

衛生工学

上水道

上水道5
管網解析
2023年5月11日



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

管水路の平均流速公式

— 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・ウイリアムズ (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

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：鋳鉄管1.9%, ダクタイル鋳鉄管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%

配水管の設計

› 管種・継手

- 配水管には、ダクタイル鋳鉄管, 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

日本水道協会, 水道施設設計指針, 2012

水圧

> 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

日本水道協会, 水道施設設計指針, 2012

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・ウイリアムズ公式**

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

h ：摩擦損失水頭 (m), C ：流速係数, D ：管径 (m), Q ：流量 (m^3/s), L ：延長 (m)

日本水道協会, 水道施設設計指針, 2012

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
- ✓ EPANET2はこれら

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。

ハーディ・クロス法 (Hardy-Cross method)

— 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 を微少量とすると

$$r(Q + \Delta Q)^m = rQ^m + mrQ^{m-1}\Delta Q$$

$$= h + \frac{mrQ^m}{Q}\Delta Q = h + \frac{mh}{Q}\Delta Q$$

— ひとつの閉管路についての損失水頭の総和は0である。

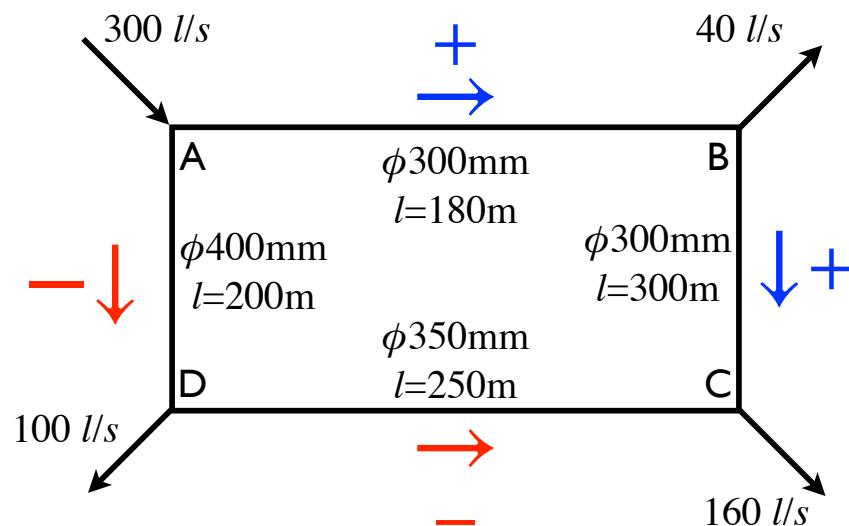
$$\sum h + m \sum \frac{h}{Q} \Delta Q = 0$$

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

ハーディ・クロス法の計算手順

- 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。
- 管路ごとに損失水頭 h と h/Q を計算する。
- 各ループ毎に、 $\sum h$ 、 $\sum h/Q$ を計算する。
- ΔQ を計算する。
- 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
- $\sum h \doteq 0$ 、すなわち許容範囲内になったとき、計算は終了。

管網計算例



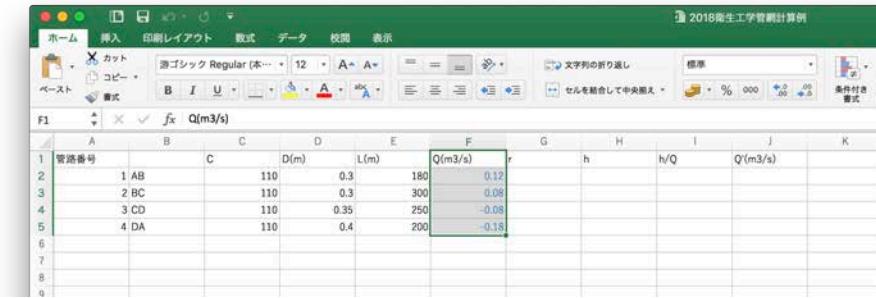
エクセルで計算する管網解析

- 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。

$$r = 10.666C^{-1.85}D^{-4.87}L, \quad h = rQ^{1.85}, \quad h/Q$$
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、

