

数値シミュレーション結果に基づいた 車両走行時の降雨強度推定手法の開発

Development of a Method for Estimating Rain Rates Considering Vehicle Speed Based on Numerical Simulation Results

東俊孝⁽¹⁾・山口弘誠・中北英一

Toshitaka AZUMA⁽¹⁾, Kosei YAMAGUCHI and Eiichi NAKAKITA

(1) 京都大学大学院工学研究科

(1) Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

It is well known that Japan has advanced Intelligent Transport Systems. “VICS” is one of the key components of these systems. The new service “VICS WIDE”, which is based on VICS, has delivered not only traditional traffic information but also weather-related information. In particular, radar-derived rainfall is useful for producing heavy rainfall areas. However, there has been no little discussion on rainfall intensity considering relative velocity of running vehicle. This paper describes a method for estimating rain rates considering vehicle speed using numerical simulation results. Finally, our results indicated that rain rates felt by a driver on an ordinary road was double XRAIN rainfall information.

キーワード: 数値シミュレーション, XRAIN, 降雨強度, 相対速度

Keywords: numerical simulation, XRAIN, rain rate, relative velocity

1. はじめに

1.1 研究の背景

近年, 都市域を中心とした局地的豪雨(とりわけ, 事前予測が難しく, 人命に関わる事象をゲリラ豪雨と呼ぶ)や集中豪雨の発生頻度が増加しており, 浸水等の被害も多数報告されている. 国土交通省では, より詳細な雨量情報の提供を目的としてXRAINを構築しており, 平成25年度からは河川情報センターを通じてXRAIN合成雨量を有料配信している. XRAIN合成雨量は, 従来のCバンドレーダ雨量と比較して, 時間的にも空間的にも高分解能となり, 精度の高い雨量情報を提供可能である. このため, 風水害軽減の強力なツールとして期待されている.

一方, 我が国では, VICS (Vehicle Information and

Communication System) と呼ばれる道路交通情報通信システムが知られている. VICSは, 都道府県警察や道路管理者により収集・加工された道路交通情報(渋滞情報, 特定区間の旅行時間, 交通規制等)をFM多重放送やビーコンといったメディアを介して, 車載機 (Automotive Navigation System) へ情報提供するシステムの総称である.

このようなシステム体系において, VICSセンターではFM多重放送による情報提供を主として担っている. 2015年4月からは, FM多重放送の帯域拡張に伴い, 新たなコンテンツを配信するサービス“VICS WIDE”を開始した(東ら, 2016). とりわけ, 多降水地区(以後, 豪雨エリアと呼ぶ)を車載機の電子地図上へ重畳することにより, 運転者に対して注意喚起するサービスは, 国内外を通じて初めての試みとな

る。このサービスは、国土交通省が運用管理する高性能レーダ雨量計ネットワーク（XRAIN：Extended radar information network）の観測値に基づいている。2016年度末時点では、河川情報センターから配信されるXRAIN合成雨量を情報源としている。XRAIN合成雨量の元データは、FM多重放送の東京放送局内だけでも約200 KB min.⁻¹となるため、限られた伝送帯域であるFM多重放送では、XRAIN合成雨量を車載機へ直接送信することは困難であった。つまり、豪雨エリアを車載機へ提供するためには、XRAIN合成雨量を加工した上で、情報量削減と運転者の視認性向上を両立する必要があった。

そこで、著者らは、運転に支障をきたす豪雨エリアをXRAIN合成雨量から抽出することにより、情報量を大幅に低減する手法を考案した（東ら，2014）。具体的には、豪雨エリアを表現する閾値を降雨強度50 mm h⁻¹に設定し、豪雨エリアを表現する多角形の頂点座標のみを抽出・伝送することで、FM多重放送で配信する情報量に低減できる仕組みを構築した。

この仕組みを活用した新サービスの開発過程において、著者らはFig. 1の赤色矢印のような「運転者が感じる降雨強度：走行時降雨強度 R' 」の推定手法を考案した（詳細は、巻末の付録A及び付録Bを参照）。

この推定手法を利用した場合、強雨時に一般道を平均的な基準速度となる50 km h⁻¹で走行すると、普通車のフロントガラス上では2.3倍の降雨強度になる。例えば、Fig. 2のようにXRAIN合成雨量が示す停止時降雨強度が50 mm h⁻¹の場合、走行時降雨強度は約117 mm h⁻¹となり、前方視認性の悪化により減速対応が必要となる（東ら，2015）。

