

(16) ファジィ推論による降雨類型化システム

Rainfall Identification System Using Fuzzy Inference

平岡 憲人*, 市川 新*

HIRAOKA Norito*, ICHIKAWA Arata*

ABSTRACT; This paper presents a system that identifies any hyetograph as 25 representative rainfalls (Raintypes) using Fuzzy inference. The preparation of identification is consisted of two parts. (1) We define Fuzzy sets of Rainfall Volume, Rainfall Duration, Peak Duration and Peak duration for each Raintype. (2) We calculate the value of indexes (RV, RD, PI and PD) of input hyetograph using filters. We calculate the integrated membership grade for a Raintype by letting these values of indexes substitute into the membership functions of the four fuzzy sets of the Raintype respectively to get the membership grade for the four fuzzy sets and linear-connecting these membership grades. Concerning the coefficients of linear-connection, we change them according to the characteristics of input-hyetograph. We repeat the above calculation for all Raintypes. The Raintype of the biggest integrated membership grade for Raintype is defined as the Raintype to which the input hyetograph belongs. We tested this system with real rainfalls in a French local authority and get positive results.

KEYWORDS; Real-time sewer control system, Rainfall classification, Fuzzy inference, Expert system

1. はじめに

フランス・パリ近郊のSeine-Saint-Denis県 (SSD) は広域下水道リアルタイム制御システムの実用化にとりくんできた (Department of the Seine-Saint-Denis, 1984)。SSDでは、降雨実測値および2時間先までの降雨予測値をもとに、合計100箇所を超えるポンプ場や滞水池の制御戦略を決定しなければならない。任意の降雨に対して制御戦略をたてるのが困難なため、あらかじめ25の代表降雨に対応した制御戦略を用意し、降雨によってその戦略を使い分けている (Delattre J.M., 1993)。降雨を代表降雨に類型化するプロセスは、降雨の特性やシステムの制御特性を熟知した実務者が経験的にやっている。そのため、負荷が特定の実務者に集中する問題がある。

本研究では、上述の実務者の経験を、任意の降雨の特徴量をもとに2段のファジィ推論で各代表降雨への帰属度を求めることでシステム化した。このシステムをSSDの実降雨に適用し、実務者による類型結果と整合するか検討をおこなっている。

2. 対象システム

2.1 対象地域とその降雨特性

Seine-Saint-Denis 県はFig.1に示すようにフランス北部パリ近郊にある。面積は235km²でほぼ大阪市の大きさに匹敵する。地形は平坦で、排水は自然流下によっている。流域はFig.1中の丸印を中心とした5つのゾーンに大別される。但し、管路がネットワーク状に連結されているため各ゾーンは独立ではない。流域には100を超えるポンプ場やサイホンがあり流路の変更や滞水池の運用に用いられている

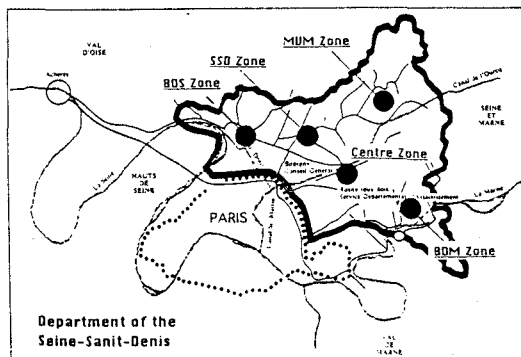


Fig. 1 Department of the Seine-Saint-Denis

*東京大学工学部都市工学科 (Dept. of Urban Engineering, Fcty. of Engineering, Univ. of Tokyo)

(Delattre J.M., 1993)。

気候は西岸海洋性気候である。モンスーンはなく、季節に関わりなく降雨がある。雪の影響は無視できる。降雨は前線性降雨と雷雨が混在している。年間降雨量は約500mm、年間降雨時間約500時間である。Fig.2にSSDにおける最近17年間の主要降雨(総降雨量5mm以上)の分布を示した。日本に比べて降雨量が少なくかつ弱いことがわかる。

