

## 高温環境における粒子付着モデルの検証

### Validation of Particle Deposition Models in High-temperature Environment

- 河野結香, 東理大, 東京都葛飾区新宿 6-3-1, E-mail: 4516045@ed.tus.ac.jp
- 水取賢太, 東理大, 東京都葛飾区新宿 6-3-1, E-mail: 4519545@ed.tus.ac.jp
- 福留功二, 東理大, 東京都葛飾区新宿 6-3-1, E-mail: kfukudome@rs.tus.ac.jp
- 山本誠, 東理大, 東京都葛飾区新宿 6-3-1, E-mail: yamamoto@rs.kagu.tus.ac.jp
- 鈴木正也, JAXA, 東京都調布市深大寺東町 7-44-1, E-mail: suzuki.masaya@jaxa.jp
- 大北洋治, JAXA, 東京都調布市深大寺東町 7-44-1, E-mail: okita.yoji@jaxa.jp
- Yuka Kono, Tokyo University of Science, 6-3-1 Niijuku, Katsushika-ku, Tokyo
- Kenta Mizutori, Tokyo University of Science, 6-3-1 Niijuku, Katsushika-ku, Tokyo
- Koji Fukudome, Tokyo University of Science, 6-3-1 Niijuku, Katsushika-ku, Tokyo
- Makoto Yamamoto, Tokyo University of Science, 6-3-1 Niijuku, Katsushika-ku, Tokyo
- Masaya Suzuki, Japan Aerospace Exploration Agency, 7-44-1 Jindaiji Higashi-machi, Chofu-shi, Tokyo
- Yoji Okita, Japan Aerospace Exploration Agency, 7-44-1 Jindaiji Higashi-machi, Chofu-shi, Tokyo

When an aircraft engine ingests sand or ash in the atmosphere, the particles adhere to the turbine blades. This phenomenon is called deposition and has various negative effects on the engine. There is a need to elucidate the deposition mechanism so that several researchers have proposed deposition models. In this study, we numerically simulated the deposition on a flat plate using three deposition models and validated their accuracy. Moreover, we investigated the influence of particle size distribution on deposition behavior. As a result, the OSU model showed the result closest to the experiment, and we found the deposited particle distribution depends on the particle diameter.

#### 1. 緒言

航空機のジェットエンジンに大気中の砂や塵、火山灰が取り込まれると、燃焼室を通過することで高温に熱されて融解し、後に続くタービン翼に衝突して急冷され、凝固・付着することがある。この現象はデポジションと呼ばれ、タービンに様々な悪影響を及ぼす。タービン翼に粒子が堆積することで、翼の形状が変化し、空力性能が低下する問題や、フィルム冷却孔が塞がれる問題が生じる。他方でジェットエンジンは常に効率向上が求められており、タービン入口温度の高温化が進んでいる。しかし、堆積した粒子によって冷却孔が塞がれると冷却が十分に行われず、場合によってはタービン翼の破損を引き起こし大事故につながる可能性がある。低温環境下での粒子の付着はある程度メカニズムが解明されているが、実際のジェットエンジンにおける高温環境下に関しては、未だ不明な点が多く残っている。

デポジションのメカニズム解明のため、様々な研究がなされているが、実機タービンの条件を模擬してデポジションを再現する実験は、膨大な費用と時間を要する。そのため、CFDによる解析は非常に有効な手段であり、これまでに多くの研究者たちがデポジションの発生メカニズムに関するモデルを提唱している。

El-Batsh & Haselbacher<sup>(1)</sup>は、粒子の付着現象を付着プロセスと剥離プロセスの二段階で考える臨界速度モデルを開発した。Sreedharan & Tafti<sup>(2)</sup>は、軟化点温度と衝突時の温度の粘度比から付着確率を計算する臨界粘度モデルを考案した。Bonsら<sup>(3)</sup>は、粒子を円筒形状として考え、衝突時の運動エネルギーと変形によるエネルギーの関係から付着現象を捉える OSU モデルを提唱した。タービン翼のデポジションモデルとして、これらの三種類のモデルが比較的よく使用されているが、その妥当性については十分な検証がなされていない。

