

将来有望な2,3の蛋白食品について

大阪大学工学部 吉田敏臣

1. はじめに

全人類に十分な食卓を用意するために食糧供給を増加させることは政治的、社会的、経済的な障害がある。そして人口の増加と共に目を追ってむつかしくなりつつある。食糧供給問題の文明の維持に対する重要性を完全に認識してはじめて、この問題の解決に対して世界的な努力が生まれるであろう。

しかしながら、世界のこの問題に対する認識は十分ではなく、人類が自身で満足に養えることができるまでには次の4つのことを成就しておかねばならない。

1) 化学的(有機化学的、光化学的、電気化学的、生化学的)または微生物学的合成法によって食糧、飼料を実用的、経済的に製造すること。

2) 効率の高い新食用生物(動物、植物、あるいは微生物)を育成すること。

3) 食糧生産の場としての海洋の高度の利用(食用海産生物の人為的増殖拡大とこれに適應する飼料の発見、発明と実用、経済的製造)

4) 生物化学工学、食糧工学、食物調理学などの進歩と応用による食品の利用性、貯蔵性、運搬性の向上および食品の栄養強化、風味の増加を実現すること。

本稿ではこれらの問題点のうち新食用生物の開発に関するトピック的なものを2,3扱ってみたい。

2. 食糧供給の現状と将来

最近、食糧工業ならびに関連産業の進歩は政治、経済の発展に伴って著しいものであり、われわれに種々の豊富な食品を供給し、周囲の食糧事情は全く良好であるかのごとき感がある。しかしこのようなめぐまれた食糧供給の環境におかれているのは欧米諸国そのほか先進国に限られており、それらの地域に食糧が偏在しているということにはかならない。実は今日すでに世界の食糧事情が不満足な状態にあって、インドそのほかの低開発地域などでは餓死者すらだしている。

ところで世界人口は図1に示すごとく、人類史上、未曾有の増加のカーブを描いており21世紀初頭には60億を越すと想像される。人口は幾何級数的に増加するが食

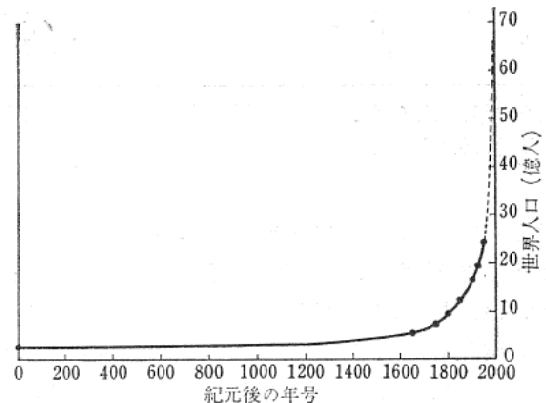


図1 紀元後の世界の人口増加

糧は算術級数的に増加する、というマルサスの警告があるが、未来の食糧事情ははなはだきびしいものである。国連のF.A.O.はこの対策に非常な苦心を払っており、先進国の協力を要請し、それに応じて先進国が多大の努力を払っている。また後進国指導という面から UNESCO 主催による「応用微生物学の世界的影響に関する国際会議」が昨年、エチオピアにて開催されたが、そこにおいても食糧問題が中心的課題になっていた。しかしながら、このような多大の努力にもかかわらず、今後の人口増加に対処することは非常に困難になってきているようである。新耕地の開拓、農業技術の改善などによって、1953年から1960年にかけて人口増加率に等しい7%増産を達成したが、これには限度があり今後食糧のなかでも生命のもととなる蛋白質食糧の不足は大きな問題となる。このような観点から、地球上における蛋白資源を有効に利用する必要があり、またあらゆる手法による蛋白資源の増産あるいは活用を考えねばならない。

