

導圧管を介して検知された圧力波形から計測部の圧力波形を復元する方法

松尾典孝¹⁾

A Method of Restoring Pressure Waveforms at a Measurement Part from Detected Pressure Waveforms through Pressure Guide Tube

Noritaka Matsuo

Pressure sensor is often installed on branch guide tube, when the sensor cannot be mounted on a measurement part due to its location or environmental conditions. This report discusses on a method of restoring the pressure at the open end of the guide tube considered to be the measurement part from the pressure detected by the sensor mounted on the closed end, using a four-terminal circuit model that represents the pressure propagation in the tube in an analogy with electric circuit.

Key Words: Electronics and Control, Test/Measurement/Diagnosis, New Measurement Technique, Pressure (E1)

1. まえがき

小型で高応答の圧力センサがエンジンや流体機器の計測・診断に広く使用されている。圧力センサの取付け方法は受圧面を直接計測部に露出させるフラッシュマウント(図-1-(1))が望ましいが計測部の位置や形状、温度・振動などの環境条件によりフラッシュマウントができない場合は測圧孔を介して取付けるリセスマウント(図-1-(2))や導圧管を介して取り付ける導圧管方式(図-1-(3))が用いられる。

フラッシュマウント以外の方式を用いる場合は圧力変動に対する応答性や負荷効果に配慮する必要がある。リセスマウントにおける測圧孔や受圧室の設計方法については過去にいくつかの研究報告¹⁾²⁾があり日本機械学会発行の技術資料³⁾にも詳細な記載がある。一方測圧孔に比べ遥かに長く内径も大きな導圧管を用いる場合はデッドボリュウムの増加により周波数特性が大幅に低下しまた位相誤差が大きいため変動圧計測には向かないとされ平均圧計測用に限られている⁴⁾⁵⁾。しかし例えばエンジンの吸排気圧力変動の計測目的は主に動的効果に関連した情報を得ることであり最近では計測データを 1D シミュレーションの精度検証や CFD の境界条件設定に利用することが多くそのような用途では回転数の高々 3~4 次の振動の波形が計測できればよい。本稿では長い導圧管を介して計測されたエンジン吸排気圧力波形から計測部の原圧力波形を復元する方法を検討する。

2. 解析に用いるソース圧力波形

今回ソース圧力波形はエンジンの吸排気圧力波形とし実際に代わりシミュレーションにより得た圧力波形とした。シミュレーションツールはオープンソースのエンジン 1D

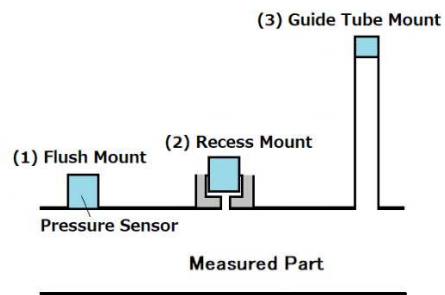


Fig.1 Schematic of Three-Types of Pressure Sensor Mount

コード OpenWAM⁶⁾⁷⁾を用いた。同コードは管内非定常流解析に空間・時間ともに 2 次精度の Two-Step Lax-Wendroff 法を用い、また管内伝播に伴う圧力波形の崩れを極力なくするため各管メッシュでの Courant 数が略 1.0 となるよう各管に独立の時間刻みを適用していること、管内計算式や理論の多くが公開されていることなどから今回の検討に適したツールと考えた。エンジンモデルと主要諸元を図-2、表-1 に示す。吸排気系にある 0-D の Plenum を圧力計測部とし Plenum から分岐する導圧管の閉端の圧力をセンサ圧力とする。通常分岐管は Branch 要素を用いてモデル化されることが多いが OpenWAM の Branch モデルは集合管の入口境界に等圧の仮定を用いており開口端部の圧力損失が考慮できないため代わりに Plenum と管を接続する Deposit の流量係数で圧力損失を与えるモデルとした。

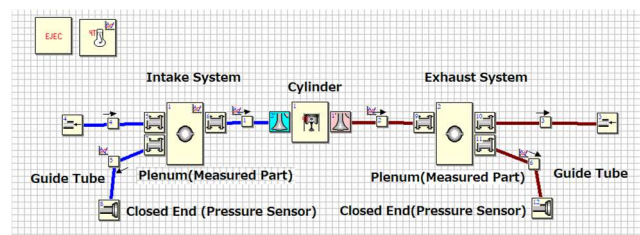


Fig.2 The Flow Diagram of the Engine Model

1) 松尾技術士事務所 (436-0062 静岡県掛川市旭ヶ丘 1-15-12
Email : mec-matsuo@mail.wbs.ne.jp)

