

アレニウスモデルによる 接着接合部の寿命予測法について (アイリングモデルを用いた寿命予測法を含む)

鈴木 靖昭 鈴木接着技術研究所

E-mail : yasuzuki-1@nifty.com

1 接着接合部の劣化の要因

接着接合部を劣化させる要因は, (1) 温度ストレス (加温) および (2) 機械的応力負荷, 湿度 (水分), 電圧印加などの温度以外のストレスの二種類に大別されるが, 接着層界面へ水分の侵入による影響がかなり大きい。

また, 湿度として相対湿度を用いる場合は, 同一湿度下では温度により絶対湿度が大きく異なる。これらの要因による劣化, 加速試験および寿命予測法については, 3 章において述べる。

2 アレニウス式 (温度条件) による劣化, 耐久性加速試験および寿命推定法^{2,3,11)}

2.1 化学反応速度式と反応次数¹⁾



上式の化学反応において, A ~ D は物質, a ~ d は化

学量論係数であり, 反応速度は, 次式で表される。

$$\frac{d[A]}{dt} = -k[A]^\alpha[B]^\beta \quad (2)$$

ここで, [A] および [B] : 時間 t における A および B の濃度, k : 反応速度定数, $\alpha + \beta$: 反応次数である。

2.2 濃度と反応速度および残存率との関係^{1-3,11)}

表 1 には, 0 次反応, 1 次反応, および 2 次反応における [A] および [B], ならびに時間 t における [A] の残存率 r を与えるそれぞれの式を示す。

表 1 において, $[A]_0$ および $[B]_0$ は A および B の初期濃度, k_0, k_1 , および k_2 は, それぞれ 0 次反応, 1 次反応, および 2 次反応における反応速度定数である。

接着剤の劣化がその酸化反応により進行し, 接着強度 σ が接着剤の残存量 [A] に比例すると仮定した場合, 表 1

表 1 反応速度と残存率との関係^{1-3,11)}

項 目	0 次反応 ($\alpha+\beta=0$)	1 次反応 ($\alpha+\beta=1$)	2 次反応 ($\alpha+\beta=2$)	
反応速度式	$\frac{d[A]}{dt} = -k_0$	$\frac{d[A]}{dt} = -k_1[A]$	$\frac{d[A]}{dt} = -k_2[A]^2$	$\frac{d[A]}{dt} = \frac{d[B]}{dt} = -k_2[A][B]$
A の濃度	$[A] = [A]_0 - k_0 t$	$[A] = [A]_0 e^{-k_1 t}$	$\frac{1}{[A]} - \frac{1}{[A]_0} = k_2 t$	[A] ₀ と [B] ₀ が等しい場合 : $\frac{1}{[A]} - \frac{1}{[A]_0} = \frac{1}{[B]} - \frac{1}{[B]_0} = k_2 t$
			$[A] = \frac{[A]_0}{1 + k_2 [A]_0 t}$	
A の残存率	$r = [A]/[A]_0 = 1 - \frac{k_0}{[A]_0} t$	$r = [A]/[A]_0 = e^{-k_1 t}$	$r = \frac{[A]}{[A]_0} = \frac{1}{1 + k_2 [A]_0 t}$	
半減期	$t_{0.5} = \frac{0.5[A]_0}{k_0}$	$t_{0.5} = \frac{\ln 2}{k_1} = \frac{0.693}{k_1}$	$t_{0.5} = \frac{1}{k_2 [A]_0}$	
r = r _l となる 時までの時間	$t_l = \frac{(1 - r_l)[A]_0}{k_0}$	$t_l = \frac{\ln (1/r_l)}{k_1}$	$t_l = \frac{1 - r_l}{r_l k_2 [A]_0}$	

