

1. 書籍などの情報源の活用法

【農産物および食品の熱物性値が取り纏められている書籍】

- 食品製造・流通データ集編集委員会編(1998). 食品製造・流通データ集. (産業調査会事典出版センター)
- 日本食品工学会編 (2006). 食品工学ハンドブック. (朝倉書店)
- 日本熱物性学会編 (2008). 新編 熱物性ハンドブック. (養賢堂)
- Sarvacos, G.D. and Maroulis, Z.B. (2001). Transport Properties of Foods. (Marcel Dekker, Inc)
- Rao, M.A., Rizvi, S.S.H. and Datta, A.K. (2005). Engineering Properties of Foods 3rd ed. (CRC Press)
- Rahman, M.S. (2009). Food Properties Handbook 2nd ed. (CRC Press)
- Heldman, D.R., Lund, D.B. and Sabliov. C. (2018). Handbook of Food Engineering 3rd ed. (CRC Press)

2. 物性の推算法 -2.1 密度-

(1) 密度の加成性を考慮した推算式

$$\rho = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (x_i / \rho_i)}$$

ρ : 食品の密度 (kg/m³)

ρ_i : 各成分の密度 (kg/m³)

x_i : 各成分の質量分率 (-)

i : 各成分 T : 温度 (°C)

各成分の密度:

水: $\rho_w = 9.9718 \times 10^2 + 3.1439 \times 10^{-3} T - 3.7574 \times 10^{-3} T^2$

たんぱく質: $\rho_p = 1.3299 \times 10^3 - 5.1840 \times 10^{-1} T$

脂質: $\rho_f = 9.2559 \times 10^2 - 4.1757 \times 10^{-1} T$

炭水化物: $\rho_c = 1.5991 \times 10^3 - 3.1046 \times 10^{-1} T$

食物繊維: $\rho_{fb} = 1.3115 \times 10^3 - 3.6589 \times 10^{-1} T$

灰分: $\rho_m = 2.4238 \times 10^3 - 2.8063 \times 10^{-1} T$

2. 物性の推算法 -2.1 密度-

(2) 密度の加成性を考慮した推算式(試料が空隙構造を有する場合)

$$\rho = \frac{(1 - \varepsilon)}{\sum_{i=1}^n (x_i / \rho_i)}$$

ρ : 食品の密度 (kg/m³)

ρ_i : 各成分の密度 (kg/m³)

x_i : 各成分の質量分率 (-)

i : 各成分

ε : 空隙率 (-)

2. 物性の推算法 -2.2 比熱-

(1) Siebelの式・・・高水分の野菜や果実

$$C_p = 3.349 \underline{\underline{X_w^w}} + 0.8372 \quad (\text{凍結点以上})$$

$$C_p = 1.256 \underline{\underline{X_w^w}} + 0.8372 \quad (\text{凍結点以下})$$

水分

食品に応じて推算方法・推算式を使い分ける必要がある。

(2) Charmの式・・・食品の各成分の比熱を考慮した推算式

$$C_p = 2.093 \underline{\underline{X_f^w}} + 1.256 \underline{\underline{X_{NS}^w}} + 4.187 \underline{\underline{X_w^w}}$$

脂質 無脂固形分 水分

(3) ChoiとOkosの式・・・食品の各成分の比熱を考慮した推算式

$$C_p = 4.180 \underline{\underline{X_w^w}} + 1.711 \underline{\underline{X_p^w}} + 1.928 \underline{\underline{X_f^w}} + 1.547 \underline{\underline{X_c^w}} + 0.908 \underline{\underline{X_a^w}}$$

