

雨水流出の基本と歴史を再点検する (学習者を念頭に)

高島 英二郎 下水道アドバイザー (一財)下水道事業支援センター

- 合理式

$$\text{雨水流出量 } Q(\text{m}^3/\text{s}) = 1/360 \text{ } C \cdot I \cdot A$$

C: 流出係数 A(ha): 集水面積(排水面積、流域面積)

I (mm/h): 「流達時間内の平均降雨強度」

↳ tc: time of concentration

人名は敬称略と致します
内容は私見を含みます

合理式について以下のようなことが言われるが・・・

- 降雨が一定強度で降ることが前提
- 合理式は、懸案地点での時間的な関連性、継続性はないもの
- 合理式による算定量は過大になる

自己紹介～雨水への関心

S56～H27 建設省・国土交通省

雨水との関わり

H8-9 住宅・都市整備公団（貯留浸透、雨水調整池）



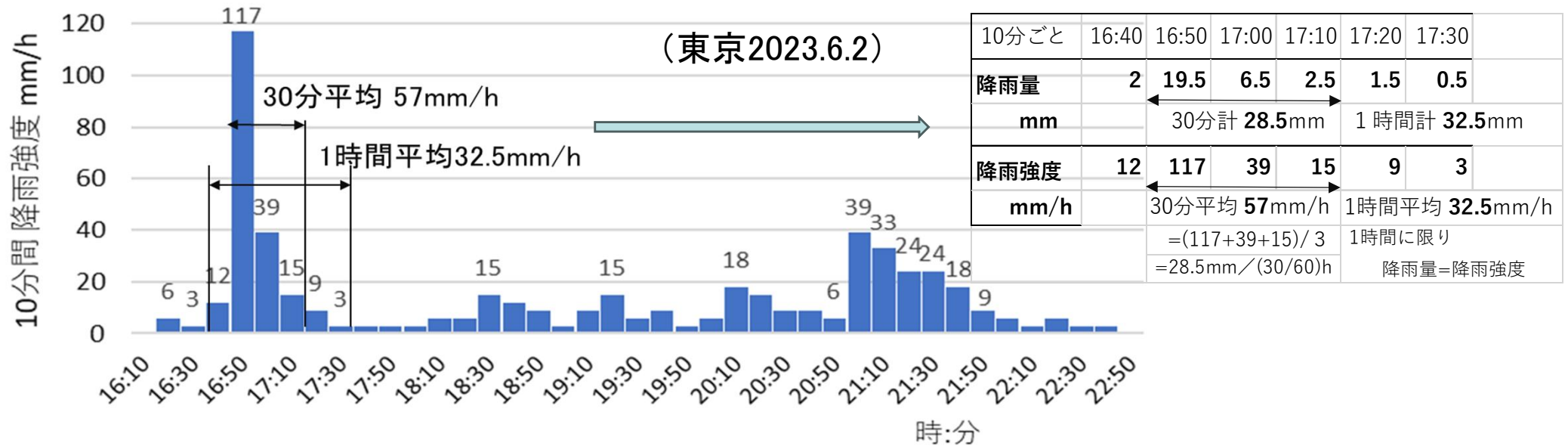
H10-12 京都府（いろは呑龍トンネル）、H16-18 千葉市（大小の雨水対策）

H21-23 江戸川河川事務所

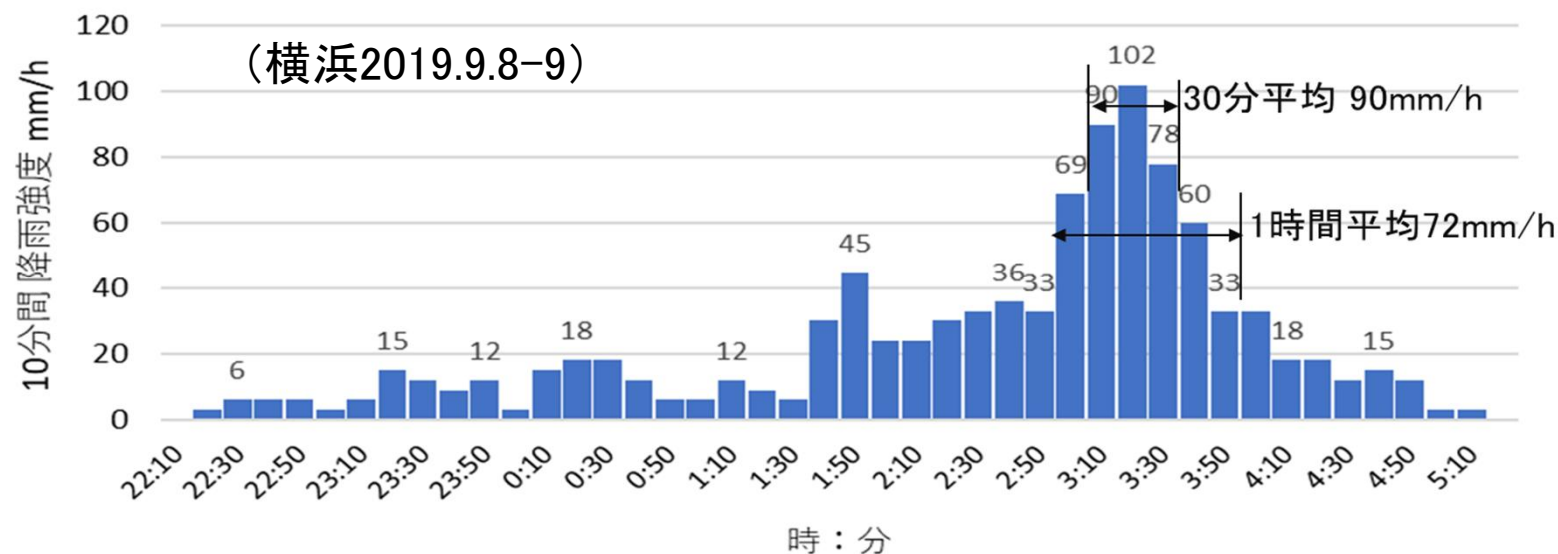
H27-R4 コンサルタント

雨水につき調べるほど、既往文献に疑問

降雨強度ハイレートグラフの例 時間変動は大きい



16:50 10分間で $19.5 \text{ mm} \div (10/60) \text{ h} = 117 \text{ mm/h}$ rate→数字で雨の強さが伝わる



