

混合正規分布による雨天時浸入水の流出成分分離

保坂 成司 中根 進 佐藤 克己
高橋 岩仁 森田 弘昭

要 旨：筆者らは、これまでに AI を用いて時系列の流量データから雨天時浸入水量を推定する手法を構築した。また、推定した雨天時浸入水量を、河川の洪水流量の流出成分を分離する手法の 1 つである勾配急変点法を用いて、表面流出、中間流出、地下水流出に分離する手法を提案している。しかし、勾配急変点法では、雨天時浸入水量の減水側勾配の変化点の特定が難しいことと、RTK (Real Time Kinematic) 法では雨天時浸入水量の流出成分を三角分布で表していることから、本論文では、雨天時浸入水量の時間的な変化の形状を、複数の正規分布が混ざった混合正規分布で表す手法を考案した。なお、各流出成分の分離には混合比を用いた。本手法と勾配急変点法との比較・検討の結果、表面流出割合についてはほぼ同等であり、混合正規分布により雨天時浸入水の流出成分の分離が可能であると結論した。

キーワード：混合正規分布, 混合比, 雨天時浸入水量, 流出成分, 勾配急変点法

1. はじめに

国土交通省が、分流式下水道を採用する地方公共団体を対象に実施した「雨天時浸入水に関するアンケート調査」の結果によると、約 57% の処理区が雨天時浸入水を「維持管理上の問題」と回答¹⁾している。このように、雨天時浸入水は全国的な課題となっており、今後、老朽化の進行などにより、さらに深刻な状況になる前に適切な調査を行い、効果的かつ効率的な対策を講ずる必要がある。

筆者らは、これまでにニューラルネットワークを用いて雨天時浸入水量を推定する手法^{2), 3)}を構築している。既報²⁾では、雨天時浸入水量を独立降雨大、中、小の 3 つのケースについて、河川洪水流量解析の 1 つの勾配急変点法を用い表面流出、中間流出、地下水流出に分離する方法とその結果を示した。

しかし、勾配急変点法は、雨天時浸入水量の減水側勾配の変化点の特定が難しく、流出成分の分離が困難なため、新たな流出成分の分離法を模索した。

本稿では、ニューラルネットワークを用いて抽出した雨天時浸入水量を、複数の正規分布からなる混合正規分布と仮定して、流出成分を分離する手法を検討した。

すなわち、雨天時浸入水量の流出成分を複数の正規分布として分離することにより、浸入水の要因を特定で

きれば、より効果的な雨天時浸入水対策を講ずることができる。

2. 河川洪水流量および雨天時浸入水量の流出成分

(1) 河川洪水流量

河川洪水流量は、図-1 に示すように降雨による流量^{4), 5)}であり、地表面を流れ河川に流入する「表面流出」、地中深く浸透した雨水が河川に流入する「速い中間流出」、地中深く浸透した雨水が河川に流入する「遅い中間流出」および地下水面下の地下水となり河川に流入する「地下水流出」に分けられる。

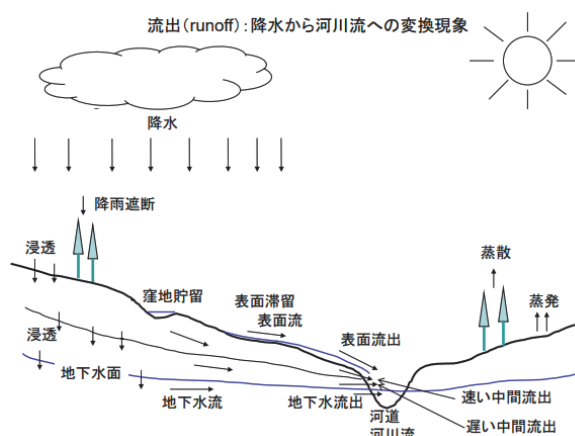


図-1 降水から河川流量への変換⁴⁾

(2) 汚水量と雨天時浸入水量

分流式の下水道の流下下水水量の内訳は、図-2に示すとおりであり、降雨時には誤接合などからの雨水の流入により下水水量が増加することがある。この増加水量を雨天時浸入水量と呼んでいる。

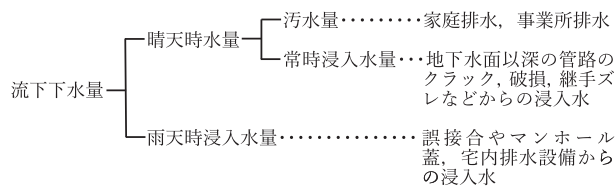


図-2 流下下水水量の内訳

一方、地下水面以深にある管きよの損傷などからの地下水の浸入を常時浸入水といい、下水道施設設計指針と解説⁶⁾では、計画汚水量に、日最大汚水量の10～20%の地下水量を常時浸入水量として見込んでいる。また、ガイドライン¹⁾では、雨天時浸入地下水を、「雨天時の地下水位上昇等に伴い、汚水系統に流入する地下水」と定義している。すなわち計画汚水量に見込んだ日最大汚水量の10～20%の常時浸入水量を超えるものを雨天時浸入地下水と呼んでいる。

分流式下水道管きよを、先の図-1に示す河道に見立てると、雨天時浸入水は河川と同様に次に示す3つの流出成分で構成されと考えられる。

河川という表面流出：誤接合（宅内屋根、池のオーバーフロー（汚水扱い）、雨水側溝）、マンホール蓋孔、マンホール蓋と枠の隙間、公共ます蓋の隙間、宅内排水管、宅内ます蓋の隙間から污水管への雨天時浸入水

河川という中間流出：地表から地下水面の間にある本管、取付け管、マンホールの破損、クラック、継手ズレから污水管への雨天時浸入水

河川という地下水流出：地下水面以深の污水管にあって、管きよ、マンホールの破損、クラック、継手ズレ、取付け管などからの地下水の浸入水

3. 河川洪水流量の流出成分分離法

河川流の流出曲線は、図-3に示すように、降水量の時間変化（ハイトグラフ）と河川流量の時間変化（ハイドログラフ）で表され、降雨ピークと流出ピークの時間差、表面流出、中間流出、地下水流出に分け、洪水の規模やピーク時間の予測・計画に用いられている。この流出成分の分離手法には、次のようなものがある。

