

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 —

藤田 光伸¹⁾

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

— Classification and Characteristics of the Scattering Mechanism Based on Actual Collision Tests —

Mitsunobu Fujita

In order to correctly identify the collision point when reconstructing a traffic accident, it is important to understand the mechanism of scattering phenomenon of broken parts in traffic accidents. However, few studies have been conducted to clarify the mechanism of such phenomenon based on actual collision tests. This paper classifies the phenomenon according to the mechanism and clarifies each characteristic. The analysis is based on more than 100 actual collision tests.

Key Words: Safety, Crash Test, Accident Reconstruction / Broken Part, Collision Point (C1)

1. 背景と目的

衝突地点によって過失割合が大きく変化する等、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は非常に重要である事が多い。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一切得られない場合には、路面に残されたタイヤ痕、破損部品の散乱状態といった客観的な物理的事象のみを基に衝突地点を特定しなければならない。また、事故当事者や目撃者の証言は曖昧である事も多い為、そのような主観的情報のみから最終的な判断を下すには十分な注意が必要となる。即ち、事故状況の正確な把握の為には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事が重要である。

ところで、事故によっては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する必要がある。この場合、衝突時の部品飛散現象の理解が不足している者が衝突地点を特定しようとする、短絡的に破損部品の散乱地点(停止地点)を衝突地点と特定してしまう恐れもある。

過去には自動車事故における破損部品の飛散現象についての調査・研究・検討^{1)~3)}が実施されているが、実際の衝突現象を高速度映像等で分析した例は存在しない。よって、過去の言及内容を全ての破損・飛散現象に当てはめる事については大きな疑問が残る。そこで、前報⁴⁾において直接損傷部位(衝突時に相手に直接接触する部位)の破損部品の落下機序(飛翔~落下~停止の機序)および衝突地点と部品停止位置の関係を明らかにしたが、特定の速度域における一次元衝突、且つ部位を直接損傷部位に限定した議論であり、全ての衝突態様に適用できる訳ではない。つまり、より正確な衝突地点の特定の為には更なる基礎的な調査・研究を実施し、その結果を基に部品飛散現象の理解を深める事が重要である。

以上の背景の下、本報では対象を二次元衝突および直接損傷部位以外の部品にも拡張し、衝突実験の高速度映像を基にして破損部品の飛散態様をその飛翔機序(飛翔を開始する際

の機序)を基に分類し、それぞれの特徴を明らかにする。また、定量的な議論の可能性についても検討する。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. 衝突実験映像データに基づく分類と解析

2.1. 分析データの概要

(株)自研センターの衝突バリア実験装置において過去に実施した衝突実験の高速度映像を確認した結果、103件において部品の破損・飛散現象を確認できた。その衝突態様(Collision Mode)および衝突速度(衝突相手物に接触する直前の速度)の分布を表1に示す。Car-to-car (CC)は停止車両に対する車対車衝突、Moving rigid barrier (MRB)は停止車両へのムービングリジッドバリアの衝突、Angled barrier (AB)はアングルバリアへの衝突、Other barrier (OB)はフルラップ・オフセット等のアングルバリア以外の固定バリアへの衝突、Others (OT) (1件)は車両の縁石乗り上げの態様を表す。即ち本報では、衝突時に速度を持った状態の車両/ムービングバリアは1台であり、複数車両が速度を持って衝突する衝突態様は対象としない。衝突地点(衝突物体同士が最初に接触する地点: Collision Point)の左右・上方から撮影した毎秒500フレームの高速度映像を解析に使用する。高速度映像の例を図5~10に示す(詳細は後述)。

2.2. 部品落下機序の分類と概要

上方映像の画像解析により、破損部品の飛翔開始時間(衝突開始(衝突物同士が接触する瞬間)から破損部品が飛翔を開始するまでの時間)、部品飛翔速度(部品が飛翔し始めた直後の水平方向速度)および部品飛翔方向(部品が飛翔し始めた直後の水平面における方向)を記録した。同時に、全て

Table.1 Breakdown of Analyzed Collision Tests

Collision Speed x km/h	Collision Mode				
	Car-to-car (CC)	Moving rigid barrier (MRB)	Angled barrier (AB)	Other barrier (OB)	Others (OT)
0 < x ≤ 10	0	0	0	3	0
10 < x ≤ 20	5	7	2	16	0
20 < x ≤ 30	18	3	4	5	1
30 < x ≤ 40	26	0	7	3	0
40 < x ≤ 50	3	0	0	0	0

