

## 衛生工学 上水道

### 6. 災害と水道システム



名古屋大学減災連携研究センター  
Disaster Mitigation Research Center, NAGOYA UNIVERSITY

## 阪神・淡路大震災の被害

> 死者数：6,434人（直後 約5,500人）

- 窒息死；53.9%，圧死；12.5%
- 高齢者の割合が高い
- 木造住宅居住者の被害が多い



> 早朝の地震であったことから住宅被害と人的被害  
がリンク

## 我が国の水道システムにおけるエポック

- 1978年宮城県沖地震 ブロック管網
- 1995年阪神・淡路大震災 耐震管路、連携
- 2007年新潟県中越沖地震 応急給水
- 2011年東日本大震災 津波、レジリエント
- 2016年熊本地震 水質管理

## 問題の背景にあったもの

### > 関西地域での地震対策に対する関心の低さ

- 関西に大きな地震は来ないという勝手な思い込み

### > 災害マネジメントサイクルの欠如

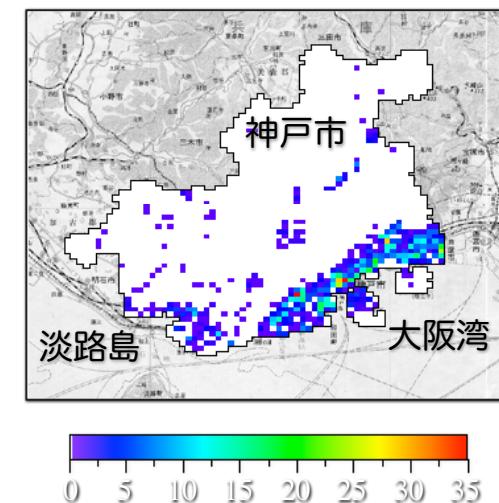
- 地震被害想定は防災部局で行われていても、それが全局的に応急対策計画の具体化や有効性評価のために使われることがなかった

### > 普段できないことは災害時にもできない

## 上水道システムの被害概要

施設	箇所数	備考
貯水池	3	堤体クラックや管理道路破損
浄水場	2	施設の損壊
送水施設	11	機能停止、漏水
配水池	1	ジョイント損傷、漏水
配水管路	1,757	継手離脱、破損など
給水施設（道路下）	14,561	
給水施設（宅地内）	75,023	

## 配水管被害件数分布



## 上水道施設被害



ダクトタイル鉄管・継手部の抜け 800mm

## 上水道施設被害



鉄管の管体破損 800mm

## 上水道施設被害



液状化による管体 (CIP) 被害 600mm

## 上水道施設被害



水管橋 (CIP) の破損 200mm

## 上水道施設被害



仕切弁の破損

## 上水道施設被害



給水管の破損

## 被災管路



## 被災管路



## 上水道施設被害



庁舎の被害

## 給水車による応急給水



## 仮設給水栓による応急給水



## 新潟県中越地震での応急給水



## 仮設応急給水栓（新潟県中越地震）



## 応急復旧（1995年阪神淡路）



## 応急復旧



## Oridate district, Sendai City



## Sendai Airport & Kyoto University Meeting

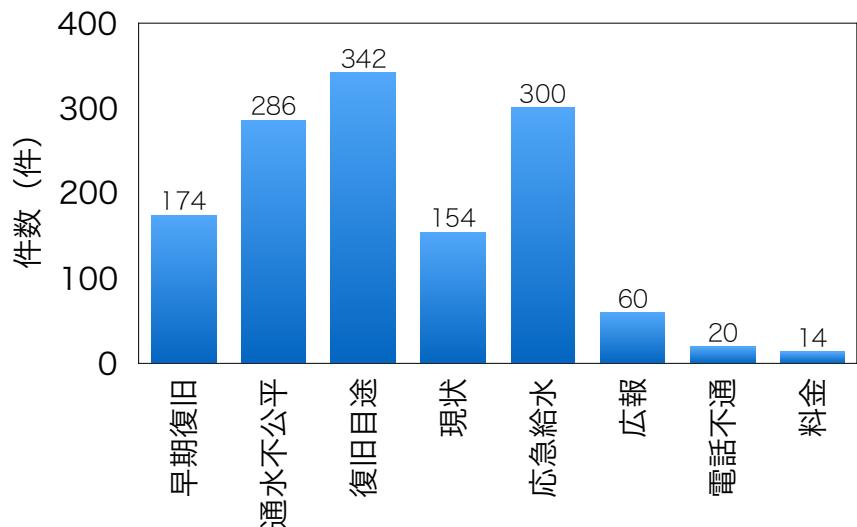


## 市民の声

震災発生から神戸市応急復旧完了に至る期間において、神戸市水道局災害対策本部で受け付けた苦情、要望、問い合わせ等、合計2,398件の電話

早期復旧	早く通水してほしい
通水不公平	断水および通水が不公平である
復旧目途	復旧の目途を教えてほしい
現状、何故	現状を教えてほしい、現状は何故？
広報	広報に対する要望
応急給水	応急給水への問い合わせ、要望
電話不通	水道局の電話が不通であることに対する苦情
料金	水道料金、工事費用に関する問い合わせ
漏水止水、修理	漏水を修理してほしい
閉栓	閉栓依頼、要望

## 断水時の要望別電話件数



## 市民のニーズと対応

	第1週	第2週	第3・4週	第5週
Keyword	知りたい	納得したい	不安、焦り	怒り、泣き、我慢できない
留意点	病院、避難所への給水確保、陽援護者への配慮	応急給水に対する不公平、もっと近くまで、来てもわからない	応急復旧に対する不公平、近くは通水しているのに	復旧困難地域での対策
必要な対応	常設給水拠点	常設給水拠点増設 タンク給水の強化	仮設給水栓 共用栓設定	仮設配管による臨時給水栓

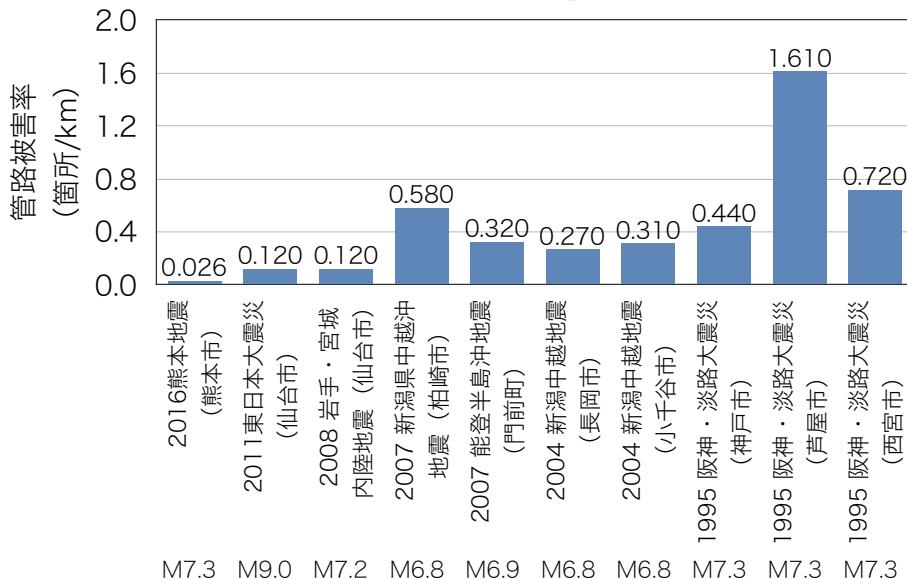
## 災害時における応急給水目標水量

地震発生からの日数	1人当たり水量(L/日)	用途
地震発生～3日	3	飲料 (生命維持に最小限必要)
～10日	20	飲料、水洗トイレ、洗面など (日周期の生活に最小限必要)
～21日	100	飲料用、水洗トイレ、洗面、風呂・シャワー、炊事
～28日	100～250	ほぼ通常の生活用 (若干の制約はある)