本研究では、デポジションのCFD解析において、これらのモデルの妥当性を調査するため、上述の臨界速度モデル、臨界粘度モデル、OSUモデルを用いて、平板におけるデポジションの数値解析を行い、Bowenら<sup>(4)</sup>の実験結果と比較を行った。また、粒子直径分布と堆積高さの関係を明らかにしたデータは限られており、

粒径分布がモデルの検証に与える影響は大きいと考えられる。よって、投入する粒子の粒径分布の影響も調査した。

#### 2. デポジションモデル

##### 2. 1. 臨界速度モデル

El-Batsh & Haselbacher<sup>(1)</sup>は、粒子の付着判定を付着プロセスと剥離プロセスの二段階に分けて行う、臨界速度モデルを提唱した。まず、付着プロセスでは、式(1)で示される臨界速度  $u_{cr}$  に対して衝突速度で判定する。

$$u_{cr} = \left( \frac{2E_p \times 10^{-9}}{d_p} \right)^{\frac{10}{7}} \quad (1)$$

ここで、 $E_p$  [Pa]は粒子のヤング率、 $d_p$  [m]は粒子の直径である。

付着プロセスにおいて付着すると判定された粒子は剥離プロセスの計算に移行する。剥離プロセスでは、式(2)で表される臨界摩擦速度  $u_{\tau,cr}$  を算出し、壁面摩擦速度が臨界摩擦速度を超えていれば粒子が剥離する。

$$u_{\tau,cr}^2 = \frac{CuW_A}{\rho_f d_p} \left( \frac{W_A}{d_p K_c} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

ここで、 $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]は流体の密度、 $K_c$  [Pa]は複合ヤング率、 $W_A$  [J/m<sup>2</sup>]は付着による仕事、 $Cu$ はカンニンガム係数である。複合ヤング率は次の式で示される。

$$K_c = \frac{4}{3} \left[ \frac{1-\nu_s^2}{E_s} + \frac{1-\nu_p^2}{E_p} \right]^{-1} \quad (3)$$

式(3)において、 $E_s$  [Pa]は付着面のヤング率、 $\nu$  はポアソン比であり、下添え字  $s$ ,  $p$  はそれぞれ付着面と粒子を表している。

##### 2. 2. 臨界粘度モデル

臨界粘度モデルとは、Sreedharan & Tafti<sup>(2)</sup>によって考案されたモデルで、軟化温度での粒子の粘度と現在の温度での粒子の粘度が

ら付着確率を計算するモデルである。

$$P_{st} = \frac{\mu_{soft}}{\mu_{Tp}} \quad (4)$$

ここで、 $\mu_{soft}$  [Pa・s]は軟化温度での粒子の粘度、 $\mu_{Tp}$  [Pa・s]は衝突時の粒子の粘度である。粒子の軟化温度及び粘度は、粒子の組成によって決まる。

### 2. 3. OSU モデル

OSU モデルは、Bons �ら<sup>(3)</sup>によって考案された。このモデルの特徴は、粒子を円筒状の物体として捉え、その円筒軸方向の圧縮変形を考える点にある。円筒粒子の体積が球形粒子の体積と一致するように、円筒の直径は球形粒子の直径  $d = d_p$  [m]、高さは  $l = 2d_p/3$  [m]とする。粒子が壁面に衝突すると、弾性変形あるいは塑性変形が起こる。そのとき粒子に蓄えられる最大弾性エネルギー  $E_{cr}$  [J] は次の式で表される。

$$E_{cr} = \left( \frac{K_c A}{l} \right) \frac{w_{cr}^2}{2} \quad (5)$$

ここで、 $K_c$  [Pa]は複合ヤング率、 $A = \pi l^2/4$  [m<sup>2</sup>]は円筒の接触表面積、 $w_{cr}$  [m]は弾性変形できる最大変形量であり、 $\sigma_y$ を粒子の降伏応力とすると、 $\sigma_y/K_c$  [Pa]に等しい。このモデルにおける複合ヤング率  $K_c$  は

$$K_c = \left[ \frac{1 - \nu_s^2}{E_s} + \frac{1 - \nu_p^2}{E_p} \right]^{-1} \quad (6)$$

