

ライト CAE による排気吐出音最適化技術の開発

Development of Exhaust Orifice Noise Optimization Technology Using Light-CAE

桜井 雅人*

Masato SAKURAI

吉本 秀之*

Hideyuki YOSHIMOTO

要 旨

排気吐出音と排気流量の最適化予測技術を、設計者に使いやすい開発支援ツールとして開発した。

排気吐出音の精度を流体音響理論と実験値による気流音の補正をおこなうことで向上させた。また最適化技術と組み合わせることで、設計パラメータと吐出音や排気流量の目標値との関係を近似関数化でき、設計者自らがリアルタイムに解析でき、初期の設計段階で容易に扱えるライト CAE システムとして商品開発に役立つ開発支援ツールを提供した。

ABSTRACT

A prediction optimization technology for exhaust orifice noise and exhaust gas flow rate has been developed as an easy-to-use development support tool for designers.

The accuracy of predicted exhaust orifice noise was increased by using the Lighthill analogy and by correcting for airflow noise using empirical values. Combining this optimization technology with a Light-CAE system enables the relationship between the design parameters and the target values of orifice noise and exhaust gas flow rate to be represented by an approximation function. It also allows designers to carry out analyses in real time. As Light-CAE systems can be easily used in the initial design phase, this technology is positioned as a product development support tool.

1. まえがき

最近の Computer Aided Engineering(CAE)は、商品開発のさまざまなフェーズに広く活用されつつある。排気系の振動騒音解析の事例でいえば、試作品をテストする前に詳細な CAE 解析をおこなうことで、振動・強度・消音器減衰量・排気流量などの性能を定量的に予測できるまでに至った。一方、これらの性能を初期の設計段階において簡便で比較的精度良く短時間に予測できる CAE 解析の開発支援ツールを要望する声が設計者の間で強まってきており、最近のコンピュータ資源のハードとソフトウェアの飛躍的な向上によりそれらが実現可能になってきた。

そこで筆者らは、CAEの専門的な知識を持たなくても設計者が容易に解析することができ、排気吐出音と排気流量の目標値と設計パラメータ(変数)間の関係を最適化技術を使って近似関数化して、リアルタイムに解析をおこなうことができるライト CAE システムを開発したので報告する。

2. ライト CAE の必要性

ライト CAE⁽¹⁾とは、Light(手軽)な CAE という意味であり、対語としてはパワー CAE が挙げられる。実験解析の代替として広く普及しているパワー CAE の目指すところは、ボデー骨格解析からブラケット部品などの詳細構造解析に至るまで実験解析結果の多岐にわたる物理現象を高精度で定量的に模擬することである。しかしながらパワー CAE による解析は多くのコンピュータ資源を必要とし、詳細な三次元形状図面のメッシュ作成作業に多大の作業時間を要するのが一般的である。

ライト CAE とパワー CAE の明確な境界の定義は無く、あくまでも相対的な関係であらわされる。一日あたりの実稼働時間内で予測計算可能な CPU 要求性能(1秒あたりの浮動小数点の計算回数;FLOPS)を横軸に、必要十分な精度を得ることができる計算モデルの自由度(計算格子点がもつ座標軸の数;DOF)を縦軸にしたグラフを Fig. 1 に示す。

*四輪開発センター

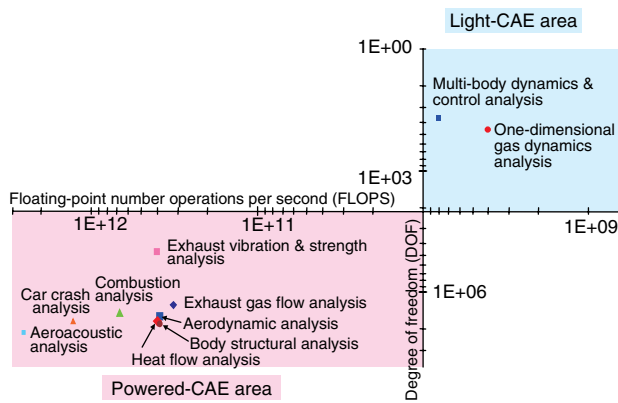


Fig. 1 Map of Light-CAE & powered-CAE analysis tools

このグラフから、ライト CAE 領域で使われている性能予測ツール群がパワーCAEの領域に比べて明らかに少ないことがわかる。

開発の初期段階においては、形状寸法や材質などの部品仕様が図面に具体化されていない初期設計(上流設計ともいう)工程がほとんどを占め、その下流の工程に部品仕様が具体化された詳細設計工程が続く。初期の設計工程において、部品仕様を決めるにあたり、設計者がCAE解析に要する時間は初期設計工数の30%以上を占める場合があり、その理由としては、次工程で部品仕様の設計変更を何度も繰り返さないようにするために、十分な仕様検討を初期設計段階におこなわなければならないからである。

