

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月27日現在

機関番号：11401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2012

課題番号：21560879

研究課題名（和文） 地下水流れと相変化を伴う地中熱交換器の採熱特性

研究課題名（英文） Heat Extraction Characteristics of Downhole Heat Exchanger with Ground-Water Flow and Phase Change

研究代表者

田子 真 (TAGO MAKOTO)

秋田大学・大学院工学資源学研究科・教授

研究者番号：50171682

研究成果の概要（和文）：地層浅部の地熱エネルギーを有効利用するための方式として、螺旋管型地中熱交換器方式を提案し、その採熱特性に及ぼす地下水流れの影響について数値計算により検討を行った。また、将来的なマグマからの採熱に伴って生じるマグマの凍結・凝固などの相変化現象を明らかにするため、多孔質層内の冷却実験を行った。その結果、地下水流れがあると螺旋管型地中熱交換器の採熱量が増大すること、多孔質層内の凍結挙動は空隙率の違いにより複雑に変化することが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：A spiral-tube downhole heat exchanger has been proposed to make the best use of geothermal energy in shallow stratum, and the effect of ground-water flow on heat extraction characteristics with a spiral-tube downhole heat exchanger has been investigated by numerical simulation. Moreover, cooling experiments in a porous cavity have been carried out to clarify phase change phenomena such as freezing and solidification with heat extraction from magma. From the present study it was noted that the heat extraction rate increased with increasing ground-water velocity and that the freezing phenomena in a porous cavity intricately changed due to the difference of porosity.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
2012年度	300,000	90,000	390,000
総計	2,100,000	630,000	2,730,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・エネルギー学

キーワード：エネルギー節約・効率利用、自然エネルギーの利用

1. 研究開始当初の背景

地中熱交換器方式の弱点として、伝熱面積を容易に拡大することが困難であるとの指摘がなされているが、U字管を垂直方向に複数本配置する方式の検討を通して、坑井内の限られた空間内で伝熱面積を拡大する方法として、水平方向に採熱管を配置するような形態となる螺旋管型地中熱交換器方式を思

いつくに至った。この方式によって地中から熱エネルギーを抽出する手法は、従来にない新しい試みと言える。

さらに、近年になりようやく、地下水流れが地中熱交換器の採熱特性に及ぼす影響について検討されるようになってきたが、採熱に伴って地中熱交換器の周りに相変化（例えば、将来的にマグマから採熱する場合には、

熱交換器の周囲でマグマが凝固・固化し、また、寒冷地などでは凍結層が発生することが予想される)が生じ、これが地中熱交換器の採熱量に大きな影響を及ぼすものと考えられるが、これらの相変化を伴う場合の研究はまったくなされていない現状にある。

2. 研究の目的

本研究は、従来にない新しい地中熱交換器方式として「螺旋管型地中熱交換器」を提案し、数値計算による理論的検討、ならびに実験的検討を行うことにより

- (1) 地層内の伝熱メカニズムが熱伝導と想定される場合
- (2) 地下水流れが存在する場合
- (3) 採熱に伴い地中熱交換器の周囲に相変化が生じる場合

に対して、螺旋管型地中熱交換器方式の採熱特性を解析・評価することを目的としている。

3. 研究の方法

本研究では、地下水流れと相変化を伴う螺旋管型地中熱交換器方式の採熱特性について数値計算による理論的検討を行い、あわせて実験的に検討を加える。このため、本研究は、数値計算ならびに実験による計画・方法に分離して、都合4年間にわたり実施するものとする。具体的な計画・方法を以下に示す。

