PWBにおけるIVHの熱疲労寿命に及ぼすFR-4の積層構造の不均質性の影響（第2報、変動要因の組み合わせの影響メカニズムとその設計への適用）

竹中 国浩*, 于 強**

Effect of Heterogeneity of Laminated Structure in FR-4 on Thermal Fatigue Life of Interstitial Via Hole in Printed Wiring Board (Second Report, Mechanism of Combinational Effect of Variation Factors and its Application to Design Techniques)

Kunihiro TAKENAKA* and Qiang YU**

* 株式会社安川電機技術開発本部開発研究所つくば研究所（〒300-2635 茨城県つくば市東光台5丁目9-10）

** 横浜国立大学大学院工学研究院（〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5）

* Tsukuba Research Laboratory, Corporate R&D Center, Technology & Development Division, YASKAWA ELECTRIC CORPORATION (9-10 Tokodai 5 Chome, Tsukuba-shi, Ibaraki 300-2635)

** Yokohama National University (79-5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 240-8501)

概要 本研究の第1報において、Interstitial Via Hole (IVH)の熱疲労寿命に対して組み合わせる変動要因を明らかにした。本報では、その要因の組み合わせが熱疲労寿命に影響するメカニズムを検討した。本研究における変動要因は、Printed Wiring Board (PWB)の製造工程のうちガラスクロス積層工程に起因した積層されたガラスクロスの積層状態の違いと、IVHの穴加工工程に起因したある積層状態のガラスクロスに対するIVH形成位置の違いである。これらの変動要因の組み合わせが熱疲労寿命に影響するメカニズムは、IVHに対するガラス繊維の拘束の強さの違いによって説明できることを明らかにした。また、そのメカニズムに基づいて、変動要因の特徴的な組み合わせをパターン化し、そのパターンを用いてIVHの熱疲労寿命の変動を制御する設計の考え方を示した。

Abstract

In a previous study, we clarified the combinational effect of variation factors on the thermal fatigue life of an Interstitial Via Hole (IVH). In the present study, the mechanism of the combinational effect of the variation factors on thermal fatigue life is investigated. The variation factors in this study are the differences in the laminating conditions of the glass cloth, attributed to the process of laminating the glass cloth during the manufacturing of the Printed Wiring Board (PWB), and the differences in the position of the IVH relative to the glass cloth at certain laminating conditions, attributed to the process of drilling the IVH. We found that the mechanism of the combinational effect of the variation factors on the thermal fatigue life was due to the difference in the strength of the restraining force of the glass fiber on the IVH. Moreover, based on the mechanism, a characteristic combination of variation factors is patterned and a design concept to control the variation of the thermal fatigue life of an IVH is proposed.

Key Words: Interstitial Via Hole, Printed Wiring Board, Thermal Fatigue Life, Variation Factor, Finite Element Method, Patterning, Glass fiber

1. 緒言

ロボットは、一般生活環境で人間をサポートすることを期待されており、あらゆる機能を備えた上でコンパクトな構造が求められる。したがって、これに使用される電子機器には、できる限りの小形化と高信頼性を両立した設計が求められる。このような設計を行うには、これまで寿命のばらつきに対する設計マージンとしていた部分を小形化に合わせて最適化する必要があると考えられる。そのためには、製造工程に含まれる複数の変動要因のうち、主要因だけでなく複数の要因の組み合わせが寿命に影響するようなケースも考慮する必要があると考えられる。

本研究の前報¹⁾では、Printed Wiring Board (PWB)において、これまで均質体として取り扱われてきたFR-4の積層構造が、実際には不均質である点に注目し、その積層構造の不均質性がInterstitial Via Hole (IVH)の熱疲労寿命に影響

しているかどうかを調べた。その結果、積層された各層のガラスクロスの相対的なずれの違いと、あるずれの状態に積層された不均質なガラスクロスに対するIVHの形成位置の違いが、IVHの熱疲労寿命に影響していることを示唆した。これらの違いは、FR-4を均質体とみなした場合には考慮できず、また、製造過程においても制御されていないため製品ごとに異なっていると考えられる。よって、本研究においてはこれらの違いを無視できないものとして取り扱う。ガラスクロスの相対的なずれの違いは、積層工程における変動要因とし、また、積層されたガラスクロスに対するIVH形成位置の違いは、その違いが穴加工工程におけるある種の変動とみることができると、これを穴加工工程の変動要因とする。これらの変動要因の組み合わせが最終的な熱疲労寿命に影響していると考えられることから、ガラスクロスにおける束ねられたガラスの紡糸に樹脂が含浸されたガラス繊維の束（以下、ガラス繊維、Glass fiber）と

IVH との相対的な位置関係が熱疲労寿命へ影響していると考えられる。通常の PWB においては、IVH とガラス繊維のさまざまな相対的な位置関係が現れる。したがって、このさまざまな相対的な位置関係と熱疲労寿命との関係を明らかにするには、ガラスクロス積層工程における変動要因と穴加工工程における変動要因の多数の組み合わせを評価しなければならない。さらに、各要因は独立して熱疲労寿命へ影響しているわけではなく、その組み合わせが影響していることから、要因同士は相互に作用していると考えられる。したがって、要因の組み合わせと熱疲労寿命の関係は複雑であり、変動要因の組み合わせが熱疲労寿命に影響するメカニズムを明らかにしなければ、適切に変動要因の組み合わせの熱疲労寿命への影響を評価することが難しい。

