

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

2023年3月

関西大学 環境都市工学部

教授・工博・楠見 晴重

目次

第1章	序論	
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
第2章	大野盆地の地下水流入量	
2.1	はじめに	6
2.2	地下水浸透量の推定	6
2.2.1	季節別による蒸発散量の推定	6
2.2.2	表面流出量の推定	9
2.2.3	地下水浸透量の推定	9
2.3	地下水流動量の推定	11
2.4	水田からの地下水浸透量の推定	11
2.5	地下水流入量の推定	12
2.6	まとめ	13
第3章	大野盆地の地下水流出量	
3.1	はじめに	14
3.2	生活用水量の推定	14
3.2.1	地下水利用量アンケートの目的	14
3.2.2	地下水利用量アンケートの調査方法と調査項目	14
3.2.3	アンケート調査の実施と結果	17
3.3	地下水揚水量の推定	18
3.4	地下水湧出量の推定	19
3.4.1	地下水湧出量について	19
3.4.2	測定方法と測定結果	22
3.4.3	地下水湧出量の推定	29
3.5	地下水流出量の推定	30
3.6	まとめ	30
第4章	大野盆地の地下水収支	
4.1	はじめに	31
4.2	地下水収支の推定	31
4.3	まとめ	33
第5章	大野市簡易観測井における地下水位の変動について	
5.1	はじめに	34
5.2	21年間における地下水位	34
5.2.1	御清水観測井と春日公園観測井における地下水位	34

5.2.2 揚水量と地下水位の関係.....	36
5.3 地域別による地下水位とその変動.....	36
5.4 まとめ	40
第6章 結論	41
参考文献	43

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、管理には、正確な地下水性状の把握が必要である¹⁾。

地球上に存在する水量はおよそ 14 億(km³)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²⁾。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、全国的にみても指折りの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、未来永劫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

大野市は石川県と岐阜県に隣接した福井県で最も東に位置している市となっており、約 3 万 1 千人が暮らしている。面積は 872.43(km²)と福井県で最も面積の大きい市町村であり、面積の約 9 割を森林が占める自然豊かな地域である³⁾。そして、日本百名山の「荒島岳」をはじめとし、市街地が四方をぐるりと美しい山々に囲まれていることから、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、西側から赤根川、清滝川、真名川、九頭竜川の 4 本の一級河川が南から北に向かって流れており、盆地北部で九頭竜川と合流し日本海へと流れていく。 1.1 は大野市の位置を示し、 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

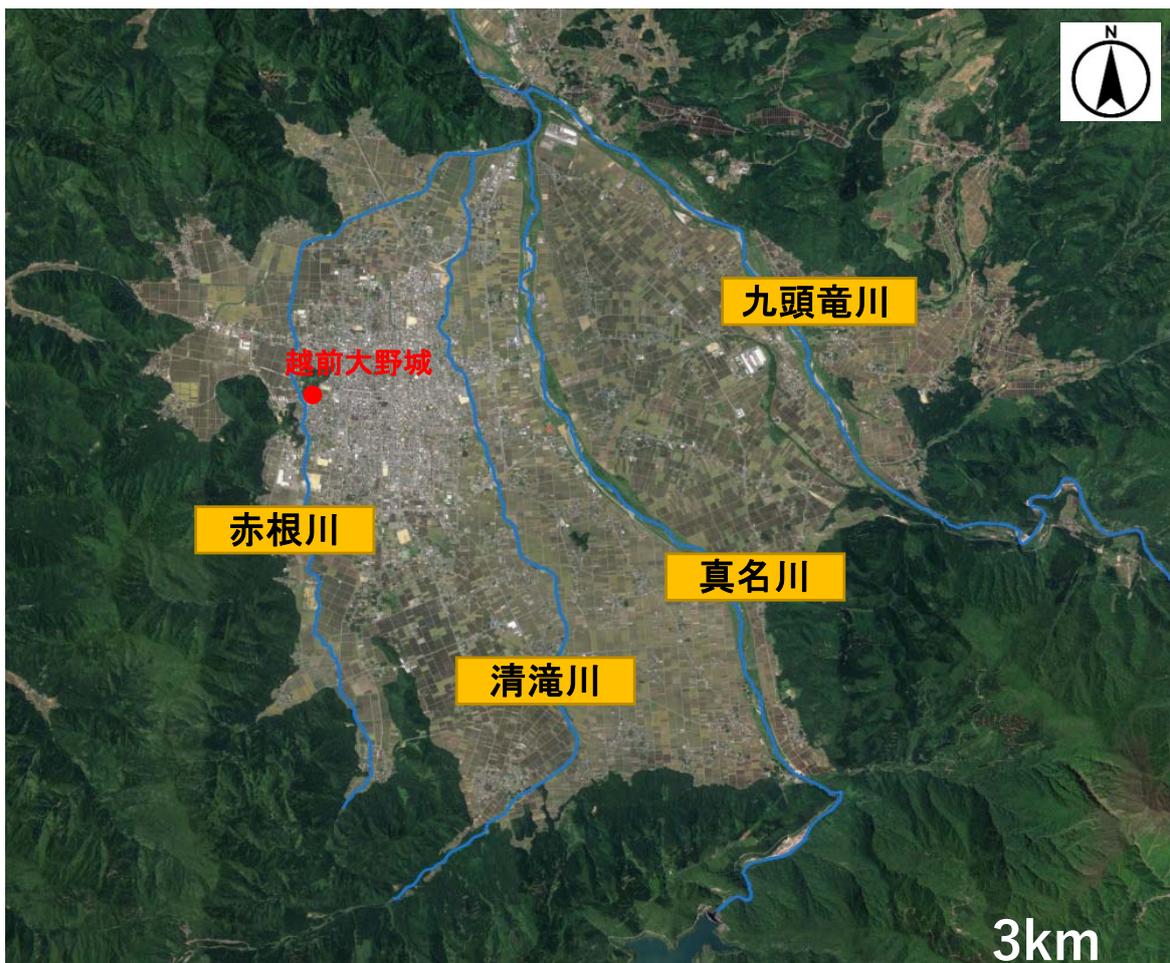


図 1.2 大野盆地と各河川の位置関係

図 1.3 は過去 10 年間における、各月の降水量と気温の平均を示す。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、全国規模でみても多い⁴⁾。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といった特徴を持つ。

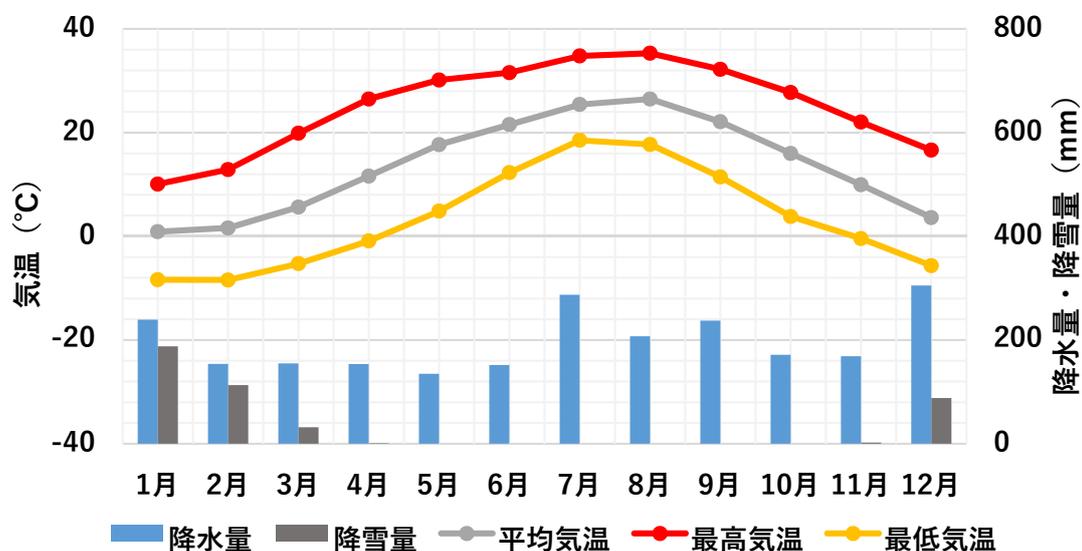


図 1.3 過去 10 年間（2011-2020 年）の各月の降水量と気温の平均

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⁵⁾

写真 1.1 は越前大野城を示す。越前大野城は、天正 4 年(1576 年)、織田信長家臣の金森長近により、約 4 年の歳月をかけて築城された。また、市街地を京都に模して碁盤の目の構造にしたことから、「北陸の小京都」ともよばれている⁶⁾。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おり、歴史と文化を受け継ぐ町となっている。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 越前大野城

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。そして、今年度は地下水収支の精度をさらに上げるため、蒸発現象における蒸発散量の精度、大野市の方が年間に使用する生活用水量の推定、地下水湧出量を推定する際に行う測定データの数を増やした。また、大野市の簡易観測井における地下水位を観測し、地域による地下水位の変動の要因を調査した。

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都市であるが、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、本研究は継続したものであり、昨年度は地下水の流入量と流出量を調べ総合的な地下水収支の算出を行ったが、今年度は地下水による生活用水、ならびに昨年度に引き続いて地下水収支に関して研究を進めた。

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たため、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、地下水揚水量と生活用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によって求められる。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工業用水や農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 3 年度版～」に記載のデータを活用した。また、生活用水量は東京のデータを参考にして大野市で使用される年間の生活用水量を調査した。また、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、九頭竜川はその下流部を除くと、河川のまわりが難透水層に囲まれていることから、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⁷⁾。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。

大野市簡易観測井の地下水位の変動の要因には、はじめに御清水観測井と春日公園観測井を比較した。それぞれの 21 年間の水位を観察することで、水位の変動の特徴と変動する要因について調査した。次に、大野盆地を北部、中部、南部の 3 つの地域に分け、それぞれの地域に代表の観測井を 1 つ設定して、水位の比較を行った。それぞれの観測井の月平均地下水位と月降雨量のデータを用いて、地域による地下水位の変動を調査した。

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、盆地内における地下水浸透量と盆地外からの地下水流動量と水田からの涵養に大きく分けられる。地下水浸透量は、降水量からの影響を強く受けることから、降水量から蒸発散量と表面流出量を減ずることにより推定した。蒸発散量の推定には、ペンマン式を用いた。変数である土地被覆因子のアルベドを、季節によって変化させることにより推定した。表面流出量は、赤根川、清滝川、真名川の3河川が合流した下流の流量の測定結果を基に推定した。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。水田からの浸透量は、耕地面積と減水深と蒸発散量のデータを用いることにより推定を行った。

2.1 地下水浸透量の推定

2.2.1 季節別による蒸発散量の推定

蒸発散量の推定にはソーンス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存在する⁹⁾。ソーンス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、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最も近いと考えられる。以上の理由により、蒸発散量の推定にはペンマン式を活用した。三浦ら¹⁰⁾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 ($MJ \cdot m^{-2}$)

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

α : 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 ($kW \cdot m^{-2}$)

ω_0 : 日没の時角 (rad)

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

φ : 計算地点の緯度

δ : 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

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

t : 気温 ($^{\circ}\text{C}$)

e_a : 空気の水蒸気圧 (mbar)

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

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

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

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_m での風速

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 (%)

今回、使用した変数のうち、気温、降水量、日照時間は気象庁の過去の気象データより入手した⁴⁾。相対湿度のデータは、大野市消防本部より大野市役所の方を通じて頂いた。

また、式(2.2)の純放射量 $S(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2})$ に含まれる α は土地被覆因子のアルベド (反射率) であり、地表面に入射するエネルギーと反射するエネルギーの比を表す。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。昨年度用いた土地の状態に分けたアルベド値の一覧表を表 2.1 に示す。昨年度は、こちらの表の中間値を用いて蒸発散量の推定を行った。しかし、地表面に入射するエネルギーは、一年中一定ではないため、季節によってアルベド値は変更される。そこで、今年度はアルベド値を春夏秋冬の季節によって変更することで、蒸発散量の推定を行った。**表 2.1** の最大値を冬、最小値を夏、中間値を春と秋として、アルベド値を春夏秋冬に分けた。季節別で示したアルベド値の一覧表を**表 2.2** に示す。

表 2.1 アルベド値一覧¹¹⁾¹²⁾

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			

表 2.2 季節別によるアルベド値一覧¹¹⁾¹²⁾

土地の状態	春	夏	秋	冬
裸地	0.15	0.1	0.15	0.2
草地	0.225	0.15	0.225	0.3
森林	0.1	0.05	0.1	0.15
道路	0.1	0.2	0.225	0.025
海面	0.225	0.05	0.225	0.4
水面	0.08	0.06	0.08	0.12
雪面				0.55

