

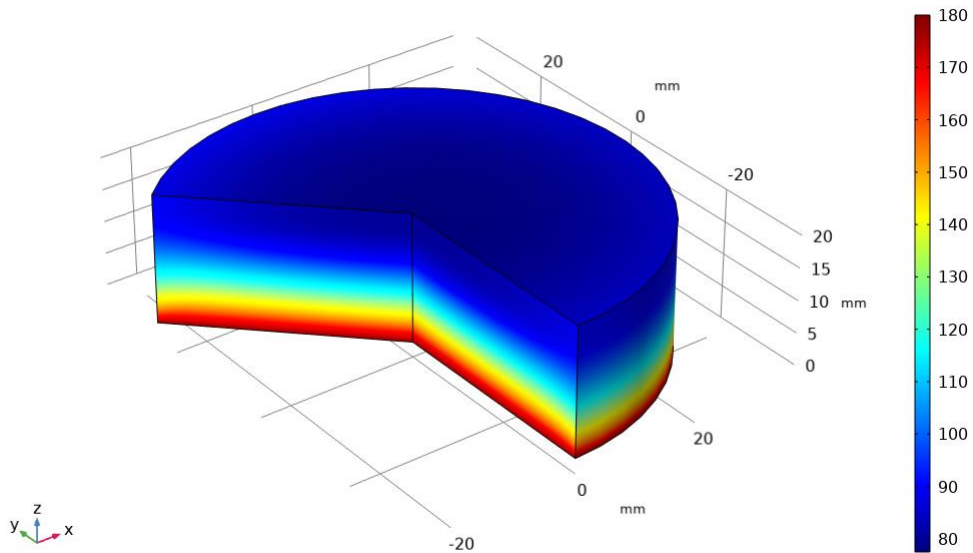
【概要】

- 例えば**ハンバーグパティ**のような**円柱状食品**を**フライパンの上で加熱調理**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。
- 円柱状食品を温度一定の金属板の上に置き、**まず底面側から加熱**し、一定時間が経過したら**食品を反転**させて、次に**上面側から加熱**します（金属板に接した**食品の底面 or 上面温度は金属板温度と等しい**と仮定します）。
- 食品周囲の流体（空気など）とその流体に接している食品表面（側面および上面 or 底面）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。金属板と食品との間の**放射伝熱は無視**しています。
- 食品の**サイズ**（食品の半径・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、食品の底面・上面温度(=金属板温度)、底面・上面からの加熱時間)を自由に設定し、**食品の表面および内部温度を計算・可視化**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。
- 中心点および上面と底面の2点、合計3点の温度変化は**1Dプロット**（**加熱時間と温度の関係**）で確認でき、また、表面・内部温度変化や中心高さ軸上の温度変化は**アニメーション**でも確認できます。
- 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（値）を取り出すこともできます。
- 食品周囲の流体温度や食品の底面・上面温度を食品の初期温度よりも低く設定すれば、**食品の冷却を解析するアプリ**としても使用できます（例えば、お皿にのせた円板状食品を冷蔵庫の中で冷却するような状況の解析）。

