





# GFSI 科学技術 諮問グループ (STAG) 報告書

- 2022年

STAG: Science and Technology Advisory Group

www.mygfsi.com



# 目次

STAG議長からの歓迎の言葉

食品安全におけるビッグデータ

食品安全におけるマイクロバイオームの役割

新たな食中毒菌

フードシステムのレジリエンス。食品安全への影響

謝辞

グローバル・フード・セーフティ・イニシアティブについて

3

6

14

20

28

36

37

# グローバル食品安全イニシアチブ(GFSI)の科学技術諮問グル ープ (STAG) の報告書へようこそ。

### なぜGFSIには科学技術諮問チームが必要なのですか?

GFSIのビジョンである「すべての人々に安全な食品を」は、すでに多くの企業や組織にとっても 目指すところとなっています。世界中の食品小売業者やメーカー、サプライヤー、農業界、学者 、政府、その他多くの人々が、GFSIが認める認証・監査結果に対する信頼性、透明性、信用を 向上させるために、GFSIエコシステムの監視強化を提案するGFSI Race to the Topフレームワ 一クに賛同しています。

さらに、GFSIは、食品安全の「どのように」ではなく「何を」に責任を負うベンチマーキング と調和のための組織として、その中核的な目的に忠実でありたいと考えています。

このビジョンとRace to the Topのフレームワークに不可欠なのは、正しい科学と技術のガイダ ンスを持つことです。STAGは、GFSIのガバナンスとオペレーションを共同で強化する一連の取 り組みの一環として2021年3月にGFSIに導入され、GFSIの食品安全活動に影響を与える可能性 のあるあらゆる科学技術の発展について、**専門的**かつ独立した見通しを提供するという重要な責 任を担っています。

確かに、新しい技術や科学の進歩は、エキサイティングな新しい能力や機会を約束するもので すが、こうした開発の多くは、それ自身のリスクや課題をもたらす可能性があります。

### STAGの役割とは?

STAGの使命は、独立した専門家を用いて科学技術の動向を綿密かつ質高く検討し、適切で実用的 かつタイムリーな提言を行うために必要な洞察力と先見性を提供することです。

STAGは、自身および外部の専門家(個人またはネットワーク)の協力を得て、科学技術の動向 や発展に関する本質的で客観的かつ独立した分析をGFSIとそのメンバーに提供し、GFSIが食品 **安全の持続可能な未来を定義する**準備と支援をすることができるようにします。

### STAGの仕組みは?

新しく設立されたSTAGでは、その任務と作業方法を精緻化してきました。次頁の図1は、STAGの 「プロセス」を示しており、インプット、ガイド、アウトプット、成功要因を特定しています。 必要なアウトプットを達成するためには、これらの要素がすべて整っていなければなりません

また、世界は驚くべきスピードで変化していることも認識しなければなりません。COVID-19の大流 行、最近の地政学的な出来事、そしてもちろん気候変動という実存する圧力に見られるように 、食糧供給に対する課題は最近の世代では経験したことがないほど山積しています。現在の事 業環境は安定したものとは言い難いため、STAGがステークホルダーのニーズに応え、十分に機 敏に対応できるようにしたいと考えました。私たちの目標は、次頁の図2に示すような運営モデ ルに移行することです。STAGは、各分野の専門家からなるワーキンググループの触媒となり、 ある頻度でインパクトがあり適切な報告を行うことを目指します。

### 図1:

## STAG - インプット、ガイド、アウトプット、成功要因

# Guides

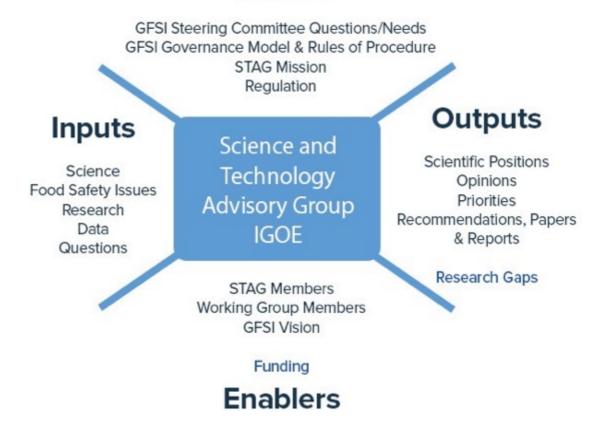
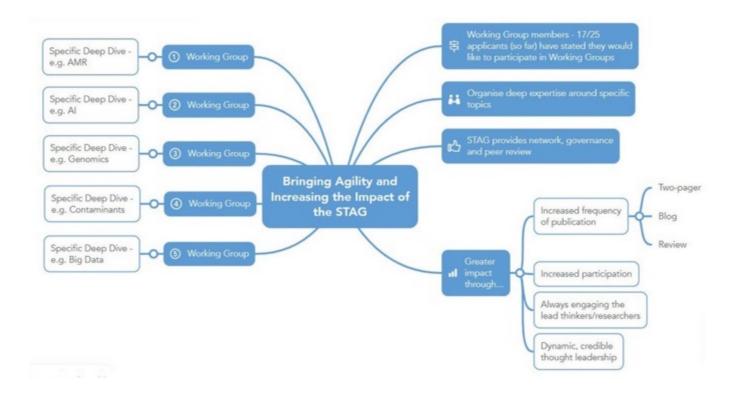


図2: GFSI STAG - 作業モデル 関連性と敏捷性



### STAGはこれまでどのような成果を上げてきたのでしょうか。

本レポートはSTAGの最初のアウトプットであり、4つのトピックを取り上げています。

- 1. 食品安全におけるビッグデータ Jeffrey Farber氏
- 2. 食品安全におけるマイクロバイオームの役割 Kaye Burgess氏
- 3. 新たな食中毒菌 Francisco Diez-Gonzalez氏
- 4. フードシステムのレジリエンス。食の安全への影響 Robert Scharff氏

STAG は、これらの分野が食品の安全性に重大な影響を及ぼす可能性が高いと判断しました。各論文は、主執筆者が他のチームメンバーからの情報および評価を受けながら執筆しています。公開前に、別の独立したグループによる正式なレビューを受けています。

これらの論文は網羅的なレビューではありません。これらの重要な科学技術分野の概要や紹介であり、食品専門家がこれらの分野がなぜ重要なのか、そしてその範囲や起こりうる影響を理解することができるように書かれたものです。我々は、この最初の作業に続いて、これらのトピックを「深く掘り下げる」ためのワーキンググループを結成し、より詳細なアウトプットを作成したいと考えています。さらなるテーマが検討され、他の論文も執筆中です。

### STAGには誰がいる?

STAGのメンバーは、以下の通りです。

- Kaye Burgess, Senior Research Officer and Principal Investigator, Teagasc Food Research Centre - Food Safety Department, Ireland
- Francisco Diez-Gonzalez, Professor and Director, Center for Food Safety, University of Georgia, USA
- Jeffrey Farber, Adjunct Professor in the Department of Food Science at the University of Guelph, Ontario, Canada
- Lise Korsten, co-Director of the DSI/NRF Centre of Excellence Food Security, University of Pretoria, South Africa
- Robert Scharff, Professor and Consumer Sciences Graduate Studies Chair, Ohio State University, USA.
- Dr Yunbo Luo, Director of the Special Food Research Center and Professor and Member of the Academic Committee of the College of Food Science and Nutritional Engineering at China Agricultural University (CAU), China.



これまでのチームの努力と素晴らしい貢献に感謝するとともに、チーム全員を 代表して、今後の仕事と貢献を非常に楽しみにしていることをお伝えしたいと 思います。

Dave Crean GFSI STAG 議長





### I. 背景 - なぜこのテーマに関心を持たなければならないのか?

ビッグデータの定義には様々なものがありますが、大まかに言えば、大量の異なるタイプのデータを指します。ビッグデータの用途は多岐にわたり、食品安全の分野では、農場から食卓まで、あるいは船から喉元までといった食品サプライチェーンのすべての段階においてビッグデータを収集することができ、また実際によく集められています。

FORUM

ビッグデータが食品安全だけでなく、食品システムの他の側面にも大きな影響を及ぼしている、あるいは及ぼすであろう領域は数多くあります。ビッグデータの種類には、全ゲノム配列、メタゲノム、メタバーコーディング、センサー、オンライン食品安全データベース/データソース、予測分析、インターネット上のソーシャルメディアや電子商取引データ、さらには農場、加工、小売レベルなど、食品サプライチェーンに沿って収集されるデータなどがあります。ビッグデータの分析と利用から得られる有益な成果という点では、次のテーマにおいて進展が見られています。i)食品のトレーサビリティ、ii)気象データと最適な収穫時期の予測、iii)製造中の現場検証、例えば CIP、環境モニタリング、製造または輸送中にリアルタイムで属性を監視する包装内センサー、iv) デジタル害虫管理、v) 出所の特定、vi) 食中毒発生の検出と管理、vii) 宿主と病原体の相互関係の理解、viii) 食品腐敗の減少、および ix) 食品詐欺の発見。

食品安全管理におけるビッグデータ技術の応用は、現在から将来にわたって、食品業界に多大な影響を与え、継続的な改善を促進するのに適しています。ビッグデータ技術は、食品の持続可能性、安全性、品質といった面を改善し、それらを結びつけることができます。より良い品質の実現、食品廃棄の防止、安全性の確保から始まり、増加する世界人口を養うことまでもができるのです。

#### Ⅱ. 今日、私たちは何を知っているのでしょうか?

フードサプライチェーンにおいてビッグデータが収集されている分野の多くでは、すでに食品の安全性に対する好影響を得ています。以下は、現在わかっていることの中から顕著な例を挙げたものです。

#### ブロックチェーン

国際的な食品取引の拡大に伴い、食品リコール、食品安全、食料安全保障、真正性、持続可能性、消費者の信頼などの分野で継続的な改善を推進することに関心が高まっており、新しい最先端技術のニーズが急激に高まっています。ブロックチェーンは、これらの分野の多くで進展を支援することができる有望な技術の一つです。実際、データを不変に保存し、フードサプライチェーンの全領域で迅速な製品追跡を可能にすることで、食品業界をあらゆるレベルでより透明性の高いものにします。ブロックチェーンは極めて透明性の高い環境を作り出すため、理論的には「信頼」が全く不要になります。現在、小売業者や大規模な食品加工業者は、製品のトレーサビリティを向上させるためにブロックチェーンを実験的に使用しています。多くの異なる製品で検証したケーススタディでは、ブロックチェーンを利用したトレーサビリティによって、コスト削減、セキュリティの向上、政府規制への準拠強化、食品事故や食中毒への対応時間の短縮が実現できることが分かっています。

食中毒については、発生源の特定がより迅速に行えるようになりました。2006年、アメリカの保健当局は、汚染されたほうれん草が原因の大腸菌による食中毒の発生源を特定するのに2週間近くかかりました。(https://www.cdc. gov/ecoli/2006/spinach-10-2006.\_html) これは、食品サプライチェーン全体の時間、エネルギー、資源を浪費し、ホウレンソウ農家に多大かつ持続的な経済的損害を与え、食品サプライチェーンに対する消費者の信頼を失墜させることにつながりました。

ブロックチェーンなどのビッグデータ技術の利用が進めば、リコールや人の疾病に関与した汚染製品の出所を捜査当局が迅速に追跡できるようになります。

#### ダイナミック・リスク・マネジメント

ビッグデータは、食品安全管理におけるダイナミック・リスク・マネジメント(DRMS)に利用することができます。例えば、科学者たちは、バリューチェーンのさまざまな地点で得られた食品安全に関連するデータを持つDRMSシステムを、葉物野菜に含まれるハザードの特定と志賀毒素産生*大腸菌の*制御にリアルタイムで使用できることを示しました(Donaghyら、2020年)。

更に、予測分析の分野でも大きな進展があり、ハザード発見のピークを予測するために、リコール、感染症発生、国境通過拒否、RASSF(Rapid Alert System for Food and Feed)アラートなどを評価するツールが利用できるようになりました。早期警戒システムのためのダッシュボードの制作や、サプライヤーのリスクプロファイリングの分野では、多くの企業が積極的に活動しています。

#### グローバルサプライチェーン

サプライチェーンの混乱は出荷・輸送の遅れにつながり、腐敗の発生を増やす可能性があります。ビッグデータを活用すれば、腐敗の恐れのある出荷に優先順位をつけることができるでしょう。例えば、輸入検査では、サプライチェーンの情報を使って検査の優先順位を決めることができます。輸送中(貨物またはトラック)の現場センサーは、運搬業者/運転手による是正措置のためのアラートとして定期的に利用され、食品廃棄、腐敗、または安全問題の防止に役立っています。