これらのことから、図面形状が決められていない初期の設計段階において、計算モデル作成から計算実行までの時間が短時間であること、十分な部品仕様の検討をおこなうため設計パラメータと目標値との関係をリアルタイムに表示する、設計者にわかりやすい開発支援ツールであることを念頭にいたライト CAE システムが必要であると考えた。

3. ライト CAE システム

ライト CAE を活用したシステムの概要を Fig. 2 に示す。

システム構成として排気脈動計算部分、最適化部分、リアルタイム解析部分と大きく三つに分けられる。最適化部分はシステムの中核の部分であり、排気吐出音や排気流量の目標値と設計パラメータの関係を最適関数として求めるため、最適解の自動探索をおこなう機能をもつ。すなわちライトCAEである一次元排気脈動計算部分を繰り返し自動実行し、最適関数をあらかじめ決められた最適化アルゴリズムにより自動的に求める。得られた最適関数はリアルタイムインターフェース部分の Microsoft 社 Excel の Macro 命令機能を利用した Visual Basic for Application (VBA) プログラムにより、設計者が指定した複数の設計パラメータに対

応した吐出音と排気流量の値をリアルタイムにグラフ表示する。

3.1. 一次元排気脈動計算技術

吐出音と排気流量を同時に計算可能な解析ツールとしてガスダイナミクス理論⁽²⁾に基づく排気脈動計算が知られている。すなわち排気管上流側の脈動ガスの圧力・速度・温度の時間変動をタイムステップ毎に逐次計算していく手法である。これらの物理量を入力条件とし、ナビエ・ストークスの流体運動方程式、質量保存則、エネルギー保存則などの支配方程式により時刻歴計算をおこない、排気管下流側の管内圧力、管内流速、ガス温度の時刻歴として計算出力する。

本テーマではライト CAE ツールとして Ricardo 社の一次元ガスダイナミクスCAE“WAVE”を使用した。WAVEは排気管上流側の排気原音モデルとして、エンジンの仕様諸元(ボア・ストローク、圧縮比、バルブタイミングリフト量など)から排気脈動を生成する機能を有しており、排気原音と組み合わせた下流の排気系の吐出音や排気流量の計算が可能となっている。しかし吐出音は脈動音と気流音が合わさったものであり、その音源は吐出口端の圧縮波と吐出噴流の渦輪の圧力変動である⁽³⁾。ところが一次元ガスダイナミクスCAEでは気流音に関しては予測計算することはできない。したがって後述の流体音響則を用いた補正計算をおこなうことにより、一次元ガスダイナミクスCAEによる吐出音予測精度の向上を試みた⁽⁴⁾。

3.1.1. 脈動音の算出

脈動音の算出には吐出口端部の管内圧からの音響パワーが距離の二乗に比例して減衰する関係にあることから、マイク位置までの観測点音圧を式(1)を用いて算出する⁽⁵⁾。

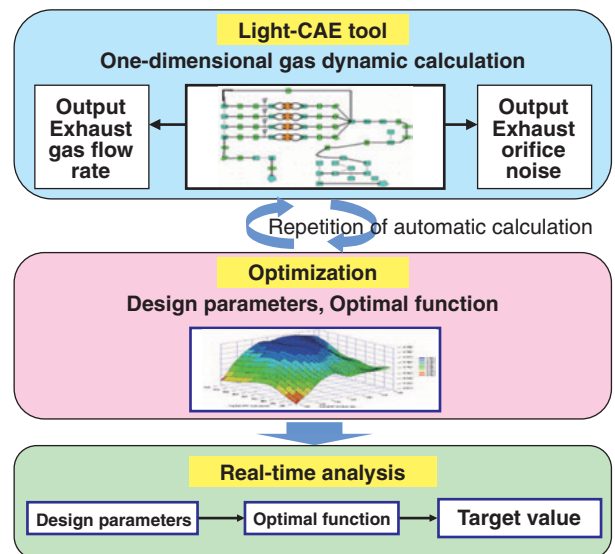


Fig. 2 Flow diagram of Light-CAE system

$$P(t) = \frac{\rho}{4\pi R} \frac{dS(t-R/c)}{dt} \quad (1)$$

P : 脈動音音圧 (Pa)

