

### 1. 研究背景

都市施設や都市空間の安全性は、従来は構造物自体の強度を中心に議論されることが多かった。しかし、不特定多数の利用者が存在する空間では、施設の強度に加えて、利用者の避難安全性の観点からの議論が重要になる。ところが、多くの都市施設では商業的な制約条件により、安全に対する明確な根拠なしに設計が行われている事も多い。この背景には、上記のような問題を定量的に議論するための手法が確立されていないことも理由として挙げられる。

そこで本研究では、上記のような一人一人の人間行動の把握が可能で、かつ人間同士にかかる力を定量的に評価できる楕円形要素を用いた拡張個別要素法(EDM)による群集行動解析モデルを構築する。そして日常的に混雑が生じている一般在来線を対象空間として、列車災害時を含めた様々な条件下におけるシミュレーションを行い、乗客の安全性評価と安全対策に関する考察を行う。

### 兵庫県南部地震の鉄道被災

日時：1995年1月17日午前5時46分  
死者：直後2週間に5500人、今日現在6433人  
(鉄道利用者の死者は0人)

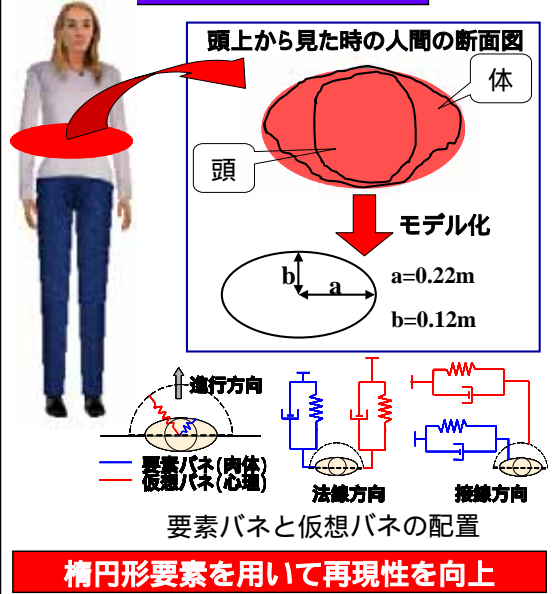
鉄道被災：列車の脱線、  
高架橋の損壊、  
軌道変状など



地震の発生時刻が通勤ラッシュ時であった場合、鉄道被災による人的被害は甚大なものになったと考えられる。

### 2. 楕円形個別要素法の特徴

#### 要素形状・スケール



#### 楕円形要素の接触判定

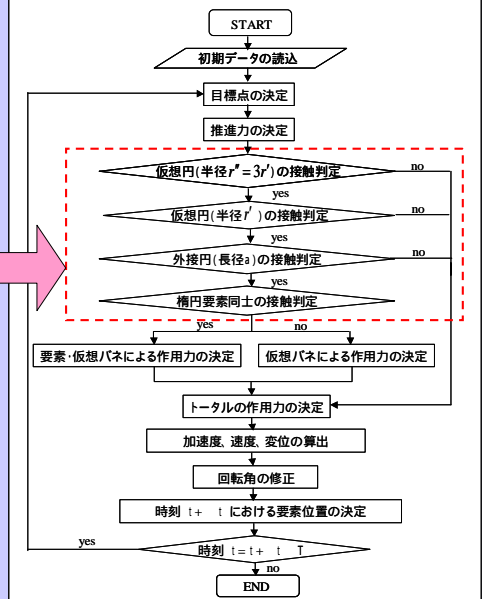
2つの楕円の方程式を  
連立させ4次方程式を作る

実数根が存在すれば接触  
存在しなければ非接触

計算時間の増大

接触判定を4段階に分け  
計算時間を大幅に短縮

#### 計算手順



### 3. 圧迫による人体危険度評価手法

#### 圧迫による窒息死と生存の事例

生死	荷重 (kg)	時間 (分)	年齢 (歳)	性別	標準体重	荷重/体重 (kg)	荷重×時間 (kg・分)	荷重×時間/体重
死亡	700	10	36	男	70	10	7,000	100
死亡	250	10	39	男	70	4	2,500	35.7
死亡	2,000	0.17	40	男	70	29	340	4.9
死亡	700	10	50	男	70	10	7,000	100
死亡	450	1	64	男	70	6	450	6.4
生存	300	0.03	1.6	男	12	25	9	0.8
生存	350	1	1.9	男	13	27	350	26.9
生存	2,500	0.03	4	女	17	147	75	4.4
生存	120	3	5	男	18	7	360	20
生存	700	1	13	男	45	16	700	15.6
生存	500	0.03	15	男	50	10	15	0.3
生存	100	2	15	女	40	3	200	5
生存	700	15	16	女	40	18	10,500	262.5
生存	1,000	0.03	20	男	70	14	30	0.4
生存	100	30	20	男	70	1	3,000	42.9
生存	2,500	0.03	22	男	70	36	75	1.1
生存	5,000	0.03	24	男	70	71	150	2.1
生存	2,500	0.03	28	男	70	36	75	1.1
生存	300	5	30	男	70	4	1,500	21.4
生存	200	1	36	男	70	3	200	2.9
生存	120	0.03	37	男	70	2	4	0.1
生存	700	10	52	女	60	12	7,000	116.7
生存	136	10	52	男	70	2	1,360	19.4
生存	120	20	54	男	70	2	2,400	34.3

