

基礎論文

加熱調理のVRでの再現のためのリアルタイム伝熱シミュレーション

加藤 史洋^{*1} 小野原 覚^{*2} 三武 裕玄^{*3} 長谷川 晶一^{*4}

Real-Time Heat Transfer Simulation for Reproduction of Heat Cooking in VR

Fumihiro Kato^{*1} Satoru Onohara^{*2} Hironori Mitake^{*3} and Shoichi Hasegawa^{*4}

Abstract – We propose a real-time heat transfer simulation method which visualize heat behavior in virtual cooking interactively. Our method is a combination of finite element heat transfer simulation and rigid body dynamics simulation. We achieved to reproduce temperature changes on the surface of both a beef and an iron plate as cookware. Proposed simulator also targets changes of boundary condition; e.g. between the air and solid objects or solid objects and solid objects. The rigid body dynamics simulation calculates the collision between solid objects. An experimental implementation showed the computation speed is high enough for cookery with a multi-thread computation. We aim that our method will be useful for cooking technique practice, cookery prediction and cookery game.

Keywords : Real-Time Thermal Simulation, Cooking Simulator, Finite Element Method, Food Engineering

1 はじめに

近年、インタラクティブ操作可能なVRシミュレータが登場しており、医療手技訓練のためのVRシミュレータ [1] [2] やフライトシミュレータ [3], ドライビングシミュレータ [4] などが研究されている。VRシミュレータでは、訓練や作業を再現するために、インタラクション手法とインタラクティブな計算機モデルが必要となる。そのため、手を使った組立作業が実現可能なインタラクション手法 [5] や、積み木を動かしたり積み上げたりする作業が可能な6自由度力覚インタラクションのための、動力学シミュレーション手法 [6] について研究が進められている。我々はVRシミュレータを調理作業の訓練に利用することをめざして調理の加熱操作シミュレータ [7] を構築している。加熱に伴う食材内部の温度や焼け具合を可視化し、調理操作と調理効果の関係を練習することで、調理スキルの獲得に効果があると考えられる。また今後、研究の進展により、現実で応用可能な調理技術の上達、学習コンテンツの作成、調理結果の予測、ゲームへの応用が

可能になると期待している。

数値シミュレーションを用いた調理操作に伴う食材の振る舞いの表現には、次のような先行事例がある。Smoothed-Particle法を用いたクレープ生地を構成する粒子とのインタラクション手法が提案されており、生地液体粒子やクレープ薄膜とのインタラクションを可能にする物理計算モデル [8] や、チャーハンを模した米粒群がフライパン上で飛散する様子を表現する計算モデル [9] の提案がある。

調理伝熱の再現には、上述のような調理操作による食材の位置・運動変化に加えて伝熱の再現による温度変化や温度変化に伴う調理変化の再現が必要である。加熱調理には様々な種類があるが、本研究では間接焼きと呼ばれる焼き操作を対象とする。焼き操作には“直火焼き”と“間接焼き” [10] とがあり、“間接焼き”は熱源が加熱する高温の調理器具からの伝熱により食材を加熱する調理法である。間接焼きでは、食材を裏返したり高温の位置に移動したりなど調理器具との接触状態を変えることで伝熱を調整し、所望の加熱を実現する。

本研究では間接焼きを再現するために、食材の接触変化と伝熱とを長時間で計算する手法を提案する。ただし、食材の変性、変形と水分蒸発については扱わない。

1.1 関連研究

加熱調理で生じる現象の解明を目的とした伝熱解析手法が検討されている。ハンバーグの最適調理を目的

^{*1}東京工業大学大学院 総合理工学研究科/日本学術振興会特別研究員 DC1

^{*2}東京工業大学大学院 総合理工学研究科

^{*3}東京工業大学大学院 精密工学研究所

^{*4}東京工業大学大学院 精密工学研究所/科学技術振興機構 さきがけ

^{*1}Tokyo Institute of Technology/JSPS Research Fellow

^{*2}Tokyo Institute of Technology

^{*3}Tokyo Institute of Technology

^{*4}Tokyo Institute of Technology/PRESTO JST

としたボロニアソーセージ試料の加熱再現を目的として、フライパン表面の温度分布からIH（Induction Heating）クッキングヒーターによる加熱流束量分布を2つの一次関数の組み合わせを用いて再現するモデルを提案 [11] するとともに、空気への熱伝達係数を同定している。また、炒めもの食材を一つのバルクとみなし、フライパンとバルク間の熱伝達率が算出 [12] されている。しかし、これらはインタラクティブな調理操作に応じて伝熱の変化を再現するシミュレータではない。前者はフライパン平面内の熱伝導は考慮せず、アルミのような熱伝導の良い調理器具を対象としている。後者は個別食材とフライパンとの熱伝達を対象とせず、食材内での温度変化を再現することをめざしていない。また、双方とも計算実現手段については明記しておらず、調理器具と食材間の接触状況が実時間変化する調理をインタラクティブに再現可能な手法ではない。前者に対して本提案では調理器具内の熱伝導を考慮し、熱伝導がアルミほど良くない鉄製の調理器具も対象に含めることで一般に用いられる調理器具内での熱伝導の再現をめざす。後者に対しては食材個別とフライパンとの熱の授受を対象とすることで食材内での細かな温度変化の再現をめざす。

調理を対象としたものではないが、インタラクティブな伝熱のシミュレーションを道具の設計支援に利用する提案 [13] があり、やかんの形状変更による熱対流を可視化している。2次元の有限要素法のリアルタイムシミュレーションによりやかんの形状変更による熱対流を可視化している。これに対して本提案手法は調理器具と周囲空気や食材との境界において熱伝達による温度の実時間変化や個体内部の熱伝導を伴う3次元加熱シミュレータの実現をめざす。

2 要求分析

本研究では、間接焼き調理を再現するために必要なリアルタイム伝熱再現の基盤となるシミュレータを構築する。

間接焼き調理は熱源で調理器具を介して食材を加熱する調理法である。熱源にはIHクッキングヒーターを利用し、直上の調理器具底を誘導加熱 (a) すると調理器具内部の温度差を減少させる熱伝導 (b) が生じる。調理器具上の熱は食材等の被加熱試料に空気や油膜を介して熱伝達 (c) し、食材表面から内部への熱伝導 (b) により温度が上昇する。一方で調理器具の接触面上の温度は下降する。調理器具や食材と空気との間に温度差がある場合には、空気との接触面から周囲空気へ伝熱が生じる (d)。裏返し、かき混ぜなど食材の配置や姿勢を変える操作により調理器具との接触領域が変化する。接触領域の熱分布を反映する熱

