

エンジン用ブリーザシステムの オイル分離挙動シミュレーション

Simulation of Oil Separating Behavior for Engine Breather System

芳 賀 誠*

Makoto HAGA

笠 原 巧**

Takumi KASAHARA

要 旨

レシプロエンジンのブリーザシステムには、クランクケース内を換気する際にブローバイガス中よりオイルミストを分離する機能が求められる。ブリーザチャンバ内の気液分離は液体の分裂や合体を伴う複雑な現象であるため、一般的な数値計算手法である格子法では計算格子の変形や移動量が著しくなり、直接予測解析をすることが困難である。

本研究では自由表面や液体の分裂、合体といった複雑な流体现象の解析に適した粒子法に着目し、ブリーザチャンバのオイル分離挙動を予測することを試みた。計算にはMoving Particle Semi-implicit法を使用し、格子法によって事前に算出した気体の速度場履歴を境界条件として粒子の運動を計算する空気抵抗モデルを導入した。また粒子の粗視化モデルにより、粒子への空気抵抗力の作用が実際のオイルミストと同等となるよう考慮した。

本シミュレーションと実機可視化結果を比較し、オイルの飛散や分離過程の傾向が定性的に一致することを確認した。以上により、粒子法を活用したオイル分離機能の予測手法を確立した。

ABSTRACT

The breather system of a reciprocating engine requires a function for separating the oil mist from the blow-by gas when ventilating the inside of the crankcase. Gas-liquid separation behavior inside the breather chamber is a complex phenomenon that involves liquid breakup and coalescence. Directly predicting this behavior by grid method, which is a typical numerical calculation method, is challenging, because the calculation grid deforms and moves excessively.

This study focused on a particle method suited to the analysis of complex fluid phenomena such as free surfaces and liquid breakup and coalescence, and attempted to predict the oil separating behavior of the breather chamber with the Moving Particle Semi-implicit method. An air resistance model was applied to accurately simulate particle motion based on the gas velocity field history that was calculated in advance by the grid method. In addition, a particle coarse-graining model was newly proposed to take into account the effect of air resistance on oil mist.

It was confirmed that the simulated oil scattering and separating behavior qualitatively agreed with the experimental results by high-speed camera, and that the oil separating behavior can be predicted by particle method.

1. はじめに

レシプロエンジンのクランクケース内部には燃焼室より吹き抜けた未燃ガスと燃焼ガス（総称：ブローバイガス）が充満しており、以下の課題を引き起こす原因となる。それはケース内圧の増加によるオイル漏れや大気汚染物質の放出、燃料やガス中の水分によるエンジンオイルの希釈、ガス中のNO_x成分によるオイル劣化である。上記の課題に

対処するため、一般的なレシプロエンジンにはブローバイガスを吸気経路へと排出し、新気をクランクケースに取り入れることでケース内を換気するブリーザシステムが搭載されている。ブローバイガスは多量のオイルミストを含有しており、吸気経路へのオイルの混入はオイル消費量の増加、スロットルバルブや吸気バルブの汚損、オイル燃焼に伴うエミッションの低下を招く。このことからブリーザチャンバにはブローバイガスとオイルミストで構成される

* 四輪 R&D センター

** プロメテック・ソフトウェア株式会社

混相流からオイルを分離する機能が求められる。

このオイル分離機能を一般的な数値計算手法である格子法によって予測評価する試みがなされているが^{(1),(2)}、オイルの分裂や合体、壁面に付着したオイルが再度気流に持ち去られるような動的な挙動は、計算格子の変形や移動量が著しくなり、計算によって予測することが困難である。したがってオイル分離のメカニズムには不明確な点が多く、ブリーザチャンバの全ての諸元をCFDにより決定するには至っていない。

本研究では格子を使用せず流体を粒子で離散化することにより、ラグランジュ的に流体の運動を計算する粒子法に着目した(Fig. 1)。粒子法は粒子によって流体の位置を直接取り出せるため、自由表面や分裂、合体を伴う複雑な流体の解析に適している。本研究ではMoving Particle Semi-implicit(MPS)法を用いたプロメテック・ソフトウェア株式会社製の流体解析ソフトウェアParticleworks⁽³⁾を使用し、空気抵抗モデル、粒子の粗視化モデル、表面張力モデルを導入することによってブリーザチャンバ内のオイル分離挙動を解析する手法を構築した。

