

地震工学 Earthquake Engineering  
第12回  
人を護る防災対策（負傷者の話）  
—問題の本質の理解と解決のための処方—

今日のキーワード

1. 家具転倒
2. 二項分布と幾何分布
3. 家具転倒領域
4. 室内危険度ゾーニング
5. 室内危険度診断システム
6. リアルタイム地震防災
7. 避難誘導システム
8. 意思決定基準

本日のテーマ：世帯単位の人間防災学

1. 哲学編：  
このテーマを考究することの意味
2. 調査編：  
事実をどのように把握し、データベース化するか
3. 理論編：  
テーマを支える物理モデル・数学モデル
4. 実践編：  
世帯単位での対策の実際

参考資料：北大公開講座配布資料（家庭で取り組む防災マネジメント）

1. 哲学編  
このテーマを考究することの意味

北海道大学

建物被害と人的被害の関係

被害度	0.0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~0.9	0.9~1.0
破壊パターン						
建物被害	倒壊なし			倒壊あり		
人的被害	軽傷、中等症、重症			遅延死、過延死、即死		
対策	空間の質的保存 室内散乱抑制、ライフライン強化			空間の物理的保存 建物耐震化		

人的被害には死および負傷の二つがある。前者は発生メカニズムが異なる。すなわち、詳細な死因調査が必要である。建物内居住者が死ぬのは、地震により建物が倒壊した結果その直下の下敷きとなり圧死するケースが殆どである。一方、負傷者は建物倒壊とは無関係に家具転倒等による室内散乱で発生している。本研究はこの両者を対象とする。

北海道大学

負傷要因

■ 揺れ始め ■ 揺れ最中 ■ 揺れ直後 ■ 揺れ後少して

(十勝沖地震) 負傷割合

負傷要因	揺れ始め	揺れ最中	揺れ直後	揺れ後少して
家具転倒	24.0	43.4	46.2	33.3
家具転倒	60.0	23.0	29.2	11.1
家具転倒	12.0	10.1	14.2	5.0
家具転倒	1.1	1.1	1.1	1.1
家具転倒	1.0	1.0	1.0	1.0
家具転倒	14.7	26.7	10.0	2.7
家具転倒	7.0	1.0	1.0	1.0

家具固定をすれば解決する問題と思われるが...

北海道大学

2. 調査編  
事実をどのように把握し、データベース化するか

北海道大学

2. 室内で発生する負傷者に関する研究  
～世帯・居室単位での実態調査～

- 地震時の建物被害調査
- 地震時の周辺環境調査
- 地震時の負傷・人間行動のトレース
- 地震後の対策・教訓聞き取り



ヒアリング      実測調査      アンケート



・ 調査員構成(3人で1チーム)

調査員	用種	役割
責任員	調査世帯票、負傷状況票、調査調査票	住人とのやり取り
描画員	平面図書き取り票	図面作成、被害状況の描画
記録員	時間行動票	図面作成補佐、被害状況の記録

・ 調査の流れ(1世帯あたり1～2時間)

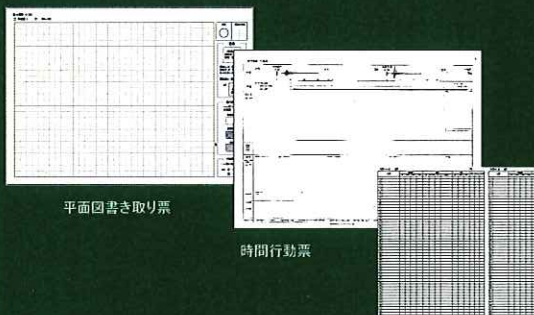
調査員	名前	役割	準備	ヒアリング	終了
責任員	〇〇	調査世帯票、負傷状況票、調査調査票、責任員記入票	調査世帯票、負傷状況票、責任員記入票	本員・他員と話し合い、調査世帯の負傷・被害の有無、家具の移動・転倒状況	調査世帯の負傷・被害の有無、家具の移動・転倒状況、調査世帯の負傷・被害の有無、家具の移動・転倒状況
描画員	〇〇	平面図書き取り票	調査世帯の負傷・被害の有無、家具の移動・転倒状況	調査世帯の負傷・被害の有無、家具の移動・転倒状況	
記録員	〇〇	時間行動票	調査世帯の負傷・被害の有無、家具の移動・転倒状況	調査世帯の負傷・被害の有無、家具の移動・転倒状況	

アンケート調査票



耐震診断・建物被害調査票      家族負傷・行動調査票      アンケート調査票

ヒアリング用調査票



平面図書き取り票      時間行動票      家具リスト

1. 調査世帯調査書

- 建物形式
- 簡易耐震診断
- 地震後の補修
- 対策状況の変化



2～3. 負傷状況票

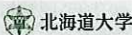
- 家族構成
- 本震・余震毎の建物被害
- 本震・余震毎の人的被害
- 本震時の負傷状況
- 余震時の負傷状況





