

# 福井県大野盆地における 3 次元地下構造解析 および総合的な地下水収支に関する研究

2021 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	大野盆地の地下水	3
1.4	本研究に関連した従来の研究	3
1.5	本研究の目的と内容	4

## 第2章 3次元地下構造解析

2.1	はじめに	6
2.2	解析概要	
2.2.1	重力探査について	8
2.2.2	重力異常値の推定方法	8
2.3	重力異常分布の推定	
2.3.1	仮定密度の決定	9
2.3.2	重力異常分布図	14
2.4	基盤標高の推定	18
2.5	まとめ	21

## 第3章 大野盆地の地下水賦存量

3.1	はじめに	22
3.2	大野盆地地下の3次元モデル	
3.2.1	帯水層モデルの作成範囲	22
3.2.2	データの補正	23
3.2.3	帯水層厚の算出	24
3.2.4	帯水層のモデル化	24
3.3	地下水賦存量の推定	27
3.4	まとめ	28

## 第4章 大野盆地の揚水量分布モデル

4.1	はじめに	29
4.2	工業用・公共施設用揚水量の推定	30
4.3	水道用揚水量の推定	
4.3.1	大野市の水道	31

4.3.2	水道の利用状況	32
4.3.3	単位使用水量の設定	34
4.3.4	水道利用による揚水量の推定	39
4.3.5	浅井戸利用による揚水量の推定	39
4.4	揚水量分布モデルの作成	41
4.5	まとめ	47
<b>第5章</b>	<b>大野盆地の地下水流出量</b>	
5.1	はじめに	48
5.2	解析概要	48
5.3	河川流量の測定	49
5.4	地下水湧出量の推定	53
5.5	地下水流出量の推定	54
5.6	まとめ	54
<b>第6章</b>	<b>大野盆地の地下水流入量</b>	
6.1	はじめに	55
6.2	大野盆地の流域面積と降水量	55
6.3	盆地内の地下水浸透量の推定	
6.3.1	蒸発散量の推定	60
6.3.2	表面流出量の推定	63
6.3.3	地下水浸透量の推定	63
6.4	山岳部から盆地内への地下水流動量の推定	64
6.5	地下水流入量の推定	67
6.6	まとめ	67
<b>第7章</b>	<b>大野盆地の地下水収支</b>	
7.1	はじめに	69
7.2	地下水収支の推定	69
7.3	年毎の地下水収支	71
7.4	まとめ	73
<b>第8章</b>	<b>結論</b>	75
<b>参考文献</b>		77

# 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、人間生活・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、最近の人口増加に伴う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<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<sup>1)</sup>、そのうちの約 97.5%が海水であり、淡水は約 2.5%である。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<sup>2)</sup>。

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飲み水に利用するなど、古くから生活用水や工業用水など、様々な用途の水源として地下水が利用されてきた。さらに大野市には、御清水（しょうず）や本願清水などといった「名水百選」に選ばれている湧水がみられるなど、全国的にみても指折りの豊富な水環境にあることから、市民と地下水との関わりには特に深いものがある。そこで、ここ大野市が挙げられた理由は、この豊富な地下水が決して無限にあるものではなく、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ためである。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把握し、地下水の現状を市民に理解してもらうことが不可欠である。

## 1.2 大野市の概要

大野市は人口約 3 万 4 千人、福井県東部の内陸に位置する街である。図 1.1 は大野市の位置を示す。また、面積は 872.43km<sup>2</sup>であり、福井県で最も面積の大きい市町村となって

いる。さらに大野市は四方が山々に囲まれ、面積の約 90%が森林であり、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、扇状地形を成している<sup>3)</sup>。そのため、市街地は地形的な意味合いで「大野盆地」と称されることがある。図 1.2 は、大野盆地と 4 本の一級河川を示す。また大野市は、内陸盆地型の気候で寒暖の差が大きい。平成 30 年から過去 10 ヶ年の年平均気温は 13.4℃、年間平均降水量は 2429.5mm で、全国平均降水量の約 1800mm を大きく上回っている。また、地形や季節風の影響から典型的な北陸山地型の気候で、夏季に比べ冬季の降水量が多く、平成 30 年の最深積雪が 177cm に達するなど降雪量も多い<sup>3)</sup>。

市街地である城下町は、織田信長家臣の金森長近により 400 年以上前に築かれ、大野盆地にある亀山に大野城を建設し、そのふもとに碁盤目状の城下町を作った。今でもそのまら並みはかつての城下町としての風情を色濃く残し、「北陸の小京都」ともよばれている。秋から冬にかけ、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時、「天空の城越前大野城」が現れ、大野市を代表とする構造物となっている。



図 1.1 大野市の位置

### 1.3 大野盆地の地下水

1.1 にも述べたように、大野市は地下水に恵まれたまちであり、市街地のいたるところで湧水がみられる。このように、多くの地域で湧水がみられる大野市の住民にとって、地下水は必要不可欠な存在である。なぜなら、大野市街地の大部分の家庭や事業所は、各自で家庭用ホームポンプを用いて地下水を揚水し、利用しているからである。さらに、主に市街地で普及している上水道や簡易水道も、それらの水源の大部分は地下水に頼っているため、市民や事業所にとって、地下水はかなり重要な資源であることがうかがえる<sup>3)</sup>。

### 1.4 本研究に関連した従来の研究

ここで、本研究に関連した従来の研究について述べる。福井平野および鯖江盆地において、過去に重力探査と微動探査を用いた3次元基盤構造解析が行われている。この研究によって、福井平野および鯖江盆地の基盤構造に関して調査し、それをモデル化している<sup>4)</sup>。他の類似研究としては、深層地下水調査における重力探査の有効性を検討した研究がある。これによって、基盤構造の推定や地下水賦存量の推定が行われ、重力探査の有効性が提言されている<sup>5)</sup>。このように、3次元基盤構造解析により地下構造をモデル化することで、帯水層の構造なども詳しく知ることができる。そして地下水賦存量の推定により、その地域における地下水性状の把握へとつながる。他にも、日本列島全域での帯水層の構造を調査し、それをモデル化したものを用いて各地域の今後の地下水利用やその管理方法についてまとめ、今後の地下水シミュレーションにつながる結果を残している研究もある<sup>6)</sup>。また濃尾平野において、地下水収支量を推定し、その結果から、その地域における土地利用について言及している研究もある<sup>7)</sup>。

本研究対象である大野盆地についても、過去に地下水性状を定量的に解明するための解析が国土交通省、国土技術政策総合研究所によって行われている<sup>8)</sup>。この研究では、大野盆地における地下水位や降水量、地質データを用いて3次元モデルならびに地下水収支量を推定している。しかしこの研究においては、揚水量や地下水浸透量など、地下水収支量の一部の要素には実測データを用いずに地下水収支量を推定している。したがって本研究では、主に実測データや観測データに基づいた解析を行う。

以上より、地下水性状の把握には3次元基盤構造解析は必要不可欠であり、また地下水収支量を定量的に把握することは、今後の地下水利用やその管理方法のみならず、その土地の土地利用や土地開発という観点についても言及することが可能となるため、重要な情報となる。

## 1.5 本研究の目的と内容

本研究の目的は、大野盆地における地下水性状を総合的かつ定量的に解明することにある。

また具体的な研究内容は以下のとおりである。まず重力探査を用いて大野盆地の3次元地下構造解析を行う。3次元地下構造解析では、未知である基盤面の標高ならびにその形状を推定することができ、本研究では、その結果を用いて帯水層の構造を把握しモデル化する。さらにモデル化の後、現状の地下水賦存量を推定する。本解析の流れは、帯水層のモデル化のために基盤面の標高ならびにその形状を推定する。そして同じく標高データを用いて、地表面の標高と形状を推定する。そして基盤面と地表面をそれぞれ3次元でモデル化すれば、基盤面と地表面の間を帯水層とみなした地下構造がモデル化される。大野盆地では、地表と基盤岩の間はすべて飽和した砂礫層であるとみなすため、ここから帯水層の体積が算出できる。よって、帯水層の体積に間隙率を乗じることで地下水賦存量が推定される。

次に、大野盆地における地下水収支量を定量的に把握する。地下水収支量とは、大野盆地における地下水流出量や地下水流入量などを指す。地下水流出量とは、主に揚水量と湧出量である。揚水された地下水は生活用水や工業用水として利用されており、本研究では年間の揚水量ならびにその場所を推定し、それをメッシュ地図上に反映する。これを揚水量分布モデルとする。生活用水としての揚水量は、人口に1人1日当たりの使用水量を乗じることで推定する。工業用水としての揚水量は、各事業所が揚水量を市へ報告し集計されたデータを用いて推定を行う。そして推定された揚水量をメッシュ地図上に反映し、揚水量モデルを作成した。湧出量の推定については、河川流量に注目した。盆地北部の地域では湧水が顕著であり、北部を流れる河川流量の差分が地下水湧出量であるとみなし、推定を行った。しかし、河川流量についての実測データはほとんどないため、現地ですれらを測定し、その結果を用いて湧出量を推定した。そして、これら揚水量と湧出量を足し合わせ、地下水流出量とした。

地下水流入量とは、主に盆地内の浸透量と、盆地周囲の山岳からの流動量である。浸透量は降水量に起因すると考え、降水量の一部を浸透量として推定した。しかし、降水量に対する浸透量の割合が不明なため、降水量から浸透量以外の要素を引くことで浸透量の推定が可能であると考えた。他の要素として、降水量は浸透量のほかに蒸発散量、表面流出量に分かれる。蒸発散量は、ペンマン式や類似地域の過去の推定値を用いて推定し、表面流出量は、河川流量として盆地外へ流出する値を指すとし、測定した河川流量を用いて推

定した。そして、降水量から蒸発散量と表面流出量の和を引くことで、盆地内の浸透量を推定した。盆地周囲の山岳からの流動量は、山岳部の浸透量の一部を盆地への流動量として推定した。その方法は、山岳部の透水係数を年間の透水距離に変換し、山岳部から盆地内へ地下水がどれだけ流動するのかを推定した。そして、これら浸透量と流動量を足し合わせ、地下水流入量とした。そして以上の結果を集計し、地下水収支量を推定した。



## 第2章 3次元地下構造解析

### 2.1 はじめに

大野盆地の地下水賦存量を推定するには、帯水層の構造を把握する必要がある。そこで本研究では、重力探査を用いて大野盆地の3次元地下構造解析を行い、大野盆地の基盤標高を推定した。大野盆地の地質のほとんどは砂礫であり、基盤岩に砂礫が堆積し帯水層が形成されていると考えられるため<sup>9)</sup>、基盤標高が分かれば帯水層の構造が分かる。また大野盆地では基盤岩まで到達したボーリングデータが存在しないため、この手法を用いる必要があった。したがって、基盤標高とその起伏を推定することで大野盆地の帯水層の構造が判明し、地下水賦存量の推定が可能となる。よって本章では基盤標高の推定を目的とし、3次元地下構造解析ならびにその結果について述べている。また図2.1は解析範囲を示し、その範囲は大野盆地を中心とした30km×30kmの範囲となっており、日本の平面直交座標第VI系において、 $-15000\text{m} \leq x \leq 15000\text{m}$ 、 $32000\text{m} \leq y \leq 62000\text{m}$ を対象とした<sup>10)</sup>。

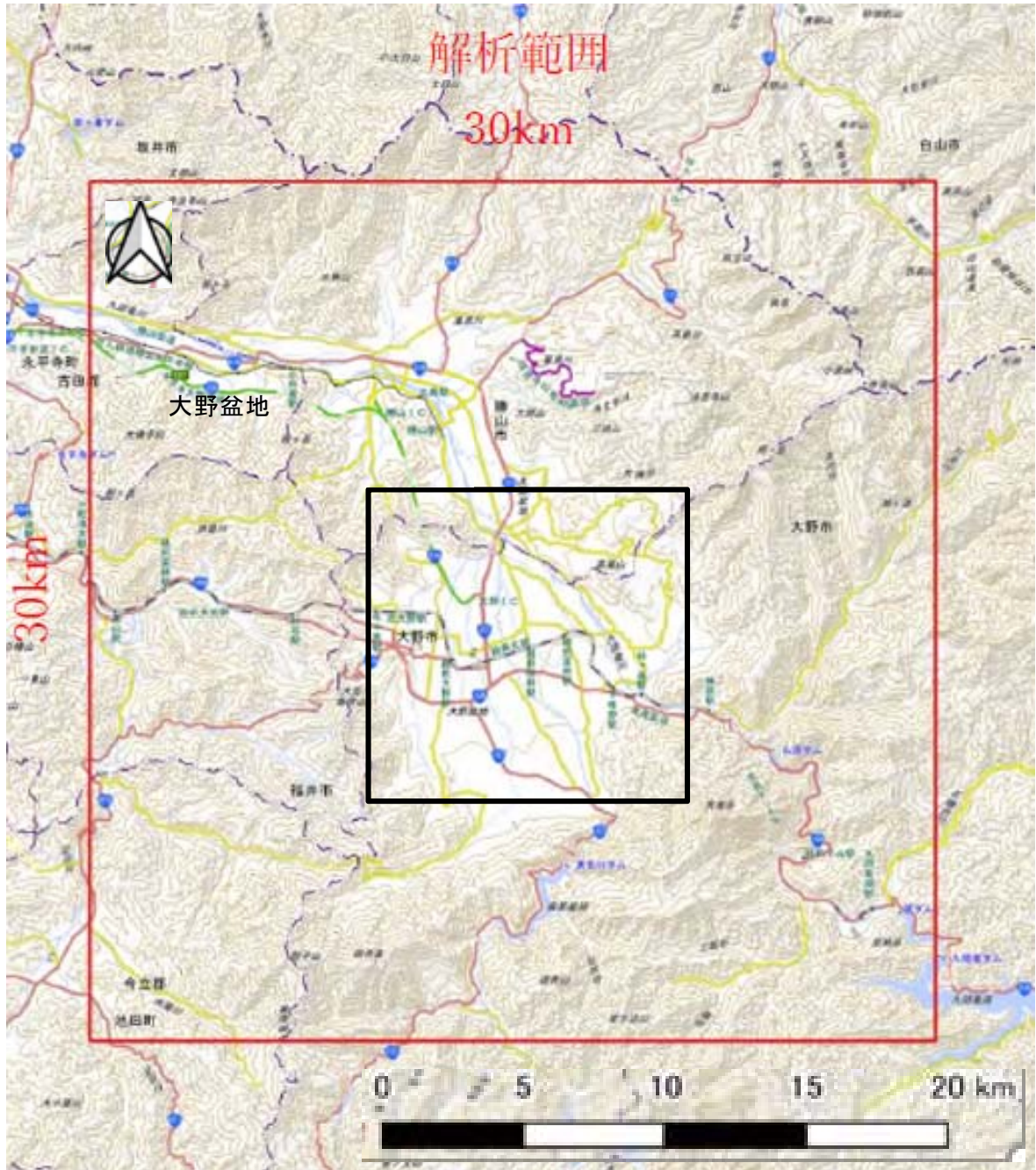


図 2.1 解析範囲

## 2.2 解析概要

### 2.2.1 重力探査について

まず本解析で用いる重力探査について述べる。重力探査は、任意の位置においての重力値を測定し、測定した結果から地下の物質や構造を把握することができる物理探査の一種である。地表における重力値は、地下に分布する岩石や岩盤などの密度、分布深度、形状に大きく起因する。例えば、地下に密度の同じ岩盤が存在する場合でも、出現深度が浅いと地表での重力値は大きく測定され、深いと小さく測定される。また、地下に空洞が存在する場合には重力値は小さく測定される。簡潔に言えば、地下に密度の大きい物質が存在すると重力値は大きくなり、密度の小さい物質が存在すると重力値は小さくなる。

重力値が大きく測定される場合と小さく測定される場合とを述べたが、測定された重力値の大小を決定するための基準を定める必要がある。その基準を定めるために用いるものを仮定密度という。仮定密度とは、海拔 0m から測定点までが、任意の密度をもつ地質によって一様に構成されていると仮定したときの密度を指す。そして、その仮定密度での重力値を正規重力値  $g_0(\text{cm/s}^2)$  という。また、実際に測定される重力値  $g(\text{cm/s}^2)$  との差を重力異常値  $\Delta g(\text{cm/s}^2)$  といい、式(2.1)はこれらの中に成り立つ関係を示す。

$$\Delta g = g - g_0 \quad (2.1)$$

$\Delta g(\text{cm/s}^2)$  : 重力異常値、 $g(\text{cm/s}^2)$  : 実際に測定される重力値、 $g_0(\text{cm/s}^2)$  : 正規重力値

重力異常値を利用することによって、地下構造の把握が可能となる。式(2.1)より、 $\Delta g$  は地下の物質が仮定密度に対して高密度物質（一般に基盤岩を指す）であればより高くなることを示している。仮定密度が実際の地殻物質の平均密度よりも小さければ、重力異常分布のパターンは正の相関となり、大きければ負の相関となる。一般に、基盤岩と基盤岩に堆積している地質の密度を比較すると、前者の方が大きい。したがって、この相関が比較的小さい仮定密度での重力異常値を採用する。

### 2.2.2 重力異常値の推定方法

本解析では、産業技術総合研究所（以下 AIST と称する）に収録されている重力異常値を入力データとして使用した。AIST は、大野市を含む周辺地域の重力異常値を、仮定密度が  $2.0\text{g/cm}^3$ 、 $2.3\text{g/cm}^3$ 、 $2.67\text{g/cm}^3$  の 3 種類で過去に解析を行っているため、本研究に見合

う仮定密度をこの3種類の中から抜粋する<sup>11)</sup>

検出された重力異常値には、本解析の対象深度である基盤面よりも深部の構造から、地表付近の不均質な構造まで、地下の様々な情報が含まれている。なお、本解析では、基盤面付近の密度構造に対応した重力異常値を抽出することを目的としているため、基盤面よりも深部な地層からの影響を排除したい。したがって、まずは重力異常値を二成分に分離することから考える。ここで二分される成分をそれぞれトレンド成分、シグナル成分と称す。トレンド成分とは、ある深度に対して、それよりも深部の地質情報による重力異常値を指し、シグナル成分とは、ある深度に対して、それよりも浅部の地質情報による重力異常値を指す。本解析では、トレンド成分とシグナル成分とに分割する深度を砂礫層と基盤面の間と定め、シグナル成分に表れる重力異常値こそが、基盤面よりも上方の影響を受けた重力異常値であるとみなし、本解析で使用するデータとする。そこで、この二成分への分離を、上方接続フィルター処理によって行った。上方接続フィルター処理とは、例えば高度 2000m における重力値は、深度 2000m 程度よりも深い地下構造異常の影響を反映しているという性質がある。元の重力異常値から高度 2000m における重力値を除去した残差重力異常値は、深度 2000m 程度以浅の地下密度構造異常であるといえる。これを接続高度 2000m と表現する。したがって、上方接続フィルター処理を施し、重力異常値をトレンド成分とシグナル成分に分離することで、基盤付近の密度構造に対応するシグナル成分を抽出する。これで、大野盆地の重力異常値が判明する<sup>12)</sup>。

## 2.3 重力異常分布の推定

### 2.3.1 仮定密度の決定

AIST に収録されている仮定密度  $2.0\text{g/cm}^3$ 、 $2.3\text{g/cm}^3$ 、 $2.67\text{g/cm}^3$  について、地形と重力異常分布のパターンを比較した。図 2.2、図 2.3、図 2.4 はそれぞれ仮定密度  $2.0\text{ g/cm}^3$ 、 $2.3\text{ g/cm}^3$ 、 $2.67\text{ g/cm}^3$  の重力異常分布を示している。また、図 2.5 に大野盆地の標高分布を示す。図 2.2、図 2.3 の仮定密度  $2.0\text{g/cm}^3$ 、 $2.3\text{g/cm}^3$  による重力異常値は、図 2.5 と比較すると、両者とも市街地を含む標高の低い盆地内部で顕著に重力異常値が負の値を示しており、盆地周囲の標高が高い山々では正の値を示している。これは主に、基盤面付近の地下構造に起因するというより、地表、または比較的浅部の地下構造にのみ起因していると考えられる。対して図 2.4 の仮定密度  $2.67\text{g/cm}^3$  による重力異常値では、仮定密度  $2.0\text{g/cm}^3$ 、 $2.3\text{g/cm}^3$  でみられたような特徴がみられない。すなわち、最も地形との相関が小さく、基盤面付近の情報を多く含んでいると判断できるため、本解析では仮定密度  $2.67\text{g/cm}^3$  での重力異常

値を採用する。

さらに、重力異常値算出の元となっている重力値の測点位置を図 2.6 に示す。これより、測点は主に道路上に配置されており、大野盆地内についてはほぼ全域に配置されていることが分かる。

