

## 地震による人間被害の定量解析

### 人体のモデル化

・2次元平面上の人間を円要素でモデル化する。

・それぞれの円要素には、一定速度になるまでの駆動力と、壁や他要素などの接触時の反力、および心理的な作用力を受けるものとする。

・接触時の力は、ばねとダッシュポットを介して伝達される。

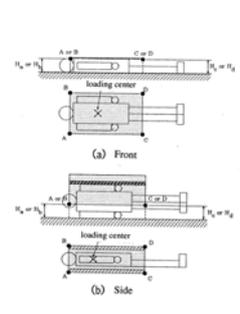
Element spring

Virtual spring

Normal direction

Tangential direction

### 人体のパラメータ



Parameters	Value
Physical spring constant $k_n$ (N/m)	$1.26 \times 10^4$
(tangential) $k_t$ (N/m)	$6.29 \times 10^3$
Physical damping constant $c_n$ (Nsec/m)	$1.35 \times 10^2$
(tangential) $c_t$ (Nsec/m)	$3.02 \times 10^1$
Virtual spring constant $k'_n$ (N/m)	$6.62 \times 10^3$
(tangential) $k'_t$ (N/m)	$3.31 \times 10^0$
Physical damping constant $c'_n$ (Nsec/m)	$9.79 \times 10^1$
(tangential) $c'_t$ (Nsec/m)	$2.19 \times 10^1$
Physical radius of element $r$ (m)	0.259
Virtual radius of element $r'$ (m)	0.717
Weight per unit volume $w$ (N/m <sup>3</sup> )	$1.69 \times 10^3$
Time step $\Delta t$ (sec)	0.01
Acceleration for driving force (m/sec <sup>2</sup> )	0.837

### 数値解析法

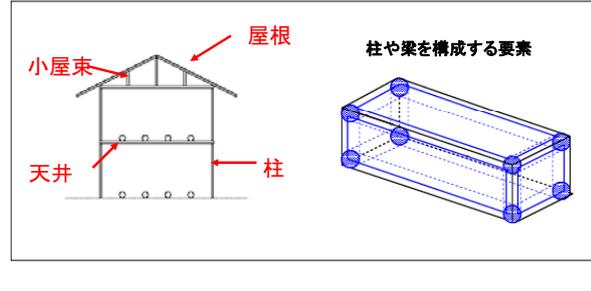
各時間ステップごとに、個々の要素に働く力を求め、前進差分によって各要素の位置を求める。

$$m \frac{d^2 x_t}{dt^2} = \sum F_x$$

$$\frac{dx_t}{dt} = \frac{dx_{t-\Delta t}}{dt} + \frac{d^2 x_{t-\Delta t}}{dt^2} \Delta t$$

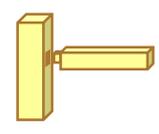
$$x_t = x_{t-\Delta t} + \frac{dx_{t-\Delta t}}{dt} \Delta t$$

