シリコンゲルで封止されたワイヤの振動環境下の疲労強度評価法[†]

竹 田 憲 生* 成 瀬 友 博*
河 野 賢 哉** 服 部 敏 雄*

Fatigue Strength Estimation Method of Wire Protected with Silicone Gel under Vibration Environment

by

Norio TAKEDA*, Tomohiro NARUSE*, Kenya KAWANO** and Toshio HATTORI*

Silicone gel is usually applied to electrical automotive devices to protect them from corrosion. However, under a vibration environment, the silicone gel vibrates bonding wires in the devices; thus, to evaluate the reliability of the devices, the vibration analysis of the gel/wire structure is indispensable. In this study, we clarify the relation between the fatigue life of gel-protected bonding wires and the geometry of the gel and bonding wires experimentally. It was founded that the diameter of wires and the thickness of the gel have a significant influence on fatigue life. Then, we developed a method, based on a vibration analysis model that takes into account the visco-elasticity of a gel, for predicting the fatigue life of the wires. It was confirmed that the predicted fatigue life showed good agreement with the measured fatigue life. Finally, we developed a design tool for easily calculating the fatigue life of the wires. This tool estimates the strain range by using a response surface, i.e., a neural network. As Bayesian regularization was executed in learning of unknown parameters in the neural network, we could make the response surface and ensure good generalization ability.

Key words: Silicone gel, Vibration, Electrical device, Bonding wire, Fatigue life

1 緒 言

近年、自動車用電子部品は配線作業の工数低減を図るため、エンジンルーム内に設置あるいはエンジンに直付けされる傾向にある。そのため、自動車用電子部品はより過酷な熱および振動環境下で使用され、これらの環境に対する信頼性確保が重要な課題となっている。自動車用電子部品では、プリント基板上の配線やボンディングワイヤを水滴などから保護するため、プリント基板全体をシリコンゲルで封止しているものが多い。このシリコンゲルの特性選択を誤ると、過酷な振動環境下でシリコンゲルがボンディングワイヤを加振し、ワイヤを疲労断線させることがある。このような疲労によるワイヤの断線を防ぐためには、ゲル封止されたワイヤの振動挙動を明らかにし、ワイヤの強度評価を行う必要がある。そこで、著者らは先にレーザドップラ振動計でゲル中のワイヤの振動を測定し、ワイヤがゲルとともに振動することを明らかにした。また、ゲルの粘弾性を考慮したゲルとワイヤの連成振動解析法により、ゲル中のワイヤの振動挙動が計算できることを確認した^{1), 2)}

本報では、ゲル封止されたワイヤの振動環境下での強度評価法について検討する。まず、ゲルで封止されたワイヤの振動環境下での疲労試験を実施し、様々なゲル、ワイヤの寸法、加振条件でワイヤの疲労寿命を明らかにする。次に、ゲルとワイヤの連成振動解析で計算したワ

イヤのひずみ範囲とワイヤ単体の疲労試験結果から、ゲル封止されたワイヤの疲労寿命を予測する手法を提案する。最後に、設計者が基本構造設計段階でワイヤおよびゲルの寸法変更による疲労寿命の変化を簡単に概算できるゲル封止ワイヤの簡易寿命評価法を提案する。

2 ゲル封止ワイヤの振動環境下疲労試験

2・1 試験方法

アルミワイヤをシリコンゲルで封止した Fig. 1 (a)の試験片を作製した。ゲルの底面は絶縁被膜を挟んでアルミの板に付着しており、ゲルの側面は拘束されていない。ワイヤは銅配線上にボンディングし、銅配線にリード線を接続してワイヤに通電できるようにした。ワイヤおよびゲルの寸法が異なる Table I の4種類の試験片をそれぞれ数個ずつ用意し、加振器で試験片に振動を与えてワイヤを断線させた。Table I の l , w , h は Fig. 1 (a)に示したゲルの寸法である。試験片の加振方向を Fig. 1 (a)の y 方向とするため、Fig. 1 (b)のように治具を介して試験片を加振器に取り付けた。加振周波数は 60Hz に固定し、加振加速度を変化させて試験片を加振した。加振時にワイヤに通電しておき、電気信号の変化でワイヤの断線を確認した。ワイヤが断線するまでの時間を記録し、断線時間と加振周波数からワイヤの破断繰返し数を求めた。

