[農化 第 50 巻, 第 3 号, p. R 105~R 114, 1976]

SCP (微生物たん白) 開発の現状と問題点

蓑 田 泰 治

(東京大学農学部)

The Present Situation and the Future Perspective of SCP Development

By Yasuji MINODA

Department of Agricultural Chemistry, Faculty of Agriculture, The University of Tokyo

SCP 開発の背景

食糧, 特にたん白質の世界的窮乏が騒がれたのはまだ記憶に新しいが, 昨今では世界の食糧増産によって近くまた, 食糧が生産過剰になりかねないような論議もみうけられる。過渡期的にはそのようなことがあり得るかもしれないが, 長期的な展望では, 世界人口の急激な増加にたん白の生産が追いつかないであろうことは, FAO をはじめとする国連機関がすでにはっきり警告している。国連統計年鑑によれば, 1970 年の世界人口は 36 億 3000 万人であったが, その年のたん白の供給は穀物から 4000 万トン, 豆類から 1500 万トン, 動物から 2500 万トン, 合計 8000 万トンで, 1 人 1 日 68 g のたん白を供給するには, すでに 1000 万トン不足であり, この不足は世界人口の 2/3 を占める開発途上国にしわよせされている。1971 年には人口は 7600 万人増え, 1980 年には 44 億 5600 万人, 2000 年には約 65 億になるというから, これを充足するたん白を確保するのは, なみ大低ではないことは明らかである。しかも, たん白の生産消費が地域にかたよっていることが, たん白不足に拍車をかけている。

先進工業国では, 次第に動物性たん白を多くとるようになってきているが, 動物性たん白 1 トンをつくるのに, プロイラーのように効率のよいものでも, 餌として植物性, または安価な動物性たん白 3~4 トンを要し, 牛では 10 トンも与えなければならない。このようなたん白の偏在のために, 現在でも開発途上国では發育不全, 早死になやんでいると伝えられている。

この深刻な問題の解決を目ざして, 国連は FAO, WHO, あるいは UNICEF が 1950 年代から活動を開始

したが, 1955 年, これら 3 機関共同で PAG (Protein Advisory Group of United Nation Systems) をつくり, 各国から各分野の専門家を集めて, たん白のすべてに対して討議がなされている。食糧の増産にはもちろん農業の振興が基本であって, 緑の革命ということが強くいわれた。しかし, 農業技術の向上, 品種の改良, 耕地面積の拡大といっても, たん白の飛躍的増産に結びつけるのは容易でないようである。水産業の振興も資源の枯渇, 水質の汚染から悲観的であり, 養殖, 畜産も餌料がなければ成り立たないから, 結局たん白の増産にはならず, 開発途上国ではむしろたん白の浪費だと反対している。

このようなわけで, PAG はたん白危機への解決策としてリジン, メチオニンなどによる穀類のアミノ酸強化, 油糧種子の食用化, 濃縮魚類たん白の実用化, 緑葉たん白の利用を提案し, 微生物のたん白の利用をその次に位置づけていたが, 1970 年, ニューヨークで行なわれた PAG の第 17 回会議では, 「もはや微生物たん白以外に頼るべきたん白資源をわれわれはもたない。数年前にわれわれが予想した時期よりもずっと早く, われわれはその実用化を迫られている」として, 動物の飼料としてのみならず, 人間の食糧としてその製造, 栄養価値, 安全性, コスト等について早急に検討する必要を強調した。

人類が微生物を口にしたのは, いまにはじまったことではなく有史以前からである。酵母を加えてパンをふくらますことは古代から行なわれており, 特に, 日本人は甘酒や納豆として, かびやバクテリアを食してきた。自然界の食物連鎖からいっても, 魚は微生物を餌としてお

り、牛は胃の中で微生物を繁殖させて栄養としている。微生物を培養して直接食料や飼料にしようとする試みは第 1 次大戦下、ドイツで木材を酸で糖化し、食用酵母を生産、人工肉をつくったのが始りというが、わが国も戦後、亜硫酸パルプ廃液から酵母を製造して飼料に用いてきた。これはまた廃液の BOD を除去し、水質の汚染防止にも役立った。しかし、微生物たん白が世界的な注目をあびるようになったのは、1963 年 Société Française de Pétrole BP の Champagnat という人が、ガスオイルから酵母を製造するプロセスを発表して以来である。これは、北欧市場向けの燃料用軽灯油が厳寒期に流動性が悪くなるのを防ぐため、酵母を培養して固化しやすいノルマルパラフィン分を食べさせて脱ロウを試みたところ、ここにできる酵母が栄養価値が高く、飼料としてよいとの発表で、たまたま世界的なたん白不足が予想されたときでもあり、各国でいわゆるこの石油たん白が開発されることとなった。その後、原料はノルマルパラフィンのみならず、天然ガスや石油化学製品であるメタノール、エタノールなどから酵母やバクテリアを用いて、たん白製造法がつつぎと確立された。わが国でも、1960 年頃から研究が始められたが、従来から世界のトップレベルにあった微生物工業技術を生かして、いくつかの企業がいち早く製造法を確立した。しかし、石油たん白の安全性に対する社会的コンセンサスが得られないため、実用化はストップしたままになっている。もちろん安全性については十分な検討が必要であるが、指摘されている発ガン物質や重金属は、ふつうの食品中の含有量以下にする技術は十分確立されている。また微生物の毒性物質やその病原性については詳しい試験が必要であるが、そのような試験をすることすら反対されている日本の現状はまことに残念である。