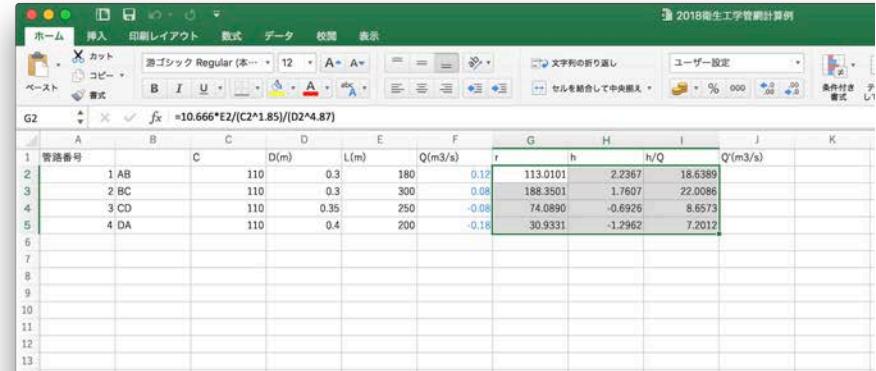
$$h = rQ|Q|^{0.85}$$
として計算する。
- 全ての管路について計算し、 $\sum h$ 、 $\sum h/Q$ を計算する。
- 補正流量 ΔQ を計算する。
- 各管路の流量 $Q + \Delta Q$ を計算する。
- $\sum h \doteq 0$ となるまで、繰り返し計算する。

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



管路番号	A	B	C	D(m)	E	F	Q(m³/s)			G	H	I	J	K
							r	h	h/Q					
1 AB			110	0.3	180	0.12								
2 BC			110	0.3	300	0.08								
3 CD			110	0.35	250	-0.08								
4 DA			110	0.4	200	-0.18								

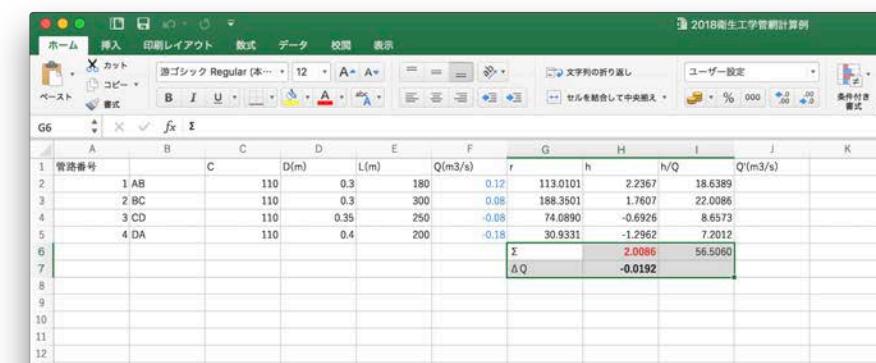
全ての管路で r , h , h/Q を計算



管路番号	A	B	C	D(m)	E	F	Q(m³/s)			G	H	I	J	K
							r	h	h/Q					
1 AB			110	0.3	180	0.12	113.0101	2.2367	18.6389					
2 BC			110	0.3	300	0.08	188.3501	1.7607	22.0086					
3 CD			110	0.35	250	-0.08	74.0890	-0.6926	8.6573					
4 DA			110	0.4	200	-0.18	30.9331	-1.2962	7.2012					

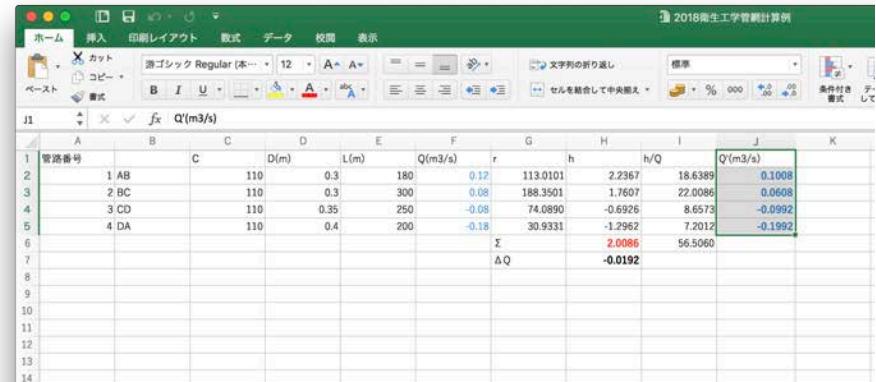
$\sum h$, $\sum h/Q$ を計算し、補正流量 ΔQ を計算

$$\Delta Q = - \sum h/1.85 \sum \frac{h}{Q}$$



管路番号	A	B	C	D(m)	E	F	Q(m³/s)			G	H	I	J	K
							r	h	h/Q					
1 AB			110	0.3	180	0.12	113.0101	2.2367	18.6389					
2 BC			110	0.3	300	0.08	188.3501	1.7607	22.0086					
3 CD			110	0.35	250	-0.08	74.0890	-0.6926	8.6573					
4 DA			110	0.4	200	-0.18	30.9331	-1.2962	7.2012					