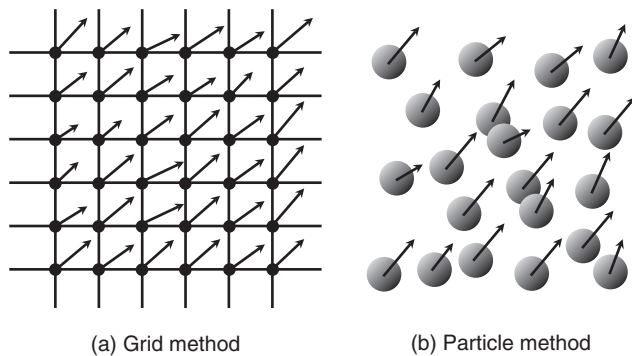


Fig. 1 Concepts for grid and particle methods

2. ブリーザシステム

2.1. ブリーザシステムの概要

ブリーザシステムの一例をFig. 2に示す。ブリーザシステムは別名Positive Crankcase Ventilation(PCV)システムと呼ばれ、部分負荷運転時におけるスロットルバルブ下流の負圧を利用して吸気経路へとブローバイガスを排出し、スロットル上流の別経路より新気を吸入することでクランクケース内部を換気する。ブローバイガスの流量は吸気管圧力に応じたPCVバルブの開度によってコントロールされるが、アイドルおよび全負荷時にはPCVバルブは全閉となり、ブローバイガスは新気導入路を逆流して吸気管へと排出される。この場合ブリーザシステムのブローバイガス排出路は2系統存在し、オイル分離機能を有するブリーザチャンバも2系統必要となる。

2.2. ブローバイガスとオイルミスト

ブローバイガスの流量はエンジンの排気量、ピストンリングやシリンダの摩耗の程度により異なるが、2 L 直列4気筒エンジンでは最大30 L/minを超える流量となる。ブローバイガスに含有するオイルミストの量は、エンジンのどの部位からガスを取り出すかで大きく異なるため、取り出し口の選定によってチャンバ内に流入するオイル量が決まる。オイルミストの粒径はガソリンエンジンの場合、およそ1 μm から10 μm の分布をとる。

2.3. オイル分離手法

オイル分離の手法は主にラビリンス式、インパクト式、サイクロン式に大別される。ラビリンス式およびインパクト式の例をFig. 3に示す。ラビリンス式はチャンバ内の仕切り板により流路を長く取り、そこをガスが流れる過程で重力によってオイルミストを分離する手法である。一方、インパクト式はガスを衝突板へ衝突させ、慣性力によってオイルミストを分離する手法である。サイクロン式はガスに旋回流を形成させ遠心力によってオイルミストを分離する手法である。

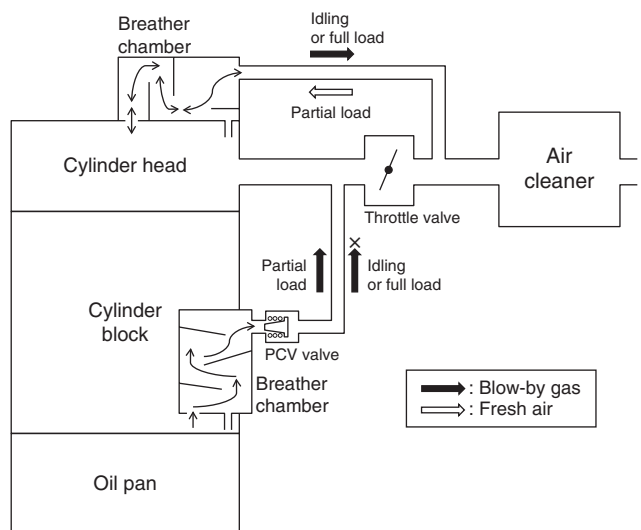


Fig. 2 Breather system

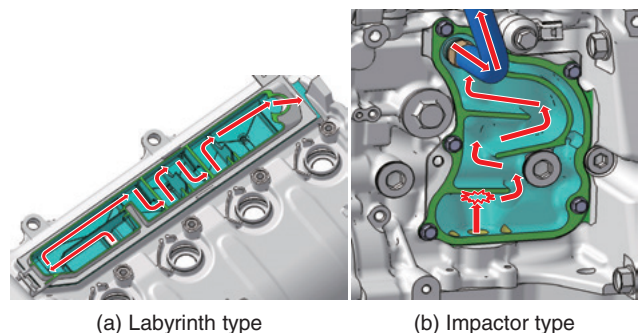


Fig. 3 Breather chambers

3. シミュレーション手法

3.1. MPS 法の概要

MPS 法とは非圧縮性流れの半陰的アルゴリズムを導入した手法であり、圧力や粘性による粒子間の相互作用を Fig. 4 に示す粒子 i の影響半径 r_e 内に存在する粒子との距離により重み付けすることで支配方程式を離散化する^{(4),(5)}。支配方程式は以下のラグランジュ法で記述された連続の式(質量保存則)である式(1)と、Navier-Stokes 方程式(運動量保存則)である式(2)を使用する。

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = -\frac{\nabla P}{\rho} + \nu \nabla^2 \vec{u} + \vec{g} \quad (2)$$

ρ : 密度, $\vec{u}$: 速度, P : 圧力, ν : 動粘性係数

$\vec{g}$: 重力加速度, $\frac{D}{Dt}$: ラグランジュ微分

3.2. オイル分離挙動シミュレーションへの応用

ブリーザチャンバ内部の流体はグローバイガスとオイルで構成された気液混相流である。MPS 法の場合、気体と液体のように密度差の大きい流体を同時に粒子として解くと圧力の計算が不安定になる⁽⁵⁾。そこで本研究では気体の流れを格子法で事前に解き、それを境界条件として粒子の運動を解く空気抵抗モデルを導入した。シミュレーションの手順を Fig. 5 に示す。さらに粒子挙動の計算精度を向上させるため粒子の粗視化モデルおよび表面張力モデルを導入した。以下各モデルの内容を説明する。