### 数値解析のための建物要素のモデル



小屋束 屋根 柱や梁を構成する要素 天井 柱

### 要素実験



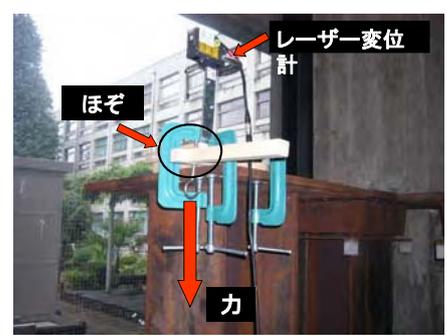
Parameter

- 法線方向ばね定数  $K_n$
- 接線方向ばね定数  $K_s$
- ばねの最大値

Experiment

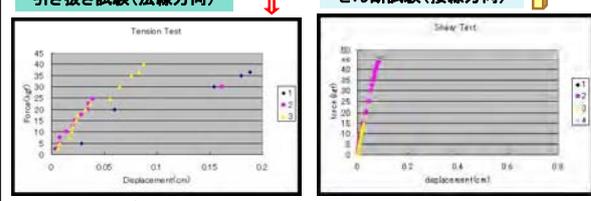
- 引き抜き試験
- せん断試験
- モーメント試験

### 要素実験概要



レーザー変位計 力

