

一次元衝突の衝突速度推定における車体強度の影響*

藤田 光伸¹⁾

Significance of Consideration of Body Stiffness to Reconstruct Pre-impact Speed in One-dimensional Collisions

Mitsunobu Fujita

The purpose of this paper is to study the effect of body stiffness on the accuracy of reconstruction of pre-impact speed in one-dimensional collisions, and to enable more accurate reconstruction case by case than previous studies. This paper shows, by comparing body stiffness data of several types of automobiles, that the appropriate method depends on their relations. In addition, this knowledge is validated based on actual collision tests. The body stiffness data used in this study is mainly based on the data obtained in the Japan New Car Assessment Program (JNCAP).

Key Words: (Standardized) safety, crash test, accident reconstruction (Free) Crush, Stiffness, Pre-impact Speed (C1)

1. 諸言

交通事故の原因調査および再現において、衝突速度（衝突直前の速度）を知る事は事故状況の把握の為に重要である。車対車の衝突事故では、双方車両の損傷状態や衝突後速度（衝突時の接触が終了した直後の速度）から衝突速度を推定する方法が提案されている^(1~6)。しかし双方車両の詳細な情報を得る事ができず、事故状況の再現が困難となる場合がある。つまり、一方の車両の情報のみから衝突速度の妥当な推定が可能となれば非常に有用である。一方の車両の損傷と有効衝突速度（後述）や速度変化（衝突直前と衝突直後の速度差）を関連づける事で、一方の車両の損傷のみから衝突速度が推定できる可能性も示されている^(1~8)が、全ての衝突事故に適用する事の妥当性については疑問点も多い（次章で詳述する）。

よって、一次元衝突（フルラップの正面衝突や追突のように衝突の事象がひとつの軸方向で完結する衝突）を対象とし、このような「一方の車両の情報のみを基にした衝突速度の推定」を適切に実施する為に必要な知見を得る事を本報の目的とする。

本報では最初に、過去に研究・提案された衝突速度の推定手法を精査し、それらの問題点を検討する。そして、自動車アセスメント（JNCAP）で得られている衝突実験データ等を基に、衝突速度推定の際に考慮すべき荷重-変形特性（外力に対する変形しにくさを意味し、以下、「車体強度」という）の影響を考察する。最後に、実車衝突実験の結果を基に、エネルギー吸収^(9~16)等の複数の手法による衝突速度の推定を実施し、得られた知見の妥当性を確認する。同時に、今後の課題についても言及する。

以上により、事故再現の際に、より多くのケースで妥当性

のある事故状況の把握が可能となる事が期待できる。

2. 過去の研究とその問題点

二次元衝突（出会い頭衝突のように車両が回転や横滑り等の平面運動をする衝突）を含む車対車の衝突事故では、双方車両の変形エネルギーの総和、衝突後の滑走状況から求まる衝突後速度等を基に、運動量保存則やエネルギー保存則、各種モデル化を活用してバリア換算速度（固定壁衝突において車体の変形エネルギーが等価となる速度、Equivalent Barrier Speed, Barrier Equivalent Velocity）や速度変化（ ΔV ）、衝突速度等を推定する手法の研究、シミュレーションの構築、およびデータ収集が実施されてきた^(1~6, 17~23)。これらの手法では基本的に双方車両の事故後の状態（損傷、滑走距離等）が記録・保存されている事が前提となる。よって、一方の車両しか調査されていない場合は、事故状況の再現が困難な場合が多い。それに対し、一方の車両の損傷状態のみから他方の変形エネルギーを推定する手法^(5~8, 22)も一部では検討されている。

ここで一次元衝突に議論を限定すると、二台の車が衝突中に同一速度（ V_c ）となる瞬間があり、衝突開始からその同一速度までの速度変化が有効衝突速度（実効衝突速度）と定義される^(3, 4, 29)。佐藤⁽³⁾は「実効衝突速度を用いれば、相手が車とか固定壁の区別なく比較する事ができる」とし、林⁽⁴⁾は「衝突中の車両の間に V_c の速度で走る質量無限大の壁（バリア）があったと考えても力学的に矛盾せず、有効衝突速度で考える事にすれば、すべての衝突現象を固定壁（バリア）への衝突に置き換える事ができる」としている（以下「佐藤・林理論」という）。もしも佐藤・林理論が全ての衝突において成立すると仮定できれば、バリア換算速度が有効衝突速度と一致する事になり、運動量保存則から導き出される以下の関係、

*2011年6月23日受理。

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

$$V_{10} - V_{20} = \frac{m_1 + m_2}{m_2} \cdot V_{eff1} \quad \dots (1)$$

$$V_{10} - V_{20} = \frac{m_1 + m_2}{m_1} \cdot V_{eff2} \quad \dots (2)$$

(添字 1, 2 は車両 1, 2 を示し, V_{10} , V_{20} : 衝突速度[m/s], m_1 , m_2 : 質量[kg], V_{eff1} , V_{eff2} : 有効衝突速度[m/s]) より, 双方車両の相対速度が導出可能である. 即ち, 一方が停止 ($V_{20}=0$) 中の事故であれば, どちらか一方の車両の損傷 (つまりバリア換算速度) のみから衝突速度を推定できる事になる. (双方車両が走行中の場合には相対速度しか導出することはできず, 衝突速度を求める為には少なくともどちらか一方の車両の衝突前速度や衝突後速度等, 他の情報が必要となる.)

