

IV-15

舗装路面の水はね現象の挙動分析

北海道大学大学院工学研究科 学生員 熊谷 洋
 いすゞ自動車(株) 寺口 和広
 北海道大学工学部 正員 加来 照俊

1 まえがき

降雨時に車が水たまりや轍を通過する際、水はね現象が起こり歩行者や対向車などに多大な迷惑をかける。また、最近の新聞などで、降雨時に高速道路などで起こる交通事故で、走行車線を走行していた車から、水をフロントガラスにかけられたことにより、運転者が視界を奪われてハンドル操作を誤り、事故を起こしたこと等が報告されている。また、車が水たまりに入ることにより、ハンドルを取られるなど運転者自身にも安全上の悪影響を与える。水はね現象の形態は、大まかには比較的水粒の大きいスプラッシュと水粒が小さく、車が通過する際に生ずる空気の流れに霧状になって運ばれるスプレーの二つに分類される⁽¹⁾。スプラッシュは、さらにタイヤの前に飛び出すボウウェーブと横に飛び出すサイドスプラッシュの2種類がある。スプレーに関する論文は数多く報告されているが、スプラッシュに関する研究は日本はもとより、世界でもほとんど報告されていない。本研究は、水はね現象の内のスプラッシュのメカニズムを実験的に解明していこうとするものである。

2 実験計画

2-1 水準の検討

道路の轍掘れの深さから、降雨時に轍にたまる水の深さは3~4cm⁽²⁾と報告されている。北海道の舗装は、ほとんどが非透水性舗装で、排水溝の能力不足や路面の局部的なたわみから、最大水深はさらに2~3cm深いものと予測される。降雨時の走行速度は、北海道の一般国道では本州に比べ線形などが良好なことから車種にかかわらず制限速度+10km/h程度で走行するものと思われる。水はね現象を、より物理的に明確にとらえるために、実際に起こり得る水深や速度を水準とする。

2-2 水はね試験種類

水はねの物理的な性質を把握するために、水はね試験を10月2日より10月28日まで、北海道鶴川町のいすゞテストコースにて実験を行った。実験には、乗用車、4tトラック、10tトラックの3車種を用い、速度は30、50、70km/hの3条件、水深は3、5、7cm

N値	3回(乗用車のみ2回)		
車型	乗用車	4tトラック	10tトラック
速度(km/h)	30	50	70
水深(cm)	3	5	7

水はね試験

N値	3回			
車型	10tトラック			
速度(km/h)	20	30	40	50
水深 (cm)	5			

飛散量測定試験

表1 実験の種類

An analysis of behavior of splash and spray on a pavement

By Yo KUMAGAI, Kazuhiro TERAGUCHI and Terutoshi KAKU

2-3-3 飛散水回収

水はね量試験は、縦30cm、横22cm、深さ20cmの箱を30個用いて飛散水を回収し、その重量を測定する。回収箱の設置位置を図3に示す。

2-3-4 解析

ビデオ及び、カメラで撮影したテープとスライドから水はね形状、高さ、水はね角度を求める。水はね距離については、プール横に設置したスタッフ棒をスケールとして測定する。

3 実験結果

目測やビデオやスライドから得られたピーク高さはタイヤから最高点までの距離がまちまちであるためにそのままでは値としては信頼性にかける。そのため速度により水の飛ぶ飛形を定め、とんだ距離から最高点までの距離を決めた飛形より求めて、幾何学的に最高点の値を求めた。

以上実験から得られたデータ及び補正したデータを多変量分析を行いそれぞれの因子がどの因子と相関があるかどうかを調べた。主な因子の組み合わせについて実験からわかったことを述べると、次のようになる。

3-1 飛散距離-速度-深さとの関係

速度が上がるにつれ、飛散距離は線形的に増加する。乗用車と4t車、10t車と比べると速度が低くかつ水深が浅いと飛距離はあまり変わらないが、速度が高かつ水深が深くなるほど乗用車は4t、10tに比べると飛距離は短くなる傾向にある。これは乗用車がハイドロプレーニングを起こしホイールパスの水を十分に吐き出してないのが原因だと思われる。