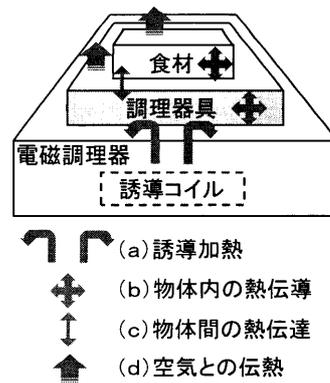


図1 伝熱の種類と構成

Fig. 1 Configuration elements of heat transfer

伝達 (c) が食材表面に与えられる。

以上より、加熱調理の再現には図2に示す伝熱要素が必要である。

- (a) 熱源から調理器具底への誘導加熱
- (b) 調理器具内や食材内の熱伝導
- (c) 調理器具-食材間の熱伝達
- (d) 調理器具や食材と空気との間での伝熱

ただし本論文では、間接焼きでの食材への伝熱の再現の確認を先に行うため、食材内の水分の蒸発や脂質の流出が伝熱に与える影響は含めない。IHクッキングヒーターによる加熱は弱火による短時間加熱を対象とすることで、水分蒸発の影響は小さいと考えられる。

(a) IHクッキングヒーターの放出する交流磁界は調理器具底のごく表面で渦電流を生み出す。渦電流が鍋底を流れる際の電気抵抗により鍋底を加熱するためである。これを再現する必要がある。

(b) では、調理器具内や食材内で温度の偏りを再現する必要がある。現実の調理では、IHクッキングヒーターによる加熱のため調理器具内に温度の偏りがある。調理者は、調理器具の温度が高いところで食材を焼いたり、温度が低い部分を加熱するように調理器具を動かしたりする。調理器具内の温度の偏りは食材内の温度の偏りにも影響を与える。

(c) 間接焼きの熱伝達を再現するために、調理器具や食材は3次元の剛体メッシュから構成し、食材や調理器具が接触面で密着する熱伝達面を構成する。接触面には空気や油などの薄い層が含まれる可能性があるが、熱伝達率を同定に含めることで熱伝達面内での物質の状態を問わないこととする。食材変性に伴う熱伝導や熱伝達の変化 [14] は今後の課題とする。

(d) 熱伝達に含まれる伝熱（調理器具と食材とが接する境界）以外では空気との伝熱が生じると考え、調理器具や食材と周囲の空気との伝熱を計算する。空気は周囲から十分に供給されるため、周囲空気の温度

は一定とみなし、調理器具が温めた空気から食材への伝熱や、調理器具－食材間での熱放射による伝熱は考慮しない。これらは結果として物体間の熱伝達の同定に含まれることになる。

3 調理における伝熱再現シミュレータの構成

2節の要求分析に挙げた(a)～(d)を有限要素法によりシミュレーションすることで、要求を満たすシミュレータを構築する。(b)物体内の熱伝導は、有限要素法による熱伝導シミュレーションにより計算される。(a)誘導加熱と(d)空気との伝熱は有限要素モデルの境界条件を設定することで、(c)物体間の熱伝達は2つの有限要素モデルの境界条件の対応をとることでシミュレーションされる。

以降、3.1節では伝熱計算の構成を支配方程式の離散化に基づいて説明する。これは上記の伝熱要素(a)～(d)の関係を説明するものである。また、(b)物体内の熱伝導についての説明も含まれる。境界条件は3.2節にて全体像を、3.3節にて(a)誘導加熱、3.4節にて(c)熱伝達、3.5節にて(d)空気への伝熱について説明する。3.6節では、3.1節で求めた支配方程式の時間軸離散化式と解法を示す。最後に3.7節にて温度の可視化手法を示す。

3.1 伝熱計算式の構成

フーリエの法則から、ガラーキン法を用いて四面体要素に離散化[15]した伝熱の支配方程式を式(1)に示す。式(2)～式(4)は式(1)の各項を表す。

$$[K]\{\Phi\} + [C]\left\{\frac{\partial\Phi}{\partial t}\right\} = \{F\} \quad (1)$$

$$[K] = \lambda \int_v \left\{ \frac{\partial[N]^T}{\partial x} \frac{\partial[N]}{\partial x} + \frac{\partial[N]^T}{\partial y} \frac{\partial[N]}{\partial y} + \frac{\partial[N]^T}{\partial z} \frac{\partial[N]}{\partial z} \right\} dv + \int_{S_3} \alpha_r [N]^T [N] ds \quad (2)$$

$$[C] = \int_v \rho c [N]^T [N] dv \quad (3)$$

$$\{F\} = - \int_{S_1} q_0 [N]^T ds + \int_{S_2} \alpha (T - T_c) [N]^T ds + \int_{S_3} \alpha_r \Phi_{out} [N]^T ds \quad (4)$$

ただし、 $[K]$ 、 $[C]$ は熱伝導、熱容量マトリクス、 $\{F\}$ は熱流速ベクトル、 $\{\Phi\}$ は物体全体を構成する n 節点メッシュの温度ベクトル(n 行1列)、 $[N]$ は形状関数(1行 n 列)、 $\frac{\partial\Phi}{\partial t}$ は温度の時間微分である。 S_1 は熱流束境界面(熱流束 q_0 [J/(m²·s)]), S_2 は熱伝達境界面(熱伝達率 α [J/(m²·K·s)]), S_3 は熱放射境界面(熱放射率 α_r [J/(m²·K·s)])である。上付き添え字 T は転置を、 v は物体を構成する要素の体積を表す。 λ は熱伝導率[J/(m·K·s)], t は時刻[s], ρ は密度[kg/m³],

c は比熱[J/(kg·K·s)], T_c は熱伝達境界で接する他物体の表面温度, q_0 は熱流束[J/(m²·s)]である。

調理器具・食材内の熱伝導は熱伝導マトリクス $[K]$ (式(2))を用いて計算する。食材の熱伝導率には異方性がある場合があるため、方向により異なる熱伝導率を用いることにする。境界条件は次節以降にて詳述する。

3.2 境界条件

境界条件は、熱流束境界条件(3.3節)・熱伝達境界条件(3.4節)・熱放射境界条件(3.5節)を用いて構成する。IHクッキングヒーターから加熱調理器具の底への加熱分布は熱流束境界条件を用いて計算する。加熱調理器具から食材への熱伝達は熱伝達境界条件を用いて計算する。加熱調理器具・食材から周囲空気への伝熱は熱放射境界条件を用いて計算する。

3.3 熱流束境界条件

IHクッキングヒーターの放出する交流磁界の強度に応じた熱流束を調理器具底へ加える加熱流束モデルを構成した。20～50[kHz]と高周波数な交流磁界の金属への浸透深さは極めて浅く、アルミや鉄では0.5[mm]未満である[16]。そのため渦電流による加熱境界は調理器具底の表面とする。式(4)の第一項を用いて計算する。4.4節で、交流磁界による加熱流束分布モデルを加熱実験から同定する。

