

公益社団法人 全国上下水道コンサルタント協会

令和7年度技術研修会

成分分解ならびにAI学習による下水温解析手法

－水温法による雨天時浸入水発生区域のスクリーニング調査－



令和7年5月14日

 中日本建設コンサルタント株式会社

中根 進

目次

- 水温法および水温調査機器
- 水温調査位置
- 下水温の特徴
- 水温法の解析フロー
- 計測水温の成分分解
 - 計測水温の成分分解（不規則変動水温）
 - 計測水温の成分分解（評価方法）
 - 計測水温の成分分解（結果の表示例）
 - 成分分解法による晴天時水温推定と雨天時浸入水割合
- 計測水温のAI解析
 - AI学習による晴天時水温の推定
- その他のAI解析 流量、管内水深、管きょ劣化要因、処理水質など

水温法および水温調査機器

流量調査あるいは水位調査によらず雨天時浸入水発生区域の選定する。

下水温を計測・解析することにより雨天時浸入水の有無や計測区域間の雨天時浸入水量の多寡を調査することを水温法と呼ぶ。



写真1 ロガーと温度センサー

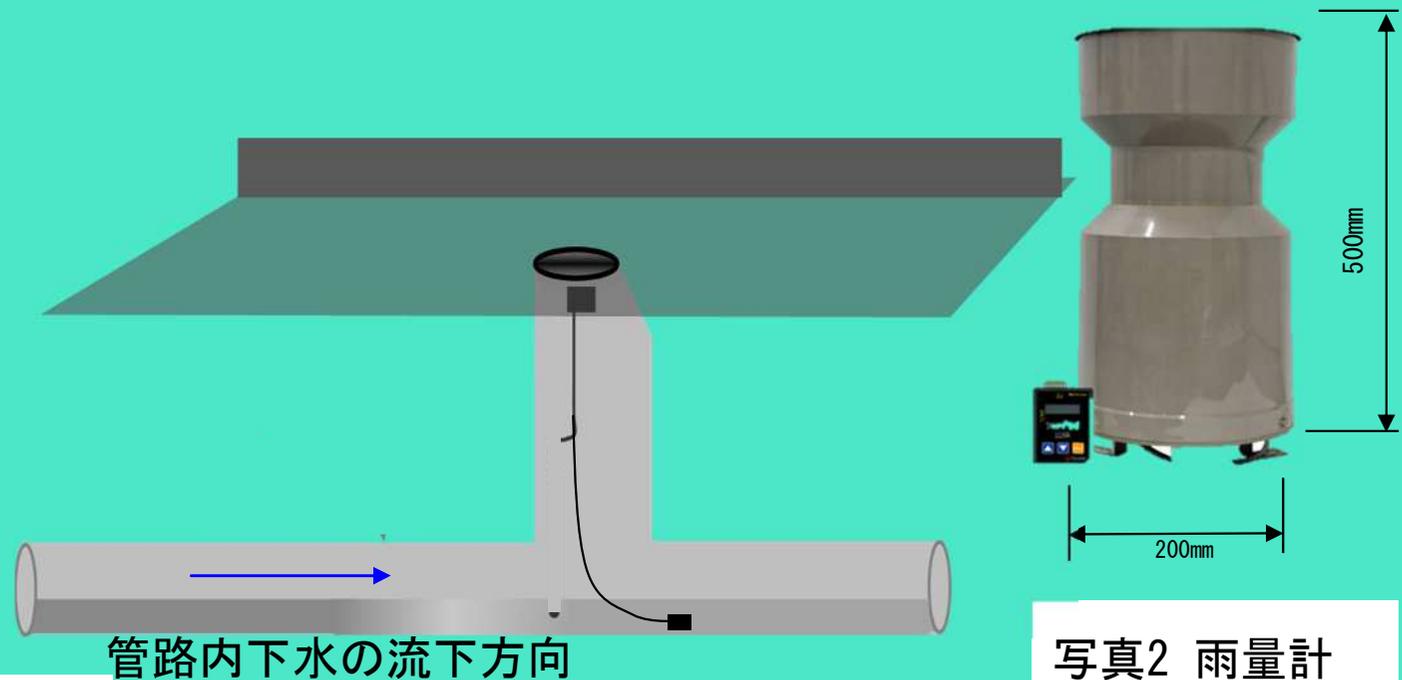
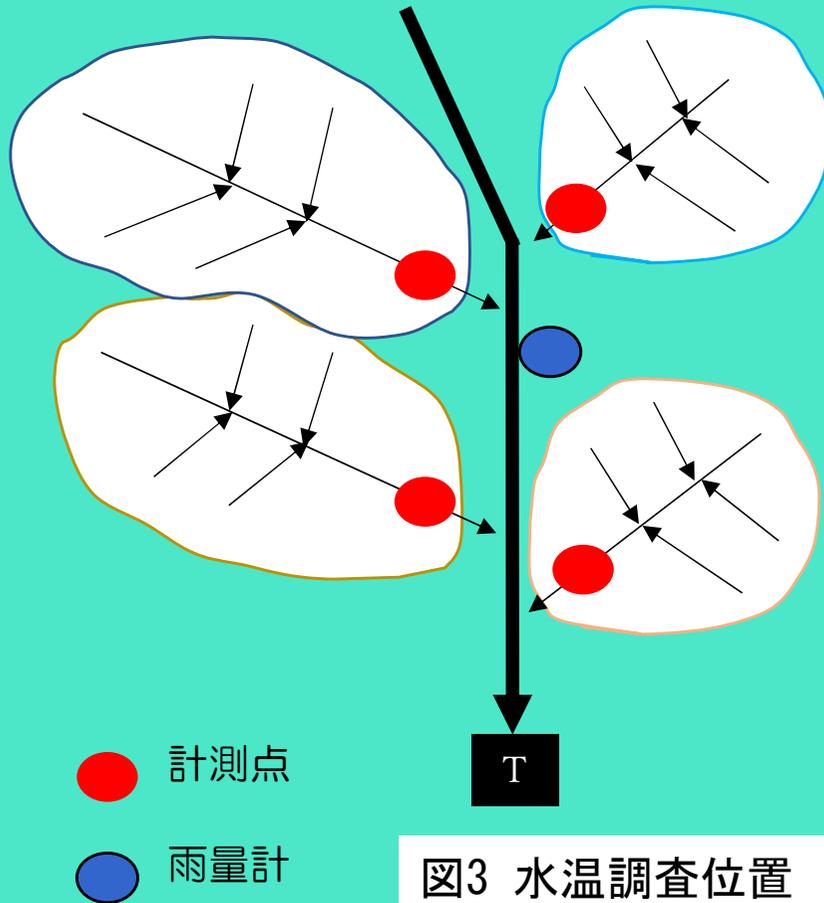


図2 温度センサーの設置

写真2 雨量計

雨量計の下部皿で雨
温度測定

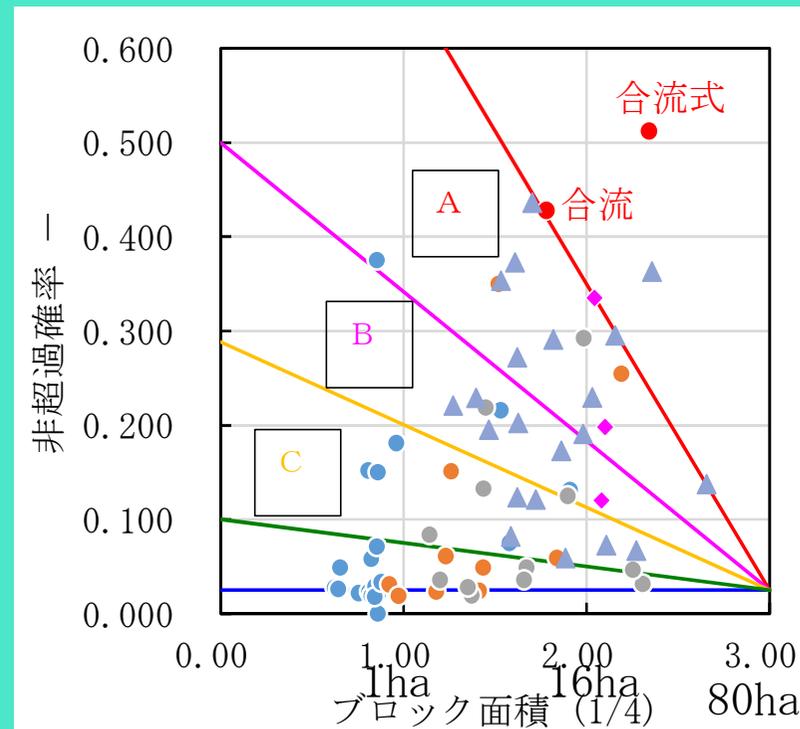
水温調査位置



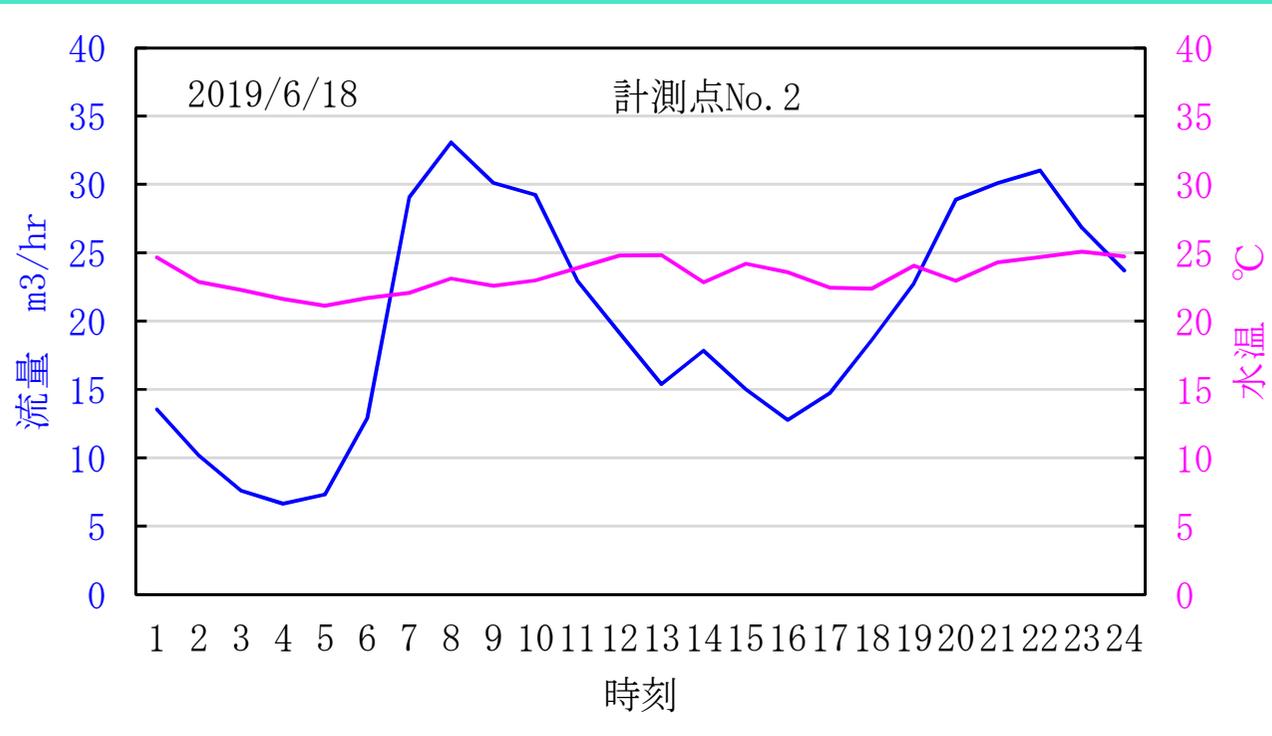
計測点の流入区域面積は、同じ規模の面積が望ましい。

区域面積が大きくなると、雨天時浸入水の多い区域、少ない区域が混ざるので、一般に評価数値(非超過確率)が小さくなる。

令和3年度 分流式下水道における雨天時浸入水の調査技術に関する共同研究
日本下水道新技術機構と管診協
0.1ha×1箇所、0.4ha×3箇所、1.3ha×1箇所、2.9ha×1箇所



下水温の特徴その1 / 3



変動係数(= 標準偏差 ÷ 平均値)

