

# 福井県大野盆地における地下水利用を 考慮した水収支に関する研究

2022年3月

関西大学 環境都市工学部

教授・工博・楠見 晴重

# 目次

<b>第1章</b>	<b>序論</b>	
1.1	はじめに .....	1
1.2	大野市の概要 .....	1
1.3	既往の研究および調査 .....	4
1.4	本研究の目的と内容 .....	5
<b>第2章</b>	<b>大野盆地の地下水流入量</b>	
2.1	はじめに .....	6
2.2	地下水浸透量の推定 .....	6
2.2.1	大野盆地の降水量と流域面積 .....	6
2.2.2	蒸発散量の推定 .....	9
2.2.3	表面流出量の推定 .....	12
2.2.4	地下水浸透量の推定 .....	13
2.3	地下水流動量の推定 .....	14
2.4	水田からの地下水浸透量 .....	15
2.4.1	水田からの地下水浸透について .....	15
2.4.2	減水深について .....	15
2.4.3	冬期湛水事業による浸透量の推定 .....	16
2.4.4	水田灌水による浸透量の推定 .....	16
2.5	地下水流入量の推定 .....	17
2.6	まとめ .....	17
<b>第3章</b>	<b>大野盆地の地下水流出量</b>	
3.1	はじめに .....	18
3.2	地下水揚水量について .....	18
3.3	地下水湧出量の推定 .....	19
3.3.1	地下水湧出量について .....	19
3.3.2	河川流量の測定方法と測定結果 .....	23
3.3.3	地下水湧出量の推定 .....	32
3.4	地下水流出量の推定 .....	33
3.5	まとめ .....	33
<b>第4章</b>	<b>大野盆地の地下水収支</b>	
4.1	はじめに .....	34
4.2	地下水収支の推定 .....	34
4.3	まとめ .....	35

<b>第5章</b>	<b>MATLABによる機械学習による欠損データの補完と推定</b>	
5.1	はじめに.....	36
5.2	サポートベクター回帰 (SVR: Support Vector Regression) について .....	36
5.3	MATLABによる予測結果 .....	37
5.4	まとめ.....	38
<b>第6章</b>	<b>長期間の少雨による地下水位低下の現状とその影響</b>	
6.1	はじめに .....	39
6.2	地下水位の変化 .....	39
6.3	長期間の少雨による影響 .....	42
6.4	まとめ .....	44
<b>第7章</b>	<b>結論</b> .....	45
	<b>参考文献</b> .....	47

# 第1章 序論

## 1.1 はじめに

地下水は、地球上の多くの国々において農業・工業・生活用の水資源として重要であり、さらには、社会活動・文化といったような観点においても大切な環境要素である。近年では、融雪等の目的のために地下水を利用する機運も高まっており、地下水の重要性はますます増加している傾向にある。しかし、人間活動の広範囲化や気候変動の影響に伴い、地下水環境は大きく変動している。有用な地下水資源の利用や管理には、正確な地下水性状の把握が必要である<sup>1)</sup>。

地球上に存在する水量はおよそ 14 億 km<sup>3</sup>であると言われ、そのうちの約 97.5 %が海水であり、淡水は約 2.5 %である<sup>2)</sup>。この淡水の大部分は、氷や氷河として存在しており、地下水や河川、湖沼の水として存在する淡水の量は、地球上の水の約 0.8 %である。さらにこの淡水の量は、大部分が地下水として存在し、河川や湖沼はわずか 0.01 %にすぎない。地下水が我々の使用できる淡水資源として豊富に存在することから、いかに地下水が貴重な資源であるかがわかる。

本研究の対象地域は、福井県大野市である。大野市は豊かで良質な地下水に恵まれた城下町として知られており、市街地では家庭用ホームポンプで直接地下水を揚水して飲み水に利用するなど、古くから生活用水や工業用水として様々な用途で地下水を利用してきた。さらに大野市には、御清水や本願清水などの「名水百選」に選ばれている湧水がみられ、全国的にみても豊富な水環境にあることから、市民と地下水は密接な関係にあるといえる。しかし、この豊富な地下水は決して無限にあるものではない。地域共通の貴重な資源であることを市民が認識し、将来にわたって保全し利用し続けていくためにも、現状の地下水性状を定量的に把握する必要がある。現に、融雪時に大量の地下水を揚水するなどの理由から、地下水位低下による井戸枯れなどの問題が発生した事例も存在する。したがって、大野市の地下水性状を定量的に把握することは、大野市における将来の地下水・環境政策に重要な方向性を与えるとともに、住民に対しても有用性の高い資料となると認識される。

## 1.2 大野市の概要

大野市は福井県東部の内陸に位置しており、人口は約 32,000 人である。市域の面積は 872.43 km<sup>2</sup>と福井県で最も面積の大きい自治体であり、面積の約 9 割を森林が占める自然豊かな地域である<sup>3)</sup>。そして、標高は約 170 m~230 m の高所に位置している。さらに、市街地の周囲は加賀越前山地や越前中央山地などの 1,000 m 級の山々に囲われており、市街地は地形的な意味合いで「大野盆地」と称されている。また、市内には南から北に向かって九頭竜川、真名川、清滝川、赤根川といった 4 本の一級河川が流れている。図 1.1 は大野市の位置を示し、図 1.2 は大野市を流れる 4 本の一級河川を示す。

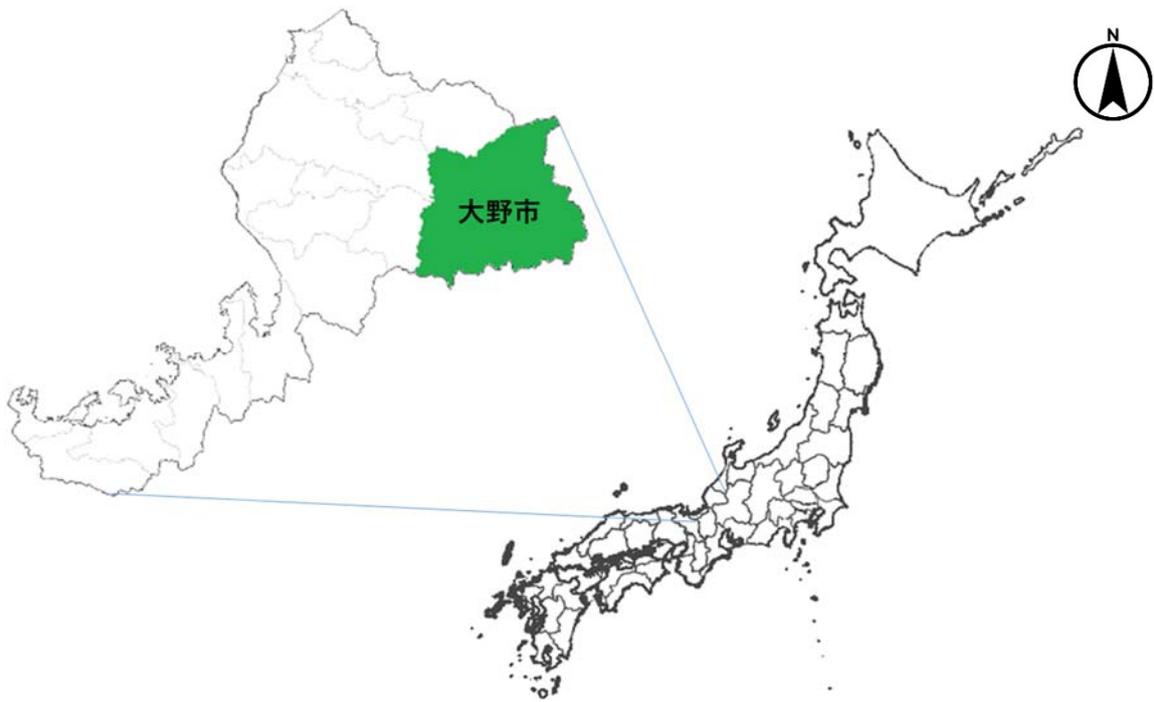


図 1.1 大野市の位置図

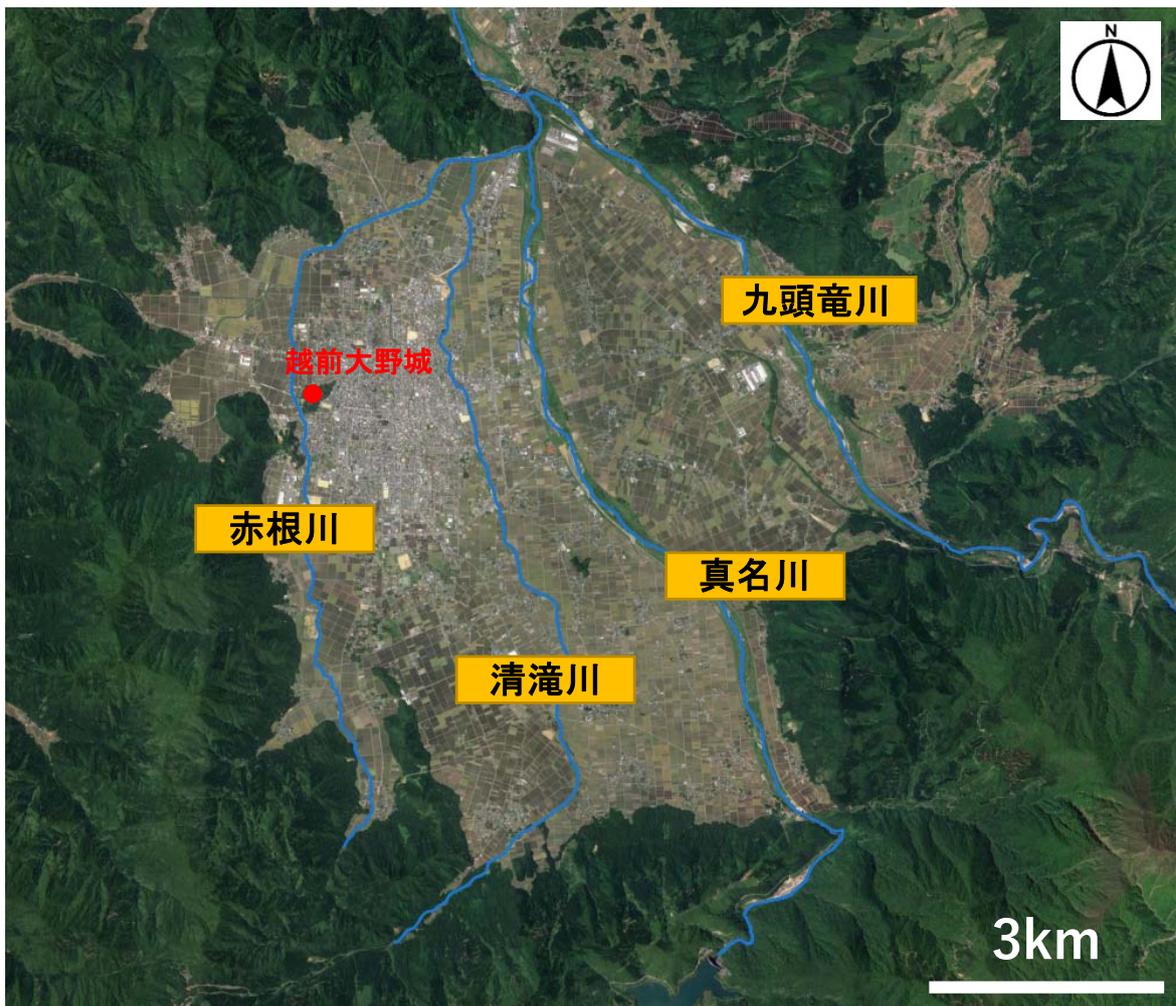


図 1.2 大野盆地と各河川の位置関係

大野市の過去10年間（2011-2020年）の年間降水量の平均は2,365 mmで、全国的に比較しても多量である<sup>4)</sup>。そして、気候区分は日本海型の気候となり、冬期の降水量や降雪量も多い特徴を持つ。過去10年間における、各月の降水量と降雪量および気温の平均を図1.3に示す。

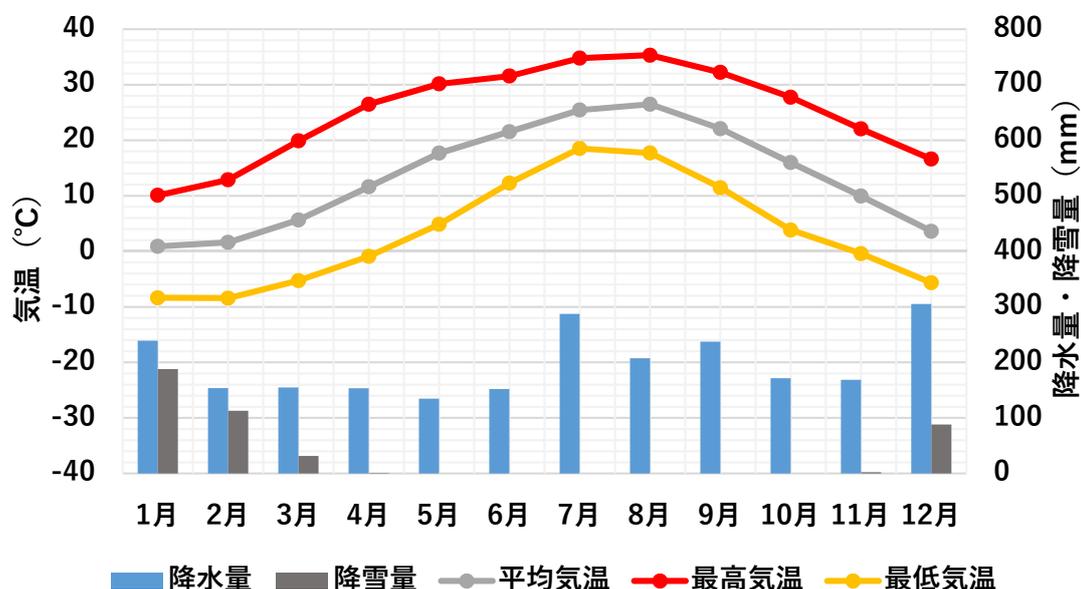


図 1.3 過去10年間（2011-2020年）の各月の降水量と降雪量および気温の平均

図1.4は大野盆地の地質構造を示す。大野盆地の地質は主に砂礫によって構成されており、周辺の山地は安山岩、玄武岩、花崗岩等で構成されている。砂礫によって構成された地質や盆地という地形、降水量の多さなどの理由より、大野盆地は豊かで良質な地下水に恵まれていると考えられる。

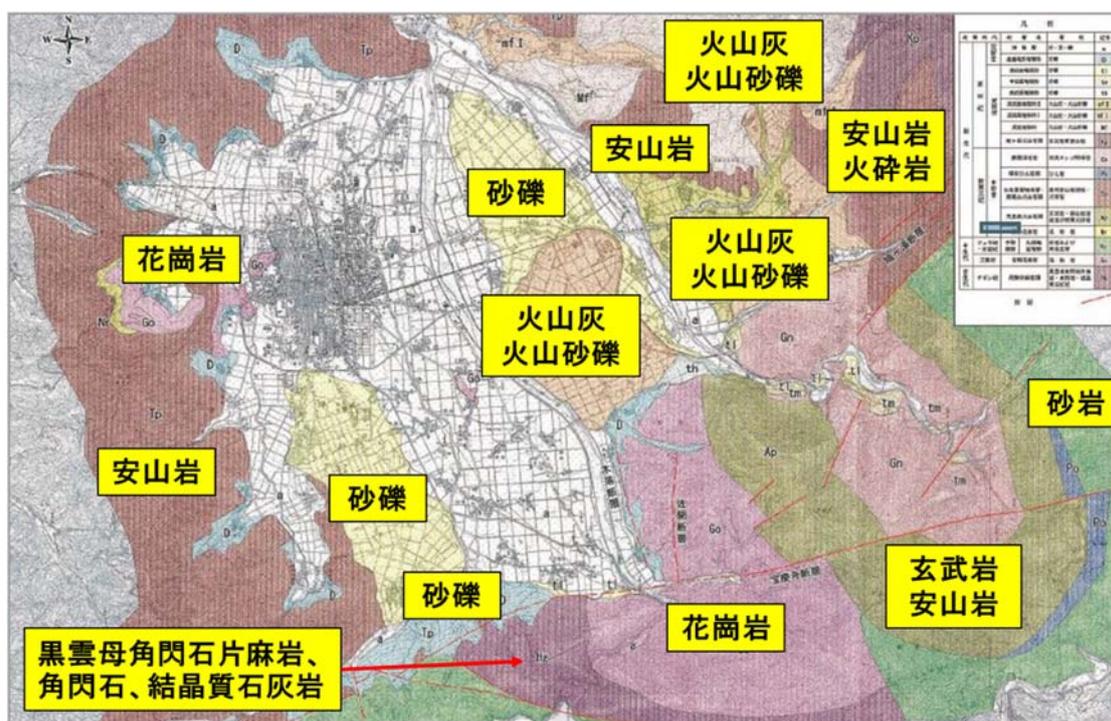
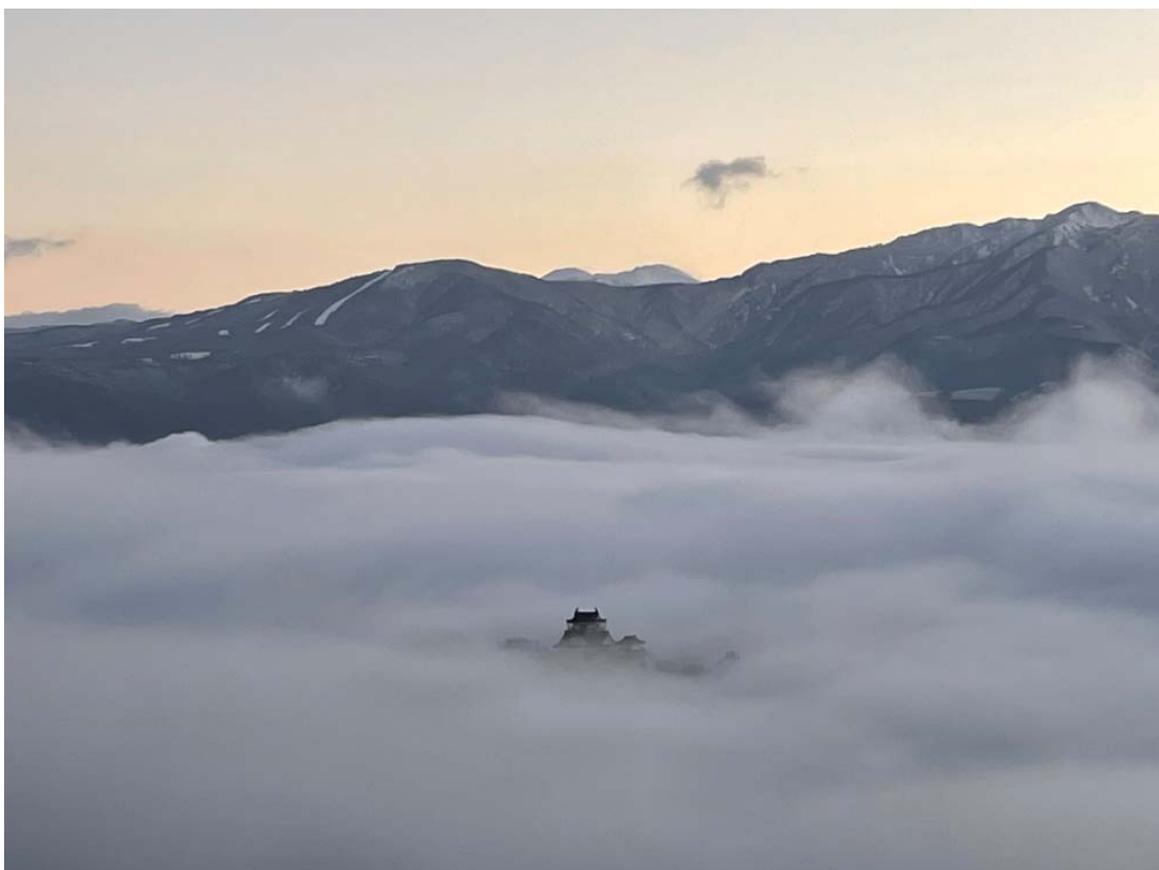