このような課題を解決するため、本研究では、結果のばらつきに対する複数の変動要因の組み合わせの影響を評価する実用的な方法を確立することを目的とした。具体的な問題として、IVH の熱疲労寿命に対する前報¹⁾で明らかにした PWB の積層工程および穴加工工程におけるそれぞれの変動要因の組み合わせの影響を評価する過程において、本手法の具体的な適用について述べ、本手法の有効性について検証した。

2. 変動要因の組み合わせの影響評価方法

結果のばらつきを定量的に評価する場合において、主要因を定量的に評価する方法^{2),3)}は既に確立されているが、変動要因の組み合わせについて定量的な評価を行うことは難しい。変動要因の組み合わせが熱疲労寿命へ影響する場合において、各要因同士が相互に作用していると考えられるが、一般にこのような場合は、注目している要因が物理的な現象と明確に対応していないことが多い。そのため、複雑な物理的メカニズムと、それを説明できる変数（以下、説明変数）を明らかにする必要がある。

しかし、相互に作用し合う変動要因の熱疲労寿命への影響について評価する場合、検討する要因が変動するため、その組み合わせが多くなる。したがって、変動要因の組み合わせの熱疲労寿命への影響を効率的に評価するために、前述した物理的メカニズムと説明変数を明らかにする。この説明変数を用いれば、変動要因のさまざまな組み合わせを物理的メカニズムに基づいて整理することができ、その結果として、説明変数の値が同じものを近い物理的な現象とみなすことができる。したがって、説明変数の値が同じ変動要因の組み合わせを集め、その集めた組み合わせを1つのパターンとして処理すれば、大まかにではあるが多くの変動要因の組み合わせを容易に分類することができる。本研究ではこのプロセスをパターン化と呼ぶ。パターンは、変動要因の組み合わせの物理的メカニズムを考慮した上で、変動要因の組み合わせの熱疲労寿命への影響の特徴

を表すことができるよう定義する。このパターン化によって、物理的メカニズムを表す説明変数と変動要因の組み合わせの関係を容易に理解することができるため、数多くある変動要因の組み合わせと熱疲労寿命との関係を大まかに把握できる。以下の(1)～(5)に変動要因の組み合わせの熱疲労寿命への影響を評価する手順を述べる。

(1) 主効果の影響の確認

まず、変動要因の組み合わせが影響することが明らかな要因から、そのうちの1つの変動要因を選んで変動させ、その要因の特性への影響を調べる。これにより、その要因の主効果を調べることができる。

(2) 物理的メカニズムと説明変数の仮定

しかし、主効果を調べるときに、変動させる要因以外の要因を固定していても、他の変動要因との組み合わせは同時に変化することになる。その結果、要因の組み合わせが変化するために生じる影響が主効果と同時に現れる。そのため、ある変動要因の主効果を調べた結果はその要因の影響だけでは説明できない。そこで、得られた結果において、同じ物理的な現象に注目し、その現象における変動要因の組み合わせの特徴を調べる。同じ現象をもたらす類似する変動要因の組み合わせを抽出し、その特徴から、物理的メカニズムを推測する。さらに、推測した物理的メカニズムに対して最も説明しやすい説明変数を仮定する。

(3) 物理的メカニズムと説明変数の検証

次に、変動要因の他の組み合わせに対しても推測した物理的メカニズムを適用し、その結果が説明変数で整理できるかどうかを確認する。これによって、物理的メカニズムとその説明変数を検証する。

(4) 特性と説明変数の関係把握

検証された物理的メカニズムを設計へ適用するには、物理的メカニズムと特性との関係を把握する必要がある。物理的メカニズムは説明変数によって評価が可能であることから、説明変数と特性の関係を把握する。

(5) パターン化

最後に、同じ説明変数の値をもたらす変動要因の組み合わせのパターンを定義する。パターンの定義は、説明変数の典型的な値を用いる。典型的な値を用いることで、少ないパターンの数で多くの組み合わせの振る舞いを表すことができる。定義したパターンは、(4)で得られた説明変数と特性の関係をj用いて検証することで、そのパターンが有効であるかどうかを確認することができる。また、結果として、変動要因の組み合わせと特性の関係は、パターンを通して検討することができるため、パターンは必要な変動要因の組み合わせを得る手掛かりとなる。

このパターン化は、本報で述べるガラス繊維ネットワークのような周期的な形状によって、同じとみなせる現象が繰り返し発生するような変動要因の組み合わせに対して特に有効であると考えられる。

3. 評価試料と変動要因, および有限要素法解析

3.1 評価試料¹⁾

Fig. 1 に, 本研究で用いた試料の概略図を示す。IVH は 2 層の平織りのガラスクロスを通して形成されている。IVH の各寸法は, 設計値でドリル径 $\phi = 500 \mu\text{m}$, 高さ $h = 400 \mu\text{m}$, 層間を接続する部分のめっき厚さ $t_p = 20 \mu\text{m}$ である。ガラスクロスはガラス繊維の方向によって織り周期が異なっている。Fig. 1 では紙面に対して平行なガラス繊維をガラス繊維 1, 垂直なガラス繊維をガラス繊維 2 としている。ガラス繊維 1 の波長は $1,560 \mu\text{m}$, ガラス繊維 2 の波長は $1,160 \mu\text{m}$ である。

