

[共同研究成果]

自動車エンジン用ピストンリングまわりの気液二相流解析

川本裕樹^{*1}, 蔵本結樹^{*1}, 大栗拓実^{*1}, 高橋俊^{*1}, 落合成行^{*1}, 畔津昭彦^{*1}鹿野みどり^{*2}, 曾我隆^{*2}^{*1} 東海大学^{*2} 日本電気株式会社

自動車エンジンの高効率化のために低張力ピストンリングや低粘度オイルが使用されるが、これらの取り組みによりオイル消費の増加を招くことが知られている。本研究ではこのメカニズムの把握のため埋め込み境界法に基づく気液二相流解析を実施した。オイルリングを考慮した二次元解析においてはリング溝内でのオイル挙動について評価した。リングパックまわりの三次元解析では合口隙間を経由したオイルの輸送が確認された。この解析では隙間が一直線上に配置された場合にオイルの上昇が顕著に見られ、ピストンリングに対する二相流解析の適用性が示された。

1. 研究背景

CO₂ 排出量削減などの環境問題やエネルギー問題の観点から、様々な分野において省エネルギー化が求められている。日本国内での CO₂ 排出量は自動車や船舶などを含む運輸部門が約 18% を占めている^[1]。この運輸部門のうち自動車に起因する割合は 86% であるため、国内の CO₂ 排出量の約 15% が自動車によるものといえる。このことから各所で自動車のエンジンの効率向上に向けた取り組みが進められている。

内燃機関の高効率化に対し摩擦損失の低減は不可欠である。自動車の摩擦損失のなかでもエンジンに関連する要素の割合は大きく^[2]、特にシリンダ内部において往復運動を行うピストンまわりの摩擦低減は効率向上に寄与するといえる。このピストン系の摩擦に対してはシリンダとピストンリング間の潤滑が重要な要素となる。ピストンリングはピストン外周に設けられた溝に取り付けられる部品であり潤滑や燃焼ガスのシールに加え、ピストンの姿勢安定や冷却を担う部品である。一般に一つのピストンに対し 3 点のリングが取り付けられ、主に気密性を保つコンプレッションリングが 2 本、オイルの量を調整するオイルリングが 1 本使用される。

ピストンリングに関連する損失低減への取り組みとして、低張力ピストンリングや低粘度オイルの使用が挙げられる。しかしこれらの取り組みからオイルが燃焼室内まで上昇し消費される傾向が高まる^[3-4]。またシリンダ下部より供給されたオイルの上昇に関する詳細なメカニズムは示されていない。燃焼室までのオイルの輸送経路としては図 1 の①に示すピストンリング摺動面や、②の背面および③の合口隙間が考えられる。しかし各要素がオイル消費に対して如何なる条件下でどの程度影響するかは明らかにされていない。また高温高压下のシリンダ内で高速な往復運動を行うピストン周辺のオイルの挙動の実験的な可視化には課題が残されている。このことから本研究では埋め込み境界法に基づく気液二相流解析によりピストンリングまわりのオイル挙動の予測を行う。

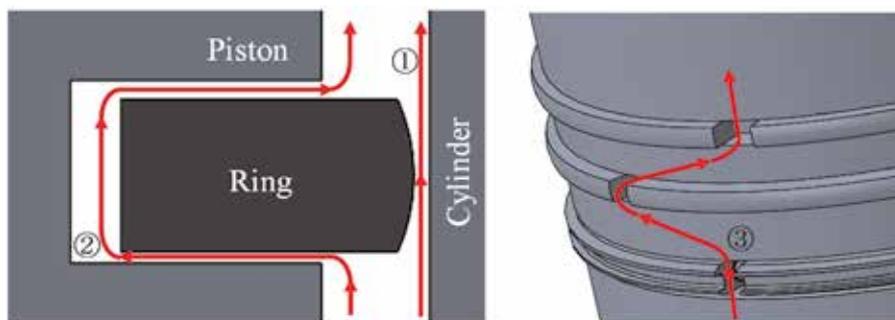


図 1 ピストンリングまわりのオイル輸送経路

先行研究^[5-6]では気液の体積分率に基づいて界面を定義する **diffuse interface model** が用いられている。このモデルを代表する **VOF 法**^[7]は市販のソフトウェアにも広く用いられており工学分野にも応用されてきた。しかしこの手法は体積保存性に優れる反面、気液界面の鮮明な表現に課題を有する。これに伴い界面付近の密度や粘性係数などの物理量も拡散的に捉える必要がある。この問題はピストンリング周辺に形成される薄い油膜の解像に影響を与えると考えられる。これに対しては気液界面を鮮明に解像可能な **sharp interface model** に基づく解析手法が有効である。本研究では各計算格子からの符号付き距離を用いて厚みの無い界面を定義する **level set 法**^[8-9]を用いる。

