

# 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 —

藤田 光伸<sup>1)</sup>

## Scattering Phenomenon of Broken Parts in Traffic Accident (First Report)

— Analysis of Scattering Mechanism of Broken Parts Based on One Dimensional Car-to-Car Collision Tests —

Mitsunobu Fujita

It is important to identify the collision point when reconstructing a traffic accident. Investigators including police officers sometimes have to determine the collision point based only on the stop positions of broken parts. However, few studies have been conducted to clarify the mechanism of such phenomenon. We have started to conduct car-to-car collision tests to understand the mechanism. This paper, focusing one-dimensional car-to-car collision, shows the clarified mechanism and the relation between collision points and stop points of broken parts.

Key Words: Accident, Collision / Reconstruction, Collision Point, Broken Part ⑬

### 1. 序 論

#### 1.1. 背景

交通事故の原因調査および交通事故の再現において衝突地点(衝突した車両・物同士が最初に接触した地点)の特定が重要であることは異論を挟まない。例えば、中央線はみ出しによる正面衝突事故の場合には、衝突地点によって(どちらの車両が中央線をはみ出したかによって)過失割合が大きく異なる。

その際に参考とする情報としては、事故当事者や目撃者の証言(記憶)、路面に残されたタイヤ痕、破損部品の散乱状態等が考えられる。しかしながら、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、証言が一切得られない場合がある。また、交通事故における衝突事象は0.1~0.2秒で完結する正に瞬間的事象である為、事故当事者や目撃者の証言が得られたとしてもその記憶は曖昧である場合が多く正確性に欠けることが少なくない。よって事故状況の正確な把握の為に、タイヤ痕や破損部品の散乱状態という客観的な物理的事象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することが重要である。

ところが、他の客観的情報が得られず、衝突によって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。このような状況において衝突時の部品散乱現象の理解が不足している者が衝突地点を特定する場合、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もある。

#### 1.2. 過去の研究とその問題点

江守<sup>1)</sup>は、「ガラスの破片、床下の泥などが散乱している個所が必ずしも衝突した地点ではない。すなわち破損した部品の位置が高ければ高いほど、路面に落ちるまでに時間がかかるから、落ちた個所と衝突点との距離は長くなる。」として、取付け高さが違う2種類の部品の散乱位置から衝突速度を理論的に推定する方法を示しているが、衝突速度と部品飛翔速度(破損して空中に飛び出す速度)の関係について検討していない。また、破片の着地後の滑走状態を考慮しておらず、現実には破損部品は路面に着地した後様々な状態で滑走する(滑走状態によってみかけの摩擦係数が異なる)から、この方法を精度良く使用することは困難である場合が多い。

林<sup>2,3)</sup>は、「ガラスは最も脆弱な車体部品であるから、衝突の早い時期に車体を離れて飛ぶ。従って、比較的忠実に衝突速度を反映しているものとみられる。」という考えの下、衝突速度(衝突する直前の速度)をガラスの飛翔速度と考え、理論式および実験結果を比較している。しかし衝突実験は実施しておらず、理論式と実験結果も整合していない。現代の自動車のウインドシールドガラスは合わせガラスが採用されており、また取り付けに接着式が主流となっていることから、衝突の早い時期に車体を離れて飛ぶとは考えにくい。樹脂製部品についても一般には弾性破壊するから、衝突の早い時期に破損して車体を離れるとは考えにくい。また衝突時に相手車に直接接触する部位(直接損傷部位)においては、衝突速度で部品が飛び出すとすれば相手車両を通り抜けていくことになるから、そのような状況は生じ得ない。

以上のように、過去には部品の散乱位置と衝突速度に関する検討・記述がなされている一方で、衝突実験を実施して衝突時の部品落下状況を高速度カメラ等で撮影し、その破損か

\*2009年5月20日受理。2009年5月20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)

