

細胞性食品における アミノ酸コストおよび サプライチェーン分析



著者

Marie Gibbons, MS (細胞性食品研究者)
<https://www.mariegibbonsconsulting.com>

Amanda Bess, PhD (シニア分析プログラムマネージャー)

Elliot Swartz*, PhD (シニア主席研究員、細胞性食品)

*責任著者: elliots@gfi.org

推奨引用文献:

Gibbons, M., A. Bess, and E. Swartz. Amino acid cost and supply chain analysis for cultivated meat. Washington D.C.: Good Food Institute. 2025.
<https://doi.org/10.62468/xcjx6040>

グラフィックデザインおよび校閲:

Kelli Crowsigt, Emily Hennegan, Joe Gagyi, Tara Foss

GFIについて

The Good Food Institute (GFI) は、地球・人・生物にとってより良いグローバルな食料システムを実現することを目指す非営利のシンクタンクです。GFIのチームは、科学者、企業、政策立案者と協働しながら、プラントベース食品、発酵由来食品、そして細胞性食品を従来の動物由来タンパクと同じまたはそれ以上に美味しく、手頃に、誰もが手にすることができますように取り組んでいます。フィランソロピーによって支えられる国際的なネットワーク組織として、気候変動、公衆衛生、食糧安全保障、生物多様性といった地球規模の課題に対する解決策として、代替タンパク質の普及と発展を推進しています。GFIの活動はすべて、世界中の寄付者の皆さまからの寄付と助成金によって成り立っています。寄付について詳しく知りたい場合は philanthropy@gfi.org までお問い合わせください。

詳細は www.gfi.org をご覧ください。

エグゼクティブサマリー

費用対効果の高いアミノ酸供給を実現することは細胞性食品産業の拡大に不可欠である。アミノ酸は必要量が多だけでなく、食品用途に適した品質と規模で供給するためのサプライチェーンが複雑であることから、細胞性食品生産における主要なコスト要因となっている。

本報告書では、競争力のある細胞性食品産業に必要なコストと量のアミノ酸を供給するための方策を評価している。将来のアミノ酸需要、代替調達戦略、実際の価格データを組み合わせた包括的分析の試みを通じて、アミノ酸サプライヤーから細胞性食品生産者に至るまでのステークホルダーに対し、最も効果的な研究およびサプライチェーン解決策の優先順位をつけるために必要な知見を提供する。

本書は、アミノ酸が依然として大きなコスト要因である一方で、コスト面で決定的な障壁とはならないことを示している。生産規模の積極的な拡大、低コスト原料の活用、明確な規制要件に関する整備が進めば、細胞性食品産業はより手頃でスケラブルであり、かつ持続可能なタンパク質生産を実現できる好ポジションにある。

分析アプローチ

1. アミノ酸サプライヤー、細胞培地の設計者、細胞性食品生産者、加水分解物の専門家など、サプライチェーン全体のステークホルダーを対象とした構造化インタビューを通じて、データと知見を収集した。
2. 細胞性食品1 kgあたりの総アミノ酸 200~650 gを用いて、年間25万トンの細胞性食品を生産するために必要な総アミノ酸量および個別アミノ酸量をモデル化した。
3. 実際の見積価格に基づく食品グレードのアミノ酸の2価格帯と、複数サプライヤーのデータを集約して得た飼料グレードの1価格帯を用いて、培地1 Lおよび細胞性食品1 kgあたりのアミノ酸コストに占める割合を推定した。
4. バルクアミノ酸供給源として50種類の原料および加水分解物の可能性を評価し、発酵由来アミノ酸と競合するために必要な加水分解物の採算ラインとなる価格を算出した。

主要な知見

1 アミノ酸コストは従来の推計を大幅に下回る

食品グレードおよび飼料グレードのアミノ酸の実際の価格は、引用頻度の高い先行研究(Humbird 2021)で用いられた数値よりも最大で10倍低くなっている。業界が低価格帯の食品グレードアミノ酸を調達し、生産効率を高められれば、アミノ酸コストは細胞性食品1 kgあたり\$5未満にまで低下する可能性がある。これは、細胞性食品生産コストの約半分を占めていた従来推定値(約\$18~19/kg, Humbird 2021)から大幅な改善となる。商業化を想定した培地におけるアミノ酸コストの寄与は、処方と価格帯に応じて1 Lあたり\$0.02~0.17の範囲であった(図1)。これは、総培地コストが1 Lあたり\$0.20未満を達成できることを示唆しており、業界企業の最近の報告とも一致する。これらの最新のアミノ酸価格推計は、今後の技術経済分析および培地コストモデルの最も現実的な基準として活用されるべきものである。

