

【ムーンショット目標5】

「2050年までに、未利用の生物機能等のフル活用により、
地球規模でムリ・ムダのない持続的な食料供給産業を創出」
研究開発構想

令和2年3月
農林水産省

1. ムーンショット目標

ムーンショット目標（令和2年1月23日総合科学技術・イノベーション会議決定）のうち、以下の目標の達成に向けて研究開発に取り組む。

＜ムーンショット目標＞

「2050年までに、未利用の生物機能等のフル活用により、地球規模でムリ・ムダのない持続的な食料供給産業を創出」

（ターゲット）

- 2050年までに、微生物や昆虫等の生物機能をフル活用し、完全資源循環型の食料生産システムを開発する。
- 2050年までに、食料のムダを無くし、健康・環境に配慮した合理的な食料消費を促す解決法を開発する。
- 2030年までに、上記システムのプロトタイプを開発・実証するとともに、倫理的・法的・社会的（ELSI）な議論を並行的に進めることにより、2050年までにグローバルに普及させる。

（研究推進機関：生物系特定産業技術研究支援センター）

2. ムーンショット目標設定の必要性

我々は、これまで世界人口の増加ペースに合わせ、地球上の農地や林地、海洋を開拓し、様々なテクノロジーを駆使して食料供給を実現してきたが、同時に自然環境の破壊や自然資源の乱獲をもたらし、化学肥料や農薬の多投による土壌劣化や河川、地下水の汚染など様々な問題を引き起こしてきた。また、最近では、温室効果ガスによる地球温暖化が深刻化し、その削減が急務となって

いるが、世界的に見れば、一酸化二窒素やメタンなどを含め温室効果ガスの総排出量の1/4は農林業その他の土地利用に起因すると言われている。

2050年には世界人口が1.3倍（2010年対比）に達し、中所得国における家畜飼料としての穀物需要量の増加等も相まって、食料需要量は1.7倍に増大すると予想されており、今後、食料供給のさらなる拡大が必要となる。一方、本来、食料の元となる有機物は、農作物、食品、排出物、土壌物質等として循環しているが、生産効率のみを重視した現行方式の食料生産では、その循環が破綻しており、気候変動、食料供給の持続性への障害等、地球環境に悪影響を及ぼしている。今後、食料の増産と地球環境保全を両立するためには、現行方式の食料生産を抜本的に見直すことが必要である。

一方で、微生物や昆虫等にあつては、未利用な機能が多数存在しているものと推測され、これら未知な「知」を解明して自然・生物が持つ機能を覚醒・最大限活用することにより、新たな社会経済活動のシステム化を図ることが重要である。

したがって、人類が、今後も食料を持続的に確保し、世界人口の増加ペースに合わせて食料供給量の拡大を図るためには、微生物や昆虫等の生物機能をフル活用した完全資源循環型の食料生産システムを開発することが不可欠である。