### 実験結果



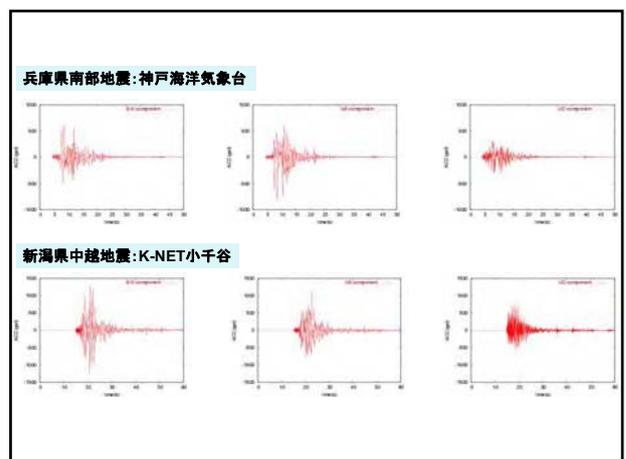
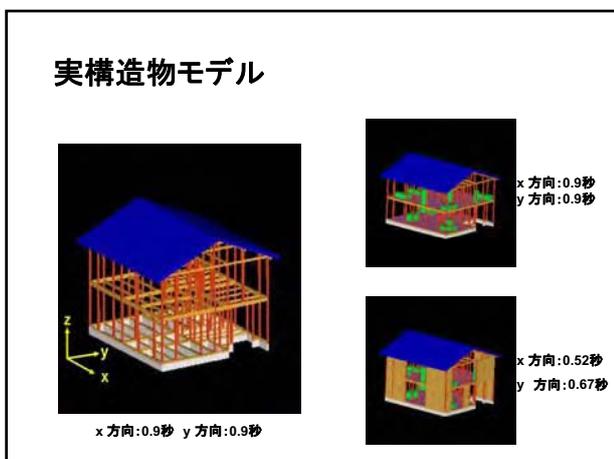
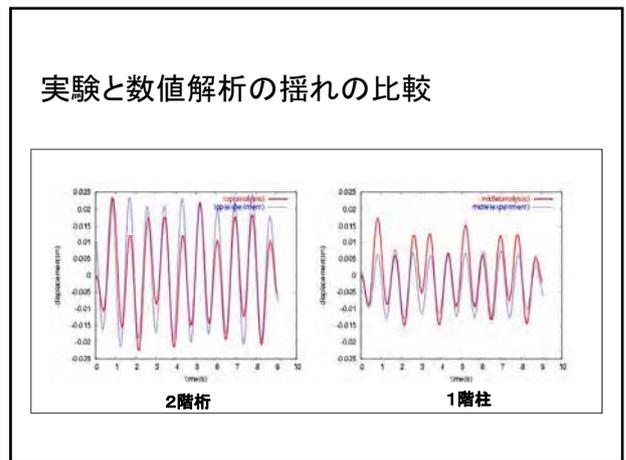
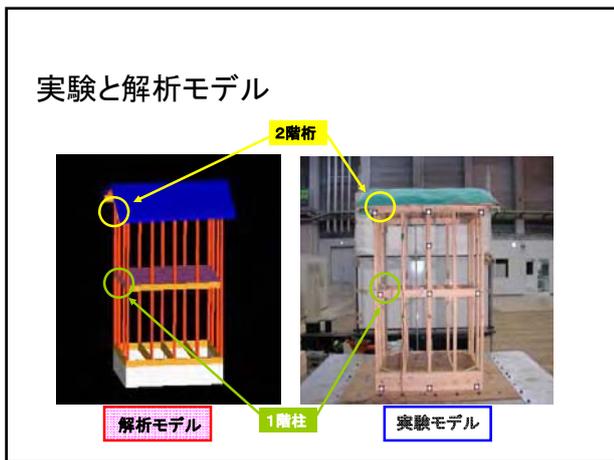
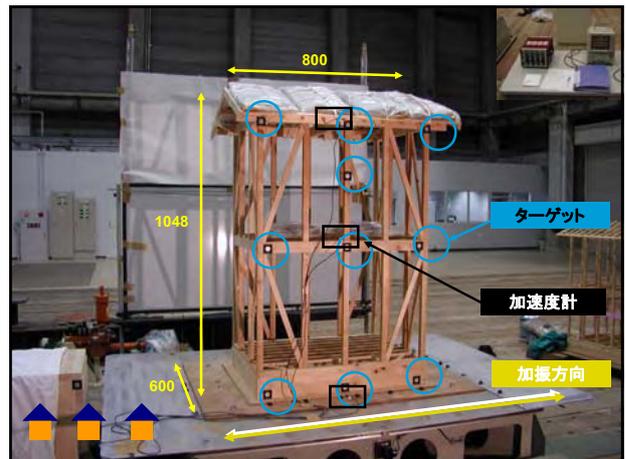
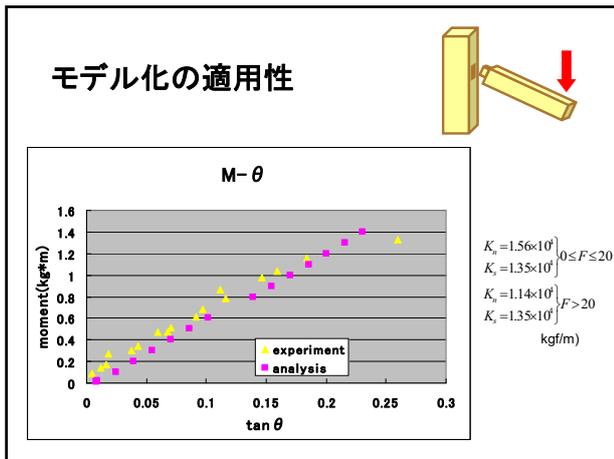
引き抜き試験(法線方向)

