

雨水流出の基本

～空間と時間、流達時間等を考える～

(公社)全国上下水道コンサルタント協会
技術・研修委員長
オリジナル設計(株)
高島 英二郎

発表の流れ

- 雨水流出とは
- 「降雨量」と「降雨強度」 降雨強度式
- 合理式 流達時間
- 都賀川(神戸市)の事例
- 流量測定的重要性

内容は私見を含みます

雨水流出とは

- 降雨 ⇒ 流域・排水区 ⇒ 流量
[流出モデル]
- 表面流出、中間流出、地下水流出
下水道では、ほぼ表面流出
- 流出モデル（河川砂防技術基準 調査編 より）
集中型：対象地点の上流の流出過程を流域全体で平均化する
モデル（合理式等）
分布型：降雨時の時空間観測データを取り込み、水文量の
時空間分布を計算できるような構造のモデル

汚水と雨水は大きく違う

- 汚水

人工的 流量変動は雨水に比べ安定

建物 ⇒ 排水設備 ⇒ マス ⇒ 取付管 ⇒ 公共下水道に直接接続

- 雨水

自然現象 時間変動不規則 確率は低くても大流量が発生
面全体から発生

公共下水道への流入形態は様々

敷地(屋根、舗装、裸地、緑地等様々) ⇒ 道路経由 など

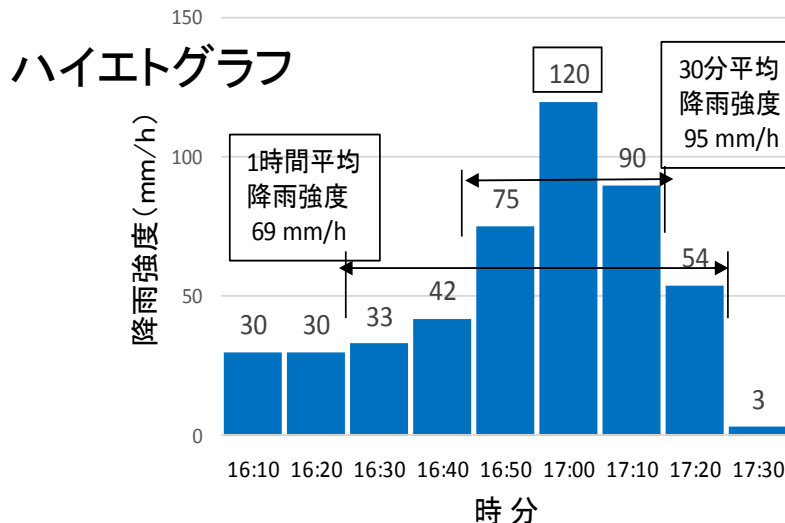
「降雨量」と「降雨強度」は異なる

- 気象観測値は、「降雨量」: mm

観測時刻前のある継続時間(10分間・1時間・1日など)における総量
継続時間と降雨量から、

- 「降雨強度」: mm/hに換算。その降雨が1時間続いたとした値 (率)

(例) 10分間降雨量20mm $\Rightarrow$ $20\text{mm} / (10/60)\text{h} \Rightarrow$ 10分間の降雨強度120 mm/h
1時間降雨量69mm $\Rightarrow$ 1時間の降雨強度69 mm/h (1時間では両者同じ値)

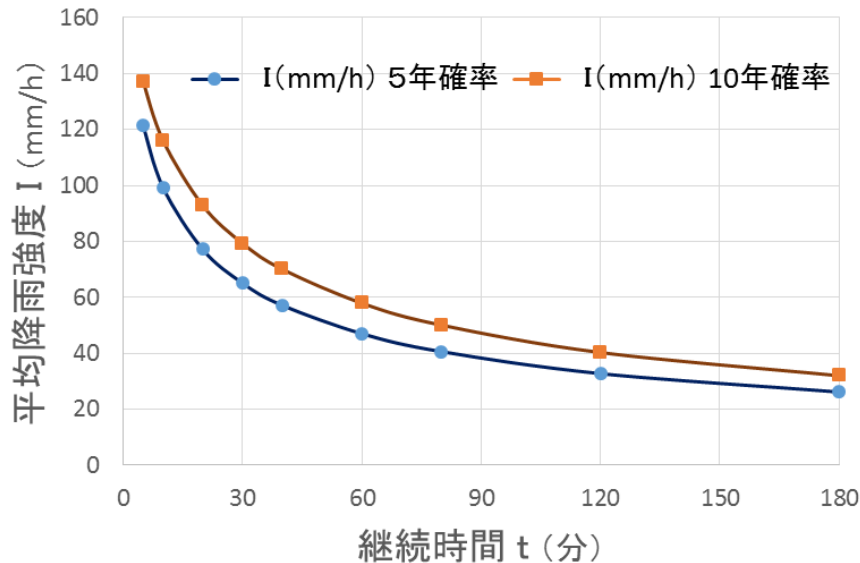


降雨強度mm/hに換算すれば、異なる継続時間どうして強度の比較ができる

- ピークを中心に継続時間を長くとるほど、平均降雨強度は小さくなる特性
 $\Rightarrow$ 「降雨強度式」は、この特性を利用して降雨の時間分布を表現。

降雨強度式

- 降雨強度式：継続時間(分)と〇年確率 降雨強度(mm/h)の関係



(Y市の例)

