

琉球大学学術リポジトリ

水置換型空気流量計の研究（第一報）

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学教育学部 公開日: 2007-10-25 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 新里, 祐宏, Shinzato, Sukehiro メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/2119

水置換型空気流量計の研究 (第一報)

新 里 祐 宏

Study on the Gasometer (1st Report)

Sukehiro SHINZATO *

(Received May 31, 1989)

1. 緒 言

内燃機関の性能試験において、吸入空気量は重要な測定対象となっている。今日、使われている空気流量の測定方法は、大別して3つに分けられる。第一に絞り流量形（オリフィス、ノズル、ベンチュリー管）によるもの、第二に速度分布（ピトー管）によるもの、第三に容積型によるものである¹⁾。

容積型には、水置換を利用した装置がある。この水置換型の装置は空気流量を容器の体積に直接変換して測定しているので、精度が高く、絞り流量形の検定に広く利用されている。しかし、空気槽の自重と水の浮力の作用で、空気槽の下降に伴い槽内の圧力も大きく変化するため、圧力の測定も必要となり、その煩わしさが使用上の1つの欠点になっている。

そこで、自重と浮力により生ずる槽内圧力の変動を、モータのON-OFF制御によりコントロールする装置を開発した。ここでは、その装置の動作原理、構造及び特性について報告する。

2. 空気槽の自重と槽内圧力の関係

水置換形の場合、その構造から明らかなように、空気槽内の圧力（以下、供給圧力という）は、空気槽の自重と浮力の差（以下、増圧の力という）の影響を受け、大気圧より高くなる。したがって、供給圧力を大気圧に保つためには、この増圧の力を零にしなければならない。そこで、現在、広く利用されている装置では、空気槽を持ち上げるためにカウンタウェイトが利用されている。ここで

は、カウンタウェイトを利用した場合と利用しない場合の増圧の力と供給圧力の関係を考察する。

2.1 カウンタウェイトを使用しない場合

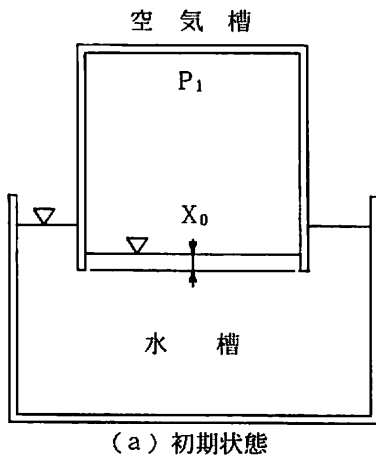
図1(a)に示す空気槽は、厚さが一様な材料で作られた軸に直角方向の断面積が一様な容器である（以下の解析でも同じような容器を想定している）。いま、空気槽の自重を w 、内底面積を a 、外底面積を A および水の比重量を r とすると、初期の状態において、空気槽内の下端から槽内の液面の高さを X_0 とすると、供給圧力 P_1 は大気圧 P_a より dX_1 mm H_2O だけ高いことになる。図1(b)において、空気槽内の液面の高さ dX_0 に対応する分だけ空気が水に置換されたとすると、そのときの供給圧力 P_1 は dX_0 の関数として次のように表現される。

$$P_1 = P_a + \frac{W}{A} - \left(1 - \frac{a}{A}\right) r X_0 - \left(1 - \frac{a}{A}\right) r dX_0 \quad \dots\dots(1)$$

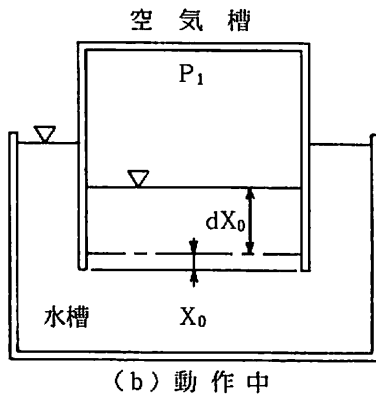
空気槽の自重 W は供給圧力を増加させ、浮力はその増加を緩和するように働くが、(1)式の右辺第3項は初期状態の浮力効果、第4項は動作中の空気槽内の液面の増加 dX_0 による浮力効果の増加分を示している。