流量の変動係数 : 0.402



水温の変動係数 : 0.056

図4 流量・水温の変動

雨天時浸入水が認められると、

- ・ 流量は増加する。
- ・ 水温は低下する。

流量の多いときは低下水温は小さく、流量が少ないときは低下水温が大きい。

下水温の特徴その2 / 3

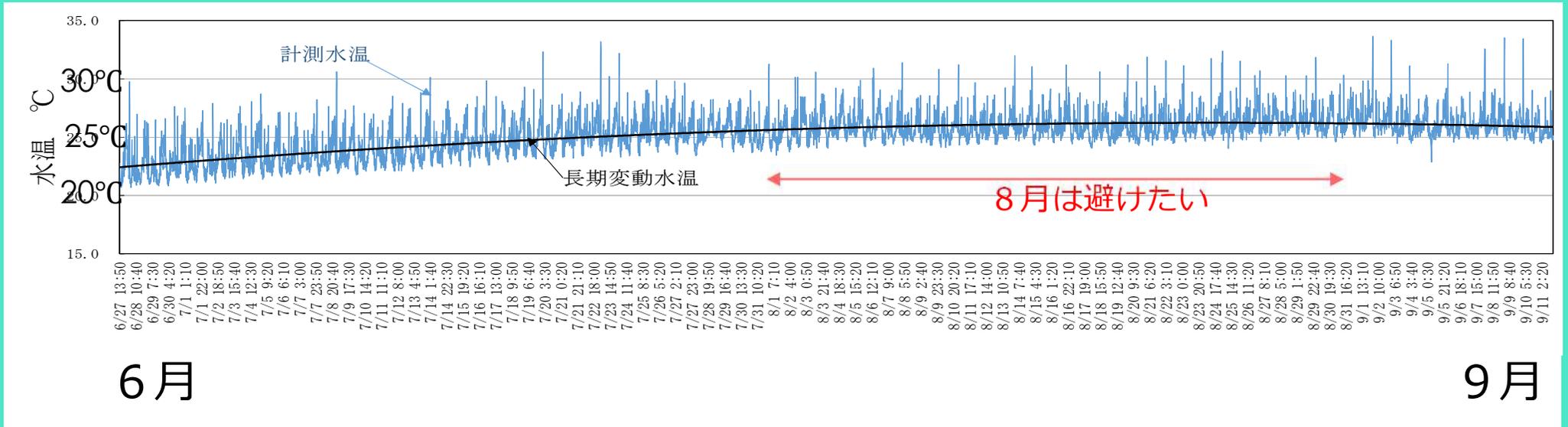


図5 時系列での計測水温データ

計測期間が長期にわたるため、水温が季節により漸増あるいは漸減する。

下水温の特徴その3 / 3

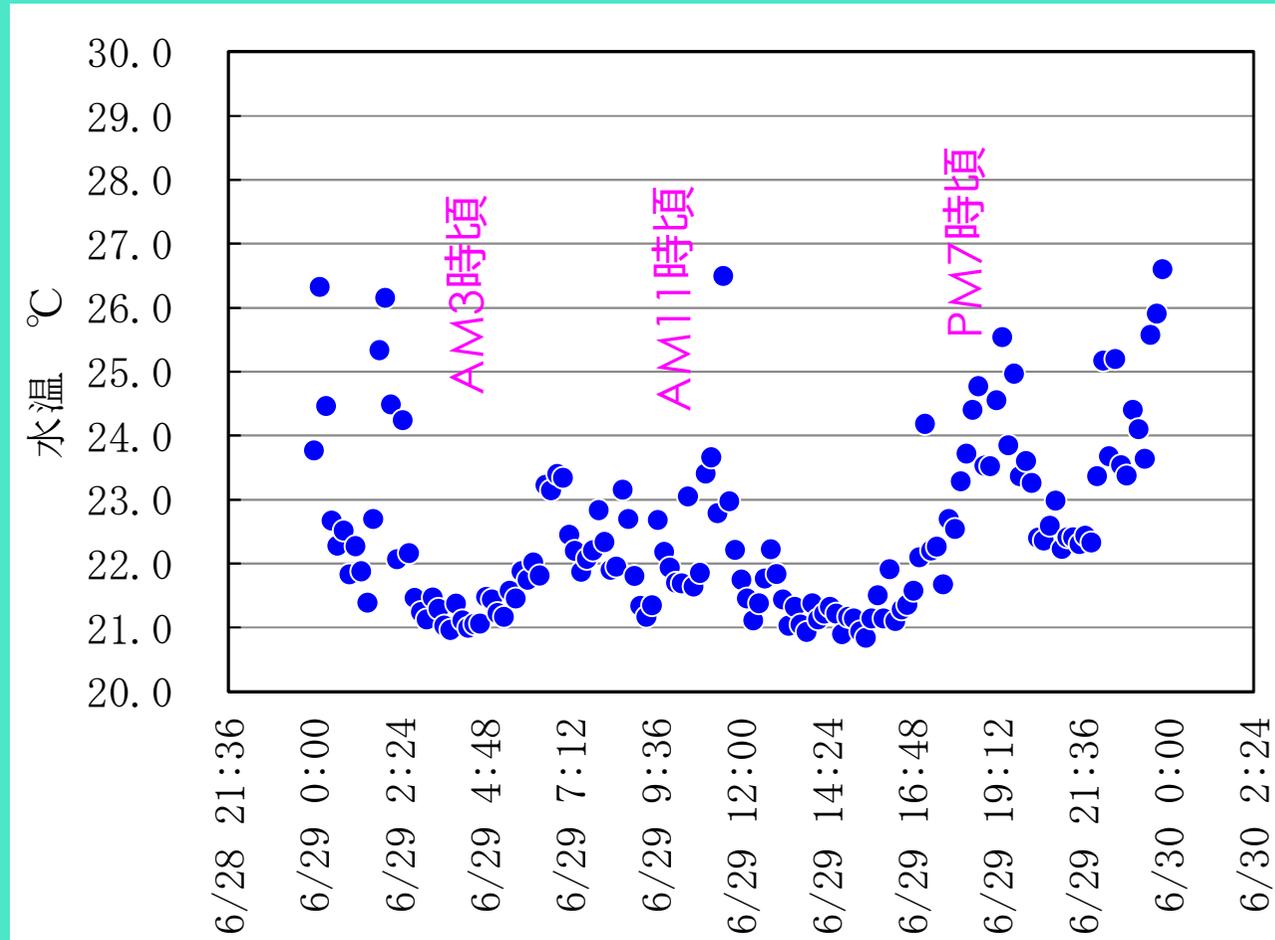
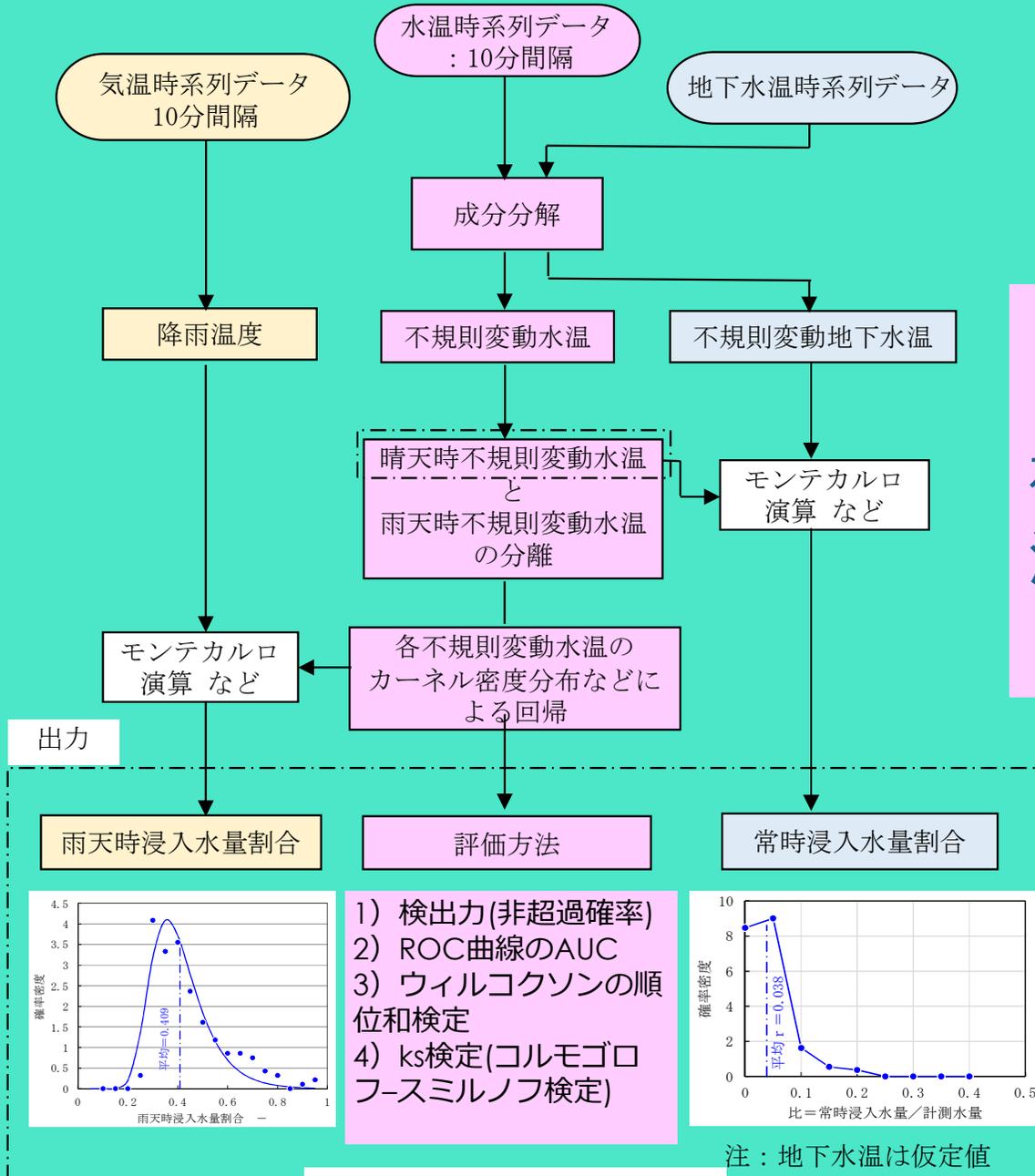


図6 1日の水温の変動

1日の水温の変動が激しい。

深夜から早朝、お昼、夕方から深夜にかけて水温が高くなる。

水温法の解析フロー



下水温を計測・解析することにより雨天時浸入水の有無や計測区域間の雨天時浸入水量の多寡を調査することを水温法と呼ぶ。

評価方法にはいろいろあるが？

図7 解析フロー

計測水温の成分分解その1 / 7

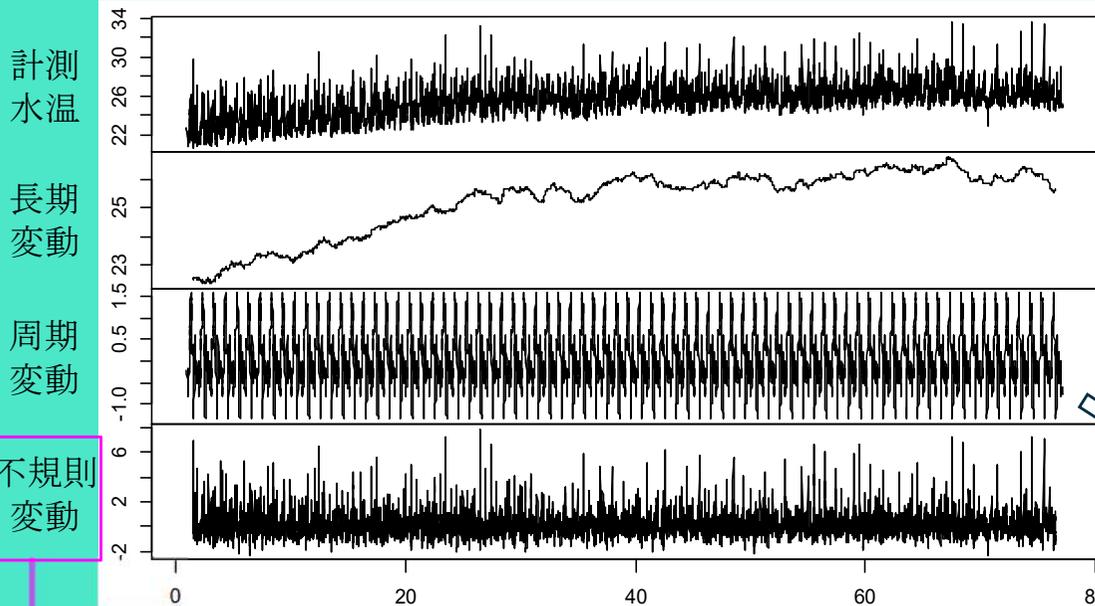


図8 計測水温の時系列データの成分分解

成分名	データの状態	データの特徴
長期変動	データが長期間にわたる観測により上昇、あるいは下降する状態	長期間にわたり増加または減少する変化がある(図2.1)
周期変動	データがある時間間隔で変動を繰り返す状態	1日の間で変動を繰り返す(図2.2)
不規則変動	データの動きが時間の経過に依存しない状態	時間に関係なく水温の増減がある。

計測水温 = 長期 + 周期 + 不規則

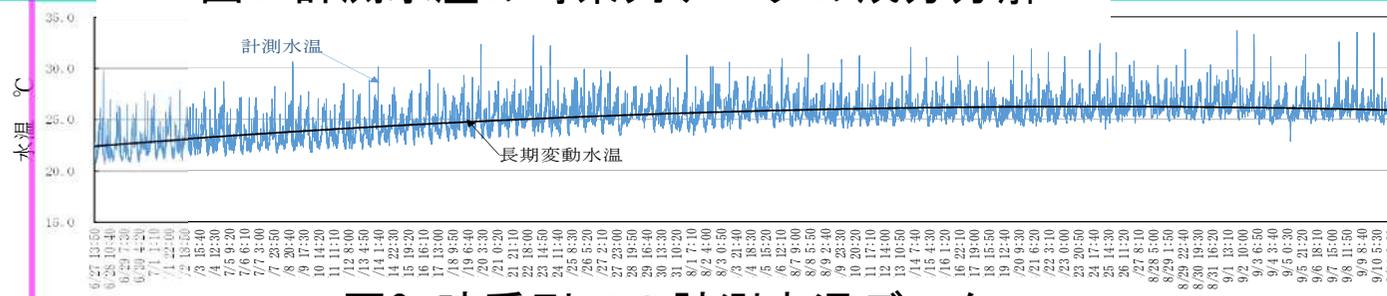


図9 時系列での計測水温データ

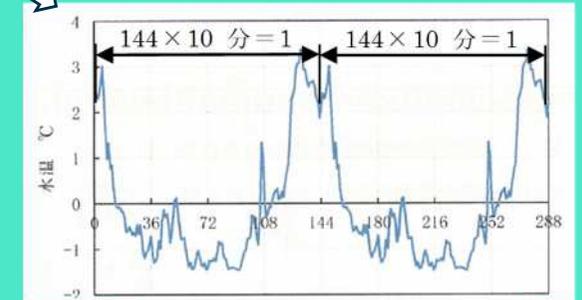


図10 周期変動

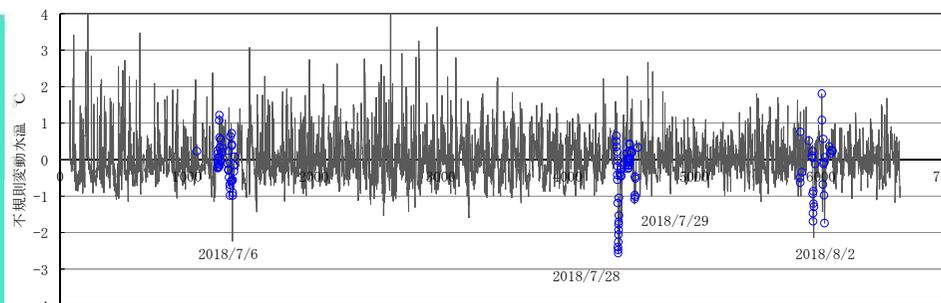


図11 不規則変動水温と雨天時不規則水温

成分分解フローは次頁に。

計測水温の成分分解その2 / 7 (不規則変動水温)

