

地震工学 Earthquake Engineering

第11回

人を護る防災対策（死者の話）
— 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. 国の防災戦略

2. 国土強靱化基本法

3. 致死率関数

4. 生存率関数

5. 死者発生モデル

6. ベイズ統計学

7. トリアージ

8. SAR

2

国の災害対策に関する動き

I 防災戦略の策定

II 国土強靱化

2004年7月28日中央防災会議報告・承認

地方公共団体に対して「地域目標」の策定を要請

減災目標

人的被害・経済被害に関する具体的目標策定要請

たとえば、今後 対象期間 で 対象地震 による人的被害を 具体値 させる。

10年間

東南海・南海地震

東海地震

首都直下地震

被害想定

半減

住宅耐震化

津波ハザードマップ作成支援

津波海岸保全施設整備

具体的対策

北海道大学

3

国の災害対策に関する動き

I 防災戦略の策定

II 国土強靱化

2014年最上位のアンブレラ計画として成立

国土強靱化基本法

平時/災害時における強靱な国土をソフトとハードの対策で実現

国土強靱化地域計画

災害対策基本法

1961年 法第100条

防災基本計画

地域計画の指針

都道府県

地域防災計画

都道府県の対応マニュアル

市町村

地域防災計画

市町村の対応マニュアル

脆弱性評価

手法

リスクを特定、分析

目標に照らし脆弱性を特定

脆弱性評価、対応策の検討

重点化・優先順位を付け実施

結果の評価

内閣府国土強靱化推進室「国土強靱化とは」パンフレットより

北海道大学

(1)方法論の問題点

・相関モデルの危うさ⇒因果モデルの重要性

・入手困難なデータの問題⇒主観確率（ベイズの方法）で

・棟単位死傷確率評価モデルの提案

現状における人的被害推定式
～入出力モデル～

入力

建物被害数

人的被害発生モデル

出力

人的被害（死者・負傷者）数

単なる重回帰式（相関モデル）

ハザードマップ

被害率関数

地域被害率

全壊率 1.2%

河角式

致死率関数

河角式

致死率関数

河角式

致死率関数

河角式

河角式：建物被害数と死者数との関係 → Lethality ratio (致死率)

$D = \alpha \times H^\beta$

$I = \gamma \times D$

D: 死者数[人] H: 被害建物数[棟] $\alpha=0.01$ $\beta=1.3$

I: 負傷者数[人] $\gamma \approx 10 \sim 100$

その他の致死率関数

100,000

10,000

1,000

100

10

1

死者数

10

100

1,000

10,000

100,000

半壊以上の建物被害数 (≧D3)