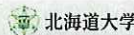
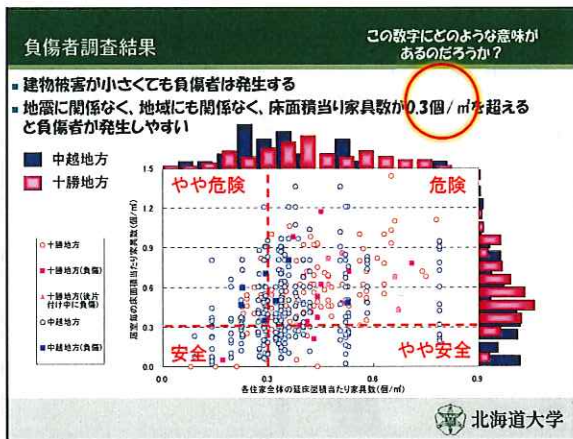
### 3.1 理論編

テーマを支える物理モデル・数学モデル



### 理論編(1)

#### 二項分布と超幾何分布





### 負傷確率 $p$ と確率関数

- 閉空間に1人の場合  
負傷確率 $p$ =家具転倒落下領域率 $Rtr$
- 複数人の場合  
各人の $p_i=Rtr$ ならば、二項分布でモデル化できる  
各人の $p_i \neq Rtr$ ならば、超幾何分布でモデル化できる

各人の存在は独立。同エリアの共有化、居住高密度：住宅

各人の存在は従属。同エリアの共有不可、居住高密度：集会所



第3章 22


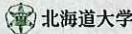
#### 二項分布モデル ( $p_i=Rtr$ )

各人の結果は「負傷する、負傷しない」の2種類  
各人の負傷確率 $p_i$ は互いに等しい(= $Rtr$ )  
各人の負傷発生は互いに独立

このとき、 $n$ 人中、 $k$ 人負傷する確率は

$$P_{bin}[X=k] = {}_n C_k Rtr^k (1-Rtr)^{n-k} \quad (k=0,1,\dots,n)$$

$n$ : 閉空間内(静止)人数 [人]  
 $k$ : 負傷者数 [人]  
 $Rtr$ : 閉空間の家具転倒落下領域率  
 ${}_n C_k = \frac{n!}{k!(n-k)!}$

#### 超幾何分布モデル ( $p_i \neq Rtr$ )


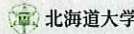
人間の占有面積を考慮すると、実際には $p_i \neq Rtr$ となる

閉空間を単位平面で $N$ 分割し、そのうち $M$ 個が負傷(=  $N-M$ 個が負傷しない)としたとき、 $n$ 個中、 $k$ 個の負傷を選ぶ確率、すなわち、単位平面を人間1人の占有面積とすると、 $n$ 人中、 $k$ 人負傷となる確率は

$$P_{hyp}[X=k] = \frac{{}_M C_k {}_{N-M} C_{n-k}}{{}_N C_n} \quad (\max(0, n+M-N) \leq k \leq \min(n, M))$$

$N$ : 閉空間の単位平面での分割数 [個]  
 $M$ : 家具転倒落下となる単位平面数 [個]  
 $n$ : 閉空間内(静止)人数 [人]  
 $k$ : 負傷者数 [人]

・単位平面の設定に任意性が残り、評価式としては二項分布の方が扱い易い

### 超幾何分布の二項近似条件

一般的には、 $N \geq 10n$  で二項近似可能 → 室内問題へ応用  
**[単位平面サイズの決定]**  
 単位平面サイズ=人間1人の占有面積 $S_h$  と仮定  
 限界人間密度 $Hd_{max} = 17 \text{人/m}^2$  ( $S_h \approx 25 \times 25 \text{cm}^2$ ) とすると、床面積 $S$ のとき近似条件は、  

$$N = 17S \geq 10n \quad \therefore n/S \leq 1.7$$
 ここで、 $n/S = Hd$  (人間密度) より  
 $Hd \leq 1.7 \text{人/m}^2$  で二項近似可能となる

北海道大学

### 二項分布モデルの適用範囲 (人間密度 $Hd$ からの検討)

用途別	人間密度 [人/m <sup>2</sup> ]
劇場、映画館、公会堂の高床部分等	2.0
一般の集合室、宴会場等	1.5
遊藝場、キヤルレー、大衆食堂、百貨店の特売場、雑居等	1.0
レストラン、教室、倉庫等、百貨店の中食売場等	0.75
図書館、一般図書、地下道部分、百貨店の一般売場等	0.5
事務所、大宴会、宴会場、旅館、一般住宅等	0.25
小売店、コンビニ、共同住宅、診療所、ホテルの客室部分等	0.1
一般住宅等	0.05
地下(最大深部人員算出時)	3.0

被害調査世帯・居室の $Hd$ 分布  
 出典：日本建築センター(1981)