*2010年5月19日受理。2010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)

の映像を観察することで、破損部品の飛翔機序を基に分類を実施した。その結果、103件全ての衝突における部品飛散現象を7種類(①~⑦)に分類する事が可能となった。以下、図1に飛翔開始時間、図2~4に部品飛翔速度・方向の一部、図5~10に映像例(衝突地点、破損部品の名称とその軌跡、属する分類を付加)を示しつつ、詳細を述べる。なお、本報では水平面における部品飛翔速度・方向に注目し、垂直方向については議論の対象としない。つまり斜め上方に飛翔する場合と水平方向に飛翔する場合について、水平速度成分が同じであれば同一とみなす事になる。よって、より正確な議論の為には垂直方向の検討も必要であり今後の課題といえる。一方、破損部品の多くは水平方向に飛翔する事が左右からの高速度映像により確認できる。また、垂直方向を無視したとしても破損部品が最初に着地するまでの飛翔距離は変化するがその後の滑走距離は理論的には同じであるから、停止位置が極端に変わる事は少ない。よって、水平方向のみの議論であっても十分に有用であると考えられる。

(1) 直接損傷部位(Directly Damaged Part (DDP)) : 衝突中(相手物と接触している間)に相手物との間に挟まれた状態で破損する部品の飛散態様。更に、以下の2つに分類できる。

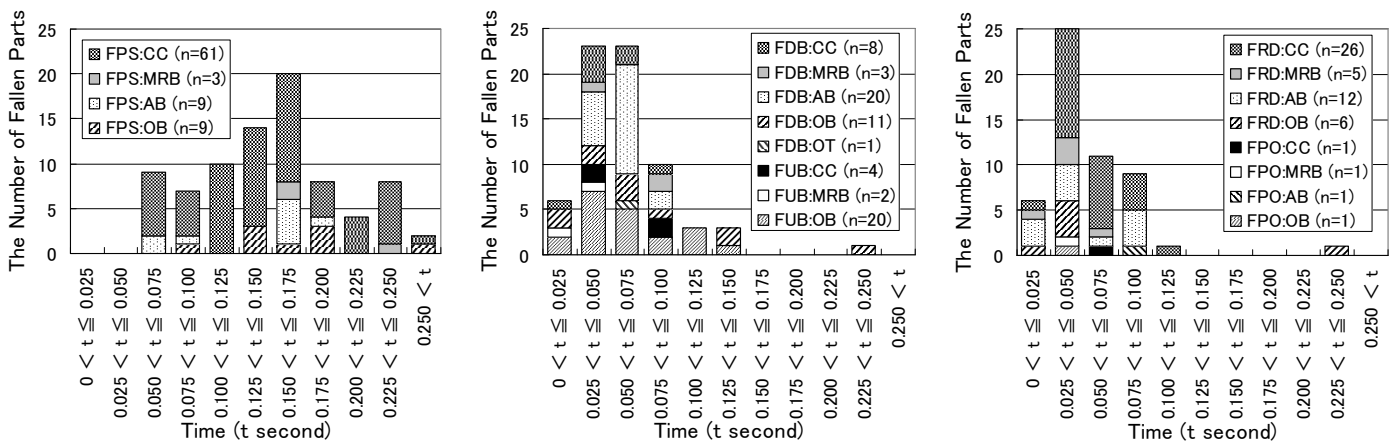
①[FPS] 衝突後速度飛散型(Flying at Post-impact Speed) : 衝突物同士が滑る事なく、押し込み力だけが生じる衝突が代表例である(図5[A][B], 図6[A])。衝突中において、破損部品は衝突物同士に挟まれた状態で留まり、衝突後(相手との接触が終了した直後)に落下を開始する。相手物との間で滑りが生じる場合であっても、アングルバリアのように一方が滑らかな衝突面の場合にはバリア面と部品との間で一方的に滑りが生じる為、破損部品が落下する際の飛翔速度としては車両側の速度を反映する(図7[A])。また図1(a)に示すように、ほとんどが衝突開始から0.1秒超で部品の落下が開始する(図1(b)(c)に示す後述の他分類と比較すると非常に遅い)。これにより、衝突後速度(相手との接触が終了した直後の速度)を反映して放物線運動