中の A の濃度 $[A]$ を表す各式から接着強度 σ は、0次反応、1次反応及び2次反応において次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \sigma_0 - C_0 k_0 t \\ \sigma &= \sigma_0 \exp(-k_1 t) \\ \sigma &= \frac{\sigma_0}{1 + \left(\frac{k_2}{C_2}\right) \sigma_0 t} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで、 $\sigma_0 : t = 0$ における接着強度 ($= C_0[A]_0 = C_1[A]_0 = C_2[A]_0$)、 C_0 、 C_1 および C_2 : 比例定数である。また、上式から0次反応、1次反応および2次反応における接着強度と時間 t との関係が次式および図1のように直線化できる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \sigma_0 - C_0 k_0 t \quad [\text{この式は式(3)と同じ}] \\ \ln \sigma &= \ln \sigma_0 - k_1 t \\ \frac{1}{\sigma} &= \frac{1}{\sigma_0} \left[1 + \left(\frac{k_2}{C_2}\right) \sigma_0 t \right] = \frac{1}{\sigma_0} + \left(\frac{k_2}{C_2}\right) t \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

これらは、接着継手の寿命 (例えば半減期) を求めるために接着強度実験値と経過時間 t との関係を直線化するための指標となる式であり、実験値をプロットして最も適合する式を選ぶ。

2.3 材料の寿命の決定法^{2,3,11)}

次項で述べるアレニウス式を用いて、より低い温度 (例えば室温) における寿命を推定するためには、より高い少なくとも2種類の温度における寿命実験値を必要とする。

(1) 寿命到達時が明確な場合^{2,3,11)}

機械的分離破断、絶縁破壊などの現象により、材料が寿命に達した時間が明確に分かる場合は、その時間を寿命とする。

(2) 材料の物性が低下して実用に供さなくなる場合^{2,3,11)}

この場合は、その材料の物性値が実用に供さない値になる時間を寿命とする。故障判定基準としては、材料や機器によって多様な値が採用されており、一般的には、材料のある温度 T における寿命を決定する方法として、対象とする物性値 (例えば強度、弾性率、など) の残存率 r が一定値となる時までの時間 t を寿命とするという方法が採用される。劣化の進行により固くなる、すなわち弾性率が増加する場合もあるが、その場合は故障判定基準を弾性率初期値より大きい値とする。

ここでは、劣化により反応量に比例して物性値が低下する場合について述べる。寿命としては、表1に示す半減期すなわち $r = r_{0.5} = 0.5$ となる $t_{0.5}$ または $r = r_l$ (l : limit) [$\sigma = \sigma_l$] となる時間 t_l が用いられる。決定方法としては、式(4)に基づいて、図1のように接着強度 σ と経過時間 t との関係をプロットし、内挿または外挿により寿命 $t_{0.5}$ または σ_l (l : limit) を求める。

2.4 反応速度定数と温度との関係

アレニウスは、反応速度定数 k と絶対温度 T に関する次の経験式を提出した^{4,5)}。

$$k = A \exp \left(-\frac{E_a}{RT} \right) \quad (5)$$

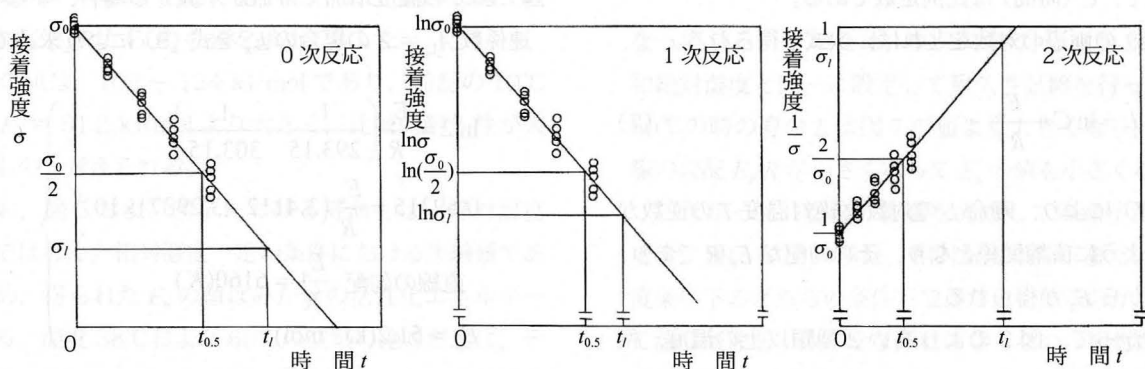


図1 寿命決定法 (接着強度の場合の例)^{2,3,11)}

ここで、 A : 温度に無関係な係数 (頻度因子)

(物質量/時間)

E_a : 活性化エネルギー (J/mol) (図 2 参照)

