

# 航空機タイヤからの水跳ね予測技術に関する研究

窪田 健一, 古賀 星吾, 飯島 由美, 小池 俊輔, 中北 和之 (JAXA)

## Research on Prediction Technology of Water Spray Generated from Aircraft Tire

KUBOTA Kenichi, KOGA Seigo, IIJIMA Yoshimi, KOIKE Shunsuke, NAKAKITA Kazuyuki (JAXA)

### ABSTRACT

Research on prediction technology of water spray generated from aircraft tires is going on in JAXA. As a prediction tool, a numerical code using the explicit MPS (Moving Particle Simulation) method, which is one of the particle methods, is being developed to simulate the water spray. As a benchmark problem, the water spray test conducted by NASA was simulated under a simplified condition. It was found that the angle of side spray observed behind the tire is consistent with the experimental data when the deformation of the tire due to load is taken into account, whereas the angle was underestimated when the deformation was ignored. Experimental efforts to obtain in-house data are also being made to validate the simulation. A laboratory model has been fabricated to establish the technology to measure the water behavior, and a test using actual tire is also planned in the near future.

### 1. はじめに

降雨により滞水状態となった滑走路上で航空機が離着陸する際、図1のように滑走路の水がタイヤにより周囲に跳ね上げられ、機体周囲に飛散する。水の存在により機体にかかる抵抗は増加するため、離陸に必要な距離は増加することとなる。また、前脚からの水しぶきが過剰にエンジンに流入すると不具合を引き起こす可能性があるため、設計の段階でその点に配慮したエンジン配置とすることが必要である。滑走路の水によるこれらの影響評価は航空機の型式証明取得の際に必須とされており、開発フェーズ初期において定量的に評価されることが望ましい<sup>1)</sup>。しかし、高い精度で事前に評価することは困難であり、高精度での評価は開発フェーズ後期に実施する実機を用いた大掛かりな試験に頼らざるを得ないのが現状である<sup>2)</sup>。スケールモデル試験や実機試験のデータに基づく水跳ね分布の経験式は存在するものの<sup>3)</sup>、その精度は低いとされており<sup>4)</sup>、より高い精度で水跳ね予測が可能な技術の構築が望まれている。

航空機タイヤからの水跳ね現象の数値的な予測技術の研究は2000年代にオランダの研究機関であるNLRにて実施されており、その評価ツールでは経験式と粒子追跡を組み合わせた手法が用いられている<sup>5)</sup>。また近年では、粒子法の一つであるSPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) を用いた数値解析が中国・米国のグループにより行われつつあるが、精度の面で改善の余地が残されている<sup>4,6)</sup>。一方で、実験的研究は70年代にムービングベルトを用いた簡易試験がブリストル大学で実施されている<sup>6)</sup>。また、80年代にはNASA Langleyにてセスナの胴体の一部を用いた実機スケール試験が実施されており<sup>7)</sup>、水深や速度をパラメータとした水跳ね分布のデータが公開されているが、その他で参照しうる体系的に取得されたデータは皆無であるのが現状である。

そのような状況に鑑み、JAXAでは統合シミュレーションの研究開発、通称ISSAC (Integrated Simulation System of

Aerospace vehiCles) の枠組みの中で航空機タイヤからの水跳ね予測技術に関する研究が開始された<sup>8)</sup>。本研究では水しぶきの分布、および水により生じる抵抗を定量的に評価するための粒子法解析ソルバ (P-Flow) の開発を目指しており、解析結果の検証を目的とした実験も進行中である。本稿では開発中のソルバの概要について説明した後、先述したNASAによる水跳ね試験を模擬した解析結果を示す。また、検証データ取得に向け検討中である簡易試験、準実機スケール試験に関する取り組みについても紹介する。