ら落下、停止までの経緯を詳細に分析した例は存在しない。その為、過去の研究における上記の記述を、全ての部品の破損・飛散現象に当てはめることについては大きな疑問が残る。

### 1.3. 目的

本報では、車対車の一次元衝突（フルラップの正面衝突および追突）を高速度撮影した映像で解析し、直接損傷部位の樹脂部品の落下機序および衝突地点と部品停止位置の関係を明らかにする。これにより、より正確な事故状況の把握につながる事が期待できる。

## 2. 衝突実験による分析

### 2.1. 実験条件

(株) 自研センターの衝突バリア実験装置により、同型車同士のフルラップ追突実験を実施した。警察庁<sup>(4)</sup>によれば、人身事故における危険認知速度は40km/h 以下で全体の40%を超えており、物損事故も含めるとその割合は更に多くなることが予想できる。また、低速衝突では部品の飛散自体が生じることが稀である。よって、30~40km/h 程度の速度域における部品飛散の状態を把握することが重要であると考え、停止中の被追突車（ブレーキなし）の後方より、30, 35, 40km/h の3条件の目標速度で同型車をフルラップで追突させるものとした。各条件2回ずつ、計6回の衝突実験を実施した。表1に実験条件の一覧を示す。

衝突による部品飛散の状態を把握する為に、衝突地点（Collision Point）の左右・上部から毎秒500フレームの高速度映像を撮影した。また、衝突地点から破損部品の停止地点までの距離を計測する為に、衝突前の追突車の進行方向に平行に定規を設置した（以下、この方向を「進行方向」という）。加えて通常の追突事故を模擬し、且つ二次衝突を防ぐという目的で、衝突終了後（衝突後に両車両が離れた後）、追突車にブレーキをかけ停止させた。衝突直前の追突車の速度は、衝突直前の2点に非接触型スイッチを設置し、その通過時間を基に算出した。実験の概要を図1に示す。

各衝突実験後、衝突地点から破損部品の停止地点までの進行方向の距離（以下、「部品飛散距離」という）を計測した。

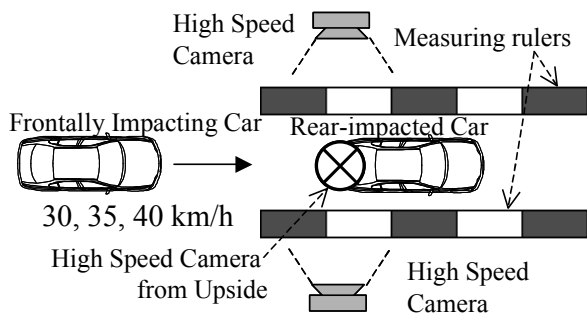


Fig.1 Outline of Rear-end Collision Test

### 2.2. 実験結果

6回の衝突実験中5回において、追突車のフロントフォグランプ穴のフニッシャ（以下「対象部品（Target Part）」という）が落下した。そこで、直接損傷部位である対象部品の破損～落下～停止までの挙動を、高速度映像を用いて解析した。なお、実験No.2においては追突車がフォグランプ装着車であった為、対象部品が存在せず落下しない結果となった。

