

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 13 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K14205

研究課題名(和文)人間の暗黙知とカオス混合理論を組み合わせた革新的攪拌装置の開発

研究課題名(英文)Development of an Innovative Mixing Device by Incorporating Human Tacit Knowledge and Chaotic Mixing Theory

研究代表者

大村 直人(Ohmura, Naoto)

神戸大学・工学研究科・教授

研究者番号：50223954

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、主に調理における人間の攪拌動作の中の暗黙知に着目した。5人の熟練者と2人の非熟練者の攪拌動作を観察した。生クリームの状態は、生クリームの気泡巻き込み量を示すオーバーランとレオロジー特性を用いて評価した。動作解析においては、被験者の肘、手首、泡だて器の柄の3点にマーカーを設置して、その動きを記録した。生クリームの混合過程を、食紅をトレーサーとして可視化した。5人の熟練者はいずれも、非熟練者よりも約半分の時間でオーバーランのピーク値に到達し、その値も100を超えた。動作解析より、熟練者は非熟練者の動きに比べ、肘、手首、泡だて器の運動は同期しておらず、複雑でカオス的であることがわかった。

研究成果の概要(英文)：This study focused on a "tacit knowledge" on agitating motions in cooking. This study observed human agitating motion conducted by five experts and two non-experts. Mixing (whipping) state of fresh cream was evaluated by an overrun which indicates the amount of gas phase and rheology of fresh cream. In the motion analysis, three observation points were set at research subjects' elbow, wrist and whisk. Mixing behaviors were visualized by food red and recorded by a high-speed camera. The all experts accomplished to reach peak values larger than 100 of the overrun in two times shorter period than the non-experts. In the non-experts' motions, all motions of elbow, wrist and whisk were strongly synchronized and the time series of displacement showed relatively simple periodic motions. On the other hand, in the experts' motions phase difference of motions among elbow, wrist and whisk was observed and the time-series of displacement showed rather complex and chaotic.

研究分野：移動現象論

キーワード：攪拌 暗黙知 動作解析 カオス解析 調理

### 1. 研究開始当初の背景

研究代表者は平成 24~25 年度科学研究費補助金挑戦的萌芽研究「異常輸送現象の解明とプロセス強化への応用」において、テイラー渦流のように循環渦流を持つ流動場に対して、循環流動の周期、流動場に与える撓動の強さおよび、その周期を最適化すれば、異常輸送の効果により、トレーサの拡散が劇的に進むことを明らかにした。しかし、従来の撹拌翼をベースにした撹拌プロセスの開発においては、撹拌翼の回転によりこの 3 つのパラメータが決まってしまうため、このパラメータを独立に制御できず、異常輸送の効果を十分に活かすことができないことがわかった。そこで、「革新的な撹拌装置の開発のためには、これまでの撹拌翼を出発点とするのではなく、理想の混合状態を出発点として考えるデチューニング的なアプローチ」も必要ではないか」という考えに至った。

### 2. 研究の目的

そこで、人間の暗黙知に着目する。人間は長年の経験の積み重ねで、理想の混合状態を得るための撹拌動作を暗黙的に修得している。特に、熟練した職人においては、優れた所作を身につけている。本研究では、日常生活でも撹拌動作を伴うことの多い「調理」に着目し、熟練した調理師の撹拌動作と調理を学び始めた一般学生の撹拌動作を解析し、カオス混合理論を用いて混合メカニズムを数理科学的に明らかにすることで、全く新しいタイプの撹拌装置の開発につなげようとするものである。

### 3. 研究の方法

本研究では、以下の 4 つの方法により研究を進めた。

(1) 撹拌動作を伴う調理について、撹拌が担う機能を分類し、その機能の充足度を評価するための評価項目と基準を策定するとともに、分類された撹拌機能を代表する調理過程を選定する。

(2) 熟練調理師による撹拌動作を複数の CCD カメラに撮影記録する。また、同じ調理過程について、調理初心者の学生による撹拌動作を同じ撮影条件にて撮影記録する。

(3) 調理後に撹拌の機能評価を、策定した評価基準に従い、評価するとともに、撮影された撹拌動作を、動作解析ソフトを用いて解析し、機能充足度と撹拌動作の関係を、熟練調理師と調理初学者の動作の違いから明らかにする。さらに、機能充足度の高い撹拌動作を、カオス混合理論に基づき解釈を試みる。