1/1

1/10

1/100

河角式

無補強組積造

補強組積造

木造軸組積造

木造軸組（日本）

鉄筋コンクリート造

鉄筋コンクリート造（阪神大震災）

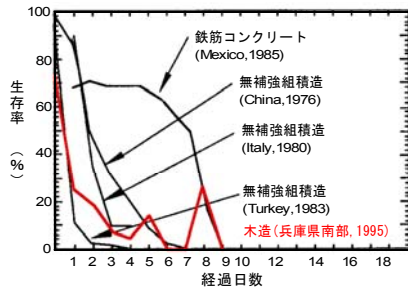
淡路島・神戸（阪神大震災）

補強組積造

木造軸組

致死率関数（危険性） → 補強組積造 < 木造軸組造 < 鉄筋コンクリート造

もう一つの関数：生存率関数



生存率関数(安全性) → 鉄筋コンクリート造 > 無補強組積造 ≒ 木造軸組造

矛盾する2つのデータ

- 致死率関数 → 鉄筋コンクリート造が危険
- 生存率関数 → 組積造が危険

I. 合理的に説明するモデルが必要

相関モデル → 因果モデルへ

II. モデル化の意味(利用法)

- 被害予測のツール
- 死者発生制御のための対策意思決定ツール:
パラメータスタディ

9

被害想定手法

http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku_wg/

3. 人的被害

3.1 建築物による被害

3.2 建築物以外での被害

3.3 避難場所での被害

3.4 避難経路での被害

3.5 避難先での被害

3.6 避難先での被害

3.7 避難先での被害

3.8 避難先での被害

3.9 避難先での被害

3.10 避難先での被害

3.11 避難先での被害

3.12 避難先での被害

3.13 避難先での被害

3.14 避難先での被害

3.15 避難先での被害

3.16 避難先での被害

3.17 避難先での被害

3.18 避難先での被害

3.19 避難先での被害

3.20 避難先での被害

3.21 避難先での被害

3.22 避難先での被害

3.23 避難先での被害

3.24 避難先での被害

3.25 避難先での被害

3.26 避難先での被害

3.27 避難先での被害

3.28 避難先での被害

3.29 避難先での被害

3.30 避難先での被害

3.31 避難先での被害

3.32 避難先での被害

3.33 避難先での被害

3.34 避難先での被害

3.35 避難先での被害

3.36 避難先での被害

3.37 避難先での被害

3.38 避難先での被害

3.39 避難先での被害

3.40 避難先での被害

3.41 避難先での被害

3.42 避難先での被害

3.43 避難先での被害

3.44 避難先での被害

3.45 避難先での被害

3.46 避難先での被害

3.47 避難先での被害

3.48 避難先での被害

3.49 避難先での被害

3.50 避難先での被害

3.51 避難先での被害

3.52 避難先での被害

3.53 避難先での被害

3.54 避難先での被害

3.55 避難先での被害

3.56 避難先での被害

3.57 避難先での被害

3.58 避難先での被害

3.59 避難先での被害

3.60 避難先での被害

3.61 避難先での被害

3.62 避難先での被害

3.63 避難先での被害

3.64 避難先での被害

3.65 避難先での被害

3.66 避難先での被害

3.67 避難先での被害

3.68 避難先での被害

3.69 避難先での被害

3.70 避難先での被害

3.71 避難先での被害

3.72 避難先での被害

3.73 避難先での被害

3.74 避難先での被害

3.75 避難先での被害

3.76 避難先での被害

3.77 避難先での被害

3.78 避難先での被害

3.79 避難先での被害

3.80 避難先での被害

3.81 避難先での被害

3.82 避難先での被害

3.83 避難先での被害

3.84 避難先での被害

3.85 避難先での被害

3.86 避難先での被害

3.87 避難先での被害

3.88 避難先での被害

3.89 避難先での被害

3.90 避難先での被害

3.91 避難先での被害

3.92 避難先での被害

3.93 避難先での被害

3.94 避難先での被害

3.95 避難先での被害

3.96 避難先での被害

3.97 避難先での被害

3.98 避難先での被害

3.99 避難先での被害

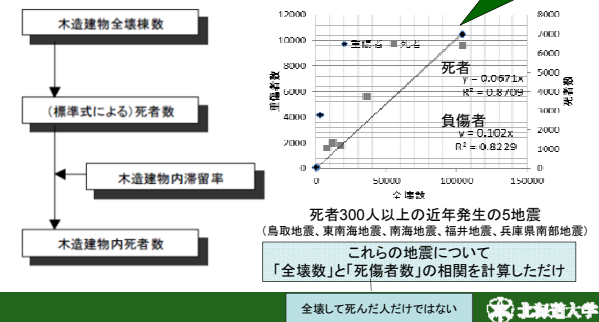
3.100 避難先での被害

北海道大学

10

既往の人的被害推定式：中央防災会議

死者数 = $0.0676 \times$ 木造倒壊数 $\times$ 建物内滞留率
負傷者数 = $0.1 \times$ 木造全壊棟数 $\times$ 建物内滞留率



11

既往式の問題点(1)

死者数 = $0.0676 \times$ 木造倒壊数 $\times$ 建物内滞留率

被害関数は関東地域モデルで地域性の考慮無し

死因は考慮されておらず、単に死者数との関係性のみ

導き出しているのは、予想される棺桶の数

北海道大学

12

既往式の問題点(2)

- データの信頼性なし。
 - 行政(災害対策本部)発表を公表値とする。
 - 病院への搬送データが基本で、全数捕捉はしていない。
 - 被害の定義不明確。
 - 死者(即死～関連死・孤独死)の区別なし。
 - 死因に触れない(成傷器一住家、家具一の区別なし)。
 - 重傷、軽傷に明確な定義なし。

部局が必要被害情報

地震発生時における衛生局の役割

超急性期 災害医療活動支援

急性期 災害医療活動支援

慢性期 災害医療活動支援

予防活動、メンタルケア

必要情報は死者数よりも...
重傷者の数・分布・負傷程度

部局が必要な情報を提供できない!

13

既往式(中央防災会議の方法)の問題点 ～まとめ～

- 中央防災会議の方法は東京都が対象
 - 地域特有の問題に未対応。 ➡ **地域別建物損傷度関数の導入**
- 対策に必要な情報の精査が未熟
 - 各対策部署における評価項目の洗い出し必要。
- 対策の効果評価は不可能
 - 評価式は加害要因と減災要因から構成される必要がある。 ➡ **4に同じ**
- 認識論的不確定性に基づく過誤の見過ごし
 - モデル化の不完全性 ➡ **因果モデル検討**
- 現象論的不確定性に基づく過誤の見過ごし
 - データの不完全性 ➡ **ベイズによる主観確率の導入と更新**

モデルの入出力

入力

死者発生モデル

出力

内閣府既往式:
死者数=0.0676×木造倒壊数×建物内滞留率

単なる相関モデル

係数
0.0676

出力
【死者数】

入力
【木造倒壊数(建物内滞留率)】

因果(メカニズム)モデルへ

建物被害の定義(破壊パターン)

RC被害ランク: 軽微, 小破, 中破, 大破, 倒壊
自治体統計: 一部破壊, 半壊, 全壊
被害尺度: 0.0 to 1.0

死の定義

傷病	時間的余裕	予想される転帰
気道閉塞	5分	心停止 圧迫による死 (即死)
血気胸	数分～数時間	心停止 敗血性ショック (即死)
出血性ショック	1時間	不可逆性ショック 外傷 (遅延死)
圧挫症候群	数時間	腎不全 敗血性 (遅延死)
動脈閉塞	6時間	壊死、切断 (遅延死)
腸穿孔	6時間	腹膜炎、敗血症 (遅延死)
脱水	2～7日	外傷なし Delayed Death (遅延死)

(Pretto, Safar, Watoh 作成)

死に至る時間による死者の分類(災害医学)

絶対被害 (Naked damage) → 顕在化した死 (Total death) → 助けられた死 (Prevented death) → 関連死 (Related death)

建物倒壊による圧死 (Instant death) → 遅延死 (Protracted death) → 間接死 (Delayed death) → 関連死 (Related death)

適切な対策による回避可能性 (Preventable/Not preventable death)

阪神・淡路大震災の死因

窒息 55%, 圧死 12%, 外傷性ショック 8%, 打撲・挫減傷 12%, 焼死・全身火傷 0%, 衰弱・凍死 0%, 不詳 3%, その他 1%

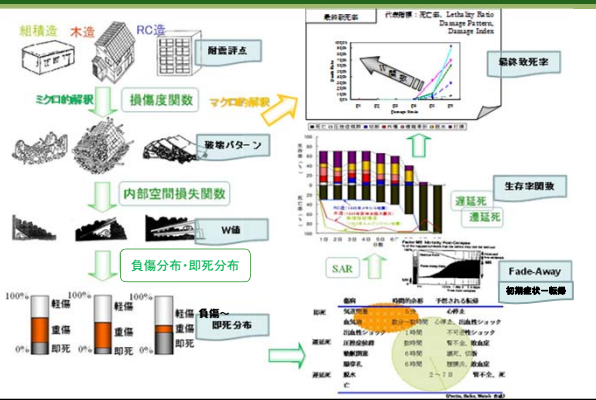
死因	割合
窒息	55.9%
圧死	12.4%
外傷性ショック	2.2%
頭部損傷	3.4%
内臓損傷	1.5%
腰部損傷	1.7%
打撲・挫減傷	8.2%
焼死・全身火傷	12.2%
不詳及び不明	3.2%
臓器不全	0.4%
衰弱・凍死	0.2%
その他	0.7%