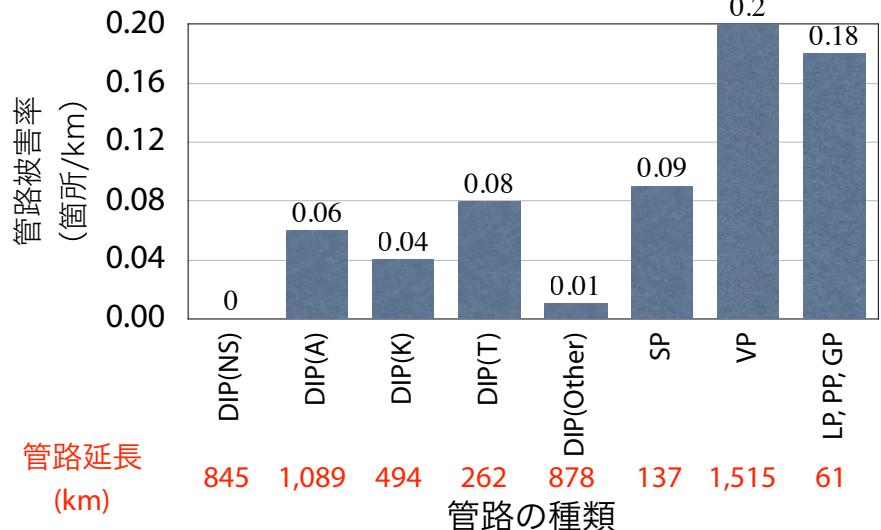
## 復旧に係る費用は？

施設	被害の状況	被害額(億円)
貯水施設	千刈貯水池・鳥原貯水池・布引貯水池の各一部損壊	5
導水施設	千刈導水路・その他導水路の一部損壊	68
浄水施設	上ヶ原浄水場内ろ過池、沈殿池、汚泥・排水処理施設等の損壊	19
送水施設	各所揚水管・送水管の破損多数	3
配水施設	各所配水管・弁栓類の損壊多数	183
給水装置	各所給水装置の損壊多数	24
その他	本庁舎、東部営業所庁舎全壊	14
		316

## 管路被害率



## 管路の種類別被害率

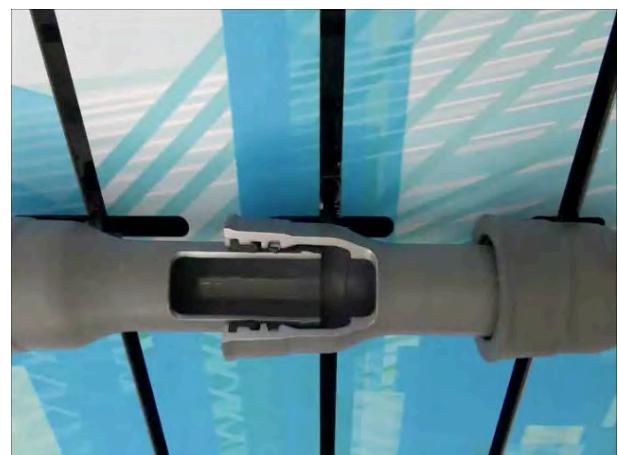


## 耐震管路



Property	Performance
Amount of expansion/contraction	$\pm 1\%$ of nominal pipe length
Pull-out resistance	3 DkN
Maximum deflection angle	6 – 8°

## 耐震継手ダクタイル鋳鉄管



## Los Angeles ER-DIP Pilot Project



©2013 The Wall Street Journal, April 14, 2013

## 耐震管と耐震適合管

### 基幹管路

導水管、送水管および配水本管

水道施設の技術的基準を定める省令第1条第7号イ(3)を基本  
(i)配水管のうち、給水管の分岐のないもの、(ii)配水本管に接続するポンプ場、  
(iii)配水本管に接続する配水池等、(iv)配水本管を有しない水道における最大容  
量を有する配水池等  
水道事業の規模、配水区域の広がり、市街化の状況、配水管路の口径・流量・  
配置状況等を勘案して、水道事業体等において適切に定める  
災害拠点病院、避難所などの重要給水施設に給水する管路は、口径を問わず、  
基幹管路として扱うことが望ましい。

### 配水本管

配水本管を除く配水管

### 耐震管

レベル2地震動において、管路の破損や継手の離脱等の被害が軽微な管  
液状化等による地盤変状に対しても、上記と同等の耐震性能を有する管

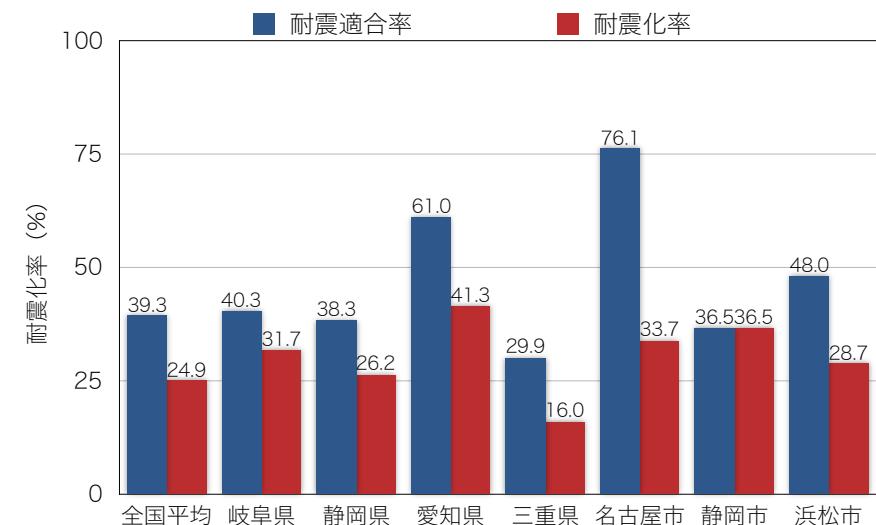
### 耐震適合管

レベル2地震動において、地盤によっては管路の破損や継手の離脱等の被害が  
軽微な管

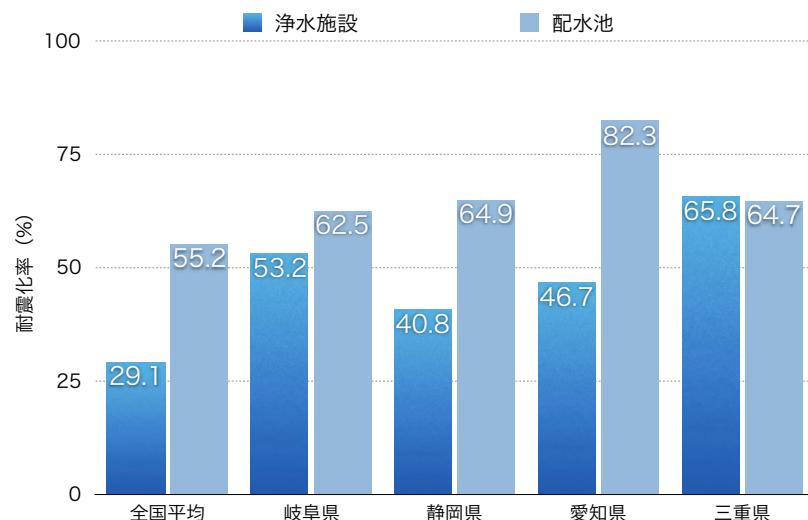
## 管路が備えるべき耐震性能

機能	レベル1地震動	レベル2地震動
基幹管路	当該管路の健全な機能を損なわない (設計能力を損なわない)	生ずる損傷が軽微であって、当該管路の機 能に重大な影響を及ぼさない (一定の機能低下をきたしたとしても、速 やかに機能が回復できる)
配水支管	生ずる損傷が軽微であって、当該管路の機 能に重大な影響を及ぼさない (一定の機能低下をきたしたとしても、速 やかに機能が回復できる)	耐震性能の規定はない。しかし、 災害その他非常の場合に断水その他の給水 への影響ができるだけ少なくなるように配 慮されたものであるとともに、速やかに復 旧できるように配慮されたものであること