2・2 試験結果

試験結果を Fig. 2 に示す。Table I に示した試験片 1

[†] 原稿受理 平成 14 年 1 月 17 日 Received Jan. 17, 2002

* 正 会 員 (株)日立製作所機械研究所 〒300-0031 土浦市神立町, Mech. Eng. Res. Lab., Hitachi Ltd., Kandatsu-cho, Tsuchiura, 300-0031

** (株)日立製作所機械研究所 〒300-0031 土浦市神立町, Mech. Eng. Res. Lab., Hitachi Ltd., Kandatsu-cho, Tsuchiura, 300-0031

Table I. Geometry of wire and silicone gel.

	Silicone gel	Wire		
	$l \times w \times h$ (mm)	Span (mm)	Height (mm)	Diameter (mm)
1	30×30×8	11.0	5.0	0.125
2	30×30×8	11.0	3.0	0.125
3	30×30×8	11.0	3.0	0.200
4	30×30×2	11.0	3.0	0.125

Fig. 1. Specimen and setting of specimen.

Fig. 2. Results of fatigue test for aluminum bonding wire protected with silicone gel under vibration.

(○)と試験片2(△)の結果より、ループ高さはワイヤの疲労寿命にあまり影響せず、また、試験片2(△)と試験片3(◆)の試験結果を比べると、ワイヤ径は疲労寿命に大きく影響することがわかる。さらに、試験片2(△)と試験片4(■)の結果から、ゲル厚さも疲労寿命に大きく影響することがわかる。

3 ゲル封止ワイヤの振動環境下疲労寿命予測

3・1 ゲル封止ワイヤの振動解析

前章の疲労試験の各試験片、加振加速度においてワイヤに生じるひずみを求めるため、Fig. 1の試験片のゲルとワイヤをFig. 3のようにモデル化し、有限要素法でゲルとワイヤの振動解析を行った。ワイヤは3節点ビーム要素、ゲルは20節点ソリッド要素でモデル化した。ビーム要素の節点と同一座標にあるソリッド要素の節点が振動時に同一変位となるように拘束条件を与え、ゲルとワイヤの連成振動を模擬した。解析には汎用コードの

Fig. 3. Finite element model of aluminum bonding wire protected with silicone gel.

ABAQUSを用いた。ABAQUSでは粘弾性材料の複素弾性率を材料データとして与えれば、粘弾性材料から成る構造体の周波数応答が求められる。ワイヤは弾性材料、ゲルは粘弾性材料として材料定数を入力し、加振周波数60Hzでゲルの底面とワイヤのボンディング部がFig. 3のy方向に加振される条件でワイヤのひずみを計算した。著者らは、このような連成振動解析の計算結果とレーザードップラ振動計によるゲル封止ワイヤの周波数応答特性の測定結果が良く一致することを確認している。^{1), 2)}

3・2 疲労寿命予測

前項の振動解析でTable Iの各試験片、加振加速度においてワイヤに生じるひずみを求め、Fig. 2の縦軸をワイヤのネック部のひずみ範囲に変換した結果をFig. 4に示す。振動解析ではワイヤのひずみの最大値はワイヤのネック部で認められたが、疲労試験においてもワイヤの断線はネック部で生じた。Fig. 4には、ウェッジボンディングしたワイヤ径300μmのアルミワイヤの一端に強制変位を機械的に与えた疲労試験(以降、強制変位疲労試験と略記する)で得た累積断線確率50%の疲労寿命をManson-Coffin則でまとめた直線を併記した。Fig. 4から、縦軸をひずみ範囲に変換すれば、第2章の試験結果は強制変位疲労試験の寿命曲線の近傍にプロットでき、ワイヤ径、ゲル厚さの異なる試験結果が一本の寿命曲線に整理できることがわかる。

また、別途行った加振周波数100Hzでの疲労試験の結果もFig. 4に付記した。ゲルは粘弾性材料であるため、

Fig. 4. Fatigue life of aluminum bonding wire protected with silicone gel under vibration.