#### 次世代シーケンスベースプラットフォーム

#### 1.全ゲノム配列

科学者は現在、細菌性病原体の何千もの完全なゲノム配列を分析・比較することができます。 たとえ過去に発生したものであっても、全ゲノム配列を使用して食中毒とその原因と疑われる 食品を正確に関連付けることができる例は数多くあります(Brownら 2019年、Koutsoumanisら 2019年、Liら 2021年)全ゲノム解析によって集められたこの膨大な量のビッグゲノムデータにより、科学者は、i)病原性形質、ii)宿主-病原体相互作用、iii)抗菌剤耐性因子などの食中毒菌の 重要な情報をより深く理解することができます。

更に、食品安全規制当局は、その執行活動において日常的にビッグデータを活用しています。 例として次のようなものがあります。

- 1. 米国FDAの検査官は、定期検査の一環として、何らかの理由で検査後に、または疫学調査の一環として、食品事業におけるL.monocytogenesの大規模な環境拭き取り検査 ('swabathon'と呼ばれる)を実施します。
- 2. 欧州の規制当局は、根本的な原因を分析するために大規模な環境サンプリングを実施しています。
- 3. GenomeTrakr(https://www.fda.gov/food/whole-genome-sequencing-wgs-program/genometrakrnetwork) や PulseNet (https://pulsenetinternational.org/) といったプログラムに政府が参加し、配列やメタデータは NCBI やその他の機関によって収集されています。GenomeTrakrのデータは、研究者や公衆衛生担当者がリアルタイムで比較・解析することができ、食中毒発生の調査を迅速化し、食中毒や死亡を減らすのに役立ちます。最近のFDAの調査によると、GenomeTrakr Whole Genome Sequencing Networkの金銭的利益に関して、2019年までに、公衆衛生機関による約2200万ドルの投資に対して、このプログラムはすでに年間約5億ドルの健康利益をもたらすと推定されました(Brown et al. 2021)。

#### 2. メタゲノミクス

培養非依存的診断試験(CIDT)、ショットガン/ロングリードメタゲノミクスそしてメタバーコーディングなどのメタゲノムに基づく方法論のアプローチは可能性が非常に大きく、とりわけ環境サンプル、食品、食品成分中の微生物群集全体を直接特定する能力につながります(Forbes et al. 2017; Billington et al, in press)。

FORUM

ショットガンメタゲノミクスはすでに、発酵乳中の病原性大腸菌、ほうれん草中の志賀毒素産生性大腸菌、アウトブレイクに関連したアイスクリームサンプルにおけるL monocytogenes などの食中毒菌の検出に成功しています。(Koutsoumanisら、2019)。更に、擬似的メタゲノムシーケンスは、L. monocytogenes などの食中毒菌の迅速な同定につながる、食品業界にとって貴重なハイブリッド監視ツールとなり得ることが示されています(Wagner et al. 2021)。

メタゲノミクスは、原因不明のアウトブレイク、および/または培養不可能(例えば、生存しているが培養不可能な細胞)で増殖が困難な食中毒菌に起因するアウトブレイクの検出に役立てることも可能です。また、例えば、病気を引き起こす同じ食品に2種類の細菌、または1種類の細菌と1種類のウイルスが混在している場合にも役立ちます(Koutsoumanis et al. 2019)。

#### 3. マイクロバイオーム

ビッグデータは、食品の腐敗を減らすために利用することができます。例えば、企業は、生産した食品のマイクロバイオームを調査しカタログ化することに固有の「ビッグデータ」を利用しています。例えば、チーズのバッチがあまりにも早く、あるいは予想外に腐敗した場合、腐ったチーズと腐っていないチーズのマイクロバイオームを比較し、その腐敗が再び発生しないよう試みることができるのです。

#### センサー技術

フードチェーン全体で計器やセンサーなどのビッグデータを適切に収集・活用することで、フードチェーンに関わる誰もが、製品の品質に関する情報にリアルタイムでアクセスできるようになります。これは、意思決定への情報提供、ひいては、例えば、食品の腐敗を減らし、食品回収のスピードを向上させるために、非常に有効です。

さらに、農地における yステリア菌などの食中毒菌の特徴を把握し、これを気象・環境データと組み合わせることで、研究者は農地における yステリア菌の存在を予測できるようになりました(Strawn et al. 2013年、Weller et al. 2016年)。

#### ソーシャルメディア

ビッグデータを活用することで、食中毒の発生を予測したり、その発生を食い止めたりすることができます。多くの研究により、有意差はあるものの、Twitter、Googleの検索スコア、Yelpのデータと食中毒の発生事例との間に相関関係が存在することが示されています。また、人工ニューラルネットワークなどの機械学習手法も有望な結果を示しています(Tao et al. 2021)。この分野の研究が進むにつれて、ソーシャルメディアからのビッグデータを活用することで、公衆衛生を向上させるための教訓や提言を展開し、食中毒の早期警告や 軽減ができるようになります。

#### スマートフォン・携帯端末

ビッグデータは、小売店レベルでも食品の安全性を向上させるために活用することができます。ある大手小売業者は、携帯情報技術、ブルートゥース通信、最新の温度測定装置を使って、ロティサリーチキンを調理するたびに内部温度をチェックし、安全な内部温度を確保することで、鶏肉に関連する食中毒の発生を抑えています。カナダで行われた研究では、スマートフォンを使って、ファーマーズ・マーケットの出店者の食品安全に関する行動を調査しました(Young et al.)また、小売店のストアカードやスワイプによる支払い方法を利用して、消費者にリコールに関する注意喚起を行うことも行われています。

#### III.我々の知識における重要なギャップは何か?

ビッグデータ」革命を最大限に活用するために解決しなければならない重要なギャップや課題 には、以下のようなものがあります。

- 1. データの所有権/プライバシー、相互運用性(特に供給業者、製造業者、小売業者間)、グローバルなアクセス性、収集されるデータの完全性。
- 2. データソース内の関連データを特定し、他のデータソースとリンクさせる。
- 3. 食品サプライチェーンにおけるビッグデータの標準化(例:命名法、報告)の必要性。
- 4. 低中所得国が新しいビッグデータ技術を採用することは非常に困難であることを理解すること。例えば、全ゲノム解析技術はそれ自体では公衆衛生を改善する上でほとんど価値がなく、 既存の監視システムとアウトブレイク対応ネットワークが必要です。
- 5. 効率的なリアルタイムデータ収集、膨大または複雑なデータの迅速かつ有意義な解明、人間の介入を伴わない意思決定の自動化の必要性など、食品安全問題の解決にAI/機械学習を活用する上での課題。
- 6. ゲノム解析手法(WGSパイプラインなど)が標準化されておらず、結果の解釈も標準化されていない。
- 7. メタゲノミクスを日常的な診断や監視に用いる場合、統一された手法の欠如、検出感度の低さ、バイオインフォマティクス・パイプラインの選択などにまつわる問題。

### IV.食糧供給と食品ビジネスへの潜在的な影響は?

食品供給と食品ビジネスに対する潜在的な影響は甚大である。これらには、特に以下のものが含まれる。

- 1. 食材が腐る原因を正確に把握できる。
- 2. 工場環境や生産する食品の微生物叢を調べ、保存性を向上させる。
- 3. 病原体がどのようにして工場に侵入し、どのようにしてある場所から別の場所に移動しているのかを追跡する。
- 4. あなたのお店や施設にある食材/ロットがどこから来たのかを追跡する。
- 5. 原産地、収穫、輸送などに基づく食品・商品に関するリスクの評価が向上する。
- 6. 食中毒に関与しているのが自社製品でないことを確認する。一方、自社製品である場合は、 汚染されたロットを迅速に特定し、その結果生じるリコールの規模や範囲を小さくする。
- 7. 製品の認証
- 8. 食品由来のリコール及び/又はアウトブレイクの早期警報及び緩和のためのソーシャルメディアの活用。

企業が考えるべき課題は、例えばバイオインフォマティクスの分野での主要なスキルギャップや、企業がビッグデータにアクセスする方法などである。さらに、シーケンシングやデータ解釈を提供するラボが、その資格を有しているかどうかも考える必要がある。



### V.企業は何をすべきか/何を考えるべきか?

- 食品企業は、**継続的な改善を推進する上でビッグデータがどのように役立つか、そしてその限界とギャップは何かを認識**する必要があります。ビッグデータの利用は、すぐに、あるいはこの先大きな改善につながるとは限りません。
- ・ 中堅・大企業では、いつ、どこで、ビッグデータの収集、蓄積、分析、可視化が意味を持つか を認識できる人材が必要です。
- 食品企業は、データ分析の結果に基づいて意思決定できるメカニズムを持つべきです。つまり、データをダッシュボードと照合することが、早期警告、事故の根本原因分析、サプライヤーのリスクプロファイリング、製造対応など、企業に付加価値をもたらす必要があるのです。
- 低中所得国の政府や企業は、新たに出現する全てのビッグデータ技術に対応できるよう努力し、主要なスタッフの一部を教育し、あるいは国連機関を通じて利用可能な資金を利用して専門家を雇い、「トレーナー」を育成する必要があります。また、どのようなアプリケーションが低中所得国の文脈で最も有用であるかを理解する必要があります。
- 世界的な、そして機関間のデータ共有の増加により、より相互接続性の高い規制システムが 構築されつつあります。このように、私たちは現在、サプライチェーンを介した病原体の 流れをグローバルに監視するための優れたツールを手に入れ、発生源の特定をこれまで以 上に正確にできるようになっています。
- 重要な問題の1つは、企業がビッグデータが自社の業務に及ぼす戦略的影響を理解し、こう した変化に対応した適切な人材戦略を持っているかということです。

### 参考文献

Billington, C., J. M. Kingsbury and L. Rivas. 2021. Metagenomics approaches for improving food safety. J. Food Protect. In Press. https://doi.org/10.4315/JFP-21-301.

Brown B, Allard M, Bazaco MC, Blankenship J, Minor T. 2021. An economic evaluation of the whole genome sequencing source tracking program in the U.S. PLoS ONE 16(10): e0258262. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0258262.

Brown, E., Dessai, U., McGarry, S., and Gerner-Smidt, P. 2019. The use of whole-genome sequencing for food safety and public health in the United States. Foodborne Pathog. Dis. 16, 441–450. doi: 10.1089/fpd.2019.2662.

Donaghy JA, Danyluk MD, Ross T, Krishna B and Farber J. 2021. Big Data Impacting Dynamic Food Safety Risk Management in the Food Chain. Front. Microbiol. 12:668196. doi: 10.3389/fmicb.2021.668196.

Forbes, J. D., Knox, N. C., Ronholm, J., Pagotto, F., and Reimer, A. 2017. Metagenomics: the next culture-independent game changer. Front. Microbiol. 8:1069. doi: 10.3389/fmicb.2017.01069.

Koutsoumanis, K., Allende, A., Alvarez-Ordonez, A., Bolton, D., Bover-Cid, S., Chemaly, M., et al. 2019. Whole genome sequencing and metagenomics for outbreak investigation, source attribution and risk assessment of food-borne microorganisms. EFSA J. 17:e05898. doi: 10.2903/j. efsa.2019.5898.

Li W, Cui Q, Bai L, Fu P, Han H, Liu J, Guo Y. 2021. Application of Whole-Genome Sequencing in the National Molecular Tracing Network for Foodborne Disease Surveillance in China. Foodborne Pathog. Dis 18:538-546. doi: 10.1089/fpd.2020.2908.



Strawn, L. K., Fortes, E. D., Bihn, E. A., Nightingale, K. K., Gröhn, Y. T., Worbo, R. W., et al. 2013. Landscape and meteorological factors affecting prevalence of three food-borne pathogens in fruit and vegetable farms. Appl. Environ. Microbiol. 79, 588–600. doi: 10.1128/AEM.02491-12

Tao, D, D. Zhang, R Hu, E Rundensteiner and H. Feng. 2021. Crowdsourcing and machine learning approaches for extracting entities indicating potential foodborne outbreaks from social media. Scientific Reports 11:21678. https://doi.org/10.1038/s41598-021-00766-w.

Wagner E, Fagerlund A, Langsrud S, Møretrø T, Jensen MR, Moen B. 2021. Surveillance of Listeria monocytogenes: early detection, population dynamics, and quasimetagenomic sequencing during selective enrichment. Appl. Environ. Microbiol. 87:e01774-21. https://doi.org/10.1128/AEM .01774-21.

Weller, D., S. Shiwakoti, P. Bergholz, Y. Grohn, M. Wiedmann and L. K. Strawn. 2016. Validation of a previously developed geospatial model that predicts the prevalence of Listeria monocytogenes in New York state produce fields. Appl. Environ. Microbiol. 82: 797-807.

Young I, Chung A, McWhirter J, Papadopoulos A: Observational assessment of food safety behaviours at farmers' markets in Ontario, Canada: A cross-sectional study. Food Control 2020, 108:106875.

#### Some additional references

Astilla, J., Darab, R. A., Campbell, M. C., Farber, J. M., Fraser, E. D. G., Sharif, S., et al. 2019. Transparency in food supply chains: a review of enabling technology solutions. Trends Food Sci. Technol. 91, 240–247. doi: 10.1016/j.tifs.2019.07.024.

