エアバッグ方式流量計を用いたオゾンゾンデ用ポンプ効率測定装置の開発

中野 辰美*・岩野 園城**

Development of a Pump Efficiency Measurement System for Ozonesonde using the Bag Method Flowmeter

Tatsumi NAKANO and Sonoki IWANO

要旨

オゾンゾンデに内蔵されるポンプの低圧下における流量特性，すなわちポンプ効率を測定する装置を開発した．同装置は測定法としてエアバッグ方式を採用した流量測定部，低圧環境を再現する気圧制御部，およびこれらを統合して制御する制御部で構成される．ECC 型オゾンゾンデのポンプを用いた測定試験の結果，ポンプの排気側負荷によりポンプ効率が顕著に変化することが明らかとなり，ポンプおよび反応管を含めた流量特性として測定する必要があることがわかった．また，他の機関が取得した ECC 型の平均的なポンプ効率値と比較し，妥当と思われる測定値が得られていることを確認した．今後はさらに測定値の検証を進めるとともに，自動測定等の機能を加え，測定システムとして完成させる予定である．

1．はじめに

現在世界で利用されている各種オゾンゾンデは，その殆どが電気化学式であり，いずれも大気を吸引し反応管へと導く小型のピストンポンプを内蔵している(図 1). このポンプは周囲の気圧が低くなるに従い流量(体積流量)が低下する特性をもち，地上での流量に対する比率をポンプ効率として上空大気の吸引速度補正に用いる．

通常このポンプ効率は地上気圧から 100hPa 程度までは殆ど変化しないが，数 10hPa 以下では急激に低下し，現在気象庁で採用している KC 型オゾンゾンデ(以下, KC 型という)においては，10hPa で 25%，5hPa で 66%の補正量に相当する．KC 型のポンプ効率は，バブリング限界の気圧を基準とした理論式(気象庁：1997)によるが，これまで実際のポンプ効率の振る舞いや個体差が測定値に与えている影響は把握されていない．

また, 世界で広く使用されている ECC 型オゾンゾンデ(以下，ECC 型という)のポンプ効率についても，一般的には開発時の実験値，あるいは製造元の推奨値といった平均値のテーブルが用いられるため, 同様の問題があり，近年のオゾンゾンデ国際比較観測(WMO：2004a，2004b)においても観測に不確かさを与える要因として取り上げられている．このような課題について調査を行うには，低圧下におけるポンプ流量を測定し，個別のポンプ効率を把握する必要があるが，そのような特殊な流量計は市販されておらず，新たに開発する必要があった．

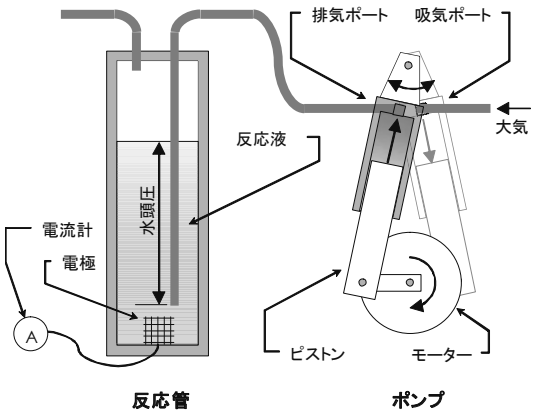

図1　電気化学式オゾンゾンデのセンサー部略図

電気化学式オゾンゾンデは，ピストンポンプにより大気を吸引し，反応液(ヨウ化カリウム溶液)とオゾンの反応により生じる電流を測定する．このとき，ポンプの排気側に対して反応液のバブリングに伴う負荷(水頭圧)が加わる．

*高層気象台 観測第三課 **高層気象台 観測第二課

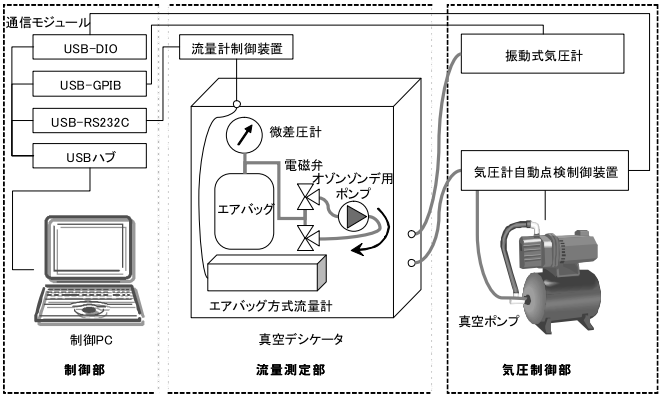

図2　ポンプ効率測定装置の概念図

制御部：装置全体の制御を行う制御PCおよび通信モジュール，流量測定部：ポンプ流量を測定するエアバッグ方式流量計および流量計制御装置，気圧制御部：低圧環境を再現する真空ポンプ，気圧計自動点検制御装置，振動式気圧計で構成される．