平成21年度計画

- (1) 地下水流れが存在する場合の数値計算プログラムの作成

図1に、本研究で提案する「螺旋管型地中熱交換器」を示す。図には、採熱媒体が螺旋

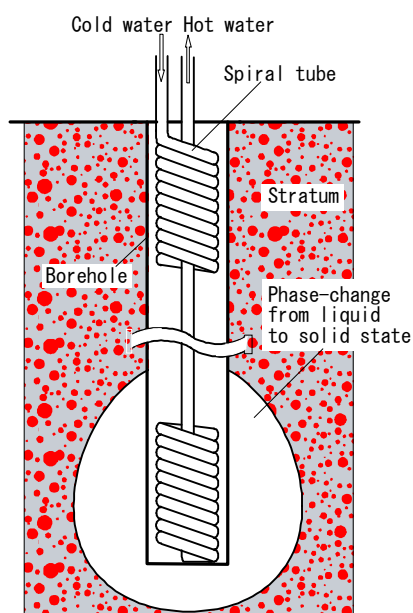


図1 螺旋管型地中熱交換器

管内を地層深部に向かって下降しながら、周囲の地層より採熱を行い、これに伴い螺旋管周囲に相変化現象が生じている様子が示されている。なお、これとは逆の方向に採熱媒体を流して採熱を行うことも可能である。螺旋管型地中熱交換器の採熱特性に関しては、両者の方式について比較検討する予定である。平成21年度には、地下水流れを伴う場合の螺旋管型地中熱交換器方式による採熱量を解析する数値計算プログラムを作成する。なお、螺旋管型の場合、熱交換器の形状が複雑となるため、プログラムの作成に際してはコントロール・ボリューム法を適用する。また、数値計算プログラムの作成およびデバッグについては、申請した設備備品の自作パーソナルコンピュータを用いて行う計画であり、申請した謝金を利用して当研究室の大学院生や4年次学部生に研究を補助してもらおう予定である。

- (2) 数値計算の実施

作成した数値計算プログラムを用いて計算を行い、地下水流れが存在する場合の螺旋管型地中熱交換器方式の採熱特性を明らかにする。

平成22年度計画

- (1) 相変化を伴う場合の数値計算プログラムの作成

多孔質層内の凍結・凝固など相変化現象を模擬する数値計算プログラムを作成する。なお、数値計算の離散化手法としては、有限体積法(コントロールボリューム法)を用いることにする。

- (2) 数値計算の実施

作成した数値計算プログラムを用いて計算を行い、多孔質層内の凍結を伴う相変化現象を明らかにする。

平成23年度計画

- (1) 冷却実験装置の製作

多孔質層内の凍結・融解などの相変化現象を明らかにするための冷却実験装置を製作する。実際の地層の物性値は地域によって異なるが、特定の地域に限定することなく、実験結果に普遍性を持たせるために、地層を水で飽和した多孔質媒質と考え、直径数ミリから1センチ程度のガラスビーズを使用する。地層を模擬した水で飽和した多孔質層内には、温度分布の非定常変化を測定するために熱電対を多数配置する。なお、これら多数の熱電対からの出力信号は、既設のデータアキュイジションユニット(MX100)に取り付けるユニバーサル入力モジュールを介してパーソナルコンピュータにより処理・測定する。

- (2) 冷却実験の実施

製作した冷却実験装置を用いて、多孔質層内の凍結を伴う相変化現象を可視化撮影により明らかにする。

平成24年度計画

(1) 数値計算と実験結果のクロスチェック

前年度に実施した多孔質層内の冷却実験に基づいて数値計算を実施し、実験結果と数値計算結果の両者をクロスチェックする。これによって、本研究で作成した多孔質層内の相変化現象を明らかにするための数値計算プログラムの有効性を検証する。

(2) 検討結果のまとめと報告書の作成

螺旋管型地中熱交換器方式の採熱特性に関する定量的な解析・評価を行うとともに、多孔質層内の凍結を伴う相変化現象を明らかにする。さらに、本研究による検討結果を踏まえて、螺旋管型地中熱交換器を設計するための設計指針・基礎資料を、報告書として提出する。

4. 研究成果

(1) 数値計算モデル

図2に、数値計算モデルを示す。計算領域は、x軸とy軸の水平方向に10m、z軸の鉛直方向に50mとした。計算領域中央に位置する直径0.2m、深さ30mの坑井内に螺旋管型地中熱交換器を設置し、隙間はセメントで充填する構造とした。図中の矢印は地下水流れの方向を示している。地下水は坑井に沿って流れるため、その近傍で速度分布が生じる。しかしながら、本研究ではその速度分布を考慮せず一様な速度分布を与え、また、坑井部を除き、地表面から計算領域最下部まで一様な速度の地下水が流れていると仮定した。

図3は、螺旋管の詳細と螺旋管内を流れる採熱媒体の循環方向を示したものである。螺旋管型地中熱交換器は、螺旋状採熱管を坑壁に沿ってドーナツ状に配置し、一段下の採熱管へと階段状に降下する構造とすることにより、螺旋管を模擬した。なお、採熱管にはポリエチレン管を用いた。また、採熱媒体は矢印の方向に流れており、外側の螺旋状採熱管から注入され、坑井最下部に到達した後は、中央に位置した採熱管から直線状に流出する。以後、この循環方式を「逆循環方式」と