Bhakta, I., Phadikar, S., and Majumder, K 2019. State-of-the-art technologies in precision agriculture: a systematic review. J. Sci. Food Agric. 99, 4878–4888. doi: 10.1002/jsfa.9693.

Deng X, Cao S, Horn AL. 2021. Emerging applications of machine learning in food safety. Annu Rev Food Sci Technol 12:513-538. doi: 10.1146/annurev-food-071720-024112.

Jin C, Bouzembrak Y, Zhou J, Liang Q, van den Bulk LM, Gavai A, Liu N, van den Heuvel LN, Hoenderdaal W and Marvin HJP. 2020. Big Data in food safety- A review. Cur. Op. in Food Sci. 36:24–32. doi.org/10.1016/j.cofs.2020.11.006.

Kashyap PK, Kumar S, Jaiswal A, Prasad M and Gandomi AH. 2021. Towards Precision Agriculture: loT-Enabled Intelligent Irrigation Systems Using Deep Learning Neural Network. IEEE Sensors Journal, 2:17479-1749. doi: 10.1109/JSEN.2021.3069266.

King, T., Cole, M., Farber, J. M., Eisenbrand, G., Zabaras, D., Fox, E. M., et al. 2017. Food safety for food security: relationship between global megatrends and developments in food safety. Trends Food Sci. Technol. 68, 160–175. doi: 10.1016/j.tifs.2017.08.014.

Kovac, J. 2019. Precision food safety: a paradigm shift in detection and control of foodborne pathogens. mSystems 4, e00164–e00119. doi: 10.1128/ mSystems.00164-19.

Kovac, J., den Bakker, H., Carroll, L. M., and Wiedmann, M. 2017. Precision food safety: a systems approach to food safety facilitated by genomics tools. Trends Anal. Chem. 96, 52–61. doi: 10.1016/j. trac.2017.06.001.

Marvin, H. J. P., Janssen, E. M., Bouzembrak, Y., Hendriksen, P. J. M., and Staats, M. 2017. Big data in food safety: an overview. Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 57, 2286–2295. doi: 10.1080/10408398.2016.1257481



Patelli, N. and M. Mandrioli. 2020. Blockchain technology and traceability in the agrifood industry. J. Food Sci. 85: 3670-3678.

Rejeb, A., Keogh, J.G. & Rejeb, K. Big data in the food supply chain: a literature review. J. of Data, Inf. and Manag. (2022). https://doi.org/10.1007/s42488-021-00064-0.



Sadilek, A., Caty, S., DiPrete, L. et al. Machine-learned epidemiology: real-time detection of foodborne illness at scale. npj Digital Med 1, 36 (2018). https://doi.org/10.1038/s41746-018-0045-1.

Sander, F., Semeijn, J., and Mahr, D. 2018. The acceptance of blockchain technology in meat traceability and transparency. Br. Food J. 120, 2066–2079. doi: 10.1108/BFJ-07-2017-0365.

Shafi, U., Mumtaz, R., García-Nieto, J., Hassan, S. A., Zaidi, S. A. R., and Iqbal, N. 2019. Precision agriculture techniques and practices: from considerations to applications. Sensors 19:3796. doi: 10.3390/s19173796.

Westerlund, M., S. Nene, S. Leminen and M. Rajahonka. 2021. An exploration of blockchain-based traceability in food supply chains: On the benefits of distributed digital records from farm to fork. Technol. Innov. Mgmt. Rev. 11:6-18. <a href="http://doi.org/10.22215/timreview/1446">http://doi.org/10.22215/timreview/1446</a>.

Xu, Y., X. Li, X. Zeng, J. Cao & W. Jiang. 2022. Application of blockchain technology in food safety control: Current trends and future prospects. Critical Revs. in Food Sci. Nutrition, 62:2800-2819. DOI:10.1080/10408398.2020.1858752.



#### 1. 背景

ヒトの病原体を含む微生物は、様々な環境に存在し、適応して生存しており、一次生産から消費者の食卓に至るまでの食物連鎖全体に存在しています。ある環境に存在する微生物群の構成は、その活性とともに、条件によって異なる生態的地位によって変化します。シーケンサー技術や関連するバイオインフォマティクス解析ツールの進歩により、極限環境から食品、ヒトの腸内細菌まで、さまざまな環境におけるマイクロバイオームの組成や役割を理解することに関心が高まっています。

マイクロバイオームの定義についてはかなりの議論があり、このテーマに関する最近のレビューでは、定義が更新されました(Berg et al, 2020)。通常、マイクロバイオータは、定義された環境に存在する生きた微生物の集合体として定義されます(Marchesi and Ravel, 2015)。一方、マイクロバイオームは、宿主と環境の両方がマイクロバイオームの不可欠な生態学的構成要素であるという点で、より複雑です。食品マイクロバイオームの認証、安全性、プロセス管理への応用に焦点を当てた論文では、マイクロバイオームを、あらゆる環境サンプル内に存在する常在微生物の生態的コミュニティと定義しています(Weimar et al, 2016)。Bergらは、マイクロバイオームを「明確な生理・化学的特性を持つ、合理的に定義された生息域を占める特徴的な微生物群」と定義しています。Bergら(2020)が想定するマイクロバイオームは、関与する微生物を指すだけでなく、特定の生態的地位の形成をもたらすその「活動の劇場」も包含します。この「活動の劇場」という言葉には、微生物の構造、代謝物、トランスポゾン、ファージ、ウイルスなどの可動遺伝因子、生息地の環境条件に埋め込まれたDNAの残骸などが含まれます。(Berg et al, 2020)。

この定義は、「誰がいるのか」「何ができるのか」「何をしているのか」といった問いに取り組むという点での複雑さを示している。しかしながら、このような疑問は、食品微生物学、特に食品の品質と安全性を保証する上で極めて重要である。従来の培養に基づく分析は、現在でも病原体検出のためのゴールドスタンダードであるが、時間がかかることや、ある生息環境におけるすべての微生物の培養オプションがないことなどから、その限界はある。ハイスループット・シーケンス(HTS)技術の進歩により、培養に頼らないアプローチで、さまざまな環境や製品におけるマイクロバイオームの構成と機能、さらに最近では、それをどのように操作して活用すればよいかを真に理解する能力が大きく向上しています。

### Ⅱ. 今日、私たちは何を知っているのでしょうか。

HTS技術の進歩により、規制当局は非常に速やかに個々の病原体の全ゲノムシーケンスをアウトブレイク調査に広く取り入れるようになりました。現在利用可能な大量のゲノムは、アウトブレイクの一部として病原体の地理的起源と媒介した食品を特定するために使用できる重要なリソースです。米国のGenomeTrackrのようなデータベースには、現在75万を超える分離株のデータが含まれています。マイクロバイオームの配列決定と解析は、個々の分離株のそれよりも複雑です。Caoら(2017)は、食品関連のマイクロバイオームをより深く理解するためのシーケンス技術の進歩とその潜在的な利用法について概説しています。近年、食品産業や新しいスタートアップ企業が幅広い用途で利用するために、マイクロバイオームベースの研究に注目が集まっています。以下、決して網羅的なリストではありませんが、食品安全に関するマイクロバイオーム解析の潜在的用途の一部を簡単に説明します。

原料のマイクロバイオームをベースラインでモニタリングすることで、原料の品質や安全性の 指標となるような変化を明らかにすることができます。食品のメタゲノム解析の応用例が



Sabaterらによる最近のレビューに含まれています(2021)。鶏肉について最近レビューされたように、多くの多様な要因が生産および小売チェーンを通じて製品のマイクロバイオームに影響を与える可能性があります(Marmionら、2021)。具体的な例を見てみると、米国の研究では、4つの加工現場からの小売用鶏胸肉のマイクロバイオームを調査し、鶏胸肉のマイクロバイオームが経時的に一貫性を示し、個々の加工環境間で異なる特徴を示すことを発見されました。彼らは、包装の種類と加工環境が、抗生物質の使用量と季節性ではなく、マイクロバイオームの組成と多様性に影響を及ぼすことを明らかにしました。最近発表された別の研究では、メタゲノム配列決定法を用いて、2つのサプライヤーから18カ月にわたって収集した鶏肉ミール由来の高タンパク粉末のマイクロバイオームを分析することに焦点を当てています(Beck et al、2021年)。この研究では、食品基質の組成の変化が、製品のマイクロバイオームの観察可能な変化と関連していることが示されました。しかし、このような多くの研究調査の分析から、一般的に培養ベースの方法は、厳密なゲノム検査と比較して、疑わしさのない結果(分離)がはるかに少ないため、病原体検出のための食品マイクロバイオーム研究において、より多くのベンチマークが必要であることが示されています。

建築環境 (BE) には、ウイルス、細菌、真菌、原生動物など多様な微生物群が生息しており、これらが集合的に建築環境のマイクロバイオーム (MoBE) を構成しています。食品加工施設など機能性の異なるBEでは、MoBEはかなり異なっています(Li et al, 2021)。食品加工環境に存在する微生物群は、これらのマイクロバイオーム中の細菌が環境中のさまざまな表面にコロニーを形成し、生産中および/または加工後に微生物が食品に移行する機会を提供するため、食品の品質および安全性に影響を与える可能性があります。食品会社は強固な洗浄・消毒体制を敷いていますが、存在するすべての微生物を除去できるわけではありません。食品製造における環境マイクロバイオームのマッピングにおけるHTSシーケンシングの使用に関する最近のレビューでは、この技術が適用されている幅広い分野を示していますが、現在、日常業務への適用は困難であり、技術的問題がまだ残っていることも指摘しています(De Filippis et al、2021)。

食品ベースの HTS (ハイスループット・シーケンス)研究のほとんどは、食品発酵中の微生物 叢のモニタリングに焦点を合わせています。Kamilariら(2019)は、チーズ生産内のさまざまな 用途でのHTS技術の利用をレビューしました。これらには、チーズマイクロバイオーム構成要素の特定、その多様性、熟成中の微生物の時間的分布、チーズマイクロバイオームの形成と構成に影響を与える要因などが含まれます。著者らは、この技術が製品の原産地呼称保護(PDO)ステータスをサポートし、真正性を実証するために有用であり、食品詐欺防止における追加のツールとして機能する可能性についても概説しています。また、ゴーダチーズのマイクロバイオームに関する最近の研究の主な焦点は食品安全でした。この研究では、食中毒菌の存在が製品のマイクロバイオームに及ぼす影響を調べるために、Uステリア菌に汚染された生乳を使用してチーズを製造しました(Salazar et al、2021年)。

マイクロバイオーム解析は、病原体の検出、環境および工程のモニタリング、製品の品質予測に利用できる可能性があるだけでなく、抗菌剤耐性遺伝子の存在など公衆衛生上重要な他の形質について、食品および加工環境を迅速に評価する機会を提供します。抗菌剤耐性決定因子の伝播において食品製造が果たす役割に注目が集まっていますが、多くの商品、特に非動物由来の食品に関する定量データはまだ不足しています。メタゲノムシーケンスを用いると、耐性遺伝子データベースを利用して、このような決定因子を容易に特定することができます。Liらによる研究(2020)やAlexaらによる研究(2020)など、最近の研究では、製品上または生産環境内に存在する耐性遺伝子を特定する方法論の可能性が実証されています。このような耐性遺伝子の移動性を特定するのと同様に、臨床的な意味合いを決定することは依然として困難です。一般的に使用されているショートリードシーケンス技術は、通常、抗菌剤耐性遺伝子をコードした移動性遺伝要素を考慮するとその有用性はやや限定的になりますが、ロングリード技術の

進歩がこれに対処するのに役立っています。HTS(ハイスループット・シーケンス)は、ヒトや動物の腸内細菌叢に対するマイコトキシンの影響など、食物連鎖における化学物質の安全性の懸念に対しても、理解を深める役割を果たすことができます(Jin et al. 2021)。

