

吸気口音シミュレーションの構築

Development of Intake Noise Simulation

高 林 徹* 石 川 直 宏*
Toru TAKABAYASHI Naohiro ISHIKAWA
伊 藤 秀 昭* 三 澤 吉 次*
Hideaki ITOH Kichiji MISAWA

要 旨

エンジンの出力性能向上と吸排気音の低減に対する手法はお互いに相反し、この両者の妥協点を見いだすことに多大な開発期間を必要としている。そこで、この両者をエンジンレイアウト段階で同時に予測できるようなツールを開発した。本論文においては、このシミュレーションの考え方、精度検証および開発への適用について述べる。

ABSTRACT

The improvement of output power and the reduction of the intake and exhaust noise of the engine are the item to be each other disagreed and need a great development period to finding the point of compromise of these. Therefore, we developed the tool as these can be estimated at the same time in the engine laying-out process. In this paper, the point of view, the precision verification of this simulation and application to the development are described.

1. まえがき

近年自動車用エンジンに対しては、より高い出力と低い吸排気音が求められている。吸排気系のレイアウトはエンジンルーム内の様々な機器のレイアウトによって大きく左右され、また出力性能の向上と吸排気音の低減に対する手法はお互いに相反する関係が多く、これらの妥協点を見いだすことは多大な開発期間を必要とする。この両者がエンジンの吸排気系レイアウト段階にて同時に予測が可能となれば、エンジンルームのパッケージングも早期に設定でき、開発期間も大幅に短縮することができるため、このような同時予測ツールが求められている。

従来から、エンジン開発においては、出力予測を可能とする吸排気シミュレーション (η_v シミュレーション) と吸排気系の音響減衰量予測を可能とする音響減衰量シ

ミュレーション (四端子法) が使われていた。一方、吸排気口音シミュレーションとしては、吸排気シミュレーションから出力される粒子速度を用いた手法^{1), 2)} が用いられていたが、各吸気系デバイスの影響が十分に表現しきれず満足な結果が得られていなかった。そこで、吸排気シミュレーションと音響減衰量シミュレーションを組み合わせることで、吸気口音を精度良く計算可能とし、エンジンレイアウト段階で出力性能と吸気口音を同時に確認できるようにした。

本稿では、この吸気口音シミュレーションを構築するにあたり、用いた手法およびその手法に基づいたシミュレーションの精度検証とエンジン開発への適用について述べる。

* 栃木研究所

2. シミュレーションの概要

2. 1. 吸気口音シミュレーションの考え方

一次元の η_v シミュレーションは、エンジンの吸排気系を管、容器、エンジンシリンダの要素でモデル化し、空気の流れを Euler 方程式を解くことによって、管、容器、シリンダ内圧力、流速等を計算するものである。また四端子法は、エンジンの吸排気系を管、サイドブランチ、レゾネータ、チャンバの各パーツ毎にモデル化し、波動方程式を解くことによって、吸気系の周波数毎の音響的な減衰量を計算するものである。前者は、流れの非線形現象を計算することに向いているが、吸気開口部での高周波数までの計算に対しては十分な精度が得られない。また後者は、音響的に高周波数まで計算できるが、流れの要素は計算することができない。そこで、この二つの計算方法のそれぞれの長所を活かし、使い方を踏まえた上で、二つの計算方法を組み合わせることにより、高周波数まで吸気口の音を予測できるようにした。すなわち、

吸気原音点よりシリンダに近い側は流れの非線形領域と考え η_v シミュレーションで計算し、原音点から吸気口側は音響的線形領域と考え四端子法で計算する。この様子を Fig.1 に示す。実際には、原音点における η_v シミュレーションからの計算結果（圧力、粒子速度）を四端子法に投入し、吸気口音を算出する。