図 1.4 大野盆地の地質構造<sup>5)</sup>

市街地は碁盤目状の城下町の構造をしており、「北陸の小京都」ともよばれている<sup>6)</sup>。織田信長家臣の金森長近により 400 年以上前に築かれたまち並みは、今でもかつての城下町としての風情を色濃く残している。越前中央山地に属する飯降山が赤根川の浸食を受けて分離した亀山の頂上には越前大野城が聳え立っており、越前大野城は一定条件を満たした際に、大野盆地が雲海に包まれ亀山だけが雲に浮かんで見える状態から「天空の城 越前大野城」とよばれ、大野市を代表とする観光名所となっている。**写真 1.1** は越前大野城を示す。



**写真 1.1** 雲海に包まれた越前大野城 (2021 年 11 月 28 日撮影)

### 1.3 既往の研究および調査

大野盆地の直近の地下水収支量の推定は、平成 14 年度に大野市と株式会社利水社によって実施された「大野市地下水総合調査業務」となり、それ以降、公共機関や一般企業による地下水収支量の推定は実施されていない。また、本研究室ではこれまでに、3 次元基盤構造解析による地下水賦存量の推定や揚水量分布モデルの作成、地下水収支の推定を行ってきた。しかし、地下水収支の推定では、推定に用いた実測値データが少なく、水田からの地下水の涵養は除外していた。そこで、本研究では、実測データを増やし、水田からの地下水の涵養を考慮した推定を行う。

## 1.4 本研究の目的と内容

大野市は豊かで良質な地下水に恵まれたまちであるが、昭和 50 年代から生活様式の変化や揚水量の増加に伴い地下水は減少傾向にあった。また、融雪用の過度な地下水の揚水により地下水障害が発生した事例もある。近年でも地下水の過剰利用により地下水位の低下が問題視されている。そこで、本研究では市民の方々に地下水が地域共通の貴重な資源であることを示し、今後もこの地下水を利用し続けていくために、「大野盆地における地下水性状を定量的に解明すること」を目的とした。また、1.3 で述べたように、本研究は過去の研究内容を引き継いでおり、今年度は新たに水田からの地下水浸透量の推定を加えるとともに、計算方法などのアプローチの方法を変え、データ量を増やすことでより精度の高い地下水収支を算出することを試みた。

地下水収支の推定方法は以下の通りである。地下水収支は地下水流入量と地下水流出量の差より求めることができるため、地下水流入量と地下水流出量のそれぞれの要素を推定する。地下水流入量は、盆地内の浸透量および山岳部からの地下水流動量、水田灌水や冬期湛水による浸透量の和で、地下水流出量は、地下水揚水量と地下水湧出量の和である。

地下水浸透量は降水量に起因することから、降水量から地下水浸透量以外の要素を減ずることと求められる。地下水浸透量以外の要素としては蒸発散量と表面流出量があり、蒸発散量はペンマン式を用いて推定し、表面流出量は河川流量の測定結果を基に推定した。盆地外からの地下水流動量は、山岳部での地下水浸透量の一部を盆地内への地下水流動量とし、山岳部における透水係数を基に推定した。また、水田からの地下水浸透量の推定は減水深に着目して行い、水田灌水および冬期湛水の実施面積に減水深と蒸発散量の差と実施日数を乗ずることで推定した。以上の 4 項目の和が、地下水流入量である。

地下水揚水量とは大野盆地内で生活用水や工業用水などの用途で揚水された地下水の水量のことをいい、今回の地下水収支の推定では「大野市地下水年次報告書～令和 2 年度版～」に記載のデータを活用した。また、地下水湧出量は赤根川、清滝川、真名川の 3 河川において流量の測定を行い、測定地点間の差分から地下水湧出量を推定した。なお、九頭竜川は河川のまわりが難透水層に囲まれていることから、市街地周辺での地下水涵養に果たす役割は極めて小さいものと考えられるので除外した<sup>7)</sup>。以上の 2 項目の和が、地下水流出量である。そして、以上の推定結果を基に地下水収支を算出した。

## 第2章 大野盆地の地下水流入量

### 2.1 はじめに

地下水流入量とは、主に盆地内での地下水浸透量と盆地外からの地下水流動量に大別される。さらに地下水浸透量は、降雨による自然涵養や水田灌水による涵養、冬期湛水による涵養に分けることができる。

地下水浸透量は降水量に起因することから、降水量から地下水浸透量以外の要素を減ずることにより推定した。地下水浸透量以外の要素として蒸発散量と表面流出量があり、蒸発散量はペンマン式を用いて推定し、表面流出量は河川流量の測定結果を基に推定した。

盆地外からの地下水流動量は、山岳部での地下水浸透量の一部を盆地内への地下水流動量とし、山岳部における透水係数を基に推定した。

### 2.2 地下水浸透量の推定

#### 2.2.1 大野盆地の降水量と流域面積

地下水浸透量は降水量に起因することから、まずは大野盆地における降水量と流域面積を把握する必要がある。降水量は気象庁のデータを活用し、流域面積は Google Maps の面積測定機能を用いて測定した<sup>4)8)</sup>。その結果、大野市の 2000 年から 2021 年の年間降水量の平均は 2,340 mm であった。各年における降水量は図 2.1 に示す。また、大野盆地を含む全流域面積 A は  $947.17 \times 10^6 \text{ m}^2$  であった。年間降水量と全流域面積の積は  $2,215.9 \times 10^6 \text{ m}^3$  である。図 2.2、図 2.3、図 2.4、図 2.5 は九頭竜川、真名川、清滝川、赤根川の各流域面積を示し、表 2.1 は全流域面積に占める各土地状態の面積を示す。

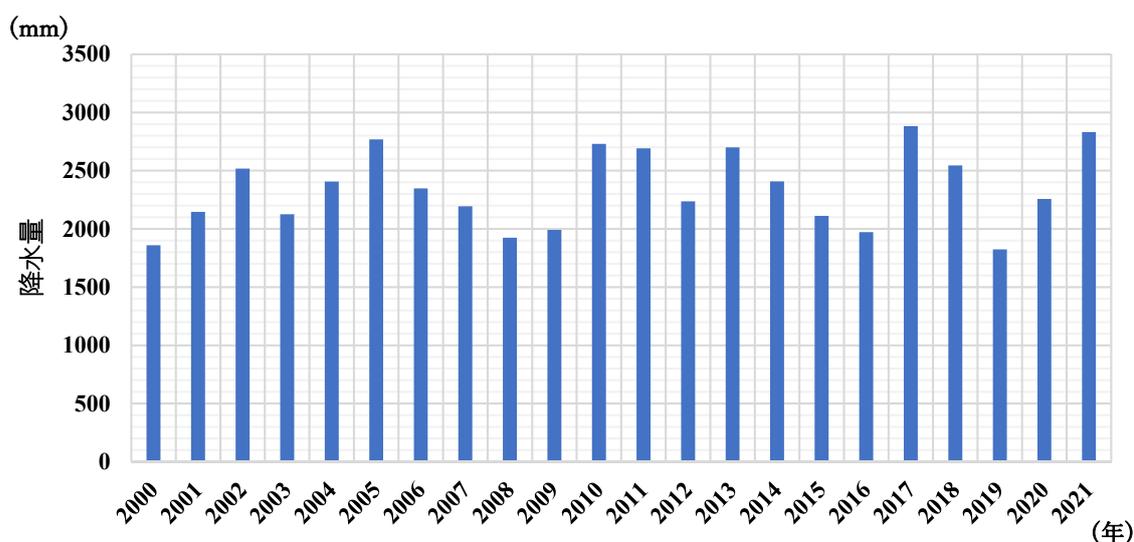


図 2.1 大野市の年間降水量

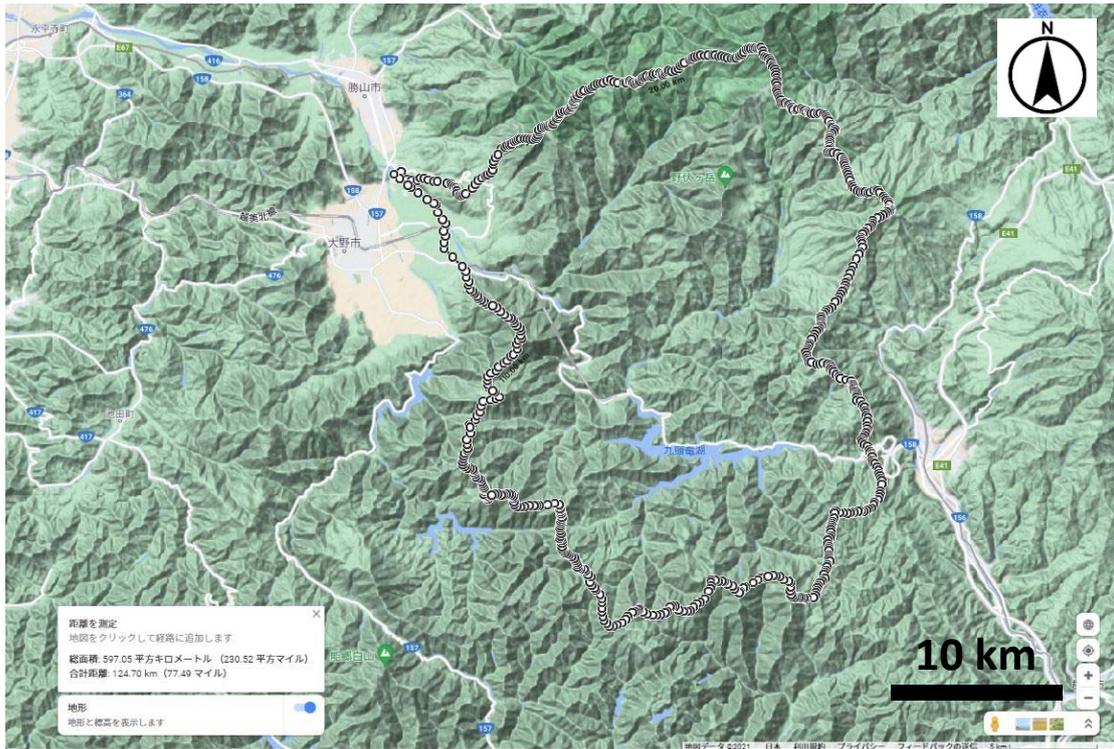


図 2.2 九頭竜川の流域面積 (597.05km<sup>2</sup>)

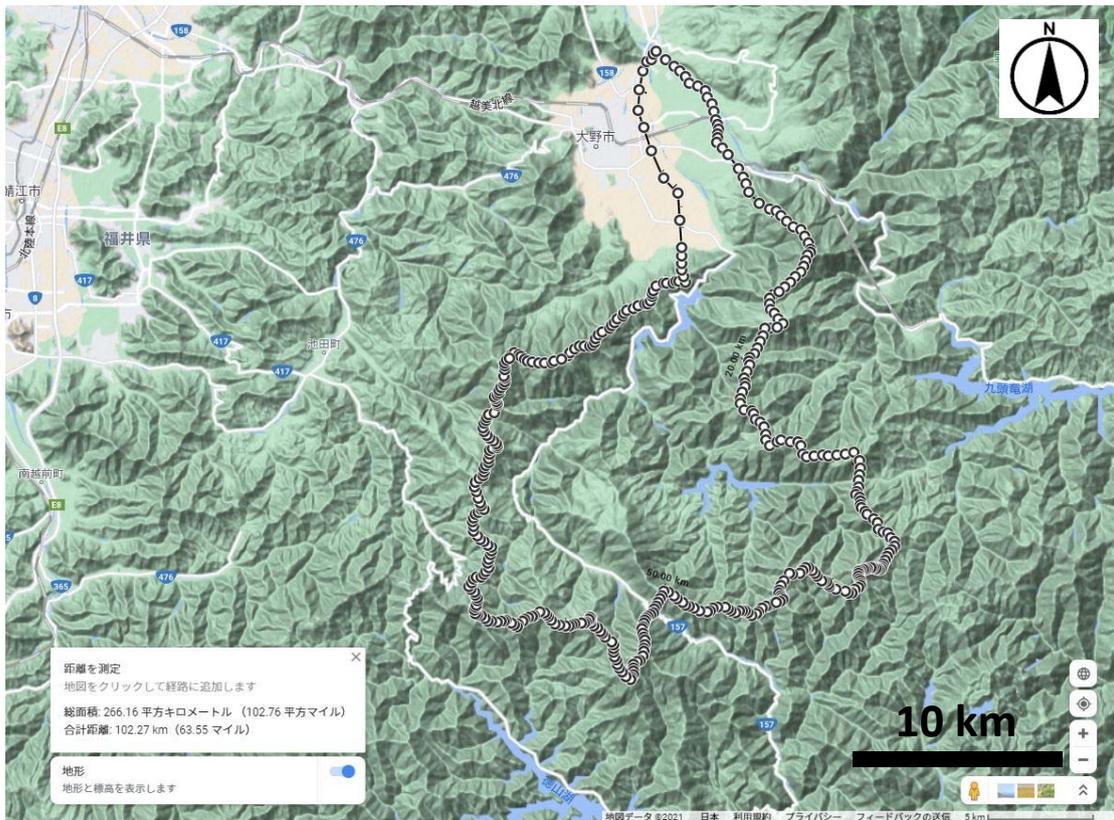


図 2.3 真名川の流域面積 (266.16km<sup>2</sup>)

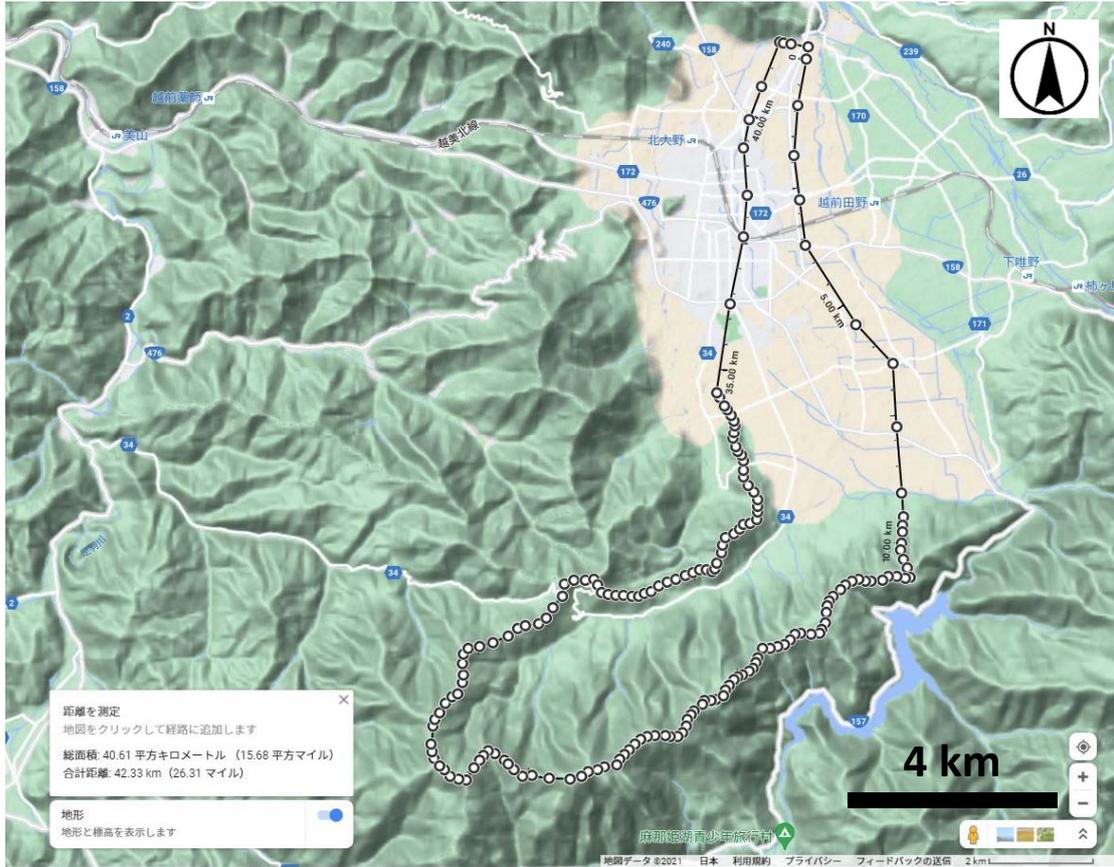


図 2.4 清滝川の流域面積 (40.61km<sup>2</sup>)

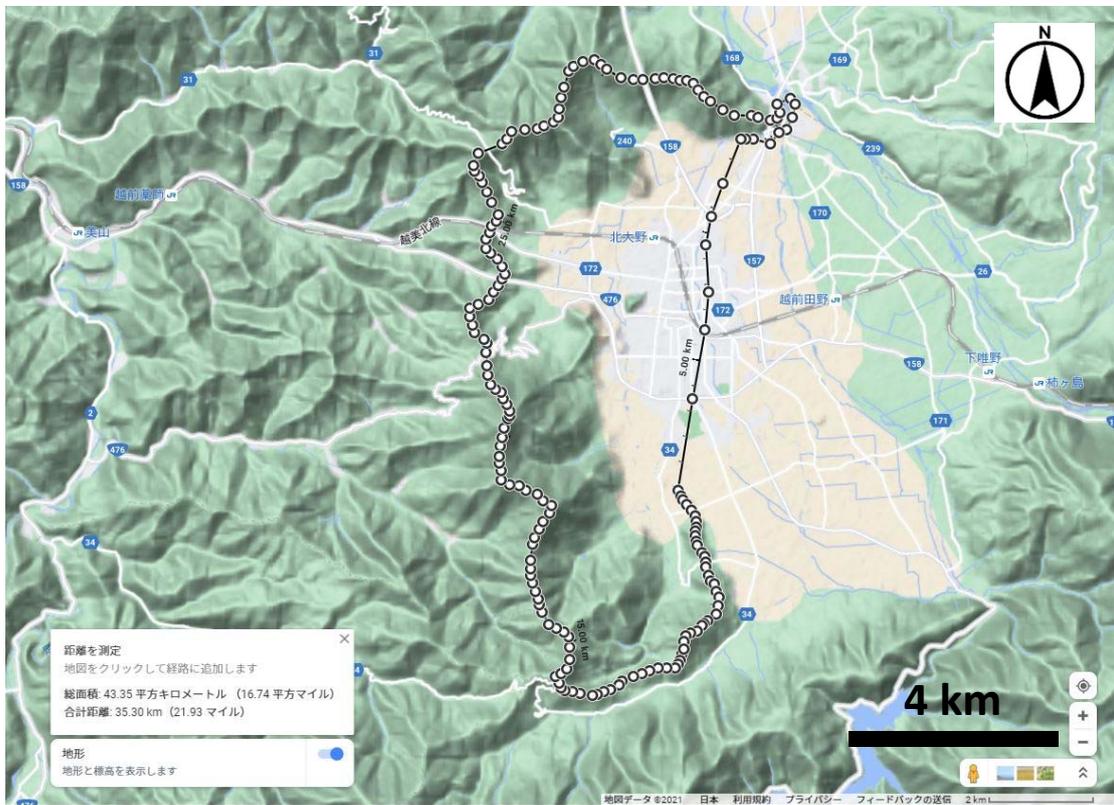


図 2.5 赤根川の流域面積 (43.35km<sup>2</sup>)