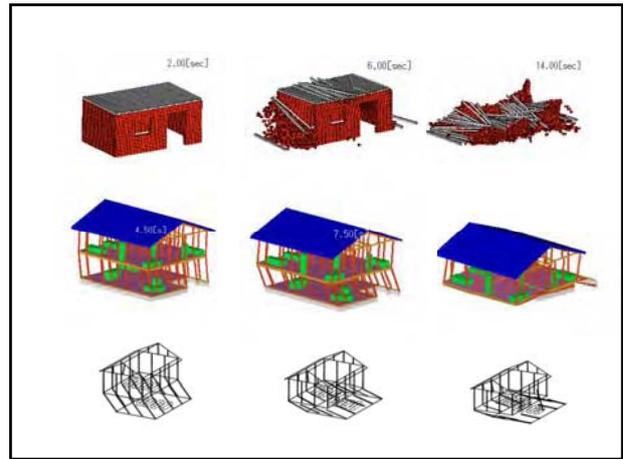
$k_n = 1.56 \times 10^4 \text{ kgf/m} (F < 20 \text{ kgf})$

$k_n = 1.14 \times 10^4 \text{ kgf/m}$

せん断試験(接線方向)

$K_s = 1.35 \times 10^4 \text{ kgf/m}$





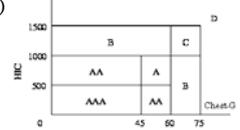
### 人間被害の定量化の例(1)

- AIS (Abbreviated Injury Scale, AIS, 1990)
- 1:軽症から2:中等症、3:重症、4:重篤、5:瀕死、そして6:致命傷(死亡)まで6段階に分類
- ISS (Injury Severity Score)
- 1:頭部・頸部、2:顔面、3:胸部、4:腹部・腰部、5:四肢、6:体表の6つの負傷部位に適用し、怪我の程度を定量化
- 6つの各部位における最大のAISを取り出し、スコアの高い上位3つを選んで、その二乗和を算出：得点は1-75
- 負傷の程度を患者の定性的な「状態」で点数化して表す
- 生命への危険性を表す指標

### 人間被害の定量化の例(2)

- 自動車工学の分野では、衝突時の乗員安全性評価の指標(運輸省, 1999)として胸部合成加速度(胸Gと略す)および頭部傷害基準値HIC(Head Injury Criteria)

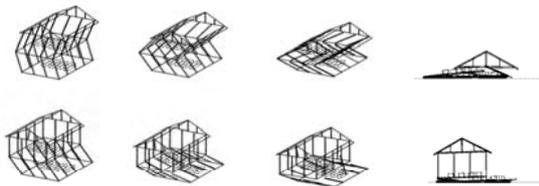
$$HIC = \left[ T \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T a(\tau) d\tau \right\}^{2.5} \right]_{\max}$$



- 現在では乗員保護性能として、前面や側面などの衝突モードごとに頭部や頸部、胸部や下肢部への傷害の度合いを得点化し、その総得点で安全性を5段階評価している(「独」自動車事故対策機構, 2000)
- 純粋に人体に働く力や力積という計測可能な物理量で負傷程度を表す

AAA: 頭と胸の双方に重大な傷害を受ける危険性が極めて低いもの。  
 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、他の一方は重大な傷害を受ける危険性が低いもの。  
 A: 頭と胸の双方に重大な傷害を受ける危険性が低いもの。  
 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、他の一方は重大な傷害を受ける危険性がややあるもの。  
 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もの。  
 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もの。