2. 2. 吸気口音シミュレーションの処理フロー

吸気口音の出力までの計算処理手順を Fig.2 に示す。各計算要素について、 η_v シミュレーションおよび四端子法に合わせてそれぞれモデル作成を行う。 η_v シミュレーションに対しては吸排気系、四端子法に対しては吸気系モデルをそれぞれのユーザーインターフェースの誘導に従って行う。例えばチャンバに対しては、 η_v シミュレーションは容量のみの入力であるのに対し、四端子法は径と長さの入力となり、またその他の要素モデルの入力データは、四端子法の方が詳細である。この二つのシミュレーションは、それぞれ独立に η_v の値および音響減衰量を算出する。 η_v シミュレーションに対しては、 η_v の値の他に、スロットルボディ部の圧力、粒子速度を出力させ、その出力結果を四端子法に投入し、最終的に吸気口部の音圧レベル、すなわち吸気口音が算出される。

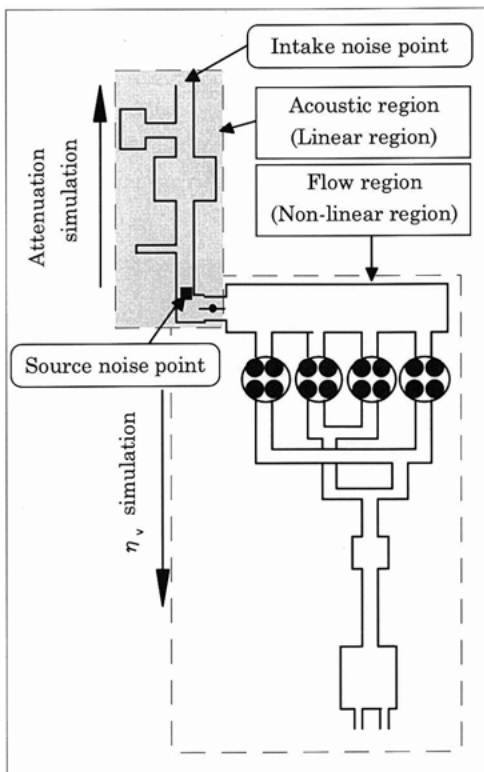


Fig.1 Role of η_v simulation and attenuation simulation

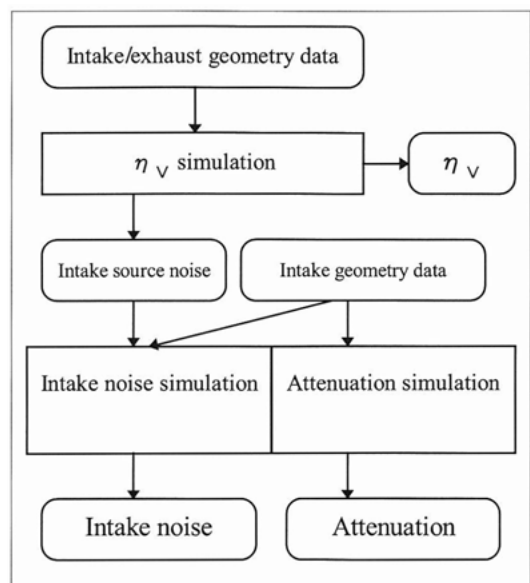


Fig.2 Process of intake noise simulation

前述のように、現在 η_v シミュレーションと四端子法の入力データは、同じ部品であっても入力項目が異なる場合が多く、モデル作成者は二つの入力モデルを作る必要があり、非常に煩雑である。したがって、モデルを共通にし、さらに簡単に吸気口音が計算できるようにする必要がある。

2. 3. η_v シミュレーションの概要

η_v シミュレーションでは、エンジンの吸排気系を管、容器、シリンダの要素でモデル化し計算する。特に、脈動波形の精度に影響を及ぼす管内の計算は、Euler方程式をTVD Lax-Wendroff法³⁾で解くことで精度向上を図っている。しかし、このシミュレーションでは、実際には三次元形状を一次元のモデルに置き換えているため、形状の変化に対応できる汎用性のあるモデルを作成する必要がある。そこでこの計算精度向上のために、 η_v の値を左右する吸気系の長さおよび径のモデル上の値の決め方の標準化を行なった。例えば、直列4気筒エンジンにおいては、Fig.3のようにモデル化を行なうが、それぞれに対応する長さおよび径がこの標準化マニュアルによって決定される。また、この標準化を行なうことにより、各エンジン回転数に対する η_v の影響因子を知ることができ、標準化マニュアルはエンジン設計段階での事前検討にも役立てることが可能である。

