

■業務概要

- (1) 業務対象範囲
諏訪市内及び既存文献等所在地（図1参照）
- (2) 業務期間
平成27年7月23日～平成28年2月26日
- (3) 発注者
諏訪市市民部生活環境課
- (4) 受注者
八千代エンジニアリング株式会社
- (5) 業務目的と概要
市民や市内事業者に地中熱利用を拡げていくためには、地中熱の利用潜在量を基盤情報図として可視化し、利用検討の足掛かりとして広く周知していくことが必要である。
そのため、本調査は既存資料等をもとに各種解析を行い、概ね標高800m以下の市内平坦部の冷暖房における地中熱の賦存量及び利用潜在量を評価し、地中熱利用潜在量マップ等の作成を行うものである。
- (6) 業務の方針
【方針1】 諏訪市特有の地域パラメータの評価を実施
【方針2】 地中熱交換井深度の違いを明確にできる評価を実施
【方針3】 更新が容易な地中熱利用潜在量の評価式を提案

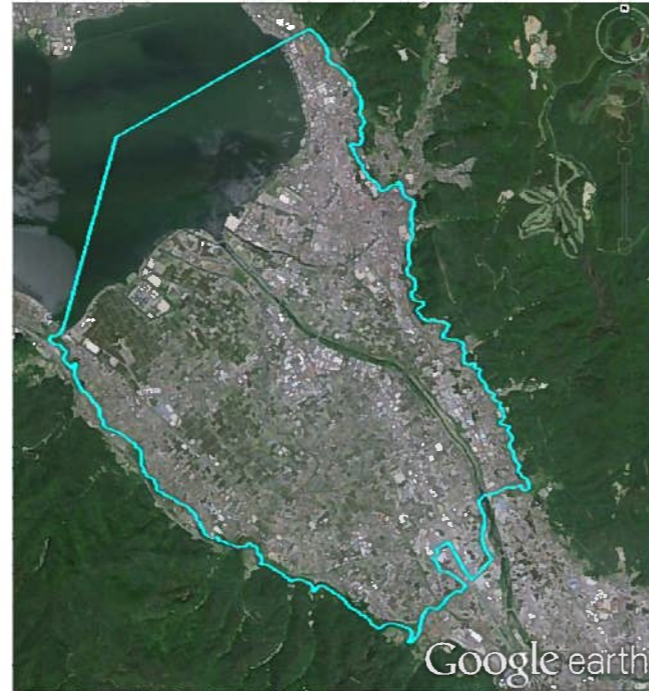


図1 業務対象範囲

■調査その1：【結果】諏訪市の地域パラメータ

①地層の物性

過年度調査において、諏訪市美術館、諏訪湖ホテルで熱応答試験を実施し、見かけの熱伝導率を評価している。本業務ではこれら成果を活用して、数学モデルによる逆解析により地質区分ごとの固相の熱伝導率 λ_s と堆積熱容量 ρC_s をそれぞれ評価した（表2）。また、文献調査に基づき対象地域の帯水層区分ごとに透水係数を推計した（表3）。

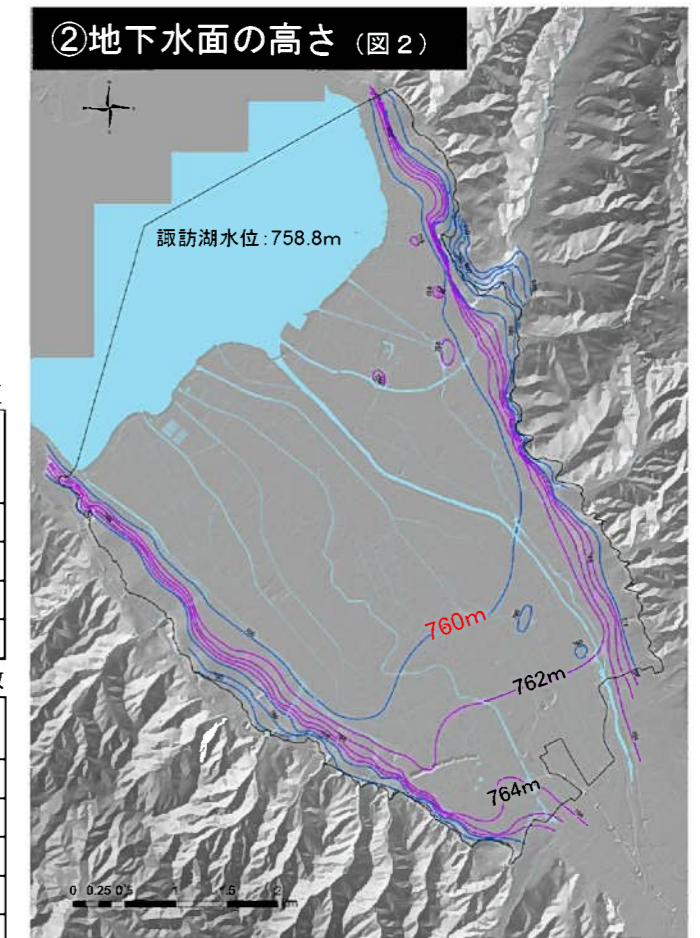
表2 地質区分ごとに把握した固相の熱物性値

No.	地質区分	固相の熱伝導率 λ_s W/(m・K)	固相の体積熱容量 ρC_s MJ/(m ³ ・K)
1	粘性土	3.3	3.0
2	砂	4.2	2.8
3	砂礫	4.8	2.7
4	基盤岩	6.0	3.0

表3 帯水層区分ごとに把握した透水係数

No.	帯水層区分	透水係数（文献値の平均） cm/sec	
		回復法	注水法
1	粘性土主体層	6.5×10^{-5}	4.1×10^{-5}
2	腐植土主体層	7.9×10^{-4}	2.4×10^{-4}
3	砂主体層	1.6×10^{-3}	1.8×10^{-3}
4	砂礫主体層	1.8×10^{-3}	5.1×10^{-3}

②地下水面の高さ（図2）



■調査その1：地中熱利用潜在量（ポテンシャル）を決定する「地域パラメータ」把握

【目的と内容】

地中熱利用の潜在量（ポテンシャル）を評価する際に、表1に示す5つの「地域パラメータ」を把握する必要がある。諏訪市、長野県、国等が実施した既往調査結果を参考にして、対象地域の地域パラメータを把握した。

