

日常生活空間のサーマルカメラによる 継続的な観測に基づく食材表面の温度予測

松野 拓斗† 角所 考‡

1. はじめに

コンピュータビジョンの分野では、従来から物体や人物の認識や追跡等、カメラ画像を用いた様々な処理の実現が試みられてきた[1][2][3]。これらの多くは、各瞬間に得られる情報のみを用いて実現される処理であるが、近年は、監視カメラや IoT 機器等の普及によって我々の日常生活空間の様々な場所へのカメラの設置が進んだ結果、高齢者の非日常的な行動の検知[4]や子供の危険状況の検出[5]など、日常生活空間の継続的な観測に基づく処理の実現も試みられている。また、利用されるカメラは、カラーカメラに加え、近年は対象までの距離も得られる RGB-D カメラも利用され始めているが、その他に、調理状況認識を目的とした研究[6]等では、サーマルカメラを利用したものも見られる。上記のような状況を踏まえると、サーマルカメラを用いた日常生活空間の継続的な観測に基づく処理として、日常生活空間中に放置された様々な食材の温度を継続的に観測し、その後の温度予測をすることで、品質管理等に利用する可能性が考えられる。これに関連する従来研究として、食材加熱後の表面温度から内部の温度を予測する研究[7]等があるが、上のように日常生活空間中に放置された食材の温度予測を考える場合、冷凍庫から取り出された直後などは食材が凍っている状況も考えられ、その場合の温度変化は相変化によって食材が融けるまでの温度上昇が緩やかになる。そこで本研究では、このような相変化も含めた食材の温度予測を試みる。

2. 食材端部、中心部が受ける熱影響

食材を長さ L_x 、幅 L_y 、厚み L_z の直方体で近似し、それぞれに沿った方向を x 軸、 y 軸、 z 軸とする。本稿では、この食材を図1のようにサーマルカメラで真上から撮影したときの、食材が外気によって温められていく場合の食材の上面各点 $(x, y, 0)$ の温度変化を考える。

日常生活空間中に放置された食材は外気温の影響を受けるが、これはニュートンの冷却法則によって表現できる。こ

のとき、上の食材上面上の点は、いずれも外気と触れているが、特に4つの稜線 $(x, 0, 0)$ 、 $(0, y, 0)$ 、 $(x, L_y, 0)$ 、 $(L_x, y, 0)$ 上の点は、外気に触れている部分が他の点に比べてより大きいため、外気の影響を最も大きく受ける。これにより、稜線部分はより内部の点に比べて速く温度が上昇し、内部との温度差が次第に大きくなる。その結果、稜線から内部への熱伝導が生じるので、内部の点は外気からの熱の影響に加えて、この熱伝導の影響も受けることになる。この熱伝導の影響はフーリエの法則で表現できる。さらに、食材が凍っている場合には、それが解凍されていく過程で相変化が生じるため、温度上昇が緩やかになるが、これは熱物性値の変化として表現できる。

次節では、以上の過程を熱伝導等の物理法則を用いてモデル化すると共に、サーマルカメラによって観測される食材表面の温度変化に基づいて熱伝達率や熱物性値等のパラメータを推定するための手法について述べる。なお、上の過程において、外気から各稜線を経て中心点 $(\frac{L_x}{2}, \frac{L_y}{2}, 0)$ に熱が伝わる過程はどの稜線に対しても同じなので、以下では $(x, 0, 0)$ と $(0, y, 0)$ から $(\frac{L_x}{2}, \frac{L_y}{2}, 0)$ への伝熱現象に限定して議論を進める。