を描き飛翔~落下~停止する事になる(次節で詳述)。前報⁽⁴⁾において示した一次元衝突における直接損傷部位の破損部品の落下もこの分類に含まれる。即ち、部品飛翔速度・方向共に車両該当部位(対象となる部品が装着されていた部位)の衝突後速度を反映するから、衝突地点の定量的な推定が可能となる場合がある。

②[FRS] 不定速度飛散型(Flying at Random Speed) : 衝突物同士の間挟まれ部品が破損するが、衝突中に衝突物間で滑りが生じる衝突が代表例である(図8[A])。前述のアングルバリアとは異なり、例えば車対車衝突のように衝突面がいずれも滑らかではない場合、破損部品の落下タイミングは不定となる。滑り面の法線方向については飛翔開始時の車両該当部位の速度を反映する事が多く、滑りの接線方向については衝突物双方の衝突中の最低速度~最高速度の範囲で飛翔する事が多いが、衝突相手物の凹凸部で弾かれる等により全く異なる速度・方向で飛び出す場合も認められ、部品飛翔速度・方向は不定と言わざるを得ない。つまり、部品飛散現象の定型的な把握は困難であり、今後の課題といえる。

(2) 間接損傷部位(Induced Damage Part (IDP)) : 衝突中に相手物とは直接接触しない部位の部品の飛散態様。更に、以下の2つに分類できる。

③[FDB] ベース変形飛散型(Flying by Deformation of Base parts) : 対象部品が装着されているベース部品が衝突で変形し、ツメ等の締結要素の外れや破損、ブラケット類の破損が発生して、部品本体またはブラケット類が飛翔する。ほとんどが衝突開始から0.1秒以下の衝突初期に飛翔が開始する(図1(b))。衝突速度が極低速(5km/h)の衝突において、0.2秒超が2件認められたが、極低速衝突の場合には衝突によるベース部品の変形速度も遅い為、飛翔開始時間が遅くなる場合があると考えられる。極低速衝突では衝突地点の検討が必要になる事は希であるから、通常は議論する必要はない。また、飛翔開始の機序としては2種類



(a) DDP (Only FPS type is analyzed) (N=82)

(b) IDP (N=69)

(c) SDP (N=53)

Fig.1 Distribution of the Time Length from the Beginning of Collision to the Beginning of the Drop of Broken Parts

認められた。一方は締結が単に外れるだけの場合であり、衝突前（相手との接触が開始する直前）の速度・方向を反映して慣性により飛翔を開始する（図7[B]）。他方は、ベースとなる部位の変形によってばねのように部品が飛び出す場合（図5[C]）である。これら2種類の機序はどちらか一方のみが顕著に認められる場合もあるが、中間の性質を持つ場合が多い。後者が顕著な場合は部品の取付状態および衝突姿勢により部品飛翔速度・方向は大きく変化する。つまり、高速衝突であれば前者の影響が大きくなり衝突前の速度を反映する場合が多いと考えられるが、衝突速度が極低速、または停止状態からの被衝突の場合には後者の影響が顕著となる可能性が高く注意を要する（次節で詳述）。

④[FUB] ベース外れ飛散型(Flying by Unfastening of Base parts)：衝突による外力で部品が外れる事で、それを固定しているクリップ類やブラケット部が飛翔する(図9[A])。その飛翔開始は部品が外れるタイミングに依存する事になるが、本報においては、ほとんどが衝突開始から0.1秒以下の衝突初期に飛翔が開始した(図1(b))。一方、部品飛翔速度・方向は部品の取付位置や状態により大きく変化する為、定型的な把握は困難である。また、この分類の飛翔態様を示す部品は締結要素(クリップ等)の小部品が多い為、事故後の調査においては記録されない場合がある。

(3) 半直接損傷部位(Semi-directly Damaged Part (SDP))：衝突中に相手物と部分的に接触する部品の飛散態様。更に、以下の2つに分類できる。

⑤[FRD] 直接損傷関連飛散型(Flying in Relation to DDP)：部品の一部は衝突中に相手物との間で挟まれた状態で破損する((1)の飛散態様を示す)が、残りの部位が挟まれずに破損(割損)し飛翔する(図6[B])。飛翔開始時間はほとんどが0.1秒以下と、衝突初期に飛翔が開始する(図1(c))。0.2秒超のケースが1件認められたが、③[FDB]の場合と同様に衝突速度が5km/hの極低速衝突の場合であり、通常は議論する必要がない。衝突姿勢および破損部品の装着位置により部品飛翔方向はおおよそ決まるが、部品飛翔速度は場合によって異なる(次節で詳述)。