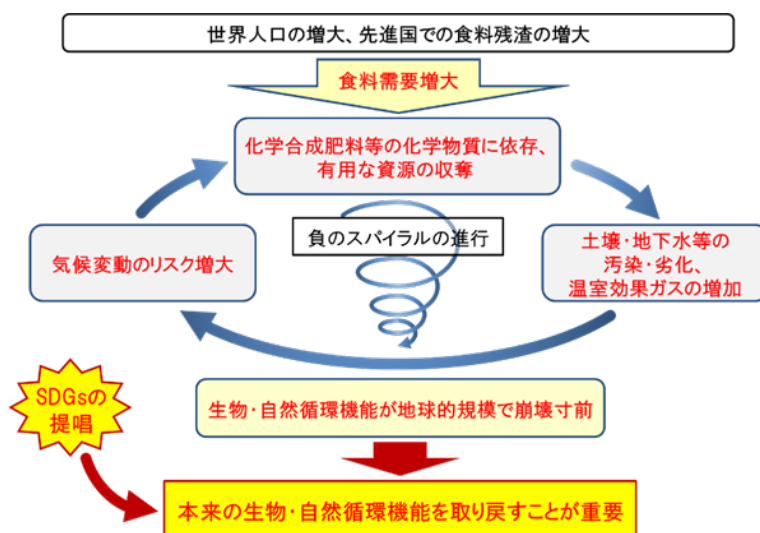


図1. 食料供給における2050年を見通した課題

加えて、今後、我々自らの消費行動も見直す必要がある。現在、先進国を中心に大量の食料が廃棄され、肥満や生活習慣病の増加が社会問題化している。我が国においても、大量の食品が廃棄され、肥満や生活習慣病といった食にまつわる様々な課題が生じている。

したがって、食料のムダを無くし、健康・環境に配慮した合理的な消費行動を促す解決法を開発し、グローバルに展開する挑戦が求められる。

なお、国連の持続的な開発目標（SDGs）においても、

- ①生態系の維持や気候変動に対する適応能力が高い、持続的な農業を促進すること（目標 2）
- ②世界規模で植林等を大幅に増やし、生物多様性の保全を含め山地生態系の保全を進めること（目標 15）
- ③海洋及び海洋資源を保全し、持続的な形で利用すること（目標 14）
- ④食料廃棄や食品ロスを削減し、持続可能な生産消費形態を確保すること（目標 12）

等の重要性がうたわれ、今日、国際的な連携活動が始まりつつある。

以上のことから、今後見込まれる世界人口の増加及び地球環境の保全の両者に対応するため、「2050年までに、未利用の生物機能等のフル活用により、地球規模でムリ・ムダのない持続的な食料供給産業を創出」することを目標とし、世界中から研究者や起業家の英知を結集し、挑戦的な研究開発を推進することが早急に必要である。

3. 研究開発の方向性

ムーンショット国際シンポジウム（令和元年12月17、18日開催）での議論等を踏まえ、現時点での研究開発の方向性を以下のとおりとする。

（1）挑戦的研究開発を推進すべき分野・領域

今後見込まれる気候変動に対応しつつ、食料の持続的な増産を達成するためには、植物等の環境適応力を格段に高める必要がある。加えて、生物機能を活用して水や人工物質への依存度を大幅に引き下げ、地球環境への悪影響を予防し、生物多様性の保全に努めることが食料生産の持続化には必要である。このため、昆虫、土壌微生物、人体内微生物、植物等が持つ未利用な生物機能を解明し、完全資源循環型の食料生産へと活用することが不可欠である。

また、食料の供給量の拡大に合わせ、生産された食料がムダなく効果的に活用されることが重要であり、我々の消費行動自体にイノベーションを起こすことが求められる。現在、先進国を中心に大量の食料が廃棄されて環境を悪化させ、肥満や生活習慣病の増加などが社会問題化している一方、未だ飢餓問題は解決されていない。このため、食品ロスを減らし、必要な人々に必要な量の食料を確実に届けることができる、新たな解決法の開発が不可欠である。

以上のことから、未利用の生物機能等をフル活用して食料供給の拡大と地球環境保全を両立できる食料の生産・消費システムを確立することが必要である

が、現時点においては、技術的には極めて困難であり、生物機能の解明・利用に関する研究開発も初期段階で社会実装には遠い。このため、「食料供給の拡大と地球環境保全を両立すること」をムーンショット型研究開発制度において推進すべき挑戦的な研究開発の分野・領域として想定する。

（２）目標達成に当たっての研究課題

ムーンショット型研究開発制度においては、上記の推進すべき挑戦的な研究開発の分野・領域について挑戦的な研究開発を国内外から広く募り、研究開発を進める。

なお、研究開発の推進においては、ムーンショット目標の達成に資する技術開発、かつ挑戦的な課題を対象とし、技術アプローチについては科学的な検証がなされているものを幅広く取り上げ、ステージゲートを設けて実施する。また、最も効率的かつ効果的な手段を取り得るよう、最新の科学的動向を調査し研究開発に活かす。