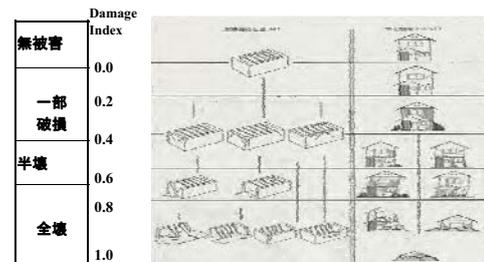
### 人的被害発生メカニズム



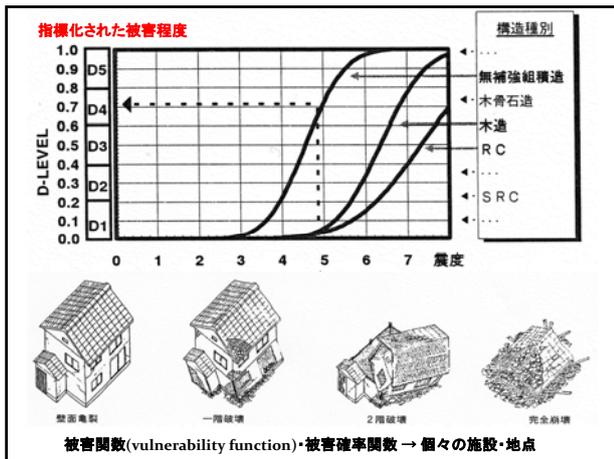
	胸G	HIC	判定		胸G	HIC	判定
P1	220	6618	D	P1	91	2827	D
P2	109	1111	D	P2	67	985	B
P3	20	69	AAA	P3	10	51	AAA
P4	25	19	AAA	P4	14	9	AAA
P5	32	49	AAA	P5	13	5	AAA
P6	47	116	AA	P6	10	4	AAA
P7	80	575	D	P7	19	13	AAA
P8	187	3860	D	P8	24	80	AAA

### ダメージ指標

Damage Indexとは、構造的な被害を表す尺度である。シミュレーション結果と下図を照らし合わせ、各モデルに対するDamage Indexを決定した。



(岡田・高井)



### 内部被災度

内部被災度(W score)は内部空間の被害を示す尺度であり、以下の式で表す。

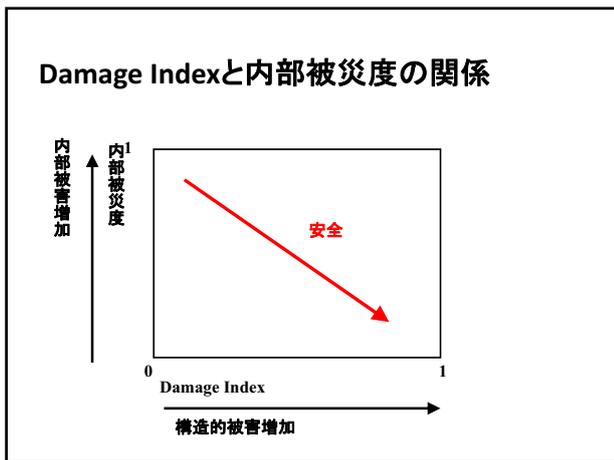
W1(平面損失)=A1(損失平面)/A(初期平面)

W2(立面損失)=B2(損失立面)/B(初期立面)

W3(体積損失)=C3(損失体積)/C(初期体積)

平面損失  $W1=A1/A$  立面損失  $W2=B1/B$  体積損失  $W3=C3/C$

(岡田・高井)



### 構造物の種類による比較

- ◆ 木造のモデル全体と組積造と比較すると、木造の方が内部被災度が小さく安全性が高い。
- ◆ 木造の1階・2階と組積造を比較した場合、2階部分は組積造より格段に安全性は高いが、1階部分は同程度の被害が発生する。

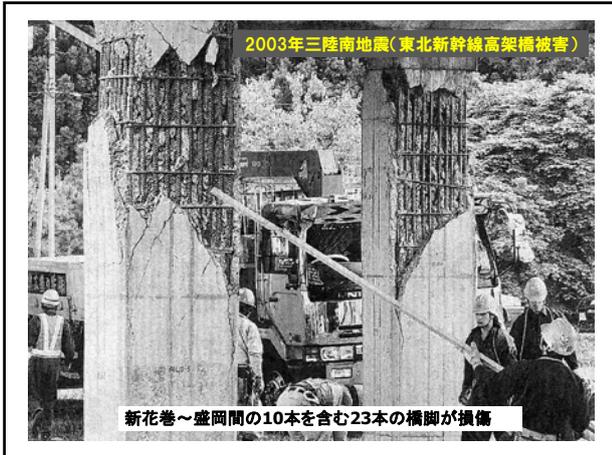
平面(W1) 立面(W2) 体積(W3)

### 家具数による比較

- ◆ 立面損失・体積損失についてはほぼグラフは一致する。
- ◆ 平面損失については、家具数が多くなるほど内部被災度が大きくなっていくが、家具数が12となったところで家具同士が転倒を妨げ合い、内部被災度は減少している。

平面(W1) 立面(W2) 体積(W3)