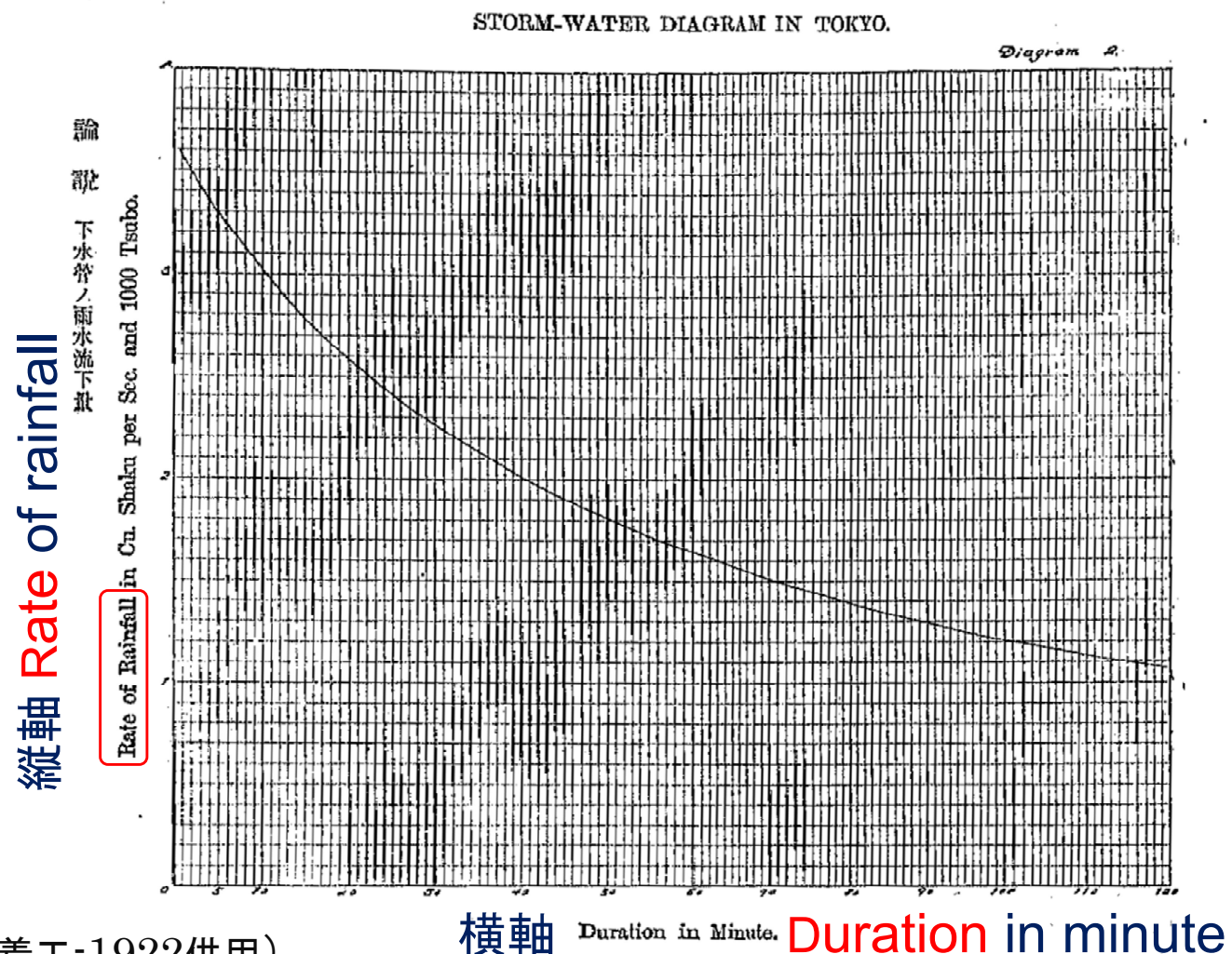
ピークを挟み、時間区間(duration)を長く取るほど、平均強度は下がる(普遍特性)

⇒ 降雨強度曲線(次頁)

米元晋一 降雨強度曲線・式を日本へ導入

- 1890～1910頃 欧米で、様々な降雨強度式が発表
- 1911(明治44)-12年 米元晋一(東京市) 欧米下水道調査
1915年(大正4) 合理式、降雨強度曲線(下図)を併せて発表
土木学会誌 論説
『下水管ノ雨水流下量』

米元は、イギリスとドイツの
例を参考に、
東京での21年間
(明治24～44年)の
降雨観測値から、
7年確率の曲線を作成。



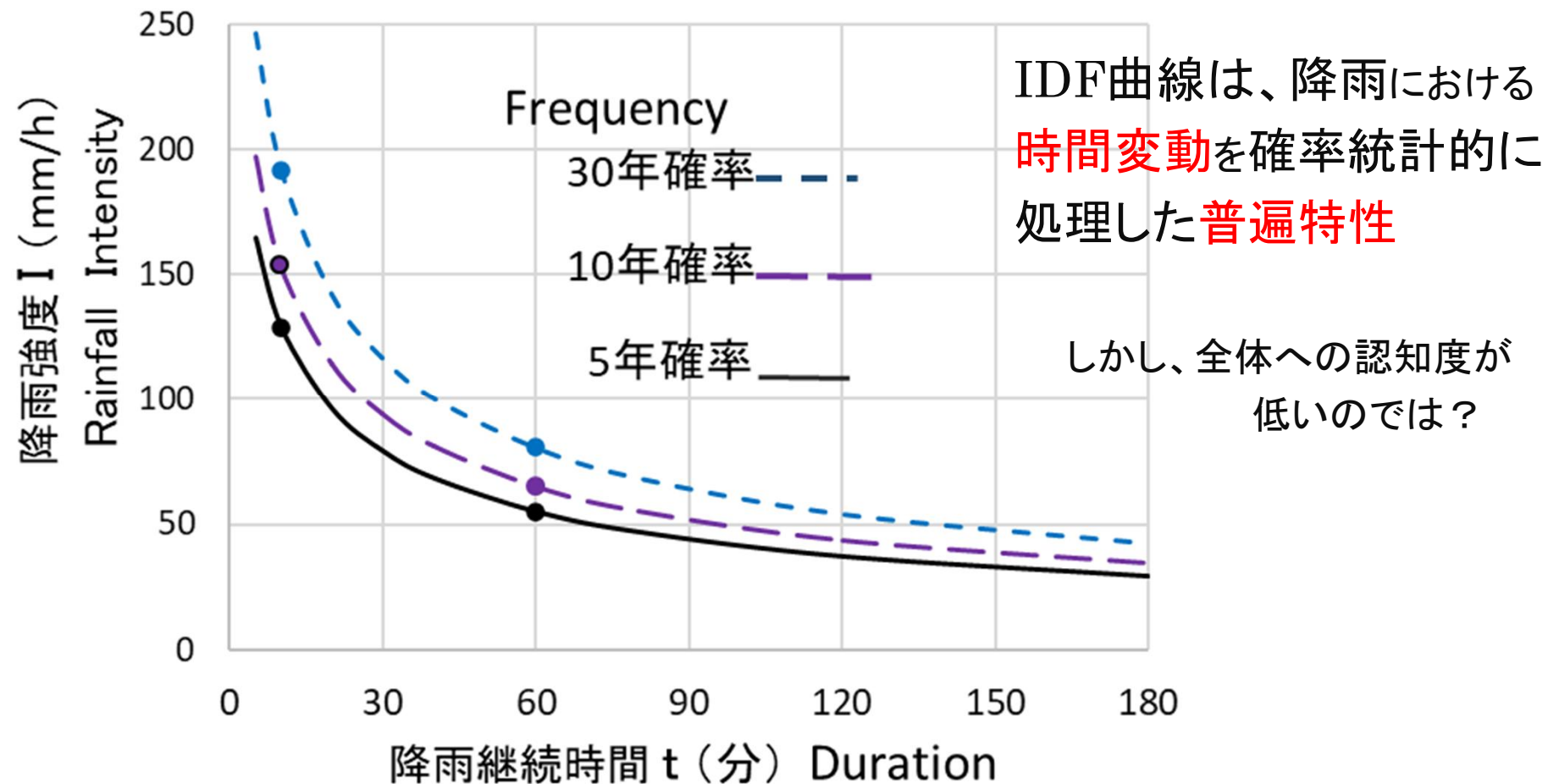
(参考)

米元は三河島污水処分場も(1914着工-1922供用)

合理式の特長[1]

(確率)降雨強度曲線・式 (IDF curves)を利用

I と D の関係を曲線に。Frequency(確率年)ごとの曲線で。



横軸は雨の降り始めからの時間経過でない **強雨継続時間** とするのがよい

(下水道用語集の課題)

下水道用語集(2000年)による「降雨継続時間」「合理式」

降雨継続時間 こううけいぞくじかん

英 rainfall duration

雨が降り始めて終るまでの降雨が継続していたと考えられる時間。一般に降雨強度の大きい降雨は継続時間が短く、小さい降雨は継続時間が長い傾向にある。

降雨強度曲線式の t と不整合

合理式 ごうりしき

英 rational method, rational formula

流達時間に相当する継続時間を有する降雨が、排水区域に降るものと仮定して計画最大雨水流出量を算定する式。 Q ：最大計画雨水流出量 (m^3/s), C ：流出係数, I ：流達時間 (t) 内の平均降雨強度 (mm/hr), A ：排水面積 (ha) とすると, $Q = CIA/360$ で表される。

