

## 技術論文

## 1D-3D連成CFDによる建設機械エンジンルーム内の部品温度予測手法の開発

## Development of Temperature Prediction Method for Components in Engine Room of Construction Machinery Using Thermal-fluid Simulation Coupled with 1D-CFD and 3D-CFD

湯 口 雅 也  
Masaya Yuguchi  
吉 田 良 明  
Yoshiaki Yoshida  
渡 邊 翔  
Sho Watanabe  
溝 上 高 明  
Takaaki Mizokami

設計のフロントローディングを実現するには、開発初期段階で建設機械のエンジンルーム内の熱害発生懸念のある高温箇所の特定と、効果的な冷却方法の検討が重要となる。効果的な対策の検討には、CFDを用いた温度予測が必要であることが知られている。本稿では、1D-CFDと3D-CFDを連成させた熱流体解析を用いた温度予測手法を開発したので報告する。

In order to achieve front-loading of designing, it is important to identify heat spots in the engine room of construction machines and consider effective ways to cool them at the initial development stages. It is known that in order to study effective cooling methods, it is necessary to accurately predict temperatures using CFD (Computational Fluid Dynamics). In this paper, we report the development of a temperature prediction method using thermal-fluid simulation coupled with 1D-CFD and 3D-CFD.

**Key Words:** CFD, Co-simulation, 油圧ショベル, 熱害, 熱流体, エンジン, 後処理装置, クーリング

## 1. はじめに

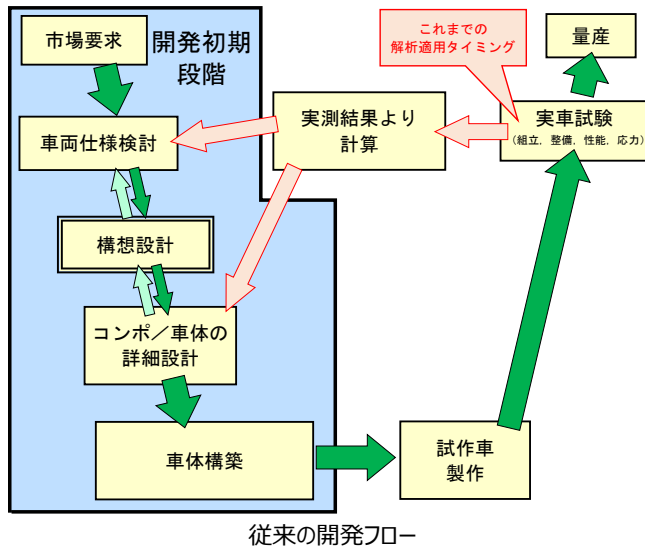
近年、建設機械が大気環境に与える負荷の軽減を目的として、排気ガス性能の良い建設機械の普及促進および排気ガス対策の実施がなされ、世界的にも排気ガス規制の強化が実施されている。排気ガス対策として、排気ガス浄化装置や排気ガス再循環装置を用いることもあり、それらの高温の装置をエンジンルーム内に集約しなければならないため、エンジンルーム内の熱環境はますます厳しくなっている。

建設機械は高負荷での定置稼働が多く、自動車とは異なり、高負荷時に走行風を冷却として活用できない。そのため、高速回転するファンによる送風により高温装置を冷却しているが、ファンの送風は非常に複雑な流れとなるため、それを予測して熱害対策するのは難しい。また、建設機械の一部の熱害部品の最高温度は高負荷状態ではなく、エンジン停止後に発生することもあり、高負荷時の定常状態からエンジン停止後の非定常状態までを考慮する必要がある。しかし、両事象での部品最高温度を事前検討するのは非常に難しく、設計のフロントローディングを実現させるための予測手法の開発が望まれている。