つまり、先行研究では、「走行時降雨強度」を明示的に取り上げていないのに対して、この研究では新たに着目している点が最大の特長となる。加えて、「走行時降雨強度」により、速度低下や走行危険性のある豪雨エリアを注意喚起情報としてサービス提供し、運転者の事前回避行動に結びつける試みが新しい。

一方、2015年の論文公表の段階では、屋内施設での人工降雨による停止車両の前方視認性のみを議論している。このため、強雨時に走行車両のフロントガラス周辺に発生する気流場や自然界の雨滴粒径による降雨強度への影響評価が課題として残っていた。

1.2 研究の目的

一般的に走行車両に対する降雨や風の影響を評価するには、大規模な風洞実験が必要となる。このような実験は、空気抵抗の低減による燃費性能や安定走行の向上を目的としており、車両のデザイン開発時に実施されるケースが多い（石原，2002；炭谷ら，

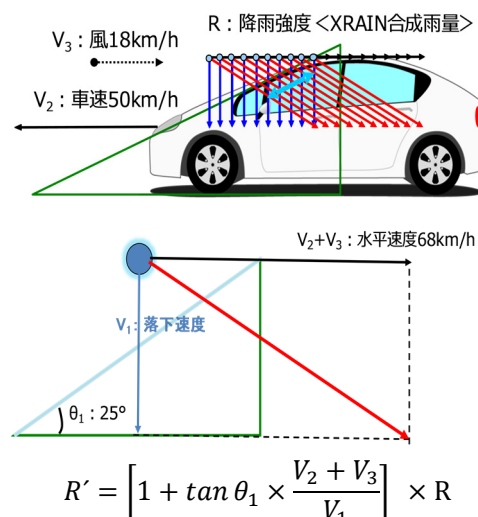


Fig. 1 Concept of estimating rain rates included relative velocity (see Azuma et al., 2015)

2004）。一方、運転者が感じる降雨強度に関連して、風洞実験により評価した研究事例は見当たらない。言い換えると、強雨時に走行車両のフロントガラスに衝突する雨滴を正確に測定すること自体が現実的ではない。加えて、自然界の雨滴粒径分布を精緻に再現できる屋内設備もない状況にある。

このため、数値シミュレーションにより走行車両周辺に発生する気流場や降雨状況を再現した上で、降雨強度への影響を評価する方法が最良の方策といえる。しかしながら、走行時の雨滴の挙動を把握するためには、空気中を移動する雨滴の空気抵抗を考慮したモデルを選定する必要があった。

そこで、本研究では自由表面で非圧縮性流れの計算ができる粒子法に着目した。従来手法では流体挙動を把握する際に格子が必須となっていたが、粒子法では格子を用いずに流体挙動を粒子運動から計算できる。そのため、自由表面流れの取り扱いが容易となり、移動境界問題への適用も可能となる。加えて、自然界の降雨では、強雨時において雨滴粒径分布の中央値が約2 mmに収束することが知られている（Brangi et al, 2003）。このため、本研究では雨滴粒径を2 mmとして数値シミュレーションを実施する方針とした。

以上より、本研究では、数値シミュレーション結果に基づいた走行時降雨強度の推定式を開発する。具体的には、有限体積法に基づいた数値シミュレーションにより、向かい風及び車両走行に伴う雨滴の相対速度を考慮した上で、走行時に車両周辺で発生する気流場を再現する。加えて、粒子法（越塚，2002）に基づいた数値シミュレーションへ反映させることにより、気流場による雨滴の挙動を解析する。最終

