

大阪平野における地中熱ポテンシャルマップ

Potential Map of Ground-Source Heat Pump system in Osaka Plain

内田洋平¹⁾・吉岡真弓²⁾・シュレスタ ガウラヴ¹⁾・富樫 聡¹⁾・石原武志¹⁾
Yohei Uchida, Mayumi Yoshioka, Shrestha Gaurav,
Akira Tomigashi, and Takeshi Ishihara

¹⁾産総研 再生可能エネルギー研究センター
Renewable Energy Research Institute, AIST

²⁾産総研 地圏資源環境研究部門
Institute for Geo-Resources and Environment, AIST

令和元年 6月
June 2019

1. はじめに

地中熱ヒートポンプシステムについては、1970年代のオイルショックを契機として、欧米諸国が積極的に導入・普及を進めたことは、よく知られている。その普及の背景には、各国の社会事情がある。米国では掘削費が安いと、経済的な暖房システムとして、特に天然ガスなど他のエネルギー源と競合しない地域で普及が進んだ。一方、ヨーロッパ諸国では環境対策の面から政策的に導入が促進され、導入数増加に従って導入コストが下がった。しかし、日本では競合する空気熱源のシステムに比べて初期コストが高く、また諸外国と比べても地中熱ヒートポンプシステムの導入コストが高いために、地中熱の利用がなかなか普及していないのが実状となっている(内田, 2014)。

また、本システムのエネルギー源となる地下地質についても、日本と欧米諸国とでは大きな違いがある。欧米諸国はその多くが地殻活動の安定な地域に位置し、地質は主に岩盤からなる。その熱伝導率は、たとえば花崗岩の場合は $3.0 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 程度である。一方、海洋プレートの沈み込み帯に位置する日本では、地質構造が欧米諸国よりも複雑であり、特に都市の立地する平野・盆地では第四系(第四紀層)が厚く堆積している。第四系とは、約260万年前から現代までにおける、人類の出現や氷河に覆われた時代の地層を指す。地質は未固結の砂・礫・泥などで構成されており、軟弱地盤を形成する一方で地下水の流れは活発である。第四系の熱伝導率は $1.2 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 程度で、岩盤に比べて4割から5割程度の値となっており、熱伝導率だけから見ると地中熱システムには不利な地質条件と言える。ところが、第四系の透水係数は高く、優良な帯水層を形成している場合が多い。地下水の流れが活発であれば、熱の移流効果により見かけの熱伝導率が高くなり、地中熱利用に適してくる。つまり、日本で地中熱システムの普及を考える場合、地域の地下水流動を考慮することにより、効率の良いシステム設計が可能になると思われる。

日本における地中熱システムの普及を考えた場合、その導入コストを下げ、システム効率の向上が重要である。そのためには地域毎の地中熱システムに関わる地下情報をまとめ、そのポテンシャルを評価する必要がある。

本報告では、大阪平野における地中熱ポテンシャルマップの作成を目的として、既存の水文地質資料の収集および対象地域における3次元地下水流動・熱輸送モデルを構築し、構築したモデルを用いて対象地域における地中熱クローズドループシステムのポテンシャルおよびオープンループシステムの適地を評価した。クローズドループシステムに関しては、基本的にはどのような水理地質環境でも導入可能であるため「ポテンシャル」を評価するが、オープンループシステムは、水理地質環境によっては導入が不可能の地域もあるため、ここでは「適地」の評価を行った。

なお、本地中熱ポテンシャル評価の解析については、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)「再生可能エネルギー熱利用技術開発/地中熱利用トータルシステムの高効率化技術開発及び規格化、および再生可能エネルギー熱利用のポテンシャル評価技術の開発/地下水を活用した高効率地中熱利用システムの開発とその普及を目的としたポテンシャルマップの高度化」(平成26年度～平成30年度)で開発された手法を用いた(NEDO, 2019a)。

2. 評価手法

本手法では、まず、対象とする大阪平野の3次元地下水流動熱輸送解析を実施し、平野内部の地下水流動場および温度場を推定した。その後、その解析結果を元に、クローズドループのポテンシャル評価およびオープンループの適地分布を評価した。

本章では、対象地域および解析に用いた基礎資料について説明する。第3章では、3次元地下水流動熱輸送解析について詳細を述べ、第4章では、クローズドループの地中熱ポテンシャルマップの作成方法およびオープンループの適地の選定方法について紹介する。

2.1. 調査地域

本調査の対象地を図 2-1 に示す。本調査対象地は、西側を兵庫県神戸市須磨区、北側および東側を京都府八幡市～京田辺市、南側を大阪府泉南市までとする大阪平野（約 60km×約 60km）である。

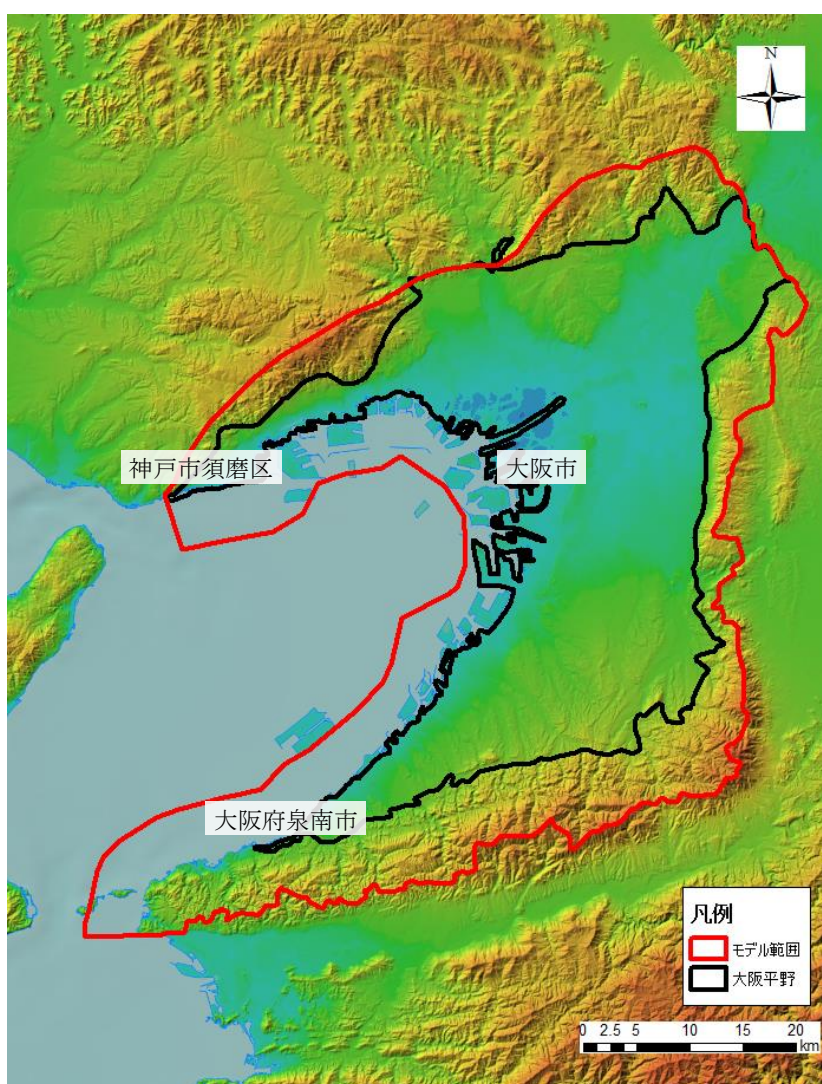


図 2-1 モデル構築範囲。背景地図には地理院タイルの色別標高図を使用 (<https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>)。海域部は海上保安庁海洋情報部の資料を使用して作成。

2.2. 資料収集

モデル構築にあたり、表 2-1 に示す資料を収集した。各データの観測地点位置図を図 2-2 に示す。

表2-1 収集資料一覧.

資料	データ元
地層構造 大阪平野の第四系を、水理地質構造を考慮し、 3層に分離したときの地層の上下面境界	・ NEDO (2019b) による成果を引用。
地下水ポテンシャル分布	・ 地下水地盤環境に関する研究協議会 (2018)
地下水位観測データ	・ 大阪府より提供 ・ 国土交通省 (水文水質データベース, http://www1.river.go.jp/)
河川水位観測データ	・ 国土交通省 (水文水質データベース, http://www1.river.go.jp/)
気温データ	・ 気象庁 (アメダスデータ, http://www.jma.go.jp/jma/index.html)
海水温観測データ	・ 国土交通省 (大阪湾水質定点自動観測データ配信システム (近畿地方整備局神戸港湾空港技術調査事務所,) http://222.158.204.199/obweb/)
地温深度プロファイル	「水文環境図 No. 11 大阪平野」(井川ほか, 2019)

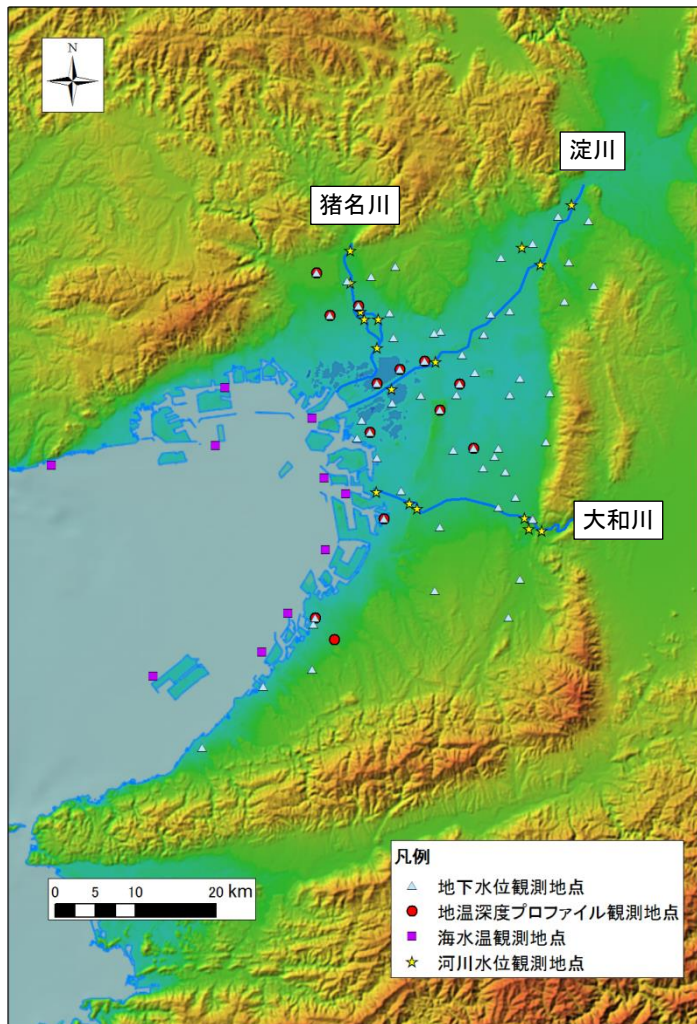


図 2-2 地下水・地温深度プロファイル・河川水位および海水温度観測地点. 背景地図には地理院タイルの色別標高図を使用
 (<https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>) . 海域部は海上保安庁海洋情報部の資料を使用して作成.

3. 大阪平野の3次元地下水流動・熱輸送解析

大阪平野の3次元地下水流動熱輸送解析の手順を図3-1に示す。本解析では、まず地下水流動解析により地下水面の再現を行い、その妥当性を確認した後、熱輸送解析を行った。

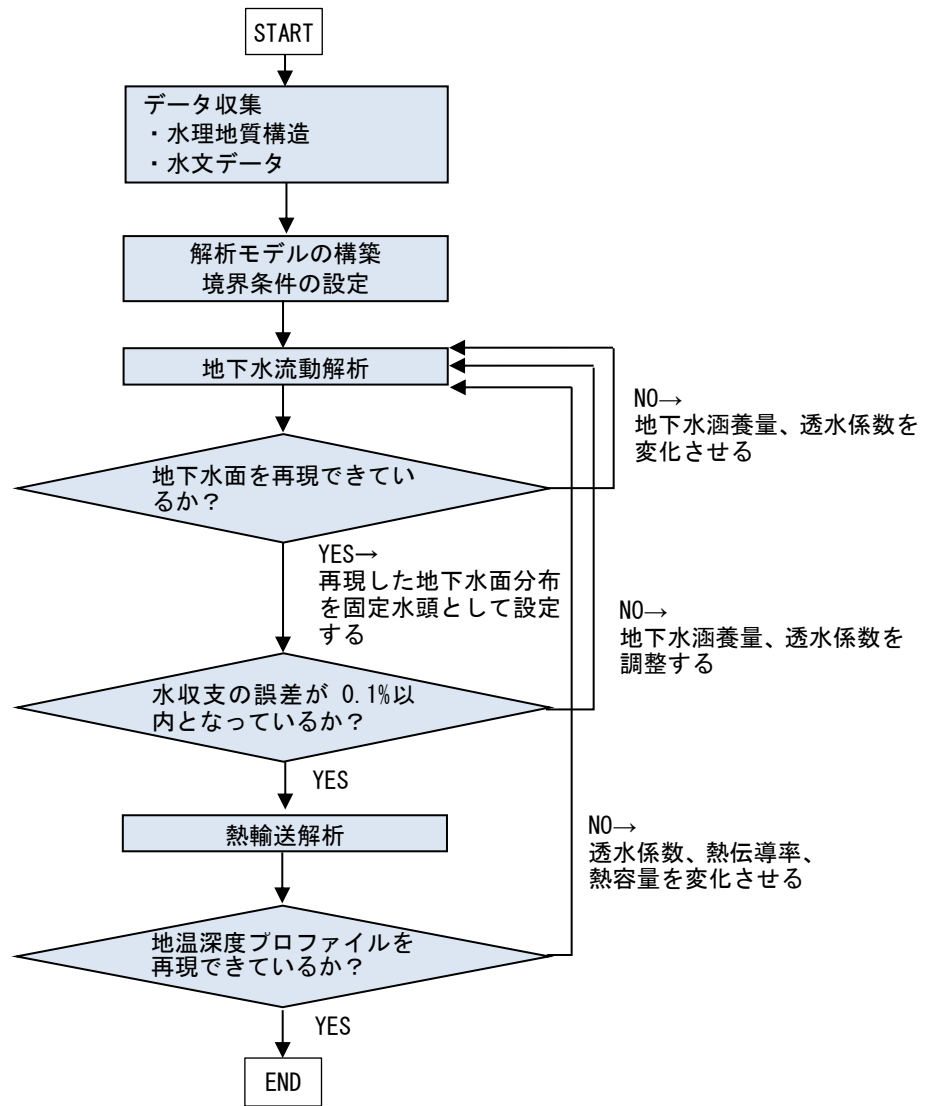


図3-1 解析手順のフロー図.