建物が破損器(83.3%)
火災が原因(15.4%)

モデル化のアプローチ

- ミクロ的解釈
: 人が死ぬプロセスを追跡
→ 一人を救うための方法
- マクロ的解釈
: 地域集合 (mass casualty) の統計的実用式
→ 防災行政の施策ツール

人が死ぬプロセス(相関モデルを棄てメカニズムモデルへ)
ミクロモデル



マクロモデル

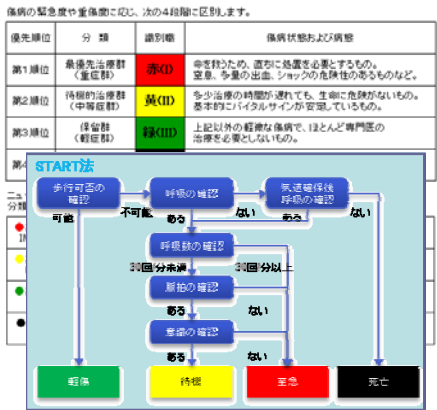


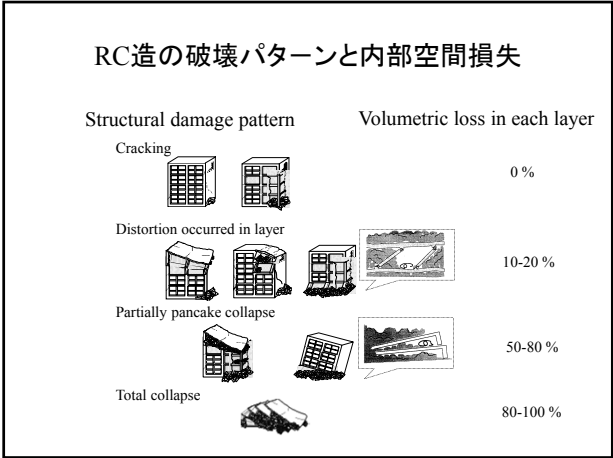
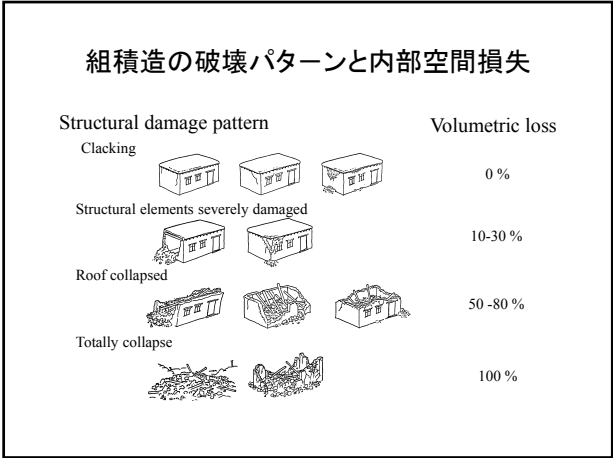
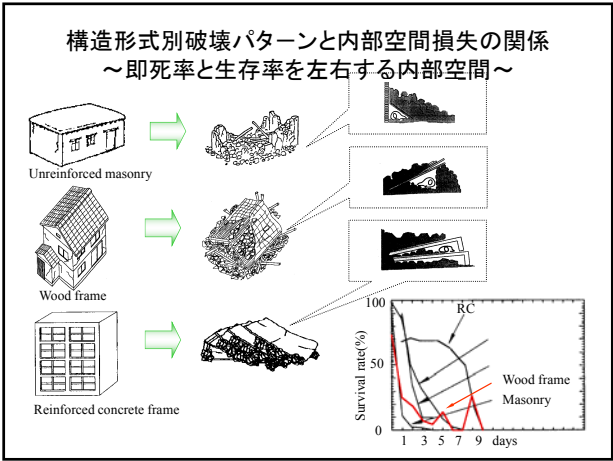
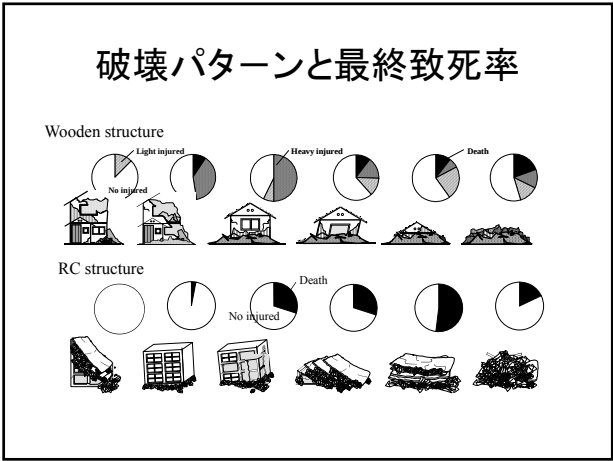
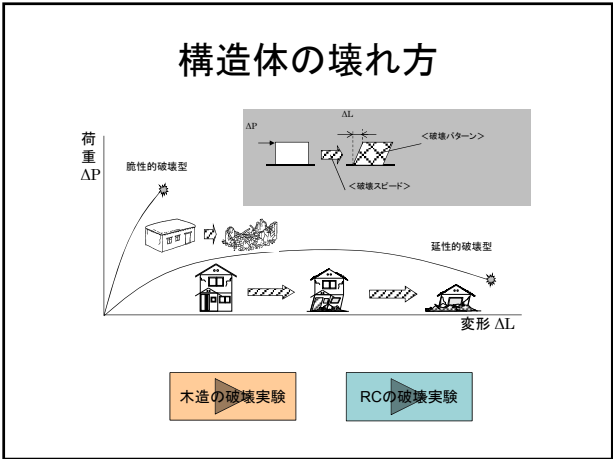
ミクロ的解釈
～一人を救うための方法～

