

衛生工学

上水道5：災害時の水道水質（つづき）&管網解析

2024年5月16日



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

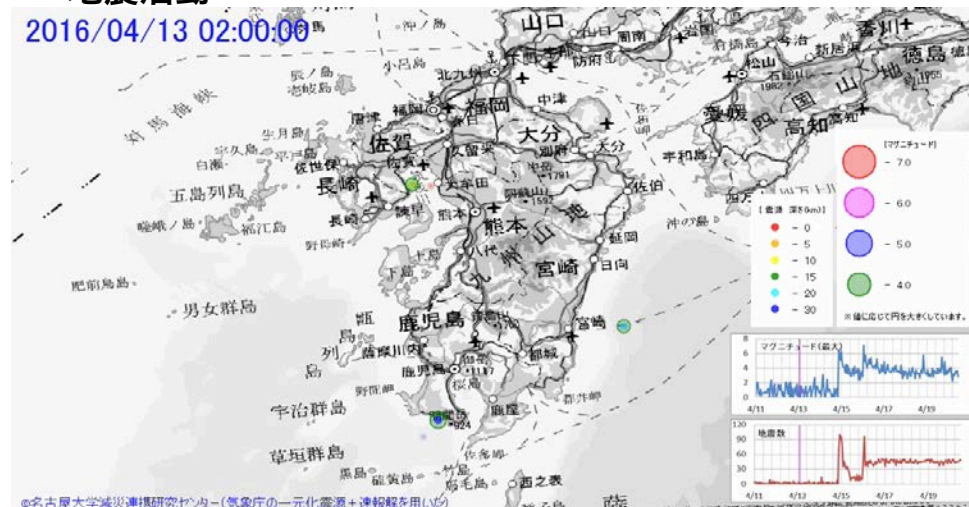
平山修久

1

2016年熊本地震

地震活動

2016/04/13 02:00:00

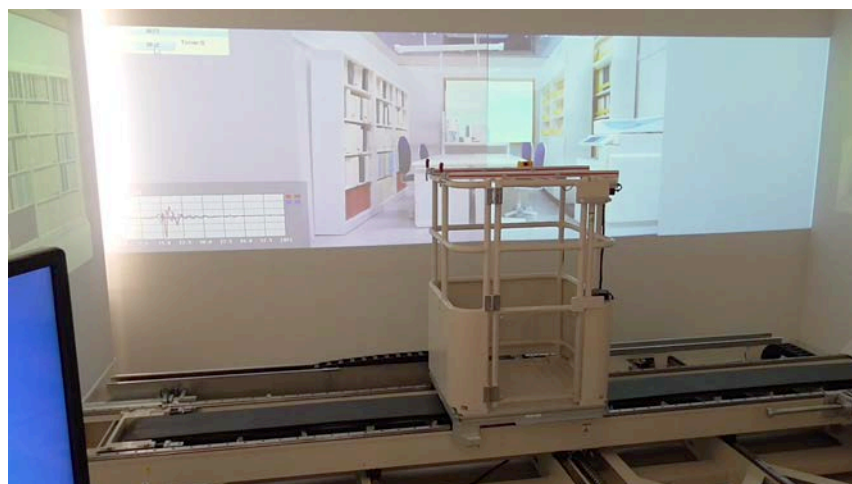


2

©名古屋大学減災連携研究センター, 2016

KiK-net益城の地震動

減災館BiCURI



3

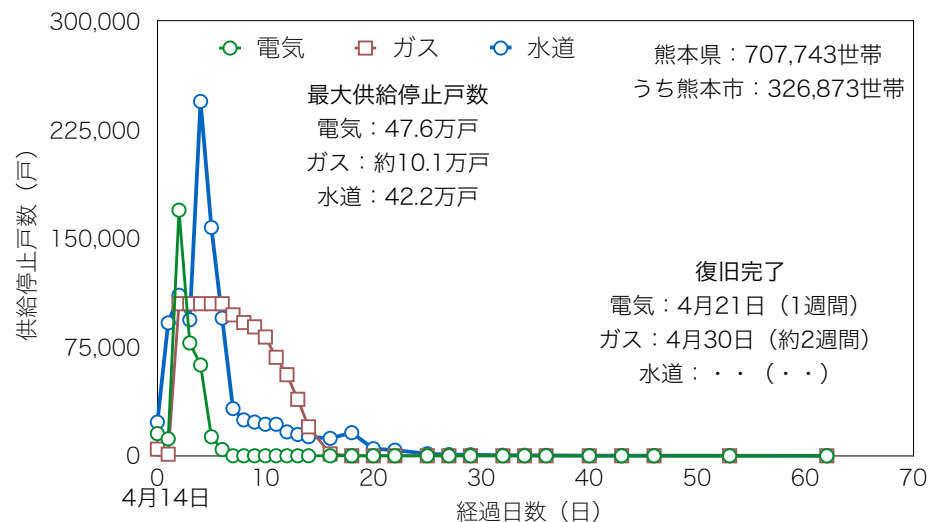
©防災科学技術研究所, 2016, 2018

1995年阪神淡路大震災と2016年熊本地震

	熊本地震	阪神・淡路大震災
活断層	日奈久・布田川断層帯	野島断層
発生日時	2016年4月16日（土）1:25	1995年1月17日（火）5:46
地震の規模	Mj 7.3	Mj 7.3
地震の種類	活断層型（直下型）地震	活断層型（直下型）地震
死者行方不明	270人（関連死含む） 【直後50人】	6,434人 【直後5,500人】
被災自治体	熊本県	2府県 （兵庫10市10町、大阪5市）
建物被害	全壊8,648棟、半壊34,398棟	全壊104,906棟、半壊144,274棟
避難者	約18万人	約32万人
震度6弱以上 暴露人口	915,877人	3,596,836人
災害廃棄物	311万トン	2,000万トン （非公共1,450万、公共550万）