水分 たんぱく質 脂質 炭水化物 灰分

C_p : 比熱 kJ/(kg·K) X_i^w : 各成分の質量分率 i : 各成分

w : 水 p : たんぱく質 f : 脂質 c : 炭水化物 a : 灰分 NS : 無脂固形分

2. 物性の推算法 -2.2 比熱-

(4) 比熱の加成性を考慮した推算式

$$C_p = \sum_i C_{pi} X_i^w$$

$$\sum_i X_i^w = 1$$

【加成性】混合物や化合物のある性質を示す量が、それらを構成する成分の量の和に等しくなる性質。

C_p : 比熱 kJ/(kg·K) C_{pi} : 各成分の比熱 kJ/(kg·K)

T : 温度 °C i : 各成分

X_i^w : 各成分の質量分率 (-)

たんぱく質 $\underline{\underline{C_{pp}}} = 2.0082 + 1.2089 \times 10^{-3} T - 1.3129 \times 10^{-6} T^2$

脂質 $\underline{\underline{C_{pf}}} = 1.9842 + 1.4733 \times 10^{-3} T - 4.8008 \times 10^{-6} T^2$

炭水化物
または糖質 $\underline{\underline{C_{pc}}} = 1.5488 + 1.9625 \times 10^{-3} T - 5.9399 \times 10^{-6} T^2$

食物繊維 $\underline{\underline{C_{pfb}}} = 1.8459 + 1.8306 \times 10^{-3} T - 4.6509 \times 10^{-6} T^2$

灰分 $\underline{\underline{C_{pa}}} = 1.0926 + 1.8896 \times 10^{-3} T - 3.6817 \times 10^{-6} T^2$

水 $\underline{\underline{C_{pw}}} = 4.1762 - 9.0864 \times 10^{-5} T + 5.4731 \times 10^{-6} T^2$

2. 熱物性の推算法 -2.1 比熱-

比熱の加成性を考慮した推算式 $C_p = \sum_i C_{pi} X_i^w$ を用いた計算手順

1. 式(a)~(f)より、与えられた温度 T [°C]における各成分の比熱 C_{pi} [kJ/(kg·°C)]を算出する。

たんぱく質 $\underline{\underline{C_{pp}}} = 2.0082 + 1.2089 \times 10^{-3} T - 1.3129 \times 10^{-6} T^2 \dots$ 式(a)

脂質 $\underline{\underline{C_{pf}}} = 1.9842 + 1.4733 \times 10^{-3} T - 4.8008 \times 10^{-6} T^2 \dots$ 式(b)

炭水化物
または糖質 $\underline{\underline{C_{pc}}} = 1.5488 + 1.9625 \times 10^{-3} T - 5.9399 \times 10^{-6} T^2 \dots$ 式(c)

食物繊維 $\underline{\underline{C_{pfb}}} = 1.8459 + 1.8306 \times 10^{-3} T - 4.6509 \times 10^{-6} T^2 \dots$ 式(d)

灰分 $\underline{\underline{C_{pa}}} = 1.0926 + 1.8896 \times 10^{-3} T - 3.6817 \times 10^{-6} T^2 \dots$ 式(e)

水 $\underline{\underline{C_{pw}}} = 4.1762 - 9.0864 \times 10^{-5} T + 5.4731 \times 10^{-6} T^2 \dots$ 式(f)

2. 各成分の比熱 C_{pi} [kJ/(kg·°C)]に各成分の質量分率 X_i^w [-]をかける(乗算)。
例えば、 $C_{pp} \times X_p^w$ (たんぱく質), $C_{pf} \times X_f^w$ (脂質), $C_{pc} \times X_c^w$ (炭水化物または糖質), $C_{pfb} \times X_{fb}^w$ (食物繊維), $C_{pa} \times X_a^w$ (灰分), $C_{pw} \times X_w^w$ (水)を計算する。
3. すべての成分に関する $C_{pi} \times X_i^w$ を加え(加算), 食品の比熱 C_p [kJ/(kg·°C)]を求める。
例えば,

$$C_p = C_{pp} \times X_p^w + C_{pf} \times X_f^w + C_{pc} \times X_c^w + C_{pfb} \times X_{fb}^w + C_{pa} \times X_a^w + C_{pw} \times X_w^w$$

