

気化器燃料系統の過渡現象

Transient Flow in Carburetor Fuel Systems

大山 宜茂* 手島 友亮** 宝 諸 幸 男***
 Yoshishige Ōyama Tomosuke Tejima Yukio Hōshō

要 旨

車の過渡運転時に生ずるカーノックを軽減し、運転性能を改善するには気化器燃料管路の非定常特性がどうあるべきかを検討した。その結果、低速系統と主系統の引き合い、エアブリード系統の気液二相流の応答性、加速系統の付加燃料供給方式の改善、円滑な非定常流動特性を得る方法を考案することができた。

1. 緒 言

車が雑踏する市街地における加速、減速、旋回などの過渡運転状態における、カーノック⁽¹⁾と称するエンジンの不完全燃焼に基づくトルク変動および排気ガス中の一酸化炭素や炭化水素などの有害成分の軽減は気化器燃料供給の円滑化に帰するところが多く、近年にわかに気化器燃料管路の非定常流動特性の改善が重要視されるに至った。

これに関して、気化器過渡流動特性の理論的展開⁽²⁾⁽³⁾と気化器内部の燃料流動の挙動の探知⁽⁴⁾およびそれに伴う諸量の計測⁽⁵⁾など部分部分には大きな進展がみられるものの複雑な細管路網で形成されている気化器燃料系統を流れる気液二相流の過渡流動現象を理解するにはじゅうぶんでなくいまだカーノックの解消と排気ガスの問題解決に至らず、むしろその要望は深刻化の傾向にある。

よって本研究は、気化器燃料管路に使われているような細管内を流れる液一相流および気液二相流の非定常流を明らかにし⁽⁶⁾⁽⁷⁾、次いで複雑な管路系を形成している実気化器の非定常流動特性の解析方法を新たに導出し、自動車の加減速過渡運転状態における非定常流動特性を解明し、その結果をもとにカーノックや排気ガスの問題の解決を図ったものである。

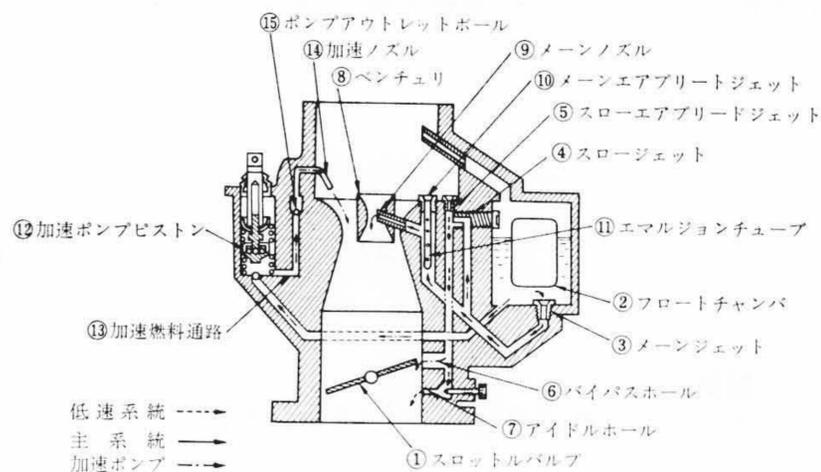
2. 気化器燃料管路の非定常流の基礎解法

2.1 燃料系統の構成

現在最も広くエンジンに装着されているゼニス・ストロンパークタイプの気化器を例にとり気化器の作動を説明すると、燃料系統は図1に示すように低速運転時に燃料を供給する低速系統、常用運行時にエンジンの要求する最適混合気を供給する主系統およびエンジンを低速より加速しようとしてスロットルバルブを開く場合に燃料を供給する加速系統の三者から構成されている。これらの三系統は別々に作動するのではなく相互に関連し合って円滑な燃料の供給がなされている。

低速系統はスロットルバルブ①の開度が小さいときにスロットルバルブ下部に生ずる負圧の作用によってフロートチャンバの燃料を吸い出し、軽負荷低速時のエンジン回転を保持するものである。燃料はフロートチャンバ②よりメインジェット③を通過してスロージェット④で制御され、スローエアブリードジェット⑤からはいる空気と混合し、バイパスホール⑥およびアイドルホール⑦からエンジンに供給される。

主系統はベンチュリ⑧が二段ベンチュリ方式となってメインノズル⑨から吸い出す燃料の霧化をよくし最も経済的な混合気を供給するようになっている。エンジンの回転数が上昇するにつれて、ベン



(ゼニス・ストロンパークタイプ)

図1 気化器燃料系統の説明図

チュリ部の空気流速が早くなりメインノズル⑨先端部の負圧が大きくなることによってメインノズル⑨から燃料が吸い出される。このとき、低速系統からも燃料は流出しているが、ベンチュリ部を流れる空気量が増し流速がますます早くなるとメインノズル⑨にかかる負圧のほうが低速系統に作用している負圧より大きくなって燃料がメインノズル⑨に引かれるので低速系統への燃料の供給は少なくなる。メインジェット③で計量された燃料はメインエアブリードジェット⑩から流入する空気とエマルジョンチューブ⑪で混合し、メインノズル⑨を通過してベンチュリ部に吸い出される。

