

## 高分子材料の寿命評価法

高分子材料はポリマー、添加剤の種類や使用環境などによって劣化速度は一樣ではないものの必ず劣化が進行し、金属材料や無機材料と比べると比較的短命である。このため、高分子材料の寿命が製品全体の寿命を左右することも多い。したがって、高分子材料の寿命の把握と長寿命化材料の開発などのために寿命評価は欠かすことができない。本稿では寿命予測モデルを解説し、予測結果の信頼性を高めるために必要な寿命評価法の注意点と劣化度の定量法について解説する。

仲山 和 海

### 1 製品寿命

ゴム、プラスチックをはじめとする高分子材料は金属材料、無機材料と比べると、本質的に軽量で物性の設計範囲が広く、加工温度が低いため成形が容易であり、その特徴を活かして種々の製品の機能を担う部品や構造材など多様な用途で使用されている。一方で高分子材料は可燃性と劣化が生じやすいことが弱点として挙げられ、有用な高分子材料を活用するためにはこれらの弱点を抑えるあるいはリスクを回避した使用方法を取り入れる必要がある。燃焼については難燃剤の添加やポリ塩化ビニル（PVC）などの難燃性の高いポリマーを選択することで材料面での対策ができる。劣化に関しては酸化防止剤、紫外線吸収剤などの劣化防止用添加剤の添加や劣化因子に強いポリマーを選択することで対策を施し寿命を長くすることができる。それでも図1に示すように高分子材料は徐々に劣化によりその特性が損なわれ寿命を迎え、高分子材料の寿命が工業製品の寿命を決定することも多い。故に寿命評価の重要度や期待は大きいものの、寿命を左右する劣化現象に変動要因が多いため、画一的あるいは完全な寿命予測法が存在しない。しかしな

がら、寿命評価の手法や条件（寿命予測のモデル、劣化度の定量法、促進劣化処理条件、寿命ラインなど）を選択し、設定することができれば予測結果の精度を高めることができ、意味のある寿命評価にすることが可能になる。本稿では寿命予測モデルと予測結果の信頼性を高めるために必要な寿命評価法の注意点と劣化度の定量法について解説する。

#### 1.1 寿命の定義

材料、製品の寿命は状況や見方によって定義が変わり、商品的寿命と機能的寿命に大別される。商品的寿命は汚れ、傷、変色などの外観の変化、流行、新製品登場などの嗜好の変化、時代の流れなどの理由によって、製品や材料としての機能は維持していても使用されなくなり寿命を迎えるものである。商品的寿命も考慮しなければ高品質化が過剰になりコスト増を招くため、製品開発のうえで重要である。機能的寿命は製品として使用できる期間で、材料の劣化に強く依存し、機能性の低下、破壊、変形などによって決まる。技術者が寿命評価の対象とするのは機能的寿命で、以降では機能的寿命について述べる。

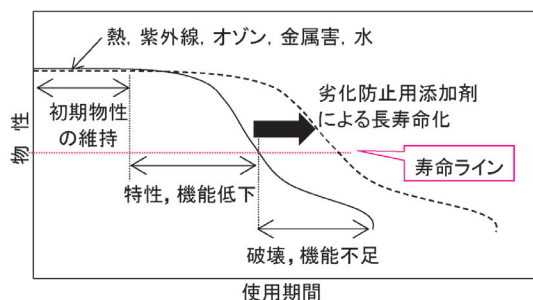


図1 高分子材料の劣化の進行と寿命到達の模式図

#### 1.2 寿命予測モデル

寿命評価を行う際には同一条件で加速試験を行い、試料間の優劣を比べることもできるが、寿命予測モデルを適用して耐久回数や時間を推定することも広く行われている。このとき寿命予測モデルが劣化現象に適合している必要がある。

