化学独立栄養性細菌の動向

都 留 信 也

(Shinya TSURU)

東京大学応用微生物研究所

1. は じ め に

化学独立栄養性細菌については、これまでに数多くの研究がなされてきた。この問題については 1922 年, Winogradsky の提案による, 化学合成と無機酸化の 2 つの能力を有する微生物について化学独立栄養性細菌なる定義が与えられている。Winogradsky により提起された問題は, この 2 つの過程に基づく化学独立栄養性細菌の代謝と機能について述べられていたもので, かなりの混乱が生じている。2 つの過程とは無機酸化と化学合成とを意味するが, 前者はエネルギー獲得のための無機酸化, 後者は炭酸の独立栄養的同化をいう。微生物の代謝型については, 以下の 4 つの型の組合せが考えられている。

	炭 酸 の 独 立 栄 養 的 同 化	炭素化合物の 還 元 的 同 化
無機化合物の酸化 有機化合物の酸化	I 型 III 型	II 型 IV 型

1946 年の Cold Harbour Symposium における命名方法に従うならば, これらの代謝型は, I 型 Chemolithoautotrophy; II 型 Chemolithoheterotrophy; III 型 Chemoorganoautotrophy; IV 型 Chemoorganoheterotrophy と記述されることになる。これらの代謝型は, エネルギー代謝と基礎代謝とが統一的機作として作用し, かつ, ある生育段階までは相互関連が存在しないものと仮定しているのであるが, ある微生物の個々の生育段階において各種の栄養型がみられるところからも, 1 つの代謝型のみに規定してしまうことは困難をとまう。たとえば, 同化される炭酸, あるいは酸化される基質の相互関係が広範囲にわたって変異する場合とか, 炭酸同化にアデノシン 3 磷酸 (ATP), 還元型ピリジヌクレオチド (DPNH₂) ばかりでなく, エネルギー代謝の中間生成物をも必要とする場合, さらに, 炭酸同化と基質酸化とに関与する酵素系が空間的にはなれて位置している場合などには, 上述の概念規定は化学独立栄養性細菌にあてはまらないことになる。

大部分の細菌は代謝 IV 型 (Chemoorganoheterotrophy) に属している。ごくわずかの絶対化学独立栄養性

細菌が代謝 I 型 (Chemolithoautotrophy) にみられる。多くの他の微生物, とくに水素酸化菌は, 代謝 I 型から代謝 IV 型に広く見いだされる。代謝 II 型は硫酸の水素還元の際にみられるし, 代謝 III 型はギ酸の酸化に際してみられる。化学独立栄養性細菌については, 多くの論文・報告・総説が発表されているので参照されたい*。

2. 炭酸の独立栄養的同化

光・化学独立栄養性細菌による炭酸の独立栄養的同化は, Calvin (1955) の提唱したリブローズ 2 磷酸サイクルに基づくものと考えられている。緑色微生物を用いて行なわれた実験において明らかにされた Calvin 反応の発表後, はやくも同様のサイクルの存在が *Th. denitrificans* においても確認された。すでに, 同サイクルは良く知られているので, ここでは省略して述べることにしたい (図 1)。

独立栄養性細菌におけるその機構は, 従属栄養性細菌におけるペントース磷酸代謝と多くの共通性を有している。2 種類の酵素のみが独立栄養性細菌に特異的なものである。すなわち, リブローズ 5 磷酸をリブローズ 1, 5 磷酸に磷酸化するフォスホリブロキナーゼと, リブローズ 2 磷酸を 2 分子のグリセリン酸 3 磷酸にカルボキシル化するカルボキシディスムターゼの 2 種類の酵素が, それである。これらの酵素により同化された炭酸は, グリセリン酸 3 磷酸のカルボキシル基にとりこまれ, 同化の一次安定生成物となる。グリセリン酸 3 磷酸はグリセリン・アルデヒド磷酸に還元され, さらに反応は図 1 に