S : 体積流量 (m^3/s)

R : 音源とマイク位置までの距離 (m)

c : 音速 (m/s)

t : 時間 (s)

ρ : 空気密度 (kg/m^3)

(1)式を用いて観測点マイク位置までの吐出音を計算し実測値と比較した結果を Fig. 3 に示す。3000rpm 以上のエンジン高回転時において計算の吐出音圧レベルが実測値に対して不足していることがわかる。

これは計算による吐出音圧が脈動音成分のみであり、気流音成分が不足しているためと考えられる。

3.1.2. 気流音の算出

排気吐出音の場合、気流音の音響インテンシティ Ei は流体音響則⁽⁶⁾によって以下の式で表すことができる。

$$Ei = \frac{\rho}{r^2 c^3} L^2 U^6 \quad (2)$$

Ei : 気流音の音響インテンシティ (W/m^2)

ρ : 密度 (kg/m^3)

r : 音源からの距離 (m)

c : 音速 (m/s)

L : 音源の代表寸法 (m)

U : 流速 (m/s)

ここで音源の代表寸法 L とは気流音源の長さ、すなわち主な渦輪が発生から減衰するまでの移動距離をいう。

つぎに音響インテンシティ Ei と気流音音圧 Ep との関係は次式(3)の関係で表される。

$$Ep = \sqrt{Ei \times \rho \times c} \quad (3)$$

Ep : 気流音音圧 (Pa)

高速脈動発生装置⁽⁷⁾をつかって、流速 u と観測点気流音

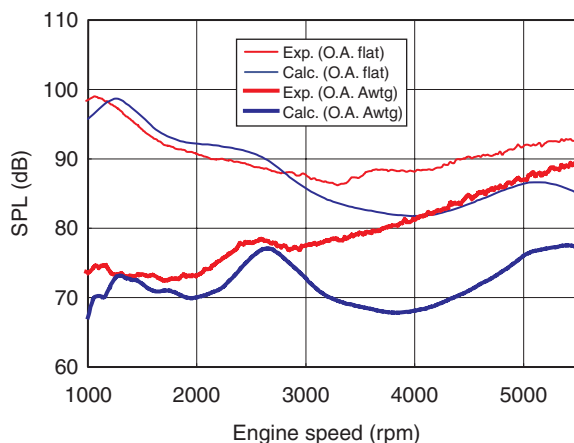


Fig. 3 Comparison of orifice noise level in combustion

音圧 Ep を満足する音源の代表寸法 L を流体音響則(2)式および(3)式を使って求めた (Fig. 4)。

Fig. 4 において流速 U が大きくなればなるほど音源長 L が小さくなるが、このことは気流音の音源である複数の渦輪の間隔が密になり高周波成分が増加することを意味している。また音源長 L は脈動周期による影響は小さく、流速のみにほぼ依存していることがわかる。

すなわち、流速 U と音源長 L がわかれば気流音の音圧を予測することができる。

3.1.3. 吐出音の算出

つぎに内燃機関(4気筒、排気量 1.3L)において、音源長 L と流速 U と流体音響則(2)式、(3)式を用いて、脈動音に気流音 Ep を加えた吐出音圧レベルとエンジン回転数を横軸にとった急加速時の近接排気吐出音(マイク位置 50cm45 度後方)の実測値と計算結果を Fig. 5 に示す。