R : 気体定数 (8.3145 J/mol/K)

T : 絶対温度 (K)

反応速度定数 k は、活性化エネルギー E_a の値が小さく、温度 T が高いほど大きくなる。

2.5 アレニウス式を用いた寿命推定法^{2,3,11)}

材料の酸化反応などにより劣化が生じ、その寿命を表 1 の半減期 $t_{0.5}$ または時間 t_l として定義すれば、寿命

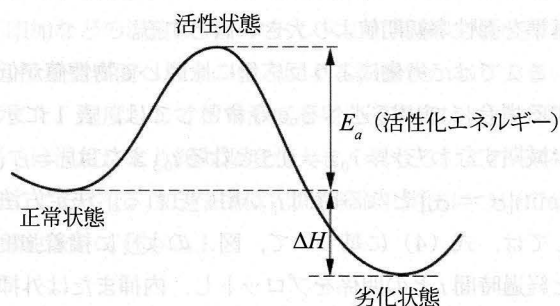


図2 活性化エネルギー

はすべて反応速度定数 k_0 , k_1 , および k_2 に反比例する。

したがって、材料の寿命はアレニウス式 (5) で表される反応速度定数 k に反比例する。すなわち、寿命 $t_{0.5}$ または t_l をまとめて L で示せば、それは次式で表される。

$$L = C \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (6)$$

ここで、 C (時間) は比例定数である。

式 (6) の両辺の対数をとれば、次式が得られる。

$$\ln L = \ln C + \frac{E_a}{RT} \quad (7)$$

式 (7) により、寿命 L の対数と絶対温度 T の逆数が図 3 のように直線関係となり、その勾配が E_a/R であり、その値から E_a が得られる。

したがって、図 3 のより高い 2 種類以上の温度、例えば T_1 および T_2 ($T_1 < T_2$) における寿命の実験値 (L_1

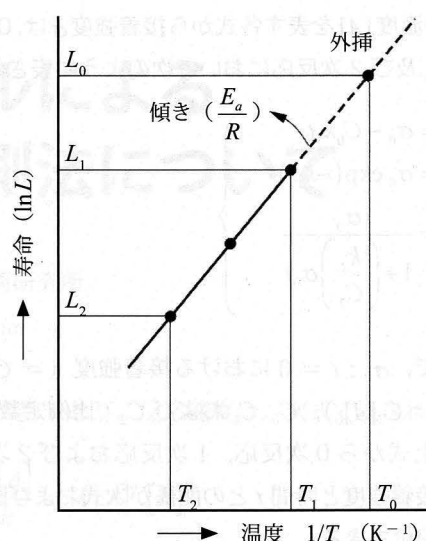


図3 アレニウスプロットによる寿命の推定

および L_2) を外挿することにより、より低い温度 (例えば室温) T_0 における寿命 L_0 を次式により推定できる。

$$\ln L_0 = \frac{1/T_0 - 1/T_2}{1/T_1 - 1/T_2} \cdot \ln\left(\frac{L_1}{L_2}\right) + \ln L_2 \quad (8)$$

このとき、加速係数 A_L 、すなわち温度 T_1 および T_2 ($T_1 < T_2$) における寿命 L_1 および L_2 の比は、次式により表される。

$$A_L = \frac{L_1}{L_2} = \exp\left\{\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right\} \quad (9)$$

経験的に室温付近では温度が 10℃ 増加すると寿命が半減する (10℃ 則) といわれているので、20℃ → 30℃ の 10℃ の温度増加で寿命が半減する場合、すなわち加速係数 $A_L = 2$ の場合の E_a を式 (9) により求めてみる。

$$\left. \begin{aligned} \ln 2 &= \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{293.15} - \frac{1}{303.15} \right) \\ 0.69315 &= \frac{E_a}{R} (3.4112 - 3.2987) \times 10^{-3} \\ \text{直線の勾配 } \frac{E_a}{R} &= 6160 (K) \\ E_a &= 51.2 (kJ/mol) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

2.6 Sustained Load Test による接着継手の温度、湿度、および応力負荷条件下の耐久性評価結果

Sustained Load Test は、米国 3M 社の W. D. Sell により開発された方法で、同社の A. V. Pocius らは、各種航空機用接着剤による Al 板の重ね合せ接着継手に対し、コイルばねによって負荷をかけ、温度および高湿度条件下の長期の耐久性を調べた^{6,7)}。

