

論文・解説

19

## 被水シミュレーションを用いた実車被水量の予測技術 Prediction of Amount of Water Received for Vehicle by Using Splash Simulation

丸山 慧<sup>\*1</sup> 土屋 明宏<sup>\*2</sup> 吉田 敏弘<sup>\*3</sup>  
Satoshi Maruyama Akihiro Tsuchiya Toshihiro Yoshida  
山根 貴和<sup>\*4</sup> 上岡 孝志<sup>\*5</sup> 落岩 克哉<sup>\*6</sup>  
Takakazu Yamane Takashi Kamioka Katsuya Ochiwa

### 要約

自動車の防錆品質の適正化のためには、部品ごとの腐食環境を定量化し、それぞれの環境に応じた防錆処理を施す必要がある。しかしながら、車両の構成部品は何万点にも及ぶことから、実車での腐食環境計測には膨大な時間、コストを要する。そこで、防錆開発の効率化のために部品ごとの腐食環境を予測する上で最も重要な因子である走行中の部品ごとの被水量に着目し、被水シミュレーションの開発に取り組んだ。流体解析手法として Moving Particle Simulation (MPS) 法を活用することでタイヤからの水跳ね挙動を再現し、更に車両周りの気流速度データとの連成解析を行うことで、極めて高精度な被水量の予測技術を確立した。

### Abstract

In order to optimize the quality of anti-corrosion for vehicle, it is necessary to quantify corrosion environment of each component and provide appropriate treatment according to the environment. However, it takes much time and cost to measure corrosion environment on vehicle because a vehicle is composed of tens of thousands of parts. For the efficient development of anti-corrosion performance, we have worked on developing the splash simulation, focusing on the amount of water received on the vehicle while running, which is the most important factor to predict the corrosion environment for each component and developed the splash simulation. We have replicated splash behavior from own tire by utilizing the Moving Particle Simulation (MPS) as the CFD (Computational Fluid Dynamics) method. Furthermore, we have developed the highly accurate prediction of the amount of water received by conducting a water-airflow velocity coupled analysis around the vehicle.

**Key words :** Rust prevention, Reliability, CFD

### 1. はじめに

腐食とは金属と水の電気化学反応であり、金属表面に形成する水膜の性質とその持続時間の影響を強く受ける。自動車の腐食を促進する因子としては、車体に付着した塩が挙げられる。塩の付着量が多いほど、水膜中の電気伝導度が増加し、その吸湿作用により水膜の持続時間が長時間化する。従って、東南アジアに代表される飛来海塩が多い地域と、欧米の寒冷地に代表される冬季に凍結防止塩を散布する地域では腐食起因の車両故障が問題となる<sup>(1)</sup>。このような問題を起こさないためには、地域ごとの腐食環境を定量化し、適切な防錆処理を設定する必要がある。そこで、走行中の自動車各部位の腐食環境を定量的に測定可能な腐食環境計測システムを構築し<sup>(2) (3)</sup>、本システムにより得られた計測データと走行地域の気象

データを関連付けて、大規模データを解析する技術を開発した。その結果、気象データを元に海塩地域における腐食環境が予測可能となった<sup>(4)</sup>。更に、本手法を発展させることで、凍結防止塩散布地域における気象データを元に腐食環境を予測する技術を開発した<sup>(5) (6)</sup>。これらの成果により、気象データを元に地域ごとの腐食環境については、おおむね予測が可能となった。一方で、車両の部品ごとの腐食環境を定量化するためには、現状何万点にも及ぶ車両の構成部品の腐食環境を計測する他なく、そのためには膨大な時間、コストを要する。そこでマツダは、部品ごとの腐食環境を予測する上で最も重要な因子である走行中における被水量の予測技術を確立した。本稿では、凍結防止塩散布地域を対象として、新規に開発した被水シミュレーションを用いた被水量の予測結果と実車試験結果との比較を行い、その精度を検証した結果について報告する。

\*1~5 車両実研部  
Vehicle Testing & Research Dept.

\*6 市場品質部  
Field Quality Dept.