3.1. モデルの構築

図 2-1 に示した範囲を対象に、3 次元地質構造モデルを構築した。モデル周囲の境界については平野の分水嶺を、下面境界については深度方向に十分なクッションゾーンが必要となるため、新第三系まで含めたモデルの切り出しをおこなった。図 3-2 にモデルの俯瞰図を示す。本モデルの水理地質条件は、上部から沖積層及び段丘堆積層 (Ma9 層まで)、大阪層群 Ma9~Ma1 層、大阪層群 Ma1~基盤岩類上面、基盤岩類の 4 つに区分した (井川ほか, 2019)。モデルの各レイヤー (層) の層厚については、沖積層及び段丘堆積層では最大でも 20m 程度となるようにレイヤーの分割を行い、その他のレイヤーも適宜分割を行った。表 3-1 にモデルの基本情報を示す。

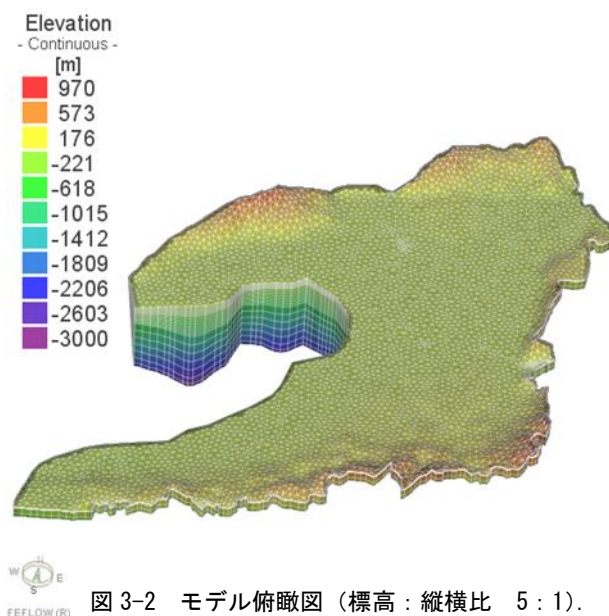


図 3-2 モデル俯瞰図 (標高 : 縦横比 5 : 1).

表3-1 モデルの基本情報.

使用ソフト	FEFLOW Ver.7.0 (Diersch, 2005)
モデルの構造	3次元地下水流動・熱移流モデル
サイズ	東西約 66,000m×南北約 73,500m
節点数	143,696 (5,132 点/面)
層数	27 層

3.2. 地下水流動解析

(1) 境界条件の設定

地下水流動解析における境界条件の設定を表 3-2 に示す。上面 (陸域) は、地下水涵養 0.001mm/day を与え、地下水面が標高より高くなる場合は排水する設定とした。上面 (河川) は淀川、猪名川および大和川の部分に、過去 10 年間の平均河川水位を固定水頭として与え、観測地点間は内挿補間により固定水頭を設定した。上面 (海域) は、海水面に相当する固定水頭 0m を与えた。側面 (陸域) の山地部分は、地形標高データに基づいて推定した水頭を固定水頭として設定した。側面 (海域) および下面は、不透水境界とした。

表 3-2 地下水流動解析時の境界条件の設定一覧.

境界位置	設定
上面 (陸域)	地下水涵養=0.001mm/d を与え、地下水面が 地表面標高より高くなる場合は排水
上面 (河川)	固定水頭：過去 10 年間の平均河川水位
上面 (海域)	固定水頭：海水面 (=EL. 0m)
側面 (陸域)	固定水頭：地形標高データより推定
側面 (海域)	不透水
下面	

(2) 物性値の設定

モデルに設定した物性値を表 3-3 に示す。実測の地下水位観測結果を再現できるように、試行錯誤的に変化させた。

表 3-3 設定した物性値の一覧.

Layer	地層	透水係数 _{xy} [m/s]	透水係数 _z [m/s]	間隙率 [-]	熱伝導率 [W/m/K]	熱容量 [MJ/m ³ /K]
1-10	沖積層及び段丘堆積層 (Ma9 層まで)	4.0×10^{-5}	4.0×10^{-6}	0.2	1.40	2.76
11-20	大阪層群 Ma9~Ma1 層	4.0×10^{-6}	4.0×10^{-8}	0.2	1.40	2.76
21-25	大阪層群 Ma1~基盤岩類 上面	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-7}	0.2	1.50	2.76
26-27	基盤岩類	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-10}	0.1	3.00	2.76
Fluid	-	-	-	-	0.65	4.20

(3) 地下水面の再現

図 3-3 にモデル第 1 層 (Layer1) の計算地下水面コンターを、各観測井の過去 10 年間の平均地下水位 (不圧地下水のみ) と比較して示す。大局的には、大阪平野の不圧地下水を再現できているものと判断した。

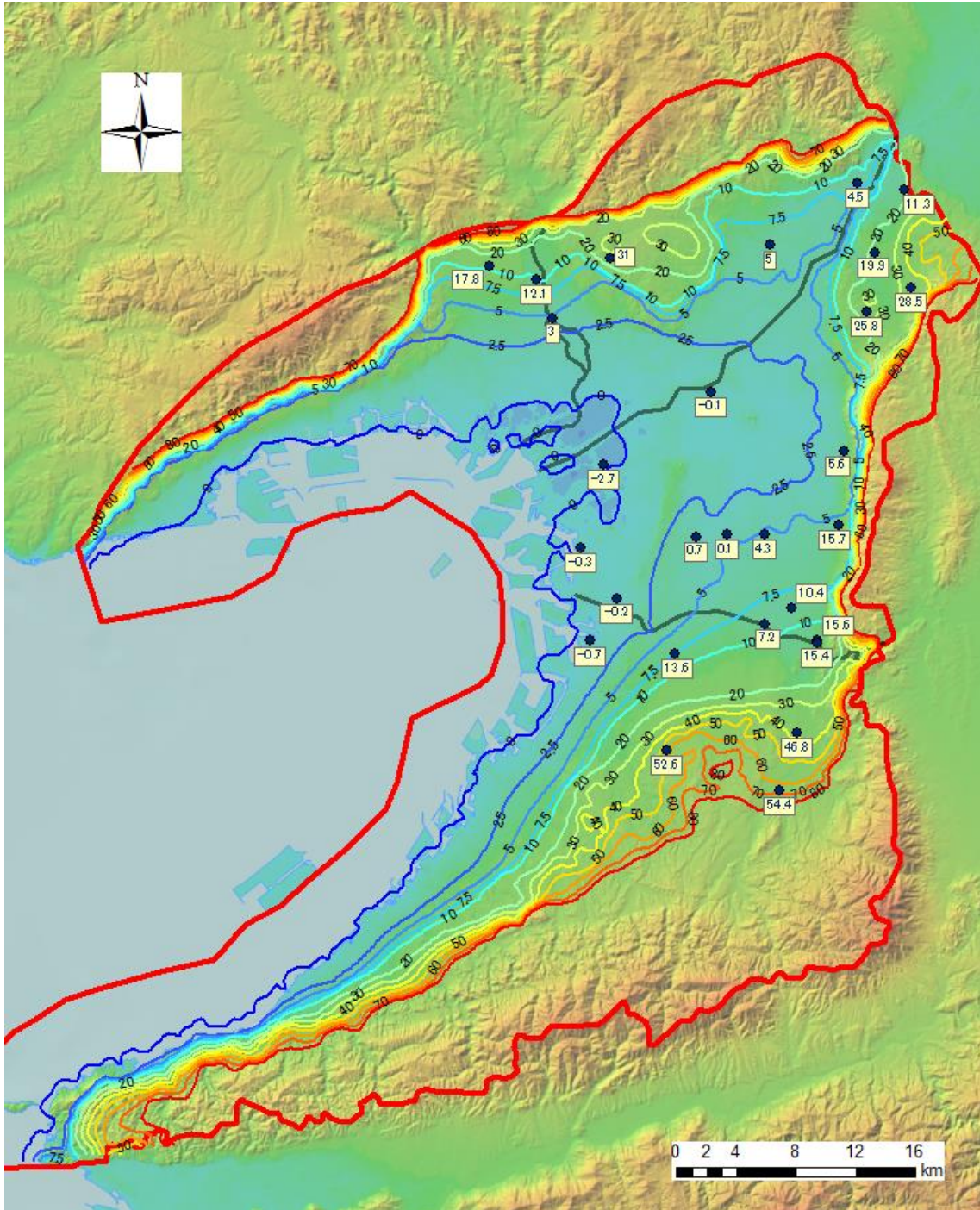


図 3-3 計算地下水面コンター（0~10m までは 2.5m 間隔、10m 以降は 10m 間隔）。四角で囲まれた数字は各観測井の過去 10 年間の平均地下水位（不圧地下水のみ）を示す。背景地図には地理院タイルの色別標高図（<https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>）を使用。海域部は海上保安庁海洋情報部の資料を使用して作成。

図 3-4 に実測地下水頭と計算地下水頭を比較したものを示す。実測地下水頭は図 2-2 に示した地下水位観測地点 (69 地点) の観測結果 (過去 10 年間の平均地下水位) として、計算地下水頭は観測地点のストレーナ深度と同等深度となる層を選択し比較を行った。グラフ上の直線は、 $y=x$ となる部分でありこの直線に近いほど観測結果と計算結果の水頭差が小さいことを示す。観測結果と計算結果の誤差を確認するため、RMSE (Root Mean Square Error) 値を明示した。また、本研究においては深度 100m 程度までの再現性が特に重要となるため、ストレーナ深度 100m 以浅の地点を抜粋した結果も示す。結果をみると、実測地下水頭 0m 以上の地点では概ね直線付近にプロットされている。また、実測地下水頭 0m 以下となっている地点が多くみられるが、一般的に地下水頭がマイナスになる原因としては地下水の揚水が考えられる。本解析では地下水の揚水は考慮していないため、これらの地点については再現性が低くなっていると考えられる。ただし、地下水頭マイナスの値を示している地点の多くは、そのストレーナ深度が 100m 以深に存在するため、ストレーナ深度が 100m 以浅の地点のみを抜粋するとこれらの地点の多くは除外される。

さらに、地下水頭と揚水量の関係を確認するため、図 3-5 に大阪府における市町村別単位面積当たりの年平均地下水揚水量 (2008~2014 年の年間揚水量の平均値) (株式会社ニュージェック、2016) と観測地点 (ストレーナ深度 100m 以浅) における計算地下水頭-実測地下水頭の水頭差を示す。同図から解析範囲の北部および東部で多くの揚水がされていることがわかる。また、観測地点の水頭差についてみると、揚水量の多い北部や東部では計算地下水頭が実測地下水頭よりも高くなる傾向があり、揚水による地下水頭への影響が示唆された。

