地中熱利用における課題と地下水学からのアプローチ

阪田義隆*・長野克則*

Current Problems for Shallow Geothermal Utilization and Approaches to Solve in Groundwater Researches

Yoshitaka SAKATA* and Katsunori NAGANO*

要 旨

地中熱利用への関心の高まりに対し、設備導入件数が伸び悩む現状の課題に依然コスト削減があり、近年の研究動向を踏まえた地下水学からの解決アプローチを論じた。クローズドループシステムでは熱移流を考慮した地中熱交換器規模の削減を挙げ、このための設計性能予測ツール、設計に必要な地下水流速のデータベースや原位置試験法を紹介した。オープンループシステムは、帯水層蓄熱に対する規制緩和の動きから今後導入拡大が期待される中、井戸の目詰まりリスク等の導入指標とその評価法の確立、設計に用いる帯水層データベース構築を課題とした。最後に海外先進事例を紹介し、わが国の地下水資源を活かす積極的な地中熱利用への期待を述べた。

キーワード：地中熱、ヒートポンプシステム、移流効果、帯水層蓄熱

1. はじめに

日本地下水学会が60周年を迎えるのに際し、地中熱利用の一層の普及に向けた現状の課題に対し、地下水学的視点に基づく解決へのアプローチを近年の国内外の研究成果を踏まえながら考察した。わが国の地中熱研究の動向は、既に落藤(2002)や長野(2007a, b), Nagano(2015)がとりまとめている。本誌でも、藤縄(2011)ほかによる誌面講座「地中熱利用技術」において理論から設計に至る各分野の詳細な解説がなされた。また井岡ほか(2018)により特集「地下水と地熱・地中熱エネルギーの利用」では近年の地中熱研究の成果が報告された。本稿では、これらに対し屋上屋を重ねることをできるだけ避け、近年とくに2010年以降の地中熱研究の動向に注目しながら考

察を行った。

2. 地中熱利用の関心の高まりと導入実態

わが国の社会システムを大きく変える契機となった一つに2011年3月11日の東日本大震災が挙げられる。とりわけエネルギー分野では、その二次災害としての福島第一原発事故を機にエネルギー需給構造の抜本的見直しと全部門に渡るエネルギー消費量の削減が急務となった。また大震災以降、発電への化石燃料の依存度が高くなったことから、温室効果ガス排出量削減に向けた国際公約達成の上でもエネルギー消費量削減の徹底が求められている。実際、わが国のエネルギー消費量は震災以降、減少傾向にあり、2016年時点 1.3×10^4 PJ/y、 CO_2 排出量 1.2×10^9 t/yに相当してい

* 北海道大学大学院工学研究院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

る(経済産業省, 2017)。しかしながら部門別で見ると、全消費量の約3割を占める業務・家庭部門では減少ペースが鈍く、1990年比で未だ約20%も多い状態が続いており、その削減が課題となっている(国土交通省, 2019)。こうした背景において、「エネルギー基本計画」(2014年4月11日閣議決定)では同部門に対する対策方針として、2030年までに新築建物の平均で、快適な室内環境を前提に消費エネルギーゼロを目指す Zero Energy Building(ZEB)/Zero Energy House(ZEH)の実現が明記された。また「建築物のエネルギー消費性能の向上に関する法律」が2019年11月16日から施行され、一定規模(現行、延床面積2000 m²、将来想定、同300 m²)以上の非住宅建築物は新築時にエネルギー消費量を計算し、基準に適合することが義務化された。また住宅に対してもトップランナー基準が設けられ、特定建設工事業者へ必要に応じて省エネ性能向上に向けた勧告や命令ができるようになった。

地中熱は、再生可能エネルギーの内、どこでもいつでも使うことができ、熱源として安定する利点を有する。わが国では古くから入浴(温泉)や融雪に地下水を汲み上げ熱源に利用してきたが、近年はヒートポンプと組み合わせて利用する、いわゆる地中熱ヒートポンプ(Ground Source Heat Pump: GSHP)システムが、省エネ基準適合やZEB/ZEHを実現するための高効率設備として関心が高まっている。こうした関心に応える国の動きとして、環境省は「地中熱利用にあたってのガイドライン」(2015年改訂、2018年増補)を作成したほか、2013年には国交省が「公共建築工標準仕様書(機械設備工事編)」として設計・施工法を標準化した。また省エネ基準適合計算プログラムでもGSHPシステムを選択し、省エネ適合判定時にその性能を見積もることができる(建築研究所, 2017)。各地方自治体では地域の導入ポテンシャルを評価しマップとして公開する動きがあるほか(例えば東京都, 2014など)、民間でも特定非営利活動法人地中熱利用促進協会が施工マニュアルの作成、講習会・講演会の開催などを通じ啓蒙に努めているほか、各地域にも地中熱の研究会在組織され、それぞれ普及活動を行っている。本学会でも、前述のとおり地中熱関連の論文