Fig. 5 からわかるように、脈動音と気流音の両方を計算することにより、吐出音の精度向上を得ることができた。

3.1.4. 排気流量試験の算出

排気系の流量を定量的に調べる方法として、プロアーファンを用いた定常流れ試験機を排気系の上流側に設置し

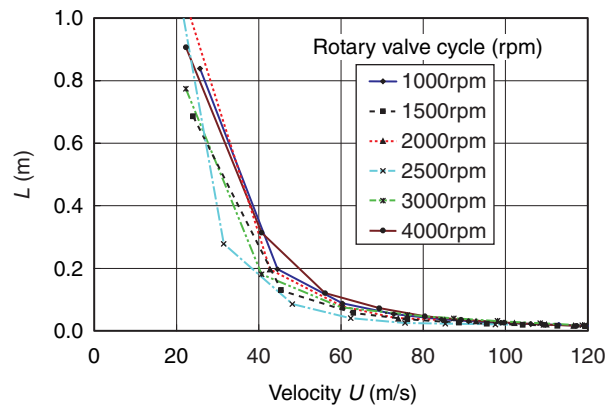


Fig. 4 Relationship between L (noise source length) and flow velocity

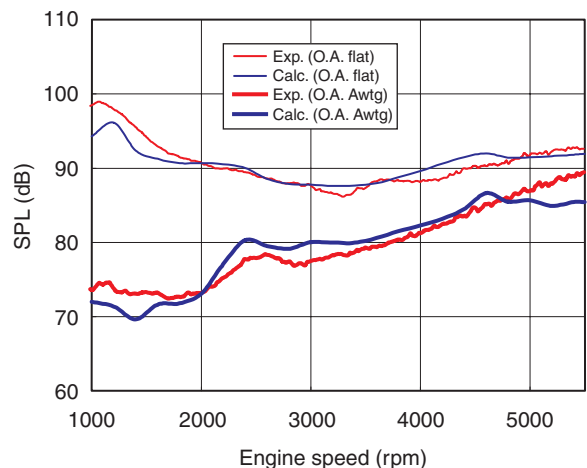


Fig. 5 Comparison of orifice noise level in combustion engine

下流の大気解放側との圧力差が、ある一定の水頭圧(600mmAq)になったときの流量 Q を調べる手法がある。排気脈動計算で用いた排気系計算モデル(排気原音モデルは含まず)とライト CAE ツールを用いて、これらの流量試験を計算した。流量試験実測値と計算結果との比較を Fig. 6 に示す。

3.2. 最適化技術

本技術でいう最適化とは、設計者が設計図面を作製する際に必要な形状寸法(パイプ径、長さ、消音器径、消音器長さなど)である設計パラメータと吐出音、排気流量の目標値との関係を関数化することである。この最適関数を求めるため、応答曲面法を使った。

3.2.1. 応答曲面法

応答曲面法は Response Surface Model(RSM)⁽⁸⁾とよばれ、回帰分析をベースとした工学的な統計的近似モデルである。

設計変数に対する目標値の誤差を最小とするように n 次の最適化関数を最小 2 乗法により推定する。

この応答曲面手法を使うため、ライト CAE を制御し最適関数を自動探索して求める市販ツール Engineous 社

iSIGHT を使用した。

Fig. 7 に応答曲面法による設計パラメータであるパイプ長と吐出音、Fig. 8 に設計パラメータであるパイプ径と排気流量の応答曲面法による近似関数を示す。図中、四角い点はライト CAE 単体で計算した値である。

3.2.2. 近似精度向上手法

Fig. 7, Fig. 8 からわかるように、ライト CAE 単体で計算した値に対して、回帰曲線の近似誤差が生ずる。特に吐出音は多くの設計パラメータに対し非線形性が強く、回帰曲線とライト CAE との間で近似誤差が大きく生じる場合が多い。