と定義される。粒子の法線方向の運動エネルギー  $KE_{n1}$  [J] と変形によるエネルギーの関係から

$$KE_{n1} = E_{cr} + \int_{w_{cr}}^{w_{max}} \sigma_y A dw \quad (7)$$

が成り立つので、最大変形量  $w_{max}$  [m]は

$$w_{max} = l - \exp \left[ \ln(l - w_{cr}) - \frac{KE_{n1} - E_{cr}}{\sigma_y A l} \right] \quad (8)$$

と表すことができる。最後に、反発後の法線方向の運動エネルギー  $KE_{n2}$  [J] を計算し、粒子の付着判定を行う。 $KE_{n2}$  は次の式で定義される。

$$KE_{n2} = E_{cr} + M_{drag} - W_A \sin \alpha_1 \quad (9)$$

ここで、 $M_{drag}$  [N・m]は流体の剪断応力による回転モーメント、 $W_A$  [J]は付着力による仕事、 $\alpha_1$ は衝突角度である。 $M_{drag}$  と  $W_A$  は、それぞれ次の式で表される。

$$M_{drag} = \frac{\rho_f^3 u_\tau^4 dl^4}{8\mu_f^2} + \frac{3\rho_f^3 d^3 u_\tau^3 l^3}{2\mu_f^3} \quad (10)$$

$$W_A = A_{cont} \gamma \quad (11)$$

式(10)、式(11)において、 $\mu_f$  [Pa・s]は流体の粘性係数、 $\rho_f$  [kg/m<sup>3</sup>]は流体の密度、 $u_\tau$  [m/s]は摩擦速度である。 $\gamma$ は表面自由エネルギーで、粒子と壁面の材料特性によって決まるが、本研究では  $\gamma = 0.8$  とする。 $A_{cont}$  [m<sup>2</sup>]は接触表面積であり、次の式で定義される。

$$\frac{A_{cont}}{A_{crit}} = 0.1 + \frac{1}{7} \left( \frac{w_{max}}{w_{cr}} \right)^{0.5} \quad (12)$$

ここで  $A_{crit}$  [m<sup>2</sup>]は変形量が  $w_{cr}$  [m]のときの接触表面積である。式(12)は本モデルで適用したような非球体形状に適用される半経験的な式である。 $KE_{n2}$ の計算結果が0より小さいとき、粒子は付着すると判定され、そうでない場合は反発後の接線方向速度  $V_{t2}$

[m/s]を次の式で求める。

$$V_{t2} = V_{t1} - \mu(V_{n1} + V_{n2i}) \left( \frac{V_{n2}}{V_{n2i}} \right) \times \cos^2 \alpha_1 \quad (13)$$

ここで、 $V_{t1}$  [m/s]と  $V_{n1}$  [m/s]はそれぞれ接線方向、法線方向の衝突速度、 $V_{n2}$  [m/s]は接線方向の反発後の速度、 $\mu$ は衝撃比 ( $\mu = 0.3$ ) である。 $V_{n2i}$  [m/s]は粒子の質量  $m$  [kg]を用いて次の式で表される。

$$V_{n2i} = \sqrt{\frac{2E_{cr}}{m}} \quad (14)$$

### 3. 数値計算手法

本研究では、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の CFD ソルバー UPACS<sup>(5)</sup>を用い、流れ場計算、粒子軌道計算、堆積計算の順で計算した。