以上の内容を考慮して、これらの結果から大阪平野における自然状態の地下水位を再現できていると判断した。

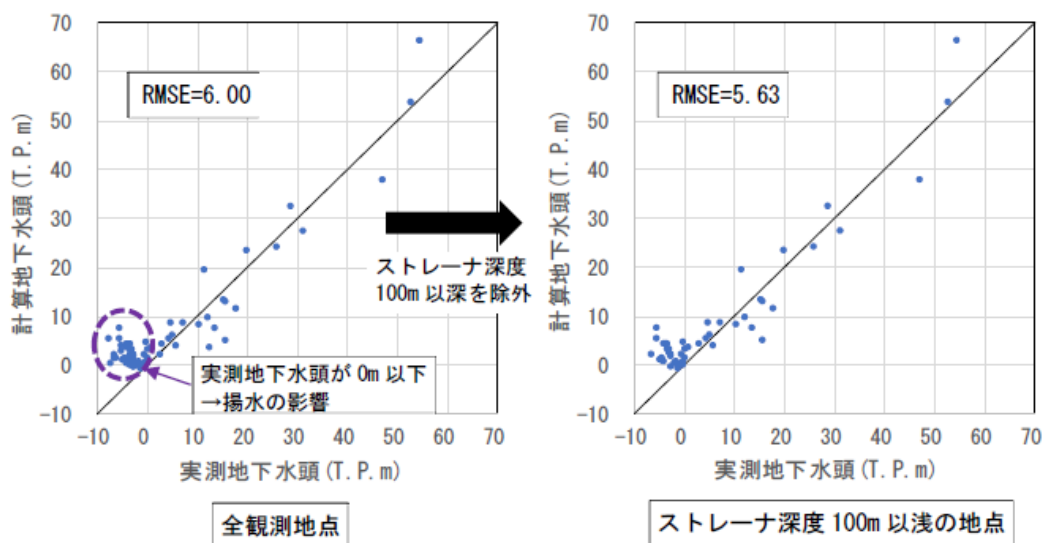


図 3-4 地下水頭の再現結果。 T.P.m は東京湾平均海面 (Tokyo Peil) からの水位を示す。

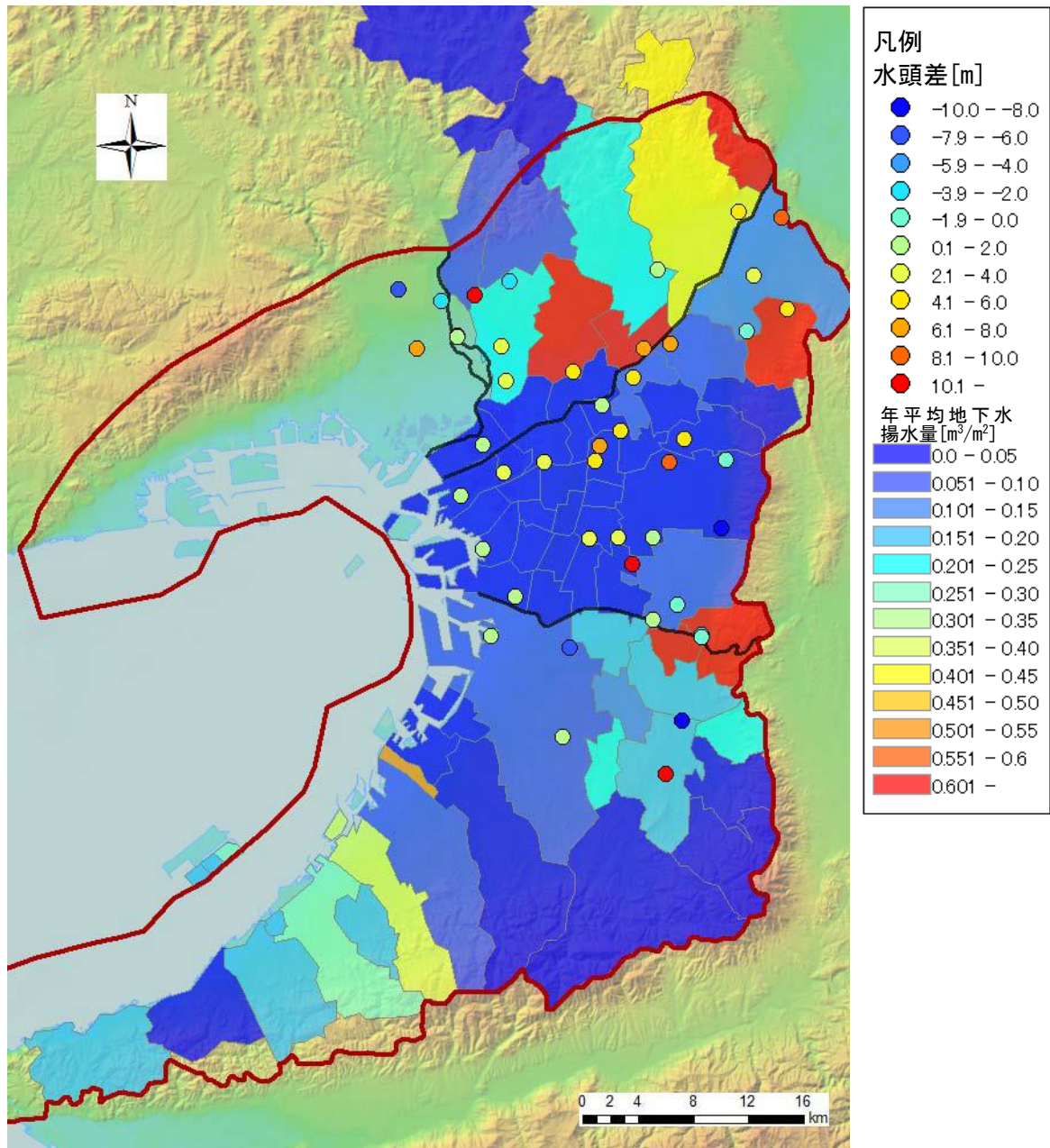


図 3-5 大阪府の市町村別単位面積当たりの年平均地下水揚水量（2008～2014 年）と観測地点（ストレーナ深度 100m 以浅）毎の計算地下水頭-実測地下水頭の水頭差。背景地図には地理院タイルの色別標高図を使用 (<https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>)。海域部は海上保安庁海洋情報部の資料を使用して作成。

(4) 水収支の計算

地下水流動解析における境界条件毎の水収支集計結果を図 3-6 に示す。モデル全体の水収支誤差は 0.2%程度であった。

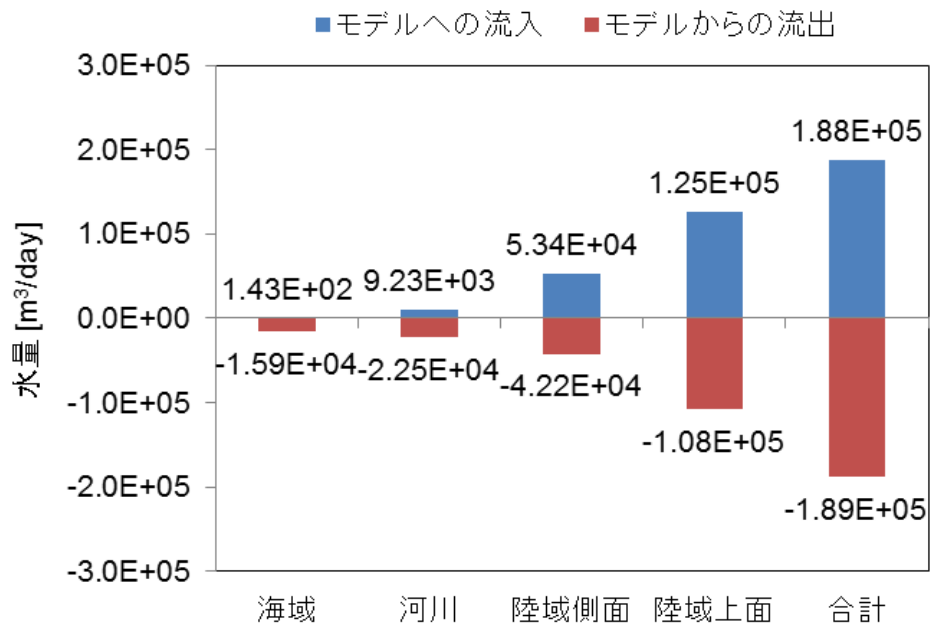


図 3-6 境界条件ごとの水収支集計結果.

3.3 熱輸送解析

(1) 境界条件の設定

熱輸送解析における境界条件の設定を表 3-4 に示す。上面境界は、地下水流動解析で求めた地表面水頭分布をモデル上面に固定水頭として設定した。上面(陸域)および上面(河川)の固定温度は、大阪府の気象庁観測地点の中で標高 30m 以下の地点(6 地点)を抜粋し、その地点の過去 10 年間の平均気温 16.7℃を基準温度とし、高度逓減率 $-0.65^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ として算出した温度で固定した。上面(海域)の固定温度については、国土交通省の大阪湾水質定点自動観測データ配信システムにより観測されているものの内、モデル範囲近傍の観測地点(10 地点)から取得した、2010/4/1(観測開始)～2018/3/31の8年間の深度毎海水温を平均した温度 17.7℃で固定した。

また、モデルの側面および下面の固定温度については、地温の深度プロファイルの結果から深度 100m 以下まで観測している地点(5 地点)を抜粋し、それらの地点の平均深度温度勾配 $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ の値を用いて算出した温度で固定した。

表 3-4 熱輸送解析時の境界条件の設定一覧.

境界位置	地下水流動	固定温度
上面(陸域)	地下水流動解析で求めた地下水面標高を地表面に固定水頭として設定	過去 10 年間の平均気温(16.7℃)から高度逓減率 $-0.65^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ として算出した温度
上面(河川)	固定水頭: 過去 10 年間の平均河川水位	
上面(海域)	固定水頭: 海水面 (=EL. 0m)	大阪湾の過去 8 年間の平均海水温(17.7℃)
側面(陸域)	固定水頭: 地下水流動解析結果	上面固定温度から深度温度勾配 $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ の値を用いて算出した温度
側面(海域)	不透水	
下面		

(2) 地温の深度プロファイルの再現

図 3-7 に地温の観測地点位置図を示す。計 13 地点において地温深度プロファイルの比較を行い、再現結果を図 3-8、図 3-9 に示した。これらの結果から、地温深度プロファイル結果を再現できているものとした。

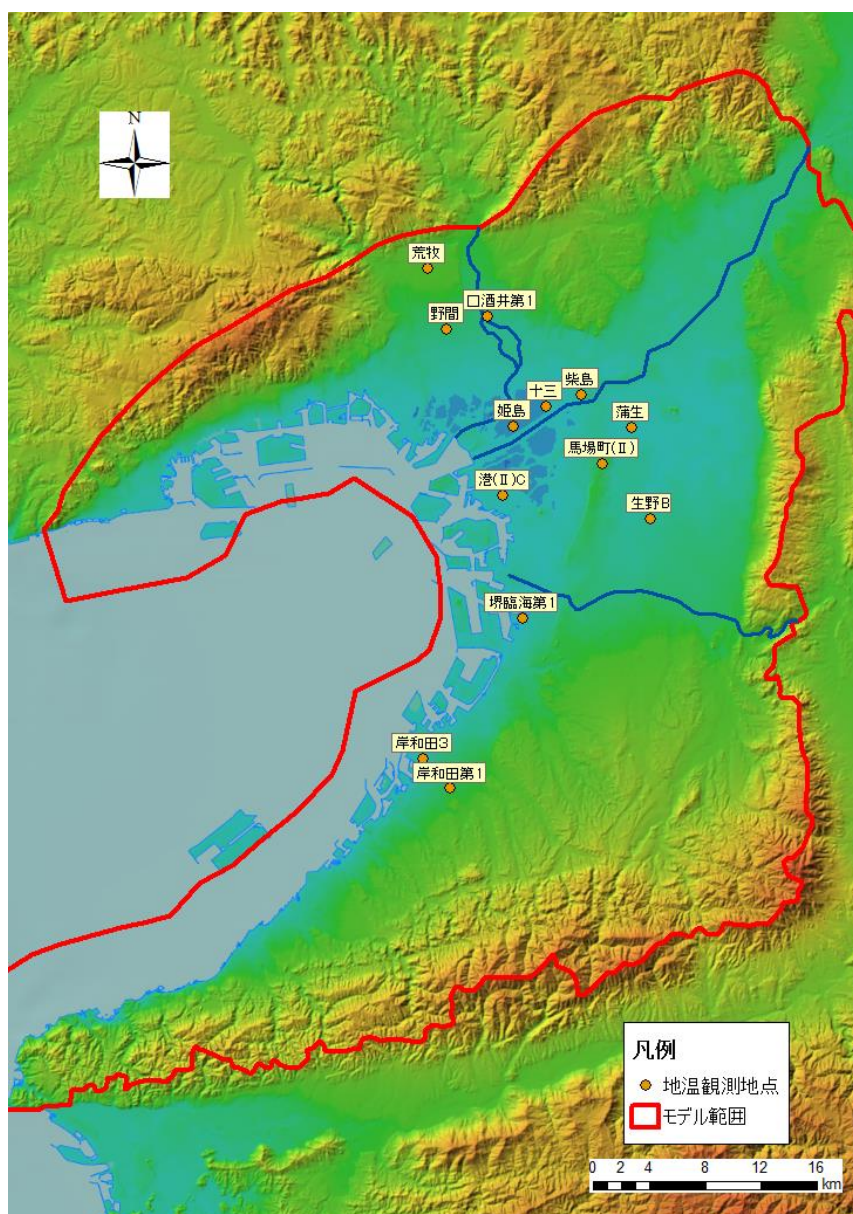


図 3-7 熱輸送解析のモデル範囲と地温深度プロファイルの観測地点位置図. 背景地図には地理院タイルの色別標高図を使用 (<https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>). 海域部は海上保安庁海洋情報部の資料を使用して作成.