加速系統は加速ポンプより構成され、スロットルシャフトに連結している加速ポンプピストンは当初上昇した位置にあるが、スロットルバルブ①を開くとリンク(省略)で連動している加速ポンプピストン⑫が下降し、ポンプ室内の燃料は加速通路⑬を通り加速ノズル⑭から押し出され、加速時の燃料遅れを補っている。また、ポンプアウトレットボール⑮は吸気圧による燃料吸い出しを防止している。図1はピストンが下降した状態を示したものである。

上記の系統を構成する燃料管路は1.5~6φの細い直管、L字管、ベンド管、径違い管および分岐管からなり、また通路の途中のエアブリードから空気が混入し気液二相流を呈するので管内流動状況は複雑多岐にわたる。

2.2 基礎解法の導出

前述のように複雑な管路網に対しては管路全体を流れ方向に沿って細分し、小区分内の流動特性をまず求めてこれらを組み合わせて全体の流動特性を解析するのが便利である。図2には管路の区分方法の一例を示した。この各区分内においては密度を一様とみなし、以下述べる連続の式、運動の式がそのまま適用できるものとする。

さて、小区分内の平均密度を $\bar{\rho}$ とすると、連続の式は

$$\frac{\partial(A \cdot \bar{\rho})}{\partial t} + \frac{\partial(A \cdot G)}{\partial x} = 0 \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 t : 時 間

* 日立製作所日立研究所
 ** 日立製作所日立研究所 工学博士
 *** 日立製作所佐和工場 工学博士

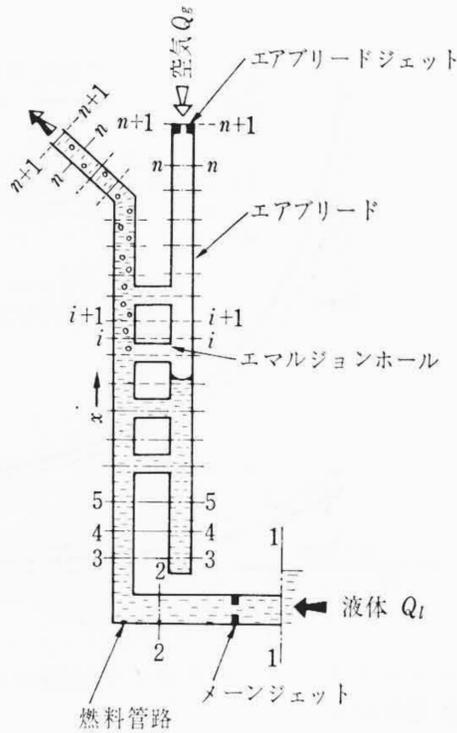


図2 管路区分方法の一例

- x : 管路流れ方向に沿って測った距離
- G : 質量速度
- A : 管路断面積
- $\bar{\rho}$: 小区分内の平均密度

で表わされる。一方、運動の式は

$$\frac{\partial G}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{G^2}{\bar{\rho}} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} - \lambda' \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{|G|G}{2D_h} - \bar{\rho} \cdot g \frac{\partial H}{\partial x} - \xi' \frac{|G|G}{2\bar{\rho}} \quad (2)$$

- ここに、 p : 圧力
- D_h : 管路の水力平均直径
- H : 管路2点間の垂直距離
- g : 重力の加速度
- λ' : 非定常流の場合の摩擦損失係数⁽⁷⁾
- ξ' : 非定常流の場合の管路の諸流動損失係数⁽⁷⁾

さらに、エマルジョンホールからの気体の流出量 Q_b を考慮すると

$$\frac{\partial}{\partial x} [A \cdot w_l \cdot f + A \cdot w_g (1-f) + Q_b] = 0 \quad (3)$$

- ここに、 w_l : 液相の速度
- w_g : 気相の速度
- f : 液容積比
- Q_b : 気体の流出量

の関係が成立する。また、相対速度 $w_r = (w_g - w_l)$ を用いて(3)式を書き換えると

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{A \cdot G}{\bar{\rho}} + \frac{A w_r f (1-f) (\rho_l - \rho_g)}{\bar{\rho}} + Q_b \right] = 0 \quad (4)$$

- ここに、 ρ_l : 液体の密度
- ρ_g : 気体の密度

が得られる。

さて、以下図2に示したような簡単な気化器管路模型を考えて数値解法の概要を説明することにする。まず、管路を $\Delta x_i = x_{i+1} - x_i$ ($i=1, 2, \dots, n$) に細分し、かつ経過時間に対する諸量の変化を $\Delta t_j = t_{j+1} - t_j$ ($j=1, 2, \dots, m$) に細分し、各メッシュポイント (i, j) で上記の方程式を差分方程式におきかえる。ここに初期条件としては $j=1$ において $i=1, 2, \dots, n$ 点の流速、密度および圧力が、また境界条件としては $j=1, \dots, m$ における $i=1$ (燃料管路入口)、 $i=n+1$ の燃料管路出口およびエアブリードジェット入口の圧力が与えられる。以下の計算では管路区分 i 、時間区分 j の密度、流速などの値を $\bar{\rho}(i, j)$ 、

