地震により建物はどう揺れるか？
―建築物の地震被害と対策―

新宿駅周辺防災対策協議会
新宿駅周辺都市再生緊急整備協議会
2015年度第2回セミナー

2015年9月16日
工学院大学

工学院大学・建築学部・まちづくり学科
久田嘉章

講演概要

- **今後想定すべき様々な地震と地震動**
  首都直下地震、海溝型巨大地震、活断層帯地震
- **被害事例にみる各種建築と耐震対策と教訓**
  1923年関東大震災から2011年東日本大震災
  耐震設計法・対策の変遷、地震動と被害
- **想定首都直下地震と建物の耐震対策**
  ハード対策：建物（耐震・免震・制震）、非構造（天井・間仕切り壁など）、室内の安全対策など
  ソフト対策：火災と震災の違い（避難・自宅待機）、備蓄、教育・訓練、自助・共助と公助

今後想定すべき様々な地震と地震動

地震を正しく恐れ、決して諦めないで対策を考えよう

・地震保険料 再値上げへ 首都直下地震の発生確率上昇（各種メディア、今年６月）

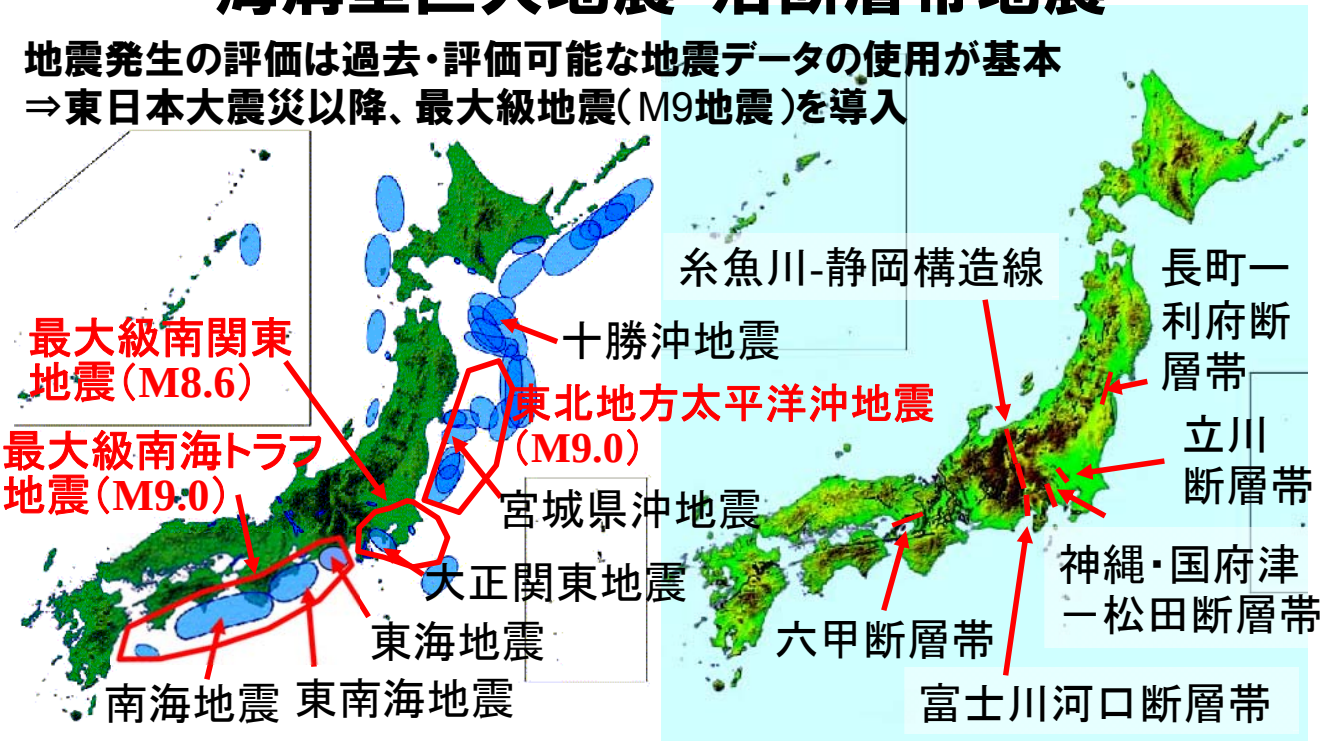
政府と損害保険各社は三日、家庭向けの地震保険料を来年秋にも全国平均で19%引き上げる方針を固めた。政府が首都直下の地震などの発生確率を引き上げたためで、将来の巨大地震に伴う保険金支払いに備える。

⇒「首都直下地震などの発生確率上昇 」は誤り！

正しくは、仮定する震源モデルの最大級の規模を大きく（M8⇒M9級）、かつ震源（首都直下のフィリピン海プレート上面）の深さを浅く評価し直したため、予測される地震動（震度）の確率を高く評価することにした（専門家判断）

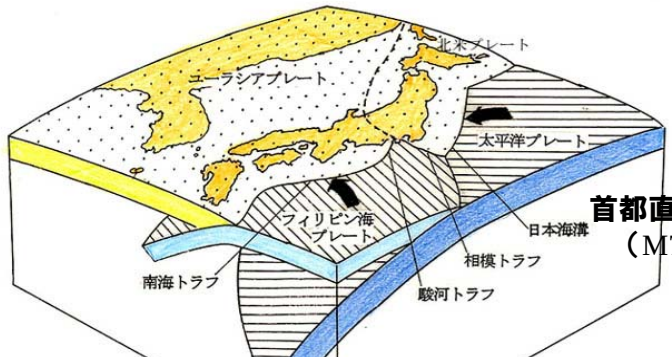
海溝型巨大地震・活断層帯地震

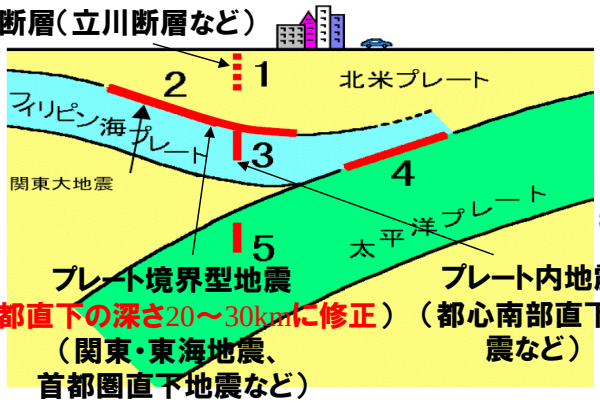
地震発生の評価は過去・評価可能な地震データの使用が基本
⇒東日本大震災以降、最大級地震（M9地震）を導入



日本周辺の被害地震（地震調査研究推進本部「日本の地震活動」より）

首都圏で想定すべき震源モデル



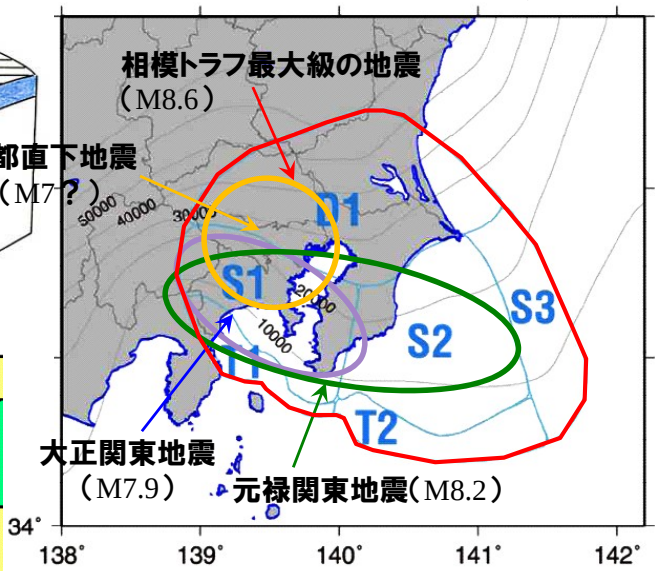


プレート境界型地震
（首都直下の深さ20～30kmに修正）
（関東・東海地震、首都圏直下地震など）

プレート内地震
（都心南部直下地震など）

日本周辺のプレート構造（上）
関東直下のプレート構造断面（下）

フィリピン海プレート上面の等深度図



相模トラフの震源モデルの例
S1（S1）：大正関東地震（Mw7.9）
S12（S1+S2）：元禄関東地震（Mw8.3）
ST123D（全て合計）：最大級地震（Mw8.6）