や特集が2010年以降相次ぎ学会誌に発表されており、春季・秋季講演会でも「地中熱」セッションが定着し、学会員の関心の高いトピックとなっている。

こうした地中熱利用への関心や普及に向けた動きの一方、わが国のGSHPシステムの年間導入数は、2013年の約350件をピークに減少傾向に転じ、2017年には200件以下まで落ち込んでいる(環境省, 2018)。諸外国が再生可能エネルギーへの関心から地中熱利用を着実に進めている(Lund and Boyd, 2016)の対照的に、わが国では導入件数が伸び悩んでいるのが現状である。また環境省(2018)によれば、導入したGSHPシステムの9割がクローズドループシステムとなっている。わが国には豊富な地下水資源があり、各地で地下水を積極的に汲み上げ生活や産業に使用しているにも関わらず、汲み上げた地下水からヒートポンプを通して熱利用するオープンループシステムの導入は現状、限られている。

3. 地中熱利用の普及に向けた課題とアプローチ

3.1 地中熱利用における課題

北海道大学ではGSHPシステム導入の課題を分析すべく、2017年に人口5万人以上の全国409自治体を対象にアンケート調査を実施した(阪田ほか, 2020)。その結果によれば、GSHPシステムを「知っている」とした回答は9割に達し、認知が進んでいる一方、実際に公共施設へ導入した回答は63件(15%)に留まり、実際の導入が進んでいない現状が明らかになった。また導入時の課題に対する回答としては、「導入コストの低減」(33%)、「運用によるコスト回収試算の確立」(15%)、「国などからの補助金増額」(8%)が挙げられ、コストを導入の課題とする回答が半数以上を占めた。本調査は自治体を対象にしたが、個人や企業の場合は、自治体に比べコスト意識が更に高くなると予想されることから、地中熱利用の普及の鍵は依然コスト削減にあると言える。

GSHPシステムでは、地中熱交換器の設置分のコストが上乗せされるため、コスト削減には、まず地中熱交換器の規模(鉛直型地中熱交換器の場

合、総延長＝長さ×本数）をできるだけ削減することが求められる。しかしながら、わが国では、地中熱利用の需要のある都市の大半が堆積平野・盆地に立地し、未固結な第四紀層が厚く堆積する。こうした地盤では、欧米のような岩盤主体の地盤に比べ、有効熱伝導率が相対的に低く、同一の熱負荷に対しより大きな規模の地中熱交換器が必要になる。加えて、未固結地盤では孔壁保護のケーシング挿入や泥水処理などに手間がかかるほか、建物密集地での運搬や騒音対策などが掘削コストを押し上げる。新エネルギー・産業技術総合開発機構 NEDO (2017) によれば、戸建住宅向け GSHP システムの初期コストは米国に比べ約 1.5 倍、特に地中熱交換器工事が約 2 倍との試算が示された。こうした背景から、同機構は GSHP システムのコスト削減を目的に 2013～2018 年度にかけて「自然再生可能エネルギー利用熱技術開発」を実施した。この NEDO 事業では、著者らも含む 15 事業者により掘削機や地中熱交換器などの一次側からヒートポンプや制御システムなどの二次側、地中熱利用ポテンシャル評価まで網羅する研究開発が行われ、これら成果の実用化を通じて目標とする 20% のコスト削減の見込みが示された (新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2017)。

未固結地盤における地中熱利用は、熱伝導の点では必ずしも有利ではないが、帯水層中を地下水が流れる場合には移流効果が加わることで、地盤からの採熱量の増大と地中熱交換器の削減効果が期待できる。これまでの地中熱交換器の設計では地下水流れの有無によらず深度当たり 40～60 W/m の採熱量として延長を決定している。しかし地下水流れがある場合、80～100 W/m の採熱量が見込める可能性があり (VDI, 2001)、その場合には地中熱交換器の延長を大幅に削減、場合によっては半減できることになる。

また、これまでクローズドループシステムが導入の大半を占めていたが、コスト削減の観点からは、オープンループシステムも今後、有望となる。クローズドループシステムでは熱負荷の増大に対し比例的に地中熱交換器を埋設する必要があるが、オープンループシステムの場合、一本の井戸で揚水量を増やせば採熱量も増やすことができるため、熱負荷が大きい大規模施設になるほどコ