©熊本県危機管理防災課, 2018, ©兵庫県, 2008

熊本地震でのライフライン被害



内閣府，平成28年熊本地震に関する被害状況等による

益城町惣領地区

汚水管の被災



6

益城町寺迫地区



7

水道施設の被災（西原村）

減圧弁



8

配水管の被災（抜け）



9

©小仲, 2016

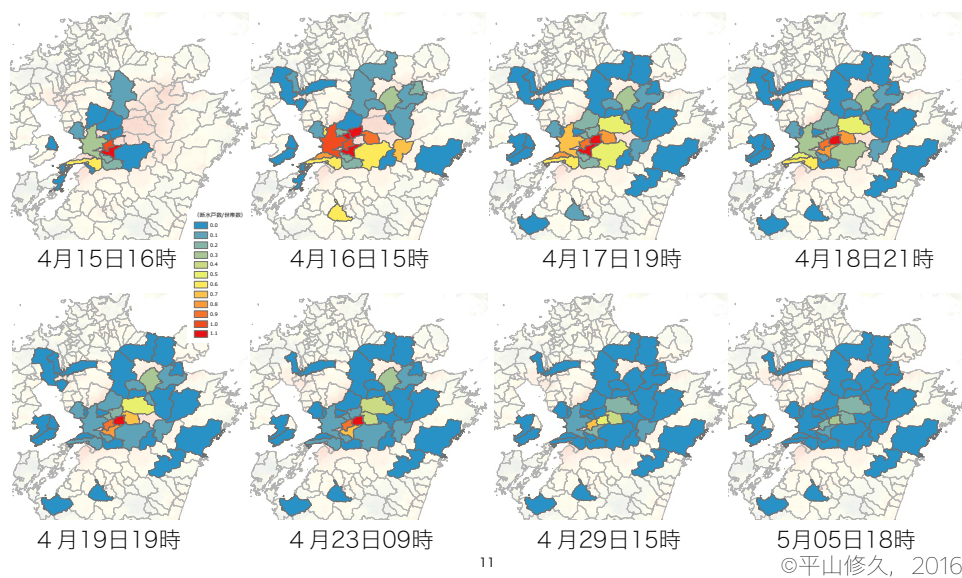
配水管の被災（抜け）



10

©小仲, 2016

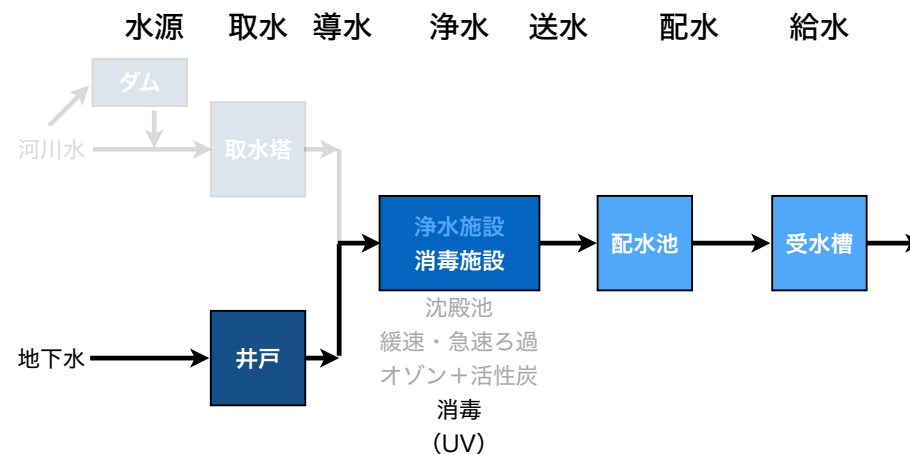
断水率の推移



11

熊本地域の上水道システムの特徴

消毒のみ



12

熊本の水道水源

健軍水源地



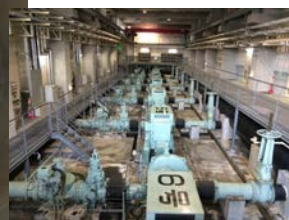
緊急遮断弁



13



ポンプ室



あなたならどうする？

あなたは水道技術管理者です。地震後、原水の濁度が上昇し、配水・給水の水質が、水道水質基準（濁度2度以下）に適合することができません。

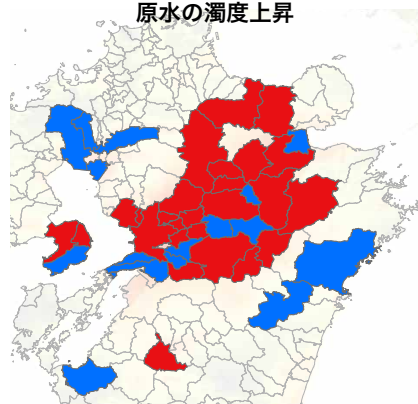
A.給水停止（断水）する。

B.摂取制限を伴う給水継続を行う。

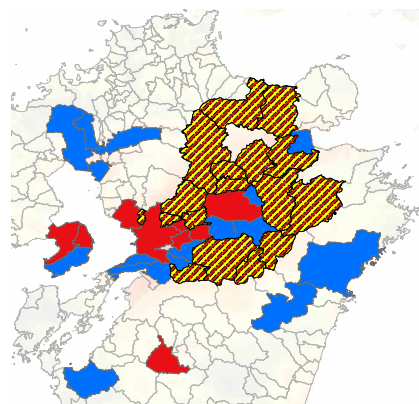
原水の濁度上昇と摂取制限

飲用不可

原水の濁度上昇



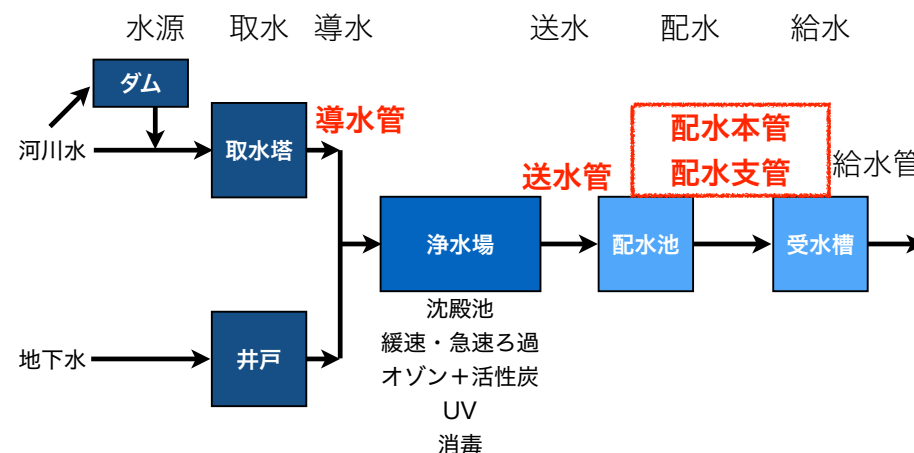
■ 原水濁度上昇なし
■ 原水濁度上昇あり



■ 摂取制限 ■ 原水濁度上昇なし
