

225-20115039 自動車事故における部品の落下についての研究 (第3報)*

— 破損部品の停止位置を推定するシミュレーションモデルの構築 —

藤田 光伸¹⁾

Scattering Phenomenon of Broken Parts in Traffic Accident (Third Report)

— Basic Simulation Model for Calculating Final Rest Positions of Broken Parts —

Mitsunobu Fujita

A new simulation model is proposed in order to calculate the final rest positions of parts broken in traffic accidents. The algorithm of this model is based on the classification and the characteristics of the scattering mechanisms reported in the previous reports. In this paper, a simulation for a single broken part is developed, as the first step towards actual use in traffic accident reconstruction. The results of this simulation are expressed in two-dimensional probability distribution form. This paper confirms that this model has high potential to help investigators judge collision points more accurately.

KEY WORDS: (Standardized) safety, crash test, accident reconstruction (Free) Broken Part, Simulation, Monte Carlo Method [C1]

1. 緒言

1.1. 背景と目的

交通事故の原因調査および再現において、衝突地点の特定が重要である場合が多い。ところが、全ての当事者が重篤な傷害を負い病院へ搬送される等により、証言が全く得られない場合がある。また、交通事故の衝突は瞬間的現象である為、事故当事者や目撃者の証言（記憶）は曖昧な場合が多く、そのような主観的情報のみで判断を下すには十分な注意が必要となる。つまり、事故後に残された客観的な情報をできるだけ多く採用し、それらを主体とした総合的な検討を実施した上で衝突地点を特定する事が重要である。一方、事故によっては他の客観的情報が得られず、衝突で破損した部品の散乱状態のみから衝突地点を特定しなければならない場合がある。この際に、衝突による部品飛散現象の理解が不足している者の場合には、短絡的に破損部品の散乱（停止）地点を衝突地点と特定してしまう恐れがある。

ところが、このような破損部品の飛散現象については、過去に一部で検討^(1~3)されているだけであり、衝突時の部品の破損～飛翔～落下～停止までの経緯を、高速度映像等を用いて詳細に分析した例は存在しなかった。それに対し、前報⁽⁴⁾では103件の衝突実験の高速度映像を基に、衝突時の部品飛散現象が7種類に分類できる事を明らかにし、その中の3分類については定量的な議論へとつながる知見を得ている。また第1報⁽⁵⁾では、一次元衝突での直接損傷部位の破損部品の飛散現象（前報⁽⁴⁾の「①衝突後速度飛散型（[FPS]: Flying at Post-impact Speed）」に相当）について、衝突から破損部品の停止までの過程をモデル化し、その妥当性を示している。

一方、事故再現の分野に目を向けると、自動車の衝突については理論的な検討およびそれを基にしたコンピュータシミュレーションの構築が過去に多く実施されている^(6~10)。このようなシミュレーションは、手計算による解析的な解の導出

が困難な衝突形態であっても、適切な入力パラメータを使用する事により適切な解の取得を期待できる。また、結果を即時に得る事が可能であれば、例えば各種パラメータの変化による衝突現象の変化の程度（感度）を比較的容易に得ることができる等の利点も考えられる。このように、事故再現の目的においてその利用価値が高い事は間違いない。つまり、衝突による破損部品の飛散現象についても同様にシミュレーションが可能となれば、事故再現の実務への活用可能性が大きく広がると考える。

以上の背景の下、本報では前報まで^(4,5)に得られた知見を基に、破損部品の最終停止地点を確率分布を用いて推定する為のモデル化手法を提案する。また、単一部品を対象としたシミュレーションを作成し、本モデル化手法が衝突地点をより適切に判断するための一助となる可能性がある事を示す。

1.2. 用語の定義

本報では、各用語を以下の意味で使用する。（用語の後に意味を括弧内に示す。）

衝突前（衝突物同士が接触する直前）、衝突後（衝突相手物との接触が終了した直後）、衝突中（衝突物同士が接触している間）、衝突速度（衝突相手物に接触する直前の速度のスカラ量）、衝突後速度（相手との接触が終了した直後の速度のスカラ量）、衝突時間（衝突物同士が接触している時間）、飛翔開始（破損部品が飛翔を開始する事）、飛翔開始時（飛翔開始直後の瞬間）、飛翔開始時間（衝突前から飛翔開始までの時間）、部品飛翔速度（飛翔開始時の破損部品の速度のスカラ量）、部品飛翔方向（飛翔開始時の破損部品の方向）、部品飛翔速度ベクトル（部品飛翔速度および部品飛翔方向を表すベクトル）、車両該当部位（対象となる破損部品の装着部位）、該当部位速度（飛翔開始時の車両該当部位の速度のスカラ量）、該当部位方向（飛翔開始時の車両該当部位の方向）、該当部位速度ベクトル（該当部位速度および該当部位方向を表すベクトル）。