(1)式から明らかなように、 $P_1 = P_a$ にするためには、 $A \gg a$ の関係を満たし、しかも軽い材料を使えばよいことになる。すなわち、ブリキ板のような薄い材料でしかも軽い材料を使って空気槽を作ればよいことになる。しかし、この制限条件は、空気槽の断面積を軸に直角方向で一様に保つとい

*Tech. Educ., Coll. of Educ., Univ. of the Ryukyus



(a) 初期状態



(b) 動作中

図1 カウンタウェイト使用しない場合

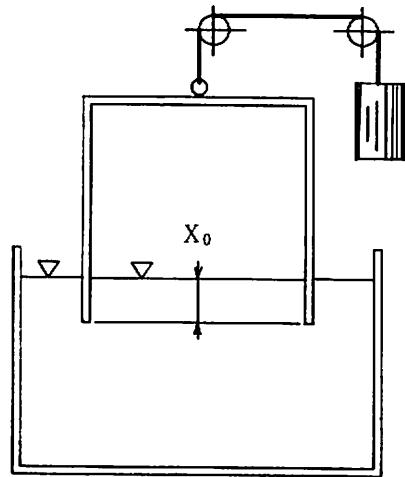
う観点からは、工作上必ずしも容易な条件ではない。

2.2 カウンタウェイトを利用した場合

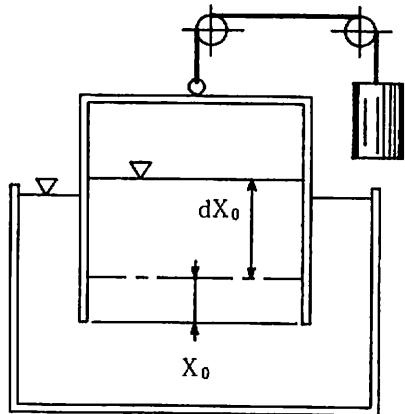
図2(a)は増圧の力を相殺するためにカウンタウェイトをつけた初期の状態を示している。空気槽の材料厚さを t 、内周長さは ℓ で、空気槽はその下端から X_0 だけ水中に没しており、空気槽内外の液面は同一水準にあり、供給圧力は大気圧に等しい。このときのカウンタウェイト W_0 の大きさは、

$$W_0 = W - t\ell X_0 \dots\dots\dots(2)$$

である。一方、図2(b)に示す任意の状態では、空気槽が水中に沈んだ分だけ浮力が増加し、増圧の



(a) 初期状態



(b) 動作中

図2 カウンタウェイト使用した場合

力は小さくなる。そこで、カウンタウェイト W_0 が初期状態の値(2式)に保たれていると、カウンタウェイトは増圧の力を上回ることになり、空気槽を引き上げ、供給圧力は大気圧より低くなる。この場合の供給圧力は空気槽内の液面上昇量 dX_0 の関数として次のように表される。

$$P_1 = P_a - \frac{1}{A} \{W_0 + t\ell r (X_0 + dX_0) - W\} \dots\dots\dots(3)$$

dX_0 の増加とともに供給圧力が直線的に減少することがわかる。

そこで、供給圧力を大気圧に保つためには、(3)式において dX_0 の増加にともなう浮力の増加分だ

け初期のカウンタウェイト W_0 を小さくすればよいことになる。

3. 装置の概要と動作原理

図3は動作原理を示すための装置の概念図である。初期の状態においては、空気槽側の増圧の力は、てこの反対側につけたカウンタウェイト（定重量おもりと引張られたばね力の和）に釣り合っている。そこで、空気槽内の空気が内燃機関等の吸入空気として排出されると、空気槽は下降するが、それに伴って空気槽にかかる浮力が増し、その分、増圧の力は減少する。その減少分を相殺するためにばねを縮めてやればよい。（原理的には、ばねを介せず増圧の力が0になるように空気槽の位置制御をしてもよい）この装置は、供給圧力と大気圧との差異を空気槽内外の液面差として検出し、それらの液面を一致させるように動作するon-off制御システムになっている。