* 化学独立栄養性細菌の一般問題については, van Niel (1954), Lees (1955), Larsen (1960); 水素酸化菌については Schlegel (1961); イオウ酸化菌については Vishniac と Santer (1957); Vishniac と Trudinger (1962) の詳細な報告がある。

イオウ化合物の代謝に関する総説としては, Peck (1962) のものがあり, 硝化菌については Ruban (1961), Engel (1960) が, また硝酸化生成の機作については Nason (1962) がまとめている。硫酸還元菌については Postgate (1959), 鉄酸化菌については, van Iterson (1958) の総説がある。さらに, 生物圏における化学独立栄養性細菌の役割については Kuznetsov, Ivanov, Ljallikova (1962), Ivanov (1964), Sokorova と Karavaiko (1964) の著書が出版されている。

従属栄養から独立栄養への移行に関連して、リブローズ 2 磷酸サイクルの酵素合成における変化についての興味ある報告がなされている (Vishniac and Trudinger, 1962). *Th. novellus* を用い、そのカルボキシディスムターゼの適応試験において、彼らは従属栄養条件下ではカルボキシディスムターゼ活性が 2% しか保持されていないことを明らかにした。従属栄養生長への移行は、生育の誘導期のあとで見いだされた。

化学独立栄養性細菌のリブローズ 2 磷酸サイクルによる炭酸とりこみの主要経路のほかに、副次経路がある。標識炭素の急速なとりこみがアスパラギン、グルタミンに見いだされている。このことは、トリカルボン酸サイクル中のグリセリン酸 3 磷酸部位の弱化に関連している。アミノ化はアミノ酸の集積を引き起こす。エノールビルビン酸 2 磷酸のカルボキシル化は、 β -カルボキシル・グルタミン酸や、 α -カルボキシル・アスパラギン酸への標識炭素のとりこみとなっている。炭酸同化の安定生成物は非常に多様であり、集積された物質の性質は微生物の生育条件に密接に関連している。リブローズ 2 磷酸サイクルの構成要素は、触媒性質のみについて明らかになっている。

4. 簡単な有機化合物の酸化

炭化水素、メタノール、ギ酸、シュウ酸など、簡単な炭素化合物を酸化する独立栄養性細菌の所属についての問題が、長いあいだ論議されてきた。これには、炭素化合物の酸化がエネルギー源のみに限定される場合と、菌体形成に炭酸が利用される場合とが考えられる。

メタン酸化菌による化学合成についての研究から、この種の栄養型がはっきり分離できないことが報告されている。炭酸のとりこみの程度は、メタン酸化菌の菌株によってかなり変異する。メタン酸化に際して、微生物は 60~80% の還元炭素化合物をその菌体形成に利用しており、従属栄養的代謝が存在することになる (Quayle, 1961)。メタンに生育させた場合、還元炭素化合物の従属栄養的同化が行なわれ、独立栄養的生育はないということになる。

炭酸のとりこみにおける微生物の代謝は、従属栄養性細菌が培地から菌体形成のために利用する場合よりも、大きな質的役割のあることが知られている (Quayle, 1961)。このことについては、*Ps. PRLW 4* (Kaneda *et al.*, 1959) と *Ps. AM 1* (Quayle *et al.*, 1961) とについての比較研究が著名である。

標識基質による実験で、これらの微生物のすべての菌

株において、炭酸のとりこみが独立栄養的同化によらないことが明示された。これらのすべての菌株は、カルボキシディスムターゼを欠損していた。標識基質に懸濁させた菌体の炭酸：空気 (1:99) 混合気流中での培養により、比活性の減少を測定し、炭酸あるいは代謝生成物が代謝で基本的役割をはたしていることを確かめている。*Ps. AM 1* の細胞炭素の 50% までが、メタノールに生育させた場合には、炭酸経路によって合成されていた。また NaHCO_3 存在下で、一次生成物としてアミノ酸のグリシンとセリンが生成された。炭酸の炭素 2 化合物へのとりこみが起こり、生成物がメタノールに由来することは明らかであった。メタンあるいはメタノールに生育する微生物に見られる代謝型を独立栄養性として算入することは、当を得ないように思われる。