最近の開発エンジンにおいて適用された計算結果例をFig.4に示す。モデルの標準化で長さを正確に適合できるようになり、計算誤差は最大でも5%以内に収まっており、 η_v の山谷やピーク位置等の特性は一致できた。

今後、音の規制や出力向上の要求が高まることにより、吸気系形状の複雑化がさらに予想されるので、この標準化作業は順次行なっていく必要がある。

2. 4. 四端子法の概要

四端子法は、エンジンの吸排気系の音響減衰量特性を把握するのに使われている。計算方法は線型な波動方程式を微小擾乱を仮定することにより、2行2列の伝達行列におきかえるものである。この計算では、管、容器、サイドブランチ、レゾネータ等吸排気系部品として採用される10種類以上のモデルに対して定式化を行い、それぞれの伝達行列を用意している。更に複雑なモデルに対しては、これらの基本モデルを組み合わせることによって

モデル化が可能である。また、等価管長を標準化することで精度向上がなされ、誰にでも良い精度で音響減衰量が計算できる⁴⁾。

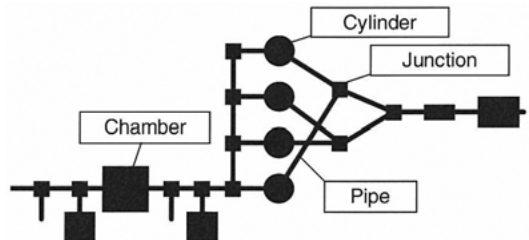


Fig.3 Standard model of η_v simulation for 4 cylinder engine

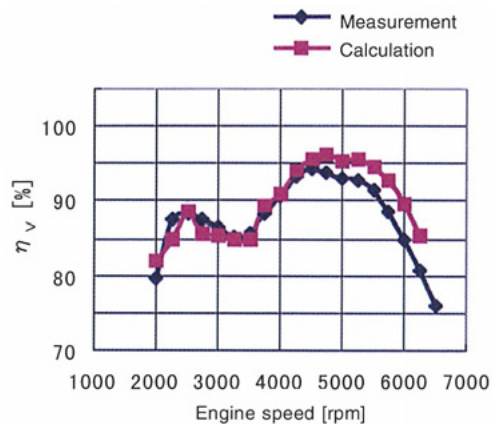


Fig.4 Comparison between measured and calculated η_v

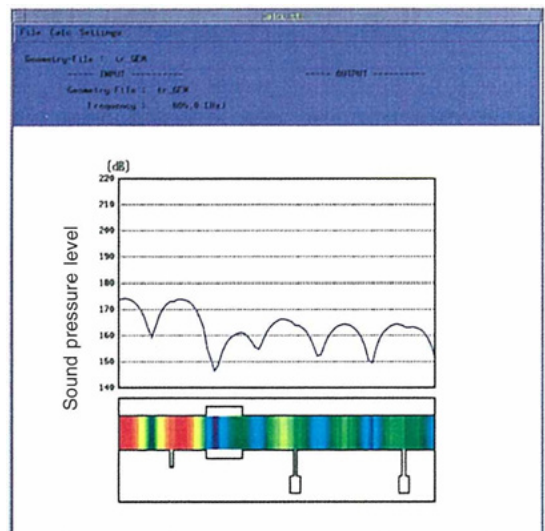


Fig.5 Example display for sound pressure computation result of intake system

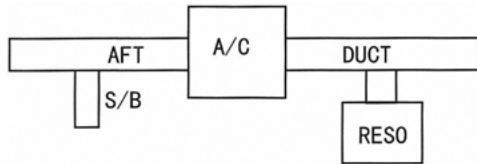


Fig.6 Simulation model of 4-pole parameters method

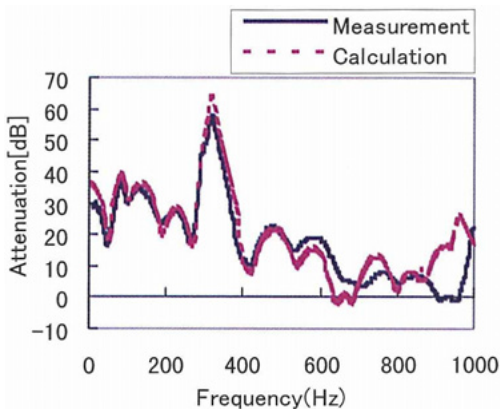


Fig.7 Comparison between measurement and calculation of acoustic attenuation for speaker test