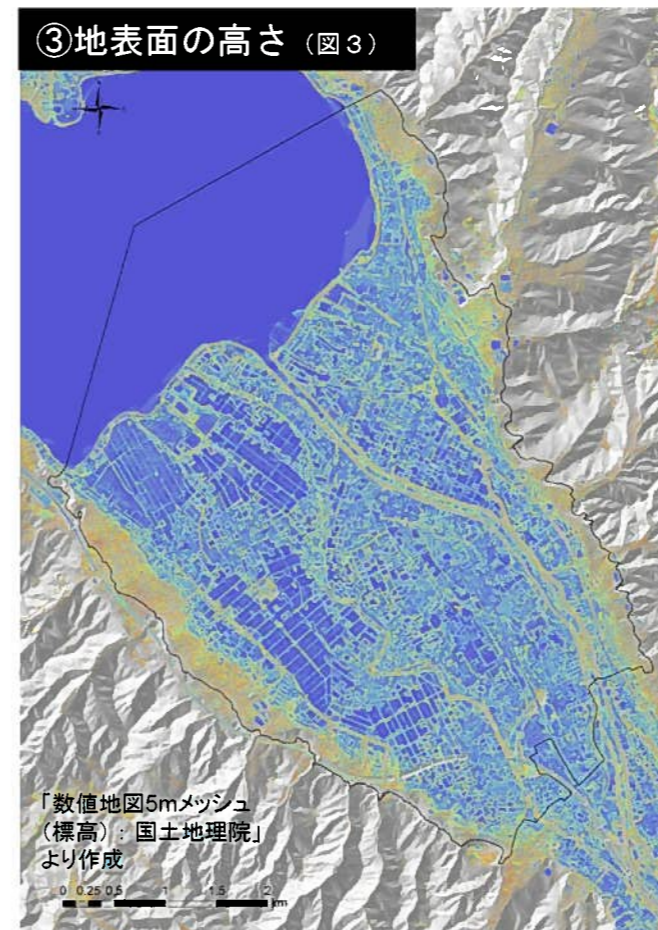
表1 把握した地域パラメータと概要

①	地層の物性	地中熱の交換特性を評価するためには、地層の有する熱伝導特性の理解が最も重要と言える。さらに、システム利用を想定すると地層の熱保存のしやすさ（熱容量）の評価も必要である。具体的には、地質構成材別の熱伝導率、体積熱容量、透水係数を地質構成と地層構造から把握する。
②	地下水面の高さ	対象地域の地下水面の分布は、既存の地下水位調査結果を活用して把握する。地下水面が地表に近いほど熱交換の効率は高くなる。
③	地表面の高さ	地表面と地下水面の高さの差分を不飽和層と呼ぶ。不飽和層の幅が厚いほど、熱交換効率は低下する。したがって、対象地域における不飽和層の厚さを把握することは、地中熱利用潜在量の評価精度の向上につながるため、地下水面の高さのみでなく、地表面の高さ（標高）を高い精度で検討に反映することが重要である。
④	地下水の流速	地下水の流速が早いほど熱交換の効率は高くなる。この地下水の流速を加味した「見かけの熱伝導率」を評価するためには、対象地域の地下水流速の面分布を理解する必要がある。
⑤	地下水の水温	地中温度の高い諏訪市では、地下水の水温が地中熱利用潜在量に大きく影響を及ぼす。また、異なる熱交換井深度における検討のためにも、3次元の地下水温度分布を把握する必要がある。

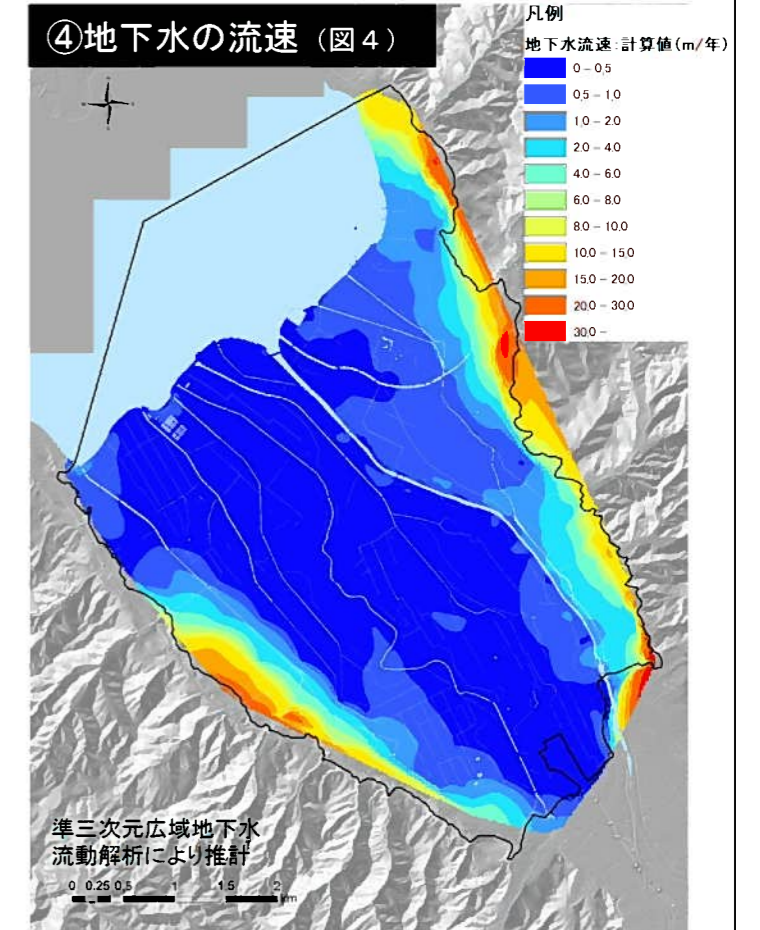
【調査結果のまとめ】

- ・対象地域の地下水面は総じて地表近くにあり、とくに平地部の地下水面はほぼ平坦であることがわかった
- ・地下水面が平坦なため、不飽和層の厚さの評価には対象地域の微地形の把握が重要であることがわかった
- ・整理した地層の物性値（透水係数）を用いて対象地域の地下水流動解析をおこなったところ、平野部の地下水は1年間で数メートルの移動のみと流速は非常に遅く、地下水の流れによる地中熱交換効率の向上（移流効果）はあまり期待できないことが予想される
- ・地下水温は温泉地付近は深度が大きいほど上昇するが、他地域は年間気温（11.1℃）程度と考えられる

③地表面の高さ（図3）



④地下水の流速（図4）



■調査その3：基礎解析

【目的と内容】

調査その2で把握した諏訪市の地域パラメータを基にして、地中熱利用システム導入適地の評価に役立つ諸情報を取得するため、以下の項目で基礎解析を実施した。

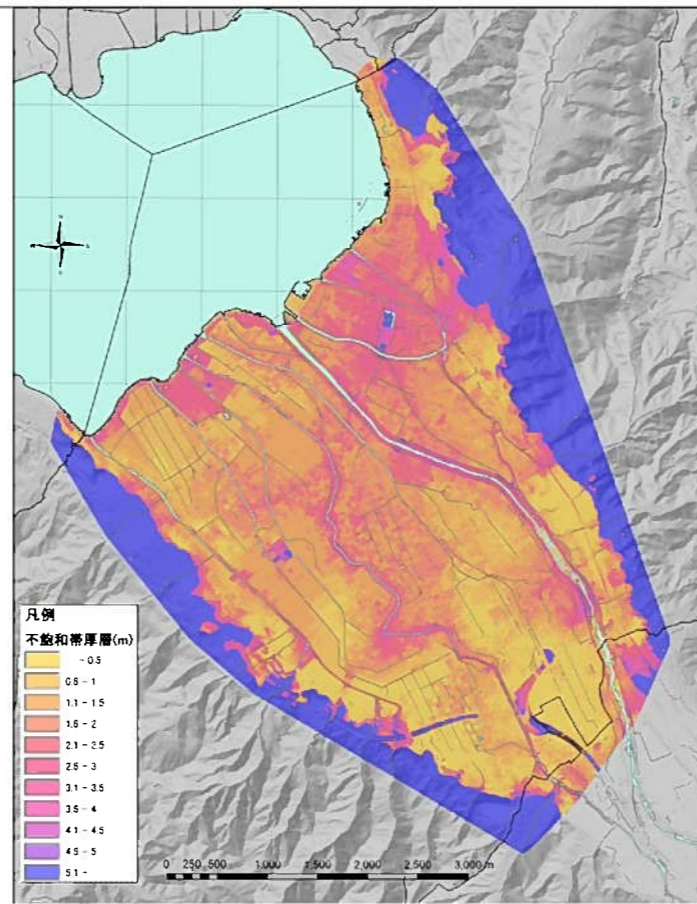
表4 基礎解析を実施した項目

① 地表面と地下水面の差分	地下の間隙中を水で満たされた場所ほど、地中熱交換の効率が低い。地表面と地下水面の差分（不飽和層厚）は、地中熱交換の効率を評価する際に有用な情報となる。
② 見かけの熱伝導率	地中における熱交換を決定する「見かけの熱伝導率」や「地中温度」の把握が重要となる。これらは、地中熱交換井の長さに応じて変化するため、基礎解析により熱交換井設置深度別に評価した。
③ 平均地中温度	

【調査結果のまとめ】

- ・微地形情報を用いて地表面と地下水面の差分（不飽和層厚）を評価したところ、平野部では概ね地表より5m以浅に地下水面があると推計された
- ・地下水流速、不飽和層厚を考慮して評価した見かけの熱伝導率は、深度による変化が明確になった
- ・深度別の平均地中温度を解析し、深度ごとに温度が上昇する想定と通りの結果が得られた

