

## 学位論文題名

# Study on a calculation algorithm for the design of slinky heat exchanger and performance evaluation of a large scale GSHP system

(スリンキーコイル式埋設管設計のための計算手法および大規模地中熱ヒートポンプシステムの運転評価に関する研究)

## 学位論文内容の要旨

Ground source heat pump has been recognized as a sustainable way of space heating and cooling in the world. If the electricity is provided by renewable energy, GSHP is a zero CO<sub>2</sub> emission system, which is a great contribution for decreasing CO<sub>2</sub> emission and establishing a sustainable world.

Vertical GSHP system provides high efficiency, requires less land area but a relatively high initial investment. While, horizontal GSHP system needs a rather large land area but low initial investment. Vertical borehole GSHP system is the dominating system applied in the world as far, theoretical and numerical studies have been performed to get a proper system design. Classic models such as infinite line source, finite line source and finite cylindrical source has been proposed and applied for the system design for years. On the other hand, the application of the horizontal system is not as wide as vertical system, the research regarding to the horizontal system is relative rare. Numerical study of the horizontal system analysis is carried out by researches, but there is no theoretical analysis concern about the horizontal heat exchanger which is important for the system design as we have addressed previously. Due to the priorities of the horizontal ground source heat pump (HGSHP), it has been recognized as an alternative solution compared to the vertical GSHP system. A proper system design is of important on considering the efficiency and costs. Thus, a study regarding to the heat transfer of the slinky heat exchanger with its surround ground with and without the groundwater flow was carried out and the study aims to build a calculation algorithm for the horizontal slinky heat exchanger design without and with the groundwater flow, then package the algorithm to a design tool to provide convenient for the horizontal system design for the engineering.

The content of each chapter is organized as follows:

Chapter 1 is a general introduction of global energy consumption, GSHP market situation in main adopted countries and their properties.

Chapter 2 reviews the research background on both vertical and horizontal system, including theoretical and numerical research and a introduction of GSHP system design tool. Based on the review, the objective of current research is proposed correspondingly.

Chapter 3 focuses on the theoretical study of the multiple ring sources to solve the temperature response of the slinky heat exchanger. A ring source model was established and solved analytically to describe the temperature variation of the ground caused by a spiral heat exchanger firstly. The virtual ring tube surface temperature response of unit ring circle was calculated by a superposition of the contributions of the ring source itself and adjacent ring sources. Furthermore, a fast algorithm was created to compute the average tube surface temperature. It is confirmed that the calculation time of this proposed algorithm decreased by a factor of 100 compared with the traditional integration method. On the other hand, a theoretical model of the straight horizontal heat exchanger was proposed as well. The average tube surface temperature comparison between the slinky type and horizontal type heat exchanger was carried out. It is known that average tube surface temperature of the straight horizontal and slinky heat exchange are almost the same under the same total heat flux amount and the same configuration area.

Chapter 4 discussed the proposing of a moving ring source model and its solution to describe the temperature response of a spiral heat exchanger with groundwater flow. The validity of the proposed model was proven by the good agreement between the experimental and calculated results. The average virtual tube surface temperature variations of single ring sources in two different configurations are discussed. Furthermore, the average virtual tube surface temperatures of multiple ring sources extending from single arrangements were computed and approximation algorithms were introduced to reduce the calculation time. The approximation approach has been proven to run thousands of times faster than the initial method. In summary, this study provides a useful tool for the design of spiral heat exchangers.

Chapter 5 expressed the development of the program package regarding to the spiral heat exchanger design and evaluation based on the proposed model. The validity of the package was verified by a TRT test data. The optimum heat exchanger size, electricity consumption as well as the system performance under given heating load was discussed by this tool. It is clear known that this tool could provide relative accurate results, and it is beneficial for the designer to evaluate a horizontal system.

Chapter 6 illustrates the performance of a huge borehole system which provides heating and cooling for twelve greenhouses in a cold climate region with groundwater flow existence was presented. The system performance in the cooling and heating mode was investigated by the measurement data firstly. The COP and SCOP was found at 3.0 and 2.7 respectively in the heating mode. Then, a numerical model was built by FEFLOW, a series studies were carried out on the numerical model to investigate the parameter influences to the system behavior to provide reference for the optimum system design and operation. It is found from the study that based on equal heat injection and extraction ability each year, the average brine temperature variation in the cooling and heating mode keeps the same no matter the operation period. The influence of the heat injection and extraction to the soil temperature variation decreases with the increase of the borehole length. In addition, under the fixed input brine temperature, a small borehole interval is benefit for the heat storage. A numerical model based on the greenhouse borehole system was built to evaluate the system long-term performance. The numerical model was verified by a good agreement between the measurement data and the numerical calculation results firstly, and then it was used to predict the system future operation. And it is known that the system could satisfy the greenhouse requirement in the future.

Chapter 7 is a conclusion of each chapter.

The proposed ring source model could be applied for a proper slinky heat exchanger design on both speed and accuracy which will provide great advantages for the GSHP designer and engineering. The discussion of the numerical model of the vertical borehole system can give valuable reference for the system design.