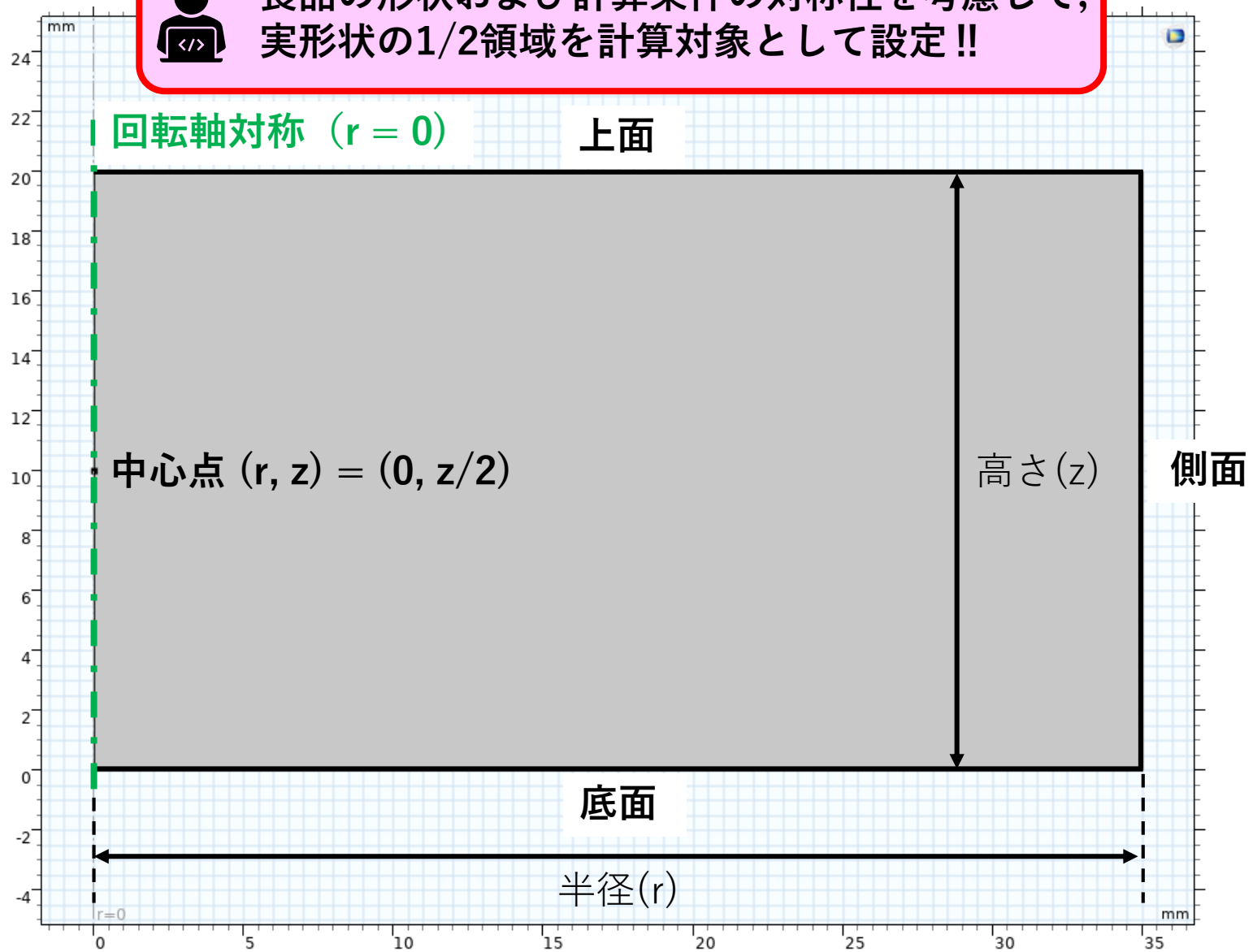


## 【計算内容】

- 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**高さ (z軸)** からなるr-z平面を作成します。
- このr-z平面は、**中心軸 (r = 0)** 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。