①地表面と地下水面の差分：不飽和層厚（図9）



■調査その4：地中熱利用潜在量マップの作成

【目的と内容】

調査その1～その3で把握・整理した各情報に基づき、地中熱利用潜在量マップを作成した。マップ作成にあたり、対象地域に地中熱利用システムを導入した際のシステム運転シミュレーションをおこない、このとき得られる熱交換量（W/m）の計算値をポテンシャルの指標とした。なお、より実状に近い条件での地中熱交換の予測を行うために、諏訪市の戸建住宅の空調利用を想定した熱負荷条件を設定し（図11）、シミュレーションには地中熱ヒートポンプシステム性能予測プログラム「Ground Club」（図12）を利用した。

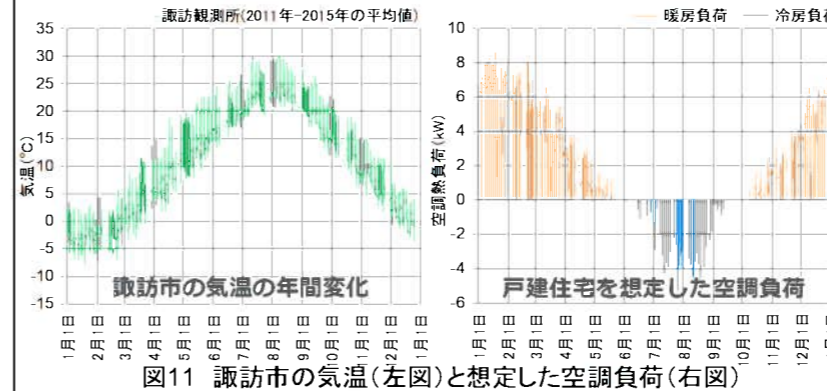


図11 諏訪市の気温（左図）と想定した空調負荷（右図）

GSHP設計・性能評価ツール「Ground Club」のインターフェース

- ◇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ね合わせによる計算

図12 Ground Clubの概要

【調査結果のまとめ】

- ・システム運転シミュレーションの結果、地域パラメータや熱交換井深度の違いによって、熱交換量に差異が生じることが明らかとなり、この結果を基に地中熱利用潜在量マップを作成した
- ・今後、対象地域において熱応答試験や地下水温の調査を実施した場合に、これら成果を活用して地中熱利用潜在量を更新できるように地中熱利用潜在量の評価式を作成しており、これにより成長型のマップとなるように工夫した

■調査その3：【結果】基礎解析により評価された熱交換井深度と物性値の変化

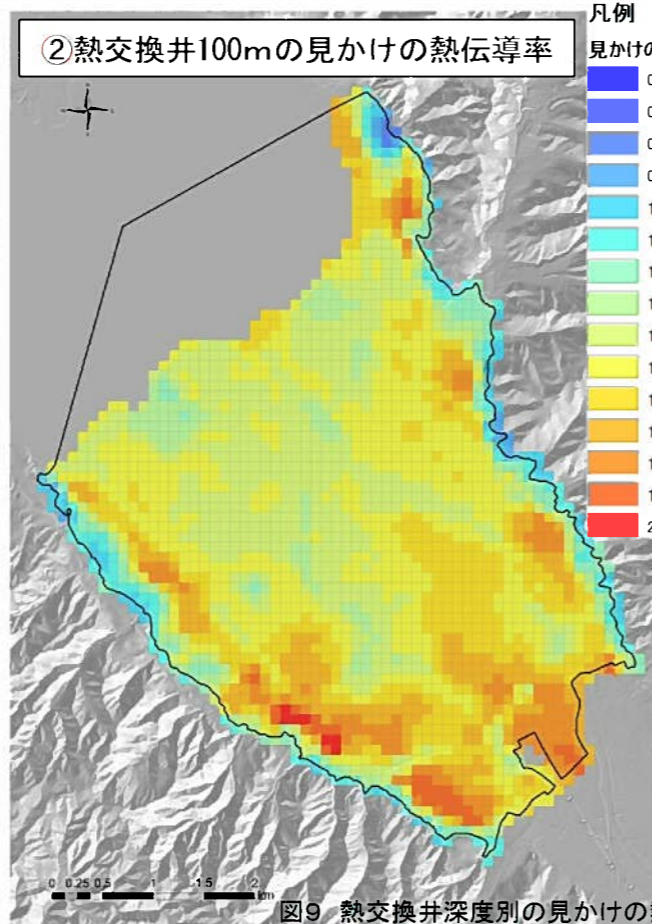
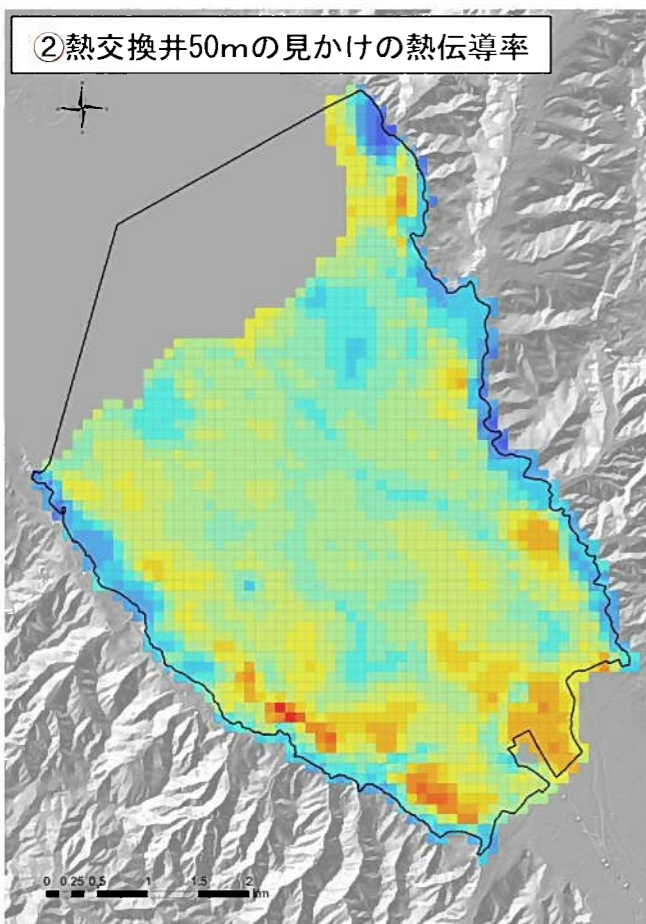


