

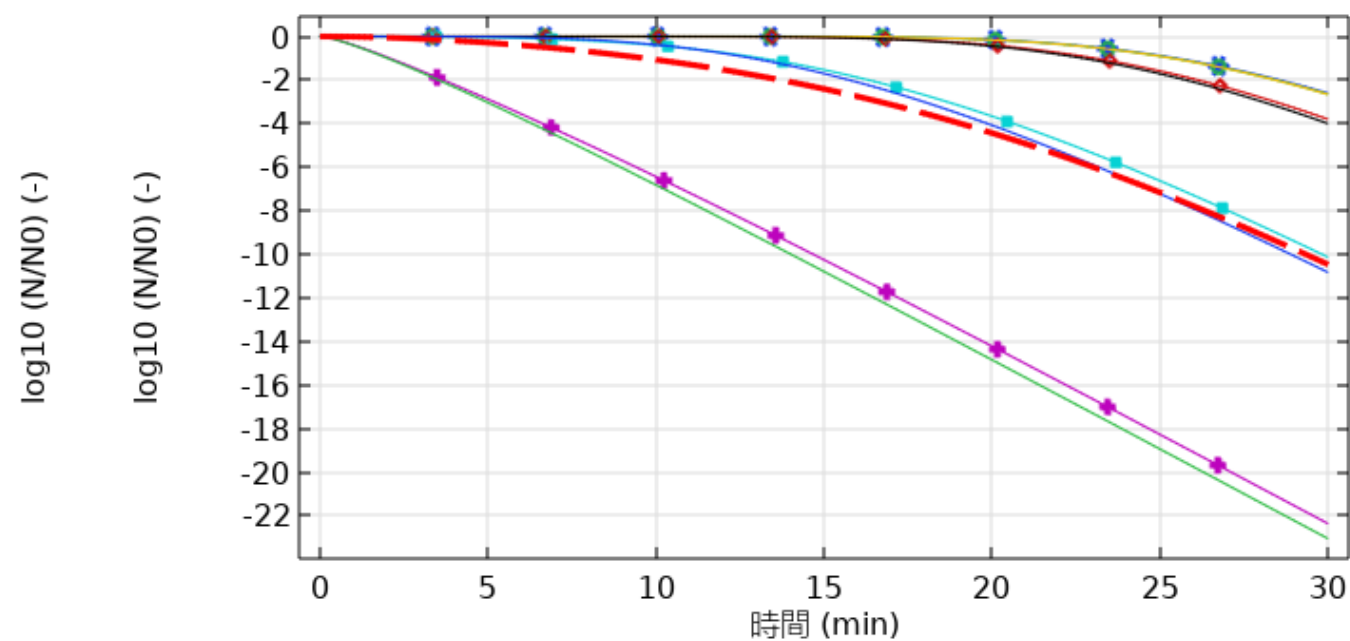
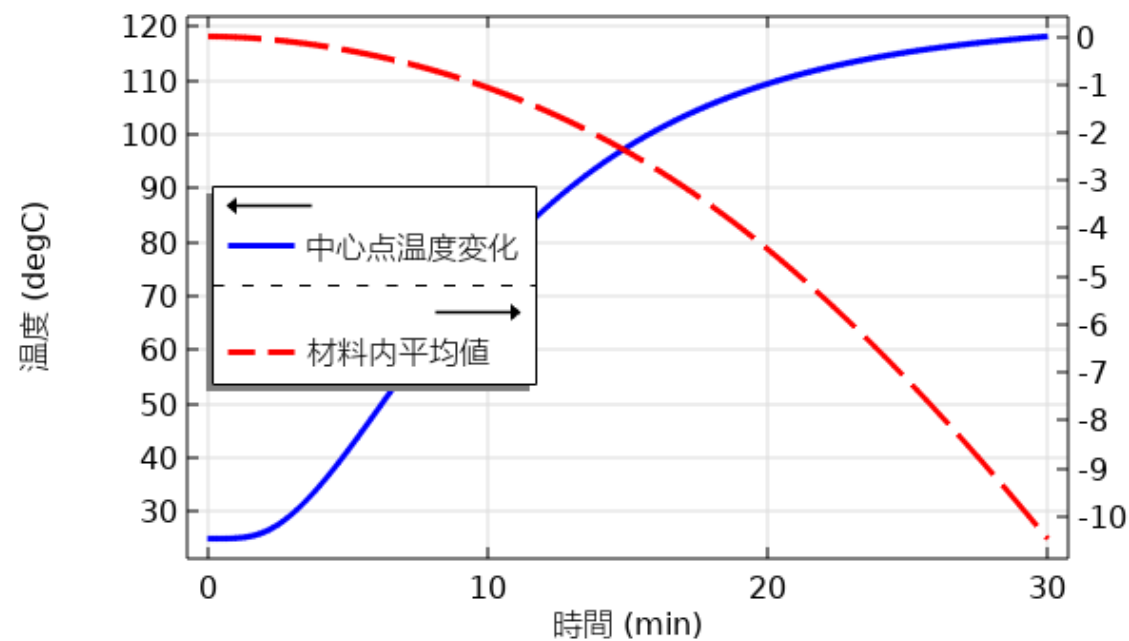
【概要】