今回の推定では、土地の状態と季節を考慮することによりアルベド値を変更した。また、積雪があった日は、どの土地状態も雪面におけるアルベド値とした。蒸発散量の計算方法は、土地の状態における蒸発散位にそれぞれの土地の状態に対応した面積を比例分配し、全流域面積を乗ずることにより推定した。それぞれの土地状態の面積は昨年度と同様の面積を使用した。土地の状態別面積の一覧表を表 2.3 に示す。また、(式 2.1)より、2022 年度における土地の状態別での蒸発散位は、水面・水面：889.62mm、草地・畑：759.62mm、道路・アスファルト舗装：739.69mm、森林：881.31mm と推定された。これらの値を用いて 2022 年度の蒸発散量の計算式を下記に示す。

$$ET = 889.62 \times \frac{43.07}{947.17} + 759.62 \times \frac{3.67}{947.17} + 739.69 \times \frac{33.26}{947.17} + 881.31 \times \frac{867.17}{947.17} = 876.24(\text{mm/year})$$

$$V_{ET} = \frac{876.24}{1000} \times 947.17 = 829.95(\text{m}^3/\text{year})$$

表 2.3 土地の状態別面積

土地の状態	面積(km ³)
水面・水田	43.07
草地・畑	3.67
道路・アスファルト舗装	33.26
森林	867.17
全流域面積	947.17

アルベド値を春夏秋冬に分けて計算を行った 2022 年の蒸発散量は、 $830.0 \times 10^6 \text{m}^3/\text{year}$ と推定された。また、2000 年から 2021 年も同様の計算方法で蒸発散量を推定した結果、23 年間での平均蒸発散量は、 $812.6 \times 10^6 \text{m}^3/\text{year}$ と推定された。

2.2.2 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、過去と今年の河川流量の測定結果を基に推定した。本研究では 3 河川（真名川、清滝川、赤根川）の合流地点の流量を表面流出量とする。九頭竜川の周辺は難透水層に囲まれている。そのため、地下水の浸透は極めて少ないと考えられる理由から、九頭竜川からの地下水浸透量は除外する。

測定の結果、3 河川合流地点における流量は 2022 年 11 月 24 日が $20.1 \text{m}^3/\text{s}$ 、2021 年 11 月 28 日が $18.8 \text{m}^3/\text{s}$ 、2020 年 11 月 12 日が $26.6 \text{m}^3/\text{s}$ であるため、その平均から年間の表面流出量 V_o は $687.27 \times 10^6 \text{m}^3/\text{year}$ と推定された。年間降水量の平均は $2209.89 \times 10^6 \text{m}^3/\text{year}$ であるため、降水量に占める表面流出量の割合は 31.2% である。この降水量比を基にして、2000 年から 2022 年までの表面流出量を推定した結果、23 年間での平均表面流出量は $687.3 \times 10^6 \text{m}^3/\text{year}$ と推定された。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。

2.2.3 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。盆地面積は、表 2.3 の森林以外の土地の状態を足した値とする。2000 年からの 2022 年の蒸発散量、表面流出量、地下水浸透量を示した数値を表 2.4 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^3/year)

V_P : 年間降水量 (m^3/year)

V_{ET} : 蒸発散量 (m^3/year)

V_o : 表面流出量 (m^3/year)

A' : 盆地面積 (km²)

A : 全流域面積 (km²)

表 2.4 地下水浸透量の推定結果

	蒸発散量 (×10 ⁶ m ³)	表面流出量 (×10 ⁶ m ³)	盆地内の地下水浸透量 (×10 ⁶ m ³)	昨年度の盆地内の 地下水浸透量 (×10 ⁶ m ³)
2000年	800.5	547.6	34.9	34.4
2001年	778.1	632.1	52.6	50.1
2002年	803.5	741.4	70.9	68.2
2003年	738.5	626.3	54.8	52.1
2004年	835.0	709.0	62.1	61.2
2005年	727.6	815.7	91.2	87.6
2006年	740.1	691.4	66.9	64.1
2007年	806.9	646.3	52.8	49.8
2008年	795.2	566.9	38.9	38.6
2009年	771.7	586.6	44.6	41.5
2010年	791.0	804.3	83.7	80.5
2011年	811.2	793.0	79.9	78.6
2012年	829.5	659.0	53.2	52.8
2013年	852.9	795.2	76.8	71.9
2014年	825.1	709.2	63.0	60.0
2015年	837.9	622.0	45.6	42.7
2016年	876.3	580.9	34.7	30.4
2017年	823.4	849.0	89.3	88.0
2018年	905.2	749.8	63.9	63.1
2019年	860.4	537.1	27.8	27.3
2020年	809.6	664.7	56.0	55.1
2021年	840.3	833.9	85.1	83.7
2022年	830.0	645.9	50.8	

式(2.10)より、2000年から2022年の盆地内の地下水浸透量 V_R' の推定結果を表2.4に示す。これより、23年間の平均地下水浸透量は $60.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ と推定された。今年度、蒸発散量を求める際のアルベド値は季節によって変更させ、表面流出量は今年の測定データも加えることで地下水浸透量を推定した。しかし、昨年度の過去22年間における平均地下水浸透量は、 $58.3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ であるため、今年度推定した盆地内に地下水浸透量とあまり変化はなかった。

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の内、年間でどれだけの地下水が盆地内へ流動するのかを示す値である。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計測し、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⁵⁾。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 24.68km^2 、 23.87km^2 、 240.94km^2 で、それぞれの山岳部での浸透量は $15.7 \times 10^6 \text{m}^3$ 、 $15.1 \times 10^6 \text{m}^3$ 、 $152.9 \times 10^6 \text{m}^3$ であった。したがって、地下水流動量は $49.4 \times 10^6 \text{m}^3$ と推定された。また、過去 23 年間の平均地下水流動量は、 $58.4 \times 10^6 \text{m}^3$ と推定された。昨年度、地下水流動量の過去 22 年間の平均は $56.7 \times 10^6 \text{m}^3$ と推定された。今年度と昨年度の地下水流動量を比べた際、あまり変化がなかったのは、**2.2** の地下水浸透量が昨年度とあまり変化がなかったからである。

2.4 水田からの地下水浸透量の推定

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。水田灌水とは、稲作期間の水田に張ってある水から地下水を涵養させる方法であり、冬期湛水とは、稲刈りが終わった後、水田に水を張ることで地下水を涵養させる方法である。どちらも同様の計算方法で推定することができ、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^3/year)

S : 湛水実施面積 (灌水実施面積) (m^2/year)

h_1 : 蒸発散量 (mm/day)

h_2 : 減水深 (mm/day)

n : 日数 (day)

大野市における稲作期間の水田面積は約 4000ha、灌水期間は約 3 か月である。一方、冬季湛水を行っている水田面積は約 30ha あり、実施期間は約 5 か月である。また、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ある。大野市における減水深の調査データは存在しないため、昨年度と同様に 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。稲作期間における減水深調査のデータを表 2.5、冬季湛水における減水深のデータを表 2.6 に示す。

表 2.5 稲作期間における減水深調査¹³⁾

	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¹⁴⁾

標本数 (個)	減水深の平均値 (mm/day)
13	6.35

式(2.11)より、大野盆地における稲作期間の水田灌水による地下水の浸透量は、 $36.9 \times 10^6 \text{m}^3$ 、冬季湛水による地下水の浸透量は $0.2 \times 10^6 \text{m}^3$ 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、降雨による地下水浸透量、山岳部からの地下水流動量、水田灌水による地下水浸透量、冬期湛水による地下水浸透量の和で表される。それぞれの過去 23 年間の平均は、 $60.0 \times 10^6 \text{m}^3/\text{year}$ 、 $56.7 \times 10^6 \text{m}^3/\text{year}$ 、 $36.9 \times 10^6 \text{m}^3$ 、 $0.2 \times 10^6 \text{m}^3$ であった。以上より、大野盆地における地下水の流入量は $155.5 \times 10^6 \text{m}^3/\text{year}$ と推定された。

2.6 まとめ

大野盆地本章では、地下水流入量を推定した。地下水流入量は、降雨による地下水浸透量、山岳からの地下水流動量、水田灌水による地下水浸透量、冬期湛水による地下水浸透量に分けて、それぞれの推定を行った。降雨による浸透量は、降水量から蒸発散量と表面流出量を減じた値で推定した。蒸発散量は、ペンマン式を用いて季節によりアルベド値を変更することにより推定し、表面流出量は、現地調査による測定結果を基に推定した。その結果、降雨による浸透量は、 $60.0 \times 10^6 \text{m}^3/\text{year}$ と推定された。山岳部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。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。水田灌水による地下水浸透量及び冬期湛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、水田灌水による地下水浸透量は $36.9 \times 10^6 \text{m}^3$ 、冬季湛水による地下水の浸透量は $0.2 \times 10^6 \text{m}^3$ と推定された。したがって、大野盆地における地下水流入量は、 $155.5 \times 10^6 \text{m}^3/\text{year}$ 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生活用水量と湧出量に大別される。揚水量とは大野盆地内で工業用水や農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、生活揚水量とは、市民の方が生活する際に使用される水量のことをいい、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、生活揚水量の推定方法と湧出量の推定方法とその結果に関して述べる。

3.2 生活用水量の推定

3.2.1 地下水利用量アンケート調査の目的

人間が生活を営む際に必要とする調理、洗濯、掃除、水洗トイレなどで使用される水の事を生活用水と呼ぶ。家庭で使われた後の生活用水は、下水道を通り、下水処理施設へと運ばれていく。大野市の家庭では、自己井戸を所有している家庭が多くあり、各家庭でどの程度地下水を汲み上げているかは不明である。そこで、本研究では、複数の大野市民の方に**表 3.1**、**表 3.2**に示すような地下水利用量アンケート調査を行った。具体的には、同居人数別で世帯当たりの地下水利用量を調査し、大野市の世帯数に調査結果を乗ずることで、大野市の家庭で使用される年間生活用水量を推定する。

3.2.2 地下水利用量アンケートの調査方法と調査項目

地下水利用量を調査する方法は主に3つある。1つ目は、カウンターによる計測である。2つ目は、ポンプの性能と電気使用量による計測である。3つ目は、ポンプの1kWhあたりの揚水量と電力使用量による計測である。3つの測定方法を比較した際、精度が最も良い測定が3つ目の測定方法であるが、揚水量を測定する器具や電気使用量の明細などが必要となっている。アンケートとしてこちらの内容を市民の方にしていただくのは困難なため協力者を募りにくいと考え、最も手軽な1つ目の測定のカウンターによる計測を採用した。カウンターによる測定方法の式は、式(3.1)に示す。また、実査に市民の方に配布したアンケートの調査表と協力していただく際の補足資料を次に示す。

$$Q = Q_e - Q_s \quad (\text{式 3.1})$$

Q：地下水利用量 (m³)

Q_e：1週間後に読み取ったカウンターに記載されている数値 (m³)

Q_s：測定日に読取ったカウンターに記載されている数値 (m³)

表 3.1 大野市地下水に関するアンケート調査

問 1. あなたのご家庭で同居されている人数を教えてください。

- a) 1 人、 b) 2 人、 c) 3 人、 d) 4 人、 e) 5 人、 f) それ以上(人)

問 2. 地下水を利用している主な目的は何ですか？

- a) 水道水の使用量削減、 b) 災害時対策、 c) 生活用水、 d) 融雪用、 e) その他()

問 3. あなたのご家庭では、一週間でどのくらい井戸から地下水をくみ上げていますか？

①開始日 (月 日) (m³)

②1週間後 (月 日) (m³)

また、一日のうち何にどのくらい使用しているか分かる限りで教えてください。

\ L	～1	1～5	5～10	10～20	20～50	50～100	100～150	200～
風呂								
トイレ								
飲用								
炊事								
洗濯								
園芸								
ペットの飼育								

他にも使用しているものがあれば、教えてください。

()

問 4. 家庭に井戸の数はいくつありますか？

- a) 1 つ、 b) 2 つ、 c) 3 つ、 d) それ以上(つ)

また、分かれば、井戸の口径と深さについて教えてください。

深さ(m) 口径(mm) 深さ(m) 口径(mm)

深さ(m) 口径(mm) 深さ(m) 口径(mm)