本研究ではオイル消費等のピストンリングまわりの諸問題のメカニズムの解明に向け、**level set 法**に基づく埋め込み境界法を用いた気液二相流解析による流体挙動の予測を行う。

2. 数値計算法

本研究における支配方程式を連続の式および非圧縮性 Navier-Stokes 方程式とする。

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d\mathbf{U}}{dt} + \mathbf{U} \cdot \nabla \mathbf{U} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{U} + \mathbf{g} + \mathbf{a}_p \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{U} は流体の速度、 P は圧力、 μ は粘性係数、 ρ は密度、 \mathbf{g} は重力加速度、 \mathbf{a}_p はピストンの加速度である。

本研究では等間隔直交格子上で二相の界面と物体形状を **level set 法**により定義する。**level set 法**は各セルから界面までの符号付き距離である **level set 関数**を用いる。ここで **level set 関数**を ϕ とすれば $\phi = 0$ が界面となり厚みを持たない境界が定義される。本研究では式(3)の **level set 関数**の移流方程式により気液界面の挙動を求める。

$$\frac{d\phi}{dt} + \mathbf{U} \cdot \nabla \phi = 0 \quad (3)$$

ここで ϕ は気液界面の **level set 関数**である。なお移流方程式の計算に伴い **level set 関数**は距離関数としての性質を維持することが困難となるため、**level set 関数**の再初期化を行う。式(3)の **level set 関数**の移流計算は界面近傍の格子のみ行い、その他は式(4)を解くことで **level set 関数**の再初期化を行う。

$$\frac{d\phi}{d\tau} + \text{sign}(\phi) + (1 - |\nabla \phi|) = 0 \quad (4)$$

また本研究では二相の界面近傍の計算格子に対して境界条件を与える **ghost fluid 法**^[10-11]を用いる。本手法は二相をそれぞれ単相流の問題として取り扱うため、アルゴリズムの簡便さに利点を有する。流体として計算するセルおよび境界条件として使用するセルの区分は、界面からの距離関数である **level set 関数**の符号と値を用いて決定する。本研究では液相の速度と気相の法線方向速度および空気の圧力を外挿して求める。これらの境界条件セルの値 q_{GF} の値は式(4)を解くことにより決定される^[12]。また表面張力は液相の圧力の境界条件として式(6)により与えられる。

$$\frac{dq_{GF}}{d\tau} + \text{sign}(\phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \cdot \nabla q_{GF} = 0 \quad (5)$$

$$P_{GF} = P_{GF} + \sigma \kappa \quad (6)$$

ここで σ は表面張力係数、 κ は曲率である。

本研究では物体表面での **non-slip 条件**の決定法として **ghost cell 法**^[13]を用いた。本手法は物体内部のセルの値の決定に **image point** が用いられる。**image point** は物体境界から伸びる法線方向に伸びるプローブの先端にある点を示す。**ghost cell** の値 \mathbf{V}_{GC} は **image point** の値 \mathbf{V}_{IP} を用いて決定する。

$$\mathbf{V}_{GC} = \mathbf{V}_{IP} - \frac{d_{IP} + d_{GC}}{d_{IP}} (\mathbf{V}_{IP} - \mathbf{V}_{IB}) \quad (7)$$

ここで、**image point** の値 \mathbf{V}_{IP} はその点を囲むセルから線形内挿により決定する。 d_{GC} は **ghost cell** から物体表面までの法線方向距離、 d_{IP} はプローブの長さ、 \mathbf{V}_{IB} は物体の移動を速度である。圧力と **level set 関数**は **image point** に内挿された値を **ghost cell** に用いることで物体近傍の勾配が 0 とな

るように決定した。

式(1)と式(2)の時間発展には Fractional Step 法^[14]を用いた。各項の離散化手法としては対流項に 5 次精度 WENO 法^[15]を、粘性項に 2 次精度中心差分法を用い、時間積分は 3 次精度 TVD Runge-Kutta 法^[16]とした。また圧力の Poisson 方程式の解法には SOR 法を用いた。式(3)の移流項には 5 次精度 WENO 法^[15]を、時間積分には 3 次精度 TVD Runge-Kutta 法を用いた。

3. オイルリング周辺の二次元解析

3.1 計算条件

本解析ではピストンリング溝内にオイルを配置し、ピストンの上下動および圧力変化による流れ場とオイル挙動の確認を行う。解析対象を 4 サイクルエンジンの 2 ピースオイルリング周辺とし、溝中心部における油膜厚さを取得した。ここで図 2 に計算領域とリング溝壁面の油膜と計算格子を示した。本項では初期の油膜厚さが 50 μm の Case 1.1 と 100 μm の Case 1.2 により溝内部の油量の影響を調査する。

