

# 研究テーマ：都市内鉄道路線の地震時システムリスク解析

東京都市大学：高澤/吉川，篠塚研究所：静間/中村

応用分野：想定地震に対する復旧曲線の設定，BCP/事業継続計画への定量情報の付与

## <研究概要>

### ・都市内輸送路線：

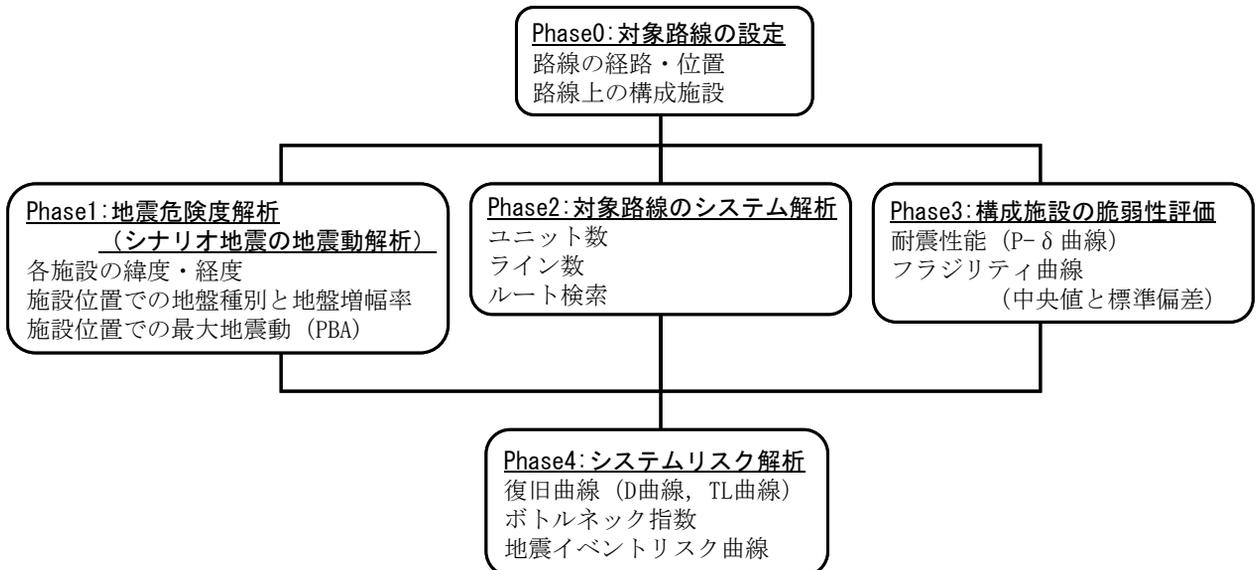
線状構造のため，強震時には構造施設1か所の損傷により，長期機能停止と直接・間接損失が生じる。

### ・研究内容：

地震時システムリスクの解析手法を構築し，設定した都市内鉄道路線モデルに対する事例解析を提示する。

### ・システムリスク解析：

異種構造物にて構成される線状施設を直列/並列混在システムとてモデル化し，シナリオ地震に対するリスク(機能停止/復旧過程)を定量化する



## 解析フローチャート

## <骨格理論と付随理論>

### 骨格理論：

1. 施設群の損傷確率理論
  - ・地震動/施設の性能関数による定式化
  - ・施設間の相関特性の導入
2. システム信頼性理論に基づく機能停止理論
  - ・最小カット集合/最小パス集合とルート探索
  - ・D曲線/TL曲線による復旧曲線表示
  - ・地震イベントリスク曲線とNEL/PMLの算定

### 付随理論：

1. 複数震源モデルによる地震動評価
  - ・J-SHISモデルの導入
  - ・距離減衰式と地盤増幅率
2. Fragility関数による構成施設の脆弱性評価
  - ・ETAによるユニット/コンポーネントの脆弱性評価
  - ・対数正規確率関数によるユニットのFragility表記

## <Phase0:対象路線の設定>

- ・郊外の駅と都心環状線(JR山手線)を繋ぐ都市内鉄道路線を想定
- ・直列/並列混在システム路線(総延長22Km)
- ・構成施設: 駅構築物(地上, 地下), 高架橋, 橋梁, トンネル, 土構築物



