

Abstract

Air intakes and outlets of motorcycle powertrain combustion and cooling systems tend to suffer infiltration by contaminants such as dust and water (Figure 1). Yamaha Motor uses commercially-available CFD (Computational Fluid Dynamics) code to conduct theoretical study of the dust contamination phenomenon, and has utilized the code for product development since 2008.

This report introduces an overview of Yamaha Motor's dust contamination analysis, which includes issues, our approach to resolving them, and validation of the analysis.

1 はじめに

モーターサイクルはパワートレイン燃焼や機器冷却のために各種吸気口・換気口を備えるが、これらは同時にほこりや水も浸入しやすい(図1)。ほこりが入る現象を机上で検討するため、当社では市販CFD(Computational Fluid Dynamics)コードによる「ほこり入り解析」を運用しており、2008年より製品開発へ適用している。

ここでは、当社で実施しているほこり入り解析の概要、その課題と解決へのアプローチ、解析の妥当性確認について紹介する。



図1 ほこりを立てながら走行するモーターサイクル

2 背景

不整地路など、土や砂を由来とするほこりが立ちやすい環境でのモーターサイクルの使用において、各種吸気口は清浄な空気を吸入することが望ましい。自車のタイヤが巻き上げるほこりを、同じく自車の吸気口より連続的に大量に吸気することは防ぐべき事象である。この要件を満足しない場合は、ほこりによる各機器の磨耗促進や固着、汚損が発生し、またはフィルター類の頻繁な交換・メンテナンスが必要になる。走行

中の車両にまわり付くように分布するほこりは、その車両とライダーの並進運動に相反して発生する空気の流れに乗り、拡散していく。このほこりの挙動は外装カバー類、タイヤ近傍を含めた車両の形状、タイヤに付着し放出されるほこりのベクトル、車速、地表近傍の風向風速、地面のほこり量などに依存している。

あわせて、モーターサイクルの形状・スタイリングは魅力として顧客への訴求効果が高い。特にアセアン諸国やインドで需要が伸びているスクーター機種は外装カバー類による表現の自由度が大きく、開発初期でのスタイリングの決定は、製品開発のコンセプトに一貫性を持たせるための重要なプロセスである。開発後期での実機検証の段階でほこり入り要件を満足しなかった場合は、スタイリングへの妥協のみならず、設計検討と実機検証の繰り返し、車体部門とパワートレイン部門との調整、コストの増大、製品リリースの遅延など、影響する損失が大きい。一般的にこの損失は、構想設計から実機検証までの間にまたがる期日、工程、システム・部品が多く存在するほど大きいとされる。スタイリングと機能の両立が求められるほこり入り要件はこれに当てはまる。

主たる機能と防ぐべき事象、スタイリングなど、これらの要件を高いレベルで両立させながら製品を具現化するために、「ほこり入り解析」は当社モーターサイクルの開発プロセスに組み込まれている。

3 ほこり入り解析の概要

3-1. ほこり入り解析の目的と手段

ほこり入り解析の目的は主に以下の2点である。

- ・エアクリーナや各機器の吸気口へのほこり量を評価する
- ・タイヤ近傍から吸気口までのほこりの経路を分析し、改良案を考案する

解析と結果処理の方法は以下の通りである。

- ・走行中のモーターサイクルのタイヤ近傍から解析領域へ一定量のほこりを流入させる(図2)
- ・解析領域へ流入したほこりを、空気の流れや渦により輸送させる
- ・エアクリーナや各機器の吸気口へ流入するほこりを濃度として取得する
- ・車両まわりのほこりの濃度、流速ベクトルなどを図化する

ほこり入り解析の利点は、物を作る前での机上検討ができることだけでなく、ほこり濃度分布の空間的な把握や、実機評価の課題であるテストコースの天候や風向きに左右されない、定量的な比較が可能な点も挙げることができる。

