

平成26年度 地表水・地下水等調査  
検討業務委託

報 告 書

平成27年 3月



# 目 次

第1章 業務概要	1-1
第2章 小水力発電関連	2-1
2.1 発電能力の設定	2-1
2.2 今後の維持管理の提案	2-3
第3章 地下熱関連調査	3-1
3.1 松本盆地における地中熱導入適地（クローズド型）の検討方針	3-1
3.2 地中熱ポテンシャルの評価方法	3-2
3.2.1 本検討で用いる地中熱の移動の理論とパラメータ設定方法	3-2
3.2.2 広域を対象としたシステム運用シミュレーションの適用方法	3-9
3.3 地中熱利用システムの運用シミュレーション条件の整理	3-11
3.3.1 建築物条件と気象データ	3-12
3.3.2 熱負荷計算	3-13
3.4 地中熱利用システムの運用シミュレーションの実施	3-14
3.4.1 Ground Clubによるシステム運用シミュレーションの基本条件	3-15
3.4.2 システム運用シミュレーションの諸条件	3-15
3.5 地中熱利用システムの導入適地の評価	3-16
3.5.1 対象地域の水文地質構造の概要 <sup>10)</sup>	3-16
3.5.2 地下水流動機構	3-18
3.5.3 水文地質情報のメッシュデータ	3-20
3.5.4 平均化した帯水層パラメータの空間分布	3-25
3.5.5 ダルシー流速および見かけの熱伝導率の評価	3-27
3.5.6 松本盆地における熱交換量評価式の作成	3-32
3.5.7 地中熱ポテンシャル（熱交換量）の評価	3-34
3.6 帯水層蓄熱システム導入にあたっての留意点および導入適地の考え方の整理	3-37
3.6.1 実証試験サイトの概要	3-37
3.6.2 実証試験の結果	3-40
3.6.3 帯水層蓄熱システム導入にあたっての留意点と導入適地	3-42

## 第1章 業務概要

### (1) 業務名

平成26年度 地表水・地下水等調査検討業務委託

### (2) 業務の目的

本業務は、(独) JST 科学技術イノベーション政策のための科学 研究開発プログラム『イノベーション政策に資する公共財としての水資源保全とエネルギー利用に関する研究』における『地表水及び地下水等の水資源の実態と基礎的課題の把握に関する自然科学的調査』の一環として、平成24年度および平成25年度に実施したナノ水力及び地中熱関連の基礎データの収集および調査・検討結果に基づき、ナノ水力実証機の性能評価精度の向上に努め、さらに地中熱利用システムの運用シミュレーションを行い、地域の特性および課題を把握するものである。

### (3) 業務対象範囲 (図 1-1～図 1-3 参照)

- ・ 小水力関連：長野県下水内郡栄村
- ・ 地下熱関連：松本盆地(安曇野市を中心とした松本平全般)

及び信州大学工学部キャンパス内



図 1-1 長野県全図

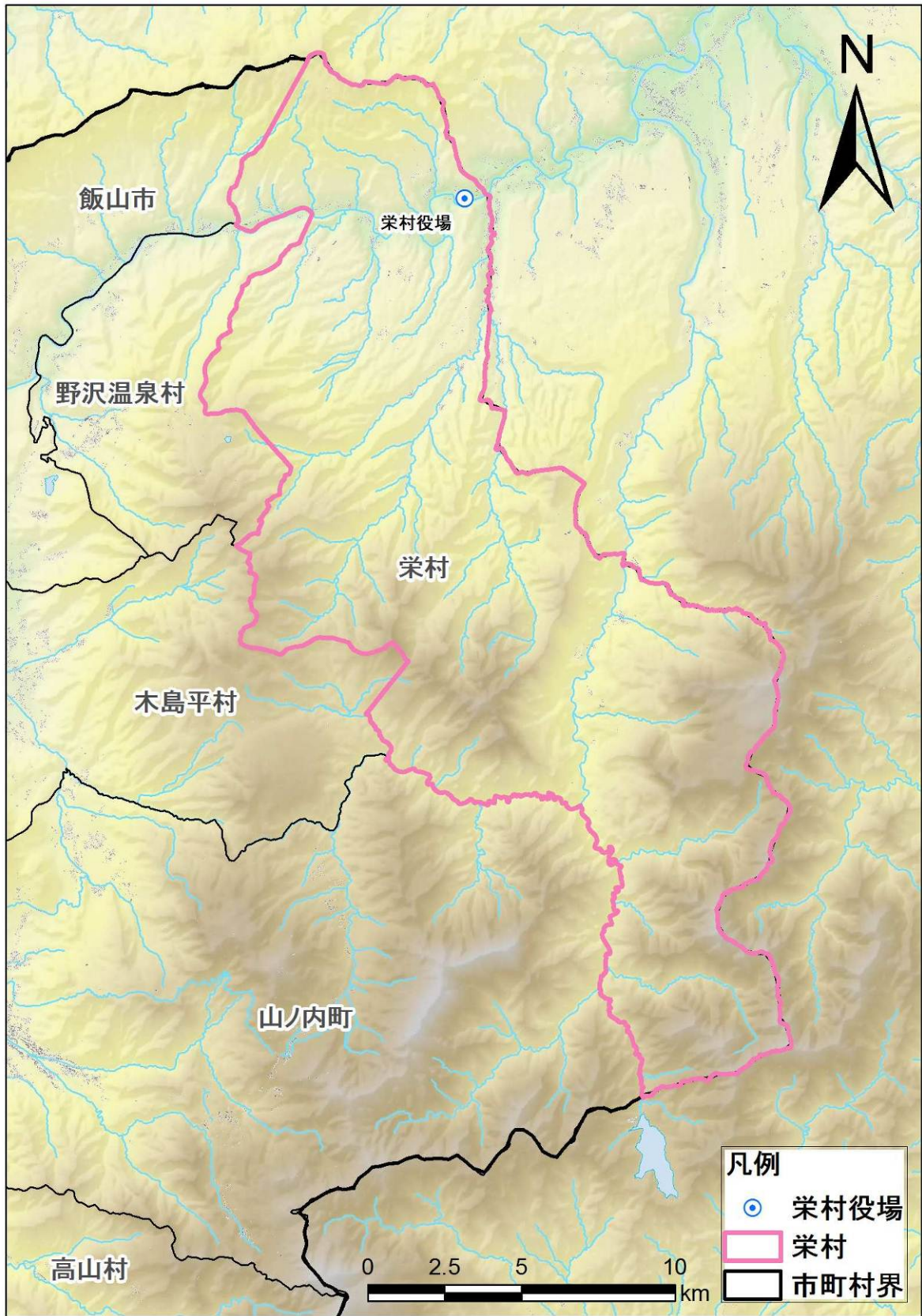


図 1-2 小水力発電施設関連調査の対象地域(長野県栄村)

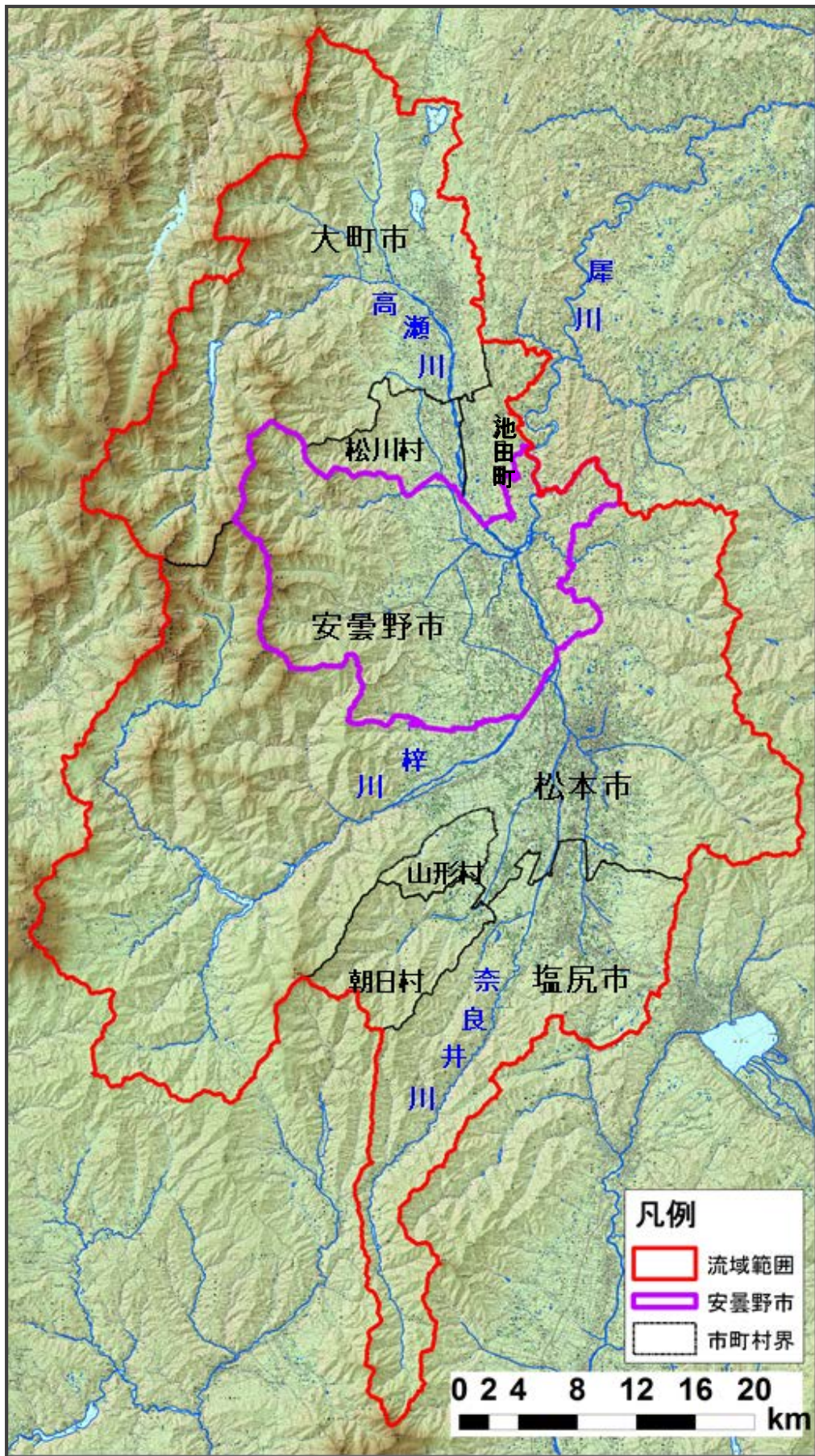


図 1-3 地下熱関連調査の対象地域(松本盆地全体及び安曇野市域)

(4) 委託期間

平成26年4月1日～平成27年3月31日

(5) 業務実施フロー

本業務の実施フローを図 1-4に示す。

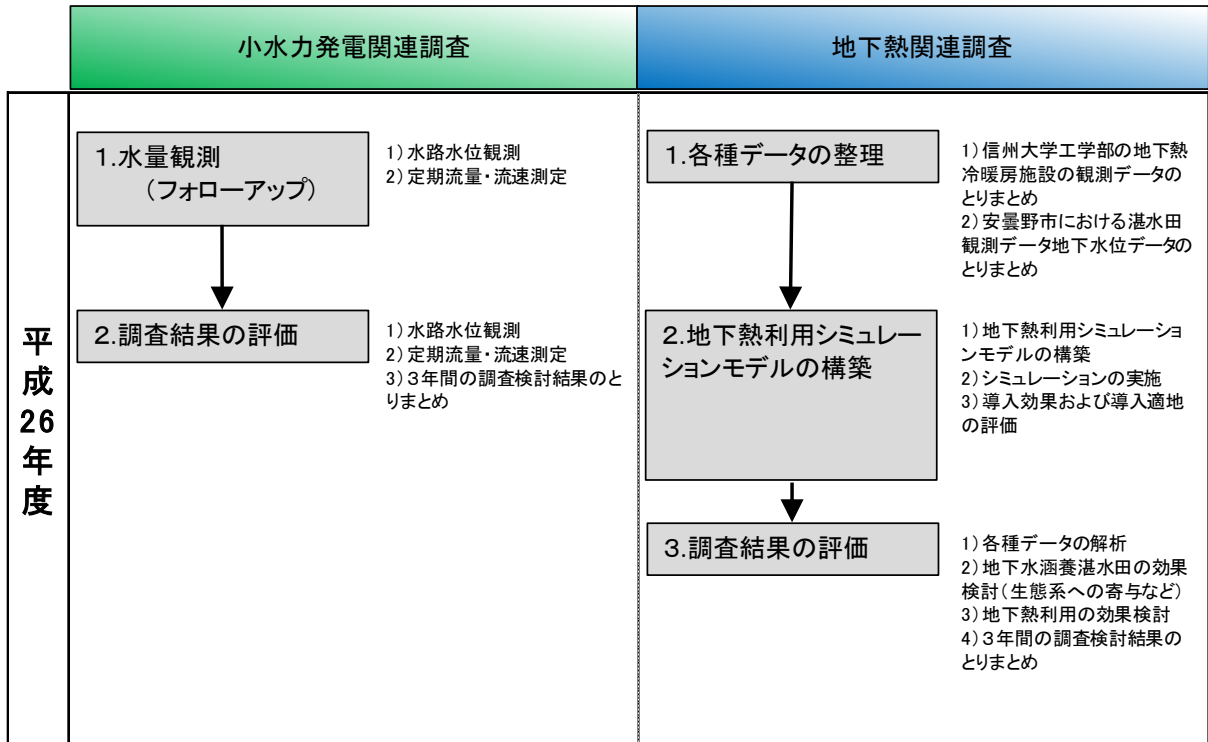


図 1-4 平成26年度業務の実施フロー

(6) 発注者

国立大学法人信州大学

(7) 受注者


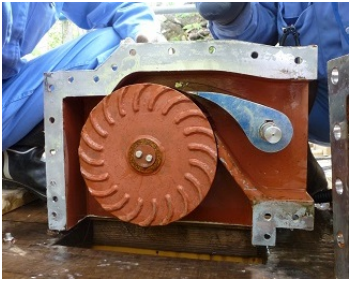
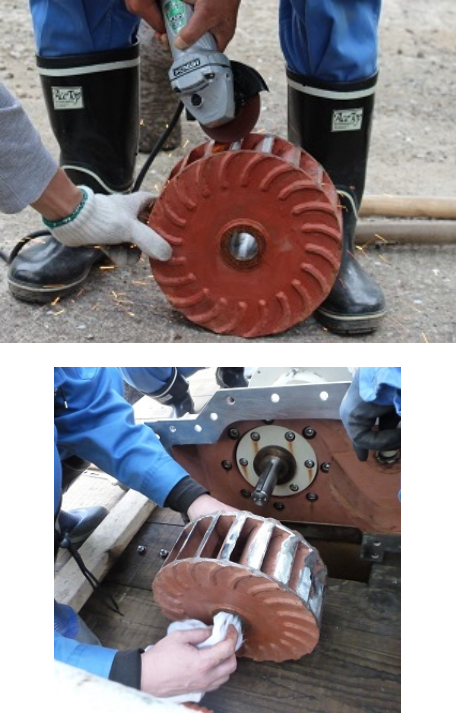
八千代エンジニアリング株式会社

2.1 発電能力の設定

(1) 水車の改造

発電量2kw未満の小水力水車について、少しでも効率を上げる工夫として、以下の改造を行った。その結果の流量は微増できた。

表 2-1 水車改造と流量

タイプ	概要	流量 (ℓ/s)	写真
A	ガイドベーンを三角形にしたもので、ガイドベーンの入口と出口の流水断面を均一化したもの	34	
B	ガイドベーンを流線形にしてガイドベーンの入口を広く、出口部を狭くしたもの	35	
C	ガイドベーンは流線形のままで水車ランナ入口をグラインダ削り調整（水流の剥離防止目的とした）	35	



(1) 発電量の確認

現地発電量の確認は、ドライヤーなどの動作負荷をかけ発電量を確認した結果は以下に示すとおりである。

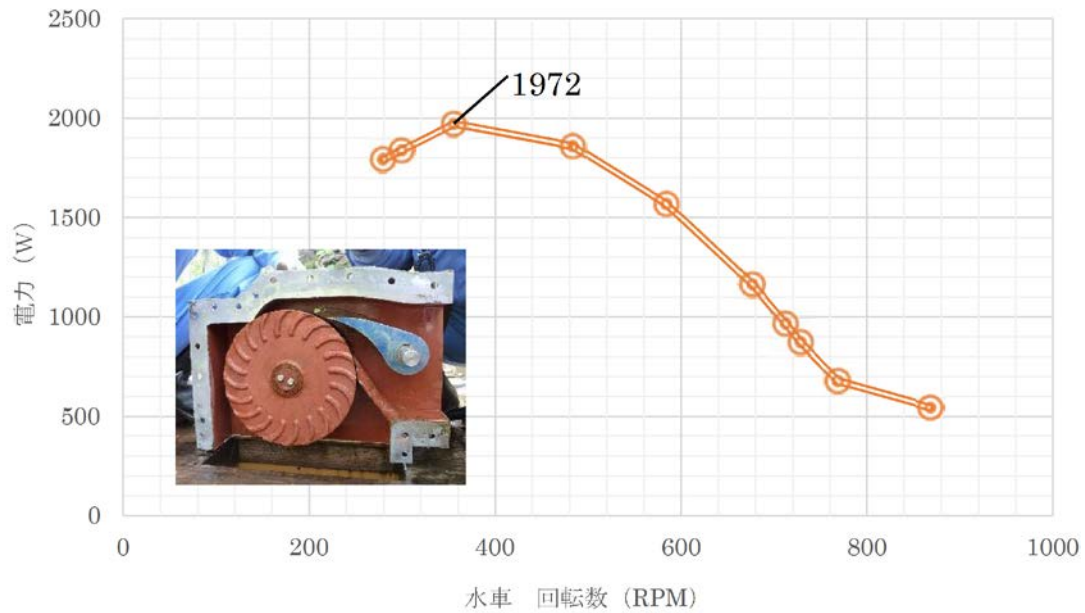


図 2.1 回転数と発電量

- ① 水車・発電機のみでの発電量  
水車効率  $C_p$ , 発電機効率  $C_g$  ⇒ 最大出力 1.97kW
- ② インバーター接続語の発電量  
 $C_p, C_g$  および インバーター効率  $C_i$  ⇒ 写真 2-1 の測定器を用いて、1.10kW
- ③ 電力消費負荷（ドライヤー）での電力  
 $C_p, C_g, C_i$  ドライヤーで負荷 ⇒ 写真 2-2 に示すとおり 1.26kW 出力（最大）



写真 2-1 インバーター器



写真 2-2 消費負荷（ドライヤー）での電力

## 2.2 今後の維持管理の提案

従来のスクリーン（網目形式）では、**写真2-3**に示すように、目詰まりしやすい状況だった。新除塵機（日本エンジニア株式会社製）によって、格段に目詰まりが少なくなり、定常的な発電が可能になった。新除塵機は**図2-3**に示すとおりである。