(Beach H H A, James S Williamsらによる)

#### 動物使用による実験的研究

群	圧迫荷重量	例数	10分以内死亡数	10~60分死亡数	60分以上生存率
A群	2倍	29	0	0	29(100%)
B群	3倍	18	0	18(100%)	
C群	4倍	20	15(75%)	5(25%)	
	5倍	10	10(100%)		

(久米睦夫による)

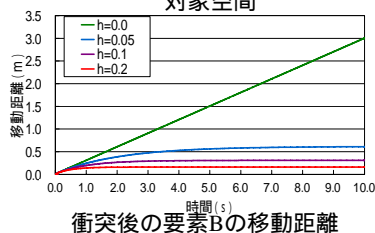
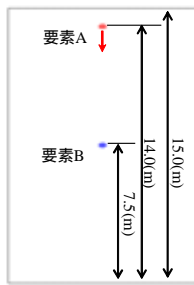
A群：体重×2以下の荷重により長時間でも死亡しない  
B群：体重×3,4の荷重により長時間で死亡する(1h)  
C群：体重×5以上の荷重により短時間で死亡する(10min)

人の圧迫事故事例(左表)では様々なケースが見られ、圧迫による窒息死の荷重条件を決めるのは困難である。ここでは家畜(犬)を用いた実験的研究の成果(上表)と人の胸部圧迫に関する事故事例のデータから、体重の3~5倍の荷重を限界値として用いることとした。

### 4.シミュレーション

#### 減衰力の導入

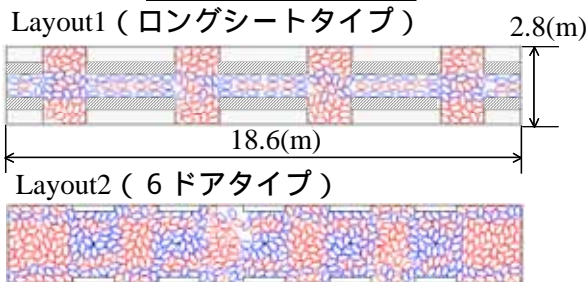
激しく押されたり、引っ張られたりした際に、人は踏ん張ってそれらの力に抵抗しようとする。この力を減衰力として模擬することを試みた。減衰力は下の式によって与えられるものとした。そして減衰定数(h)をh=0.0, 0.05, 0.1, 0.2と変化させたシミュレーションを行い、減衰定数のキャリブレーションを行った。具体的には右図のような2要素の衝突実験のシミュレーションを行い、移動距離の変化から減衰定数を検討した。



$$fd = 2 \times h \times \sqrt{m \times k} \times v$$

$h$ : 減衰定数       $k$ : 要素のバネ定数  
 $m$ : 質量           $v$ : 要素の絶対速度

#### 対象空間と乗客数



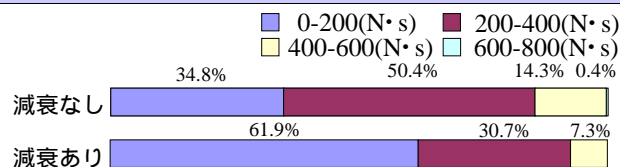
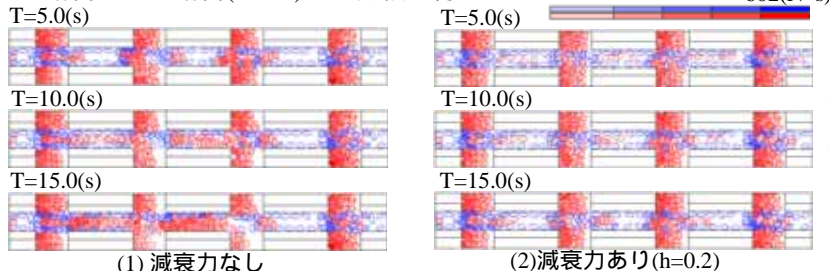
進行方向 ←  
 N ↑  
 W ← E →  
 S ↓

