

デジタル画像相関法を活用した熱疲労予測技術向上

Improvement of Simulation Method for Thermal Fatigue by Digital Image Correlation

井上 幸治^{*1} 浮田 和彦^{*1} 浅野 哲夫^{*1} 相原 秀紀^{*1}
 Koji Inoue Kazuhiko Ukita Tetsuo Asano Hideki Aihara

*1 エンジン事業部 技術第一部

要旨 今回新たに開発したV型6気筒ディーゼルエンジン(F33A-FTV)では、排気エネルギーを効率的に利用するために、排気系部品をバンク間に収めるホットインサイドレイアウトを採用した。しかし、複雑なストレスが作用するバンク間において、従来のCAE手法では耐熱疲労性の予測精度確保が困難であった。本稿では、デジタル画像相関法(以下DIC: Digital Image Correlation)を活用したCAE実証によって、予測精度向上に取り組んだ内容を報告する。

キーワード: CAE、デジタル画像相関法、ホットインサイドレイアウト、熱疲労

Abstract The brand new V6 diesel engine (F33A-FTV) adopted the hot inside layout that installed the exhaust system between V banks for increase efficiency of the exhaust energy. However, that is difficult to predict heat fatigue bresistance by the conventional CAE method between V banks under the complicated stress. The purpose of this paper is to explain the method of the improved prediction CAE verification using DIC (Digital Image Correlation).

Keywords: CAE, Digital Image Correlation, Hot Inside Layout, Thermal Fatigue

1. はじめに

今後、さらに厳しい燃費規制や排気規制の導入が想定されるなか、V型6気筒ディーゼルエンジン(F33A-FTV)には規制対応に加え、走りと静粛性を両立するためのさまざまな新システムが採用された。

新システムの開発を効率よく進めるための要素技術として、CAE(Computer Aided Engineering)は条件や形状を変更したときのバーチャル評価の役割

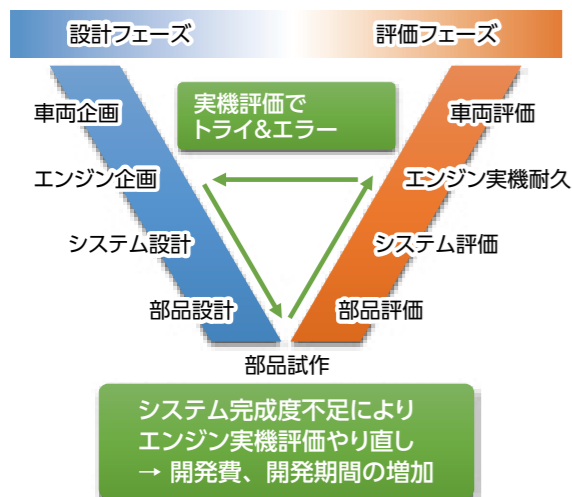


図1 従来の開発プロセス
Fig.1 Conventional Development Process

を担っている。

しかし、排気系部品の耐熱疲労性については従来よりCAEの想定どおりとならず、実機での耐久試験を繰り返すことで信頼性を確保していた(図1)。

CAEにおいて、排気系部品の熱疲労予測を難しくさせる要因は以下の2つと考えられる。

- a) 材料非線形性:高温での弾塑性変形
- b) 境界非線形性:締結部品間の接触、滑り

F33A-FTVに採用されたホットインサイドレイアウトは排気系部品が左右バンクの本体構造を連結する構成であり、従来システムに比べてさらに締結構造が複雑化した。そのため、開発を効率化するうえでCAE手法の改善が必須であった。

本稿では、システム評価フェーズで新たにDIC計測技術を導入し、締結近傍の現象把握をすることでCAEの精度向上に活かした事例を紹介する。

2. ホットインサイドレイアウトの採用

V型エンジンにおいて、吸排気部品のレイアウトは大きく二通りに分かれる。排気系部品がVバンク外側に位置するホットアウトサイドと、排気系部品がVバンク内側に位置するホットインサイドである(図2)。