非現実的な感じ

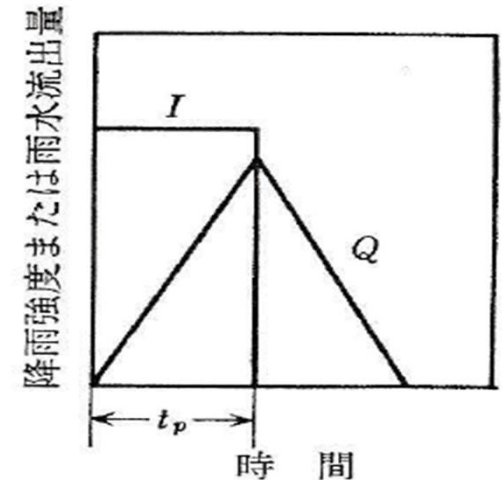
これらの記述は、
「合理式の伝統的説明」による？

「合理式の伝統的説明」の課題

(伝統的説明の例)

『下水道工学』(1982朝倉書店) 松本順一郎、西堀清六

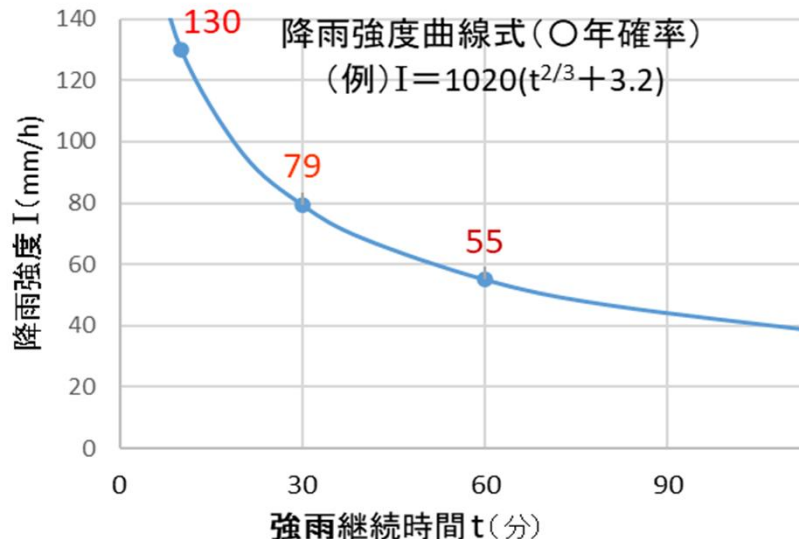
「長方形の排水区域に、一様な降雨強度の雨が、流達時間に等しい時間だけ降るという、理想化された場合を考えると、・・・
ピーク流量は、流達時間に等しい経過時間 t_p に現れる。」
(面積の全体から集水→ピーク流量)



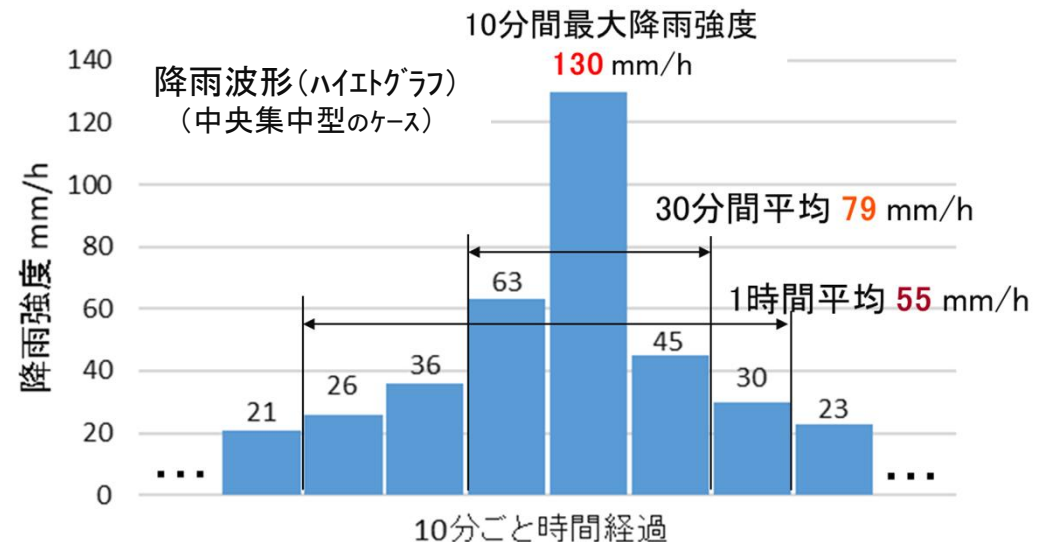
しかし、「一定強度」だけでは以下を表現できず、合理式の理解を狭める。

詳細は、下水道協会誌 2024/11「降雨・雨水流出・時間をめぐる歴史的解釈及び提案」

◎合理式を実際に使用する際に降雨強度曲線を用いる⇒ 流達時間が短いほど I 高く
⇒ピーク流量が大



対応
↔



合理式の特長[2]