3.2.1. 空気抵抗モデル

空気抵抗モデルでは粒子は式(2)に空気抵抗項を追加した以下の Navier-Stokes 方程式の式(3)を満たしながら運動する。

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = -\frac{\nabla P}{\rho} + \nu \nabla^2 \vec{u} + \vec{g} - \frac{1}{m} \vec{D} \quad (3)$$

m : 液体質量, $\vec{D}$: 空気抵抗

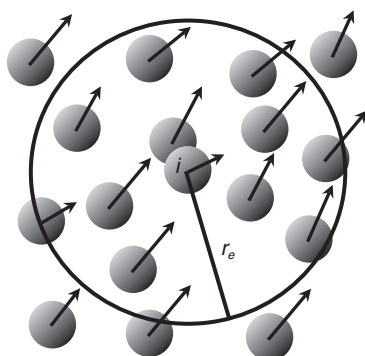


Fig. 4 Effective radius for MPS method

$\vec{D}$ は以下の式(4)のように定義される。

$$\vec{D} = \frac{C_D}{2} \rho_{air} |\vec{u}_l - \vec{u}_g| (\vec{u}_l - \vec{u}_g) S \quad (4)$$

C_D : 抗力係数, ρ_{air} : 空気の質量密度, $\vec{u}_l$: 液体速度
 $\vec{u}_g$: 気体速度, S : 液体の代表面積

3.2.2. 粒子の粗視化モデル

オイルミストの運動を精度よく計算するためには MPS 法で使用する計算粒子(以後、MPS 粒子)の径を実際のオイルミスト粒径(1 μm から 10 μm)と同等とすることが望ましい。しかしそれでは流入するオイルの体積に対して莫大な粒子数が必要となり、実用的な時間内で結果を得ることができない。実用性を考慮すると MPS 粒子の径は 250 μm から 500 μm 程度に設定する必要がある。そこで本研究では空気抵抗による MPS 粒子への作用が実際のオイルミストと同等となるよう、MPS 粒子をグループ化した液滴群として粗視化した。粗視化の概念図を Fig. 6 に示す。粗視化した MPS 粒子とオイルミスト粒径の関係は以下になる。

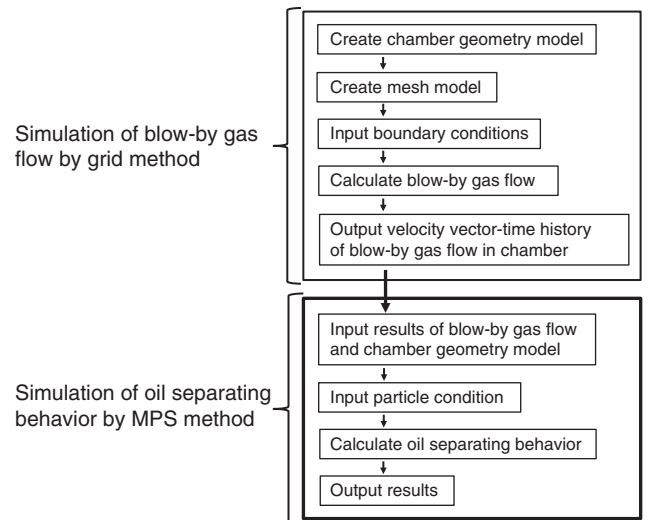


Fig. 5 Flowchart of simulation

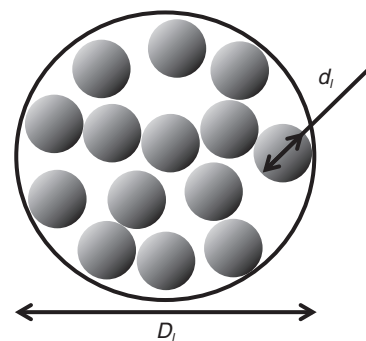


Fig. 6 Coarse graining model

$$R_{cg} = \frac{D_l}{d_l} \quad (5)$$

$$N = R_{cg}^3 \quad (6)$$

R_{cg} : 粗視化率, D_l : MPS 粒子径, d_l : オイルミスト粒径
 N : グループ化した液滴数

また式 (4) の抵抗係数 C_D を以下の式 (7), 式 (8) によって与える⁽⁶⁾.

$$Re = \frac{d_l |\vec{u}_l - \vec{u}_g|}{\nu_g} \quad (7)$$

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{Re^{2/3}}{6} \right) & Re \leq 1000 \\ 0.424 & Re > 1000 \end{cases} \quad (8)$$

Re : レイノルズ数, ν_g : 気体動粘性係数

粗視化した MPS 粒子に加わる空気抵抗力はグループ化したオイルミストの数 N 個に加わる力の合力とし, MPS 粒子は以下の式 (9) を満たして運動する.