$\bar{w}(i, j)$ などで表示し、またエアブリードのほうは添字 g をつけて区別することにした。

さて、(1)式の連続の式にエマルジョンホールを介して流出する流量 Q_b を考慮して差分方程式におきかえると、小区分内の密度変化 $r(i, j) = \bar{\rho}(i, j) / \bar{\rho}(1, 1)$ は次のように表わされる。

$$r(i, j+1) = \frac{\bar{w}(i-1, j) r(i-1, j) - \bar{w}(i, j) r(i, j) + q(i, j) r_g(i, j)}{v(i)} \Delta T_j + r(i, j) \quad (5)$$

$$r_g(i, j+1) = \frac{\bar{w}_g(i+1, j) \cdot r_g(i-1, j) - \bar{w}_g(i, j) \cdot r_g(i, j) - q(i+1, j) \cdot r_g(i+1, j)}{v_g(i)} \Delta T_j + r_g(i, j) \quad (6)$$

$$\text{ここに、} \bar{w}(i, j) = \frac{G(i, j)}{\bar{\rho}(i, j)} \cdot \frac{\bar{\rho}(1, 1)}{G(1, \infty)} \cdot \frac{A(i)}{A(1)}$$

$$\bar{w}_g(i, j) = \frac{G_g(i, j)}{\bar{\rho}_g(i, j)} \cdot \frac{\bar{\rho}(1, 1)}{G(1, \infty)} \cdot \frac{A_g(i)}{A(1)}$$

$$q(i, j) = \frac{Q_b(i, j)}{G(1, 1)} \cdot \frac{\bar{\rho}(1, 1)}{A(1)}$$

$$v(i) = \frac{V(i)}{V(1)} \quad (V(i) \text{ は区分内の体積})$$

$$v_g(i) = \frac{V_g(i)}{V(1)}$$

$$\Delta T_j = \frac{G(1, \infty) \cdot A(1)}{\bar{\rho}(1, 1) \cdot V(1)} \cdot \Delta t_j$$

また、(2)式の運動の式を差分方程式でおきかえると、(7)式および(8)式が得られる。

$$\bar{w}(i, j+1) = \zeta(i, j) \{y(i, j) - y(i+1, j) - \phi(i, j)\} \Delta T_j + \eta(i, j) \bar{w}(i, j) \quad (7)$$

$$\bar{w}_g(i, j+1) = \zeta_g(i, j) \{y_g(i+1, j) - y_g(i, j) - \phi_g(i, j)\} \Delta T_j + \eta_g(i, j) \bar{w}_g(i, j) \quad (8)$$

ここに、 $y(i, j) = p(i, j) / p(1, 1)$

$$y_g(i, j) = p_g(i, j) / p(1, 1)$$

$$\phi(i, j) = \frac{1}{p(1, 1)} \left[\lambda'(i, j) \frac{1}{\bar{\rho}(i, j)} \frac{|G(i, j)| G(i, j)}{2D_h(i)} + \bar{\rho}(i, j) \cdot H(i) \cdot g + \frac{G^2(i+1, j)}{\bar{\rho}(i+1, j)} - \frac{G^2(i, j)}{\bar{\rho}(i, j)} \right]$$

$$\phi_g(i, j) = \frac{1}{p(1, 1)} \left[\lambda'_g(i, j) \frac{1}{\bar{\rho}_g(i, j)} \frac{|G_g(i, j)| G_g(i, j)}{2D_h(i)} + \bar{\rho}_g(i, j) \cdot H_g(i) \cdot g + \frac{G_g^2(i+1, j)}{\bar{\rho}_g(i+1, j)} - \frac{G_g^2(i, j)}{\bar{\rho}_g(i, j)} \right]$$

$$\zeta(i, j) = r(i, j) / r(i, j+1)$$

$$\zeta_g(i, j) = r_g(i, j) / r_g(i, j+1)$$

$$\eta(i, j) = 1 / [r(i, j+1) \cdot p_a \cdot l(i)]$$

$$\eta_g(i, j) = 1 / [r_g(i, j+1) \cdot p_a \cdot l_g(i)]$$

$$p_a = G^2(1, \infty) / [p(1, 1) \cdot \bar{\rho}(1, 1)]$$

さらに(4)式より

$$\bar{w}(i-1, j+1) + \phi(i-1, j+1) + q(i, j+1) = \bar{w}(i, j+1) + \phi(i, j+1) \quad (9)$$

$$\bar{w}_g(i, j+1) + \phi_g(i, j+1) = \bar{w}_g(i-1, j+1) + \phi_g(i-1, j+1) + q(i, j+1) \quad (10)$$

$$\text{ここに、} \phi(i, j) = \frac{A(i) w_r(i, j) \cdot f (1-f)}{A(1) w(1, \infty) \bar{\rho}(i, j)} (\rho_f - \rho_g)$$

$$\phi_g(i, j) = \frac{A_g(i) w_{rg}(i, j) \cdot f (1-f)}{A(1) w(1, \infty) \bar{\rho}_g(i, j)} (\rho_f - \rho_g)$$

また、(9)式および(10)式の右辺第2項の $q(i, j)$ に関しては $y_g(i, j) - y(i, j) = p_a \cdot c_b(i) r_g(i, j) |q(i, j)| + \sigma(i, j)$ (11)

