的に負荷し、負荷ストレスと残存絶縁破壊電圧との関係を詳細に検討した内容、および劣化後の断面組織を走査

電子顕微鏡 (SEM) 観察して負荷ストレスとミクロクラックの発生形態との関係について報告する。

表 1 試験条件
Table.1 Aging condition.

熱劣化温度・時間	疲 勞 試 験		試料数(本)
	試験温度	負荷ひずみ ($\times 10^{-6}$)	
熱劣化無し	23°C	700	1
		900	6
		1100	13
		1300	18
155°C ~7600h	—	0	33
180°C ~7600h	—	0	27

2. 供試試料と実験方法

供試試料の形状と寸法を図 1 に示す。試料はスチール導体に集成マイカおよびフレックマイカテープを巻回し、エポキシレジンで全含浸方式にて製作した絶縁厚さ 2 mm のテストバーである。この

試料に熱劣化と繰り返し疲労劣化を表1に示すように体系的に与え、それぞれのストレス条件と残存破壊電圧との関係を検討した。同時に、劣化条件の違いによるマイクロ破壊の発生状況や進展度合の差異についてSEM観察し、マイカ/エポキシ絶縁体の劣化機構について検討した。

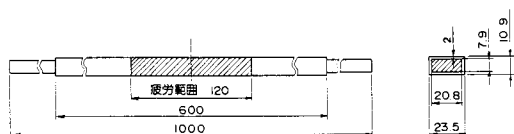


図1 供試試料の形状と寸法

Fig1. Shape and dimension of test bar samples.

疲労試験装置の概略を図2に示す。疲労試験は単純支持2点集中荷重による曲げ疲労試験方法（以降4点曲げ疲労試験と呼ぶ）とした。この方法は試料の中央部に均一な曲げ応力を生じさせる特長がある。本実験に用いた疲労試験機は荷重制御方式であり、試料の曲げ剛性が変化すると試料に生じるひずみも変化する。したがって本報告で述べる負荷ひずみは全て初期の負荷ひずみである。ひずみは図に示すように試料中央の絶縁物表裏にひずみゲージを張り付けて初期ひずみを管理した。

SEM観察試料作成に際しては、試料の周囲をエポキシ樹脂でモールドした後、観察する大きさに低速ダイヤモンドカッターで注意深く切断した。その後洗浄、真空乾燥し、観察面を残して周囲をエポキシ樹脂で再モールドした。観察面はモールド後マイカの積層方向に注意深く鏡面研磨し、再洗浄後250Åの厚さに金をスパッタリングした。観察には低加速SEM（日立S-806型）を使用した。

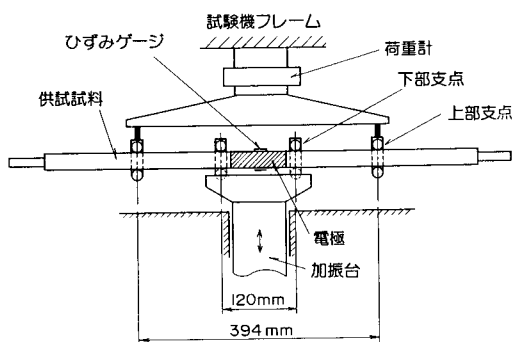


図2 疲労試験装置の概略

Fig2. High-speed repetitive four-point bending machine for test bar samples.

3. 実験結果と考察

3-1 熱劣化による残存破壊電圧の変化

熱劣化による残存破壊電圧特性は、155°C、180°Cで熱劣化し、一定劣化時間毎の破壊電圧を計測して求めた。フレークマイカ/エポキシ絶縁試料の180°C熱劣化での特性を図3に、集成マイカ/エポキシ絶縁試料の180°Cでの特性を図4に示す。図から明らかなように、7600時間までの熱劣化では破壊電圧はほとんど低下せず、7000時間劣化後でも破壊電圧の低下は10%程度である。

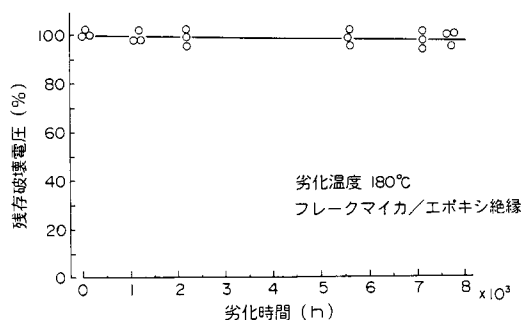


図3 フレークマイカ/エポキシ絶縁の熱劣化による残存破壊電圧の変化

Fig3. Decrease of breakdown voltage against thermal aging time of mica splitting / epoxy insulation.