各管路の流量 $Q + \Delta Q$ を計算



管路番号	A	B	C	D(m)	E	F	Q(m³/s)			G	H	I	J	K
							r	h	h/Q					
1 AB			110	0.3	180	0.12	113.0101	2.2367	18.6389					
2 BC			110	0.3	300	0.08	188.3501	1.7607	22.0086					
3 CD			110	0.35	250	-0.08	74.0890	-0.6926	8.6573					
4 DA			110	0.4	200	-0.18	30.9331	-1.2962	7.2012					

2回目

2回目の Q の設定

2回目の補正流量 ΔQ の算出

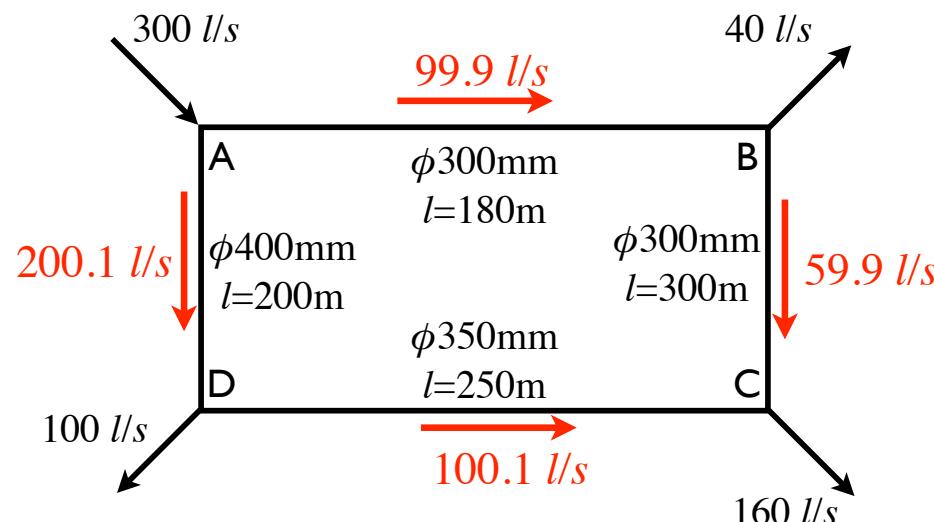
管路番号		D(m)	L(m)	Q(m³/s)	r	h	h/Q	Q'(m³/s)	
1	AB	110	0.3	180	0.12	113.0101	2.2367	18.6389	0.1008
2	BC	110	0.3	300	0.08	188.3501	1.7607	22.0086	0.0608
3	CD	110	0.35	250	-0.08	74.0890	-0.6926	8.6573	-0.0992
4	DA	110	0.4	200	-0.18	30.9331	-1.2962	7.2012	-0.1992
					Σ	2.0086	55.5060		
					ΔQ	-0.0192			
9	計算2回目								
管路番号		D(m)	L(m)	Q(m³/s)	r	h	h/Q	Q'(m³/s)	
11	AB	110	0.3	180	0.1008	113.0101	1.6196	16.0697	
12	BC	110	0.3	300	0.0608	188.3501	1.0593	17.4260	
13	CD	110	0.35	250	-0.0992	74.0890	-1.0314	10.3994	
14	DA	110	0.4	200	-0.1992	30.9331	-1.5637	7.8496	
					Σ	0.0837	51.7406		
					ΔQ	-0.0009			

2回目：各管路の流量 $Q + \Delta Q$ を計算

3回目

計算3回目										
管路番号	C	D(m)	L(m)	Q(m ³ /s)	r	h	h/Q	I	J	K
1 AB		110	0.3	180	0.12	113.0101	2.2367	18.6389	0.1008	
2 BC		110	0.3	300	0.08	188.3501	1.7607	22.0086	0.0608	
3 CD		110	0.35	250	-0.05	74.0890	-0.6926	8.6573	-0.0992	
4 DA		110	0.4	200	-0.18	30.9331	-1.2962	7.2012	-0.1992	
					Σ		2.0086	56.5060		
					ΔQ		-0.0192			
計算2回目										
管路番号	C	D(m)	L(m)	Q(m ³ /s)	r	h	h/Q	I	J	K
1 AB		110	0.3	180	0.1008	113.0101	1.6196	16.0697	0.0999	
2 BC		110	0.3	300	0.0608	188.3501	1.0593	17.4260	0.0599	
3 CD		110	0.35	250	-0.0992	74.0890	-1.0314	10.3954	-0.1001	
4 DA		110	0.4	200	-0.1992	30.9331	-1.5637	7.8496	-0.2001	
					Σ		0.0837	51.7406		
					ΔQ		-0.0009			
計算3回目										
管路番号	C	D(m)	L(m)	Q(m ³ /s)	r	h	h/Q	I	J	K
1 AB		110	0.3	180						
2 BC		110	0.3	300						
3 CD		110	0.35	250						
4 DA		110	0.4	200						