一般住宅では $Hd \leq 1.7$ より、二項近似可能

北海道大学

### 理論編(3) 簡易診断方法と安全化規準

### 簡易負傷危険度評価指標

～家具密度 $Fd$ と転倒領域率 $Rtr$ の関係式～

- 家具密度 $Fd$  [個/m<sup>2</sup>]  
床面積 $S$ , 家具数 $m$ のとき  

$$Fd = m/S$$
- 潜在的家具転倒落下領域率 $Rtr_{potential}$ (転倒・落下する家具は全て転倒・落下した場合の領域率)と家具密度 $Fd$ の関係  

$$Rtr_{potential} \approx 0.8897 \cdot Fd$$
- 上式を以下の負傷発生確率式に代入  

$$P[X=k] \approx {}_n C_k Rtr^k (1-Rtr)^{n-k}$$
- 以下を得る  

$$P_{r-tr}[X=k] \approx {}_n C_k (0.890 \cdot Fd_{room})^k (1 - 0.890 \cdot Fd_{room})^{n-k}$$

北海道大学

### 負傷頭在化家具密度

～世帯人数⇒持ち家具数⇒負傷者発生60%確率⇒家具密度推定～

$Fd_{room} = 0.42$   
 $Fd_{dwell} = 0.24$   
 $Fd = 0.54 \cdot x^{-0.6115}$

世帯人数	平均世帯人数	平均世帯人数
1.47人	1.47人	2.70人
家具頭在化家	(n=14) 世帯平均家具数	(n=11) 世帯平均家具数

北海道大学

### 室内安全化基準(家具配置密度)の提案

二項分布モデルと日本の平均世帯統計値から求めた家具配置密度閾値

負傷率6.1%  
 負傷率11.8% (危険空間)  
 安全空間  
 負傷率2.6%  
 負傷率2.3%  
 $Fd_{room} = 0.42 \text{個/m}^2$

注：家具に移動するだけで不適切な行動による負傷

二項分布による室内負傷発生モデルにより、室内の安全空間確保のための家具配置密度が求められた。原則全体では0.42個/m<sup>2</sup>、室内単位では0.24個/m<sup>2</sup>以上家具が配置された空間では、負傷発生確率が50%を超える、室内安全化基準として、0.3個/m<sup>2</sup>を提案する。

北海道大学









### 診断法3：震度5.9に対する診断

①Ishiyamaの判別式により家具は全て転倒すると判断される

②転倒領域率Rtrを計算し、以下の式に代入し

$$P[X = k] = C_n Rtr^k (1 - Rtr)^{n-k} \quad (k = 0, 1, \dots, n)$$

③負傷人数別の発生確率を得る

転倒領域率Rtr=0.29 P[X=0]=50.2% P[X=1]=41.3% P[X=2]=8.5%  
→負傷者ゼロ、又は一人の発生確率が五分五分。

### 診断法4：震度5.9に対する診断

①金子の家具転倒確率により転倒領域別の発生確率Pを得る

②以下の式に代入し、

$$P[X = k] = \sum_{j=1}^n \{P(Rtr_j), C_n Rtr_j^k (1 - Rtr_j)^{n-k}\}$$

③負傷人数別の発生確率を得る

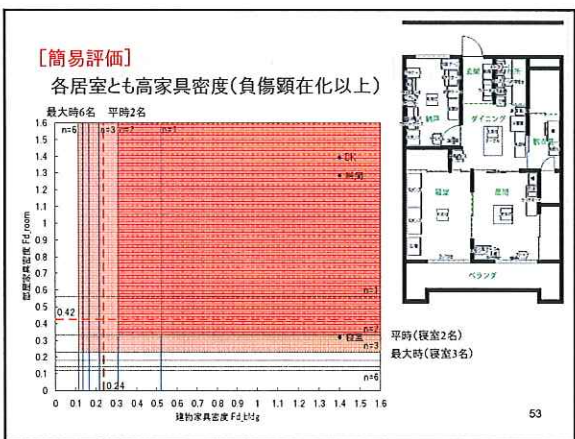
P[X=0]=89.5% P[X=1]=9.7% P[X=2]=0.8%  
→負傷者ゼロの確率が90%。

### 対策応用事例(2) 個別世帯診断法

### 世帯診断と対策効果の評価事例

**【対象】**  
愛知県西尾市・新渡場住宅改善計画  
愛知県西三河建設事務所(川端課長・都市計画委員会幹事)との共同研究

**【建物】**  
「県営・新渡場住宅」  
RC造5階建て  
建築面積≒434㎡  
総床面積≒2124㎡  
1980年建設  
30戸/棟



対策応用事例(3)  
部屋内安全空間の走査  
(散乱シミュレーション：パソコン版)

### 危険度ゾーニング法

$$D_i(x_i) = Prob[Be|x_i] \sum_j [V_j(I) \cdot S_j(x_i) \cdot \{1 - H(I, time; age, gender, mobility, role)\}]$$