##### 1.2.1 クリープ破壊の予測モデル ラーソン・ミラー式

クリープ破壊に対してはラーソン・ミラー式が選択される。プラスチック材料では温度または応力が高いほどクリープ変形が起こりやすく、破壊に至るまでの時間が

短い。ラーソン・ミラー式を式 (1.1) に示す<sup>1)~3)</sup>。  
 ラーソン・ミラー式では温度と応力とクリープ破壊時間の関係が表されている。

$$T(C + \log t) = Q \dots\dots\dots (1.1)$$

$T$ は絶対温度,  $C$ は定数,  $t$ は破壊時間,  $Q$ はラーソン・ミラー定数で応力によって決まる。

**1・2・2 疲労破壊の予測モデル マイナーの累積損傷則**

疲労破壊に対してはマイナーの累積損傷則 (通常, マイナー則と呼ばれる) が選択される<sup>2)3)</sup>。金属では広く適用できるが, ゴム, プラスチックの場合は必ずしも適用できるとは限らない。マイナー則では縦軸に応力振幅と横軸に破壊に至るまでの繰返し数の関係を示した  $S-N$  線図を作成する。  $S-N$  線図を図 2 に例示する。通常, 横軸は対数軸, 縦軸は線形軸か対数軸とし,  $S-N$  線図は直線関係で表される。応力振幅  $\sigma_i$  が  $n_i$  回加えられ,  $N_i$  回に達したときに破壊することを意味しており, いくつかの応力振幅  $\sigma_1, \sigma_2, \dots$  がそれぞれ  $n_1, n_2, \dots$  回繰返し付与され, 累積損傷度  $D = \sum (n_i/N_i)$  が 1 に達すると破壊するモデルである。

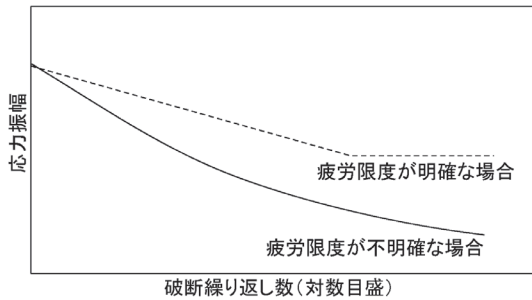


図 2 疲労試験における  $S-N$  線図

**1・2・3 化学的劣化に対する予測モデル アレニウスモデルとアイリングモデル**

アレニウス法は熱や光, 酸素などの使用環境に存在する劣化因子によって生じる化学的な劣化現象に対する代表的な寿命予測法で, 温度上昇によって劣化の進行が促進されることを活用する。温度以外の促進因子で加速した促進劣化試験ではこのモデルから明らかに外れることになる。ポリマーの劣化反応が次の式 (1.2) に示すアレニウス式に従い生じるとする<sup>1)4)</sup>。

$$k = Ae^{-E_a/RT} \dots\dots\dots (1.2)$$

ここで  $k$  は反応速度定数,  $A$  は頻度因子,  $E_a$  は活性化エネルギー,  $R$  は気体定数である。両辺の対数をとると式 (1.3) が得られる。

$$\ln k = \ln A - \frac{E_a}{RT} \dots\dots\dots (1.3)$$

一定の劣化反応が進んだとき, 寿命に達すると考えると寿命は  $k$  の逆数に比例するため, 式 (1.4) が得られる。

$$\ln L = A' + \frac{B'}{T} \dots\dots\dots (1.4)$$

ここで  $L$  は寿命 (寿命ラインの特性値に達する時間),  $A', B'$  は定数である。促進試験で得られた寿命の対数と促進試験温度の逆数をプロット (アレニウスプロット) し, 実環境温度に外挿することで寿命を予測できる。