*2011年5月19日自動車技術会春季学術講演会において発表。

1) (株) 自研センター(272-0001 千葉県市川市二俣 678-28)

2. モデル化手法

2.1. 前提

モデル化を実施する際に、対象となる車両（衝突物）の衝突前・後の姿勢（位置関係）、速度・角速度および車両該当部位の位置といった衝突条件が入力パラメータとして既知である事が前提となる。尚、本報では一次元・二次元衝突を対象とし、横転等の三次元衝突は対象としない。また、勾配のない路面を対象とし、空気抵抗の影響は無視する。

2.2. 分類

前報⁽⁴⁾において、衝突時の破損部品の飛散現象を表1①～⑦に示す7種類に分類できる事、即ち飛翔開始までの機序（メカニズム）が分類によって異なるという事が明らかとなっている。よって、既知の情報である衝突前の姿勢や車両該当部位の位置を基に、その破損部品の飛散現象がどの分類に当てはまるかを、シミュレーション実施者が決定する事が第一段階となる。この分類を基に、後述の各種モデルに使用する確率分布を決定する。

本報では、衝突実験を基に得られた前報まで^(4,5)のデータを参考に、第3章にて各分類の確率分布を作成し使用する。但し、実験データを増強する事でその分布を改善していく事が重要であり、今後の課題といえる。

2.3. 飛翔開始モデル

まずは飛翔開始までのモデル化を実施する。

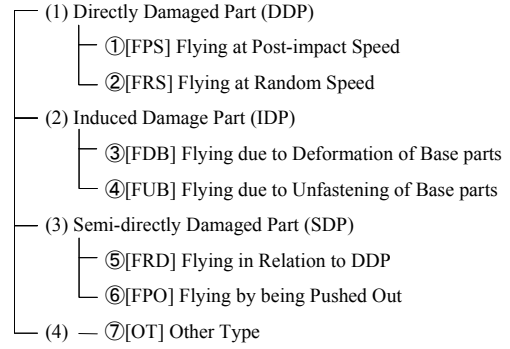
部品飛翔速度ベクトルに影響の大きいパラメータは、表1の分類毎に異なる特徴をもつ事が前報⁽⁴⁾で明らかとなっている。例えば、衝突後速度飛散型（①[FPS]）では、概ね衝突後に飛翔開始し、部品飛翔速度ベクトルは車両該当部位の衝突後速度およびその方向を反映する。一方、ベース変形飛散型（③[FDB]）では、衝突初期に飛翔開始し、（衝突前に速度を有した車両の場合は）部品飛翔速度ベクトルは車両該当部位の衝突速度およびその方向を反映する。また、それらは完全にひとつの値に特定できる訳ではなく、同一分類内であっても分布をもった結果となる事が明らかとなっている。

本報では、この分布を確率として捉える。そして選択された分類に基づき、部品飛翔速度ベクトルに関するパラメータの確率分布が決定される事とする。このように飛翔開始モデルは確率分布で表されるが、1回限りの現象として捉えた場合には、その確率分布を基に部品飛翔速度ベクトルが以下のよう一意に決定される事になる。

(1) 該当部位速度ベクトル

衝突中にも車両該当部位の位置は変化する。またその速度についても、衝突速度から衝突後速度へと変化する。ここで、衝突時間は極めて短時間であるから、衝突中の位置および速度の変化は直線かつ線形であると仮定する。この場合、0を衝突前、1を衝突後とし、飛翔開始時をその間（またはその前後）の数値（飛翔タイミング係数）として表せば、次式によって表現が可能となる。（Z軸を高さ方向とする。）

Table.1 Seven Categories of Scattering Phenomena of Broken Parts⁽⁴⁾



$$\vec{P}_{B0} = (1 - q_1) \cdot \vec{P}_0 + q_1 \cdot \vec{P}_1 \quad \dots (1)$$

$$\vec{V}_{B0} = (1 - q_1) \cdot \vec{V}_0 + q_1 \cdot \vec{V}_1 \quad \dots (2)$$