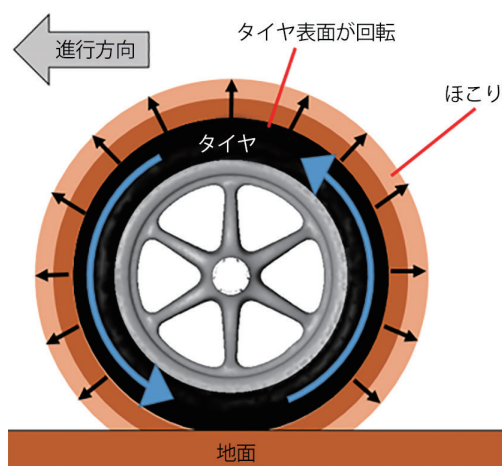


図2 ほこりの流入条件 模擬図

3-2. ほこり入り解析の課題

ほこり入り解析のように空間の流れを解析するときは、空間を格子で区切る必要がある(空間の離散化)。見たい現象を微細に解析できるように、なるべく細かく、かつ多くの格子数を設定したいところであるが、格子数が多いほどコンピュータのCPUやメモリの消費量が増える(計算負荷が増える)ため、適度に粗い格子サイズと解析手法、数学モデルの採用などで対処している。

ほこりは分子拡散や、下図のような空気の流れで輸送される(図3)。中でも輸送に大きく寄与する流れは渦状の流れであり、大小さまざまな渦が発生または散逸していく状態を「乱流」と呼ぶ。車両まわりの流れは時々刻々と変化しており、ほこりは小さい渦で拡散され、時には大きな渦に乗って急激に向きを変える。この状況を「強い非定常性」と呼び、これをたとえば時間平均的な流速ベクトルの扱いにしようとして設計検討を見誤る場合もある。ほこりの挙動を解析するには、この強い非

定常性の乱流をどのように取り扱うかが重要である。

ここで、仮に渦のひとつひとつを詳細に解く場合の格子数を試算する。乱流の状態を表す無次元数としてレイノルズ数(粘性力と慣性力の比)がある。50km/hで走行しているモーターサイクルまわりの流れのレイノルズ数は概ね 10^6 である。ここで、乱流の最小渦のスケールはレイノルズ数の $3/4$ 乗に比例する(コルモゴロフのマイクロスケールとテイラーの評価より)。最大渦スケールを解析対象の代表長さ(車両のホイールベース長さなど)と同じとし、かつ、渦を3次元的な流れの回転として表現する格子数を考慮すると、最大渦スケールと最小渦スケールを同時に解くための格子数はレイノルズ数の $9/4$ 乗となる。結果として 10^{13} (10兆)の格子数が必要と試算できる。理化学研究所の「京」スーパーコンピュータで取り扱える格子数が概ね 10^9 (10億)格子とのことより、それより多い格子数で渦のひとつひとつを詳細に解くことは、現時点および今後も実現困難である。

以上のことより、強い非定常性の乱流を、現実的な格子数、現実的な計算負荷で解析するために、当社では数種の解析手法と乱流の解法を採用している。これらの紹介と実測との妥当性確認結果、メリット・デメリット、解析コストを次章より記す。

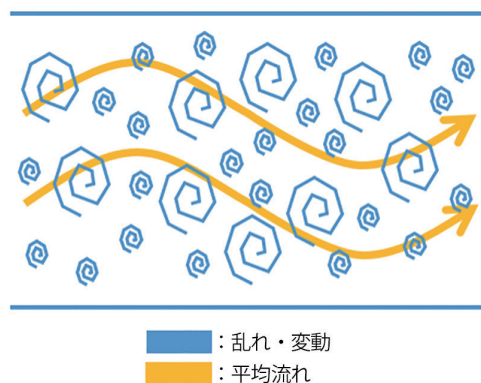


図3 CFDにおける流れ場 模擬図

4

CFDについて

4-1. 解析手法

4-1-1. 有限体積法(FVM:Finite Volume Method)

流体の支配方程式であるナビエ・ストークス方程式(以下、NS方程式)をベースとして、領域を有限個の空間で離散化し、その空間に入出入りする物理量の収支を計算することで流体の挙動を再現するのが有限体積法(以下、FVM)である^[1](図4)。

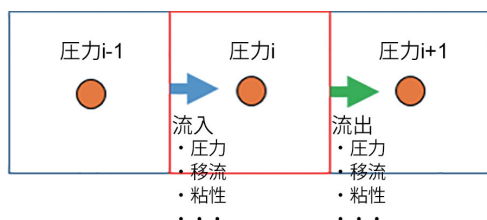


図4 有限体積法 模擬図

現在多くの市販CFDコードに用いられている手法であり、非構造格子を採用することが多い。非構造格子は複雑形状の再現性に優れているが、要素配置の不規則さゆえに、計算負荷や計算時間が大きくなる場合がある。また、移流項の離散化スキームによっては、数値拡散によって実際の解より値を小さく見積もってしまう場合もある。