## 東海圏での基幹管路の耐震化状況 (H29)



## 浄水施設・配水池の耐震化状況 (H29)



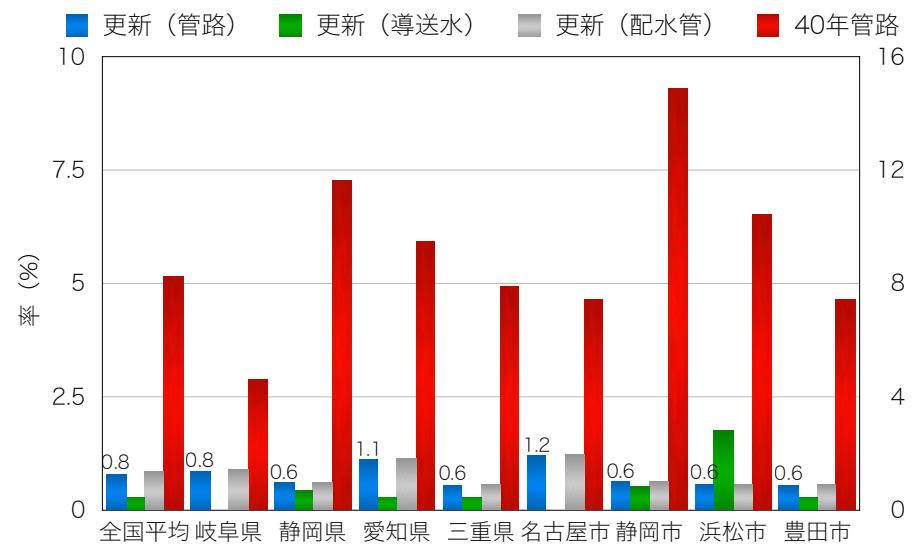
## 管路の耐震化 (更新)



管路の更新、耐震化を進めているが…



## 管路の更新状況



## 運搬給水



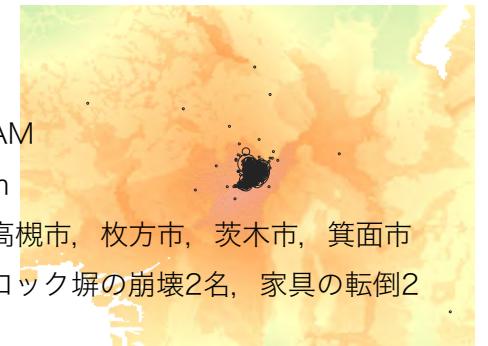
## Emergency water supply station



## Disaster Community Training at KOBE primary school



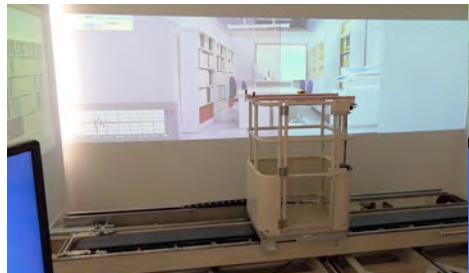
2018.6.18 大阪府北部地震



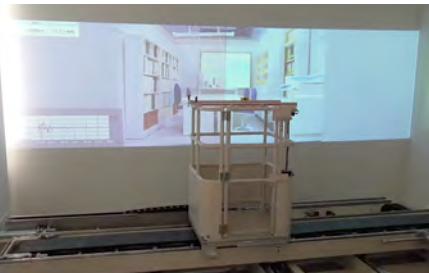
- ✓ 2018年6月18日 7:58AM
- ✓ Mj6.1, 震源の深さ13km
- ✓ 震度6弱：大阪市北区, 高槻市, 枚方市, 茨木市, 箕面市
- ✓ 人的被害：死者5名（ブロック塀の崩壊2名, 家具の転倒2名）, 負傷者423名
- ✓ 住家被害：全壊3棟, 半壊19棟, 一部損壊10,802棟
- ✓ 火災発生件数：8件
- ✓ 震度6弱暴露人口：100万人

## KiK-net益城&K-NET高槻

KiK-net益城



K-NET高槻



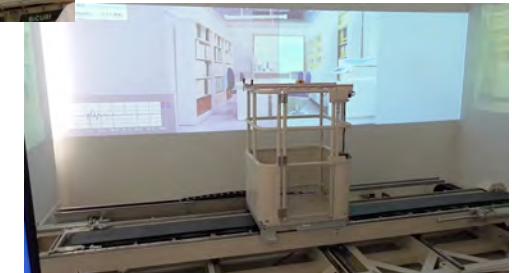
©防災科学技術研究所, 2016, 2018

## 益城と高槻での木造2階の揺れ



大阪府高槻市

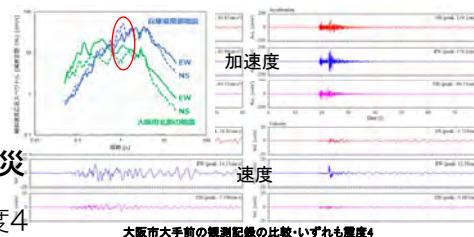
熊本県益城町



## 25年前との揺れに違い

### ✓ 1995年阪神・淡路大震災

- > 大阪市・大手前：震度4
- > 死者31名，全壊895



### ✓ 2018年大阪府北部の地震

- > 88震度計，大阪府高槻市震度6弱
- > 死者5名，全壊12，半壊273，一部損壊41,459

## 都市の脆弱性

- ✓ ブロック塀，家具の転倒防止：1978年宮城県沖地震 ブロック塀倒壊18名。
- ✓ 通勤時間帯の地震：通勤困難，帰宅困難。1995年午前5時46分，首都圏の大雪，台風。
- ✓ 道路の渋滞：1995年阪神・淡路大震災国道2号，43号。2011年東日本大震災国道4号，三陸自動車道，2016年熊本地震国道3号。
- ✓ エレベータ：大阪府74,303台，緊急停止1万基以上，339件閉じ込め，復帰に時間がかかる。
- ✓ 都市インフラ：淀川等堤防に亀裂11ヶ所。

## 都市ライフラインの脆弱性

### ✓ M6.1、震度6弱でこれほど影響が出るのか…

- ✓ 水道：20日復旧（3日間）。送水管被災。1995年阪神・淡路大震災阪神水道企業団、2011年東日本大震災宮城県企業庁。水源から蛇口まで。
- ✓ 電気：18日復旧（1日未満）。
- ✓ ガス：24日復旧（7日間）。11万2千戸供給停止。1995年86万戸、3ヶ月間、2016年熊本地震10万戸、15日間。
- ✓ 通信：輻輳。大きな被災なし。

