異形状タンク内の液量計測[†]

—自動車燃料計への応用—

渡 辺 嘉二郎*・鈴木 林 蔵*・山 田 光 司*

Volume Measurement of Liquid in a Deformed Tank

—Application to the Fuel Meter of Automobiles—

Kajiyo WATANABE*, Rinzo SUZUKI* and Koushi YAMADA*

This paper describes how to directly and accurately measure liquid volume in a deformed tank which has gas-leaking pinholes, whose attitude changes and walls vibrate, and in which liquid sloshes. The proposed method differs from the conventional methods that use level meters and makes the measurement possible without setting level detecting devices such as a float in the tank. The method makes use of the Boyle's law, and the measurement procedure is as follows: (a) first, we determine the volume of gas in the tank by measuring gage pressure increased by compressing the volume in the tank, and (b) next, we find the volume of liquid by subtracting the volume of gas from the capacity of the tank.

This yields that one standard measurement system can be applied to a variety of tanks with a certain range of volume capacities, whereas the conventional methods using level meters are required to design and manufacture different detecting devices depending on shapes of the tanks. Thus, the proposed method can be effectively applied to accurate measurement of amount of fuel in an automobile tank.

Here, we focus our discussion only to measure fuel in the automobile tank, but this method can be generally applied to measure volume of liquid, solid and powder in a tank. Principle of measurement and procedure how to design instrument system based on the proposed measurement method is described. Validity of the proposed method was examined by experiments.

Key Words: fuel meter, volume measurement, deformed tank, level meter, Boyle's law

1. はじめに

燃料計は自動車の基本計器の一つである。燃料がほとんどない状態での残された正確な走行可能距離、省エネルギー運転に必要な正確なデータなどを運転者に与えるために、高精度な燃料計の開発は重要である。

タンク残留液量の計測はレベル計、流量計、秤、タンク内音響共鳴を利用する方法などの間接法と、体積の直接計測法に分類できる。これらのうち、レベル計による方法が最も多い¹⁾。この方法ではあらかじめ知っているタンクの断面積とレベル計で計測された液位より液体の体積を算定する。これは等断面積タンクの場合、体積が液位に線形に比例し、手軽な方法である。しかし、姿勢が変化する異形状タンクの場合、液位から液体の体積を正確に計算するのは困難である^{1), 2)}。

流量計による方法は、計測開始時の残留液量を初期値として、タンクの流入出量の差を積分し体積を求める。この場合、初期値の誤差は保存され、流量計の誤差が積分され、精度が悪い。流量計は燃料計ではなく燃料消費率計に用いられるほうが多い^{3), 4)}。

秤を用いる方法は液体の重量を計り、それから体積を求める。これは静止しているタンクには容易に応用できるが、振動がある場合には多くの問題を含む。

残留液量の直接計測法はタンクの形状、姿勢の変化によらず、レベル計を用いた場合の問題は生じない。しかし、この方法は少ない。1975年4月から1986年12月の11年半の文献をJICSTにより〔(体積計測). OR. (容積計測)]. AND. (燃料計)で検索してもこの範疇に属する文献はない。この方法の一例は粉体の密度計測に必要な粉体体積計測に応用されている。これはベックマン法⁵⁾と呼ばれる方法で、容積が既知の

[†] 第29回自動制御連合講演会で発表 (昭61・11)

* 法政大学工学部 小金井市梶野町 3-7-2

* Faculty of Engineering, Hosei University, Koganei
(Received January 20, 1987)

(Revised April 21, 1987)

完全密閉容器に一定の体積の空気を等温的に注入した後、容器内圧力を計測する。つぎに同じ容器に粉体を入れ、まったく同様に空気を注入し容器内圧力を計測し、これらの圧力の比と容器容積から粉体を入れた場合の容器内空気の体積を求め、容器容積からこの空気の体積を差し引く方法である。ベックマン法は直接法の多くの特長をもつが、気体の等温変化を利用しており、容器への空気の注入に容器の熱時定数に比例した時間を必要とする。さらに、容器にピンホールがあると、漏れにより容器内の圧力が低下し、著しい計測誤差をもつ。

ここでの提案はベックマン法に類似する計測法であるが、気体の断熱変化を利用し、漏れのあるタンクの残留量を高精度に高速に計測し、誤差1%程度で表示可能な自動車燃料計として動作できるものである。

2. 測定原理

2.1 仮定と問題の記述

Fig. 1 のような漏れがあり、姿勢が変化し、液面が揺動し、壁面が振動する異形状タンクを考える。タンク上部に取り付けたシリンダ内部のピストン底面 aa' は破線 $(-b, -b') \sim (+b, +b')$ の間で変化する。いま、このタンク、シリンダ系を破線 $(+b, +b')$ で2室A, Bに分け、つぎのように変数、係数を定義する。