このような場合は、

- (1) 回帰曲線の多項式の次数を上げる
- (2) 学習データの探索回数を増やす
- (3) 設計パラメータの範囲を狭める

等の対応手法がある。これらの近似精度向上のための対応手法を以下に述べる。

排気系の二種類のパイプ長を設計変数として縦軸と横軸にとり、その設計変数空間上に対応したライト CAE による学習データの探索点をグラフ化した(Fig. 9)。

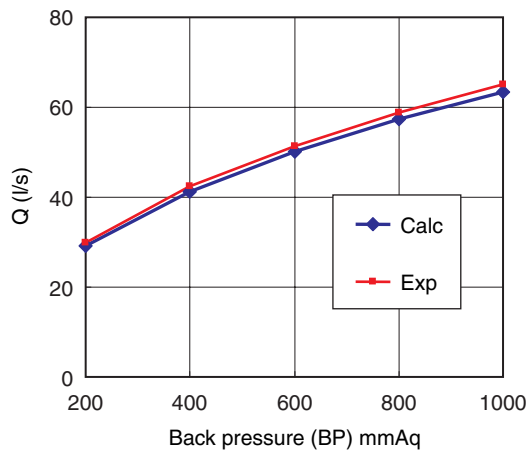


Fig. 6 Calculated and experimental accuracy of flow tester

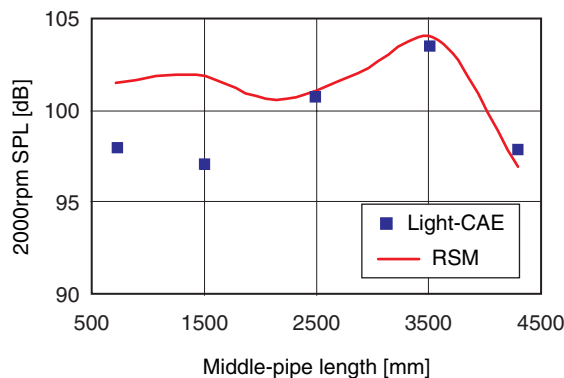


Fig. 7 Relationship between RSM approximation error and Light-CAE (Orifice noise)

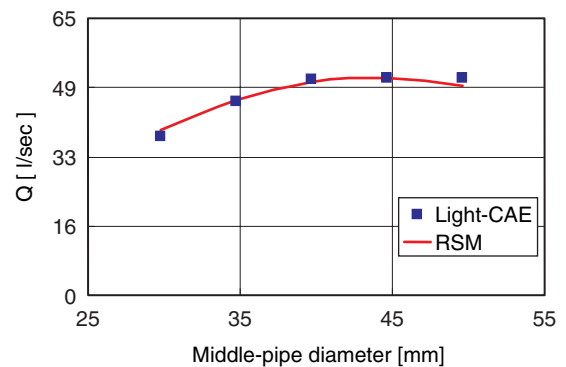


Fig. 8 Relationship between RSM approximation error and Light-CAE (Exhaust gas flow rate)

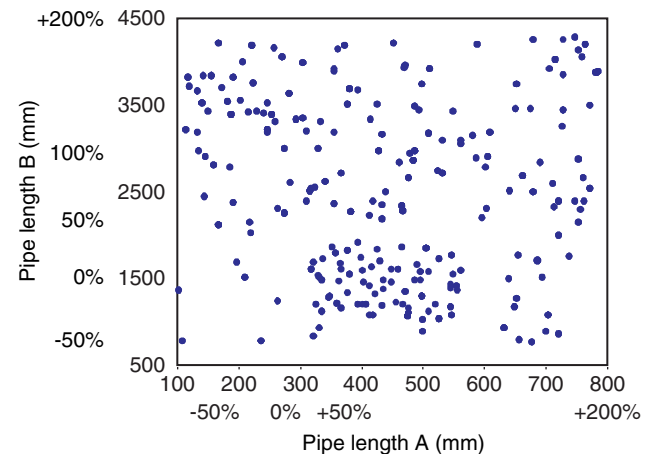


Fig. 9 Search map of optimal study data (Before enhancement)

グラフからわかるように、設計変数空間のすべての範囲の学習データの探索をライト CAE を使っておこなうことは、最適化のための計算回数が増大することを意味しており実用的ではない。これらの問題点を解決する手法として Fig. 10 のようなアルゴリズムを考えた。

すなわち、要求される設計変数空間のすべてを探索するのではなく、設計者にとって重要な設計変数において、指定した中央値から $\pm 50\%$ の設計変数のふり幅範囲で設計変数空間上の学習データの探索回数の密度を向上させる手法である (Fig. 11)。

近似精度を向上した応答曲面法による設計パラメータであるパイプ長と吐出音の近似関数とライト CAE 単体で計算した値を Fig. 12 に示す。

グラフから、応答曲面法の近似関数とライト CAE の誤差が Fig. 7 に対し減少したことがわかる。

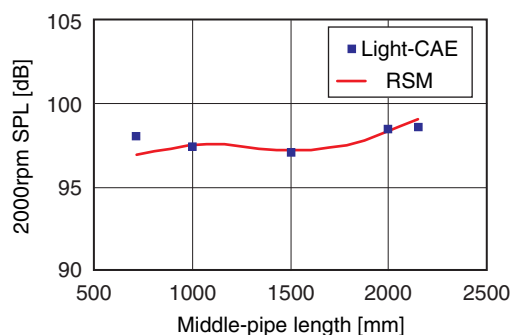


Fig. 12 Relationship between RSM approximation error and Light-CAE (Orifice noise)