## 水道施設について

- 管路延長（導水、送水、配水管）11,684.2km、33,924.4km、630,887.6km
  - ✓ 茨木市：6.5km, 45.0km, 728.5km、高槻市：3.6km, 20.1km, 1044.9km、大阪広域水道企業団：16.7km, 553.7km, 0.0km
- 耐震管（基幹管路：導水、送水、配水管）全国：24.4%
  - ✓ 茨木市：37.1%、高槻市：32.0%、大阪広域：31.3%
- 耐震管（導水、送水、配水管、配水支管）全国：15.4%
  - ✓ 茨木市：16.7%、高槻市：15.0%、大阪広域：31.3%
- 布設40年以上の管路、全国（導）25.2%、（送）19.7%、（配）18.4%，（支）12.8%
  - ✓ （導水）茨木市：51.8%、高槻市：53.6%、大阪広域：90.2%
  - ✓ （送水）茨木市：13.7%、高槻市：19.2%、大阪広域：58.6%
  - ✓ （配水管）茨木市：16.1%、高槻市：54.0%、大阪広域：-%
  - ✓ （配水支管）茨木市：12.3%、高槻市：11.6%、大阪広域：-%

## 水道施設について（更新状況）

- 導水・送水（H28更新率）全国0.92%
  - ✓ 茨木市：3.74%、高槻市：0.00%、大阪広域水道企業団：0.12%
- 配水管（H28更新率）全国1.11%
  - ✓ H28：茨木市：0.98%、高槻市：1.08%、大阪広域水道企業団：-
  - ✓ H27：茨木市：1.23%、高槻市：0.69%、大阪広域水道企業団：-
  - ✓ H26：茨木市：1.38%、高槻市：0.88%、大阪広域水道企業団：-
- 水道料金20立方メートル（全国平均：3,236円）
  - ✓ 茨木市：1,998円、高槻市：2,376円
- 給水原価20立方メートル（全国平均：3,456円）
  - ✓ 茨木市：2,773円、高槻市：2,500円
- 全国平均では、**3,456円で製品を生産し、3,236円で販売している。**

## 大阪府北部の地震

- ✓ **水源から蛇口まで**、ひとつの水道システム機能として考えた災害対策。
- ✓ 事業継続。
- ✓ 災害対応リソース（事業体、民間、市民）。
- ✓ 委託事業における契約。
- ✓ 管路更新（耐震化）の更なる促進。
  - > 「お金がない、人がない」という言い訳は災害には通用しない。

## 広域的複合災害

### ✓ 広範囲での浸水被害

> バックウォーター：岡山県倉敷市真備町

> ダム放流：愛媛県大洲市)

### ✓ 土砂災害：広島県呉市、愛媛県宇和島市

### ✓ 砂防ダム決壊：広島県坂町

### ✓ ため池決壊：広島県福山市、山田古池

### ✓ 上水道施設の被災

> 全国18道府県76市町村：最大263,319戸の断水

## 岡山県倉敷市真備町地区



©朝日新聞, 2018

## 2018年7月西日本豪雨災害 吉田浄水場への被害



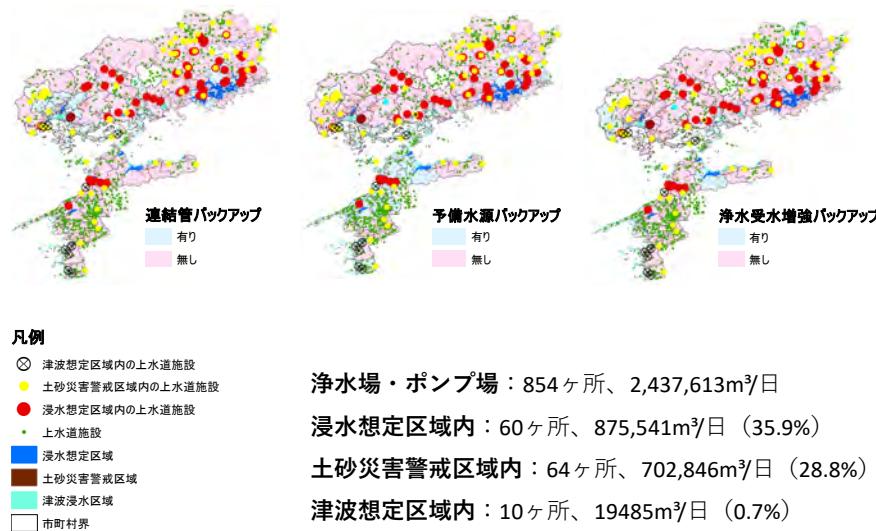
©後藤隆昭, 2018

## 三間仮設浄水場



©後藤隆昭, 2018

## 上水道施設の水害リスク

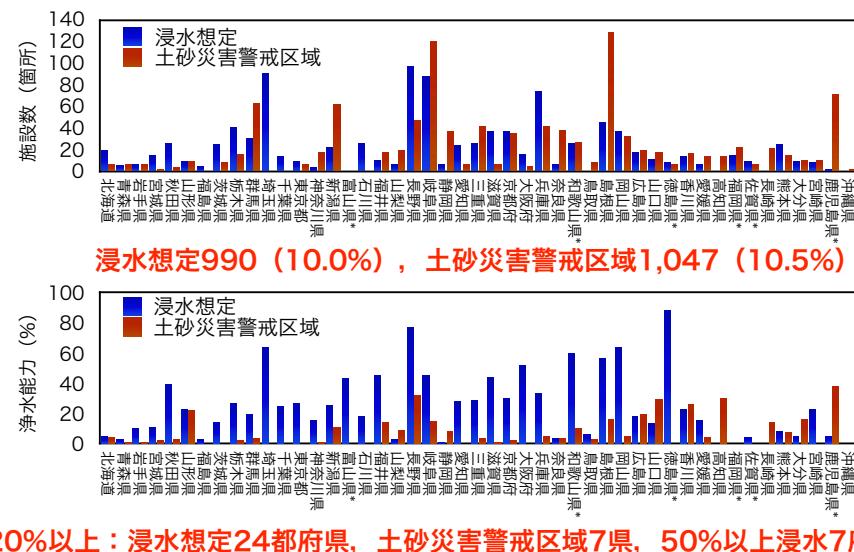


## 水害リスクマップによる評価

	岡山県	広島県	愛媛県
256箇所	194箇所	404箇所	
994,267m <sup>3</sup> /日	926,699m <sup>3</sup> /日	496,647m <sup>3</sup> /日	
37箇所	17箇所	6箇所	
634,229m <sup>3</sup> /日	164,518m <sup>3</sup> /日	76,794m <sup>3</sup> /日	
63.8%	17.8%	15.4%	
32箇所	19箇所	13箇所	
47,656m <sup>3</sup> /日	186,203m <sup>3</sup> /日	20,961m <sup>3</sup> /日	
4.8%	20.1%	4.2%	
津波想定区域	3箇所	7箇所	
—	8,005m <sup>3</sup> /日	11,480m <sup>3</sup> /日	
	0.9%	2.3%	

— 2018年西日本豪雨災害で被災水道施設の多くが、浸水想定区域、土砂災害警戒範囲内に存在。バックアップの対策がなされていない、水量的には不十分。

## 我が国の水道施設における水害リスク



## 上下水道施設の災害対策

- ✓ 地震対策、風水害対策、水安全計画、危機管理対策、渇水対策、新型インフルエンザ対策、テロ対策…
- ✓ 水害リスクの把握
  - > 浸水想定区域
  - > 土砂災害警戒区域
  - > 津波浸水想定
- ✓ 地震対策のみならず**地域特性を考慮した水害対策**
- ✓ 水害リスク低減を考慮した施設更新