しかし実際には, 例えば車両がガードレールに衝突した場合, 車両はその場で停止するから有効衝突速度は固定壁への衝突と同じになるが, ガードレールも変形して運動エネルギーを吸収するので車両の損傷は固定壁衝突の場合よりも小さくなる. 牧下⁽³⁰⁾によれば, 軽自動車は車両質量の小ささに対してそれほど車体強度は小さくなっておらず, 佐藤・林理論から外れる事も報告されている (但し, 当時は規格変更前の軽自動車であり, 600kg 前後の車両を対象としていた為, 現在の規格の軽自動車においては別途検討が必要).

このように, 佐藤・林理論が成立するのは, 衝突部位の車体強度が質量に比例する (重いほど硬い) 関係にある物同士の衝突の場合であり⁽⁴²⁾, あらゆる衝突に適用する事はできないと考えるのが妥当である.

尚, Emori^(6, 2)によれば, 車体前部の車体強度は車両重量 (質量) に比例する事が, 固定壁衝突および車対車衝突実験を基に報告されている. また, 藤田⁽⁴²⁾は有効衝突速度の考え方を停止車両への直角偏心衝突に拡張し, その中で実施した衝突条件ではバリア換算速度と有効衝突速度が一致した事を報告している. これらの場合には, 佐藤・林理論が成立する事になる.

一方, Emori^(6, 2)によれば, 車体後部は車体前部よりもはるかに柔らかく (車体強度が低く), 追突事故では一方的に車体後部が損傷するから, 衝突による吸収エネルギー (変形量) は車体後部の変形量にのみ消費されるとみなして差し支えないとしている. 変形量が多い高速度の衝突においてはこのような傾向が認められると考えるが, 変形量が少ない低速衝突の場合にも適用可能であるかについては疑問である.

また石川⁽⁶⁾は, 衝突による吸収エネルギー (変形量) は車体強度に反比例する事を基に双方車両の変形量の関係を示している. Grimes ら⁽⁷⁾や Prasad⁽⁸⁾は同様の理論を基にして, 一方の車両の損傷状態と双方車両の車体強度 (Stiffness) データから他方の不明な車両の損傷を推定した上で総変形エネルギーを算出する手法を提案している. つまり, 作用反作用の法則に則って一方の車両の損傷から他方の車両の損傷 (変形エネルギー) を予測するというものである. この前提・手法を基に一方の車両の損傷のみから衝突速度の妥当な推定が可能とな

れば非常に有用であり, 車両別の車体強度に関するデータも公表されている^(24~28)が, いずれも車両への外力 (F) と変形量 (C) が線形の関係 ($F = A + B \cdot C$: A, B は定数) を持つという前提の下に検討された手法である. 各種衝突実験結果^(5, 9~16, 31, 32, 34~38)によれば, 必ずしも外力と変形量には線形の関係が認められない結果が報告されており^(5, 11, 12, 31, 32, 34~38), 特に乗用車の車体後部^(5, 11, 37)においては明らかに非線形の関係が認められる. つまり, 過去の検討における前提に当てはまらない特性をもつ損傷部位 (特に車体後部) の場合には, その特性をよく考慮した上で手法の適用可否を含めて検討し解析を進めなければならないが, 過去にそのような検討は実施されていない. 車体強度の非線形性も検討されている^(34~38)が, モデル化に留まっている.

よってまずは次章において, 上記のように様々な状況が考え得る車体強度の関係を整理し, 車体の損傷から衝突速度を推定する際に必要な情報, 考慮すべき点を明らかにする.

3. 車体強度による分類と特徴

自動車アセスメント⁽⁴³⁾のフルラップ前面衝突試験で得られた車両加速度およびバリア荷重のデータを基に, 車両前部 (フルラップ衝突時) の単位車幅あたりの荷重対永久変形量 (車体強度データ) を取得する. 本報では大賀⁽¹⁵⁾と同様の手法により, 1500cc クラスのセダン (SF), 同じく 1500cc クラスのハッチバック車 (HF) および軽自動車 (KF) の 3 車種の車体強度データを取得した.

一方, 車体後部についてはバリア荷重のデータを取得できなかった為, 公開されているエネルギー吸収図⁽¹¹⁾から, セダントタイプの車体後部 (SR) の車体強度データを推定した.

以上により得られた車体強度データを図 1 に示す.

これら 4 種類の車体強度データはフルラップ衝突のみが対象であり, また全車種を網羅している訳ではない. しかし, 衝突する 2 台の車両の衝突部位の車体強度の関係として少なくとも次の [1], [2] の組み合わせがあり, 車体の損傷状態から衝突速度を推定する際には, それぞれに対して注意すべき点および使用すべき手法が異なる事が分かる. 以下, その詳細を述べる.

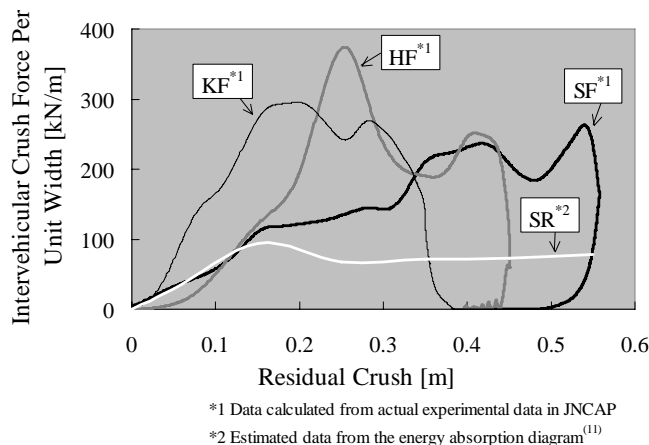


Fig.1 The Relations between Normalized Intervehicular Crush Force and Residual Crush