### 数値シミュレーションの一例

列車と崩壊した高架橋のDEMモデルを用い、列車の挙動を検討するとともに、各車両が受ける力(加速度)を算定する。

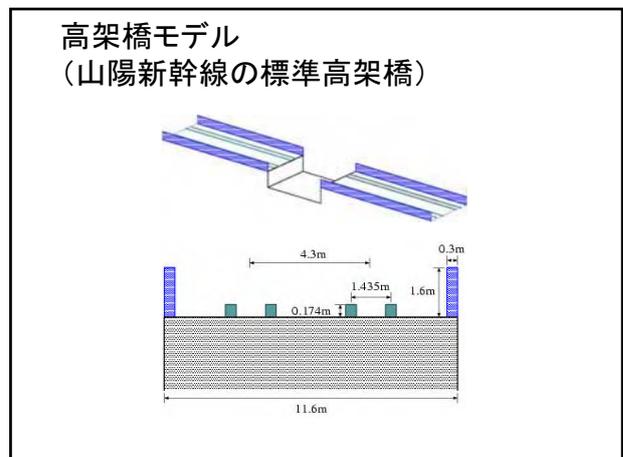
↓ <列車-軌道部の解析>

各車両が受ける加速度を慣性力として車両に入力し、DEMにより人が受ける衝撃力を求める。 <車両内部の解析>

↓

人が受ける衝撃力を用い、人的被害を検討する。 <人的被害の算出>

**頭部傷害**  
**胸部最大衝**



### 車両モデル

対象モデル: 700系車両

重量	44.25(ton)
高さ	3.65(m)
幅	3.38(m)
長さ(先頭車)	27.35(m)
長さ(中間車)	25.00(m)
先頭部長さ	9.20(m)
床下高さ	1.30(m)
連結部長さ	0.50 ( m )

### 列車内部のモデル

先頭車および最後尾車  
N=13

中間車  
N=20

人のモデル  
⇒ 球要素  
半径: 0.219m  
質量: 64.0kg

### 乗員傷害の評価区分 <人的被害の算出>

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もの

- 胸部最大加速度
- 頭部傷害基準値 HIC

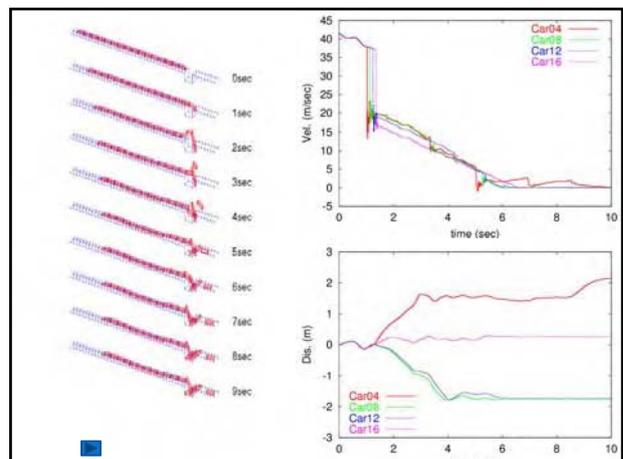
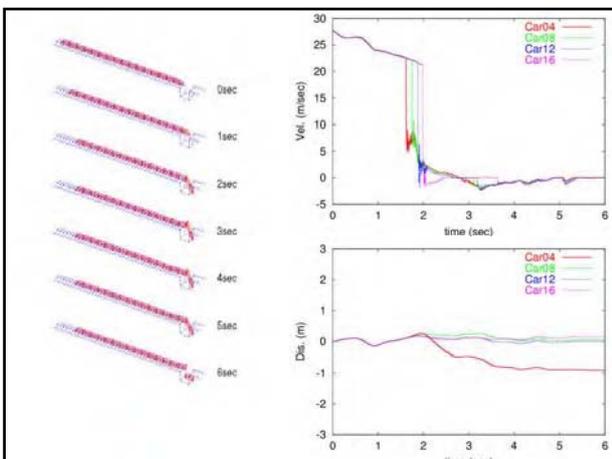
$$HIC = \left[ T \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T a(\tau) d\tau \right\}^{2.5} \right]_{\max}$$

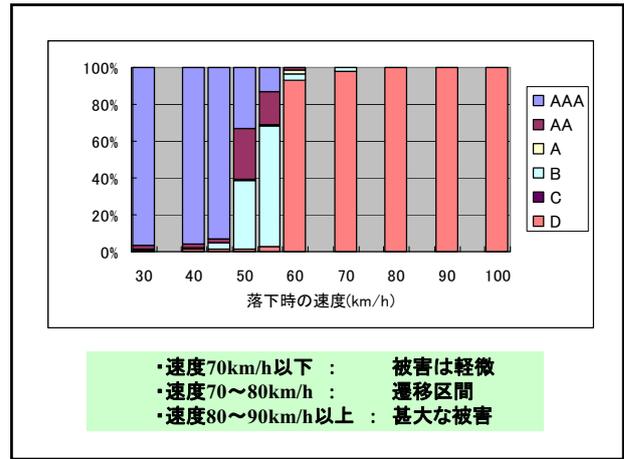
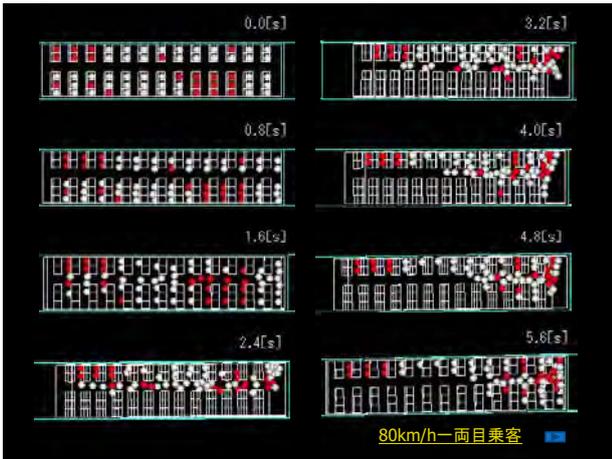
胸部加速度 = 球要素が受ける衝撃加速度  
頭部加速度 = 球要素が受ける衝撃加速度 × 1.31

