

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：33919

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23740135

研究課題名(和文) 日本酒醸造過程を表現する数理モデルの導出と仮似変分不等式による解析

研究課題名(英文) Constructing mathematical model for brewing process of Japanese Sake and its analysis with techniques of quasi-variational inequality

研究代表者

村瀬 勇介 (Murase, Yusuke)

名城大学・理工学部・助教

研究者番号：80546771

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：日本酒醸造現象に現れる熱反応と化学変化、及び微生物に関する活動をもとにして、偏微分方程式による日本酒醸造過程モデルを構築した。このモデルは5段階ある醸造の段階にあわせて変化する項目が含まれている。また、数学的には仮似変分不等式と呼ばれるタイプの問題に対応している。本研究を通して、構築した数理モデルのうち第1段階に当たる米麹の作成段階に対応した方程式に対する解の存在性を示した。また、関連するいくつかの数学的問題に対する解析を行い、仮似変分不等式に対応する抽象発展方程式の解の存在性を示した。

研究成果の概要(英文)：We constructed a mathematical model for brewing process of Japanese Sake by using partial differential equations with focusing thermal reactions, chemical reactions, and biological phenomena. Our model includes some factors that depends upon each fermenting stages (there are 5 fermenting stages). Moreover, our model corresponds to the mathematical problem so-called "quasi-variational inequality". Throughout our study, we got the existence of solutions for our mathematical model of 1st fermenting stage (the stage of culturing Koji). Furthermore, we analyze some relating mathematical problems, and proved solvability results for a certain abstract evolution equation of quasi-variational inequality type.

研究分野：非線形解析

キーワード：非線形解析 日本酒醸造過程 偏微分方程式 仮似変分不等式

### 1. 研究開始当初の背景

(1) それまでに日本酒醸造過程を包括的に表現した数理モデルは確認されておらず、限定された一部分のみに対する数理モデルがいくつか確認できるだけであった。また、それらの研究に対する結果も多くはなく、公開されている研究結果のほとんどは農学・工学的観点からの結果であり、数学的な理論の裏付けは存在していなかった。

(2) 実際の醸造のコントロールは杜氏の経験則とそれまでに得られた農学的・工学的結果によって支えられており、数理的な見地からの方法は開発されていなかった。また、吉のコントロール手法を裏付ける数学的議論もされていなかった。

(3) 数学における仮似変分不等式の理論は発展途上であり、様々な偏微分方程式系の研究を進めることで仮似変分不等式の抽象理論に関してもさらに改善を行うことができると考えられる。

### 2. 研究の目的

(1) 日本酒醸造過程を記述する数理モデルを構築し、数学の観点から当該モデルの解析を行う。特にモデルの可解性と最適制御問題の解決と、数値シミュレーションの実践を優先的な目的とする。

(2) 当該モデルの解析で得られた手法をもとにして仮似変分不等式の抽象理論を発展させる。この観点では、放物型仮似変分不等式に対応する抽象発展方程式と、楕円型仮似変分不等式に対応する抽象作用素方程式が考察の対象となる。

(3) 数理モデルに対して十分な解析結果が得られた場合は、実現象へのフィードバックを行い、醸造現象のコントロール技術や醸造シミュレータの開発を目指して工学的研究を進める。

### 3. 研究の方法

(1) 醸造過程において起こる化学変化と微生物の活動、熱力学的現象をもとにして日本酒醸造過程を記述する数理モデルの構築を行う。特に醸造の手法のうち段仕込みの手法を考察の対象とし、段仕込みの各段階を包括的に記述できるようモデルを構築する。また、数理モデルの構築手法としては制約条件付き偏微分方程式系による表現を用いる。

(2) 構築したモデルに対して仮似変分不等式の理論を適用して可解性を検討する。この解析には加納・剣持・村瀬による 2009 年の研究結果が有効であると考えられる。また、この可解性が得られた後には同様に加納・剣持・村瀬による結果を利用して当該モデルに対する最適制御問題の解決を目指す。数値シ

ミュレーションの実践可能性については構築した数理モデルの内容に大きく影響されるため、モデルの形状と可解性の結果を精査した上で検討を進める。

(3) 構築した数理モデルの解析で利用した方法を再度抽象的な方程式に適用できるかを検討し、同様の手法が適用できる場合はその方法によって抽象理論を改善できるか検討する。

