分子流真空領域の抵抗回路網シミュレーション技術*

太田 進**・吉村 長光**

(昭和56年12月5日 受理)

Resistor Network Simulation Technique
for Molecular Flow Vacuum Region

Susumu OHTA and Nagamitsu YOSHIMURA

(JEOL Ltd., Nakagami, Akishima, Tokyo 196)

(Received December 5, 1981)

1. 序

複数のガス源と複数のポンプによって構成される真空系において、その圧力分布を求めることはなかなか難しい。これを求めるため、電気回路網によってシミュレーションする方法¹⁾について検討した。そのプロセスの概要は次のとおりである。

(1) ガス源は流量発生器と見なされる。ポンプの排気機能および、排気管のコンダクタンスは、いずれも真空抵抗に変換される。真空系はこれら要素によって構成される真空回路網と見なされる。

(2) 上記構成要素は、各々、電気回路網における電圧発生器と抵抗に対応するものと見なされ、真空回路網自体も電気回路網に対応せしめられる。

(3) このようにして想定された電気回路網上の電圧分布は真空系中の圧力分布に対応するものとして、シミュレーションされる。

なお、この方法は分子流領域のみを対象としている。

2. 真空概念とシミュレーション

分子流領域において、導管のコンダクタンスは圧力に依存しない。各種ガス源から放出されるガス量もまた、圧力には依存しないと考えられている。真空ポンプは、分子流領域において、ほぼ一定の排気速度を保持する。このような真空系においては、オーム則が成立する。

すなわち、圧力 P 、流量 Q 、コンダクタンス C および排気速度 S の間には、 $P=Q(1/C+1/S)$ の関係が成立する。

ここで、 P と Q は電気回路における電圧 V と電流 I に対応し、 $1/C$ と $1/S$ は共に電気抵抗 R に対応する。この考察は、真空系が電気回路網によってシミュレーション出来ることを示唆している。以上の概念はまだ従来概念の範囲内である。

2.1 真空系とその構成要素に関する新しい概念

流量 $Q(\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ のガス源は、 $Q=P_0/W_0$ の関係で規定されると考える。すなわち、このガス源は発生圧力 $P_0(\text{Pa})$ の圧力発生器と真空抵抗 $W_0=P_0/Q(\text{s} \cdot \text{m}^{-3})$ の抵抗器が直列接続された機能を持ち、かつ、その一端は絶対真空に、他端は真空圧力に接続されていると考える (Fig. 1 (a) 参照)。ただし、発生圧力 P_0 は真空圧力に比べて十分に大きく、従って、真空抵抗 W_0 も導管等の抵抗に比べて十分に大きい、との条件が付されている。

コンダクタンス $C(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ の導管は真空抵抗 $W_c=1/C(\text{s} \cdot \text{m}^{-3})$ の抵抗器と考える排気速度 $S(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ のポンプは真空抵抗 $W_s=1/S(\text{s} \cdot \text{m}^{-3})$ の抵抗器が絶対真空に接続されていると考える。

ここでさらに、仮想ルートの概念を導入する。この仮想ルートは上述の絶対真空領域に対応するものであり、ガス源とポンプ各々の絶対真空側を接続する。この結果、ここに提案された真空系は閉回路を形成する。

以上の概念を従来概念と共に Fig. 1(a)~(d) に図示する。

* 昭和56年11月6日 第22回真空に関する連合講演会で講演 (6Ap-6)

** 日本電子株式会社 (東京都昭島市中神町1418)

Fig. 1 Comparison between conventional and proposed concepts for vacuum elements and vacuum system. The part closed by chain lines shows a high vacuum region. Ground potential corresponds to the absolute vacuum (zero Pa).

