

平成22年度 第3回成果発表会

相互に関連したライフラインの復旧最適化に関する研究

千葉大学	教授	山崎	文雄
岐阜大学	教授	能島	暢呂
筑波大学	准教授	庄司	学
横浜国立大学	教授	佐土原	聡
鹿島 技術研究所		永田	茂
千葉大学	准教授	丸山	喜久

首都直下地震とライフライン

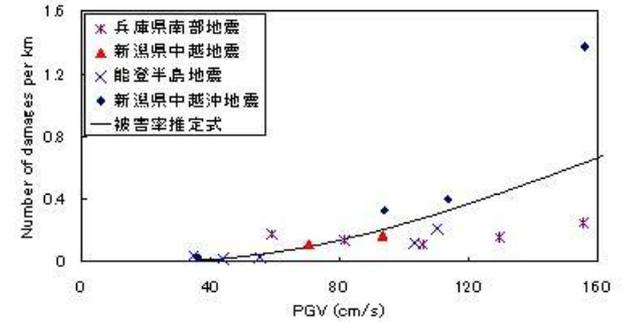
人口・事業所

ライフライン
交通網

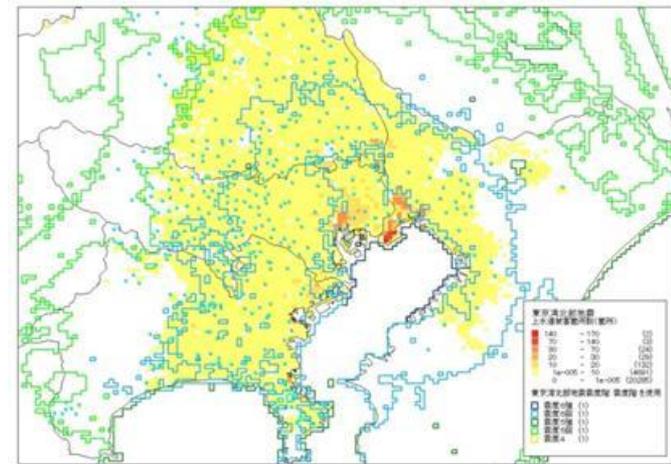
地盤

地震動

中央防災会議



被害予測式



ライフライン・交通網の
被害・復旧予測

ライフライン施設被害による供給支障

(中央防災会議:東京湾北部地震M7.3)

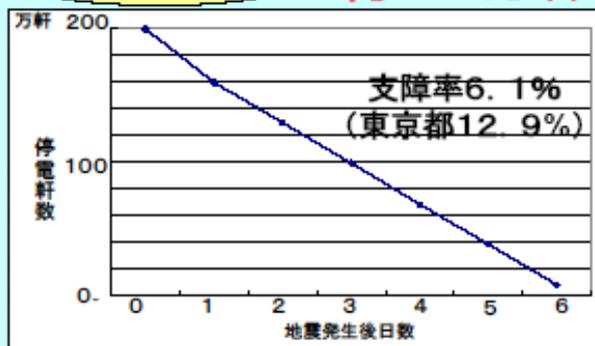
18時、風速15m/s

ライフライン施設被害による供給支障

阪神:約40万件

電力

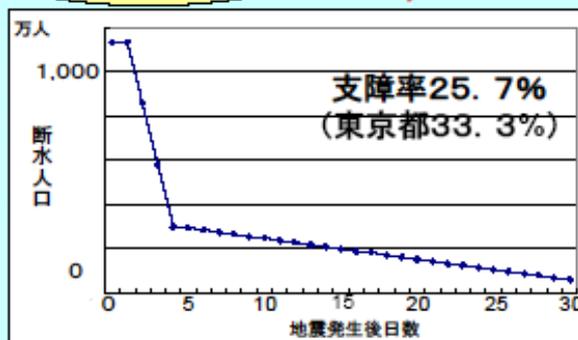
約160万軒



阪神:約96万人

上水道

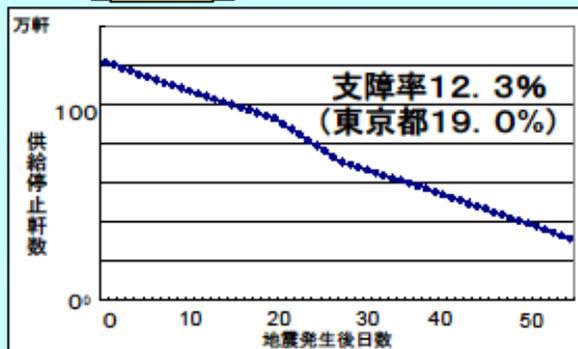
約1,100万人



阪神:約86万件

ガス

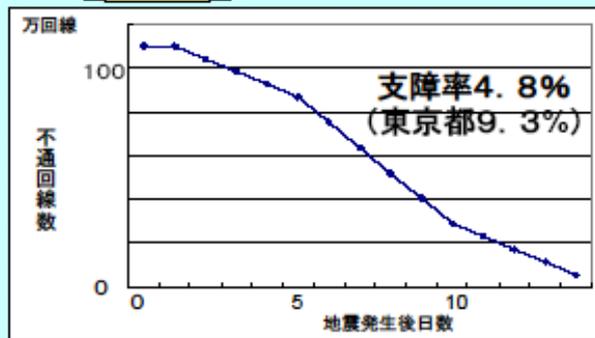
約120万軒



阪神:約30万回線

通信(固定電話)

約110万回線



問題点

- ・過去の地震の経験式
- ・首都圏固有の複雑さ
- ・都市機能の相互連関

※支障数は、発災1日後の数

※地下埋設物である上水道及びガスは復旧に時間を要する。

※各事業ごとに復旧作業の過程が異なっているため、復旧曲線は異なっている。

ライフラインの相互依存性と被害波及

被害波及、復旧対応、事前対策における時間・空間スケール

平常時

地震発生

時間スケール

物理的被害波及

機能的被害波及

復旧支障

相互依存

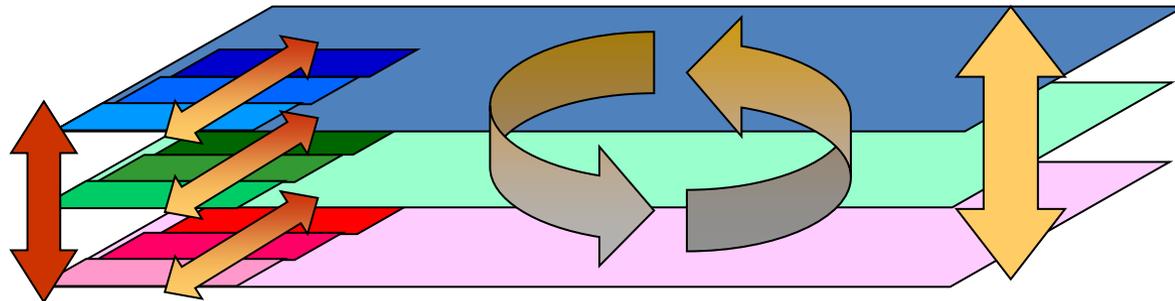


モデル化
空間スケール

ミクروسケール
(局所的)

ネットワーク
全体系

マクروسケール
(広域的)



対策

自律分散型拠点

総合的復旧調整

広域的連携

ライフラインの復旧最適化に関する研究

実態把握

ライフライン施設被害の相関性と復旧過程の**実態解明**

千葉大学

モデル化と対策

ライフライン被害波及モデル
と**解析法**の開発

岐阜大学

筑波大学

広域連携による復旧
効率化

横浜国大

自律分散型拠点
による地域防災力向上

鹿島

復旧最適化による企
業の**事業継続性**向上

シミュレーション

モデル地域の**設定・データ収集**

全メンバー

首都直下地震の**復旧最適化**シミュレーション

フィードバック

ライフライン**減災対策**ポートフォリオ

本日の発表内容

1. 岐阜大：ライフラインの供給側とユーザー側の対策を考慮した広域機能充足度の評価
2. 筑波大：交通インフラ網等の復旧を基点とした広域連携による復旧効率化に関する検討
3. 横国大：自律分散型拠点構築による地域防災力向上
4. 鹿島：地震時における企業の事業影響日数評価式
5. 千葉大：首都直下地震における上水道管と木造建物の広域被害予測

1. 岐阜大：概要

(ライフラインの供給側とユーザー側の対策を考慮した広域機能充足度の評価)

(1) 兵庫県南部地震の被災事例をもとに構築された「**地震時ライフライン機能被害予測モデル**」を、首都圏に適用するために改良した。

- ・電力供給システム：変更なし
- ・上水道システム：配水管の脆弱性の違いを考慮
- ・ガス供給システム：SI値に基づく緊急供給遮断を考慮
＋復旧初動体制の改善を考慮

(2) ライフライン停止状況下における各種社会機能の「**機能充足度**」を従来は時間的に一定値としていたが、ユーザー側の**バックアップ体制**を反映できるように時間関数に拡張した。

(3) 以上、(1)(2)の改良モデルを用いて、東京湾北部地震の被害予測に適用し、供給系ライフラインの同時被害状況下における製造業の**広域機能充足度**を評価した。

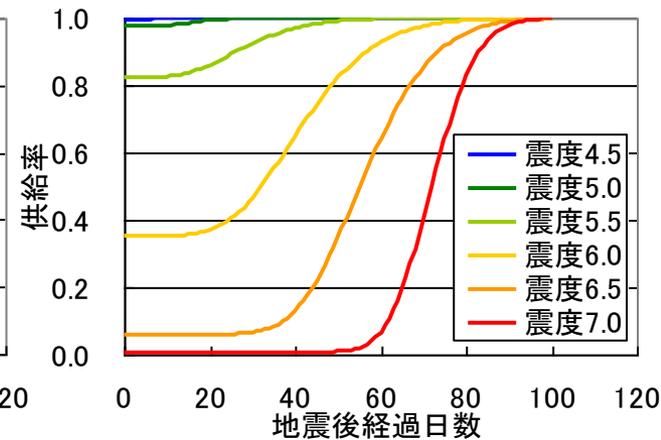
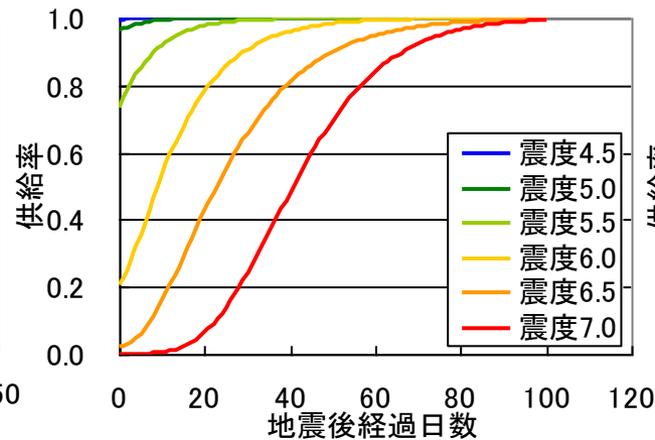
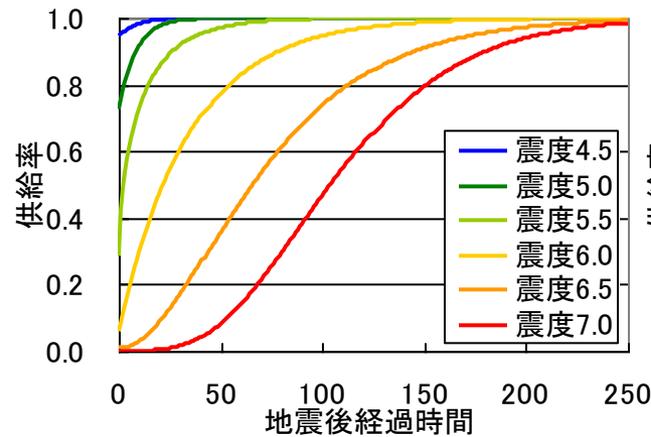
(1) 地震時ライフライン機能被害予測モデル

1995年兵庫県南部地震の被災事例に基づく
(改良前・オリジナル)

電力

水道

都市ガス



$$P(I, t) = \{1 - p(I)\} + p(I) \cdot F(I|t)$$

$P(I, t)$: 震度 I ,地震後経過日数における供給率

$p(I)$: 震度 I における機能停止確率

$F(I|t)$: 震度 I ,機能停止確率の非超過確率

- 機能停止確率・機能停止期間を含む二段階評価モデル
- 震度情報のみで予測可能

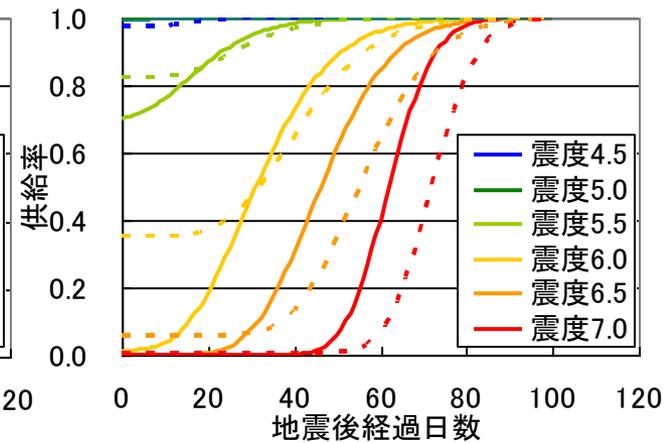
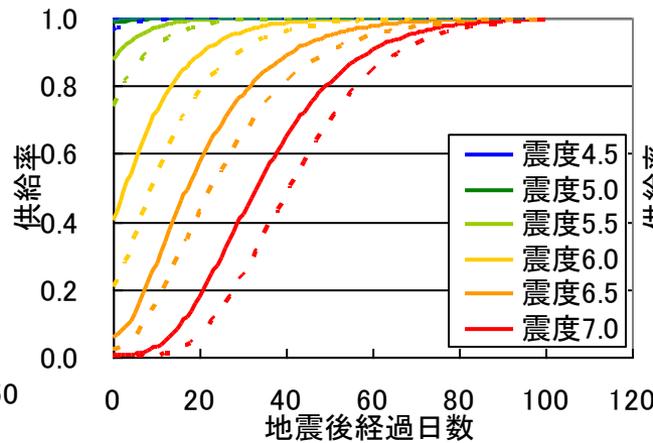
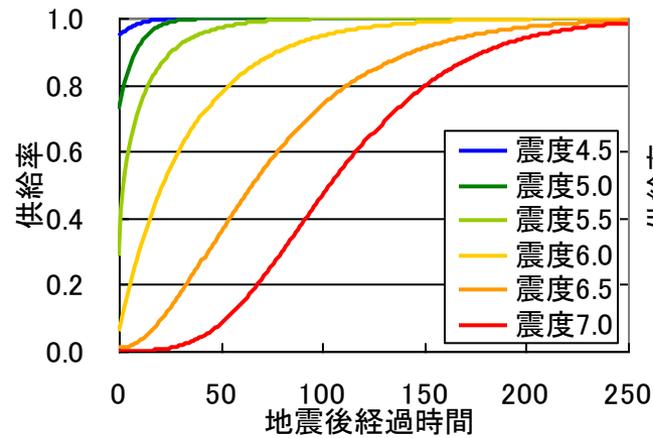
(1) 地震時ライフライン機能被害予測モデル

改良モデル (供給システム側の要因を考慮)

電力

水道

都市ガス



破線:オリジナル, 実線:改良モデル

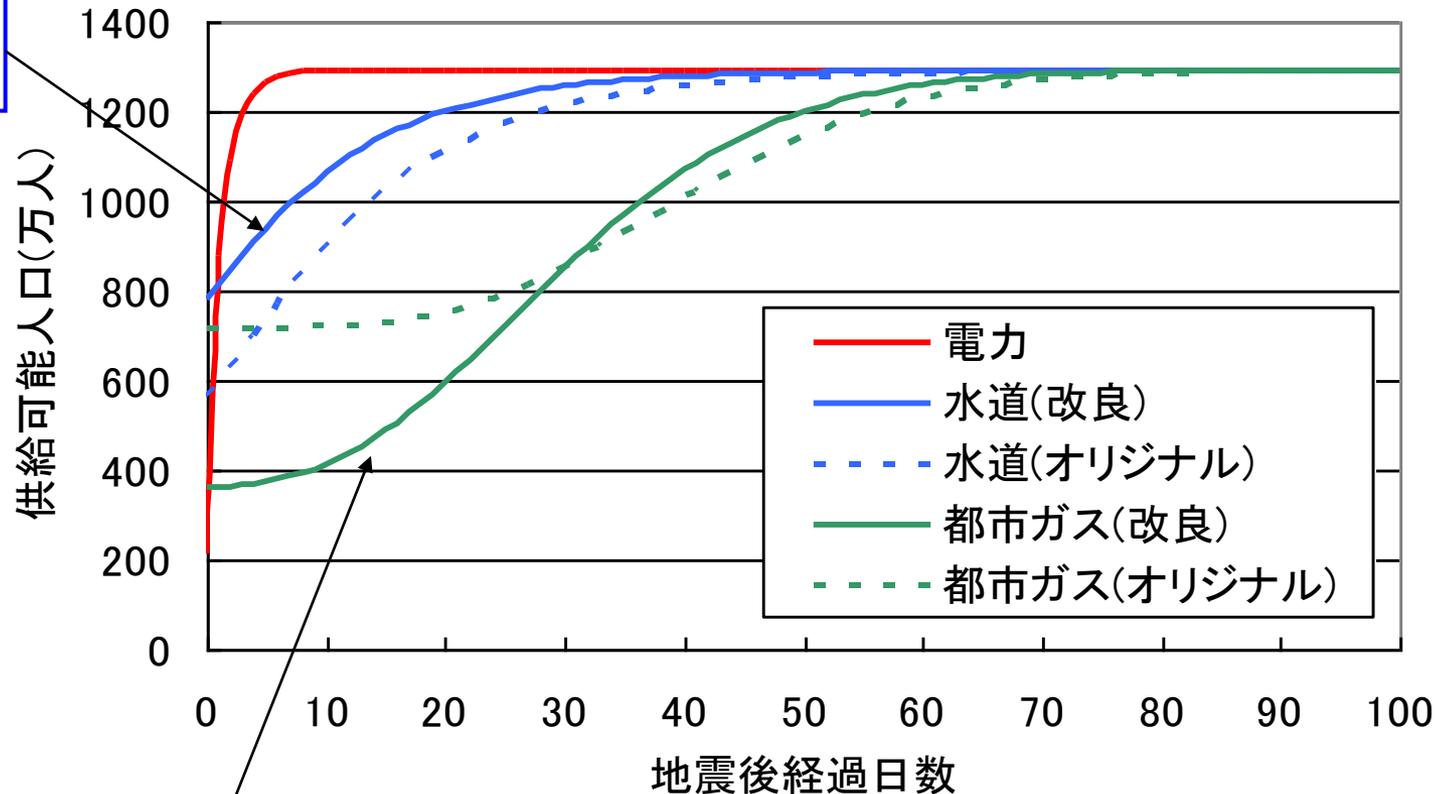
•変更なし

•神戸周辺(1995年)と首都圏(2010年)の配水管の脆弱性の違いを考慮

•SI値(40-50kine)に基づく緊急供給遮断の導入
•復旧初動体制の改善効果の考慮

(1) 地震時ライフライン機能被害予測モデルの改良による供給可能人口の変化(東京都)