### 4. 研究成果

(1) (財)日本醸造協会が発行する「最新酒造講本」をもとに段仕込みにおいて発生する現象をまとめ、それぞれの現象に対応する偏微分方程式を構成し、日本酒醸造過程を表現する数理モデルを構築した。この数理モデルでは化学反応の表現には反応拡散方程式、熱反応の表現には熱方程式、微生物の反応にはロジスティック型の反応拡散方程式を利用し、さらに微生物の生存可能性の制限を表現するために制約条件を付加している。合計で 15 本の方程式と 1 つの制約条件による連立系が今回構築した数理モデルである。また、実際の醸造では対象物が理想的な状態になったときに醸造過程を終了するので、我々のモデルでもこのことを表現するために方程式を考える最終時刻は未知関数に依存して決定するようにした。伊藤・村瀬による研究によって当該モデルのうち第 1 段階(製麹過程)に対応する偏微分方程式系の可解性を示し、論文③によって発表した。

(2) この方程式の解析に関連するテーマについての研究として、放物型仮似変分不等式に対応する抽象発展方程式の可解性についての考察を行った。加納・剣持・村瀬による 2009 年の結果では、劣微分作用素によって特徴付けられる抽象発展方程式のうち、主要項が 1 つの関数値変数と 1 つのヒルベルト空間値変数を持つ劣微分作用素となっているもので、時間微分とこの劣微分項、そして外力項によって構成される発展方程式を対象としている。これに対して、今回の研究ではさらに未知関数に依存する摂動項を加えた発展方程式を対象として可解性の議論を行った。加納・村瀬の研究によってこの発展方程式に対する一定の条件下における解の存在性を証明することができたため、論文②において発表した。この結果は今回構築した数理モデルの解析に直接適用できるものにはならなかったが、これまでに得られている仮似変分不等式理論の改善になっている。

(3) 構築した数理モデルのある種の近似方程式系に対する数値計算を実際に行い、実現象との適合性に関する検証を行った。実現象のデータは守秘義務があるため公開できないが、ある程度の適合性が認められるとともに、一部問題点があることが数値シミュレ

ションの結果判明した。これらの結果のうち、守秘義務に抵触しない部分に関しては今後論文として発表する予定である。

(4) 今回構築した数理モデルの第1段階に対応する偏微分方程式系に対する最適制御問題や、第2段階以降対応部分を含む数理モデルの可解性の議論には、既知の結果を適用できない本質的な困難があることが判明した。これらの問題の解決は今後の課題である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

① N. Sato, T. Aiki, Y. Murase, K. Shirakawa, A one dimensional free boundary problem for adsorption phenomena, *Netw. Heterog. Media*, 査読有り, Vol. 9, no. 4, 2014, pp. 655-668  
doi:10.3934/nhm.2014.9.655

② R. Kano, Y. Murase, Solvability of nonlinear evolution equations generated by subdifferentials and perturbations, *Discrete Contin. Dyn. Syst. Ser. S*, 査読有り, Vol. 7, no. 1, 2014, 75-93  
doi:10.3934/dcdss.2014.7.75

③ Y. Murase, A. Ito, Mathematical model for the process of brewing Japanese Sake and its analysis, *Adv. Math. Sci. Appl.*, 査読有り, Vol. 23, No. 1, 2013, pp. 297-317

④ 村瀬勇介、伊藤昭夫、日本酒醸造過程を記述する数理モデルとその解析、京都大学数理解析研究所講究録、査読無し、No. 1746、2011、pp. 141--161

[学会発表] (計26件)

① 久保雅弘、村瀬勇介、準劣微分作用素によって生成される楕円型変分不等式と仮似変分不等式について、2015年度年会(2015-3) 東京都、明治大学

② 村瀬勇介、日本酒醸造過程モデルの解析と数値計算に関連する今後の研究について、第5回非線形数理科学(2015-2) 新潟県、なおか市民センター

③ 村瀬勇介、久保雅弘、準劣微分作用素によって生成される仮似変分不等式に対応した作用素方程式の可解性について、第40回発展方程式研究会(2014-12) 東京都、日本女子大学

④ 愛木豊彦、村瀬勇介、水分吸着過程を記述する自由境界問題の解の時間無限大の挙動について、日本数学会 2014年度 秋期総

合分科会(2014-9) 広島県、広島大学

⑤ 伊藤昭夫、剣持信幸、村瀬勇介、終了時刻が未知関数に依存する日本酒醸造過程モデルに対する最適制御問題について、日本数学会 2014年度 秋期総合分科会(2014-9) 広島県、広島大学