- 例えば**缶詰**のような**円柱状食品**を**加熱殺菌**するケースをイメージしたアプリです。
- 対象食品は固体あるいは粘性の強いゲル・ペーストを想定していて、**食品内で流動は起こらない**と仮定します。
- 伝熱現象に関しては、食品周囲の流体（水蒸気や空気など）とその流体に接している食品のすべての表面の間で**熱伝達**、また食品内部では**非定常熱伝導**という熱移動現象が生じています。
- このアプリは**伝熱解析**と**微生物死滅解析**、 **$F_p$  値算出**を行います。
- このアプリでは、伝熱解析により**食品内部の温度変化**を求め、その結果に基づいて**食品内部の微生物死滅曲線**や**中心点の $F_p$  値を計算・可視化**します。
- 伝熱解析では、食品の**サイズ**（食品の半径・半分の高さ）や**物性値**（食品の熱伝導率・密度・比熱）、**加熱条件**（食品の初期温度、食品周囲の流体温度(主流温度)・熱伝達係数、処理時間）を自由に設定します。
- また、食品周囲の流体温度・熱伝達係数は、処理時間中、一定値とします。
- 微生物死滅解析では、ある温度（ **$D$  値の温度**）における想定した微生物の **$D$  値**と **$z$  値**を設定して、**一次反応速度式**に基づいて、**微生物死滅曲線**（log reduction）を計算します。
- さらに、 $F_p$  値算出用基準温度・ $z$  値を設定して、これらの値と中心点の温度変化を用いて、 **$F_p$  値**を計算します。
- 食品の領域をメッシュといわれる領域に分割して計算しますが、そのメッシュサイズ（メッシュ最大要素サイズ、境界層(第1層)厚さ）も変更可能です。
- **缶詰の加熱殺菌だけでなく、加熱調理中の円柱状食品の温度変化と微生物死滅を解析するアプリ**としても使用できます。



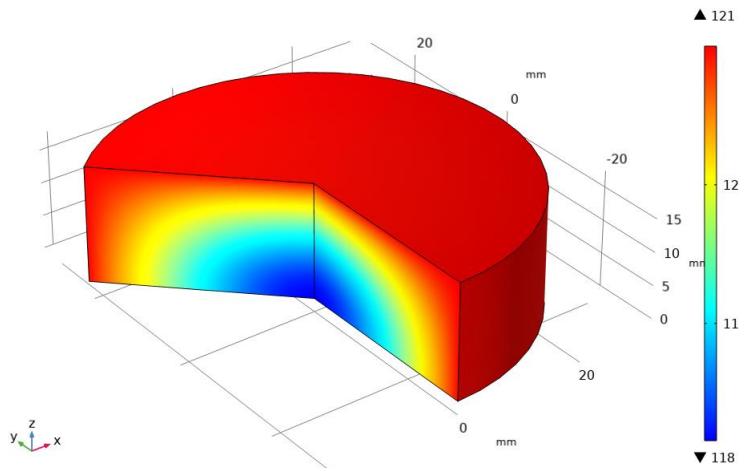
## 【概要（つづき）】

- 内部温度変化は3次元形状**アニメーション**で確認できます。
- 食品全体の平均微生物死滅曲線や中心点温度変化に基づいて算出された $F_p$ 値は，**1Dプロット（加熱時間と温度の関係）**で確認できます。
- 中心点を含め，複数点（Gauss-Legendre数値積分におけるGauss 9 pointsを基準）における温度変化や微生物死滅曲線も**1Dプロット（加熱時間と温度の関係）**で確認できます。
- 計算内容の詳細および結果は**Wordファイル**として保存することもできます。
- 中心点の温度変化や微生物死滅曲線， $F_p$ 値，また，平均温度変化および平均微生物死滅曲線は，数値として取り出すこともできます。



