

強震動による高架橋被災時の列車事故とその人的被害について

Earthquake-Induced Train Accident and Its Casualty Occurrence Mechanism

清野純史¹, 永井克実²

Junji KIYONO¹, Katsumi NAGAI²

¹ 京都大学工学研究科都市社会工学専攻

Department of Urban Management, Kyoto University

² 大阪市港湾局

Port and Harbor Bureau, City of Osaka

In the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, many railway facilities sustained severe damage. Totally thirty-two railway bridges collapsed, eight of which occurred along the San'yo express line. Accidents such that trains fell into a collapsed part of bridge, fortunately, did not occur. A high-speed train and a mass transportation system recently are promoted, therefore the preparedness for a serious accident is inevitable. We here assumed an earthquake-induced train accident. Trains and inside passengers were modeled as 3D distinct elements and their behavior was simulated by DEM. Impact forces on human bodies were computed and damage level were discussed by Chest-G and HIC in the automobile engineering.

Key Words: earthquake damage, railway facilities, train accident, distinct element method, impact force, injury criteria

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震は、大都市圏を襲った戦後初の大規模直下型地震であり、阪神地区を中心として甚大な被害をもたらした。鉄道についても、列車の脱線、高架橋の損壊、軌道変状、盛土の崩壊などの大きな被害を受けた。特に、この地震では21件(うち地下線内2件)にも及ぶ列車の脱線事故が報告されている¹⁾。ただし、幸いにも鉄道利用者(乗客および旅客)に死者は出ていない²⁾。一方、鉄道施設の被害については、最も被害を受けた構造物は橋梁であり、山陽新幹線で8ヶ所、在来鉄道および新交通システムで24ヶ所の計32ヶ所が落橋したほか、鉄筋コンクリート製高架橋柱が多数損壊している。加えて、鋼製橋脚が1ヶ所水平方向に破断したり、多数の桁式橋梁で支承部が破損するなど、多くの鉄道施設に被害が生じている²⁾。

過去の地震動に起因した列車事故についてみると、国内では兵庫県南部地震をはじめとする9つの地震によって走行中の列車に何らかの被害が生じている³⁾。鉄道施設の被害については、例えば1964年の新潟地震や1978年の宮城県沖地震において、桁の落下・崩壊が報告されている⁴⁾。また海外での事例では、例えば1989年のロマブリータ地震においては桁の落下・崩壊、1994年のノースリッジ地震において、サザンパシフィック鉄道 Coast 線で貨物列車の脱線転覆事故が発生している⁵⁾。

このように、これまで、地震時に鉄道や鉄道施設が被災する例は多く報告されているが、今のところ、強震動により鉄道橋の桁が落下あるいは崩壊して、走行する列車がそこに落下するような事故は報告されていない。これは、列車の走行に影響を与えるような大地震が稀にしか起こらないためであろうが、わが国においては、四国の足摺岬の沖から室戸岬、和歌山の潮岬沖を経て駿河湾に至る南海トラフに沿った領域で、ここを震源域としたプレート間大地震が過去から繰り返し発生している。これら歴史地震の評価結果によれば、駿河湾付近の想定東海地震はいつ発生してもおかしくない状態であるといわれており、また、東南海、南海地震もほぼ今世紀前半には起こると考えられている。鉄道の防災対策としては、「鉄道構造物の耐震性向上」と「地震初期の動きを捉えることによる減速」を柱とした安全確保を考えており、このような南海トラフ沿いの巨大地震の発生が、そのまま鉄道事故や鉄道施設の被災に結びつくわけではない。しかし、兵庫県南部地震後、永瀬ら¹⁾は、鉄道施設の被災状況について調査した結果、「今回の震災で崩壊した高架橋や落橋した陸橋に列車が高速で突っ込んでいたら最悪事態となった可能性がある」とする見解を示しているように、このような事故がひとたび起これば、特に列車が高速で走行する場合には、その人的・物的被害や社会への影響は量り知れないものとなる。

そこで本研究では、兵庫県南部地震の際の山陽新幹線の被災状況に鑑み、強震動により鉄道橋の桁が落下あるいは崩壊して、走行する列車がそこに落下するような状況を想定し⁶⁾、そのときの列車および乗客の挙動を3次元数値解析によって求め、合わせて被災時の人的被害に対して検討を行うことを目的としている。

2. 解析手法

(1) 解析に用いるモデル

本研究では解析の対象を全て剛体とし、列車-軌道部は図1のように、そして車両内部は図2のようにモデル化する。列車は6面体の車両を両端ヒンジの梁要素により連結したもので表現し、軌道部については、走行する列車の落下時挙動を解析するため、走行路の一部が矩形に欠落したものを考えている。さらに車両内部では人を均質な球要素で表し、初期状態にこれらがそれぞれ座席の上にあるものとしている。なお、車両は前から1両目、2両目、...とし、車両内部の人は進行方向に対して最も右側の列から順に、列に沿って前から1番目、2番目、...とする。

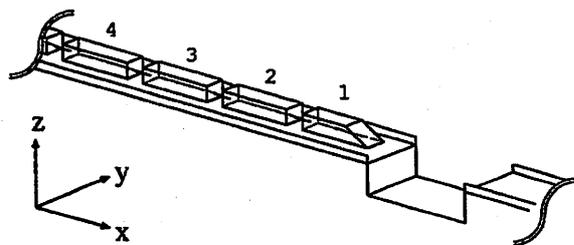
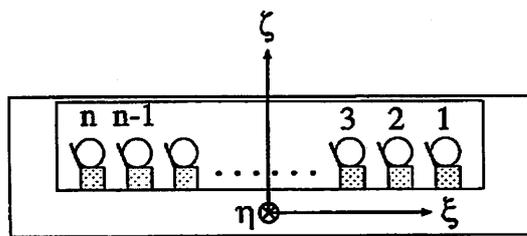
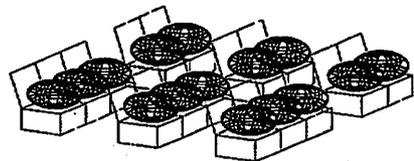