ここで、 $\vec{P}_{B0} = (x_{B0} \ y_{B0} \ h)^T$ ：飛翔開始時の車両該当部位の位置ベクトル（=飛翔開始時の破損部品の位置ベクトル）[m]、 h ：破損部品の装着高さ（=車両該当部位の高さ）[m]、 \vec{P}_0 ：車両該当部位の衝突前の位置ベクトル[m]、 \vec{P}_1 ：車両該当部位の衝突後の位置ベクトル[m]、 $\vec{V}_{B0} = (v_{B0x} \ v_{B0y} \ 0)^T$ ：該当部位速度ベクトル[m/s]、 \vec{V}_0 ：車両該当部位の衝突前の速度ベクトル[m/s]、 \vec{V}_1 ：車両該当部位の衝突後の速度ベクトル[m/s]、 q_1 ：飛翔タイミング係数、である。

(2) 部品飛翔速度ベクトル

基準となる速度ベクトル（基準速度ベクトル）に対する部品飛翔速度ベクトルの差を表すパラメータを導入する事で、部品飛翔速度ベクトルを次式により算出できる。

$$\vec{V}_{P0} = q_2 \cdot \Theta_H \cdot \Phi \cdot \Theta_V \cdot \Phi^{-1} \cdot \vec{V}_{BASE} \quad \dots (3)$$

$$\text{但し、} \quad \Theta_H = \begin{bmatrix} \cos \theta_H & -\sin \theta_H & 0 \\ \sin \theta_H & \cos \theta_H & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \Theta_V = \begin{bmatrix} \cos \theta_V & 0 & \sin \theta_V \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_V & 0 & \cos \theta_V \end{bmatrix}$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \vec{V}_{BASE} = \begin{cases} \vec{V}_0 & \text{または} \\ \vec{V}_{B0} & \text{または} \\ \vec{V}_1 \end{cases}$$

$$\phi = \arctan(v_{B0y} / v_{B0x})$$

ここで、 $\vec{V}_{P0} = (v_{P0x} \ v_{P0y} \ v_{P0z})^T$ ：部品飛翔速度ベクトル[m/s]、 \vec{V}_{BASE} ：基準速度ベクトル[m/s]、 q_2 ：速度比率係数、 θ_H ：基準速度ベクトルと部品飛翔速度ベクトルとの水平方向の角度差[rad]、 θ_V ：基準速度ベクトルと部品飛翔速度ベクトルとの高さ方向の角度差[rad]、である。

尚、前報⁽⁴⁾では、車両該当部位の衝突前または衝突後どちらから一方の速度ベクトル（ \vec{V}_0 または \vec{V}_1 ）を基準速度ベクトル（ \vec{V}_{BASE} ）とし、部品飛翔速度ベクトル（ \vec{V}_{P0} ）を比較する事で、分類毎に水平方向の差および速度の絶対値の差に関する特徴を得ている。一方、衝突時間が比較的長い擦過衝突等を含めたシミュレーションを将来的に考慮するとすれば、 \vec{V}_{B0} を

基準とする事が可能な方が、より多様な部品飛散現象を適切に再現できる可能性が高い。

また前報⁽⁴⁾では、高さ方向の飛翔方向 (θ_V) は考慮していないが、実際には高さ方向にも破損部品の飛翔方向は差が生じる(斜め上方向に飛翔する)場合も考え得る。

以上の理由から、基準速度ベクトル (\vec{V}_{BASE}) を分類に応じて \vec{V}_0 , \vec{V}_{B0} または \vec{V}_1 から選択できる事とする。そして、それに対する速度比率, 水平方向角度差, 高さ方向角度差についての確率分布を用いたモデル化を実施する。

2.4. 落下モデル

上記の飛翔開始モデルによって部品飛翔速度ベクトルが一意に決定されると、その後の放物線運動も一意となる。つまり、着地位置および着地時の速度ベクトルを次式によって算出できる。(着地時の反発は無視する。)

$$\vec{P}_{P1} = (x_{B0} + t \cdot v_{P0x} \quad y_{B0} + t \cdot v_{P0y} \quad 0)^T \quad \dots (4)$$

$$\vec{V}_{P1} = (v_{P0x} \quad v_{P0y} \quad 0)^T \quad \dots (5)$$

$$\text{但し, } t = \left(v_{P0z} + \sqrt{v_{P0z}^2 + 2gh} \right) / g$$

ここで、 $\vec{P}_{P1} = (x_{P1} \quad y_{P1} \quad 0)^T$: 破損部品の着地時の位置ベクトル[m], $\vec{V}_{P1} = (v_{P1x} \quad v_{P1y} \quad 0)^T$: 破損部品の着地時の速度ベクトル[m/s], t : 飛翔時間[s], g : 重力加速度 (= 9.8[m/s²]), である。