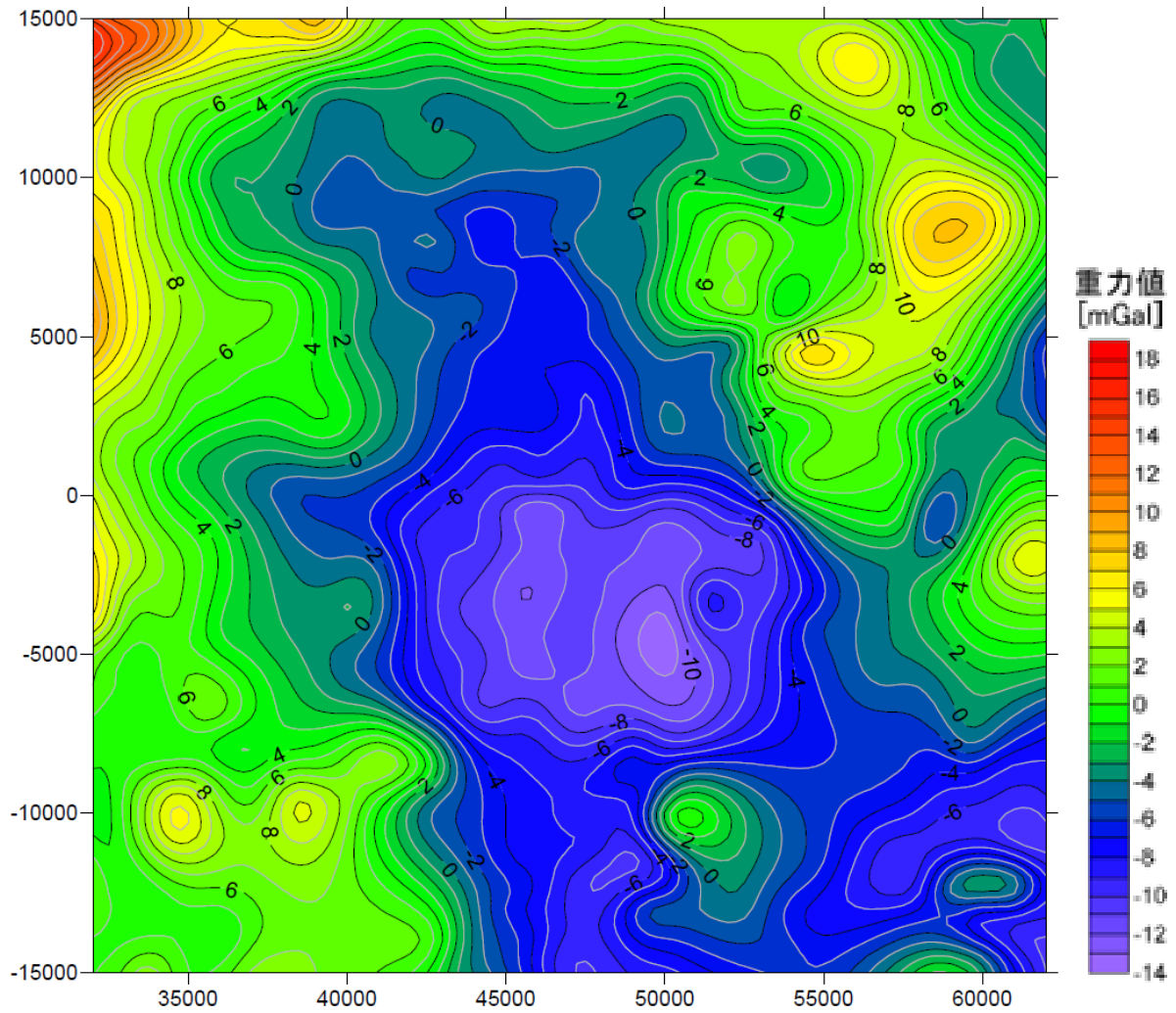


図 2.2 仮定密度  $2.0\text{g}/\text{cm}^3$  での重力異常分布

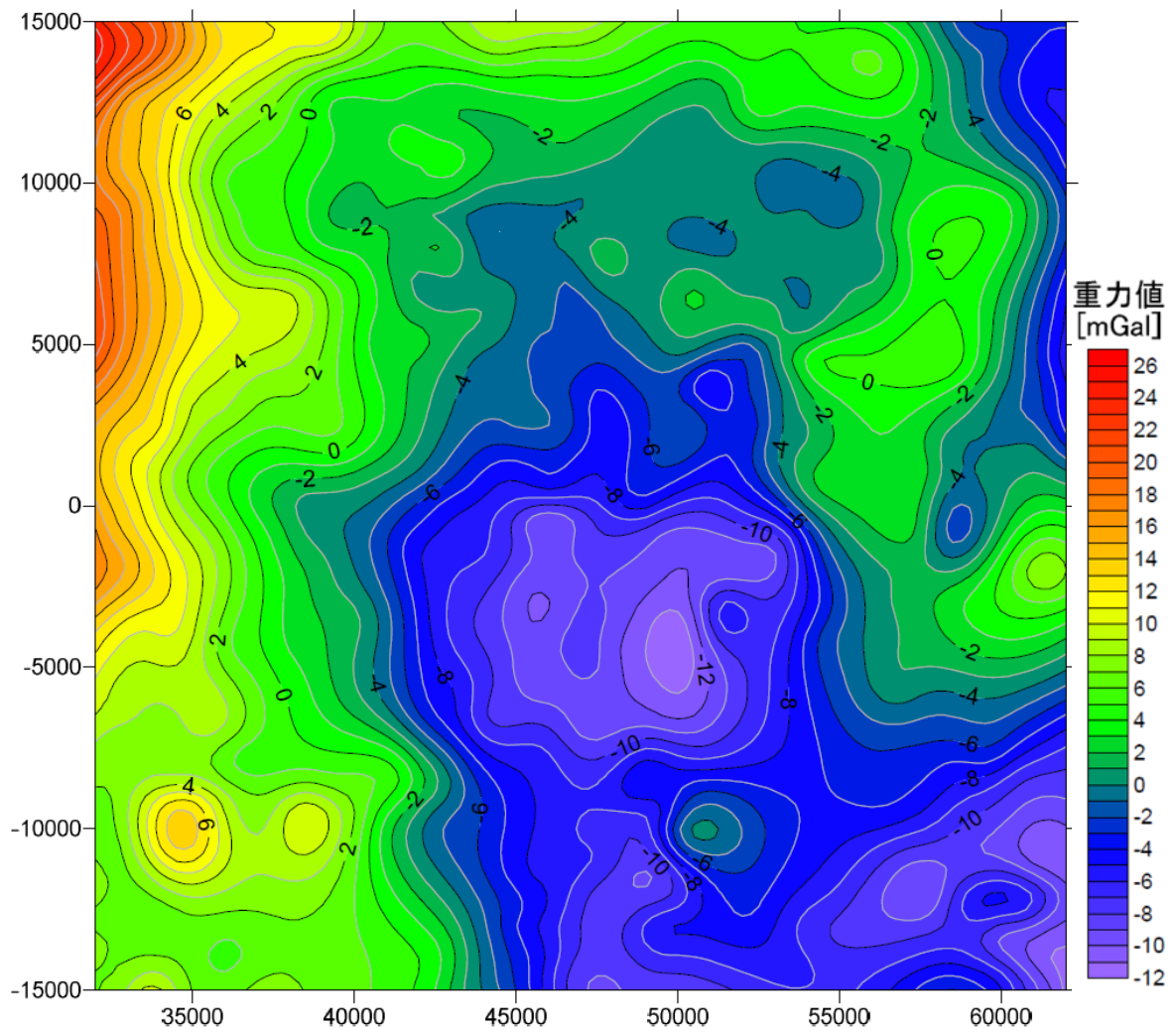


図 2.3 仮定密度  $2.3\text{g/cm}^3$  での重力異常分布

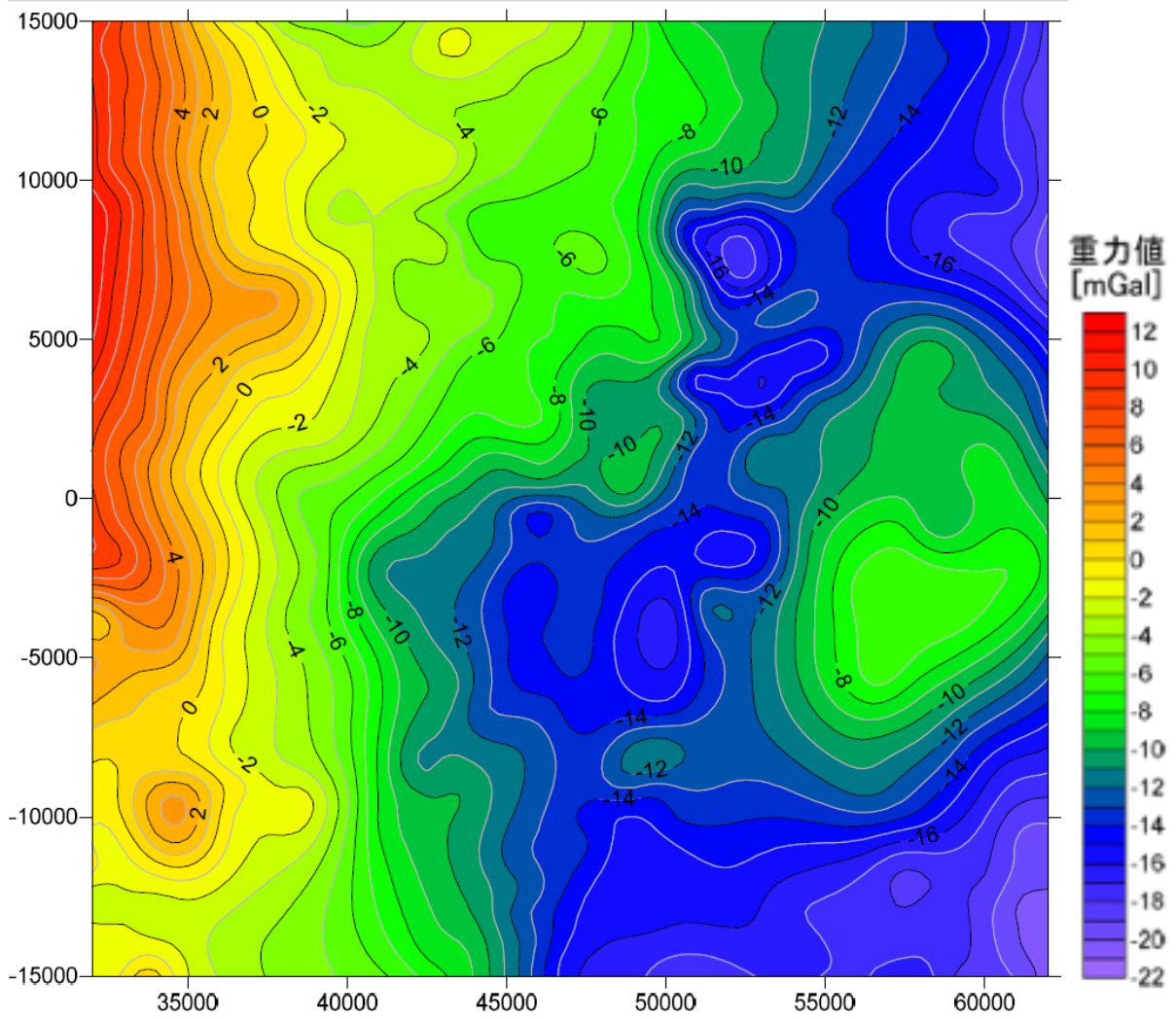


図 2.4 仮定密度  $2.67\text{g/cm}^3$  での重力異常分布

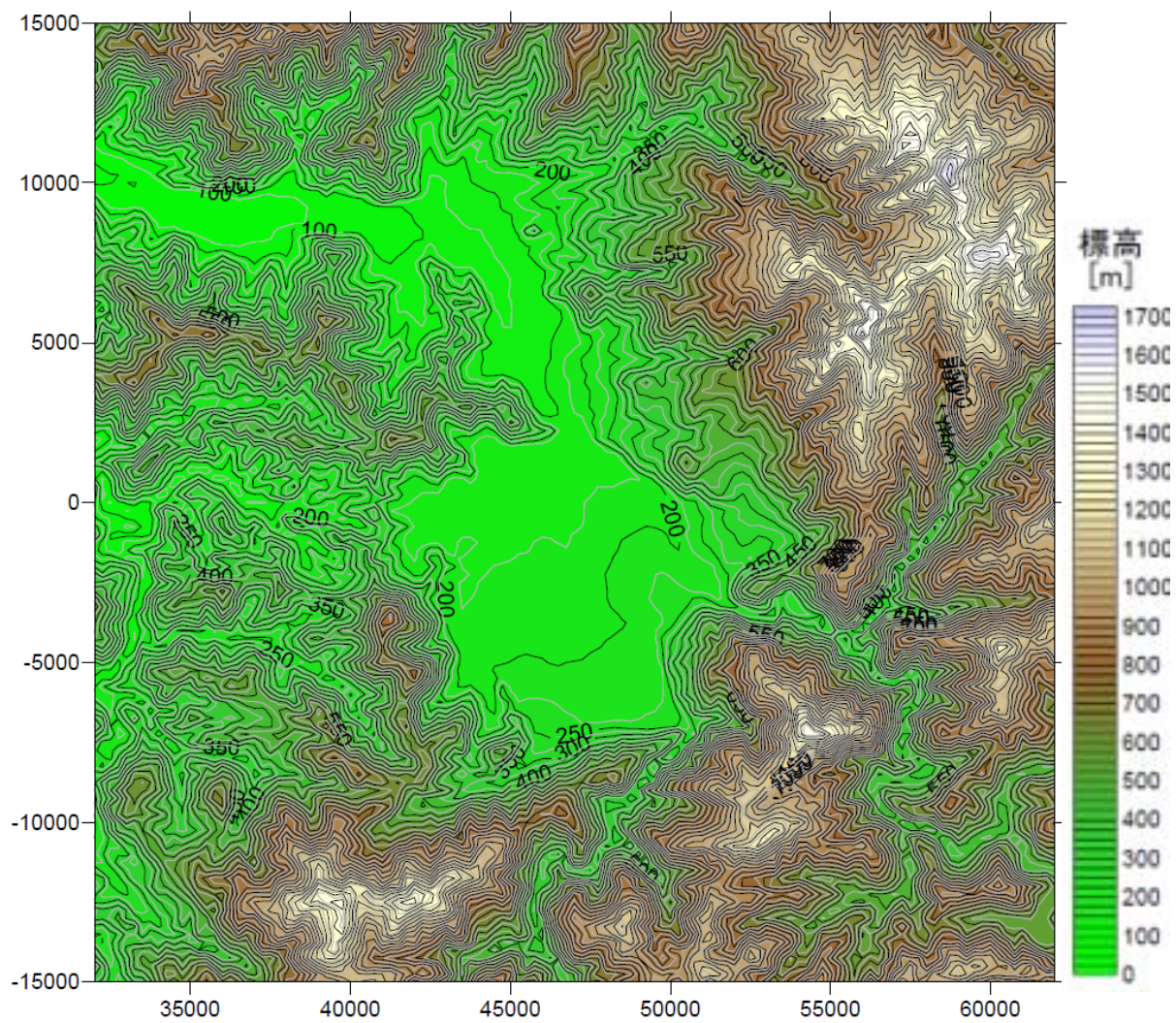


图 2.5 標高分布图



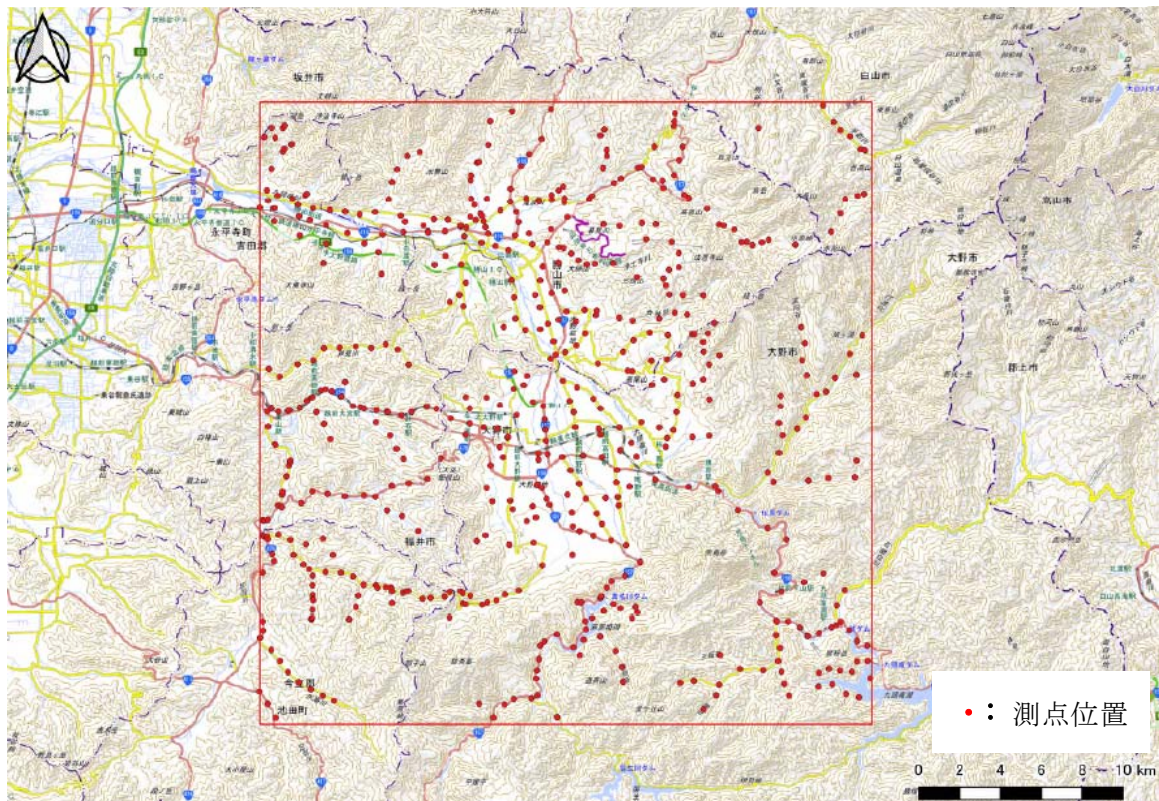


図 2.6 解析範囲と測点位置

### 2.3.2 大野盆地の重力異常分布図

上方接続フィルター処理により、仮定密度  $2.67\text{g/cm}^3$  におけるシグナル成分およびトレンド成分を抽出した。接続高度は  $2000\text{m}$  とした。図 2.7、図 2.8 は、それぞれ仮定密度  $2.67\text{g/cm}^3$  におけるシグナル成分とトレンド成分を示している。

図 2.8 のトレンド成分を見ると、南東から北西に向かうにつれ重力異常値が増加する傾向があると分かる。これは、日本海側の地下奥深くのモホロビッチ不連続面（以下モホ面と称す）の影響であると考えられる。モホ面とは、地中奥深くに展開している地殻物質とマントルとの境界面のことを指す<sup>13)</sup>。図 2.9 は、モホ面のイメージを示している。本解析での仮定密度が  $2.67\text{g/cm}^3$  であるのに対し、地殻物質の平均密度はこの仮定密度と何ら差は生じないが、マントルの平均密度は一般的に  $3.3\text{g/cm}^3 \sim 5.6\text{g/cm}^3$  と考えられている<sup>13)</sup>。すなわち、密度の大きいマントルの標高が、南東から北西に向かうにつれ高くなっているため、重力異常値が増大する。よって、トレンド成分は深度の大きい位置に展開しているモホ面の影響までも的確に捉えていると考えられるため、本解析においては無視をする必要があり、シグナル成分が本解析における重力異常値と断定する。図 2.10 は、国土地理院の地理院地図とシグナル成分を重ねた図を示す。

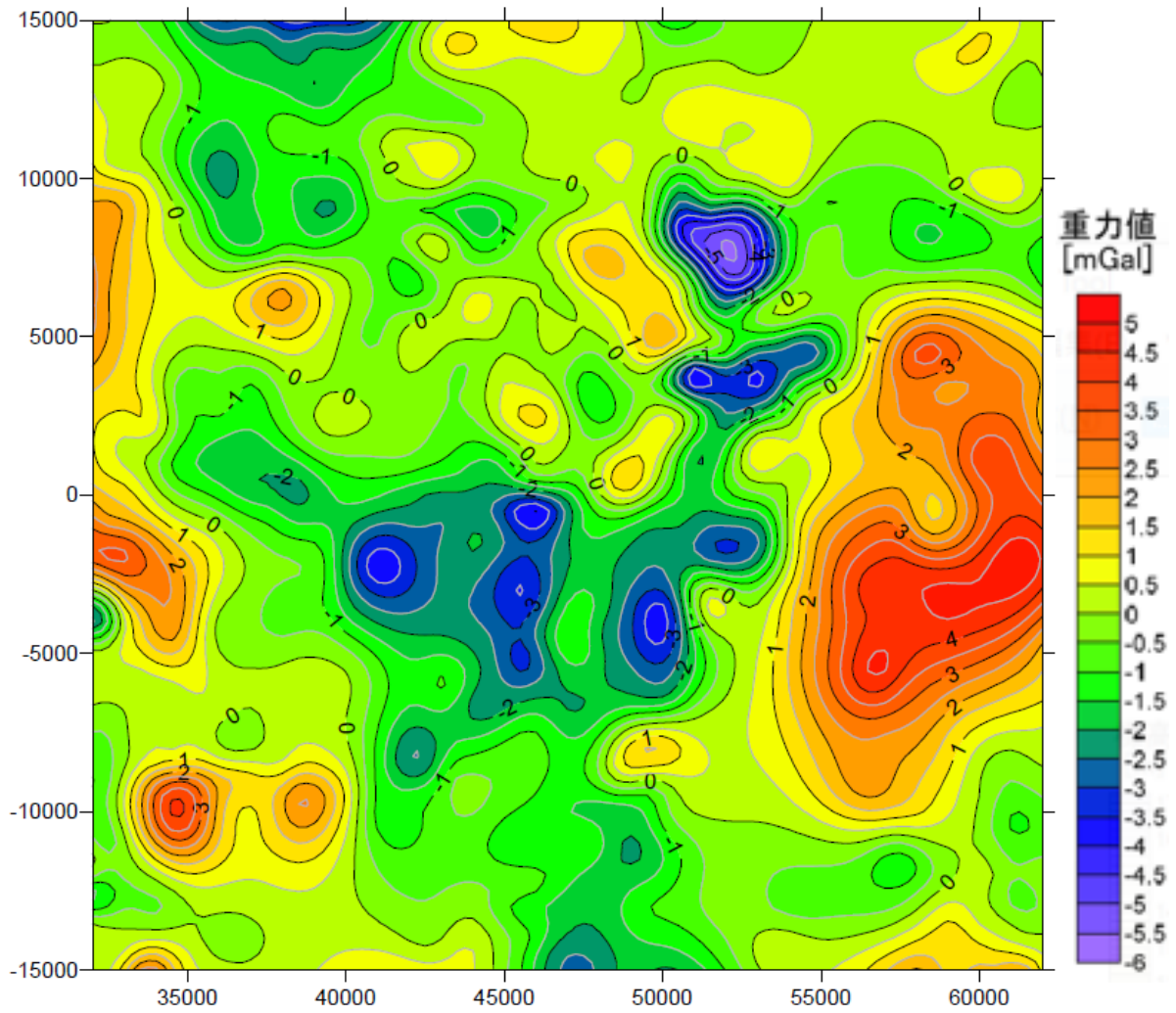


図 2.7 シグナル成分 (地表面下 0m~2000m)

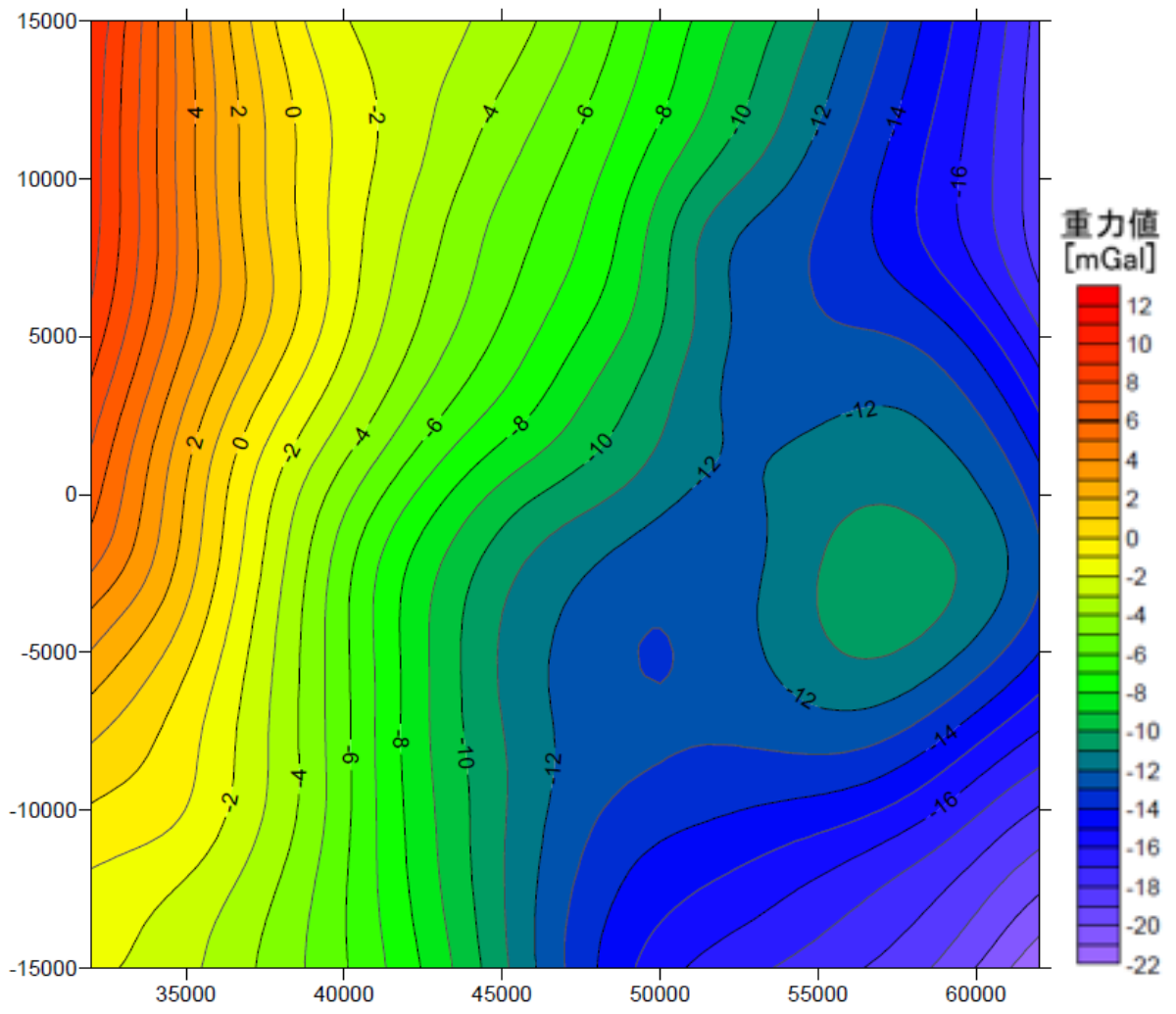


図 2.8 トレンド成分 (地表面下 2000m 以深)

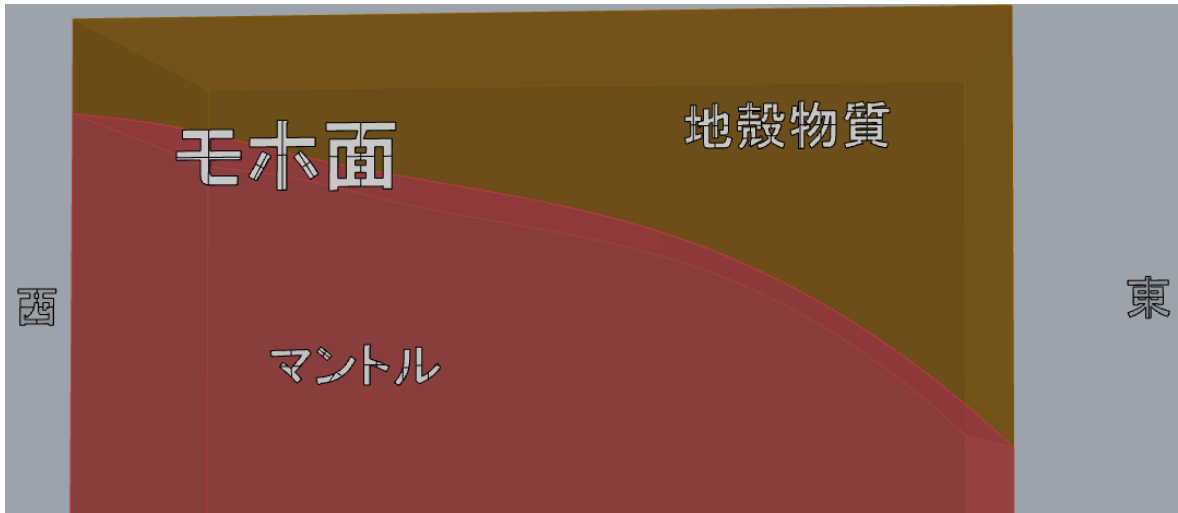


図 2.9 モホ面のイメージ

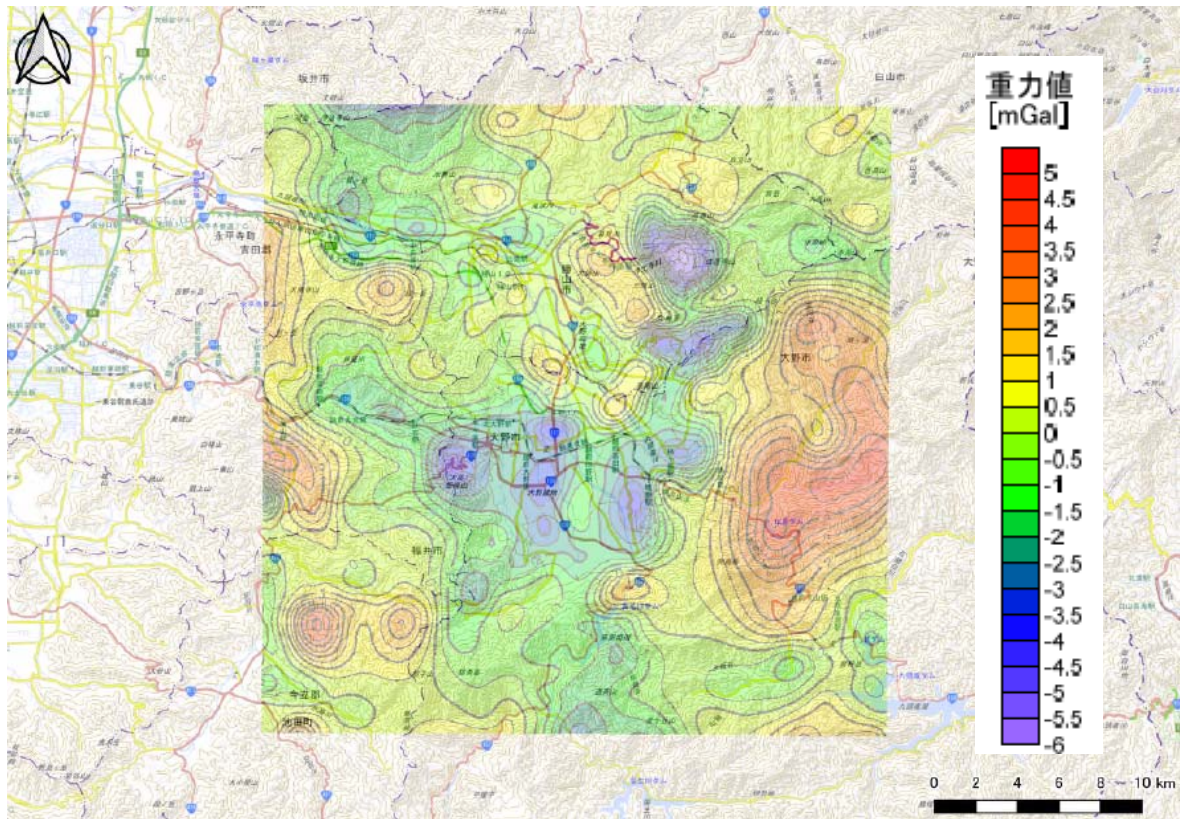


図 2.10 国土地理院「地理院地図」と重力異常分布

## 2.4 基盤標高の推定

シグナル成分を入力データとし、基盤岩とその上位層との密度境界面の深度分布を推定した。大野盆地周辺では基盤岩まで到達したボーリングデータは存在しないため、高重力異常域 3 点をコントロールポイント (CP1、CP2、CP3) とした拘束条件を設けた。ここで、重力異常分布の高重力異常域の地表は露出していると仮定した。図 2.11 は、コントロールポイントを含むシグナル成分を示しており、表 2.1 は、コントロールポイントの座標と標高を示している。

高重力異常域である各コントロールポイントは露岩しているため、その位置での標高は基盤標高と等しいとみなし、コントロールポイントでの基盤標高を推定する。そして、これら 3 点のコントロールポイントでの基盤標高と重力異常値との関係性を基準とし、解析範囲すべての基盤標高を、グリッド間隔 250m で推定した。図 2.12 は、推定された重力基盤標高の分布を示しており、図 2.13 は、国土地理院の地理院地図と重力基盤標高分布を重ねた図を示している。これより、大野盆地の基盤標高とその起伏が推定された。