シナリオ別FSF4培地におけるアミノ酸コストへの寄与 (\$/L)

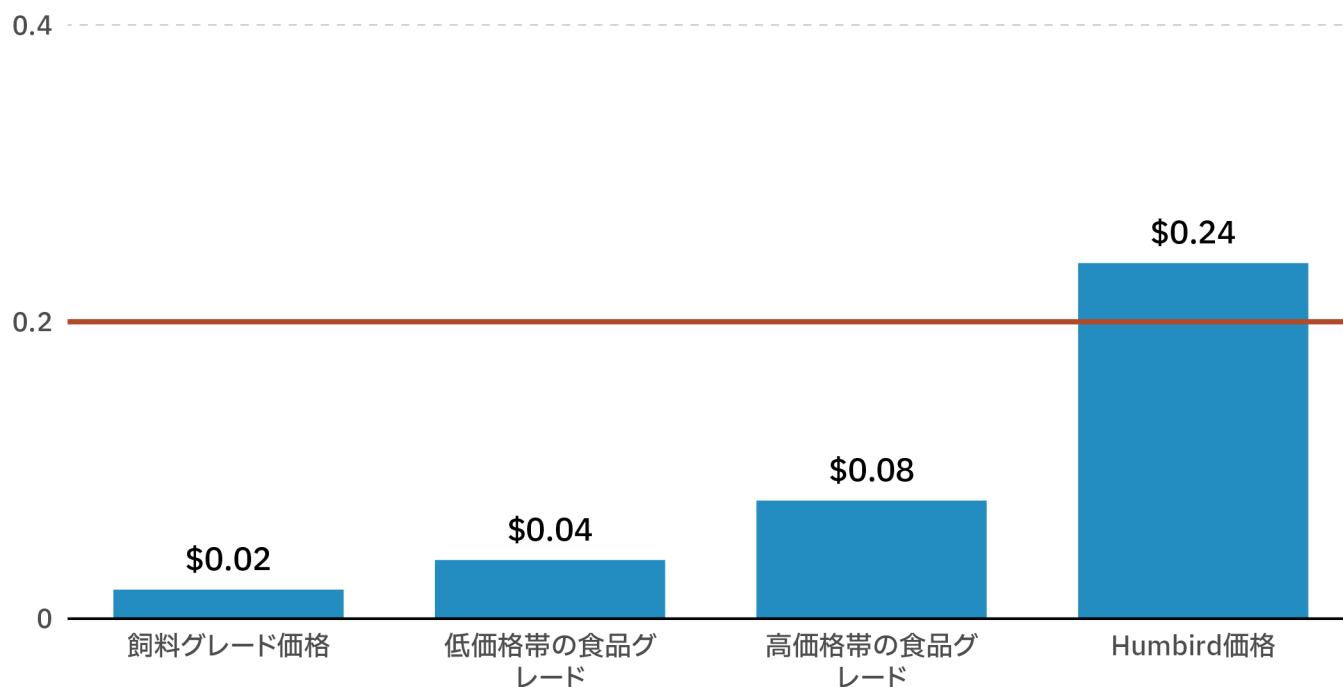


図1. 4つの価格シナリオにおける商用レベルの培地組成に対するアミノ酸総コストの寄与度。赤線は業界企業の最新報告を示す参照線として\$0.20/Lに設定。

2

アミノ酸需要予測に対して世界的に供給が逼迫する恐れがある

現在のアミノ酸供給量と培地製造能力は現状の需要には十分であるが、将来的には急速に逼迫する可能性がある。将来の細胞性食品生産量を25万トン/年(現在の世界の肉消費量の1%未満に相当)とした場合、総アミノ酸需要は年間約5万~16.3万トンに達する可能性がある。アルギニン、グルタミン、セリンはそれぞれ年間1万トンを超える需要が見込まれ、さらに8種類のアミノ酸でも少なくとも年間2,200トンの需要が予測される。アスパラギン、グルタミン、ヒスチジン、プロリン、セリン、チロシン、そして程度は低いもののロイシンとイソロイシンは、将来の需要が現在の生産量を上回る可能性があるため、供給ボトルネックのリスクが高いアミノ酸とされている。