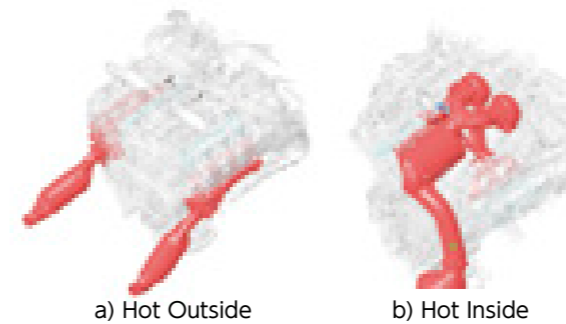


図2 排気系部品のレイアウト
Fig.2 Layout of Exhaust System

従来、ランドクルーザーに搭載していたVD型ディーゼルエンジンではホットアウトサイドを採用していたが、今回開発したF33A型ディーゼルエンジンでは、力強い低速トルクとダイレクト感、爽快な加速感を実現するため、2wayツインターボシステムを採用している^[1]が、このシステムにおいて、より効率的に排気エネルギーを利用するため、排気系部品をVバンク間に集約するホットインサイドを採用した(図3)。

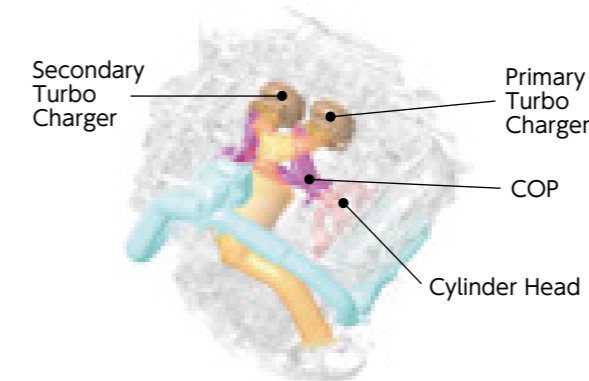


図3 F33A-FTV ホットインサイドレイアウト
Fig.3 Hot Inside Layout adopted by F33A-FTV

2wayツインターボシステムにおいて、シングルモードでは、両バンクの排気ガスをプライマリターボに、ツインモードでは、両バンクの排気ガスを2つのターボに流す役割を担うのがクロスオーバーパイプ(以下COP: Cross over Pipe、図4)である。

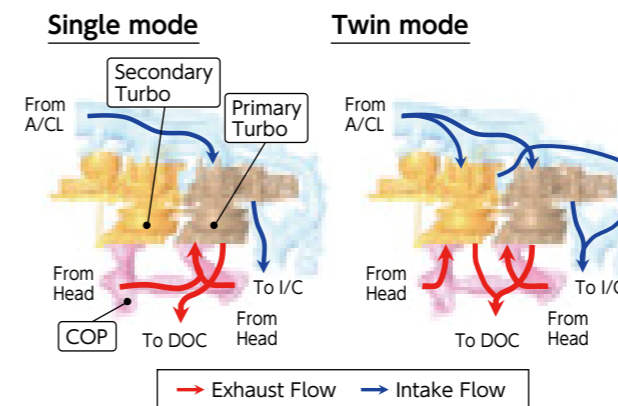


図4 2WayツインターボシステムおよびCOPの機能
Fig.4 2Way Twin Turbo System & Function of COP
(A/CL: Air Cleaner, I/C: Inter Cooler, DOC: Diesel Oxidation Catalyst)

Vバンク間に熱変形の大きい排気系部品をレイアウトすることは、部品の耐熱疲労性を確保することが非常に困難である。特に、シリンダヘッドやターボチャージャーに挟まれるCOPには、周辺部品の熱膨張が複数作用することから、複雑なストレスが発生するため、耐熱疲労性確保が開発上の大きな課題であった。

3. COPの熱疲労予測と計測ニーズ

熱疲労は、冷熱サイクルに伴う熱ひずみの繰り返しによって起きる疲労現象である。したがって、熱疲労を予測するためには、CAEによる熱ひずみの再現性が重要となる。ここで記述する熱ひずみは弾性ひずみと非弾性ひずみの和である。