図1 列車-軌道部モデル



(a) 2次元表示



(b) 3次元表示, 内部拡大

図2 車両内部モデル

(2) 運動方程式

数値解析を行うにあたっては個別要素法 (DEM)⁷⁾を用いる。したがって、接触力は仮想のばねとダッシュポットを介して伝えられるが、接触点を厳密に要素の角とすると、特に3次元での解析では接触判定が非常に複雑となる。そこで、図3に示すように適当な半径を用いて、車両および軌道部の頂点を1/8球、辺を1/4円柱と仮定し、レールについては1/2円柱とする。この仮定により、列車と軌道部との接触および人と車内設備との接触は全て、図4のように球と球、球と面、球と円柱、円柱と円柱の4つのパターンに分類でき、要素間の接触判定を簡便化することができる⁸⁾。

任意の時刻 t における接触力 $F = (F_x, F_y, F_z)^T$, $M = (M_\xi, M_\eta, M_\zeta)^T$ を求め、これを全接点に関して足し合わせたものが全接触力であり、解析に用いる運動方程式は以下ようになる。ただし、座標系としては、図1に示すような絶対座標系 (x, y, z) と、図2(a)に示すような各車両の重心を原点とし、車両の前方を ξ 方向、上方を ζ 、右手系の向きを η とする要素座標系 (ξ, η, ζ) を用いている。

$$m \cdot \begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{pmatrix} = F_b + \sum F \quad [1]$$

$$\frac{dL}{dt} + \omega \times L = \sum M \quad [2]$$

ここで、 m は要素の質量、 F_b は物体力であり、 L は角運動量、 d/dt は要素系に対する時間微分、 ω は角速度、 \times は外積を表す。なお、要素座標系において角運動量 L は、主慣性モーメント I_ξ, I_η, I_ζ を用いて次式で表される。

$$L = \begin{pmatrix} L_\xi \\ L_\eta \\ L_\zeta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_\xi \omega_\xi \\ I_\eta \omega_\eta \\ I_\zeta \omega_\zeta \end{pmatrix} \quad [3]$$

また、数値積分は差分近似の1つである前進差分法を用いて行なう。

a) 垂直方向の接触力

図5(a)に示すように、微小時間増分 Δt 間の垂直方向の相対変位増分 Δu_z に比例した抗力増分 Δe_z を生じる弾性ばね (ばね係数 K_n) と相対速度増分 $\Delta u_z / \Delta t$ に比例した抗力増分 Δd_z を生じるダッシュポット (減衰係数 C_n) の並列配置を仮定する。すなわち、

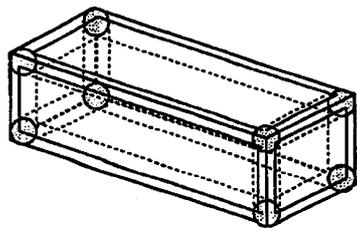
$$\Delta e_z = K_n \cdot \Delta u_z \quad [4]$$

$$\Delta d_z = C_n \cdot \Delta u_z / \Delta t \quad [5]$$

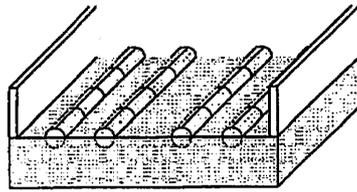
ただし、圧縮方向を正とする。したがって、時刻 t において垂直方向に作用する弾性抗力 $[e_z]_t$ と粘性抗力 $[d_z]_t$ は次式のようなになる。

$$[e_z]_t = [e_z]_{t-\Delta t} + \Delta e_z \quad [6]$$

$$[d_z]_t = \Delta d_z \quad [7]$$



(a) 車両モデル



(b) レールモデル

図3 DEMを用いる際のモデル

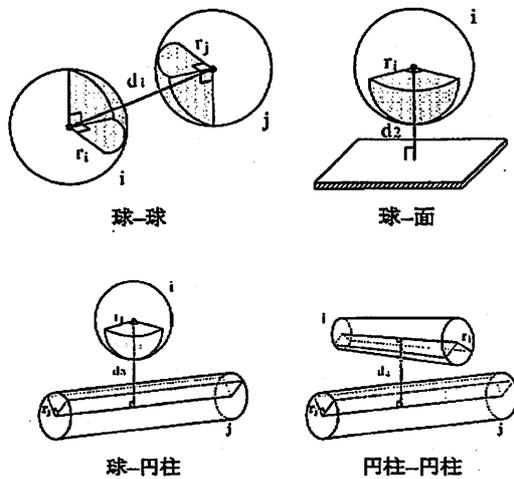


図4 要素間の接触パターン⁸⁾

ここで、要素間の引張力を認めないため、式[6]、[7]は次式の制約を受ける。

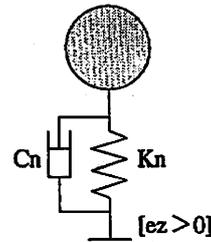
$$[e_z]_t < 0 \text{ のとき } \begin{cases} [e_z]_t = 0 \\ [d_z]_t = 0 \end{cases} \quad [8]$$

以上より、時刻 t における垂直方向の接触力 $[F_z]_t$ は次式で求められる。

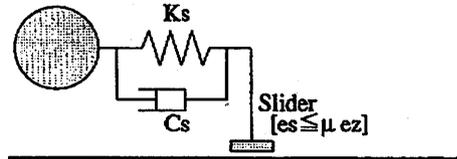
$$[F_z]_t = [e_z]_t + [d_z]_t \quad [9]$$

b) 接線方向の接触力

図5(b)に示すように、微小時間増分 Δt 間の接線方向の相対変位増分 Δu_x , Δu_y についても同様に、せん断抗力を与える弾性ばね (ばね係数 K_s) とダッシュポット (減衰係数 C_s) の並列配置を x, y 方向の2方向に仮定する。す



(a) 垂直方向の接触



(b) 接線方向の接触

図5 解析要素の接触モデル (球と面のパターン)