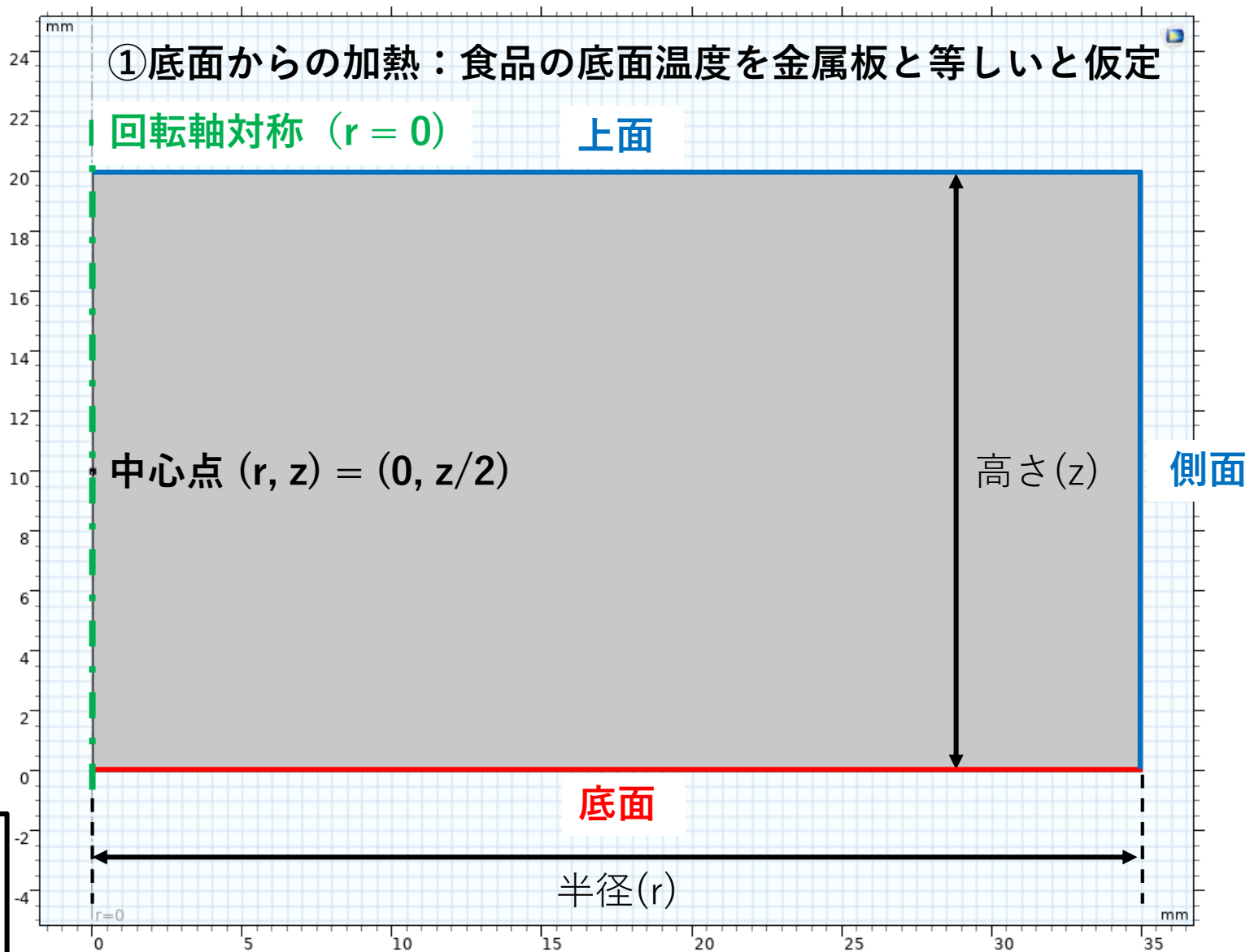
食品の形状および計算条件の対称性を考慮して、**実形状の1/2領域を計算対象として設定!!**



✓ 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 食品の底面を金属板に接触させて加熱する場合（第1段階加熱）

- 食品の半径（ $r$ 軸）と高さ（ $z$ 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**  
 $(r, z) = (0, \text{食品の高さ}/2)$
- 初期条件：温度一定
- 境界条件
  - ①**底面**：  
一定温度を指定する条件
  - ②**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
  - ③**中心軸（ $r=0$ の軸）**：  
回転軸対称