■ 原水濁度上昇あり

上水道システム

本日の範囲



我が国の水道管路

- 管路の総延長：712,290km 地球17.77周分
 - 導水管：11,684km, 送水管：33,924km, 配水管：630,888km
- 一日平均給水量1,000m³当たりの配水管延長：16.3km
- 給水人口一人当たりの管路長：5.74m
- 管種：铸铁管1.9%, ダクタイル铸铁管54.8%, 鋼管2.6%, 石綿セメント管0.6%, 硬質塩化ビニル管32.9, ポリエチレン管6.4%, その他0.8%
- 耐震管：24.9%, 耐震適合性：39.3%
- 法定耐用年数40年を越えた管：16.3%

17

管路の平均流速公式

- ・ 局部損失を無視しうる長管では、管内流量 Q と摩擦損失水頭 h

$$h = rQ^m$$

- ・ ヘーゼン・ウィリアムズ (Hazen-Williams) の式

$$V = 0.35464CD^{0.63}I^{0.54}$$

$$Q = 0.27853CD^{2.63}I^{0.54}$$

$$I = 10.666C^{-1.85}D^{-4.87}Q^{1.85}$$

V : 平均流速 (m/s), Q : 流量 (m³/s), D : 管径 (m),

I : 導水勾配, C : 流速係数

18

配水管の設計

管種・継手

- ✓ 配水管には、ダクタイル铸铁管、鋼管、ステンレス鋼管、硬質ポリ塩化ビニル管及び水道配水用ポリエチレン管
- ✓ 浸出基準を満足する
- ✓ 水圧、外圧に対する安全性
 - ・ 最大静水圧、水撃圧
 - ・ 土圧、路面荷重及び地震力