わが国は世界有数の食飼料輸入国で、大量の食飼料を輸入しているが、もしこれが停止すれば、国民 1 人当たり 1 日 45 g の蛋白しか供給できないという。しかも世界のたん白の貿易市場は意外に小さく、約 700 万トン程度とされている。一方、わが国は世界の海に魚を求めてたん白を補給しているが、これも世界の厳しい目にさらされていることが報ぜられている。にもかかわらず、なかば心理的ともいえる理由で安全性の検討すらストップするのは、経済大国のエゴイズムとの非難も食糧欠乏国から起こりかねない。

微生物たん白の生産は、わが国の農業を衰微させると

の意見もある。もちろん、農業は食糧生産の根幹であってその振興は重要であるが、国民のたん白供給が農産物だけではきわめて困難なのは明らかであるとすれば、なにかで補わなければならない、昨今のように石油と同様食糧が世界戦略の決め手として考えられ、外貨があっても買えないような事態にいつ追い込まれるかもしれないとすれば、ここはもっと冷静に科学的にものを考えなければ、悔を千載に残すことになるのではなかろうか。

世界における SCP 開発の現況

一方、世界の SCP 製造計画は石油ショックによる原料やプラントの価格上昇や、食糧増産による需要のゆるみなどあってスローダウンの傾向がみられるが、1 歩 1 歩進んでいる。第 1 表に主要な計画を示すが、すでにブリティッシュ・ペトロリアムは、スコットランドのグランジュマウスで年産 4000 トンの工場を動かしている。イタリアではサルジニア島とシシリー島でそれぞれ 10 万トンの工場を、ルーマニアではブカレスト郊外で 6 万トンの工場を建設中である。昨夏、東京で行なわれた世界石油会議での発表によれば、ソビエトでは現在、20 万トン規模の生産が行なわれており、近く生産を 100 万トンに拡大するという。

一方、イギリスのインペリアルケミカルインダストリー (ICI) は、メタノールを原料としたバクテリアたん白の 10 万トンプラントの建設に入り、スタンダード・オイルは、エタノールから酵母を年産 4500 トン生産し、食用としてアモコ・フーズから販売するという。その他、ベネズエラ、サウジアラビア、インドネシア等の産油国、中国、イスラエル等、世界各国にわたり計画は目白押しに並んでいる。

また安全性に対しても、世界各国で膨大な試験が行なわれて、安全性が検討されており、BP の製品はすでに EC 9 カ国中政府の審査承認を必要とせず、企業の責任で実施するたてまえをとっているイギリス、デンマークを除き、イタリア、オランダ、西ドイツ、フランス、ベルギー、アイルランド、ルクセンブルグが認可し、南ア、スペイン、ポルトガル、イラン等も承認している。

SCP の多様性

微生物には単細胞よりなる細菌、酵母、藻類をはじめとしてやや分化した放線菌、糸状菌、担子菌からプロトゾアにいたるまできわめて多種のものが知られているのみならず、なお未知の微生物が膨大な可能性をもって存在していると考えられる。それを用いて食糧を生産する

第1表 各国の SCP 生産計画 (天然ガス, 石油系原料)

国名	企 業 名	工 場 所 在 地	原 料	規 模 (t/Y)	技術提供	稼動状況等
仏	Société Française de Pétrole BP	Lavera	軽 油	20,000	BP	生産中
	Groupement Française de Proteine	Solaise	ノ ル マ ル パラフィン	100 (kg/day)	Inst. Fr. de Pétrole	パイロット
英	British Petroleum	Grangemouth	ノ ル マ ル パラフィン	4,000	BP	生産中
	"	Kinneil (Scotland)	"	100,000	"	1976以降
	Imperial Chemical Industries (ICI)	Billingham, Teaside	メタノール	1,000	ICI	1973より
	"	"	"	100,000	"	1978予定
	Shell	Sittingbourne	天 然 ガ ス	100,000	Shell	1980頃, 現在パイロット
伊	Italproteine	Sarroch (Sardinia)	ノ ル マ ル パラフィン	100,000	BP	1976予定
	Liquichemica	Saline de Montebello	"	100,000	鐘淵化学	1975年12月完成
西 独	"	"	"	500,000		1976以降
	Hechst, Uhde, Gelsenberg Group	"	"	45	Molecular Bio. Res.	試作中
ソ 連	"	"	メタノール	100,000		1980頃
	"	バシュキリア	ノ ル マ ル パラフィン			1967パイロット
	"	ゴルキー地区	"	20,000		1974
	"	"	"	200,000 1,000,000		生産中 計画中
ルーマ ニア	Roniprotol	Bucharest	"	60,000	大日本インキ	1977
チェコ	チェコ石油化学公社	Kojetin	エタノール ノ ル マ ル パラフィン	1,000		パイロット 100,000 t 計画
米	Standard Oil (Indiana) Amoco	Hutchinson, Minnesota	エタノール	4,500		生産中
ベネズ エラ	ビオプロティナス・デ・ ベネズエラ	プエルト・ラ・クルー ス	ノ ル マ ル パラフィン	100,000	BP	1978
サウジ アラビア	ペトロミン	"	"	100,000	"	計画中