# FORUM

### III.私たちの知識における重要なギャップや直面している課題は何か?

- 食品マイクロバイオーム解析は、食の安全という観点も含め、様々な応用が可能である一方、多くの課題があることは広く認識されています。
- ある環境下での微生物群の相互作用は、病原体の生存に影響を及ぼします。その相互作用を理解し、調節する方法を見つけることは、食品の安全性を保証する上で大きな前進となります。実際、将来的には、環境マイクロバイオームのエンジニアリングの進歩により、農業、園芸、水産養殖における化学物質の代替や、環境資源のより持続可能な利用を促すとともに、食品加工を改善する可能性があると想定されています(Berg et al, 2020)。しかし、このような研究はまだ初期段階にあり、実現にはデータベースの改善、方法論の統合、適切な分析ツールが必要です。
- ・ 結果のばらつきは、異なる抽出方法、配列決定プラットフォーム、データベース、バイオインフォマティクスツールの使用によって生じる可能性があります (Yap et al, 2021)。また、サンプル採取に使用したスワブも結果に影響を与える可能性があります (De Filippis et al, 2021)。サンプルに存在する菌種の分類や遺伝子の機能予測をするために使用されるデータベースは、入力情報と同じくらいの質が求められます。より多くのデータが提出されれば、データベースはより正確で有用なものになるでしょう。このようなシナリオでは、調和された方法でデータを共有することの利点はにわかに明らかになります。しかし、食品業界の観点からは、特に機密情報管理との関連で、課題がないわけではありません。それにもかかわらず、食品の安全性やその他の用途のための食品マイクロバイオーム研究の可能性を確実に実現するために、方法論、データ分析パイプライン、データ保存場所の管理の標準化が急務となっています。
- 細胞の生存率の問題は、特に病原体の検出に関しては非常に重要です。多くのマイクロバイオームに基づく研究ではDNAに着目していますが、DNAが存在するからといって、そのDNAに由来する生体の生存が保証されるわけではありません。RNAを使用することで、より近い結果が得られますが、扱いはより困難です。また、DNA抽出とプロピジウムモノアジドのような色素の使用を組み合わせたアプローチも、生存率を高めるために現在研究されています。
- 食品および環境マイクロバイオーム解析を効果的に利用するために、食品産業では拭き取りから解析までのワークフローの各要素に対する標準作業手順書(SOP)が必要です。de Filippisら(2021)が指摘するように、異なる加工環境および食品に対応するために、手順には汎用性が必要です。McHughら(2021)が観察したように、加工環境から十分なDNAを抽出することも課題となるかもしれません。
- 多くのメタゲノム解析ツールの活用とそこからのアウトプットは、依然として複雑なままです。これらのアウトプットを企業の食品安全管理システムに効果的に組み込むには、アウトプットを解釈しやすく定量化できる結果に変換して、迅速な対応をサポートすることが必要です。

# Ⅳ.食糧供給と食品ビジネスへの潜在的な影響は?

食品事業者は、安全な食品を生産し、これを確保するためにあらゆる適切な措置を講じることが求められています。安全な食品の生産は、気候変動、水の確保、生産性向上の必要性、廃棄物やロスを減らし、より循環型のバイオベース経済へ移行する必要性など、複数の社会的課題から影響を受けています。これらの要因はすべて、微生物群に影響を与え、それに応じて病原体の行動にも影響を与えます。マイクロバイオーム解析は、

これらの複雑な相互作用を理解し、それらの変化が不用意に食品の安全性に影響を与えないようにする機会を提供します。

食品製造におけるマイクロバイオーム応用の可能性は、間違いなく広大です。例えば、個々のニーズに合わせたプレバイオティクスやプロバイオティクスを使用することで、食中毒菌による疾病の発生を予防できるかもしれません。一次生産に生物防除剤またはマイクロバイオームを戦略的に組み込むことで、食品生産チェーンのより早い段階で病原体を標的にできるかもしれません。このような応用に対する規制の状況は複雑で国によって異なるため、商業化には困難が伴いますが、それでも大きな関心が持たれています。メタゲノム解析のアプローチを用いて食品の安全性と品質を確保するための環境および成分モニタリングの利点は明らかであり、今後数年間で食品安全管理システムにさらに組み込まれるようになることは間違いありません。HTS(ハイスループット・シーケンス)の利用拡大による経済的利益は、すでにいくつかのケースで明らかになっています。例えば、GenomeTrackr の純益は年間数億ドルに相当すると推定され、ここには配列決定される病原体に関連する疾病の数の減少も含まれます。今後、メタゲノム解析のアプローチにも同様のことが起こるのは間違いないでしょう。

### V.ビジネスは何をすべきなのか?

マイクロバイオーム解析が企業内の食品安全目的のために有益であるためには、我慢強くサンプリング計画を実施し、そこでベンチマーク用のベースラインを構築するために十分なサンプリングを行う必要があります。メタゲノムシーケンスの解析は複雑で、適切な専門知識と、非常に大きなデータセットを解析・保存する能力が必要です。食品安全管理システムの中で食品マイクロバイオーム解析の応用が目的に適うようにするためには、適切なチーム、インフラ及び予算が必要です。

### 参考文献

Alexa Oniciuc, E. A., C. J. Walsh, L. M. Coughlan, A. Awad, C. A. Simon, L. Ruiz, F. Crispie, P. D. Cotter, and A. Alvarez-Ordóñez. 2020. Dairy Products and Dairy-Processing Environments as a Reservoir of Antibiotic Resistance and Quorum-Quenching Determinants as Revealed through Functional Metagenomics. mSystems 5.

Beck, K. L., N. Haiminen, D. Chambliss, S. Edlund, M. Kunitomi, B. C. Huang, N. Kong, B. Ganesan,

R. Baker, P. Markwell, B. Kawas, M. Davis, R. J. Prill, H. Krishnareddy, E. Seabolt, C. H. Marlowe, S. Pierre, A. Quintanar, L. Parida, G. Dubois, J. Kaufman, and B. C. Weimer. 2021. Monitoring the microbiome for food safety and quality using deep shotgun sequencing. NPJ Sci Food 5:3.

Berg, G., D. Rybakova, D. Fischer, T. Cernava, M. C. Vergès, T. Charles, X. Chen, L. Cocolin, K. Eversole, G. H. Corral, M. Kazou, L. Kinkel, L. Lange, N. Lima, A. Loy, J. A. Macklin, E. Maguin, T. Mauchline, R. McClure, B. Mitter, M. Ryan, I. Sarand, H. Smidt, B. Schelkle, H. Roume, G. S. Kiran.

J. Selvin, R. S. C. Souza, L. van Overbeek, B. K. Singh, M. Wagner, A. Walsh, A. Sessitsch, and M. Schloter. 2020. Microbiome definition re-visited: old concepts and new challenges. Microbiome 8:103.

Cao Y, Fanning S, Proos S, Jordan K, Srikumar S. 2017. A Review on the Applications of Next Generation Sequencing Technologies as Applied to Food-Related Microbiome Studies. Front Microbiol.;8:1829.

De Filippis, F., V. Valentino, A. Alvarez-Ordóñez, P. D. Cotter, and D. Ercolini. 2021. Environmental microbiome mapping as a strategy to improve quality and safety in the food industry. Current

Opinion in Food Science 38:168-176.

Jin J., Beekmann, K., Ringø, E., Rietjens, I. M.C.M. and F; Xing. 2021. Interaction between foodborne mycotoxins and gut microbiota: A review. Food Control, 126:107998.

FORUM

- Kamilari, E., M. Tomazou, A. Antoniades, and D. Tsaltas. 2019. High Throughput Sequencing Technologies as a New Toolbox for Deep Analysis, Characterization and Potentially Authentication of Protection Designation of Origin Cheeses? Int J Food Sci 2019:5837301.
- Li, S., D. A. Mann, S. Zhang, Y. Qi, R. J. Meinersmann, and X. Deng. 2020. Microbiome-Informed Food Safety and Quality: Longitudinal Consistency and Cross-Sectional Distinctiveness of Retail Chicken Breast Microbiomes. mSystems 5.
- Li, S., Z. Yang, D. Hu, L. Cao, and Q. He. 2021. Understanding building-occupant-microbiome interactions toward healthy built environments: A review. Front Environ Sci Eng 15:65.

Marchesi, J. R. and J. Ravel. 2015. The vocabulary of microbiome research: a proposal. Microbiome 3:31.

Marmion M, Ferone MT, Whyte P, Scannell AGM. 2021. The changing microbiome of poultry meat; from farm to fridge. Food Microbiol.;99:103823.

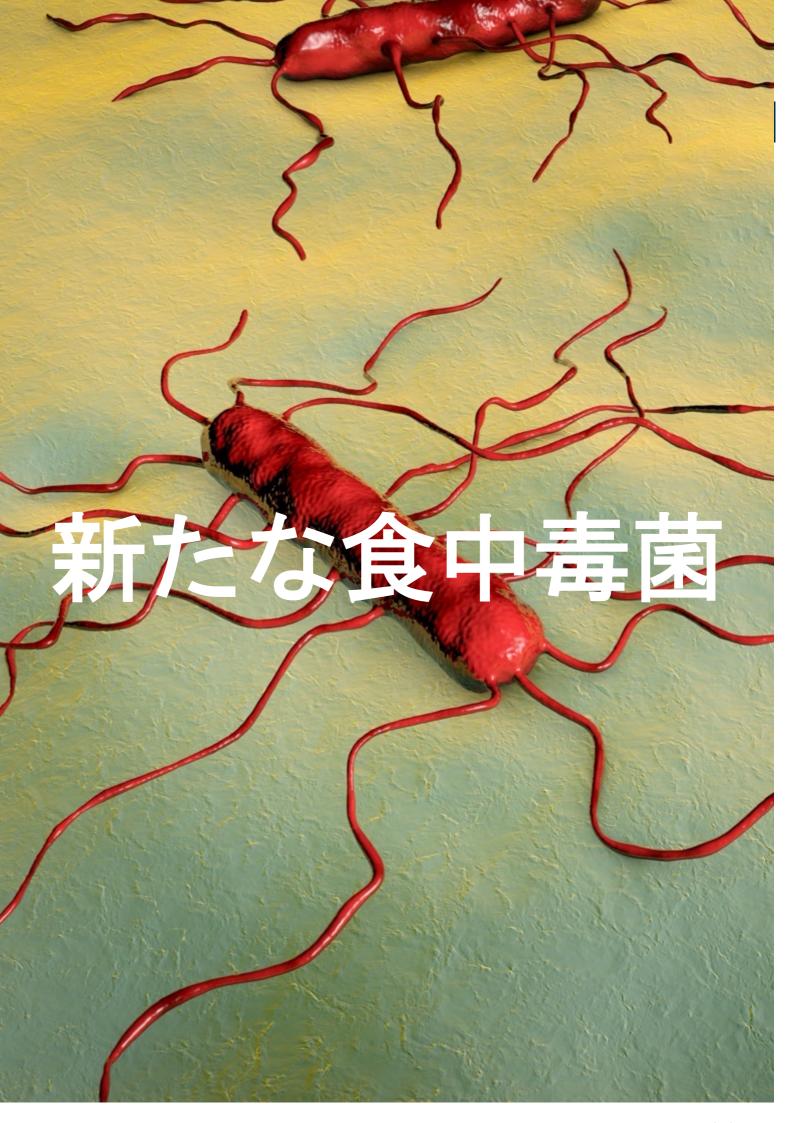
McHugh, A. J., M. Yap, F. Crispie, C. Feehily, C. Hill, and P. D. Cotter. 2021. Microbiome-based environmental monitoring of a dairy processing facility highlights the challenges associated with low microbial-load samples. NPJ Sci Food 5:4.

Sabater, C., J. F. Cobo-Díaz, A. Álvarez-Ordóñez, P. Ruas-Madiedo, L. Ruiz, and A. Margolles. 2021. Novel methods of microbiome analysis in the food industry. Int Microbiol 24:593-605.

Salazar JK, Gonsalves LJ, Fay M, Ramachandran P, Schill KM, Tortorello ML. 2021. Metataxonomic Profiling of Native and Starter Microbiota During Ripening of Gouda Cheese Made With Listeria monocytogenes-Contaminated Unpasteurized Milk. Front Microbiol.; 12:642789.

Weimer, B. C., D. B. Storey, C. A. Elkins, R. C. Baker, P. Markwell, D. D. Chambliss, S. B. Edlund, and J. H. Kaufman. 2016. Defining the food microbiome for authentication, safety, and process management. IBM Journal of Research and Development 60:1:1-1:13.

Yap, M., D. Ercolini, A. Álvarez-Ordóñez, P. W. O'Toole, O. O'Sullivan, and P. D. Cotter. 2021. Next-Generation Food Research: Use of Meta-Omic Approaches for Characterizing Microbial Communities Along the Food Chain. Annu Rev Food Sci Technol. 10.1146/annurev-food-052720-010751.