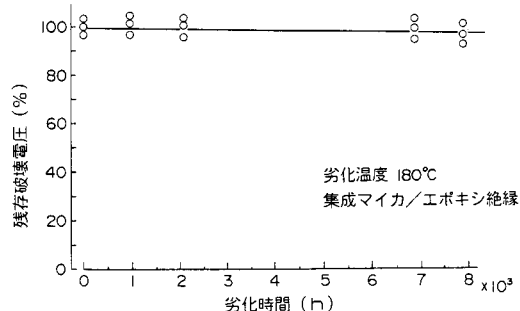


図4 集成マイカ/エポキシ絶縁の熱劣化による残存破壊電圧の変化

Fig4. Decrease of breakdown voltage against thermal aging time of mica paper / epoxy insulation.

3-2 疲労劣化による残存破壊電圧の変化

試料に繰り返し曲げ疲労を負荷した時の繰り返し回数-残存破壊電圧特性の代表例として、フレークマイカ/エポキシ絶縁に負荷ひずみ 1100×10^{-6} を負荷したときの結果を図5に示す。破壊電圧は繰り返し数の増加とともに低下する。

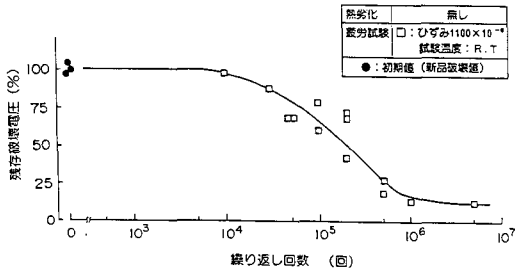


図5 曲げ繰り返し回数と残存破壊電圧の変化

Fig.5. Decrease of breakdown voltage against the number of bending repetition.

負荷ひずみ 1100×10^{-6} では 1×10^4 回から破壊電圧が低下しはじめ、 2×10^5 回では初期値の50%に、 5×10^5 回では25%に低下する。 5×10^5 回以上では疲労によるマイカの機械的劣化が著しく、機械的に破壊したマイカ／エポキシ層の空気の絶縁破壊値となる。

繰り返し回数と残存破壊電圧の関係は負荷するひずみレベルによって異なる。フレークマイカ／エポキシ絶縁試料の破壊電圧の低下が始まる繰り返し数は、負荷ひずみ 1300×10^{-6} では $5 \times$

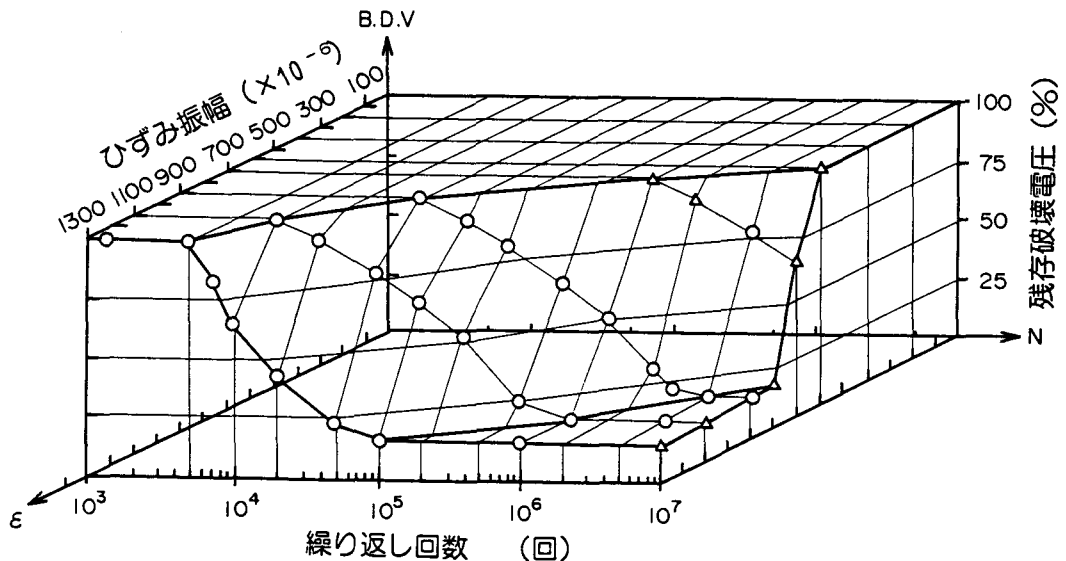
10^3 回となり、 900×10^{-6} では 5×10^4 回となる。破壊電圧が50%に低下する繰り返し数も同傾向で変化する。これらの負荷ひずみ値を変化させた場合の繰り返し数と残存破壊電圧の関係を図6に示す。図には負荷ひずみ (ϵ)・繰り返し数 (N)・残存破壊電圧を3次元表示した。図に示すように ϵ 、 N 、残存破壊電圧を3次元表示すると3者の関係が明瞭に表現出来る。