#### 3. 1. 流れ場計算

流れ場は二次元圧縮性乱流場を仮定し、支配方程式としてファール平均した連続の式、ナビエ・ストークス方程式、エネルギー式を用い、乱流モデルには Spalart-Allmaras モデル<sup>(6)</sup>を採用した。また、セル中心有限体積法に基づき、非粘性項には Roe のリーマン近似による二次精度 MUSCL 法、粘性項には二次精度中心差分を用いて離散化を行った。時間進行には、MFGS 陰解法を適用した。

#### 3. 2. 粒子軌道計算

粒子軌道は、個々の粒子についてラグランジュ法により計算した。飛行中の粒子は球形で、変形・回転しないものとして扱った。また粒子の濃度は希薄であるとして、流れ場に影響を及ぼさないとし、粒子同士の衝突もないとした。粒子に作用する力は流体から受ける定常抗力のみとした。

#### 3. 3. 堆積計算

先に述べた3つのモデル(臨界速度モデル、臨界粘性モデル、OSU モデル)を用いて、粒子の付着判定を行った。堆積高さは、各セルの付着体積をセル面積で除すことで算出した。

### 4. 計算対象及び計算条件

本研究では、Bowen ら<sup>(4)</sup>の実験を対象とし、平板におけるデブジションの解析を二次元の計算で行った。計算領域を Fig. 1 に示す。計算格子にはマルチブロック法を採用して、9つのブロックに分割した。総格子点数は約24万点である。Fig. 1はブロックごとに色分けをしてある。流入境界は、全圧・全温・主流の乱流粘性パラメータを固定し、流出境界は静圧を固定した。壁面については滑りなしの断熱壁とした。Bowen らの実験では、12.5秒間に0.033g ずつ、0~5µmの粒子を投入し、12.5秒おきに堆積高さが

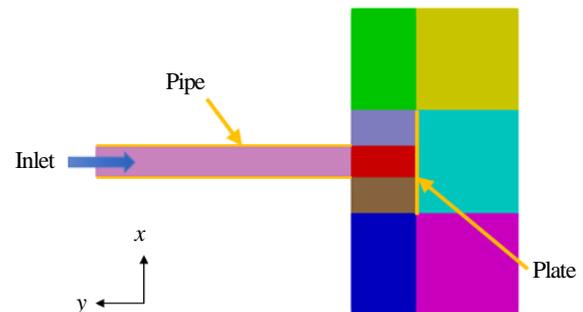


Fig. 1 Computational domain (Two dimension)

測定された。本研究では、この実験の最初の 12.5 秒間について、シミュレーションを行い、結果の比較を行った。使用されている粒子は ARD (Arizona Road Dust) である。流れ場の条件を Table 1 に、粒子と平板の材料特性を Table 2 に示す。なお、臨界速度モデルにおいては、Ai & Fletcher<sup>7)</sup>に基づいて、粒子のヤング率  $E_p$  を以下の式(16)で算出した。ここで、 $T_p$  は粒子の温度である。

$$E_p = 3 \times 10^{20} \exp(-0.02365T_p) \quad (15)$$

Table 1 Details of the flow fields

Inlet pipe's diameter [mm]	6.35
Distance from intel to wall [mm]	12.7
Inlet flow velocity [m/s]	80
Inlet temperature [K]	811

Table 2 Material properties

Particle's material	ARD
Yield stress [MPa]	130
Young's modulus [GPa]	104
Poisson ratio	0.18
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	2650
Plate's material	410SS
Yield stress [MPa]	290
Young's modulus [GPa]	200
Poisson ratio	0.27

また、全粒子の追跡をするには計算コストが過大となるため、追跡する粒子数は 100 万個とし、総量の収支から求めた係数を乗じて局所堆積質量を補正した。

本研究では、各モデルについてそれぞれ 4 ケースの粒子直径を与えて計算を行った。Case 1 は全ての粒径を 5  $\mu\text{m}$  で一定とし、Case 2~4 はそれぞれ異なる粒径分布をもたせて、堆積高さを求めた。Case 1~4 の粒径分布を Table 3 に示す。