4-1-2. 格子ボルツマン法 (LBM:Lattice Boltzmann Method)

NS方程式を直接用いず、流体を有限個の仮想粒子の集合体とみなし、各粒子の衝突と並進について速度分布関数 f を用いて逐次計算する。そこで得られたパラメータから、流体としての物理量である密度や運動量、圧力を算出し、流体の挙動を再現するのが格子ボルツマン法(以下、LBM)である^[2](図5)。

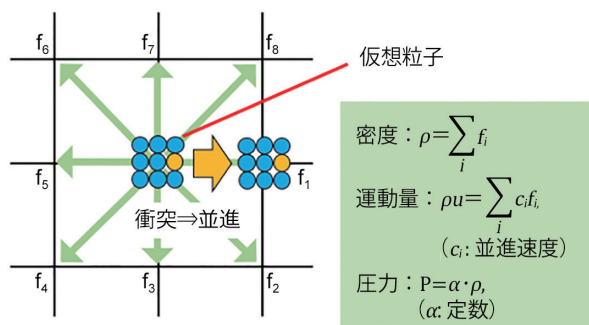


図5 格子ボルツマン法 模擬図

CFDの歴史から見ると、比較的近年に注目され始めた手法である。構造格子を基本とするため計算速度に優れており、カットセル法や埋め込み境界法などを併用すれば、複雑形状にも対応できる。

4-2. 乱流の解法

4-2-1. RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes)

NS方程式にレイノルズ平均を施し、時間平均値とそのずれ

を通して乱流を取り扱う解法で、乱流の計算には $k-\varepsilon$ モデルなどの乱流モデルが必要となる。物体に働く平均的な抗力や揚力など、工学的に重要な諸量の予測が可能で、計算負荷も低いことから一般的によく利用される。

しかし、このような平均量では評価できないケースが多く存在する。例えば、空力騒音や乱流燃焼、そして今回の物質の乱流拡散などである。これらの現象は非定常性が強いということに加え、大小さまざまなスケールの渦運動と密接に関係するためである。したがって、以上の乱流の本質的な部分に着目するには、RANSでは不十分といえる。

4-2-2. LES (Large Eddy Simulation)

乱流の本質をより正確に捉えるために、LESという解法がある。この解法の概念はシンプルで、流れ場に対して空間的な“ふるい”をかけ、“ふるい”の上に残った大きな渦は一切のモデル化をせずに直接計算する、というものである。“ふるい”の目の粗さをグリッドスケール(GS)と呼び、GSをすり抜ける小さな渦はサブグリッドスケール(SGS)モデルで計算する。

LESにはRANSより小さな渦運動をとらえられるという利点があるが、車両周り流れに適用するには格子数および計算負荷が膨大となるため、相応の計算リソースの確保が必要となる。そこで、流れが複雑でない部分のみRANS等を用いて計算することで、LESの特長は残しながら、全体の計算負荷を低減するVLES(Very Large Eddy Simulation)やDES(Detached Eddy Simulation)といったハイブリッドモデルが考案されている。

4-3. ダストモデル

4-3-1. 拡散ガス

質量をもたず、流れと分子拡散に従う物質である。弊社では分子拡散の影響を0とし、流れにのみ従う形をとっている。また、壁面への付着はしないものとして考え、物理量として濃度が算出される。簡便なダストモデルとして使われる。

4-3-2. 質量粒子

質量をもつため、粒子速度や質量によっては慣性力が大きくなり、流れ場に完全には従わない物質である。また、壁面への付着・反発が考慮されるなど、取り扱いが難しいが、実現象を比較的厳密に模擬できる。物理量としては数密度(濃度に相当)や粒径分布などが算出される。本検討ではJIS 7種相当の砂を想定し、粒子径分布や密度を設定する。