ここでは、著者らの耐久性試験結果を以下に紹介する。

(1) 接着剤 A および C (一液性 120℃ / 1h 硬化エポキシ系) の耐久性試験結果

著者らは、温度、湿度、および応力に関し、Sustained Load Test 装置を用いて、Pocius らと同一条件下で、ステンレス鋼板の接着継手 (溶剤脱脂のみ) の耐久性を調べた⁸⁾。

図 4 に試験片形状、図 5 に応力負荷装置を示す。なお、図 5 の応力負荷装置は、試験片破断時に反動で図の右方向に飛び出して危険であるため、最初に荷重を加える時を含めて、架台に固定しておく必要がある。

図 6 に、120℃ / 1h 硬化、1 液性エポキシ系接着剤 A の耐久性試験による $\ln L - \ln S_m$ 線図を示す⁸⁾。

図 6 においては後記アイリングの式 (14) を適用して、寿命 L (破断までの保持時間) およびストレス S_m (応力) の対数をとっているが、温度一定 (38℃) においてほぼ直線を示しており、アイリング式の妥当性が確認された。

(2) アレニウスプロットによる継手のみかけの活性化エネルギー E_a の算出

図 6 の 38℃ および 60℃ の実験結果の近似直線から、応力 = 1, 5, および 10 MPa における寿命 L を読み取り、アレニウスプロットとして図 7 に示した。図中には、直線の勾配 E_a/R から E_a の値を求めて示した。

E_a の値は、102 ~ 124 kJ/mol であり、前記の 10℃ 則の $E_a = 51.2$ kJ/mol より大きく、比較的耐久性が大きいものと考えられる。

なお、図 6 および図 7 における寿命 L は、絶対湿度一定ではなく、相対湿度一定の条件下における実験値であるため、得られた E_a の値はみかけの活性化エネルギーである。温度 38℃ および 60℃ の空気絶対湿度は、それぞれ 46.2 および 130.2 g/m³ と後者の方が 2.8 倍と

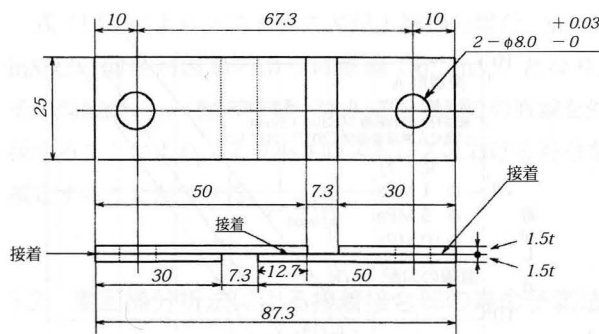


図 4 耐久性試験片⁸⁾



図 5 応力負荷装置⁸⁾

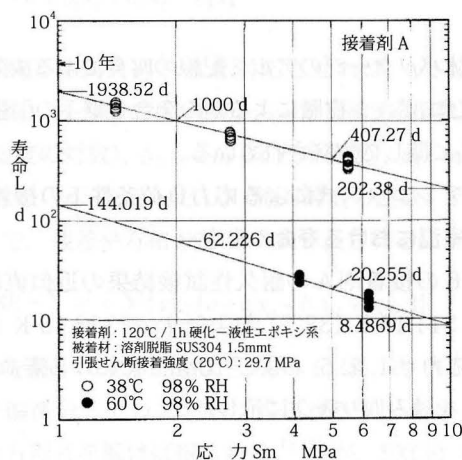


図 6 接着剤 A の Sustained Load Test 結果
($\ln L - \ln S_m$ 線図)⁸⁾

なっている。そのため、60℃の絶対湿度を38℃の飽和絶対湿度と同一に設定して耐久性試験を行った場合、60℃の時の寿命 L は図 7 の値より大きくなり、図の直線の勾配 E_a/R が小さくなって E_a の値も小さくなる。

したがって、湿度の影響を考慮して寿命予測を行う場合、用いる E_a の値は、相対湿度条件下または絶対湿度条件下のどちらの条件下で得た値であるのかを考慮して湿度条件を一致させなければならない。相対湿度条件下でも寿命予測が可能であることが、エポキシ樹脂封止