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = -\frac{\nabla P}{\rho} + \nu \nabla^2 \vec{u} + \vec{g} - \frac{R_{cg}^3}{m_l} \vec{D} \quad (9)$$

m_l : オイルミスト質量

3.2.3. 表面張力モデル

気液分離過程での液体の表面張力の影響を考慮するため, 表面張力のポテンシャルモデルを導入した. 表面張力の影響を受ける粒子は以下の Navier-Stokes 方程式の式 (10) を満たして運動する.

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \vec{u} + \vec{g} + \nabla \Phi \quad (10)$$

第 4 項はポテンシャルモデルの表面張力項であり, 以下の式 (11), 式 (12) のように計算される.

$$\nabla \Phi = \sum_{j \neq i} \frac{d\phi}{dr_{ij}} \cdot \frac{\vec{r}_{ij}}{|\vec{r}_{ij}|} \quad (11)$$

$$\Phi = C\phi \quad (12)$$

i, j : 粒子番号, $\vec{r}_{ij}$: 粒子 i から j への位置ベクトル

ϕ はポテンシャルエネルギーを表し, プロメテック・ソフトウェア独自の式を用いた.

C はポテンシャル力の大きさを決めるポテンシャル係数であり, 液体の表面張力係数に比例した値である.

さらに粒子と壁面間では, 以下の式 (13) のポテンシャル係数 C_{fs} を使用して濡れ性を考慮する.

$$C_{fs} = \frac{1}{2} (1 + \cos \theta) C \quad (13)$$

θ : 接触角

3.3. 粗視化モデルの必要性

粗視化モデルを検証するため, 事前にガス流れを計算した簡易形状チャンバに対して, 粗視化をしない場合 ($R_{cg} = 1$) と粗視化率 R_{cg} を 100 とした MPS 粒子をそれぞれ流入させ粒子の挙動を比較した. 初期粒子間距離 (MPS 粒子径) は 500 μm とした. Fig. 7 にシミュレーション結果を示す. 粗視化をしない場合 ($R_{cg} = 1$), MPS 粒子は実際のオイルミスト粒径 (1 μm から 10 μm) より大きい 500 μm のオイルミストに相当する. そのため空気抵抗力による粒子の速度変化が小さく, 粒子は表面張力によって徐々に凝集し 0.5 s 時点で流入孔が完全に閉塞した. 一方, 粗視化率 R_{cg} が 100 の場合, MPS 粒子は 5 μm 相当のオイルミストと同等の空気抵抗力の作用を受けるため, 流入孔が閉塞することなく粒子がチャンバ内に飛散していく様子が確認できた.

以上からブローバイガス中のオイルミストの挙動を計算するために粒子の粗視化が必要であると判断し, 以後実験を想定した計算には実際のオイルミスト粒径の 10 μm と 5 μm に相当する粗視化率 $R_{cg} = 50$ と $R_{cg} = 100$ を設定して計算を実施した.

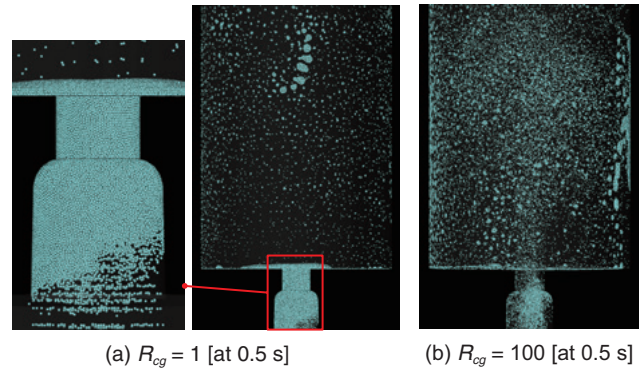


Fig. 7 Comparison of particle movement between $R_{cg} = 1$ and $R_{cg} = 100$

4. オイル分離挙動シミュレーション

4.1. シミュレーション条件

4.1.1. シミュレーション対象

今回は代表としてシリンダブロック内蔵型ブリーザチャンバのインパクト式セパレータをシミュレーション対象とした. 事前に実機のブローバイガス流入孔径と衝突板距離をパラメータとしたオイル分離能力検証テストにより, 分離能力差が顕著だった 2 仕様を比較対象とした. Fig. 8 および Table 1 にチャンバの外観図と諸元を示す. TYPE1 は流入孔径が $\phi 15$ mm, 流入孔から衝突板の距離が 30 mm で, TYPE2 は流入孔径が $\phi 6$ mm, 流入孔から衝突板の距離が 15 mm である.