なわち、

$$\Delta e_i = K_s \cdot \Delta u_i \quad [10]$$

$$\Delta d_i = C_s \cdot \Delta u_i / \Delta t \quad [11]$$

ただし、以後添字 i は x または y とする。したがって、時刻 t における接線方向の弾性抗力 $[e_x]_t$, $[e_y]_t$ と粘性抗力 $[d_x]_t$, $[d_y]_t$ は次式ようになる。

$$[e_i]_t = [e_i]_{t-\Delta t} + \Delta e_i \quad [12]$$

$$[d_i]_t = \Delta d_i \quad [13]$$

ただし、式[12]、[13]は次の2つの制約を受ける。

1) $[e_z]_t < 0$ のとき

$$\begin{cases} [e_i]_t = 0 \\ [d_i]_t = 0 \end{cases} \quad [14]$$

2) $\sqrt{[e_x]_t^2 + [e_y]_t^2} > \mu [e_z]_t$ のとき

$$\begin{cases} [e_x]_t = \mu [e_z]_t \times \text{Sign}([e_x]_t) \times \cos \beta \\ [e_y]_t = \mu [e_z]_t \times \text{Sign}([e_y]_t) \times \sin \beta \\ [d_x]_t = 0 \\ [d_y]_t = 0 \end{cases} \quad [15]$$

ここに、 μ は動摩擦係数、 $\text{Sign}(z)$ は変数 z の正負を表す。また、 $\cos \beta$, $\sin \beta$ は滑りが生じている場合の動摩擦力をそれぞれ x , y 方向へ配分するための項であり、

$$\beta = \tan^{-1}([e_y]_t / [e_x]_t) \quad [16]$$

である。条件式[14]は非接触条件を、式[15]および式[16]は摩擦力の限界をそれぞれ表している。

以上より、時刻 t における接線方向のせん断力 $[F_x]_t$, $[F_y]_t$ は次式で求められる。

$$[F_i]_t = [e_i]_t + [d_i]_t \quad [17]$$

3. 解析に用いるパラメータ

(1) 解析要素の諸元

a) 車両および高架橋の諸元 (表 1, 図 6,7)

車両のモデルとしては新幹線のぞみ 700 系車両⁹⁾¹⁰⁾を対象にし、高架橋のモデルとしては山陽新幹線の標準高架橋¹¹⁾を対象としてその諸元を与えた。列車の速度としては、落橋地点の 5m 手前を走行する時点での速度と定義した。また、通常の走行時に対しては、700 系と同様のブレーキシステムを採用している 500 系新幹線が速度 300km/h で走行する時の非常ブレーキ距離が約 4.0km である事実¹²⁾から、その平均減速度 (1.08m/sec^2) を求め、通常の走行状態で列車にこの減速度を生じさせるような動摩擦係数を決定し、落下直前のブレーキによる効果を表現した。さらに、軌道に直角な方向 (y 方向) に 570gal 以上の加速度が作用するか、車両の上昇量が 30mm より大きくなると車両は脱線する¹³⁾ものとし、脱線前は y 方向の動きを拘束、脱線後はレールによる y 方向への変位および回転の拘束がなくなるものとした。その時の動摩擦係数は、兵庫県南部地震において速度 65km/h で高架橋上を走行していた列車が脱線した際に 60m 先で停止した事実¹⁾から、その平均減速度 (2.72m/sec^2) を求め、これに対応する値として決定した。図 6 において、斜線部の空間に全重量があるものと仮定し、その重心位置を (l_G, b_G, h_G) としている。また、表 1 の I_x, I_y, I_z は要素座標系における主慣性モーメントを表している。

b) 球要素の諸元 (表 2)

人のモデルである球要素の諸元は接触パラメータ決定の際に参考とした実験¹⁴⁾での被験者の体格から決定することにし、半径 r および質量 m はそれぞれ被験者の肩幅および体重の平均値とした。 I_0 は重心まわりの慣性モーメントである。

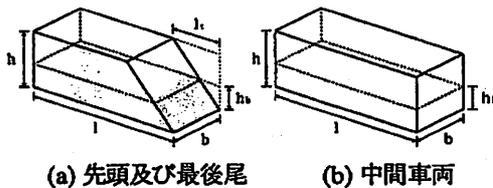


図 6 車両のパラメータ

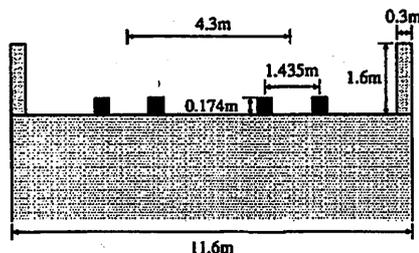


図 7 高架橋のパラメータ

表 1 車両諸元

$m(\text{ton})$	44.25
$I_x(\text{ton}\cdot\text{m}^2)$	42.48
$I_y(\text{ton}\cdot\text{m}^2)$	2304.78
$I_z(\text{ton}\cdot\text{m}^2)$	2346.81
$l(\text{m}) - 1, 16$ 両目	27.35
$l(\text{m}) - 2 \sim 15$ 両目	25.00
$b(\text{m})$	3.38
$h(\text{m})$	3.65
$l_G(\text{m}) - 1$ 両目	11.53
$l_G(\text{m}) - 2 \sim 15$ 両目	12.50
$l_G(\text{m}) - 16$ 両目	15.82
$b_G(\text{m})$	1.69
$h_G(\text{m}) - 1, 16$ 両目	0.636
$h_G(\text{m}) - 2 \sim 15$ 両目	0.650
$l_s(\text{m})$	9.20
$h_s(\text{m})$	1.30

表 2 球要素の諸元

$r(\text{m})$	$m(\text{kg})$	$I_0(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$
0.219	64.00	1.228

(2) 接触パラメータ

a) 車両の接触パラメータ (表 3, 図 8)

垂直方向のばね係数 K_n の 1 次剛性は筒井ら¹⁵⁾が実際の鉄道車両の圧縮試験より決定した値を用い、2 次剛性は簡便のため 0, また降伏変位は 4mm としている。また、垂直方向の減衰係数 C_n については、自動車の固定壁前面衝突実験¹⁶⁾の際の跳ね返り速度を基にその値を求め、動摩擦係数 μ は、兵庫県南部地震で脱線した列車の平均減速度²⁾から決定した。ただし、接線方向のばね定数 K_t については接触する 2 要素のもつ材料特性の違いを考慮するため、軌道部はコンクリート、車両は鉄と仮定し、それぞれのポアソン比から決定した。なお、本研究では接線方向の減衰係数 C_t を 0 とする。

b) 人の接触パラメータ (表 4)

垂直方向のばね係数 K_n については、9 人の被験者に対する人体圧縮試験で得られた荷重～変位関係¹⁴⁾から決定し、接線方向のばね係数については計測が困難なため、文献¹⁴⁾に従い、垂直方向の値に 0.05 を乗じた値とした。また、減衰定数に関しては臨界減衰⁷⁾を採用している。