この評価試料に対して冷熱サイクル試験を行って得られた熱疲労寿命には, 各層のガラスクロスの相対的なずれの違いと, あるずれの状態で積層されたガラスクロスに対する IVH 形成位置の違いが影響していることが示唆されている¹⁾。本報ではこれらの違いを無視できないものとして取り扱うため, 前述したようにガラスクロスの相対的なずれの違いは積層工程の変動要因とし, また, 積層されたガラスクロスに対する IVH 形成位置の違いは穴加工工程の変動要因とした。

Fig. 1 Schematic drawing of PWB specimen¹⁾

3.2 変動要因

ガラスクロスの積層工程と IVH の穴加工工程のそれぞれの変動要因の組み合わせが及ぼす熱疲労寿命への影響を評価するために, それぞれの要因を次のように定義した。Fig. 2 に定義した変動要因を示す。Fig. 2 の断面図は, それぞれのガラス繊維に対して垂直な断面を示している。以降では, ガラス繊維 1 の断面を繊維 1 断面, ガラス繊維 2 の断面を繊維 2 断面と呼称する。

ガラスクロスの積層工程における変動要因は, 2 層のガラスクロスの相対的なずれである。そのため, そのずれを第 I 層と第 II 層のガラス繊維ネットワークの位相ずれ量 (以下, 繊維位相ずれ量, Fig. 2 では PD) で表した。具体的には第 II 層のガラスクロスは基準として固定し, 第 I 層の繊維位相をずらすことで繊維位相ずれを表した。この繊維位相ずれ量の影響を評価するとき, 繊維位相ずれ量の範囲は Fig. 2 の上段に示したように PD_1 で $0 \sim \lambda_2$, PD_2 で $0 \sim 1/2\lambda_1$ とした。また, IVH の穴加工工程における変動要因は, あるずれ状態の 2 層のガラスクロスに対する IVH 形成位置 (Fig. 2 では P) である。そのため, その位置は, Fig. 2 の下段に示したように, ガラス繊維 1 に対しては第 II 層の繊維 1 断面の端から IVH の中心軸までの距離を P_1 で表し, ガラス繊維 2 に対しては P_1 と同様な繊維 2 断面の端からの距離を P_2 と表した。この IVH 形成位置の影響を評価するとき, Fig. 2 に示すように P_1 は $1/2W_1 \sim 3/2W_1$ の範囲で移動させ, P_2 は固定した。さらに, ガラス繊維に対する IVH の相対的な位置を評価するために, Fig. 3 に示すような IVH と各層のそれぞれのガラス繊維の相対的な位置関係を表すことができるパラメータとしてオーバーラップ率 (OR_{ij}) を定義した。 OR_{ij} とは, ガラス繊維の各繊維断面と IVH が重なりあっている長さ (Fig. 3 では L_{II} , L_{III}) を IVH の外径で除して, IVH と繊維断面の相対的な重なり割合を表すも

Fig. 2 Definition of variation factors in PWB manufacturing

Fig. 3 Definition of overlap rate

のである。 OR_{ij} が 1 の場合は、IVH と繊維断面が完全に重なり合っている状態を表す。ただし、重なり合っている距離は、同じ層の隣り合う繊維断面において長い方を用いた。また、各層において、2 方向のガラス繊維に対するそれぞれの OR_{ij} の平均値を平均 OR_{ij} として式 (1)、(2) のように定義した。

$$ORA_I = \frac{(L_{1I} + L_{2I})}{2D} \quad (1)$$

$$ORA_{II} = \frac{(L_{1II} + L_{2II})}{2D} \quad (2)$$

式 (1) において、 ORA_I は第 I 層の平均 OR_{ij} 、 L_{1I} 、 L_{2I} はそれぞれ第 I 層における繊維 1 断面と繊維 2 断面のオーバーラップ長さ、 D は IVH の外径である。同様に、式 (2) において、 ORA_{II} は第 II 層の平均 OR_{ij} である。

3.3 有限要素法解析

Fig. 4 に、変動要因である繊維位相ずれ量と IVH 形成位置を検討する解析モデルイメージを示す。この解析モデルは、前報¹⁾で冷熱サイクル試験結果との相関関係が確認されている。解析モデルにおけるガラス繊維の寸法は前報¹⁾と同様で、IVH の寸法は設計値を用いた。また、Table 1 に使用した材料定数を示す。各材料は、前報¹⁾と同様に IVH (Cu) を弾塑性体、その他は弾性体と仮定した。Cu の応力-ひずみ曲線は、Table 1 に示したヤング率と降伏応力を使用し、硬化係数を 12,000 とした 2 直線近似のもの¹⁾を用いた。また、温度負荷も前報¹⁾と同様に初期温度を 25°C とし、-60°C~120°C の 2 サイクルの温度変化を与えた。なお、解析には汎用有限要素法解析コード ANSYS Version 12.1 を用いた。

評価に用いた IVH には、Fig. 5 に示すようなき裂が生じることがわかっており、このき裂は 2 層のガラスクロスに挟まれた樹脂の部分に生じている¹⁾。したがって、その部分に生じるひずみを評価することができる平均相当塑性ひずみ幅¹⁾を、変動要因の組み合わせの熱疲労寿命への影響