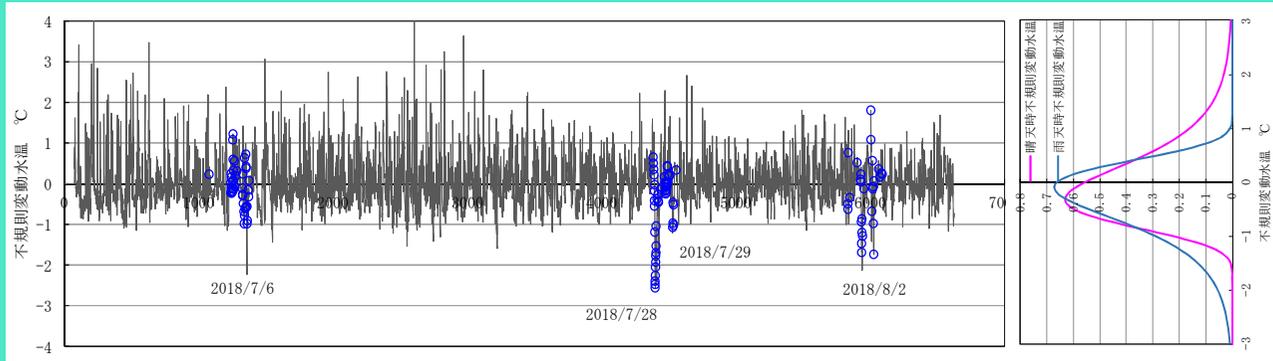


図12 不規則変動水温と雨天時不規則水温

不規則変動水温の検出力(非超過確率)による評価

晴天時下限値水温を超えない雨天時水温の確率

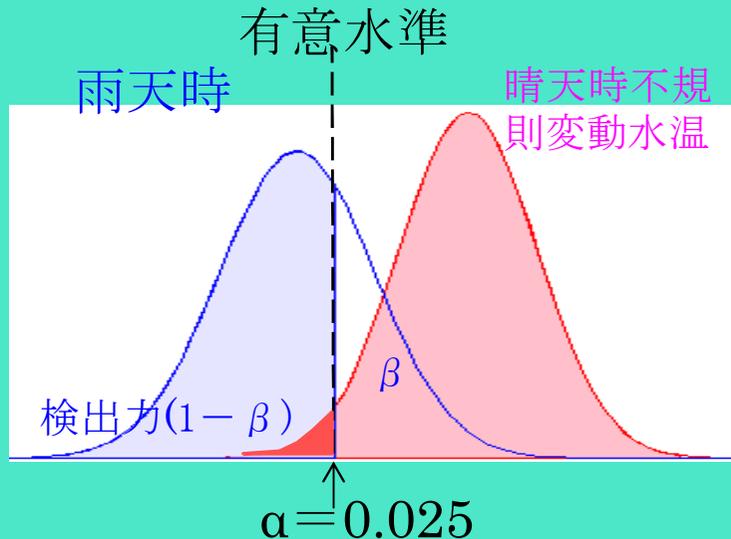


図13 晴天時と雨天時の不規則変動水温分布

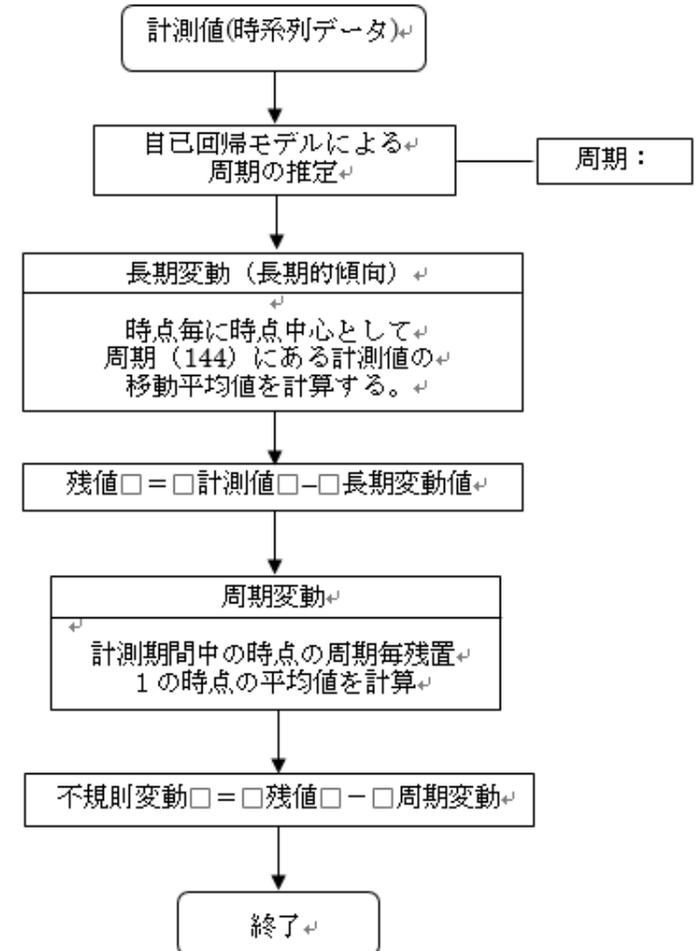
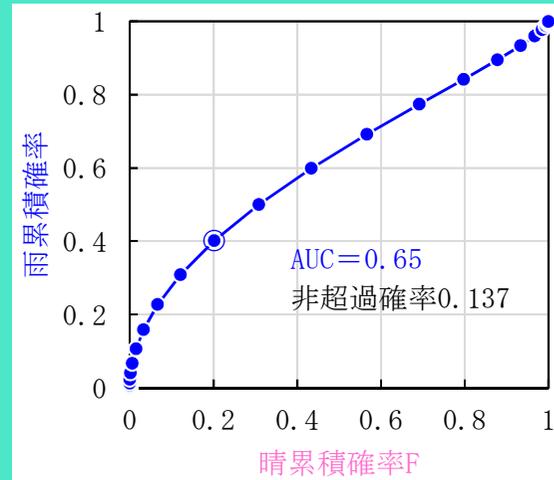
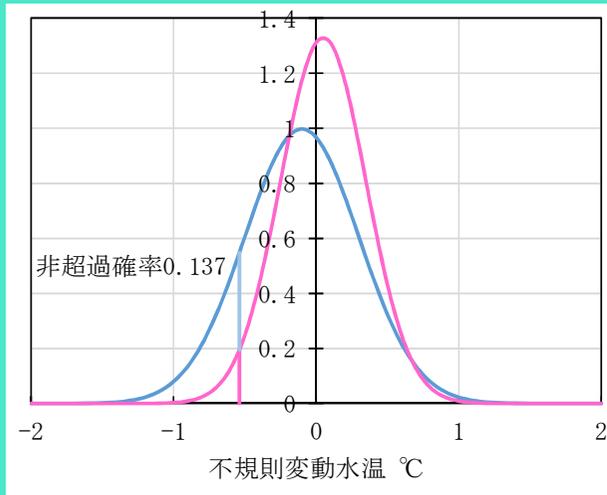


図14 成分分解のフロー

計測水温の成分分解その3 / 7 (評価方法)

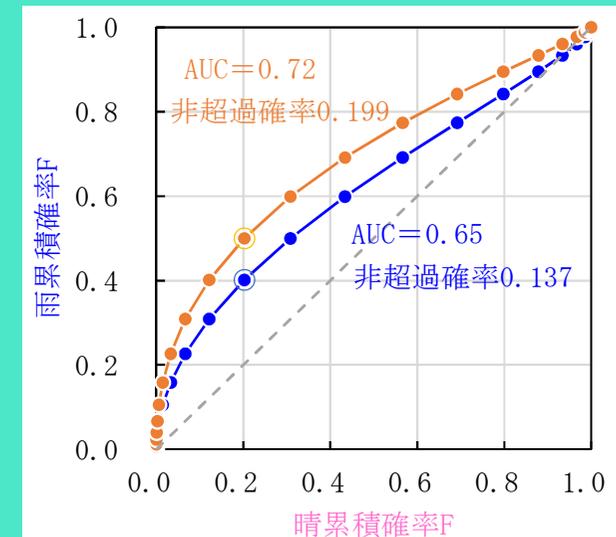
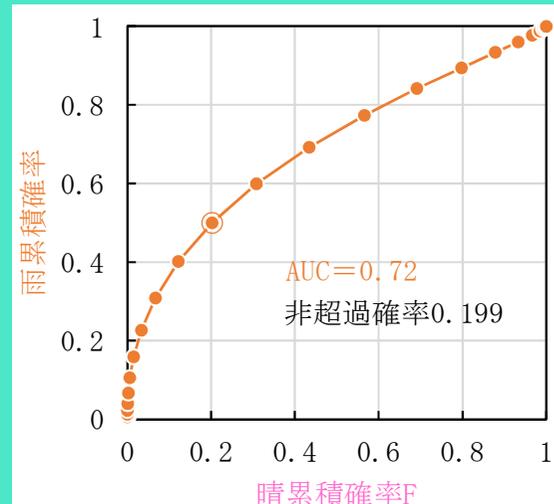
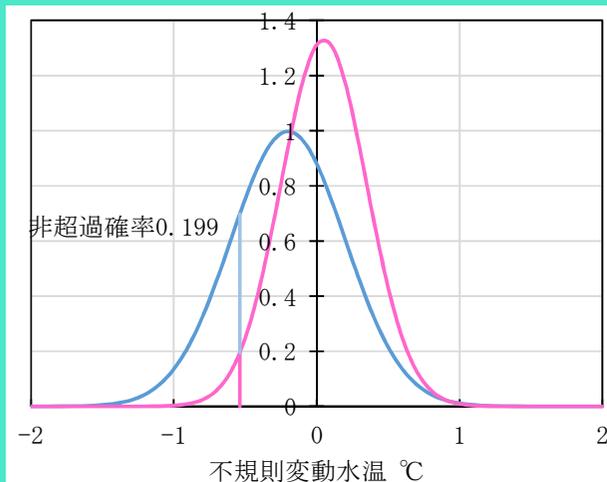
1) 検出力(非超過確率)による評価

2) ROC曲線による評価



AUC(Area Under Curve : ROC曲線より下側の面積) :

0から1までの値をとり、値が1に近いほど分布に差が有ることを示す。

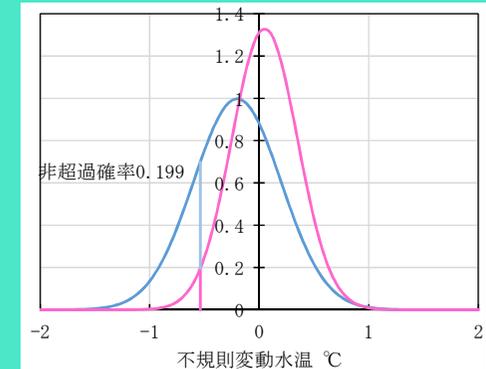
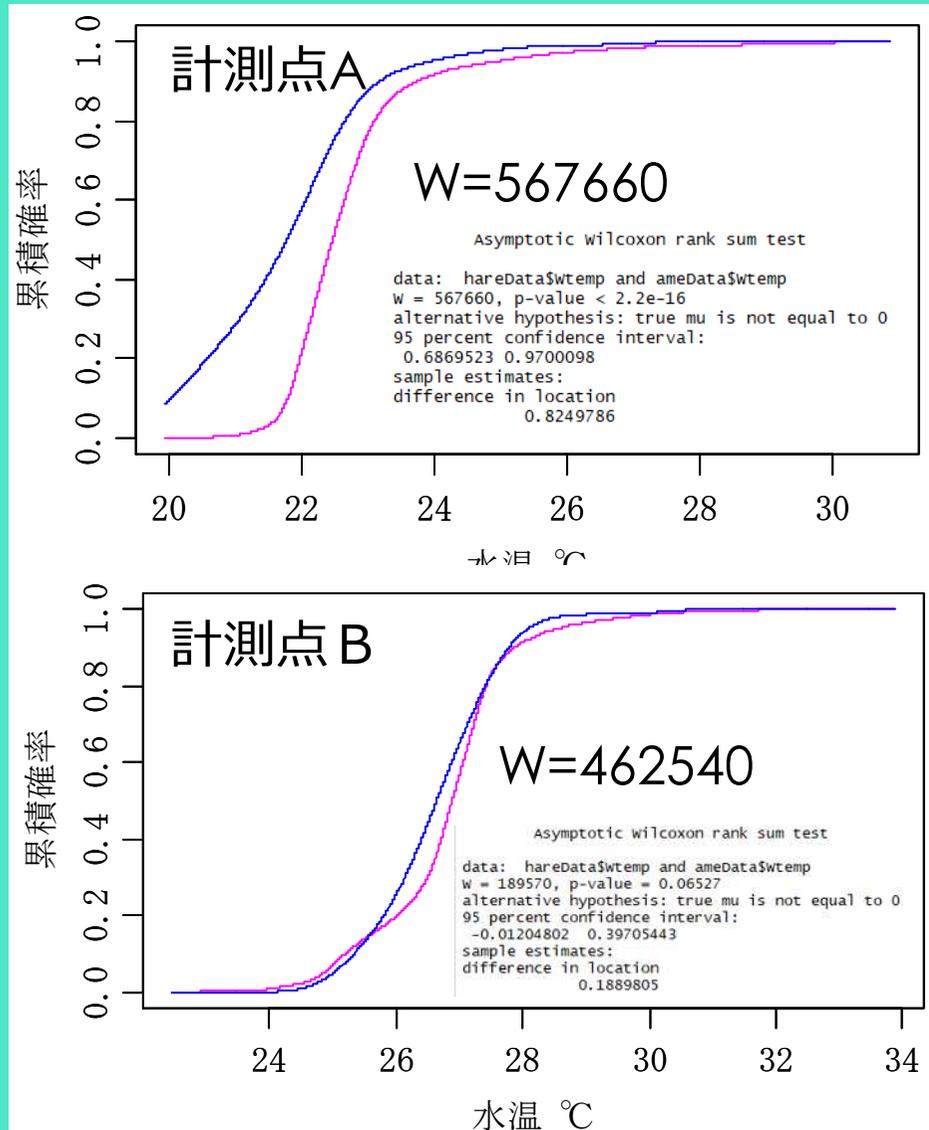


面積の値も具体的な数字でない。??