2.5. 停止モデル

破損部品が着地した後は、地面を滑走または転がる事によって速度を減じ、最終的に停止する。つまり見かけ上の摩擦係数が決まれば、落下モデルによる着地位置および着地時の速度ベクトルから、停止位置を次式によって算出できる。

$$\vec{P}_{P2} = (x_{P1} + A \cdot v_{P1x} \quad y_{P1} + A \cdot v_{P1y} \quad 0)^T \quad \dots (6)$$

$$\text{但し, } A = \left(\sqrt{v_{P1x}^2 + v_{P1y}^2} \right) / 2\mu g$$

ただし、 $\vec{P}_{P2} = (x_{P2} \quad y_{P2} \quad 0)^T$: 破損部品の停止位置ベクトル[m], μ : 破損部品と地面の間の見かけ摩擦係数, である。

2.6. 停止位置の確率分布モデル

以上より、破損部品の最終停止位置 \vec{P}_{P2} は、 \vec{P}_0 , \vec{P}_1 , \vec{V}_0 , \vec{V}_1 , q_1 , q_2 , θ_H , θ_V , μ が決まる事で一意に決定できる。つまりベクトル関数 \vec{F} を用いて、以下のように表現できる。

$$\vec{P}_{P2} = \vec{F}(\vec{P}_0, \vec{P}_1, \vec{V}_0, \vec{V}_1, q_1, q_2, \theta_H, \theta_V, \mu) \quad \dots (7)$$

ここで、衝突条件に関するパラメータ \vec{P}_0 , \vec{P}_1 , \vec{V}_0 , \vec{V}_1 を前提とした上で、 q_1 , q_2 , θ_H , θ_V , μ それぞれの発生確率が $f_1(q_1)$, $f_2(q_2)$, $f_3(\theta_H)$, $f_4(\theta_V)$, $f_5(\mu)$ であるとすれば、それらのパラメータ下で決定される最終停止位置 \vec{P}_{P2} に停止する確率 p は、次式によって表すことができる。

$$p(\vec{P}_0, \vec{P}_1, \vec{V}_0, \vec{V}_1, q_1, q_2, \theta_H, \theta_V, \mu) \quad \dots (8)$$

$$= f_1(q_1) \cdot f_2(q_2) \cdot f_3(\theta_H) \cdot f_4(\theta_V) \cdot f_5(\mu)$$

よって、ある衝突において対象とする破損部品が \vec{P}_{P2} に停止する確率 $P(\vec{P}_{P2})$ を次式によって得ることが可能となる。

$$P(\vec{P}_{P2}) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \Lambda(\vec{P}_{P2} - \vec{F}(\vec{P}_0, \vec{P}_1, \vec{V}_0, \vec{V}_1, q_1, q_2, \theta_H, \theta_V, \mu)) \right. \\ \left. \times p(\vec{P}_0, \vec{P}_1, \vec{V}_0, \vec{V}_1, q_1, q_2, \theta_H, \theta_V, \mu) \right\} dq_1 dq_2 d\theta_H d\theta_V d\mu \quad \dots (9)$$

$$\text{但し, } \Lambda(\vec{B}) = \begin{cases} 0 & (\vec{B} \neq \vec{0}) \\ 1 & (\vec{B} = \vec{0}) \end{cases}$$

尚、次章のシミュレーションへの実装では、式9を離散的に扱うことで、停止位置に関する確率分布を得ることを可能としている。

3. シミュレーションの作成

前章で示したモデル化手法を用いたシミュレーションを実現する為には、表1①~⑦等で分類される破損部品の飛翔形態の分類毎に、パラメータ q_1 , q_2 , θ_H , θ_V , μ それぞれの発生確率の分布を設定する必要がある。

本報では前報まで^(4,5)に得られた知見を基に、以下のように確率分布を設定する事で、単一部品の停止位置を確率分布を用いて推定する為のシミュレーションを作成した。

3.1. 対象とする分類

前報⁽⁴⁾では、衝突後速度飛散型 (①[FPS])、ベース変形飛散型 (③[FDB]) および直接損傷関連飛散型 (⑤[FRD]) という3つの分類について、定量的な議論へとつながる知見を得ている。よって本報では、この3分類のみをシミュレーションの対象とし、確率分布の設定を実施する。

今後、衝突実験等のデータを増強する事で確率分布をより精度の高いものへと更新する事、および他の分類についても確率分布を設定する事が重要であり、今後の課題といえる。

3.2. 確率分布の設定

対象とする3分類それぞれについて、各パラメータの確率分布を以下のように設定する。

(1) 飛翔タイミング係数 (q_1)