代謝 III 型に相当する微生物が見いだされている。これらは *Ps. oxalaceticus* と *Bact. formoxidans* と命名されている。この両微生物を炭酸と空気の混合気流中でギ酸培地に生育させた場合、細胞菌体の炭素 94% が炭酸の代謝経路を通ることがわかった。Quayle と Keech (1958, 1959) は *Ps. oxalaceticus* による重炭酸から、グリセリン酸 3 磷酸とリブローズ 2 磷酸サイクルへの標識炭素のとりこみを行なわせている。菌体抽出液は、カルボキシディスムターゼとフォスホリプロキナーゼを含有していた。これらの酵素は、適応的にギ酸培地に生育させた場合に形成された。

化学独立栄養性細菌の代謝効率については、Winoogradsky が最初に計算している。その後、Baas-Becking と Parks (1927) は遊離エネルギー反応を計算に利用した。さらに、Larsen (1960) によって利用エネルギーの計算が研究された。

有機培地に生育させた *D. desulfuricans* の菌体量は、基質 1 モル当り 9.5 g となる。つまり、硫酸還元によって少なくとも基質 1 モル当り ATP 1 モルを得る。グリセリン酸 3 磷酸 1 モルの還元により、ATP 9 モルが消費

表 2 化学独立栄養性細菌によるエネルギー利用率

	$-\Delta F$ kcal	K %	ATP 最大モル数	収 理値	量 測定値
<i>Nitrosomonas</i>	60	20	5	4.7	2.64
<i>Nitrobacter</i>	17	30	1	0.96	1.02
<i>Th. denitrificans</i>	179	25	14	13.5	9.0
<i>Th. thiooxidans</i>	118	16	9	8.6	3.8
<i>Th. thioparus</i>	220	16	8	7.7	7.04
<i>Th. thiocyanooxidans</i>	220	25	17	16.3	11.0
<i>Th. ferrooxidans</i>	11	34	1	0.96	0.7
<i>Hydrogenomonas</i>	57	30	4	3.8	3.4

される。これは、グリセリン酸 3 磷酸炭素 1 g 当り ATP 0.25 モル、あるいは菌体乾重 1 g 当り ATP 0.125 モルに相当する。従属栄養性細菌は有機物からの菌体形成のために、菌体乾重 1 g 当り ATP 0.1 モルを消費する。有機物のアミノ化のためには、菌体乾重 1 g 当り ATP 0.03 モルを消費する。そこで、乾重 1 g 当り ATP 0.25 モル ($0.125 + 0.1 + 0.03 = 0.25$)、あるいは、ATP 1 モル当り乾重で 4.3 g が合成されることになる。ピロビン酸に生育させた場合の *D. desulfuricans* は、ATP 1 モル当り乾重 9.57 g を合成する。この水準まで還元するためには、化学独立栄養性細菌は炭素 3 化合物 1 モル当り ATP 9 モルを消費せねばならない。すなわち、 $9.57/9 = 1$ g 乾重/ATP 1 モルの収量が期待できる (Senecz, 1962)。いくつかの化学独立栄養性細菌についてのエネルギー利用率を表 2 に示した。

5. 化学独立栄養性細菌の利用

イオウの不足に関連して、微生物プロセスによるイオウの回収の重要性が研究されてきた (Knivett, 1960)。原料としては、石膏と水素あるいは都市排水の有機物が考慮された。*D. desulfuricans* の作用により硫酸が硫化水素に還元され、それからガスとして追い出され、工場生産規模での試験も行なわれた。同様の研究は、チェコスロバキアでも行なわれた。ガス・ブラインからのイオウの回収についても、*Th. thioparus* を応用する試みがなされたことがある。

硫酸還元菌の作用は経済的重要性の因子となっている。Postgate (1960) は、排水浄化、金属腐食、ベトン分解などに微生物プロセスが関与することを認めることができると指摘している。石油鉱床、イオウ鉱床においても、微生物の役割は大きい。