Merriam-Webster辞書によると、「emerging」という形容詞は、「新しく形成された」または「目立つようになった」ものに適用されます。<sup>1</sup> 米国科学アカデミー医学研究所は、新興感染症の最初の定義の1つを次のように定めました。「過去20年以内にヒトでの発生率が増加した、あるいは近い将来に増加する恐れのある感染症」です。<sup>2</sup> 1996年には、Morseが新興感染症という言葉を「ある集団に新たに出現した感染症、または存在していたが、発生率や地理的範囲が急速に増加している感染症」と定義しました。<sup>3</sup> これらの定義によれば、罹患率や死亡率の発生率の増加傾向は、すべて新興感染症の定義に当てはまります。

食中毒に適用される'emerging'という言葉には、次のような意味があります。1) まったく新しい病因物質、2) 既知の病原体の食品感染能力が向上したもの、3) 検出方法がないために知られていなかった感染性病原体、4) 食品媒介感染とは無関係だった既知の病原体、5) その疾患の原因となる病原体に住民がこれまでさらされていなかった新しい地域で発生した疾患、および 6) 定期的に発生して大流行を引き起こす新しいクラスタまたは菌株。 $^{4,5}$  これらの食品由来病原体の各カテゴリーの例としては、それぞれ大腸菌O104:H4、サルモネラ・エンテリカ・セロバール・インファンティス、カンピロバクター・ジェジュニ、クロノバクター、サイクロスポラ、ノロウイルスが挙げられます。

ヒトの感染症の発生と蔓延は、複数の生物学的、人的、環境的要因によって常に影響を受けています。Smith と Fratamico による最近のレビューでは、食品由来の病原体の出現に影響を及ぼす数多くの要因がまとめられています。4 この研究では、19もの可能性のある要因が特定され、それらは以下の8つのカテゴリーに分類されました。

1) 人口統計、2) 消費者、3) 食品の種類、4) 特定の病原体、5) 農業と環境、6) 教育、7) 公衆衛生、そして8) 社会的側面。新興感染症に関する他のレビューでは、フードサプライチェーンに影響を与える最も重要な要因の1つはグローバル化であり、これは人口統計のカテゴリーで考えられています。6 特定の国や地域に影響を与える要因の種類は、その国の社会政治的、経済的状況に大きく影響されます。例えば、多くの国では公衆衛生のインフラが整っていないため、新たに発生した問題を認識する能力が著しく低下しています。家畜に関連する食中毒菌の出現には、しばしば動物性貯蔵庫が非常に重要な要因になります。また、抗生物質の使用など、食品製造の慣行も病原体の出現に影響を及ぼしています。

### Ⅱ.新規の病原体に関する知見のまとめ

#### 薬剤耐性(AMR)

国連の世界保健機関は、薬剤耐性(AMR)を世界の全人類を脅かす公衆衛生問題のトップ10のひとつと宣言しています。<sup>7</sup> AMRの中でも、細菌性病原体における抗生物質耐性は、最も懸念される問題です。米国疾病管理予防センターは、米国では毎年280万人以上の抗生物質耐性感染症と3万5千人の死亡が発生していると推定しています。<sup>8</sup> AMRの発生は自然のプロセスであり、微生物が大量かつ頻繁に抗生物質にさらされることで顕著に促進される可能性があります。細菌群におけるAMRの出現は非常に複雑な現象であり、多くの場合、移動性要素を介した常在菌から病原性細菌へのAMR遺伝子の移動が関与しています。食品生産においては、家畜の成長促進のための抗生物質の使用がこの健康問題の最も重要な要因の一つと特定されており、多剤耐性(MDR)を持つ動物由来病原体の出現との関連は大きな懸念事項です。

AMRヒト感染の大部分は、ナイセリア淋菌、メチシリン耐性黄色ブドウ球菌 (MRSA)、

バンコマイシン耐性*陽球菌*、クロストリジウム-ディフィシル*などの*感染性細菌によるものですが、近年、MDR食中毒菌の数と頻度が増加しています。9 サルモネラ・チフス菌ファージ型DT104は、1990年代に出現した最初のMDR病原体の1つで、牛や食品への感染に関連し、世界的に広がりました。10 キノロン耐性カンピロバクター・ジェジュニ感染症も鶏肉摂取に関連して1990年代に出現し、家畜への抗生物質使用と関連したAMR菌の最初の例の一つとなりました。11 近年、多くの国でMDR株の種類や分離頻度が増加し続けています。

#### MDR REP病原体

CDC(米国疾病予防管理センター)や他の規制機関による全ゲノム配列解析の普及の結果、特定の商品に関連するMDR近縁株の出現が、2019年、CDC職員によって過去の年に収集された分離株から初めて確認されました。  $^{12}$  これらのユニークな株群は、「Re-occurring, Emerging and Persisting」またはREP株と名付けられ、それらはすべて複数の抗生物質に対する耐性を示しています。系統学的には、REP株群は同一株とは見なされませんが、ゲノムの違いは比較的少なく、一見無関係に見える事象から分離された臨床株や環境株も含まれています。現在、少なくとも6つのREP株クラスターが特定されています。それらは、ロメインレタスの MDR 大腸菌の157:H7、鶏肉の MDR サルモネラ血清型Infantis、七面鳥製品の MDR サルモネラ 血清型Reading、豚関連の MDR サルモネラ 4,5,12:i:- 、ペットショップの子犬の MDR カンピロバクタージェジュニ、ホームレスの集団の MDR Shigella などです。これらの新しいREPクラスターが公衆衛生や規制当局に与える影響については、まだ十分に解明されていません。

#### 強毒性ハイブリッド株

複数の新しい病原体の中で、大腸菌血清型O104:H4ほど、強毒性微生物の自然発生の可能性の大きさを見事に示している細菌は他にないでしょう。<sup>13</sup> 2011年以前、*大腸菌*O104:H4は、世界でもごく少数の胃腸感染症の原因となるまれな腸管凝集性*大腸菌*(EAEC)血清型として知られていました。<sup>14</sup> 2011年には、腸管出血性大腸炎の最大規模の集団発生が発生し、EUの複数の国で約4,000人が罹患しましたが、それは汚染されたフェヌグリークスプラウトの摂取に関連していました。驚いたことに、症例の22%が溶血性尿毒症症候群を発症したこの集団発生の原因は、志賀毒素を産生できる全く新しいMDR O104:H4株でした。<sup>15</sup>このEAEC血清型のゲノム解析により、志賀毒素2遺伝子と従来から他の腸管出血性大腸菌で知られていた追加遺伝子の自然形質転換によって病原性が増強されていることが明らかになりました。 また、この集団発生は、フェヌグリークの種子がエジプトから輸入されていたことから、病原体の国際的な移動の例でもありました。 興味深いことに、2011年以降、このユニークな血清型による感染例は記録がありません。

#### 寄生虫

多くの消化管内寄生原虫がヒトに感染することが知られていますが、クリプトスポリジウムとサイクロスポラはそれぞれ1970年代と1990年代に初めてヒトの病原体として認識されました。

16,17 近年では、世界各地、特に低・中所得国での風土病であることが広く確立されつつあります。
18,19 原虫は複雑なライフサイクルを持ち、ほとんどの場合、オーシスト(嚢胞体)期がヒトへの唯一の感染ステージとなります。クリプトスポリジウムは複数の動物種に感染可能ですが、サイクロスポラ・カエタネンシスはヒトを唯一の宿主とすることが知られています。

世界におけるクリプトスポリジウムの常在菌感染率は、先進国で4.3%、途上国で10.4%と推定されています<sup>20</sup> が、気候変動によりこの数値が上昇している可能性が懸念されています。この5年間に、世界各地で、強毒性で感染力の強いクリプトスポリジウム・パルバムと

クリプトスポリジウム・ホミニスの亜型(それぞれIIA15G2R1、IbA10G2)が出現しています。このうち、C. hominisは、中低所得国において大きな問題となっています。 $^{20}$ 

サイクロスポラの流行国での有病率は、0.2%から24%と非常に幅が広いことが報告されています。<sup>19</sup> ほとんどの健康な成人は、これらの寄生虫へに感染しても自然に治癒しますが、免疫不全の人は重篤な慢性合併症を発症する可能性があります。サイクロスポラは先進国では流行していないと考えられていますが、過去20年間、海外旅行や輸入製品がカナダや米国での集団発生を引き起こしています。これらの国で最近発生した集団感染は、この寄生虫がサプライチェーンにも定着していることを示しているようです。

#### 次の新しい病原体を予測する

人類の歴史は、感染症の発生がほぼ避けられないことを教えてくれています。今回のCOVID-19のパンデミックは、まさにこの確らしさを思い知らされます。数十年前から、疫学者やウイルス学者が公衆衛生当局に人獣共通感染症の呼吸器ウイルスによるパンデミックの危険性を警告していましたが、2019年までに十分な予防措置が展開されることはありませんでした。同様に科学者たちは、近い将来、新しい食中毒菌が出現し続けると考えています。腸管出血性大腸菌(EHEC)の出現は、過去の出来事から学んだ教訓を、新しい病原体を予測する取り組みに応用していることを物語っています。1982年以前には、大腸菌O157:H7による腸管出血性大腸炎は記録されていませんでしたが、2000年代には、汚染された食品の摂取により、複数の国で数千人がこの細菌に定期的に感染するようになりました。21 このユニークな血清群の特徴を徹底的に解明した結果、規制管理(ゼロ・トレランス・ポリシー、検査など)は、最近知られた他のEHEC血清群の出現も想定して拡大されました。しかし、大腸菌O104:H4の急激な増加は、複数の自然および人為的要因が重なった場合、次の新しい病原体を予測することが困難な作業であることを示しました。

### III.これらの問題に対する知識のギャップ

#### a.薬剤耐性

効果的な制御戦略を開発できるようにするために、薬剤耐性の複数の側面に関して不足している知識に対応するために、複数の国や複数の機関による分析が行われています。2018年、米国CDC、英国科学イノベーションネットワーク、ウェルカムトラストが主催する国際環境薬剤耐性フォーラムの白書では、薬剤耐性に関する知識創出が大きな利益をもたらす5つの主要分野、1)病院の廃棄物管理、2)良い衛生習慣、3)畜産・水産業の役割、4)抗生物質製造廃棄物の管理、5)抗生物質の作物への使用における透明性、が挙げられています。22 同年、27カ国(主にEU)が参加する「薬剤耐性に関する共同プログラミングイニシアチブ」が主催したワークショップでは、薬剤耐性をよりよく理解し制御するために、環境に関連する複数の研究ニーズが明らかにされました。23 これらの研究ニーズは、1)抗生物質と薬剤耐性菌の様々な供給源が環境に与える相対的影響、2)薬剤耐性の進化における、人為的な影響を受ける環境の役割、3)異なる環境経路でヒトが薬剤耐性菌に曝露する程度とヒトの健康への影響、4)環境を介した薬剤耐性の出現と拡大を抑える効果的な技術、社会、経済、行動介入、の主に4グループに分類されました。

#### b. 多剤耐性(MDR) REP病原体

REPの疫学的クラスターが認識されたのはごく最近のことですが、その結果、これらの病原体群をよりよく理解し、制御するために取り組むべき多くの疑問が生じました。現在までのところ、これらの菌株について得られる情報は、そのゲノムの特徴や特定の商品と関連するメタデータに限られています。最も早急に必要な研究の一つは、感染に関与する株をこれらのREPクラスターと判断するための標準的な分類基準を開発することです。菌株の由来は調査の重要な部分です。S. Infantis/こついてはペルーが起源である可能性を示す証拠がいくつかありますが、他のほとんどのREPグループについては起源が不明です。また、これらのREPクラスターの商品特異性も解明する必要があります。これらの緊急の必要性に加え、MDRプロファイルの分子進化についての知識不足も問題です。影響の程度を評価するために、コストだけでなく公衆衛生上の負荷を推定することができます。また、将来的な再発生の可能性を評価するためのモデルも開発することができます。

#### c. 強毒性ハイブリッド株

大陽菌O104:H4のような、公衆衛生における全く新しい微生物の突然の出現は、全ゲノム配列 (WSG) の威力を示すまたとない機会となりました。この集団発生は、最初の分離株が得られてからわずか数日後に、ほぼ完全な株の特性判定を可能にした最初のWGS応用例の1つです。 WGSのおかげで、病原因子、起源、AMR遺伝子のユニークな組み合わせがすぐに解明されました。トレーサビリティ調査により、食品媒体 (新芽) と種子を感染源として特定することができましたが、フェヌグリークの種子がどのように汚染されたのか、この菌株の特定の保存場所についてはまだ多くの疑問が残されています。24 この菌株は、種子や、種子が栽培されたエジプトの農場から分離されなかったため、ポストハーベスト中に汚染が起こった可能性があると考えられています。腸管凝集性大腸菌 (EAEC) 株が家畜から検出されることはほとんどないため、この菌株の自然界での生態的地位については、牛が自然宿主ではない可能性があります。 Ecoli O104:H4の出現で最も興味深いことの1つは、10年以上経過しても、世界中でこれ以上の症例報告や分離がないことです。この突然の消滅と非常にユニークなハイブリッド遺伝子型から、食品供給への意図的な持ち込みの可能性さえ推測されています。25 まとめると、このような新種の病原体に対する予防策を開発するには、知識面での大きなギャップがあることは明らかですが、それでも出現の要因を理解しようとすることは重要です。