## 2. 凍結防止塩散布地域の被水予測技術

### 2.1 凍結防止塩散布地域における被水シーン

凍結防止塩散布地域においては、凍結防止塩により凝固点が降下することで溶解した雪により水たまりが形成され、このような水たまり上を走行する際に塩水が車体へと付着する。従って、海風により塩が運ばれ、車体へ一様に塩が付着する飛来海塩地域と異なり、凍結防止塩散布地域においては、走行中の被水量が車両の腐食因子として極めて重要である。被水シミュレーションを構築するにあたっては、走行中の被水シーンを Fig. 1 のように分類した。図中(1)の自車のタイヤによる水跳ねにより、サスペンションを始めとした車両下回りの部品やドア、エンジンルーム内の比較的低い位置にレイアウトされた部品が被水する。また、図中(2)の前走車からの水跳ねにより、ドアやボンネット、ルーフといった車両外板の他、フロントグリルを通過しエンジンルーム内の車両前方側にレイアウトされた部品が被水する。新規に開発する被水シミュレーションにはこれら2つのシーンを再現可能であることが求められる。

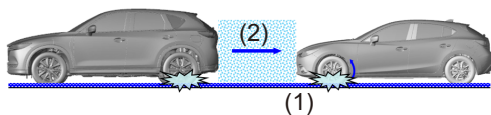


Fig. 1 Schematic Illustration of The Splash in The Region Where Anti-freezing Salt is Spread

### 2.2 被水シミュレーション技術の課題と対応

車両周りの流体解析を行う上では、解析空間を格子状に分割し計算点とする格子法を用いるのが一般的であり、これまでに多くの研究が報告されている<sup>(7)(8)</sup>。しかしながら、今回対象としている自車のタイヤによる水跳ねや、前走車からの水跳ねの飛散を格子法で再現する際には、広大な解析空間を格子により微細に分割する必要があり、計算コストの増加が課題になる (Fig. 2(a))。更には、流体をオイラー的に計算する格子法では水やオイルのような液体特有の分裂や凝集といった挙動を再現するのが困難である。そこで、流体を粒子の集まりとして表現する粒子法に着目した。粒子法を用いることにより、計算コストを小さくするだけでなく、車両周りにおける水の分裂や凝集といった現象の再現が期待される (Fig. 2(b))。

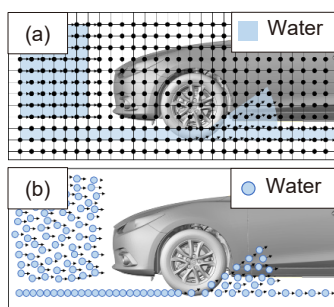


Fig. 2 Schematic Illustration of The Simulation Concepts (a) Grid Method (b) Particle Method

### 2.3 粒子法の概要

本研究では、粒子法の中でも Moving Particle Simulation (MPS) 法を用いたプロメテック・ソフトウェア(株)製の流体解析ソフトウェアである Particleworks を用いて解析を行った。MPS 法は、有限個の粒子により非圧縮流れの支配方程式を離散化する計算手法である。非圧縮性流れの支配方程式は連続の式(1)とナビエ・ストークス方程式(2)である<sup>(9)</sup>。

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

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

ここで、 $\rho$ : 密度、 $\bar{u}$ : 速度、 $P$ : 圧力、 $\nu$ : 動粘性係数、 $\bar{g}$ : 重力加速度である。

## 3. 水跳ね挙動の可視化

### 3.1 実験方法

被水シミュレーションを開発する上で、実車の水跳ね挙動及び被水箇所の可視化に取り組んだ。

#### (1) タイヤによる水跳ね

実車の走行中、タイヤにより跳ね上げられた水の挙動を明らかにするために、水深 10mm に設定した試験路の上を走行し、水の飛散を車両前方及び後方から高速度カメラにより撮影した。このとき、水の飛散に及ぼす車速の影響について調べるために車速は 20, 40, 60km/h の 3 水準とした。

#### (2) 前走車からの水跳ね

前走車からの水跳ねによる被水を再現するために、風洞試験室において車速 100km/h 相当の風を与えながら、車両前方に設置したノズルから水を散布した。ここで、フロントグリルやラジエーターへの通過といったユニークな現象があるために、シミュレーション化が最も困難なエンジンルーム内の部品における被水箇所の面積率を指標としてシミュレーションを開発した。開発を行う上で、被水した際に赤く変色する被水検知薬をエンジンルーム内の部品へ塗布し、エンジンルーム内の被水箇所の可視化に取り組んだ。