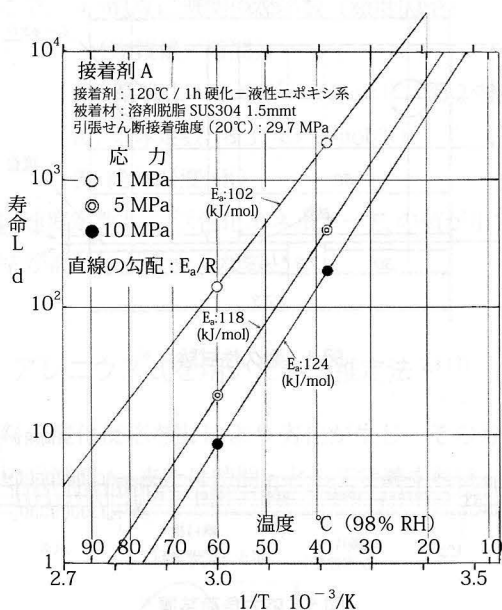


図7 接着剤 A のアレニウスプロット

半導体パッケージのアルミ配線の腐食による故障時間⁹⁾ およびエポキシ樹脂による銅の突合せ継手の引張接着強度¹⁰⁾ に関して実証されている。

(3) アレニウス式による応力・負荷条件下の接着継手の室温における寿命の推定

図6の接着剤 A の耐久性試験結果の近似直線から、 $T_1 = 311.15 \text{ K}$ (38°C) および $T_2 = 333.15 \text{ K}$ (60°C)、負荷応力 = 1, 2, 5, および 10 MPa における寿命 L_1 および L_2 を読み取り表2に示した。

表2 室温 (20°C) における応力・負荷条件下の接着剤 A 継手の寿命の推定結果³⁾

負荷 応力 MPa	寿命 L_1	寿命 L_2	推定寿命 L_0			
	d	d	d	年	年	年
	($T_1 = 311.15\text{K}$)	($T_2 = 333.15\text{K}$)	($T_0 = 293.15\text{K}$) (20°C)			
	(98% RH)	(98% RH)	(98% RH)	(60% RH)	(60% RH)	(60% RH)
1	1938.52	144.019	22124	60.6	99	164
2	1000.00	62.226	13226	36.2	59	98
5	407.27	20.255	6634	18.2	30	49
10	202.38	8.4869	3863	10.6	17	29

接着剤 A の室温における引張せん断強度: 29.7 MPa (303 kgf/cm^2)
 $h = 1$ および $h = 2$: 式 (13) の相対湿度 S_h に関する指数 h をこの値に仮定した場合の推定寿命

式 (8) の寿命予測式に $T_1 = 311.15 \text{ K}$ および $T_2 = 333.15 \text{ K}$ を代入すれば、次式が得られ、

$$\ln L_0 = \frac{1/293.15 - 1/333.15}{1/311.15 - 1/333.15} \ln \left(\frac{L_1}{L_2} \right) + \ln L_2 \quad (11)$$

$$= 1.9298 \ln \left(\frac{L_1}{L_2} \right) + \ln L_2$$

この式に表2の各応力における L_1 および L_2 の値を代入し、室温 20°C ($T_0 = 293.15 \text{ K}$) における寿命予測値 L_0 を求めて表2に併記した。

この継手の場合、 20°C 、98% RH において、負荷応力が 1 MPa (10 kgf/cm^2) から倍の 2 MPa になると、推定寿命が 60% に低下することが分かる。なお、この接着試験片の耐久性試験前の室温における引張りせん断接着強度は、29.7 MPa (303 kgf/cm^2) と比較的大きく、負荷応力 1 MPa は、そのわずか 3.4% である。