3-3 劣化後の SEM 観察

3-3-1 熱劣化試料

(1) 集成マイカ／エポキシ絶縁

180°C、2000時間劣化後の集成マイカ／エポキシ絶縁断面 SEM 写真の代表例を図7に示す。写真で局部的白い部分は、深いクラックなどの欠陥部で内部への金スパッタが不十分なことから電子がクラック表面に帯電して像が不鮮明になったものである。劣化後試料においても大部分が健全な層であるが、部分的には集成マイカ片とエポキシとの界面に沿ってマイカ積層方向にクラックや剥離・へき開(本報告ではこれらを総称して層方向クラック

図6 負荷ひずみ値 ϵ と繰り返し数 N に対する残存破壊電圧の3次元プロットFig.6 3-D plot of residual breakdown voltage against the strain amplitude ϵ and the repetition number N .

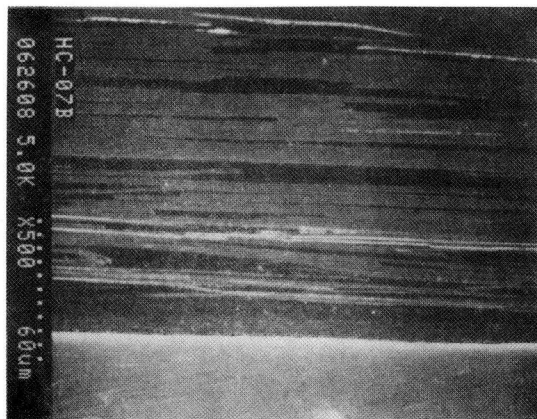


図7 熱劣化試料のSEM写真
(集成マイカ絶縁)

Fig.7 SEM picture of the mica paper/epoxy insulation after thermal aging.

クと呼ぶ)が発生する。層方向クラックの幅は2～3 μm 長さは0.5～1 mm程度で、割れた面は平坦である。層方向クラックは界面にのみ生じており、マイカ内部へは進展していないことが確認された。

(2)フレークマイカ/エポキシ絶縁

劣化後のフレークマイカ/エポキシ絶縁の場合も大部分は健全な層であるが、稀に存在するマイカ/エポキシ界面の層方向クラックは集成マイカに比べて大きい。180°C2000時間劣化後の代表的な写真を図8に示すが、幅20 μm 、長さ数10mmに及ぶものが観察された。稀に存在する厚いレジン層ではマイカ/エポキシ界面以外の割れも見られ、その方向はマイ

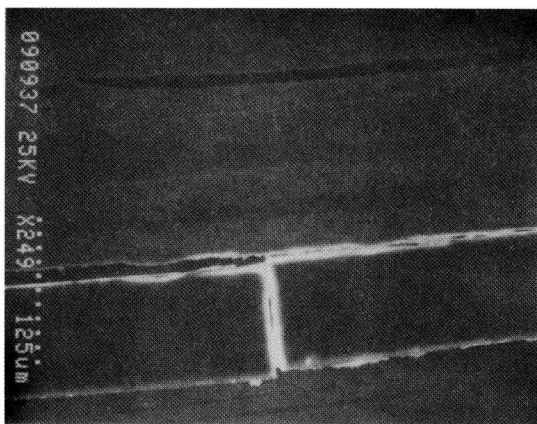


図8 熱劣化試料のSEM写真(フレークマイカ絶縁)

Fig.8. SEM picture of the mica splitting/epoxy insulation after thermal aging.