- $v(t)$: ピストンの動きで変化するA室の容積
- v_0, v_{01}, v_{02} : $v(t)$ が正弦波運動する場合の振幅
- V_h : シリンダ内のB室の容積
- V_T : タンクの容量
- $V(t)$: B室(タンクとシリンダの容積 V_h の空間)の気体体積, $\max[V(t)] = V_T + V_h$,
 $\min[V(t)] = V_h$
- $V_F(t)$: タンク残留液体の体積
- $p(t)$: タンク内の気体の絶対圧力

Fig. 1 Scheme of the fuel tank

- $\Delta p(t)$: $v(t)$ の変化によるタンク内ゲージ圧力変化
- $\Delta p_s(t)$: 液面揺動によるタンク内ゲージ圧力変化
- $\Delta p_w(t)$: 壁面振動によるタンク内ゲージ圧力変化
- $\Delta p_T(t)$: $\Delta p(t)$ と $\Delta p_s(t)$ と $\Delta p_w(t)$ の総和
- $\Delta P(\omega)$: バルブを開き, $v(t)$ を周波数 ω で正弦波運動をさせた場合のB室のゲージ圧の振幅
- $\Delta P_h(\omega)$: バルブを閉じ, $v(t)$ を ω で正弦波運動をさせた場合のシリンダ内B室のゲージ圧の振幅
- $T(t)$: タンク内気体の絶対温度
- $\Delta T(t)$: $v(t)$ に伴い変化するタンク内温度変化分
- $n(t)$: タンク内の気体のモル数
- $\Delta n(t)$: 漏れによるタンク内気体のモル数の減少分
- R : ガス定数
- γ : タンク内気体の比熱比(定圧比熱/定積比熱)
- r : タンクの気体の漏れ流量抵抗
- τ : タンクの熱時定数
- T_L : 漏れ時定数

Fig. 1 の系についてつぎの仮定を設ける。

(A1) タンクの形状はタンク内空間を液で2カ所以上に遮らない。また、液の重量によるタンクの容積変化は無視できる。

(A2) タンク内の気体は理想気体とみなせる。

(A3) 壁面振動、液面揺動、A室のピストン運動による体積変化の速さは準静的変化とみなせる。

(A4) $\max\{v(t)\} \ll \min\{V(t)\}$ とする。

(A5) タンクの気体の漏れはピンホールによる。

以上の仮定は容易に満たされう。仮定(A1)の条件下でもさまざまなタンクが作れ、液の重量による容量変化は容易に補正できる。タンク内の温度、圧力では気体は仮定(A2)を満たす。音の伝播ですら準静的変化とみなせ、仮定(A3)は十分満たされる。仮定(A4)の $\ll$ の程度は $\max\{v(t)\}/\min\{V(t)\} \leq 1/20$ とする。

以上のタンク系のもとで、高精度に残留量を計測する方法を考える。

2.2 タンク内の気体体積変化と圧力変化

Fig. 1 のピストンを $0^- \leq t \leq 0^+$ の間でステップ状に変化させ、A室の体積を $v(0^-) = v_0$, $v(0^+) = 0$ とする。ここで仮定(A3)より、このステップ変化は準静的変化である。 $t \leq 0^-$ において、A, B室の気体の体積、圧力、温度、モル数はすべて一定値の定常状態にあり

$$\begin{aligned} v(t) &= v_0, \quad V(t) = V_0, \quad p(t) = p_0, \\ T(t) &= T_0, \quad n(t) = n_0 \end{aligned} \quad (1a)$$

であり、ステップ変化後の圧力、温度、モル数は

$$\begin{aligned} p(t) &= p_0 + \Delta p(t), \quad T(t) = T_0 + \Delta T(t) \\ n(t) &= n_0 - \Delta n(t) \end{aligned} \quad (1b)$$

で表わす。\$0^- \leq t \leq 0^+\$ 間のステップ変化の速さは熱時定数に比して速く、タンク内外での熱の出入りが無い。よってタンク内気体は断熱変化していると考えられ、

$$\begin{aligned} p(0^-) \{V(0^-) + v(0^-)\}^\gamma &= p(0^+) \{V(0^+) + v(0^+)\}^\gamma \\ T(0^-) \{V(0^-) + v(0^-)\}^{\gamma-1} &= T(0^+) \{V(0^+) + v(0^+)\}^{\gamma-1} \end{aligned} \quad (2a)$$

を満たす。ここで、

$$\begin{aligned} V(0^-) &= V_0, \quad v(0^-) = v_0, \quad p(0^-) = p_0, \quad T(0^-) = T_0, \\ V(0^+) &= V_0, \quad v(0^+) = 0, \quad p(0^+) = p_0 + \Delta p(0^+), \\ T(0^+) &= T_0 + \Delta T(0^+) \end{aligned} \quad (2b)$$