水圧

配水管路

配水管の水圧は、「技術的基準を定める省令」で定められている。

- ✓ 配水管から給水管に分岐する箇所での配水管内の最小動水圧は、150kPa (0.15MPa) 以上を確保する。
- ✓ 配水管から給水管に分岐する箇所での配水管内の最大静水圧は、740kPa (0.74MPa) を超えないこと。
- ✓ 2階：0.15～0.20MPa
- ✓ 3階：0.20～0.25MPa
- ✓ 4階：0.25～0.30MPa
- ✓ 5階：0.30～0.35MPa

管径

- ・管路の動水圧は、平常時においては、その区域に必要な最小動水圧以上になるよう、かつ、水圧の分布ができるだけ均等となるよう決定する。
- ・管径の算定にあたっては、配水池、配水塔及び高架タンクの水位はいずれも低水位をとる。

・ヘーゼン・ウィリアムズ公式

$$h = 10.666C^{-1.85}D^{-4.87}Q^{1.85}L$$

h ：摩擦損失水頭（m）， C ：流速係数， D ：管径（m）， Q ：流量（m³/s）， L ：延長（m）

管網解析

・ハーディ・クロス法（Hardy-Cross method）

- ✓ 配水管網（閉管路）における流量，損失水頭を計算するための**逐次近似法**。
- ✓ 管網を**ループごと**に解析する。
- ✓ 管網を構成する各管路の管径，流量，流向を仮定し，この仮定流量にしたがって補正計算を反復して，流量，流向，損失水頭を決定する方法。
- ✓ 計算手順が簡単。
- ✓ 計算時間がかかる。

管網計算の分類

流量法

- 流量を未知数として解く方法
- 古典的な**Hardy-Cross法**はこれ
- 方程式の種類が多い
- エネルギー位を指定しにくい

エネルギー位法

- 接点エネルギー位を未知数として解く方法
- 方程式の種類が少ない
- 直接エネルギー位を計算
- 管網解析ソフト**EPANET2**はこちら

ハーディ・クロス法（Hardy-Cross method）

計算の理論

- ✓ 仮定流量 Q ，補正量 ΔQ とすれば，実際流量は $Q + \Delta Q$
- ✓ 損失水頭は， $h = rQ^m = r(Q + \Delta Q)^m$
- ✓ 二項定理によって展開し， ΔQ を微量とすると

$$\begin{aligned} r(Q + \Delta Q)^m &= rQ^m + mrQ^{m-1}\Delta Q \\ &= h + \frac{mrQ^m}{Q}\Delta Q = h + \frac{mh}{Q}\Delta Q \end{aligned}$$

- ✓ **ひとつの閉管路についての損失水頭の総和は0**である。

$$\sum h + m \sum \frac{h}{Q} \Delta Q = 0$$

$$\Delta Q = - \sum h/m \sum \frac{h}{Q}$$

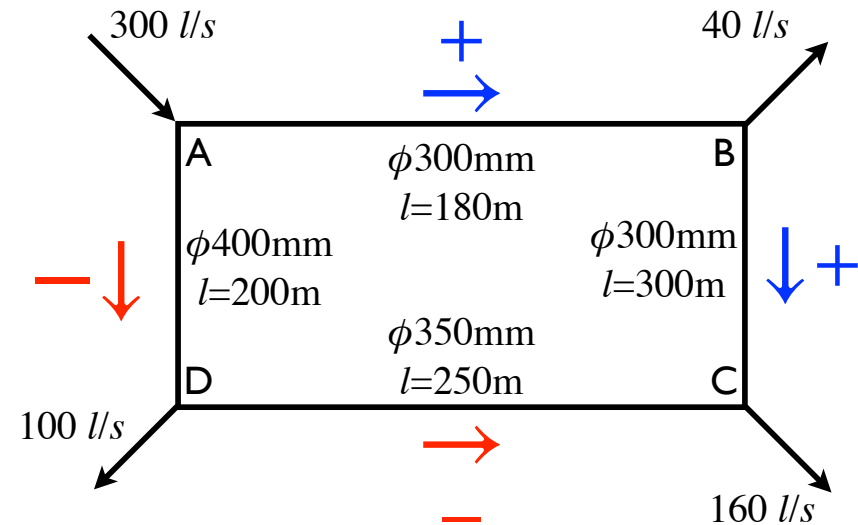
ハーディ・クロス法

計算手順

1. 各管路に流量 Q とその方向を仮定する。ループの時計回りを正とする。二つの網目の共通管は、それぞれの流量の符号が逆になる。
2. 管路ごとに損失水頭 h と h/Q を計算する。
3. 各ループ毎に、 $\sum h$, $\sum h/Q$ を計算する。
4. ΔQ を計算する。
5. 各ループ毎に補正流量 $Q + \Delta Q$ を計算する。共通管の場合には、当該管のみ二度修正されることになり、 ΔQ の符号も逆にして加える
6. $\sum h \approx 0$, すなわち許容範囲内になったとき、計算は終了。