しかし、細かなゴミ、藻類はスクリーン目間で**写真2-4**に示すように詰まっている状況にある。



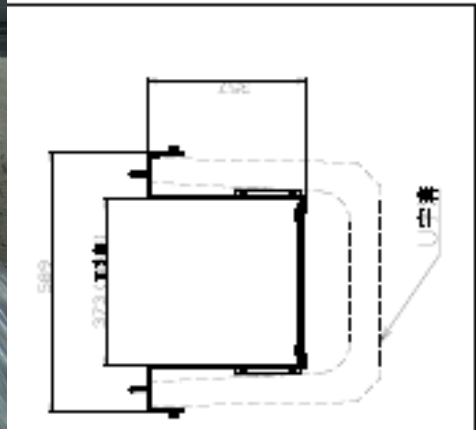
写真 2-3 従来スクリーンの目詰まり状況



写真 2-4 新除塵機での目詰まり状況



新スクリーンの下面放流状況



秋山郡除塵装置外形寸法図  
S-1:10

スクリーン区間

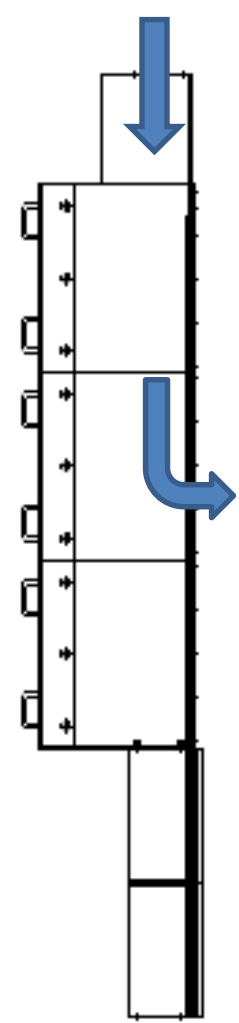
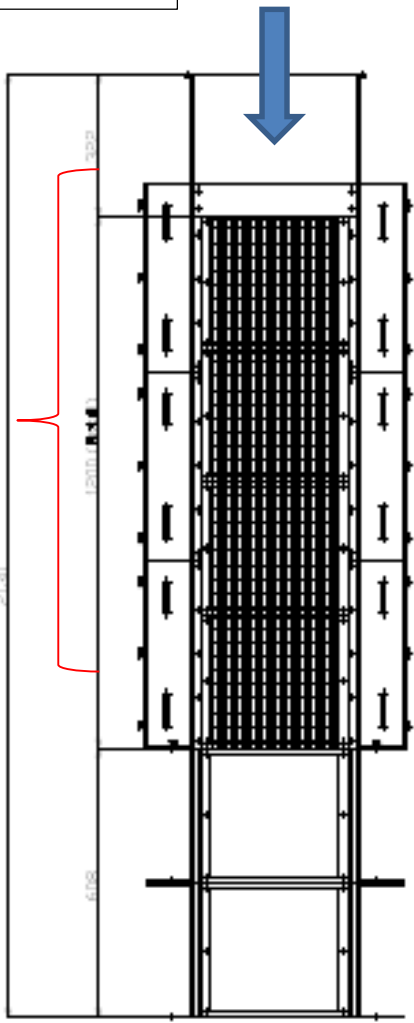


図 2-3 新除塵機構造

スクリーンの目詰まりの除去は、写真2-5に示すように、市販のブラシで簡単に除去できるもので、地元の方々にも容易にできるものである。



写真 2-5 スクリーン除塵状況

以上のことを考慮し、現地発電設備の維持管理については以下に示すことを提案する。

**【維持管理案】**

- ① 定常的な発電を行うには、水車へのゴミの混入を防ぐ事が重要である。周辺は落葉樹も多いことから、落ち葉が導水路（オープン水路）に直接入り込まないように蓋をする。
- ② 新除塵機に対しては、地元の方々にお願ひし、1回/日に箒やブラシでゴミ除去していただく。
- ③ 水車については、防音化しているといえども漏れ音を聞いて異状は音がないか聞くと共に、公衆トイレに電気を供給しているのて、照明スイッチを点灯してみても、正常に明かりが点くか確認してもらおう。
- ④ 発電設備の異状を発見した場合、地元ー信州大学間で協議する。

**【今後の課題】**

- a) 水車・発電機の設置架台はあくまで仮設材での設置であり、今後変形や変状がないか確認しておく。永久構造物とする場合は、架台設計・施工が必要である。
- b) コンバータからの表示は消費発電量を示すもので、今後は発電量を表示することの方がわかりやすい。

本検討パートにおいて、地下熱関連の調査を実施する。

なお、浅い地盤中に存在する定温の熱エネルギーを利用する技術である「地下熱利用」は、一般的に「地中熱利用」と呼称されることが多い。しかしながら、地下水の熱をそのまま利用するものや地中で土壌や間隙水等と熱交換するものなど、その熱源としての利用形態はさまざまである。そこでここでは、地中で熱交換するタイプ（クローズド型）を「地中熱」利用、「地中熱」に地下水を揚水し地上で熱交換するタイプ（オープン型）を含めた総称として「地下熱」利用と定義することとする。

### 3.1 松本盆地における地中熱導入適地（クローズド型）の検討方針

松本盆地を対象とする地中熱の導入適地評価は、富樫ほか<sup>1)</sup>の手法を参考にし、次のとおり検討をすすめる。

#### 【STEP1】対象地域のスクリーニング

地中熱利用のためには、その場所に熱需要が存在することが大前提となる。したがって、まずは対象地域の中で検討対象範囲を設定する。検討対象範囲は、平成25年度検討成果を踏まえて、広域地下水流動シミュレーションの検討範囲とする。

#### 【STEP2】水文地質情報の収集・整理

標準地域メッシュ区分に基づき、対象となる地域を約250m四方でメッシュ分割し、GISを用いてメッシュ毎の地質情報、地下水位情報を整理する。水文地質情報のメッシュ化に用いた情報は、平成24年度検討ならびに平成25年度検討において収集・整理したものをを用いる。

#### 【STEP3】帯水層情報およびパラメータの整理

地中熱利用システムの導入効果が高いのは、地中の熱伝導が大きく、さらに地下水流動による熱の移流効果が期待できる箇所である。そこで熱伝導現象の関連情報に加え、移流現象に関係する情報も整理対象として、地下水位、難透水基盤上面高、飽和帯・不飽和帯厚、平均熱伝導率、平均透水係数、ダルシー流速、見かけの熱伝導率等のメッシュ情報を作成する。

#### 【STEP4】数値解析による地中熱交換量の推算

長野ほか<sup>2)</sup>が開発したGroudClub<sup>3)</sup>を用いてシミュレーションを行い、熱交換井の必要本数を算定する。シミュレーションにおける二次側条件は、検討対象地域の気象や熱需要を加味して設定する。なお、GroundClubは、地中熱ヒートポンプの設計・性能予測ツールとしてシステムの計画・設計に広く利用されており、本検討ではGroundClubを用いた数値解析を行い、任意の二次側条件下における熱交換井の必要本数を評価する。

#### 【STEP5】地中熱ポテンシャルマップの作成

STEP4までの結果より、熱伝導のみおよび移流効果を見込んだ地中熱ポテンシャルが面情報として得られる。これにより、地中熱利用システムの導入適地を評価する。

## 3.2 地中熱ポテンシャルの評価方法

富樫ほか<sup>4)</sup>を参考とし、以下のとおり地中熱ポテンシャルを評価する。

### 3.2.1 本検討で用いる地中熱の移動の理論とパラメータ設定方法

#### (1) 理論

地域別の地中熱交換特性を定量的に評価するには、シミュレーションが有効である。本研究ではGroundClubを用いて、以下に示す円筒座標系の熱伝導方程式の解析解を用いたシミュレーションを実施する。

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{b(\rho c)}{b\lambda} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

ここに、 $T$ は温度(K)、 $r$ は半径(m)、 $\lambda$ は平均熱伝導率(W/m/K)、 $(\rho c)$ は平均体積熱容量である。また、 $\rho$ は地層の平均土粒子密度(kg/m<sup>3</sup>)、 $c$ は地層の平均比熱(J/kg/K)であり、 $\rho$ と $c$ を乗じて $(\rho c)$ が求まる。

なお、実際の地中の熱移動現象は、密度流を考慮した浸透流の方程式と熱の移流分散方程式に支配される連成現象となるが、ここでは単純な熱伝導方程式として、移流や分散による熱移動の影響を受けた「見かけの熱伝導率」を(1)式の $\lambda$ に用いることで便宜的に地下水流れの影響を見込むこととした。

#### (2) パラメータの評価

平均熱伝導率 $\lambda$ は、固相、液相、気相が混合した地層を代表する熱伝導率となり、 $\lambda$ の評価にはde Vriesモデル、直列並列混合モデル、Maxwellモデルなどの多くのモデルが提案されている<sup>4)</sup>が、本研究では直列・並列混合モデルを採用する。

直列型 $\lambda_i$ と並列型 $\lambda_{ii}$ の割合をde Vriesモデルと近い結果が得られる1:4とすると、(2)式より平均熱伝導率 $\lambda$ が得られる。

$$\begin{aligned} \lambda &= (\lambda_i + 4\lambda_{ii})/5 & (2) \\ \lambda_i &= nS_w \lambda_w + n(1-S_w)\lambda_a + (1-n)\lambda_s \\ 1/\lambda_{ii} &= nS_w/\lambda_w + n(1-S_w)/\lambda_a + (1-n)/\lambda_s \end{aligned}$$

ここに、 $\lambda_s$ 、 $\lambda_w$ 、 $\lambda_a$ はそれぞれ固相、液相、気相の熱伝導率、 $n$ は間隙率、 $S_w$ は飽和度である。

同様に、平均体積熱容量 $(\rho c)$ は、固相、液相、気相の体積熱容量となる $(\rho c)_s$ 、 $(\rho c)_w$ 、 $(\rho c)_a$ を用いて、固相・液相・気相混合系の体積熱容量として次式で与えられる。

$$\begin{aligned} (\rho c) &= nS_w(\rho c)_w \\ &\quad + n(1-S_w)(\rho c)_a + (1-n)(\rho c)_s \end{aligned} \quad (3)$$

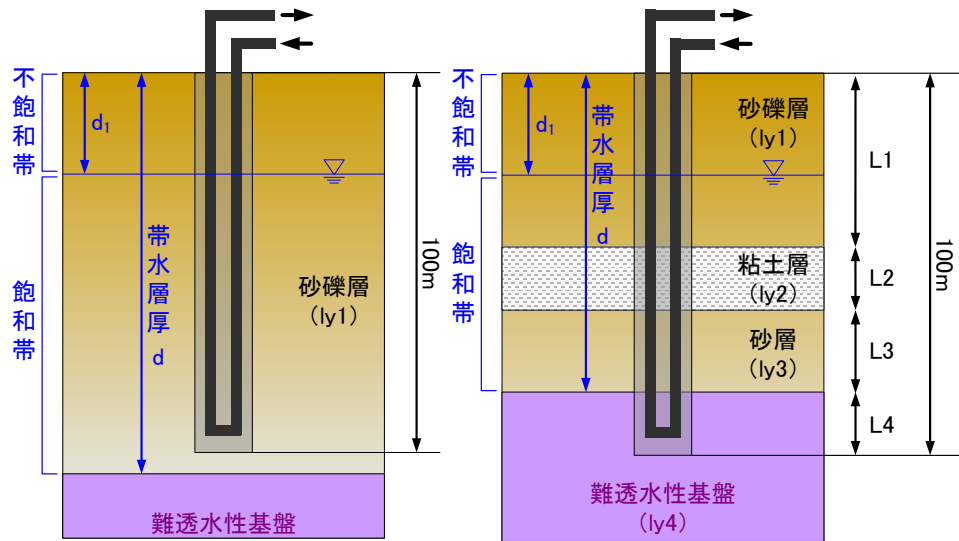


図 3-1 帯水層厚、飽和・不飽和帯厚、地層厚の考え方

なお本検討では、熱交換井の長さを100mとし、難透水性基盤の上部の位置する帯水層のみを対象として飽和度  $S_w$  を考えている。図 3-1のように、メッシュ毎に整理した帯水層厚を  $d$ 、不飽和帯厚を  $d_1$  とし、(4)式により飽和度  $S_w$  を算定した。

$$\begin{aligned}
 d \geq 100 & : S_w = (100 - d)/100 \\
 d < 100 & : S_w = (d - d_1)/d
 \end{aligned} \tag{4}$$

(2)式および(3)式において、液相（水）の熱伝導率  $\lambda_w$  と体積熱容量  $(\rho C)_w$ 、気相（空気）の熱伝導率  $\lambda_a$  と体積熱容量  $(\rho C)_a$  は場所により変化するものではないため、一定値として文献値を用いた。また、間隙率  $n$ 、固相の熱伝導率  $\lambda_s$ 、固相の体積熱容量  $(\rho C)_s$  は地質の構成材により異なるため、地域特性に依存する物性値となる。これらの物性値は既往文献を参考に概算した値を設定した。ちなみに、図 3-1に示すように対象地の地質構造が層状となっている場合は、(5)式、(6)式により固相の熱伝導率および体積熱容量の平均化を行う。

$$\begin{aligned}
 d \geq 100 & : \lambda_s = \sum_{l=1}^N \frac{L_l \cdot \lambda_l}{100} \\
 d < 100 & : \lambda_s = \sum_{l=1}^m \frac{L_l \cdot \lambda_l}{d}
 \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
 d \geq 100 & : (\rho C)_s = \sum_{l=1}^N \frac{L_l \cdot (\rho C)_l}{100} \\
 d < 100 & : (\rho C)_s = \sum_{l=1}^m \frac{L_l \cdot (\rho C)_l}{d}
 \end{aligned} \tag{6}$$

ここに、 $N$  は地表からの深度が100mまでに存在する地層の総数、 $I$  は最上部層を1とした場合の地層の番号、 $m$  は難透水基盤上面より上位に位置する地層の総数である。

また、難透水基盤を構成する岩類の間隙率、熱伝導率、体積熱容量はバラつきが大きく、また風化の程度による数値の変動が大きい。そこで帯水層厚  $d < 100$  となる場合は、難透水基盤のみを対象とし、間隙がすべて飽和していると見なして文献値より平均熱伝導率および平均体積熱容量を設定した。

さらに、帯水層を対象として(2)式、(3)式、(4)式、(5)式、(6)式により算定した帯水層の平均熱伝導率および平均体積熱容量を用いて、これらより帯水層厚と難透水基盤厚を用いた加重平均を行い、評価対象区間における平均値を決定している。

### (3) 移流の効果を考慮したパラメータの評価

前述のとおり、地中熱交換型（クローズド型）の地中熱利用システムは、地下水面の深度や地下水流速の大小により熱交換効率が大きく変化することが知られている<sup>5)</sup>。特に、地下水の流れに伴う熱の移動現象は移流と呼ばれ、図 3-2に示すように移流が卓越する場所では、熱伝導のみで熱交換する場合に比べて熱交換効率の向上が期待できる。また、移流現象が卓越すると、熱分散も顕著となる。

移流や熱分散による効果を定量的に評価するには、数値解析や流向流速試験等の原位置試験が必要となるが、本検討では前述のとおり、これら影響が反映された「見かけの熱伝導率」をパラメータに用いることで、便宜的に地下水流れの影響を考慮する。

以降において、地下水流速の情報から見かけの熱伝導率を概算する方法を整理する。

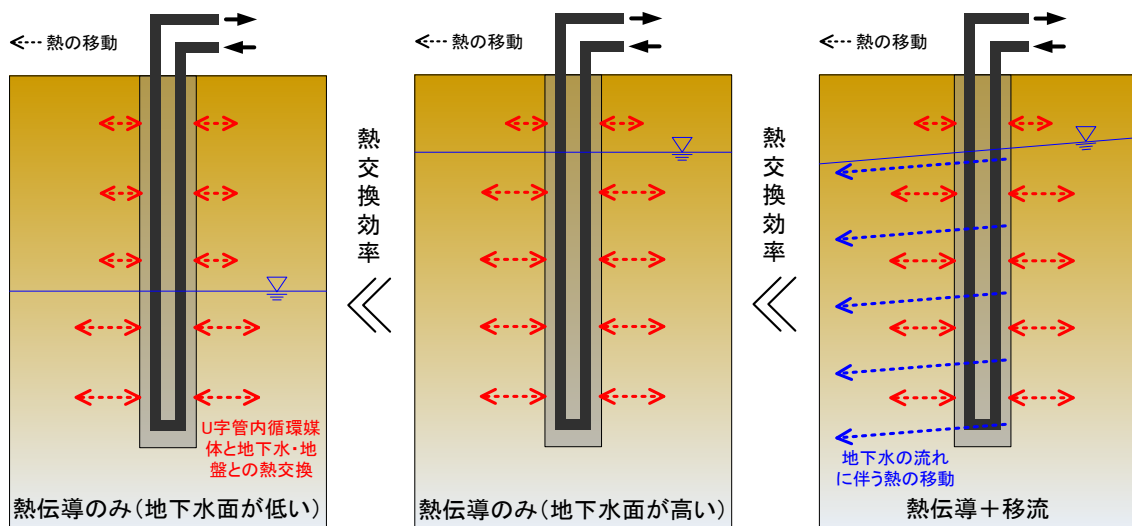


図 3-2 地下水環境と地中熱交換効率の関係



本検討では、冨樫ほか<sup>1)</sup>の提案方法にしたがい、大久保ほか<sup>6)</sup>の研究を参考にしてペクレ数 $P_e$ を変数として見かけの熱伝導率 $\lambda_a$ を概算する係数の算出式を適用し、ポテンシャル評価に移流効果を見込むこととした。

ペクレ数 $P_e[-]$ は新堀ら<sup>7)</sup>、藤縄・冨樫<sup>4)</sup>に従い $P_e=ul/\kappa_e$ で評価される。ここに、 $u$ はダルシー流速[m/s]、 $l$ は地中熱交換器外周長の半分の長さ[m]となる。また $\kappa_e$ は等価熱拡散率[m<sup>2</sup>/s]であり、 $\kappa_e=\lambda/(\rho c)$ で求めることができる。したがって、図 3-3に示す地層の熱伝導率 $\lambda$ に対する見かけの熱伝導率 $\lambda_a$ の比率とペクレ数 $P_e$ の関係より、 $P_e$ を変数として、 $\lambda_a/\lambda$ を概算する近似式が得られる。なお、図 3-4に示すとおり、熱交換井の深度方向において、飽和帯厚さが小さい箇所では移流効果も低減することが想定される。そこで、見かけの熱伝導率 $\lambda_a$ の評価の際は、地下水通過幅 $B$ [m] ( $d \geq 100$ の場合は $B=100-d_1$ )を用いて補正を行う。

以上より、見かけの熱伝導率 $\lambda_a$ の概算式として、次式を適用する。

$$\lambda_a = \left\{ \left( e^{0.0733P_e} - 1 \right) \left( B/100 \right) + 1 \right\} \lambda \quad (7)$$

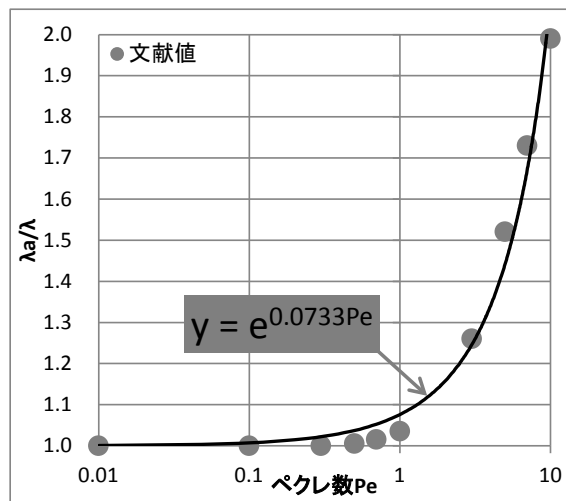


図 3-3 ペクレ数と熱伝導率の関係<sup>6)</sup>に加筆

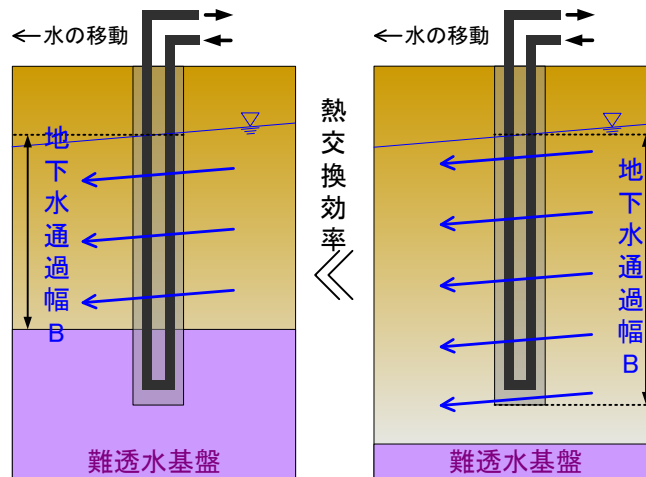


図 3-4 地下水通過幅 $B$ の考え方

ペクレ数 $P_e$ を求めるためには、予め地域におけるダルシー流速 $u$ の分布を整理しておく必要がある。本検討では、平成25年度検討において実施した広域地下水流動シミュレーションの結果を利用し、図3-5のとおりダルシー流速の面情報を得ており、この情報を用いた見かけの熱伝導率の評価を検討する。

