

令和 7 年度厚生労働科学研究費補助金（食品の安全確保推進研究事業）
「国際的な基準に基づく HACCP システムの導入に資する研究」

分担研究報告書
予測微生物学に関する研究

研究分担者 小関成樹 北海道大学大学院農学研究院

研究要旨： HACCP プラン構築の支援ツールや教育資材等を開発することにより、国内食品等事業者による衛生管理レベルの向上を図ることを目標として、今年度は最新の大規模言語モデル（large language model、LLM）を搭載した人工知能（AI）活用して、HACCP プラン策定への具体的な活用方法について検討することを目的とした。その結果、従来の作業によるプラン策定と比較して飛躍的に速く、かつ網羅性に富む HACCP プランを作成することが可能であることが示された。

A. 研究目的

本研究では、食品取扱従事者が 50 名以上の大規模な食品製造・加工業者に対して義務付けられている国際的な基準（コーデックス規格）に適合した HACCP に基づく衛生管理について、食品等事業者自身が的確な危害要因分析と分析結果に基づく管理措置の決定及び HACCP 導入後の検証を適切に行い、国際的な基準に適合した HACCP プランを無理なく構築することを可能とするツールや教育資材等を開発することにより、国内食品等事業者による衛生管理レベルの向上を図ることを目標とする。

本年度においては、各種微生物の増殖／死滅挙動に関する既存の国際的なデータベースや予測ツールの情報を活用するとともに、最新の大規模言語モデル（large language model、LLM）を搭載した人工知能（AI）活用して、HACCP プラン策定への具体的な活用方法について検討することを目的とした。

B. 研究方法

個々の生成 AI はそれぞれに特徴があるので、一概にどのツールが最適かどうかを判断することは難しいが、本研究では文献検索とのリンクが効率的である Google 社の Gemini をモデル AI として採用した。なかでも Deep Research 機能を活用することで、参照する Web ページ情報を明示することができ、誤った情報源によるハルシネーションを回避できる。そして、Notebook LM との融合によって、調査した文献情報のみから、重要情報を抽出して具体的な HACCP プラン策定までを実行した。

具体的な実行環境は以下のとおりである。

- ・ Google Gemini 3.1 Pro (Deep research)
- ・ Notebook LM

上記の実行環境に「豆腐製造プロセスにおける潜在的病原性細菌のハザード分析と高度な制御手法を定時せよ」との指示で検討した。

C. 結果

AI による情報検索と HACCP プラン提示の

結果、以下のような結果が得られた。

豆腐製造における潜在的ハザードを効果的に制御するためには、最終製品の抜き取り検査に依存するのではなく、製造工程の各段階に安全性を組み込み、監視する HACCP システムの厳格な運用が不可欠である。以下に、病原性細菌群を封じ込めるためのクリティカルな制御基盤を詳述する。

1 水質管理と原料の初期負荷低減（前提条件プログラム）

ワシントン州でのエルシニア菌によるアウトブレイク¹が強烈に示す通り、豆腐の構成成分の大部分を占める「水」の安全性は絶対に譲歩できない基本要件である。大豆の浸漬、製品の冷却、およびパッケージへの充填に使用される全ての水は、塩素消毒、紫外線（UV）殺菌、あるいは精密ろ過（マイクロフィルトレーション）等によって病原微生物が完全に排除された飲料水適格の水でなければならない。加えて、原料大豆表面に付着している土壌由来の芽胞菌（セレウス菌やボツリヌス菌等）の初期微生物負荷（Initial bioburden）を低減するため、受け入れ時の徹底した物理的洗浄・異物除去を実施し、浸漬工程における発芽・増殖を防ぐために浸漬水を定期的に換水するか、浸漬温度を低温（10℃以下）に保つことが求められる²。

2 加熱と凝固の熱履歴管理（CCP 1）

豆乳の加熱（通常 97℃～106℃の沸騰状態で 2 分以上、または 100℃～110℃で 3 分～10 分間）は、大腸菌、リステリア菌、サルモネラ菌などの栄養細胞を完全に死滅させるための最初の重要管理点（CCP）である（図 1）³。加熱装置に設置された温度センサーの定期的な校正と、豆乳が連続的に規定の温度と時間を満たして通過していることを保証する自動フローコントロールが必須となる。また、その後の凝固工程においても、製品の温度を 60℃～