# 国土強靭化政策大綱

## 内閣府国土強靭化推進本部, 2013年12月

### > 基本目標

- 人命の保護が最大限図られる
- 国家及び社会の重要な機能が致命的な障害を受けず維持される
- 国民の財産及び公共施設に係る被害の最小化
- 迅速な復旧復興

### > 事前に備えるべき8つの目標

### > 回避すべき起こってはならない45の事態

# 水分野における強靭化

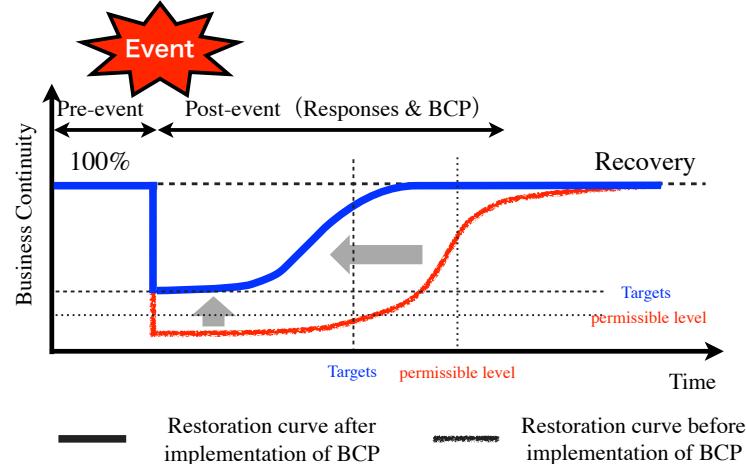
### > 國土強靭化基本計画

- ライフライン（電気、ガス、上下水道、通信）の管路や施設の耐震化、各家庭・地方公共団体等における飲料水等の備蓄、代替機能の確保を図る。

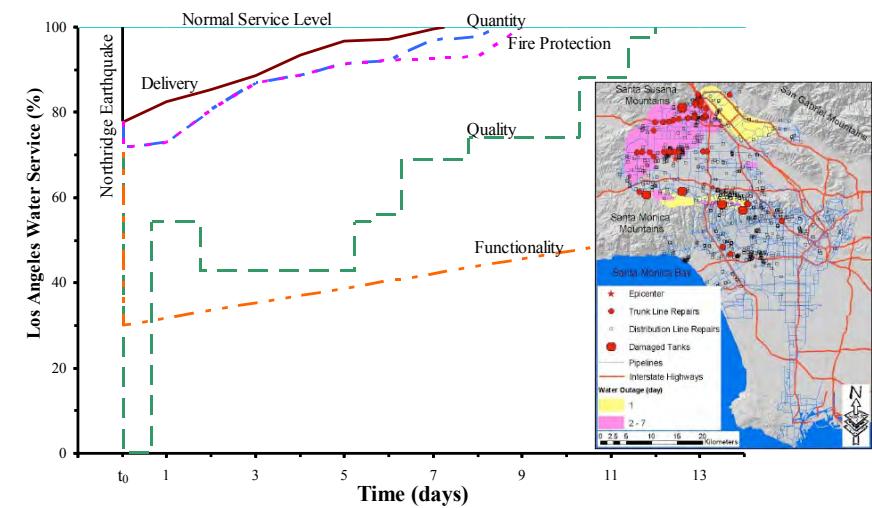
### > 新水道ビジョンの推進

- 安全、強靭、持続
- > 水道施設の耐震化対策
- > 生活基盤施設耐震化等交付金
- > 水道施設の計画的更新・耐震化

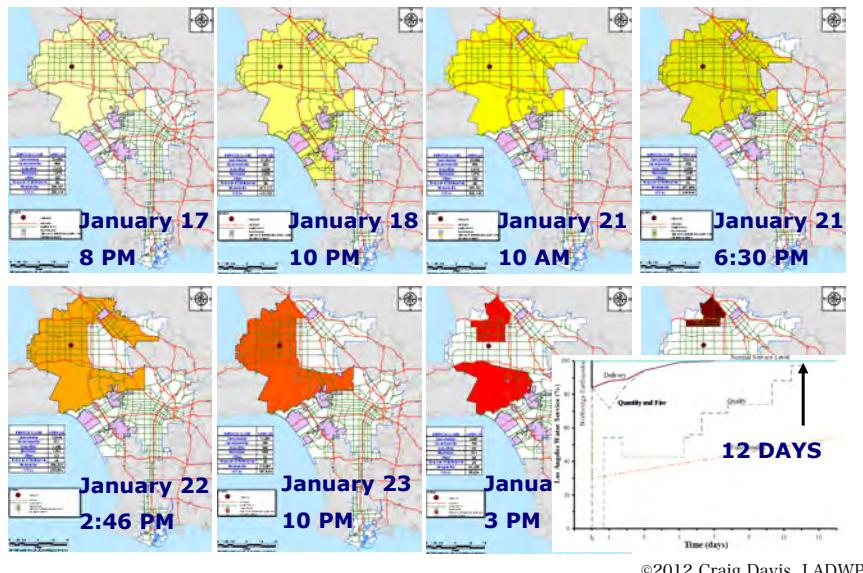
# 事業継続計画 (BCP) の概念



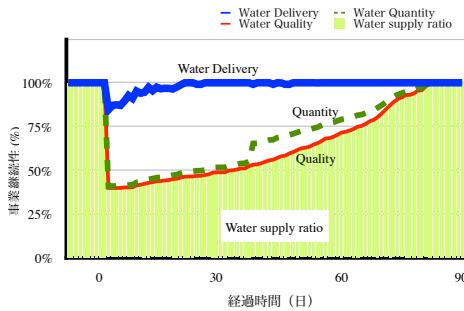
# 1994 NORTHRIDGE EARTHQUAKE L.A. WATER RESTORATIONS