Table 1 Specifications of breather chambers

Breather chamber	TYPE 1	TYPE2
Oil separation performance	Good	Poor
Volume [cm ³]	215	
Distance to first collision plate from inlet hole [mm]	30	15
(1) Blow-by gas inlet hole		
Diameter [mm]	15	6
(2) Blow-by gas outlet hole		
Diameter [mm]	7	
(3) Connecting channel to cylinder head		
Diameter [mm]	7	
(4) Oil drainage holes		
Diameter [mm]	8	

4.1.2. 格子法によるブローバイガス流れの計算

空気抵抗モデルにおいて粒子に空気抵抗力として作用するガス流れ場を算出するため、格子法によりチャンバ内のガス流れを計算した。計算はオイル分離能力検証テスト時にブローバイガス流量が最大の 40 L/min を計測したエンジン回転数 6000 rpm の運転条件と同等条件で実施した。境界条件としてガス流入孔 (1) にはクランクケース内の圧力脈動、試験時に大気開放としたガス流出孔 (2) には大気圧、連通孔 (3) にはシリンダヘッド内部の圧力脈動を設定した。なおオイル排出孔 (4) はオイルパン内の油中に接続するため境界条件の設定はしていない。格子法によるシミュレーション結果を Fig. 9 に示す。チャンバには圧力脈動によってガスが周期的に流入し、衝突板への最大衝突速度は TYPE1 の場合に 30 m/s, TYPE2 の場合に 40 m/s となった。本結果を Particleworks に入力し、空気抵抗モデルの境界条件とした。

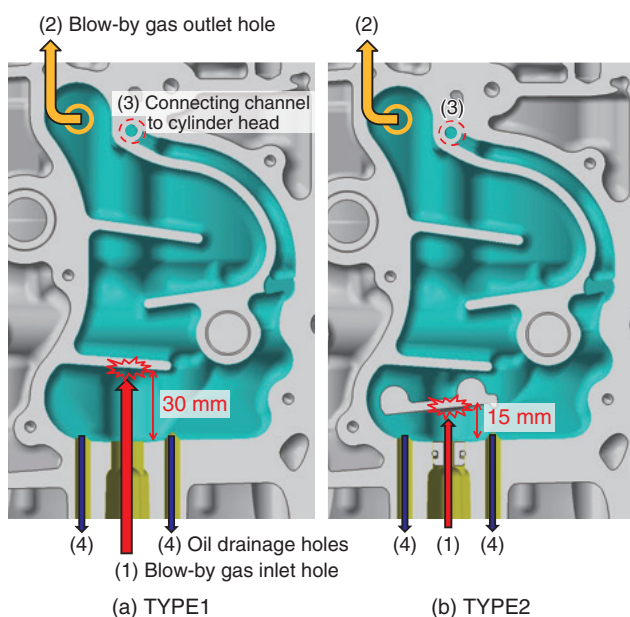


Fig. 8 Schematic of measured breather types

4.1.3. 粒子法のシミュレーション条件

オイルミストの流量はブローバイガスの体積流量の 1% と仮定し、その流量に相当する MPS 粒子を流入孔 (1) からガス流入速度と同期して流入するように設定した。また MPS 粒子の物性値には 80℃ におけるオイルの動粘性係数、表面張力係数、接触角を入力した。MPS 粒子径は 500 μm とし、粗視化率 R_{cg} が 50 (オイルミスト粒径 10 μm 相当) と 100 (5 μm 相当) の 2 条件で計算を実施した。

4.2. シミュレーション結果

4.2.1. 粒子の挙動

TYPE1 における粗視化率 R_{cg} が 100 の時の MPS 粒子の挙動を Fig. 10 に示す。MPS 粒子は速度ベクトル表示とし、図中の数字は圧力脈動と対応している。粒子はケース内の圧力脈動により変動する流れ場の作用によって周期的にチャンバ内に流入し、衝突板へと衝突する様子が確認できる。

TYPE1 と TYPE2 における衝突板近傍の粒子の運動を Fig. 11 に示す。図中の矢印は壁面に付着した粒子の流れを示している。TYPE1 では衝突板へ衝突した粒子がガス主流から分離してチャンバ左右の壁面に付着していく。特に衝突板の右端部から飛散する粒子の方向が、脈動によって周期的に変化する挙動が特徴的である。また左右壁面へ付着した粒子は壁面に沿ってチャンバ底部へと流れ、排出孔へ向かう流れを形成していることが確認できる。一方、

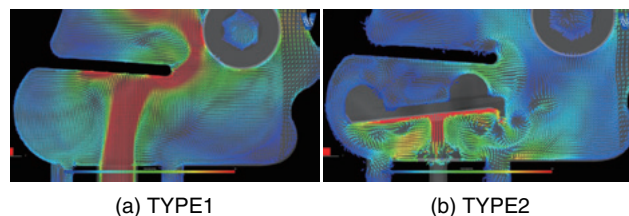
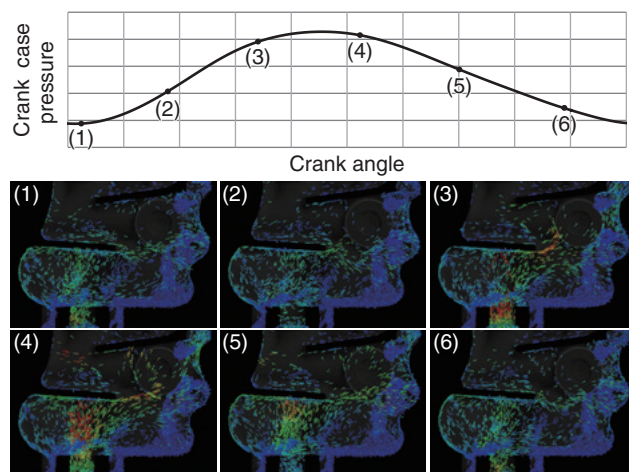