問 5. 大野市の地下水が他の市の地下水と比べて何が一番違うと思いますか？

- a) 地下水の豊富さ、 b) 湧水地の数、 c) 水質、 d) 軟水、 e) 水温、 f) その他()

表 3.2 アンケート調査補足資料

この度は大野市の地下水使用量の定量化についてのアンケート調査にご協力いただきありがとうございます。この調査をするにあたりご不明な点が多々あると思いますので予め補足資料として、想定される質問や注意事項といった内容を記載させていただきます。

・一週間でどのくらい地下水をくみ上げているか測る方法

まず、ご家庭で井戸水を利用している場合では、このようなカウンターと呼ばれるものがついてあります。このカウンターと呼ばれているものを用いて測定を行います。

カウンターはご家庭の玄関の前、あるいは建物の横についてある場合が多いです。



1. カウンターに記載されている数字を①に記入してください。
2. 1週間後にカウンターを確認し、その数字を②に記入してください。
3. ②から①を引いた値を③に記入をしてください。

・井戸の深さと口径の測り方

井戸の深さについては、設置した業者の方へ伺いと教えていただけます。

井戸の口径については、ご家庭にある巻き尺などを用いれば測定することが可能です。

こちらの質問は必須では無いため、分かるようであれば教えていただきたいと思います。

3.2.3 アンケート調査の実施と結果

アンケート調査の協力者は、現地にいる方の人脈と下水道に加入している世帯に訪問して協力の依頼をすることにより募集した。8月から9月にかけて調査を実施した結果、1か月当たりの平均使用水量は、2人世帯：15.6m³、3人世帯：18.8m³、5人世帯：27.1m³と推定された。しかし、大野市の下水道の加入率の低さやアンケートの調査内容が簡便でなかった等の理由により、信頼度のある統計を取れるほど回答数を収集することができなかった。そこで、今回は東京都水道局による令和2年度生活用実態調査で得られた「世帯人員別の1か月あたりの平均使用水量」⁸⁾のデータを代用して生活用水量を求めた。表3.3は、東京都水道局による「世帯人員別の1か月あたりの平均使用水量」と大野市の世帯人数別の世帯件数を示している。

表 3.3 世帯人員別年間生活用水量

世帯人数	世帯人員別1か月当たりの平均使用水量(m ³)	大野市世帯件数	年間生活用水量(m ³)
1人	8.1	3,348	325,425.6
2人	14.9	2,992	534,969.6
3人	19.9	2,033	485,480.4
4人	23.1	1,503	416,631.6
5人	27.8	863	287,896.8
6人以上	34.1	857	350,684.4
合計		11,596	2,401,088.4

大野市で使用される民間世帯の年間の生活用水量は、以下のように算出される。

世帯人員別1か月当たりの平均使用水量(m³/月)×各世帯人員別世帯件数×12か月

表 3.3 より

$$1 \text{ 人世帯} : 8.1 \times 3348 \times 12 = 325425.6$$

$$2 \text{ 人世帯} : 14.9 \times 2992 \times 12 = 534969.6$$

$$3 \text{ 人世帯} : 19.9 \times 2022 \times 12 = 485480.4$$

$$4 \text{ 人世帯} : 23.1 \times 1503 \times 12 = 416631.6$$

$$5 \text{ 人世帯} : 27.8 \times 863 \times 12 = 287896.8$$

$$6 \text{ 人以上の世帯} : 34.1 \times 857 \times 12 = 350684.4$$

それぞれの世帯人数あたりの年間生活用水量を足した値は、2401088.4m³と求められた。よって、大野市で使用される民間世帯の生活用水量は2.4×10⁶m³/yearと推定された。

3.3 地下水揚水量の推定

大野市では、地域の重要な資源である地下水の保全と利用の調和を図るため、様々な取組が行われている。その一環として、年ごとに地下水の現状を取りまとめた「地下水年度報告書」³⁾を作成している。今回の研究では、「大野市地下水年次報告書～令和3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」³⁾の平成12年から令和3年までのデータを活用した。**表 3.4**は2000年から2021年までの用途別地下水揚水量を示している。

表 3.4 地下水推計揚水量の経年変動状況（単位：千 m³）

年	工業用	建築物用	水道用	農業用	消雪用	合計
2000	3,901	706	4,111	552	129	9,399
2001	4,055	748	4,104	506	224	9,637
2002	3,759	926	4,448	488	215	9,836
2003	3,325	811	4,420	444	156	9,156
2004	3,225	712	4,302	416	175	8,830
2005	3,127	736	4,452	438	393	9,146
2006	3,009	822	4,317	426	200	8,774
2007	2,770	759	4,053	449	74	8,105
2008	3,427	735	4,020	434	201	8,817
2009	2,947	702	3,961	483	163	8,256
2010	3,616	739	3,993	448	274	9,070
2011	3,866	822	4,101	410	282	9,481
2012	3,709	869	4,118	481	322	9,499
2013	3,306	911	4,119	426	237	8,999
2014	3,458	862	3,950	442	164	8,876
2015	3,432	802	3,856	496	205	8,791
2016	3,248	755	3,841	495	78	8,417
2017	3,204	745	3,864	430	242	8,485
2018	3,663	783	3,890	457	330	9,123
2019	3,406	688	3,723	481	45	8,343
2020	3,420	707	3,743	424	59	8,353
2021	3,118	699	3,718	364	248	8,147

本研究では、**表 3.4**に記載されている合計の項目の値を地下水揚水量とした。したがって、22年間における平均地下水揚水量は、 $8.9 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ と推定された。

3.4 地下水湧出量の推定

3.4.1 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。現地での測定は2回行った。1回目は10月20日、21日に測定を行い、各河川の下流、中流、上流の測定を行った。2回目は、11月23日に測定を行い、河川の測定に加え、河川に間にある用水路の流出箇所、盆地西部から流れてくる山水の流入量も測定した。それぞれの測定日1カ月前から降雨量と気温の変化を図3.1、図3.2に示す。また、それぞれの測定の位置図と名称を図3.3、図3.4、表3.5、表3.6に示す。

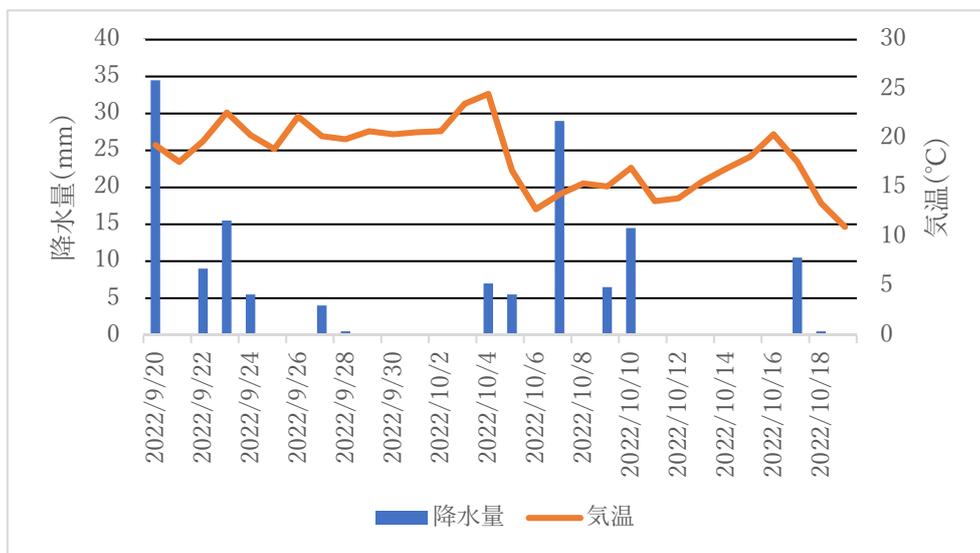


図 3.1 10月20日の測定日前の降雨量と気温の変化

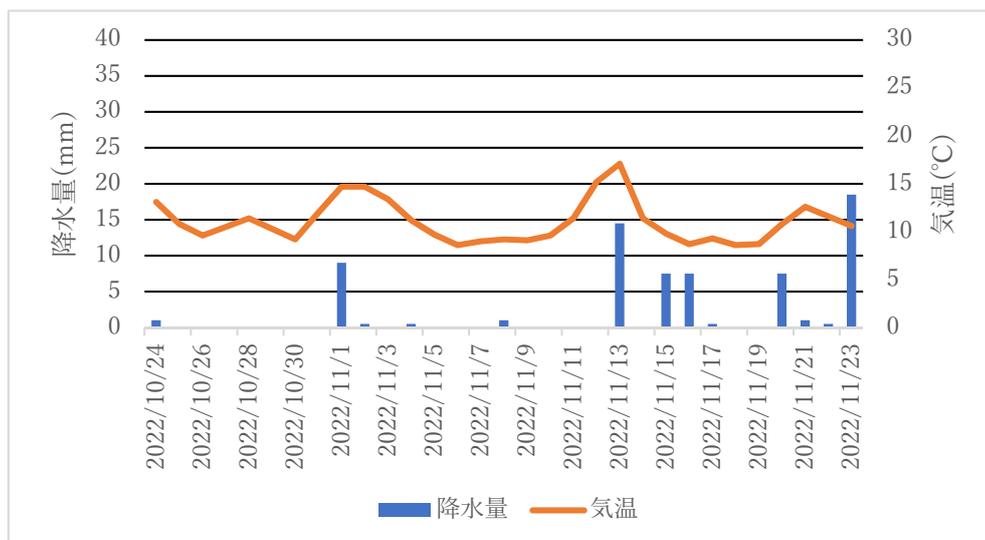


図 3.2 11月23日の測定日前の降雨量と気温の変化

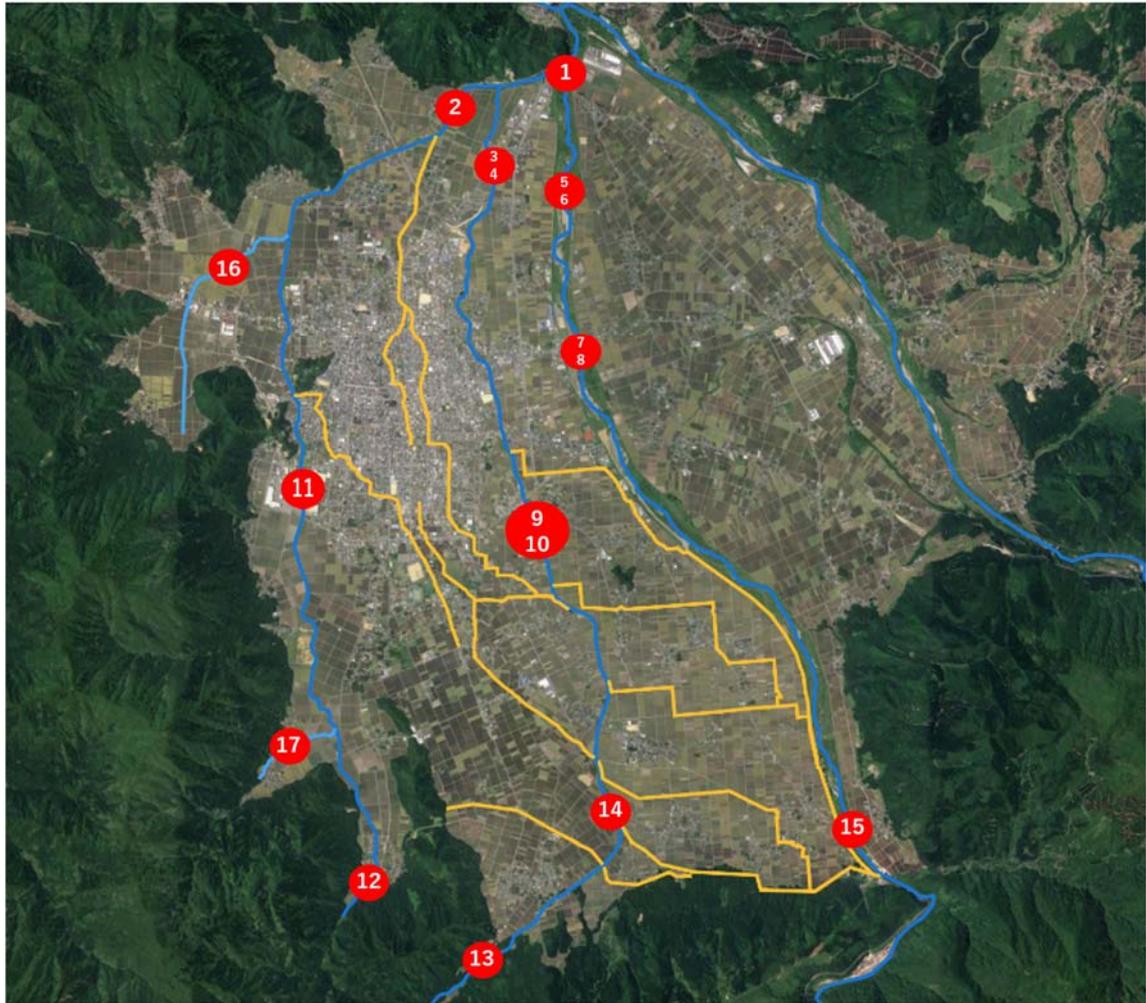


図 3.3 10月20日測定位置図

表 3.5 10月20日測定位置名称

番号	名称	番号	名称
1	3 河川の合流地点	10	清滝川中流 1
2	赤根川下流	11	赤根川中流
3	清滝川下流 1	12	赤根川上流
4	清滝川下流	13	清滝川上流
5	真名川下流 1	14	清滝川中流 2
6	真名川下流	15	真名川上流
7	真名川中流	16	日詰川
8	真名川中流 1	17	黒谷川
9	清滝川中流	-	-