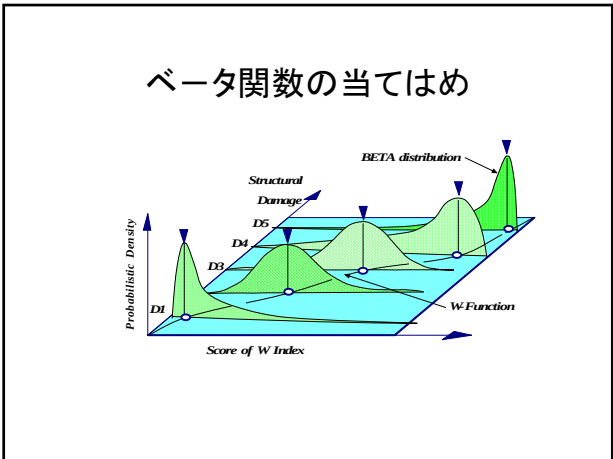
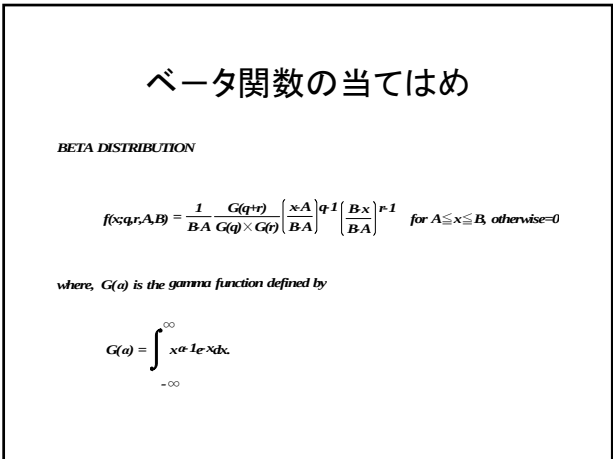
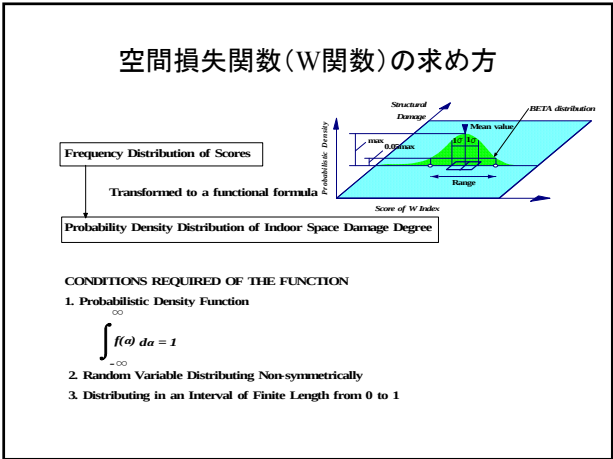
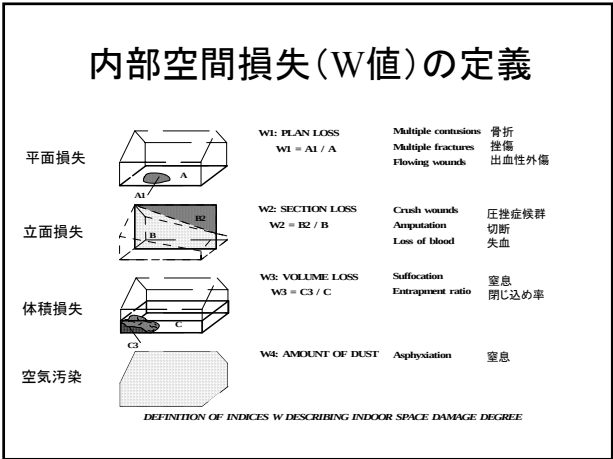
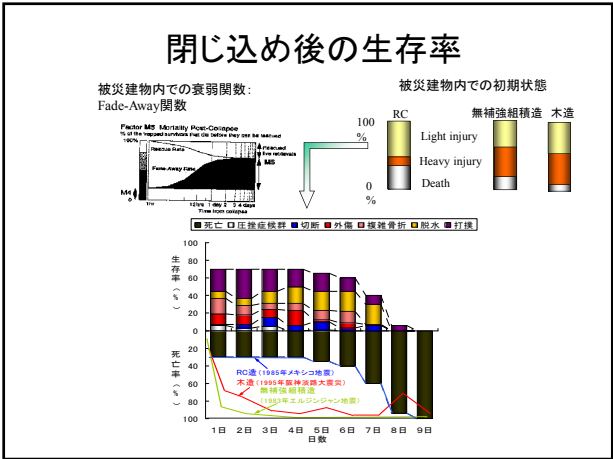
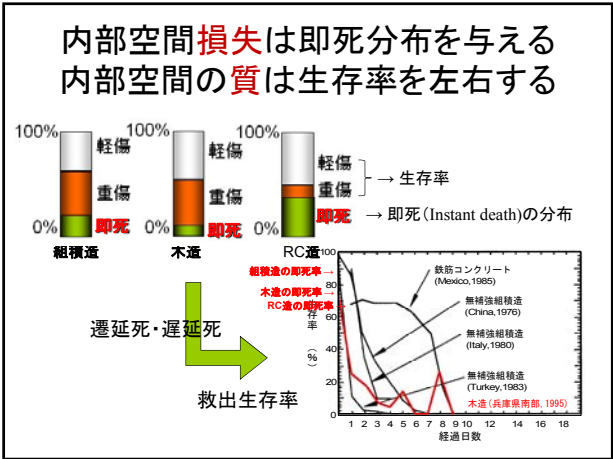
トリアージ・タグ