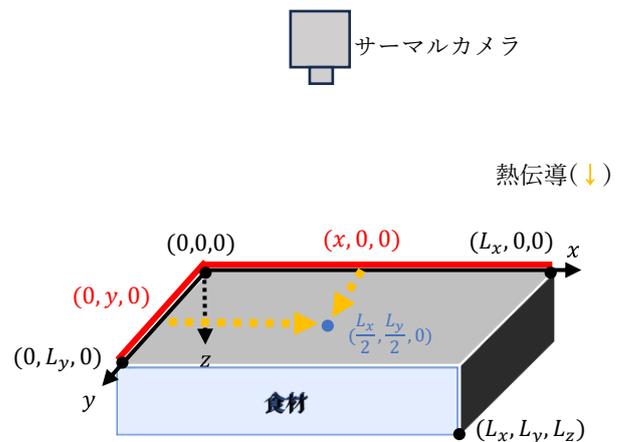


図1 サーマルカメラによる食材上面の観測

3. 食材の温度変化の物理モデル

3.1 食材表面微小区間の熱収支

図2に示すように、2で述べた食材表面上の位置 $(x, y, 0)$ における時刻 t での食材温度を $T(t; x, y, 0)$ としたとき、 $(x, y, 0)$ の近傍の長さ Δx 、幅 Δy 、厚み $\frac{\Delta z}{2}$ の微小区間 $R(x, y)$ に対して、外気中から x, y, z 軸方向に流入する熱量を $P_x^N(x, y), P_y^N(x, y), P_z^N(x, y)$ 、熱伝導によって x, y 軸方向に流入する熱量を $P_x^F(x, y), P_y^F(x, y)$ 、 x, y, z 軸方向に流出する熱量を $Q_x^F(x, y), Q_y^F(x, y), Q_z^F(x, y)$ とする。ただし、 $x = 0, y \neq 0$ および $x \neq 0, y = 0$ の位置では、それぞれ x, y 軸方向から $R(x, y)$ に流入する熱量は外気によるものとなるので、 $P_x^F(0, y) = P_y^F(x, 0) = 0$ と考える一方、 $x \neq 0, y \neq 0$ の位置では、それらは熱伝導によるものとなるので、 $P_x^N(x, y) = P_y^N(x, y) = 0$ と考える。図2では、外気と熱伝導によって流入する熱量をそれぞれ赤色と橙色で示している。

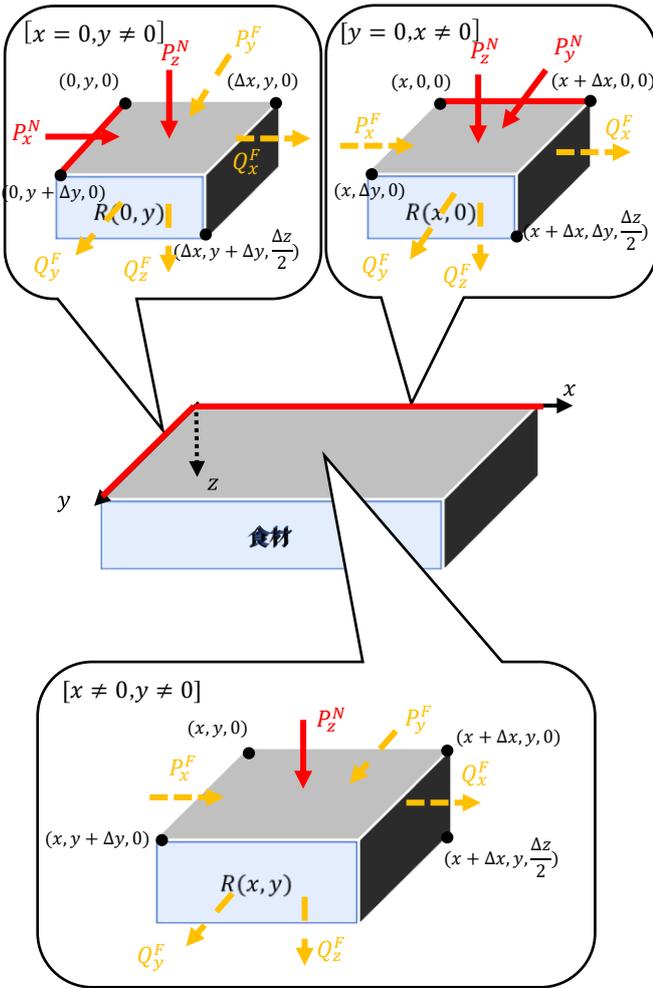


図2 食材表面微小区間に流入・流出する熱量

上のような熱量のうち、 $P_x^N(x, y), P_y^N(x, y), P_z^N(x, y)$ の時間変化量は、ニュートンの冷却法則により、外気温 T_∞ と $T(t; x, y, 0)$ の差に比例し、熱伝達率を h 、各面の伝熱面積を $\Delta y \frac{\Delta z}{2}, \Delta x \frac{\Delta z}{2}, \Delta x \Delta y$ として、次式で表すことができる。