ワイヤに生じるひずみは加振周波数に大きく依存する。3・1節の振動解析では、ゲルの粘弾性を考慮してワイヤのひずみを算出するため、加振周波数 100Hz の試験結果 (▲) も強制変位疲労試験の寿命曲線の近傍にプロットできた。これより、加振周波数に関わらず疲労試験の結果は一本の寿命曲線に整理できることがわかる。

以上から、次のような手順でゲル封止されたワイヤの累積断線確率 50% の疲労寿命が予測できる。

(I) ゲル封止されたワイヤの解析モデルを作成する。

(II) ゲルとワイヤの連成振動解析を実施し、ワイヤのネック部のひずみ範囲 $\Delta\varepsilon$ を求める。

(III) 強制変位疲労試験の寿命評価式

$$N_f = (\Delta\varepsilon/\varepsilon_0)^{-1/m} \quad (1)$$

に (II) で求めたひずみ範囲 $\Delta\varepsilon$ を代入して疲労寿命 N_f を得る。ただし、Fig. 4 のようにひずみ範囲 0.1% を疲労限と考え、 $\Delta\varepsilon < 0.1\%$ では断線しないとする。

例えば、式 (1) を累積断線確率 0.1% の寿命評価式とすれば、上記の手順と同様の手順で累積断線確率 0.1% の疲労寿命が予測できる。

4 ゲル封止ワイヤの簡易寿命評価法

4・1 設計対象

自動車に搭載される電子部品では、Fig. 5 に示すようにプリント基板上の配線やボンディングワイヤを水滴、油滴などから保護するために、シリコンゲルをハウジング内に充填しているものが多い。このような電子部品のボンディングワイヤの振動に対する疲労寿命を簡易的に評価する手法を開発した。

簡易寿命評価法では、実際の電子部品をゲルとワイヤのみに簡略化した Fig. 6 のひずみ評価モデルに置き換えてワイヤのネック部のひずみ範囲を求め、それを式 (1) に

Fig. 5. Cross section of typical electrical automotive device.

Fig. 6. Modeling of electrical device for calculation of strain range of wire.

代入してワイヤの疲労寿命を簡易的に求める。ワイヤは基板上的様々な箇所にあるが、振動によって最も疲労破断しやすいのは、ゲルの振幅が最も大きくなる中央付近のワイヤ (Fig. 5 では②) である。ハウジングの側壁近くではゲルの振幅が小さいため、①, ③のワイヤの疲労破断は②よりも起こりにくい。したがって、簡易評価手法では、ハウジング底面の中央にワイヤがあると仮定してひずみを評価し、安全側の寿命評価を行う。また、加振によるハウジングの変形は無視できるほど小さいので、加振時にゲル側面は変形せず、底面と同じ変位で振動すると考える。加振方向はワイヤの疲労寿命に大きく影響する。ワイヤが疲労破断するのは、Fig. 6 のようにワイヤの張ってある方向と垂直 (y 方向) に電子部品が加振された場合である。したがって、ひずみ評価モデルでは、ワイヤの張ってある方向は加振方向に対して完全に垂直とする。

4・2 簡易寿命評価法の流れ

ゲル封止ワイヤの振動による疲労に対する簡易寿命評価法の流れを Fig. 7 に示す。本手法では、まず設計対象の電子部品を Fig. 6 のようなひずみ評価モデルに置き換え、ワイヤ径 d 、ループ高さ h_w 、スパン長さ l_w 、ゲルの W_g 幅、ゲルの長さ l_g 、ゲルの厚さ、および加振周波数 f を設定する。次に、予め用意したひずみ範囲 $\Delta\varepsilon$ を求める近似式

$$\Delta\varepsilon = F(d, h_w, l_w, w_g, l_g, h_g, f) \quad (2)$$

にゲルおよびワイヤの寸法、加振周波数の各値を入力し、加振加速度 9.8m/s^2 でのワイヤのひずみ範囲を概算する。任意の加振加速度に対するひずみ範囲は、加振加速度とひずみが比例すると考えて概算する。以降では、式 (2) の近似式をひずみ応答曲面と呼ぶ。続いて、ひずみ範囲の概算値を式 (1) の寿命評価式に代入し、振動環境下でのゲル封止ワイヤの疲労寿命を簡易的に求める。このような簡易寿命評価法により、設計者はゲル、ワイヤの寸法変更による疲労寿命の変化を容易に確認でき、基本構造設計段階での試行錯誤が簡便に行える。