その結果、図2に示す[1]から[8]の経緯を経て対象部品が破損～落下～停止していることが明らかとなった。その詳細は以下のとおり。

[1]～[3] 衝突が開始し、追突車の速度が減じ始めると同時に車両前部の変形が始まるが、部品は落下しない。

[3]～[5] 衝突が終了し、双方車両が離れ始める瞬間になって初めて部品が落下を開始する。つまり、ほぼ追突車の衝突後速度で部品は前方に飛び出すことになる。

[5] 飛び出した部品は放物線を描き地面に着地する。

[5]～[8] 着地後は地上を滑るか、または転がることによって速度を減じ、最終的に停止する。

衝突によって破損・飛散した部品の部品飛散距離を表2に示す。次節において、衝突速度と部品飛散距離の関係についての詳細な検討を実施する。

### 2.3. 部品落下機序の検討と理論式の導出

まず、前節で得られた部品の飛散経緯を基に、部品落下に関する理論式を導出する。

衝突による部品の落下の経緯[1]～[8]を、力学的観点から以下の3期間に分類する。

【期間1】衝突から部品落下開始までの期間（[1]～[3]）

Table.1 List of Experimental Conditions

No.	Target Collision Speed	Gross Weight of Frontally Impacting Car *1	Gross Weight of Rear-impacted Car *2
1	30 km/h	1039 kgf	1026 kgf
2	30 km/h	1042 kgf *4	1021 kgf
3	35 km/h	1037 kgf	1022 kgf
4	35 km/h	1048 kgf	1021 kgf
5	40 km/h	1048 kgf	1030 kgf
6	40 km/h	1012 kgf	1009 kgf

\*1 Frontally impacting cars are braked after collision to avoid secondary collision.

\*2 Rear-impacted cars are in stop conditions and no-braked.

\*3 The types of all collided vehicles are same.

\*4 with frontal fog lamps

Table.2 Actual Collision Speed and Distances of Scattered Target Parts from the Collision Point

No.	Actual Collision Speed	Distances from Collision Point	
		Target Part (Left)	Target Part (Right)
1	29.85 km/h	Not Dropped	3.90 m
2	30.04 km/h	Not Exist	Not Exist
3	34.84 km/h	5.50 m	5.10 m
4	35.03 km/h	5.30 m	4.00 m
5	39.60 km/h	5.95 m	5.10 m
6	39.91 km/h	3.90 m	6.10 m

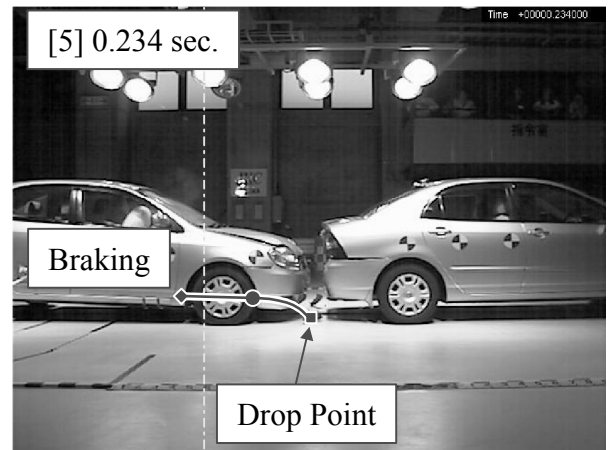
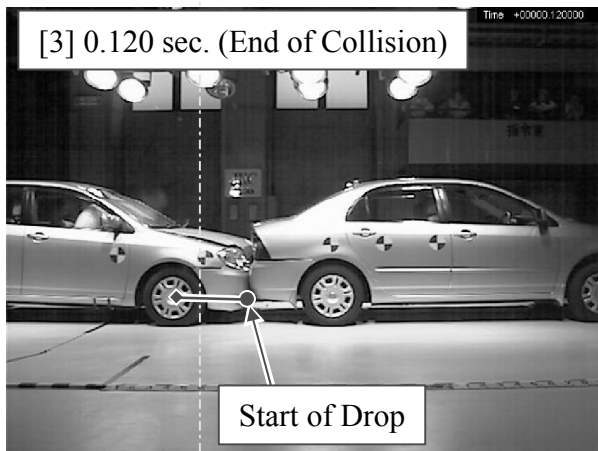


Fig.2 Sequence of Collision and Parts' Drop in Rear-end Collision Test (No.3, 35km/h)

【期間2】部品落下開始から着地までの期間 ([3]~[5])

【期間3】着地から停止までの期間 ([5]~[8])