スト的に有利となる。特に欧米では季節間蓄熱が可能な帯水層蓄熱システム (Aquifer Thermal Energy Storage System: ATES) の導入が進んでいる。

本説では、今後、わが国の地中熱利用の普及に向けた課題として依然コスト削減があるとし、その解決に向けた地下水学からのアプローチとして、移流を考慮した地中熱交換器規模の削減とオープンループシステム、特に ATES の導入拡大を挙げ、最近の研究成果を紹介しながら、その有効性や今後の課題について述べる。

3.2 地下水流れの移流効果

地下水流れがある場合、地盤中の熱移動には伝導だけでなく移流も加わることで、採放熱時の地中温度変化が抑えられ、ヒートポンプへ入る熱媒体温度が安定し、低い消費電力とシステム性能の向上が期待できる。特にわが国では、地形が起伏に富むことから、動水勾配が大きく、地下水流れが速い地域が多いと考えられる。既往研究でも GSHP システムの移流効果を考慮した地中熱利用ポテンシャルとして各地域で、その効果が示されてきた (Fujii et al., 2007; 内田ほか, 2010; シュレスタほか, 2015 など)。

地中熱交換器の採熱性能に移流効果が現れる目安は、ダルシー流速にして 10^{-8} m/s (≈ 0.3 m/y) 以上とされ (Ferguson, 2015)、この程度の流速条件は多くの地盤で遭遇しうる。ただし、実質的な効果は地下水流速だけでなく、熱負荷や熱伝導との相対関係で決まる。例えば、熱負荷が小さい場合、伝導だけでも地中温度があまり変化しなければ移流効果は無視される。同様に有効熱伝導率が充分大きい地盤であれば、地中温度はやはり安定し移流効果は無視される。また地下水流速が速ければ比例的に効果が得られるわけではなく、地中温度が安定する流速でその効果は収束する。阪田ほか (2018a) は、戸建住宅への 10 kW 級 GSHP システムにおいて 20 年ライフサイクルコストを最小とする地中熱交換器長さを有効熱伝導率、ダルシー流速の異なる組み合わせで計算した。その結果、地中熱交換器長さの削減効果は、ダルシー流速が 20 m/y 以上で現れ、削減量はダルシー流速の対数に比例しながら、200 m/y を境に収束す

る。地盤の有効熱伝導率によっても削減効果は異なり、有効熱伝導率が低い ($1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$) 場合は最終的に約4割の削減が見込めるが、高い ($2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$) 場合、約1割の削減に留まる(図1)。

こうした移流効果を考慮した地中熱交換器規模の設計には、地下水流速だけでなく有効熱伝導率、熱負荷を考慮した地中温度、ヒートポンプ性能を計算するシミュレーションツールが必要とな

図1 戸建住宅向け冷暖房 GSHP システムにおけるダルシー流速 U と20年ライフサイクルコスト最小となる地中熱交換器長さ $L_{\min}$ の異なる有効熱伝導率 λ に対する関係 (阪田ほか, 2018a より再作図)

Fig. 1 Relationships of borehole heat exchanger lengths for minimum 20y-LCC with Darcy velocities in two different cases of effective thermal conductivity.

る。北海道大学が開発した設計性能予測ツール Ground Club は現在、有効熱伝導率の全国データベース (Sakata et al., 2020) と組み合わせ、地下水流れを有する複層地盤条件にも対応した計算が可能であり (葛ほか, 2015)、先述の NEDO 事業においてクラウド技術を活用した Ground Club Cloud として開発された。

移流効果を考慮した地中熱交換器設計をするには地下水流速を推定する必要がある。なお地盤中の熱輸送では、伝導対流の支配方程式中の流速として、ダルシー流速が分かればよい。予備設計段階では、地下水流動シミュレーションによる推定値を用いるのが現実的である。著者らは全国62流域における地下水賦存量調査 (産業技術総合研究所, 2008) のシミュレーションモデルをベースに、地形高解像度化による境界水位、阪田ほか (2018b) による透水係数分布を再入力して計算を行い、500 m グリッドでの地下水流速データベースを整備した (Sakata et al., 2019, 図2)。一方、実施設計段階では原位置試験、特に熱応答試験データから、より精度の高いダルシー流速の推計値を得ることが求められる。地下水流れが速い場合の熱応答試験では、有効熱伝導率よりも見かけ上高い値、すなわち見かけ熱伝導率が得られ

図2 地下水流動シミュレーション対象62流域 (a) と関東平野流域の計算ダルシー流速分布 (b)

Fig. 2 62 water basins of Japan for groundwater flow simulation and one example results of simulated Darcy velocity in Kanto Basin.