直接損傷部位 ((1)DDP)、間接損傷部位 ((2)IDP) および半直接損傷部位 ((3)SDP) それぞれの大分類について、飛翔開始時間が表2(A)列に示す分布となる事が前報⁽⁴⁾で得られている。よって本報では、衝突時間 ($q_1 = 1$ のタイミング) を0.15秒として捉え、①[FPS]、③[FDB]および⑤[FRD]それぞれの q_1 に対して表2(B)列の確率分布を使用する。

(2) 速度比率係数 (q_2)

前報⁽⁴⁾では、更に衝突を固定物衝突 (CF: Collision to Fixed objects)、被衝突 (SC: Stationary cars to be Collided) および通常衝突 (NC: Normal Collision) という3種の態様

に分類した上で、衝突前・後の車両該当部位の速度ベクトルに対する部品飛翔速度ベクトルを比較し、対象とする3分類について定量的な議論へとつながる知見を得ている。

ここで、 q_2 は速度ベクトルのスカラ量の比率を意味する事になるが、例えば①[FPS]のSCおよびNCでは、車両該当部位の衝突後速度に対する部品飛翔速度の比率が1.0を中心に分布している事が明らかとなっている。(CFでは車両が衝突後に停止し、破損部品はほぼその場に落下する為、この比率の大小はほとんど意味を持たない。)また、③[FDB]のCFおよびNCでは、部品飛翔速度は車両該当部位の衝突速度よりも低く(比率で0~1.0)になり、SCでは衝突後速度よりも低く(比率で0~1.0)なるという分布が得られている。⑤[FRD]のCFおよびNCでは、衝突速度よりも低く(比率で0~1.0)なる場合が多く、一部で衝突速度と同等からやや高くなる(比率で1.0~1.3)の分布が得られている。前者は部品が単に外れて落ちるだけの場合であり、後者は破損する部品自体の変形によって破損部が弾かれて飛び出す場合であると考えられる。前報⁽⁴⁾では示していないが、SCについては概ね衝突後速度よりも低い(比率で0~1.0)の分布が得られている。以上の分布を表3(A)列に示す。本報では、これらの知見を基に、表3(B)列に示す確率分布および基準速度ベクトルを q_2 に対し

Table.2 Configurations of Coefficients of Flight Time of Broken Parts Based on Actual Experimental Data⁽⁴⁾

(A) Distributions of the time length from the beginning of collision to the beginning of the flight of broken parts ⁽⁴⁾	(B) Probability distributions of the coefficients of flight time of broken parts (q_1)
(1) DDP (①[FPS] Only) (N=82)	q_1 for ①[FPS]
(2) IDP (N=69)	q_1 for ③[FDB] and ⑤[FRD]
(3) SDP (N=53)	q_1 for ⑤[FRD]

て使用する。

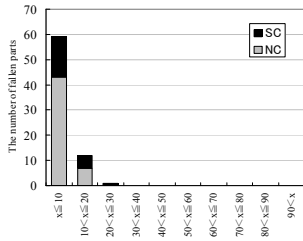
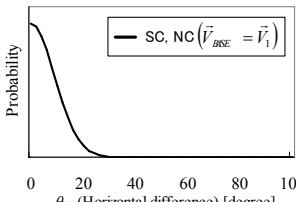
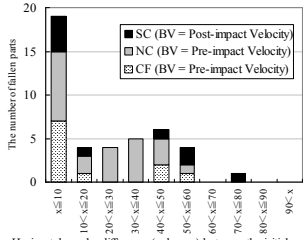
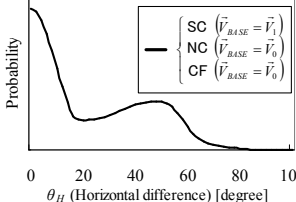
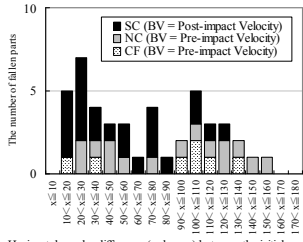
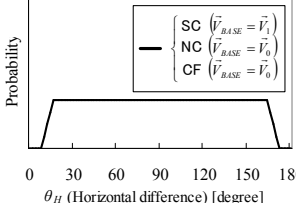
(3) 水平方向の角度差 (θ_H)