計算領域上下の外部境界条件には速度に Neumann 条件を、上下の圧力境界条件には実験で計測された圧力を Dirichlet 条件として与えた。また溝内におけるリングの上下動にも実験値を使用した。ただし通常のオイルリング背面に存在するコイル状のエキスパンダは二次元空間では形状の再現が困難であるため本解析では考慮していない。また式(2)で示したように計算領域全体に負のピストン加速度を加えた。計算領域右部のシリンダライナ表面にはこれと逆方向の速度を与えることでシリンダ内の環境を模擬した。なおエンジン回転数は 3000rpm である。またオイルがピストンリング溝内に配置されているため、液相が初期体積を維持するよう level set 関数の補正^[17]を行った。計算領域内の格子は 685,000 点である。本計算は MPI による並列計算により 96 並列で実行した。

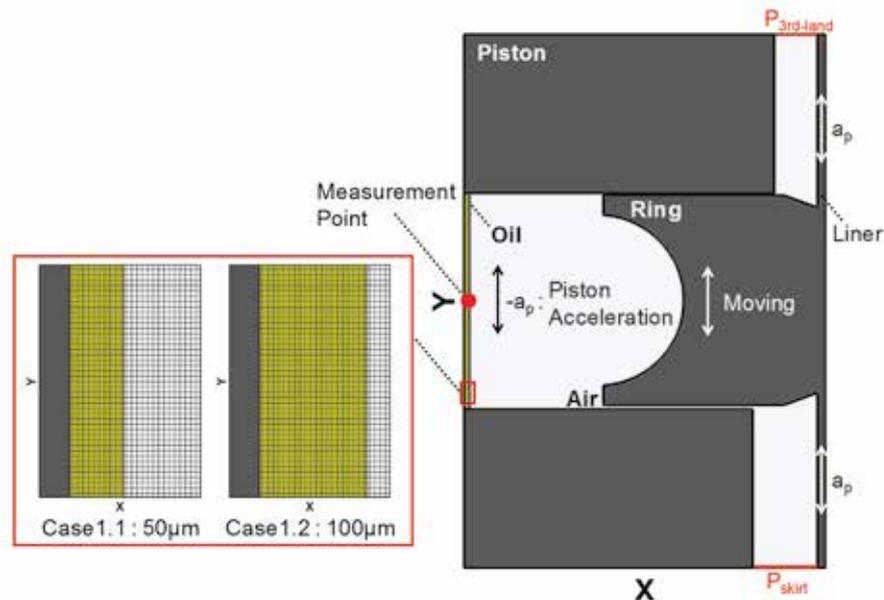


図 2 二次元オイルリング解析の計算領域と壁面の油膜に対する計算格子

3.2 結果および考察

図 3、図 4 に Case 1.1 と Case 1.2 における気液界面と速度分布をそれぞれ示した。各図のクランク角度は各行程の終了時を示しており -180deg.CA が吸気行程、0deg.CA が圧縮行程、180deg.CA が膨張行程、360deg.CA が排気行程である。また図 5 に溝中心部の油膜厚さのクランク角度に対する履歴を示した。

図 3, 図 4 より吸気行程と膨張行程においてはピストンが下降するため慣性力によりオイルがリング溝上部に集中し, 圧縮行程と排気行程においてはピストンの上昇によりオイルが溝下部に集中している. Case 1.2 は Case 1.1 よりも初期油膜厚さが大きいため溝内の油量が多く, 溝の上下面においてオイルが広範囲に分布している. また圧縮行程以降では溝内において渦の発生が見られた. これは筒内圧の上昇に伴う上部境界からの空気の流入に起因する.

図 5 の Case 1.1 と Case 1.2 とともに各行程において油膜厚さのピークが見られる. これはピストンの運動に伴う慣性力によりオイルが溝内を上下し, 計測点の通過時に油膜厚さが増大したためである. また両者ともに油膜厚さの最小値は約 $25\mu\text{m}$ であることから溝内のオイルの大部分が上下に移動していることがわかる. 最小油膜厚さの値が同様であるのは, 油膜が薄い場合は壁面の粘性力がピストンの慣性力を上回るためと考えられる. このことからリング溝の壁面に形成される油膜厚さに対する溝内の油量の影響は少ないと考えられる. また壁面から離れた部分で移動するオイルは慣性力の影響を強く受けるため, 溝内へのオイルの進入が多い状況下ではリング上面のサイドクリアランスよりオイルが流出する可能性がある.

