

長周期地震動の予測技術と その利活用の事例紹介



多様なニーズに対応する
予測情報検討
WG(第1回)
気象庁
2017年3月15日



久田嘉章
(工学院大学建築学部)

概要

長周期地震動の予測技術

- ・理論的手法と経験的手法
- ・距離減衰式とサイト補正(松竹梅)

予測情報の利活用と事例紹介

- ・高層建築の揺れの予測(最大振幅までの時間、高さ方向の震度・変位・長周期地震動階級など)
- ・新宿駅周辺地域の事例(超高層・駅周辺エリア)
- ・SIP防災「レジリエントな防災・減災機能の強化(内閣府・JST)」との連携など

長周期地震動の予測技術：理論的手法

理論解析手法（波数積分法、離散化波数法・・・）

平行層構造が仮定できれば、広い周期帯域での高速計算が可能。内陸直下地震で実体波が卓越する場合には有効。

数値解析手法（差分法、有限要素法・・・）

3次元不整形地盤構造が扱え、堆積層表面波なども再現可能。現在、内閣府での長周期地震動想定や設計用地震動などに実用化。但し、震源から計算点までの高精度な地盤構造と、膨大な計算時間が必要であり、観測記録等による綿密な波形の再現性の検証が必須。

長周期地震動の予測技術：経験的手法

経験的グリーン関数法

震源スケーリング則等により小地震波から大地震波を合成。理想的な震源と観測点の組み合わせ、かつ、長周期地震動を含む観測記録を用いることが望ましい。

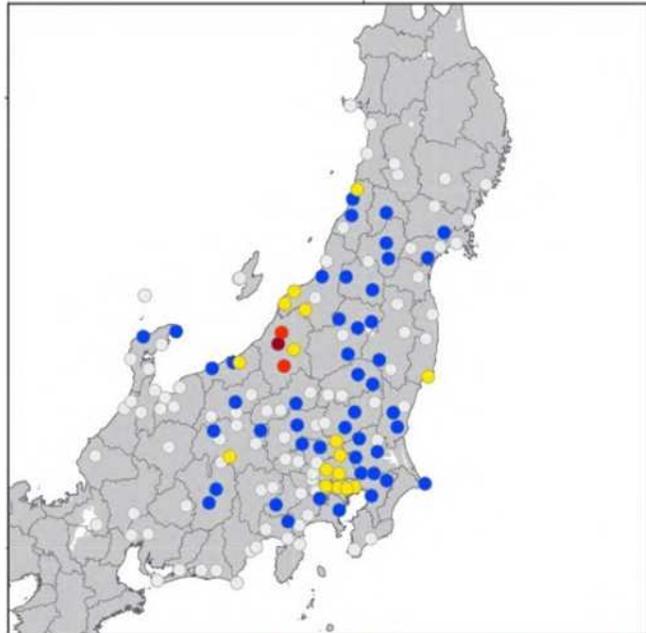
距離減衰式(振幅、波形、応答スペクトル…)

Mや震源距離、サイト補正係数などで簡便に波形や応答スペクトルを予測可能。実用性・即時性に優れている。

- ・建研式(大川ほか、2013) M_w 等から波形を合成
- ・防災科研式(Dhakai et al., 2015) M_j 等から絶対速度応答スペクトルを推定

全国で標準値は得られるが、観測点以外での精度は高くない 対象地点直下の地盤構造から補正する手法等があるが、その地点の観測記録で補正するのがベスト

東京23区における気象庁観測点



長周期地震動階級の凡例: ■ 階級1 ■ 階級2 ■ 階級3 ■ 階級4

2004年新潟県中越地震
(○は観測点ごと、予報は予報区で?)

過去の地震における長周期
地震動階級の事例
(気象庁資料、平成28年3月)



気象庁観測点(23区内の8点)
(<https://ja.wikipedia.org/wiki/東京都区部に加筆>)

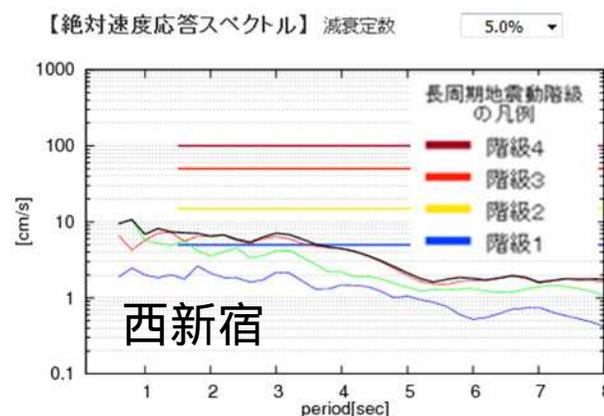
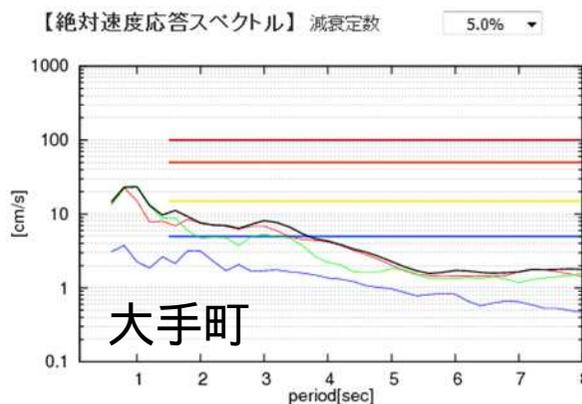
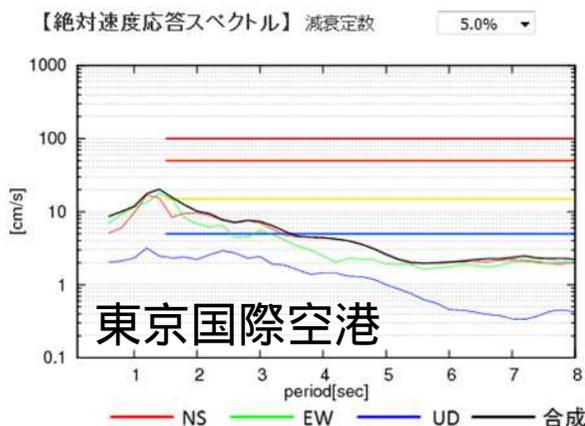
2015年小笠原諸島西方沖地震の例

予報区と各サイトによる震度・長周期地震動階級の違い

長周期地震動に関する観測情報(試行): 2015年05月30日 20時24分ころ地震。震源地は、小笠原諸島西方沖で、震源の深さは約590km、マグニチュードは8.5と推定

長周期地震動階級 2: 埼玉県北部、千葉県北西部、東京都23区、八丈島、小笠原...

