

高度先端技術における真空の役割



中山 勝 矢*

Role of Vacuum in High-technologies

Katsuya NAKAYAMA

1. ま え が き

真空の話は広い。全体を説明することはそれほど簡単なことではない。その理由の一つは、真空の領域が広範にわたるからであり、第二はその利用が複雑で多岐であることによる。

工学的な真空は、決して真に空なる状態を指すものではない¹⁾。こういった状態の実現に限りなく努力することは大切である。だが、われわれの関心をこの点にのみとどめておいたのでは真空利用の発展は期し難い。

現在、真空の定義は、国際的に「大気圧より低い圧力の気体で満たされている特定の空間の状態」となっている。宇宙時代を迎えた今日、この定義に難点がないとはいえないが、とにかく真空とは大気圧以下のすべての圧力領域を対象としており、15 桁以上に及ぶのである。

そもそも真空は利用があつてこそ価値がある。真空は単なる場に過ぎない。それ自体が経済的な価値を持つことはないとしてよい。歴史的にも、利用によつて真空技術は発展してきたことを忘れてはならない。

真空の領域は非常に広範にわたるから、そこで起きる現象も種々のものがある。真空の利用とは、つまりは真空下で起きる諸現象の利用にはかならない。最近では、多方面から真空の利用が試みられており、真空を利用した商品も驚くほど増えた。これを一概に説明することは、今や困難になつた。

真空技術は、これまで「真空を作成、計測する技術」と理解されてきた。しかし、産業技術として考えた場合には、これでは狭いような気がする。むしろ積極的に、「真空下で起きる諸現象の利用を達成するための技術」と考えた方がよい²⁾。

このような立場から、真空の技術と利用とを展望し、今後の技術的課題を明らかにしてみたい。

2. 真空を実現する基本的な考え方¹⁾

2.1 容器とポンプ

宇宙空間へ行つて真空を利用しようという考え方もあるが、当分は経済的に無理である。

大気圧下において真空を実現するためには、大気圧の空気をさえぎる容器と内部の気体を除去するための機械とが必要である。

容器に加わる圧力は最大 1 気圧程度であるから、たいした問題ではないといえるものの、これが内圧でなく外圧であるため、装置が大型になつた場合、常に座屈のことを念頭においておく必要がある。

既存の材料はいずれも、真空用の材料としては不完全なものである。あとで述べるように、材料を通しての気体の透過、材料表面からの気体の脱離、分解など気体の発生が見られ、真空の実現を妨げる。

通常、機械工学では、流体に圧力や速度などを付与しながらこれを輸送する装置をポンプと呼んでいる。しかし真空技術では、これよりも広い意味で使つており、一般に真空ポンプとは気体を除去する機能をもつ装置のことである。もちろん、油回転ポンプやルーツブロアー型のメカニカルブースターのような機械ポンプもある。また拡散ポンプやターボ分子ポンプのように、気体分子に直接運動量を与えて流れを作るポンプも存在する。だが、化学的に活性な面や極低温に保たれた面によつて気体分子を吸着、あるいは固化するだけのポンプは、真空技術独特のものである。これらすべてを真空ポンプと呼ぶ。

真空下の諸現象を利用するために、まず希望する真空の状態を実現しなければならないが、とにかく完全に近い容器と性能のよい真空ポンプのあることが前提となる。ところが、これが意外と難しい課題なのである。

2.2 真空容器の排気

いま図 1 のような容器を考える。容積 V (m^3) で、

昭和 61 年 12 月 11 日受付 (Received Dec. 11, 1986) (依頼解説)

* 工業技術院中国工業技術試験所所長 工博 (Government Industrial Research Institute, Chugoku, Agency of Industrial Science and Technology, 15000 Hiromachi Kure 737-01)

Key words: high technology; vacuum; pump; physical properties; plasma; gas flows; electronic device; nuclear physics.