3.4 熱伝達境界条件

接触のある物体境界面での熱伝達は熱伝達境界条件を用いて計算する。接触している物体を一体の有限要素メッシュとして境界条件をメッシュ内部に設定する手法[17]や、凹凸のある接触面の熱伝達を凸形状で接している面と空隙にある潤滑油とで構成する手法[18]が提案されている。本提案では実時間性を重視するために境界に物体を介さない計算手法とし、メッシュの節点間の熱伝達の計算にはこれらの影響を含めて同定するモデルを提案する。以降、熱伝達境界面の上下にある物体表面の節点を上・下境界節点と呼ぶ。上・下境界上にある物体内の任意点の温度を T 、 T_c 、節点温度ベクトルを $\{\Phi\}$ 、 $\{\Phi_c\}$ とする。2点間の熱伝達にともなう熱流束項 $\{F_2\}$ を式(4)の第二項より抜き出す(式(5))。任意点での温度は形状関数と節点温度から計算可能である(式(6))。式(6)を式(5)に代入することで節点温度間の熱伝達式(式(7))を得る。式(8)は上境界の i 番目の節点と下境界の j 番目の節点の間の熱伝達について抜き出したものである。以上から物体間の伝熱は式(8)を熱伝達があるすべての節点のペアについて計算する事により求められる。しかし、式(8)の形状関数 N と N_c との対応は接触状態が変化する度に計算し直す必要があり、煩雑で膨大な量の計算が必要となってしまふ。そこで、節点間の伝熱を近似計算するために都合が良くなるように、形状関数を式(10)のように近似する。これにより、式(8)は式(9)

のように簡単化される。

$$\{F_2\} = \int_{S_2} \alpha(T - T_c)[N]^T ds \quad (5)$$

$$T(x, y, z) = [N(x, y, z)]\{\Phi(t)\} \quad (6)$$

$$\{F_2\} = \alpha \int_{S_2} [N]^T [N] ds \cdot \{\Phi\} - \alpha \int_{S_2} [N_c]^T [N_c] ds \cdot \{\Phi_c\} \quad (7)$$

$$\{F_{2,i}\} = \alpha \int_{S_2} [N_i]^T [N_i] ds \cdot \{\Phi_i\} - \alpha \int_{S_2} [N_{c,j}]^T [N_{c,j}] ds \cdot \{\Phi_{c,j}\} \quad (8)$$

ただし、 $[N_c]$ は境界の下側にある物体の境界節点の形状関数、 S_2 は熱伝達境界面である。

ノード間の熱伝達は式 (8) により計算されるが、この式を数値計算するためには、上側の形状関数と下側の形状関数の位置関係を求めて積分するの必要があり、アルゴリズムが複雑になる上、計算量が多くなってしまふ。そこで、上境界の要素内での i 番目の節点と下境界の要素内での j 番目の節点との熱伝達があると仮定し、 N, N_c を N', N'_c に置き換える近似を行うことで式 (9) とする。この式は四面体要素の接触面の三角形の面積の 3分の1 と温度差の積であり、計算量が少ない。ただし、 i, j は上・下物体の節点番号 ($i = 1, 2, \dots, m_u, j = 1, 2, \dots, m_b$) である。

$$F_{2ij} = \alpha \int_{S_{\text{対応づけ}}} ds \cdot (\Phi_i - \Phi_{c_j}) \quad (9)$$

例として、 N', N'_c は次のように置き換える。

$$N'_k = 1, \text{ if } (i == k) \quad N'_{ck} = 1, \text{ else } N'_{ck} = 0$$

$(i, j) = (2, 5)$ のとき

$$N' = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} (\in R^{m_u})$$

$$N'_c = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \end{bmatrix} (\in R^{m_b}) \quad (10)$$

形状関数が満たすべき条件は以下である。

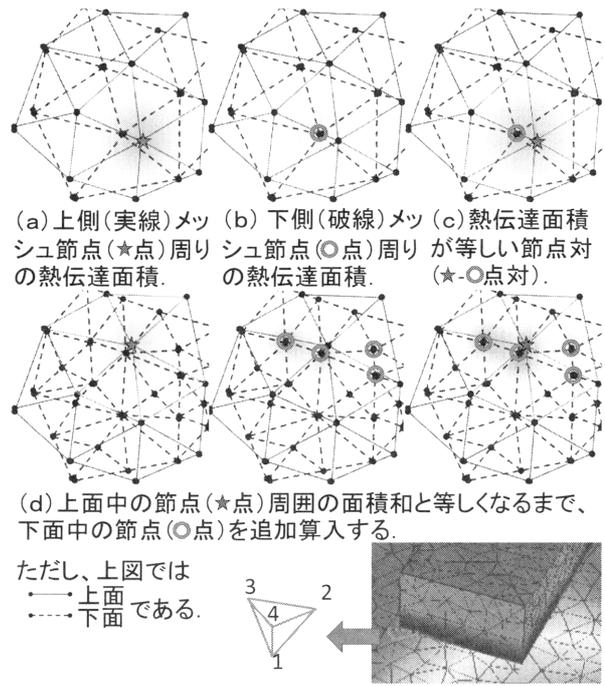
$$\sum N'_i = 1 \quad (11)$$

$$N'_i = 0 \quad \text{or} \quad 1 \quad (12)$$

$$\int_{S_{all}} N_i = \int_{S_{all}} N'_i = \frac{1}{3} \sum_i \Delta_i \quad (13)$$

(ただし、 S_{all} は境界面全域、 Δ_i は頂点 i を含む S 上の三角形の面積)

式 (9) を求めるために、上・下境界節点の対応づけが必要である。鉄板側の熱伝達面 (図 2 (a) ~ (c) 中の下面・破線) に属する節点と被加熱試料側の面 (同図中の上面・実線) の節点との間の温度差分と熱伝達面積を用いて熱伝達量を計算する。以下に手順を示す。



(a) 上側(実線)メッシュ節点(★点)周りが等しい節点対の熱伝達面積。 (b) 下側(破線)メッシュ節点(○点)周りが等しい節点対の熱伝達面積。 (c) 熱伝達面積が等しい節点対(★-○点对)。 (d) 上面中の節点(★点)周囲の面積和と等しくなるまで、下面中の節点(○点)を追加算入する。 (e) メッシュ間の接触面上に属する四面体の三角形面を計算に用いる

ただし、上図では
 実線 上面
 破線 下面
 である。
 Fig. 2 Correspondence between mesh vertices on the heat transfer surface.

1. 物体間に接触があるとき、上・下境界節点の法線が境界面を挟み相対する節点を熱伝達候補点として限定する。節点の法線は、節点が属する四面体面の法線の平均値である。物体間の接触判定時に、上・下境界節点の法線と接触面の法線の内積が負となる節点を相対と判定する。相対と判定された節点を同一の接触平面内に射影する。
2. 節点探索範囲を絞り込むために両物体を含む Bounding Box (BB) を接触平面上に設定する。BB の中心付近にて上・下境界節点から一つずつ選択して対をつくる。
3. 各節点を含む三角形、すなわち四面体の三角形面毎に式 (9) から熱伝達量を求める (図 2 の (a) ~ (c))。ただし、形状関数 N, N_c は三角形の外に値を持つことを許す。
4. 一般には図 2 の (d) のように上面と下面物体でメッシュサイズが異なるため 1 点 - 1 点对では節点対の熱伝達面積の大きさがつりあわない。熱伝達面積に等しくなるまで熱伝達面積が小さい側の節点と辺でつながった周囲節点の面積を算入することで、熱伝達面積が等しい 1 点 - 複数点对をつくる。接触領域の外殻の境界では対応点が見つからず面積が余る場合がある。境界に併せて節点の対応をとってはいないためである。