$$\frac{dP_x^N(t; x, y, 0)}{dt} = -h\Delta y \frac{\Delta z}{2} (T(t; x, y, 0) - T_\infty) \quad (1)$$

$$\frac{dP_y^N(t; x, y, 0)}{dt} = -h\Delta x \frac{\Delta z}{2} (T(t; x, y, 0) - T_\infty) \quad (2)$$

$$\frac{dP_z^N(t; x, y, 0)}{dt} = -h\Delta x \Delta y (T(t; x, y, 0) - T_\infty) \quad (3)$$

一方、 $P_x^F(x, y), P_y^F(x, y)$ の時間変化量は、フーリエの法則により、各軸方向の温度勾配に比例し、食材温度に依存する熱伝達率を $k(T(t; x, y, 0))$ として次式で表すことができる。

$$\frac{dP_x^F(t; x, y, 0)}{dt} = -k(T(t; x, y, 0))\Delta y \frac{\Delta z}{2} \frac{\partial T(t; x, y, 0)}{\partial x} \Big|_x \quad (4)$$

$$\frac{dP_y^F(t; x, y, 0)}{dt} = -k(T(t; x, y, 0))\Delta x \frac{\Delta z}{2} \frac{\partial T(t; x, y, 0)}{\partial y} \Big|_y \quad (5)$$

同様に、 $Q_x^F(x, y), Q_y^F(x, y), Q_z^F(x, y)$ も、フーリエの法則により、次式で表すことができる。

$$\frac{dQ_x^F(t; x, y, 0)}{dt} = -k(T(t; x, y, 0))\Delta y \frac{\Delta z}{2} \frac{\partial T(t; x, y, 0)}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x} \quad (6)$$

$$\frac{dQ_y^F(t; x, y, 0)}{dt} = -k(T(t; x, y, 0))\Delta x \frac{\Delta z}{2} \frac{\partial T(t; x, y, 0)}{\partial y} \Big|_{y+\Delta y} \quad (7)$$

$$\frac{dQ_z^F(t; x, y, 0)}{dt} = -k(T(t; x, y, 0))\Delta x \Delta y \frac{\partial T(t; x, y, z)}{\partial z} \Big|_{\frac{\Delta z}{2}} \quad (8)$$

3.2 食材の温度予測式

$x \neq 0, y \neq 0$ の位置での $R(x, y)$ の内部エネルギーの時間変化量は、 $P_x^F(x, y)$ と $Q_x^F(x, y)$ 、 $P_y^F(x, y)$ と $Q_y^F(x, y)$ 、 $P_z^N(x, y)$ と $Q_z^F(x, y)$ の間での熱収支の時間変化量の総和となり、(3)~(8)式を用いて次式で表される。

$$\begin{aligned} & C(T(t; x, y, 0))\Delta x \Delta y \frac{\Delta z}{2} \frac{\partial T(t; x, y, 0)}{\partial t} \\ &= \left(\frac{dP_x^F(t; x, y, 0)}{dt} - \frac{dQ_x^F(t; x, y, 0)}{dt} \right) \\ &+ \left(\frac{dP_y^F(t; x, y, 0)}{dt} - \frac{dQ_y^F(t; x, y, 0)}{dt} \right) \end{aligned}$$

$$+ \left(\frac{dP_z^N(t; x, y, 0)}{dt} - \frac{dQ_z^F(t; x, y, 0)}{dt} \right) \quad (10)$$

ただし、 $C(T(t; x, y, 0))$ は食材温度に依存する熱容量である。

一方、 $x = 0, y \neq 0$ および $x \neq 0, y = 0$ の位置での $R(x, y)$ の内部エネルギーの時間変化量は、それぞれ $P_x^N(x, y)$ と $Q_x^F(x, y)$ 、 $P_y^F(x, y)$ と $Q_y^F(x, y)$ 、 $P_z^N(x, y)$ と $Q_z^F(x, y)$ 、および、 $P_x^F(x, y)$ と $Q_x^F(x, y)$ 、 $P_y^N(x, y)$ と $Q_y^F(x, y)$ 、 $P_z^N(x, y)$ と $Q_z^F(x, y)$ の間での熱収支の時間変化量の総和となる。しかし P_x^N, P_y^N, P_z^N に比べて P_x^F, P_y^F の影響は小さいと考えられることから、 P_x^F と Q_x^F 、 P_y^F と Q_y^F の間の熱収支は無視する。このとき、(10)式は次式で表されることになる。