表 2.1 全流域面積に占める各土地状態の面積

名称			面積 (km <sup>2</sup> )		
全流域面積	盆地面積	耕地面積 <sup>9)</sup>	畑	1.43	947.17
			水田	40.80	
		アスファルト舗装面積		33.23	
		河川面積 (河川敷含む)		4.54	
	山岳部面積		867.17		

## 2.2.2 蒸発散量の推定

蒸発散量の推定にはソーンズウェイト式やペンマン式、マッキング式などの様々な推定方法がある<sup>10)</sup>。ソーンズウェイト式は気温のみ、マッキング式は気温と日射のみを変数として持つ。それに対して、ペンマン式は気象因子に気温、日射、風速、湿度、土地被覆因子としてアルベドという変数を持つ。このようにペンマン式は多くの変数を持つことから、実際の蒸発散現象により近似しているといえる。そのため蒸発散量の推定にはペンマン式を採用した。三浦ら<sup>11)</sup>によって提示されたペンマン式を式(2.1)に示す。

$$ET_{pen} = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{S}{l} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \cdot f(u_2)(e_{sa} - e_a) \quad (2.1)$$

$ET_{pen}$  : ペンマンの蒸発散位 (mm)

$S$  : 純放射量 ( $MJ \cdot m^{-2}$ )

$$S = (1 - \alpha)Q_a(0.18 + 0.55n/N) - \sigma(t + 273.2)^4 \cdot (0.56 - 0.080\sqrt{e_a})(0.1 + 0.9n/N) \quad (2.2)$$

$\alpha$  : 地表面のアルベド

$Q_a$  : 大気圏外日射量 (大気上端における水平面日射強度) ( $MJ \cdot m^{-2}$ )

$$Q_a = 1.37 \cdot 10^{-3} / (d/\bar{d})^2 \cdot 86400 / \pi \cdot (\omega_0 \sin \varphi \sin \delta + \sin \omega_0 \cos \varphi \cos \delta) \quad (2.3)$$

$d, \bar{d}$  : 地球太陽間距離の瞬間値と平均値 (天文単位)

1.37 : 太陽定数 ( $kW \cdot m^{-2}$ )

$\omega_0$  : 日没の時角 (rad)

$$\omega_0 = \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (2.4)$$

$\varphi$  : 計算地点の緯度

$\delta$  : 計算日の赤緯 (夏至 $\delta = 23.4^\circ$ , 冬至 $\delta = -23.4^\circ$ , 春分 $\delta = 0$ , 秋分 $\delta = 0$ )

$n$  : 日照時間

$N$  : 可照時間

$\sigma$  : ステファンボルツマン定数 ( $5.671 \cdot 10^{-11} kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ )

$t$  : 気温 ( $^\circ C$ )

$e_a$  : 空気の水蒸気圧 (mbar)

$\Delta$  : 気温  $t$  における温度飽和水蒸気圧曲線の勾配 ( $mbar \cdot ^\circ C^{-1}$ )

$$\Delta = 0.4495 + 0.2721 \cdot 10^{-1}t + 0.9873 \cdot 10^{-3}t^2 + 0.2907 \cdot 10^{-5}t^3 + 0.2538 \cdot 10^{-6}t^4 \quad (2.5)$$

$\gamma$  : 乾湿計定数 ( $0.66\text{mbar} \cdot \text{°C}^{-1}$ )

$l$  : 水の蒸発潜熱 ( $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

$f(u_2)(e_{sa} - e_a)$  : ダルトン型蒸発散量推定式 ( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )

$$f(u_2) = 0.26(1 + 0.54u_2) \quad (2.6)$$

$u_2$  : 2m での日平均風速 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$$u_2 = u_H \cdot \log 200 / \log(100 \cdot H) \quad (2.7)$$

$u_H$  : 高度  $H\text{m}$  での風速 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$H$  : 風速計設置地上高さ (m)

$e_{sa}$  : 気温  $t$  における飽和水蒸気圧 (mbar)

$$e_{sa} = 6.1078 \exp\left(\frac{17.2694t}{t + 237.3}\right) \quad (2.8)$$

$e_a$  : 空気の水蒸気圧 (mbar)

$$e_a = e_{sa} \times \text{RH} / 100 \quad (2.9)$$

RH : 相対湿度 (%)

式(2.2)の純放射量  $S(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2})$  に含まれる  $\alpha$  は土地被覆因子のアルベド (反射率) であり、日射に対する反射日射の比を表す。このアルベドを変更することにより、その土地の状態での蒸発散量を推定することができる。例えば、 $\alpha=0.10$  を代入して計算を行うと、森林での蒸発散量の推定となる。アルベドの値は表 2.2 に示す。

表 2.2 アルベド値一覧<sup>12)13)</sup>

土地の状態	アルベド値	最大値	中間値	最小値
裸地	0.1~0.2	0.20	0.15	0.10
草地	0.15~0.3	0.30	0.225	0.15
森林	0.05~0.15	0.15	0.10	0.05
道路	0.2~0.25	0.25	0.225	0.20
海面	0.05~0.4	0.40	0.225	0.05
雪面	0.4~0.7	0.70	0.55	0.40
水面(夏期:4月~9月)	0.06	-	-	-
水面(夏季以外)	0.12	-	-	-

今回の推定ではアルベドを変更し、それに対応した面積で比例配分することにより、実際の蒸発散量の推定をした。それぞれの面積は、Google Maps の面積測定機能と大野市が発表している公式の値から算出した (表 2.1)。推定において田畑面積を草地、水田面積を水面 (灌漑期間外は草地)、山岳部面積を森林、アスファルト舗装面積を道路としてアルベド値を代入している。また、積雪があった日はすべての土地状態においてアルベド値を雪面とする。なお、盆地内の河川 (河川敷) 面積は半分を水面、もう一方を草地として計算する。

また、今回使用している変数のうち、気温、降水量、日照時間、風速のデータは気象庁より

入手した<sup>4)</sup>。湿度のデータは気象庁では測定していなかったため、同じ盆地内の大野市消防本部よりの気象月報を用いて推定を行なった。気象庁のアメダス観測地点と大野市消防本部の位置関係を図 2.6 に示す。

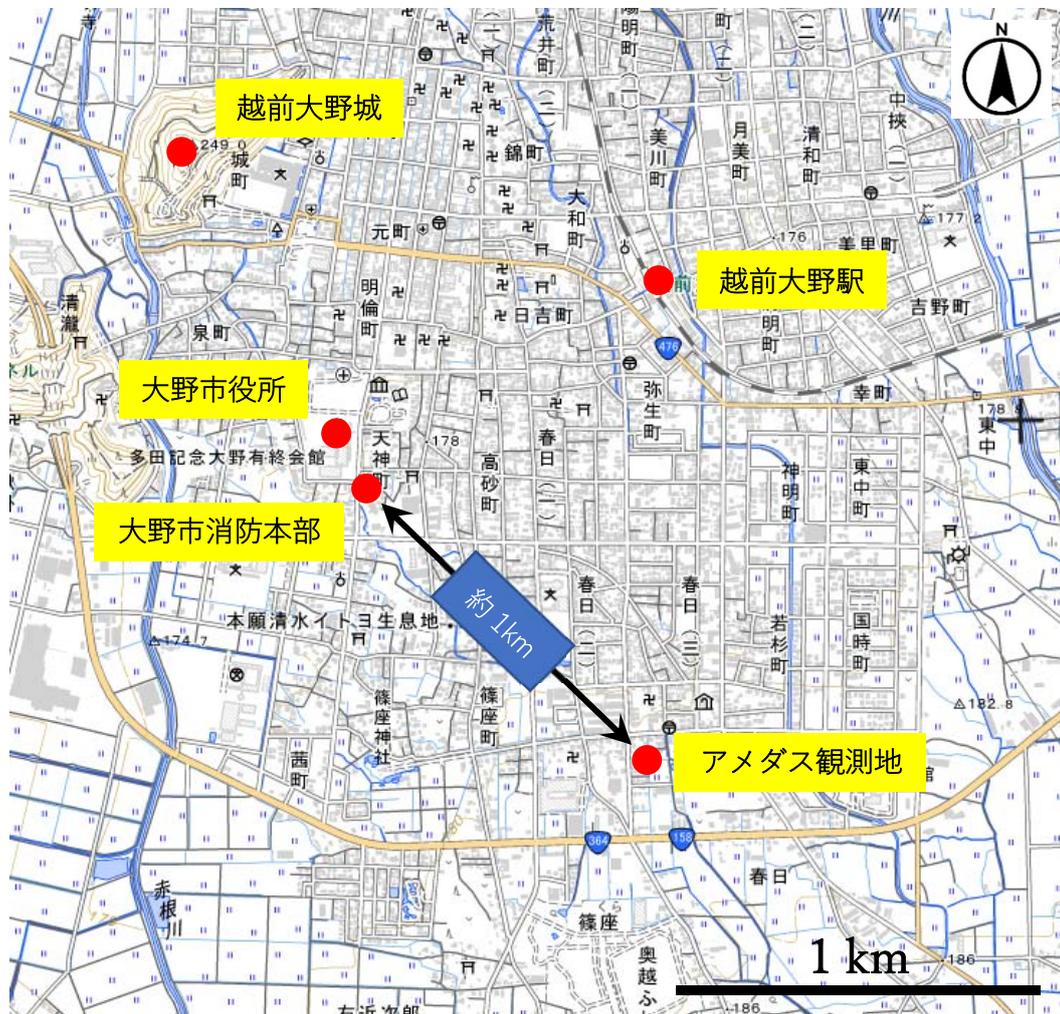


図 2.6 気象庁アメダス観測地点と大野市消防本部の位置関係

気象庁のアメダス観測地点は北緯 35 度 58 分 0 秒、東経 136 度 29 分 13 秒、標高 182 m に位置しており、風速計の地上設置高さは 6.4 m である。大野市消防本部は北緯 35 度 58 分 41 秒、東経 136 度 29 分 17 秒、標高 175 m に位置しており、平成 31 年 3 月 1 日から風速計の地上設置高さは 23 m で、それ以前の百葉箱は GL 設置である。2 地点の直線距離で約 1 km であることから、推定を行う際のデータの活用には支障はないと考えられる。式(2.1)により推定した蒸発散量を表 2.3 に示す。アルベドを許容範囲の中間値で計算を行なった際の蒸発散量 ET の平均は 855.62 mm/year となり、全流域面積 A との積である蒸発散量の体積  $V_{ET}$  は  $810.41 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$  と推定された。

表 2.3 蒸発散量の推定結果

アルベド値	蒸発散量(mm/year)		
	最大値	中間値	最小値
2000 年	771.96	828.05	884.14
2001 年	768.71	826.82	884.92
2002 年	795.59	851.84	908.08
2003 年	738.26	788.33	838.40
2004 年	808.21	864.90	921.58
2005 年	725.23	779.18	833.12
2006 年	732.11	788.01	843.83
2007 年	810.88	862.47	914.06
2008 年	761.52	820.77	880.02
2009 年	776.76	829.08	881.39
2010 年	784.41	842.00	899.60
2011 年	785.21	839.51	893.80
2012 年	796.64	854.64	912.64
2013 年	869.98	928.45	986.91
2014 年	822.72	879.52	936.32
2015 年	840.08	895.64	951.19
2016 年	901.54	954.76	1007.99
2017 年	796.34	851.26	906.18
2018 年	877.72	934.79	991.86
2019 年	840.16	893.60	947.05
2020 年	788.06	839.33	890.68
2021 年	815.50	870.61	925.64

### 2.2.3 表面流出量の推定

表面流出量とは降雨が地表面から河川に流入し、盆地外に流出する水量のことである。表面流出量の推定には、現地調査による河川流量の測定結果を基に推定した。本研究では九頭竜川以外の3河川（真名川、清滝川、赤根川）が合流した後の下流の流量を表面流出量とする。なお、九頭竜川は河川のまわりが難透水層に囲まれていることから、市街地周辺での地下水涵養に果たす役割は極めて小さいものと考えられるので除外した。

測定の結果、3河川合流地点における流量は2021年11月28日が18.8 m<sup>3</sup>/s、2020年11月12日が26.6 m<sup>3</sup>/sであるため、その平均から年間の表面流出量V<sub>o</sub>は715.87×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/yearと推定された。年間降水量の平均は2215.93×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/yearであるため、降水量に占める表面流出量の割合は32.3%である。この降水量比を基に推定した各年の表面流出量を表2.4に示す。河川流量の測定方法や測定日時、測定結果などについては第3章で詳細を記述する。

表 2.4 表面流出量の推定結果

	降水量 (×10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	表面流出量 (×10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
2000 年	1760.79	568.73
2001 年	2032.63	656.54
2002 年	2384.03	770.04
2003 年	2013.68	650.42
2004 年	2279.84	736.39
2005 年	2622.71	847.14
2006 年	2223.01	718.03
2007 年	2078.09	671.22
2008 年	1822.83	588.77
2009 年	1886.29	609.27
2010 年	2586.25	835.36
2011 年	2549.78	823.58
2012 年	2118.82	684.38
2013 年	2556.89	825.87
2014 年	2280.31	736.54
2015 年	1999.95	645.98
2016 年	1867.82	603.31
2017 年	2729.74	881.71
2018 年	2411.02	778.76
2019 年	1727.16	557.87
2020 年	2137.29	690.34
2021 年	2681.44	866.10

#### 2.2.4 地下水浸透量の推定

盆地内の地下水浸透量は、年間降水量から浸透量以外の要素である蒸発散量と表面流出量を減じ、全流域面積に占める盆地面積の割合を乗ずることによって求めることができる。盆地内の地下水浸透量を求める計算式を式(2.10)に示す。

$$V'_R = (V_P - V_{ET} - V_o) \times A' / A \quad (2.10)$$

$V'_R$  : 盆地内の地下水浸透量 (m<sup>3</sup>/year)

$V_P$  : 年間降水量 (m<sup>3</sup>/year)

$V_{ET}$  : 蒸発散量 (m<sup>3</sup>/year)

$V_o$  : 表面流出量 (m<sup>3</sup>/year)

$A'$  : 盆地面積 (km<sup>2</sup>)

$A$  : 全流域面積 (km<sup>2</sup>)

式(2.10)より、盆地内の地下水浸透量 $V'_r$ の平均は  $58.3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$  と推定された。また、大野市の降水量と 2.2 で求めた蒸発散量、表面流出量、地下水浸透量の関係を 図 2.7 に示す。この図より、3 要素の量は毎年の降水量によって変動しており、降水量が比較的多い年の浸透量の割合は他に比べて大きくなっていることが認められる。

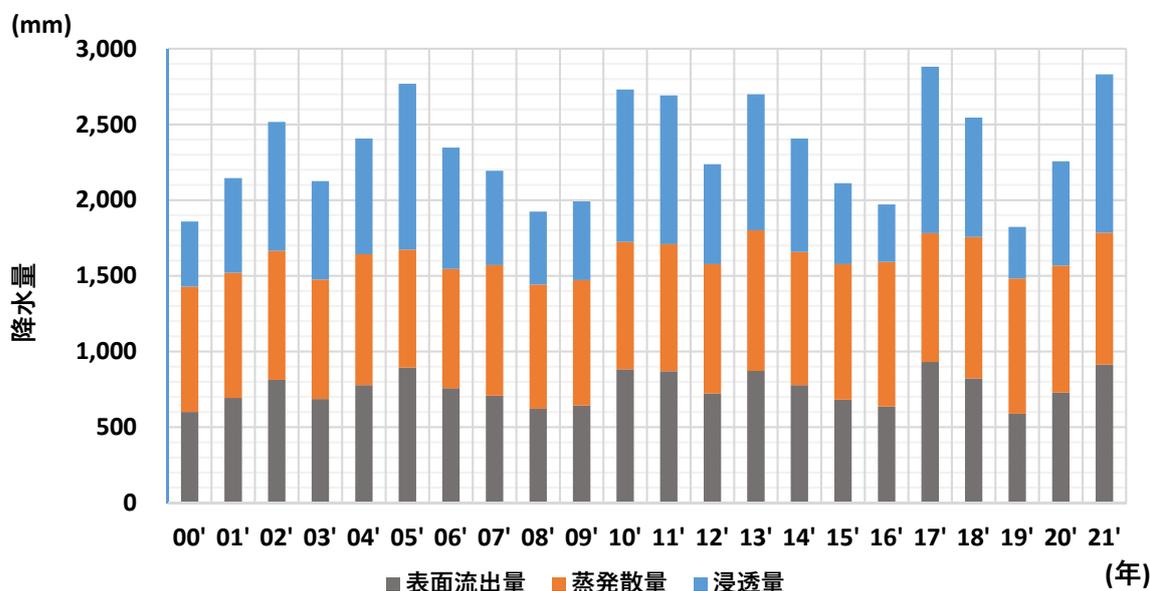


図 2.7 降水量に対する各要素の割合

### 2.3 地下水流動量の推定

本研究において地下水流動量とは、赤根川、清滝川、真名川の流域面積内の山岳部に浸透する地下水より、盆地内に流動する地下水年間の量とした。地下水流動量の推定方法を以下に示す。

まず、各河川流域における山岳部の面積を求め、全流域面積で除することにより、各河川流域の全流域面積に占める山岳部面積の割合が推定される。次に全流域面積における地下水浸透量を乗じ、各河川流域の山岳部での地下水浸透量が推定される。これらの値に、山岳部の地盤の透水係数を各河川流域の地形上の分水界から山岳部と盆地の境界までの直線距離で除した値を乗ずることにより、各河川流域の山岳部からの地下水の流動量が推定される。そして、各河川流域の山岳部からの地下水の流動量の和が、山岳部から盆地内へ流れる地下水流動量である。なお、地形上の分水界は任意の地点の数か所で測定しており、地形上の分水界から山岳部と盆地の境界までの直線距離は、それぞれの標高と水平距離の平均によって算出している。

山岳部の透水係数  $k$  は、「大野市地下水総合調査報告書」に記載されている値を用いる<sup>5)</sup>。盆地内において地盤の透水係数が判明し、かつ山岳部に最も近い地点での透水係数の平均値は  $9.95 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$  であった。この値を山岳部の地盤の透水係数とする。