A suitable GSHP system design is helpful for the investment saving, enhancing the system efficiency, and more importantly, it is good for the spreading of the system worldwide to do a great contribution to CO<sub>2</sub> emission decrease and energy saving to build a sustainable world.

# 学位論文審査の要旨

主査	教授	長野	克則
副査	教授	羽山	広文
副査	教授	五十嵐	敏文
副査	准教授	石井	一英

## 学位論文題名

### Study on a calculation algorithm for the design of slinky heat exchanger and performance evaluation of a large scale GSHP system

(スリンキーコイル式埋設管設計のための計算手法および大規模地中熱ヒートポンプシステムの運転評価に関する研究)

地中熱ヒートポンプは、国際的に持続可能な暖冷房・空調機器の一つとして認知されている。しかし、地中熱交換器の設置費用が普及の障害の大きな一つとなっている。地中熱交換器は世界的にみても密閉式の間接熱交換方式が主流であり、大きく分けて深さ数十 m から百数十 m までのボーリング孔に熱交換器として U 字状の樹脂管を挿入する垂直方式と深さ 2m 以浅に開削した溝や窪地に樹脂管を敷設する水平方式がある。コスト面から言えば、水平方式の優位性は高い。ここで、垂直方式の規模算定・性能予測などには線熱源理論や円筒熱流応答理論などを応用した設計手法が古くから用いられてきたが、水平方式、特に低施工コストが期待できるスリンキーコイル型の理論解析的な規模算定・性能予測手法はなく、またこれに関する研究も見当たらない。そこで、本研究は、スリンキーコイル型の水平方式地中熱交換器を対象に、環状熱源理論の重ね合わせと鏡像法を応用して地中熱交換器平均表面温度の理論解を導出すると共に、工学的に十分な精度を維持しながら高速で地中熱交換器の平均表面温度を計算する手法を提案したものである。次いでこの計算手法を設計プログラムに組み込み、具体的に規模算定や長期間の性能予測に用いることができることを示している。さらに、移動熱源理論を応用して地下水流れ存在下における熱交換器平均表面温度の算定も可能としている。

本論文は以下の第 1 章から第 7 章で構成されている。

第 1 章は、序論であり世界的なエネルギー消費の実態、および欧米、中国、日本における地中熱ヒートポンプシステム（以降、GSHP）市場動向と特徴を分析している。

第 2 章は、垂直方式、および水平方式の理論解析、および数値解析に関する既往研究について調査するとともに、現在、入手できる GSHP 設計・性能予測プログラムやツールの特徴について概説し、その上で本論文が解決すべき課題と目的を述べている。

第 3 章は、環状熱源理論の重ね合わせ、および鏡像法を適用してスリンキーコイル型水平方式地中熱交換器の温度応答の理論解を導出して、地中温度分布の算出を可能としている。次に、超高速で地中熱交換器の平均表面温度を計算する手法を提案して、その精度と速度を検証している。その結果、この手法は工学的に十分な精度を持ちながら数値積分による計算に比べて 100 倍以上の速度を持つことを明らかにしている。同時に、蛇行配管型水平方式の平均表面温度の計算手法を導き、単位

敷設土地面積あたりの採熱量とチューブ長さが同じであれば配管形態が異なっても平均表面温度は同じとなることを明らかにしている。

第4章は、移動熱源理論を応用して地下水流れ存在下におけるスリンキーコイル型の温度応答の計算を可能としたものである。同時に、地下水流れ存在下における熱交換器平均表面温度を高速に算出する手法を提案し、この方法が工学的な精度を確保しつつ数値積分法の計算時間の数千分の一で算出できることを明らかにしている。

第5章は、スリンキーコイル型および蛇行配管型の水平方式地中熱交換器を GSHP 設計プログラムに組み込み、地中熱交換器の規模算定と長期性能予測を可能としたものである。

第6章は、汎用地下水・熱解析プログラムである FE-FLOW を用いた大規模 GSHP システムの長期予測である。地下水流れが採熱量と放熱量のインバランスによる地中温度の長期的低下や上昇の緩和にどの程度効果的なのかを数値解析から明らかにしている。

第7章は総括であり、結論を述べると、スリンキーコイル型水平型地中熱交換器を用いた GSHP システムの可能性と設計・性能予測の重要性について述べている。

これを要するには、筆者は、スリンキーコイル型水平方式地中熱交換器に関して、環状熱源の重ね合わせと鏡像法の適用により地中温度分布の計算を可能とすると共に、平均表面温度を超高速で計算する手法を提案し、実際にそれを GSHP 設計プログラムに組み込み、地中熱交換器の規模算定と長期性能予測を可能としている。

このように本研究で得られた計算手法や GSHP 設計プログラム、および地下水流れ存在下における GSHP 稼働時の地中温度の数値解析は、エネルギー利用効率の高い地中熱ヒートポンプシステムの最適設計と普及、そして暖冷房・加温冷却に関する省エネルギー、省コスト、CO<sub>2</sub> 排出量の削減と地球温暖化防止に多大に貢献する。これはまた環境設備工学、空気調整工学、伝熱工学、環境工学、施設園芸などの進展に寄与するところ大である。

よって、筆者は北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。