図9 熱交換井深度別の見かけの熱伝導率

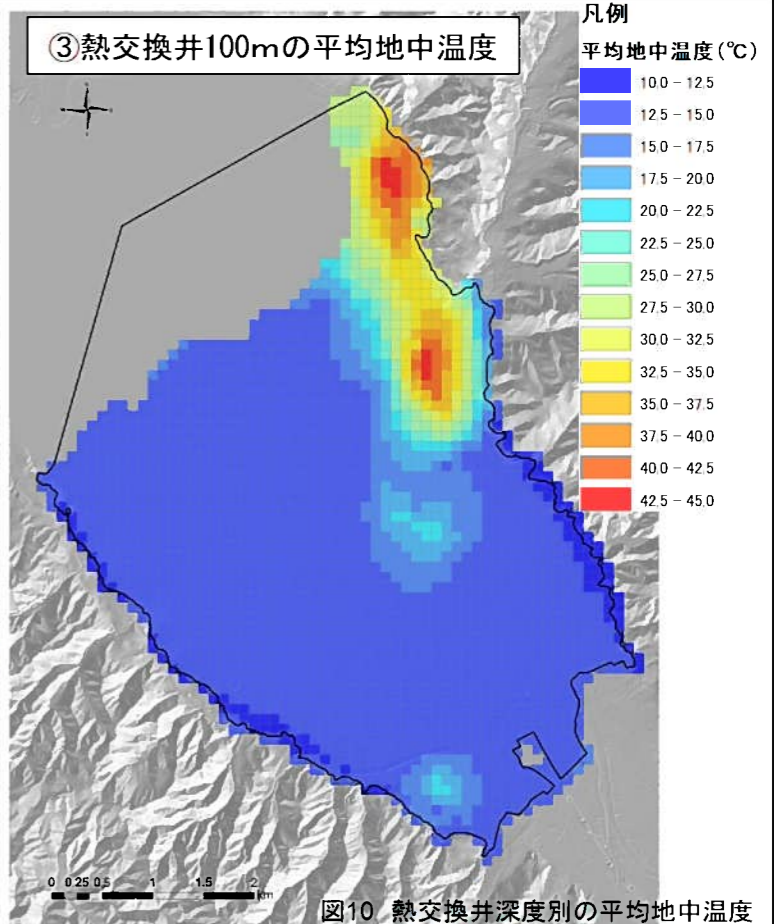
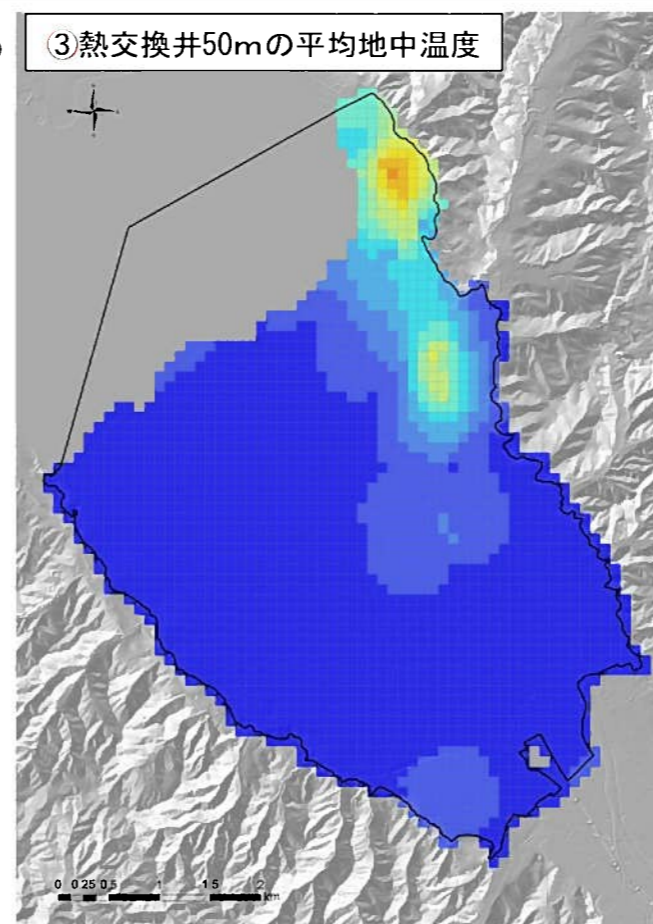
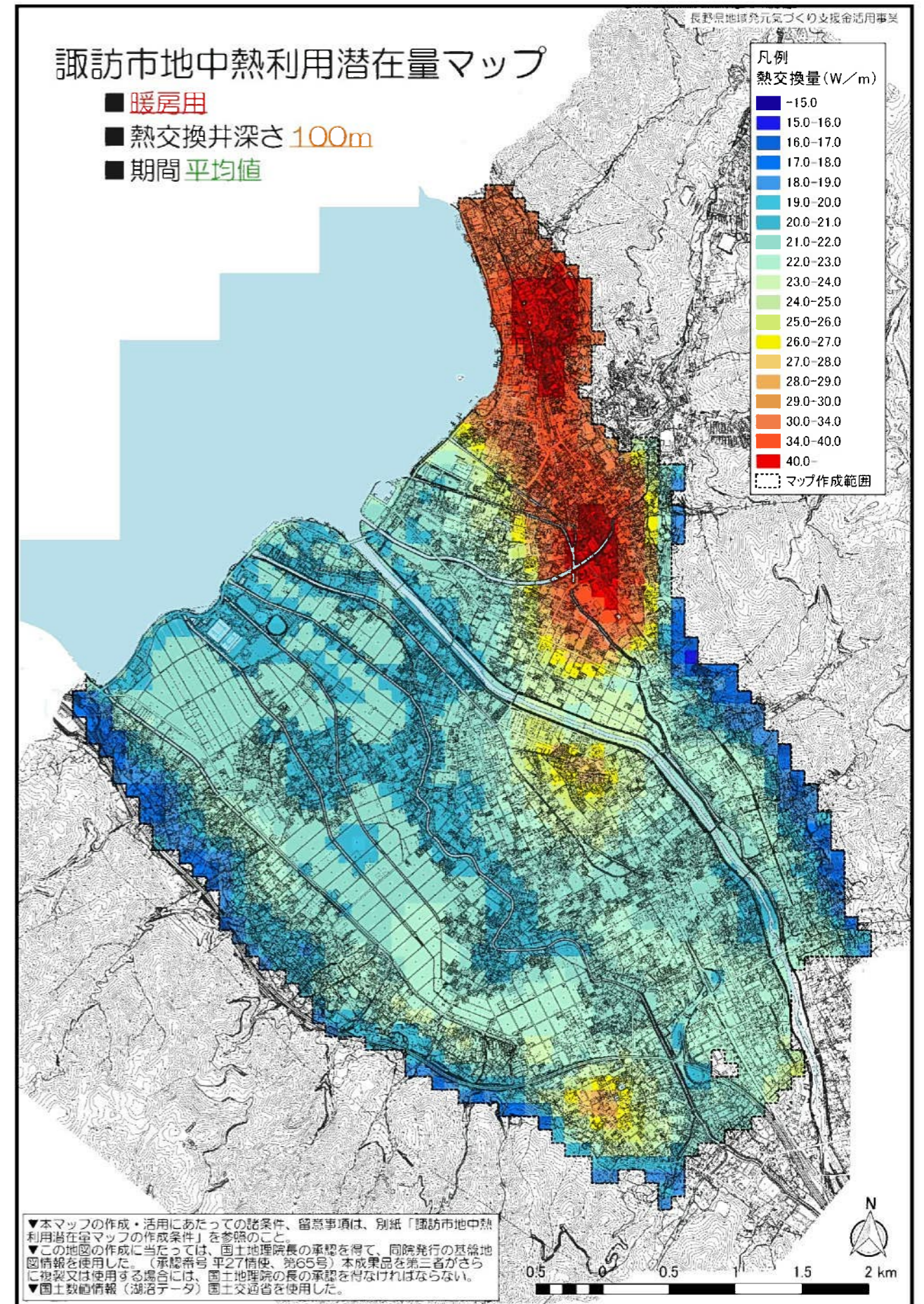