2.2 新しい概念の検討

Fig. 1(d) に示した二つの真空系において、圧力 P_m と P_n は従来概念に基いて、次の如く導かれる。

$$P_m = Q/S \quad (1)$$

$$P_n = P_m + Q/C = Q(1/S + 1/C) \quad (2)$$

圧力 P_m' と P_n' は新しい概念に基いて、次の如く導かれる。

$$P_m' = P_Q \cdot W_s / (W_Q + W_c + W_s) \quad (3)$$

$$\approx Q/S \quad (\because W_Q = P_Q/Q, W_Q \gg W_c, W_s) \quad (3')$$

$$P_n' = P_Q(W_c + W_s) / (W_Q + W_c + W_s) \quad (4)$$

$$\approx Q(1/S + 1/C) \quad (\because \text{同上}) \quad (4')$$

(1)式と(3')式の対比、および(2)式と(4')式の対比から、 P_m と P_m' および P_n と P_n' はおおむね等しく、新しい概念はおおむね承認される。なお、上式間における差異は、流量の圧力依存性に基くものであり、後章において、改めて考察する。

2.3 キルヒホフ則の導入

複雑な真空回路網においては、多くのループ路が含まれる。この場合には、電気回路網におけるキルヒホフ則と同等の法則が成立すると考える。すなわち、

第1則；真空回路網において、或る点に入出する流量の代数和は零である。

第2則；いかなる閉じた真空ループにおいても、すべての発生圧力の代数和と、すべての真空抵抗における圧力降下の代数和は等しい。

真空回路におけるキルヒホフ則の証明は電気回路の場合と全く同じプロセスであるため、ここでは省略する。

2.4 シミュレータの作製手順

実際のシミュレーションは電気回路網によって行われる。真空回路網における各構成要素の次元は、圧力 (Pa)、流量 ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) および抵抗 ($\text{s} \cdot \text{m}^{-3}$) である。これに対応する電気回路網の次元は、電圧 (V)、電流 (A) および抵抗 (Ω) である。ただし、実際のシミュレータにおいては、取扱いの容易さ等の観点から、これらの値に或る係数が乗ぜられる。

ガス源の発生圧力は頭初 10^5 (Pa) が選ばれる。この理由は、他の真空圧力に比べて十分に大きな値であること、また、大気側からのリークを想定した場合に、問題が考え易いためである。

シミュレータの作成手順は以下のとおりである。

(1) まず、2.1 で述べられた概念に従って、真空回路網を作図する。この場合、コンダクタンス C_i (i は位置を示す指標。以下同じ) の導管は $1/C_i$ ($\text{s} \cdot \text{m}^{-3}$) の抵抗器となり、排気速度 S_i のポンプは $1/S_i$ ($\text{s} \cdot \text{m}^{-3}$) の抵抗器となる。ガス量 Q_i のガス源は 10^5 (Pa) の圧力発生器と $10^5/Q_i$ ($\text{s} \cdot \text{m}^{-3}$) の抵抗器が直列接続されたものとなる。

(2) この真空回路網を電気回路網に変換する。この場合、単位系の変換は次のとおりとなる。

$$\text{Pa} \rightarrow \text{V}, \text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \rightarrow \text{A}, \text{s} \cdot \text{m}^{-3} \rightarrow \Omega$$

この結果、圧力発生器は電圧発生器に、真空抵抗器は電気抵抗器に変換される。

(3) この電気回路網に対して、取扱いの容易さ、回路部品の入手の容易さの観点から、或る係数が剩ぜられ、シミュレータ回路に変換される。すなわち、

(i) 10^5 V の圧力発生器は 10 V の圧力発生器に変換される。従って、シミュレータとしての変換係数は 10^4 Pa/V となる。

(ii) ガス源に対応する全ての抵抗器の抵抗は M 倍される。M 倍された抵抗が他の抵抗器の抵抗より充分大きい、という条件が付く。この結果、変換係数は $10^4 \cdot \text{MPa/V}$ となる。

(iii) 全ての抵抗器の値は N 倍される。変換係数は $10^4 \cdot \text{M Pa/V}$ のままである。

2.5 シミュレータの使用法

シミュレータを構成し、シミュレータ各点の電圧を測定する。真空系の真空圧力分布はシミュレータの変換係

数, $10^4 \cdot \text{MPa/V}$ より求められる。

系の或る場所にガスを導入し、種々の圧力設定を行う系に対して、シミュレーション技術が便利に適用出来る。すなわち、シミュレータにおいて、ガス導入場所に対応する点に可変電圧発生源を接続し、設定真空圧力に相当する電圧を供給することによって、容易にシミュレーションされる。