高架橋



トンネル

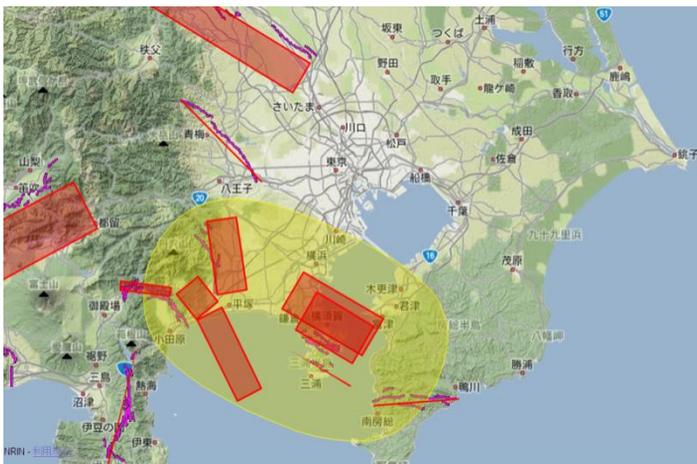


橋梁

## <Phase1:地震危険度解析>

首都圏付近の主要断層

- 主要活断層帯
- 海溝型地震震源断層



対象路線の地震リスク上位50

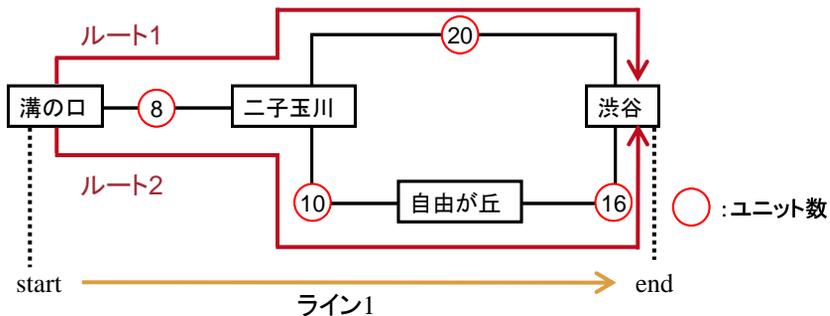
No.	震源名	マグニチュード	PBA (gal)	年間発生確率 $\times 10^{-3}$	累積確率 $\times 10^{-3}$
1	(139.70, 35.60)	M7.0	355.8	0.021	0.021
2	(139.60, 35.60)	M7.0	355.8	0.021	0.042
3	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
18	(139.60, 35.60)	M6.5	293.7	0.047	0.432
19	1703,1923 関東	M8.0	293.7	1.277	1.709
20	(139.70, 35.70)	M6.5	293.7	0.047	1.756
21	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
39	(139.40, 35.70)	M7.0	246.7	0.021	2.444
40	立川断層帯	M7.4	246.7	0.430	2.873
41	(139.90, 35.50)	M7.0	246.6	0.021	2.895
42	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
50	(139.70, 35.70)	M6.0	229.4	0.106	3.369

PBA (Peak Bedrock Acceleration)  
: 基盤最大加速度

出典: (独) 防災科学技術研究所

## <Phase2:対象路線のシステム解析>

ユニット数:58  
 ライン数:1  
 ルート数:2

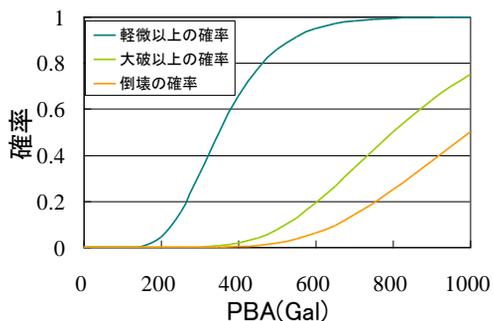


### ルート検索

機能属性情報入力				検索結果															検索履歴																			
No.	機能名	比率	検索結果	溝の口	高架区間1	高架区間2	高架区間3	高架区間4	二子玉川駅	高架区間5	解放	二子玉川駅	高架区間6	池田区間	池田区間1	二子玉川駅	池田区間2	池田区間3	池田区間4	池田区間5	池田区間6	池田区間7	池田区間8	池田区間9	池田区間10	池田区間11	池田区間12	池田区間13	池田区間14	池田区間15	池田区間16	池田区間17	池田区間18	池田区間19	池田区間20			
1	ライン1	1	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35

