

衛生工学

上水道2：流出解析と地下水取水

2024年4月25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

流出解析

2

水文現象の解析

- ・ 極値現象（最大・最小，順序統計，極値統計）
 - ・ 渇水
 - ・ 雨水
- ・ 決定論（現象論）
- ・ 確率論（統計論）

3

再現期間（Return Period）

- ・ x （流量，雨量など）がある値 x_a 以上（洪水）または以下（渇水）となることが平均的にみて T 年に一度の割合で期待される。
- ・ T 年を x の再現期間（Return Period）という。

4

分布型を想定しない場合：Hazen Plot

1. N 個のデータを小さい順に並べる。 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$
2. それぞれの正規確率を $1/N$ とする。
3. x_i をはさむ小区間面積をすべて $1/N$ になるよう小区間近似をする。

- N 個のデータの i 番目の非超過確率（超過確率）は、

$$W(x_i) = \frac{1}{N}(i-1) + \frac{1}{2N}$$

- （特徴）実用性が大きい。確率の大きい、または小さいところ（両端）で精度が落ちる。

5

分布型を想定しない場合：Thomas Plot

- Hazen Plotと同様、データを大きさの順に並べ、 x_i の（非）超過確率を W_i とすると、

$$W(x_i) = \frac{i}{N+1}$$

- Hazen Plotにくらべ、下端で大きめの確率を与える傾向が強く、技術上安全側であり多用される。
- 確率降雨強度の算出に用いる。

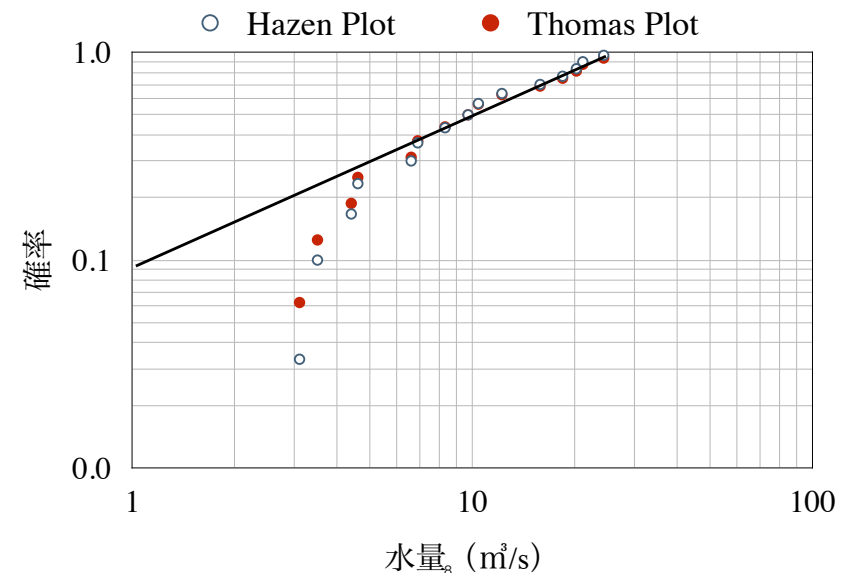
6

流量の毎年（15年）最小データ

i	$x_i (m^3/s)$	Hazen	Thomas
1	3.1	1/30	1/16
2	3.5	3/30	2/16
3	4.4	5/30	3/16
4	4.6	7/30	4/16
5	6.6	9/30	5/16
6	6.9	11/30	6/16
7	8.3	13/30	7/16
8	9.7	15/30	8/16
9	10.4	17/30	9/16
10	12.2	19/30	10/16
11	15.8	21/30	11/16
12	18.4	23/30	12/16
13	20.2	25/30	13/16
14	21.1	27/30	14/16
15	24.3	29/30	15/16

7

毎年最小データより喝水の10年確率



岩井法

分布型を想定する場合

- データの母集団の分布について、下限値 b を有する対数正規分布を頻度分布と想定して、水文予測する。
- 日本の確率計算法として広く用いられる方法。
- 片側有限分布