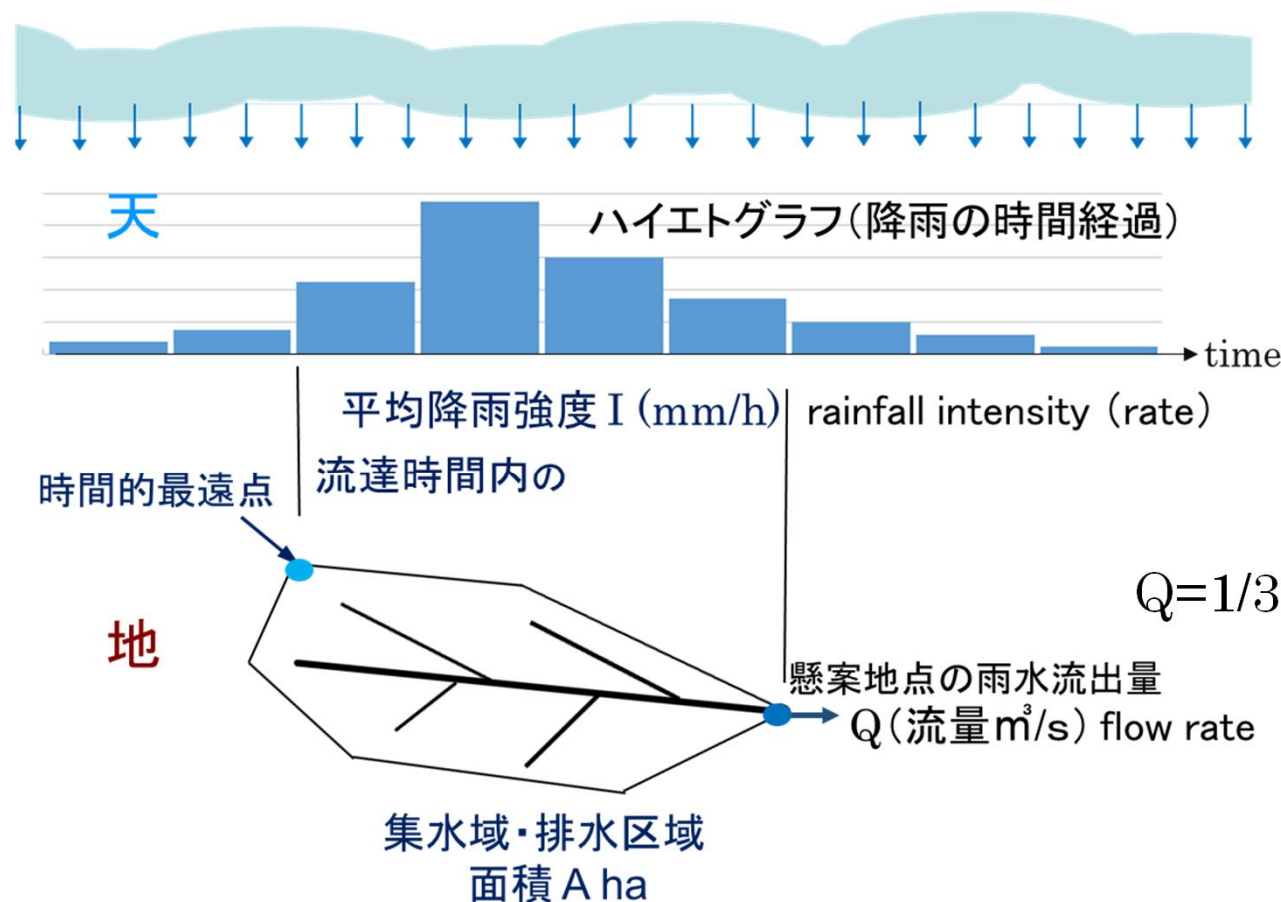
「I: 流達時間内の平均降雨強度」を入力

集水域への降雨が流達時間 t_c をかけ流集



時間的最遠点～懸案地点への流下を時間で表現

(t_c に、集水域の奥行・勾配・粗度・水路状況は集約)



(地) 流達時間をもって、
(天) 時間変動する降雨
から 降雨強度の最大部
を切り出して、式に入力

$$Q = 1/360 C \cdot I \cdot A \rightarrow \text{最大流出量}$$

(降雨は空間的には一様とする)

合理式とタイムエリア法は同原理 流達時間を区分しハイドログラフに展開

流達時間 t_c 30分、 $\Delta t=10$ 分 の例 $\Rightarrow$ 排水面積 A を3区分

$$Q = 1/360 C \cdot I \cdot A \quad (\text{区分し、掛け、足し算})$$

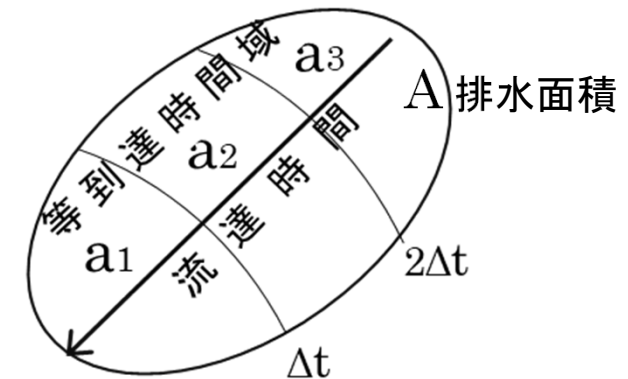
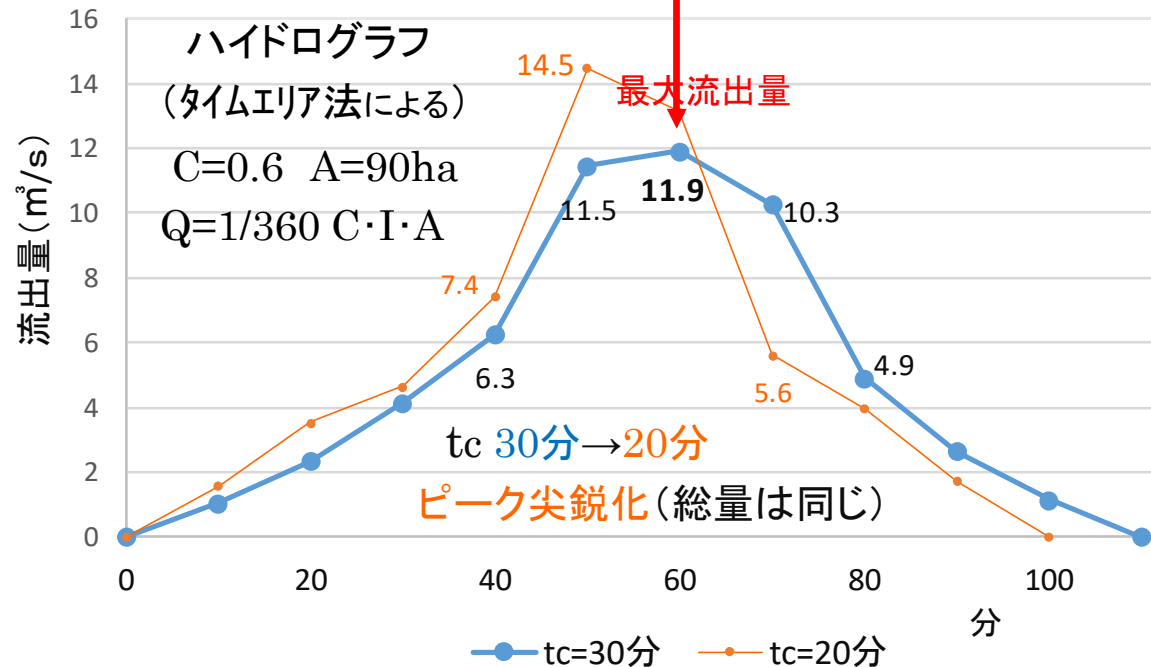
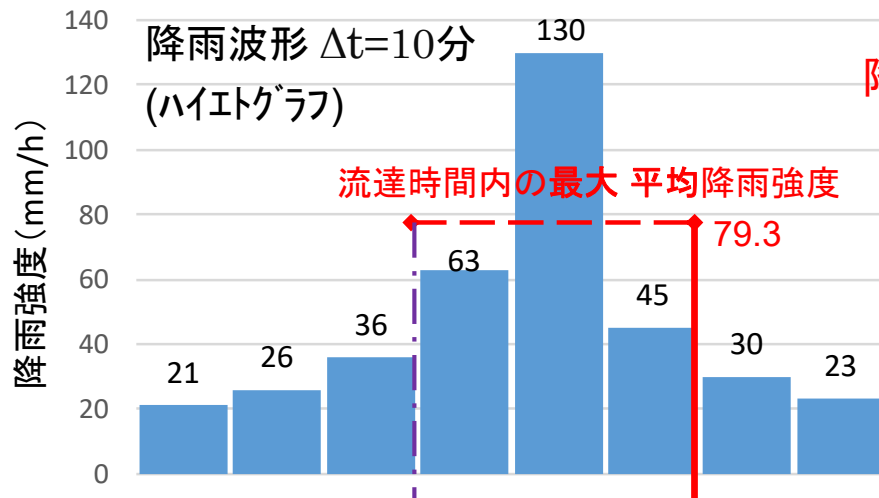
$$\text{降雨強度} \Delta t \text{ごと} \quad 45 \cdot a_1 + 130 \cdot a_2 + 63 \cdot a_3$$

等到達時間域が均等 $a_1 \sim a_3 = A/3$ であれば

$$= (45 + 130 + 63) / 3 \times A = 79.3 \times A$$

(流達時間内の平均降雨強度)

$$(45 + 130 + 63) \times (10/60) / (30/60)$$



設計指針 実験式の解説

2) 実験式の性格

実験式は、式 (3.4.2) で表される。

$$Q' = \frac{1}{360} C' \cdot R \cdot A \cdot \sqrt[n]{S/A} \quad \text{外国の観測から経験的に得た項}$$

2009年
版まで

Q' : 最大計画雨水流出量 (m^3/s)

C' : 流出係数

R : 降雨強度 (mm/h) ... (Durationの記述がなかった)

A : 排水面積 (ha)