これまで、熱源表面温度を計測し、その値を入力条件に用

いて3D-CFDを実施することで熱害を予測していた。これは、熱源表面温度をCFDで予測することが困難であったためであり、表面温度を計測する必要があった。実車のない開発初期段階では実施することは困難であった。また、熱源の温度は定常状態で取得した一定値を用いており、エンジン停止後の過渡的な熱源温度の変化を解析で確認することも困難であった。熱源の温度も含めて、すべてを3D-CFDで解析すると膨大な解析時間が必要になり、現実的でない。そこで、1D-CFDを用いて発熱源であるエンジンの発熱量を解析することで、実車計測を必要とせず熱源温度を予測し、**図1**のように開発初期段階での予測が可能になると考えた。しかし、1D-CFDは、実物の形状を完全に再現することは難しく、計算による部品表面の温度分布や構造の影響を強く受けるエンジンルーム内の風流れを正確に予測することは困難であると考えられる。

このことから、1D-CFDと3D-CFDを連成させ、解析結果を反映しあうことで、表1に示すように互いの欠点を補い、車体稼働時の温度状況を正確に再現し、設計のフロントローディングを実現し、開発初期段階で熱害の予測・検討・対策が可能になると考え、解析手法の開発を実施した。



従来の開発フロー

理想の開発フロー

図1 開発フロー

表1 1D-CFDと3D-CFDの対比

1D-CFD	3D-CFD
<ul style="list-style-type: none"> <li>・構造(3D)の影響を加味できない</li> <li>・周囲の非定常な風流れを予測できない ⇒3D-CFDで求められる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・管内を流れる水や油等の影響を加味できない</li> <li>・熱源温度は実測が必要 ⇒1D-CFDで求められる。</li> </ul>
熱伝達係数40~200 [W/m <sup>2</sup> ・K] 	シリンダー内部の熱 
流体温度90~200 [°C] 	エンジンオイルの流れ 

## 2. 予測手法の概要

本手法は、開発初期段階で熱害の対策・検討に使用できる予測手法とするため、実車計測を必要としない、すべてをCFDで完結させることを目標にモデルの構築を実施した。エンジンの燃焼の様子から、各配管内の流れまで、すべてを3D-CFDで解くには膨大なリソースと時間を必要とし、現実的ではない。そこで、3D-CFDに比べて計算負荷が軽い1D-CFDを組み合わせた手法を構築した。

今回構築したCFDモデルは、1Dの内部流体回路モデル、3Dの熱伝導解析用車体モデル、3Dの流体解析用車体モデルの3つのモデルで構成されており、1D-CFDでエンジンの燃焼や冷却回路、排気ガスの温度等を解き、3D-CFDで固体部の熱伝導、および外部への放熱、周囲の風流れを解いている。それぞれの解析モデル間の境界条件は、図2のように、壁面温度、流体温度、熱伝達率を各解析モデル間受け渡しており、図3のように、一定期間ごとに受け渡すことで、連成解析を実現している。

図4は1D-CFDの内部流体回路モデルでの後処理装置の模式図を表しており、図のように粒度が粗くなってしまう。一方、3Dの熱伝導解析用車体モデルは図5のように実形状を再現するため、粒度は細くなる。そこで、1D-CFDと3D-CFD間の連成は、1Dの内部流体回路モデルにあわせて3Dの熱伝導解析用車体モデルを分割し、平均化した情報を受け渡し、粒度をそろえることで連成を実現させた。