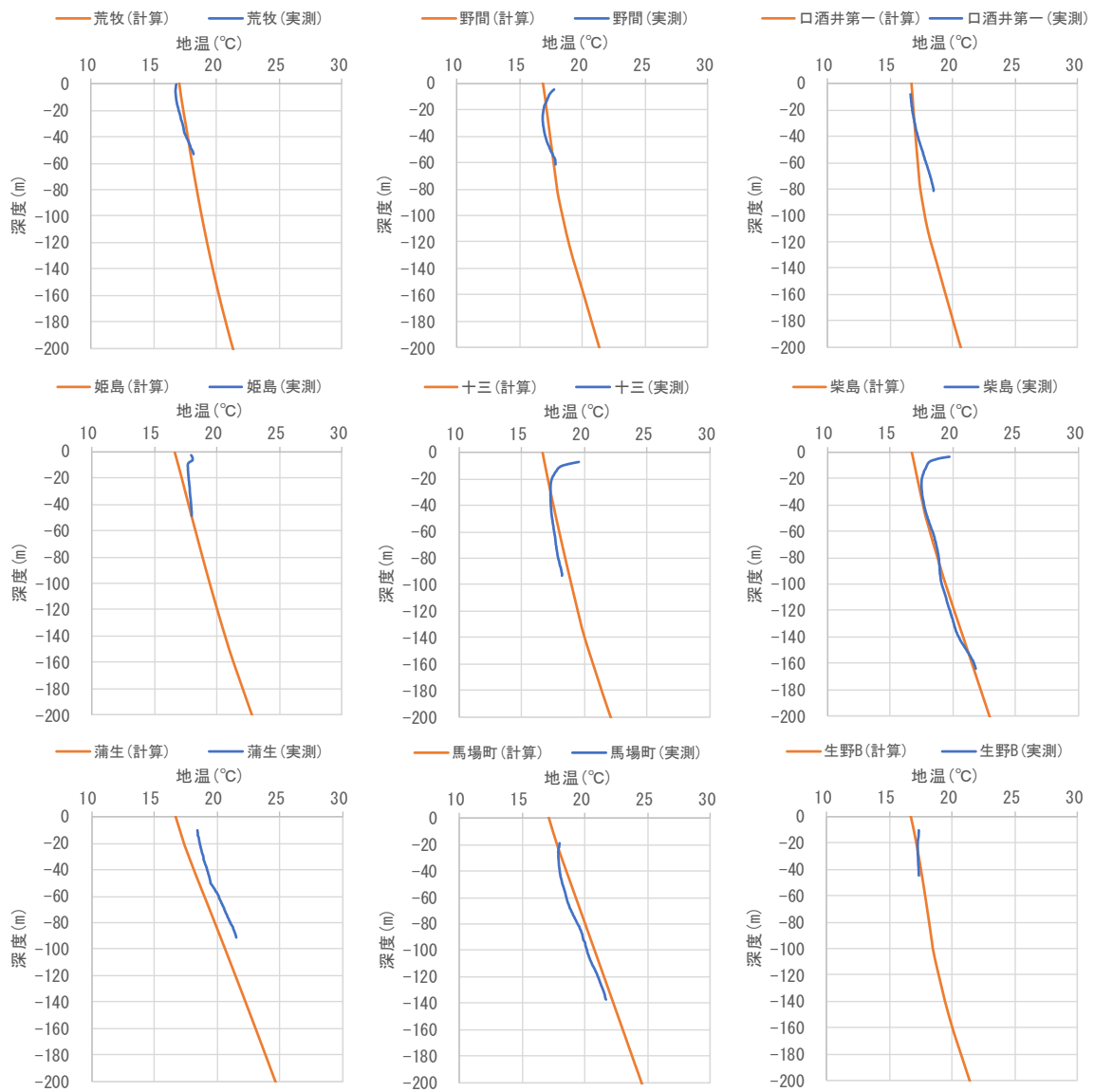


図 3-8 地温深度プロファイルの再現結果 (1). 深度 20m 付近までの相違は、実測値が気温変化の影響を受けているためであると考えられる。

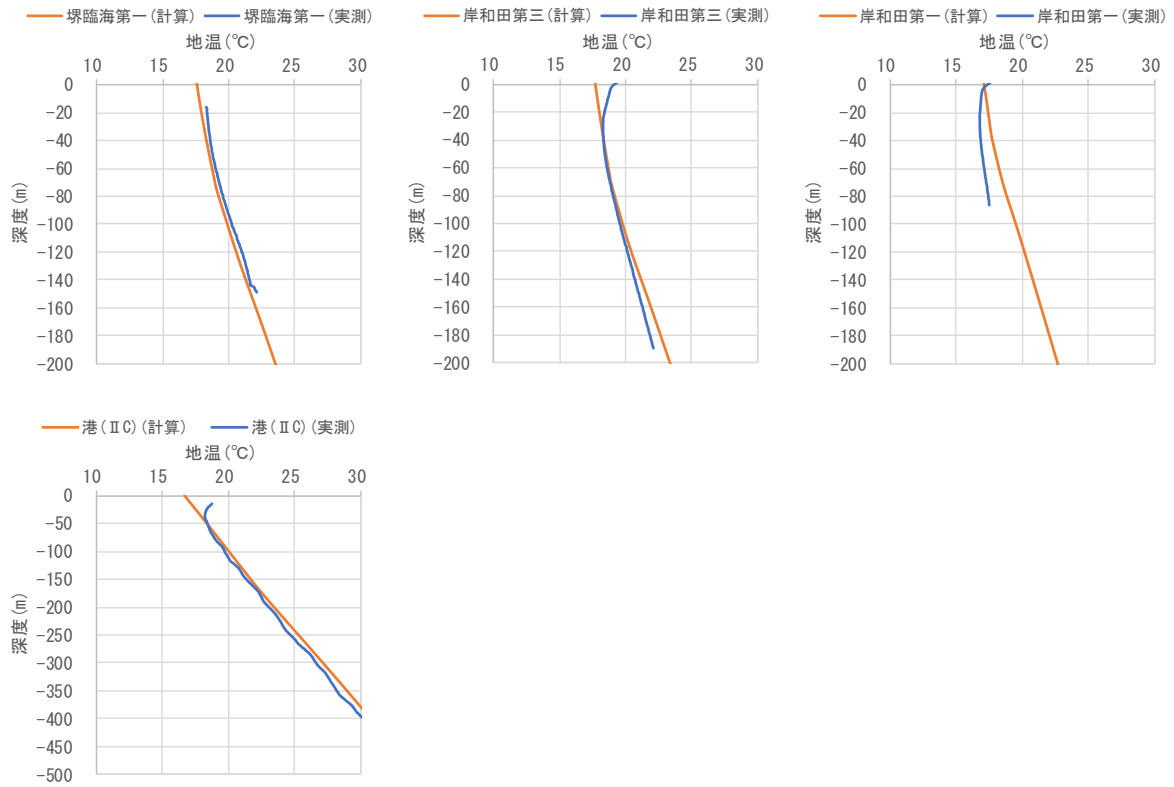


図 3-9 地温深度プロファイルの再現結果 (2). 深度 20m 付近までの相違は, 実測値が気温変化の影響を受けているためであると考えられる.

4. 地中熱ポテンシャル評価解析

4.1. クローズドループシステムのポテンシャル評価

クローズドループシステムのポテンシャル評価では、戸建住宅における地中熱利用システムの導入を想定し、対象地域の気象条件を元に推定した冷暖房負荷を賄うことができる必要最低限の熱交換器長さを求めた。この「対象地域の冷暖房負荷を賄うことができる必要熱交換器の長さ」を「クローズドループの地中熱ポテンシャル」とする。また、地中での採排熱の基礎的な情報として、熱交換器 100m を想定した場合の可能採熱量および可能排熱量を求めた。これらを求めるにあたり、前章と同様のソフトウェア FEFLOW を用いて数値シミュレーションを実施した。

クローズドループの地中熱ポテンシャル評価手順を以下の通りである。

●3次元熱交換器モデルの構築

地下水流動・熱輸送シミュレーションソフト FEFLOW(ver. 7)および同ソフトウェアに付随する Borehole Heat Exchanger (BHE) モジュールを用いて、熱交換器周辺の3次元モデル（以下、熱交換器モデル）を構築する。モデルの範囲は 30m 四方、鉛直方向最大 100m として、対象範囲内の計 32 地点でモデルを作成する。なお、計算に必要な地質や物性値、モデル周辺の地下水ポテンシャルなどの設定条件は、第3章で述べた広域地下水流動熱輸送解析の結果を使用する。よって、計算を実施する 32 地点すべてにおいて、地質構造や地下水流動が異なるモデルが構築されることになる。

●対象地域の気象条件に応じた冷暖房熱負荷および地中熱交換量の計算

構築したモデルに、戸建住宅 1 軒あたり 1 日毎の地中熱交換量を与え、3 年間の稼働シミュレーションを実施した。そのシミュレーションにおいて、熱交換器の入口温度または出入口温度の平均値が設定した閾値を超過しない「最低限必要な熱交換器長さ」を求め、その長さを「地中熱ポテンシャル」とした。また、同モデルを用いて、一定条件の熱負荷を与え、10 年間の稼働シミュレーションを実施し、10 年後の「可能採排熱量」（熱交換器長さ 100m）を求めた。

●クローズドループの地中熱ポテンシャルマップ

以上の計算結果を基準に空間的に内挿（一部外挿）することで、大阪平野の「必要熱交換器長さ分布（＝クローズドループの地中熱ポテンシャルマップ）」および「可能採排熱量分布図」を作成した。

以下に各手順の詳細を述べる。

(1) 3次元熱交換器モデルの構築

地中熱ポテンシャル計算を行うため、水平方向 30m 四方、鉛直方向 100m サイズの格子モデルの中心部に熱交換器を設定した「熱交換器モデル」を構築した。熱交換器モデルでは、第3章で述べた広域地下水流動熱輸送モデルから計算対象地点に選定した地点の地質条件や解析結果を抽出したデータを、物性値および境界条件として設定した。これにより、熱交換器モデルに広域モデルの計算結果（温度条件、地下水流動条件）を反映させた。具体的なモデルの境界条件および初期条件を表 4-1 および図 4-1 に示す。また、地層ごとの物性値は広域モデルと同様に表 4 表-2 の値を使用した。また、モデルでの熱交換器には FEFLOW の Borehole heat exchanger モデルのダブル U チューブの設定を使用した。モデルの設定条件を表 4-3 に示す。

地中熱ポテンシャル計算は、対象地域内の 32 地点に対し実施した。計算を実施した地点を図

4-2 に示す。計算地点の選定にあたっては、地下水位または地温深度プロファイルが良好に再現されている地点を優先的に採用し、かつ面的に概ね均等間隔で分布するように配慮した。

表4-1 熱交換器モデルの設定条件.

項目名		設定値・設定方法
モデル構造	モデルサイズ	長：幅：深 = 30m：30m：100m
	モデル要素数	XY 平面：1824 深度方向の層数は計算地点によって異なる（30 層程度）
	帯水層構造	水平堆積構造
	slice の標高と区分	以下の方法で、モデルの深度方向のメッシュ境界 (slice) を設定した。 <ul style="list-style-type: none"> ・広域モデルのデータを基に、地表から G.L. -100 m までの地層分布を取得し、地層境界の深度に slice を設定した。 ・2 つの slice の間隔が 5 m を超過する場合、5 m 厚さの layer を挿入し、両 slice の間隔が 5 m を超えないように区分した。
	水頭境界 (図 4-1)	上流側：地表面標高と同じ値を固定水頭境界として設定した。 下流側：広域モデルより対象地点各深度のダルシー流速を取得し、同じダルシー流速が発生するように各深度の下流側の水頭を固定水頭境界として設定した。
	温度境界 (図 4-1)	上流側：広域モデルによる対象地点各深度の温度を固定温度境界とした。 表層と底層：広域モデルを元に全 slice に固定温度境界を与えた。
	地盤初期温度分布	熱交換条件なしのモデルを用いて定常計算し、その結果を初期条件とした。
地盤初期水頭分布	熱交換条件なしのモデルを用いて定常計算し、その結果を初期条件とした。	

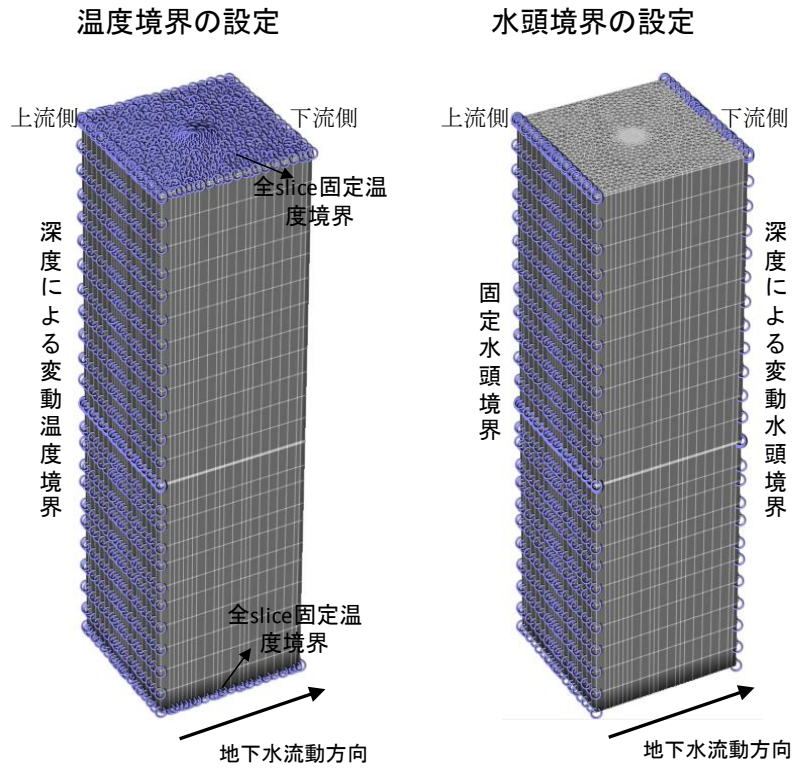


図 4-1 熱交換器モデルの境界条件の設定.