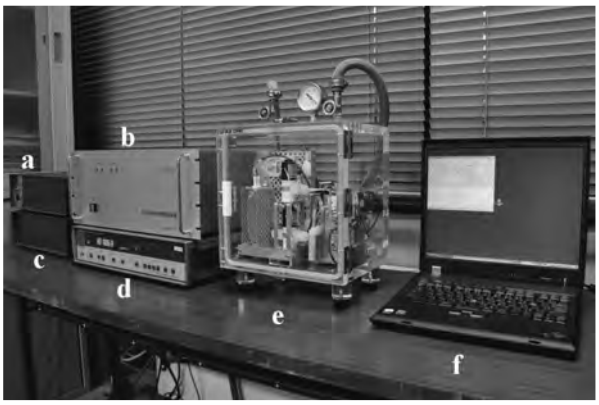

写真1　ポンプ効率測定装置の概観

a：流量計制御装置 b：気圧計自動点検制御装置 c：制御部通信モジュール d：振動式気圧計 e：真空デシケータおよびエアバッグ方式流量計 f：制御PC

海外の一部の機関においては，すでにポンプ効率の測定を行い，ポンプの性能の確認および観測値の品質向上を図っており，NOAA/CMDL ではシリコンオイルを用いたシリコン膜方式流量計を開発（Johnson *et al.*：2002)し，それまで標準的に用いられてきたポンプ効率テーブルが，現在製作されている ECC 型のポンプ効率に対して過小であることを示した．また，ワイオミング大学ではエアバッグと高ポンプ効率のギアポンプを用いたエアバッグ収縮方式流量計により個別のポンプ効率の測定を行っている．

今回の開発にあたり，各種のポンプ効率測定法を検討した結果，自動測定への発展を考慮して，制御の容易なエアバッグ方式を採用した流量計を製作し，ポンプ効率の測定システムとして開発を行った．本稿では同装置の概要，測定方法，および測定試験結果について紹介する．

２．装置の概要

ポンプ効率測定装置は大きく 3 つの部分にわかれており，低圧下におけるポンプ流量を測定する「流量測定部」，低圧環境を再現するための「気圧制御部」，およびこれらを統合して制御する「制御部」からなる．なお，「気圧制御部」はオゾン観測官署に整備されている既存のシステム(坂尻ほか：1995)の一部である．装置の概念図を図 2 に，概観を写真 1 に示す．

２．１ 制御部

ポンプ効率測定装置全体の制御および流量データの収集を行うため，Windows PC に各種の通信モジュール(DIO, GPIB，RS232C)を組み合わせている．これらのモジュールと制御 PC 間は USB による接続となっており，汎用的な PC で制御可能となっている．

ポンプ効率測定制御プログラムは Windows 上で動作するソフトウェアとして開発し，これを用いて気圧制御部の制御，および流量測定部の制御を行う．また，このプログラムは，流量測定部から一定時間毎に各種測定データを取得し，物理値へ換算，振動式気圧計他の情報とあわせてデータを収集する機能等がある．

２．２ 気圧制御部

真空デシケータ内の気圧を制御し，低圧環境の再現を行う役割をもつ．制御プログラムにより気圧計自動点検制御装置内の排気バルブの開度を操作すると，真空ポンプの排気速度，つまり真空デシケータ内の減圧速度を調節することができる．また，大気圧開放用の電磁弁の開閉とあわせて操作することで，加圧速度の調節も可能である．

減圧および加圧の開始時には，真空ポンプ内のオイルの逆流防止や，急激な気圧変化を起こさないように一連の手順に従って操作を行う必要があるが，制御プログラムにはこれらを安全に実行する機能がある．

流量測定は指定気圧ごとに行うが，このときは減圧速度を 0 とし，できるだけ安定した気圧を維持する必要がある．現時点では指定気圧ごとに排気バルブの開度の目安を設け，手動による減圧速度の調節を行っているが，目標気圧に対しておよそ±0.1hPa 以内で気圧を維持することができる．また，このシステムの排気限界は 3hPa 未満であり，実際の観測に対して十分な範囲の低圧環境の再現が可能である．