[1] 双方の荷重が単純増加

衝突開始から最大変形量に至るまでの間、双方の荷重がいずれも増加し続ける形態。ここで車体強度を線形とみなせば、例えば車両1が車両2に衝突する一次元衝突の場合、双方車両の吸収エネルギー(変形量)は車体強度に反比例^(6~8)し、式3が成り立つ。また、衝突による総エネルギー吸収量 T_L は式4によって算出可能^(1, 2)である。この2式より、双方車両(車両1, 2)のいずれか一方の吸収エネルギーが判明している場合の衝突前の相対速度はそれぞれ式5または式6によって算出可能となる。よって一方が停止していた ($V_{20} = 0$) とすれば、衝突速度 (V_{10}) が算出可能となる。

$$k_1 E_1 = k_2 E_2 \quad \dots (3)$$

$$T_L = \frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (1 - e^2) (V_{10} - V_{20})^2 = E_1 + E_2 \quad \dots (4)$$

$$|V_{10} - V_{20}| = \sqrt{\frac{2(m_1 + m_2)(1 + k_1/k_2)E_1}{m_1 m_2 (1 - e^2)}} \quad \dots (5)$$

$$|V_{10} - V_{20}| = \sqrt{\frac{2(m_1 + m_2)(1 + k_2/k_1)E_2}{m_1 m_2 (1 - e^2)}} \quad \dots (6)$$

(添字 1, 2は車両1, 2を示し, V_{10} , V_{20} : 衝突速度[m/s], m_1 , m_2 : 質量[kg], E_1 , E_2 : エネルギー吸収量[J], k_1 , k_2 : 車体強度[N/m], T_L : 総エネルギー吸収量[J], e : 反発係数)

また双方車両の車体強度の関係によって、以下の2種類に分けて捉える事が可能である。

[1-1] 衝突部位の車体強度がほぼ同じ関係。例えば、図1のSF, HF, SRのいずれかが衝突し永久変形量が約0.15m以下の場合がこの種に当てはまる。例えば、推定する衝突速度の要求精度を±10%とした場合、車体強度の差(図1グラフにおける傾きの差)が±40%以内の組み合わせについては車体強度を同一($k_1/k_2 = 1$)とみなして差し支えない(式5, 6より)。近年の乗用車の車体前部は、車体前部側からバンパカバー(バンパフェイス, バンパフェイスア), バンパラインホース(バンパビーム), クラッシュボックス(バンパステー), フロントサイドメンバ(フロントサイドフレーム), と続く骨格構造が一般的であり、ほぼ全ての車種で同様の構造をもっている。また、低速衝突での損傷性および歩行者保護の観点から、変形初期に極めて高い車体強度を持たせるとは考えづらい。一方、乗用車の車体後部については、リヤサイドメンバ(リヤサイドフレーム)が主な衝撃吸収部位である為、薄板鋼板による構造部位という意味では基本的には車体前部と同じ構造ともいえる。よって、同一クラス車であれば、ある変形量までは車体強度が似ている事には妥当性があると考えられる。

[1-2] 衝突部位の車体強度が極端に異なる関係。図1のSFとKFが衝突し永久変形量が約0.20m以下の場合がこの種に当てはまる。

この場合、車体強度比(k_1/k_2)を式5, 6で使用する必要がある。軽自動車は他の乗用車に比べて寸法的な制限がある事は明らかであり、衝突時のエネルギー吸収効率を上げることを目的として高い車体強度をもっている事には妥当性があると考えられる。

[2] 一方の車体強度が低下する関係

例えば、図1のSFとSRが衝突し永久変形量が0.15m付近を超える形態。即ち、この例においてSRは変形量が0.15m付近を超えると発生荷重が低くなる為、SRが一方的に変形する。これがEmori^(6, 2)によって指摘の「一方的に車体後部が損傷する領域」である。この場合、車体前部はエンジンという強固な構造物が存在する為にある変形量から荷重は更に上がる。しかし、車体後部はある変形量から構造部材のサイドメンバに座屈等が生じて十分に衝撃を吸収する事ができなくなる為、荷重は下がる事になる。このような構造の差によって、車体強度に差が生じると考えられる。

尚、損傷差が大きい場合には、SRの損傷のみから得られるエネルギー吸収量を総エネルギー吸収量とする事で十分に精度の良い推定が可能であると考えられる。

損傷差が小さい場合にはSFを無視する事による誤差が大きくなる。必要とされる精度は状況によって異なる為、誤差の可否をここで議論することはできないが、例えば車体の前・後部の吸収エネルギーの比が1:2の場合に、車体後部の吸収エネルギーだけを用いて式4から衝突速度(または衝突前の相対速度)を算出すると、双方の吸収エネルギーを使用する場合に比べて22%の誤差が生じる(1:1.5なら29%, 1:3なら15%, 1:4なら12%)事が分かる。つまり、この点を考慮に入れた検討が必要となる。

4. 実車衝突実験による事例検討

実際の衝突実験結果を例に、前章で示した車体強度の関係の具体例を示す。同時に、前章で得られた知見の妥当性も検証する。

4.1 実験方法

(株)自研センターの衝突バリア装置を使用し、停止した車両の後方からのフルラップ追突試験を4回実施した(衝突速度29.99~50.39km/h)。試験条件を表1に示す。実験1~3の追突車両は、図1のSFとほぼ同一骨格を持つ車種(#1)を選定した(モデルが一世代古い骨格構造はほぼ同一の車種)。実験4の追突車両は、図1のHFと同一車種(#2)を選定した。また、全実験の被追突車両は図1のSRに該当する車種(#3)を