図 1 A350 の水跳ね試験 <sup>2)</sup>

### 2. 粒子法解析ソルバの開発

#### 2.1. 粒子法モデル

水跳ね現象は回転するタイヤにより水膜が押しつぶされるとともに巻き上げられ周囲に飛散する複雑な現象である。液体の界面は大規模に変形し、最終的には微小な液滴が広範囲に飛散することになるため、混相流の解析手法として広く知られるVOF法などの格子法を用いると、膨大な格子数が必要となることが予想される。そこで、本研究では、大規模な界面の変形を伴う液体解析を得意とする粒子法を採用した。粒子法は流体を粒子で近似し、個々の粒子がNavier-Stokes方程

式に従うよう運動させることで流体挙動を追跡する手法である。そのため基本的には空間格子を必要とせず、大規模な界面の変形に対しても柔軟に対応できる。

粒子法モデルとしては非圧縮性流体向けに開発されたMPS (Moving Particle Simulation) 法を用いた<sup>9)</sup>。MPS法には圧力をポアソン方程式から求める半陰解法と疑似圧縮性を仮定する陽解法があり、それぞれの計算コストは粒子数 $N$ に対し半陰解法では $O(N^{1.5})$ 、陽解法では $O(N^{1.0})$ でスケールする。本研究では将来的に数千万から数億個の粒子を用いた比較的大規模な解析を目指しており、並列化が容易な陽解法を適用した<sup>10,11)</sup>。

MPS法では非圧縮Navier-Stokes方程式に現れる各種の微分演算子に対し、影響半径内の粒子の寄与を自身からの距離に応じて重み付けした上で積算する相互作用モデルが用いられる。

$$\frac{D\mathbf{u}_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p_i + \frac{\mu}{\rho}\nabla^2\mathbf{u}_i + \mathbf{g} \quad (1)$$

$$\nabla p_i = \frac{d}{n_0} \sum_{j \neq i} \left[ \frac{p_i + p_j}{r_{ij}^2} \mathbf{r}_{ij} w_{gr}(r_{ij}) \right] \quad (2)$$

$$\nabla^2\mathbf{u}_i = \frac{2d}{\lambda_0 n_0} \sum_{j \neq i} [(\mathbf{u}_j - \mathbf{u}_i) w(r_{ij})] \quad (3)$$

ここで $\mathbf{u}_i$ ,  $p_i$ ,  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $\mathbf{g}$ はそれぞれ粒子 $i$ の速度ベクトル, 圧力, 質量密度, 粘性係数, 重力を表す。また,  $\mathbf{r}_{ij} = \mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i$ ,  $r_{ij} = |\mathbf{r}_{ij}|$ ,  $d$ は空間の次元数,  $w_{gr}, w$ はそれぞれ勾配, ラプラシアン用の重み関数である。上述のとおり空間を離散化するための格子は原理的に不要であるが、近傍粒子探索の効率化のために仮想的な直交格子を設け個々のセル（粒子法ではバケットと呼ばれる）内に存在する粒子のリストデータを保持するのが一般的である。本研究ではこの仮想格子を、含まれる粒子数が均等になるように領域分割し、それらをMPIにより並列化された各プロセスに割り当てることで計算負荷を均一化した。本研究では室谷らに倣い領域分割にはグラフ分割ライブラリであるParMETISを利用し<sup>10)</sup>、あるプロセスの担当粒子数が基準値を上回ると再分割することとした。現状、P-Flowはプロセス並列にしか対応していないが、スレッド並列化も施すことで性能が向上することも旧バージョンで実証済みであるため<sup>12)</sup>、将来的にはハイブリッド並列に対応させる予定である。

## 2.2. 境界条件

MPS法の壁面モデルには、壁を壁面粒子で表す手法とポリゴン壁を用いる手法がある。本研究では、壁面データの構築が容易な後者を採用し、ポリゴン壁モデルにはMitsumeらにより提案されたERP (Explicitly Represented Polygon) モデルを採用した<sup>13)</sup>。ERPモデルは近傍壁内に仮想的なミラー粒子があるものと見なし、そのミラー粒子の影響半径内にある流体粒子の寄与を加算することで壁面の影響を考慮することができるモデルである。オリジナルのERPモデルでは着目する粒子にとって最近傍のポリゴン壁のみが考慮されている