降雨強度式

10年確率 $I = 1452 / (t^{0.70} + 7.5)$

5年確率 $I = 880 / (t^{0.65} + 4.4)$

- 降雨強度 I mm/h $\longrightarrow$ 流出量 (flow rate) m^3/s
変換

下水道の場合 A (排水区面積) を (ha) $\rightarrow 1/360 \cdot C \cdot I \cdot A$

河川の場合 A (流域面積) を (km^2) $\rightarrow 1/3.6$

合理式（と実験式）

- 合理式 $Q = 1/360 C \cdot I \cdot A$

Q: 雨水流出量 (m^3/s)

C: 流出係数

I: 流達時間内の平均降雨強度 (mm/h) ←← 降雨強度式 or
ハイトグラフ

A: 排水(流域)面積 (ha)

当該地域の降雨強度式があればピーク流出量を簡便に計算。

- 実験式 $Q' = 1/360 C' \cdot R \cdot A \cdot \sqrt[n]{S/A}$ S: 地表勾配

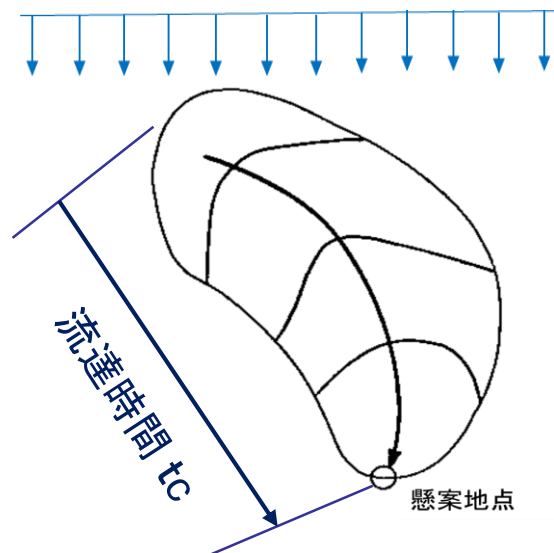
R: 1時間の降雨強度 (=1時間降雨量)

実験式では、排水区の大きさ等による流達時間の違いを考慮せず、
1時間強度のみを使用。

外国の特定地域の雨水流出観測によって作られたもの。

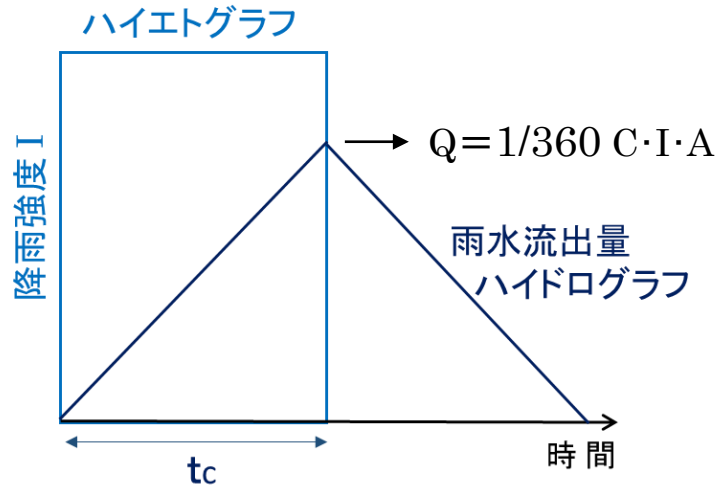
流達時間とは

- 排水区において、懸案地点（流出量算定地点）にとって時間的最遠点に降った雨が、懸案地点に流達するまでにかかる時間。
- 言い換えると、雨水が排水区全体から懸案地点に集中するためにかかる時間。 英語ではtime of concentration (t_c)
- 排水区の特徴（奥行、勾配、粗度、水路状況など）を流達時間に集約。