であり、\$\Delta p(0^+)\$, \$\Delta T(0^+)\$ はつぎようになる。

$$\begin{aligned} \Delta p(0^+) &= p_0 \{(1 + v_0/V_0)^\gamma - 1\} \\ \Delta T(0^+) &= T_0 \{(1 + v_0/V_0)^{\gamma-1} - 1\} \end{aligned} \quad (2c)$$

仮定(A2)より、タンク内は理想気体なので、\$t \leq 0^-\$ で

$$p_0(V_0 + v_0) = n_0 R T_0 \quad (3a)$$

を満たし、\$t \geq 0^+\$ においても次式を満たす。

$$[p_0 + \Delta p(t)] V_0 = [n_0 - \Delta n(t)] R [T_0 + \Delta T(t)] \quad (3b)$$

(3a), (3b)式より、\$t \geq 0^+\$ について \$\Delta p(t)\$ を求める。

$$\Delta p(t) = \frac{v_0}{V_0} p_0 + \frac{R}{V_0} [n_0 \Delta T(t) - \{T_0 + \Delta T(t)\} \Delta n(t)] \quad (4a)$$

また上式の \$\Delta T(t)\$, \$\Delta n(t)\$ の動特性は

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta T(t)}{dt} &= -\frac{1}{\tau} \Delta T(t), \\ \Delta T(0^+) &= T_0 \{(1 + v_0/V_0)^{\gamma-1} - 1\} \end{aligned} \quad (4b)$$

$$\frac{d\Delta n(t)}{dt} = \frac{1}{r} \Delta p(t), \quad \Delta n(0^+) = 0 \quad (4c)$$

で与えられる。(4b)式の解は

$$\Delta T(t) = T(0^+) e^{-t/\tau} = T_0 \{(1 + v_0/V_0)^{\gamma-1} - 1\} e^{-t/\tau} \quad (4d)$$

である。仮定(A4)より、\$v_0 < V_0\$ であり、

$$\begin{aligned} T_0 + \Delta T(t) &= T_0 [1 + \{(1 + v_0/V_0)^{\gamma-1} - 1\} e^{-t/\tau}] \\ &\doteq T_0 \left[1 + (\gamma - 1) \frac{v_0}{V_0} e^{-t/\tau} \right] \doteq T_0 \end{aligned} \quad (4e)$$

となる。よって(4a)式は、つぎようになる。

$$\Delta p(t) = \frac{v_0}{V_0} p_0 + \frac{R}{V_0} [n_0 \Delta T(t) - T_0 \Delta n(t)] \quad (4f)$$

\$v(t)\$ が \$0^- \leq t \leq 0^+\$ で \$v_0\$ から 0 にステップ変化したことを考慮に入れ、\$\mathcal{L}[\Delta T(t)] = \Delta T(s)\$, \$\mathcal{L}[\Delta n(t)] = \Delta n(s)\$, \$\mathcal{L}[\Delta p(t)] = \Delta p(s)\$ (\$\mathcal{L}\$ はラプラス変換) とし

て、(4b), (4c), (4f) 式をラプラス変換する。

$$\Delta T(s) = \frac{s\tau T_0 \{(1 + v_0/V_0)^{\gamma-1} - 1\} / v_0 \left(\frac{v_0}{s}\right)}{1 + s\tau} \quad (4b')$$

$$\Delta n(s) = \frac{1}{sr} \Delta p(s) \quad (4c')$$

$$\Delta p(s) = \frac{p_0 \left(\frac{v_0}{s}\right)}{V_0} + \frac{R}{V_0} [n_0 \Delta T(s) - T_0 \Delta n(s)] \quad (4f')$$

上式より、\$(v_0/s)\$ から \$\Delta p(s)\$ までの伝達関数は

$$\frac{\Delta p(s)}{(v_0/s)} = G(s) = \left(\frac{p_0}{V_0}\right) \frac{s T_L}{1 + s T_L} \cdot \frac{1 + s\alpha\tau}{1 + s\tau} \quad (5a)$$

となる。ここで、漏れ時定数 \$T_L\$ は次式で与えられる。

$$T_L = (r V_0) / (R T_0) \quad (5b)$$

\$T_L\$ はB室の気体の体積で変化し、この最小値 \$T_{L\min}\$ は

$$T_{L\min} = \frac{r \cdot \min\{V(t)\}}{R T_0} = \frac{r V_b}{R T_0} \quad (5c)$$

となる。また係数 \$\alpha\$ は次式で与えられる。

$$\alpha = \frac{V_0}{v_0} \left\{ \left(1 + \frac{v_0}{V_0}\right)^\gamma - 1 \right\} \quad (5d)$$