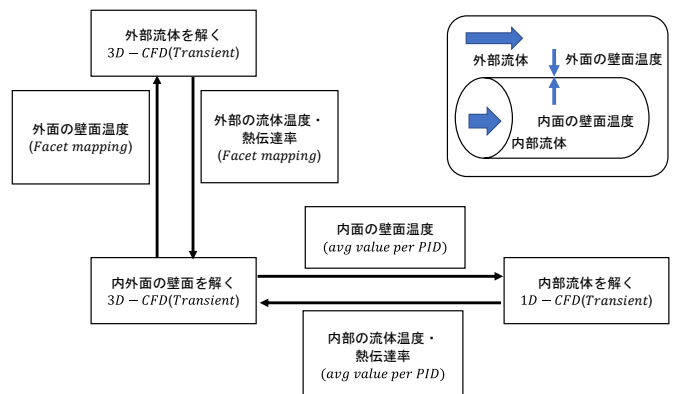


図2 各解析モデル間の境界条件

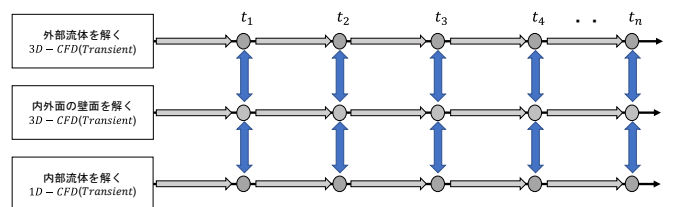


図3 モデル間のデータの受け渡しの模式図

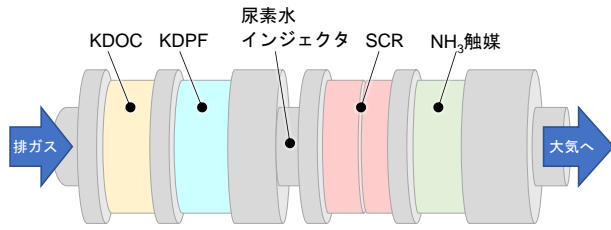


図4 1Dモデルでの後処理装置の模式図

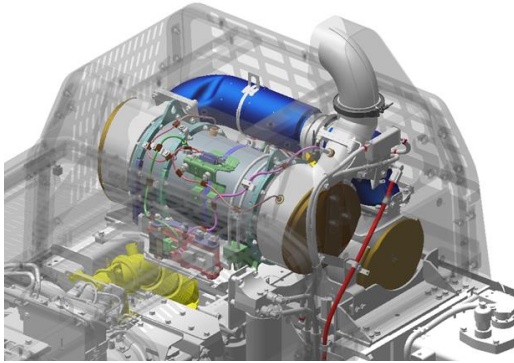


図5 3Dモデルでの後処理装置の模式図

### 3. 解析モデル

#### 3.1 1Dモデルの概要

本手法には、1Dツールとして、株式会社IDAJのGT-SUITEを使用してモデルを構築した。GT-SUITEは、Gamma Technologies社で開発されたマルチフィジックス・システムシミュレーションツールで、任意の運転条件におけるエネルギー効率、冷却系システムの熱マネジメント評価などをおこなうことができる。

今回作成した1Dの内部流体回路モデルを図6に示す。エンジンや後処理装置等の主熱源の表面温度を正確に予測するために、エンジンの燃焼や冷却水、燃料、排気ガス等の複数の回路をモデル化し、内部の熱の収支を予測するモデルとなっている。