9

極値分布

分布型を想定する場合

- N 個のデータの i 番目の順序統計量の分布は、Thomas Plotで表される。

$$W(x_i) = \frac{i}{N+1}$$

- 特に $i=1$ 、もしくは、 $i=N$ 、つまり最大値または最小値の分布は、母集団がある条件を満足するとき、 $N \rightarrow \infty$ になるにしたがって、特定の極限形式に漸近する。

$$F(x; \mu, \theta, \gamma) = \exp \left\{ - \left[1 + \gamma \left(\frac{x - \mu}{\theta} \right) \right]^{-\frac{1}{\gamma}} \right\}$$

- ガンベル型、フレシェ型、ワイブル型

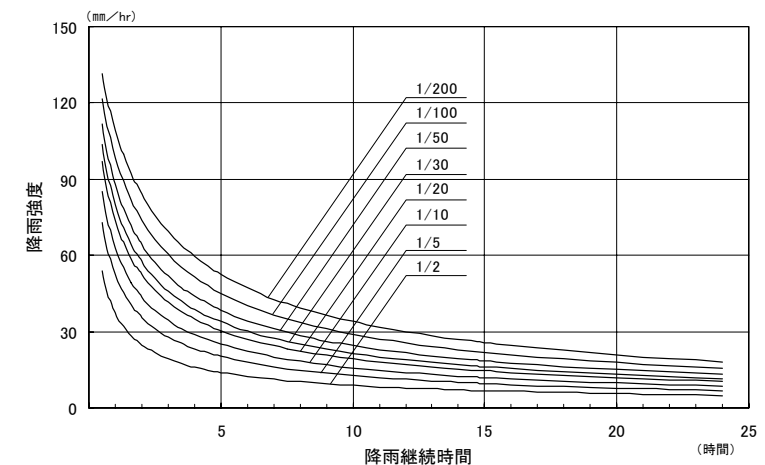
10

流出解析

- 時間降雨曲線 (Hyetograph)
- 時間流量曲線 (Hydrograph)
- ピーク流量 → 施設の設計：合理法
- 実時間ハイドロ → 開水路水理：特性曲線法
- 損失雨量： R_l 、雨量： R
- 有効降雨： $R_e = R - R_l = CR$
- C ：流出係数

11

降雨強度曲線



12

降雨強度公式

・ タルボット型 $I = \frac{b}{t+a}$

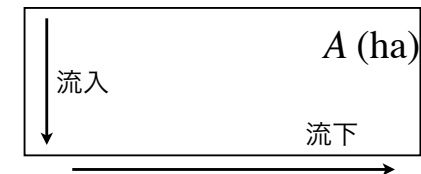
・ シャーマン型 $I = \frac{b}{t^n}$

・ 久野・石黒型 $I = \frac{b}{\sqrt{t} \pm b}$

・ クリーブランド型 $I = \frac{a}{t^n + b}$

13

雨水流出の合理法



- ・ 対象地域の降雨強度公式を選定し，降雨継続時間とその地域の関係に関連させ，流達時間や遅滞減少を検討して最大雨水流出量を算定する。

- ・ 最下流点流量（ピーク流量） $Q (m^3/s)$

$$Q = \frac{1}{360} CIA$$

- ・ 流達時間 = 流入時間 + 流下時間

- ・ 流出係数； C

- ・ 住宅地：0.25～0.75，郊外：0.25～0.40，緑地：0.10～0.40，道路：0.70～0.95

14

特性曲線法

- ・ 地表に落下した雨滴が時間の経過とともに流下していく様子を x - t 平面に表現したものを特性曲線という。
- ・ 分割した流路の1区間を取り上げて，その上流端を $x = 0$ にとり，上流端からの流入がないとして， x - t 平面の原点から出る特性曲線を求め，これをもとに h - t 図， Q - t 図（ハイドログラフ）を求める方法を特性曲線法という。

15

地下水取水

16

Darcyの式

$$Q = Aki = kA \frac{H}{L}$$

・ Darcyの式

- 地下水の流れの計算式。地下水の流れは粒子間の間隙を流れるから、ミクロの流線をみれば層流とはならないが、マクロの視点からみれば一定の方向へ流れる層流と考えられる。