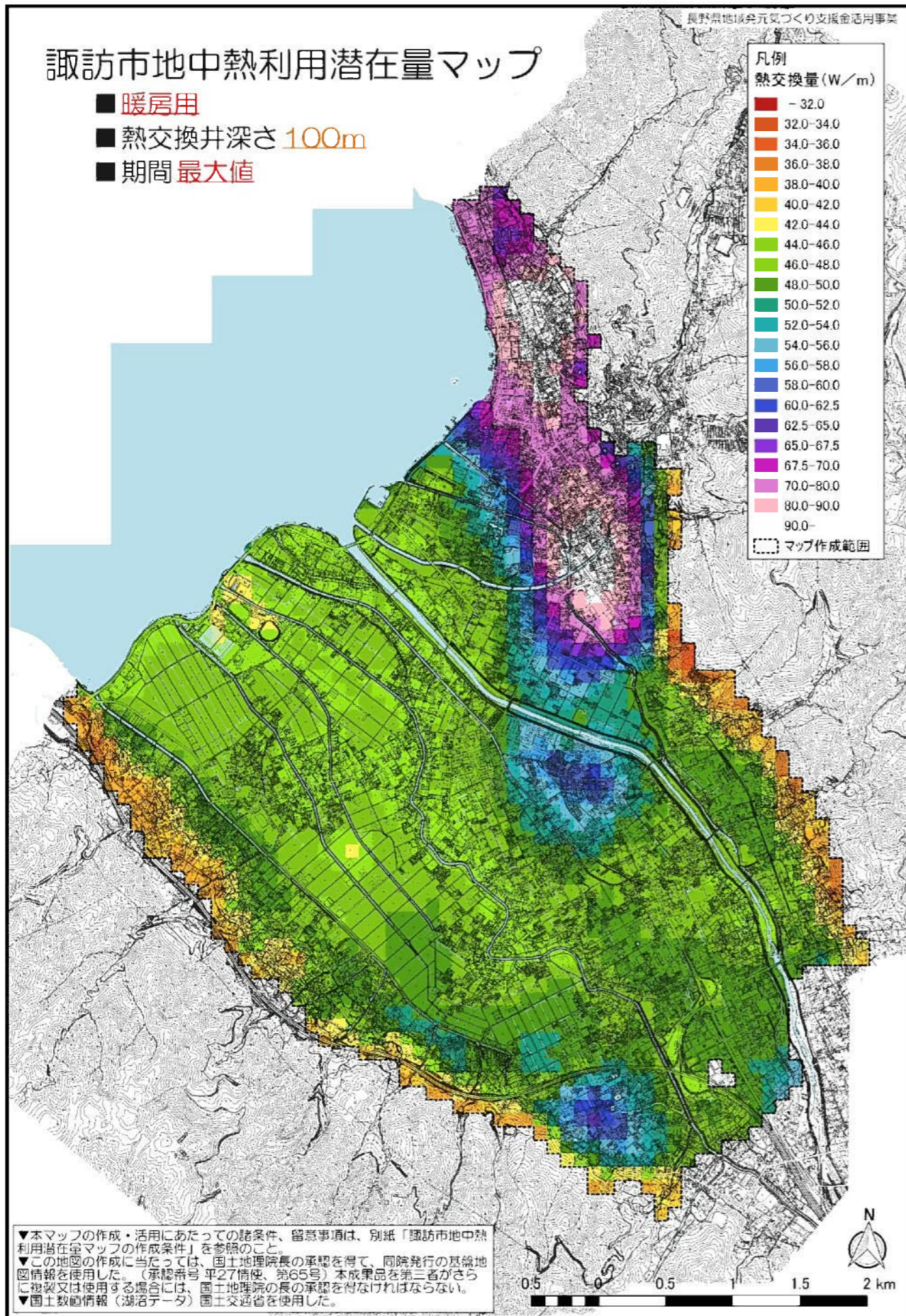
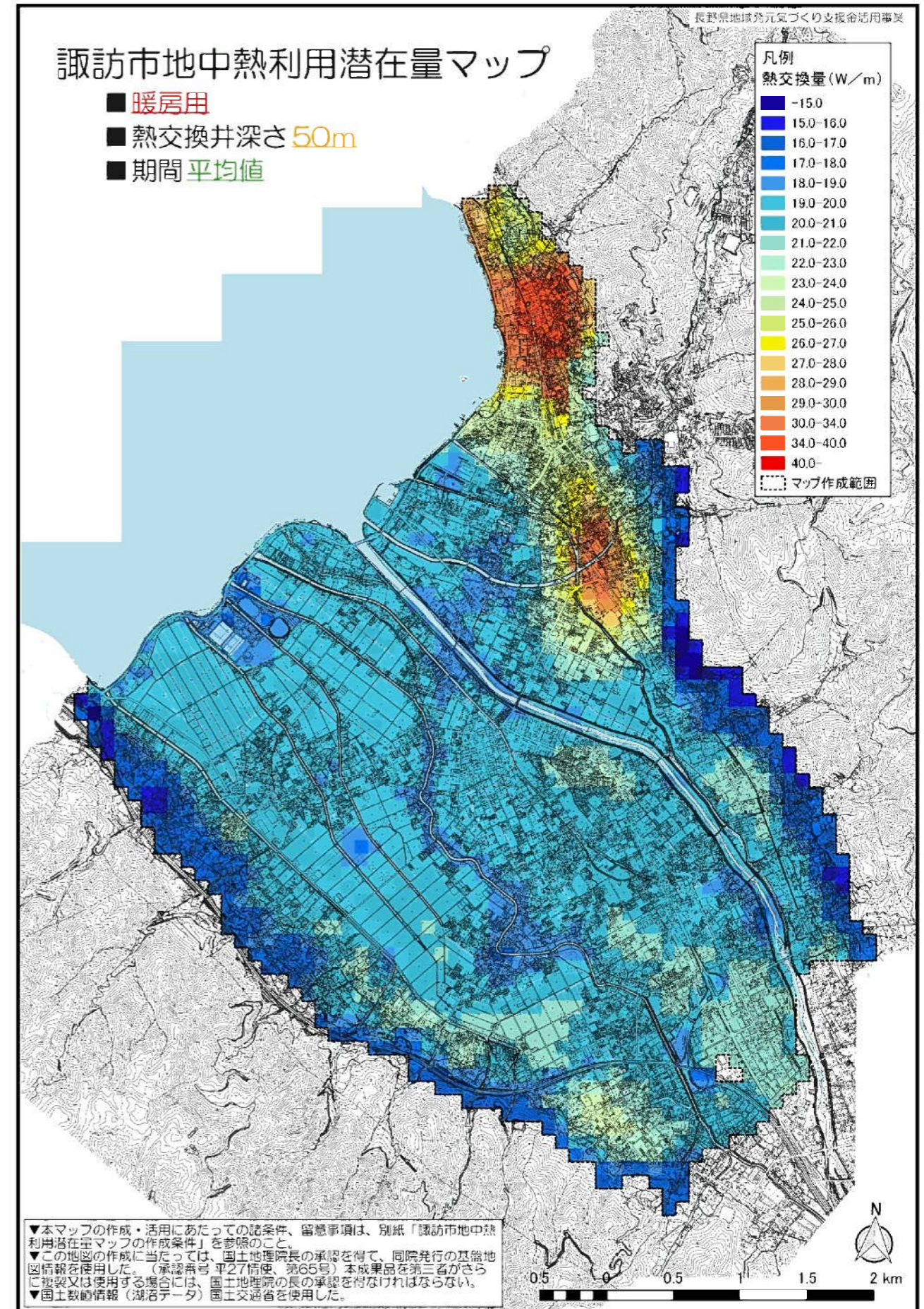
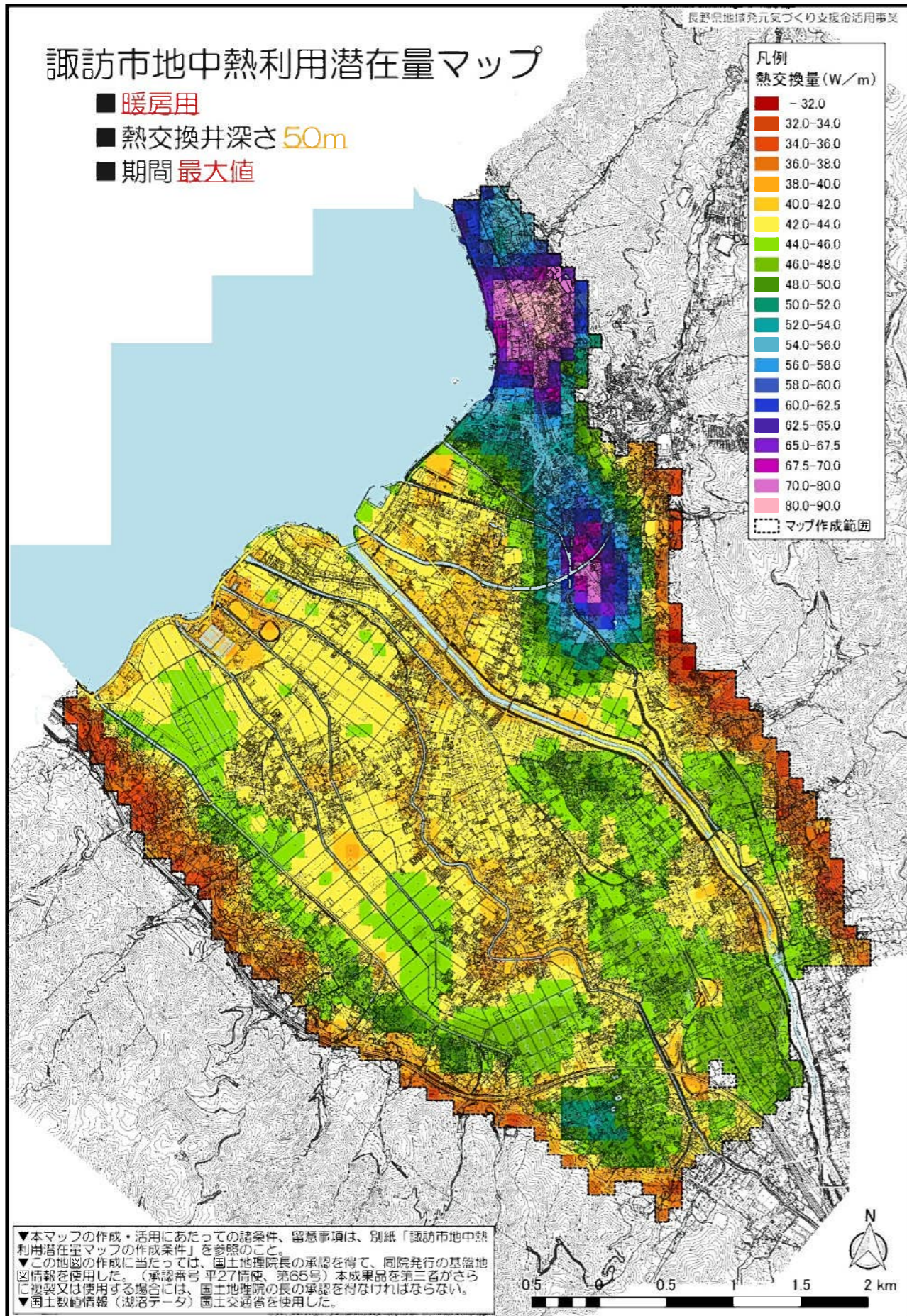