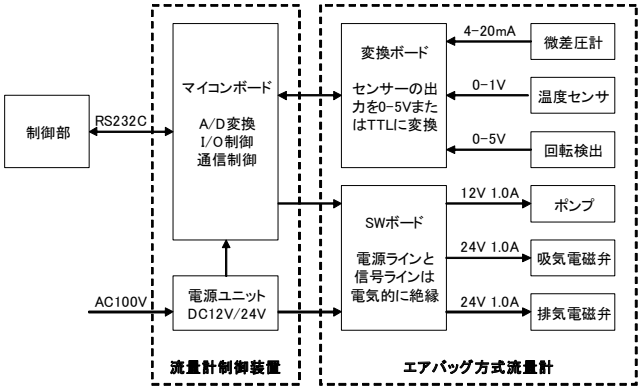

図3　流量測定部の概要図

エアバッグ方式流量計は，センサー出力の変換ボード，ポンプ，電磁弁の電源制御を行うスイッチボードがあり，流量計制御装置のマイコンボードを介して各種の測定および制御を行う．

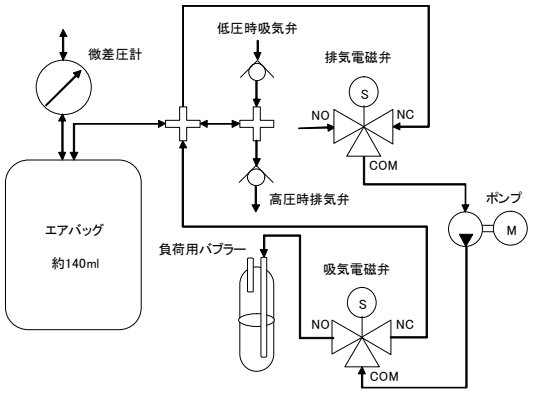

図4　エアバッグ方式流量計の配管接続図

二つの電磁弁により，ポンプからエアバッグへの吸気，排気の切り替えを行う．エアバッグ内外圧差(差圧)を測定する微差圧計，ポンプに排気側負荷を与えるバブラーがある．

２．３ 流量測定部

真空デシケータ内部に測定対象のオゾンゾンデ用ポンプ(以下，特に区別する必要がない場合は単にポンプという)，エアバッグ方式流量計を配置し，真空デシケータ外部の流量計制御装置によりエアバッグへの吸気，排気をはじめとする流量計の各種制御および測定を行う．流量測定部の概要図を図 3 に示す．

流量計制御装置は，流量計への電源供給をはじめ，内蔵のマイコン(H8/3052F)によって 1 ミリ秒毎に流量計の状態の監視および制御を行い，制御 PC とは RS232C により，制御命令および測定データの送受信を行っている．このように流量計制御部が時間的に密な制御を担当することで，制御 PC にかかる負担を大幅に低減している．エアバッグ方式流量計には，各種センサーの出力をマイコンボードへの入力に適合させるための変換ボード，およびポンプ，電磁弁の電源制御を行うスイッチボードがある．これらの電源ラインと信号ラインはフォトカプラを用いて電気的に絶縁し，信号ラインへのノイズの混入を低減させている．

流量測定部の主な制御，測定項目は以下のとおり．

・ポンプの ON/OFF
・吸気(排気)弁による流路の切り替え
・エアバッグ内外圧差(差圧)の測定　(0.01hPa)
・ポンプ温度，デシケータ内温度の測定　(0.1℃)
・ポンプ回転速度の測定　(0.1r.p.m)
・規定の差圧をトリガーとした時間間隔の測定　(1msec)

エアバッグ方式流量計の配管接続図を図 4 に示す．吸気弁，排気弁はフッ素樹脂製の三方電磁弁で，無通電状態では NO(Normal Open)－COM(Common)間が通じ，通電状態では NC(Normal Close)－COM 間が通じる．これらの弁を交互に切り替えることでポンプからエアバッグ内への吸気および排気を行う．エアバッグには吸排気用のポートとは別に差圧測定用のポートを設け，安定した差圧の測定を行えるようにしている．微差圧計には，Setra Systems の圧力トランスデューサ Model 265 を用いた．測定範囲は±1hPa で精度は±1%FS である．吸気弁の NO 側にはポンプに排気側負荷をかけるためのバブラーが取り付けてあり，この中には流量測定に影響を与えないように非常に蒸気圧の低いシリコンオイル(Dow Corning Toray SH704 diffusion pump fluid)を入れてある．

また，測定時以外のエアバッグおよび微差圧計内の空気は，周囲と閉ざされた密閉状態となることから，真空デシケータ内の気圧変化により膨張，収縮し，エアバッグおよび微差圧計に過大な圧力がかかる恐れがある．このため，ある一定以上の差圧を検出するとポンプによって自動的にエアバッグへの吸気および排気を行う保護動作を取り入れたほか，制御不能時に備えて低圧時吸気弁，高圧時排気弁を取り付けている．

エアバッグの素材については，ごく小さな力で変形すること，気密性が高く，伸び縮みが少ないこと，加工性に優れていることが求められるが，入手できた素材のなかでは厚さ 0.01mm のポリエチレンフィルムが最も良好な動作を示した．またエアバッグが膨張，収縮を繰り返すうちにしわがより，誤測定を起こす場合があったため，エアバッグ内部にひとまわり小さいフッ素樹脂フィルムを入れてしわの防止を図っている．試作を重ねた結果，最終的には点滴のバッグに似た形状となった．