Table-1 The Main Specifications of the Engine Model

Items	Specifications
Engine Concept	4-Stroke Single Cylinder SI
Bore x Stroke	80mm x 95mm
Intake	Pipe Config. Φ40mm x 300mm, Mesh 5mm
	Plenum 20cc (@100mm from In. Valve)
	Guide Tube Φ4mm Mesh 2mm
Exhaust	Pipe Config. Φ36mm x 500mm, Mesh 10mm
	Plenum 20cc (@200mm from Ex. Valve)
	Guide Tube Φ4mm Mesh 2mm

3. 導圧管の線形モデルによる圧力波形復元

3.1 線形モデルの基礎式

導圧管内の流体を非圧縮性流体と仮定したときの管内圧力と流量の動特性は(1)、(2)式で表される。

$$\partial Q / \partial t + (A / \rho) \cdot \partial P / \partial x + R \cdot Q = 0 \text{-----(1)}$$

$$(A / K) \cdot \partial P / \partial t + \partial Q / \partial x = 0 \text{-----(2)}$$

但し Q :流量(m³/s) P :圧力(N/m²) R :粘性抵抗係数(1/s)

ρ :密度(kg/m³) A :管断面積(m²) K :体積弾性率(N/m²)

(1)、(2)式で $\rho / A = L_f$ 、 $\rho R / A = R_f$ 、 $A / K = C_f$ とすると

$$\partial Q / \partial t + (1 / L_f) \cdot \partial P / \partial x + (R_f / L_f) \cdot Q = 0 \text{-----(3)}$$

$$C_f \cdot \partial P / \partial t + \partial Q / \partial x = 0 \text{-----(4)}$$

3.2 電気回路 (送電線路) とのアナロジ

図-3 に示す送電線路の電圧と電流の動特性も(3)、(4)式と類似する(5)、(6)式で表すことができ管内の P 、 Q の動特性は電気回路の v 、 i とのアナロジで考察することができる。

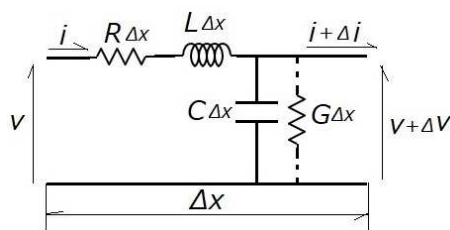


Fig.-3 Distributed Constant Circuit Model of Electric Power Line

$$\partial i / \partial t + (1 / L) \cdot \partial v / \partial x + (R / L) \cdot i = 0 \text{-----(5)}$$

$$C \cdot \partial v / \partial t + \partial i / \partial x = 0 \text{-----(6)}$$

但し i :電流(A) v :電圧(V)

R :線路単位長さ当たりのレジスタンス(Ω/m)

L :同インダクタンス(H/m) C :同キャパシティ(F/m)

G :同コンダクタンス(S/m) ここでは $G=0$ とする

3.3 管路の4端子回路モデル

送電線路の送電端と受電端の v 、 i の関係は4端子回路モデルを用いて求めることができるがここでは送電端と受電端の v 、 i を管上流端 (開口端) と管下流端 (閉端) の P 、 Q に置き換えて考える。

ラプラス変換により s 領域における開口端での圧力と流量を $P_i(s)$ 、 $Q_i(s)$ と閉端での値 $P_e(s)$ 、 $Q_e(s)$ との関係は4端子回路モデルを用いて(7)式で表される。⁸⁾

$$\begin{bmatrix} P_i(s) \\ Q_i(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \Gamma(s) & Z_c(s) \sinh \Gamma(s) \\ \frac{1}{Z_c(s)} \sinh \Gamma(s) & \cosh \Gamma(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_e(s) \\ Q_e(s) \end{bmatrix} \text{----- (7)}$$

$Z_c(s)$:特性インピーダンス $\Gamma(s)$:伝播オペレータ

$$Z_c(s) = \{Z(s) / Y(s)\}^{0.5} = (L_f / C_f)^{0.5} = (\rho \cdot K)^{0.5} / A \text{-----(8)}$$

$$Z(s) = R_f + L_f \cdot s \text{-----(9)}$$

$$Y(s) = C_f \cdot s \text{-----(10)}$$

$Z(s)$:直列インピーダンス/単位長 $Y(s)$:並列アドミタンス

ここで音速の式 $a = (K / \rho)^{0.5}$ を用いて

$$Z_c(s) = (\rho \cdot K)^{0.5} / A = \rho \cdot a / A \text{-----(11)}$$

一方

$$\Gamma(s) = L_p \delta(s) \text{----- (12)}$$

$\delta(s)$:伝播定数 L_p :管長さ(m)

$$\delta(s) = \{Z(s) \cdot Y(s)\}^{0.5} = (L_f \cdot C_f)^{0.5} \cdot s = (\rho / K)^{0.5} \cdot s \text{----- (13)}$$