5. 節点对応づけの成立後は、対応づけた上・下境界節点の周囲にある、辺で結合された節点を次の対応付けステップでの候補節点として選定する。選定した節点は手順3,4と同様に対応付ける。
6. 選定した節点をすべて対応付けた後に、更に周囲の節点へと対応を広げる。
7. 手順3~6を反復し上・下境界節点のすべての対応づけが完了すると探索を終了する。

手順1に示す熱伝達候補点の限定手法は、ステーキなどの薄い物体でも利用可能である。接触境界面からの距離しきい値を用いて節点候補を絞るだけでは薄い物体の場合に反対側の面の節点も候補に入る可能性があるため、法線を用いた判定も行う。

3.5 熱放射境界条件

物体から周囲空気への伝熱を計算する。空気との伝熱は周囲空気との熱放射と空気粒子との熱伝達とに大別されるが、本提案では熱放射と熱伝達を区別せず、物体表面から周囲空気への熱放射を求める近似式[15]に含める。他物体と接触していない物体表面には熱放射境界条件を適用する。熱放射は式(2)の第二項と式(4)の第三項が該当する。これは式(14)から式(6)を用いた離散化により導出した式である。式(14)は、 α_r を表す式(16)を用いて非線形な式(15)の変形から導出した近似式である。ただし、 q :熱流束 [$J/(m^2 \cdot s)$], ϵ :放射率[1], σ :ステファン・ボルツマン定数 [$J/(m^2 \cdot K^4 \cdot s)$], F :形状から求まる係数[1], T :周囲空気温度 [K], T_r :放射源温度 [K] である。

$$q = \alpha_r(T - T_r) \quad (14)$$

$$q = \epsilon\sigma F(T^4 - T_r^4) \quad (15)$$

$$\alpha_r = \epsilon\sigma F(T + T_r)(T^2 + T_r^2) \quad (16)$$

α_r は、 T_r によって変化する(式(16))ため実験により同定する必要がある。ただし、周囲空気の温度は一定と仮定する。

3.6 時間軸離散化と方程式の解法

式(17)は、空間軸で離散化した支配方程式(1)を差分法を用いて時間軸で離散化した式である。

$$\begin{aligned} & \left[\epsilon[K] + \frac{1}{\Delta t}[C] \right] T(t + \Delta t) \\ & = \left[-(1 - \epsilon)[K] + \frac{1}{\Delta t}[C] \right] \{T(t)\} + \{F\} \quad (17) \end{aligned}$$

係数 $\epsilon = 1$ とし、安定性の高い完全陰解法を用いて計算する。数値解法には収束の速い反復法であるガウスザイデル法を用いる。方程式を解く際の計算コストを小さくするために非0成分のみを用いて計算式を組み立てる。

3.7 温度の可視化

調理の練習のためには調理状態を分かりやすく可視化することが重要であると考えられる。調理器具の高温部など温度の分布を可視化したり、焼け具合を可視化[7]すれば調理状態を把握できると考えられる。本提案では、調理器具や食材表面の伝熱計算による温度の変動を色や数値で表現する。

色による温度の可視化のために OpenGL の 3次元テクスチャ機能を用いる。色による温度の表示は、物体の頂点温度に対応する3次元テクスチャ画像の深度値を変更することで実現する。赤外線サーモグラフィ画像のように温度と対応した色分布を表現するために、単色画像を複数枚用意し鉄板や食材の温度を表現する。

鉄板や被加熱試料内の任意領域での温度は、測定位置が属する四面体の形状関数と四面体節点の温度から計算する。

また、加熱調理による変性や変形などの外観変化については、食材内部の温度や焼け具合の変化の可視化[7]を拡張することで、食材の外観変化の形で可視化することもできると考えられる。

4 実験による動作の確認とパラメータ同定

3節で提案した伝熱再現シミュレータには、食材の物性値から与えられるパラメータのほか IH クッキングヒーターの出力する加熱量や物体間の熱伝達率のように現実に合わせて同定する必要があるパラメータが存在する。実験では、調理器具や食材として物性値が既知の鉄板や金属試料を用いて、伝熱シミュレータの動作確認とパラメータの同定を行う。

以下、4.2節にて同一物体内での熱伝導計算の確認を、4.3節にて空気への熱放射係数の同定を、4.4節にて IH 加熱流束分布モデルの同定を、4.5節にて鉄板と金属試料間の熱伝達率の同定を示す。

4.1 実験環境

調理器具には物性値が既知で厚み 3[mm] の鉄板 (SU S 430, JFE スチール製) を、熱源には IH クッキングヒーター (HT-B60S, 日立製作所製) を、温度分布の計測には赤外線サーモグラフィ装置 (TH9100MV, NECAvio 製, 測定誤差 $\pm 2[^\circ C]$ または 2[%] の大きい値) を用いた。鉄板や被加熱試料には、黒体スプレー (放射率 0.94, タスコジャパン株式会社) を塗布し、熱放射率を一定値に揃えて実験を行った。鉄板底-IH クッキングヒーター上面のガラスとの間では熱の移動を防ぐために鉄板底の四隅に断熱ゴムシートを貼り付けて鉄板を浮かせた。

計算機環境は、ThinkPad T430s(Corei7 - 3520M, 2.9[GHz], メモリ 16[GB]) を用いた。Springhead2[19] を用いて 3次元 CG によるシミュレータシーンを作成

した。加熱調理器具や食材のモデルは3次元CGモデリングソフト [20] を用いて作成した。モデルを四面体メッシュに分割 [21] 後に伝熱計算の離散化式を適用してシミュレーションモデルとした。各モデルのサイズや四面体メッシュ分割時の四面体数、四面体の辺の平均長さを表1に示す。シミュレーションの時間ステップは、動力学的計算には0.02[s]を、伝熱の計算には0.1[s]を用いた。

表1 実験で用いた鉄板や金属試料, 牛もも肉モデルのサイズと分割四面体数, 辺の平均長
Table 1 Tetrahedral division number, size and average side length of meshes. About iron plate, metal and beef sample.