微生物腐食のほかにも、イオウ酸化菌は鉱化鉱石のリーチングに利用されている。近年、化学独立栄養性細菌の利用も研究されるようになってきている。また非常に古い問題の 1 つとして、鉄鉱床形成における鉄細菌の関与がある。この分野での進歩は、方法の開発研究が不充分なので、まだ良い結果が得られていない。さらに、堆積性マンガン鉱床形成における微生物因子についても、まだ仮説の域を出ていない。しかしながら、研究の進展によりかなりの進歩が期待されている (Tsuru, 1967)。

地球微生物学の分野における無機酸化に関連する微生物群の意義は、とくに大きい。また、経済的に重要なこの分野での発展は、生物圏での地球微生物学の研究に大きな基礎を与えることになるう。

化学独立栄養性細菌の化学合成活性は、無機酸化のそれと比べると、あまり利用できそうもない。せいぜい標識炭素化合物を得るために、その合成活性を利用することができにすぎないであろう。

イオウ循環に関与する微生物を中心にして、地球微生物学的過程について図に示した (図 3)。

硫酸還元プロセスの広範な分布にもかかわらず、この反応に関与する微生物はごく限られた数が確認されているにすぎない。Postgate (1966) は、硫酸還元菌について以下のごとく述べている。*D. desulfuricans* は、水素を利用して硫酸を還元するところから化学独立栄養性細菌として考えられた。しかるに、硫酸を利用して水素を酸化しつつ、炭酸から菌体を形成できない菌株の存在が明らかにされている。この場合、炭素は酵母抽出物からとりこむので、酸化のための基質がないとこの菌株は生育できない。還元剤として、水素とともに各種の有機物 (イソブタノールなど) を利用できるが、菌体合成のための基質としては利用されない。この条件下での菌体への標識炭素とりこみは 9% 以下であった (Peck, 1962)。これに反して、有機培地での *D. desulfuricans* は 30% の炭酸とりこみが観察された。この種の微生物は代謝 II 型を有し、明らかにエネルギー代謝と基礎代謝のかなり高度な非関連性の特徴づけられる。

硫酸の還元は、安定な中間生成物として亜硫酸を経由する。この 2 段階還元は非細胞標品で追跡された。硫酸還元は 2 種類の酵素、ATP スルフィラーゼとアデノンフォスフォスルフェイト (APS) レダクターゼが関与している。この酵素作用は MoO_4^{2-} 、 WO_4^{2-} 、 GO_4^{2-} イオンによって反応が抑制され、無機磷酸が遊離される。標識硫酸の添加によって APS の形成が確認された。電子供与体が存在するならば、APS 還元が起こる。非細胞標品を用いた実験では、電子伝達のためにメチルビオローゲンが利用され、APS レダクターゼとヒドロゲナーゼ系は結合された。細胞を用いた実験では、メチルビオローゲンは硫酸還元を阻害した。硫酸賦活のため電子受容体として ATP 2 モル、あるいはピロ磷酸からの ATP 再成が可能ならばピロ磷酸 1 モル、が必要とされる。あるいは、細胞は ATP 生成系として硫酸 1 モルと水素 2 モルを保持していなければならない。アセチル磷酸による基質の磷酸化が、硫酸還元を充分に保証するものと考えられている。

水素酸化に際しては基質の磷酸化は重要でなく、そのため酸化的磷酸化が存在せねばならない。そこでは、ジニトロフェノールが細胞による硫酸還元を完全に阻止す

図 3 イオウの地球生化学的転化 (Vernadsky, Kuznetsov, 1962 より改修)