3

加水分解物は、制約はあるものの長期的には供給源としての高い可能性を秘めている

加水分解物および原料は、グルタミン、アルギニン、シスチン、セリン、アスパラギンといった主要アミノ酸が一貫して不足しており、補完が不可欠である。さらに、単一の加水分解物で残りのアミノ酸を供給することは難しく、2種類以上の加水分解物のブレンドが必要となる可能性が高い。それでも、モデル化シナリオでは複数の加水分解物ブレンドが必要なアミノ酸の最大60%を供給できる結果が示されている。発酵由来アミノ酸と競合するためには、加水分解物ブレンドのコストを\$1.51~11.27/kgの範囲に抑える必要がある。バッチ間のばらつき、溶解性の問題、組成データの不足は、依然として普及の足かせとなっている。加水分解物への期待やR&Dでの試験は進んでいるものの、これらの課題が解決されるまでは、短期的に細胞性食品製品においてアミノ酸補給源として加水分解物を活用する可能性は低いと考えられる。

写真提供: Влад Варшавский / Adobe Stock

4

6種類のアミノ酸がコストと供給リスクの大部分を占めている

セリン、グルタミン、アスパラギン、ヒスチジン、プロリン、アルギニンの6種類は、使用量の多さ、価格の高さ、世界的な生産量の少なさ、製造の複雑さといった理由から、最も問題の大きいアミノ酸であることが明らかになった(図2)。中でもセリンは際立っており、培地中のアミノ酸総コストの約16~38%を占めている。さらに、これらのアミノ酸の多くは加水分解物で代替することが難しく、今後も発酵由来に依存する可能性が高い。長期的なスケールアップのためには、生産効率の向上、調達源の多様化、コスト削減に向けた戦略的な取り組みが不可欠である。

高リスクアミノ酸

	コスト要因	供給ボトルネックの可能性	加水分解物での代替困難
アルギニン	●		●
アスパラギン	●	●	●
シスチン	●		●
グルタミン	●	●	●
ヒスチジン	●	●	
イソロイシン		●	
ロイシン		●	
プロリン	●	●	
セリン	●	●	●
チロシン		●	

図2. 高リスクアミノ酸。本分析の主要結果をまとめたヒートマップの概要であり、コスト要因であること、供給が限られていること、加水分解物による代替が困難であることが重なるアミノ酸を示している。色が薄いほどリスクが低いことを示す。

行動提言

細胞性食品は、環境負荷を大幅に軽減し、公衆衛生を改善し、従来型の畜産がもたらす倫理的・社会的影響を軽減することで、タンパク質生産を変革する可能性を持っている。従来製品との価格競争力の確立(価格の同等性)を実現することは、こうした公共の利益を社会全体で実現するための重要なステップであり、細胞性食品の可能性を最大限に引き出すためにはアミノ酸のコストと供給課題に対処しなければならない。そのためには、業界全体が一丸となって取り組むことが求められる。

以下の行動提言は、アミノ酸サプライヤー、研究者、細胞性食品企業、政策立案者、非営利団体が細胞性食品産業の発展と、安定的で低コストかつスケラブルなアミノ酸サプライチェーンの構築に向けて取るべき具体的な行動をまとめたものである。

アミノ酸サプライヤーへの提言

1. 世界の細胞性食品生産の動向を積極的に把握し、増大するアミノ酸需要、特にリスクの高いアミノ酸(アスパラギン、グルタミン、ヒスチジン、プロリン、セリン、チロシン等)へ対応できるよう見越した生産能力を計画する。
2. アルギニン、アスパラギン、グルタミン、ヒスチジン、プロリン、セリン、チロシンなど、高リスクアミノ酸の発酵生産の効率化と収率改善を図る。
3. 細胞性食品企業や規制の専門家と連携しながら、用途に適した「細胞性食品グレード」アミノ酸原料規格の共同策定を支援し、エンドトキシン閾値、重金属、微生物汚染、その他懸念される不純物に関する基準の標準化を推進し、文書化および規制審査の効率化を図る。
4. アミノ酸の生産量に関する情報を共有する。細胞性食品に適した多くのアミノ酸の実際の生産量は現時点で十分に把握されておらず、どのアミノ酸が供給制約を受ける可能性があるかを見極めていくためにはより精度の高いデータが必要である。
5. 実際の食品グレード・飼料グレードのアミノ酸生産に関する最新のライフサイクルインベントリ(LCI)データを共有するとともに、再生可能エネルギーの導入により環境負荷の低減を図る。