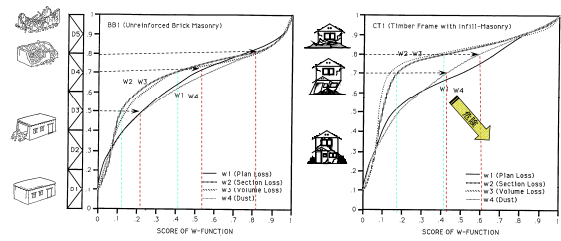
【トリアージの実施基準】



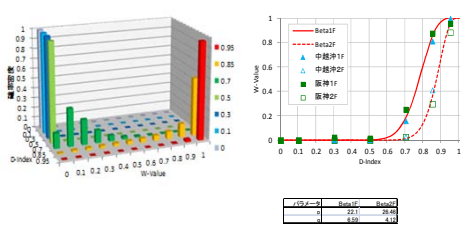




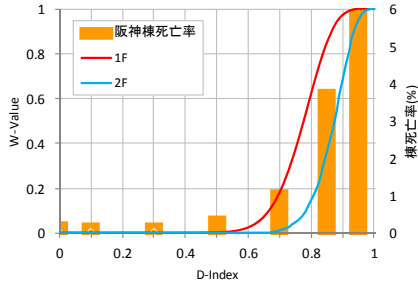
無補強組積造(BB1)と木骨組積造(CT1)のW関数



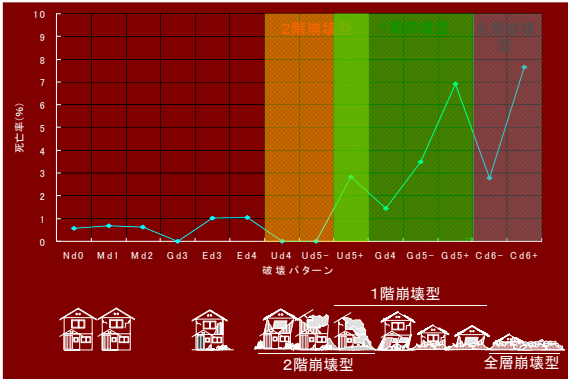
木造軸組(CT2:日本)のW関数



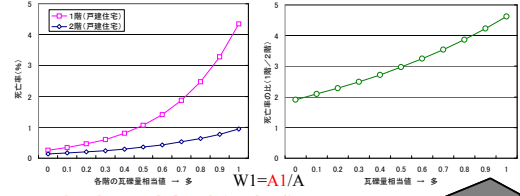
W値(実線)と致死率(棒グラフ)の比較
～W値と最終致死率(死亡率)との関係～



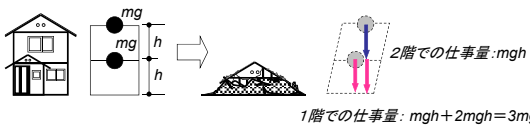
建物損傷度と死亡率



1階と2階の死亡率比較



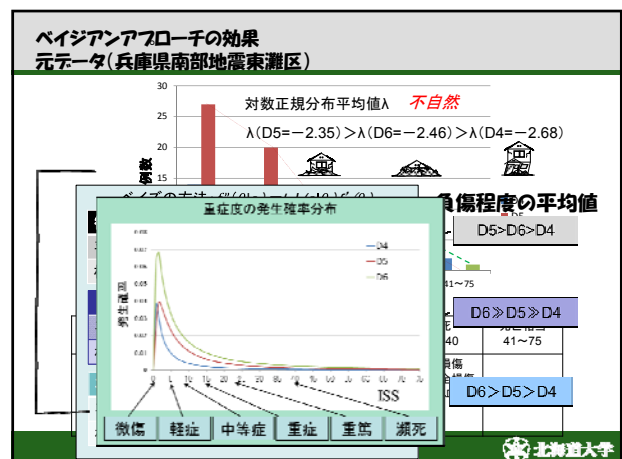
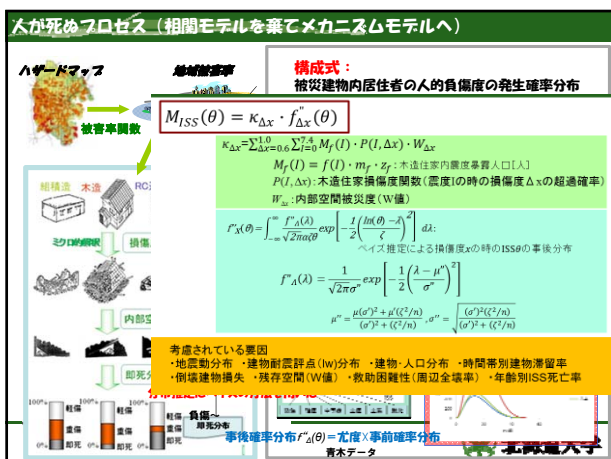
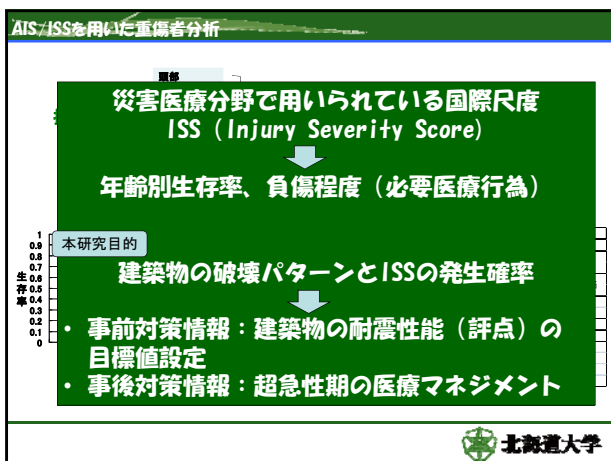
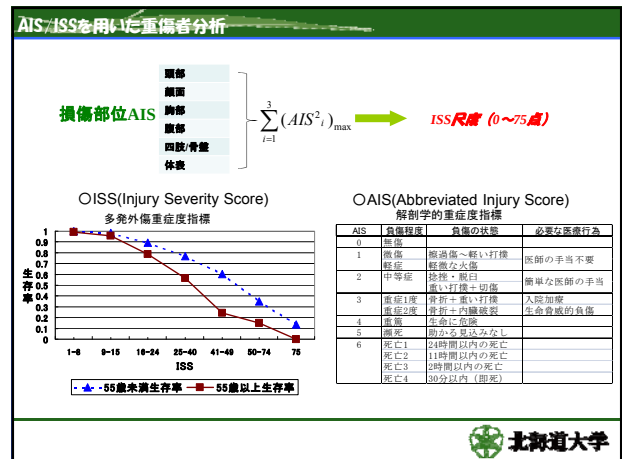
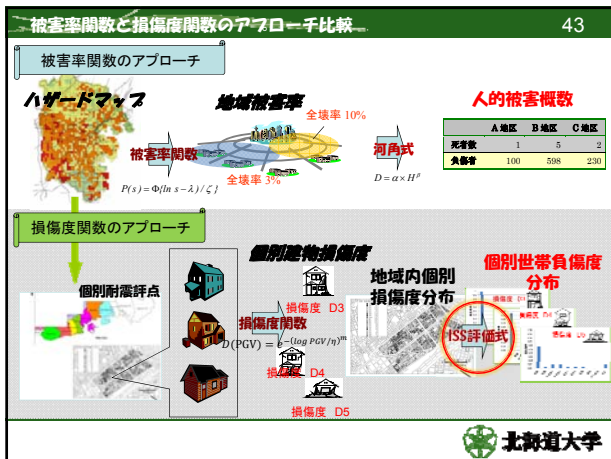
2階の方が安全:死亡率に最大4倍の差
落下物の仕事量(エネルギー量)からの説明:約3倍