- ・勾配急変点法
- ・RTK hydrograph generation method（単位図

法）⁷⁾

- ・フィルター分離 AR 法による流出成分分離⁸⁾
- ・貯留関数式による流出成分分離⁹⁾
- ・菅原、丸山の方法¹⁰⁾

なお、分流式下水道における雨天時浸入水量を混合正規分布と仮定し、勾配急変点法で流出成分の分離を試みる本研究は、三角分布で表す RTK 法にヒントを得ている。

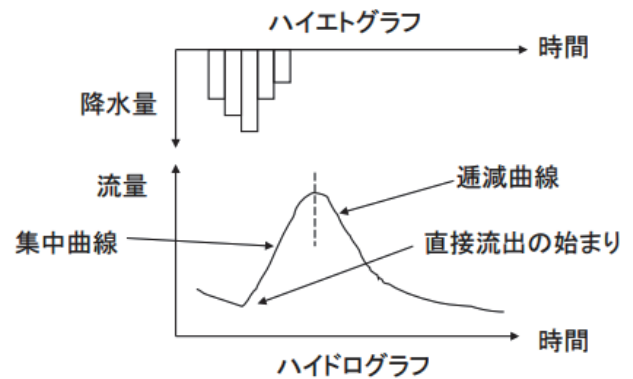


図-3 河川流の流出曲線⁴⁾

(1) 勾配急変点法

勾配急変点法は、河川洪水の流出解析において時間と洪水流量の関係を示すハイドログラフから流出成分として、表面流出、中間流出、地下水流出の3つの流出成分に分離する方法のひとつである。

本手法は、図-4に示すように、ハイドログラフを対数をとることにより直線の式で表し、直接流出の始まりであるA点から水平に伸ばし、ハイドログラフと交わるB点を直接流出の終わり（水平分離法：線分ABより上が直接流出成分）とし、減水側の第1変曲点（G1）より上側を「表面流出」、第1変曲点（G1）と第2変曲点（G2）の間を「中間流出」、第2変曲点（G2）より下側を「地下水流出」として分離するものである。この勾配急変点法は、降雨の時系列分布が1山のものに適用できるが、複数の山がある降雨には適用できない。

勾配急変点法による分離線と河川流出曲線に囲まれる面積から流出成分割合を算出する。

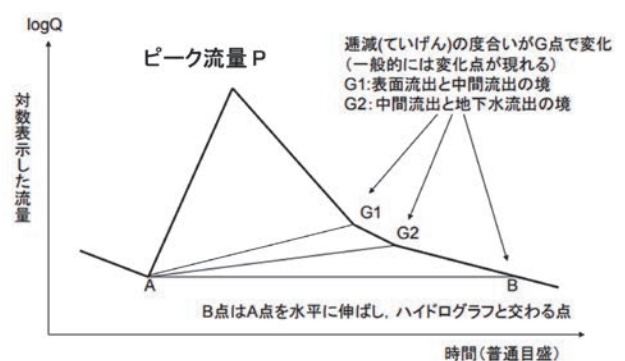


図-4 対数表示した河川流の流出曲線⁴⁾

(2) RTK 法

RTK 法⁷⁾は、単位図法の1種であり、独立した単位時間の1降雨による河川洪水流量には、表面流出、中間流出、地下水流出の3つの流出成分が含まれるものとし、3つの流出成分の流出過程を三角分布で、図-5のように表現する手法である。

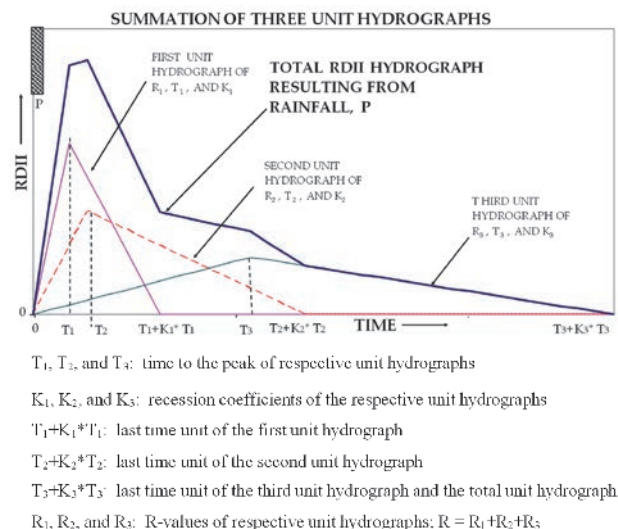


図-5 RTK 法による流出成分の分離⁷⁾

詳細は次の4.に示すが、独立した1降雨のデータが多く存在しないため、本研究においては数時間続くような独立降雨から流出成分を分離する手法を用いた。

4. 混合正規分布による下水道管きよの雨天時浸入水の流出成分の分離

混合正規分布による下水道管きよの雨天時浸入水の流出成分の分離は、次のように行った。

図-6に示す1つの独立降雨に対する下水道管きよの雨天時浸入水量を、時間ごとの頻度値とし、横軸の時間(1時間単位)に対する頻度分布に見立てる。この頻度分布を確率密度分布に変換し、雨天時浸入水量分布とし、雨天時浸入水量分布は複数の正規分布からなる混合正規分布であると仮定する。

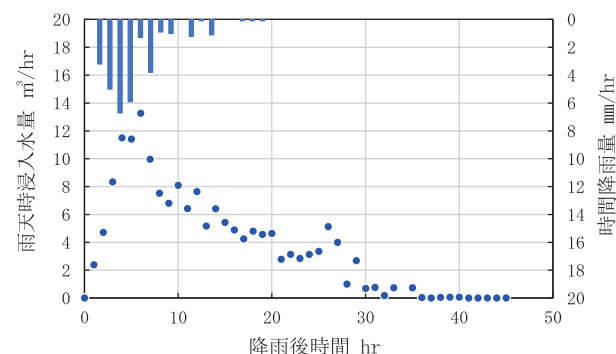


図-6 時系列の雨天時浸入水量の推移

次に雨天時浸入水量が、いくつかの分布(流出成分)から成っているのかをEMアルゴリズム¹¹⁾により、尤度が最大となる正規分布の個数(以降、流出成分数と称す)と、各正規分布のパラメータを同定する。