表4-2 地層ごとの物性値.

地層	透水係数 _xy	透水係数 _z	間隙率	熱伝導率	熱容量	縦分散長	横分散長
	[m/s]	[m/s]					
沖積層及び段丘堆積層 (Ma9層まで)	4.0×10^{-5}	4.0×10^{-6}	0.2	1.40	2.76	5.0	0.5
大阪層群 Ma9~Ma1層	4.0×10^{-6}	4.0×10^{-8}	0.2	1.40	2.76	5.0	0.5
大阪層群 Ma1~基盤岩類 上面	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-7}	0.2	1.50	2.76	5.0	0.5
基盤岩類	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-10}	0.1	3.00	2.76	5.0	0.5

*この他に、水の熱伝導率 0.65 W/m/K、熱容量 4.2 MJ/m³/K を使用.

表4-3 最短熱交換器長さ計算時のモデル設定条件.

項目名		設定値・設定方法
熱交換器システム設定	ボアホール径	150 mm
	熱交換器仕様	ダブルU字管
	熱交換器の設定	
	外径	32 mm
	厚さ	2.9mm
	パイプ距離	0.04m
	パイプ熱伝導率	0.42 W/m/K
	充填材熱伝導率	2.5 W/m/K
	延長	熱交換器出入口温度をキャリブレーションターゲットとして、地中熱交換器の延長を5m毎に変化させた。
	熱媒体の設定	
	熱媒体材	プロピレングリコール 15%
	熱容量	4.1 MJ/m ³ /K
	熱伝導率	0.51 W/m/K
	粘度	3.7×10 ⁻³ kg/m/s
密度	1.016×10 ³ kg/m ³	
運転条件設定	運転時間	1095日(3年)のうち 6月～9月(4カ月間)冷房運転 11月～3月(5ヶ月間)暖房運転
	熱媒体流量	運転時のみ、35m ³ /day
	地中熱交換量	対象地域の戸建住宅を想定した日平均負荷量を設定(次項)

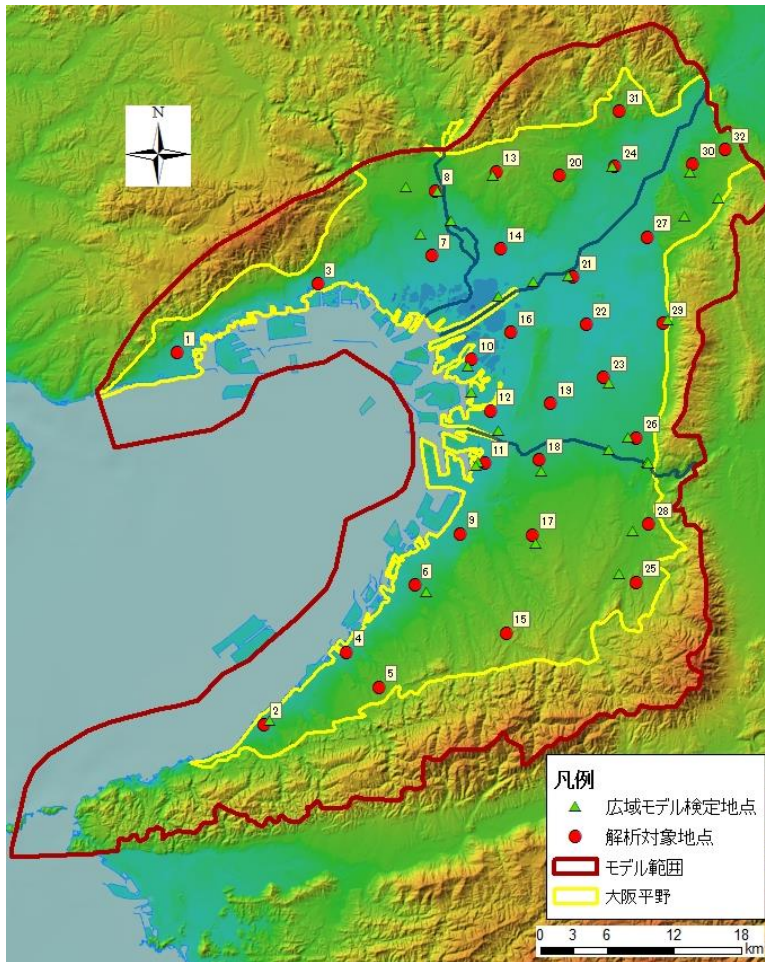


図 4-2 地中熱ポテンシャルの計算地点. 背景地図には地理院タイルの色別標高図を使用 (<https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>). 海域部は海上保安庁海洋情報部の資料を使用して作成.

(2) 対象地域の戸建住宅を想定した冷暖房熱負荷量および地中熱交換量の計算

①冷暖房負荷量の計算方法

大阪平野における戸建住宅の冷暖房熱負荷は以下の計算式を用いて求めた。

(a) 暖房負荷の場合

$$Q_h = \frac{U \times A_e (T_i - T_0)}{A_f} - \frac{I \times \theta \times A_e}{A_f \times 100} \quad \text{式(1)}$$

(b) 冷房負荷の場合

$$Q_c = \frac{U \times A_e (T_0 - T_i)}{A_f} + \frac{I \times \theta \times A_e}{A_f \times 100} \quad \text{式(2)}$$

ここで、

Q_h , Q_c : 暖房および冷房熱負荷 [W/m^2]

A_e : 外皮面積 [m^2]

U : 外皮平均熱還流率 [$\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$]

- A_f : 延べ床面積[m²]
- T_i : 室内設定温度[° C] (冬季 : 22 ° C、夏季 : 26° C)
- T_o : 外気温度[° C]
- I : 全天日射量[W/m²]
- θ : 平均日射熱取得率[W/(W/m²)]

である。

外皮平均熱還流率 (U) および平均日射熱取得率 (θ) は、平成 25 年省エネルギー基準における地域区分に従い、大阪平野では以下の値を与えた。

$$U = 0.87、\theta = 2.8$$

国土交通省の省エネルギー基準改定計算にモデルケースとして用いられた住宅を想定し、延床面積の合計 (A_f) および外皮面積の合計 (A_e) については、以下の値を用いた (国土交通省 Web サイト 省エネルギー基準改正の概要、<http://www.mlit.go.jp/common/001012880.pdf>)。

$$A_f = 120.08、A_e = 312.80$$

式(1)および(2)を用いて熱負荷を求めるにあたり、対象地域の外気温および全天日射量を与える必要がある。本報告においては、計算に用いる気温変化および全天日射量変化を求めるため、アメダス大阪観測所における過去 10 年間 (2008~2017 年) の年平均気温変化の平均値に最も近い年を基準年に定め、その年の 1 時間毎の外気温および全天日射量データを用いた。図 4-3 に大阪観測所の年平均気温の推移を示す。本データより、10 年間の平均気温は 17.02°C であり、その値に最も近い 2009 年を基準年と決定した。図 4-4 にアメダス大阪観測所の 2009 年の時間ごとの気温変化を示す。

冷暖房熱負荷の計算において、表 4-4 に示す期間に対し、冷房運転および暖房運転を設定した。

表 4-4 設定した冷暖房運転期間.

	冷房運転	暖房運転
運転期間	6月～9月 (4ヶ月)	11月～3月 (5ヶ月)

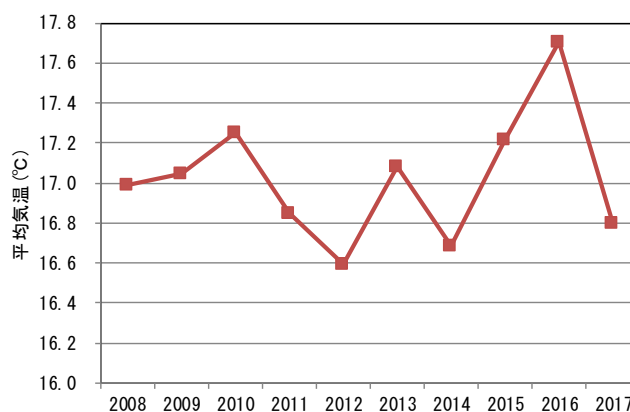


図 4-3 大阪観測所の年平均気温の推移 (2008~2017 年) (気象庁 HP のデータを加工).

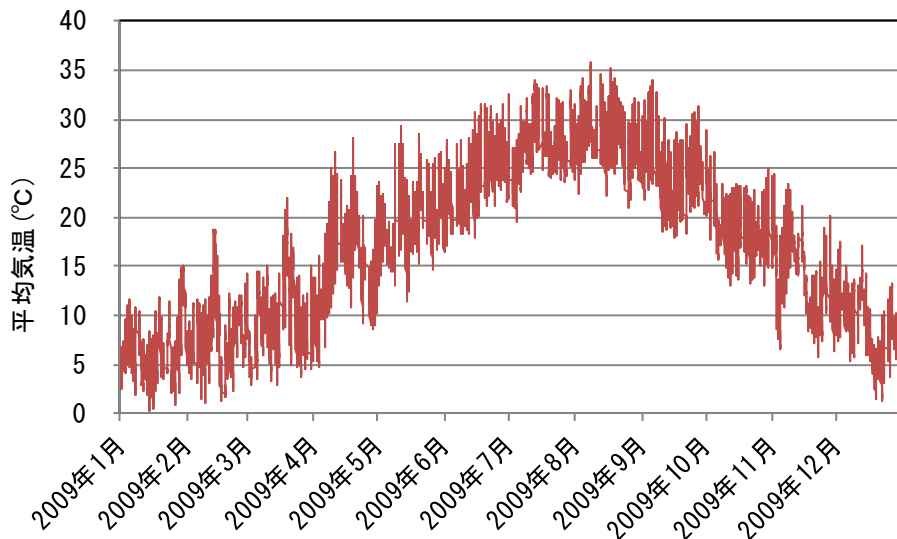


図 4-4 大阪観測所における基準年 2009 年の気温（時間単位）の推移。

ただし、冷房運転では外気温が 26°C を上回った時刻、暖房運転では外気温が 14°C を下回った時刻のみ、運転を行うものとした。また、表 4-4 に定めた期間以外については、26°C を上回る（または 14°C を下回る）日があっても運転は行わないものとした。運転を行わない日の冷暖房熱負荷については 0 [W/m²] を与えた。運転の有無を合わせた 1 日当りの平均冷暖房熱負荷量を式 (3) (4) により算出し、基準年の 1 年間分の日平均冷暖房熱負荷の変化を計算した。

$$Q_{h, day} = \frac{\sum_{t=1}^{t=24} Q_{h, t}}{24} \quad \text{式 (3)}$$

$$Q_{c, day} = \frac{\sum_{t=1}^{t=24} Q_{c, t}}{24} \quad \text{式 (4)}$$

ここで、

- $Q_{h, day}$: 1 日平均暖房熱負荷 [W/m²]
- $Q_{h, t}$: 時間 t における暖房熱負荷 [W/m²]
- $Q_{c, day}$: 1 日平均冷房熱負荷 [W/m²]
- $Q_{c, t}$: 時間 t における冷房熱負荷 [W/m²]

これらの計算により、1 年間分の 1 日毎の $Q_{h, day}$ 、 $Q_{c, day}$ 求まる。この冷暖房熱負荷に空調面積 (120.08 m²) を乗じた値が戸建住宅 1 軒あたりの熱負荷量 ($Q_{h, all}$ 、 $Q_{c, all}$) である。

1 日の平均冷暖房負荷に対し、必要となる平均地中熱交換量は、想定する空調機器の成績係数 (COP) によって決定される。本研究において地中熱空調で使用する機器の COP として冷房運転時は 5.5 を、暖房運転時は 3.5 を仮定した。この値を用い、1 日当たり必要となる日平均地中熱交換量 $Q_{E, h}$ 、 $Q_{E, c}$ [W] は以下の式により求めた。

$$Q_{E, h} = Q_{h, all} - \frac{Q_{h, all}}{COP} \quad \text{式(5)}$$

$$Q_{E, c} = Q_{c, all} + \frac{Q_{c, all}}{COP} \quad \text{式(6)}$$

式(5)、(6)により求めた日平均地中熱交換量を熱交換器モデルに入力し、計算を行う。

以上の手法により求められた大阪平野における戸建住宅 1 軒あたりの冷暖房時熱負荷量の日変化を図 4-5 に、地中熱交換量を図 4-6 に示す。

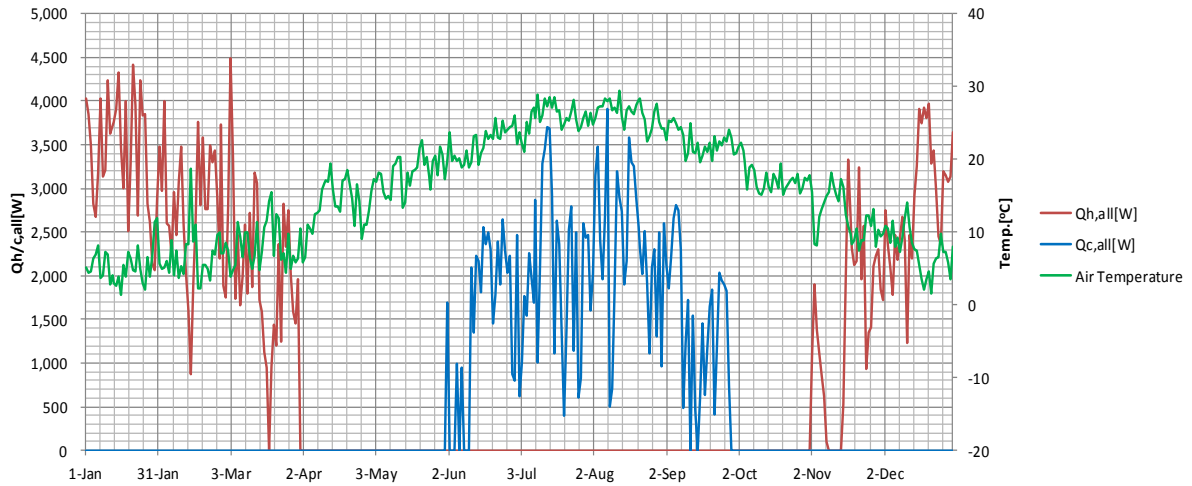


図 4-5 対象地域における戸建住宅 1 軒あたりの日平均熱負荷量.