## 【計算内容】

- このアプリでは、食品の形状および計算条件の**対称性を考慮**して、**2次元回転軸対称問題として解析**します。
- 右図のように**食品の半径 (r軸)** と**食品半分の高さ (z軸)** からなるr-z平面を作成します。
- 食品の中心点の座標は $(r, z) = (0, 0)$ です。
- このr-z平面は、**中心軸 ( $r = 0$ )** および  **$z = 0$  の軸に関して対称**とみなすことができます。
- 中心軸 ( $r = 0$ ) を起点に、この平面を1回転させて (**回転軸対称**)、下図のように計算結果を**3次元的に可視化**します。



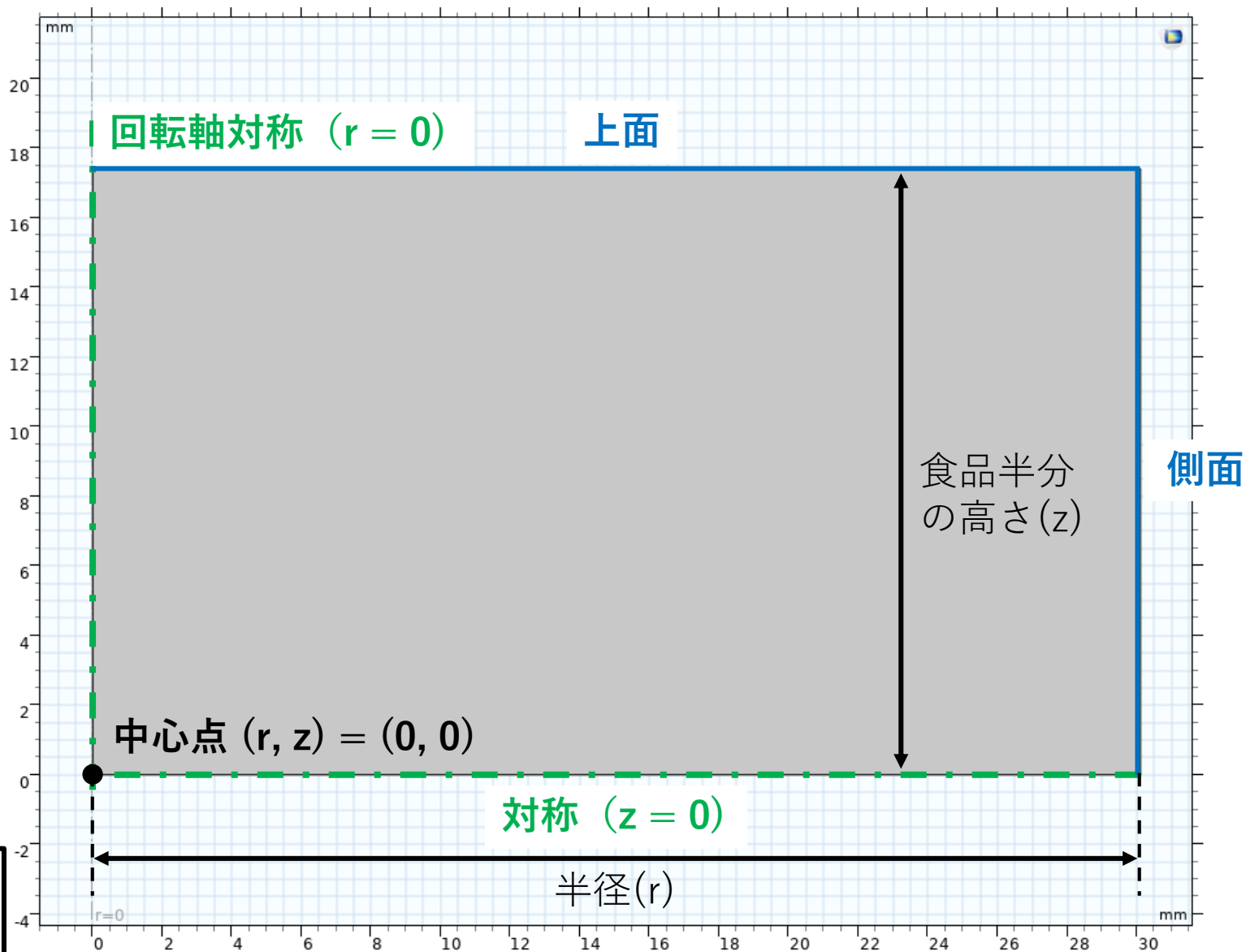
食品の形状および計算条件の対称性を考慮して、**実形状の1/4領域を計算対象として設定!!**



