

日本酒醸造過程の数理モデル

岡山大学・環境学研究科 久保 悠 (Nodoka Kubo)
Graduate School of Environmental Science Okayama University
岡山大学・環境学研究科 梶原 毅 (Tsuyoshi Kajiwara)
Graduate School of Environmental Science Okayama University
岡山大学・環境学研究科 佐々木 徹 (Toru Sasaki)
Graduate School of Environmental Science Okayama University

1 初めに

微生物を利用して作られている食品は、現在ではデータなど解明されつつあるが、本来その技術は昔から経験などで受け継がれてきたものである。この微生物と食品の相互作用を研究、そして理解することで、よりよい食品技術への発展に役立てることができるのではないかと考える。本稿では、中でも特殊な技法を使って醸造を行う、日本酒をモデルの対象とした。日本酒醸造の過程を微生物とそれらの生成物の相互作用の観点から数理モデル化し、それを用いて日本酒醸造における三段仕込みなどの伝統技法をシミュレーションした結果を記述している。特に、並行複発酵、三段仕込みなど実際に活用されている技法の有利性を示すことができるようなモデルの形、パラメータ、初期値を探ることが主たる目的である。

2 日本酒醸造について

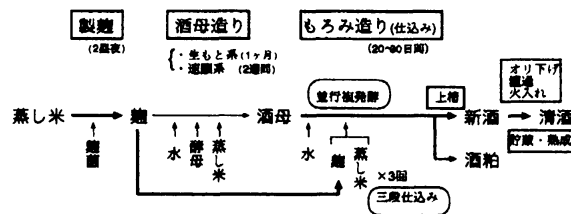


図 1: 日本酒の製造工程

日本酒は米を米麴によって醸造する唯一の酒であり、醸造酒として世界で最も高いアルコール濃度をもつ。黄麴カビと酵母による並行複発酵という手法によってその高いアルコールが成り立っており、醸造学的にもこの並行複発酵で造る特異なものとする。

日本酒の醸造の過程は大きく分けると、米のデンプンを糖化するための麹菌を繁殖させるための製麹と、糖化されたブドウ糖をアルコールに作り変える清酒酵母を培養する酒母、そしてそれらを仕込んでいくもろみの三段階に分けられる。

特に最後のもろみの工程は糖化と発酵を同時に行う「並行複発酵」という技法が用いられる。これは、清酒酵母は糖を餌にアルコールに造り変えていくものの、多量の糖の中では生理的活性が下がってしまうので、徐々に糖を供給するための手法である。

また「三段仕込み」といって、材料を三度に分けて仕込むことによってより一層糖の供給を緩やかに行う。

3 日本酒醸造 (並行複発酵) のモデル

並行複発酵が行われるもろみにおいて、まず米のデンプンを餌に麹菌が酵素によって分解し、ブドウ糖を生成する。次にそのブドウ糖を清酒酵母がアルコールに作り変える。この一連の流れをモデルに表すと次のようになる。

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = -aSM \\ \frac{dM}{dt} = bSM - cM \\ \frac{dG}{dt} = vSM - wGF \\ \frac{dF}{dt} = xGF - yF \\ \frac{dA}{dt} = zGF \end{cases} \quad (1)$$

ここで各記号、パラメータは、S(Starch):デンプン, M(Malt):麹菌, G(Glucose):ブドウ糖, F(Ferment):清酒酵母, A(Alcohol):アルコール, a:デンプンの消費, ブドウ糖の生成, b,x:麹及び酵母の増殖, c,y:麹及び酵母の減少, w:ブドウ糖の生成, アルコールの生成を示す。

この並行複発酵と、糖化と発酵を別にして行う単行複発酵のモデルを実行して比較したものが図2である。基本モデルでは糖濃度が20%超えると酵母の活性低下が起こる、という要素を含んでいない為に一気に糖が供給される単行複発酵の方がアルコールが多く生成される。

3.1 酵母の活性低下を含む並行複発酵モデル

酵母の活性低下を酵母の増殖率とアルコール発酵率の低下ととらえ、式(1)のブドウ糖に関わる関数を $k(G)$ とし、式(2)のように場合分けを行った。(n:正の定数とする)

$$k(G) = \begin{cases} G & (G < 700) \\ \frac{700^{n+1}}{G^n} & (G \geq 700) \end{cases} \quad (2)$$

図3のように単行複発酵では酵母が増殖することができず十分に発酵を行えず、並行複発酵有利となった。

実際の醸造を示すには酵母の活性低下を考える必要があることが分かった。

4 三段仕込みのモデル

三段仕込みは表のように3度に分けて仕込まれる。初添えを行った翌日は踊りといって麹や酵母の増殖を図る。これらを参考に初期値を設定する。

モデルは式(1)の並行複発酵のモデルを使用する。ここで、酵母の活性低下を以下のように設定する。

- ・ブドウ糖濃度が20%以上:増殖発酵不可 ($w=0, x=0, y=0$)
- ・アルコール濃度が10%以上:増殖不可, 発酵可 ($x=0, y=0$)