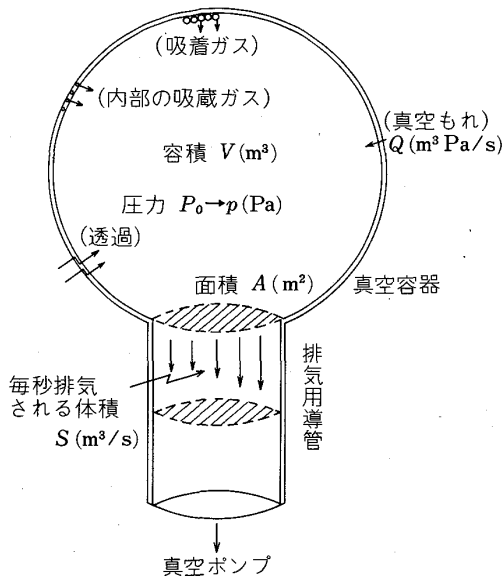


図1 真空容器の排気

最初の圧力が P_0 (Pa), とりつけられている排気用配管の断面積 A (m²) を通して毎秒一定体積だけ気体の膨張が許されているとする。つまり体積速度 S (m³/s) で排気が定常的に続いている場合を想定する。この S を, 真空技術では排気速度と呼んでいる。

この配管の先には, たえず S (m³/s) ずつ気体を分ちとつては圧縮し, 大気圧に排出する機械ポンプがあるとしてもよいが, ここに極低温面があつて, やはり S (m³/s) に相当する気体分子を固化し, 気相から除去し続けている場合もある。

ある時刻 t のときの真空容器内の圧力を p (Pa) とすると, 排気の方程式は

$$V \frac{dp}{dt} = -Sp \quad (1)$$

となり, $t=0$ のとき $p=P_0$ という条件を入れれば

$$p = P_0 \exp\left(-\frac{S}{V}t\right) \quad (2)$$

である。

$V=2\text{ m}^3$, $S=1\text{ m}^3/\text{s}$ の場合, p が 10^{-4} だけ低下するに要する時間は 18.5 s で, しかも超高真空に至るまで限りなく真空容器の圧力は低下し続けるという結論が得られる。しかし, これは実情と著しく異なっている。

その原因はいくつかある。

第一に, 真空ポンプ自体に到達できる圧力の限界があることで, 真空容器の真空はこれを越えることはできない。

第二に, 真空容器は一般に不完全なのである。まずどこかに気体のもれがあるとする。その量が Q (m³·Pa/s) としよう。そうすると, (1) 式は右辺に Q を加えねばならず, 少し長い時間が経過した後の真空容器の圧力

表1 物理的な現象の利用例

現象	利用目的	利用の例
A. 圧力が低い	差 圧	真空チャック, 鋳型, 成型, 搬送, 掃除機, ピンセット
B. 分子密度が小さい	断 熱	ジャー, 電気炉, 低温容器, 宇宙環境試験装置
	有害物除去	真空包装, 脱気, 金属熱処理, 白熱電球, 蒸留
C. 平均自由行程が長い	衝突回避	電子管, テレビ受像管, 蒸着分子蒸留, 電子顕微鏡, 粒子加速器, X線管, 質量分析計
	放電持続	蛍光灯, レーザー, 核融合, スパッタリング装置, ネオンサイン
D. 入射頻度が小さい	清浄面の維持	電子源(電子銃), 薄膜作成人工格子作製, 電子デバイス

p_f (Pa) は

$$p_f = Q/S \quad (3)$$

となる。これが真空容器の到達圧力である。

第三に, 真空もれが仮になかったとしても, 容器内壁や内部に装着された部品の表面などから, 毎秒同じ割合で気体が発生していたら同様のことになる。実際は, こういつた表面から発生する気体の量と種類とは千差万別近く, また時間とともに変化するから, 事態は複雑である。ゆつくりと真空が向上するように見える。