ための原料として、これまた多種類のものが考えられる。したがって、それぞれの立地条件にしたがい適当な微生物種と資源を組み合わせることによって最も有利な SCP を選ぶことができ、熱帯の砂漠でも極地においても食糧を生産することが可能である。

利用する炭素原料の形によって、微生物を大きく2群に分けることができる。1つは植物と同じように炭酸ガスを利用し、他の生物に頼らない独立栄養菌で、他の1つは主として植物が光合成でつくった有機物に頼らなければならぬ従属栄養菌である。

後者の原料としては、まず糖類やデンプンのような炭水化物があるが、そのまま食飼料となるものはもったいないから、農林畜産の廃棄物が考えられる。デンプン、砂

糖、コーヒー、果実加工などの工場からの廃棄物、パルプ廃液、家畜のふん尿などは BOD が高く廃棄すれば環境汚染を起こすから、公害処理ともあわせて、これから微生物菌体を製造することはきわめて有意義である。第2表に、計画されている主要なプロセスを示した。わが国においても、いならぬ、柑きつ粕、魚練製品廃液、のこぎりくずなどからの SCP 開発研究が行なわれている。石油や石油化学製品からの SCP が、現在 SCP 開発の中心となっていることはすでに述べた。しかし、これらの化石燃料も、やがて枯渇するであろう。そのとき、人類には炭素源としては炭酸ガスしか残されていないであろう。それはいつのことか、筆者には見当がつかない。まだまだ先のこともかもしれないが、意外に早いかもしれ

第 2 表 農林畜産廃棄物を原料とする SCP プロセス

廃 糖 蜜	<i>Candida</i> , Baker's Yeast	台湾糖業
亜硫酸パルプ廃液	<i>Candida utilis</i>	十条製紙, 山陽国策パルプ, Boise Cascade, St. Regis Paper Co.
"	<i>Paecilomyces</i>	United Paper Mills Ltd. (PEKILO PROCESS)
澱粉カス, 廃糖蜜	<i>Fusarium graminearum</i>	Rank Hovis McDougal (RHM-MYCOPROTEIN)
澱 粉 廃 水	<i>Endomyces fibligera</i> <i>Candida utilis</i>	Swedish Sugar Co. (SYMBA PROCESS)
カ ロ ブ 豆	<i>Aspergillus niger</i>	Tate and Lyle
バ ガ ス	<i>Trichoderma viride</i> Yeast	Cent. Am. Res. Inst. Ind.
コーヒー廃水	<i>Aspergillus oryzae</i>	Cent. Am. Res. Inst. Ind.
チーズホエー	乳 酸 菌	Wisconsin Univ.
フィードロット ウエースト	高温性放線菌	General Electric Co.

と同様光エネルギーを吸収して炭酸ガスを固定する仲間で、他の 1 つは化学エネルギーを利用する仲間である。前者には葉緑体をもっている藻類や、葉緑体類似の色素をもつ光合成細菌があるが、SCP として話題にのぼっているものにはクロレラ、セネデススのような緑藻や藍藻の一種スピルリーナがある。セネデススは、ドイツや東欧で古くから研究されている。わが国でもクロレラの培養は 25 年の歴史をもち、年間 180 トンくらい生産されているとい

ない。少なくとも化石燃料の保存のために、大量消費が許されなくなる時代は比較的早くくることが予想される。

植物は炭酸ガスを固定して増殖し、有機物を合成するから、このような時代になればますます重要性を増すであろうが、微生物の中にも同様の能力をもつものがある。植物よりもかなり増殖の速度が大きいため、これらの微生物の重要性はきわめて大きなものとなるであろう。

炭酸ガスを摂取してたん白質その他の菌体成分にするためには、なにか他のエネルギー源を必要とする。このエネルギーをどこから得るかによって、炭酸ガスを固定する微生物は 2 つに大別される (第 3 表)。1 つは植物

うが、これは SCP としてではなく、動物や乳酸菌の生長促進効果をもつ薬品、あるいは整味剤として酢酸を原料として生産され、1 キログラム数千円で取引されている。これらが微細藻類で遠心分離などの回収コストがかかるのに対し、スピルリーナは大型のラセン藻で回収が容易なことが注目され、フランス国立石油研究所が開発し、メキシコでも現在メキシコシティに近いテクスコ湖で日産 1 トンの生産をあげているという。しかし、これら藻類は大量迅速に培養するためには、空中の 0.03 % という低い炭酸ガス濃度を高めてやる必要があり、安価大量の炭酸ガスをどうして得るかという問題のほか、土地問題がある。