図15 晴天時と雨天時の不規則変動水温分布

計測水温の成分分解その4 / 7 (評価方法)

3) ウィルコクソンの順位和検定による評価



晴天時と雨天時不規則水温の両者を合わせて低い温度から順位を付け、晴天時と雨天時不規則水温おのおのについて順位の和を計算する。

晴天時と雨天時不規則水温のデータ数の少ない方の和をWとする。

計測点AのW=567660

計測点BのW=462540

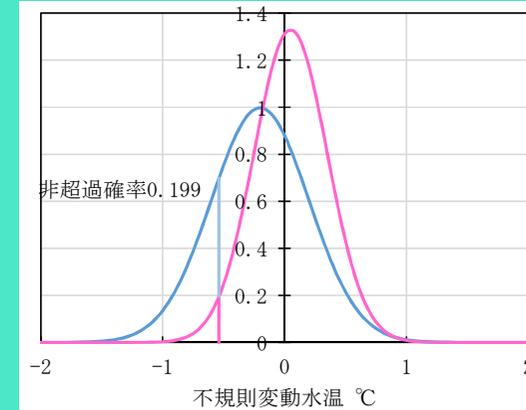
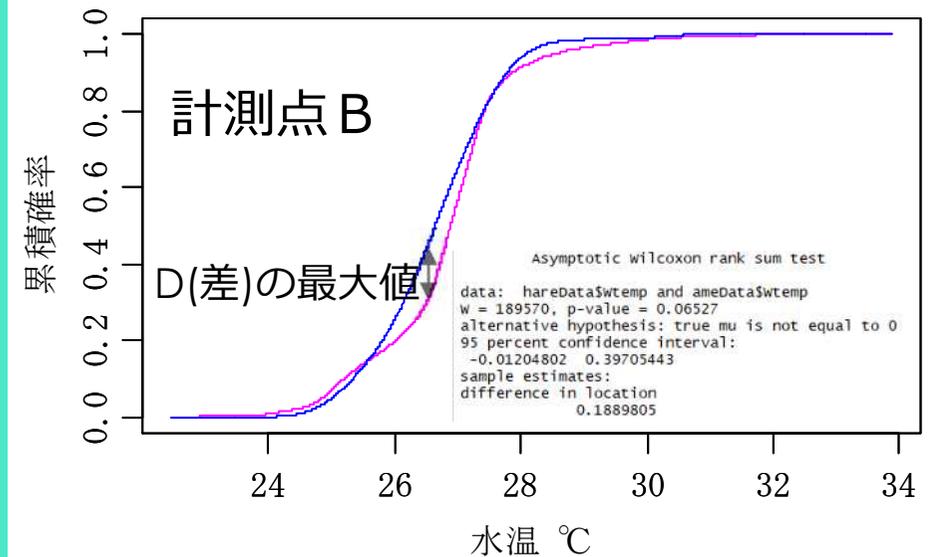
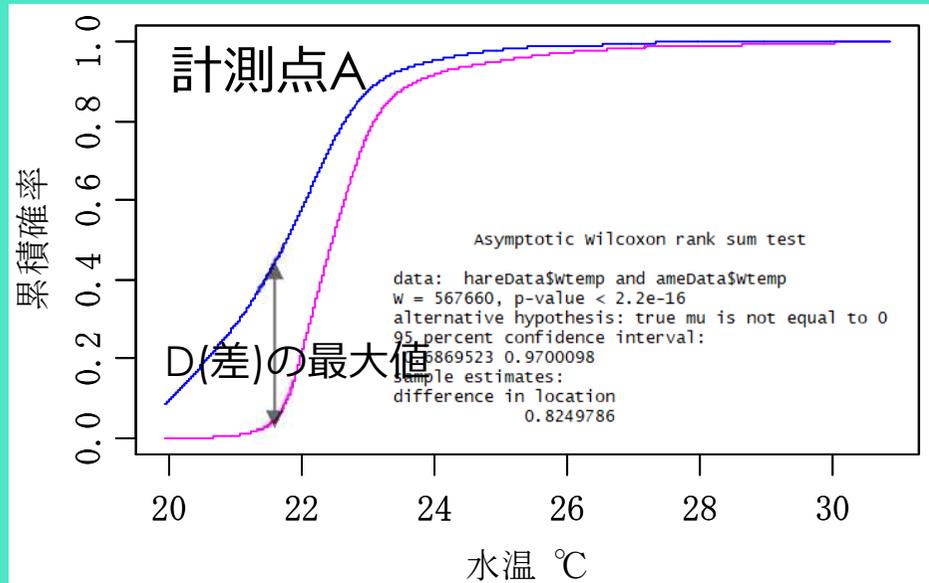
計測点Aの方がBよりW値が大きく、晴天時と雨天時不規則水温分布に差があり、雨天時浸入水の影響が大である。

しかし、W値を見ても???

図16 ウィルコクソンの順位和検定による評価

計測水温の成分分解その5 / 7 (評価方法)

4) ks検定(コルモゴロフ-スミルノフ)による評価



晴天時と雨天時水温の累積確率の差D

$$D \sqrt{\frac{nm}{n+m}}$$

データ個数 n および m

有意水準 5% の場合、 $D \sqrt{\frac{nm}{n+m}}$ の値が 1.36 以上だったら帰無仮説を棄却し、「分布は一致しない」とする。

しかし、 $D \sqrt{\frac{nm}{n+m}}$ の値を見ても ???

図17 ks検定による評価

計測水温の成分分解その6 / 7 (評価方法)

評価値

2) ROCによる評価

3) ウィルコクソンの順位和検定による評価

4) ks検定による評価

上記 2)、3)、4)の評価の値は、数字の意味が分かりづらい。

一方、1)の検出力は分布の面積であり、非超過確率は下水道技術者になじみがある。

1) 検出力(非超過確率)による評価

そのため、評価値に非超過確率を使った。

計測水温の成分分解その7 / 7 (評価方法)

評価結果の表示例(非超過確率)

↓ 下水道新技術推進機構と管診協共同研究

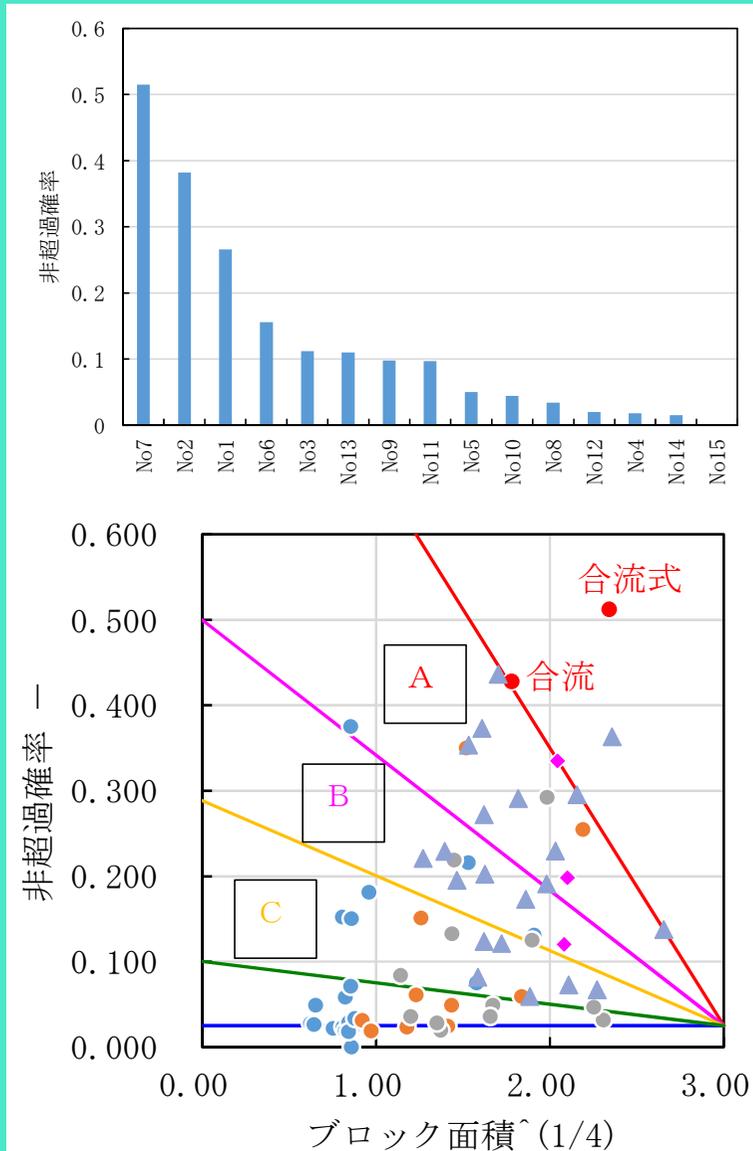


図18 非超過確率の面積補正後のリスクランク区分

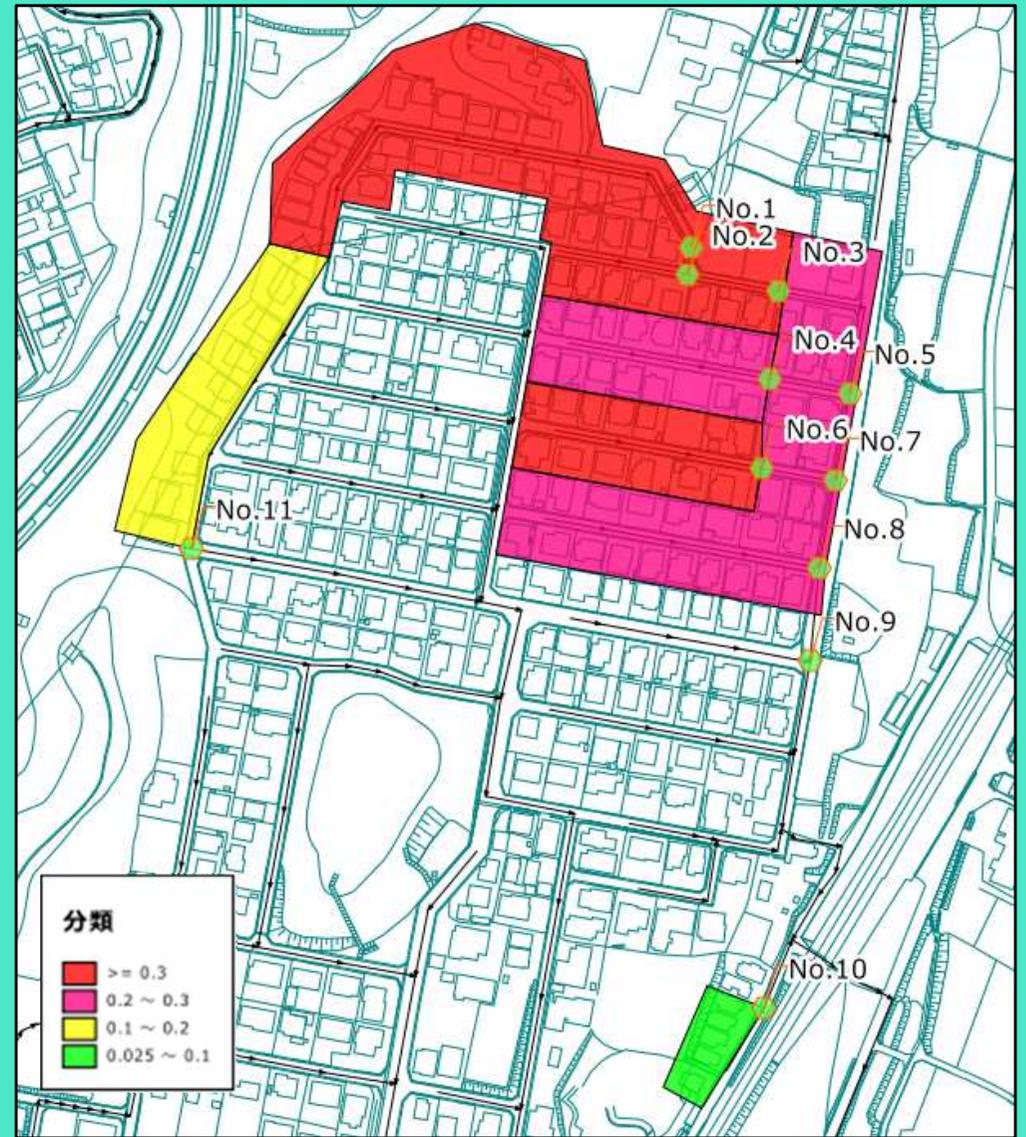
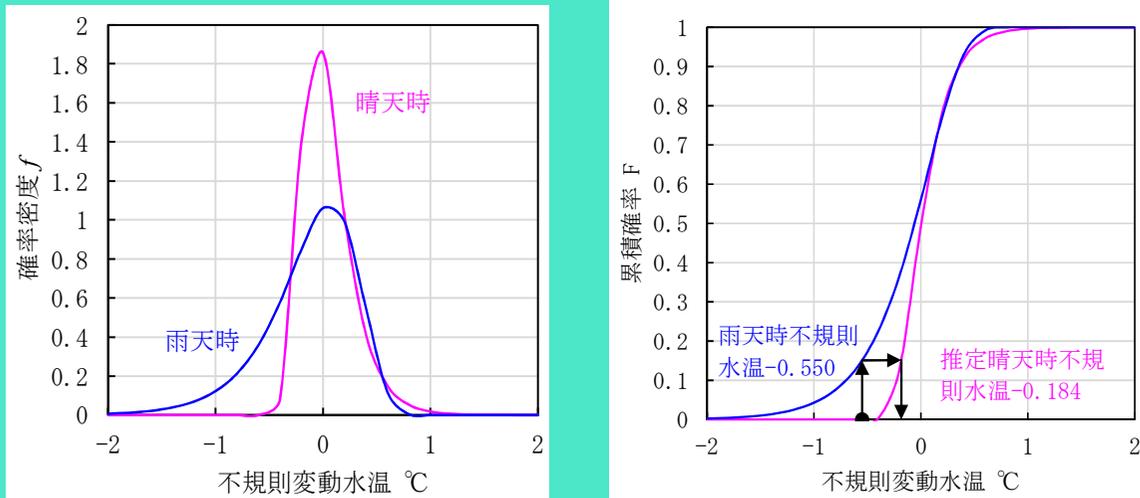


図19 雨天時浸入水発生区域

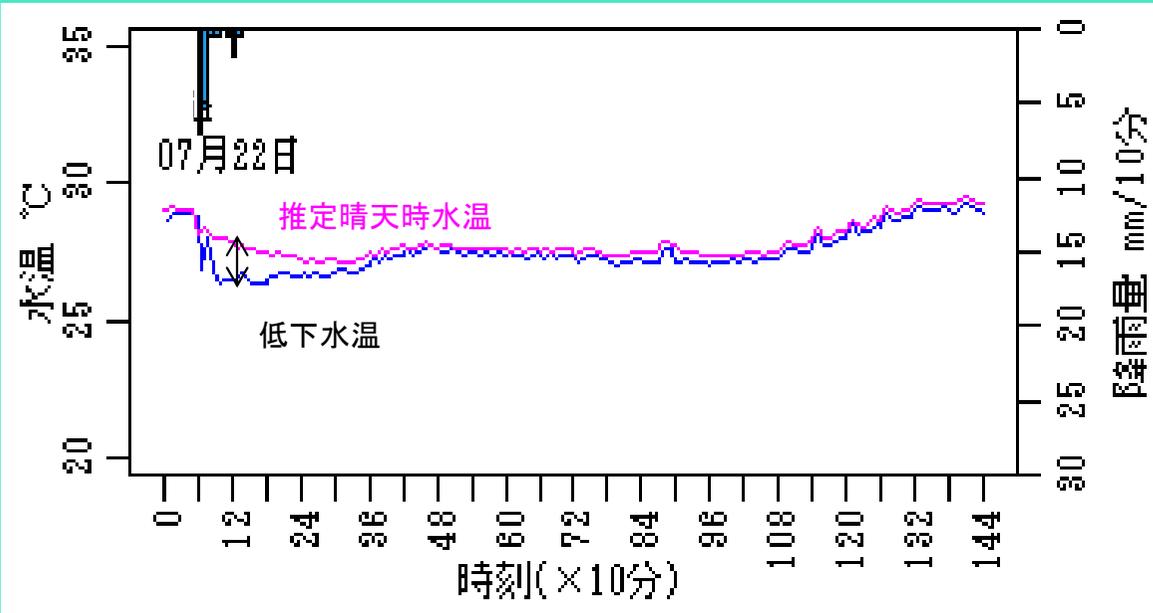
令和7年度技術研修会

成分分解法(累積確率法)による晴天時水温推定と雨天時浸入水量割合その1/2



雨天時浸入水量割合を算定するため、晴天時水温を推定する。

中根ら：下水温の成分分解法を用いたノンパラメトリック手法による雨天時浸入水量割合の推定
 令和5年6月下水道協会誌 優秀論文 (学術部門)受賞



	水温	流量割合	
混合水温	27.00 °C	0.25	雨天時浸入水
低下水温	1.00 °C	1.00	汚水

図20 計測水温と推定晴水温

成分分解法(累積確率)による晴天時水温推定と雨天時浸入水量割合その2/2

雨天時浸入水量割合 r'

$$q_i \times T_i^S + q_i r'_i \times T_i^R = q_i (1.0 + r'_i) \times T_i$$

$$r'_i = \frac{T_i^S - T_i}{T_i - T_i^R}$$

ここに、

i : 各時刻(10分単位)の順番 1~n(計測期間)

q_i : 汚水量(晴天時水量)=1.0する

r'_i : 汚水量(晴天時水量)に対する雨天時浸入水量割合

r_i : 流下水量に対する雨天時浸入水量割合

$$r = r' / (1 + r')$$

T_i^S : 晴天時水温 °C(成分分解またはニューラルネットワークによる推定晴天時水温)