⑥[FP0] 押出され飛散型(Flying by being Pushed Out)：装着状態の部品が一方から押される事で外れ、飛翔する(図7[C])。衝突時の相手物との位置関係により部品飛翔方向はおおよそ決まるが、部品飛翔速度は場合によって異なる。飛翔開始時間はほとんどが0.1秒以下と、衝突初期に飛翔が開始する(図1(c))。また本分類に限らず、図7[C]のような円形部品の場合、飛翔～落下し転がった後に停止する可能性がある為、その場合には停止位置が部品飛翔方向を反映しない可能性があり注意を要する。

(4) ⑦[0T]その他(Other Type)：上記分類に当てはまらない飛散態様。例えば、乗員や積載物が衝突時の慣性で車両前方へ投げ出されることによるウインドシールドガラスの破損、助手席エアバッグの展開によるウインドシールドガラ

スやルームミラーの破損等、二次的な破損部品の飛翔が考えられる(図10)。定型化は困難であり、個別に詳細な検討が必要である。

以上のように、破損部位および飛翔機序を基にすると、衝突による破損部品の部品飛散現象を7種類に分類できる事が明らかとなった。但し、映像例からも明らかなように、1度の衝突において単一の飛翔機序のみが生じる訳ではなく、複数種類が同時に発生し得る。加えて、同一部品内においても①[FPS]と⑤[FRD]という複数の飛翔機序が認められる場合もある。つまり、車両の衝突姿勢を基に、飛散部品それぞれの分類を特定する事が重要である。それにより、部品飛散現象の正しい理解が可能になる。

尚、解析対象の衝突実験映像では存在しなかった為、本報では議論の対象外とするが、衝突によりガラスが割損～飛散する状況は、その衝突態様によって③[FDB]または⑤[FRD]に分類されると考える。

2.3. 定量的な推定へ向けた検討

次に、部品飛散現象の定量的な検討を実施する。本節では、対象の破損部品が装着されている車両(対象車両)の衝突前後の状況を基に、改めて以下の3種類に衝突態様を分類する。

(CF) 固定物衝突(Collision to Fixed objects)：車両が固定物に衝突し、衝突後には速度がほぼゼロになる態様。2.1節の衝突態様ではOBが当てはまる。

(SC) 被衝突(Stationary cars to be Collided)：停止している対象車両が衝突される事で速度を持って移動する態様。2.1節の衝突態様ではMRBおよびCCにおける被衝突車両が当てはまる。

(NC) 通常衝突(Normal Collision)：対象車両が停止車両等に衝突した後も速度を持って惰行する態様。2.1節の衝突態様ではAB、OTおよびCCにおける衝突車両が当てはまる。

以上の3分類、および前節にて述べた①～⑦の7分類に従い、部品飛翔速度・方向を高速度映像により解析する。その際に、部品飛翔速度・方向が車両該当部位の衝突前後の速度や方向に依存する可能性を解析する事を目的とし、次式により部品飛翔速度・方向を正規化した上で解析する。

$$\begin{pmatrix} U_x \\ U_y \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}} \begin{pmatrix} u_x \cos \theta + u_y \sin \theta \\ -u_x \sin \theta + u_y \cos \theta \end{pmatrix}$$

但し $\theta = \arctan \frac{v_y}{v_x}$

ここで、 (u_x, u_y) ：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)、 (v_x, v_y) ：正規化の基準となる速度ベクトル(車両該当部位の衝突速度または衝突後速度のベクトル)、 (U_x, U_y) ：正規化後の部品飛翔速度ベクトル、である。正規化前の速度については、X軸正の方向が衝突車両の衝突前の移動方向を意味する。また、 U_y の正負は衝突車両の左右方向を意味している為、全て正の値に正規化する。

る。 U_x については、正規化の基準となる速度と同方向の場合に正、逆方向の場合に負の値をとる事になる。以上により、基準となる速度（衝突速度または衝突後速度）のベクトルを(1, 0)として正規化した上での、部品飛翔速度ベクトルの比較が可能となる。

