

# 管内脈動流れにおける圧力と温度の計測

## Measurements of pressure and temperature of pulsating flow in pipe

○芳賀 建人(東京電大) 佐藤 直輝 (東京電大) 遠藤 正樹 (東京電大)

Kento HAGA, Naoki SATO, Masaki ENDO, Tokyo Denki University, Ishizaka, Hatoyama-cho, Saitama 350-0394

### 1. 序論

自動車の急速な普及は排気ガスによる大気汚染などの環境問題や地球温暖化につながるため、有害成分については規制が行われ、現在は非常に厳しい規制値となっている<sup>(1)</sup>。近年、規制強化への対応として CO<sub>2</sub> を排出しない EV の普及が始まっている。しかし、EV 車の充電に用いる電気の発電時にも CO<sub>2</sub> などの有害ガスが排出される。よって、発電方法によっては EV の普及が環境問題改善に必ずしも直結するとは限らない。CO<sub>2</sub> の削減を優先する場合、EV に代え HEV の普及により、CO<sub>2</sub> 排出量を 2/3 に減少させることができる<sup>(2)</sup>。HEV のベース技術は内燃機関であることから、内燃機関の需要は依然として高い。

内燃機関の排気ガス浄化システムの中で、古くより使用されてきた装置に触媒が挙げられる。触媒とは、排気ガス中に含まれる有害物質を無害な物質に変える装置である。ガソリンエンジンでは、触媒が約 300 度以上の決められた温度範囲にある時のみ実現できるが、冷間始動時の触媒温度は低く、触媒の早期加熱システムの研究が必要とされる<sup>(3)</sup>。また、冷間始動時、特に寒冷地においては不均一燃焼による燃料消費量の増加や、有害排出ガスの増加がより顕著となる<sup>(4)</sup>。

船舶の分野でも同様な問題が生じている。船舶は、出港の際のエンジンの起動等が生活圏に近い場所で行われるため、人体への被害が大きい<sup>(5)</sup>。

そこで、衝撃波を持つ、衝撃波通過後の流体温度を上昇させる性質を利用することを考えた。

本研究は、内燃機関の排気管内に生じる脈動流を利用し、早期に触媒装置の温度を上昇させることを目的とする。排気管内の温度は波動現象と密接に関係しており、衝撃波の形成と反射が温度上昇に寄与していることが報告されている。そこで、内燃機関の排気管内の流れを排気管を模擬した供試管とロータリーバルブで再現した装置を用いて圧力測定および温度測定を行った。排気管内での衝撃波形成と管内の温度上昇との関係を調査し、触媒装置の早期昇温に最適な排気管形状について議論した。

### 2. 実験装置

図 1 に配管系統図を示す。供試管上流には高压タンクとロータリーバルブから構成される脈動流発生装置がある。コンプレッサーで圧縮された空気はエアードライヤー機能によって除湿され、サージタンクに供給される。サージタンクで脈動成分が取り除かれ定常流となった圧縮空気は、オイルミストセパレーターとマイクロオイルミストセパレーターを通過することで、微粒固形物が取り除かれ、脈動流発生装置の高压タンクへ供給される。

図 2 に内燃機関の排気管内の流れを再現した供試管の詳細を示す。供試管は、ロータリーバルブから 850 mm の位置で 2 つに分岐する。

供試管の直管部分には測定孔を設けてある。ロータリーバルブから 50 mm の場所に 1 番を、1 番から 6 番までは 100

mm 等間隔で 5 箇所、6 番から 7 番までは 200 mm の間隔、7 番から 8 番は 100 mm の間隔で測定孔を設けている。また、二又部には、分岐に 1 箇所の測定孔、そこから 100 mm の間隔で 3 箇所の測定孔を設けている。本実験では 2 番、4 番、6 番、8 番、10 番を用いる。また、本実験では衝撃波を伴う流れ場のため圧力測定孔における共振周波数が高いほど応答性が良いことを踏まえ、導管は太く短く、かつ空隙部体積を小さくすることが必要とされる。これらを考慮し、導管の直径および長さを各 1 mm、圧力変換器から受圧面までの長さを 1 mm とした。