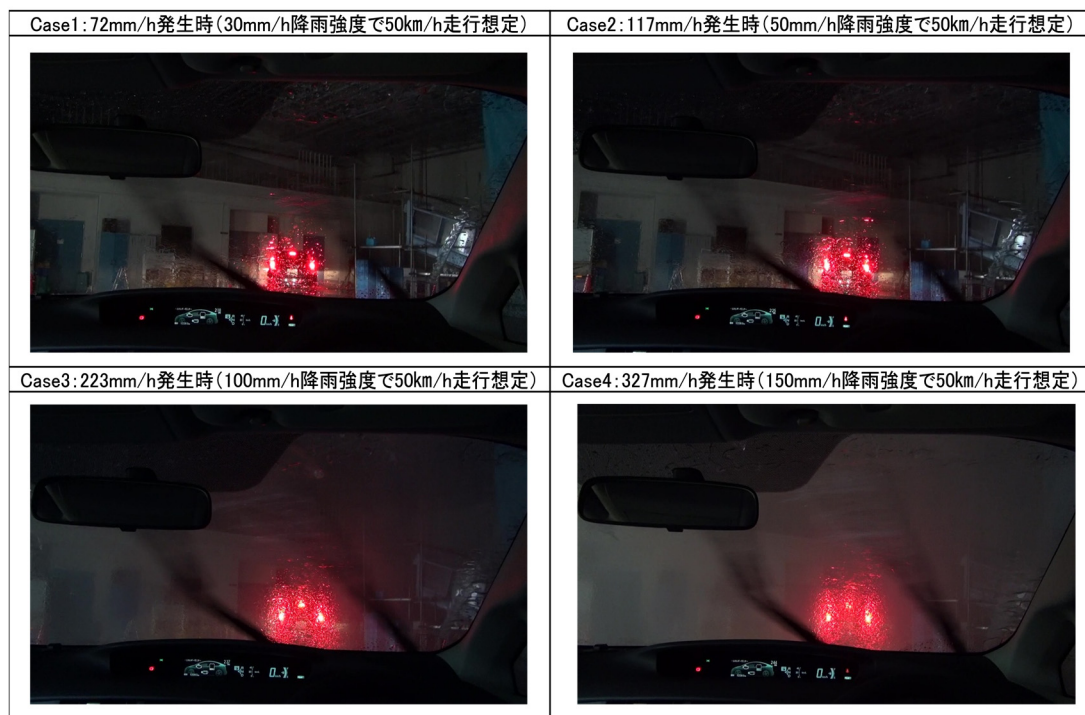


Fig. 2 Comparison of forward visibility seen from a vehicle during heavy rainfall (see Azuma et al., 2015)

的には、走行時にフロントガラスへ到達する雨滴の割合を算定した上で、気流場を考慮した走行時降雨強度推定式を構築する。

2. 数値シミュレーションに基づく解析手法

本章では、数値シミュレーションの概要を整理した上で、解析手法について説明する。

具体的には、気流場による雨滴挙動の解析手順を整理した上で、有限体積法による気流計算について説明する。加えて、粒子法の代表的な手法（越塚，2002）について、気流場に基づいた雨滴の挙動計算の概要と空気抵抗値の考え方について整理する。以下、各項目の内容について記載する。

2.1 気流場による雨滴挙動の解析手順

走行時降雨強度は、単位時間あたりに車両のフロントガラスに衝突する雨滴数から推定できる。このため、本研究では有限体積法による車両周辺の気流場を計算した上で、その結果を考慮した粒子法による数値シミュレーションから走行車両のフロントガラスに衝突する雨滴数を把握した。なお、走行時にフロントガラスに衝突する雨滴数を算出するには、精緻な車両モデルを用いた現実的な雨滴挙動の再現と解の収束が不可欠となる。解析対象とした標準的

な普通車両の3次元モデルをFig.3に示す。

2.2 有限体積法による気流計算

本節では、有限体積法における流体解析の基礎方程式を説明した上で、離散化の手順を整理する。

(1) 流体解析の基礎方程式

運動量保存の法則より、Navier-Stokes方程式のEinsteinの縮約記法では、式(1)で定義される。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + g \quad (1)$$

ここでは、流速 u [m s^{-1}]、時間 t [s]、密度 ρ [kg m^{-3}]、流体の圧力 P [N m^{-2}]、動粘度 ν [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]、重力加速度 g [m s^{-2}]、添字 i, j の値が1で x 方向成分、2で y 方向成分、3で z 方向成分となる。加えて、質量保存の法則より、連続式のEinsteinの縮約記法では、式(2)で定義される（補足説明は付録Cを参照）。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

本解析では、上記の2式より速度 u_i (3成分) 及び圧力 P を求める。なお、式(1)のNavier-Stokes方程式は、以下のような力の釣り合いを意味する。

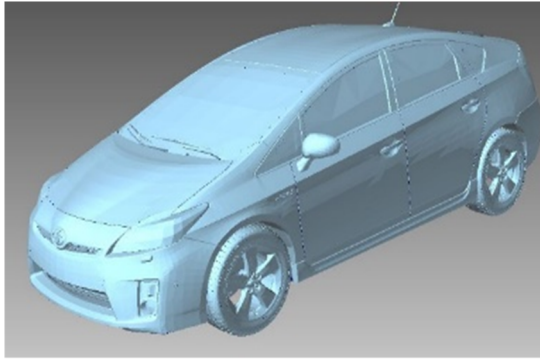


Fig. 3 Three-dimensional model of a standard-sized car used for analysis

質量×加速度＝圧力＋粘性力＋重力

(2) 離散化及び領域分割

離散化とは、Navier-Stokes方程式など直接解くことができない基礎方程式を格子等により分割した後、連立方程式に変換することである。離散化により得られる解は近似解となる。つまり、離散化することにより、連立方程式として扱うことができ、コンピュータによる計算が可能となる。