## <Phase3:構成施設の脆弱性評価>

連続高架橋構 造被害	電車線・付帯 設備構造被害	復旧期間 (日数)
なし	なし	0
	軽微	1
軽微	大破・倒壊	3
	なし	2
大破	軽微	2
	大破・倒壊	3
倒壊	なし	20
	軽微	20
	大破・倒壊	20
		90



高架区間のイベントツリーとフラジリティ曲線

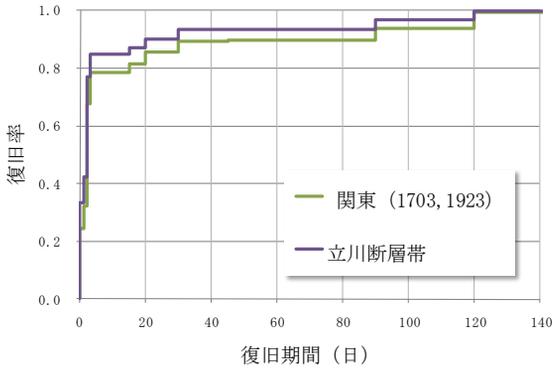


橋梁(大破)

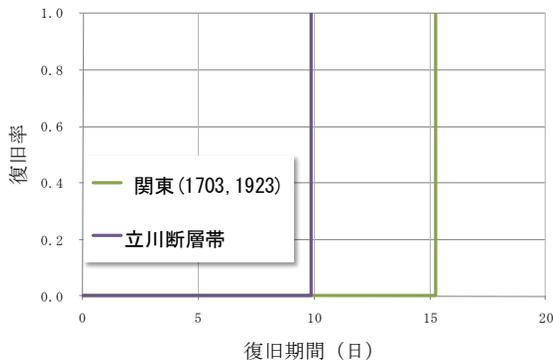


高架橋(倒壊)

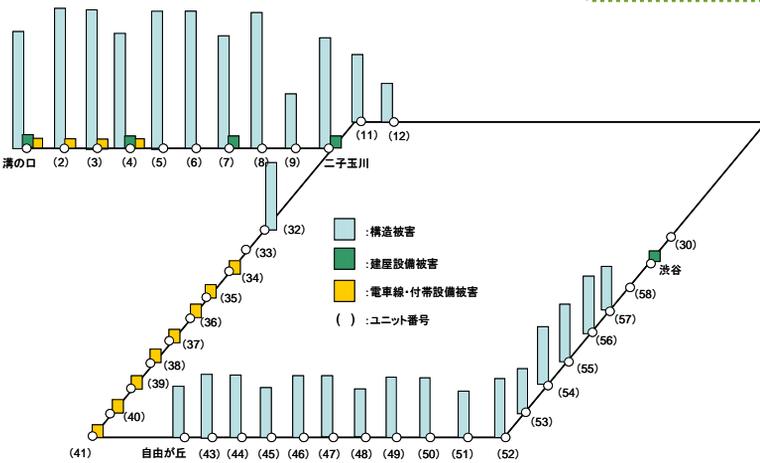
## <Phase4:システムリスク解析>



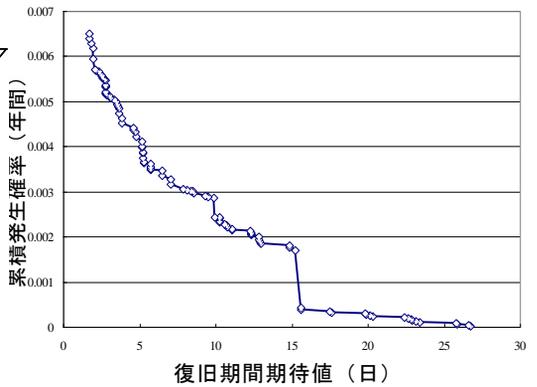
復旧曲線 (D曲線)



復旧曲線 (TL曲線)



ボトルネック指数 (関東地震)



地震イベントリスク曲線

### ・復旧曲線

D曲線 :  $R_D(t) = 1 - \sum_{\text{alli}} r_i \cdot G_T(t | r_i)$

T曲線 :  $R_T(r_i) = \int_0^{\infty} G_T(t | r_i) dt$



機能毎にn個の直列システムに分解

TL曲線 :  $R_{TL}(r_k) = \int_0^{\infty} G_T(t | r_i) dt$

### ・ボトルネック指標 (B.I.)

$B_i = e_i \cdot E(T_i), i = 1 \sim n$

$i$ : コンポーネント ( $n$ : 総数)