Table.1 Test Conditions of Rear-end Collision Test

Experiment Number	1	2	3	4	
Bullet Vehicle	Model/Year	#1 / 2000	#1 / 2001	#1 / 2002	#2 / 2002
	Test Weight	1055 kg	1059 kg	1065 kg	955 kg
	Width	1695 mm	1695 mm	1695 mm	1660 mm
	Type	SF	SF	SF	HF
Target Vehicle	Model/Year	#3 / 2003	#3 / 2000	#3 / 2002	#3 / 2003
	Test Weight	1025 kg	1010 kg	1021 kg	1052 kg
	Width	1695 mm	1695 mm	1695 mm	1695 mm
	Type	SR	SR	SR	SR
Impact Speed	29.99 km/h	35.01 km/h	40.83 km/h	50.39 km/h	

選定した。つまり、実験 1~3 は前章で示した SF と SR の部位同士、実験 4 は HF と SR の部位同士が衝突した関係にある。

4.2 実験結果と考察

接触式三次元計測器を使用し、各衝突実験前後の車体変形量を計測した。その計測結果を使用し、車体前部は大賀ら⁽¹⁵⁾、車体後部は久保田ら⁽¹¹⁾によるそれぞれのエネルギー吸収図によって、エネルギー吸収量(Absorbed Energy)を算出した^(33, 39)。更に、式 1, 2 および式 5, 6 の手法により衝突速度を推定し、その結果を実際の衝突速度と比較した。その他、式 4 を使用

して総エネルギー吸収量から求める手法(Total Absorbed Energy Method)による推定結果も比較した。その結果を表 2 と表 3 に示し、以下の 2 種類の関係について得られた知見を示す。

(1) 衝突部位の変形量がほぼ同じ関係

実験番号 1~3 では、車体前部および後部の永久変形量は概ね同程度であり、且つ 0.15m を大きく超える事はなかった。表 2 に、変形量、エネルギー吸収量、および衝突速度の推定結果を示す。なお、反発係数は 0.1 を使用した。(ただし、結

Table.2 Results of Rear-end Collision Test (Experiment 1 – 3)

[Experiment 1] Rear-end Collision to a Stationary Target Vehicle at 29.99km/h																																
Model/Year : #1 /2000 Pre-impact Speed : 29.99km/h Test Weight : 1055kg Width : 1.695m							Model/Year : #3 /2003 Pre-impact Speed : 0.0km/h Test Weight : 1025kg Width : 1.695m																									
Front by Oga Method (FFA less than 1500cc)							Rear by Kubota Method (Sedan Type)																									
100mm	0	0	0.092	0.896	2.666	0.651	0.325	0.350	0.400	0.378	0.578	2.365	1.523	0.090	0	0	400mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
200mm	0	0	0.022	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	300mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
300mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	200mm	3.6	0	0	0	0	0	0	0	0	6.0	0	2.4	0	0	0
400mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100mm	33.3	29.6	37.0	37.0	37.0	37.0	37.0	32.6	33.3	0	0	0	0	0	0
Absorbed Energy	10.116×1055÷1000 = 10.67[kJ]						288.8×1.695×9.8÷1000 = 4.80[kJ]						Error																			
Calculation from Eq. 1	$\frac{1055+1025}{1025} \times \sqrt{\frac{2 \times 10.67 \times 1000}{1055}} \times 3.6 = 32.86[km/h]$						$\frac{1055+1025}{1055} \times \sqrt{\frac{2 \times 4.80 \times 1000}{1025}} \times 3.6 = 21.72[km/h]$						Error																			
Calculation from Eq. 5	$\sqrt{\frac{2 \times (1055+1025) \times (1+1) \times 10.67 \times 1000}{1055 \times 1025 \times (1-0.1^2)}} \times 3.6 = 32.78[km/h]$						$\sqrt{\frac{2 \times (1055+1025) \times (1+1) \times 4.80 \times 1000}{1055 \times 1025 \times (1-0.1^2)}} \times 3.6 = 21.99[km/h]$						Error																			
Total Absorbed Energy Method	$\sqrt{\frac{2 \times (1055+1025) \times (10.67+4.80) \times 1000}{1055 \times 1025 \times (1-0.1^2)}} \times 3.6 = 27.91[km/h]$						Error						-2.08 km/h																			