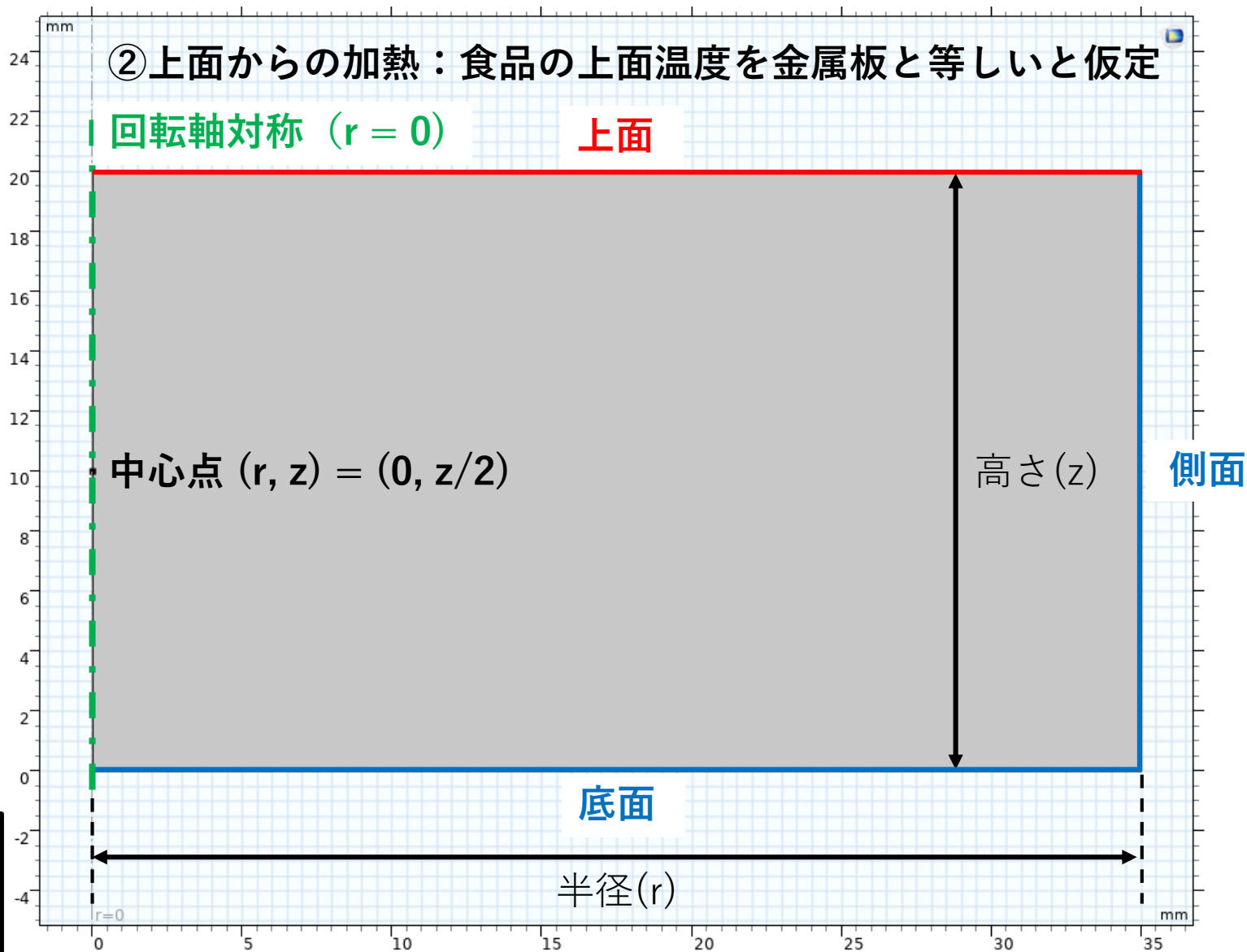


伝熱解析を実行するために、食品の**サイズ**（食品の半径・高さ）や**物性値**（食品の熱伝導率・密度・比熱），**加熱条件**（食品の初期温度 [初期条件]，食品周囲の流体温度・熱伝達係数 [境界条件②]，食品の底面・上面温度 [境界条件①]，底面・上面からの加熱時間）を設定します。

※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 食品の上面を金属板に接触させて加熱する場合（第2段階加熱）

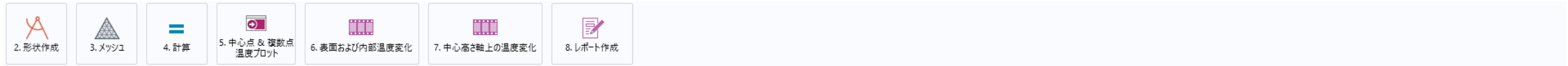
- 食品の半径（ $r$ 軸）と高さ（ $z$ 軸）からなる $r$ - $z$ 平面を作成したとき、  
**食品の中心点の座標**  
 $(r, z) = (0, \text{食品の高さ}/2)$
- 初期条件：第1段階加熱終了時の温度
- 境界条件
  - ①**上面**：  
一定温度を指定する条件
  - ②**底面と側面**：  
食品底面・側面と周囲流体の間で生じる熱伝達による熱流束を指定する条件  
✓周囲の流体温度(主流温度)と熱伝達係数を指定
  - ③**中心軸（ $r=0$ の軸）**：  
回転軸対称