### 3.2 実験結果

#### (1) タイヤによる水跳ね

車速 60km/h で走行した際のタイヤによる水跳ねを Fig. 3 に示す。水は車両の前方及び横方向へと飛散しているが、このとき、横方向へ飛散する水に注目すると、車両進行方向に対して正面視でおおよそ 45°の角度で飛散していることが分かる。車速の増加に伴い、タイヤから跳ね上げられた水の最高到達高さは高くなるものの、その飛散角度はおおよそ 45°で一定であった。

#### (2) 前走車からの水跳ね

車両前方から散布された水は、フロントグリルを通過してエンジンルーム内へと侵入し、エンジンカバーやオイルパンなど広い範囲で被水が認められた。侵入した水はそれぞれの部品へ付着した後、風の影響を受けて車両後方側へ流れていた。

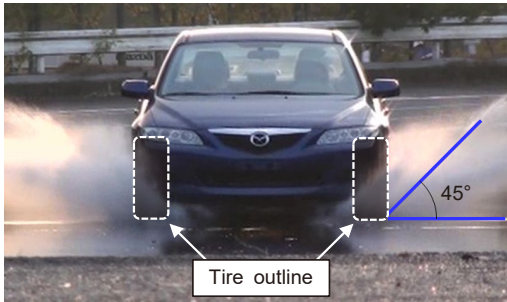


Fig. 3 Splash Behavior From Own Tire at 60km/h

### 4. 被水シミュレーションの開発

#### 4.1 シミュレーション条件

##### (1) タイヤによる水跳ね

自車のタイヤによる水跳ねのシミュレーション化は、水たまりを模擬した試験路モデル上で車両モデルを走行させることで行った。試験路モデルは路面モデルと水たまりから構成されており、幅 2.6m の路面モデル上に水深 10mm の水たまりを設定した。このとき、水たまりは粒子径が 2mm の粒子に対して密度や動粘性係数といった水の物性を付与し、路面モデルとの境界条件を与えることで作成した。車両モデルについては、20、40、60km/h の車速に応じた車両前方への進行速度を与え、車両モデルのうちタイヤとホイールに対しては、車速 20、40、60km/h 相当の回転速度を与えることで、水粒子にタイヤから圧力を与え、タイヤによる水跳ねを模擬した (Fig. 4)。

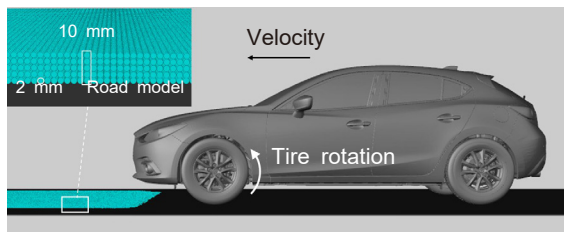


Fig. 4 Simulation Condition for Splash from Own Tire

##### (2) 前走車からの水跳ね

前走車からの水跳ねのシミュレーション化は、ノズルに相当する水の流入口を設け、車両前方から粒子を飛散させることで行った (Fig. 5)。粒子径は 2mm とし、密度や動粘性係数といった水の物性を付与した上で、飛散する速度や量といった試験条件は実車試験に揃えた。このとき、水の飛散に対する車両周りの風流れの影響を評価するために、気流速度有無の Case1 と Case2 の 2 つの条件で解析を行った (Table 1)。このとき、Case2 では、粒子に対して空気抵抗力を作用させるために、外部の流体解析ソフトを用いて取得した車速 100km/h 相当の車両周りの気流速度データをインポートした。更に、インポートした気流に対して粒子が追従するように、抗力係数のパラメータ設定を行った。一方で、Case1 では上記の気流速度データのインポート及びパラメータ設定は行わずに解析を行った。

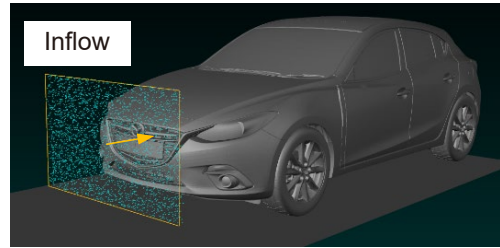


Fig. 5 Simulation Condition for Splash from Vehicle Ahead

Table 1 Simulation Conditions about The Two Cases for Splash from Vehicle Ahead

| Property          | Case1 | Case2                     |
|-------------------|-------|---------------------------|
| Airflow Velocity  | None  | Imported from Other CFD   |
| Parameter Setting | None  | Provides Drag Coefficient |