以上の正規化後の部品飛翔速度ベクトルの分布から得られた知見の中で、衝突地点推定の視点から特に有意と思われる以下の3分類(①, ③, ⑤)の特徴について説明する。

①[FPS] 衝突後速度により正規化した部品飛翔速度ベクトルの分布を図2に示す。部品飛翔方向については、全てにおいてX軸正に近い分布となっており、破損部品は衝突後の車両該当部位の移動方向に飛翔する事が分かる。尚、X軸正の範囲の分布は、衝突後速度（基準が衝突速度の場合には衝突速度）と同一方向に部品が飛翔した事を表している（負の場合には方向が逆）。部品飛翔速度については、CFではX軸で0.0~0.5の範囲に分布しており、衝突後速度の0.0~0.5倍の部品飛翔速度を持つ事を意味する。しかし、CFでは衝突後速度がほぼゼロに近い為、破損部品はその場に落下すると考えて差

し支えない。その他のSC, NCでは、SCがX軸で0.5~1.0, NCが1.0~1.5の範囲に分布しているという偏りが認められる。つまり、車両該当部位の衝突後速度に対する誤差範囲はSC, NCのいずれかによって異なる傾向を持つ事を意味するから、破損部品の出所の確認が重要であるといえる。一方、概して1.0を中心に分布しているともいえるから、前報⁽⁴⁾において確認した「一次元衝突における直接損傷部位の破損部品の飛翔速度は衝突後速度を反映している」という部品飛散機序の妥当性が確認できたといえる。同時に、図5, 7のような二次元衝突においても、衝突面が滑りを伴わない場合（または滑りを伴っても一方が滑らかな衝突面の場合）にはこの知見が適用可能である事も明らかとなったといえる。

③[FDB] 衝突速度および衝突後速度により正規化した部品飛翔速度ベクトルの分布をそれぞれ図3(a), (b)に示す(SCでは衝突前は停止の為(b)のみ)。

まずCFおよびNCに注目すると、部品飛翔方向については(b)よりも(a)の方がY軸方向のバラツキは少なくX軸正に近い分布となっている(b)のCFについては、グラフのY軸表示範囲外に更に2点存在する)事から、車両該当部位の衝突速度の方向を反映する傾向が大きい事が分かる。一方、FPS(図2)よりもややY軸にバラツキが大きく、衝突により破損部品がバネのように弾かれ、衝突前の車両該当部位の移動方向とは異なる方向に飛翔する事もある事も

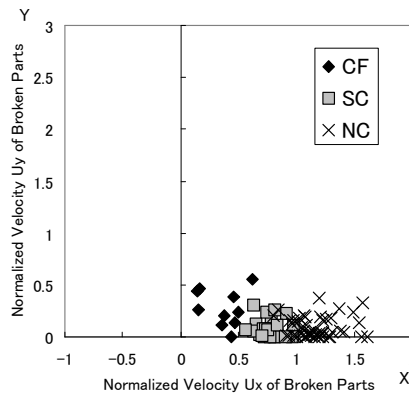


Fig.2 Horizontal Velocities of Broken Parts Normalized by Post-impact Speed Regarding FPS

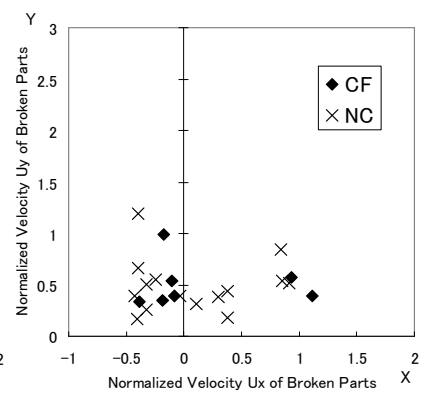
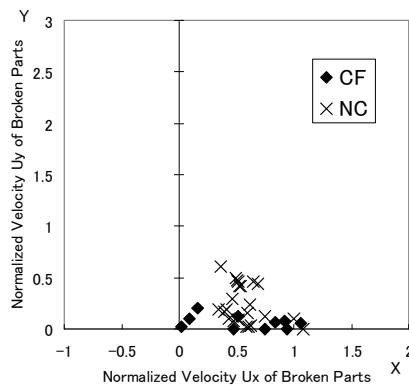
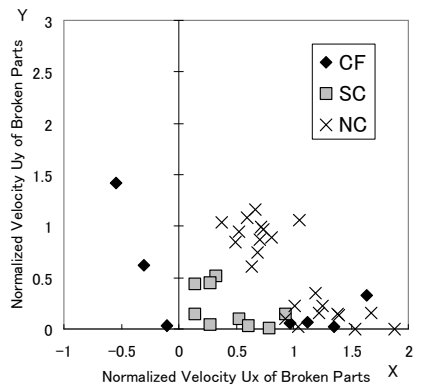