欧米では動物性蛋白が主たる蛋白源として利用されてきたが、その代用品として植物性蛋白を考えており、手始めとして蛋白含量の高いあらゆる種類の大豆食品が考慮されている。例えば、油抽出工業らの発達に派生して、牛乳に代るものとしての豆乳、豆腐などの利用が考えられており、ブラジルなどが大豆の一大供給地と有望視されている。そのほか発展性のある高蛋白添加原料とし

表1 油糧種子の世界の産高*

品 目	1年の産高	平均蛋白量**	平均有効蛋白量
	千トン		千トン
大豆	27,600	38%	10,500
ピーナツ	13,900	25	3,470
綿 実	15,900	20	3,180
ゴ ム	1,750	25	437
ヒマワリ	1,400	20	280
計	60,550		18,867

*1958年, F. A. O. 農業経済機関誌の月例報告による
**窒素×6.25

て魚粉のほか、綿実、ピーナツ、ココナツ、ヒマワリなどの油糧種子がある。これらの油糧種子の生産高からF. A. O. の調査により計算された有効蛋白量を表1に示す。この表から5種類の油糧種子だけの有効蛋白量は1,887万トンであり、もし油抽出後蛋白が有効に使われるとすれば、今後の人口増加に対してあと30年くらいもちこたえられる蛋白量を確保することができる。

これらの新しい蛋白源の利用の問題としては、消化性、栄養素のバランス、毒性、感触などがある。しかし精神的な研究によってそれらの大部分は解決されつつある。しかし食べ物に対する嗜好性という保守性は根強いもので新しい食品の採用にはかなりの抵抗が考えられる。したがって例えば他の食品の蛋白強化という形で添加するなどの方法を講じなければならない。

上述のような食糧生産方式はいわば土に依存したもので、おのずから限界がある。土を使わずに食糧を生産するという形をとるものとして海を利用する方法があり、海産生物の人工生産は魚類の人工養殖など研究が進められており、今後の発展が期待される。一方空間を利用するという工場規模での単細胞蛋白源の生産ならびにその食品添加物としての応用が広く行なわれつつある。

3. クロレラ蛋白

土を使わずに水と空気と光さえあれば、ネズミ算式に繁殖するクロレラの培養は注目を浴びており、現在すでに生産、実用の段階に至っている。乾燥物の50%以上も蛋白質であり(表2参照)そのアミノ酸組成(表3参照)は極めて優秀で、ことに成長に必要な必須アミノ酸で、小麦粉などに不足しているリジンが豊富な上に葉緑素、ビタミン類の含量も多い。そしてその利用は第1次世界大戦時ドイツで取り上げられて以来種々検討されている

表2 クロレラの主要成分(乾燥重量基準の百分率)

	粗蛋白	粗脂肪	炭水化物	粗繊維	ミネラル
クロレラ	53.76	6.31	19.28	10.33	10.31
白 米	7.48	0.94	90.60	0.35	0.72
小 麦	10.87	2.32	82.65	2.42	1.85
大 麦	11.57	2.20	77.89	5.74	2.78
大 豆	38.99	19.33	30.93	5.11	5.68

表3 クロレラの必須アミノ酸含量
(g/100g蛋白)

	クロレラ	酵 母	カゼイン
リ ジ ン	10.5	8.0	8.0
チ ロ シ ン	—	3.4	5.8
トリプトファン	1.5	1.2	1.3
フェニールアラニン	8.6	2.9	5.4
シ ス チ ン	0.8	1.1	0.4
メ チ オ ニ ン	2.3	2.8	3.1
ス レ オ ニ ン	3.7	5.1	4.3
ロ イ シ ン	6.6	6.8	10.0
イ ソ ロ イ シ ン	6.4	5.8	6.6
バ リ ン	6.7	5.4	7.4

