

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	リアルタイム伝熱シミュレーションによる加熱調理のバーチャルリアリティ
Title(English)	
著者(和文)	加藤 史洋
Author(English)	Fumihiro Kato
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10227号, 授与年月日:2016年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:長谷川 晶一,佐藤 誠,長橋 宏,中本 高道,高村 大也
Citation(English)	Degree:., Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10227号, Conferred date:2016/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

# 博士論文

リアルタイム伝熱シミュレーション  
による加熱調理のバーチャルリアリティ

加藤 史洋

東京工業大学大学院 総合理工学研究科  
知能システム科学専攻

2016年3月

リアルタイム伝熱シミュレーション  
による加熱調理のバーチャルリアリティ

博士論文審査委員会

主査	長谷川晶一	准教授
委員	佐藤誠	教授
委員	長橋宏	教授
委員	中本高道	教授
委員	高村大也	准教授

著作權所有者

加藤史洋

2016

# 目次

<b>第1章</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	バーチャルリアリティ	1
1.2	調理のバーチャルリアリティ	2
1.3	調理の理解の重要性	5
1.4	調理における加熱モデル	5
1.5	加熱調理のバーチャルリアリティに必要な要件	7
1.6	加熱調理における伝熱	7
1.6.1	エネルギー保存則	8
1.6.2	熱伝導の支配方程式の離散化	10
1.6.3	ガラーキン法に基づく有限要素法	10
1.6.4	境界条件	12
1.7	熱伝達境界モデル	14
1.8	本研究の目的	15
1.9	本論文の構成	16
<b>第2章</b>	<b>インタラクティブ調理シミュレータ</b>	<b>17</b>
2.1	目的	17
2.2	提案システムの構成	17
2.2.1	(A) 力覚インタフェース	18
2.2.2	(B) リアルタイム動力学シミュレーション	18
2.2.3	(C) リアルタイム伝熱シミュレーション	19
2.2.4	(D) リアルタイム食材変性シミュレーション	20
2.2.5	(E) グラフィクスレンダリング	20
2.2.6	(F) 映像提示装置	22
2.3	評価実験	23
2.3.1	試作システム	23

---

2.3.2	計算速度の評価	23
2.3.3	加熱調理に伴う変化の妥当性の評価	25
2.3.4	牛ステーキ肉断面の加熱に伴う調理変化の妥当性	25
2.3.5	野菜やエビの加熱に伴う調理変化の妥当性	27
2.4	被験者実験	29
2.5	結論	30
<b>第3章</b>	<b>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</b>	<b>32</b>
3.1	目的	32
3.2	要求分析	32
3.3	調理における伝熱再現シミュレータの構成	34
3.3.1	伝熱計算式の構成	35
3.3.2	境界条件	35
3.3.3	熱流束境界条件	36
3.3.4	熱伝達境界条件	36
3.3.5	熱放射境界条件	39
3.3.6	時間軸離散化と方程式の解法	40
3.3.7	温度の可視化	40
3.4	実験による動作の確認とパラメータ同定	41
3.4.1	実験環境	41
3.4.2	同一物体内での熱伝導計算の確認	42
3.4.3	空気への熱放射係数の同定	42
3.4.4	IH加熱流束分布モデルの同定	43
3.4.5	鉄板と金属試料間の熱伝達率の同定	43
3.5	提案シミュレーションの評価	44
3.5.1	金属試料の境界条件変化と温度経過の評価	44
3.5.2	牛もも肉の熱伝達率の同定	45
3.5.3	牛もも肉の両面焼きでの温度経過の評価	46
3.5.4	リアルタイム性の測定	47
3.6	まとめ	47

---

第 4 章 結論	51
4.1 結論 . . . . .	51
4.2 展望 . . . . .	51
参考文献	54

# 目次

1.1	微小直方体に出入りする熱量 . . . . .	9
2.1	提案システムの構成要素 . . . . .	19
2.2	食材はフライパン内に重畳表示する . . . . .	22
2.3	インタラクティブ調理体験システムの概観 . . . . .	22
2.4	3次元CGによる食材メッシュモデル. 左下は霜降りの牛ステーキ: MBS, 右下は赤身の牛ステーキ:LBSである. . . . .	24
2.5	片面からの加熱時:実際に焼いた時のステーキ断面の褐色変化 . . . . .	25
2.6	片面からの加熱時:ステーキ断面の褐色変化のシミュレーション結果 . . . . .	25
2.7	ステーキ反転時:実際に焼いた時の断面の褐色化の結果 . . . . .	26
2.8	ステーキ反転時:ステーキの断面の褐色変化シミュレーションの結果. 画像内1と2の間で反転している. . . . .	26
2.9	ステーキ肉の食材内部断面の様子(上段左:全体の温度分布, 同右: 断面の温度分布, 下段左:全体の焼け具合, 同右:断面の焼け具合) . . . . .	27
2.10	左:赤身のステーキ(左)と霜降りのステーキ(右)では熱伝導率が異 なる. 中央:加熱開始直後. 右:暫く時間が経った時. 左側の赤身の ステーキの方が熱が伝わり易いことが分かる.(色が赤に近いほど温 度が高く, 緑色に近いほど低い.) . . . . .	27
2.11	ニンジン, エビ, ネギの焼きシミュレーション結果 . . . . .	28
2.12	左:実際の調理結果, 右:シミュレータによる炒め調理結果 . . . . .	29
2.13	シミュレータによるミディアム焼きの獲得実験 . . . . .	31
3.1	伝熱の種類と構成 . . . . .	33
3.2	熱伝達境界での節点对応づけ模式図. 形状関数の影響を節点周囲に色 の濃度で図示. . . . .	38

---

3.3	(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 . . .	48
3.4	(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 . . .	49
3.5	黒体スプレー塗布した牛もも肉片 . . . . .	49
3.6	牛もも肉の熱伝達率同定. . . . .	50
3.7	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. . . . .	50

# 表 目 次

2.1	インタラクティブ調理体験システムの機器構成 . . . . .	23
2.2	メッシュの節点サイズ . . . . .	23
2.3	ニンジンやエビをフライパンに入れた炒め調理時の CPS. . . . .	24
2.4	同数のニンジンとエビをフライパンに入れた炒め調理時の CPS. . . . .	24
2.5	シミュレータで選択可能な加熱ヒーターの出力 . . . . .	30
2.6	焼け具合の定義 . . . . .	30
3.1	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 . . . . .	42

# 第1章

---

## 序論

ヒトの進化は調理と共にあったといわれている。“火の賜物-ヒトは料理で進化した”[1]の著者リチャード・ランガム博士へのインタビュー[2]によれば、180万年前では火の使用の発達と符合するようにホモ・エレクトスの歯はより小さくなり、胃腸の容量が縮小していたという。肉食による進化のほか、食物を料理して食べることで、食物は柔らかく消化されやすくなり、また、より多くのエネルギーを得られるようになり、摂取する食物が高品質になったことで胃腸は小さく変化したと考えられている。

現代の生活においても、食材の調理は生活に欠かせない。調理により、安全性や摂取の効率性が高まるほか、保存性が良くなる。また、食味に幅が生まれることで食の楽しみが広がる。食事や、食事をつくる過程である調理にはエンタテインメント性がある。つまり調理は生命維持の効率を高めるにとどまらず楽しみの根源でもあり、生活の豊かさの一端を担っているといえる。筆者らは調理の効率の向上や、楽しさを増すために、練習を可能にする加熱調理のバーチャルリアリティの実現をしたいと考えている。

### 1.1 バーチャルリアリティ

バーチャルリアリティ（以下、VR）は“バーチャルリアリティ学”[3]の中で以下のように定義されている。

”バーチャルはバーチュ（virtue）の形容詞であり、バーチュは、徳とか、善行とか、長所あるいは効力などの意を持つが、さらに原義に戻ると、その物をその物として在らしめる本来的な力という意味を持つ。つまり、それぞれのものには表層的な部分と本質的な部分があって、その本質的な部分がバーチュであり、その形

容詞であるバーチャルは、「表層的にはそうではないが、本質的にはそうである」という意味である。(中略)つまり、「みかけや形はそのものではないが、本質あるいは効果としてはそのものであること」である。”

また、バーチャルリアリティの三要素として

- ・ 実時間相互作用
- ・ 3次元空間
- ・ 自己投射

が提唱されている。理想的なバーチャルリアリティシステムはこの3要素をすべて備えている。とある。

バーチャルリアリティシミュレータの例は数多く、医療手技訓練のためのVRシミュレータ [4] [5] [6] やフライトシミュレータ [7], ドライビングシミュレータ [8] などがある。VRシミュレータには“3次元空間”にて、“自己投射”を可能とする体験や作業を再現するために、“実時間相互作用”をもつインタラクシオ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。インタラクティブ操作性があれば、手を使った作業により組立作業 [9] や、力覚インタラクシオン [10] が実現可能となる。

本研究ではバーチャル・リアリティの三要素から調理のバーチャルリアリティに必要なと考えられる要素について見きわめ、「みかけや形はそのものではないが、本質あるいは効果としてはそのものであること」を満たすシミュレータによる調理のバーチャルリアリティの実現をめざす。

## 1.2 調理のバーチャルリアリティ

### 調理のバーチャルリアリティ

広義には、料理のレシピを扱うWebサイトは主として視覚での調理VRと考えられる。食材と調理手順や完成図などからなり、完成図から料理を味わった気分に入り調理操作や手順を想像する。クックパッド [11], 楽天レシピ [12], レシピ大百科 [13] など数多くのレシピサイトがある。

調理した結果である食事を味わう局面でのVRについて提案がなされている。料理を盛り付けたお皿の彩りをよく見せるための映像投影システム [14] の提案では、

食事をより楽しむために、料理に使われている色を分析し適切に決定した映像を投影する。調理中の食材の見た目を制御することを目的としたものではない。

視覚・嗅覚・味覚間の感覚相互作用を利用することでクッキーを食べた際の味を変化させる味覚提示手法 [15] や食事の量を大きく見せる視覚提示手法 [16] が提案されている。

### 食材のグラフィクス表現

食材や調理アニメーションを CG で表現する研究やゲーム作品がある。中身の詰まった食品 CG モデルの生成手法 [17] や、果物など食品内部の繊維など組織構造をテンソル場パッチの組み合わせから生成する手法 [18]、食材表面の光の拡散を考慮した表現手法 [19] が提案されている。また、クレープ調理時の焼き模様を、カラーマッピングとバンプマッピングを用いて表現する手法 [20] の提案がなされている。これらはリアルな食品 CG の生成手法の確立を目的としている。そのため、食品 CG の加熱に伴う調理変化を対象としているものではない。本論文では、加熱調理による食品の焼け具合を再現する CG の生成手法の構築をめざす。

### 調理ゲーム作品

家庭用ゲームむけのままごとゲーム [21] ではゲームコントローラの加速度を使って卵を割ったり、液体をかき混ぜたり、フライパンを傾けてバターを溶かすといった調理操作や流れが体験可能である。また、カレー調理の進行に合わせた匂い提示を目的として「香る料理ゲーム」が提案 [22] されている。調理変化を 2次元のアニメーションにて表現し、カレーの匂いをユーザに提示することで、カレー調理を体験できる。これらは予め作成した調理手順を体験するものであり、加熱による調理変化をシミュレーションにより再現していない。本論文では、加熱調理の練習をするために調理操作入力により調理状態が変化する加熱調理シミュレータの構築をめざす。

### インタラクション可能な調理の数値シミュレーション

調理操作に伴う食材の動きについて、数値シミュレーションを用いた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 [23] が提案されており、また、生地液体粒子やクレープ薄膜との6自由度の力覚インタラクションが可能である。また、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手法 [24] の提案では、wiiリモコンを用いてフライパンを傾ける操作入力が可能である。本論文では、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をめざす。

食材の加熱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ことをめざし、やかんの形状変更による熱対流を可視化する手法 [25] が提案されている。インタラクティブなやかんの形状変更に対して、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る熱対流を可視化している。以上より、本論文で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。