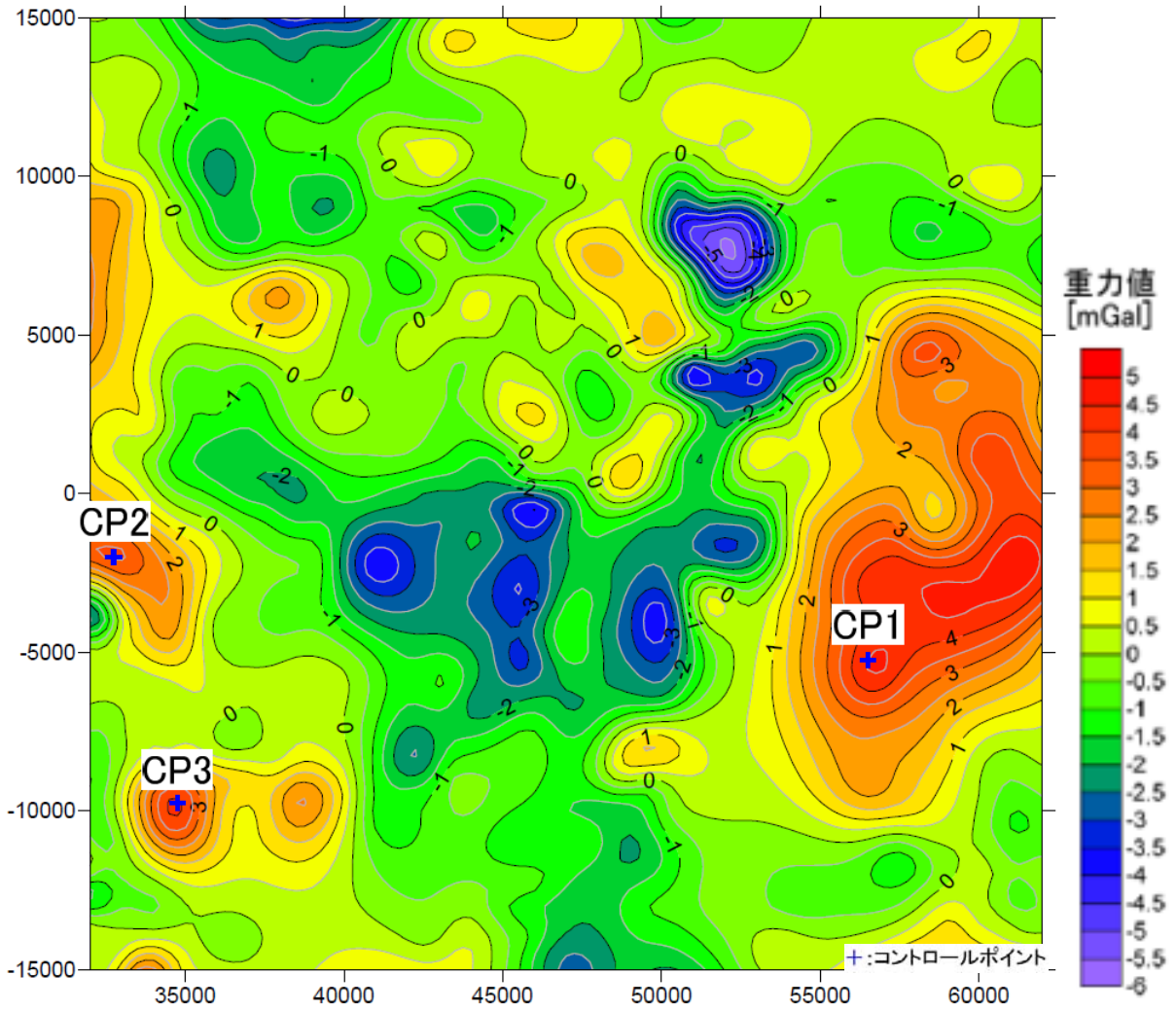
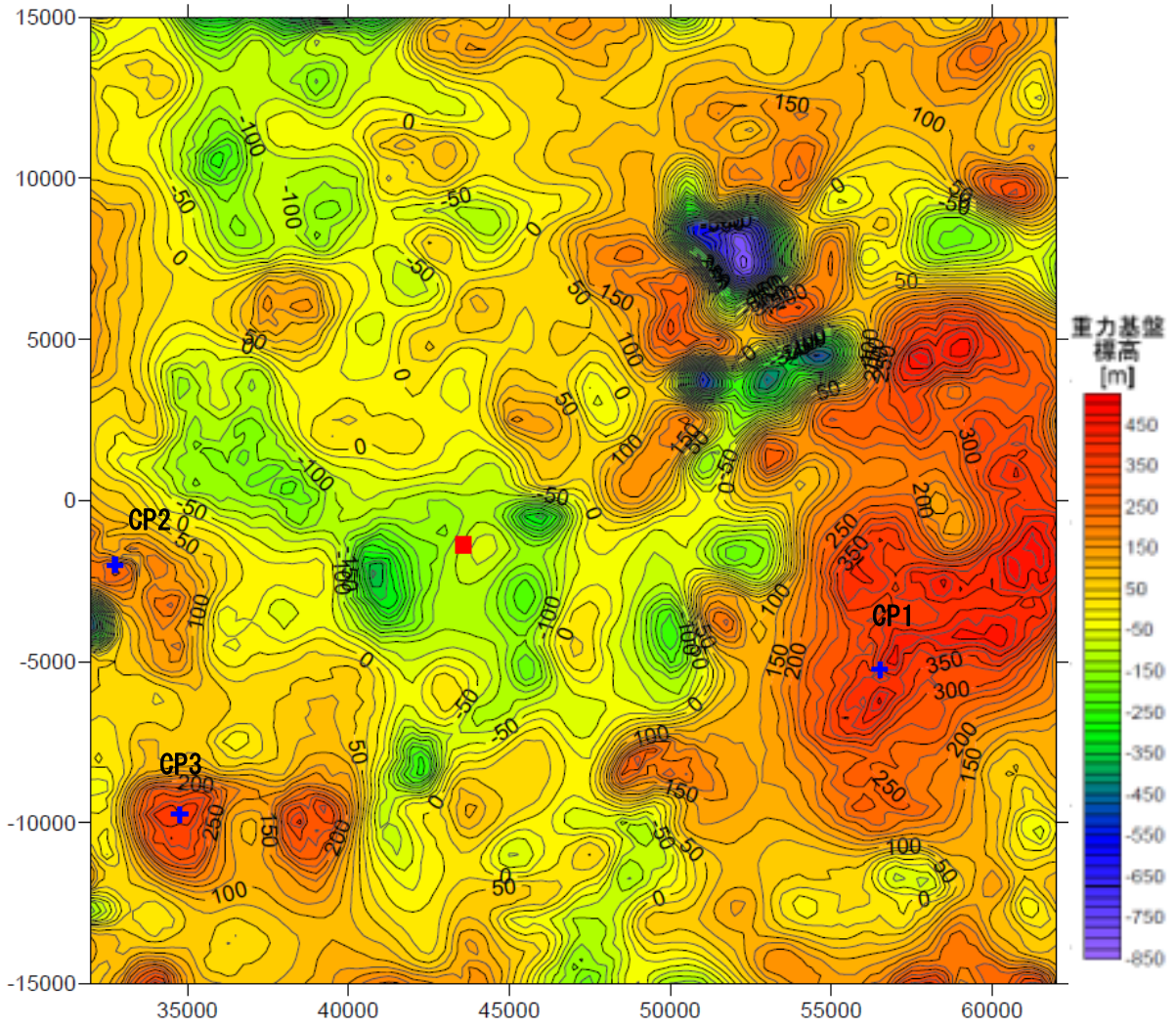


図 2.11 シグナル成分とコントロールポイント

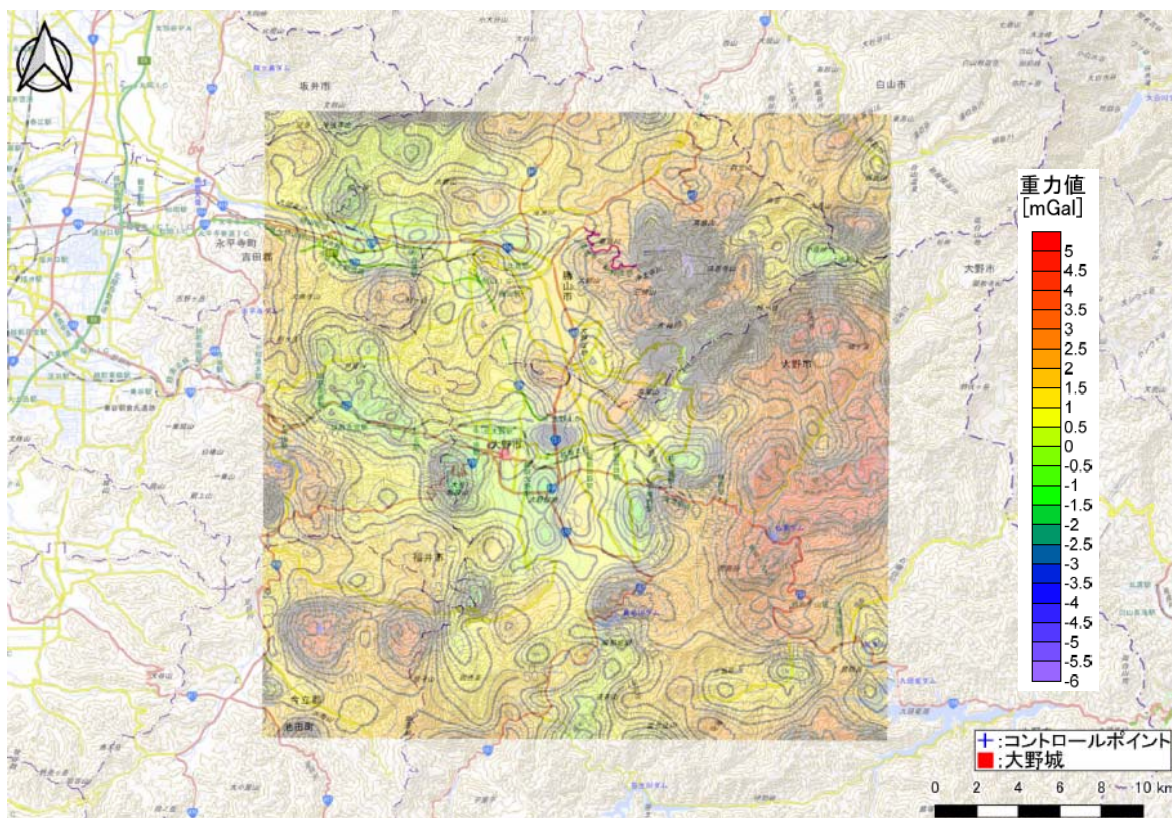
表 2.1 コントロールポイントの座標と標高

名前	平面直交座標第VI系		標高 (m)
	X (m) [北向き正]	Y (m) [東向き正]	
CP1	-5250	56500	390.586
CP2	-2000	32750	241.364
CP3	-9750	34750	350.644



+: コントロールポイント  
 ■: 大野城

図 2.12 重力基盤標高分布



2.13 国土地理院「地理院地図」と重力基盤標高分布

## 2.5 まとめ

本章では、大野盆地の3次元地下構造解析で用いた重力探査の説明と、それによって得られた結果について述べた。本解析で用いた仮定密度は  $2.67\text{g/cm}^3$  を採用し、それを基盤岩付近の情報を含むシグナル成分と、基盤岩よりも深部の情報を含むトレンド成分に分離した。したがって、シグナル成分のみを用いて大野盆地の基盤岩の標高を推定した。また大野盆地では、過去に一度も基盤岩まで到達したボーリング調査が行われていないことから、推定した重力異常値と基盤岩の標高との関係性を求める必要がある。それは、解析により作成された重力異常分布図において、高重力異常域では基盤岩が露出していると考え、その地点での基盤岩の標高と地表面の標高が等しいとみなした。なぜなら、地表面の標高は既知であるため、こうすることでそれらの地点における基盤岩の標高が求まるからだ。よってそれらの地点での基盤岩の標高と重力異常値の関係性を基準とし、解析範囲におけるすべての地点の基盤岩の標高を推定した。その結果として、大野盆地を含む解析範囲における重力基盤標高分布図が作成された。



## 第3章 大野盆地の地下水賦存量

### 3.1 はじめに

第2章により推定された基盤標高を用いて、大野盆地の帯水層を3次元でモデル化し、その体積を推定した後に地下水賦存量を推定する。まずは大野盆地の基盤面と地表面をモデル化し、これらを用いて帯水層をモデル化する。ここで、基盤面、地表面ならびに帯水層モデルの作成は、(株)応用地質の3次元モデリング作成ソフトウェア GEO-CRE (ジオクリ)を用いた<sup>14)</sup>。GEO-CREとは、地質データやボーリングデータ、物理探査データ、地形データなどを可視化し、リアルタイムで現実的感覚のある3次元地質モデリングを可能とするソフトウェアである。

### 3.2 大野盆地地下の3次元モデル

#### 3.2.1 帯水層モデルの作成範囲

3次元地下構造解析の対象範囲は、大野盆地を中心とした30km×30kmの範囲で、日本の平面直交座標第VI系においては $-15000\text{m} \leq x \leq 15000\text{m}$ 、 $32000\text{m} \leq y \leq 62000\text{m}$ である。しかし、本研究では大野盆地内の帯水層をモデル化することが目的であるため、帯水層モデルの作成範囲としては、 $-7500\text{m} \leq x \leq 4000\text{m}$ 、 $40000\text{m} \leq y \leq 54000\text{m}$ とした。図3.1は帯水層モデルの作成範囲を示している。

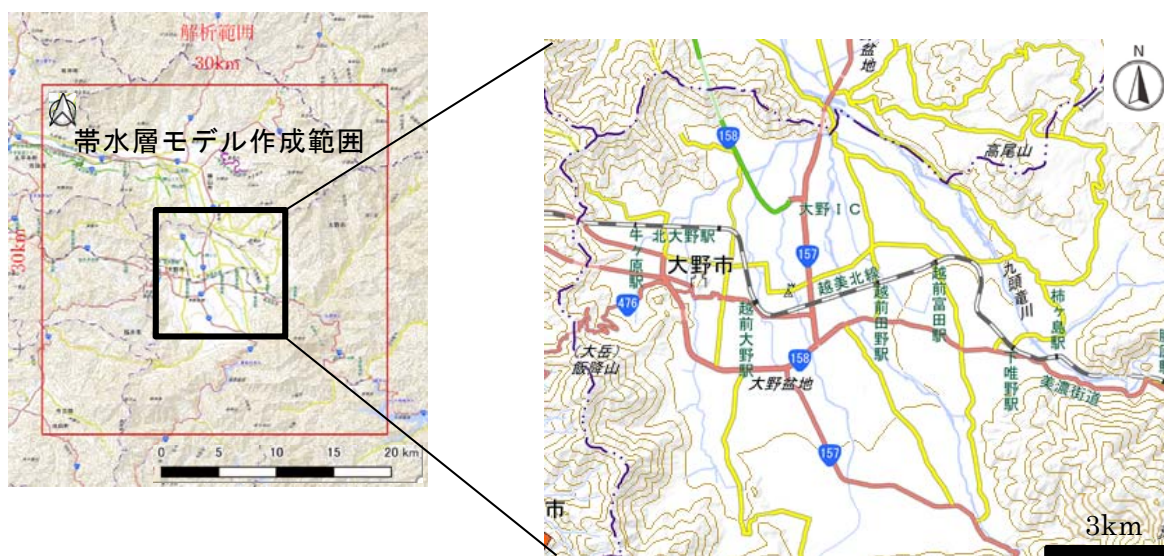


図 3.1 帯水層モデル作成範囲

### 3.2.2 データの補正

まず基盤面の作成は、第2章で求めた重力基盤標高データ(以下重力基盤標高)と重力標高データ(以下重力標高)を用いて GEO-CRE 上に表示させるが、より精度の高いモデルを作成するために、重力基盤標高の補正を行う。また重力基盤標高と重力標高とは、それぞれ前述の本解析において推定された基盤標高値と地表面の標高値を指す。

補正方法は以下のとおりである。本解析では、重力基盤標高と重力標高が等しい地点が複数カ所検出された。そのため、両者の値が等しい任意の地点における重力基盤標高を  $h_i$ (m)、重力標高を  $H_i$ (m)とし、この任意の地点では、本解析において基盤岩が露出していると考えることができる。したがってこの地点においては、重力基盤標高は国土地理院の地理院地図に掲載されている標高  $H_i'$ (m)(以下実際の標高)と比較可能なため、 $h_i$ と  $H_i'$ との差  $\Delta H_i$ (m)を算出する。 $\Delta H_i$ が小さければ  $h_i$ の信頼性は高いと考えられるが、 $\Delta H_i$ が大きければ  $h_i$ の信頼性は低いと考えられる。また、重力基盤標高と重力標高が等しい地点は解析範囲内の測定点の全1177地点中59地点であり、これら59地点における  $\Delta H_i$ を求め、その誤差を解析範囲のすべての重力基盤標高  $h_k$ (m)に適用した。

$h_i$ に対する  $\Delta H_i$ の割合を  $r_i$ とし、59地点すべての  $r_i$ の平均値を  $\bar{r}$ とする。この  $\bar{r}$ を、帯水層モデルの作成範囲の全1177地点の  $h_k$ に作用させ、 $h_k$ を補正する。また、全1177地点における、補正後の重力基盤標高を実際の重力基盤標高  $h_k'$ (m)とする。式(3.1)、式(3.2)、式(3.3)、式(3.4)は、上記の内容を式にまとめたものである。

$$H'_i - h_i = \Delta H_i \quad (3.1)$$

$$r_i = \Delta H_i / h_i \quad (3.2)$$

$$\bar{r} = \sum_{i=1}^{59} r_i / 59 \quad (3.3)$$

$$h'_k = h_k + h_k \times \bar{r} \quad (3.4)$$

$H_i'$ (m) : 実際の標高、 $h_i$ (m) : 重力基盤標高と重力標高が等しい地点における重力標高

$\Delta H_i$ (m) : 重力基盤標高と実際の標高の誤差( $H_i'$ と  $h_i$ の差)

$r_i$  :  $h_i$ に対する  $\Delta H_i$ の割合、 $\bar{r}$  : 59地点における  $r_i$ の平均値

$h_k$ (m) : 解析範囲内のすべての重力基盤標高、 $h_k'$ (m) : 実際の重力基盤標高

上式より、 $\bar{r} > 0$  となると、平均的に実際の標高が重力標高よりも高いため、重力基盤標高を高くする必要があり、 $\bar{r} < 0$  となると、平均的に実際の標高が重力標高よりも低い

ため、重力基盤標高を低くする必要がある。

式(3.1)、式(3.2)、式(3.3)より、 $\bar{r}$ の値は $\bar{r} = -0.0403$ と算出された。これは、実際の重力基盤標高は重力基盤標高よりも4.03%低いことを意味する。よって、この値を作成範囲である $-7500\text{m} \leq x \leq 4000\text{m}$ 、 $40000\text{m} \leq y \leq 54000\text{m}$ でのすべての重力基盤標高 $h_k$ に式(3.3)の通り作用させ、帯水層モデル作成で使用する実際の重力基盤標高 $h'_k$ を求めた。

### 3.2.3 帯水層厚の算出

3.2.2で算出した実際の重力基盤標高 $h'_k$ と、同じ位置における帯水層のモデル作成範囲の実際の標高 $H'_k$  (m)を用いて、鉛直方向の帯水層の層厚(地表面から基盤面までの深さ) $D_k$ (m)を求める。式(3.5)は、 $D_k$ を求める計算式を示す。

$$D_k = H'_k - h'_k \quad (3.5)$$

$D_k$ (m)：帯水層厚、 $H'_k$  (m)：帯水層のモデル作成範囲の実際の標高

$h'_k$ (m)：実際の重力基盤標高

以上より、大野盆地の基盤面、地表面ならびに帯水層の3次元モデル化が可能となった。

### 3.2.4 帯水層のモデル化

基盤面と地表面の作成は、作成範囲における各位置の実際の基盤標高と実際の標高を点で表示させ、クリギング手法によりそれらを結び基盤面・地表面とした。基盤面とは、基盤岩と堆積層の境界面を指す。ここで、**図 3.2**は基盤面を表し、**図 3.3**は地表面を表す。ここで、便宜上鉛直方向の起伏を5倍とした。

**図 3.2**から分かるように、大野盆地の基盤面は凹凸のある形状を成しており、**図 3.3**の地表面では、盆地構造を成しているのが分かり、市街地の起伏はほぼ平坦であることが分かる。また帯水層のモデル化については、地表面から基盤面までを帯水層として作成した。大野盆地では、基盤面に帯水層である砂礫が堆積していると考えられる。**図 3.4**は大野盆地を南側から見た図を示し、**図 3.5**は大野盆地を北側から見た図を示す。以上より、大野盆地の帯水層のモデル化が完了した。

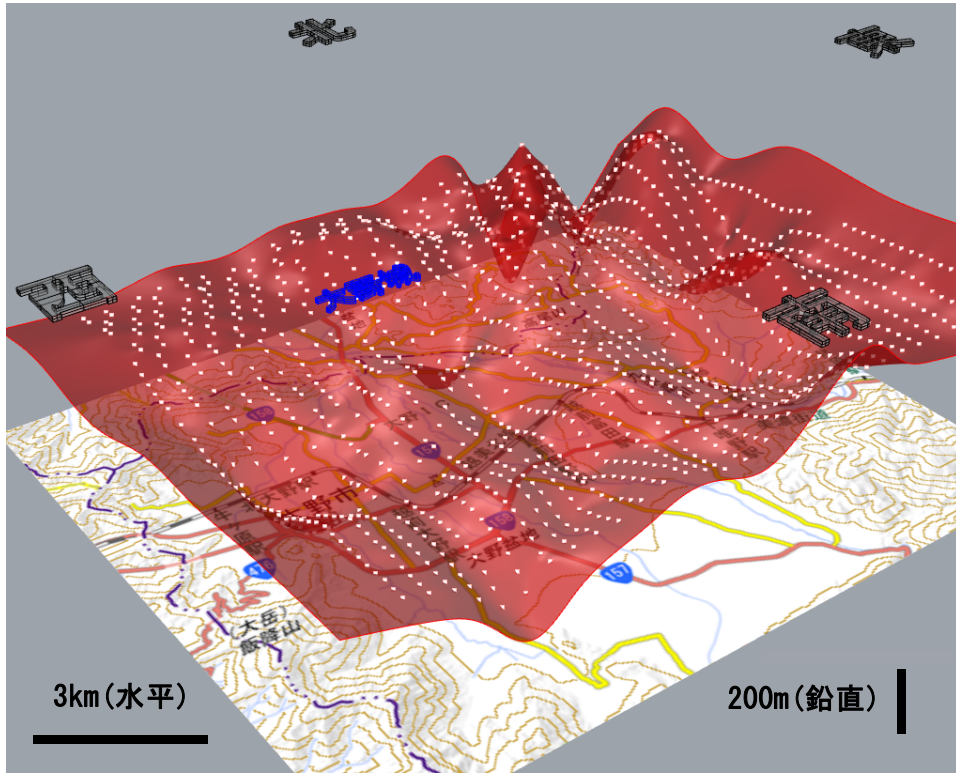


图 3.2 基盤面

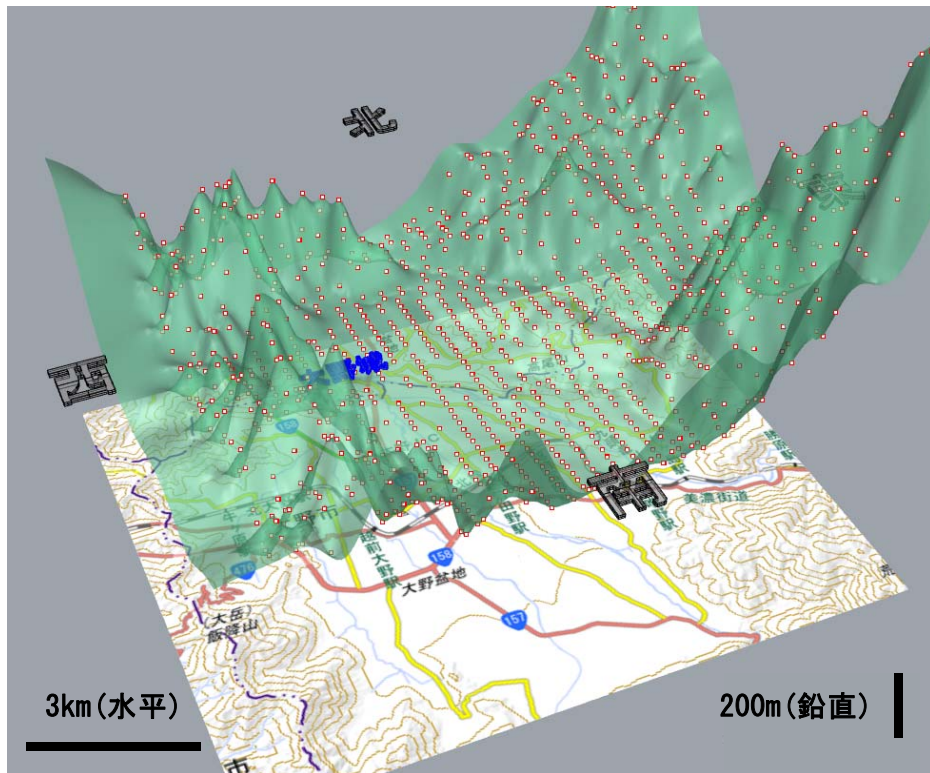


图 3.3 地表面

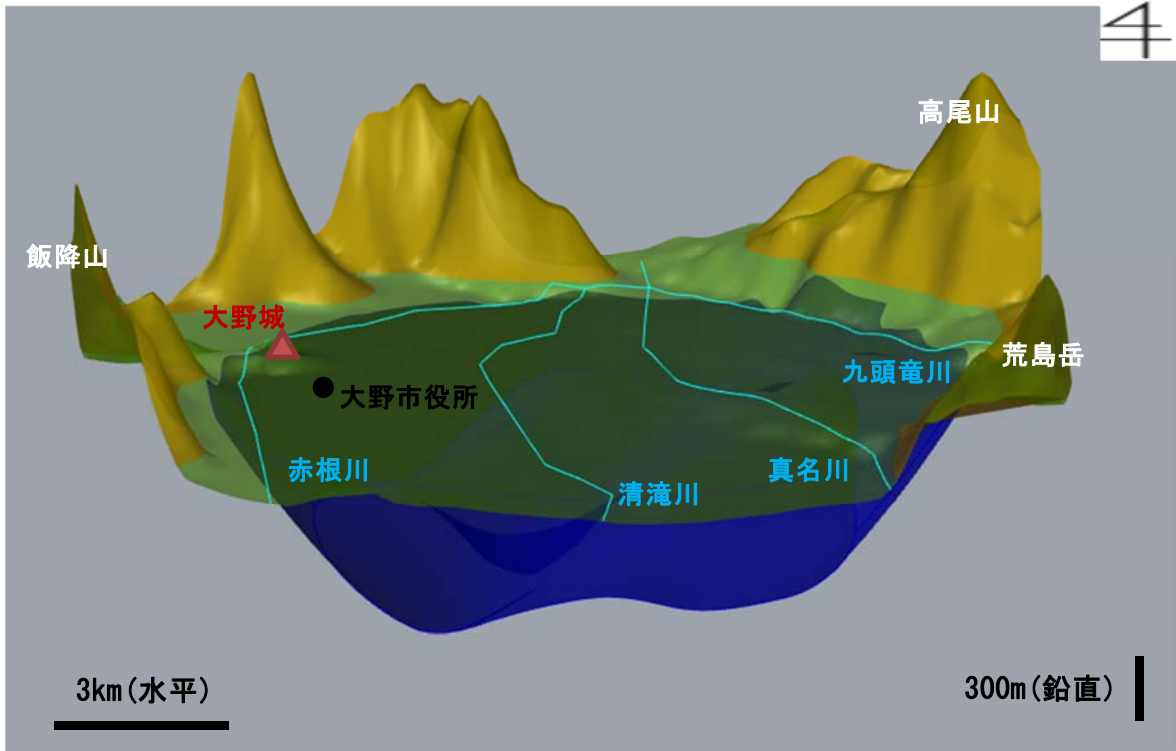


図 3.4 大野盆地南側視点の 3 次元立体図

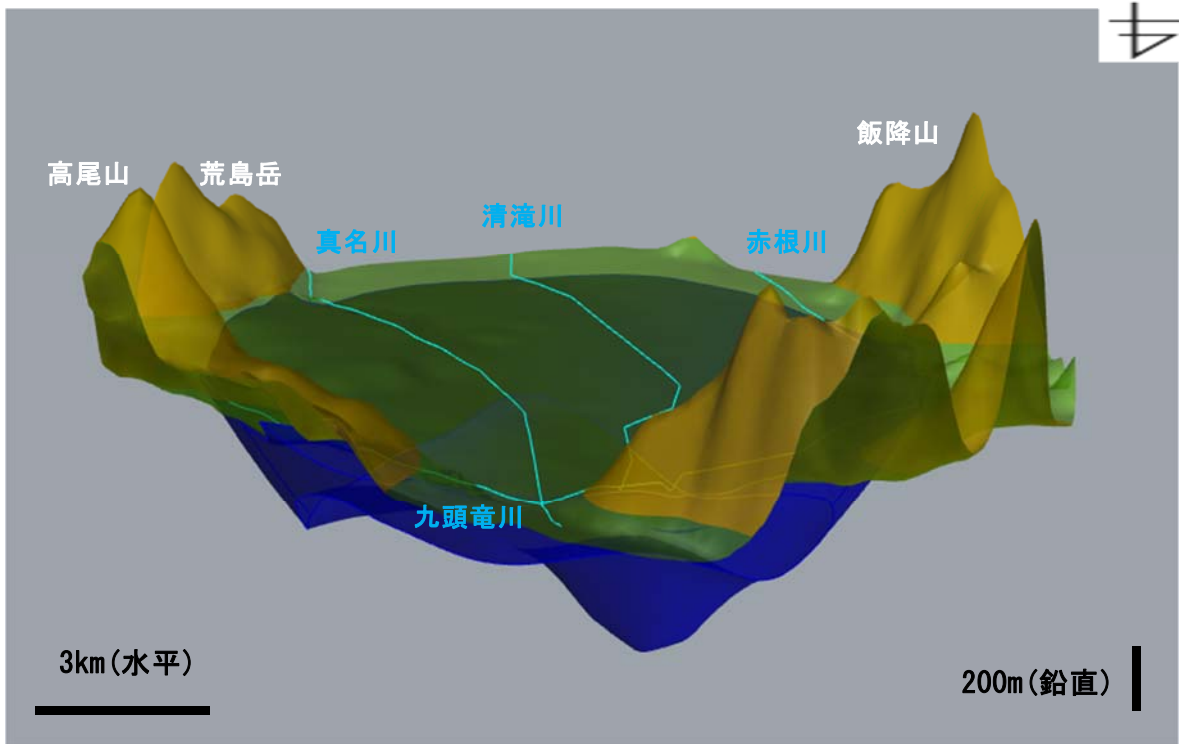


図 3.5 大野盆地北側視点の 3 次元立体図

### 3.3 地下水賦存量の推定

大野盆地の地下水賦存量を推定するにあたり、本研究においては、地下水面を G.L.±0 として扱い、それ以下の帯水層は基盤面まですべて飽和していると仮定する。したがって、地下水賦存量の推定は、帯水層の体積と未固結層の間隙率の積によって算出することができる。式(3.6)はその計算式を示し、帯水層の体積を  $V(\text{m}^3)$ 、帯水層の間隙の体積を  $V_V(\text{m}^3)$ 、間隙率を  $n$  として表している。

$$V_V = V \times n \quad (3.6)$$

$V_V(\text{m}^3)$  : 帯水層の間隙の体積、 $V(\text{m}^3)$  : 帯水層の体積、 $n$  : 間隙率

帯水層の体積は、帯水層モデルの体積を算出することにより導かれる。その方法は、帯水層モデルを無数の断面に分割し、微小断面を積分法により足し合わせた。図 3.6 はその概念図を示す。この方法を用いた結果、 $V$  は  $1.22 \times 10^{10} \text{m}^3$  と算出された。