⑥ Y. Murase, Solvability and optimal control problems on mathematical modeling for brewing process of Japanese Sake, AIMS 10th International Conference (2014-7) Madrid, Spain

⑦ 久保雅弘、村瀬勇介、準劣微分作用素によって生成される楕円型変分不等式と仮似変分不等式について、日本数学会 2014年度 年会(2014-3) 東京都、学習院大学

⑧ 愛木豊彦、村瀬勇介、水分吸着過程を記述する自由境界問題の時間無限大における解の挙動について、第39回発展方程式研究会(2013-12) 東京都、日本女子大学

⑨ Y. Murase, Solvability of mathematical modeling for brewing process of Japanese Sake with unknown finish time, EQUADIFF'13 (2013-8) Charles University, Czech Republic

⑩ 伊藤昭夫、剣持信幸、村瀬勇介、終了時刻が未知関数に依存する日本酒醸造過程モデルの可解性について、日本数学会 2013年度 年会(2013-3) 京都府、京都大学

⑪ 佐藤直紀、愛木豊彦、村瀬勇介、白川健、吸着現象を表すある1次元自由境界問題の時間大域解の存在について、日本数学会 2013年度 年会(2013-3) 京都府、京都大学

⑫ 村瀬勇介、日本酒醸造過程モデルの導出と解析、第22回岐阜数理科学セミナー(2013-1) 岐阜県、岐阜大学サテライト

⑬ 村瀬勇介、日本酒醸造過程モデルの単一ステージ可解性について、第38回発展方程式研究会(2012-12) 東京都、日本女子大学

⑭ Y. Murase, Solvability of mathematical modeling of brewing Sake in single fermenting stage, 5th Polish-Japanese Days "Nonlinear Analysis in Interdisciplinary Sciences - Modellings, Theory and Simulations -" (2012-11) 京都府、関西セミナーハウス

⑮ 村瀬勇介、伊藤昭夫、日本酒醸造過程モデルの解の存在性について、日本数学会 2012年度 秋期総合分科会(2012-9) 福岡県、九州大学

⑩ 佐藤直紀、愛木豊彦、村瀬勇介、吸着現象を表すある1次元自由境界問題について、日本数学会 2012年度秋期総合分科会 (2012-9) 福岡県、九州大学

⑪ Y. Murase、A. Ito、Mathematical modeling for brewing process of Sake and its analysis、9th AIMS Conference on Dynamical Systems, Differential Equations and Applications (2012-7) Florida、USA

⑫ Y. Murase、Analyzing a mathematical model for brewing process of Sake、第4回サービス数学セミナー (2012-6) 京都府、佛教大学

⑬ 加納理成、村瀬勇介、放物型仮似変分不等式に対応する摂動項付き発展方程式の解の存在について、日本数学会 2012年度年会 (2012-3) 東京都、東京理科大

⑭ R. Kano、Y. Murase、Existence theorems for nonlinear evolution equations generated by subdifferentials and perturbations、CONFERENCE ON Evolution Equations、Related Topics and Applications (2012-3) 東京都、早稲田大学

⑮ 村瀬勇介、日本酒醸造過程モデルに対応する非線形発展方程式の可解性について、第37回発展方程式研究会 (2011-12) 岐阜県、岐阜大学

⑯ Y. Murase、Nonlinear evolution equations with perturbations for mathematical modeling for brewing process of Japanese Sake、Dutch-Japanese workshop “Analysis of non-equilibrium evolution problems: selected topics in material and life sciences” (2011-11) Eindhoven、Netherlands

⑰ 村瀬勇介、伊藤昭夫、雑菌の効果を無視した日本酒醸造過程モデルと解の存在・非存在について、日本数学会 2011年度秋期総合分科会 (2011-9) 長野県、信州大学

⑱ 村瀬勇介、雑菌の効果を無視した日本酒醸造過程モデルとその解析について、第33回発展方程式若手セミナー (2011-8) 茨城県、つくばグランドホテル

⑲ 村瀬勇介、伊藤昭夫、サービス数学の研究事例—日本酒の醸造について—、第1回サービス数学セミナー (2011-4) 京都府、佛教大学

⑳ 村瀬勇介、伊藤昭夫、日本酒醸造過程を表現する数値モデルに対する解の存在と非

存在について、日本数学会 2011年度年会 (2011-3) 東京都、早稲田大学

〔図書〕 (計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村瀬 勇介 ( Murase, Yusuke )

名城大学・理工学部・助教

研究者番号：80546771

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：