また、研究成果を円滑に社会実装する観点から、倫理的・法制度的・社会的課題（ELSI）について様々な分野の研究者が参画できるような体制を検討することとする。

<食料供給の拡大と地球環境保全を両立する食料生産システム>

一例として、以下の研究開発事例が想定される。

- ・ 劣悪な環境に耐える、野生種の「強靱さ」のメカニズムの全容解明
- ・ 植物等のゲノムをゼロから再構築し、目的の機能を有する系統の開発
- ・ 土壌微生物環境の完全制御による養分の究極利用と温室効果ガス発生抑制技術の開発
- ・ 生態系に影響を与えない植物病虫害等の完全制御技術の開発
- ・ CO₂吸収力を高めた植物・海藻等の開発とその利用による有機物循環システムの開発

<食品ロス・ゼロを実現する食料消費システム>

一例として、以下の研究開発事例が想定される。

- ・ あらゆる食料需給ニーズをサイバー空間上で瞬時にマッチング・供給できるシステムの開発
- ・ 生物機能のフル活用による食材の超長期保存技術の開発
- ・ 余剰農作物や家庭の食料残渣等をカートリッジ化し再利用する 3D 加工調理システムの開発など健康や環境に配慮した食品等への効果的な転換・再利用技術の開発

- ・生物機能のフル活用による食料残渣や林地残材の食品・養殖飼料等への転換技術の開発

(3) 目標達成に向けた研究開発の方向性

○2030年（アウトプット目標）

〈食料供給の拡大と地球環境保全を両立する食料生産システム〉

「生物機能をフル活用した完全資源循環型の食料生産システム」のプロトタイプを開発・実証する。

〈食品ロス・ゼロを実現する食料消費システム〉

「健康・環境に配慮した合理的な食料消費を促す解決法」のプロトタイプを開発・実証する。

○2050年（アウトカム目標）

地球規模でムリ・ムダのない持続的な食料供給産業を創出する。これは即ち、「生物機能をフル活用した完全資源循環型の食料生産システム」及び「健康・環境に配慮した合理的な食料消費を促す解決法」がグローバルに普及されることを意味する。2050年（アウトカム目標）のイメージを図2に示す。

2050年（アウトカム目標）を達成するためには、「生物機能をフル活用した完全資源循環型の食料生産システム」及び「健康・環境に配慮した合理的な食料消費を促す解決法」について、実証拠点の設置、各段階における次に必要となる技術開発課題の解決を経て、製品やシステムの普及期間を確保する必要がある。加えて、研究開発と併行して、倫理的・法的・社会的（ELSI）な議論も必要である。したがって、2030年時点における目標は、プロトタイプでの技術の確立となる。



図2. 2050年（アウトカム目標）のイメージ

＜参考：目標達成に向けた分析＞

ムーンショット国際シンポジウム（令和元年12月17、18日開催）における Initiative Report 等を踏まえ、目標達成に向けた分析を以下に示す。

（1）食料供給の拡大と地球環境保全を両立する食料生産システムに関連する技術の動向

植物と土壌微生物の相互作用（灰色）及び植物と微生物の共生（緑色）の研究は持続的に行われているが、2012年頃から増加傾向にある。土壌微生物と温室効果ガスについての研究は、2015年以降わずかに増える傾向にあるが、まだ数は少ない（黄色）（図3）。微生物のゲノム編集については、2013年以降増えているが（橙色）、土壌微生物に限ると数が極端に少なく（11件、データ示さず）、土壌微生物をデザインし改変するという研究はこれからの分野であるといえる。

一方、植物のゲノム編集については2013年から急激に件数が増えている（青色）。これはCRISPR/Cas9が植物に応用され始めた時期に一致する。ゲノム編集の基盤技術の開発やゲノム育種技術を用いた作物創出等の研究成果が出ていると予想される。対して、AIを活用した育種研究はまだ件数が少なく（39件、水色）、黎明期であることが示されるが、2019年に数が増え始めており、今後急速に研究が進むことが予想される。