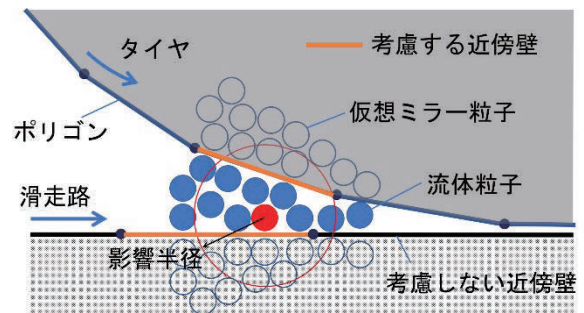
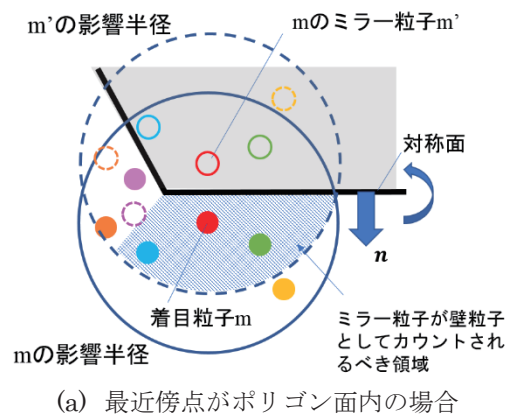
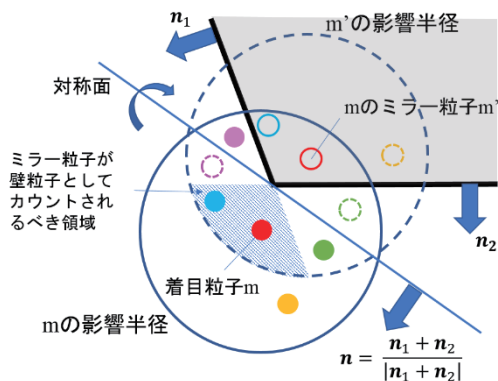


図2 複数の近傍壁を考慮した壁面モデル



(a) 最近傍点がポリゴン面内の場合



(b) 最近傍点が辺または頂点である場合

図3 凸面におけるERPモデル（●：流体粒子，○：壁粒子として考慮するミラー粒子，○：壁粒子として考慮しないミラー粒子）

が、本研究の解析対象である水跳ね問題においては、タイヤと滑走路が近接する領域では図2に示すように対向するポリゴン壁が近接して配置されるため、最近傍のポリゴンのみを考慮するだけでは不十分であり、影響半径内に存在する複数の近傍壁を過不足なく考慮する必要がある。そこで本研究では、仮想格子の各バケットに近傍壁リストの情報を保持させ、そのバケット内の粒子はリストに基づき壁面の影響を考慮することとした。影響半径内に複数のポリゴンが存在する場合、ポリゴンの位置関係によっては重複してミラー粒子を生成してしまう可能性があるため、それを避けるために考慮する近傍壁のみを適切に選択する必要がある。また、タイヤ表面は基本的には凸面で構成されるが、凸面に対しERPモデルを適用する場合、ミラー粒子

の評価方法に注意する必要がある．図3に示すように，着目粒子 $m$ のミラー粒子 $m'$ の影響半径内にある流体粒子( $s$ とする)の寄与を積算する際， $s$ のミラー粒子 $s'$ が壁面内に存在する場合のみ $s$ の寄与を積算した．また，最近傍点が辺または頂点である場合，平均化された法線ベクトルを算出し，その法線ベクトルに垂直な平面に対してERPモデルを適用した．これはERPモデルが面对称の位置にミラー粒子を配置することを前提としたモデルであることに配慮した措置である．