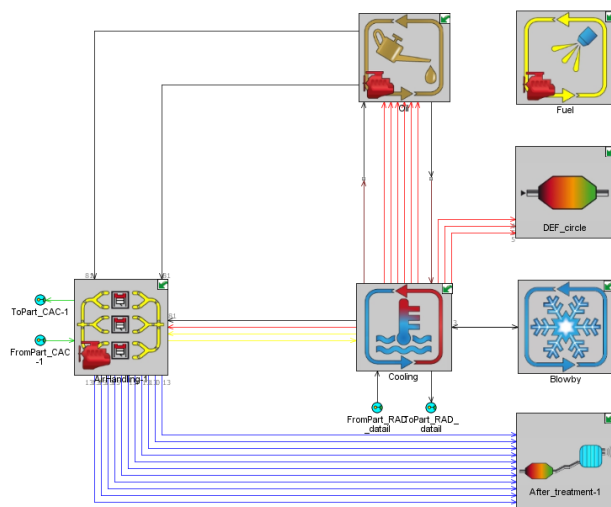


図6 1D内部流体回路模式図

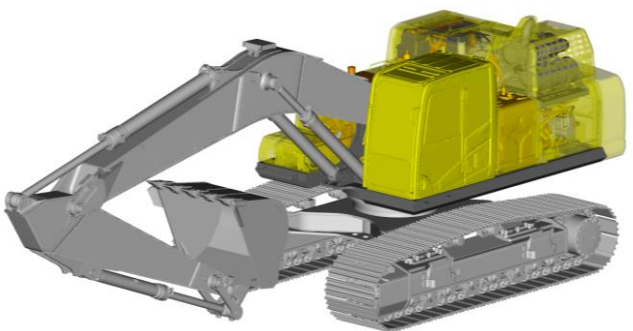


図7 3Dの流体解析用車体モデル

#### 3.2 3Dモデルの概要

本手法には、3Dツールとして、ダッソー・システムズ株式会社のPowerFLOWおよび、PowerTHERMを使用してモデルを構築した。PowerFLOWは、格子ボルツマン法に基づいた非定常な物理解析を活用し、実世界の条件での動作を正確に予測できる。また、PowerTHERMは、表面温度と熱放射、熱伝導、熱対流により生成される熱流束を予測できる。PowerFLOWとPowerTHERMを組み合わせることで、幅広い熱および、流体に関する解析を実現できる。

今回作成したモデルは、3Dの流体解析用車体モデルと3Dの熱伝導解析用車体モデルの2つである。

3Dの流体解析用車体モデルは図7に示すように車体のCADモデルを使用して作成している。ファンによって形成される流れ場を正確に再現するため、ファンの3Dモデルを解析上で任意の回転数で回転させている。エンジンルーム内の雰囲気温度を正確に予測するため、熱交換器のモデル化も実施しており、エンジンからの入熱、内部流量、熱交換器の性能を入力値として、熱交換器での温度変化を解いている。また、実際の車体では、エンジンルーム内の暖かい空気が開口部や隙間から熱交換器前に回り込むことがある。熱交換器前の雰囲気温度は各性能および、エンジンルーム内の各部品の温度への影響が大きいので、形状を忠実に再現することで現象を解析可能にしている。空間メッシュは図8に示すように、風速が早く、解析精度に最も影響を与えるファン近傍に最も細かいメッシュを当てている。

3Dの熱伝導解析用車体モデルは図9に示すように、計算コストを下げるために車体すべてではなく、エンジンルーム外装および、各コンポーネントを部品単位でモデル化し、作業機や履帯、CAB等はモデル化していない。また、各部にある断熱材に関してもモデル化を実施して精度向上に努めている。配管や外装、断熱材等のモデル化に関しては、表面形状のみモデル化し、仮想厚みを与えることで更なる計算コスト低減を実施している。