モデル種別	サイズ [mm]	四面体数	辺の平均長 [mm]
鉄板	125 × 125 × 3	5543	4.7
金属試料	50 × 20 × 10	1437	4.3
牛もも肉	50 × 20 × 13	2579	3.9

4.2 同一物体内部での熱伝導計算の確認

同一物体内部での熱伝導計算が正しいことを確認する実験を断熱境界条件を用いて行った。個別物体全体の温度が1[°C]上昇するために必要な熱量を物体の端点にまとめて加え、断熱境界条件を設定して十分長い時間放置する実験を行った。実験の結果、物体全体の温度上昇が1[°C]に収束することが確認できた。

4.3 空気への熱放射係数の同定

加熱により高温となった鉄板の放熱時の温度低下を用いて放熱係数を同定した。まず鉄板上面の中心が250[°C]付近になるまで加熱後、放熱を開始する。鉄板中心付近の温度が200, 150, 100[°C]となった時を放熱開始温度として選び、鉄板中心から1.0[cm]おきの間隔でそれぞれ10[s]後までの温度経過を取得した。本放熱実験での温度分布をシミュレータで再現し放熱開始温度毎に空気への放熱具合から空気への放熱係数を求めた。放熱係数 α_r は、 $3.6 \times 10^{-2} \cdot T - 0.2$ と温度依存性のある式で表せることが分かった(ただし T は被加熱物体(鉄板)の表面温度[°C])。求めた熱放射係数は、本提案と同様に鉄板から空気への係数を同定した報告 [22] (20~300[°C]にて10~30[J/(m²·K·s)])と近い値であり妥当であるといえる。以上より、空気との熱伝達を含む空気との熱放射の近似式により空気との伝熱が再現可能であるといえる。

4.4 IH加熱流束分布モデルの同定

IHクッキングヒーター内のコイルが鉄板底を加熱する際の加熱分布モデルを同定した。IH加熱コイルが調理器具を加熱する領域を赤外線サーモグラフィ装置をつかって観察すると、加熱コイル中心から一定半径の円弧状に分布することが分かる(図4(a))。この円弧を中心として、およそ一定の幅を持った円環領域が常に最高温度を保ちながら円の半径中心方向の内

側と外側に熱伝導する。加熱開始5秒間の鉄板表面の上昇温度から1秒間あたりの加熱量を求めた。IHクッキングヒーターの加熱コイルの中心から1[cm]毎に0.0, 1.0, ..., 9.0[cm]にて温度経過を測定し加熱モデルを同定した。本提案手法での同定モデルを用いることで図3のように90[s]まで鉄板上の温度変化を再現できることが示された。120[s]付近から計算値と実測値の差異が広がる原因は、IHクッキングヒーターによる加熱制御によると考えられる。本実験では弱火を用いたが、強火を用いると制御の具合が変わることが確認された。

本実験で用いたIHクッキングヒーター内の加熱コイルは、温度センサの配置により内コイルと外コイルに分かれた構造をしており、単コイルと仮定したシンプルなモデルを構築することができなかった。また、内コイルと外コイルの間で打ち消し合う磁束を推定したモデルでも同定したが、シミュレーションの精度が同様だったためより簡単な先述のモデルを用いた。IH加熱モデルの同定では本検証手法と同様の手法が先行研究で提案されている [11]。しかし、鉄板内の平面方向の熱伝導は考慮されておらず、加熱分布の同定も15[s]までしか検証されていなかった。本提案手法では熱伝導を考慮し、より長時間での温度経過の合致を確認した。

4.5 鉄板と金属試料間の熱伝達率の同定

金属試料(アルミ合金A5052, 神戸製鋼製, 熱伝導率140[J/(m·K·s)], 比熱917[J/(K·kg)], 密度2680[kg/m³])を鉄板上に置き、試料の温度上昇変化と合致する熱伝達率を求めた。調理を想定し、試料と鉄板の間には植物油脂を薄く塗り鉄板上に横たえて密着させた。試料の上面の温度変化を赤外線サーモグラフィ装置で撮影し温度変化を測定した。シミュレータでは、同じ状況を再現するシーンを設定した(図4(b))。試料表面温度の測定温度変化と一致する熱伝達率を求めた。熱伝達率 α は、 1.2×10^3 [J/(m²·K·s)]となった。鉄製の金型上で固体化過程のアルミニウムとの熱伝達率の平均を導出した式の報告 [23]によれば、250[°C]では 5.4×10^2 [J/(m²·K·s)]程度と算出でき、ここで同定した熱伝達率はより高めの値となっている。これは黒体スプレーの塗布により黒体に近づいたことと、油を塗布したことで熱の伝達効率が良くなったことが原因と考えると妥当な値と考えられる。以降、鉄板と金属試料を用いた加熱実験ではここで求めた熱伝達率を用いる。

5 提案シミュレーションの評価

3節のシミュレーションモデルと4節のパラメータ同定の妥当性を検証するため5.1節にて金属試料の境

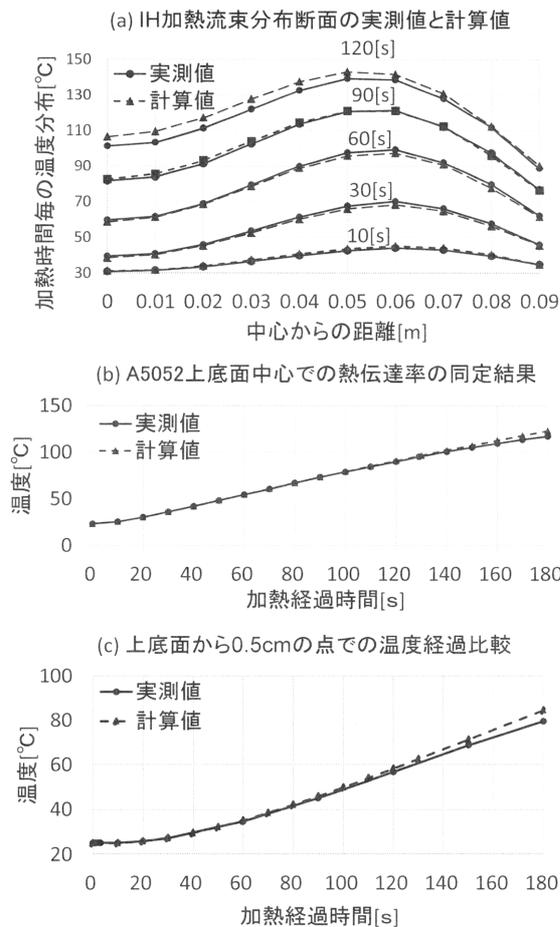


図3 (a)IH加熱モデルの同定. (b)金属試料A5052と鉄板の熱伝達率の同定 (c)金属試料の鉄板との接触面積を小さくした後も再現性を保持

Fig. 3 (a)Identification of Induction Heating calculate model. (b)Identification of heat transfer coefficient between metal sample A5052 and iron plate. (c) Rotation result of metal sample is also fit.

界条件変化と温度経過の評価, 5.2節にて牛もも肉の熱伝達率の同定, 5.3節にて牛もも肉の両面焼きでの温度経過の評価, 5.4節にてリアルタイム性の測定について説明する.