Fig. 9 Simulation results of flow in breather chamber by grid method

Fig. 10 Simulation results by MPS method [TYPE1, $R_{cg} = 100$]

TYPE2 では排出孔付近の粒子が気流によって吹き飛ばされており、特に右壁面に堆積した粒子は衝突板で偏向した気流の影響によりチャンバ底部へは流れず、気流によって再度巻き上げられチャンバ下流へと流されていく様子が確認できる。つまり TYPE2 は一度分離されたオイルが再度気流に巻き上げられやすい構造であると判断できる。

4.2.2. 粗視化率による粒子挙動の違い

TYPE1 における粗視化率 R_{cg} が 50 と 100 のシミュレーション結果を Fig. 12 に示す。粗視化率の違いによる粒子の挙動を比較すると、 $5\ \mu\text{m}$ のオイルミストに相当する $R_{cg} = 100$ の方が粒子はより下流まで飛散しており、左右の排出孔へ流れる粒子の割合も異なる傾向がみられる。

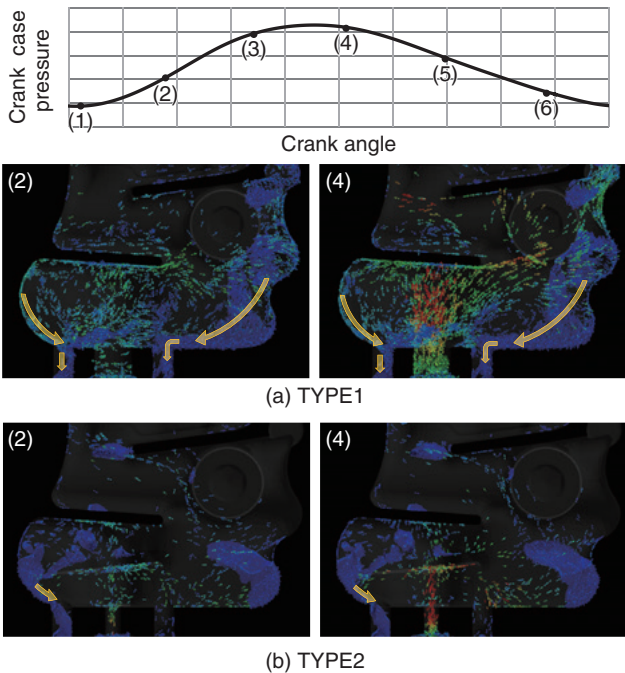


Fig. 11 Velocity vectors of MPS particles [$R_{cg} = 100$]

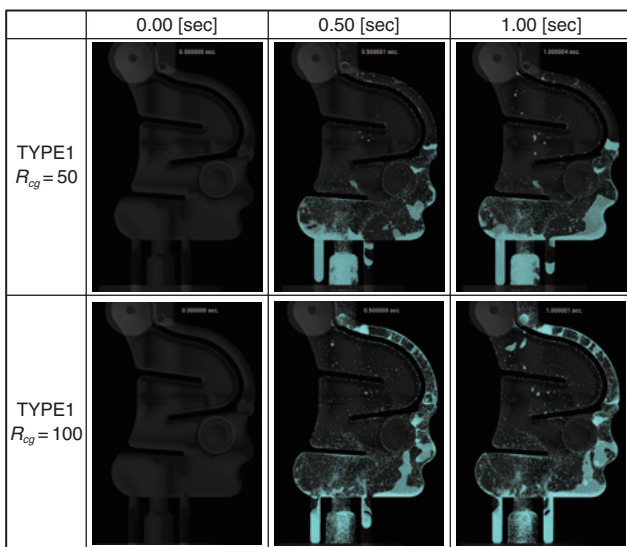


Fig. 12 Comparison of particle movement between $R_{cg} = 50$ and $R_{cg} = 100$

5. シミュレーション結果の検証と考察

5.1. 実機可視化試験によるシミュレーション結果の検証

シミュレーション結果の検証のためブリーザチャンバの実機可視化試験を実施した。撮影は解析条件と同等であるブローパイガス量 $40\ \text{L/min}$ を計測したエンジン回転数 $6000\ \text{rpm}$ の運転時とし、ハイスピードカメラを使用してチャンバ内部の様子を可視化撮影した。フレームレートは $15000\ \text{fps}$ 、シャッタースピードは $1/30000\ \text{s}$ とした。

Fig. 13 に可視化結果の静止画と特徴的なオイル挙動を模式的に表す。図中の数字は圧力脈動と対応している。TYPE1 ではクランクケース内の体積変化により生じる圧力脈動によってオイルミストが周期的にチャンバ内に流入し、衝突板へ衝突して飛散する様子が観察された。特に衝突板の右端部では、脈動によって気流の方向が変化する様子が顕著に現れており、オイルの飛散する方向が周期的に変化する様子が観察された。また、チャンバの左右壁面に付着したオイルが重力によって徐々にチャンバ底部へと落下する様子が観察された。これらの傾向は粗視化率 50 や 100 のシミュレーション結果とよく一致している。