ここに  $D_i(x_i)$ : ある一人の居住者の場所  $x_i$  における負傷危険性  
 I: 負傷レベル, 軽傷 at 1-1, 重傷 at 2-2  
 Prob[ ]: ある居住者がその場所  $x_i$  での滞在確率  
 $V_j(I)$ : 家具  $j$  の転倒確率 (被害種別)  
 $S_j(x_i)$ : 家具  $j$  の被害種別, たとえば 家具の被害種別, たとえば  
 $H(I)$ : 居住者の災害回避能力

### Vulnerability Function on Interior Damage

$$D_i(x_i) = Prob[Be|x_i] \sum_j [V_j(I) \cdot S_j(x_i) \cdot \{1 - H(I, time; age, gender, mobility, role)\}]$$

Physical Potential for Evaluation  
 Falling objects  
 Overturn of furniture

JMA scale: 0-7  
 MSK scale: 1-12

Scenario Intensity  
 Probability of light injured  
 Probability of heavy injured

### Supplementary Function for Human Behavior

$$D_i(x_i) = Prob[Be|x_i] \sum_j [V_j(I) \cdot S_j(x_i) \cdot \{1 - H(I, time; age, gender, mobility, role)\}]$$

Behavioral Ability vs age (0, 10, 20, 30, 40, 50, 60 years old)  
 Behavioral Ability vs time (0, 12, 24 hour)

### Boolean Algebra of $S_j(x_i)$

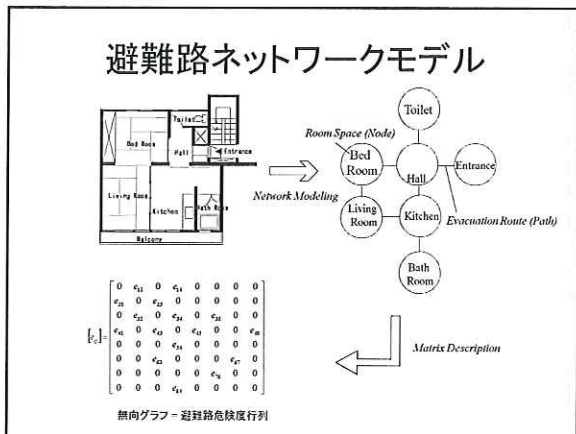
$$D_i(x_i) = Prob[Be|x_i] \sum_j [V_j(I) \cdot S_j(x_i) \cdot \{1 - H(I, time; age, gender, mobility, role)\}]$$

Overturn	Fall	Scatter	Overturn and Scatter
$A = W \cdot H$	$A = x^2, B = \sqrt{W^2 + H^2} \cdot H \cdot H_2$ $B = H_1 \cdot H_2 / 2$	$A = (W \cdot 2) \cdot H \cdot h_1 \cdot w_1 / 2$	$A = (W \cdot 2 \cdot H^2) \cdot H_1 \cdot H_2 / 2$ $B = H_1 / 2$

### Example Data for $Prob[Be|x_i]$

$$D_i(x_i) = Prob[Be|x_i] \sum_j [V_j(I) \cdot S_j(x_i) \cdot \{1 - H(I, time; age, gender, mobility, role)\}]$$

Legend:  
 Activities in the Home (white)  
 Activities at the Workplace (hatched)  
 Activities in Other Buildings (dotted)  
 Activities Outdoors or In Transit (black)



### Equation for Estimating Risk Potential of Evacuation Route

$$F_i = \min_{route} \sum \{e_{ij}\}$$

where,  $F_i$ : The risk potential of evacuation route from location  $i$  to the outdoors  
 $e_{ij}$ : The time needed to move from location  $i$  to location  $j$   
 $e_{ij} = [Distance \text{ from } i \text{ to } j] \times [Obstacles] / [Walking \text{ speed}]$   
 Obstacles =  $F$ [Furniture-overturned, Stairs, Corridors, Fire, Doors, Emergency exit]

### Risk Estimation for Typical Japanese House #1

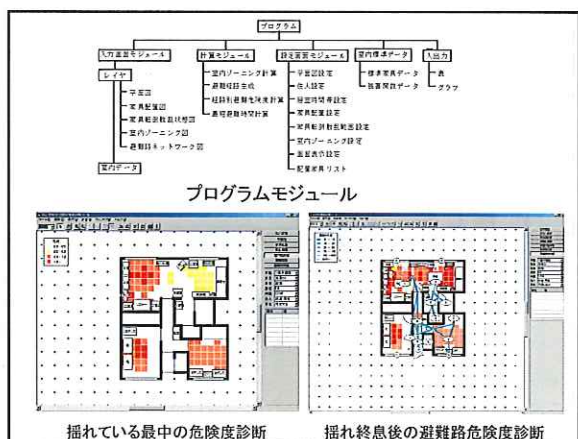
Start	End	Intensity in JMA Scale			
		0	4	5-	6-
1 Bed Room	16 Door in B.R.	1.9	1.9	3.1	4.5
2 Living	22 Door in L.R.	1.6	1.6	6.2	7.7
22 Door in L.R.	3 Kitchen	1.6	1.6	2.7	5.7
3 Kitchen	15 Door in Kitchen	2.3	2.3	6.2	19.5
15 Door in Kitchen	9 Hall	1.0	1.0	1.0	1.0
9 Hall	8 Entrance	0.6	0.6	1.0	2.2