3. 真空下の現象とその利用³⁾

真空の利用とは真空下で起きる諸現象の利用のことだから, まず真空下の現象を整理しておきたい。

ここでは, それらの現象を大別して, 物理的な現象と化学的な現象とし, 利用との関係を述べる。

3.1 物理的な現象の利用

特定の空間の状態を大気圧以下にすれば, 当然差圧が生じる。差圧の利用は最も古く, 今日でも行われている。この場合, 特定空間を完全に封じ切つたのでは利用できないので, 一部開放して目的を達する場合もある。

具体的な例は, 表1に示した。

気体の圧力の低下は, 単位容積中に存在する気体分子の個数(気体分子密度)の減少にほかならない。酸素が減っているから, タングステンを加熱しても燃焼しないわけで, 白熱電球が生まれた。実際にはタングステンの蒸発を抑えるために窒素やアルゴンを加えている。最近, 食品関係では防腐剤添加を避けるために, 真空包装が急速に普及した。反応性の強い金属を溶融したり加熱したりするときも同じである。酸素や窒素を除くために真空にする。

気体が希薄になれば, 気体分子どうしの衝突が減る。その結果, 気体分子は衝突せずに飛行できる距離が長くなる。この平均的な距離を平均自由行程というが, これが容器の代表的な寸法と同程度になると, 真空の状況は著しく変わった様子を示す。物理学では, 平均自由行程

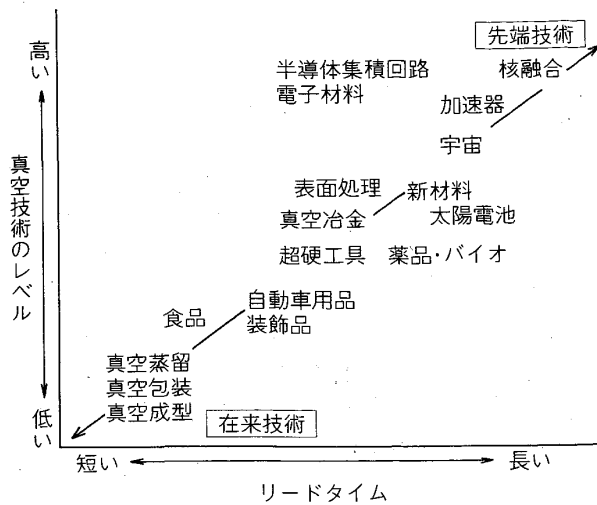


図2 真空と先端技術とのかかわり

が容器の代表的な寸法に比べて短い状況を粘性流と呼ぶのに対し、長くなった場合を分子流と名付けて区別する。

粘性流領域では、気体の熱伝導率は気体の圧力に無関係だが、分子流領域では比例して減少する。つまり分子流領域では、真空がよくなると断熱効果が向上する。この現象を利用したものが、ジャー、電気炉、低温容器などである。これは真空利用の一つの大きな分野である。

平均自由行程は、気体中を飛ぶ電子やイオンに対しても同じ効果が期待できる。つまり低圧では電子やイオンは気体分子に邪魔されずに進むことができる。これが電子管や粒子加速器、電子顕微鏡に真空がいる理由である。

逆に少し圧力が高い中真空では衝突が適当にくり返され、電子やイオンは再結合や生成を行って放電が持続する。蛍光灯、ネオンサイン、レーザー、スパッタリング装置、核融合などが、これに当たる。

固体表面へ飛来する気体分子の数も気体の分子密度に比例する。したがって清浄表面の維持には超高真空が、有害分子の分圧を極度に下げることが必要である。高性能の電子デバイスや電子部品の製造、光学用部品のコーティングなどには、この点の配慮が重要である。ニーズ側からの強い要望が、こうした技術を進展させた。

真空利用のなかには他の技術で代替できるものもある。だが大雑把にいつて、イオン、電子、プラズマといった荷電粒子の利用には真空が必要だとしてよい。

全体に、圧力差や有害物除去などといった利用に比べ、荷電粒子や表面汚染防止を目的とした利用は新しい。技術も複雑であり、図2に見るように先端技術とのかかわりも一般に深いといつてよい。