Fig.4 Horizontal Velocities of Broken Parts Normalized by Pre-impact Speed Regarding FRD



(a) Normalized by Pre-impact Speed



(b) Normalized by Post-impact Speed

Fig.3 Normalized Horizontal Velocities of Broken Parts Regarding FDB

示している。(但し、衝突前の車両該当部位の移動方向から±60度以内に収まっている。)部品飛翔速度については、(a)では正規化後速度の絶対値でほぼ0.0~1.0の範囲に分布しており、(b)では正規化後速度の絶対値で1.0倍超に多く分布している。つまりCF, NCの場合には、車両該当部位の衝突速度~衝突後速度の範囲内で飛翔する事が多い事を意味する。但し、(グラフ表示範囲外であるが)衝突速度で正規化した部品飛翔速度の絶対値が3.0を超える場合も1件認められた。この例は車両の衝突速度が5km/hと極低速であるのに対し、バネのように弾かれた破損部品の飛翔速度が速かったという事例である。前述のように車両の衝突速度が極低速の場合には衝突位置が議論される事は希ではあるが、同時に注意が必要である事も示している。

次にSCについて注目する(図3(b))。部品飛翔方向については概ねX軸正に近い分布となっているが、一方で図5[C]のように衝突後速度とは大きく異なる方向に飛翔する場合も認められる。つまり、SCの場合の部品飛翔方向は、衝突姿勢によっては衝突後速度ベクトルの±90度の範囲いずれにも飛翔する可能性があるといえる。一方、部品飛翔速度については、正規化した速度の絶対値でほぼ0.0~1.0の範囲に分布しており、衝突後速度より低い速度で飛翔する可能性が高い事を示している。

⑤[FRD] 衝突速度により正規化した部品飛翔速度ベクトルの分布を図4に示す(SCは衝突前停止の為CF, NCのみ)。部

品飛翔方向については、衝突姿勢および破損部品の装着位置によって様々な方向が確認された。つまり検討の都度、衝突姿勢および破損部品の装着位置を考慮する事が重要である。一方、部品飛翔速度については、正規化した速度の絶対値ではほぼ 0.0~1.0 の範囲に分布している。この事は、衝突速度以下の速度で飛翔する可能性が高い事を示している。衝突後速度による正規化においては有用な知見は得られなかった為、SC については飛散現象の定型的な把握は困難であるといえる。

その他、分類に関わらず得られた知見として、図 5~10 の映像例でも認められるように破損部品は必ず衝突地点から離れる方向へ飛散していた。つまり、破損した部品が衝突地点で停止する事は、極低速衝突および固定物への衝突を除いて非常に希であるといえる。

3. 結論

本報では、衝突実験の高速度映像 103 件を基に解析を実施したところ、衝突時の部品飛散現象を 7 種類に分類できる事が明らかとなった。その中の 3 つの分類 (①[FPS], ③[FDB], ⑤[FRD]) については、飛翔開始時間、部品飛翔速度および部品飛翔方向についての定量的な議論へとつながる知見を得た。加えて、全ての破損部品は衝突地点から離れる方向へ飛散している事も確認された。このような解析・検討は過去、皆無であり非常に有用な知見が得られたと考える。

4. 今後の課題

本報の結果は 103 件という特定の衝突態様に限定した情報を基にしている。定量化の議論においても、件数が不十分な事もあり飛散現象の定型的な把握が困難な分類も多い。加えて、垂直方向の部品飛翔速度・方向については議論の対象としていない。つまり、実際の事故によって発生する部品飛散現象を全て議論できているとは限らない。また、本報で得られた知見を事故調査の実務にどのように応用していくかの議論も未実施である。

以上より、定量化の議論について本報の検討では未解明である分類について、衝突実験の更なる実施により知見を増補すると同時に、実務への応用についての検討も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，254p (1993)
- (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，276p (1996)
- (4) 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)