#### 4.2 シミュレーション結果

##### (1) タイヤによる水跳ね

車両後方からとらえた自車のタイヤによる水跳ねのシミュレーション結果と実車試験の結果を比較して Fig. 6 に示す。車速の増加に伴いタイヤからの水跳ねの最高到達高さは高くなる一方で、その飛散角度はおよそ 45° で一様であり、実車試験における水跳ねの挙動をよく再現できている。

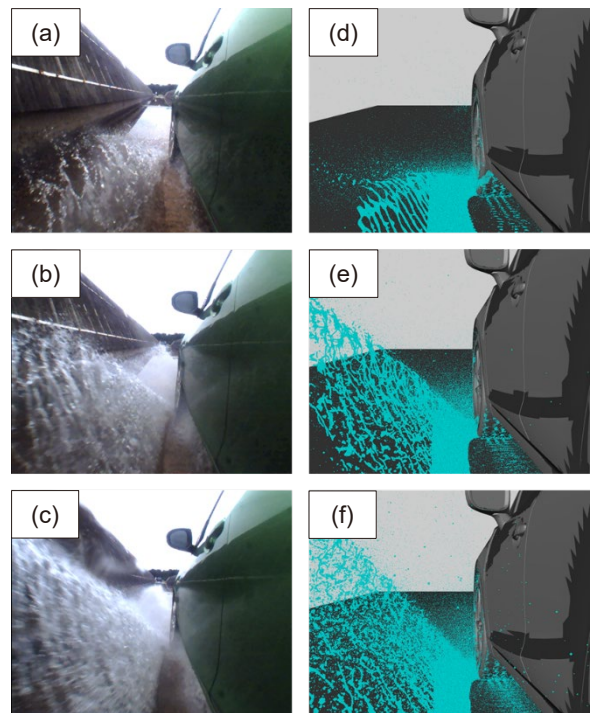


Fig. 6 Comparison of Splash Behavior from Own Tire between Experiments (a, b, c) and Simulations (d, e, f) at 20km/h (a, d), 40km/h (b, e) and 60km/h (c, f)



(2) 前走車からの水跳ね

前走車からの水跳ねのシミュレーション結果を Case2 においてインポートした気流速度データとともに、車両右半分の断面図で示す (Fig. 7)。フロントグリルから流入した風はエンジンカバー上方及びオイルパン下方を通り、車両後方まで流れていく (Fig. 7(a))。このとき、気流速度データをインポートし、パラメーター設定を行った Case2 は、気流速度データをインポートしていない Case1 に対し、粒子がエンジンルーム内の車両後方まで飛散しており、インポートした気流に対して粒子が追従していることが分かる (Fig. 7(b,c))。更に、エンジンルーム内に侵入した水粒子により被水した箇所を可視化するために、解析モデルに対する粒子の衝突箇所を元にマッピングを作成し、実車の被水箇所との比較を行った。図中の数字は被水箇所の面積率を表す (Fig. 8)。Case1 では、エンジンカバーやオイルパンの前端までしか被水が認められず、面積率も一致していないのに対し (Fig. 8 (c, d)), 気流速度データをインポートした Case2 では、被水箇所がより後方まで拡大しており、面積率についても実車とよく一致している (Fig. 8(a, b, e, f))。従って、被水シミュレーションの精度向上を図る上で、車両周りの気流速度データをインポートし、解析を行うことが有効であることが分かった。

4.3 シミュレーション結果に対する考察

4.2.(1)項において、MPS 法を用いて開発した被水シミュレーションがタイヤからの水跳ね挙動をよく再現できていることを明らかにした。更に 4.2.(2)項において、車両周りの気流速度データをインポートすることで、前走車からの水跳ねが車両周りの気流に追従する様子を再現可能であることを明らかにした。これらの知見を踏まえ、自車のタイヤによる水跳ねと前走車からの水跳ねの両方を併せて予測できる被水シミュレーションを開発した。気流速度データを用いずに解析した結果 (Fig. 9(b)) に対し、車両周りの気流速度データをインポートすることにより、自車のタイヤによる水跳ねと前走車からの水跳ねの両方が気流に対して追従しているのが認められる (Fig. 9(a, c))。更に、実車走行後の被水箇所を被水検知薬により、被水シミュレーションにおける被水箇所は粒子の衝突情報を元にマッピングを作成することでそれぞれ可視化し、被水箇所の比較を行った。図中の数字は被水箇所の面積率を表しており、被水箇所及び面積率はよく一致していることが分かる (Fig. 10)。なお、当初懸念されていた計算コストについても、MPS 法という新規手法を用いることにより、解析の開始から完了までおよそ 10 時間と実用上問題のない解析時間に抑えることができた。