各正規分布の面積は1.0であり、複数の正規分布を合成すると面積が1.0以上となるため、混合正規分布と仮定した雨天時浸入水量分布の総面積が1.0となるよう各正規分布の割合となる「混合比」を決定する。

前記手順の一例を次に示す。

①図-6の時系列の雨天時浸入水量を、図-7の頻度分布に変換する。

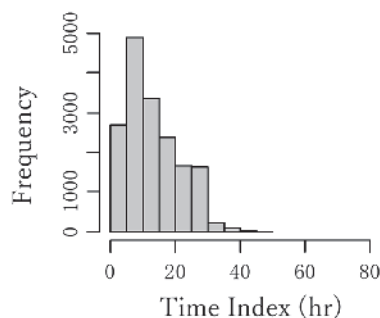


図-7 雨天時浸入水量の頻度分布への変換

②次に図-7の頻度分布を図-8に示す確率密度分布に変換する。

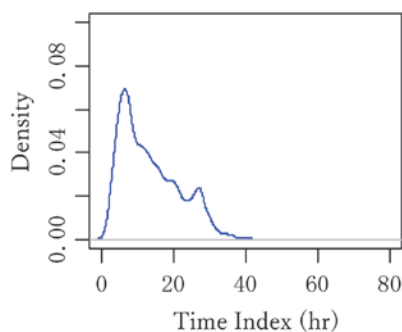


図-8 雨天時浸入水量の確率密度分布への変換

③この確率密度分布を混合正規分布で表す。

④この混合正規分布を複数の正規分布で表すために、統計用言語Rとそのライブラリmclust¹²⁾を用い、流出成分数、混合比、各正規分布のパラメータを同定する。

⑤mclustにより、流出成分数は図-9のように出力される。

図中のEとVは次のとおりであり、Vの各流出成分で分散が異なるモデルを使って流出成分数を設定する。

E: 各流出成分で分散を共通とする混合正規分布

V: 各流出成分で分散が異なる混合正規分布

BIC: ベイズ情報量規準 (Bayesian Information Criterion)

BICの値は、小さい方がその確率モデルのあてはまりが良いことを意味するが¹³⁾、mclustでは、確率モデ

ルのあてはまり具合を視覚的に分かりやすくするため符号を逆にして¹³⁾図-9のように表示している。すなわち、この例では流出成分数が3以上でBICの値が最大となることから、流出成分数3が最適なモデルとして選択される。なお、流出成分数3は、RTK法による表面流出、中間流出、地下水流出への分離と同数である。

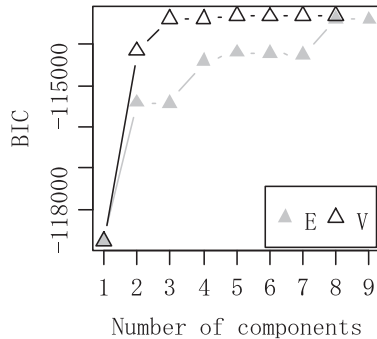


図-9 流出成分数とBICの関係

表-1に各流出成分の割合となる混合比を示す。このパラメータを用いて確率密度分布を描いたものが図-10であり、また、前述した勾配急変点法により各流出成分を分離し、その境界線を示すと図-11となる。

表-1 混合比と正規分布のパラメータ

	表面	中間	地下水
混合比	0.313	0.323	0.364
平均	5.718	11.452	21.984
標準偏差	1.851	3.457	6.002

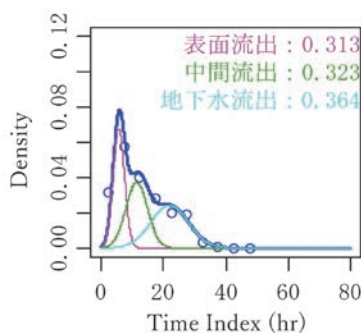


図-10 混合正規分布による確率密度分布

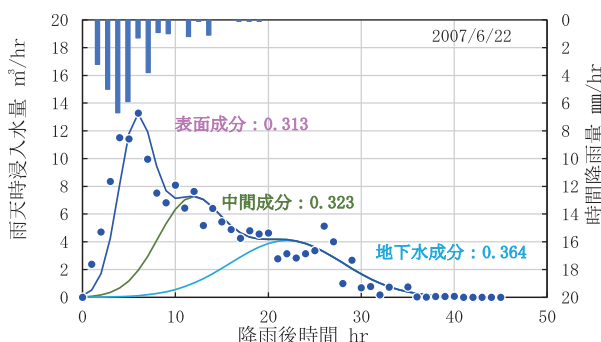


図-11 勾配急変点法による流出成分の分離

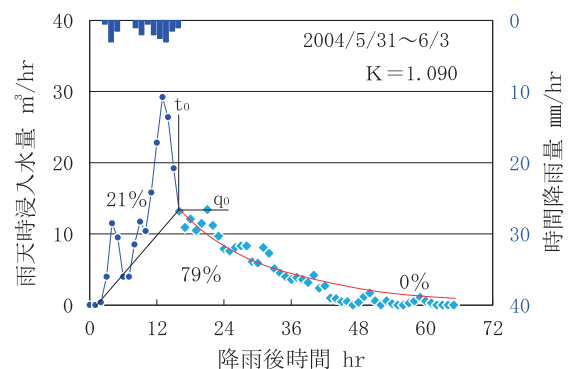
5. 勾配急変点法と混合正規分布による流出成分の比較

(1) 勾配急変点法による流出成分分離

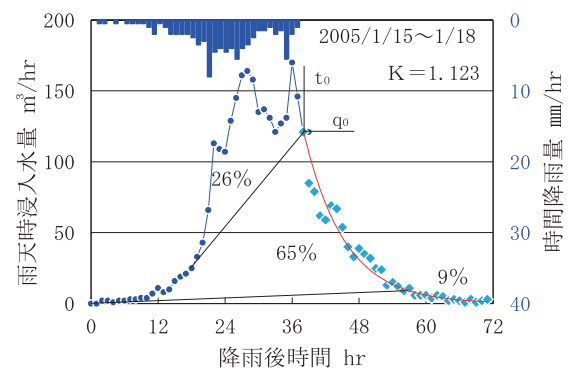
既報²⁾に示した、集水面積101haの污水中継ポンプ場の流量記録から推定した雨天時浸入水量を、勾配急変点法により流出成分を分離したものが表-2、および図-12である。