5.1 金属試料の境界条件変化と温度経過の評価

熱伝達境界条件と熱放射境界条件の面積を変化させた際の温度経過の再現を確認するため, 金属試料の長手方向が鉄板に直立するように鉄板に置いて加熱実験した(図4(c)). これは鉄板との接触面積が最小で空気に触れる面積が最大となる状況である. 4.5節では金属試料の長手方向が鉄板に平行となるように置いたため空気との接触面積は最小であった. 加熱源である鉄板から十分離れた測定点として, 金属試料の上面から0.5cm地点(図4(c)の矢印の地点)を選定した. 実測値と計算値の測定点温度経過を比較したものが図3(c)のグラフである. シミュレータでの温度測定結果は, 150[s]までは実測結果と良好に一致する

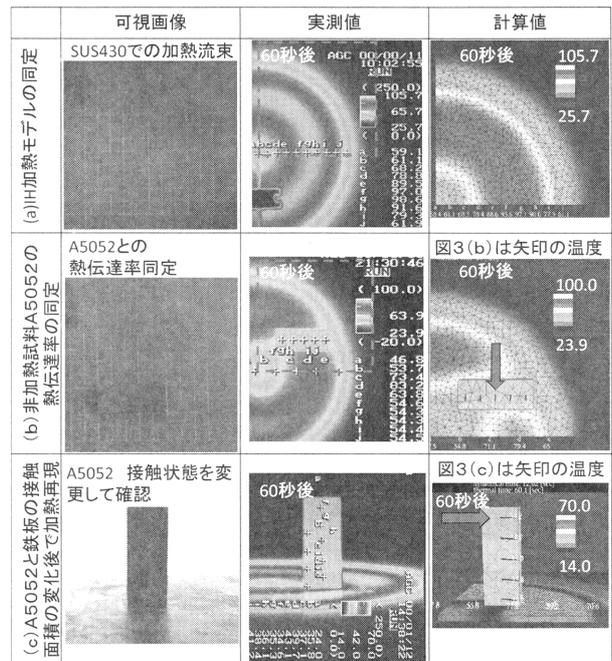


図4 (a)IH加熱モデルの同定,(b)金属試料A5052と鉄板の熱伝達率の同定,(c)金属試料の鉄板との接触面積を小さくした後も再現性を保持

Fig. 4 (a)Identification of Induction Heating calculating model. (b)Identification of heat transfer coefficient between metal sample A5052 and iron plate. (c)Rotation result of metal sample is also fit.

ことがわかった. 150[s]以降のシミュレーション温度変化が実測値とずれてしまうのは, ほかの実験と同様に, IHクッキングヒーターによる加熱制御を受けていることが原因と考えられる.

熱伝達境界条件にて, 上下物体の接触境界面の全節点の位置が重なる場合とずらした場合との熱伝達誤差を調べた. まず, 金属試料(A5052)モデル1を用いて, 上下物体の接触境界面の全節点の位置が重なるようなメッシュを作成し, 熱伝達計算による温度の上昇を調べた. 上, 下部の物体の初期温度を10, 50[°C]に設定した. 次に, 上物体の節点位置を1[mm]ずつ長手方向に1[cm]スライドさせて調べた. 1計算ステップで平均0.03[°C], 最大0.13[°C]の差が生じることが分かった. 計算を簡略化した接触面の影響は, 上下境界の接触面での節点位置が合致している場合に比べて差が生じるが, 1ステップでの上昇温度に対し3.1[%]程度であることが確認できた.

これらの結果から, 鉄板と金属試料の接触面積や空気への伝熱面積が異なる境界条件でも, 本提案の伝熱計算手法を用いることで温度経過を再現可能であることが示された.

5.2 牛もも肉の熱伝達率の同定

本提案手法は食材の加熱調理を再現できるシミュレーション手法の構築を目的としているため食材の温

度変化を評価した。食材には熱物性値が文献に豊富に掲載されている牛もも肉を選択した。牛もも肉の間接焼きを再現するシミュレーションでの温度変化と同様の実測値を比較した。

肉の熱伝導率は繊維方向に依存する異方性があるため、シミュレーションでは異方性のある熱伝導率を用いた。牛もも肉の繊維に平行・垂直な方向の熱伝導率はそれぞれ $0.434, 0.467[\text{J}/(\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{s})]$ [10] であり、これを再現した。

加熱実験の前には、金属試料とほぼ同サイズ(表1)の肉片を用意し表面に黒体スプレーを塗布して冷蔵庫で一定温度まで冷却した。鉄板と肉片の間に薄く植物油を塗布して加熱した(図5)。肉片の上面の温度変化から鉄板と肉片の熱伝達率 α を $2.0 \times 10^2[\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s})]$ と同定した(図6)。牛ミートパティとフライパン間の熱伝達率を $2.5 \times 10^2[\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s})]$ と同定した報告[22]や $1.0 \sim 2.2 \times 10^2[\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s})]$ を推移したとする報告[14]があり、本実験で求めた熱伝達率は妥当な値であるといえる。

有限要素法での空間解像度が低い対象では、空間周波数が大きな現象はシミュレーションによる再現が困難である。熱伝導率が低い肉を境界面から加熱すると、温度の空間勾配が急になるため必要な空間解像度が高くなる。解像度が不足する場合にはエイリアシングによる誤差により温度が振動する。そこで、肉の熱伝導率で振動が生じない程度の解像度の有限要素を用いた。なお、振動が生じない解像度であっても、熱伝導率が低い(空間周波数が高い)場合には誤差が大きくなるがリアルタイム性が損なわれないようにするため、あまり高くなく振動が生じない解像度を試行錯誤により選んだ。メッシュ分割時の四面体の最大体積を $1.5 \times 10^{-8}[\text{m}^3]$ とした。牛もも肉の片面焼きでの実測値とシミュレーション値との差は加熱開始時から 180[s] までの 10[s] 毎に計測した平均で $1.8[^\circ\text{C}]$ であった(図6)。これは、A5052 試料を用いた同様の状況での温度誤差平均 $1.2[^\circ\text{C}]$ (90[s] までは平均 $0.13[^\circ\text{C}]$) に比べて大きい。メッシュ内の温度分布は四面体内を 1 次式で近似しているため、境界面での温度差が大きい場合に境界付近の要素内の温度勾配が急になり、境界付近の要素内部では低温となると考えられる。特に牛もも肉では A5052 に比べ熱伝導率が小さく伝熱が遅いため、境界付近の要素内では低温と温度の急勾配がより長い時間継続しやすいと考えられる。このため、牛もも肉は A5052 よりも温度が上昇しにくく、80[s] までに誤差が拡大したと考えられる。メッシュ分割の粗さによる振動は生じていないが、より細かく分割することでこれら計算誤差をさらに低減可能と考えられる。

牛もも肉の上面(測定面)での温度変化は、本実験

での牛もも肉の鉛直方向の熱伝導率の寄与が大きい、水平方向の熱伝導率の影響も受けることがシミュレーション結果によりわかった。実験で使用した試料は、繊維の方向が鉛直方向であったため、繊維と平行な熱伝導率で揃えた等方性モデルの温度変化とほぼ一致している。しかし、10[s] 毎の 19 箇所の測定値のうちの 84[%]、平均で $2.9 \times 10^{-3}[^\circ\text{C}]$ 異方性のあるモデルの方が高い温度となったことから、熱伝導率のより高い水平方向からの熱伝導の影響は小さいが、温度上昇に寄与していると分かった。以上から、食材の温度変化の再現には、異方性のある熱伝導率の設定が有効だといえる。

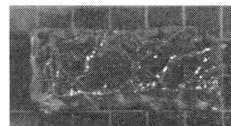


図5 黒体スプレー塗布した牛もも肉片
Fig. 5 A beef sample is sprayed in black-body

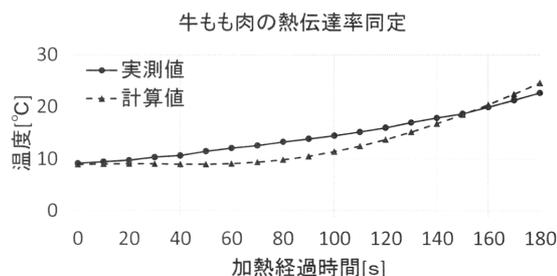


図6 牛もも肉の熱伝達率同定.
Fig. 6 Identification of heat transfer coefficient.