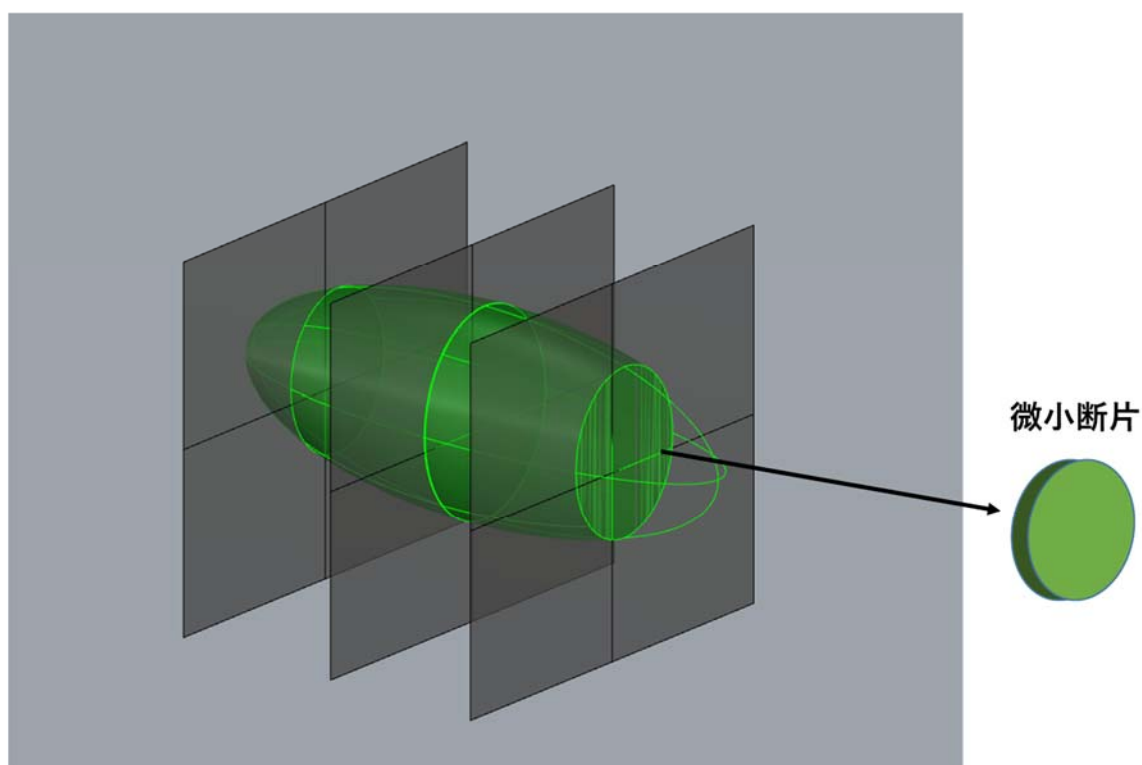


図 3.6 帯水層の体積の推定方法

未固結層の間隙率は地質の種類に依存するため、大野盆地の地質構成比を把握する必要がある。そこで、大野市地下水総合調査業務報告書に掲載されている過去に実施されたボーリングデータを利用し、帯水層を構成する地質をまとめた。表 3.1 は大野盆地の地質構成比を示す。表 3.1 より、主な構成要素が砂礫であることが確認され、全体の約 76% を占めているため、本研究においての間隙率は砂礫の一般的な数値である  $n=0.3$  を帯水層の間隙率として使用した<sup>15)</sup>。

以上より、それぞれの値を式(3.6)に代入し計算すると、大野盆地の地下水賦存量は  $3.66 \times 10^9 \text{m}^3$  と算出された。

表 3.1 大野盆地の地質構成比

層種	砂礫層	粘土層	砂利層・その他
層厚(m)	3889.2	664.3	538.7
割合(%)	76.4	10.6	13.0

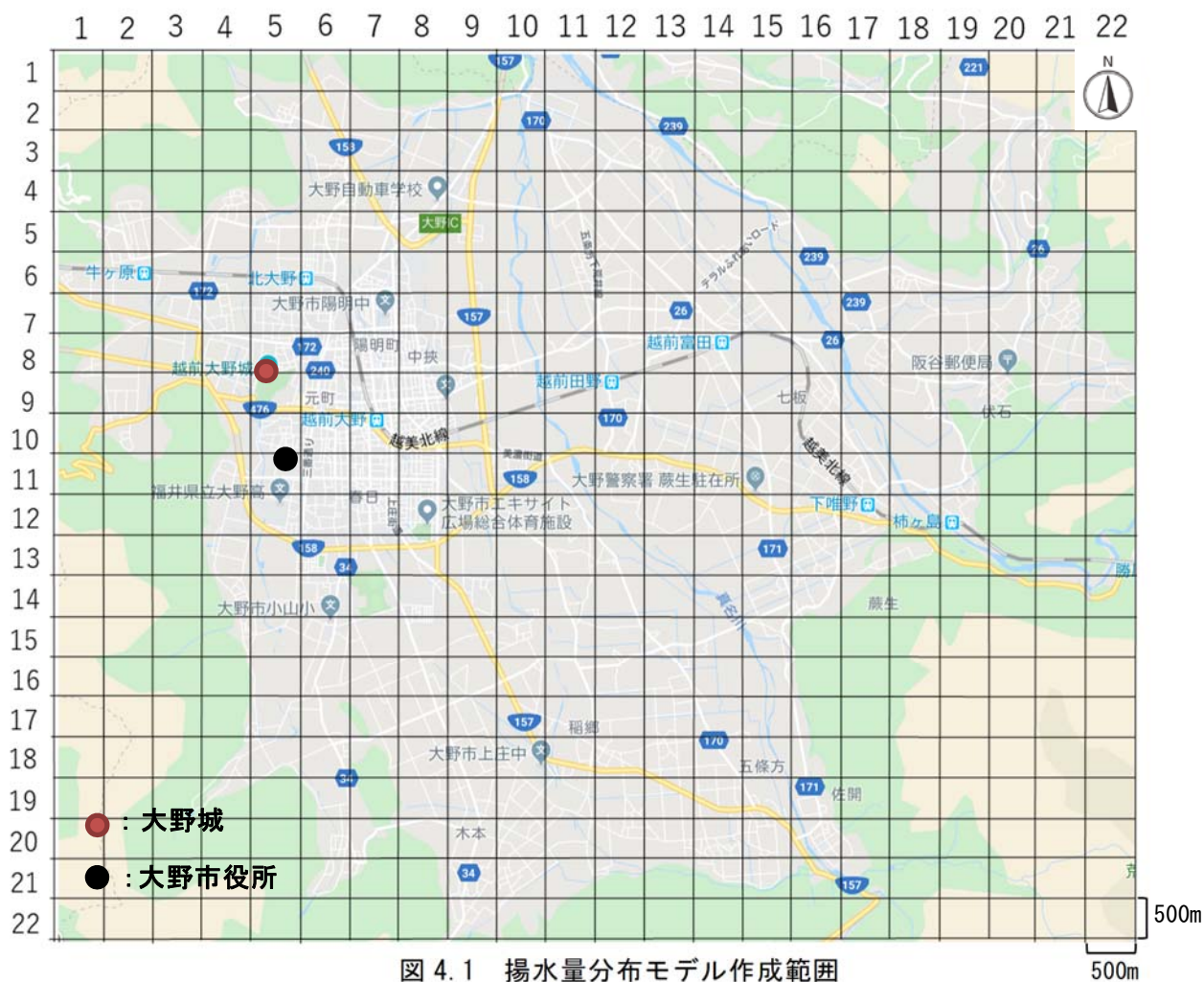
### 3.4 まとめ

重力探査による大野盆地の 3 次元地下構造解析を行った。それにより大野盆地の地下構造が把握され、基盤面の標高やその形状が推定された。また基盤標高と標高を用いて大野盆地の基盤面ならびに地表面を 3 次元でモデル化した後、それらを用いて帯水層を 3 次元でモデル化した。さらに、積分法を用いてモデル化した帯水層の体積を求め、地下水賦存量を推定した。その結果、大野盆地の地下水賦存量は  $3.66 \times 10^9 \text{m}^3$  と推定された。

## 第4章 大野盆地の揚水量分布モデル

### 4.1 はじめに

大野盆地における地下水収支量を定量的に把握するために、まずは大野盆地の地下水流出量の一部である地下水揚水量を推定する。揚水された地下水は生活用水や工業用水として利用されており、本研究では年間の揚水量ならびにその場所を推定し、それをメッシュ地図上に反映する。これを揚水量分布モデルとする。生活用水としての揚水量は人口に1人1日当たりの使用水量を乗じることで推定する。工業用水・公共施設用としての揚水量は、各事業所が揚水量を市へ報告し集計されたデータを用いて推定を行う。そして推定された揚水量をメッシュ地図上に反映し、揚水量分布モデルを作成する。図4.1は揚水量分布モデルの作成範囲を示す。図に示す通り作成範囲は大野盆地を含む11km×11kmの範囲で、500m×500mのメッシュに分けそれぞれのメッシュ内での年間揚水量を色分けして表す。





## 4.2 工業用・公共施設用揚水量の推定

工業用・公共施設用の揚水量とは事業所による揚水量を指し、市内に多数存在する学校やショッピングセンター、病院、織物関係等の事業所・工場などが含まれる。大野市では、地下水保全条例に基づき吐出口の断面積が 19.6cm<sup>2</sup>(直径 50mm)以上の揚水施設を設置している井戸については揚水量を報告する義務がある。そのため、市の工業用・公共施設用の揚水量の推定は、各事業所から報告を受けた値を集計して使用する。本研究では、平成 30 年度における年間揚水量について推定した。

平成 30 年度の報告書に記載されていた事業所数は 66 であったが、その中には故障中や休止中、廃止されたものが多く、実際に揚水量が記載されていたのは 38 の事業所で 46 のメーターであった。表 4.1 は月別の揚水量を示す。月別では 5 月が最も多く、11 月が最も少ない値であった。その結果、年間揚水量は 4.25×10<sup>6</sup>(m<sup>3</sup>/year)と推定された。

表 4.1 平成 30 年度における月別の工業用・公共施設用揚水量 (m<sup>3</sup>)

業種	織物関係	官公署		民間団体	その他	合計
		市立施設	その他			
1 月	27,531	42,223	2,556	15,839	294,597	382,746
2 月	26,829	40,308	1,898	16,600	290,030	375,665
3 月	30,028	37,701	2,283	7,482	283,538	361,032
4 月	0	35,397	2,588	5,519	279,947	323,451
5 月	0	45,596	3,002	5,400	351,267	405,265
6 月	0	44,336	2,711	5,881	279,974	332,902
7 月	0	46,289	2,583	6,822	346,113	401,807
8 月	0	47,769	3,199	8,634	285,969	345,571
9 月	0	40,369	2,603	6,836	262,409	312,217
10 月	0	45,489	2,988	5,973	330,864	385,314
11 月	0	43,645	2,608	6,105	256,508	308,866
12 月	0	43,113	2,393	7,200	260,581	313,287
合計	84,388	512,235	31,412	98,290	3,521,797	4,248,122

## 4.3 水道用揚水量の推定

### 4.3.1 大野市の水道

ここでの水道用とは、市民の生活用水のことである。大野市では多くの家庭で井戸を持ち、ホームポンプを用いて地下水を生活用水として利用している。そのため市の上水道普及率は平成31年3月31日時点で20.05%、簡易水道を含めた普及率でも38.54%と全国的に見ても普及率は低く、また水道の水源も大部分は地下水を利用している。そのため生活用水は地下水に大きく依存している。しかし、ポンプにメーターを設置している家庭用井戸はほとんどなく、実際に揚水量を計測したデータがないのが現状である。

大野市民の生活用水の水源は主に、各家庭で持つ浅井戸、市営水道、地区営水道の3つである。それぞれ揚水場所が異なるため、この3つを区別して揚水量の推定を行う。実際には浅井戸と水道を併用している家庭が存在しているが、それぞれの水源における使用割合は家庭によってさまざまであり、調整するのは困難を極めるため、本研究では併用はないと仮定した。基本的には人口に1人1日当たりの使用水量を乗じることで推定する。また大野市の総人口P(人)は、住民基本台帳によると平成31年1月1日時点で33,516人である。人口分布図については、e-Stat 政府統計の総合窓口、地図で見る統計(jSTAT MAP)を用いた<sup>16)</sup>。図4.2は、人口分布モデルを示す。

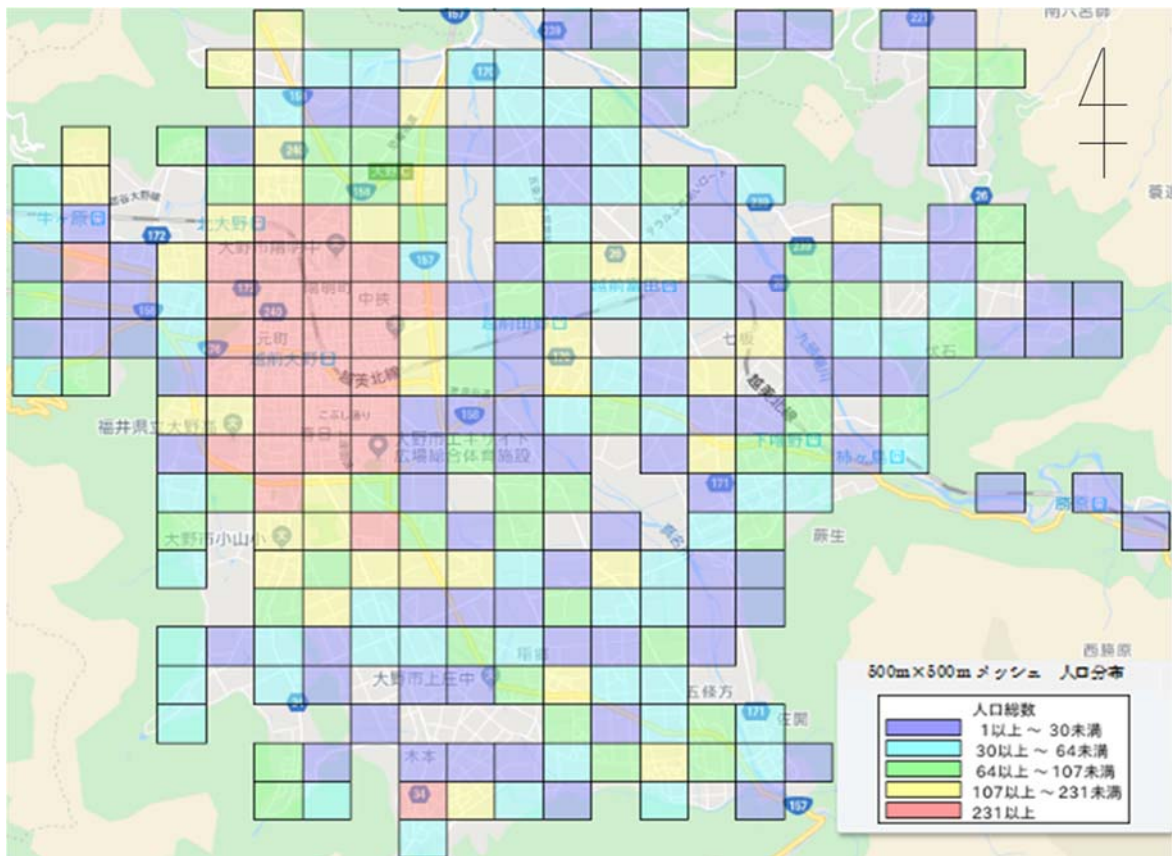


図 4.2 人口分布図

### 4.3.2 水道の利用状況

まず浅井戸以外の市営水道と地区営水道の2種類について説明する。市営水道は上水道の他に11地区の簡易水道施設、地区営水道は25地区の簡易水道が存在している。地区営とはその地区の住民によって管理されている水道である。簡易水道とは計画給水人口が101人以上5000人以下の水道のことである。また他にも計画給水人口が100人以下である飲料水供給施設も数カ所存在している。表4.2は市営水道の給水人口、表4.3は市営水道の揚水量、表4.4は大野市の水道の詳細を示している。表4.2と表4.3は平成26年から平成30年のデータであり、表4.4の地区営水道のデータは平成30年のデータである。地区営水道は市営水道と違い、給水区域内人口と給水人口が同じことが特徴として挙げられる。伏流水とは河川敷や山麓の下層にある砂礫層を流れる極めて浅い地下水のことである。したがって本研究においては伏流水を地下水とは区別して考える。

表 4.2 市営水道の給水人口(人)

年度	上水道	簡易水道(市営簡易水道施設 11地区)										
		西富田	富田	荒島	木本	菖蒲池	北富田	阪谷第一	南富田	下庄北部	和泉	阪谷第二
H26年度	4,798	697	415	661	603	182	554	263	326	287	457	370
H27年度	4,694	675	403	656	583	173	544	258	318	284	465	350
H28年度	4,584	670	396	638	579	173	540	250	315	276	439	339
H29年度	4,572	662	386	617	580	174	520	243	313	265	436	321
H30年度	4,586	649	375	630	572	186	521	241	334	274	437	329

表 4.3 市営水道の揚水量(m<sup>3</sup>)

年度	上水道	簡易水道(市営簡易水道施設 11地区)										
		西富田	富田	荒島	木本	菖蒲池	北富田	阪谷第一	南富田	下庄北部	和泉	阪谷第二
H26年度	494,046	74,694	104,538			6,202	17,184	17,413	13,059	12,774	56,072	32,843
H27年度	457,034	71,659	79,992			5,792	18,296	18,593	13,565	13,794	53,318	35,091
H28年度	480,142	75,560	86,535			5,500	22,004	18,979	13,868	13,768	60,900	36,507
H29年度	496,069	42,466	93,971			5,957	36,395	21,145	14,724	13,535	69,773	38,370
H30年度	533,978	85,630	94,943			5,748	28,477	23,156	15,433	12,961	65,245	35,685

※荒島・木本については水源が伏流水のため計測不能

表 4.4 水道施設状況

施設区分	経営区分	施設名	給水区域内人口 (人)	給水人口 (人)	給水戸数	水源種別
上水道	市営	大野市上水道	22,873	4586	1576	地下水
簡易水道	市営	西富田	744	649	193	地下水
		富田	414	375	127	地下水
		荒島	660	630	212	伏流水
		木本	624	572	187	伏流水
		菖蒲池	287	186	62	地下水
		北富田	550	521	151	地下水
		阪谷第一	255	241	87	地下水
		南富田	375	334	102	地下水
		下庄北部	277	274	73	地下水
		和泉	463	437	264	地下水・伏流水
		阪谷第二	375	329	115	地下水
簡易水道	地区営	五条方	423	423	114	伏流水
		上据	133	133	39	地下水
		西山・稲郷	495	495	176	伏流水
		平沢・今井	293	293	82	地下水・伏流水
		下打波	2	2	2	伏流水
		西勝原	36	36	13	伏流水
		友兼	136	136	36	地下水
		森政領家	130	130	37	地下水
		森政地頭	43	43	14	地下水
		医王寺	85	85	25	地下水
		猪島	64	64	16	地下水
		吉	94	94	32	地下水
		北御門	54	54	20	地下水
榎	90	90	30	地下水		

	下黒谷	55	55	18	伏流水
	上黒谷	97	97	25	伏流水
	上丁	73	73	22	伏流水
	千蔵	46	46	12	地下水
	深井	71	71	20	伏流水
	柿ヶ嶋	135	135	45	地下水
	中据	200	200	54	地下水
	御給	97	97	26	地下水
	阿難祖領家	101	101	24	伏流水
	阿難祖地頭方	133	133	35	伏流水
	富田（下唯 野・七板）	334	334	117	伏流水

#### 4.3.3 単位使用水量の設定

大野市民 1 人が 1 日あたりに使用する生活用水のことを本研究では単位使用水量とする。本研究では大野市の人口に単位使用水量を乗じることで水道用揚水量を求める。浅井戸を利用している家庭での単位使用水量は、料金の付加される水道を利用している家庭の単位使用水量よりも多いと考えられる。「平成 9 年度地域水循環改善事業推進調査報告書」によれば、浅井戸における単位使用水量の値は、水道における値より 30%ほど多い<sup>17)</sup>。そのため各々異なるデータを用いて、設定を行う。地区営水道は料金の付加がないため、浅井戸における単位使用水量と同じとする

まず浅井戸・地区営水道における単位使用水量  $W_1(\ell/\text{day})$  であるが、こちらは過去に行われた調査の「平成 9 年度地域水循環改善事業推進調査報告書」の結果に基づき、設定を行う。この調査は、平成 5 年から約 2 年間、30 世帯 139 人の毎月の平均単位使用水量を実際に計測するといったものである。調査年月が 20 年以上前であるため、現在の研究に利用するにあたってはデータの精度は低いと考えたが、これの他に利用できる資料等がなく、実際に各世帯を訪問し揚水量を把握することも不可能であるため、これを使用する。表 4.5 は「平成 9 年度地域水循環改善事業推進調査報告書」の調査結果を示している。これによると浅井戸における平均の単位使用水量  $W_1$  は  $340(\ell/\text{day})$  であり、夏季は特に使用水量が多

いことが分かる。この結果から月平均気温  $t(^{\circ}\text{C})$ と単位使用水量  $W_1(\ell/\text{day})$ の関係をグラフ上に表すと、やや良い相関性( $R=0.7$ )が得られることから、この関係式と月平均気温  $t(^{\circ}\text{C})$ から単位使用水量  $W_1(\ell/\text{day})$ を設定する。図 4.3 は単位使用水量  $W_1(\ell/\text{day})$ と月平均気温  $t(^{\circ}\text{C})$ の関係を示し、式(4.1)はこれらに成り立つ関係式を示す。

$$W_1 = -0.0063t^3 + 0.6329t^2 - 9.2791t + 336.06 \quad (4.1)$$

$W_1(\ell/\text{day})$  : 浅井戸・地区営水道における単位使用水量、 $t(^{\circ}\text{C})$  : 月平均気温

表 4.5 調査結果

年月	単位使用水量 ( $\ell/\text{day}$ )	年月	単位使用水量 ( $\ell/\text{day}$ )
H05.04	-	H06.04	373
H05.05	-	H06.05	300
H05.06	332	H06.06	366
H05.07	405	H06.07	405
H05.08	414	H06.08	438
H05.09	357	H06.09	316
H05.10	360	H06.10	301
H05.11	326	H06.11	253
H05.12	342	H06.12	312
H06.01	341	H07.01	375
H06.02	354	H07.02	277
H06.03	237	H07.03	291

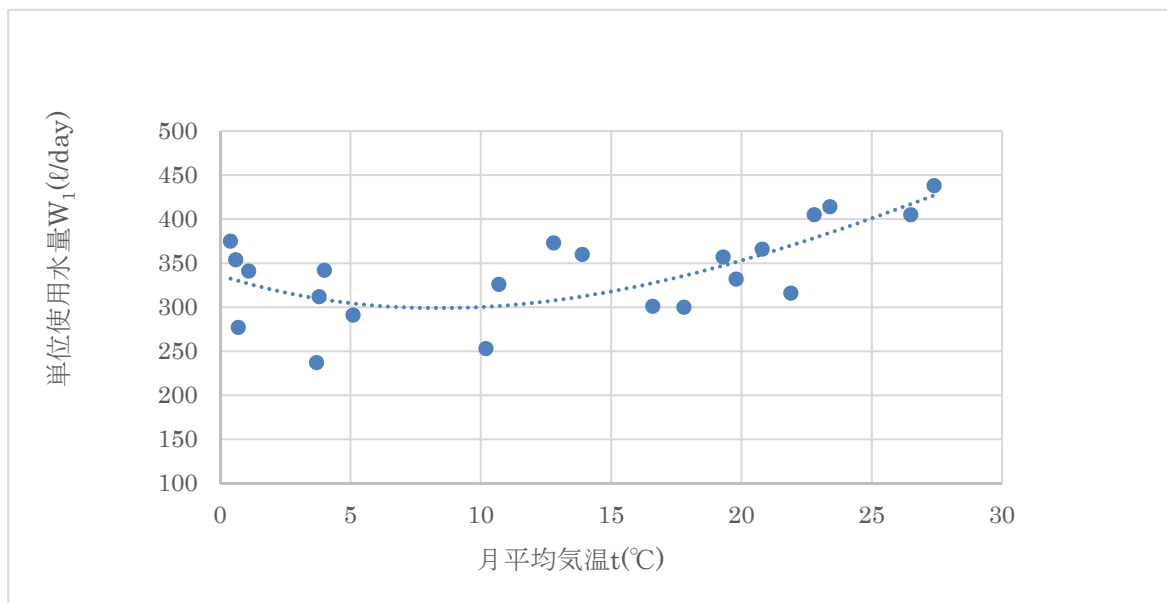


図 4.3 単位使用水量  $W_1$  と月平均気温  $t$  の関係

式(4.1)に、月平均気温を代入すると、平成 30 における浅井戸・地区営水道の単位使用水量は、年平均で  $W_1=348.0(\text{l/day})$  となった。表 4.6 は、月ごとの気温、単位使用水量またその平均値を示す。