※ここでの“食品周囲の流体温度”は“主流温度”を意味します。

伝熱解析を実行するために、食品の**サイズ**（食品の半径・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②]，食品の底面・上面温度 [境界条件①]，底面・上面からの加熱時間）を設定します。

# 【アプリ使用手順】



1. 計算条件の設定 (入力)

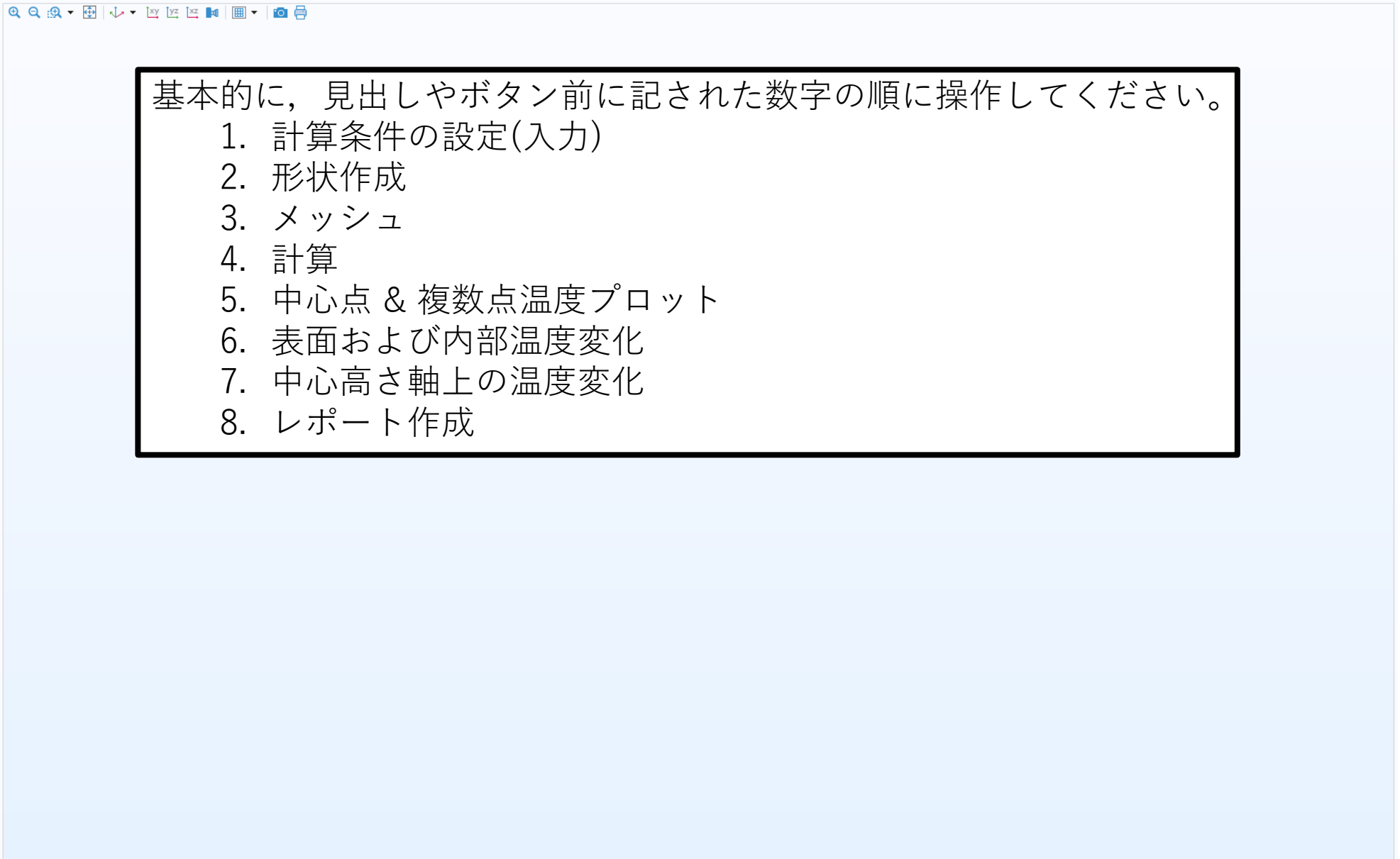
|               |  |                       |
|---------------|--|-----------------------|
| 食品の半径:        | <input type="text" value="50"/>                                | mm                    |
| 食品の高さ:        | <input type="text" value="20"/>                                | mm                    |
| 食品の熱伝導率:      | <input type="text" value="0.4"/>                               | W/(m·K)               |
| 食品の密度:        | <input type="text" value="1080"/>                              | kg/m <sup>3</sup>     |
| 食品の比熱:        | <input type="text" value="2500"/>                              | J/(kg·K)              |
| 食品の熱拡散率:      | <input type="text" value="1.481·10&lt;sup&gt;-7&lt;/sup&gt;"/> | m <sup>2</sup> /s     |
| 食品の初期温度:      | <input type="text" value="10"/>                                | °C                    |
| 食品周囲の流体温度:    | <input type="text" value="100"/>                               | °C                    |
| 食品周囲の熱伝達係数:   | <input type="text" value="20"/>                                | W/(m <sup>2</sup> ·K) |
| 食品の底面・上面温度:   | <input type="text" value="180"/>                               | °C                    |
| (1)底面からの加熱時間: | <input type="text" value="180"/>                               | s                     |
| (2)上面からの加熱時間: | <input type="text" value="180"/>                               | s                     |
| メッシュ最大要素サイズ:  | <input type="text" value="1"/>                                 | mm                    |
| 境界層(第1層)厚さ:   | <input type="text" value="0.002"/>                             | mm                    |
| タイムステップ:      | <input type="text" value="5"/>                                 | s                     |

