

論文審査の要旨および担当者

報告番号	甲 第 号	氏 名	小林 弘嗣	
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学 SDM 研究科教授	博士（工学）	前野 隆司
	副査	慶應義塾大学 SDM 研究所顧問	工学博士	日比谷 猛俊
	副査	慶應義塾大学 SDM 研究科教授	博士（工学）	小木 哲朗
	副査	慶應義塾大学准教授	博士（工学）	深淵 康二

（論文審査の要旨）

小林弘嗣君提出の学位請求論文は「Y字型モデルを用いた樹形状地中熱交換器のシステムデザイン」と題し、本文8章から構成される。

本論文は、再生可能エネルギーのひとつである地中熱を効率的に利用するための、新たな流路形状を持つ地中熱交換器の適用可能性を、数値計算解析により検討するとともに、その実用性を確認しているものである。まず、Duke 大学 A. Bejan 教授が提唱する Constructal theory を用いて、自然界の長年のセレクションで培われた生物がもつ形状の規則性や自己相似性を参考に、すなわち、河川や樹木、生物の肺など自然界の多くに見られる先に進むにつれて分岐を繰り返す形状にヒントを得て、そのシステムデザインを行っている。まず、地中熱交換器の要求分析を行った後に、樹形状モデルを用いて土壌を広く捉えられる新しい流路形状をシミュレーションにより詳細に渡って設計するとともに、現在の地中熱交換器への適用可能性をコストや工法などの具体的項目に渡って検討している。すなわち、イノベーティブな新たなデザインを、ミクロ及びマクロな視点より検討したものである。まず、地中内に幹となる配管を1本設置して、枝管を2方向へ自由な角度に分岐をさせ、伝熱効率が最も良い第1分岐角度を求めている。次に第2分岐角を求め、分岐の対称性、非対称性の検討を行っている。その後、再度第1分岐角の検討へ戻り、第2分岐角までの収束解を得ている。最終的に第4分岐角まで同過程の繰り返しを行い、Y字型のモデルを用いた樹形状モデルを求めている。本モデルは樹木や肺の形状と似た構造を示しており、フラクタル次元からも、樹木の自己相似性と同程度まで模倣ができていることを確認している。そして、一般的に使用されているU字型モデル、樹形状モデルの特殊解として求められていたT字型モデルの2つを用いて、Y字型モデルの優位性を確認した。同一の条件（掘削深度、配管容積）での伝熱効率を比較し、Y字型モデルは他2モデルよりも高い伝熱効率を示すことを明らかにした。これは土壌を広く面で捉えて、伝熱面積を多く設けられたことに起因すると考えられる。さらに、実際に地中熱交換器として使用するための可能性検証を実施した。一般的な住宅をイメージした場合のU字型、Y字型の掘削深度を比較し、それぞれのモデルの導入に必要な概算費用（工費）の算出を行った。その結果、Y字型モデルはU字型モデルの掘削深度と比較して、約50%まで軽減できることがわかった。したがって、埋設対象土壌に岩盤、地下水が存在する、地質が脆弱であるなどの場合には、Y字型モデルが適していると考えられる。一方で、概算費用としては現状の掘削技術のままではU字型に比較してY字型モデルは費用が多く掛かると見積られた。これらより、今後のジェット流やロボット掘削機の技術開発動向によっては費用の低減が期待でき、今後の技術発展が待たれるという考察を行っている。

本研究の構成は以下のとおりである。

第1章では、序論として、研究の背景について述べている。

第2章では、地中熱利用のための地中熱交換器の要求分析を行い、地中熱、地中熱ヒートポンプの現状と課題を明らかにした上で、シミュレーションに基づく新たな熱交換器形状の設計仕様を明らかにしている。

第3章では、Y字型モデルを用いた樹形状地中熱交換器のシステムデザインを行うためのシミュレーションにおけるモデル化および評価の手法について述べている。

第4章では、Y字型モデルを用いた地中熱交換器の設計について述べている。すなわち、新たなY字型樹形状地中熱交換器の形状を提案している。

第5章では、提案した形状の優位性についてシミュレーションにより評価し、従来形状よりも性能が優れていることを明らかにしている。

第6章では本提案の適用可能性と実用性の検証を行っている。すなわち、実際に設計・製造・販売するにあたってのコストや工法などの具体的な課題について検討し、本結果が一定の将来性を有することを明らかにしている。

第7章では全体としての考察を、第8章では結論を述べている。

以上要するに、本論文では、生物模倣型のY字型モデルを用いた樹形状地中熱交換器のシステムデザインを行っている。その結果、現時点ではコストなどの問題が残されているものの、将来的にはイノベーティブなエネルギー問題解決策となる可能性を秘めた課題に対し、緻密なシミュレーションによる形状設計と、多面的な視点による実用性検討を行っている。これは、システムの視点に基づき、ニーズとシーズを考慮して全体から詳細までの設計を行った事例であり、システムズエンジニアリング学上、実用上の寄与が少なくない。従って、本論文の著者は博士（システムエンジニアリング学）の学位を受ける資格があるものと認める。