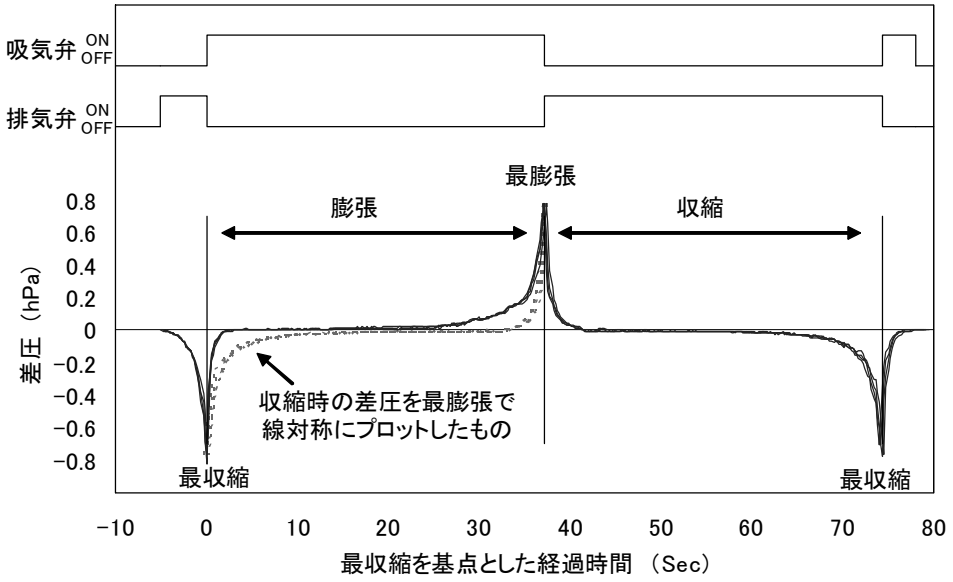

図5　膨張収縮を繰り返した時のエアバッグの差圧変化の様子

地上気圧において，エアバッグの差圧が±0.8hPa に達した時点で膨張，収縮を切り替えたときの差圧変化の様子．最収縮を基点に連続 4 回の計測結果を重ねている．点線は，収縮時の差圧を最膨張で線対称に折り返すようにプロットしたもの．あわせて吸気弁および排気弁の切り替えシーケンスについても示してある．

３．エアバッグ方式によるポンプ効率の測定方法

３．１ 基本的な考え方

エアバッグを用いた基本的な流量測定のアイデアとしては，エアバッグが収縮しきった状態(以下，最収縮という)から，ポンプで空気を送り込み，エアバッグが膨張しきった状態(以下，最膨張という)となるまでの時間(膨張時間)，あるいは最膨張から最収縮までの時間(収縮時間)を計測する方法があげられる．任意の気圧 p におけるポンプ効率 k_p は，地上におけるポンプ流量 S_0 とその気圧におけるポンプ流量 S_p の比率であることから，エアバッグの内容積 V_b を気圧によらず一定に再現することができれば，この測定時間 t_p の比率で以下のとおりポンプ効率 k_p が求まる．このようにポンプ効率のみを算出するには，エアバッグの内容積 V_b について正確な値を必要としない．

$$S_p = V_b / t_p \qquad (1)$$

$$k_p = S_p / S_0 = (V_b / t_p) / (V_b / t_0) = t_0 / t_p \qquad (2)$$

ここで，

k_p ： 気圧 p におけるポンプ効率

t_p ： 気圧 p における計測時間，t_0 は地上値

S_p ： 気圧 p における流量，S_0 は地上値

V_b ： エアバッグの内容積(一定と仮定)

一方，エアバッグの内容積は，エアバッグの差圧により生じるエアバッグ表面上の張力によって決まると推察される．そこで地上気圧において，差圧が±0.8hPa に達した時点で膨張，収縮を切り替える一連の計測を複数回行い，最収縮時を基点とした経過時間に対する差圧変化の様子として図 5 に示した．地上におけるポンプ流量が安定していることを考慮すると，経過時間はエアバッグの内容積と等価と考えることができ，折り返してプロットした収縮時の差圧が最収縮で一致することから，このときの膨張時間と収縮時間は等しく，一定体積の吸気と排気を繰り返していることがわかる．また，膨張時と収縮時では差圧と内容積の関係が一致しないヒステリシス状の特性を持っているが，複数回の計測結果は，常に同じ位置に重なっている．

これらのことから，膨張時の差圧と収縮時の差圧はそれぞれある決まったエアバッグの内容積をあらわしており，一定の差圧(以下，差圧閾値という)を検出した時間の間隔を測定することで(2)式よりポンプ効率を求めることができる．