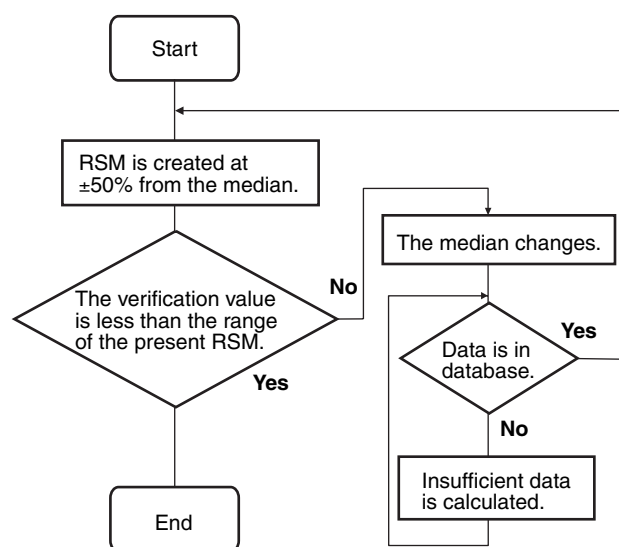


Fig. 10 Enhancement algorithm in RSM approximation accuracy

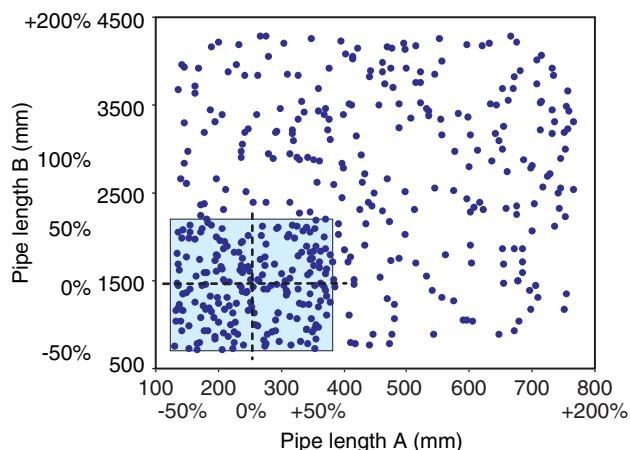


Fig. 11 Search map of optimal study data (After enhancement)

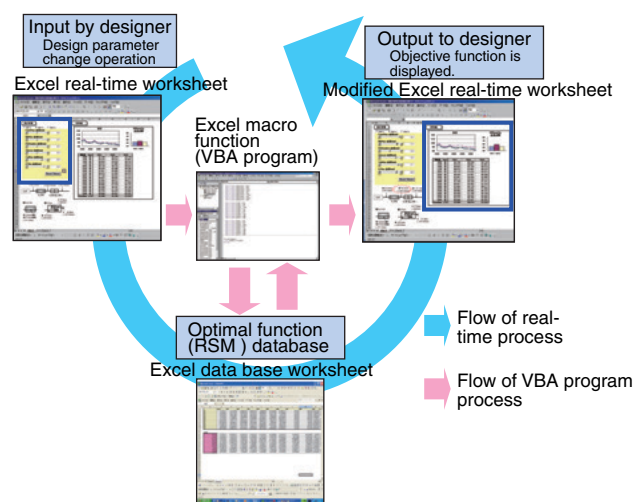


Fig. 13 Block diagram of real-time process

3.2.3. リアルタイム解析手法

応答曲面法により得られた設計パラメータと吐出音や排気流量の目標値を関数化した最適化関数は非常に多くの係数項データが組み合わせられた多次多項式である。

これらの最適化関数を用い、設計者に設計パラメータと目標値を瞬時にしかも連続的に表示することを考えた。Fig. 13 にリアルタイム解析のブロックダイアグラムを示す。

このブロックダイアグラムにより、設計者が指定した設計パラメータが、意図した目標値に達成可能かどうか設計者自らがリアルタイムに解析できるようになった。

4. 開発支援ツールへの応用事例

前章で述べた技術構築を具体的に設計者向けに開発支援ツールとして提供した。留意点として、

- (1) 設計者が CAE 操作のための専門知識を習得することなく簡便に使えること。
- (2) 計算モデルはパラメトリックモデルとしてあらかじめ登録してあるモデルを選択して使用して、計算前処理時間を短縮すること。