25

管網計算例



26

エクセルで計算する管網解析

ハーディ・クロス法

1. 管路別に、管路番号、始点終点、 $C = 110$ (流速係数), D (管径), L (管長), Q (流量)を入力する。 Q は各節点でのマスバランスを考慮して設定する。 $r = 10.666C^{-1.85}D^{-4.87}L$, $h = rQ^{1.85}$, h/Q は計算式で計算する。ただし、損失水頭の正負情報を残すため、 $h = rQ|Q|^{0.85}$ として計算する。
2. 全ての管路について計算し、 $\sum h$, $\sum h/Q$ を計算する。
3. 補正流量 ΔQ を計算する。
4. 各管路の流量 $Q + \Delta Q$ を計算する。
5. $\sum h \approx 0$ となるまで、繰り返し計算する。

27

管路別に、管路番号、始点終点、 C (流速係数), D (管径), L (管長), Q (流量)を入力
ループを構成する管路

管路番号	始点	終点	C	D(m)	L(m)	Q(m³/s)	h	h/Q	Q(m³/s)
1	A	B	110	0.3	180	0.12			
2	B	C	110	0.3	300	0.08			
3	C	D	110	0.35	250	-0.08			
4	D	A	110	0.4	200	-0.18			

28

2回目の Q の設定

1回目の $Q + \Delta Q$

管路番号	C	D(m)	L(m)	Q(m³/s)	r	h	h/Q	Q'(m³/s)
1 AB	110	0.3	180	0.1008	0.12	113.0101	2.2367	0.1008
2 BC	110	0.3	300	0.0608	0.08	188.3501	1.7607	0.0608
3 CD	110	0.35	250	-0.0992	-0.08	74.0890	-0.6926	-0.0992
4 DA	110	0.4	200	-0.1992	-0.18	30.9331	-1.2962	-0.1992
Σ				0.0000			2.0086	
ΔQ							-0.0192	

33

2回目の補正流量 ΔQ の算出

管路番号	C	D(m)	L(m)	Q(m³/s)	r	h	h/Q	Q'(m³/s)
1 AB	110	0.3	180	0.1008	0.12	113.0101	2.2367	0.1008
2 BC	110	0.3	300	0.0608	0.08	188.3501	1.7607	0.0608
3 CD	110	0.35	250	-0.0992	-0.08	74.0890	-0.6926	-0.0992
4 DA	110	0.4	200	-0.1992	-0.18	30.9331	-1.2962	-0.1992
Σ				0.0000			2.0086	
ΔQ							-0.0192	

34

2回目：各管路の流量 $Q + \Delta Q$ を計算

管路番号	C	D(m)	L(m)	Q(m³/s)	r	h	h/Q	Q'(m³/s)
1 AB	110	0.3	180	0.1008	0.12	113.0101	2.2367	0.1008
2 BC	110	0.3	300	0.0608	0.08	188.3501	1.7607	0.0608
3 CD	110	0.35	250	-0.0992	-0.08	74.0890	-0.6926	-0.0992
4 DA	110	0.4	200	-0.1992	-0.18	30.9331	-1.2962	-0.1992
Σ				0.0000			2.0086	
ΔQ							-0.0192	

35

3回目

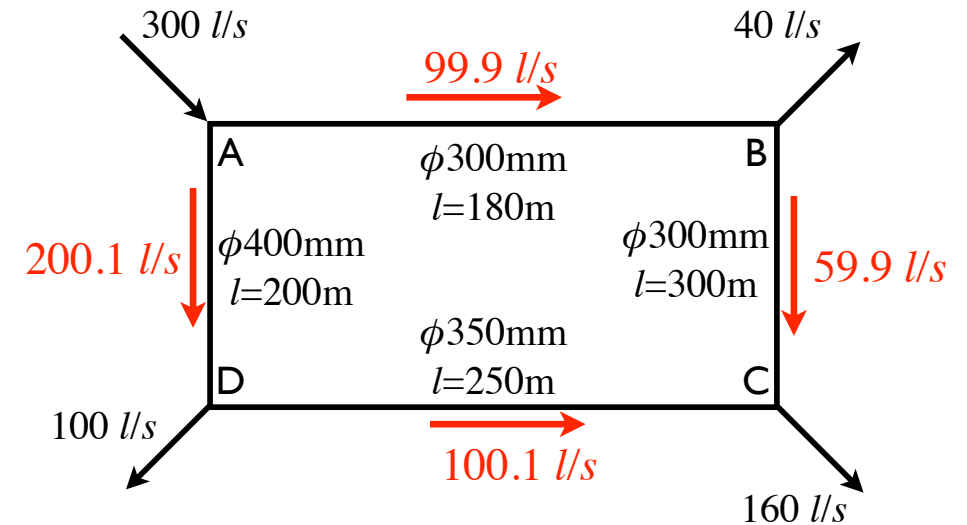
管路番号	C	D(m)	L(m)	Q(m³/s)	r	h	h/Q	Q'(m³/s)
1 AB	110	0.3	180	0.1008	0.12	113.0101	2.2367	0.1008
2 BC	110	0.3	300	0.0608	0.08	188.3501	1.7607	0.0608
3 CD	110	0.35	250	-0.0992	-0.08	74.0890	-0.6926	-0.0992
4 DA	110	0.4	200	-0.1992	-0.18	30.9331	-1.2962	-0.1992
Σ				0.0000			2.0086	
ΔQ							-0.0192	