カ層に垂直に割れたものが多い。マイカ層では局部的に小さい層方向クラックが見られるがマイカは比較的健全である。

このように熱劣化によって生じるクラックは主にマイカ/エポキシ界面の剝離やレジン層の割れである。マイカそのものは比較的健全であり破壊電圧は大きく低下しない。

3-3-2 曲げ疲労劣化試料

(1)集成マイカ/エポキシ絶縁

負荷ひずみ 1100×10^{-6} で 5×10^5 回の曲げ疲労を与えた試料の代表的なSEM写真を図9に示す。図には集成マイカ層内部の層方向に

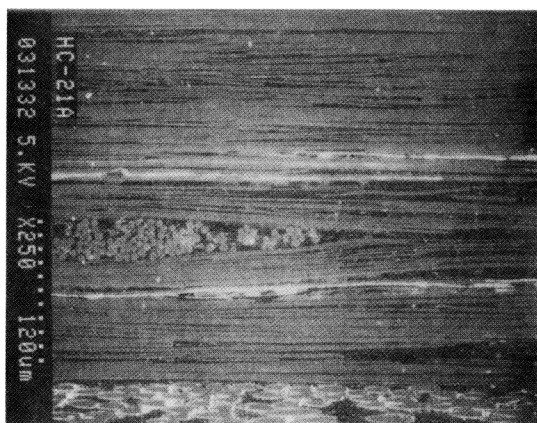


図9 曲げ疲労試料のSEM写真
(集成マイカ絶縁)

Fig.9 SEM picture of the mica paper/epoxy insulation after mechanical fatigue.

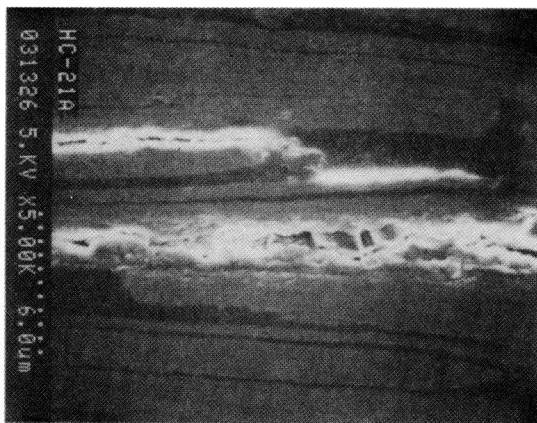


図10 曲げ疲労試料のSEM写真
(集成マイカ絶縁)

Fig.10 SEM picture of the mica paper/epoxy insulation after mechanical fatigue.

局所的なマイカの部分破壊が見られる。破壊面の特徴として、摩滅的形態を示している。すなわち、剝離やへき開ではマイカ層方向に直線的な割れを示すが、疲労では直線的に割れた周辺のマイカが繰り返し応力によって更に細かく割れて層状を成し、疲労が更に進むと細かく割れた層はマイカ片全域を占めるまでに拡大される。この状態を示す SEM 写真を図10に示す。集成マイカは幅 2～3 μm 長さ 300～500 μm のマイカ片を積層して構成されているが、このマイカ片内部に 1 μm 以下のミクロクラックが多数発生し、それが連続したクラックとなってマイカ片内全域に達している。クラックが生じたマイカ片にはマイカを貫通する破壊路が形成されており、図に示す試料では SEM 観察領域の全マイカ片のうち 7～8 % がこのような状態になっていた。この試料では破壊電圧が初期値に対して約 30 % 低下している。