表-2 勾配急変点法による流出成分の割合

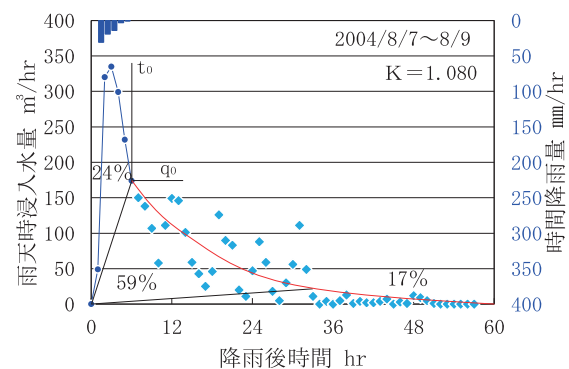
	今回分離法		
	降雨小	降雨中	降雨大
表面流出	21%	26%	24%
中間流出	79%	65%	59%
地下水流出	0%	9%	17%



a 降雨小



b 降雨中



c 降雨大

図-12 勾配急変点法による降雨3ケースの流出成分の分離

(2) 混合正規分布による流出成分分離

図-12 の a 降雨小、b 降雨中、c 降雨大に対する雨天時浸入水量を混合正規分布として、流出成分を分離した結果を次に示す。

1) 降雨小

降雨小の降雨は独立した降雨であるが、図-12 a のハイトグラフに示すように、降雨のピークが2つある。mclust を用いて降雨小における流出成分数を求めたものが図-13 であり、2 山目の降雨の影響で流出成分数が3以上になっている。

1 山の降雨と見なして流出成分数は3とし、各正規分布のパラメータを同定したものが表-3 であり、各流出成分を分離し境界線を示すと図-14 となる。

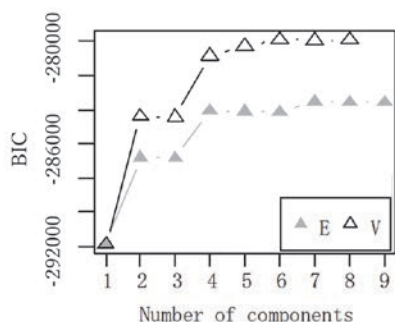


図-13 降雨小における流出成分数と BIC の関係

表-3 降雨小における混合比と各正規分布のパラメータ

	表面	中間	地下水
混合比	0.206	0.329	0.465
平均	10.834	15.878	28.094
標準偏差	4.148	4.198	10.532

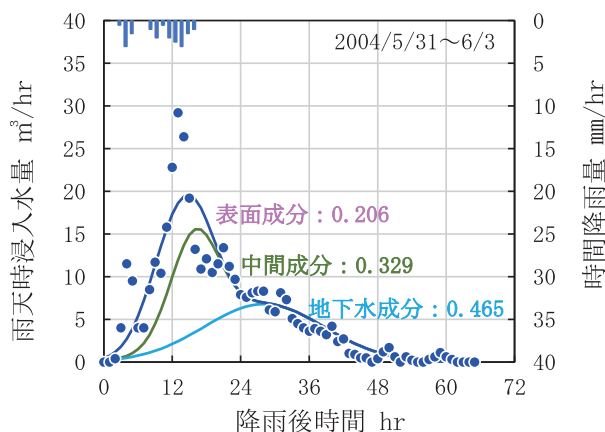


図-14 降雨小における雨天時浸入水量と各流出成分の割合

2) 降雨中

図-12 b のハイトグラフに示すように、降雨のピークが複数あり、流出成分数は図-15 より3以上になっている。1 山の降雨と見なして流出成分数は3とし、各正規分布のパラメータを同定したものが表-4 であり、各流出成分を分離し境界線を示すと図-16 となる。

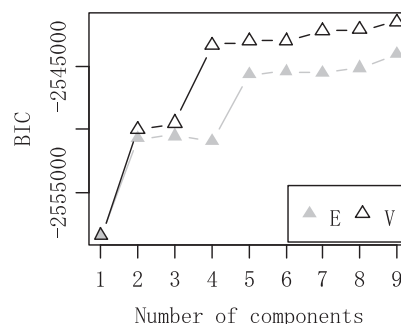


図-15 降雨中における流出成分数と BIC の関係

表-4 降雨中における混合比と各正規分布のパラメータ

	表面	中間	地下水
混合比	0.278	0.396	0.325
平均	28.959	30.820	42.351
標準偏差	8.280	5.928	8.232

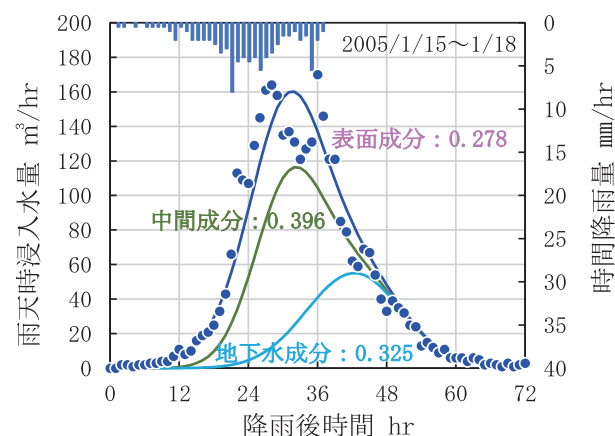


図-16 降雨中における雨天時浸入水量と各流出成分の割合

3) 降雨大

図-12 c のハイトグラフに示すように、1 山の強い降雨（※グラフ右軸の降雨量の目盛りは、降雨小、降雨中と異なる）であり、図-17 より流出成分数は3と考えられる。各正規分布のパラメータを同定したものが表-5 であり、各流出成分を分離し境界線を示すと図-18 となる。