図10 熱交換井深度別の平均地中温度

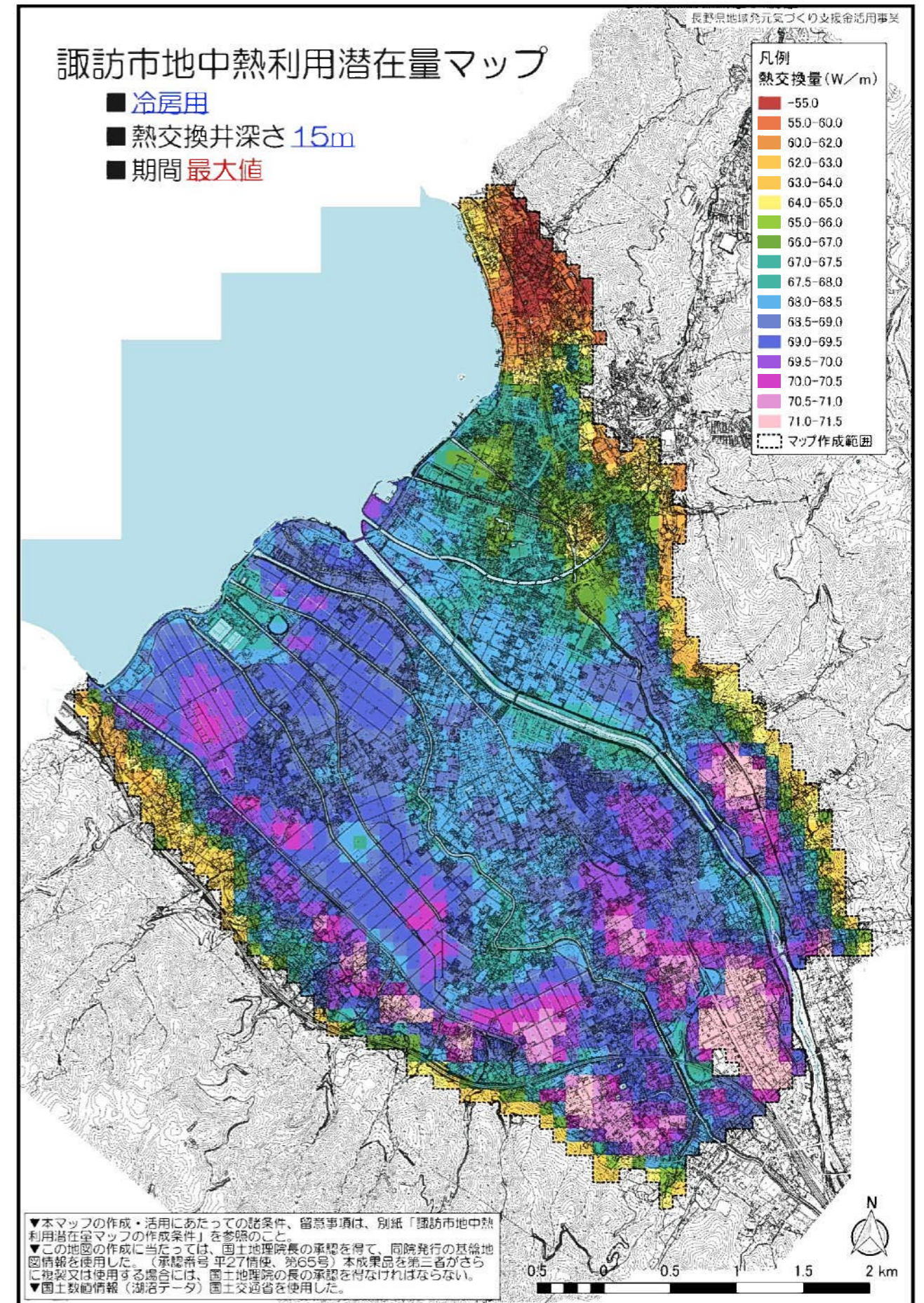
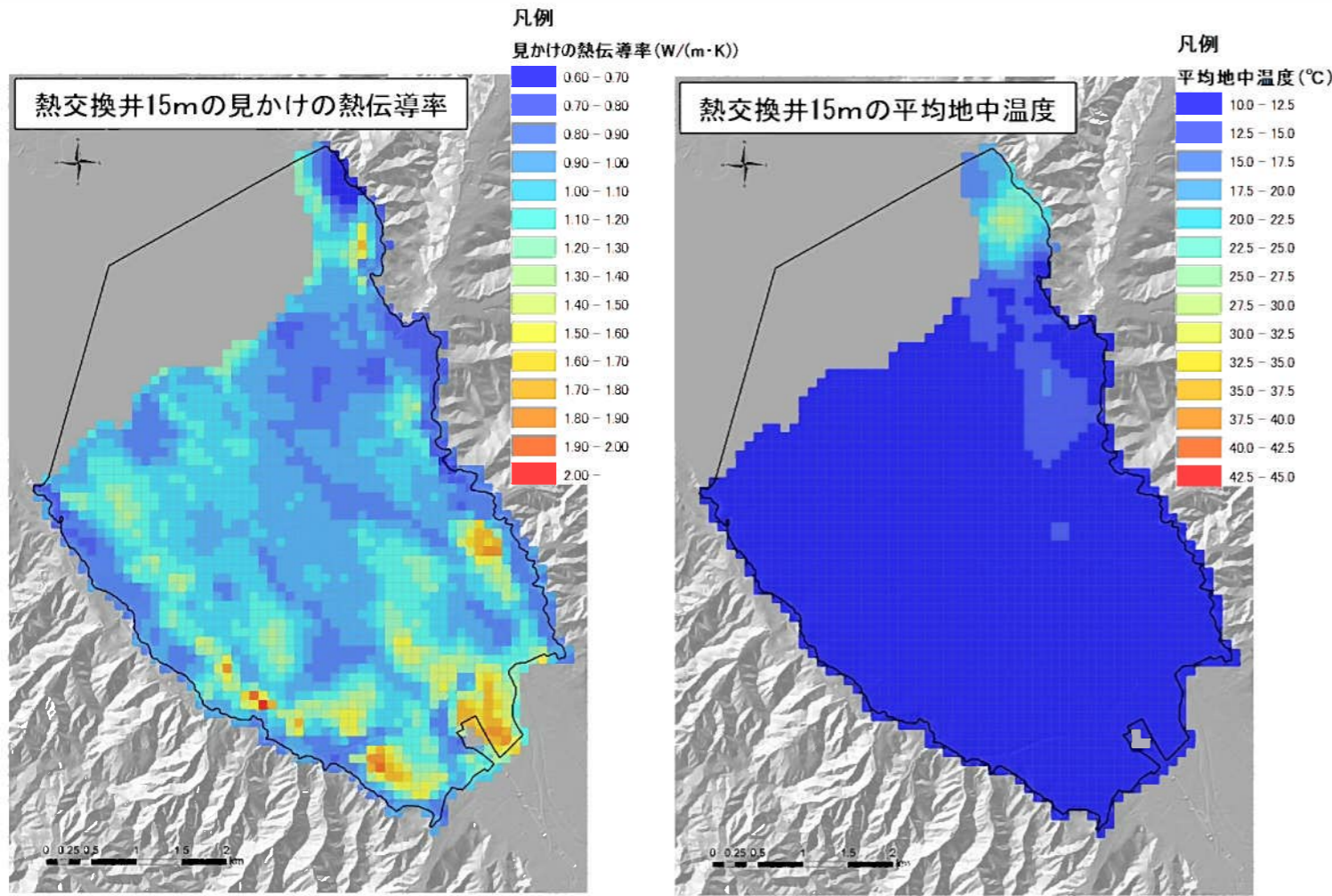
■調査その4：【結果】諏訪市の地中熱利用潜在量マップ