3-2 速度-水深-ピーク高さの関係

速度が上がるにつれてピーク高さは線形的に増加する。水深が深くなるにつれて車型に関わらずピーク高さが増加する傾向にある。これはタイヤと水が接触する角度と関係があると思われる。

3-3 速度-水深-bow waveの投射角との関係

投射角は速度や車型や水深に関わらず大体一定の角度を示すものと思われる。すなわちタイヤの幅や半径や速度や水深はサイドブラッシュの角度を決める要因ではないように思われる。

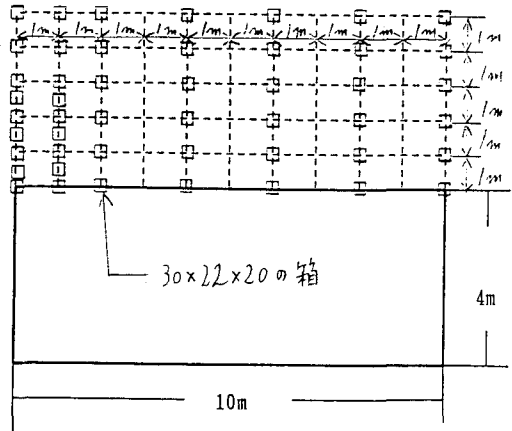


図3 飛散水回収方法

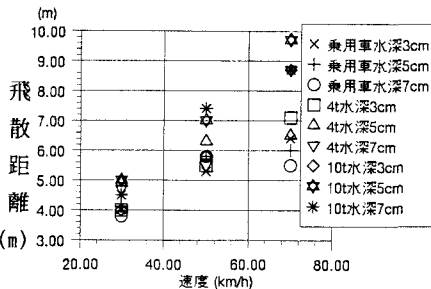


図4 飛散距離

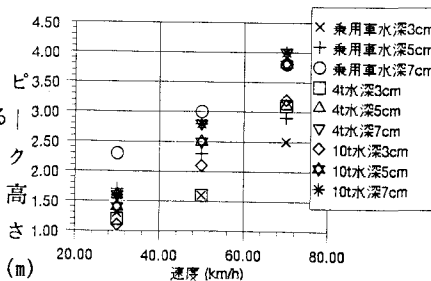


図5 ピーク高さ

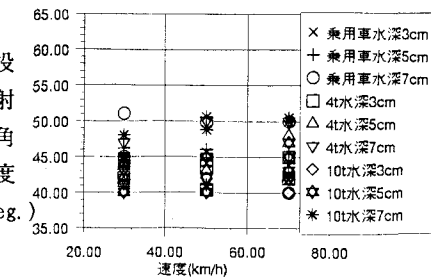


図6 bowの投射角

3-4 速度-水深-サイドスプラッシュの投射角との関係

投射角は速度や水深や車型に関わらず大体一定の角度を示すものと思われる。すなわちタイヤの幅や半径や速度や水深はサイドスプラッシュの角度を決める要因ではないように思われる。

3-5 飛散水量

スプラッシュで飛んだ水の総量は30km/hから50km/hの間は線形的に増加する。しかしそれ以上の速度になると速度の増加に比べて飛散水量の増加が鈍る傾向にある⁽³⁾。これはある速度以上だとホイールパスの水は水の粘性に打ち勝ちホイールパス上の水がすべて飛んでいくためものと思われる。

3-6 飛散水の分布

速度の増加につれて飛散水量のピーク値を取る距離が延びていく。速度が30km/hの場合、飛散距離はほとんどが1m前後しか飛ばないが、速度の増加につれてタイヤ位置から量的にピークを取る距離が遠い地点に移動する。40km/hから50km/hの速度だと対面交通の一般道路においてちょうど乗用車のフロントガラス近辺、すなわちドライバーのアイポイント高さ1m付近に量的にピークの値を取る水が飛んでいくことが想像できる。これは我々の経験に近いものがあると思われる。