[Experiment 2] Rear-end Collision to a Stationary Target Vehicle at 35.01km/h																																
Model/Year : #1 / 2001 Pre-impact Speed : 35.01km/h Test Weight : 1059kg Width : 1.695m							Model/Year : #3 / 2000 Pre-impact Speed : 0.0km/h Test Weight : 1010kg Width : 1.695m																									
Front by Oga Method (FFA less than 1500cc)							Rear by Kubota Method (Sedan Type)																									
100mm	0	0	0.098	1.050	3.658	1.155	0.793	0.854	0.776	0.882	1.044	3.630	1.659	0.097	0	0	400mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
200mm	0	0	0.028	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	300mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
300mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	200mm	0	3.6	25.2	25.2	27.6	36.0	4.8	0	0	0	0	0	0	0	0
400mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100mm	36.6	34.8	37.0	37.0	37.0	37.0	34.8	36.6	0	0	0	0	0	0	0
Absorbed Energy	15.939×1059÷1000 = 16.88[kJ]						413.2×1.695×9.8÷1000 = 6.86[kJ]						Error																			
Calculation from Eq. 1	$\frac{1059+1010}{1010} \times \sqrt{\frac{2 \times 16.88 \times 1000}{1059}} \times 3.6 = 41.64[km/h]$						$\frac{1059+1010}{1059} \times \sqrt{\frac{2 \times 6.86 \times 1000}{1010}} \times 3.6 = 25.92[km/h]$						Error																			
Calculation from Eq. 5	$\sqrt{\frac{2 \times (1059+1010) \times (1+1) \times 16.88 \times 1000}{1059 \times 1010 \times (1-0.1^2)}} \times 3.6 = 41.35[km/h]$						$\sqrt{\frac{2 \times (1059+1010) \times (1+1) \times 6.86 \times 1000}{1059 \times 1010 \times (1-0.1^2)}} \times 3.6 = 26.36[km/h]$						Error																			
Total Absorbed Energy Method	$\sqrt{\frac{2 \times (1059+1010) \times (16.88+6.86) \times 1000}{1059 \times 1010 \times (1-0.1^2)}} \times 3.6 = 34.67[km/h]$						Error						-0.34 km/h																			

[Experiment 3] Rear-end Collision to a Stationary Target Vehicle at 40.83km/h																																
Model/Year : #1 / 2002 Pre-impact Speed : 40.83km/h Test Weight : 1065kg Width : 1.695m							Model/Year : #3 / 2002 Pre-impact Speed : 0.0km/h Test Weight : 1021kg Width : 1.695m																									
Front by Oga Method (FFA less than 1500cc)							Rear by Kubota Method (Sedan Type)																									
100mm	0	0	0.099	1.204	3.658	1.050	0.715	0.854	0.736	0.778	1.476	5.115	2.016	0.098	0	0	400mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
200mm	0	0	0.030	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	300mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
300mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	200mm	76.8	93.6	96.0	75.6	79.2	85.2	82.8	63.6	0	0	0	0	0	0	0
400mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100mm	37.0	37.0	37.0	37.0	37.0	37.0	37.0	37.0	37.0	37.0	37.0	37.0	37.0	37.0	37.0
Absorbed Energy	18.568×1065÷1000 = 19.77[kJ]						948.8×1.695×9.8÷1000 = 15.76[kJ]						Error																			
Calculation from Eq. 1	$\frac{1065+1021}{1021} \times \sqrt{\frac{2 \times 19.77 \times 1000}{1065}} \times 3.6 = 44.82[km/h]$						$\frac{1065+1021}{1065} \times \sqrt{\frac{2 \times 15.76 \times 1000}{1021}} \times 3.6 = 39.18[km/h]$						Error																			
Calculation from Eq. 5	$\sqrt{\frac{2 \times (1065+1021) \times (1+1) \times 19.77 \times 1000}{1065 \times 1021 \times (1-0.1^2)}} \times 3.6 = 44.56[km/h]$						$\sqrt{\frac{2 \times (1065+1021) \times (1+1) \times 15.76 \times 1000}{1065 \times 1021 \times (1-0.1^2)}} \times 3.6 = 39.79[km/h]$						Error																			
Total Absorbed Energy Method	$\sqrt{\frac{2 \times (1065+1021) \times (19.77+15.76) \times 1000}{1065 \times 1021 \times (1-0.1^2)}} \times 3.6 = 42.24[km/h]$						Error						+1.41 km/h																			

Table.3 Results of Rear-end Collision Tests (Experiment 4)

[Experiment 4] Rear-end Collision to a Stationary Target Vehicle at 50.39km/h																									
Model/Year : #2 / 2002 Pre-impact Speed : 50.39km/h						Model/Year : #3 / 2003 Pre-impact Speed : 0.0km/h																			
Test Weight : 955kg Width : 1.660m						Test Weight : 1052kg Width : 1.695m																			
Front by Oga Method (FFA less than 1500cc)						Rear by Kubota Method (Sedan Type)																			
100mm	0	0	0.096	0.910	2.852	0.924	0.715	0.980	0.880	0.504	0.486	1.705	0.903	0.050	0	0	500mm	0.0	9.3	3.7	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0
200mm	0	0	0.096	0.910	2.852	0.924	0.715	0.980	0.880	0.504	0.486	1.705	0.903	0.050	0	0	400mm	0.9	81.9	87.4	80.1	71.0	80.1	48.2	0.0
300mm	0	0	0.022	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	300mm	63.6	86.0	86.0	86.0	86.0	86.0	43.0	42.1
400mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	200mm	120.0	120.0	120.0	120.0	120.0	120.0	120.0	120.0
500mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100mm	37.0	37.0	37.0	37.0	37.0	37.0	37.0	37.0
Absorbed Energy	11.027 × 955 ÷ 1000 = 10.53[kJ]						Absorbed Energy							2298.3 × 1.695 × 9.8 ÷ 1000 = 37.94[kJ]											
Calculation from Eq. 1	$\frac{955 + 1052}{1052} \times \sqrt{\frac{2 \times 10.53 \times 1000}{955}} \times 3.6 = 32.25[km/h]$						Calculation from Eq. 2							$\frac{955 + 1052}{955} \times \sqrt{\frac{2 \times 37.94 \times 1000}{1052}} \times 3.6 = 58.33[km/h]$						Error					
																				-18.14 km/h					
Calculation from Eq. 5	$\sqrt{\frac{2 \times (955 + 1052) \times (1 + 1) \times 10.53 \times 1000}{955 \times 1052 \times (1 - 0.1^2)}} \times 3.6 = 33.19[km/h]$						Calculation from Eq. 6							$\sqrt{\frac{2 \times (955 + 1052) \times (1 + 1) \times 37.94 \times 1000}{955 \times 1052 \times (1 - 0.1^2)}} \times 3.6 = 63.00[km/h]$						Error					
																				+12.61 km/h					
Total Absorbed Energy Method							$\sqrt{\frac{2 \times (955 + 1052) \times (10.53 + 37.94) \times 1000}{955 \times 1052 \times (1 - 0.1^2)}} \times 3.6 = 50.35[km/h]$													Error					
																				-0.04 km/h					
Calculation from only the Rear Crush							$\sqrt{\frac{2 \times (955 + 1052) \times 37.94 \times 1000}{955 \times 1052 \times (1 - 0.1^2)}} \times 3.6 = 44.55[km/h]$													Error					
																				-5.84 km/h					