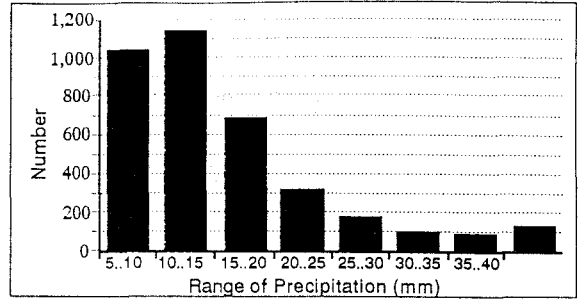


Fig. 2 Rainfall Statistics in SSD

2.2 降雨類型化システムの位置づけ

SSDではFig.3の流れで制御する。降雨データは、観測降雨については5分単位、予測降雨については2時間先まで15分単位で与えられるハイトグラフである。このハイトグラフをFig.1のゾーン毎に、Fig.4の25の代表降雨(Raintype)に類型化し、代表降雨に対応した制御戦略を得て、その戦略をもとにポンプ場の制御装置などに遠隔指令している(Delattre J.M., 1993)。

本研究では、任意のハイトグラフを25の代表降雨に類型化するシステムを開発した。Fig.3では太線で囲んだ部分にあたる。

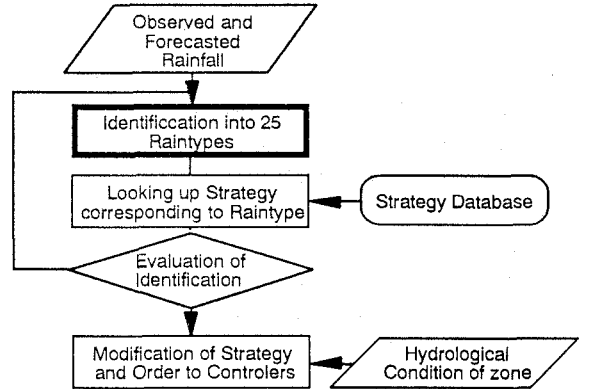


Fig.3 Control Flow of System in SSD

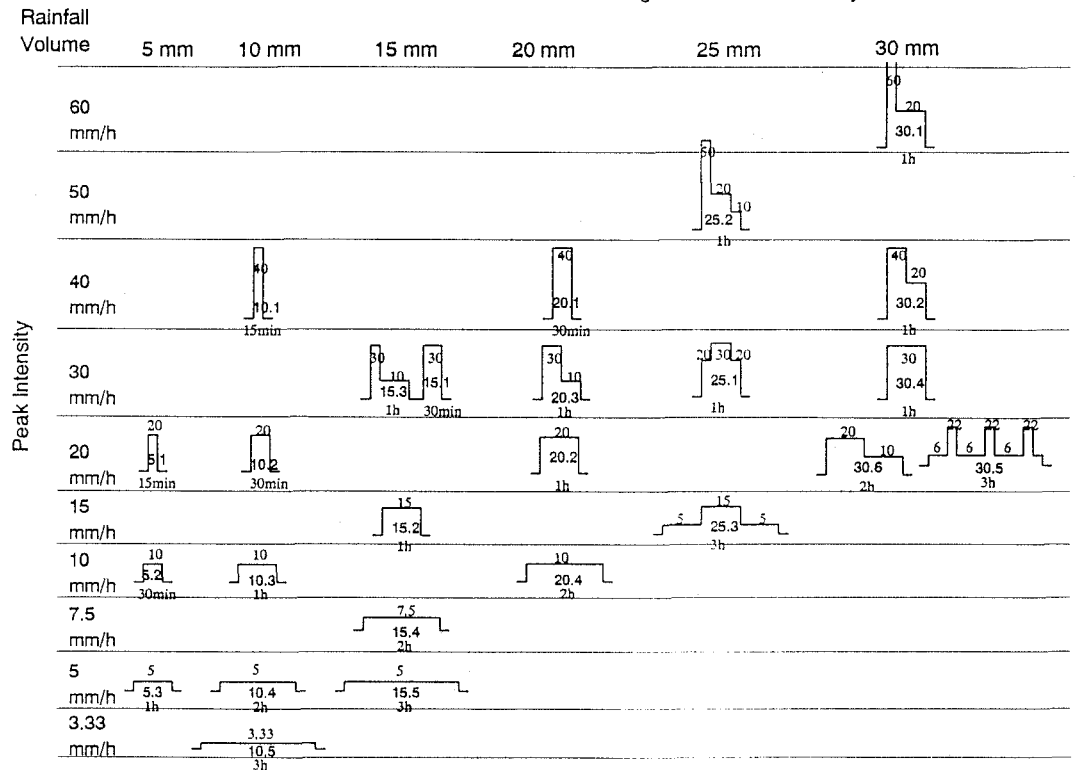


Fig. 4 Raintypes

3. 降雨類型化システムのアーキテクチャ

3.1 代表降雨のファジィベクトル

各代表降雨に対応したファジィベクトルを次の手順で定める。

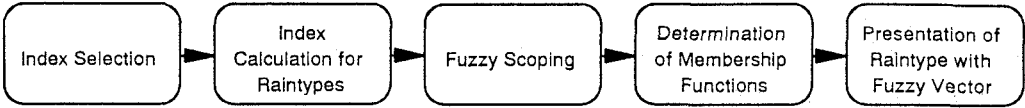


Fig. 5 Flow of Definition of Fuzzy Vector

(1) 指標選択

SSDにおける代表降雨設定の基本的な考え方に基づき、ここでは、降雨の特徴を降雨量(Rainfall Volume, RV)、降雨継続時間(Rainfall Duration, RD)、ピーク強度(Peak Intensity, PI)、ピーク継続時間(Peak Duration, PD)の4つの指標であらわすことにした。

(2) 代表降雨指標計算

それぞれの代表降雨について、各指標の値を求める。代表降雨の形は単純であり、容易に計算できる。例として代表降雨30.6の場合をFig.6に示す。計算結果はTable 1の通り。

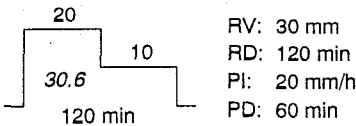


Fig. 6 Index value of Raintype, case of Raintype 30.6