赤色: 何もつかんでいない乗客  
 青色: つり革や手すりをつかんでいる乗客

	乗客数と密度	
	要素数(人)	密度(人/m <sup>2</sup> )
Layout1	244	10
Layout2	486	10

#### 減衰力の効果

ここでは、70(km/h)で走行中の列車が通常使用されるブレーキによる負の加速度3.5(km/h/s)で減速したときの乗客の挙動を追跡するために減衰力がない場合とある場合(h=0.2)での比較を行った。



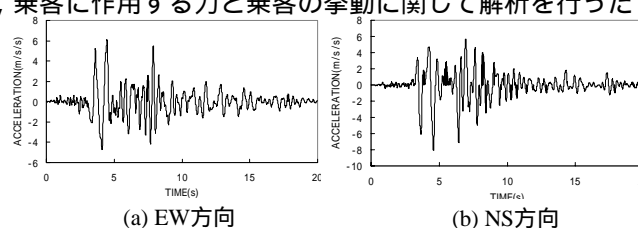
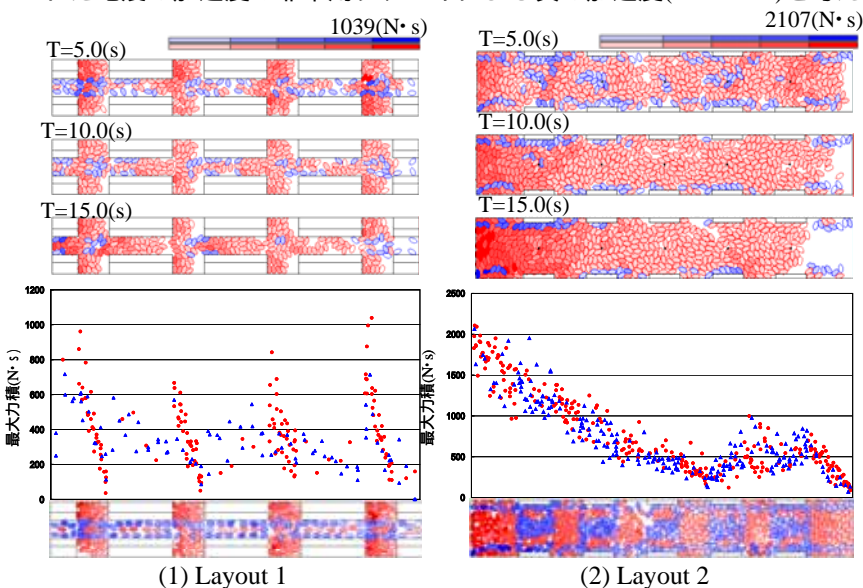
減衰なし: 34.8%, 50.4%, 14.3%, 0.4%  
 減衰あり: 61.9%, 30.7%, 7.3%

要素比率

減衰力がない場合は車輻の中央部の乗客が前方に押し出されてしまい、前方の乗客を押し付けているのに対して、減衰力がある場合には、それぞれの座席(シート)の角の部分で分断され、前方へ流れる乗客が減っている。それによって前方への押し付けも小さくなり、大きな力を受ける乗客の比率も小さくなっている。

#### レイアウトの違いによる比較

次に減衰力を導入し、70(km/h)で直進走行している鉄道車輛に対して、下図に示す兵庫県南部沖地震の際に神戸海洋気象台で記録された地震の加速度と非常用ブレーキによる負の加速度(4.5km/h/s)を与え、乗客に作用する力と乗客の挙動に関して解析を行った。



Layout 1では、乗客の密度が高い場所や、座席(シート)やつり革をつかんでいる乗客など、ほかの乗客の動きを妨げるものの後ろにいる乗客はさらに後ろの乗客に挟まれることで大きな力を受けている。一方、流れを妨げるもの前方やシート間に立っている乗客はそれほど大きな力を受けていない。

Layout 2に関しては、車輻後方においてLayout 1と同じように、乗客の流れを妨げるものを境に前後で作用する力の大きさが異なっている。車輻中央付近より前方では乗客に作用する力が大きいため、つり革を放してしまう乗客が多くなり、前方にいる乗客にはさらに大きな力が作用している。

#### まとめ

本研究では、楕円形個別要素法を用いた避難行動モデルに、乗客の踏ん張る力を模擬する減衰力などの改良を加えたモデルを構築した。そして都市近郊で最もよく用いられるロングシートタイプの車輻と通勤時に用いられる6ドアタイプの車輻に関して、地震時に非常ブレーキをかけた際の乗客の挙動の検討を行い、初期位置と最大力の関係を分析した。様々な条件下の検討結果からは、車輻前方にいる乗客ほど、または乗客の動きを分断するものと後ろからの乗客に挟まれるような位置にいる乗客ほど大きな力を受けることがわかった。