17

透水係数

- 土層の中を単位時間に流れる水の流量は、浸透流量を Q 、断面積を A 、**透水係数**を k 、動水勾配を i とすると、

$$Q = Aki$$

- したがって、透水係数は、単位時間に単位面積中を単位動水勾配のもとで、土層の中を流れる浸透速度である。透水係数は一般に粗粒の砂質土層では大きく、細粒の粘性土層では小さい。
- 単位はcm/s

18

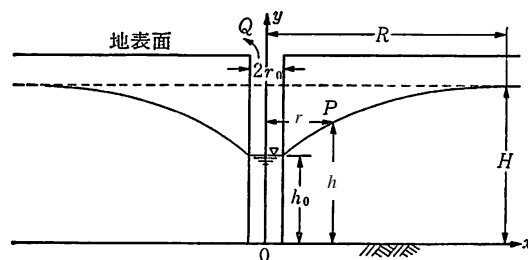
地下水取水（不被圧）

・ 運動式；Darcy則

$$v = k \frac{dh}{dr}$$

・ 連続式

$$Q = h(2\pi r)v$$



19

地下水取水（不被圧）

$$Q = h(2\pi r)v \quad \text{と} \quad v = k \frac{dh}{dr} \quad \text{から}$$

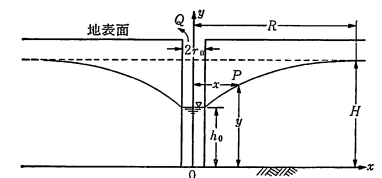
$$Q = h(2\pi r)k \frac{dh}{dr} = 2\pi kh \frac{dh}{dr}$$

r は r_0 から R , h は h_0 から H , なので

$$Q \int_{r_0}^R \frac{1}{r} dr = 2\pi k \int_{h_0}^H h dh$$

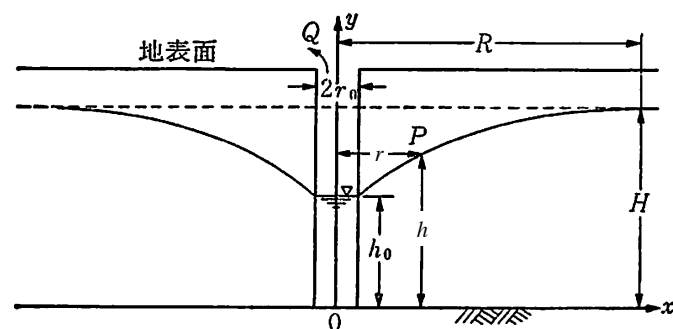
$$Q(\ln R - \ln r_0) = \pi k (H^2 - h_0^2)$$

$$Q \ln(R/r_0) = \pi k (H^2 - h_0^2)$$



20

不被压地下水取水



$$Q = \pi k \frac{H^2 - h_0^2}{\ln(R/r_0)}$$

21

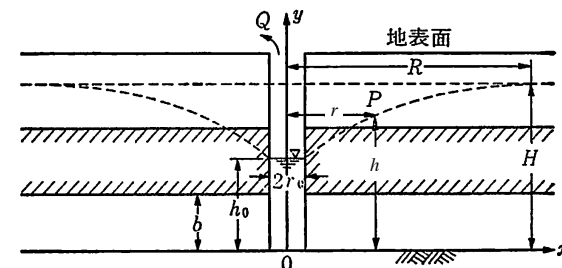
地下水取水（被压）

・ 運動式；Darcy則

$$v = k \frac{dh}{dr}$$

・ 連続式

$$Q = 2\pi r b v$$



22

被压地下水取水

$Q = 2\pi r b v$ と $v = k \frac{dh}{dr}$ から

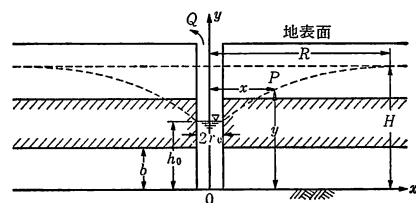
$$Q = 2\pi r b k \frac{dh}{dr} = 2\pi k b d h r \frac{1}{dr}$$