90℃（140°F～194°F）の高温帯に維持することにより、この段階で環境から落下してくる細菌や、設備からの交差汚染菌の増殖を即座に阻止することができる³。

3 急速冷却プロトコルによる芽胞発芽の阻止（CCP 2）

加熱工程は前述の通り、セレウス菌等の耐熱性芽胞に対して発芽のシグナルを与えている。したがって、凝固・圧搾・成型後の豆腐の「冷却速度」が、最終的な安全性を決定づける最もクリティカルな段階となる。細菌の増殖至適温度帯である 10℃～50℃（とりわけ爆発的な増殖が起こる 20℃～40℃の危険帯）を、可能な限り速やかに通過させることが至上命題である。HACCP に基づく衛生管理手順では、製造終了後、直ちに流水やチラー（冷却水）設備を用いて製品から急速に熱を奪い、その後冷蔵庫等に移して「2 時間以内」に製品の中心温度を 10℃以下（理想的には 5℃以下）に到達させることが強く推奨されている²。この冷却プロセスが遅延したり不十分であったりした場合、セレウス菌は直ちに対数増殖を開始し、熱に極めて安定なセレウリド毒素の産生が始まってしまう（図 2）⁴。

4 包装技術の高度化と二次殺菌の導入（CCP 3）

充填豆腐（絹ごし豆腐の一種）や、スーパーマーケットでの長期陳列を目的とした製品においては、容器包装に豆乳と凝固剤を充填して密閉した後に二次的な加熱凝固・殺菌を行う手法が取られる。日本の厚生労働省の基準においては、包装豆腐に対して「90℃で 40 分間加熱する方法、またはこれと同等以上の効力を有する方法」による殺菌が明確に規定されている⁵。この二次殺菌プロセスにより、冷却・切り分け・包装工程で製品の表面に付着した可能性のあ

る環境由来の低温細菌（リステリア菌、エルシニア菌、黄色ブドウ球菌など）をパッケージ内部で確実に追加排除することが可能となる³。さらに近年では、超高温殺菌（UHT：Ultra-High Temperature）技術とアセプティック（無菌）包装技術を組み合わせた高度な無菌充填豆腐の生産が進んでいる³。この技術においては、豆乳を135℃以上という超高温で数秒間瞬間的に加熱することで、最も強靱な芽胞をも完全に不活化し（Devitalization）、完全にコントロールされた無菌チャンバー内で凝固剤とともに無菌パッケージに充填する³。これにより、冷蔵流通を必要とせず常温保存が可能なシェルフスタブル（Shelf-stable）製品が実現し、病原菌の増殖リスクを根本から排除することに成功している。

5 流通・消費段階のハードルテクノロジー

製品が出荷された後も、コールドチェーン全体を通じて製品温度を常に5℃（41°F）未満に維持し続けることが、耐冷性を持つリステリア菌、エルシニア菌、およびボツリヌス菌 E 型の増殖を抑える最後の防波堤となる³。製品のパッケージには、未開封状態での消費期限を明記するだけでなく、「開封後は3～5日以内に消費すること」という具体的な取り扱い指示を記載することで、消費者段階での温度乱用や長期保存によるリスクを軽減する³。加えて、製品を浸漬する保存水（Aqueous solution）の中に、法的に認可された抗菌剤や保存料（Preservatives）を添加したり、有機酸を用いて pH を微弱な酸性に調整したりするハードルテクノロジー（Hurdle technology）の適用も、包装後に生き残った細菌の増殖を相乗的に抑制する有効な手段として産業的に活用されている（図3）³。

D. 考察

HACCP プランの策定における出発点である

対象食材とハザードとの組み合わせを特定することが、製造現場の担当者にとっては難しい場合が多い。これまでは様々な文献情報等を頼りにしてハザードを特定していたが、最新の大規模言語モデルを核とする AI を活用することで、対象食材とハザードとの組み合わせを容易に推定することができることが確認された。また、広範囲な科学文献情報を参照して必要な情報の収集・分析を瞬時に実行し、さらには具体的な HACCP プランの提示まで実行できる点は、従来の熟練者の経験に基づく HACCP プラン策定よりも、情報の漏れを少なくできるとともに、大幅な時間短縮が期待できる。

E. 結論

最新の大型言語モデルを搭載した生成 AI の活用は HACCP プラン策定において、従来の作業によるプラン策定と比較して飛躍的に速く、かつ網羅性に富む HACCP プランを作成することが可能であることが示された。最新の世界中の文献情報をも包括的に組み込むことができることから、製造技術の高度化、規制の変更などにも柔軟に対応できるものと考えられる。

F. 研究発表

1. 論文発表

なし

2. 学会発表

なし

G. 知的財産権の出願・登録状況

なし

参考文献

- 1) Epidemiologic Notes and Reports Outbreak of *Yersinia enterocolitica* -- Washington State,