が、その細胞壁が強いため消化吸収されにくく、そのままでは食糧とはなりえない。

最近その強靱なクロレラの細胞膜を破碎し、無味、無臭、白色の蛋白を抽出単離し、クロレラに包含されている有効成分を利用する方法が確立され、クロレラの食糧化が実現されたと満田博士¹⁾は報告している。この方法の要点はクロレラを自己消化するか、または-30°C附近で凍結させ、急激に+10°C附近に上昇させて凍結融解を行う。つぎに水を加えて懸濁液を調製し、ブタノールをこれに滴下し、0.4容まで加えると、葉緑素その他の色素、リピット類はブタノール層に移り、水溶液にクロレラ蛋白が溶存することになる。そこで酸を加えてpH 3~4.5にすると簡単にクロレラ蛋白が調製される。このようにして調製した無味、無臭、白色の消化率の良好なクロレラ蛋白を小麦粉に混入すれば必須アミノ酸のリジンの強化された栄養価の高いパン、麺類として摂取されるようになる。

4. 微生物蛋白

第2次世界大戦時、ドイツにおいて、酵母の利用が動物植物蛋白源の供給不足の一解決策として検討されたが、それ以来微生物の食糧、飼料としての大量生産が注目されるようになった。酵母はアミノ酸のメチオニン、シスチンの含量が幾分不足しているとはいえ、蛋白やビタミンのB化合物の価値ある原料となってきた。酵母の生産ならびに利用は先進国においては大部分動物飼料の方向をとってきた。特に米国においてはその生産の1つの目的が工業廃産物の消費にあったためその傾向が強い。

しかしこれらの微生物は試験的ではあるが、炭水化物に比らべて蛋白質が不足している地域での栄養不良改善に用いられている。

酵母以外の微生物もまた補助的な蛋白源として考えられており、その中には廃糖蜜、さつま芋粉、とうもろこし澱粉のような余剰炭水化物に窒素の無機塩を加えて蛋白合成を行う不完全菌の一群がある。

酵母培養の概略を述べると0.5~1.0%炭素源(糖蜜またはパルプ廃液を前処理したもの)にトルラ酵母(直径4~9 μ)を2%濃度に懸濁し、窒素源として硫酸アンモニウム、リン源として過リン酸塩あるいは第2リン酸ナトリウム、カリ源として塩化カリを添加し、pH 4.2~5.6で30°C附近で激しく通気攪拌する(培養容器に空気をふき込みながら、気液相をかき混ぜて液相に酸素を溶け込ます方法で、深部培養法—submerged culture—という)。通常5~6時間で炭素源の40~50%は利用され、酵母は3~4倍に増殖する。酵母を遠心分離し、クリーム状となし蒸気加熱ロールで乾燥する。南アフリカで既に実施している一例によると、食用酵母1 tonを得るために5 tonの糖蜜、25%アンモニア水0.55~0.6 tonを必要とし、1 kgの生産には約160円程度である。この酵母から酵母蛋白を10~12Mの尿素溶液で浸漬し抽出、透析膜外に除去して沈降せしめる。この蛋白をさらに精製すると酵母臭のない淡黄色の消化率の高い蛋白が調製される。

このような微生物生産において最近1つの話題になっているのが石油発酵である。

1963年 Société Française de Pétrole B. P. (British Petroleum) の Champagnat らによって発表されたガスオイルからの酵母菌体の生産は石油蛋白の工業的生産に正面から取り組んだものとしてまさに画期的であった。それを契機としてアメリカの Esso Research, Gulf Oil, あるいはイギリス本国の B. P. なども同様の研究を行っていることをつぎつぎと明らかにし、最近ではソ連、中国、チェコなどでも工業化の準備を進めている。アメ

リカ、イギリス、フランスあるいは日本など、石油蛋白の生産に関する研究、開発の進んでいる自由経済諸国では現在のところ食糧あるいは蛋白質の不足はほとんど問題となっていないので、それらの国で石油からの菌体生産を企業化した場合、製品の主用途は人間の食糧ではなくさしあたり動物の飼料であろうというのが一般的な見方である。