再び仮定(A4)より、\$1 \gg (v_0/V_0)\$ であり、上式は

$$\alpha \doteq \gamma \quad (\text{比熱比} = \text{一定}) \quad (5e)$$

となり、(5a)式は仮定(A4)のもとでは線形であり、任意の体積変化 \$v(t)\$ に対する伝達関数である。

熱時定数 \$\tau\$, 漏れ時定数の最小値 \$T_{L\min}\$ は理論的にも求めうるが、実験的に求めるほうが容易である。

2.3 残留液体積計測の原理

\$v(t)\$ を大きさ \$v_0\$ でステップ変化させる。このとき、伝達関数(5a)の時定数 \$T_L\$ の不完全微分特性 \$[s T_L / (1 + s T_L)]\$ で表わされる漏れのため、\$\Delta p(\infty) = 0\$ となり、この定常値からはなにも求まらない。そこで、漏れ効果が現れない \$\Delta p(0^+)\$ に注目する。ラプラス変換の初期値定理より、

$$\begin{aligned} \Delta p(0^+) &= \lim_{s \rightarrow \infty} s G(s) \left(\frac{v_0}{s}\right) = \alpha \left(\frac{v_0}{V_0}\right) p_0 \\ &= \left\{ \left(1 + \frac{v_0}{V_0}\right)^\gamma - 1 \right\} p_0 \doteq \gamma \left(\frac{v_0}{V_0}\right) p_0 \end{aligned} \quad (6a)$$

となる。これより、

$$V_0 = \frac{v_0}{\left\{ 1 + \frac{\Delta p(0^+)}{p_0} \right\}^{1/\gamma} - 1} \doteq \gamma \frac{p_0}{\Delta p(0^+)} v_0 \quad (6b)$$

が得られ、液の体積はつぎのように求められる。

$$V_F(t) = V_T - \gamma \frac{p_0}{\Delta p(0^+)} v_0 \quad (6c)$$

タンクに漏れがなく \$r = \infty\$ の場合、(5b)式より、\$T_L = \infty\$ となり(5a)式の伝達関数 \$[s T_L / (1 + s T_L)]\$ はゲイン1の比例要素となる。よって、定常状態の

Fig. 2 Frequency response of dynamics from $v(t)$ to $\Delta p(t)$

$\Delta p(\infty)$ も 0 でないある値をもつ。ラプラス変換最終値定理より、

$$\begin{aligned}\Delta p(\infty) &= \lim_{s \rightarrow 0} s \left(\frac{P_0}{V_0} \right) (1) \frac{1 + s\alpha\tau \left(\frac{v_0}{s} \right)}{1 + s\tau} \\ &= \frac{v_0}{V_0} P_0\end{aligned}\quad (6d)$$

となる。これより容易に残留液の体積が求められる。

$$V_F(t) = V_T - \frac{P_0}{\Delta p(\infty)} v_0 \quad (6e)$$

この関係式はベックマン法の基礎式となる。

再び、タンクに漏れがある場合を考える。A室の体積を正弦波状に変化させる。(5a)式の伝達関数は高域通過形の周波数特性をもち、熱時定数 τ と漏れの最小時定数 T_{Lmin} に対して、次式の条件を満たす周波数 ω

$$\max \left(\frac{1}{\tau}, \frac{1}{T_{Lmin}} \right) < \omega \quad (7a)$$

でA室の体積 $v(t)$ を変化させ、つぎのようにする。

$$v(t) = v_0 \sin(\omega t) \quad (7b)$$

仮定(A5)より、漏れはピンホールにより、 T_{Lmin} は比較的大きな値をもち、 τ も小さくない。よって ω はそれほど大きな値である必要がない。(5a)式の伝達関数は線形で周波数応答はFig. 2のようになり、タンク内のゲージ圧も同じ周波数で振動し、つぎのようになる。

$$\begin{aligned}\Delta p(t) &= \Delta p(\omega) \sin(\omega t) = v_0 G(\omega) \sin(\omega t) \\ &= \left\{ \left(1 + \frac{v_0}{V_0} \right)^\gamma - 1 \right\} P_0 \sin(\omega t) \\ &\approx \gamma \frac{v_0}{V_0} P_0 \sin(\omega t)\end{aligned}\quad (7c)$$