■調査その4：【結果】諏訪市の地中熱利用潜在量マップ

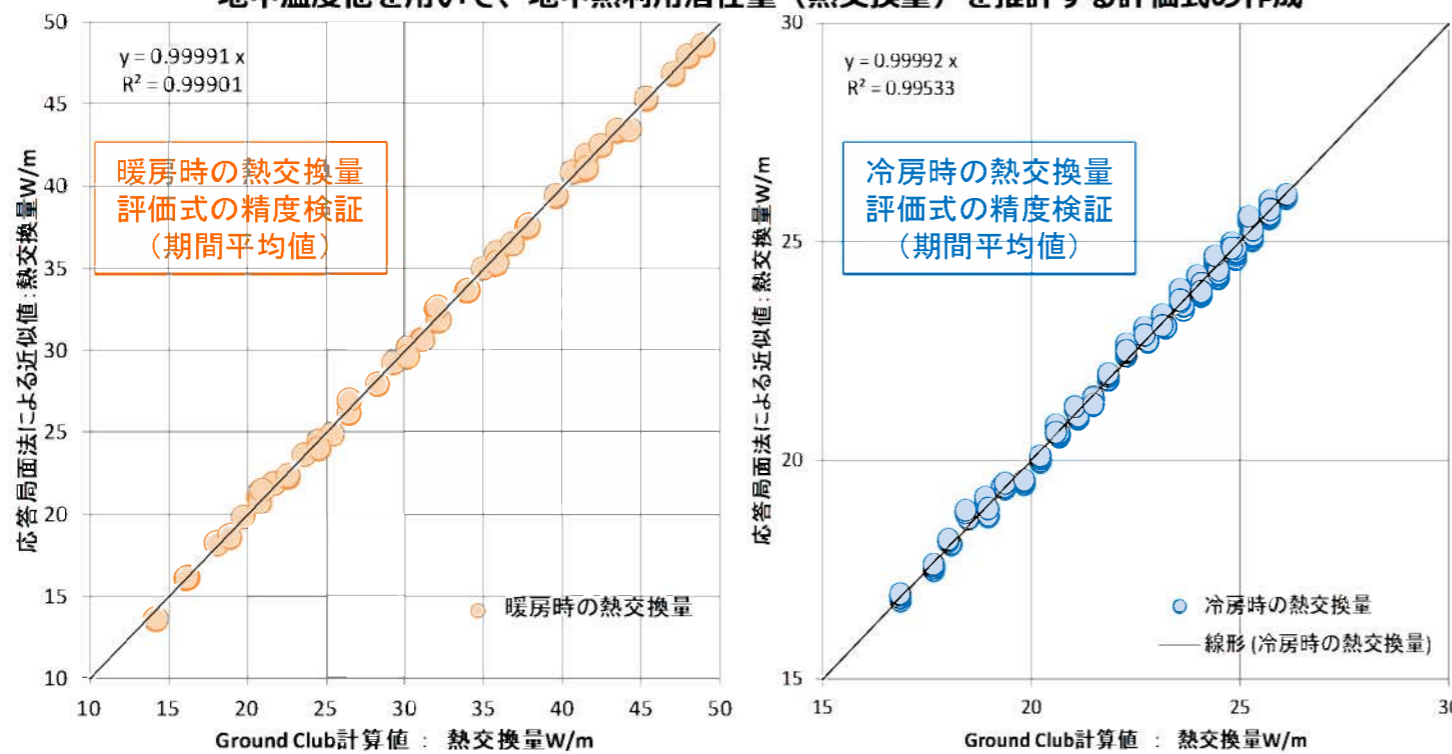


■調査その4：【結果】諏訪市の地中熱利用潜在量マップ

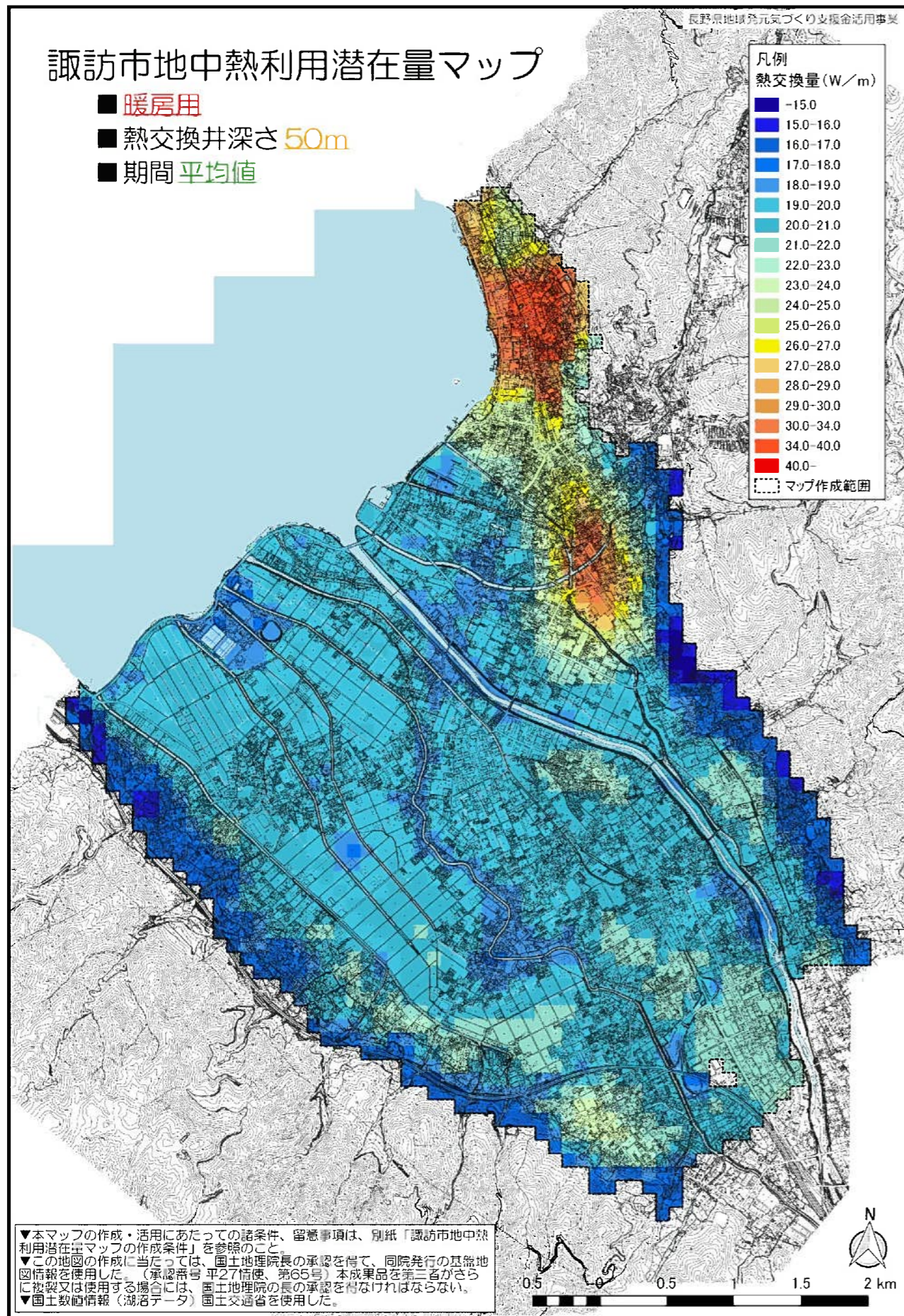


地中温度の観測データの充足によって地図情報の更新ができる「成長型マップ」

地中温度他を用いて、地中熱利用潜在量（熱交換量）を推計する評価式の作成



■調査その4：【結果】諏訪市の地中熱利用潜在量マップ



■諏訪市地中熱利用潜在量マップの作成条件

▼評価区画の大きさや評価指標

- ・評価区画の大きさは100m×100mとした。
- ・区画ごとに地中熱利用潜在量の指標として「熱交換井単位長さあたりの熱交換量」を用いて定量化、評価した。
- ・一般に、地中熱利用に用いられる熱交換井単位長さあたりの最大熱交換量は30～70W/m程度*とされている。
*官庁施設における地中熱利用システム導入ガイドライン（案） 国交省H25.10