3.2 化学的な現象の利用

真空状態においては、大気圧下では見られない電子、イオン、あるいはプラズマに伴う化学反応が可能である。また励起種とかフリーラジカルといった高エネルギー準

表2 化学的な現象の利用例

現象	利用目的	利用の例
A. プラズマ反応	材料合成	アモルファス太陽電池 ダイヤモンド薄膜
	表面改質	親水性表面層形成
B. 元素供給	組成改変	イオン注入、イオン照射による改質、表面処理
C. 分解析出	成膜 表面処理	減圧 CVD、プラズマ CVD、 光 CVD、ガス源 MBE、人工 格子、電子デバイスの製造
D. 反応析出	成膜 表面層形成	化成スパッタリング、イオン プレーティング、装身具 製造、超硬工具の皮膜形成
E. 反応除去	エッチング	半導体デバイス

位にある粒子も出現して反応に関与することが多いから、新しい利用の開ける可能性が高い。（表2）

グロー放電法によるアモルファス太陽電池の製造は明らかにプラズマ反応の利用といえようし、減圧 CVD、光 CVD などによる表面処理や成膜は分解析出という化学反応によるものである。化成スパッタリングやイオンプレーティングは、いまや超硬工具や装身具用の成膜技術として大いに利用されている。これなどは大気圧下の加熱程度ではとても作れない TiC とか TiN といったものを、イオンを介在させることで反応析出させている。

エッチングのように、反応性の強いラジカルやイオンを、プラズマ放電というプロセスで作り出して局所的に目的を達する場合もある。逆に表面と反応させて改質を行うことも可能である。

こうした真空下の化学的な現象の利用は、1970 年代後半において、半導体製造、電子材料、電子部品といった新しい先端技術の分野で、特にめざましい展開を見せた。その技術的な内容は、単に物理的な現象の利用にとどまるものではなく、積極的に真空下で化学反応を起こさせて固体表面に物質層を形成させたり、微細加工のために除去したりしているのが特徴である。

真空下の化学的な現象には、イオンや電子、あるいはプラズマが関与する場合が多い。このような反応はまだ解明が不十分で基礎研究も遅れている。それにもかかわらず産業上の利用は進み、設備の投入が行われてきた。

最近では、こうした半導体や電子材料、電子部品の分野で始まった技術革新が、鉄をはじめ、各種金属材料、有機材料、無機材料にも及ぶ傾向が見られる。CVD のような化学的な成膜法も加え、表面処理による高付加価値化に注目が集まっている。さらに新しい課題として、真空中で蒸発させたウランのレーザー分離も付け加えておくべきかも知れない。これも真空下の大切な現象である。

4. 高度先端技術と真空の役割⁴⁾

4.1 高度先端技術とは

高度先端技術というと、今日、エレクトロニクス、情

報, 新素材, バイオテクノロジー, 航空・宇宙, 原子力といったように個別に課題が列挙されることが多い。しかし, どういう技術のことかという説明は聞かない。

一般的にいうとしたら, 高度先端技術とは「未知未だの世界に向かつて拡大を続けている既知の世界の最先端にある技術」のことではないかと思う。ここでは, このような考え方に立つて話を進めることとしたい。

4.2 歴史的な展望

17 世紀においては, トリチェリの水銀柱の実験も, フォン・ゲーリケの空気ポンプによるマルデブルグの半球の実験も, 当時の最先端の技術と知識に関するものであったに違いない。生まれながらにして重い大気層の底に生活している者にとつては, 大気圧に関する正確な知識を得, さらに真空の世界に達することは容易でなかった。真空は本来われわれの日常生活で経験する知識の外にあるものだからである。

19 世紀に真空放電という現象から得られた新しい知識は量子力学や電子工学の基礎となった。電子管工業から電子工業に至る最先端の産業を生み出した。エジソンの白熱電球でさえ, ガス灯に比べていかに当時の高度先端技術だったか説明を要しないほどである。X 線管や電子顕微鏡が新しい物質観を切りひらく道具として活躍し, 粒子加速器は原子核エネルギーへの道を見出した。