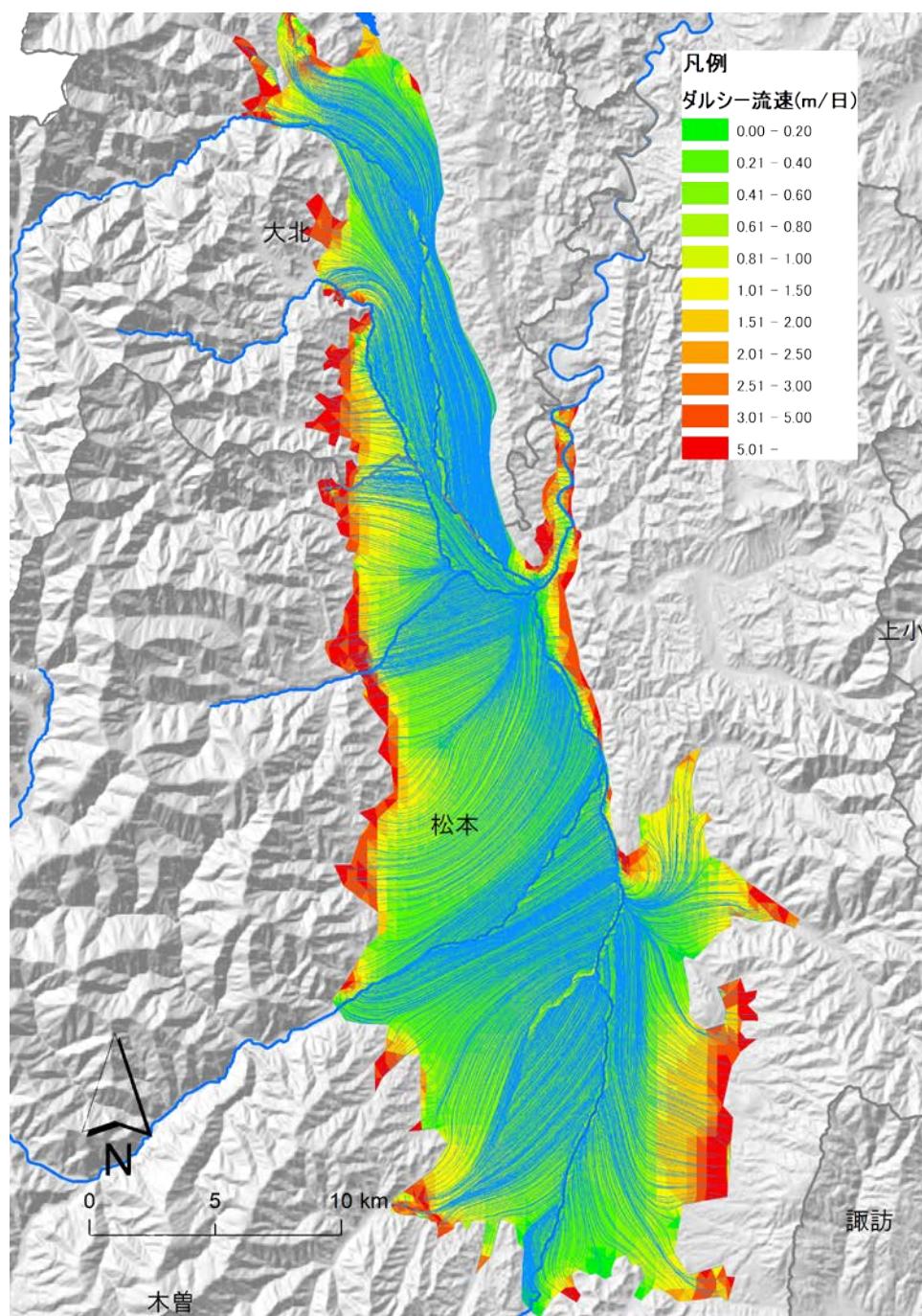


図 3-5 広域地下水流動シミュレーション結果（流線とダルシー流速分布）

なお、松本盆地においては、広域の地下水位一斉観測が実施されており、詳細な地下水面の情報が得られている。このような場合、富樫ほか<sup>1)</sup>にしたがって、地層の透水係数  $K$ 、動水勾配  $i$  から得られるダルシー流速  $q(=Ki)$  を算定し、移流現象に係るパラメータとして整理することも可能である。したがって、富樫ほか<sup>1)</sup> の現地観測結果に基づく評価手法で推定した地下水流速(ダルシー流速)を前述の地下水流動シミュレーション結果と比較し、両者に大きな相違がない場合には、正值となる地下水面情報ならびにこの情報から概算したダルシー流速を用いて地中熱ポテンシャルを評価することとする。

透水係数  $K$  は文献値や既往調査結果より推定するが、このとき、対象地の地質が互層構造となる場合は、(8)式により地層の平均透水係数を求める。

$$d \geq 100 \quad : \quad K = \sum_{l=1}^N \frac{L_l \cdot K_l}{100} \quad (8)$$

$$d < 100 \quad : \quad K = \sum_{l=1}^m \frac{L_l \cdot K_l}{d}$$

動水勾配  $i$  の概算には大谷ほか<sup>8)</sup>も用いているSobel法を適用し、(8)式より求まる微分係数  $f'(x, y)$  で表すことができる。ちなみにSobel法では、評価メッシュに隣接する8メッシュの地下水位と位置による重み係数を用いて、評価メッシュにおいて平均化した動水勾配を求めることができる。このときの計算に用いる重み係数を図 3-6に示す。

$$f'(x, y) = \sqrt{\left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2} \quad (9)$$

$$\frac{dz}{dx} = \frac{(h_6 + 2h_7 + h_8) - (h_1 + 2h_2 + h_3)}{8\Delta x}$$

$$\frac{dz}{dy} = \frac{(h_3 + 2h_5 + h_8) - (h_1 + 2h_4 + h_6)}{8\Delta y}$$

評価メッシュと隣接メッシュの標高値			x方向の重み係数			y方向の重み係数		
$h_1$	$h_4$	$h_6$	-1	0	1	-1	-2	-1
$h_2$	$h_0$	$h_7$	-2	0	2	0	0	0
$h_3$	$h_5$	$h_8$	-1	0	1	1	2	1

図 3-6 Sobel法で用いる重み係数

なお、Sobel法により求めた動水勾配  $i$  に透水係数  $K$  を乗じてダルシー流速  $q$  を算出できるが、図 3-7 のように地下水の流れる深度方向の厚さが小さい箇所では移流効果が低減することが想定される。そこで、移流を加味した評価の際には、ダルシー流速  $q$  に代表幅  $B$  ( $d \geq 100$  の場合は  $B = 100 - d_1$ ) を乗じることで地点別の通過流量  $Q$  を求め、これを評価指標に用いることとする。

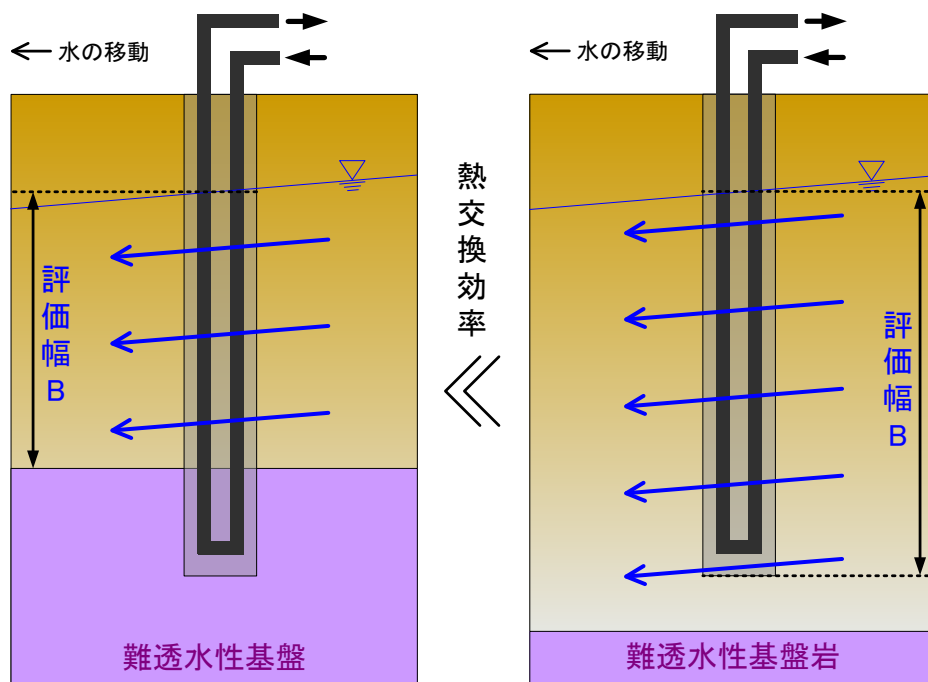


図 3-7 熱交換井通過流量による移流効果の考え方

### 3.2.2 広域を対象としたシステム運用シミュレーションの適用方法

熱交換井の必要本数を求めるには、熱伝導率 $\lambda$ や見かけの体積熱容量( $\rho C$ )を入力条件として、GroundClubにより地中熱交換井単位長さあたりの出力量 $P$ (W/m)を算定する必要がある。出力量 $P$ については手計算でも概算できるものの、熱交換器の材質や種別、地中熱交換井の充填材等による影響の反映が可能であり、任意の空調負荷条件における計算を速やかに実施できるという利点から本検討ではGround Clubを用いている。

なお、広域を対象として数値解析を実施する場合、メッシュの数だけ $\lambda$ と( $\rho C$ )の組合せができることから、すべてのメッシュにおいて計算を実行することは現実的でない。そこで、冨樫ほか<sup>1)</sup>では以下に示す数理最適化による評価手法を提案している。

出力量 $P$ は $\lambda$ と( $\rho C$ )を変数とする関数で表現できると考え、 $\lambda$ と( $\rho C$ )の2変数からなる出力量 $P$ の近似式を応答曲面法により作成し、これを全メッシュに展開することとした。

応答曲面法とは最適化問題の目標関数等に近似手法を用いた最適化の1つで、その近似に応答曲面と呼ばれる関数を使用した手法である。応答曲面とは、 $n$ 個の予測変数 $x_i$  ( $i=1\cdots n$ )から予測される応答 $y$ の関係を定式化したものである<sup>9)</sup>。

回帰係数 $\beta$ とし、応答関数として二次多項式を用いた場合、応答曲面式は(10)式で与えられる。

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^n \beta_{ij} x_i x_j \quad (10)$$

ここで、熱交換井単位長さ当りの出力量 $P$ を2変数 $\lambda$ 、( $\rho C$ )より近似する場合には、(10)式は(11)式に示す双二次多項式で表すことができる。

$$P \cong \beta_0 + \beta_1 \lambda + \beta_2 (\rho C) + \beta_3 \lambda^2 + \beta_4 (\rho C)^2 + \beta_5 \lambda (\rho C) \quad (11)$$

ここに、 $\beta_0 \sim \beta_5$ はパラメータである。

(10)式、(11)式における未知係数 $\beta$ は、回帰分析により最小二乗法を用いて求めることができる。回帰係数 $\beta$ の推定に用いる実験点の総数を $M$ 、説明変数の数を $k$ 、誤差を $\varepsilon$ とすると、その回帰モデルは行列表示で(12)式となる。

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\beta + \varepsilon \quad (12)$$

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_M \end{bmatrix} \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{M1} & x_{M2} & \cdots & x_{Mk} \end{bmatrix} \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_M \end{bmatrix} \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_M \end{bmatrix}$$

ここに、 $\mathbf{Y}$ は応答値ベクトル、 $\mathbf{X}$ は評価点による行列、 $\beta$ は回帰係数ベクトル、 $\varepsilon$ は誤差ベクトルである。

本検討では、(11)式による近似式作成のため、まずは複数パターンの $\lambda$ と $(\rho C)$ のパラメータデータセットを設定した。次に設定したデータセット毎の条件をGround Clubに入力し計算を実行し、熱交換井単位長さ当りの出力量 $P$ の計算値を得た。すなわち、 $P$ については以下のようなデータ群が得られる。

$$\left\{ \begin{array}{l} P_1(\lambda_1, (\rho C)_1) \\ P_2(\lambda_2, (\rho C)_2) \\ P_3(\lambda_3, (\rho C)_3) \\ \vdots \\ P_i(\lambda_i, (\rho C)_i) \\ \vdots \\ P_M(\lambda_M, (\rho C)_M) \end{array} \right.$$

ここに、 $i$  ( $i=1 \cdots M$ )は計算の試行ステップである。数値解析により得られた出力量 $P$ のデータ群を(11)式で近似する際に最も再現性が高くなるような $\beta_0 \sim \beta_5$ は、最小二乗曲面を生成することにより与えられる。なお本研究では、Microsoft Excelの分析ツールを用いてパラメータの推定を行った。

### 3.3 地中熱利用システムの運用シミュレーション条件の整理

松本盆地を対象として、地中熱利用システムの運用シミュレーションに必要な気象データを整理し、これらよりシステム導入を想定する施設の年間熱負荷変化を概算する。

図 3-8には気象庁「松本」観測所と「東京」観測所における気温（平年値）の年間推移を整理する。図からわかるとおり、「松本」は内陸性の気候特性を示し、「東京」に比べても気温の年間変動が大きいことがわかる。

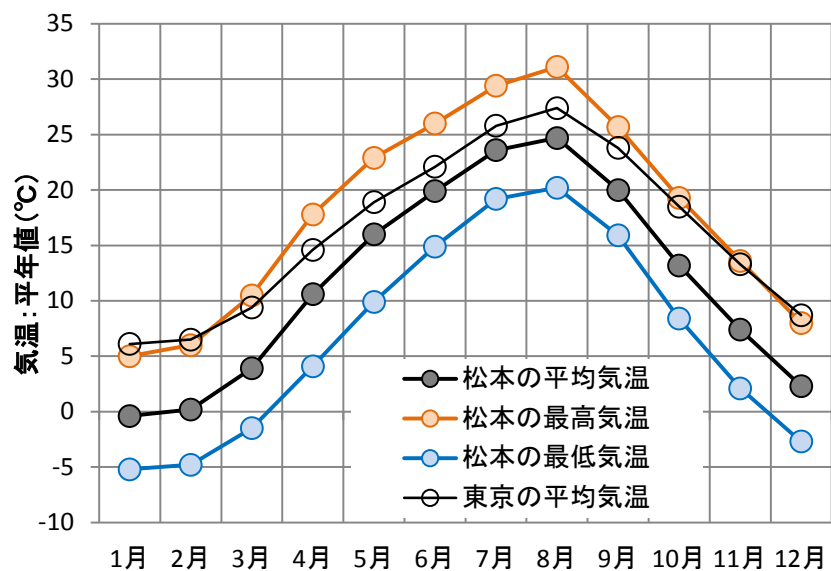


図 3-8 気象庁「松本」観測所と「東京」観測所における気温（平年値）の年間推移

### 3.3.1 建築物条件と気象データ

まず、建築物の条件を決定する。省エネ地域区分のうち長野県が該当する地域Ⅲについては、基準熱損失係数は $2.4 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{°C)}$ 、基準日射取得係数は $0.07$ として設定した。

また、「熱損失係数＝基準熱損失係数×熱損失補正率」、「日射取得係数＝基準日射取得係数×日射取得補正率」となることから、熱損失係数と日射取得係数の計算に必要な熱損失係数と日射取得補正率はそれぞれ $0.9$ と $0.8$ を採用した。

つぎに、熱負荷計算に必要な気象データとして、気象庁長野気象台（2004年）の1時間ピッチの気温、日射量、日射時間の各データを図 3-9のとおり整理した。

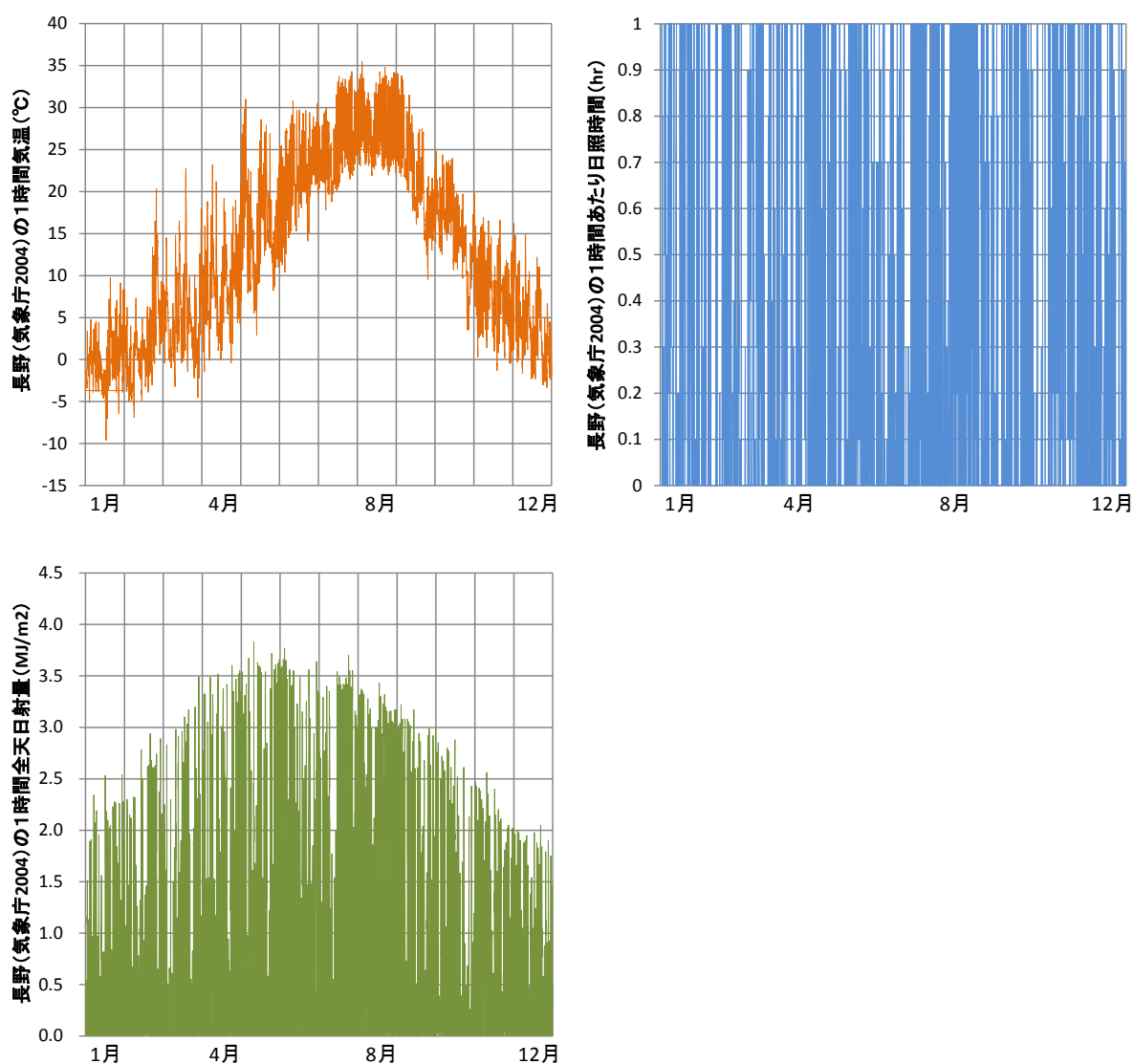


図 3-9 熱負荷データの作成に用いた気象データ



### 3.3.2 熱負荷計算

GroundClubを用いて、熱損失係数 (W/(m<sup>2</sup>・°C))、日射取得係数、延床面積 (m<sup>2</sup>)、外気温 (°C)、日射時間 (h)、全天日射量 (MJ/m<sup>2</sup>) より以下の式に従って夏季の冷房負荷 (W/m<sup>2</sup>) と冬季の暖房負荷 (W/m<sup>2</sup>) を計算する。

$$\text{夏季負荷} = \{ (\text{外気温} - 27) \times \text{熱損失係数} + \text{日射取得係数} \times \text{日射時間} \times \text{全天日射量} / 3.6 \times 1000 \} \times \text{延床面積}$$

$$\text{冬季負荷} = \{ (20 - \text{外気温}) \times \text{熱損失係数} - \text{日射取得係数} \times \text{日射時間} \times \text{全天日射量} / 3.6 \times 1000 \} \times \text{延床面積}$$