#### d. 寄生虫

米国でサイクロスポラ感染症が繰り返し発生していることから、FDAと民間企業がいくつかの取り組みを始めています。FDAは、緊急の対策に取り組むと同時に、知識の向上のための最も緊急なニーズの概要を示すことを目的とした行動計画を発表しました。 $^{26}$  このアクションプランによる知識のギャップを埋めることを意図した提言には、以下のものがあります。 $^{1}$  迅速で効果的な検査キットの開発、 $^{2}$  サーベイランスサンプリングの実施、 $^{3}$  遺伝子型判定法の開発、 $^{4}$  農業用水での流行の評価、 $^{5}$  排水の役割の調査、 $^{6}$  生産者、政府、科学者間でのデータ共有の奨励。このFDAの行動計画に加えて、 $^{1}$  サイクロスポラの制御は、体外細胞培養と動物モデルの開発の進歩から大きな恩恵を受けるでしょう。 $^{19}$ 

サイクロスポラとクリプトスポリジウムは、流行地では主に生鮮食品に加えて汚染された水を介して感染する原虫であるため、水との相互作用についてより深く理解することが重要です。最近の研究では、地下水中のクリプトスポリジウムについて、1)世界の水源における流行、2)地下水への移動・侵入のメカニズム、3)胞嚢体の感染力の評価、4)用量反応の決定、5)全体としてこの病原体に関する研究数は限られている、といったいくつかの重要な知識不足が指摘されています。<sup>27</sup>

水系・食系の寄生虫に関する情報が少ないという一般的な懸念に加え、最近、C. parvumとC. hominisの超伝達性亜型の出現により、その起源と独特の遺伝子型についてより詳しく調査し、より広範囲な世界的拡散を予測することが求められています。

#### e.次に出現する病原体を予測する

前節で述べたように、いくつかの新しい病原体の発見は、多くが高処理能力のシーケンシング技術の開発と、疫学調査に使われて強化されたバイオインフォマティクス機能との組み合わせによるものです。現在、機械学習や予測モデリングなどの高度な計算技術を用いたゲノム情報の解析は、今後発生する可能性のある問題を特定する上で非常に有望であると思われます。これらのアプローチの一例として、ランダムフォレスト回帰と機械学習を用いた全ゲノム配列データの解析が挙げられます。米国のInteragency Food Safety Analytics Collaboration(IFSAC)の研究者は、動物の分離株の大規模なコレクションを使用して、サルモネラ症の散発的なケースの出所帰属を予測するランダムフォレストに基づくアプローチを他に先駆けて開発しています。 $^{28}$  過去および現在の散発的症例の分析は、疫学の基本データに隠れている新たな傾向を明らかにする大きな機会を提供します。

サーベイランスのための人工知能アプローチは、メタゲノム技術と組み合わせることも可能です。現在、培養非依存性診断技術(CIDT)を用いることで単一菌株の培養が段階的に廃止され、それに代わる検出方法を見つけることが求められていますが、新しい病原体の検出・同定の可能性は非常に高くなると思われます。これらの技術に加え、さらに強化されたサーベイランス技術の開発は、疾病動向の出現を予測することに貢献することができます。

### IV.食糧供給と食品事業への実際の影響と潜在的影響

複数の商品と食品ビジネスのサプライチェーンが、これらの新しい病原体によって混乱に陥っています。2つの主要なREP EHEC株(REPEXHO1、REPEXHO2)による葉物野菜の汚染は、過去5年間、米国で少なくとも毎年複数州にわたる大規模なアウトブレイクを引き起こしています。29 このように繰り返し発生するアウトブレイクは、直接関係する生産者や企業に大きな経済的・市場的損失をもたらしますが、消費者の信頼も損なわれています。生鮮食品業界も、2014年以降、コリアンダー、葉物グリーンサラダ、ベリー類などさまざまな製品を巻き込んだサイクロスポラのアウトブレイクにより、深刻な影響を受けています。29

EHEC REP株によるアウトブレイクの調査では、灌漑用水が汚染の媒体となる可能性が示唆されていますが、最終的な原因を決定的に特定するためには、より広範な根本原因の分析が必要です。一方、葉物野菜産業は今後も EHEC による汚染で混乱し続ける可能性があります。 サイクロスポラは、EHECよりもはるかに複雑で理解しにくいようです。 その結果、サイクロスポラ症の発生を防止するための介入策の開発には、より長い時間がかかる可能性があります。

すべての薬剤耐性の世界的な負担は、資本の損失として300ドルから1兆ドルに及ぶと推定されています。<sup>30</sup> 2014年に英国政府とウェルカムトラストが支援したレビューでは、2014年から2050年の間に薬剤耐性が世界の累積GDPに与える影響は100兆ドルに達すると予測されました。<sup>31</sup> こうした世界経済への影響のうち、食品由来の薬剤耐性菌感染症が占める割合はまだ具体的に算出されていませんが、現在の多剤耐性の増加傾向を考えると、現在、数百万人を苦しめ、食品業界に莫大な損失をもたらす世界的に大きな負担になっています。



#### V.食品事業者の対応と予防措置

新たな問題や食中毒菌の多様性を考慮し、食品業界や政府機関からはさまざまな対応がなされています。例えば、抗菌剤の使用に対する監督強化や家畜への抗菌剤の使用禁止、監視、検出、生態、制御に関するソリューションを提供するための研究への投資、民間および公的監視システムの開発・強化などが挙げられます。全ゲノム配列の応用は、食品由来のアウトブレイクの規模を縮小し、サーベイランスの感度を基準を下回る症例を検出できるまでに向上させる最も有効な手段の1つであり続けています。

牛肉のEHEC O157:H7、RTE加工肉のリステリア *菌*、そして最近では米国でのサルモネラ・チフス菌全体の減少など、比較的成功したケーススタディは、可能な介入策についていくつかの洞察を与えてくれるでしょう。従来のアプローチと人工知能、機械学習、予測微生物学などの新技術を組み合わせて適用することで、おそらくより効果的な対策につながるでしょう。このような新たな病原体の問題に取り組むには、体系的かつ総合的なOne Healthのアプローチが不可欠であると思われる。32

### 参考文献

- 1. 2021. Emerging definition. Merriam-Webster Dict.
- 2. Committee on Emerging Microbial Threats to Health I of M. 1992. Emerging Infections: Microbial Threats to Health in the United States1st editio. National Academy Press, Washington, DC.
- 3. Morse SS. 1995. Factors in the emergence of infectious diseases. Emerg Infect Dis 1:7–15.
- 4. Smith JL, Fratamico PM. 2018. Emerging and Re-Emerging Foodborne Pathogens. Foodborne Pathog Dis 15:737–757.
- 5. Pew Charitable Trusts. 2016. Emerging Foodborne Risks, How and why pathogens emerge.
- 6. Zhu Y, Gillings M, Simonet P, Stekel D, Banwart S, Penuelas J. 2017. Microbial mass movements. Science (80- ) 357:1099–1100.
- 7. WHO. 2021. Antimicrobial Resistance Key Facts. Antimicrob Resist.
- 8. CDC. 2019. Biggest Threats and Data. Antibiot / Antimicrob Resist (AR / AMR).
- 9. CDC. 2019. Antibiotic Resistance Threats in the United States. Atlanta, GA.
- 10. Lynn MKAG, Opp CHB, Ewitt WD, Abney PD, Mokhtar M, J. F. 1998. Typhimurium Dt104 Infections in the United States. N Engl J Med 338:1333–1338.
- Smith K, Besser J, Hedberg C, Leano F, Bender J, Wicklund J, Johnson B, Moore K, Osterholm M. 1999. Quinolone-resistant Campylobacter jejuni infections in Minnesota, 1992-1998. Investigation Team. N Engl J Med 340:1525–1532.
- 12. Tauxe R V. 2019. From Outbreak Catastrophes to Clades of Concern, How Whole Genome Sequenciing Can Change the Food Safety LandscapelAFP Annual Meeting. Louisville, KY.
- 13. Frank C, Werber D, Cramer JP, Askar M, Faber M, an der Heiden M, Bernard H FA, Prager R, Spode A, Wadl M, Zoufaly A, Jordan S, Kemper MJ, Follin P, Müller L, King LA, Rosner B, Buchholz U, Stark K KGHIT. 2011. Epidemic profile of Shiga-toxin—producing Escherichia coli O104:H4 outbreak in Germany Preliminary report. N Engl J Med 365:1771–1780.
- 14. David A. Rasko, Dale R. Webster, Jason W. Sahl, Ali Bashir, Nadia Boisen, Flemming Scheutz, Ellen E. Paxinos, Robert Sebra, Chen-Shan Chin, Dimitris Iliopoulos, Aaron Klammer, Paul Peluso, Lawrence Lee, Andrey O. Kislyuk, James Bullard, Andrew Kasarskis SW, Jakob Frimodt-Møller, Carsten Struve, Andreas M. Petersen, Karen A. Krogfelt, James P. Nataro, Eric E. Schadt and MKW. 2011. Origins of the E. coli strain causing an outbreak of hemolytic-uremic syndrome in Germany. N Engl J Med 365:709-717.
- 15. Bielaszewska M, Mellmann A, Zhang W, Köck R, Fruth A, Bauwens A, Peters G, Karch H. 2011. Characterisation of the Escherichia coli strain associated with an outbreak of haemolytic uraemic syndrome in Germany, 2011: A microbiological study. Lancet Infect Dis 11:671–676.



- 16. Nime FA, Burek JD, Page DL, Holscher MA, Yardley JH. 1976. Acute enterocolitis in a human being infected with the protozoan Cryptosporidium. Gastroenterology 70:592–598.
- 17. Ortega Y, Sterling C, Gilman R, Cama V, Díaz F. 1993. Cyclospora species--a new protozoan pathogen of humans. N Engl J Med 328:1308–1312.
- 18. Ryan UM, Feng Y, Fayer R, Xiao L. 2021. Taxonomy and molecular epidemiology of Cryptosporidium and Giardia a 50 year perspective (1971–2021). Int J Parasitol 51:1099–1119.
- 19. Almeria S, Cinar HN, Dubey JP. 2019. Cyclospora cayetanensis and cyclosporiasis: An update. Microorganisms 7:1–34.
- 20. Dong S, Yang Y, Wang Y, Yang D, Yang Y, Shi Y, Li C, Li L, Chen Y, Jiang Q, Zhou Y. 2020. Prevalence of Cryptosporidium infection in the global population: A systematic review and meta-analysis. Acta Parasitol 65:882–889.
- 21. Viazis S, Diez-Gonzalez F. 2011. Enterohemorrhagic Escherichia coli. The Twentieth Century's Emerging Foodborne Pathogen: A ReviewAdvances in Agronomy.
- 22. CDC, UKSIN, Wellcome. 2018. Initiatives for addressing antimicrobial resistance in the environment: current situation and challenges.
- 23. Larsson DGJ, Andremont A, Bengtsson-Palme J, Brandt KK, de Roda Husman AM, Fagerstedt P, Fick J, Flach CF, Gaze WH, Kuroda M, Kvint K, Laxminarayan R, Manaia CM, Nielsen KM, Plant L, Ploy MC, Segovia C, Simonet P, Smalla K, Snape J, Topp E, van Hengel AJ, Verner-Jeffreys DW, Virta MPJ, Wellington EM, Wernersson AS. 2018. Critical knowledge gaps and research needs related to the environmental dimensions of antibiotic resistance. Environ Int 117:132–138.
- 24. Kampmeier S, Berger M, Mellmann A, Karch H, Berger P. 2018. The 2011 German enterohemorrhagic Escherichia coli O104:H4 outbreak—The danger is still out there, p. . In Frankel, G, Ron, E (eds.), Escherichia coli, a Versatile Pathogen. Current Topics in Microbiology and Immunology, vol 416. Springer Cham.
- 25. Radosavljevic V, Finke EJ, Belojevic G. 2015. Escherichia coli O104:H4 outbreak in Germany Clarification of the origin of the epidemic. Eur J Public Health 25:125–129.
- 26. FDA. 2021. Cyclospora Prevention, Response, and Research Action Plan. Fooodborne Pathog.
- 27. Chique C, Hynds PD, Andrade L, Burke L, Morris D, Ryan MP, O'Dwyer J. 2020. Cryptosporidium spp. in groundwater supplies intended for human consumption A descriptive review of global prevalence, risk factors and knowledge gaps. Water Res 176:115726.
- 28. Zhang S, Li S, Gu W, Den Bakker H, Boxrud D, Taylor A, Roe C, Driebe E, Engelthaler DM, Allard M, Brown E, McDermott P, Zhao S, Bruce BB, Trees E, Fields Pl, Deng X. 2019. Zoonotic source attribution of Salmonella enterica serotype typhimurium using genomic surveillance data, United States. Emerg Infect Dis 25:82–91.
- 29.CDC. 2021. List of Selected Multistate Foodborne Outbreak Investigations. Foodborne Outbreaks.
- 30. Burki TK. 2018. Superbugs: An Arms Race Against Bacteria. Lancet Respir Med 6:668.
- 31. O'Neill J. 2014. Antimicrobial resistance: tackling a crisis for the health and wealth of nations. Rev Antimicrob Resist.
- 32. Jani K, Srivastava V, Sharma P, Vir A, Sharma A. 2021. Easy Access to Antibiotics; Spread of Antimicrobial Resistance and Implementation of One Health Approach in India. J Epidemiol Glob Health 11:444–452.