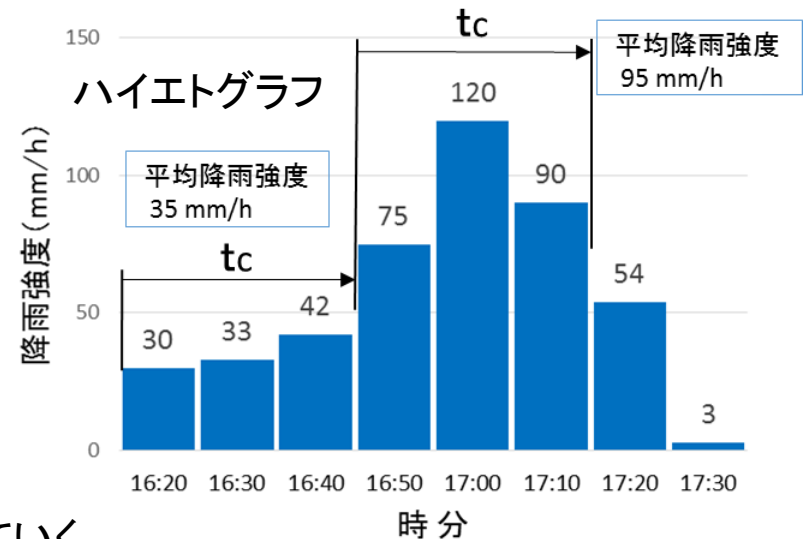
合理式の説明

時間的一定降雨を t_c の間与え、
均等な排水区条件
→三角形のハイドログラフを形成 で説明



(Q上昇) 雨水が集まるエリアが下流から上流に広がっていく。
雨が t_c の間降り続くと、排水区全体から雨水が集中。
(Q下降) 降雨が止んでも、最遠点の雨水が流れてくるまで、徐々に減少。

実際の降雨は時間変動するため、 t_c で平均
 $t_c = 30$ 分の場合



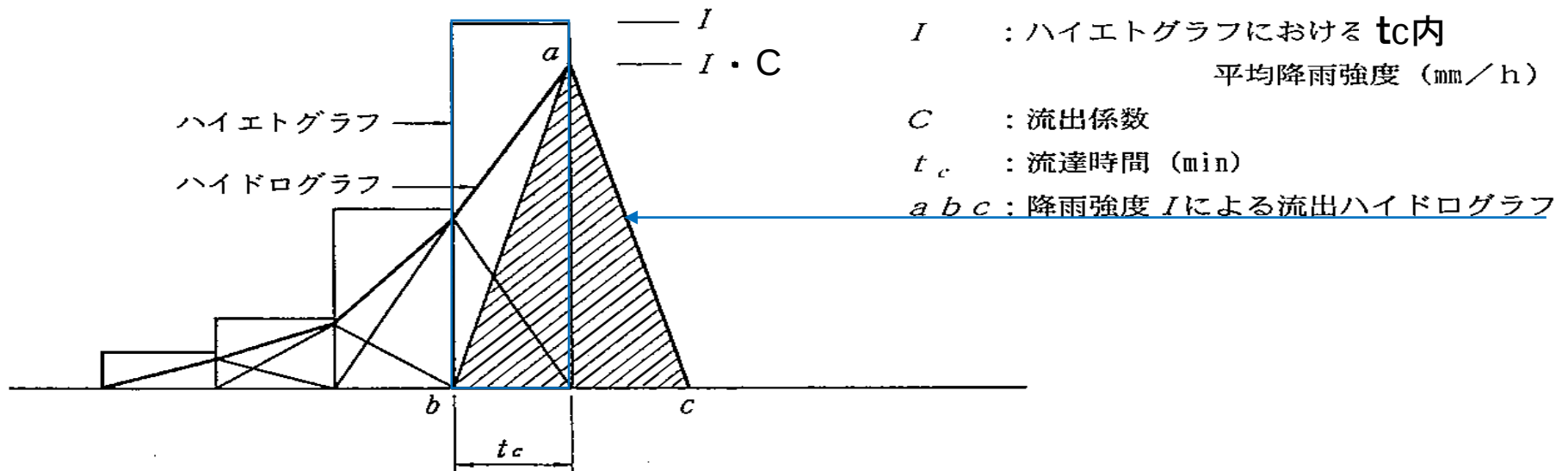
排水区全体から流達時間をかけて降雨が集中
その流達時間内の降雨強度を平均する → 合理式の原理

合理式合成法(ハイエトグラフからハイドログラフを作成)

- 合理式合成法 流達時間ごとに平均降雨強度を設定

→それぞれで三角形のハイドログラフ →合成して全体ハイドログラフ作成

計画設計指針(2009)前編p.179



(補足) 一般的に「合理式」は、計画最大流出量を算出する式

降雨強度式(〇年確率の計画最大降雨を出す式)を使ってIを出す

アメリカ土木学会による合理式の仮定

「Design and Construction of Urban Stormwater Management Systems」

(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)ピーク流出量の再現期間(確率年)は、平均降雨強度の再現期間と同じ。

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、排水区的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.