建物データ条件は、長野地方気象台の2004年の年間気象データを用いることとした。また延床面積は、「2009家庭用エネルギーハンドブック ((株)住環境計画研究所編)」の長野県(関東地方)におけるストック住宅および新設戸建住宅を想定し、120m<sup>2</sup>とした。また、冷房期間は、長野県の日中最高気温の平年値が28°Cを上回る期間を想定し、6月15日から9月15日とした。なお、冷房期間以外は暖房運転期間としてGroundClubの自動処理機能により設定している。負荷データは、気温15°Cを閾値として冷暖房を切り替える条件とした。

以上により計算した熱負荷を図 3-10に示す。計算で得られた最大暖房負荷は7.7 (kW)、最大冷房負荷は8.3 (kW)、年間暖房負荷は63.2 (GJ)、最大冷房負荷は15.1 (GJ) であり、最大負荷は冷房時に記録するものの、季節間の総負荷は暖房が冷房の4倍以上となり、暖房負荷が卓越することがわかる。なお、設定した熱負荷はあくまで推定のものであり、実際のものとは異なることに留意が必要である。

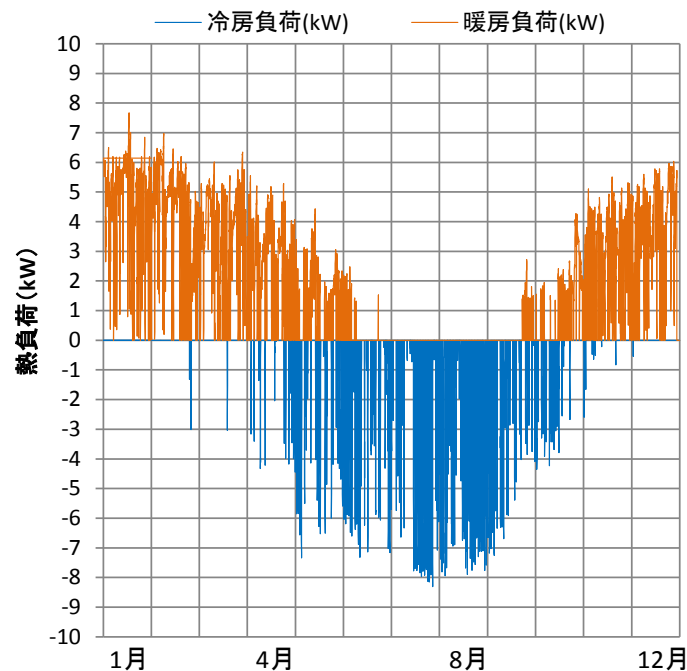


図 3-10 ポテンシャル評価に用いた熱負荷データ

### 3.4 地中熱利用システムの運用シミュレーションの実施

平成25年度に実施した広域地下水流動シミュレーション結果を活用し、地中熱利用システムの運用シミュレーションを実施する。なお、システム運用期間は3年程度を想定する。

システム運用シミュレーションは、地中熱利用システムの設計・性能予測ソフト「Ground Club」(図 3-11参照)を用いる予定とする。シミュレーションに必要な入力条件を表 3-1に示す。表中に整理するような地域性および施設に応じた詳細な各種条件を設定可能であることが、「Ground Club」の特徴と言える。また、シミュレーションにより冷暖房別「エネルギー消費量」「二酸化炭素排出量」等が算出でき、これにより熱交換井必要本数も定量的な根拠に基づき決定できる。

GSHP設計・性能評価ツール  
**「Ground Club」**

- ◇時間毎熱負荷に応じた超高速計算
- ◇ユーザーフレンドリーな入出力
- ◇円筒表面熱流境界の温度応答理論解の重合せによる計算

(GroundClubインターフェース)



販売元/ゼネラルヒートポンプ工業(株)

(地中熱交換井周辺の熱移動の基礎方程式)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{(\rho C)} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right)$$

$T$ : 土壌の温度[°C]  
 $t$ : 時間 [h]  
 $r$ : 半径 [m]  
 $\lambda$ : 地層の平均熱伝導 [W/m/K]  
 ⇒ 「**地層の熱伝導率**」  
 $\rho C$ : 地層の平均体積熱容量 [kJ/m³/K]  
 ⇒ 「**地層の体積熱容量**」

図 3-11 地中熱利用システム設計・性能予測ソフト「Ground Club」の概要

表 3-1 地中熱システム運用シミュレーションの設定条件

項目	条件項目	データ種例
1	地域情報・建築データ	延床面積、冷暖房期間等
2	負荷データ	気象データ、空調負荷等
3	放熱器	ファンコイル型・台数、インバータ有無等
4	ヒートポンプ	地中熱 HP 加熱・冷却 COP 等
5	地中熱交換器	地中熱交換器種類、熱交換器長さ等
6	土壌データ	熱伝導率、体積熱容量等

### 3.4.1 Ground Club によるシステム運用シミュレーションの基本条件

GroundClubによるシミュレーションを実施し、熱伝導率と体積熱容量より熱交換井単位長さあたりの出力量の近似式を作成した。以下に数値解析の基本条件を示す。

- ・長野県中部を対象とする
- ・気象条件は対象地域の気象観測データを用いる
- ・数値解析期間は3年とする
- ・冷暖房を想定した二次側の熱負荷条件を設定する
- ・熱交換器の素材は高密度ポリエチレン管のダブルUチューブとする
- ・熱交換器長さは100mとする
- ・ボアホール径は120mmとする

### 3.4.2 システム運用シミュレーションの諸条件

放熱器の設計温水入口温度は40℃、設計冷水入口温度は7℃とそれぞれ設定した。なお、床暖房は考慮しない。

ファンコイルは負荷データで設定する最大冷暖房負荷を賄うように設定する必要があるため、出力2kWのタイプを5台設置することとした。また、二次側放熱ポンプの循環流体はエチレングリコールとし、二次側放熱ポンプの運転は省エネルギーに配慮してインバータ制御を考慮した。

地中熱ヒートポンプの加熱COPは4.0とし、一次側の熱源ポンプについてはインバータ制御を考慮した。

単位長さあたりの出力量を算定するため、地中熱交換井本数は深度100mを1本とし、地中熱交換器のタイプは近年において導入実績が多いダブルUチューブとした。また、ヒートポンプから熱交換器までの平均距離は便宜的に40mとした。ボアホール径は一般的な径である120mmと仮定した。

地中熱交換器は高密度ポリエチレン管25A（外径34mm，内径27mm）を想定し、配管径は0.032m、熱伝導率は0.38W/m/Kと設定した。さらに、熱交換井孔内でのダブルUチューブ間隔は0.009mと想定した。

充填材はグラウトを想定し、熱伝導率は一般的な値となる2.0W/m・Kを採用した。

### 3.5 地中熱利用システムの導入適地の評価

システム運用シミュレーション結果を基に、松本盆地における地中熱利用システムの導入適地を評価する。

#### 3.5.1 対象地域の水文地質構造の概要<sup>10)</sup>

長野県中西部に位置する松本盆地を対象モデル地域として、地下熱ポテンシャルを評価した。松本盆地は、安曇野市、松本市、塩尻市にまたがり、山地や丘陵と、この間に南北に細長く伸びる段丘面あるいは沖積面からなる（図 3-12参照）。段丘面は盆地内で広い平坦な地形を形成しており、形成年代の違いから「波田面」及び「森口面」に区分される。これらの段丘は、犀川、梓川、奈良井川、穂高川等の河川によって形成されたもので、その分布も河川に沿ったものが多い。各段丘面は上流から下流へと高度を下げ、沖積面下に没している。沖積面は盆地全域に広く分布している。犀川、穂高川と高瀬川の三河川が合流する狭い地域は、北は青木湖・北アルプスの槍ヶ岳、西は安房峠から穂高岳・上高地、南は塩尻・中央アルプスに囲まれた広い地域の降水を集める特殊な地域である。さらに、この地域は地下水の流出も同様に集中するため、水量の豊富な湧泉帯（わさび田）を形成している。

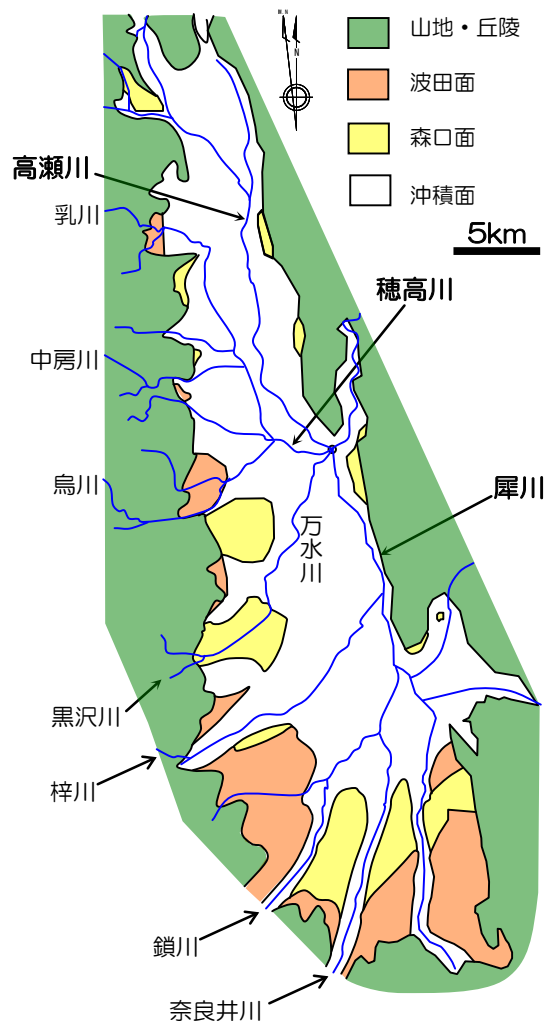


図 3-12 地質の分布

対象地には糸魚川－静岡構造線の主断層とされる姫川断層をはじめ、南北方向の断層が分布する。この姫川断層の西側には北アルプスの山々が連なり、先第三系である美濃帯と花崗岩が分布する。一方、小谷-中山断層の東側には、フォッサマグナとよばれる凹地に侵入した海を埋積した新第三紀中新世から新第三紀鮮新世の地層（複数の地層からなるため、以下では単に「中新統」と呼称する）が分布する。姫川断層と小谷-中山断層の間には新第三紀鮮新世から新第三紀鮮新世の大峰累層が分布する。

松本盆地を埋める堆積物は一般に砂礫などの粗粒相が主体をなし、その厚さは300～400mに達する（図 3-13参照）。これらは、古いものから梨ノ木礫層(中期更新世初期)、片丘礫層(中期更新世中期)、赤木山礫層(中山泥炭層を含む、中期更新世後期～後期更新世初期)、波田・千石礫層(後期更新世中期)、森口礫層(後期更新世後期)、沖積層(完新世)に区分され、いずれも帯水層として機能している。これらの地層は東側で松本盆地東縁断層により境される。

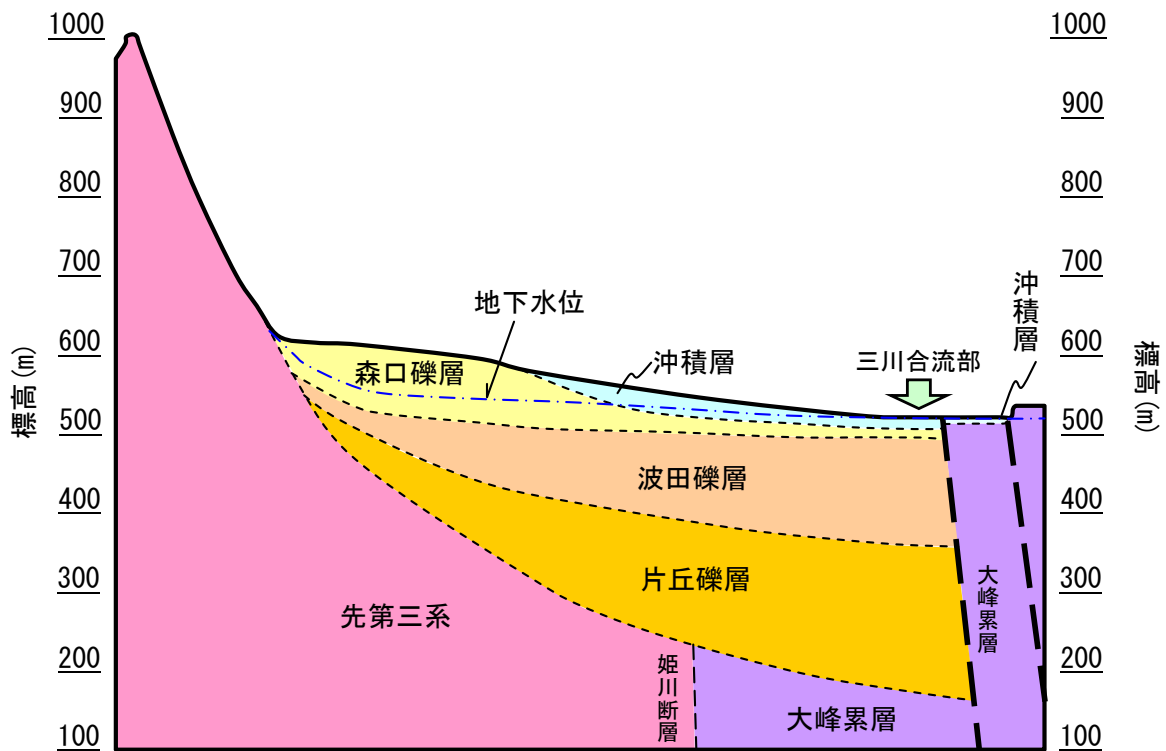


図 3-13 想定地質断面の模式図

### 3.5.2 地下水流動機構

国土交通省北陸地方整備局千曲川河川事務所が平成19年に実施した松本盆地全域を対象とする一斉地下水調査より得られた地下水等高線図ならびに平成25年度検討において実施した広域地下水流動シミュレーション結果を、それぞれ図 3-14に示す。これより、シミュレーション結果は概ね現況を再現できているといえる。

なお、これら調査、解析結果や既往文献より明らかとなっている対象地域の地下水流動機構を以降に整理する。

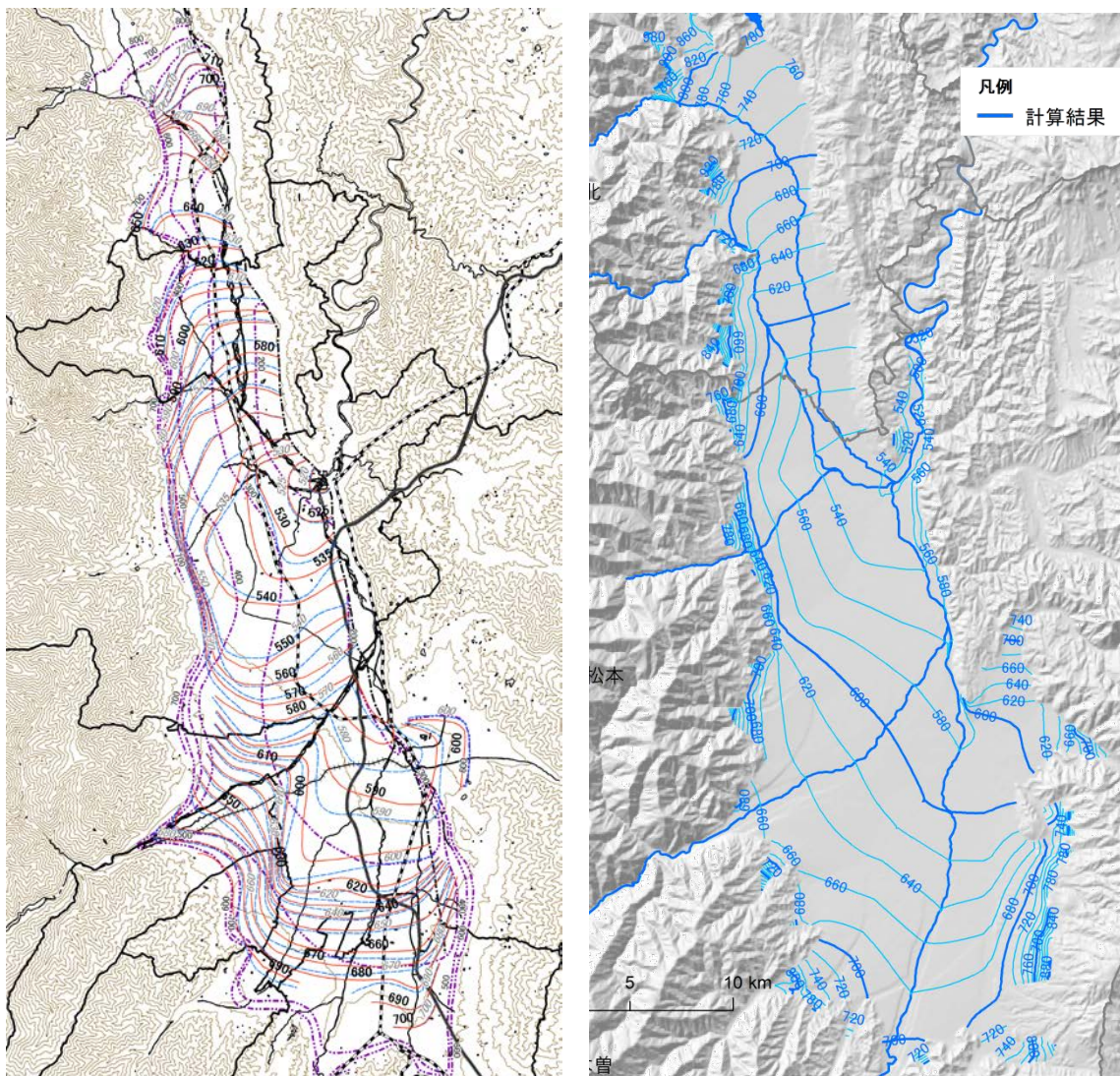


図 3-14 地下水流動機構（左：一斉観測結果、右：平成25年度解析結果）

(1) 松本盆地全域

地下水位等高線は三川合流部を中心とする半同心円状の形状をなし、地表等高線と調和し、地下水は三川合流部に向かい流動している。三川合流部付近の地下水位は、標高約520mにあり、地形の形状と調和して上流域ほど高くなっているが、その勾配は地表面勾配よりやや緩い。ただし、山地と平坦地の境付近で勾配が急になっている。

(2) 大町地域

大町市、松川村および池田町がある盆地北部は、東西3～6kmの南北に伸びた狭小な形状をなす。他の地域に比べ平坦地の地表面勾配が急なため、地下水位等高線の勾配が急で、北ほど勾配が大きい。ただし、大町市南部では地下水位等高線の間隔(勾配)がやや広く(緩く)なっている箇所がある。

(3) 安曇野地域

安曇野市域の平坦地は、三川合流部を東縁として東西7～10km、南北約15kmにわたって広がっている。三川合流部を中心に西側へ広がる半同心円状の地下水位等高線が特徴的である。南縁の梓川では地下水位等高線が下流に凸の形状を示しており、河川水から地下水帯への涵養(伏没)が示唆される。

(4) 松本地域

松本市北部(梓川と奈良井川合流点付近)を中心とする南側に扇状に開いた半同心円状の地下水位等高線をなす。安曇野地域と同様、梓川からの涵養が示唆される。松本市内の田川、奈良井川および鎖川流域で地下水位等高線の間隔が広がっている。

(5) 年間の地下水位変動特性

豊水期では渇水期の地下水位等高線に対し、下流に等高線が移動しており、全体的に地下水位が上昇していることが読み取れる。この傾向は、盆地中央部の安曇野地域や南部の松本地域で顕著である。ただし、三川合流部付近では下流への移動(地下水位の上昇)はわずかである。

大町市では地下水位等高線の形状がほとんど変化していない。これは大町市の年間の地下水位が、5～6月を最低、9～10月を最高とする変化パターンをなすため、2月と8月ではあまり差がないためである。

松本市東部では渇水期に比べ地下水位等高線が上流に移動している。この地域では農業用水の汲み上げによる影響を受けていると考えられる。

### 3.5.3 水文地質情報のメッシュデータ

収集した水文地質情報に基づき、地表標高、帯水層基盤高、地下水位をメッシュデータとして整理した。また、これらより帯水層厚、飽和帯厚、不飽和帯厚の各メッシュデータを整理し、飽和度を求めた。作成したメッシュデータを図 3-15～図 3-19に示す。