3) 人的被害の検討に用いる指標

人的被害の検討は、自動車の分野でよく用いられている胸部最大衝撃加速度 (胸 G) と頭部傷害基準値 HIC を組み合わせて用いることにより行う¹⁷⁾。なお、HIC は次式により算出される。

$$HIC = \left[T \left\{ \frac{1}{T} \int_t^{t+T} a_{\text{head}}(\tau) d\tau \right\}^{2.5} \right]_{\text{max}} \quad [18]$$

ここで、 t は任意の時刻、 T は $T \leq 36(\text{msec})$ を満たす衝撃の継続時間であり、 $a_{\text{head}}(t)$ は頭部重心における合成

表3 車両の接触パラメータ

	軌道部との接触	車両同士の接触
μ	0.277	0.277
C_s (kN·sec/m)	0.0	0.0
C_n (kN·sec/m)	2.322×10^4	2.322×10^4
K_s (kN/m)	5.042×10^5	4.537×10^5
K_n (kN/m)	1.210×10^6	1.210×10^6

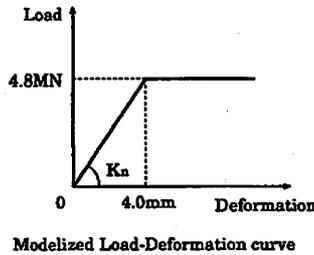


図8 車両の垂直方向ばねの荷重-変形特性

衝撃加速度 (G) である。ただし、球要素が受ける衝撃加速度 $a(t)$ を胸部での衝撃加速度 $a_{chest}(t)$ とし、頭部での衝撃加速度 $a_{head}(t)$ は、車対車衝突実験の結果¹⁸⁾を参考にし、胸部での衝撃加速度を 1.32 倍する形とした。この胸 G と HIC の組み合わせによる乗員傷害評価区分を示したものが図9である。「AAA」～「D」はそれぞれ以下の状況を表す。

- AAA：頭と胸の双方に重大な傷害を受ける危険性が低い
- AA：頭か胸のいずれか一方に重大な傷害を受ける危険性が極めて低く、他方は重大な傷害を受ける危険性が低い
- A：頭と胸の双方に重大な傷害を受ける危険性が低い
- B：頭か胸のいずれか一方に重大な傷害を受ける危険性が低く、他方は重大な傷害を受ける危険性がややある
- C：頭と胸の双方に重大な傷害を受ける危険性がややある
- D：頭か胸のいずれか一方またはその双方に重大な傷害を受ける危険性がある

4. 解析諸元の妥当性の検証

3. で決定したパラメータを用いて数値解析を行う前に、このパラメータを用いて得られる人的傷害値が現実的なものであるかどうか、その妥当性について検証しておくなければならない。そこで本節では、実車による自動車の衝突実験と同様のシミュレーションを行い、実験で得られている乗員の傷害値と比較することによって、パラメータの妥当性を検証することにした。

自動車事故対策センター¹⁷⁾では、運転手席と助手席にダミーを乗せて、安全基準の衝突速度より 10% 速い速度 55km/h でコンクリート製の障壁 (バリア) に前面衝突させる実験を行っており、このときのダミーの傷害値を測定・評価している。この実験に用いられているダミーは HYBRID-III と呼ばれるもので、これは前面衝突用に世界各国で使用されているものである。

この実験と比較するため、100 人の人を配置した中間車

表4 人の接触パラメータ

C_s (N·sec/m)	8.037×10^2
C_n (N·sec/m)	3.594×10^3
K_s (N/m)	2.523×10^5
K_n (N/m)	5.047×10^4

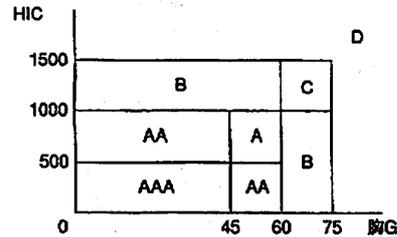


図9 乗員傷害の評価区分

両 1 両を固定壁衝突時の速度が 55km/h になるようにして、図 10 に示す固定壁衝突シミュレーションを行った。このとき車両には図 11 に示す加速度が作用する。そして、例えば車内の 1 番目の人は図 12 に示すような加速度を受ける。

2000 年度と 2001 年度の試験では、合わせて 47 車による衝突実験で 94 の実験結果 (運転手席+助手席) が得られているが、このうち、乗員傷害評価が「AAA」に相当するものが 39、「AA」が 39、「A」が 13、「B」が 3 つである。なお、この衝突実験では全てのダミーにシートベルトが装着されており、さらに、これらの 47 車ではすべて運転手席、助手席ともにエアバッグ、シートベルトプリテンショナー、シートベルトフォースリミッタが装備されている。この状態は列車内部の状態と大きく異なっている。そこで、エアバッグの装備率が 7% に満たなかった 1994 年式の自動車の助手席乗員の傷害値を見ると、胸 G で 59.0G、HIC で 796 となっている。しかし、この時もすべてのダミーにはシートベルトが装着されているため、本シミュレーションによる結果はこの実験結果よりもさらに上回ることが予想される。

図 13 は本シミュレーション結果を示したものである。ただし、車両の動きは 2 次元に限られ、乗員の動きおよび傷害値は横の列で等しくなるため、1 番目から 20 番目の人の傷害値のみを示している。図 13 より、胸 G および HIC は各人ほぼ一定で、平均値はそれぞれ 85.7G、1022.6 であった。全乗員の胸 G が 75G 以上になっているので、乗員傷害評価は「D」である。これらの傷害値と 1994 年式の自動車の助手席乗員の傷害値とを比較すると、胸 G については 1.45 倍、HIC については 1.28 倍となり、本シミュレーションによる結果の方が大きな値となっている。しかし実験により得られている傷害値には車両の重量や強度によりばらつきのあることが予想され、また、シートベルトの有無や車内形状等の実験条件の違いを考慮して比較すると、本シミュレーションは現実的な結果を与えていると考えられ、用いたパラメータは十分妥当であると判断できる。