$e_i$ : 全体機能への影響度,  $E(T_i)$ : 復旧期間期待値

### ・地震イベントリスク曲線

$P_1 = Q_1$

$Q_k = 1 - (1 - P_k) (1 - Q_{k-1})$

$Q_k$ :  $k$ 番目までの地震の累積発生確率

$P_k$ :  $k$ 番目までの年間発生確率

§ 応用分野: 都市鉄道路線の地震防災対策, 耐震補強計画, BCP, リスクマネジメント/ファイナンス

§ 展開分野: 各種線状ネットワーク施設への展開: 高速自動車道, 海運/陸運物量, サプライチェーン etc.

# 首都圏鉄道路線の地震時システムリスク解析

## -仮想路線の地震後復旧シミュレーション-

東急建設(株), 篠塚研究所, 東京都市大学総合研究所

### 検討目的

- 都市内輸送路線の復旧日数を解析する
- 利用客数を重みとして設定し、ボトルネックを探る
- 地震動の地盤増幅率の影響を取り込む
- 補強前と補強後の復旧日数を比較検討する



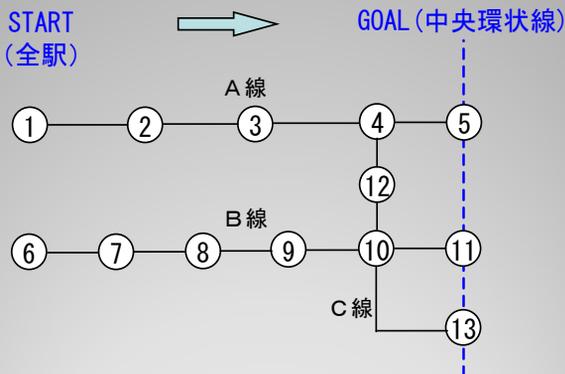
出典: 土木が遭遇した阪神大震災 日経コンストラクション

### 対象施設 (仮想)

- ラダーシステム路線 (単路線距離約40km)
- 損傷対象: 高架橋5種類 (年代別、耐震性能に違い)
- 地盤種類: 2種類 (普通地盤と軟弱地盤)
- 上り線のみ

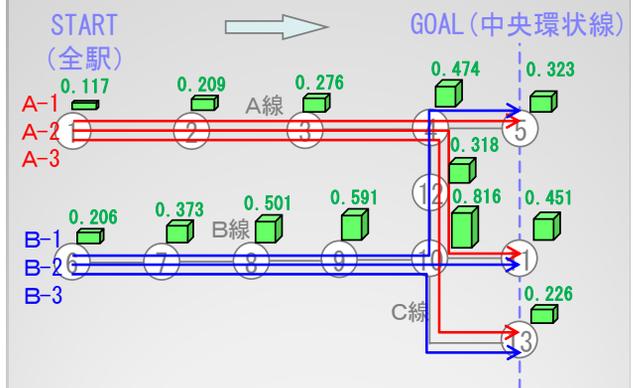


### システムコンポーネント



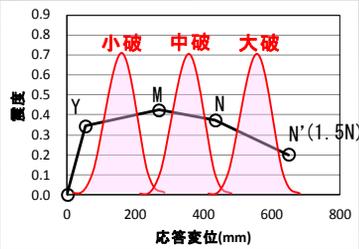
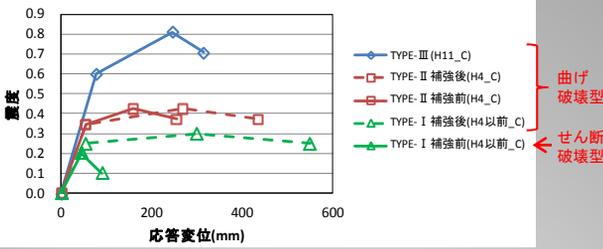
ブリッジ構造のラダーシステム