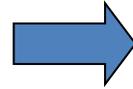
水道：初期被害は軽減され、復旧効率も改善



都市ガス：緊急供給遮断により初期被害は広がるが、復旧効率は改善

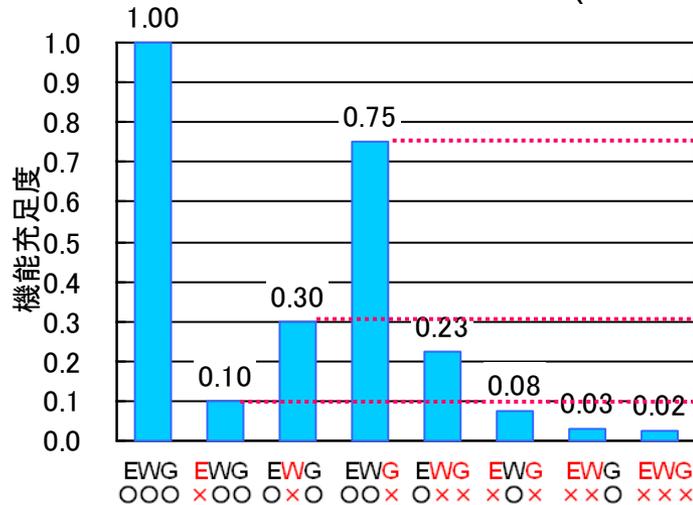
(2) バックアップを考慮した機能充足度モデルの改良(ユーザー側の要因)

改良前: 時間に依存しない定数

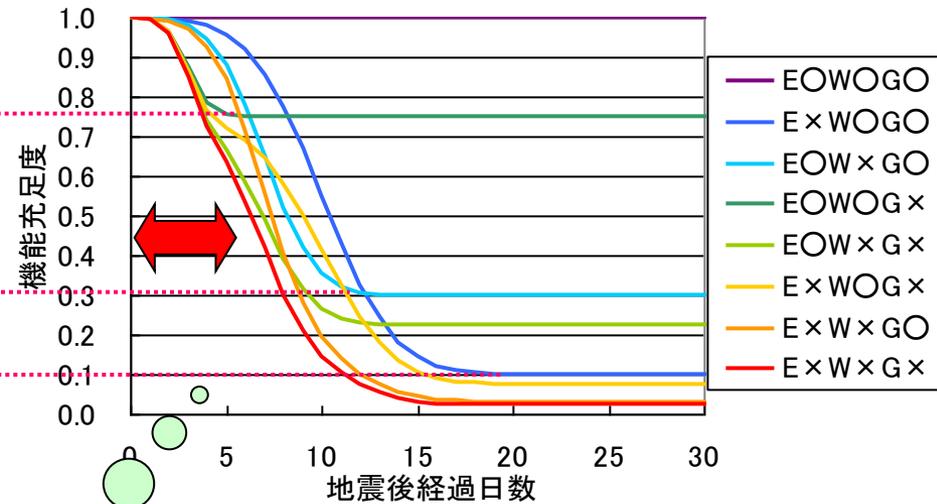


改良後: 時間関数としてモデル化

停止パターン別機能充足度(食料品製造業)



停止パターン別機能充足度の時間関数

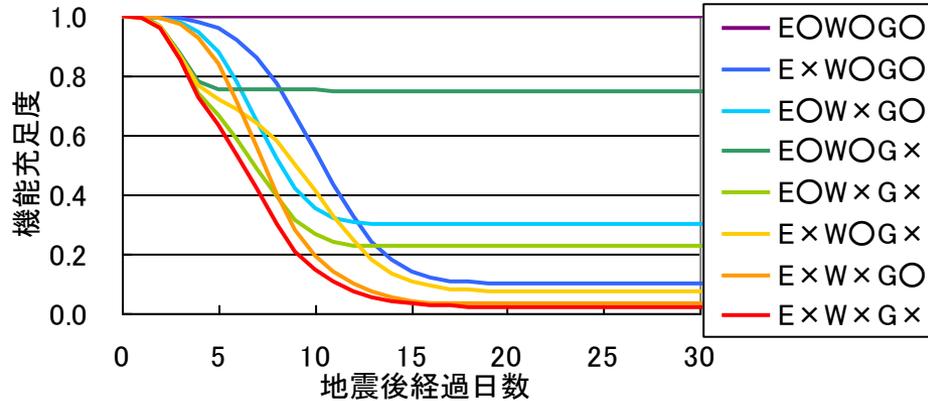


自立分散的なバックアップ機能により影響出現を遅らせ、被害波及が緩和されていることを表現

(2) バックアップを考慮した機能充足度

効果的なバックアップ対策を検討できる枠組みを構築

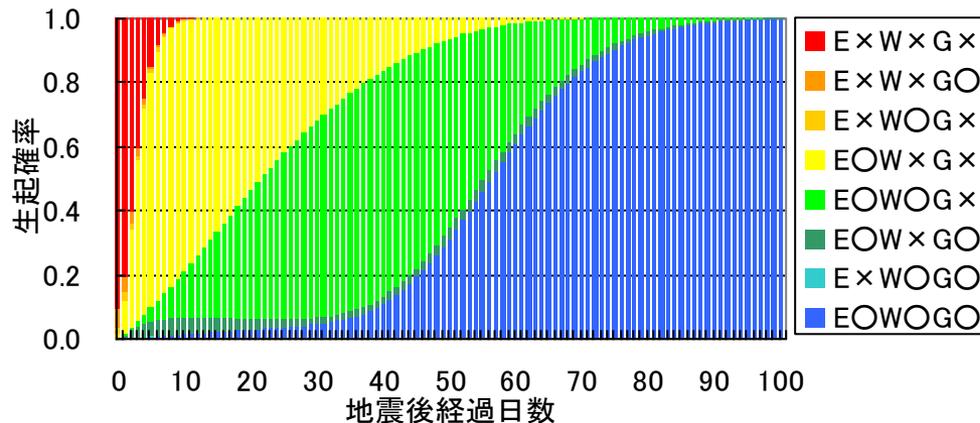
停止パターン別機能充足度の時間関数
(食料品製造業)



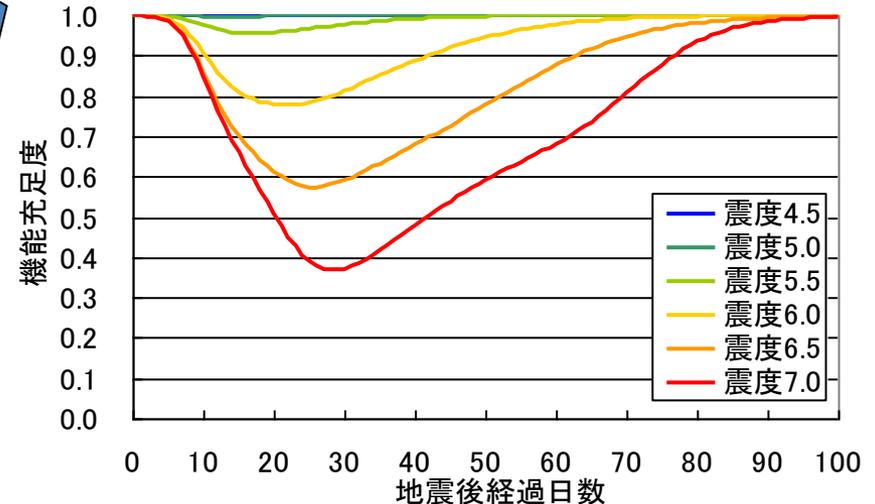
$$\bar{R}_i(I, t) = \sum_{\delta_E, \delta_W, \delta_G} R_i(\delta_E, \delta_W, \delta_G; t) \cdot Q(\delta_E, \delta_W, \delta_G; I, t)$$

$\bar{R}_i(I, t)$: 震度 I ,地震後 t における機能充足度
 $R_i(\delta_E, \delta_W, \delta_G; t)$: 地震後 t における停止パターン別機能充足度
 $Q(\delta_E, \delta_W, \delta_G; I, t)$: 震度 I ,地震後 t における停止パターン生起確率
 i : 業種

停止パターン生起確率分布(改良モデルに基づく)

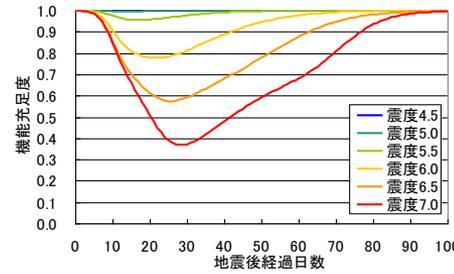
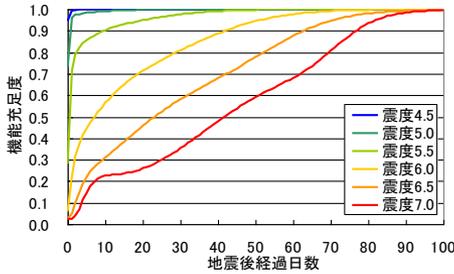


バックアップを考慮した機能充足度



(3) 首都圏製造業を対象とした広域機能充足度評価

震度別機能充足度(バックアップなし) (バックアップあり)

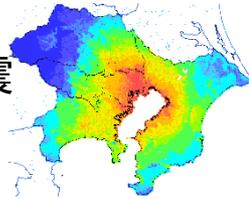


広域機能充足度の評価式

$$S_i(t) = \frac{\sum_I PEX_i(I) \cdot \bar{R}_i(I,t)}{\sum_I PEX_i(I)}$$

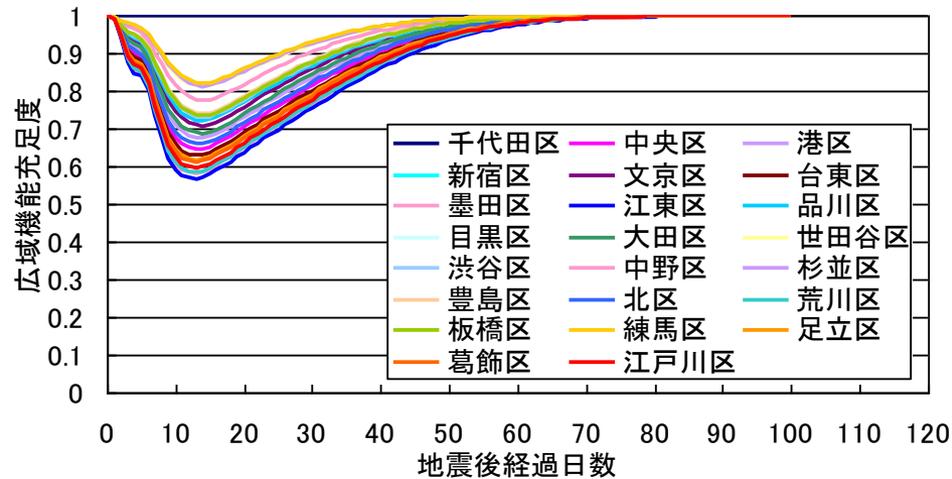
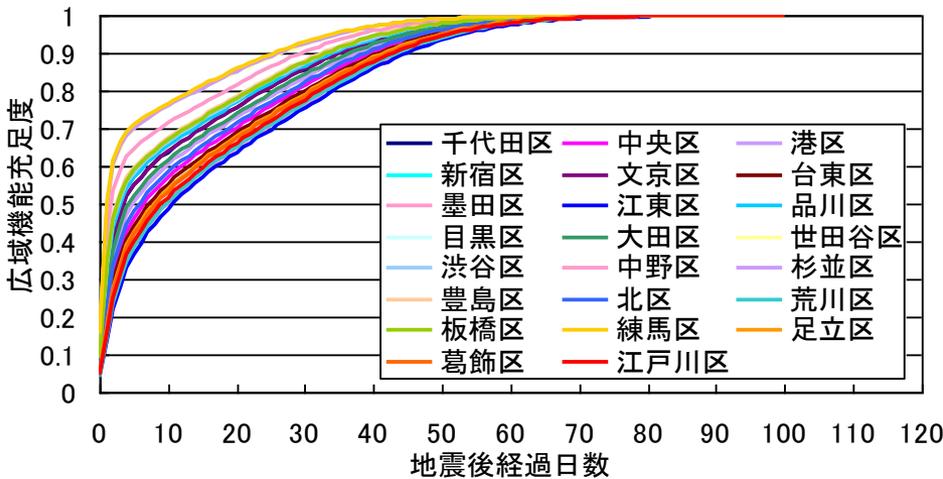
- $S_i(t)$: 震度 I ,地震後 t における広域機能充足度
- $\bar{R}_i(I,t)$: 震度 I ,地震後 t における機能充足度
- $PEX_i(I)$: 震度 I の震度曝露人口
- i : 業種

東京湾北部地震
の震度分布



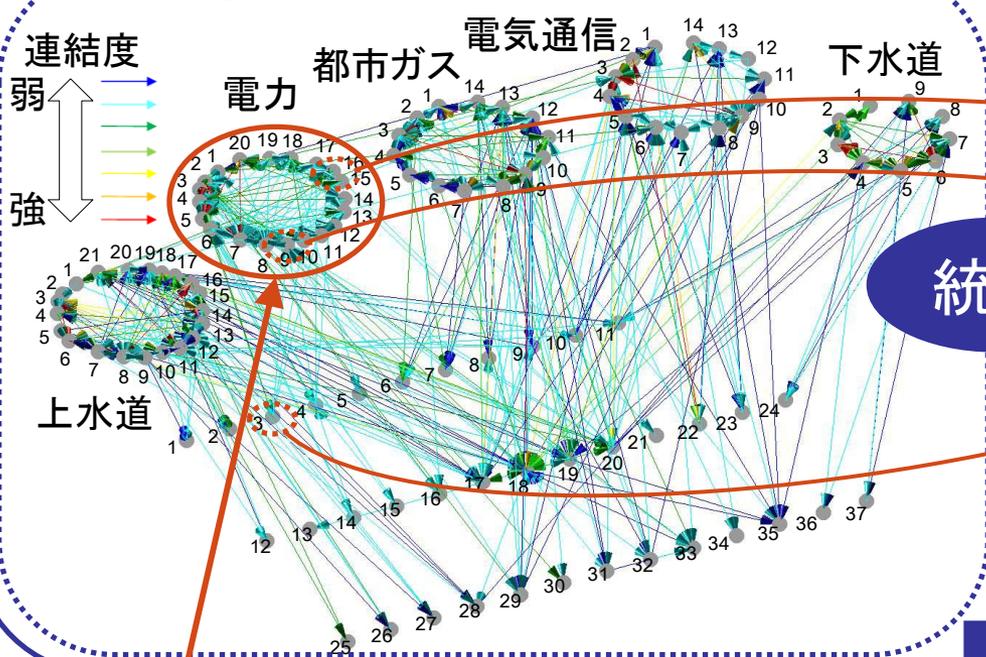
広域機能充足度(バックアップなし)

(バックアップあり)