このシミュレーションからは、音響減衰量の他に、管内の音圧モードも求めることができるので、デバイスの取り付け位置を最適化するために使うこともできる。量産エンジンの吸気系の300Hz時の音圧モードの出力例をFig.5に示す。

3. 計算精度検証

シミュレーションの精度検証は、直列4気筒1600ccエンジンをを用い、吸気系はデバイス交換が簡単にできるよう変更し、様々な吸気系のレイアウトについて検討した。

3. 1. 四端子法の検証

まず、吸気口音計算の基本因子となる四端子音響減衰量シミュレーションの精度検証を行った。エンジンの吸気系の計算モデルはFig.6に示すように文献4)の標準化マニュアルに従って作成したモデルであり、Fig.7に計算結果を示す。

この計算結果とスピーカ加振テストの結果を比較すると、1Hzから1kHz間での範囲で、良い精度で計算できていることが分かる。サイドブランチ等のデバイス付加に

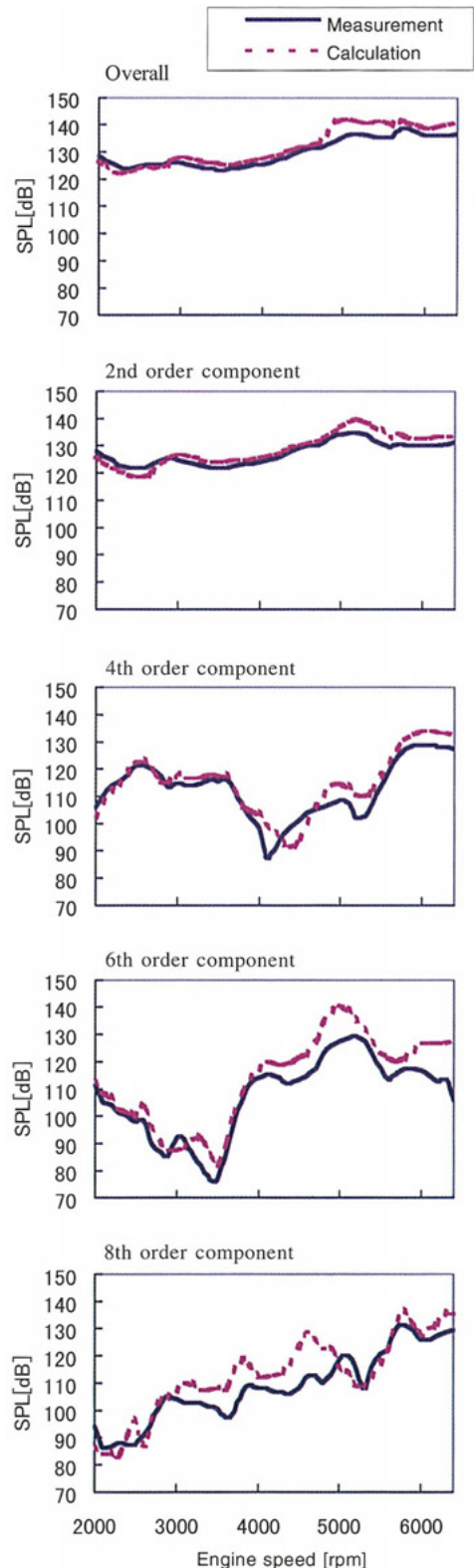


Fig.8 Intake noise simulation results which inputted measurement results as source noise