(1) Riedelの式・・・糖液や果汁などの水溶液 (温度 T 0~80 °C)

$$k = (0.565 + 1.80 \times 10^{-3} T - 0.581 \times 10^{-5} T^2) (1 - 0.54 X_s^w)$$

固形分

(2) Sweatの式

$$k = 0.148 + 0.493 X_w^w \cdots \text{水分60 \%以上の果実と野菜}$$

$$k = 0.080 + 0.52 X_w^w \cdots \text{水分60~80 \% , 温度0~60 °Cの肉}$$

水分

(3) 食品を構成する各成分の熱伝導率を考慮した推算式

ChoiとOkosの式

$$k = 0.2051 X_c^w + 0.2 X_p^w + 0.175 X_f^w + 0.135 X_a^w + 0.61 X_w^w$$

Sweatの式

$$k = 0.25 X_c^w + 0.155 X_p^w + 0.161 X_f^w + 0.135 X_a^w + 0.58 X_w^w$$

炭水化物 たんぱく質 脂質 灰分 水分

k : 熱伝導率 W/(m·K) X_i^w : 各成分の質量分率 i : 各成分

w : 水 p : たんぱく質 f : 脂質 c : 炭水化物 a : 灰分 s : 固形分

(4) 食品の組成や構造を加味した伝熱モデル - 並列モデル -

$$k = \sum_i k_i X_i^v$$

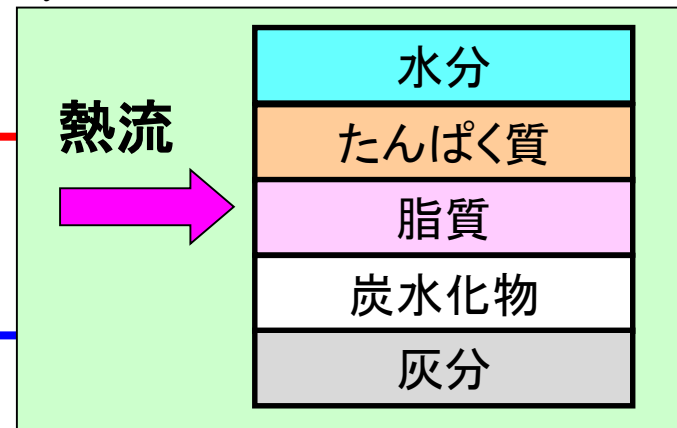
$$\sum_i X_i^v = 1$$

k : 熱伝導率 W/(m·K) k_i : 各成分の熱伝導率

T : 温度 °C

X_i^v : 各成分の体積分率 (-)

i : 各成分



各成分の熱伝導率

水 $\underline{k_w} = 5.7109 \times 10^{-1} + 1.7625 \times 10^{-3} T - 6.7036 \times 10^{-6} T^2$

たんぱく質 $\underline{k_p} = 1.7881 \times 10^{-1} + 1.1958 \times 10^{-3} T - 2.7178 \times 10^{-6} T^2$

脂質 $\underline{k_f} = 1.8071 \times 10^{-1} - 2.7604 \times 10^{-4} T - 1.7749 \times 10^{-7} T^2$

炭水化物
または糖質 $\underline{k_c} = 2.0141 \times 10^{-1} + 1.3874 \times 10^{-3} T - 4.3312 \times 10^{-6} T^2$