### 対象施設の重み (利用客の比率)



系統⇒6  
重み⇒各駅通過客数/全客数

## 対象施設の脆弱性評価



TYPE-I (補強前:せん断破壊型)		
損傷度	弾性応答加速度 $\alpha_e$ (gal)	復旧日数※ (日)
無被害	0	0
大破	472	60

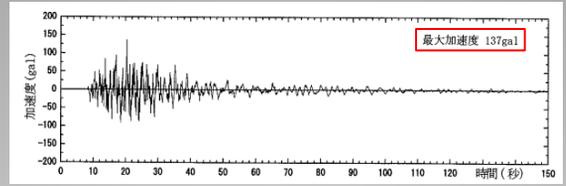
TYPE-II (補強前:曲げ破壊型)		
損傷度	弾性応答加速度 $\alpha_e$ (gal)	復旧日数※ (日)
無被害	0	0
小破	720	3
中破	1188	10
大破	1800	60

TYPE-III (曲げ破壊型)		
TYPE-I (補強後:曲げ破壊型)		
TYPE-II (じん性補強後:曲げ破壊型)		
損傷度	弾性応答加速度 $\alpha_e$ (gal)	復旧日数※ (日)
無被害	0	0
小破	1296	3
中破	2088	10
大破	3060	60

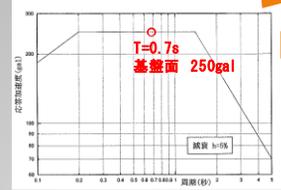
※GOAL地点(中央環状線)の復旧日数は2倍

## 地震動の増幅



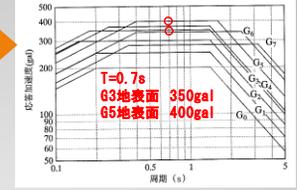
基底地震動波形(L1地震動)

①地震波⇒建造物の弾性応答倍率



基底面における弾性加速度応答スペクトル

②基底面⇒地表面の地震増幅率



地表面における弾性加速度応答スペクトル

### 地盤種別に応じた地震加速度の増幅

地盤種別	地盤条件	弾性応答倍率			地震増幅率	
		地震動の最大加速度	基底面 応答加速度 $\alpha_e$ (gal)	倍率 S	基底面 応答加速度 $\alpha_e$ (gal)	増幅率 $\alpha_e/\alpha_B$
G3	普通地盤	137	250	1.825	250	350 1.40
G5	軟弱地盤				250	400 1.60

## 地震動の増幅を考慮した 地盤加速度による脆弱性評価

### 対象施設の脆弱性評価

TYPE-I (補強前:せん断破壊型)						
損傷度	弾性応答加速度 $\alpha_e$ (gal)	弾性応答倍率 S	普通地盤(G3)		軟弱地盤(G5)	
			増幅率 $\lambda$	基礎加速度 $\alpha_B/S/\lambda$ (gal)	増幅率 $\lambda$	基礎加速度 $\alpha_B/S/\lambda$ (gal)
無被害	0	1.825	1.4	0	1.6	0
大破	472	1.825	1.4	185	1.6	162

TYPE-II (補強前:曲げ破壊型)						
損傷度	弾性応答加速度 $\alpha_e$ (gal)	弾性応答倍率 S	普通地盤(G3)		軟弱地盤(G5)	
			増幅率 $\lambda$	基礎加速度 $\alpha_B/S/\lambda$ (gal)	増幅率 $\lambda$	基礎加速度 $\alpha_B/S/\lambda$ (gal)
無被害	0	1.825	1.4	0	1.6	0
小破	720	1.825	1.4	282	1.6	247
中破	1188	1.825	1.4	465	1.6	407
大破	1800	1.825	1.4	705	1.6	616

TYPE-III (曲げ破壊型)、TYPE-I (補強後:曲げ破壊型)、TYPE-II (じん性補強後:曲げ破壊型)						
損傷度	弾性応答加速度 $\alpha_e$ (gal)	弾性応答倍率 S	普通地盤(G3)		軟弱地盤(G5)	
			増幅率 $\lambda$	基礎加速度 $\alpha_B/S/\lambda$ (gal)	増幅率 $\lambda$	基礎加速度 $\alpha_B/S/\lambda$ (gal)
無被害	0	1.825	1.4	0	1.6	0
小破	1296	1.825	1.4	507	1.6	444
中破	2088	1.825	1.4	817	1.6	715
大破	3060	1.825	1.4	1198	1.6	1048