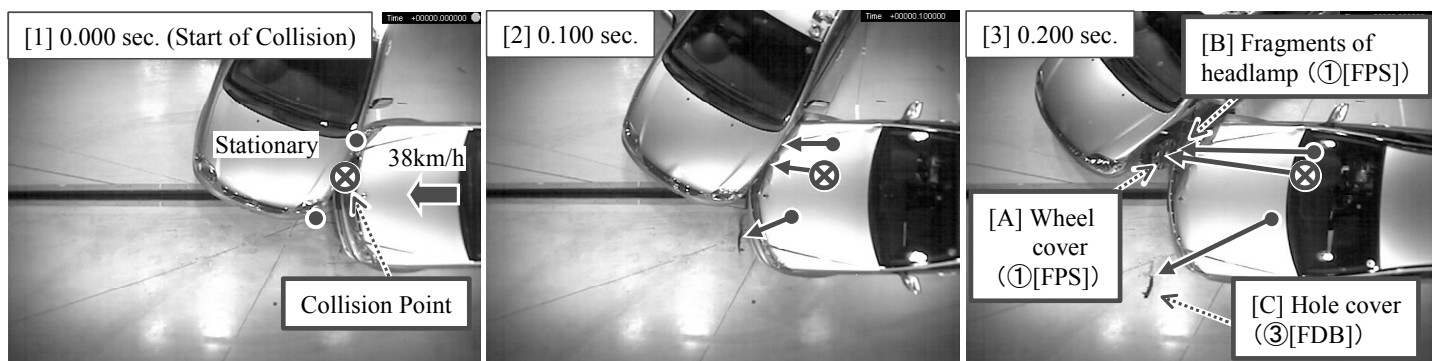


Fig.5 Example of ①[FPS] and ③[FDB]

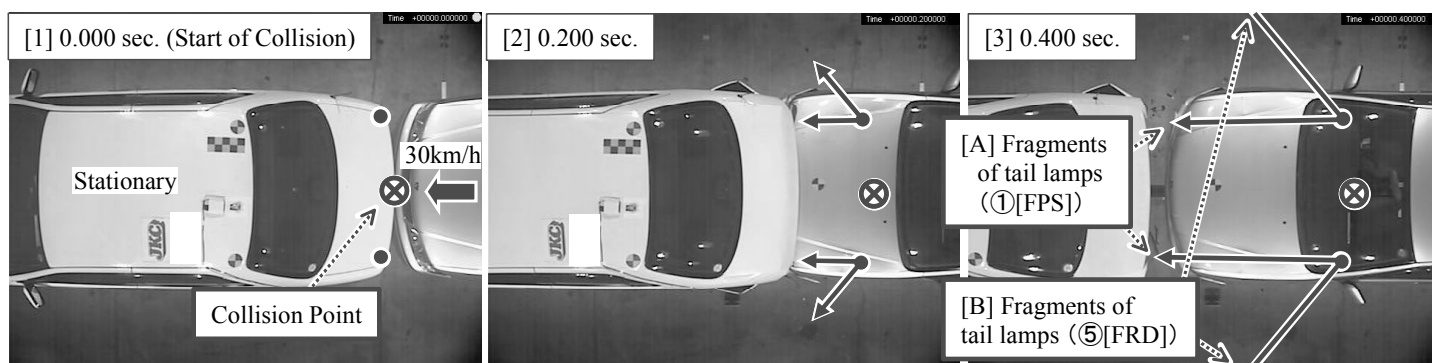


Fig.6 Example of ①[FPS] and ⑤[FRD]