このため、全体の近似式を導くためには、計算領域を複数の領域に分割する必要がある。言い換えると、分割された領域ごとに基礎方程式の近似式を導入する。

最終的には、領域毎の近似式をマトリックスの形でくみ上げる。細かく分割された領域は近似の精度が上昇するものの、近似式が多くなるために計算時間が増加する問題がある。

2.3 粒子法による雨滴挙動の把握

本節では、気流場に基づいた雨滴の挙動計算の概要を整理した上で、非圧縮性流れの空気抵抗値の計算式について説明する。

(1) 気流場に基づいた雨滴の挙動計算

(a) 粒子法の概説

粒子法は歴史が古く、Los Alamos研究所での PAF 法 (Particle-and-Force method) が最初と言われている。その後、様々な手法が提案されているものの、本研究では、粒子法に非圧縮性流れのアルゴリズムを導入した MPS 法 (Moving particle Semi-implicit method) を用いた (越塚, 2002)。

MPS 法は、自由表面非圧縮性流れの計算ができる数値シミュレーション手法の一つであり、車両走行時にフロントガラスへ衝突する前後の雨滴挙動を分

析するのに最適といえる。一方、従来技術となる格子法では、流体挙動を格子により計算している。

つまり、MPS 法では、格子を用いずに流体挙動を粒子運動から計算できるため、以下の特徴を有する。

- ・格子生成作業が不要
- ・自由表面流れの取り扱いが容易
- ・移動境界問題への適用に優位
- ・流体と剛体の連成問題への適用が可能

(b) 離散化

MPS 法では、有限体積法に代表される格子法と同様に、以下の支配方程式を解いている。

- ・質量保存の法則に基づいた連続式

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (3)$$

- ・運動量保存の法則に基づいた Navier-Stokes 方程式

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = -\frac{\nabla P}{\rho} + \nu \nabla^2 \vec{u} + g \quad (4)$$

これらの式では、密度 ρ [kg m^{-3}], 速度 u [m s^{-1}], 圧力 P [N m^{-2}], 動粘度 ν [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$], 重力加速度 g [m s^{-2}] となる。勾配や発散といった微分演算子に対応する粒子間相互モデルに適用することで離散化する。なお、Navier-Stokes 方程式の離散化では、以下の方法が異なる。

- ・有限体積法：オイラー法

現象を空間の固定された点 (格子) で観測する方法である。

- ・粒子法 (MPS 法)：ラグランジュ法

個々の物体の運動 (粒子の動き) を観測者も同様に移動しながら観測する方法である。

(2) 非圧縮性流れの空気抵抗値

雨滴の流れを非圧縮流れと仮定することにより、前述した式 (4) で定義できる。このため、空気抵抗項は、式 (5) のように表現される。

$$\vec{D} = \frac{C_D}{2} \rho_{air} |\vec{V}| \vec{V} S \quad (5)$$

ここでは、抗力係数 C_D , 空気の質量密度 ρ_{air} [kg m^{-3}], 空気と液体の相対速度 $\vec{V}$ [m s^{-1}], 雨滴の代表面積 S [m^2] となる。

本研究で用いた MPS 法では、隣接する格子点の空気速度から線形補完をすることで、雨滴座標における空気速度を算出する。これらの速度を利用して、空気抵抗値 $\vec{D}$ を求める。

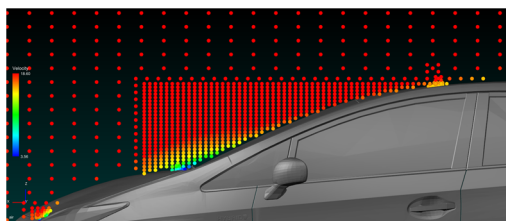


Fig. 4 Visualization of the synthesized airflow velocity in vehicle speed of 50 km h⁻¹ using finite deposition method