【観測地点】	【震度】	【長周期地震動階級】	【長周期地震動階級データの周期帯別の最大値】																
地点名: 東京国際空港 地域名: 東京都23区 観測時間 2015.05.30 20:24:50~20:31:50	4	② 区内最大	<table border="1"> <thead> <tr> <th>周期</th> <th>1秒台</th> <th>2秒台</th> <th>3秒台</th> <th>4秒台</th> <th>5秒台</th> <th>6秒台</th> <th>7秒台</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>階級</td> <td>2</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	周期	1秒台	2秒台	3秒台	4秒台	5秒台	6秒台	7秒台	階級	2	1	1	0	0	0	0
周期	1秒台	2秒台	3秒台	4秒台	5秒台	6秒台	7秒台												
階級	2	1	1	0	0	0	0												
地点名: 東京千代田区大手町 地域名: 東京都23区 観測時間 2015.05.30 20:24:50~20:31:50	4	1	<table border="1"> <thead> <tr> <th>周期</th> <th>1秒台</th> <th>2秒台</th> <th>3秒台</th> <th>4秒台</th> <th>5秒台</th> <th>6秒台</th> <th>7秒台</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>階級</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	周期	1秒台	2秒台	3秒台	4秒台	5秒台	6秒台	7秒台	階級	1	1	1	0	0	0	0
周期	1秒台	2秒台	3秒台	4秒台	5秒台	6秒台	7秒台												
階級	1	1	1	0	0	0	0												
地点名: 東京新宿区西新宿 地域名: 東京都23区 観測時間 2015.05.30 20:24:50~20:31:50	3	1	<table border="1"> <thead> <tr> <th>周期</th> <th>1秒台</th> <th>2秒台</th> <th>3秒台</th> <th>4秒台</th> <th>5秒台</th> <th>6秒台</th> <th>7秒台</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>階級</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	周期	1秒台	2秒台	3秒台	4秒台	5秒台	6秒台	7秒台	階級	1	1	1	0	0	0	0
周期	1秒台	2秒台	3秒台	4秒台	5秒台	6秒台	7秒台												
階級	1	1	1	0	0	0	0												



対象地点でのサイト補正係数があれば、より高い精度で周期別の長周期地震動を予測可能 (梅: 予報区の数そのまま、竹: 最寄サイトの係数を補正、松: 対象サイトの観測記録の係数)

予測情報の利活用について:2015年小笠原諸島西方沖地震の事例

2015年5月30日20時23分、小笠原諸島西方沖でM8.5・深さ 約590km(後にM8.1、682km)
最大震度5強(神奈川県・二宮町など)、首都圏:震度3~4、長周期地震動階級1~2



関東で最大震度5強 一部列車で運休など鉄道ダイヤの乱れ続く(フジテレビ系(FNN))



巨大地震、エレベーター2万台が自動停止(TBS系(JNN))

予測・観測情報と事前の被害レベル別の行動計画があれば、より柔軟な対応が可能だった? 6

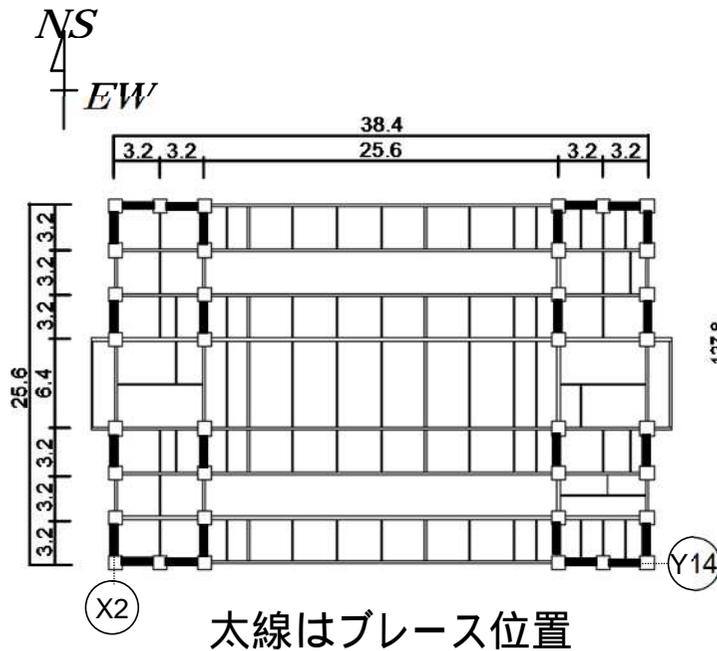
工学院大学新宿校舎の事例

- ・東西コアを結ぶ25.6mの大スパン梁
- ・EW方向16階、21階にスーパーフレーム

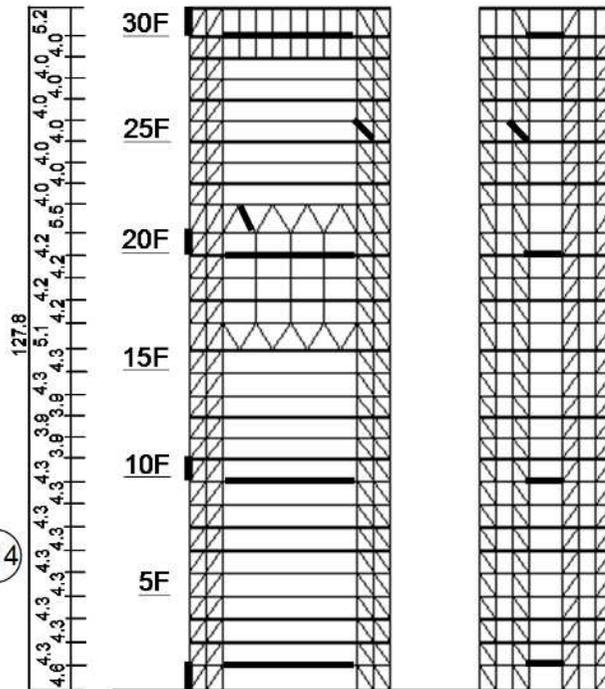
建物名称	大学棟(工学院大学高層棟)
建築場所	東京都新宿区西新宿
竣工念	1989年
基準階面積	1170m ²
階数	地上29階、地下6階、塔屋1階
アスペクト比	NS:5.59、EW:3.73
構造種別	地上:鉄骨造(ブレース付ラーメン架構)
	地下1~2階:鉄骨鉄筋コンクリート造
	地下3~6階:鉄筋コンクリート造