3. 考 察

前章までの展開においては、以下の三つの項目について、問題を残している。すなわち、

(1) ポンプは固有の到達圧力をもつが、この点を無視している。

(2) シミュレータ作成においては、適宜係数を乗じて定数変更を行っている。この場合の誤差発生について言及していない。

(3) 流量の高真空圧力依存性について、考察を保留している。

まず(1)項については次のように考える。排気速度 S 、固有到達圧力 P_u の真空ポンプが、流量 Q を排気する時の、ポンプ直上の圧力は $P_u + Q/S$ となる。このことは、真空回路中のポンプ抵抗器の絶対真空側に、圧力 P_u の圧力発生器を追加すれば良いことになる。

(2)項はむしろ電気回路の誤差問題であり、シミュレーションの本質から離れるため、検討を省略する。ただし、実際には、1%以下の誤差でシミュレータを作製することは容易である。

(3)項については、やや詳細に以下考察する。

3.1 流量の高真空圧力依存性

まず、ガス源が大気からのリークである場合を考える。リークのコンダクタンスを $C(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ 、絶対真空 (0 Pa) へのリーク量を $Q_0(\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ 、高真空 ($P_h \text{ Pa}$) へのリーク量を Q_{Ph} とすれば、

$$Q_0 = C \times 10^5$$

$$Q_{Ph} = C (10^5 - P_h)$$

となる。従って、リーク量の高真空圧力依存性として、(5)式が成立する。

$$Q_{Ph} = Q_0 (1 - P_h/10^5) \quad (5)$$

次に、ガス源が材料のガス放出である場合を考える。ガス放出現象に対して、次の仮定をする。すなわち、

(1) 高真空 ($P_h \text{ Pa}$) においては、絶対真空 (0 Pa) における放出ガス量 Q_0 よりも P_h に比例した量だけ少ない放出ガス量 Q_{Ph} を放出する。

(2) 限界真空圧力 $P' \text{ Pa}$ 以下の真空圧力領域において、(1)の関係が成立する。

(3) 限界真空圧力 $P' \text{ Pa}$ において、放出ガス量は零と

なる。

以上の仮定のもとでは、放出ガス量の高真空圧力依存性は(6)式で表わされる。

$$Q_{Ph} = Q_0 (1 - P_h/P') \quad (6)$$

(5)式、(6)式より解るように、上記の仮定のもとで、放出ガス量の高真空圧力依存性も、リーク量の依存性と類似した形態であることがわかる。

ここで、ポンプの到達圧力及びリークを想定した場合のガス量の圧力依存性を考慮した、新しいシミュレーション真空回路を提示する。Fig.2(a)の真空系の新しいシミュレーション回路はFig.2(b)に示される。Fig.2(b)において、 Q_0 は絶対真空にリークするときの流量である。真空回路における Q_{Ph} は(5)式を満足していることが明かである。

ガス源として、材料のガス放出を想定する場合には、Fig.2(b)のシミュレーション真空回路において、 Q_0 を絶対真空(現実には極高真空)における放出ガス量とみなし、 10^5 Pa の値を $P' \text{ Pa}$ に置き換えて扱うことができる。

(a) High vacuum system

(b) Precisely simulated vacuum circuit

Fig. 2 High vacuum system and its precisely simulated vacuum circuit.

従来概念においては、ガス放出量は高真空圧力には、依存しない、と一般に考えられている。一方この論文で提案した概念では、(5)式または(6)式に関係を仮定している。この相異が(1)式、(2)式と(3)式、(4)式間の差異を生ぜしめている。

以上のことは、別途検討の上、改めて報告したい。

謝 辞

シミュレーション法の考察に際し、有益な討論をしていただいた、日本電子学会の平野治男氏に感謝する。

〔文 献〕

- 1) S. Ohta: Abstract for 4th annual meeting of the vacuum society of Japan, 21a-3 (1963).