Zhaoらの解析では移動壁を用いてタイヤの並進および回転運動を模擬しているが<sup>4)</sup>，本解析では近傍壁リストの更新に伴う計算コストを抑えるために，機体静止系を採用した．そのため，本解析では速度境界条件を課した．すなわち，壁面ポリゴンは空間中に固定し，滑走路およびタイヤの各ポリゴンに速度ベクトルを与えることでタイヤの並進および回転運動を考慮した．機体静止系では，水たまりを表す流体粒子は計算領域境界からタイヤ並進速度で流入させることとなる．流入境界付近ではタイヤで反射した擾乱が粒子の挙動を乱すため，擾乱を抑制するために人為的に粘性係数を増加させた高粘性領域を設けた．

### 2.3. 解析条件

本稿ではNASAにより実施されたタイヤ単体による水跳ね試験を模擬した解析結果を示す<sup>7)</sup>．表1にベースラインとする計算条件を示す．タイヤの直径，幅は”6.00×6, TT, 8-ply”のサイズ(直径:0.445 m, 幅:0.16 m)とし，タイヤのホイールやトレッド(溝)，気流との相互作用，表面張力等は簡単のため無視した．実際の試験では約1 tonの荷重がタイヤにかかっておりタイヤは変形しているが，変形を無視したタイヤ形状をベースラインとした(図4参照)．ただし，水跳ね角度に対するタイヤ形状の影響を調べるため，荷重により変形した形状に対しても解析した．変形したタイヤの形状については公開されている輪郭データを基に作成した．座標軸として流れ方向に $x$ 軸，鉛直方向に $y$ 軸，奥行方向に $z$ 軸を設け，タイヤの接地点を原点とした．水深は16 mmとし，本解析では水たまりを鉛直方向に6粒子で表す粒子径(2.67 mm)を用いた．なお，水たまりを維持するために滑走路の両端に高さ30 mmの堤防を設けてある．水はタイヤの上流 $x = -0.5$  mの位置から幅1.4 m，速度18.3 m/sで流入させた．また，高粘性領域は $x = -0.25$  mより上流に設定しており，本解析では粘性係数に $10^4$ を乗じた．全解析領域は $x$ 方向に2.8 m， $y$ 方向に2.0 m， $z$ 方向に4.0 m確保しており，この領域内での粒子は追跡するが領域外に出た粒子は削除した．

図5に初期条件における粒子とタイヤの位置関係を示す．本解析ではタイヤ中心より0.1 m上流位置に水たまりの先端が位置するとして計算を開始した．図5ではプロセス毎に粒子を色分けして表示しており，各プロセスが保持する粒子数がほぼ等しいことが見て取れる．なお，プロセス数が多いため同色が複数のプロセスに重複して使われていることに注意されたい．本解析ではJAXAスーパーコンピューターJSS2を利用し，Flat MPIの120並列で解析を行った．最終的な粒子数は300万個程度であり，解像度の向上や広範な領域での解析

表 1 解析条件

粒子サイズ ( $L_0$ )	2.67 mm
影響半径	2.1 $L_0$
ラプラスアン用影響半径	3.1 $L_0$
質量密度	1000 kg/m <sup>3</sup>
重力加速度	9.8 m/s <sup>2</sup>
動粘性係数	1×10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s
並進速度 (流入速度)	18.3 m/s
水深	16 mm
疑似音速	100 m/s