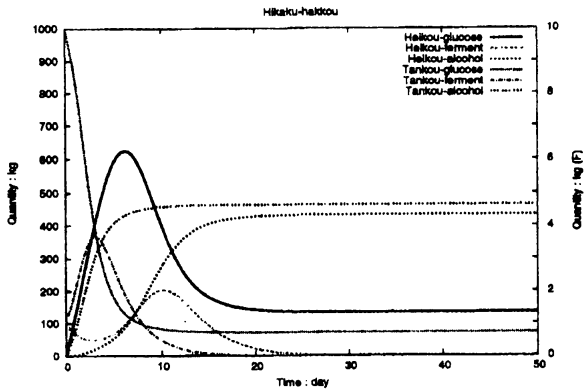


図 2: $a=0.12, b=0.0004, c=0.05, w=0.12, x=0.0013, y=0.5$

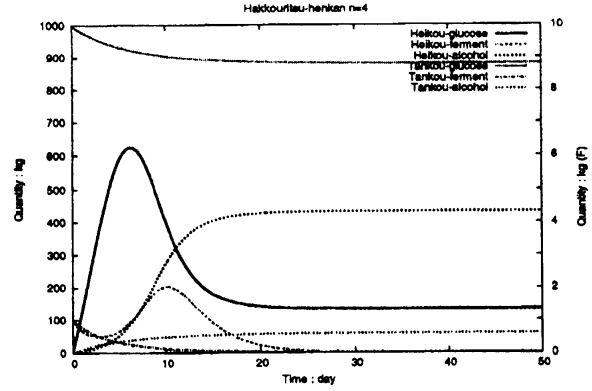


図 3: $n=4$

	酒母	1. 初添え	2. 仲仕込	3. 留仕込	計
米 (デンプン)	1 (95kg)	× 2.1 (199.5kg)	× 4.3 (408.5kg)	× 7.5 (712.5kg)	1415.5kg
糖	1 (45kg)	× 1.8 (81kg)	× 2.8 (126kg)	× 3.9 (175.5kg)	427.5kg
水	1 (155ℓ)	× 1.6 (248ℓ)	× 4.1 (635.5ℓ)	× 8.1 (1255.5ℓ)	2294ℓ

図 4: 仕込みの配合例

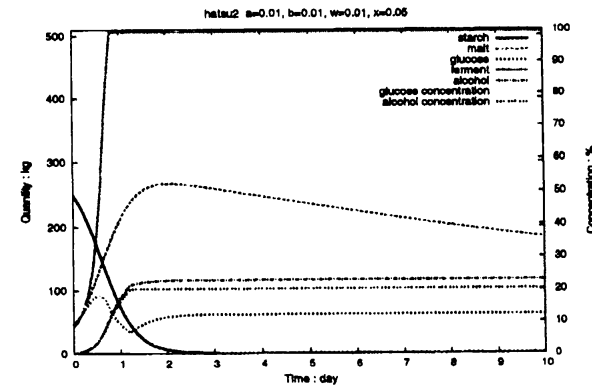
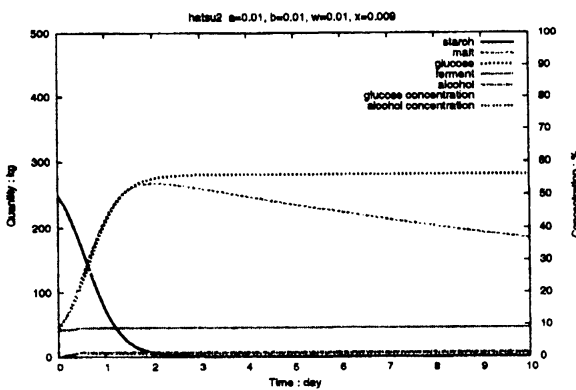


図 5: 三段仕込みー初

・アルコール濃度が20%以上：発酵不可 ($w=0$)

図5の結果はパラメータを変更したものである。この三段仕込みでは、ブドウ糖が大量に生成して酵母が増殖不可となり、発酵できなくなるか(左)、酵母が増殖したものの初の時点でアルコールが20%に達し(右)、実際の醸造の状況を示すことができなかった。

4.1 麴の糖化酵素を考えた三段仕込みモデル

麴菌が順調に増殖するのでその分大量に生成するブドウ糖が問題であると考え、糖化は麴の酵素の働きによるものであることに注目した。麴菌は増殖していくと一定となるように上限を設けて糖化酵素が

糖化を行うという条件を加える。

・麹菌の濃度が20%以上：麹の増殖不可，量は一定 ($b=0, c=0$)

初添えの2日後に仲仕込み，仲仕込みの翌日留仕込みを行う(図6~8)。次の仕込みに移るのにほどよくブドウ糖が生成し，酵母が増殖して発酵が少しずつ始まる。最後の留仕込みを行うとすぐにアルコールが20%に達し，発酵が完了する。