Table 1 Index value of Raintype

Raintype	RV	RD	PI	PD	Raintype	RV	RD	PI	PD	Raintype	RV	RD	PI	PD
5.1	5	15	20	15	15.1	15	30	30	30	25.1	25	60	30	30
5.2	5	30	10	30	15.2	15	60	15	60	25.2	25	60	50	15
5.3	5	60	5	60	15.3	15	60	30	15	25.3	25	180	15	60
10.1	10	15	40	15	15.4	15	120	7.5	120	30.1	30	60	60	15
10.2	10	30	20	30	15.5	15	180	5	180	30.2	30	60	40	30
10.3	10	60	10	60	20.1	20	30	40	30	30.4	30	60	30	60
10.4	10	120	5	120	20.2	20	60	20	60	30.5	30	180	22	15
10.5	10	180	3.3	180	20.3	20	60	30	30	30.6	30	120	20	60
					20.4	20	120	10	120					

(3) 定義域のファジィ分割

(2)で求めた代表降雨の指標の値は、Table 2に示す離散的な値に限られる。この数値を中心にそれぞれの指標の定義域をファジィ分割し、ファジィ集合を作成する。ピーク強度の22mm/hについては、20mm/hで代用した。

Table 2 Distribution of value of indexes

RV: 5, 10, 15, 20, 25, 30 (mm)
RD: 15, 30, 60, 120, 180 (min)
PI: 3.3, 5, 7.5, 10, 15, 20, 22, 30, 40, 50, 60 (mm/h)
PD: 15, 30, 60, 120, 180 (min)

(4) メンバーシップ関数決定

それぞれのファジィ集合はFig.7のメンバーシップ関数で定義した。類型化後におこなう洪水制御をより安全にするため一部のメンバーシップ関数は非対称にした。なぜなら7mmの降雨を5mmと認識し操作する危険を避けるためである。また、帰属度の合計が1にならない領域がある。なお、ファジィ集合を表す場合、集合名を下線つきで記述することにする。