アレニウス法による寿命予測の実際の手順は, まず, 三水準以上の熱劣化処理温度で劣化速度を調べる。劣化指標としては, 引張試験による弾性率, 引張強さ, 切断時伸び, 化学分析による酸化劣化度, 分子量など複数の指標を用いて適切な指標を見出す必要がある。図 3 に加硫ゴムを熱劣化処理し, 硬さを劣化指標とした例を示す<sup>5)</sup>。次に回帰式などを用いて, 設定した寿命ラインに至るまでの時間  $L$  を各処理温度  $T$  に対して求める。そして, 図 4 のように  $1/T$  と  $\ln L$  の関係をプロットし, 線形近似式より使用温度まで直線を外挿し寿命を算出する<sup>5)</sup>。

アレニウスモデルの反応速度論をより一般的にしたものがアイリングモデルである<sup>1)4)</sup>。アイリングモデルでは温度以外の劣化に対するストレスの影響が考慮される。ストレスは濃度, 電圧, 湿度, 応力などである。

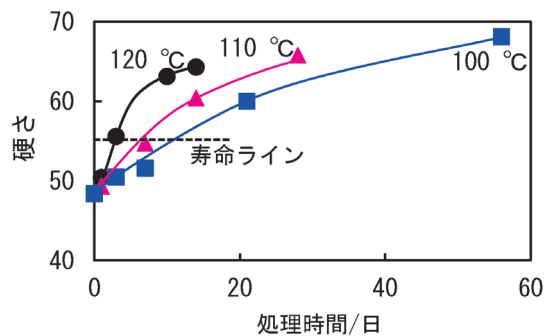


図 3 加硫ゴムの熱劣化処理による硬さ変化<sup>5)</sup>

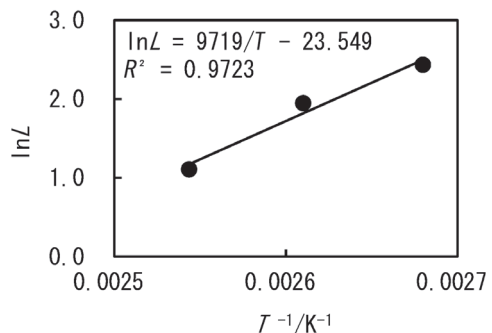


図 4 アレニウス法に基づく  $1/T - \ln L$  プロット<sup>5)</sup>

$$k = a(k_B T/h) e^{-E_a/k_B T} S^n \dots\dots\dots (1.5)$$

$$\approx A e^{-E_a/k_B T} S^n \dots\dots\dots (1.6)$$

$a$ ,  $n$  は定数,  $k_B$  はボルツマン定数,  $h$  はプランク定数,  $E_a$  は活性化エネルギー,  $S$  は温度以外のストレスである. 両辺の対数をとると, 式 (1.7) が得られる.

$$\ln k = \ln A - \frac{E_a}{k_B T} + n \ln S \dots\dots\dots (1.7)$$

一定の劣化反応が進んだとき, 寿命に達すると考えると寿命は  $k$  の逆数に比例し, 一定温度では式 (1.8) が得られる.

$$\ln L = A' - n' \ln S \dots\dots\dots (1.8)$$

$n'$  は定数である. 促進試験で得られた寿命の対数とストレス, 例えば, 濃度, 応力, 湿度などの対数をアレニウス法と同様の要領でプロットし, 実環境のストレスの強さに外挿することで, 寿命を予測できる. 得られた寿命予測値は実験温度での予測値になる.

アイリング法による寿命予測の実際の手順は, まず三水準以上のストレス条件で劣化速度を調べる. 次に回帰式などを用いて, 設定した寿命ラインに至るまでの時間  $L$  を各ストレス  $S$  に対して求める. そして,  $\ln S$  と  $\ln L$  の関係をプロットし, 線形近似式より使用環境のストレスまで直線を外挿し寿命を算出する.