S : 地表平均こう配 ($\%$)

n : 定数 (= 4 又は 6)

ツルゲー・ツグラ式 ———— フリック2式

2019年
版

Q' : 最大計画雨水流出量 (m^3/s)

C' : 流出係数

R : 1時間の降雨強度 (mm/h) = 1時間の降雨量

A : 排水面積 (ha)

S : 地表平均勾配 ($\%$)

n : 定数 (= 4 又は 6)

合理式(米元晋一) × 実験式(茂庭忠次郎) 論争 より

- 米元晋一(東京市)

青は発表者見解

1915 土木学会誌 論説

実験式について「一単位時間内の降雨量(1時間降雨量)と、
大きさに何ら制限なき任意の面積とを、公式中に連結せしむるは不合理」
合理式では、流達時間を介して、排水面積と平均降雨強度を連結(9頁参照)

- 茂庭忠次郎(東京市⇒名古屋市⇒内務省等)

1949 水道協会雑誌『雨水の流出量算定に就て』

合理式について「流域の地表勾配を無視し、その雨水流出量は
排水面積の拡大に伴い無制限に増進するが如き欠陥ある」
→合理式は、勾配、流域の大きさを流達時間そして降雨強度に反映している

実験式に降雨強度式を組み込んだ「古稀翁公式」をさいごに提示。

- 米元 1950 水道協会雑誌に反論『合理公式かビュルクー公式か』

「新提案の古稀翁公式は、ビュルクー式(実験式)の画一1時間強度なるに反し
変化強度を採入れ、これは公式中 最重要 組成因子である」

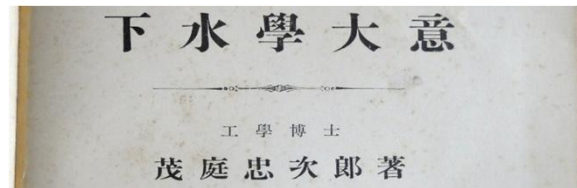
(合理式×実験式 続き)

- 米元 1950 水道協会雑誌 『合理公式かビュルクー公式か』

「合理式よりもビュルクー式を使用した方が工事費の節約上 好都合であるとの言を聞くが(実験式は小さい計算値を与えるため)・・・理論上 より正当性を有するものがある判断を加えて使用した方が得策」 → 正論と思います

- 茂庭

『下水學大意(1932)』



雨量観測について「自記雨量計の設備あるは極めて稀・・・多くは附近の測候所
又は官公所等の観測に係る一時間最大降雨量を用い、計画の基準となす」
→ 当時の観測状況では、降雨強度曲線式の作成は先進地を除いて困難だった

「実験式を適用する場合 理論上最も不合理と思われることは、
降雨量・面積・勾配等のみの関数で 全く時間の因子を欠く事である」

(新たな雨水管理計画策定手法の論点集(案) 国交省2015年)

「合理式は、懸案地点での時間的な関連性、継続性はないもの」

・・・合理式が実験式と混同されてる？

設計指針 合理式の解説

§3.4.2 計画雨水量の算定

1) 合理式の性格

合理式は、式 (1.7.1) で表される。

$$Q = \frac{1}{360} C \cdot I \cdot A \dots\dots\dots (1.7.1)$$

ここに、

Q : 最大計画雨水流出量 (m^3/s)

C : 流出係数

I : 流達時間 (t) 内の平均降雨強度 ($= \frac{a}{(t^m + b)^n}$, ただし a, b, m, n は定数) (mm/h)

A : 排水面積 (ha)

この式を適用する過程は、図1.7.3に示すとおりである。

この式は、図1.7.3からも明らかなように、計画対象地域の都市計画、降雨特性等を的確に計算過程のなかに組み込んでおり、絶対的ではないが、現時点では最大計画雨水流出量の算定に適している。

降雨強度曲線のグラフと意味も示す方がよい。

2009年
版まで

1) 合理式の性格

合理式は、式 (3.4.1) で表される。

$$Q = \frac{1}{360} C \cdot I \cdot A \dots\dots\dots (3.4.1)$$

ここに、

Q : 最大計画雨水流出量 (m^3/s)

C : 流出係数

I : 流達時間 (t) における降雨強度 (mm/h)

A : 排水面積 (ha)

(降雨の変動ありきなので)

・・・「平均」を入れる方がよい

この式を適用する過程は、図3.4.1に示すとおりである。

この式は、図3.4.1からも明らかなように、計画対象地域の都市計画、降雨特性等を計算過程の中に組み込んでおり、実用上施設規模の設定に用いる最大計画雨水流出量の算定に適している。

2019年
版

合理式の仮定 (米土木学会・WEF) 『Design and Construction of Urban Stormwater Management Systems』 (1992)

The rational method is based on the following assumptions:

(a) ある地点におけるピーク流出量は、

その地点への流達時間における平均降雨強度に比例する。

The peak discharge at any point is directly proportional to the average rainfall intensity during the time of concentration to that point.

(b) ピーク流出量の確率年(再現期間)は、平均降雨強度の確率年と同じ。

The return period of the peak discharge is the same as the return period of the average rainfall intensity.

(c) 流達時間は、集水域の最遠点から懸案地点までの流下時間である。

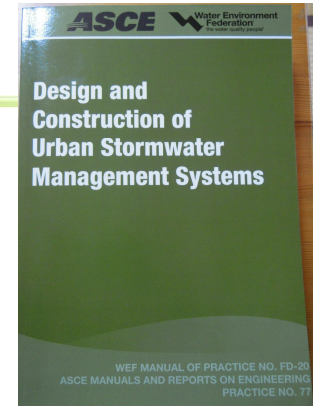
これは時間的な最遠点であり、必ずしも距離的な最遠点ではない。

The time of concentration is the travel time from the most remote point in the contributing area to the point under consideration. This assumption applies to the point most remote in time, not necessarily in distance.

(d) 合理式に使う集水面積は、計画地点の上流域全体でありうるとともに、

直接繋がる不浸透区域のような、流域の一部区域のこともある。

The contributing area can be the entire drainage area upstream of the design point or some subset of this area, such as only the directly connected impervious portion of the drainage area.



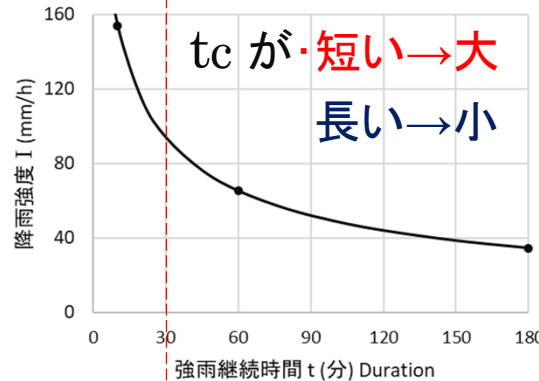
米土木学会 合理式仮定(d) から気付くこと

合理式による Q 最大 $\Rightarrow C \times I \times A$ の組合せで決まる

流出係数

t_c 内平均降雨強度

集水面積



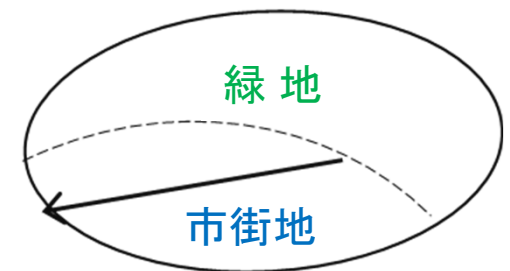
① 市街地のみ $\rightarrow$ 大

② 市街地 + 緑地 $\rightarrow$ 小

大
小

流域の[一部]

流域の[全体]



集水面積が流域の一部でも、 Q ピークがより大きくなる場合がある

- ・ 降雨の時間変動の影響は大事
- ・ 合理式は理に沿った、簡潔な組立（降雨 $\rightarrow$ 集水域 $\rightarrow$ 流量 までを表現）