防災科学技術研究所：長周期地震動予測地図作成支援事業（平成24年度 成果報告書）

首都圏における歴史地震の履歴

南関東では、200～400 年間隔で発生する関東地震（M８クラス）の地震の間に、
マグニチュード７クラスの地震が数回発生している

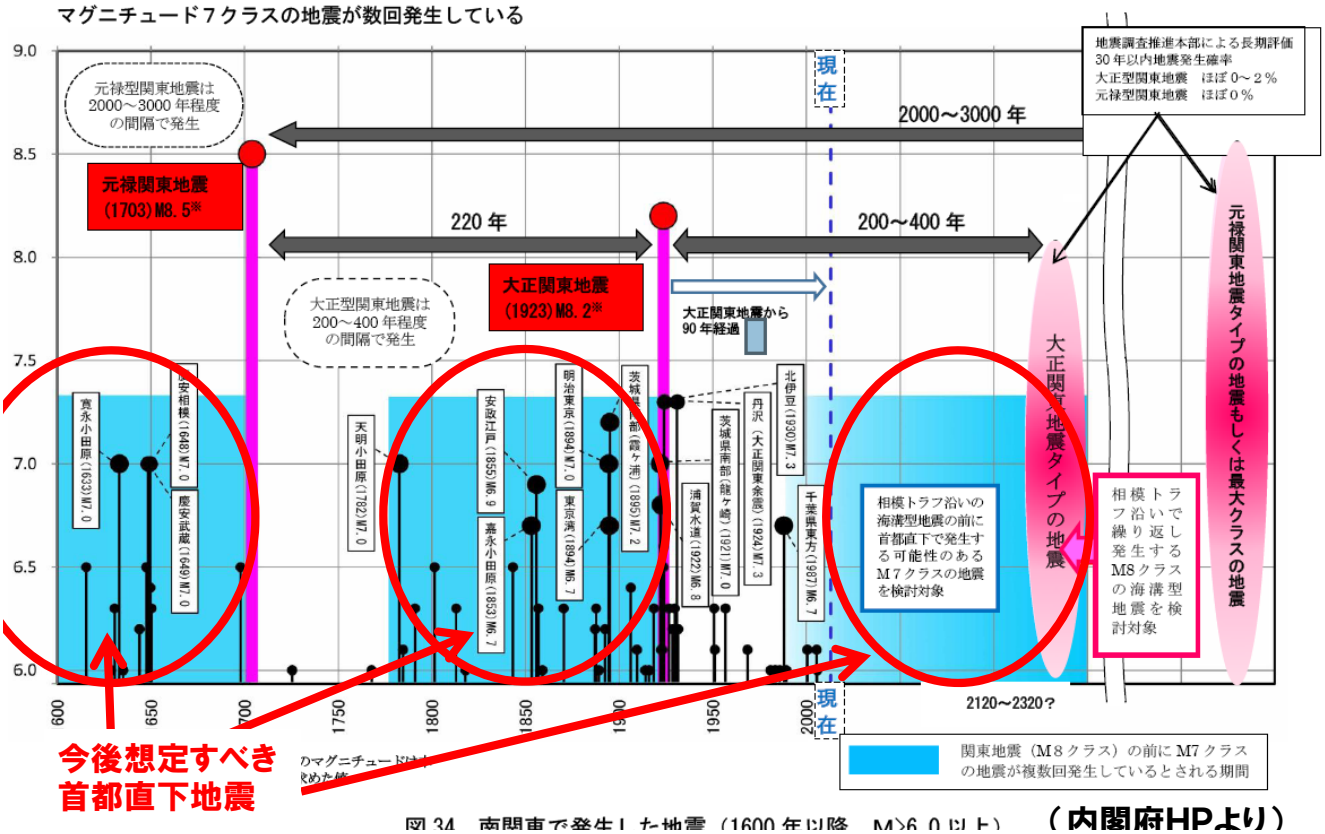


図 34　南関東で発生した地震（1600 年以降　M>6.0 以上）

（内閣府HPより）

前回評価
119年間
に5回（30
年で72%）

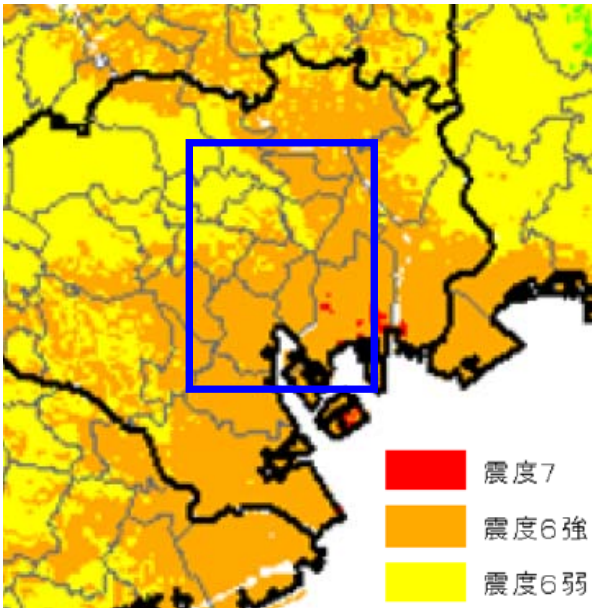
今回評価
220年間
に8回（30
年で66%）

M7級の首都直下地震（相模トラフ沿い）の歴史地震と30年70%の発生確率評価

番号	前回	今回	地域・名称	西暦	北緯	東経	M	被害摘要
1			元和江戸	1615	35.7	139.7	6.8	家屋が倒壊し，死傷多く，地割れを発生．
2			寛永小田原	1633	35.2	139.2	7.0	小田原で民家の倒潰多く，死150．熱海に津波が襲来．
3			慶安相模	1648	35.2	139.2	7.0	小田原城破損，領内で潰家が多かった．死1
4			慶安武蔵	1649	35.8	139.5	7.0	川越で大地震，町屋700軒ほど大破．圧死多数
☆			**元禄関東**	**1703**	**34.7**	**139.8**	**8.2**	**房総半島南部・小田原で被害大、死者約1万人、津波有**
5		○	天明小田原	1782	35.4	139.1	7.0	小田原城天守傾き，江戸でも潰家．死者あり
6		○	嘉永小田原	1853	35.3	139.15	6.7	小田原で被害大．潰家あり
7		**○**	**安政江戸**	**1855**	**35.7**	**139.8**	**7.1**	**江戸下町で被害大、死者7千人以上**
8	○	○	明治東京	1894	35.7	139.8	7.0	東京・横浜の被害が大、東京で死24．川崎・横浜で死7
9		○	東京湾付近やや深い	1894	35.6	139.8	6.7	建物に小被害
10	○	○	茨城県南部	1895	36.1	140.4	7.2	茨城県南部に被害大
11	○	○	茨城県南部	1921	36	140.2	7.0	千葉・茨城県境付近に小被害
12	○	○	浦賀水道	1922	35.2	139.8	6.8	東京湾岸に被害があり，東京・横浜で死各1
☆			**大正関東**	**1923**	**35.3**	**139.1**	**7.9**	**死者約10万人、住家全潰10万9千余，焼失21万2千余**
13			丹沢	1924	35.3	139.1	7.3	死19，家屋全潰1200余．特に神奈川県中南部に著しい被害
14			西埼玉	1931	36.2	139.2	6.9	死16，家屋全潰207(住家76，非住家131)．
15	○		千葉県東方沖	1987	35.4	140.5	6.7	千葉県を中心に死2，傷161．住家全壊16，一部破損7万余

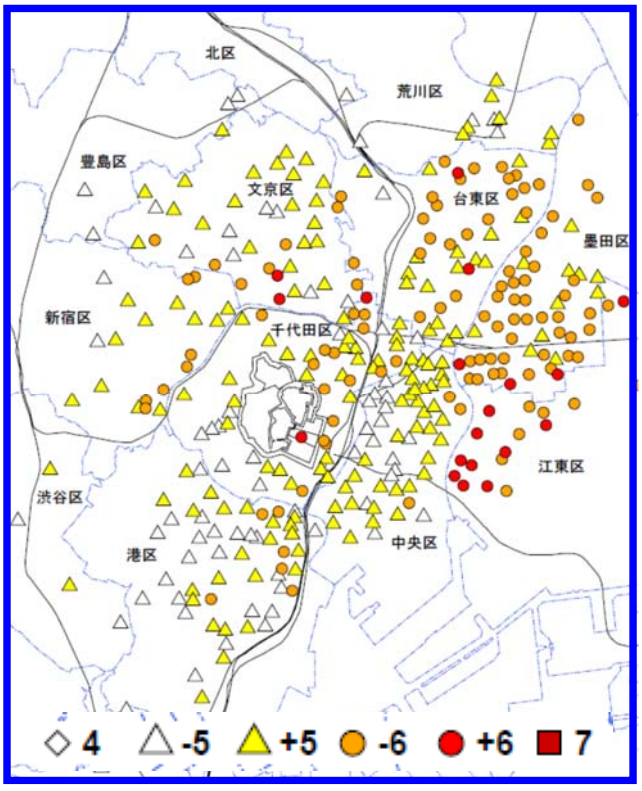
・30年70%は、Scienceというよりも、Expert Judgment（専門家判断）
・過去400年のM7地震、死者数千人1回、数百人3回、数十名以下11回