4・3 ひずみ応答曲面の作成

本手法では、ゲルとワイヤの寸法、および加振周波数を入力、ワイヤのひずみ範囲を出力とする式 (2) のひずみ応答曲面を作成する。ひずみ応答曲面を作成するため

Fig. 7. Estimation flow.

に、近似式に含まれる未知係数を求める。この未知係数は、ゲルとワイヤの寸法、および加振周波数の異なるゲル封止ワイヤの連成振動解析を数回実施し、その数回の計算結果を利用して決定する。以降では、未知係数の決定に利用する計算結果を教師データと呼ぶ。

4・3・1 直交表による教師データの選択 信頼度の高い応答曲面を作成するためには、設計空間上に適切に分散された教師データで未知係数を決定する必要がある。³⁾そこで、加振周波数 f を除く6変数（ワイヤ径 d 、ループ高さ h_w 、スパン長さ l_w 、ゲルの幅 w_g 、ゲルの長さ l_g 、ゲルの厚さ h_g ）を3水準系のL27直交表⁴⁾に割り付け、27組の各組み合わせに対応した連成振動解析を実施した。加振周波数を除く6変数の水準範囲をTable IIに示す。加振周波数については、直交表には割り付けず、27組の各解析において10～100Hz間の10点{10.0, 12.9, 16.7, 21.5, 27.8, 35.9, 46.4, 59.9, 77.4, 100.0}でワイヤのひずみを計算した。結局、 $27 \times 10 = 270$ 組の計算結果を教師データとした。

4・3・2 応答曲面の作成方法 ゲル、ワイヤの寸法、加振周波数とワイヤのひずみの間には強い非線形性が存在する。また、本研究で選んだ設計変数では、複数の設計変数間に複雑な交互作用があるので、応答曲面としてChebyshevの直交関数⁴⁾は使い難い。そこで、本評価法ではひずみ応答曲面として非線形性の強い入出力関係の写像に有効なニューラルネットワーク（以降NNと略記する）を採用する。NNの構造をFig. 8に示す。入力層の素子数は7個の設計変数と近似式の定数項に相当するバイアス項1の合計8である。中間層の素子数は40とし、出力層の素子数はひずみ範囲の1である。NNでは未知係数 w を決定することをNNの学習と呼ぶ。NNは未知係数の数が非常に多いため、学習を誤ればFig. 9(b)のように、教師データ(x)の近似精度は良いが、教師デ

Fig. 9. Generalization ability.

ータ以外の入力(○)に対しては近似精度の悪い応答曲面となる。教師データ以外の入力に対しても近似精度の良い、すなわち補間性能の良いFig. 9(a)のような応答曲面を作成するために、ベイズ統計学に基づく適切化^{5)~7)}を適用する。補間性能の良い応答曲面はFig. 9(b)のような凹凸の激しい曲面ではなく、Fig. 9(a)のように滑らかな応答曲面である。そこで、ベイズ統計学に基づく適切化を利用して「応答曲面は滑らかである」という情報をNNの学習に反映させ、補間性能の良い応答曲面を作成する。教師データを x としたとき、ベイズ統計学に基づくNNの未知係数 w の決定（学習）手順は以下の通りである。

- (I) NNを確率的に解釈し、NNを尤度 $l(w|x)$ として表現する。
- (II) 未知係数 w についての既知情報を事前密度 $p(w)$ の形に表現する。
- (III) ベイズの定理により、事後密度 $p(w|x)$ を求める。
- (IV) 未知係数 w を決定する。