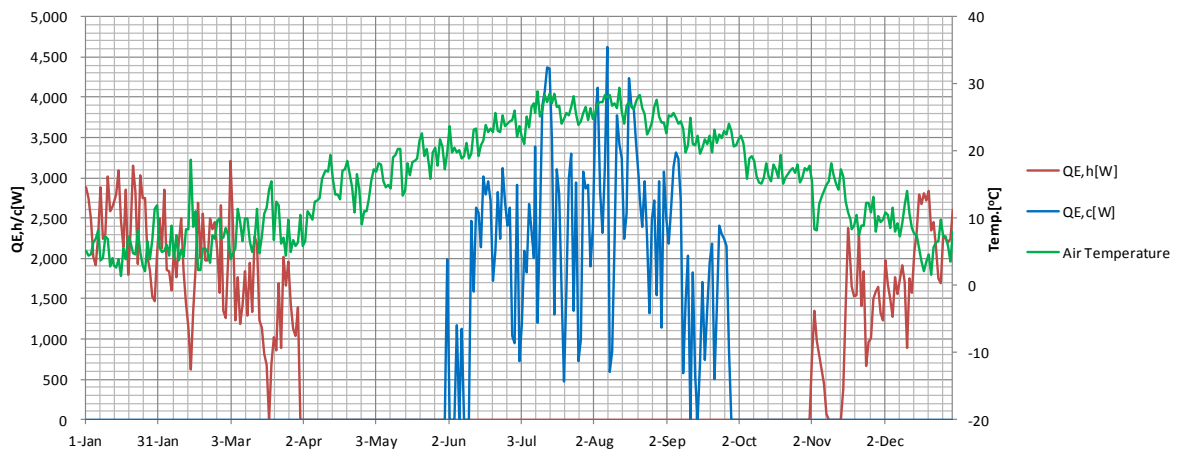


図 4-6 対象地域における戸建住宅 1 軒あたりの日平均地中熱交換量.

②必要熱交換器長さの算出方法

式(1)～(5)により求められた日平均地中熱交換量を熱交換器モデルに入力し、3年間の稼働シミュレーションを行った。その計算において、以下の条件(閾値)を満たす熱交換器最短の長さを求めた。

- a) 暖房時は、地中熱交換器の出入口温度の平均値が-2℃よりも下がらないこと
- b) 冷房時は、地中熱交換器への入口温度が35℃よりも高くないこと

また、本熱交換器モデルの鉛直方向の格子は最大厚さ5mであり、厳密に閾値を超過する長さを求めるのは難しい。そのため、深度5m以内については、地中熱交換器の出入口温度(または入口温度)と熱交換器の長さを直線で補間し、出入口温度(または入口温度)が閾値となる場合の熱交換器長さを推定した。閾値を超過した期間が暖房時の場合は式(6)、冷房時の場合は式(7)を用いた。

暖房期間に閾値を超過した場合

$$L = \frac{(L_a - L_b) \times (-2 - T_a)}{(T_a - T_b)} + L_a \quad \text{式(7)}$$

L : 求める熱交換井長さ[m]

L_a : 熱交換器出入口平均温度が-2℃を下回らないケース a での熱交換井長さ[m]

L_b : 熱交換器出入口平均温度が-2℃を下回ったケース b での熱交換井長さ[m]

T_a : ケース a の熱交換器出入口平均温度の最低温度[℃]

T_b : ケース b の熱交換器出入口平均温度の最低温度[℃]

冷房期間に閾値を超過した場合

$$L = \frac{(L_a - L_b) \times (35 - T_a)}{(T_a - T_b)} + L_a \quad \text{式(8)}$$

L : 求める熱交換井長さ[m]

L_a : 熱交換器入口温度が35℃を上回らないケース a での熱交換井長さ[m]

L_b : 熱交換器入口温度が35℃を上回ったケース b での熱交換井長さ[m]

T_a : ケース a の熱交換器入口温度の最高温度[℃]

T_b : ケース b の熱交換器入口温度の最高温度[℃]

③採排熱可能量の計算方法

可能採排熱量の計算では、①と同様の熱交換器モデルを用い、地中熱交換器の長さを100m、地中熱交換器の入口温度を暖房期は5℃、冷房期は35℃、流量20Lと固定した条件で10年間の稼働シミュレーションを実施し、10年目の採熱量および排熱量を集計し、それぞれの平均値を算出した。その他の熱交換器システム設定は表4-4と同様の設定を用いた。また、可能採排熱量計算時の冷暖房稼働期間を図4-7に示す。冷房期間は日平均気温(2009年)が26℃以上、暖房期間は14℃以下となる日を対象として、この期間は24時間連続で運転を行う設定とした。

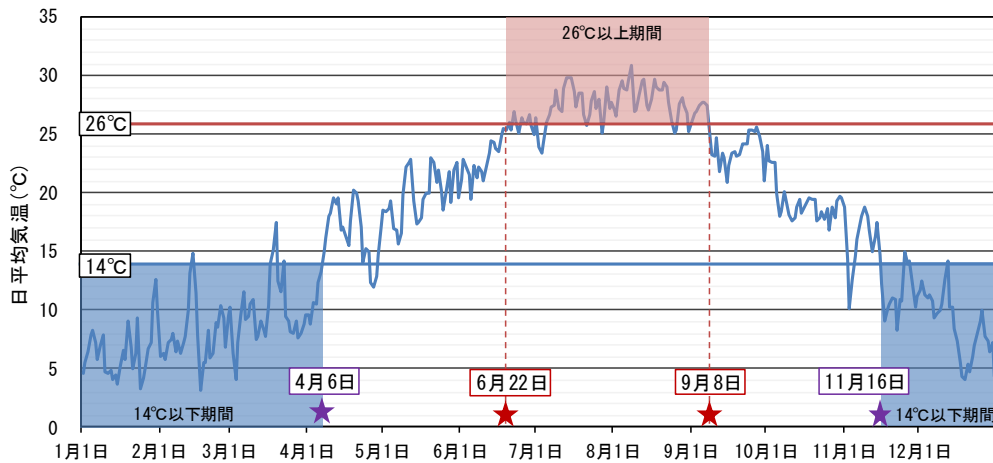


図 4-7 可能採排熱量計算に用いた冷暖房対象期間

④不飽和層を有する地点のポテンシャル計算方法検証作業

熱交換器モデルにおいて、不飽和層中の取り扱いについてはその計算方法が確立されているとは言えない。それは不飽和土壌中の水・熱輸送プロセスは非常に複雑であり、計算に必要な物性値を獲得するのが困難であることが一因である。本研究では、FEFLOW を用いてできるだけ計算負荷（計算時間）の少なく、かつ妥当な計算方法について検討を行った。

大阪平野における不飽和層を有する地点のポテンシャルの計算方法を検証するため、まずは大阪平野における不飽和層の厚さを確認した。図 4-8 に大阪平野の不飽和層の厚さの分布を示す。同データは、第 3 章の 地下水流動・熱輸送解析の結果をもとに作成されたものである。地中熱ポテンシャルの解析対象地点のうち、不飽和層の厚さが 10m 以上の地点は、No. 13（不飽和層厚 30m）、No. 20（不飽和層厚 12m）、No. 31（不飽和層厚 18m）の 3 地点であった。

計算上の不飽和層の取り扱いが、計算結果である必要熱交換器長さに与える影響について検討するため、不飽和層が厚いと計算された 3 地点について、不飽和層の間隙に水の物性値を入力した場合（＝飽和状態）と、空気の物性値を入力した場合の両ケースを対象に計算した。具体的な計算条件の変更点は、不飽和層に相当するレイヤーの間隙部分の物性値（熱容量、熱伝導率）を、通常設定している水の値から空気の値に変更する点である（図 4-9）。実際の不飽和土壌中は水分も一定量は保持されており、完全乾燥を仮定した本設定はポテンシャルを過小に評価することになるが、最もポテンシャルが小さくなるケースでの計算結果と考えられ、今回の不飽和層がポテンシャルに与える影響評価においては、問題ないと考えられる。

計算結果を表 4-5 に示す。不飽和層の厚さが 30m であった No. 13 地点でも、飽和（間隙を水の物性値としたケース）から、不飽和（間隙を空気の物性値としたケース）の条件に変えることによるポテンシャルの変化量は、ポテンシャル値（95～99m）の 5%未満であった。不飽和層の厚さが 18m であった No. 31 地点では、その差が 3%程度であり、不飽和層の厚さが 12m であった No. 20 地点では、その差がさらに小さくなり、2%未満である。2%程度の誤差は許容できるものと判断し、不飽和層の厚さが 10m 未満の地点については、通常の飽和条件により、ポテンシャルを計算することとした。

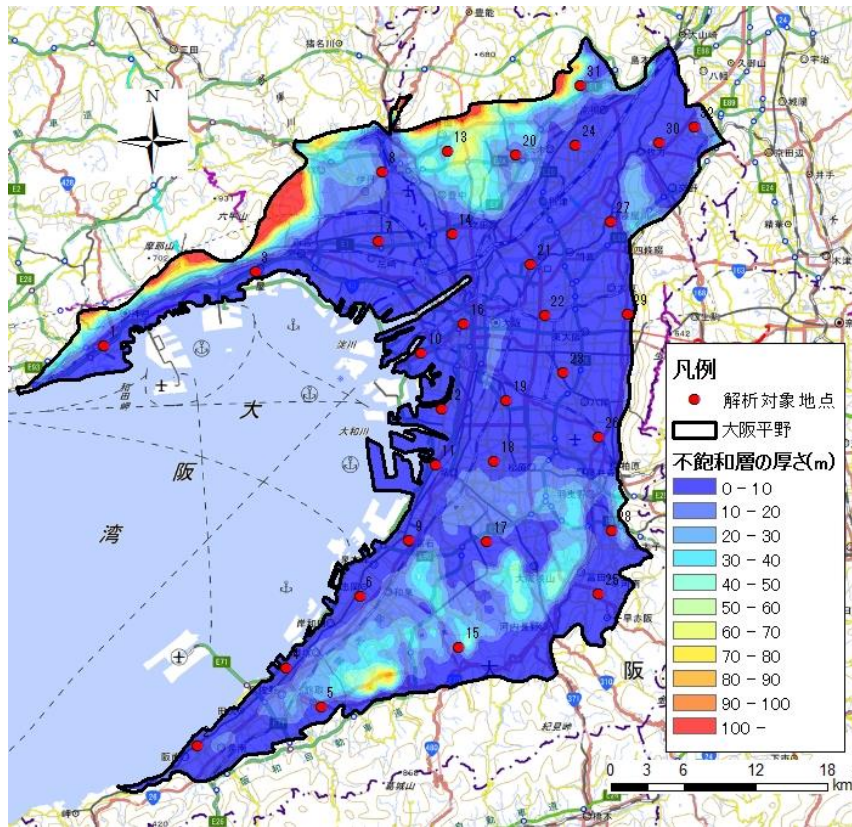


図 4-8 大阪平野の不飽和層厚の分布（計算値）. 背景には国土地理院の電子国土基本図（タイル）<https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html> を使用.