θ_H についても同様に、前報⁽⁴⁾でいくつかの定量的な知見を得ている。例えば①[FPS]では、車両該当部位の衝突後速度の方向に破損部品が飛翔する事が明らかとなっている。また、③[FDB]のCFおよびNCでは、車両該当部位の衝突速度の方向から±60度の範囲に分布しており、SCでは車両該当部位の衝突後速度の方向に対して±90度の範囲での分布が得られている。ピークが0度付近と50度付近の2箇所が存在するが、前者は部品が単に外れて落ちるだけの場合であり、後者は飛翔する部品のベース部の変形により部品が弾かれて飛び出す場合であると考えられる。⑤[FRD]のCFおよびNCでは、飛翔方向は決まった方向に特定する事はできず、衝突姿勢および破損部品の装着位置により方向が様々に異なる事が明らかとなっている。前報⁽⁴⁾では示していないが、SCではそれらよりも車両該当部位の衝突後速度の方向に分布が多い(0度に近い)傾向が認められる。つまり、⑤[FRD]では破損部品の装着位置

Table.3 Configurations of Speed Ratios and Base Velocities Based on Actual Experimental Data⁽⁴⁾

(A) Distributions of initial horizontal flight speeds of broken parts normalized by pre-/post-impact speeds of the original positions where the parts were attached before the collisions ⁽⁴⁾	(B) Probability distributions of the coefficients of speed ratios (q_2) and the velocities adopted as base velocities (\vec{v}_{BASE})
①[FPS] except for CF (N=72)	q_2 for ①[FPS]
③[FDB] (N=43)	q_2 for ③[FDB]
⑤[FRD] (N=45)	q_2 for ⑤[FRD]

Table.4 Configurations of Horizontal Angular Differences and Base Velocities Based on Actual Experimental Data ⁽⁴⁾

(A) Distributions of horizontal angular differences between initial flight velocities of broken parts and pre-/post-impact velocities of the original positions where the parts were attached before the collisions ⁽⁴⁾	(B) Probability distributions of the horizontal angular differences (θ_H) and the velocities adopted as base velocities (\vec{V}_{BASE})
<p>①[FPS] except for CF (N=72)</p>  <p>Horizontal angular difference (x degree) between the initial flight velocity of a broken part and the post-impact velocity of its original attached position</p>	<p>θ_H for ①[FPS]</p>  <p>— SC, NC ($\vec{V}_{BASE} = \vec{V}_i$)</p>
<p>③[FDB] (N=43)</p>  <p>Horizontal angular difference (x degree) between the initial flight velocity of a broken part and the Base Velocity (BV) of its original attached position</p>	<p>θ_H for ③[FDB]</p>  <p>— SC ($\vec{V}_{BASE} = \vec{V}_i$) — NC ($\vec{V}_{BASE} = \vec{V}_0$) — CF ($\vec{V}_{BASE} = \vec{V}_0$)</p>
<p>⑤[FRD] (N=45)</p>  <p>Horizontal angular difference (x degree) between the initial flight velocity of a broken part and the Base Velocity (BV) of its original attached position</p>	<p>θ_H for ⑤[FRD]</p>  <p>— SC ($\vec{V}_{BASE} = \vec{V}_i$) — NC ($\vec{V}_{BASE} = \vec{V}_0$) — CF ($\vec{V}_{BASE} = \vec{V}_0$)</p>

を考慮する事でより正確な再現が可能になると考えられ、今後の課題といえる。

表 4(A)列に、以上の分布を示す。本報では、これらの知見を基に、表 4(B)列に示す確率分布および基準速度ベクトルを θ_H に対して使用する。左右方向については、シミュレーション実施者が事故状況を基に任意に選択する。

(4) 垂直 (高さ) 方向の角度差 (θ_v)

前報⁽⁴⁾では、 θ_v についての定量的な知見は得られてない。但し、左右からの高速度映像により破損部品の多くは水平方向に飛翔する事が確認されている。よって本報では、平均 0 度、標準偏差 7.5 度の正規分布を θ_v の確率分布として使用する。但し、より正確な再現の為にこの点についての調査も進めていく必要があり、今後の課題といえる。

(5) 見かけ摩擦係数 (μ)

μ については路面の状況や部品形状、材質等、様々な要因

で変化する事は明らかである。よって再現しようとする状況に応じて適切な値 (または確率分布) を使用する必要がある。

本報では、第 1 報⁽⁵⁾で得られている破損部品の見かけの摩擦係数 0.20~0.56 を参考値として使用し、この範囲では均等な確率で滑り (転がり) 摩擦係数が生じる事とする。

3.3. 計算の実施

式 9 で示したように、上記 5 つのパラメータについて全ての状況における最終停止地点を算出し、同一停止地点に停止するケースについてはその確率を積算する事で、それぞれの地点で停止する確率の分布を得る事ができる。しかし、実際のシミュレーション計算においては、各パラメータおよび最終停止地点を離散的に扱ったとしても、全ての状況について計算を実施するには極めて長時間の計算が必要となる場合が考えられる。よって本報では主な計算手法としてモンテカルロ法^(11, 12)を採用し、モンテカルロ法と全通りの計算のどちらか一方の解法を選択可能とする。