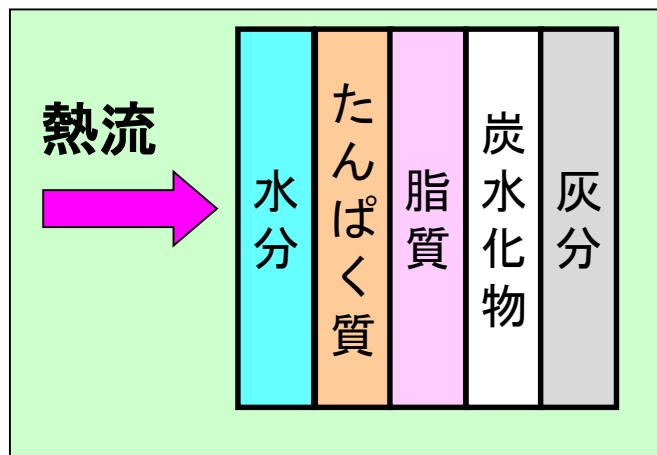
食物繊維 $\underline{k_{fi}} = 1.8331 \times 10^{-1} + 1.2497 \times 10^{-3} T - 3.1683 \times 10^{-6} T^2$

灰分 $\underline{k_a} = 3.2962 \times 10^{-1} + 1.4011 \times 10^{-3} T - 2.9069 \times 10^{-6} T^2$

(5) 食品の組成や構造を加味した伝熱モデル – 直列モデル –

$$\frac{1}{k} = \sum_i \frac{X_i^v}{k_i}$$

$$\sum_i X_i^v = 1$$



質量分率から体積分率への換算

$$X_i^v = \frac{X_i^w / \rho_i}{\sum_{j=1}^n X_j^w / \rho_j}$$

各成分の熱伝導率

水 $\underline{k_w} = 5.7109 \times 10^{-1} + 1.7625 \times 10^{-3} T - 6.7036 \times 10^{-6} T^2$

たんぱく質 $\underline{k_p} = 1.7881 \times 10^{-1} + 1.1958 \times 10^{-3} T - 2.7178 \times 10^{-6} T^2$

脂質 $\underline{k_f} = 1.8071 \times 10^{-1} - 2.7604 \times 10^{-4} T - 1.7749 \times 10^{-7} T^2$

炭水化物
または糖質 $\underline{k_c} = 2.0141 \times 10^{-1} + 1.3874 \times 10^{-3} T - 4.3312 \times 10^{-6} T^2$

食物繊維 $\underline{k_{fi}} = 1.8331 \times 10^{-1} + 1.2497 \times 10^{-3} T - 3.1683 \times 10^{-6} T^2$

灰分 $\underline{k_a} = 3.2962 \times 10^{-1} + 1.4011 \times 10^{-3} T - 2.9069 \times 10^{-6} T^2$

2. 物性の推算法 —2.3 熱伝導率—

並列モデル $k = \sum_i k_i X_i^v$ による熱伝導率の推算方法

1. 式(g)～(l)より、与えられた温度 T [°C]における各成分の熱伝導率 k_i [W/(m·K)]を算出する。

各成分の熱伝導率

水 $\underline{k_w} = 5.7109 \times 10^{-1} + 1.7625 \times 10^{-3} T - 6.7036 \times 10^{-6} T^2 \dots$ 式(g)

たんぱく質 $\underline{k_p} = 1.7881 \times 10^{-1} + 1.1958 \times 10^{-3} T - 2.7178 \times 10^{-6} T^2 \dots$ 式(h)

脂質 $\underline{k_f} = 1.8071 \times 10^{-1} - 2.7604 \times 10^{-4} T - 1.7749 \times 10^{-7} T^2 \dots$ 式(i)

炭水化物
または糖質 $\underline{k_c} = 2.0141 \times 10^{-1} + 1.3874 \times 10^{-3} T - 4.3312 \times 10^{-6} T^2 \dots$ 式(j)

食物繊維 $\underline{k_{fi}} = 1.8331 \times 10^{-1} + 1.2497 \times 10^{-3} T - 3.1683 \times 10^{-6} T^2 \dots$ 式(k)

灰分 $\underline{k_a} = 3.2962 \times 10^{-1} + 1.4011 \times 10^{-3} T - 2.9069 \times 10^{-6} T^2 \dots$ 式(l)

