

## □ Kamal 式に基づく硬化度計算ソフト

### 目次

1. 本ソフトの狙いと構成
2. 基礎式
3. 各シートの説明
  - 3.1. 等速昇温硬化
  - 3.2. 一定温度硬化
4. 体験版
5. ロック解除の手順
6. 参考文献
7. 不具合発生時
8. ファイル掲載基準

## 1. 本ソフトの狙いと構成

本ソフト（Excel ファイル）は、(a). 一定速度昇温 および (b). 一定温度において、Kamal 式に従う樹脂材料の硬化反応が生じた場合の、硬化度および硬化速度（発熱量変化）と時間の関係をシミュレーションすることを目的としている。本ソフトは、次に示す 2 枚のシートで構成されています。

- i) 等速昇温硬化: 一定速度で昇温しながら樹脂を硬化させる場合における、材料パラメータならびに硬化条件の入力と、硬化度計算およびグラフの描画
- ii) 一定温度硬化: 一定温度で樹脂を硬化させる場合における、材料パラメータならびに硬化条件の入力と、硬化度計算およびグラフの描画
- iii) Calculation\_01: 等速昇温硬化の硬化反応計算シート
- iv) Calculation\_02: 一定温度硬化の硬化反応計算シート

ここで、「等速昇温硬化」と「一定温度硬化」の詳細は、「3. 各シートの説明」において説明します。本ソフトを使用する場合には、操作ミスなどによって表計算を破損してしまうことを防ぐため、ダウンロードした原本は保存し、コピーしたファイルを使用することを推奨します。

本ソフトを使用するためには、マクロの有効とセキュリティの許可が必要となります。詳細は、下の Web サイトなどをご参照ください（下記サイトは、本ソフトとは関係ありません）。

<https://sakusaku-office.com/excel/post-16231/>

また、Calculation\_01 および 02 は基礎式に従った計算を行っており、その詳細説明は本書では省きます。なお、これら 2 つのシートに関しては、表計算の破損を防ぐため編集不可としており、本ソフトを購入してもこれを解除することはできません。

本ソフトは、1 ライセンスで PC1 台での使用を前提としている。よって、複数の PC で使用する場合には、その台数分のライセンスを購入してください。

## 2. 基礎式

本ソフトで用いた硬化挙動計算の基礎式を説明する。本ソフトでは、次式で表される Kamal 式に基づいて硬化挙動を計算している。

$$\frac{d\alpha}{dt} = (K_1 + K_2\alpha^M)(1 - \alpha)^N \quad (1)$$

ここで、 $\alpha$ は硬化度、 $t$  (sec)は時間、 $M$ および $N$ は材料パラメータである。また、 $K_1$ および $K_2$ は次式により表される。

$$K_1 = K_a \exp\left(-\frac{E_a}{T}\right) \quad (2)$$

$$K_2 = K_b \exp\left(-\frac{E_b}{T}\right) \quad (3)$$

ここで、 $K_a$  (1/sec)、 $E_a$  (K)ならびに $K_b$  (1/sec)、 $E_b$  (K)は材料パラメータであり、 $T$  (K)は絶対温度である。また、硬化反応における発熱量を $Q$  (J/kg)としたとき、その時間変化 $dQ/dt$  (W/kg)は、総発熱量 $H$  (J/kg)により次式のように表される。 $Q$  (J/kg)は任意時刻までの発熱量