以上は温度変化による影響を考慮していないが，実際には電磁弁やポンプのモーターの発熱があるため，測定誤差の要因となる．このため，測定前には 1 時間以上のウォームアップを行い，ポンプおよび流量計の温度を安定させた後に測定を行う必要がある．

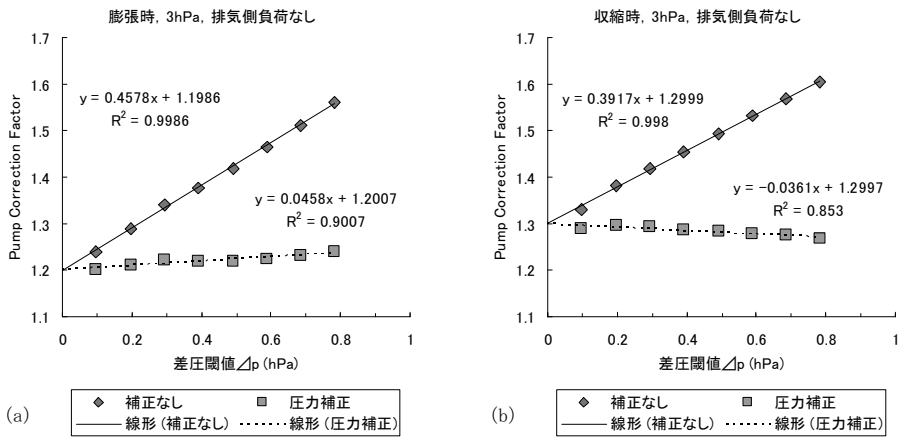

図6　差圧閾値別のポンプ修正係数

差圧閾値別に算出したポンプ修正係数(ポンプ効率の逆数)について，補正なしと，圧力補正を行ったものをプロットした. (a)は膨張時, (b)は収縮時の計測時間を元にし, それぞれ周囲の気圧 3hPa における値である. これらは，ポンプの吸排気ポートから直接流量計に接続し，排気側負荷をかけない状態で計測した.

３．２ 差圧による影響の補正

実際にエアバッグ内に送り込まれた空気は，差圧による影響で伸縮を起こすと考えられ，この伸縮量が計測時間に与える影響について，エアバッグ内の気圧変化を体積変化に換算して考えてみる．周囲の気圧 p に対し，エアバッグの差圧が Δp で，温度には変化がないと仮定すると，ボイル・シャルルの法則から，エアバッグの内容積 V_b は，エアバッグの差圧 Δp と周囲の気圧 p の比だけ変化させて考えることができ，計測時間 t_m は，気圧 p における正味の計測時間 t_p に対して以下のように表される．さらに厳密には，配管の容積やポンプの吸気側と排気側が置かれている気圧についても考慮する必要があるが，これらの影響は小さいため省略する．

$$t_m = t_p \cdot (1 + \Delta p / p) \qquad (3)$$

ここで，

t_m ： 計測時間

t_p ： 気圧 p における正味の計測時間

p ： 周囲の気圧

Δp： エアバッグの差圧

これによると，周囲の気圧 p が低くなるほど計測時間への影響が増大することがわかる．(3)式を用いた計測時間の補正(以下，圧力補正という)の効果を確認するため，差圧閾値を±0.1～±0.8hPa まで順番に変化させ，それぞれについて，ポンプ効率を求め，補正しない場合との比較を行った. 周囲の気圧 3hPa における結果を図 6 に示す．なお，ECC 型においてはポンプ効率の逆数であるポンプ修正係数(Pump Correction Factor)を用いて表すことが一般的であるため，図 6 はこのポンプ修正係数を用いて図示してある．以降の図表もこれに従うこととする．

これによると，圧力補正の結果は概ね良好であるが，補正後も差圧閾値との相関が高く，完全には補正されていない．これは，先ほど省略した配管の容積等について考慮しても殆ど変わらないことがわかっており，別の要因として差圧がポンプへの負荷として作用する効果が考えられる．つまり，エアバックを膨張させる場合には排気側負荷として，エアバックを収縮させる場合には負の吸気側負荷として作用しているとすれば先の圧力補正の結果と矛盾しない．ただし，これらの負荷は計測中に変化し，さらに個体差により応答が異なると予想されるため，単純には補正できない．このような影響を避けるためには, より低い差圧閾値での計測を行うことになるが，微差圧計での検出そのものが難しくなり，時間間隔の計測にも誤差が生じやすくなるため限界がある．