学術研究者への提言

1. 細胞性食品およびグルコース・グルタミン・その他アミノ酸などの主要基質の飼料転換率(FCR)をより正確に把握するために、商業化レベルのバイオプロセスから得られる実証データを開発・公開する。
2. 有望な加水分解原料ブレンドの探索範囲を絞り込み、実験的検証につなげるために、本レポートの加水分解物モデリングフレームワークを活用する。
3. 加水分解物を発酵由来アミノ酸と比較してコスト競争力のあるアミノ酸供給源(\$ 1.51~11.27/kg 加水分解物)とするための加水分解プロトコルを開発する。
4. 培地最適化に向けてAIおよび機械学習(ML)ツールを活用できるよう、加水分解物の組成および性能に関するオープンアクセスのデータセットを構築する。
5. 食品グレード・飼料グレードのアミノ酸生産に関する環境影響データを更新し、将来のLCAモデルに統合するためにアミノ酸サプライヤーと連携する。
6. 発酵収率と細胞性食品の飼料転換率を改善することで、アルギニン・アスパラギン・グルタミン・ヒスチジン・プロリン・セリン・チロシンなど影響の大きいアミノ酸のコスト負担を軽減するために代謝工学・細胞工学戦略の研究を推進する。

細胞性食品企業への提言

1. アミノ酸サプライヤーと連携し「細胞性食品グレード」のアミノ酸基準を策定するとともに、用途に適した品質基準を確立することで、文書整備および規制対応の効率化を図る。このような取り組みを行わずに、より高グレードの原料に依存する場合、イノベーションを不必要に制約し、商業規模でのコスト競争力のある生産を妨げる可能性がある。
2. 業界全体でのモデリング精度を向上させ、サプライチェーンの計画立案を円滑にするために、分化培地を含む商用レベルの培地処方を開示する。
3. 細胞性食品の飼料転換効率(FCR)や、グルコース、グルタミン、その他主要なアミノ酸といった基質の利用効率を明らかにするために、商業化レベルのバイオプロセスの実証データを公開する。
4. 長期的なコストおよびサステナビリティの向上を図るために、加水分解物と発酵由来アミノ酸を組み合わせたハイブリッド培地戦略を模索する。
5. 供給リスクの高いアミノ酸に対する明確かつ集約された需要シグナルを提示し、業界全体で連携して「共同調達戦略」を構築する。これと並行し、細胞性食品グレード規格の策定を進めることで、サプライチェーン全体が共通の期待値のもとで運用される体制を確立する。

政府・政策立案者・規制当局への提言

1. 規制審査を効率化し、費用対効果の高い調達を可能にするために、「細胞性食品グレード」アミノ酸規格の策定と承認を支援する。
2. 補助金、税制優遇、低利融資プログラムなどを通じて設備投資(CapEx)負担のリスク低減を図り、国内アミノ酸製造振興のためのインセンティブを整備することで、細胞性食品分野における国際的リーダーシップを確立する。アミノ酸製造の国内回帰は、特定地域に集中した国際サプライチェーンへの依存とそれに伴うリスクを低減するとともに、地域のバイオマスや原料を活用したアミノ酸発酵を通じて、新たな雇用や経済機会の創出にもつながる。

非営利組織・業界団体への提言

1. 事業停止したスタートアップから培地組成やその他の知的財産(例:細胞株、バイオプロセスデータ)を取得し、業界全体の透明性を高め、モデリングの精度向上を支援するオープンソースとして公開する。
2. 加水分解物ブレンドの検証、原材料調達・加工の最適化、機能特性評価を行うプロジェクトへの資金提供を通じて、競争前段階のR&Dを促進する。
3. 「細胞性食品グレード」培地原料規格の策定と普及を推進し、業界の期待と規制ニーズの整合性を図るためにステークホルダーを招集する。
4. 将来のモデリングおよび投資指針とするために、アミノ酸生産量、加水分解物性能、環境影響に関する共有データベースの構築を支援する。