具体的には、NNは多変量正規分布の確率密度関数

$$p(D|w, \beta, A) = Z_D(\beta)^{-1} \exp[-\beta E_D(D|w, A)] \quad (4)$$

に従ってデータを発生すると考え、式(4)をNNの尤度とする。ここで、 D は教師データの集合、 A はNNの構造、 β はひずみの計算値に含まれる誤差の尺度を表わし、 $Z_D(\beta)^{-1}$ は式(3)の左辺を右辺と等しくするための規準化定数である。 $E_D(D|w, A)$ は教師データ $D = \{x^\mu, \varepsilon^\mu\}$ がNNに与えられた場合のNNの出力 $F(x^\mu; w, A)$ と x^μ に対する真の出力 ε^μ の2乗誤差

$$E_D(D|w, A) = \sum_{\mu} \frac{1}{2} [F(x^\mu; w, A) - \varepsilon^\mu]^2 \quad (5)$$

である。添え字 μ は μ 組目の教師データを意味する。「応答曲面は滑らかである」という既知情報を確率密度関数で表現すると

$$p(w|\alpha, A, R) = Z_w(\alpha)^{-1} \exp[-\alpha E_w(w|A, R)] \quad (6)$$

となる。ここで、 R は未知係数の事前分布、 α は w の事前密度の特性を決定する係数、 $Z_w(\alpha)$ は規準化定数、 $E_w(w|A, R)$ は

$$E_w(w|A, R) = \sum_i \frac{1}{2} w_i^2 \quad (7)$$

である。式(3)に式(4)の尤度と式(6)の事前密度を代入し、

$$p(w|D, \alpha, \beta, A, R) = Z_M(\alpha, \beta)^{-1} \exp(-\alpha E_w - \beta E_D) \quad (8)$$

Table II. Level values.

Factor	Level 1	Level 2	Level 3
Diameter of wire d (mm)	0.100	0.200	0.300
Height of wire h_w (mm)	1.0	2.0	3.0
Length of wire l_w (mm)	7.0	11.0	15.0
Length of gel w_g (mm)	20	50	80
Width of gel l_g (mm)	20	50	80
Height of gel h_g (mm)	1.2	3.2	5.2

Fig. 8. Architecture of neural network.

となる。 $Z_M(\alpha, \beta)^{-1}$ は規準化定数である。 NN の学習とは、事後密度を最大とする未知係数 w を見つけることに相当する。したがって、ベイズ統計学に基づく適切化を利用した NN の学習では、誤差関数

$$M = \alpha E_w + \beta E_D \quad (9)$$

を最小化する w を見つける。ただし、すべての未知係数に対して同一の事前分布を仮定するのは不自然⁶⁾なため、入力層—中間層間の未知係数 w_{IH} と中間層—出力層間の未知係数 w_{HO} に対して異なる事前分布を仮定する。また、バイアス項に乘じられる未知係数に事前分布は仮定しない。したがって、式 (9) の誤差関数は

$$M = \sum_c \alpha_c E_w^c + \beta E_D \quad (10)$$

となる。ここで、 c は異なる事前分布を意味する。未知係数 w の決定には逆誤差伝ば則⁸⁾を用いた。

式 (10) の α_c , β はベイズ統計学に基づくモデル選択基準を利用して次のように決定する。 α_c , β の事後密度は

$$p(\alpha_c, \beta | D, A, R) = \frac{p(D | \alpha_c, \beta, A, R) p(\alpha_c, \beta)}{p(D | A, R)} \quad (11)$$

となる。ここで、 α_c , β の事前分布を無情報事前分布⁹⁾とすると、 α_c , β の事後密度は式 (11) の右辺の $p(D | \alpha_c, \beta, A, R)$ にのみ依存する。 $p(D | \alpha_c, \beta, A, R)$ は

$$p(D | \alpha_c, \beta, A, R) = \frac{Z_M(\alpha_c, \beta)}{Z_w(\alpha_c) Z_D(\beta)} \quad (12)$$