推定の結果、赤根川、清滝川、真名川流域の山岳部面積は  $24.68 \text{ km}^2$ 、 $23.87 \text{ km}^2$ 、 $240.94 \text{ km}^2$  で、それぞれの山岳部での浸透量（過去 22 年間の平均）は  $18.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、 $17.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、 $175.5 \times 10^6 \text{ m}^3$  であった。そして、地下水流動量（過去 22 年間の平均）は  $56.7 \times 10^6 \text{ m}^3$  と推定された。

## 2.4 水田からの地下水浸透量

### 2.4.1 水田からの地下水浸透について

大野市における水田からの地下水浸透は主に2種類あり、稲作期間における水田灌水に伴う浸透と冬期湛水に伴う浸透である。

一般的な水田の灌水期間は中干し期間を除く、4月中旬から8月中旬までである。なお、中干し以降も常時水田に水を入れるとは限らないため、灌水期間はおおよそ3ヶ月程度だと考えられる。大野市の平成26年の耕地面積は4,220 ha、水田比率は96.7%であり、それ以降も耕地面積の推移に大きな変動はなく、水田面積は約4,000 ha程度である<sup>9)</sup>。

冬期湛水とは稲刈りが終わった水田に冬場にも水を張ることで地下水を涵養する方法であり、市街地における冬期の揚水に伴う地下水位の低下を緩和することが目的である。冬期湛水は昭和53年度から盆地南部の木本扇状地周辺で行われている。期間は各年の状況により多少前後するが、毎年10月から翌年の2月までの約5か月間で、近年は約30haの水田で冬期湛水を実施している。冬期湛水を行う際は、透水性を高めるために荒起こしをしてから、「田面が露出しない程度」、「田んぼの畦が崩れない程度」で河川水を断続的に取り入れている。

### 2.4.2 減水深について

水田からの地下水浸透量の推定は減水深に着目して行なった。減水深とは、蒸発散量と浸透量の和を時間当たりの水深で表したもので、一枚の水田圃場における水の減り具合を示す。大野市における減水深調査のデータは存在しなかったため、今回は2007年に新潟県西蒲原地域で行われた稲作期間における減水深調査と2008年に宮城県で行われた冬期湛水事例の減水深調査のデータを活用した。これらのデータを表2.5、表2.6に示す。

表 2.5 稲作期間における減水深調査<sup>14)</sup>

	標本数 (個)	減水深の平均値 (mm/day)
活着期	640	11.0
分けつ期	667	11.8
中干し期	195	14.1
幼穂形成期	432	16.0
出穂期	470	17.4
登熟期	396	17.5

表 2.6 冬期湛水事例の減水深調査<sup>15)</sup>

標本数 (個)	減水深の平均値 (mm/day)
13	6.35

### 2.4.3 冬期湛水事業による浸透量の推定

冬期湛水事業による浸透量は湛水実施面積に減水深と蒸発散量の差と湛水実施日数を乗じることで推定することができる。その計算式を式(2.11)に示す。

$$V_R'' = S \cdot (h_2 - h_1) \cdot n \quad (2.11)$$

$V_R''$  : 水田の地下水浸透量 (m<sup>3</sup>/year)

$S$  : 湛水実施面積 (湛水実施面積) (m<sup>3</sup>/year)

$h_1$  : 蒸発散量 (mm/day)

$h_2$  : 減水深 (mm/day)

$n$  : 日数 (day)

式(2.11)より、冬期湛水を 30 ha で 5 ヶ月間行なった際の浸透量は 246,150 m<sup>3</sup>となった。大野市の融雪用揚水量の平均 (過去 21 年間) は 198,000 m<sup>3</sup>であるため、冬期湛水事業は大野市の融雪用揚水量を賄えているといえる。実際の推定結果と融雪用揚水量の関係を 図 2.8 に示す。

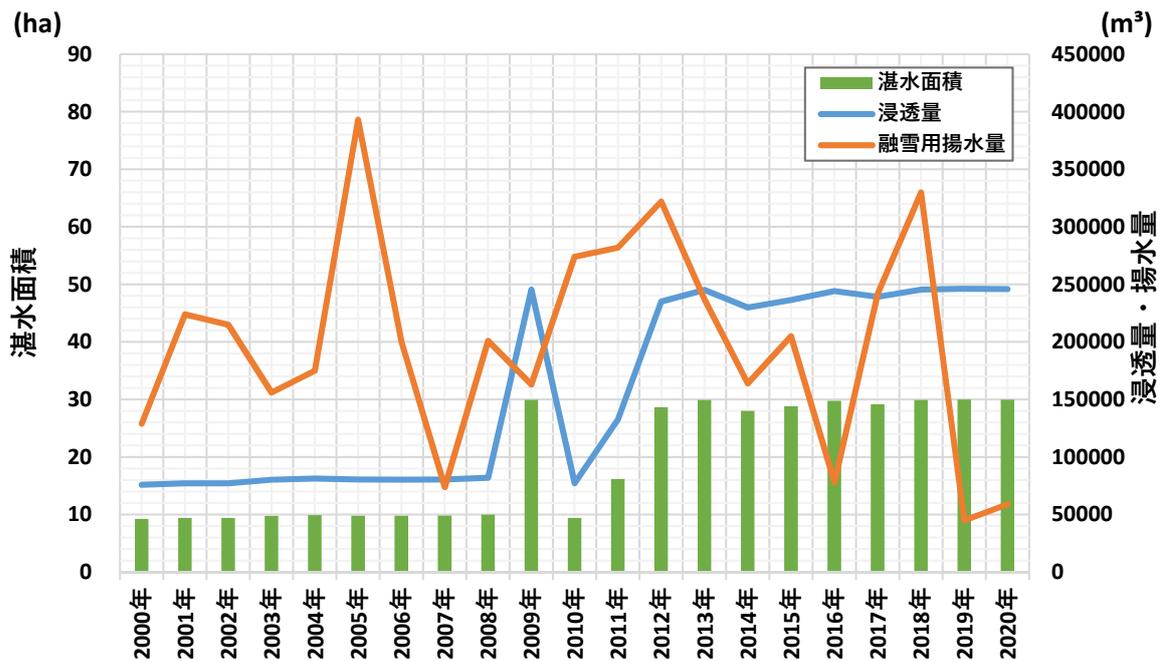


図 2.8 冬期湛水からの浸透量と融雪用揚水量の比較

### 2.4.4 水田灌水による浸透量の推定

稲作期間における水田灌水による浸透量は、冬期湛水事業による浸透量の推定と同様の方法で求めることができる。式(2.11)より、灌水実施面積に減水深と蒸発散量の差と灌水実施日数を乗じることで、過去 22 年間の稲作期間における水田灌水による浸透量の平均は  $36.9 \times 10^6$  m<sup>3</sup>と推定された。

## 2.5 地下水流入量の推定

大野盆地における地下水の流入量は、降雨による盆地内の自然涵養、山岳部からの地下水流動量、冬期湛水による地下水浸透量、水田灌水による地下水浸透量の和で表される。それぞれの過去22年間の平均は  $58.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ 、 $56.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ 、 $198,000 \text{ m}^3$ 、 $36.9 \times 10^6 \text{ m}^3$ であった。以上より、大野盆地における地下水の流入量は  $152.1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$  と推定された。

## 2.6 まとめ

本章では地下水流入量を推定した。地下水流入量は盆地内での地下水浸透量と盆地外からの地下水流動量の和で求められる。ここでは地下水浸透量を、降雨による自然涵養や冬期湛水による涵養、水田灌水による涵養に分けて推定を行なった。

2.2 では、降雨による自然涵養として、盆地内の地下水浸透量を推定した。地下水浸透量は降水量に起因することから、降水量から地下水浸透量以外の蒸発散量と表面流出量を減ずることによって求められた。蒸発散量はペンマン式を用いて推定し、表面流出量は河川流量の測定結果を基に推定した。その結果、降雨による盆地内の自然涵養は  $58.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$  と推定された。

2.3 では、山岳部からの地下水流動量を推定した。山岳部での地下水浸透量の一部を盆地内への地下水流動量とし、山岳部における透水係数を基に推定した。その結果、山岳部からの地下水流動は  $56.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$  と推定された。

2.4 では、冬期湛水による地下水浸透量及び水田灌水による地下水浸透量を推定した。水田からの地下水浸透量の推定は減水深に着目して行い、蒸発散量を減ずることにより推定した。その結果、冬期湛水による地下水浸透量は  $198,000 \text{ m}^3$ 、水田灌水による地下水浸透量は  $36.9 \times 10^6 \text{ m}^3$  と推定された。

以上より、これらの推定結果を足し合わせることで、大野盆地における地下水の流入量は  $152.1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$  と推定された。

## 第3章 大野盆地の地下水流出量

### 3.1 はじめに

地下水流出量とは、主に盆地内での地下水の揚水量と湧出量に大別される。揚水量とは大野盆地内で生活用水や工業用水などの用途で揚水された地下水の水量のことをいい、湧出量とは地下水が自然に地表面まで流出した水量のことをいう。本章では、今回の推定に用いた揚水量データ、湧出量の推定方法とその結果に関して述べる。

### 3.2 地下水揚水量について

大野市では、地下水保全条例に基づく地下水採取量報告によって、おおよその地下水揚水量の把握と住宅や一般事務所などの条例対象外の井戸を含めた揚水量の推定を行なっている<sup>3)</sup>。今回の地下水収支の推定には、「大野市地下水年次報告書～令和2年度版～」に記載のデータを活用した。本データより、「地下水推計揚水量の経年変動状況」の一部を抜粋して、地下水流出量を算出することを試みた。使用したデータは表3.1に示す。

表 3.1 地下水推計揚水量の経年変動状況（単位：千 m<sup>3</sup>）

年	工業用	建築物用	水道用	農業用	消雪用	合計
平成 12 年	3,901	706	4,111	552	129	9,399
平成 13 年	4,055	748	4,104	506	224	9,637
平成 14 年	3,759	926	4,448	488	215	9,836
平成 15 年	3,325	811	4,420	444	156	9,156
平成 16 年	3,225	712	4,302	416	175	8,830
平成 17 年	3,127	736	4,452	438	393	9,146
平成 18 年	3,009	822	4,317	426	200	8,774
平成 19 年	2,770	759	4,053	449	74	8,105
平成 20 年	3,427	735	4,020	434	201	8,817
平成 21 年	2,947	702	3,961	483	163	8,256
平成 22 年	3,616	739	3,993	448	274	9,070
平成 23 年	3,866	822	4,101	410	282	9,481
平成 24 年	3,709	869	4,118	481	322	9,499
平成 25 年	3,306	911	4,119	426	237	8,999
平成 26 年	3,458	862	3,950	442	164	8,876
平成 27 年	3,432	802	3,856	496	205	8,791
平成 28 年	3,248	755	3,841	495	78	8,417
平成 29 年	3,204	745	3,864	430	242	8,485
平成 30 年	3,663	783	3,890	457	330	9,123
令和元年	3,406	688	3,723	481	45	8,343
令和 02 年	3,420	707	3,743	424	59	8,353

### 3.3 地下水湧出量の推定

#### 3.3.1 地下水湧出量について

本研究では赤根川、清滝川、真名川の3河川において流量の測定を行い、測定地点間の差分から地下水湧出量を推定した。なお、各河川間を用水路によって河川水が移動することを考慮するために、主要な用水路の流入地点および流出地点での流量の測定も行った。測定地点の位置図を図3.1、測定地点の緯度経度および標高、測定日時の一覧を表3.2に示す。また、それぞれの測定日の1か月前からの気温と降水量の変化を図3.2、図3.3、図3.4、図3.5に示す。

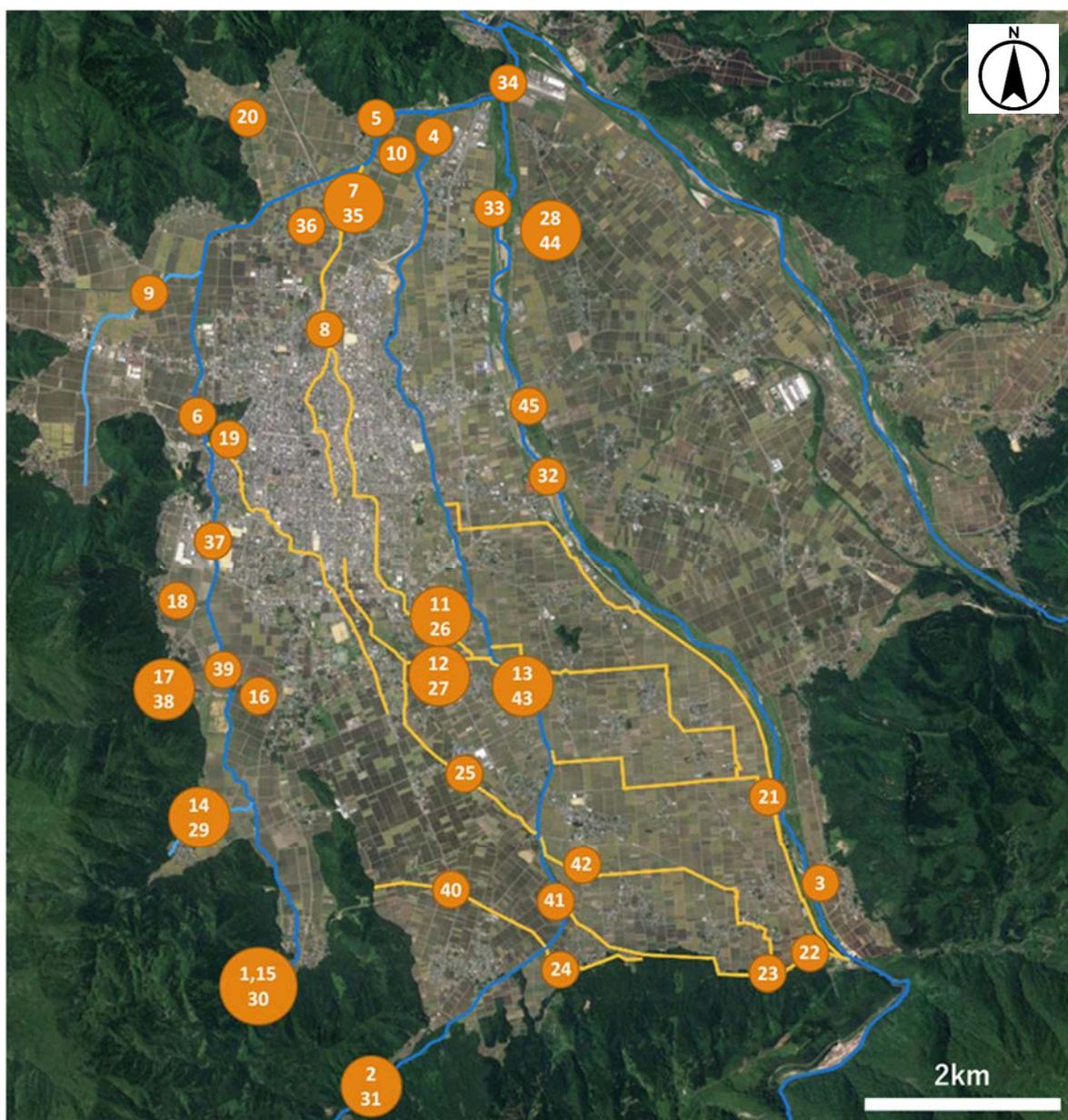


図 3.1 流量測定位置図

表 3.2 測定地点の詳細

	番号	名称	緯度	経度	標高 (m)	測定日時
昨 年 度	1	赤根川上流	35.9339722	136.4893333	-	2020/9/24
	2	清滝川上流	35.9245000	136.5004444	-	2020/9/24
	3	真名川上流	35.9437778	136.5501111	-	2020/9/24
	4	清滝川下流	36.0124722	136.5069722	-	2020/10/13
	5	赤根川下流	36.0147500	136.5026389	-	2020/10/13
	6	赤根川中流	35.9845556	136.4813333	-	2020/10/13
	7	用水B下流	36.0069722	136.4976389	-	2020/11/12,13
	8	用水B中流	35.9953611	136.4946667	-	2020/11/12,13
	9	日詰川	35.9986944	136.4757500	-	2020/11/12,13
	10	用水A・赤根川合流地点	36.0133333	136.5044444	-	2020/11/12,13
	11	用水B上流	35.9646667	136.5117222	-	2020/11/12,13
	12	用水C上流	35.9641667	136.5118333	-	2020/11/12,13
	13	清滝川中流	35.9627222	136.5169444	-	2020/11/12,13
今 年 度	14	黒谷川	35.9492849	136.4820411	197.2	2021/10/8 13:30
	15	赤根川上流	35.9338076	136.4892914	223.1	2021/10/8 14:10
	16	清滝川-赤根川間1	35.9610088	136.4845418	182.8	2021/10/8 14:50
	17	赤根川左岸1	35.9621252	136.4796133	191.9	2021/10/8 15:00
	18	赤根川左岸2	35.9695847	136.4805265	176.6	2021/10/8 15:20
	19	新堀川	35.9843645	136.4837818	172.0	2021/10/8 16:00
	20	赤根川左岸3	36.0135492	136.4859387	177.2	2021/10/8 17:00
	21	真名川-清滝川間1 (3か所)	35.9505172	136.5461246	215.4	2021/10/9 10:00
	22	真名川-清滝川間2	35.9365349	136.5508462	230.4	2021/10/9 10:40
	23	真名川-清滝川間3	35.9344852	136.5463788	231.7	2021/10/9 11:00
	24	真名川-清滝川間4	35.9359212	136.5202863	229.7	2021/10/9 11:35
	25	清滝川-赤根川間2	35.9531318	136.5108891	206.3	2021/10/9 12:10
	26	木瓜川上流1	35.9643345	136.5119431	191.1	2021/10/9 13:45
	27	木瓜川上流2	35.9641551	136.5115931	190.8	2021/10/9 14:00
	28	九頭竜川-真名川間1	36.0051705	136.5180989	163.3	2021/10/9 14:45
	29	黒谷川1'	35.9492849	136.4820411	197.2	2021/11/27 14:50
	30	赤根川上流1'	35.9338076	136.4892914	223.1	2021/11/27 15:15
	31	清滝川上流1'	35.9245274	136.5006978	286.3	2021/11/27 16:00
	32	真名川中流2	35.9846118	136.5176831	177.9	2021/11/28 10:20
	33	真名川下流	36.0060044	136.5152603	161.0	2021/11/28 11:00
	34	3河川合流地点	36.0170221	136.5156311	156.5	2021/11/28 11:40
	35	木瓜川下流	36.0093562	136.4991316	159.8	2021/11/28 12:45
	36	赤根川-木瓜川間1	36.0043484	136.4940158	164.4	2021/11/28 13:10
	37	赤根川中流4	35.9751530	136.4823526	176.0	2021/11/28 13:45
	38	赤根川左岸1	35.9621425	136.4796967	191.4	2021/11/28 14:10
	39	赤根川中流3	35.9614611	136.4840787	183.4	2021/11/28 14:30
	40	清滝川-赤根川間3	35.9420745	136.5111562	226.7	2021/11/28 15:00
	41	清滝川中流2'	35.9428117	136.5215605	216.8	2021/11/28 15:15
	42	真名川-清滝川間5	35.9452899	136.5222291	210.5	2021/11/28 15:30
	43	清滝川中流1'	35.9626683	136.5170881	194.8	2021/11/28 16:00
	44	九頭竜川-真名川間1'	36.0051705	136.5180989	163.3	2021/11/28 16:30
	そ の 他	45	麻生島観測所	北緯35度59分26秒	東経136度31分03秒	168.0