### 調理のバーチャルリアリティに必要な VR 三要素

VR 三要素に対応する、調理のバーチャルリアリティに必要な構成を以下に示す。シミュレータ利用者の3次元空間とシミュレータ内で表現した3次元空間をつなぐようにシミュレータシステムを構成する（3次元空間）。シミュレータ利用者の操作入力が逐次的にシミュレータ内の調理器具や食材の操作に反映され、シミュレータ内の調理器具の運動変化や食材の調理変化が利用者にリアルタイムに提示される（実時間相互作用）。以上より、利用者の3次元空間での操作入力が、シミュレータ内の調理器具の動きとシームレスにつながり、シミュレータが生成した映像が利用者の3次元空間内で違和感なく投影されることで（自己投射）、シミュレータ内の調理器具や食材の存在感を感じることができると考えられる。

本論文では調理器具を動かすことによる調理操作の再現とともに、調理器具や食材の動きに伴う接触変化を反映した伝熱シミュレーションを付加することで、加熱調理を再現するバーチャルリアリティを構築し、食材内部の温度や焼け具合を示すCGを生成して体験者に提示する。また、調理練習を可能とし、調理スキルの習得を目指すものである。VR調理にすることで、現実で失敗して食材を無駄にしまいうリスクを低く抑えて楽しく練習することが可能となり、理解を深められると考えられる。調理の理解の重要性について次の節に説明する。

### 1.3 調理の理解の重要性

料理を作るとき、料理を作る手順について書かれたレシピを参照しながら料理をつくる活動が広く行われている。どの料理をつくるのかを決める理由は人それぞれに様々あり、その目的にあうようなレシピを探し選択する。レシピが決まれば食材や道具を準備し、いざ調理にとりかかる。しかし、レシピの手順や調理者の意図通りに調理することは、初心者にとっては難しい。多くの場合、料理レシピには、食材や調理手順、完成イメージなどが記載されているが、調理手順は曖昧な表現を含んでいたり、ある程度の調理経験を要求していたり、レシピの著者の調理環境の差異が分かるように記載されていなかったりと、レシピ通りの手順をこなしても目的とする完成度の料理をつくるのが難しい場合がある。

近年、インターネットには調理のプロではないアマチュア料理家のレシピの掲載が増えており、こうした状況に拍車がかかっている。しかしこれらの問題は、調理を理解している者であれば、回避することが可能である。不足している情報を経験や知識から補うことができる。調理をよく理解するためには、調理の効果に着目し繰り返し練習することが必要である。プロの調理人は、その膨大な調理経験を繰り返し積むことで調理を深く理解している。調理経験の浅い者が、経験を積み熟達した者と同様に調理を理解することは困難である。調理を深く理解するためには多くの時間と、多くの食材を用いた練習が必要であり、これを一朝一夕に身につけることは困難である。

経験の浅い者が調理の理解を深めるためには、少ない練習で調理操作の効果について理解を深めることが必要である。これを助けるために、温度や焼け具合などの調理中の内部状態を可視化することで支援する方法が考えられる。しかし、これらは現実の料理では見ることでできない状態である。可視化のためには、シミュレーションを行うのが一つの方法であり、現実に忠実なシミュレーションモデルをつくることが求められる。

### 1.4 調理における加熱モデル

調理における食材の加熱による物性変化や熱伝達経路、調理モデルの解明を目的に様々な研究がなされている。各種の食材について加熱変性の実験やシミュレーションによるモデル化の研究がなされている。ジャガイモ [26] や豚肉 [27] を水中で加熱

し、温度や硬さの時間変化を調べている。これらは食材周囲の温度を一定の水温とみなしているが、本研究では加熱する調理器具の温度に偏りがあるシミュレータを再現することで、被加熱食材の周囲温度が一定ではない加熱状態へ対応する。

プロの炒め調理の解析を目的として、炒め調理におけるあおり操作前後での、中華鍋肌や具材の平均温度変化を計測するサーモグラフィ動画画像解析環境を構築し、プロ調理と家庭調理の温度変化の違いについて調べた研究 [28] がある。プロ調理では、あおり前後で鍋肌や食材の温度を大きく上昇させていることを突き止めている。低温加熱調理 (真空調理) の解明を目的とし、和牛もも肉のタンパク質の変性速度を、熱分析法によって算出する手法 [29] が提案されている。スチームコンベクションオーブン加熱を再現した境界条件では、試料内の温度分布に基づいた 3 次元伝熱計算から肉タンパク質の未変性分布を求めている。前者は加熱調理の解明を目的としているが、加熱調理体験を可能とするものではない。後者は、牛肉の加熱による変性モデルの構築に役立つ、食品物性の解明を目的とした研究であるが調理操作の変更に伴う調理効果を提示することをめざしたものではない。

加熱調理における伝熱の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としたボロニアソーセージ試料の加熱モデルの提案 [30] では、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するとともに、空気への熱伝達モデルなどを同定している。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を算出する手法の提案 [31] もなされている。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。

ハンバーグパティの片面焼きでの伝熱解析の報告 [32] がある。パティをフライパンで片面焼きや反転後の両面焼きの際の熱伝達モデルの有限要素法による解析を目的としている。実験では、フライパンや空気との熱伝達率を同定するとともに、水分の蒸発による減少率を同定している。円柱形状のパティの断面は 209 節点で区切られた 2 次元の有限要素メッシュであり、熱伝達境界条件には、フライパン温度を  $140 \cdot 180 [^{\circ}\text{C}]$  と固定した値を用いている。パティ調理時に調理器具への押し付け圧力の変動や調理状態の進行にともなう熱伝達率の変動結果の報告 [33] がある。本研

究では、食材と調理器具との接触圧力の再現を対象としていないが、本研究の実現により接触領域の変動に対応して圧力を再現することで、例えば牛肉の変形により調理器具から浮いていしまう対象を押さえつけることで伝達を良くする調理操作の再現が、本研究の発展により可能になると考えられる。

次節にて、調理シミュレータの再現に必要と考えられる調理のリアリティ要素について述べる。

## 1.5 加熱調理のバーチャルリアリティに必要な要件

調理は加熱調理と非加熱調理とに分類 [34] されるが、本研究では加熱調理を対象とする。非加熱調理の例として、切る、混ぜる、漬けるなどがある。これらの作業は予測しやすく、タイミングを見極めることは容易である。一方で、加熱調理の例である、焼く、炒める、煮るなどの操作は予測が難しく、操作のタイミングが重要である。また、温度を見ることはできず、食材内部の焼け具合を知ることはできないためである。

加熱調理のバーチャルリアリティの実現には、現実の加熱調理で必要となる調理操作の再現と加熱調理による調理効果の再現、調理状態の判断に必要な感覚の提示が必要である。本研究では調理器具を用いた調理操作の入力と、調理操作の入力に伴う調理効果の生成、食材の調理状態を確認するための調理映像や調理が進行中であることを示す焼ける音の提示とを備えた加熱調理のバーチャルリアリティを実現することを目的とする。バーチャルリアリティで加熱調理を実現することで、温度や焼け具合など食材内部の見えない状態を可視化することや、繰り返し練習することが可能となる。食材内部の温度や焼け具合を確認しながら繰り返し練習することで、現実の調理で用いることのできる調理技術を身につけることが可能になると考えている。そのため、加熱調理のバーチャルリアリティシステムを用いた調理練習の効果を被験者実験により評価する。

## 1.6 加熱調理における伝熱

加熱調理の再現のためには、伝熱による温度変化の再現が必要である。食材の温度変化により食材の性質が変化する。例えば、水分の蒸発や乾燥が促進、タンパク

質の変性や細胞壁の軟化，焦げによる風味の変化などが生じる．温度の時系列変化がこれらを支配している．伝熱様式は，伝導，対流，放射の3種に分類される．伝導伝熱は，固体内あるいは静止している流体内部での伝熱 [35] を対象とする．対流伝熱は，水系の煮る，油系の揚げる調理がある．放射伝熱はガスや炭火焼きなど表面で熱を受ける調理，マイクロ波を用いた電子レンジなど食材の内部深くに浸透する加熱とがある．伝導伝熱や対流伝熱では，調理器具から食材の界面を介して伝熱する．本論文では，伝導伝熱や対流伝熱による加熱調理の再現をめざす．伝導伝熱や対流伝熱では，伝熱の界面を定義することが重要なため，食材と伝熱手段との境界を示す境界条件について考える．境界条件を定めることで，調理器具から食材への伝熱を計算可能になり，食材の温度変化が計算可能になると考えられる．

本節では加熱調理に必要な伝熱を見極めるために境界条件の導出まで述べる．熱伝導の支配方程式の導出 [36][37] を次に示す．支配方程式は，次節のエネルギー保存則に“フーリエの法則”を導入することで導出 [36] される．

### 1.6.1 エネルギー保存則

静止している連続体の内の微小直方体の持つ単位質量当りのエネルギー  $E$  は，

$$E = e \quad (1.1)$$

ただし， $e$  は内部エネルギーを表し，比熱  $c$ ，温度  $T$  を用いると，

$$e = cT \quad (1.2)$$

で表せる．微小直方体要素中に含まれるエネルギーは密度を  $\rho$  とすると， $\rho E dx dy dz = \rho c T dx dy dz$  である．単位時間当たり変化率は， $\frac{\partial(\rho c T)}{\partial t} dx dy dz$  となる．ただし，微小直方体の  $x, y, z$  軸方向の微小幅をそれぞれ  $dx, dy, dz$  とする．エネルギー保存則より，

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho c T)}{\partial t} dx dy dz \\ & = \left( \text{単位時間に外部から要素内部に供給される熱量} \dot{Q} dx dy dz \right) \\ & - \left( \text{単位時間に熱伝導によって外部に流出する熱量} \dot{q} \right) \end{aligned} \quad (1.3)$$

ここで， $\dot{Q}$  は単位時間に単位体積あたりに外部から供給される熱量で，強制加熱，放射，化学反応によるものなどがある．ただし，内部で熱が発生しないものとする．

発生したり，吸収して温度上昇以外のエネルギーとして変性が生じたりする場合には上式に加えて  $\dot{q}$  に加わる熱量を考慮する必要がある。

フーリエの法則：

“単位時間に単位面積を移動する熱量は，その点における温度勾配に比例する”

より，ある点における温度を  $T$ ，熱伝導係数を  $\lambda$  とすれば，その点における  $x, y, z$  方向に伝導する熱量の単位時間，単位面積当たりの値は，それぞれ  $-\lambda_{xx} \frac{\partial T}{\partial x}$ ， $-\lambda_{yy} \frac{\partial T}{\partial y}$ ， $-\lambda_{zz} \frac{\partial T}{\partial z}$  と書ける。したがって， $dx, dy, dz$  が十分に小さい時， $x$  で  $x$  軸に垂直な面から流入する熱量は， $(-\lambda_{xx} \frac{\partial T}{\partial x}) dydz$  となる。微小距離  $dx$  離れた点  $x + dx$  では，位置  $x$  での温度勾配  $\frac{\partial T}{\partial x}$  を用いて， $T_{x+dx} = T + \frac{\partial T}{\partial x} dx$  となるので，流出する熱量は， $-\lambda_{xx} \frac{\partial T_{x+dx}}{\partial x} dydz = (-\lambda_{xx} \frac{\partial T}{\partial x}) dydz + \frac{\partial}{\partial x} (-\lambda_{xx} \frac{\partial T}{\partial x}) dx dydz$  となる。

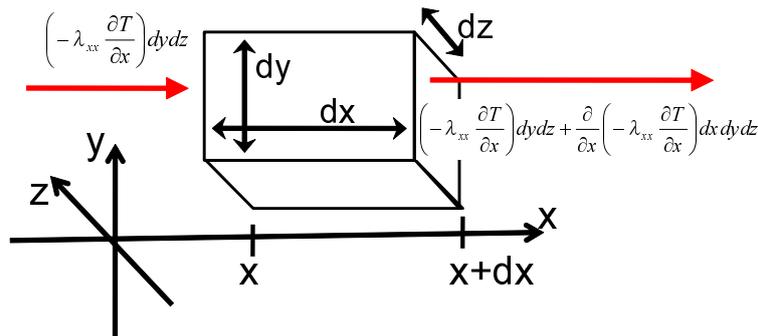


図 1.1: 微小直方体に入出入りする熱量

よって，単位時間に単位直方体から流出する熱量は， $\frac{\partial}{\partial x} (-\lambda_{xx} \frac{\partial T}{\partial x}) dx dydz$  となる。同様にして， $y, z$  軸方向でも導出すると，式 1.3 の  $\dot{q}$  は，

$$\dot{q} = - \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] dx dy dz \quad (1.4)$$