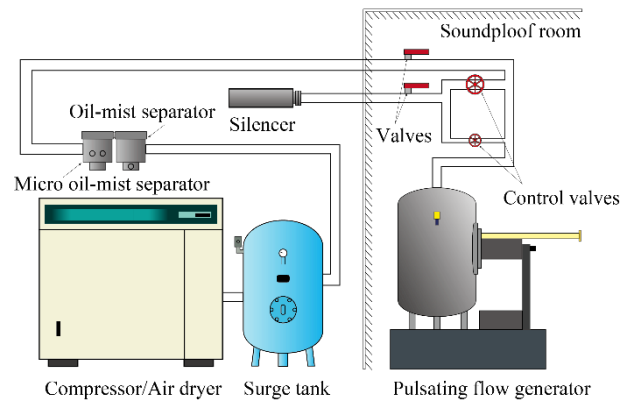


Fig.1 Piping System

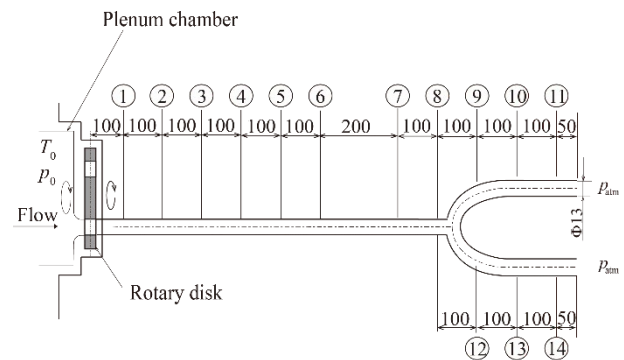


Fig.2 Model of exhaust system

### 3. 実験方法

実験条件は実機を考慮し、タンク内圧力  $p_0$  と大気圧  $p_{atm}$  の比  $p_0 / p_{atm} = 4.0$ 、ロータリーバルブの回転数  $n = 500$  rpm から 4500 rpm まで、500 rpm 刻みで計測を行う。

圧力測定と、温度測定を行う。圧力測定では、圧力変換器を用いる。圧力変換器には受圧面にひずみゲージが設けられており、変化に応じて信号を出力する。その信号を DC アンプで増幅し、A/D ボードを介して読み取り圧力履歴を記録する。また、平均圧力も測定する。

温度測定では、T 型熱電対を用いて時間平均温度を測定し、無次元温度  $T / T_{ref}$  を求める。ここで、 $T_{ref}$  は、高压タ

ンク内の空気を脈動時に測定した平均圧力まで定常流の状態に膨張させた際の流体温度である。また  $T$  は、脈動流を発生させた状態での流体温度である。

#### 4. 結果と考察

図 3 に圧力比  $p_0/p_{atm} = 4.0$ 、回転数  $n = 4500$  rpm における二又供試管の圧力履歴を示す。横軸は測定時間  $t$  をロータリーバルブの開口周期  $\tau$  で無次元化した無次元圧力  $p/p_{atm}$  である。図の最下部の赤線の波形はロータリーバルブの開口断面面積比  $\phi$  の変化を示しており、この図では 2 周期分の変動を表している。右側の数字は測定孔の番号を示している。よって、図の下側が供試管の上流に対応しており、上側が供試管の下流に対応している。

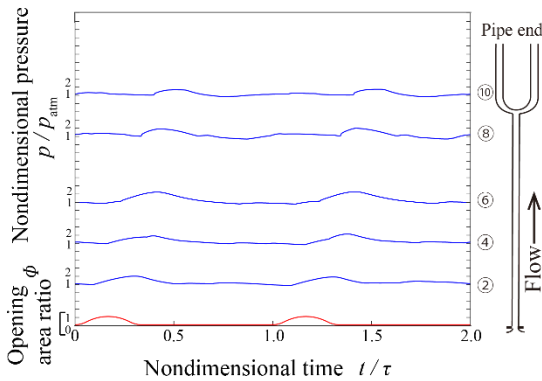


Fig.3 Wave history (Two way pipe,  $n = 4500$  rpm)

図 4 と図 5 に圧力差分波形を示す。差分波形は圧力履歴を時間に関して差分することで得られる。各図の横軸は無次元時間であり、縦軸は  $(p_{i+1} - p_i)/p_i$  で示される圧力波強さである。実線の矢印はロータリーバルブ開口時に発生した圧縮波 P1 の伝ば経路を示している。点線の矢印は下流の管端部で反射した波 SR1 およびロータリーバルブで反射した波 SR2 の伝播経路を示している。破線の矢印は分岐点で反射した波 R1 を示している。P1 は下流に進むにつれて、衝撃波へと遷移している。P1 は管端部で反射し、前述の SR1 となり上流へ伝播していることがわかる。SR1 はロータリーバルブで閉口端反射して SR2 となり下流へ伝播している。回転数 3000 rpm では P1 と SR2 が重なっている。これによって測定孔 8 番と 10 番では強い衝撃波へと遷移していることがわかる。また、分岐部から反射してくる波 R1 が見られる。