$$\frac{dQ}{dt} = H \frac{d\alpha}{dt} \quad (4)$$

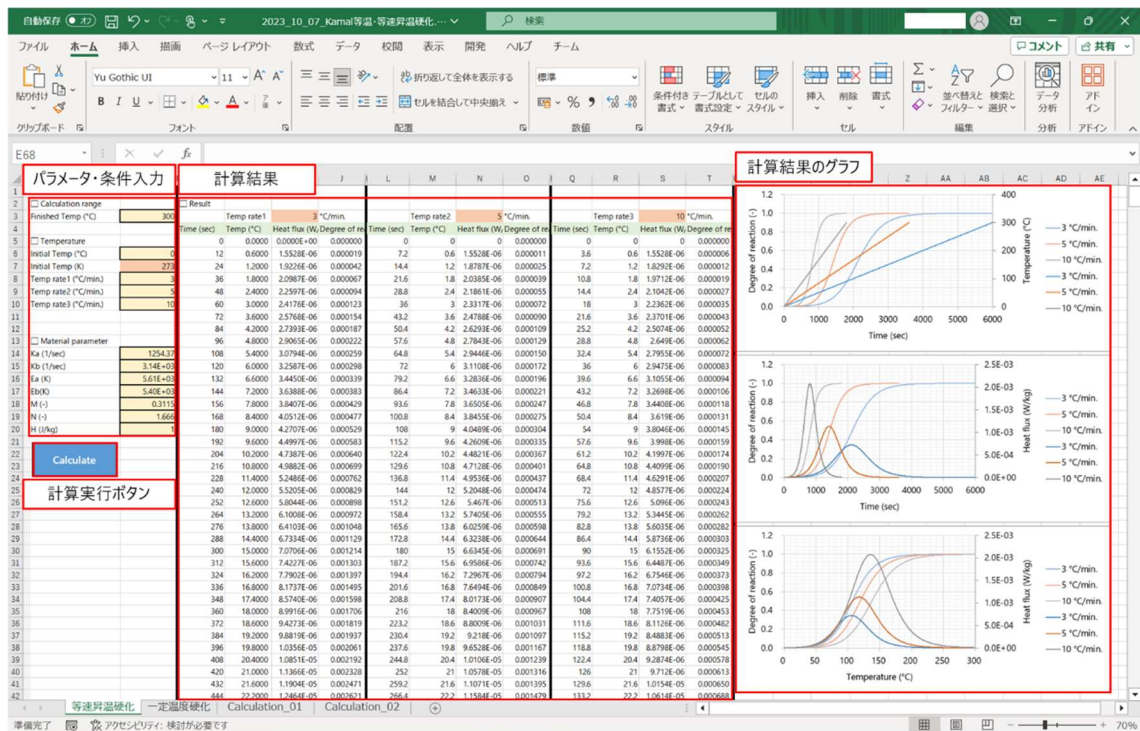
式(1)-(4)を離散化し、増分計算を行うことにより、時間と硬化度ならびに硬化速度の関係を計算した。

なお本 Excel ファイルでは、初期値として参考文献[1]に示されている事例の数値が入力されている。

### 3. 各シートの説明

本ソフトにおいて、材料パラメータ入力および硬化度計算結果の表示とグラフの描画を行う、「等速昇温硬化」と「一定温度硬化」シートに関して、その詳細を説明する。

#### 3.1. 等速昇温硬化



「等速昇温硬化」シートは、一定速度で昇温しながら樹脂を硬化させる場合における、材料パラメータならびに硬化条件の入力と、硬化度計算およびグラフの描画を行うシートである。

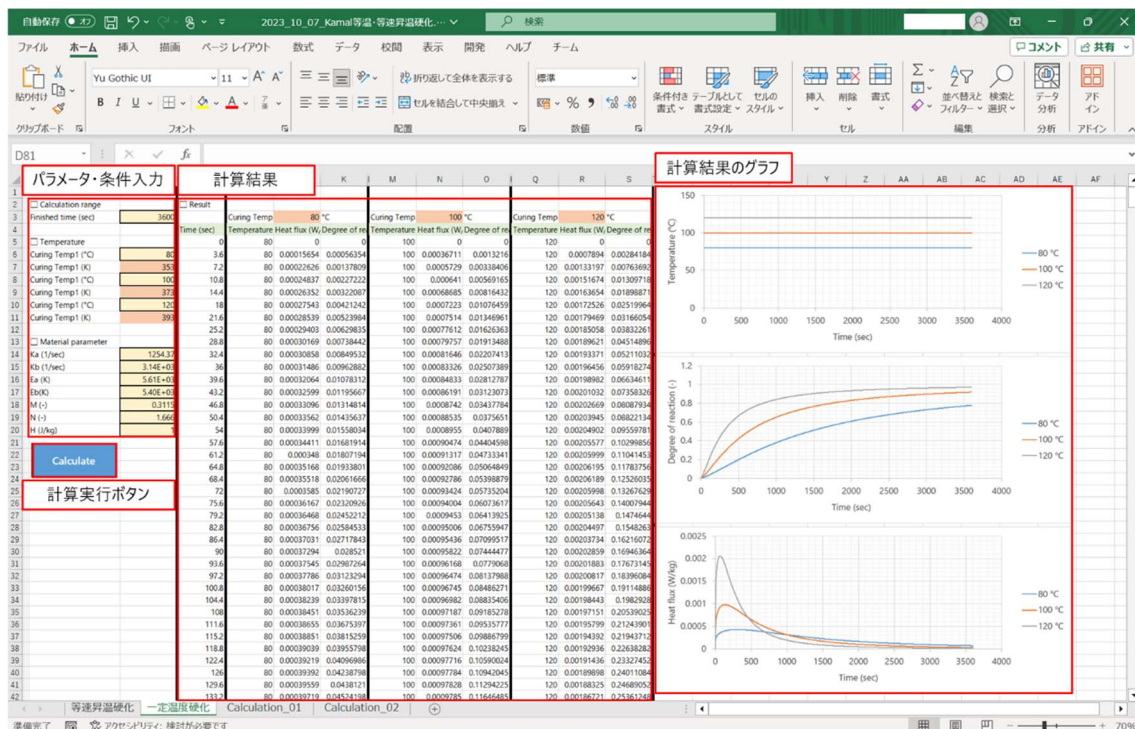
本シートの D, E 列は Kamal 式のパラメータおよび硬化条件の入力部である。まず、E3 は昇温硬化計算における最終温度である。続いて、E6-10 は昇温条件を表し、E6 に初期温度を摂氏で入力する。この時、E7 に絶対温度に変換された値が出力される。さらに、E8-10 には昇温速度を 3 つまで入力することができる。ただし、最終温度および初期温度を個別に定義することはできない。また、E14-20 は Kamal 式のパラメータであり、本書における「2. 基礎式」に記述したものとそれぞれ対応している。