それぞれの期間における衝突地点からの進行方向の移動距離については、以下のように理論式を導出することができる。

ここで、 $L_1$ ：【期間1】での対象部品の進行方向の移動距離[m]、 $L_2$ ：【期間2】での対象部品の進行方向の移動距離[m]、 $L_3$ ：【期間3】での対象部品の進行方向の移動距離[m]、 $v_{A0}$ ：追突車両の衝突（直前）速度[m/s]、 $v_{A1}$ ：追突車両の衝突直後速度[m/s]、 $t$ ：衝突時間（車両同士が接触している時間）[s]、 $h$ ：対象部品高さ[m] (=0.310)、 $g$ ：重力加速度[m/s<sup>2</sup>] (=9.8)、 $\mu$ ：対象部品と路面の間の摩擦係数、 $D$ ：車両前端から対象部品までの奥行き方向（進行方向）の距離[m] (=0.15)、である。

【期間1】追突車は衝突速度を初速度として衝突により速度を減じるから、次式で近似できる。

$$L_1 = \frac{v_{A0} + v_{A1}}{2} \cdot t \quad \dots (1)$$

【期間2】初速度 $v_{A1}$ で水平方向に投げ出されるから、放物線運動の次式で算出できる。

$$L_2 = v_{A1} \cdot \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad \dots (2)$$

【期間3】初速度 $v_{A1}$ の対象部品が、路面との摩擦によって減速し最後には停止するから、次式で算出できる。

$$L_3 = \frac{v_{A1}^2}{2\mu g} \quad \dots (3)$$

つまり、部品飛散距離 $L$  [m]は以下の式により算出できる。（正確に捉えると、対象部品の部位の潰れ量が多い場合、その長さを減じる必要がある。一方、その場合には速度が高く、 $L$ も長くなるから潰れ量は無視して構わないレベルになると考えられる。且つ、本実験では潰れ量自体も極微である。よって、本報では潰れ量の影響は考慮しないこととした。また、空気抵抗の影響は無視することとした。）

$$L = L_1 + L_2 + L_3 - D \quad \dots (4)$$

本実験においては追突車両の衝突直後速度 $v_{A1}$ を計測できていない為、運動量保存の法則および反発係数の関係式から求められる次式により算出した値を使用することとした。

（衝突（直前）速度と衝突直後速度を共に客観的情報から特定できる場合は少なく、どちらか一方から他方を次式により推定する事が、実用に即した手順であると考え。）

$$v_{A1} = v_{A0} - \frac{(1+e) \cdot m_B}{m_A + m_B} \cdot v_{A0} \quad \dots (5)$$

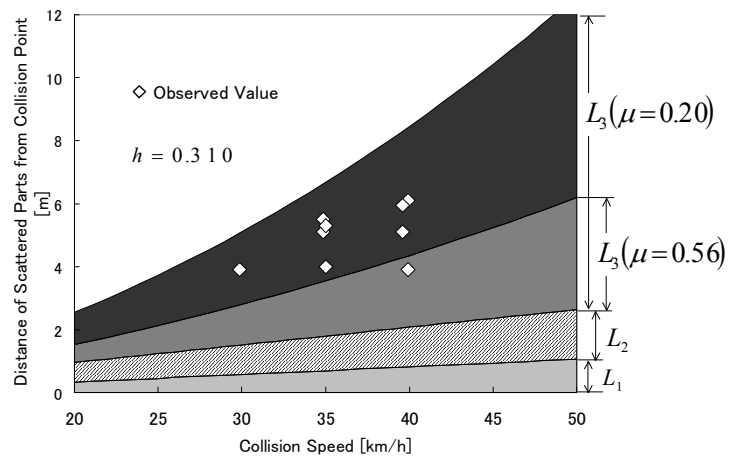


Fig.3 Comparison between the Theoretical Formulae and Observed Values in Rear-end Collision Tests