となる。

以上より，式 1.3 に  $\dot{q}$  を代入して，両辺を  $dx dy dz$  で除すると，

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \lambda_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \lambda_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \lambda_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} \quad (1.5)$$

ただし，比熱を  $c$  とする。

### 1.6.2 熱伝導の支配方程式の離散化

本節では、導かれた熱伝導の支配方程式を基に、固体内の3次元熱伝導式をガラーキン法で離散化する。式(1.5)を整理すると次式になる。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q} \quad (1.6)$$

ただし、 $T[K]$ : 温度,  $\lambda[J/(m \cdot s \cdot K)]$ : 熱伝導率,  $Q$ : 内部発熱率 ( $\dot{Q}$ は単位時間に単位体積あたりに供給される熱量  $[J/s] \cdot$  発熱率),  $\rho[kg/m^3]$ : 密度,  $c[J/(kg \cdot K \cdot s)]$ : 比熱,  $t[s]$ : 時刻 である。

熱伝導問題の境界条件は熱流速を  $q[J/(m^2 \cdot s)]$ , 境界上での外向き法線ベクトルを  $n$  とすると、フーリエの法則より次の式で与えられる ([36] の pp.103 の (3) 式)。

$$q = -[\lambda] \frac{\partial T}{\partial n} \quad (1.7)$$

以上より、熱伝導問題の支配方程式と有限要素の境界条件が与えられたので、支配方程式をガラーキン法によって離散化する。

### 1.6.3 ガラーキン法に基づく有限要素法

ガラーキン法は変分法の一つであり、変分法を拡張した重みつき残差法を基本とする近似解法である。解析対象を有限な要素に分割し、要素内の温度分布を次のように表現する。

$$T(x, y, z, t) = [N(x, y, z)] \{T(t)\}_{ele} \quad (1.8)$$

ただし、有限要素内での任意位置  $(x, y, z)$  ・任意時間  $(t)$  の温度を  $T$ , 要素内部温度とを結びつける重み関数  $[N](1 \times n$  の行マトリクス,  $n$ : 有限要素の接点数) と、ある時刻  $t$  における有限要素の節点温度ベクトル  $\{T\}_{ele}$  で表す。  $[N]$  を重み関数として、式(1.6)にガラーキン法を適用すると、以下の式になる。

$$\int_v [N]^T \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q} - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \right\} dv = 0 \quad (1.9)$$

ただし、上付き添え字  $T$  は転置を、 $v$  は要素領域を表す。(ガラーキン法は  $[N]^T$ (転置) を付け加える。)

上式について、次のように3つの項に分けて考える。

$$\int_v [N]^T \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right\} dv \quad (1.10)$$

$$\int_v [N]^T \frac{\partial Q}{\partial t} dv \quad (1.11)$$

$$\int_v [N]^T \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dv \quad (1.12)$$

ここで、式(1.10)は、2階微分項を含むので、部分積分を用いて1階微分に弱形式化を行う。

$$\int_v N \nabla^2 A dv = \int_S N \nabla A \cdot n dS - \int_v \nabla N \cdot \nabla A dv \quad (1.13)$$

式(1.13)を用いて、式(1.10)を変形すると、次式のようにになる。

$$\begin{aligned} & \int_v [N]^T \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right\} dv \\ &= \int_S [N]^T \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \lambda \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \lambda \frac{\partial T}{\partial z} n_z \right) dS \\ & - \int_v \left\{ \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial \{N\}^T}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial \{N\}^T}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right\} dv \end{aligned} \quad (1.14)$$

式(1.8)を式(1.14)に適用すると、次式のようにになる。ただし、節点温度は空間の関数ではないので、積分の外に出すことができる。

$$\begin{aligned} & \int_v [N]^T \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right\} dv \\ &= \int_S [N]^T \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \lambda \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \lambda \frac{\partial T}{\partial z} n_z \right) dS \\ & - \int_v \lambda \left\{ \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N] \{T\}_{ele}}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N] \{T\}_{ele}}{\partial y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \frac{\partial [N] \{T\}_{ele}}{\partial z} \right\} dv \\ &= \int_S [N]^T [\lambda] \frac{\partial T}{\partial n} dS \\ & - \int_v \lambda \left\{ \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \frac{\partial [N]}{\partial z} \right\} dv \cdot \{T\}_{ele} \end{aligned} \quad (1.15)$$

(ただし、 $[N]^T$ (転置)はガラーキソ法によるもの、 $[N]$ は $T = NT$ によるものである。)

式(1.15)の右辺第一項に式(1.7)のフーリエの法則の式を適用すると

$$\int_S [N]^T [\lambda] \frac{\partial T}{\partial n} dS = - \int_S q [N]^T dS \quad (1.16)$$

が得られる。以上より、支配方程式に Galerkin 法することで、次の離散化された式が得られる。

$$\begin{aligned}
& - \int_v \lambda \left\{ \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \frac{\partial [N]}{\partial z} \right\} dv \cdot \{T\}_{ele} \\
& - \int_S q [N]^T dS + \int_v [N]^T \frac{\partial Q}{\partial t} dv \\
& - \int_v \rho c [N]^T [N] \frac{\partial \{T\}_{ele}}{\partial t} dv = 0
\end{aligned} \tag{1.17}$$

両辺に  $-1$  をかけて

$$\begin{aligned}
& \int_v \lambda \left\{ \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \frac{\partial [N]}{\partial z} \right\} dv \cdot \{T\}_{ele} \\
& + \int_S q [N]^T dS - \int_v [N]^T \frac{\partial Q}{\partial t} dv \\
& + \int_v \rho c [N]^T [N] \frac{\partial \{T\}_{ele}}{\partial t} dv = 0
\end{aligned} \tag{1.18}$$

上式を整理すると、次式になる。

$$[K] \{T\}_{ele} + [C] \frac{\partial \{T\}_{ele}}{\partial t} = \{F\} \tag{1.19}$$

$$[K] = \int_v \lambda \left\{ \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \frac{\partial [N]}{\partial z} \right\} dv \cdot \{T\}_{ele} \tag{1.20}$$

$$[C] = \int_v \rho c [N]^T [N] \frac{\partial \{T\}_{ele}}{\partial t} dv \tag{1.21}$$

$$\{F\} = \int_v [N]^T \frac{\partial Q}{\partial t} dv - \int_S q [N]^T dS \tag{1.22}$$

式 (1.22) 中の  $\int_S q [N]^T dS$  について  $q$  を次に示す境界条件と置き換えることで導入する。

#### 1.6.4 境界条件

次に、境界条件について考える。境界条件には、温度固定条件、熱流速条件、熱伝達条件、熱輻射条件の4つの境界条件がある。

**温度固定境界条件：**

温度固定境界条件は，有限要素法での固定境界条件に相当し，境界  $S_1$  上で固定温度  $T_{fix}$  である境界を設定する．

$$T = T_{fix} \quad (\text{境界 } S_1 \text{ 上で}) \quad (1.23)$$

物体内部の伝導によらず，境界温度を固定する温度境界条件である．

**熱流速境界条件：**

熱流速境界条件では，境界  $S_2$  上で熱流速  $q_0[J/(m^2 \cdot s)]$  が流出入するという境界条件である．

$$q = q_0 \quad (\text{境界 } S_2 \text{ 上で}) \quad (1.24)$$

したがって，式 (1.22) 第二項である境界積分項は，次式のようにになる．

$$\int_{S_2} q[N]^T dS = \int_{S_2} q_0[N]^T dS \quad (1.25)$$

**熱伝達境界条件：**

熱伝達境界条件では，境界  $S_3$  上で固体表面と周囲を流れる流体などとの間での熱伝達が生じる．熱伝達率を  $\alpha[J/(m^2 \cdot K \cdot s)]$ ，周囲の流体などの温度を  $T_c$  とすると，

$$q = \alpha(T - T_c) \quad (\text{境界 } S_3 \text{ 上で}) \quad (1.26)$$

同様にして，式 (1.22) 第二項である境界積分項は，次式のようにになる．

$$\begin{aligned} \int_{S_3} q[N]^T dS &= \int_{S_3} \alpha[N]^T (T - T_c) dS \\ &= \int_{S_3} \alpha[N]^T ([N] \cdot T_{ele}) dS - \int_{S_3} \alpha T_c [N]^T dS \\ &= \int_{S_3} \alpha [N]^T [N] dS \cdot T_{ele} - \int_{S_3} \alpha T_c [N]^T dS \end{aligned} \quad (1.27)$$

熱輻射境界条件：

熱輻射境界条件では，境界  $S_4$  上で周囲環境に対して熱輻射が行われる．熱輻射率を  $h[J/(m^2 \cdot K \cdot s)]$ ，周囲環境温度を  $T_{OUT}$  とすると，次式のようになる．

$$q = h(T - T_{OUT}) \quad (\text{境界 } S_4 \text{ 上で}) \quad (1.28)$$

同様にして，式 (1.18) での境界積分項は，次式のようになる．

$$\begin{aligned} \int_{S_4} q[N]^T dS &= \int_{S_3} h(T - T_{OUT})[N]^T dS \\ &= \int_{S_4} h([N] \cdot T_{ele})[N]^T dS - \int_{S_4} hT_{OUT}[N]^T dS \\ &= \int_{S_4} h[N][N]^T dS \cdot T_{ele} - \int_{S_4} hT_{OUT}[N]^T dS \end{aligned} \quad (1.29)$$

次節では，境界条件について本研究と関連する研究事例を説明する．

## 1.7 熱伝達境界モデル

物体間の熱伝達シミュレーションにおける研究事例について述べる．本研究で対象とする熱伝達シミュレーションでは，調理器具の操作が可能で，操作に応じて食材への伝熱の変動を計算するために，調理器具と食材との接触の変化や，接触箇所での調理器具の温度が反映される熱伝達境界条件を再現する．

### 境界の設定範囲

物体同士の熱伝達を計算するモデルが提案されている．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 [38] 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 [39] が提案されている．本研究では，接触境界位置のリアルタイムな変化に対応する境界領域の設定が必要である．また，これらはリアルタイムな計算に対応することをめざすものではない．

### 熱伝達率の変動

また、熱伝達境界面の熱伝達率の変化要因について研究報告がある。被加熱物体を加熱器具に対して押し付ける圧力の変動によって熱伝達率に変動が生じることを分析している。チタンの鋳造にて圧力がない時の熱伝達率  $234[\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s})]$  が  $200[\text{MN}/\text{m}^2]$  の圧力により最大  $2474[\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s})]$  へと推移したとする報告 [38] や鉄鋳型でのアルミのスクイズ鍛造における熱伝達率を算出する式を導出した報告 [40] がある。  $500[^\circ\text{C}]$  未満の固体化の過程で熱伝達率は  $h_s = 3.081T + 1.303P - 232.942$  と導出している。ただし、 $h_s$  は熱伝達率、 $T$  はアルミニウムの温度、 $P$  は圧力である。本論文では、熱伝達率の変動は対象としない。将来、食材の変形の再現モデルの導入とともに、食材押さえつけによる調理の再現ではこれらを考慮する熱伝達シミュレーションを構築したいと考えている。

以上より、本論文では加熱調理器具と食材との接触位置変化による、熱伝達境界位置のリアルタイムな変動がある場合にも、接触位置での熱伝達境界条件を再現する。また、計算はリアルタイムで実施する必要がある。そのため、熱伝達面での節点の位置の対応を簡略化した手法を提案する。ただし、熱伝達率の変動は対象に含めない。

## 1.8 本研究の目的

以上の関連研究をふまえて、バーチャル・リアリティの三要素を構成する調理のバーチャルリアリティの実現のため VR 三要素から考えたシミュレータ利用者の3次元空間とシミュレータ内で表現した3次元空間をつなぐように構成したシミュレータシステムを用いシミュレータ利用者の操作入力がありリアルタイムにシミュレータ内の調理器具や食材の操作にシームレスに反映され、シミュレータ内の調理器具の運動変化や食材の調理変化などのシミュレータが生成した映像が利用者にリアルタイムに3次元空間内の映像として提示される機能をもち、シミュレータでの食材の重さや調理の音を感じることができる VR 調理シミュレータを構築する。食材の加熱調理の経過の映像や重さ、音の提示により調理結果の確認操作が可能な VR シミュレータを構成する。料理レシピのような完成図だけではなく、調理途中での調理操作による調理結果の生成を行う。調理操作の入力を可能とし、インタラクティブに食材と調理器具との相対位置や接触変化の再現する。加熱調理による食品の焼け具合