(3)計算結果処理はすべて Microsoft 社 Excel 上でおこない、設計者にわかりやすく図表を用いて可視化することを。
を考慮して開発した。

4.1. 入力インターフェース

ライト CAE ツールを意識することなく、設計者に使いやすい開発支援ツールを提供するため、ソフトウェア言語として Sun Microsystems 社 Java 言語を用いた専用のインターフェースを開発した(Fig. 14)。メニューシート構成として、排気系の基本レイアウト例を Fig. 15 に示す。排気原音となるエンジン、キャタライザ、消音器などで構成された排気系間の排気ガス通路である排気管径、管長などをパラメトリックな数値入力として任意に設計者が入力でき設計パラメータにも設定可能である。

同様に、消音器のメニューシート例をFig. 16に示す。消音器径、全長、インナーパイプ管径、長さなどをパラメトリックな数値入力として任意に設計者が入力でき設計パラメータにも設定可能である。

計算に必要な設定条件をすべて入力したあとで、設計パラメータの一覧をプルダウンメニューとして表示し、振幅、中央値、上下限値を設定して計算実行をおこなう(Fig. 17)。なお、計算結果ファイルの転送先はe-MAILアドレスを指定できる。

4.2. リアルタイム解析インターフェース

計算結果ファイルは、Excel の Macro 命令機能を利用した VBA プログラムにより、設計パラメータ(Fig. 18 図中左側スライドバー)と吐出音(Fig. 18図中上側折れ線グラフ)および排気流量(Fig. 18 図中右側棒グラフ)が表示される。

すなわち、設計者が設計パラメータのスライドバーを操作することによって、吐出音と排気流量のグラフがリアルタイムに変化し、それぞれの設計パラメータの目標値に対する感度や優位性を設計者自らが容易に解析できる。