(4) 撹拌棒による人間の撹拌動作を模擬した巡回型撹拌装置を用いて、麹菌 *Aspergillus oryzae* の培養、タンパク質生産

特性を調べ、一般的なディスクタービン翼を用いた場合と比較することで、撹拌性能を評価する。

なお、当初予定していた 3 次元動作解析を用いた撹拌動作の再構成と、これを用いた数値流体力学による流動シミュレーションについては、動作解析ソフトの制約により、3 次元計測ができず、断念した。

### 4. 研究成果

(1) 本研究では、撹拌動作を伴う調理として、生クリームの撹拌を選定した。撹拌された生クリームの状態を評価する指標として、次式で定義される気泡巻き込みによる体積増加率であるオーバーランを用いた。

$$\Delta W = \frac{W_0 - W}{W} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 $W_0$  [kg/m<sup>3</sup>] は初期の生クリームの密度、 $W$  [kg/m<sup>3</sup>] は撹拌後の生クリームの密度であり、オーバーラン  $W$  が 100 を超えると生クリームは良好なホイップ状態となる。また撹拌後の生クリームのレオロジー特性を、レオメーターを用いて測定した。

熟練者として、5 名の製菓衛生士、非熟練者として 2 名の女子学生を選定した。図 1 に示すとおり、5 名の熟練者のオーバーランは、いずれも 3~4 min でピーク値をとり、その値は 100 を超えており、この時点で良好なホイップが得られていることがわかる。一方、非熟練者では、オーバーランのピーク値到達に 6 min 程度かかっており、またその値も 100 を大きく下回っていることがわかる。

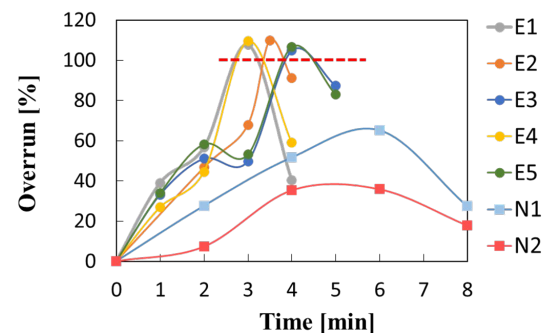


図 1 オーバーランの時間変化；E1~E5 が熟練者，N1，N2 が非熟練者

なお、生クリームのレオロジー変化は、熟練者、非熟練者で顕著な差はみられなかった。

(2) 図 2 に示すように、撹拌中の泡だて器の動きを、ハイスピードカメラを用いて撮影した。また、生クリームに食紅を入れておき、生クリームの混合過程も同時に記録した。熟練者と非熟練者の泡だて器の動きを比較すると、図 3 に示すとおり、水平方向に往復運

動しており、一方、非熟練者は垂直方向に回転運動をしていることがわかった。

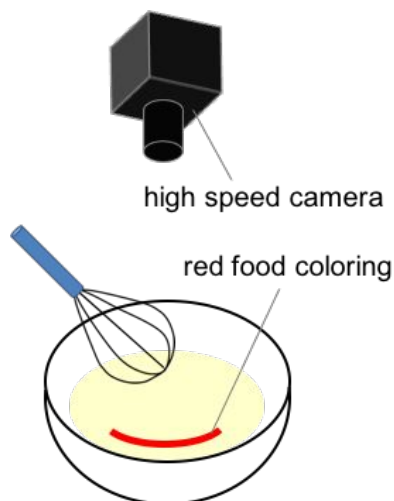


図2 泡だて器の動きと生クリームとの混合過程の観察

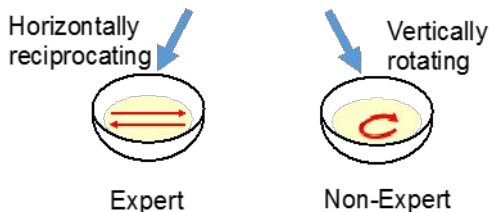


図3 熟練者と非熟練者の泡だて器の動きの違い

さらに、熟練者の泡だて器の動きを詳細に調べてみると、一往復の攪拌動作中に、泡だて器の先端が生クリームから離れない完全な往復運動と、泡だて器の先端がわずかの間生クリームから離れる楕円運動に分けられることがわかった。この2つの動きでは、泡だて器の水平方向の動きも異なることがわかった。なお、前述の非熟練者が熟練者の動きを真似て攪拌動作を行った場合、オーバーランのピーク値は、100には至らなかったが、90程度まで上昇し、ホイップの状態は大きく改善した。