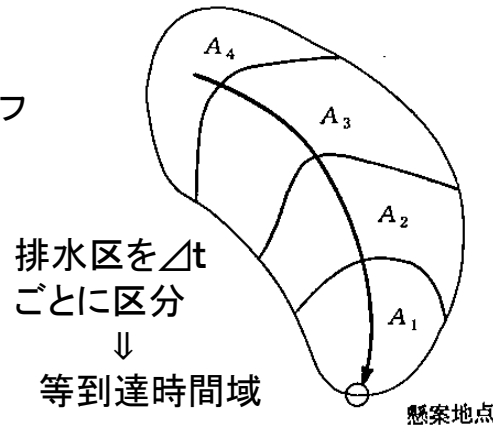
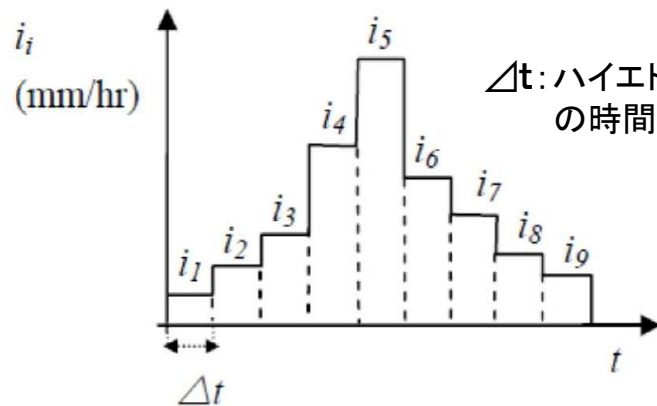
(d)合理式中のA(面積)は、計画地点の上流域全体でありうるとともに、直接繋がる不浸透区域のような、流域の一部区域のこともある。

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.

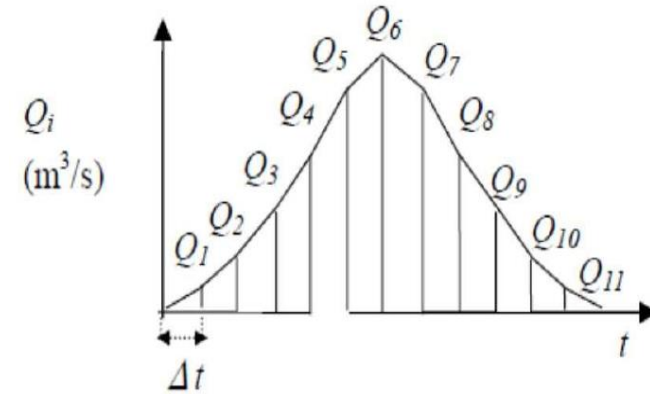
(補足)タイムエリア法によるハイドログラフ算出

- ・計画設計指針 前編p.180
- ・流出解析モデル利活用マニュアル(下水道機構)p.41

A : Δt ごとの等到達時間域別面積 (ha)
 n : 等到達時間域の数 (図参11.2)



流出ハイドログラフ



タイムエリア法の模式図

Q 流出量の変化(A1~A4からの流出の重なり)					Δt ごとの有効降雨強度			
					t6	t7	t8	t9
			t5	$I_6 \times A_1$	$I_6 \times A_2$	$I_6 \times A_3$	$I_6 \times A_4$	I_6
		t4	$I_5 \times A_1$	$I_5 \times A_2$	$I_5 \times A_3$	$I_5 \times A_4$		I_5
	t3	$I_4 \times A_1$	$I_4 \times A_2$	$I_4 \times A_3$	$I_4 \times A_4$			I_4
	t2	$I_3 \times A_1$	$I_3 \times A_2$	$I_3 \times A_3$	$I_3 \times A_4$			I_3
t1	$I_2 \times A_1$	$I_2 \times A_2$	$I_2 \times A_3$	$I_2 \times A_4$				I_2
$I_1 \times A_1$	$I_1 \times A_2$	$I_1 \times A_3$	$I_1 \times A_4$					I_1
流出量								
A 1 A 2 A 3 A 4 (Δt ごとの等到達時間域)								
排水区域								

高島: 合理式等の再認識を通じた雨水流出に関する基本的考察, 下水道協会誌 2016年4月

(補足)タイムエリア法・合理式合成法・合理式の関係

[降雨強度の与え方]

[面積]

タイムエリア法→ ハイエトグラフ Δt ごと

$A_1 \sim n$ (排水区を n 分割)

合理式合成法→ 流達時間ごとに平均

排水区を1つの面

「合理式」→ピーク(計画最大)流出量の算定

○年確率 降雨強度式を使う

- いずれも雨水流出の集中を面的に表現、流達時間の概念を用い、原理は同じ。

(タイムエリア法について例えば)