この振幅は(6a)式の $\Delta p(0^+)$ と等しく、(6c)式と同様に、

$$V_F(t) = V_T - \gamma \frac{P_0}{\{\Delta p(\omega)\}} v_0 \quad (7d)$$

よりタンク残留液の体積が計測できる。

2.4 近似による誤差の解析

仮定(A4)に基づく、(4e)、(5e)および(6a)式

Fig. 3 Relative error for the approximation $\alpha \approx \gamma$

の近似による誤差は、(6c)および(7d)式に現れ、計測結果に直接影響する。これらの誤差はすべて、(5d)式の α が(5e)式の γ (一定値) で近似されたことによると解釈できる。 γ の α に対する相対誤差を16°Cの空気 ($\gamma = 1.403$)、100°Cの水蒸気 ($\gamma = 1.33$)、16°Cの二酸化炭素 ($\gamma = 1.302$) の場合でFig. 3に示す。いずれの場合も、

$$v_0/V_0 \leq 1/20 \quad (8)$$

の範囲で、 α に対する γ の誤差は1%以内である。

3. 計測方法

3.1 計測手順

(6c)、(7d)式による方法では、 $v(t)$ のステップあるいは正弦波変化に対し、 $\Delta p(0^+)$ あるいは $\Delta p(\omega)$ のほか、タンク内気体の絶対圧力 $p(t) = P_0$ と比熱比 γ の値を必要とする。 P_0 と γ の測定、推定には余分な計器と処理が必要となり、ここでは γ 、 P_0 を独立に推定する代わり、補正空間と切り替えバルブを利用して一括して $\{\gamma P_0\}$ を求める。以下、 $\Delta p(\omega)$ を用い、ピストンを正弦波状に動かす場合で手順を説明する。

Fig. 4にFig. 1のA室部を拡大して示す。はじめ、Fig. 4(a)のようにバルブを閉じ、aa'の周りにつぎ

Fig. 4 Piston motion to change the volume $v(t)$

のようにピストンを動かす。

$$v(t) = v_{01} \sin(\omega t) \quad (9a)$$

破線 $(+b, +b') - cc'$ 間には容積 V_h の補正空間がある。 V_h と v_{01} に関しては(8)式を、 ω は(7a)式を満たす。このとき、B室空間 V_h のゲージ圧は(7c)式より、

$$\Delta p(t) = \Delta p_h(\omega) \sin(\omega t) = \frac{v_{01}}{V_h} \gamma p_0 \sin(\omega t) \quad (9b)$$

となる。これより $\{\gamma p_0\}$ はつぎのように求められる。

$$\gamma p_0 = \Delta p_h(\omega) \frac{V_h}{v_{01}} \quad (9c)$$

つぎに、Fig. 4(b)のようにバルブを開く。破線 $(+b, +b')$ と cc' の間の空間の容積 V_h は変わらないように、軸 aa' を上方に移動し、つぎのようにピストンを動かす。

$$v(t) = v_{02} \sin(\omega t) \quad (9d)$$

このとき、A、B室のゲージ圧はつぎようになる。

$$\Delta p(t) = \Delta p(\omega) \sin(\omega t) = \gamma p_0 \frac{v_{02}}{V_0} \sin(\omega t) \quad (9e)$$

(9e)式の γp_0 に(9c)式を代入し、 V_0 を求める。

$$V_0 = \frac{\Delta p_h(\omega)}{\Delta p(\omega)} \frac{v_{02}}{v_{01}} V_h \quad (9f)$$

これより、残留液はつぎのように求められる。

$$V_F = V_T - V_0 = V_T - \frac{\Delta p_h(\omega)}{\Delta p(\omega)} \frac{v_{02}}{v_{01}} V_h \quad (9g)$$

係数 $\{\gamma p_0\}$ の推定のためにバルブの切り替えをしはば行う必要はない。

3.2 容積 V_h とピストンストローク v_{01} 、 v_{02} の決定

Fig. 4(a) のバルブ閉の状態ではゲージ圧力は最大となり、これを圧力計の最大許容圧 $\Delta p_{\max}$ とする。タンク内の残留液 0 の状態で Fig. 4(b) のようにバルブを開いたとき、ゲージ圧は最小となり、これを圧力計の最小分解可能圧 $\Delta p_{\min}$ とする。これらより

$$\Delta p_{\max} = \frac{\gamma p_0 v_{01}}{V_h}, \quad \Delta p_{\min} = \frac{\gamma p_0 v_{02}}{V_T} \quad (10a)$$

となる。ゲージ圧計測系の S/N 比を S_n とすると

$$S_n = \frac{\Delta p_{\max}}{\Delta p_{\min}} = \frac{V_T}{V_h} \left(\frac{v_{01}}{v_{02}} \right) \quad (10b)$$

なる関係を得る。これより、 V_T に対し V_h を小さくするためには (a) $v_{02} > v_{01}$ とする、(b) ゲージ圧計測系の S_n を大きくする、である。方策(a)は、2種類の体積変化機構を必要とし、得策でなく、 $v_{01} = v_{02}$ とし、一つの体積変化機構にして方策(b)を選ぶべきである。