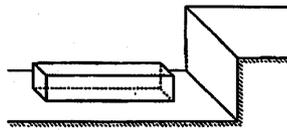


図 10 比較実験モデル図

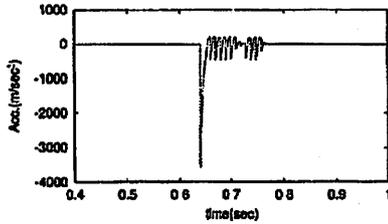


図 11 車両の受ける加速度 (x 方向)

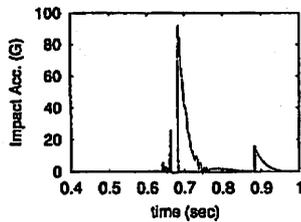
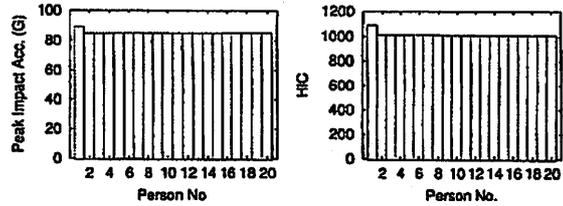
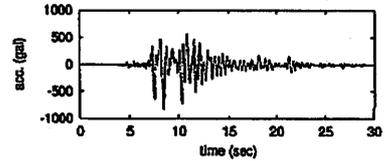


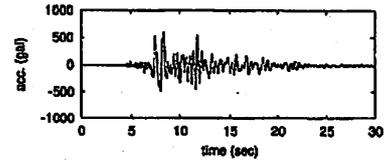
図 12 車内の人が受ける衝撃加速度



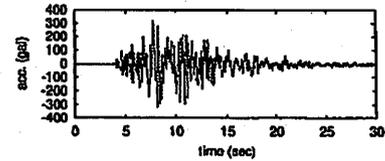
(a) 胸 G (b) HIC
図 13 人的傷害値



(a) NS 成分



(b) EW 成分



(c) UD 成分

図 14 入力加速度波形

5. 列車被災時のシミュレーション

車両数 16 両, 先頭車および最後尾車の乗員 65 名, 中間車の乗員 100 名, 落橋区間 30m, 橋の高さ 10m という条件を想定し, 1995 年の兵庫県南部地震において神戸海洋気象台で記録された加速度波形図 14 を用い, 図 1 に示す絶対座標系の x 方向に EW 成分, y 方向に NS 成分, そして z 方向に UD 成分を入力した. この地震波入力に関しては, x 軸負方向に見かけの伝播速度 3km/s で伝わる位相差入力を考え, 各車両の重心に一樣に同じ時間 (85msec) ずつ遅らせて入力した. y 方向の拘束は, 軌道直交方向に 570gal 以上の加速度が作用するか, 車両の上昇量が 30mm を越える場合に解除されるので, 脱線が生じるとすれば 1 両目から脱線することになる. また, 列車の脱線が速い段階で生じるよう, 1 両目について NS 成分が開始から 10 ステップ目 (10^{-3} 秒後) に 570gal を越えるように入力を行った. 速度が 60, 80, 100, 150km/h の場合の列車挙動について示したものが図 15 (a),(b),(c),(d) である.

これらの図から, 速度が 60km/h のように比較的低速度での列車事故発生時には先頭車両が落橋部分に落下し, 2 両目以降は落下せずに停止する. 速度が 80km/h になる

と, 列車の速度が大きいため先頭車は落橋部分の側面と衝突し, その後に下方向に変位することで, 2 両目は持ち上げられて 1 両目の上方へ乗り上げようとする挙動を示す. なお, これらの速度では各車両の y 方向へのずれが小さいために各車両がほぼ正面衝突に近い形で衝突している. 速度が 100km/h になると, 先頭車が落橋部分の側面および底面に衝突した後すぐに後続の車両が順次前の車両と衝突することになる. このとき, 1 両目と 2 両目の y 方向のずれは幾分大きい, 後続の車両では y 方向のずれが小さいために各車両がほぼ正面衝突に近い形で衝突する. さらに, 速度が 150km/h になると, 2 両目は 1 両目を飛び越して落橋部分を挟んだ向こう側の高架橋上に落下し, 4 両目までが落橋部分に落下する. また, 落下しない 5 両目以降も衝突の影響で多くの車両が軌道から大きくずれて停止している. 結局, 速度が 60~70km/h および 150km/h を境に列車の挙動が遷移することがわかった. 図 16 および図 17 は速度が 100km/h と 150km/h のときの 4, 8, 12, 16 両目の x 方向の速度および y 方向の変位についての時間変化を示しているが, これらの図より, 速度が速くなるほど各車両の挙動は複雑になり, y 方向への変位も大きくなる可能性が高いと言える.