Table 3 Particle diameter distribution

Case 1			
Diameter [ $\mu\text{m}$ ]	5.0		
Number fraction [%]			
Diameter [ $\mu\text{m}$ ]	Case 2	Case 3	Case 4
1.0~1.5	10	-	-
1.5~2.0	10	-	-
2.0~2.5	10	-	-
2.5~3.0	10	-	-
3.0~3.5	10	-	-
3.5~4.0	10	-	-
4.0~4.5	20	10	10
4.5~5.0	20	90	70
5.0~5.5	-	-	20

## 5. 結果と考察

### 5. 1. 流れ場及び粒子軌道

流れ場の計算結果 (静温・静圧・マッハ数) を Fig. 2 に示す。

流入パイプから平板に衝突するまでの粒子が通る領域の温度は流入温度の 811 K にほぼ等しく、一定温度のまま衝突が生じる。平板中心部付近が淀み点となるため、静圧が高くなっている。パイプ出口の平均速度は 80 m/s であり、平板に衝突する手前で減速している。

粒径による粒子軌道の違いを Fig. 3 に示す。Fig. 3 より、粒径が大きいほど慣性力の影響が大きく、平板に衝突しやすいのに対して、粒径が小さいほど流れの影響を強く受けて、外側に流されやすい傾向が見られた。なお、Fig. 3 の粒子軌道は、OSU モデルで付着判定を行ったものを代表として示している。その他のモデルでは平板への衝突後の挙動が異なるが、基本的には共通の粒子軌道となることを確認している。

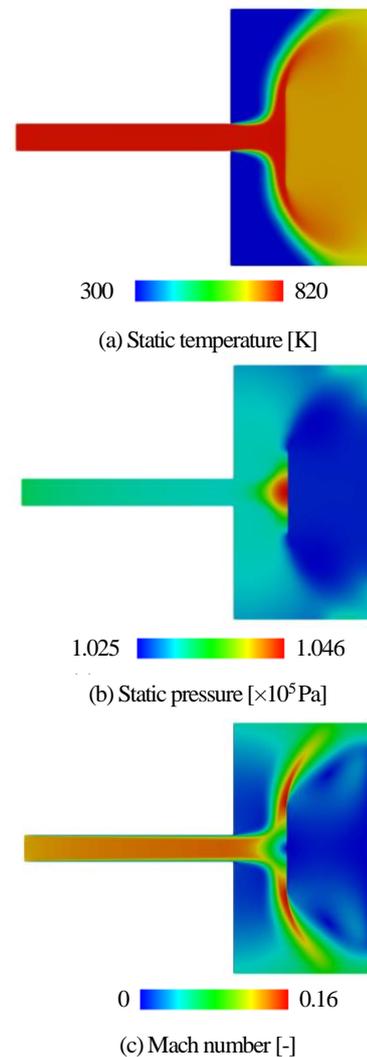


Fig. 2 Flow fields before deposition

### 5. 2. 堆積分布

Case 1~4 について、堆積高さ  $h$  の分布を Fig. 4 に示す。Fig. 4 において、堆積高さ及び座標は、パイプの直径  $D$  で無次元化してある。

臨界粘性モデルを用いた計算ではほとんど粒子が付着しない結果となった。臨界粘性モデルの付着判定は、粒子の温度と組成のみによって行われ、粒子の衝突速度は考慮されない。よって、臨界粘性モデルは、衝突速度に関わらず付着が発生するような衝突速度の影響が無視できる条件でなければ正確な結果が得られると

推測できる。

臨界速度モデルの結果を見ると、堆積の幅が過大に予測されている。これは、臨界速度モデルで用いられる式の多くが、実験に基づく経験式であることによると考えられる。例えば、付着力による仕事は  $W_A = 0.39$  としているが、材質が変われば、付着力は実験によって測定し直す必要がある。すなわち、臨界速度モデルで正確な結果を得るには、計算の前に実験を必要とするため、様々な材質で計算を行うことが容易ではない。