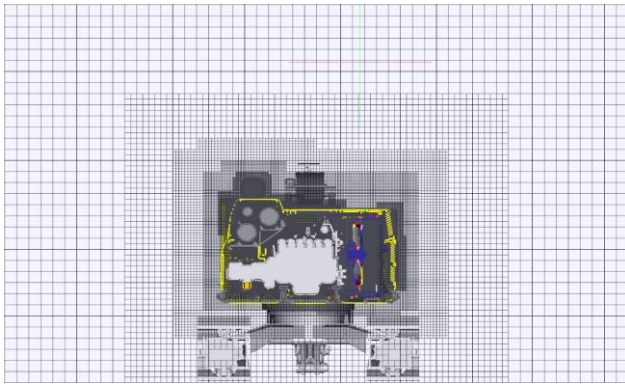


図8 3Dの流体解析用空間メッシュ（ファン軸断面）

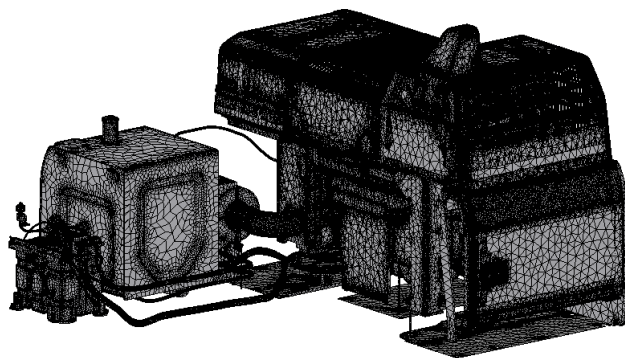


図9 3Dの熱伝導解析用車体モデル

### 3.3 連成解析の手法

本手法では、3Dの流体解析用車体モデルと3Dの熱伝導解析用車体モデル間の各データの受け渡しは、PowerFLOWとPowerTHERMの既存の仕組みを利用することで実現している。1Dの内部流体回路モデルと3Dの熱伝導解析用車体モデル間の各データの受け渡しは、GT-SUITEとPowerTHERMを繋ぐ既存の仕組みがなかったため、GT-SUITEの外部ツールと接続するための機能と、PowerTHERM用に新たに作成したスクリプトを組み合わせ、使用することで実現した。こちらのスクリプトは、あらかじめ1Dの内部流体回路モデルと3Dの熱伝導解析用車体モデルで対応させておくことで、部品ごとにデータの受け渡しを行う仕組みとなっている。

本手法では、すべての解析を非定常で解くことで現象を正確に予測できる手法であるが、3Dの流体解析用車体モデル解析はその他の2つの解析に比べて、計算リソースおよび、時間が膨大にかかってしまう。一方、現象の変化で見てみると、風流は熱の変化に比べて非常に短い時間で現象が変わり、外乱がなければ安定するのも早い。そこで、風流の変動が大きい時間は同じタイミングで連成を行い、風流が安定している時間では、流れ場を固定し、計算せずに参照することで、計算コストを抑え、現実的な時間での解析を実現した。

前段で述べた連成のタイミングを模式図にしたものを図10に示す。図10は、車体稼働中からエンジン停止後の風量と温度の変化と、全体の解析の流れを示している。青線はエンジンルーム内の風量の変化を、赤線は部品の温度の変化を示しており、青矢印が3Dの流体解析を実行している時間帯を、赤矢印が1D解析および、3Dの熱伝導解析を実行している時間帯を示している。①③の範囲が風流の変動が大きい時間帯を示しており、②④の範囲が風流の安定している時間帯を示している。

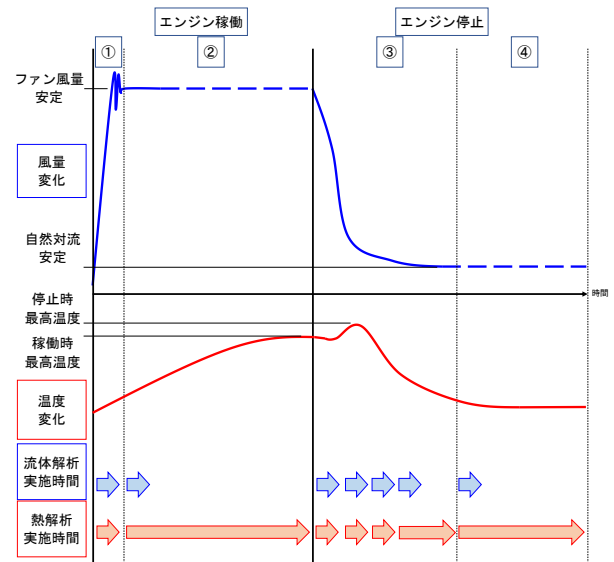


図10 解析の流れの模式図

## 4. 部品温度予測と精度検証結果

本検討では油圧ショベルを対象に実作業試験を実施し、車体稼働時とエンジン停止後の各部品の温度および、熱源表面温度を、図11のように熱電対を用いて測定した。計測点は、エンジンルーム内の各部品の表面温度および、エンジンや後処理装置等の高温熱源部品である。エンジンや後処理装置等、部品のサイズが大きく、場所によって風当たりが違ふ部品に関しては多点計測を実施することで、詳細な計測値を取得した。

今回検証で行った油圧ショベルの実作業試験とは、図12のように「掘削」→「ブーム上げ+旋回」→「排土」→「ブーム下げ+旋回」→「掘削」というサイクルを長時間繰り返し実施する試験である。事前に旋回運動の影響を解析で確認した結果を図13に示す。熱交換器前温度の外気との雰囲気温度の変化は、1サイクルで平均温度を算出すると+1.5℃程度であったため、表面温度に与える影響は小さいと判断し、連成解析は旋回運動をせずに解析を実行している。初期旋回時に温度が上昇し、後期旋回時に低下する理由は、車体の形状に起因し、初期旋回時は吸気開口が排気開口から出た暖かい空気に向かっていき、後期旋回時は離れていく動きをするためである。