✓ 数値解析 (数値実験, 数値シミュレーション) では、形状や計算条件の対称性を考慮したり、低次元化 (例えば実際は3次元問題であるが、可能であれば2次元で解析する) したりする場合があります。計算コストを軽減させることが主な理由です。

## 【計算内容】 その1 伝熱解析

- 食品の半径 (r軸) と半分の高さ (z軸) からなるr-z平面を作成したとき、  
**食品の中心点の座標**  
 $(r, z) = (0, 0)$
- 初期条件：温度一定
- 境界条件
  - ①**上面と側面**：  
食品上面・側面と周囲流体の間で生じる熱伝達による熱流束を指定する条件  
✓周囲の流体温度(主流温度)と熱伝達係数を指定
  - ② **z = 0の軸**：  
軸対称
  - ③ **中心軸 (r=0の軸)**：  
回転軸対称



伝熱解析を実行するために、食品の**サイズ**（食品の半径・半分の高さ）や**物性値**（食品の熱伝導率・密度・比熱）、**加熱条件**（食品の初期温度[初期条件]、食品周囲の流体温度・熱伝達係数[境界条件①]、処理時間）を設定します。

※ここでの“食品周囲の流体温度”は“主流温度”を意味します。



## 【計算内容】 その2 微生物死滅解析

- 伝熱解析による温度変化の計算結果に基づいて、以下の一次反応速度式から食品内部の微生物死滅曲線を算出

$$\frac{d}{dt} \left[ \log_{10} \frac{N(r, z, t)}{N_0} \right] = -\frac{1}{D_r} 10^{\frac{T(r, z, t) - T_r}{z}} \quad \leftarrow \text{これらの関係をまとめた式}$$

または

$$\log_{10} \frac{N(r, z, t)}{N_0} = -\frac{1}{D_r} \int_0^t 10^{\frac{T(r, z, t) - T_r}{z}} dt$$

$N(r, z, t)$  : 座標  $(r, z)$ , 処理時間  $t$  (min)における微生物数 (CFU)

$N_0$  : 初期菌数 (CFU)

$\log_{10} N(r, z, t)/N_0$  : 微生物の対数減数值 log reduction (-)

$D_r$  : 温度  $T_r$  (°C)における想定した微生物の  $D$  値 (min)

$T_r$  : 想定した微生物の  $D$  値 (min)の温度 (°C)

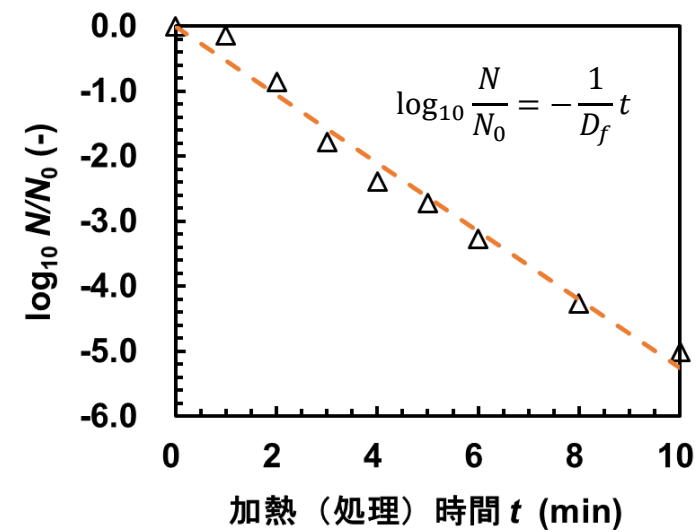
$z$  : 想定した微生物の  $z$  値 (°C)

$T(r, z, t)$  : 座標  $(r, z)$ , 処理時間  $t$  (min)における食品の温度 (°C)