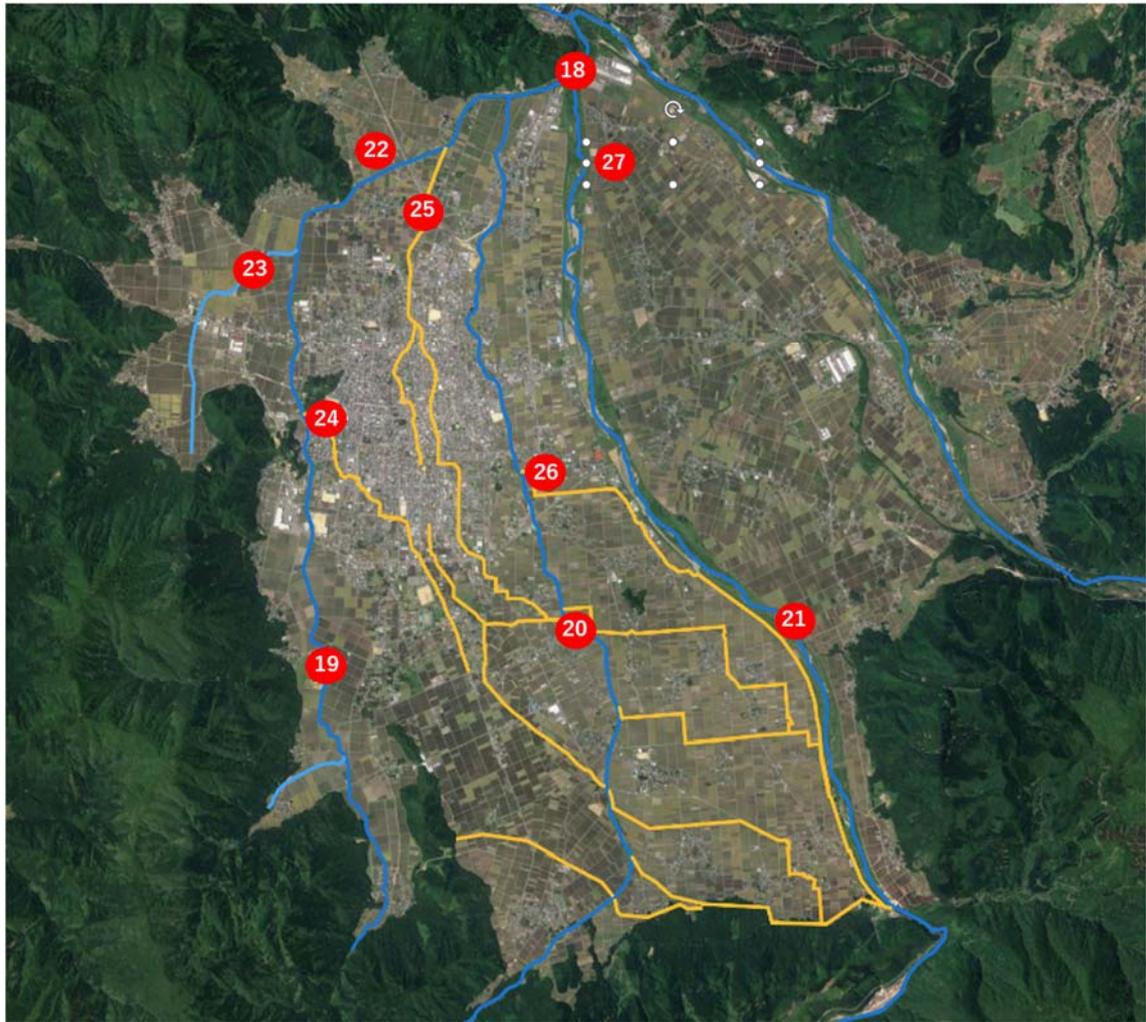


図 3.4 11月23日測定位置図

表 3.6 11月23日測定位置名称

番号	名称	番号	名称
18	3 河川の合流地点	23	日詰川
19	赤根川中流	24	新堀川
20	清滝川中流	25	木瓜川
21	清滝川真名川中流	26	清滝川-真名川間
22	赤根川左岸	27	真名川-九頭竜川間

3.4.2 測定方法と測定結果

流量の測定方法は、河川あるいは用水路の水深、流速、河川幅の積によって求められる。流量の計算式を式(3.2)に示す。

$$Q = H \times V \times B \quad (\text{式 3.2})$$

Q : 流速 (m³/s)

H : 水深 (m)

V : 流速 (m/s)

B : 河川幅 (m)

水深は、河川に入り標尺を垂直に立て5回目盛りを読み取り、その平均を取る。また、河川に入るのが困難な場所では、橋の上から10cmごとに目盛りのついた錘付きロープを垂らし、おおよその水深を読み取った。流速は、葉っぱや木片などを流し、進んだ距離を秒数で割り、5回の平均を取る。河川幅は、スケールを用いて河川に対して垂直に測る。測定の際に用いた器具を写真3.1に示す。また、測定中の風景を写真3.2、写真3.3、写真3.4、写真3.5に示す。10月20日の測定結果を表3.7、表3.8、11月23日の測定結果を表3.9、表3.10に示す。



写真 3.1 測定の際に用いた器具



写真 3.2 赤根川上流にて錘付きロープを用いた測定の様子



写真 3.3 黒谷川にて水深測定の様子



写真 3.4 新堀川にて河川幅測定の様子



写真 3.5 真名川上流にて水深測定の様子

表 3.7 10月20日測定結果(1)

名称	3河川の合流地点	赤根川下流	清滝川下流	真名川下流	日詰川	赤根川中流	清滝川中流	真名川中流	赤根川上流	清滝川上流	真名川上流	黒谷川	真名川中流	清滝川中流
河川幅(cm)	2235	1770	1530	2690	1646	852	1221	2270	369	1070	3015	717	1900	1300
水深(cm)														
	230	55	18	16	5	22	4	20	28	10	20	22	35	23
	95	50	19	30	8	36	6	50	26	28	60	18	39	17
	171	28	13	28	17	28	10	43	27	40	88	23	37	12
	80	15	5	35	19	8	28	55	27	15	110	35	30	13
	260	45	3	13	4	3	40	22	27	12	60	45	32	2
平均水深(cm)	167.2	38.6	11.6	24.4	10.6	19.4	17.6	38	27	21	67.6	28.6	34.6	13.4
流速(cm/s)														
	56.48	91.68	59.85	77.2	17.21	37.57	72.95	33.9	7.23	66.1	29.24	5.22	56.18	39.14
	33.63	101.86	55.47	80.42	51.62	31.93	42.28	64.41	11.4	72.49	21.45	3.51	65.57	54.64
	47.25	94.94	51.03	73.95	15.06	44.11	38.34	60.58	5.04	64.46	15.07	2.72	97.09	58.65
	66.94	86.95	42.99	55.14	20.85	46.55	39.46	35.51	5.31	67.65	23.22	2.23	84.89	50
	61.79	104.85	45.54	53.31	25.21	60.67	40.86	65.8	5.24	67.18	26.38	1.29	64.1	44.5
平均流速(cm/s)	53.218	96.056	50.976	68.004	25.99	44.166	46.778	52.04	6.844	67.576	23.072	2.994	73.566	49.386
流量(cm ³ /s)	19887140.86	6562738	904722.05	4463510.5	453463	730010.98	1005240.5	4488970.4	68186.772	1518432.7	4702396.61	61395.6	4836228.8	860304.12
流量(m ³ /s)	19.88714086	6.562738	0.904722	4.4635105	0.45346	0.730011	1.0052405	4.4889704	0.0681868	1.5184327	4.70239661	0.0614	4.8362288	0.8603041
流量(m ³ /year)	627160874	206962507	28531315	140761269	1.4E+07	23021626	31701265	141564171	2150338	47885294	148294779	1936170	152515313	27130551
流量(m ³ /year)	6.27E+08	2.07E+08	2.85E+07	1.41E+08	1.43E+07	2.30E+07	3.17E+07	1.42E+08	2.15E+06	4.79E+07	1.48E+08	1.94E+06	1.53E+08	2.71E+07

表 3.8 10月20日測定結果(2)

名称	真名川下流1	清滝川上流	真名川上流	黒谷川	真名川中流1	清滝川中流1	清滝川中流2	清滝川中流2	清滝川下流1	3河川	2回目	木瓜川
河川幅(cm)	3440	1070	3015	717	1900	1300	792	792	1390	2385	650	
水深(cm)	19	43	20	22	35	23	45	45	25	117	25	
	22	50	60	18	39	17	45	45	10	202	35	
	30	45	88	23	37	12	58	58	19	255	30	
	28	38	110	35	30	13	60	60	22	185	30	
平均水深(cm)	48	44	60	45	32	2	28	28	30	140	28	
	36.7	21	67.6	28.6	34.6	13.4	47.2	47.2	21.2	179.8	29.6	
流速(cm/s)	36.1	25.58	29.24	5.22	56.18	39.14	36.27	36.27	61.73	66.4	95.23	
	55.56	34.01	21.45	3.51	65.57	54.64	36.78	36.78	66.23	69.2	65.36	
	55.25	29.76	15.07	2.72	97.09	58.65	41.74	41.74	54.95	69.22	57.8	
	49.75	54.35	23.22	2.23	84.89	50	38.07	38.07	51.55	34.15	59.52	
平均流速(cm/s)	54.95	49.26	26.38	1.29	64.1	44.5	39.46	39.46	50.25	42.31	79.37	
	44.46	67.576	23.072	2.994	73.566	49.386	38.464	38.464	56.939	56.256	71.456	
流量(cm ³ /s)	5612541.499	1518432.7	4702396.6	61395.6	4836228.84	860304.12	1437876.6	1437876.63	1677885.9	24123866.7	1374813	
	5.612541499	1.5184327	4.7023966	0.0614	4.83622884	0.86030412	1.4378766	1.43787663	1.6778859	24.1238667	1.37481	
流量(m ³ /year)	176997108.7	47885294	148294779	1936170	152515313	27130550.7	45344878	45344877.5	52913810	760770260	4.3E+07	
流量(m ³ /year)	1.77E+08	4.79E+07	1.48E+08	1.94E+06	1.53E+08	2.71E+07	4.53E+07	4.53E+07	5.29E+07	5.29E+07	5.29E+07	

表 3.9 11月23日測定結果(1)