本シートの G-T 列は、硬化反応計算の結果が出力される。E6-10 に入力した昇温条件に対応する硬化反応計算を実施し、その時間、温度、発熱量ならびに硬化度が出力される。

また本シートには予め 3 つのグラフが描画されており、それぞれ上から、硬化度（左軸）/温度（右軸）と時間、硬化度（左軸）/発熱量（右軸）と時間、硬化度（左軸）/発熱量（右軸）と温度を表す。

材料パラメータと計算条件を入力した後、計算実行ボタンを押すことによって硬化反応計算が実行され、G-T 列の計算結果とグラフが更新される。

### 3.2. 一定温度硬化



「一定温度硬化」シートは、一定温度で樹脂を硬化させる場合における、材料パラメータならびに硬化条件の入力と、硬化度計算およびグラフの描画を行うシートである。

本シートの D, E 列は Kamal 式のパラメータおよび硬化条件の入力部である。まず、E3 は一定温度硬化計算における終了時間である。続いて、E6-11 は硬化温度を表し、E6, E8, E10 に硬化温度を摂氏で3つまで入力することができる。この時、E7, E9, E11 に絶対温度に変換された値が出力される。ただし、終了時間を個別に定義することはできない。また、E14-20 は Kamal 式のパラメータであり、本書における「2. 基礎式」に記述したものとそれぞれ対応している。

本シートの G-S 列は、硬化反応計算の結果が出力される。E6-10 に入力した昇温条件に対応する硬化反応計算を実施し、その時間、温度、発熱量ならびに硬化度が出力される。