5 妥当性確認

本章では、ほこり入り現象の再現性の指標として、エアクリーナエレメントの吸気開口部入口(以下、A/C_inとする)や空間のほこり濃度に着目し、さまざまな組み合わせの解析手法の中から実機との相関が最も高い解析方法を選出する。そして、選出した解析方法にて、開発行為を想定した仕様差における実機との相関を見ることで、解析方法の妥当性を確認する。

5-1. 解析方法の妥当性確認

調査を実施する組み合わせは下表の通り(表1)。

表1 解析方法の組み合わせ

	1.解析手法	2.乱流の解法	3.ダストモデル
(1)	FVM	RANS (非定常)	拡散ガス
(2)	LBM	VLES	拡散ガス
(3)	LBM	VLES	質量粒子 初速あり

(参考) FVM+LESという組み合わせでの解析を当社の解析ハードウェアリソース下にて試みたが、計算負荷上、形状の大幅な簡略化が必要かつ、ほこりの流入条件を加えることは不可能であった。また、FVM+質量粒子・初速ありという組み合わせに関しては、粒子の空間分布を濃度分布として可視化することが困難であった。したがって、以上2つの解析方法は比較不能として、本稿には記載しないこととする。

また、今回実機との比較を行うにあたり、対象とする車両に「Nozza Grande」を選んだ(図6)。ここにA/C_inを示す。



図6 Nozza Grande

まず、(1) FVM+RANS、(2) LBM+VLESの流れ場を図7、図8に示す。図はある瞬間の流れ場であり、ベクトル、コンターはそれぞれ流れの方向と流速の大きさを示している。

図の通り、おおよそは同等と見ることもできるが、流れの方向や流速の大きさが異なる箇所が散見される。RANSでは渦

が渦粘性としてモデル化されているため、詳細な渦運動が表現されていないことが原因と考えられる。

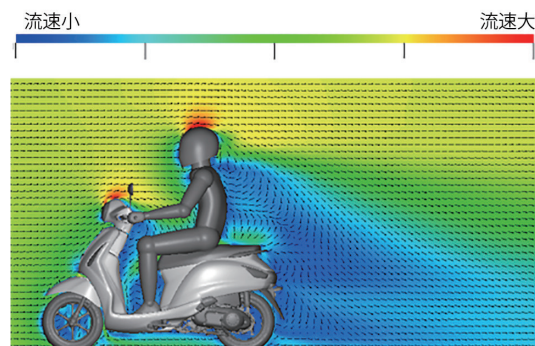


図7 FVM + RANS ある瞬間の流れ場

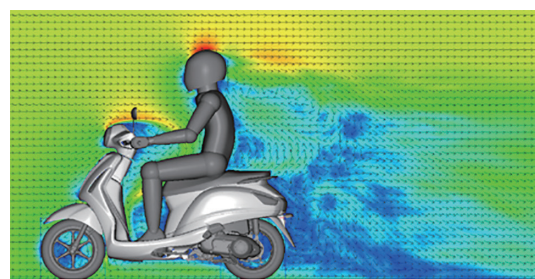


図8 LBM+VLES ある瞬間の流れ場

次に、車両センターLH断面、エアクリーナ近傍HW断面での時間平均ほこり濃度分布を、FVM+RANS+拡散ガス(図9)、LBM+VLES+拡散ガス(図10)、LBM+VLES+質量粒子・初速あり(図11)の順で示し、比較を行う。

まず、図9と図10の比較から、LBM+VLESでは流れ場の違いによって拡散が促進された結果となっていることが分かる。そして、図10と図11の比較から、質量粒子・初速ありのダストモデルは、慣性力により流れ場に完全に従わない粒子が存在するために、アンダーカウル下や後流などの濃度分布が異なっていることが分かる。

解析方法の妥当性確認として、実機走行時の濃度計測結果と解析結果の比較を行う。実機計測では、粒子を十分捕捉可能な光散乱方式の粉じん計を用い、A/C_inと車両後流3点のほこり濃度の計4点を計測した(図12)。

以下にA/C_inのほこり濃度を基準とした各測定点における濃度倍率を示す(図13)。値は解析、実機ともに時間平均値から算出している。このグラフから、“LBM+VLES+質量粒子・初速あり”が最も実機と傾向が合っていることが定量的に確認できた。