3.3 A室の体積変化の方式

A室の体積 $v(t)$ の変化方式は、2.3で述べたように、ステップ変化と正弦波変化法が考えられる。タン

ク内ゲージ圧はタンク壁面振動による項 $\Delta p_w(t)$ 、液面揺動による項 $\Delta p_s(t)$ がA室の体積変化による項 $\Delta p(t)$ に加えられつぎのように与えられる。

$$\Delta p_T(t) = \Delta p(t) + \Delta p_w(t) + \Delta p_s(t) \quad (11a)$$

【ステップ変化の場合】 タンク内気体のゲージ圧は

$$\Delta p_T(0^+) = \Delta p(0^+) + \Delta p_w(0^+) + \Delta p_s(0^+) \quad (11b)$$

と計測され、この誤差を減少させるのは、できるだけ多くの $\Delta p_T(0^+)$ の平均をとることだけである。

【正弦波変化の場合】 ピストン運動の周波数は(7a)式の周波数範囲で、かつ $\Delta p_w(t)$ 、 $\Delta p_s(t)$ のスペクトルのパワーの小さいものを選ぶ。更に、圧力検出器の増幅部に上で選ばれた周波数が中心周波数である狭帯域通過フィルタを使用し、 $\Delta p_w(t)$ 、 $\Delta p_s(t)$ の影響を取り除く。これより、精度の高い $\Delta p(t)$ が得られる。ピストンを正弦波状に動かすことは更につぎの効果をもつ。(a) 交流信号処理となり、ドリフトが除去でき、(b) ピストン運動により、補正空間 V_h 部の気体とタンク内気体が攪拌され、同じ気体の状態になる。

3.4 計測システムの設計

正弦波ピストン運動、 $v_{01} = v_{02} = v_0$ の場合で、本方法による計測システム設計手順を示す。

[I] ピストン運動の周波数の決定

① 熱時定数 τ の推定 与タンクを空にし(熱容量を最小にし)、すべての漏れを塞ぐ。 $v(t)$ をステップ変化させ、 $\Delta p(t)$ を観測し、これより熱時定数 τ を求める。

② 漏れ時定数の推定 タンクを液で満たし、ガス抜きなどの本来タンクがもつ漏れの塞ぎを外す。①と同じ実験を行い、漏れの最小時定数 T_{Lmin} を求める。

③ 液面揺動と壁面振動の特性 液面揺動が最も激しくなる量の液をタンクに入れ、自動車走行時と同様な振動を与える。観測された $\Delta p_T(t)$ をフーリエ変換しパワーレベルの低い周波数範囲を求める。

④ ピストン運動周波数の決定 (7a)式の条件を満たし、③で得られた周波数範囲から必要なパワー、寿命、計測速度などを考慮して周波数を決定する。

[II] ピストン容積の決定

⑤ ノイズレベルの計測 圧力センサの出力に[I]で決まった周波数を中心周波数としてもつ狭帯域通過フィルタを取り付け、③のようにタンクに振動を加えゲージ圧雑音レベル Δp_n を求める。

⑥ ピストン容積の決定 液がほとんどない状態で1%の精度を得るため $\Delta p_{\min} = 100 \Delta p_n$ とする。(10a)式の第2式を利用してピストンの容量 v_0 を決める。

Fig. 5 Experimental system

$$v_0 = \frac{V_T}{\gamma P_0} \Delta p_{\min} \quad (11c)$$

【Ⅲ】 圧力計の許容圧 $\Delta p_{\max}$ と補正空間体積 V_h の決定

⑦式(10b)より, 次式が得られる.

$$\Delta p_{\max} V_h = \Delta p_{\min} V_T \quad (11d)$$

この関係を満たすような $\Delta p_{\max}$ および V_h を求める.

4. 実験による検証

4.1 実験システム

2章のタンク内気体圧力動特性, 3章の計測原理と方法の妥当性を実験的に検証する. 実験では Fig. 5 に示す実験系を利用した. タンクは高さ 435 mm, 容積 50.67 l の円筒形で肉圧 1.52 mm の鉄製である. このタンクに補正空間 V_h 用の小タンクを内径 21 mm の鉄パイプで接続する. 鉄パイプの間に開状態の内径 14 mm のバルブが設置され, パイプとバルブの全長は 192.7 mm である. バルブの下方のパイプ容積はタンクに, 上方の容積は空間 V_h に加算してある. Fig. 1 の A 室は, この室の体積をステップ状と, 正弦波状に変化させる実験を行うため, 2 種類用意しバルブで切り替える. ピストンをステップ変化させる場合 $V_h = 1.407$ l, 正弦波変化の場合 $V_h = 1.541$ l と異なる. ステップ状体積変化の大きさは 5 cc, 60 cc ~ 180 cc であり, 正弦波変化の場合, 振幅は 246/2 cc である. 小タンクにはゲージ圧力計を取り付け, B 室のゲージ圧を計測する. ゲージ圧力計の最大許容圧は $\Delta p_{\max} = 0.1$ kg/cm², 固有周波数 800 Hz, ゲインが一定の周波数範囲は 0 ~ 50 Hz である.