るが、その値は地下水流速だけでなく、試験条件（加熱量や加熱時間）や解析条件（熱媒体循環温度の上昇勾配決定区間）にも依存する。このため、試験と条件が異なる実施地の地中熱交換器規模の検討に見かけ熱伝導率をそのまま用いることはできず、有効熱伝導率とダルシー流速に分離する必要がある。分離の方法には、これまでの逆解析（Raymond et al., 2011など）に加え、より実用的な方法として移動線熱源理論解に基づくフィッティング（Chae et al., 2020）、加熱時の温度変化勾配と地下水流速の関係をj用いる手法（葛ほか, 2015）なども提案されている。また水平型地中熱交換器を設置する浅層部の地下水流れに対しても、サーマルプローブを用いた試験法（葛ほか, 2006）やフーリエ数に対する無次元温度応答の関係をj用いる方法などが提案されている（Li et al., 2012）。

3.3 オープンループシステム、特に ATES の導入可能性

オープンループシステムは、導入コストの低減と安定した熱利用、なによりわが国の豊富な地下水資源の有効利用の点から、今後の導入が期待される。特に季節間蓄熱が可能な ATES は近年、実証事業を通じ、その有効性が改めて報告されており（藤縄・富樫, 2012；中曾ほか, 2013；桂木ほか, 2018a）、実施への導入も進みつつある（若林・坂部, 2016）。これまで地中熱利用の需要のある都市部、特に三大都市圏を含む臨海地域では地下水の採取規制があり、ATES 導入の大きな制約になってきた（桂木ほか, 2018b）。こうした状況に対し、大阪市等による実証事業を踏まえた

提言により採取規制地域でも国家戦略特区として地盤沈下を起こさない範囲での管理の下 ATES 導入を可能とする「環境省関係国家戦略特別区域法第二十六条に規定する政令等規制事業に係る省令の特例に関する措置を定める命令の一部を改正する命令」が2019年8月27日公布された（大阪市, 2019）。これにより、ATES を中心としたオープンループシステムが関西圏を皮切りに今後、関東や中部その他規制地域にも導入される可能性が高まった意義は大きく、わが国における今後の地中熱利用の転換点になることが期待される。

国際的には ATES は出力 $10^2 \sim 10^3$ kW 以上の中～大規模システムとして導入されており（Xu et al., 2013；Gehlin and Andersson, 2019）、高効率運転によるライフサイクルコストの削減、ペイバックタイムの短縮効果が報告されている（Vanhoudt et al., 2011など）。IEA DHC/CHP (2018) によれば、大規模（出力1 MW 以上）ATES システム導入の帯水層条件を表1のようにまとめている。また世界の ATES 適正マップがデンマーク IF Technology 社によって公開されている（図3）。図3によれば、日本は ATES の適正が低位（low）から中位（Medium）で、特に関東・大阪・北陸地方は高位（High）とされている。ただし、わが国の場合、より小規模（ $10^1 \sim 10^2$ kW オーダー）のシステムを想定するのが現実的であるため、表1の条件に必ずしも当てはまらない。例えば、北海道北広島市における14年間に渡る ATES のモニタリング事例では、実質的な透水層厚4 m でも平均約30 kWh、回収率約70%で安定して稼働できた実績がある（中村ほか, 2000）。図3のポテンシャルマップは解像

表1 大規模（1 MW 以上）ATES における帯水層条件（IEA DTS/CTS, 2018）
Table 1 Criteria of unconsolidated aquifers for large-scale ATES systems.

	下 限	上 限
井戸深度 (m)	25 (注入必要圧から)	300 (経済性から)
帯水層厚 (m)	20	無し
透水係数 (m/s)	1×10^{-4} (層厚大) 5×10^{-4} (層厚小)	1×10^{-3} *
地下水流速 (m/d)	0	0.3 *
静水位 (地表からの深度, m)	50	-5