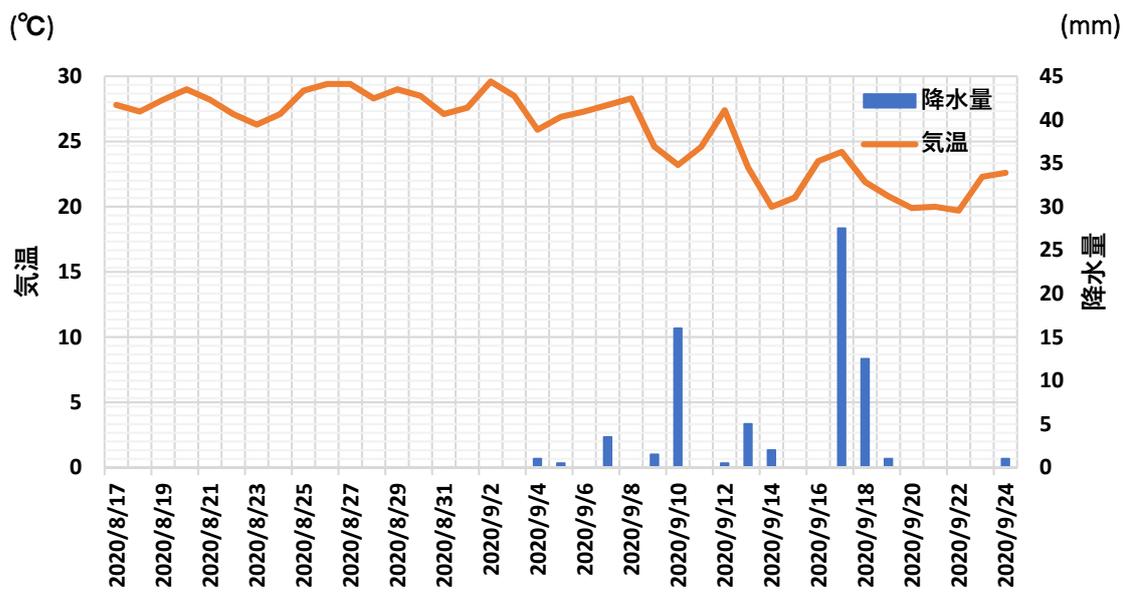


図 3.2 測定日前の気温と降水量の変化 (1)

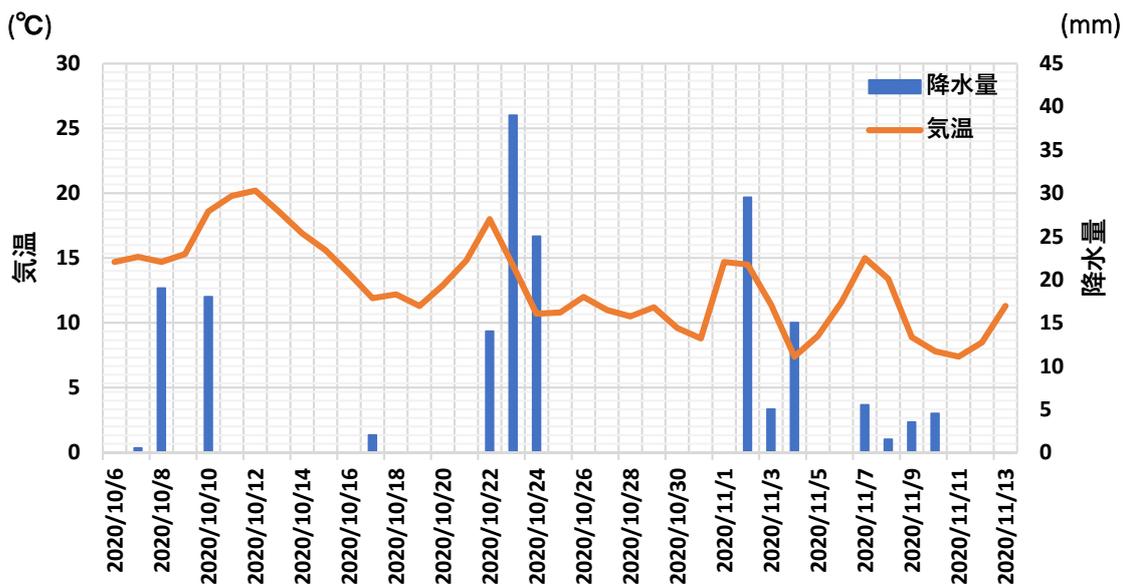


図 3.3 測定日前の気温と降水量の変化 (2)

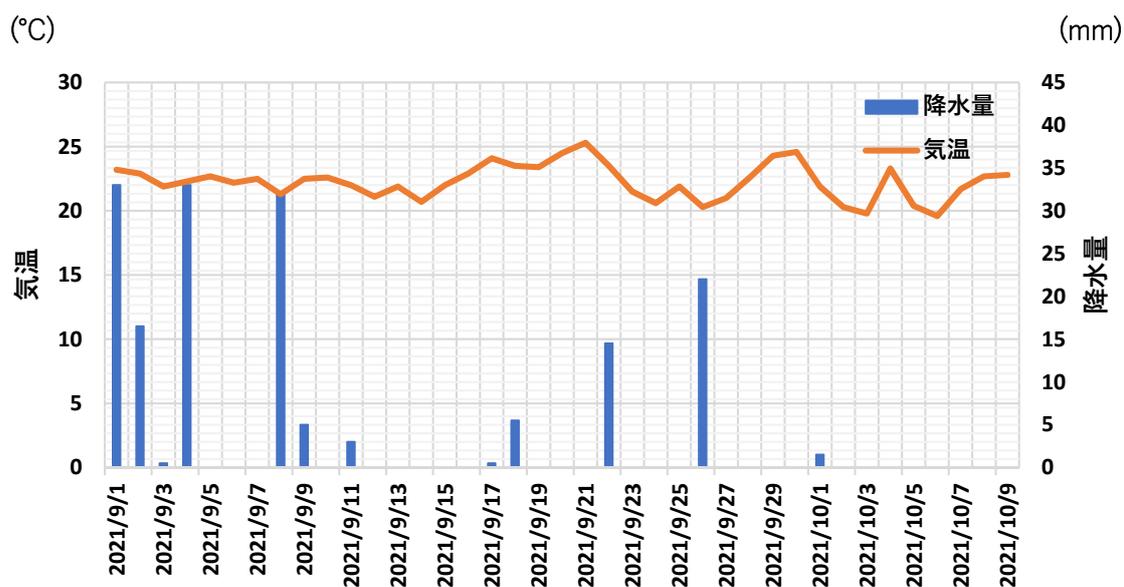


図 3.4 測定日前の気温と降水量の変化 (3)

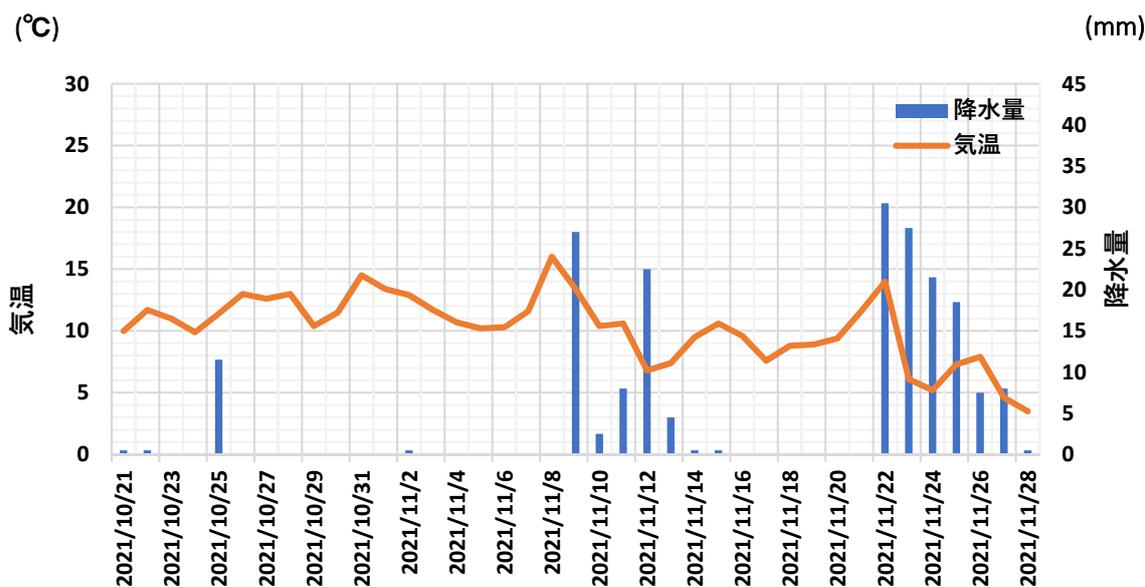


図 3.5 測定日前の気温と降水量の変化 (4)

表 3.3 現地調査前の気温と降水量の比較

	2020/9/24	2020/11/13	2021/10/9	2021/11/28
測定日前 1 週間の 降水量合計 (mm)	14.5	15.0	0.0	114.0
測定日前 1 週間の 降水量平均 (mm)	2.1	2.1	0.0	16.3

### 3.3.2 河川流量の測定方法と測定結果

流量は河川（用水路）の流速、水深、河川幅の積で算出することができる。流量の計算式を式(3.1)に示す。

$$Q = B \times H \times V \quad (3.1)$$

Q：流量（m<sup>3</sup>/s）

B：河川幅（m）

H：水深（m）

V：流速（m/s）

流速は流れてくる葉や木片が一定距離を流れる時間で割ることで測定し、河川幅や水深はスケールや標尺によって測定した。なお、水深が深い地点では錘付きのロープに10 cmごとに印を付けたものを橋から降ろし、おおよその水深を読み取った。それぞれ数回の測定を行い、平均値を算出して推定した。測定に用いた道具を**写真3.1**、**写真3.2**に示し、実際の測定中の様子を**写真3.3**、**写真3.4**、**写真3.5**、**写真3.6**に示す。また、河川流量および用水路の流量の測定結果を**表3.4**、**表3.5**、**表3.6**、**表3.7**、**表3.8**、**表3.9**に示す。



写真3.1 測定に用いた道具 (1)  
(左から胴長、標尺、スケール)



写真3.2 測定に用いた道具 (2)  
(10 cmごとに印を付けた錘付きロープ)



写真 3.3 赤根川上流での測定の様子



写真 3.4 用水路での測定の様子



写真 3.5 新堀川での測定の様子



写真 3.6 真名川での測定の様子

表 3.4 2021 年 10 月 8, 9 日の測定結果 (1)

名称	黒谷川	赤根川上流	清滝川-赤根川間1	赤根川左岸1	赤根川左岸2	赤根川左岸3	木瓜川上流1	木瓜川上流2
河川幅(cm)	700.0	358.0	241.0		250.0	250.0	250.0	181.0
水深(cm)	19.8	27.3	23.6	0.0	7.2	5.5	18.2	18.2
	19.2	27.1	24.0			6.5		
	19.0	27.8	24.9			6.0		
	20.1		24.6					
	18.8		24.9					
平均水深(cm)	19.4	27.4	24.4	0.0	7.2	6.0	18.2	18.2
流速(cm/Os)	103	107	408	0	96	129	435	310
	94	117	370		81	100	467	340
	107	150	392		86	115	445	318
	116	145	385		95	129	510	320
	149	139	382		120		450	305
		126						
測定時の秒数(s)	20	20	3		10	10	10	10
流速(cm/s)	5.2	5.4	136.0	0.0	9.6	12.9	43.5	31.0
	4.7	5.9	123.3		8.1	10.0	46.7	34.0
	5.4	7.5	130.7		8.6	11.5	44.5	31.8
	5.8	7.3	128.3		9.5	12.9	51.0	32.0
	7.5	7.0	127.3		12.0		45.0	30.5
		6.3						
平均流速(cm/s)	5.7	6.5	129.1	0.0	9.6	11.8	46.1	31.9
流量(m <sup>3</sup> /s)	0.077	0.064	0.759	0.000	0.017	0.018	0.210	0.105
流量(m <sup>3</sup> /year)	2434280.9	2021040.5	23947039.9	0.0	542671.5	559369.8	6620573.2	3309804.5
流量(m <sup>3</sup> /year)	2.4.E+06	2.0.E+06	2.4.E+07	0.0.E+00	5.4.E+05	5.6.E+05	6.6.E+06	3.3.E+06

表 3.5 2021 年 10 月 8, 9 日の測定結果 (2)

名称	新堀川	(東)真名川-清滝川間1	(中央)真名川-清滝川間1	(西)真名川-清滝川間1	真名川-清滝川間2	真名川-清滝川間3	真名川-清滝川間4	清滝川-赤根川間2
河川幅(cm)	462.0	150.0	160.0	299.0	169.5	227.0	224.0	150.0
水深(cm)	51.0	35.0	20.0	34.8	32.7	52.4	55.7	9.0
	51.5	33.5	20.5	35.0	32.6	52.7	55.8	9.3
	57.4	34.0	20.8	35.3	32.7	52.5	56.3	9.5
	53.0						56.6	
	52.5							
平均水深(cm)	53.1	34.2	20.4	35.0	32.7	52.5	56.1	9.3
流速(cm/Os)	370	481	410	530	364	319	341	180
	360	503	401	690	365	306	363	150
	342	475	391	581	334	277	278	170
	380	469	343	702	342	299	324	210
	355	520	474	683	389	326	298	
		473	417	669			368	
		505	355	683			342	
		474	440	602				
測定時の秒数(s)	10	5	5	5	5	5	5	5
流速(cm/s)	37.0	96.2	82.0	106.0	72.8	63.8	68.2	36.0
	36.0	100.6	80.2	138.0	73.0	61.2	72.6	30.0
	34.2	95.0	78.2	116.2	66.8	55.4	55.6	34.0
	38.0	93.8	68.6	140.4	68.4	59.8	64.8	42.0
	35.5	104.0	94.8	136.6	77.8	65.2	59.6	
		94.6	83.4	133.8			73.6	
		101.0	71.0	136.6			68.4	
		94.8	88.0	120.4				
平均流速(cm/s)	36.1	97.4	81.2	128.5	71.8	61.1	65.7	35.5
流量(m <sup>3</sup> /s)	0.886	0.499	0.265	1.346	0.397	0.728	0.826	0.049
流量(m <sup>3</sup> /year)	27949088.2	15736595.4	8371857.7	42448503.5	12530360.3	22970288.6	26049725.0	1556143.9
流量(m <sup>3</sup> /year)	2.8.E+07	1.6.E+07	8.4.E+06	4.2.E+07	1.3.E+07	2.3.E+07	2.6.E+07	1.6.E+06

表 3.6 2021 年 11 月 27, 28 日の測定結果 (1)

名称	黒谷川1'	赤根川上流1'	真名川中流2'	真名川下流(深い)	真名川下流(浅い)	木瓜川下流	赤根川-木瓜川間1	赤根川左岸1	清滝川-赤根川間3	真名川-清滝川間5
河川幅(cm)	700	358	1960	3390	3390	650	198	285	190	328
			1980	3560	3560					
			2010	3590	3590					
				3660	3660					
				3730	3730					
平均河川幅(cm)	700	358	1983	3550	3550	650	198	285	190	328
水深(cm)	25.0	40.0	37.5	46.8	21.0	25.5	13.8	8.5	74.5	17.2
	23.5	40.0	42.3	41.5	18.4	31.5		5.0		
	28.0	41.0	46.0	38.7	25.0	34.5		3.2		
	28.0		35.3	42.3	19.9	36.0		7.1		
	35.2		32.1	40.1	25.5	28.0				
			38.0							
			29.0							
平均水深(cm)	27.9	40.3	37.2	41.9	22.0	31.1	13.8	6.0	74.5	17.2
流速(cm/〇s)	237	298	598	810	580	580	554	521	401	479
	219	250	582	803	520	524	501	461	412	502
	203	260	636	761	560	537	503	598	427	475
	218	271	610	755	470	506	533	658	347	498
	203	278	550	817	478	588	482	639	396	456
	224	275	653	856	486	531		556	334	464
	188	294	660	752				669		
			595					530		
			560					644		
			600							
測定時の秒数(s)	10	10	10	10	10	5	5	5	5	5
流速(cm/s)	23.7	29.8	59.8	81.0	58.0	116.0	110.8	104.2	80.2	95.8
	21.9	25.0	58.2	80.3	52.0	104.8	100.2	92.2	82.4	100.4
	20.3	26.0	63.6	76.1	56.0	107.4	100.6	119.6	85.4	95.0
	21.8	27.1	61.0	75.5	47.0	101.2	106.6	131.6	69.4	99.6
	20.3	27.8	55.0	81.7	47.8	117.6	96.4	127.8	79.2	91.2
	22.4	27.5	65.3	85.6	48.6	106.2		111.2	66.8	92.8
	18.8	29.4	66.0	75.2				133.8		
			59.5					106.0		
			56.0					128.8		
			60.0							
平均流速(cm/s)	21.6	27.2	60.4	79.3	51.6	108.9	102.9	117.2	77.2	95.8
流量(m <sup>3</sup> /s)	0.422	0.393	4.456	11.796	4.020	2.201	0.281	0.199	1.093	0.540
流量(m <sup>3</sup> /year)	13322471.5	12385759.8	140519315.6	372005592.1	126775798.5	69402526.1	8868510.0	6269901.3	34476348.3	17044113.1
流量(m <sup>3</sup> /year)	1.3.E+07	1.2.E+07	1.4.E+08	3.7.E+08	1.3.E+08	6.9.E+07	8.9.E+06	6.3.E+06	3.4.E+07	1.7.E+07

表 3.7 2021 年 11 月 27, 28 日の測定結果 (2)