$t_c = 30$ 分、 $\Delta t = 10$ 分とすると、等到達時間域 A_i は3つに。

$A_1 = A_2 = A_3 = A/3$ の場合、

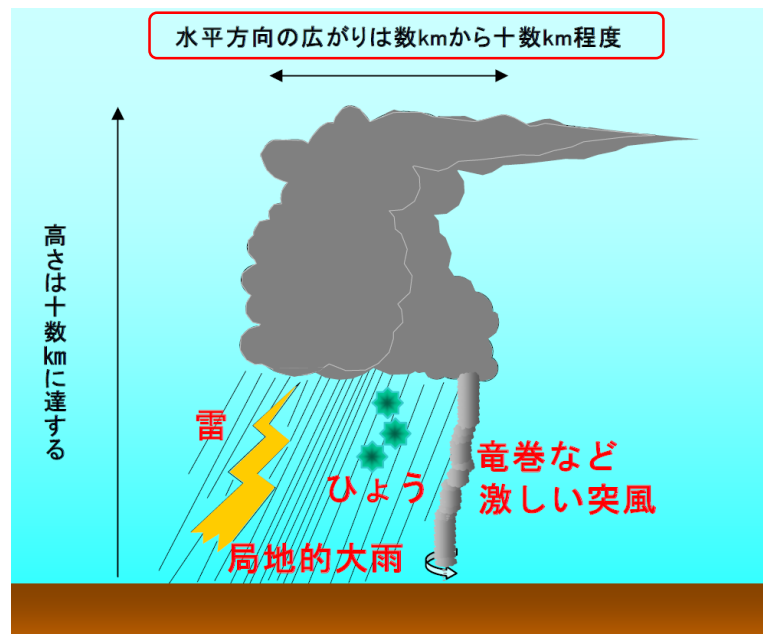
$I_1 \cdot A/3 + I_2 \cdot A/3 + I_3 \cdot A/3 = (I_1 + I_2 + I_3)/3 \times A \Rightarrow$ 合理式と同じ

流達時間内降雨強度の平均

降雨の空間・時間分布について

◆降雨の空間分布について

気象庁：局地的大雨から
身を守るために



(めやす) 流域面積 2km^2 以上は河川、 2km^2 未満は下水道 (S48建設省)