36

3回目の補正流量 ΔQ の算出

管線番号	C	D(m)	L(m)	Q(m ³ /s)	r	h	h/Q	Q'(m ³ /s)
1 AB	110	0.3	180	0.1008	113.0101	2.2367	18.6389	0.1008
2 BC	110	0.3	300	0.0608	188.3501	1.7607	22.0086	0.0608
3 CD	110	0.35	250	-0.0992	74.0890	-0.6926	8.6573	-0.0992
4 DA	110	0.4	200	-0.1992	30.9331	-1.2962	7.2012	-0.1992
Σ						2.0086	56.5060	
ΔQ						-0.0192		

管網計算結果



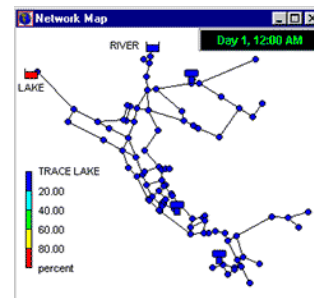
38

管網解析ツール

EPANET2

is software that models the hydraulic and water quality behavior of water distribution piping systems

U.S. EPA



EPA, <https://www.epa.gov/water-research/epanet#main-content>

EPANET2について

- ✓ USEPAが提供するPublic domain software（完全にフリー）
- ✓ Windows, MacOS X, Linux
- ✓ コードも提供されている。改変自由。
- ✓ 多くの市販管網解析ツールの解析エンジンとして利用されている。
- ✓ エネルギー位法で解いている。
- ✓ 水質計算もできる。

40

EPANET2の入手

- ・ EPANET2で検索したら出てくるサイト
<https://www.epa.gov/water-research/epanet>
- ・ ダウンロードとしたファイルをダブルクリックしてOKを何回か押すとインストールされる。

41

火災時における流量計算

水道システム設計における考え方

- ・ 計画給水人口100,000人を超える場合は、計画時間最大配水量に十分余裕があり、平常時の場合と同様に計算する。
- ・ 計画給水人口100,000人以下の場合は、各管路の分担する流量は、計画一日最大給水量と消火用水量との合計とするのが望ましい。

42 日本水道協会、水道施設設計指針、2012

計画一日最大給水量に加算する人口別消火用水量

水道施設設計指針

人口 (万人)	消火用水量 (m ³ /min)
0.5未満	1以上
1	2
2	4
3	5
4	6
5	7
6	8
7	8
8	9
9	9
10	10

43

Rainbows プロジェクト 将来の不確実性に対応した水道管路システムの 再構築に関する研究

新技術を取り入れた管網管理に向けた研究

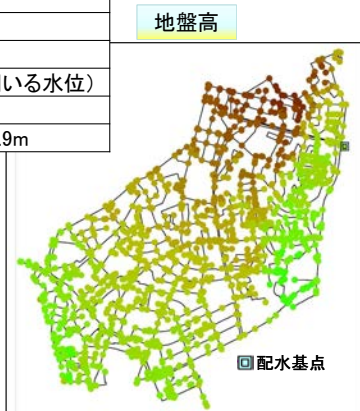
管網管理研究委員会

44

対象エリアの概要(1/3)(管網状管路)

配水エリア面積	約1.49km ²
総管路延長	35.8km
管路口径	φ100～φ350
配水方式	自然流下方式
減圧弁有無	なし
配水池水位	68.0m(解析に用いる水位)
配水池出口の残塩濃度	0.52mg/l
地盤高	TP+22.7m～48.9m

凡例 地盤高(m)	
-∞～24未満	
24～26未満	
26～28未満	
28～30未満	
30～32未満	
32～34未満	
34～36未満	
36～38未満	
38～40未満	
40～42未満	
42～44未満	
44～∞	



2

45

管網の評価指標

管網評価指標	目標値
(1)水圧	平常時:0.15MPa～0.74MPa 火災時:正圧であること
(2)流速	ほぼすべての管路において0.2～3.0m/s
(3)残留塩素濃度	0.1mg/L～0.4mg/L

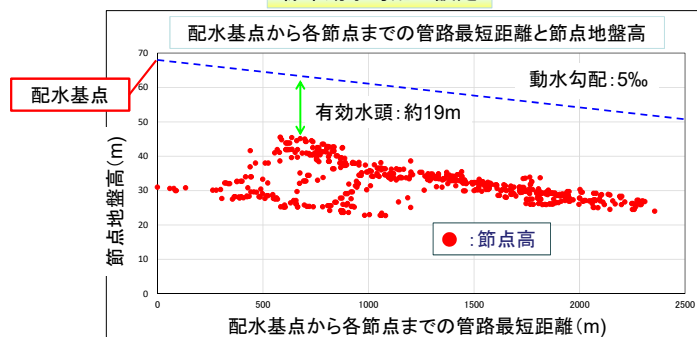
※上記は目安として示したものであり、実際の検討に当たっては事業体の特性に応じて設定する必要がある。