(3) 図4に示すように、攪拌を行う被験者の肘、手首、泡だて器の柄にマーカーを取り付け、CCDカメラで被験者の攪拌動作を記録した。得られた画像データについて、図4の画像の左側の角を原点として、それぞれのマーカーの変位を2次元画像処理ソフトにより、取得した。図5に熟練者と非熟練者のマーカーの変位の時系列データを示した。図から、



図4 運動解析における座標系

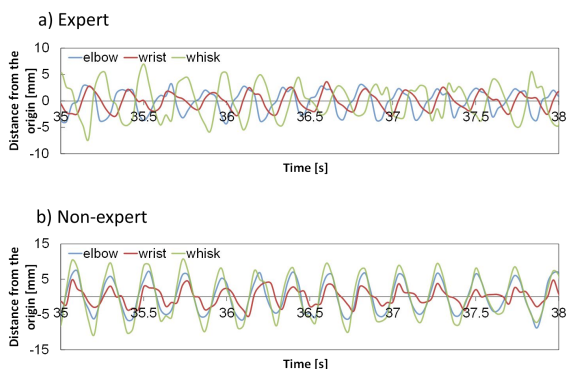


図5 マーカー変位の時系列データ

非熟練者の動きは、肘、手首、泡だて器ともに正弦波に近い動きをしており、波形の移送もそろっていることがわかった。一方、熟練者の動きは、肘、手首、泡だて器で波形の移送がずれており、波形の形も複雑であることがわかった。この位相のずれから、熟練者の攪拌ではスナップをきかせた攪拌動作を行っていることが示唆された。また、これらの波形をスペクトル解析した結果、波形の周波数は熟練者、非熟練者とも5 Hz程度であり、攪拌の速さには、大きな差がないこともわかった。

熟練者の複雑な動きを、カオス解析により、特徴づけすることを試みた。得られた肘、手首、泡だて器の時系列データを用いて、位相空間写像を構成し、得られた写像から、図6に示すリアプノフスペクトラムを求めた。

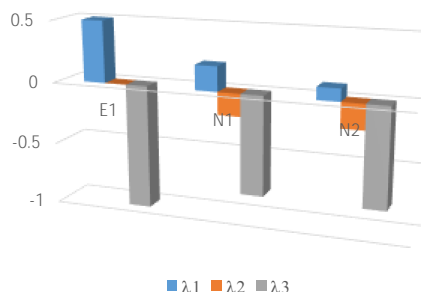


図6 リアプノフスペクトラム; E1が熟練者、N1, N2が非熟練者

リアプノフスペクトラムでは、リアプノフ指

数の組 $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ が $(+, 0, -)$ であるとき、カオス的な挙動であるとされていることから、熟練者の動きはカオス的な動きをしていることが示唆された。また、最大リアプノフ指数 $\lambda_1$ が大きい値をとるほど不規則性が高いことから、熟練者の動きのほうが非熟練者よりも複雑な動きをしていることがわかった。さらに、オーバーランのピーク値の大きさは、最大リアプノフ指数の大きさと相関関係があることも見出された。

(4) 図 7 に示す人間が攪拌棒を用いて混ぜる動作を模擬した旋回型の攪拌翼 Singstir( 神鋼環境ソリューション社製 )を用いて、麹菌 *Aspergillus oryzae* の培養を行い、タンパク質生産特性を検証した。



図 7 実験に用いた旋回型攪拌翼

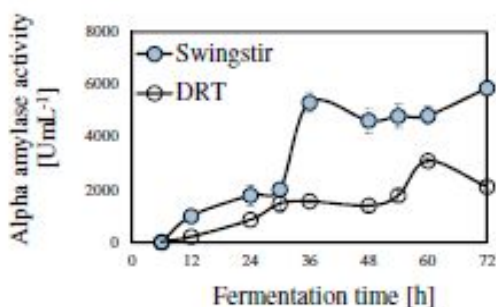


図 8 - アミラーゼの活性

旋回型の攪拌翼 Singstir は、通常使用されるディスクタービン翼 DRT に比べて、菌体生産量が多く、また図 8 に示すように、 $\alpha$ -アミラーゼの活性が非常に高いことがわかった。これは、旋回型の攪拌翼のせん断がやさやかであり、菌体の形態制御性が良好で、培養後期まで培養液が低粘度を維持できることにより、培養液中への酸素供給能が強化されたことによると推定された。