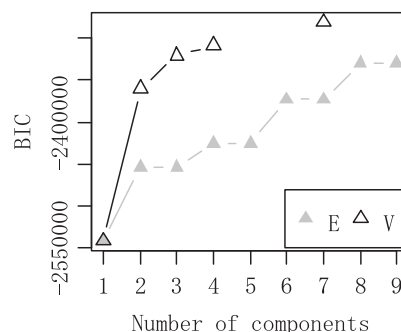


図-17 降雨大における流出成分数と BIC の関係

表-5 降雨大における混合比と各正規分布のパラメータ

	表面	中間	地下水
混合比	0.322	0.312	0.366
平均	4.336	10.099	23.197
標準偏差	1.263	3.558	9.023

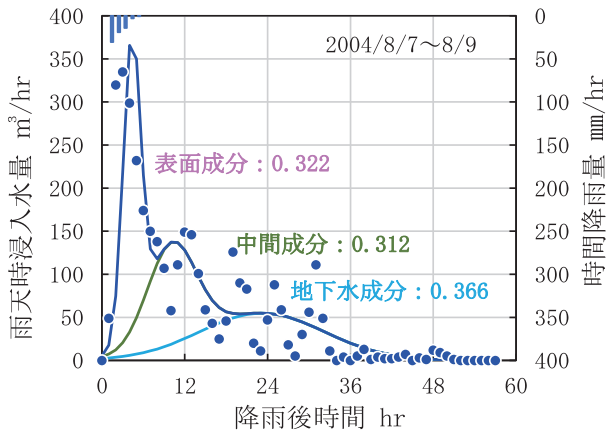


図-18 降雨大における雨天時浸入水量と各流出成分の割合

4) 混合正規分布による降雨別流出成分割合の比較

降雨小、降雨中、降雨大の各降雨について、混合正規分布による流出割合（混合比）をまとめたものが表-6である。総降雨量と中間流出、地下水流出の割合に相関は認められないが、表面流出割合は、最大降雨量の増加に伴い大きくなる傾向にある。

混合比については、降雨小において、表面流出<中間流出<地下水流出の順に高くなるが、降雨中、降雨大においては混合比にあまり差はない。

表-6 降雨量と流出割合（混合比）

降雨	総降雨量 mm	最大降雨 量 mm	降雨継続 時間 hr	流出割合(混合比)		
				表面	中間	地下水
小	18.5	3	11	0.206	0.329	0.465
中	81.5	8	35	0.278	0.396	0.325
大	67	30.5	5	0.322	0.312	0.366

(3) 勾配急変点法と混合正規分布による流出成分分離の比較

表-7に勾配急変点法と混合正規分布の流出割合、図-19に勾配急変点法と混合正規分布による表面流出割合を示す。表および図より、降雨小、降雨中、降雨大とも表面流出割合（混合比）は、勾配急変点法も混合正規

表-7 勾配急変点法と混合正規分布の流出割合

流出成分	成分分離法	降雨小	降雨中	降雨大
表面流出	勾配急変点法	0.21	0.26	0.24
	混合正規分布	0.206	0.278	0.322
中間流出	勾配急変点法	0.79	0.65	0.59
	混合正規分布	0.329	0.396	0.312
地下水流出	勾配急変点法	0	0.09	0.17
	混合正規分布	0.465	0.325	0.366

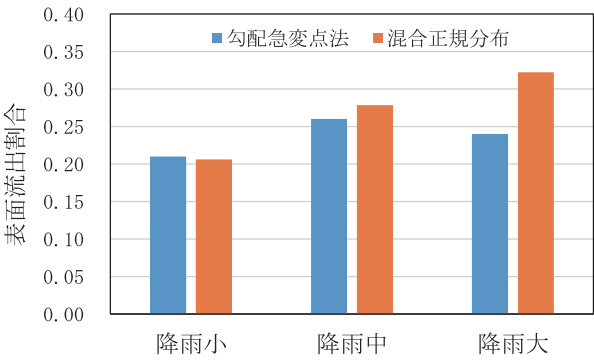


図-19 勾配急変点法と混合正規分布による表面流出割合

分布もほぼ同じ結果となった。なお、地下水流出は、勾配急変点法では変化点が特定しにくく、値の妥当性は低いと考えられるが、混合正規分布では中間流出と地下水流出を分離できている。

6. 雨天時浸入水量の混合正規分布による流出成分の分離

異なる集水面積における独立降雨の流量調査結果を用い、ニューラルネットワークにより雨天時浸入水量を推定した。さらに、雨天時浸入水量を混合正規分布として流出成分の分離を試みた。

(1) 小集水面積の流出成分分離

既報³⁾では、集水面積が小さい計測点においては、ニューラルネットワークでは、計測流量からの雨天時浸入水量の推定が難しく、精度（Nash 係数）が低下することを示した。本研究においては、雨天時浸入水発生箇所を細ブロック（2～5ha 未満）まで絞り込む調査技術¹⁴⁾の検証地区のデータを用いて、雨天時浸入水量を混合正規分布として分離可能か試みた。

1) 集水面積 1.2ha（O市K地区 No.03）

図-20より2つの流出成分にしか分離できず、地下水流出は検出できていない。表-8は各正規分布のパラメータを同定したものであり、各流出成分を分離し境界線を示すと図-21となる。