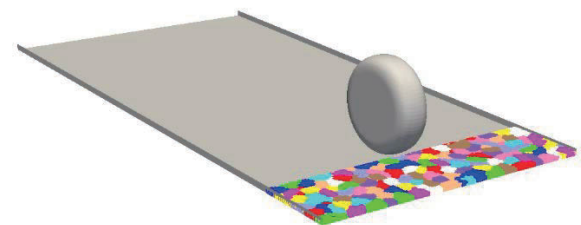
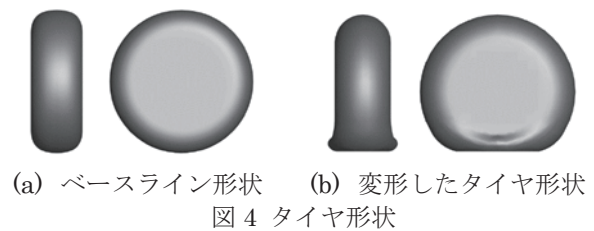


図 5 タイヤおよび滑走路と粒子初期位置 (粒子はプロセス毎に色分けして表示，ただし重複あり)

は今後の課題とする．

## 3. 解析結果と考察

### 3.1. 水跳ねの全体構造

図6にベースライン形状のタイヤによる水跳ねの全体構造を示す．図6-(a)のとおりタイヤの側方に水膜が形成される様子が捉えられており，実験で撮影された水跳ねの様子と定性的に一致する結果が得られた<sup>7)</sup>．図6-(b)では回転するタイヤにより押しつぶされた水の一部が上流側にも飛散する様子が捉えられている．側方および前方への水跳ねはタイヤからの水跳ね現象に特徴的な水しぶきの構造として知られており<sup>4)</sup>，これらの構造が現れていることは本解析結果の妥当性を支持するものと言える．

図6から解析領域には周囲に粒子が存在しない孤立粒子が多数生じていることがわかる．孤立粒子は圧力勾配や粘性の影響を受けないため流体粒子としては振る舞わず，また気流の影響も無視していることから重力以外の力を受けない．実際には表面張力により孤立粒子の発生は抑制されると考えられる．また発生しても気流による空気力により加減速を受けるため，これらの影響により全体的な分布は変化するものと予想され，その調査は今後の課題としたい．また，当然ながら孤立粒子以外の水滴に対する空気力も無視することはできない．その影響を考慮するために任意形状の水