排気系部品の熱ひずみ計算に用いられる従来CAE手法は実測した熱ひずみと比較しながら、直列エンジンやホットアウトサイドのV型エンジンの排気レイアウトを前提に構築された。モデル化範囲を最小限とし、締結境界条件として遊離しない接触を設定し、また、摩擦滑りを扱わずにガスケットのせん断剛性を調整することで、簡易的に締結部品間の相対滑りを模擬している。

新開発のF33A-FTVに採用されたホットインサイドレイアウトの場合、熱変形が影響を及ぼし合う周辺部品が多く、熱膨張に伴う締結部品どうしの接触や滑りが複雑になる。これらに対応するため、CAEのモデル化範囲を大幅に拡大したうえ、摩擦滑りを考慮するなど締結境界条件を詳細化した(図5)。


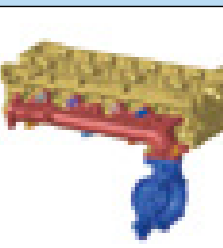
	今回(F33A-FTV)	既存(直列4気筒エンジン)
モデル化範囲	 部品数: 39	 部品数: 6
締結境界条件	法線方向: 接触、遊離が可能 滑り方向: 摩擦滑り	遊離なし せん断剛性を調整して相対滑りを表現

図5 CAEモデルの比較
Fig.5 Comparison of CAE Models

F33A-FTVにおけるCAE計算手順を図6に示す。Step1～5まで連続ステップで計算することで荷重履歴の影響を受けた弾塑性変形や摩擦滑りが得られる。組付けステップについては、COPを締結する際のミスアライメントを考慮するため2段階に分け、実際の組付け順に沿って計算した。事前に測定した温間時および冷間時の温度実測値を参考に温度計算を行い、それらの結果を熱ひずみ計算の入力値としている。一度、温間条件(Step3)にて初期塑性変形を生じさせたうえで、Step4以降の冷間から温間で発生する熱ひずみを評価した。

見直したCAE手法の妥当性を確認するため、計測による現象把握が必要である。まず、着目すべき計測部位を検討するため、ホットインサイドレイアウトのCAE結果を確認した。熱膨張したCOPは前側に締結されたターボに押し付けられることで、締結ボルト座面の隅にある曲率が小さい部位に熱ひずみの集中が見られた(図7)。従来より排気系部品の熱ひずみは高温域対応の溶接型ひずみゲージを用いて計測される。しかし、ゲージが長く、また、小さな曲率に曲げて装着できないことが難点である。そのため、COPの熱ひずみ計測は困難と判断し、別の物理量を対象とした現象把握を検討した。

熱ひずみの影響要因を図8に示す。熱ひずみは自由な熱膨張が拘束されることで生じる^[2]。自由な熱膨張については各部材の線膨張係数と温度変化によって決まり、それぞれ、材料データおよび実測温度に基づいてCAEソフトウェアに入力することで容易に表現できる。それに対し変位は、締結部品どうしが弾塑性変形したうえで、力がつり合うことで結果的に決まる。したがって、締結境界における変位は拘束を示す物理量である。つまり、COPに関していえばシリンダヘッドおよびターボとの締結境界において、法線方向および滑り方向の変位についてCAE結果が正しければ、熱ひず