## シミュレーションケース

ケース1: 補強前

ケース2: TYPE-I せん断補強 渋谷のみ未補強

ケース3: TYPE-I せん断補強

ケース4: TYPE-I せん断補強、TYPE-II じん性補強

A線					
主要駅・高架橋	地盤種別	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
1 相模湖	普通(G3)	III	III	III	III
2 矢部	普通(G3)	II	II	II	II(補)
3 新百合ヶ丘	普通(G3)	II	II	II	II(補)
4 狛江	普通(G3)	I	I(補)	I(補)	I(補)
5 渋谷	普通(G3)	I	I	I(補)	I(補)

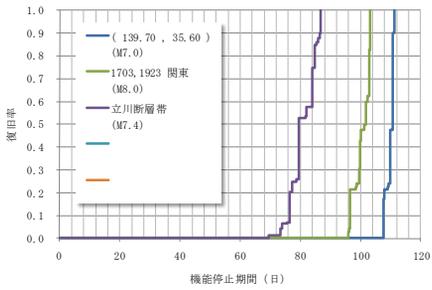
B線					
主要駅・高架橋	地盤種別	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
6 八景島	軟弱(G5)	III	III	III	III
7 磯子	軟弱(G5)	I	I(補)	I(補)	I(補)
8 横浜	軟弱(G5)	I	I(補)	I(補)	I(補)
9 川崎	軟弱(G5)	I	I(補)	I(補)	I(補)
10 旗の台	普通(G3)	I	I(補)	I(補)	I(補)
11 恵比寿	普通(G3)	I	I(補)	I(補)	I(補)

C線					
主要駅・高架橋	地盤種別	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
4 狛江	普通(G3)	I	I(補)	I(補)	I(補)
12 都市大	普通(G3)	I	I(補)	I(補)	I(補)
10 旗の台	普通(G3)	I	I(補)	I(補)	I(補)
13 大崎	普通(G3)	I	I(補)	I(補)	I(補)

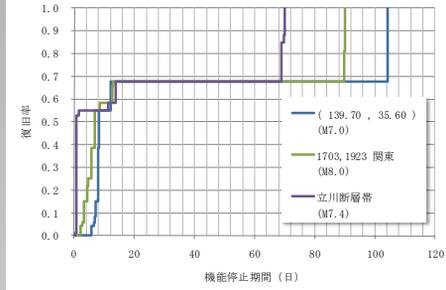
## シミュレーション結果

### Case1



・復旧に時間がかかる

### Case2



・7割弱は比較的早期に復旧

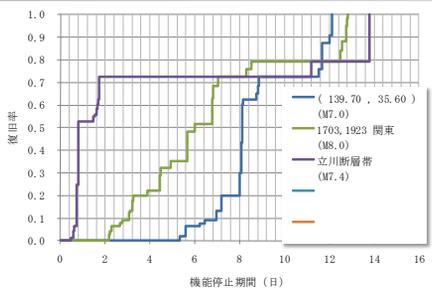
1703,1923 関東 (M8.0)			
損傷要因	影響度	脆弱性	BI
地震名   1703,1923 関東 (M8.0)			
恵比寿 高架橋梁構造被害	0.451	90.02	40.62
諏の台 高架橋梁構造被害	0.816	45.83	37.41
川崎 高架橋梁構造被害	0.591	50.81	30.00
渋谷 高架橋梁構造被害	0.323	89.87	29.04
横濱 高架橋梁構造被害	0.501	52.67	26.41
沼津 高架橋梁構造被害	0.474	47.22	22.36
大崎 高架橋梁構造被害	0.226	90.44	20.41
磯子 高架橋梁構造被害	0.373	53.68	20.04
都市大 高架橋梁構造被害	0.318	46.75	14.85
新百合ヶ丘 高架橋梁構造被害	0.276	11.18	3.98
大宮 高架橋梁構造被害	0.209	13.46	2.81
八景島 高架橋梁構造被害	0.206	5.46	1.13
相模湖 高架橋梁構造被害	0.117	4.97	0.58