名称	清滝川上流1'	3河川合流地点	赤根川中流4	赤根川中流3	清滝川中流2'	清滝川中流1'	九頭竜川-真名川間1'
河川幅(cm)	1370	2770	1010	660	580	1320	1200
			760	680			
平均河川幅(cm)	1370	2770	885	670	580	1320	1200
水深(cm)	13.5	85	66	41	60	20	12
	14.0	125	77	42	63	18	15
	13.0	150	60		62		6
		150	85				10
		120	88				
		105					
平均水深(cm)	13.5	122.5	75.2	41.5	61.7	19.0	10.8
測定距離(cm)	500	720	920	652	985	510	1060
通過時間(s)	4.57	17.28	22.53	7.26	16.30	5.27	16.46
	3.65	14.56	23.52	6.45	12.90	5.13	18.82
	3.98	15.02	22.28	6.65	13.77	4.26	15.86
	4.42	12.73	21.94	6.72	12.21	5.97	18.11
	4.04	10.52	24.49	7.03	12.53	4.53	17.15
	3.37	10.57			13.13	4.51	
	3.69	14.69			16.79		
		12.37					
		11.19					
		14.16					
流速(cm/s)	109.4	41.67	40.83	89.81	60.43	96.77	64.40
	137.0	49.45	39.12	101.09	76.36	99.42	56.32
	125.6	47.94	41.29	98.05	71.53	119.72	66.83
	113.1	56.56	41.93	97.02	80.67	85.43	58.53
	123.8	68.44	37.57	92.75	78.61	112.58	61.81
	148.4	68.12			75.02	113.08	
	135.5	49.01			58.67		
		58.21					
		64.34					
		50.85					
平均流速(cm/s)	127.5	55.5	40.1	95.7	71.6	104.5	61.6
流量(m <sup>3</sup> /s)	2.359	18.818	2.672	2.662	2.561	2.621	0.794
流量(m <sup>3</sup> /year)	74388556.8	593453332.5	84262657.1	83951611.7	80774218.7	82651396.8	25051239.03
流量(m <sup>3</sup> /year)	7.4.E+07	5.9.E+08	8.4.E+07	8.4.E+07	8.1.E+07	8.3.E+07	2.5.E+07

表 3.8 昨年度の測定結果 (1)

名称	真名川下流	清滝川下流	用水A	赤根川下流(浅い)	赤根川下流(深い)	用水B下流	用水B中流	日詰川
河川幅(cm)	3032	974	659	1495	1495	660	919	531.2
	3040	932		1464	1464			
	3012	957		1461	1461			
	2985	958		1475	1475			
	3005	946		1488	1488			
	3003	1009		1455	1455			
	3014	977		1481	1481			
	3016	968		1493	1493			
	3025	948		1501	1501			
	3025	942		1449	1449			
平均河川幅(cm)	3016	961	659	1476	1476	660.0	919.0	531.2
水深(cm)	161	36.1	15.0	27.1	59.5	51.0	54.0	49.5
	136	39.6	20.0	26.9	54.8	51.0	27.0	51.0
	111	38.3	25.0	23	58.2	33.0	19.0	50.5
		41		27.5	54.7	50.0		
		32.9		28				
平均水深(cm)	136	37.6	20.0	26.5	56.8	46.3	33.3	50.3
流速(cm/s)	70.5	86.8	9.0	57.1	117.6	103.7	29.6	12.6
	58.6	84.6	17.9	55.7	127.0	93.5	24.4	12.2
	70.4	86.2	16.2	53.2	122.7	106.6	25.6	13.0
	64.3	84.0	11.1	46.4	126.6	88.9	38.1	13.7
	62.9	87.9	16.8	52.4	118.0	96.9	29.6	12.0
	62.3	86.4	18.6	51.9	122.7	96.1	27.4	
	65.8	85.3	17.8	52.2	123.8	95.4	32.9	
		89.7	15.1	53.1	118.3	93.2	34.9	
		91.7		52.3	125.8	89.6	32.7	
		81.3		57.7	117.6	93.1	28.3	
							30.6	
平均流速(cm/s)	65.0	86.4	15.3	53.2	122.0	95.7	30.4	12.7
流量(m <sup>3</sup> /s)	26.651	3.120	0.202	2.082	10.231	2.922	0.930	0.339
流量(m <sup>3</sup> /year)	840461037.2	98399854.6	6361361.9	65648973.9	322655379.8	92133480.6	29335131.4	10694770.3
流量(m <sup>3</sup> /year)	8.405.E+08	9.8.E+07	6.4.E+06	6.6.E+07	3.2.E+08	9.2.E+07	2.9.E+07	1.1.E+07

表 3.9 昨年度の測定結果 (2)

名称	赤根川中流(浅い)	赤根川中流(深い)	用水B上流	用水C上流	清滝川中流	赤根川上流	清滝川上流	真名川上流
河川幅(cm)	1579	1579	185	239	1320	371.6	386.5	1086
	1537	1537						1061
	1575	1575						1089
	1561	1561						1068
	1552	1552						1066
	1540	1540						1065
	1539	1539						1050
	1542	1542						1078
	1558	1558						1057
	1559	1559						1065
平均河川幅(cm)	1554	1554	185	239	1320	371.6	386.5	1069
水深(cm)	23.0	41.6	31.0	19.0	15.0	1.8	26.5	62.8
	21.2	43.0			10.0	2.5	27.6	67.8
	18.3	41.1			15.0	2.1	27	70.8
	20.7	43.2				2.6	27.9	72.0
	16.3	39.7				1.7	28.4	69.0
	18.0	41.4				1.3		
	17.3	37.1						
平均水深(cm)	19.3	41.0	31.0	19.0	13.3	2.0	27.5	68.5
流速(cm/s)	52.2	36.2	7.1	40.6	64.0	26.0	29.5	90.4
	50.4	38.0	5.1	41.5	64.2	27.3	33.7	76.9
	53.9	32.9	6.2	39.5	74.3	30.8	37.0	87.5
	51.3	37.9	5.8	39.1	80.4	28.9	37.3	97.5
	49.0	34.0	5.4	42.9	94.8	29.8	26.4	
	52.4	41.1	5.0		96.2	26.7	31.3	
	49.1	36.3			45.1	29.5	32.1	
	47.1	33.2			65.4	26.8	30.2	
	49.6	36.5			56.0	31.8	36.5	
	51.9	33.9			58.8	26.8	42.7	
						28.6	35.2	
							31.2	
平均流速(cm/s)	50.7	36.0	5.7	40.7	69.9	28.5	33.6	88.1
流量(m <sup>3</sup> /s)	1.517	2.295	0.033	0.185	1.231	0.021	0.357	6.445
流量(m <sup>3</sup> /year)	47840878.2	72378941.1	1039637.6	5829007.5	38815351.7	667075.7	11251397.2	203234548.5
流量(m <sup>3</sup> /year)	4.8.E+07	7.2.E+07	1.0.E+06	5.8.E+06	3.9.E+07	6.7.E+05	1.1.E+07	2.0.E+08

### 3.3.3 地下水湧出量の推定

次に地下水湧出量の推定方法について述べる。3.3.2の測定結果を基に用水路による河川水の移動を考慮した任意地点での流量と任意地点間での増減を図3.2に示す。

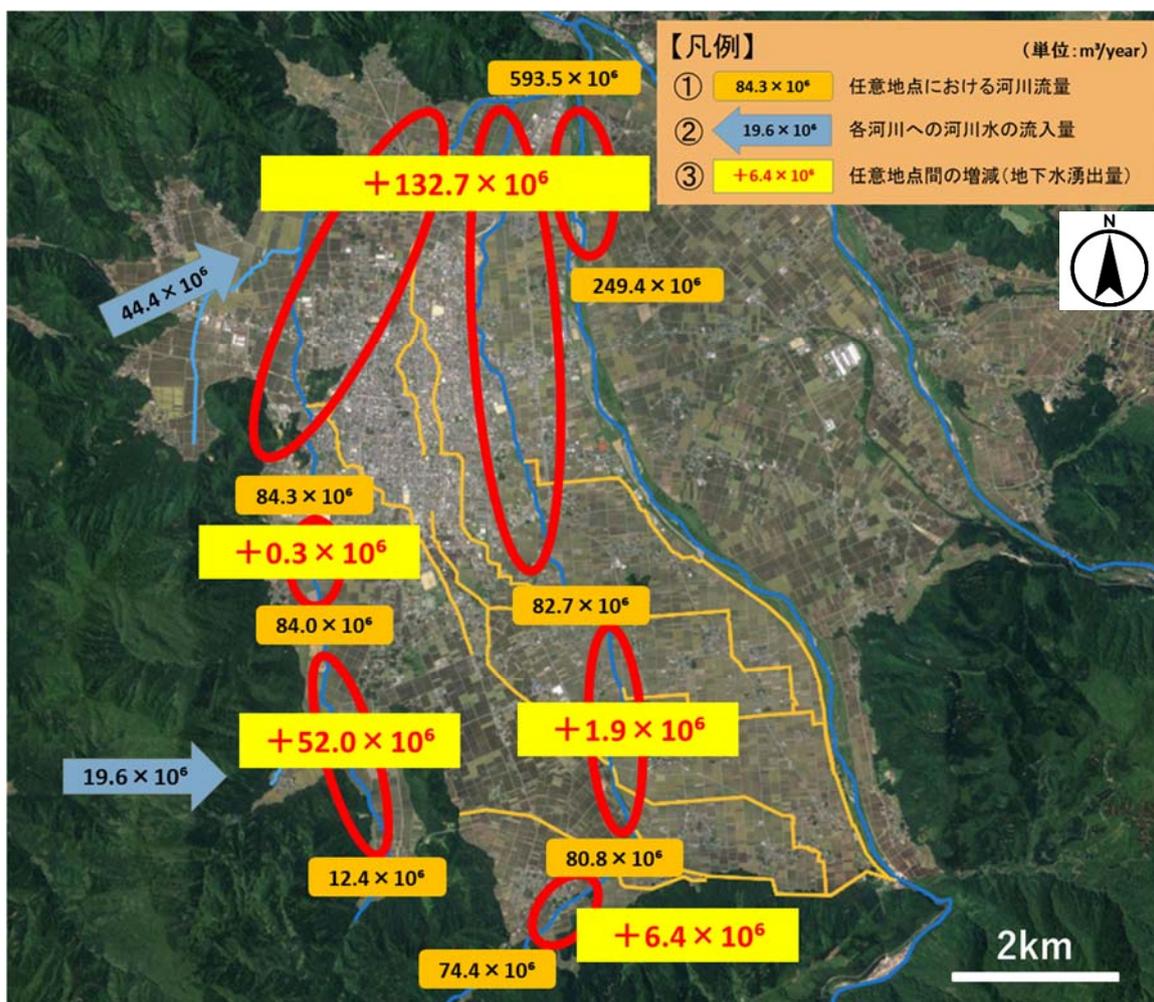


図 3.6 任意地点での流量と任意地点間の増減 (単位:  $\text{m}^3/\text{year}$ )

凡例①は、3河川の任意地点における河川流量を示しており、いずれも2021年11月24日の実測値である。凡例②は、実測値を基に算出した各河川への河川水の流入量である。なお、日詰川【流量:  $44.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ 】に関しては、2020年11月13日に測定した流量を補正したものである。補正方法は以下のとおりである。まず、2020年11月13日と2021年11月24日では測定日前の降水量に違いがある(表3.3参照)。そこで、両日ともに測定を行なった赤根川上流と清滝川上流において、測定地点までの流域面積に対する降水量1mm増加あたりの流量の増加量を求めた。そして、2地点での流量の増加量より、日詰川の河川流量測定地点までの流域面積に対する流量の増加量を算出し、2020年11月13日の実測値を補正して、2021年11月24日での日詰川の流量を推定した。補正に用いた数値を表3.10に示す。最後に、凡例③は、凡例①の測定地点間の流量の差から凡例②の流入量を減じた値である。この値が各地点間の地下水湧出量である。

表 3.10 日詰川の流量補正に用いた数値

	赤根川上流	清滝川上流	日詰川
測定地点までの流域面積(km <sup>2</sup> )	3.23	17.77	9.50
2020年11月13日の流量(m <sup>3</sup> /s)	0.375	0.021	0.339
2021年11月24日の流量(m <sup>3</sup> /s)	2.359	0.393	-
降水量1mmあたりの流量の増加量(m <sup>3</sup> /s)	+0.00373	+0.0201	-
日詰川の流量測定地点までの流域面積に対する 降水量1mm増加あたりの流量の増加量(m <sup>3</sup> /s)	+0.01097	+0.001074	+0.0108

本研究では盆地北部は地下水面が浅く、湧水が顕著にみられ、また、用水路による河川水の移動の影響が少ないという理由より、赤根川、清滝川、真名川の3河川の中流地点での流量の和と3河川が合流した地点での流量の差分から、赤根川左岸および真名川右岸からの流入量を引いた値を地下水湧出量とした。なお、各河川の中流地点は赤根川が新庄地区、清滝川が猪島地区、真名川が真名川大橋付近での測定である。したがって、大野盆地の地下水湧出量は  $132.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$  と推定された。

### 3.4 地下水流出量の推定

大野盆地の地下水流出量は、揚水量と地下水湧出量の和で表される。揚水量は地下水保全条例に基づく地下水採取量報告を基に大野市によって示されたデータを活用し、その過去21年間の平均は  $8.923 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$  であった。また、地下水湧出量は今年度の測定結果を基に、赤根川、清滝川、真名川の3河川の中流地点での流量の和と3河川が合流した地点での流量の差分から、赤根川左岸および真名川右岸からの流入量を引いた値を地下水湧出量とした。その結果、地下水湧出量は  $132.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$  と推定された。したがって、大野盆地における地下水流出量は  $141.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$  と推定された。

### 3.5 まとめ

本章では地下水流出量を推定した。地下水流出量は盆地内での揚水量と地下水湧出量の和で求められる。揚水量は大野市が推計しているデータを活用し、地下水湧出量は実際に現地調査を行い、河川流量の測定から推定した。大野盆地では市街地周辺の盆地北部において、地下水面が浅く、湧水が顕著にみられる。そのため、地下水湧出量は、赤根川、清滝川、真名川の3河川の中流地点である新庄地区、猪島地区、真名川大橋周辺の流量の和と3河川が合流した地点での流量の差分から、赤根川左岸および真名川右岸からの流入量を引いた値を地下水湧出量とした。その結果、揚水量の過去21年間の平均は  $8.923 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$  であり、今年度の測定結果を基に推定した地下水湧出量は  $132.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$  と推定された。以上より、揚水量と地下水湧出量を足し合わせることで、大野盆地における地下水流出量は  $141.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$  と推定された。

## 第4章 大野盆地の地下水収支

### 4.1 はじめに

大野市では古くから地下水を生活用水や工業用水として利用しており、市民と地下水は密接な関係にある。そのため、地下水の枯渇や汚染が市民に及ぼす影響は多大である。地下水を合理的に維持管理するためには、大野盆地における地下水収支を定量的に解明することが重要である。本章では、**第2章**で推定した地下水流入量と**第3章**で推定した地下水流出量を基に、大野盆地における地下水収支を推定する。

### 4.2 地下水収支の推定

大野盆地における地下水収支は盆地内に流入する地下水の水量と盆地外に流出していく地下水の水量の差より求められる。**第2章**では、過去22年間の地下水流入量の平均は $152.1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ と推定された。**第3章**では、過去22年間の地下水流出量の平均は $141.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ と推定された。したがって、地下水収支は $+10.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ と推定された。地下水収支の内訳を表4.1、図4.1に示す。

表 4.1 【過去22年間平均】地下水収支の内訳（単位： $\text{m}^3$ ）

地下水流入量	降雨による自然涵養	$+58.3 \times 10^6$	$+152.1 \times 10^6$
	山岳部からの流動量	$+56.7 \times 10^6$	
	水田からの浸透量	$+37.1 \times 10^6$	
地下水流出量	地下水揚水量	$-8.9 \times 10^6$	$-141.6 \times 10^6$
	地下水湧出量	$-132.7 \times 10^6$	
地下水収支			$+10.4 \times 10^6$

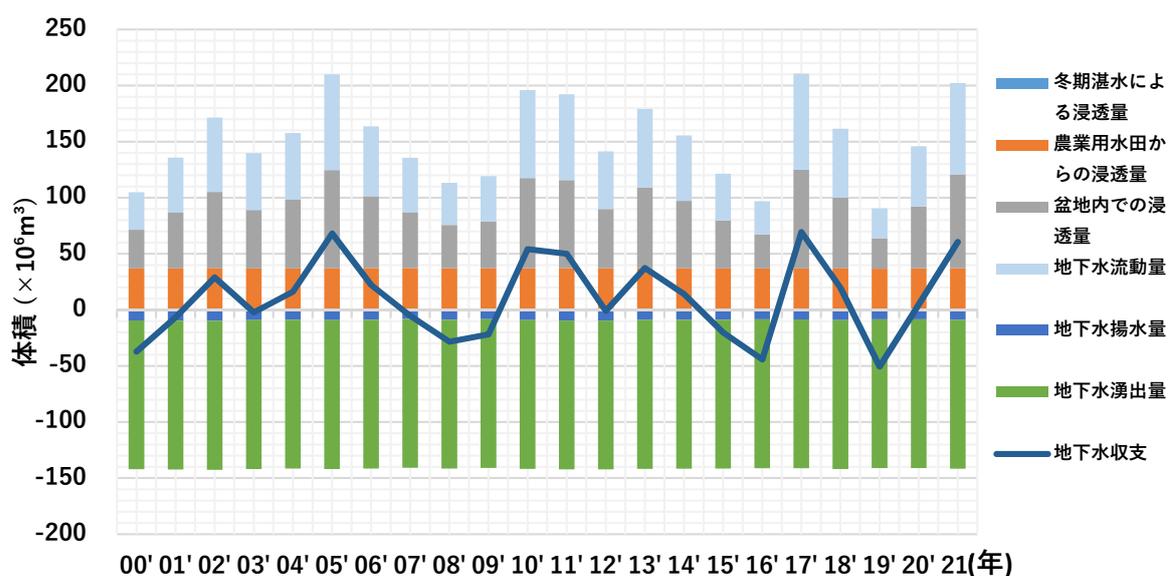


図 4.1 地下水収支の内訳

図 4.2 は年間降水量と地下水収支量の関係を示したものである。この図より、決定係数  $R^2$  が 0.96 と強い直線的な相関がみられることから、年間降水量の増加に伴い、地下水収支は増加することが認められた。また、この関係から得られた関係式より、地下水収支は年間降水量の影響を強く受け、揚水量や水田灌水の期間に大きな変動がなかった場合、年間降水量が 2245.7 mm を超えると年間の地下水収支が正の値になる傾向があると考えられる。この関係式は、年間降水量から地下水収支量の予測が高い精度で求められることを示唆しているが、今後更にデータの積み重ねることによって、より精度の高い関係を構築すべきと考えられる。