Fig. 4 Analysis model

Table 1. Material properties¹⁾

Component	Young's modulus (GPa)	Shear modulus (GPa)	Poisson's ratio	Coefficient of thermal expansion ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	Yield stress (MPa)
IVH(Cu)	70	—	0.34	16	200
Glass fiber 1	x 18	xy 7	x 0.24	x 5	
	y 18	yz 8	y 0.24	y 15	
	z 51	zx 8	z 0.24	z 5	
Glass fiber 2	x 47	xy 6	x 0.25	x 5	
	y 13	yz 5	y 0.25	y 15	
	z 13	zx 6	z 0.25	z 5	
Resin	3	—	0.3	100	
FR-4	x 22	xy 10	x 0.2	x 16	
	y 6	yz 10	y 0.2	y 65	
	z 25	zx 10	z 0.2	z 14

Fig. 5 Cross sectional observation of IVH after thermal cycling test¹⁾

を評価するための特性に用いた。平均相当塑性ひずみ幅とは、2 サイクルの温度変化のうち、1 サイクル目の低温から 2 サイクル目の低温までの温度変化によって発生する累積相当塑性ひずみの変化量の平均値を相当塑性ひずみ幅として、この相当塑性ひずみ幅を Fig. 6 に示すように、実際にき裂が生じる IVH の高さの中間から IVH の外周と内周に沿ってそれぞれ 1 周分取得して平均したものである。このようなき裂が生じる部分の平均的なひずみの値を評価に用

Fig. 6 Extraction technique of average equivalent plastic strain range¹⁾

いたのは、本研究における IVH の寿命は抵抗値の変化によって定義しており、その寿命は IVH のほぼ全周にわたってき裂が発生した状態に対応していると考えられる¹⁾ためである。実際に、前報¹⁾においてこの平均相当塑性ひずみ幅と冷熱サイクル試験で得られた熱疲労寿命には良い相関が見られている。

4. 変動要因の組み合わせの熱疲労寿命への影響評価結果

4.1 主効果の影響の確認

まず、変動要因の1つである繊維位相ずれ量の主効果の影響を調べた。繊維位相ずれ量は、3.2 節で定義したように、第 I 層のガラスクロスに $PD_1 = 0 \sim \lambda_2$ ($\lambda_2 = 1,160 \mu\text{m}$)、 $PD_2 = 0 \sim \lambda_1/2$ ($\lambda_1 = 1,560 \mu\text{m}$) の範囲でそれぞれずらした。 PD_1 をずらしているときは $PD_2 = 0$ で固定し、逆の場合も同様にした。また、IVH 形成位置はある位置 (Position: a,

$P_1 = 640 \mu\text{m}$, $P_2 = 280 \mu\text{m}$) で固定した。ガラス繊維ネットワークは周期的な形状であるため、1/2 波長まで第 I 層をずらして解析を行えば、2 層のガラスクロスにおけるガラス繊維のとり得る相対的な位置関係を網羅できる。これらの繊維位相ずれ量の主効果の影響を調べるための条件を Table 2 の 1~23 に示す。Table 2 では、繊維位相ずれ量を変化させた結果の IVH とガラス繊維の重なる長さ L_{ij} をあわせて示している。なお、Table 2 の 24~41 については後述する。

Fig. 7 に、Table 2 の 1~23 で解析したときの平均相当塑性ひずみ幅の変化を示す。Fig. 7 の横軸は、繊維位相ずれ量をガラス繊維ネットワークの波長で除して正規化している。Fig. 7 は第 II 層のガラス繊維に対して IVH 形成位置を固定した場合における繊維位相ずれ量の影響を示しているが、繊維位相ずれ量を変化させることによって 2 層のガラスクロスに挟まれた樹脂の形状が変化するという主効果だけでは平均相当塑性ひずみ幅の変化を十分に説明できないことがわかる。その原因として、第 I 層のガラスクロスを増やすことによって、第 I 層のガラス繊維と IVH の相対的な位置関係も同時に変わる影響が現れていると考えられる。

4.2 物理的メカニズムと説明変数の仮定

Fig. 7 に示した PD_1 を変化させた結果を見ると、2 つのピークがあることがわかる。このピークにおける変動要因の組み合わせに注目すると、IVH と第 I 層の繊維断面がどちらのピークにおいても完全に重なり合っている状態である。この変動要因の組み合わせの特徴の類似性から、物理的メカニズムを推測する。熱負荷が与えられた場合、IVH