（米土木学会・WEF）流出係数 C の解説

「浸透、凹地貯留、流量ピークに対する流下過程での一時的な貯留という、総合的な影響から成る」

モデルにおける仮定について考える

- モデル: 複雑な現象(システム)を数式で表現
- 比較的単純なものとして扱い、効率的にシミュレーション
- 仮定はモデルの出発点

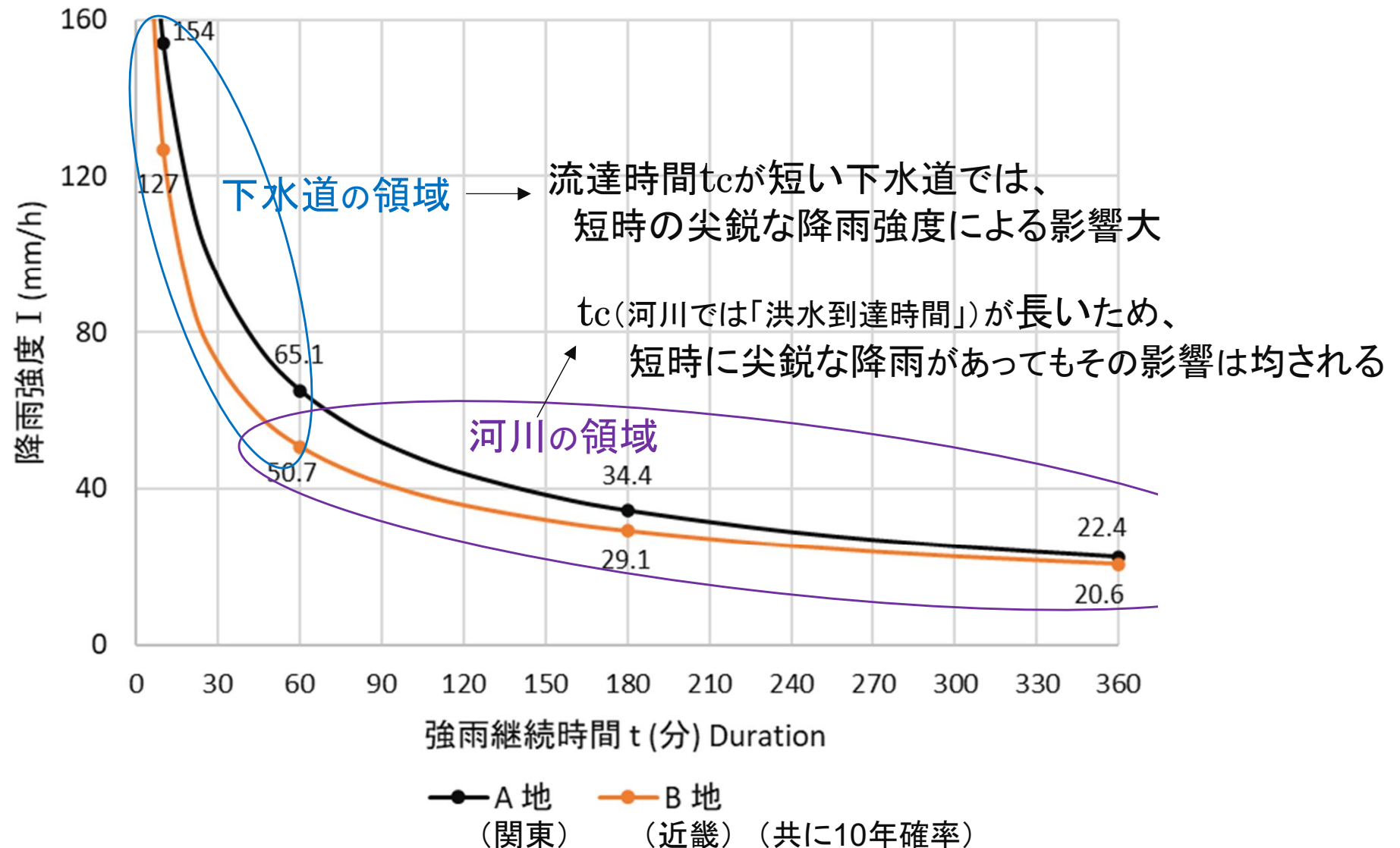
⇒ 施設計画等のためのモデル → 実用性が大事

施設が設計・整備された後、状況を見て必要があれば修正

「一定降雨強度」等による合理式の説明は、多くの文献に書かれている。
しかし、分かりやすく説明するため単純化した条件に、実務において
とらわれすぎない方がよい と考えます

⇒ 米土木学会・WEFの合理式仮定(a)は実務上適切。

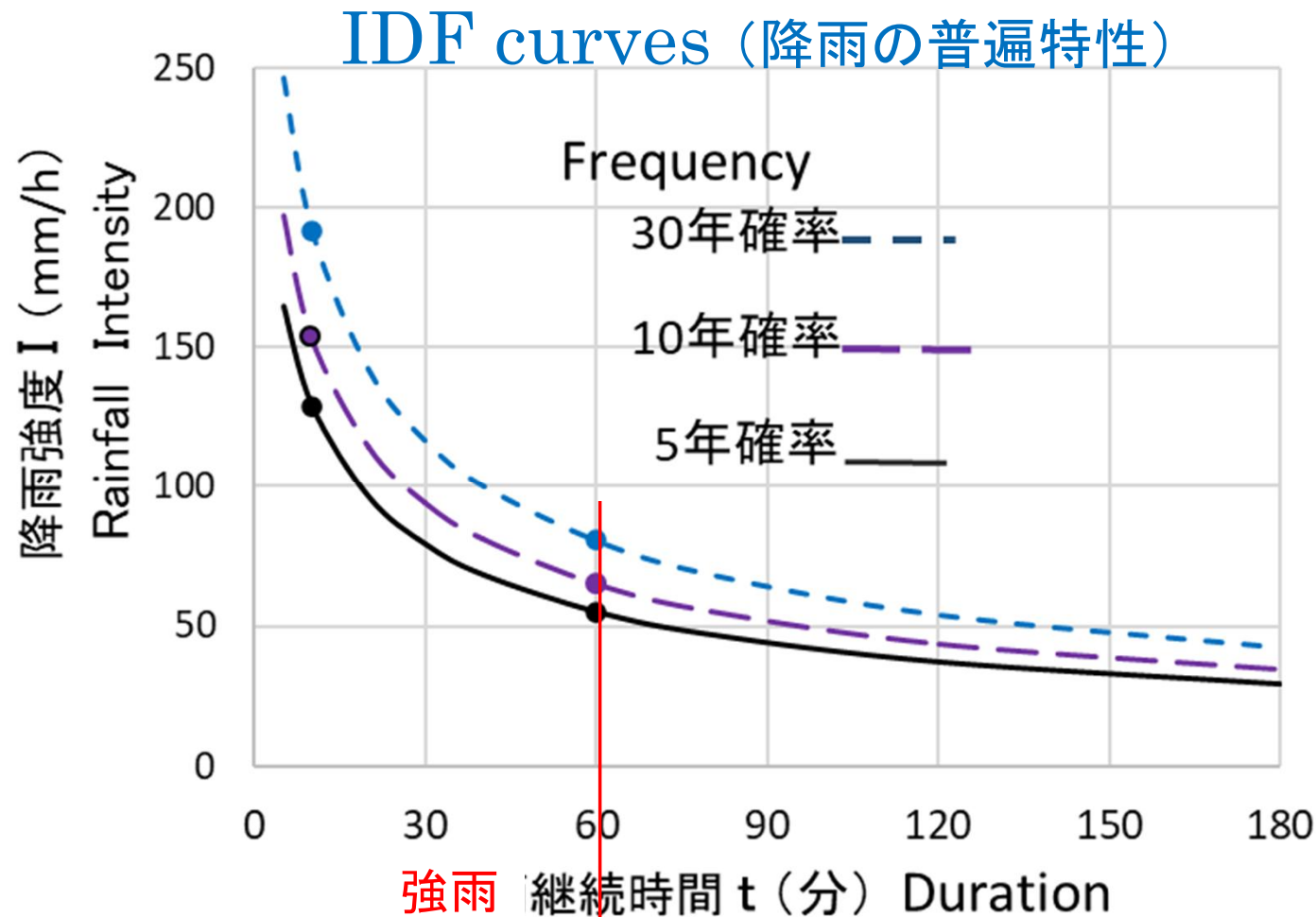
降雨強度曲線から 下水道と河川の関係を見る



合理式 $Q(\text{m}^3/\text{s}) = 1/360 C \cdot I \cdot A \rightarrow \text{比流量 } Q/A \propto I$