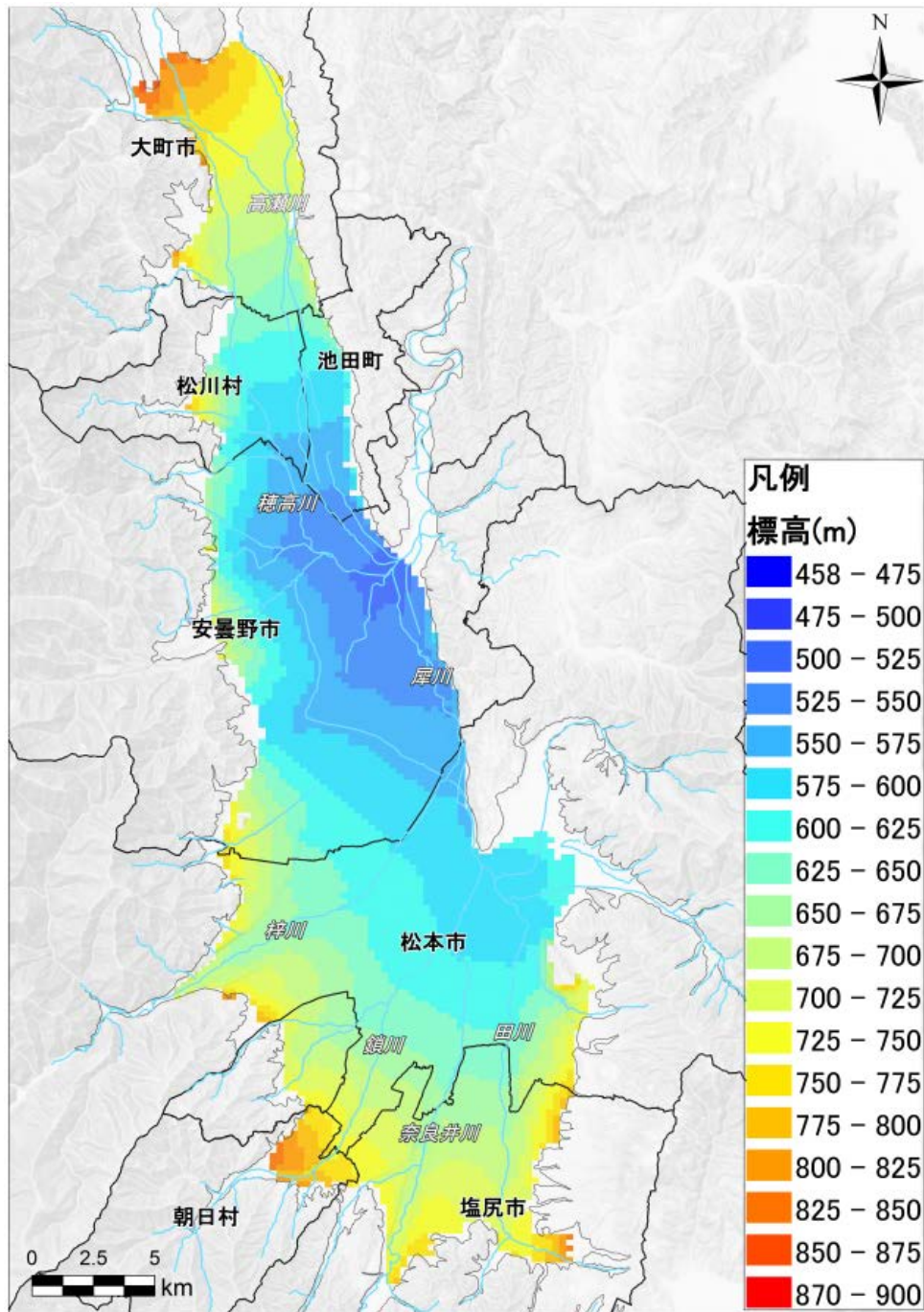


図 3-15 メッシュデータ：標高



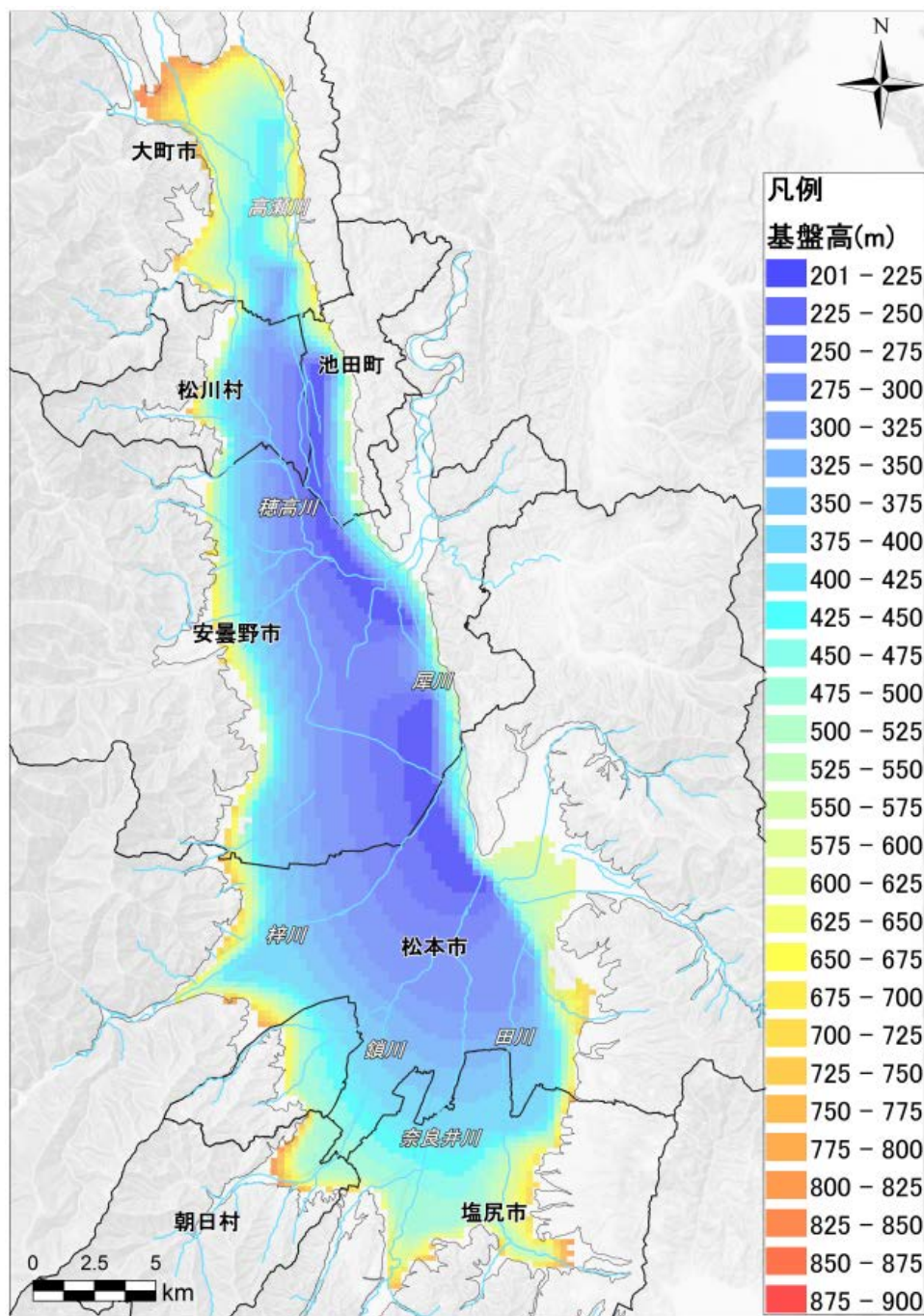


図 3-16 メッシュデータ：帯水層基盤高

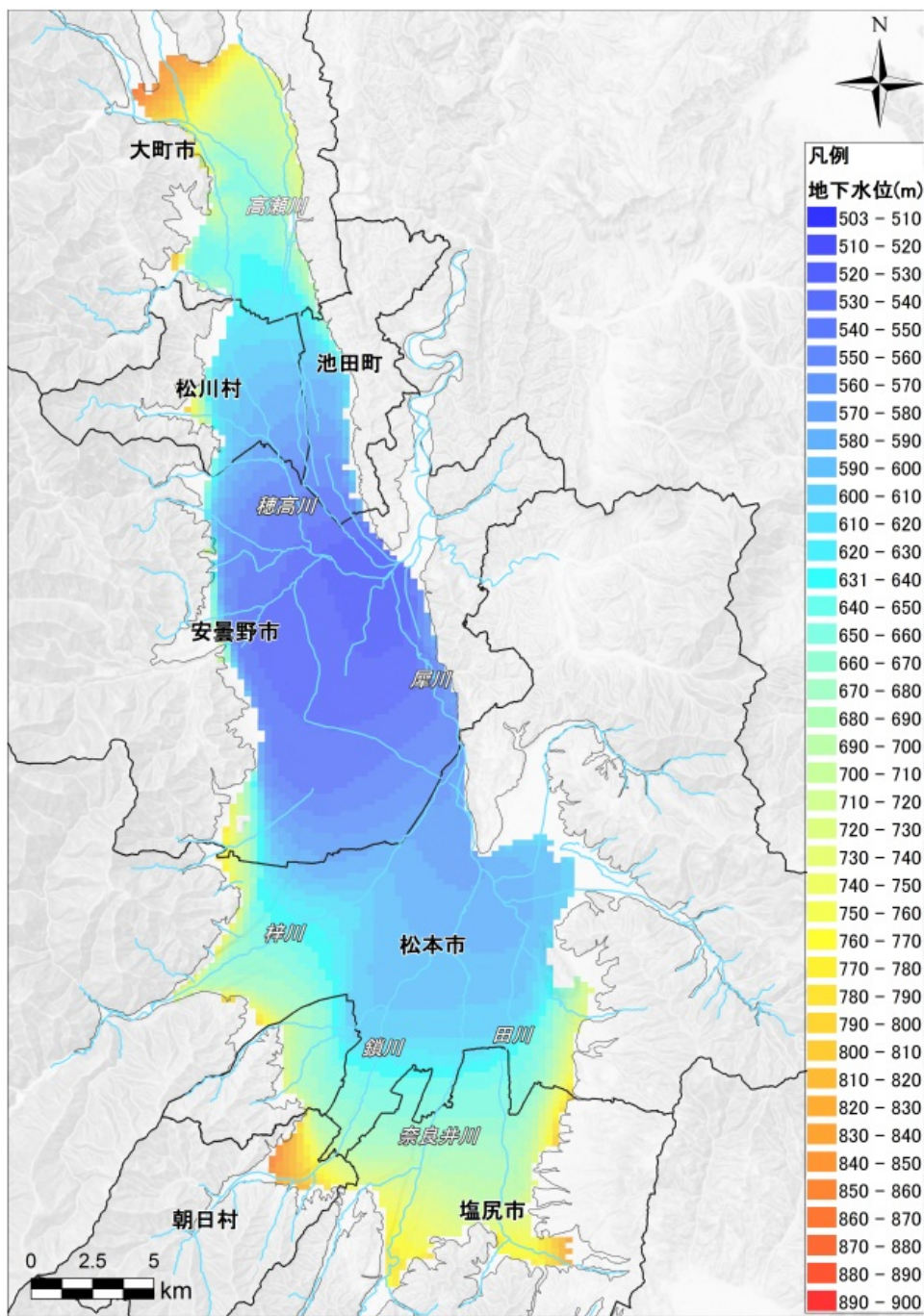


図 3-17 メッシュデータ：地下水位

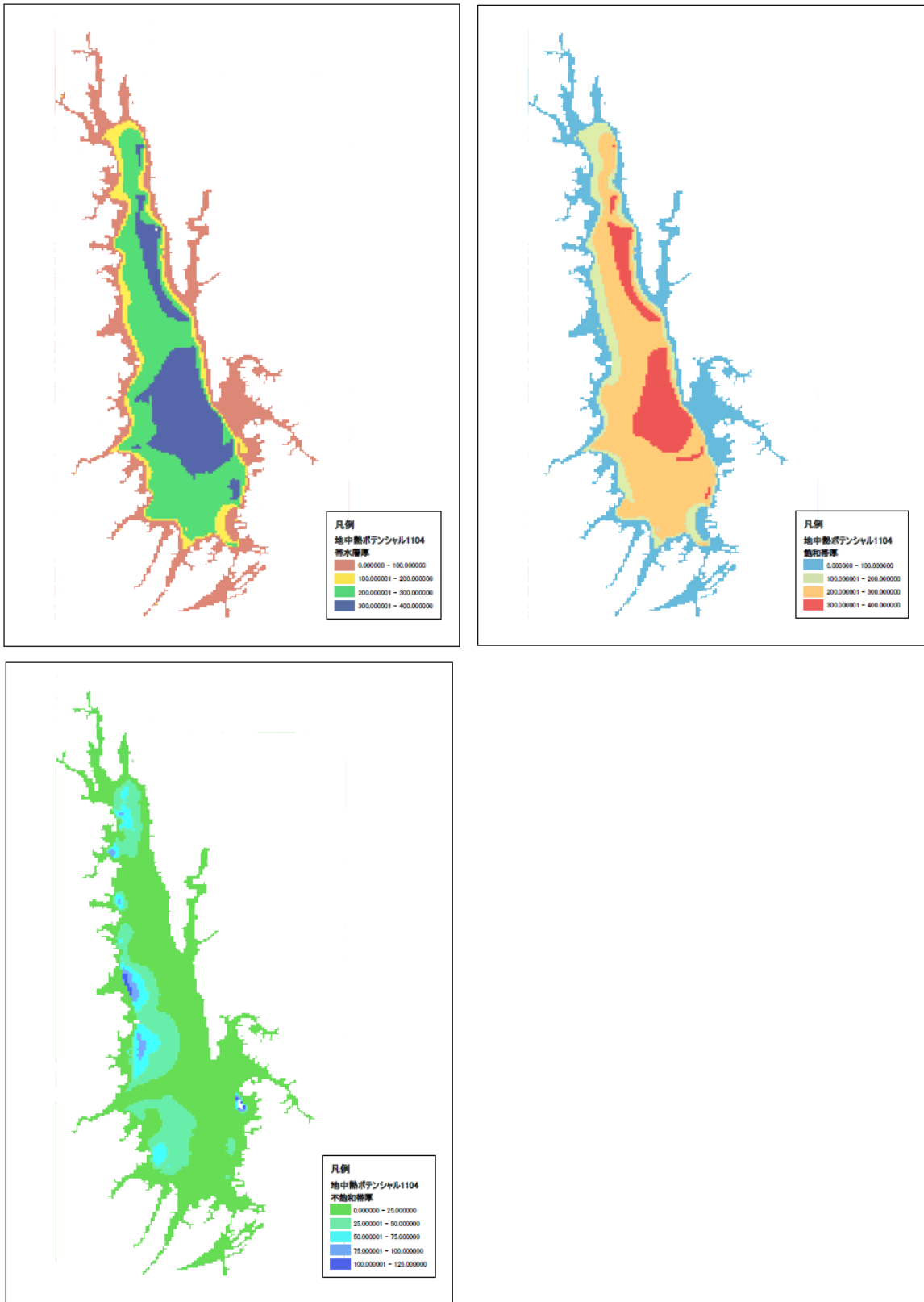


図 3-18 メッシュデータ：帯水層厚、飽和帯厚、不飽和帯厚

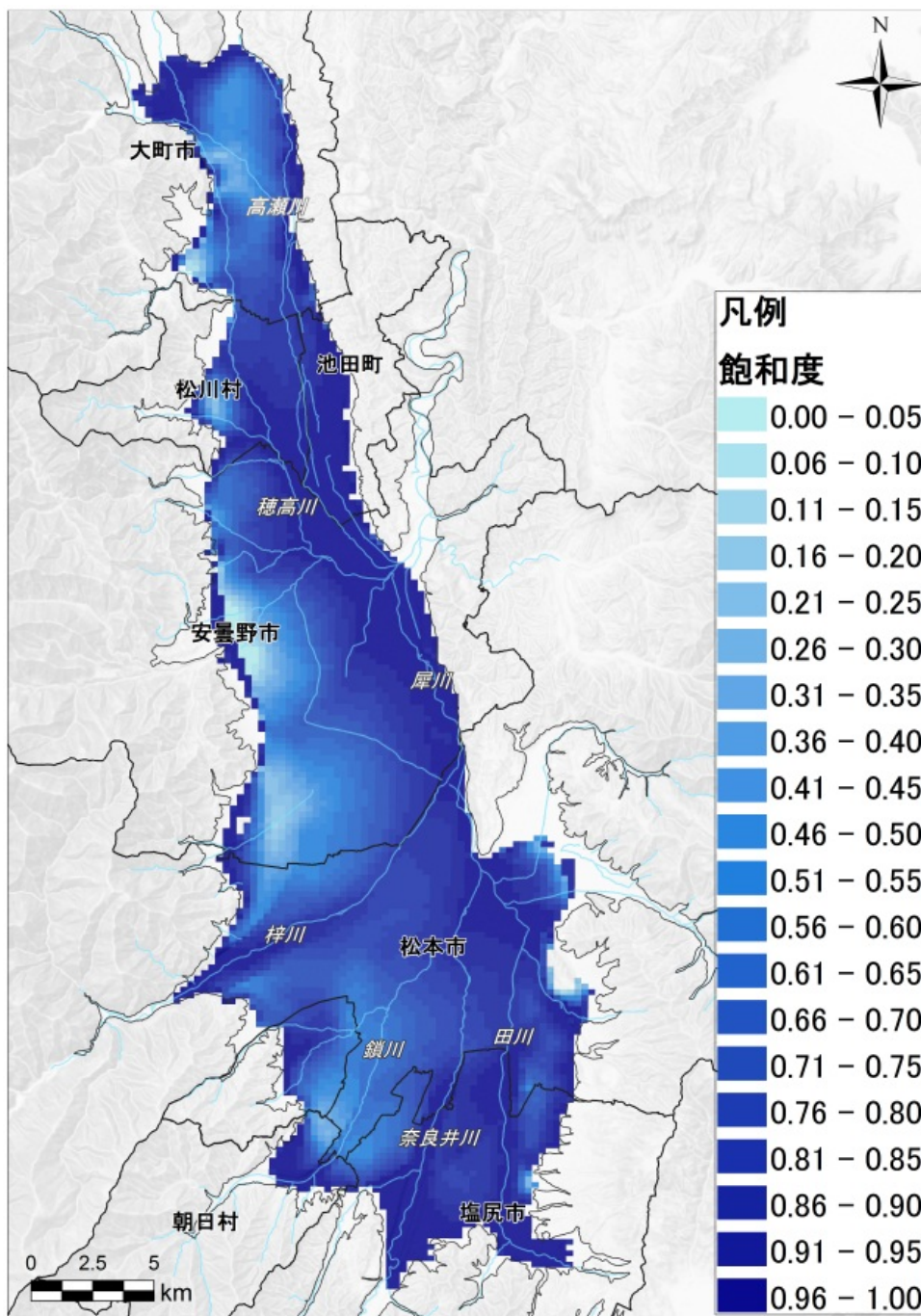


図 3-19 メッシュデータ：飽和度

### 3.5.4 平均化した帯水層パラメータの空間分布

(2)式および(3)式より算定した地層の平均熱伝導率および平均体積熱容量の分布を図 3-20 および図 3-21にそれぞれ示す。

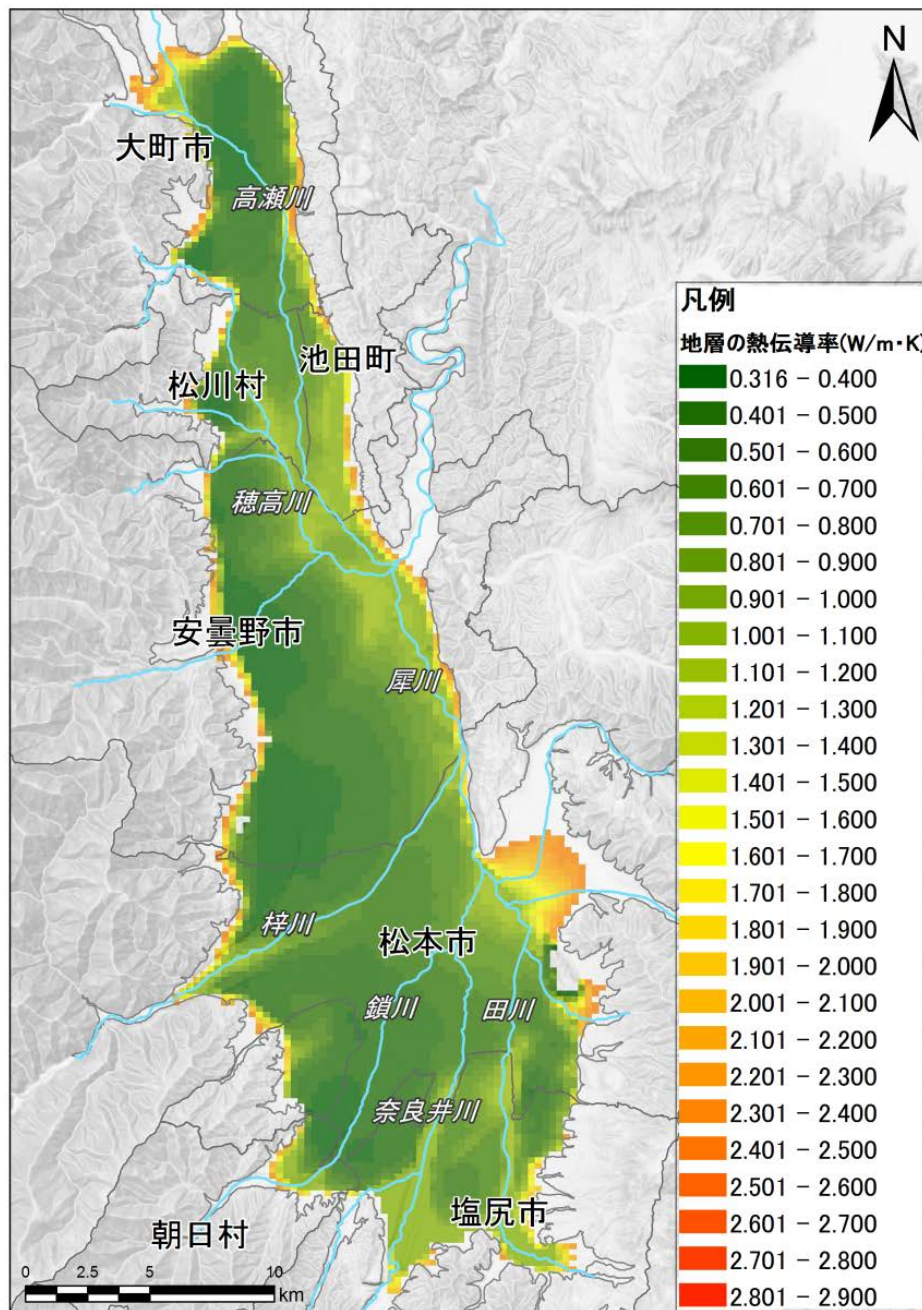


図 3-20 メッシュデータ：地層の平均熱伝導率

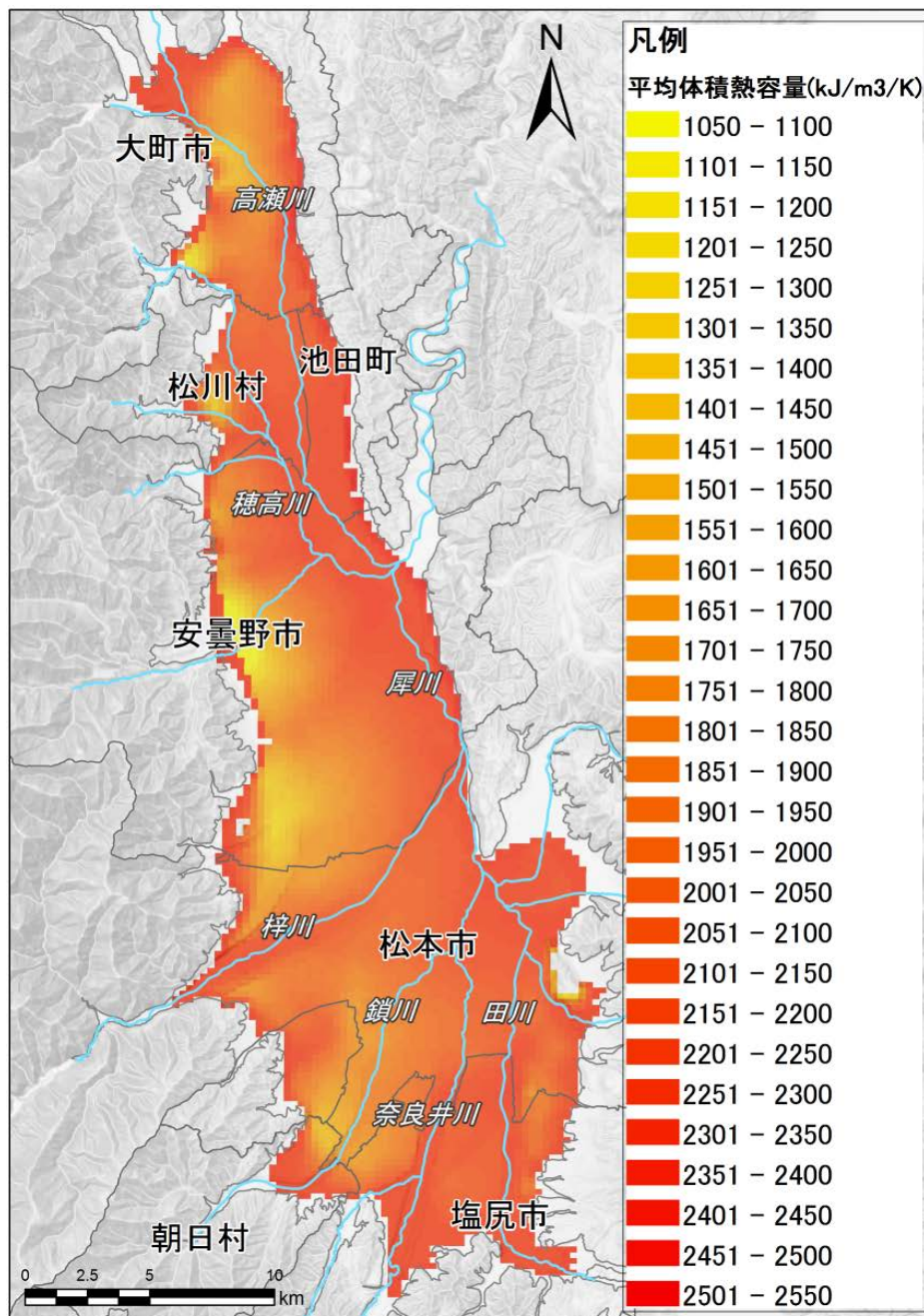


図 3-21 メッシュデータ：地層の平均体積熱容量

### 3.5.5 ダルシー流速および見かけの熱伝導率の評価

前述のとおり本検討では、現地観測結果に基づき(8)式、(9)式の評価手法で推定した地下水流速（ダルシー流速）を、平成25年度検討の地下水流動シミュレーション結果と比較し、両者に大きな相違がない場合には、正值となる地下水面情報ならびにこの情報から概算したダルシー流速を用いて地中熱ポテンシャルを評価することとする。