4.2 基礎実験

(1) ステップ応答実験

Fig. 5 の実験系のタンクに空気を入れ, バルブ

Fig. 6 Response of $\Delta p(t)$ for step change in $v(t)$

(1), (3)を開き, バルブ(2)を閉じ, A(1)室の体積 100cc をステップ状に減らし, B 室のゲージ圧を計測する. ステップ変化には約 0.5 s の時間を要した. 漏れがない場合, 漏れがあり, 漏れの時定数がそれぞれ, $T_L = 22.0$ s, $T_L = 5.0$ s, および, $T_L = 0.9$ s の場合の結果を Fig. 6 に示す.

【漏れがない場合】 ゲージ圧はステップ変化直後最大値をもち, 定常値は非零の値をもつ. (6a)式より, $\Delta p(0^+) = \gamma(v_0/V_0)P_0$ であり, また(6d)式より, $\Delta p(\infty) = (v_0/V_0)P_0$ であり, この比はつぎようになる.

$$\Delta p(0^+)/\Delta p(\infty) = \gamma \quad (12a)$$

空気の場合の $\gamma = 1.403$ (16°C) に対し, 実験では

$$\gamma = 1.396 \quad (12b)$$

となり, 誤差はわずか 0.5% である. このことは (5a), (6a) および (6d) 式の妥当性を示している.

【漏れがある場合】 漏れ時定数 $T_L = 22.0$ s の場合, $\Delta p(0^+)$ は漏れがない場合と等価である. しかし, 漏れ時定数 $T_L = 5.0$ s, 0.9 s の場合, $\Delta p(0^+)$ は小さくなる. これは, ステップ変化に要する時間が 0.5 s もあり, 漏れ時定数 $T_L = 0.9$ s, 5.0 s に対し, ステップ変化とみなせないためである. $\Delta p(\infty) = 0$ となる.

(2) 周波数応答実験

Fig. 5 の実験系で, バルブ(1)を閉じ, バルブ(2), (3)を開き, 室 A(2)の体積を一定振幅の正弦波状に動かす. 周波数を 0.1 Hz ~ 1.5 Hz の範囲で変えゲー

Fig. 7 Amplitude of $dp(t)$ for sinusoidal changes in $v(t)$

ジ庄の振幅を読み取り、周波数応答を求めた。漏れがない場合、漏れがあり、漏れの時定数が、 $T_L = 22.0$ s, $T_L = 5.0$ s, $T_L = 0.9$ s の場合の周波数応答実験結果を Fig. 7 に示す。これらはすべて、高域通過フィルタ特性をもつ。折れ点周波数は漏れの時定数に逆比例して高くなる。ある周波数からゲインは一定になり、この値は $20 \log_{10}(dp_0/V_0)$ に比例する。Fig. 7 では $V_0 = V_T$ としたときのゲインが 0 dB となるように基準化してある。これらの周波数応答は Fig. 2 の応答に似ており、再びモデル(5a)の妥当性を示している。

4.3 タンク残留液量の計測

(1) ピストンをステップ状に変化させる場合

3.1 の計測手順に基づき、しかし、ピストンをステップ状に変えた場合で残留液量を(9g)式に対応する次式より求め、計測誤差を求めた。

$$V_F = V_T - \frac{\Delta p_h(0^+)v_{02}V_h}{\Delta p(0^+)v_{01}} \quad (13)$$

【漏れがない場合】二つのピストン、シリンダ系が必要な $v_{01} \neq v_{02}$ の場合で、 $v_{01} = 5\text{cc}$, $v_{02} = \{60\text{cc}, 80\text{cc}, 100\text{cc}, 140\text{cc}, 180\text{cc}\}$ とし残留液量を計測し、その誤差を Fig. 8(a) に示す。 $v_{02} = 60\text{cc}$ の場合、最大誤差は約 1% であり、平均値は約 0.5% である。 $v_{02} = 80\text{cc} \sim 180\text{cc}$ の場合、最大誤差は約 0.6%，平均は約 0.3% であり、高い精度で計測される。

一つのシリンダ、ピストン系で $v_{01} = v_{02} = v_0 = \{60\text{cc}, 80\text{cc}, 100\text{cc}, 140\text{cc}, 180\text{cc}\}$ とした場合の計測誤差を Fig. 8(b) に示す。 $v_{01} \neq v_{02}$ の場合と同様に、 $v_0 = 60\text{cc}$ の場合の最大誤差は約 1%，平均値は約 0.5% である。 $v_0 = 80\text{cc} \sim 180\text{cc}$ の場合、最大誤差は約 0.6%，平均値は約 0.3% であり、 $v_{01} \neq v_{02}$ の場合と変わらない。