5.3 牛もも肉の両面焼きでの温度経過の評価

5.2 節で同定した熱伝達率を用いて牛もも肉の両面焼きについて弱火で温度経過を測定する評価実験を行った。加熱開始後 1 分毎に 2 度裏返す操作を想定した。水分の蒸発による温度低下を避けるため、 $100[^\circ\text{C}]$ 未満の範囲で加熱実験を行った。加熱に伴う温度変化の実測値と計算値を図7に示す。反転前後での牛もも肉の温度経過を良好に再現出来ている。反転後の、空気への伝熱による温度低下の曲線は実測値と似た形になっており牛もも肉反転後の温度経過を表現できている。

2 度めの反転後、計算値が実測値より高温となっている要因として、1 度めの反転後は既に内部温度が上昇していることで、熱伝達境界面のすぐ内側の要素内の温度の 1 次式の傾きが小さくなるため要素内部の温度が上昇しやすくなると考えられる。このほか、実測定温度が $100[^\circ\text{C}]$ に近づいたことで、IH クッキングヒーターの加熱制御が影響、水の沸点に近づく温度帯では水分蒸発に伴う潜熱、タンパク質変性に伴う吸熱

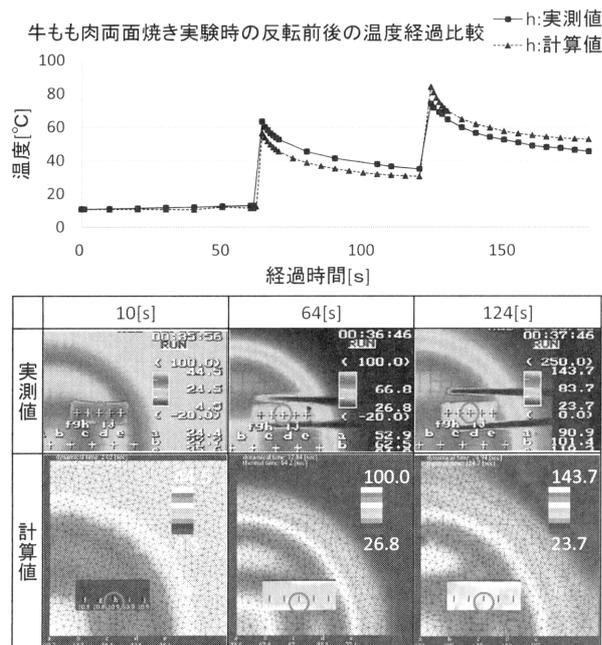


図7 牛もも肉反転時の温度測定経過と計算値の比較。図中h(丸囲)にて実験により測定した温度経過と計算により得た温度経過をグラフにて比較した。

Fig. 7 We compared a beef sample temperature differences between calculated and measured results when we flip the beef. We checked the point h temperature.

反応や肉汁の流出に伴う鉄板温度の低下が影響を与えていると考えられる。また、より細かくメッシュ分割することで精度が向上すると考えられる。

5.4 リアルタイム性の測定

鉄板上で牛もも肉を加熱するシミュレーションでの計算速度を計測した。1分間の計算サイクル数から1計算サイクルあたりの平均所要時間を求めた。伝熱に要した平均時間は 7.8×10^{-2} [s], 物体同士の接触など伝熱以外の平均計算時間は 2.0×10^{-2} [s] と各々における計算周期は 12.8 [Hz], 50 [Hz] となった。伝熱に要した時間ステップは 0.1 [s], 伝熱以外では 0.02 [s] をそれぞれ乗じると 1 [s] を超えることから、リアルタイムでの計算が実現できているといえる。また、本提案手法における計算周期は食材の温度を人が確認するために十分といえる。鉄板と牛もも肉との接触の判定等に要する計算周期は調理操作の再現に十分であるといえる。熱伝達の節点对応づけは、毎計算ステップで更新しているため、接触状態が変化しても計算量は変化せず、リアルタイム性を維持しているといえる。計算機は、4コアのうち3コアが常時ほぼ 100 [%] 稼働する状態であった。計算時間の測定に使用したメッシュは表1と同一である。

6 まとめ

本研究では、調理操作による調理器具と食材の接触境界条件や空気との伝熱境界条件が加熱途中に変化する場合でも、伝熱による温度変化をリアルタイムに計算可能なシステムを提案し、試作システムを構築して評価を行った。試作システムの評価により、鉄板上でIH加熱分布の再現と被加熱金属試料・被加熱牛もも肉の伝熱による温度変化の再現ができることを示した。提案シミュレータは複数の食材間での接触を伴う伝熱にも対応しており、調理予測やインタラクティブな加熱調理訓練シミュレータのような現実の調理の再現が必要となる用途への応用が期待できる。

7 制限と今後の展望

牛もも肉の加熱では、本実験で用いた牛もも肉のメッシュ分割数では振動は生じていないが、更に細かいメッシュとするか、時間ステップをより細かくすることで、応答性を改善できると考えられる。

本研究では、食材成分の偏在や加熱調理に伴う食材の変性は対象に含めなかった。タンパク質・水分・油分・肉汁等の偏在による熱伝導率の分布、食材の変性に伴う変形や流動と熱伝達率の変動、成分の流動に伴う伝熱変化、粘弾性のある食材など、今後の課題とする。

本論文では、食材を剛体としてモデル化し、接触面での熱伝達変化がないものとして伝熱を再現した。剛体では食材の変形や粘弾性により接触面の変動が大きな食材は再現できない。脂身と赤身が結合された肉や溶き卵など、加熱による変形が大きな食材や流動性のある食材の熱伝達は剛体では再現できないため、今後の課題である。

本論文に記載した伝熱ライブラリは、<http://springhead.info/wiki/index.php>にて公開を予定している。

謝辞

本研究の一部は、情報処理推進機構による未踏IT人材発掘・育成事業、日本学術振興会の特別研究員(DC1)による助成を受けた。

参考文献

- [1] 黒田嘉宏, 中尾恵, 黒田知宏, 小山博史, 小森優, 松田哲也. 複数臓器間の接触シミュレーションを実現する弾性体間の相互作用モデル(<特集>医工連携とVR). 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 8, No. 2, pp. 155-162, Jun 2003.
- [2] 鈴木薫之, 鈴木直樹, 服部麻木, 内山明彦. バーチャル手術システムに適した弾性臓器モデルの開発(マルチメディアパターン処理). 電子情報通信学会論文誌. D-II, 情報・システム, II-パターン処理, Vol. 86, No. 9, pp. 1341-1349, Sept 2003.
- [3] 梶原景範. 3-1 教育・訓練システム: フライトシミュレータ(3. インタラクティブシミュレーション)(<小