4. 検証

本報で提案したモデル化手法の有用性を確認する為に、前章で作成したシミュレーションでの計算結果を、衝突実験において破損部品が実際に停止した位置と比較した。

前報⁽⁴⁾で解析した衝突実験の中で、破損部品の停止位置が記録されている実験結果の中から、①[FPS]2件、③[FDB]1件、⑤[FRD]1件についてシミュレーションを実施した。いずれもモンテカルロ法を使用し、計算回数は 100,000 回とした。それぞれの結果を図 1(a)~(d)に示す。結果を表示している枠の 1 単位は 0.5m×0.5m としている。また、1つの枠内に停止した部品の個数の最大値と最小値を 5 等分し、それぞれの枠における停止回数的大小によって色を 5 段階に変えて表示している。停止回数がゼロであった枠については白色としている。つまり、全部で 6 段階の色の表示としている。

いずれも、破損部品の実際の停止位置がシミュレーション結果での停止確率の高い範囲に概ね位置しており、モデル化手法の有用性を確認できたといえる。

5. 結言

本報では、前報まで^(4, 5)に得られた知見を基に、破損部品の最終停止地点を確率分布を用いて推定する為のモデル化手法を提案した。また、それを基に単一部品を対象としたシミュレーションを作成し、衝突実験における破損部品の実際の停止位置をシミュレーション結果と比較した。その結果、破損部品の実際の停止位置が、シミュレーションで得られた停止確率の高い範囲に概ね位置するという結果が得られ、本モデル化手法の有用性を確認できた。

ところで 2.1 節で述べた通り、本モデル化手法はあくまで部品の飛散現象のみを対象としており、衝突地点や衝突姿勢、衝突速度といった衝突条件は既知である必要がある。つまり、事故再現の実務において衝突条件が既に特定されている場合

にはそれを入力パラメータとして使用すれば良い。しかし、前提とすべき情報が特定されていない場合には、例えば車両の損傷状態や路面の痕跡等、事故後に確認される客観的情報を基に各種衝突シミュレーションや物理法則等を活用する事で、まずは衝突の状況を特定する必要がある。加えて、本手法では全ての現象を確率的に扱っている。その為、対象とする交通事故を1度限りの現象として捉えたと、本モデル化手法により得られる結果の中で(ゼロではないが)比較的確率の低い範囲にだけ実際の破損部品が停止する可能性がある。つまり、本手法のみを過度に頼る事なく、他の客観的情報を含めた上での総合的な検討を実施する事が望ましい。これらの点は本手法の実施において特に注意が必要な点である。

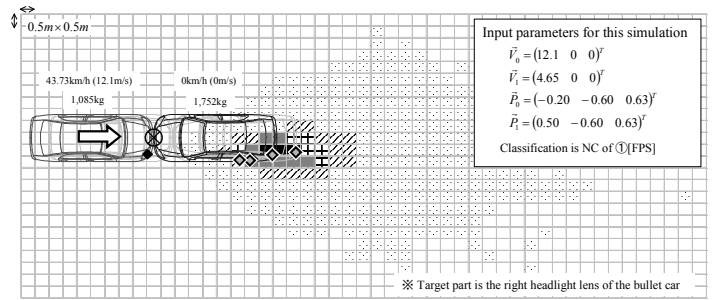
一方、前提とする衝突条件を入力パラメータとして本モデル化手法による解析を実施し、その結果を実際の破損部品の停止位置と比較する事で、前提とした衝突条件自体の妥当性を確認できる事になる。つまり、前提とする衝突地点や衝突速度等の妥当性を判断する材料のひとつとしても活用できる事を意味し、この点は大きな有用性のひとつであると考えられる。

いずれにせよ、本報で提案のモデル化手法によって、事故再現の実務への活用の可能性が大きく広がると確信する。

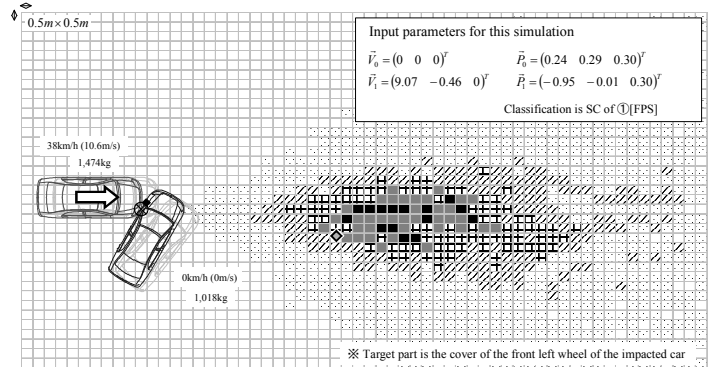
最後に、本報で示した各パラメータの確率分布は現時点では最良と考えるが、実験データを積み重ねる事で更に改良していく事が重要であり、今後の課題である。