出力

中心点温度評価(値)

テーブル 1

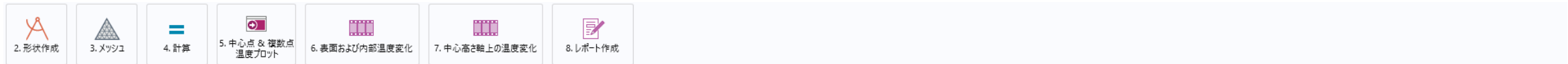
|      |     |      |      |
|------|-----|------|------|
| 8.85 | 8.5 | 8.50 | 0.85 |
| 8.72 | 8.1 | 8.1  | 0.85 |



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. 中心点 & 複数点温度プロット
6. 表面および内部温度変化
7. 中心高さ軸上の温度変化
8. 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:        | 50                     | mm                    |
| 食品の高さ:        | 20                     | mm                    |
| 食品の熱伝導率:      | 0.4                    | W/(m·K)               |
| 食品の密度:        | 1080                   | kg/m <sup>3</sup>     |
| 食品の比熱:        | 2500                   | J/(kg·K)              |
| 食品の熱拡散率:      | 1.481·10 <sup>-7</sup> | m <sup>2</sup> /s     |
| 食品の初期温度:      | 10                     | °C                    |
| 食品周囲の流体温度:    | 100                    | °C                    |
| 食品周囲の熱伝達係数:   | 20                     | W/(m <sup>2</sup> ·K) |
| 食品の底面・上面温度:   | 180                    | °C                    |
| (1)底面からの加熱時間: | 180                    | s                     |
| (2)上面からの加熱時間: | 180                    | s                     |
| メッシュ最大要素サイズ:  | 1                      | mm                    |
| 境界層(第1層)厚さ:   | 0.002                  | mm                    |
| タイムステップ:      | 5                      | s                     |

出力

中心点温度評価(値)

テーブル 1

|      |     |      |      |
|------|-----|------|------|
| 8.85 | 8.5 | 8.50 | 0.85 |
| 8.72 | 8.1 | 8.1  | 0.85 |

## 1. まず、“単位”に注意して、計算条件を設定します。

(1)食品のサイズ（食品の半径・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、食品の底面・上面温度、(1)底面からの加熱時間、(2)上面からの加熱時間）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。