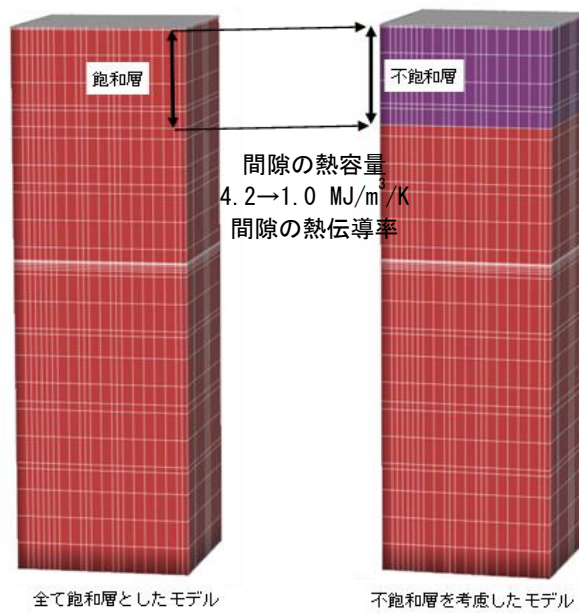


図 4-9 不飽和層部分の熱物性の設定.

表4-5 飽和/不飽和の計算条件の違いによる地中熱ポテンシャルの変化量.

Well No.	飽和/不飽和計算	不飽和層の厚さ (m)	熱交換器長さ (m)	熱交換器長さの差 (m)
13	不飽和計算	30	99.61	4.02
	飽和計算	-	95.59	
20	不飽和計算	12	99.44	1.83
	飽和計算	-	97.60	
31	不飽和計算	18	82.87	2.71
	飽和計算	-	80.16	

(4) 解析結果と地中熱ポテンシャルマップ (クローズドループ)

前述したシミュレーション解析により算出された必要地中熱交換器長さは、表 4-6 に示す L 値となった。同表のうち X、Y はシミュレーション対象地点の座標（平面直角座標 JGD_2000_Japan_Zone_6）、Elevation は解析地点の地表面標高である。

シミュレーションにより計算された地中熱交換器最短長さの分布を図 4-12、可能採熱量および可能排熱量の分布を図 4-13、図 4-14 に示す。計算地点間の内挿補間処理については、地理情報システムソフトウェアである ArcGIS (ESRI 社) を用い、クリギング補間によって内挿を行った。

表 4-6 必要地中熱交換器長さの計算結果

Well No.	X	Y	Elevation (m)	L (m)
1	-76585.1	-147588.2	3.0	97.45
2	-68787.8	-180907.3	6.2	78.07
3	-63970.7	-141386.7	4.0	94.01
4	-61367.1	-174420.2	3.5	89.80
5	-58459.3	-177579.7	53.5	66.56
6	-55258.7	-168423.9	8.5	73.21
7	-53689.1	-138851.4	2.9	79.19
8	-53383.2	-133063.6	18.8	68.17
9	-51132.0	-163807.8	5.7	68.10
10	-50135.2	-148173.8	0.4	92.44
11	-48954.1	-157511.7	1.7	72.63
12	-48462.2	-152796.1	1.8	87.97
13*	-47960.6	-131333.6	57.6	99.61
14	-47569.0	-138289.7	3.2	85.20
15	-47022.0	-172700.2	91.5	78.90
16	-46578.5	-145724.2	1.8	89.26
17	-44663.8	-163910.7	51.6	65.45
18	-44047.0	-157175.3	11.5	65.65
19	-43041.9	-152106.0	5.7	86.17
20*	-42235.5	-131707.4	41.2	99.44
21	-41046.9	-140776.6	1.3	97.45
22	-39879.4	-145053.9	1.4	86.81
23	-38297.9	-149809.3	5.9	78.74
24	-37263.3	-130852.8	8.6	92.56
25	-35373.5	-168170.4	82.0	53.18
26	-35353.9	-155197.1	12.0	72.49
27	-34412.6	-137214.4	6.2	86.74
28	-34287.4	-162962.8	45.2	84.28
29	-32973.5	-144966.9	7.1	89.15
30	-30304.8	-130691.8	25.7	75.86
31*	-36883.3	-125929.9	37.6	82.87
32	-27406.3	-129329.1	44.3	69.12

*不飽和層を考慮して計算した地点

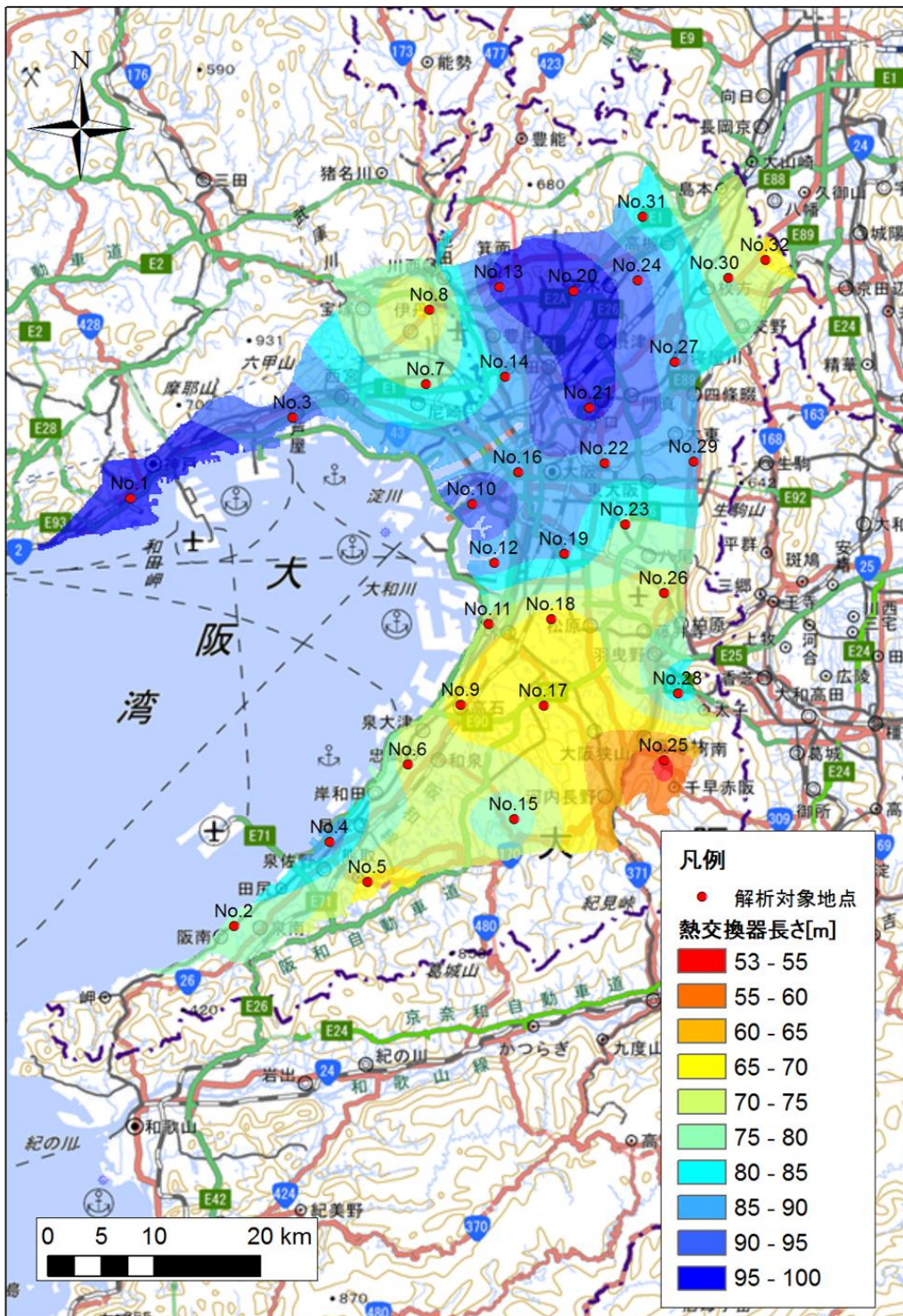


図 4-12 クローズドループの地中熱ポテンシャルマップ（必要熱交換器長さ）。背景地図には、国土地理院 電子地形地図（タイル）<https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html> を使用。

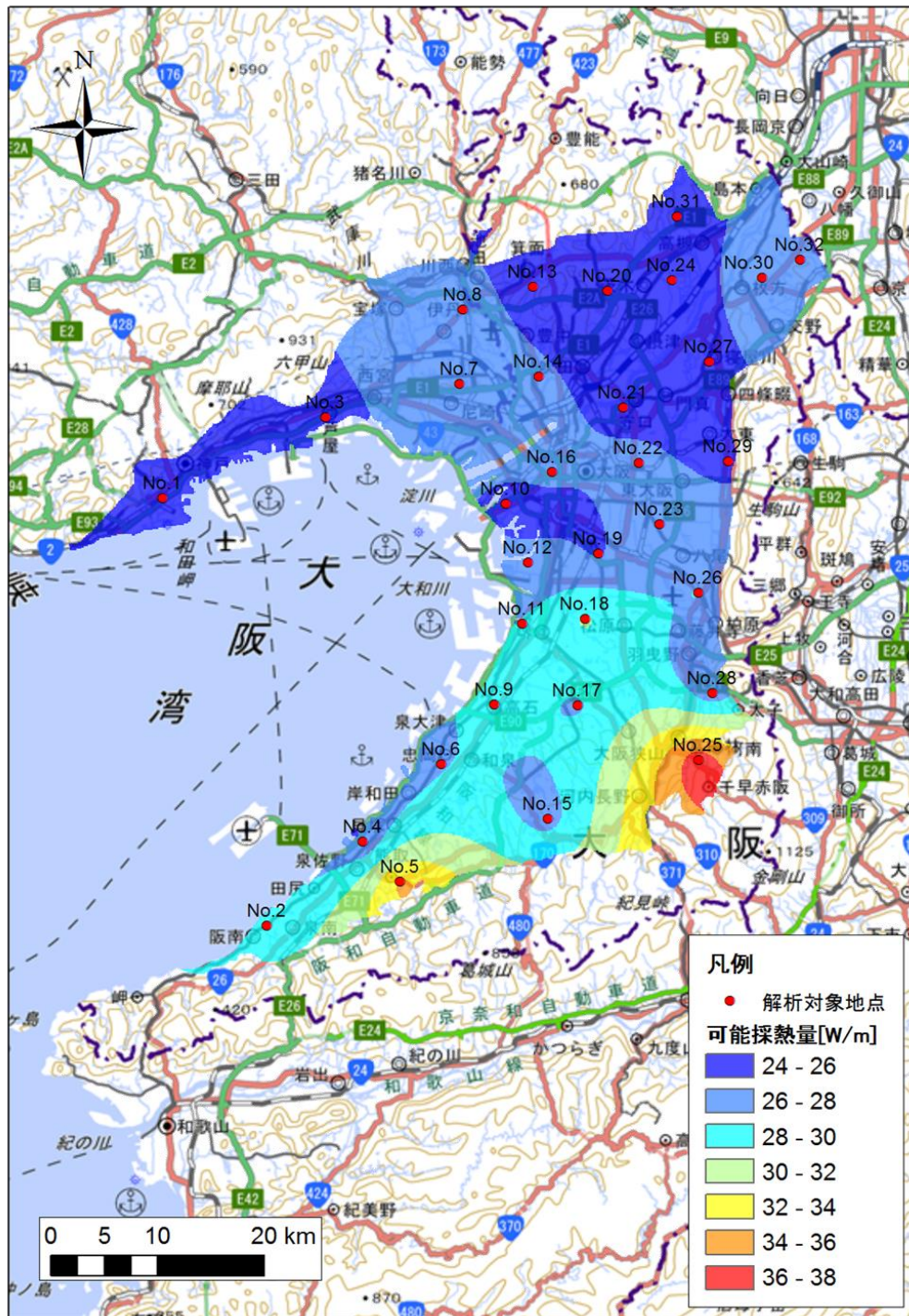


図 4-13 クローズドループの地中熱交換器 100m あたりの可能採熱量分布. 背景地図には、国土地理院 電子地形地図 (タイル) <https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html> を使用.