太陽エネルギーは膨大ではあるが、希薄なエネルギー

第 3 表 Autotrophic microorganisms

Photolithotrophs	
Algae	$\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \xrightarrow{\text{Light}} (\text{CH}_2\text{O}) + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$
Green algae	
Blue-green algae	
Photosynthetic bacteria	
Sulfur purple bacteria	$\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{S} \xrightarrow{\text{Light}} (\text{CH}_2\text{O}) + \text{H}_2\text{O} + 2\text{S}$
Sulfur green bacteria	$3\text{CO}_2 + 2\text{S} + 5\text{H}_2\text{O} \xrightarrow{\text{Light}} 3(\text{CH}_2\text{O}) + 4\text{H}^+ + 2\text{SO}_4^{2-}$
Non-sulfur purple bacteria	$\text{CO}_2 + 2\text{H}_2 \xrightarrow{\text{Light}} (\text{CH}_2\text{O}) + \text{H}_2\text{O}$
Chemolithotrophs	
Nitrifying bacteria	
Ammonia oxidizer	$\text{NH}_4^+ + 3/2\text{O}_2 \longrightarrow \text{NO}_2^- + \text{H}_2\text{O} + 2\text{H}^+$
Nitrite oxidizer	$\text{NO}_2^- + 1/2\text{O}_2 \longrightarrow \text{NO}_3^-$
Sulfur oxidizing bacteria	$\text{S} + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{SO}_3^{2-} + 2\text{H}^+$
Iron oxidizing bacteria	$2\text{FeSO}_4 + 1/2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 \longrightarrow \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{H}_2\text{O}$
Hydrogen bacteria	$\text{H}_2 + 1/2\text{O}_2 \longrightarrow \text{H}_2\text{O}$
Methane bacteria	$\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \longrightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$
Carbon monooxide oxidizing bacteria	$\text{CO} + 1/2\text{O}_2 \longrightarrow \text{CO}_2$

で昼夜, 季節, 天候によって変動するから, 土地面積の割に捕捉できるエネルギーは小さい。また増殖には温度が影響するから, 藻類の培養に有利なのは日照も多く高温な一部の熱帯地方に限られるのである。そのような地方では, さとうきびのような有機物生産効率の高いものはあるが, 蛋白生産に適する作物は少なく藻類はたん白質の含量が高いから, たん白質の生産効率としては圧倒的に有利である。しかし, わが国のような国土が狭く土地の高価な国では, なかなか経済的にはむずかしいのではないかと考える。前述のテクスコ湖の場合には, これらの条件にあううえ, 天然の湖に自然にスピルリーナが棲息しており, アルカリ性で生産に適するなど好条件がそろっているから有利なのである。このような粗放な製法なら, 経済的に引合うと思われるが, それだけに雑菌に汚染され製品としては問題があるという。なお光合成細菌については, 最近窒素含量の高い廃水の処理への利用が注目されているが, SCPとしての利用は今後の問題である。

CO₂ を使って微生物菌体をつくるのに, 太陽エネルギーに頼ることがわが国の立地条件としてむずかしいとすれば, 残されたのは化学合成菌といわれる一群の微生物で, これは主として無機物を酸化し, そのエネルギーを用いて炭酸ガスを同化する仲間である。これには, 第3表のようないろいろな種類があって, それぞれ自然界における物質循環に関与し, 人類の生活にもかかわりあって棲息している。これらの化学合成菌を比較して食糧生産の面からの適性を考えてみると, 結論的には水素細菌が最も将来性があるように思われる。そのおもな理由は, 水素が将来のエネルギー源として開発が進められており, 太陽炉, 原子炉, 核融合炉を用いた熱分解により水から大量安価に生産されるようになる可能性があること, 水素を酸化してエネルギーを得る際生成するのは, 水で硫黄や鉄などを酸化する菌に比べてクリーンであること, 増殖のスピードが比較的早いことなどがあげられ

る。しかし水素, 酸素, 炭酸ガスの混合ガスを使用するがその混合比率が爆発限界内にあるため, その安全管理が必要なことや, 細菌へのガスの供給効率をよくするための培養装置の設計など, なお検討を必要とする問題が残っている。

SCP の要因

以上述べたごとく, SCPには微生物の種類と各種原料の組合せによって多くの可能性が考えられるが, これが実用化されるためには, いくつかの要件を満足しなければならない。要件として考えられるものをあげると,

1. 原料が安価で大量供給が可能なこと
2. 生産効率が高く収量のよいこと
3. 栄養要求が少ないこと
4. 雑菌汚染の少ないこと
5. 培養が容易で連続培養の可能なこと
6. 回収が容易なこと
7. 排水処理が簡単なこと
8. 蛋白含量が高く, アミノ酸組成がよいこと
9. 消化性, 嗜好性, 保存性がよいこと
10. 病原性, 毒性のないこと

等である。

原料の価格と供給は, 地域によって大きく異なる。石油価格は産油国を除いて国際的に格差が少ないので, 日本にも競争力があるとされているが, ノルマルパラフィンの価格は石油の各留分の需給のバランスに影響されるところが大きいのので複雑である。たとえば, イタリアはリビア原油のようなパラフィン含量の多い原料をもち, ヨーロッパにおいて圧倒的なノルマルパラフィンのシェアをもっているので有利といわれている。天然ガスは安価であるが, 輸送船が高価であるので, これをメタノールとし燃料その他に大量供給しようとする, いわゆるジャンボメタノール計画があるので, SCP原料としてのメタノールが注目されている。英国や西独の計画も, 北海油田の開発に焦点があわされているという。農産廃棄物