Table 2. Combinations of PD and P in analysis

	$PD (\mu\text{m})$		P	$L_{ij} (\mu\text{m})$					$PD (\mu\text{m})$		P	$L_{ij} (\mu\text{m})$			
	PD_1	PD_2		L_{11}	L_{21}	L_{111}	L_{211}		PD_1	PD_2		L_{11}	L_{21}	L_{111}	L_{211}
1	0	0	a	310	500	310	500	22	0	585	a	310	335	310	500
2	72.5	0	a	262.5	500	310	500	23	0	680	a	310	430	310	500
3	145	0	a	335	500	310	500	24	0	0	b	500	500	500	500
4	217.5	0	a	407.5	500	310	500	25	0	0	c	500	500	500	500
5	290	0	a	480	500	310	500	26	72.5	0	b	467.5	500	500	500
6	362.5	0	a	500	500	310	500	27	145	0	b	395	500	500	500
7	435	0	a	455	500	310	500	28	217.5	0	b	322.5	500	500	500
8	507.5	0	a	382.5	500	310	500	29	290	0	b	250	500	500	500
9	580	0	a	310	500	310	500	30	362.5	0	b	322.5	500	500	500
10	652.5	0	a	262.5	500	310	500	31	435	0	b	395	500	500	500
11	725	0	a	335	500	310	500	32	507.5	0	b	467.5	500	500	500
12	797.5	0	a	407.5	500	310	500	33	580	0	b	500	500	500	500
13	870	0	a	480	500	310	500	34	72.5	0	c	467.5	500	500	500
14	942.5	0	a	500	500	310	500	35	145	0	c	395	500	500	500
15	1,015	0	a	455	500	310	500	36	217.5	0	c	322.5	500	500	500
16	1,087.5	0	a	382.5	500	310	500	37	290	0	c	250	500	500	500
17	0	97.5	a	310	432.5	310	500	38	362.5	0	c	322.5	500	500	500
18	0	195	a	310	335	310	500	39	435	0	c	395	500	500	500
19	0	292.5	a	310	237.5	310	500	40	507.5	0	c	467.5	500	500	500
20	0	390	a	310	140	310	500	41	580	0	c	500	500	500	500
21	0	487.5	a	310	237.5	310	500								

PD : Phase difference between glass fiber networks

P : Position of IVH (i: Glass fiber number = 1, 2)

L_{ij} : Overlap length (j: Layer number = I, II)

Fig. 7 Relationship between average equivalent plastic strain range and phase difference between glass fiber networks

は樹脂が膨張することによって変形する。このとき、ガラス繊維は硬く、熱膨張係数も小さいことから、IVH に対して拘束として働いていると考えられる。IVH と第 I 層の繊維断面が完全に重なり合っている状態では、ガラス繊維が IVH を拘束している程度が最も強いと考えられる。Fig. 8 に、Fig. 7 において最も高いひずみを示したときの 2 サイクル終了時の累積相当塑性ひずみのコンター図を示す。このように、IVH に対するガラス繊維の拘束が強くなることによって、IVH のガラス繊維に挟まれた樹脂と接している部分にひずみが集中し、高いひずみが生じると考えられる。

この拘束の強さを表すパラメータとして、式 (1) に示した ORA_1 を用いることができると考えられる。 ORA_1 が 1 のときは IVH と第 I 層の繊維断面が完全に重なり合っている状態を表す。したがって、 ORA_1 は、拘束の強さという物理的メカニズムを表すことができるため、説明変数として用いることができると考えられる。そこで、Fig. 7 に示した結果を ORA_1 で整理した。Fig. 9 に ORA_1 と平均相当塑性ひずみ幅の関係を示す。なお、Fig. 9 で $PD_1 = 0$ に固定し PD_2 を変化させたときの ORA_1 は、Fig. 2 に示したように隣り合う繊維 2 断面が離れて配置されているため、0.5 以下のプロットがある。

PD_1 を変化させた場合において、 ORA_1 が 1 に近づくほど平均相当塑性ひずみ幅が大きくなる傾向が確認できる。前述したように ORA_1 が 1 のときが、Fig. 7 に示した 2 つのピークに対応している。 ORA_1 が増加し IVH と繊維断面とが重なっている割合が増えることによって、IVH に対して

Fig. 8 Analysis result of cumulative equivalent plastic strain

Fig. 9 Relationship between average equivalent plastic strain range and average overlap rate of first layer

ガラス繊維の拘束が強く働くようになり、その結果、実際に IVH にき裂が生じる 2 層のガラスクロスに挟まれた樹脂と接している部分¹⁾に最もひずみが集中し、さらにその集中する領域も広がると考えられる。

一方で、 PD_2 を変化させた場合においては、繊維 1 断面のオーバーラップ長さが小さく、さらに、隣り合う繊維 2 断面は離れて配置されていることから、 ORA_1 が小さくなり、IVH に与えるガラス繊維の拘束の影響が PD_2 を変化させてもさほど変わらないため、平均相当塑性ひずみ幅への影響が顕著ではないと考えられる。

このことから物理的メカニズムは、IVH に対するガラス繊維の拘束の強さで説明できると考えられる。また、その物理的メカニズムの傾向を表す説明変数として ORA_1 を用いることが妥当であると考えられる。

4.3 物理的メカニズムと説明変数の検証

推測した IVH に対するガラス繊維の拘束の強さという物

Fig. 10 Relationship between average equivalent plastic strain range and average of ORA_I and ORA_{II}

理的メカニズムは、第Ⅱ層のガラス繊維に対しても適用できると考えられる。これを確認するため、IVH 形成位置を式 (2) で示した ORA_{II} が 1 となるような位置へ移動させて解析した。具体的には、IVH に対する第Ⅰ層と第Ⅱ層のガラス繊維の拘束の強さを同じにするために、 $PD_1 = PD_2 = 0$ とし、その積層状態のガラス繊維に対して、Fig. 4 に示したように、 $P_2 (= 280 \mu\text{m})$ を固定したまま、 $P_1 = 290 \mu\text{m}$ (Position: b), $870 \mu\text{m}$ (Position: c) へ移動して解析した。この第Ⅱ層のガラス繊維の拘束の強さの影響を確認するための条件を Table 2 の 24, 25 に示す。なお、Table 2 の 26~41 については後述する。