想定首都直下地震と安政江戸地震の震度分布



首都直下地震（東京都心南部地震、M7.3）の推定震度例（2013内閣府）

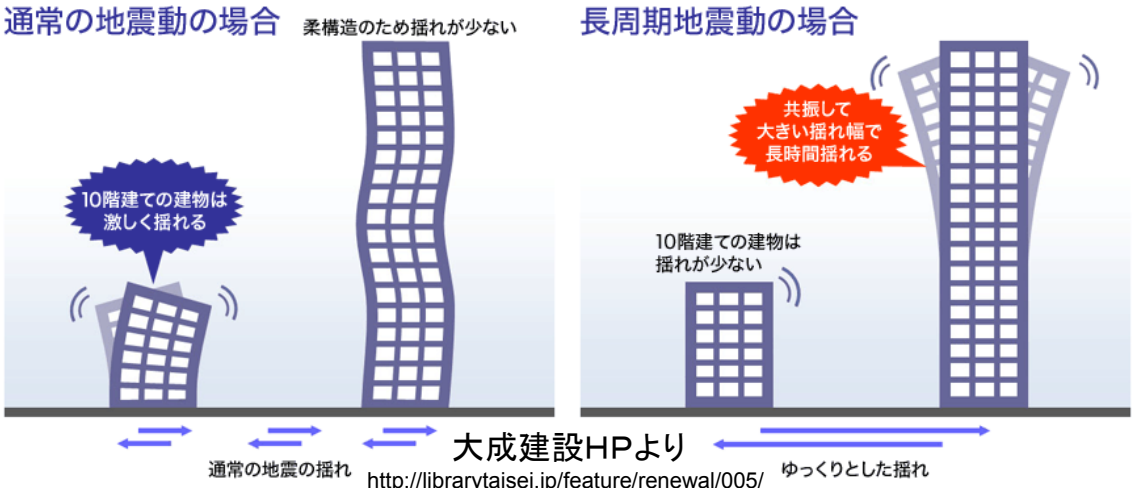
どこでも震度6の可能性があることを意味
実際の地震でこのような分布にはならない
⇒「どうせ東京は火の海で壊滅」と諦めない！



1855年安政江戸地震（M7）の震度分布
作成　中村 操 氏　http://www.bousai.go.jp/oshirase/h15/031222/2-3.pdf

通常の地震動（短周期、首都直下地震）と長周期地震動（海溝型巨大地震）

- 長周期地震動：海溝型巨大地震など大規模な浅い震源で効率的に発生する地震波（主に表面波）が、関東・大阪・濃尾平野などの厚い堆積層を持つ盆地内で大きく増幅する地震動である。
- 通常の地震動と異なり、周期は2～3秒程度以上と非常にゆっくりとした揺れであり、継続時間が非常に長い（数分～10分以上）
- 低層建物には殆んど影響しないが、超高層建築・大規模タンク・長大橋など長周期構造物と共振した場合、大きな揺れとなる。



大成建設HPより
http://librarytaisei.jp/feature/renewal/005/

震災から学ぶ：明治初期の建物の地震被害

- 地震の主要動は横揺れ：水平力が耐震対策の基本
- 組石造・鉄骨レンガ造など、西洋の直輸入建築
  → 地震で多大な被害、組石造禁止
- 伝統木造建物：地震力（水平力）には筋違等が有効

1891年濃尾地震（M8活断層地震）による建物被害

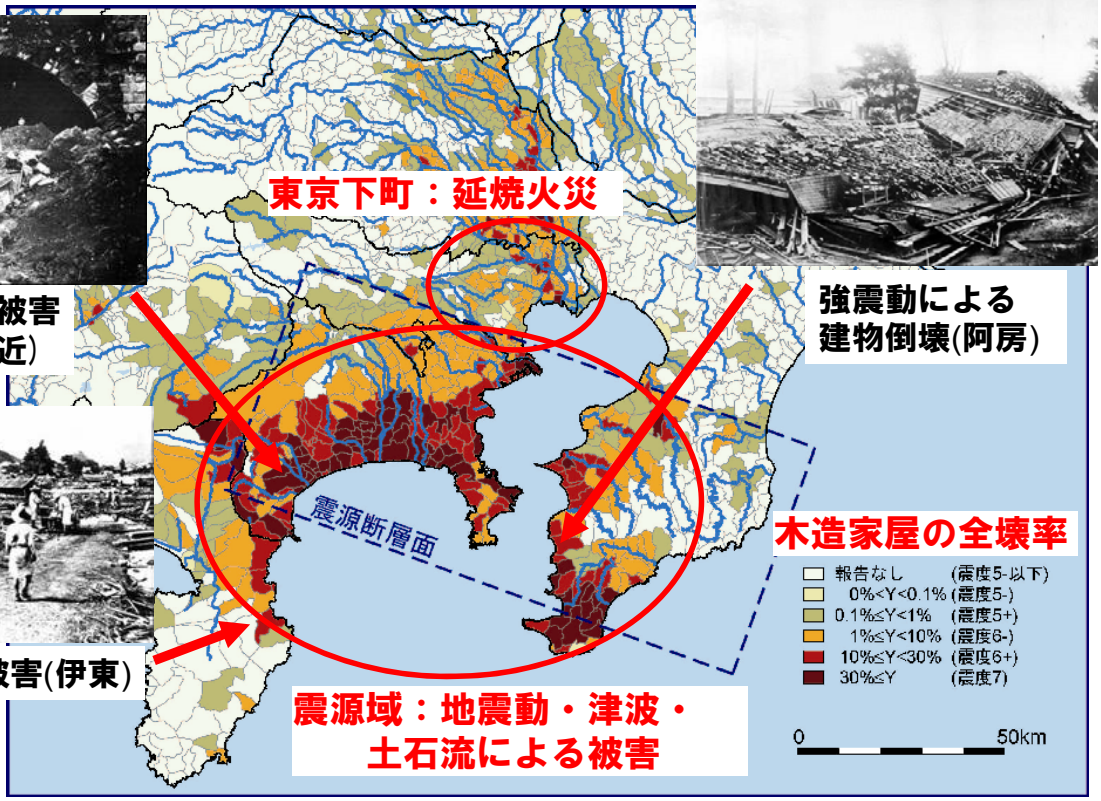
国立博物館地震資料室　http://www.kahaku.go.jp/research/db/science_engineering/namazu/index.html

1923年関東大震災の震源断層と被害

土石流による被害
(根府川駅付近)

強震動による
建物倒壊(阿房)

津波による被害(伊東)



写真：国立科学博物館資料室　　図：武村雅之：関東大震災(鹿島出版会 2003)より

1923年関東大震災

東京市の大火災：震災対策の原点

地震発生:1923年9月1日正午

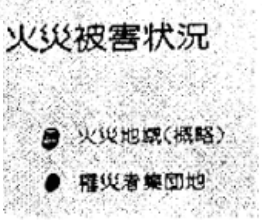
東京市:死者数　71,615名(全体約10万)

圧死者数　3,668名(5%)

焼死者数　56,774名(78%)

水死者数　11,233名(16%)

→ 95%の死者は火災による
(ただし、大規模延焼火災発生は
震災発生から4～5時間後)



・耐震規定導入(市街地建築物法の改正、1924)
設計震度導入(0.1,剛構造)、高さ制限(100尺)など
・初期消火と避難→空地・広域避難場所の整備
→消火・避難訓練("逃げる対策・訓練")

初期の耐震設計法と耐震構造建築

- **設計震度**：設計震度（建物に作用する水平力を建物重量で基準化）を導入
- **筋交い・耐震壁**：水平力に耐えるための基本となる構造材・構造壁

・**日本初の耐震構造ビル**：（旧）日本興業銀行本店（東京・丸の内、1923年竣工）。内藤多仲博士による耐震壁をとりいれた7階建て鉄骨鉄筋コンクリート造の建物で、完成3ヶ月後の関東大震災で軽微な被害。近隣の鉄骨とレンガのカーテンウォールによる米国直輸入の内外ビルは倒壊した。使用した設計震度は2/15(0.133)