### 1.3 寿命予測の注意点

寿命予測の上でポイントとなるのは, 寿命予測の特性値の決定 (どの特性値で寿命を予測するかで, 寿命予測値は大きく変わる), 寿命ラインの決定 (どの程度特性が低下したところを寿命とするかで, 寿命予測値は大きく変わる) と, 促進劣化処理条件の決定である. 促進劣化処理条件は, 市場回収品などで劣化評価を行い, 実環境での劣化因子を特定し, この劣化因子を過酷にしたものである. このため, 促進劣化処理条件は実環境と異なり, 加えて, 実環境ではその他の因子も関与しているために, 促進劣化処理によって実際の劣化現象と特性変化を完全に再現することはできず, 寿命予測には誤差が生じる. これは, 寿命予測モデルが単一の化学反応を対象とした化学反応速度論を適用していることに起因している. すなわち, 加熱による促進劣化はほとんどの化学反応を促進するため最も有効な促進法であるが, 加熱によってすべての劣化にかかわる反応及び変化が一樣に促進されるわけではないために, 寿命予測結果と市場での寿命にはかい離が生じる. 例えば, 高温のみで生じる反応が促進劣化処理で生じ, 市場環境と劣化反応が異なることがかい離の原因になる. また, 酸素や水などの劣化因子の浸透領域が促進処理条件と市場環境で異なることもかい離の原因として挙げられる. 図 5 に高温で酸化

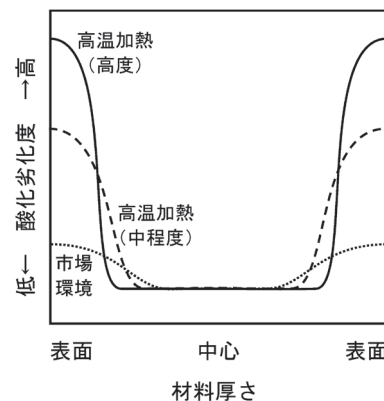


図 5 市場環境と熱による促進劣化時で生じる酸化劣化のかい離状況模式図<sup>5)</sup>

劣化を促進させた場合と市場環境で生じる酸化劣化とのかい離状況を模式図に示した<sup>5)</sup>. 高温での熱劣化においては反応速度が加速されるために表面付近で酸素が速やかに消費されて激しく酸化劣化が生じるものの中心部では酸素濃度が低く酸化が進行しなくなる. 一方, 市場環境では酸素が内部にも拡散し表面付近の酸化劣化はそれほど高くはならないが酸化劣化層が深くなる. これらのかい離原因をできる限り回避し, より正確な寿命予測値を得て, 寿命評価法の信頼性を高めるためのポイントとして次の事項が挙げられる.

- (i) 促進劣化処理の妥当性を化学分析により検証する必要がある.
- (ii) なるべく実際の条件に近い温度で促進試験を実施する.
- (iii) 予測された劣化速度と市場での実際の劣化速度を比較し補正する.

寿命予測結果は絶対値ではなくあくまでも予測値で使用環境にも寿命は影響を受けるため, 生物の寿命と同様で正確に知ることは不可能であるが, 寿命予測技術は耐久性向上を定量的に確認するには効果的で, 寿命予測結果にかい離が生じることまで正しく理解することで極めて有効な寿命評価技術になる.

## 2 寿命評価のための分析法

表 1 に高分子材料の主な劣化分析法を示す<sup>5)</sup>. 高分子材料の劣化時に生じる変化は多様であるためにその変化に応じた分析法を選択する必要がある. ここではいくつか劣化分析法を取り上げて得られる情報や分析上の注意点を解説する.