(12)、(13)式より

$$\delta(s) = s / a \text{----- (14)}$$

$$\Gamma(s) = (L_p / a) \cdot s \text{----- (15)}$$

(7)式において Q_e は閉端での流量であることから $Q_e(s) = 0$ したがって

$$P_i(s) = \cosh \Gamma(s) \cdot P_e(s) = \frac{e^{\frac{L_p \cdot s}{a}} + e^{-\frac{L_p \cdot s}{a}}}{2} \cdot P_e(s) \text{----- (16)}$$

$$Q_i(s) = \frac{1}{Z_c(s)} \sinh \Gamma(s) \cdot P_e(s) = \frac{A}{\rho \cdot a} \cdot \frac{e^{\frac{L_p \cdot s}{a}} - e^{-\frac{L_p \cdot s}{a}}}{2} \cdot P_e(s) \text{----- (17)}$$

(16)、(17)の s 領域の式をラプラス逆変換により t 領域の式に戻し、さらに流量 Q_i から流量 u_i を求めると

$$P_i(t) = \frac{P_e(t + \frac{L_p}{a}) + P_e(t - \frac{L_p}{a})}{2} \text{----- (18)}$$

$$Q_i(t) = \frac{A}{\rho \cdot a} \cdot \frac{P_e(t + \frac{L_p}{a}) - P_e(t - \frac{L_p}{a})}{2} \text{----- (19)}$$

$$u_i(t) = \frac{1}{\rho \cdot a} \cdot \frac{P_e(t + \frac{L_p}{a}) - P_e(t - \frac{L_p}{a})}{2} \text{----- (20)}$$

(18)~(20)式は閉端の圧力から開口端の圧力と流量、および流速を求める方法を明快に示している。つまり或る時刻 t における開口端の圧力と流速は t に対し圧力波が音速 a で管長 L_p を伝播する時間 $\Delta t = L_p / a$ だけ前と後の2つの時刻で計測された閉端の圧力から求めることができるということである。

3.4 圧力伝播速度を考慮した線形モデル計算

非圧縮性流体の場合管内流速は音速 a に比べ小さく圧力波伝播速度は略音速 a と見做せるため(18)~(20)式がそのまま適用できるが圧縮性流体の場合は圧力波伝播速度に対する管内流速の影響が無視できない。したがって管内流速と音速から圧力波伝播速度を求め時刻 t より前に閉端を發した圧力波が丁度 t において開口端に到達する時、該圧力波が閉端を發した時刻 $t - \Delta t$ と、時刻 t に開口端を發した圧力

波が閉端に到達する時刻 $t + \Delta t'$ を求め $t - \Delta t$ と $t + \Delta t'$ の 2 時刻で計測された閉端の圧力を用いて開口端の圧力を求める。このとき管内流速は管内位置と時間により刻々変化しているので近似が必要である。

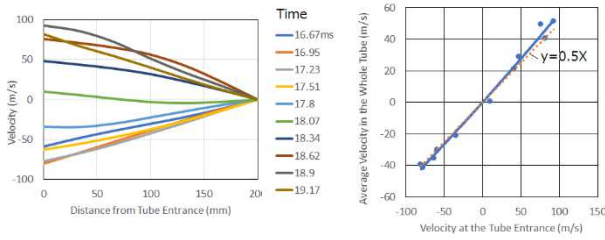


Fig.-4 Variation of Flow Velocity in the 200mm Guide Tube

図 4 に吸気 Plenum に取付けた径 4mm、長さ 200mm の導圧管内の 6,000rpm での時刻毎の流速分布を示す。管内には近似的に 1 次固有振動モードの定在波と見做せる流速変動発生しており平均流速は開口端の流速のほぼ 1/2 となっている。これは流速が開口端から閉端に向けて直線的に変化すると仮定してよいことを示唆している。(図-5)

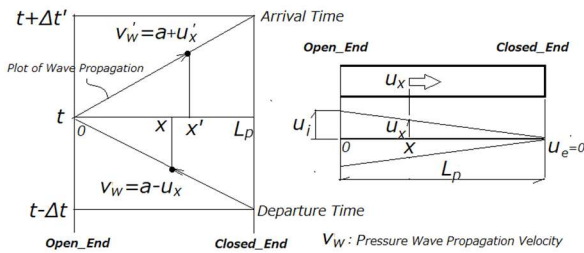


Fig.-5 Pressure Propagation Diagram

時刻 t より前に閉端を発生した圧力波に対し時刻 t から時間を遡った時刻 $t - \tau$ における圧力波の位置 x は(21)、(22)式で求められる。(21)式で $x = L_p$ となる Δt を得る。

$$x = \int_0^{\Delta t} \{a - u_x(t - \tau)\} d\tau \quad (21)$$

$$u_x(t - \tau) = u_i(t - \tau) \frac{(L_p - x)}{L_p} \quad (22)$$

同様に開口端を時刻 t に発生した圧力波に対し時間 τ が経過した時刻 $t + \tau$ における圧力波の位置は(23)、(24)式で求められ(23)式で $x' = L_p$ となる $\Delta t'$ を得る。

$$x' = \int_0^{\Delta t'} \{a + u_x(t + \tau)\} d\tau \quad (23)$$

$$u_x(t + \tau) = u_i(t + \tau) \frac{(L_p - x')}{L_p} \quad (24)$$

開口端での圧力と流速は(25)、(26)式で求める。

$$P_i(t) = \frac{P_e(t + \Delta t') + P_e(t - \Delta t)}{2} \quad (25)$$

$$u_i(t) = \frac{1}{\rho \cdot a} \cdot \frac{P_e(t + \Delta t') - P_e(t - \Delta t)}{2} \quad (26)$$