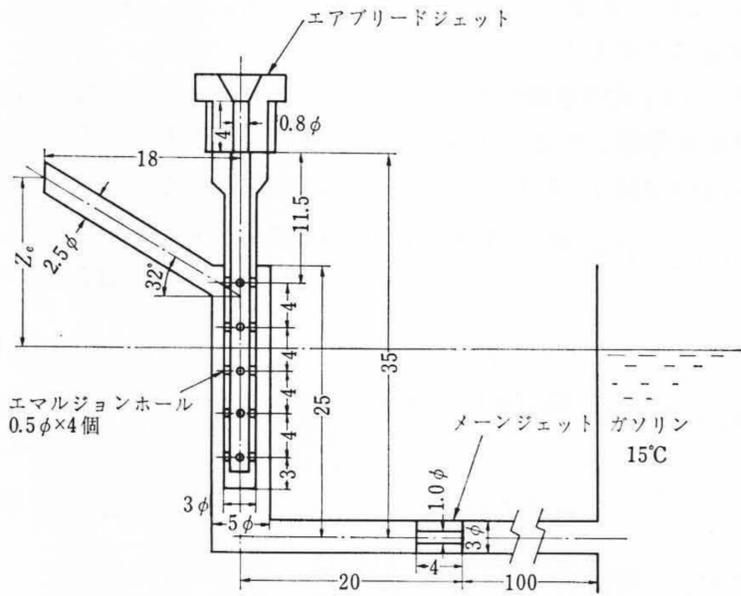


図3 供試ゼニス・ストロンパーク模型の管路寸法

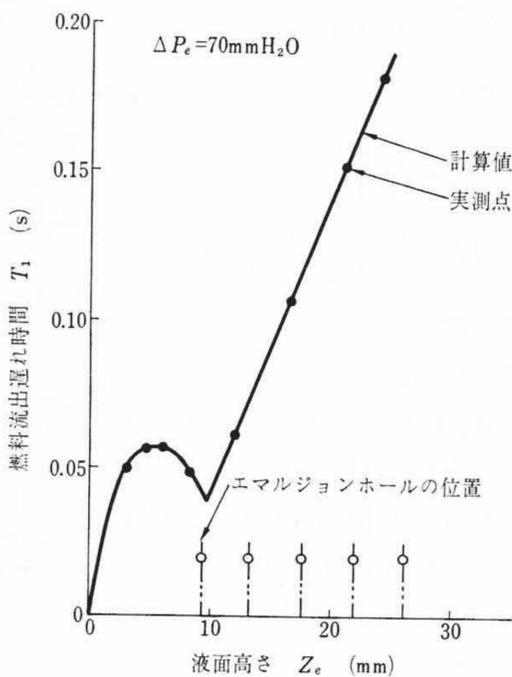


図4 液面高さが流出遅れ時間に及ぼす影響

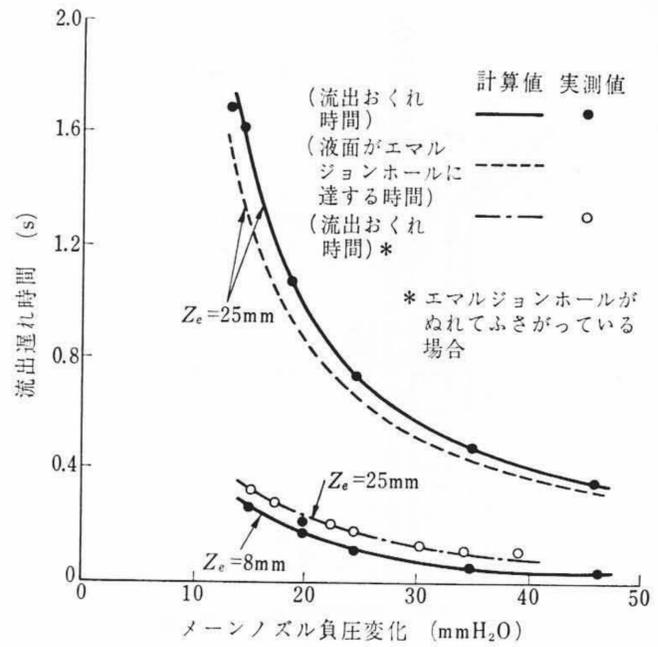


図5 ゼニス・ストロンパークタイプ模型における流出遅れ時間

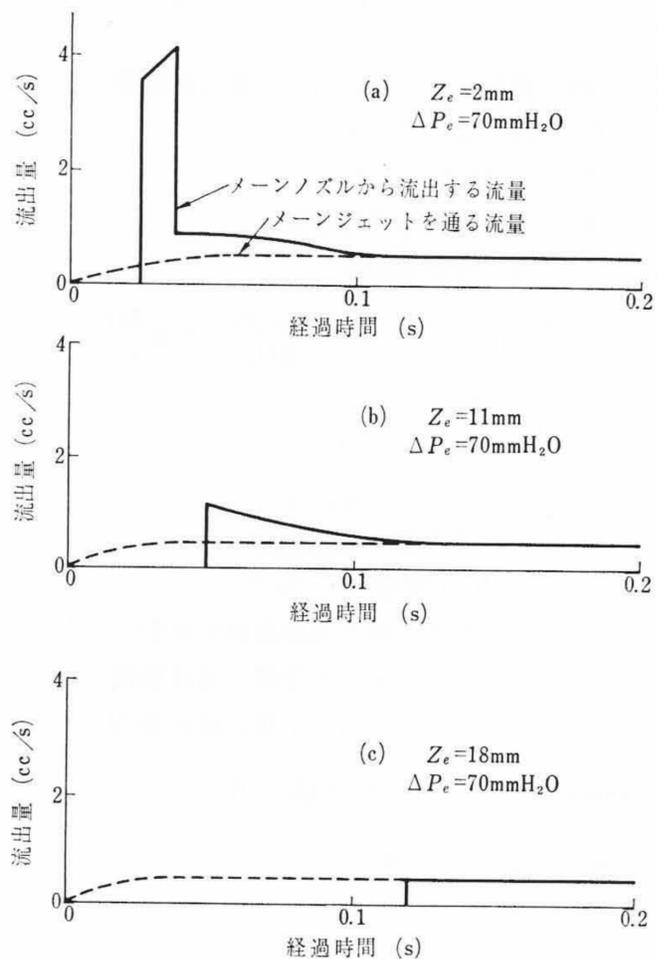


図6 ゼニス・ストロンパークタイプ模型における燃料流出量の変動

さて、(7)式および(8)式を(9)式および(10)式に代入して $\bar{w}(i, j)$ および $\bar{w}_g(i, j)$ を消去し、さらに(11)式を用いて $q(i, j)$ を消去すると、 $y(i, j)$ 、 $y_g(i, j)$ のみが未知数となって前述したように境界条件として $y(1, j)$ 、 $y(n+1, j)$ および $y_g(n+1, j)$ を与えることによって各点の $y(i, j)$ および $y_g(i, j)$ を求めることができる。以下、(7)式から $\bar{w}(i, j+1)$ 、(8)式から $\bar{w}_g(i, j+1)$ 、(5)式から $r(i, j+1)$ 、(6)式から $r_g(i, j+1)$ がそれぞれ求まる。ここに、 Δx_i 、 Δt_j の値は試行錯誤的に定める。これらの値が大きすぎると計算の途中で $y(i, j)$ 、 $y_g(i, j)$ などの値が発散し解が求まらないときがあり、エマルジョンホールが多数の場合には $\Delta t_j = 10^{-5} \text{s}$ 、 $\Delta x_i = 10^{-4} \text{mm}$ 程度まで細分する必要がある。実際の計算は HITAC 5020 によって行なわれた。