時間スケールが実際の醸造と合わなかったものの，最終的な状態としては残ったブドウ糖濃度も約5%と実際の原酒とほぼ同じであり，適切なシミュレーションだと思われる。

図9は比較の為に同じパラメータで三段仕込みをせず，一気に仕込んだときの結果である。このとき，多量のブドウ糖が生成され，すぐに20%に達するので酵母が発酵を行うことができない。

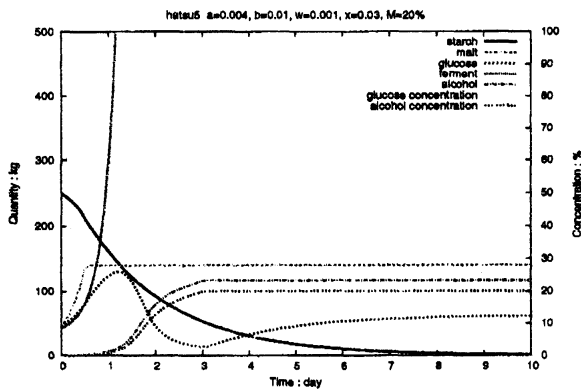


図 6: 初

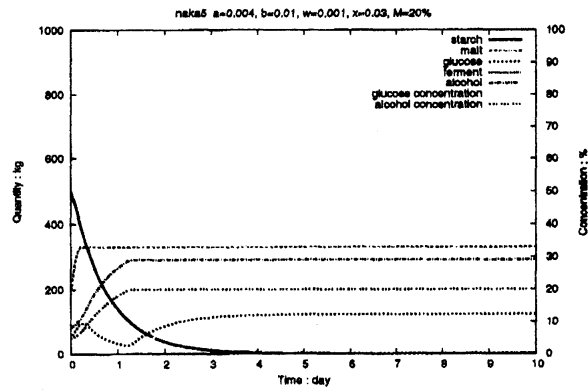


図 7: 仲

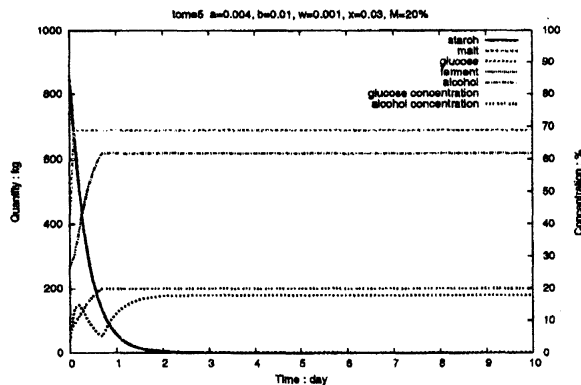


図 8: 留

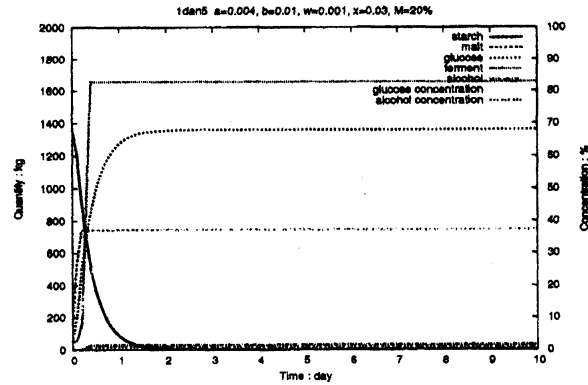


図 9: 一段仕込み (比較用)

5 考察

糖分が発酵に必要である一方で，多量にあると害にもなることを適切にモデルに組み込む必要がある。酵母の活性低下は酵母の増殖率とアルコールの発酵率と考えるべきである。

並行複発酵の有利性を示すには酵母の活性低下を適切に示す必要があり，三段仕込みの有効性を示すにはさらに麹の糖化酵素の作用によると推定される。

糖化酵素の条件を加えることによって一気に仕込むと上手く発酵が行えなくなる。三段仕込みで酵素がブドウ糖を生成し、それを餌に酵母が増殖と発酵を徐々に行うことによって実際の醸造の状況を示すことができた。

実際には微妙な温度調節によって発酵の速度を調節するので、温度などのパラメータを組み込むことによって時間スケールに合ったシミュレーションが可能になるのではないかと考える。

参考文献

- [1] 巖佐庸『数理生物学入門-生物社会のダイナミクスを探る-』共立出版 1998
- [2] 寺本英『数理生態学』朝倉書店 1997
- [3] Martin Braun『微分方程式 下 -その数学と応用-』シュプリンガー・フェアラーク東京 2001
- [4] 井上喬『やさしい醸造学』工業調査会 1997
- [5] 野白喜久雄 小崎道雄 好井久雄 小泉武夫 編集『改訂 醸造学』講談社 1993
- [6] 吉澤淑 石川雄章 蓼沼誠 長澤道太郎 永見憲三 編集『醸造・発酵食品の事典』朝倉書店 2002
- [7] 谷吉樹『応用微生物学』コロナ社 1992
- [8] 大隅良典 下田親 編集『酵母のすべて-系統, 細胞から分子まで-』シュプリンガー・ジャパン株式会社 2007