る。これで、酸化的燐酸化の系に切り換えるメチルピオローゲンの作用が明確にされる。従属栄養性細菌の無機酸化におけるイオウ代謝が多岐にわたっていることが明らかにされてきたが、イオウ源として硫酸に生育することのできる微生物 15 種のうち、11 種においてフォスフォアデノシンフォスフォスルフェイト (PAPS) レダクターゼが見いだされてきた。なお、15 種とも APS レダクターゼをもっていなかった。また、他の 6 種では無機酸化が認められ、いずれにおいても PAPS レダクターゼは認められなかったが、そのかわり APS レダクターゼを有していた。供試した 6 種の微生物は、*D. desulfuricans*, *Cl. nigricans*, *Vibrio cholonicus*, *Th. thioparus*, *Th. thiooxidans*, *Th. denitrificans* である。

6. イオウ化合物の微生物による酸化

Nathansohn によりイオウ酸化菌が発見され、その培養方法が確立されたことにより、一連の微生物群が生理学的研究によって確認されるようになってきた。すべてのイオウ酸化菌は、グラム陰性菌で、形態的には短桿、極鞭毛をもち、運動性を有し、大きさは $0.5 \times 1 \sim 3 \mu$ である。種間の変異はあまり大きくない。これらの微生物は、イオウ酸化に適応した *Pseudomas* あるいは *Pseudomonas* 類縁のイオウ菌ともいえる。生理的には多岐に分かれ、菌株ばかりでなく、培養条件によっても同一菌株の生理が変化する。実際には、培地に生育する能力によって、これら微生物の種の判定を行なっている。便宜的に、イオウ酸化菌は pH 5 以下と pH 5 以上とに生育する

2 群に分けられる。酸性培地での生育に適応したイオウ酸化菌は、pH 0.5 でもイオウを硫酸にまで酸化できる。*Thiobacillus* では従属栄養的生育は認められない。代表としては *Th. thiooxidans* がある。以前、*Th. concretivorus* とされていたものとか、*Th. thermitans*, *Th. lobatus*, *Th. unbonata* などは、培地上でのコロニー形態を異にするとところから区別されていたが、すべて *Th. thiooxidans* と同定される。2 価鉄を酸性培地で酸化する微生物が発見されたが、この菌はイオウ化合物を酸化する能力をもたないので、*Ferrobacillus ferrooxidans* と命名された。このほかに、2 価鉄とイオウ培地上で生育する *Th. ferrooxidans* や *F. sulfooxidans* とが区別される。

中性・弱アルカリ性培地で亜硫酸を酸化する微生物としては、*Th. thiooparus* がある。イオウを沈積し、チオン酸を酸化する能力により、多くの菌株に分けられている。*Th. neapolitanus* (*Th. X*) によるチオン酸、イオウの形成は培養条件に関係しているので、この菌を独立した種とする充分な基礎とはならないと考えられている。

Th. denitrificans のみが窒素源から窒素を脱窒する能力を有する (Baalsrud と Baalsrud, 1954)。 *Th. thiooparus* と *Th. thiooxidans* のある菌株も硝酸により亜硝酸を酸化するが、還元は亜硝酸までで窒素は生成しない (de Kruffy et al., 1957)。なお、後者はロダニンを酸化するが、これはまず酵素的加水分解によりシアネートが不安定となり、自然に加水分解される (Youatt, 1954)。

その他のイオウ酸化菌としては、亜硫酸を酸化したり、

有機物を酸化したりして生育するものとして *Th. novelus* がある。これは Starkey が分離したものを、肉汁・ペプトン培地に 20 年植え続けて得られたという菌株であるが、独立栄養的に生育させたと急遽にその性質をとりもどしたという (Santer *et al.*, 1959)。

レプリカ法によって亜硫酸培地と有機培地とを置換すると、独立栄養の生育と従属栄養の生育とが個々の菌株で転換することが、実験的に証明された。独立栄養の生育には適応期間が必要で、生育の誘導期のあとで関連酵素活性が認められた。

従属栄養性細菌の存在についても、多数の報告がある (*Th. trawtweinii*, *Th. bejerinckii*, *Th. nathansonii*)。 *Th. thioparus* の独立栄養の菌株から従属栄養の菌株が得られたという報告もある (Johnstone *et al.*, 1961)。イオウ酸化菌によるイオウ化合物酸化機作については、以下の研究に詳しい (Vishniac と Santer, 1957; Vishniac と Trudinger, 1962; Santer *et al.*, 1959, 1960; Peck, 1962)。