3-7 回帰式

実験結果から飛散距離とピーク高さを求める実験式を求めた。多変量解析によってF検定を行い $F > F_0$ となる要因はタイヤ動半径、タイヤ幅、水深、速度の4つであり、これらの要因から重回帰分析を行い、Zをピーク高さとし、Hを水平距離として以下の式を得た。

$$Z = -1.507 - 0.223x_1 + 0.302x_2 + 0.303x_3 + 0.883x_4 \quad (1)$$

$$H = -1.198 + 0.108x_1 + 0.187x_2 + 0.137x_3 + 0.820x_4 \quad (2)$$

また実験データから異常値を省いた上で重回帰分析を行った結果、次のような実験式を得た。

$$Z' = -1.460 + 0.290x_1 + 0.383x_2 + 0.316x_3 + 0.884x_4 \quad (3)$$

$$H' = -1.536 + 0.028x_1 + 0.235x_2 + 0.156x_3 + 0.864x_4 \quad (4)$$

x_1 タイヤ動半径

x_2 タイヤ幅

x_3 水深

x_4 速度

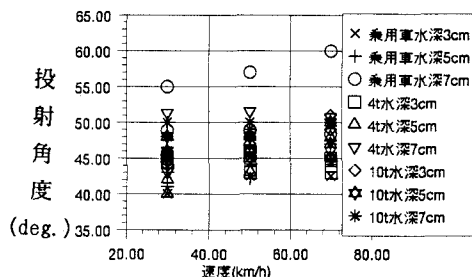


図7 サイドスプラッシュの投射角

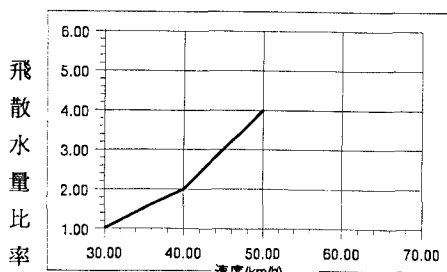


図8 水はね総量

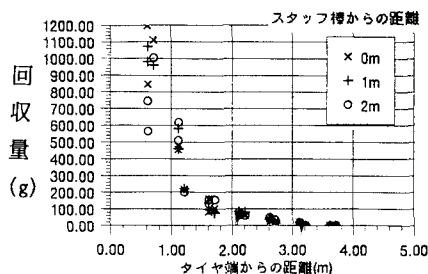


図9 飛散水の分布30km/h

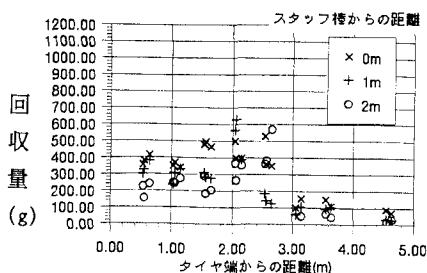


図10 飛散水の分布50km/h

この回帰式からいえることはピーク高さと水平距離は速度が一番依存していることがいえる。

4 水はね現象のシミュレーション

水はね現象は、タイヤの回転によりタイヤの下の水を両方向に押し出し⁽⁴⁾、押し出された水が周りの水に衝突して、斜め上方向に水がはね上げるものとする。まず、タイヤによって水が押し出されるまでについて考察する。座標系は、タイヤの進行方向をx軸、タイヤの幅をy軸、高さをz軸とする。接地長さlに対して水面の厚さが十分に小さいならば、タイヤの円周上の要素のサイクロイド運動を、幅a長さΔxの平行な平板に挟まれ、上部に微小力ΔFで押されて水はy方向に押し出されると仮定する。このように考えた粘性流体に対するNavier Stokesの方程式は流体は非圧縮性としかつ連続の式が成り立つとして、

$$\eta \frac{\partial f^2}{\partial z^2} - \frac{\partial p}{\partial y} - \rho f \frac{\partial f}{\partial y} - \rho \frac{\partial f}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = 0, \frac{\partial p}{\partial x} = 0, v_x = v_z = 0, v_y = f(y, z, t)$$