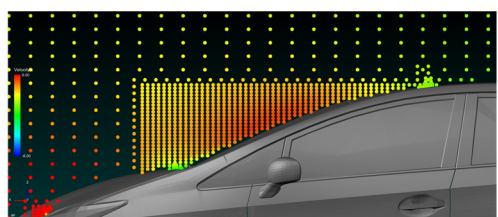
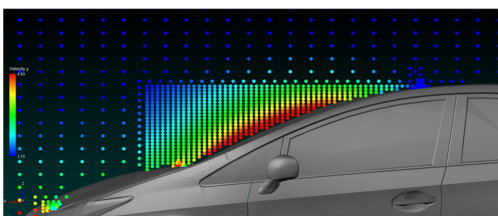
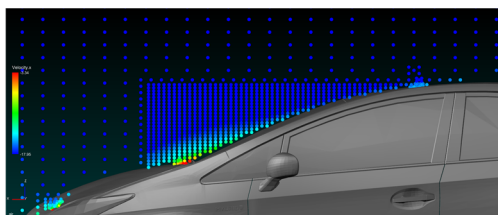


Fig. 5 Visualization of airflow velocity in X-axis (upper), airflow velocity in Y-axis (middle) and airflow velocity in Z-axis (lower)

3. 車両走行時における雨滴の挙動解析

本章では、前述した気流場の数値シミュレーション結果に基づいた雨滴の挙動解析について説明する。最終的には、走行時にフロントガラスへ到達する雨滴の割合を算出した上で、前述した走行時降雨強度の推定式を改良する。以下、詳細な内容を記載する。

3.1 走行車両周辺の気流場の再現実験

(1) 概要

本解析では、強雨時に発生する向かい風に加えて、走行車両の運転者から見た場合に雨滴に作用する相対速度を考慮し、SOLIDWORKS Flow Simulationにより気流場を再現した。

有限体積法を用いた車速50km h⁻¹におけるフロントガラス端の気流場の合成速度をFig. 4、同一条件下3次元空間における各座標軸の速度をFig. 5に示す。

本解析では、車体による気流場の乱れが影響しない範囲の格子間隔は10 cmとし、車体周辺で気流場の変化が大きく、その微小な変化を正確に捉える必要がある部分の格子間隔は1 mmとした。加えて、雨滴に作用する3次元空間の流速(V_x : x方向の流速, V_y : y方向の流速, V_z : z方向の流速)を内部保持している。このため、最終的な気流場 V [m s⁻¹]は、3次元空間における各方向の流速の合成値とすることで、式(6)のように定義した。

$$V = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (6)$$

具体的な気流場の再現実験では、強雨時に発生する向かい風: 5m s⁻¹に加えて、水平方向の車速に応じた相対速度50km h⁻¹: 13.89 m s⁻¹を考慮した。雨滴を流出する部分の形状、流入角および流速等の位置関係を含む数値シミュレーションの条件をFig. 6に示す。

(2) 考察

気流解析の結果、フロントガラス下部は流速が小さく、上部に移動するに従って流速が大きな気流場が形成されていく様子を確認できた (Fig. 4)。加えて、フロントガラスに衝突する直前の雨滴は、車両の側方部へ押し出す気流場 (赤色領域) の影響により、フロントガラス自体に衝突しない現象を想定できた (Fig. 5 middle)。

次章の粒子法による数値シミュレーションにおいて、雨滴の挙動を詳細に確認する。

3.2 粒子法による数値シミュレーション

(1) 概要

本研究では、前述した気流場を考慮した上で、Particleworksにより走行車両のフロントガラスに衝突する前後の雨滴の挙動を再現した。雨滴粒径は、強雨時の平均的な雨滴粒径となる2 mmとした。本解析の概要は、以下の通りである。

(a) 液体物性(雨)