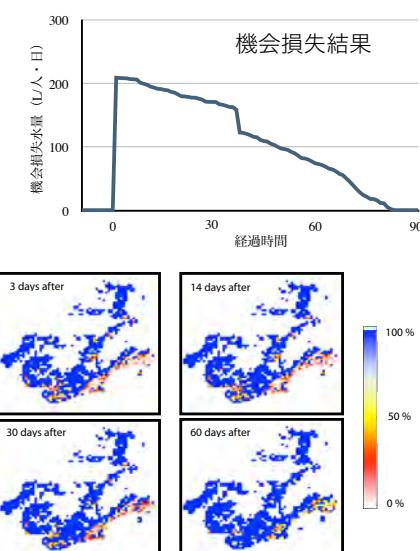
## 1994 L.A. QUALITY RESTORATION



## 災害レジリエンス曲線による評価



数値解析結果（水量）



## 上水道事業の事業継続性

### > 機会損失

- 地震等の被災により通常時の給水量からみて享受することができない水量

### > 水アクセス (Water Delivery(Water Accessibility))

- 1日当たりの応急給水量が3Lの人口割合

### > 水量 (Water Quantity)

- 一人一日平均給水量に対する応急給水量の割合

### > 水質 (Water Quality)

- 净水場、配水池等から直接給水される人口割合

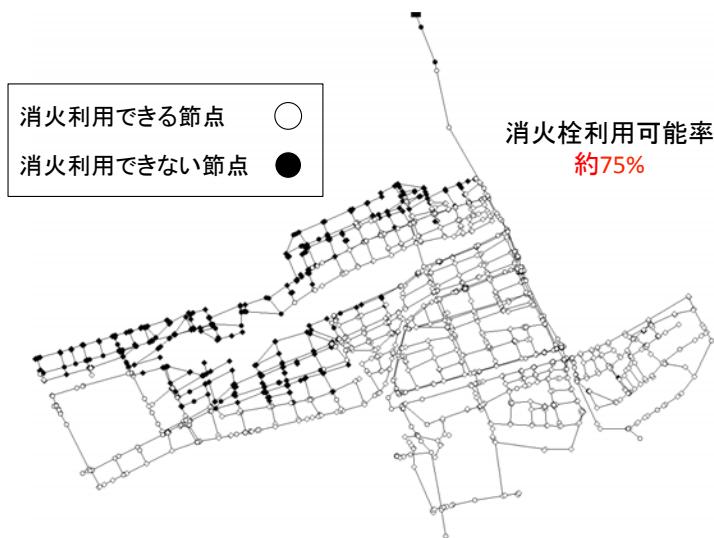
## 消防機能の評価

### > 管網解析による (EPANET 2.0)

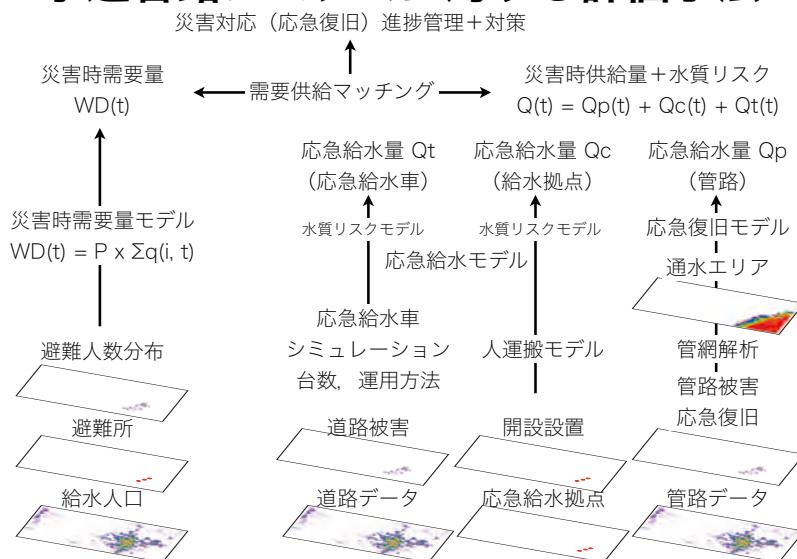
### > 評価手法

- 消火用水 ( $3m^3/min$ ) を取り出した節点に隣接して接続されている節点すべてが正圧であれば、当該消火栓が利用可能
- 配水管網全体で消火栓が利用可能な割合

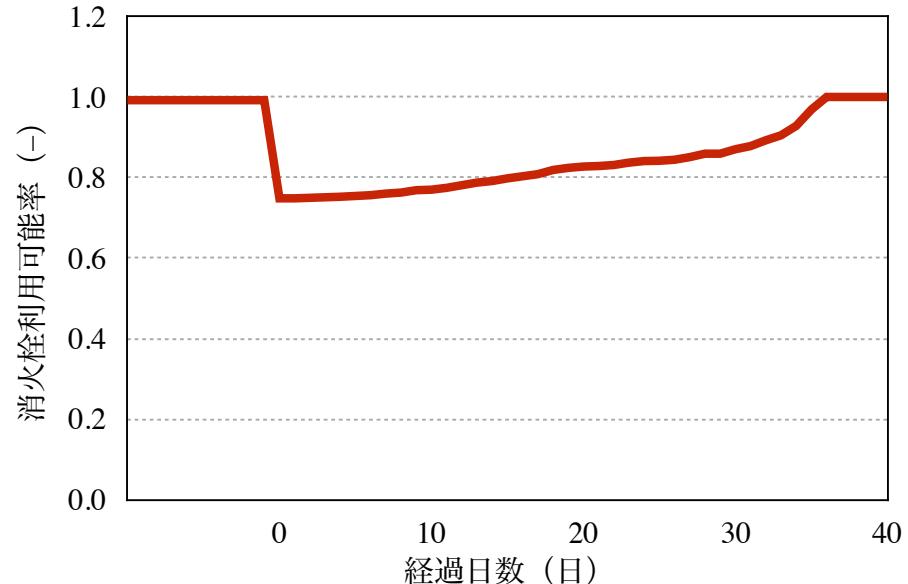
## 消火機能解析結果例 発災直後



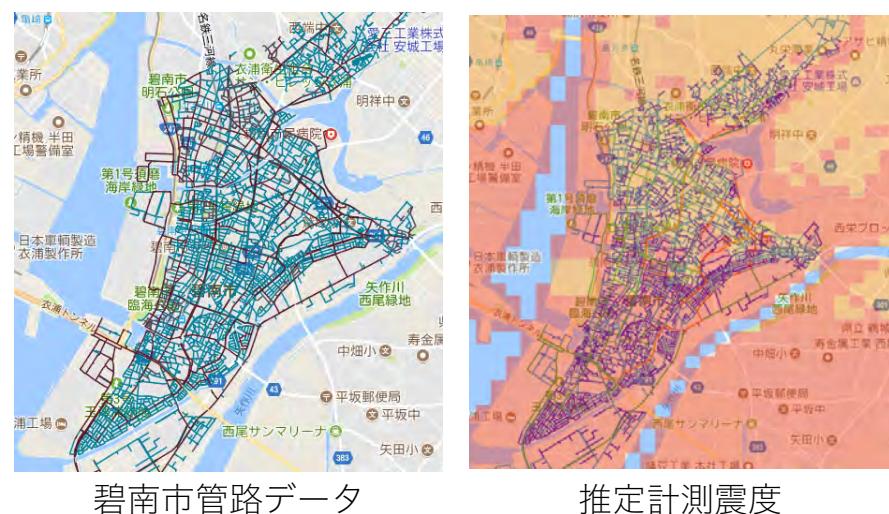
## 災害レジリエント曲線による 水道管路システムに対する評価手法



## 災害レジリエンス曲線による消火機能評価



## 愛知県碧南市でモデル構築



# 管路被害の推定 (精度向上への取り組み)

## 一 水道管の離散的地震被害推定手法

- ✓ 管路被害率（件数/km）ではなく、被害の有無で表現
- 地震被害曲線と確率論的アプローチ
- メッシュ法への適用
- 被害地点の推定
- 応急復旧戦略策定への展開

# 管体データベースの構築

## データベース統合

- 管路に対して、属性情報を与える

管路属性

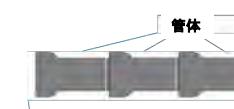
管種・口径・敷設年度・  
埋設地盤・液状化危険度

地震ハザード属性  
地震最大速度 (PGV)

被害属性  
被害数

分析に用いるデータベース

データベース名	主な属性	形状	入手先
配水管路図	管種、口径、敷設年度	ライン	神戸市
被害地点分布図	被害箇所	ポイント	神戸市
地形分布図	埋設地盤 液状化危険度 (250m)	メッシュ	防災科学技術研究所
最大速度分布図	PGV	メッシュ (250m)	総務省消防庁



直管一本当たりの長さ	
口径 (mm)	長さ (m)
75~100	4
150~250	5
300~1500	6
1650~2600	5

管体のイメージ

## 管体データ作成

- 管路 (km) を管体 (本) に換算

\* 被害点は同一座標系で最も近い管路に結合  
\*\* 直管一本当たり長さは、一般的なダグタイル鉄管の基準を使用

属性情報が与えられた管体データを作成

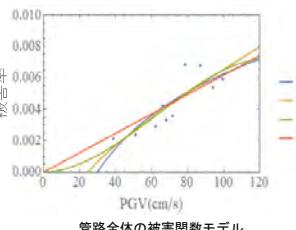
# 水道管体に対する地震被害関数推定

## Fit関数の設定と被害関数

被害関数…与えられたPGV  $x$  (cm/s) に対して被害率  $P$  を返す。

Fit1 : PGVに対する被害率が正規分布・対数正規分布に従うと仮定

$$P = \phi\left(\frac{\ln x - m}{\sigma}\right) \quad \phi = \int_0^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx$$