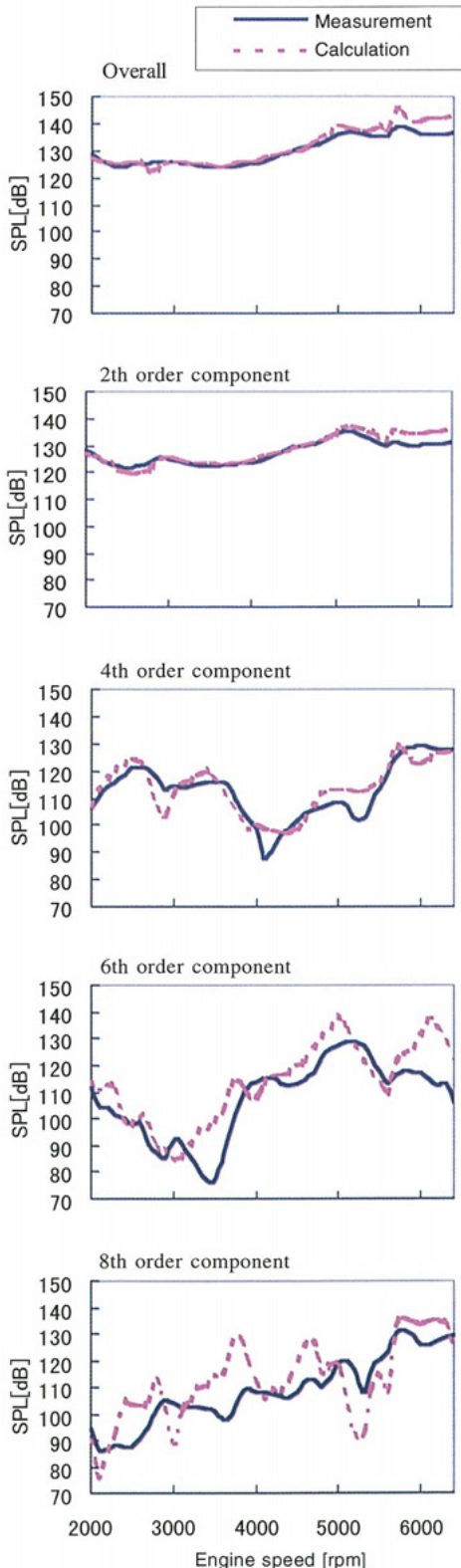


Fig.9 Intake noise simulation results which inputted calculation results as source noise

伴い減衰量特性の共振点が増えるが、音響減衰量の計算もそれに追従していることが分かる。

3. 2. 実測原音を用いた吸気口音シミュレーションの精度検証

この吸気口音シミュレーションの手法を検証するために、実測の原音を四端子法に入力して、吸気口の音圧レベルを計算した。ここでは吸気原音をスロットルボディ部の音圧、粒子速度とした。粒子速度は2マイクロフォン法で計測したものである⁵⁾。Fig.8は、吸気口音の計算値と実測値をエンジン回転数に対して比較したものである。グラフの数値軸のSPLはSound Pressure Levelを意味する。検証用エンジンは4気筒で、オーバオール、2次、4次、6次および8次成分で比較を行ったが、高い次数まで精度良く計算できている。

3. 3. 計算原音を用いた吸気口音シミュレーションの精度検証

η_v シミュレーションの計算結果を原音とし、3. 1. で作成した四端子法のモデルを使い、吸気口音の計算を行った。各エンジン回転数に対する吸気口音の計算は基本的に四端子法の計算と同様のため、計算時間はすべてのエンジン回転数に対して計算を行っても、EWSにて30秒程度である。Fig.9に計算結果と実測との比較を示す。オーバオール、2次成分、4次成分共によく特性をとらえているが、6次以上の高次成分においては十分な精度が得られていない。これは、この周波数領域において原音が十分な精度で計算できていないためであり、今後吸気口音計算時における原音の計算精度の向上が必要である。

4. ユーザインターフェイスの構築

吸気口音シミュレーションを、エンジン吸排気系開発担当者が簡単に利用できるように、マウス操作主体のインタフェースを作成した。グラフィカルユーザインタフェースとしてはX-Windowを用いた。計算手順としては、先ず、Fig.10に示すプリプロセッサにて η_v シミュレーションモデルを作成し、吸気原音の計算を行う。次に、Fig.11に示すように吸気系の四端子モデルを作成し、原音ファイルを読み込むことにより、吸気口音の計算が開始される。Fig.12に計算結果の出力例を示す。計算時