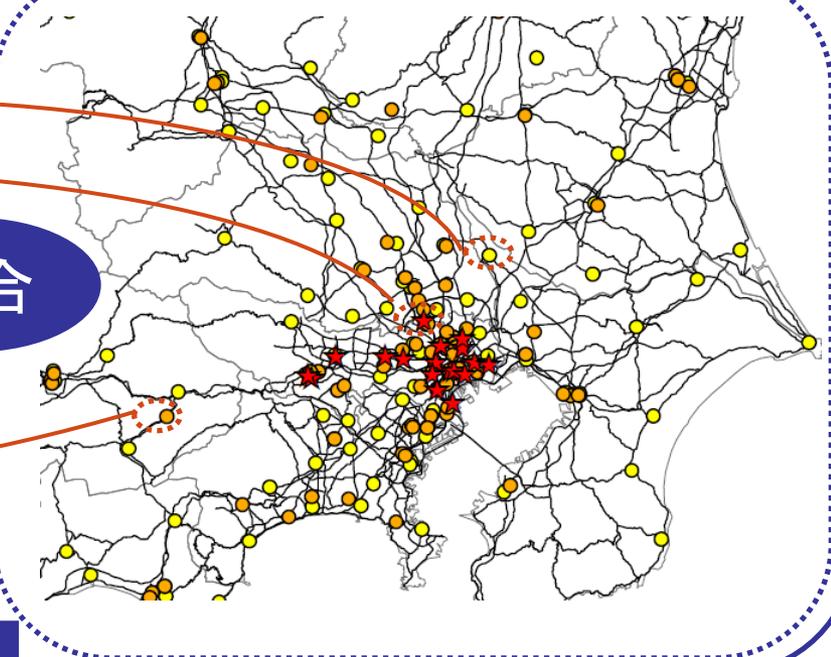


2. 筑波大 ライフラインシステムの地震時復旧活動の相互関連に関わる構造モデル化

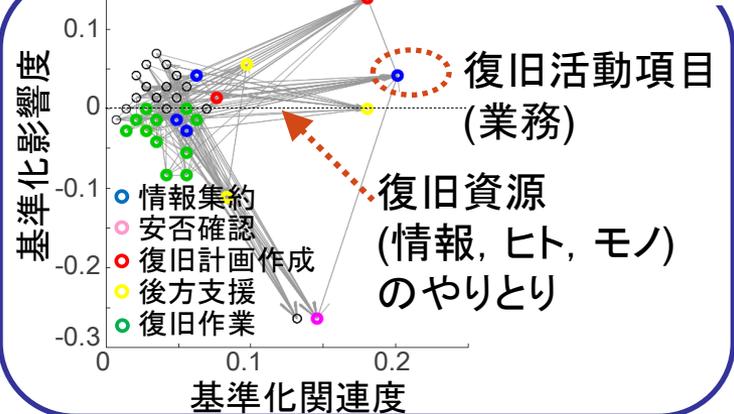
②復旧活動の構造モデル



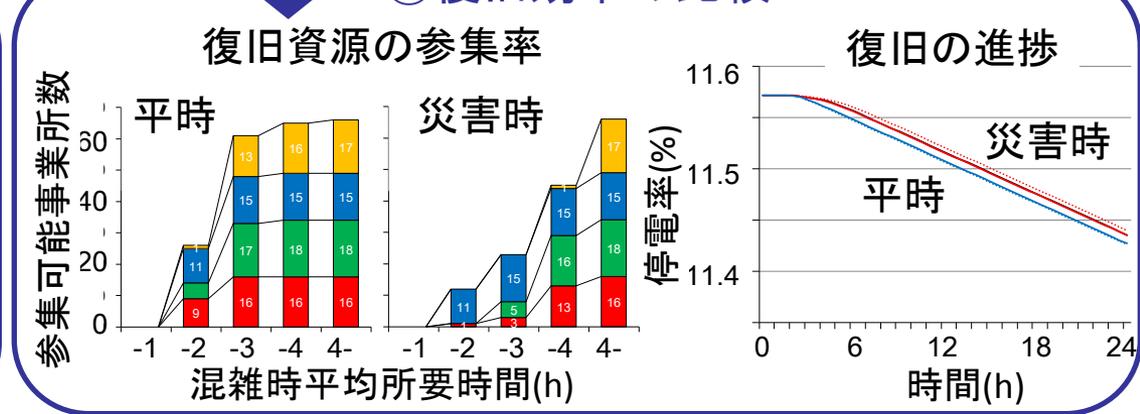
③空間情報



①電力システムの復旧活動の構造

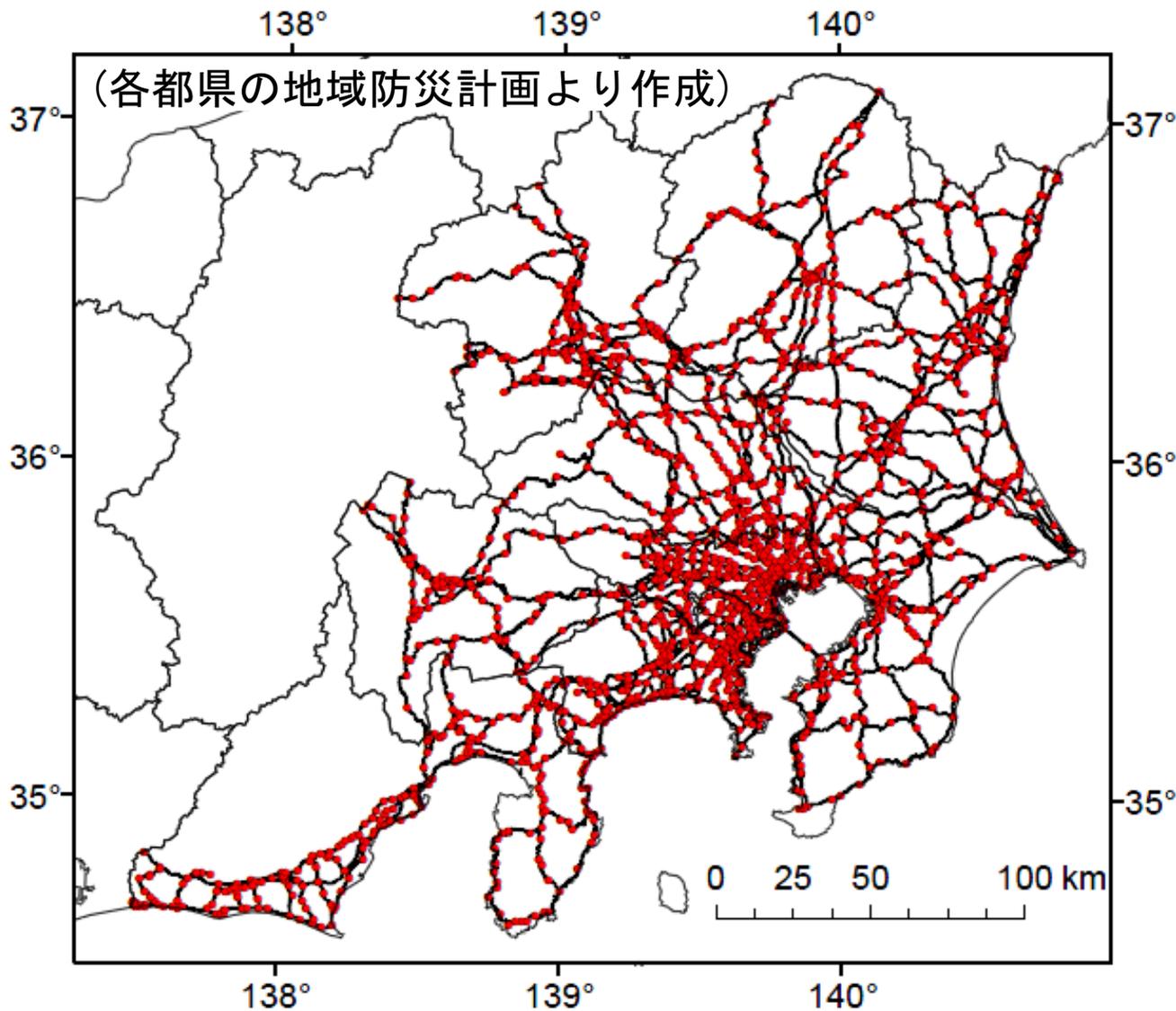


④復旧効率の比較



緊急道路のネットワークモデル

～首都圏の緊急交通路・緊急輸送路網～



ノード(2,072)
道路網の端点・交点
調査区間の節点

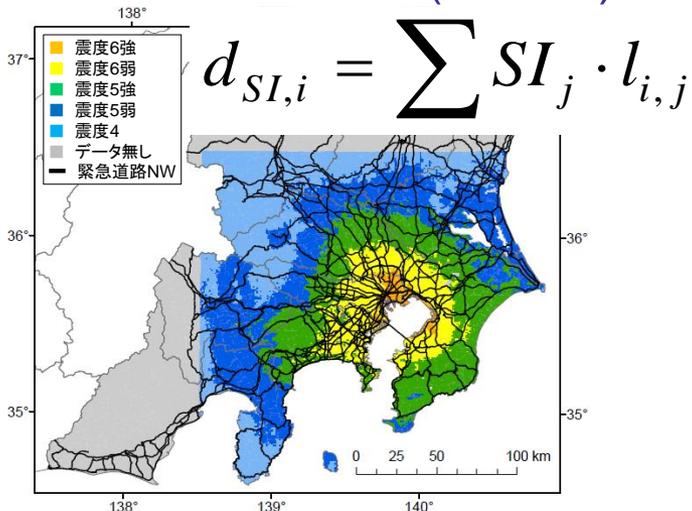
リンク(2,551)

都県	延長
東京都	737.4km
神奈川県	1,227.2km
千葉県	1,342.4km
埼玉県	863.0km
茨城県	1,463.6km
栃木県	753.7km
群馬県	747.4km
山梨県	622.1km
静岡県	1,083.1km

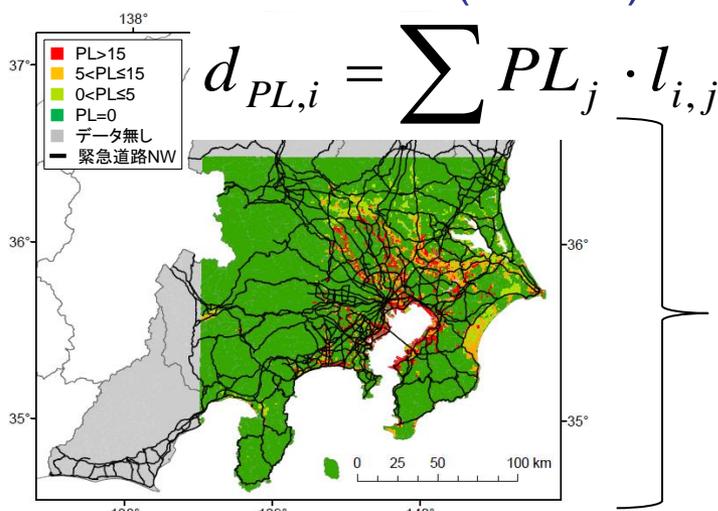
移動経路選択(Dijkstra法による最短経路探索)

■ 実距離(Case1)

■ 震度曝露距離(Case2)

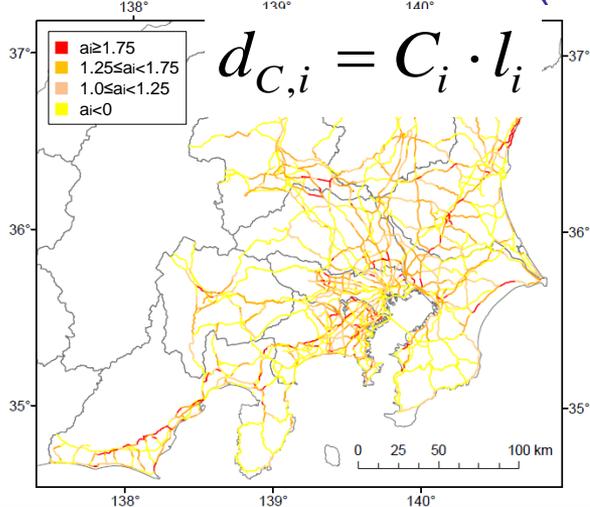


■ PL値曝露距離(Case3)

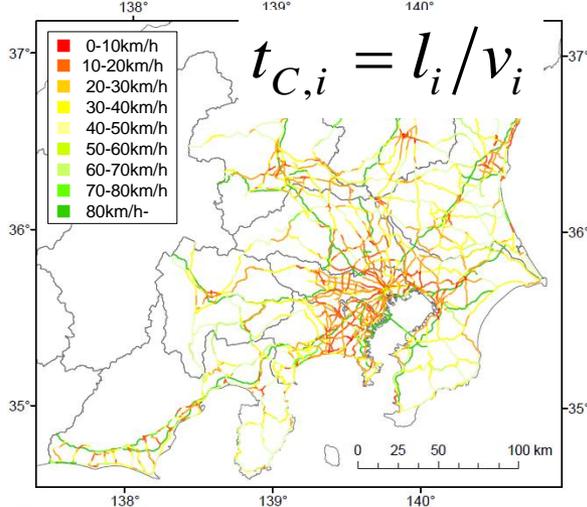


災害時の
移動経路

■ 混雑時重み付距離(Case4)



■ 混雑時平均所要時間(Case5)



平時の
移動経路

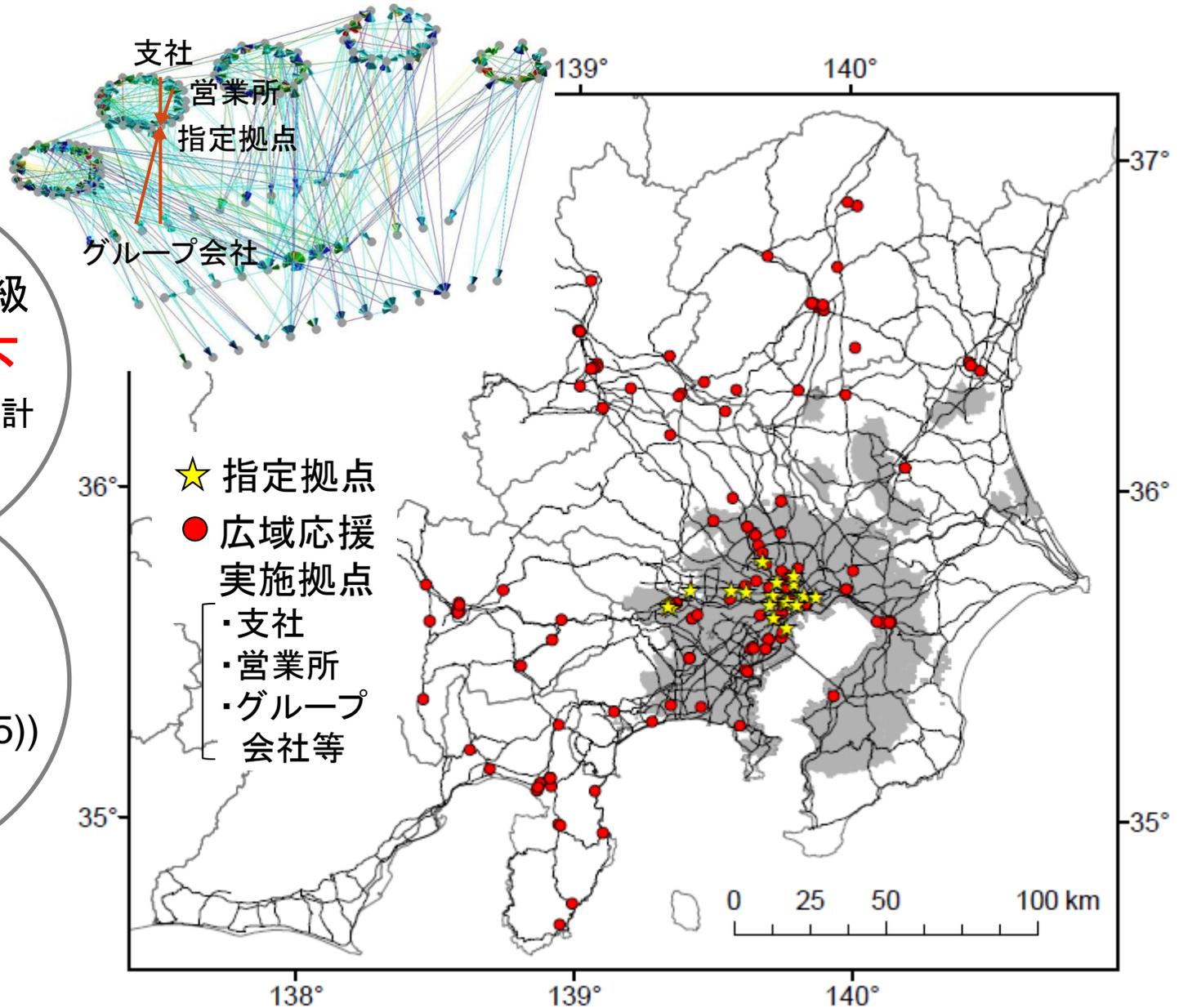
電力の広域応援活動に関連した施設の分布

230施設

応援派遣の
派遣可能震度階級
震度5強以下
(東京電力：防災業務計
画(2006)より推定)

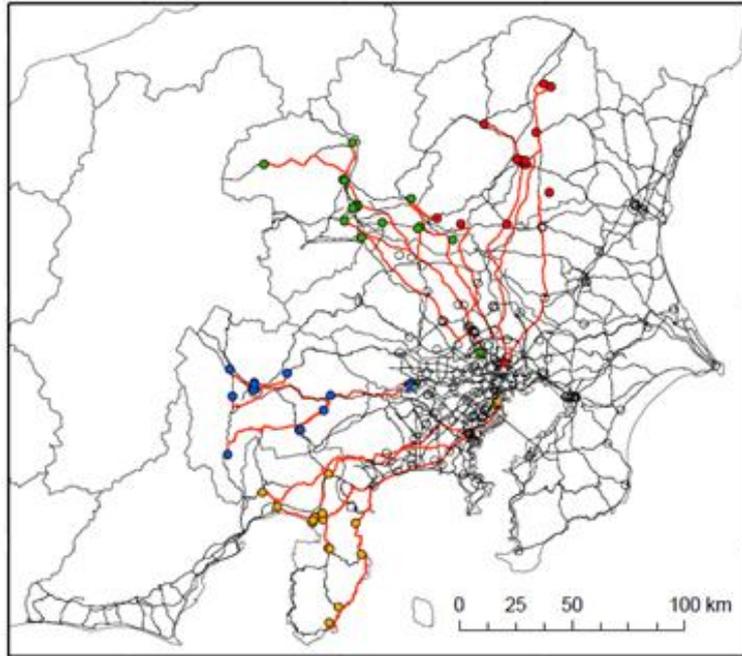
機能支障
無発生地域
(中央防災会議(2005))