(2) フレークマイカ／エポキシ絶縁

負荷ひずみ 1100×10^{-6} で 5×10^5 回の曲げ疲労を与えた試料の SEM 写真を図11に示す。この写真は破壊電圧が 75 % 低下したものを観察したものである。図からレジン／マイカ界面ではマイカ片が引き剥がれ、厚いレジン層では方向不統一なクラックがジグザグに大きく進展しているのがわかる。

この試料では、マイカ層内のへき開も随所に見られた。厚さ 20～30 μm のフレークマイカ片内にマイカ片と平行に数箇所発生したへき開が、疲労の進行とともにへき開間を連結し、局所的な貫通方向破壊が形成されている。

4. ま と め

マイカ／エポキシ絶縁体の熱・機械ストレス劣化について、次の傾向があることが明らかとなった。

- ① 熱劣化ではマイカ／レジン界面剝離が主体でマイカ方向に直線的に割れる。マイカ片そのものは健全であり破壊電圧は大きく低下しない。
- ② 曲げ疲労劣化では、最初にマイカ片内部のマイカ層方向にミクロクラックが発生する。疲

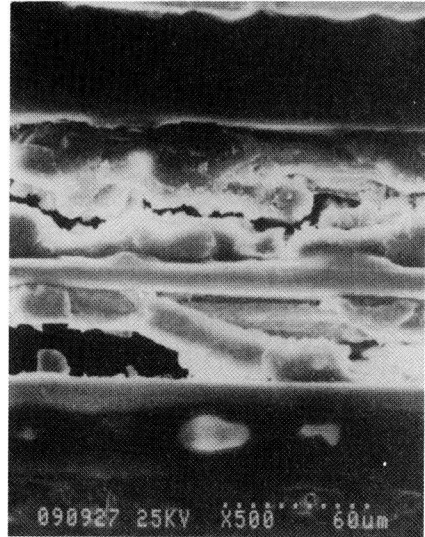


図11 曲げ疲労試料の SEM 写真
(フレークマイカ絶縁)

Fig.11 SEM picture of the mica splitting/epoxy insulation after mechanical fatigue.

労の進行とともにミクロクラックがマクロクラックへと成長し部分的な貫通方向破壊が形成される。

- ③ 貫通方向破壊が形成されると破壊電圧が大きく低下する。疲労劣化の進行は負荷ひずみ、繰り返し回数と密接に関係している。
- ④ 疲労による残存破壊特性は、負荷ひずみ・繰り返し数・残存破壊電圧で 3 次元表示すると 3 要因の関連を明瞭に表現できることが判明し、マイカ／エポキシ絶縁の基本特性を把握できた。

参考文献

- (1) 電気学会技術報告 (II 部) 第267号 昭和63年3月
 - (2) 門谷：電気学会論文誌55-A68、昭55-9、100巻 9号
 - (3) 加子、他：電気学会論文誌57-A64、昭57-9、102巻 9号
 - (4) 諏訪原、他：昭和59年電気学会全国大会254
 - (5) 三井、他：電気学会論文誌60-A19、昭60-3、105巻 3号
 - (6) 谷口、他：絶縁材料研究会 EIM-86-41
 - (7) 梅本、他：絶縁材料研究会 EIM-86-42
 - (8) 兼田、木村、平沢：第22回電機絶縁材料シンポジウム P-6 (1989)
 - (9) 兼田、木村、松田：平成元年電気学会全国大会281 (1989)
 - (10) 木村、兼田：平成元年電気学会関西支連大会 G183 (1989)
 - (11) 兼田、木村、平沢：絶縁材料研究会 EIM-90-32 (1990)
 - (12) 兼田、木村、平沢：平成2年電気学会全国大会321 (1990)
- (1993年4月19日受理)



兼田 吉治

昭和22年3月生まれ。昭和42年3月大阪府立北野高校卒業。37年4月三菱電機入社。生産技術研究所・中央研究所にて機器の絶縁劣化診断および大形回転機絶縁の研究開発に従事。電気学会会員。



木村 健

昭和22年5月生まれ。48年3月早稲田大学大学院理工学研究科電気工学専攻修士過程修了。同年4月三菱電機入社。生産技術研究所・中央研究所にて電気機器絶縁の研究開発に従事。工学博士。電気学会、IEEE 会員。