名称	3河川合流地点	木瓜川	赤根川中流	清滝川中流	真名川中流	日詰川	新堀川	新堀川-右岸	清滝川-真名川間	真名川-九頭竜川間	真名川-九頭竜川間-右岸	赤根川左岸
河川幅(cm)	2385	650	750	860	1370	560	290	120	170	1320	70	360
水深(cm)												
	117	25	25	27	64	33	23	57	8	18	10	4
	202	35	33	23	51	48	22	57	8	18	10	4
	255	30	35	26	60	48	26	56	8	20	10	4
	185	30	40	30	65	43	21	57	8	13	10	4
	140	28	30	23	80	42	24	57	8	15	10	4
平均水深(cm)	179.8	29.6	32.6	25.8	64	42.8	23.2	56.8	8	16.8	10	4
流速(cm/s)												
	66.4	95.23	65.08	43.86	86.21	15.56	33.56	27.7	55.56	71.54	63.29	39.86
	69.2	65.36	68.13	64.1	123.46	26.92	31.65	22.88	51.28	67.88	64.52	37.08
	22.63	57.8	72.35	43.48	102.04	19.69	30.21	30.21	58.48	63.66	62.5	36.34
	34.15	59.52	74.61	57.14	128.21	24.21	34.72	34.72	52.36	73.46	61.35	36.59
	42.31	79.37	83.45	48.08	76.92	20.01	29.76	29.76	64.1	61.31	69.93	33.81
平均流速(cm/s)	46.938	71.456	72.724	51.332	103.368	21.278	31.980	29.054	56.356	67.570	64.318	36.736
流量(cm ³ /s)	20128093.97	1374813	1778101.8	1138954.4	9063306.2	509991	215161.4	198032.06	76644.16	1498432.32	45022.6	52899.84
流量(m ³ /s)	20.12809397	1.37481	1.7781018	1.1389544	9.0633062	0.50999	0.215161	0.1980321	0.07664416	1.49843232	0.0450226	0.0529
流量(m ³ /year)	634759571.6	4.3E+07	56074218.4	35918066	285820426	1.6E+07	6785331	6245139.2	2417050.23	47254561.64	1419832.714	1668249
流量(m ³ /year)	6.35E+08	4.34E+07	5.61E+07	3.59E+07	2.86E+08	1.61E+07	6.79E+06	6.25E+06	2.42E+06	4.73E+07	1.42E+06	2.E+06

表 3.10 11月23日測定結果(2)

名称	日詰川	新堀川	新堀川-右岸	清滝川-真名川間	真名川-九頭竜川間	真名川-九頭竜川間-右岸	赤根川左岸
河川幅(cm)	560	290	120	170	1320	70	360
水深(cm)	33	23	57	8	18	10	4
	48	22	57	8	18	10	4
	48	26	56	8	20	10	4
	43	21	57	8	13	10	4
	42	24	57	8	15	10	4
平均水深(cm)	42.8	23.2	56.8	8	16.8	10	4
流速(cm/s)	15.56	33.56	27.7	55.56	71.54	63.29	39.86
	26.92	31.65	22.88	51.28	67.88	64.52	37.08
	19.69	30.21	30.21	58.48	63.66	62.5	36.34
	24.21	34.72	34.72	52.36	73.46	61.35	36.59
	20.01	29.76	29.76	64.1	61.31	69.93	33.81
平均流速(cm/s)	21.278	31.980	29.054	56.356	67.570	64.318	36.736
流量(cm ³ /s)	509991.104	215161	198032.064	76644.16	1498432.32	45022.6	52899.84
流量(m ³ /s)	0.509991104	0.21516	0.19803206	0.07664416	1.49843232	0.0450226	0.0529
流量(m ³ /year)	16083079.46	6785331	6245139.17	2417050.23	47254561.64	1419832.714	1668249
流量(m ³ /year)	1.61E+07	6.79E+06	6.25E+06	2.42E+06	4.73E+07	1.42E+06	2.E+06

3.4.3 地下水湧出量の推定

地下水湧出量とは地下水が地表面に流出した水量である。本研究では、11月23日の測定結果（表3.9、表3.10）を基に地下水湧出量を推定する。この日を選択した理由は2点ある。1つ目は盆地北部では地下水位が高いことから、盆地北部では地下水湧出量が多いと考えられる点と、2つ目は用水路からの流入量や山水からの流入量を考慮しているからである。地下水湧出量は3河川の合流地点から赤根川、清滝川、真名川の中流地点の流量、山水からの流入量、用水路からの流入量を引いた値とする。式は下記に示す。また、図3.5に測定地点における流量を示す。図中の青線は河川、黄線は用水路、①は河川における流量、②は用水路における流量、③は山水の流量を示している。

3河川の合流地点の流量 - (各河川の中流地点の流量+山水の流入量+用水路からの流入量)



図3.5 測定地点における流量（単位：m³/year）

図3.5および表3.9、表3.10より、3河川の合流地点の流量は $634.8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ 、各河川の中流地点における流量を足した値は、 $377.8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ 、用水路からの流入量を足した値は $107.5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ 、山水からの流入量は $18.1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ である。したがって、大野盆地における地下水湧出量は $131.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ と推定された。

3.5 地下水流出量の推定

本研究では、生活用水量と地下水揚水量と地下水湧出量の和を地下水流出量とする。生活用水量は、東京水道局の世帯人員別の1カ月あたりの平均使用水量に大野市の世帯数を乗ずることで推定する。その結果、大野市で使用される年間の生活用水量は $2.4 \times 10^6 \text{m}^3/\text{year}$ と推定された。地下水揚水量は大野市が年ごとに作成している「大野市地下水年次報告書～令和3年度版～」に記載されている「地下水推計揚水量の経年変動状況」の平成12年から令和3年までのデータを活用した。この23年間の平均揚水量は $8.9 \times 10^6 \text{m}^3/\text{year}$ と推定された。また、地下水湧出量は現地調査を行い、地点区間の増減によって推定した。その結果、地下水湧出量は $131.4 \times 10^6 \text{m}^3/\text{year}$ 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 $142.7 \times 10^6 \text{m}^3/\text{year}$ と推定された。

3.6 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、生活用水量と地下水揚水量と地下水湧出量の和で表される。生活用水量は世帯人員別の1カ月あたりの平均使用水量に大野市の世帯数を乗ずることで推定する。本来であれば、大野市民にアンケート調査を協力して頂き、世帯人員別の1カ月あたりの平均使用水量を推定する予定だったが、アンケートの回答数が統計を取れる収集できなかったため、東京水道局のデータを代用して研究を行った。その結果、大野市で使用される年間の生活用水量は $2.4 \times 10^6 \text{m}^3/\text{year}$ と推定された。また、地下水揚水量は大野市が作成しているデータを活用し、23年間の平均は $8.9 \times 10^6 \text{m}^3/\text{year}$ と推定された。地下水湧出量は、3河川の合流地点の流量から各河川の中流地点の流量、山水からの流入量、用水路からの流出量を引いた値とした。その結果、地下水湧出量は、 $131.4 \times 10^6 \text{m}^3/\text{year}$ と推定された。以上より、大野盆地における地下水流出量は $142.7 \times 10^6 \text{m}^3/\text{year}$ 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工業用水や生活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昨年度に引き続き行い、精度の向上を試みた。

4.2 地下水収支の推定

地下水収支は、盆地内に流入する地下水流入量と盆地外に流出していく地下水流出量の差によって求められる。**第2章**より、降雨による地下水浸透量、地下水流動量、水田灌水・冬期水田湛水による地下水浸透量を推定した結果、過去23年間の地下水流入量の平均は $155.5 \times 10^6 \text{m}^3/\text{year}$ と推定された。また、**第3章**より、生活用水量、地下水湧出量、地下水揚水量を推定した結果、過去23年間の地下水流出量の平均は $142.7 \times 10^6 \text{m}^3/\text{year}$ と推定された。したがって、大野盆地における過去23年間における平均的な地下水収支量は $12.8 \times 10^6 \text{m}^3/\text{year}$ と流入超過となっている。ただし、年度ごとの地下水収支量は、年度によって大きく変化する。**図4.1**は年度ごとにおける地下水収支を用途別に示したものである。**表4.1**は、2000年から2022年までの大野盆地における地下水流入量、地下水流出量および今年度解析した地下水収支量（地下水流入量 - 地下水流出量）と昨年度解析を行った地下水収支量を示したものである。

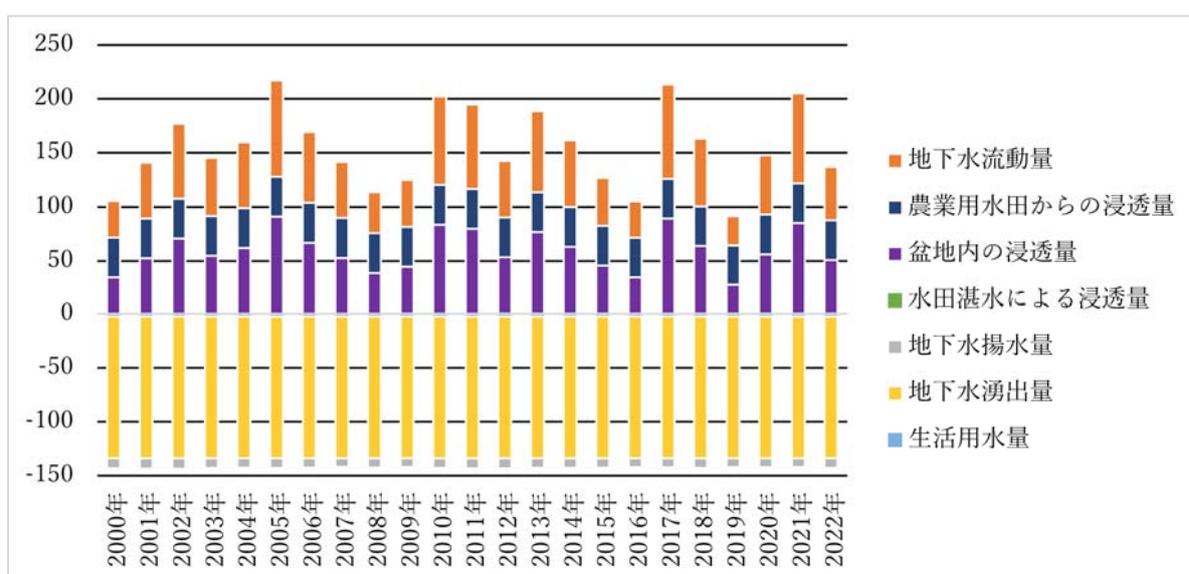


図 4.1 地下水収支の内訳（単位： $\times 10^6 \text{m}^3/\text{year}$ ）

表 4.1 地下水収支の推定結果

	地下水流入量 ($\times 10^6 \text{m}^3$)	地下水流出量 ($\times 10^6 \text{m}^3$)	今年度地下水収支量 ($\times 10^6 \text{m}^3$)	昨年度の地下水収支量 ($\times 10^6 \text{m}^3$)
2000年	105.8	-143.2	-37.4	-37.1
2001年	140.7	-143.4	-2.7	-6.5
2002年	176.9	-143.6	33.2	29.0
2003年	145.2	-143.0	2.2	-2.1
2004年	159.7	-142.6	17.0	16.2
2005年	217.1	-142.9	74.1	68.2
2006年	169.2	-142.6	26.6	22.2
2007年	141.4	-141.9	-0.5	-5.2
2008年	113.9	-142.6	-28.7	-28.3
2009年	125.3	-142.1	-16.8	-21.7
2010年	202.3	-142.9	59.4	54.2
2011年	194.7	-143.3	51.5	50.1
2012年	142.3	-143.3	-1.0	-0.8
2013年	188.7	-142.8	45.9	37.4
2014年	161.5	-142.7	18.8	14.1
2015年	127.1	-142.6	-15.5	-20.1
2016年	105.4	-142.2	-36.8	-44.1
2017年	213.3	-142.3	71.0	69.5
2018年	163.0	-142.9	20.1	19.7
2019年	91.6	-142.1	-50.5	-50.5
2020年	147.7	-142.2	5.5	4.8
2021年	205.1	-141.9	63.1	60.7
2022年	137.4	-142.7	-5.3	

図 4.1 の地下水湧出量に関しては大規模な計測を伴うことから、年度ごとに明らかにされていないが、大野盆地周辺の環境条件が大きく変化していないことから 2000 年から 2022 年までは、ほぼ同様の値とした。この図より、盆地内の浸透量は年度ごとによって大きく異なっている。これは、年度ごとの気象条件、自然条件に左右されることに起因していると考えられる。また、地下水流動量に関しても同様のことであると考えられる。表 4.1 では今年度、ペンマン式による蒸発散量に用いられるアルベド値を季節性に考慮した値として、蒸発散量を求めたものを使用している。また、生活用水に関しては、第 3 章で考察した値を用いた。更には、今年度現地計測を行った結果と昨年度現地計測を行った結果より、より高い精度向上を目指すために複数年のデータから求めたものを用いた。以上より今年度の地下水収支に反映した。