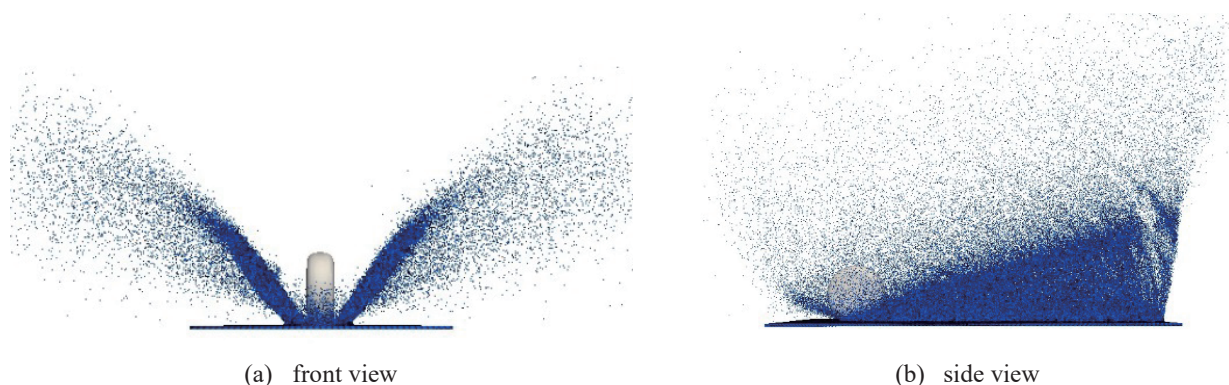


図6 タイヤ単体による水跳ね分布

滴に対する空気力モデルの構築も進めており<sup>14)</sup>、将来の気流との連成解析に用いる予定である。

### 3.2. 荷重によるタイヤ変形の影響

図7にタイヤ中心から0.7 m後方での水跳ね分布を示す。ただし、解析結果では十分な数の粒子数を描画するため、 $x = 0.7 - 0.8$  mに存在する粒子を示した。図中にはベースライン形状による分布の他に、変形タイヤによる分布、およびNASAの試験で得られた水跳ね分布（最も流量が多いライン）も示した。図7から、ベースライン形状では水跳ね角度が過小評価されるのに対し、変形したタイヤでは水跳ね角度が実験と一致することがわかる。このことから、水跳ね角度の予測においては荷重によるタイヤの変形を考慮することが重要であると言える。ベースライン形状はタイヤと滑走路は点接触である一方で変形タイヤは面接触であり、接地箇所付近から側方に引いたタイヤ表面の接線が滑走路と成す角度は、図8に示すとおり変形タイヤの方が大きい（正確にはベースライン形状の接地点での接線は滑走路面と一致するため、接地箇所付近の接線とした）。押しつぶされた水が側方に跳ね上げられる際、跳ね上

げられる角度はこの接線の角度に強く影響されると考えられる。接地箇所付近の水はこの接線と滑走路の間に飛散することになり、そのまま空間に飛散する粒子もあれば周囲の水を押し上げることに寄与する粒子も存在する。接線角度と水跳ね角度が大きく異なるベースライン形状では後者の粒子が多いことが予想される。一方、変形タイヤの場合は接地箇所付近の粒子にとって上方が開けていることから前者の割合が増えるものと考えられる。双方の水跳ね機構の詳細な調査は今後の課題としたい。

### 4. 実験的研究

前述の通り、これまでも模擬試験や実機試験が行われているが、大規模な試験となるため多額のコストが必要となる。また、公開されているデータは限られており、開発中の数値解析コードの検証用データとして十分ではない。そこで、比較的成本を抑えた方法によりデータを蓄積する試験技術、及び、計測技術の開発を目指す。

具体的には、水跳ねのスケール効果に着目して、大規模な試験ではなく、簡易試験や準実機スケール試験において、最新の高速カメラや計測手法を導入することにより水跳ねの詳細データを取得する。ここでは、これまで実施した簡易試験の結果の一部と準実機スケール試験の計画について紹介する。

まず、簡易試験に関しては、図9に示すような装置を構築した。全長1 mの水槽に液体を数mmから数cm程度溜めて、その中を電動レールアクチュエータに支持系で取り付けられた供試体を水平移動させることにより水跳ねを発生させ、高速カメラを用いて計測する。加えて、実際の供試体の速度を確認するため、レーザ測距計を用いて移動物体の時系列の距離を計測し、それを微分することにより速度を導出する。図10は表2に示す条件で実施した試験結果を示す。このように、現象の移動速度に対する感度を取得することができたが、今後は速度以外の条件を変更し、様々なパラメータ（供試体速度、サイズ、水深等）によるデータベースを構築する予定である。

次に、準実機スケール試験に関しては、図11に示すような装置の構想を考えており、再現性の高い定常状態の水跳ねデータを取得するため、自動車等を用いた

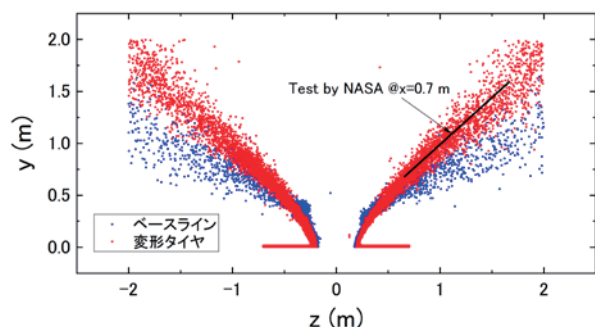
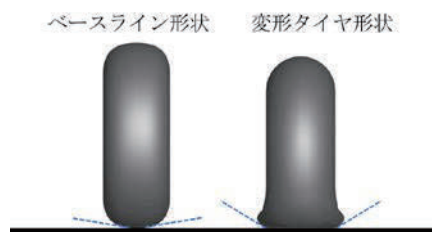
図7 タイヤ中心から0.7 m後方での水跳ね分布<sup>1)</sup>