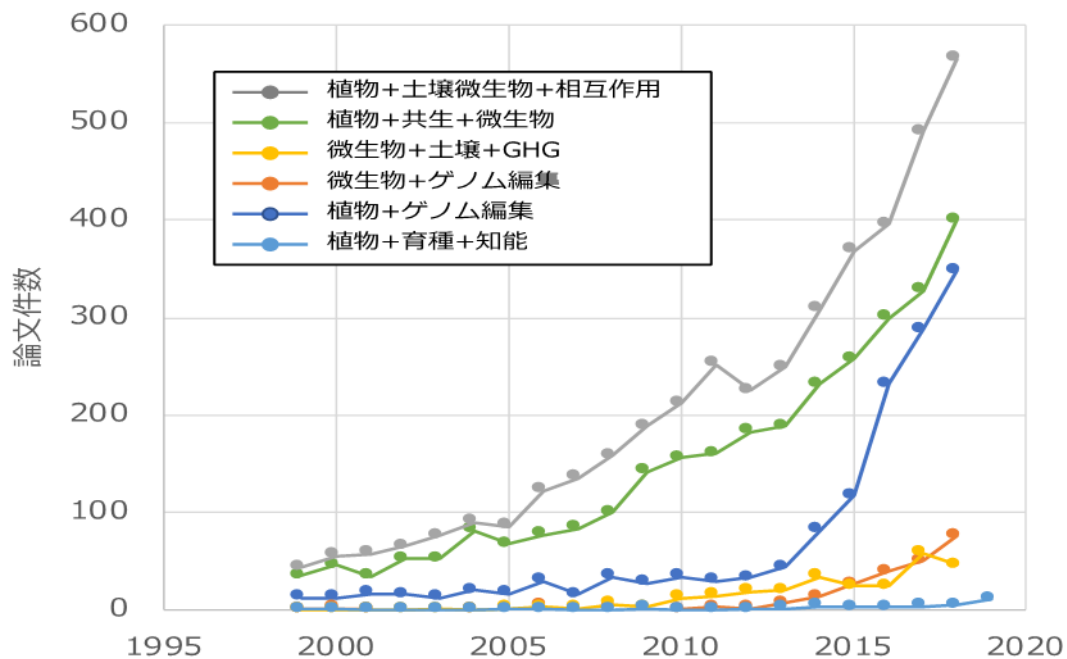


図3. 1999年から2019年における国内外の育種・土壌微生物関連の研究動向 (Web of Science)

害虫制御の手法開発に関する研究動向を俯瞰すると、これまでの論文件数は化学的防除（化学農薬）と生物的防除（天敵利用）の2つが圧倒的に多い(図4-A)。次いで、物理的防除、耕種的防除、抵抗性品種、共生微生物、不妊虫放飼に関する件数が多い。このうち、ここ5年で件数が大きく伸びているのは、共生微生物利用と不妊虫放飼の2つである(図4-B)。一方、ゲノム編集等を利用した害虫制御に向けた研究の件数は、ここ3年ぐらいで急速に伸びており、ドローン、AIを用いた研究についても増加傾向にある。これらの分野については、今後さらに研究が進むと考えられる(図4-C)。