⇒ **筋交い等・耐震壁による剛構造で水平力対策**
高さ制限など、市街地建築物法の改正（1924）

（旧）日本興業銀行本店

佐々木茂建築設計事務所
http://blog.livedoor.jp/shyougaiitisekkeisi2581/archives/51452369.html

1948年福井地震と建築基準法の制定

・**1948年福井地震**：福井市直下の活断層により、福井市は壊滅的な被害。気象庁は震度7を追加。

・**1950年建築基準法の制定**：全国に適用。長期荷重（自重）と短期荷重（地震・風）を導入。水平震度は0.2としたが、許応力度も2倍にした。高さ制限は31ｍのまま継続。⇒ **時代背景（終戦直後の多数のバラック建築等）：基準法は最低限の基準（死者を出さない）**

小林啓美氏撮影

1948年福井地震による大和デパートの倒壊
http://kanazawa.typepad.jp/weblog/2010/03/post-551f-1.html

東京のバラック家屋（昭和22年）

早稲田大学　よく分かる！
http://www.waseda.jp/student/weekly/contents/2006b/109e.html

地震被害と建築基準法・耐震規定改正

1968年十勝沖地震（M7.9）
（RC造短柱被害ほか）

1978年宮城県沖地震（M7.4）
（ピロティ-・偏心などバランス悪い建物）

1971年建築基準法改定

1981年建築基準法改定
（新耐震設計法の導入）

鹿島建設:「地震による教訓」（http://www.kajima.co.jp/tech/seismic/higai/030604.html）

1978年宮城県沖地震（M7.4）

- 仙台市内の最大震度は5
- 28人の死者のうち16人が、倒れたブロック塀などの下敷き
- 宅地造成地（緑ヶ丘など）の地盤崩壊
- ライフライン被害と長期生活障害
- 高層建物の被害（エレベータ閉じ込め、非構造壁の被害）

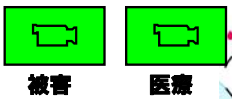
高層マンションの被害（ほぼ全戸で非構造壁が、せん断破壊し玄関ドアが開かなくなった）→補修したが、東日本大震災でさらに大きな被害、取り壊しに・・・

宮城県：http://www.pref.miyagi.jp/sdh-doboku/fureaidayori/fureaidayori01/fureaidayori01-3.htm

（瀬尾和大氏・東工大名誉教授より）

1995年阪神・淡路大震災の被害

1995年1月17日　5時46分
阪神・淡路大震災（M7.3）
死者：6,434名　負傷者：43,792名
直接死　5,520名
約8割：建物倒壊による圧死
約1割：家具類等の転倒による圧死
約1割：焼死
関連死　914名
仮設住宅孤独死者数：233名
災害復興住宅孤独死者数：396名



活断層地震，震度7
約20秒の揺れ

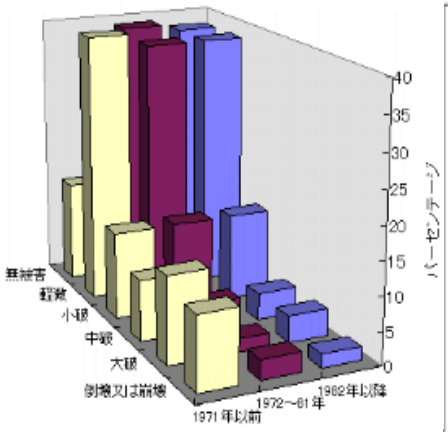
建物倒壊と火災発生が震災の帯の集中
http://dil.bosai.go.jp/workshop/01kouza_kiso/kasai/f5.htm

同時多発火災（285件）

建物被害：512,882棟

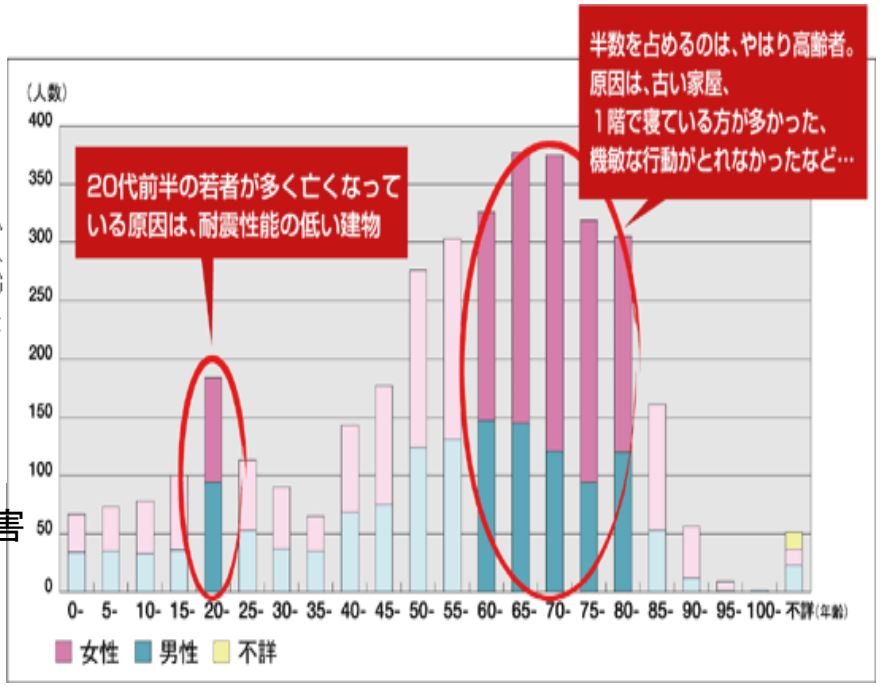
多くの病院も被災

阪神・淡路大震災の教訓：
建設年代と建物被害、年齢別死者数



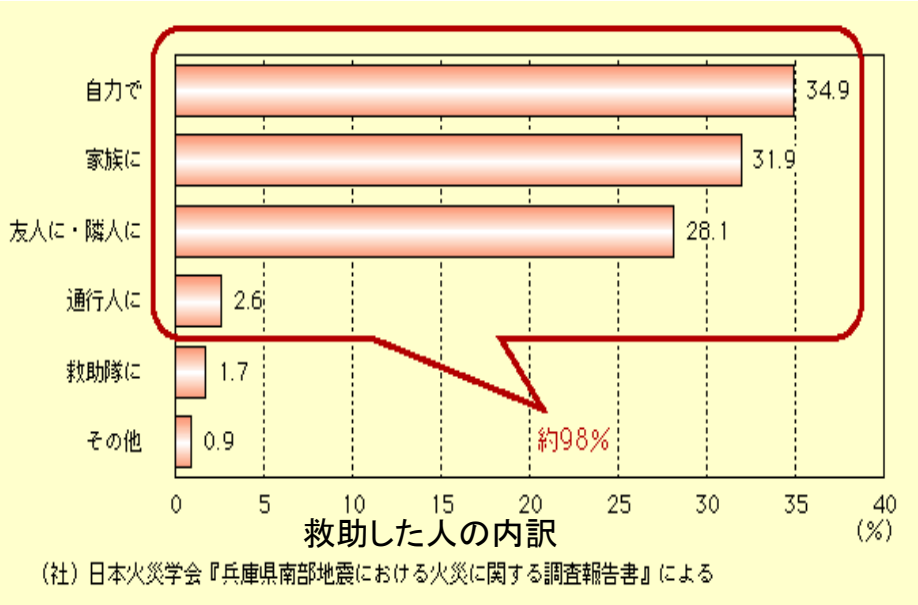
建設年代別のRC造建物被害
日本建築学会
http://www.aij.or.jp/jpn/seismj/rc/rc2.htm