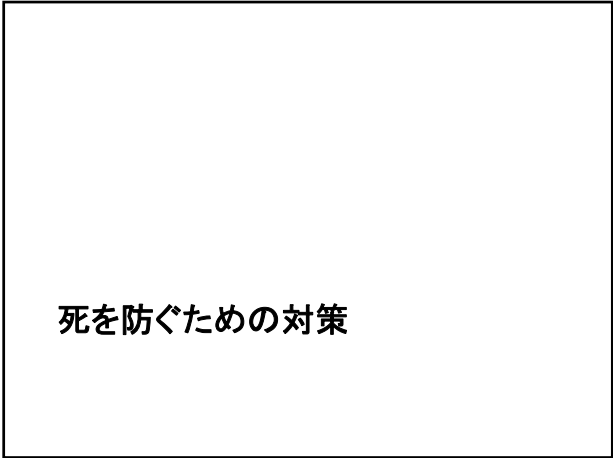
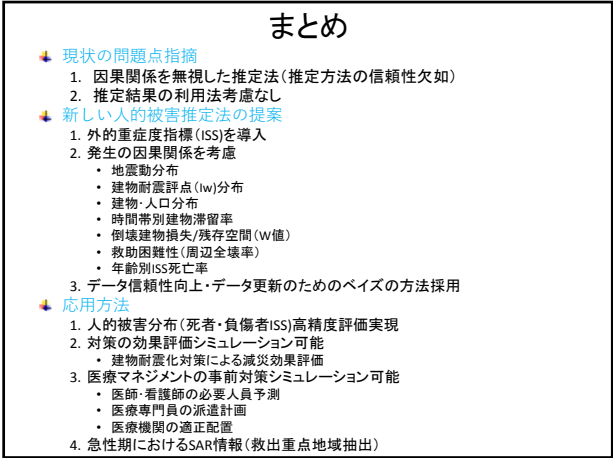
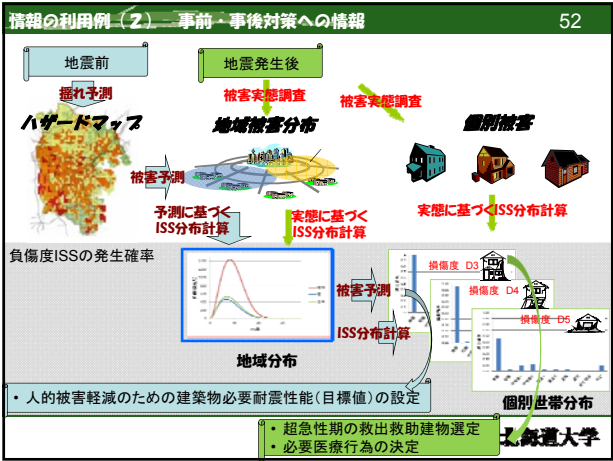
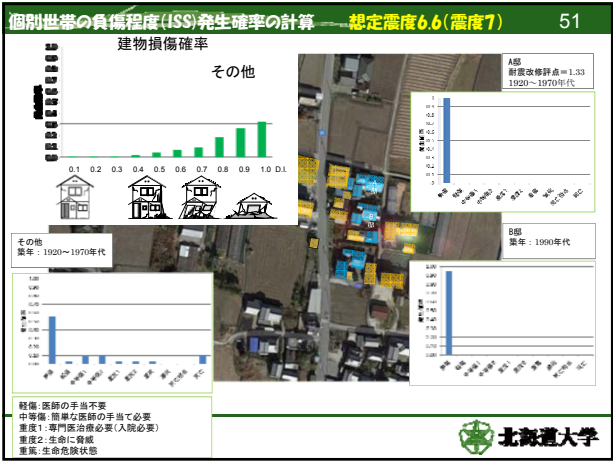
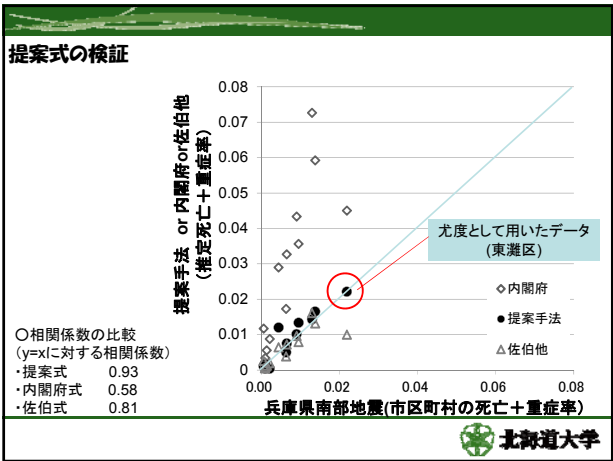
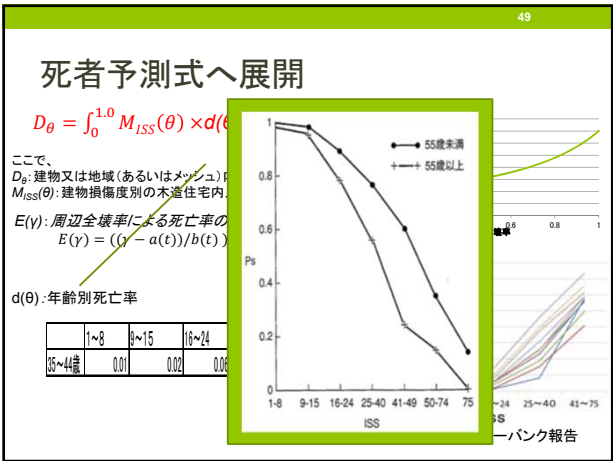