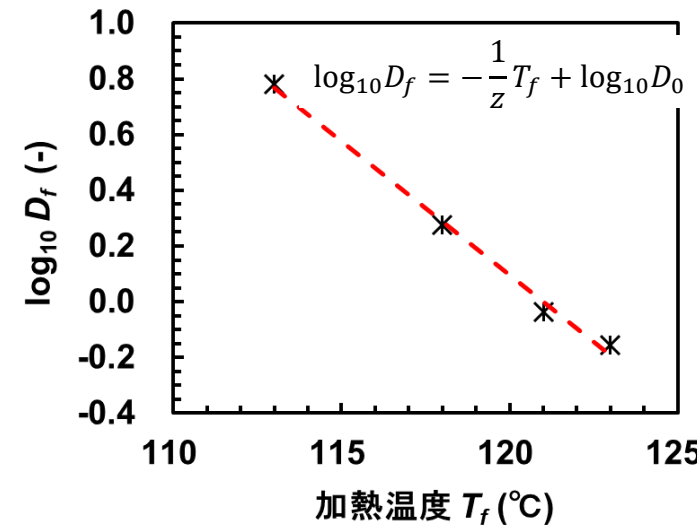
$t$  : 処理時間 (min)

微生物死滅解析を実行するために、想定した微生物のある温度 ( **$D$  値の温度**) における  **$D$  値**と  **$z$  値**を設定します。

ある一定温度において加熱 (処理) 時間と微生物数を測定し、微生物数あるいは生存率の対数值の関係を求めると**直線関係**が得られる。



加熱温度を変えて  $D$  値を測定し、 $D$  値の対数值と加熱温度の関係を求めると**直線関係**が得られる。



### ◆ 実際の計算では...

$T_r \Rightarrow T_{ref}$ ,  $D_r \Rightarrow D_0$ ,  $z \Rightarrow z_z$ ,  $10^{\frac{T(r, z, t) - T_r}{z}} \Rightarrow D_f$ ,  $\log_{10} N(r, z, t)/N_0 \Rightarrow \log N_{mb}$ と変数を置き換えて、 $\log N_{mb}$ の初期値を0として計算

## 【計算内容】 その3 $F_p$ 値算出

- 伝熱解析による食品の中心点温度変化の計算結果に基づいて、以下の式から中心点における  $F_p$  値変化を算出

$$\frac{d}{dt} [F_p] = 10^{\frac{T(0,0,t)-T_{FP}}{z_{FP}}}$$

または

$$F_p = \int_0^t 10^{\frac{T(0,0,t)-T_{FP}}{z_{FP}}} dt$$

$F_p$  : 処理時間  $t$  (min)における  $F_p$  値 (min)

$T(0,0,t)$  : 処理時間  $t$  (min)における食品の中心点温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{FP}$  :  $F_p$  値算出用基準温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$z_{FP}$  :  $F_p$  値算出用  $z$  値 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$t$  : 処理時間 (min)

$F_p$  値を算出するために、 **$F_p$  値算出用基準温度**と **$F_p$  値算出用  $z$  値**を設定します。

### ◆ 実際の計算では...

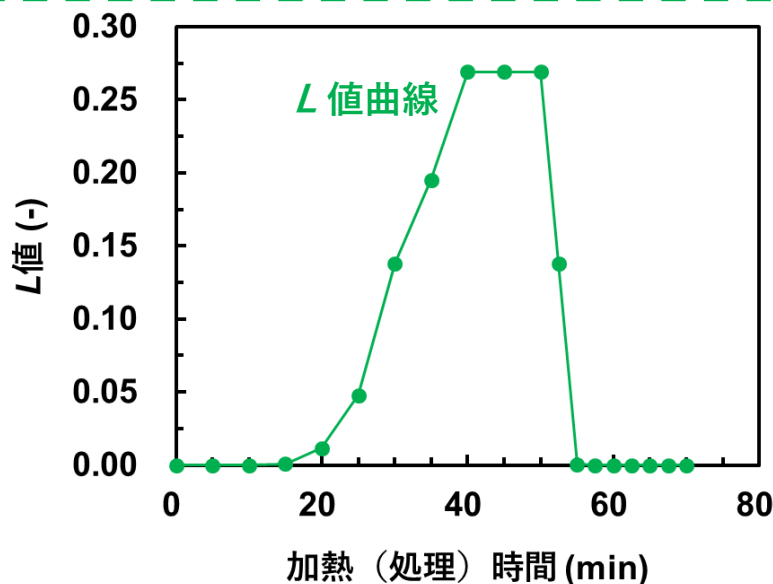
$10^{\frac{T(0,0,t)-T_{FP}}{z_{FP}}} \Rightarrow \text{DFF}$  と変数を置き換えて、 $F_p$  値の初期値を0として計算