第4表 各種基質よりの酵母菌体生産における収率, 生産効率酸素要求および発熱量の比較

基 質	菌 体 収 率 $Y_{X/S}$ (kg/kg)	生 産 効 率 μX (kg/m ³ ·hr)	単位菌体当 酸素必要量 $Y_{O/X}$ (mole/kg)	単位培養液当 酸素必要量 $\mu X \cdot Y_{O/X}$ (mole/m ³ ·hr)	単位菌体当 発 熱 量 $Y_{H/X}$ (kcal/kg)	単位培養液当 発 熱 量 $\mu X \cdot Y_{H/X}$ (kcal/m ³ ·hr)
Glucose	0.55	4	13.9	55.6	1218	4873
n-Dodecane	1.07	3.5	55	192.5	5140	17990
Ethanol	0.74	4	41.5	166	4081	16324
Methanol	0.52	2	44	88	4865	9730

の場合は、大量集荷が容易なことが重要な立地条件である。世界的にはバガス、コーヒーかす、とうもろこし廃棄物などが大きな原料であるが、日本では稲わらや柑橘かすが注目されている。砂糖生産国のような炭水化物が豊かでたん白の乏しい国では、糖蜜からの SCP 生産も有意義であろう。

生産効率（単位時間、単位容積当り菌体生産量）は、増殖速度係数（ μ : hr⁻¹）と菌体濃度（ X : kg/m³）の積 μX （連続培養では DX , D : 希釈率 hr⁻¹）で示される。 μ の値は細菌が大きく、酵母がこれにつぎ、糸状菌は小さいとされているが、糸状菌にもかなり大きいものが知られている。原料の質と濃度によっても変わってくる。酵母に例をとると、 μX の値は大体 2~4 kg/m³·hr で、糖類、ノルマルパラフィン、エタノールでは大差ないが、メタノールではやや小さい（第4表）。ちなみに作物の生産性は、植物体全体として、生育のよいトウモロコシでも最高乾物量 50 g/m²·day、大豆では 35 g/m²·day が限度とされている。熱帯降雨林やさとうきびは有機物生産性は非常に高いものであるが、年間 50 t/ha 程度と考えられている。光合成藻類は、熱帯地方においても生産量はほぼこれに等しい。これに比して有機物を原料とする微生物の生産効率は、単純には比較できないがきわめて大きな値で、しかも季節、天候、地域に左右されず工業生産できる。

収量は原料によって大きく左右される（第4表）。一般には、1 kg の原料から得られる菌体乾物量として糖類で 0.5 kg、ノルマルパラフィンで 1 kg、メタノールで 0.4 kg、エタノール 0.7 kg である。これを 1 kg の飼料より得られる牛乳、鶏卵、ブロイラー、豚、肉牛の可食部中固形物の量、それぞれ 0.13 kg, 0.09 kg, 0.05 kg, 0.04 kg, 0.02 kg と比べるとかなり大きい。

栄養要求が小さければ単純な培地でよいから経済的に有利であるだけでなく、雑菌汚染の危険も小さく、排水処理も簡単にすむ。独立栄養菌の場合は、この点さらに有利となる。連続培養では回分培養に比べて密閉性が悪いから、雑菌汚染のおそれ大きい。低い pH で培養できる糸状菌あるいは酵母、高温で培養できる高温性微生物ではこれが緩和される。

培養上の工学的問題としては酸素供給、発熱、発泡の問題等が重要である。第4表に示すように、単位菌体を生産する際の必要酸素量は炭化水素が大きく、炭水化物は小さく、アルコール類はその中間である。単位時間

に単位培養液量あたりの必要酸素量は、これに μX をかけたものとなるから、 μX にも大きく左右される。炭化水素を原料とする場合は 200 mole O₂/m³·hr くらいは必要となるから、エアリフト型発酵槽が用いられる。単位菌体量を生産するときに発生する熱量も原料によって異なり、炭水化物に比べ炭化水素、アルコールの場合はかなり大きい。また単位時間単位液量あたりの発熱量は μX に大きく左右され、ノルマルパラフィン、エタノールでは特に冷却のための工夫が必要である。高温菌は、ここにも有利性を発揮する。発泡の問題も、ノルマルパラフィンなどの場合は重要である。また、ノルマルパラフィンなど水に難溶な原料を用いる場合は不均一系となり、基質は培養液中に粒子となって存在し、微生物による取込みの速度はその分散状態に大きく依存する。分散は攪拌や培地の物理的性質、界面活性剤の使用に影響され、微生物自身が界面活性物質を分泌して分散を促進することも知られているが、なお不均一系培養の速度論的解析には未解決の問題も多い。また、ガス状の基質の効率よい供給に関する基礎的研究、工学的研究も今後の課題である。連続培養については細菌、酵母に関しては理論的にも応用の面でも十分な検討がなされたが、糸状菌はなお検討を要する。

回収の難易は細胞の大小により、酵母に比べて細菌は遠心分離の経費が大きい。ICI では、細菌を凝集させて回収する方法を開発した。糸状菌は、濾過でも簡単に回収できる。菌の洗浄回数も、回収費に大きく影響する。アルコール類やガス状原料はこの点有利といわれ、これは排水処理費にも関係する。