⇒1981年の基準で、しっかり設計・施工された建物では、大きな被害は少なかった



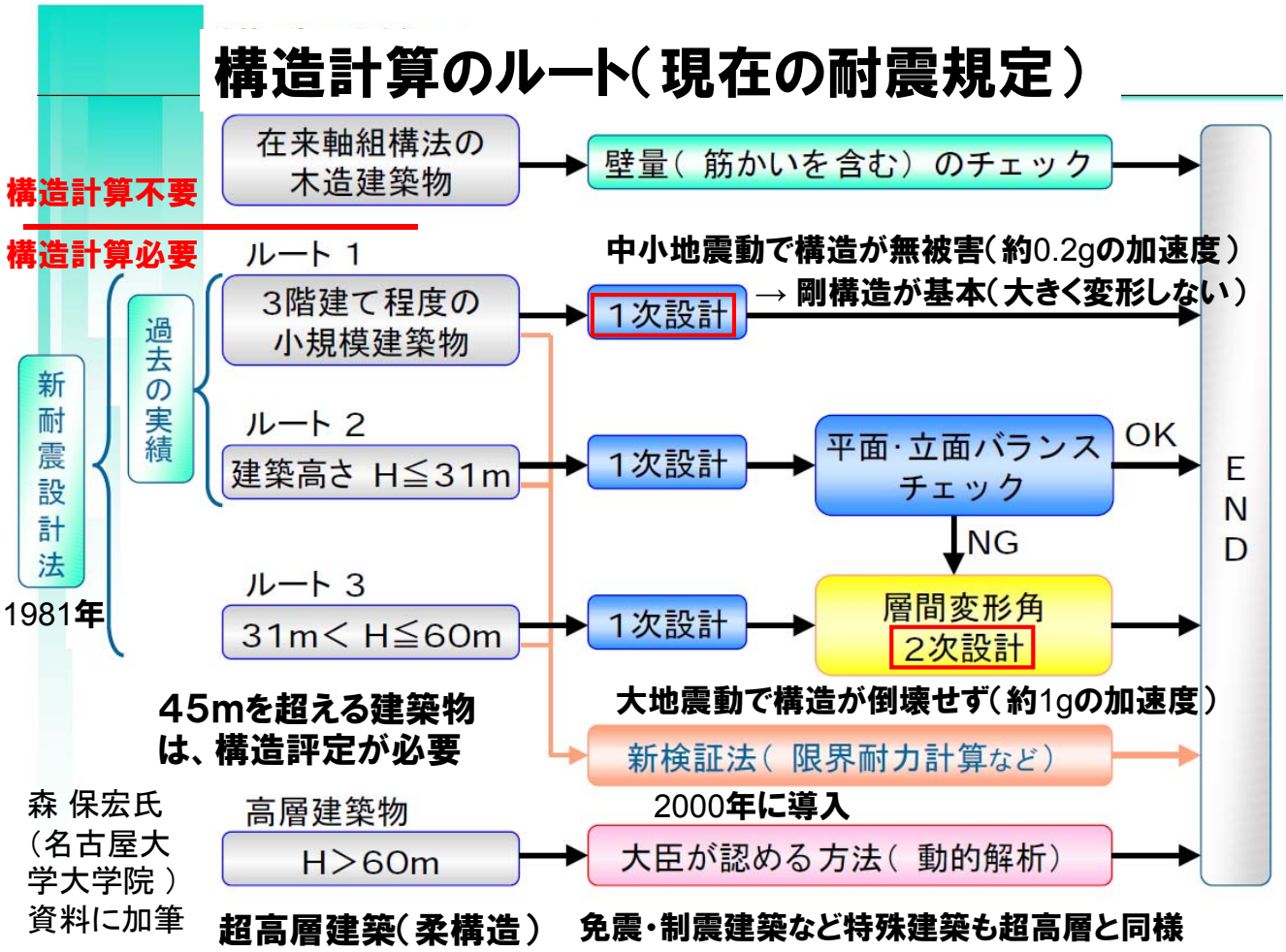
ほんとうの阪神・淡路大震災犠牲者の声なき声に学ぶ
http://www.toyotahome.co.jp/toyoie/meguro/hanshin_awazi/#top

神戸の住民は避難したか？



・殆どの住民は消火・救援救護活動、大多数は地域住民が救助
・訓練通りに住民が避難した地域では、救えなかった命も
・「逃げる対策」から、「逃げないで被害に立ち向かう対策」も必要
・地域特性を吟味し、避難対策・訓練だけでなく、減災対策・訓練も

構造計算のルート（現在の耐震規定）

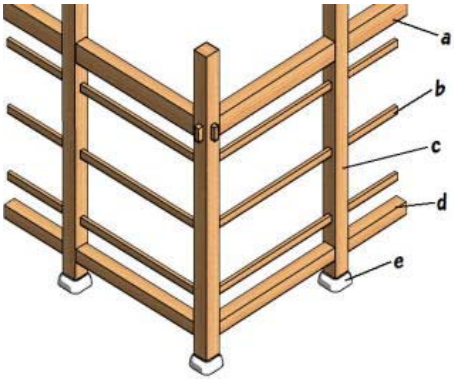


森 保宏氏
（名古屋大学大学院）
資料に加筆

自宅の対策：木質系住宅の構造と耐震性

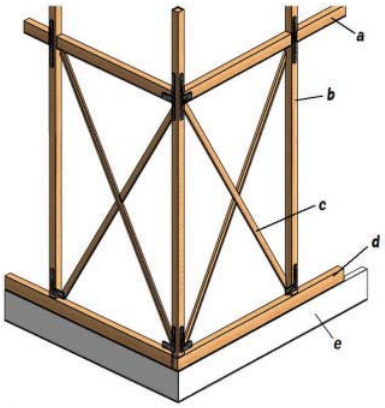
- **伝統工法**：釘・金物は使わない柔構造で、地震力を受け流す。大変形でも修復性が高いが、現在では地震後の継続使用性に難点有り
- **在来工法**：柱・梁・土台で軸組で構成、筋交いや構造用合板と金物等で十分な水平剛性を確保すれば耐震性は高い。できれば構造計算を！
- **2x4工法、木質系プレハブ工法など**：規格化された壁式工法で、品質が保証されており、耐震性能は非常に高い。

⇒ 耐震等級はⅠ（基準法）より、Ⅱ（基準法の1.25倍）、Ⅲ（同1.5倍）を！



日本の伝統工法（柔構造）

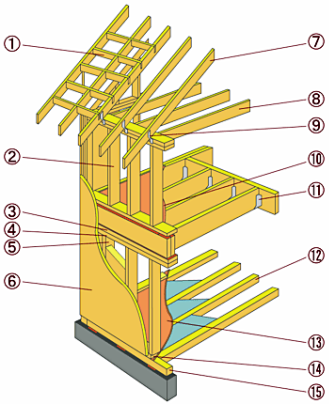
a=梁 b=貫 c=柱 d=床梁 e=束石



木造軸組工法/在来工法（剛構造）

a=梁 b=柱 c=筋交い d=土台 e=基礎

引用：http://www.wb.commufa.jp/kazuya/sub8.html



木造枠組壁工法/2x4工法（剛構造）

http://www.d-a-h.com/iedukuri

木造被害の被害例　接合部被害

金物無しの接合部

撮影：宮澤健二・工学院大名誉教授

隅柱の引き抜け（金物なし）

筋かいの引きぬけ・踏み外し

壁配置が不適切
・壁量の不足

狭小間口の3階建木造住宅
（1階開口・HD金物なし）

1階の耐震要素が偏心して倒壊した建物

1階の耐震性が不足して倒壊した建物

腐朽・蟻害による劣化被害

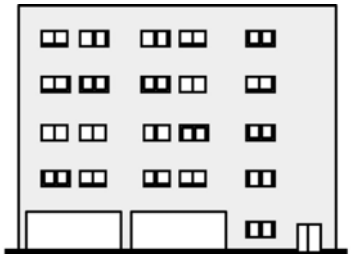
腐朽による柱の被害

腐朽による柱の被害

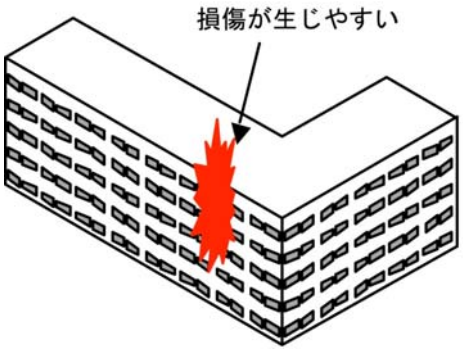
雨漏りによる腐朽被害

鉄筋コンクリート(RC)造建物の被害

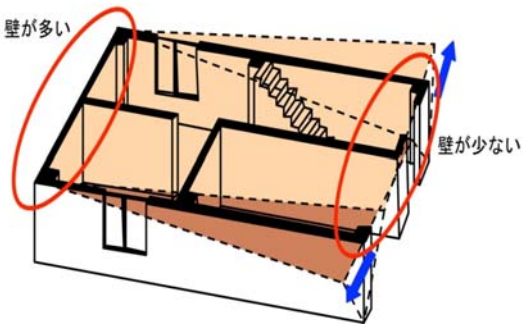
被害が集中した特長的なRC建物
・古い耐震基準の建物
・1階の耐震性が不足した建物(ピロティー)
・耐震壁の配置が偏心した建物
・複数棟が一体となった建物



1階の耐震性が不足した建物(ピロティー)