一方，補正なしのポンプ修正係数は差圧閾値に対して非常に高い相関を示しており，回帰直線のy切片は差圧閾値0のポンプ修正係数の推定値として十分に利用可能と思われる．この推定は，圧力補正分を除いた残りの負荷として作用する部分についても差圧閾値と比例関係があると仮定しているが，負荷が±1hPa程度の範囲であれば大きな問題とはならないであろう．したがって，実際の測定においては，複数の差圧閾値別計測時間から，回帰直線によって差圧の影響を補正したポンプ修正係数を推定することとした．

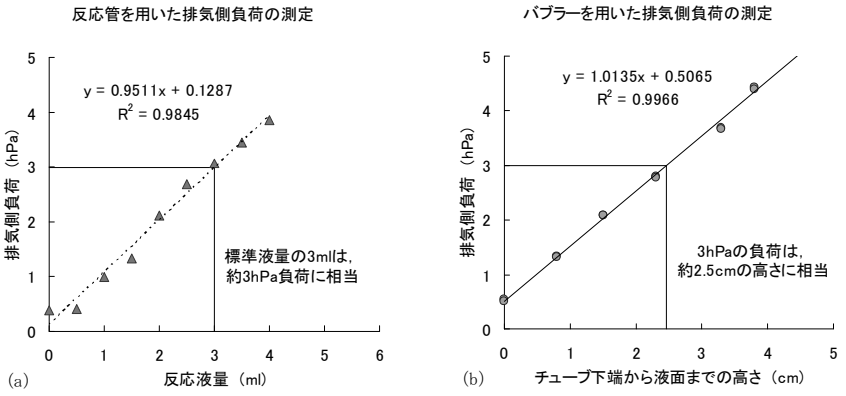

図7　ポンプ排気側負荷の測定結果

地上気圧におけるポンプの排気側に加わる負荷の測定結果．振動式気圧計を用いてポンプの排気ポートと周囲の気圧の差を測定した．(a) 反応管を用いた排気側負荷．(b) バブラーを用いた排気側負荷．　ECC型(EN-SCI 1Z)のポンプおよび反応管を用いて測定．

４．測定試験

４．１ ポンプ排気側負荷の測定

観測時の状況を再現したポンプ効率の測定を行うため，地上気圧においてポンプの排気側負荷を調査した．反応管を用いた排気側負荷の測定結果を図 7(a)に示す．これによると，ECC 型の標準反応液量である 3ml に対して，排気側負荷は約 3hPa であった．同様に流量計のバブラーを用いた排気側負荷の測定結果を図 7(b)に示す．これによると，3hPa の排気側負荷の再現には，チューブ下端から液面までの高さを約 2.5cm とすればよいことがわかる．なお，以上を含めた全ての測定試験には，同一の ECC 型(EN-SCI 1Z)のポンプを用いた．

４．２ ポンプ排気側負荷によるポンプ効率の変化

ポンプの排気ポートから直接流量計に接続し，バブラーを用いて排気側負荷を 3hPa かけた場合と，排気側負荷をかけない(0hPa)場合の比較を行った結果を図 8(a)に示す．膨張時はいずれも排気側負荷をかけていない同一の条件であるため，両者のポンプ効率に差はない．一方，収縮時では 3hPa の負荷をかけたほうが大きくポンプ効率が低下(3hPa で約－17%)しており，排気側負荷がポンプ効率に与える影響は大きいことがわかる．

４．３ 反応管を通したポンプ効率の変化

ポンプの排気ポートから直接流量計に接続した場合と，空の反応管を通した場合について比較を行った結果を図 8(b)に示す．これによると，反応管を通したことでポンプ効率は低下(3hPa で約－6%)し，反応管そのものが排気側負荷として作用していることがわかる．

４．４ 反応液量によるポンプ効率の変化

空の反応管(0ml)と，ECC 型の標準反応液量である 3ml を入れた場合について比較を行った結果を図 8(c)に示す．このとき，実際の反応液を入れると蒸気圧の影響で正常な流量測定ができなくなるため，代わりに反応液とほぼ同じ比重のシリコンオイルを用いた．これによると，反応液の負荷によってポンプ効率は低下(3hPa で約－4%)するが，その影響は比較的小さいことがわかる．

４．５ 膨張時と収縮時のポンプ効率の比較

ポンプへ与える負荷の条件が膨張時と収縮時で同一である試験について，膨張時と収縮時のポンプ効率の比較を行った結果を図 8(d)に示す．通常，ポンプの吸引速度と排気速度は同一であり，ポンプ効率についても同じ値となるはずであるが，膨張時に比べ，収縮時のポンプ効率は常に低い(3hPa で約－8%)．他の負荷によるポンプ効率の変化と同様に，周囲の気圧に依存した変化傾向を示すことから，なんらかの負荷が影響していると思われる．