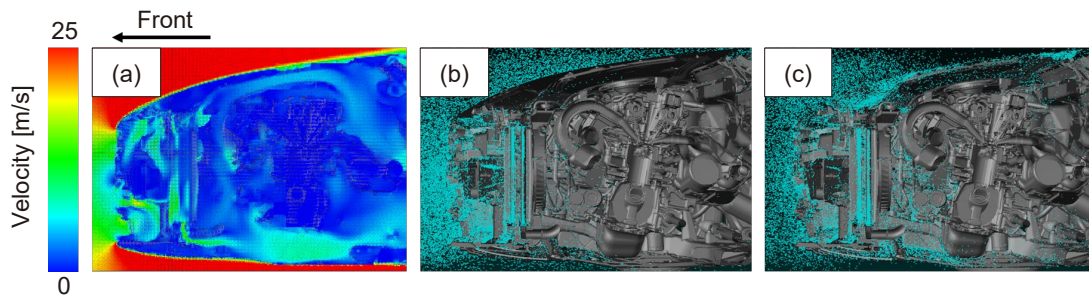


Fig. 7 Simulation Results of Splash from Vehicle Ahead, Showing The Cross Section of The Right Part of Vehicle  
 (a) Airflow Velocity Data Imported for Case2, (b) Case1 (without Airflow Velocity),  
 (c) Case2 (with Airflow Velocity)

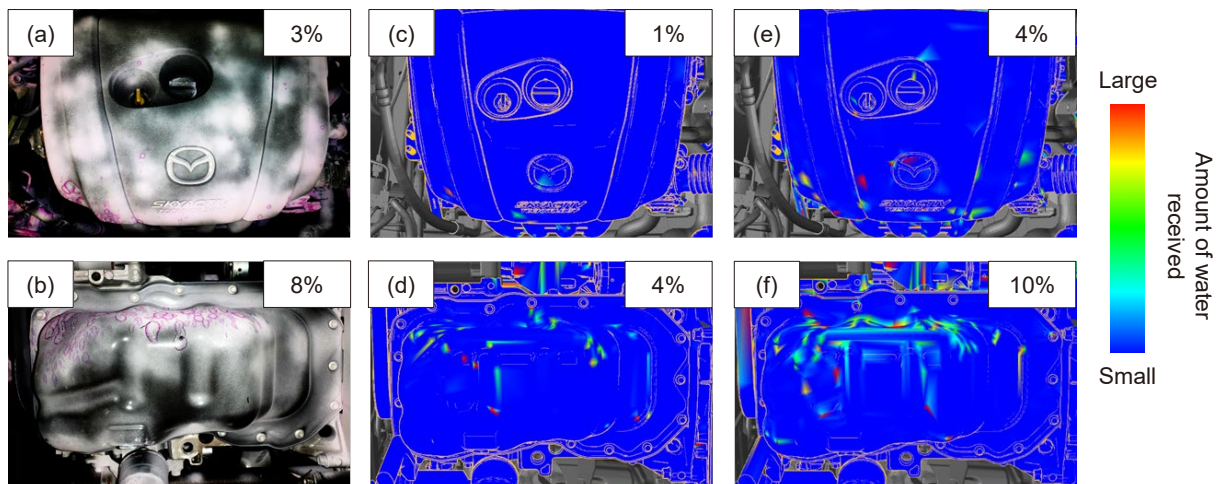


Fig. 8 Comparison of Areas Water Received between Experiments (a, b) and Simulations without Airflow Velocity Data (c, d), with Airflow Velocity Data (e, f) at Engine Cover (a, c, e) and Oil Pan (b, d, f)