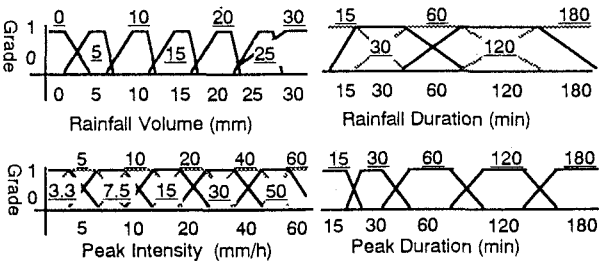


Fig. 7 Membership Functions

(5) 代表降雨のファジィベクトル表記

(2)で計算した代表降雨の指標値と(4)で定義したファジィ集合を対応させる。簡単にベクトル表記する。例えば、代表降雨30.6の場合、

$$RT\ 30.6 = (RV, RD, PI, PD) \\ = (30, 120, 20, 60)$$

と表現する。これを代表降雨のファジィベクトルと呼ぶ。代表降雨に対して、各指標のファジィ集合への帰属度は(1,1,1,1)である。

全ての代表降雨についてこのような操作を行いファジィベクトルを得る。

3.2 代表降雨への総括帰属度

ファジィベクトルと任意のハイエトグラフ（入力ハイエトグラフ）の指標の値を照合し、個々の帰属度を線形結合して、各代表降雨への総括帰属度を求める。

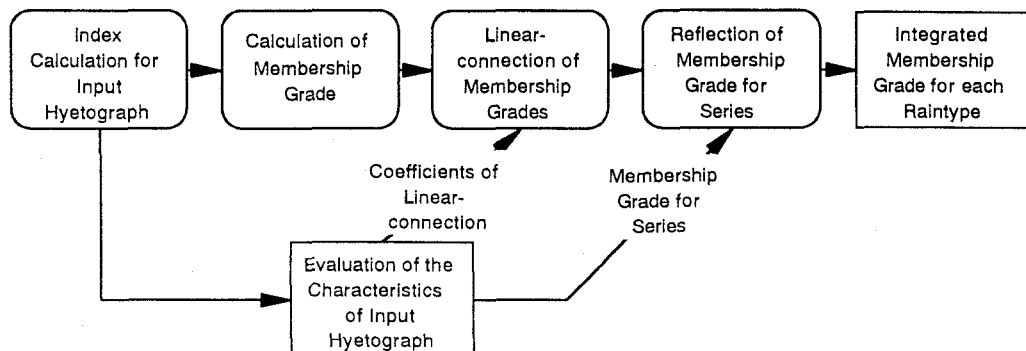


Fig. 8 Flow of Calculation of Integrated Membership Grade for Raintype

(1) 入力ハイエトグラフの指標計算

入力ハイエトグラフの4つの指標の値を、以下に述べるフィルターを用いて計算する。RVについては特別なフィルターを用いず入力ハイエトグラフの総降雨量で与える。RDについては、2.5mm/h 以下の降雨を無視しそれ以上の降雨強度が連続する時間をRD_{2.5}とする(Fig.9)。次にFig.10の斜線部分の降雨量がRVの55%になる降雨強度を求め、それ以上の降雨強度が連続する時間をRD_{55%}とする。そして、この2値の平均をRDとする。但し、RD_{2.5}<RD_{55%}の時はRD_{2.5}をRDとする。PIについては、15分間の最高降雨強度で与える。これは代表降雨の最小時間単位が15分であることによる。PDについては、10分間の降雨強度が0.7PI以上の区間を抽出しその時間で与える。

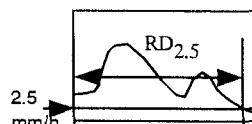


Fig. 9 RD filter 1

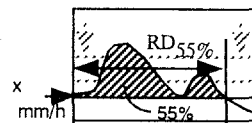


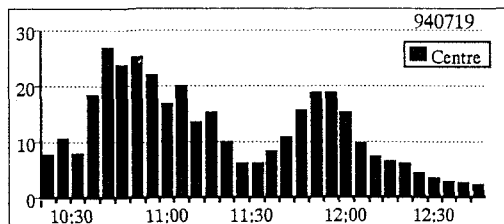
Fig. 10 RD filter 2

(2) 帰属度ベクトル計算

(1)で求めた入力降雨の指標値を代表降雨のファジィベクトルに代入し、各ファジィ集合への帰属度を求める。Fig.11の入力ハイエトグラフを例にすると、代表降雨30.6について、Fig.11の様に帰属度を得る。帰属度は