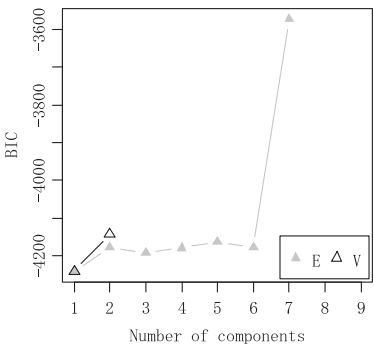


図-20 流出成分数と BIC の関係

表-8 混合比と正規分布のパラメータ

	表面	中間	地下水
混合比	0.275	0.725	—
平均	2.566	5.019	—
標準偏差	0.572	1.445	—

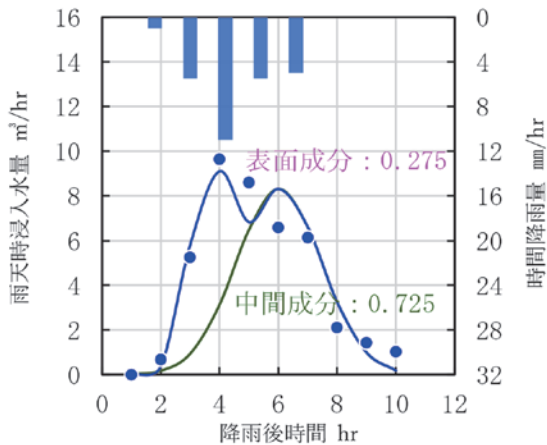


図-21 各流出成分の確率密度分布

2) 集水面積 0.4ha (O市K地区 No.04)

1) のO市K地区 No.03 同様、図-22 に示すように、集水面積が小さい計測点においては、2つの流出成分にしか分離できず、地下水流出は検出できていない。表-9 は各正規分布のパラメータを同定したもので、図-23 は各流出成分を分離し境界線を示したものである。

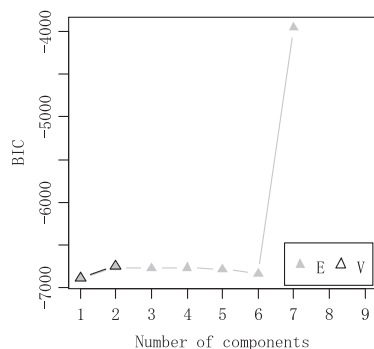


図-22 流出成分数と BIC の関係

表-9 混合比と正規分布のパラメータ

	表面	中間	地下水
混合比	0.443	0.557	—
平均	3.758	5.789	—
標準偏差	0.801	1.407	—

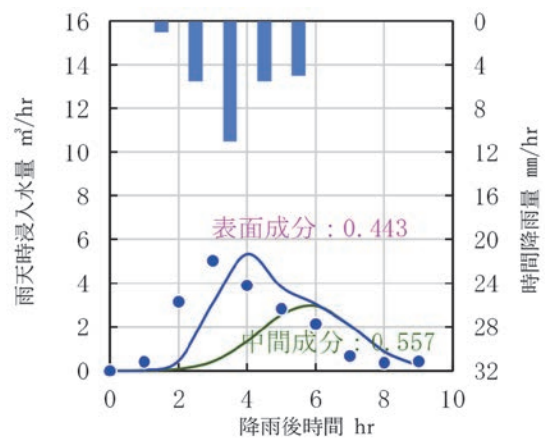


図-23 各流出成分の確率密度分布

以上、集水面積が小さい計測点においては、ニューラルネットワークによる雨天時浸入水量の推定が難しいだけでなく、雨天時浸入水量を表面流出と中間流出の2つの流出成分にしか分離できない。

(2) 小集水面積以外の流出成分分離

表-10 に示す3つの自治体において、集水面積ごとの流量調査結果から独立降雨を抽出し、ニューラルネットワークによって雨天時浸入水量を推定した。さらに、雨天時浸入水量を混合正規分布として流出成分を分離した。

表-10 3自治体の流量調査概要と調査期間中の独立降雨数

自治体名	計測箇所数	集水面積 ha	計測期間	独立降雨数	混合分布取出数
I市	2	14.8/8.1	2007/5/21~7/21	12	7
T市	3	16.18/11.65/10.88	2008/1/17~2/16	9	4
S市	2	21.6/12.6	2019/6/14~7/16	10	8
計				31	19

AI 学習による経過時間に対する雨天時浸入水量推定のばらつきもあり、合計 31 回の独立降雨のうち、混合正規分布として3つの流出成分に分離できたのは19回であった。3つの流出成分に分離できた各降雨における流出成分の分離結果を表-11 に示す。

1) 表面流出

図-24 に降雨継続時間と表面流出割合の関係を示す。

計測箇所では表面流出割合は異なるが、S：計測点 05 と T：計測点 05 は、降雨継続時間により表面流出割合に変動がある。その他の計測箇所では、降雨継続時間に関係なくほぼ一定である。

表-11 より降雨回数 19 回のうち地下水流出割合が表面流出割合より多い回数は13回である。

表面流出割合と総降雨量を使って計測箇所における面積当りの表面流出量を次式により算定する。

$$\text{面積当り表面流出量 (mm/ha)} = \text{降雨日の総降雨量 (mm)} \times \text{表面流出割合 (混合比)} / \text{集水面積 (ha)}$$