(22)、(24)式中の u_i は予め(20)式で求めておいた u_i を初期値とし、(26)式で得た u_i を(22)、(24)式右辺に再代入するループ演算により収束解を得る。

3.5 開口端圧力と計測部圧力

次に計測部 Plenum 内の圧力 P_c を求める。開口端の流速 u_i が(-)でガスが管から Plenum に向けて流れている場合は開口端の圧力 P_i をそのまま Plenum 内圧力 P_c と見做せるが、流速 u_i が(+)で Plenum 側から管内にガスが流入する場合は入口付近の縮流による損失や静圧の動圧への変換があるので P_i から P_c を推測する必要がある。入口流量係数を C_d とし非圧縮性流体の準定常モデルを用いて

$$P_c(t) = P_i(t) + 1/2 \cdot \rho \cdot u_i(t)^2 \cdot (1/C_d^2 - 1/C_d + 1) \quad (u_i(t) > 0) \quad (27)$$

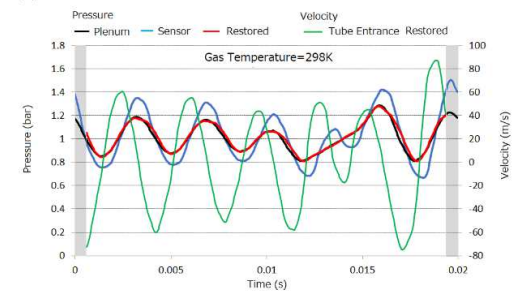
$$P_c(t) = P_i(t) \quad (u_i(t) \leq 0) \quad (28)$$

また圧力とは別に導圧管内の平均ガス温度を熱電対等により計測 (今回は平均温度のシミュレーション値) するものとし、得られた絶対温度から音速 a を求める。また密度 ρ は $P_c(t)$ と温度から状態方程式により求める。

3.6 線形モデルによる圧力波復元結果

図-6(a)、(b)に 6,000rpm の吸気および排気圧力波形の復元結果を示す。導圧管は径 4mm、長さ 200mm、開口端の流量係数は 0.86 である。またサンプル周期は 0.05ms である。計測部圧力に相当する Plenum 内圧力に対しセンサ圧力は振幅、位相とも異なるのに対し線形モデルを用いて復元した圧力波形は良い一致を示している。なお計測区間の前後には灰色で示す復元不可の期間があるがこれは復元する時刻 t の前後 Δt または $\Delta t'$ の区間に計測データが必要なのに対し各々片側区間のデータが不足するためである。

(a) Intake



(b) Exhaust

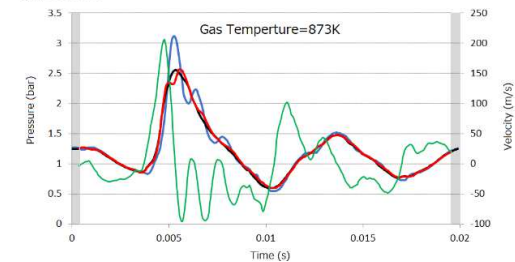


Fig.-6 Restoration of Pressure Waveform 6,000rpm (Guide Tube: Φ 4mm x 200mm)

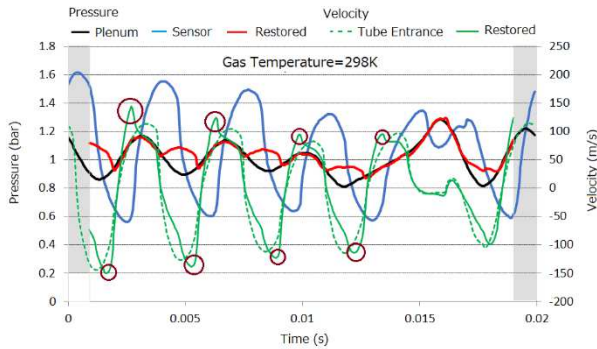


Fig.-7 Restoration of Intake Pressure Waveform 6,000rpm
(Guide Tube: Φ4mm x 300mm)