管路全体の被害関数モデル  
\* 未知パラメータを非線形の関数モデルを用いて、データに最も当てはまりの良いパラメータを推定する非線形最小二乗法を使用。

Fit2 : 標準被害率曲線 (日本水道協会, 1998)

$$P = c(x - A)^b$$

パラメータ →  $b, c$   
A : 被害が発生し始める PGV

Fit3 : PGVに対する被害率がワイルブル分布に従うと仮定

$$P = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^m\right\}$$

m : 形状パラメータ  
η : 尺度パラメータ

Fit4 : PGVに対する被害率が原点を通る回帰直線に従うと仮定

$$P = ax$$

パラメータ →  $a$

非線形最小二乗法を用いたパラメータ推定により、被害関数モデルを構築

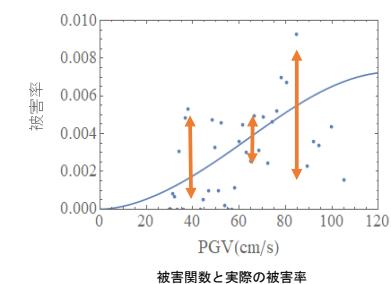
# 被害関数と確率論的アプローチ

## 離散的被害件数推定手法1

➢ 被害関数によって求められた被害率に対して、  
実際の被害率には、ばらつきがある

➢ 実例として、耐震管は被害率は0であるが、  
熊本地震では、施工不良による被害が生じた。

➢ 設定した管路属性以外の影響因子を不確定要素として考慮する必要がある



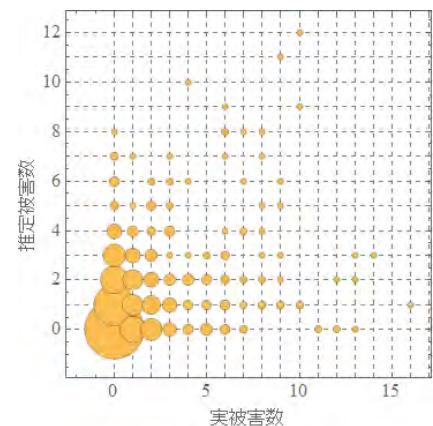
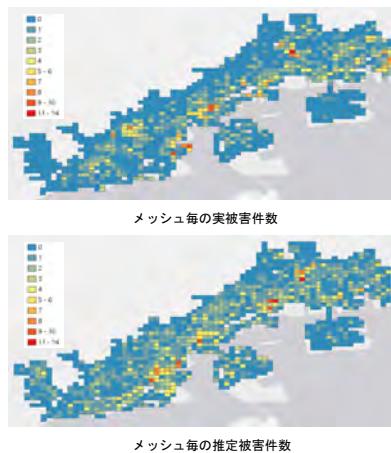
被害関数から算出した被害率はあくまで被害率の平均値として扱い、推定被害率はポアソン分布を用いて決定する

ポアソン分布とは?…単位時間当たり平均  $\lambda$  回起きた現象が単位時間に  $k$  回起きた確率を表す確率分布  
ここでは、平均値  $\lambda$  の故障率が  $k$  となる確率を表す。

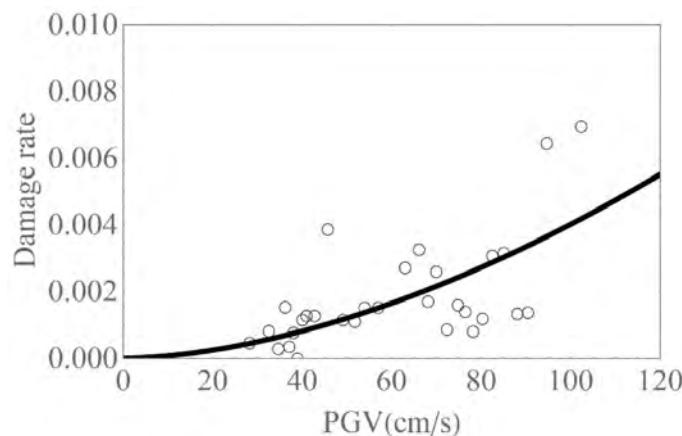
$$P(k) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!}$$

被害関数より求められた被害率のばらつきをポアソン分布によって表現

# 1995年阪神・淡路大震災への適用結果



## 推定された標準被害関数



2016年熊本地震に適用した結果、推定結果355件  
実被害件数252件

## 管路被害の推定 (精度向上への取り組み)

既往の地震被害曲線の導出は、管種、口径、経年、地形によってグルーピングして推定。

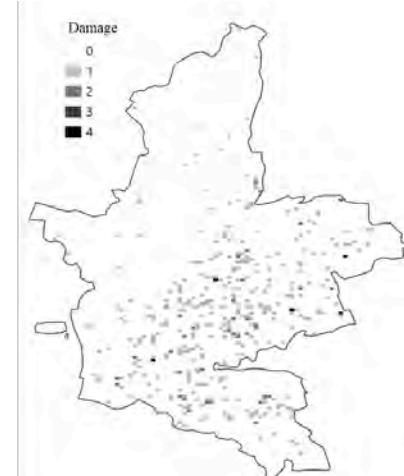
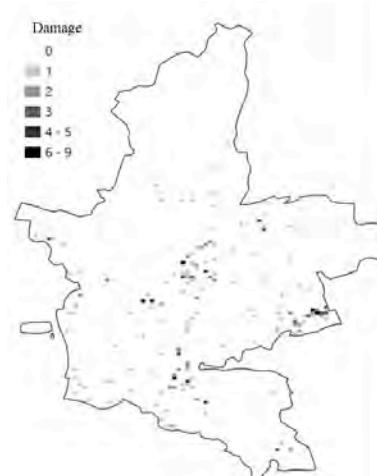
- ✓ 管種、口径、経年、地形の組み合わせによって精度が大きく異なる。