第Ⅱ層のガラス繊維の拘束の強さの影響を確認した結果を、Fig. 10 に塗りつぶしたマーカーで示す。比較のために、Fig. 9 に示した ORA_I = 1 の場合（このときの ORA_{II} = 0.81 である）を●のマーカーで示している。Fig. 10 の横軸には ORA_I と ORA_{II} の平均値を用いた。なお、Fig. 10 のその他のマーカーについては後述する。

Fig. 10 に示した塗りつぶしたマーカーを比較すると、ORA_I と ORA_{II} が同時に 1 になることによって、平均相当塑性ひずみ幅が大きくなる傾向が確認できる。このことから、IVH に対するガラス繊維の拘束の強さという物理的メカニズムは、第Ⅱ層のガラス繊維に対しても適用できると考えられる。また、IVH に対するガラス繊維の拘束の強さは、ORA_I と ORA_{II} という説明変数でその傾向を表すことができると考えられる。

4.4 特性と説明変数の関係把握

IVH に対するガラス繊維の拘束の強さと熱疲労寿命との関係を把握する。熱疲労寿命は、平均相当塑性ひずみ幅で

評価することができる¹⁾。繊維位相ずれ量と IVH 形成位置の組み合わせは IVH に対する拘束の強さを考慮して決定した。具体的には、繊維位相ずれ量を変えながら、その 2 層のガラス繊維に対して IVH 形成位置を ORA_{II} が 1 となるような位置にして解析した。Table 2 の 26~41 にその繊維位相ずれ量 (PD) と IVH 形成位置 (P) の組み合わせを示す。

Fig. 10 に Table 2 の 26~41 で解析した結果を ORA_I と ORA_{II} の平均値で整理した結果を示す。ORA_I と ORA_{II} の平均値が 1 に近づくと平均相当塑性ひずみ幅が大きくなる傾向が確認できた。ORA_I = ORA_{II} = 1 のときガラス繊維の拘束が最も強く働くことによって平均相当塑性ひずみ幅が大きくなり、ORA_I < 1 かつ ORA_{II} < 1 のときその拘束が弱くなることで平均相当塑性ひずみ幅が小さくなると考えられる。よって、熱疲労寿命と説明変数の関係を把握することができたといえる。

4.5 変動要因の組み合わせのパターン化

Fig. 10 に示したように、説明変数である ORA_I と ORA_{II} の平均値が同じであっても、変動要因の組み合わせは多数ある。よって、その組み合わせを詳細に検討するよりも、まずは ORA_I と ORA_{II} の平均値に基づいて、変動要因の組み合わせを集めてパターン化すれば、熱疲労寿命に対する変動要因の組み合わせの影響を分かり易く表すことができると考えられる。この本報でのパターン化は、Fig. 10 に示した平均相当塑性ひずみ幅と ORA_I と ORA_{II} の平均値の関係から、拘束の強さを表す ORA_I と ORA_{II} の平均値を 0.9 以上、0.8~0.9、0.8 以下の 3 つのケースに分けて考えた。熱疲労寿命への影響が大きい ORA_I と ORA_{II} の平均値が 0.9 以上のケースは、IVH に対して第Ⅰ層と第Ⅱ層のガラス繊維が同じような強い拘束を与えるケースと考えられる。同様に、0.8~0.9 のケースは少なくともどちらかの層のガラス繊維が強い拘束を与えるケースであり、0.8 以下の場合は 2 層とも強い拘束を与えないケースと考えられる。この 3 つのケースにおいて、変動要因である繊維位相ずれ量に注目する。ORA_I と ORA_{II} の平均値が 0.9 以上と 0.8 以下のケースは、2 層の繊維断面がほとんど揃っている状態である。また、ORA_I と ORA_{II} の平均値が 0.8~0.9 のケースは、2 層の繊維断面は揃っていない状態である。この繊維断面の 2 つの状態に対して IVH 形成位置を考えることでパターンを定義した。Fig. 11 に定義した繊維断面の形状パターンを示す。この形状パターンを各繊維断面にあてはめて考えることで、変動要因の組み合わせの影響を理解できると考えられる。

第Ⅰ層と第Ⅱ層の繊維断面が揃っているときは、第Ⅰ層と第Ⅱ層のガラス繊維の相対的な位置関係を表す繊維位相ずれ量 PD_1 と PD_2 は 0 か $1/2\lambda$ である。このときの各繊維断面を Fig. 11 に示すように形状パターン D とし、 PD_1 と PD_2 が 0 か $1/2\lambda$ のときのグループを繊維 1 断面 - 繊維 2 断面 = D-D と表す。第Ⅰ層と第Ⅱ層のガラス繊維の位置関