比流量は上図の関係から当然 下水道 > 河川 となる。

確率降雨強度曲線から見る 合理式、「1時間〇〇ミリ」、実験式



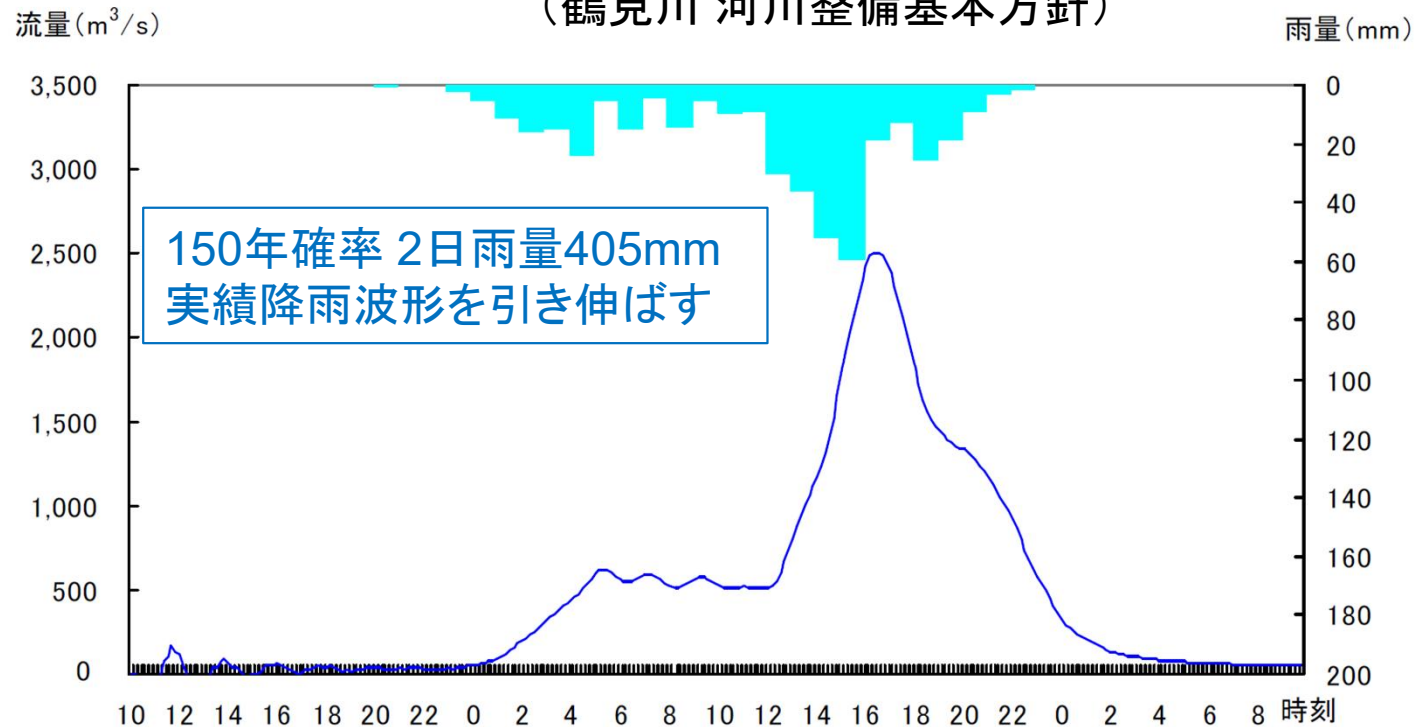
合理式では、降雨強度曲線全体から、集水域の流達時間に応じた I を入力
(下水道の流達時間は30分以下が多い)

「1時間〇〇ミリ」と言う時、60分の断面の I を代表として表現

実験式では、60分の断面のみの I を入力

河川における 時間変動 との関係

河川計画の降雨波形及びハイドログラフ (鶴見川 河川整備基本方針)



河川流量は変動(計画高水流量はピーク時) ⇒ ピーク時の外は河道に余裕

河川流量ピークと内水排水ピークには時間的ずれ があり得る

河川サイトと議論するために、**時間変動の考慮**は重要(庄内川で先進事例)

次の設計指針改訂に期待

人材希少社会→指針を読んで技術の基本を学べることを重視すべき。

- 「確率降雨強度曲線 IDF curves」は、降雨の時間変動を確率統計的に処理した「普遍特性」
- 米土木学会・WEFの合理式仮定は、雨水流出に関する基本を表すとともに、実務に適する。