また本シートには予め 3 つのグラフが描画されており、それぞれ上から、温度と時間、硬化度と時間、発熱量と温度を表す。

材料パラメータと計算条件を入力した後、計算実行ボタンを押すことによって硬化反応計算が実行され、G-S 列の計算結果とグラフが更新される。

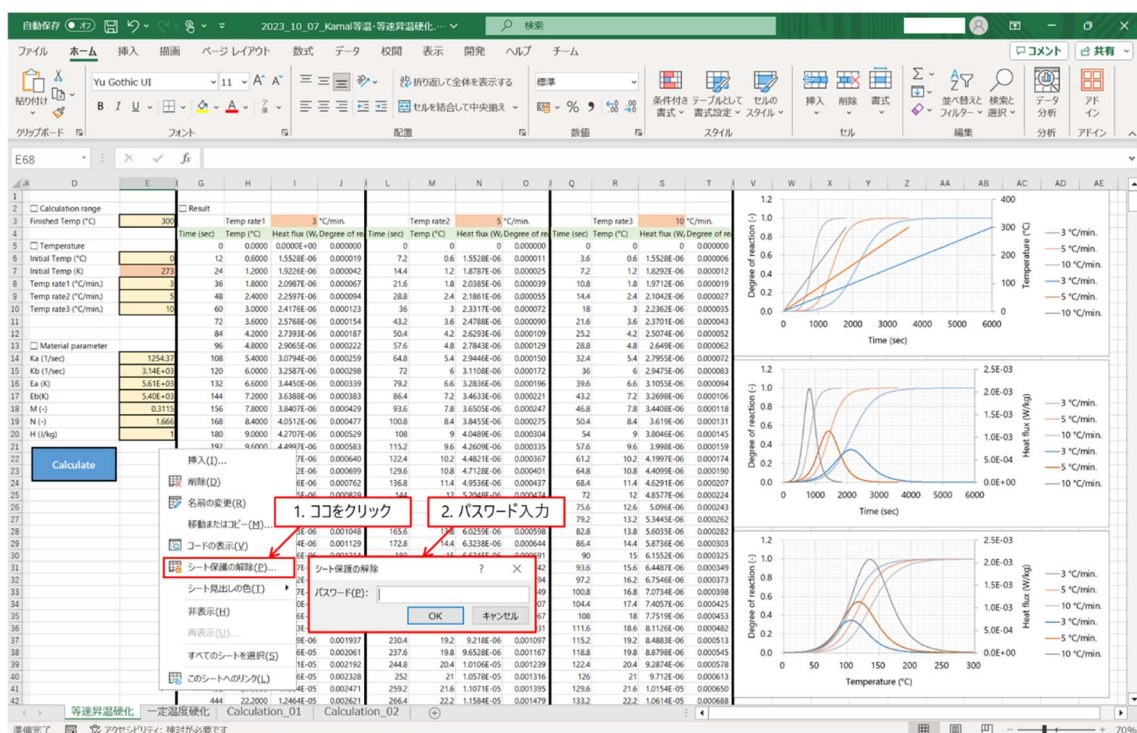
#### 4. 体験版

体験版では、「等速昇温硬化」と「一定温度硬化」における硬化パラメータのうち、それぞれ昇温速度と硬化温度のみ編集可能としている。購入後、Kamal 式のパラメータなどを編集可能となるロック解除キーを送付し、すべての機能を利用することができる。

なお、デフォルトで入力されている Kamal 式のパラメータは参考文献[1]の値を使用している。

#### 5. ロック解除の手順

本章では、購入後のロック解除手順を示す。



手順 1: 「一定温度硬化」シートおよび「等速昇温硬化」シートを右クリックする

手順 2: シート保護の解除をクリック

手順 3: パスワードを入力（パスワードは両方とも同じ）

※ 購入後に配布されるパスワードは、「一定温度硬化」シートおよび「等速昇温硬化」シートのみであり、Calculation\_01 および 02 のパスワードは配布されない。

#### 6. 参考文献

[1] T. Kosaka, K. Osaka and Y. Sawada, “Cure motion of resin by real-time measurement of refractive index using single-mode optical fibers”, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol. 59, pp. 391-397 (2010).



## 7. 不具合発生時（計算がうまくできなくなった時）

ダウンロードした原本は保存し、コピーしたファイルを使用することを推奨します。計算がうまくできなくなった時には、第 2 章に書かれている初期物性値を入力し直し、計算結果が表示されることを確認ください。それでも動作しない場合には、ファイルの破損が疑われるため、ダウンロード後未使用のファイルで計算し直してください。

## 8. ファイル掲載基準

### ・ソフトの概要

エポキシ等の熱硬化性樹脂の硬化状況をシミュレーションするために、一般的に Kamal の式が使用されている。本ソフトを用いることで、Kamal 式に従う熱硬化性材料の a.等速昇温硬化、b.一定温度硬化における硬化度等と時間の関係を詳細にシミュレーションすることができる。

本ソフトでは kamal の材料パラメーターや硬化条件等の加工パラメーターを変更可能である。

### ・作者への連絡先(メールアドレス、掲示板 等)

作者：科学計算.com

メールアドレス：scientificcalculation@gmail.com

### ・取り扱い種別(フリーソフト、シェアウェア 等)

取り扱い種別：本ソフトはシェアウェアになります。購入後にパスワードを入力することで、すべての機能を使用することが可能になります。購入前は、機能を制限した体験版としてご使用いただけます。

### ・動作環境

動作 OS：Windows10、Windows11 で確認済みになります

使用ソフト：マイクロソフト エクセル（EXCEL）上で動作するソフトになりますので、エクセルソフトを別途ご準備ください。

### ・インストール・アンインストール方法

本ソフトは、エクセル上でマクロを使用して動作させているため、インストール及びアンインストールは不要になります。ダウンロードした Zip ファイルを展開し、フォルダ内にある Kamal v1.0.xlsm をクリックしてご使用ください。また不要となった場合は Zip ファイル及び展開ファイルを削除してください。

・シェアウェアの場合、金額や送金方法など

金額：本ソフトは 15000 円になります。

送金方法：Vector のシェアレジでお支払い後に解除キーが案内されますので、説明書の手順に従ってパスワードを入力してください。