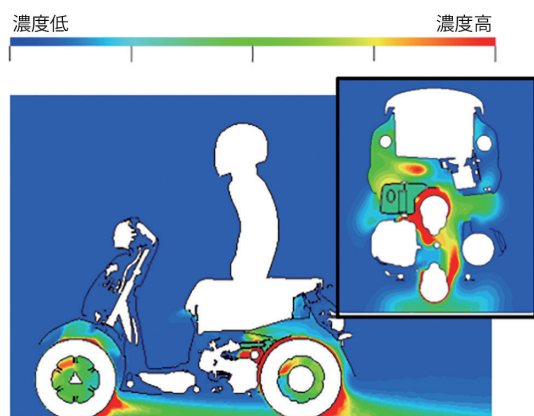


図9 FVM+RANS+拡散ガス 時間平均濃度場

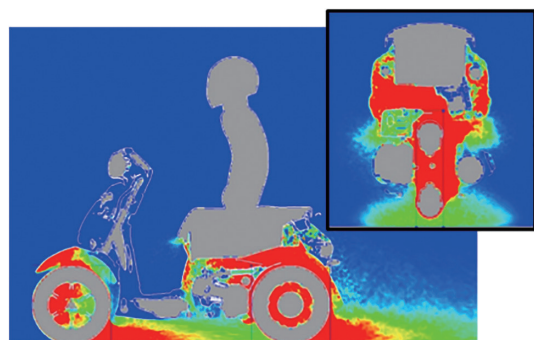


図10 LBM+VLES+拡散ガス 時間平均濃度場

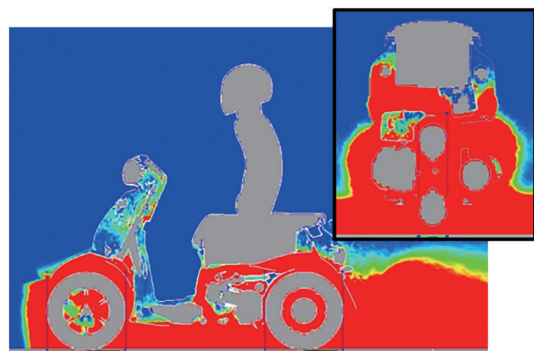


図11 LBM+VLES+質量粒子・初速あり 時間平均濃度場

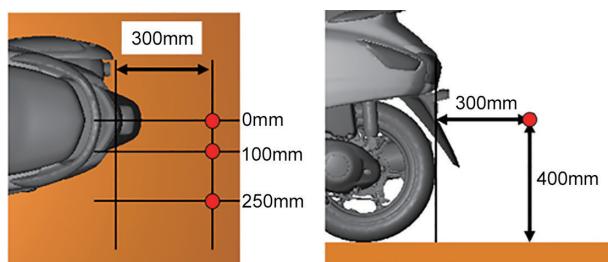


図12 測定箇所

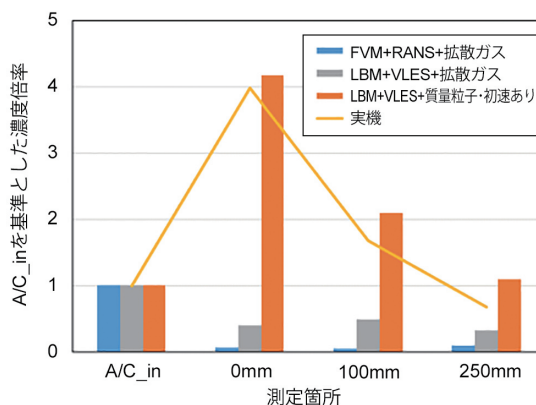


図13 A/C_inを基準とした測定点濃度倍率

参考として、開発での運用において重要となる以下項目について、各解析方法を定性的にA>B>Cで評価し、記載する(表2)。

- ・解析費用(1ケースあたりのソフト+ハード費用)
- ・解析時間
- ・現象再現性

表2 解析方法の評価

解析方法	費用	時間	再現性
(1) FVM+RANS+拡散ガス	A	A	C
(2) LBM+VLES+拡散ガス	C	B	C
(3) LBM+VLES+質量粒子	C	B	A

5-2. 仕様差の確認

本節では、前節にてほこり入り現象がよく再現された“LBM+VLES+質量粒子・初速あり”の解析方法を用い、ほこり入り対策アイテムの仕様差に関して実機と傾向が合っているかを確認する。