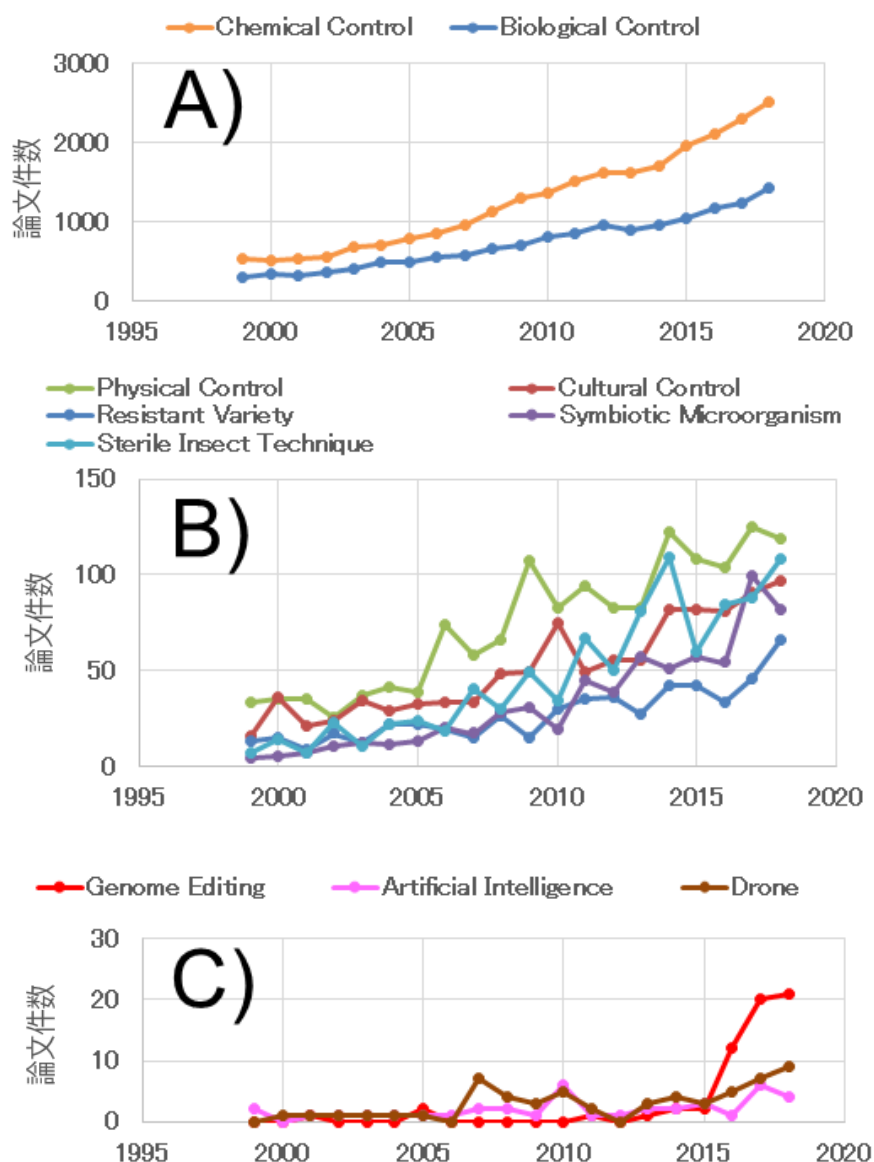


図4. 1999年から2018年における国内外の害虫制御関連の研究動向 (Web of Science)

なお、ライフサイエンス分野においては、ここ2～3年で一細胞レベルでのオミックス解析が可能となるとともに、イメージング技術が格段に進展している。さらに、ゲノム編集技術の精度が向上し、医療・食料応用へ展開している。計測技術、AI 機械学習等をはじめとする ICT 技術は自動化、大規模化を通じてライフサイエンス等へ着実に浸透している。さらに、大量の生命現象から法則を発見する「データ駆動型」の新しいアプローチによる生命現象の理解が進展している。一方、AI、ゲノム編集、合成生物学等の進展に伴い、ELSI が科学技術の推進上重要な要素として位置づけられている（研究開発の俯瞰報告書 統合版 2019）。

（2）食品ロス・ゼロを実現する食料消費システムに関連する技術の動向

食品ロス・廃棄に関わる研究は増加傾向にあり（図5）、特にここ5年は急激に増加している。また、2000年前後の研究では動物学、社会学、栄養学、水資源の研究分野での文献が多いが、近年では Transportation Science Technology, Transportation, Telecommunication 分野の研究が伸びてきている。

このことは、食品のロスや廃棄が生産から消費までの移動（フードチェーン）におけるミスマッチに多く起因しており、そのマネジメントを積極的に行おうという気運が高まっていることを示唆している。