$$c(T(t; x, y, 0)) \Delta x \Delta y \frac{\Delta z}{2} \frac{\partial T(t; x, y, 0)}{\partial t} = \begin{cases} \left(\frac{dP_x^N(t; x, y, 0)}{dt} - \frac{dQ_x^F(t; x, y, 0)}{dt} \right) + \left(\frac{dP_z^N(t; x, y, 0)}{dt} - \frac{dQ_z^F(t; x, y, 0)}{dt} \right) : x = 0 \\ \left(\frac{dP_y^N(t; x, y, 0)}{dt} - \frac{dQ_y^F(t; x, y, 0)}{dt} \right) + \left(\frac{dP_z^N(t; x, y, 0)}{dt} - \frac{dQ_z^F(t; x, y, 0)}{dt} \right) : y = 0 \end{cases} \quad (11)$$

3.2 食材の熱物性値式

食材が凍っている状態から解凍されていく場合は、温度上昇の過程で融点に達すると相変化が生じ、解凍が終わるまでの間、外気からの熱と端部から来る熱の両方が食材の融解のために使われるため、温度変化が緩やかになる。このような過程において食材の熱容量は大きくなる一方、食材の熱伝導率は小さくなる。この熱物性値の変化は、食材の温度に依存する関数として、それぞれ次式のように表現できる[8]。

$$C(T(t; x, y, 0)) = \begin{cases} C_1 + \frac{C_2}{(T_{sw} - T(t; x, y, 0))^{C_3}} & : T(t; x, y, 0) \leq T_{sh} \\ C_1 & : T(t; x, y, 0) > T_{sh} \end{cases} \quad (12)$$

$$k(T(t; x, y, 0)) = \begin{cases} k_f + (k_l - k_f) \frac{(T_{sw} - T_{sh})}{(T_{sw} - T(t; x, y, 0))} & : T(t; x, y, 0) \leq T_{sh} \\ k_l + S(T(t; x, y, 0) - T_{sh}) & : T(t; x, y, 0) > T_{sh} \end{cases} \quad (13)$$

ただし、 C_1 は食材の熱容量、 C_2, C_3, S はパラメータ、 k_f は凝固点以下の食材の熱伝導率、 k_l は凝固点以降の食材の熱伝導率、 T_{sh} は食材の凝固点、 T_{sw} は純水の凍結温度である。

このとき(12)式では $\frac{C_2}{(T_{sw} - T(t; x, y, 0))^{C_3}}$ の項により、 $T(t; x, y, 0)$ が T_{sh} に近づくにつれ、 C_1 が大きくなる一方、(13)式では $(k_l - k_f) \frac{(T_{sw} - T_{sh})}{(T_{sw} - T(t; x, y, 0))}$ の項により、 $T(t; x, y, 0)$ が T_{sh}