と書ける。式 (12) の対数の α_c , β に関する偏微分を 0 とおくと、式 (12) を最大とする α_c , β は

$$\alpha_c = \gamma / 2 E_w^c, \quad \beta = (N - \gamma) / 2 E_D \quad (13)$$

となる。 N は教師データと出力層の素子数の積であり、 γ は未知係数の有効数と呼ばれ、0 から k までの値をとる。 k は未知係数の個数である。有効数 γ の計算は複雑なため、本研究では簡易的に $\gamma = k/2$ とした。

4・3・3 補間性能と近似精度 前項の手順で作成したひずみ応答曲面の補間性能を調査した。加振周波数に関する補間性能を調査するため、L27 直交表の No. 1, No. 3 と No. 27 の設計変数の組み合わせに対して、ワイヤのひずみ範囲を応答曲面で概算した。No. 1, No. 3 と No. 27 の設計変数の組み合わせを Table III に示す。No. 15, No. 23 および No. 25 の設計変数の組み合わせについても後に調査対象とするため、Table III に付記した。ワイヤのひずみは No. 3 の組み合わせで最小となり、No. 27 の組み合わせで最大となる。Fig. 10 にワイヤのひずみ範囲の

Table III. Design variables for training data.

	d (mm)	h_w (mm)	l_w (mm)	w_g (mm)	l_g (mm)	h_g (mm)
No.1	0.1	1.0	7.0	20	20	1.2
No.3	0.3	3.0	15.0	20	80	1.2
No.15	0.2	3.0	15.0	50	80	3.2
No.23	0.2	3.0	7.0	50	50	5.2
No.25	0.2	1.0	7.0	80	20	5.2
No.27	0.1	3.0	15.0	80	80	5.2

Fig. 10. Generalization ability for frequency.

計算値 (教師データ) と応答曲面によるひずみ範囲の概算値を示す。図中の RS は応答曲面 (Response surface) の略である。非常に滑らかな応答曲面が Fig. 10 で認められることから、加振周波数に対して補間性能の良い応答曲面が前項の手順で作成できることが確認できた。

次に、ゲルやワイヤ寸法に関する補間性能を調査した。特に、ワイヤ径 d およびゲル厚さ h_g とワイヤのひずみの間には強い非線性が存在するため、適切な補間が難しい。Table III に示した L27 直交表の No. 1 と No. 23 の設計変数の組み合わせに対し、ワイヤ径のみを 100 μ m から 300 μ m まで変化させ、加振周波数 10 Hz のワイヤのひずみ範囲をひずみ応答曲面で概算した。また、この概算値の近似精度を確認するため、ゲルとワイヤの連成振動解析でワイヤのひずみ範囲を計算した。No. 1 の場合、ワイヤ径 100 μ m の計算結果は教師データなので、150 μ m から 300 μ m まで 50 μ m 間隔でワイヤ径を増加させてひずみを計算した。No. 23 に対しても、教師データの 200 μ m を除く 50 μ m 毎のワイヤ径でひずみを計算した。Fig. 11 に、応答曲面によるひずみ範囲の概算値と有限要素法によるひずみ範囲の計算値を示す。ひずみの応答曲面は非常に滑らかであり、ワイヤ径に関して補間性能の良い応答曲面が生成できた。ただし、応答曲面による

Fig. 11. Generalization ability for diameter of wire.

ひずみ範囲の概算値は教師データ (Fig. 11 の○と△) とは良く一致しているが、教師データ以外の計算値 (Fig. 11 の●と▲) と比較すると、誤差の最も大きい点で概算値は計算値の 1/2 となった。このことは、ワイヤ径とワイヤのひずみの間には強い非線形性があり、ひずみの近似が難しいことを示唆している。