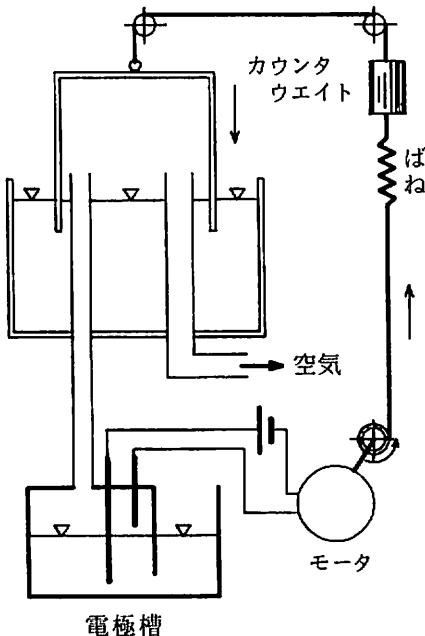


図3 動作原理図

動作の流れは次の通りである。

- ↪ 空気槽内外の液面の一致
- | ↓

- | 空気を排出
- | ↓
- | 空気槽（電極槽）内の液面上昇
- | ↓
- | 電極棒 ON / モータ回転
- | ↓
- | ばねは縮みながら上昇
- | ↓
- | 空気槽 下降
- | ↓
- | 空気槽（電極槽）内の液面下降
- | ↓
- ↳ 電極棒 OFF / モータ停止

図4はシステムの構成図である。主な構成要素についてその形状、材料および仕様等について記す。

①バランス機構： 一般に利用されている、2個の滑車にワイヤーをかけ、そのワイヤーの両端に力かける方法は、摩擦損失が大きく感度が悪いので、本装置ではてこを利用し、中央での一点支持（玉軸受けを使用）の形を採用し摩擦損失を小さくした。また、空気槽やカウンタウェイトを吊り下げているピアノ線（ $\phi 0.75$ ）が常に垂直になるよう円弧のバランス翼（厚さ10mm、アクリル板）をてこの両側につけた。

②ばね： モータ側のばねは先に記したように浮力による加圧の力の減少分を吸収するもので、本装置の最も重要な構成要素である。

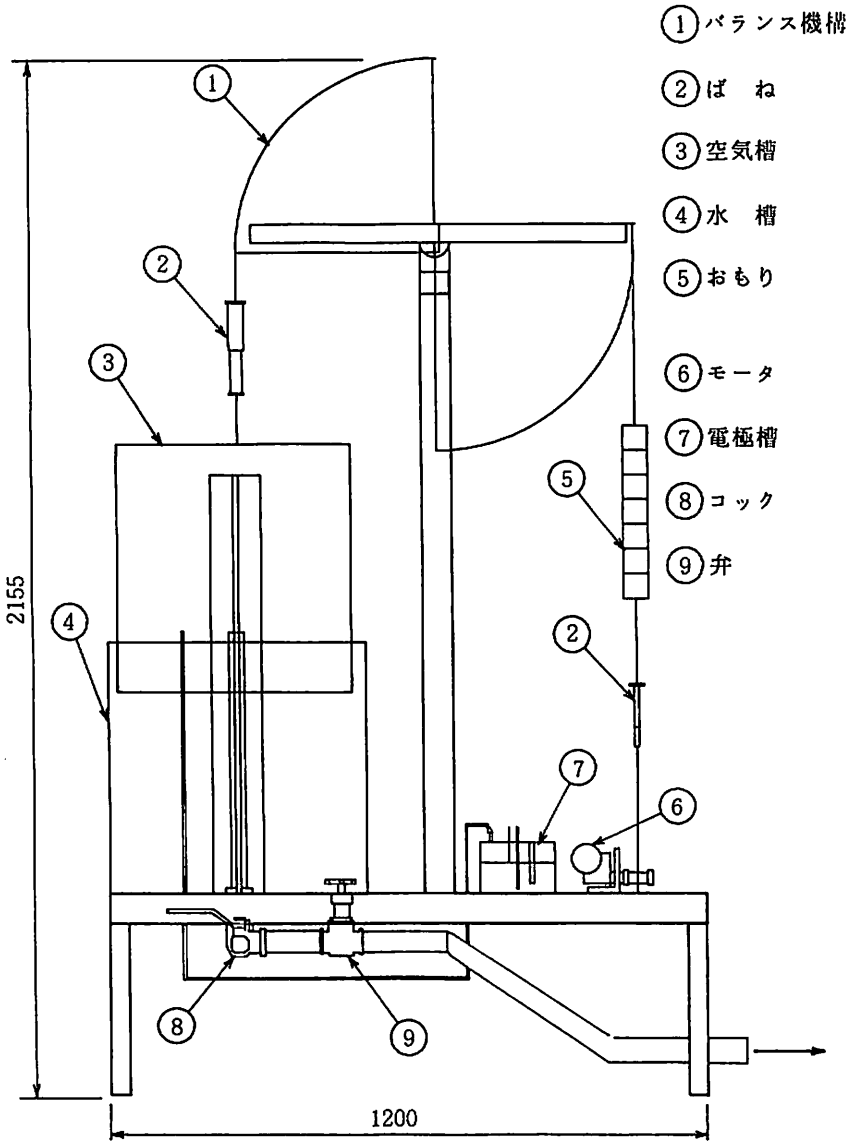
空気槽側のばねは2.1や2.2で扱った静的な解析では不要なばねであるが、後で記すように、このばねがないと吸入空気流量の増加に伴って動作特性が大幅に悪化するので、このばねは不可欠なものとなっている。