表 4.1 より、特に今年度と昨年度の地下水収支を比較すると、全体的な傾向は類似しているが、年度ごとでは地下水収支量の値は異なった結果となっている。これは、今年度考慮したペンマン式による蒸発散量の季節性、住民が使用する生活用水量の精度向上に取り組んだ結果が反映されていると考えられる。また、表より 2022 年は地下水収支量がマイナスとなっている。この原因としては、2022 年は年平均降雨量よりも少ない降雨量に起因しているものと考えられる。23 年間における地下水収支量は $12.8 \times 10^6 \text{m}^3$ 、近年 10 年間における地下水収支量は $11.6 \times 10^6 \text{m}^3$ 、近年 5 年間における地下水収支量は $6.6 \times 10^6 \text{m}^3$ であり、年々地下水収支量が減少している。これは地球温暖化などにより、気候が変化しているからだと考えられる。また、地下水収支量と降雨の関係を図 4.2 に示す。この図より、地下水収支量が負になる年の年間降雨量は約 2100mm 以下であることが推定された。このように年度によって降雨量の大小が地下水収支に少なからず影響を及ぼすことに今後注意を要する。

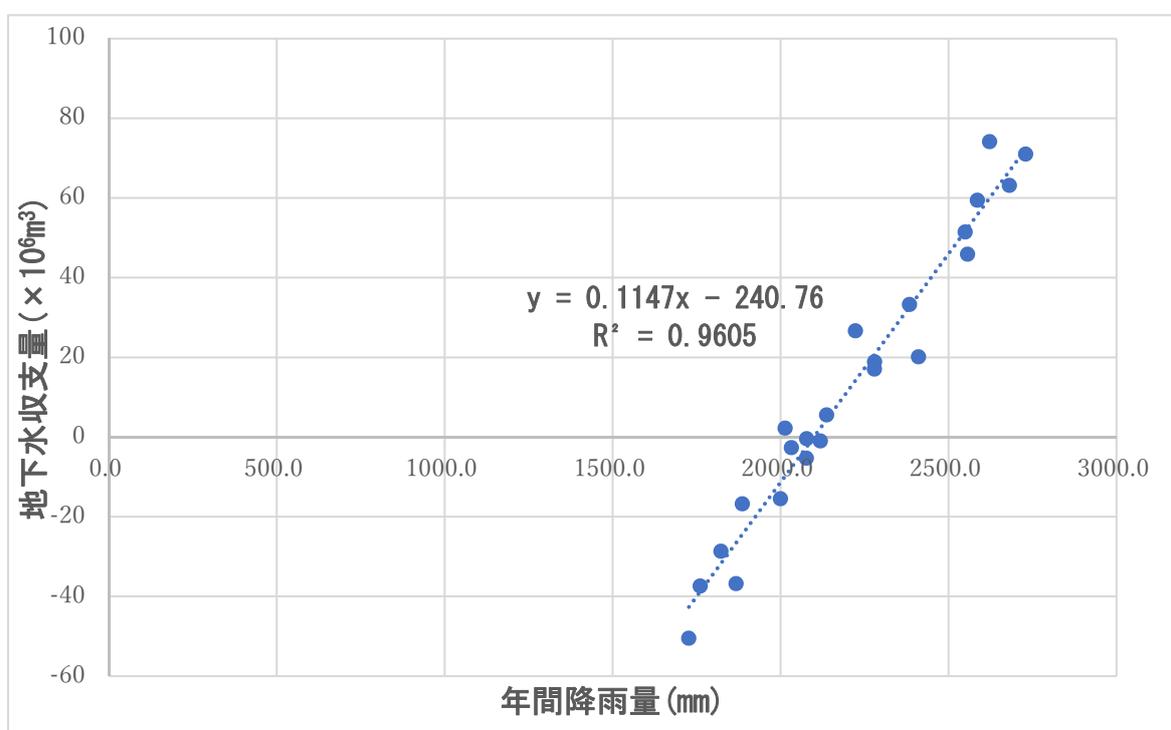


図 4.2 地下水収支量と年間降雨量の関係

4.3 まとめ

本章では、大野盆地における地下水収支について推定した。地下水収支は、盆地内における地下水流入量から地下水流出量を引いた値によって求められる。第 2 章より、過去 23 年間の地下水流入量の平均は $155.5 \times 10^6 \text{m}^3/\text{year}$ 、第 3 章より、過去 23 年間の地下水流出量の平均は $142.7 \times 10^6 \text{m}^3/\text{year}$ と推定された。したがって、大野盆地における過去 23 年間の地下水収支量は、 $12.8 \times 10^6 \text{m}^3/\text{year}$ と推定された。また、2022 年の地下水収支量がマイナスになった要因は 2022 年の降雨量が過去 23 年間の降雨量より少ないからであると考えられる。また、地下水収支量が負になる年は年間降雨量が約 2100mm 以下になる年と推定された。

第5章 地下水位の変動

5.1 はじめに

大野市は、地下水が豊富な町で昔から利用が盛んである。現在においても、生活用水の主流は地下水に依存している。昭和 50 年頃、地下水の過剰利用により各地の湧水地で井戸枯れが発生した。そこで、地下水保全の一環として、住民によって地下水位の観測が毎日行われている。本章では、これまでに観測された簡易観測井の水位データを基に、大野盆地内に存在する観測井水位の挙動と地域的な特徴に関して検討を行った。

5.2 21 年間における地下水位

5.2.1 御清水観測井と春日公園観測井における地下水位

簡易観測井のうち、基準観測井とされている御清水観測井と春日公園観測井の 2000 年から 2022 年の地下水位と降水量のグラフを **図 5.1** に示す。図中の地下水位、降水量は 1 日当たりの値を示している。

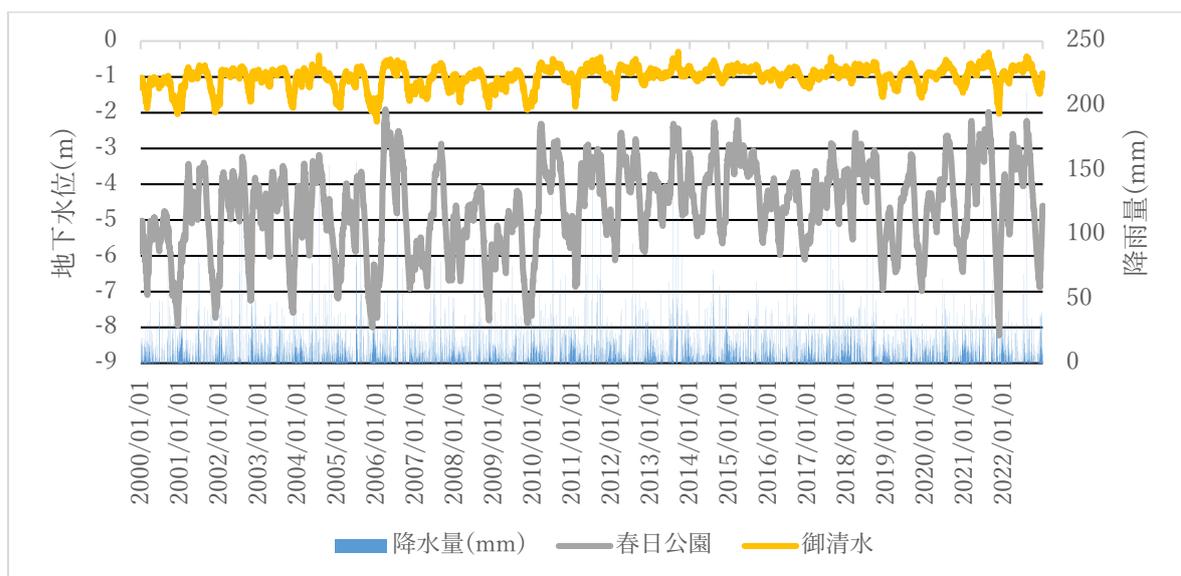


図 5.1 御清水観測井と春日公園観測井の 22 年間の地下水位と降水量

図 5.1 より、御清水観測井と春日公園観測井では、地下水位の変化は大きく異なっている。御清水観測井では、地下水位の変動幅がおよそ-1m から-2m で変動するのに対し、春日公園観測井では地下水位の変動幅がおよそ-2m から-8m で変動している。このような差が生じる原因として、大野盆地の地形と大野市内にある揚水場の位置が関係していると推測される。すなわち、御清水観測井と春日公園観測井の標高は、春日公園観測井が南部に位置していることから高くなっている。この標高差が地下水挙動に影響を及ぼしていると考えられる。以上から、地下水挙動と地域の関連性に関して検討した。**図 5.2** は、空中写真上に示した大野盆地の標高分布である。**図 5.3** は観測井と揚水井の位置を示している。

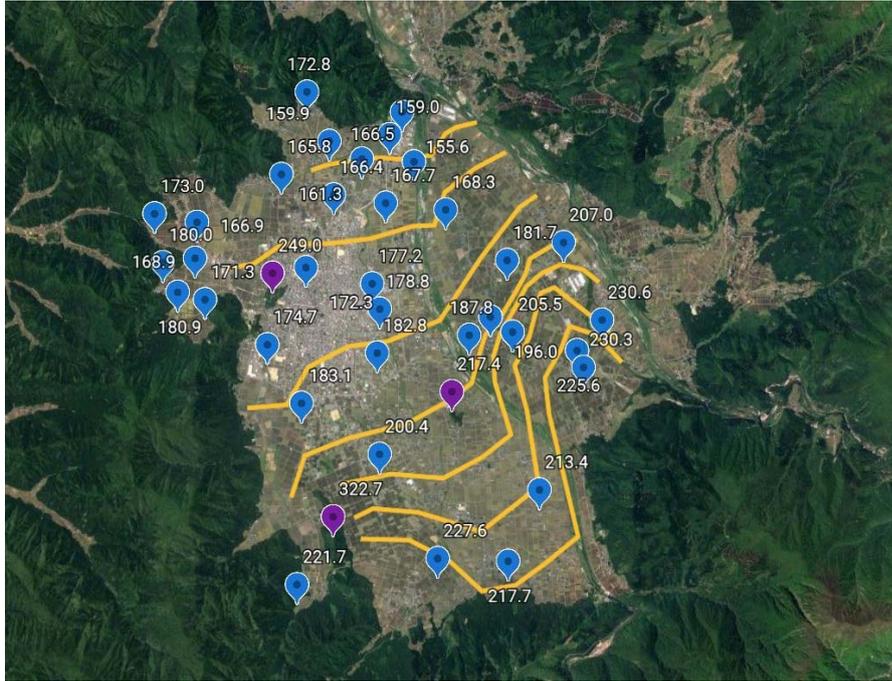


図 5.2 大野盆地内の標高

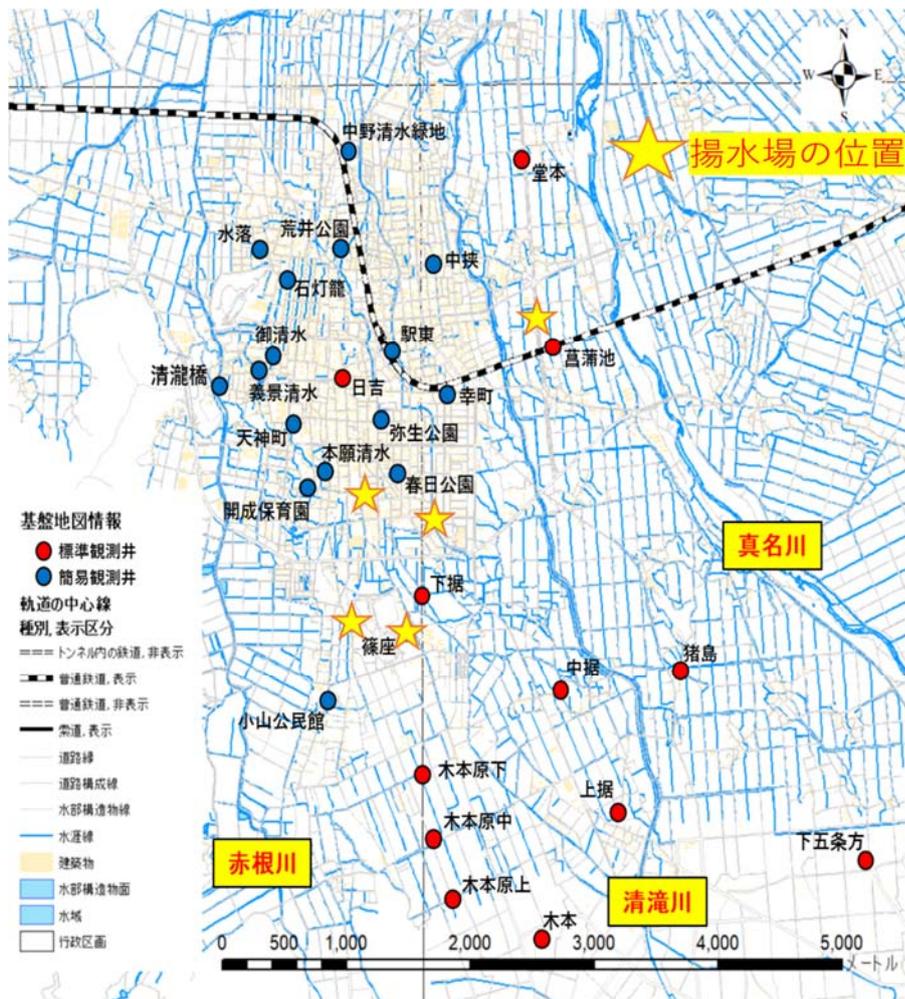


図 5.3 観測井と揚水場の位置図

図 5.2 より、大野盆地は南から北に向かって標高が低くなっていっていることが分かる。これにより、地下水の流れは標高差にしたがって、盆地南部から北部へと流下することになる。また、盆地内には 4 つの河川が南から北へと流下し、初代下荒井トンネル付近で合流することにより、九頭竜川として流下している。この合流地点は、盆地の狭隘部となって、自然の地下ダムを形成していると推測される。これらのことから、盆地北部には、地下水が滞留している可能性が大きいことより、北部に位置している観測井水位は、比較的水位が高く、地下水変動は小さい。それに対して、南部に位置する観測井水位は、地表面より比較的深い位置にあり、地下水変動は大きいものと考えられる。