また管径 4mm、長さ 300mm の導圧管の場合、吸気管と導圧管の長さが同じため共振が発生しセンサ圧力の振幅と導圧管内の流速振幅が共に大きくなり長さ 200mm に比べ復元精度は低下している。(図-7) 今回の波形復元法では圧力伝播速度が復元精度を決める重要なパラメータであるが線形モデルではセンサ圧力と管内流速の変動幅が共に大きくなるとその予測精度が低下するものと考えられる。

4. 導圧管の非線形モデルによる圧力波形復元

4.1 非線形モデルの概要

導圧管の線形モデルを用いた 4 端子回路演算である程度圧力波の復元が可能であるが管内流速が大きくなると復元精度が悪化することがわかった。そこで流体の圧縮性を考慮した非線形モデルによる解析を試みる。このとき線形モデル解析により得られた開口端における時刻 t の圧力と流速は閉端における時刻 $t - \Delta t$ と $t + \Delta t'$ の 2 時刻において計測された圧力を用いて求めることができるという基本原理は非線形モデルでも使うものとする。非線形モデルが線形モデルと異なる点は以下の 3 点である。

- ・圧縮性を考慮して圧力波を重ね合わせ波高を求める。
- ・管内圧力の変化に応じて音速 a の変化を考慮する。
- ・管摩擦による圧力損失を考慮する。

非線形モデルには流体機械やエンジン吸排気管脈動の数値解析に広く使用されている特性曲線法のアルゴリズムを応用する。特性曲線法では圧力と流速を一旦無次元音速 A と無次元流速 U の 2 つの無次元変数に変換しそれらを使って圧力と同じ時空($t-x$)座標面上の伝播ラインに沿って管内を伝播するリーマン変数 λ 、 β を求め、 λ 、 β 間の線形演算により開口端での A 、 U を求め最後にそれらを圧力 P と流速 u に逆変換する。この方法による演算は既に作成した線形モデルの演算と多くのアナログを有する。

特性曲線法における各変数間の基本関係式を以下にまとめて示す。

$$A = (a/a_0) = (P/P_0)^{\xi} = (\lambda + \beta)/2 \text{-----(29)}$$

$$U = u/a_0 = (\lambda - \beta)/(\kappa - 1) \text{-----(30)}$$

但し A :無次元音速 U :無次元流速

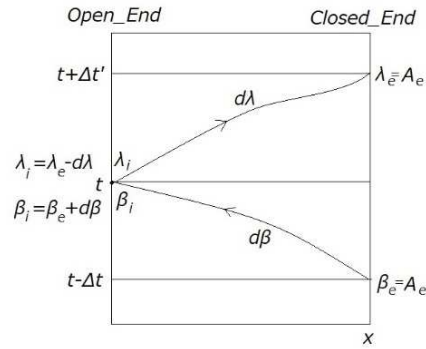


Fig.-8 Characteristic Curve Method Diagram

$\xi = (\kappa - 1)/(2 \cdot \kappa)$ κ : 気体比熱比

a_0 : 基準圧下での音速 P_0 : 基準圧 (例えば大気圧)

$$\lambda = A + (\kappa - 1)/2 \cdot U \text{-----(31)}$$

$$\beta = A - (\kappa - 1)/2 \cdot U \text{-----(32)}$$

$$P = A^{1/\xi} \cdot P_0 = \{(\lambda + \beta)/2\}^{1/\xi} \cdot P_0 \text{-----(33)}$$

$$u = U \cdot a_0 = (\lambda - \beta)/(\kappa - 1) \cdot a_0 \text{-----(34)}$$

閉端では流速 $U_e = 0$ なので

$$A_e = \lambda_e = \beta_e = (P_e/P_0)^{\xi} \text{-----(35)}$$

4.2 非線形モデルによる動特性計算

β は閉端から開口端に向けて速度 $a-u$ で伝播し λ は開口端から閉端に向けて速度 $a+u$ で伝播する。また λ 、 β は伝播途中で管摩擦により各々 $d\lambda$ 、 $d\beta$ だけ変化する。(図-8) 時刻 t に開口端に到達する β が閉端を発進する時刻を $t - \Delta t$ 、時刻 t に開口端を発進した λ が閉端に到達する時刻を $t + \Delta t'$ とすると時刻 t における開口端の $A_i(t)$ と $U_i(t)$ は 2 つの時刻 $t - \Delta t$ 、 $t + \Delta t'$ における閉端の P_e を基に(35)式で求めた A_e を用いて(36)~(39)式で求められる。

$$\lambda_i(t) = \lambda_e(t + \Delta t') - d\lambda = A_e(t + \Delta t') - d\lambda \text{-----(36)}$$

$$\beta_i(t) = \beta_e(t - \Delta t) + d\beta = A_e(t - \Delta t) + d\beta \text{-----(37)}$$

$$A_i(t) = \frac{\lambda_i(t) + \beta_i(t)}{2} = \frac{A_e(t + \Delta t') + A_e(t - \Delta t) - d\lambda + d\beta}{2} \text{-----(38)}$$

$$U_i(t) = \frac{\lambda_i(t) - \beta_i(t)}{\kappa - 1} = \frac{A_e(t + \Delta t') - A_e(t - \Delta t) - d\lambda - d\beta}{\kappa - 1} \text{-----(39)}$$