③空気槽： 厚さ8mmのアクリル板で、軸に直角な内断面が450mm X 450mmの四角形で、深さが500mmの容器である。開口部を水中に伏せて空気槽を形成させ、底には吊り下げ用のフックと、空気取入れ用としてねじこみ式の蓋がついている。

④水槽： 厚さ13mmのアクリル板で、軸に直角な内断面が484mm X 484mmの四角形で深さが513mmの容器である。底には、空気排出用パイプ（1.5"塩ビパイプ）が立ち、また、空気槽の圧力を

電極槽へ伝達するビニールパイプの接続口も設けてある。

供試空気量を増すためには、槽内の水位を上げ、空気槽のストロークを増してやればよい。



- ① バランス機構
- ② ばね
- ③ 空気槽
- ④ 水槽
- ⑤ おもり
- ⑥ モータ
- ⑦ 電極槽
- ⑧ コック
- ⑨ 弁

図 4 システム構成図

⑤定重おもり： 台秤用のおもり（1 kg f/個）を7-8個用いた。このおもりは原理的には不要なもので、ここではモータの出力カルクが小さくそれを補うために使った。

⑥モータ： 自動車用ワイパーモータ（定格12 V）を使用した。このモータには減速用にウオー

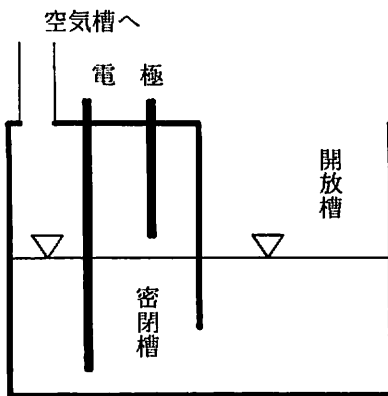
ムとウオームギアが組込まれているため、モータ停止時にはブレーキの役をはたし、空気槽を吊っているピアノ線が弛むのを防いでいる。最大出力トルクは約4 kg f-cmである。

⑦電極槽： 電極槽は2つの槽で構成され、1つは、大気に開放されている槽で、以後、開放槽

と呼ぶ。他の1つは、ビニールパイプで空気槽の圧力を取込んでいる槽で、空気槽と同じ圧力になる槽で、以後、密閉槽と呼ぶ。

ここでは、図5に示すように、密閉槽と開放槽の断面積の比によって、3種類の電極槽を準備した。電極は密閉槽内に立っているのので、密閉槽が狭いほど、短時間に電極に液面が接触し、液面の変化を早く検出することができる。