アイリングの式による湿度、応力などのストレス・負荷条件下の耐久性加速試験および寿命推定法^{2,3,11)}

接着継手は、温度だけでなく応力、湿度などのストレスが作用すると、寿命に大きく影響を受けるので、耐久性試験を行って把握しておく必要がある。

図8は、ボーイング社による加熱硬化型エポキシ系接着剤で接着した Al 試験片の高温、高湿条件下の耐久性試験結果²³⁾ で、無負荷応力条件では残存接着強度は

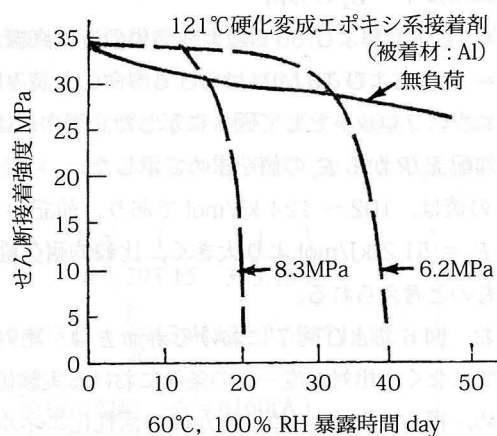


図8 高温高湿条件下の重ね合せ継手の残存せん断接着強度に対する負荷応力の影響²³⁾

長期間大きく保たれているが、応力負荷条件下では急速に低下しているので注意が必要である。

接着剤を構成する樹脂の種類によっては（水素結合が期待できない場合）、これ以上に負荷応力の影響を受けやすい接着剤があるので注意を要する。

3.1 アイリングの式を用いた寿命推定法

アイリング (H. Eyring) は、遷移状態理論（活性錯合体理論）により、反応速度式を導出した^{12,14)}。

詳細は省略して結果のみを示せば、アイリングの式から、反応速度 k と温度 T 、湿度 S_h 、負荷応力 S_m などの外部からのストレス S との関係が次式のように導かれる。

$$k = a_1 T S^n \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \doteq a_2 S^n \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (12)$$

$$= a_3 S_h^h S_m^m \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

ここで、 $a_1 \sim a_3$ は定数、 n, h 、および m は S, S_h 、および S_m の指数であり、 $\exp(-E_a/RT)$ の項はアレニウス式に一致する。

式 (12) の右の項は、 T の狭い領域について成立する近似アイリング式である^{4,5,13,17)}。温度以外のストレスが複数個ある場合は、それらのべき乗の積となる。

寿命 L (時間) は k の逆数に比例するため、次式で表わされる。なお、 $d_1 \sim d_4$ は比例定数である。

$$L = d_1 S^{-n} \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) = d_2 S_h^{-h} S_m^{-m} \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (13)$$

および、

$$\ln L = d_3 - n \ln S + \frac{E_a}{RT} = d_4 - h \ln S_h - m \ln S_m + \frac{E_a}{RT} \quad (14)$$

式 (13) から、加速係数 A_L は次式で表される。

$$A_L = \frac{L_1}{L_2} = \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^n \exp\left\{\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right\}$$

$$= \left(\frac{S_{h2}}{S_{h1}}\right)^h \left(\frac{S_{m2}}{S_{m1}}\right)^m \exp\left\{\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right\} \quad (15)$$

式 (14) により、ストレス S が 1 種類の場合、 $\ln L$ と $\ln S$ との関係が図 6 のように直線 ($\ln L - \ln S_m$) となり、その勾配が $-n$ (図 6 では $-m$) である。この直線を外挿することにより、より小さいストレスにおける寿命を推定することができる。

3.2 重回帰分析法による接着接合部の寿命予測法

重回帰分析とは、独立変数（説明変数）の個数 p が 2 以上の場合の最小二乗法、すなわち残差平方和を最小にする方法である^{18,19)}。

得られる回帰式は、独立変数の個数 $p = 1$ の場合は回帰直線（通常の最小二乗法）、 $p = 2$ の場合は回帰平面、 $p \geq 3$ の場合は多次元空間における超回帰平面となる²⁰⁾。 $p = 3$ の回帰式は式 (16) となる。

$$y = a + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 \quad (16)$$

式 (16) と式 (14) とを対応させれば、 $y: \ln L$ (寿命の対数)、 $a: d_4$ (切片)、 $b_1: -h$ (湿度の指数)、 $x_1: \ln S_h$ (湿度の対数)、 $b_2: -m$ (応力の指数)、 $x_2: \ln S_m$ (応力の対数)、 $b_3: E_a/R$ 、 $x_3: 1/T$ (絶対温度の逆数) である。