3

46

計画管網モデルの設定(1/3)(管網状管路)

標準動水勾配の設定

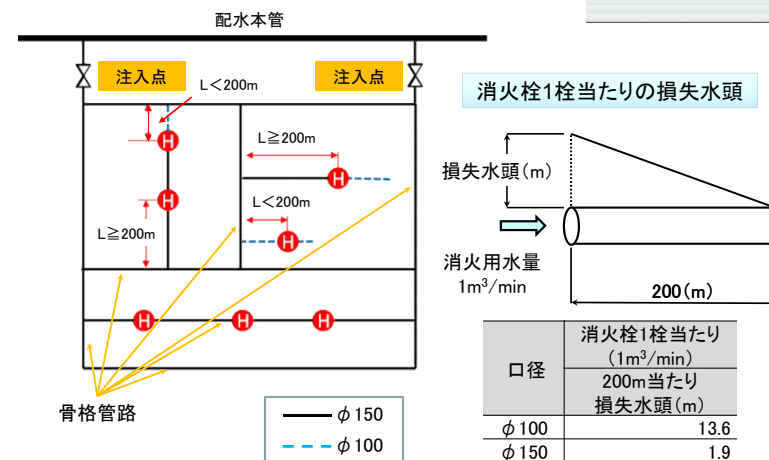


・各節点の最小動水圧を0.15MPa以上確保するために、配水基点の水頭TP+68.0mから、おおむね「5%」の動水勾配と設定。

4

47

消火栓設置管路(骨格管路)の最小口径の設定

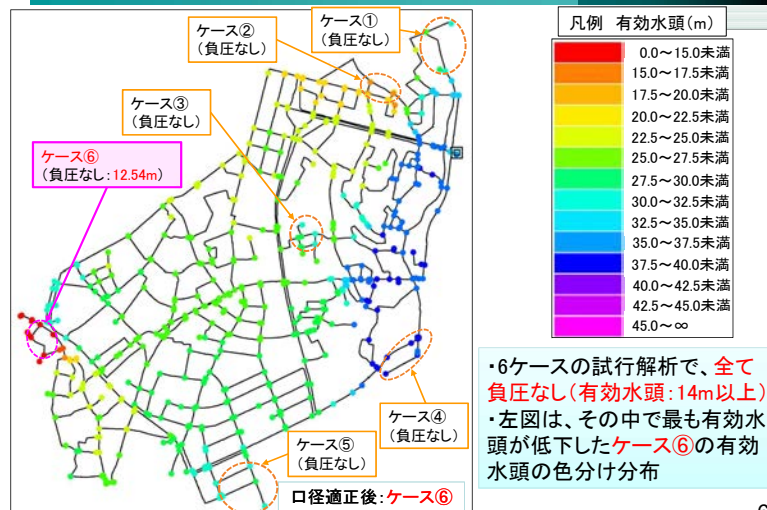


5

48

火災時の評価解析結果(管網状管路)

JWRC

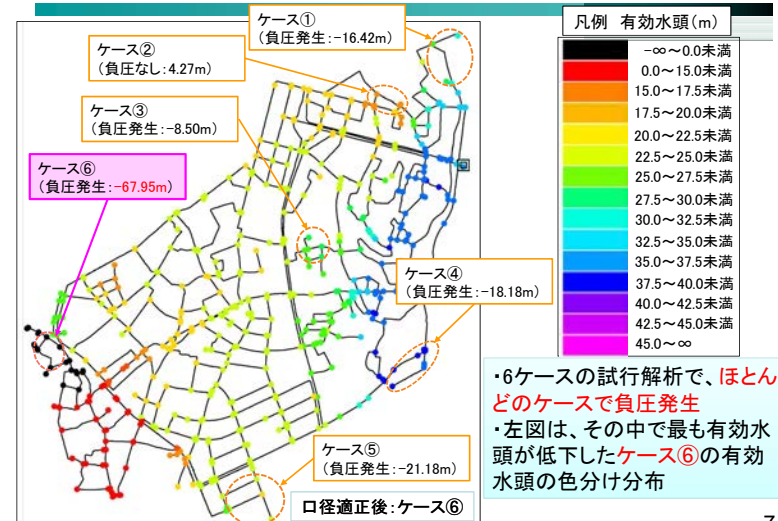


6

49

火災時の評価解析結果(管網状管路)(骨格最小口径φ100)

JWRC



7

50

消火用水量を考慮しない場合の検討(1/2)(管網状管路)