ここで図 6 に膨張行程時の 60 deg.CA における気液界面および速度分布を示した. 図 3, 図 4 の速度分布に比較し溝内に形成される渦の流速が上昇している. これは燃焼室内における圧力上昇のピークが圧縮上死点直後に訪れるためと考えられる. また Case 1.2 では Case 1.1 に比較し溝上部に集中するオイルが気流の進入を妨げる様子が見られ, これに伴いオイルの形状も変化している. このように膨張行程においては溝内の空気とオイルの相互作用が生じることが確認された.

以上より溝内のオイル挙動については膨張行程を除く行程でピストンの慣性力の影響が支配的であると推測される. これに対し膨張行程においては筒内圧の上昇に起因するリング溝内に形成される渦の影響も加わることが確認された. 通常の 2 ピースオイルリングに用いられるエキスパンダを考慮した場合は溝内のオイルと空気の干渉が異なる傾向を示すと考えられる. またエンジン回転数を変更した場合は圧力境界条件とピストンの慣性力が変化するため溝内の流れ場が異なる様相を示すことも考えられる.

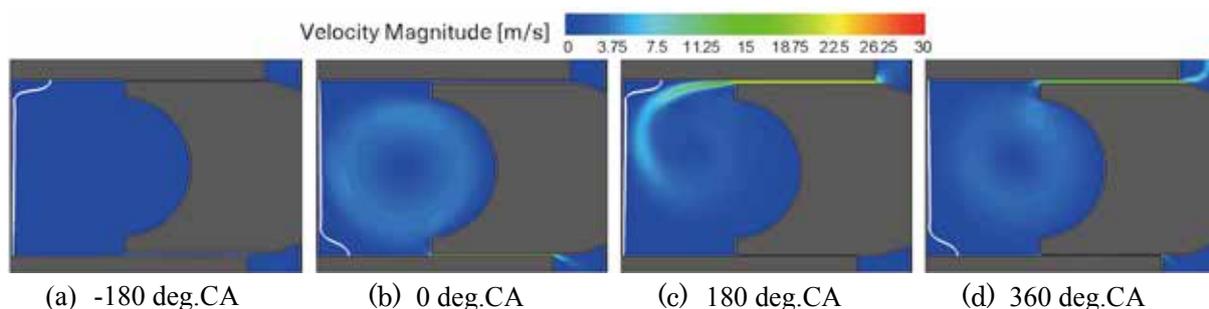


図 3 Case 1.1 における気液界面と速度分布

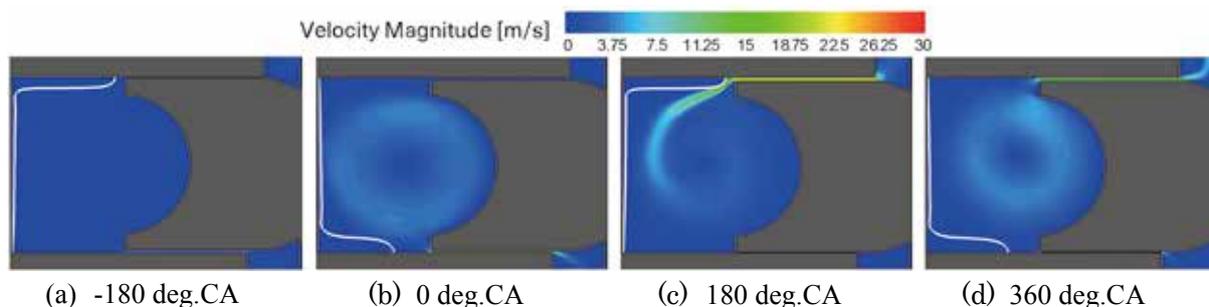


図 4 Case 1.2 における気液界面と速度分布

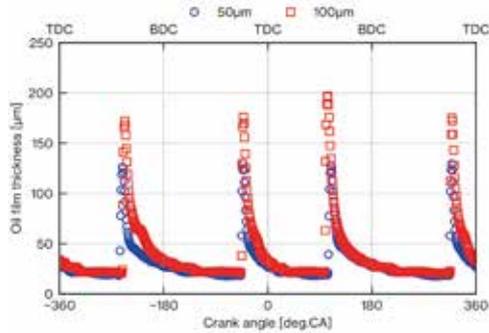
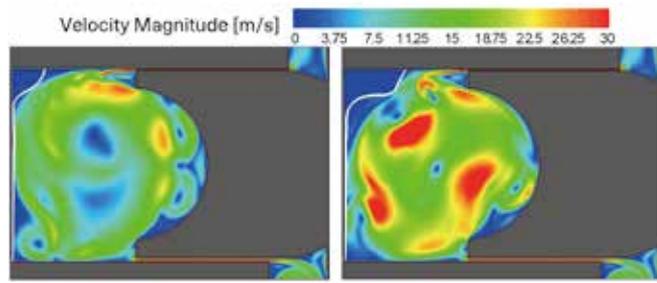