### 標準地震被害曲線の導出

- ✓ すべてのデータ、約161万のデータを用いて推定。

- ✓ 関数形は、正規分布に従う関数、日本水道協会標準被害曲線、[ワイルブル分布に従う関数](#)、直線回帰

## 2016年熊本地震への適用



# 応急給水拠点、応急給水タンク車モデル

## 一 応急給水拠点モデル

- ✓ 公共施設（学校、福祉施設等）
- ✓ 6L/人・日、拠点の隣接8メッシュも給水可（300m）

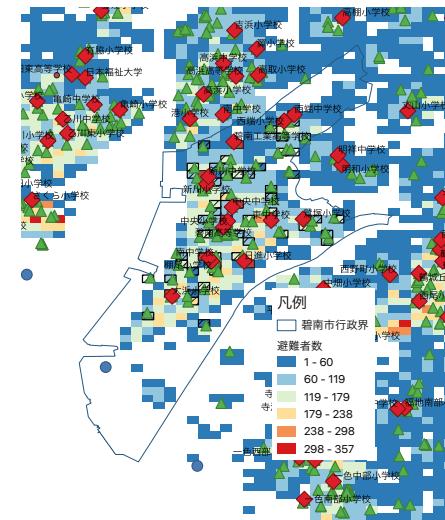
## 一 応急給水タンク車モデル

- ✓ セルオートマトン法によるシミュレーション
- ✓ 3台、2t、給水補給15分+移動速度25km+給水15分

## 一 概算検討条件

- ✓ 建物被害（地震+津波）により応急給水需要が発生

# 避難者数と公共施設



# 検討結果

一 応急給水を必要とする市民：28,641人

一 給水タンク車のみで応急給水：2.09L/人・日

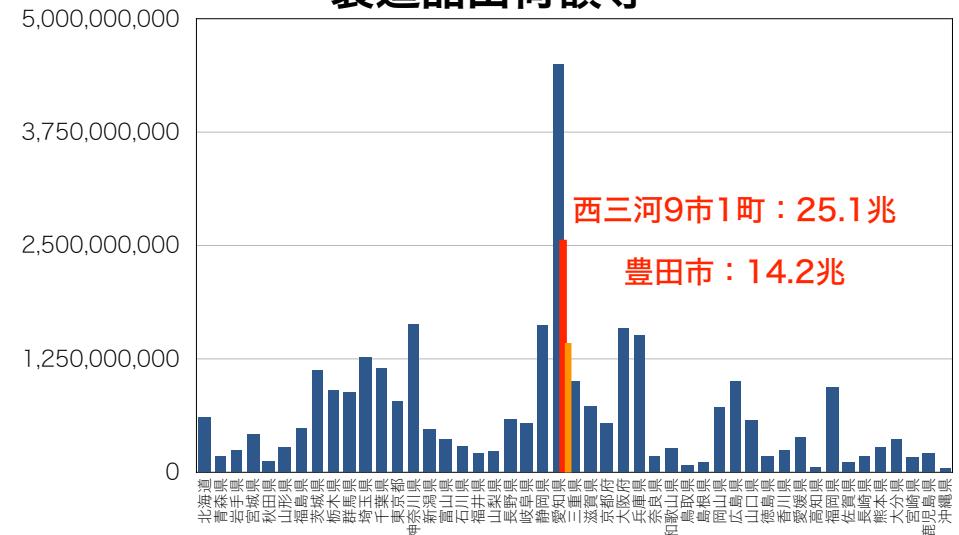
一 給水タンク車+応急給水拠点（学校：14メッシュ）：

- ✓ 4.30L/人・日（3.31L/人・日、6.00L/人・日）

一 給水タンク車+応急給水拠点（公共：65メッシュ）：

- ✓ 7.02L/人・日（11.68L/人・日、6.00L/人・日）

# 平成29年度工業統計調査 製造品出荷額等



## 愛知県の工業用水

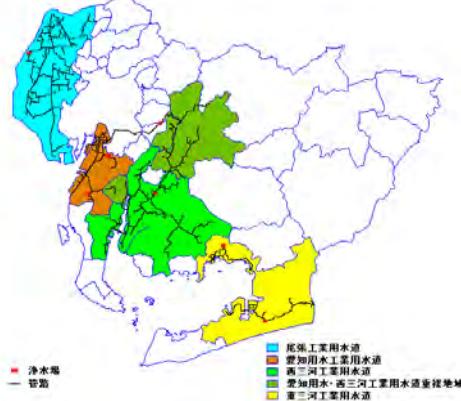
愛知県企業庁

愛知用水工業用水道 : 845,600m<sup>3</sup>/日

西三河工業用水道 : 300,000m<sup>3</sup>/日

東三河工業用水道 : 155,000m<sup>3</sup>/日

尾張工業用水道 : 290,000m<sup>3</sup>/日



愛知県

工業用水 : 923,043m<sup>3</sup>/日

上水道 : 136,499m<sup>3</sup>/日

井戸水 : 242,354m<sup>3</sup>/日

その他淡水 : 252,797m<sup>3</sup>/日

年間給水量

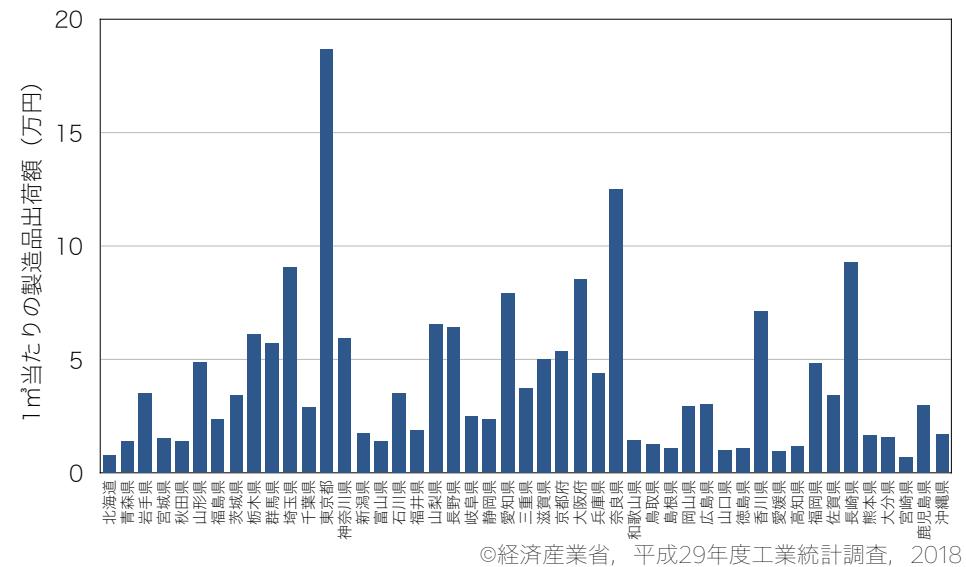
567,462,945m<sup>3</sup>

製造品出荷額等

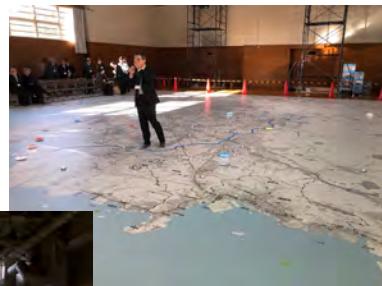
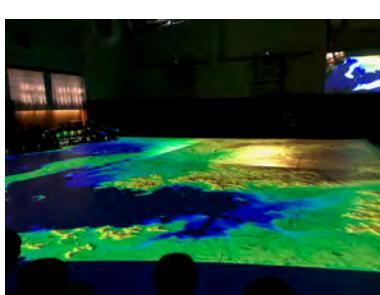
44.9兆円

1m<sup>3</sup>当たり7.91万円

## 水1m<sup>3</sup>が生み出す製造品出荷額



## みずから考える連携～水に流せない現実



## 災害レジリエントな水道システム

### 災害レジリエンス

- 被害を最小限に留めるとともに、被害からいち早く立ち直り元の生活に戻らせる

### 基本的には、

- 被害を最小限に留める；被害抑止
- 被害からいち早く立ち直り元の生活に戻らせる；被害軽減

### しかしながら…

- 耐震管路、施設耐震化も100年後には老朽化
- 不測の事態は避けられない

## 産官学民連携の上水道システムに

- > 市民は上水道事業の消費者であり、株主。
  - 消費者の生（いのち）を衛（まも）る
  - 安全な水を供給する
  - 株主の利益を守る
  - 地域の水、水資源を守る
- > 製品（水道水）の安全性、安定性
- > 事業活動や水質リスク管理を**産官学民連携**で支える。
- > コミュニケーション

## Communication



## 上水道レポート

- > NUCT上で提出。
- > 添付ファイルで提出すること。
- > 手書きについては、写真（字が読めること）も可。
- > 締め切り：7月30日（木）13時。