ゲル厚さに関する補間性能を調査した。L27 直交表の No. 15 と No. 25 の設計変数の組み合わせに対して、ゲル厚さのみを 1.2mm から 5.2mm まで変化させ、加振周波数 10Hz のワイヤのひずみ範囲をひずみ応答曲面で概算した。この概算値の近似精度を確認するため、ゲル厚さ 1.2mm, 3.2mm と 5.2mm の場合のひずみ範囲を有限要素法で計算した。No. 15 のゲル厚さ 3.2mm, No. 25 のゲル厚さ 5.2mm の計算結果は教師データである。Fig. 12 に、応答曲面によるひずみ範囲の概算値と有限要素法によるひずみ範囲の計算値を、横軸をゲルの厚さとして示す。ひずみ応答曲面は非常に滑らかであることから、ゲルの厚さに対して補間性能の良い応答曲面が生成できたと考えられる。ただし、ワイヤ径の場合と同様に、応答曲面によるひずみの概算値は教師データ (Fig. 12 の□と◇) とは非常に良く一致しているが、教師データ以外の計算値 (Fig. 12 の■と◆) と比較すると、最も誤差の大きい No. 15 でゲル厚さ 5.2mm において概算値は計算値の 1.5 倍となった。

本評価法は補間性能の良い応答曲面が作成できるため、設計者の基本構造設計時に有用なツールとして活用できる。ただし、ひずみとゲル、ワイヤの寸法および加振周波数は強い非線形性が存在するため、条件によってはひずみ範囲の概算値と有限要素法による計算値に差異が認められた。このような場合、式 (1) にひずみ範囲の概

算値を代入して求めた疲労寿命は実際の疲労寿命と大きく異なる可能性がある。したがって、提案する簡易評価法は基本構造設計時に活用し、最終的な構造を決定する段階では 3・2 節の寿命予測法でワイヤの疲労寿命を確認すべきと考える。

5 結 言

本研究ではゲル封止されたワイヤの振動環境下の疲労強度を明らかにするため、ゲル封止ワイヤの疲労寿命予測法と簡易寿命評価法を提案し、以下の結論を得た。

(1) ゲル封止されたワイヤの振動環境下の疲労試験を実施し、ワイヤ径とゲルの厚さはワイヤの破断寿命に大きく影響することがわかった。

(2) 上記疲労試験の各条件に対応するゲルとワイヤの連成振動解析を実施し、縦軸をワイヤのひずみ範囲横軸を破断繰返し数として試験結果を整理したところ、試験結果は一本の寿命曲線にまとめられた。

(3) ゲルとワイヤの連成振動解析で計算したワイヤのひずみ範囲とワイヤ単体の強制変位疲労試験で求めた寿命評価式からワイヤの疲労寿命を予測する手法を提案した。

(4) ゲルとワイヤの寸法変更による疲労寿命の変化を簡便に概算できる応答曲面を利用したゲル封止ワイヤの簡易寿命評価法を提案した。

(5) ベイズ統計学に基づく適切化を利用して応答曲面を作成し、ゲル、ワイヤの寸法および加振周波数に対して優れた補間性能を有する応答曲面を得た。これより、簡易寿命評価法は設計者の基本構造設計時に有用なツールであることがわかった。

参 考 文 献

- 1) 竹田憲生, 成瀬友博, 服部敏雄, 浅野雅彦, 日本材料学会第 49 期通常総会・学術講演会, 57 (2000).
- 2) 竹田憲生, 成瀬友博, 服部敏雄, 大野啓充, 材料, **50**, 1305(2001).
- 3) R. T. Haftka and E. P. Scott, "Theoretical and Applied Mechanics 1996", edited by T. Tatsumi, E. Watanabe and T. Kambe, P.103 (1997) Elsevier Science B. V..
- 4) 田口玄一, "第 3 版実験計画法", p.144 (1977) 丸善.
- 5) D. J. C. Mackay, Neural Computation, **4**, 415 (1992).
- 6) D. J. C. Mackay, Neural Computation, **4**, 448 (1992).
- 7) P. M. Williams, Neural Computation, **7**, 117 (1995).
- 8) J. Hertz, A. Krough and R. G. Palmer, "INTRODUCTION TO THE THEORY OF NEURAL COMPUTATION", p.115 (1991) Addison-Wesley.
- 9) 繁榊算男, "ベイズ統計学入門", p.53 (1985) 東京大学出版会.

Fig. 12. Generalization ability for Height of gel.