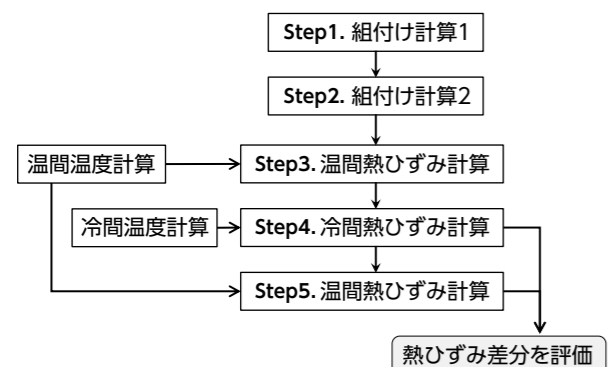


図6 CAE計算手順
Fig.6 CAE Calculation Steps

みのCAE結果も信頼できるといえる。そこで、CAE検証の対象として変位の計測が必要となった。

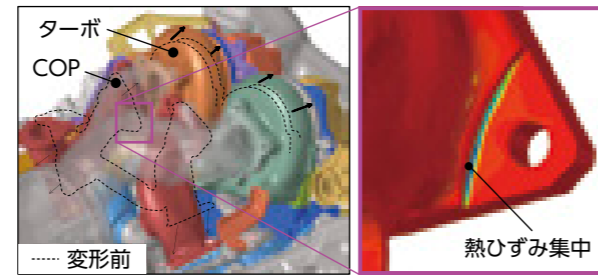


図7 ホットインサイドの熱変形(倍率30倍)とCOPの熱ひずみ集中
Fig.7 Thermal Deformation of Hot Inside (x30) and Thermal Strain Concentration of COP

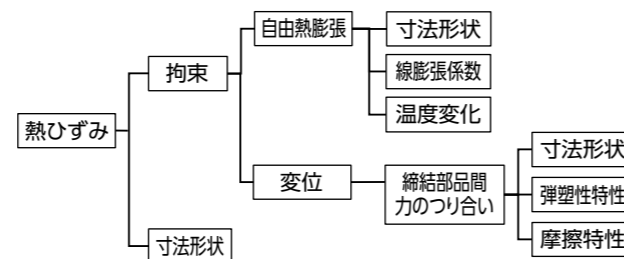


図8 熱ひずみの影響要因
Fig.8 Factors of Thermal Strain

4. 変位測定

従来、測定対象の変位を把握するには、ギャップセンサもしくはレーザ変位計を用いてきた。しかしながら、ギャップセンサは接触式のため使用温度に制限がある。レーザ変位計は設置箇所が限定されることや、エンジン振動の影響を受けやすいため微小変位の測定精度が悪い。このように従来の計測手法では、Vバンク内のシステム全体変位の把握には適さなかった。

Vバンク内全体変位を把握するため、今回、DICを用いた。DICの特徴は非接触で広範囲の変位と温度を同時に3次元計測できることである。測定対象表面に塗装されたスペクトルパターンをカメラで撮影する。撮影した画像をサブセットと呼ばれる微小領域に分割し、変形前のサブセット内パターン分布と同じ分布を画像解析により探索。これにより変形前後のサブセット移動量から、その点における変位量を算出。これらを画像全体で行うことで、変位分布を算出できる^[3]。COPでの事例を図9に示す。

また2台のカメラ視差を利用することで、面内変形に加え、奥行方向も計測することができる。さらに

サーモカメラと2台のカメラとの位置関係を校正することで、温度分布も同時に3次元把握が可能である。

しかし運転中のエンジンを撮影するため、振動や排気熱による画像の焦点ズレを防止する必要があった。上記対策として、振動や高熱でも撮影できる環境整備を行った。振動対策にはシャッタースピードを速くできるような強い光源を用意した。排気熱による熱ゆらぎ防止として、測定物とカメラの間に熱気が停滞しないよう、送風機を設置した(図10)。上記システムにより撮影、解析した画像の一例を示す。コンターで変位分布や温度分布を示すことができる(図11)。