ここで、残差平方和 SSE は次式で表される。

$$SSE = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n \{y_i - (a + b_1 x_{i1} + b_2 x_{i2} + b_3 x_{i3})\}^2 \quad (17)$$

SSE を最小にする a および $b_1 \sim b_3$ は、式 (17) を各係数で偏微分しゼロとおいて得られる $p + 1 = 4$ 元連立一次方程式を解けば得られる^{18,19)} が、EXCEL の重回帰分析関数 LINEST (Line estimation)²¹⁾ を用いれば、任意の独立変数の個数 p の場合の解が瞬時に得られる。

当然、 $p = 1$ すなわち、湿度、応力、または温度のみ変化の場合および $p = 2$ (2 変数) の場合の予測もできる。

湿度 S_h 、応力 S_m 、温度 T を変化させて得られた多数の寿命 L の実験値を用いれば、回帰式 (14) に続いて寿命予測回帰式 (13) が容易に得られ、任意の条件における接着継手の寿命が予測できる。

表 3 は、図 6 の接着剤 A の寿命試験結果 30 点（湿度 98% RH、応力 5 種類、温度 38℃ および 60℃）の内、平均値を挟む 10 点、および式 (14) の湿度の指数 h を 1 と仮定して寿命 L に $98/60 = 1.6333$ を乗じて得た

表3 重回帰分析関数 LINEST による図6接着剤Aの耐久性試験結果の回帰分析結果および寿命予測結果²²⁾

G2				fx =LINEST(A2:A21,B2:D21,TRUE,TRUE)								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	
1	lnL	lnS _n	lnS _m	1/T			温度(1/T)	応力(lnS _n)	湿度(lnS _m)	切片		
	y	x ₁	x ₂	x ₃			b ₃	b ₂	b ₁	a		
2	5.8721	4.5850	1.70656	0.0032139		係数	13964	-0.93610	-0.98772	-32.833		
3	6.0403	4.5850	1.70656	0.0032139		係数の標準偏差	235.15	0.044870	0.083456	0.84941		
4	6.4489	4.5850	1.01160	0.0032139		決定係数 標準偏差	0.99793	0.091557	#N/A	#N/A		
5	6.6080	4.5850	1.01160	0.0032139		分散比 残差自由度	2573.8	16.000	#N/A	#N/A		
6	7.1156	4.5850	0.32208	0.0032139		回帰変動 残差変動	64.727	0.13412	#N/A	#N/A		
7	7.2577	4.5850	0.32208	0.0032139		活性化エネルギー E _a	116	-8.3145 × G2/1000 (kJ/mol)				
8	2.6946	4.5850	1.82455	0.0030017		注 左表の入力データの順序はx ₁ → x ₂ であるが、上表の戻された結果の順序は、 b ₃ → b ₂ のように逆になっているので注意。						
9	2.8792	4.5850	1.82455	0.0030017		LINEST関数計算法 [yの範囲 A2:A21, xの範囲 B2:D21]						
10	3.2921	4.5850	1.41828	0.0030017		1. 数式入力行 fxに =LINEST(A2:A21,B2:D21,TRUE,TRUE) と入力する。						
11	3.3358	4.5850	1.41828	0.0030017		2. 評価結果出力セル(上図緑色)を選択し、Shift + Ctrl + Enter キーを押下→						
12	6.4542	4.0943	1.70656	0.0032139		寿命予測結果 →重回帰分析結果が表示される。						
13	6.4465	4.0943	1.70656	0.0032139								
14	6.9904	4.0943	1.01160	0.0032139								
15	7.0545	4.0943	1.01160	0.0032139								
16	7.7483	4.0943	0.32208	0.0032139								
17	7.6813	4.0943	0.32208	0.0032139								
18	3.1853	4.0943	1.82455	0.0030017								
19	3.2569	4.0943	1.82455	0.0030017								
20	3.7902	4.0943	1.41828	0.0030017								
21	3.7827	4.0943	1.41828	0.0030017								

lnL	温度 K	応力 MPa	湿度 %RH	予測寿命L _d	予測寿命L _y
6.0096	311.15	5	98	407	1.12
3.0460	333.15	5	98	21	0.06
10.7564	293.15	1	60	46927	129
10.1075	293.15	2	60	24526	67
9.2498	293.15	5	60	10402	28
8.6009	293.15	10	60	5437	15