ここで $d\lambda$ 、 $d\beta$ は

$$d\lambda = \int_0^{\Delta t'} (\kappa - 1) \cdot \frac{f}{D} \cdot U_x^2(t + \tau) \cdot \frac{U_x(t + \tau)}{|U_x(t + \tau)|} \cdot [1 - (\kappa - 1) \cdot \frac{U_x(t + \tau)}{A_x(t + \tau)}] \cdot d\tau \text{-----(40)}$$

$$d\beta = \int_0^{\Delta t} (\kappa - 1) \cdot \frac{f}{D} \cdot U_x^2(t - \tau) \cdot \frac{U_x(t - \tau)}{|U_x(t - \tau)|} \cdot [1 + (\kappa - 1) \cdot \frac{U_x(t - \tau)}{A_x(t - \tau)}] \cdot d\tau \text{-----(41)}$$

但し f : Fanning の管摩擦係数(Darcy の管摩擦係数 λ の 1/4)
 D : 管径(m)

A_x 、 U_x は管位置 x における無次元変数 A 、 U であり各時刻における x は(21)~(24)式で求める。ただし(21)、(23)式で音速 a は一定ではなく u_x と同様 x における音速 $a_x(A_x)$ は開口端から閉端に向けて直線的に変化するものとし例えば(23)式では定数 a に代わりに(42)式による a_x を用いる。

$$a_x(t+\tau)=[A_i(t+\tau)\cdot(Lp-x)+A_e(t+\tau)\cdot x]/Lp\cdot a_0\text{-----}(42)$$

(38)、(39)式で求めた $A_i(t)$ と $U_i(t)$ を P_i 、 u_i に逆変換して

$$P_i(t)=A_i(t)^{1/\kappa}\cdot P_0\text{-----}(43)$$

$$u_i(t)=U_i(t)\cdot a_0\text{-----}(44)$$

4.3 開口端圧力と計測部圧力

次に計測部である Plenum 内の圧力を求める。計測部と管開口端の間の計算には圧縮性流体の準定常モデルを用いる。準定常モデルには熱力学的仮定の異なるものいくつか提唱されているが今回は OpenWAM と同じく縮流によるスロート部と開口端間の等圧モデル⁹⁾を用いる。(図-9)

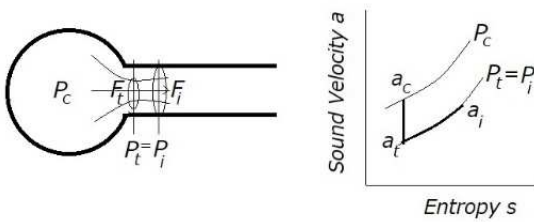


Fig.-9 Quasi-Steady Model of Outflow from Plenum to Tube

$$P_c = P_i / [1 / (2 \cdot C) \{ \Psi \cdot (\Psi^2 + 4 \cdot C)^{0.5} - \Psi^2 \}]^{\kappa / (\kappa - 1)}\text{-----}(45)$$

但し Ψ :縮流部流量係数(= $F_c/F_i = C_d$)

$$C = (\kappa - 1) / 2 \cdot U^2 / [1 - (\kappa - 1) / 2 \cdot U^2]^2\text{-----}(46)$$

$$U = u_i / a_c = a_{c0} \cdot (P_i / P_0)^{\epsilon}\text{-----}(47)$$

ここで a_{c0} は熱電対等により測定した計測部の平均温度から求めた音速とする。

4.4 非線形モデルによる圧力波復元結果

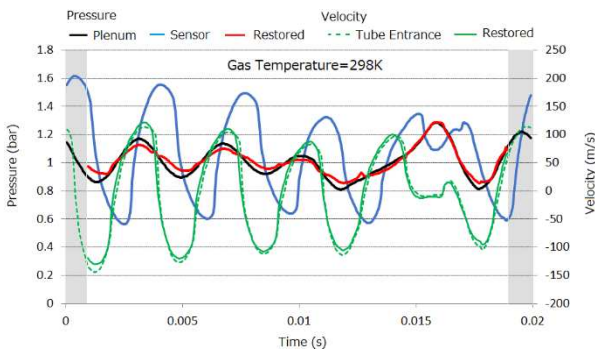


Fig.-10 Restoration of Intake Pressure Waveform 6,000rpm by Non-Linear Flow Model (Guide Tube: Φ4mm x 300mm)