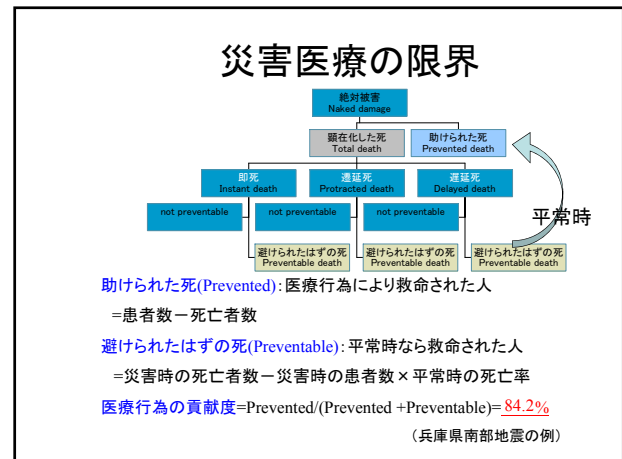
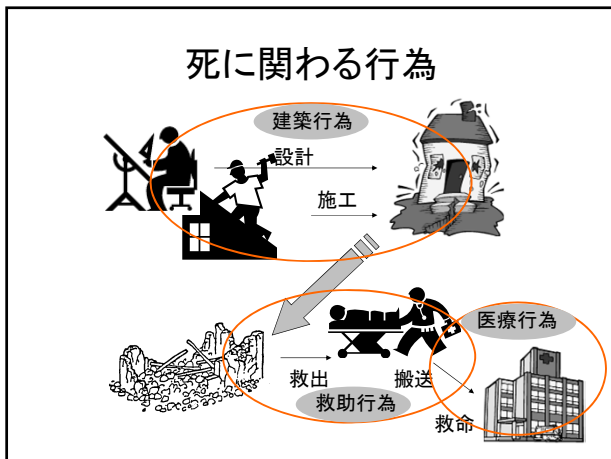
致死率・生存率を制御する関数

A. Coburn & R. Spence (1992)

- $K_{S_b} = D_{S_b} \times [M1 \times M2 \times M3_b \times (M4_b + M5_b(1 - M4_b))]$
 - K_{S_b} : 死者数
 - D_{S_b} : 建物被害数
 - $M1$: 建物用途別1棟あたりの居住者平均人口
 - $M2$: 地震発生時間別の在宅率
 - $M3_b$: 被害建物における在宅者閉じ込め率(負傷率)
 - $M4_b$: 被災直後の死傷者割合(即死分布)
 - $M5_b$: 衰弱関数(Fade-Away関数)
- Lethality Ratio(致死率) = K_{S_b} / D_{S_b}
- 内部空間被災度の写像 $f \rightarrow f: W_i \rightarrow (K_{S_b} / D_{S_b})$







建築行為からの考察 または 災害救助行為からの考察

死に至るメカニズム

- 地震動入力 → 建物の構造破壊
- 建物内部空間損失 → 直撃による死(即死)
- 瓦礫内にトラップ → 遅延死
(内部空間、負傷程度、居住者属性(生命力))
- SARによる救助 → 遅延死
(救出の困難性=救出時間の遅れ)