※食品の底面・上面温度は金属板（フライパンなど）の温度と等しいと仮定します。

※まず底面側を金属板温度で一定時間加熱し、次に上面側を金属板温度で一定時間加熱しますので、それぞれの条件での加熱時間を設定します。

※(1)底面からの加熱時間、(2)上面からの加熱時間は、それぞれの面を金属板に接触させた場合の加熱時間です。（トータルの加熱時間は(1)と(2)を加えた時間）

(4)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）は細かくなり、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はいかがでしょうか。

※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】



3. 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。

1. 計算条件の設定 (入力)

|               |                        |                       |
|---------------|------------------------|-----------------------|
| 食品の半径:        | 50                     | mm                    |
| 食品の高さ:        | 20                     | mm                    |
| 食品の熱伝導率:      | 0.4                    | W/(m·K)               |
| 食品の密度:        | 1080                   | kg/m <sup>3</sup>     |
| 食品の比熱:        | 2500                   | J/(kg·K)              |
| 食品の熱拡散率:      | 1.481·10 <sup>-7</sup> | m <sup>2</sup> /s     |
| 食品の初期温度:      | 10                     | °C                    |
| 食品周囲の流体温度:    | 100                    | °C                    |
| 食品周囲の熱伝達係数:   | 20                     | W/(m <sup>2</sup> ·K) |
| 食品の底面・上面温度:   | 180                    | °C                    |
| (1)底面からの加熱時間: | 180                    | s                     |
| (2)上面からの加熱時間: | 180                    | s                     |
| メッシュ最大要素サイズ:  | 1                      | mm                    |
| 境界層(第1層)厚さ:   | 0.002                  | mm                    |
| タイムステップ:      | 5                      | s                     |

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、計算結果の確認ができます。

- ✓ メッシュ分割（メッシング）では、上面・底面・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。
- ✓ 中心点および上面と底面の2点、合計3点の温度変化は1Dプロット（加熱時間と温度の関係）で確認できます。中心点の座標は(r, z)=(0, 食品の高さ/2)であることに注意してください。
- ✓ 表面および内部温度変化や中心高さ軸上の温度変化はアニメーションでも確認できます。

出力

中心点温度評価(値)

テーブル 1

|      |     |      |      |
|------|-----|------|------|
| 8.85 | 8.5 | 8.50 | 0.85 |
| 8.72 | 8.1 | 8.1  | 0.85 |

4. このボタンをクリックすると、中心点の温度変化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:        | 50                     | mm                    |
| 食品の高さ:        | 20                     | mm                    |
| 食品の熱伝導率:      | 0.4                    | W/(m·K)               |
| 食品の密度:        | 1080                   | kg/m <sup>3</sup>     |
| 食品の比熱:        | 2500                   | J/(kg·K)              |
| 食品の熱拡散率:      | 1.481·10 <sup>-7</sup> | m <sup>2</sup> /s     |
| 食品の初期温度:      | 10                     | °C                    |
| 食品周囲の流体温度:    | 100                    | °C                    |
| 食品周囲の熱伝達係数:   | 20                     | W/(m <sup>2</sup> ·K) |
| 食品の底面・上面温度:   | 180                    | °C                    |
| (1)底面からの加熱時間: | 180                    | s                     |
| (2)上面からの加熱時間: | 180                    | s                     |
| メッシュ最大要素サイズ:  | 1                      | mm                    |
| 境界層(第1層)厚さ:   | 0.002                  | mm                    |
| タイムステップ:      | 5                      | s                     |



- 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。
- 1回の反転（まず底面側から加熱し、一定時間が経過したら食品を反転させて、次に上面側から加熱）のみで、安全に加熱調理ができるような調理条件（サイズや物性値、加熱条件）を検討してください。その際、美味しさや過加熱（例えば、焦げ付きがないか）に関しても想定してください。

出力

中心点温度評価(値)

テーブル 1

|      |     |      |      |
|------|-----|------|------|
| 8.85 | 8.5 | 8.50 | 0.85 |
| 8.12 | 8.1 | 8.1  | 0.85 |