固有周期(秒)

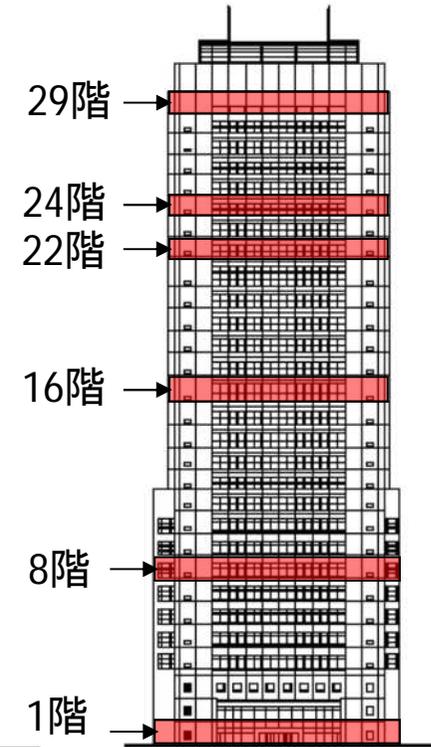
	微動		構造計算書	
	NS	EW	NS	EW
1次	2.8	2.6	3.3	3.1
2次	0.83	0.87	1.08	1.08



基準階伏図

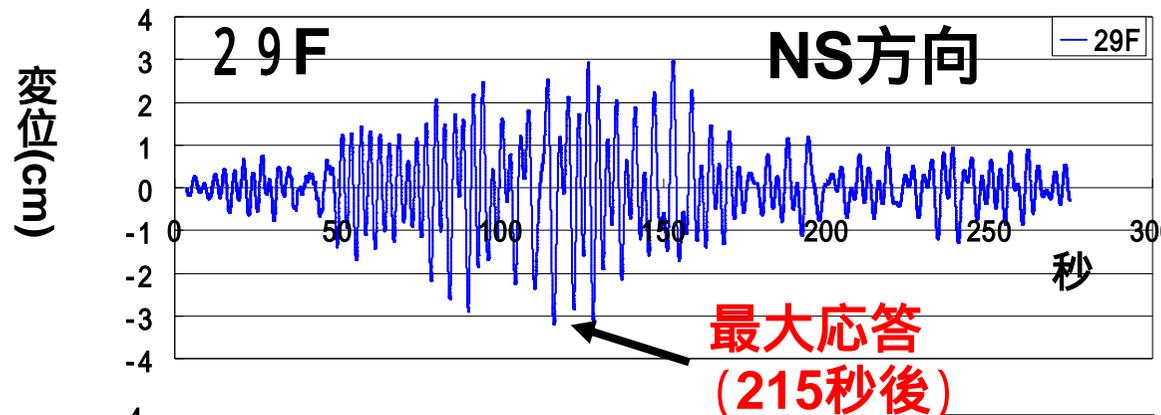


軸組図(左Y14、右X2通り)



地震計設置階

2004年9月5日紀伊半島南東沖地震(M7.4) S波・表面波の到達時刻と工学院大学・新宿校舎の揺れ



震源情報

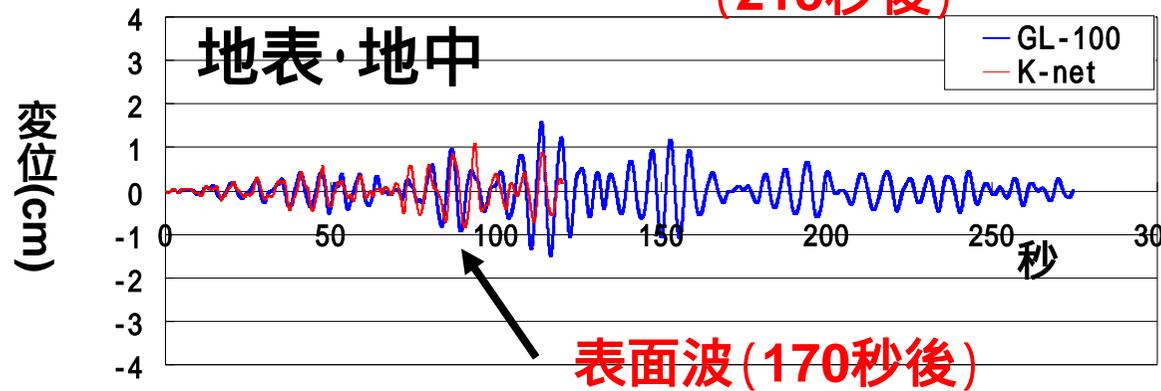
2004年9月5日:23:57:17

Mw:7.5 深さ:44 km

震央距離:約270km

K-Net (新宿)

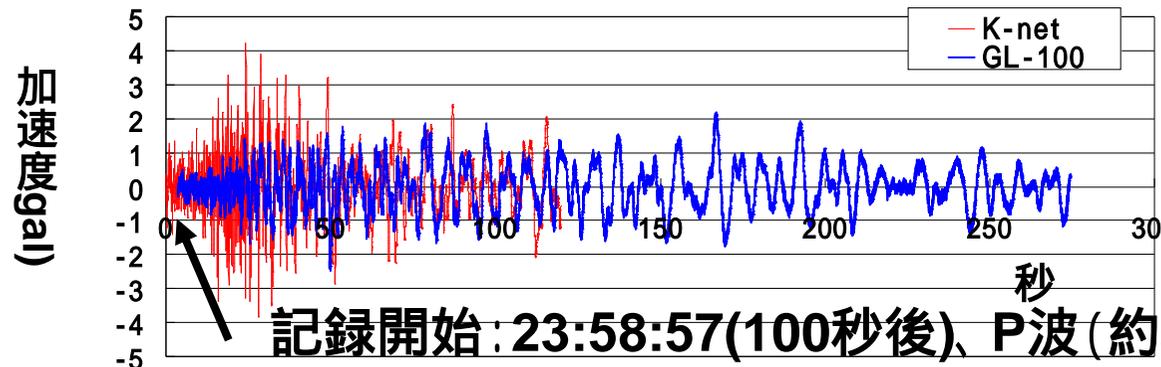
観測時刻:23:58:57(100秒後)



緊急地震速報

到達予測時間:

P波:約52秒後、S波:約91秒後



表面波

到達時間:約170秒後

最上階の最大応答

到達時間:約215秒後

工学院大学新宿キャンパスにおける対策事例

東日本大震災時の緊急地震速報・長周期地震動予測(25階)



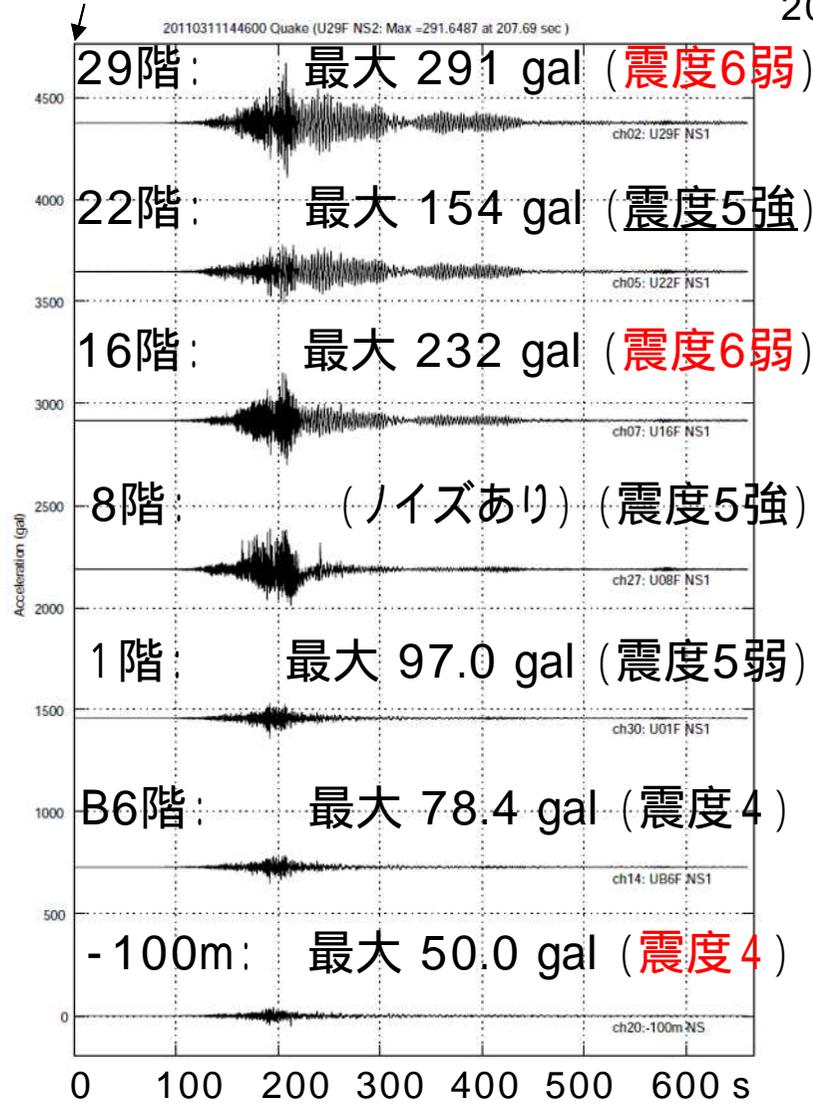
→ P波・S波に加え、表面波(長周期地震動)の到達予想時刻も表示

(表面波はS波の約半分程度の伝播速度を仮定)

技術協力:防災科学技術研究所

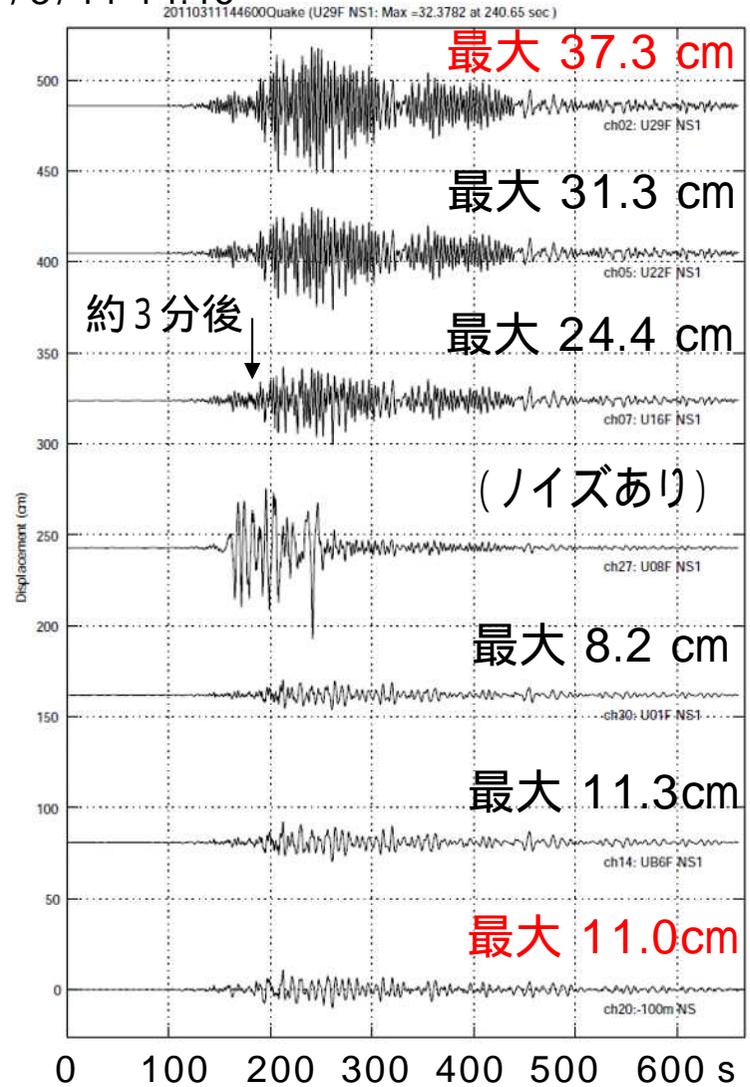
2011年東日本大震災(本震)による超高層建築の揺れ -工学院大学・新宿校舎の加速度と変位波形-

2011/3/11 14:46



南北方向の揺れ: 加速度 (短周期地震動)