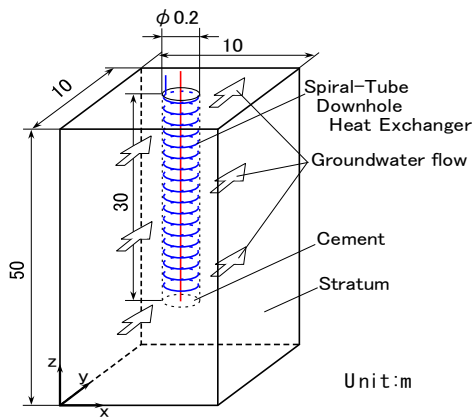


図2 数値計算モデル

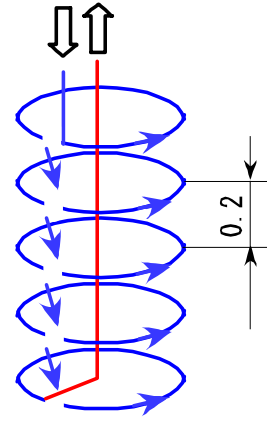


図3 螺旋管の詳細と採熱媒体循環方向

呼び、これとは逆の循環方式（中央直線状の管から採熱媒体を注入し、外側の螺旋状採熱管を上昇しながら流出する方式）を「順循環方式」と呼ぶことにする。

地層の初期温度は、地下水流れを考慮して地表から深度50mまで15°C一定の温度分布を与えた。また、境界条件として、地表面を断熱とし、地下水流れの下流側側面では温度勾配を一定とした。それ以外の側面および底面は初期温度で固定した。地中熱交換器内に流入する採熱媒体の温度は5°Cで固定し、出口では流れ方向に対する温度勾配を一定とした。

(2) 支配方程式

螺旋管型地中熱交換器内を流れる採熱媒体は、工学的見地から流れ方向に一次的に考えた。また、地層内を流れる地下水は、計算領域のy軸方向のみに流れているものとし、その速度も計算領域全体にわたり一様な任意のダルシー速度を与えた。なお、坑井内にはセメントが充填されているため、熱の移動は熱伝導のみとなる。以上の仮定に基づく、基礎式は以下のように与えられる。

採熱媒体：

$$\frac{\partial}{\partial t} \{(\rho C_p)_f T\} + \nabla \cdot \{(\rho C_p)_f \mathbf{V} T\} = \nabla \cdot (\lambda_f \nabla T) + Q$$

周囲地層：

$$\frac{\partial}{\partial t} \{(\rho C_p)_m T\} + \nabla \cdot \{(\rho C_p)_m \mathbf{V} T\} = \nabla \cdot (\lambda_m \nabla T)$$

坑井内セメント、および地中熱交換器

$$\frac{\partial}{\partial t} \{(\rho C_p)_c T\} = \nabla \cdot (\lambda_c \nabla T)$$

なお、下添え字は、*f*：採熱媒体、*m*：周囲地層、*c*：坑井内セメント、および地中熱交換器を表している。

(3) 多孔質層内冷却実験装置

図4に、多孔質層内冷却実験装置の概略図を示す。本実験装置は、試験部、制御用冷却液循環部、温度制御装置、および温度測定装置により構成されている。試験部は冷却面を

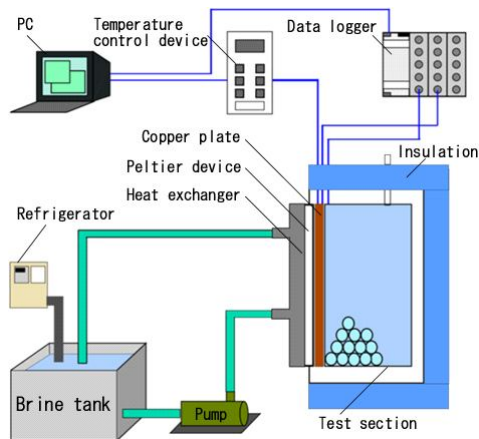


図4 多孔質層内冷却実験装置概略図

有するアクリル製の矩形容器である。容器の左壁面が冷却面（厚さ3mmの銅板）であり、その背面にペルチェ素子を取り付け、さらにその背面にはペルチェ素子からの放熱を吸収するための熱交換器を設置した。

温度制御装置には、ペルチェ素子に送る電流を制御するペルチェコントローラを用いた。冷却面に取り付けられたサーミスタにより温度を検知して、ペルチェコントローラにより冷却面の温度を制御した。なお、サーミスタと熱電対により測定された温度は、データ収集装置（DARWIN）を介してコンピュータにより記録した。