図5 溝中心部での油膜厚さ



(a) Case 1.1 (b) Case 1.2
図6 膨張行程時の気液界面と速度分布

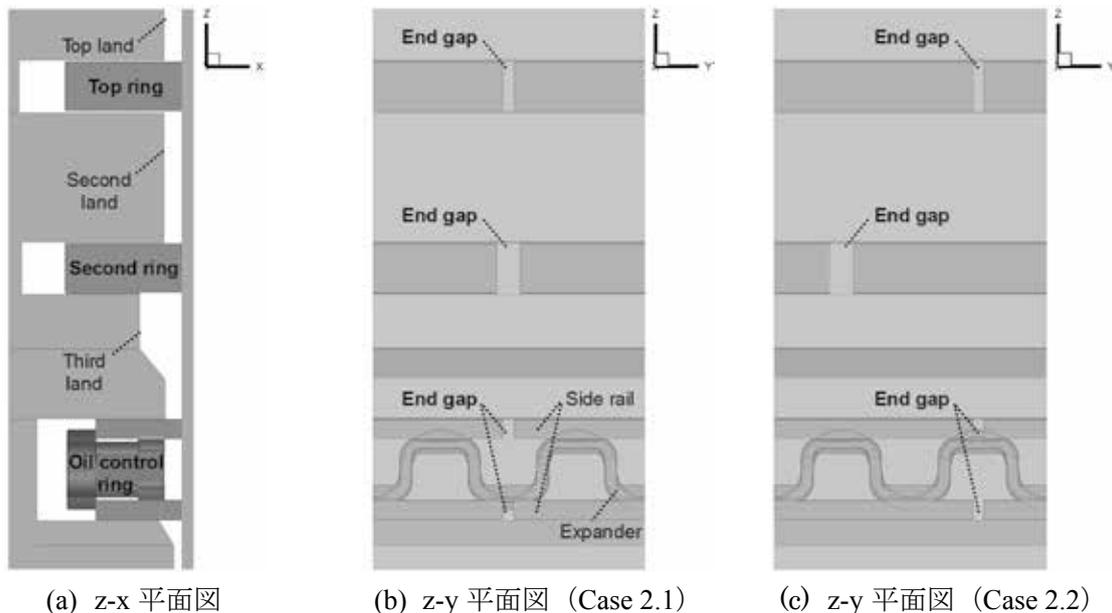
4. リングパック周りの三次元解析

4.1 計算条件

上記の二次元解析においてはピストンリング合口およびオイルリングの複雑形状を考慮することが困難であるため、計算領域を三次元に拡張しピストンの周方向の影響調査を行う。ここで3ピースオイルリングを含むリングパックを対象とした計算領域を図7に示した。ピストンの周方向についてはオイルリングの形状を考慮して領域を設定した。本項では各リングの合口隙間の位置を一直線上に配置した Case 2.1 と、これをオフセットさせた Case 2.2 について比較を行う。

計算領域上下の外部境界条件には速度に Neumann 条件を与えた。また上部の圧力には実験で計測された筒内圧を Dirichlet 条件として与えた。またピストンの周方向に対しては周期境界条件を用いた。トップリングとセカンドリングの上下移動はピストンの慣性力を考慮した運動方程式により求めた。なおエンジン回転数は 600 rpm である。

計算領域内の格子は 27,820,800点である。本計算は MPI による並列計算に加えベクトル計算機向けに最適化したコードにより 256 並列で実行した。



(a) z-x 平面図 (b) z-y 平面図 (Case 2.1) (c) z-y 平面図 (Case 2.2)

図7 三次元リングパックを対象とした計算領域

4.2 結果および考察

図8, 図9に Case 2.1 と Case 2.2 の吸気行程から圧縮行程にかけての各クランク角 (-330 deg.CA から -120 deg.CA) における気液界面を示した。両結果ともに吸気行程時のピストンの下降により