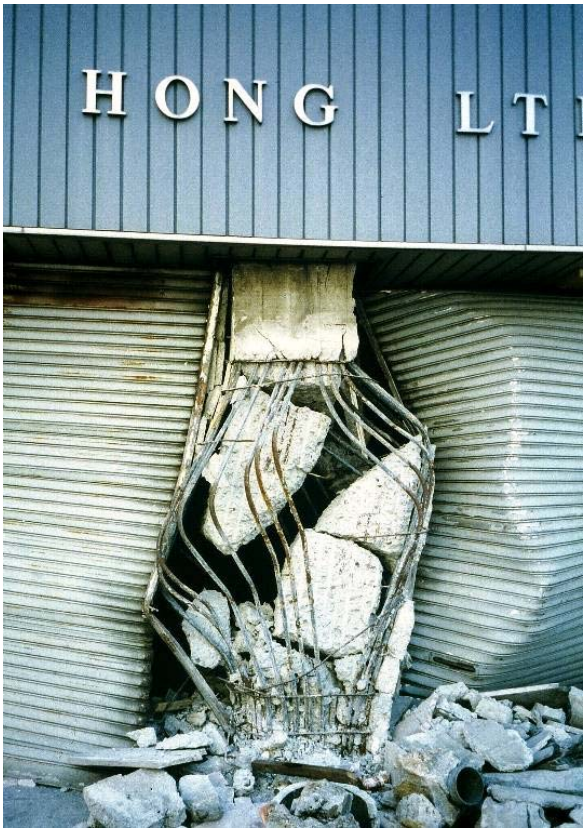


複数棟が一体となった建物(複雑な平面形状)



耐震壁の配置が偏心した建物

古いRC建築の被害



1971年の耐震基準より古いRC建物の柱被害

中間層の被害

１階ピロティの被害

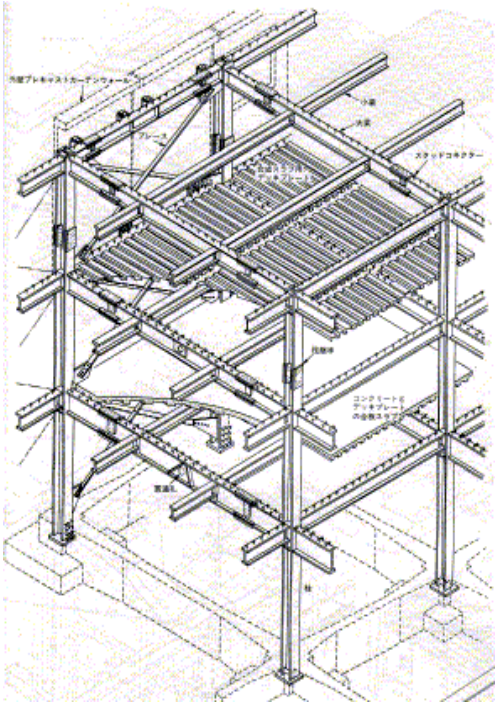
鉄骨(Ｓ)造建物の被害

鉄骨構造の特徴

・ラーメン(フレーム)構造:柱とはり
・剛性が低い部分にブレース(筋かい)
・用途:オフィスビル・工場・体育館など

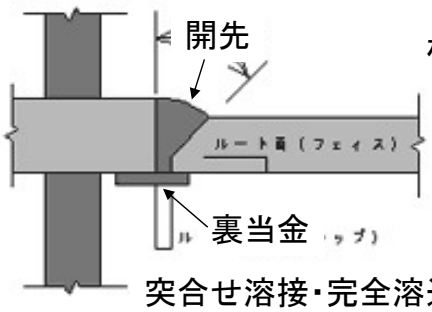
主な被害の特徴

・古い耐震基準の建物に被害が集中
・柱・はり接合部の溶接不良による被害
・柱脚部のアンカーボルト破断・抜け出し
・ブレース(筋かい)の破断
・柱継手の不良
・構造躯体が外観から見えないため
震災直後では被害を見つけにくい

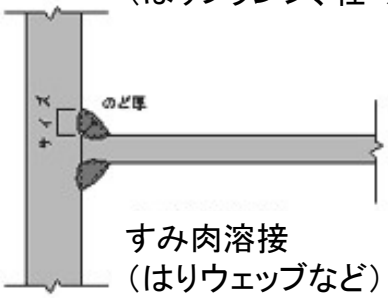


典型的なS造建物の構造

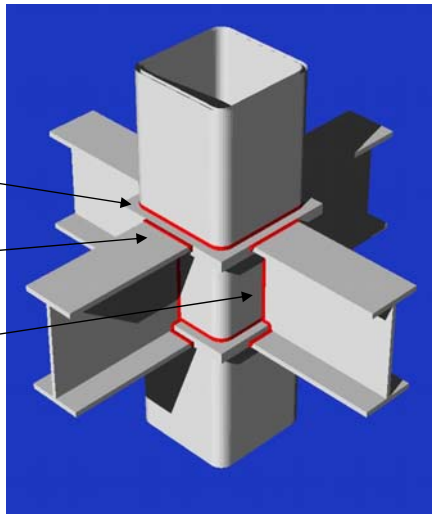
柱・はり接合部と被害



突合せ溶接・完全溶込溶接
（はりフランジ、柱・ダイヤフラムなど）



すみ肉溶接
（はりウェッブなど）

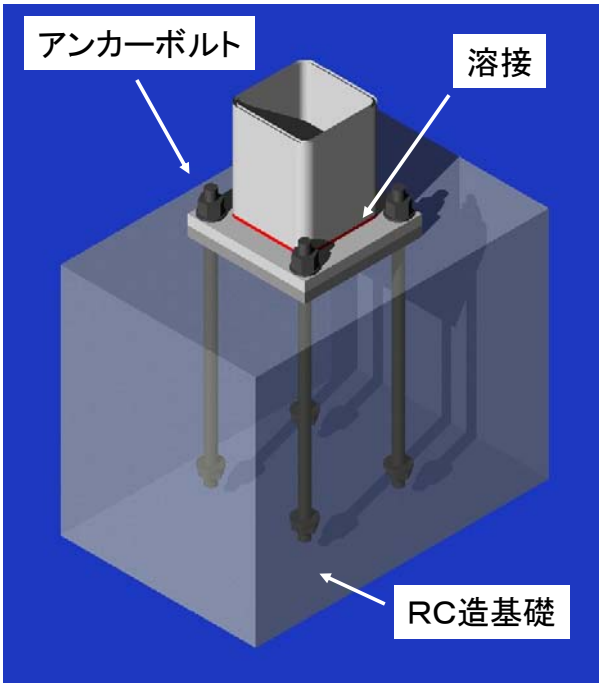


柱・はり接合部と溶接

柱・梁接合部の破断

有限会社 トチオ構造設計室
http://www6.plala.or.jp/tochio/report/report02_2.html
鹿島建設：http://www.kajima.co.jp/tech/seismic/higai/030604.html
さくら構造：http://taishin.kozoweb.jp/shindan/how.shtml（日本建築学会報告書より）

柱脚部の構造と被害

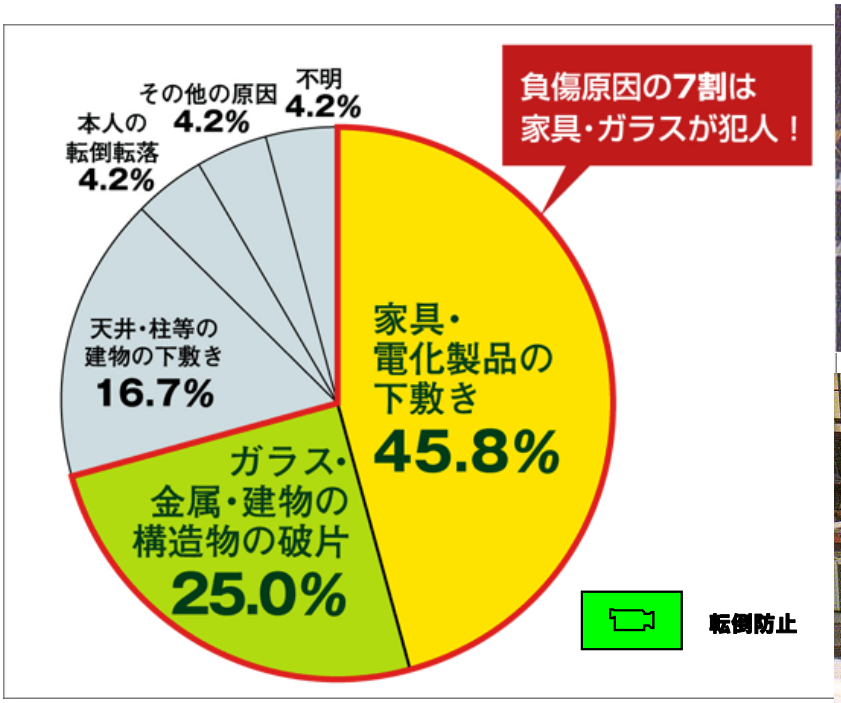


柱脚部の構造

柱脚アンカーボルトの破断

株式会社 構造工学研究所　http://kozo-ogaku.co.jp/earthquake.html
さくら構造：http://taishin.kozoweb.jp/shindan/how.shtml（日本建築学会報告書より）