ここで、 $m_A$ ：追突車両の実験時車両総質量[kg]、 $m_B$ ：被追突車両の実験時車両総質量[kg]、 $e$ ：反発係数、である。

式（4）の理論式 $L$ を求めるにあたり、本実験の車両の質量はほぼ同じとみなして良いと考え、 $m_A = m_B$ とした。衝突時間 $t$ は条件によって変動するが、今回実施した6回の衝突実験では0.11~0.13[s]の範囲であり、それらの平均値0.12[s]を採用した。反発係数 $e$ は、自研センターの近年の衝突実験結果を基に、追突速度30~40km/hでの平均値と思われる値として0.10を採用した。

【区間3】における対象部品と路面の間の摩擦係数については、日本電産シンボ（株）製デジタルフォースゲージFGC-0.2Bを使用し、一定速度で水平方向に引いた際に要する力、および対象部品の重量（73.5gf）を計測して、前者を後者で除することで（動）摩擦係数とした。路面は完全な平滑面ではなく多少の凹凸が存在する為、対象部品の路面への置き方を変えて複数回計測したところ、0.38~0.56の範囲の摩擦係数が計測された。一方、高速度映像による部品の落下~停止間の移動状態をみると、部品飛散距離が短い場合には落下直後から滑るように移動し、最終的には停止している。しかし、落下後に滑るのではなく回転して転がった後に停止している場合も存在した。その場合には部品飛散距離は長くなり、転がる場合の摩擦係数相当の値（以下、「みかけ転がり摩擦係数」という）は上記摩擦係数より小さくなった。

よって本報では、対象部品と路面間の摩擦係数の最大値を（上記の摩擦実験の結果から）0.56とする一方で、最小値については表2の部品飛散距離の結果と理論式との当てはまりを考慮した上で、みかけ転がり摩擦係数の0.20を使用することとした。（なお、アスファルト路面でも摩擦係数を計測した結果、ほぼ同範囲の摩擦係数が得られた。つまり、極端な凹凸のないアスファルト路面であれば上記数値は採用できると考える。但し、極端に凹凸のある路面、泥地や草地等のように明らかに異なる路面では、その都度の計測・検討が必要である。）

以上によって求められる、本実験を対象とした理論式  $L$  および実測値 (表 2) の関係を図 3 に示す。

衝突速度が 40km/h の実験においては、他の速度域と比較して理論式に対してやや低めの結果が得られている。これは、高速の衝突では衝突時にノーズダイブ (頭下がり) の傾向が大きくみられるようになった為、つまり  $h$  が低くなったことによる影響が大きいと思われる。それを含めたとしても、ほとんどの実測値が理論式の範囲に入っており、30~40km/h の速度域での理論式の有用性が確かめられたと言える。

また本章で示した理論式から、一次元衝突を含むあらゆる衝突事故において衝突直後の速度が比較的高い場合、直接損傷部位の部品が破損して停止する位置と衝突地点とは通常は一致しないということがいえる。

### 3. 他条件への適用

本章では、前章の理論式  $L$  が別車両の別部品、異なる速度等の別条件においても適用できるかどうか確認を実施する。

具体的には、前章とは異なる車種の同型車 2 台を自研センター衝突バリア実験装置により正面衝突させた。同一質量ではなく大きく異なる質量の車両同士を 40km/h 超の速度で衝突させることにより、前章よりも高い衝突速度、および大きな速度変化を伴う衝突に対する、理論式の適用可否を確認することとした。1 台の車両をノーブレーキで停止状態とし、その停止車両に対して 43.73km/h の速度で他の 1 台の車両 (衝突車両) を正面衝突させた。停止車両には錘を車体に固定し、質量を約 700kg 増加させた状態で衝突実験を実施した。また、衝突車両の前部の部品に薄白色で塗装することで、衝突車両と停止車両との部品を識別できるようにし、本実験では衝突車両の破損部品の飛散状態を確認することとした。実験条件の概要 (両車両の実験時質量を含む) を図 4 に示す。