7. お わ り に

最後に、無機酸化に関与する独立栄養性微生物群を一覧表として掲げることとする (表 3)。近年、かなりの微生物が純粋培養されるようになってきたが、まだ生理学的研究の対象として残されているものもある。多かれ少なかれ、これらの微生物は関連元素の循環に関与しており、なんらかの地球生化学的意義を有している。酸化される元素によって、化学独立栄養性細菌は硝化菌、水素酸化菌、イオウ酸化菌、鉄酸化菌、マンガン酸化菌などに区別される。研究の進展状況を示すために、以下の記号をつけておいた。①は集積培地より分離研究される

もの、②は純粋培養として研究可能なもの、③は非細胞標品として研究されるもの、をそれぞれ意味している。

前述したように、自然条件下で観察され、あるいは分離培地のみに生育する微生物群が存在するが、これらについてはまだ詳細な実験が集積されていないので、他の機会に述べることにしてこの稿を終える。

本稿をまとめるにあたり、種々の便宜を与えられた東京大学応用微生物研究所飯塚廣教授、ならびに同第 3 研究部瀬戸尚典氏に謝意を表します。

文 献

- Aubert, J., G. Milhaud et J. Millet : *Comp. Rend. Sci.*, 242, 2059 (1956), 244, 398 (1957); *Ann. Inst. Pasteur*, 92, 585 (1957).
 Bass-Becking, L. and G. Parks : *Physiol. Rev.*, 7, 17 (1927).
 Baalsrud, K. and K. S. Baalsrud : "Autotrophic Microorganisms", 4th Symp. Soc. J. Gen. Microbiol., 1954, p. 544.
 Bergey's Manual of Determinative Bacteriology, 7th ed. (1957).
 Bergmann, H., F. Towne and R. Burris : *J. Biol. Chem.*, 230, 13 (1958).
 Butlin, K. R. and J. R. Postgate : "Autotrophic Microorganisms", 4th Symp. Soc. J. Gen. Microbiol., 1954, p. 271.
Cold Spring Harbour Symp. Quant. Biol., 11, 302 (1946).
 de Kruyff, I., I. van der Walt, H. Schwartz and A. van Leeuwenhoek : *J. Microbiol. Serol.*, 23, 305 (1957).
 Delwich, C., W. Bruge and E. Malovolta : *Federat. Proc.*, 20, 350 (1961).
 Engel, H. : "Handbuch der Pflanzenphysiologie" Bd. 5, T. 2, 664 (1960).
 Emoto, Y. : *Bot. Mag.*, 47, 6, 268, 405 (1933).
 Ivanov, M. V. : "Role of Microorganisms in Formations and Degradation of Sulfur Deposits", Akad. Nayk, USSR (1964).
 Johnstone, K., M. Townshend and D. White : *J. Gen. Microbiol.*, 24, 201 (1961).