r は r_0 から R , h は h_0 から H , なので

$$Q \int_{r_0}^R \frac{1}{r} dr = 2\pi k b \int_{h_0}^H dh$$

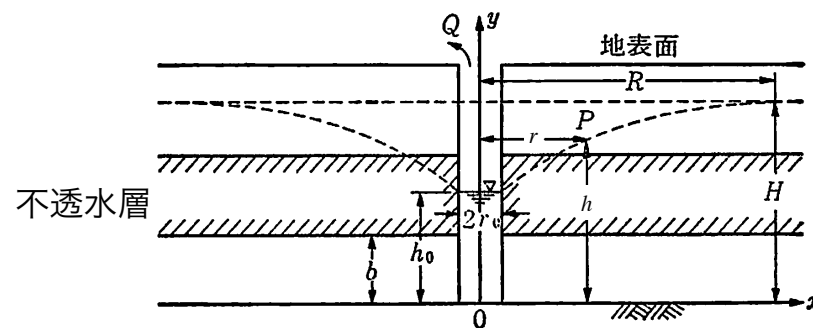
$$Q(\ln R - \ln r_0) = 2\pi k b (H - h_0)$$

$$Q \ln(R/r_0) = 2\pi k b (H - h_0)$$



23

被压地下水



$$Q = 2\pi b k \frac{H - h_0}{\ln(R/r_0)}$$

24

明治用水頭首工大規模漏水事故

25

明治用水頭首工

概要

明治用水：明治13（1880）年4月に通水，かんがい地域は8市4町。現在の頭首工は3代目。世界かんがい施設遺産

明治用水頭首工は，国営農業水利事業によりS26年からS32年にかけて造成。国営施設整備事業によりS53年からS58年に改修。H29年からR4年に堰柱やゲート設備等の耐震化対策を実施



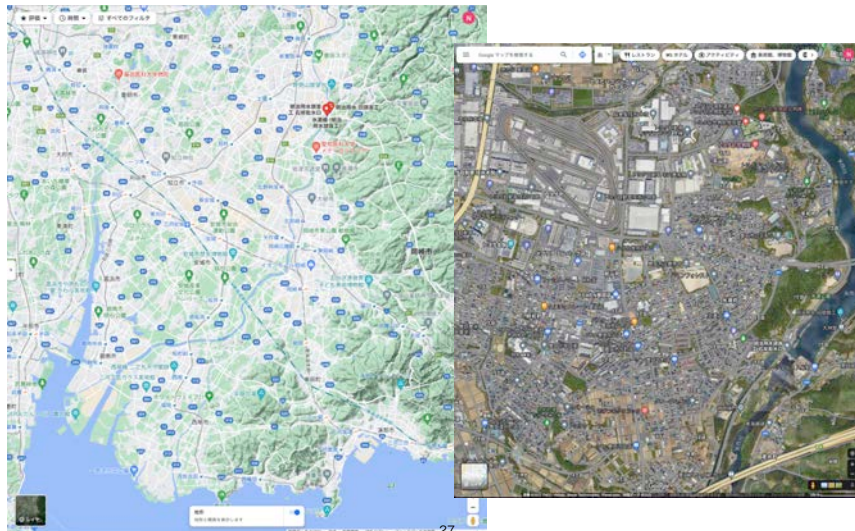
頭首工：フローティングタイプ
堤長：167.3m（洪水吐133.0m，土砂吐26.05m，その他8.25m）
取水量：右岸34.02m³/s（農水30.00m³/s，工水4.02m³/s）
左岸8.17m³/s

26

©明治用水土地改良区，2022

明治用水頭首工

碧海台地の北端



27

愛知県の工業用水

愛知県企業庁

愛知用水工業用水道：845,600m³/日
西三河工業用水道：300,000m³/日
東三河工業用水道：155,000m³/日
尾張工業用水道：290,000m³/日