(8)式、(9)式の適用にあたり、図 3-22に示すとおり、透水係数およびSobel法により求めた動水勾配のメッシュデータを整理した。また、これら動水勾配と透水係数を乗じて求めたダルシー流速のメッシュデータを図 3-23に、平成25年度広域地下水流動シミュレーションにより得られたダルシー流速を図 3-24にそれぞれ整理する。両手法により評価したダルシー流速は、地下水面の分布の差異により、その分布には若干の違いがあるものの、ダルシー流速は概ね同程度の値となることがわかった。したがって、地域の水文地質環境をより詳細に表現出来る現地観測結果から概算したダルシー流速を用いて、以降の検討を行うこととした。

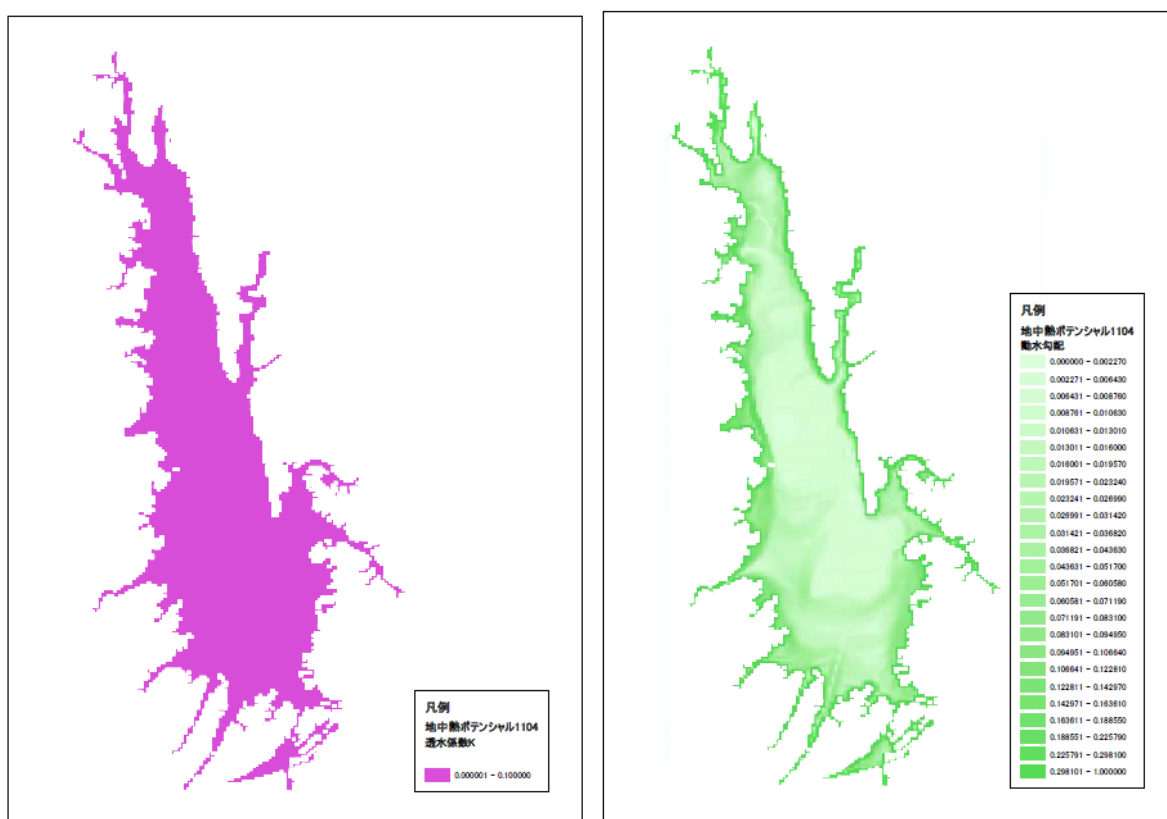


図 3-22 メッシュデータ：(左) 透水係数、(右) Sobel法で求めた動水勾配

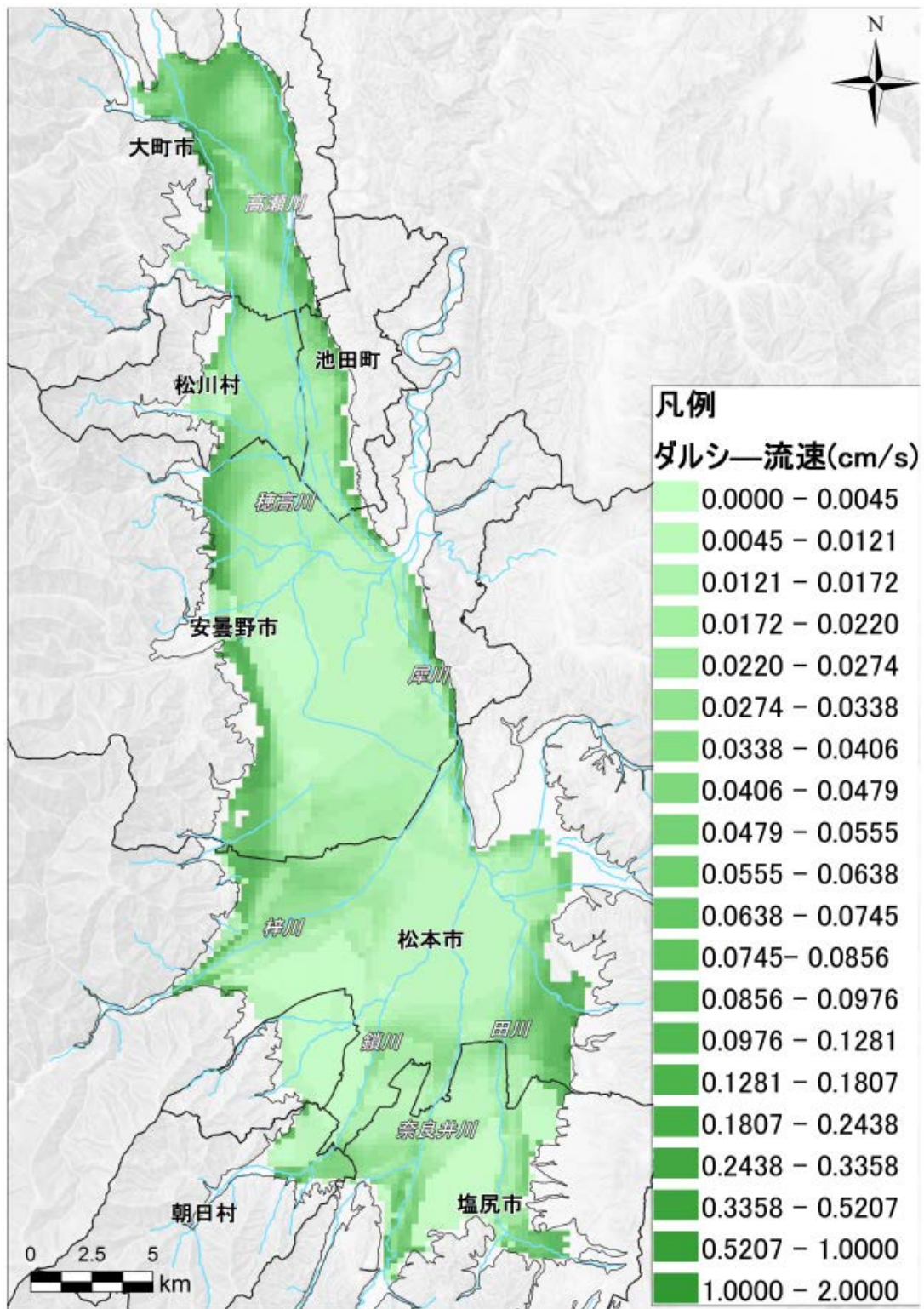


図 3-23 メッシュデータ：現地観測結果から概算したダルシー流速



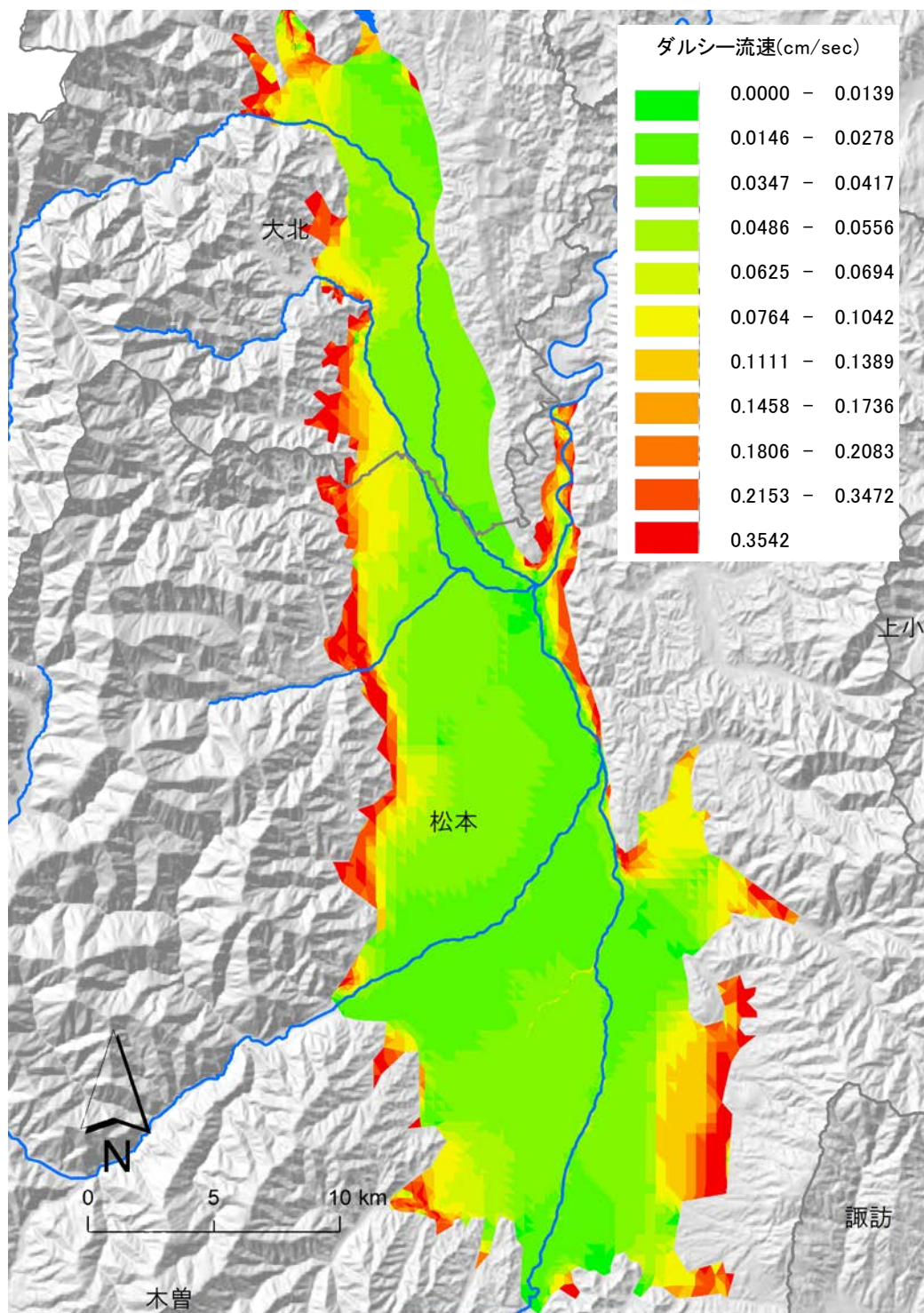


図 3-24 メッシュデータ：ダルシー流速（広域地下水流動シミュレーション結果）

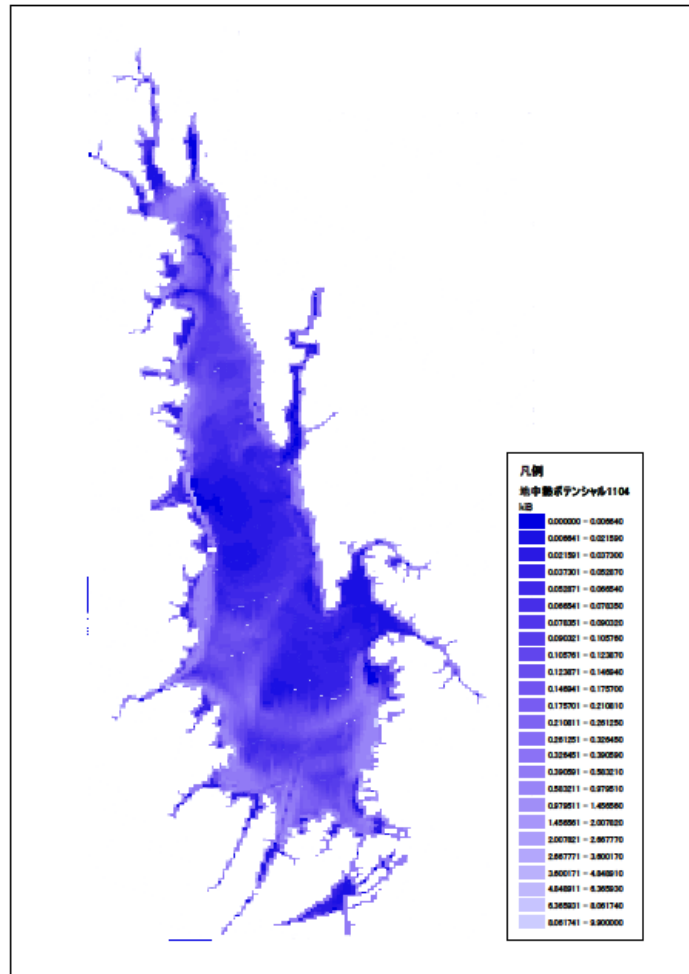


図 3-25 メッシュデータ：地下水通過幅B

図 3-25には、地下水通過幅Bのメッシュデータを示す。さらに、図に示す情報を用いて、(7)式から図 3-26のとおり見かけの熱伝導率のメッシュデータが得られる。