密度: 1000 kg m⁻³

粘度: 1e-6 m² s⁻¹

表面張力係数: 0.072 N m⁻¹

接触角: 90°

(b) 解析条件

粒子サイズ: 2 mm

物理時間: 0.5 s

解析次元: 3D

解析時間刻み: 0.0001 s

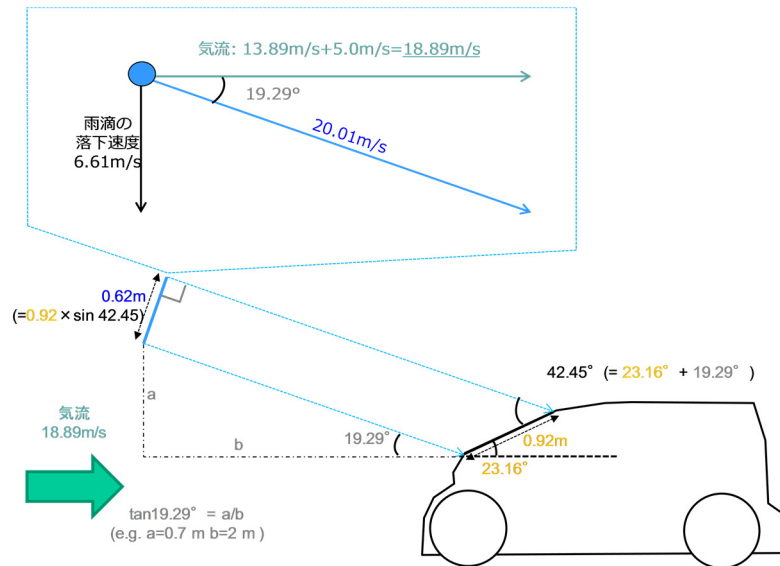


Fig. 6 Simulation condition of raindrop behavior by airflow velocity using MPS method

(2) 雨滴の射出条件

本研究では、気流場の影響を受けない場合、射出した全ての雨滴がフロントガラスに衝突することを想定し、Fig. 6のような数値シミュレーションの条件を設定した。加えて、雨滴が空気中を進行することを想定しているため、空気抵抗による減速も反映した数値シミュレーションを実施した。重力場については、流出口からの射出条件（角度および速度）において既に考慮しているものの、雨滴がフロントガラス等に衝突した後の挙動（雨滴が車体側部に流れ落ちる現象も含む）も把握する必要がある。このため、車両周辺を含めた計算領域内に重力が掛かる設定とした。なお、本解析では流出口からフロントガラスまでの距離が極端に短いため、射出された雨滴が分裂又は併合する現象は想定していない。つまり、フロントガラスの衝突前後において、雨滴の総数は維持されることとなる。

3.3 総合考察

気流場を想定した雨滴の流入速度の減速率を計測したところ、車速50 km/hの場合で約1%となることが分かった。言い換えると、空気抵抗によりフロントガラスへ流入する雨滴の合成速度が、初期値である「20.01 m/s」から終端時の「19.78 m/s」に変化した。

空気抵抗は、雨滴と空気の相対速度差から決定される。このため、水平方向の成分に関しては、向かい風の成分が相対速度差となり、雨滴が空気抵抗を受けたと考えられる。一方、鉛直成分に関しては、雨滴の重力落下に伴う空気抵抗により、減速の方向に作用したと考えられる。つまり、水平方向及び鉛直方

向の速度がともに減少したため、雨滴の合成速度が小さくなったと解釈できた。

次いで、粒子法に基づく数値シミュレーションにより、フロントガラス衝突後に車両の前方又は後方へ移動した雨滴、並びにフロントガラスへ衝突せずに車両の側方部へ逸れた雨滴を測定した。Fig. 7のように、車両を正面から見たフロントガラスを基準とし、前方を赤色、後方・上部を青色、後方・下部・左側を緑色、後方・下部・右側を黄色の領域に区分した上で、各領域における雨滴の存在比率を算出した。

その結果、走行速度が50 km/hの場合、気流場の影響により約15%の雨滴（緑色+黄色の存在比率）がフロントガラスに衝突しないことが判明した。言い換えると、気流場の影響により車両の左右それぞれに総雨滴数の約8%が逸れており、これらはフロントガラスを通じた運転者の前方視認性に影響しないことが分かった。

4. まとめ

本研究では、数値シミュレーションにより、強雨時に一般道を平均的な基準速度で車両が走行した場合、フロントガラスに衝突する総雨滴数の約15%が低減されることを示した。このため、東ら（2015）で提案した降雨強度 R と走行時降雨強度 R' の関係式に対して、気流場の補正係数である0.85を連乗し、最終的な走行時降雨強度推定式を式(7)と定義した。

従来の走行時降雨強度は、降雨強度50 mm/hでXRAIN合成雨量の2.3倍だが、新たな推定式では2.0倍となる。車両の相対速度を加味した気流場の影響は限定的であり、これまでの見解に変更はない。