図-10 に管径 4mm、長さ 300mm の導圧管を介して計測した 6,000rpm の吸気圧波形を非線形モデルを用いて復元した結果を示す。図-7 で示した線形モデルでの復元結果に比べ開口端流速の復元精度が大きく向上し、圧力波形の復元精度も向上していることがわかる。また図-11 に吸気系 12,000rpm、図-12 に排気系 9,000rpm の圧力波形復元結果を示す。排気系圧力復元では 0.007~0.008s 区間の開口端流速、圧力とも復元精度が低下している。

図-13 に排気系 9,000rpm における開口端からの距離をパラメータとして流速の時間変化を示す。今回のモデルでは

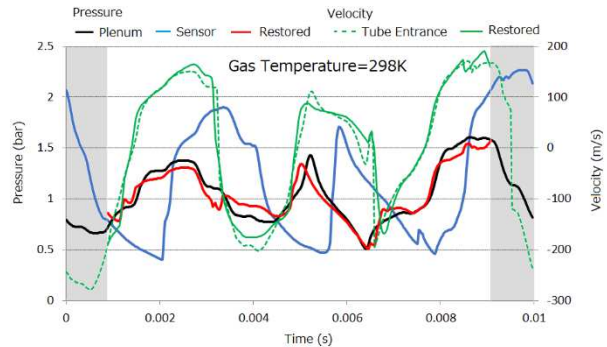


Fig.-11 Restoration of Intake Pressure Waveform 12,000rpm by Non-Linear Flow Model (Guide Tube: Φ4mm x 300mm)

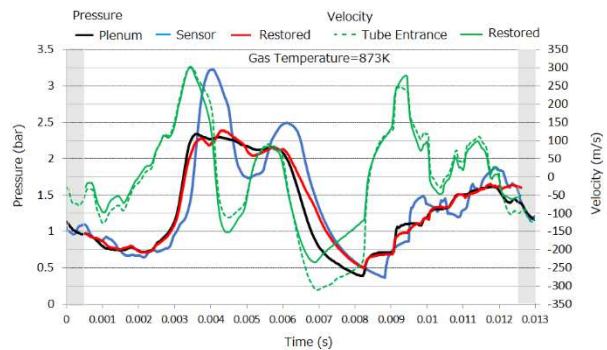


Fig.-12 Restoration of Exhaust Pressure Waveform 9,000rpm by Non-Linear Flow Model (Guide Tube: Φ4mm x 300mm)

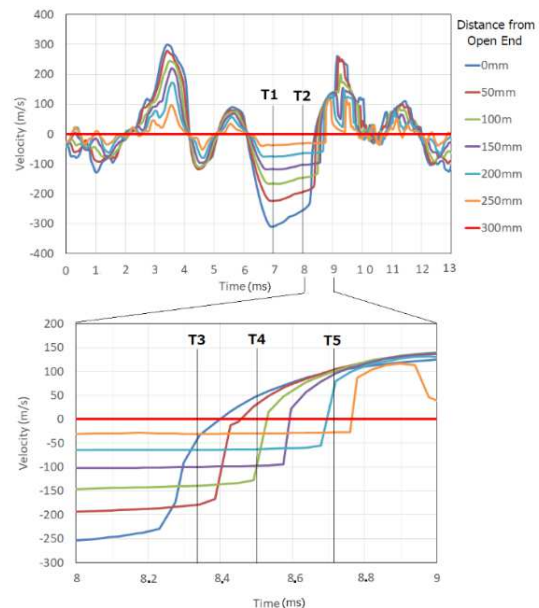


Fig.-13 Flow Velocity in the Guide Tube in Exhaust 9,000rpm (Guide Tube: Φ4mm x 300mm)

図-5 に示すように管内には 1 次固有振動モードの定在波が発生していると仮定しているが区間 7ms~9ms の区間の時刻 $T1$ ~ $T5$ の流速を調べると $T1$ ~ $T2$ では定在波となっているものの $T3$ ~ $T5$ では管内位置により位相が変化する進行波に変わり開口端から閉端に向かっている。(図-14) これは管内脈動の加振源となるソース圧力波形に含まれる高周波成分により管内の 2 次振動成分が増幅されたためである。

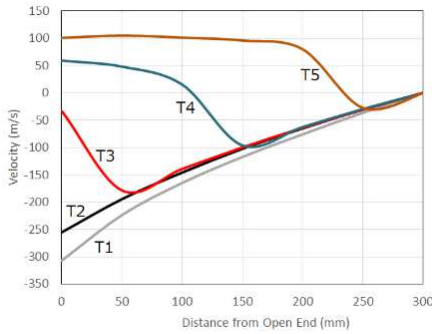


Fig.-14 Variation of Velocity along the 300mm Guide Tube

4.5 復元の信頼度推定

ソース圧力波形の一部区間に高い周波数の成分が含まれる場合、その区間および前後の区間の復元精度は低下する可能性がある。そこで得られた復元波の観察からその信頼度を推定する方法を検討する。図-15 に吸気圧 6,000rpm の復元圧力波形とセンサ波形、および復元流速波形を示す。流速波形の正負両側のピーク発生時刻毎に復元圧力とセンサ圧力の高低が交互に入れ替わっていることがわかる。これは振動成分の中で 1 次固有振動数以下の成分が支配的な場合の特徴でありしたがって得られた圧力と流速の復元波の観察により全区間に亘りこの特徴が見られる場合は復元精度も高いと推定できる。しかし今回の復元法をより高い周波数帯域をもつソース圧力波にも適用可能とするためには復元で得られた圧力と流速の周波数や時間変化を元に必要に応じて補正を加えるなどの改良が必要と考える。