電極には、+側にアルミニウム棒（φ3）、-側には、タングステン線（φ0.7）を、電解液として5%濃度の食塩水を使った。



タイプ	面積比	
	密閉槽	開放槽
①	1	4
②	1	1
③	4	1

図5 電極槽の種類

⑧コック： 空気の流路を、空気槽側と大気側にきりかえるために使用した。

⑨弁： 流量制御用として機能し、1.5"の仕切弁を使っている。

4. 特性試験と考察

4.1 試験方法

この装置の圧力制御特性は、空気槽内外の液面

差の大小によって評価される。すなわち、空気槽内の圧力と大気圧の比較によってなされる。その特性に影響を与えると考えられる主な因子は次のとおりである。

- ① 空気流量
- ② 流れの形態（定常、非定常）
- ③ 液面変位検出感度
- ④ ばね定数
- ⑤ モータの回転速度

これらの影響因子の効果と考察は次の項で詳しく扱うが、ここでは、それらの因子の設定法及び液面変位測定方法について記す。

1) 液面変位測定の方法

液面の変位を測定する方法として5%濃度の食塩水の入った変位測定槽を利用した。構造は電極槽①と同型で、密閉槽にはビニールホースにより空気槽内圧 P_1 が伝達される。図6に示すように、開放槽には、長さ50mmの2本の炭素棒電極（φ0.9）が、10mmの間隔で垂直にしかも平行な状態で、先端から20mmまで沈められて、ブリッジの一辺を形成している。液面の変化に伴い電極の液中の長さが変わり、可変抵抗器の役割をはたす。ブリッジの出力電圧の変化を液面変化としてX-Yレコーダに記録する。

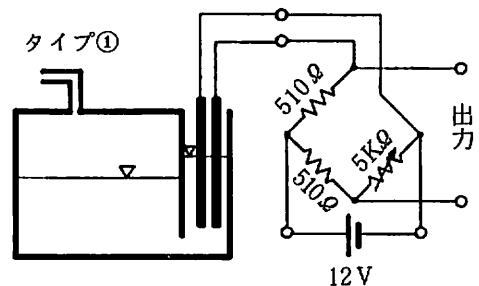


図6 液面変位測定回路

2) 空気流量

空気槽の下降距離を X cm、内断面積を a mm^2 とし、 X cmだけ下降するに要した時間を T secとすると、単位時間当りの空気流量は aX / T (cm^3/s)として求まる。ここでは、 $X = 20$ (cm)で実験した。

3) 流れの形態

流れの形態としては、掃除機で吸込むような場

合の定常流とみなせる流れと、エンジンが吸入する場合の非定常流れ（脈流）がある。ここでは、掃除機を利用した定常的な流れについて制御特性を評価した。

4) 液面変位検出感度

この装置は、空気槽内外の液面差から ON-OFF 制御の動作信号を得ているので、液面差検出感度は制御特性に大いに関与する因子である。感度を上げるためには、基準液面高さ（空気槽内外の液面高さが一致した状態）と検出電極先端との距離（以後、電極高さと呼ぶ）を小さくすればよい。しかしながら、液の表面張力により電極先端からの水切れが悪く、誤動作の原因になるのであまり小さくすることはできない。ここでは、電極高さ、0.5 mm と 1.0 mm の場合について実験した。感度を上げるための他の方法として、液面変位速度を上げてやる方法がある。ここでは、図 5 に示す 3 つのタイプの電極槽により液面変位速度を変えて実験した。

5) ばね定数

ばねには取り扱いが容易な市販のばね秤を利用した。2種類のばねを使って制御特性を調べたが、それぞれのばね定数は 0.5 kgf/cm (5 kgf 用) と 1.33 kgf/cm (20 kgf 用) であった。

6) モータの回転速度

この装置の制御目標は、モータによる位置の制御なので、モータの回転速度は重要な影響因子である。しかしながら、モータの出力トルクに余裕がなく、広い範囲にわたる速度設定ができず、系統的な実験はできていない。ここでは、使用したモータの最高速度である 40rpm についての実験結果を報告する。なお、試し実験で、回転速度を 40 rpm から下げるに従って制御特性が低下する傾向に在ることがわかっている。

4.2 試験結果と考察

4.2.1 理論式の検証

カウンタウェイトを使用しない場合の空気槽内の圧力変動を示す理論式 (1) の検証を行なった。まず、図 1 (A) のように水槽の中に空気槽を浮かべて、初期状態における X_0 を測定する。次に、空気槽内の空気を排出すると、その体積を置換するように空気槽内の液面は上昇する。その上昇高

さ dX_0 は、空気槽内外の液面差と X_0 の差として与えられる。空気槽内外の液面差は、電極槽へのビニール導管を U 字管マンメータ（封液：水）に連結し測定した。この X_0 、 dX_0 を (1) 式に代入して P_1 の理論値が求まる。一方、マンメータの読みは空気槽内の圧力を与えるので、 P_1 の実験値となる。任意の位置を出発点として空気槽の下降距離に対する圧力変化の一例を示したのが図 7 である。理論値と実験値はほぼ完璧に一致し、水置換型空気流量計の設計に (1) 式は利用できる。