$$\ln L = \$G\$2*(1/G15) + \$H\$2*\ln(H15) + \$I\$2*\ln(I15) + \$J\$2$$

LnL=\$G\$2*(1/G15)+\$H\$2*LN(H15)+\$I\$2*LN(I15)+\$J\$2
上式の\$:セルを絶対対象とする記号

注. この EXCEL 関数計算シートの入手をご希望の読者は、著者宛 mail でお知らせください

湿度 60% RH における寿命 L の仮実験値 10 点、合計 20 点の実験結果を用いて、LINEST 関数により得た寿命予測式の各係数および寿命予測結果である²²⁾。活性化エネルギー E_a : 116kJ/mol は図7接着剤Aの $S_m = 5\text{MPa}$ における $E_a = 118\text{kJ/mol}$ に、予測寿命は表2の値に、ほぼ一致している。

参考文献

- 1) C. Capellos and B. H. J. Bielski, 鍛冶健司訳, システム反応速度論, 地人書館, (1977), pp. 1-19
- 2) 鈴木靖昭, 粘着剤, 接着剤の最適設計と適用技術 (村田貴士編), 技術情報協会, (2014), pp. 370-386
- 3) 鈴木靖昭, 接着工学 異種材料接着・接合, 強度・信頼性・耐久性向上と寿命予測法, 丸善出版, (2018) pp. 213-247
- 4) 福井泰好, 入門信頼性工学, 森北出版, (2007), pp. 151-153
- 5) 塩見 弘, 改定三版信頼性工学入門, 丸善, (1998), pp. 242-265
- 6) A. V. Pocius, D. A. Womgsness, C. J. Almer, A. G. McKown, Adhesive Chemistry-Developments & Trends (Editor : L. H. Lee), Plenum Press (New York) (1984)
- 7) 上坊武夫, 高性能構造用接着剤の開発に関する調査研究報告書, (財) 大阪科学技術センター, (1985), p. 438
- 8) 鈴木靖昭, 石塚孝志, 水谷裕二, 日本接着学会誌, 41, 143 (2005)
- 9) 中村和裕, エレクトロニクス実装学会誌, 6, 540-545 (2003)

- 10) 鈴木陸, 荘司郁夫, 小林竜也, 戸野塚悠 : Proc. of Mate 2020 (Microjoining and Assembly Technology in Electronics), (2020), pp. 143-146
- 11) 鈴木靖昭, 炭素繊維およびその繊維複合材料における分析試験, 評価解析に関する最新事例集 (藤本登編), 技術情報協会, (2019), pp. 536-551
- 12) R. Chang & J. W. Thoman, Jr, 訳 : 岩澤康裕・北川禎三, 基本物理化学, 東京化学同人, pp. 348-353 (2018)
- 13) 塩見 弘, 故障物理入門, 日科技連, (1970), pp. 77-84
- 14) S. Glastone, K. J. Laidler, H. Eyring, (訳) 長谷川繁夫, 平井西夫, 後藤春雄, 絶対反応速度論, 上, 下巻, (1968) 吉岡書店
- 15) Vaccaro, J. Gorton, H. C., RADC Reliability Physics Notebook, AD624769 (1965)
- 16) Endicott, H. S., Walsh, T. M., Proc. 1966 Annual Symp. on Reliability
- 17) Vaccaro, J., Smith, J. S., Proc. 1966 Annual Symp. on Reliability
- 18) 棟近雅彦, 多変量解析入門, サイエンス社, pp. 78-83 (2019)
- 19) 新村秀一, オペレーションズ・リサーチ, 439-445 (1983)
- 20) 栗本達児, 京都大学大学院, 心理データ解析演習「重回帰分析と重回帰分析」(2005-6-15)
- 21) きたみあきこ, EXCEL 関数逆引き辞典パーフェクト第3版, 翔泳社, pp. 618-623 (2019)
- 22) 鈴木靖昭, 異種材料の接着・接合技術と応用事例 (菊池寛編), 技術情報協会, (2021), pp. 631-647
- 23) Marceau, J. A., Moji Y. and McMillan, J. C., Adhesive Age, october, 28-34 (1976)