管網計算結果

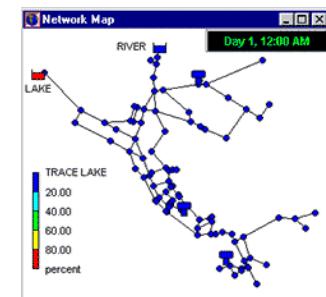


3回目の補正流量 ΔQ の算出

管網解析ツール

> EPANET2

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

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。

火災時における流量計算

- 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、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。

計画一日最大給水量に加算する 人口別消火用水量

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

備考 人口については当該人口の万未満の端数を四捨五入して得た数による (0.5万人未満を除く)。

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

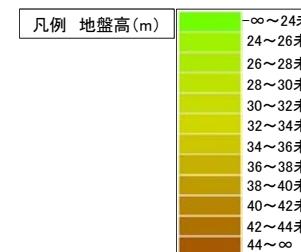
管網の評価指標

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

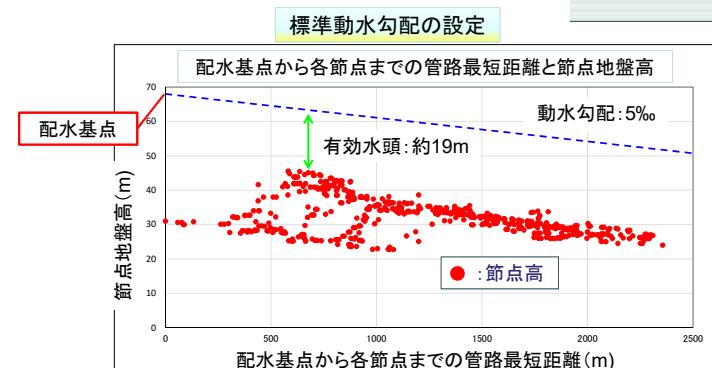
※上記は目安として示したものであり、実際の検討に当たっては事業体の特性に応じて設定する必要がある。

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	Φ 100 ~ Φ 350
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

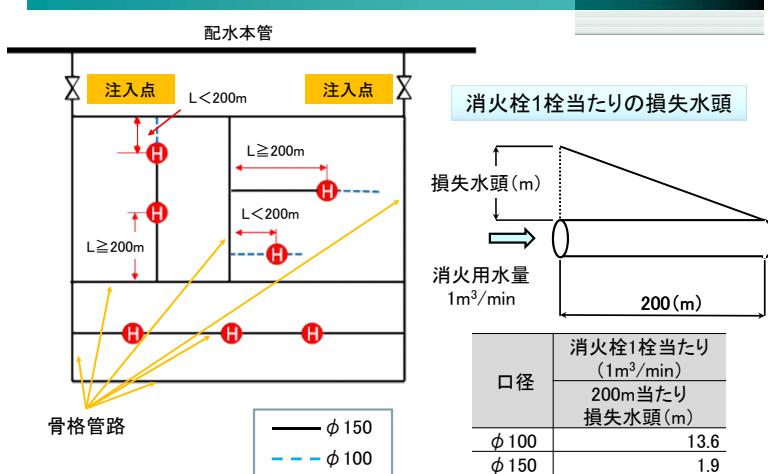


計画管網モデルの設定(1/3)(管網状管路)