や温度変化などの調理変化を可視化するグラフィクスを構成するが、食材表面と食材内部の調理状態も可視化する。調理器具と食材との間での伝熱を再現することで、食材が接する箇所からの熱の伝達、また調理器具内の温度の偏りを再現する。熱の伝達はリアルタイムな調理操作入力に伴う、調理器具と食材との熱伝達境界位置の変動をリアルタイムに計算するために、熱伝達面での節点位置の対応を簡略化した手法を提案する。また、熱伝達率の調理に伴う変動は対象に含めない。以上により構成する加熱調理のバーチャル・リアリティシステムであれば、調理操作による焼け具合などの調理効果をリアルタイムで可視化することができると考えられる。本システムを用いることで、練習の練習が可能になると考えられるため、調理スキルの習得への効果を検証する。

## 1.9 本論文の構成

本論文は4章から構成される。第1章「序論」では、バーチャルリアリティの定義や従来のバーチャルリアリティ事例、調理の理解の重要性、加熱調理のバーチャルリアリティ、調理工学分野での加熱モデルの事例、伝熱方程式の導出と境界条件、熱伝達シミュレーション研究について関連研究を紹介しながら述べた。第2章「インタラクティブ調理シミュレータ」では、加熱調理の練習が可能なシステムの構築手法について示すとともに、調理シミュレータを用いた調理の練習により、調理の練習の効果を評価する。第3章「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」では忠実に伝熱を再現する伝熱シミュレータを構築し、牛肉を用いた加熱実験によりシミュレータ結果が実測値と一致することを確認する。第4章「結論」では本論文をまとめ、今後の展望について述べる。

## 第2章

---

# インタラクティブ調理シミュレータ

調理の訓練が可能なインタラクティブ調理シミュレータの構成方法について提案する。また、本提案による調理シミュレータを用いることで得られる調理技術の習得効果や、シミュレータで得た調理技術の、現実の調理での活用について評価する。

### 2.1 目的

現実の調理では食材内部の温度や焼け具合が見えないため調理状態を判断しにくい。食材内部の調理状態を可視化し確認しながら調理の練習をすることで、加熱調理操作の効果の理解が進むと期待している。

加熱調理の訓練が可能なバーチャルリアリティ実現のために食材内部の温度や焼け具合などの見えない調理状態の可視化が可能な加熱調理シミュレータを構築することを目的とする。また、加熱調理シミュレータを用いて繰り返し練習が可能な試作システムをつくり、システムを用いて練習することで、調理技術の習得が可能であるか評価を行う。

試作システムの評価では、調理による食材の焼け具合の変化を表現するCGの生成結果や、算出する計算速度からのインタラクティブ性を評価する。ユーザー評価では、シミュレータを用いた調理練習による効果を評価し、練習から得た調理技術が現実の調理で活かすことのできる可能性について考察する。

### 2.2 提案システムの構成

フライパン用いた焼き・炒め調理の体験システムを提案する。

フライパン調理の練習のために、操作者の調理操作による調理効果が視覚的に即時提示される必要がある。操作者の調理操作入力にはフライパンの動きとして入力され、フライパン内の食材を動かす。食材にはフライパンからの熱を伝え、食材には加熱調理による化学変化からタンパク変性や褐色化が生じるためこれを表現する必要がある。

また、食材がフライパンの上にある分だけの重さの提示や、フライパンと食材が衝突する刺激があると入力しやすいと考えられる。そこで、これらの要求を満たすために、試作システムを次の要素で構成する。(A) 力覚インタフェース、(B) リアルタイムな剛体動力学シミュレーション、(C) リアルタイムな伝熱シミュレーション、(D) リアルタイムな食材変性シミュレーション (E) グラフィクスレンダリング、(F) 映像提示装置また、試作システムでは食材として牛ステーキ肉、ネギ、ニンジン、エビを作成し評価で用いた。

### 2.2.1 (A) 力覚インタフェース

SPIDARG6[41] を応用し、フライパン把持部を備えた力覚インタフェースを用いる。インタフェースの体験者はフライパンを操作することで位置と回転で6自由度の入力が可能である。SPIDARG6のグリップを球からフライパンに置き換えるために、糸の結合場所やモーター配置を変更する。フライパンに食材の重さを提示するためにフライパンの底面よりも重力方向である下側にモーターを配置し、糸をフライパン底部に結合する。糸は8本用い、フライパンの手間と奥、左右にそれぞれ2本ずつ結合する。3 DCG シーン内では、体験者によるフライパンの並進・回転操作入力に同期して3 DCG のフライパンが動く。フライパンの上に食材が置いてある場合には、その重さやフライパンへの食材の衝突による振動が、体験者が握っている実世界のフライパンにフィードバックされる。

### 2.2.2 (B) リアルタイム動力学シミュレーション

動力学シミュレーションは、動力学演算ライブラリ Springhead2 [42] を用いて構成する。Springhead2では、物体は凸形状の剛体の組み合わせで表現している。食材とフライパンの剛体間で接触を判定計算する。

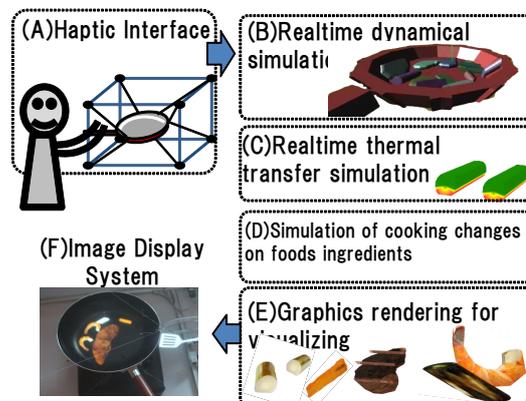


図 2.1: 提案システムの構成要素

### 2.2.3 (C) リアルタイム伝熱シミュレーション

熱伝導の支配方程式はフーリエの法則より，次式を用いる．

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.1)$$

ただし，要素内の任意点における温度を  $T[K]$ ，熱伝導率を  $\lambda[W/(m \cdot K)]$ ，比熱を  $c[W/(kg \cdot K \cdot s)]$ ，密度を  $\rho[kg/m^3]$  とする．熱伝導率は物体内で均質で，等方性があるものとする．

有限要素法を用いて，上の式を空間・時間軸で離散化して計算式を導出する．通常の有限要素法では，メッシュ節点間の熱伝導の計算に形状関数を用いる．本研究では形状関数は用いずに，節点の点間を1次元の線分の集合とみなして計算を構成した．使用するメッシュは立方体の集合であると仮定し，メッシュ内部の線分の断面積は線分の長さの平方で計算した．本計算手法は，使用するメッシュ側に制限がある計算モデルを用いている．伝熱の計算は，食材内部にのみ用いる．熱伝導率は食材固有のものを用いる．熱伝導率や比熱の値は [35] 掲載の値を用いた．

フライパンから食材への熱伝達の計算の実行は，フライパンの内側の底から一定距離にある食材メッシュの節点の温度を変更することで代替する．フライパン底の温度を任意に変化させ，フライパンに接している食材への熱伝達量を計算する．動力学シミュレーションでの接触計算では食材がフライパンに沈み込む．食材メッシュの節点間隔は食材により異なるため，フライパン内に沈み込む節点の数も変動する．食材底面にある節点にのみ熱伝達量を与えために，フライパン底から食材へ熱伝達量を与える範囲を食材メッシュ毎に設定する．

## 2.2.4 (D) リアルタイム食材変性シミュレーション

### 水分の蒸発

食材の温度が上昇に伴い、水の沸点 100 度を超える節点では水分の蒸発を計算する。節点温度と沸点との差分がすべて潜熱により奪われたと仮定し、蒸発する水分量を逆算する。蒸発した水分量は節点の持つ水分量から差し引く。

### タンパク質の変性

動物性食品を表現するために、タンパク質の変性判定モデルを構築する。タンパク質の変性開始温度と終了温度を設定可能にした。エビ、牛ステーキ肉に対して、変性による色変化を設定する。

### 霜降り肉と赤身肉

畜肉の脂身は、赤身に比べて熱伝導率が小さい。そのため、同じサーロインステーキでも、赤身の多い肉と脂身の多い肉では、加熱されやすさが異なる。肉全体の平均の熱伝導率を変えることで、この違いを表現する事ができる。

### 褐色化と焦げ変化

水分の蒸発計算結果に応じて、褐色化を表現する。褐色化の要因としては、メイラード反応、キャラメル化、炭化がある。これらの区別は難しいが、おおむね 150 度以上で変化する。そのため、褐色化は 150 度以上で生じる変化とした。また、食材を加熱実験し、生じた褐色化状態のテクスチャと水分量減少の対応関係を取得する実験を行った。ただし、実験での質量の減少は、水分量が減ったものとみなす。

## 2.2.5 (E) グラフィクスレンダリング

温度、水分の蒸発、タンパク質変化、褐色化や焦げ変化を表現するグラフィクスレンダリング手法について述べる。OpenGL の 3 次元テクスチャ機能を用いることで、メッシュ節点のテクスチャ座標には、平面座標に加え奥行き座標を指定可能である。奥行き座標が浅い順に焼く前のテクスチャ、タンパク質の変性テクスチャ、焦

げテクスチャとテクスチャを切り替えて合成することで表現する。温度の上昇やタンパク質の変性の進行，焦げの増加にともない，テクスチャの奥行き座標を大きな値とする。

### 温度変化

－ 50℃から 250℃まで 50度刻みの 7枚のテクスチャを切り替え・合成することで温度を表示する。

### タンパク質の変性表現

エビでのタンパク質の変性には，変性前と変性後の2枚のテクスチャを用いた。牛肉は，赤身の牛サーロインステーキ肉と，霜降りの牛サーロインステーキ肉の2種類についてそれぞれテクスチャを用意した。肉の変性の過程を生，変性途中，変性完了後の3段階に分類し，あわせて3枚のテクスチャで表現する.. 牛肉が赤色から褐色に色変化が生じるのは，色素タンパク質ミオグロビンの変性によるものだ。ミオグロビンは，65度でピンク色，75度以上で灰褐色になる [43]。本システムでは，牛肉ステーキの色変化をミオグロビンの色変化によるものと見なし，これらの温度帯に達する前後にて色変化を表現することにする。

### 褐色化

ネギ，ニンジン，牛ステーキ肉について褐色化を表現する。初期テクスチャである生テクスチャのほか，焦げの進行に応じてさらに4枚の褐色化テクスチャを用いて表現する。

### 内部断面の可視化

調理状態の可視化のためのテクスチャは，調理実験によりタンパク質の変性や褐色変化前後での食材の画像を撮影することで得た。ステーキ肉断面のテクスチャも同様にして得た。調理実験から得た牛ステーキ肉の内部断面のタンパク質の変性前・変性過程・変性後のテクスチャを切り替えて，内部断面の焼け具合を表示する。また温度表示も可能とした。

### 2.2.6 (F) 映像提示装置

グラフィクスレンダリングの結果を単焦点プロジェクターを利用してスクリーンに投影する。投影された映像はハーフミラーに反射する。ハーフミラー上部から覗き込むユーザーには、フライパン内に食材が重畳して見える。食材の映像もフライパンの動きに同期して動き、フライパン内に重畳される。

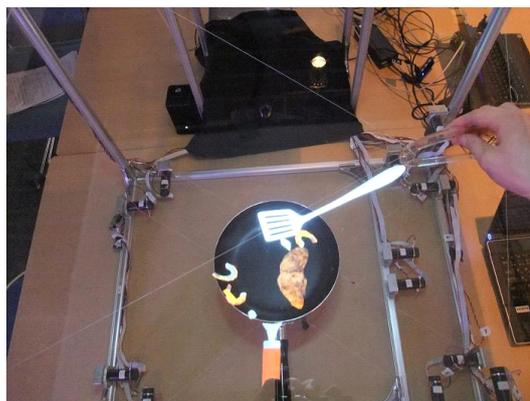


図 2.2: 食材はフライパン内に重畳表示する

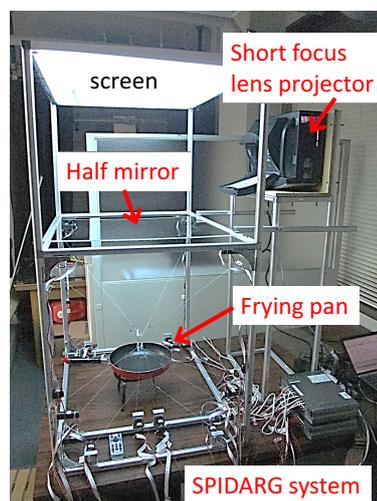


図 2.3: インタラクティブ調理体験システムの概観

## 2.3 評価実験

### 2.3.1 試作システム

システム要求を満たす調理体験環境を表 2.1 記載の機器を用いて構築した。また、食材メッシュの節点数を表 2.2 に示す。霜降りの牛ステーキモデルを MBS (Marbled Beef Steak)、赤身の牛ステーキモデルを LBS (Lean Beef Steak) する。図 2.4 は食材メッシュを示す。