JWRC

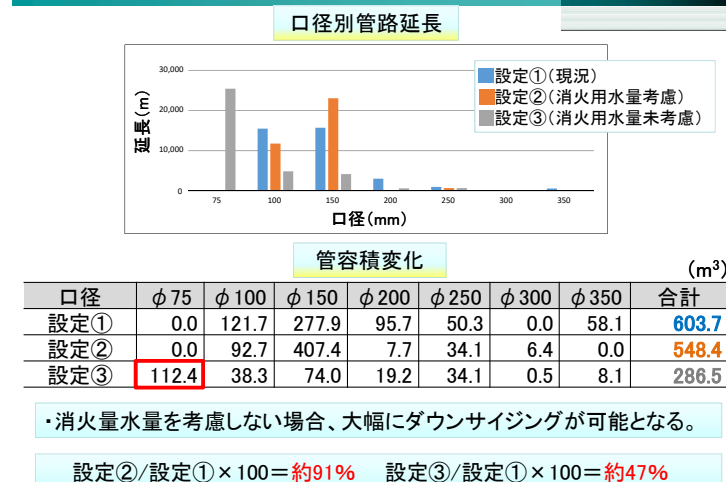


8

51

消火用水量を考慮しない場合の検討(2/2)(管網状管路)

JWRC



9

52

消防水利の基準の緩和に係る告示改正について

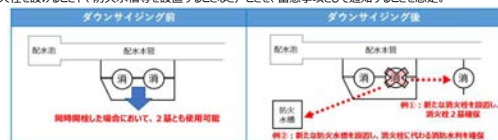
- 令和4年度の地方分権提案において、**消防水利の基準第3条の規定に基づく消火栓の設置要件に係る水道配管の管径基準を緩和できるよう提案**があり、「地域の実情に応じて緩和できるよう、関係者の意見や科学的な検証を踏まえ検討し、令和5年中に結論を得る。その結果に基づいて必要な措置を講ずる。」と閣議決定した。
- 令和5年8月から10月にかけて意見聴取会及び実地調査を実施。減径した水道配管に消火栓を設置する場合は、取水可能水量が毎分1 m³以上を満たさなくなることが懸念されるため、**解析と実測の2つの検証を行い、当該取水可能水量を有することを確認する必要があるとの結論が得られた。**
 - 解析・・・管網解析ソフト又は水理公式（ハゼン・ウィリアムス等）を活用し、取水可能水量が毎分1 m³以上を有することを確認すること。
 - 実測・・・水道事業者が使用する流量計又は消防車両の流量計を活用し、取水可能水量が毎分1 m³以上を有することを確認すること。

【告示改正（令和5年12月25日付消防第426号）】

改正後	改正前
<p>第三条 消防水利は、常時貯水量が四十立方メートル以上又は取水可能水量が毎分一立方メートル以上で、かつ、連続四十分以上の給水能力を有するものでなければならない。</p> <p>2 消火栓は、呼称六十五の口径を有するもので、直径百五十ミリメートル以上の管に取り付けられていなければならない。ただし、管網の一边が百八十メートル以下となるように配管されている場合は、管網の管の直径を七十五ミリメートル以上とすることができる。</p> <p>3 前項の規定にかかわらず、解析及び実測により、取水可能水量が毎分一立方メートル以上であると認められるときは、管の直径を七十五ミリメートル以上とすることができる。この場合において、消火栓の位置その他の消防水利の状況を勘案し、地域の実情に応じた消火活動に必要な水量の供給に支障のないように留意しなければならない。</p>	<p>第三条 消防水利は、常時貯水量が四十立方メートル以上又は取水可能水量が毎分一立方メートル以上で、かつ、連続四十分以上の給水能力を有するものでなければならない。</p> <p>2 消火栓は、呼称六十五の口径を有するもので、直径百五十ミリメートル以上の管に取り付けられていなければならない。ただし、管網の一边が百八十メートル以下となるように配管されている場合は、七十五ミリメートル以上とすることができる。</p> <p>〔新設〕</p>

※「地域の実情に応じた消火活動に必要な水量の供給に支障のないように留意しなければならない」

ダウンサイジングすることにより、これまで使用できていた消火栓が活用できなくなり（1 基のみであれば必要な給水能力を有するが、近接する2 基を同時開栓すると必要な給水能力を有さなくなることがあり得る）、消火活動に必要な水量が確保できないなどといった弊害が生じぬよう、各消防本部における消防戦術や鑑防計画等に基づき、地域の実情に応じた消防水利の整備を行う（別の場所に新たに消火栓を設けることや、防火水槽等を設置することなど）ことを、留意事項として通知することを想定。



課題_第5回

TACTにて提出（締切：5月17日24時）

1. 以下について知っていることを記述せよ。（数行）

1) ハーディ・クロス法

2. あなたは水道技術者です。人口減少で水需要量が減少しており、管網のダウンサイジングを検討しないといけません。しかしながら、消防部局からはダウンサイジングはやめてほしいとわれています。あなたは、A.ダウンサイジングの検討を進める？B.ダウンサイジングの検討をやめる？その理由や条件等とともに示すこと。