表 3 化学独立栄養性細菌の一覧表

$\text{NH}_4 + 2\text{O}_2 \longrightarrow \text{NO}_2^- + 2\text{H}_2\text{O}$	$2\text{NO}_2^- + \text{O}_2 \longrightarrow 2\text{NO}_3^-$	$\text{Fe}^{2+} \longrightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{e}$
<i>Nitrosomonas</i> : <i>N. europaea</i> ③	<i>Nitrobacter</i> : <i>N. winogradskyi</i> ③	<i>Ferrobacillus</i> : <i>F. ferrooxidans</i> ②
<i>N. monocella</i> ②	<i>N. agilis</i> ③	<i>F. sulfooxidans</i> ②
<i>N. oligocarbogenes</i> ②	<i>Nitrocystis</i> : <i>N. sarcinoides</i> ①	<i>Thiobacillus</i> : <i>Th. thioparus</i> ③
<i>Nitrosococcus</i> : <i>N. nitrosus</i> ②	<i>N. micropuncta</i> ①	<i>Th. neapolitanus</i> ②
<i>Nitrosospira</i> : <i>N. briensis</i> ①		<i>Th. denitrificans</i> ③
<i>N. antarctica</i> ①	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \longrightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	<i>Th. novellus</i> ③
<i>Nitrosocystis</i> : <i>N. javanensis</i> ①	<i>Hydrogenomonas</i> : <i>H. pantotropha</i> ②	<i>Th. trawtweinii</i> ②
<i>N. coccoides</i> ①	<i>H. flava</i> ②	<i>Th. thiooxidans</i> ③
<i>N. oceanus</i> ②	<i>H. vitrea</i> ②	<i>Th. concretivorus</i> ③
<i>Nitrosogloea</i> : <i>N. merismoides</i> ①	<i>H. facilis</i> ③	<i>Th. thermitanus</i> ②
<i>N. schizobacteroides</i> ①	<i>H. oligocarbophila</i> ②	<i>Th. lobatus</i> ②
<i>N. membranacea</i> ①	<i>H. ruhlandii</i> ③	<i>Th. crenatus</i> ②
	$4\text{H}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 \longrightarrow \text{H}_2\text{S} + 4\text{H}_2\text{O}$	<i>Th. umbonatus</i> ①
	<i>Desulfovibrio</i> : <i>D. desulfuricans</i> ②	<i>Th. ferrooxidans</i> ③
	<i>D. orientis</i> ②	<i>Th. thiocyanooxidans</i> ②

- Kaneda, T. and T. Roxborough : *Canad. J. Microbiol.*, **5**, 87 (1959); *Biochem. Biophys. Acta*, **33**, 106 (1959).
 Khoudekormoff, V. : *Ann. Inst. Pasteur*, **100**, 257 (1961).
 Knivett, V. : *Progr. Industr. Microbiol.*, **2**, 27 (1960).
 Kornberg, H., I. Collins and D. Bigley : *Biochem. Biophys. Acta*, **39**, 9 (1960).
 Kuznetsov, S. I., M. V. Ivanov and N. N. Ljalikova : "Introduction to Geological Microbiology", ed. Akad. Nayk, USSR (1962).
 Larsen, H. : "Handbuch der Pflanzenphysiologie", Bd. 5, T. 2, 613 (1960).
 Lees, G. : "Biochemistry of Autotrophic Bacteria" (1955).
 McFadden, B. : *J. Bacteriol.*, **77**, 339 (1959).
 Nakamura, T. and A. Yoshimoto : *Seibutsu-Kagaku*, **14**, 98, 152 (1962).
 Nason, A. : *Bacteriol. Revs.*, **26**, 16 (1962).
 Peck, H., Jr. : *Bacteriol. Revs.*, **26**, 67 (1962).
 Postgate, J. R. : *Ann. Rev. Microbiol.*, **13**, 505 (1959). ; *Progr. Industr. Microbiol.*, **2**, 47 (1960).
 Postgate, J. R. and L. L. Campbell : *Bacteriol. Revs.*, **30**, 732 (1966).
 Quayle, J. R. and D. Keech : *Biochem. J.*, **72**, 623, 631 (1959), **31**, 587 (1959), **78**, 225 (1961); *Biochem. Biophys. Acta*, **29**, 223 (1958), **75**, 515 (1960).
 Quayle, J. R. and G. Taylor : *Biochem. J.*, **18**, 3 (1961).
 Quayle, J. R. and P. A. Johnson : *Biochem. J.*, **95**, 859 (1965).
 Quayle, J. R. and D. Peel : *Biochem. J.*, **81**, 465 (1961).
 Quayle, J. R. and P. T. Large : *Biochem. Biophys. Acta*, **107**, 174 (1965); *Biochem. J.*, **87**, 386 (1963).
 Quayle, J. R. and M. B. Kemp : *Biochem. J.*, **99**, 41 (1966).
 Quayle, J. R. : *J. Gen. Microbiol.*, **32**, 163 (1963); *Ann. Rev. Microbiol.*, **15**, 119 (1961).
 Ruban, E. L. : "Physiology and Biochemistry of Nitrifying Microorganisms", ed. Akad. Nayk, USSR (1961).
 Santer, M., J. Boyer and U. Santer : *J. Bacteriol.*, **78**, 199 (1959).
 Santer, M., M. Margulies, N. Kleinman and R. Kabach : *J. Bacteriol.*, **79**, 313 (1960).
 Schlegel, H., G. Gottschalk and von R. Barth : *Nature*, **191**, 462 (1961).
 Senoz, J. : *Bacteriol. Revs.*, **26**, 95 (1962).
 Sokolova, G. A. and G. I. Karavaiko : "Physiology and Ecological Activities of Sulfur-oxidizing Bacteria", ed. Akad. Nayk, USSR (1964).
 Suzuki, I. and C. Werkman : *Arch. Biochem. Biophys.*, **76**, 103 (1958).
 Trudinger, P. : *Biochem. Biophys. Acta*, **18**, 581 (1955), **30**, 211 (1958), **31**, 270 (1959).
 Trudinger, P. : *Biochem. J.*, **64**, 274 (1958), **78**, 673, 680 (1961).
 Tsuru, S. : "Roles of Microorganisms in Biosphere", *Jap. J. Chem.*, **17**, 35 (1964).
 Tsuru, S. : "Microbial Activities in Sediments", Symp. Soc. Geol., Nagoya (1967).
 Van Itersen, W. : *Verhandel. Koninkl. Nederl. Akad. Wet., Afd. II, Reeks*, **52** (1958).
 Van Niel, C. : *Ann. Rev. Microbiol.*, **8**, 106 (1954).
 Vishniac, W. and M. Santer : *Bacteriol. Revs.*, **21**, 195 (1957).
 Vishniac, W. and P. Trudinger : *Bacteriol. Revs.*, **26**, 168 (1962).
 Winogradsky, S. : "Microbiologie du Sol", 1949, p. 16.
 Youatt, J. : *J. Gen. Microbiol.*, **11**, 139 (1954).