に近づくにつれ、 k_l は小さくなる。これらの結果、融点付近での温度変化は緩やかになり、相変化を再現できる。

3.3 パラメータ推定

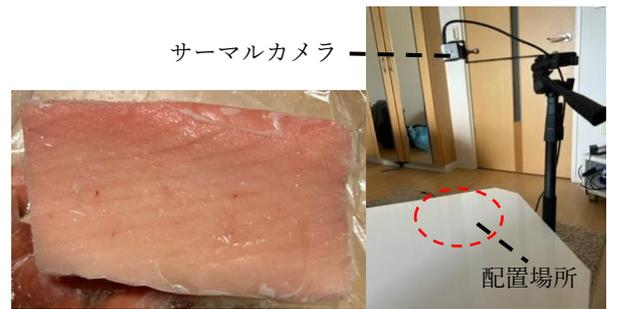
パラメータ $C_1, C_2, C_3, k_f, k_l, S, h, T_{sh}$ をまとめて $\boldsymbol{\pi} = (C_1, C_2, C_3, k_f, k_l, S, h, T_{sh})$ とする。サーマルカメラで得られる時刻 t での位置 $(x, y, 0)$ における観測温度を $T^M(t; x, y, 0)$ とすると、 $T(0; x, y, 0) = T^M(0; x, y, 0)$ として、時刻 t における食材上面の位置 $(x, y, 0)$ での予測温度 $T(t; x, y, 0)$ は、(10)式を時刻0から t まで積分することによって求める。このときの $\boldsymbol{\pi}$ は、食材上面の中心位置 $(t; \frac{L_x}{2}, \frac{L_y}{2}, 0)$ における $T(t; \frac{L_x}{2}, \frac{L_y}{2}, 0)$ と $T^M(t; \frac{L_x}{2}, \frac{L_y}{2}, 0)$ の差の二乗の区間 $t \in [0, t_f]$ についての総和を次式のように $E(\boldsymbol{\pi})$ として、これを最小化する $\hat{\boldsymbol{\pi}}$ として求める。

$$E(\boldsymbol{\pi}) = \sum_{t=0}^{t_f} \left\{ T^M\left(t; \frac{L_x}{2}, \frac{L_y}{2}, 0\right) - T\left(t; \frac{L_x}{2}, \frac{L_y}{2}, 0\right) \right\}_{\boldsymbol{\pi}}^2 \quad (14)$$

4. 実験

4.1 実験環境

上で述べた手法の有効性を調べるための実験を行った。実験食材として図4(a)の冷凍刺身を使用し、これを同図(b)の実験環境の赤色の点線が示す位置に配置し、食材表面が外気温に達するまでの表面各点での $T^M(t; x, y, 0)$ をサーマルカメラで観測した。サーマルカメラにはインフィニテグラ株式会社の OWLIFT Type-F 用い、 $E(\boldsymbol{\pi})$ の最小化には Levenberg-Marquardt 法を用いた。



(a)冷凍刺身

(b)実験環境

図4 実験食材と実験環境

4.2 実験結果

$\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta t = 1$ とし、食材を設置する前の机の温度をサーマルカメラで測った結果を基に $T_{\infty} = 23[^\circ\text{C}]$ とした。このとき $t_f = 150$ として $\hat{\boldsymbol{\pi}}$ を求めた結果、表1のようになった。

表1 パラメータの推定結果

C_1	14.9 [J/(mm ³ ·°C)]
C_2	65.4
C_3	3.5
k_f	2.7 [W/(mm·°C)]
k_l	0.1 [W/(mm·°C)]
S	0.4
h	0.0003[W/(mm ² ·°C)]
T_{sh}	-1.2 [°C]

得られた \hat{n} を用いて算出した $t = 170, 190, 210, 256$ のときの $T(t; x, y, 0)$ を $T^M(t; x, y, 0)$ と共にヒートマップとして表示した結果を図5に示す。

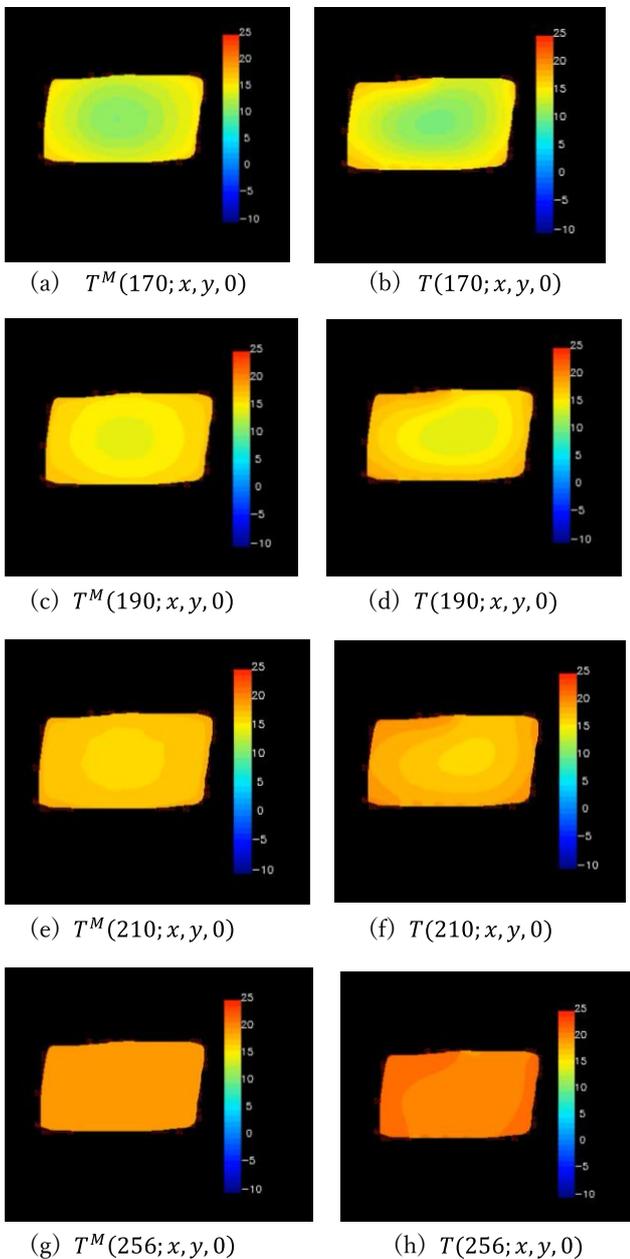
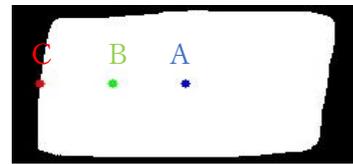