* 速い地下水流れにより蓄熱の低効率化をもたらす値

度の点で実用的ではなく、今後、各地域において ATES を含むオープンループシステムのポテンシャルマップの整備を進める必要がある。わが国の ATES のポテンシャルマップの先駆けは札幌周辺を対象とした濱田ほか (2004) があり、また大阪での実証事業を踏まえ、藤原ほか (2019) や大阪府 (2019) がポテンシャルマップを作成している。著者らはクローズドループシステムに対し全国を統合的に評価する手法を提案したが (阪田ほか, 2019), オープンループシステムにおいても同様に全国共通で適用可能な評価手法の確立が必要と考える。例えば先の IEA DHC/CHP は表 1 に加え、層序、粒径分布、固結度、地中温度、地下水流向、地質構造 (亀裂分布)、帯水層構造、熱貯留性と上下加圧層への熱漏洩なども導入指標に挙げている。こうした導入指標を各地域の帯水層毎に整理し、設備設計者が閲覧可能なデータベースに整備することが今後必要となろう。導入指標として特に評価の課題となるのが、採熱後の復水 (還元) に対する目詰まりリスクである。スクリーン及び井戸周辺の地層の目詰まりは、揚水井より還元井の方が生じやすく、細粒分の蓄積、気泡発生、溶出成分の形態変化・析出、更に水質変化に微生物活動に起因したバイオフィーム発生といった、物理的・化学的・生物学的に様々な要

因で発生する。先行する多くの導入事例のある欧米でも、未だ目詰まり要因とメカニズムの解明は定性的な範囲に留まるようである (Hähnlein et al., 2013; Jeong et al., 2018)。目詰まりリスクは設計時のメンテナンスの不確実要因となっており、その予測評価は今後、オープンループシステムの普及に向けて地下水学に課せられた解決すべき課題と言える。また大規模施設になるほど採熱の繰り返しにより、長期的な地下の熱汚染とそれに起因する環境変化が懸念される。こうした熱汚染による実質的な環境影響についても未だ不明な点が多く (斎藤・小松, 2014), その評価手法の確立についても地下水学に課された課題と言える。

4. 地中熱利用の国際的流れ

地中熱の国際的な流れを紹介することで、わが国の地中熱利用の次の展開や課題も見えてくる。わが国に比べ地中熱利用が進む欧米、中国ではシステムの大深度化・大規模化、高密度化、高信頼化、ネットワーク化が進んでいる。大深度化の例として、スウェーデンでは地中熱交換器の長さが1980年には平均100m 以下であったが、掘削機的大型化により2018年には平均190 m、最大深度500 m、家庭用でも平均176 m に達してい

図3 ATES 導入可能性マップ (IF Technology ホームページ, <https://www.iftechnology.com/> より)

Fig. 3 ATES feasibility map over the world.

る (Gehlin and Anderson, 2019)。また大規模化として、出力 10^4 MW オーダー、地中熱交換器本数が 10^3 オーダーのシステムが次々導入されている。中国では、北京国際会議場において冷房出力17 MW、暖房出力7.4 MW、123 m の BHE が1060本というシステムが導入されている (Zhang and Wu, 2014)。また2019年9月開港の北京大興国際空港では257万 m^2 の事務エリアに世界最大、1万本の地中熱交換器が設置された (北京市, 2018)。高密度化としては、スイスでは地中熱利用システムの導入数は2013年時点でトータル約84千台 (日本の約240倍、国土面積は約9分の1) に達している。これは12 kW 標準システムに換算して1 km^2 当たり平均3台に相当する (Link et al., 2015)。こうした高密度化は、特に5千本の地中熱交換器が埋設されるチューリッヒ市において互いの熱干渉が問題視されている (Wieland, 2017)。高信頼化として、前述の IEA DHP/CHP (2018) に加え、IEA ECES ANNEX21 (2017) において熱応答試験の規格化が行われたほか、IEA ECES ANNEX27 (2019) ではボアホール型蓄熱システムの規格化が進められている。ネットワーク化としては、ドイツでは10年以上に渡って GSHP システムのデータ集中管理が既に行われている (Miara et al., 2017) ほか、地域熱供給システムでは、より低温の地中熱をヒートポンプ技術と組み合わせて熱源とする第5世代開発が進みつつある (Buffa et al., 2019)。

これら地中熱利用先進国における先端的な技術や知見に学ぶところは大きい。わが国においても、こうした先端施設と同等あるいはそれ以上の地中熱利用システム、特に、わが国に豊富に賦存する地下水資源の有効利用として移流効果や蓄熱効果を最大限活かす独自の地中熱利用システムの導入を実現させることが社会全体へのインパクトとなり、地中熱利用の普及に繋がると考える。

5. まとめ

東日本大震災以降のわが国のエネルギー需給環境の変化を受け、地中熱利用、特に高効率設備としての GSHP システムの導入拡大による民生部門における省エネ貢献が期待される一方、現状、