T_i^R : 計測降雨温度 °C

T_i : 計測水温 °C

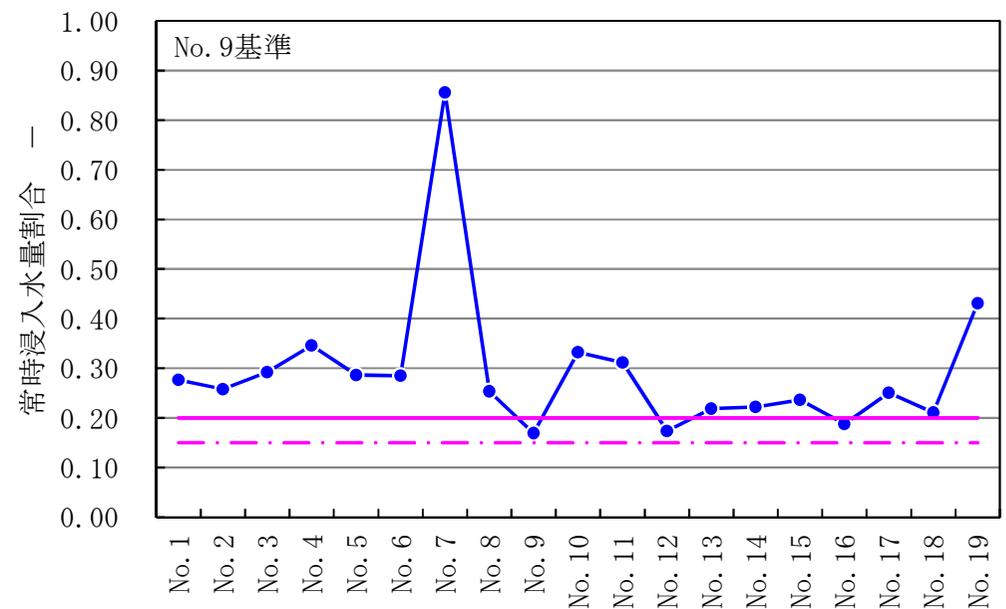
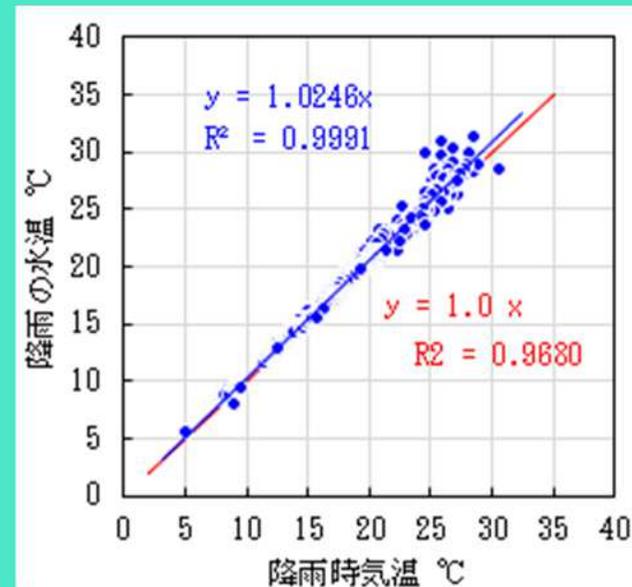


図21 計測点の雨天時浸入水量割合の比較

計測水温の成分分解法等

2021年6月 下水道協会誌 奨励論文(学術部門)賞

2022年6月 全国上下水道コンサルタント協会 有効賞

2023年6月 下水道協会誌 優秀論文(学術部門)賞

2024年6月 全国上下水道コンサルタント協会 新技術奨励賞

計測水温のAI解析

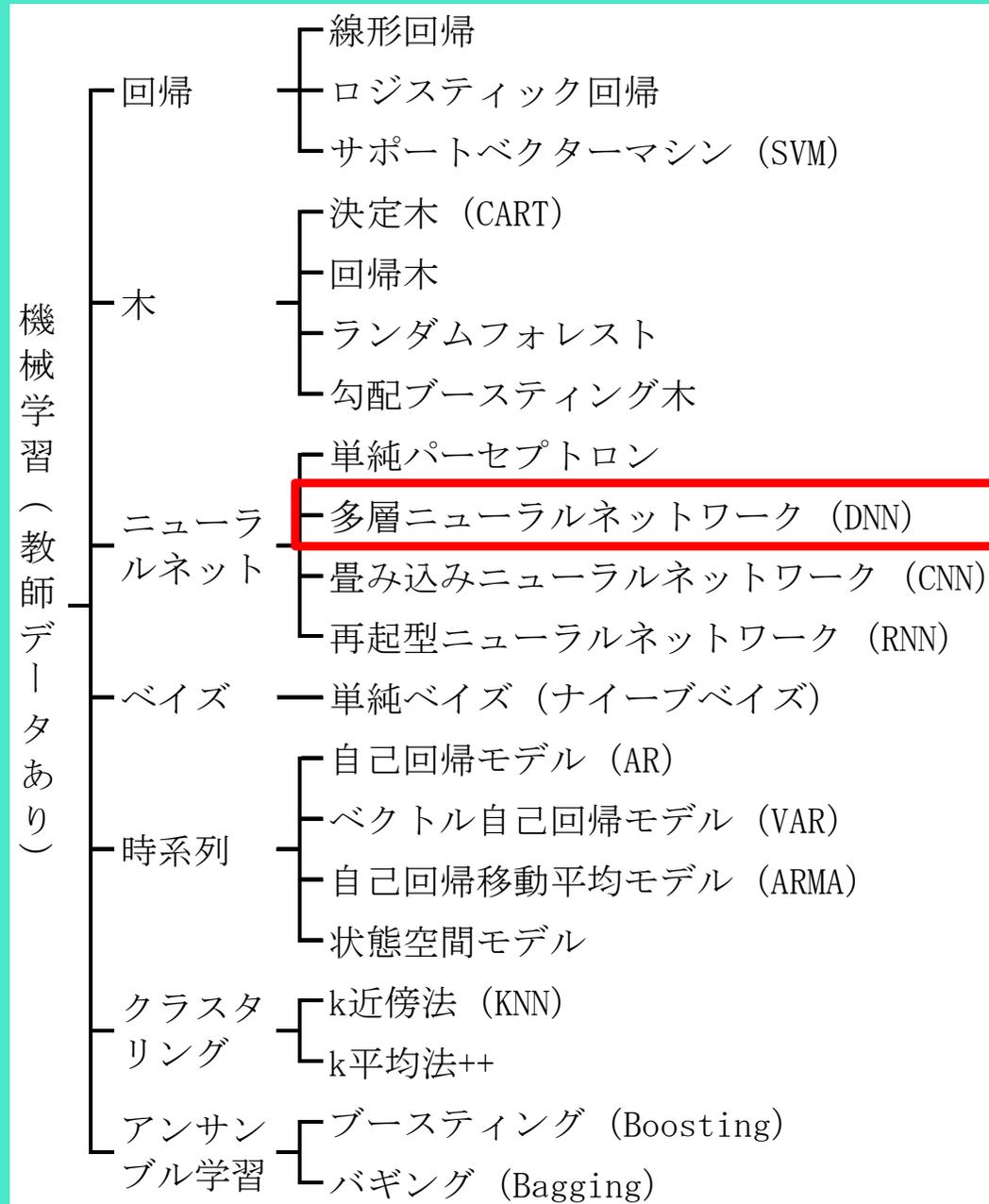


図22 AI機械学習の学習技術

AI学習による晴天時水温の推定 その1

表2 データ項目とデータ構成

データ項目	データ構成
教師データ	・計測水温
目的変数	・推定水温
説明変数	
入力層データ：時刻カテゴリ（10分間隔）	
質的データ	<ul style="list-style-type: none"> ・時刻カテゴリ：144個 ・曜日カテゴリ：7個 小計 151個
量的データ	<ul style="list-style-type: none"> ・降雨量データ：12個^{*1} ・長期変動水温：1個^{*2} 小計 13個
合計 164個	

*1 対象とする計測水温の降雨の影響がある時刻まで遡る降雨量データ

*2 成分分解した長期変動水温データ

降雨の影響時間1日(24時間)