阪神・淡路大震災：負傷者の内訳



ほんとうの阪神・淡路大震災犠牲者の声なき声に学ぶ
http://www.toyotahome.co.jp/toyoie/meguro/hanshin_awazi/#top

2011年東北地方太平洋沖地震（M9.0）

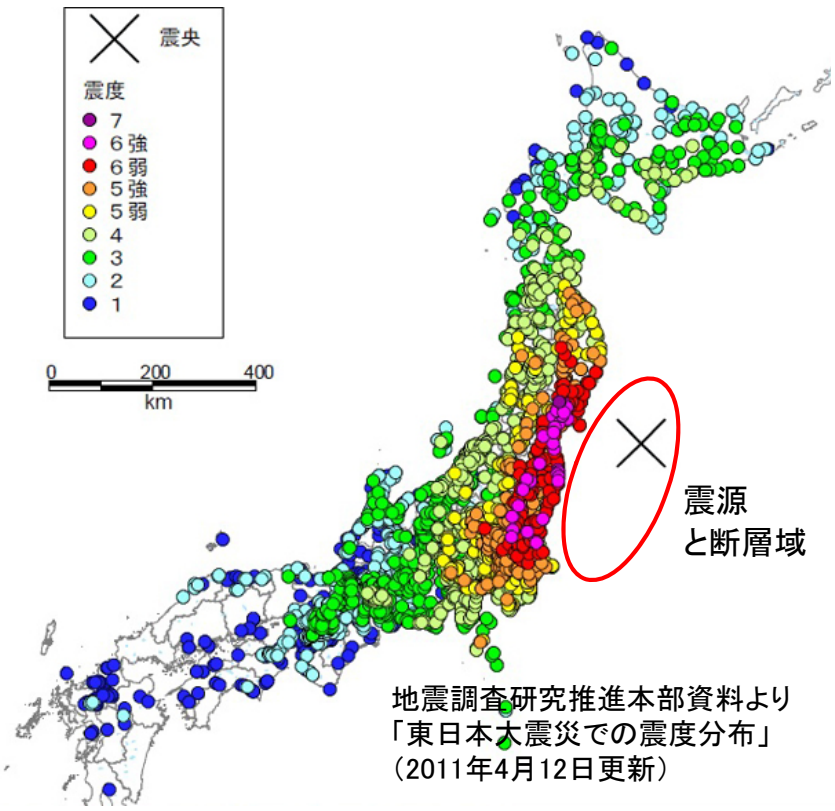
表1　東日本太平洋沖における海溝型地震の長期発生予測（地震調査研究推進本部による）

海　域	予想されるマグニチュード		今後30年以内の発生確率	平均発生間隔
三陸沖北部	M8.0前後		0.5%～10%	約97年
三陸沖中部	（過去に大地震がなく評価不能）			
三陸沖南部海溝寄り	M7.7前後	連動時は	80%～90%	105年程度
宮城県沖	M7.5前後	M8.0前後	99%	37年
福島県沖	M7.4前後（複数地震が続発）		7%程度以下	400年以上
茨城県沖	M6.7～M7.2		90%程度以上	約21年
房総沖	（過去に大地震がなく評価不能）			
三陸沖北部から房総沖の海溝寄り	M8.2前後（津波地震）		20%程度	133年程度
	M8.2前後（正断層型地震）		4%～7%	400～750年

日経サイエンス
2011-6より

・今回の地震は、6つの震源域が連動し、M9の超巨大地震となった
・海溝型地震の地震サイクルは、従来の数百年ではなく、数千～万年単位で考える必要がある

2011年東日本大震災
震度分布と建物・人的被害



地震調査研究推進本部資料より
「東日本大震災での震度分布」
（2011年4月12日更新）

消防庁発表（2014/9/10）

人的被害
死者: 19,074
（約9割は溺死）
行方不明 : 2,633
負傷: 6,219、重傷:697
避難者:70,077

建物被害
全壊: 127,361
半壊: 272,277
一部破損: 762,277
火災:330

建物被害と死者数（内閣府）
約1万9千人の死者・行方不明者のうち、内陸での死者・行方不明数は、125人
（総務省消防庁発表被害報
平成24年3月11日現在、死者・行方不明者の0.6%）
（http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku/pdf/2_2.pdf）

東日本大震災における首都圏（震度５）での様々な被害

津波（千葉県旭市）

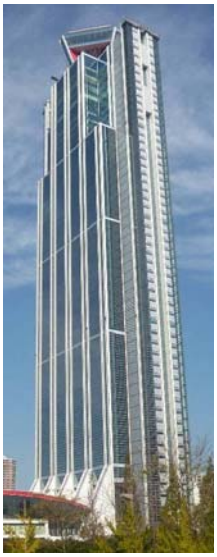
液状化（浦安市）

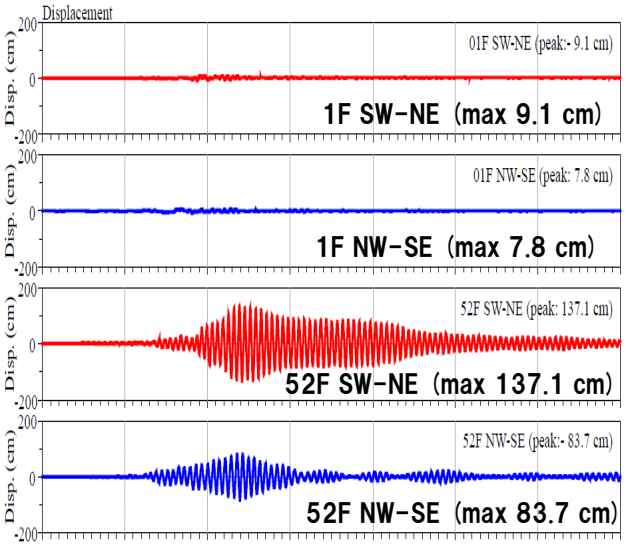
【共同通信】
天井崩落（九段会館）⇒基準法改正へ

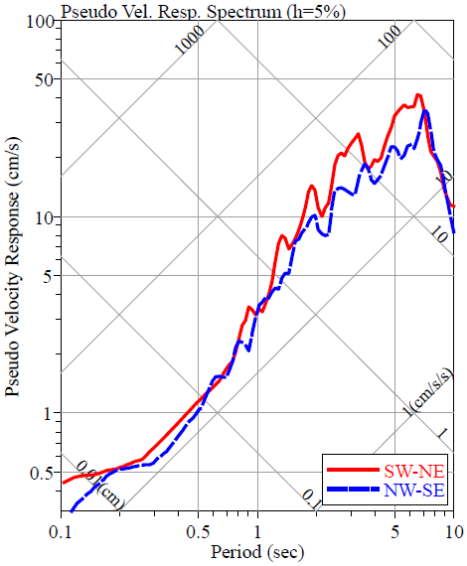
帰宅困難者と大渋滞（新宿駅南口）

大阪府咲洲庁舎（55階 高さ256 m）と長周期地震動

- 建物の固有周期と地盤の卓越周期が一致（約7秒で共振）
- スプリンクラー破損による漏水、階段壁面のパネル落下、100 カ所以上のひび割れ、エレベータによる閉じ込めなど多数の被害
- 震災直後、上層階の被害を防災センターで全く理解できなかった