菌体成分と栄養価

第5表に菌体成分の分析例を示した。粗たん白含量は一般に細菌で 60~70%、酵母が 50~60%、糸状菌はそれよりやや低いとされているが、なかにはかなり高いものもある。藻類や担子菌も、50~60%のたん白を含んでいる。ただし、粗たん白の定量値には核酸や細胞表層の窒素化合物の窒素も含まれるから、少なくとも α -アミノ酸の定量値で論ずることが望ましい。各種 SCP の主要なアミノ酸組成を第6表に示した。一般的に、微生物たん白は含硫アミノ酸が不足とされているが、その他はあまり問題なく、リジンなどはかなり多い。アミノ酸組成的には、SCP の栄養価は魚粉と大豆の中間と考えられている。

飼料価値については、わが国においても産卵鶏などを

第5表 菌体成分

	水分	粗蛋白	灰分	粗脂肪	可溶性無窒素	粗繊維
魚粉	10.4	62.3	16.3	4.5		6.0
大豆粉	12.5	46.4	5.8	1.1		
酵母 (n-パラフィン)	4.5	61.0	9.8	3.2	25.8	4.2
酵母 (メタノール)	5.3	60.2	7.4	7.9		
酵母 (エタノール)	5.0	53.0	7.5	7.0		
酵母 (亜硫酸パルプ廃液)	6.0	46.0	5.7	2.3	35.4	4.6
細菌 (メタノール)	5.0	83.0	8.6	7.4		
細菌 (メタン)		59.2		6.0		
糸状菌 (酢酸)		49.2	5.0	6.4		19.1
糸状菌 (SWL)		56~63	5~6	2~4		
クロレラ (光合成)		58.2	6.7	16.1	14.6	4.4
クロレラ (酢酸)		54.2	5.9	13.0	22.6	4.2
シイタケ (エタノール)		55.1	10.1	3.8	22.8	8.2

第6表 各種 SCP のアミノ酸組成 (g/100 g dry matter)

	Ile	Leu	Phe	Thr	Try	Val	Arg	His	Lys	Met
FAO 基準	4.2	4.8	2.8	1.4	4.2				4.2	2.2
魚粉	2.4	3.7	2.1	2.4	1.3	2.8	3.9	1.5	4.3	1.2
大豆	2.5	3.4	2.2	1.7	0.6	2.4	3.2	1.1	2.9	0.6
酵母 (n-パラフィン)	2.7	3.9	2.4	2.0	0.7	2.9	2.7	1.3	3.8	0.8
"	2.8	4.3	2.4	3.1	0.9	3.2	2.8	1.0	4.4	0.6
酵母 (メタノール)	2.6	3.7	2.3	2.4	0.8	2.7	3.3	1.1	3.6	0.9
酵母 (エタノール)	3.2	4.6	2.8	2.8	0.8	3.9	3.1	1.1	3.7	1.0
酵母 (パルプ廃液)	2.4	2.9	2.1	1.6	0.5	2.6	2.3	0.9	2.9	0.5
細菌 (メタノール)	3.6	5.6	2.9	3.8	0.7	4.3	3.7	1.5	4.9	2.0
細菌 (メタン)	4.0	6.4	5.8	4.4			4.7	2.6	4.0	1.6
細菌 (水素)	4.6	8.5	4.0	4.5		2.5	8.0	2.5	8.6	2.7
麹菌 (酢酸)	5.5	8.2	4.3	4.9		6.4			5.5	1.8
糸状菌 (パルプ廃液)	4.3	6.9	3.7	4.6	1.2	5.1			6.4	1.5
担子菌菌糸 (エタノール)	2.4	3.8	1.3	2.4		3.4	4.2	tr	4.3	0.5
クロレラ (光合成)	4.2	8.1	5.1	3.6	1.5	5.9	5.8	1.8	7.7	1.3
クロレラ (酢酸)	3.4	7.0	3.2	4.0	1.4	5.1	10.2	3.0	9.4	1.8

用いて膨大な試験が行なわれた。ひなの飼料にノルマルパラフィン酵母の添加量をふやしていくと、魚粉に比してひなの体重増加が劣ってくるが、これはメチオニンとV.B₁₂の不足であって、これを補うと魚粉と同等の成績を示した。また酵母はリン酸含量は多いが、カルシウムが少ないから、カルシウム添加も有効という。酵母添加区は卵を産みはじめるのはやや遅かったが、卵重はやや大であった。産卵後期になると、酵母区の方が明らかに産卵率が高かった。特徴的であったのはマレック病などに対し生存率が高く、また卵の受精率や受精卵のふ化率が高かったことであって、酵母に有効成分が含まれていることを示唆している。病理組織学的検査にも異常はなく、風味テストでも区別されなかった。

魚は炭水化物の利用率が悪く、たん白の要求が大きい

から、餌として SCP の利用が有効である。多くの試験の結果、こい、うなぎ、あゆ等の温水性淡水魚にはきわめて良好な結果が得られている。冷水性淡水魚のにじますやたい、くるまえばなどの海水魚には工夫を必要とするが、30%くらいは添加できるという。

SCP の安全性について

わが国における SCP の安全性の検討は、はじめ通産省、農林省でも行なわれたが、昭和44年10月厚生省の食品衛生調査会の中に石油たん白特別部会が設けられ、安全性に関する試験項目、試験方法、基準が検討された。昭和45年12月部会は「飼料としての石油たん白の安全性」について公表し、6段22項目(第7表)にわたる安全性基準を示し、企業に報告書の提出を求めた。昭和46年から47年にわたり、提出された各社報告書の