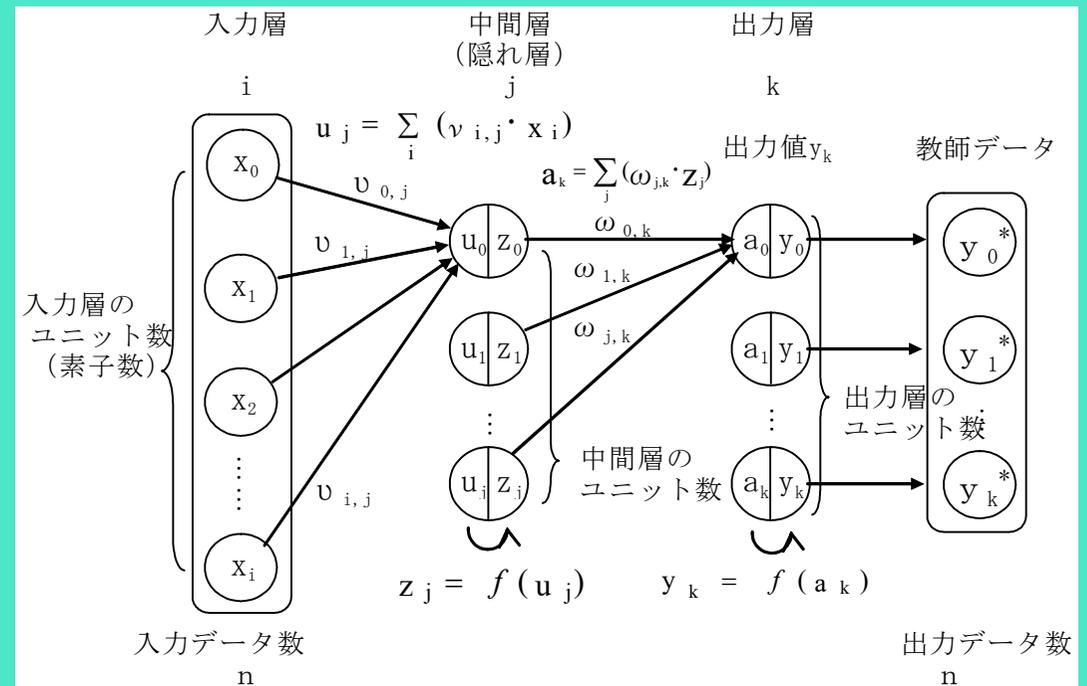


図23 AI (ニューラルネットワーク)のアルゴリズム

計測水温を教師データとし、AI学習の1つであるニューラルネットワーク法を使って左表の説明変数を使い学習させ、目的変数の水温を推定する。

学習結果(v 、 ω)を使い、降雨量をなし(0)で再計算し、晴天時水温を推定する。

AI学習による晴天時水温の推定 その2

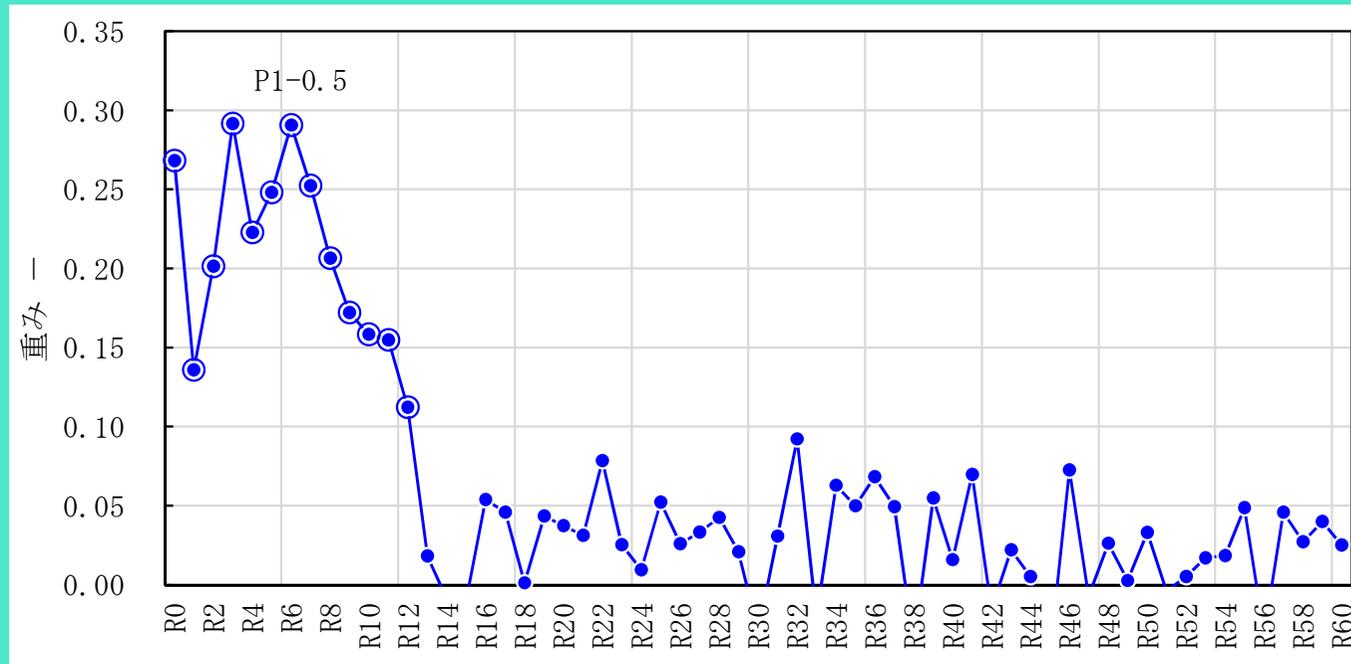
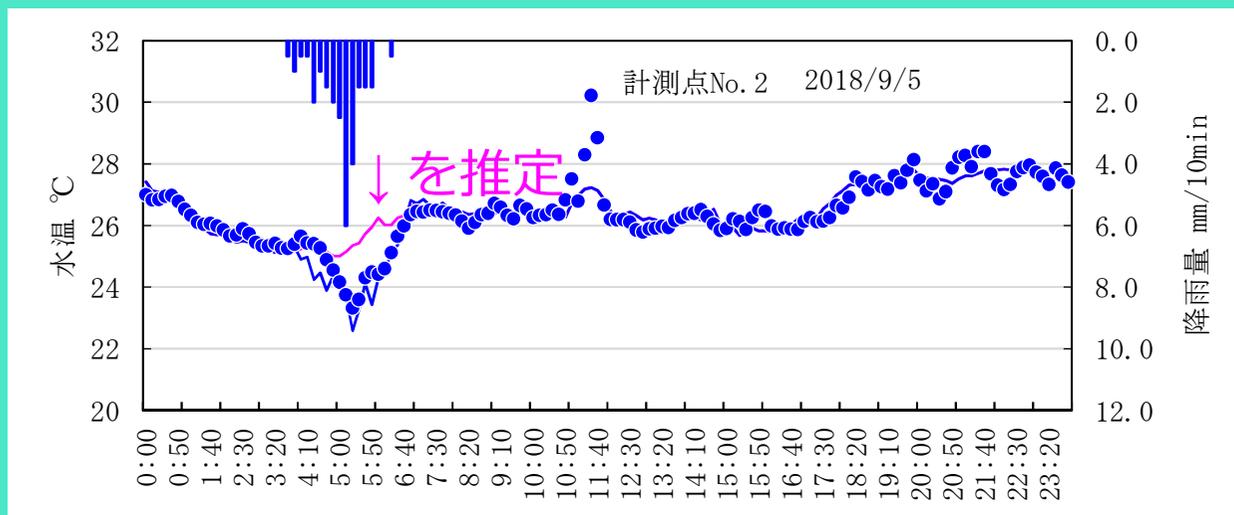
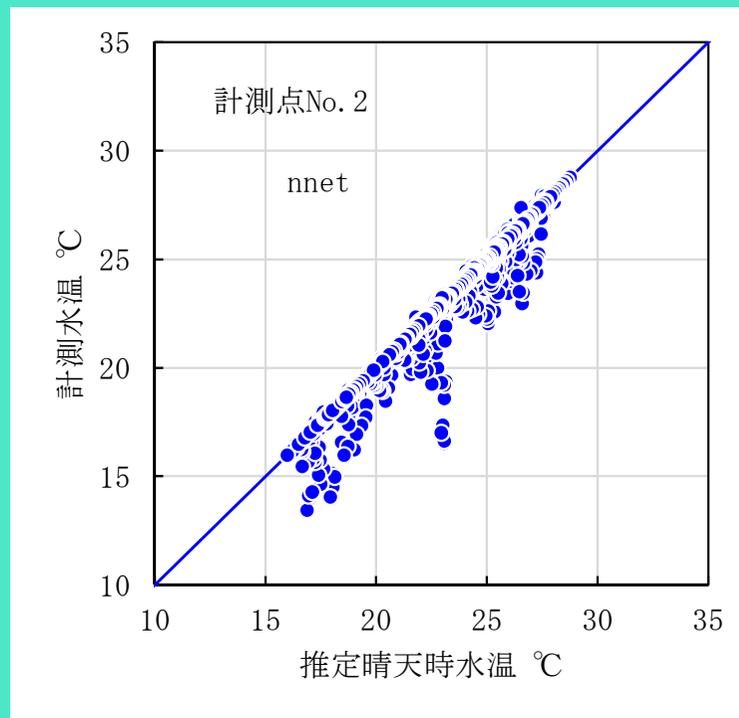
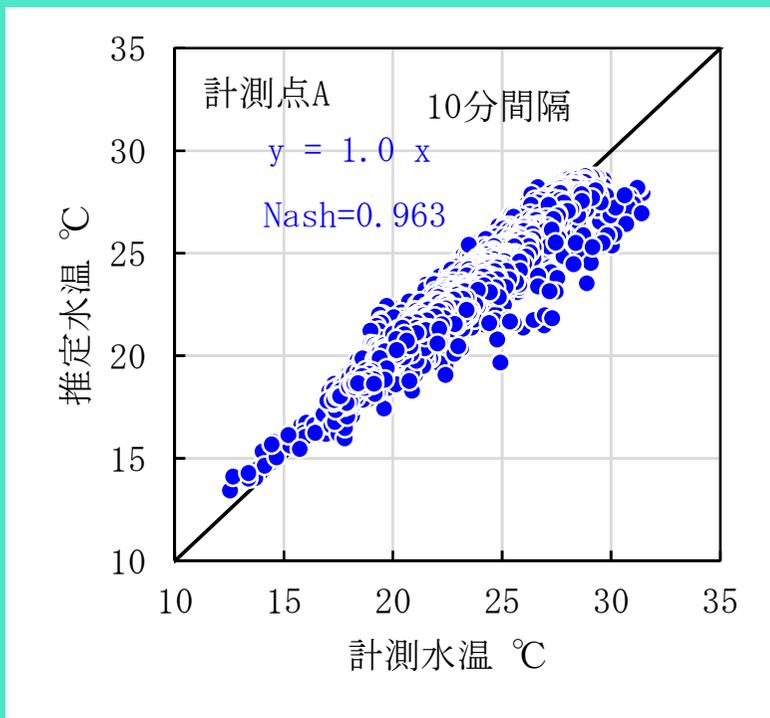


図7.1 降雨影響時間の低下水温に及ぼす重み

計測点面積6.85haの降雨影響時間 12×10 分 = 120分 = 2時間

AI学習による晴天時水温の推定その3



成分分解法(累積確率)の雨天時浸入水量割合 r' と同様に計算する。

図24 AI学習による晴天時水温推定例

AI学習による晴天時水温の推定その4 (成分分解法との比較)

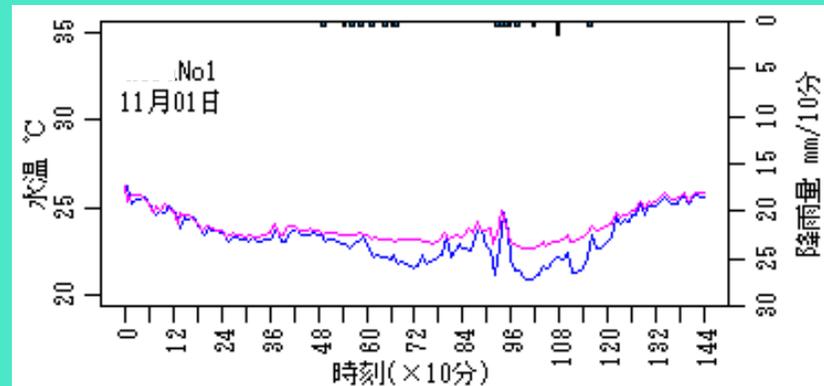
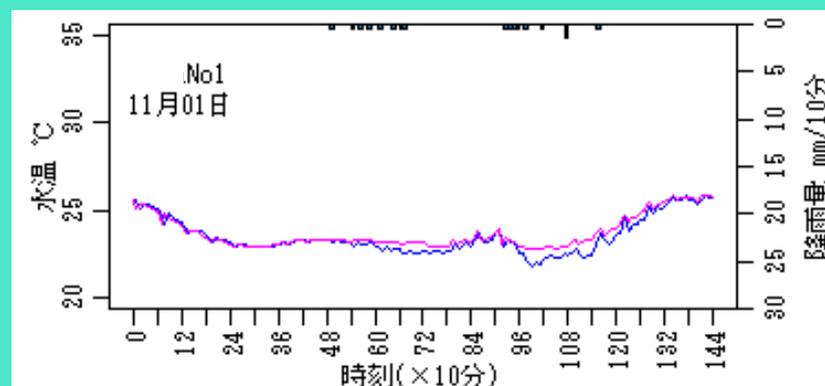
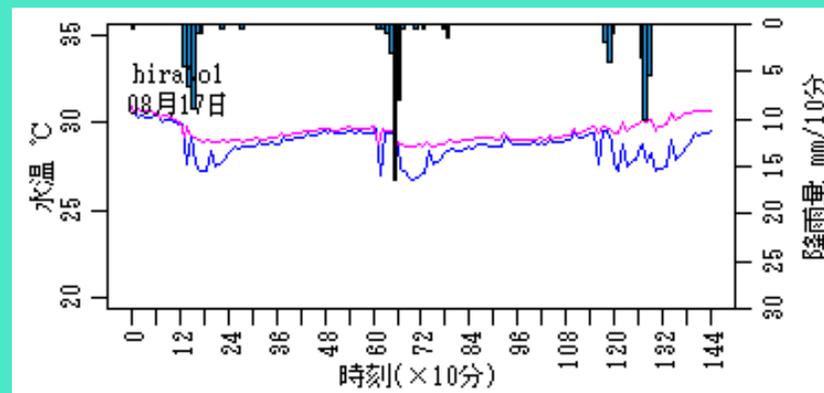
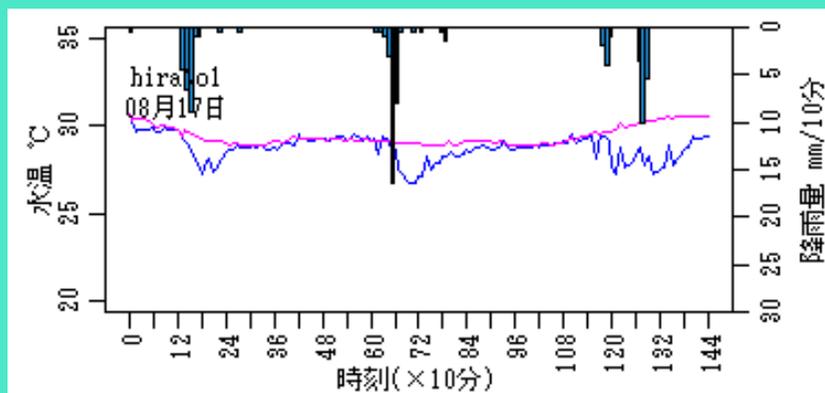
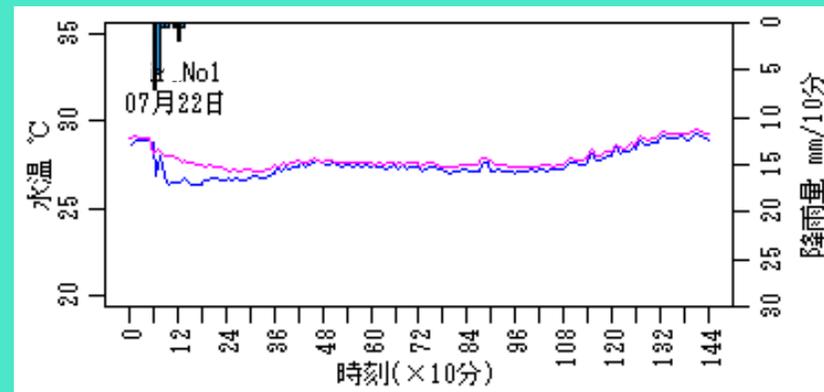
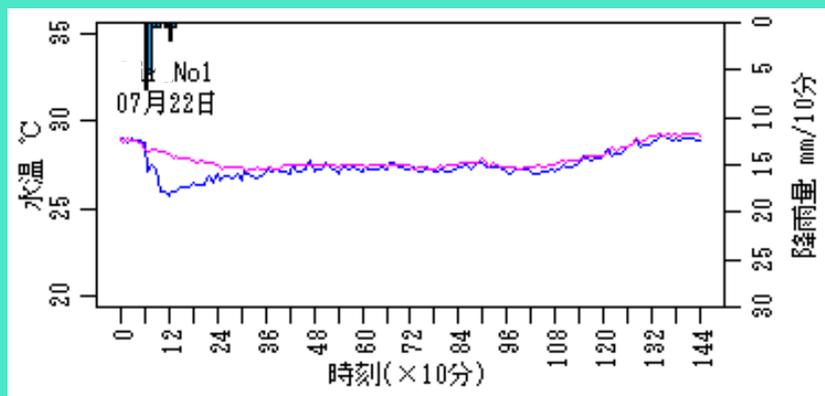


図25 AI学習

図26 成分分解法(累積確率法)