### 1. 背景

COVID-19 の大流行とそれに伴うサプライチェーンの混乱を受けて、グローバルなインフラの不可欠な部分である食品システムとそのレジリエンスに注目が集まっています。15 しかし、食品システムのレジリエンスという概念は、さまざまな種類の危機を幅広くカバーしており、一般に理解されている以上に、ビジネスと消費者に潜在的な影響を及ぼしています。これには、食品の安全性への影響も含まれ、現在と将来の危機を乗り越えてブランド価値を維持したいと願う政策立案者とビジネスリーダーの両方にとって真の関心事であるはずです。5-7

国連食糧農業機関(FAO)は、レジリエンスを次のように定義しています。

「災害や危機を予防する能力、また、災害や危機を予期し、受け止めて、対応する、あるいはタイミング良く、効率的かつ持続可能な方法で回復する能力をいう。これには、農業、栄養、食料安全保障、食品安全に影響を与える脅威に直面した際の生活システムの保護、回復、改善も含まれる。」<sup>8</sup>

レジリエンスという概念の中心は、市場における安全で栄養価の高い食品の入手を脅かす可能性のあるシステムに対するショックから回復する、あるいは被害を回避するという考えです。 食糧システムの場合、企業、家庭、政府機関、非政府組織(NGO)のすべてがシステムのレジリエンスに影響を及ぼします。

#### Ⅱ. なぜ関心を持たなければならないのか?

フードシステムのレジリエンスは、企業の問題としても、より広範な社会問題としても重要です。食糧は、おそらく人間の健康を決定する最も重要な要素です。人々に供給される食糧の質または量の崩壊は、健康、生産性、および経済成長に長期的な影響を及ぼしかねません。極端に言えば、食糧システムの回復力の欠如は、致命的な飢饉を引き起こしたり、その一因となる可能性があります。

フードシステムへの衝撃は、主に生産され地域社会に分配される食糧の量に影響を与えますが、そのような衝撃は食糧の安全性の低下にもつながります。これは、栄養不良の影響や、生産者、消費者、その他の利害関係者による適応的な行動によって起こり得ることです。

ビジネスの観点からは、システムや会社のレジリエンスを欠くと、売上が減少し、評判やブランド価値への悪影響につながる可能性があります。危機管理の取り組みは後手に回り、リスクよりもメッセージの管理に重点が置かれることがあります。危機の前に、レジリエンスを促進するプラクティスに投資しておけば、危機が発生する可能性と発生した場合のダメージの両方を低減することができます。一方で、企業がこうした事象に対する計画と管理を成功させることができなかったことによる悪影響は、民衆の怒りにつながり、その結果、長期的にはレジリエンスを弱めるような誤った考えの政府政策につながる可能性があります。

システムのレジリエンスは一企業の手に負えるものではありませんが、危機に対してシステムがどのように反応するかを理解することは、個々の企業にとってのリスクを把握する上で重要です。レジリエンスの高い企業は、システムに対する広範なショックの影響を緩和することができます。業界団体、政府、その他の NGO は、システムのレジリエンスを促進する役割を果たすことができます。

### Ⅲ. 何がわかったか?

フードシステム<sup>9,10</sup> 食糧システムは、広範囲の食糧生産、流通、およびサービス産業にわたる人々や企業が関与する複雑なシステムです。レジリエンスを評価する目的においては、



食品加工や包装に機器や消耗品(洗浄剤、検査用品など)を供給する関連産業への対応も重要です。

フードシステムのレジリエンスに関する研究 研究者たちは、フードシステムの回復力に関し、システムに対する広範なショックの影響を緩和する能力について検討してきました<sup>9</sup>。こうしたショックは、地域市場(異常気象、地域紛争や不安、輸送の途絶、疫病、虫害、政府の抑圧的規則など)または世界市場(パンデミック、気候変動、地政学的紛争、世界金融ショックなど)に影響を及ぼす可能性があります。<sup>19,11-13</sup> 最近では、COVID-19によって引き起こされたサプライチェーンの混乱に関する研究が盛んに行われています。<sup>15</sup>

低レジリエンスの健康への影響:栄養失調と食糧不安。9.14 レジリエンスの低いフードシステムは、危機の後に市場に供給される食糧の量が減り、供給される食糧の栄養価も低くなる可能性があります。さらに、代替品が入手できなかったり、既存の事業の拡大が不可能な場合、市場が損失から回復するまでに時間がかかります。最終的にはシステムの制約が、完全な回復を妨げ、食糧安全保障の問題を長期化させる可能性があります。

低レジリエンスが健康に及ぼす影響:食品の安全性7,15-17 外的ショックに対するシステムのレジリエンスの欠如は、3つの側面で食品安全の問題につながる可能性があります。

- ショックは、食品安全に必要な物資や機器の不足を引き起こす可能性があります。
- ショックは、生産を著しく低下させるボトルネックを作り出すことがあります。こうしたボトルネックを解消するために存在する強いインセンティブは、ベストプラクティスを一時的に放棄させ、それに伴って食品安全リスクが増大する可能性があります。
- システムの不具合に起因する栄養不良は、病気への感受性を高め、病気の数や重症度を増加 させることにつながります。

食糧安全保障と病気の関係は、特に発展途上国において、地域社会や国家の長期的な健康見通しを損なう悪循環につながる可能性があります。

レジリエンスの低さによる食品安全問題の発生源 企業、消費者、政府のすべてが、レジリエンスやその欠如の要因となる可能性があります。

食品事業は、危機の際にいくつかの課題に直面します<sup>25</sup> COVIDの経験は示唆に富んでいます。 危機に適応するために多くのリソースが必要とされていた時に、労働者の欠勤が多く発生しま した。代替要員や疲労した経験豊富な作業員の使用は、注意力を低下させ、ミスを誘発する状 況を作り出しました。また、食品加工業者はサプライヤーの問題により、代替品を探すことを 余儀なくされ、より慎重さに欠けるサプライヤーと新たな関係を結ぶ可能性もあり、汚染のリ スクを高めることになりました。サプライヤーに対して高い基準を設けている善意の企業であ っても、不慣れな新しいサプライヤーが、製品を偽装したり、購買者が製品の品質を評価する ための実務、認証、監査結果、その他シグナルを不正に誤魔化そうとする場合、新たなリスク に直面することになります。

消費者行動もまた、回復力と食中毒の重要な決定要因です。恐怖による買い占めとそれによる価格上昇は、食品安全保障上のリスクを上昇させ、余剰物資の不適切な保持と保管につながる可能性があります。1,18 重要なインフラ(例えば電力)に影響を及ぼす危機は、消費者が調理や冷却を通じてリスクを軽減する能力を低下させ、特に消費者に食品安全に関する知識がない場合はその傾向が顕著になります。19ショックによって入手可能な食品の種類が変化すると、食糧不安と食品安全リスクの双方に影響を与える可能性があります。20最後に、正規の市場で食品を見つけることができない消費者は、安全性の低い非公式市場に流れる可能性があります。

政府はしばしば、危機の際に善の力を発揮すると考えられていますが、それは可能です。危機の最中、政府は、政治的には受けが良くても、食糧安全保障と食品安全を損なうような反応を

示すこともあります。<sup>21</sup> 例えば、危機はしばしば(「価格高騰」に対抗するための)価格統制につながります。<sup>22</sup> 価格上昇につながる市場の失敗も起こりえますが(一時的な地域独占の発生などによる)、政府はこうしたケースと、危機的状況にある地域に供給するコストの上昇や希少な商品に対する市場の需要の高まりを反映した価格の上昇とを区別し損なう場合があります。価格コントロールは、不足を深刻化させ、回復を遅らせることによって、レジリエンスを阻害します。競争市場においては、供給に影響を及ぼす危機が発生すると、価格がつり上がります。これは、通常の流通経路の外にある、よりコストの高いサプライヤーから供給を呼び込む強い動機付けとなります(柔軟性を高めます)。

**脆弱性とレジリエンスに影響を与える要因** レジリエンスに影響を与える可能性のあるいくつかの要因が特定されています。これらには以下のようなものがあります。

- 単独調達または少数のサプライヤーへの依存(多様化)。1 単一または少数のサプライヤーとの供給契約を維持することによって、企業はそれらのサプライヤーに影響を与えるショックに対して脆弱なままです。
- **特定の原材料への依存。**1 代替食材の使用を許さない複雑な食品の規定レシピは、食品加工業者をショックに対してより脆弱にします。
- サプライチェーンの長さ。10,23 サプライチェーンが短い(例:地元サプライヤーの使用)ほど、特定の地域に集中するショック(例:悪天候)に対して脆弱です。サプライチェーンが長いと、長距離の輸送ネットワークに影響を与えるショックに脆弱です(例:COVID-19)。
- 遺伝子の多様性。<sup>24</sup> 農産物や家畜に遺伝的多様性がないと、病気が生産によって拡がってしまう可能性が高くなります。
- **インフラストラクチャー。**10 外部との交通網にほとんど依存していないインフラを持つコミュニティは、インフラを損傷するようなショックに対して脆弱です。
- **貿易要因。**23 クム(2020)は、次のような国でレジリエンスが低くなると示唆しています。
  - 食料生産の多様性が低い(地元で生産される食料の種類が少ない)。
  - ・食料供給の多様性が低い(地元で売られている食料の種類が少ない-代替品が少ない)。
  - 食料輸入に依存する(輸送危機の影響を受けやすい)。
  - 輸入のコネクションが少ない(いろいろな国から輸入した方が良い)。
- **柔軟性に欠ける政府のルール。**<sup>15,21</sup> 法律や規制は、危機に対応するための柔軟性を低下させる可能性があります。危機の際に柔軟性を許すことで、レジリエンスを高められます。
- その他の規制による誘因。 規制は、食品企業に弾力性のないサプライ・チェーンを構築する 動機を与えたり、地域市場での競争を減退させ、加工業者や消費者が主要供給業者に影響を及 ぼすショックにさらされやすくする可能性があります。15
- **低・中所得国。** 低中所得国は一般に、レジリエンスの低いフードシステムを保有しがちです。低中所得国は、上記のレジリエンスの特性の多くを欠いているだけでなく、食糧不安と疾病のレベルが高い人々を抱えています。

グローバル・フード・システム 世界のフードシステムは、食糧生産を増大させ、世界に食糧を供給する上で信じられないほどの成功を収めてきました。レジリエンスの名の下にこのシステムを作り直したり改革したりする試みにおいて、この成功の背後にある市場の推進力を排除しないように注意する必要があります。

### IV.知識のギャップ

近年、レジリエンスに特化した研究が増加しているにもかかわらず、いくつかのギャップが残っており、さらなる研究が必要であることが示唆されています。これは、特に食品の安全性に関して言えることです。

食品システムのレジリエンスの経済学は、もっと研究される必要があります。レジリエンスの 経済学とその食品安全への影響については、これまでほとんど書かれていません。

コストをかけたレジリエンスは、実現可能なオプションではありません。最適なレジリエンスは、 (ハザードベースではなく) リスクベースで評価される必要があります。

具体的には、最適性は、レジリエンスを促進するための取り組みに関連する発生確率、不利な結果、コストに左右されます。さらに、何が最適かは文脈に大きく依存し、地域や評価されるショックの種類によって異なります。

また、危機の際の企業や労働者の行動をよりよく理解する必要があります。危機によって生じた企業や労働者の短期的な動機が、より長期的な目標や動機と整合していなければ、危機管理計画は失敗する可能性が高くなります。基本的に、復興計画は、企業の利益最大化および従業員の効用最大化の目標と動機が一致したものでなければなりません。

レジリエンスに関する実証的な研究は不足している。フードシステムのレジリエンス研究で使用される理論的・概念的枠組みは改善され続けていますが、実証的な検証が必要です。また、より広範なショックによって、レジリエンスに影響する要因がフードシステム全体でどのように変化するかについて、より良く理解する必要があります。フードシステムより完全な分析が必要です。フードシステムのレジリエンス研究のほとんどは、そのシステムによる市場への食糧供給に焦点を当てています。同様に重要なのは、フードシステムのレジリエンスの低さが家庭のそれとどのように相互作用して、健康に悪影響を及ぼすかということです。

### V.食料供給とフードビジネスへの影響

COVID-19 の経験が示すように、フードシステムのレジリエンス(またはその欠如)は、食糧供給とフードビジネスに大きな影響を与えます。フードシステムにレジリエンスがある場合。