2. 各成分の熱伝導率 k_i [W/(m·K)]に各成分の体積分率 X_i^v [-]をかける(乗算)。
例えば、 $k_w \times X_w^v$ (水), $k_p \times X_p^v$ (たんぱく質), $k_f \times X_f^v$ (脂質), $k_c \times X_c^v$ (炭水化物または糖質), $k_{fi} \times X_{fi}^v$ (食物繊維), $k_a \times X_a^v$ (灰分)を計算する。
3. すべての成分に関する $k_i \times X_i^v$ を加え(加算)、食品の熱伝導率 k [W/(m·K)]を求める。
例えば,
$$k = k_w \times X_w^v + k_p \times X_p^v + k_f \times X_f^v + k_c \times X_c^v + k_{fi} \times X_{fi}^v + k_a \times X_a^v$$

(6) Randomモデル

試料を構成する各成分が、無秩序に分布しているとしたモデル

$$k = k_w^{X_w^v} \times k_p^{X_p^v} \times k_f^{X_f^v} \times k_c^{X_{fc}^v} \times k_{fi}^{X_{fi}^v} \times k_a^{X_a^v}$$

k : 熱伝導率 W/(m·K)

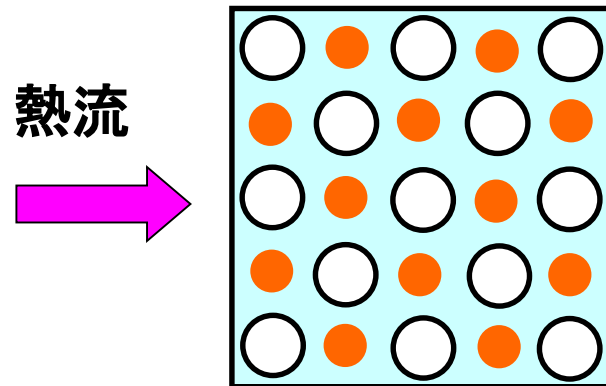
k_i : 各成分の熱伝導率

X_i^v : 各成分の体積分率 (-)

i : 各成分

(7) 多層分散系モデル

連続相（例えば水）中に他の成分（球形）が分散していると
したモデル



$$\frac{k}{k_{cont.}} = \frac{1 - 2 \sum_i X_i^v \frac{(1 - \sigma_i)}{(2 + \sigma_i)}}{1 + \sum_i X_i^v \frac{(1 - \sigma_i)}{(2 + \sigma_i)}}$$

$$\sigma_i = \frac{k_i}{k_{cont.}}$$

- k : 熱伝導率 W/(m·K)
- k_i : 各成分の熱伝導率
- $k_{cont.}$: 連続相の熱伝導率
- X_i^v : 各成分の体積分率 (-)
- i : 各成分

(1) Reidel(Dickerson)の式

$$\alpha = 0.088 \times 10^{-6} + (\alpha_w - 0.088 \times 10^{-6}) \times X_w^w$$

(2) Martensの式

$$\alpha = \{0.05736 X_w^w + 0.00028(T + 273)\} \times 10^{-6}$$

α : 熱拡散率 m^2/s α_w : 水の熱拡散率 m^2/s

X_w^w : 水の質量分率 - T : 温度 $^{\circ}\text{C}$

(3) 食品の組成や構造を加味したモデル - 並列モデル -

$$\alpha = \sum_i \alpha_i X_i^v$$

$$\sum_i X_i^v = 1$$

α : 熱拡散率 mm^2/s α_i : 各成分の熱拡散率

T : 温度 $^{\circ}\text{C}$ i : 各成分

X_i^v : 各成分の体積分率 (-)

各成分の熱拡散率

これらの式における熱拡散率の単位に注意 (mm^2/s)

水 $\underline{\underline{\alpha_w}} = 1.3168 \times 10^{-1} + 6.2477 \times 10^{-4} T - 2.4022 \times 10^{-6} T^2$