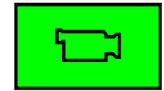
2011/3/11 14:46



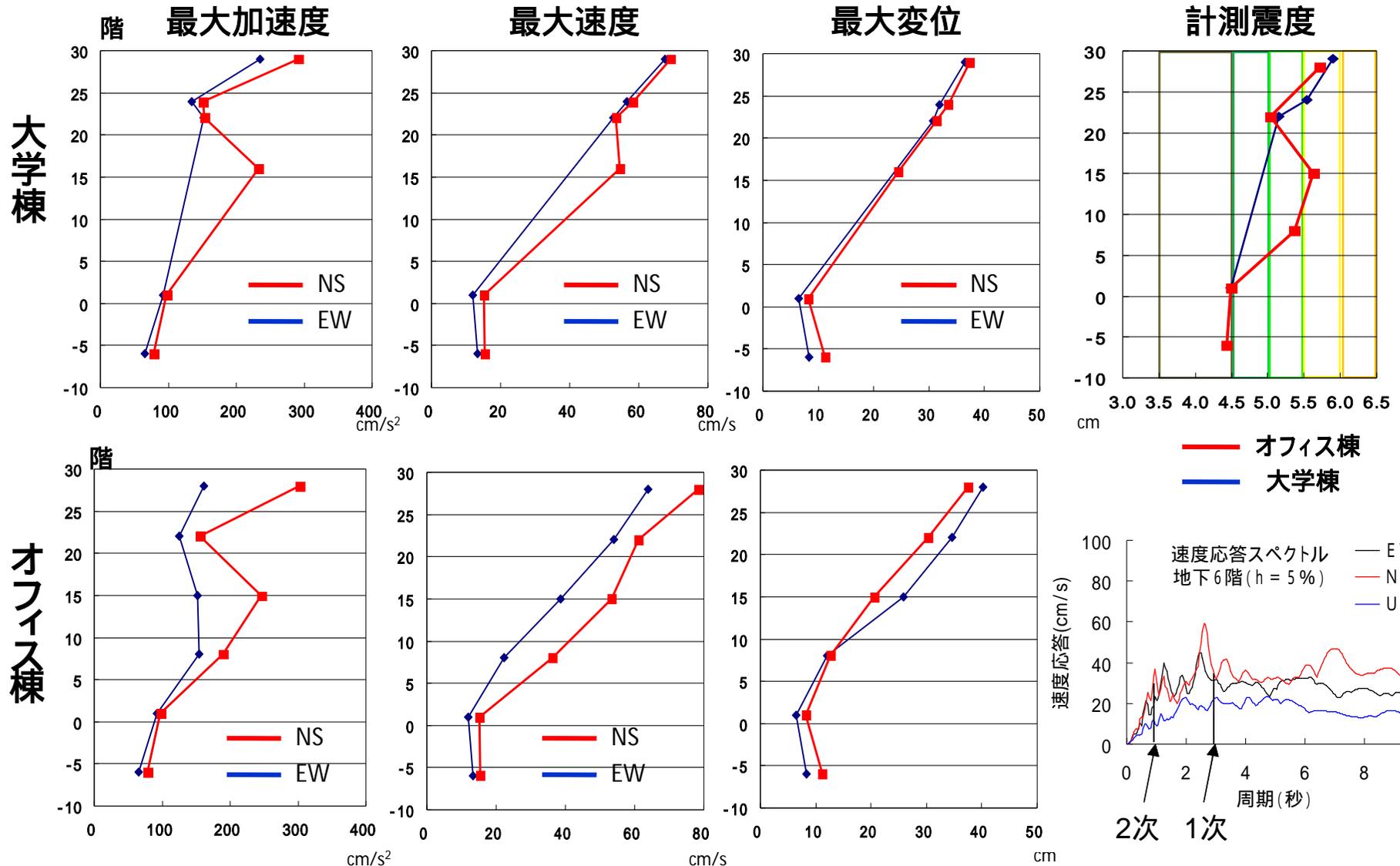
変位 (長周期地震動)

工学院大学新宿キャンパスでの揺れ

(最大加速度、最大速度、最大変位、計測震度)



3D揺れ

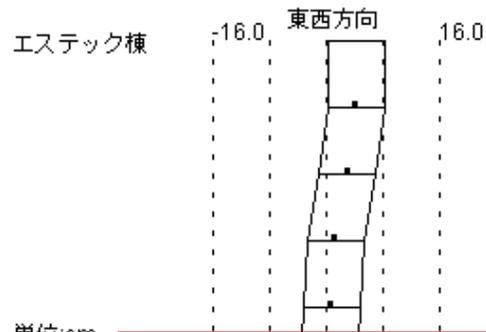
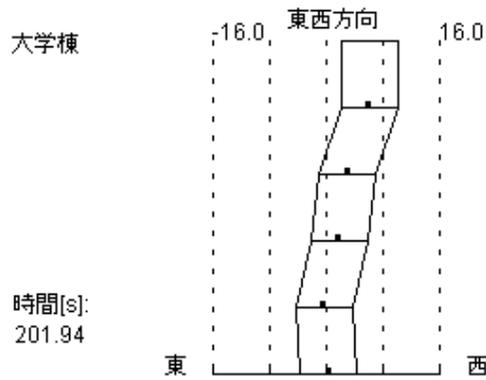


前半は2次モード(約1秒、震度・加速度分布)、後半は1次モード(約3秒、変位分布)が卓越

工学院大学新宿校舎の強震観測の活用事例

東日本大震災による建物の即時被災度判定システム結果

2011/03/11 14:46:00 建物振動状況



単位:cm

色	簡易震度	層間変形角	説明
赤	6弱以上	1/100以上	被害が出ている可能性があります
黄	5弱~5強	1/200~1/100	軽微な被害が出ている可能性があります
青	0~4	1/200以下	大きな被害は出ていないと思われます

2011/03/11 14:46:00 簡易震度と層間変形



簡易震度:
最大加速度と最大速度から計算

層間変形角:
センサー設置階の変位とセンサー間の階高から算出

簡易震度と層間変形の説明

色	簡易震度	層間変形角	説明
赤	6強以上	1/50以上	被害が出ている可能性があります
黄	5弱~6弱	1/200~1/50	軽微な被害が出ている可能性があります
青	0~4	1/200以下	大きな被害は出ていないと思われます

2011年東日本大震災における 工学院大学の被害状況と対応(新宿:震度5弱)



28F (天井パネルの落下)



24F(本棚の転倒、間仕切り壁の大変形)



14F (天井パネルの落下)