図-25 は降雨継続時間と面積当り表面流出量を示し

表-11 混合正規分布による流出成分の分離結果

自治体名	計測箇所	集水面積 ha	降雨日	総降雨量 mm	最大降雨量 mm	降雨継続時間 hr	流出割合(混合比)			表面流出量 mm	面積当り表面流出量 mm/ha	地下水流出量 mm	面積当り地下水流出量 mm/ha
							表面	中間	地下水				
I 市	計測点01	14.8	5月25日	74.3	13.5	17	0.260	0.353	0.387	19.3	1.31	28.8	1.94
			6月22日	30.5	6.7	14	0.237	0.342	0.420	7.2	0.49	12.8	0.87
			6月24日	21.3	8.8	13	0.239	0.339	0.422	5.1	0.34	9.0	0.61
			6月29日	2.8	2.4	3	0.278	0.319	0.403	0.8	0.05	1.1	0.08
	計測点02	8.1	5月25日	74.3	13.5	17	0.340	0.290	0.370	25.3	3.12	27.5	1.86
			6月22日	30.5	6.7	14	0.320	0.309	0.371	9.7	1.20	11.3	0.76
T 市	計測点03	16.18	6月29日	21.3	2.4	3	0.410	0.557	0.033	8.7	1.08	0.7	0.05
			1月20日	10.5	1.0	16	0.304	0.281	0.415	3.2	0.20	4.4	0.29
	計測点05	11.65	2月3日	9.5	3.5	6	0.320	0.309	0.371	3.0	0.19	3.5	0.24
			1月17日	25.0	8.5	12	0.538	0.182	0.280	13.4	1.15	7.0	0.47
			1月20日	9.5	3.5	6	0.197	0.450	0.354	1.9	0.16	3.4	0.23
			6月22日	30.5	6.7	14	0.237	0.342	0.420	7.2	0.49	12.8	0.87
S 市	計測点02	21.6	6月24日	31.5	5.5	15	0.239	0.339	0.422	7.5	0.35	13.3	0.90
			6月28日	13.0	10.5	8	0.278	0.319	0.403	3.6	0.17	5.2	0.35
	計測点05	12.6	6月15日	32.0	4.0	18	0.260	0.353	0.387	8.3	0.39	12.4	0.84
			6月22日	6.5	3.0	3	0.237	0.342	0.420	1.5	0.07	2.7	0.18
			6月24日	31.5	5.5	15	0.239	0.339	0.422	7.5	0.35	13.3	0.90
			6月28日	13.0	10.5	8	0.278	0.319	0.403	3.6	0.17	5.2	0.35
			6月15日	32.0	4.0	18	0.398	0.243	0.359	12.7	1.01	11.5	0.78
			6月22日	6.5	3.0	3	0.187	0.658	0.154	1.2	0.10	1.0	0.07
			6月24日	31.5	5.5	15	0.187	0.658	0.154	5.9	0.47	4.9	0.33
			7月14日	34.0	10.5	8	0.307	0.573	0.120	10.4	0.83	4.1	0.27

たものであり、降雨強度が同じ場合、降雨継続時間が長くなると総降雨量も多くなることから、面積当り表面流出量は増加傾向となる。

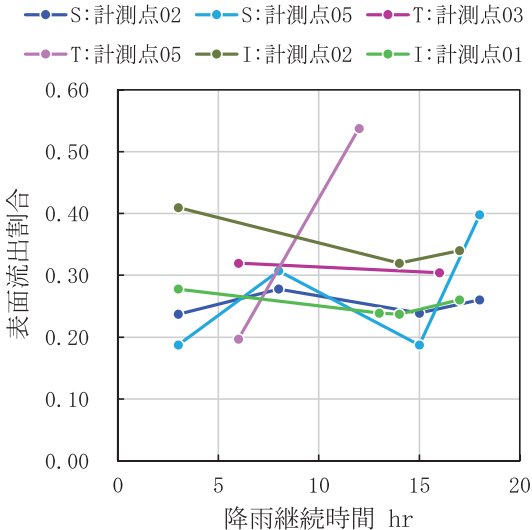


図-24 降雨継続時間と表面流出割合の関係

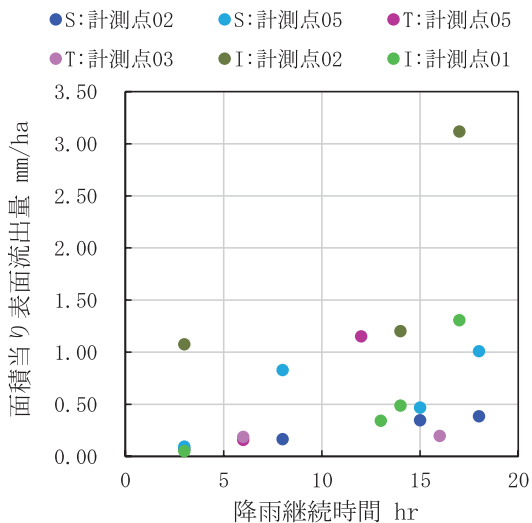


図-25 降雨継続時間と面積当り表面流出量の関係

2) 地下水流出

前述のとおり、降雨回数 19 回のうち地下水流出割合が表面流出割合より多い回数は 13 回であり、地下水流出量には、常時浸入水量を含んでいないにもかかわらず大きな割合になった。

図-26 に降雨継続時間と地下水流出割合の関係を示す。地下水流出割合は、降雨継続時間によらず一定を示す計測箇所もあれば、降雨継続時間が長くなるに従い増加する計測箇所もある。

図-27 は降雨継続時間に対する面積当り地下水流出量を示したものであり、降雨継続時間が長くなると総降雨量も多くなることから、面積当り地下水流出量は増加傾向となる。

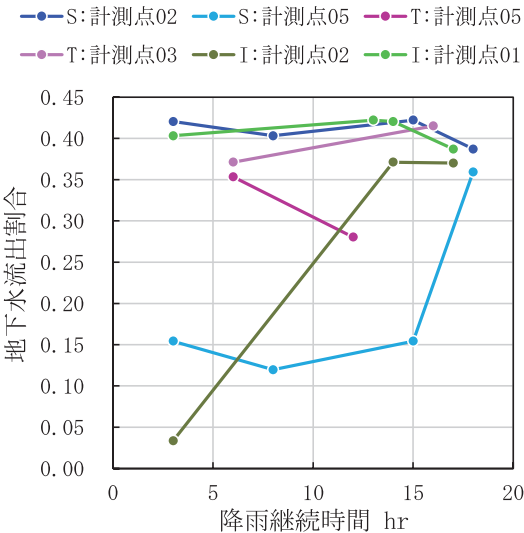


図-26 降雨継続時間と地下水流出割合の関係

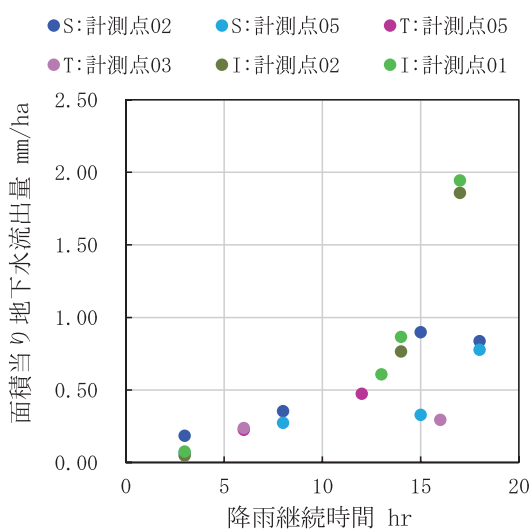


図-27 降雨継続時間と面積当り地下水流出量の関係

7. まとめ

本研究において、ニューラルネットワークにより推定した雨天時浸入水量を、混合正規分布として表面流出、中間流出、地下水流出の3つの正規分布に分離し、その流出割合である混合比を同定した。この混合比の妥当性を、河川流量の流出成分の分離法の1つである勾配急変点法との比較により行った。

