

## **Bacillus** 属細菌芽胞の増殖限界条件の解明と増殖確率予測モデルの開発

共生基盤学専攻 食品安全・機能性開発学講座 食品総合技術監理学 黒田 小百合

### 1. はじめに

芽胞形成菌である *Bacillus* 属細菌芽胞は高い耐熱性を有することから加熱殺菌が困難であるため、生育限界条件を正確に把握し、増殖を制御することが求められている。従来、細菌の増殖／非増殖の予測に一般的に用いられてきたロジスティック回帰分析は、数式の型に依存することから柔軟な予測が難しく、複雑な環境条件下での正確な予測には限界があった。近年、回帰式モデルに代わる新しい予測手法として、より柔軟で正確な予測を実現し得る機械学習を用いたモデルが注目を集めている。そこで本研究は、食品の腐敗原因となる *Bacillus* 属細菌芽胞に焦点をあて、従来法であるロジスティック回帰分析、ニューラルネットワーク、深層学習の3つのモデル化手法を用いて、pH や水分活性などの種々の環境条件下における *Bacillus* 属細菌芽胞の増殖／非増殖境界条件を予測する数理モデルの開発を目的とした。

### 2. 方法

1) 供試細菌 *Bacillus subtilis*, *B. coagulans* および *B. megaterium* の3菌株を用いた。

2) 予測モデルの開発 各種条件に調整した Tryptic soy broth (TSB) にて細菌の増殖試験を行い、増殖限界条件を決定した。この結果をもとに、ロジスティック回帰分析、ニューラルネットワーク、深層学習を用いて細菌の増殖／非増殖境界予測モデルを開発した。説明変数には、pH、水分活性、酢酸濃度 (%), 乳酸濃度 (%), 菌種および時間 (week) を用いて、応答変数は増殖 (1) または非増殖 (0) とした。

3) 予測モデルの検証 開発したモデルの予測精度を検証するため、モデル開発とは異なる条件に調整した TSB 培地またはあさりスープを用いて細菌の増殖実験を行った。この結果をもとに、未知のデータに対するモデルの予測精度の検証を行った。

### 3. 結果と考察

ロジスティック回帰分析、ニューラルネットワーク、深層学習を用いて、*Bacillus* 属芽胞菌の増殖確率予測モデルを開発した。その結果、全てのモデルにおいて良好な当てはまりを示した。一部の条件下では、ロジスティック回帰分析では数式の形に依存して、正しい予測ができなかったが、このような条件下においても、機械学習を用いたモデルでは正確な予測が可能であった。

また未知データに対する構築した予測モデルの予測精度は、TSB 培地条件下において全てのモデルで正答率が 90%以上、AUC が 0.95 以上の値を示し、高い精度で細菌の増殖／非増殖の予測が可能であった。同様に、あさりスープによる検証においても、高精度での増殖限界を予測可能であった。特に深層学習は、単層のニューラルネットワークおよび従来手法のロジスティック回帰分析と比較しても、同等以上の予測精度であり、柔軟で正確な予測が可能であることが示された。

### 4. まとめ

ロジスティック回帰分析、ニューラルネットワーク、深層学習の3手法を用いて、*Bacillus* 属細菌芽胞の増殖確率予測モデルを開発した。全てのモデルにおいて、高い精度で細菌の増殖予測が可能であり、特に深層学習は、より柔軟で正確な予測が可能であることが示された。