- フードシステムは堅牢す。危機が局所的な影響を及ぼすことはあっても、食糧生産と流通が 全体として減少することはあまりありません。ここでは調達の多様性が重要です。
- フードシステムには冗長性があります。主要な投入物の不足は、代用品を導入することで対処できます。これには、食材、設備、消耗品、輸送などの投入物が含まれます。
- フードシステムは柔軟です。このシステムはショックから迅速に回復する可能性が高く、消費者に栄養価が高く安全な食品を提供することができます。これは、迅速な変更を行い、品質管理を維持するインセンティブが十分に高いためです。
- フードシステムは、長期的な市場環境の変化に持続的に適応することができます。これは、 サプライチェーンが、脆弱なサプライチェーンや急速に枯渇するサプライチェーンに長期的 に依存しないことを意味します<sup>9</sup>。

食品企業 外部の危機は、企業に対してさまざまな影響を及ぼします。他者による供給ロスを補う立場にある企業は、そうすることが企業の長期的な利益最大化の最善の利益となるのであれば、そうするでしょう。

食品企業は、次のような場合にレジリエンスに対する先行投資を行うインセンティブを得ます。

- 準備することで、ビジネスが失敗する可能性を減らすことができる。
- 準備することで、企業は迅速に回復し、売上を維持し、サプライチェーンの混乱によるリスクの一部または全部を回避することができる。
- 準備することで、従業員が安全や品質に手を抜く誘因が減り、顧客からの苦情が減り、食中 毒の発生やリコールの確率が減少する。

食品会社は、次のような場合に危機の最中に安全で栄養価の高い食品の生産を増やすインセンティブを得ます。

- 供給量の減少や需要の増加を考慮し、価格の上昇を許容する。
- 企業は、その強化された取り組みを優れたCSR(企業の社会的責任)として売り込むことができる。
- その努力が、新たな供給契約や市場シェアの拡大という形で報われる。

レジリエンスとその対応への投資と相反するのは、その活動にかかる次のようなコストです。

- 過剰生産能力への投資。その維持には、通常、労働力と資本の両面で多額の投資が必要。
- ジャストインタイム方式からジャストインケース方式への移行によるメリットの喪失。

余分な在庫はコストがかかり、平時には一般的に必要ない。

サプライヤー、卸売業者、小売業者、運送業者などを多様に維持することは、管理費や法務費、監査や検査などの面でコストがかかり、単独契約によるメリットが失われたり、地元の小規模なサプライヤーを利用する場合には、サプライヤー価格の上昇につながる可能性があります。

FORUM

政府。レジリエンスを強化するための政府の行動には、以下のものがあります。

- 余剰なインフラ (港湾、鉄道、道路、橋など) に投資する。
- 緊急時のための食糧の倉庫(食糧の在庫が栄養価が高く、食品の安全性が確保され、危機の際に容易に配給される場合)。
- 新しい規則が食品産業のレジリエンスを低下させないようにするための規制を作成する。
- 危機対応における柔軟性を阻害するいくつかのルールを一時的に緩和することに寛容であること。
  - コーデックス規格に代表される国際的な規制ルールは食品の安全性に貢献するものの、 柔軟性の欠如により、栄養不良やその結果かかりやすくなる病気による健康被害が生じる (特に低中所得国において)。
- ローカルまたはプライベートな基準は、食品安全目標を達成するためのより柔軟な手段を可能にするという利点を潜在的に持っていることを認識する。
- 消費者を教育し、競争市場を育成し、危機の際に価格システムが資源を引き寄せるようにすることで、市場の力を利用する。

要するに、食品システムのレジリエンスの欠如は、供給の途絶、企業や従業員による不適切な慣行の誘発、栄養価が低く安全性の低い食品の市場への供給につながる可能性があるということです。企業と政府はともに、レジリエンスとその結果としての食品安全を促進する役割を果たすことができます。

### VI.ビジネスは何をすべきか/何を考えるべきか

企業は、レジリエンスの低さによる食品安全の失敗の原因、行動、誘因、および結果を検討することによって、レジリエンスの強化を通じて食品安全を向上させることができます。食品システムのショックに対する計画を立てることで、危機が発生したときの影響を軽減することができます。理想的には、企業は以下を行うべきです。

- 世界のフードシステムは**重要なインフラ**であり、システムの不具合は政府および市民社会からの監視強化につながる可能性が高いことを認識する。
- フードシステムに対する様々なショックから生じるリスクを特定し、事業運営に対する様々な 影響を認識する(例:パンデミック、不作、戦争、異常気象など)。
- サプライチェーンにおける脆弱なポイントや潜在的なボトルネックを特定する。
- 現在の投入資材の代替品を特定し、必要に応じて複数のサプライヤー、卸売業者、小売業者、運送業者と関係を構築する。
- 「ジャストインタイム」と「ジャストインケース」のバランスをとる。危機の際に、生産に必要な重要なインプットの在庫を持たないことから生じる潜在的なコストを認識する。逆に、過剰生産能力を持つ企業は、顧客満足(より大きな支払い意思)とその結果上昇する市場シェアにより、予定外の利益と長期的な利益を実現することができる。
- 安全基準を維持しながら、システムショックへの対応力・回復力を向上させるためのビッグ データ活用を考える。
- 危機が従業員、サプライチェーン関係者、消費者のインセンティブにどのような影響を与え そうかを検討する(その結果による食品安全への影響も検討する)。
- 危機に対して適応的であるけれども安全な対応を促進するために、イノベーションの文化と 並行して食品安全の文化を構築する。
- 従業員がストレスを感じ、近道をしたい誘因に直面する危機的状況において、**食品安全メッセージの**必要性が高まっていることを認識する。
- リスクのトレードオフを認識し、危機の際に(安全性を維持しつつ)柔軟な対応を可能とする規制の枠組みを推進する。 33

- 食品安全基準の維持と整合性のある、長期的な復興に向けた持続可能な計画があることを確認する。
- 過去の危機から学ぶが、次の危機が前回の危機のようになるとは考えない(注:メディアの報道・提言は、必ず前回の危機に焦点を合わせている)。

以上のことを考慮し、レジリエンス・プランを作成し、定期的に更新・評価することで、食品 会社は次に直面する危機に対して最善の備えをすることができるのです。



### 参考文献

- Béné, C. (2020). Resilience of local food systems and links to food security

   –A review of some important concepts in the context of COVID-19 and other shocks. Food security, 12(4), 805-822.
- 2. Chenarides, L., Manfredo, M., & Richards, T. J. (2021). COVID-19 and food supply chains. Applied Economic Perspectives and Policy, 43(1), 270-279.
- 3. Meuwissen, M. P., Feindt, P. H., Slijper, T., Spiegel, A., Finger, R., de Mey, Y., ... & Reidsma, P. (2021). Impact of Covid-19 on farming systems in Europe through the lens of resilience thinking. Agricultural Systems, 191, 103152.
- 4. Nordhagen, S., Igbeka, U., Rowlands, H., Shine, R. S., Heneghan, E., & Tench, J. (2021). COVID-19 and small enterprises in the food supply chain: Early impacts and implications for longer-term food system resilience in low-and middle-income countries. World Development, 141, 105405.
- 5. Thilmany, D., Canales, E., Low, S. A., & Boys, K. (2021). Local food supply chain dynamics and resilience during COVID-19. Applied Economic Perspectives and Policy, 43(1), 86-104.
- 6. Alban, L., Haesler, B., Nielsen, L., & Ruegg, S. (2017, January). Resilience in the pork supply chain from the food safety perspective. In Foz do Iguaçu-Brazil: 12th Internationa I symposium on the epidemiology and control of biological, chemical and physical hazard s in pigs and pork.
- 7. de Freitas, R. S. G., & Stedefeldt, E. (2020). COVID-19 pandemic underlines the need to build resilience in commercial restaurants' food safety. Food Research International, 136, 109472.
- 8. The Food and Agriculture Organization of the United Nations. Good Practices on Resilience (webpage). <a href="https://www.fao.org/capacity-development/resources/good-practices/resilience/en.Accessed">https://www.fao.org/capacity-development/resources/good-practices/resilience/en.Accessed</a> on Feb. 28, 2022.
- 9. Tendall, D. M., Joerin, J., Kopainsky, B., Edwards, P., Shreck, A., Le, Q. B., ... & Six, J. (2015). Food system resilience: Defining the concept. Global Food Security, 6, 17-23.
- 10. Manning, L., & Soon, J. M. (2016). Building strategic resilience in the food supply chain. British Food Journal.
- 11. Bakker, J. D., Beekman, G., de Steenhuijsen Piters, C. B., Pamuk, H., & Wigboldus, S. A. (2021). Localising value chains and food system resilience: A systematic exploration. Wageningen University & Research.
- 12. Harris, J., & Spiegel, E. J. (2019). Food systems resilience: Concepts & policy approaches. Center for Agriculture and Food Systems, Vermont Law School, South Royalton, V T <a href="https://www.nal.usda.gov/sites/default/files/food\_systems\_resilience\_concepts">https://www.nal.usda.gov/sites/default/files/food\_systems\_resilience\_concepts</a> policy\_approaches\_final. pdf.
- 13. Unruh, D. A., Gragg, S. E., Nutsch, A. L., Ackleson, J. M., & Kastner, J. J. (2017). Enhancing Food- System Resilience and Ensuring Consumer Confidence in the Aftermath of a Food-Supply Catastrophe. The CIP Report.
- 14. Gundersen, C., & Ziliak, J. P. (2015). Food insecurity and health outcomes. Health affairs, 34(11), 1830-1839.
- 15. Worosz, M. R., Knight, A. J., & Harris, C. K. (2008). Resilience in the US red meat industry: the roles of food safety policy. Agriculture and Human Values, 25(2), 187-191.
- 16. Katona, P., & Katona-Apte, J. (2008). The interaction between nutrition and infection. Clinical Infectious Diseases, 46(10), 1582-1588.
  17. Cache J. D. (2007). Procling the Powert Trans. Scientific Associace. 207(3), 40-43.
- 17. Sachs, J. D. (2007). Breaking the Poverty Trap. Scientific American, 297(3), 40-42.

- COVID-19 pandemic: An analysis of food purchasing and management behaviors in US households through the lens of food system resilience. Socio-Economic Planning Sciences, 101107.
- 19. Kosa, K. M., Cates, S. C., Karns, S., Godwin, S. L., & Coppings, R. J. (2012). Are older adults prepared to ensure food safety during extended power outages and other emergencies?: Findings from a national survey. Educational Gerontology, 38(11), 763-775.
- 20. Béné, C., Bakker, D., Chavarro, M. J., Even, B., Melo, J., & Sonneveld, A. (2021). Global assessment of the impacts of COVID-19 on food security. Global Food Security, 31, 100575.
- 21. Tinarwo, J., Babu, S.C., & Iyappan, K. (2018). Improving food system resilience through better governance: lessons from multi-stakeholder partnerships in Zimbabwe. Internation Food Policy Research Institute, Washington, DC.
- 22. Montgomery, W. D., Baron, R. A., & Weisskopf, M. K. (2007). Potential effects of proposed price gouging legislation on the cost and severity of gasoline supply interruptions. Journal of Competition Law and Economics, 3(3), 357-397.
- 23. Kummu, M., Kinnunen, P., Lehikoinen, E., Porkka, M., Queiroz, C., Röös, E., ... & Weil, C. (2020). Interplay of trade and food system resilience: Gains on supply diversity over time at the cost of trade independency. Global Food Security, 24, 100360.
- 24. Kaseva, J., Himanen, S. J., & Kahiluoto, H. (2019). Managing diversity for food system resilience. In Advances in Food Security and Sustainability (Vol. 4, pp. 1-32). Elsevier.



GFSIは、論文の査読をしてくださった以下の方々に感謝し、謝意を表します。

#### Mary Anne Amalaradjou, DVM, MVSc, MS, PhD Associate Professor of Food Microbiology Department of Animal Science University of Connecticut

#### Dr Yunbo Luo

Director of the Special Food Research Center and Professor and Member of the Academic Committee of the College of Food Science and Nutritional Engineering China Agricultural University (CAU)

#### Abigail B. Snyder, PhD

Assistant Professor of Microbial Food Safety
Department of Food Science
Cornell University

#### John W. Spink, PhD

Assistant Professor (Fixed-Term), Department of Supply Chain Management, Eli Broad business College, Michigan State University

### グローバル・フード・セーフティ・イニシアティブについて

グローバル・フード・セーフティ・イニシアチブ(GFSI)は、コンシューマー・グッズ・フォーラムのCEO主導による行動連合で、41の小売業者とメーカー、および幅広い食品安全コミュニティが集まり、企業の食品安全基準を監督し、世界中の人々が安全な食品にアクセスできるよう支援する組織です。GFSIは、安全な食品の実現を支援する世界最大級のネットワークとして、食品安全をすべての人のビジネスにすることを約束し、連合メンバーは、サプライチェーンとその市場において食品安全システムが直面する課題に取り組み、世界的に食品安全の水準を高めることに貢献しています。その野望は、増大する世界人口を養えるように食品安全システムを強化し調和させ、消費者が世界のどこにいても安全に食品を届けられる市場を発展させることです。

詳しくは、<u>www.mygfsi.com を</u>ご覧ください。