愛知県用水量（工業統計調査）

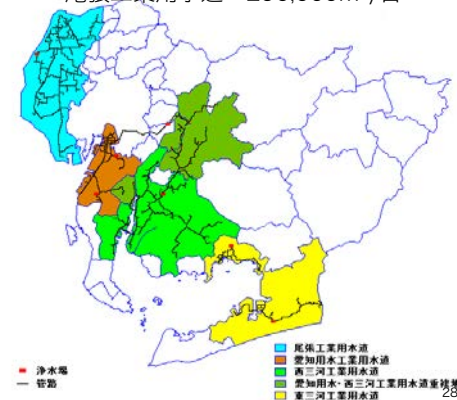
2017年：155.5万m³/日
2018年：156.6万m³/日
2019年：154.9万m³/日

製造品出荷額

2017年：44.91兆円
2018年：46.97兆円
2019年：48.72兆円

工業用水が生み出す製造品出荷額

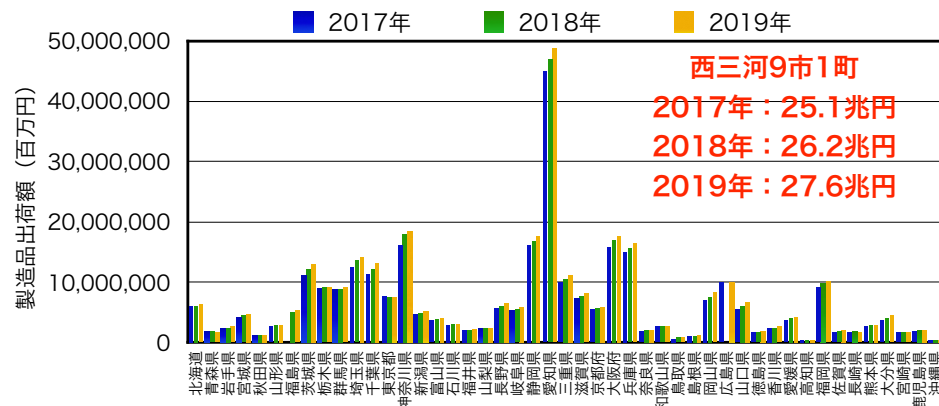
2017年：7.91万円/m³
2018年：8.22万円/m³
2019年：8.62万円/m³