### パラメータの妥当性の検証

国土交通省による自動車アセスメントの衝突安全性能試験(速度55km/hの固定壁前面衝突試験)結果と比較するため、1車両を速度55km/hで固定壁に衝突させた。

平成6年度の助手席の結果: 胸G=59.0(G)、HIC=796  
⇒ 十分妥当な値である。





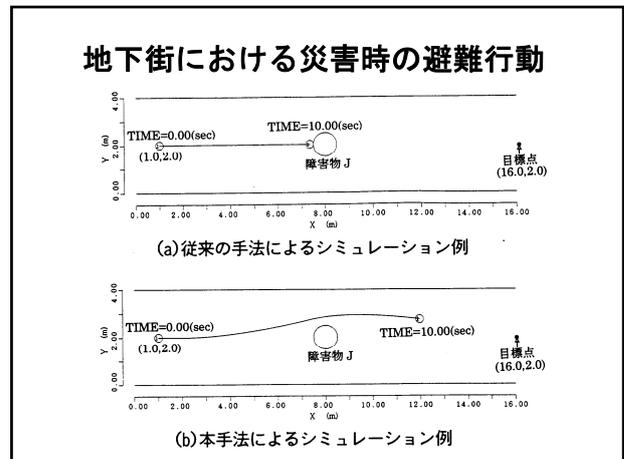
### 人間被害を最小にするためには

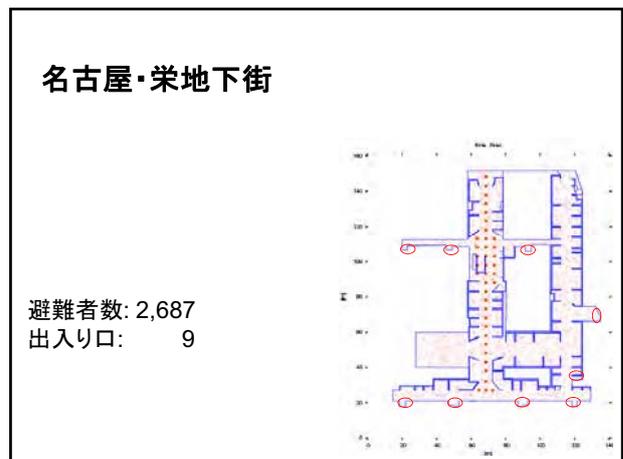
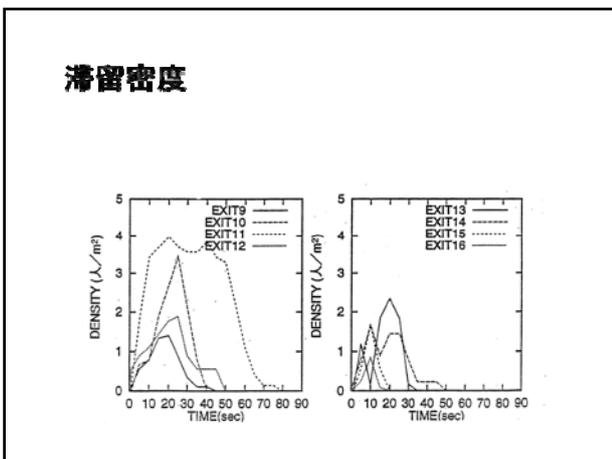
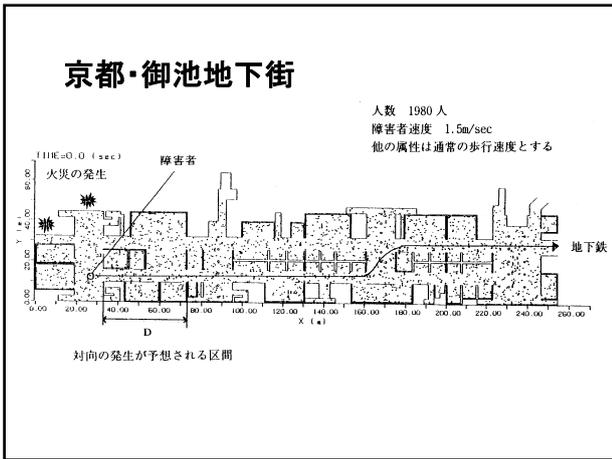
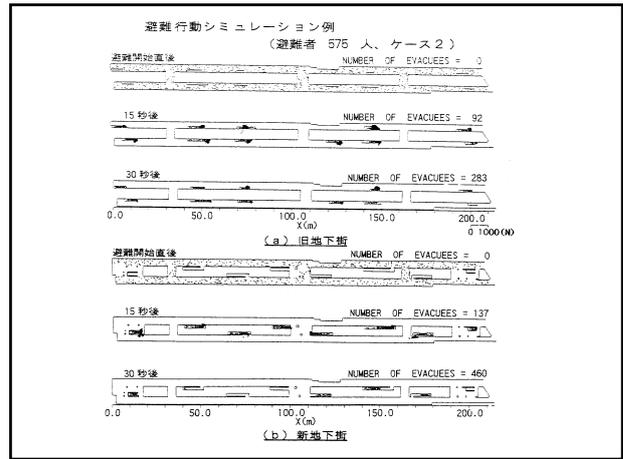
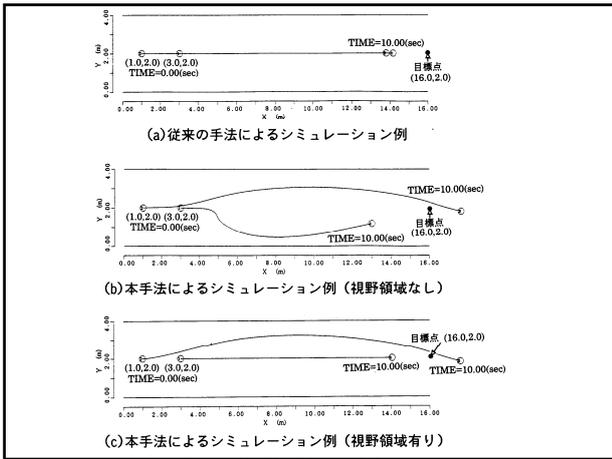
- 列車を早く止める: センサーの改良や設置箇所を飛躍的に増大させるなど、直下型地震に対応する新たなシステムを創出する。
- 列車を早く止める: 制動の性能を飛躍的に向上させる。
- 高架橋を揺れないようにする: 免震装置など新たなデバイスや機能を取り入れた構造にする。
- 脱線した場合でも人的被害が最小となるように、車内設備や鉄道構造物を整備する。  
(この観点は少なくとも神戸以降にも見過ごされていたのではないかと)