衝突の結果、衝突車両の左右ヘッドランプのレンズ ( $h = 0.625[m], D = 0.15[m]$ ) および右フロントフォグランプ穴のフィニッシャ ( $h = 0.360[m], D = 0.15[m]$ ) が衝突地点から 3.0~5.1m の範囲で落下・停止した。いずれも樹脂製部品である。高速度映像による部品破損~落下~停止までの経緯の一部を図 5 に示し、部品飛散距離の実測値、および前章における理論式  $L$  との比較を図 6 に示す。(微細な破片を含



Fig.5 Sequence of Collision and Parts' Drop in Frontal Collision Test

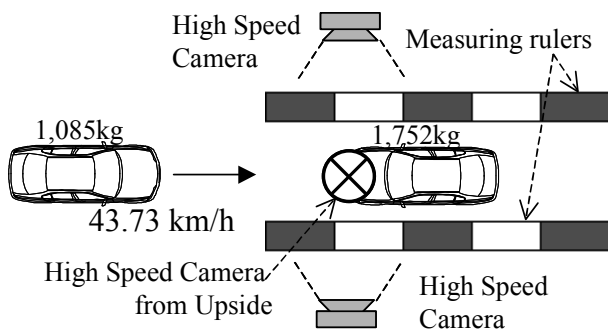


Fig.4 Outline of Frontal Collision Test

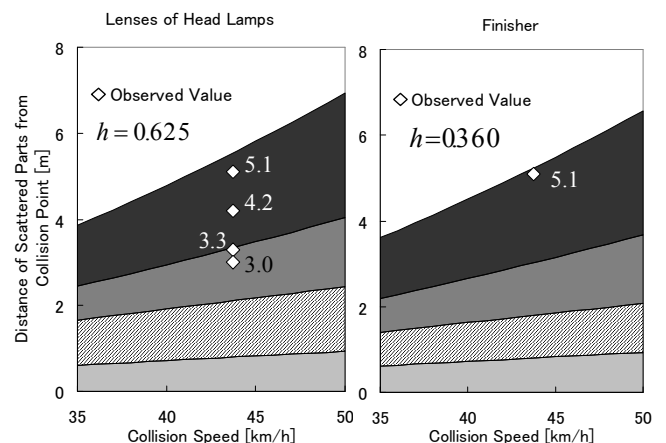


Fig.6 Comparison between the Theoretical Formulae and Observed Values

めると衝突地点から 3.0~5.1m の範囲に多数の破片が存在したが、ここでは比較的大きな破片の位置を計測した。また理論式を求めるにあたり、 $h$  および  $D$  は前記の値を使用した。反発係数  $e$  は正面衝突と追突で異なることが報告<sup>(4, 3)</sup>されているが、自研センターでのフルラップ正面衝突実験の実施例がほとんどない為使用できる平均的な数値が存在しなかった。よって、本実験での両車両の速度変化を画像解析により推定し、反発係数  $e$  として 0.13 を使用した。そして、衝突後速度  $v_{41}$  は式 (5) を使用して算出した。その他のパラメータについては、前章と同じ値を使用した。) )

実測値が理論値の範囲には含まれており、衝突車両の質量比および衝突速度域が異なる条件においても、前章で示した理論式  $L$  が適用可能であることが確認できた。

なお、更に高速の場合には空気抵抗を考慮する必要があると思われる。しかし、前述のように人身・物損事故の危険認知速度は 40km/h 以下の割合が高く<sup>(4)</sup>、理論式  $L$  の適用を 40km/h を大きく超えない速度域に限定したとしても、適用できる事故の割合は十分に多いと考える。