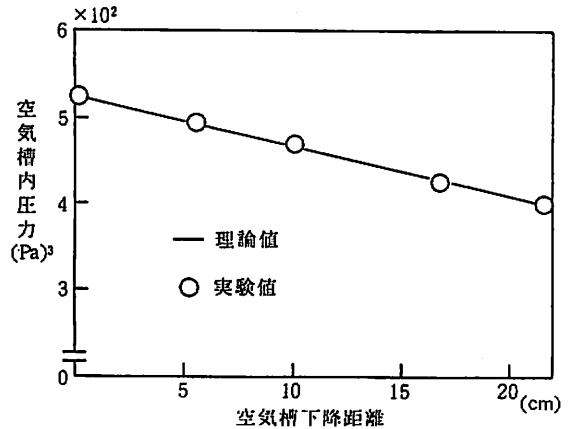


図 7 理論式の検証

4.2.2 液面変動波形の解析

ここでは、空気槽内外の圧力変動を、空気槽内外の液面差の変動に置き換えて記録している。空気流量と液面変動波形の一例を図 8 に示す。この図は液面変動を圧力変動のイメージで見るために、空気槽内の液面が上昇するとき記録波形は基準水面から下に記録されている。空気流量は 1213 cm³/s ~ 6750 cm³/s で、図中の | | は空気槽が 20 cm 移動する時間に対応している。流量が増すに従って時間が短くなっていくのがわかる。液面上昇によりモータが回転を始め、液面は基準位置への回復過程に入るが、波形①~⑩において、その回復過程を示す変動波形の右上がりの部分の勾配が流量と共に小さくなっており、空気槽の全行程時間に対するモータ動作時間が長くなることがわかる。ついに、波形⑩、⑪のように全行程でモータが動作状態にあっても液面差は増加を続け制御不能な状態になる。波形⑩は液面差を一定に保