28

平成29年度工業統計調査

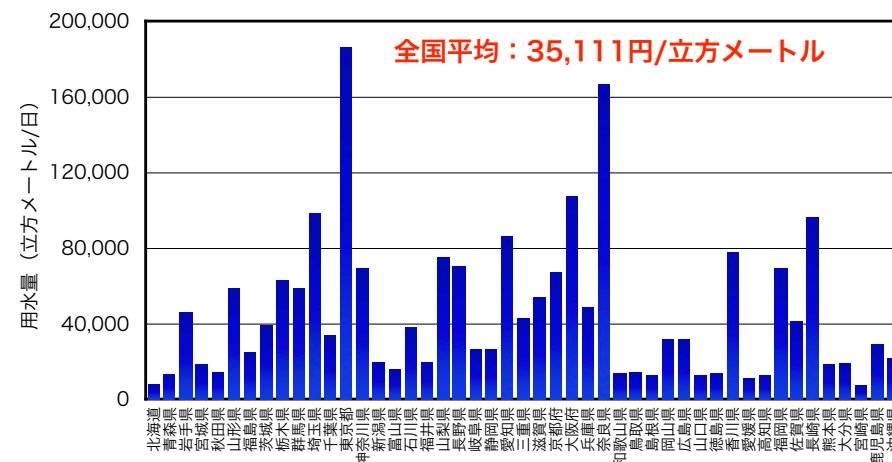
製造品出荷額等



全国計 (2019) : 331.8兆円, 愛知県 48.7兆円, 神奈川県 18.4兆円

経済産業省：工業統計調査2017年, 2018年, 2019年

用水量1立方メートル当たりの製造品出荷額

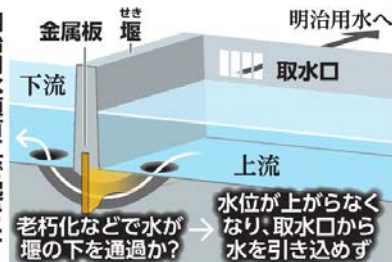


経済産業省：工業統計調査2017年, 2018年, 2019年

2022年5月明治用水頭首工大規模漏水



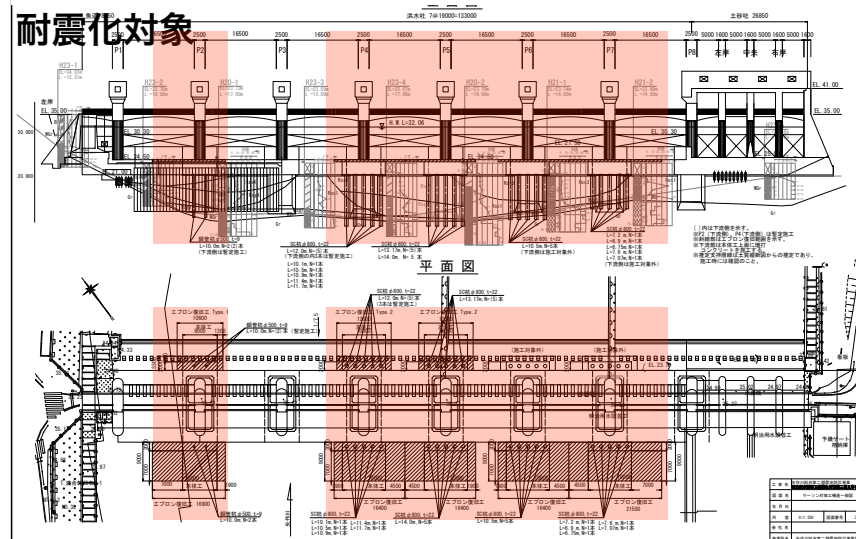
明治用水頭首工で起きた
漏水のメカニズム



©NHK, 朝日新聞, 橋富, 2022

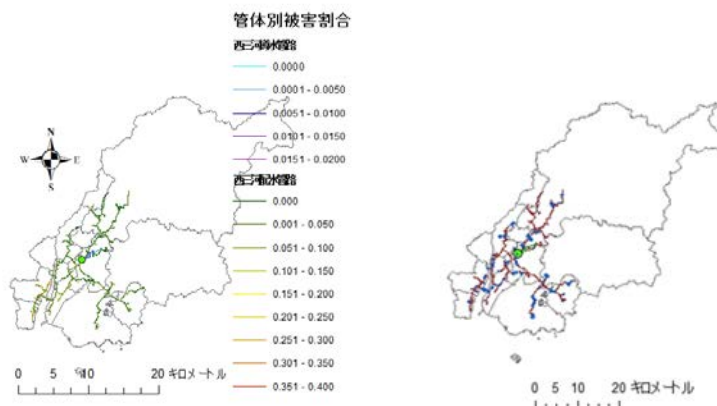
明治用水頭首工耐震化 (H29～)

耐震化対象



32 ©明治用水頭首工復旧対策検討委員会, 2022

工業用水の管路被害推定結果



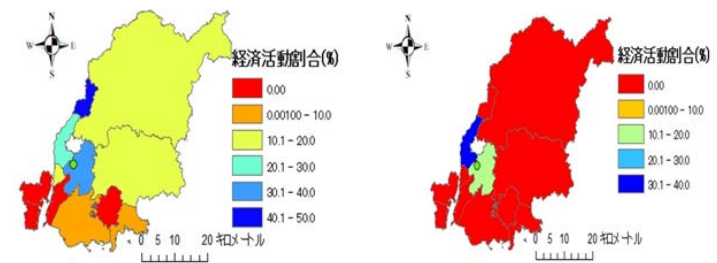
モンテカルロ法

N=1,000

被害推計結果例

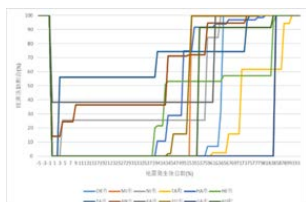
平均被害件数：114.51件

南海トラフでの経済被害損失率

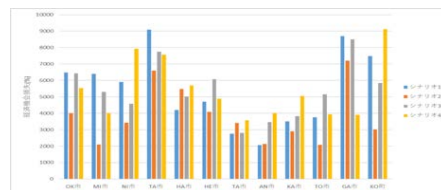


地震発生時経済活動割合(1000ケース平均)