Shape pattern name	Shape pattern	Influence on life
D	<p>PD_1 / λ_2 or $PD_2 / \lambda_1 = 0$ or 0.5 $OR_{ij} < 1$ (Both layers of glass fiber)</p>	Small
D'	<p>PD_1 / λ_2 or $PD_2 / \lambda_1 = 0$ or 0.5 $OR_{ij} = 1$ (Both layers of glass fiber)</p>	Large
E	<p>$0 < (PD_1 / \lambda_2 \text{ or } PD_2 / \lambda_1) < 0.5$ $OR_{ij} < 1$ (Both layers of glass fiber)</p>	Small
E'	<p>$0 < (PD_1 / \lambda_2 \text{ or } PD_2 / \lambda_1) < 0.5$ $OR_{ij} = 1$ (Either layer of glass fiber)</p>	Medium

$PD_{1,2}$: Phase difference between glass fiber networks
 $\lambda_{1,2}$: Wavelength of glass fiber network
 OR_{ij} : Overlap rate
 i : Glass fiber number = 1, 2, j : Layer number = I, II

Fig. 11 Definition of shape patterns

係が形状パターン D の組み合わせで表せるときに、IVH に対するガラス繊維の拘束が最も強く働くのは、IVH と繊維断面が完全に重なり合ったときである。このときの IVH 形成位置は $L_{II} = L_{2I} = L_{III} = L_{2II} = 500 \mu\text{m}$ となる位置である。このときの各繊維断面を特殊なケースとして Fig. 11 に示すように形状パターン D' とし、先ほどと同様に繊維 1 断面 - 繊維 2 断面 = D' - D' と表す。

次に、第 I 層と第 II 層の繊維断面が揃っていないときは、第 I 層と第 II 層のガラス繊維の相対的な位置関係を表す繊維位相ずれ量 PD_1 と PD_2 は 0 よりも大きく $1/2\lambda$ よりも小さい。ここで、繊維位相ずれ量は $1/2\lambda$ まで考えれば、2 層のガラスクロスにおけるガラス繊維の相対的な位置関係を網羅できる。このときの各繊維断面を Fig. 11 に示すように形状パターン E とし、このグループを繊維 1 断面 - 繊維 2 断面 = E - E と表す。第 I 層と第 II 層のガラス繊維の位置関係が形状パターン E の組み合わせで表せるときに、IVH に対するガラス繊維の拘束が最も強く働くのは、IVH と第 I 層と第 II 層のどちらかの繊維断面が完全に重なり合ったときである。このときの IVH 形成位置は $L_{II} = L_{2I} = 500 \mu\text{m}$ か $L_{III} = L_{2II} = 500 \mu\text{m}$ の位置である。このときの各繊維断面を特殊なケースとして Fig. 11 に示すように形状パターン E' とし、先ほどと同様に繊維 1 断面 - 繊維 2 断面 = E' - E' と表す。定義した 4 つの形状パターンを組み合わせることによって、 ORA_I と ORA_{II} の平均値を網羅できる。

Fig. 12 Verification result with defined shape patterns

このように定義した形状パターンを、Fig. 10 に示した平均相当塑性ひずみ幅と ORA_I と ORA_{II} の平均値の関係で検証した。検証は、定義した形状パターンを各繊維断面にあてはめて、Fig. 10 の結果を形状パターンで分類した。Fig. 12 に検証結果を示す。4 つの形状パターンを組み合わせることによって、 ORA_I と ORA_{II} のさまざまな組み合わせをおよそ 4 つのグループに分類できた。なお、実際の形状パターンは、連続的に変化するため、Fig. 12 に示した 4 つのグループは重なりあう部分がある。

以上のことから、定義した形状パターンは、熱疲労寿命のばらつきに対する変動要因の組み合わせの複雑な影響を分かり易く表すことができたといえ、定義した形状パターンが有効であることが確認できた。また、その形状パターンを用いることで、設計において重要な熱疲労寿命への影響を小さくできる変動要因の組み合わせと、評価において重要な熱疲労寿命への影響が大きい変動要因の組み合わせを明らかにすることができた。

5. 変動要因の組み合わせの物理的メカニズムの設計への適用

IVH の熱疲労寿命に対する繊維位相ずれ量と IVH 形成位置の組み合わせの物理的メカニズムが明らかとなったことから、そのメカニズムの設計への適用を検討した。これまでの検討では繊維位相ずれ量と IVH 形成位置は制御していないものとして、変動として取り扱ったが、ここでは、これらを制御して設計変数として取り扱う。

4 章で明らかにした変動要因の組み合わせの物理的メカニズムを設計へ適用する際にも、定義した形状パターンを用いて、必要な設計変数の得る手掛かりとすることができ

$PD_{1,2}$: Phase difference between glass fiber networks
 λ_2 : Wave length of glass fiber network
 L_{ij} : Overlap length
 (i: Glass fiber number =1,2)
 (j: Layer number =I,II)

Fig. 13 Relationship between variation of average equivalent plastic strain range and shape patterns in PD_1/λ_2

る。4.5節で定義した各形状パターンは各変動要因の値と関係づけられていることから、設計変数として繊維位相ずれ量とIVH形成位置を考慮することができる。Fig. 13に、各繊維位相ずれ量における形状パターンと平均相当塑性ひずみ幅の変動の関係を示す。Fig. 13では簡単のための PD_1 のみの影響を示している。