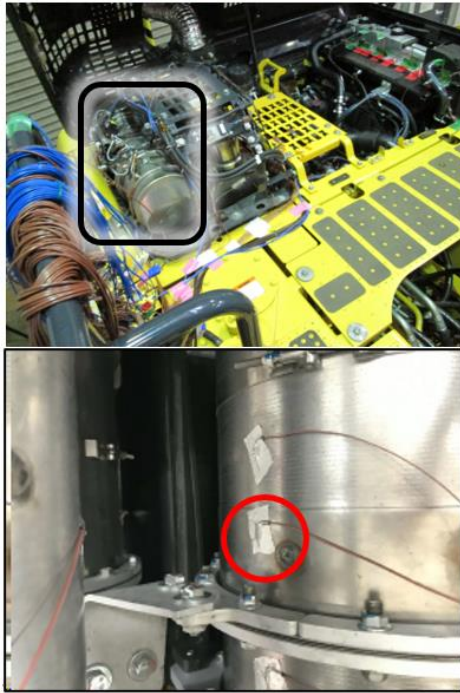


図11 実車計測の様子  
(下：後処理装置の表面拡大図（赤丸が熱電対）)

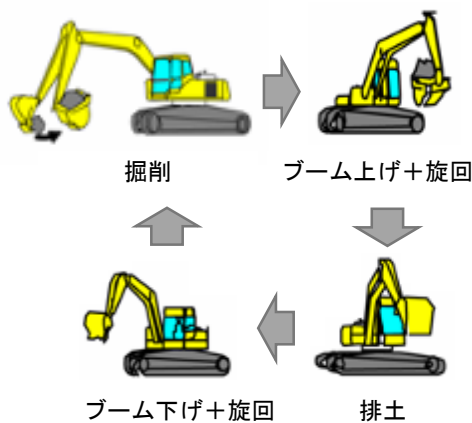


図12 実作業試験の模式図

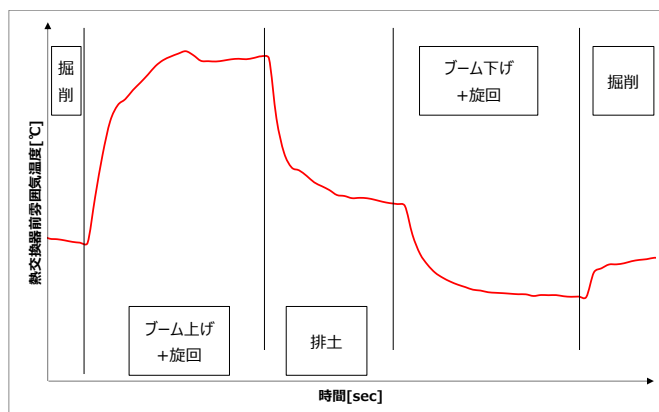


図13 旋回運動による熱交換器前温度の変化

#### 4.1 エンジン稼働状態の部品温度予測結果

エンジン稼働状態では、各部品の最高温度で比較検証を実施した。エンジンルーム内の雰囲気温度の分布を図14に、エンジンおよび、後処理装置の表面温度の分布を図15に示す。排気マニフォールドや、後処理装置は非常に高温になっており、エンジンルーム内の雰囲気温度は、均一に近い状態になっていることがわかる。

エンジンルーム内の検証対象の部品の表面温度を図16に示しており、合計32点の測定点における試験と解析の結果である。エンジン稼働状態での各部品の表面温度は、すべて誤差 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 以内で予測できている。

次に主熱源の表面温度を検証した結果を示す。主熱源のうちの後処理装置表面温度の結果を図17に示しており、合計32点の測定点における試験と解析の結果である。エンジン稼働状態での後処理装置の表面温度の誤差は、最大誤差は $-23^{\circ}\text{C}$ であり、計測点の内、85%は誤差 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 以内で予測できている。