66施設

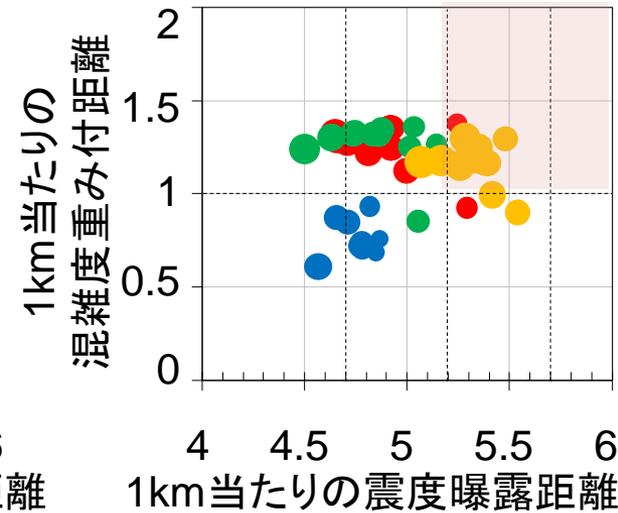
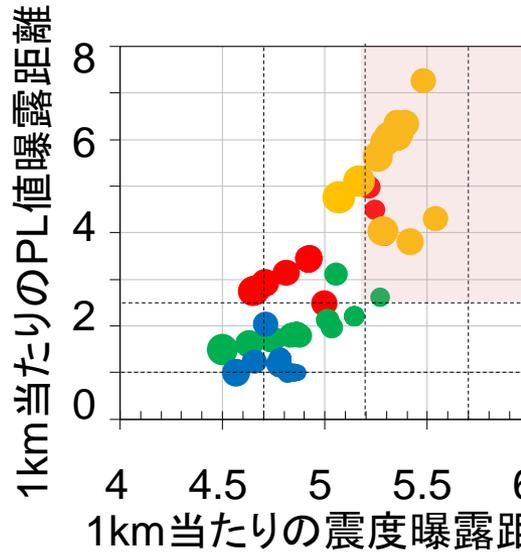


災害時の想定移動経路の特徴

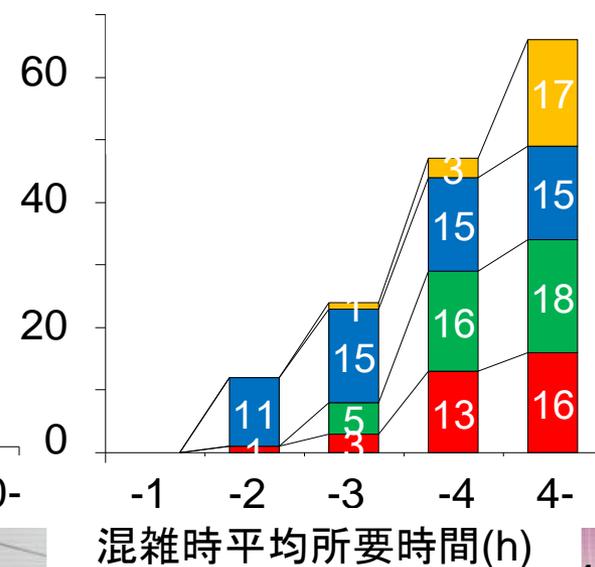
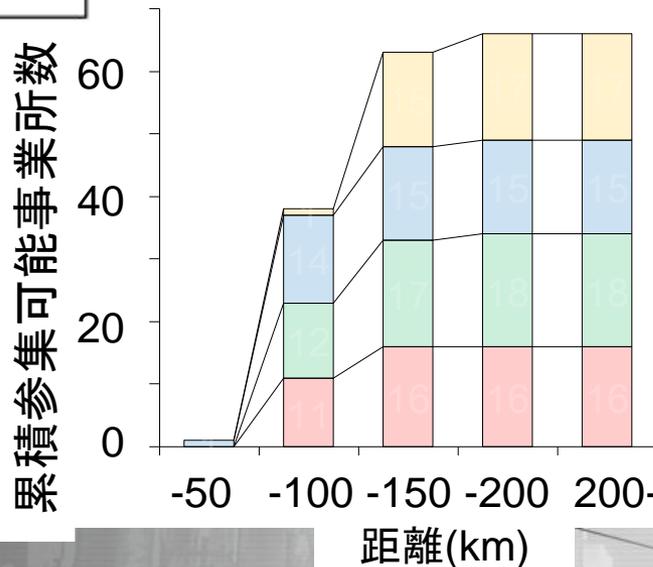
: 震度曝露距離をコストとした場合(Case2)



■ 山梨方面 ■ 群馬方面 ■ 栃木方面 ■ 静岡方面



- 効率の良い路線: 山梨方面
- 効率の悪い路線: 静岡方面

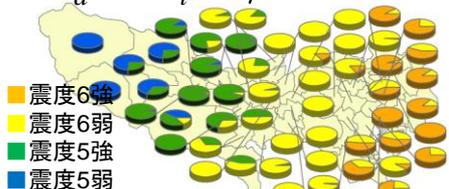


平時と災害時の復旧効率の比較

①物理的被害の推定(電柱被害)

地震ハザード × 設備敷設量

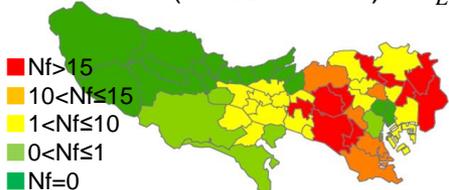
$$N_d^P = C_l \cdot R/100 \cdot N + N_f \cdot N \quad (\text{東京都, 1997})$$



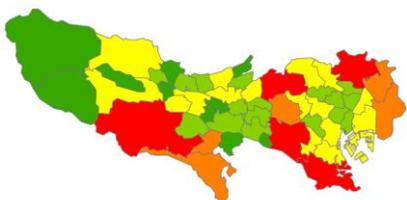
震度分布(中防会, 2005)→R



PL値分布(中防会, 2005)→C_L



焼失率(%)(東京都, 2006)→N_f



電柱敷設量N(東京都, 1997)

- 3万本以上
- 2~3万本
- 1~2万本
- 5千~1万本
- 5千本以下

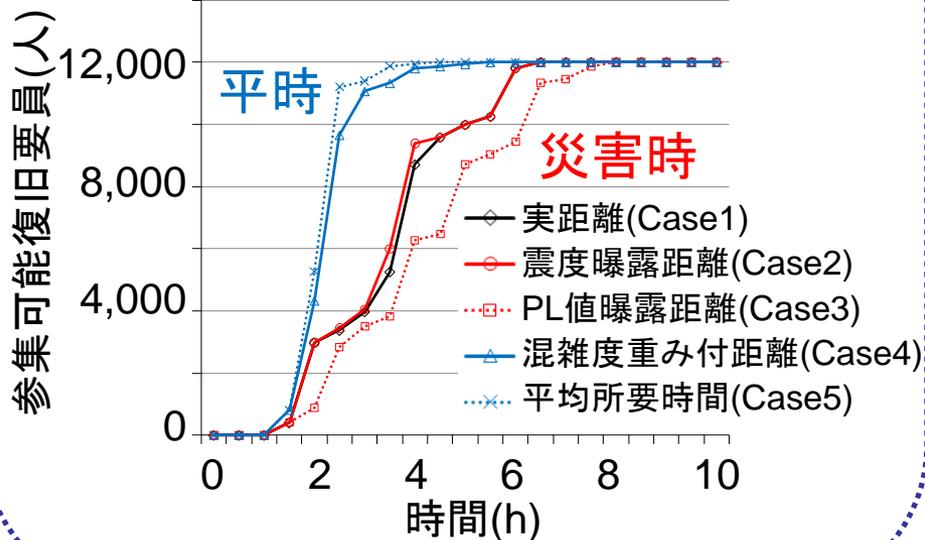
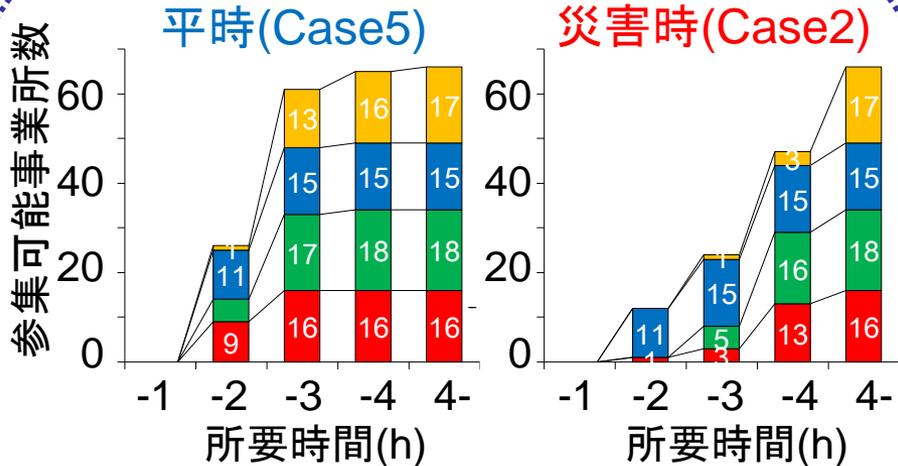


- 8千本以上
- 4~8千本
- 2~4千本
- 1~2千本
- 1千本以下



- 40%以上
- 30~40%
- 20~30%
- 10~20%
- 10%以下

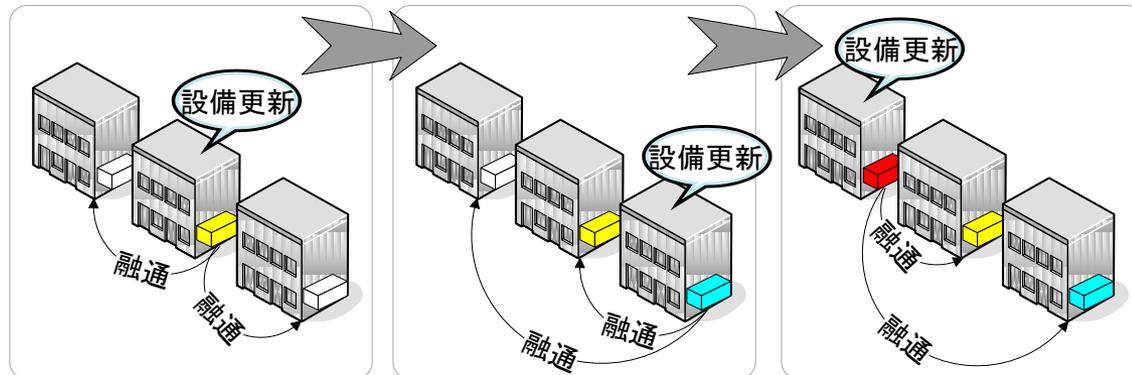
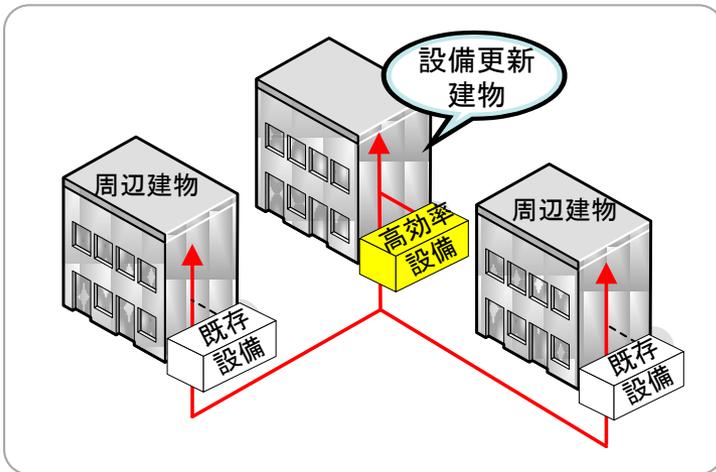
②復旧資源量の経時的推移



3. 横浜国大

自律分散型拠点構築の方向性

- 非常用設備の常用化 ⇒供給信頼性の向上
- 公共的施設を中心とした既存施設の活用 ⇒ストックの有効活用
- 隣接施設と設備や空間を街区内で共用
⇒設備更新頻度の増加、高性能設備の導入
⇒施設・設備更新の地域的なマネジメント



▲街区・地区内での設備更新と共有のイメージ

重要施設を対象としたエネルギー・給水設備に関する調査

■これまでの調査

- 都県市庁舎調査(2007年):回収数8／回収率100%
- 区役所庁舎調査(2008年):回収数65／回収率82.8%

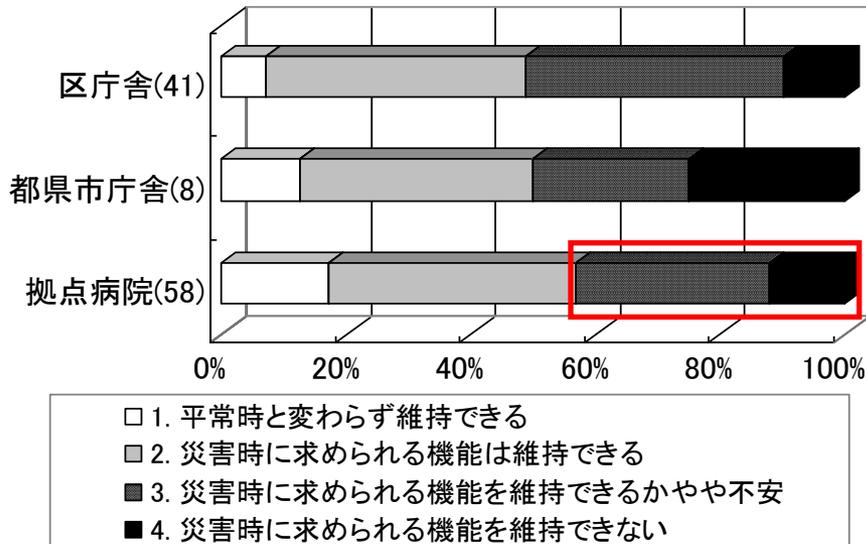
■2010年度調査

- 対象:**災害拠点病院**(132病院)・回収率:50.8%(回収継続中)
- 調査項目:建物・設備概要, 防災対策, 水・エネルギー消費量等

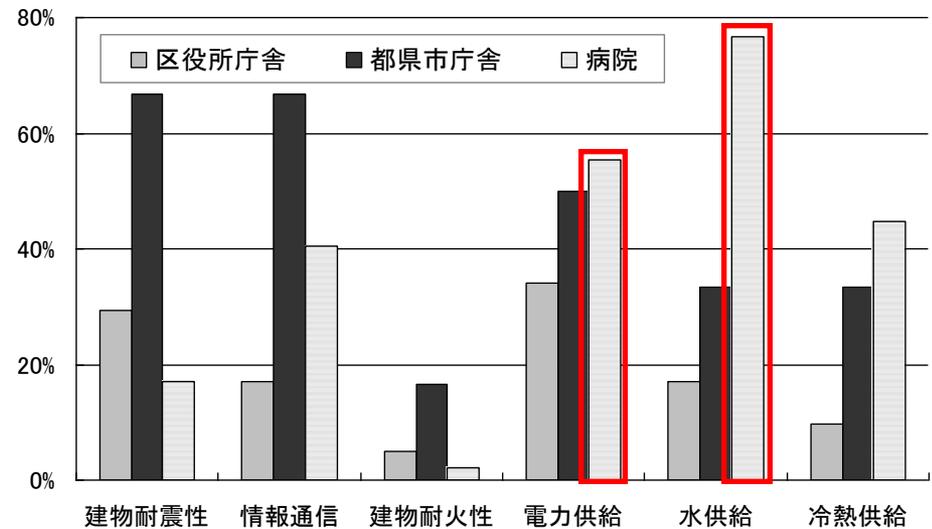
	災害拠点病院の特徴
給水設備	高置水槽方式が9割超(他方式との併用含む) 一部の病院で, ポンプ直送方式, 圧力タンク方式を採用.
電気	スポットネットワーク受電 16%(他方式との併用含む), ループ受電 10%, 2回線受電 52%, 1回線受電 22%
ガス	中圧以上 50%, 中圧・低圧併用 36%, 低圧 14%
自家発電設備	37%の病院で常用の発電設備を整備

非常時の施設機能維持に関する意見

大規模災害発生時に 建物機能を維持できるか？



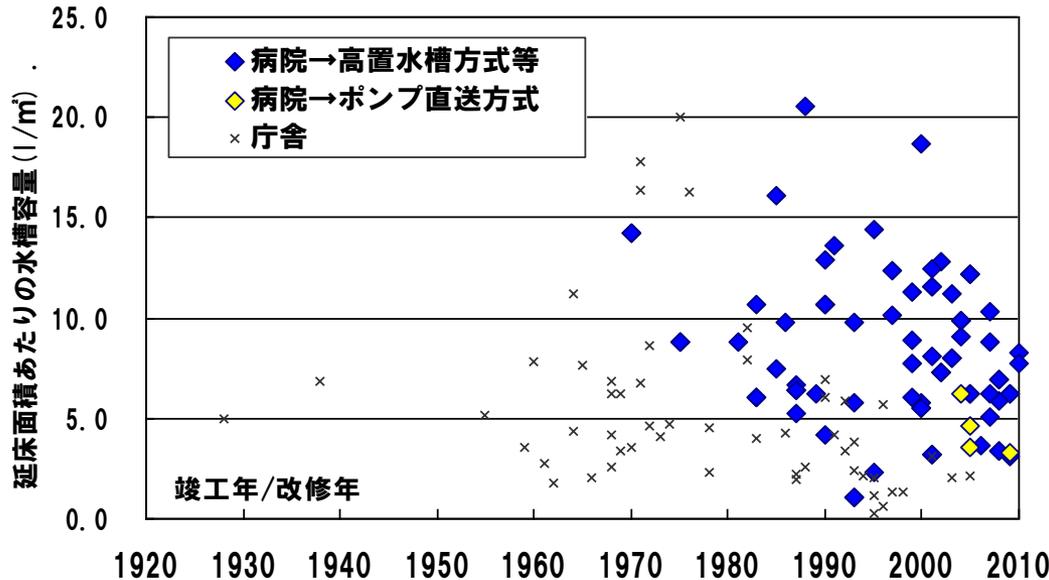
大規模災害発生時の 建物機能維持に不安のある部分



- 庁舎では、**建物耐震性**や**情報通信**に関する不安を挙げる割合が高く、病院では、**水供給**や**電力供給**への不安を抱える割合が高い
- 建物の耐震性を確保している場合、ライフライン途絶への不安を持つ。

水供給の自立性

延床面積あたりの水槽容量(上水用受水槽+中間・高置水槽容量)