#### 4. 応用方法の提案

破損部品の落下事象を考慮に入れて事故の再現を実施する場合、「破損部品の停止位置」、「両車両の事故時質量」、「破損部品の正常時の高さ」については事後調査において確定できる。「衝突の反発係数」、「部品と路面との摩擦係数」については過去の実験結果、文献等から推定が可能である。一方、確定できない可能性がある要素としては「①衝突地点の絶対位置(衝突地点から部品停止位置までの距離)」、「②衝突速度」の2要素が考えられる。理論式  $L$  より、これら2要素のうち一方の要素が確定できるならば、他方が推定できる。一方、共に不明である場合には、推定する事はいずれも不可能である。

よって本章では、提案した理論式  $L$  の実用に際し、どのような状況下でどのような使用方法が可能であるかについて前

章の正面衝突実験(以下「3章検証実験」という)の結果を用いて説明・提案する。なお以下においては、前章までで対象としたフルラップ追突や正面衝突のような一次元衝突を前提とした議論を実施する。

##### 4.1. 「①衝突地点の絶対位置」の推定

衝突地点の絶対位置を推定する場合には、タコグラフの記録または石川ら<sup>(6)</sup>の方法等により衝突速度が確定している事が前提となる。以下、3章検証実験において衝突地点が不明とした場合の衝突地点の推定過程を説明する。

ここでは一次元衝突を前提としているから、3章検証実験の衝突後の部品散乱状態から、ヘッドランプレンズの飛散範囲は 2.1m (= 5.1 - 3.0) に渡っていることになる。このように飛散範囲の広い部品に注目すること、またそのような部品が複数種類ある場合にはそれらを総合的に検討すること、が重要である。

ヘッドランプレンズの理論式のグラフに対し、衝突速度 43.73km/h において 2.1m の飛散範囲が認められる場合の部品飛散距離を、図 7(A) に示す。これによれば、衝突地点に最も近い部品停止位置から約 3.3~3.4m の位置に衝突地点があることが推測できる。実際の衝突地点までの距離(真値)は 3.0m であるから、約 0.3~0.4m の誤差が生じる結果となった。その他の客観的情報が不在の状況においては、非常に有用な情報となり得るといえる。

##### 4.2. 「②衝突速度」の推定

衝突速度を推定する場合には、タイヤスリップ痕やガウジ痕等により衝突地点が確定していることが前提となる。以下、3章検証実験において衝突速度が不明とした場合の衝突速度の推定過程を説明する。

衝突地点と部品停止位置との距離の測定から、ヘッドランプレンズの部品飛散距離は 3.0~5.1m に渡ったとする。理論式のグラフに対し、3.0~5.1m の部品飛散距離が認められる衝突速度を図 7(B) 左に示す。これによれば、衝突速度が 40.5km/h において部品飛散距離が一致する。(部品飛散の