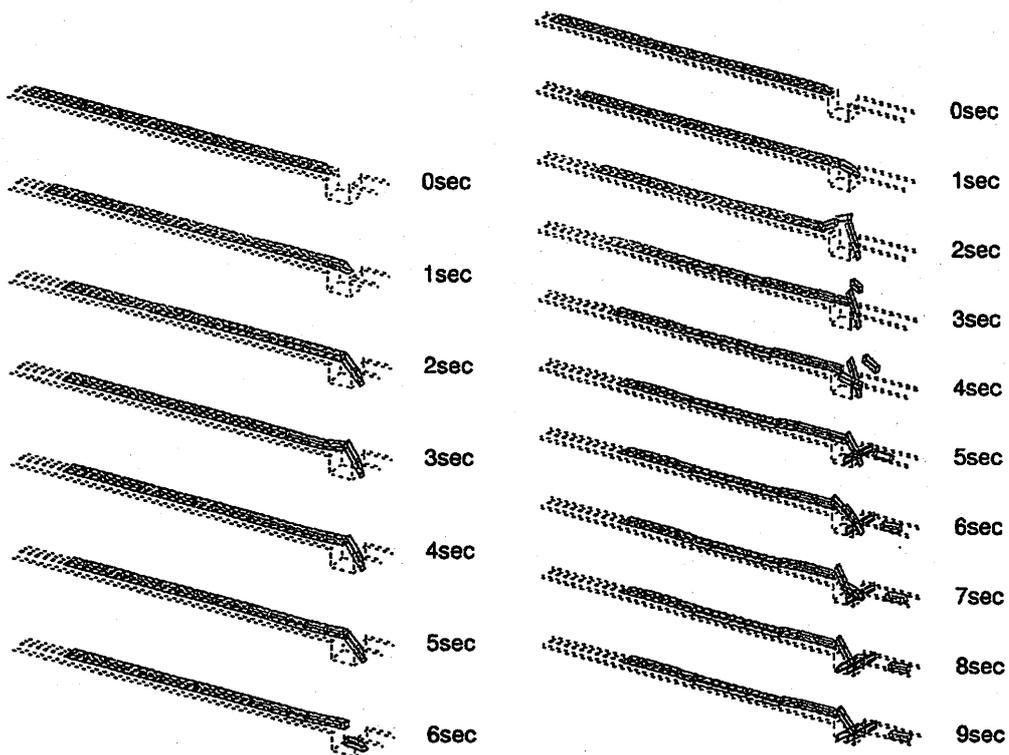
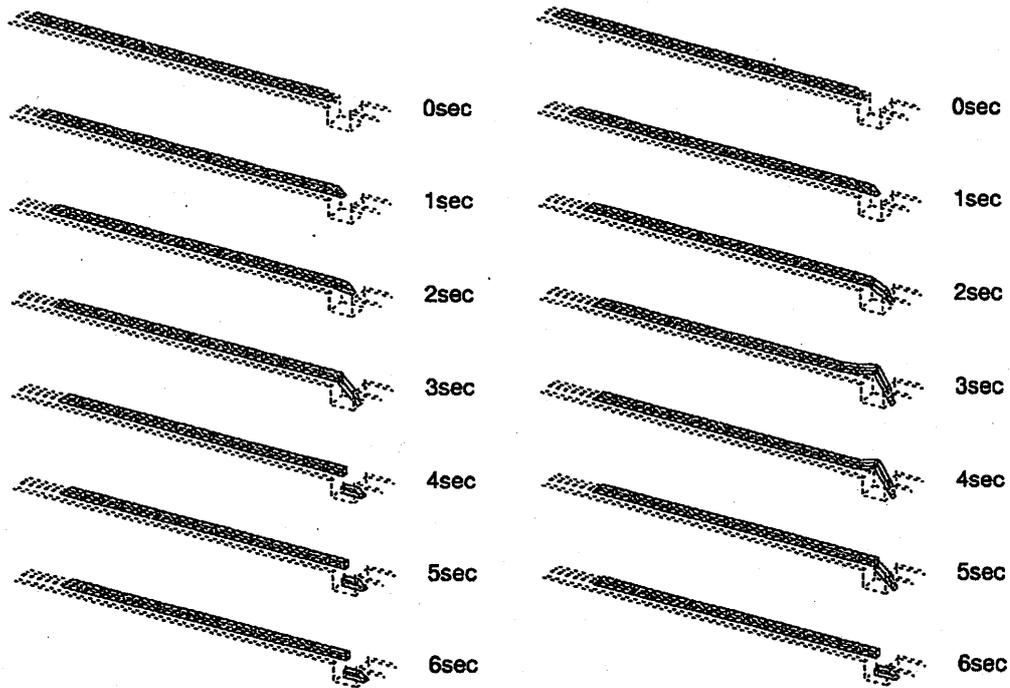
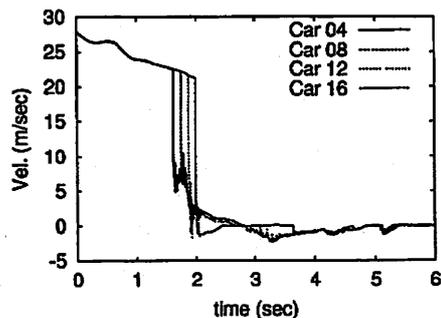
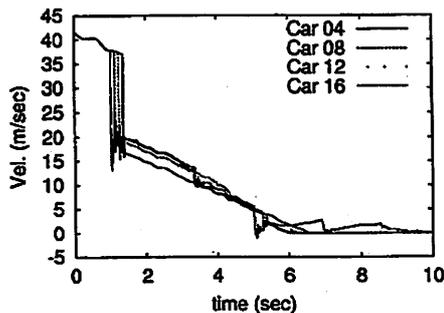


図 15 列車の挙動

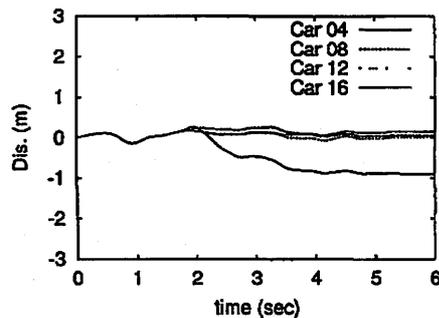


(a) 速度 100km/h

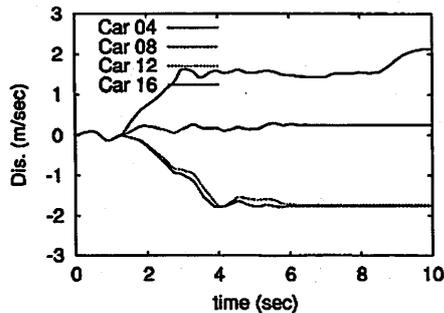


(b) 速度 150km/h

図 16 車両の x 方向速度の時間変化



(a) 速度 100km/h



(b) 速度 150km/h

図 17 車両の y 方向変位の時間変化

6. 列車被災時の人的被害

ここでは、速度を 50,60,70,80,90,100(km/h) と 6 通りに変化させて列車内部の解析を行った。なお、全ての座席に人を配置させて解析を行うため、乗員は 1 両目と 16 両目が 65 人、それ以外の車両では 100 人の計 1530 人となる。

まず、落下する 1 両目内部の各人の傷害評価について、その各人の挙動と絡めて考察を行う。図 18 は速度 80km/h の場合の 1 両目内部の人の挙動を上方から見たものであり、シミュレーション終了後に傷害評価が基準値より危険側になった人を始めから色つきの球 (円) で示している。ただし、縦方向の列については進行方向に向かって最も右側の列から A,B,C,D,E 列と呼ぶものとする。なお、この車両は先端が落橋部分の側面と 2.1 秒付近で衝突した後、2.5 秒付近において落橋部分の底面と衝突し、後部は 2 両目に衝突される。そして、車両の後部が落下を始め、5.8 秒付近で落橋部分の底面に衝突して停止する。