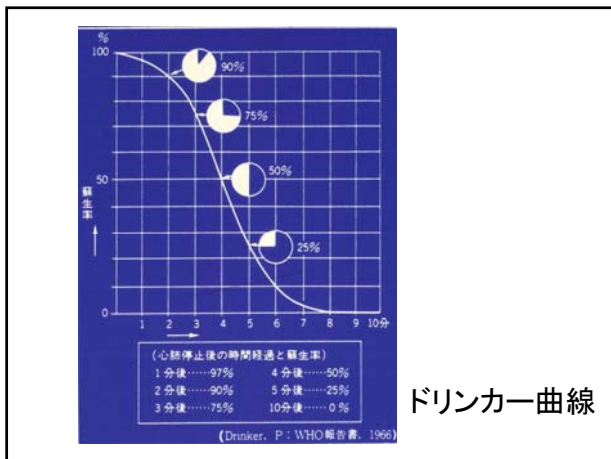
• 3回、死ぬ危険がある。

• 3回、生き延びるための努力の機会がある。

死に至る時間と救出時間

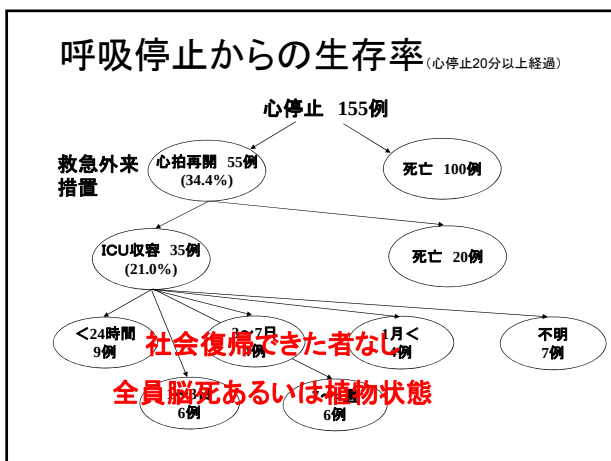
- 死に至る時間 > 救出時間 → 救出成功
- 死に至る時間 < 救出時間 → 救出失敗
- 死に至る時間** ← 建物構造・建物倒壊状況(W関数)
 - 即死 (数分～1時間) ... 救出困難
 - 遅延死 1時間～数日 ... 組積造(トルコ:12時間)木造(日本:24時間)
 - 遅延死 数日～1週間 ... RC造(アルメニア:24時間、メキシコ:1週間、ハイチ:10日間)
- 救出時間** ← 周辺被害状況・建物倒壊状況・動員作業員数
 - 現着時間 5時間 ... 交通事情(周辺被害状況)
 - 探索時間 数分～数日 ... 建物倒壊状況
 - 救出作業時間 6.5[作業時間・作業人数/救出人数] ... 建物倒壊状況
 - 搬出時間 ... 交通事情(周辺被害状況)

救出に要する時間



119番覚知から医療機関収容までの時間

全国平均(1988)	
交通事故	18.9分
一般外傷	20.1分
急病	21.9分
その他	26.0分
平均	22.0分
現場到着までの時間	6.8分



SARに要する時間

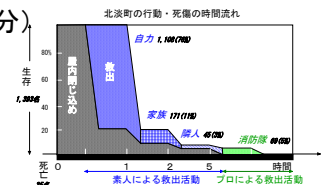
救出に要する時間＝

現場到着時間(救助隊:5時間)

＋探索時間(数分～数日)

＋救出作業時間(6.5[時間・人])

＋搬送時間(22分)



SARに要する時間

救出に要する時間＝

【現着時間】＋【探索時間】＋【救出作業時間】＋【搬送時間】
(5時間) (数分～数日) (6.5時間・人) (22分)

➤ 死に至る時間 (Golden time)

RC造(アルメニア地震)＝24時間
組積造(エルジンジャン地震)＝12時間

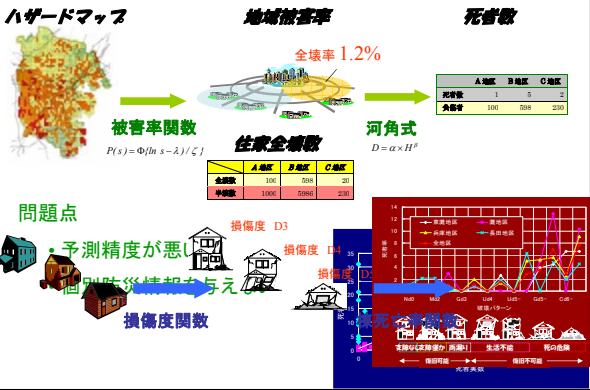
死者を防ぐための対策

- ・救助行為・医療行為による対策には限界がある。
- ・避けられたはずの死 Preventable death を減らすための建築行為への要望
 - － 即死状態では救出・救助は不可能
 - － 層崩壊させない耐震設計が基本
 - － 揺れている最中に脱出できる時間を付与
 - 靱性の高い建築物
 - － 即死を避けるような崩壊メカニズムの導入
 - 低層階の層崩壊を避ける
 - － 遅延死・遅延死を減らす
 - SARの援助→内部空間確保
- ・建築行為に求められる耐震化戦略 → 次節

マクロ的解釈
～防災行政の施策ツール～

個別防災情報のための「地震動入力
－建物耐震評点－棟死亡率」の
3者間関数化の試み

既往の人的被害評価式の問題点

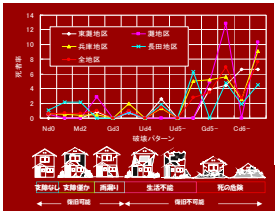


棟死亡率の提案

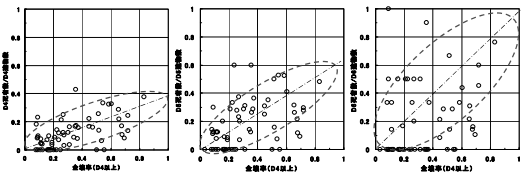
棟死亡率 $D_r = \frac{\text{一棟当たりの死亡者数 } D_n}{\text{地震時在宅者数 } P_n} \times 100$

実際の計算: 行政区を一単位に建物損傷度(x)別の棟死亡率を算定

$$D_r(x) = \frac{\sum_{i=1}^{N_n} D_n(x_i)}{\sum_{i=1}^{N_n} P_n(x_i)} \times 100$$



周辺全壊率と棟死亡率の関係



棟死亡率関数

$$D_r(x, y) = 0.0104e^{6.68x} + 11.0xy^2$$