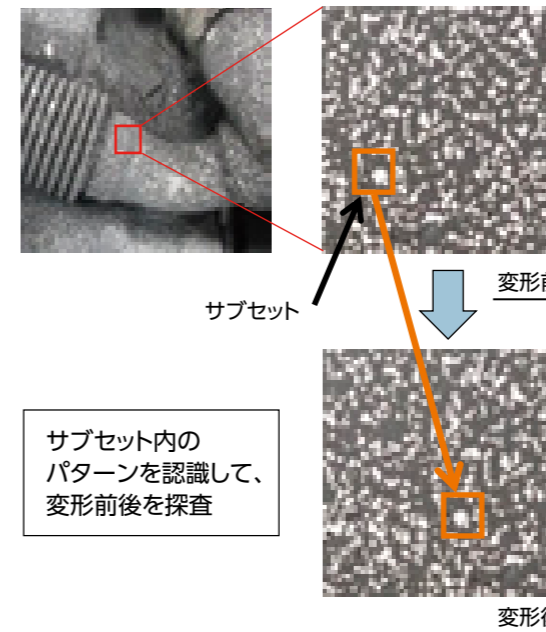


図9 DIC計測時のスペクトルパターンとサブセットイメージ
Fig.9 Spectral Pattern & Subset on DIC Measurement

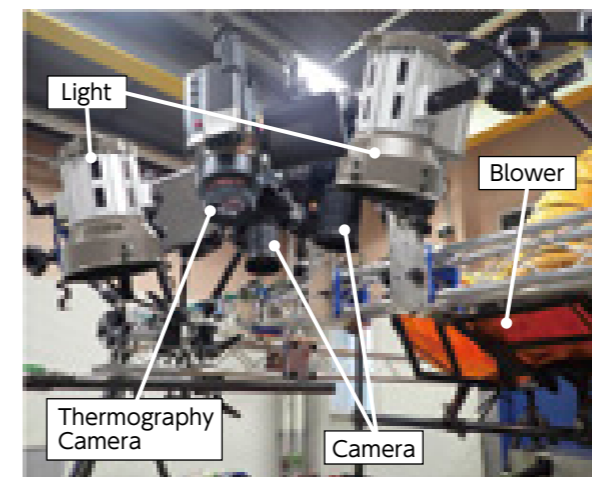


図10 DIC計測外観
Fig.10 DIC Measurement System

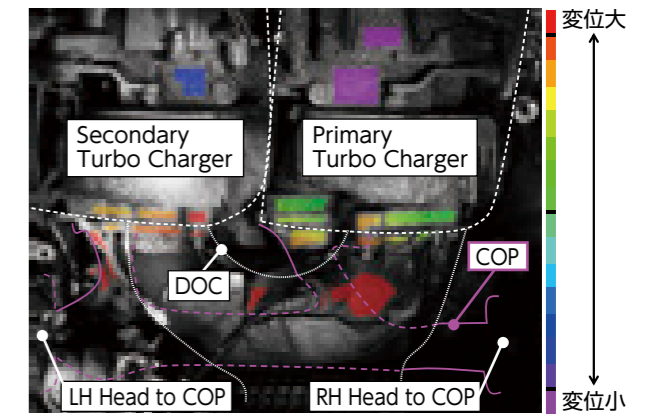


図11 DICによる計測例(エンジン上面視)
Fig.11 Output Image of DIC Measurement (Engine Upper View)

5. 変位量CAE解析結果

ベンチに固定されたDICでの測定結果をCAEの検証に使うには、エンジン全体の剛体回転補正が必要となる。この剛体回転は、エンジン定常運転時に出力トルクの反作用によってゴムマウントが変形して起こる(図12)。しかし、CAEはエンジン静止状態のまま熱応力計算をするため、座標系が維持される。そこで、座標変換の補正として計測値とCAE計算値の差が小さくなるように、最小二乗法にて計測値をエンジン回転軸周りに回転させた。

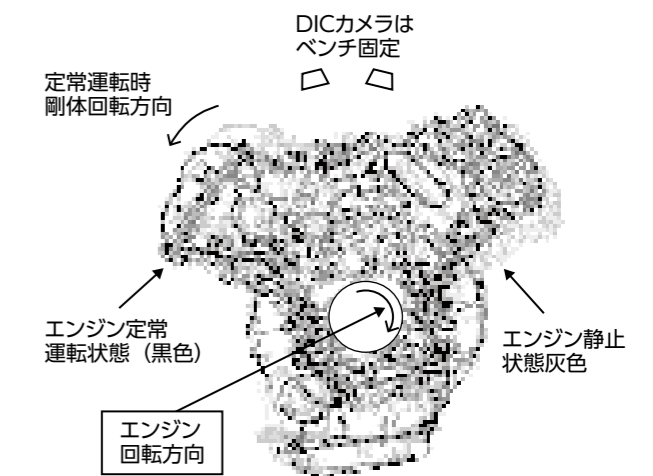


図12 エンジン定常運転時の状態(正面視)
Fig.12 State of Engine Constant Operation (Engine Front View)