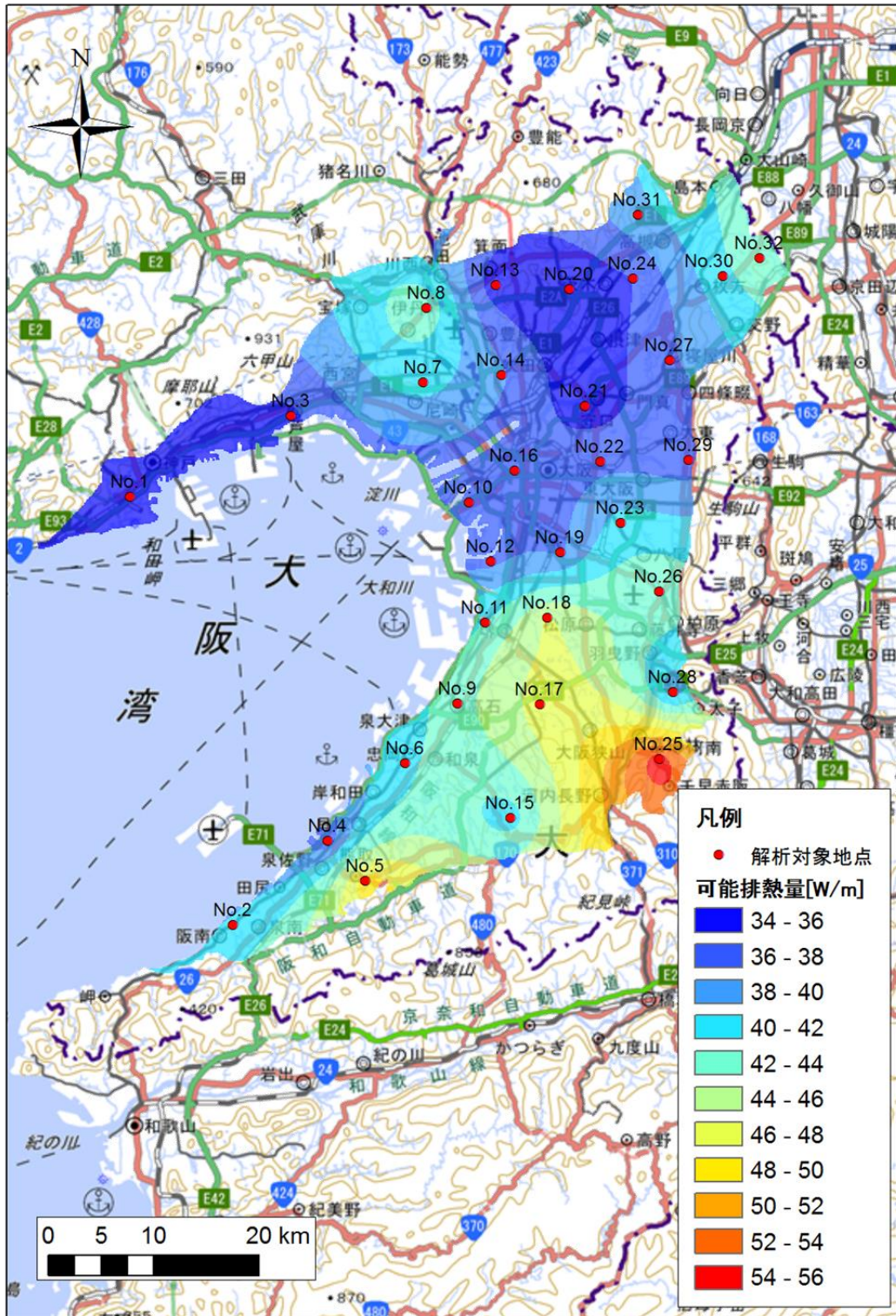


図 4-14 クローズドループの地中熱交換器 100m あたりの可能排熱量分布. 背景地図には, 国土地理院 電子地形地図 (タイル) <https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html> を使用.

4.2 オープンループシステムにおける適地評価

(1) オープンループ適地評価の計算方法

オープンループシステム（ヒートポンプの熱源として地下水を揚水し、再び地下水を地下へ還元する方式）は、クローズドループシステムと異なり、地域によって導入可能である場所と適さない場所が存在する。したがって、本報告では、オープンループシステムのポテンシャルマップについては、「適地マップ」と称することにする。

オープンループシステムにおける適地評価については、下記の手順で選定した。なお、本評価手法についても、日本地下水開発株式会社他（2019）の手法を用いている。

- ① 第3章の3次元地下水流動熱輸送解析で構築した大阪平野の広域モデルから、地下水面標高、および第一帯水層の下面標高、を抽出する。
- ② 地下水面標高と第一帯水層の下面標高の差異（帯水層厚さ）が20m以上ある範囲を抽出する。この帯水層厚さについては、既存の事例（例えば、日本地下水開発株式会社ほか、2013など）を元に設定した。それ以外の地域については、帯水層が薄いため十分な地下水揚水が見込めない可能性があり、よって「事前調査必要地域（揚水能力）」とした。
- ③ ②で抽出した範囲において、地下水面から20m深度までの第一帯水層における各接点の鉛直方向の平均地下水流速を抽出し、地下水流向が下向き、または上向きであっても流速が非常に遅い地域について、オープンループシステムの適地とした。本報告では鉛直方向の上向きの地下水流速0.0005m/dを閾値と設定して、上向きの地下水流速0.0005m/d以下（および下向きの地下水流速）の範囲をオープンループシステムの適地と選定した。それ以外の地域については、上向きの地下水流速が卓越すると見込まれる地域であり、地下水還元が困難な場合もある。よって、「事前調査必要地域（還元能力）」とした。

(2) 解析結果およびオープンループの適地分布

上記において抽出した、第一帯水層の厚さが20m以上である範囲の鉛直方向地下水流速の分布を図4-15に、参考として水平方向の地下水流速を図4-16に示す。図中の地下水流速が示されている範囲は、第一帯水層の厚さが20m以上と推定される地域であり、図に示した地下水流速は、地下水面から20m深度までの平均値である。

図4-17にオープンループシステムの適地マップを示す。大阪平野の北部、南部および上町台地周辺では帯水層が薄いと見込まれ、オープンループシステムの導入の際には、事前に可能揚水量に関する調査を行うことが必要である。また、一部では上向きの地下水流速が大きい（自分や湧水など）地域があるが、平野全体的には鉛直方向よりも水平方向の流れが大きく、十分な地下水揚水量が見込まれる地域であれば、オープンループシステム導入の可能性が高いことが示唆された。

なお、本手法による選定は、基本的に第一帯水層を想定したものであり、それ以深の帯水層の利用を対象とする場合には別途検討が必要である。

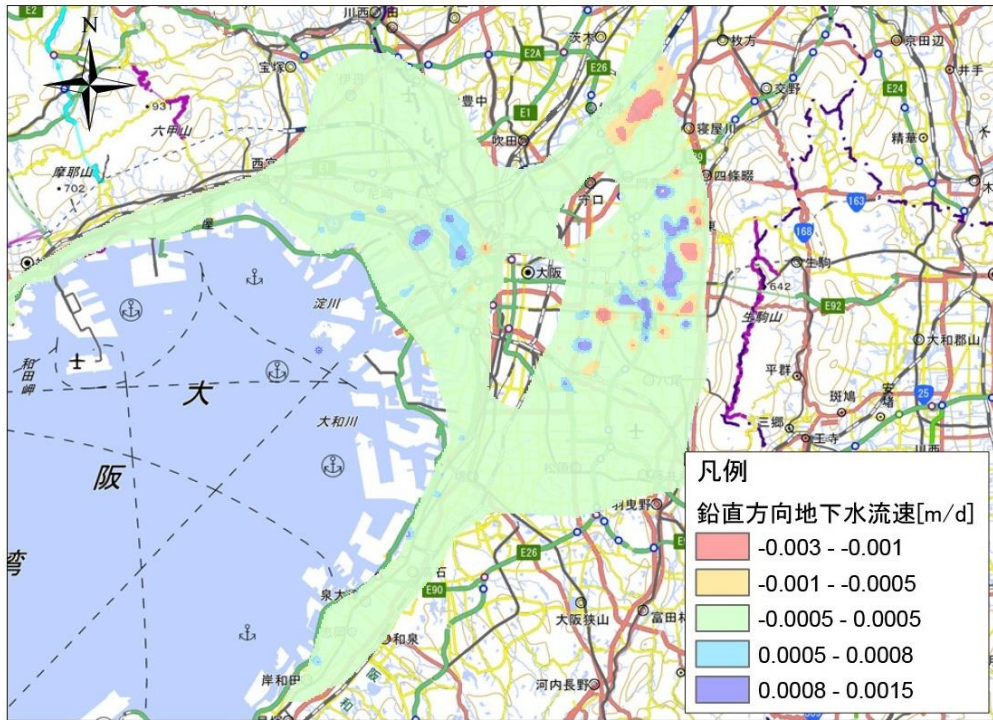


図 4-15 第一帯水層厚さ 20m 以上の範囲における鉛直地下水流速分布. 負値は下向きの流速, 正値は上向きの流速を示す. 背景地図には, 国土地理院 電子地形地図 (タイル) <https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html> を使用.

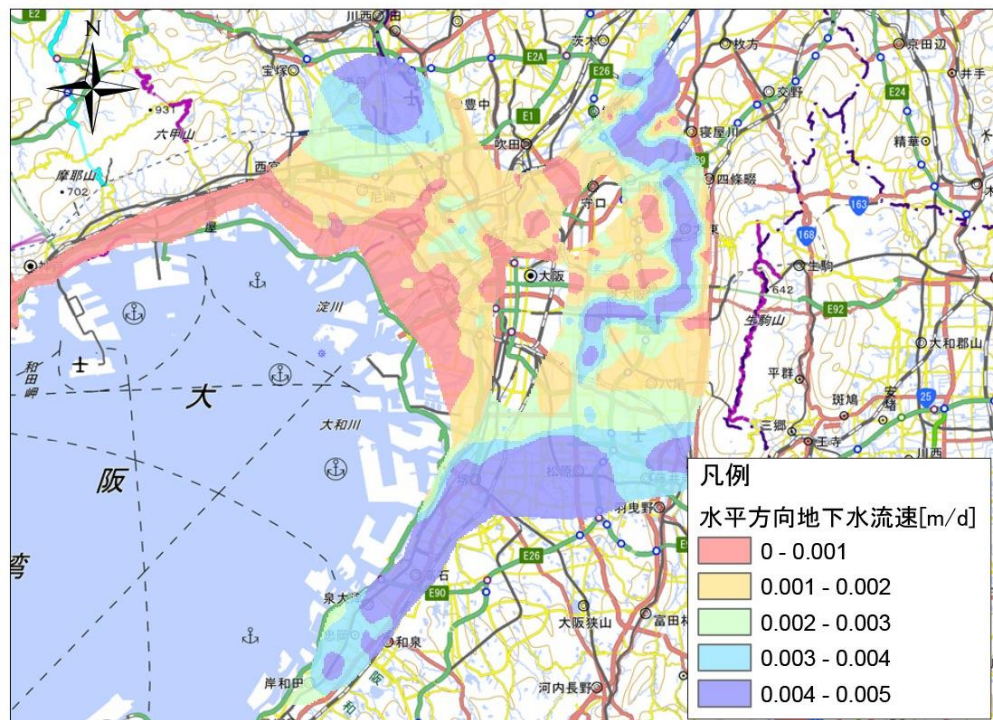


図 4-16 第一帯水層厚さ 20m 以上の範囲における水平方向の地下水流速分布. 背景地図には国土地理院 電子地形地図 (タイル) <https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html> を使用.



図 4-17 オープンループシステムの適地マップ。背景地図には、国土地理院 電子地形地図（タイル）
<https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html> を使用。

5. 終わりに

本報告では、既存の水文地質資料の収集、および対象地域における3次元地下水流動・熱輸送モデルを構築し、構築したモデルを用いて、地下水流動・熱交換量予測シミュレーションに基づく地中熱ポテンシャル評価を行った。その評価結果については、クローズドループ地中熱システムのポテンシャルマップ、およびオープンループシステムの適地マップとして取りまとめた。

クローズドループシステムのポテンシャルマップおよびオープンループシステムの適地マップは、それぞれ地域の地下水流動系の影響を受けた分布形態を示しており、システムの導入計画に際して、地域に適した熱交換方式をマップで示すことができた。今後、本マップを活用することにより、地中熱システムの大阪平野への普及に貢献することを期待する。

謝辞：

本研究を実施するにあたり、大阪府エネルギー政策課の方々にはデータの提供等のご協力をいただきました。また、地域地盤環境研究所の方々には地盤データに関してご助言・ご協力いただきました。記して謝意を表します。

引用文献

- 地下水地盤環境に関する研究協議会（2018）平成29年度 地下水情報に関する報告書，CD-ROM
- Diersch, H. J. G. (2005): FEFLOW Reference Manual; WASY GmbH Institute for Water Resources Planning and Systems Research: Berlin, Germany, 2005.
- 株式会社ニュージェック（2016）：平成27年度 地中熱等導入促進事業調査業務委託その2（ポテンシャル調査等）報告書，p.186.
- 気象庁：アメダスデータ，気象庁ホームページ，<https://www.jma.go.jp/jp/amedas/> [参照確認：2019.05.16]
- 国土交通省：水文地質データベース，<http://www1.river.go.jp/> [参照確認：2019.05.16]
- 国土交通省：大阪湾水質定点自動観測データ配信システム，<http://222.158.204.199/obweb/> [参照確認：2019.05.16]
- 国土交通省：省エネルギー基準改正の概要，<http://www.mlit.go.jp/common/001012880.pdf> [参照確認：2019.05.16]
- 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合機構（2019a）「再生可能エネルギー熱利用技術開発／地下水を利活用した高効率地中熱利用システムの開発とその普及を目的としたポテンシャルマップの高度化」（研究代表者：日本地下水開発株式会社）成果報告書（https://www.nedo.go.jp/library/seika/list_201906/list_201906.html，管理番号：20190000000346）[2019.06.06公開]
- 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合機構（2019b）「再生可能エネルギー熱利用技術開発／再生可能エネルギー熱利用のポテンシャル評価技術の開発／都市域における、オープンループシステムによる地下水の大規模熱源利用のための技術開発」（研究代表者：地域地盤環境研究所）成果報告書（2019年7月公開予定）。
- 日本地下水開発株式会社，秋田大学，産業技術総合研究所（2013）環境省平成25年度地球温暖化対策技術開発・実証研究事業成果報告書，p.204.

井川怜欧, 益田晴江, 新谷 毅, 三田村宗樹 (2019) 水文環境図 No. 11 大阪平野, 産業技術総合研究所地質調査総合センター (2019年6月公開予定).

内田洋平 (2014) : 地中熱利用のための広域における地下水流動と熱輸送解析. 太陽エネルギー、vol. 40, p. 25-34.