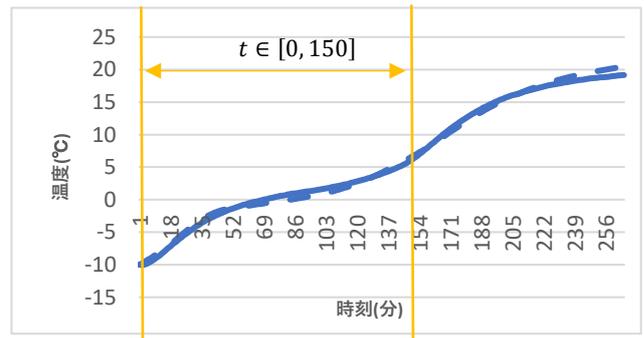
図5 ヒートマップによる比較

このヒートマップでは赤色が高温、青色が低温を示している。このとき(a),(c),(e),(g)の $T^M(t; x, y, 0)$ を見ると、端から中心にかけて同心円状に広がる変化をしながら、外気温に近づいているが、(b),(d),(f),(h)の $T(t; x, y, 0)$ も同様の変化を示している。このことから食材上面の各位置での温度分布の時間変化を再現できていることが確認できる。

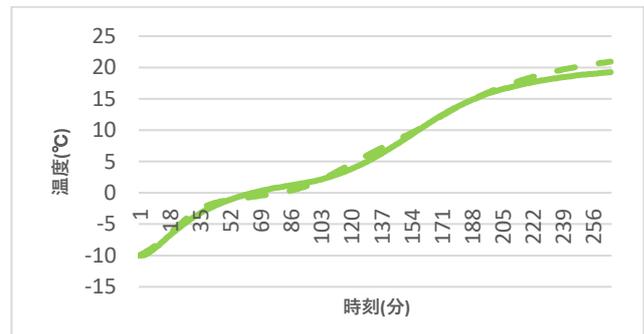
次に、各位置での $T(t; x, y, 0)$ が実際の観測温度 $T^M(t; x, y, 0)$ をどの程度正確に予測できているかを確認するために、図6(a)のA(青点)、B(緑点)、C(赤点)の各位置における任意の時刻 t での $T(t; x, y, 0)$ を求めたものを $T^M(t; x, y, 0)$ と共に同図(b),(c),(d)に示す。