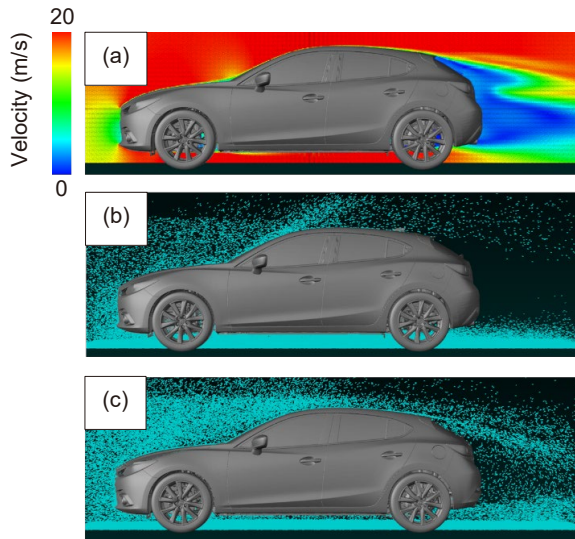


Fig. 9 Newly Developed Splash Simulation, Showing (a) Airflow Velocity Data Imported and Splash Behavior around The Vehicle (b) without Airflow Velocity and (c) with Airflow Velocity

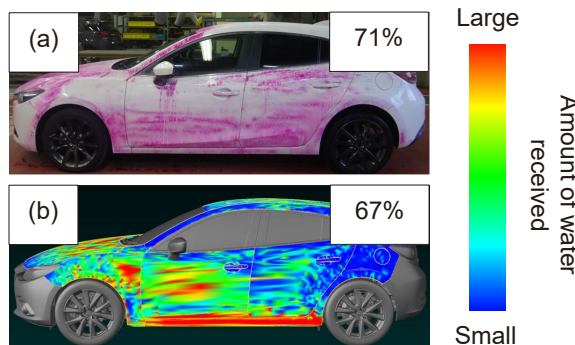


Fig. 10 Comparison of Areas Water Received between Experiments (a) and Simulation (b) at Body Side Components

## 5. 被水量予測結果の検証

### 5.1 実車被水量の定量化手法

開発した被水シミュレーションを用いて実車における被水量の予測技術を構築する。まず、シミュレーションの精度を検証する上で指標となる実車被水量の定量化手法について検討を行う。被水量の測定方法については、対象部品の近くにタンクを設置し、飛散してきた水を採用する方法や多孔質のシートで部品を覆い、浸透した水量を測定する方法などさまざまな報告<sup>(10)</sup>がされているが、本研究においては吸水性ポリマーシートを用いて測定を行った。被水量に対するポリマーシートの吸水量の評価をラボにて行ったところ、被水量が 2000g/m<sup>2</sup> 以内であれば被水量に対する吸水率はおよそ 80%であり、最大で 2400g/m<sup>2</sup> までの吸水が可能であるという知見が得られた (Fig. 11)。

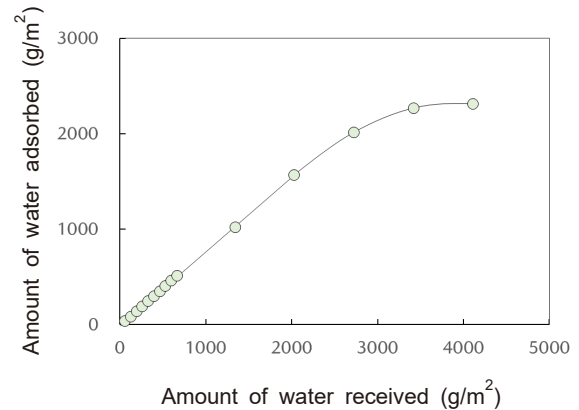


Fig. 11 Relationship between Amount of Water Adsorbed and Amount of Water Received

### 5.2 被水シミュレーションを用いた被水量の予測

被水シミュレーションにおける被水量の予測は粒子の衝突回数を元に式(3)により求めた。

$$L = V \times \rho \times N \tag{3}$$

ここで、 $L$ ：被水量、 $V$ ：一粒子あたりの体積、 $\rho$ ：密度、 $N$ ：粒子衝突回数である。MPS法の計算は粒子の体積一定で行っているため、粒子の衝突回数が多いほど被水量が多いという結果が得られる。

被水シミュレーションによる被水量の予測精度を検証するために、被水量が 2000g/m<sup>2</sup> 以下となる実車の 5 箇所にポリマーシートを装着した状態で走行し、吸水量の測定を行った。得られた吸水量は、5.1 節で得られた知見を元に被水量へと換算した (Fig. 12(a))。次に、被水シミュレーションにおいて実車でポリマーシートを装着した箇所と同様の部位にポリマーシートを模したモデルを挿入した後に解析を実施した (Fig. 12(b))。解析終了後に挿入したモデルに対しての被水量を式(3)により求めたところ、得られた被水量は実車試験における計測値とよく一致した (Fig. 13)。