４．６ 他の機関が取得したポンプ効率との比較

他の機関で取得された同型ポンプ(EN-SCI 1Z)のポンプ効率平均値と，今回取得したデータを比較した結果を図 8(e)，(f)に示す．ワイオミング大学では，反応液による負荷を与えずに測定していることから，反応液 0ml と比較した．一方，NOAA/CMDL では反応液よる負荷を与えた測定を行っていることから，反応液 3ml と比較した．これらによると，膨張時のポンプ効率は他の機関の取得した値と近く，気圧に対する変化傾向も同様であることから，今回取得したデータについては，ほぼ妥当な測定ができていると思われる．

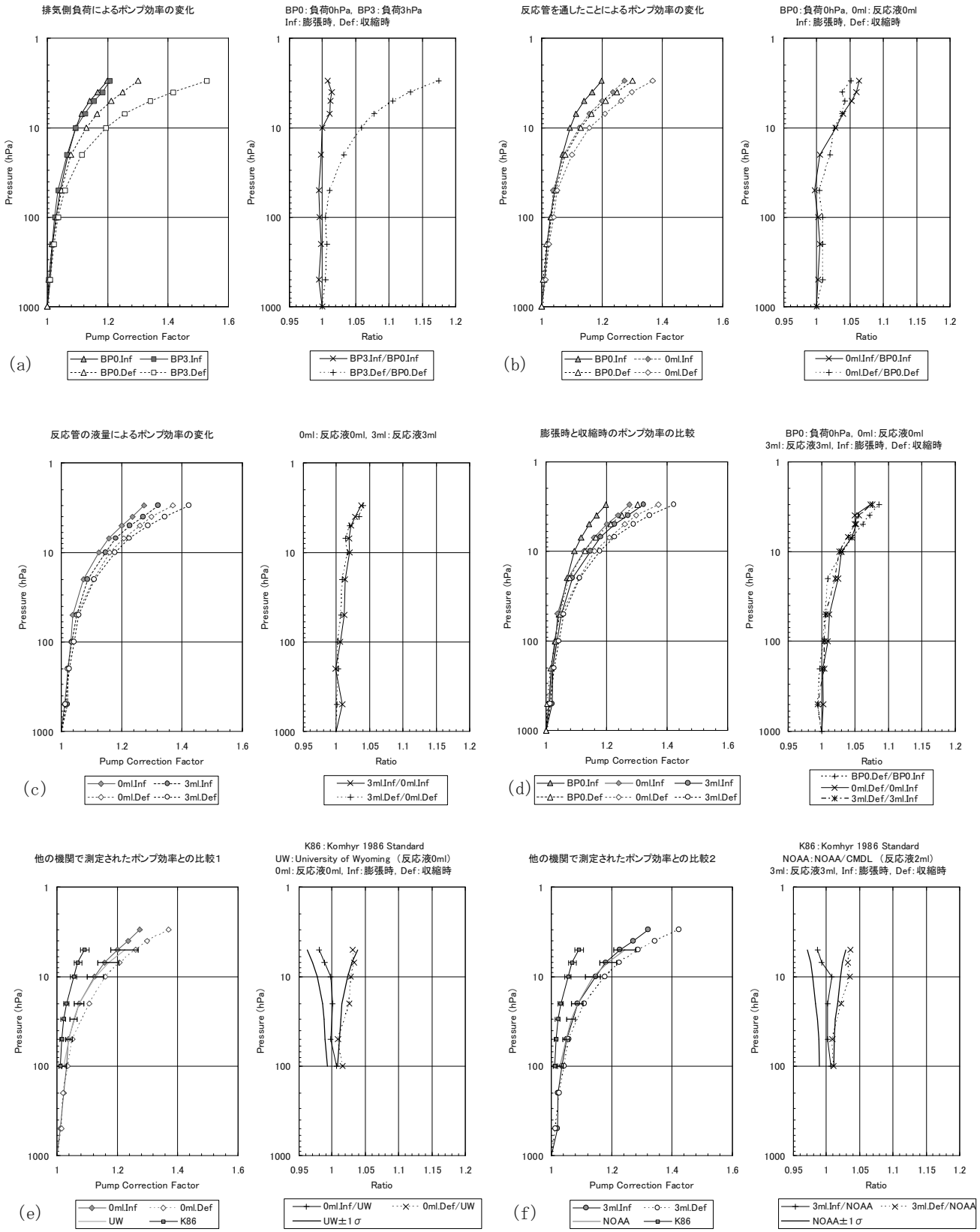

図8　ECC型(EN-SCI 1Z)のポンプを用いたポンプ効率の測定試験結果

(a) 排気側負荷によるポンプ効率の変化．(b) 反応管を通したことによるポンプ効率の変化．(c) 反応液の液量によるポンプ効率の変化．(d) 膨張時と収縮時のポンプ効率の比較．(e)と(f) 他の機関で測定されたポンプ効率との比較．