石油酵母を飼料として市場にだす場合、直接比較の対象となるのは、パルプ廃液あるいは廃糖蜜などの炭水化物を原料として従来から生産されている飼料酵母である。表4,5にその一例を示すが、SF/BP (Société Française de Pétrole B. P.) の石油酵母は脂肪含有量が高く、アミノ酸組成においてリジン、スレオニン、ヒスチジンなどに富んでいるのが目立つが、ソ連の石油酵母とパルプ廃液酵母との間にはほとんど差異は認められず、全体としての栄養価に大きな差異があるとも考えられない。また、消化率

表4 石油酵母とパルプ廃液酵母との菌体成分 (g/100g 乾燥菌体量)

成分	石油酵母		パルプ廃液酵母
	ソ連	SF/BP	
粗蛋白	53.0	43.6	51.0
粗脂肪	1.5	18.5	1.1
可溶性無窒素物	36.5	21.9	40.2
灰分	9.0	4.4	8.5

表5 石油酵母蛋白とパルプ廃液酵母蛋白の必須アミノ酸組成 (g/100g 蛋白)

アミノ酸	石油蛋白		パルプ廃液蛋白酵母
	ソ連	SF/BP	
ロイシン	7.0	7.0	8.8
イソロイシン	5.2	3.1	8.6
バリン	5.1	8.4	6.6
スレオニン	5.7	9.1	5.3
メチオニン	1.1	1.2	0.8
シスチン	—	0.1	1.0
リジン	6.7	11.6	6.8
アルギニン	5.2	8.0	7.0
ヒスチジン	2.0	8.1	2.6
フェニールアラニン	4.0	7.9	6.4
トリプトファン	2.3	1.2	1.4

は80~90%と両者ともほぼ同様である。コスト的には原料費の差だけ石油酵母のほうが不利になるだろう。現在、飼料酵母の価格は80円/kgくらいで、fish meal (55~65円/kg, 蛋白含量16%)あるいは大豆粕 (35~40円/kg, 蛋白含量40%)と市場においても競合しており、より割高な石油酵母にとって市場の開拓は容易でない。

これは食糧の比較的豊富な先進国における評価であるが、将来蛋白食糧源の不足することは明らかであり、石油蛋白の重要性は大きくなっていくと思われる。

また、前述のごとく後進国ではすでに食糧危機に直面しており石油酵母の食品としての利用が真剣に考えられている。たとえばインドではインド石油協会が中心となってパイロットプラントの建設を急ぎ石油酵母を米、麦などの食糧にまぜて食用に供するべく準備をすすめており、クリシュナン博士は3年の猶予が与えられれば食糧に利用できるだろうといっている。実際米国でも石油会社の Standard Oil と Nestle が共同してこの問題にとりこんでいるのもその意欲のあらわれである。Gulf Oil 社の研究所では乾燥菌体を用いてクッキー、スープなどの試作も行なっている。

5. き の こ 蛋 白

いま一つの食糧資源としてきのこがある。このきのこというのは植物分類学的にいうならば、他の植物性食品がいわゆる高等植物に属するのに対して菌類に属するもので比較的、酵母、細菌やかびに近い。学名でいう Basidiomycetes の大部分と Ascomycetes の一部であり、古来人類に親しまれており、食用に供せられているものが多く、現在林産業の一部門を占めるとともに食品工業上重要な資源となっている。きのこが食品として好まれる第一の原因は嗜好性および呈味性であるが、その他ビタミン、アミノ酸に富む栄養食品であることも認められている。ところで、古くから「きのこ」とか「たけ」と呼ばれ親しまれているが、これは人類が直接食品として利用した最初の菌であり現在本邦で可食菌種として百数十種が認められている。その中で椎茸、松茸を初め、榎茸、シャンピニオン(マッシュルームあるいは西洋松茸)白木茸、ナメコなどのきのこが林産業の一部門として実用的に栽培され、企業としてなりたっている。東洋人は西洋人に比べて、きのこに対する認識が深く、利用できるきのこを数多く知っており、上述の我国の例のように企業的に栽培している種類も多い。西欧においては欧州人が米国人に比してきのこに対する認識が深く、スイスでは野生種53種の販売が認められており、チェコでは64種、ドイツでは50数種、フランスでは30数種が販売されている。これらはいずれも一定の販売規則によって取