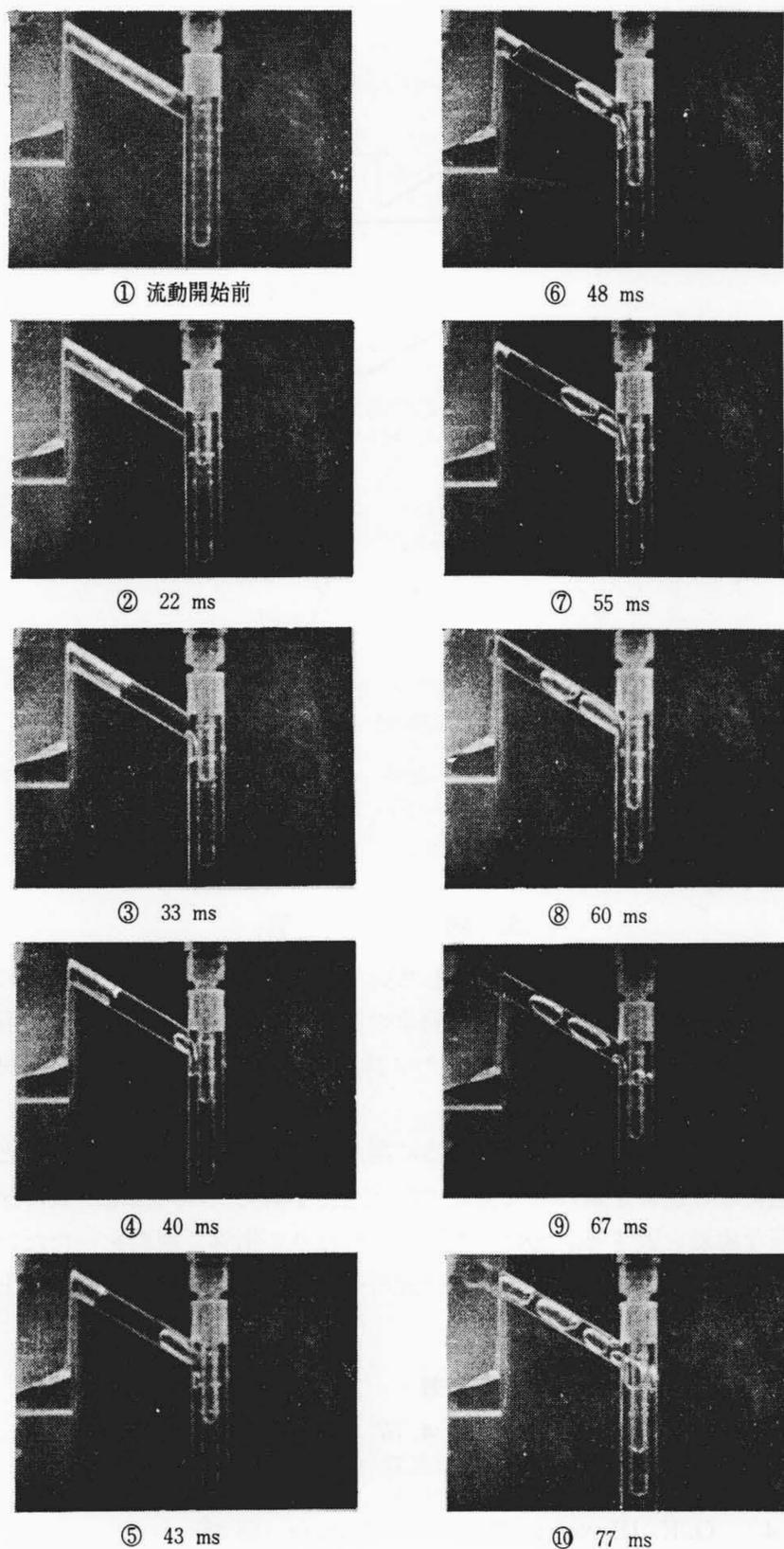
3. 気化器燃料管路の非定常流動特性

3.1 燃料流出遅れ時間

気化器の燃料流出孔は、普通急な坂道に停車したときの燃料の溢(いっ)出を防止するため、フロートチャンバの油面より約十ミリメートル高く設置してある。また、低速軽負荷運転時には低速系統の燃料に引っ張られて主燃料管内の液面はフロートチャンバの油面より数ミリメートル低下する。このような管路出口端より液面が低下している状態から加速した場合には管内流が流動を開始してもす

ぐには出口端から燃料が流出せず、ベンチュリ部を流れる空気量の増加に対して燃料の流出量は時間的に遅れる。この燃料の流出遅れ時間を短縮することは混合気が希薄になって生ずるカーノックを軽減するためにきわめて重要である。

図3は国産の1000ccクラスのエンジンに広く用いられているゼニス・ストロンパークタイプ気化器の模型を示したものである。