表 2.1:インタラクティブ調理体験システムの機器構成

計算機	CPU:Corei7 860 2.8GHz RAM:8GB OS:Windows7 GPU:GeForce GTS250
短焦点レンズ搭載プロジェクタ:	NEC WT610
スクリーン	40 inches
ハーフミラー	アクリル板
フライパン:	直径:26cm フライパン内の側壁高さ 5.4cm
力覚インタフェース	SPIDAR G6 とフライパン

表 2.2:メッシュの節点サイズ

食材	carrot	shrimp	leek	MBS	LBS
節点サイズ	54	119	85	1207	840

試作システムを用いて、計算速度が調理操作の体験のために十分な速度であるか評価した。また、タンパク質の変性や褐色化を示す食材の表現についても評価を行った。

### 2.3.2 計算速度の評価

計算速度の評価では評価指標に、1 秒間当りのシミュレーション試行回数として CPS(Cycle per Sec) を用いる。計算で用いる食材の種類や数を変えて、計算速度を調べた。



図 2.4.3 次元 CG による食材メッシュモデル. 左下は霜降りの牛ステーキ : MBS, 右下は赤身の牛ステーキ : LBS である.

### 多くの食材を同時に焼く場合

食材メッシュ内の頂点数が最も多いエビと、最も少ない人参をフライパンに入れたときの CPS を調べた. 個別に食材数を増やす場合の速度を表 2.3 に, どちらも同じ数ずつ入れた場合の速度を表 2.4 に示す.

人参とエビを 11 こずつ入れた調理では 116[CPS], エビだけを 35 個入れた炒め調理では 60[CPS] の計算速度であることが判明した. インタラクティブに調理操作するために, 十分な速度であると考えられる.

表 2.3: ニンジンやエビをフライパンに入れた炒め調理時の CPS.

食材 \ 個数	5	10	15	20
ニンジン [CPS]	310	205	155	127
エビ [CPS]	310	190	145	110

表 2.4: 同数のニンジンとエビをフライパンに入れた炒め調理時の CPS.

ニンジン	1	3	5	7	9	11
エビ	1	3	5	7	9	11
CPS	333	293	200	161	139	116

なお, フライパンを動かす時と, 動かさないときでは速度に違いが生じなかったため, フライパンを動かさないときの速度で計測した. フライパンを動かして煽り操作をすると, 一部の食材が宙に浮くことで, 接触計算が不要となる食材があらわれる. これが, フライパンを動かしても速度が下がらない原因と考えられる.

### 2.3.3 加熱調理に伴う変化の妥当性の評価

牛ステーキ肉の加熱と野菜炒め加熱のそれぞれについて、実際に焼いて得た焼け具合とシミュレータによるテクスチャの切り替え・合成により生成した焼け具合とを比較する実験を行った。牛ステーキでは、内部断面の焼け具合について、実際の調理結果とシミュレーションによる合成結果を比較した。

### 2.3.4 牛ステーキ肉断面の加熱に伴う調理変化の妥当性

ステーキの片面からのみ加熱する場合

片面からのみ加熱する場合のステーキ断面の加熱変化について実際に焼いたときの変化の様子を図 2.5 に、シミュレーションにより合成した変化の様子を図 2.6 に示す。



図 2.5:片面からの加熱時：実際に焼いた時のステーキ断面の褐色変化

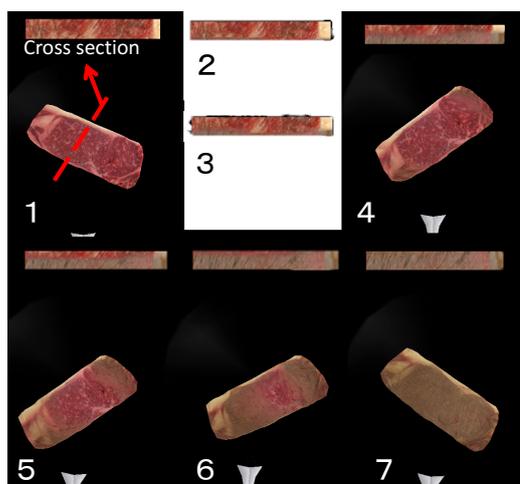


図 2.6:片面からの加熱時：ステーキ断面の褐色変化のシミュレーション結果

図 2.5, 図 2.6 の結果の比較から, 片側から熱が伝わることによるタンパク変性の推移が同様であることが確認できる. 以上より, 片面からの加熱による牛ステーキ肉のタンパク質の変性を表現することができた.

### ステーキを反転し両面から加熱する場合

図 2.7, 図 2.8 は片面を焼いた後, 上下を反転した後のステーキ断面を示す. 実際に焼いた時の断面の変化の様子を図 2.7 に, シミュレーションにより合成した断面の変化の様子を図 2.8 に示す.

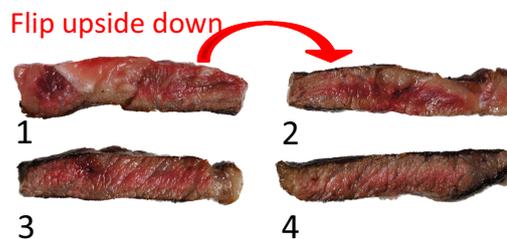


図 2.7:ステーキ反転時: 実際に焼いた時の断面の褐色化の結果

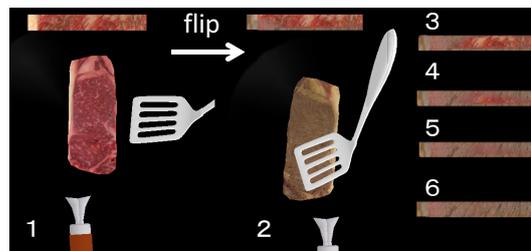


図 2.8:ステーキ反転時:ステーキの断面の褐色変化シミュレーションの結果. 画像内 1 と 2 の間で反転している.

### 牛ステーキをミディアムに調理した時の温度変化とタンパク変性の対応

図 2.9 はミディアムに調理した時のステーキの温度変化とタンパク変性の様子である. ステーキの表面と内部で温度と焼け具合の対応を確認することが可能である.

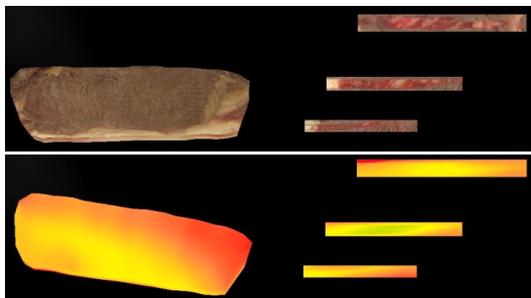


図 2.9: ステーキ肉の食材内部断面の様子（上段左：全体の温度分布，同右：断面の温度分布，下段左：全体の焼け具合，同右：断面の焼け具合）

### 熱伝導率が異なるステーキ肉

赤身の肉は霜降りの肉に比べて熱伝導率が高い。赤身の肉と霜降りの肉のシミュレーション結果を図 2.10 に示す。図 2.10 内の見かけの食材メッシュサイズは異なるが、熱伝導率以外の熱物性値を揃えている。図 2.10 では、色が赤に近いほど温度が高く、緑色に近いほど低いため、赤身のステーキの方が熱が伝わり易いことが示されている。

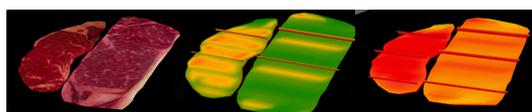


図 2.10: 左：赤身のステーキ (左) と霜降りのステーキ (右) では熱伝導率が異なる。中央：加熱開始直後。右：暫く時間が経った時。左側の赤身のステーキの方が熱が伝わり易いことが分かる。(色が赤に近いほど温度が高く、緑色に近いほど低い。)

以上より、提案シミュレータを用いることで、赤身の肉と霜降りの肉のように熱伝導率の異なる食材の伝熱速度の違いを示すことが可能である。

### 2.3.5 野菜やエビの加熱に伴う調理変化の妥当性

$\alpha$ ) フライパンを動かさずに食材を加熱した場合、 $\beta$ ) フライパンを動かしたり裏返す操作をしながら食材を加熱した場合の 2 条件を比較する。図 2.11 はエビやニ

ニンジン、ネギの加熱による調理変化を焦げテクスチャの合成により表現した結果である。片面だけを焼いていると、食材の底面の焼け具合を確認することができないため、図内の左から3番めの画像にて食材を上下反転させて底面の焼け具合を示した。フライパンと接する面では、エビはタンパク質変性が生じ、ニンジンやネギは褐色化が生じている。これらの変化は食材の上面には表れないことが図内の左から1, 2枚目の画像より確認できる。

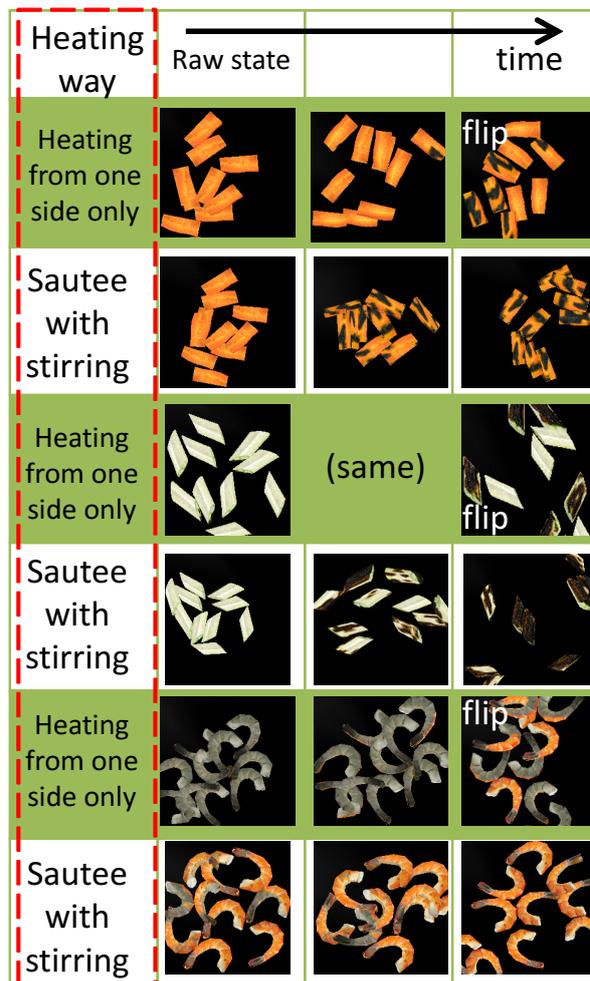


図 2.11: ニンジン、エビ、ネギの焼きシミュレーション結果

### ニンジン、ネギ、エビの炒め調理

図 2.12 はニンジン、ネギ、エビ炒め調理時の実際の調理結果とシミュレーション結果の比較である。実際の調理で得た食材表面とシミュレーションにより合成した食材表面テクスチャの比較から、同じような焦げ模様を生成することが確認できる。また、1つのメッシュの中に、生の箇所と焦げている箇所が混在する表現が実現できている。