図8 接地箇所付近のタイヤ表面の接線

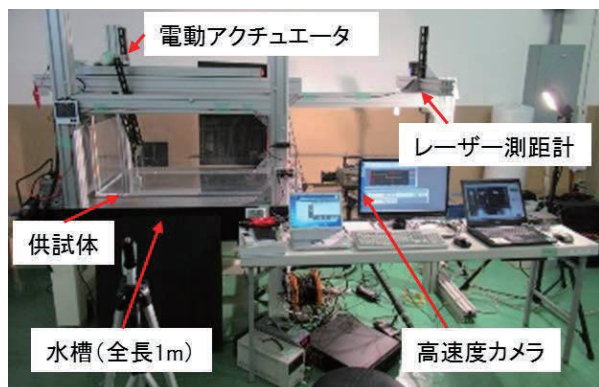


図 9 簡易試験装置

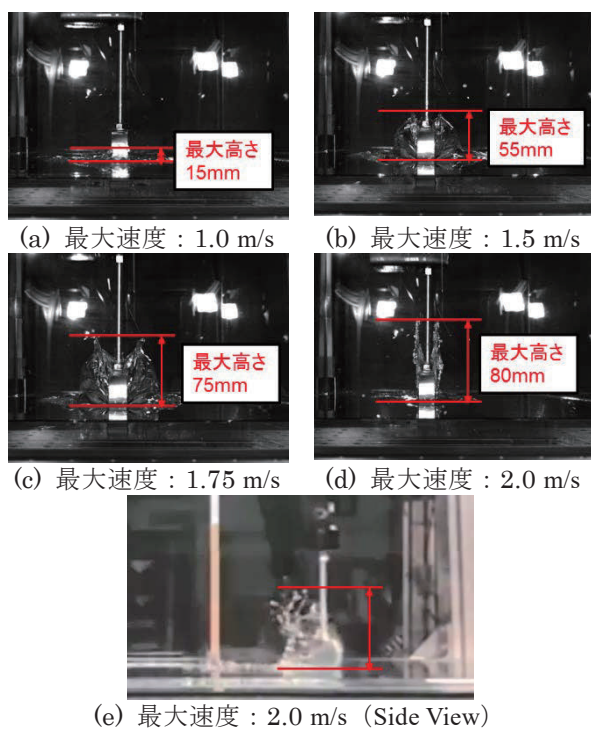


図 10 簡易試験結果の一例

方法ではなく、電動モータ駆動制御のレール走行台車を用いた方法を考案した。供試体を速度10 m/s以上の一定速度で滞水区間距離10 m以上移動させ、水跳ね現象を発生させて試験を実施する予定である。

## 5. まとめ

滞水状態の滑走路を走行する航空機のタイヤから生じる水しぶきの分布、および水に起因する抵抗の予測技術の研究に関する取り組みについて紹介した。予測ツールとして粒子法解析ツールP-Flowを開発中であり、その内容を説明するとともにNASAによる水跳ね試験の模擬解析の結果を示した。解析結果ではタイヤからの水跳ねに特徴的な側方および前方への水しぶきを確認された。また、荷重によるタイヤの変形を考慮することで実験結果と整合する水跳ね角度が得られることを示した。予測ツールの検証データ取得に向けた取り組みも進行中であり、水の挙動を計測するための技術を獲得するための簡易試験装置を構築した。準実