⇒ 合理式で、降雨の空間分布を一様と扱うことは、河川流域より小さい下水道排水区では許容しやすい。

◆降雨の時間分布について

合理式においても、降雨強度式等を使うことで、時間分布は考慮。

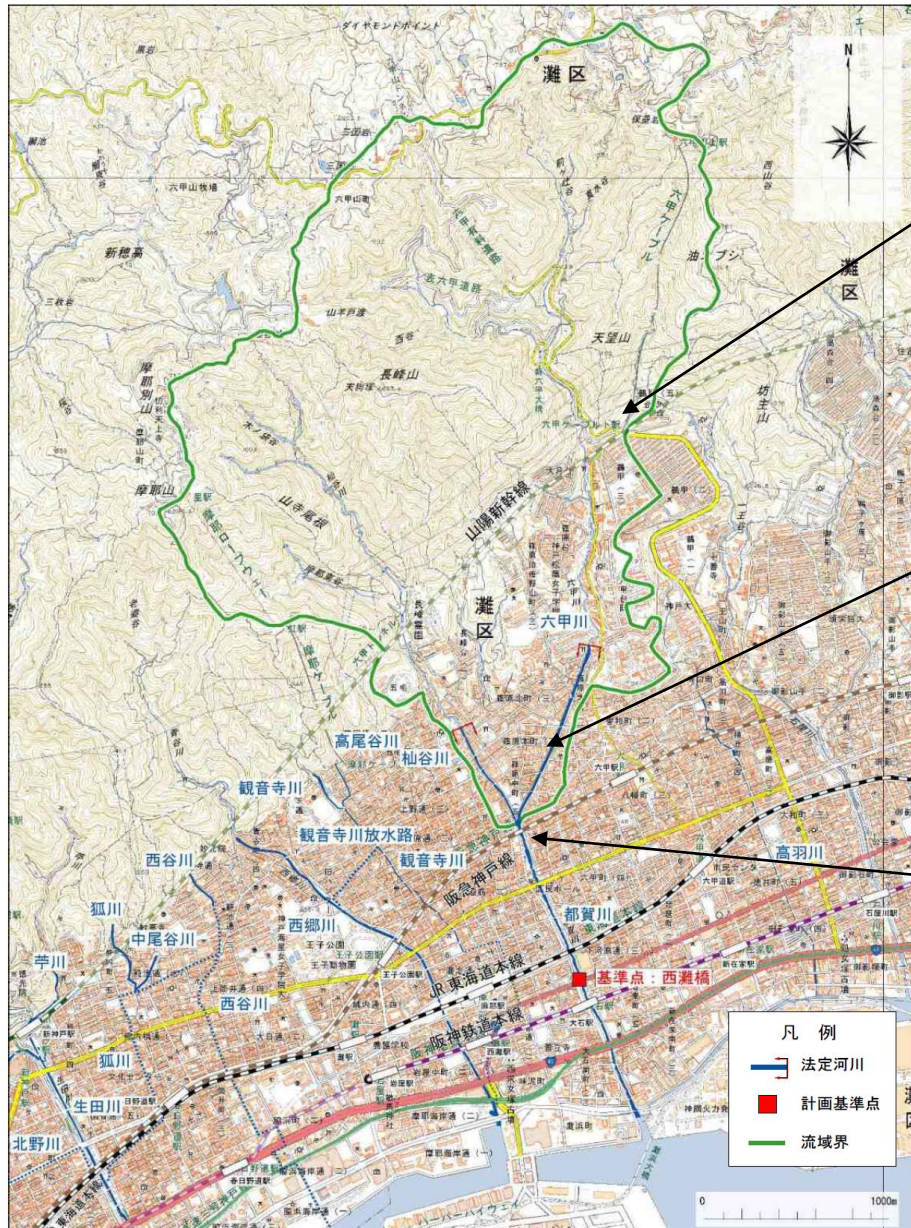
都賀川(とががわ)事例から考察



都賀川水難事故
神戸市灘区
2008年7月28日

川を利用していた市民・学童が急激な出水により流され、5名の人命が失われた。
ほかに、52名が自力避難または救助された。

都賀川流域

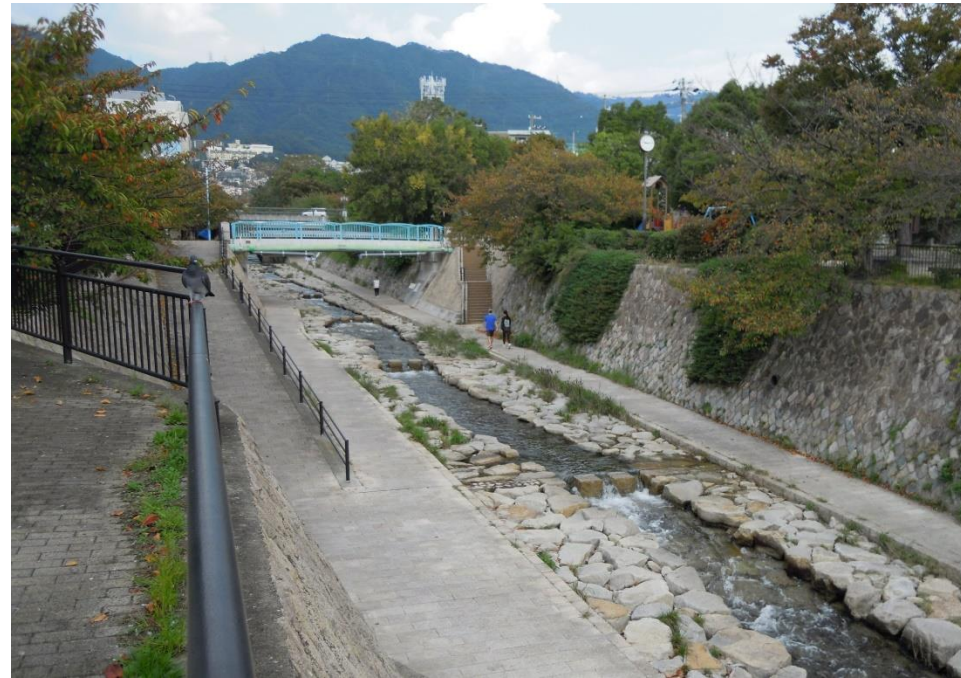


六甲ケーブル
下 駅



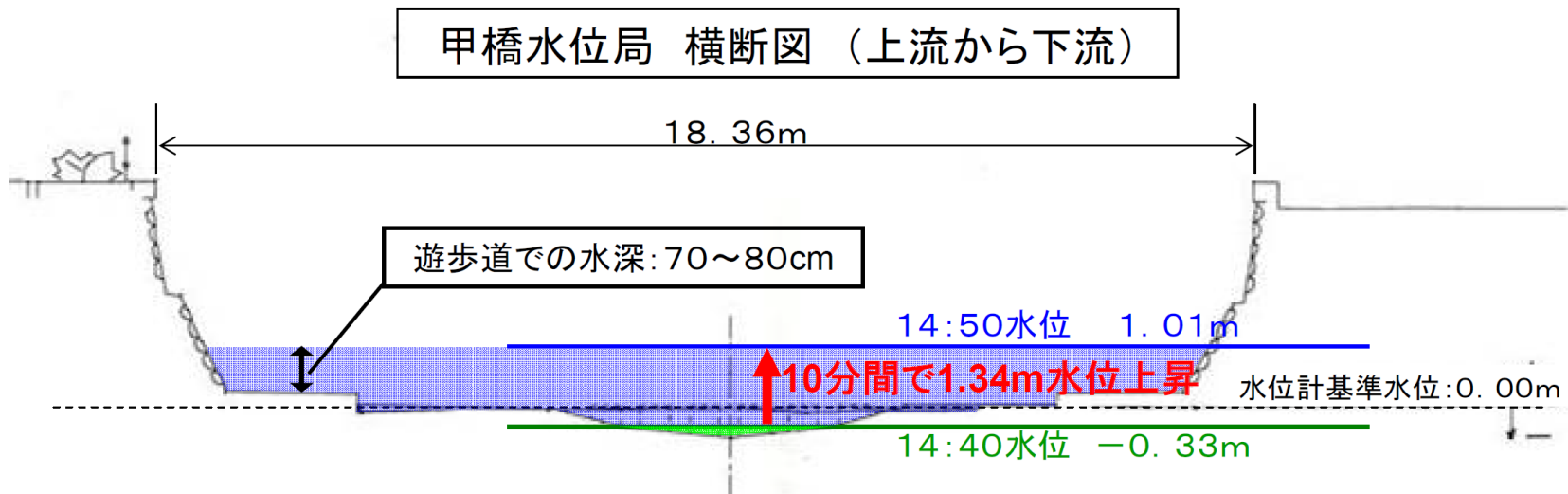
甲橋
(水位
・カメラ
観測
箇所)