(4) 結果と考察

① 地下水流れの影響

地下水流れが採熱量に及ぼす影響を、図5に示す。なお、計算条件として、螺旋管型地中熱交換器入口から注入する採熱媒体（本研究では水を使用）の温度は5°C、その流量は20 L/min、循環方式は「逆循環方式」とした。また、坑井の深さは30 mとした。図中の実線が地層内に地下水流れがなく、地層中を熱伝導のみによって熱が伝わる場合である。また、破線は地下水流速が10⁻⁵ m/s、一点鎖線は10⁻⁴ m/sの場合である。図より、熱伝導ならびにいずれの地下水流速においても、採熱開始から1分ほどの間では、初期に螺旋管型地中熱交換器内に滞留している15°Cの温度の採熱媒体が流出することにより、採熱量は14kWほどの高い値を示している。また、採熱開始から10分程度までは、地下水の流速によらず採熱量はほぼ同じ値となっているものの、10分以降では地下水流速の違いにより採熱量に差が生じており、その差は時間の経過とともに大きくなっている。採熱開始から24時間後に着目すると、地下水流速が早いほど採熱量は高い値を示しており、この時の採熱量は、地下水流速V=0.0m/s（熱伝導）では約1.19kW、V=10⁻⁵ m/sでは約1.52kW、V=10⁻⁴

m/sでは約2.06kWとなっている。したがって、地層内に地下水の流れがあると、熱伝導の場合に比べ1.3~1.7倍ほどの採熱量の増加が見込まれる。

図6は、採熱開始から24時間後における採熱量と採熱媒体の流量との関係を、地下水流速をパラメータとして示したものである。図より、地下水流れの有無にかかわらず、採熱媒体の流量が増加するにしたがい、採熱量も増加する傾向を示している。しかしながら、採熱媒体の流量が15 L/min以上に増加すると、採熱量の増加割合は小さくなっていることから、これ以上採熱媒体の流量を増加させても採熱量に大きな増加は見込めないことが予想される。

さらに、いずれの採熱媒体の流量においても、地下水流れの存在により採熱量は増加し、地下水流速が早いほど24時間後に得られる採熱量は大きくなっていることがわかる。

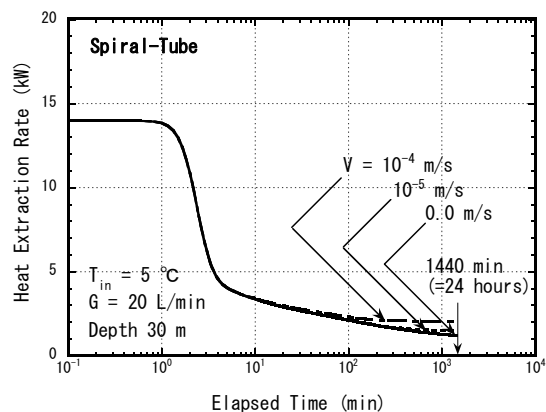


図5 採熱量の時間変化

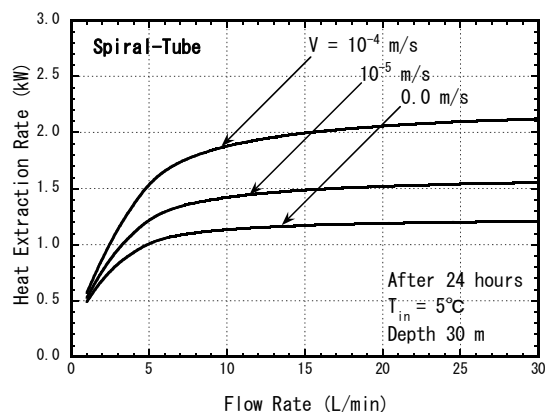


図6 採熱量と採熱媒体流量との関係

② 凍結挙動に及ぼす空隙率の影響

表1に、容器内に充填した粒子径(mm)、容器内の水の体積(ml)、充填粒子の質量(kg)、および空隙率(容器内に占める充填粒子を除

いた液体空間の割合)を示す。なお、充填粒子にはガラスビーズを用いた。

図7は、多孔質容器内の凍結挙動に及ぼす空隙率の効果について検討したものであり、冷却開始から1800秒後における可視化実験ならびに数値計算による結果を示す。上図が可視化実験結果であり、下図がシミュレーションによる計算結果である。また、上下両図ともに左から順に空隙率 ϵ は0.38, 0.40, 0.45である。なお、上図における黄色い破線は凍結界面を表している。また、下図の白色部分が凍結層であり、液相内の等高線は流線分布を示している。

まず、空隙率が0.38の場合、左側冷却壁にほぼ平行に凍結層が成長している。空隙率が0.40の場合、空隙率が0.38の場合と比較すると、全体的に凍結層の厚さが成長しているものの、容器上部において凍結層の厚さがわずかではあるが薄くなっている。さらに空隙率が増加して0.45の場合、全体的に凍結層の厚さが成長している一方で、容器上部で