表 4.6 平成 30 年の浅井戸・地区営水道における単位使用水量  $W_1$

H30	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	平均
$t(^\circ\text{C})$	-0.2	-0.5	6.7	13.4	17.6	21.8	27.5	27.1	21.6	15.8	10.4	4.9	13.8
$W_1(\text{l/day})$	341.9	344.8	304.1	313.3	337.1	371.4	429.7	425.2	369.6	325.5	304.3	308.8	348.0

次に市営水道利用における単位使用水量  $W_2(\text{l/day})$  であるが、これは公共下水道の加入件数と使用水量から設定を行う。市が管理しているデータには、2 か月ごとの値が記されていたため、直線補完によって月別のデータを算出した。図 4.4 は、平成 15 年から平成 23 年の使用水量と加入件数の推移を示す。1 年間を通してみると使用水量の増減に傾向がみえるため、この推移を基に平成 16 年から平成 30 年までの月別の単位使用水量の平均を算出した。表 4.7 は月別の公共下水道の加入件数と使用水量のデータの例を示す。

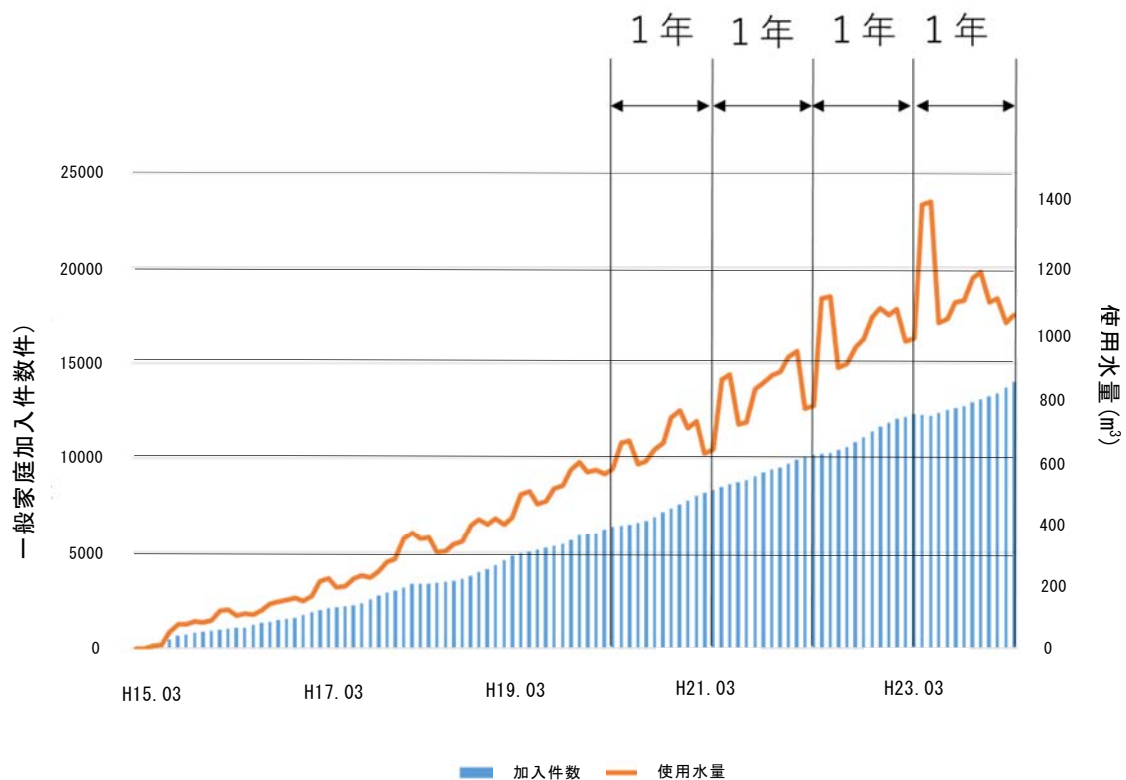


図 4.4 公共下水道の加入件数と使用水量

表 4.7 月別の公共下水道の加入件数 S と使用水量 U

		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
H15	S(件)	-	-	0	0	7	15	27	39	44	49	52	56
	U(m <sup>3</sup> )	-	-	0	0	140	160	855	1234	1263	1405	1351	1454
H16	S(件)	58	60	63	66	73	80	84	88	91	95	105	115
	U(m <sup>3</sup> )	1,959	2,027	1,717	1,799	1,783	1,953	2,317	2,428	2,537	2,648	2,497	2,734
H17-H27													
H28	S(件)	1,272	1,273	1,279	1,285	1,293	1,301	1,311	1,321	1,327	1,333	1,345	1,357
	U(m <sup>3</sup> )	31,303	31,340	26,625	26,750	27,658	27,830	29,918	30,147	28,647	28,776	26,962	27,203
H29	S(件)	1,364	1,371	1,377	1,382	1,392	1,401	1,408	1,415	1,425	1,435	1,447	1,458
	U(m <sup>3</sup> )	34,834	35,013	28,030	28,141	30,067	30,273	31,484	31,641	30,509	30,723	28,826	29,056
H30	S(件)	1,462	1,465	1,470	1,475	1,477	1,479	1,485	1,491	1,497	1,503	1,515	1,527
	U(m <sup>3</sup> )	42,610	42,713	34,120	34,236	31,113	31,156	32,658	32,789	31,654	31,781	28,796	29,024



単位使用水量の設定については、まずは下水道加入件数  $N$ (件)に、大野市の1世帯当たりの平均人員である3(人)を乗じることで、公共下水道の利用人口を算出する。そして、1日における下水道使用水量  $U$ (ℓ)を公共下水道の利用人口で除することで、市営水道の単位使用水量  $W_2$ (ℓ/day)が算出できると考えた。式(4.2)はこの計算式を示す。また表 4.8 はその結果を示す。

$$W_2=U/(N \times 3) \quad (4.2)$$

$W_2$ (ℓ/day)：市営水道の単位使用水量、 $U$ (ℓ)：1日あたりの下水道使用水量

$N$ (件)：下水道加入件数

表 4.8 市営水道における単位使用水量  $W_2$  (ℓ/day)

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	平均
H30	313.5	347.1	249.6	257.9	226.5	234.1	236.5	236.5	234.9	227.4	211.2	204.4	248.3
H16- H30の 平均	302.8	335.3	248.5	256.7	255.0	261.0	267.5	267.5	266.6	258.0	243.8	235.6	266.5

先にも述べた通り、「平成9年度地域水循環改善事業推進調査報告書」によれば、浅井戸における単位使用水量は、水道におけるその値より30%ほど多い。よって算出した値の確認を式(4.3)によって行う。浅井戸・地区営水道における単位使用水量  $W_1=348.0$ (ℓ/day)、市営水道における単位使用水量を平成16年から平成30年の平均  $W_2=266.5$ (ℓ/day)とする。

$$W_1/W_2=1.306 \quad (4.3)$$

$W_1$ (ℓ/day)：浅井戸・地区営水道における単位使用水量

$W_2$ (ℓ/day)：市営水道における単位使用水量

浅井戸・地区営水道における単位使用水量  $W_1$ は、市営水道における値  $W_2$ より30.6%大きいと算出され、確からしい値であるといえる。

#### 4.3.4 水道利用による揚水量の推定

地区営水道については、揚水量によるデータが皆無であるため、推計によって算出を試みる。地区営水道の給水人口  $P_1$ (人)と給水区域内人口  $P_2$ (人)が等しいこと、さらに実際に地区営水道給水区域の市民の方々を訪問した際に、ほとんどの方が水道を利用していると回答をいただいたことから、給水区域の世帯すべてが水道を利用していると仮定し、地区営水道の年間揚水量  $P_{a1}$ ( $m^3/year$ )を推定する。式(4.4)はその計算式を示す。

$$P_{a1} = W_1 \times P_1 \quad (4.4)$$

$P_{a1}$ ( $m^3/year$ ) : 地区営水道の年間揚水量

$W_1$ ( $l/day$ ) : 浅井戸・地区営水道における単位使用水量、 $P_1$ (人) : 地区営水道の給水人口

式(4.4)を用いると、地区営水道の年間揚水量  $P_{a1}$  は  $0.16 \times 10^6$ ( $m^3/year$ )と推定された。

市営水道利用については、市民は需要に応じてその時に必要な量を揚水しているわけではない。一度にある程度の量を揚水し、配水施設で貯水され各家庭に配水される。したがって水道施設の揚水量と市民の需要水量は本来異なる値になると考えられる。しかし本研究では水道施設の揚水量と市民の需要水量は等しいと考え、これを市営水道利用による揚水量と仮定する。したがって、表 4.3 に記載されている上水道と簡易水道の和が市営水道の年間揚水量  $P_{a2}$ ( $m^3/year$ )となり、その値は  $0.90 \times 10^6$ ( $m^3/year$ )と推定された。

#### 4.3.5 浅井戸利用による揚水量の推定

浅井戸の利用世帯は、どの水道の給水区域にも含まれない世帯の他に、市営水道の給水区域に含まれる世帯にも存在していると考えられる。なぜなら、前述の表 4.4 に示す通り、市営水道の給水人口  $P_1'$ (人)と給水区域内人口  $P_2'$ (人)の値が異なるためである。給水人口  $P_1'$ の全員が水道を利用していると仮定した場合、浅井戸を利用している人数が極端に少なくなる。そこで、市営水道の揚水量  $P_{a2}$ と単位使用水量  $W_2$ を用いて、市営水道の揚水量に相当する利用人口  $P_1''$ (人)を求め、給水区域内人口  $P_2'$ から  $P_1''$ を引いた値を給水区域内の浅井戸利用人口  $S_1$ (人)とする。式(4.5)、式(4.6)は上記の内容を計算式にまとめたものである。

$$P_1'' = P_{a2} / W_2 \quad (4.5)$$

$$S_1 = P_2' - P_1'' \quad (4.6)$$

$P_1'$ (人) : 市営水道の給水人口、 $P_{a2}$ ( $m^3/year$ ) : 市営水道の年間揚水量

$W_2$ ( $\ell/day$ ) : 市営水道における単位使用水量

$S_1$ (人) : 市営水道の給水区域内の浅井戸利用人口、 $P_2'$ (人) : 市営水道の給水区域内人口

また、どの水道の給水区域にも含まれない世帯での浅井戸利用人口  $S_2$ (人)は、大野市の総人口  $P$ (人)と全水道の給水区域内人口との差である。式(4.7)はその計算式を示す。

$$S_2 = P - (P_2 + P_2') \quad (4.7)$$

$S_2$ (人) : どの水道の給水区域にも含まれない世帯での浅井戸利用人口

$P$ (人) : 大野市の総人口、 $P_2$ (人) : 地区営水道の給水区域内人口

$P_2'$ (人) : 市営水道の給水区域内人口

そして、浅井戸における単位使用水量  $W_1$ と浅井戸利用人口である  $S_1$ と  $S_2$ の和の積を計算することで浅井戸における年間揚水量  $P_{a3}$ ( $m^3/year$ )が推定される。式(4.8)はその計算式を示す。

$$P_{a3} = W_1 \times (S_1 + S_2) \quad (4.8)$$

$P_{a3}$ ( $m^3/year$ ) : 浅井戸における年間揚水量

$W_1$ ( $\ell/day$ ) : 浅井戸・地区営水道における単位使用水量

$S_1$ (人) : 市営水道の給水区域内の浅井戸利用人口

$S_2$ (人) : どの水道の給水区域にも含まれない世帯での浅井戸利用人口

式(4.8)を用いると、浅井戸における年間揚水量  $P_{a3}$ は  $2.70 \times 10^6$ ( $m^3/year$ )と推定された。

以上より、年間の大野市の水道用揚水量  $P_a$ ( $m^3/year$ )は、 $P_{a1}$ 、 $P_{a2}$ 、 $P_{a3}$ の和で求めることができる。式(4.9)はその計算式を示す。

$$P_a = P_{a1} + P_{a2} + P_{a3} \quad (4.9)$$

$P_a(\text{m}^3/\text{year})$  : 大野市の年間揚水量、 $P_{a1}(\text{m}^3/\text{year})$  : 地区営水道の年間揚水量

$P_{a2}(\text{m}^3/\text{year})$  : 市営水道の年間揚水量、 $P_{a3}(\text{m}^3/\text{year})$  : 浅井戸における年間揚水量

式(4.9)を用いると、 $P_a$ は $3.76 \times 10^6(\text{m}^3/\text{year})$ と推定された。

#### 4.4 揚水量分布モデルの作成

前述の4.2より、工業用・公共施設用揚水量は年間 $4.25 \times 10^6(\text{m}^3/\text{year})$ と推定され、4.3より、水道用揚水量は年間として $3.76 \times 10^6(\text{m}^3/\text{year})$ と推定された。よって、これらの和が大野市における年間揚水量と考えられるため、その値は $8.01 \times 10^6(\text{m}^3/\text{year})$ と推定された。次に、この揚水量の分布について考える。揚水量分布モデルは、工業用・公共施設用揚水量の揚水量分布モデル、水道用揚水量の揚水量分布モデルをそれぞれ作成し、これらを合成したものである。まず工業用・公共施設用揚水量の揚水量分布モデルを作成する。揚水場所については、事業所が報告する資料に記載されているため、それを地図上にプロットした。さらに大野盆地を地図上で $500\text{m} \times 500\text{m}$ のメッシュ状に区分けし、揚水量と揚水場所の基づきメッシュに色をつけることで、揚水量分布モデルを作成した。図4.5は工業用・公共施設用揚水量分布モデルを示す。図4.5より、盆地北部の河川の合流地点周辺での大量揚水が確認される。ここでは、電気機器の工場が工業用・公共施設用揚水量の70%以上である $3.03 \times 10^6\text{m}^3$ もの地下水を揚水している。

次に水道用揚水量の揚水量分布モデルを作成する。前述の通り、揚水場所は市営水道や地区営水道の給水区域、またどの給水区域にも含まれていない区域と様々である。図4.6は、大野市の人口分布モデルに給水区域を重ねた図を示す。表4.4より、地区営水道の給水区域では給水区域内人口と給水人口が等しいため、地区ごとの揚水量を各対象のメッシュに反映させる。また、どの給水区域にも属していないメッシュにおける揚水量は、そのメッシュ人口が全員浅井戸を利用しているとみなすため、人口に浅井戸の単位使用水量を乗じることで推定できる。そこで、市営水道の給水区域に含まれるメッシュについては、浅井戸を利用する世帯と水道を利用する世帯が混在しているため、各メッシュの浅井戸利用と水道利用の人口をそれぞれ推定する。その方法については上水道を例に挙げて説明する。

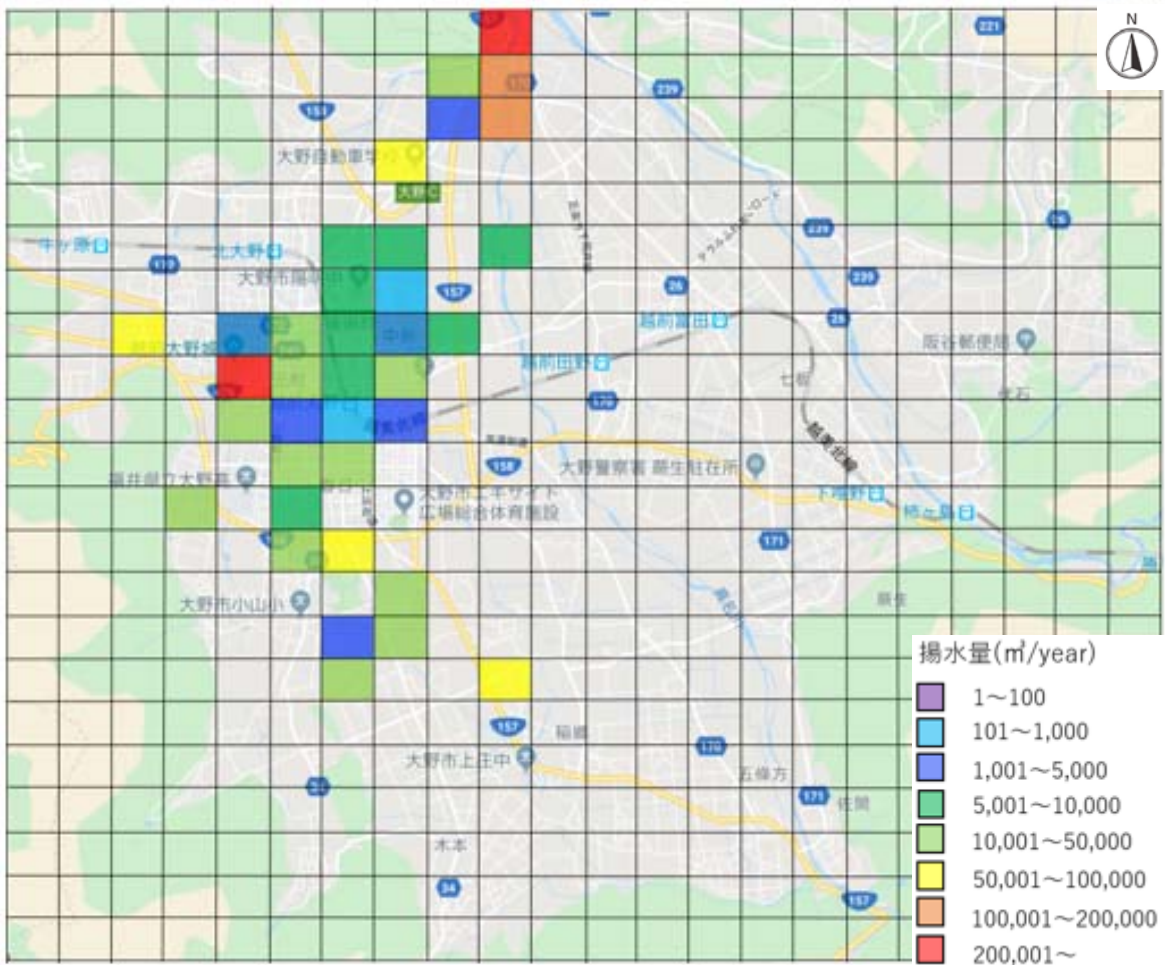


図 4.5 工業用・公共施設用揚水量分布モデル

まず、給水区域内の水道利用率を求める。図 4.7 は、人口分布モデルに上水道の給水区域を重ねた図を示す。表 4.4 より、上水道の給水区域内における人口は 22,873 人、給水人口は 4,586 人である。この給水人口を給水区域内人口で除することで、給水区域内における水道利用率  $p(\%)$  が求まる。その結果、上水道給水区域内における水道利用率  $p$  は 20.0% であった。そして、上水道給水区域内の各メッシュ人口  $\alpha(\text{人})$  に水道利用率  $p(\%)$  を乗じることで、そのメッシュにおける水道利用人口  $\alpha_1(\text{人})$ 、また浅井戸利用人口  $\alpha_2(\text{人})$  が算出できる。式(4.10)、式(4.11)は、これらの計算式を示す。

$$\alpha_1 = \alpha \times p / 100 \quad (4.10)$$

$$\alpha_2 = \alpha - \alpha_1 \quad (4.11)$$

$\alpha_1(\text{人})$  : 各メッシュの水道利用人口、 $\alpha(\text{人})$  : 各メッシュの人口、 $p(\%)$  : 水道利用率

$\alpha_2$ (人) : 各メッシュの浅井戸利用人口

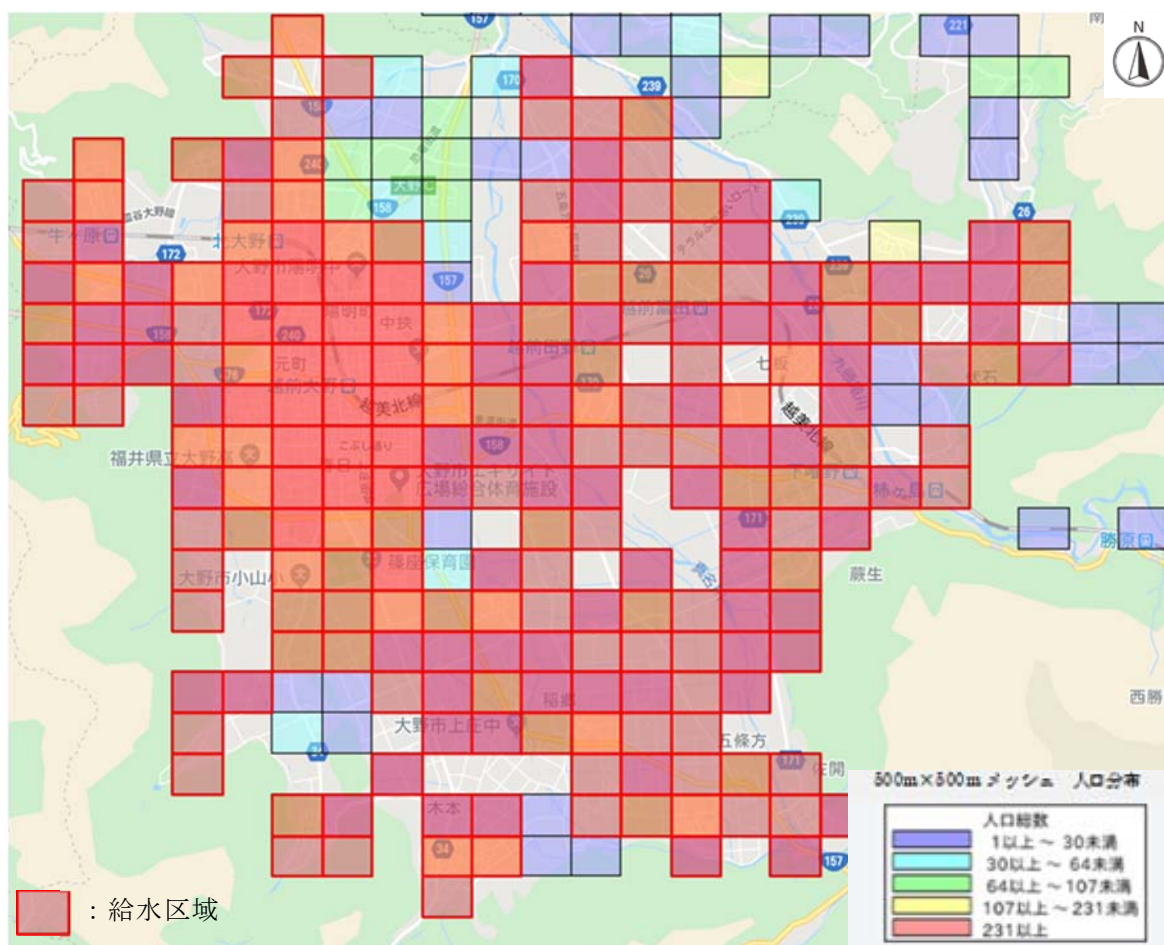


図 4.6 人口分布モデルと給水区域

例えば、上水道区域内のメッシュ人口  $\alpha$  が 941 人では、188 人が上水道を利用しており、残りの 753 人が浅井戸を利用していることになる。そして式(4.10)、式(4.11)にしたがい、上水道以外の市営水道の給水区域に属するすべてのメッシュについても同様の計算をし、各メッシュにおける揚水量を算出した。以上の方法から各メッシュの水道用揚水量を推定し、大野盆地の 500m×500m のメッシュ地図上に水道用揚水量分布モデルを作成した。図 4.8 はその結果を示す。

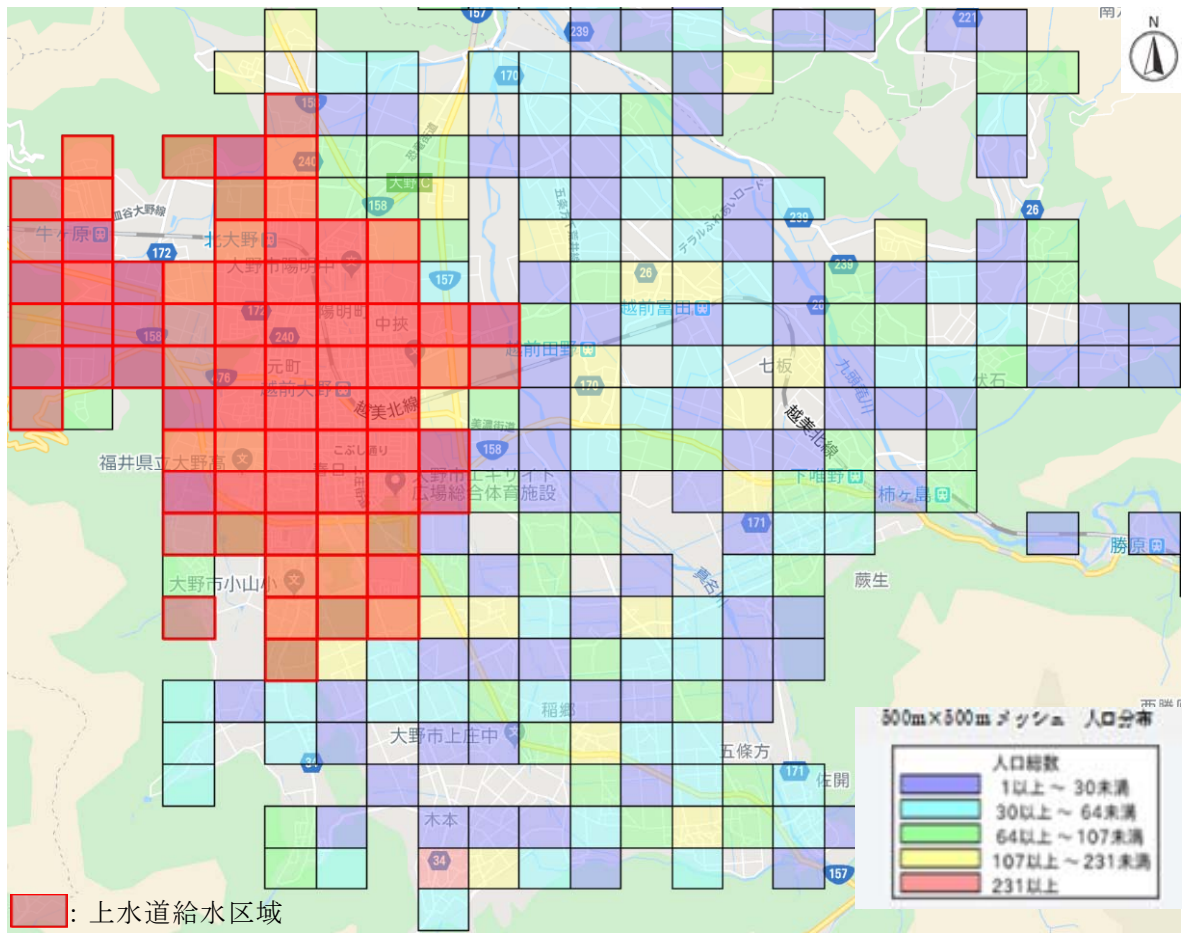


図 4.7 人口分布モデルと上水道給水区域

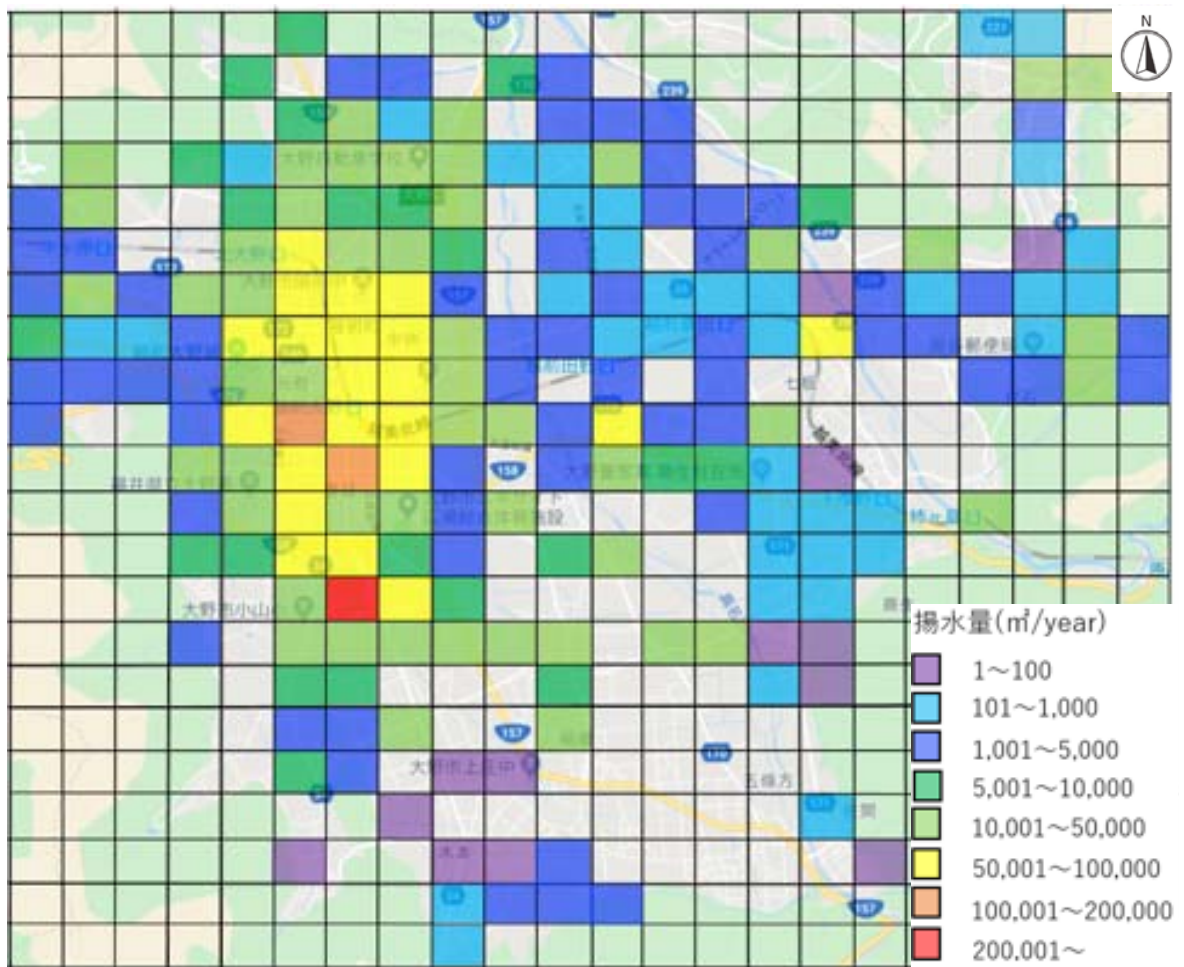


図 4.8 水道用揚水量分布モデル



図 4.8 に示した水道用揚水量分布モデルから、人口の集中している市街地部での揚水が多いことが分かる。唯一の赤色のメッシュは、市営上水道の第 1 揚水井が位置しており、このメッシュでは  $510,042(\text{m}^3/\text{year})$  揚水されている。