5.2.2 揚水量と地下水位の関係

次に揚水量が、春日公園観測井の地下水位にどの程度影響を及ぼすのかを調査した。図 5.4 は春日公園観測井の月平均地下水位(m)と月平均揚水量(m³)との関係を示したものである。月平均揚水量は、春日公園観測井に近接している第 3 取水場、第 4 取水場で揚水されている合計揚水量である。

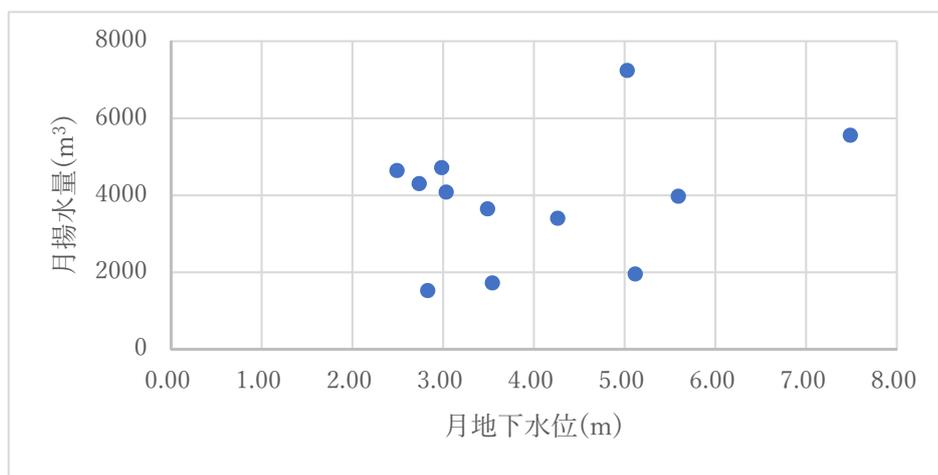


図 5.4 月揚水量と月平均地下水位の関係

図 5.4 より、全体的に月平均揚水量が増加すると、春日公園観測井の月平均地下水位の値は大きくなっているが、その関係性に関しては、あまり高くないと思われる。

5.3 地域別による地下水位の変動とその要因

大野盆地は南から北にかけて標高が低くなっており、それに伴い地域により観測井水位の変動が異なっている。北部にある観測井水位の変動が小さく、南部にある観測井水位の変動が大きい特徴があることが判明した。そこで、大野盆地を北部地域、中部地域、南部地域と 3 つの地域に分け、それぞれの地域に代表の観測井を 1 つ設定する。地域ごとの観測井を、北部地域では中野清水緑地観測井、中部地域では天神町観測井、南部地域では小山公民館観測井に注目した。図 5.5 は北部地域に位置する中野清水緑地観測井の 2018 年 1 月から 2022 年 12 月までの月平均地下水位を示している。ここで、図中の過去 10 年間の平均地下水位は、各年度同様の挙動を繰り返している。図 5.6、図 5.7 は天神町観測井と小山公民館観測井における、図 5.5 と同様の地下水変動を示している。

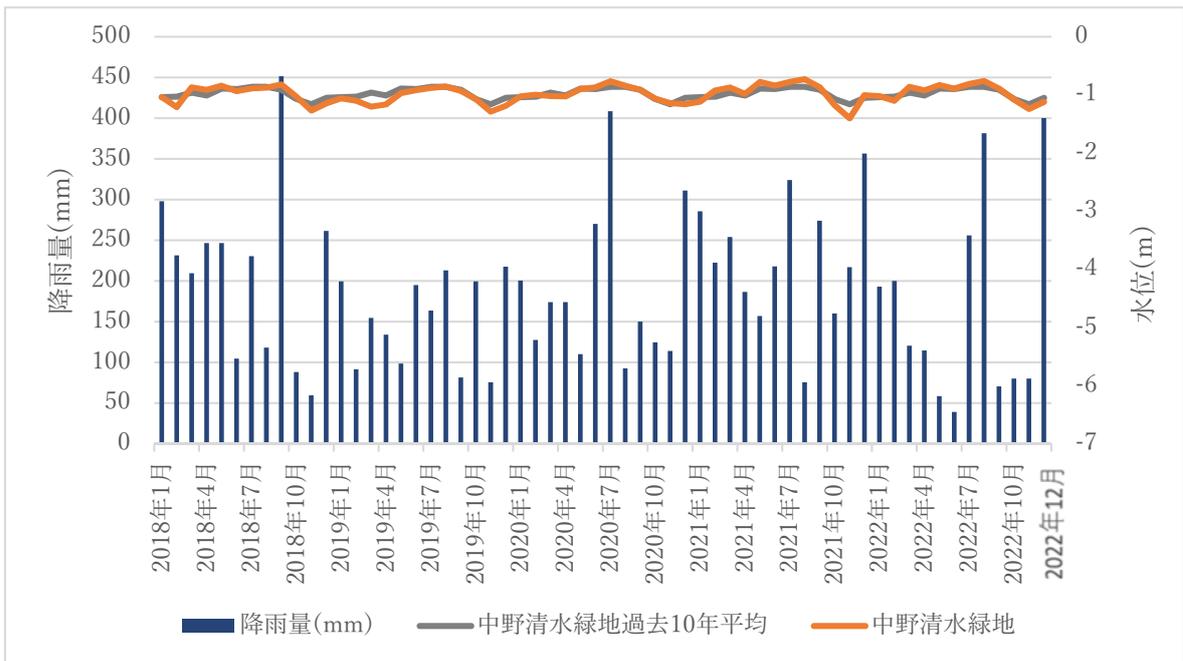


図 5.5 中野清水緑地観測井における地下水位と降雨量

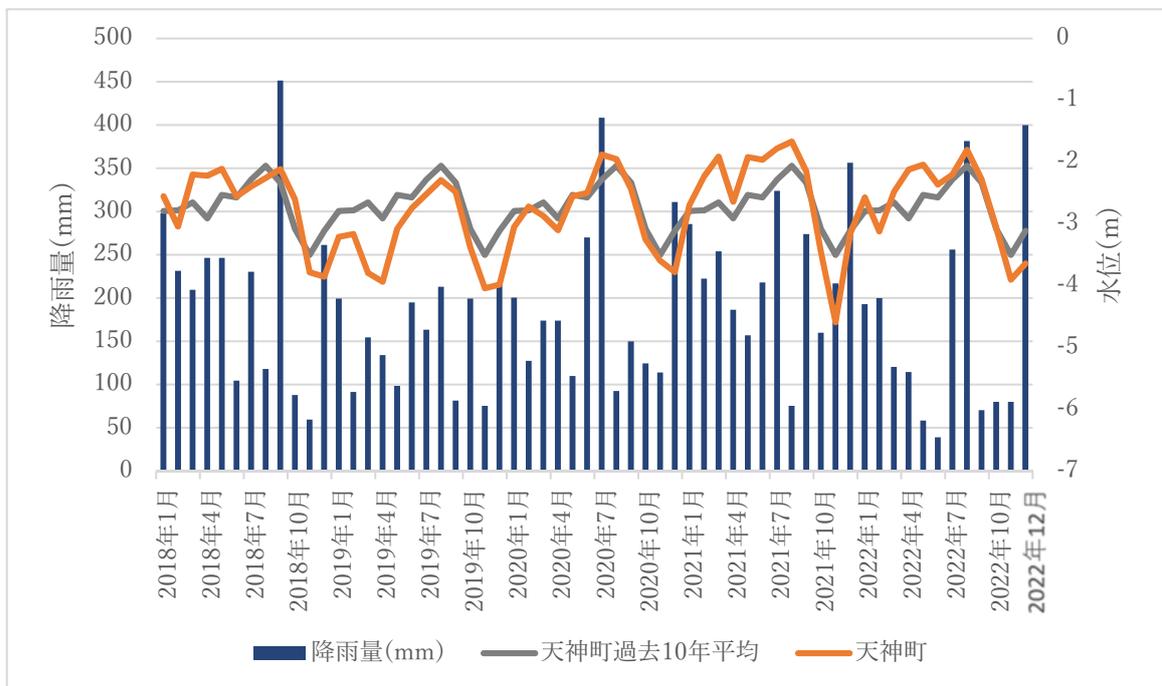


図 5.6 天神町観測井における地下水位と降雨量

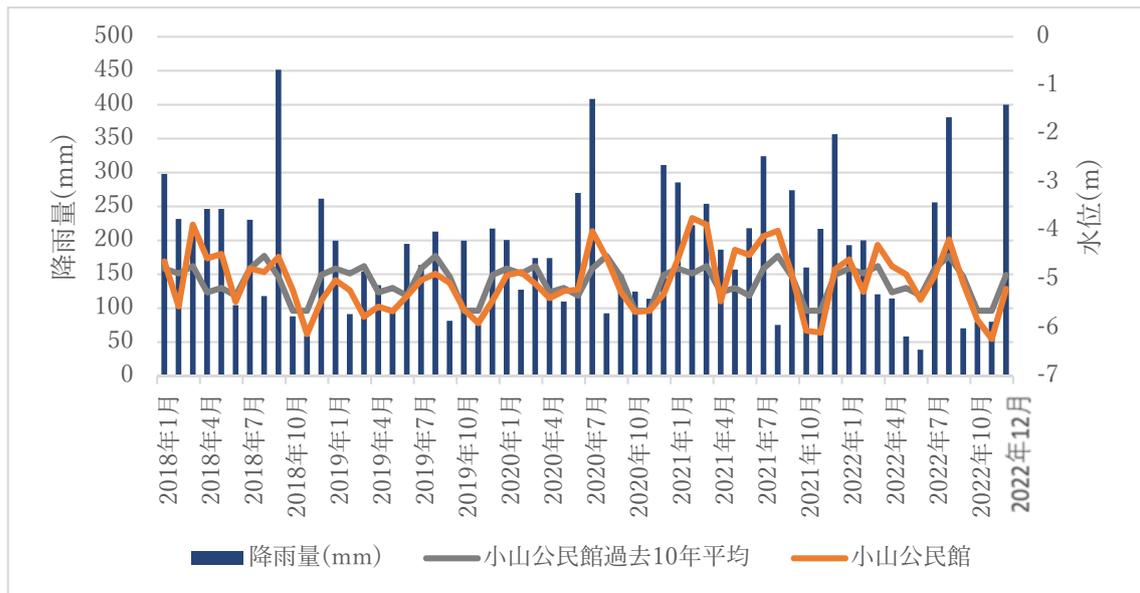


図 5.7 小山公民館観測井における地下水位と降雨量

これらの図より、北部地域に位置している中野清水緑地観測井の挙動は、過去 10 年間の平均地下水位変動とほぼ同様の挙動を示している。しかし、中部地域に位置している天神町観測井の水位変動、および、南部地域に位置している小山公民館観測井の水位変動は、ともに過去 10 年平均の地下水位変動とは、部分的に異なった挙動を示している。このことより、大野盆地の地下水変動は地域により異なり、とくに北部地域の地下水変動は他に比べて小さい事が認められた。そこで、北部地域、中部地域、南部地域の観測井を用いて、縦軸に前月との水位差、横軸に月降水量を取り、散布図を作成し、Excel を用いて近似曲線を求めた。図 5.8 は中野清水緑地観測井、図 5.9 は天神町観測井、図 5.10 は小山公民館観測井である。