・恵比寿の脆弱性が影響最大  
・ボトルネックが分散

1703,1923 関東 (M8.0)			
損傷要因	影響度	脆弱性	BI
地震名   1703,1923 関東 (M8.0)			
渋谷 高架橋梁構造被害	0.323	89.87	29.04
新百合ヶ丘 高架橋梁構造被害	0.276	11.18	3.98
矢部 高架橋梁構造被害	0.209	13.46	2.81
横濱 高架橋梁構造被害	0.501	4.36	2.19
川崎 高架橋梁構造被害	0.591	3.45	2.04
磯子 高架橋梁構造被害	0.373	5.01	1.87
恵比寿 高架橋梁構造被害	0.451	3.67	1.65
諏の台 高架橋梁構造被害	0.816	1.99	1.63
八景島 高架橋梁構造被害	0.206	5.46	1.13
沼津 高架橋梁構造被害	0.474	2.30	1.09
大崎 高架橋梁構造被害	0.226	3.74	0.84
都市大 高架橋梁構造被害	0.318	2.19	0.70
相模湖 高架橋梁構造被害	0.117	4.97	0.58

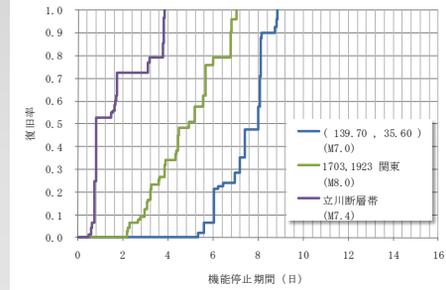
・渋谷がボトルネック

### Case3



・全駅比較的早期に復旧  
・新百合ヶ丘と矢部に近い立川断層による影響が大

### Case4



・耐震性が非常に高く全駅早期に復旧

1703,1923 関東 (M8.0)			
損傷要因	影響度	脆弱性	BI
地震名   1703,1923 関東 (M8.0)			
新百合ヶ丘 高架橋梁構造被害	0.276	11.18	3.98
矢部 高架橋梁構造被害	0.209	13.46	2.81
横濱 高架橋梁構造被害	0.501	4.36	2.19
川崎 高架橋梁構造被害	0.591	3.45	2.04
磯子 高架橋梁構造被害	0.373	5.01	1.87
恵比寿 高架橋梁構造被害	0.451	3.67	1.65
諏の台 高架橋梁構造被害	0.816	1.99	1.63
渋谷 高架橋梁構造被害	0.323	3.64	1.18
八景島 高架橋梁構造被害	0.206	5.46	1.13
沼津 高架橋梁構造被害	0.474	2.30	1.09
大崎 高架橋梁構造被害	0.226	3.74	0.84
都市大 高架橋梁構造被害	0.318	2.19	0.70
相模湖 高架橋梁構造被害	0.117	4.97	0.58

・新百合ヶ丘と矢部が脆弱  
・ボトルネックが分散

1703,1923 関東 (M8.0)			
損傷要因	影響度	脆弱性	BI
地震名   1703,1923 関東 (M8.0)			
横濱 高架橋梁構造被害	0.501	4.36	2.19
川崎 高架橋梁構造被害	0.591	3.45	2.04
磯子 高架橋梁構造被害	0.373	5.01	1.87
恵比寿 高架橋梁構造被害	0.451	3.67	1.65
諏の台 高架橋梁構造被害	0.816	1.99	1.63
渋谷 高架橋梁構造被害	0.323	3.64	1.18
八景島 高架橋梁構造被害	0.206	5.46	1.13
沼津 高架橋梁構造被害	0.474	2.30	1.09
大崎 高架橋梁構造被害	0.226	3.74	0.84
矢部 高架橋梁構造被害	0.209	3.59	0.75
新百合ヶ丘 高架橋梁構造被害	0.276	2.69	0.74
都市大 高架橋梁構造被害	0.318	2.19	0.70
相模湖 高架橋梁構造被害	0.117	4.97	0.58

・横浜が最も脆弱  
・ボトルネックが分散

§ 応用分野: 都市内/都市間鉄道路線の被害予測/防災対策提案

§ 具体的な展開分野: 耐震補強計画の立案, B C P 対策, 地震後早期点検計画の立案, etc.