地震発生時経済活動割合(1ケース)



経済活動の災害レジリエンス曲線

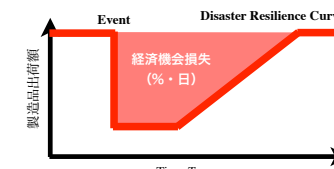


市町別累積経済機会損失 (%・日)

35

経済機会損失評価モデル

- 災害時の自治体別製造品出荷額を推定
 - 各市町別、産業中分類項目別の工業用水取水量当たりの製造品出荷額 (円/m³) を算出
 - 離散的管路被害の推定。被害管路より下流の節点は断水と仮定。
 - 節点数より、各市町別断水率を推定。
 - 断水率から災害時の工業用水取水量 (m³/日) を算出し、災害時製造品出荷額 (円/日) を算出。

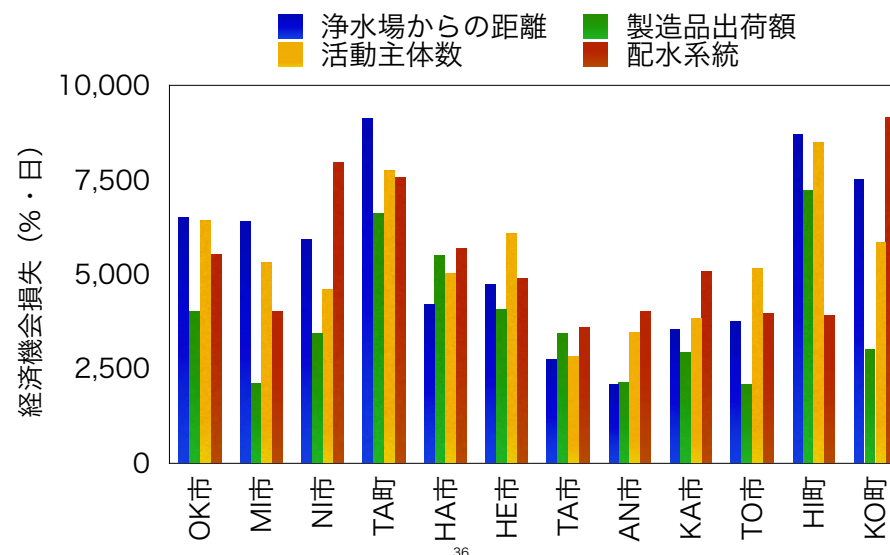


- 経済機会損失

$$\sum (\text{平常時製造品出荷額} - \text{応急復旧期製造品出荷額})$$

34

応急復旧戦略別の経済機会損失推定結果



36

明治用水頭首工大規模漏水事故

何を学ぶのか

明治用水頭首工：明治13年供用開始，昭和58年～

- ・ 維持管理（保守点検から再構築）の重要性と施設老朽化
- ・ 高度成長 ⇒ 基盤強化・維持管理
- ・ 農業用水，工業用水（西三河：製造業29兆円）：代替施設（機能）がない『止めることができない』重要施設
- ・ 二重化やバックアップがないと徹底的な点検が困難
- ・ 災害に対する備えは『余裕』か，『余剰』か
- ・ 危機管理と経営効率，地域ごとでどのようにバランスを考えるのか ⇒ 文明と文化

課題__第2回

TACTにて提出（締切：4月26日24時）

1. 用語についての説明（2～3行程度）

- 1) 雨水流出の合理法
- 2) 再現期間

2. あなたは技術者です。

重要施設耐震化プロジェクトの責任者です。施設の耐震診断結果から，施設の70％は否，30％は適でした。財務部局からは，施設一体ではなく，70％の部分のみだけ耐震費用を認めるとの話がありました。あなたは財務部局からの指摘を受け入れ，重要施設の70％だけの耐震化としますか？それとも重要施設100％の耐震化としますか？その理由とともに述べよ。