- ✓ レトルト殺菌では、対象とする食品に応じて基準温度と  $z$  値を設定して  $F_p$  値を算出する。基準温度を  $121^{\circ}\text{C}$ 、 $z$  値を  $10^{\circ}\text{C}$ として算出された  $F_p$  値を  $F_0$  値 (エフォー) という。

右図の  $L$  値曲線と加熱 (処理) 時間軸 (x軸) で囲まれた面積が  $F_p$  値と等しい。

$$L = 10^{\frac{T(0,0,t)-T_{FP}}{z_{FP}}}$$

$$F_p = \int_0^t L dt$$



# 【アプリ使用手順】

### 1. 計算条件の設定 (入力)

食品の半径:	<input type="text" value="30.1"/>	mm
食品半分の高さ:	<input type="text" value="17.4"/>	mm
食品の熱伝導率:	<input type="text" value="0.682"/>	W/(m·K)
食品の密度:	<input type="text" value="958"/>	kg/m <sup>3</sup>
食品の比熱:	<input type="text" value="4350"/>	J/(kg·K)
食品の熱拡散率:	<input type="text" value="1.637·10&lt;sup&gt;-7&lt;/sup&gt;"/>	m <sup>2</sup> /s
食品の初期温度:	<input type="text" value="25"/>	degC
食品周囲の流体温度:	<input type="text" value="121"/>	degC
食品周囲の熱伝達係数:	<input type="text" value="5500"/>	W/(m <sup>2</sup> ·K)
D値の温度:	<input type="text" value="120"/>	degC
D値:	<input type="text" value="1.5"/>	min
z値:	<input type="text" value="10.7"/>	degC
Fp値算出用基準温度:	<input type="text" value="121"/>	degC
Fp値算出用z値:	<input type="text" value="10"/>	degC
処理時間:	<input type="text" value="30"/>	min
タイムステップ:	<input type="text" value="10"/>	s
メッシュ最大要素サイズ:	<input type="text" value="0.5"/>	mm
境界層(第1層)厚さ:	<input type="text" value="0.002"/>	mm

### 出力

中心点の温度, 微生物死滅, Fp値評価(値)

テーブル 1

8.85 e-12	AUTO	8.5 e-1	850 e-1	0.85			
--------------	------	------------	------------	------	--	--	--

平均温度と平均微生物死滅評価(値)

テーブル 2

8.85 e-12	AUTO	8.5 e-1	850 e-1	0.85			
--------------	------	------------	------------	------	--	--	--

2. 形状作成   3. メッシュ   4. 計算   5. 温度変化アニメーション

6. 平均微生物死滅プロット   7. Fp値

基本的に、見出しやボタン前に記された数字の順に操作してください。

1. 計算条件の設定(入力)
2. 形状作成
3. メッシュ
4. 計算
5. 温度変化アニメーション
6. 平均微生物死滅プロット
7. Fp値
8. 温度プロット
9. 微生物死滅プロット
10. レポート作成

8-1. 温度プロット (Gauss inner 9 points)   8-2. 温度プロット (Center lines)   8-3. 温度プロット (Surface lines)

9-1. 微生物死滅プロット (Gauss inner 9 points)   9-2. 微生物死滅プロット (Center lines)   9-3. 微生物死滅プロット (Surface lines)   10. レポート作成

# 【アプリ使用手順】

## 1. まず、“単位”に注意して、計算条件を設定します。

1. 計算条件の設定 (入力)

食品の半径:	30.1	mm
食品半分の高さ:	17.4	mm
食品の熱伝導率:	0.682	W/(m·K)
食品の密度:	958	kg/m <sup>3</sup>
食品の比熱:	4350	J/(kg·K)
食品の熱拡散率:	1.637·10 <sup>-7</sup>	m <sup>2</sup> /s
食品の初期温度:	25	degC
食品周囲の流体温度:	121	degC
食品周囲の熱伝達係数:	5500	W/(m <sup>2</sup> ·K)
D値の温度:	120	degC
D値:	1.5	min
z値:	10.7	degC
F <sub>p</sub> 値算出用基準温度:	121	degC
F <sub>p</sub> 値算出用z値:	10	degC
処理時間:	30	min
タイムステップ:	10	s
メッシュ最大要素サイズ:	0.5	mm
境界層(第1層)厚さ:	0.002	mm