計算領域下部のピストンスカート部からオイルの流入が見られる。-330 deg.CA においてはオイルがオイルリング上部のサイドレール合口を通過しサードランド部に進む様子が確認された。Case 2.1 の-300 deg.CA から-210 deg.CA ではオイルがトップリングとセカンドリングの合口隙間を通過し計算領域上部より燃焼室側に流出した。またトップリング下面の隙間に進入したオイルが徐々に広がる様子も確認された。これに対し Case 2.2 ではオイルがセカンドリング下部でせき止められサードランド部を満たしていく傾向が見られた。しかしセカンドリングの合口隙間をオイルが通過し上昇する様子は見られなかった。また本計算を複数サイクル実施した場合にはサードランド部に残されたオイルが合口を通じて上昇することが予想される。

-180 deg.CA 以降の圧縮行程ではピストンが上昇するためオイルは慣性により計算領域下部へ移動している。Case 2.1 の-150 deg.CA においてはセカンドランドとオイルリング溝でオイルが下部に集中している。また Case 2.2 ではサードランドとオイルリング溝内で同様の傾向が見られた。

-120 deg.CA では両者ともにピストンスカート部のオイルが計算領域外に流出した。

以上より、計算領域を三次元に拡張したことで二次元解析では考慮されない合口隙間を経由したオイルの輸送が確認された。また合口隙間が一直線上に揃う場合には燃焼室へのオイルの流出が急増することが示された。ピストンリングは運転中に周方向に回転することが考えられるため、リングの合口位置によりオイル消費量が変化することが本解析から推測される。