Time needed to move from point to point [seconds]

### Risk Estimation for Typical Japanese House #2

Start	Seismic Intensity in the JMA Scale					
	0	4	5-	5+	6-	6+
1 Living	7.4	7.4	10.4	16.2	22.2	22.9
2 D.K	7.2	7.2	10.0	9999.9	9999.9	9999.9
3 Utility	9.1	9.1	12.2	9999.9	9999.9	9999.9
4 Bath	9.6	9.6	12.7	9999.9	9999.9	9999.9
5 B.R.	4.6	4.6	5.0	9999.9	9999.9	9999.9
6 B.R.	4.4	4.4	7.3	14.8	19.9	23.4
11 Corridor	2.1	2.1	2.2	3.4	3.8	4.1
8 Entrance	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7

Time needed to evacuate to outdoor [seconds]



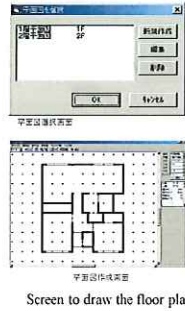
### Software for Diagnosis #1

Menu screen

Procedures

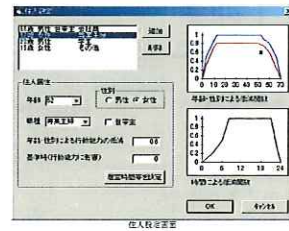
1. Draw the floor plan of the house
2. Input the inhabitant's Information
3. Arrangement of furniture
4. Input the seismic information
5. Estimate the risk by the indoor-zoning method
6. Estimate the risk by the refuge route network method

### Software for Diagnosis #2



Screen to draw the floor plan

### Software for Diagnosis #3



Screen to input the Information about inhabitants

### Software for Diagnosis #4



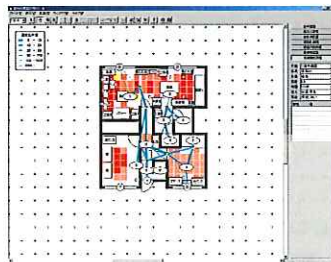
Screen for furniture arrangement

### Software for Diagnosis #5



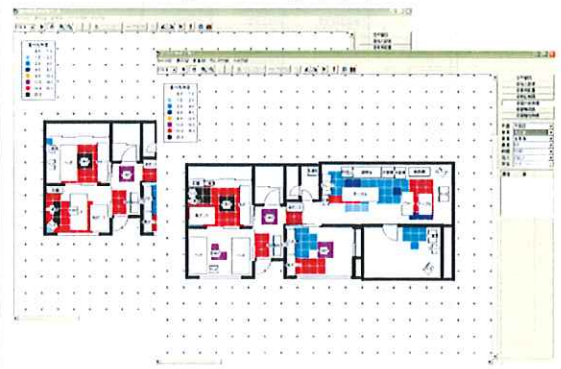
Display of the results on risk potential of dwelling space suffered from furniture-overturned during the sway.

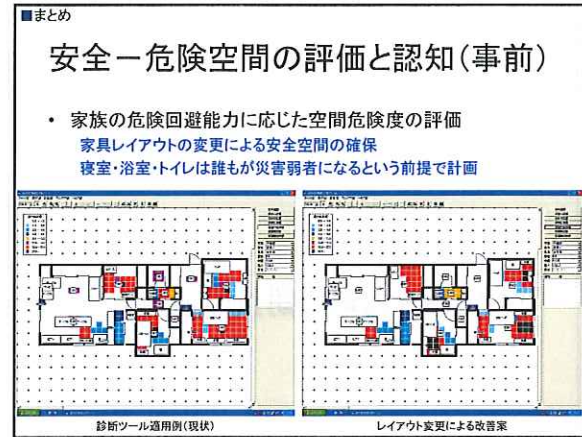
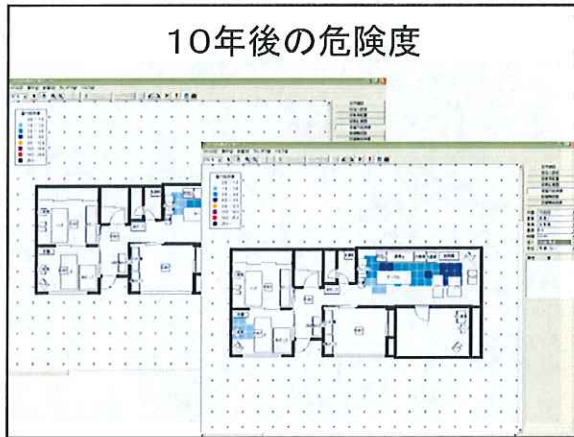
### Software for Diagnosis #6