	病院	庁舎
平均水槽容量 [L/m ²]	8.34	5.27
水消費原単位 [L/m ² ・日]	7.59*	1.86*
	約1日分	約3日分

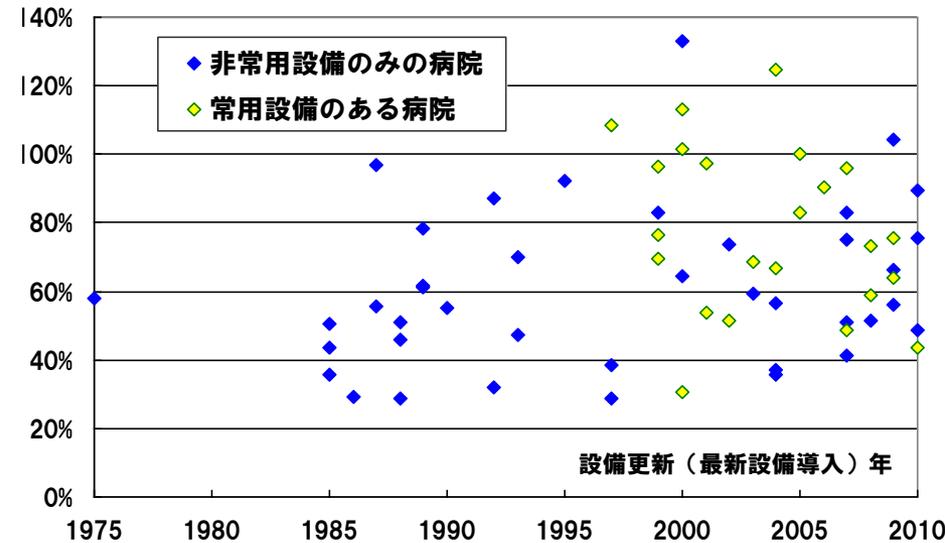
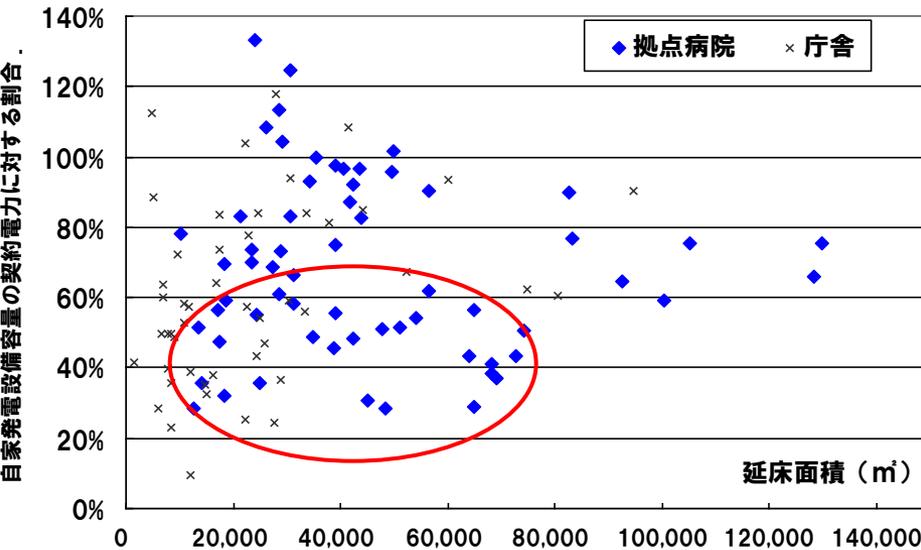
- **高置水槽方式**は、断水・停電時に水槽貯留水が利用可能。
- **ポンプ直送方式**や**圧力タンク方式**は、停電時に給水不能・困難に。
- **井水**、**雨水**、**中水**利用は増えつつある(病院の利用率は各34%, 26%, 40%)

上水用の水槽に加え、雑用水槽、雨水貯留槽、貯湯槽、蓄熱槽、防火水槽等の貯留水も活用し、排水処理の状況も考慮するなど、施設毎に詳細な検討が必要

* 高口 他: 非住宅建築物(民生業務部門)の環境関連データベース構築に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, 2009年

電力供給の自立性

自家発電設備容量の契約電力※に対する割合

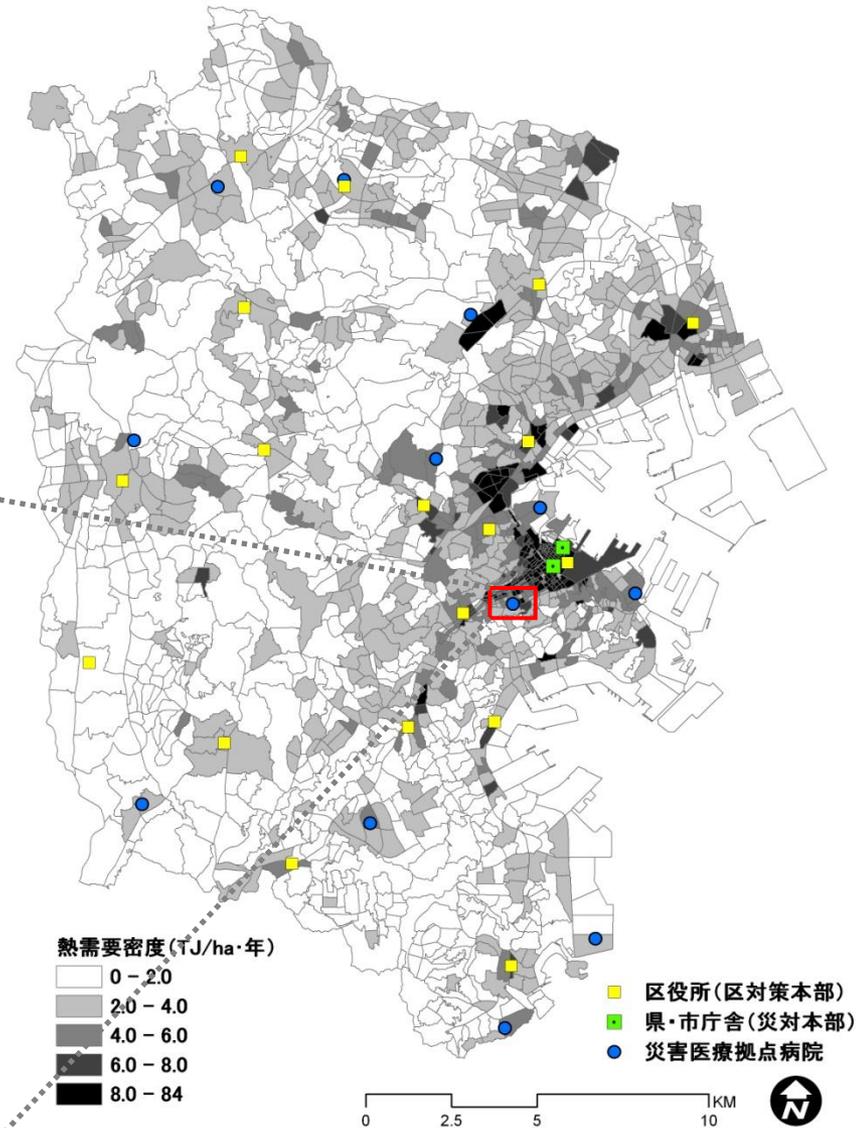
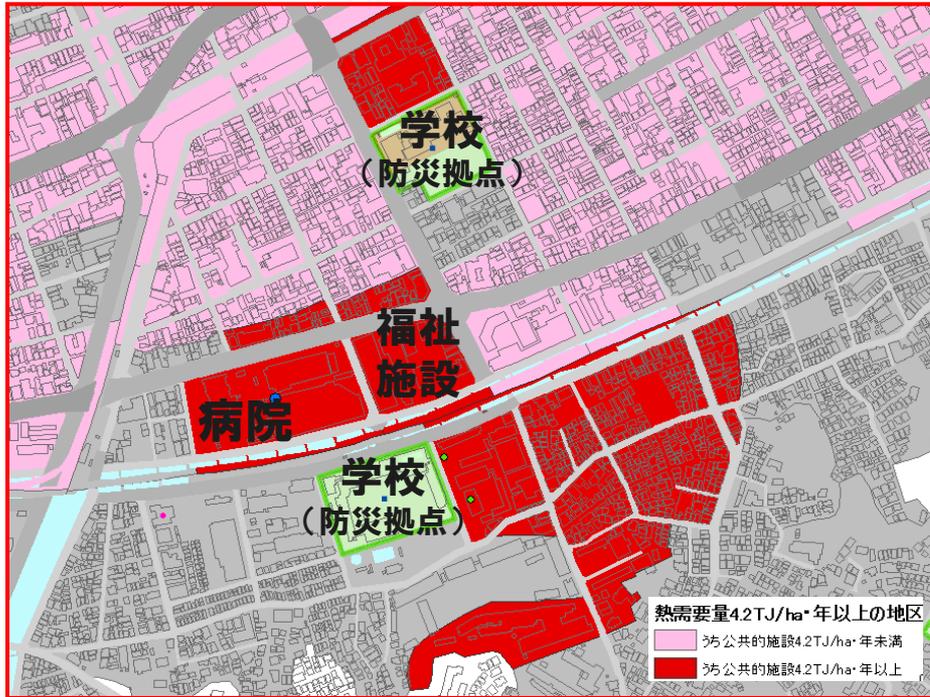


- 病院平均: 約67% (cf. 庁舎平均60%)
- 大規模病院は約60~90%程度
- 中規模病院は約30~125%であり、ばらつきが大きい

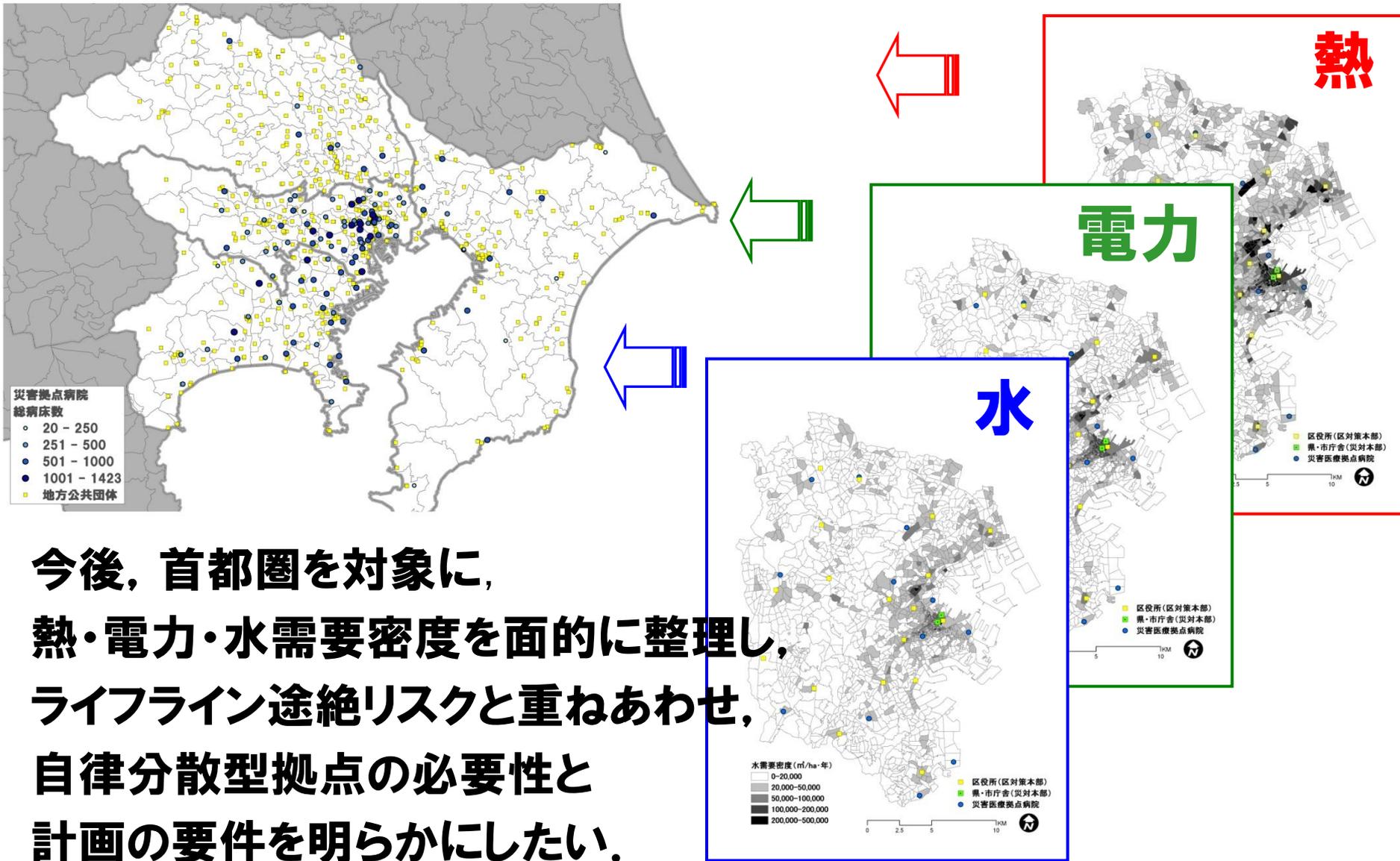
- 近年、常用発電設備(CGS)が導入される傾向がある
- CGSは、省エネ・コスト削減のため、エネルギー面的利用(建物間融通)で導入されることも多い

※常用の発電設備を有している施設は、契約電力に自家発電設備の発電容量を加算

- 設備共有の一例として、エネルギー一面的利用の潜在性を概観する
- エネルギー一面的利用導入適地の最低条件(熱負荷密度 $4.2\text{TJ}/\text{ha}\cdot\text{年}$ 以上)を満たす地区に庁舎や病院がある
- 街区内設備共有の候補地といえる



▲ 熱需要密度と庁舎・病院の立地



今後、首都圏を対象に、
熱・電力・水需要密度を面的に整理し、
ライフライン途絶リスクと重ねあわせ、
自律分散型拠点の必要性と
計画の要件を明らかにしたい。

▲各需要密度と庁舎・病院の立地

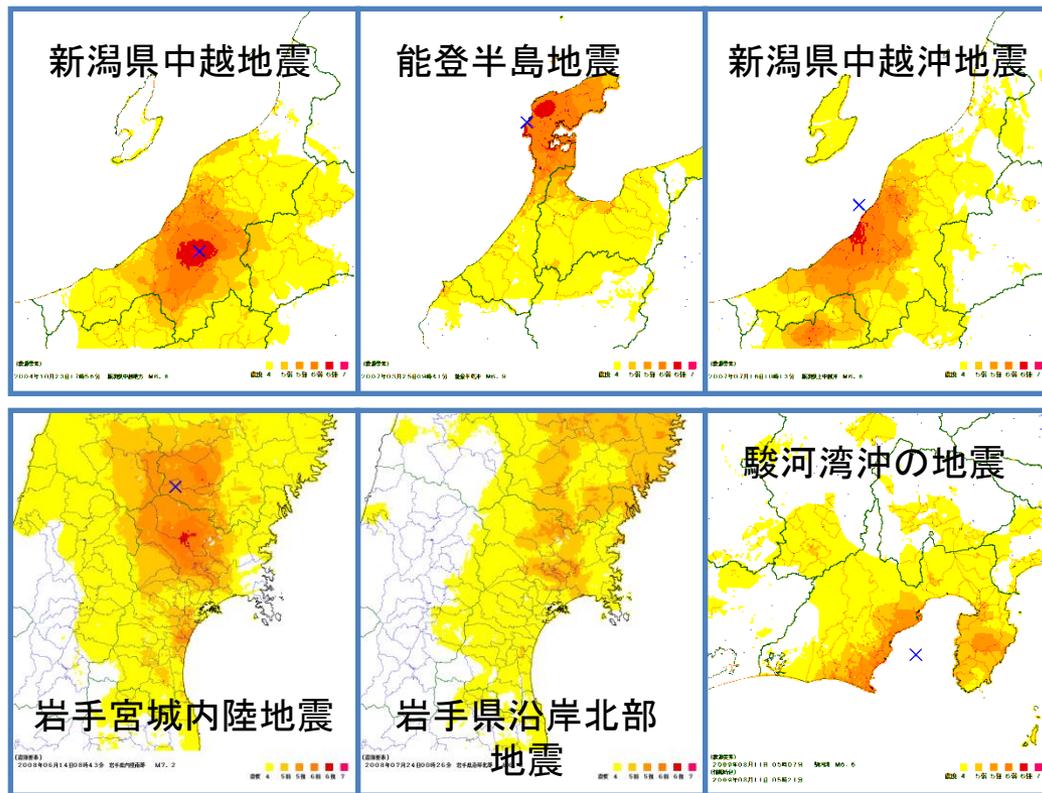
4. 鹿島：概要

地震時における企業の事業影響日数評価式

- 証券取引所の適時開示情報などの公開情報を活用して、253事業所の地震後の事業中断日数の事態調査を行った。
 - 公開情報から読み取ることのできる事業再開時期は、企業活動(生産、販売、サービス)を再開した時期と考えられるため、事業中断日数は比較的短期間である。
- 調査データをもとに、計測震度を指標とする事業所(業種別及び規模別)事業中断日数の簡易予測式の検討を行った。
- 対象地震は2004年新潟県中越地震、2007年能登半島地震、2007年新潟県中越沖地震、2008年岩手・宮城内陸地震、2008年岩手県沿岸北部地震、2009年駿河湾を震源とする6地震。