さて、図4および図5はそれぞれ横軸に燃料管内の液面高さ Z_e 、管路出口端に作用するベンチュリ負圧の変化量 Δp_e をとって図3のノズルに跳躍関数的負圧変化を与えた場合の燃料流出遅れ時間を示したものであるが、これらの図からわかるように負圧変化の値が小さくなるほど、かつ加速前の液面高さが低くなるほど燃料流出遅れ時間は増大している。また図4および図5は流出遅れ時間を実験的に求めた結果をあわせ示したものであるが計算値と実験値とはほぼ合致した。ここに、液面が低くなると流出遅れ時間は急激に増大するが、



① 流動開始前

⑥ 48 ms

② 22 ms

⑦ 55 ms

③ 33 ms

⑧ 60 ms

④ 40 ms

⑨ 67 ms

⑤ 43 ms

⑩ 77 ms

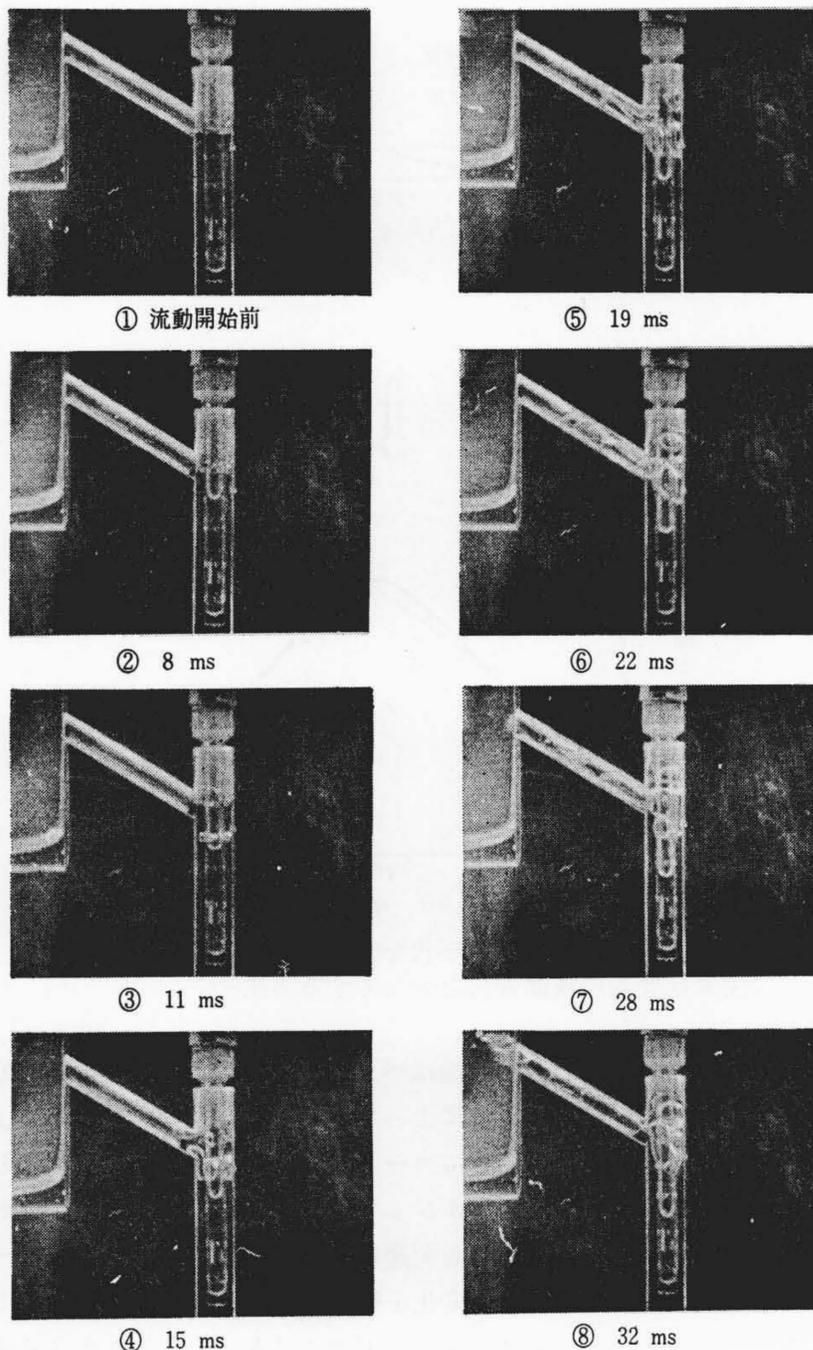
(ゼニス・ストロンパークタイプ, サブマージドエアブリード, $\Delta P_e=70 \text{ mm H}_2\text{O}$), 倍率 1.0