$$(RV30, RD120, PI20, PD60) = (1, 1, 0.97, 0)$$

と表現し、これを代表降雨に対する帰属度ベクトルと呼ぶ。



RV: 30.2 RD: 132.5 PI: 25.3 PD: 35

Fig. 11 Example of Input Hyetograph

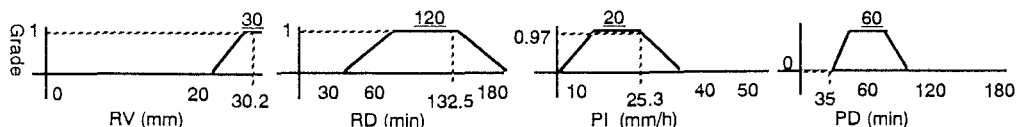


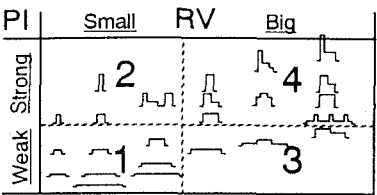
Fig. 12 Calculation of Membership Grade

(3) 入力降雨の性質判定

(2)の例の場合、RVに着目すれば、入力ハイエトグラフは代表降雨30.6と一致している。しかし、PDに着目すれば、まったく一致していない。しかし総合的に見れば代表降雨30.6に近いとはいえそうである。この例のように入力ハイエトグラフがある代表降雨に帰属しているかしていないかは、4つの指標について総合的に考える必要がある。入力ハイエトグラフの代表降雨への帰属程度を表すため4つの帰属度をなんらかの方法で統合したものを総括帰属度と名付ける。

総括帰属度の計算方法は各帰属度の最小値をとる、代数積をとるなど無数に存在する(寺野他, 1989; 高樟他, 1992)。最小値をとると最小値以外の帰属度が総括帰属度に反映されない。代数積では帰属度0が含まれると総括帰属度が0になってしまう。ここでは、帰属度の線形結合で総括帰属度を求める事にした。さらに、降雨の性質により線形結合の係数を変化させることにした。こうすれば、総括帰属度は各指標を反映し、しかも降雨の性質により指標の重要度を変化させることができる。

具体的には、入力降雨をFig.13, 14 のように降雨量の大小とピークの強弱の組合せで4つのシリーズに分類する。それぞれのシリーズについてTable 3の係数を用いる。



ex) If RV is Big AND PI is Weak
then Series 3

Fig. 13 Evaluation of Input Hyetograph

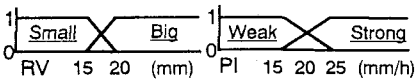


Fig. 14 Membership Functions
for Evaluation

Table 3 Coefficients for Linear-
connection

	RV	RD	PI	PD
	α_1	α_2	α_3	α_4
Series 1	0.5	0.5		
Series 2	0.33		0.33	0.33
Series 3	0.33	0.33	0.33	
Series 4	0.25	0.25	0.25	0.25

(4) 代表降雨への総括帰属度

Table 3 で示した係数を用い、帰属度ベクトルの要素を線形結合することにより、4つのシリーズ別の総括帰属度が求められる。ここで、入力ハイエトグラフは4シリーズのどれかに属している。各シリーズはファジィ表現されている(Fig.13, 14)ので、各シリーズへの帰属度をRV, PI に応じて求めることができる。4シリーズ別の総括帰属度と各シリーズへの帰属度を統合して代表降雨への総括帰属度とする。式で書けば、代表降雨nへの総括帰属度(RTn)は、

$$RTn = \sum z_j (\alpha_{j,1} RVa + \alpha_{j,2} RD b + \alpha_{j,3} PIc + \alpha_{j,4} PDd)$$

z_j : シリーズjへの帰属度
性質判定で用いたファジィ集合への帰属度の代数積
例えば、 $z_3 = RV_{Big} \times PI_{Weak}$

である。このようにすることにより、降雨の性質に応じ自動的に係数を選択することができる。

総括帰属度をすべての代表降雨について求め、そのうちで最大の総括帰属度をもつ代表降雨を入力ハイエトグラフの類型と定義した。

4. 結果と今後の展望

本システムをSSDの実降雨に適用した結果をTable 4に示す。降雨番号930527/BDS、950424/Centreを除くと、総括帰属度の3位までにSSDの実務者により類型化された代表降雨が入っている。実務者に示したところおおむね良好な結果であるとの評価をえたが、次にあげる問題がある。