鉄をはじめ多くの金属材料は, 真空処理によつて高品質化が図られている。医薬品は真空凍結乾燥により, 成品は真空中の分子蒸留で商品化されるなど, 真空利用による先端技術の例は多い。

4.3 電子産業と真空

1975 年 (昭和 50 年) に, わが国で大々的な超 LSI 開発プロジェクトが開始された。それまでの液相プロセス中心の製造技術は, より集積度の高い超 LSI のために, ドライブプロセスと呼ばれる真空下のプロセスに転換された。この 10 年間, わが国真空業界は年平均 20% の伸びを示したが, それは両者の関係の深さを物語っている。

シリコン半導体デバイスにおいて, 1 チップあたりどの程度まで集積度があげられるものかは, 技術の極限への挑戦である。そのなかで真空プロセスが多用されていることは特筆されてよい。例えば, 蒸着やスパッタリングなどの成膜プロセス, 露光後のエッチングプロセス, イオン注入などのドーピングプロセス, 分析評価プロセスといった具合である。

その後化合物半導体による光集積回路, コンパクトディスク, レーザーディスク, 光磁気記憶装置, ジョセフソン素子など, 新しい分野を目指した研究開発と商品開発が盛んである。そこには真空装置が多数使われている。現在でもわが国真空業界の出荷先の大半は電気・電子業界である。(図 3)

このように真空利用が進む第一の理由は, 化学反応を

半 導 体	そ の 他	電 気 工 業	金 属 工 業	機 械 工 業	光 学 工 業	自 動 車 工 業	化 学 薬 品 工 業	そ の 他
電子工業	46.7	15.7	8.9	5.4	4.0	3.2	3.9	12.2
昭和 59 年度 真空機械売上額 1657 億円								

図 3 わが国真空業界の出荷先

含む電子, イオン, プラズマの利用である。もう一步踏みこんで考えてみると, 電子, イオン, プラズマ, 励起種, フリーラジカルといったものと固体面の両者が関与した現象が浮上してきているといえそうである。この辺は新しい領域で未解明の部分が多いだけに先端性が高く, 多くの人から挑戦を受ける価値のあるフロンティアなのであろう。

現在, シンクロトロン放射光 (SOR) が, 電子デバイスに限らず電子材料の分野で注目を集めている。このことにも高度先端技術と結びつく真空の現状を見ることができる。

電子産業の分野で真空が利用される第二の理由に, 固体表面の汚染の管理がある。超高真空技術を基盤とした現在の真空技術には大いに期待が寄せられるのだが,それほど簡単でない。人工格子作成用の分子ビームエピタキシー (MBE) 装置に関して, 多くの要求が出されている。

4.4 巨大加速器と核融合研究装置

今日の真空技術にとつて, もう一方の大きな課題は巨大加速器と核融合研究装置である。(図 2 参照)

いずれも巨大なこと, 高エネルギーの粒子を扱うこと, 放射線が存在すること, 強磁場や強電場が共存することといった幾多の新しい問題がある。高エネルギーの粒子や電磁波 (光子) によつて真空容器の内壁が衝撃や照射を受ければ, 多量のガスを発生する。スパッタリングによる不純物の発生, 壁面の損傷, 莫大な熱入力等は, 従来の真空技術ではあまり経験してこなかった問題なのである。

こういった最先端の真空利用にまつわる新しい技術課題を明確にしておくため, 高エネルギー粒子や電磁波の多量に存在する真空を他と区別してホットバキュームと名付けている。これは, 高度な先端技術に結びついて, 真空技術がキーテクノロジーとしての役割を果たす場合に生ずる一例に過ぎない。