表 1 高分子材料の主な劣化分析法<sup>5)</sup>

項目	分析法
劣化構造解析, 劣化度	フーリエ変換赤外分光分析 (FT-IR) X線光電子分光分析 (XPS) 核磁気共鳴 (NMR)
劣化誘引元素	電子線マイクロアナリシス (EPMA)
ラジカル種及び濃度	電子スピン共鳴 (ESR)
熱分解速度	熱重量測定 (TG)
酸化開始温度	示差走査熱量測定 (DSC)
架橋度	示差走査熱量測定 (DSC) パルス法核磁気共鳴 (TD-NMR)
劣化による分子量変化 (低分子量成分)	ゲル浸透クロマトグラフィー (GPC)
老化防止剤などの配合剤	ガスクロマトグラフィー質量分析 (GC/MS) 液体クロマトグラフィー質量分析 (LC/MS)

## 2.1 劣化分析法

### 2.1.1 フーリエ変換赤外分光分析 (FT-IR) による劣化分析法

FT-IR ではポリマーの劣化により変化する官能基 (カルボニル基, ヒドロキシ基, カルボキシ基, 二重結合) を定性的, 定量的に検出することが可能で, 劣化検出法として多用される手法である. 酸化劣化などの劣化現象は一般に表面から進行するため, 表面分析法である全反射法 (ATR) が有効である. 注意すべき点は分析深さが数  $\mu\text{m}$  オーダーの表面になるため, 表面付着物の存在がデータを左右することである. 目には見えなくてもプラスチック表面には滑剤, 離型剤, ブルーム物 (又はブリード物), ゴム表面にはこれらに加えて老化防止剤, 加硫促進剤のブルーム物が存在することが多く, 溶剤で拭き取るなど適正な処理を行わなければ, ポリマー表面の劣化度を定量的に評価できなくなる.

図 6<sup>5)~7)</sup> には FT-IR の顕微 ATR 法で過酸化物質架橋剤のジクミルペルオキシド (DCP) で架橋したエチレンプロピレンゴム (EPDM) の表面の酸化劣化度合いを測定した結果を示す.  $50^\circ\text{C}$  で 40 日間熱劣化処理した

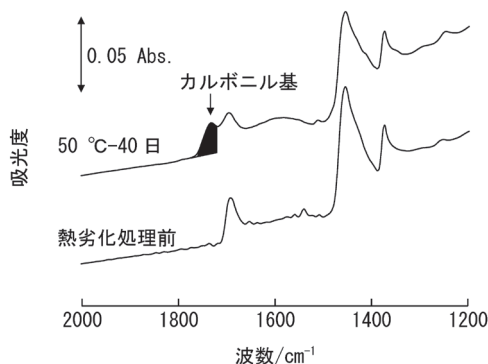


図 6 DCP 架橋 EPDM の FT-IR-ATR による劣化分析<sup>5~7)</sup>

EPDM では, 未処理では認められない  $1730\text{ cm}^{-1}$  のカルボニル基による吸収が出現し, 酸化劣化が進行している. FT-IR 法で劣化度を定量化するには測定ごとに吸光度の絶対値が変化するため, 劣化による変化の少ないピークを基準として劣化によるピーク強度を求める. 図 6 の例では  $1375\text{ cm}^{-1}$  の吸収 (A1375) を基準ピークとし  $1730\text{ cm}^{-1}$  の吸収 (A1730) の比 A1730/A1375 を求めて劣化度を定量化する.

### 2.1.2 示差走査熱量測定 (DSC) を用いた酸化開始温度 (IOT) による劣化分析法

高分子の劣化時に生じる自動酸化反応の過程でヒドロペルオキシ基が蓄積された状態にある加硫ゴム及びプラスチックが DSC 中で加熱されると, より少ないエネルギーで急激な酸化反応が生じる. この酸化反応が開始する温度を図 7<sup>5)~7)</sup> のように IOT (initial oxidation temperature) と呼び, IOT は劣化の進行に伴って, 低温側にシフトし, 劣化の指標になる<sup>8)9)</sup>.