- ・降雨番号930527/BDSの降雨について、この雨は5.3, 5.2, 5.1の順で類似しているが、結果は逆になっている。RDフィルターを修正することで改善をはかる。
- ・降雨番号950424/Centreの降雨については、より安全側の代表降雨に類型化しているため、問題は少ないものと考えられる。
- ・940719/BDM, 940719/BDM, 940719/MVMの降雨についてはピークの部分の処理が適切でなく、実務

者による類型結果と整合しない。ピークの取り扱いについて再度知識獲得を行う。

- ・シリーズ2の降雨特性をもつ降雨が今回用いた降雨データに含まれていない。追加検証する。
- ・全ての代表降雨に対する総括帰属度の合計が1でなく直感的でない。

以上の問題点を解決するために、より多くの実降雨に適用してゆく予定である。本システムを日本の都市に適用するにあたっては、代表降雨選定を降雨統計に基づき決定し、その代表降雨に対応するメンバーシップ関数および線形結合の係数を決定しなければならない。

Table 4 Results of the Rainfall Identification

Rainfall Number	RV	RD	PI	PD	by SSD	Dominant Series	1st	RT ₁	2nd	RT ₂	3rd	RT ₃	Eval.
930527/MVM	8.3	55	10.3	20	10.3	1	10.3	(0.89)	10.2	(0.78)	15.2	(0.5)	◎
930527/BDS	4.2	10	2.7	35	--	1	5.1	(1)	5.2	(0.72)	5.3	(0.5)	×
930527/Centre	8.4	55	9.2	35	10.3	1	10.3	(0.9)	10.2	(0.78)	10.4	(0.51)	◎
930527/BDM	4.7	45	5.4	20	5.3	1	5.3	(1)	5.2	(1)	15.2	(0.5)	◎
930527/SSD	7.1	55	7.7	25	10.3	1	10.3	(0.68)	10.2	(0.57)	15.2	(0.5)	◎
940719/MVM	15.4	115	12.4	60	15.4	1	15.4	(1)	15.2	(0.79)	15.5	(0.71)	◎
940719/BDS	35.2	115	25.2	75	30.4	4	30.6	(0.98)	30.4	(0.88)	20.2	(0.62)	○
940719/Centre	30.2	132.5	25.3	35	30.6	4	30.6	(0.74)	30.5	(0.67)	30.2	(0.58)	◎
940719/BDM	25.2	105	22.8	30	30.6	4	25.1	(0.87)	30.6	(0.63)	20.3	(0.62)	○
940719/SSD	25.2	132.5	17.8	50	30.6	3	30.6	(0.85)	25.3	(0.84)	30.5	(0.74)	◎
950424/MVM	23.5	122.5	18.5	45	25.3	3	30.6	(0.77)	25.3	(0.6)	30.5	(0.59)	○
950424/BDS	28.5	130	18.3	60	30.6	3	30.6	(0.98)	30.5	(0.83)	20.2	(0.47)	◎
950424/Centre	22.1	137.5	15.4	55	20.4	3	25.3	(0.72)	30.6	(0.57)	30.5	(0.5)	×
950424/BDM	15.7	135	11.0	60	15.4	1	15.4	(1)	15.5	(0.88)	15.2	(0.63)	◎
950424/SSD	22.1	145	15.5	60	25.3	3	25.3	(0.76)	30.6	(0.58)	30.5	(0.55)	◎

◎ SSD's choice is the same as the system's choice

○ SSD's choice is within the system's first three choices

×

参考文献

- Delattre J.M. (1993): *La Gestion des Flux et des Riques en Réseau d'Assainissement: Experience Operationnelle et Perspectives*, Department of the Seine-Saint-Denis
- Delattre J.M. (1993): *Risk Analysis and Real Time Operation of Sewer Systems: Experience from the user's perspective*, 6th ICUSD, Canada
- Department of the Seine-Saint-Denis (1984): *Pour Commencer à Automatiser la Gestion du Réseau d'Assainissement en Seine-Saint-Denis...*, Department of the Seine-Saint-Denis
- 高埴・椎葉・堀 (1992): 水文水資源研究のための AI 技術の利用に関するシンポジウム論文集、水文水資源学会
- 寺野・浅井・菅野 (1989): 応用ファジィシステム入門、オーム社