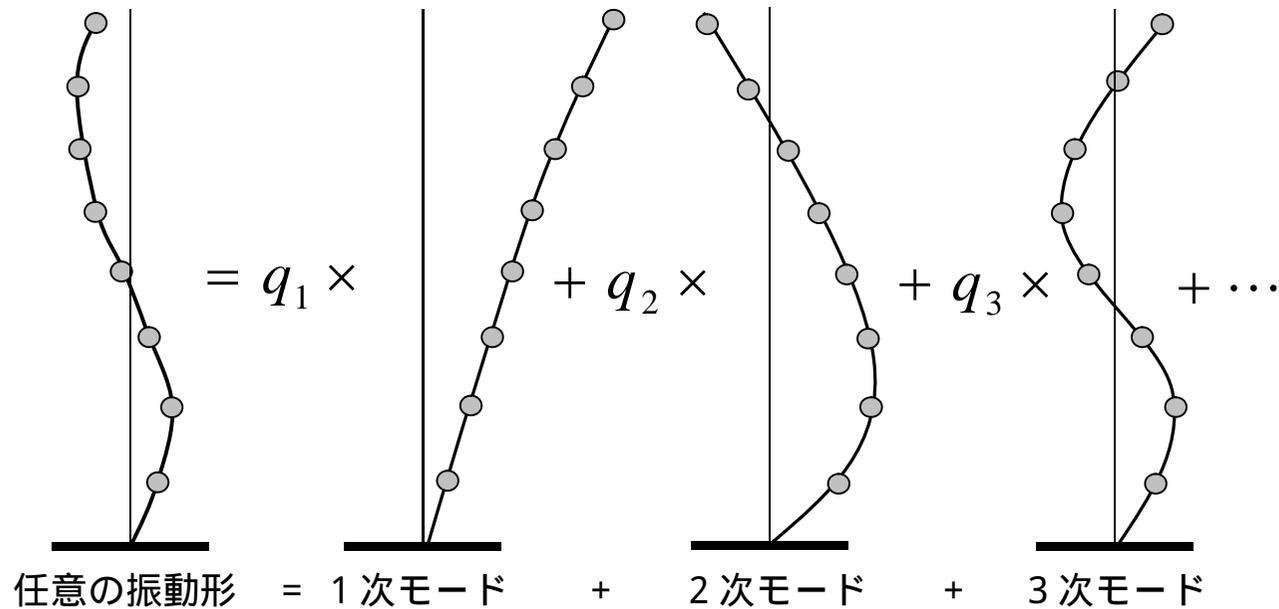


駅周辺の大混乱



帰宅困難者の受入(約700名)

長周期地震動予報(応答スペクトル)による高層建物の地震 応答推定: 応答スペクトル法(二乗和平方根法・SRSS法)



$$\{X\} = \sum_{i=1}^n q_i \beta_i \{U_i\} \approx q_1 \cdot \beta_1 \{U_1\} + q_2 \cdot \beta_2 \{U_2\} + q_3 \cdot \beta_3 \{U_3\}$$

$\{X\}$: 任意の振動形 $\beta_i \{U_i\}$: i 次モードの刺激関数

q_i : i 次モードの固有周期・減衰定数の1質点系の地震応答解

$$\{X\}_{\max} \approx \sqrt{(S_1 \cdot \beta_1 \{U_1\})^2 + (S_2 \cdot \beta_2 \{U_2\})^2 + (S_3 \cdot \beta_3 \{U_3\})^2}$$

S_i : i 次モードの固有周期・減衰定数の地震応答スペクトル値

応答スペクトル法で用いる高層建築各種パラメータの経験式 (可能であれば、構造計算書・実測値が望ましい)

固有周期の推定^{1)~3)}

$$T_1 = 0.11 \times N \quad \dots (1)$$

$$T_2 = 1/3 \times T_1 \quad \dots (2)$$

$$T_3 = 1/5 \times T_1 \quad \dots (3)$$

N:建物の地上階数

- 1) 市村将太, 他: 鋼構造超高層建築物の設計用パラメータに関する研究その1、剛性分布・固有周期・ベースシャー係数日本建築学会、1999
- 2) 市村将太, 他: 超高層鋼構造建物の弾性設計用パラメータに関する研究(その1)、各パラメータの定式化日本建築学会2000年
- 3) 日本建築学会: 建築物の減衰2000年pp.131-137

減衰定数の推定⁴⁾

$$h_1 = 0.81 \times f_1 + 1.05 \quad \dots (4)$$

f_1 : 1次固有振動数(Hz)

- 4) 横田治彦, 他: 振動試験および地震観測データに基づく鉄骨造高層建物の減衰性状 日本建築学会構造系論文報告集第453号pp.77-841993.11

応答スペクトル(h=5%)の補正

$$\text{告示式 } Fh = \frac{1.5}{1+10h} \quad \dots (5)$$

大宮・久田(日本建築学会大会、2014)より

刺激関数の近似⁵⁾

$$Xx1 \cdot \beta1 = -0.37n^2 + 1.86n - 0.06 \quad \dots (6)$$

$$Xx2 \cdot \beta2 = -3.04n^2 + 2.27n + 0.01 \quad \dots (7)$$

$$Xx3 \cdot \beta3 = 7.53n^3 - 10.11n^2 + 3.10n - 0.03 \quad \dots (8)$$

$$n = xl \quad \dots (9)$$

x:対象の階、l:建物の階数

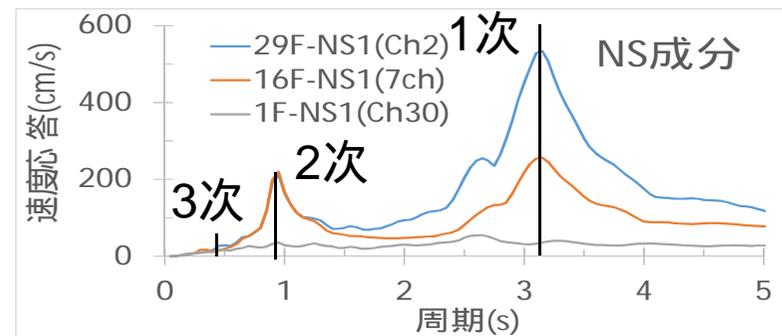
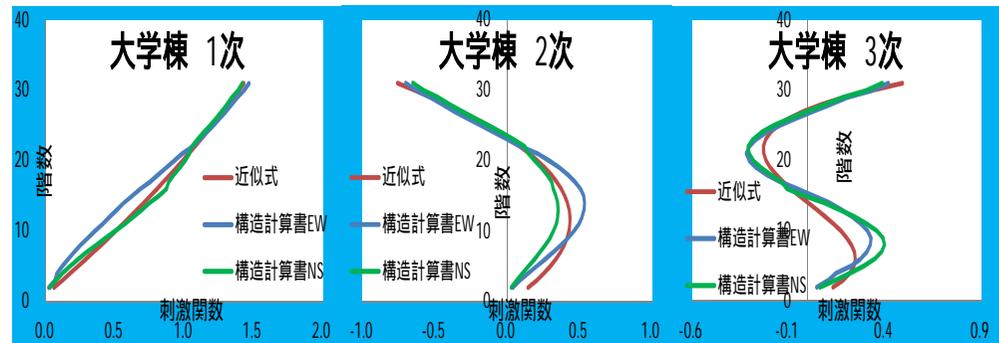