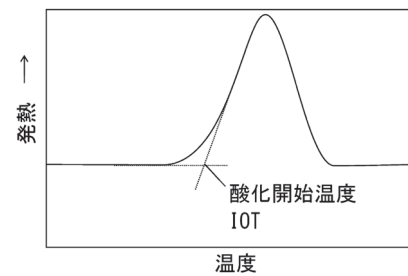


図 7 酸化開始温度測定模式図<sup>5)~7)</sup>

### 2.1.3 ゲル浸透クロマトグラフィー (GPC) による劣化分析法

ポリマーは酸化劣化, 加水分解, 疲労劣化など劣化過程で, 架橋反応と分子鎖切断反応が進行する. すなわち, ポリマーは劣化により平均分子量, 分子量分布が変化する. 分子量は材料強度に強く影響を与えるため, 分子量変化により劣化度を定量化するのは効果的である.

図 8 にポリカーボネート (PC), 低密度ポリエチレン

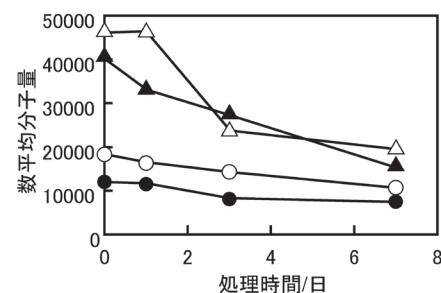


図 8 各種プラスチック試料の光劣化処理による数平均分子量の変化<sup>5)10)</sup>

○ PC, ● LDPE, △ PP, ▲ PS



(LDPE), ポリプロピレン (PP), ポリスチレン (PS) について, キセノンウェザーメーターで光劣化処理後に GPC 測定を行い, 光劣化処理に伴う数平均分子量の変化を調べた結果を示す<sup>5)10)</sup>. PC, LDPE, PP, PS の数平均分子量は処理時間の経過とともに低下しており, 分子鎖切断を伴いながら劣化が進行していることがわかる.

#### 2・1・4 電子スピン共鳴 (ESR) 法による劣化分析法

ESR 法は不対電子を対象とする分析法でラジカルや遷移金属が測定対象になる. 多くの劣化因子においてラジカルの発生が劣化に関与し, ラジカル量は劣化過程で発生したラジカルを反映して, 劣化度を示すケースがあることから, ESR は劣化検出法としても有効である. ただし, ラジカルの寿命はポリマー種, 酸化防止剤の種類と量, その置かれる環境によって影響を受け, また, ラジカルは発生と消滅を繰り返しているなどの理由により, ラジカル量が劣化度を直接示さないこともあることを注意すべきである.

図 9 にポリカーボネートの光劣化処理前後の ESR スペクトルを示す<sup>5)10)</sup>. 処理時間が 0, 1, 3, 7 日と経過すると  $g=2.004$  付近のピークが増大し, 劣化の進行過程でラジカルが発生, 蓄積されていることがわかる. 試料の誘電損失が大きくなるとピーク強度は低下するため, 標準試料のマンガンマーカの強度を基準として定量的扱いを行うのが望ましい. ラジカル量を有機ラジカルのピーク高さ/マンガンマーカ (3rd) のピーク高さにより相対ラジカル量として計算し, 各種プラスチック試料の光劣化処理によるラジカル量の変化を比較した結果を図 10 に示す<sup>5)10)</sup>. 光劣化処理時間の経過とともにラジカル量が顕著に増加したのは PC と PS で, LDPE, PP ではほとんど増加は認められなかった. PC と PS ではラジカルを生じやすく, その他はラジカルが生じにくいということではなく, 測定試料中に存在するラジカル