化学天びんで 0.1 mg のけたまで 正確にはかれるか

三 井 哲 夫
京都大学農学部

メートル法に基づく諸基本単位のうち、長さ、質量は、われわれ化学研究に従事している者にとって、最も身近な単位系である。このうち、長さは1960年以来その定義が変更され、国際メートル原器に基づくことが廃止され、光波基準となり、白金製のメートル原器は単に参考品として従来どおり保管される物体となるに至った。その結果、測定精度は向上して、 10^{-8} ないし 10^{-9} に達している。一方、質量の基準については、今なお人造の白金製国際キログラム原器が基準となっており、破壊のおそれのない天然標準を求めるための多くの努力がなされているにもかかわらず、現在ではその糸口さえも見つかっていない状況である。国際キログラム原器の保管は摩耗、汚染について十分な考慮がなされており、ガス放出による減量や空気酸化による増量も無視できる程度で、白金中に存在する白金の同位元素の崩壊による質量変化も著

しく小さいこともわかっているもので、これに優る信頼性のある質量基準を得ることは容易でない。さらに質量測定技術は、その原理がしごく簡単であるにもかかわらず、長さや温度などの測定技術に比して優れており、キログラム原器の測定精度は光波基準による長さの測定精度と同じく、 10^{-8} ないし 10^{-9} である。

わが国の計量の基準を定めた法律は計量法であり、最近改正が行なわれ、現在のものは昭和42年6月30日に施行された「新計量法」で、質量測定の分野に関する改正も多い。この新計量法によれば、下記の基準のいずれかに該当するものは「検定除外」の計量器として認められ、検定の義務を免ぜられることになっている。

1) 主として学術研究用、生産管理用など特殊の用途に用いられるもの、2) 検定を行なう必要はあるが、技術的な理由でさしあたり検定を行なうことができないもの