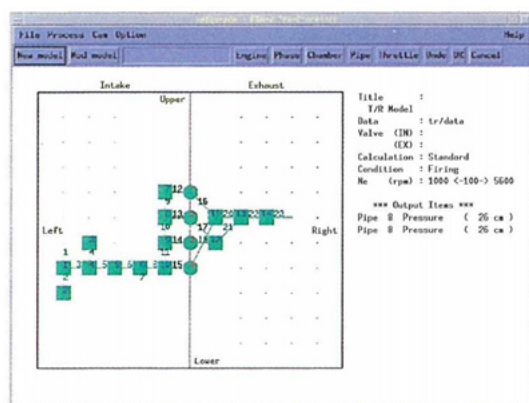


Fig.10 Screen of pre-processor of η_v simulation

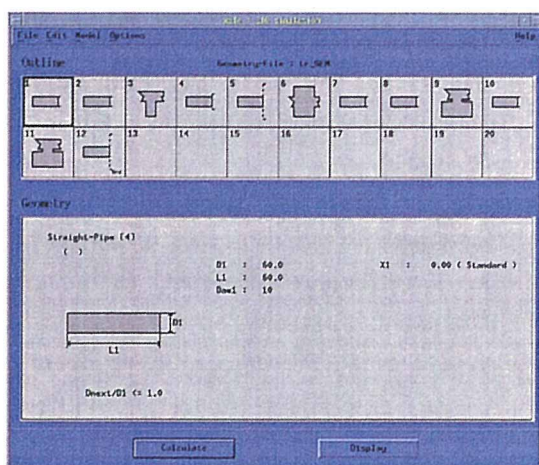


Fig.11 Screen of pre-processor of 4-pole parameters Method

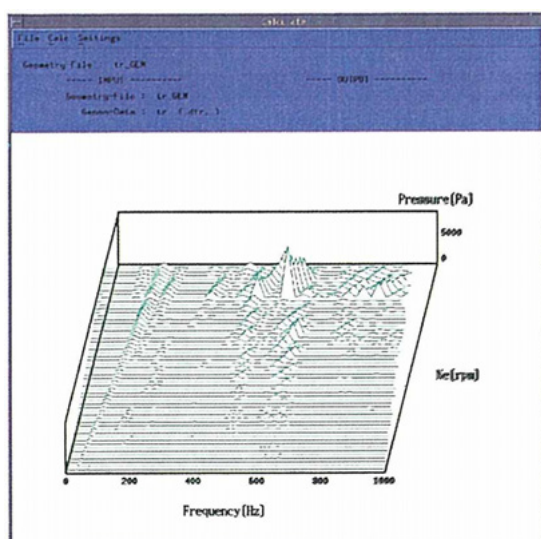
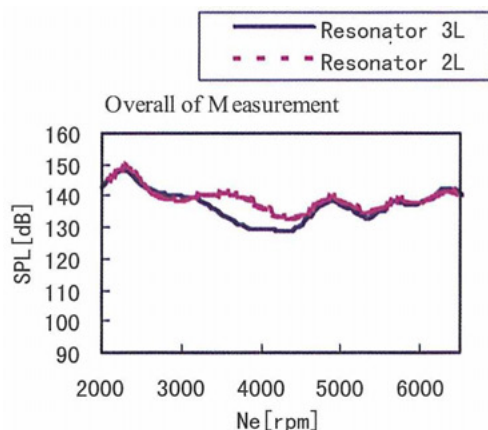
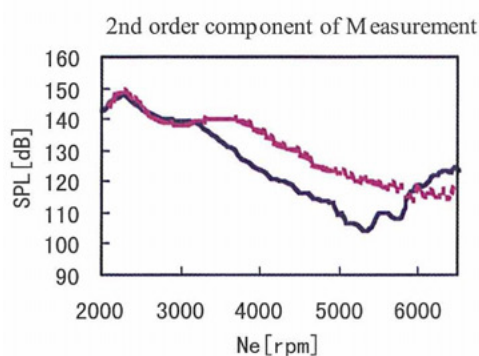