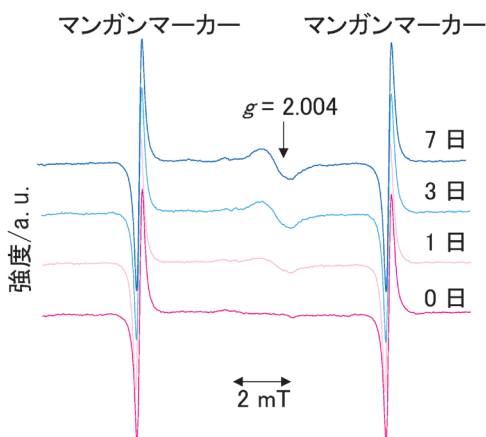


図 9 ポリカーボネートの光劣化処理前後の ESR スペクトル<sup>5)10)</sup>

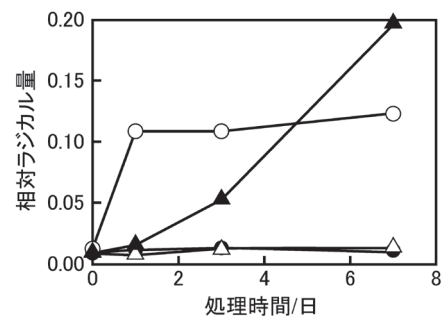


図 10 各種プラスチック試料の光劣化処理によるラジカル量の変化<sup>5)10)</sup>

○ PC, ● LDPE, △ PP, ▲ PS

量の差異があらわれている. すなわち, PC と PS では生成したラジカルが比較的安定な構造であることを示している.

#### 2・2 熱分析を用いた速度論解析による耐熱性評価

劣化は化学的構造変化を伴うという観点により, アレニウス式を用いた化学反応の速度論解析を活用して寿命を予測することが広く行われているが, 同様の取り扱いで熱重量測定 (TG), DSC などの熱分析を用いて化学反応の速度論解析を行うことで耐熱性を評価することが可能である. アレニウス式を用いた寿命予測と同じく, 劣化要因が温度のみであること, 劣化反応が単一の素反応であること, 拡散律速ではないこと, 加えて熱分析時の試料の温度分布が無視できることなどいくつかの仮定の下での解析になるが, 短時間評価法としての利便性は極めて高いため, 代表的方法を簡単に紹介する. しかし, 条件のある取り扱いのもとで成立するものであるため, 速度論の扱いを理解した上で活用するべきで, 少なくとも活性化エネルギー  $E_a$  が一定になる反応領域であることは確認すべきである. 詳細は良書<sup>11)12)</sup>を参考されたい.

##### 2・2・1 等温法による耐熱評価

一定温度  $T$  で劣化が進行し材料の特性値が  $C$  に至り, 同時に化学的構造あるいは物理的構造が変化する. 構造量を  $x$  とし, 通常速度式に従うとすると変化速度は式 (2.1) で与えられる<sup>11)12)</sup>.

$$\frac{dx}{dt} = Ae^{-E_a/RT} g(x) \dots\dots\dots (2.1)$$

この変化が材料特性値  $C$  の変化をもたらす, 特性値  $C$  に至った時の構造変化は劣化温度  $T$  が変化しても一定と考えると, 等温下である構造変化量及び特性値  $C$  に達する時間  $t$  は式 (2.2) で与えられる<sup>12)</sup>.

$$\ln t = \frac{E_a}{RT} + \text{Const.} \dots\dots\dots (2.2)$$

したがって、横軸に  $1/T$  を縦軸に  $\ln t$  をとることで、活性化エネルギー  $E_a$  が求まり、任意の温度での定温反応時間を算出できる。すなわち、複数の高温の保持温度  $T$  で熱分析を行い、一定の構造変化量までの時間  $t$  を測定することで、低温下での定温反応時間を求めることができる。

### 2.2.2 昇温法による耐熱評価

温度が変化する系では式 (2.1) の右辺は温度  $T$  の時間変化が分かれば積分可能で、この積分値が決まれば、特性値も決まる。すなわち積分値は劣化の尺度であり、劣化反応が定温反応であれ、非定温反応であれ積分値が等しければ劣化による特性変化も等しい。熱分析の昇温過程において、昇温速度  $\Phi_1$  で温度  $T_1$  に至ったときに特性値  $C$  になり、昇温速度  $\Phi_2$  では同じ  $C$  になるときの温度が  $T_2$  であった場合、式 (2.3) の関係が得られる<sup>11)12)</sup>。ただし、構造変化は単一の過程で進行する場合である。

$$\log \Phi_1 + 0.4567 \frac{E_a}{RT_1} = \log \Phi_2 + 0.4567 \frac{E_a}{RT_2} \dots (2.3)$$