図 3-26の見かけの熱伝導率と、図 3-20の平均熱伝導率を比較すると、地下水面が高く地下水流速の大きい箇所ほど熱伝導率が増加することがわかる。

以降では、ここで評価した見かけの熱伝導率を用いて、システム運用シミュレーションを実施することとした。

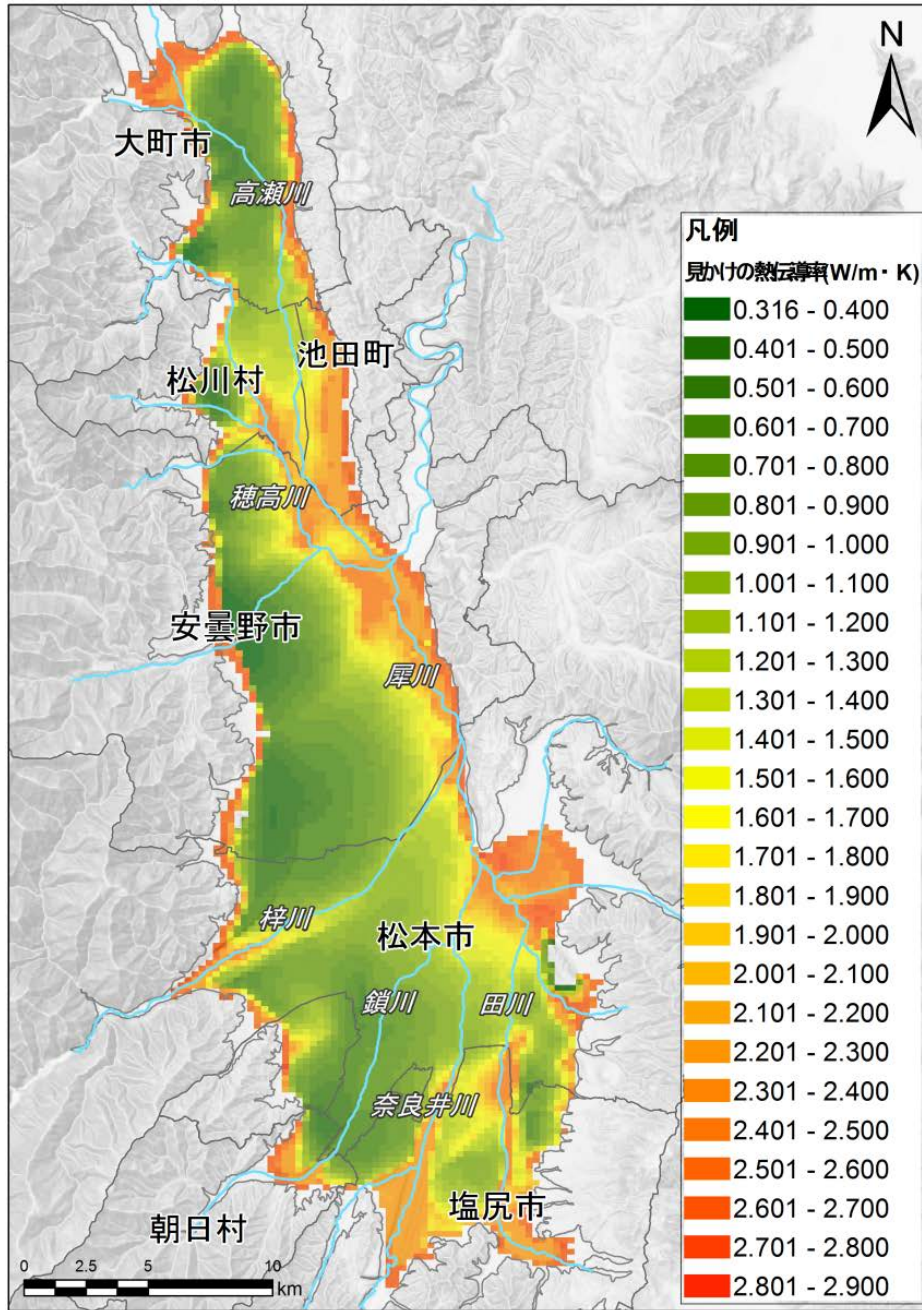


図 3-26 メッシュデータ：ダルシー流速（広域地下水流動シミュレーション結果）

### 3.5.6 松本盆地における熱交換量評価式の作成

文献より整理した平均熱伝導率および平均体積熱容量でそれぞれ想定される最大値と最小値を上下限とし、パラメータデータセット ( $M = 113$ ) を設定した。なおGroundClubでは、土粒子密度  $\rho$  と比熱  $C$  を別々に入力するインターフェースとなっているが、内部処理により土粒子密度  $\rho$  と比熱  $C$  を乗じて体積熱容量 ( $\rho C$ ) としている。

Ground Clubによる数値解析結果を利用して、(11)式で与えられる近似式を作成した。なお、暖房期間と冷房期間では熱負荷が異なるため、暖房期間と冷房期間でそれぞれ熱交換井単位長さあたりの出力量を算定している。したがってここでは、暖房期間と冷房期間を対象に近似式を作成した。なお、単位自由度あたりの残差を比較する自由度調整決定係数  $R^2$  により近似式の評価を実施したところ、平均熱伝導率に対して閾値 ( $\lambda = 2.0$ ) を設け、近似式を個別に作成することでGroundClub計算値  $P$  の近似精度の向上が確認できた。そこで、冷暖房共に、平均熱伝導率  $\lambda$  が2.0未満と2.0以上の場合でそれぞれ近似式を作成した。

同定したパラメータを表 3-2および表 3-3にそれぞれ整理する。

表 3-2 冷房運転時の近似式のパラメータ

冷房運転時			
$\lambda < 2.0$ (サンプル数29)		$\lambda \geq 2.0$ (サンプル数84)	
$\beta_0$	44.86254190	$\beta_0$	41.463144770
$\beta_1$	-3.34081404	$\beta_1$	-0.206751209
$\beta_2$	-0.00061707	$\beta_2$	-0.000142619
$\beta_3$	0.81245012	$\beta_3$	0.010748269
$\beta_4$	0.000000054	$\beta_4$	0.000000010
$\beta_5$	0.000149561	$\beta_5$	0.000009564

表 3-3 暖房運転時の近似式のパラメータ

暖房運転時			
$\lambda < 2.0$ (サンプル数29)		$\lambda \geq 2.0$ (サンプル数84)	
$\beta_0$	16.422011170	$\beta_0$	24.788345680
$\beta_1$	8.438068635	$\beta_1$	0.654317290
$\beta_2$	0.000686496	$\beta_2$	0.000240795
$\beta_3$	-1.973822825	$\beta_3$	-0.037057748
$\beta_4$	-0.000000059	$\beta_4$	-0.000000018
$\beta_5$	-0.000123927	$\beta_5$	-0.000014916

表 3-2および表 3-3に整理したパラメータを用いて、(11)式から求めた近似値 $\overline{P}_i$ とGroundClubの計算値 $P_i$ との相関性を確認する。

図 3-27は冷房運転時と暖房運転時のGroundClubの計算値 $P_i$ と近似値 $\overline{P}_i$ を、それぞれ比較したものである。これらより、自由度調整決定係数 $R^2$ は共に0.99程度となり、非常に高い相関が確認できた。この結果から、作成した近似式を対象地域に適用可能と判断した。

ちなみに、シミュレーションの結果、平均熱伝導率が小さい場合は暖房時の採熱量が小さく、冷房時の放熱量が大きい傾向が確認できた。これは、冷房時は地中に放熱するため、土壌が熱伝導しにくい場合は放熱による土壌の温度上昇が小さく、熱交換器と土壌の温度ポテンシャルが大きい状態で維持されるためだと推察できる。逆に、暖房時は地中から採熱するため、熱伝導率が小さく土壌の熱が熱交換器に伝わりにくい場合、採熱効率が低下するものと考えられる。さらに、図 3-27を見ると、冷房時に比べて暖房時の方が出力量のバラつきが大きいことがわかる。これは、暖房時ほど地質や地下水位などの地域特性の影響を受けることを示している。なお、本検討ではシステム運用シミュレーション期間を3年間としており、システムを長期間運用する場合、徐々にではあるが、経年的に熱交換効率が低下することが確認できた。

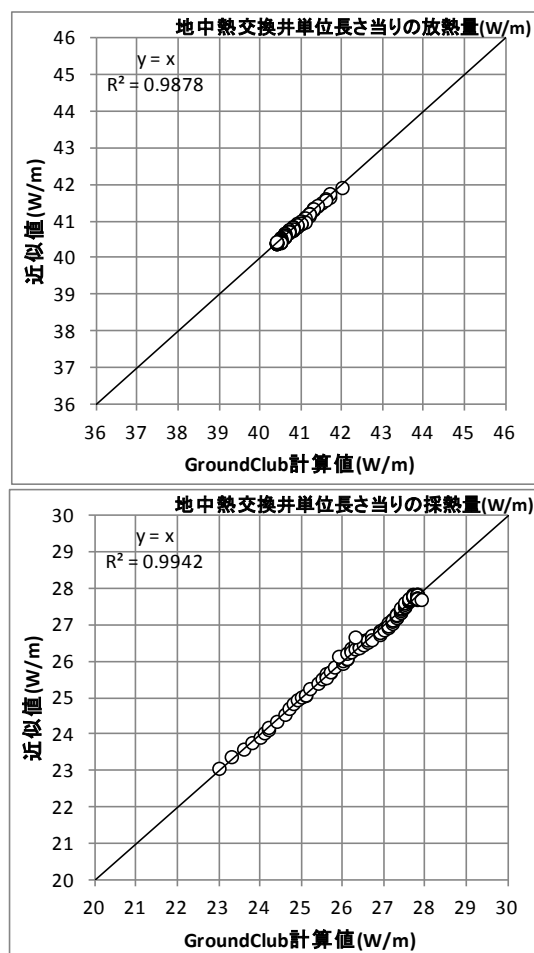


図 3-27 熱交換量の計算値と近似値の比較  
(上：冷房時放熱量、下：暖房時採熱量)

### 3.5.7 地中熱ポテンシャル（熱交換量）の評価

前項までの検討で得られた評価式を用いて、熱交換量のメッシュデータを作成する。また、本検討では、熱交換量を地中熱ポテンシャルの指標とする。

各メッシュで整理した見かけの熱伝導率と体積熱容量から、冷房時と暖房時でそれぞれ熱交換量を評価した。図 3-28が冷房時、図 3-29が暖房時における熱交換量を示した図となる。これら評価した値を見ると、概ね実態と概ね一致しており、これら結果より本検討の妥当性が確認できたと考えられる。

図 3-28と図 3-29を見比べると、暖房時の熱交換量分布（図 3-29）は飽和帯且つ地下水流速の早い箇所ほどポテンシャルが大きいものの、冷房時の熱交換量分布（図 3-28）は反対に、不飽和帯厚さの大きい箇所ほどポテンシャルが大きく評価されている。これはモデル地域とした長野県の冷暖房需要によるものであると考えられる。

長野県では暖房期間が長く、暖房期間中は地中に冷熱が貯留される。このとき、不飽和帯の卓越する箇所では、熱伝導率が低く体積熱容量が小さいため、冷熱がより低温で長く存在し続けることになる。この状態で冷房運転を開始すると、貯留した冷熱を利用することになるため、冷房初期の段階では不飽和帯厚さの大きい箇所ほど高効率な空調運転がなされる。ただし、冷房運転時間が長期にわたると不飽和帯の卓越する箇所においては、貯留した冷熱を使い切り、逆に放熱により温熱が貯留されるため、空調運転効率が徐々に低下して飽和・地下水流速大の箇所ほど高いポテンシャルを示すはずである。

したがって、図 3-29のような熱交換量の分布となった原因は、冷房に比べて暖房過多である長野県の地域性を反映したものと考えられる。

比較のために暖房に比べて冷房需要の大きい熊本県の熱負荷条件で計算したところ、冷暖房共に飽和・地下水流速大の箇所ほど熱交換量は大きくなることを確認している。

これら熱交換量により可視化した地中熱ポテンシャルの面情報は、導入適地の評価に有用であり、地中熱利用システムの社会実装に大いに役立つものと考えられる。

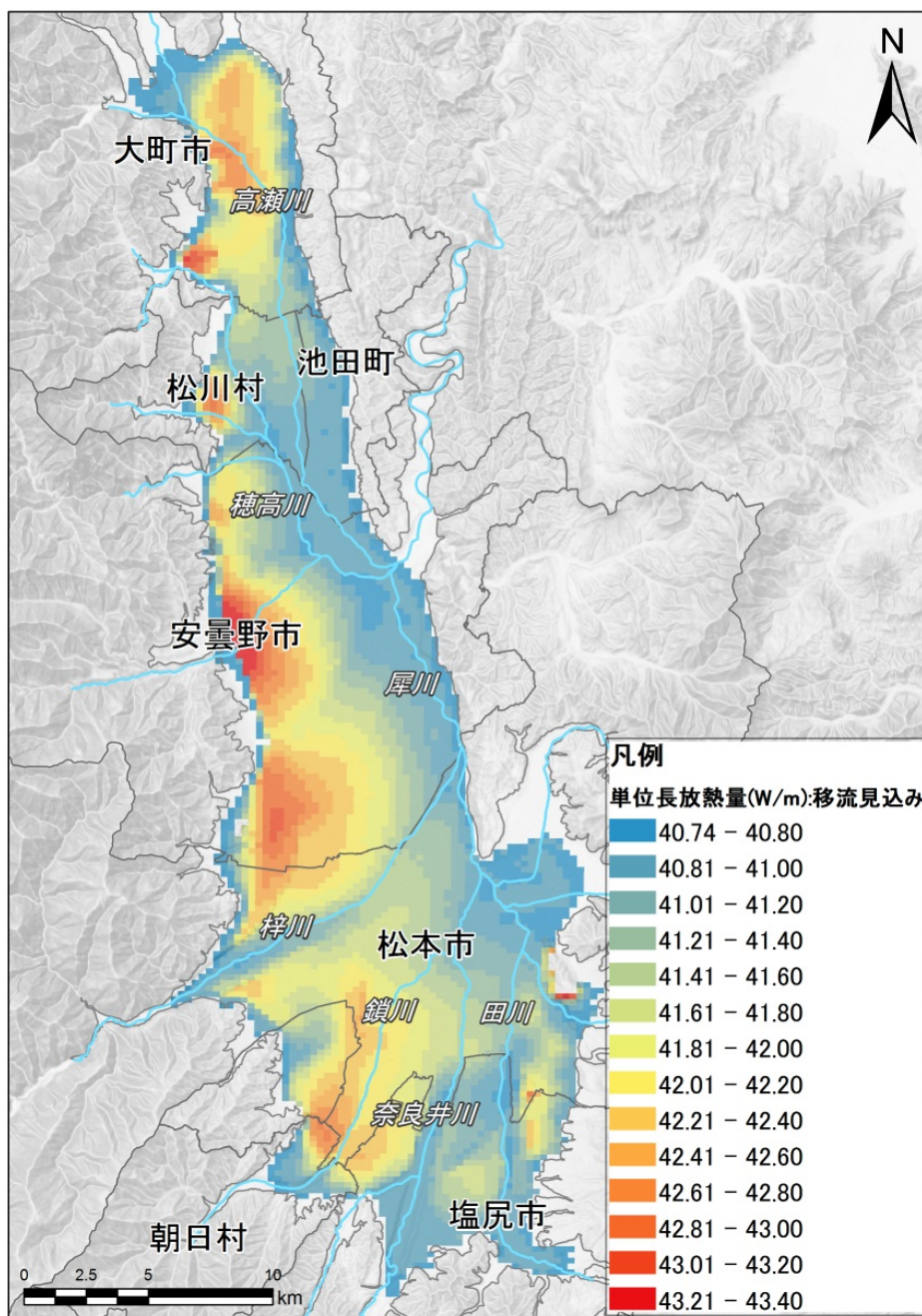


図 3-28 地中熱ポテンシャル：冷房期間

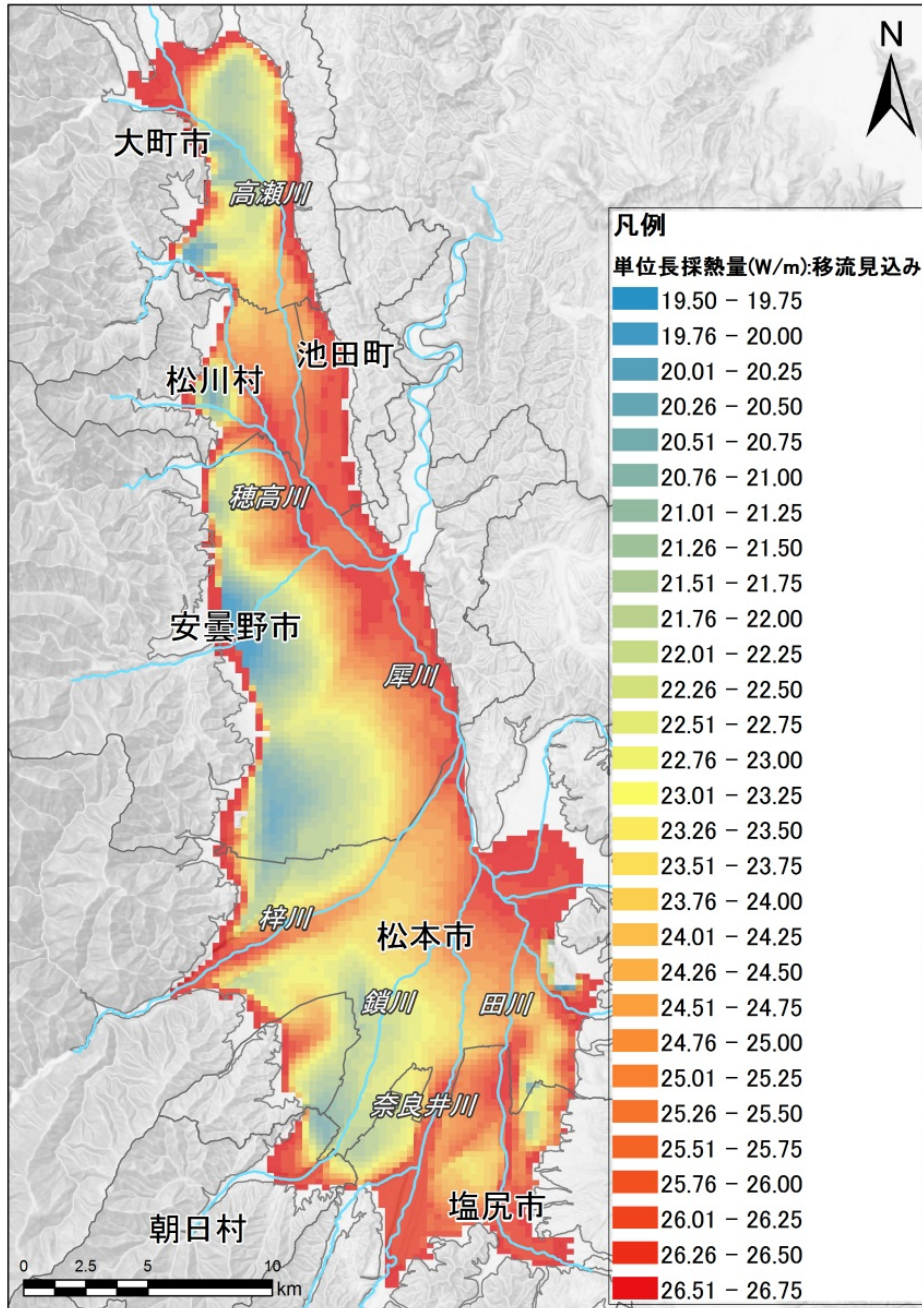


図 3-29 地中熱ポテンシャル：暖房期間



### 3.6 帯水層蓄熱システム導入にあたっての留意点および導入適地の考え方の整理

平成24年度および平成25年度に整理した信州大学工学部キャンパス内の実証試験データより、帯水層蓄熱システム導入にあたっての留意点および導入適地の考え方を整理する。