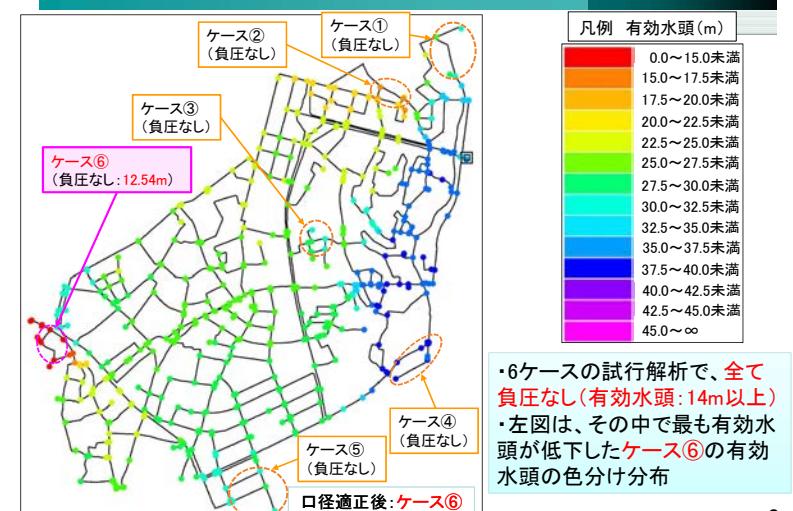


・各節点の最小動水圧を0.15MPa以上確保するため、配水基点の水頭 TP + 68.0mから、おおむね「5%」の動水勾配と設定。

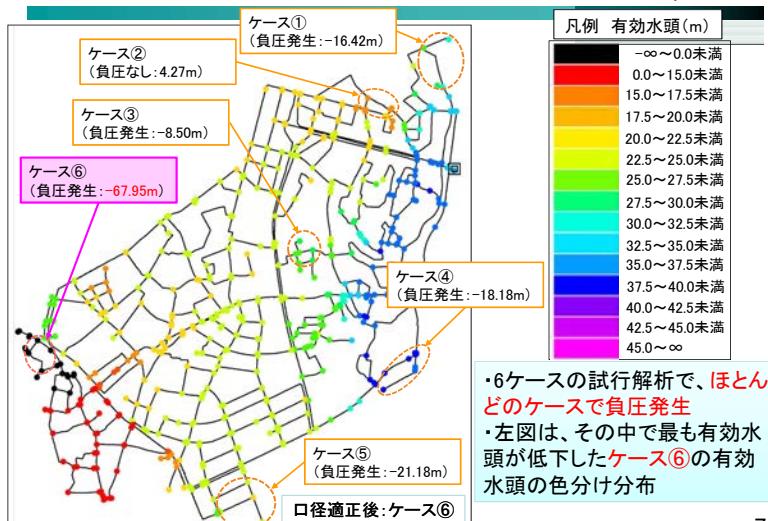
消火栓設置管路(骨格管路)の最小口径の設定



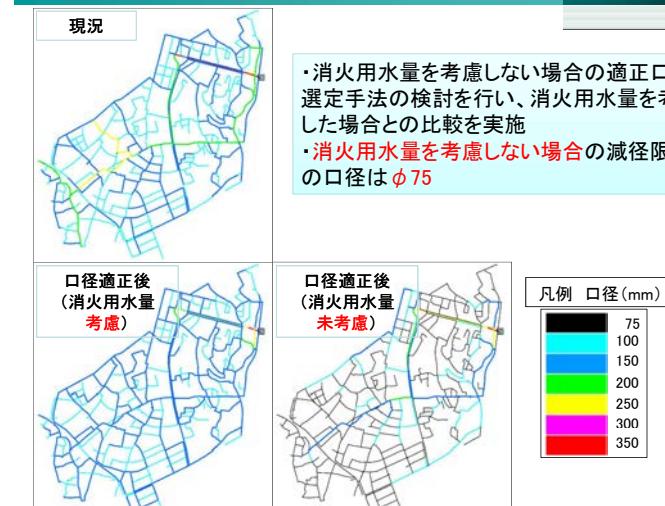
火災時の評価解析結果(管網状管路)



火災時の評価解析結果(管網状管路)(骨格最小口径 φ 100)



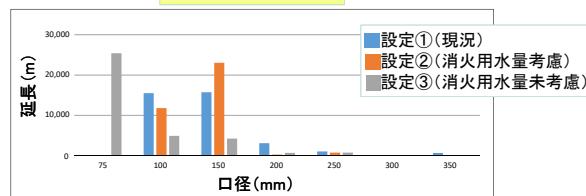
消火用水量を考慮しない場合の検討(1/2)(管網状管路)



消火用水量を考慮しない場合の検討(2/2)(管網状管路)

JWRC

口径別管路延長



管容積変化

(m³)

口径	φ 75	φ 100	φ 150	φ 200	φ 250	φ 300	φ 350	合計
設定①	0.0	121.7	277.9	95.7	50.3	0.0	58.1	603.7
設定②	0.0	92.7	407.4	7.7	34.1	6.4	0.0	548.4
設定③	112.4	38.3	74.0	19.2	34.1	0.5	8.1	286.5

・消火水量を考慮しない場合、大幅にダウンサイジングが可能となる。

設定②/設定①×100=約91% 設定③/設定①×100=約47%

課題_第5回
TACTにて提出 (締切: 5月12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言われています。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。