縦軸に熱分析測定時の昇温速度  $\Phi$  の対数 ( $\log \Phi$ ) を、横軸にある重量減少率に達するまでの絶対温度  $T$  の逆数 ( $1/T$ ) をとることで  $E_a$  が得られ、これは小澤-Flynn-Wall 法と呼ばれる方法である。さらに、式 (2.4) の関係から定温反応時間  $t$  を求めることができる。

$$t = \frac{10^{(-2.315 - 0.4567 \frac{E_a}{RT_m}) E_a}}{\Phi_m R e^{-\frac{E_a}{RT}}} \dots (2.4)$$

ここで、 $\Phi_m$  と  $T_m$  はそれぞれ熱分析時の昇温速度とある重量減少率に達した時の絶対温度測定値である。すなわち、複数の昇温速度  $\Phi$  で熱分析を行い、一定の反応量に至る温度  $T$  を測定することで、式 (2.3) から活性化エネルギー  $E_a$  が求まり、式 (2.4) から任意の温度での定温反応時間  $t$  を簡便に求めることができる。

### 3 おわりに

寿命予測から得られる結果はあくまでも一定の予測法

で得られた予測寿命で、使用環境のばらつきや変化、製品個々のばらつき、促進条件と使用環境とのかい離などによって必ず現実の寿命と差異が生じる。寿命予測の実験を実施する人の視点では測定値のばらつきが予測値に影響することを実感していると察する。しかし、推定寿命〇年と数値化された予測結果は技術者・研究者の手を離れると強力な説得力を持って活用される。故に技術者・研究者は寿命予測結果を用いて適切な寿命評価結果をまとめる工夫も必要である。本稿が適切な寿命評価の一助になれば幸いである。

### 文 献

- 1) 早川 淨：“高分子材料の寿命とその予測”，早川淨編，p.34, (1989), (アイピーシー)。
- 2) 田村 優，岡本直樹：“ゴム・樹脂製品における故障解析と寿命予測”，田村優編，p.171, (2002), (日本テクノセンター)。
- 3) 成澤郁夫：“高分子の寿命予測と長寿命化技術”，大澤善次郎，成澤郁夫編，p.30 (2007), (エヌ・ティー・エス)。
- 4) 下村一普：“ゴム・樹脂製品における故障解析と寿命予測”，田村優編，p.197, (2002), (日本テクノセンター)。
- 5) 仲山和海：接着の技術誌，41 (4), 1 (2022)。
- 6) 仲山和海：日本ゴム協会誌，88, 221 (2015)。
- 7) 仲山和海：日本画像学会誌，56, 42 (2017)。
- 8) 仲山和海，渡邊智子，大武義人，古川睦久：日本ゴム協会誌，81, 447 (2008)。
- 9) 仲山和海，渡邊智子，大武義人，古川睦久：日本ゴム協会誌，81, 467 (2008)。
- 10) 仲山和海：日本電子 news, 50, 13 (2018)。
- 11) 小澤丈夫：“熱分析”，神戸博太郎編，p.88 (1975), (講談社)。
- 12) 小澤丈夫：“高分子の寿命予測と長寿命化技術”，大澤善次郎，成澤郁夫編，p.321 (2007), (エヌ・ティー・エス)。



仲山 和海 (Kazumi NAKAYAMA)  
 一般財団法人化学物質評価研究機構東京事業所高分子技術部技術第三課長  
 (〒345-0043 埼玉県北葛飾郡杉戸町下高野 1600 番地)。長崎大学大学院生産科学研究科博士後期課程修了。博士 (工学)。  
 《現在の研究テーマ》高分子材料の劣化と解析。  
 E-mail : nakayama-kazumi@ceri.jp