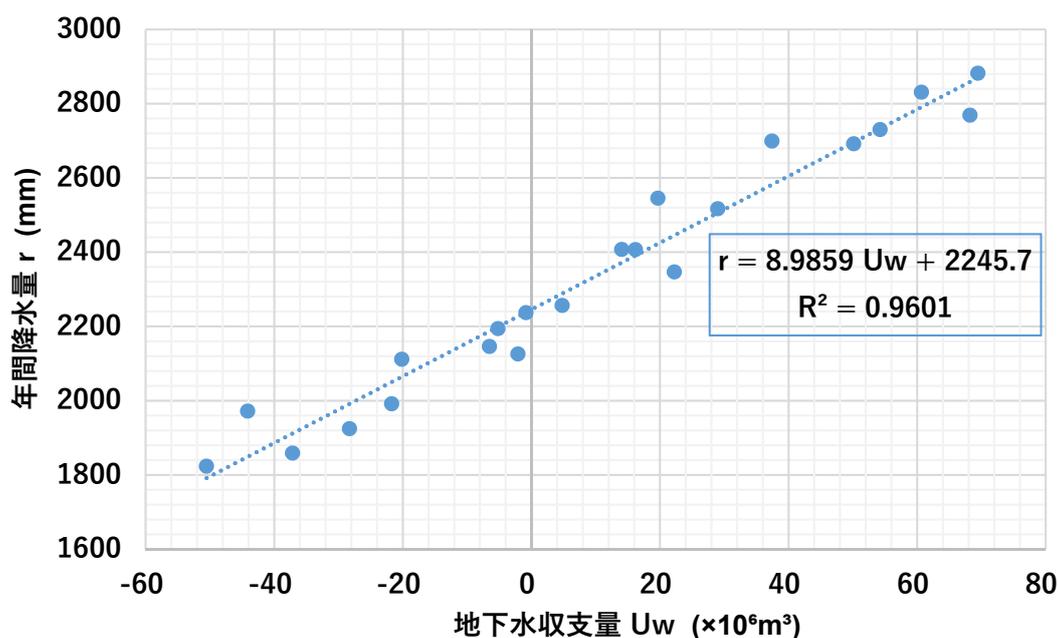


図 4.2 年間降水量と地下水収支量の関係

### 4.3 まとめ

本章では、第 2 章および第 3 章で推定した地下水流入量と地下水流出量から大野盆地における地下水収支を推定した。それぞれの過去 22 年間の平均値は  $158.2 \times 10^6 m^3/year$  と  $141.6 \times 10^6 m^3/year$  であり、地下水収支は  $10.4 \times 10^6 m^3/year$  多いことがわかった。この結果より、大野盆地の地下水収支は今後も正の値をとることが予想される。また地下水収支の値は年間降水量の影響を強く受け、年間降水量が 2245.7 mm を超えると年間の地下水収支が正の値になる傾向があると考えられる。

## 第5章 MATLABによる機械学習による欠損データの補完と推定

### 5.1 はじめに

2.2.2で推定した蒸発散量は、気象データの欠損を含めた状態での推定である。表5.1は2000年から2021年における気象データの欠損部分を示す。これらは設備点検や積雪により正常に観測できなかったことによる欠損である。降水量、日照時間、風速は大野市消防本部の観測データにより補うことができるが、湿度は気象庁では観測しておらず、大野市消防本部での欠損部分を補うことは不可能である。湿度の欠損を含めた状態での推定は、実際の蒸発散量より多い可能性があり、その値は、1日で約1 mm、1か月の湿度データの欠損で年間約30 mmに及ぶ。そこで、本研究ではMATLABの機械学習による欠損データの補完を試みた。なお、MATLABとはMath Works社によって提供されている数値解析ソフトウェアである<sup>16)</sup>。

表 5.1 気象データの欠損部分

期間		欠損データ
2001年～2015年 (2004, 2008, 2011, 2012年を除く)	2月	湿度
2013年	7月	湿度
2016年	8/21～10/15	湿度
2006年	2/5	降水量
2007年	12/20～12/25	日照時間
2011年	12/28～12/31	風速
2012年	1/1～1/4	風速

### 5.2 サポートベクター回帰 (SVR: Support Vector Regression) について

本研究では機械学習の一手法であるサポートベクターマシン (SVM: Support Vector Machine) を回帰分析に応用したサポートベクター回帰 (SVR: Support Vector Regression) を採用した。SVMとは、2値識別問題を解くために考えられた学習アルゴリズムであり、SVRは量的な目的変数を持つ場合に損失関数を用いて、小さな誤差を無視するように最適化を行うアルゴリズムである<sup>17)</sup>。これにより、過去のデータを基に未知の数値を予測することが可能である。なお、SVMの種類は分類器を計算するためのカーネル関数に線形カーネルを用いて線形の回帰モデルとするか、ガウスカーネルを用いて非線形の回帰モデルとするかの違いがある。また、精度は平均二乗偏差 (RMSE) により算出している。RMSEの計算式を式(5.1)に示す。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (f_i - y_i)^2} \quad (5.1)$$

n: データ数,  $y_i$ : 実測値,  $f_i$ : 予測値

### 5.3 MATLABによる予測結果

今回は、他の気象データ（降水量、気温、日照時間、風速）から欠損している湿度のデータを予測した。予測に用いた学習データ数とその期間、精度を表5.2に示す。また、実測値と予測値の比較を図5.1に示す。

表 5.2 MATLABによる予測結果

SVMの種類	データ数	期間	精度
線形 SVM	7180 日×5 項目	2000 年～2020 年の欠損データがない日	6.6949
中程度の ガウス SVM	7180 日×5 項目	2000 年～2020 年の欠損データがない日	6.0291
線形 SVM	1498 日×5 項目	2000 年～2020 年の 1 月/2 月/3 月で 欠損データがない日	6.1739
中程度の ガウス SVM	1498 日×5 項目	2000 年～2020 年の 1 月/2 月/3 月で 欠損データがない日	5.8213

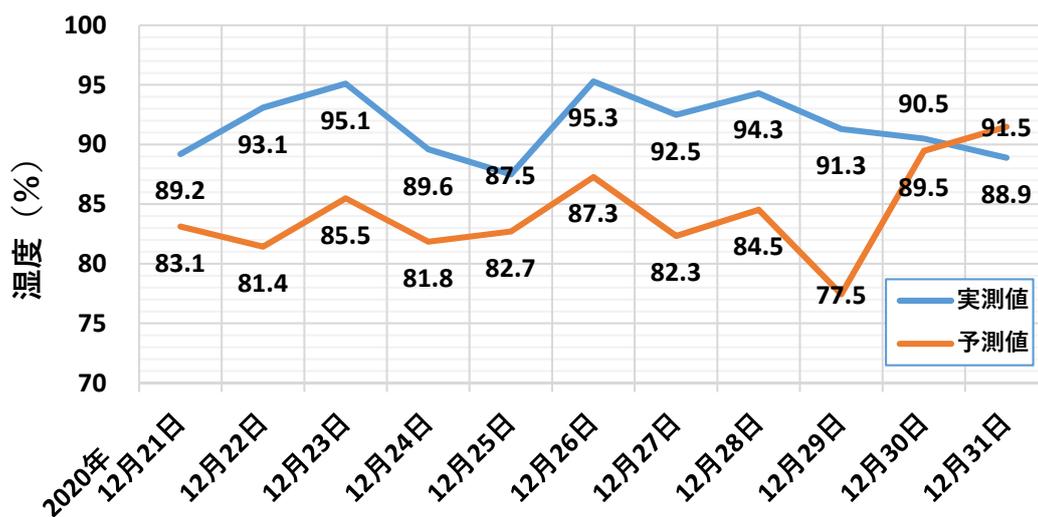


図 5.1 実測値と予測値の比較

解析の結果、気象データの予測となるため精度は極めて低い値であった。しかし、欠損データに予測値を代入することで、欠損データ（湿度 0 %）での推定より実際の蒸発散量に近づくと考えられる。したがって、MATLABにより欠損データを補完した場合の蒸発散量とその値を基に地下水収支を推定した。表5.3はMATLABにより欠損データを補完した場合の蒸発散量の推定結果を示し、表5.4はMATLABにより欠損データを補完した場合の地下水収支の内訳を示す。

表 5.3 蒸発散量の推定結果 (MATLAB の予測データ補完)

【アルベド 中間値】 蒸発散量(mm/year)			
2000 年	784.30	2011 年	795.15
2001 年	761.44	2012 年	809.49
2002 年	785.97	2013 年	833.87
2003 年	726.72	2014 年	809.50
2004 年	819.20	2015 年	821.74
2005 年	713.24	2016 年	860.02
2006 年	724.08	2017 年	806.29
2007 年	793.63	2018 年	885.40
2008 年	777.41	2019 年	846.39
2009 年	757.89	2020 年	794.99
2010 年	771.27	2021 年	824.58

表 5.4 【過去 22 年間平均】 地下水収支の内訳 (単位 : m<sup>3</sup>) (MATLAB のデータ補完)

地下水流入量	降雨による自然涵養	+59.5×10 <sup>6</sup>	+154.5×10 <sup>6</sup>
	山岳部からの流動量	+57.9×10 <sup>6</sup>	
	水田からの浸透量	+37.1×10 <sup>6</sup>	
地下水流出量	地下水揚水量	-8.9×10 <sup>6</sup>	-141.6×10 <sup>6</sup>
	地下水湧出量	-132.7×10 <sup>6</sup>	
地下水収支			+12.9×10 <sup>6</sup>

推定の結果、機械学習で予測した気象データの代入により、年間での蒸発散量が低下した分だけ、降雨による自然涵養が  $1.2 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/year、山岳部からの流動量が  $1.2 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/year 上昇し、地下水収支量は  $2.5 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/year 上昇した。年間での地下水収支は  $+12.9 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/year となり、この推定値は 4.2 で求めた推定値より実際の地下水収支量に近いと考えられる。

## 5.4 まとめ

本章では、MATLAB の機械学習による欠損データの補完を試みた。湿度の欠損を含めた状態 (湿度 0%) での推定は、実際の蒸発散量より多い可能性があり、その値は、1 日で約 1 mm、1 か月の湿度データの欠損で年間約 30 mm に及ぶ。そこで、気象データの欠損を MATLAB により予測し推定した結果、地下水収支量は  $2.5 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/year 上昇し、年間での地下水収支は  $+12.9 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/year となった。この値は第 4 章で推定した地下水収支より実際の地下水収支に近い値であるとされる。

## 第6章 長期間の少雨による地下水位低下の現状とその影響

### 6.1 はじめに

大野市では2021年9月中旬から11月中旬にかけて地下水位が減少傾向にあり、11月9日には基準観測井である春日観測井の地下水位が一定基準を下回ったことから、地下水警報が発令され、市民への啓発や節水対策が施された。例年と比較して10月以降の降水量は少なく、真名川頭首工の改修工事に伴い、10月19日から11月22日にかけて真名川から清滝川への用水路を断水したことの影響も一部あり、清滝川では渇水もみられた。本章では、地下水位の変化を示すとともに、清滝川の渇水が生じた際の影響力とその範囲について述べる。

### 6.2 地下水位の変化

図6.1は2021年の標準観測井の地下水位の変化を示し、図6.2は2021年の簡易観測井の地下水位の変化を示す。また、図6.3はそれぞれの観測井の位置を示す。地下水位の変動は主に降雨によって左右されることが多いが、その他にも影響を与える要因がある。2月下旬の地下水位の上昇は雪解けによるもので、5月上旬の地下水位の上昇は農業用水田の代掻きによる水位上昇である。一方で、9月下旬の地下水位の低下は農業用水田の落水によるものである。

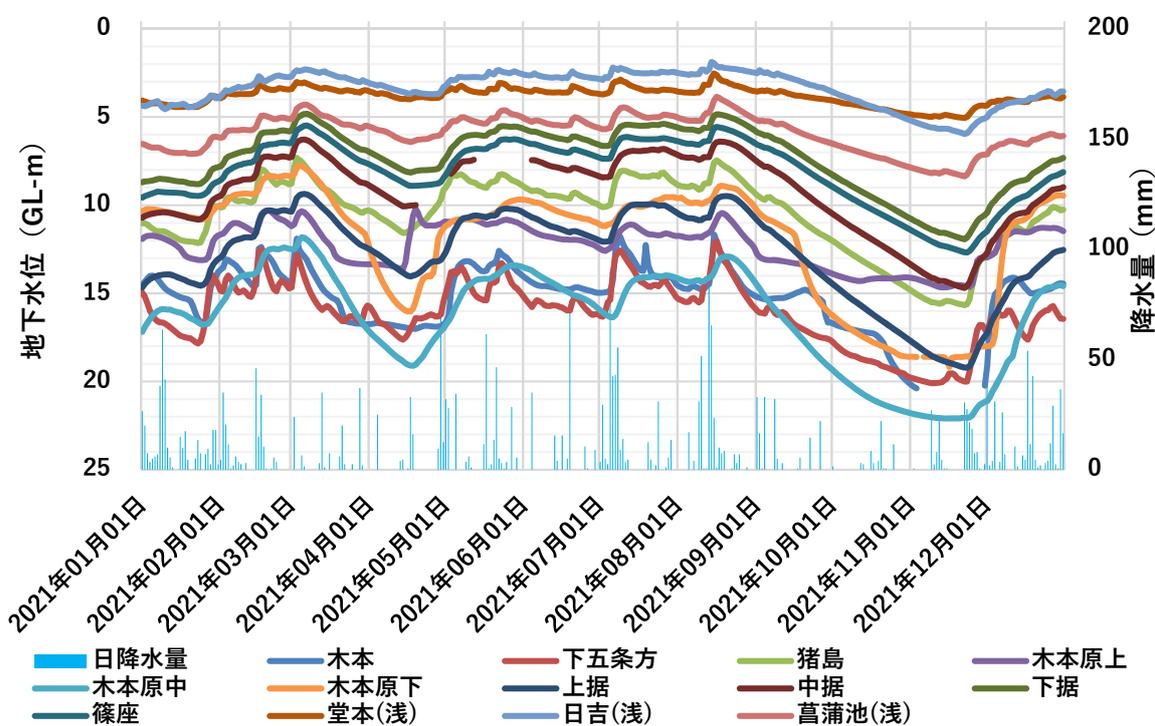


図 6.1 【2021 年】標準観測井の地下水位

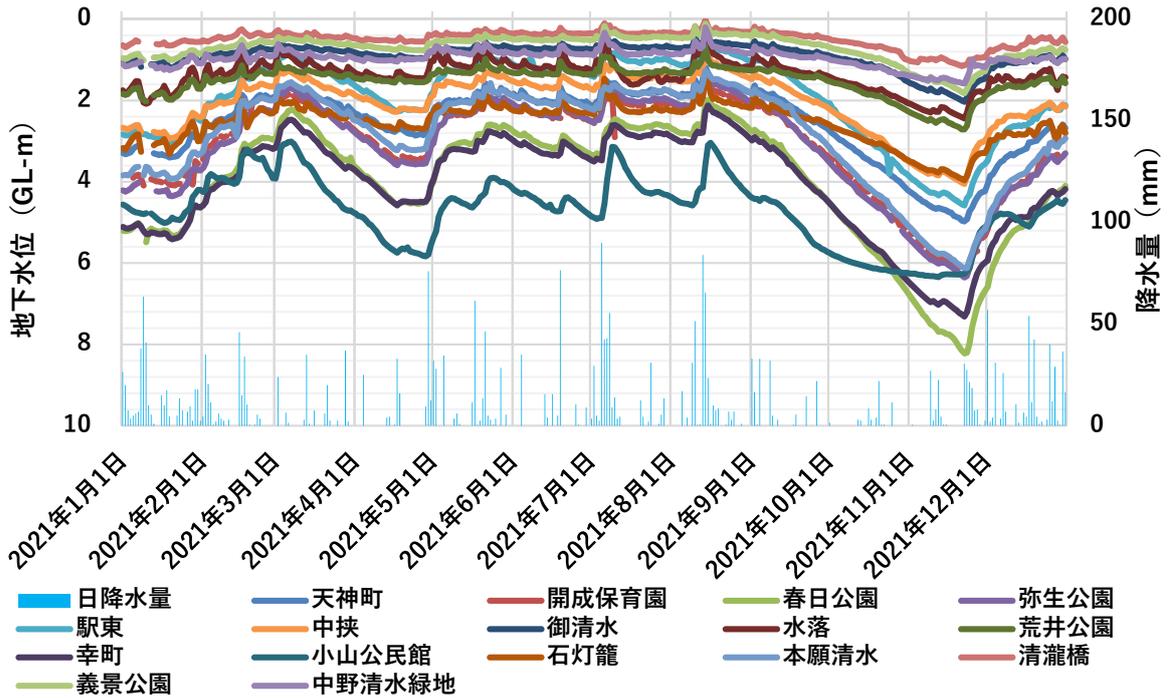


図 6.2 【2021 年】簡易観測井の地下水水位

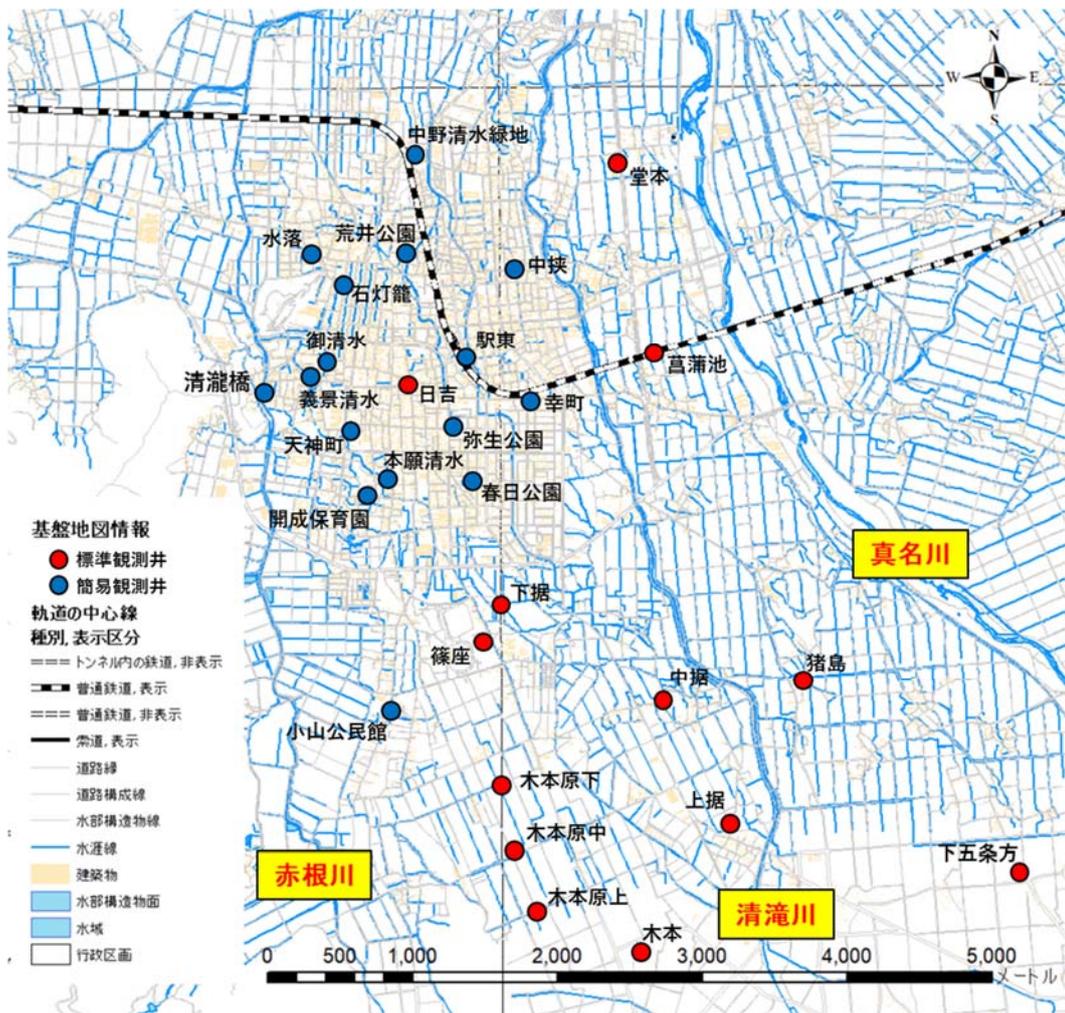


図 6.3 観測井位置図

次に各観測井の地下水位の2021年のデータと過去5年間(2016-2020年)の平均の比較をする。代表して、中野清水緑地(盆地北部)、春日公園(市街地)、上据(盆地南部)の観測井の地下水位を図6.4、図6.5、図6.6に示す。2021年は例年と比較して、10月から11月の降水量が少なかったことから、地下水位も減少傾向にあった。地下水位が最も低下した11月22日では、過去5年間の平均値からそれぞれ-0.443 m、-2.178 m、-3.421 mの地下水位低下が確認された。また、2021年10月1日から11月15日までの地下水位減少率はそれぞれ-46.5%、-70.5%、-30.5%であった。過去5年間の地下水位減少率の平均はそれぞれ-33.9%、-41.6%、-16.6%であった。