その導入数は伸び悩みを見せている。自治体に対するアンケート調査を踏まえると、普及の課題は依然コスト削減にある。コスト削減のアプローチとして、クローズドループシステムに対しては、移流効果を考慮する地中熱設計性能予測ツールの活用と、その計算条件となる地下水流速のデータベースや現位置試験法を紹介した。またオープンループシステムがコスト削減とともに、わが国の地下水資源の有効利用の点からも導入が期待される。特に ATEs は地下水採取規制緩和の新たな枠組みの中、今後の導入加速が期待されるが、その導入を促すには各地域における導入ポテンシャルの評価や設計実務者が閲覧可能な帯水層データベースの構築が求められる。特に評価指標の内、還元井の目詰まりは現状、発生要因やメカニズムの理解が定性的に留まっており、その予測法の確立が今後の研究課題になる。併せて、地中熱利用システムの国際的な流れを紹介した。地中熱利用先進国における知見や技術を学びつつ、わが国においても地下水資源を活かした先駆的システムの開発が今後、期待される。なお誌面の都合で割愛したが、気候変動がもたらす地中熱利用への影響も近年の研究トピックであり (Kharseh et al., 2015 など)、別の機会に改めて紹介したい。本稿が、今後の地中熱利用の更なる発展に向けた本誌読者の調査、研究開発の一助となれば幸いである。

参考文献

- 井岡聖一郎・富樫 聡・土原健雄 (2018) : 特集「地下水と地熱・地中熱エネルギーの利用」地下水と地熱・地中熱エネルギーの利用. 地下水学会誌, 60 (4), 461-462.
- 内田洋平・奥田佑季・藤井光・宮本重信・吉岡真弓 (2010) : 地中熱利用適地の選定方法その1 地下水流動・熱輸送解析と GIS を用いた地中熱利用適地マップの作成. 日本地熱学会誌, 32 (4), 229-239.
- 大阪市 (2019) : 帯水層蓄熱利用に向けた取り組み, <https://www.city.osaka.lg.jp/kankyo/page/0000476996.html>. (2019.10.25閲覧)
- 大阪府 (2019) : 地中熱ポテンシャルマップ. http://www.pref.osaka.lg.jp/eneseisaku/sec/chichunetsu_