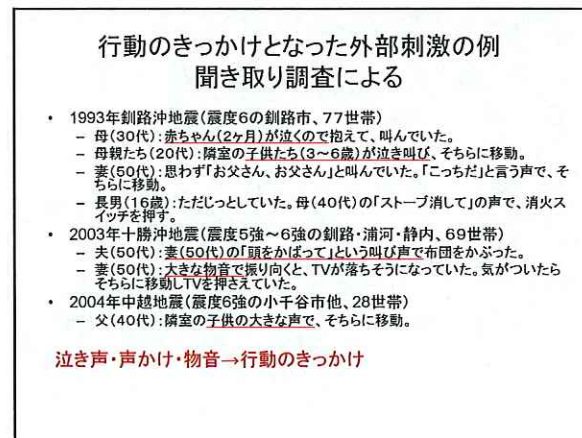
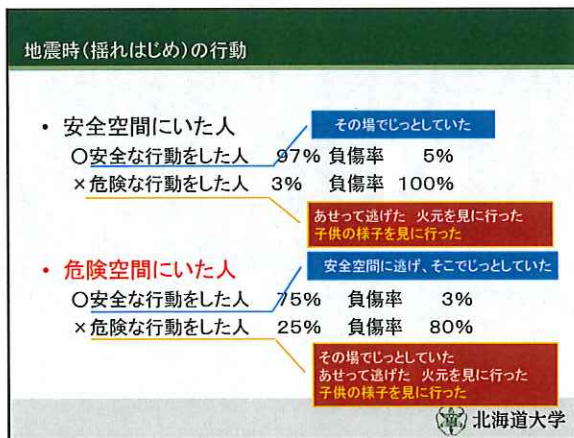
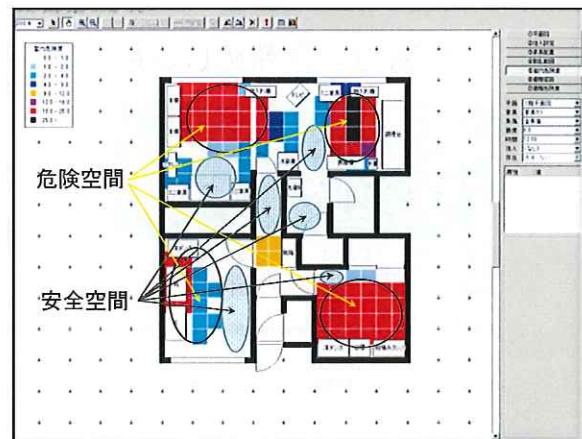
Display of the results on risk potential of evacuation routes to outdoors immediately after the sway stops

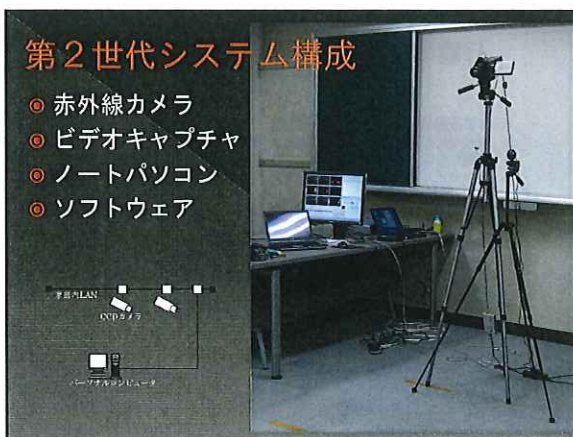
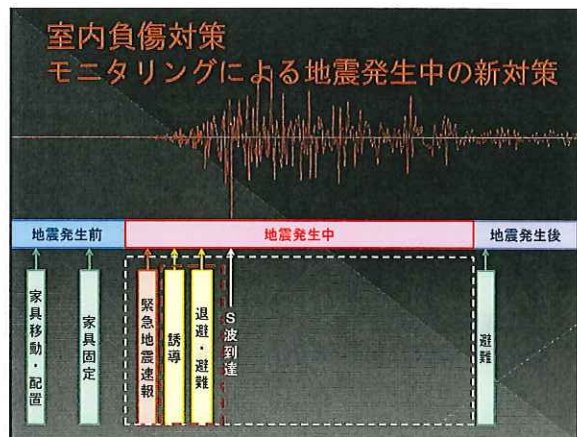
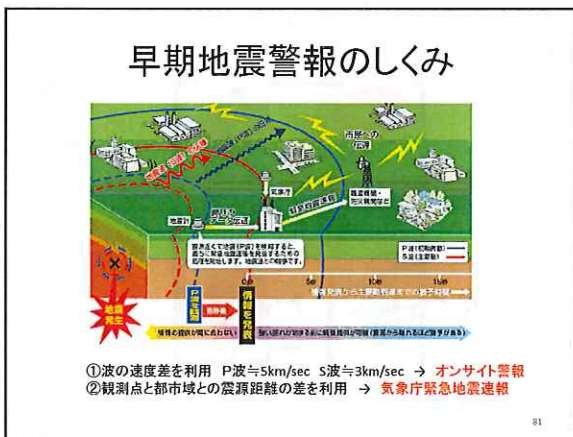
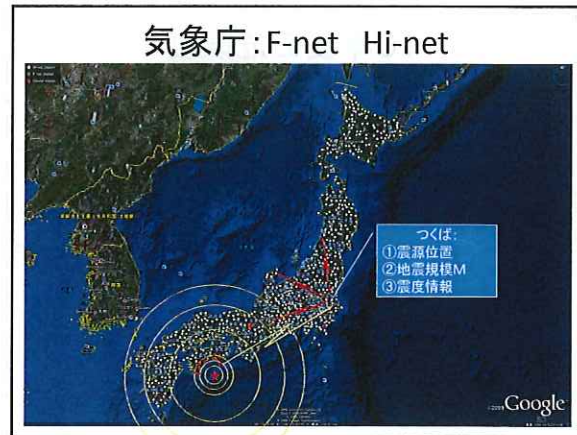
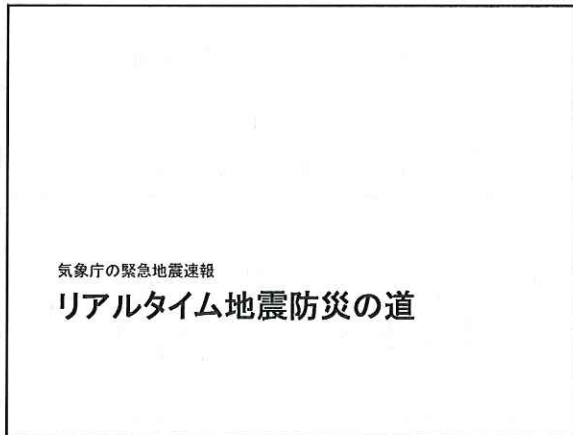
### 寝室の改善案