歴史的に見ても, 真空という日常生活外の環境で得られる新しい知見が, 先端技術となり, あるいは先端技術を支えた例が多い。この傾向は今後も変わらないと思われる。

5. 真空技術の新しい問題⁵⁾⁶⁾

差圧、断熱、有害物除去といった古くからの真空利用とは別に、電子、イオン、プラズマの利用、清浄表面の保持といった分野のあることを述べた。さらに半導体デバイスの製造装置に関連して、真空下の化学的現象の利用が進んでいること、また粒子加速器と核融合装置とに関連して高エネルギー粒子や電磁波と真空内壁の問題があることに触れた。

ここではそれ以外で、今日の真空技術が直面している新しい問題を列挙しておきたい。

(1) 真空装置内のゴミの問題

半導体デバイスの製造プロセスにおいては、極めて微細なゴミでも歩留りを低下させることになるので嫌われる。ところが真空装置内は、いままで十分に検討されてこなかったこともあつて、少なからず問題のあることが最近指摘されるようになった。

こういったことは狭い意味の真空技術ではない。しかし、真空下の現象の利用を十分に達成させるという立場からすれば等閑に付すわけにはいかない。例えば、真空装置内の摺動部分などの再検討が必要になつている。また吸排気時の乱流で生じる発塵の防止策も課題である。

(2) 真空装置のロボット対応策

クリーンルーム内の人間を極力減らすためにロボットの導入が急速に進んでいる。したがって、真空装置自体が、これらロボットと対応のとれるものであることが要求されるようになってきている。とくに半導体デバイスやコンパクトディスクなどの製造段階では著しい。(写真1)

(3) 真空装置の安全化

半導体デバイスの製造プロセスでは、有毒物質を導入することが少なくない。また、導入するときは無害な安全性の高い物質でも、プラズマ化された場合には思いも寄らない反応性の高い物質に変化していることがあり得

る。そのために、多くの油回転ポンプが損傷したり、配管が腐食する事故も起きた。こうしたことも、今後の真空技術においては常に注意を払うべき課題である。

(4) 真空装置の洗浄

ひ素やり人を多量に扱う真空装置が増えている。この場合、装置内壁に付着している状態では、運搬、修理、廃棄などが困難である。こういった汚染された真空装置の洗浄がしだいに問題になつてきている。洗浄法のいかんによつては、真空装置として機能しなくなることもあり得るのであり、生産装置の場合とくに問題が大きい。

(5) プロセス制御用のソフトウェア

生産装置としての真空装置は、多くのセンサーを持つてコンピューターコントロールされている。そのためにソフトウェアが用意されるのが普通である。ソフトウェアを作るためには、そのプロセスを完全に把握している必要があるのは当然で、かつての真空技術からいえば相当に踏み出した形になつてきている。

(6) アルミニウム材の採用

これまで真空装置の基本的な材料は軟鋼かステンレス鋼であつた。とくに超高真空装置はステンレス鋼が普通であつた。シンクロトロン放射による発熱が避けられない高エネルギーの大型加速器では、器壁の冷却が大きな問題になる。その対策のため精力的な研究が行われ、トリスタン計画ではアルミニウム材が採用されている。

半導体製造装置のような場合でも、今後装置の軽量化という別の観点からアルミニウム材の使用が検討される方向にある。ただ加速器と異なり、化学反応を内部で行わせたり、いろいろな材料を随時持ち込む可能性が高いので、腐食の点を十分に調べておく必要がある。

アルミニウム材に限らず、セラミックスなども含めた新素材を必要に応じて採用してゆくことができるよう研究を進めておくことが必要になつてきている。

(7) 真空中における放出ガス量

すでに真空ポンプの能力が決まつている場合、目的とする真空が得られるか否かは、真空容器ならびに内部に入れた各種材料からの放出ガス量による。こういったものから発生する気体の量が10倍になれば、真空容器内の圧力も10倍になる。

従来、真空下での製造プロセスの例は少なかつたし、また真空中に持ち込む素材も限られていたから、あまり大きな問題になつていなかった。しかし多量生産の工程に超高真空プロセスを入れるとなると、これは大きな課題となる。例えばコンパクトディスクの蒸着をロボットを駆使して実施しようとする場合、素材の高分子材料からの放出ガス量がロットによつて異なるというのでは、品質管理上困る。