第7表 石油蛋白特別部会の安全性基準

菌株 (石油蛋白の製造に用いる微生物)
①形態学的性状および生物学的性状についての菌学的検査, ②変異性の有無, ③感染性の有無
原料 (ノルマルパラフィンを含む培地基材)
①環状芳香族炭化水素化合物の検査, ②重金属の検査
菌体 (製造工程中の1サイクルにおける増殖の最盛時における菌株)
①環状芳香族炭化水素化合物の検査, ②重金属の検査, ③マイコトキシンの検査, ④毒性検査
培養液 (製造工程中の1サイクルにおける増殖の最盛期における培養液)
①環状芳香族炭化水素化合物, ②重金属, ③マイコトキシン, ④毒性検査
製品 (製造工程を完了し, 飼料として用いられるもの)
①生存菌株の有無, ②環状芳香族炭化水素化合物, ③重金属, ④マイコトキシン, ⑤毒性検査, ⑥次世代へ及ぼす影響
肉乳等 (製品を与えて飼育した家畜, 家禽, 魚類の肉, 乳等の可食物)
①多核環状芳香族炭化水素化合物, ②重金属, ③マイコトキシン
n-パラフィンの純度は98%以上, 問題の3,4-ベンツピレンは1ppb以下

審査が行なわれ, 昭和47年12月見解が公表された。それによれば2社の菌株, 原料, 菌体, 培養液, 製品および, それより得られた肉, 乳等については基準に合致するが, なお工業化の段階において, 各々の品質規格が守られているかを確認する方法を講ずることや, 菌の変異などの不測の事態に対処するための管理, 検査体制を確立するなどの条件のもとに青信号が出たのである。しかし, 発がん性多核芳香化合物の混入のおそれがあるとのマスコミのキャンペーンに端を発して消費者運動が起こり, 提出された報告が企業側のもので公的機関のものではないこと, 試作品と工業製品が同一かどうか保証がないこと, 未知の病源性, 毒性の恐れのあること等が問題となって国会で論議が行なわれ, 企業は自発的な製造中止に迫られ, 現在にいたっている。

これにはいくつかの誤解もあり, たとえば国においても農林省は昭和44年より特別研究として, すでに長期の安全性テストを行なっていたのである。問題となった3,4-ベンツピレンにしても食品中に広く存在しており, なかには数十ppmに及ぶものがある。食品の安全性を完全に確認することは, 現在の科学では不可能である。しかし, 当初安全性への配慮がややおろそかであったことはいなめず, 高度成長下の企業の社会的責任が問われ

て新技術への不安が高まっていた中にあって, 特に食品に対する一般の感覚は保守的であるから, 社会的コンセンサスを得るための充分な努力が必要であったと思われる。BP社では, オランダ国立機関のCIVOやILOB等によってマウス, ラット, うづら等を用いて急性, 亜急性の毒性試験はもとより慢性の発がん, 催奇性あるいは病理学的試験を長期にわたり慎重に行ない, 一般の理解についても努力を重ねた。

PAGも安全性については重大な関心をはらい, すでにNo.6, No.7, No.12, No.15の4つのガイドラインを公表し, 特にNo.15は「飼料用新たん白の栄養価ならびに安全性評価のための指針」として家畜による飼用試験計画, 安全性動物試験項目等について委しく解説しSCPの汚染微生物生菌数の限界, SCPの化学的基準等について提案している。

安全性が問題になって, 一時わが国のSCP生産技術が国際的に低く評価された。しかし各方面の努力で試験実績が紹介され, 現在では評価が回復しているという。石油たん白特別部会の安全性評価は, 撤回されたわけではない。しかしその後も, 農林省を中心に研究が続けられている。49年より「飼料の品質改善に関する法律」改正により, 検査監督体制が強化された。「酵母たん白飼餌料の検査法」の特別研究も行なわれ, GC含量, 免疫, NMR等による菌の同定などの検査法が開発されつつある。

科学は日進月歩している。核酸や奇数炭素数脂肪酸も問題とされた。SCPに比較的多く含まれる核酸中のプリン塩基は尿酸となり, 通風や結石の原因となるおそれがあるとされたが, 家畜に酵母を与えた場合尿酸は増加するけれども一過性であり, 肉, 卵等の核酸含量はSCP無添加区と変りはない。またノルマルパラフィン酵母には奇数炭素数脂肪酸は異常に多いが, 正常の動物の組織や乳の中にも少量の奇数炭素数脂肪酸があり, 酵母を与えるとこれが少し増加する。しかし, 生理学的にも病理学的にも別に変化は見られなかった。このように問題点は次第に解明され, よりよい評価法も開発されつつある。PAG等による国際的な評価基準をも参考としながら, わが国の評価基準を確立するとともに, 国民の理解を得る努力を一步一步積み上げる必要がある。

SCPの食糧化

SCPを直接食糧とするためには, さらに安全性について厳格な基準が必要である。アモコ社はエタノール酵母

をミートパイ、ビスケット、バタークッキー等に少量添加した製品を開発しているが、核酸や奇数炭素数脂肪酸の存在を考えると、たん白を抽出精製加工する必要がある、さらにこれを、可食性を有するのみならず、嗜好性もよい製品にしなければならない。したがってむしろ飼料用とし、飼料用の大豆たん白などを食用に回す方が現実的と考えられるが、飼料中のたん白のうち食肉として回収されるたん白は、鶏でも 25%、豚では 18% というから、直接食べた方が効率のよいことはもちろんである。

