

## 別紙1 (博士論文の審査結果の要旨)

専攻名 システム創成科学専攻  
氏名 Teguh Hady Ariwibowo

地下数メートルから約100メートルの地中の温度は年間をとおしてほぼ一定に保たれているため、地中熱を空調機の熱源として利用すれば、夏季には外気温より低い温度の熱源が、冬季には外気温より高い温度の熱源が利用できることになり、システムのエネルギー効率を高めることができる。しかし、地中との熱交換を行う熱交換器の設置コストや熱媒体の流動に伴うポンプ動力が課題となっている。

本研究では、設置コストを削減するために浅層の地中を利用する水平スリンキー型地中熱交換器を対象とし、ポンプ動力を削減する目的で低流量域でも伝熱性能が低下しない離散傾斜リブを有する銅製円管を考案し、その熱流動特性と伝熱性能改善について数値計算を主に用いた解析を行うとともに、実験結果を用いた検証も行った。

第1章では、エネルギー問題や省エネルギーなどの研究背景と地中熱利用の有効性について説明されている。

第2章では、地中熱利用システムに関する従来の研究をまとめるとともに、本研究の主題である地中熱交換器については、地中熱交換器の研究に限定せず、地中熱交換器として利用できる種々の伝熱管に関する従来の研究の詳細な調査結果をまとめている。

第3章では、緩やかな曲率を持つ離散傾斜リブ付きコイル状円管の熱流動特性に関する詳細な特性が示されるとともに、数値計算の信頼性についての検証も行われている。解析の結果、離散傾斜リブ付き円管では熱交換量が向上する一方で圧力損失が増加するが、圧力損失によるポンプ動力増加よりも伝熱促進による性能改善効果が高く、空調機の成績係数が向上することが示されている。

第4章では、ポンプ動力を削減できる層流域の流

量条件に特に着目し、層流から乱流に遷移するまでの条件で傾斜リブ付き円管の性能を詳細に解析している。一般に、流体の流れは層流域では伝熱及び圧力損失はともに低い値を示し、乱流に遷移すると高い値に遷移するが、解析の結果、傾斜リブ付き円管の効果はこの遷移域で高く、空調システムの成績係数の改善率が最大値を示すことを明らかにしている。

第5章では、傾斜リブ付き円管のリブ高さやリブ角度などのリブ形状パラメータ、またコイルの曲率を変化させた解析を行い、傾斜リブ付き円管を設計し、実用化する際に必要となる基礎的な解析結果を示している。

第6章では、傾斜リブ付き円管を地中に設置し、地中側の熱移動も考慮した数値解析を行っている。また、銅管を地中に設置する場合には腐食防止のため管外に樹脂皮膜を付けるが、その分だけ伝熱性能が低下する。数値解析ではその影響についても考慮した解析、さらに地中熱交換器に広く使用されている高密度架橋ポリエチレン管を用いた場合の比較も行っている。解析により、土壌の伝熱性能の低さが全体の熱交換全体の性能に大きく影響するが、傾斜リブ付き管により熱交換量が改善され、成績係数改善率が高まることが示されている。

第7章では、本論文で示された研究結果の総括が行われるとともに、今後の研究課題、方向性に関する提言を行っている。

本研究で得られた成果は、独創的な新しい結果を含んでおり、工業的に広く応用できるものである。

令和2年7月30日に実施した博士論文公聴会では、これらの内容が分かりやすく丁寧に説明され、質問に対しても適切な回答がなされた。

なお、本研究の内容は2件の査読付き Journal 論文に掲載されるとともに、1件の国際会議、2件の国内会議で発表されている。

以上のことより、本論文は博士(工学)の学位を授与するに値すると判断され、審査員全員の一致で合格と判定された。