出力

中心点の温度, 微生物死滅, F<sub>p</sub>値評価(値)

テーブル 1

8.85	8.5	850	0.85
e-12	e-1	e-1	

平均温度と平均微生物死滅評価(値)

テーブル 2

8.85	8.5	850	0.85
e-12	e-1	e-1	

### 伝熱解析の設定

- (1)食品のサイズ（食品の半径・半分の高さ）の設定
- (2)食品の物性値（食品の熱伝導率・密度・比熱）の設定  
※物性値は食品ごとに異なります。  
※各物性値は、加熱中、一定値とします。  
※熱拡散率は、熱伝導率、密度、および比熱の値と熱拡散率の定義式から自動計算されます。
- (3)加熱条件（食品の初期温度、食品周囲の流体温度(主流温度)・熱伝達係数、処理時間）の設定  
※熱伝達係数は、流体の性質や流れの特性などによって変化します。  
※食品周囲の流体温度（主流温度）および熱伝達係数は、加熱中、一定値とします。

### 微生物死滅解析の設定

- (4)ある温度（D値の温度）における想定した微生物の死滅パラメーター（D値とz値）の設定  
※温度によりD値は異なります。  
※微生物ごとにD値とz値は異なります。

### F<sub>p</sub> 値算出の設定

- (5)F<sub>p</sub> 値算出用基準温度とF<sub>p</sub> 値算出用z値の設定

### 計算条件の設定

- (6)計算条件（メッシュ最大要素サイズ、境界層(第1層)厚さ、タイムステップ）の設定  
※メッシュ最大要素サイズを小さく、また境界層(第1層)厚さを狭くすれば、計算領域（メッシュ）は細くなり、原則的に計算精度は上がりますが、計算コストがかかります（例えば計算時間が長くなります）。食品のサイズや使用する端末（パソコン、ワークステーションなど）のスペックや計算目的に応じて、これらの値を設定してください。まずはデフォルトで計算して、その計算結果や計算時間から、これらの値を変更してみてください。※ここでのタイムステップは、計算結果を取り出す時間刻みで、実際に計算を実行する時間刻みとは異なります。



# 【アプリ使用手順】

## 1. 計算条件の設定 (入力)

食品の半径:	<input type="text" value="30.1"/>	mm
食品半分の高さ:	<input type="text" value="17.4"/>	mm
食品の熱伝導率:	<input type="text" value="0.682"/>	W/(m·K)
食品の密度:	<input type="text" value="958"/>	kg/m <sup>3</sup>
食品の比熱:	<input type="text" value="4350"/>	J/(kg·K)
食品の熱拡散率:	<input type="text" value="1.637·10&lt;sup&gt;-7&lt;/sup&gt;"/>	m <sup>2</sup> /s
食品の初期温度:	<input type="text" value="25"/>	degC
食品周囲の流体温度:	<input type="text" value="121"/>	degC
食品周囲の熱伝達係数:	<input type="text" value="5500"/>	W/(m <sup>2</sup> ·K)
D値の温度:	<input type="text" value="120"/>	degC
D値:	<input type="text" value="1.5"/>	min
z値:	<input type="text" value="10.7"/>	degC
Fp値算出用基準温度:	<input type="text" value="121"/>	degC
Fp値算出用z値:	<input type="text" value="10"/>	degC
処理時間:	<input type="text" value="30"/>	min
タイムステップ:	<input type="text" value="10"/>	s
メッシュ最大要素サイズ:	<input type="text" value="0.5"/>	mm
境界層(第1層)厚さ:	<input type="text" value="0.002"/>	mm

## 出力

中心点の温度, 微生物死滅, Fp値評価(値)

テーブル 1

8.85 8.5 850 0.85  
e-12 e-1 e-1

平均温度と平均微生物死滅評価(値)

テーブル 2

8.85 8.5 850 0.85  
e-12 e-1 e-1



2. 形状作成



3. メッシュ



4. 計算



5. 温度変化アニメーション

2. これらのボタンをクリックすると、形状作成、メッシュ分割、計算を実行し、温度変化をアニメーションで確認できます。

✓ メッシュ分割（メッシング）では、上面と側面近傍において境界層メッシュを採用しています。境界層(第1層)厚さは、これらの側面に作成される第1層の境界層厚さです。そのほかの計算領域（食品）は三角形要素を使って自動的に分割します。設定する「メッシュ最大要素サイズ」とは、三角形を形成する1辺の最大サイズと考えてほぼ差し支えありません。