表6 乾燥きのこの生産 (1962)

国	きのこ	生産高 (千ポンド)
日本	<i>Lentinus edodes</i> (椎茸)	8,000
ロシア	種々のもの	4,000
ユーゴスロバキア	<i>Boletus edulis</i> (やまどりたけ)	1,000
チリー	<i>Boletus luteus</i> (ぬめりいぐち)	600
イタリア	<i>Boletus edulis</i> (やまどりたけ)	500
フランス	<i>Boletus edulis</i> (やまどりたけ)	240
アメリカ	<i>Agaricus bisporus</i> (はらたけ)	95

り締められている。一方米国ではわずかにシャンピニオンが人工栽培され生または缶詰めで利用されているだけで、輸入されているきのこが多い。表6に世界のきのこの生産高を示す資料の一例を上げる。

現在世界で大量に人口栽培されているきのこの両雄は椎茸とはらたけであり、椎茸は西洋人においても関心が高められており、その呈味性、薬効の優秀性を認められている。

一般にきのこによばれているのはそのライフサイクルの一部で子実体と称する生殖器官であり、他に高等植物の根のような立場にあり、土の中や椀木(適当な処理を施すことによってきのこの生えるようにした木材で培養基である)の皮下にまん延している栄養細胞がある(図2参照)。この栄養細胞は多数の細長い細胞がつながってできている菌糸体といわれるもので子実体も大部分この菌糸体の集まりであるが完全に組織化されている。このような菌糸体という細胞形態をとるものを糸状菌という。

前述の深部培養の技術は *Penicillium crysogenum* という糸状菌から産出される抗生物質ペニシリンの大量

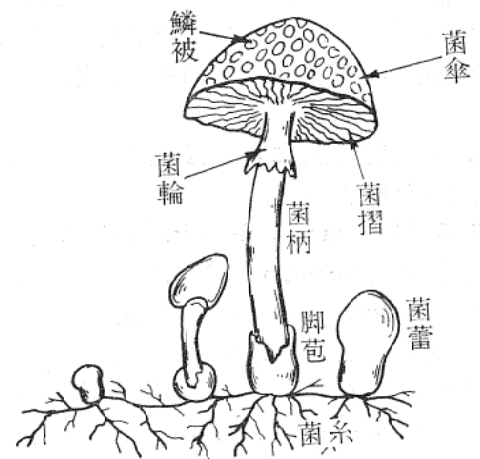


図2 茸の菌糸体

生産に対する応用を契機として発達したものである。同じく糸状菌の一種であるきのこ類の菌糸体の培養にこの手法を使って大量に生産することができる。深部培養によって生産される菌糸体と子実体とは基本的には同一のものであり、子実体の代用品として利用できる可能性が十分あることならびに、廉価な低級基質から容易にかつ短期間に大量生産が可能である（技術的にかなり進歩している応用微生物工業の手法を活用することができる）などの利点を考慮するならば深部培養におけるきのこ菌糸体の増殖のより詳細な研究はそれを行うに値するものである。深部培養菌糸体を直接きのこの子実体の代用品として利用することは、歯ごたえや視覚的な奇異さの問題が残っている。しかし粉末やスープにして添加蛋白源として使用することは実現化の段階にさしかかっている。また培養方法を工夫することによって球形の菌糸塊を作るなど行なって歯ごたえや視覚的な要求をある程度満たすことも可能である。酵母、細菌などの微生物およびクロレラに比らべて呈味性ならびに香りの良好なることに加えて食経験のあるきのこの子実体と同じものであるという受け入れ易さから非常に有望な蛋白食糧源である。