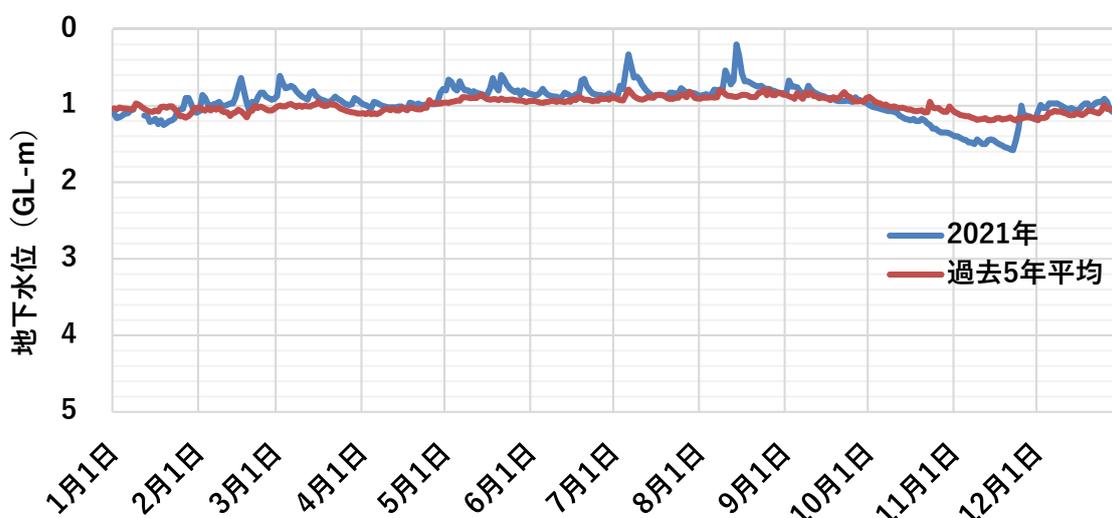


図 6.4 中野清水緑地観測井の地下水位

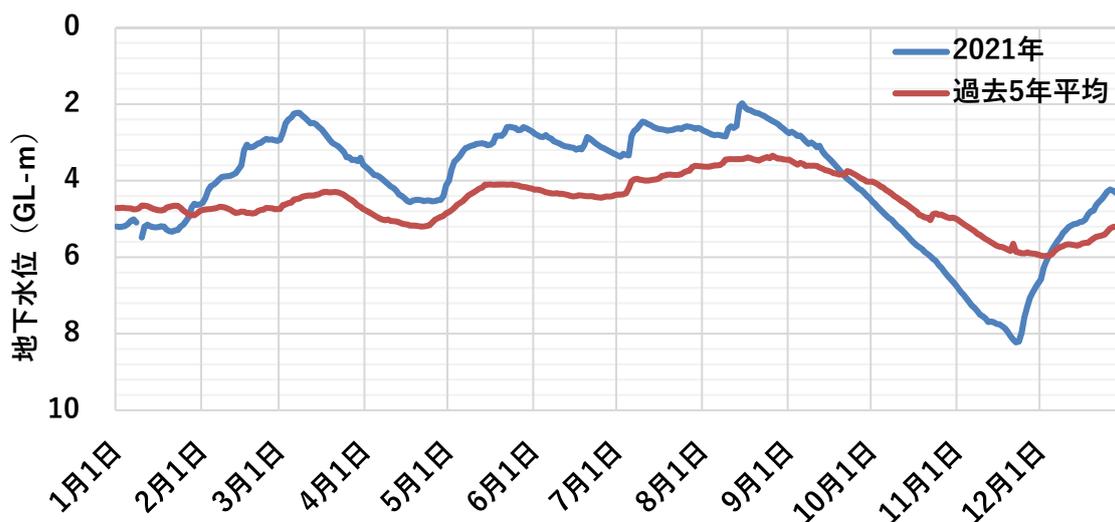


図 6.5 春日公園観測井の地下水位

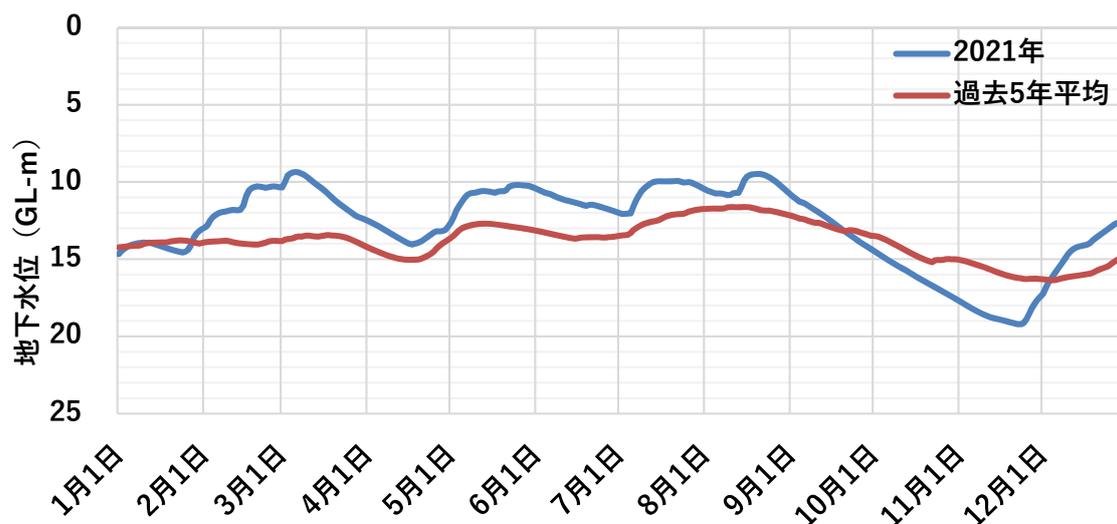


図 6.6 上据観測井の地下水位

### 6.3 長期間の少雨による影響

長期間の少雨によって、清滝川で渇水が生じた事例を基に、本研究では、清滝川の渇水に伴う地下水位への定量的な影響範囲の推定を試みた。各観測井の地下水位が最も低下した 11 月 22 日と過去 5 年間の 11 月 22 日の平均値の地下水位の差を算出し、Arc-GIS を用いてコンター図の作成を行なった。Arc-GIS とは、ESRI 社によって提供されている地理情報システムを活用した空間解析ソフトである<sup>18)</sup>。

Arc-GIS によって作成したコンター図を図 6.7 に示す。赤丸が標準観測井、青丸が簡易観測井を示す。なお、木本観測井は地下水位が測定可能範囲を下回ったことにより、データが欠損しているため除外した。このコンター図は、緑、黄、赤の順に地下水位の差が大きくなっている。推定の結果、盆地北部の上据および木本原下の周辺で影響力が大きく、市街地に向かうにつれて地下水位の差分は小さくなっている。また、清滝川以東では清滝川以西と比較して地下水位の差分は小さいことがわかった。木本原下の地下水位の差分が大きかった要因は冬期湛水事業の実施有無である。そのため、清滝川の渇水が及ぼす影響（清滝川の河川水による自然涵養）は、市街地方向に向かって、近接的なものであることが予測される。このことから、大野盆地の地下水は真名川流域の影響を強く受けることが考えられる。

また、3.3 の河川流量の測定より、清滝川上流の流量は  $74.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ 、真名川から清滝川への河川水流入量の総量は  $105.1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$  であることから、真名川頭首工の改修工事に伴う断水による清滝川の渇水への影響は大きいと考えられる。なお、清滝川の河川水による自然涵養は近接的なものであることから、真名川頭首工の改修工事による地下水位への影響力は小さく、長期間の少雨により地下水位が低下したと考えられる。

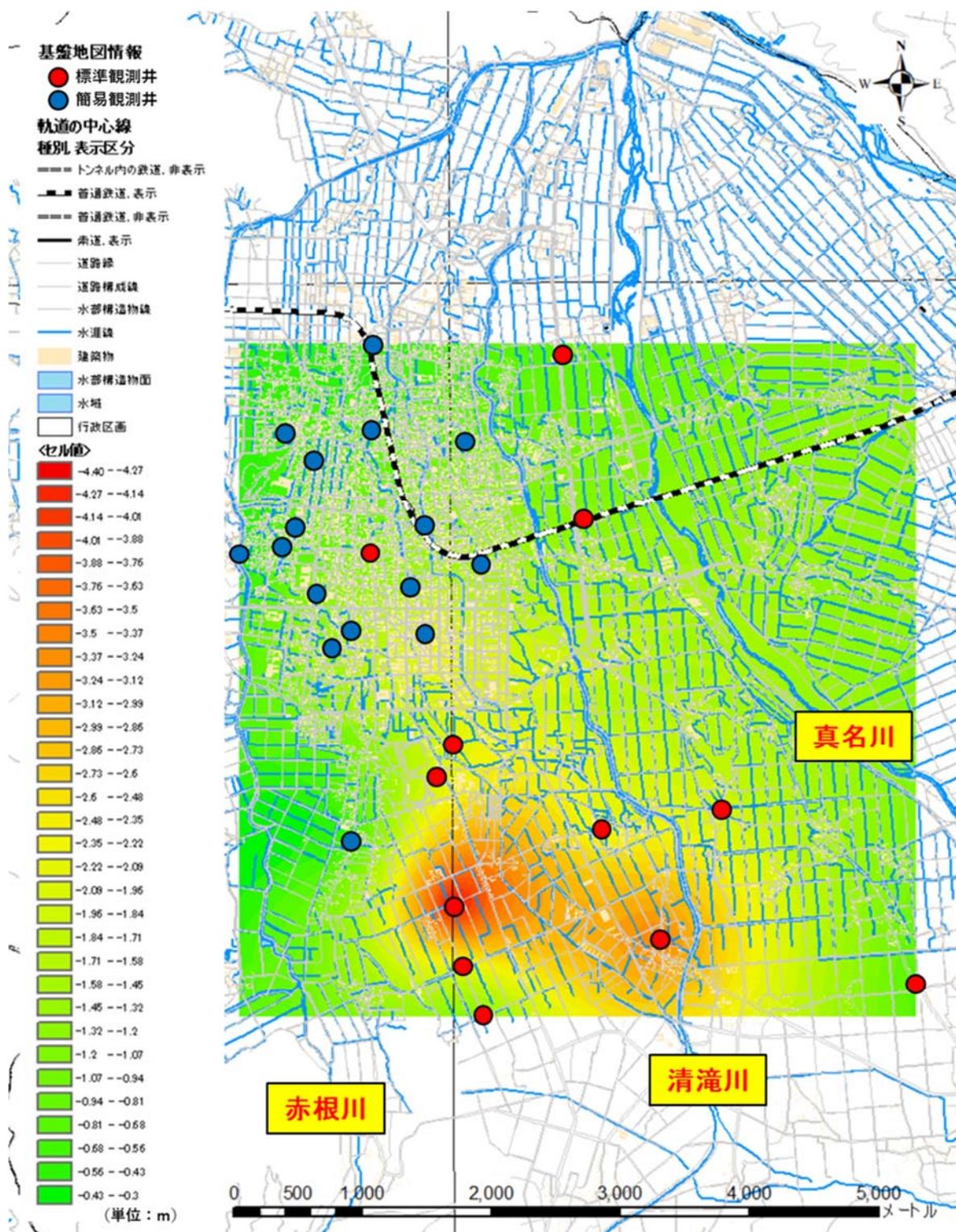


図 6.7 清滝川の渇水が生じた際の影響力

#### 6.4 まとめ

本章では、清滝川の渇水が及ぼす影響とその範囲の推定を試みた。各観測井の地下水位が最も低下した11月22日と過去5年間の11月22日の平均値の地下水位の差を算出し、作成したコンター図より、清滝川の渇水が及ぼす影響（清滝川の河川水による自然涵養）は、市街地方向に向かって、近接的なものであると予測できる。このことから、大野盆地の地下水は清滝川流域と比較して、約6.6倍の広さの真名川流域の影響を強く受け、地下水位が低下した要因は長期間の少雨によるものと考えられる。しかし、この点に関しては今後更なる検討を要する。

## 第7章 結論

本研究では、大野盆地における地下水性状を定量的に解明することを目的とし、地下水収支の推定を行なった。盆地内の浸透量および山岳部からの地下水流動量、水田灌水および冬期湛水による浸透量の和である地下水流入量と、地下水揚水量と地下水湧出量の和である地下水流出量をそれぞれ推定することで、地下水流入量と地下水流出量の差より地下水収支を求めることができた。以下に、本研究で得られた成果について述べる。

- (1) **第2章**では地下水流入量の推定をした。地下水流入量の要素として、降雨による盆地内の自然涵養は  $58.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ 、山岳部からの地下水流動は  $56.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ 、冬期湛水による地下水浸透量は  $198,000 \text{ m}^3$ 、水田灌水による地下水浸透量は  $36.9 \times 10^6 \text{ m}^3$  と推定され、これらの推定結果を足し合わせることで、大野盆地における地下水の流入量は  $152.1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$  と推定された。
- (2) **第3章**では地下水流出量の推定をした。揚水量の過去 21 年間の平均は  $8.923 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$  で、今年度の測定結果を基に推定した地下水湧出量は  $132.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$  と推定された。地下水流出量は揚水量と地下水湧出量の和であるため、 $141.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$  と推定された。
- (3) **第4章**では、**第2章**および**第3章**で推定した地下水流入量と地下水流出量から大野盆地における地下水収支を推定した。それぞれの過去 22 年間の平均値は  $152.1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$  と  $141.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$  であり、地下水収支は  $10.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$  であると推定された。この結果より、大野盆地の地下水収支は今後も正の値をとることが予想される。また地下水収支の値は年間降水量の影響を強く受け、年間降水量が  $2245.7 \text{ mm}$  を超えると年間の地下水収支が正の値になる傾向があると考えられる。
- (4) **第5章**では、MATLAB の機械学習による欠損データの補完を試みた。機械学習で予測した気象データの代入により、年間での蒸発散量が低下した分だけ、降雨による自然涵養が  $1.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ 、山岳部からの流動量が  $1.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$  上昇し、地下水収支量は  $2.5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$  上昇した。年間での地下水収支は  $+12.9 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$  となり、この推定値は**第4章**で求めた推定値より実際の地下水収支量に近いと考えられる。
- (5) **第6章**では、清滝川の渇水事例を基に清滝川の渇水が及ぼす影響とその範囲の推定を試みた。各観測井の地下水位が最も低下した 11 月 22 日と過去 5 年間の 11 月 22 日の平均値の地下水位の差を算出し、作成したコンター図より、清滝川の渇水が及ぼす影響(清滝川の河川水による自然涵養)は、市街地方向に向かって、近接的なものであると予測できた。このことから、大野盆地の地下水は清滝川流域と比較して、約 6.6 倍の広さの真名川流域の影響を強く受け、地下水位が低下した要因は長期間の少雨によるものだと考えられる。

以上が本研究で得られた成果である。本研究では、大野盆地の地下水収支の推定および清滝川の湧水が及ぼす影響とその範囲の推定を行なったが、いくつかの改善点がある。まずは、表面流出量および地下水湧出量の推定である。河川流量の測定は昨年度と比較してデータ量は増加したが、いずれにせよ年間で3回程度しか行えておらず、個人では同日に測定できる数にも限りがある。年間を通して、季節を問わず均等に測定し平均を算出することでより精度の高い推定を行えると推察される。次に、水田からの浸透量を求める際に用いた減水深についてである。今回の推定では、過去の一般的な水田での水田灌水および冬期湛水事例の調査結果から平均値を算出して推定を行なった。しかし、減水深は天候や土地の状態に左右されるため、大野盆地における実測値を用いるのが適切である。また、**4.2**で述べたように、年間降水量からの地下水収支の予測は今後更にデータを積み重ねることで、より精度の高い関係を構築すべきと考えられる。

以上、本研究で得られた成果について述べたが、これらの成果が大野市における地下水政策に寄与され、さらには大野市民への地下水への啓発活動に役立つことを期待している。

## 参考文献

- 1) 谷口真人：気候変動と地下水，地下水学会誌，Vol.47，NO.1，pp.5-17，2005.
- 2) 国土交通省：令和3年度版 日本の水資源の現状，  
[https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/mizsei/mizukokudo\\_mizsei\\_tk2\\_000028.html](https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/mizsei/mizukokudo_mizsei_tk2_000028.html)，2022/2/6 閲覧.
- 3) 大野市：大野市地下水年次報告書～令和2年度版～，2021.
- 4) 気象庁：過去の気象データ・ダウンロード，<https://www.jma.go.jp/jma/index.html>，2022/2/6 閲覧.
- 5) 大野市，株式会社利水社：大野市地下水総合調査業務報告書，2003.
- 6) 大野市：大野市について，大野市 HP，<https://www.city.ono.fukui.jp/aboutweb/konnatokoro.html>，2022/2/6 閲覧.
- 7) 大野市：大野市水循環基本計画，2021.
- 8) Google 社：Google Maps & Google Earth，<https://www.google.co.jp/maps/>，2022/2/6 閲覧.
- 9) 大野市：越前おおの型 食・農業・農村ビジョン，2017.
- 10) 小澤諭，岩松俊哉，鎌田元康，市川憲良：蒸発散量推定式の簡略化に関する検討，日本建築学会環境系論文集，Vol.77，No.675，pp.331-337，2012.
- 11) 三浦健志，奥野林太郎：ペンマン式の計算を容易にするための工夫と提案，農業土木学会論文集，Vol.1993，No.164，pp.165-170，1993.
- 12) 三浦健志，奥野林太郎：ペンマン式による蒸発散位計算方法の詳細、農業土木学会論文集，Vol.1993，No.164，pp.157-163，1993.
- 13) 木村健一：環境工学 2 巻，影国社，pp.10，1988.
- 14) 福本昌人，進藤惣治：低平地水田における減水深の空間的ばらつき，農研機構研究報告 農村工学研究部門，No.3，2019.
- 15) 田村孝浩，谷本岳，石田憲治：冬期湛水水田の水収支観測に基づいた湛水可能面積の試算，農村計画学会誌 28 巻論文特集号，2010.
- 16) Math Works：MATLAB，<https://jp.mathworks.com/products/matlab.html>
- 17) Trevor Hastie，Robert Tibshirani，Jerome Friedman：“The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction Second Edition”（杉山将 他による翻訳），2014.
- 18) ESRI ジャパン株式会社：Arc-GIS，<https://www.esri.com/products/arcgis/>，2022/2/6 閲覧.