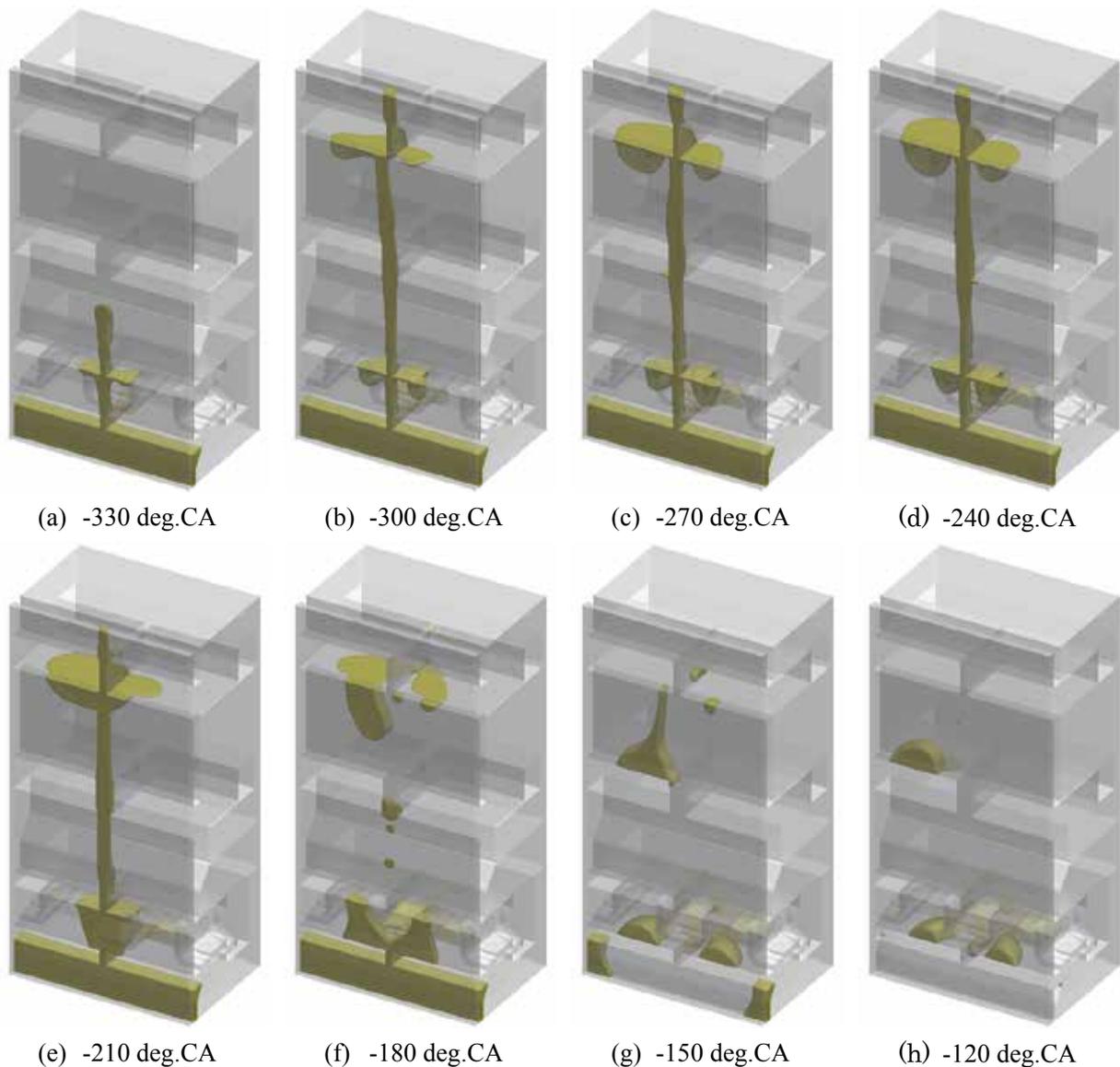


図 8 Case 2.1 における各クランク角度でのオイル挙動の可視化

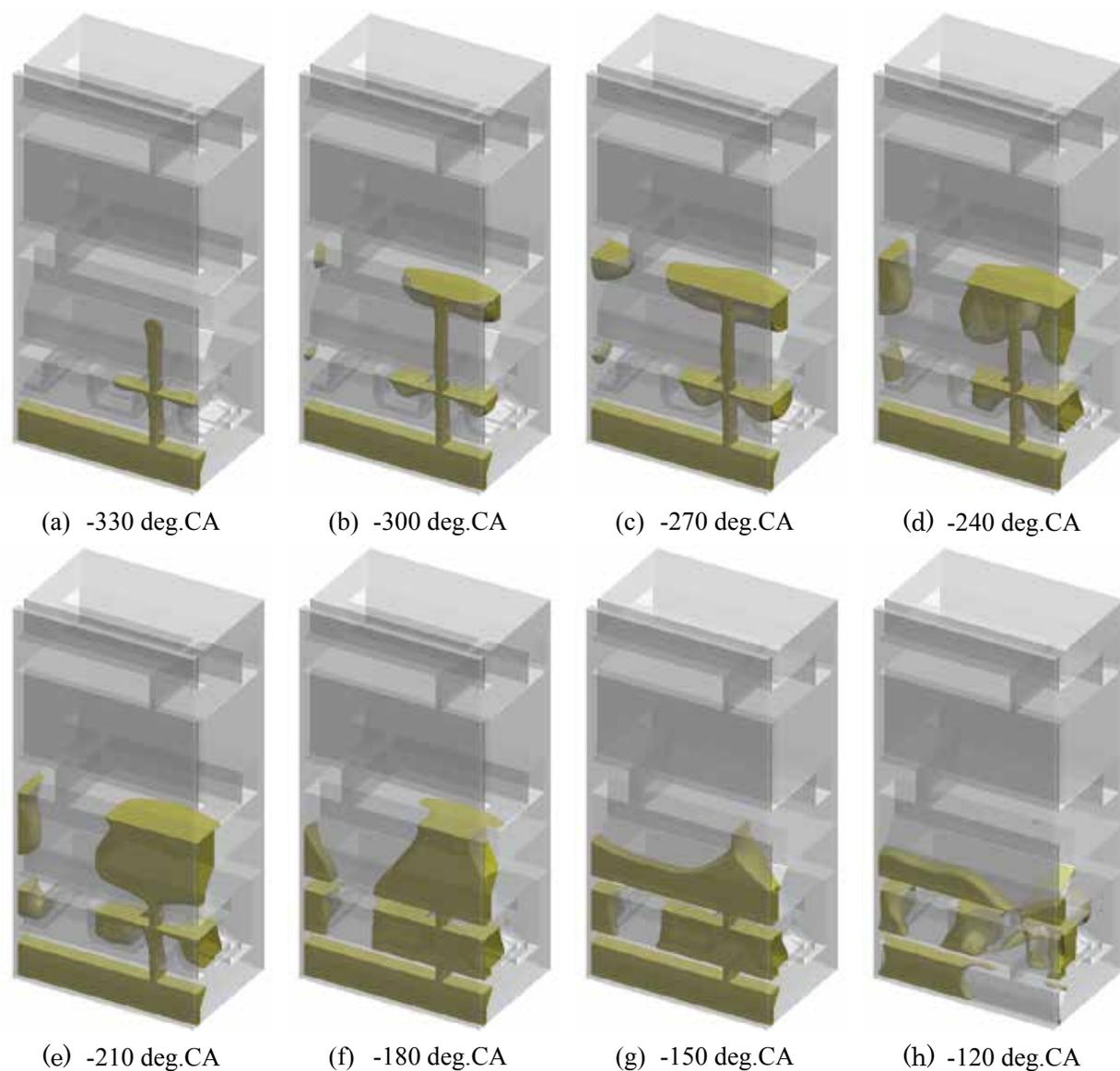


図9 Case 2.2における各クランク角度でのオイル挙動の可視化

5. 結言

埋め込み境界法を用いた気液二相流解析によりピストンリングまわりオイル挙動の予測を実施した。オイルリングまわりの二次元解析においては溝内の壁面に付着したオイルの挙動について評価し、慣性力によるオイルの上下動と壁面の粘性力による油膜の形成を確認した。リングパックまわりの三次元解析においては合口隙間を経由したオイルの輸送が見られた。合口の位置を変化させることでオイルの輸送に差が生じ、合口隙間が一直線上に配置される条件下ではオイルの上昇が顕著に見られた。