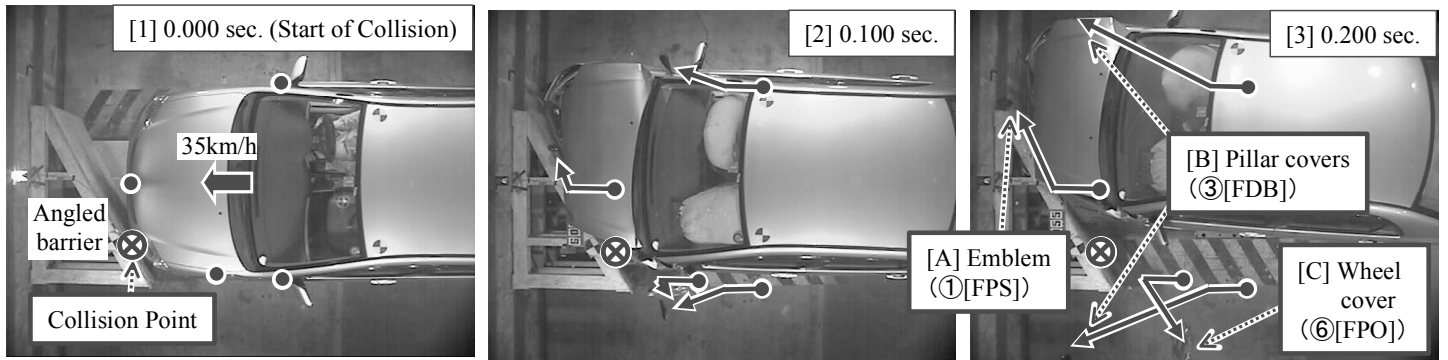


Fig.7 Example of ①[FPS], ③[FDB] and ⑥[FPO]



Fig.8 Example of ②[FRS]

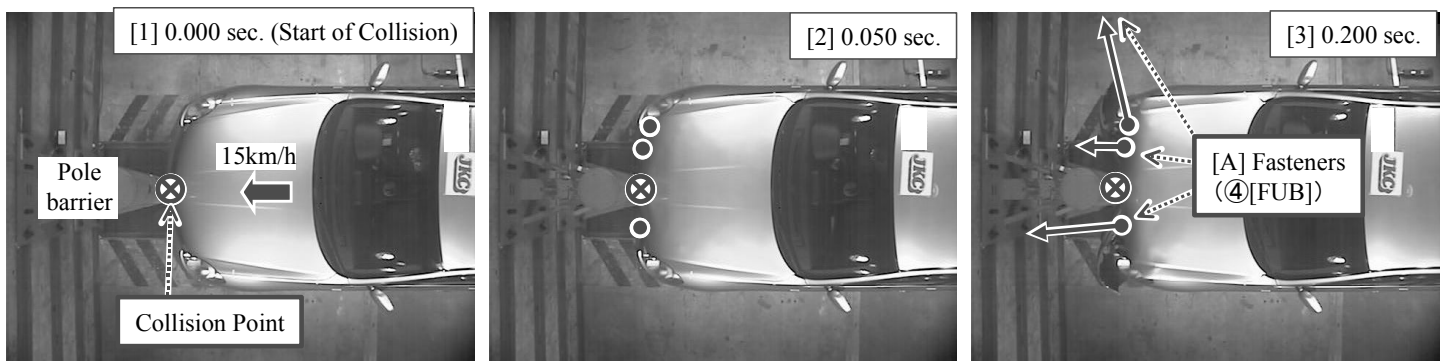


Fig.9 Example of ④[FUB]

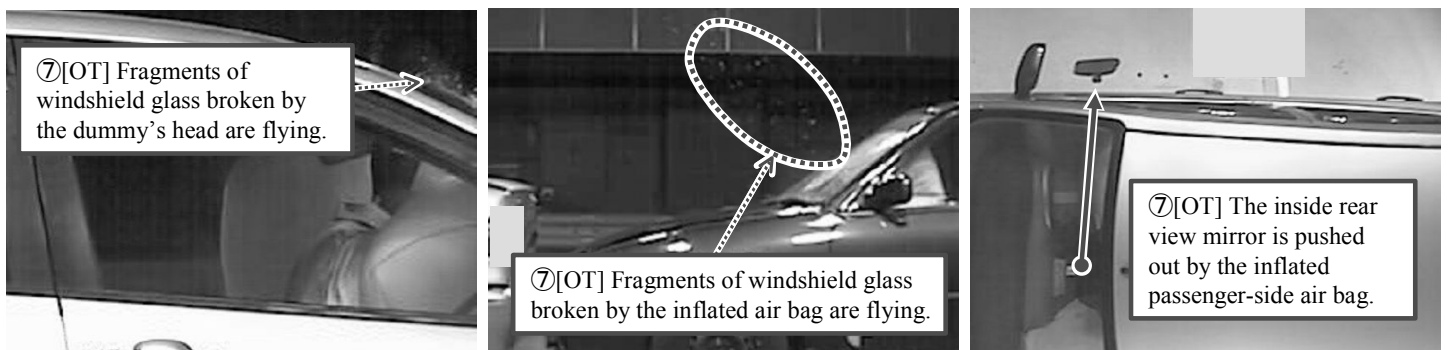


Fig.10 Examples of ⑦[OT]