一方、食品のロス・廃棄にかかるフードチェーンのマネジメントには、近年発展著しい AI（特に IoT や ICT）の情報網と連携させることが有用と考えられるが、この分野の研究はまだほとんど進展していない（例えば、2014 年は 3 件で、2018 年は 11 件）。生鮮食品は収穫後の流通過程で品質低下あるいは腐敗が生じ、最終的に価値がなくなるという生鮮物特有の特徴を有しており、特に IoT の食品物流への活用には、食品の量だけでなく質（時間経過に伴う品質変化等）も含めた検討が必要と考えられる。

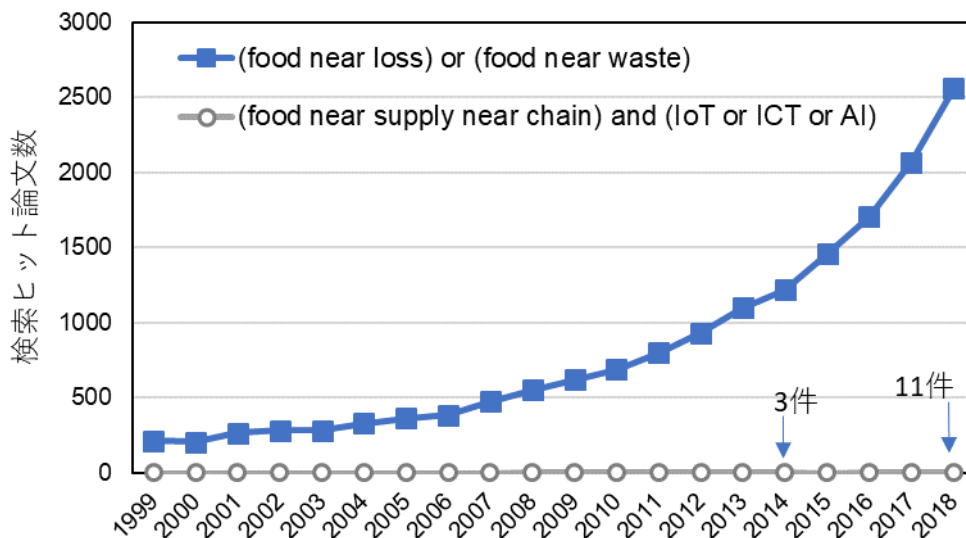


図5. 食品ロス・廃棄及びフードサプライチェーン研究の動向

食品のロス・廃棄の積極的な利用を考える際、エネルギーやマテリアルへの転換が一つの回答となるが、既往の関連研究も食品のロス・廃棄にかかる研究件数のそれぞれ約24%または14%を占め、比較的多くの関心を集めつつあるものと推察される(図6)。エネルギーやマテリアルへの転換には化学的・物理学的方法に加え、生物機能を積極的に利用することも一手段であり、関連研究も存在するが、その割合はエネルギー・マテリアル転換研究全体の1/7程度にとどまっている。

一方、食品のロス・廃棄のリサイクルに関しては、発酵リキッドフィーディングのような優良開発事例(Sasaki et al. 2011)があるものの、研究件数が食品のロス・廃棄研究全体の5%にとどまっており、その社会的受容性や技術的困難性から進展しているとは言いがたい状況にあると考えられる。

食品ロス・廃棄の一つのリサイクル手段として、これまですでに研究が進められ、一部システムとして定着している畜産への供給(家畜餌など)に加え、日本の強みである広大な海洋を活用した養殖業の可能性については、研究はほとんど行われていない。