わが国でも、種々のたん白分離法が開発されつつある。濃厚尿素溶液 (8~12M) または 2% NaOH で抽出し、酸またはアルコールで沈殿させて、たん白含量 80% の白色粉末が得られている。また impact-cell-mill を用い、400~600 kg/m² の圧で 450 μ のノズルより 250~300 m/sec の速度で壁に衝突させ物理的に cell wall を破壊し、これと酸、アルカリ、アセトン処理を組合せる方法も考案されている。cell wall に欠陥のある酵母を突然変異で造成し、たん白の分離を容易にする試みも行なわれている。cell wall の溶解酵素の開発も行なわれ、特に *Arthrobacter luteus* の β -1,3-glucanase は溶解活性が強く注目された。hemicellulase, chitinase, protease 等の利用も考えられる。一方、プロテアーゼのプラスティン反応によるたん白の精製、改良も食用化のうで注目すべき技術と考えられる。

SCP の経済性

ここ 2,3 年世界的なインフレが進行しており、特に石油系の原料の高騰が著しく、人件費、設備費等も大幅な値上りをしている。一方 SCP と競合する魚粉、大豆等の価格もきわめて流動的で、SCP の経済性を論ずるのは全く著者の能力外であるが、1974 年に発表された BP 法によるノルマルパラフィン酵母、ICI 法によるメタノールバクテリアの原価計算例を第 8 表に示した。現在では、なおノルマルパラフィン法の方がメタノール法よりやや有利という。魚粉は 1974 年末 kg 当り 90~120 円で、たん白を 65% 含むから、たん白 kg 当りでは 140~185 円となる。大豆は現在値下りして 60~70 円/kg、たん白含量 45% とすると、たん白 kg 当り 150 円前後である。したがって、SCP は大豆よりやや高いが、魚粉よりはやや安いと考えられる。しかし、これらの計算では原料のノルマルパラフィン、メタノールの価格を kg 当り 30 円前後としているが、最近ではノルマルパラフィンは米国でも 70 円、日本では 110~180 円と値上りし

第 8 表 SCP 原価計算例

原 料	ノルマルパラフィン	メタノール
微生物	酵 母	細 菌
規 模 (年産)	10万トン	10万トン
設 備 費	90~120億円	144億円
原価 (製品 kg 当)		
原 料 費	27~36円	60円
薬 品 費	13.5~18円	12円
ユーティリティ費	13.5~18円	12円
人件費、補修費、 償却費、管理費	27~30.5円	11.2円 21.6円
利 潤		25.8円
計	81~102.5円	142.6円
蛋 白 含 量	65%	80%
蛋白 kg 当原価	125~158円	177円

ている。もっとも石油化学製品の価格は総合的にきまるもので、もっと安価に入手できるともいわれている。メタノールもアメリカで 38 円、日本や西欧では 60 円台となっている。これに加えて設備費も 2 倍程度、人件費等も大幅に値上りしている。魚粉や大豆の価格も石油価格に影響されるところ少なくなく、まだ石油価格の上昇が充分折込まれていないといわれ、年 10% 程度の値上りは避けられないという。したがって、1977 年には魚粉は 180~240 円/kg、大豆は 170~200 円/kg と見込まれるというが、現在は石油系原料の値上りよりも低いレベルにとどまっている。ただ、中東の余剰天然ガスからの大規模なメタノール生産が実現すれば、安価な大量供給が期待され、メタノールからの SCP が他の方式に比べ圧倒的な経済的有利性を獲得するといわれている。しかし、いずれにしても天然ガスや石油系の SCP の将来性は、経済的にみて決して楽観は許されない。水素細菌にしても、1 kg を生産するに水素だけで 5m³ を必要とし、1m³ 25 円と見積っても 125 円、たん白 kg 当りとすれば 200 円となるから、これも水素価格の将来に左右されるところが大きい。農産廃棄物をも含め、将来の見きわめのもとに多面的な SCP の開発が、経済的見地からいっても重要である。いずれにしても SCP の開発は規模の大きさ、そのリスクからして 1 企業では重荷であり、その重要性から考えて国家的事業として取上げられるべきと考える。むしろ、世界的観点から取上げるべきだといっても過言ではあるまい。21 世紀のはじめ不足するといわれる 1 億トンのたん白生産に必要なノルマルパラフィン、メタノールも世界の石油、天然ガスの消費

量からすればごく一部であり, しかも燃料や石油化学にとっては価値の低い区分である. この貴重な資源を燃料とせず, 有用な用途に振向けるべきである. 最後に, 昨夏来日した国際微生物連合事務局長セネーズ教授の言葉「経済的に引合わないという理由で原子力の開発が遅れ,

石油ショックに対抗する有力な手段をわれわれはもたなかった. もし今経済的に引合わないからといって, SCPの開発が遅れるならば, われわれは再び同じ後悔をしなければならぬであろう」をもって本稿を終る.

(51年2月17日受理)