図 工学院大学で観測された東北地方太平洋沖地震の速度応答スペクトル(h=5%)

結果・観測との比較 (東日本大震災時の工学院大学・新宿校舎)

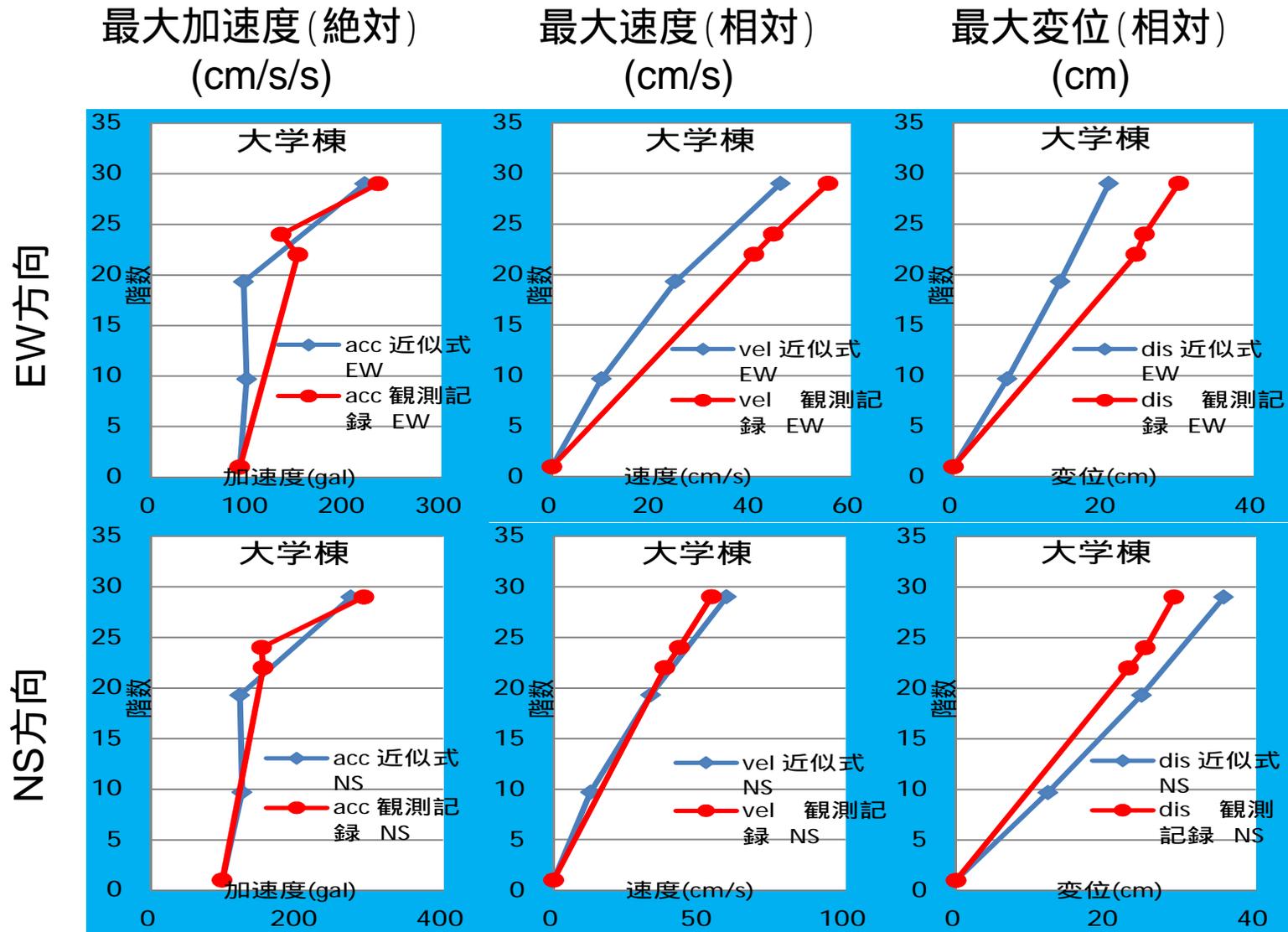


図3 結果と観測記録との最大値比較

巨大都市・中心市街地の事例(新宿駅周辺エリア)

- ・新宿駅周辺地域(具体例)
 - 世界最大の乗降客(1日約340万人)
 - 西口地域:高層オフィス街
 - 東口地域:商業・娯楽地区
 - 夜間人口2万、昼間人口30万
 - 首都直下地震(最悪条件)で死者約1万、負傷者10数万名、重傷者数万名…
- ・災害対策:現状は地域防災計画とBCP
 - 地域防災計画(避難所・備蓄・地域防災組織・医療救護所等の整備)
 - 地域住民(夜間人口)が主な対象
 - 事業者・建物 BCP/消防計画
- ・レジリエントな中心市街地の構築:
 - 新宿駅周辺地域防災対策協議会による
 - セミナー・講習会・防災訓練・検証
 - 都市再生安全確保計画と連携



新宿駅西口地域



2011東日本大震災時帰宅困難者による群衆(新宿駅東口)

都市型大規模建物(超高層建築等)の危機対応 ～被害レベルと対応計画の設定例～

対応レベル	レベル1 (各階待機)	レベル2 (部分避難)	レベル3 (全館避難)
火災の発生	なし	小火程度	あり
地震の想定例 (再現期間)	中小地震 (数年に1度程度)	大地震 (数十年に一度)	最大級地震 (数百年以上に1度)
建物の被害例	被害なし	被害の可能性あり	被害あり
室内の被害例	軽微な被害	中程度の被害	大被害あり
人的被害例	負傷者の可能性	負傷者あり	重傷者あり
建物の対応例	軽微な修復	修復可能	取壊し
火災対応	火の元確認など	通報、初期消火、安全防護、避難誘導	通報、初期消火、全館避難
震災対応	安否確認、使用継続性確認など	救援救護、建物確認、部分避難	全館避難、負傷者対応(重傷者搬送)
帰宅困難者対応	各階待機(原則)、一時滞在場所の提供	被害階から部分避難(低層階など)、受入困難	避難場所等で待機 1次滞在施設に滞在