対象地震の概要

- 図表に示した6地震を対象とした。
- 最大震度は6弱～7。



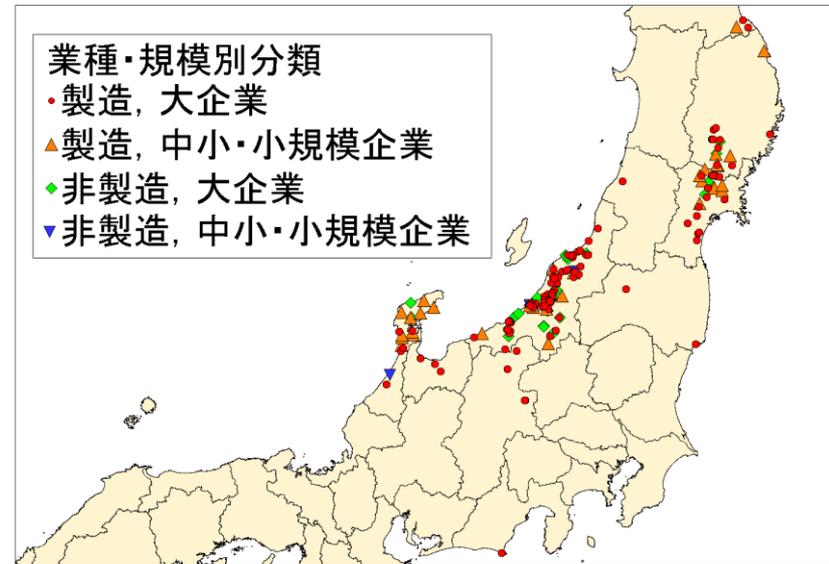
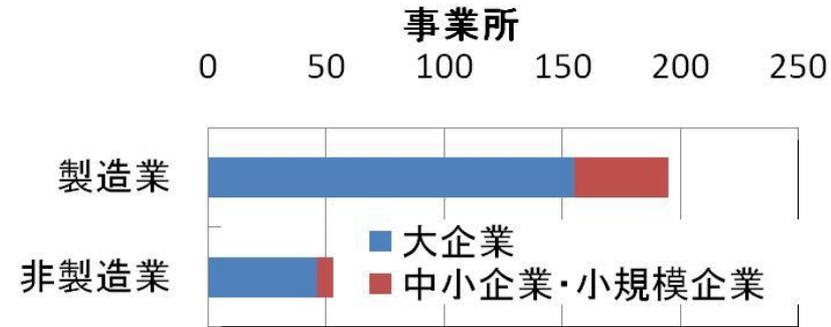
調査対象地震

地震名	発生日時	M(JMA)	深さ(km)	最大震度
新潟県中越地震	2004年10月23日(土)17時56分	M6.8	13	7
能登半島地震	2007年03月25日(日)09時41分	M6.9	11	6強
新潟県中越沖地震	2007年07月16日(月)10時13分	M6.8	17	6強
岩手・宮城内陸地震	2008年06月14日(土)08時43分	M7.2	8	6強
岩手県沿岸北部地震	2008年07月24日(木)00時26分	M6.8	120	6強
駿河湾沖の地震	2009年08月11日(火)05時07分	M6.5	23	6弱

253事業所の内訳

253事業所の業種別、企業規模別の内訳

業種	企業者区分	事業所数	業種	事業所数
製造業	大企業	155 (61%)	製造	111 (44%)
			食品	27 (11%)
			製紙	5 (2%)
			医薬	5 (2%)
			製鋼	4 (2%)
			エネルギー	3 (1%)
			小計	155 (61%)
製造業	中小企業・小規模企業	40 (16%)	製造	33 (13%)
			食品	7 (3%)
			小計	40 (16%)
製造業計		195 (77%)		
非製造業	大企業	46 (18%)	小売	27 (11%)
			サービス	11 (4%)
			金融	8 (3%)
	中小企業・小規模企業	12 (5%)	小売	9 (4%)
			サービス	3 (1%)
			小計	12 (5%)
非製造業計		58 (23%)		
合計		253 (100%)		



分析対象の253事業所の所在地

事業中断日数の予測式

- 地震によって事業中断が発生した場合の計測震度を説明変数とする事業中断日数の予測式の検討を行った。

- 平均事業中断日数：

- 正規確率分布の形状を用いた関数 $R^*(I_{JMA}) = C \cdot \Phi\left(\frac{I_{JMA} - \mu}{\sigma}\right)$
 - I_{JMA} は計測震度

- 平均値周りのばらつき：

- 対数正規確率分布

$$f(R(I_{JMA})) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \zeta \cdot R} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln R - \lambda}{\zeta}\right)^2}$$

- 分析方法：

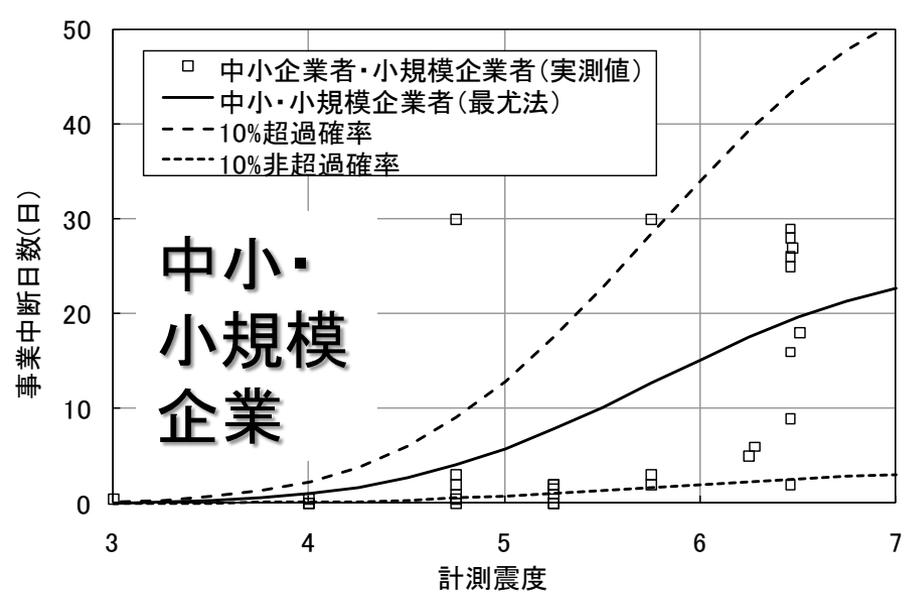
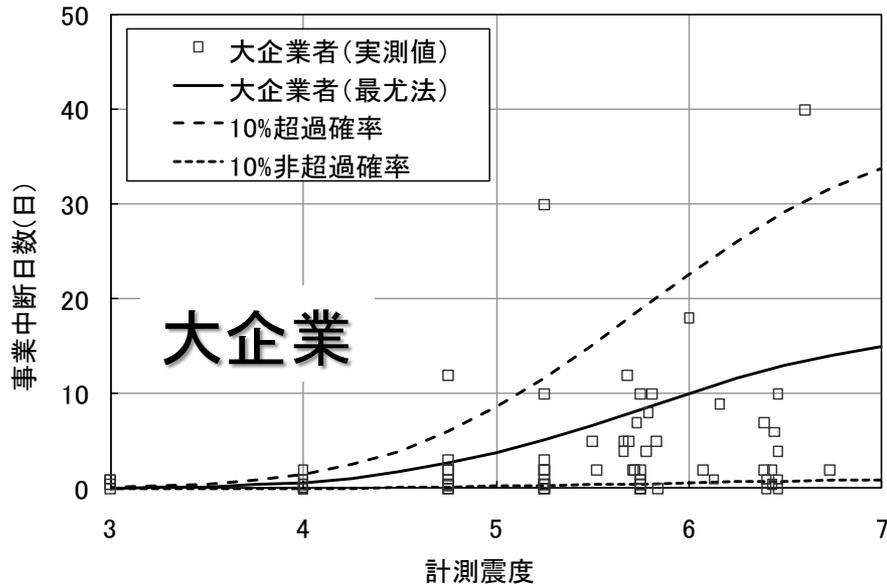
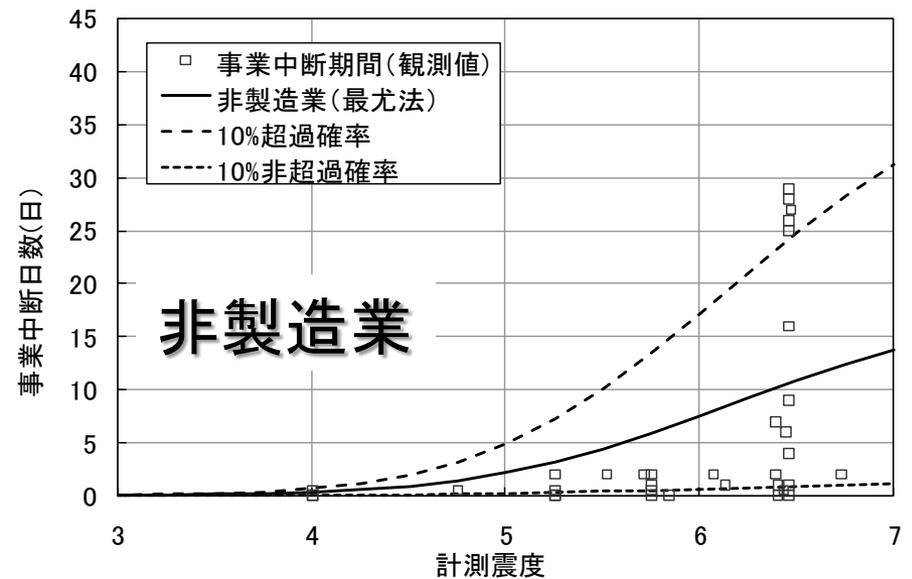
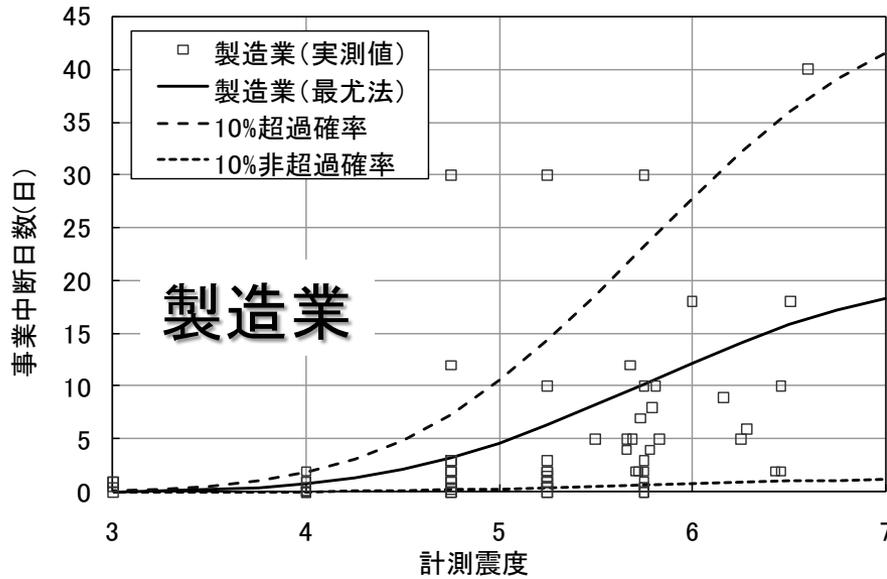
- 右式の対数尤度を最大にするように未定係数C、 μ 、 σ 、 ζ を求めた

$$\lambda = \ln(R^*(I_{JMA})) - \frac{1}{2} \zeta^2$$

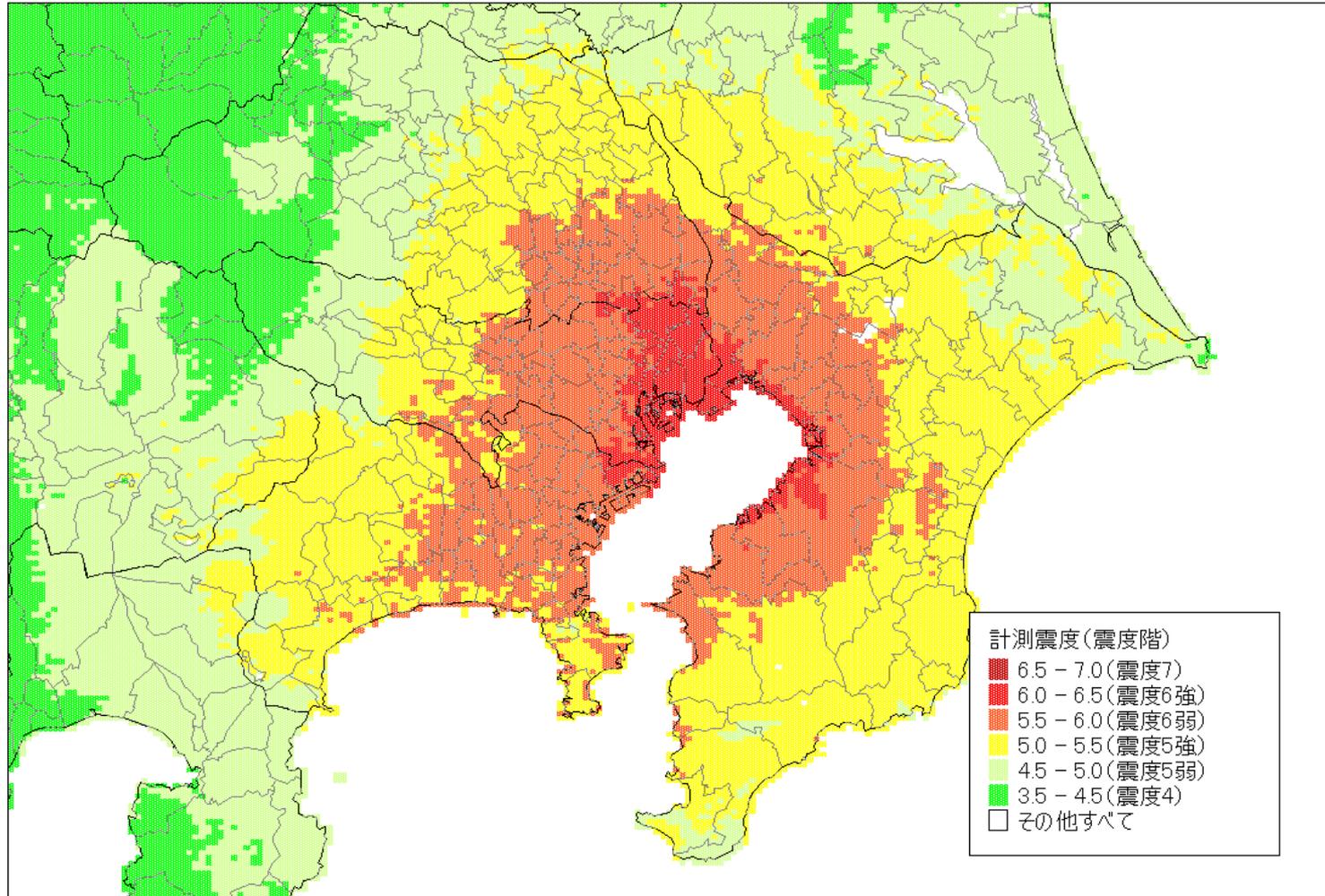
$$\ln[L(C, \mu, \sigma, \zeta; R(I_{JMA}))] = \sum_{i=1}^n \ln[f(R_i(I_{JMA}))]$$

分類	C	μ	σ	ζ
製造業	20.481	5.750	1.000	1.372
非製造業	17.128	6.151	1.000	1.306
大企業者	16.739	5.750	1.000	1.406
中小企業者・小規模企業者	25.375	5.750	1.000	1.114