図 18 を見ると、人は進行方向に向かって左側に加速度を受けることで、A,B,C 列の人は通路に投げ出され、その後車両が傾くために通路を前方に向かって滑ることになる。そして、車両が落橋部分に衝突した衝撃により、通路を滑べた人は車内設備および人と激しく衝突することで大きな衝撃力を受けることになる。このように、落下する車両では通路に投げ出された人の傷害値が大きくなる可能性が高い。ただし、D,E 列の後方の人は 1 両目後

部の落下に伴って大きな衝撃力を受けており、車両が落下する場合には様々な状況で大きな衝撃力が作用する危険性がある。

次に、落下しない車両内部の人的傷害値について考察すると、特に HIC に関して、B,C 列の人の数値が小さくなる傾向が現れた。これは B,C 列の人は車両が衝突するときに通路に投げ出されている場合が多く、1 番前の人以外は、車内設備に衝突しない可能性が大きいためであり、逆に、車両衝突時に通路に投げ出されていない場合が多い、A,D,E 列の人は前方への加速度を受けて直ちに前の座席および壁に衝突するためである。

さらに、人的被害を調べるために、速度ごとで全車両に占める計 1530 人の人について乗員の傷害評価の割合を示したものが図 19 であり、全ての速度を通して車両ごとに傷害評価の割合を示したものが図 20 である。

列車の速度が変化することで、この割合には以下のような影響が見られた。

- 評価が「AAA」となる人の割合は速度が速いほど小さくなる。その変化を見ると、速度が 70km/h 以下であれば 90% 以上の人々が評価は「AAA」であるのに対し、速度が 80km/h のときはその割合が大きく減少して 33% となる。さらに、速度が 90km/h ではその割合は 3% となり、速度が 100km/h のときは 0 になってしまう。
- 評価が「D」となる人の割合は、評価が「AAA」である人の割合とは逆に速度が速いほど大きくなる。そ

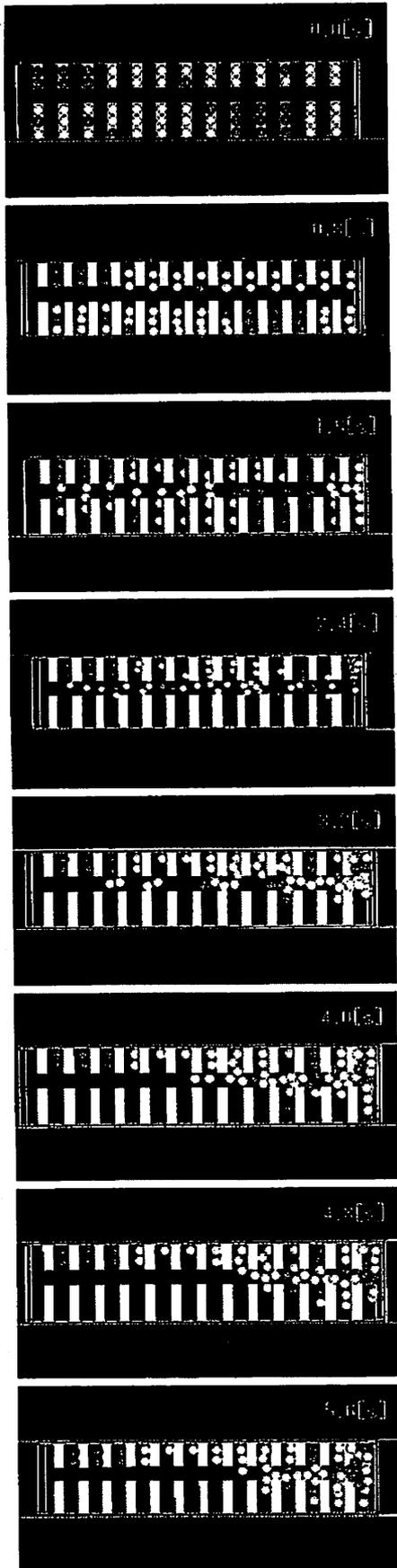


図 18 車内の人の動き (速度 80km/h, 1 両目)

の割合は速度が 80km/h 以下のときは 1%にも満たず、速度が 90km/h のときでも 9%であるが、速度が 100km/h になるとその割合が大きく増加して 59%の人が評価「D」となる。

- 速度ごとに最も人数の多い評価を調べると、70km/h 以下では「AAA」であり、80km/h では「A」、90km/h では「B」、100km/h では「D」が最も多い。

ここで、乗員傷害評価が「A」より安全側になる人の割合を見ると、速度 70km/h 以下では 90%以上の人が、そして速度 80km/h では 88%の人の評価が「A」より安全側となるが、その割合は 90km/h で 31%、100km/h で 5%と大きく減少する。以上より、速度が 80km/h を越えたところより人的被害が増大していることがわかる。

次に、車両ごとに乗員傷害評価の割合を調べた結果は以下のようであった。

- 評価が「AAA」になる人の割合は 1 両目で小さく、2~6 両目で幾分大きくなる。
- 評価が「D」になる人の割合 2~5 両目で小さくなる。

ここにおいても、乗員傷害評価が「A」より安全側になる人の割合で人的被害を評価すると、最も被害の小さい車両は 3 両目 (88%) であり、次いで 4 両目 (83%)、2 両目 (78%) となっている。逆に 12 両目 (56%) が最も被害が大きく、次いで 1 両目 (62%) で被害が大きい。以上より、1 両目を除く前方の車両で人的被害は小さくなるが、その他の車両では人的被害に大きな違いはないと言える。これは、1 両目を除く前方の車両では速度 80~100km/h における人的被害が他の車両に比べて小さくなるのが影響した結果である。この理由としては、速度 70~100km/h では 1 両目が最も y 方向にずれて停止していることから、前方の車両では後方の車両に比べてより大きく横方向にずれた状態で車両同士の衝突が起こり、車両に作用する加速度が軽減されたためと考えられる。