都賀川下流の親水整備



2018年10月撮影

都賀川甲橋 水位上昇(2008年7月28日)



出典: 兵庫県資料

土木学会 都賀川水難事故調査団 報告(1)

- 市街地には雨水幹線網が整備され、都賀川に横流入する。
- 急激な水位上昇時、山地からの流出はほとんど無かった。
(それまで晴天が続いていたため地下に浸透)
- 従って、今回の出水は、突発的で急激な降雨が雨水幹線の排水域に降ったために生じた。
- ピーク流量は $37\text{m}^3/\text{s}$ (ビデオ映像解析から)

土木学会 都賀川水難事故調査団 報告(2)

- 最大10分雨量は24mm(降雨強度144mm/h)で、神戸地点 観測史上3位と4位の間。
- 最大1時間雨量は44mmで、神戸地点 10位に比べかなり小さい。

神戸地点	観測史上						
(mm)	1位	2位	3位	4位			10位
10分間降雨量	36.5	28.0	<u>24.5</u>	<u>23.5</u>	・	・	21.0
1時間降雨量	87.7	75.8	61.5	60.8	・	・	<u>50.3</u>

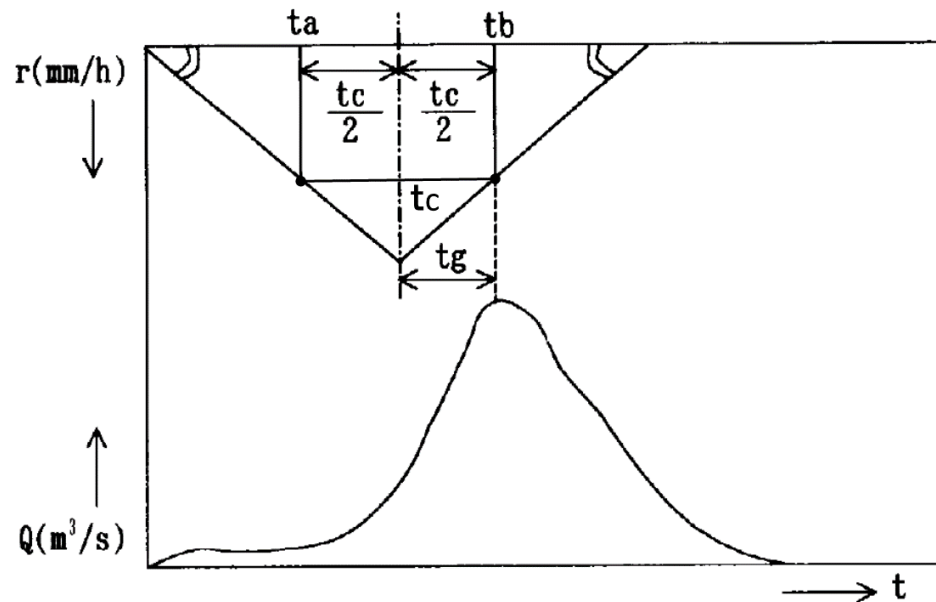
⇒ 流達時間が短い流域の場合、1時間降雨量では、現象を適切に表現できない。

実測ハイドログラフとハイエトグラフから t_c を推定

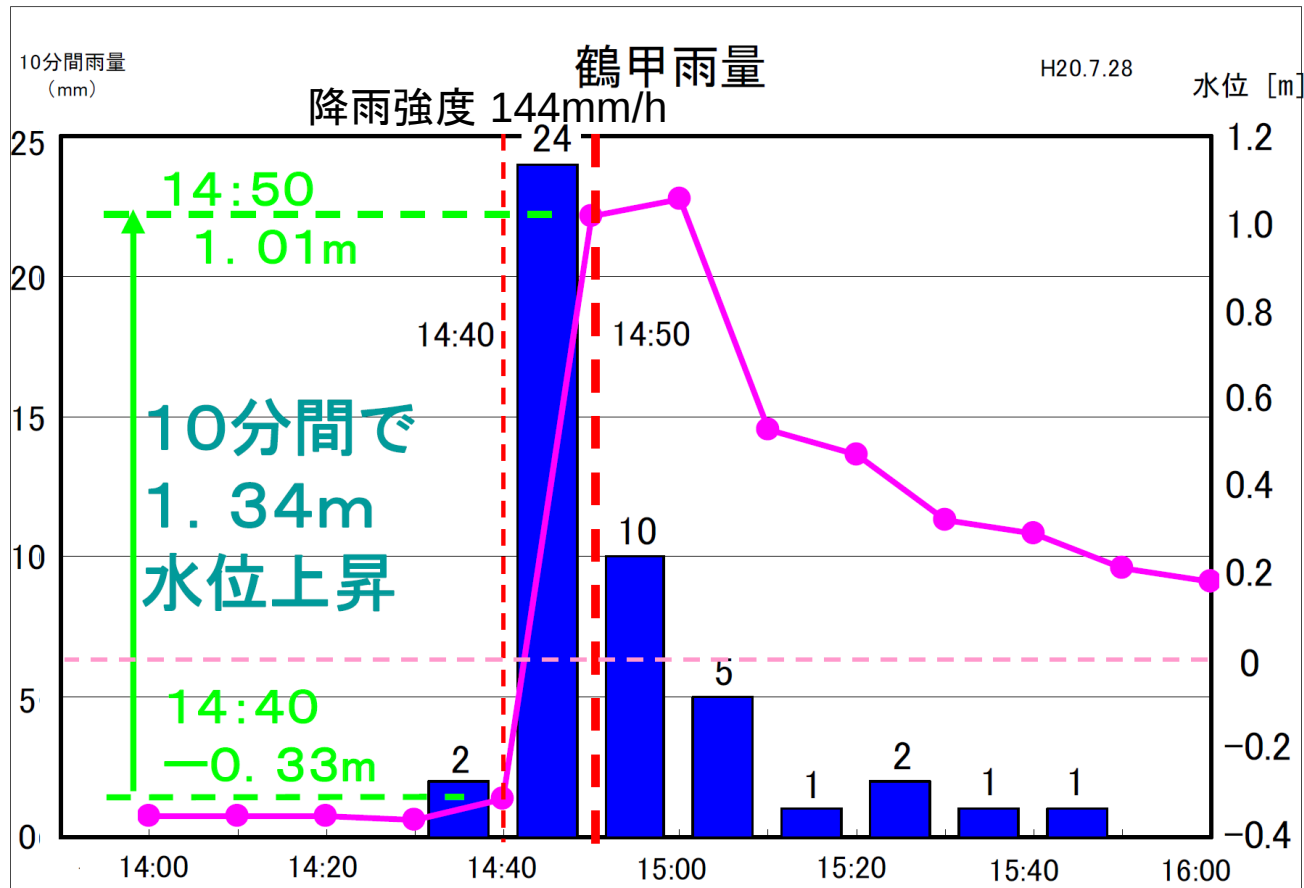
[中小河川計画の手引き（国土技術研究センターHPで公開）]

降雨ピークと流出ピークの時差 $t_g \Rightarrow$ 流達時間 $t_c = 2t_g$

流出量ピークは、その発生時刻以前 t_c 内の平均降雨強度が最も大きい時間帯（継続時間）の降雨が流達（集中）することによって生成。（合理式の原理）



都賀川における雨量と水位の変化（2008年7月28日）



14:50には
流量ピークに
(映像からも
推定)

出典: 兵庫県資料

市街地部の流達時間は10分間と解釈

流域内の市街地面積 133ha