その他：AI学習による晴天時流量の推定

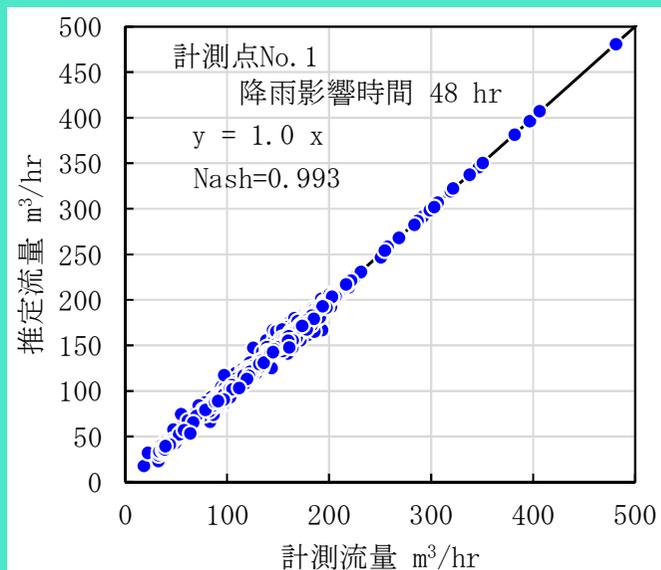


図27 AI学習による計測流量と推定流量の関係

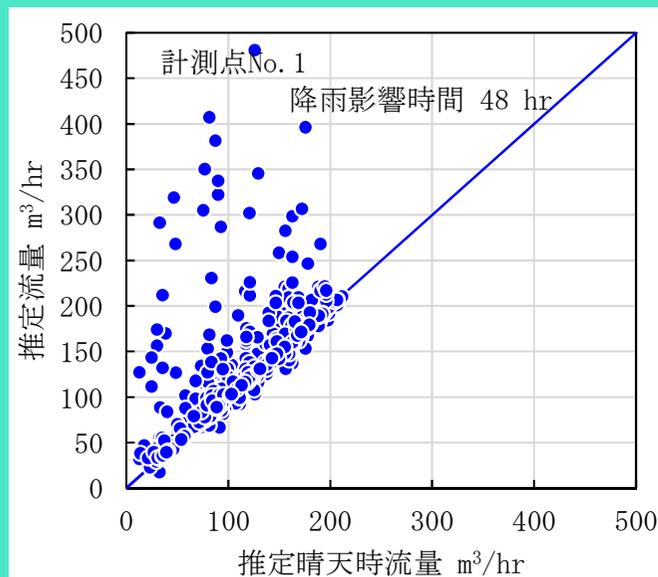


図28 AI学習による推定晴天時流量と推定流量の関係

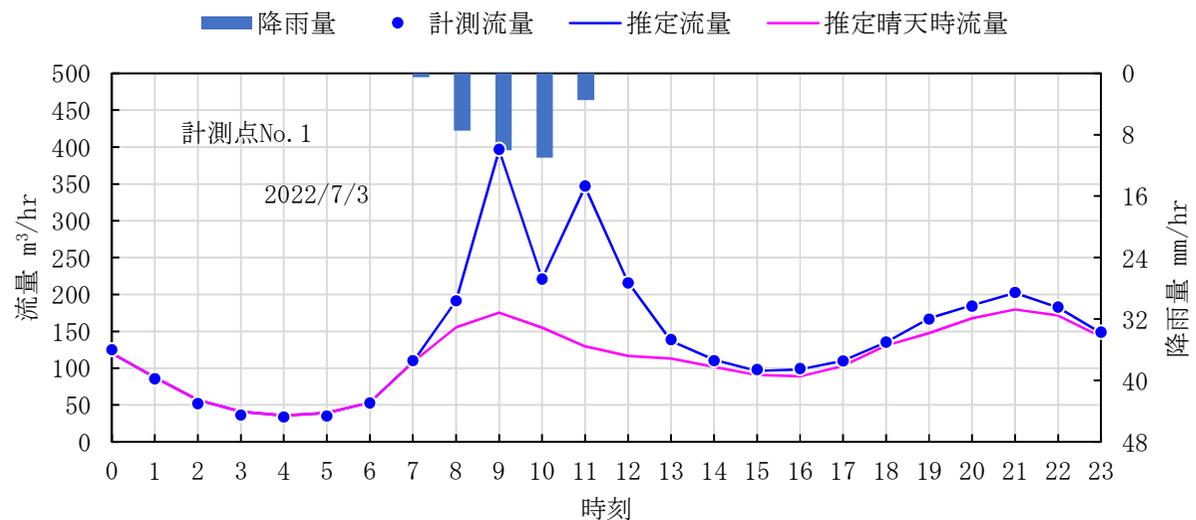


図29 降雨時の計測流量、推定流量、推定晴天時流量の例

その他：AI学習による晴天時管内水深の推定

管径○250mm

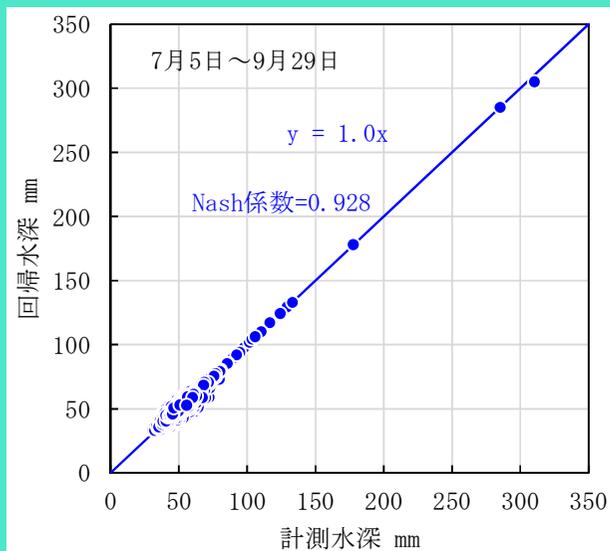


図30 計測水深と回帰水深の関係

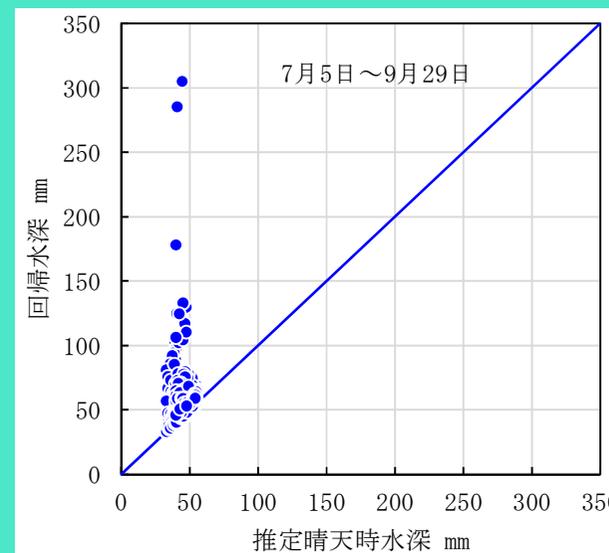


図31 推定晴天時水深と回帰水深の関係

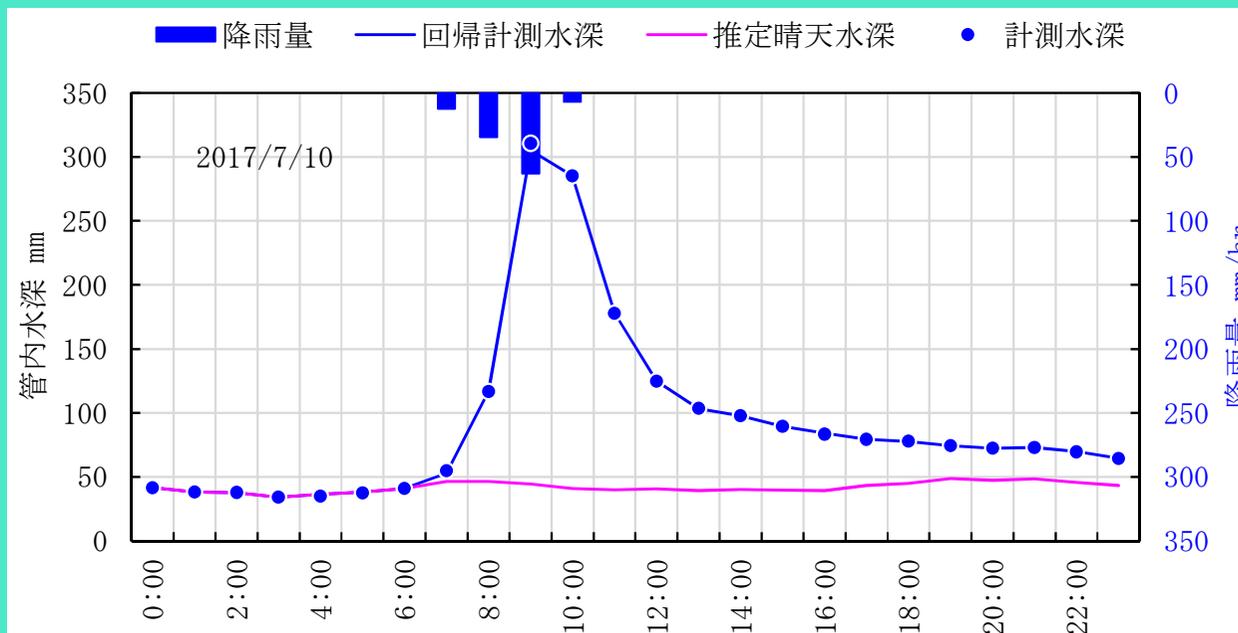
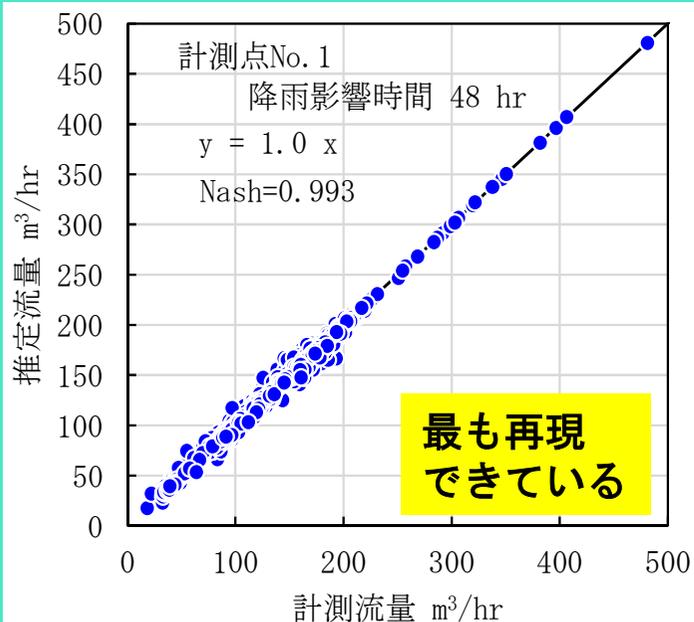
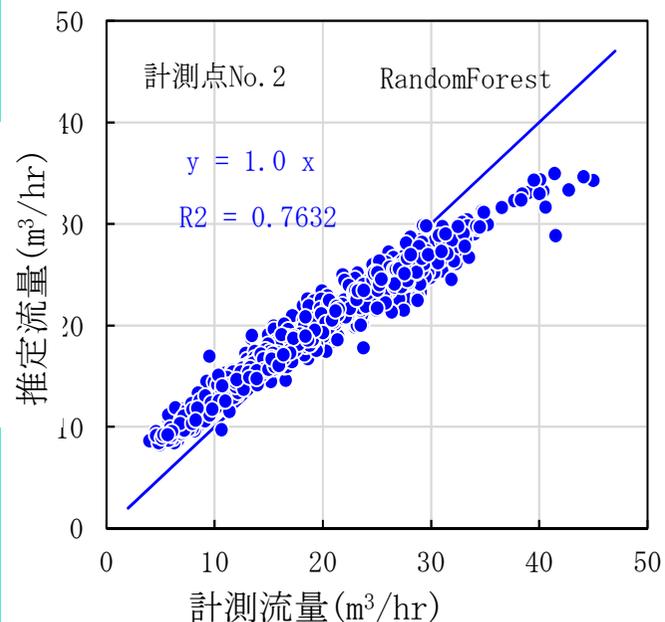


図32 降雨日の計測水深と推定晴天時水深

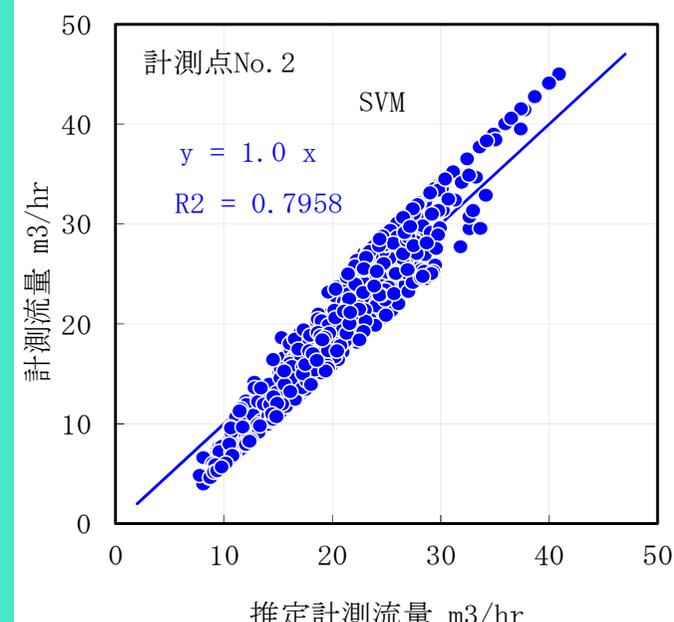
その他：AI学習方法により学習結果には違いがある



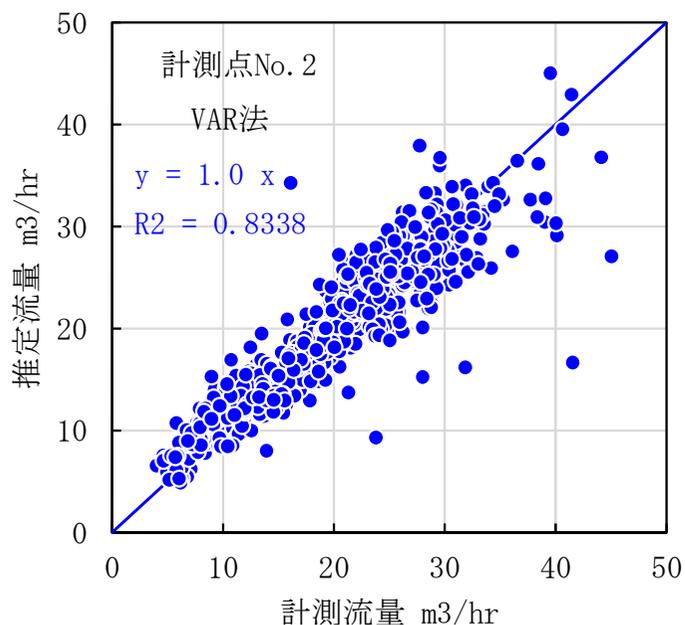
ニューラルネットワーク



ランダムフォレスト



サポートベクターマシン



ベクトル自己回帰モデル

中根 進ら：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 2021.10月号 VOL.58 NO.708

その他：AI学習 管きよ劣化要因の推定 その1 / 2

説明変数(劣化要因)

管径 : 250 mm~1,000 mm ←
 路線延長 : 5.36 m~64.03 m ←
 管本数 : 3本~30本 ←
 取付け管本数 : 1本~8本 ←
 経過年数 : 7年~35年 ←
 歩車道区分 : 歩道、車道 ←
 土被り : 0.8 m~63.3 m ←

推定判定 ←
 0:不一致 ←
 1:一致 ←

スパン 番号	調査診断 緊急度	推定緊急度の確率			推定 緊急度	推定判定
		II	III	IV		
1	III	0.01157	0.82014	1.68E-01	III	1
2	IV	0.04116	0.39599	5.63E-01	IV	1
3	IV	0.025315	0.333857	6.41E-01	IV	1
4	IV	0.015027	0.345599	6.39E-01	IV	1
5	IV	0.000876	0.446202	5.53E-01	IV	1
6	IV	5.35E-09	0.340125	6.60E-01	IV	1
7	IV	0.014906	0.44914	5.36E-01	IV	1
8	III	0.022364	0.310713	6.67E-01	IV	0
9	IV	1.57E-07	0.79117	2.09E-01	III	0
409	III	0.109479	0.47431	4.16E-01	III	1
410	III	0.149534	0.68735	1.63E-01	III	1
411	III	5.85E-08	0.498566	5.01E-01	IV	0
412	III	3.68E-06	0.714269	2.86E-01	III	1
413	III	2.7E-07	0.720947	2.79E-01	III	1
414	III	3.14E-08	0.606716	3.93E-01	III	1
415	IV	8.79E-06	0.641503	3.58E-01	III	0