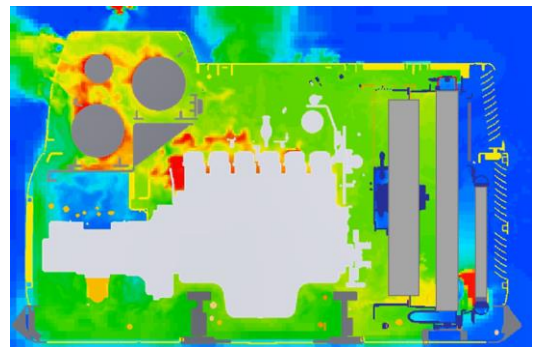


図14 エンジン稼働状態の雰囲気温度分布

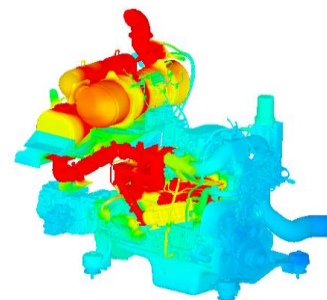


図15 エンジン稼働状態の表面温度分布

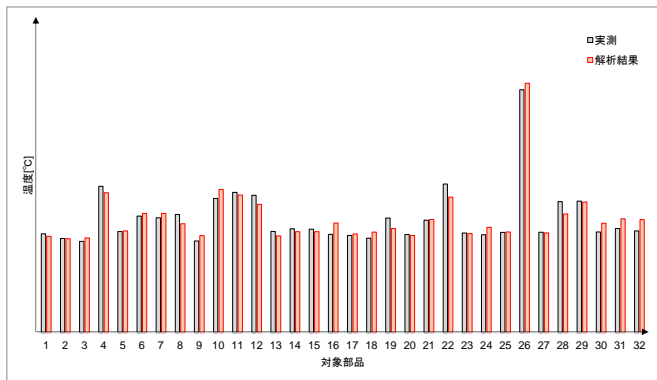


図16 エンジンルーム内部部品温度（計測値vs解析結果）

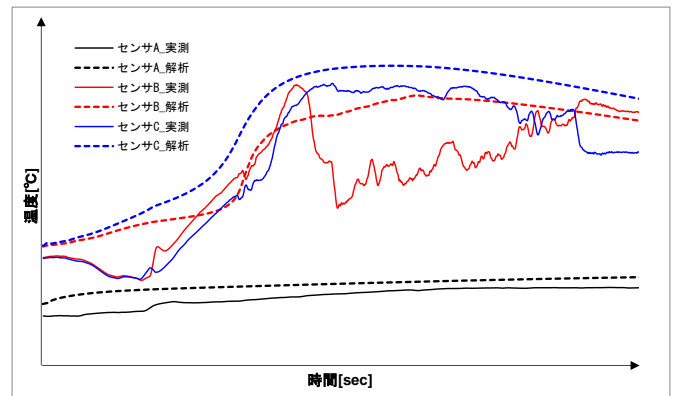


図19 対象部品温度（計測値vs解析結果）

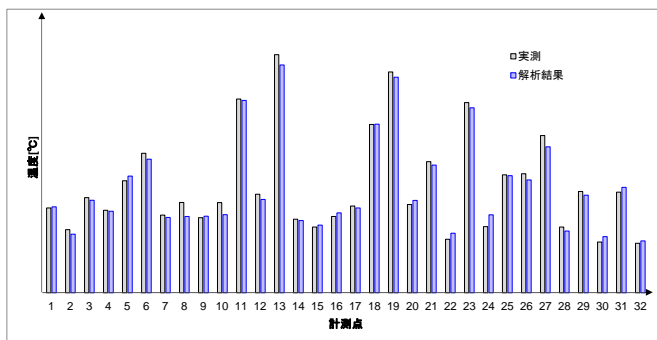


図17 後処理装置表面温度（計測値vs解析結果）

#### 4.2 エンジン停止後の部品温度予測結果

エンジン停止後では、各部品の最高温度で比較検証を実施した。最高温度に到達する時間は計測点によって違うため、時刻歴で解析結果を見ていく。エンジンルーム内の風量が安定した、自然対流状態時の雰囲気温度の分布を図18に示しており、稼働時と異なり、停止後では高温空気がエンジンルーム内に滞留していることが確認できる。