1948年、Humfeld がシヤンピニオンの菌糸体の深部培養を試みたのが、きのこの深部培養の嚆矢である。彼は *Agaricus campestris* を合成培地（組成として天然複合物の入っていないもの）、アスパラガス汁、なし廃液と米糠抽出液等の天然培地での深部培養に成功しており、蛋白豊富（45%蛋白）な食糧、飼料となることを示唆している。

きのこ（主に *A. campestris*）の培養に用いる安価な天然資源として柑きつ類搾り汁、さとうきび廃液、ビート廃糖蜜、皮革廃液、きくいも搾り汁、とうもろこし廃液、亜硫酸パルプ廃液などがあるので大規模の生産はいつでも可能である。

Block et al (1953) によると柑きつ類搾り汁による *A. blazei* (マッシュルーム) の深部培養菌糸体のアミノ酸の定性試験を行ないアスパラギン酸、グルタミン酸、セリン、グリシン、スレオニン、アラニン、チロシン、リジン、アルギニン、ヒスチジン、プロリン、バリン、メチオニン、あるいはロイシンあるいはイソロイシン、フェニールアラニンを認めておりビタミン含量を *A. campestris* の子実体、酵母、小麦と比較している。

また Reusser (1958) は種々のきのこの深部培養菌糸体について蛋白含量、脂肪含量を比較して、なかでも *Tricholoma nudum* (むらさきしめじ) を廃糖蜜培地で培養した場合が一番蛋白含量が高く54%になり、同じ菌を合成培地で培養した場合、もっとも脂肪含量が高く32%になることを報告している。

Robinson (1959) が *Morchella esculenta* (あみがさたけ) のビタミン含量を検討しており、サイアミン、リボフラビン、ナイアシンに富むと報告している。

筆者が椎茸について市販の子実体と深部培養菌糸体の菌体内成分を検討した結果を一般分析、アミノ酸、有機酸、核酸含有量を表7~10に示す。子実体と深部培養菌糸を比較してみると後者は前者に勝る栄養的価値を示している。蛋白含量などは実に子実体の数倍になっており(表7参照)、そのアミノ酸組成(表8参照)をみてもグルタミン酸、アスパラギン酸、フェニールアラニン、リジンなどに富んでおり、各アミノ酸含有量も子実体にくらべ

表7 椎茸の主要成分
(乾燥重量基準の百分率)

	深部培養菌糸体	子実体	
		生	乾燥
粗蛋白	52.81	18.13	19.12
粗脂肪	3.39	3.19	3.94
全糖	20.49	55.50	49.58
粗繊維	10.61	12.30	11.89
灰分	6.83	4.52	8.89

表8 椎茸のアミノ酸組成 (g/100g 蛋白)

アミノ酸	深部培養菌糸体	子実体	
		生	乾燥
アスパラギン酸	4.08	2.38	1.88
スレオニン	1.85	0.80	0.78
セリン	2.63	0.77	1.10
グルタミン酸	4.90	2.72	2.21
プロリン	2.39	0.61	0.92
グリシン	2.27	0.67	0.79
アラニン	3.56	0.81	0.86
バリン	2.17	0.67	0.65
イソロイシン	1.57	0.57	0.54
ロイシン	2.87	1.00	1.27
チロジン	2.23	0.77	0.93
フェニールアラニン	4.16	1.86	2.66
リジン	9.37	2.07	1.62
アルギニン	2.57	0.49	0.64