こうした問題に対処するため、放出ガスの試験法の規格化が最近浮上してきた。現在、日本真空協会が中心になつて調査を急いでいるが、イオンや電子、さらに電磁

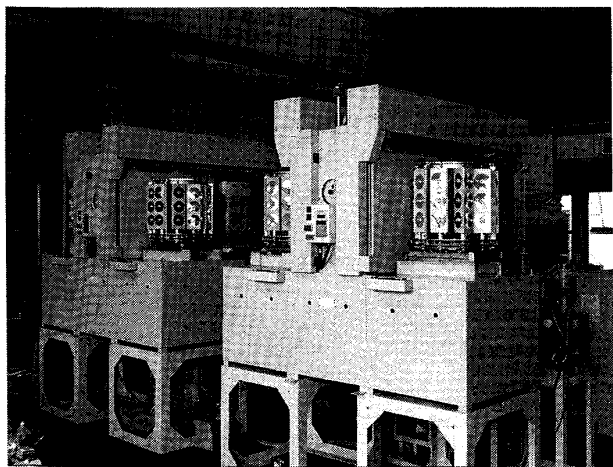


写真1 ロボットによる着脱方式のコンパクトディスク連続蒸着装置 (徳田製作所提供)

波の効果まで入れると非常に難しくなる。しかし、今後の真空利用を進めるためには避けて通れない課題である。

(8) 中真空領域の真空ポンプと真空計

真空下の化学的な現象に基盤を置いた真空利用が進んでいるが、これはどちらかといえば中真空領域であることが多い。中真空領域は、これまで研究の進んでいなかった領域である。気体の流れの性質からは粘性流と分子流の中間にある。真空ポンプでは、これまでルーツブロワー形のメカニカルブースターが使われていたが、最近ではクライオポンプとターボ分子ポンプの低真空側の性能を向上させて置き換える方向にある。

真空計についても、電離真空計とピラニ真空計の使用可能領域の限界付近にあつて、よいものがない。スピンドローター真空計や隔膜真空計も不十分であり、また高価である。現在大気圧から 10^{-1} Pa まで測れる水晶摩擦真空計の開発が進んでいるが、実用はこれからである。

6. お わ り に

はじめに述べたように、真空を大気圧より低い圧力の気体で満たされている特定の空間の状態と考え、そこで起きる諸現象の利用を達成するための技術が真空技術だとすると、これは当然横断的、支援的な性格を持つことになる。

そのために、今日の真空技術は基本的なことはいえて

も、具体的なことになれば説明に困窮する。とくに真空下の新しい現象の利用を図ることが続く限り、常に先端技術的な性格を持ちやすく、未踏の境地に行くことになるので、一般論の説明はなお難しい。教科書はないのが普通である。つまり未知のことが多いのである。

最近先端技術といわれ、確かに先端技術だと思う技術には真空を必要とするものが多い。いくつか理由を挙げてみると、第一に電子、イオン、プラズマといった荷電粒子が介在する場合、第二に極めて清浄な特別環境が必要とされている場合、第三にきちんと管理された雰囲気が必要とされる場合、第四に有毒ガスを扱うので安全性を確保したい場合、第五に極めて高温、あるいは低温を扱うため断熱を必要とする場合などとなる。真空技術がキーテクノロジーとして認識されるようになっていくことは確かである。

今後とも真空利用の進むことを願つて筆をおくこととしたい。

参考文献

- 1) 中山勝矢: 真空技術実務読本 (1967) [オーム社]
- 2) 通産省先端機械技術開発調査委員会報告書 (真空機器) (1986年7月)
- 3) 中山勝矢: トリガー, 5 (1986) 12月号, p. 105
- 4) 日本の科学と技術 (真空特集), 28 (1987) 243
- 5) 中山勝矢: ターボ機械, 13 (1985), p. 513
- 6) 日経メカニカル (1986年12月15日), p. 37