果にはほとんど影響しない。以下同様。) これにより、以下の知見が得られたと考える。

- 双方車両の変形量が同程度であるから、この範囲の変形量ならば車体強度が同程度である事を意味する。つまり、「[1-1] 衝突部位の車体強度がほぼ同じ関係」に該当する。
- Total Absorbed Energy Method の結果 (誤差: -2.08 ~ +1.41km/h) は、今回の実験結果ではいずれも良い推定精度が確認できた。
- 式 1, 2 による推定結果は、式 5, 6 による推定結果とほぼ同じであった。
- 衝突速度約 40km/h の実験 3 では、式 1, 2, 5, 6 のいずれも良い推定精度 (誤差: -1.65 ~ +3.99km/h) が確認できた。今回実施した実験において、この実験 3 が「[1-1] 衝突部位の車体強度がほぼ同じ関係」の中で最も速度が高いケースである。その為、後述の実験 1, 2 に比べて、車体の前後部共に骨格部位が左右均等に变形する結果となった (実験 1, 2 では樹脂製バンパの变形の影響が大きく、骨格部位の变形は局所的であった)。これにより、特に車体後部損傷からの衝突速度の推定で、後述の実験 1, 2 よりも良い精度が得られたと考える。
- 衝突速度が比較的低い実験 1, 2 (約 30, 35km/h) においては、車体前部損傷からの推定の式 1, 5 では比較的良い推定精度 (誤差: +2.79 ~ +6.63km/h) が確認できた。一方、車体後部損傷からの推定である式 2, 6 による推定結果はそれに比べて誤差の大きい結果となった (誤差: -9.09 ~ -8.00km/h)。今回使用した大賀ら⁽¹⁵⁾による車体前部のエネルギー吸収図はフロントサイドメンバ等の局所的な变形特性を考慮している。一方、久保田ら⁽¹¹⁾による車体後部のエネルギー吸収図は变形特性を左右方向に均一と仮定している。その為、变形が局所的な傾向がある低速衝突において、車体後部の变形からの推定では誤差

が大きくなったと考えられる。このように、低速衝突では局所的な变形特性を考慮する事が重要であり、低速衝突に適した車体後部のエネルギー吸収図、または極低速衝突でのバンパ構造と損傷特性の関係等、代替情報の使用が望まれる。

(2) 一方の变形が極端に大きい関係

実験 4 では、車体前部に対して車体後部の平均永久変形量が極端に大きな結果となり、車体後部については 0.15m を大きく超えた。尚、車体前部は平均約 0.15m であった。(1) と同様の、変形量、エネルギー吸収量、衝突速度の推定結果を表 3 に示す。加えて、Emori^(6, 2)によって示された「衝突による吸収エネルギー (変形量) は車体後部の变形のみに消費される」という前提での衝突速度の推定結果 (Calculation from only the Rear Crush) も同表に示す。以上により、以下の知見が得られたと考える。

- 変形量の違いから、この衝突における变形の範囲では、車体後部の車体強度が極端に低い事が分かる。つまり、「[2] 一方の車体強度が低下する関係」に該当する。
- Total Absorbed Energy Method の結果は、非常に良い推定精度 (誤差: -0.04 km/h) が確認できた。
- 式 1, 2 および式 5, 6 による推定結果は、いずれも誤差の大きい結果 (誤差: -18.14 ~ +12.61 km/h) となった (車体強度比 $k_1 / k_2 = 1$ と仮定)。車体強度の高い車体前部からの推定 (式 1, 5) の場合には衝突速度は低く (誤差: -18.14, -17.20 km/h) 推定され、車体強度の低い車体後部からの推定 (式 2, 6) の場合には衝突速度は高く (誤差: +7.94, +12.61 km/h) 推定された。これは、車体強度比を 1 と仮定している事で、不明な車両の変形量を過少または過大に推定してしまう為と考えられる。
- Calculation from only the Rear Crush は、式 6 で $k_2 = \infty$ ($k_1 / k_2 = 0$) として計算する事と同等である。その結果としては、比較的良い推定精度 (誤差: -5.84 km/h)