最後に、工業用・公共施設用揚水量分布モデルと水道用揚水量分布モデルを合成し、大野盆地の揚水量分布モデルを作成する。図 4.9 は揚水量分布モデルを示す。

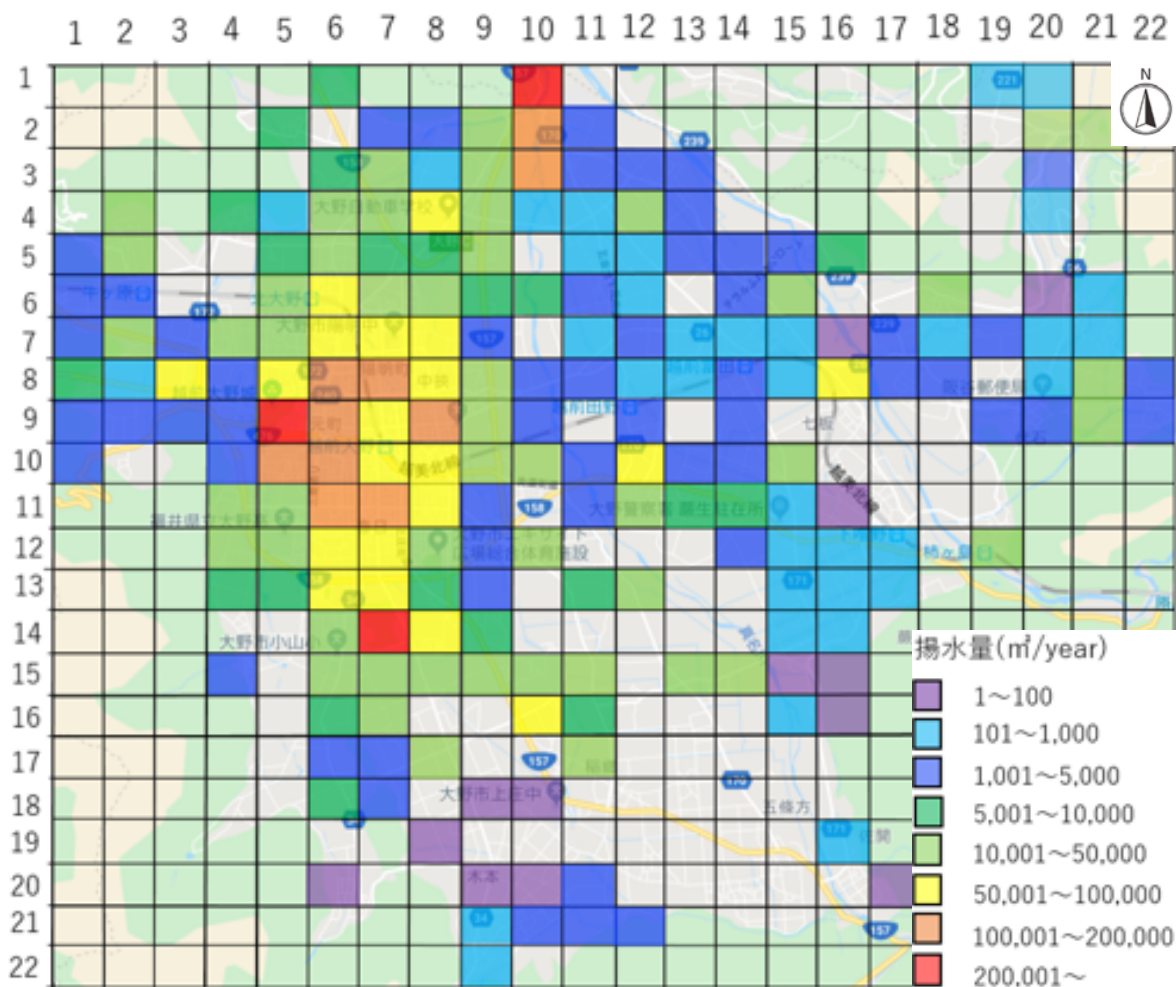


図 4.9 揚水量分布モデル

図 4.9 より、メッシュ番号(縦：横表記)が(1：10)、(9：5)、(14：7)での揚水量が年間で  $200,000(\text{m}^3)$  を上回っている。(1：10)は、電気機器を取り扱う工場が存在しており、工業用・公共施設用揚水量の 70% 以上である  $3.03 \times 10^6 \text{m}^3$  もの地下水を揚水している。(9：5)は、市街地でも特に人口の多い地域であり、市民の生活用水として多くの地下水が揚水されている。(14：7)は、上水道の主な水源である大野市第一揚水井が存在しているため、年間を通しての揚水量が多くなっている。また、南部に比べて北部での揚水量が目立っている。こ

れは人口密度に比例しているものと考えられる。また、大野盆地では北部に向かうにつれ地下水位が高くなる傾向があるため、地下水揚水に適した北部で意識的な揚水を行っているとも捉えることができる。

#### 4.5 まとめ

本章では、大野盆地における年間の地下水揚水量を推定した。揚水量は大きく2種類に分けられ、それぞれ工業用・公共施設用揚水量と水道用揚水量である。解析の結果、工業用・公共施設用揚水量は年間で  $4.25 \times 10^6 (\text{m}^3/\text{year})$  であり、水道用揚水量は年間で  $3.76 \times 10^6 (\text{m}^3/\text{year})$  と推定された。したがってこれらの和が大野盆地における年間の地下水揚水量であり、その値は  $8.01 \times 10^6 (\text{m}^3/\text{year})$  と推定された。また、揚水量の分布を示す揚水量分布モデルを作成した。作成した結果、人口の多い地域や、上水道の水源がある地域での揚水量が顕著であることが確認された。また全体としては、盆地南部より中部または北部での揚水量が多いことが見受けられた。これは、大野盆地の地下水位は南部から北部に向かうにつれ高くなっていることが要因の1つであると考えた。したがって市民や事業所は、地下水位が比較的高くまたそれに伴い地下水が豊富な地域であると考え、意識的な揚水を行っているのではないかと考える。

## 第5章 大野盆地の地下水流出量

### 5.1 はじめに

大野盆地の地下水流出量とは、第4章で推定した揚水量と盆地内の地下水湧出量である。本章では主に地下水湧出量の推定方法とその結果、また揚水量と地下水湧出量の和である地下水流出量の推定結果について述べる。

### 5.2 解析概要

大野盆地内では、地下水が湧き出している地点が多く存在している。特に盆地北部での湧水が顕著であり、地下水面が浅くなっている。表5.1は、盆地内の北部、中部、南部の観測井で平成26年から平成30年の間に確認された地下水位の平均値を示している。それぞれの観測井の名称は、中野清水緑地観測井、春日公園観測井、木本観測井である。また中野清水緑地観測井は、盆地内に存在するすべての観測井の中で最も北部に位置しており、木本観測井は最も南部に位置している。図5.1は、大野盆地とそれぞれの観測井の分布を示す。そこで地下水湧出量の推定については、地下水面が浅く地下水湧出量の多い盆地北部に注目した。

大野盆地には4本の一級河川である九頭竜川、真名川、清滝川、赤根川が南部から北部に向かってそれぞれ流れ、最北部で4河川が合流し盆地外へと流れ出ていく。地下水湧出量の推定は、これら河川流量の値を用いて推定した。その方法は、最北部における河川が合流した後の流量と、合流前のそれぞれの河川流量の和との差を求め、その値を地下水湧出量とした。しかし大野盆地内に流れる河川流量データは真名川での一カ所を除き存在しなかったため、現地測定を行い、実測データを用いて地下水湧出量を推定した。また、九頭竜川の流量の測定は困難を極めると判断したため、対象外とした。したがって、上記の通り河川流量の差が地下水湧出量であるとしたため、九頭竜川を除く3河川が合流した後の流量を合流後の河川流量とした。

表 5.1 平成26年から平成30年の地下水位平均

観測井名称	中野清水緑地	春日公園	木本
地下水位 (G. L- m)	0.979	4.201	15.336

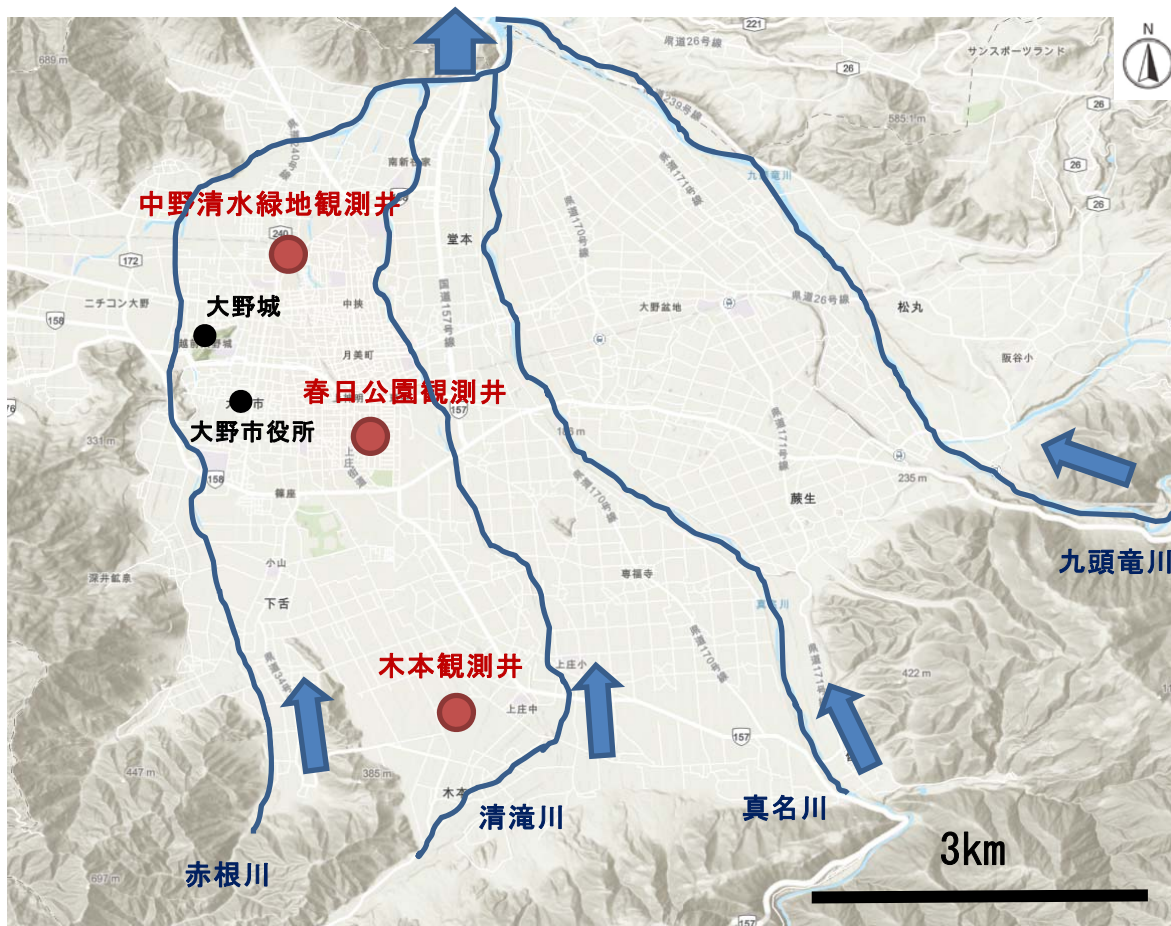


図 5.1 大野盆地と 3 観測井の分布

### 5.3 河川流量の測定

河川流量の測定については、九頭竜川を除く 3 本の一級河川で行った。測定値点数は計 10 地点である。図 5.2 は測定地点を示す。河川流量  $Q(\text{m}^3/\text{s})$  は、河川流速  $v(\text{m}/\text{s})$  と水深  $h(\text{m})$ 、河川幅(橋長)  $d(\text{m})$  との積で表すため、実測時においては、この 3 要素を測定した。式(5.1)は河川流量の計算式を示す。

$$Q=v \times h \times d \tag{5.1}$$

$Q(\text{m}^3/\text{s})$  : 河川流量、 $v(\text{m}/\text{s})$  : 河川流速、 $h(\text{m})$  : 水深、 $d(\text{m})$  : 河川幅(橋長)



図 5.2 測定地点分布図

測定方法については、すべての地点において橋の上から測定を行った。まず、河川幅(橋長) $d$  と橋幅  $b(m)$ を巻尺で測定する。次に、10cm 毎に印をつけたロープに錘を結び付け、それを橋の上から河底に垂らし、水深を測定した。そして、橋の上から一定密度の物体を河川に投げ入れ、それが橋幅  $b$  を通過するのに要する時間  $t_b(s)$ を測定した。図 5.3 は鉛直上から見たもので、河川流速  $v$  と河川幅  $d$  を求める概念図を示す。また図 5.4 は水平横から見たもので、水深  $h$  を求める概念図を示す。この測定を複数回行い、平均通過時間を算出した。そして、橋幅を平均通過時間で除した値がその地点における流速とした。なお環境に配慮し、河川に投げ入れた物体は水に溶ける材質で作られた物を用いた。図 5.5 は錘付きロープを示し、図 5.6 は測定風景を示す。以上より、式(5.1)にしたがいすべての地点における河川流量  $Q$  を算出した。

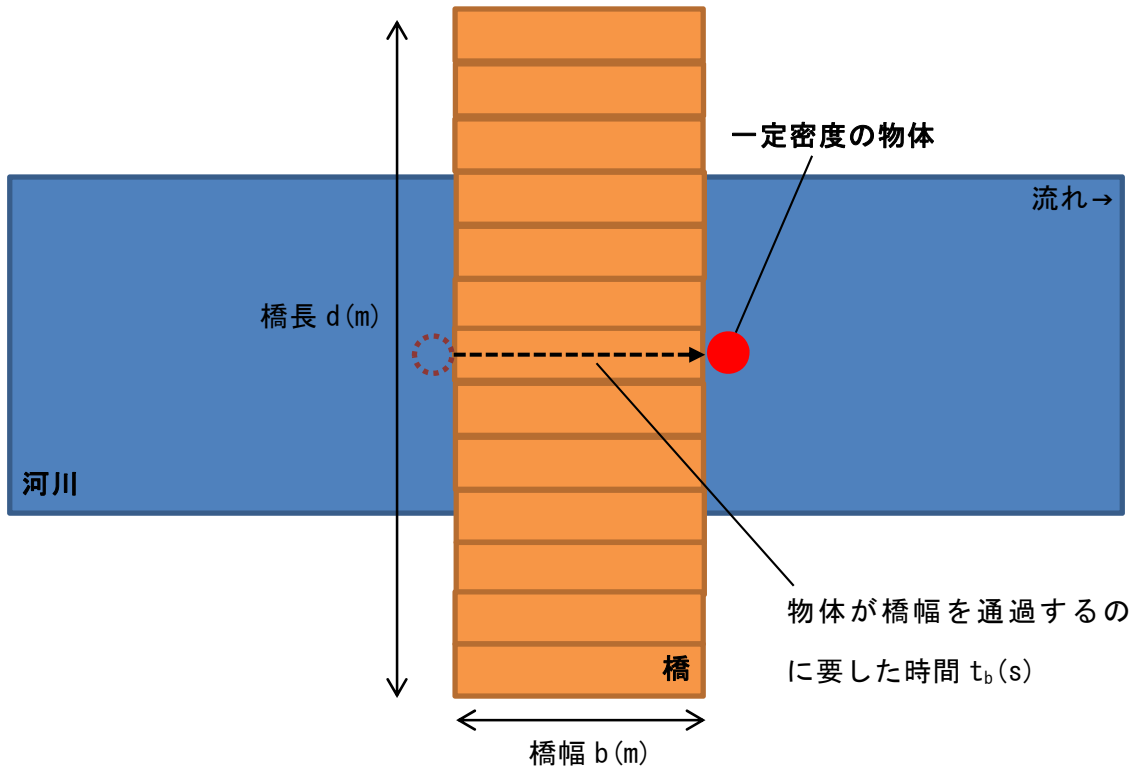


図 5.3 鉛直上から見た概念図

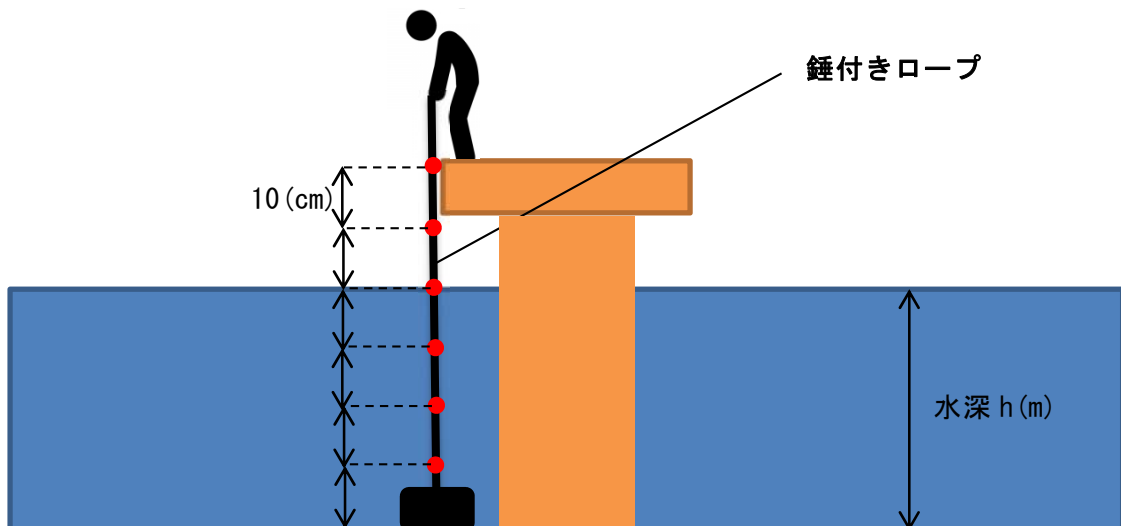


図 5.4 水平横から見た概念図



図 5.5 錘付きロープ

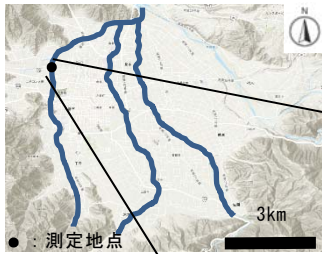


図 5.6 測定風景（赤根川中流地点）

## 5.4 地下水湧出量の推定

5.2 で述べたように、地下水湧出量の推定には河川流量を用いる。ここで、3 河川が合流する前のそれぞれの流量を中流での流量とし、合流した後の流量を下流での流量とする。

図 5.7 は中流と下流それぞれの地点を示す。また、表 5.2 はそれぞれの流量を示す。



図 5.7 下流と中流の分布図

表 5.2 下流と中流の流量

河川名称		赤根川	清滝川	真名川
流量 Q (m <sup>3</sup> /s)	中流	9.3	3.1	10.2
	下流			26.6

表 5.2 より、中流と下流の流量を比較すると、下流での流量が 4.0m<sup>3</sup>/s だけ多いことが分かる。これは、年間で 126.0×10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>/year だけ流量が変化していると考えられる。したがって、大野盆地での地下水流出量が年間 126.0×10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>/year であると推定された。



## 5.5 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として表される。第4章では揚水量が推定され、その値は年間  $8.0 \times 10^6 \text{m}^3/\text{year}$  であり、地下水湧出量は年間  $126.0 \times 10^6 \text{m}^3/\text{year}$  であると推定された。以上より、大野盆地における年間の地下水流出量が推定され、その値は年間  $134.0 \times 10^6 \text{m}^3/\text{year}$  となった。次章では大野盆地における地下水流入量について推定する。

## 5.6 まとめ

地下水流出量は揚水量と地下水湧出量の和で表され、第4章で揚水量を推定したため、本章では主に地下水湧出量の推定を試みた。地下水湧出量は、大野盆地の北部における河川流量の差で与えられると考えられ、具体的には下流の流量と中流の流量の差である。ここでの下流の流量とは、九頭竜川を除く赤根川・清滝川・真名川の3河川が合流した後の流量を指し、中流の流量とは合流前の上記3河川のそれぞれの流量の和を指す。また、それぞれの流量データは存在しなかったため、本研究では実際に現地で流量を測定し、その測定結果を用いた。その結果、下流と中流の流量差は  $4.0 \text{m}^3/\text{s}$  となり、年間の値に換算すると  $126.0 \times 10^6 \text{m}^3/\text{年}$  と推定された。したがって、地下水湧出量は  $126.0 \times 10^6 \text{m}^3/\text{year}$  と推定された。よって、揚水量が  $8.0 \times 10^6 \text{m}^3/\text{year}$ 、地下水湧出量が  $126.0 \times 10^6 \text{m}^3/\text{year}$  とそれぞれ推定されたため、大野盆地における地下水流出量は  $134.0 \times 10^6 \text{m}^3/\text{year}$  と推定された。次章からは、大野盆地の地下水流入量について述べる。

## 第6章 大野盆地の地下水流入量

### 6.1 はじめに

地下水流入量とは、主に盆地内の地下水浸透量と、盆地周囲の山岳からの地下水流動量の和である。地下水浸透量は降水量に起因すると考え、降水量の一部を浸透量として推定した。しかし、降水量に対する地下水浸透量の割合が不明なため、降水量から地下水浸透量以外の要素を引くことで地下水浸透量の推定が可能であると考えた。他の要素として、降水量は地下水浸透量のほかに蒸発散量、表面流出量に分かれる。蒸発散量は、ペンマン式や類似地域の過去の推定値を用いて推定し、表面流出量は、河川流量として盆地外へ流出する値を指すとし、第5章で測定した河川流量を用いて推定した。そして、降水量から蒸発散量と表面流出量の和を引くことで、盆地内の地下水浸透量を推定した。

盆地周囲の山岳からの地下水流動量は、山岳部における地下水浸透量の一部を盆地内への地下水流動量として推定した。その方法は、山岳部の透水係数を用いて年間の地下水流動距離を求め、山岳部から盆地内へ地下水がどれだけ流動するのかを推定した。そして、これら地下水浸透量と地下水流動量を足し合わせ、地下水流入量とした。

### 6.2 大野盆地の流域面積と降水量

地下水浸透量の推定にあたり、まずは大野市の年間降水量を把握する必要がある。気象庁のデータより、大野市の平成21年から平成30年の平均の年間降水量は2,413mm/yearであった<sup>18)</sup>。また、大野盆地を含む全流域面積  $A(\text{m}^2)$  が  $951.4 \times 10^6 \text{m}^2$  であることから、年間降水量を体積  $V_r(\text{m}^3)$  で表すと  $2,294.8 \times 10^6 \text{m}^3$  であった。図6.1、図6.2、図6.3、図6.4はそれぞれ赤根川、清滝川、真名川、九頭竜川の流域面積を示し<sup>19,20)</sup>、図6.5は流域面積の全体図を示す<sup>20)</sup>。また各流域面積の表示には google map の面積測定機能を用いた。表6.1はそれぞれの流域面積を示す。以下では、この年間降水量に対してどれだけの蒸発散量や表面流出量、地下浸透量があるのかについて述べる。