<https://www.cdc.gov/mmwr/preview/mwrhtml/00001179.htm>

2) HACCP の考え方を取り入れた 衛生管理のための手引書- 厚生労働省,

<https://www.mhlw.go.jp/content/11135000/000560170.pdf>

3)Tofu - Food Source Information - College of Health and Human Sciences,

<https://www.chhs.colostate.edu/fsi/food-articles/complex-food/tofu/>

4) Bacillus cereus in Soybean Milk - Centre for Food Safety,

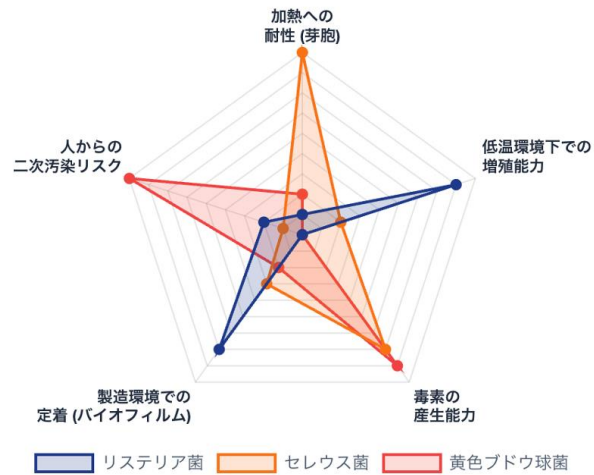
https://www.cfs.gov.hk/english/multimedia/multimedia_pub/multimedia_pub_fsf_174_01.html

5) 豆腐の規格基準改正に係る 食品健康影響評価

<https://www.fsc.go.jp/fsciis/attachedFile/download?retrievalId=kai20180301ik1&fileId=220>

警戒すべき4大病原性細菌

豆腐の製造・流通過程において特に潜在的ハザードとなるのが以下の細菌です。それぞれ「熱に強い」「低温で増殖する」など異なる生存戦略を持っているため、単一の対策では制御できません。各細菌の特性（脅威度）をレーダーチャートで比較します。



評価軸: 各細菌の環境耐性とリスク特性（値が大きいほどリスク・耐性が高い）

図 1 豆腐製造における潜在的ハザードの抽出結果

製造プロセスとハザード発生ポイント

大豆から豆腐になるまでの各工程には、特有の汚染リスクが存在します。加熱（殺菌）工程の前後での取り扱いが、最終的な製品の安全性を決定づけます。以下のフローは、重要管理点（CCP）と主なハザードを示しています。

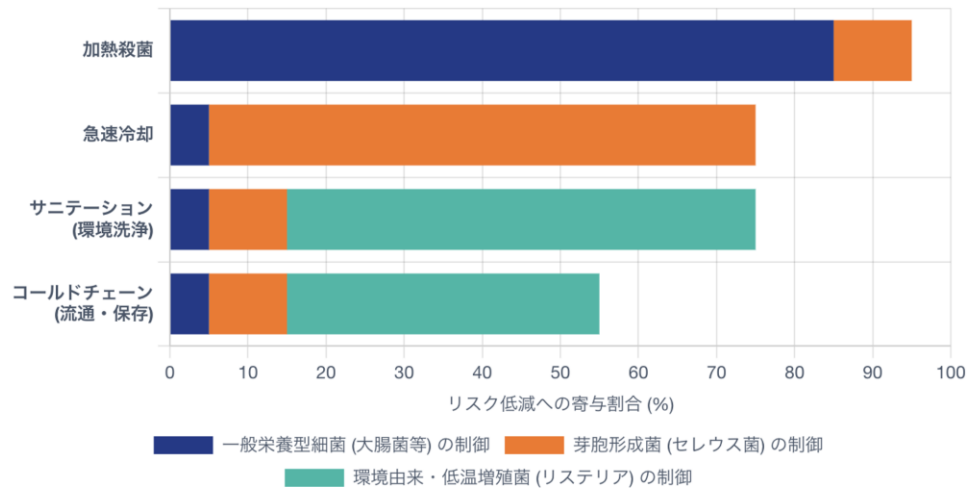


図2 豆腐製造工程におけるハザードとその管理ポイントの提示例



統合的制御アプローチの効果

病原性細菌を制御するためには、加熱、冷却、環境衛生（サニテーション）、そして流通時のコールドチェーンという複数層の防御（ハードル技術）が必要です。各制御方法がどの細菌群に対して最も効果を発揮するかを分解して示します。



データ: 各制御手法が全体的なリスク低減に寄与する割合の概念図。

図 3 豆腐製造工程における管理ポイントリスク低減に及ぼす影響解析