【漏れがある場合】 $v_{01} = v_{02} = v_0 = 100\text{cc}$, $V_F = 38\text{l}$, 漏れ時定数が $T_L = \infty$ (漏れがない), $T_L = 22.0$ s, $T_L = 5.0$ s, $T_L = 0.9$ s の場合の計測誤差を Table 1 に

(a) $v_{01} = 5\text{cc}$ and $v_{02} = 60\text{cc}, 80\text{cc}, 100\text{cc}, 140\text{cc},$ and 180cc

(b) $v_{01} = v_{02} = v_0 = 60\text{cc}, 80\text{cc}, 100\text{cc}, 140\text{cc},$ and 180cc

Fig. 8 Measurement error of liquid volume in the tank without leak by the step response method

示す。これより、漏れがないか、小さい場合は高精度で計測できるが、漏れが大きくと、計測誤差が大きくなる。これは 4.2(1) で述べたように、ステップ変化時間 0.5 s が漏れ時定数に比較して長いためであり、ステップ変化を速くすることでこの誤差を減らすことができる。

(2) ピストンを正弦波状に変化させる場合

ピストンを正弦波運動させ、(9g)式に基づき残留液量を求め、その誤差を求める。 $V_F = 38\text{l}$, 漏れ時定数が $T_L = \infty$ (漏れがない), $T_L = 22.0$ s, $T_L = 5.0$ s, $T_L = 0.9$ s の場合で、ピストン運動の周波数を 0.1 Hz $\sim$ 1.5 Hz と変えた場合の計測誤差を Fig. 9 に示す。Fig. 7 の周波数応答のゲインが増加している周波数範

Table 1 Time constant of a leak and measurement error for the step motion of the piston

Time constant of a leak	Measurement error (%)
No leak	0.5%
$T_L = 22.0$ s	0.6%
$T_L = 5.0$ s	10.9%
$T_L = 0.9$ s	29.6%

Fig. 9 Measurement errors vs. frequencies by the frequency response method

Fig. 10 Measurement errors of liquid volume in the tank without leak by the frequency response method

冊では精度は悪い。しかし、すべてのゲインが平坦になった 0.9 Hz 以上の周波数では誤差が $\pm 0.15\%$ 以内になる。

ピストン運動の周波数を 0.8 Hz, 1.2 Hz, $V_F = \{0, 8, 16, 24, 30, 38\}$ とした場合の誤差を Fig. 10 に示す。この図より誤差の最大値は $\pm 0.5\%$ 程度であり、平均値は $\pm 0.3\%$ 程度である。

4.4 液面揺動と壁面振動による影響

簡単な実験により液面揺動と壁面振動のタンク内気体のゲージ圧に対する影響を調べた。はじめ、38 l の水を入れたタンクを水平面より 14° 傾け、ステップ状に姿勢を戻し、液面揺動を起こした。このときゲージ圧変化はピストン運動による振幅に対し十分小さい。

つぎに、重さ 200 g のビニール製の重りを、タンク上面より 15 cm の高さから静かに落下、衝突させ、壁面振動を起こした。このときゲージ圧振動はピストン運動による振幅と同程度である。しかし、壁面振動によるゲージ圧の振動の周波数は約 47 Hz もありピストン運動の周波数に比してかなり高く、遮断周波数 10 Hz の低域通過フィルタを通すだけでこの影響はほとんど取り除けた。

5. む す び

以上、タンク内気体体積を圧縮することで増える圧力から残留量を直接計測する方法について述べた。この方法は、姿勢が変化し、壁面が振動し、液面が揺動し、気体の漏れがある異形状タンクの残留量を高精度に計測できることがわかった。実験結果によると計測誤差は $\pm 0.5\%$ 以内に抑えられ、50 l の自動車燃料タンクの残留燃料を分解能 0.5 l で表示できる。

参 考 文 献

- 1) 菱沼宏：化学プロセスにおけるレベル計の選定と適用 '81・計装別冊，工業技術社，86/91 (1981)
- 2) 佐々木，桃谷，小林，鈴木：静電容量式燃料センサによる燃料計システム，自動車技術学術講演会前刷，No. 851，225/228 (1985)
- 3) L. U. Pchurch: The Design and Development of a Portable, Computer Controlled Fuel Meter Calibration System, Proc. ISATA 83, 12, 737/754 (1983)
- 4) J. Konrad and H. Rulke: Zur Kraftstoffmomentanverbrauchsanzeige (KMVA), Kraftfahrzeugtechnik, No. 8, 238/241, 247 (1984)
- 5) 粉体工学編：粉体工学便覧，I 編，第 5 章，日刊工業新聞社，51/57 (1986)