図 2.12: 左:実際の調理結果, 右:シミュレータによる炒め調理結果

## 2.4 被験者実験

本提案シミュレータを用いて、被験者による加熱調理操作実験を実施し、調理効果の理解への影響を評価した。実験では、牛ステーキ肉モデルの断面節点の40%をミディアム状態とする調理法を見つけることをタスクとして設定した。ミディアムの温度範囲は60~70[°C]である。その他の温度帯は表 2.6 に示す。ユーザが実行可能な調理操作は、火加減の調節として表 2.5 に示す加熱ヒーター出力の選択と肉を裏返すスイッチ操作である。シミュレータで選択可能な火加減の選択肢は、実際に加熱する実験で用いる IH クッキングヒータの出力値から弱火、中火、強火を抜き出したものである。各火加減で加熱するときのフライパンの温度は、火加減に対応する出力電力をフライパンの質量と比熱で割ることで算出している。ただし、フライパンはすべてアルミで出来ていると仮定した。シミュレータではステーキ断面の調理状態は表 2.6 に基づいたステーキ断面の温度別の節点の割合をユーザに提示した。ステーキ断面の温度別の節点割合の表示例は次のようなものである：例) 生 2.57%, レア 5.3%, ミディアム 42.5%, ウェルダン 49.6%。また、フライパンの中心温度、調理経過時間をユーザに提示した。

2名の被験者に対し、シミュレータでミディアムな焼き方を習得するタスクを実際に牛ステーキ肉を焼く実験の前後に挿入することで焼き具合の変化を調べた(図2.13)。どちらの被験者もシミュレータにてミディアムの割合が40%以上になる焼き方を1時間以内にゲーム感覚で見つけることができた。被験者1では、シミュレータで獲得後に2度の実調理をしたところ、2回めではミディアムの領域が拡大した。被験者2では、実調理後、シミュレータにてミディアム焼きを獲得後に2度めの実調理をしたところ、ミディアムの領域は減ってしまったがよりジューシーに焼くことができた。この原因として、被験者2はシミュレータ中では頻繁に急冷することで温度を調節しており、また、シミュレータではフライパンの急冷が即時完了する機能仕様になっていたが、現実の調理では濡れフキンによる急冷のため時間を要し、フライパンを十分に冷ますことができなかつたことが原因であると考えられる。

被験者1ではシミュレータによるミディアム焼きの獲得におよそ2倍の時間を要している。また、シミュレータ後の実調理では、ウェルダンに焼けていることから、シミュレータで獲得した調理法を実調理で利用するには調整が必要であるということが出来る。これは本提案シミュレータは伝熱の計算結果が正しくないことで、現実の調理では同じ調理操作のタイミングが使えなかつたことが原因と考えられる。加熱及び冷却にかかわる伝熱の計算が正しければ、この問題を解消できると考えられる。

表 2.5:シミュレータで選択可能な加熱ヒーターの出力

弱火	中火	強火	加熱止め	急冷
400[W]	1100[W]	2000[W]	0[W]	室温 30[°C]へ

表 2.6:焼け具合の定義

生	レア	ミディアム	ウェルダン
~50[°C]	50~60[°C]	60~70[°C]	70[°C]~

## 2.5 結論

本論文では、インタラクティブ操作が可能な焼き調理シミュレータの構成を示し、シミュレータによる焼き表現結果と現実で焼いたステーキの焼き表現について比較

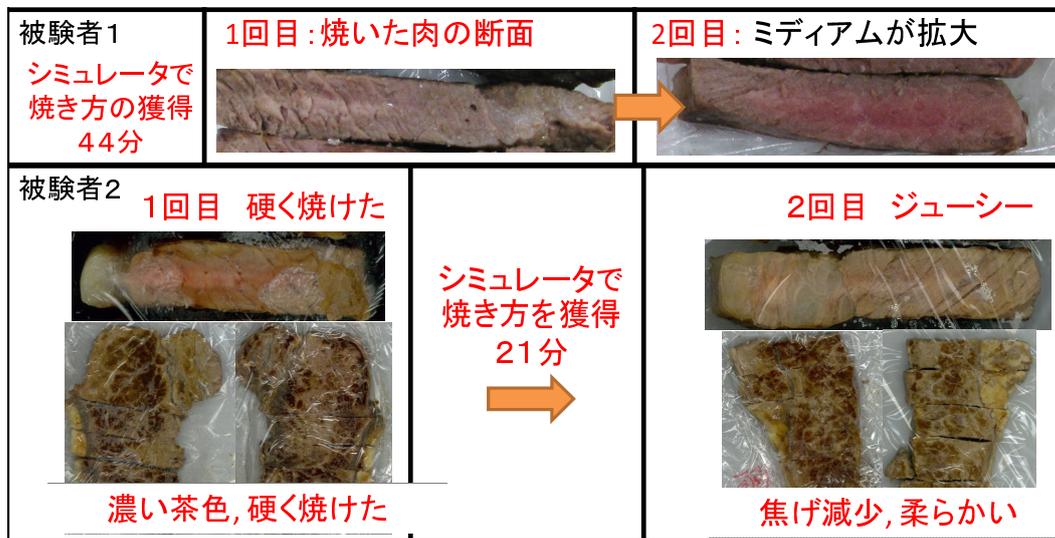


図 2.13: シミュレータによるミディアム焼きの獲得実験

した。ステーキでは、断面の温度分布や焼け具合を可視化したところ、タンパク質の変性について実際の調理で生じる変化と似た表現を合成することができた。

また、提案シミュレータを用いた被験者実験の結果から、シミュレータにより牛ステーキ肉のミディアム調理方法を1時間以内に獲得できることが示された。シミュレータ後の調理ではよりジューシーに焼けることが分かった。しかし、システムが加熱や冷却の計算が正しく求められないことで現実の調理と違ったモデルの学習となっていた。加熱及び冷却にかかわる伝熱の計算が正しいシミュレータで調理法を獲得する訓練を行うことで、シミュレータで獲得したステーキの加熱手法を現実の調理で活かせると考えられる。次の章では、伝熱を正しく計算できるシミュレータに必要な要件を示し、伝熱を忠実に再現できる伝熱シミュレータの構築手法を示す。

## 第3章

---

# 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

関連研究にて引用した2次元の有限要素法のリアルタイムシミュレーション手法 [25] がやかん内の熱対流を可視化しているのとは異なり，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。

### 3.1 目的

加熱調理シミュレータによる訓練に必要なリアルタイム伝熱再現の基盤となる伝熱シミュレータを構築し評価する。

### 3.2 要求分析

加熱調理操作のうち，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”がある [35] が，“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，食材を裏返す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。間接焼きを再現するために，食材の接触変化と伝熱とを実時間で計算する手法を提案する。

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する。

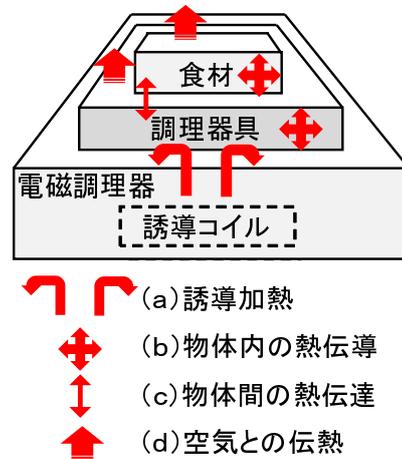


図 3.1:伝熱の種類と構成

IH クッキングヒーターから食材への伝熱過程を次に示す。ヒーターが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。一方で調理器具の表面温度は下降する。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 3.1 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

ただし本研究では、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。食材は加熱による変性や変形により、熱伝導や熱伝達 [33] の性質が変化する。本研究では、これらが無視できる範囲を扱い、変性や変形を含むシミュレーション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。

### 3.3 調理における伝熱再現シミュレータの構成

3.2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、3.3.1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3.3.2節にて全体像を、3.3.3節にて (a) 誘導加熱、3.3.4節にて (c) 熱伝達、3.3.5節にて (d) 空気への伝熱について説明する。3.3.6節では、3.3.1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3.3.7節にて温度の可視化手法を示す。

### 3.3.1 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した伝熱の支配方程式を式(3.1)に示す[36]. 式(3.2)~式(3.4)は式(3.1)の各項を表す.

$$[K]\{\Phi\} + [C]\left\{\frac{\partial\Phi}{\partial t}\right\} = \{F\} \quad (3.1)$$

$$[K] = \lambda \int_v \left\{ \frac{\partial[N]^T}{\partial x} \frac{\partial[N]}{\partial x} + \frac{\partial[N]^T}{\partial y} \frac{\partial[N]}{\partial y} + \frac{\partial[N]^T}{\partial z} \frac{\partial[N]}{\partial z} \right\} dv + \int_{S_3} \alpha_r [N]^T [N] ds \quad (3.2)$$

$$[C] = \int_v \rho c [N]^T [N] dv \quad (3.3)$$

$$\{F\} = - \int_{S_1} q_0 [N]^T ds + \int_{S_2} \alpha (T - T_c) [N]^T ds + \int_{S_3} \alpha_r \Phi_{out} [N]^T ds \quad (3.4)$$

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/(m $\cdot$ s)]),  $S_2$ は熱伝達境界面(熱伝達率 $\alpha$  [J/(m $^2$  $\cdot$ K $\cdot$ s)]),  $S_3$ は熱放射境界面(熱放射率 $\alpha_r$ [J/(m $^2$  $\cdot$ K $\cdot$ 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.  $\lambda$ は熱伝導率[J/(m $\cdot$ K $\cdot$ s)],  $t$ は時刻[s],  $\rho$ は密度[kg/m $^3$ ],  $c$ は比熱[J/(kg $\cdot$ K $\cdot$ 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/(m $^2$  $\cdot$ 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(3.2))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.

### 3.3.2 境界条件

境界条件は, 熱流束境界条件(3.3.3節)・熱伝達境界条件(3.3.4節)・熱放射境界条件(3.3.5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.

### 3.3.3 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 [44]。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 (3.4) の第一項を用いて計算する。3.4.4 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。

### 3.3.4 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 [38] 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 [39] 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 (3.4) の第二項より抜き出す (式 (3.5))。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 (3.6))。式 (3.6) を式 (3.5) に代入することで節点温度間の熱伝達式 (式 (3.7)) を得る。式 (3.8) 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 (3.8) 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 (3.8) 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う。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 (3.10) のように近似する。これにより、式 (3.8) は式 (3.9) のように簡単化される。

$$\{F_2\} = \int_{S_2} \alpha(T - T_c)[N]^T ds \quad (3.5)$$

$$T(x, y, z) = [N(x, y, z)]\{\Phi(t)\} \quad (3.6)$$

$$\{F_2\} = \alpha \int_{S_2} [N]^T [N] ds \cdot \{\Phi\} \quad (3.7)$$

$$\{F_{2_i}\} = \alpha \int_{S_2} [N_i]^T [N_i] ds \cdot \{\Phi_i\} \quad (3.8)$$

ノード間の熱伝達は式(3.8)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必要がある、アルゴリズムが複雑になる上、計算量が多くなってしまう。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(3.9)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。

$$F_{2_{ij}} = \alpha \int_{S_{\text{対応づけ}}} ds \cdot (\Phi_i - \Phi_{c_j}) \quad (3.9)$$

例として、 $N', N'_c$  は次のように置き換える。

$$\begin{aligned} N'_k &= 1, \text{ if } (i == k) N'_{ck} = 1, \text{ else} && (i, j) = (2, 5) \text{ のとき} \\ N' &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} (\in R^{m_u}) \\ N'_c &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \end{bmatrix} (\in R^{m_b}) \end{aligned} \quad (3.10)$$

形状関数が満たすべき条件は以下である。

$$\sum N'_i = 1 \quad (3.11)$$

$$N'_i = 0 \quad \text{or} \quad 1 \quad (3.12)$$

$$\int_{S_{\text{all}}} N_i = \int_{S_{\text{all}}} N'_i = \frac{1}{3} \sum_i \Delta_i \quad (3.13)$$

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

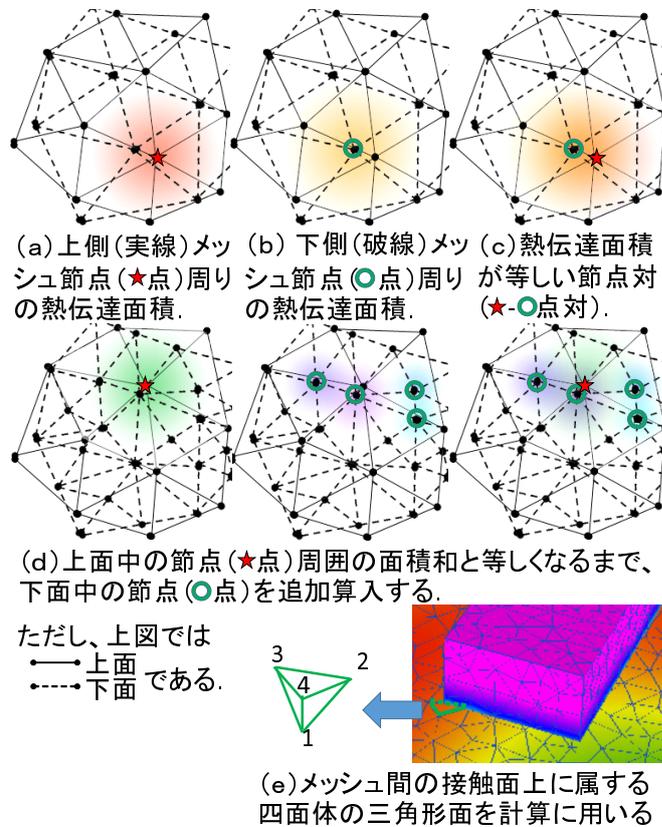


図 3.2:熱伝達境界での節点对応づけ模式図. 形状関数の影響を節点周囲に色の濃度で図示.