て深部培養菌糸体の方が高い値を示しており、後者のそれは前者の約2~5倍に達している。すなわち穀類に不足し易いリジンの豊富なことから蛋白食品としてポテンシーの高いものである。また有機酸含量(表9参照)は少し子実体に劣るようであるが、大豆、米、小麦、リンゴ、ミカン、ブドウ、コンブなどの他の食品に比して高いものであり、呈味性の点からもまた食品添加物としてpHの安定性に優れているといえる。核酸含量(表10参照)を比較してみると深部培養菌糸体のリボ核酸(RNA)は子実体の2倍以上である。最近話題となっているが、椎茸の旨味の主要因となっている呈味力の強力な5'-グアノシンモノフォスフェイトを含めて5'-モノヌクレオチド(RNAの構成単位)の含量は子実体乾燥物より多い。またRNAからこの5'-モノヌクレオチドが分解生成されるが、RNA含量が子実体よりも高く菌糸体の適当な処理(微アルカリpH8-での菌糸体の自己消化)によって5'-モノヌクレオチドが蓄積されるので、成分的にみると深部培養菌糸体は子実体に優るとも劣らぬ食品価値を有している。

表9 椎茸の有機酸組成 (mg/100g 乾燥菌糸体重量)

有機酸	深部培養菌糸体	子実体	
		生	乾燥
酢酸	68.1	52.9	126.0
フマル酸	299.0	173.4	781.8
α-ケトグルタル酸	33.5	6.4	69.7
コハク酸	183.3	85.8	142.5
乳酸	9.6	8.6	44.2
ピログルタミン酸	136.0	380.5	426.7
グリコール酸	8.5	87.8	135.6
リンゴ酸	675.6	1373.2	1289.5
クエン酸	359.8	205.9	364.2
イソクエン酸	210.9	43.6	46.8
未知酸	33.7	61.6	43.1
総有機酸量	2018.0	2479.7	3464.1

表10 椎茸の磷化合物組成

料 試	全 磷 [mg-P] g-菌体	冷 酸 溶 性 磷 画 分 の 磷		RNA 画分の磷		DNA 画分の磷		RNA含量* 乾燥菌体量 に対する%
		[mg-P] g-菌体	全 磷 に 対する%	[mg-P] g-菌体	全 磷 に 対する%	[mg-P] g-菌体	全 磷 に 対する%	
深部培養菌糸体								
菌糸塊状菌糸体	13.6	5.18	38	2.59	19	0.46	3.4	2.73
繊維状菌糸体	12.1	3.91	32	2.38	20	0.46	3.7	2.50
子 実 体	5.44	2.11	38	1.18	21	0.45	8.0	1.24

* RNA含量は黒岩の記載になる平均分子量から計算した。

6. お わ り に

新しい食品の可能性として従来の農業的な生産方式とは異なった、いわば土を使わないというような形で生産される蛋白食品を例に上げてみた。これらを比較してそれぞれ得失はあるが、おおまかにいって蛋白含量はほぼ優劣はつけがたく、また穀類に不足しがちであると注目されているリジンも豊富に含まれていることをそれぞれ主張している。クロレラは葉緑素のあることからある場合には利点となるだろうし、酵母は増殖速度が大きく生産性がよい。きのこは現段階では一般的にいって酵母より増殖速度は小さいが、食品としてなじみ易いとか、呈味性がより期待されるなどの利点をもっている。いずれにしても一長一短があるので、ケースバイケースで応用

されるだろう。

本稿で扱ったのは農業的生産に比して進んだ形とはいえ生物反応による食品生産の例であるが、より進歩した形として合成法がある。比較的構造の簡単なものはすでに合成法による生産が行なわれているが、将来蛋白食品も合成法によって安価にかつ能率的に生産されるだろう。しかし食品の場合、従来の食生活の感覚を尊重するため人工牛肉、人工魚肉の研究がなされているように、かなり強い保守性があるので、その点にも注意しなければならないだろう。

文 献

- 1) 満田：食品と科学，6,20(1964)
- 2) 高橋：食品工業，11 No.2, 19(1958)
- 3) 吉田，寺本：醸酵協会誌，投稿中(1968)