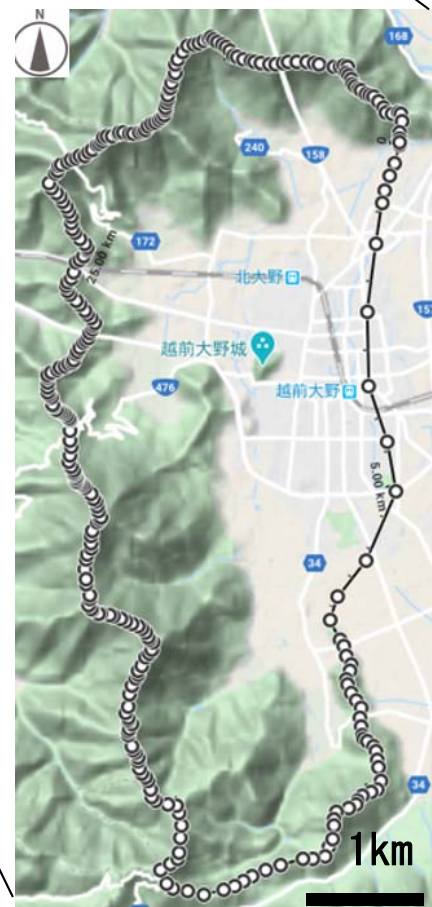
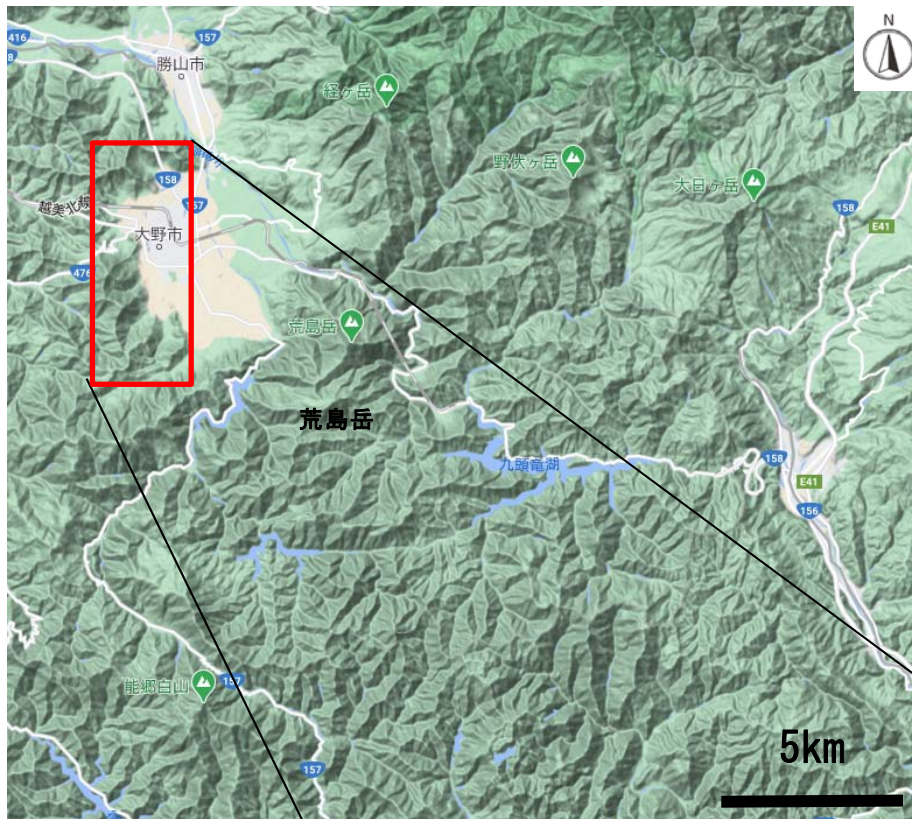


図 6.1 赤根川の流域面積 (44.16km<sup>2</sup>)

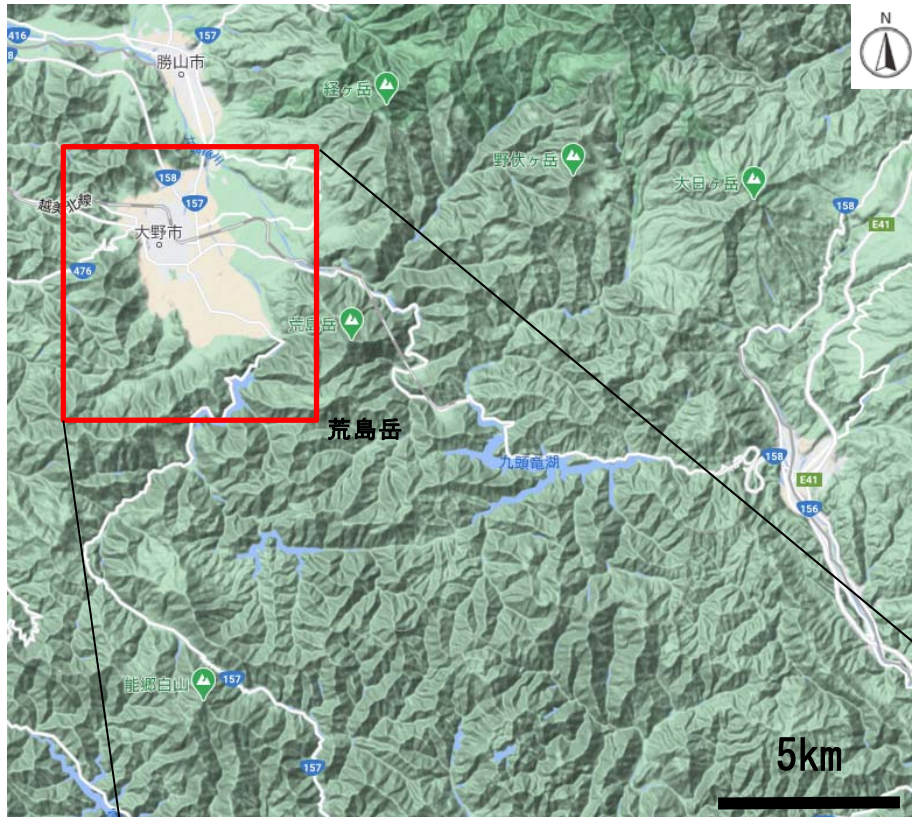


図 6.2 清滝川の流域面積 (43.86km<sup>2</sup>)

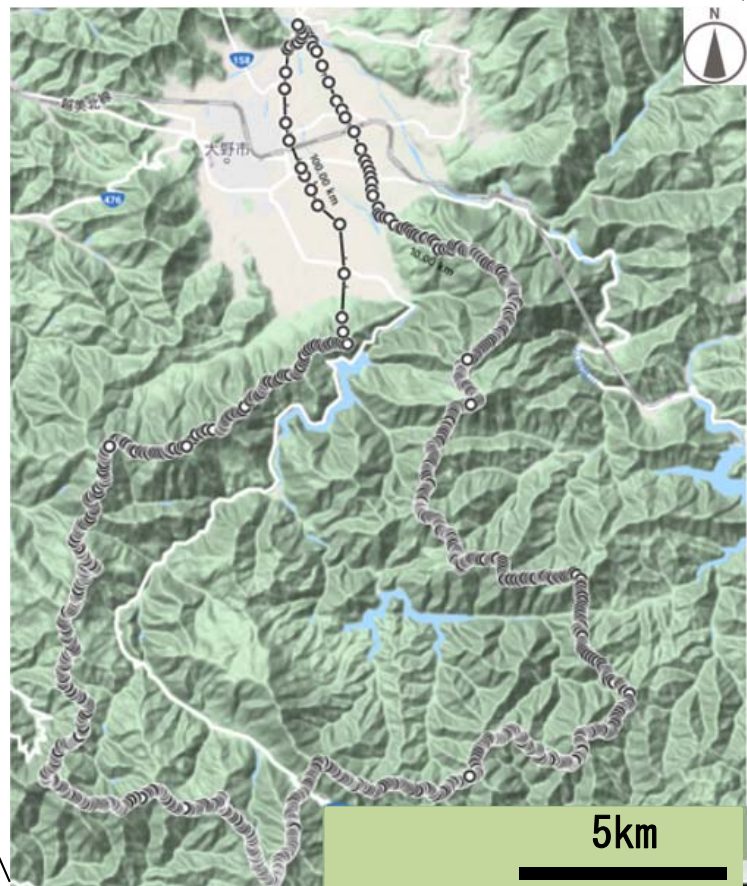
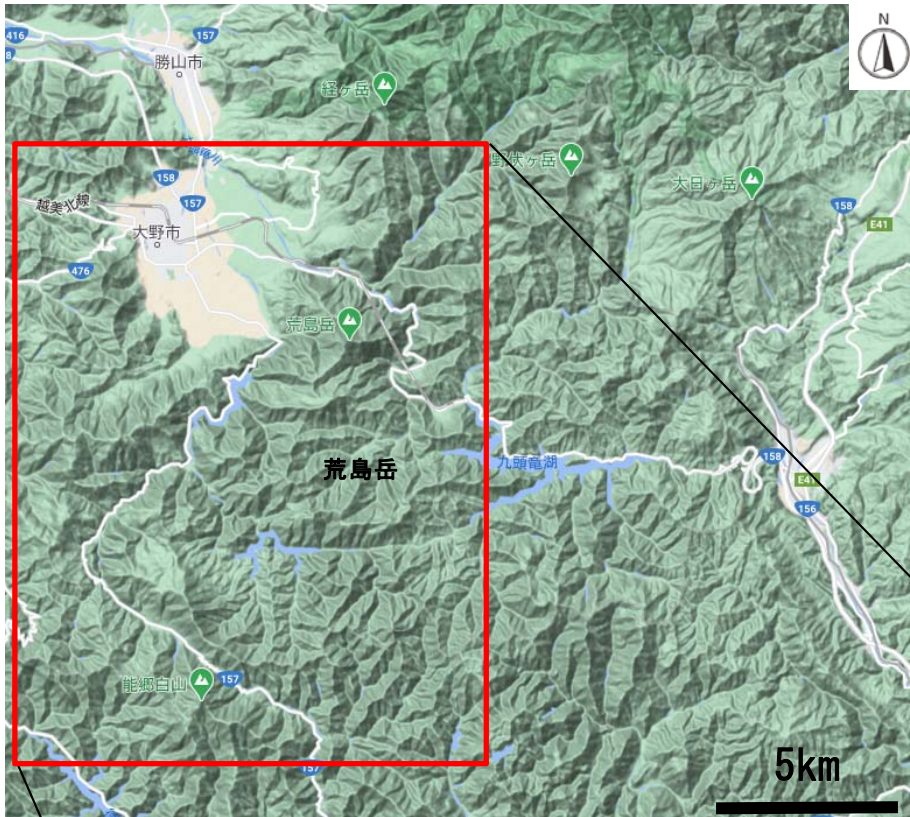


図 6.3 真名川の流域面積 (257.48km<sup>2</sup>)

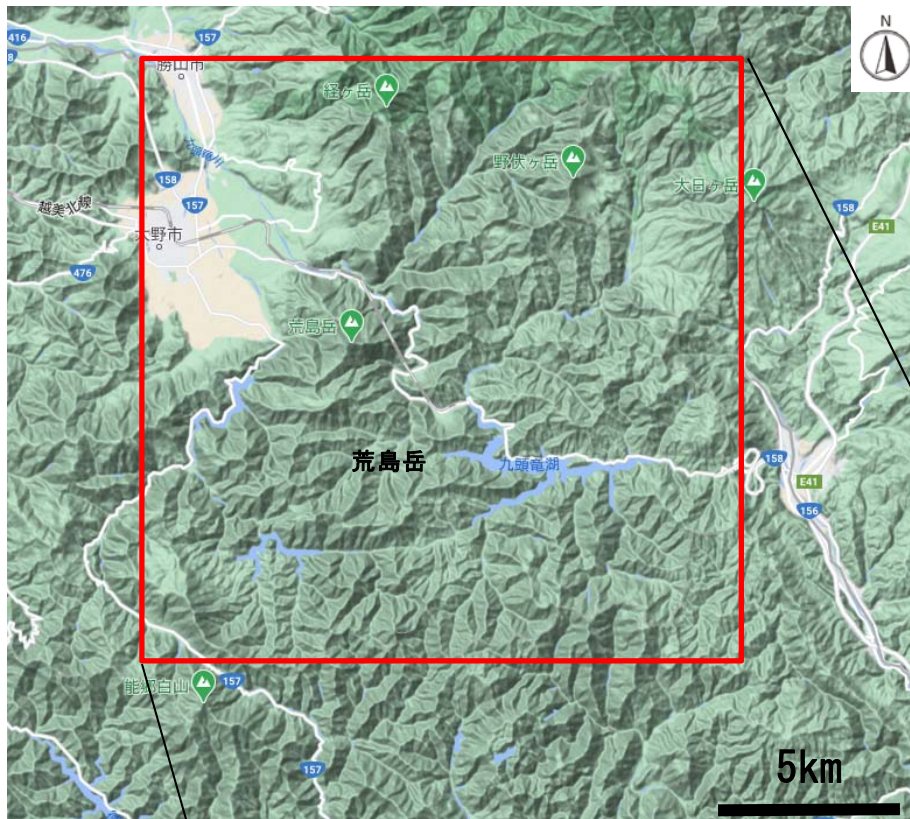


図 6.4 九頭竜川の流域面積 (605.88km<sup>2</sup>)

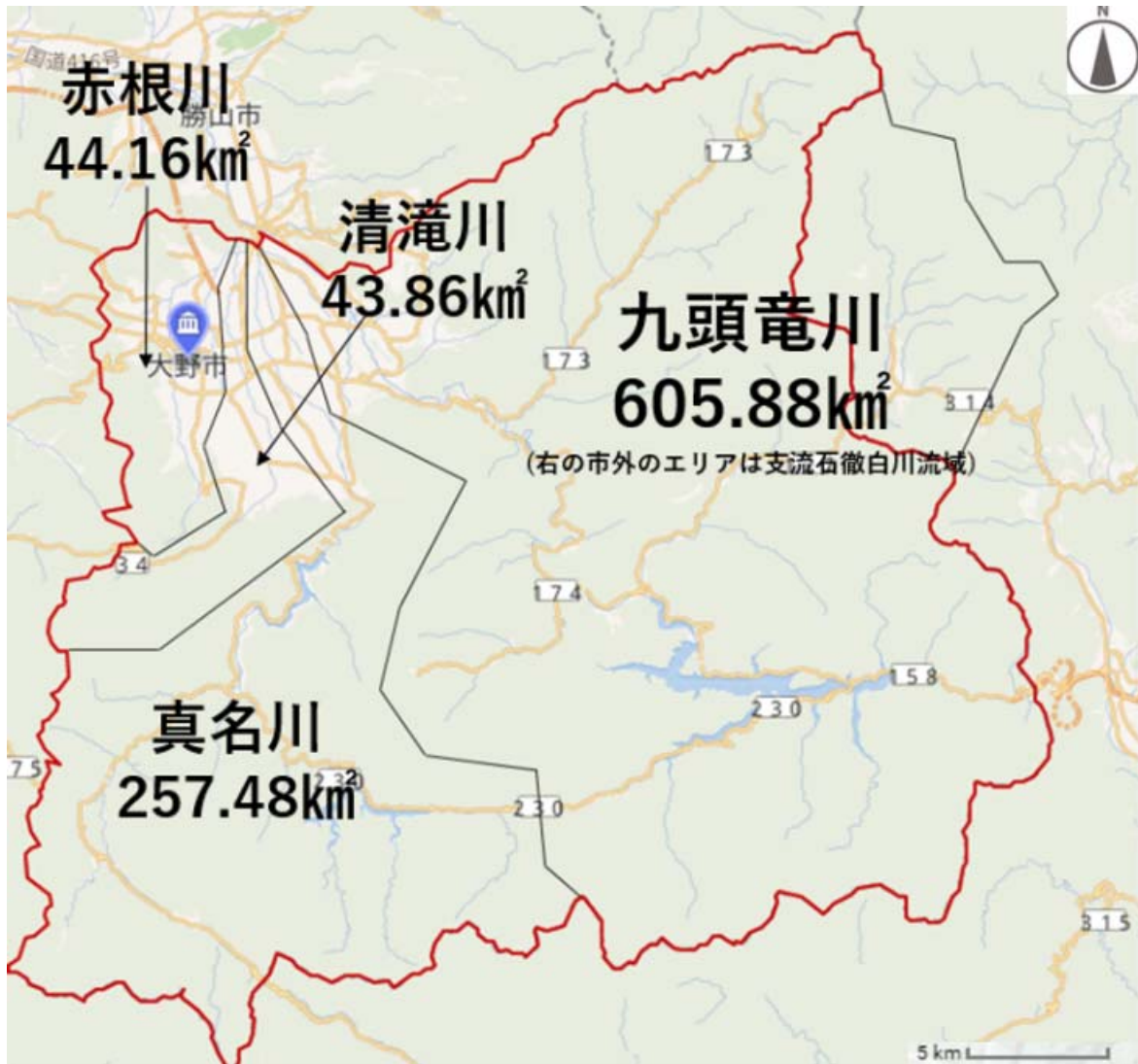


図 6.5 各河川の流域面積

## 6.3 盆地内の地下水浸透量の推定

### 6.3.1 蒸発散量の推定

蒸発散量の推定は、ハーモン式やペンマン式、ゾーンズウェイト式などを用いて行うことが一般的であるが<sup>8)</sup>、これらは多くの要素を必要としており、各要素に対応するデータを収集することは困難である。また、大野市においては、対象のデータは存在しなかった。そこで本研究では、簡略化したペンマン式を用いた。これは、地表面を全て草地に覆われたと仮定した場合に成立するペンマン式を基に計算しやすいように改良されたものである<sup>21)</sup>。式(6.1)は本研究で用いる簡略化したペンマン式と各要素について示す。

$$ET_{pen} = \frac{4}{4+\gamma} \cdot \frac{S+\gamma}{1+\frac{\gamma}{4+\gamma}} \cdot f(u_2)(e_{sa} - e_a) \quad (6.1)$$

$ET_{pen}$  : ペンマンの蒸発散位(mm)

S: 純放射量( $MJ \cdot m^{-2}$ )

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

$\alpha$ : 地表面のアルベド(草地 0.2~0.25)

$Q_a$ : 大気圏外日射量( $MJ \cdot m^{-2}$ )

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

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)

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

$\varphi$ : 計算地点の緯度

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

n: 日照時間

N: 可照時間

t: 気温( $^\circ C$ )

$e_a$ : 空気の水蒸気圧(mbar)

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

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

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

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

l: 水の蒸発潜熱( $MJ \cdot kg^{-1}$ )

$$l = 2.5 - 0.0024 \cdot t$$

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

$$f(u_2) = 0.26(1 + 0.54u_2)$$

$u_2$ : 2m における日平均風速( $m \cdot s^{-1}$ )

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

$u_H$ : 高度 H m における風速

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)

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

$e_a$ : 空気の水蒸気圧(mbar)



$$e_a = e_{sa} * RH / 100, \text{ RH: 相对湿度(\%)}$$

式(6.1)を用いて平成 29 年から平成 31 年の各年の蒸発散量を求めた結果、それぞれ 933.3mm/year、1033.6mm/year、956.4mm/year となり、3 ヶ年平均  $E_1$ (mm/year)は 974.4mm/year となった。表 6.1 はその結果を示す。この値は、年間降水量に対して 40.4%を占めており、やや大きい値として算出された。なぜなら、式(6.1)で蒸発散量を求めると、実際の蒸発散量よりも過大な値が出るという性質があるためである<sup>21)</sup>。

表 6.1 簡略化したペンマン式で推定した蒸発散量

	平成 29 年	平成 30 年	平成 31 年	3 ヶ年平均
蒸発散量 (mm/year)	933.3	1033.6	956.4	974.4

そこで次に、この蒸発散量の補正を行う。式(6.1)では、地表面がすべて草地やアスファルト舗装されているという仮定の下で計算を行っているが、全流域面積内には山岳部や水田が多々存在している。そこで、全流域面積を草地やアスファルト舗装された地表の面積と山岳部や水田の面積とに分け、蒸発散量を面積比例配分により補正した。大野盆地の面積  $A'$ ( $m^2$ )は  $80 \times 10^6 m^2$  であり、そのうち草地やアスファルト舗装された面積  $A_1$ ( $m^2$ )は  $6 \times 10^6 m^2$ 、水田の面積  $A_2$ ( $km^2$ )は  $74 \times 10^6 m^2$  である。また山岳部の面積  $S_M$ ( $m^2$ )は  $A$  と  $A'$  の差で表され、その値は  $871 \times 10^6 m^2$  である。ここで、面積比例配分をするには地表面がすべて山岳部や水田であると仮定した場合の年間の蒸発散量  $E_2$ (mm/year)を推定する必要があるが、式(6.1)ではそれを推定することはできないため、福井市の森林での蒸発散量を  $E_2$  と仮定した。したがって  $E_2$  は 890.0mm/year である<sup>22)</sup>。以上より、実際の蒸発散量  $E$ (mm/year)を求める。式(6.2)は実際の蒸発散量の計算式を示す。

$$E = E_1 \times A_1 / A + E_2 \times (A - A_1) / A \quad (6.2)$$

$E$ (mm/year) : 実際の蒸発散量

$E_1$ (mm/year) : 草地やアスファルト舗装された地表面での蒸発散量

$E_2$ (mm/year) : 山岳部や水田での蒸発散量

$A_1$ ( $m^2$ ) : 草地やアスファルト舗装された地表の面積、 $A$ ( $km^2$ ) : 大野盆地の全流域面積

この結果、実際の蒸発散量  $E$  は  $896.3\text{mm/year}$  と推定された。また実際の蒸発散量  $E$  に全流域面積  $A$  を乗じることで、全流域面積における蒸発散量  $V_E(\text{m}^3)$  が推定され、その値は  $852.8 \times 10^6 \text{m}^3/\text{year}$  となった。さらに、年間降水量に対する比である、 $V_E$  の降水量比  $P_E(\%)$  は  $37.2\%$  であった。

### 6.3.2 表面流出量の推定

大野盆地における表面流出量とは、雨水が地表面から河川に流入し、盆地外に流出する量を指す。したがって本研究では、九頭竜川を除く 3 河川が合流した後の下流の流量を表面流出量とした。第 5 章の表 5.2 に示す下流の流量が  $26.6\text{m}^3/\text{s}$  であることから、年間の表面流出量  $V_s(\text{m}^3/\text{year})$  は  $840.5 \times 10^6 \text{m}^3/\text{year}$  と推定された。さらに、年間降水量に対する比である、 $V_s$  の降水量比  $P_s(\%)$  は  $36.6\%$  と推定された。

### 6.3.3 地下水浸透量の推定

盆地内の地下水浸透量の推定は、前述の年間降水量に対する比である、降水量比の  $P_E$  と  $P_s$  を用いて行う。その方法は、全流域面積における降水量  $V_r$  に対する比である、全流域面積の地下水浸透量の降水量比  $P_p(\%)$  を求め、 $P_p$  と  $V_r$  から全流域面積における地下水浸透量の体積  $V_p'(\text{m}^3)$  を求める。そして、全流域面積  $A$  と大野盆地の面積  $A'$  を用いて面積比例配分をし、盆地内における地下水浸透量  $V_p(\text{m}^3)$  を求める。これは、盆地内の地下浸透量の推定を目的としているため、全流域面積の内、盆地以外の山岳部の地下浸透量を排除する必要があるためである。また、 $P_E$ 、 $P_s$ 、 $P_p$  はすべて百分率で表しているため、100 から  $P_E$  と  $P_s$  の和を引いた値が  $P_p$  となる。式(6.3)は  $P_p$  を求める計算式を示す。

$$P_p = 100 - (P_E + P_s) \quad (6.3)$$

$P_p(\%)$  : 全流域面積の地下水浸透量の降水量比、 $P_E(\%)$  : 蒸発散量の降水量比

$P_s(\%)$  : 表面流出量の降水量比

式(6.3)より、 $P_p$  は  $26.2\%$  と推定された。したがって、 $V_p'$  は年間降水量である  $V_r$  と  $P_p$  の積で表される。式(6.4)は  $V_p'$  の計算式を表す。

$$V_p' = V_r \times P_p / 100 \quad (6.4)$$

$V_P'(m^3)$  : 全流域面積における地下水浸透量、 $V_r(m^3)$  : 全流域面積における降水量

$P_P(\%)$  : 全流域面積の地下水浸透量の降水量比

計算の結果、 $V_P'$ は  $601.2 \times 10^6 m^3$  と推定された。したがって、盆地内の地下水浸透量  $V_P$  は、 $V_P'$ に  $A$  と  $A'$ の比を乗じればよい。式(6.5)は  $V_P$  の計算式を示す。

$$V_P = V_P' \times A' / A \quad (6.5)$$

$V_P(m^3)$  : 大野盆地内における地下水浸透量、 $V_P'(m^3)$  : 全流域面積における地下水浸透量

$A'(km^2)$  : 大野盆地面積、 $A(km^2)$  : 大野盆地の全流域面積

計算の結果、大野盆地内の地下水浸透量  $V_P$  は  $50.6 \times 10^6 m^3/year$  と推定された。

#### 6.4 山岳部から盆地内への地下水流動量の推定

ここでの地下水流動量とは、全流域面積の地下水浸透量  $V_P'$  と盆地内の地下水浸透量  $V_P$  との差である山岳部の地下水浸透量  $V_M(m^3)$  の内、年間でどれだけの地下水が山岳部から盆地内へ流動するのかわかる値である。そこでまずは、山岳部から盆地内へ流動する地下水浸透量を含む山岳部の面積である、有効山岳面積  $A_M(m^2)$  を推定する必要がある。本研究では、その値を推定するために山岳部の地盤の透水係数  $k(cm/s)$  を用いた。透水係数を用いることで、山岳部で地下水が盆地方向へ流動する距離である地下水流動距離  $D_M(m)$  が推定される。この地下水流動距離を用いることで有効山岳面積が求まり、山岳部の面積と有効山岳面積とを比例配分することで、山岳部から盆地内への地下水流動量  $V_F(m^3)$  を推定することができる。

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>15)</sup>。図 6.6 は、透水係数が判明している試料が堆積している地点を示す。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が図 6.6 に示す 2 地点であったため、これら 2 地点で得られた試料の透水係数を山岳部での透水係数  $k$  とした<sup>15)</sup>。また表 6.2 は、各地点における試料の透水係数を示す。

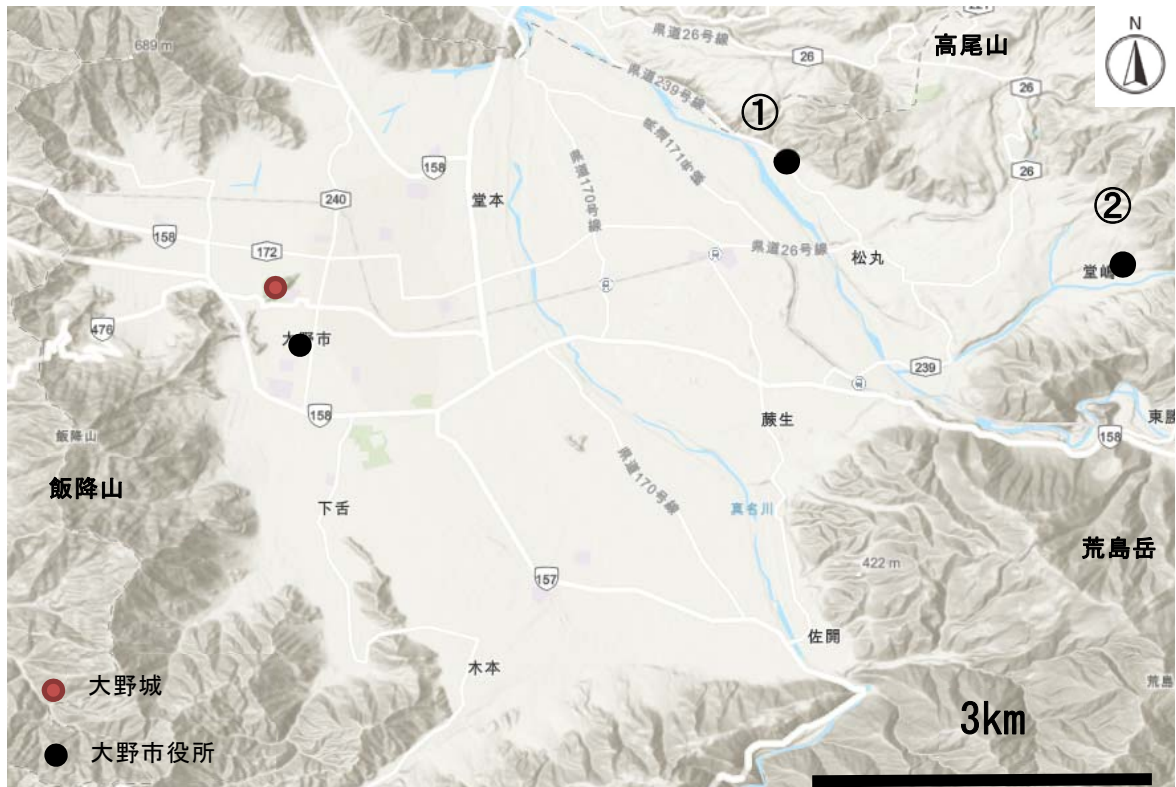


図 6.6 試料の分布図

表 6.2 各試料の透水係数

試料 NO.	①		②		①と②の平均
透水係数 ( $\times 10^{-3}\text{cm/s}$ )	9.94	8.86	9.98	11.0	9.95