となる。また解を次のようにおく。

$$f = y * g(z, t) \quad (7)$$

$y = \frac{a}{2}$ で流体の圧力が0となることに注意して式を解いた結果次式を得る。

$$\eta \frac{\partial^2 g}{\partial z^2} - \rho \frac{\partial g}{\partial t} = \frac{48 p_m \beta v t}{a^2 l} \left(1 - \frac{v t}{l}\right) \quad (8)$$

次にこの式をクラנקニコルソン法⁽⁸⁾を用いて差分化のプログラムを作成した。このプログラムからは、タイヤの端から水が飛び出す瞬間の速度を求めるものである。なお、境界条件として時間tと水深zのメッシュ数は計算の都合等しくし、タイヤと地面に直接触れる部分のメッシュの速度を0とする。その結果タイヤ端部におけるy方向の速度分布が求めることができる。(8)式でのパラメーターの個数は、タイヤ幅と最大接地圧で接地長さが求められ、車速からタイヤが

水面に接触してから地面に接触するまでの時間が求められ、なおかつタイヤの端部での速度分布を求めるので、タイヤ幅、最大接地圧、車速、水の粘性、座標位置zの5個である。

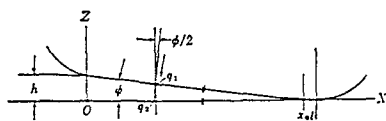


図11 トレッド部分の落下状態

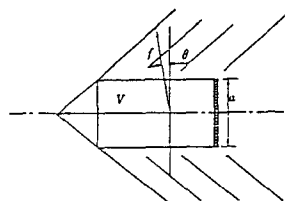


図12 タイヤ回りの水の流れ

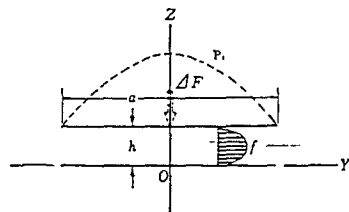


図13 2枚の平行板に挟まれた流体の2次元運動

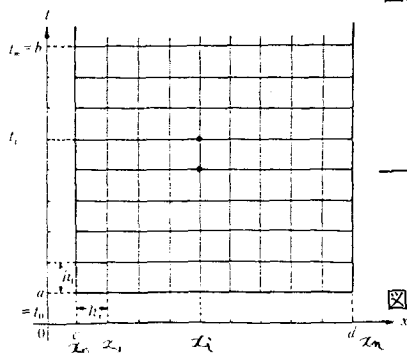


図14 クランクニコルソン法における領域Dの分割

5 あとがき

スプラッシュ発生メカニズムは、投射角度が各要因に影響されず一定であることから、タイヤに挟まれた水は圧力により飛散している事が分かった。そこで、本研究では、サイドスプラッシュについて、2つの平行な平板をモデル化し、Y方向に押し出される時の速度を求めるモデルを作成した。また、飛散水量の分布から、対面交通の一般道路で、降雨時に経験する現象を裏付けるデータが取れた。今後、この速度分布からスプラッシュの飛散軌跡を数式化し、目的変数となる飛散高さ・飛散距離をシミュレートできるようにしていく。

参考文献

- 1) Robert M. Clarke :「Heavy Truck Splash and Spray Suppression:Near and Long Term Solution」 SAE Paper No. 831178, 1983
- 2) 渡辺ら：「舗装の評価に関する研究報告書(2)」 (財)高速道路調査会、1987
- 3) 石井、三浦：「透水性舗装の夜間視認性に関する実験的研究」 土木学会第45回年次学術講演概要集第4部、1990
- 4) 酒井：「タイヤ工学」 グランプリ出版、1987
- 5) 町田、小島：「パソコンbasic数値計算Ⅱ」 東海大学出版会、1984