(5) 本研究では、攪拌に関する人間の暗黙知を、日常生活の中で必要不可欠な調理過程から抽出し、熟練した調理師の攪拌動作と調理初心者の攪拌動作を解析することで、攪拌に有効運動を明らかにするとともに、これをカオス混合理論により解釈し、新奇な攪拌装置の開発を試みるものである。このような人間の動作解析により、攪拌・混合を理解しようとする試みは、従来の化学工学ではまったく行われておらず、本研究で用いるアプローチは、極めて斬新な方法論である。本研究で得られた結果は、攪拌翼の回転運動の制約を外すことで、高性能な攪拌性能が得られることを示唆している点で大変有意義なものであるといえる。

今回の研究では、2次元の動作解析法による解析しか行えなかったため、熟練者の攪拌動作を3次的に再構成できなかった。今後は、3次元の動作解析を行うことで、熟練者の動きを再構成し、数値流体力学(CFD)を用いた流動シミュレーションを行うことによって、最適な攪拌動作を得ることを試みる予定である。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 6件)

Maiko Hara, Hayato Masuda, Takafumi Horie, Sachiko Honda, Naoko (Kataoka) Shirasugi, Naoto Ohmura, "Using motion analysis to evaluate techniques for whipping heavy cream by hand," *J. Chem. Eng. Japan*, 査読あり (2017) (掲載決定)

Maiko Hara, Hayato Masuda, Takafumi Horie, Sachiko Honda, Naoko (Kataoka) Shirasugi, Naoto Ohmura, "Effective human motion of fresh cream mixing extracted by a motion analysis," *Proceedings of 5th Asian Conference on Mixing - ACOM2016, Tendo Yamagata, Japan*, 査読あり, 108-111 (2016)

Narges Ghobadi, Chiaki Ogino, Tomohiro Ogawa, Naoto Ohmura, "Effect of swingstir impeller on rheology and morphology of submerged fermentation," *Proceedings of 5th Asian Conference on Mixing - ACOM2016, Tendo Yamagata, Japan*, 査読あり, 45-50 (2016)

Narges Ghobadi, Chiaki Ogino, Tomohiro Ogawa, Naoto Ohmura, "Using a flexible shaft agitator to enhance the rheology of a complex fungal fermentation culture," *Bioprocess Biosyst. Eng.*, 査読あり, 9 pages (2016)

DOI: 10.1007/s00449-016-1653-2

[学会発表](計 4件)

大村直人, "人間中心イノベーションから見た攪拌技術の新展開," 化学工学会第 48 回秋季大会, 2016. 9. 7, 徳島大学

( 徳島県・徳島市 )

Maiko Hara, Hayato Masuda, Takafumi Horie, Sachiko Honda, Naoko (Kataoka) Shirasugi, Naoto Ohmura, "Effective human motion of fresh cream mixing extracted by a motion analysis," 5th Asian Conference on Mixing – ACOM2016, 2016 .  
9. 1, 滝の湯ホテル ( 山形県・天童市 )

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

大村直人 ( OHMURA, Naoto )  
神戸大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号 : 5 0 2 2 3 9 5 4

### (2)研究分担者

本多 佐知子 ( HONDA, Sachiko )  
神戸山手短期大学・現代生活学科・准教授  
研究者番号 : 6 0 5 1 4 9 1 6

白杉 直子 ( SHIRASUGI, Naoko )  
神戸大学・大学院人間発達環境学研究科・教授  
研究者番号 : 8 0 2 4 3 2 9 4

### (3) 研究協力者

原 真衣子 ( HARA, Maiko )  
神戸大学・大学院工学研究科・学生

池田 和哉 ( IKEDA, Kazuya )  
神戸大学・工学部・学生

GHOBADI, Narges  
神戸大学・大学院工学研究科・学生