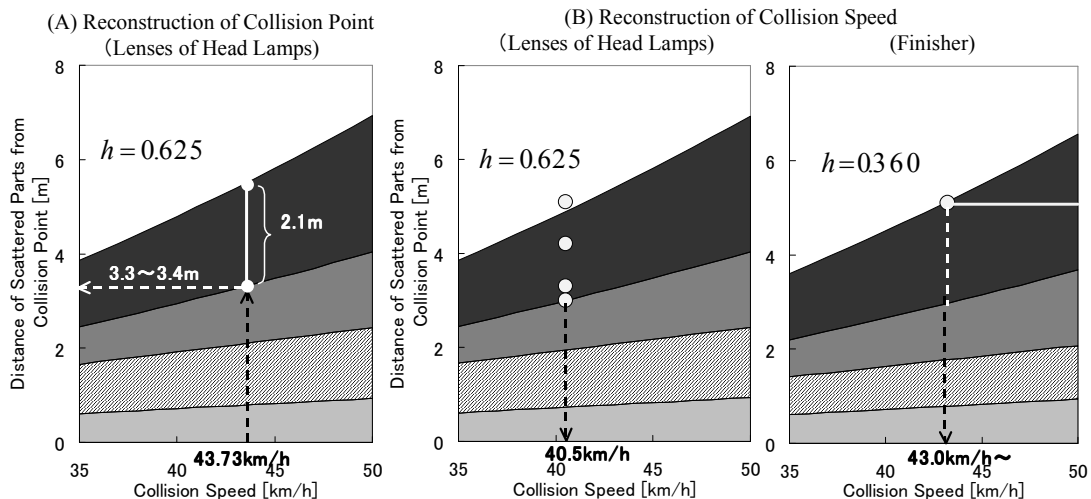


Fig.7 Reconstruction of Collision Point/Speed from Objective Information

範囲が狭い場合には速度範囲をもった結果となる。一方、この例のように部品飛散の範囲が理論式の範囲より広い場合には、「破損した部品がすぐには落下せず、しばらくは車両に乗ったまま移動し、ある地点で落下し始めた」状況が考えられるから、部品飛散距離が長い破片を無視して再度検討を実施すると良い。)ここではフィニッシャについても同様に理論式のグラフと比較したところ、図 7(B) 右に示すように 5.1m の部品停止位置は 43.0km/h 以上の衝突速度に含まれることとなった。以上を総合的に考慮すると、衝突速度は 40～43km/h 程度であったと推測できる。実際の衝突速度は 43.73km/h であるから、最大で約 4km/h の誤差が生じる結果となった。その他の客観的情報が不在の状況においては、非常に有用な情報となり得るといえる。

## 5. 結論

本報では、6 回の同型車同士のフルラップ追突実験を実施し、衝突による直接損傷部位の樹脂部品の破損および落下の状況を高速度映像で分析した。その結果、力学的相違のある 3 つの期間を経て最終的に停止していることが判明した。この知見を基に理論式を導出し実測値との比較を実施したところ、部品が路面を転がる際のみかけ上の摩擦係数の最小値を 0.20 (滑る際の最大の摩擦係数は実測により 0.56) とすることで、理論式と実測値が非常に良く一致した。(第 2 章)

次に、速度領域や重量比が異なる衝突での理論式の適用可否を確認することを目的として、約 44km/h のフルラップ正面衝突実験を実施した。その結果、適するパラメータを使用することで理論式と実測値のあてはまりが良く、異なる条件においても理論式が適用可能であること、すなわち理論式の有用性を確認した。(第 3 章)

以上より、過去の文献等による「ガラスは最も脆弱な車体部品であるから、衝突の早い時期に車体を離れて飛ぶ。従って、比較的忠実に衝突速度を反映しているものとみられる。」という考え方は、少なくとも本報にて対象とした樹脂部品の直接損傷部位においては完全に否定され、衝突後速度を反映していることが判明した。

最後に、理論式の実用的観点から、事故再現に対する実際の応用方法を説明・提案し、その有用性を示した。(第 4 章)ただし、摩擦係数や反発係数等への適切なパラメータの使用の有無によって交通事故の再現の精度が大きく変わってくる。よって、適切なパラメータを使用すること、および誤差を考慮に入れた上で事故再現を実施することが非常に重要である。

また、本報は一次元衝突での直接損傷部位に限定した議論である為、全ての衝突態様に適用できる訳ではない。よって、二次元衝突も含めた他の衝突態様や、衝突時に相手車に直接接触しない部位(間接損傷部位)の部品の飛散現象について、調査・分析を進めていくことが今後の課題である。

## 参考文献

- (1) 江守一郎：新版自動車事故工学，東京，技術書院，1993，254p.
- (2) 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)
- (3) 林洋：実用自動車事故鑑定工学，東京，技術書院，1996，276p.
- (4) 警察庁：平成 20 年中の交通事故の発生状況，2009.
- (5) 石川博敏，松川不二夫：車体変形によるエネルギー吸収と固定壁換算速度，自動車技術会前刷集 No. 792，p. 493-502 (1979)