設計変数とした各繊維位相ずれ量において、平均相当塑性ひずみ幅の値の変動範囲が異なっていることがわかる。 PD_1/λ_2 が0や0.5に近い場合には、平均相当塑性ひずみ幅の値の変動範囲が広がる。この場合は、形状パターンDおよびD'の組み合わせでおよそ2層のガラス繊維とIVH形成位置を表すことができるため、IVHに対するガラス繊維の拘束の強さは強い場合から弱い場合まで変動する。その結果、平均相当塑性ひずみ幅の変動範囲が広くなり、熱疲労寿命への影響も大きく変動する。この場合に、IVH形成位置を繊維断面に対してランダムに選択すると、長い寿命となるケースと最も短い寿命となるケースの両方を考えなければならない。大量生産品では確率的に考えると最も短い寿命の製品が発生してしまうことになり、これを避ける必要がある。そのためには、IVH形成位置を形状パターンDとなるような位置に選択的に形成すればよい。この形状パターンDでは第I層と第II層の繊維断面が揃っていることから、繊維断面とIVHが完全には重ならないようなIVH形成領域を確保しやすいため、高信頼性が達成できると考えられる。

また、 PD_1/λ_2 が0.25に近い場合には、平均相当塑性ひずみ幅の値の変動範囲は狭くなる。この場合は、形状パターンEおよびE'の組み合わせでおよそ2層のガラス繊維とIVH形成位置を表すことができるため、IVHに対するガラス繊維の拘束の強さの変動が小さい。その結果、平均相当塑性ひずみ幅の変動範囲が狭くなり、熱疲労寿命への影響も PD_1/λ_2 が0や0.5の場合に比べてあまり変動しない。この場合、IVH形成位置をランダムに選択するとしても、長い寿命となるケースと短い寿命となるケースの寿命の差は小さい。特に、 PD_1/λ_2 が0.25の場合には、繊維位相ずれ量が $\lambda_2/4$ になることによって、第I層と第II層の繊維断面とIVHが完全には重ならない領域がほぼなくなるため、ほとんどE'の形状パターンしか取り得ない。よって、長い寿命のケースは期待できないが、最も短い寿命のケースの発生を防ぐことができると考えられる。すなわち、高信頼性は達成できないが、熱疲労寿命のばらつきの小さい製品を得ることができると考えられる。

なお、ここで述べた設計への適用例のようにPWBを製作するには、いくつかの課題もあると考えられる。例えば、ガラスクロス積層時にガラスクロスの形状を考慮して積層する必要があることから、その積層時の位置制御方法が挙げられる。さらに、その制御方法による製作誤差やガラスクロスの寸法誤差などの影響を明らかにする必要があると考えられる。このようなプロセス開発や寸法誤差などの影響について更なる検討が必要になるとと思われる。

6. 結 言

本報では、複数の変動要因の組み合わせの結果のばらつきへの影響を評価する実用的な方法を提案し、IVHの熱疲労寿命に対する積層工程と穴加工工程のそれぞれの変動要因の組み合わせの物理的メカニズムと説明変数、およびそのメカニズムの設計への適用を検討した。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) IVHの熱疲労寿命に対する複数の変動要因の組み合わせとして、ガラスクロスの積層工程における繊維位相ずれ量と、IVHの穴加工工程におけるIVH形成位置の組み合わせの熱疲労寿命への影響を評価し、これらの変動要因の組み合わせの物理的メカニズムとその説明変数を明らかにした。このことによって、本手法の有効性を検証した。
- (2) IVHの熱疲労寿命に対するガラスクロスの積層工程とIVHの穴加工工程のそれぞれの変動要因の組み合わせの物理的メカニズムは、ガラス繊維とIVHの相対的な位置関係に起因しており、IVHに対するガラス繊維の拘束の強さの違いで説明できる。それは、IVHと繊維断面が大きく重なっている場合は、IVHに対する繊維断面の拘束が強くなり熱疲労寿命が短くなる。逆に、その重なりが小さい場合には、IVH

に対する拘束が弱くなり熱疲労寿命は長くなる。

- (3) 結論(2)で述べた物理的メカニズムの説明変数としてIVHと繊維断面の重なりを表す ORA_I と ORA_{II} を用いれば、物理的メカニズムと熱疲労寿命との関係を分かり易く説明できる。
- (4) 各層のガラス繊維とIVH形成位置の相対的な位置関係から、ガラスクロス積層工程における繊維位相ずれと穴加工工程におけるIVH形成位置を設計変数として取り扱うことにより、IVHの熱疲労寿命の変動を制御できる設計の考え方を示した。

(2012.11.13-受理)

文 献

- 1) 竹中国浩, 于 強: “PWBにおけるIVHの熱疲労寿命に及ぼすFR-4の積層構造の不均質性の影響(第1報, 冷熱サイ

クル試験と有限要素法解析を用いた寿命の変動要因の検討),” エレクトロニクス実装学会誌, Vol. 16, No. 2, pp. 106-118, 2013

- 2) 山田 秀: “実験計画法—方法編—,” 日科技連出版社, 2004
- 3) 立林和夫: “入門タグチメソッド,” 日科技連出版社, 2004

著者紹介

竹中国浩 (たけなか くにひろ)

1997年九州工業大学情報工学部電子情報工学科卒業, 同年株式会社安川電機入社。現在, 同社にて電子機器の実装信頼性に関する研究に従事。エレクトロニクス実装学会, 日本機械学会, IEEE 各会員。

于 強 (う きょう)
横浜国立大学