注意: 被災度や対応は、建物の耐震性能で大きく異なります。

地域連携による震災対応力向上モデル

～ 新宿駅周辺地域における震災時対応～

新宿ルール実践のための行動指針(2016年)

(新宿駅周辺防災対策協議会、新宿駅周辺地域都市再生緊急整備協議会)

新宿ルール(2007年)

1. 組織は組織で対応する(自助)
2. 地域が連携して対応する(共助)
3. 公的機関は地域を支える(公助)

基本原則: 自分の組織・地域は自分達で守る

新宿ルール実践のための行動指針(2016年)

1. むやみに移動しない (駅周辺の混乱防止)
2. 現地本部を中心に連携する (エリア情報の共有)
3. 地域で傷病者に対応する (災害時医療体制への対応)

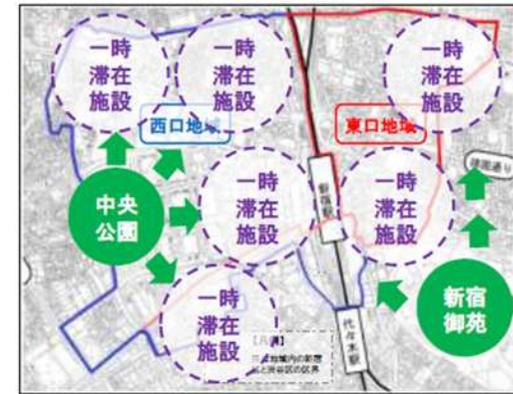
新宿駅周辺防災対策協議会で決定(2016年6月2日)

地域防災訓練(2016年11月10日)による検証

新宿駅周辺エリア震災時・行動指針(2016)

4つのフェーズにおける行動ルール

フェーズ	① 発災	② 残留・退避	③ 滞在	④ 帰宅
概要	<p>混乱を抑える。</p> <p>身の安全を確保する。</p>	<p>身の寄せどころのある滞留者を、その場で待機させる。</p> <p>身の寄せどころのない滞留者を、安全な場所に誘導する。</p>	<p>身の寄せどころのない滞留者を、安全な場所に移動し、一時滞在させる。</p>	<p>滞留者を、鉄道や代替交通機関等で帰宅させる。</p>
発災後の経過	<p>混乱の収束まで → 一時滞在施設の開設まで → 交通機関の復旧 (代替輸送手段の確保) まで</p>			



SIP防災 -2・サブテーマ1：巨大都市・大規模ターミナル駅周辺地域における複合災害への対応支援アプリケーションの開発

エリア特性に応じた複合災害の予測技術の開発

震災・水害・複合災害の想定

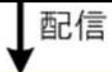


エリア災害予防のためのアプリケーションの開発

被災レベルに対応した事前行動計画の策定



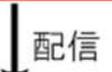
災害関連情報(SIP防災): 揺れ・被害想定・豪雨等
テストフィールド: 新宿駅・北千住駅周辺エリア



エリア災害対応支援アプリケーション開発

対応支援サーバーの開発

受信アプリの開発



来街者・従業員・市民 (サイネージ、スマホ等)



災害対応従事者 (タブレットPC、PC等)

協力・連携: 新宿駅周辺防災対策協議会・都市再生安全確保計画(行動計画・指針の作成、社会実装)、都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の軽減化プロジェクト (災害対応力向上のための教育訓練プログラム開発)

震災時地域情報の提供（スマホ試作画面）


戦略的イノベーション創造プログラム
 Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program

エリア災害対応支援アプリケーション
(一般ユーザ)

新宿マップ
 関連情報

発災 → 残留退避 → 滞在 → 帰宅

行動指針 | 鉄道運行 | 一時滞在施設 | 医療機関

10時0分、
 江東区:築館：震度6.6（最大）

新宿：震度4.8

行動指針

新宿駅周辺地域の就業者・通学者の対応
 →所属組織で原則待機を継続し、各組織の自衛消防活動に協力する
 →一時滞在施設へ移動が必要な場合、施設情報を確認して移動する
[施設位置図](#)

一般の来街者の対応
 →施設情報を確認し、支援が必要な方を優先して一時滞在施設へ移動する
 →交通機関が復旧するまで、一時滞在施設で滞在する
[施設位置図](#)

過去地震情報 | 設定 | 更新


戦略的イノベーション創造プログラム
 Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program

エリア災害対応支援アプリケーション
(防災従事者A)

新宿マップ
 関連情報
 推定情報

施設危険予測
 高層階 4
 中層階 3
 低層階 2

発災 → 残留退避 → 滞在 → 帰宅

行動指針 | 鉄道運行 | 一時滞在施設 | 医療機関 | 被害情報

10時0分、
 江東区:築館：震度6.6（最大）

新宿：震度4.8

一時滞在施設情報 | エリア別表示▼

	種別	施設名称	受入	判定
11	公共	区立角筈区民センター	100-149人	安全
1	公共	淀橋市場	250-299人	確認中
2	公共	総合芸術高等学校	250-299人	確認中

過去地震情報 | 設定 | 更新

2016年度地域防災訓練(新宿駅周辺防災対策協議会) 自衛消防訓練(震災対応:テナント地区隊)



自衛消防隊(地区隊)の編成



初期消火訓練(消火器)



救援訓練(バール)



応急救護訓練



傷病者搬送訓練



室内安全性確認訓練

自衛消防訓練(防災センター・本部隊、応急救護所)



本部隊の編制



建物使用性・室内安全性確認



情報整理・館内放送
(地震・建物・地域情報など)



傷病者搬送訓練



応急救護訓練



傷病者情報整理・共有

新宿駅周辺地域・西口現地本部訓練(地域情報共有・発信)



本部長と帰宅困難者
対策班の情報共有



情報整理・集約班
による情報整理



情報共有班による対応支援
システムへの情報入力

新宿ルール・行動指針による駅周辺滞留者誘導訓練(駅 避難場所 一時滞在施設)



新宿駅西口デジタル
サイネージ前での説明



エリア対応支援システム
による情報確認



新宿中央公園での
災害用トイレの確認