3つのモデルの中では、OSUモデルが最も実験に近い結果を示した。OSUモデルは臨界速度モデルや臨界粘性モデルと比較して経験的な要素を排して理論的に構築されており、幅広い材質、温度、速度等の条件に対応しやすいと考えられる。ただし、OSUモデルでは、表面自由エネルギー $\gamma$ を、粒子と壁面の材料特性から、調節しなくてはならない。しかし、半経験式ではあるが、式(12)により  $W_A$  に対する接触面積  $A_{cont}$  の影響が定式化されており、 $\gamma$  はおよそ1のオーダーであるため、予備試験がなくてもおおよその予測ができる。その点で、幅広い範囲から  $W_A$  を設定しなければならない臨界速度モデルに比べて、様々な材料の計算に適用しやすい。

Bowen らの実験では、0~5  $\mu\text{m}$  の直径の粒子が用いられたが、その粒径分布は明らかでないため、本研究の計算結果は実験結果と正確には比較できない。しかし、OSUモデルの結果に着目すると、粒径一定のCase 1は堆積が平らであるのに対し、粒径分布をもたせたCase 2~4の堆積高さの分布は山形になり、実験の堆積高さ分布の形に近くなった。本研究では、OSUモデルを用いた場合、Case 3が最も実験結果に近い結果となった。小さい粒子が多いCase 2では堆積高さが小さく、5.0~5.5  $\mu\text{m}$  の粒子を20%含んでいるCase 4では堆積がやや横に広がった。これらは、粒径によって粒子の挙動が以下のように異なるためである。

- 1~4  $\mu\text{m}$  の粒径で、特に初期位置がパイプの壁付近である粒子は、流れの影響を強く受けて平板に衝突しない、あるいは平板に衝突しても付着せずに跳ね返る粒子が多い。
- 5~6  $\mu\text{m}$  の粒子は、慣性力の影響が大きくなり、大きい衝突速度・衝突角度をもって平板に衝突する。

直径4~6  $\mu\text{m}$  の粒子の衝突速度、衝突角度をそれぞれ Fig. 5, Fig. 6 に示す。Fig. 5, Fig. 6 から、衝突速度が大きいほど、また