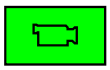




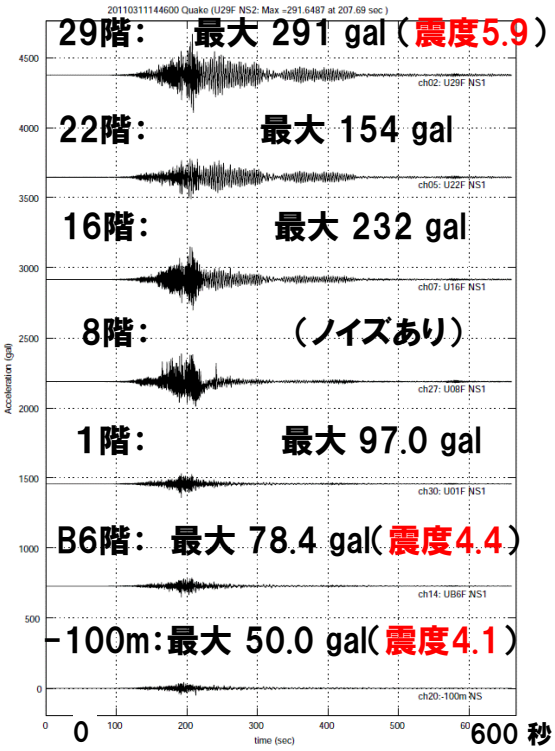


小山（2011）：第39回地盤震動シンポジウム資料（2011/11/15（火））

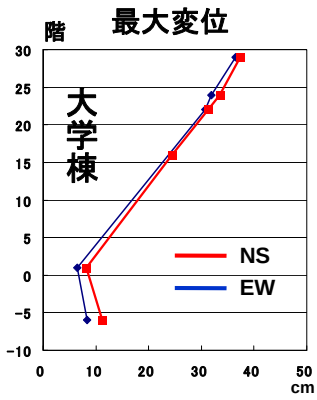
2011年東日本大震災における 工学院大学新宿キャンパスでの揺れ

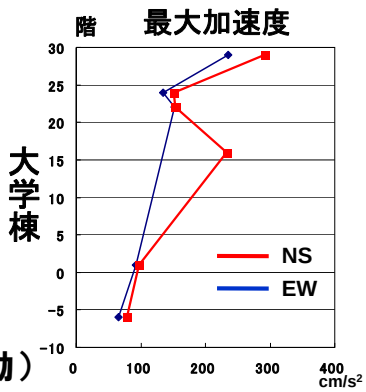


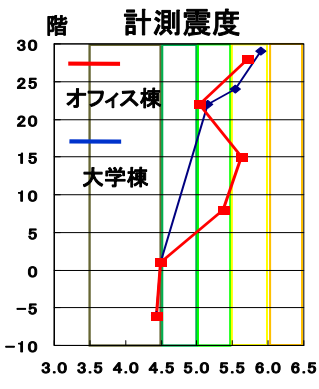
3D揺れ



南北方向の揺れ：加速度（短周期地震動）

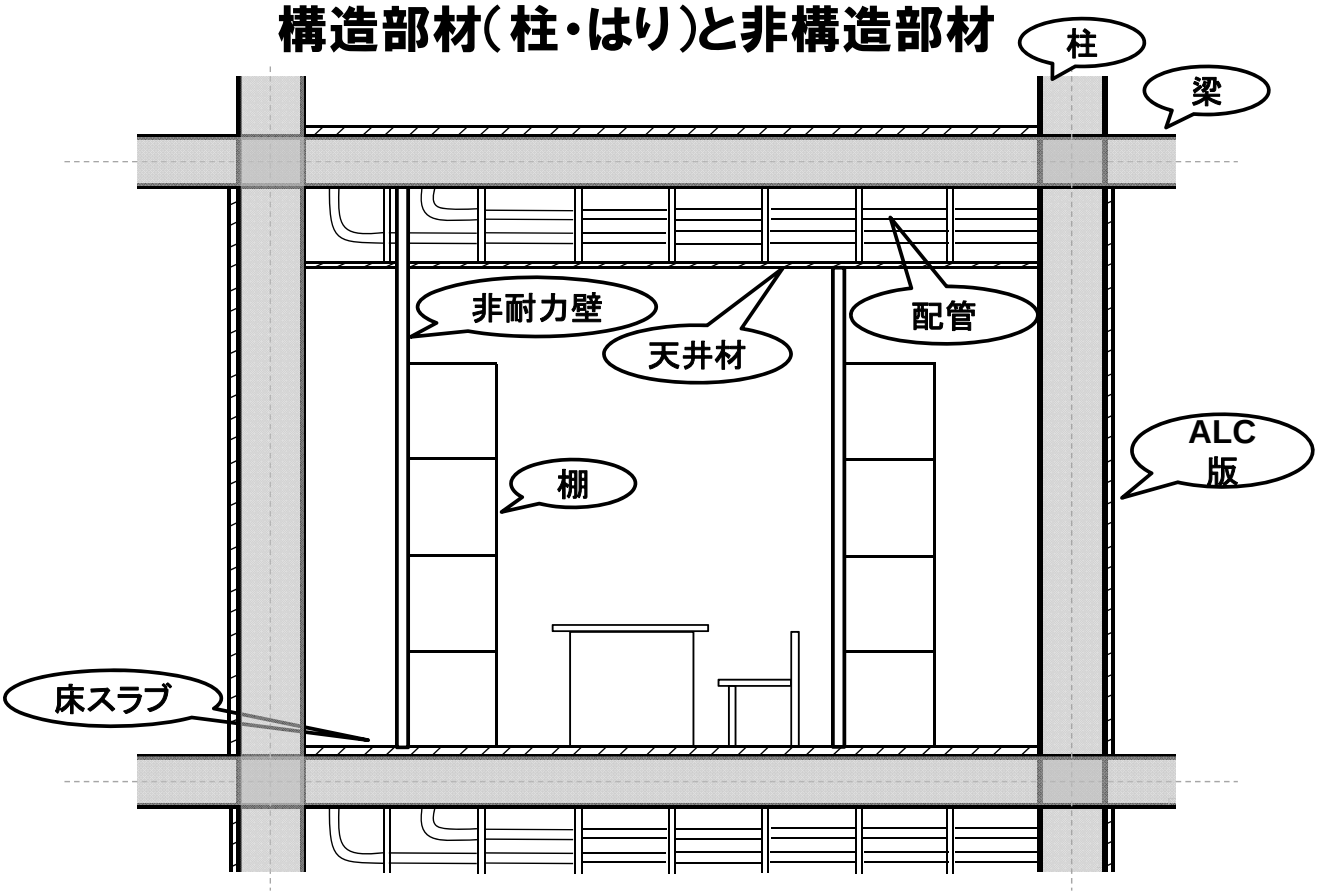






鉄骨造・高層の建物断面

構造部材(柱・はり)と非構造部材



2011年東日本大震災
工学院大学・新宿校舎の被害

28F (天井パネルの落下)

25F (コピー機の移動、室内の散乱)

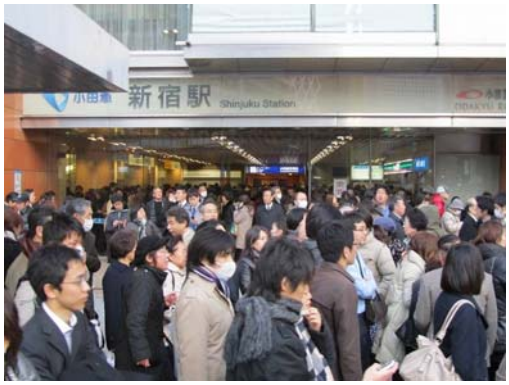
24F(固定していないかった本棚の転倒、間仕切り壁の大変形)

エレベータケーブルの絡まり
(本学の写真ではありません)

－工学院大学校舎内や周辺地域の様子－

帰宅困難者の受入（外部者の総数約700名）

非常食・水の配布（4階）1



新宿駅西口の様子（滞留者）

主要街道の渋滞（青梅街道）

逃げない対策：東京都帰宅困難者対策条例（2013年3月施行）
→ 首都圏で515万人（幹線道路麻痺・大群衆が危険因子に）

○ 一斉帰宅の抑制

- **都民の取組　むやみに移動しない、**
  家族との連絡手段を複数確保するなど事前準備（171、携帯伝言・・・）
- **事業者の取組　従業員の一斉帰宅の抑制**
  施設の安全確保、3日分の水・食糧など、従業員との連絡手段の確保など事前準備、駅などにおける利用者の保護、生徒・児童等の安全確保

○ 安否確認と情報提供のための体制整備

○ 一時滞在施設の確保（国や自治体、民間施設）

○ 状況安定後の帰宅支援（帰宅支援ステーション、代替輸送手段など）

→ 住宅・マンションも同様に、避難民にならない・自宅に留まる対策を

最大340万人(含:ライフライン停止)。本来、避難所は家を失った人へ！

→ 大震災時に家族との連絡は困難、 家庭・職場・学校で万全な対策を

耐震性能の向上、家具類の落下・転倒防止、最低3日分の備蓄、普段から地域での共助体制、171などに加えて被害外への共通の連絡先など