表2 簡易試験の試験条件の一例

供試体諸元	φ50 mm×20 mm アルミ円柱 (回転なし)
供試体速度	1.0 m/s, 1.5 m/s, 1.75 m/s, 2.0 m/s
液体	水
液体の深さ	10 mm (底面と供試体間の距離: 1 mm)
液体の温度	18 °C
室温	20 °C
湿度	40%

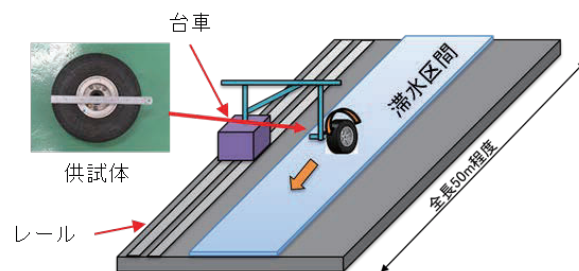


図 11 準実機スケール試験装置の構想

機スケール試験も計画中であり、試験結果をまとめてP-Flowの検証用データベースを構築する予定である。

## 謝辞

本研究ではJAXAスーパーコンピューターJSS2を利用しました。関係各位に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) Gooden, J. H. M.: Engine ingestion as a result of crosswind during take-offs from water contaminated runways, NLR-TP-2013-201, 2013.
- 2) "A350 XWB MSN004 successfully undertakes water ingestion tests at Istres". <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2014/05/a350-xwb-msn004-successfully-undertakes-water-ingestion-tests-at-istres.html> (retrieved 2017).
- 3) ESDU: Estimation of Spray Patterns Generated from the Sides of Aircraft Tyres Running in Water or Slush, STD 83042, 1998.
- 4) Zhao, K., Liu, P., Qu, Q., Lin, L., Lv, J., Ding, W., Agarwal, R. K.: Numerical Simulation of Aircraft Tire-Generated Spray and Engine Ingestion on Flooded Runways, *Journal of Aircraft*, **54**(2017), pp. 1840-1848.
- 5) Zhao, K., Liu, P., Qu, Q., Ma, P., Hu, T.: Flow physics and chine control of the water spray generated by an aircraft rigid tire rolling on contaminated runways, *Aerospace Science and Technology*, **72**(2018), pp. 49-62.
- 6) Barrett, R. V.: Spray from aircraft undercarriages at high speed-a model investigation, *Aeronautical Journal*, **81**(1977), pp. 220-225.
- 7) Daugherty, R. H., Stubbs, S. M.: Measurements of Flow Rate and Trajectory of Aircraft Tire-Generated Water Spray, NASA TP-2718, 1987.

- 8) 中北和之, 青山剛史, 浜本滋: JAXA における多分野統合基盤システム (ISSAC) の研究開発, 第 51 回流体力学講演会/第 37 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 1A11, 2019.
- 9) 越塚誠一, 柴田和也, 室谷浩平: 粒子法入門, 丸善出版, 2014.
- 10) 室谷浩平, 大地雅俊, 藤澤智光, 越塚誠一, 吉村忍: ParMETIS を用いた MPS 陽解法の分散メモリ型並列アルゴリズムの開発, *Transactions of JSCE*, **20120012**(2012),
- 11) 大地雅俊, 越塚誠一, 酒井幹夫: 自由表面流れ解析のための MPS 陽的アルゴリズムの開発, *Transactions of JSCE*, **20100013**(2010),
- 12) Miyajima, T., Kubota, K., Fujita, N.: An optimization of search for neighbour-particle in MPS method for Xeon, Xeon Phi and GPU by using directives, HPC Asia, 2018.
- 13) Mitsume, N., Yoshimura, S., Murotani, K., Yamada, T.: Explicitly represented polygon wall boundary model for the explicit MPS method, *Comp. Part. Mech.*, **2**(2015), pp. 73-89.
- 14) 辻村光樹, 窪田健一, 佐藤哲也, 高橋孝, 村上桂一: 粒子法を用いた液滴解析における空気力のモデル化, *ながれ*, **38**(2019),