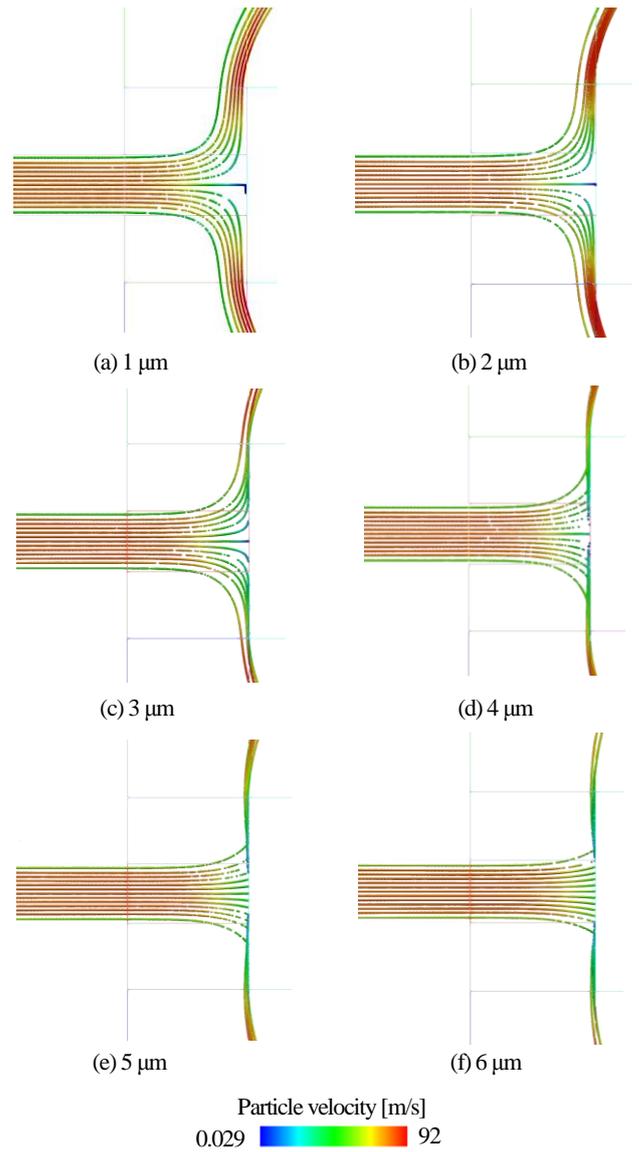


Fig. 3 Particle trajectory (OSU model)

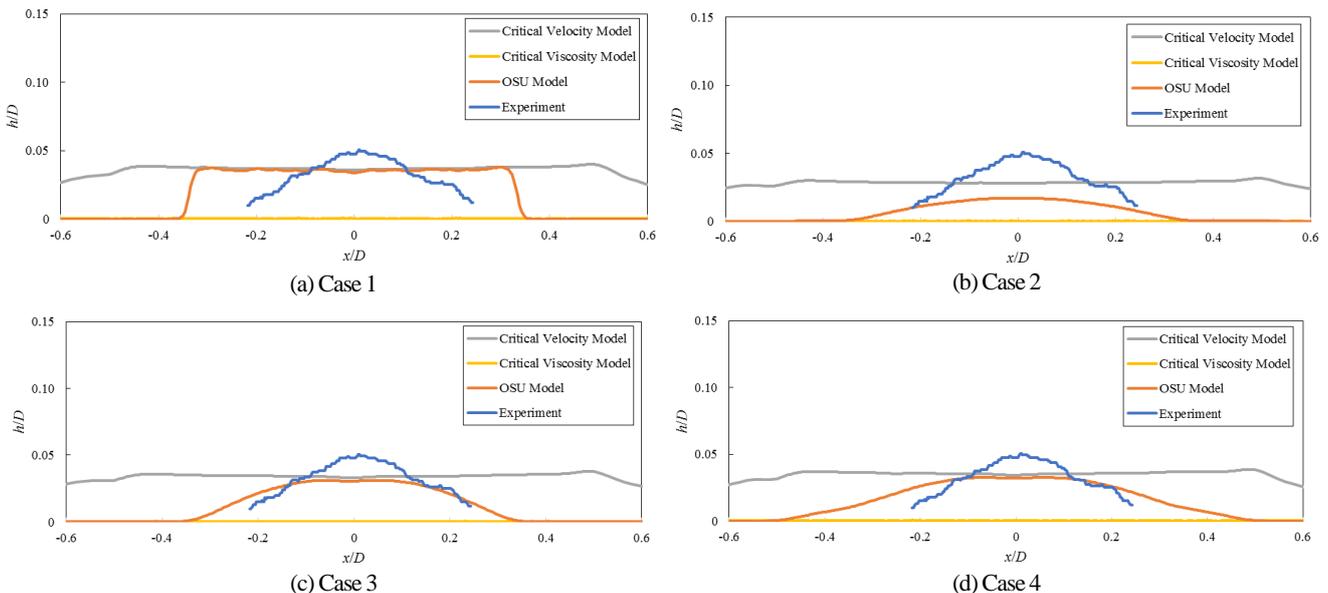


Fig. 4 Comparison of the deposition height distributions between models and experiment