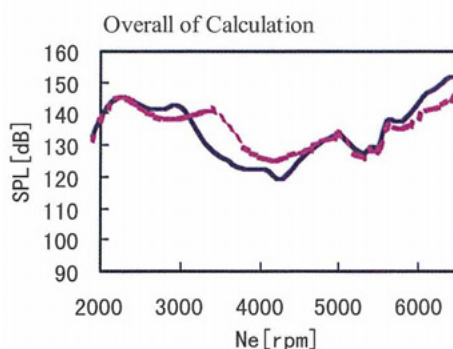
Fig.12 Screen of post-processor of intake noise simulation



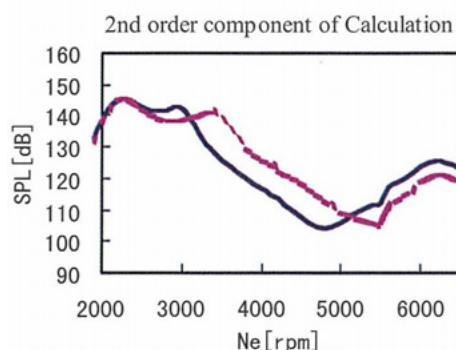
Overall of Measurement



2nd order component of Measurement



Overall of Calculation



2nd order component of Calculation

間は、今の標準EWSにて、原音計算が20～30分程度、それからの吸気口音計算が1分程度である。現在、 η_v シミュレーションモデルと四端子モデルは別々に作成する必要があるが、今後はこれらを共通化し、さらに使い勝手の向上をと図っていく予定である。

このグラフィックインタフェースの特徴としては、以下のことがあげられる。

- (1) データの入力から結果の出力までの操作は、UNIXのコマンドを使うことなく、マウス操作主体のオペレーションである。
- (2) 吸排気の音響・流れ系の様々なソフトを同一環境上にのせ、同一の操作性にて各種のシミュレーションが利用できる。

5. エンジン開発への適用

吸気口音シミュレーションを開発エンジンに適用した。エンジンの吸気系開発においては、サイドブランチを付加した場合やレゾネータチャンバの容量を増加した場合（2リットルから3リットル）の吸気口音への影響が確認されており、ここでは、この差が計算で求められるかを検証した。

Fig.13に、レゾネータチャンバの容量増加の吸気口音への影響を示す。上の2つに、実測値同士の比較、下の2つが計算値同士の比較を示す。吸気口音の開発においては特に二次成分を重視しているので、ここでは二次成分までの比較を行った。容量増加の効果がエンジン回転数の中域において現れており、これは計算でも確認することができる。

エンジン吸気系開発においては、このように、デバイスの付加やデバイスの検討を行うためにこのシミュレーションを利用し、効果を立証することができた。

6. まとめ

- (1) 原音点をスロットルボディ部とすることにより、四端子法での吸気口音の予測が可能である。
- (2) η_v シミュレーションと四端子法を組み合わせることによって、実用上十分な精度で吸気口音が計算できる。
- (3) EWS上でユーザインタフェースを構築することによって、エンジン開発担当者が簡単にシミュレーションを使えるようになった。

- (4) 上記の結果、本シミュレーションをエンジンの開発過程に適用することができた。

参考文献

- 1) 西脇 嶋本、「内燃機関の排気騒音レベル予測（第1報）」、日本機械学会論文集、第2部、44巻、377号、pp.250-259, 1978
- 2) 西脇 嶋本、「内燃機関の排気騒音レベル予測（第2報）」、日本機械学会論文集、第2部、45巻、398号、pp.1587-1598, 1979
- 3) R. J. Pearson and D. E. Winterbone, 「Calculating the effects of variations in composition on wave propagation in gases」, Int. J. Mech. Sci. Vol. 35 No.6, pp. 517-537, 1993
- 4) 岩井 他、「吸気系音響減衰量計算のモデル化手法とその適用」、HONDA R&D Technical Review, Vol. 8, pp. 115-123, 1996
- 5) 日本機械学会編、機械騒音ハンドブック、産業図書、1991

■著 者■



高林 徹



石川 直宏



伊藤 秀昭



三澤 吉次