５．考察

反応管の反応液量に対するポンプ効率の変化は，周囲の気圧 3hPa で約－4%となり，バブラーを用いて 3hPa の排気側負荷をかけた場合の－17%と大きく異なる．この差異については，実際の反応管内でのチューブ下端から液面までの高さが約 7mm(約 0.7hPa の負荷に相当)であったことから説明できる．

反応管そのものが排気側負荷として作用することについては，反応管にチューブをセットする際に，底から伸びる細いガイドに差し込んでおり，このとき配管に細い部分ができ，空気の流れを阻害するためと思われる．つまり，ポンプの排気側負荷としては，バブリングに伴う負荷と配管等が与える負荷を別にして考える必要があるということになる．

膨張時と収縮時のポンプ効率が異なることについては，ポンプの吸引側になんらかの負荷が作用して収縮時のポンプ効率を低めに算出していると思われる．空気の流れを作る圧力差について考えると，ポンプの排気側が作り出せる圧力(正圧)は周囲の気圧に対しポンプの圧縮比倍であるのに対し，吸引側が作り出せる圧力(負圧)は，周囲の気圧の圧縮比分の 1 である．つまり，吸引側は排気側より低い圧力差しか生み出せず，僅かな負荷に対しても流量が変化する可能性がある．今後，この膨張時と収縮時の違いについては，装置の構造やデータ処理に問題がないかを含め，確認・検討を行う必要がある．

他の機関が取得したポンプ効率との比較では，NOAA/CMDL のシリコン膜方式流量計，ワイオミング大学のエアバッグ収縮方式流量計によるポンプ効率の測定結果と今回取得したエアバッグ方式による測定結果はよく一致した．一方，ECC 型に標準的に使われるポンプ効率(Komhyr：1986)とは，今回取得したデータと大きく異なった．この ECC の標準ポンプ効率については，現在製作されているポンプのポンプ効率の測定データを基にした平均的なポンプ効率テーブルを用いるべきであろう．

６．まとめ

オゾンゾンデに内蔵されるポンプの低圧下における流量特性，すなわちポンプ効率を測定する装置を開発した．流量測定法としてエアバッグ方式を採用した流量計を製作し，ECC 型(EN-SCI 1Z)のポンプを用いたポンプ効率の測定試験を行った．結果は以下のとおりである．

(1) ポンプの排気側負荷によるポンプ効率の応答は顕著であり，3hPa の排気側負荷によってポンプ効率は大きく低下する(3hPa で約－17%)．
(2) 反応管そのものが排気側負荷として作用し，反応管を通したことでポンプ効率は低下する(3hPa で約－6%)．
(3) ECC 型の標準反応液量 3ml のバブリングに伴う負荷によってポンプ効率は低下する(3hPa で約－4%)．
(4) 他の機関が取得した ECC 型の平均的なポンプ効率値と比較し，膨張時のポンプ効率は，ほぼ妥当な測定結果であることを確認した．

これらのことから，ポンプ効率の測定にあたっては，ポンプおよび反応管を含めた流量特性として測定する必要があることがわかった．今後はさらにポンプ効率の再現性の確認，測定値の検証を進めるとともに，自動測定等の機能を加える予定である．

謝　　辞

本稿を草するに際し，観測第三課の廣瀬保雄課長に数々のご助言を賜った．また，装置の製作には観測第二課の中村雅道主任技術専門官，松元誠技術主任，辰己弘技術主任，伊藤智志技官に御協力を頂いた．開発にあたり，地球環境・海洋部環境気象管理官付オゾン層情報センターの江崎雄治オゾン層観測係長，観測部計画課南極事務室の中島浩一技術主任に大変お世話になった．これらの方々に厚くお礼申し上げます．

引 用 文 献

Johnson, B.J., S.J. Oltmans, H. Vömel, H.G.J. Smit, T. Deshler and C. Kroger (2002) : Electrochemical concentration cell (ECC) ozonesonde pump efficiency measurements and tests on the sensitivity to ozone of buffered and unbuffered ECC sensor cathode solutions. *J.Geophys. Res.*, **107 (D19)**, 4393.

気象庁(1997)：オゾン観測指針 オゾンゾンデ観測編．気象庁，6-3.

Komhyr, W. D. (1986) : Operations Handbook - Ozone Measurement to 40-km Altitude with 4A Electrochemical Concentration Cell (ECC) Ozonesondes (used with 1680-MHz radiosondes). *NOAA Technical Memorandum ERL ARL-149*, 49pp.

WMO (2004a) : JOSIE-1998. *WMO/GAW*, **No.157**, 64pp.

WMO (2004b) : JOSIE-2000. *WMO/GAW*, **No.158**, 147pp.

坂尻政市・須田　智・細川孝彦・川上勝弘(1995)：ラジオゾンデ用全自動式気圧点検システムの開発試験及びその試験運用．高層気象台彙報，**55**，55 - 58.