# Google Earth を援用した地震情報の視覚的表示

東京都市大学 都市工学科：藪洋亮/学部4年， 吉川弘道/教授

応用分野：地震危険度解析/地盤情報の視覚的表示， 想定被害の視覚情報

## Google Earth基本機能

- ・KML(Keyhole Markup Language)
- ・プレスマーク/バルーン
- ・HTML(Hyper Text Markup Language)



写真：Pixta

## Google Earth関連ツール

- ・AG2KML/GE-Graph
- ・Picasa3



写真：東京都港湾局

## 事例

- ① 鉄道構造物の沿線最大作用加速度
- ② 首都直下地震の震度表示
- ③ 長周期地震動の最大速度分布



写真：Wikipedia



写真：Google Earth

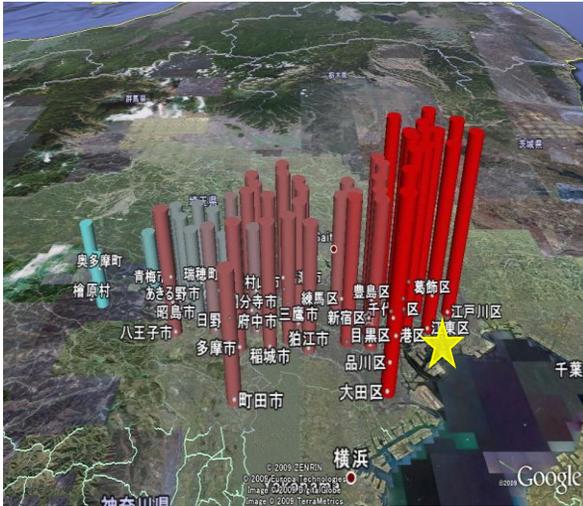
§ 適用施設:社会基盤施設(鉄道路線, 道路網, 各種建物), 上下水道, 海運/陸路ロジスティクス

§ 適用分野:防災対策, 耐震補強計画, BCP, SCM, 災害ポートフォリオ, リスクマネジメント

§ 展開分野: 市民/住民に対するリスクの説明と喚起, 企業stakeholderに対する視覚説明



## 事例 2 : 首都直下地震の震度表示



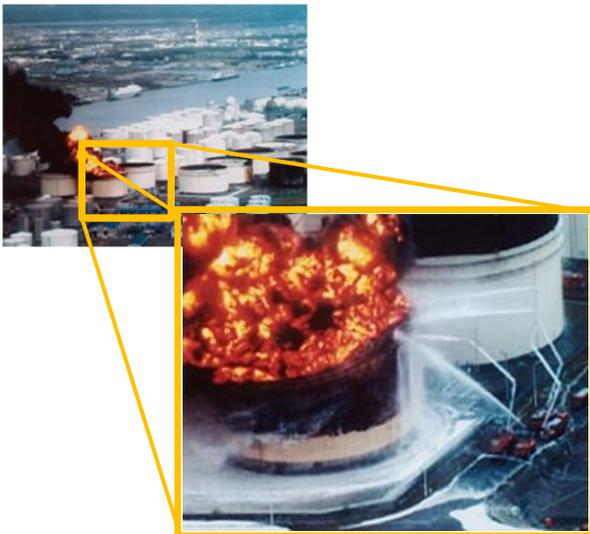
東京湾北部地震 (M7.3)



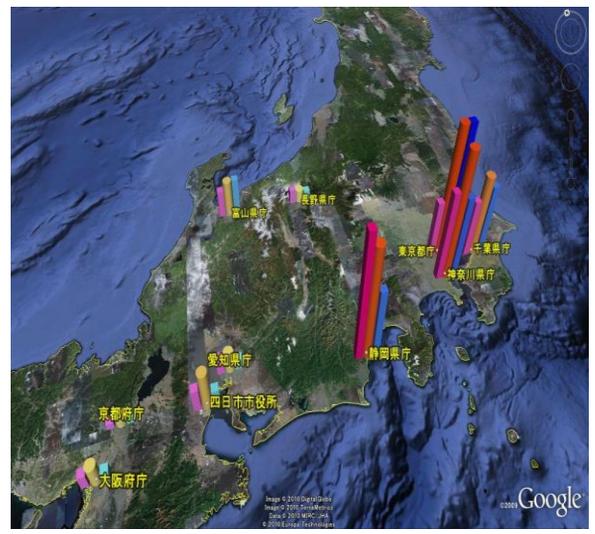
多摩直下地震 (M7.3)

想定地震における震度分布

## 事例 3 : 長周期地震動の最大速度分布



石油タンクのスロッシングによる火災  
2003年十勝沖地震 (NHKのHPより)



想定東海地震における応答速度分布  
(固有周期 : 4, 7, 10秒)