図 6 に温度測定の結果を示す。無次元温度が入り口付近の測定孔 2 番の 0.588 から分岐部手前の 6 番で 0.311 まで低

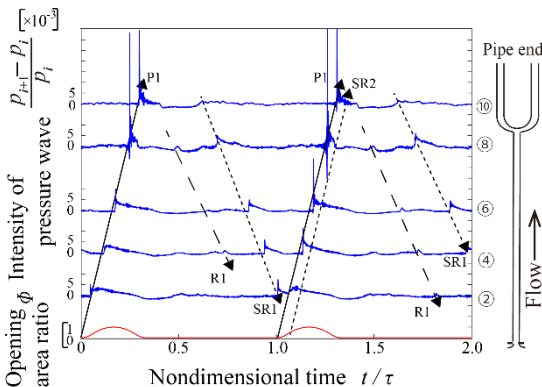


Fig.4 Wave diagram at  $n = 3000$  rpm

下しており、分岐の先の 10 番で再度 0.673 に上昇していることがわかる。

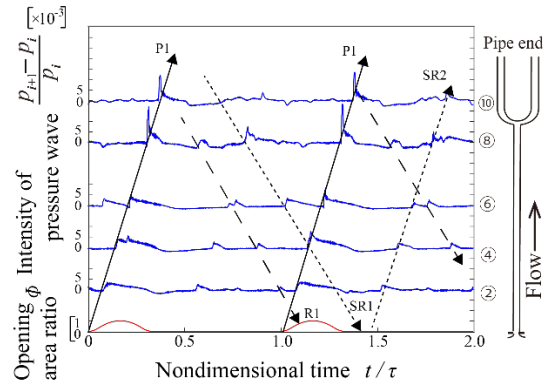


Fig.5 Wave diagram at  $n = 4500$  rpm

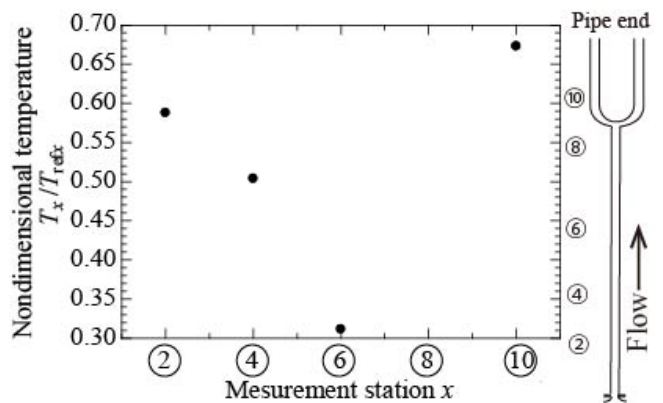


Fig.6 Nondimensional Temperature at  $n = 4500$  rpm

#### 5. 結論

$n = 3000$  rpm では開口端反射した波とロータリーバルブからの圧縮波が重なり、大きな衝撃波へと遷移する。

分岐点で反射した波がロータリーバルブからの圧縮波と重なり、強い衝撃波へと遷移する。

温度測定の結果、分岐部手前で無次元温度が低下しており、その先で再度上昇していることから波が衝撃波に遷移していることがわかる。

#### 文献

- (1) 高見明秀, “自動車排出ガス浄化用触媒の現状と今後の動向”, 日本燃焼学会誌第 52 巻 161 号(2010), pp. 198-205.
- (2) 畑村耕一, 電気自動車の普及と自動車の Well to Wheel の CO2 排出量低減の施策, ENGINE REVIEW SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN 第 9 巻 6 号 (2019), pp. 4-11.
- (3) 和佐田信, 遠藤正樹, 排気脈動流による熱伝達に関する研究, 日本機械学会論文集, Vol.80, No.810, (2014), pp. 1-12.
- (4) M.Gumus, Reducing cold-start emission from internal engines by means of thermal storage system, Applied Thermal Engineering 29, (2019), pp. 652-660.
- (5) 山西大, 津田稔, 平野尊之, 前田和幸, 船用ディーゼル機関の起動時における大気環境汚染物質の排出特性評価, Journal of National Fisheries University, Vol.61, No.4, (2013), pp. 242-246.