- map.html. (2019.10.25閲覧)
- 落藤 澄 (2002): 地中熱利用と地下蓄熱の現状と課題. 日本地熱学会誌, 24, 315-327.
- 葛 隆生, 長野克則, 武田清香, 中村 靖 (2006): サーマルプローブ法による地下水流速と温度応答の関係に関する考察. 空気調和・衛生工学会論文集, 31 (112), 51-59.
- 葛 隆生・長野克則・中村 靖 (2015): 複層地盤を考慮した地中熱交換器のシミュレーションツールの開発とその応用. 日本冷凍空調学会論文集, 32 (3), 335-344.
- 桂木聖彦・藤井 光・井上 純・山谷 陸・黒沼 覚 (2018a): 数値シミュレーションによる帯水層蓄熱冷暖房システムにおける効率的な帯水層への蓄熱方法の検討. 日本地熱学会誌, 40 (2), 97-108.
- 桂木聖彦・藤井 光・黒沼 覚・井上 純・山谷 陸・沼澤喜一 (2018b): 日本国内における帯水層蓄熱普及に向けた社会システム調査. 日本地熱学会誌, 40 (3), 193-206.
- 環境省 (2018): 平成30年度地中熱利用状況調査の集計結果. <https://www.env.go.jp/press/files/jp/111221.pdf>. (2019.10.20閲覧)
- 経済産業省 (2017): 平成28年度エネルギーに関する年次報告 (エネルギー白書2017) HTML版. <https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2017html/2-1-1.html>. (2019.10.22閲覧)
- 建築研究所 (2017): 平成28年省エネルギー基準に準拠したエネルギー消費性能の評価に関する技術情報 (非住宅建築物), 地中熱ヒートポンプの評価方法 (タイプの判別方法). <https://www.kenken.go.jp/becc/building.html>. (2019.10.10閲覧)
- 国土交通省 (2019): 建築物省エネ法の改正について. https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/sho_energy/pdf/028_03_00.pdf. (2019.10.10閲覧)
- 斎藤健志・小松登志子 (2014): 地中熱ヒートポンプが地下環境に与える影響. 地下水学会誌, 56 (1), 15-25.
- 阪田義隆・葛 隆生・長野克則 (2018a): ライフサイクルコストに基づく地中熱交換器規模の算定と地下水流れがもたらす削減効果の分析. 地下水学会誌, 60 (4), 483-494.
- 阪田義隆・葛 隆生・長野克則・丸井敦尚 (2018b): 井戸データベースを用いた地盤情報推定システムの開発その2: 確率加重平均による平均透水係数推定法の評価. 地下水学会誌, 60 (3), 273-287.
- 阪田義隆・葛 隆生・長野克則 (2019): クローズド型地中熱ヒートポンプシステムの地中熱交換器規模決定に関する研究: 個別シミュレーション決定法とその全国適用例. 日本地熱学会誌, 41 (3), 75-90.
- 阪田義隆・葛 隆生・長野克則 (2020) 地方自治体アンケート調査による公共施設への地中熱ヒートポンプシステム導入実態分析. 土木学会論文集 G (環境), 76(5), I_197-I_204.
- 産業技術総合研究所 (2008): 平成20年度地下水賦存量調査報告書, <http://dl.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11220696>. (2019.10.30閲覧)
- シェレスタガウラブ・内田洋平・吉岡真弓・藤井 光・井岡聖一郎 (2015): 地中熱ヒートポンプシステムにおけるポテンシャルマップの高度化. 日本地熱学会誌, 37 (4), 133-141.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2017): 再生可能エネルギー熱利用技術開発の取り組み. 平成29年度 NEDO 新エネルギー成果報告会熱利用分野予稿集, 103-117.
- 東京都 (2014): 東京地中熱ポテンシャルマップ. <http://www3.kankyo.metro.tokyo.jp/>. (2020.2.10閲覧)
- 長野克則 (2007a): 1章地中熱利用について, 地中熱ヒートポンプシステム (北海道大学地中熱利用システム工学講座編). オーム社, 11-12.
- 長野克則 (2007b): 6章地中熱ヒートポンプシステムの評価と将来展望, 地中熱ヒートポンプシステム (北海道大学地中熱利用システム工学講座編). オーム社, 110-116.
- 中村真人・長野克則・横山真太郎・小端武治・濱田靖弘・落藤 澄 (2000): 廃タイヤ焼却による帯水層蓄熱と活性炭生成. 空気調和・衛生工学会論文集, 25 (77), 21-30.
- 中曽康壽・伊藤貴之・佐々木健太・藤井良平・中尾正喜・西岡真稔・鍋島美奈子 (2013): 閉鎖性帯水層の昼夜間蓄熱利用: 第1報-帯水層蓄熱モデルの実験検証. 空気調和・衛生工学会誌, 38 (190), 11-20.
- 濱田靖弘, 中村真人, 窪田英樹, 丸谷 薫, 淵上栄樹, 長野克則 (2004) 国土数値情報を用いた地下帯水層蓄熱システムの導入可能性に関する研究. 太陽エネ