ライト CAE と最適化技術を組み合わせることで、設計パラメータと目標値との最適関数が求まり、このようなリアルタイム解析が可能となった。

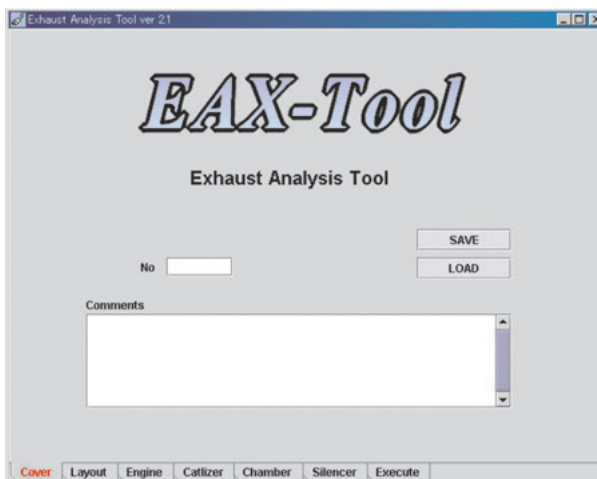


Fig. 14 Opening worksheet

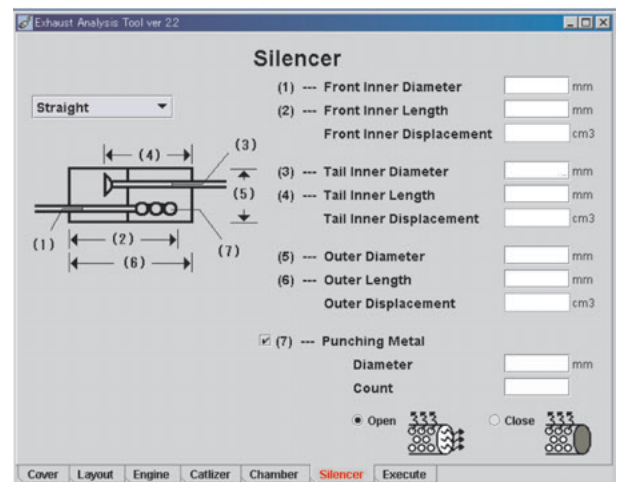


Fig. 16 Silencer system layout menu

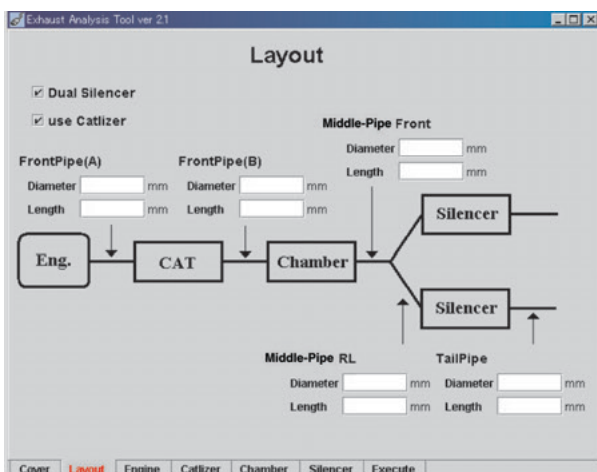


Fig. 15 Exhaust system layout menu

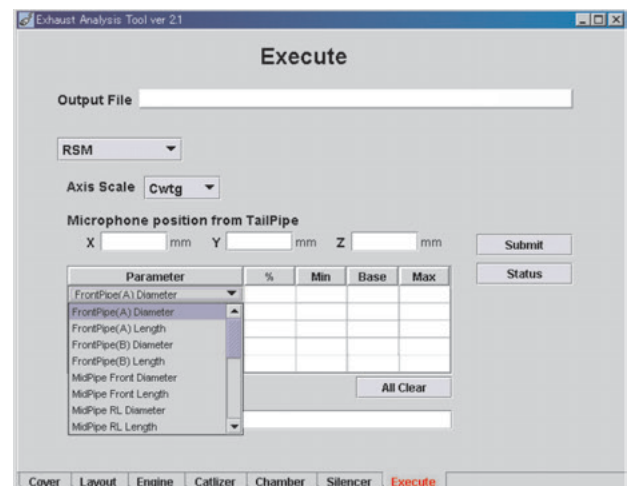


Fig. 17 Execution worksheet

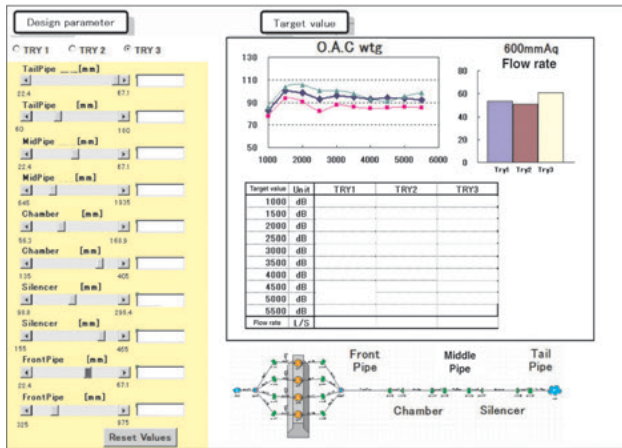


Fig. 18 Real-time analysis worksheet

(8) Box, G.E.P., Wilson, K.B.: On the Experimental Attainment of Optimum Conditions, J. of the Royal Statistical Soc., B-13, p.1-45(1951)

5. まとめ

設計の初期段階において設計者が簡便に使えるライト CAE システムを開発した。

- (1) ライト CAE による排気吐出音の予測精度を、流体音響理論を用い実験値による気流音の補正をおこなうことで、向上させた。
- (2) 最適化技術とライト CAE を組み合わせることで設計パラメータと吐出音や排気流量の目標値との関係を近似関数化でき、設計者自らがリアルタイムに解析できる手法を考案した。
- (3) (1), (2) の技術構築内容を具体化したライト CAE システム(計算時間; パワー CAE 比 1/10 以下)による開発支援ツールを設計者に提供した。

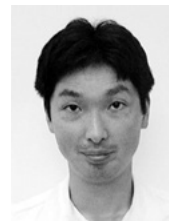
参考文献

- (1) 栗山利彦: 開発期間短縮を目的とする戦略的 CAE の展開—パワー CAE とライト CAE—, 自動車技術, Vol.51, No.4, p.79-85(1997)
- (2) Shapiro, A. H.: The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow, Vol.1, The Ronald Press Company(1954)
- (3) Sakurai, M.: Numerical Simulation of Exhaust Pulsating Flow & Orifice Noise, Review of Automotive Engineering, Vol.27, No.1, p.151-154(2006)
- (4) 桜井雅人, 笠島祐也: 排気脈動流れと排気吐出音のシミュレーション技術(第三報), 自動車技術会学術講演会前刷集, No.175-06, p.10-14(2006)
- (5) Ricardo-WAVE ユーザーマニュアル
- (6) Goldstein, M.E.: 流体音響学, 共立出版, p.311(1991)
- (7) 桜井雅人, 田中健一, 笠島祐也: 排気脈動流れシミュレーションによる排気吐出音発生メカニズムの解明, Honda R&D Technical Review, Vol.17, No.2, p.77-83

■著者■



桜井 雅人



吉本 秀之