図 7 高速度カメラによるエアブリード流動状況

これは液面が液相流のままエマルジョンホールに達して気液二相流を形成するまでの時間が増大することによるものである。したがって、加速前の液面をエマルジョンホールに近づけることによって燃料の流出遅れ時間を短縮することができる。

3.2 燃料の出初め付近における流出量の変動

エアブリードがない単純気化器における燃料流出量はメインジェットを通る流量と合致するが、エアブリードがある実用気化器においてはエマルジョンホールから流入する空気の影響によってメインジェットを通る流量と出口端から流出する流量とは必ずしも合致しない。さて、エンジンに供給される混合気の空燃比はベンチュリ部を通る吸入空気量とメインノズルから流出する燃料流量によって定まるので、カーノックの問題を解決するためにはメインジェットを通る流量ではなくメインノズルから流出する流量を求める必要がある。ここでは、前述の図 3 に示したゼニス・ストロンパーク模型において管内流が静止している状態から管路出口端に跳躍関数的負圧変化を与えた際の流出量を求めた。図 6 はその結果で、サブマージ



① 流動開始前

⑤ 19 ms

② 8 ms

⑥ 22 ms

③ 11 ms

⑦ 28 ms

④ 15 ms

⑧ 32 ms

(ゼニス・ストロンパークタイプ, エマージドエアブリード, $\Delta P_e=70 \text{ mm H}_2\text{O}$), 倍率 1.0

図 8 高速度カメラによるエアブリード流動状況

ドエアブリードの場合には液体ピストン流を伴って一時多量の燃料が流出し(図 7 参照), その後定常状態に達する。また、エマージドエアブリードの場合には最初から気液二相流を呈するので(図 8 参照) 流出量はほぼ一定である。ここに、流出遅れ時間を少なくして車の運転性を向上するためには加速前の燃料管路の液面とエマルジョンホールの設置位置を近づけること、また燃料の流出量の変動を少なくするためにはサブマージドエアブリードの状態を避ける必要があることが明らかとなった。

4. 気化器の非定常流動特性がエンジン過渡時の運転性能に及ぼす影響

4.1 低速軽負荷運転時における主燃料系統管内の液面変化

低速系統はメインジェットの下流側で主系統から分岐しているのので、低速軽負荷運転状態では低速系統に作用している負圧が主系統の管路から燃料を引っ張る。いま、フロートチャンバ内の油面を基準にした主系統管内の液面高さを h_{mw} とすると、 h_{mw} は

$$h_{mw} = \frac{\Delta p_v}{\gamma} - \frac{\Delta p_{mj}}{\gamma} + h_o \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 Δp_{mj} : 低速系統の燃料流量によってメインジェットに生ずる差圧
 Δp_v : ベンチュリ負圧
 γ : 燃料の比重量
 h_o : 毛管現象による液面上昇高さ