- ルギー, 30 (5), 57-63.
- 藤原照幸・春日井麻里・濱田晃之・伊藤浩子・北田奈緒子・三田村宗樹・和田祐宏 (2019): 地下水流動検討のための地盤モデルの構築と帯水層蓄熱 (ATES) 利用ポテンシャルマップの作成. 地下水地盤環境・防災・計測技術に関するシンポジウム論文, 13-18.
- 藤縄克之 (2011): 1. はじめに, 誌面講座地下熱利用技術. 地下水学会誌, 53 (1), 81-82.
- 藤縄克之・富樫 聡 (2012): 9. 地下熱利用のための数値解析技術, 誌面講座地下熱利用技術. 地下水学会誌, 54 (1), 39-52.
- 北京市 (2018): グリーンエネルギーを活用する新空港の建設推進. http://www.beijing.gov.cn/zfxxgk/110002/gzdt53/2018-12/13/content_05efb872776341199771a94ec7d2ffc8.shtml. (2019.10.10閲覧)
- 若林尚之・坂部高士 (2016): 酒田市庁舎における地中熱ヒートポンプシステム及び帯水層蓄熱を組み込んだ熱源システムの計画概要. 日本建築学会技術報告集, 22 (51), 627-630.
- Buffa, S., Cozzini, M., D'Antoni, M., Baratieri, M. and Fedrizzi, R. (2019): 5th generation district heating and cooling systems: A review of existing cases in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, 504-522.
- Chae, H., Sakata, Y., Katsura, T., Nagano, K. and Kondo, T. (2020): Estimation of fast groundwater flow velocity from thermal response test results. *Energy & Buildings*, 206, 1-10.
- Ferguson, G. (2015): Screening for heat transport by groundwater in closed geothermal systems. *Groundwater*, 53(3), 503-506.
- Fujii, H., Inatomi, T., Itoi, R. and Uchida, Y. (2007): Development of suitability maps for ground-coupled heat pump systems using groundwater and heat transport models. *Geothermics*, 36, 459-472.
- Gehlin, S. and Andersson, O. (2019): Geothermal Energy Use, Country Update for Sweden. *European Geothermal Congress 2019*, Den Haag, the Netherlands, 2019.
- Hähnlein, S., Bayer, P., Ferguson, G. and Blume, P. (2013): Sustainability and policy for the thermal use of shallow geothermal energy. *Energy Policy*, 59, 914-925.
- IEA DHC/CHP (2018): Integrated Cost-effective Large-scale Thermal Energy Storage for Smart District Heating and Cooling Design Aspects for Large-Scale Aquifer and Pit Thermal Energy Storage for District Heating and Cooling, 31-32. <https://www.iea-dhc.org/index.php?id=528>. (2019.10.27閲覧)
- IEA ECES ANNEX21 (2017): Thermal Response Test for Underground Thermal Energy Storages. <http://thermalresponsetest.org/>. (2019.10.27閲覧)
- IEA ECES ANNEX27 (2019): Quality Management in Design, Construction and Operation of Borehole Thermal Energy Storage Systems. <http://www.eces-boresysqm.org/>. (2019.10.27閲覧)
- Jeong, H.Y., Jun, S.-C., Cheon, J.-Y. and Park, M. (2018): A review on clogging mechanisms and managements in aquifer storage and recovery applications. *Geosciences Journal*, 22, 667-679.
- Li, H., Nagano, K. and Lai, Y. (2012): Heat transfer of a horizontal spiral heat exchanger under groundwater advection. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 6819-6831.
- Link, K., Rybach, L., Imhasly, S. and Wyss, R. (2015): Geothermal energy in Switzerland- country update. *Proceedings World Geothermal Congress 2015*, Melbourne, Austria.
- Lund, J.W. and Boyd, T.L. (2016): Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Geothermics*, 60, 66-93.
- Kharseh, M., Altorkmany, K., Al-Khawaja, M. and Hassani, F. (2015): Analysis of the effect of global climate change on ground source heat pump systems in different climate categories. *Renewable Energy*, 78, 219-225.
- Miara, M., Gunter, D., Langner, R., Helmling, S. and Wapler, J. (2017): 10 years of heat pumps monitoring in Germany. *12th IEA Heat Pump Conference*, Rotterdam, the Netherlands, 2017.
- Nagano, K. (2015): The progress of GSHP in Japan. *IEA Heat Pump Center Newsletter*, 33, 21-25.
- Raymond, J., Therrien, R., Gosselin, L. and Lefebvre, R. (2011): Numerical analysis of thermal response tests with a groundwater flow and heat transfer model. *Renewable Energy*, 36, 315-324.
- Sakata, Y., Katsura T., and Nagano, K. (2019): Nation-

- scale evaluation of required borehole heat exchangers considering advection effects of groundwater flow in Japan. IAH Congress 2019, Malaga, Spain.
- Sakata, Y., Katsura, T., Nagano, K. (2020) Estimation of ground thermal conductivity through indicator kriging: Nation-scale application and vertical profile analysis in Japan. *Geothermics*, 88, 101881.
- Xu, J., Wang, RZ. and Li, Y. (2013): A review of available technologies for seasonal thermal energy storage. *Solar Energy*, 103, 613-638.
- Vanhoudt, D., Desmedt, J., van Bael, J., Robeyn, N. and Hoes, H. (2011): An aquifer thermal storage system in a Belgian hospital: Long-term experimental evaluation of energy and cost savings. *Energy & Buildings*, 43, 3657-65.
- VDI(Verein. Deutscher Ingenieure) (2001): Thermal use of the ground. Ground source heat pump systems. VDI Richtlinien 4640, Part 2, 15-19.
- Wieland, U.(2017): Geothermal storage for our cities. <https://map.ethz.ch/content/main/en/news-und-veranstaltungen/eth-news/news/2017/01/erdwaermespeicher-fuer-unsere-staedte.html>. (2019.10.20閲覧)
- Zhang, S. and Xu. W. (2014): Research and development of large scale ground source heat pump system, Asian Heat Pump & Thermal Storage Technologies Network News Letter, <https://www.hptcj.or.jp/Portals/0/ahpnw/Newsletter/%E2%97%8E3rd%20AHPNW%20newsletter%2020140925.pdf>. (2019.10.20閲覧)
- (受付：2019年11月12日，受理：2020年3月31日)