- 特集>バーチャルリアリティ技術). テレビジョン学会誌, Vol. 46, No. 6, pp. 685-689, Jun 1992.
- [4] 久保智史, 前田公三, 綱井秀樹, 林隆三, 永井正夫, Pongsathorn RAKSINCHAROENSAK, 佐々木和也, 米川隆. 3101 車線変更時における運転行動評価手法の開発 (os6-2 シミュレータを用いた設計・評価, os6 ヒューマンファクタ, オーガナイズド・セッション (os)). 交通・物流部門大会講演論文集, Vol. 2010, No. 19, pp. 257-260, Dec 2010.
- [5] Bernd Fröhlich, Henrik Tramberend, Andrew Beers, Maneesh Agrawala, and David Baraff. Physically-based manipulation on the responsive workbench. In *Proceedings of the IEEE Virtual Reality 2000 Conference*, VR '00, pp. 5-, Washington, DC, USA, 2000. IEEE Computer Society.
- [6] S. Hasegawa and M. Sato. Real-time rigid body simulation for haptic interactions based on contact volume of polygonal objects. *Computer Graphics Forum*, Vol. 23, No. 3, pp. 529-538, 2004.
- [7] Fumihiko Kato and Shoichi Hasegawa. Interactive cooking simulator: Showing food ingredients appearance changes in frying pan cooking -. In *Proceedings of the 5th International Workshop on Multimedia for Cooking & Eating Activities*, CEA '13, pp. 33-38, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [8] Gabriel Cirio, Maud Marchal, Sébastien Hillaire, and Anatole Lécuyer. Six degrees-of-freedom haptic interaction with fluids. *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, Vol. 17, No. 11, pp. 1714-1727, 2011.
- [9] 森井敦士, 上垣内翔太, 舟橋健司, 山本大介. VR 調理学習システムのための存在確率に基づく粒子による個体群の上下動の表現. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 16, No. 4, pp. 539-549, 2011.
- [10] 渡川祥子. 食品加熱の科学, 初版第 1 刷. 朝倉書店, 1996.
- [11] 石渡奈緒美, 堤一磨, 福岡美香, 渡部賢一, 田口靖希, 工藤和幸, 渡辺至, 酒井昇. 殺菌価を考慮したフライパンによるハンバーグ焼成時の最適調理: (第 1 報) モデル試料を用いた IH クッキングヒーターによるフライパン焼成伝熱および水分移動モデルの確立. 日本調理科学会誌, Vol. 45, No. 4, pp. 265-274, aug 2012.
- [12] 渡辺学, 三堀友雄, 酒井昇. 炒め調理過程の伝熱モデル. 日本食品工学会誌, Vol. 6, No. 4, pp. 269-278, dec 2005.
- [13] N. Umetani, K. Takayama, J. Mitani, and T. Igarashi. A responsive finite element method to aid interactive geometric modeling. *Computer Graphics and Applications, IEEE*, Vol. 31, No. 5, pp. 43-53, Sept 2011.
- [14] Jirina Housova and Petr Topinka. Heat transfer during contact cooking of minced meat patties. *Journal of Food Engineering*, Vol. 4, No. 3, pp. 169 - 188, 1985.
- [15] 矢川元基. 流れと熱伝導の有限要素法入門, 有限要素法の基礎と応用シリーズ 8, 初版, pp. 19-23 103-109. 培風館, 1983.
- [16] 日本食品工学会. 食品工学ハンドブック. 朝倉書店, 2006. p.34.
- [17] ZM Hu, JW Brooks, and TA Dean. The interfacial heat transfer coefficient in hot die forging of titanium alloy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 212, No. 6, pp. 485-496, 1998.
- [18] Steven R.Schmid, William R.D. Wilson, and Jiy-ing Liu. A friction and heat transfer module for hot forging simulation. *Final Report*, 2002.
- [19] 長谷川晶一, 田崎勇一, 大内政義, 高津勝, 三武裕玄, 白井暁彦, 岡田直樹, 市川宙, 赤羽克人, 藤井伸晃, 田上信一郎, 三武裕玄, 時崎崇, 須佐育弥, 松永昇悟, 花岡優介, 加藤 史洋他. Springhead2. <http://springhead.info/>.
- [20] 株式会社テトラフェイス. Metasequoia. <http://metaseq.net/jp/>.
- [21] Hang Si. On refinement of constrained delau-nay tetrahedralizations. In PhilippeP. Pbay, editor, *Proceedings of the 15th International Meshing Roundtable*, pp. 509-528. Springer Berlin Heidelberg, 2006.
- [22] J.N. IKEDIALA, L.R. CORREIA, G.A. FENTON, and N. BEN-ABDALLAH. Finite element modeling of heat transfer in meat patties during single-sided pan-frying. *Journal of Food Science*, Vol. 61, No. 4, pp. 796-802, 1996.
- [23] J.O. Aweda and M.B. Adeyemi. Experimental determination of heat transfer coefficients during squeeze casting of aluminium. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 3, pp. 1477 - 1483, 2009.

(2015 年 8 月 12 日受付)

[著者紹介]

加藤 史洋 (学生会員)



2008 年電気通信大学電子工学科卒業。2010 年同大学院知能機械工学専攻修士課程修了後, 東京工業大学大学院知能システム科学専攻博士課程にて日本学術振興会特別研究員 (DC1)。2014 年株式会社東芝研究開発センターインタラクティブメディア部門。2016 年 3 月博士 (工学)。同年 4 月より東京大学高齢社会総合研究機構特任研究員。バーチャルリアリティ, ヒューマンインタフェースの研究に従事。

三武 裕玄 (正会員)



2006 年東京工業大学工学部情報工学科卒業, 2008 年同大学院知能システム科学専攻修士課程修了, 同年日本学術振興会特別研究員, 2011 年同専攻博士課程修了。同年 東京工業大学精密工学研究所助教, 現在に至る。バーチャルクリエータ, バーチャルヒューマンの研究に従事。工学博士。

小野原 覚



2012 年電気通信大学情報工学科卒業, 2014 年東京工業大学大学院知能システム科学専攻修了, 2014 年 (株) 東洋ビジネスエンジニアリング 2015 年より航空自衛隊。在学中, ヒューマンインタフェースの研究に従事。

長谷川 晶一 (正会員)



1997 年東京工業大学工学部電気電子工学科卒業。1999 年同大学院知能システム科学専攻修士修了。同年ソニー株式会社入社。2000 年東京工業大学精密工学研究所助手。2006 年 9 月博士 (工学)。2007 年電気通信大学知能機械工学科准教授。2010 年東京工業大学精密工学研究所准教授現在に至る。