仕様差として、シートボックス底部からエアクリーナにたれているフラップの有無による違いを確認する(図14)。ここで、フラップがある状態をSTDとする。実機計測方法は前節同様で、A/C_inのほこり濃度に着目する。

以下に結果を示す。まず、STDのA/C_inほこり濃度を基準とした濃度倍率グラフは下図の通りである(図15)。値は解析、実機ともに時間平均値から算出している。

図15からわかるように、フラップの有無という仕様差の傾向が実機と解析で非常に良く合っており、A/C_inへのほこり入り改善を机上検討する上で、十分に有用な解析方法が確立できた。

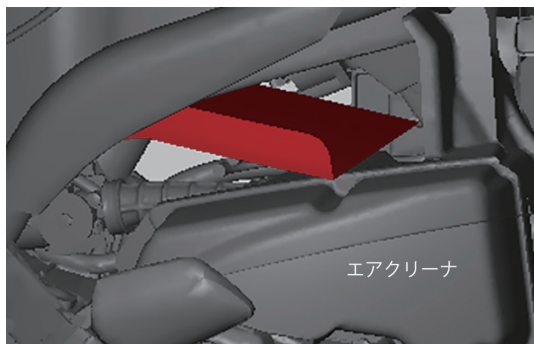


図14 フラップ形状(図中赤色表面)

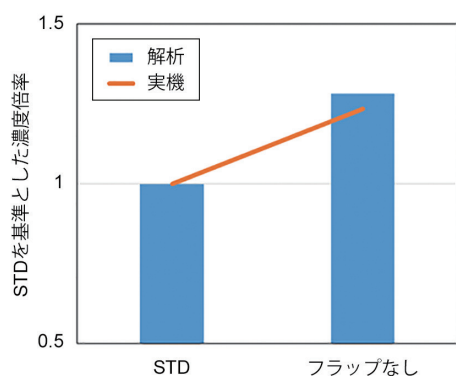


図15 STDを基準とした濃度倍率

また、リヤ周りの車両センターLH断面における、ある瞬間の濃度分布は、STD、フラップなしでそれぞれ下図の通りである(図16、図17)。これらの図から、フラップがなくなることによりタイヤに巻き上げられたほこりが前方に拡散し、エアクリーナ周辺のほこり濃度が高くなる。結果、フラップなしの仕様ではA/C_inほこり濃度が高くなったものと推測できる。

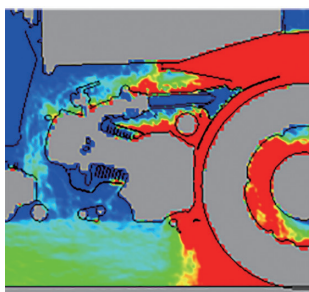


図16 STD

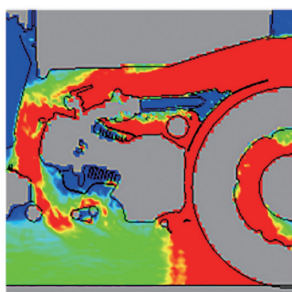


図17 フラップなし

定常性に起因する乱流拡散と、ダストモデルを厳密に考慮することで、実機との相関が高い解析が実施可能となった。

製品に求められる要求レベルが上がり、開発の効率化も求められる中で、日進月歩の解析技術の効果を見定め、今後も製品開発に役立つ解析方法を構築していく。

参考文献

- [1] Joel H. Ferziger, Milovan Peric: 小林敏雄, 谷口伸行, 坪倉誠訳: コンピュータによる流体力学
- [2] 葛原道久, 高田尚樹, 片岡武: 格子気体法・格子ボルツマン法 —新しい数値流体力学の手法—

著者



三宮 宏之
Hiroyuki Sanguu
PF車両ユニット
PF車両開発統括部
車両実験部



新田 慶
Kei Nitta
PF車両ユニット
PF車両開発統括部
車両実験部



川上 拓也
Takuya Kawakami
PF車両ユニット
PF車両開発統括部
車両実験部

6

おわりに

当社で実施しているほこり入り解析を紹介した。
ほこり入り解析の現象再現性の向上に関しては、流れの非