6. 平均微生物死滅プロット



7. Fp値

3. これらのボタンをクリックすると、食品全体の平均微生物死滅曲線や中心点温度変化に基づいて算出された $F_p$ 値を確認できます。



9-1. 微生物死滅プロット (Gauss inner 9 points)



9-2. 微生物死滅プロット (Center lines)



9-3. 微生物死滅プロット (Surface lines)



10. レポート作成

# 【アプリ使用手順】

## 1. 計算条件の設定 (入力)

食品の半径:	30.1	mm
食品半分の高さ:	17.4	mm
食品の熱伝導率:	0.682	W/(m·K)
食品の密度:	958	kg/m <sup>3</sup>
食品の比熱:	4350	J/(kg·K)
食品の熱拡散率:	1.637·10 <sup>-7</sup>	m <sup>2</sup> /s
食品の初期温度:	25	degC
食品周囲の流体温度:	121	degC
食品周囲の熱伝達係数:	5500	W/(m <sup>2</sup> ·K)
D値の温度:	120	degC
D値:	1.5	min
z値:	10.7	degC
Fp値算出用基準温度:	121	degC
Fp値算出用z値:	10	degC
処理時間:	30	min
タイムステップ:	10	s
メッシュ最大要素サイズ:	0.5	mm
境界層(第1層)厚さ:	0.002	mm



5. このボタンをクリックすると、計算内容の詳細をWordファイルとして出力します。Wordファイルでは支配方程式なども確認できます。必要であれば保存先やファイル名を指定して、Wordファイルを出力してください。

## 出力

中心点の温度、微生物死滅、Fp値評価(値)

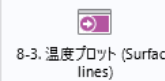
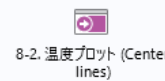
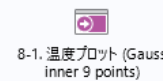
テーブル 1

8.85	8.5	850	0.85
e-12	e-1	e-1	

平均温度と平均微生物死滅評価(値)

テーブル 2

8.85	8.5	850	0.85
e-12	e-1	e-1	



4. これらのボタンをクリックすると、中心点を含め、複数点（Gauss-Legendre数値積分におけるGauss 9 pointsを基準）における温度変化や微生物死滅曲線を確認できます。

6. これらのボタンをクリックすると、中心点の温度変化・微生物死滅曲線・ $F_p$  値、食品全体の平均温度変化や平均微生物死滅曲線を数値で確認することができます。必要であれば、これらの値を、クリップボードへコピーして別形式のファイル（例えばExcelファイルなど）へ貼り付けることもできます。

# 【例題】

## 1. 計算条件の設定 (入力)

食品の半径:	30.1	mm
食品半分の高さ:	17.4	mm
食品の熱伝導率:	0.682	W/(m·K)
食品の密度:	958	kg/m <sup>3</sup>
食品の比熱:	4350	J/(kg·K)
食品の熱拡散率:	1.637·10 <sup>-7</sup>	m <sup>2</sup> /s
食品の初期温度:	25	degC
食品周囲の流体温度:	121	degC
食品周囲の熱伝達係数:	5500	W/(m <sup>2</sup> ·K)
D値の温度:	120	degC
D値:	1.5	min
z値:	10.7	degC
Fp値算出用基準温度:	121	degC
Fp値算出用z値:	10	degC
処理時間:	30	min
タイムステップ:	10	s
メッシュ最大要素サイズ:	0.5	mm
境界層(第1層)厚さ:	0.002	mm



2. 形状作成



3. メッシュ



4. 計算



5. 温度変化アニメーション



6. 平均微生物死滅プロット



7. Fp値

➤ 左の赤枠内に示された条件で計算を実行して、計算結果を確認してください。

## 出力

中心点の温度、微生物死滅、Fp値評価(値)

テーブル 1

8.85 8.5 850 0.85  
e-12 e-1 e-1

平均温度と平均微生物死滅評価(値)

テーブル 2

8.85 8.5 850 0.85  
e-12 e-1 e-1



8-1. 温度プロット (Gauss inner 9 points)



8-2. 温度プロット (Center lines)



8-3. 温度プロット (Surface lines)



9-1. 微生物死滅プロット (Gauss inner 9 points)



9-2. 微生物死滅プロット (Center lines)



9-3. 微生物死滅プロット (Surface lines)



10. レポート作成