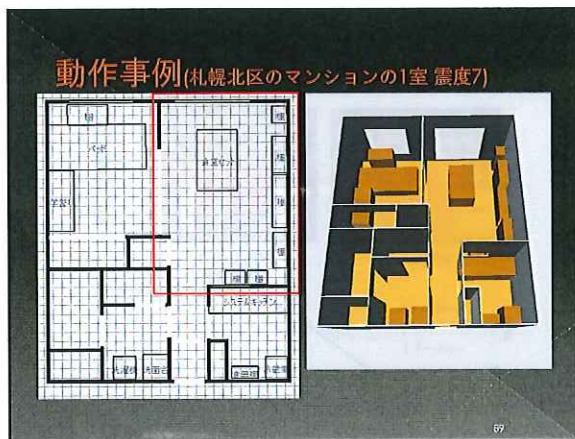
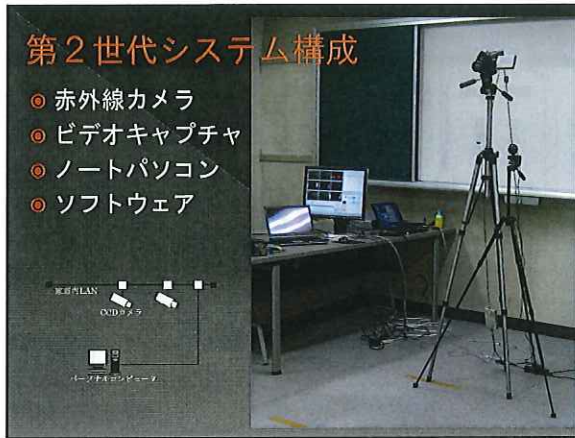


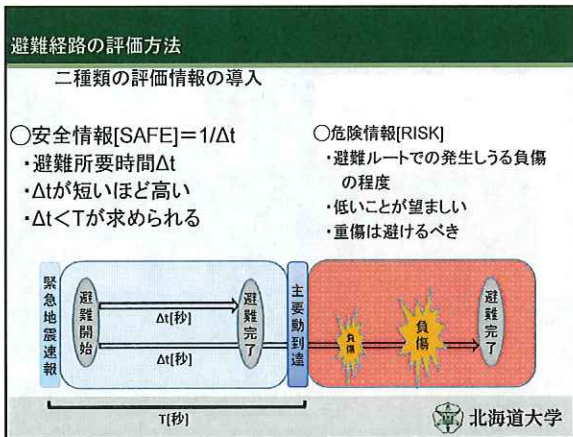
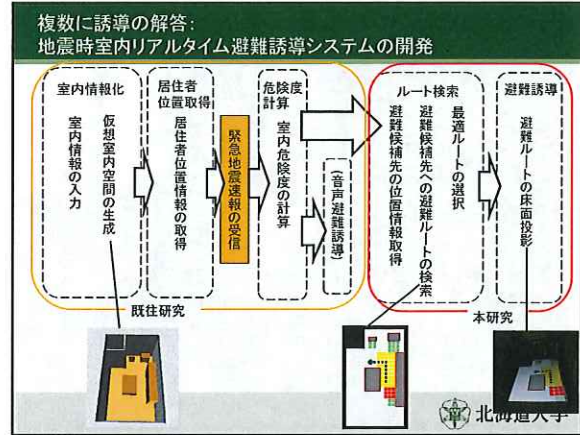
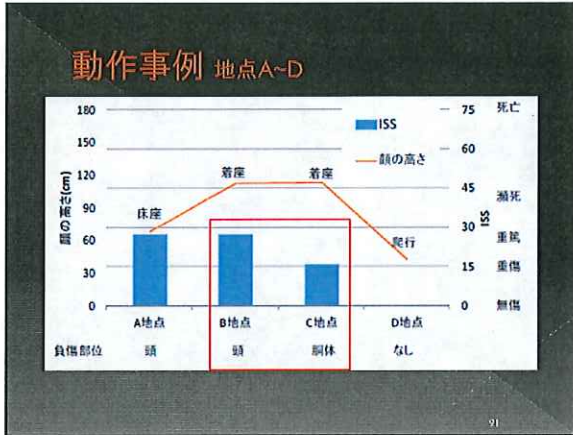