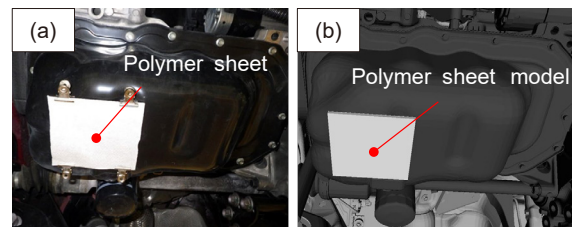


Fig. 12 Measurement Method Examples of Amount of Water Received by Using Polymer Sheets at Oil Pan (a) Experiments (b) Simulations



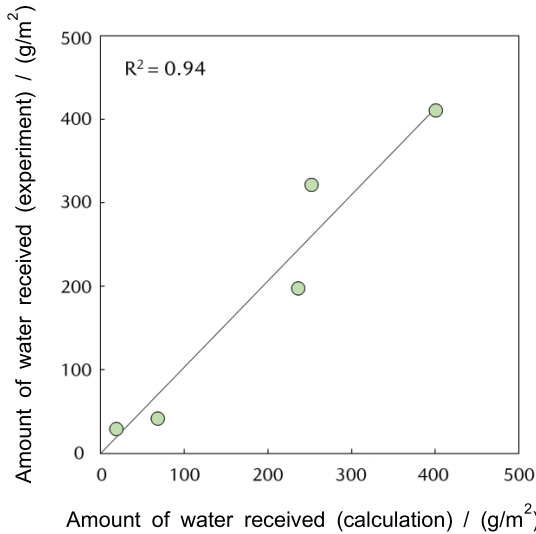


Fig. 13 Prediction Accuracy of Splash Simulation for Amount of Water Received

## 6. まとめ

車両部品の腐食環境予測を目的に、実車の被水状況を再現可能な被水シミュレーションを開発した。考案した被水量予測式により予測した被水量は実車の被水量とよく一致している。更に、本シミュレーション技術により予測した被水量から部品ごとの腐食環境を予測する技術を確認し、既に量産開発へ部分的に実用化している。

今後、本技術により得られた被水量と、腐食環境計測システムにより得られた測定値、気象データを組み合わせることで、部品あるいは市場ごとの腐食環境に応じた防錆仕様の適正化を可能とする。

## 参考文献

- (1) 田村優：自動車の錆と信頼性（故障物理と信頼性），日本信頼性学会誌，26巻，1号，pp.9-14（2004）
- (2) 福田克弘ほか：車両の腐食環境計測システムの開発，自動車技術会 2015 年春季大会学術講演会予稿集（2015），20155384 No.85-15S，pp.2023-2026
- (3) 福田克弘ほか：新計測システムを用いた車両腐食環境の定量化と解析，材料と環境 2018 講演集，B-106，pp.113-114（2018）
- (4) 中本尊元ほか：大規模データのクラスタリング分析による腐食要因推定技術の開発，第 65 回材料と環境討論会講演集，D-118，pp.351-352（2018）
- (5) 喜久山良式ほか：大規模データを用いた凍結防止塩散布地域の腐食環境分析，自動車技術会 2019 年秋季大会学術講演会予稿集（2019），20196108
- (6) 山根貴和ほか：車両腐食環境の定量化技術と分析手法の開発，自動車技術，Vol.74，No.7，pp.90-95（2020）
- (7) Prashant Khapane et al. : Wading Simulation - Challenges and Solutions, SAE Technical paper

(2014), 2014-01-0936, doi:10.4271/2014-01-0936

- (8) Mohan Makana et al. : Passenger Car Water Wading Evaluation Using CFD Simulation, SAE Technical paper (2016), 2016-28-0072, doi:10.4271/2016-28-0072

- (9) 越塚誠一ほか：粒子法入門，丸善出版，pp.24-27（2014）

- (10) Prashant Khapane et al. : Water Ingress Analysis and Splash Protection Evaluation for Vehicle Wading using Non-Classical CFD Simulation, SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems, pp.183-194（2017）

## ■ 著 者 ■



丸山 慧



土屋 明宏



吉田 敏弘



山根 貴和



上岡 孝志



落岩 克哉