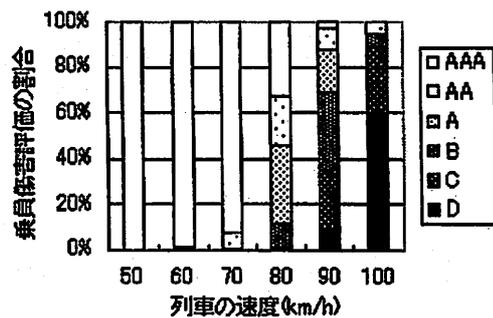


図 19 落下時の速度が変化したときの乗員傷害評価とその割合

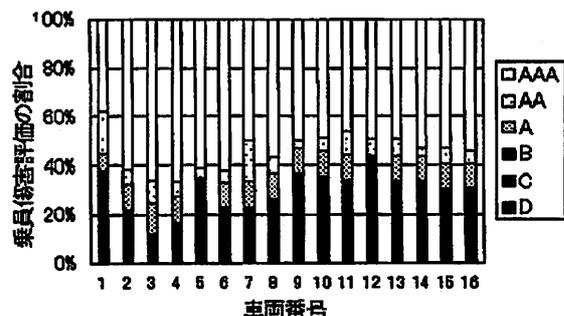


図 20 落下時の速度が変化したときの各車両の乗員傷害評価とその割合

7. まとめと今後の課題

本研究では、強震動により鉄道橋の桁が落下あるいは崩壊した場合を想定し、走行中の列車がそこに落下するときの人的被害について検討を行なった。

まず、列車事故が発生した場合を想定し、そのときの列車の挙動を速度変化にしたがって追跡するとともに、車内の乗客が受ける衝撃力を数値計算により求め、列車事故による人的被害を定量的に評価するための方法論を提案した。これより、事故発生時の列車の挙動の概略は速度により分類でき、このとき、挙動が遷移する速度は 60~70km/h および 150km/h であることが分かった。車両ごとの人的被害を考えると、1 両目を除く前方の車両で被害が軽減される傾向がある。また、列車落下時の速度が速いほど人的被害は大きくなり、被害の程度に関しては、速度が 70km/h 以下のときはほとんど被害を生じないのに対し、速度 80km/h 以上ではその被害は甚大となる。これより、高速で走行する列車に対しては、例えば JR の「ユレダス」等で地震検知後 80km/h に速度を低減するまでの時間と、地震発生場所との関係から予めリスクマップを作成することも可能である。また、人的被害を最小限に食い止めるという問題に対しては、地震の検知から主要動の到達までいかに早く 80km/h まで速度を落とせるかという点に帰着することが分かった。

今回は y 方向である軌道直交方向に最大振幅を持つ神戸海洋気象台 NS 成分を入力している。このため脱線を伴う列車事故という特定の場合を想定した解析となっている。しかし、車両が脱線後転覆したり激しく衝突したりすることがなければ、脱線することにより大きな減速度が生じるため、人的被害が更に小さくなることも考えられる。

本研究では衝突時の車両の塑性化に伴うエネルギー吸収を、垂直方向の荷重-変位関係について履歴を描かせることで考慮したが、車両の変形そのものを表すに至っていないため、車両の変形を許容するようなモデル化および定式化を行うことが必要である。また、車両を 6 面体で、そして人を球でモデル化した。より現実的な列車挙動および人的被害を得るために、今後はこれらにより現実に近い形でモデル化することが必要である。

参考文献

- 1) 永瀬和彦, 近藤和広, 野村俊明: 阪神大震災における鉄道車両の被災状況, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 63, No. 606, pp. 300-307, 1997.
- 2) 阪神・淡路大震災鉄道復興記録編集委員会: よみがえる鉄路-阪神・淡路大震災鉄道復興の記録-, 運輸省鉄道局, 1996.
- 3) 三浦重: 地震時の軌道変状と安全性, 鉄道総研報告, Vol. 10, No. 3, pp. 23-30, 1996.
- 4) 那須誠: 橋梁の地震被害と地盤構造, 鉄道総研報告, Vol. 5, No. 11, pp. 27-36, 1991.
- 5) 中村豊, 齊田淳: ノースリッジ地震による脱線転覆事例と常時微動を用いた分析, 鉄道総研報告, Vol. 9, No. 3, pp. 25-30, 1995.
- 6) 清野純史, 土岐憲三, 久保田修一: 強震時の落橋に伴う列車事故による人的被害について, 地域安全学会論文集, No.3, 2001.
- 7) 木山英郎, 藤村尚: カンドルの離散剛要素法を用いた岩質粒状体の重力流動の解析, 土木学会論文報告集, 第 333 号, pp. 137-146, 1983.
- 8) 榎本美咲, 目黒公郎: 3 次元拡張個別要素法を用いた家具の動的挙動シミュレーション, 土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集, I-A118, pp.236-237, 2001.
- 9) 鉄道ファン, 2001 年 11 月号, 交友社, 第 41 巻 第 11 号, 2001.
- 10) 鉄道ジャーナル 1 月号, 鉄道ジャーナル社, 第 36 巻 第 1 号, 2002.
- 11) 鉄道ジャーナル 3 月号, 鉄道ジャーナル社, 第 36 巻 第 3 号, 2002.
- 12) 山下高賢: 500 系新幹線電車における非常ブレーキ距離低減, JREA, Vol. 40, No. 8, pp.11-13, 1997.
- 13) 宮本昌幸: 車両の脱線メカニズム, 鉄道総研報告, Vol. 10, No. 3, pp. 31-38, 1996.
- 14) 清野純史, 三浦房紀, 瀧本浩一: 被災時の群衆避難行動シミュレーションへの個別要素法の適用について, 土木学会論文集, No. 537, I-35, pp. 233-244, 1996.
- 15) 筒井善康, 山川宏, 宇治田寧, 鈴木康文: 鉄道車両の衝突安全性向上に対する構造最適化 (第 2 報), 日本機械学会 Dynamics and Design Conference '99 講演論文集, 1999.
- 16) John F.Kerkhoff, Stein E.Husher, Michael S.Varat, Alison M.Busenga, and Kevin Hamilton: An Investigation into Vehicle Frontal Impact Stiffness, BEV and Reported Testing for Reconstruction, SAE Transactions Journal of Passenger Cars, Vol. 102, pp. 1456-1484, 1993.
- 17) 自動車アセスメント (自動車安全情報): 自動車事故対策センター, 2002.
- 18) 桜井実: オフセット前面衝突時の下肢傷害の発生状況に関する実験的検討, 自動車技術会論文集, Vol. 28, No. 4, pp. 117-122, 1997.

(原稿受付 2003.5.23)