▼システム運転シミュレーションの設定条件

- ・戸建住宅（延床面積120m²）を対象として、熱負荷条件は表1とした。
- ・一次側は次の3パターンとした。
 - 【暖房】熱交換井長さ100m：ヒートポンプCOP=4.0相当での運転時、熱交換器総延長100m：100m×1本
 - 【暖房】熱交換井長さ 50m：ヒートポンプCOP=4.0相当での運転時、熱交換器総延長100m：50m×2本
 - 【冷房】熱交換井長さ 15m：ヒートポンプCOP=5.0相当での運転時、熱交換器総延長 90m：15m×6本
- ・一次側と二次側の施設条件は表2とし、6時～24時（18時間）に外気温に応じた空調運転（常時稼働率は3割）を行うものとした。
- ・土壌条件（熱伝導率、体積熱容量、地中温度など）は、別途実施した基礎解析結果を用いた。
- ・以上の条件で3年間分の運転シミュレーションを行い、3年目の「熱交換井単位長さあたりの熱交換量（期間最大値および期間平均値）」を用いて評価した。

▼留意事項

- ・地中熱利用潜在量マップは、上記条件などのもとで評価を実施した場合の推計値によって作成しているため、実際の状況とは異なる。

表1 シミュレーションに用いた熱負荷の設定条件

室の種類		最大熱負荷 (W/m ²) ¹		地域補正係数 ²			
		冷房	暖房	冷房用	暖房用		
戸建住宅	居間(上が屋根の場合)	南向き	156	平均173.5	213	0.84	1.12
		西向き	234				
		北向き	148				
		東向き	156				

¹SHASE-S112 2009冷暖房熱負荷簡易計算法(建築設備手帳)より
1 室大きさ:8畳(13m²)、室面積:大(3.2m²)、ひさし50cm 2 諏訪市と同じ省エネ区分となる仙台の補正係数を採用

表2 シミュレーションに用いた一次側・二次側施設条件

設定項目		設定値
放熱器	設計冷温水温度	設計温水入口温度(°C) 40
	床暖房	設計冷水入口温度(°C) 7
		床暖房面積(m ²) 考慮しない
	ファンコイル	ファンコイル台数 4台
		冷房能力(kW/台) 3.1
		暖房能力(kW/台) 2.4
ファン消費電力(W/台) 40		
合計暖房能力(kW) 9.6		
合計冷房能力(kW) 12.4		
ヒートポンプ	設計最高温度(°C) 35.5	
	設計最低温度(°C) -9.6	
	地中熱HP最大電力(kW) 2.5	
	空冷HP夏期最大電力(kW) 2.8	
	空冷HP冬期最大電力(kW) 6.7	
地中熱交換器	地中熱交換器選択 ダブルUチューブ	
	HPから熱交換器までの平均距離(m) 20.0	
	熱交換器の設置間隔(m) 5.0	
	ポアホール径(m) 0.12	
地表面条件選択 温度境界条件		

■ 諏訪市地中熱利用潜在量マップ 用語解説

▼地中熱利用潜在量（地中熱ポテンシャル）

- ・暖房や冷房など、ある任意の条件で地中熱（地下の温度）を利用する際の効率性を表わす指標値のこと。
- ・本調査では、熱交換量（W/m）を地中熱利用潜在量の指標値としており、この値が大きいほど地中熱の利用に適している。注意すべき点は、例えば地下の温度が高い場合、暖房利用の地中熱利用潜在量は大きくなるが、冷房利用に対しては地中熱利用潜在量は低くなる、というように地中熱の使用目的により地中熱利用潜在量が変化するという点である。

▼熱交換量【W/m】

- ・地中熱交換井から地中の熱を採取（もしくは廃熱を送り込む）する際の、地中熱交換井の単位長さあたり（1mあたり）の熱交換の効率性を表わす値のこと。熱交換量が大きいほど効率よく熱交換ができる。
- ・本調査では、この値を地中熱利用潜在量の高さを表わす値としている。期間最大値とは、例えば暖房（冷房）では真冬（真夏）に気温が最低（最高）を記録するピーク時にヒートポンプが高負荷運転した場合の熱交換量であり、空調設備の設計の際に参考となる数値となる。また、期間平均値は、冷暖房のそれぞれの期間での熱交換量を平均した値である。
- ・熱交換量を算出するためには、地域的な自然条件として①熱伝導率、②体積熱容量、③透水係数を求める必要があり、この3つの要素を決定するためには、「地表の長さ」、「地層の物性」、「地下水位」、「地下水の流速」、「地下水温」の値が必要である。また、人為的な条件として地中熱交換器、ヒートポンプ、放熱器などの仕様を決める必要がある。

▼熱伝導率【W/(m・K)】

- ・ある物質について、熱の伝わりやすさを示した値のこと。一個の物質において温度差がある場合、温度の高い部分から低い部分へと熱の移動現象が生じる。この熱移動のおこりやすさが熱伝導率として表される。この熱伝導率の値が大きければ大きいほど、移動する熱量は大きく、熱が伝わりやすいことになる。
- ・地層の構成物としては、一般的に岩盤の場合は熱伝導率は高く、砂礫層、砂層、粘土層などの未固結層の場合は、飽和状態（地下水に浸っているかどうか）や粒子間の空隙率（隙間の多さ）により異なるが、飽和状態や空隙率が小さい場合は熱伝導率は低い。

▼体積熱容量【J/(m³・K)】

- ・ある物体について温度を1K（1ケルビン）上げるのに必要な熱量のこと。体積熱容量が大きいほどその物質を加熱しても暖まりにくく、冷却しても冷めにくい。
- ・地層の構成物としては、飽和状態（地下水に浸っているかどうか）や密度により異なり、一般的に飽和状態である方が体積熱容量は高い。

▼透水係数【cm/秒】

- ・ある物質中について、水の通過する速度が示された値のこと。透水係数が大きいほどその物質の中を早く水が通過できる。
- ・地層の構成物としては、空隙率が高いほど透水係数は高くなるため、粒子間の空隙が多い砂礫や砂の透水性は高く、粘性土や岩盤の透水係数は低い。

▼熱応答試験（通称：TRT試験）

- ・熱応答試験は、地中熱交換井周辺の地盤の熱伝導率を求める試験のひとつ。
- ・試験方法は、ボーリング孔（地中熱交換井）にパイプ状の採熱管を挿入し、その中に水を送水、循環させて温度変化を測定、記録して行う。諏訪市では、諏訪市美術館で熱応答試験が実施されている。

▼Ground Club（地中熱ヒートポンプシステム性能予測プログラム）

- ・その場所で地中熱を利用したと仮定した際の運転シュミレーションを行うことができるプログラム。各地域の気象条件、地中熱交換器やヒートポンプの性能・用途、運転期間などを任意に設定できるため、地中熱利用者の要望に合ったシュミレーションが可能で、運転期間中の熱交換量のほか、運転コスト（消費電力、費用）や環境負荷（二酸化炭素排出量）などが算出できる。