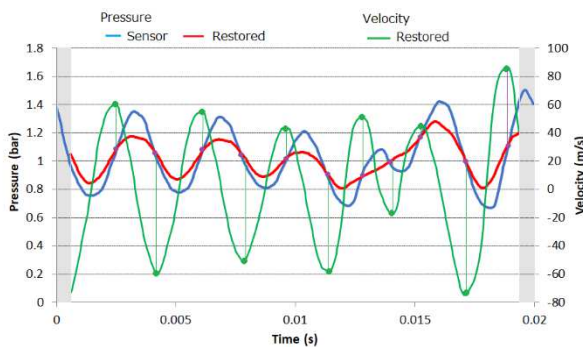


Fig.-15 Observation of Restored Waveform Obtained

4.6 導圧管の負荷効果検証

導圧管はそれを取付けることにより原波形自体を変化させる負荷効果をもつ可能性があり検証が必要である。導圧管は径を大きくするとデッドボリウムが大きく負荷効果も大きくなるが一方径を小さくすると負荷効果は小さいが管摩擦による圧力減衰が大きくなり復元精度は低下する。今回は小型の受圧面 $\Phi 3.8\text{mm}$ の半導体式センサ¹⁰⁾を管端に直接取り付けを想定し導圧管径を $\Phi 4\text{mm}$ とした。

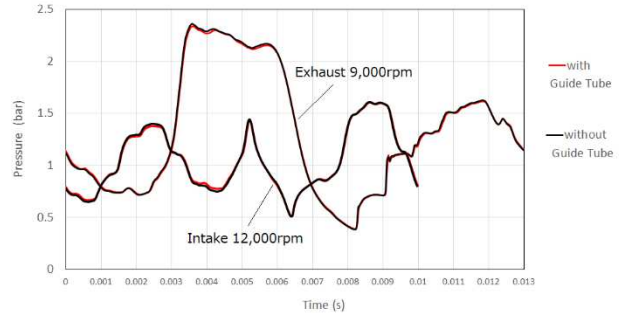


Fig.-16 Validation of Load Effect of Guide Tube

図-16 に $\Phi 4\text{mm} \times 300\text{mm}$ の導圧管取付けの有無による 9,000rpm での排気 Plenum および 12,000rpm での吸気 Plenum 内の圧力比較を示す。図から導圧管有無による Plenum 内圧力波形差は僅かであり負荷効果は無視できるレベルであるといえる。

5. まとめ

- ・導圧管を介して計測した圧力波形から計測部の原圧力波形を復元する方法をシミュレーションを用いて検討した。
- ・まず管内流れと送電線回路とのアナログを元に線形の 4 端子回路モデルを用いて計測部に接続する開口端の或る時刻の圧力をその前後の 2 つの時刻で計測された閉端圧力から求める方法を考案し復元を試みた結果、管内流速が大きいと復元精度が低下することがわかった。
- ・次に気体の圧縮性を考慮し特性曲線法のアルゴリズムを応用した非線形モデルを考案し復元精度の向上を得た。
- ・しかし今回の方法では原圧力波形の一部区間に高周波成分が含まれると復元精度が低下することから今後さらに改良が必要であることがわかった。

6. 参考文献

- 1) 飯村: 圧力測定孔の動特性に関する研究, 東北大学博士学位論文(1992)
- 2) 廣瀬他: 管路理論を適用した圧力測定孔の動特性, 日本フルードパワーシステム学会論文集(2007), 38 巻-5 号
- 3) 流体計測法, 日本機械学会, 1985, p49-62
- 4) 賀羽他: 排気圧力の新しい計測法, 自動車技術会 2001-5 学術講演会前刷集, No.71-01
- 5) 司測研, <https://www.sokken.co.jp/pressure/201011/entry24.html>
- 6) バレンシア工科大, <https://www.cmt.upv.es/OpenWam.aspx>
- 7) YouTube Movie, <https://youtu.be/78Btpb2Y57U>
- 8) 竹中他: 管内流れのモデル化とその解析(1), 機械の研究 (1987), 39 巻 5 号, p79-84
- 9) Winterbone et al. Theory of Engine Manifold Design, Wave Action Methods for IC Engines, 2000, p82-83; p243-249
- 10) Kulite 社: XTEH-7L-1900(M) Series カタログ