#### 3.6.1 実証試験サイトの概要

「次世代型ヒートポンプシステム研究開発『地下水制御型高効率ヒートポンプ空調システムの研究開発』（以降、NEDOプロジェクトと呼ぶ）において、信州大学工学部キャンパス内講義棟に、帯水層蓄熱機能を有する地下熱利用空調システム（地下水制御型HPシステム）を導入している。

地下水制御型HPシステムは信州大学工学部講義棟の近傍に設置した複数の井戸を熱源または地下水制御用に用いるシステムである。図 3-30に地下水制御型ATESシステムのための調査孔、観測孔の位置図を示す。これらの井戸システムの利用方法を試行して、2シーズンの実証試験を実施した。実証試験シーズン1（2011年冬～2012年夏の約1年間）におけるシステムの井戸機能を図 3-31に示す。また、実証試験シーズン2（2013年夏～2014年冬の約1年間）では図 3-32に示すとおり井戸システムを変更して実証試験を実施した。また、表 3-4には実証試験時の各井戸の機能とモニタリング状況を整理した。

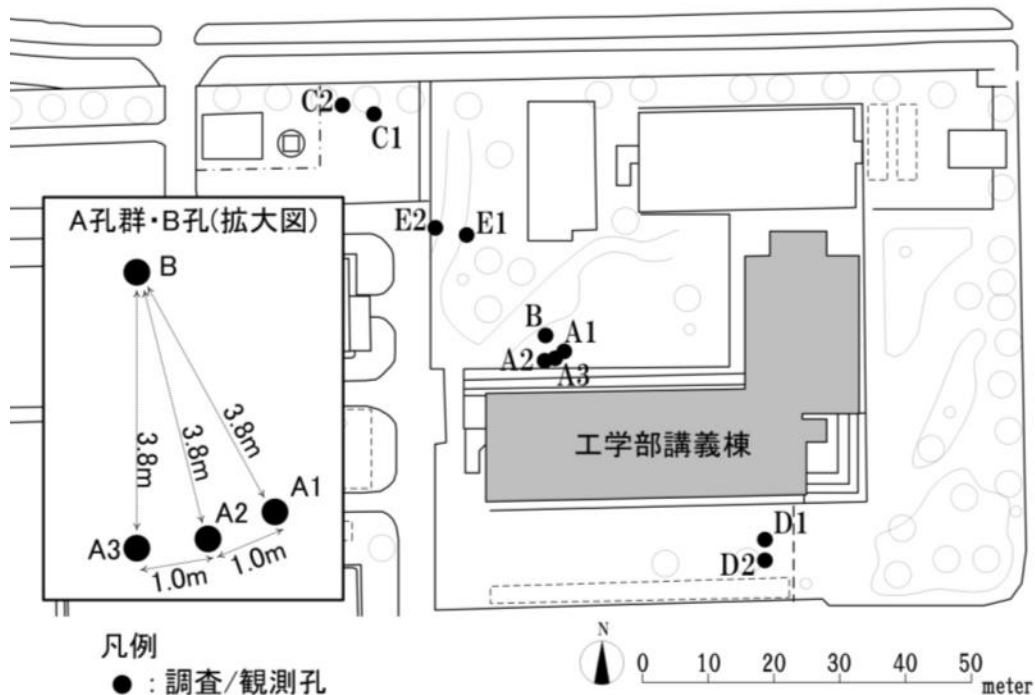


図 3-30 地下水制御型HPシステムのための調査孔、観測孔の位置図

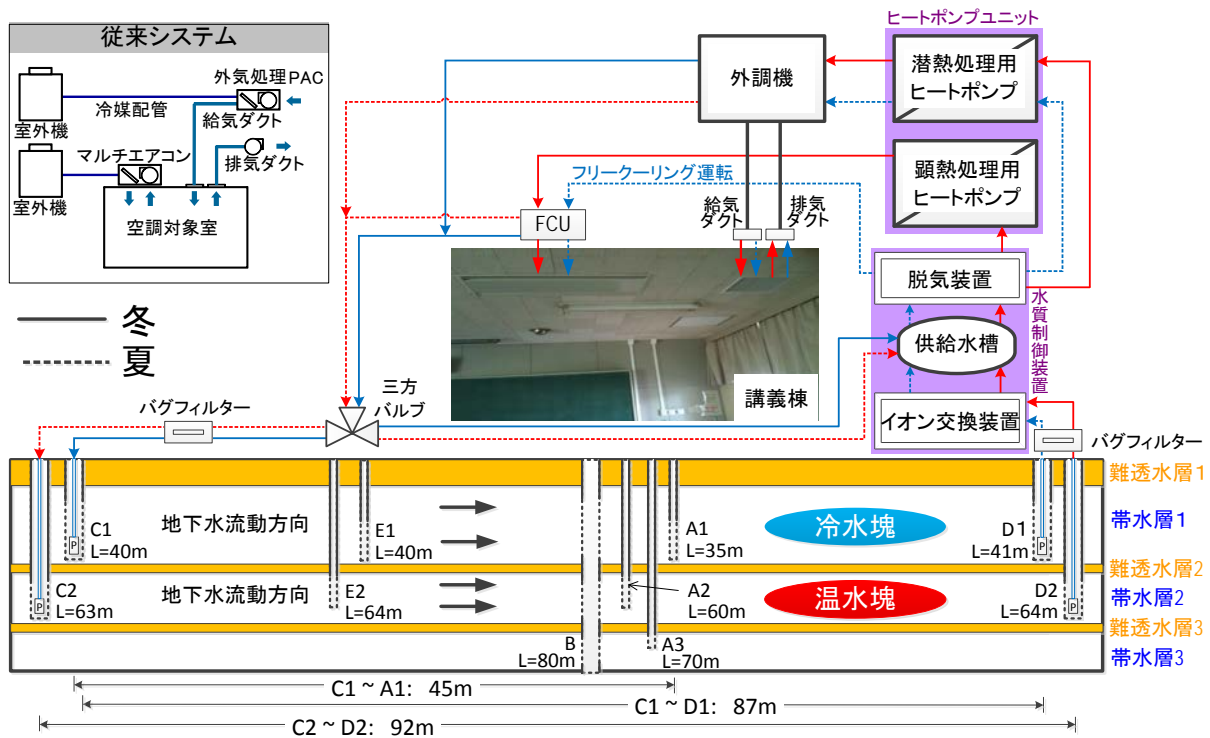


図 3-31 地下水制御型HPシステム模式図（実証試験シーズン1）

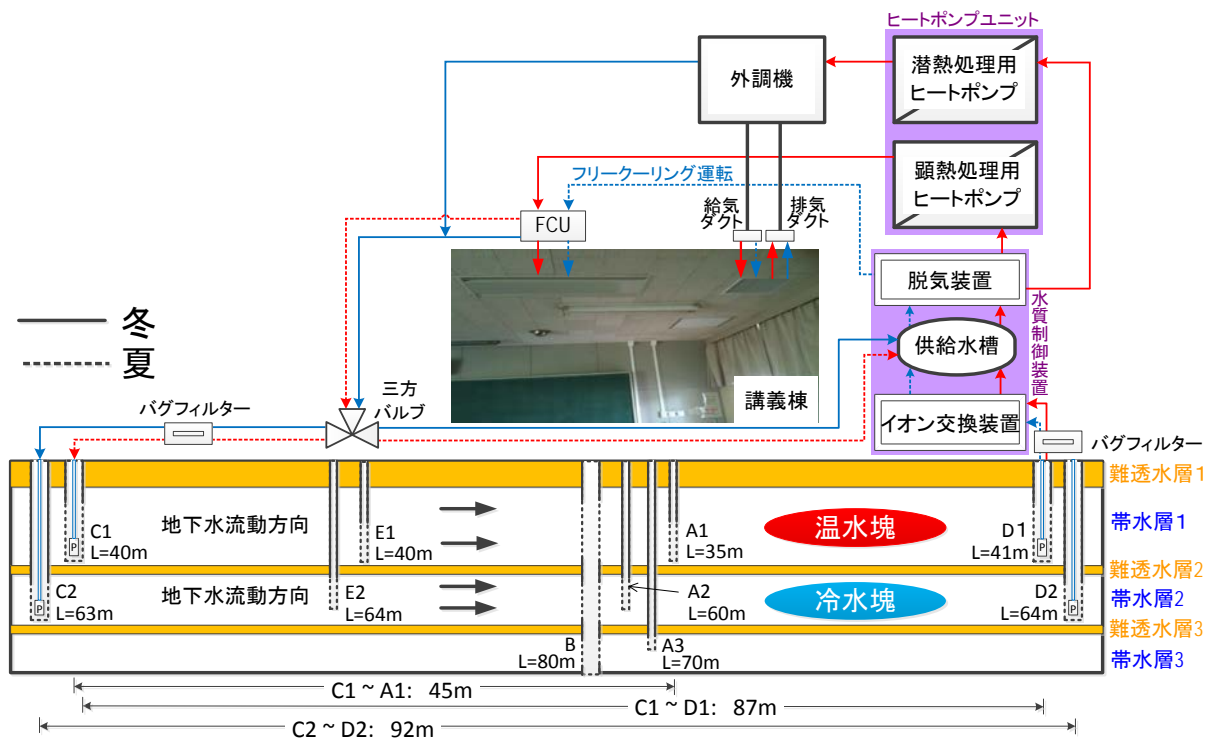


図 3-32 地下水制御型HPシステム模式図（実証試験シーズン2）

表 3-4 調査孔別の地下水原位置観測項目

調査孔名	対象とする帯水層	実証試験時の機能			地下水位		地下水温	
		用途	暖房利用	冷房利用	手測り (触針式)	自記記録 (定点)	手測り	自記記録 (定点)
A1	1	観測孔			●	●	●	●
A2	2	観測孔			●	●	●	●
A3	3	観測孔			●	●	●	●
B	1.2.3	観測孔			●		●	
C1	1	注水井	1年目	2年目	●		●	
C2	2	注水井	2年目	1年目	●	●	●	●
D1	1	揚水井	2年目	1年目 2年目	●		●	
D2	2	揚水井	1年目		●		●	
E1	1	観測孔			●	●	●	●
E2	2	観測孔			●	●	●	●

### 3.6.2 実証試験の結果

平成24年度および平成25年度業務において、信州大学工学部キャンパスにおいて実施した実証試験データを取りまとめ、帯水層蓄熱の状況を把握した。帯水層蓄熱状況を時系列で整理したものが図 3-33である。この図から、以下の結果が確認できた。

- ・ シーズン1の夏季実証運転期間中にC2孔より注入した温水が貯留されている
- ・ シーズン2の夏季実証運転期間中にC1孔より注入した温水が貯留されている
- ・ シーズン2の冬季実証運転期間中にC2孔より注入した冷水が貯留されている
- ・ E2孔では、シーズン1およびシーズン2にC1孔より第一帯水層に貯留した冷水および温水が確認でき、第一帯水層と第二帯水層のシールド（遮水）が機能していない可能性が高い

帯水層に貯留した温水および冷水は、少なくとも1年程度は残存することが明らかとなり、今後、帯水層蓄熱によるシステム性能の向上が期待できることがわかった。

なおこれは、実証試験サイトの地下水流速が非常に遅く、貯留した温冷水の移動がわずかであることが条件である。したがって将来的に周辺施設での地下水利用等、人為的なインパクトが生じた場合には、熱塊が強制的に移動するため、期待される効果が発現しない可能性もあることに留意が必要となる。

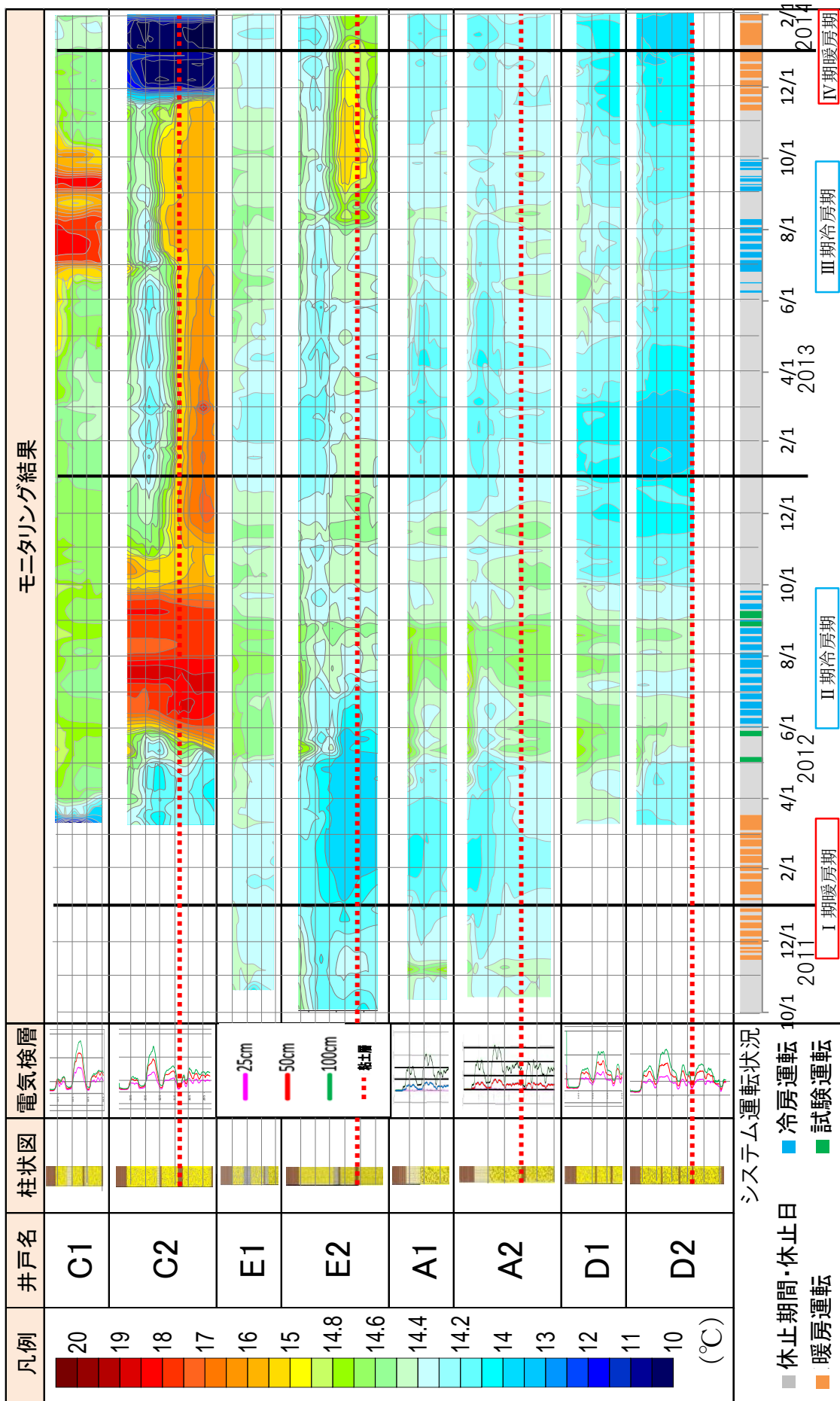


図 3-33 地下水温分布の時間変化

### 3.6.3 帯水層蓄熱システム導入にあたっての留意点と導入適地

信州大学工学部キャンパスにおける実証試験結果から、帯水層に貯留した温水および冷水は、少なくとも1年程度は残存することが明らかとなり、今後、帯水層蓄熱によるシステム性能の向上が期待できることがわかった。ただしこれは、実証試験サイトの地下水流速が非常に遅く、貯留した温冷水の移動がわずかであることが条件である。したがって将来的に周辺施設での地下水利用等、人為的なインパクトが生じた場合には、熱塊が強制的に移動するため、期待される効果が発現しない可能性もあることに留意が必要となる。

また、帯水層蓄熱にあたっては、熱利用した地下水を還元井によって帯水層に戻すことが前提となるため、還元井の機能を永続的に発揮するためのメンテナンスが必要であり、特に還元井の目詰まりの原因となりうる水質処理が重要な課題となる。なお、信州大学の実証試験では、軟水機による地下水質処理をおこなっており、このような水質処理の必要がない地域ほど、帯水層蓄熱システムの導入適地になるものと考えられる。

以上を踏まえて、次のとおり水理地質環境と地下水質に分けて、帯水層蓄熱システムの導入適地の考え方を整理する。

#### 【水理地質環境】

- ・地下水流速が小さい（動水勾配が小さい）箇所ほど蓄熱ならびに熱回収の効率が向上するため、導入適地といえる
- ・地下水面が高いほどポンプ揚程が小さいため、ポンプ稼働に要する電力を減ずることができるため、導入効果が高い
- ・揚水試験等により評価された透水量係数が大きいほど、より効率的に熱源となる地下水を取得でき、また透水性の高い地盤ほど還元能力も期待できる
- ・還元井への注水の際に、人為的な圧力注水の必要がなく、自然注水による還元が可能な箇所ほどシステムの維持管理に優れている
- ・異なる帯水層間における人為的な地下水の交流を避けるためには単一の帯水層を対象とした蓄熱をする必要があり、このとき地質構造の理解に基づき、透水性が高く層幅の厚い帯水層を対象とするのが望ましい

#### 【地下水質】

- ・地下水中に溶存する鉄イオンの濃度が高いほど地盤および還元井の目詰まりが生じやすいため、地下水質の把握が重要となる
- ・還元井の目詰まりの原因<sup>11)</sup>として、①還元水中の懸濁物質、②還元井や帯水層での微生物の増殖、③帯水層内の化学反応、④還元井の酸化・腐食、⑤還元井中に混入する空気、⑥土粒子の配列変化などがあり、これらを踏まえた地下水水質の評価に留意が必要である

## (参考文献)

- 1) 富樫聡, 西山浩平, 山本晃, 檀智之, 高橋努: 広域を対象とする地中熱ポテンシャル評価手法の提案, 日本地下水学会2013年春季講演会, pp.104-109, 2013.
- 2) 長野克則, 葛隆生: 土壌熱源ヒートポンプシステム設計・性能予測ツールに関する研究(第1報) 単独垂直型地中熱熱交換器の設計・性能予測ツールの開発, 空気調和・衛生工学会論文集, No.101, pp.11-20, 2005.
- 3) 【販売元】ゼネラルヒートポンプ工業(株): <http://www.zeneral.co.jp/seihinjyouhou/seihinjyouhou.html>
- 4) 藤縄克之, 富樫聡: 地下熱利用技術 9. 地下熱利用のための数値解析技術, 地下水学会誌, Vol.54, No.1, pp.39-52, 2011.
- 5) 濱野太宏, 富樫聡, 上原健人, 藤縄克之: 水理地質環境が熱応答試験のパラメータ同定に与える影響に関する実験的研究, 土木学会論文集C(地圏工学), Vol.70, No.1, pp.54-66, 2014.
- 6) 大久保博晃, 藤井光, 糸井龍一: 同軸型地中熱交換器の室内モデル実験および数値モデリング, 日本地熱学会誌, Vol.31, No.1, pp.51-62, 2005.
- 7) 新堀雄一, 岩田宣己, 森不可止, 深谷泫三郎: 坑井を用いた地中熱利用HPの設計と地下水流動との関係についての一考察, 日本地熱学会誌, Vol.24, No.4, pp.339-348, 2002.
- 8) 大谷具幸, 石原将司, 小嶋智: 濃尾平野の井戸情報からみた地下水利用型地中熱利用の導入可能性, 日本地熱学会誌, Vol.30, No.2, pp.121-129, 2008.
- 9) 山田秀: 実験計画報 方法編 -基盤的方法から応答局面法, タグチメソッド, 最適計画まで, 日科技連, 2004.
- 10) 山本晃, 伊藤善和, 谷保和則, 猿田久雄, 高橋努, 濱里学, 妹尾嘉之: 松本盆地の地下水の現状と課題, 日本地下水学会2005年秋季講演会要旨, pp.18-21, 2005.
- 11) 滝沢智: 地下熱利用技術 8. 地下熱利用のための水質対策, 地下水学会誌, vol.53, no.4, pp.401-409, 2011.