が確認できた。双方車両の衝突による全吸収エネルギーの大半を車体後部の変形に要しており、車体前部を無視しても大きな誤差が生じない為と考えられる。

5. 結 言

本報の目的は、次元衝突を対象とし「一方の車両の情報のみを基にした衝突速度の推定」を適切に実施する為に必要な知見を得る事である。

この目的を達成する為に、まずは過去に研究・提案された衝突速度の解析手法を精査した。それにより「過去には同様の検討・研究は実施されているものの、車体前部の車体強度が車両重量に比例^(5, 2)、車体後部が前部に比べて極端に弱い^(5, 2)、車体強度が線形^(6~8)、等の前提を基にした議論である事」、そして「特に乗用車の後部^(5, 11, 37)ではこれらの前提と異なる特性が認められる為、その特性をよく考慮し手法の適用可否を含めて検討しなければならない事」が明らかとなった。

よって、車体強度の関係を整理し、車体の損傷から衝突速度を推定する際に必要な情報、考慮すべき点を明らかにする事が、衝突速度の推定をより適切に実施するためには必要であると考え、以下の検討・実験を実施した。

まず、自動車アセスメント⁽⁴³⁾のフルラップ前面衝突試験データ、および過去に発表されたエネルギー吸収図を基に導出した車体前・後の計4種類の車体強度データを比較した。その結果、以下の知見が得られた。(第3章)

- 衝突時の車体強度の関係は、少なくとも、「[1] 双方の車体強度が単純増加」、「[2] 一方の車体強度が低下する関係」という異なる組み合わせがあり得る。更に[1]を細かく見ると、更に「[1-1] 衝突部位の車体強度がほぼ同じ関係」および「[1-2] 衝突部位の車体強度が極端に異なる関係」に分ける事ができる。つまり、車体の損傷状態から衝突速度を推定する際には、それぞれの分類に対して注意すべき点が異なる。

そして、停止車両へのフルラップ追突実験を4回実施し、上記により得られた知見を、具体例を用いて検証した。その結果、以下の知見が得られた。(第4章)

- 衝突部位の変形量がほぼ同程度の結果となった衝突は、「[1-1] 衝突部位の車体強度がほぼ同じ関係」に該当すると考えられた。この場合、衝突速度の推定においては、式1, 2による結果が式5, 6による結果とほぼ同等の結果が得られた。衝突速度の推定においては、速度の高い衝突ではいずれの式でも良い精度が確認されたが、衝突速度が比較的低い場合には、車体後部損傷からの推定(式2, 6)による推定の誤差が、車体前部損傷からの推定に比べて大きい結果となった(誤差: $-9.09 \sim -8.00$ km/h)。これは、使用した車体後部のエネルギー吸収図は車体強度が左右方向に均一と仮定しているため、変形が局所的な低速衝突には適していない事が原因と考えられ、より低速衝突に適したエ

ネルギー吸収図、または極低速衝突におけるバンパ構造と損傷特性の関係等、代替情報の使用が望まれる。

- 一方の衝突部位の変形量が極端に大きい衝突は、「[2] 一方の車体強度が低下する関係」に該当すると考えられた。この場合、衝突速度の推定においては、式1, 2および式5, 6いずれの手法によっても誤差の大きい結果となった。一方、変形量が極端に大きい部位(車体後部)の変形エネルギーだけを用いる手法であれば、比較的良好な精度での衝突速度の推定が可能であった。これは、双方車両の衝突による全吸収エネルギーの大半を、車体後部の変形に要している為、車体前部を無視しても大きな誤差が生じない為と考えられる。
- 全てのケースにおいて、総エネルギー吸収量から衝突速度を算出する手法(Total Absorbed Energy Method)では、良い推定精度が確認できた。

以上の知見が得られたが、本報で実施した衝突実験はフルラップ追突に限定している為、他の衝突形態への拡張は未検討である。しかし本報で得られた上記の知見から考えると、オフセット衝突や側面衝突、アンダライド等の他の衝突形態であっても、衝突による変形部位に関する適切な車体強度データを入手する事ができれば、一方の車両の損傷状態のみから他方の損傷状態を類推でき、且つ使用すべき衝突速度の推定手法も適切に選択できると考えられる。そのような意味で、自動車アセスメント等で計測されている多分割荷重計による衝突バリア荷重は、交通事故の原因調査および再現の視点からも非常に重要な情報であるといえ、これらを適切に活用する為の検討が、今後の課題といえる。

最後に、日本では人身事故における危険認知速度が30km/h以下で全体の75%、40km/h以下で88%を超えており⁽⁴⁰⁾、物損(物件)事故⁽⁴¹⁾も含めるとその割合は更に多くなる事は容易に想像できる。これに本報で得られた知見も踏まえて考えると、交通事故の原因調査および再現においては高速衝突に関する調査研究だけではなく、低速衝突に対応した各種研究および実験データ取得の更なる実施は非常に重要であると考えられる。

謝 辞

本研究における衝突試験データの利用において、国土交通省自動車交通局の協力をいただきました。感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) Brach, Raymond M. and Brach, R. Matthew, Vehicle Accident Analysis and Reconstruction Methods, SAE International, Warrendale, PA, 2005, 275p.
- (2) 江守一郎:新版自動車事故工学, 東京, 技術書院, 1993, 254p.
- (3) 佐藤武:自動車交通事故とその調査, 東京, 技術書院, 1987, 189p.
- (4) 林洋:実用自動車事故鑑定工学, 東京, 技術書院, 1996, 276p.
- (5) Emori, Richard I., Analytical Approach to Automobile