式 (3.9) 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 3.2 (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。

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その内積から相対を判定する。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(3.9)から熱伝達量を求める(図3.2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3.2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点对では節点对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に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。

### 3.3.5 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[36]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(3.2)の第二項と式(3.4)の第三項が該当する。これは式(3.14)から式(3.6)を用いた離散化により導出した式である。式(3.14)は， $\alpha_r$ を表す式(3.16)を用いて非線形な式(3.15)の変形から導出した近似式である。ただし， $q$ :熱流束[J/(m<sup>2</sup>·s)]， $\varepsilon$ :放射率[1]， $\sigma$ :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.

$$q = \alpha_r(T - T_r) \quad (3.14)$$

$$q = \varepsilon\sigma F(T^4 - T_r^4) \quad (3.15)$$

$$\alpha_r = \varepsilon\sigma F(T + T_r)(T^2 + T_r^2) \quad (3.16)$$

$\alpha_r$  は,  $T_r$  によって変化する (式 (3.16)) 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.

### 3.3.6 時間軸離散化と方程式の解法

式 (3.17) は, 空間軸で離散化した支配方程式 (3.1) を差分法を用いて時間軸で離散化した式である.

$$\begin{aligned} & \left[ \epsilon[K] + \frac{1}{\Delta t}[C] \right] T(t + \Delta t) \\ & = \left[ -(1 - \epsilon)[K] + \frac{1}{\Delta t}[C] \right] \{T(t)\} + \{F\} \end{aligned} \quad (3.17)$$

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.

### 3.3.7 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ている. 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 [45] すれば調理状態を把握できると考えている. 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 [45] 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。

### 3.4 実験による動作の確認とパラメータ同定

3.3 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の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、3.4.2 節にて同一物体内での熱伝導計算の確認を、3.4.3 節にて空気への熱放射係数の同定を、3.4.4 節にて IH 加熱流束分布モデルの同定を、3.4.5 節にて鉄板と金属試料間の熱伝達率の同定を示す。

#### 3.4.1 実験環境

調理器具には物性値が既知で厚み 3[mm] の鉄板 (SUS 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 $\pm 2^{\circ}\text{C}$  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[46] 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 [47] を用いて作成した。モデルを四面体メッシュに分割 [48] 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3.1に示す．シミュレーションの時間ステップは，動力学の計算には0.02[s]を，伝熱の計算には0.1[s]を用いた．

表 3.1: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

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

### 3.4.2 同一物体内での熱伝導計算の確認

同一物体内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．

### 3.4.3 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 $\alpha_r$ 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[32]（20～300[°C]にて10～30[J/(m<sup>2</sup>·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．

### 3.4.4 IH加熱流束分布モデルの同定

IH クッキングヒータ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 3.4 (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 3.3 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 [30]。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。

### 3.4.5 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  $140[\text{J}/(\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{s})]$ , 比熱  $917[\text{J}/(\text{K} \cdot \text{kg})]$ , 密度  $2680[\text{kg}/\text{m}^3]$ ) 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 3.4 (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  $\alpha$  は、 $1.2 \times 10^3[\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s})]$  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 [40] によれば、 $250[^\circ\text{C}]$  では  $5.4 \times 10^2[\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s})]$

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。

## 3.5 提案シミュレーションの評価

3.3節のシミュレーションモデルと3.4節のパラメータ同定の妥当性を検証するため3.5.1節にて金属試料の境界条件変化と温度経過の評価、3.5.2節にて牛もも肉の熱伝達率の同定、3.5.3節にて牛もも肉の両面焼きでの温度経過の評価、3.5.4節にてリアルタイム性の測定について説明する。

### 3.5.1 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3.4(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。3.4.5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3.4(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3.3(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3.1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。

### 3.5.2 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[J/(m·K·s)] [35]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3.1)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脂を塗布して加熱した(図3.5)。肉片の上面の温度変化から鉄板と肉片の熱伝達率 $\alpha$ を $2.0 \times 10^2$ [J/(m<sup>2</sup>·K·s)]と同定した(図3.6)。牛ミートパティとフライパン間の熱伝達率を $2.5 \times 10^2$ [J/(m<sup>2</sup>·K·s)]と同定した報告[32]や $1.0 \sim 2.2 \times 10^2$ [J/(m<sup>2</sup>·K·s)]を推移したとする報告[33]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 $1.5 \times 10^{-8}$ [m<sup>3</sup>]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[°C]であった(図3.6)。これは、A5052試料を用

いた同様の状況での温度誤差平均  $1.2[^\circ\text{C}]$  ( $90[\text{s}]$  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、 $80[\text{s}]$  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ですが、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、 $10[\text{s}]$  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。

### 3.5.3 牛もも肉の両面焼きでの温度経過の評価

3.5.2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3.7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。

### 3.5.4 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  $7.8 \times 10^{-2}$ [s]、物体同士の接触など伝熱以外の平均計算時間は  $2.0 \times 10^{-2}$ [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 3.1 と同一である。

## 3.6 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。本結果により、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。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いる。

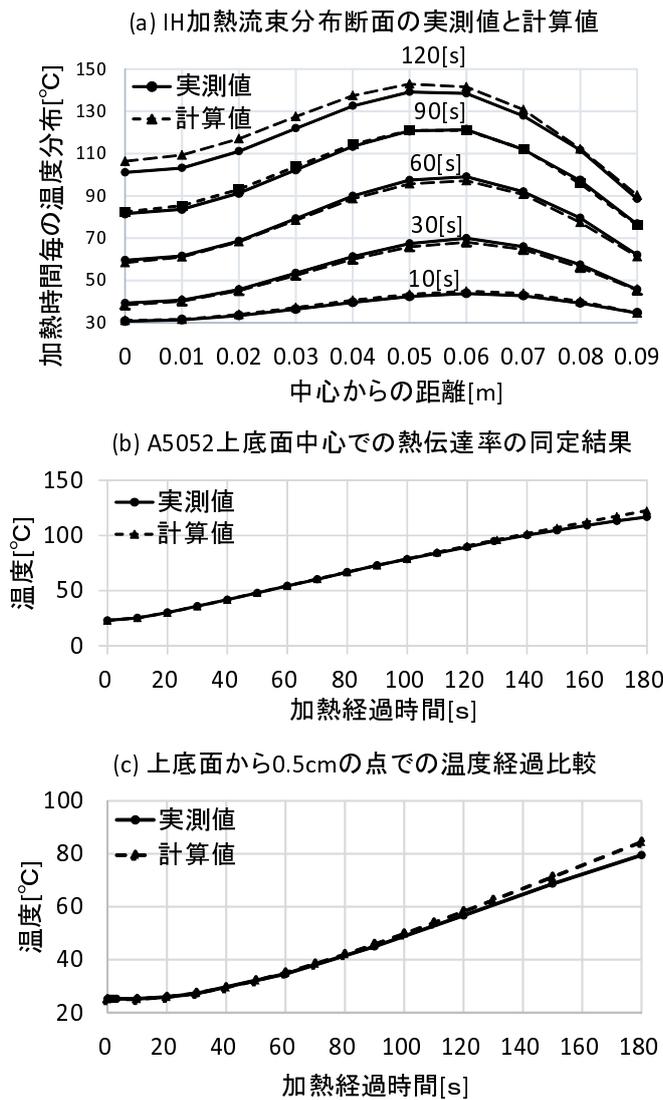


図 3.3:(a)IH 加熱モデルの同定. (b) 金属試料 A5052 と鉄板の熱伝達率の同定 (c) 金属試料の鉄板との接触面積を小さくした後も再現性を保持

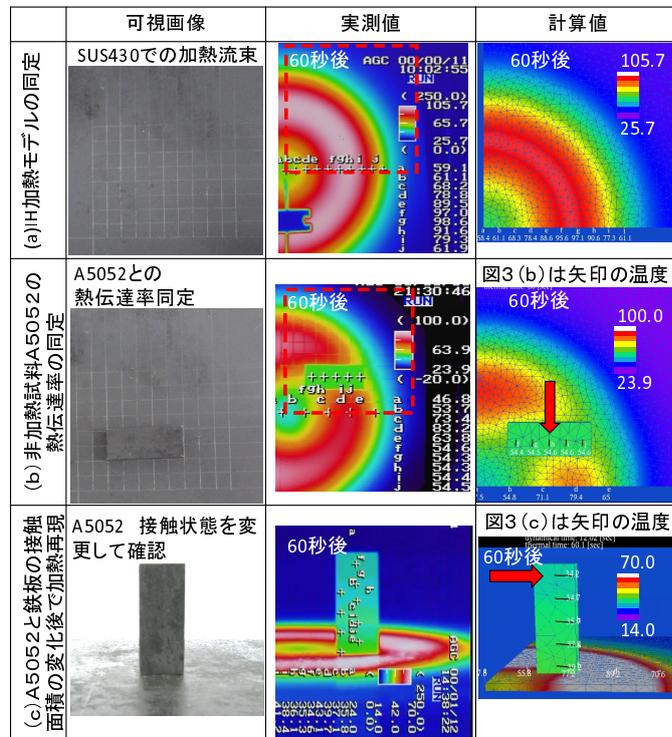


図 3.4:(a)IH 加熱モデルの同定,(b) 金属試料 A5052 と鉄板の熱伝達率の同定,(c) 金属試料の鉄板との接触面積を小さくした後も再現性を保持



図 3.5:黒体スプレー塗布した牛もも肉片

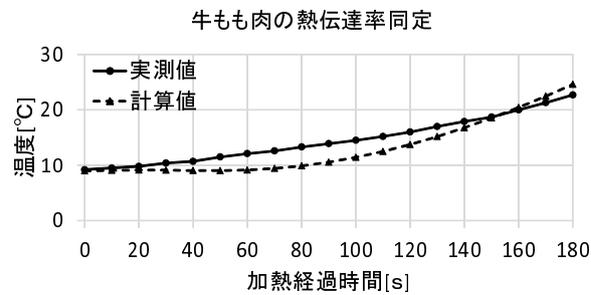


図 3.6:牛もも肉の熱伝達率同定.

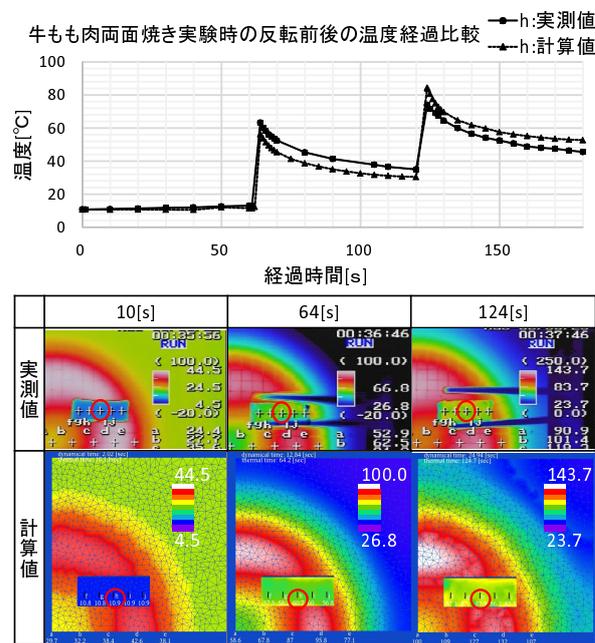


図 3.7:牛もも肉反転時の温度測定経過と計算値の比較. 図中h (丸囲) にて実験により測定した温度経過と計算により得た温度経過をグラフにて比較した.