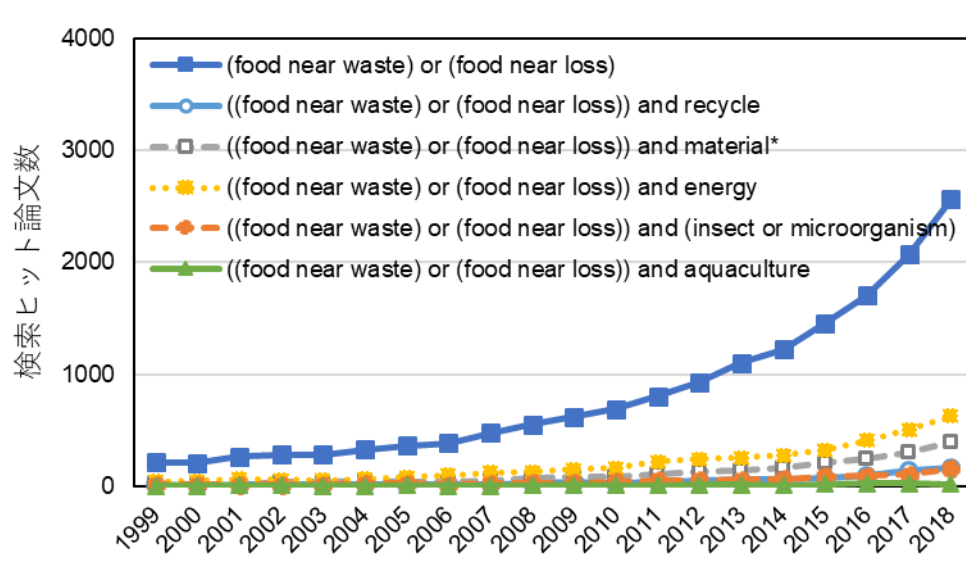


図6. 食品ロス・廃棄のリサイクル、マテリアル、エネルギー、昆虫・微生物、養殖研究の動向

食品のロス・廃棄の低減手段として、余剰農産物、規格外、副産物等可食部分を食品素材とし、栄養機能や嗜好性に優れた食品へ『再』加工する方法が考えられる。近年、少量多品目の生産が可能な3Dプリントの技術の進展が著しく、食品分野でも、個人の多彩な食の選択を可能とする有望な手段となり得ると考えられる。しかし、実際は工業分野に比べると食品分野での3Dプリンタの利用研究は少なく（図7中 橙色）、取り組みは実際にも進められているが、使用されている食材はプリンタに充填しやすい形状のものに限られている。

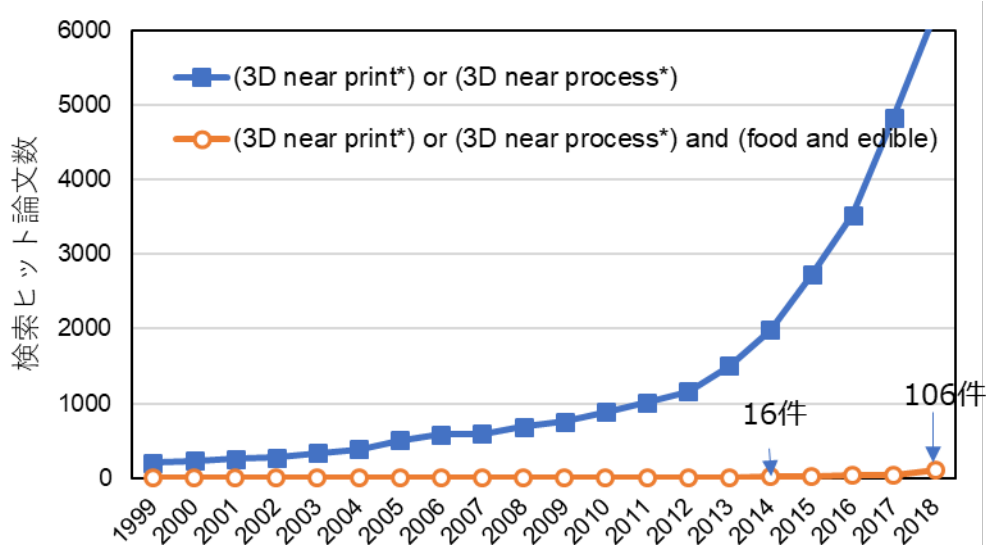


図7. 3Dプリンティング技術及びその食品利用に関する研究の動向