参考文献

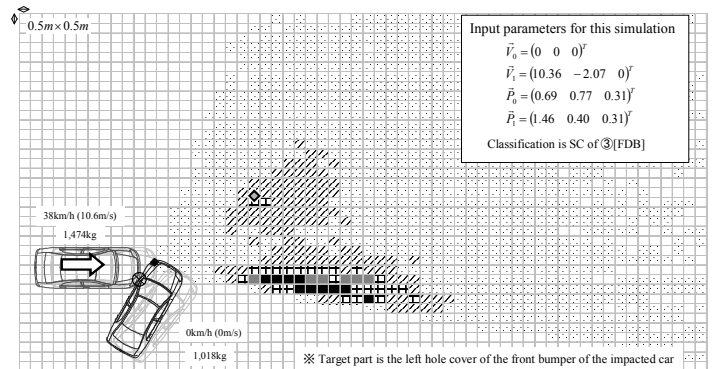
- 江守一郎：新版自動車事故学，東京，技術書院，254p（1993）
- 林洋：ガラス片飛翔速度と転倒距離との関係，交通科学研究資料第35集第30回日本交通科学協議会総会研究発表講演会，p.25-27（1994）
- 林洋：実用自動車事故鑑定学，東京，技術書院，276p（1996）
- 藤田光伸：自動車事故における部品の落下についての研究（第2報）—衝突実験に基づく部品落下機序の分類とその特徴—，自動車技術会論文集，Vol.41，No.5，p.993-998（2010）
- 藤田光伸：自動車事故における部品の落下についての研究（第1報）—一次元衝突実験による部品落下機序の分析—，自動車技術会論文集，Vol.40，No.5，p.1145-1151（2009）
- Brach, Raymond M. and Brach, R. Matthew, Vehicle Accident Analysis and Reconstruction Methods, SAE International, Warrendale, PA, 2005, 275p.
- Steffan, Hermann and Moser, Andreas, The Collision and Trajectory Models of PC-Crash, Paper 960886, SAE, 1996.
- 平成5年度交通事故シミュレーションに関する調査報告書，東京，社団法人日本機械工業連合会，61p（1994）
- Ishikawa, Hirotochi, Computer Simulation of Automobile Collision - Reconstruction of Accidents, Paper 851729, SAE, 1985.
- "CRASH3 User's Guide and Technical Manual", U.S. Department of Transportation, NHTSA.
- 津田孝夫：モンテカルロ法とシミュレーション—電子計算機の確率論的応用—<改訂版>，東京，培風館，237p（1977）
- 宮武修，中山隆：モンテカルロ法（増訂版），東京，日刊工業新聞社，249p（1962）



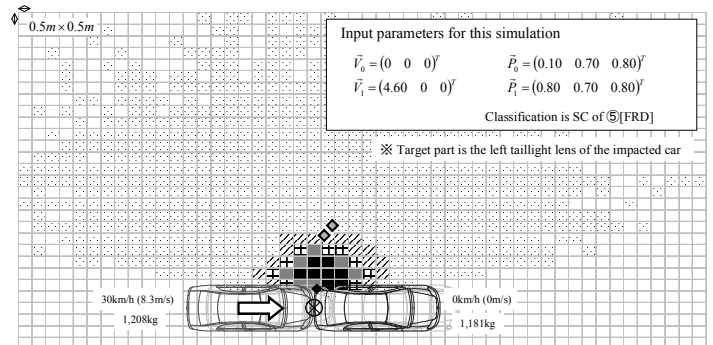
(a) ①[FPS]



(b) ①[FPS]



(c) ③[FDB]



(d) ③[FRD]

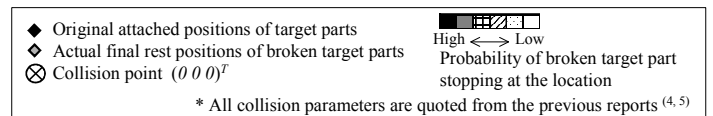


Fig.1 Comparisons of Simulation Results and Actual Final Rest Positions of Broken Parts