のまま推移しており、そのときの空気流量が制御限界流量となる。一方、波形⑩は、液面の制御にあたって、モータを連続的に、しかも、排出空

気量にみあった速さで回転させることにより、より偏差の小さい制御が可能なることを示唆している。今後の課題としたい。

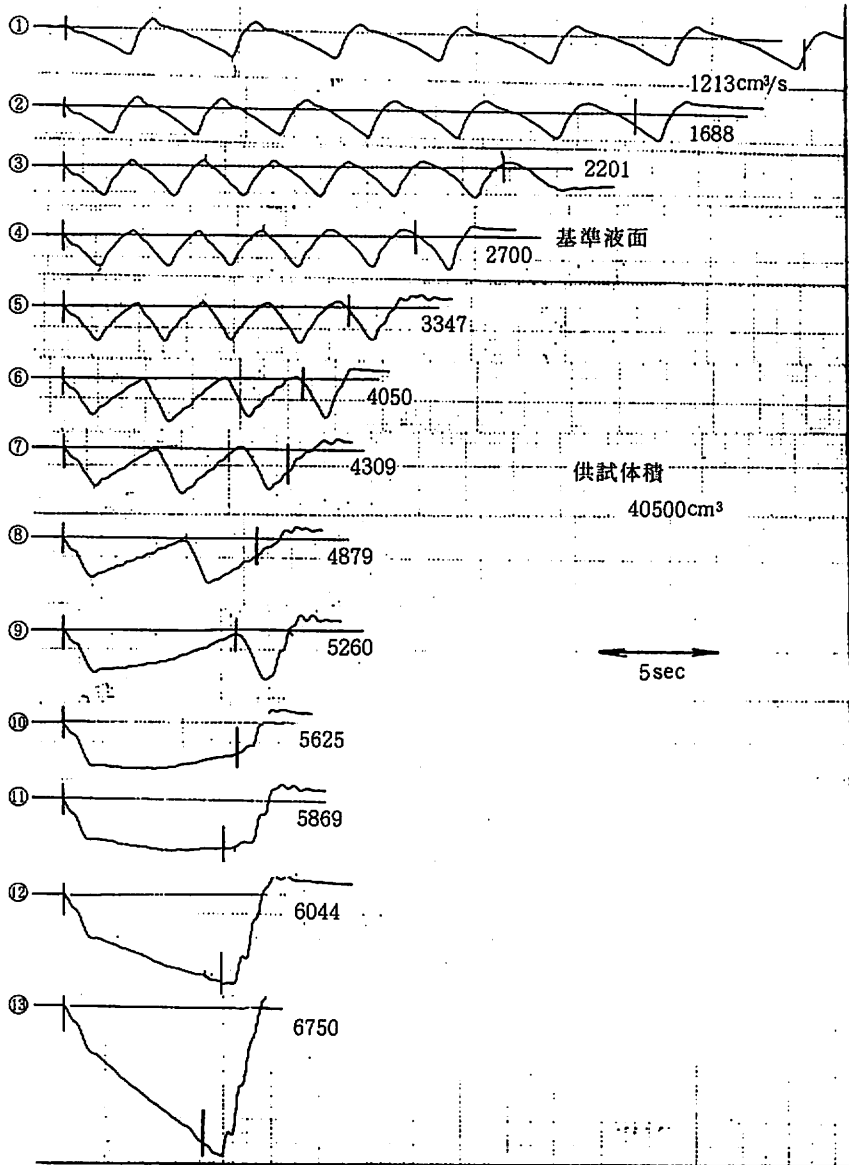


図 8 液面変動波形と流量

以後、制御特性の評価は、図 8 の液面変動波形の P-P 値によってなされる。波形①～⑤では、基準水面の上下に変動が表れるが、波形⑥以下では、基準水面の上方でのみ変動している。しかし

ながら、P-P 値は波形①～⑩ではほぼ一定で、この流量域ではほぼ同程度に液面が制御されているのがわかる。

4.2.3 液面変位検出感度の影響

1) 液面変位速度

図5に示す3種類の電極槽を使った。電極槽②は、開放槽と密閉槽の大きさが等しく、密閉槽内の液面変動量は空気槽内外の液面差の1/2とな

る。液面変動量を、その1/2より大きくしたのが電極槽①で、小さくしたのが電極槽③である。したがって、電極槽①では、電極への液面の接離が速くなり液面変位検出感度は最も高くなる。

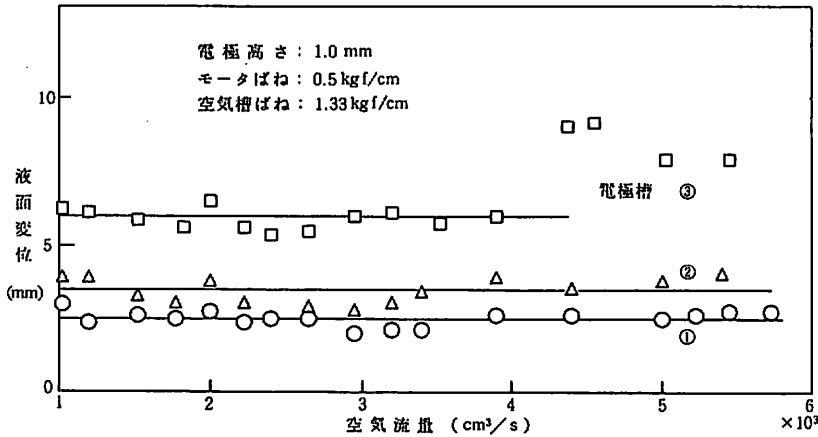


図9 電極槽と変面変位の関係

図9は電極槽①、②、③をパラメータとして、空気流量と液面変動の関係を示している。電極槽①の場合が液面変動量が最も小さく、定性的ではあるが、制御特性が液面変位検出感度に依存していることがわかる。

空気流量と液面変動の関係を示している。電極槽には①を使用している。図から明らかなように、液面変動は0.5 mmと1.0 mmとの間に顕著な差がない。したがって、電極高さとして、液の表面張力の影響をうけにくい1.0 mmを採用するのがよい。