たんぱく質 $\underline{\underline{\alpha_p}} = 6.8714 \times 10^{-2} + 4.7578 \times 10^{-4} T - 1.4646 \times 10^{-6} T^2$

脂質 $\underline{\underline{\alpha_f}} = 9.8777 \times 10^{-2} - 1.2569 \times 10^{-4} T - 3.8286 \times 10^{-8} T^2$

炭水化物
または糖質 $\underline{\underline{\alpha_c}} = 8.0842 \times 10^{-2} + 5.3052 \times 10^{-4} T - 2.3218 \times 10^{-6} T^2$

食物繊維 $\underline{\underline{\alpha_{fi}}} = 7.3976 \times 10^{-2} + 5.1902 \times 10^{-4} T - 2.2202 \times 10^{-6} T^2$

灰分 $\underline{\underline{\alpha_a}} = 1.2461 \times 10^{-1} + 3.7321 \times 10^{-4} T - 1.2244 \times 10^{-6} T^2$

2. 物性の推算法 -2.4 熱拡散率-

並列モデル $\alpha = \sum_i \alpha_i X_i^v$ による熱拡散率の推算方法

1. 式(m)~(r)より, 与えられた温度 T [°C]における各成分の熱拡散率 α_i [mm²/s]を算出する。

各成分の熱拡散率

これらの式における熱拡散率の単位に注意 (mm²/s)

水 $\alpha_w = 1.3168 \times 10^{-1} + 6.2477 \times 10^{-4} T - 2.4022 \times 10^{-6} T^2 \dots$ 式(m)

たんぱく質 $\alpha_p = 6.8714 \times 10^{-2} + 4.7578 \times 10^{-4} T - 1.4646 \times 10^{-6} T^2 \dots$ 式(n)

脂質 $\alpha_f = 9.8777 \times 10^{-2} - 1.2569 \times 10^{-4} T - 3.8286 \times 10^{-8} T^2 \dots$ 式(o)

炭水化物
または糖質 $\alpha_c = 8.0842 \times 10^{-2} + 5.3052 \times 10^{-4} T - 2.3218 \times 10^{-6} T^2 \dots$ 式(p)

食物繊維 $\alpha_{fi} = 7.3976 \times 10^{-2} + 5.1902 \times 10^{-4} T - 2.2202 \times 10^{-6} T^2 \dots$ 式(q)

灰分 $\alpha_a = 1.2461 \times 10^{-1} + 3.7321 \times 10^{-4} T - 1.2244 \times 10^{-6} T^2 \dots$ 式(r)

2. 各成分の熱拡散率 α_i [mm²/s]に各成分の体積分率 X_i^v [-]をかける(乗算)。
例えば, $\alpha_w \times X_w^v$ (水), $\alpha_p \times X_p^v$ (たんぱく質), $\alpha_f \times X_f^v$ (脂質), $\alpha_c \times X_c^v$ (炭水化物または糖質), $\alpha_{fi} \times X_{fi}^v$ (食物繊維), $\alpha_a \times X_a^v$ (灰分)を計算する。
3. すべての成分に関する $\alpha_i \times X_i^v$ を加え(加算), 食品の熱拡散率 α [mm²/s]を求める。
例えば,
$$\alpha = \alpha_w \times X_w^v + \alpha_p \times X_p^v + \alpha_f \times X_f^v + \alpha_c \times X_c^v + \alpha_{fi} \times X_{fi}^v + \alpha_a \times X_a^v$$

(4) 熱拡散率の定義式から推算する方法(間接的方法)

熱拡散率 α [m^2/s] は, 熱伝導率 k [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$], 密度 ρ [kg/m^3], および比熱 c_p [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]を用いて, 以下のように定義される。

$$\alpha = \frac{k}{c_p \rho}$$

同条件における熱伝導率, 比熱, および密度の推算値または測定値を上式に代入して熱拡散率を推算する。