このDIC検証試験の結果を参考に、温間、冷間ステップのCOP周辺の境界条件(主に摩擦係数)の最適化を実施した。ターボおよびシリンダヘッドとの締結近傍について、変更前後の変位を実測値と比較したものを図13に示す。従来CAEに比べ、今回はDIC実測値との乖離が低減され、解析精度の向上が確認できた。

今回の変位量実証結果を元に、COPの熱ひずみ、耐熱疲労性の解析を実施することで、COPの形状最適化を行い、ホットインサイドのシステム成立に貢献した。

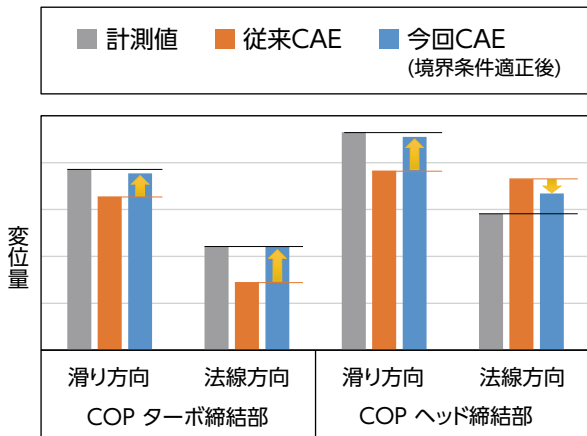


図13 計測値とCAE計算値の変位比較
Fig.13 Comparison of Displacement of DIC Measured Values and Calculated Values

6. まとめ

従来、排気系部品の熱疲労性は、エンジン実機耐久試験の繰り返しで信頼性を確認していたが、今回、システム評価として、DICを活用した非接触変位計測を実施し、CAE解析精度を飛躍的に向上させた。その取り組みにより、複雑なストレスが発生するホットインサイドレイアウトにおいて、実機評価前にシステムの完成度を向上させ、実機評価のやり直しを防止した(図14)。

今後は、本計測技術を活用したCAE実証を多様な部品、システムに幅広く適用することで解析精度の向上を図り、モデルベースでの完成度向上に取り組む予定である。

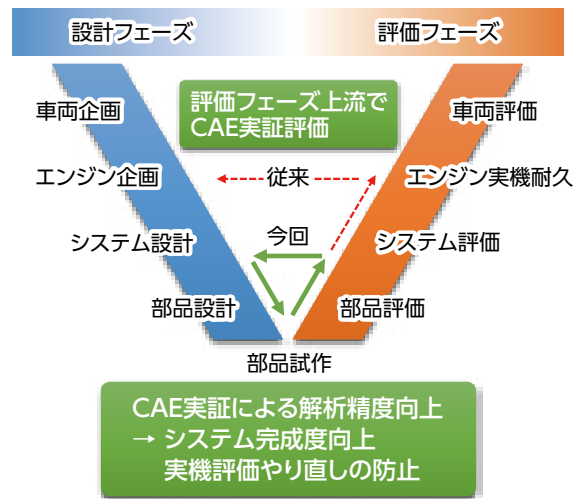


図14 F33A-FTVホットインサイドでの開発プロセス
Fig.14 Development Process for F33A-FTV Hot Inside

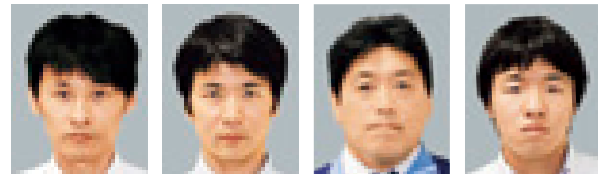
謝辞

最後に、今回の取り組みにあたり、多大なるご指導、ご協力を賜りましたトヨタ自動車(株)をはじめとした社内外の関係者の皆様に深くお礼申し上げます。

参考文献

- [1]横田晋司ら:自動車技術会学術講演会(20216116)
- [2]岡崎正和:材料 Vol.56, No.2, pp.190-196, Feb.2007
- [3]出水亨ら:土木学会論文集Vol.68, No.2, I_683-I_690

著者紹介



井上 幸治 浮田 和彦 浅野 哲夫 相原 秀紀