415スパン

その他：AI学習 管きよ劣化要因の推定 その2 / 2

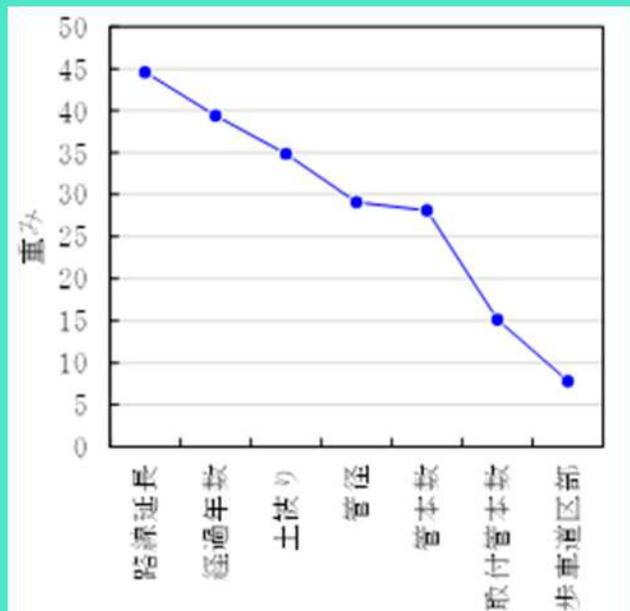


図 5.2 説明変数の重み

表 5.1 説明変数のユニットに対する重み ω

	管径	路線延長	管本数	取付管本数	経過年数	歩車道区部	土盛り
b->h1	i1->h1	i2->h1	i3->h1	i4->h1	i5->h1	i6->h1	i7->h1
-3.45	18.79	4.23	-9.64	5.71	4.5	2.17	110.58
b->h2	i1->h2	i2->h2	i3->h2	i4->h2	i5->h2	i6->h2	i7->h2
1.92	15.5	-23.72	19.95	3.67	1.4	-4.51	-8.85
b->h3	i1->h3	i2->h3	i3->h3	i4->h3	i5->h3	i6->h3	i7->h3
4.7	4.38	-80.33	78.38	0.17	22.43	4.91	-38.95
b->h4	i1->h4	i2->h4	i3->h4	i4->h4	i5->h4	i6->h4	i7->h4
-36.28	-25.91	17.96	15.89	60.48	43.24	11.73	-16.34

表 5.2 各ユニットから出力層に対する重み ω

	b->o1	h1->o1	h2->o1	h3->o1	h4->o1
II	12.02	-0.05	-11.37	-13.27	11.65
III	20.75	2.7	1.01	-18.16	-6.04
IV	b->o3	h1->o3	h2->o3	h3->o3	h4->o3
	-32.77	-2.65	10.36	31.43	-5.61

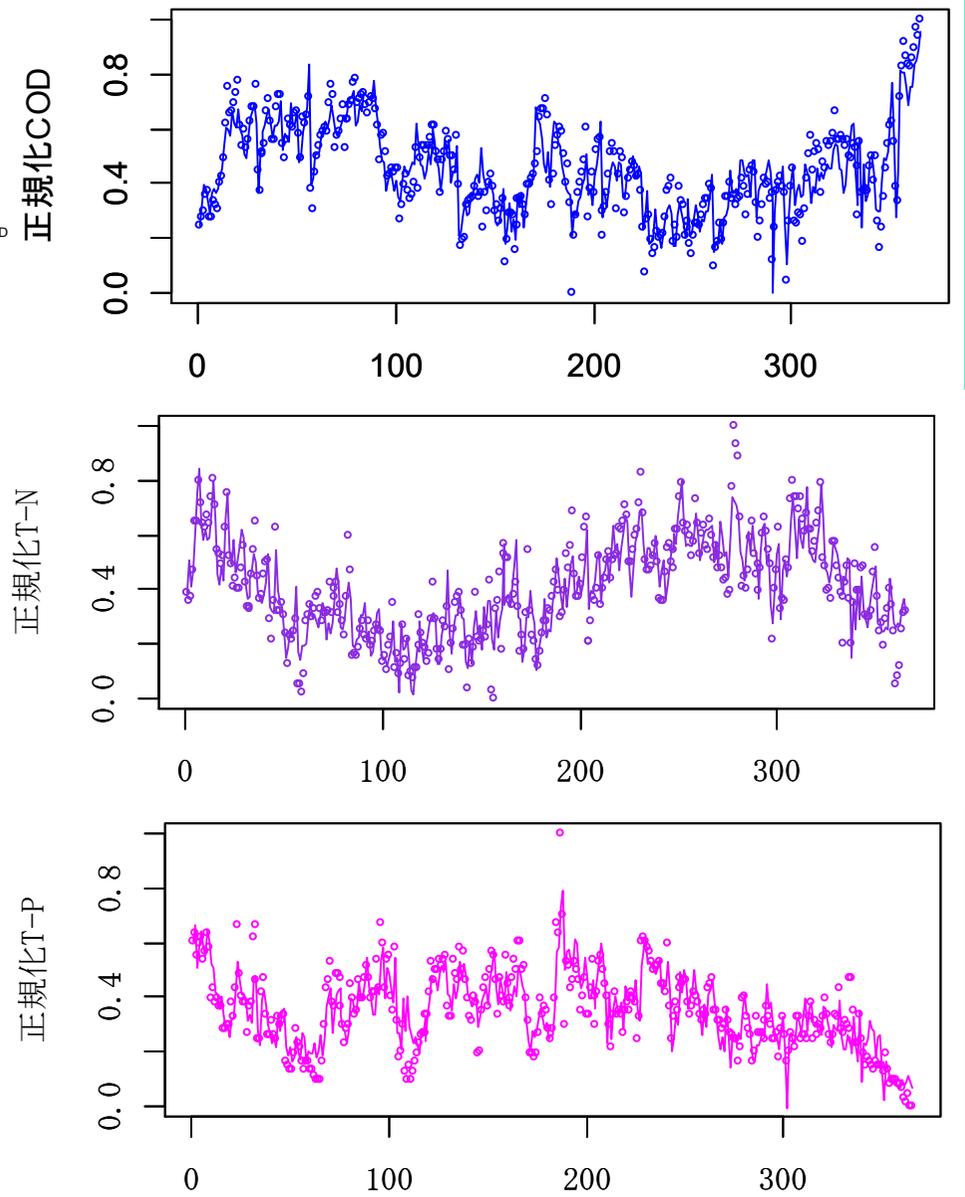
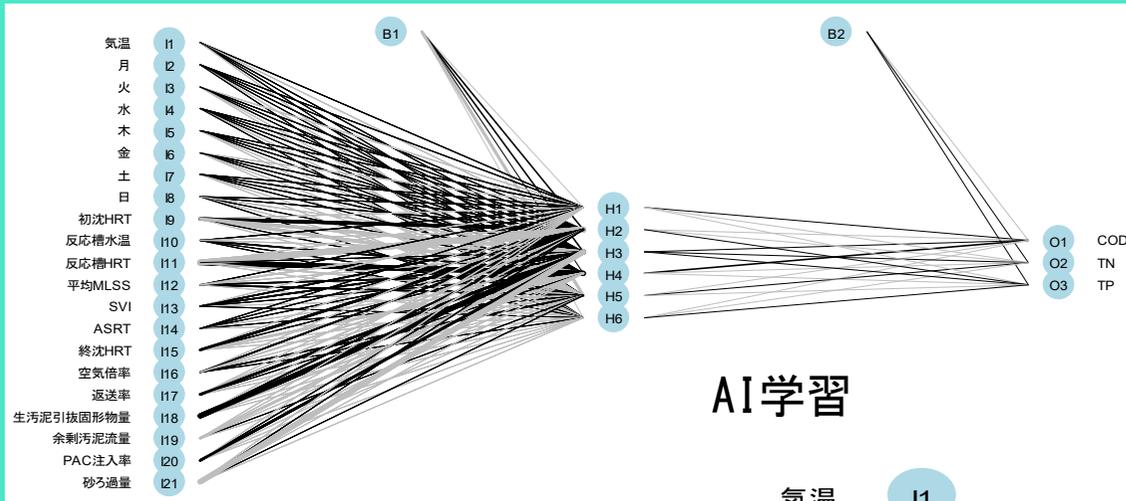
	推定結果		
	II	III	IV
II	26	1	0
III	2	250	3
IV	0	0	133
診断結果	28	251	136
的中率	0.929	0.996	0.978
総合的中率	0.986		

	推定結果		
	II	III	IV
II	0	0	0
III	14	167	54
IV	14	84	82
診断結果	28	251	136
的中率	0.000	0.665	0.603
総合的中率	0.600		

ランダムフォレストによる緊急度推定結果 >

ニューラルネットワークによる緊急度推定結果

その他：AI学習による処理水質の推定



- 気温 I1
- 月 I2
- 火 I3
- 水 I4
- 木 I5
- 金 I6
- 土 I7
- 日 I8
- 初沈HRT I9
- 反応槽水温 I10
- 反応槽HRT I11
- 平均MLSS I12
- SVI I13
- ASRT I14
- 終沈HRT I15
- 空気倍率 I16
- 返送率 I17
- 生汚泥引抜固形物量 I18
- 余剰汚泥流量 I19
- PAC注入率 I20
- 砂ろ過量 I21

その他：OPENFOAMによる終沈汚泥界面

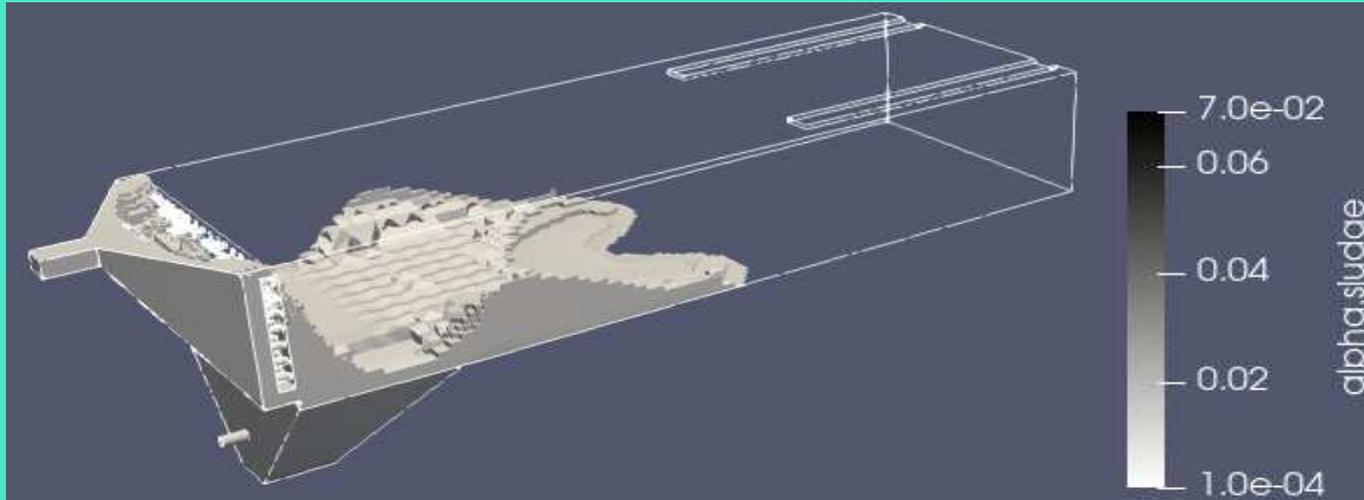


図2.5汚泥界面の状況 (t = 5000 sec)

沈降速度因子：反応槽水温、MLSS、SVI
 流量変動：水面積負荷

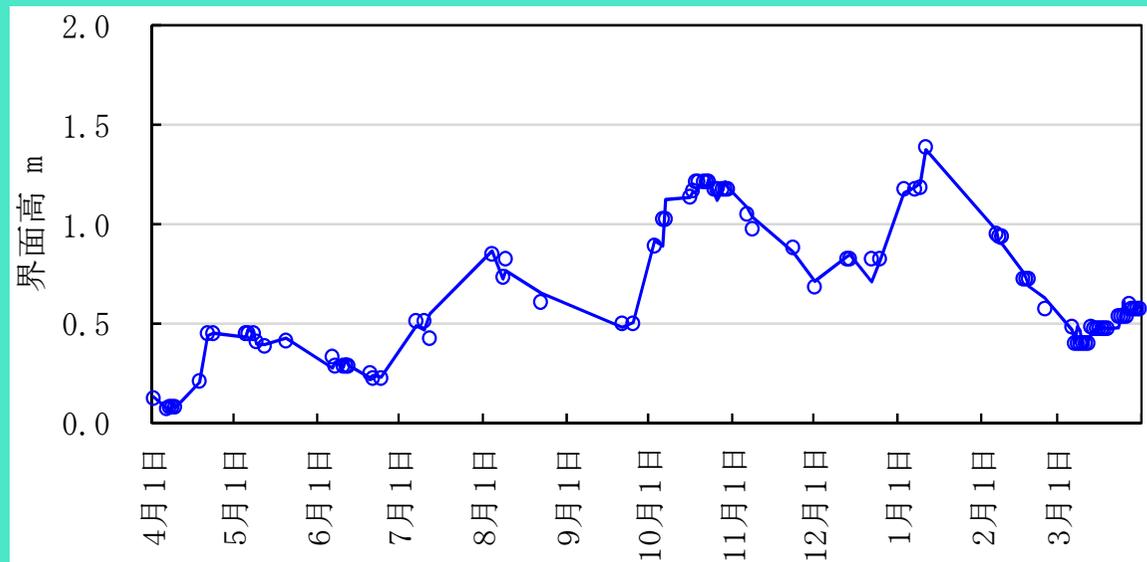
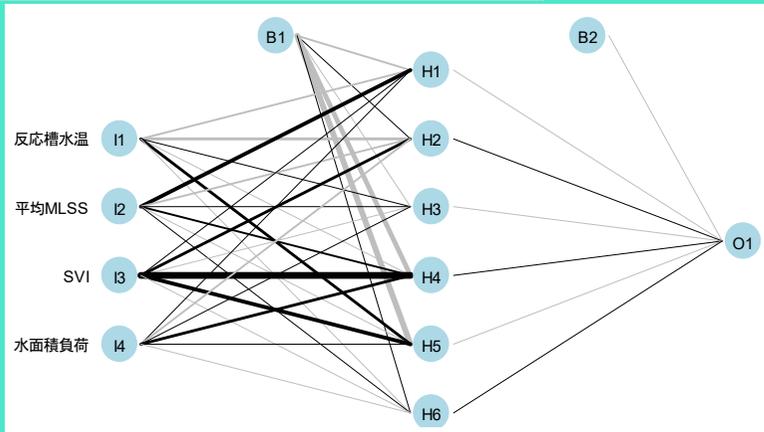


図2.5 計測界面高と推定界面高の推移

ご清聴ありがとうございました。