表 6.2 より、これらの平均値を山岳部での透水係数  $k$  と定め、その値は  $9.95 \times 10^{-3}\text{cm/s}$  と推定された。よってこの値を、地下水が 1 年間に流動する距離に換算することで地下水流動距離  $D_M$  が求まる。 $D_M$  は、透水係数  $k$  の単位を変換することで求まる。その換算式を式 (6.6) に示す。その結果、 $D_M$  は  $3.14 \times 10^3\text{m}$  と推定された。

$$D_M = k \times 60 \times 60 \times 24 \times 365 / 100 \quad (6.6)$$

$D_M(\text{m})$  : 地下水流動距離、 $k(\text{cm/s})$  : 透水係数

次に、地下水流動距離  $D_M$  を用いて、有効山岳面積  $A_M$  を推定する。本研究では、山岳部の形状が不均一であるため、簡単のため山岳部や大野盆地の形状は平面的でかつ円状であ

ると近似することとする。そこで、円状とみなした際の中心は大野盆地内部に存在することから、有効山岳面積と大野盆地の面積の和  $A_M'$ ( $m^2$ )から大野盆地の面積  $A'$ を引いた値を有効山岳面積  $A_M$ とした。したがって、地下水流動距離  $D_M$ と大野盆地の半径  $D'$ ( $m$ )の和は、有効山岳面積と大野盆地を含む円の半径として扱うことができ、 $A_M'$ が算出できる。式(6.7)、式(6.8)はその計算式を示し、**図 6.7**はその概略図を示す。

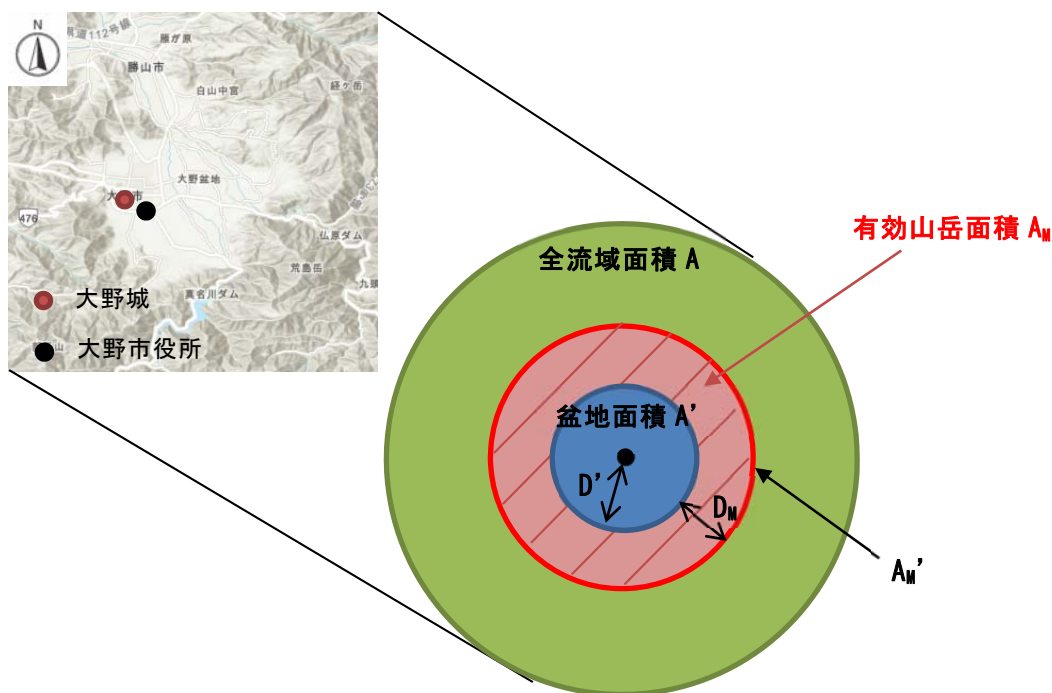
$$D' = \sqrt{A'/\pi} \quad (6.7)$$

$$A_M = A_M' - A' = \pi \times (D_M + D')^2 - A' \quad (6.8)$$

$D'$ ( $m$ ) : 大野盆地の半径、 $A'$  ( $m^2$ ) : 大野盆地の面積

$A_M'$ ( $m^2$ ) : 有効山岳面積と大野盆地の面積の和、 $A_M$ ( $m^2$ ) : 有効山岳面積

$D_M$ ( $m$ ) : 地下水流動距離(有効山岳面積と大野盆地を足した円の半径)



**図 6.7** 有効山岳面積の概略図

その結果、有効山岳面積  $A_M$ は  $130.3 \times 10^6 m^2$ と推定された。

次に、山岳部から盆地内への地下水流動量  $V_F$ を求める。そのためにまずは、山岳部の地下浸透量  $V_M$ を求める。なぜなら、山岳部の地下水浸透量  $V_M$ に山岳部の面積  $S_M$ と有効山岳面積  $A_M$ の比を乗じることで、山岳部から盆地内への地下水流動量  $V_F$ を推定することが

できるためだ。また  $V_M$  は、全流域面積の地下水浸透量  $V_P'$  と盆地内の地下水浸透量  $V_P$  の差で表すことができる。式(6.9)、式(6.10)はその計算式を示す。

$$V_F = V_M \times A_M / S_M \quad (6.9)$$

$$V_M = V_P' - V_P \quad (6.10)$$

$V_F(m^2)$  : 山岳部から盆地内への地下水流動量、 $V_M(m^2)$  : 山岳部の地下水浸透量

$A_M(m^2)$  : 有効山岳面積、 $S_M(m^2)$  : 山岳部の面積

$V_P(m^3)$  : 大野盆地内における地下水浸透量、 $V_P'(m^3)$  : 全流域面積における地下水浸透量

その結果、山岳部の地下水浸透量  $V_M$  は  $550.6 \times 10^6 m^3$  と推定され、山岳部から盆地内への地下水流動量  $V_F$  は  $90.0 \times 10^6 m^3$  と推定された。

## 6.5 地下水流入量の推定

大野盆地の地下水流入量は、地下水浸透量と山岳部から盆地内への地下水流動量の和として表される。6.3 では地下水浸透量が推定され、その値は年間  $50.6 \times 10^6 m^3/year$  であり、6.4 では山岳部から盆地内への地下水流動量が推定され、その値は年間で  $90.0 \times 10^6 m^3/year$  である。以上より、大野盆地における年間の地下水流入量が推定され、その値は  $140.6 \times 10^6 m^3/year$  となった。

## 6.6 まとめ

本章では、地下水流入量を推定した。地下水流入量は地下水浸透量と山岳部から盆地内への地下水流動量の和で求められる。したがって本章ではこれらを推定し、足し合わせることで地下水流入量を推定した。地下水浸透量は降水量の一部であると考え、降水量から地下水浸透量以外の2つの要素である蒸発散量と表面流出量を引くことで求められた。その結果、地下水浸透量は年間  $50.6 \times 10^6 m^3$  であると推定された。山岳部から盆地内への地下水流動量は、年間で地下水が山岳部から盆地内へどれだけ流動するのかを求めた。またこの方法においては山岳部の透水係数を用いた。透水係数を年間の地下水移動距離に換算し、その移動距離の範囲内にある山岳部の面積を求め、その面積に浸透している地下水量を流動量とした。その結果山岳部から盆地内への地下水流動量は年間  $90.0 \times 10^6 m^3$  であると推定された。よって、これらを足し合わせ、地下水流入量は  $90.0 \times 10^6 m^3$  であると推定された。

また、上記の地下水流入量は年間降水量に強く依存しているため、年度によっては大幅に変化することが考えられる。また、山岳部は地下水を多量に保水していると考えられるため、山岳部の地下水保水量についても考慮する必要がある。

## 第7章 大野盆地の地下水収支

### 7.1 はじめに

大野盆地では地下水を様々な用途に利用しており、社会基盤の重要な要素の一つとして機能している。しかし、この地下水が枯渇したり、地下水汚染等が発生したりすると住民の生活に多大な影響を及ぼすことになる。地下水を定量的かつ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把握することが重要である。

本研究では、大野盆地の地下水収支を定量的に把握するために様々な検討を行ってきた。本章ではこれらを総合的に解析することによって、大野盆地の地下水収支について検討を行うとともに、地下水収支の3次元モデルの作成を試みた。

### 7.2 地下水収支の推定

第5章より、地下水流出量は年間で  $134.0 \times 10^6 \text{m}^3/\text{year}$  と推定された。また第6章より、地下水流入量は年間で  $140.6 \times 10^6 \text{m}^3/\text{year}$  と推定された。表7.1は地下水流出量と地下水流入量とそれぞれの内訳を示し、表7.2は地下水収支を示す。図7.1は、地下水流出量と地下水流入量、ならびにそれらを推定する際に用いた年間降水量や蒸発散量などすべての要素を含む大野盆地の3次元モデルを示す。以上より、大野盆地における地下水収支は、地下水流入量と地下水流出量との差で表され、年間で地下水流入量が  $6.6 \times 10^6 \text{m}^3$  だけ多いと推定された。

図7.1に示す通り、表面流出は基本的には河川からの流出が主であり、大野盆地に流入する4河川のうち、赤根川、清滝川、真名川の河川流量に注目した。各河川は大野盆地に流入し、盆地最北部において合流していることから、この地点の流量に着目した。また、地下水位は南部から北部に向かうにつれて浅くなっており、北部では場所によっては湧水がみられることから、河川水の一部は、盆地内で地下浸透した水が再度地上へ出てきたものであると考えられる。したがって北部の河川流量の差分が地下水湧出量であると考えられる。さらに、降水量の一部が蒸発散量であると考えられる。盆地外からの地下水流動としては、山岳部からの地下水流動が考えられる。山岳部に降った雨が地下へ浸透し、盆地よりも標高の高い山岳部から盆地へと地下水が流動する仕組みであると考えられる。他にも、住民による揚水量や盆地内での地下水浸透を考慮することで、大野盆地の地下水収支が定量的に推定された。



表 7.1 地下水流出量と地下水流入量とそれぞれの内訳

地下水流出量 ( $\times 10^6\text{m}^3/\text{year}$ )		地下水流入量 ( $\times 10^6\text{m}^3/\text{year}$ )	
揚水量 ( $\times 10^6\text{m}^3/\text{year}$ )	地下水湧出量 ( $\times 10^6\text{m}^3/\text{year}$ )	地下水浸透量 ( $\times 10^6\text{m}^3/\text{year}$ )	山岳から盆地内への 地下水流動量 ( $\times 10^6\text{m}^3/\text{year}$ )
8.0	126.0	50.6	90.0
134.0		140.6	

表 7.2 地下水収支

地下水収支 ( $\times 10^6\text{m}^3/\text{year}$ )
6.6

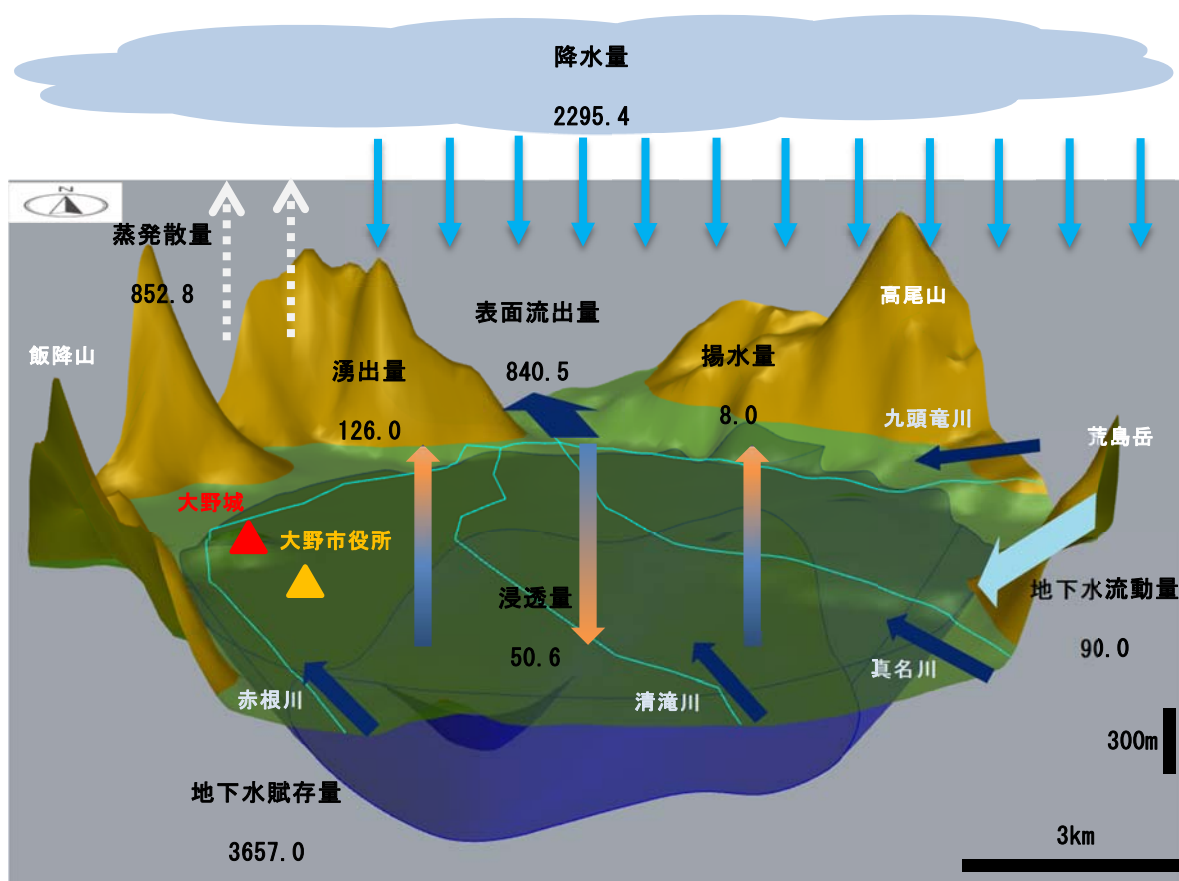


図 7.1 大野盆地の地下水収支 ( $\times 10^6\text{m}^3$ )

また上記の値は、平成 21 年から平成 30 年の年間降水量の平均値を用いて推定したものであるため、次節には降水量の影響を考慮した年ごとの地下水収支について述べる。

### 7.3 年毎の地下水収支

気象庁の年間降水量データを用いて、平成 21 年から平成 30 年における年毎の地下水収支について推定した。推定方法は、平成 21 年から平成 30 年における年間降水量の平均値と各年の年間降水量の比を上記の各要素にそれぞれ乗じ、比例配分によって行った。式(7.1)はその計算式を示す。また、平成 21 年から平成 30 年の年間降水量の平均値  $\bar{R}$  は 2412.7(mm)、各年の年間降水量を  $R_i$ (mm)、両者の比を  $R_{ri}$ (%)とした。なお、蒸発散量は唯一降水量に依存しない要素であるため、年毎の変化はないものとした。表 7.3 は平成 21 年から平成 30 年の各年の年間降水量とそれぞれの  $R_{ri}$  を示す<sup>16)</sup>。

$$R_{ri} = R_i / \bar{R} \quad (7.1)$$

$\bar{R}$ (mm) : 平成 21 年から平成 30 年の年間降水量の平均値

$R_i$ (mm) : 平成 21 年から平成 30 年の各年における年間降水量、 $R_{ri}$ (%) :  $R_i$  と  $\bar{R}$  の比

表 7.3 平成 21 年から平成 30 年の年間降水量

年 (i)	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29	H30
降水量 (mm)	1991.5	2730.5	2629.5	2262.5	2699.5	2407.5	2111.5	1972.5	2882.0	2545.5
$R_{ri}$ (%)	82.5	113.2	109.0	93.8	111.9	99.8	87.5	81.8	119.5	105.5

表 7.3 の値を用いて、各年の地下水収支を推定した。また例として、表 7.4 は平成 30 年の計算結果について示す。平成 30 年での比  $R_{r30}$  は 105.5(%)であることから、それぞれの要素に 1.055 を乗じることで推定される。

表 7.4 平成 30 年の計算結果

要素	平成 21 から平成 30 年の平均結果	平成 30 年結果
降水量 (mm)	2412.7	2545.5
降水量の体積 ( $\times 10^6\text{m}^3$ )	2295.4	2421.7
蒸発散量 ( $\times 10^6\text{m}^3$ )	852.8	852.8
表面流出量 ( $\times 10^6\text{m}^3$ )	840.5	886.8
揚水量 ( $\times 10^6\text{m}^3$ )	8.0	8.0
湧出量 ( $\times 10^6\text{m}^3$ )	126.0	132.9
浸透量 ( $\times 10^6\text{m}^3$ )	50.6	57.4
流動量 ( $\times 10^6\text{m}^3$ )	90.0	102.0
地下水流出量 ( $\times 10^6\text{m}^3$ )	134.0	140.9
地下水流入量 ( $\times 10^6\text{m}^3$ )	140.6	159.4
<b>地下水収支 (<math>\times 10^6\text{m}^3</math>)</b>	<b>6.6</b>	<b>18.5</b>

同様に、他年度についても同様の計算を行った。表 7.5 は年毎の地下水収支を示す。

表 7.5 年ごとの地下水収支

年	地下水収支 ( $\times 10^6\text{m}^3$ )
H21	-30.7
H22	34.8
H23	31.5
H24	-6.7
H25	32.1
H26	6.2
H27	-20.0
H28	-32.4
H29	48.3
H30	18.5
<b>合計値 (<math>\times 10^6\text{m}^3</math>)</b>	<b>81.6</b>

表 7.5 より、地下水収支の正負は年によってさまざまであることが分かる。また、平成 21 年から平成 30 年の地下水収支を足し合わせると  $81.6 \times 10^6 \text{m}^3$  であることが分かった。したがって、大野盆地における地下水収支は正であるという傾向がみられた。

最後に、大野盆地周囲の山岳部の地下水保水量  $V_M'(\times 10^6 \text{m}^3)$  を推定する。 $V_M'$  は、山岳部の地下水浸透量  $V_M$  から、山岳部から盆地内への地下水流動量  $V_F$  を引くことで求められる。式(7.2)はその計算式を示す。

$$V_M' = V_M - V_F \quad (7.2)$$

$V_M'(\times 10^6 \text{m}^3)$  : 山岳部の地下水保水量、 $V_M(\times 10^6 \text{m}^3)$  : 山岳部の地下水浸透量

$V_F(\times 10^6 \text{m}^3)$  : 山岳部から盆地内への地下水流動量

その結果、山岳部の地下水保水量は  $461.5 \times 10^6 \text{m}^3$  と推定された。よって、山岳部の環境などにより、この山岳部の地下水保水量の一部が盆地内へ流動することも考えられるため、地下水収支がさらに変動する可能性があるといえる。

## 7.4 まとめ

本章では、第 5 章、第 6 章で推定した地下水流出量と地下水流入量の差を取り、地下水収支を推定した。平成 21 年から平成 30 年の年間降水量の平均値を用いて推定した地下水流出量と地下水流入量はそれぞれ  $134.0 \times 10^6 \text{m}^3$  と  $140.6 \times 10^6 \text{m}^3$  であり、地下水収支は収入が  $6.6 \times 10^6 \text{m}^3$  だけ多いことが分かった。さらにこの結果を 3 次元でモデル化し、大野盆地の地下水収支の 3 次元モデルを作成した。

また地下水収支は年度ごとに異なり、その要因は主に降水量であると考えられる。したがって、年度ごとの地下水収支の推定を試みた。その結果、降水量の多い年では地下水収支が正の値を取り、降水量の少ない年では地下水収支量が負の値を取る傾向がみられた。さらに平成 21 年から平成 30 年の地下水収支を足し合わせると、地下水収支の合計値は  $81.6 \times 10^6 \text{m}^3$  と推定された。この結果より、大野盆地における地下水収支は今後も正の値を取ることが予想される。

また、大野盆地の周囲の山岳部には地下水が保水されていると考えられ、その保水量が  $461.5 \times 10^6 \text{m}^3$  と推定された。よって、山岳部から盆地内への地下水流動量は、この保水量の一部が足し合わされ、推定値よりも大きくなることが予想される。

以上より、大野盆地の地下水収支が定量的に推定された。この推定値を用いることで、地下水保全計画や地下水利用、ならびに土地開発に役立てるのではないかと考えられる。

## 第 8 章 結論

大野盆地では、過去に地下水性状を定量的に解明した研究例が少なく、また、実測値や観測値を用いた研究結果はほとんどない。本研究では、地下水性状を定量的に解明することを目的とし、過去の実測データや観測データを用いて地下水の総合的な解析を行った。そこで本研究の内容は、まずは重力探査による大野盆地の 3 次元地下構造解析を行い、大野盆地の帯水層をモデル化した。そしてそのモデルを用いて、現状の地下水賦存量を推定した。さらに、地下水収支を定量的に把握するため、地下水流出量と地下水流入量を推定した。地下水流出量は揚水量と湧出量に大別される。また、地下水流入量は大野盆地内の地下水浸透量と山岳地帯から盆地への地下水流動量に大別される。これらをそれぞれ推定することで、地下水収支を定量的に把握することができた。以下に、本研究で得られた成果について述べる。

- (1) 第 2 章、第 3 章では、重力探査による大野盆地の 3 次元地下構造解析を行った。それにより大野盆地の地下構造が推定され、基盤面の標高やその形状が推定された。また、帯水層を 3 次元でモデル化した。その結果、大野盆地の地下水賦存量は  $3.66 \times 10^9 \text{m}^3$  と推定された。
- (2) 第 4 章では、大野盆地における年間の地下水揚水量を推定した。解析の結果、工業用・公共施設用揚水量は年間で  $4.25 \times 10^6 \text{m}^3$  であり、水道用揚水量は年間で  $3.76 \times 10^6 \text{m}^3$  と推定された。したがって、大野盆地における地下水揚水量は年間で  $8.01 \times 10^6 \text{m}^3$  と推定された。また、揚水量の分布を示す揚水量分布モデルを作成した。これによると、人口の多い地域や、上水道の水源がある地域での揚水量が顕著であることが確認された。
- (3) 第 5 章では、地下水流出量を推定した。地下水流出量は揚水量と地下水湧出量の和である。地下水湧出量は、大野盆地の北部における河川流量の差で与えられると考えられ、具体的には下流の流量と中流の流量の差である。解析の結果、下流と中流の流量差は  $4.0 \text{m}^3/\text{s}$  となり、年間の値に換算すると  $126.0 \times 10^6 \text{m}^3/\text{year}$  と推定された。したがって、地下水湧出量は年間で  $126.0 \times 10^6 \text{m}^3$  と推定された。よって、第 4 章で推定した揚水量が  $8.0 \times 10^6 \text{m}^3$ 、地下水湧出量が  $126.0 \times 10^6 \text{m}^3$  とそれぞれ推定されたため、大野盆地における地下水流出量は年間で  $134.0 \times 10^6 \text{m}^3$  と推定された。
- (4) 第 6 章では、地下水流入量を推定した。地下水流入量は地下水浸透量と山岳部から盆地内への地下水流動量の和である。地下水浸透量は降水量の一部であると考え、降水量から地下水浸透量以外の 2 つの要素である蒸発散量と表面流出量を引くこと

で求められた。蒸発散量は、簡略化されたペンマン式を用いて推定した。表面流出量は、河川水として盆地外へ出ていく水量を表面流出量とみなし、河川流量を用いて推定した。その結果、蒸発散量は  $852.8 \times 10^6 \text{m}^3$  で、表面流出量は  $840.5 \times 10^6 \text{m}^3$  と推定された。そして年間降水量が  $2295.4 \times 10^6 \text{m}^3$  であるため、地下水浸透量は年間で  $50.6 \times 10^6 \text{m}^3$  であると推定された。山岳部から盆地内への地下水流動量は、年間で地下水が山岳部から盆地内へどれだけ流動するのかを求めた。この解析には山岳部の透水係数を用いた。透水係数を年間の地下水移動距離に換算し、その移動距離の範囲内にある山岳部の面積を求め、その面積に浸透している地下水量を流動量とした。その結果山岳部から盆地内への地下水流動量は年間で  $90.0 \times 10^6 \text{m}^3$  であると推定された。よって、地下水浸透量と山岳部から盆地内への地下水流動量を足し合わせ、地下水流入量は年間で  $140.6 \times 10^6 \text{m}^3$  であると推定された。

- (5) 第7章では、地下水収支を推定した。地下水収支は地下水流出量と地下水流入量との差分で与えられる。前述より、地下水流出量と地下水流入量は年間でそれぞれ  $134.0 \times 10^6 \text{m}^3$  と  $140.6 \times 10^6 \text{m}^3$  であり、地下水収支は収入が  $6.6 \times 10^6 \text{m}^3$  だけ多いことが分かった。さらにこの結果を3次元でモデル化し、大野盆地の地下水収支の3次元モデルを作成した。また、年度ごとの地下水収支の推定を試みた。その結果、降水量の多い年では地下水収支が正の値を取り、降水量の少ない年では地下水収支量が負の値を取る傾向がみられた。また、大野盆地の周囲の山岳部には地下水が保水されていると考えられ、その保水量が  $461.5 \times 10^6 \text{m}^3$  と推定された。

以上が本研究の内容と成果であり、大野盆地の3次元モデルの作成、ならびに地下水賦存量と地下水収支が定量的に推定された。今後は、大野盆地における地下水保全計画などを立案することが必要になると推測されるが、その際、本研究成果が適用されることを期待する次第である。

## 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，pp5-17，2005
- 2) 国土交通省：日本の水資源の現況，「第一章 水の循環と水資源の賦存状況」，2018
- 3) 大野市：大野市地下水年次報告書 平成 29 年版，2017
- 4) 野口達也，中谷英史，香川敬生，安井譲，小嶋啓介：重力データに基づく福井平野および鯖江盆地の 3 次元基盤構造解析，第 31 回土木学会地震工学研究発表会講演論文集，2011
- 5) 鈴木哲也，小林雄一，本館静吾：深層地下水調査における重力探査の援用について，土木試験所月報，NO.286，pp1-11，1977
- 6) 越谷賢，丸井敦尚，伊藤成輝，吉澤拓也：日本列島における三次元水文地質モデルの構築と地下水賦存量の試算，地下水学会誌，Vol.53，NO.4，pp357-377，2011
- 7) 三野徹，小林慎太郎，丸山利輔：農業土木学会誌，Vol.50，NO.1，pp11-19，1982
- 8) 西村宗倫，川崎将生：国土交通省，国土技術政策総合研究所資料，NO.883，pp41-54，2016
- 9) 大野市：大野市地下水年次報告書，平成 30 年版，2019
- 10) 国土交通省：国土地理院，地理院地図，平成 29 年版
- 11) 産業技術総合研究所：日本重力データベース DVD 版，地質調査総合センター，2013
- 12) 駒澤正夫：阿蘇火山の重力解析と解釈，測地学会誌 Vol.41，NO.2，pp17-45，1995
- 13) 古瀬慶博，河野芳輝：中部地方北西部の重力異常と地下構造，Vol.35，NO.2，pp547-556，1982
- 14) (株)応用地質：GEO-CRE 操作ガイド，Ver1.0.0，2016
- 15) 大野市：大野市地下水総合調査業務報告書，「資料編」，2001
- 16) e-Stat 政府統計の総合窓口：地図で見る統計 (jSTAT MAP)
- 17) 大野市、株式会社利水社：大野市地下水総合業務報告書，第 4 章，pp95-96，2003
- 18) 気象庁：過去の観測データ，2009-2019
- 19) Google map
- 20) 大野市：大野市史編纂委員会「大野市史 第 11 巻」，pp30，2001
- 21) 三浦健志：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第 164 号，pp165-170，1993
- 22) 近藤純正，中園信，渡辺力，桑形恒男：日本の水文気象(3)—森林における蒸発散量—，水文・水資源学会誌，Vol.5，NO.4，pp8-18，1992