## 第4章

---

### 結論

#### 4.1 結論

本論文では，加熱調理の練習が可能なバーチャルリアリティを実現した．提案システムを利用することにより，温度や焼け具合など食材内部の見えない状態の可視化が可能である．また，シミュレータでの調理スキルの獲得が可能であることが示された．

提案した「インタラクティブ調理シミュレータ」を用いることで牛ステーキ内部断面の温度や焼け具合を提示可能なことを示した．また被験者実験から，シミュレータで牛ステーキをミディアムに焼く調理方法を獲得できることを示した．考察から，伝熱シミュレータには伝熱の再現性が必要であると分かった．そこで「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」にて加熱調理における伝熱を忠実に再現する伝熱の有限要素法シミュレータを構築した．提案シミュレータを用いることで，牛もも肉をIHクッキングヒータで加熱した際の温度変化が肉の反転前後でも一致する結果を得ることができた．

以上より，リアルタイム伝熱シミュレーションによる加熱調理のバーチャルリアリティシステムを実現することができた．

#### 4.2 展望

今後の展望として，練習のための調理コンテンツの作成に取り組む．食材の種類を増やすことで，弾性のある食材や流体などの調理を可能としたい．また，調理による練習の効果を高める学習手法について検討する．リアルタイムに伝熱の計算ができることで，加熱調理中に調理予測を行い調理結果の選択肢を示す調理予測シス

テムキッチンへの発展も考えられる。

## 謝辞

本研究を行う機会を頂き，ご指導頂いた長谷川晶一准教授，佐藤誠教授に感謝いたします。調理シミュレータの研究に従事することができ，充実した大学生活を送ることができました。また，研究以外のことについても，多くのことを学び見聞を広めることができました。研究を進めるに当たり，日頃から様々なことを議論してきた，三武裕玄助教，高瀬裕氏，須佐育弥氏に深く感謝いたします。

電気通信大学在学の頃には，様々な視点から私の研究テーマについてご助言いただいた松野文俊教授（現京都大学教授），稲見昌彦教授（現東京大学教授），横井浩史教授に深く感謝いたします。合わせて授業から国際学生対抗バーチャルリアリティコンテストでの作品展示まで，多くのことで支えあった同期の椎名美奈氏，ダニアルケオキ氏，時崎崇氏，松永昇悟氏，池田有冬氏の皆様にも深く感謝いたします。

最後に，日頃から研究生活を共にした，東京工業大学の佐藤誠・長谷川晶一研究室の皆様感謝いたします。

## 参考文献

- [1] Richard W. Wrangham. *Catching Fire: How Cooking Made Us Human*. Catching fire : how cooking made us human. NTT 出版, 東京, Japan, 2010.3 2010.
- [2] 多木秀雄. 火の使用, 料理の発達と人類の進化 : リチャード・ランガム博士へのインタビューより (クッキングルーム). 日本調理科学会誌, Vol. 44, No. 4, pp. 310–312, aug 2011.
- [3] 日本バーチャルリアリティ学会. バーチャルリアリティ学. 日本バーチャルリアリティ学会, 2011.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 安藤英由樹, 近藤大祐, 飯塚博幸, 小濱和貴, 坂井義治, 前田太郎. 画像合成・代替を用いた腹腔鏡手術トレーニングシステムと評価手法の提案 (コミュニケーション支援及びヒューマン情報処理一般). 電子情報通信学会技術研究報告. HIP, ヒューマン情報処理, Vol. 113, No. 73, pp. 195–200, may 2013.
- [7] 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.
- [8] 久保智史, 前田公三, 綱井秀樹, 林隆三, 永井正夫, Pongsathorn RAKSIN-CHAROENSAK, 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] クックパッド株式会社. cookpad. <http://cookpad.com/>.
- [12] 楽天株式会社. 楽天レシピ. <http://recipe.rakuten.co.jp/>.
- [13] 味の素株式会社. レシピ大百科. <http://park.ajinomoto.co.jp/>.
- [14] 森麻紀, 栗原一貴, 塚田浩二, 椎尾一郎. いろどりん : 食卓の彩りを良くする拡張現実システム. 全国大会講演論文集, Vol. 70, pp. 245–246, mar 2008.
- [15] Takuji Narumi, Takashi Kajinami, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose. Meta cookie. In *ACM SIGGRAPH 2010 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '10, pp. 18:1–18:1, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [16] Takuji Narumi, Yuki Ban, Takashi Kajinami, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose. Augmented perception of satiety: Controlling food consumption by changing apparent size of food with augmented reality. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '12, pp. 109–118, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [17] Shigeru Owada, Frank Nielsen, Makoto Okabe, and Takeo Igarashi. Volumetric illustration: Designing 3d models with internal textures. *Proceedings of ACM SIGGRAPH(SIGGRAPH2004)*, pp. 322–328, 2004.

- [18] Kenshi Takayama, Makoto Okabe, Takashi Ijiri, and Takeo Igarashi. Lapped solid textures: Filling a model with anisotropic textures. *ACM Transactions on Graphics (proceedings of ACM SIGGRAPH)*, Vol. 27, No. 3, pp. 1–9, 2008.
- [19] Kenshi Takayama, Olga Sorkine, Andrew Nealen, and Takeo Igarashi. Volumetric modeling with diffusion surfaces. *ACM Transactions on Graphics (proceedings of ACM SIGGRAPH)*, Vol. 29, No. 6, pp. 180:1–180:8, 2010.
- [20] Kaisei Sakurai, Akihiko Shirai, Fabien Goslin, and Kazunori Miyata. Baked crepe texture generation. In *SIGGRAPH '07: ACM SIGGRAPH 2007 posters*, p. 27, New York, NY, USA, 2007. ACM.
- [21] OfficeCreate, TAITO, and NINTENDO. Cooking mamma:cook off - simulation game - wii - 01487, 2006. published by TAITO Wii Licensed by NINTENDO RVL-P-RCCJ(JPN).
- [22] Shigeki Otaguro, Masashi Kinoshita, Takamichi Nakamoto, Masahiko Nagahama, Taro Ishida, and Keita Onishi. Application of interactive olfactory display to cooking game with scents. *The Institute of Electrical Engineers of Japan*, Vol. 2006, No. 19, pp. 63–68, 20061218.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 香西みどり, 中村文子, 畑江敬子, 島田淳子. シミュレーションによるジャガイモの最適加熱時間に及ぼす形状の影響. 日本調理科学会誌, Vol. 32, No. 4, pp. 296–303, nov 1999.

- [27] Laure Bombrun, Philippe Gatellier, Stphane Portanguen, and Alain Kondjoyan. Analysis of the juice and water losses in salted and unsalted pork samples heated in water bath. consequences for the prediction of weight loss by transfer models. *Meat Science*, Vol. 99, pp. 113 – 122, 2015.
- [28] Hiroya Kawasaki, Yoko Akagi, Chinatsu Kasamatsu, and Yoshimitsu Aoki. Effects of the chefs pan flipping technique on the temperature of ingredients and the pan during chinese stir-fry cooking. *The Japan Society of Cookery Science*, Vol. 42, No. 5, pp. 334–341, 2009.
- [29] Naomi Ishiwatari, Mika Fukuoka, Akihiro Tamego, and Noboru Sakai. Validation of the quality and microbiological risk of meat cooked with the vacuum-pack cooking method(sous-vide). *Japan Journal of Food Engineering*, pp. 19–28, 2013.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 丸山悦子, 山本友江. 調理科学概論, 初版第1刷. 朝倉書店, 2005.
- [35] 渋川祥子. 食品加熱の科学, 初版第1刷. 朝倉書店, 1996.
- [36] 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.

- [37] 小林清志, 飯田嘉宏. 新版 移動論, 初版第 11 刷, pp. 3,61–63,68–69. 朝倉書店, 1997.
- [38] 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.
- [39] Steven R.Schmid, William R.D. Wilson, and Jiying Liu. A friction and heat transfer module for hot forging simulation. *Final Report*, 2002.
- [40] 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.
- [41] S Kim, J Berkley, and M Sato. A novel seven degree of freedom haptic device for engineering design. *VIRTUAL REALITY*, Vol. 6, No. 4, pp. 217–228, 2003.
- [42] Shoichi Hasegawa, Yuichi Tazaki, Masayoshi Ouchi, Masaru Takatsu, Hironori Mitake, Akihiko Shirai, Naoki Okada, Hiroshi Ichikawa, Katsuhito Akahane, Nobuaki Fujii, Shinichirou Tagami, Takashi Tokizaki, Ikumi Susa, Shogo Matsunaga, Yusuke Hanaoka, Fumihiko Kato, and et al. Springhead2. <http://springhead.info/>.
- [43] Japan Society for Food Engineering. *Food Engineering hand book*, Vol. first edition. Asakura Publishing Co.,Ltd., 2006.
- [44] 日本食品工学会. 食品工学ハンドブック. 朝倉書店, 2006. p.34.
- [45] 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.
- [46] 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/>.

- 
- [47] 株式会社テトラフェイス. Metasequoia. <http://metaseq.net/jp/>.
- [48] Hang Si. On refinement of constrained delaunay tetrahedralizations. In PhilippeP. Pbay, editor, *Proceedings of the 15th International Meshing Roundtable*, pp. 509–528. Springer Berlin Heidelberg, 2006.

# 関連論文の印刷公表の方法及び時期

## 学術雑誌論文

1. 全著者名：加藤 史洋, 小野原 覚, 三武 裕玄, 長谷川 晶一  
論文題目：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  
印刷公表の方法および時期：日本バーチャルリアリティ学会論文誌（採録，第 21 巻第 1 号（2016 年 3 月末発行）掲載予定）  
（第 3 章の内容に関連する）

## 国際会議 Full Paper（査読付き）

1. 全著者名：Fumihito Kato, Shoichi Hasegawa  
論文題目：Interactive cooking simulator: showing food ingredients appearance changes in fryingpan cooking -  
印刷公表の方法および時期：CEA '13 Proceedings of the 5th international workshop on Multimedia for cooking & eating activities, ,ACM,2013  
（第 2 章の内容に関連する）

## 国際会議 Demo（査読付き）

1. 全著者名：Fumihito Kato and Yusuke Hanaoka and Nguyen Ngoc Tu and Danial Keoki and Hironori Mitake and Takafumi Aoki and Shoichi Hasegawa  
論文題目：Interactive cooking simulator: to understand cooking operation deeply  
印刷公表の方法および時期：SIGGRAPH '09 ACM SIGGRAPH 2009 Emerging Technologies  
（第 2 章の内容に関連する）

## 受賞

1. 日本機械学会 三浦賞 (2010)
2. 情報処理学会エンタテインメントコンピューティング優秀論文賞 (2007)

## 著者略歴

- 加藤 史洋 (かとう ふみひろ)
- 1984年 福島県に生まれる
- 2004年4月 電気通信大学 電気通信学部 電子工学科 入学
- 2008年3月 電気通信大学 電気通信学部 電子工学科 卒業
- 2008年4月 電気通信大学大学院 電気通信学研究科  
知能機械工学専攻 博士前期課程 入学
- 2010年3月 電気通信大学大学院 電気通信学研究科  
知能機械工学専攻 博士前期課程 修了
- 2010年4月 電気通信大学大学院 情報理工学研究科  
知能機械工学専攻 博士後期課程 入学
- 2010年9月 電気通信大学大学院 情報理工学研究科  
知能機械工学専攻 博士後期課程 退学
- 2010年10月 東京工業大学大学院 総合理工学研究科  
知能システム科学専攻 博士後期課程 転入学
- 2014年4月 株式会社東芝へ入社 研究開発センター  
インタラクティブメディア・マルチメディア部門に在籍
- 2016年3月 東京工業大学大学院 総合理工学研究科  
知能システム科学専攻 博士後期課程 修了予定

2007年 情報処理学会エンタテインメントコンピューティング優秀論文賞. 2009年 IPA 未踏IT人材発掘育成事業（未踏ユース08上期）スーパークリエイター認定. 2010年 日本機械学会三浦賞 受賞 2010年より日本学術振興会特別研究員(DC1), バーチャルリアリティの研究に従事.