一方、TYPE2 では TYPE1 と同様に周期的にオイルミストが流入する様子が観察されたが、チャンバ右底部にオイルの液塊が形成されていることが確認された。この液塊は衝突板により偏向したガス流れと対向するため排出孔の方向へは流れずに気流によって巻き上げられ、その一部がチャンバの下流に向かって流される様子が観察された。TYPE2 の解析結果では液塊の形成は見られないもののチャンバ右壁面に付着した粒子が排出孔へ流れず堆積し、堆積した粒子が再度気流に巻き上げられ下流に流されるという類似の傾向が確認された。よってシミュレーション結果は液塊が形成される初期段階を模擬していると考えられる。

以上より、ブリーザチャンバ内の巨視的なオイルの挙動がシミュレーションと実機とで定性的に一致したことから、MPS 法に空気抵抗モデル、粗視化モデル、表面張力モデルを導入することによってチャンバ内部の巨視的なオイル分離挙動を予測できることを確認した。

5.2. 粒径の異なるオイルミストの挙動予測

オイル分離性能はオイルミストの粒径によっても左右されると考えられる。そこで今回シミュレーションをおこなった $1.0\ \text{s}$ までの計算結果から、粗視化率 R_{cg} が 50 (オイルミスト粒径 $10\ \mu\text{m}$ 相当) と 100 ($5\ \mu\text{m}$ 相当) の場合の流入粒子と分離粒子の総数をカウントし、粒径の異なるオイルミストの挙動を分析した。Fig. 14 に粗視化率 R_{cg} が 50 と 100 のそれぞれの場合について、流入粒子と左右排出孔へ落下した粒子の数から算出した流入流量と分離流量の時間履歴を示す。流入流量の履歴を比較すると、 $5\ \mu\text{m}$ のオイルミストに相当する $R_{cg} = 100$ の方がチャンバ内へ流入す

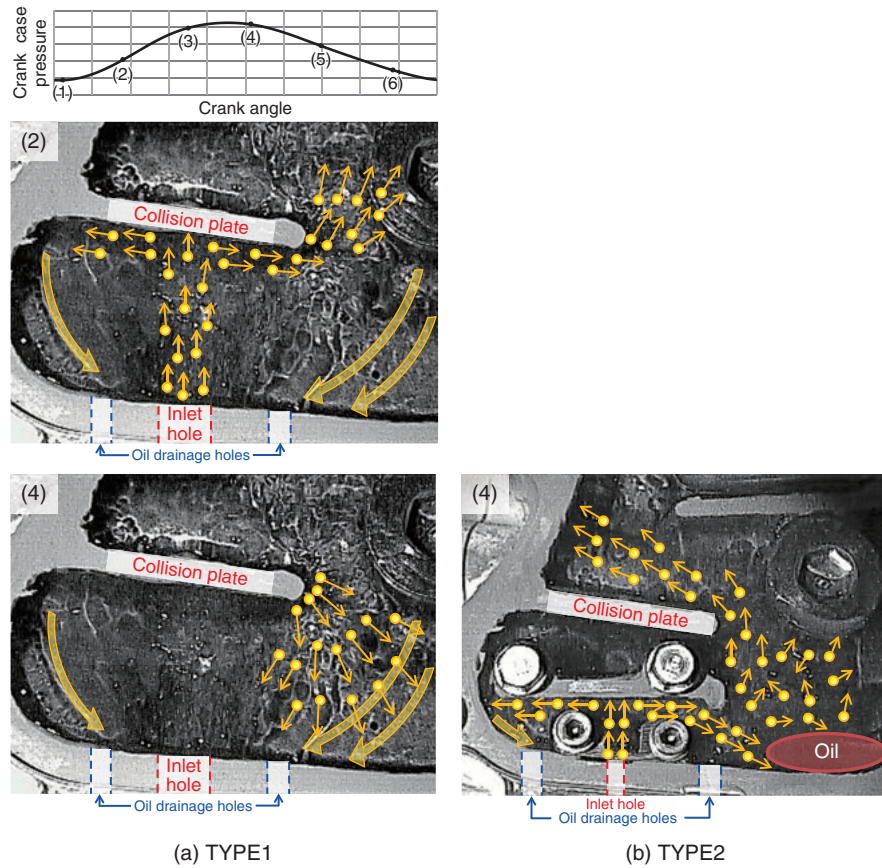
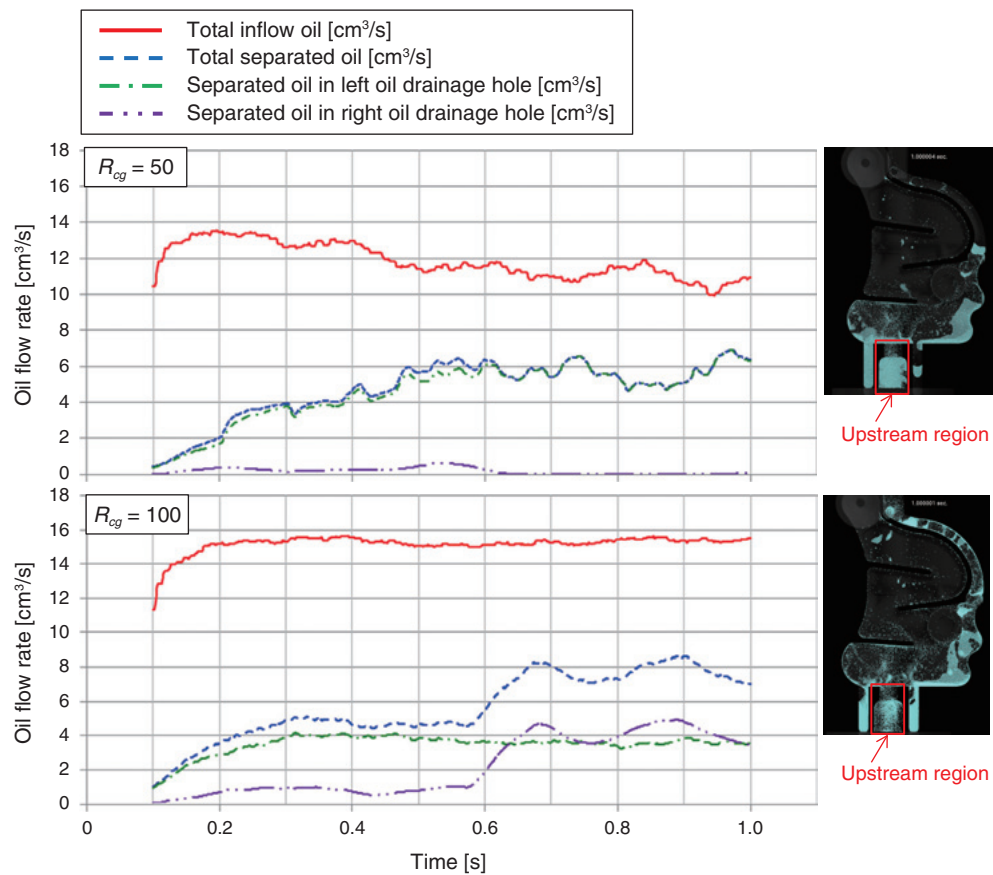