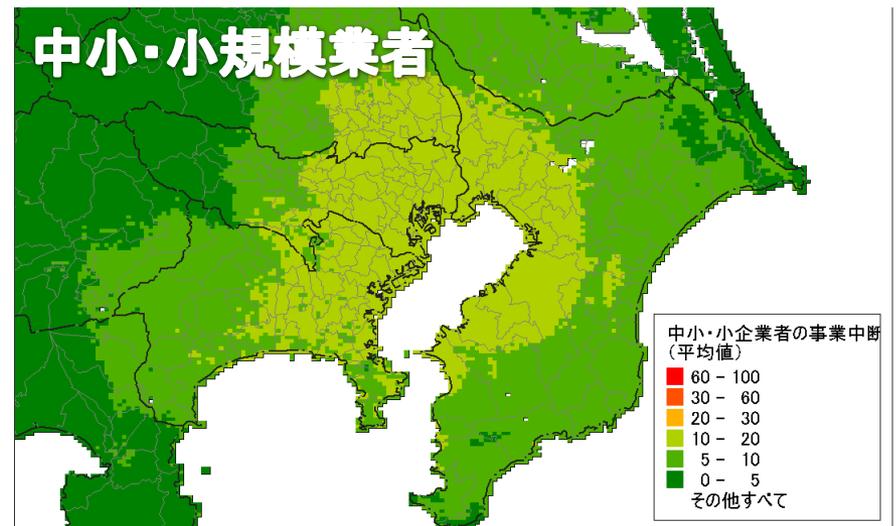
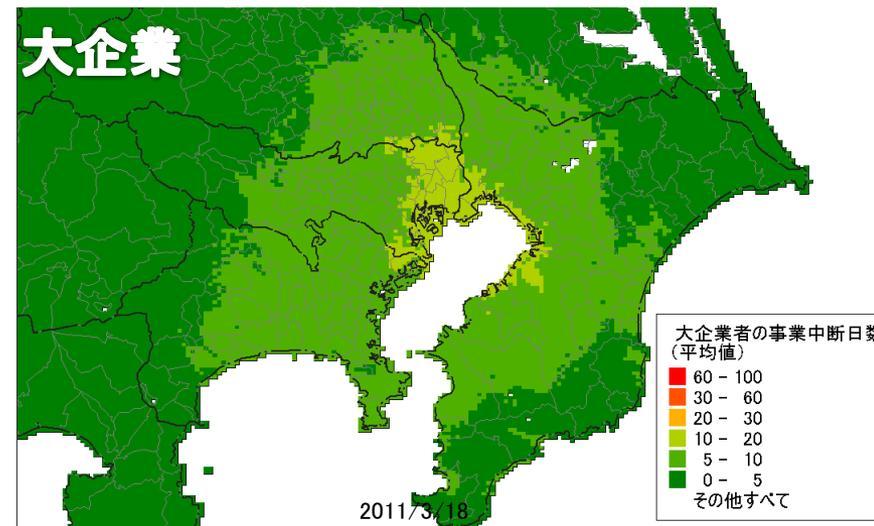
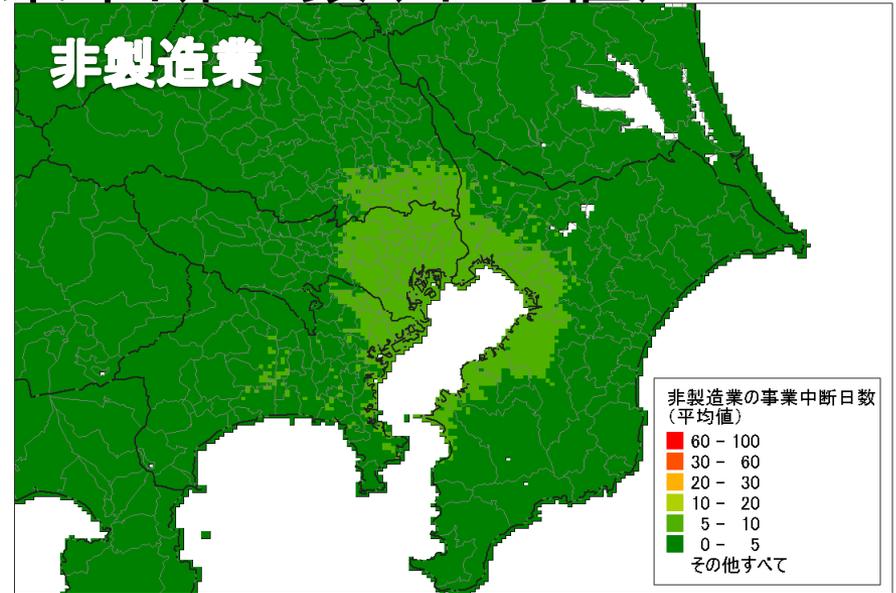
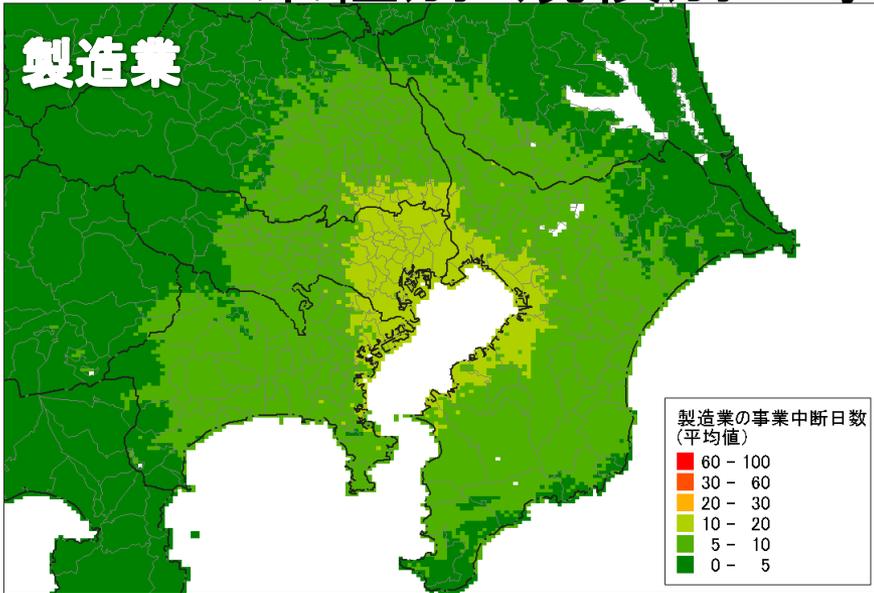
業種別・規模別の事業中断日数の予測式



首都直下地震への適用 東京湾北部地震(M7.3) (中央防災会議首都直下地震対策専門調査会)



東京湾北部地震で事業中断が発生した場合の 業種別・規模別の事業中断日数(平均値)



5. 千葉大：首都直下地震における上水道管と木造建物の広域被害予測

研究の目的

首都圏には政治・行政機能，企業の本社機能等が集中しており，迅速な復旧・復興活動が望まれ，**広域連携の必要性**が唱えられている。
⇒**都県の境界を越えた被害想定結果**は広域連携復旧戦略立案の一助になる。

統一された手法で広域被害予測をすることで，**被害量の相対評価**が可能となり，**危険性の高い地域を県境にとらわれずに指摘**することができ，首都圏の地震抑止力の向上に役立つ。

東京，神奈川，埼玉，千葉の1都3県の地震被害想定で使用された空間基盤データを用いて，**首都直下地震を想定地震とした木造建物と上水道管の広域被害予測**を行った。

首都圏における地震被害想定の実施状況

中央防災会議 首都直下地震対策専門調査会報告(2005年7月)

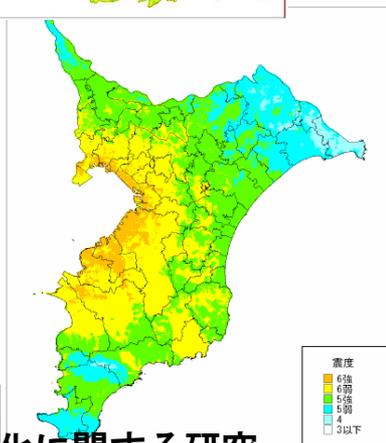
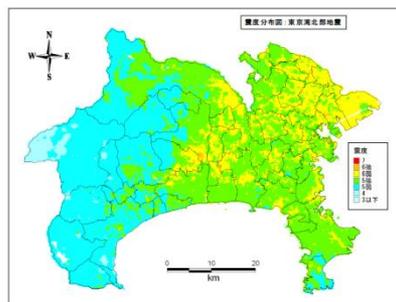
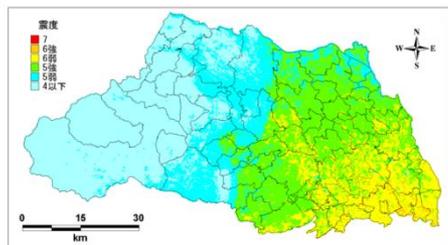
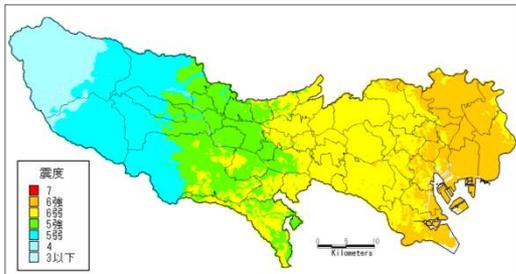
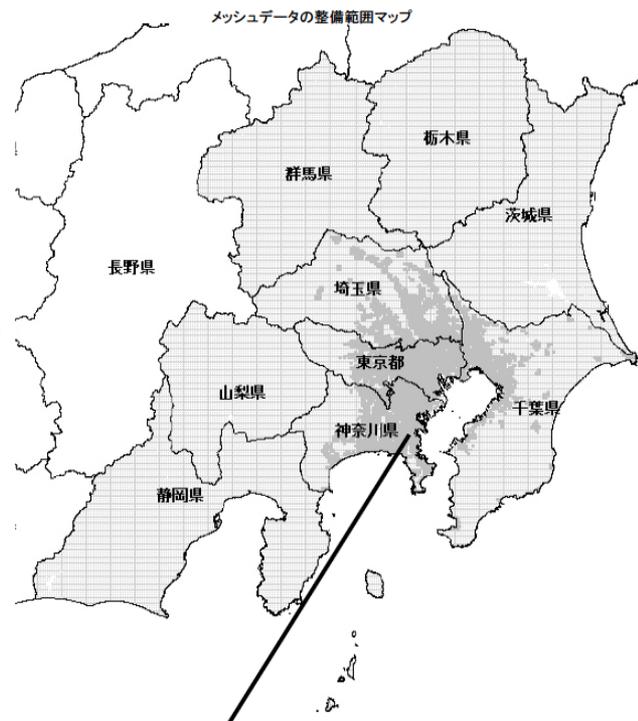
首都地域に起こりうる物的・人的被害の全体像をマクロ的な視点で捉える

東京都:首都直下地震による東京の被害想定(2006年5月)

千葉県:千葉県地震被害想定調査報告書(2008年3月)

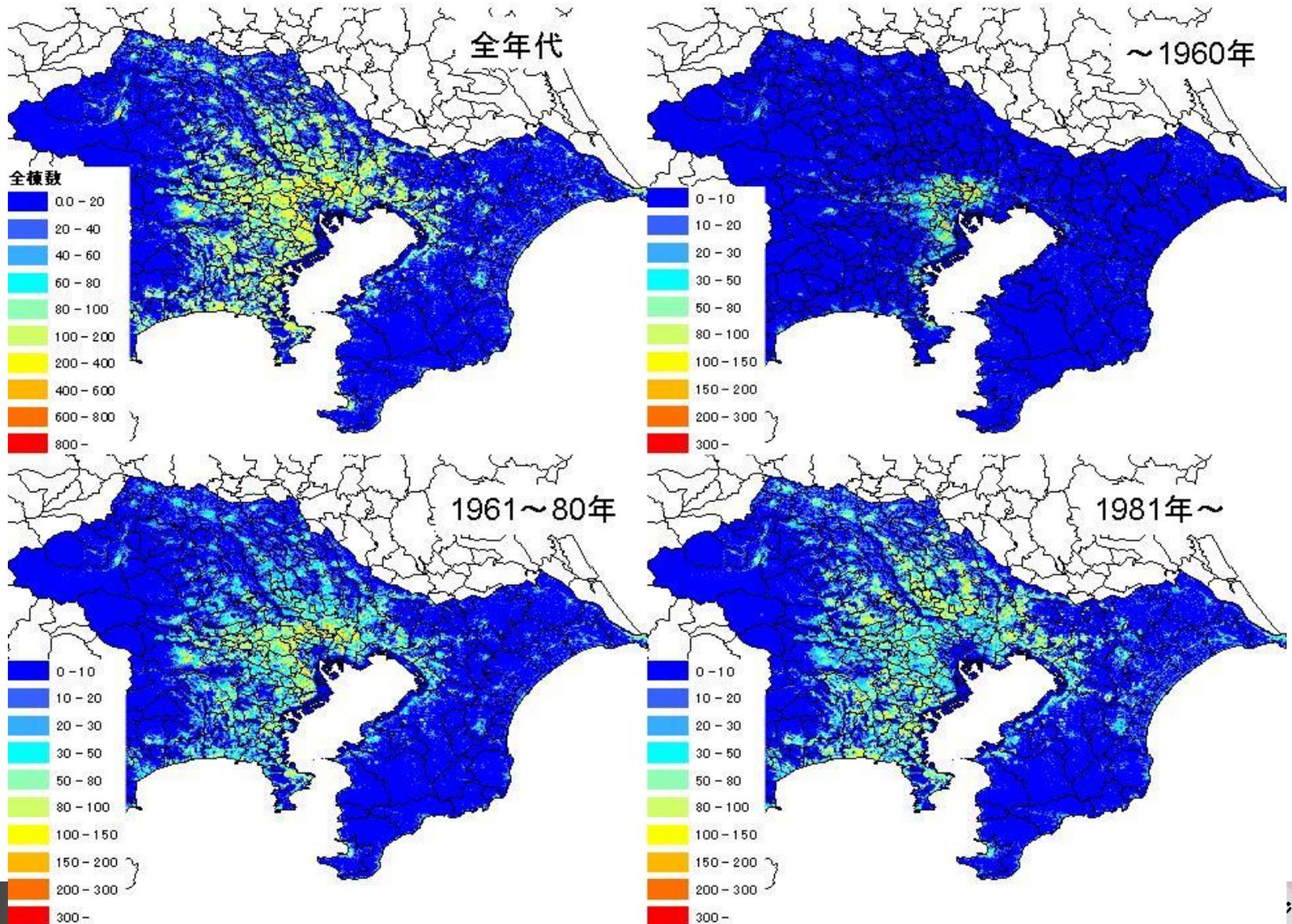
埼玉県:埼玉県地震被害想定調査報告書(2008年3月)

神奈川県:神奈川県地震被害想定調査報告書(2009年3月)



各都県が種々の手法で、
独自に被害予測を行っている。

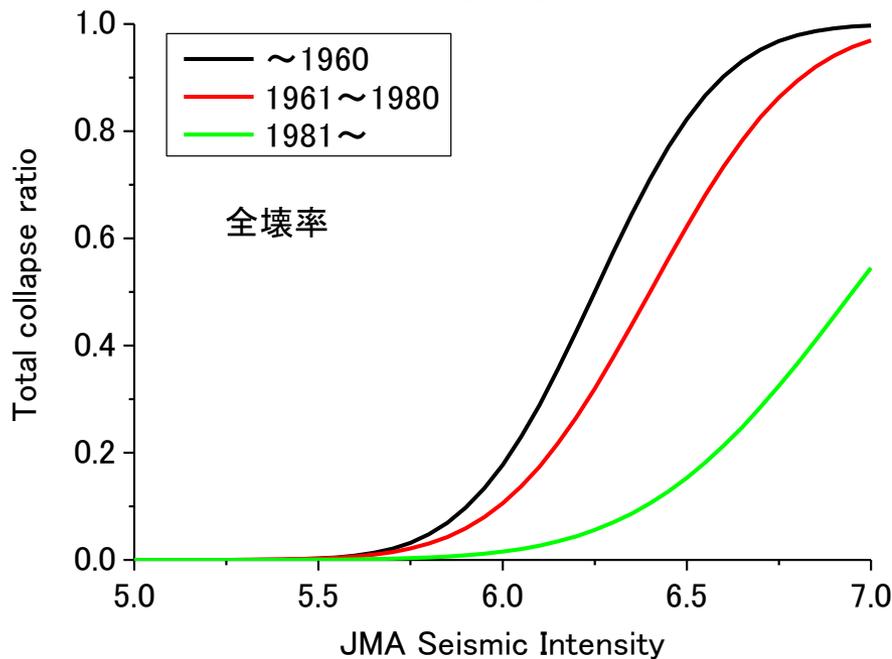
1都3県における建築年代別の木造建物数



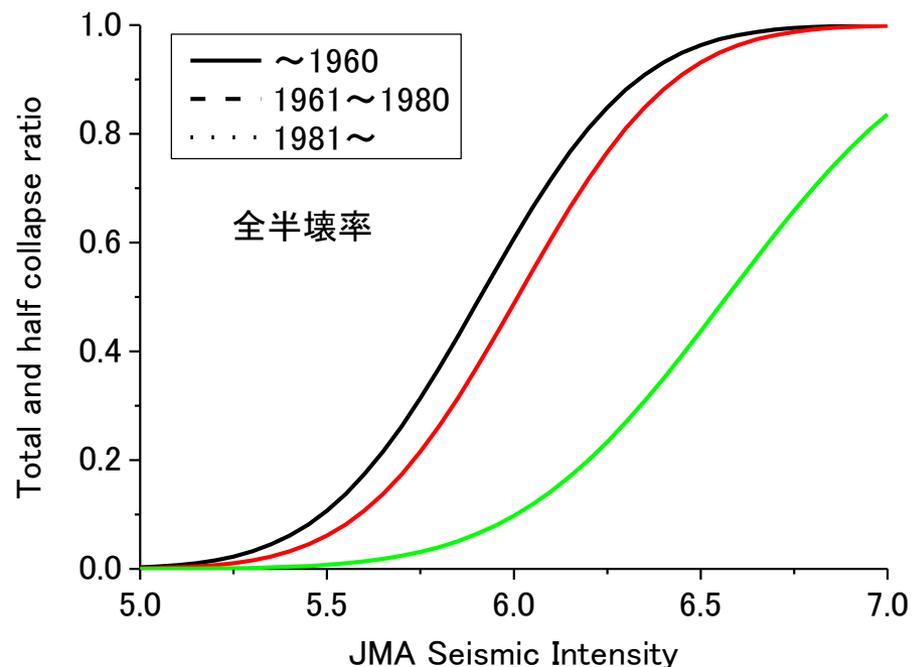
木造建物の被害関数

埼玉県(2008)