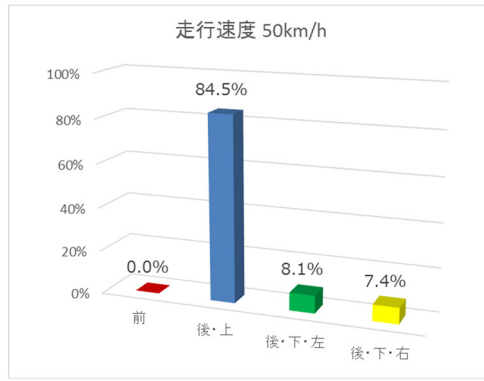
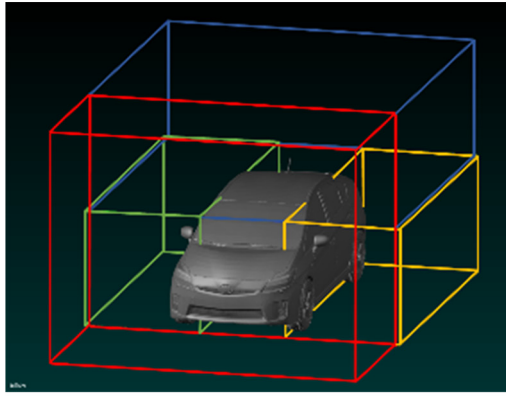


Fig. 7 Ratio of raindrops after collision with the windshield of running vehicle

$$R' = \left[1 + \tan(25\text{deg.}) \times \frac{68}{V_1} \right] \times 0.85 \times R \quad (7)$$

謝 辞

本研究は、京都大学防災研究所と（一財）VICSセンターの共同研究の一部として実施してきた内容に基づいている。粒子法の数値シミュレーション実験では、株式会社構造計画研究所の山田剛史室長代理にご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 東俊孝・古賀光彦・織田利彦（2014）：「降雨ポリゴン生成方法，コンピュータプログラム及びシステム」，特許第5570672号。
- 東俊孝・古賀光彦・中北英一（2016）：新たな道路交通情報サービス（VICS WIDE）におけるXRAINの活用，特集報文，土木技術資料，平成28年7月号。
- 東俊孝・矢上卓也・中北英一・古賀光彦（2015）：走行速度を考慮した降雨強度推定手法の提案，土木学会論文集B1（水工学），Vo.71，No.4，pp.493～498。
- 石原祐二（2002）：自動車の空気力学，ながれ21，pp.62-67。
- 小倉義光（1997）：メソ気象の基礎理論，東京大学出版。
- 警察庁（2013）：交通規制基準，平成23年2月4日付け警察庁丙規発第3号 警察庁丙交企発第10号。
- 越塚誠一（2002）：粒子法による流れの数値解析，ながれ21，pp.230-239。
- 炭谷圭二・前田和宏・一ノ瀬健一（2004）：自動車と流体力学：車体回り流れと空力特性，ながれ23，pp.445-454。

Atlas, D., Srivastava, R. C. and Sekhon, R. S. (1973) : Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence, Reviews of Geophysics and Space Physics, Vol.11, Issue 1, pp.1-35.

Bringi, V. N., Chandrasekar, V., Hubbert, J., Gorgucci, E., Randeu, W. L. and Schoenhuber, M. (2003) : Raindrop size distribution in different climatic regimes from disdrometer and dual-polarized radar analysis, Journal of the Atmospheric Sciences, Vol. 60, pp.354-365.

付 録 A

ここでは、東ら（2015）が開発した走行時降雨強度式への誘導過程を示す。

車両走行時は停止時に比べて、多くの降雨量がフロントガラスに当たると考えられる。加えて、フロントガラスに衝突する特定の雨滴に着目した場合、運転者から見た雨滴の速度は、水平成分となる車両走行の相対速度と鉛直成分となる雨滴の落下速度の合成値から算出できる。

そこで、車両走行時と停止時のフロントガラスに衝突する雨滴の存在範囲に基づいた新たな走行時降雨強度推定の関係は、以下のように導かれる。

まず、式(A1)に示すように、単位時間あたりの雨滴落下距離 H は、停止時のフロントガラスに衝突する雨滴存在範囲 L 及びフロントガラスの傾斜角 θ_1 から定義される。

$$\tan \theta_1 = \frac{H}{L} \quad \therefore H = L \times \tan \theta_1 \quad (A1)$$

次いで、式(A2)では、雨滴の落下速度 V_1 と車両走行に伴う相対速度 V_2 から合成速度が水平と成す角度 θ_2 を求める。なお、この関係は単位時間あたりの雨滴