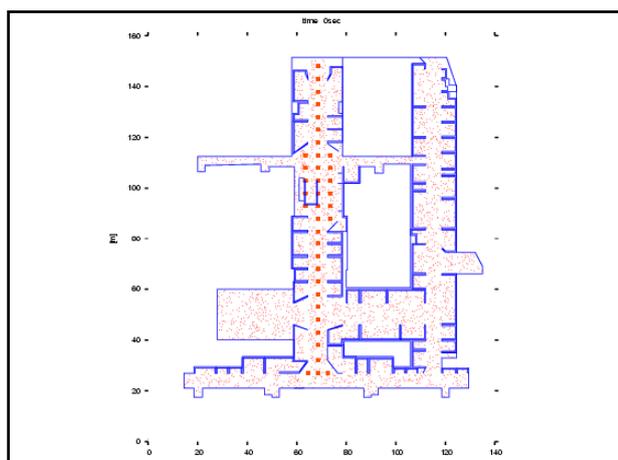
### 再発防止: 危機の芽を摘む

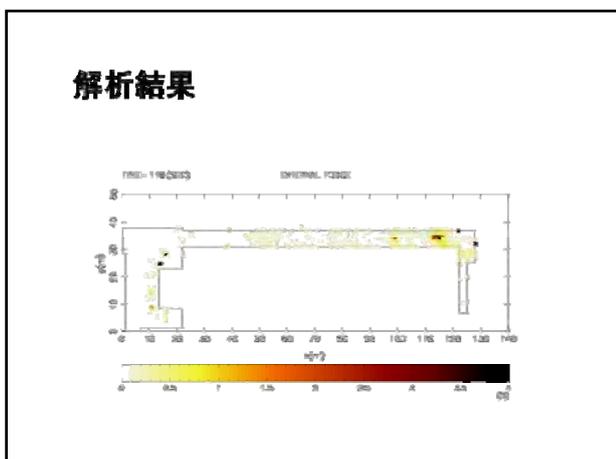
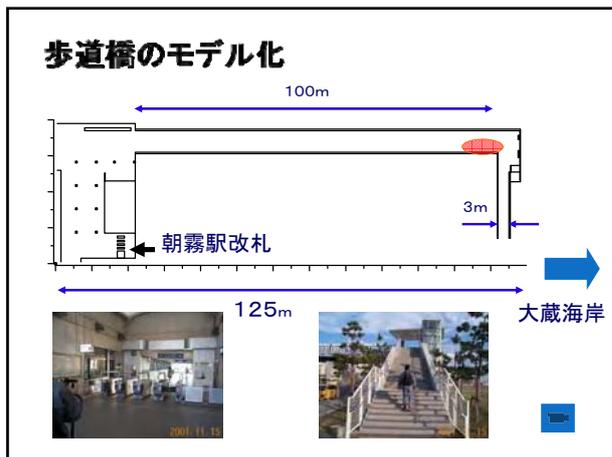
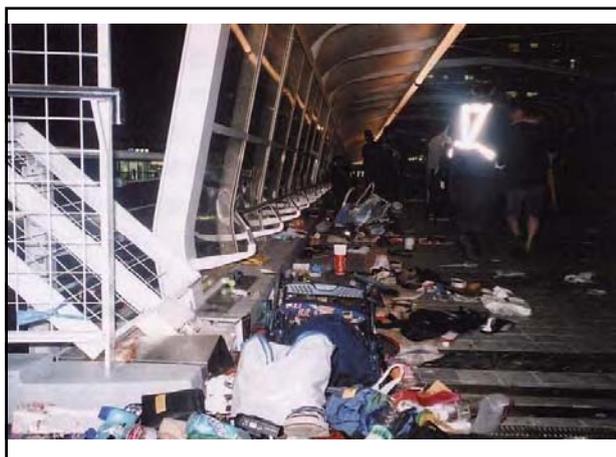
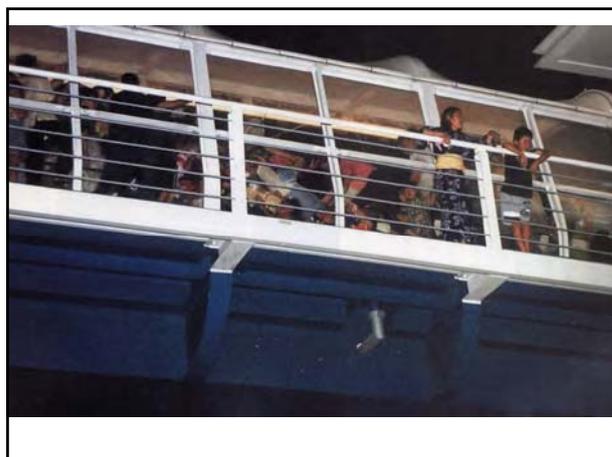
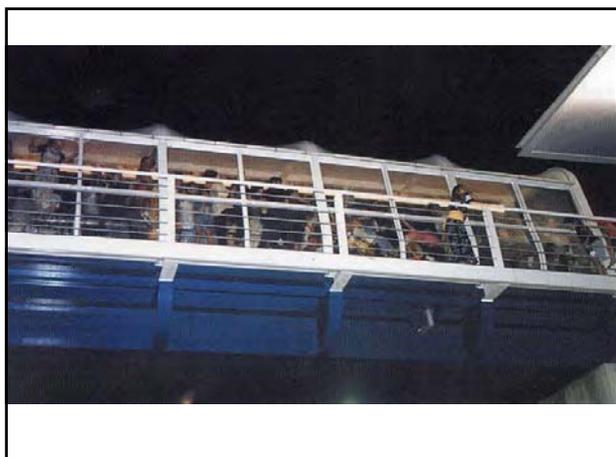
- 走行列車の人的被害軽減のためにはどのような対策が必要か。
  - － 既存の早期警報システム
  - － 制動システム
  - － 車内設備の改良 (参考: 自動車の安全対策)
- 路盤・軌道以外の線路構造物
  - － 高圧線や饋電線、電車線支持の鉄柱、信号機
- 鉄道施設以外の施設の耐震性 (新潟・神戸の例)
  - － 跨線橋、駅舎や駅舎内の2次設備
- 警戒宣言発令時の乗客の誘導
  - － 強化地域内の各駅ごとに数千人オーダー
- 土構造物の耐震性確保

### 人間被害解析の応用例









### まとめ

- 成傷器としての建物によって内部にいる人間がどのような被害を被る可能性があるかを追跡するために、その構造物が倒壊に至るまでの挙動を、主に木造建物を対象として、その地震時挙動や内部空間被害と人間被害の関係、室内変容と人間被害の関係について検討した。
- また、人間被害に関するいくつかの応用例を紹介した。
- 人間被害を物的被害と同じ立場で論ずるには、同じ土俵で議論できるような定量評価が必要となる。ここでは、定量評価のための一手法を提示し、これを用いた人間被害の数値計算例を紹介した。