合理式 $Q = 1/360 \cdot CIA = 1/360 \times 0.7 \times 144\text{mm/h} \times 133\text{ha} = 37 \text{ m}^3/\text{s}$ 土木学会推算値

(比較参考として1時間降雨強度を使うと $Q = 1/360 \times 0.7 \times 44\text{mm/h} \times 133\text{ha} = 11 \text{ m}^3/\text{s}$)

都賀川で講じられた安全対策(1)



手すり等



講じられた安全対策(2)

- 神戸市河川モニタリングカメラシステム ホームページ

過去の河川増水映像の記録

都賀川 甲橋(2008年7月28日)も

「過去に神戸市内で起きた急激な河川増水の様子を早送りで表示しています。映像からは、普段は穏やかな河川が豪雨によって一変する様子がわかります。大雨が予想されたり、雨が降り始めたりしたら、河川には絶対近づかないようにしましょう。」

親水利用とリスクの共存

水難事故で亡くなられた方々のご冥福をお祈りします

おわりに(1)

- 実際の雨水流出 →敷地からの様々な流れ、地表の凹凸、側溝・管渠等の様々な流れ →ミクロで見れば複雑多様
- 合理式はマクロ的なモデル(流下過程の水理現象は包含)。
最低限のパラメータで表現。
- 流出係数・流達時間 →降雨強度の大きさ・先行降雨条件によっても影響される
- 合理式の内容を理解することは基本。
- 合理式では表現できないこともたくさんある。
- 流出解析モデル(不定流)で既存ストックを評価することは望ましい。

おわりに(2) 流量測定的重要性

- 実際に大雨が降った場合の雨水流出量(流量)を測定することは意味が大きい。
- 流出解析モデルのキャリブレーション
- 既存施設の実際の能力を評価
- 満管流の測定や、分流、合流、越流、オリフィスなど、流量制御が計画通り行われているかどうかの検証
- 水位の1点計測だけで流量を算出することは、実際の流れは等流とは限らないため誤差が出る ⇒水位計と流速計を組合わせた計測
- 計画規模に近い大雨(いつ起きるか分からない)時のデータが取れるよう、管渠の主要地点に自動計測機器を設置 ⇒データを蓄積し分析

⇒ 雨水管理の発展へ

ご清聴ありがとうございました