以上より埋め込み境界法を用いた二相流解析はピストンリングまわりの現象に適用可能であることが示された。またスーパーコンピュータを用いた大規模解析により三次元的なオイル挙動の可視化が実現された。今後はオイルの輸送に関する定量評価等を実施することでオイル消費のメカニズムの把握を進める。

謝辞

本研究における計算結果は東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータにより行われたものであり、同センター関係各位より援助を受けた。また本研究は戦略的イノベーションプログラム(SIP)「革新的燃焼技術」により行われた。実験結果はトヨタ自動車株式会社、株式会社 SOKEN および TPR 株式会社により得られたものである。

参考文献

- [1] 温室ガスイベントリオフィス, 日本の温室効果ガス排出量データ (確報値: 1990~2017年度), 2019
- [2] Richardson, D. E., Review of Power Cylinder Friction for Diesel Engines, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 122, 506–519, 2000
- [3] Iijima, N., Sakurai, T., Takiguchi, M., Harigaya, Y., Yamada, T., and Yoshida, H., An Experimental Study on Relationship between Lubricating Oil Consumption and Cylinder Bore Deformation in Conventional Gasoline Engine, *SAE International Journal of Engines*, 2, 106–113, 2009
- [4] Harigaya, Y., Yamasuga, K., Suzuki, M., Iijima, N., Takiguchi, M., and Shimada, A., The Effect of Oil Evaporation From the Cylinder Wall on Oil Consumption of a Gasoline Engine, *ASME 2009 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference*, 523–531, 2010
- [5] Puthiya Veetil, M., and Shi, F., CFD Analysis of Oil/Gas Flow in Piston Ring-Pack, *SAE Technical Paper Series*, 1, 2011
- [6] Oliva, A., and Held, S., Numerical multiphase simulation and validation of the flow in the piston ring pack of an internal combustion engine, *Tribology International*, 101, 98–109, 2016
- [7] Hirt, C. W., and Nichols, B. D., Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, *Journal of Computational Physics*, 39, 201–225, 1981
- [8] Sussman, M., Smereka, P., and Osher, S., A Level Set Approach for Computing Solutions to Incompressible Two-Phase Flow, *Journal of Computational Physics*, 114, 146–159, 1994
- [9] Sethian, J. A., and Smereka, P., Level Set Methods for Fluid Interfaces, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 35, 341–372, 2003
- [10] Fedkiw, R. P., Aslam, T., Merriman, B., and Osher, S., A Non-oscillatory Eulerian Approach to Interfaces in Multimaterial Flows (the Ghost Fluid Method), *Journal of Computational Physics*, 152, 457–492, 1999
- [11] Kobayashi, K., Kodama, T., and Takahira, H., Shock wave–bubble interaction near soft and rigid boundaries during lithotripsy: numerical analysis by the improved ghost fluid method, *Physics in Medicine and Biology*, 56, 6421–6440, 2011
- [12] Peng, D., Merriman, B., Osher, S., Zhao, H., and Kang, M., A PDE-Based Fast Local Level Set Method, *Journal of Computational Physics*, 155, 410–438, 1999
- [13] Takahashi, S., Nonomura, T., and Fukuda, K., A numerical scheme based on an immersed boundary method for compressible turbulent flows with shocks: Application to two-dimensional flows around cylinders, *Journal of Applied Mathematics*, 2014, 2014
- [14] Kim, J., and Moin, P., Application of a Fractional-Step Method to Incompressible Navier-Stokes Equations, *Journal of Computational Physics*, 59, 308–323, 1985
- [15] Jiang, G.-S., and Peng, D., Weighted ENO Schemes for Hamilton-Jacobi Equations, *SIAM Journal on Scientific Computing*, 21, 2126–2143, 2000
- [16] Gottlieb, S., and Shu, C.-W., Total Variation Diminishing Runge-Kutta Schemes, *Mathematics of Computation*, 67, 73–85, 2002
- [17] Asai, K., and Tsubogo, K., Study on numerical simulation for rupture of bubble at water surface by Level Set method, *Environmental Hydraulics and Sustainable Water Management*, 215–224, 2005