全壊率



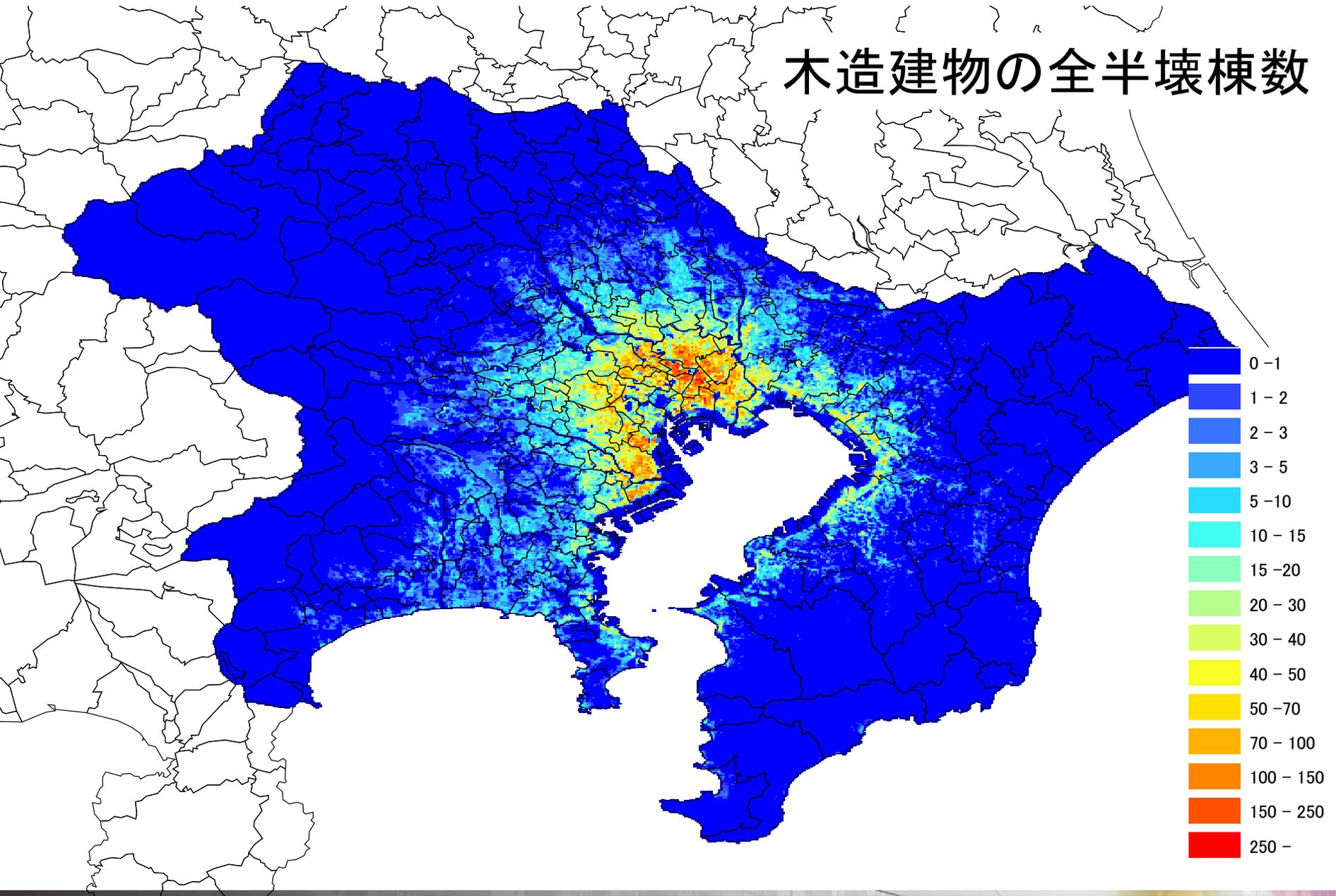
全半壊率



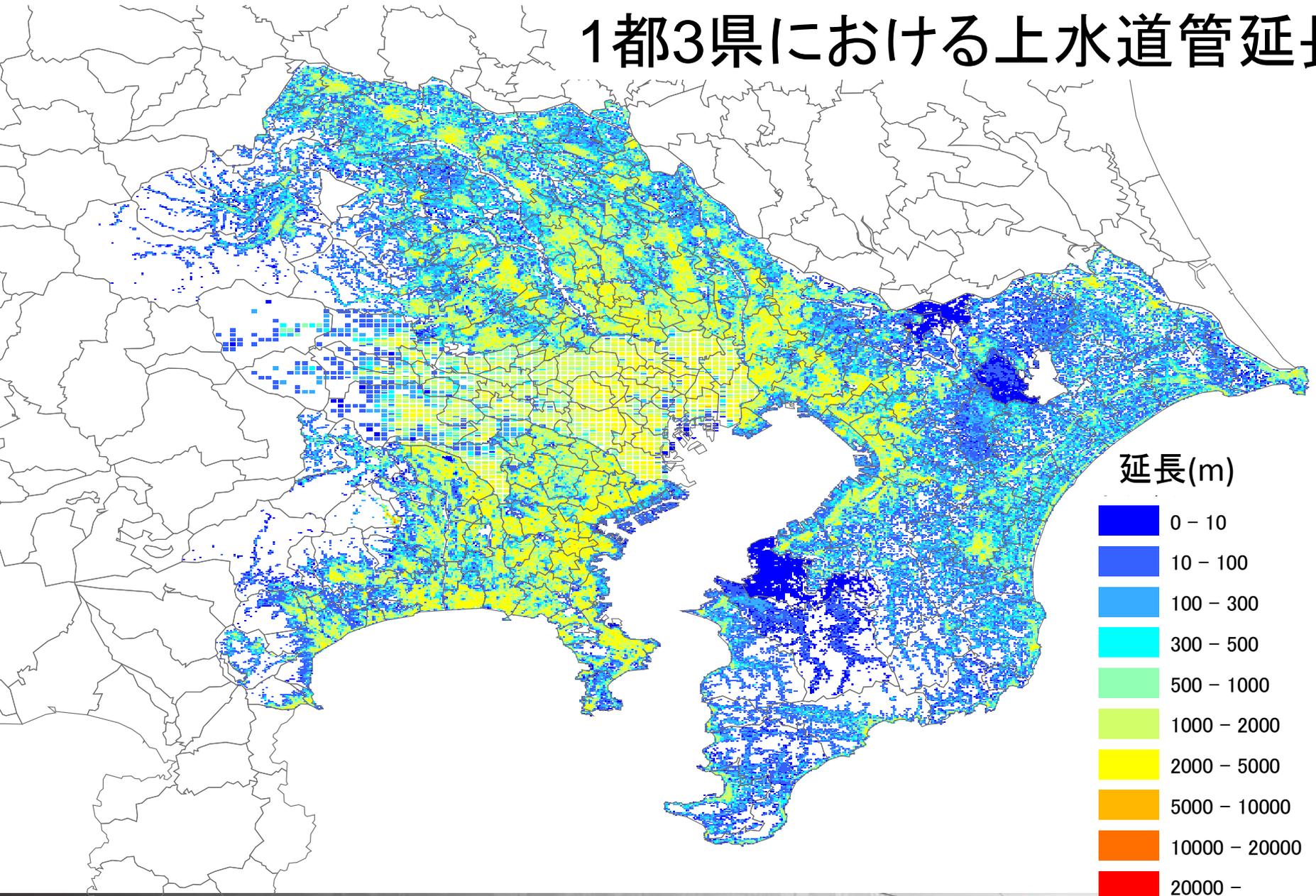
$$P(I) = \Phi\left(\frac{I - \lambda}{\zeta}\right)$$

建築年代	全壊率		全半壊率	
	λ	ζ	λ	ζ
~1960	6.25	0.27	5.91	0.33
1961~1980	6.40	0.32	6.01	0.33
1981~	6.95	0.44	6.57	0.44

木造建物の全半壊棟数



1都3県における上水道管延長

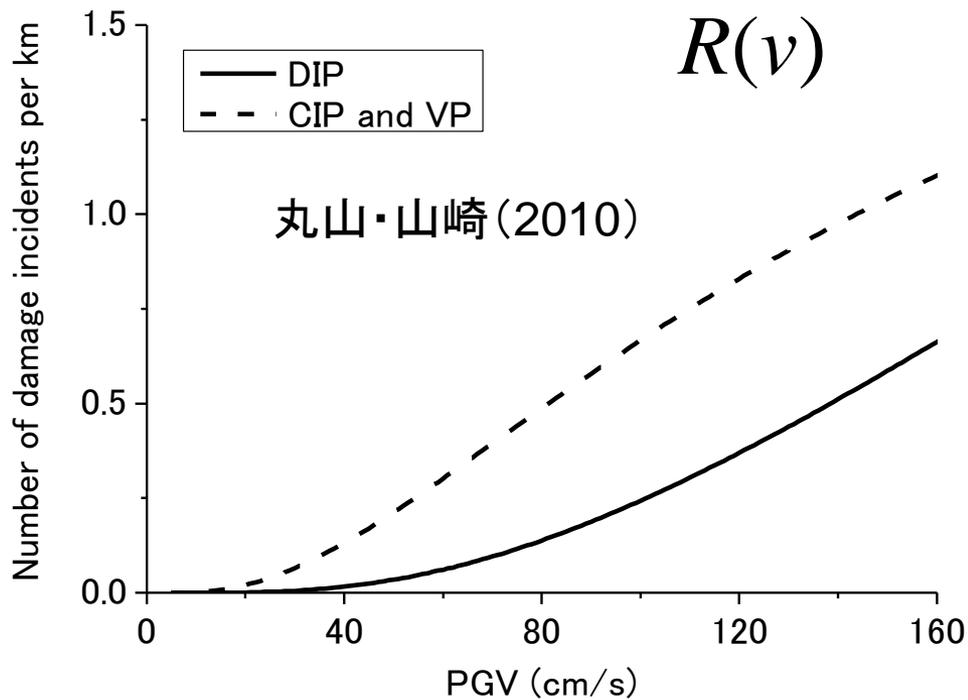


上水道管の被害予測

水道管路の被害率 R_m (件/km) の推定式

磯山ら(1998) $R_m(v) = C_p C_d C_g C_l R(v)$

v : 最大速度 (PGV) $C_p \sim C_l$: 補正係数



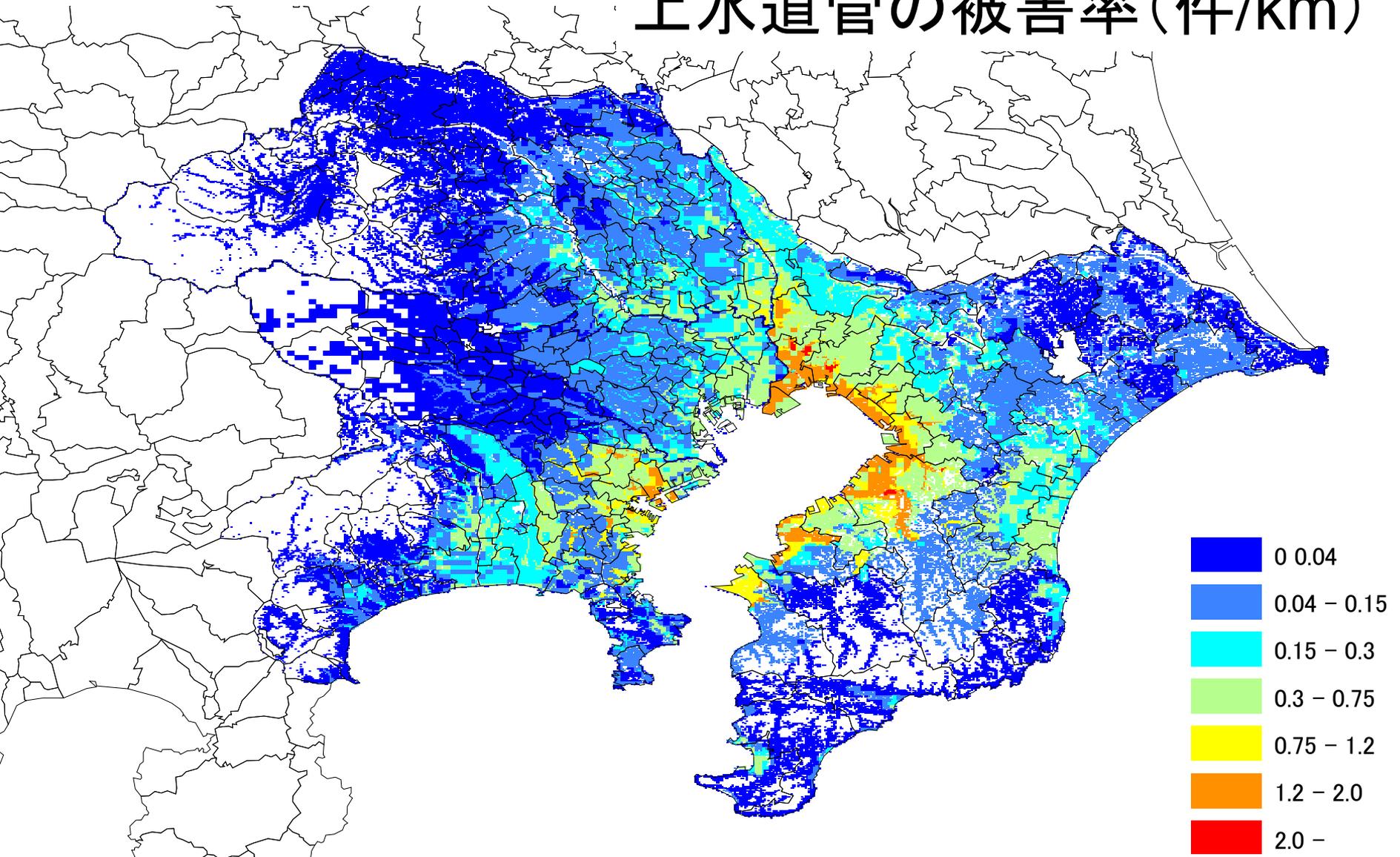
地形区分	若松らの微地形分類	地形・地盤係数 (C_g)
良質地盤	1. 山地 2. 山麓地 3. 丘陵 4. 火山地 5. 火山山麓地 6. 火山性丘陵 7. 岩石台地 8. 砂礫質台地 21. 岩礁・礫 22. 河川敷・河原	0.4
沖積平地	11. 扇状地 12. 自然堤防 13. 後背湿地 14. 旧河道 15. 三角州・海岸低地 16. 砂州・砂礫州 17. 砂丘 18. 砂州・砂丘間低地 19. 干拓地 20. 埋立地	1.0
谷・旧水部	10. 谷底低地 23. 河川・水路 24. 湖沼	3.2
段丘	9. ローム台地	1.5

管種	管種係数 (C_p)
ACP	1.2
CIP	1.0
VP	1.0
SP	2.0
PEP	0.1

管径	管径係数 (C_d)
~ $\phi 75$ mm	1.6
$\phi 100 \sim 150$ mm	1.0
$\phi 200 \sim 450$ mm	0.8
$\phi 500$ mm ~	0.5

PL値	液状化係数 (C_l)
0~5	1.0
5~15	2.0
15~	2.4

上水道管の被害率(件/km)



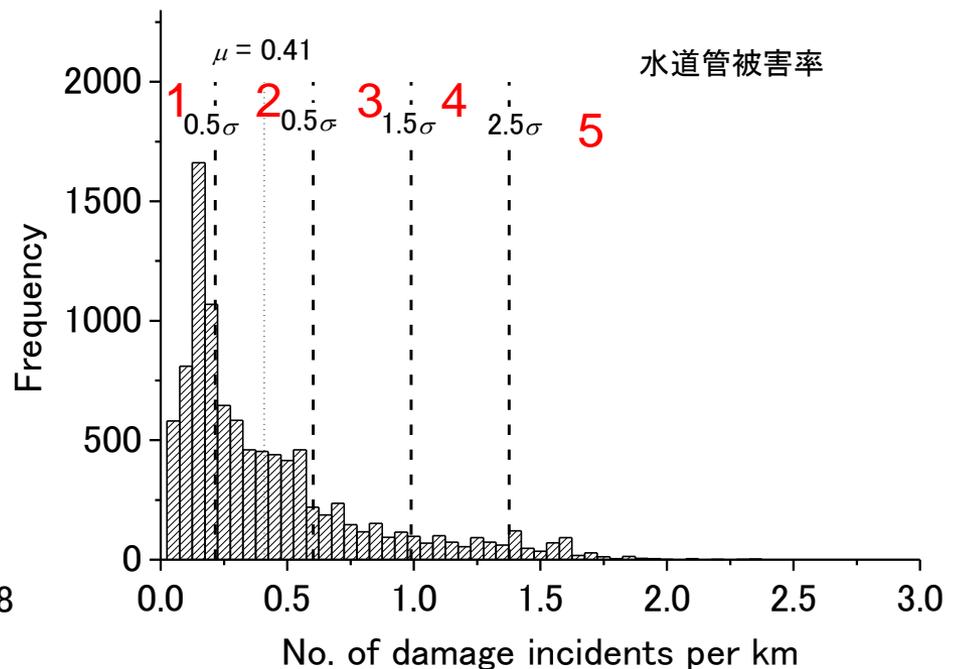
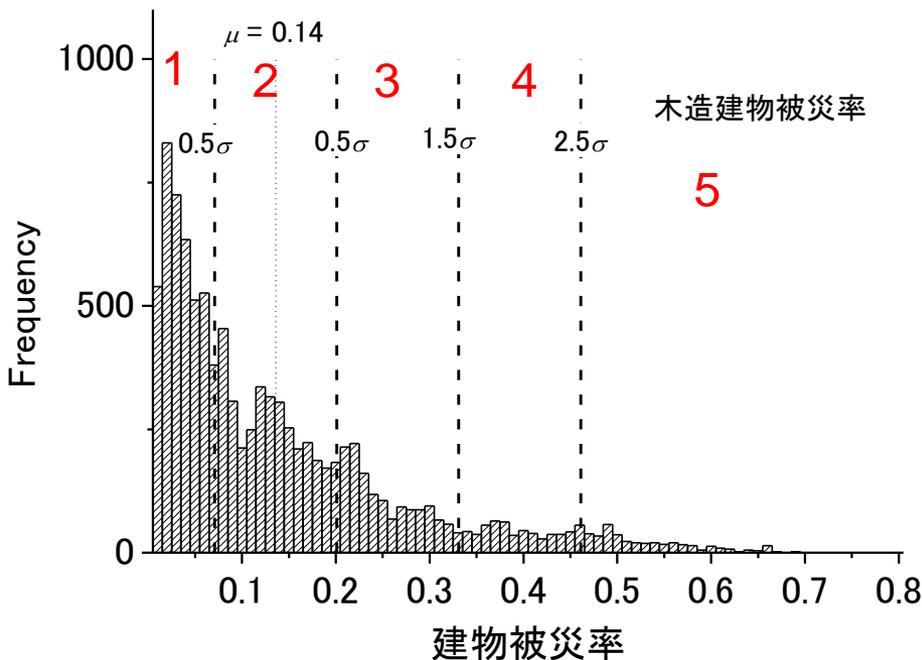
木造建物被害と上水道管被害の相関性

木造建物に被害が甚大で、さらに上水道管の被害率も高い地域については、倒壊建物による道路閉塞などの影響で、地中埋設管の復旧が遅れることが懸念される。

⇒ 町丁目ごとに木造建物被災率と上水道管被害率をランク付け

木造建物被災率 =
 (全壊棟数 + 半壊棟数/2) / 全棟数

水道管被害率(件/km) =
 被害数 / 水道管延長



木造建物と上水道 被害ランクの和