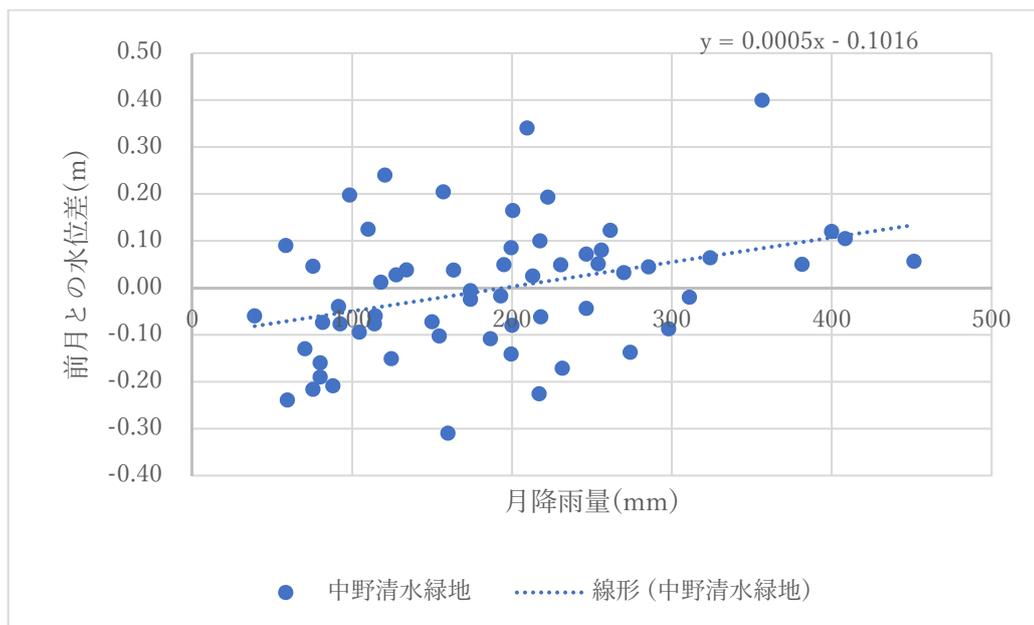


図 5.8 中野清水緑地観測井における前月水位差と月降雨量

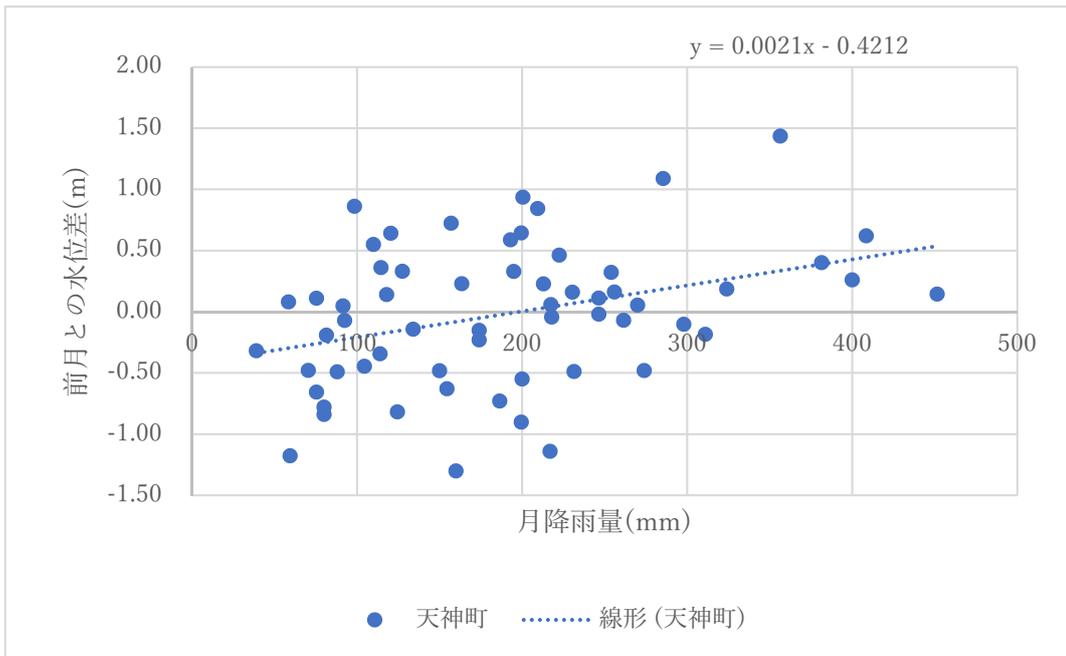


図 5.9 天神町観測井における前月水位差と月降雨量

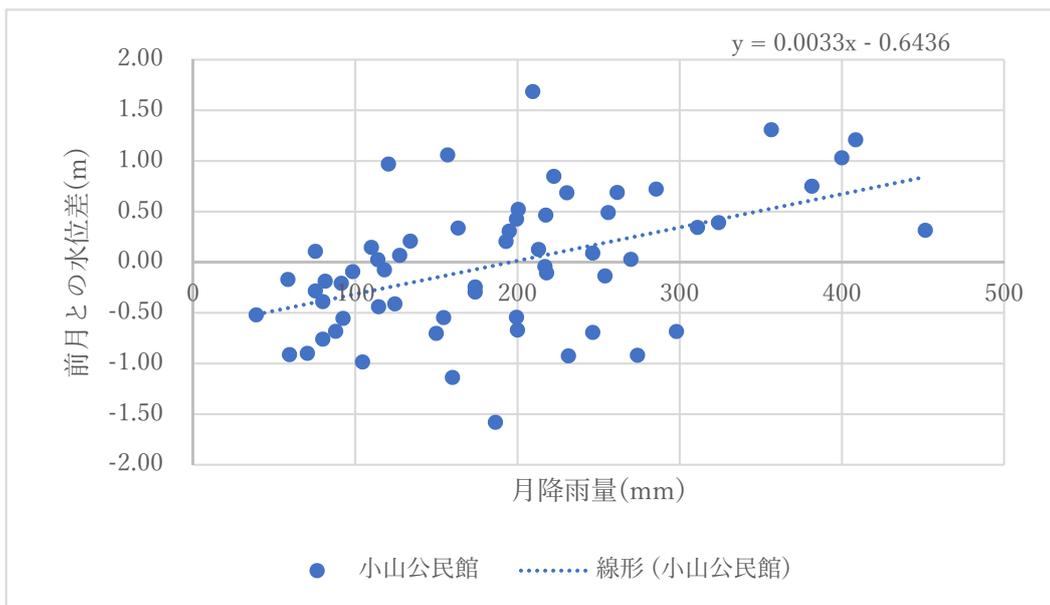


図 5.10 小山公民館観測井における前月水位差と月降雨量

曲線の傾きは、降水量に対しての水位差の増加を示している。北部地域、中部地域、南部地域で近似曲線を作成した結果、それぞれの傾きは 0.0005、0.0021、0.0033 と推定された。北部地域から南部地域に向かい、傾きが大きくなっていることが分かる。したがって、地下水変動は、盆地南部へ向かうにつれ、降雨量の影響を大きく受けることが判明した。

5.4 まとめ

本章では、簡易観測井の水位データを基に、地下水変動の要因を地域別で検討した。初めに、簡易観測井の中でも基準観測井に指定されている御清水観測井と春日公園観測井を比較した。御清水観測井は、地下水位が安定しているのに対し、春日公園観測井では地下水位が不安定だった。春日公園観測井の地下水位が不安定になる要因は地形的要因と揚水場が近くにあるからだと考えられる。そこで、揚水量と地下水位の関係を散布図で表したが、その関係性は強くなかった。次に、盆地を北部地域、中部地域、南部地域と3つの地域に分けて比較を行った。過去5年間の月平均地下水位と月降雨量のデータを用いて、それぞれの地域で散布図を作成した。縦軸に前月との水位差、横軸に月降雨量を取り、Excelにより近似曲線を求めた結果、北部地域での傾きは0.0005、中部地域での傾きは0.0021、南部地域での傾きは0.0033と推定された。曲線の傾きは、降水量に対しての水位差の増加を示している。したがって、水位変動は盆地南部に向かって、降雨量の影響を大きく受けることが判明した。

第5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。降雨からによる盆地内への浸透量、山岳からの地下水流動量、水田灌水および冬期湛水による水田からの浸透量を求めることにより地下水流入量を推定し、生活用水量、地下水揚水量、地下水湧出量を求めることにより地下水流出量を推定した。地下水流入量と地下水流出量の差から地下水収支を推定した。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。降雨による盆地内の浸透量は $60.0 \times 10^6 (\text{m}^3/\text{year})$ 、山岳部からの地下水流動は $58.4 \times 10^6 (\text{m}^3/\text{year})$ 、冬期湛水による地下水浸透量は $0.2 \times 10^6 (\text{m}^3)$ 、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 $155.5 \times 10^6 (\text{m}^3/\text{year})$ と推定された。
- (2) **第3章**では地下水流出量の推定をした。生活用水量は、 $2.4 \times 10^6 (\text{m}^3/\text{year})$ 、揚水量の過去21年間の平均は $8.9 \times 10^6 (\text{m}^3/\text{year})$ で、今年度の測定結果を基に推定した地下水湧出量は $131.4 \times 10^6 (\text{m}^3/\text{year})$ 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、 $142.7 \times 10^6 (\text{m}^3/\text{year})$ 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 $155.5 \times 10^6 (\text{m}^3/\text{year})$ と $142.7 \times 10^6 (\text{m}^3/\text{year})$ であり、地下水収支は $12.8 \times 10^6 (\text{m}^3/\text{year})$ であると推定された。また、2022年の地下水収量がマイナスになった要因は2022年の降雨量が過去23年間の降雨量より少ないことに起因している。
- (4) **第5章**では簡易観測井の水位データを基に、地下水変動の要因を地域別で検討した。大野盆地を北部地域、中部地域、南部地域と3つの地域に分けて比較を行った。過去5年間の月平均地下水位と月降雨量のデータを用いて、それぞれの地域で散布図を作成した。縦軸に前月との水位差、横軸に月降雨量を取り、Excelにより近似曲線を求めた結果、北部地域での傾きは0.0005、中部地域での傾きは0.0021、南部地域での傾きは0.0033と推定された。曲線の傾きは、降水量に対しての水位差の増加を示している。したがって、水位変動は盆地南部に向かって、降雨量の影響を大きく受けることが判明した。

以上が本研究で得られた成果である。本研究では、地下水収支の精度を向上として研究を進めたが改善点がいくつかある。まずは、生活用水量の推定についてである。本研究では、生活用水量を求める際に、世帯人員別生活用水量を東京都水道局のデータを用いて行った。東京都と大野市では生活様式が異なることから、生活用水量の値のやや異なると考えられる。そのため、大野市で計測された生活用水量の値を用いて推定を行うことでより、精度の高い結果を得られると考えられる。次に、水田からの浸透を求める際に用いた減水深である。今回の推定では、新潟県と宮城県の水田での水田灌水および冬期湛水事例の調査結果から推定を行なったが、大野市と新潟県や宮城県では天候や土地の地盤環境も異なる。そのため、実際に大野市で減水深調査を行い、それで得られた実測値を用いる方が適切である。

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、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，2005年，Vol.47 NO.1 pp.5-17
- 2) 国土交通省：令和3年度版 日本の水資源の現状，閲覧日：2023年2月8日
https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/mizsei/mizukokudo_mizsei_tk2_000028.html
- 3) 大野市：大野市地下水年次報告書～令和3年度版～，2022年
- 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>
- 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年
- 6) 大野市：大野市について，大野市 HP，<https://www.city.ono.fukui.jp/aboutweb/konnatokoro.html>，
閲覧日：2023年2月8日
- 7) 大野市：大野市水循環基本計画，2021年
- 8) 東京都水道局：くらしと水道，水の上手な使い方，
<https://www.waterworks.metro.tokyo.lg.jp/kurashi/shiyou/jouzu.html>，閲覧日：2023年2月8日
- 9) 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，2012年，第77巻 第675号 pp.331-337
- 10) 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，1993年，第1993巻 第164号 pp.165-170
- 11) 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，1993年，第1993巻 第164号 pp.157-163
- 12) 木村健一：環境工学 2巻，影国社，1988年，pp.10
- 13) 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 第3号，2019年
- 14) 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年