エンジン停止後の後処理装置に取り付けられたセンサの部品温度の時間変化の様子を図19に示しており、計測値を実線、解析結果を点線で表している。エンジン停止後での部品の表面温度の最高温度を、誤差 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 以内で予測できている。また、最高温度に到達した時間や温度上昇の様子も解析と計測値で非常に一致していることが確認できた。

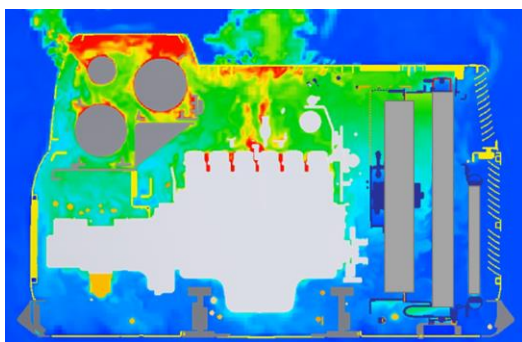


図18 エンジン停止後の雰囲気温度コンタ図

#### 5. おわりに

本報告書「1D-3D連成CFDによる建設機械エンジンルーム内の部品温度予測手法の開発」の研究・開発においては、車体稼働時の温度状況を正確に再現することで、開発初期段階で熱害の予測・検討・対策を可能にするための解析手法の開発を目的とし、それを実現した。本手法を用いることで、設計のフロントローディングを実現できると考える。研究・開発において得られた結果を以下に記述する。

- ・ 熱源表面温度の実車計測を必要としない1D-CAEと3D-CFDを連成させた温度予測手法を構築した。
- ・ 熱源表面温度を誤差 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ （検証した全計測点の85%）で予測可能である。
- ・ エンジンルーム内の部品の最高温度を誤差 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ （検証した全計測点の100%）で予測可能である。
- ・ エンジン停止後のような、時間による温度変化も予測可能である。

#### 謝辞

本手法の開発にあたり、多大なご協力およびご助言をいただきました、株式会社IDAJおよび、ダッソー・システムズ株式会社の皆さまに、この場を借りて深く御礼申し上げます。更なる連成手法の発展のためにも今後もご助力賜りますよう、よろしくお願い申し上げます。

## 参考文献

- 【1】 田中 義輝ほか, “キーオフ時のエンジンルーム内部部品温度予測技術の開発”, 自動車技術論文集, 2013年, Vol.44, p.703-708
- 【2】 王 宗光ほか, “車両キーオフ後部品温度変化の予測手法”, 自動車技術論文集, 2015年, Vol.46, p.173-178
- 【3】 石川 皓一ほか, “CFDによる車両熱管理手法の構築”, 自動車技術論文集, 2019年, Vol.50, p.148-153
- 【4】 石川 皓一ほか, “キーオフ後の冷却ファン稼働状態における部品温度予測”, 自動車技術論文集, 2020年, Vol.51, p.473-478

## 筆者紹介



Masaya Yuguchi  
湯口 雅也 2017年, コマツ入社.  
開発本部 先端・基盤技術センタ所属



Yoshiaki Yoshida  
吉田 良明 2007年, コマツ入社.  
開発本部 先端・基盤技術センタ所属



Sho Watanabe  
渡邊 翔 2013年, コマツ入社.  
開発本部 先端・基盤技術センタ所属



Takaaki Mizokami  
溝上 高明 2016年, コマツ入社.  
開発本部 先端・基盤技術センタ所属

## 【筆者からひと言】

本手法は、計測を必要としないという点で開発初期段階の検討において非常に有効な手段であると思う。モデル作成には技術が必要ではあるが、全社的に活用できれば、開発の効率化だけでなく、検討時間が増えることによる更なる商品力向上にもつながっていくと考える。近年はIoTや機械学習、AI等の活用による高精度化・容易化・自動化・最適化も進んできており、そういった技術と本手法を組み合わせることができれば、更なる技術向上が見込めると考える。