これらを、設計指針を通じて広く知ってほしい。

- 流量の実測を勧め→流出解析の向上へ

ご清聴ありがとうございました

雨水流出の基本と歴史を再点検する(学習者を念頭に) 2026.8.5

本報告に関しご意見等を頂けますとありがたく存じます eijiro1958@gmail.com

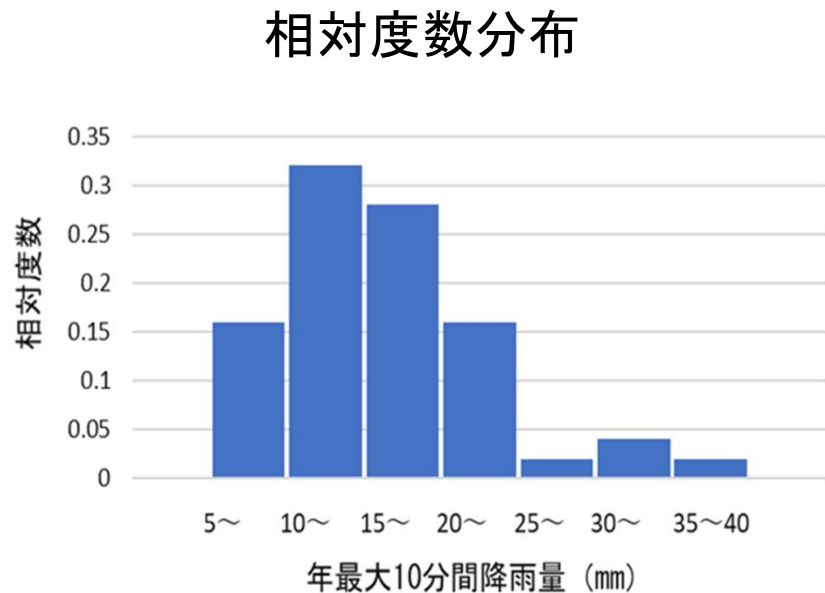
守田 優(元芝浦工業大学)「合理式の歴史と課題」より

Journal of Hydrological System, 雨水貯留浸透技術協会, 2004

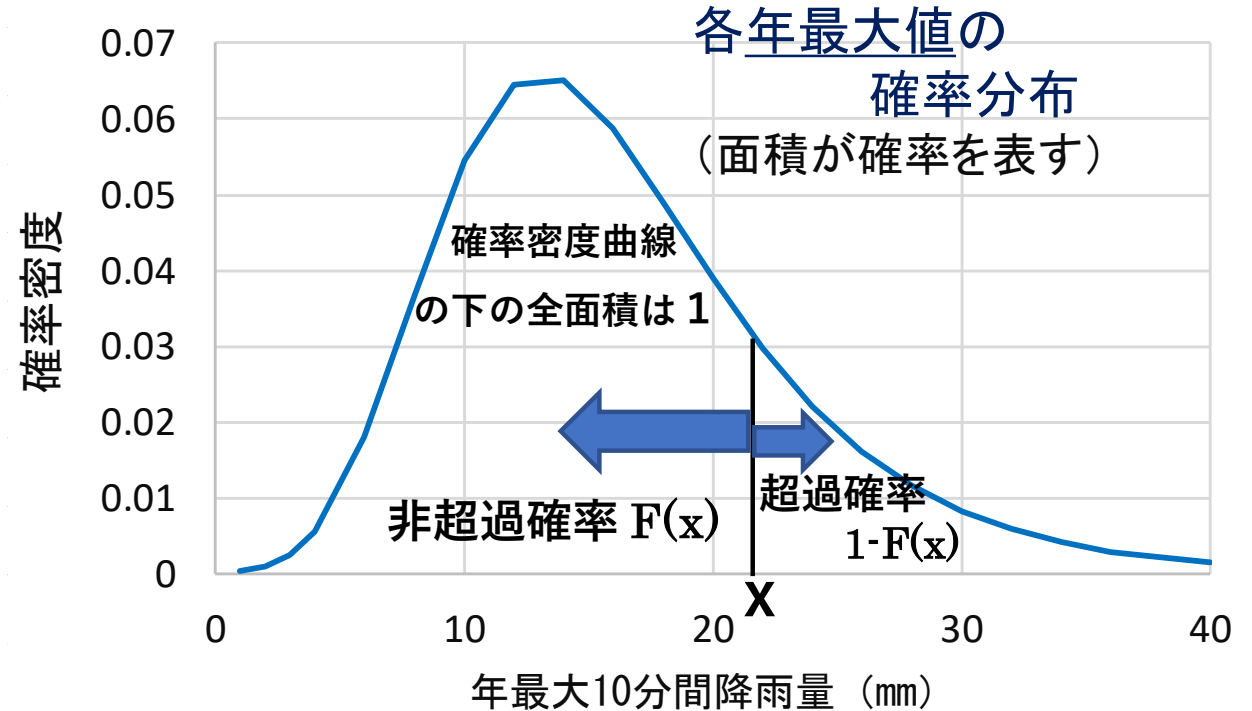
「**パラメータ**(流出係数、流達時間)の値に流出過程の様々な特性が組み込まれていることを、技術者が深く理解した上で、合理式を使いこなす必要がある。」

「合理式は、**流出現象に関する実務的な言語**としても、今後も利用され続けるであろう。」

(参考) 降雨データの確率統計処理、年超過確率と確率年



年最大 10 分間降雨量の相対度数分布例
(50年データ)



$F(x)$: 非超過確率 年超過確率: $1-F(x) = 1/T$

T年: 確率年(再現期間)

年超過確率1/5 の降雨 x = 5年確率 降雨 x

(1年あたりに x を超える降雨が発生する確率が1/5)

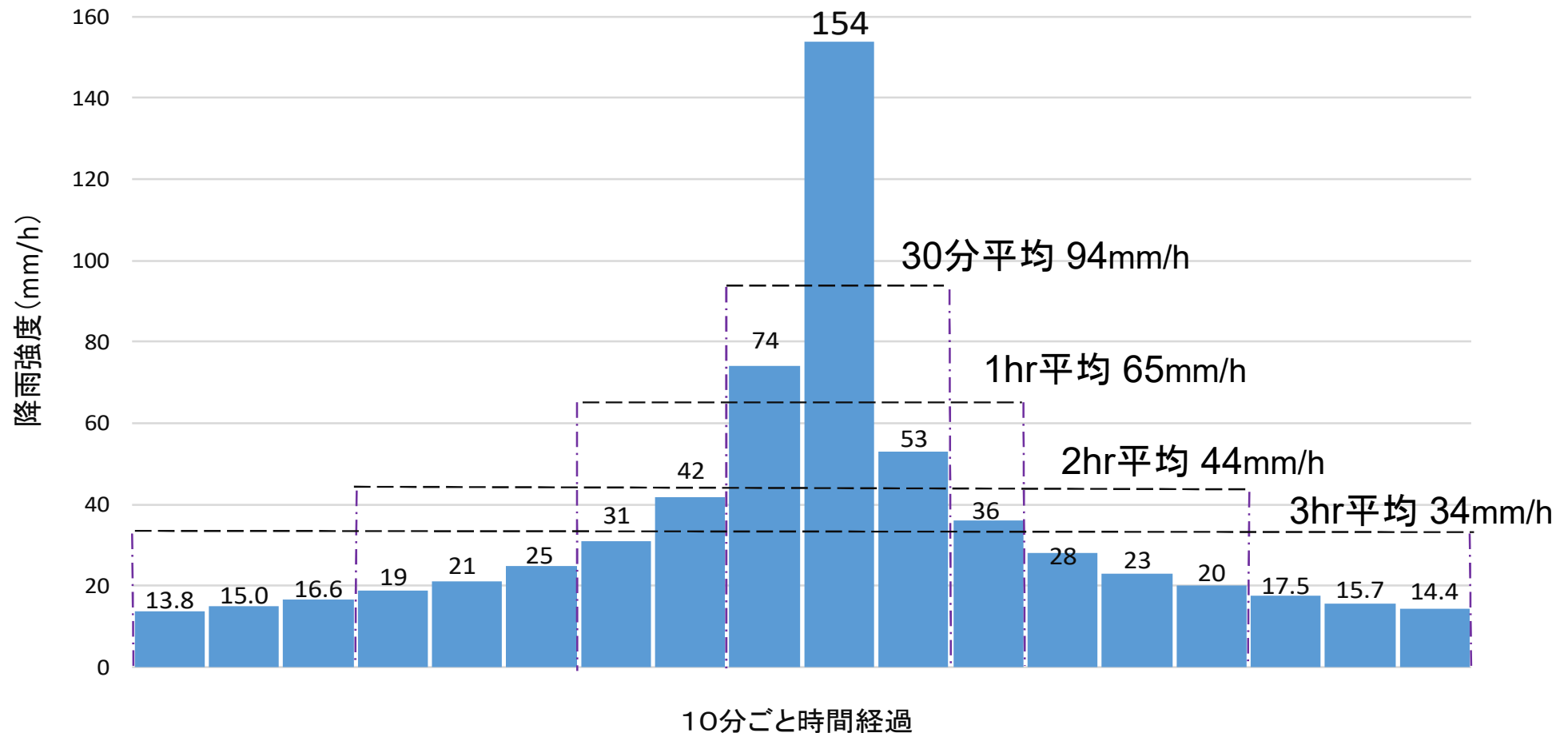
(x を超える降雨が、長い期間を平均すると5年に1回の割合で起こる)

確率分布に Gumbel分布、対数正規分布等を当てはめ、
計算により確率年に応じた x を出す。

降雨強度曲線作成のため、必要なDurationについて、同様に算出。

(参考) 降雨強度曲線から作る 降雨波形(ハイトグラフ)

(頁19) 10年確率 $I = 1205 / (t^{2/3} + 3.18)$ から作成の降雨波形例(中央集中型のケース)



(上図の例について) 合理式では、計画降雨が1時間平均65mm/hでも、
集水域の流達時間が10分間の地点には154mm/hを適用する。
(1時間一定強度ではない。)

最大計画雨水流出量の算定実務フロー 設計指針 図3.4.1