落下距離 H と車両走行時に増加したフロントガラスに衝突する雨滴存在範囲 L' との関係に等しい。

$$\tan \theta_2 = \frac{V_1}{V_2} = \frac{H}{L'} \quad (\text{A2})$$

以上の関係式より、車両走行時に増加する雨滴の存在範囲 L' は、式(A3)で示される。

$$L' = \frac{H}{\tan \theta_2} = H \times \frac{V_2}{V_1} = L \times \tan \theta_1 \times \frac{V_2}{V_1} \quad (\text{A3})$$

車両走行時のフロントガラスに衝突する雨滴の存在範囲 $L+L'$ と停止時のフロントガラスに衝突する雨滴の存在範囲 L の比は式(A4)で示される。

$$\frac{L+L'}{L} = \frac{L+L \times \tan \theta_1 \times \frac{V_2}{V_1}}{L} = 1 + \tan \theta_1 \times \frac{V_2}{V_1} \quad (\text{A4})$$

従って、走行時降雨強度は、停車時降雨強度に比べて「 $1 + \tan \theta_1 \times V_2 / V_1$ 倍」に増幅すると解釈できる。

付 録 B

ここでは、付録Aに示した標準的な走行時降雨強度となる式 (A4) に対して、東ら (2015) によるパラメータの設定過程を説明する。

一般的な普通車のフロントガラス傾斜角は、20～30度である。このため、フロントガラス傾斜角 θ_1 は、平均的な数値となる25度を設定した。

次いで、降雨強度毎の雨滴粒径分布の中央値 (Median value diameter: D_0 [mm]) は、統計的手法である Marshall and Palmer 分布より、パラメータ A [mm⁻¹] 及び降雨強度 (Rain rate: R [mm h⁻¹]) と仮定すると、式(B1)で算出される。

$$D_0 = \frac{3.67}{A} = \frac{3.67}{4.1R^{-0.21}} \quad (\text{B1})$$

大気中での降水粒子の終端速度 (Terminal velocity: V_1 [m s⁻¹]) に関しては、多くの式が提案されている。ここでは、Atlas et al. (1973) による推定式を用いて、式(B2)に基づき D_0 毎に V_1 が算出できる。

$$V_1 = 9.65 - 10.3e^{-0.6D_0} \quad (\text{B2})$$

さらに、交通規制基準では (警察庁, 2013)、一般道路における基準速度を40～60 km h⁻¹に定めている。

ここでは、車両の走行速度 V_2 を一般道路の平均的な基準速度となる50 km h⁻¹に設定した。なお、強雨時には下降流の発生が知られており、車両の走行方向に対して向い風 V_3 が発生している場合が最も影響が大きい。このため、雨滴の水平方向の速度成分が $V_2 + V_3$ [m s⁻¹]に増大されると仮定した。加えて、気象庁統計情報や関連文献 (小倉, 1997) を参照し、強雨時には地上風速で5.0 m s⁻¹程度の強風が発生しているため、風速 V_3 を5.0 m s⁻¹:18 km h⁻¹に設定すると、水平方向の合成速度は、68 km h⁻¹となる。つまり、最終的な走行時降雨強度 R' [mm h⁻¹]は、XRAIN合成雨量 R [mm h⁻¹]とすると式(B3)で定義される。なお、降雨強度50 mm h⁻¹の終端速度 V_1 は、23.8 km h⁻¹である。

$$R' = \left[1 + \tan(25\text{deg.}) \times \frac{68}{V_1} \right] \times R \quad (\text{B3})$$

付 録 C

質量保存の法則から連続式を算出するためには、直方体への流入・流出量を考える必要がある。言い換えると、直方体(dx×dy)への流入質量は、密度×速度×断面積となるため、式(C1)で定義される。

$$\rho u \, dt \cdot dy + \rho v \, dt \cdot dx = (\rho u \cdot dy + \rho v \cdot dx) dt \quad (\text{C1})$$

一方、直方体からの流出質量は、流出速度が流入速度と流入速度からの単位距離あたりの変化分の合計値になることを考慮すると、式(C2)で示される。

$$\left(\rho u + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) dx \right) dy dt + \left(\rho v + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) dy \right) dx dt \quad (\text{C2})$$

質量保存の法則より、式(C2)から式(C1)の差分は無いため、整理すると式(C3)で表される。

$$\left(\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) \right) dx dy dt = 0 \quad (\text{C3})$$

密度変化を考慮しないと、式(C4)として扱える。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{C4})$$

直方体(dx×dz)及び直方体(dy×dz)への流入・流出質量も同様のため、式(2)で定義される。

(論文受理日: 2017年6月13日)