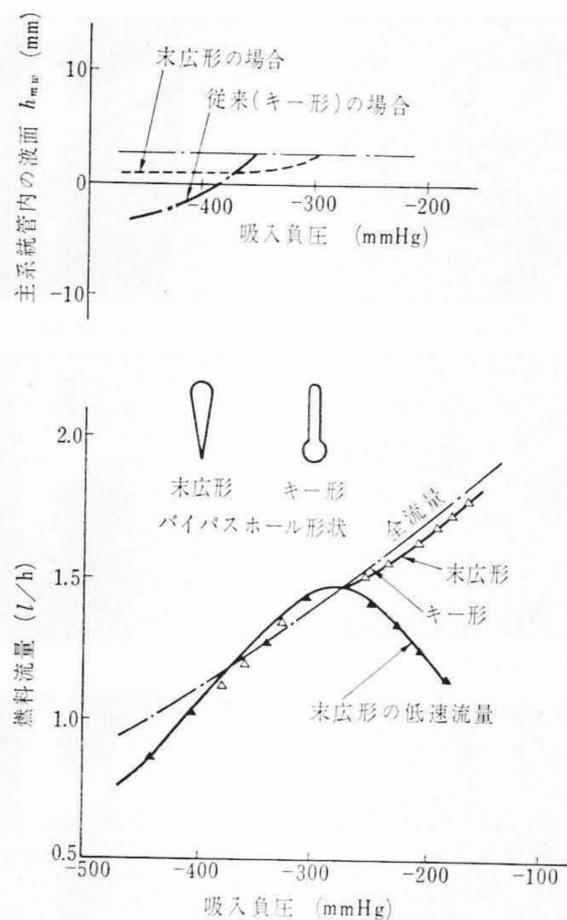


図9 バイパスホールの形状を末広形にすることによって主系統管内の液面変化を少なくする方法

で与えられる。すなわち、液面はベンチュリ負圧で引き上げられるとともに、低速系統の燃料流によって引き下げられる。前述したように流出遅れ時間を小さくしてカーノックを軽減するためにはこの主系統管内の液面を常にエマルジョンホールに近づけておく必要があるが、このためには低速軽負荷運転時の液面を一定に保持しなければならない。図9は h_{mw} の変化を吸入負圧に対して示したものであるが、末広形のバイパスホールの場合には h_{mw} の変化を小さくすることができる。

4.2 気化器の非定常流動特性の改善によるトルク変動の軽減

図10はスロットルバルブをゆっくり開いて加速した際のトルク変動軽減の一例を示したものである。燃料の流出遅れ時間が大きい従来の場合にはスロー・メーンつながり時の空燃比の変動がきわめて大きく混合気を全般に濃くしなければトルク変動を軽減することができないが、前述したように主系統管内の液面変化をおさえ流出遅れ時間を短縮すると F'/A の低下の度合が小さくなるので混合気を濃くすることなく、すなわち排気有害成分を増大させることなくトルク変動を軽減することができる。

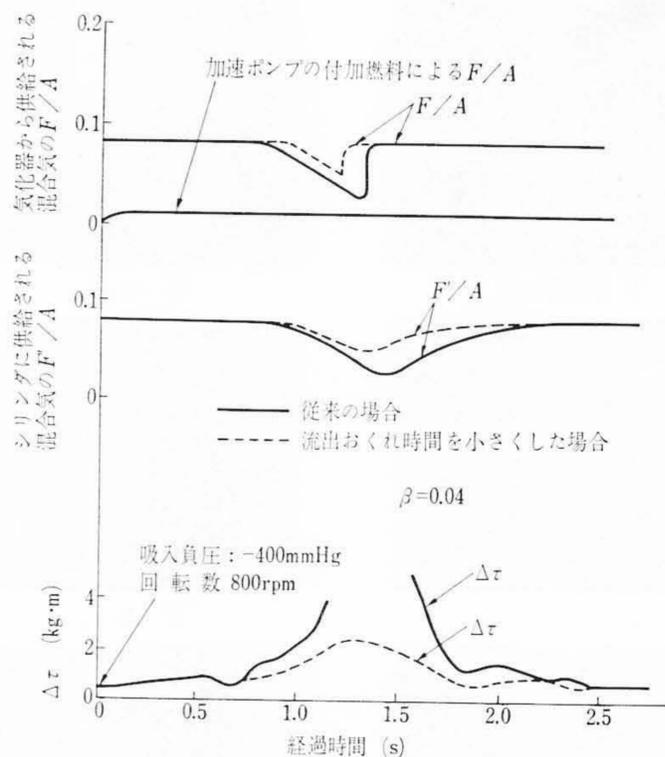


図10 スロットルバルブをゆっくり開いて加速した際のトルク変動 $\Delta\tau$ 軽減の一例

5. 結 言

以上、複雑な管路系を形成している気化器燃料管路の非定常流の解析方法を新たに導出し、自動車の加減速過渡運転状態における混合比特性を解明し、カーノックや排気ガスの問題を工学的に解決した。

終わりに、本研究を遂行するに当たって、終始ご懇切なご指導と適切なご助言を賜った東北大学高速力学研究所坪内為雄所長に深甚な謝意を表す。また、本研究に当たりご指導ご援助をいただいた日立製作所佐和工場、日立研究所の関係各位に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 田辺ほか：内燃機関 4, 37 (昭40)
- (2) 田中：熱機関体系, 山海堂 (昭31)
- (3) 渡辺：日本機械学会前刷集 (120) (昭39)
- (4) O. K. Шухов：Машгиз, Москва (昭38)
- (5) 田中, 音田, 土居：自動車技術会42年秋季学術講演会前刷集
- (6) 宝諸, 大島, 大山：自動車技術 21, 11 (昭42)
- (7) 大島, 大山：日本機械学会前刷集 (159) (昭41)