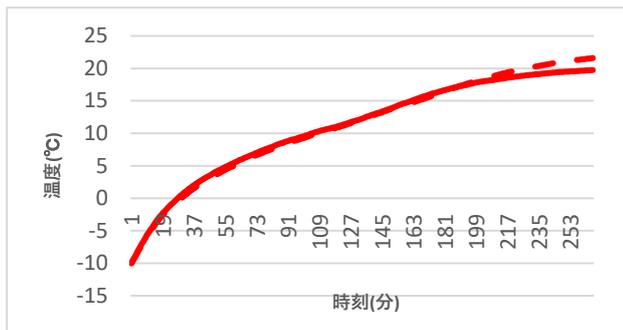
(a) 比較対象とした地点



(b) A(青点)での温度変化



(c) B(緑点)での温度変化



(d) C(赤点)での温度変化

図6 各地点での $T^M(t; x, y, 0)$ と $T(t; x, y, 0)$ の比較

図6(b),(c),(d)では、 $T^M(t; x, y, 0)$ を実線、 $T(t; x, y, 0)$ を点線で示しており、近似区間 $t \in [0, t_f]$ を黄色線で示している。この図からわかるように、稜線付近の点Cの温度変化に比べて、より内部の点B,Aでは、温度の上昇途中で温度変化が緩やかになる部分が見られる。またその時刻が、点Bに比べてより内部の点Cの方が遅れるようになっている。これらは、凍った食材が融けていくことによるものであり、相変化による影響が考慮できていることが確認できる。 $t_f = 150$ 以降の $T(t; x, y, 0)$ の $T^M(t; x, y, 0)$ との最大誤差は、点A, B, Cでそれぞれ 1.2°C , 1.6°C , 1.8°C であった。このことから本手法では、概ね誤差 2°C 以内の食材表面の温度を予測できることがわかった。

5. まとめ

本研究では、日常生活空間に放置された食材表面の温度変化を、相変化を伴う場合も含めて予測することを試みた。このため、食材が受ける外気、熱伝導の影響に加えて、相変化の影響も考慮した予測モデルを作成した。このときに必要な熱物性値等のパラメータは、食材表面の実際の温度変化に基づいて推定した。得られたパラメータを用いて食材の温度予測を行った結果、まず、外気に直接接触している周囲から同心円状に温度が上昇するような食材表面の温度分布の時間変化を再現できることが確認できた。さらに、このときの食材上面の稜線付近、中心付近、両者の中間付近の3か所の位置での温度の予測誤差を調べたところ、概ね 2°C 以内であった。

本稿では、食材が外気によって温められていく場合の食材表面の温度変化の予測を試みたが、同じモデルを用いて熱の出入を逆にすれば、食材が外気によって冷めていく場合の食材表面の温度変化にも適用可能なため、今後は、その

ような場合についても実験を行う予定である。また食材は一定の厚みを持つことから、本稿で用いたモデルをさらに厚み方向に拡張し、食材内部も含めた3次元の各位置での温度予測の有効性についても今後試みていく予定である。

参考文献

- [1] 中村 亮洋, 前田 充昭, 梅田 三千雄: “カメラ運動を考慮したフレーム間差分による人物追跡,”画像電子学会誌, Vol.36, pp.123-130, 2007
- [2] 広瀬 大樹, 三好 力: “距離センサーと画像処理による移動体認識,”第75回全国大会講演論文集, Vol.2013, pp.579-580, 2013
- [3] 川下雄大, 柴田雅聡, 増山岳人, 梅田和昇: “差分ステレオとパーティクルフィルタによる複数人物追跡,”日本機械学会論文集, Vol.80, pp.1-13, 2014
- [4] 関 宏和, 堀 洋一: “高齢者モニタリングのためのカメラ画像を用いた異常動作検出,”電気学会論文誌, Vol.122, pp.182-188, 2002
- [5] 山本 寛貴, 北村 光司, 西田 佳史, 溝口 博: “RGB-Dカメラを用いたベランダ内の子どもの危険状況検知システム,”ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, Vol.2017, pp.10-13, 2017
- [6] 池ヶ谷 剛, 大井 翔, 佐野 陸夫: “認知リハビリテーションのための一人一人称視点による調理動作認,”情報処理学会関西支部大会講演論文集, Vol.2015, pp.1-3, 2015
- [7] E.M.Avila and Y.A.Diaz: “Inner Food Temperature Estimation by IHCP Methodology on Surface Temperature Measurements obtained by Thermography,”International Journal of Food Processing Technology, Vol.6, pp.1-9, 2020
- [8] S.Tavman, S.Kumcuoglu and V.Gaukel: “Apparent Specific Heat Capacity of Chilled and Frozen Meat Products,”International Journal of Food Properties, Vol.10, No.1, pp.103-112, 2007