対策応用事例(5)  
室内モニタリングシステムへの展開





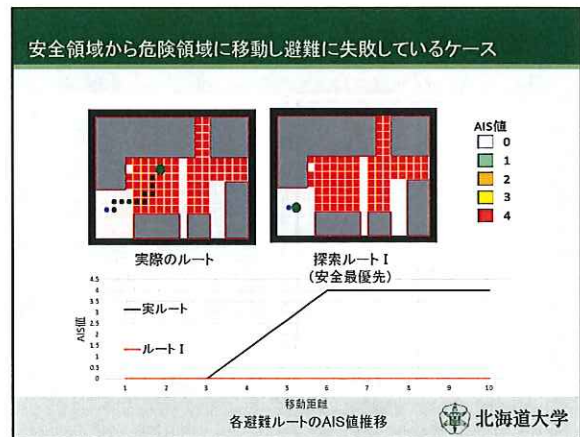
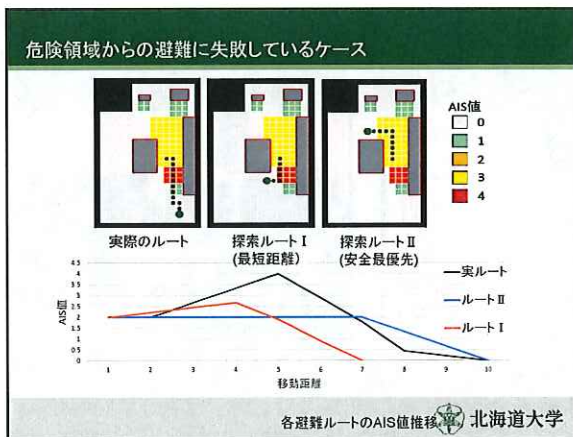




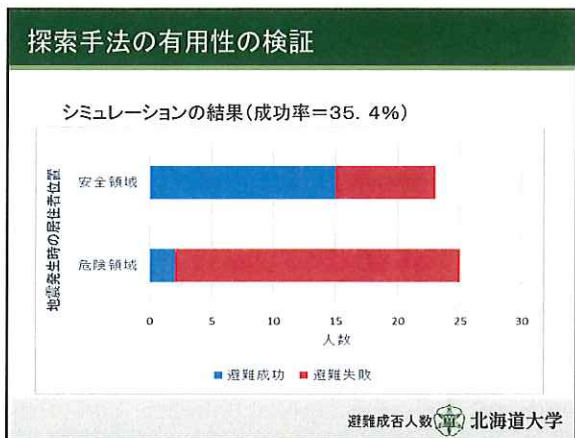
### 避難経路の探索

#### 意思決定基準に照らした避難戦略

	避難戦略	意思決定基準
避難時間優先	A 最短距離の避難 (脱出時間最優先の避難)	マキシマックス基準 $Max[SAFE] \rightarrow max$
	B ケガの限度を設定した最短距離の避難	マキシミン基準 $[SAFE / Fix[RISK]] \rightarrow max$
負傷回避優先	C ルート上の最大危険度を最小にする避難 (安全最優先の避難)	ミニマックス基準 I $Max[RISK] \rightarrow min$
	D ルートの総危険度を最小にする避難	ミニマックス基準 II $\sum[RISK] \rightarrow min$
	E ルートの平均危険度を最小にする避難	ラプラス基準 $Ave[RISK] \rightarrow min$







## 人的被害ということ

- 死者を発生させる要因
- 負傷者を発生させる要因
  1. 家具固定に頼りすぎる無策
  2. 揺れている最中の室内散乱(家具転倒)
  3. 揺れている最中の不適切な移動

安全空間の事前創出(家具固定+家具配置計画)  
危険空間からの早期脱出  
安全空間での静止 ← 怪我をしないためには  
(室内空間+住人)モニタリング と 避難誘導