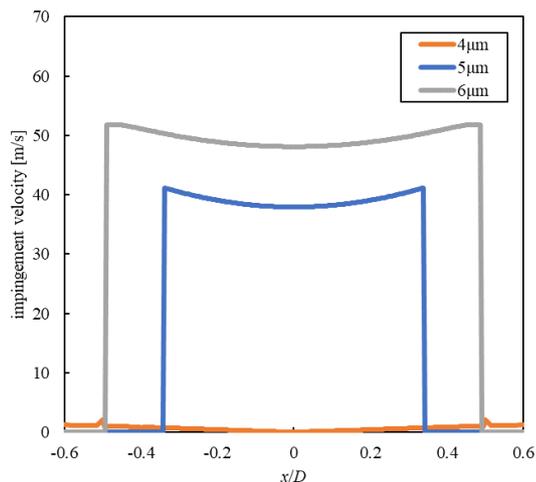


Fig. 5 Impingement velocity

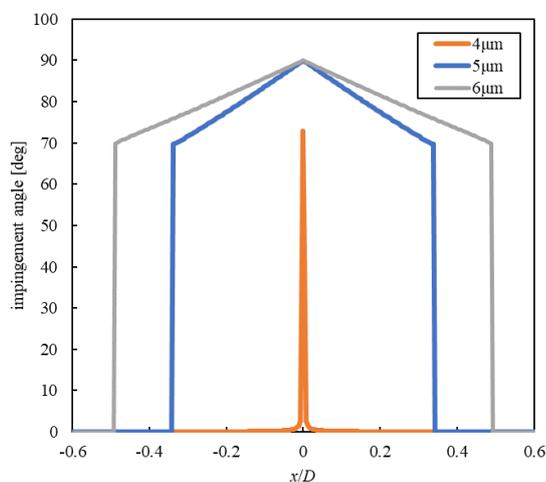


Fig. 6 Impingement angle

衝突角度が大きいほど、粒子は付着しやすいことがわかる。これらのことから、デポジションの数値シミュレーションをする際には、粒子径の分布を正確に設定することが非常に重要であると言える。

## 6. 結言

本研究では、高圧タービンで発生するデポジション現象の予測

に際して必要となるデポジションモデルの検証を目的として、3つのデポジションモデルを用いて、平板におけるデポジション現象の数値解析を行った。本研究により得られた知見は以下の通りである。

- 臨界速度モデル、臨界粘性モデル、OSU モデルの中では、OSU モデルが最も実際の現象に近い結果が得られる。特に臨界粘性モデルでは付着が再現されなかった。
- 大きい粒子は慣性力の影響が大きいので、大きい衝突速度、大きい衝突速度をもって平板に衝突し、付着しやすい。一方で小さい粒子は流れの影響を強く受け、付着しにくい。
- デポジションの数値解析を行う際には、正確に粒径分布を与えることが重要である。

## 参考文献

- (1) El-Batsh, H. and Haselbacher, H., “Numerical Investigation of the Effect of Ash Particle Deposition on the Flow Field Through Turbine Cascades,” J. Turbomach., 135 (2002), 011015.
- (2) Sreedharan, S. S. and Tafti, D. K., “Composition Dependent Model for the Prediction of Syngas Ash Deposition with Application to a Leading Edge Turbine Vane,” Proc. ASME Turbo Expo 2010, GT2010-23655 (2010), pp. 615-626.
- (3) Bons, J. P., Prenter, R., and Whitaker, S., “A Simple Physics-Based Model for Particle Rebound and Deposition in Turbomachinery,” J. Turbomach., 139 (2017), 081009.
- (4) Bowen, C. P., Libertowski, N. D., Mortazavi, M., and Bons, J. P., “Modeling Deposition in Turbine Cooling Passages With Temperature Dependent Adhesion and Mesh Morphing,” Proc. ASME Turbo Expo 2018, GT2018-76251 (2018), V02DT47A009.
- (5) 山本, 高木, 山根, 榎木, 山崎, 牧田, 岩宮, ”CFD 共同基盤プログラム UPACS の開発”, 第 14 回数値流体力学シンポジウム, D02-1 (2000), pp. 1-3.
- (6) Spalart, P. R. and Allmaras, S. R., “A One-equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows,” Proc. 30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA-1992-439 (1992).
- (7) Ai, W. and Fletcher, T. H., “Computational Analysis of Conjugate Heat Transfer and Particulate Deposition on a High Pressure Turbine Vane,” J. Turbomach., 134 (2009), 041020.