本研究で得られた知見は、次のとおりである。

- ①勾配急変点法では、減水側勾配の変化点が特定しにくく、中間流出と地下水流出の分離が困難であったが、混合正規分布を用いることにより、分離が可能となった。
- ②集水面積が小さいエリアでは、雨天時浸入水量を混合正規分布として表面流出と中間流出の2つの流出成分にしか分離できない。集水面積が小さいエリアは、下水道ネットワークの上流に位置しているため、管きよの埋設深が浅くなり、地下水の影響を受けにくくなると考えられる。
- ③流量調査結果を用い、混合正規分布により流出成分を分離した結果、次のことが明らかとなった。
 - ・表面流出割合は、降雨継続時間によらずほぼ一定である。
 - ・表面流出割合より地下水流出割合が大きい傾向にある。
 - ・面積当りの地下水流出量は、降雨継続時間が大きくなるに従い増加する。

以上、混合正規分布により雨天時浸入水量を流出成分ごとに分離可能であることを示した。しかし、現状のデータ数および解析手法では、混合正規分布による流出成分の分離は、1降雨の独立した降雨にしか適用できな

い。

今後、データの蓄積、解析手法の改善などにより雨天時浸入水量を正確に表面流出、中間流出、地下水流出に分離できれば、管きよの埋設深さや地下水面の位置などの情報から、雨天時浸入水があった地区または路線の推定が可能である。また、流出成分の割合から、誤接合や管きよの異状など、雨水の浸入経路を特定することにより、効果的な雨天時浸入水量対策が可能になると考える。

(R8.4.30 受付)

〈参考文献〉

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部：雨天時浸入水対策ガイドライン（案）令和2年1月
- 2) 中根進：ニューラルネットワークを用いた雨天時浸入水を含む流量の再現 下水道協会誌論文集 Vol.45 No.550 pp.162-169 2008年8月
- 3) 佐藤克己ら：流量・水温法データのAI機械学習による雨天時浸入水量解析の研究 下水道協会誌論文集 Vol.58 No.708 pp.91-99 2021年10月
- 4) 河川工学 水文循環2：山口大学 (<https://www.slideserve.com/meliora/1374478>) 2026年7月28日閲覧
- 5) 本間仁：新版 河川工学（株）コロナ社 38版 pp.48-52 2004年1月20日
- 6) 公益社団法人 日本下水道協会：下水道施設設計指針と解説 前編 2019年版 p.57
- 7) Srinivas Vallabhaneni et al. : Computer Tools for Sanitary Sewer System Capacity Analysis and Planning EPA/600R-0.7/111 pp.2-14 - 2-16 October 2007
- 8) 日野幹雄・長谷部正彦：フィルター分離AR法による非線形流出系の同定と予測（時間単位） 土木学会論文報告集 第324号 1982年8月
- 9) 日野幹雄・長谷部正彦：水文流出解析—FORTRANとBASICによる 森北出版 1985年1月
- 10) 本間仁：新版 河川工学（株）コロナ社 38版 p.61 2004年1月20日
- 11) 新納浩幸：Rで学ぶクラスタ解析（株）オーム社第1版2刷 pp.102-112 2009年4月5日
- 12) <https://cran.r-project.org/web/packages/mclust/index.html> 2026年7月28日閲覧
- 13) 渡辺寛之：広く使えるベイズ情報量規準（WBIC）の応用について：線形回帰モデルを例に 神戸大学経済経営研究所 p.6 2017年9月4日
- 14) 公益社団法人 日本下水道新技術機構：分流通下水道の細ブロックにおける雨天時浸入水調査技術に関する技術資料 2021年10月



ほ さか せい じ
保坂 成司

日本大学生産工学部
環境安全工学科 教授
日本下水道協会 特別会員



なか ね すすむ
中根 進

中日本建設コンサルタント（株）
水環境技術本部
技術士（上下水道部門）
日本下水道協会 特別会員



さ と う かつ み
佐藤 克己

日本大学生産工学部
土木工学科 教授
技術士（上下水道部門）
日本下水道協会 特別会員



たかはし いわひと
高橋 岩仁

日本大学生産工学部
土木工学科 教授
日本下水道協会 特別会員



もり た ひろあき
森田 弘昭

日本大学生産工学部
土木工学科 特任教授
技術士（上下水道部門）
日本下水道協会 特別会員

Abstract

Methods of Separating the Runoff Components of Stormwater Infiltration into Sewer Pipes Using the Mixed Normal Distribution

Seiji Hosaka, Susumu Nakane, Katsumi Sato, Iwahito Takahashi and Hiroaki Morita

In our previous study, we developed an artificial intelligence (AI)-based method of estimating the amount of stormwater infiltrating sewer pipes using time-series flow rate data. Additionally, we proposed a method of separating the estimated volume of infiltrated stormwater into surface runoff, intermediate runoff and groundwater runoff. This technique is used to separate the runoff components of river flood flow.

However, the Gradient Abruption Method is difficult to specify the change points on the attenuation side of the stormwater infiltration curve. The RTK (real-time kinematic) method is also not appropriate, as the stormwater infiltration runoff components are represented by a triangular distribution.

This paper discusses a method of representing time-dependent changes in stormwater infiltration into sewer pipes using a Mixed Normal Distribution, which is a combination of multiple normal distributions.

By comparing the Mixed Normal Distribution with the Gradient Abruption Method, we concluded that the proportion of surface runoff is almost equivalent, and that the Mixed Normal Distribution enables the separation of stormwater infiltration components.