2) 電極高さ

図10は電極高さが0.5 mmと1.0 mmの場合の、空

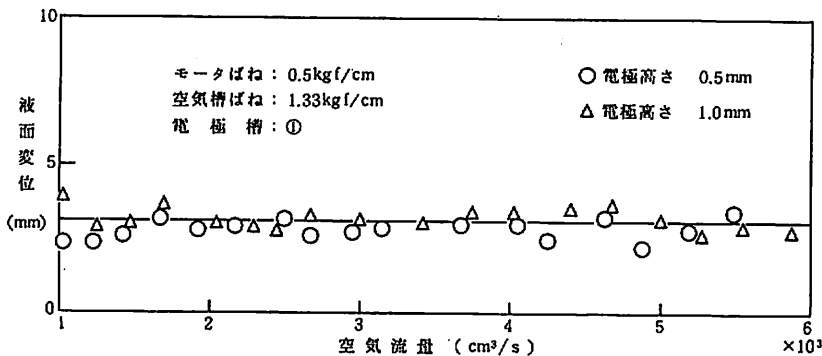


図10 電極高さと液面変位の関係

4.2.4 ばねの影響

空気槽側に、ばね定数 1.33 kgf/cm のばねを付

けた状態での、モータ側ばねと制御特性の関係を図11示す。モータ側のばねを付けると特性は大幅

に改善される。ここで付けたばねのばね定数は 0.5 kg f/cm の 1 種類だけで、モータのトルクに余裕がなく、系統的な研究はまだなされていない。

また、空気槽側とモータ側の両方にばねを付けない場合の液面変動は、流量の増加に伴って、ほぼ直線的に増加し、特性が悪くなって行くのがわかる。

空気が排出され、空気槽内の圧力が低下すると空気槽は下向きに動こうとする。そのとき、モータが回転を始める前にばねが伸び始める。したがって、モータが停止中でも空気槽は下向きに微動できるため、圧力低下を緩和するように働き、上向きの液面変動を小さくしている。

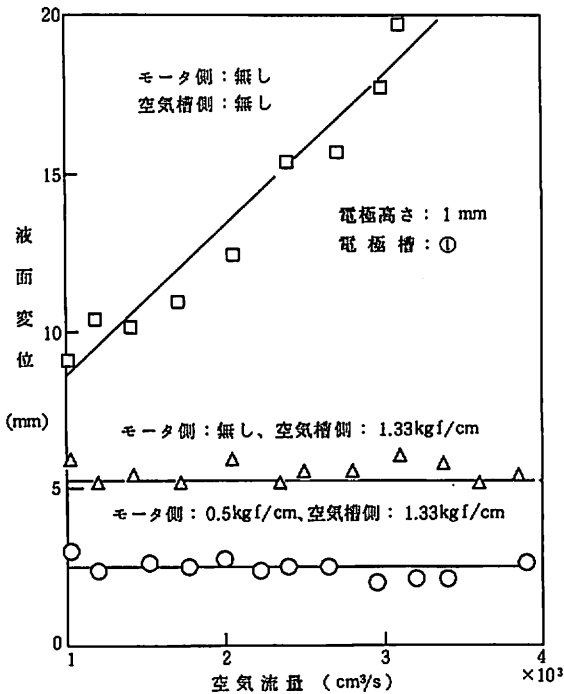


図11 ばねの有無と液面変位の関係

一方、モータが回転すると、空気槽は下降するが、モータ駆動回路の遅れと、慣性により、電極槽の電極がOFFになっても空気槽は下降を続け、

槽内の圧力を上昇させるように働く。そのとき、空気槽は浮力により少し軽くなるが、その軽くなった分をばねが吸収し、空気槽を引き上げ液面が下降するのを緩和する。

これらのばねによる特性改善動作には、モータの回転速度とばねのばね定数が密接に関係しているようであるが、その解明は今後の課題である。

5. 結 び

槽内圧力をモータのON-OFF制御で制御する水置換型空気流量計を開発し、その動作原理と特性試験の結果を報告した。

ここで提示した槽内圧力の算出式は、水置換型空気流量計の設計に有効であることが確認された。

また、各試験の結果、装置を構成する最良の組合せは、空気槽側にばね定数 1.33 kg f/cm のばねを付け、モータ側にばね定数 0.5 kg f/cm のばねを付け、電極槽に①のタイプを使い、電極高さを 1 mm とした組合せである。本装置は、この組合せで、圧力誤差を $\pm 1.5 \text{ mmH}_2\text{O}$ とし、最大約 $6000 \text{ cm}^3/\text{s}$ の流量まで測定できる。

本装置の性能向上には、ばね定数やモータ回転数に対する系統的な研究が必要であり、さらに、モータの連続回転方式による装置の開発も今後の課題である。

謝 辞

本研究を進めるにあたって、実験にご協力いただいた、当時、琉球大学技術教育科学生の安座間稔氏に感謝致します。

参考文献

- 1) 五味 努 吸入空気量の測定 内燃機関 VOL.7 PP.131