- Collisions, Paper 680016, SAE, 1968.
- (6) 石川博敏：衝突時の車両運動に関する研究- 一次元衝突の解析式 -, 自動車研究, Vol.12, No.10, 1990, p.403-410.
- (7) Grimes, Wesley D. et al., Developing a Crush Profile Estimate by Balancing Impact Forces, Paper 970942, SAE, 1997.
- (8) Prasad, Alope K., Missing Vehicle Algorithm (OLDMISS) Reformulation, Paper 910121, SAE, 1991.
- (9) 鮎川佳弘ほか：乗用車側面のエネルギー吸収特性 (第2報) - ミニバン側面のエネルギー吸収特性 -, 自動車研究, Vol.30, No.9, 2008, p.519-524.
- (10) 鮎川佳弘ほか：乗用車側面のエネルギー吸収特性, 自動車研究, Vol.29, No.9, 2007, p.471-524.
- (11) 久保田正美ほか：後面形状別の車体エネルギー吸収特性, 自動車研究, Vol.29, No.3, 2006, p.95-98.
- (12) 鮎川佳弘, 山崎俊一：小・中型トラックのバリア換算速度の推定, 自動車研究, Vol.27, No.3, 2005, p.113-116.
- (13) 久保田正美, 國分善晴：前面形状別の車体エネルギー吸収特性, 自動車研究, Vol.17, No.1, 1995, p.19-22.
- (14) 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, 自動車技術会学術講演会前刷集, 1979, p.493-502.
- (15) 大賀涼ほか：自動車アセスメントの試験データを用いた変形エネルギー吸収分布図の作製, 自動車技術会学術講演会前刷集 No.49-07, 2007, p.5-10.
- (16) 山崎俊一：“潜り込み時のバリア換算速度”, 月刊交通 2007年10月号, 2007, p.69-77.
- (17) Brach, Raymond M., Welsh, Kevin J. and Brach, R. Matthew, Residual Crush Energy Partitioning, Normal and Tangential Energy Losses, Paper 2007-01-0737, SAE, 2007.
- (18) Steffan, Hermann and Moser, Andreas, The Collision and Trajectory Models of PC-Crash, Paper 960886, SAE, 1996.
- (19) Ishikawa, Hirotooshi, Impact Center and Restitution Coefficients for Accident Reconstruction, Paper 940564, SAE, 1994.
- (20) 石川博敏：衝突時の車両運動に関する研究- 二次元衝突解析における負の反発係数と回転反発係数の導入-, 自動車技術会論文集, Vol.22, No.4, 1991, p.101-106.
- (21) Ishikawa, Hirotooshi, Computer Simulation of Automobile Collision - Reconstruction of Accidents, Paper 851729, SAE, 1985.
- (22) "CRASH3 User's Guide and Technical Manual", U.S. Department of Transportation, NHTSA.
- (23) Prasad, Alope Kumar, CRASH3 Damage Algorithm Reformulation for Front and Rear Collisions, Paper 900098, SAE, 1990.
- (24) Insurance Institute for Highway Safety Crashworthiness Evaluation Crash Test Report, IIHS, Arlington, VA.
- (25) NHTSA Vehicle Crash Test Database, National Highway Traffic Safety Administration, Washington, D.C.
- (26) Neptune, James A. and Flynn, James E., A Method for Determining Crush Stiffness Coefficients from Offset Frontal and Side Crash Tests, Paper 980024, SAE, 1998.
- (27) Neptune, James A. and Flynn, James E., A Method for Determining Accident Specific Crush Stiffness Coefficients, Paper 940913, SAE, 1994.
- (28) Neptune, James A. et al., A Method for Quantifying Vehicle Crush Stiffness Coefficients, Paper 920607, SAE, 1992.
- (29) 吉川泰輔：第一線実務家の為の事故解析技法, 株式会社自研センター, 1989, 350p.
- (30) 牧下寛ほか：軽乗用車の衝突特性について, 科学警察研究所報告法科学編, Vol.45, No.4, 1992, p.162-174.
- (31) Mogami, Kazunari et al., Frontal Crash Characteristics of Compact Car at a High Speed Collision, Paper 980553, SAE, 1998.
- (32) 最上和生ほか：軽自動車の後部衝突変形特性について, 日本鑑識科学技術学会第3回学術集会講演要旨集, 1997, p.61.
- (33) Campbell, Kenneth L., Energy Basis for Collision Severity, Paper 740565, SAE, 1974.
- (34) Woolley, Ronald L., Non-Linear Damage Analysis in Accident Reconstruction, Paper 2001-01-0504, SAE, 2001.
- (35) Welsh, Kevin J. and Struble, Donald E., Crush Energy and Structural Characterization, Paper 1999-01-0099, SAE, 1999.
- (36) Varat, Michael S. et al., An Analysis of Trends of Vehicle Frontal Impact Stiffness, Paper 940914, SAE, 1994.
- (37) Woolley, Ronald L. et al., Rear Stiffness Coefficients Derived from Barrier Test Data, Paper 910120, SAE, 1991.
- (38) Strother, Charles E. et al., Crush Energy in Accident Reconstruction, Paper 860371, SAE, 1986.
- (39) 大賀涼：“変形エネルギー吸収分布図-その成り立ちと発展-”, 月刊交通 2007年9月号, 2007, p.90-98.
- (40) 警察庁：平成22年中の交通事故の発生状況, 2011.
- (41) 社団法人 日本損害保険協会：自動車保険データにみる交通事故の実態 2007年4月~2008年3月, 2009.
- (42) 藤田光伸：衝突速度の推定 -停止車両への直角偏心衝突における有効衝突速度の導入-, 自動車技術会論文集, Vol.42, No.2, 2011, p.373-378.
- (43) 独立行政法人 自動車事故対策機構：安全なクルマの選び方 BOOK 自動車アセスメント2011.3 詳細版, 2011.