Fig. 13 Results of visualized measurement

Fig. 14 Comparison of oil flow rate between $R_{cg} = 50$ and $R_{cg} = 100$

る粒子の数が多くことがわかる。これは粒径の小さなオイルミストはチャンバ内へ流入しやすく、粒径の大きなオイルミストはチャンバ本体の上流領域(図中赤枠)で分離されやすい傾向があることを示している。また左右排出孔の流量履歴を比較すると、10 μm のオイルミストに相当する $R_{cg}=50$ の方が左の排出孔から分離される粒子が多いことから、粒径の大きなオイルミストは衝突板に衝突してチャンバ左側へ飛散しガス主流より分離される傾向があることを示している。

以上のように粗視化率をパラメータとすることで粒径が異なるオイルミストの挙動を分析することが可能であり、本手法を活用することで捕捉の対象となるオイルミスト粒径に合わせたチャンバ構造の検討が可能になると考えられる。

6. まとめ

粒子法によって一般的な数値計算手法である格子法では解析が困難であったブリーザシステムのオイル分離挙動を予測する手法を構築し、以下の成果を得た。

- (1) ブリーザシステムのオイル分離挙動を予測する手段として、MPS法に空気抵抗モデル、粒子の粗視化モデル、表面張力モデルを導入する計算手法を構築した。
- (2) シミュレーションと実機可視化試験の結果を比較し、ブリーザチャンバ内の巨視的なオイルの挙動がシミュレーションと実機とで定性的に一致することを確認した。
- (3) 粗視化率をパラメータとすることで粒径が異なるオイルミストの挙動を分析することが可能であり、捕捉の対象となるオイルミスト粒径に合わせたチャンバ構造の検討が可能になる。

7. あとがき

今後、オイル分離能力の定量的な予測をおこなうために、微小液滴の壁面衝突挙動のモデル化やオイルミストの粒径分布を反映した解析手法を構築していく予定である。

参考文献

- (1) 佐藤一成, 石川学, 松岡敏光: オイルミストセパレータ性能予測技術の開発, 自動車技術会論文集, Vol.30, No.2, p75-80(1999)
- (2) 遠藤一豊, 小林章宏, 須藤正範: 小型・高性能オイルミストセパレータの開発, 自動車技術会学術講演前刷集, No.62-07, p13-16(2007)
- (3) <http://www.prometech.co.jp/particleworks.html>
- (4) 越塚誠一: 粒子法による流れの数値解析, ながれ 21,

p.230-239(2002)

- (5) 越塚誠一: 粒子法 (計算力学レクチャーシリーズ 5), 日本計算工学会, 丸善出版株式会社, 156p.(2005)
- (6) 高木正英: 燃料噴霧シミュレーションの現状と課題, 海上技術安全研究所報告, 第8巻, 第2号, p.209-214(2008)

■著 者■



芳賀 誠



笠原 巧