表1 充填粒子の寸法と空隙率

	$d(\text{mm})$	$V_w(\text{ml})$	$m(\text{g})$	ϵ
Glass	2	94.9	396.7	0.38
Glass	5	102.0	390.1	0.40
Glass	10	112.4	345.9	0.45

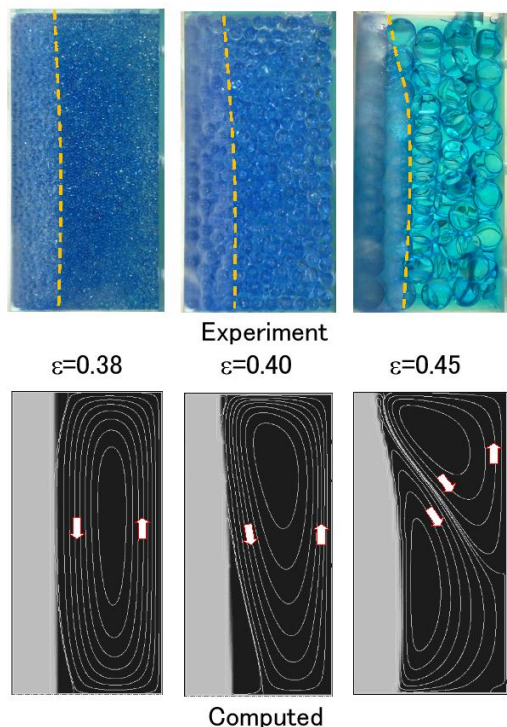


図7 凍結層厚さに及ぼす空隙率の影響

の凍結層厚さはかなり減少している様子が観察される。凍結層界面で冷却された液体(水)は、密度が増加して重くなり、そのため凍結界面に沿って下降流が生じ、全体的に半時計回りの自然対流渦が形成される。このような状況下において、空隙率が増加すると隙間が大きくなるため、水はその隙間を流れやすくなり、その結果、自然対流が強くなる。すると、凍結界面に沿って下降する流れが凍結界面から剥がれ易くなり、容器下部の領域で流れは凍結界面から剥離し、よどみ領域が発生する(空隙率0.40の場合)。このよどみ領域は空隙率の増加に伴い大きくなり、空隙率が0.45になると、容器上部領域における半時計回りの流れに引きずられて、容器下部のよどみ領域内に時計回りの流れが生じるようになる様子が観察される。

また、可視化実験結果と数値計算結果を比較すると、凍結層厚さ・形状については両者の間にいくらか定量的相違は認められるものの、定性的には比較的よく一致していると考えられる。

以上より、多孔質容器内の空隙率が増加すると自然対流が強くなり、これが多孔質層内の凍結層の発達・形状に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。この様に、凍結など相変化を伴う現象は、凍結層と温度場と流れ場の3者がお互いに影響を及ぼし合い、複雑な挙動を示すことがわかった。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

- ① 鎌田秀将, 田子真, 小松喜美, 赤田拓丈, CaCl₂水溶液による氷の融解挙動に関する数値シミュレーション, 秋田大学大学院工学資源学研究科研究報告, 査読有, 第33号, 2012, 33-40.

[学会発表] (計4件)

- ① 鎌田秀将, 田子真, 小松喜美, 赤田拓丈, 塩化カルシウム水溶液による氷の融解に関する数値解析, 2012年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, 2012年9月12日~14日, 北海道工業大学(札幌市).
- ② 三輪博和, 田子真, 小松喜美, 赤田拓丈, 小川賢栄, 多孔質内の凍結現象に関する数値シミュレーション, 日本機械学会東北支部第48期秋季講演会・講演論文集, 2012年9月22日, 八戸工業高等専門学校(八戸市).
- ③ 伊勢仙, 田子真, 小松喜美, 赤田拓丈, 螺旋管型地中熱交換器方式の採熱性能, 日本機械学会東北支部第48期秋季講演会・講演論文集, 2012年9月22日, 八戸工業高等専門学校(八戸市).
- ④ 伊勢仙, 田子真, 盛田耕二, 小松喜美, 赤田拓丈, 螺旋管型地中熱交換器の熱抽出特性, 日本地熱学会平成24年度学術

講演会・講演要旨集, 2012年10月24日
～26日, 湯沢文化会館 (湯沢市).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田子 真 (TAGO MAKOTO)

秋田大学・大学院工学資源学研究科・教授
研究者番号: 50171682

(2) 研究協力者

赤田 拓丈 (AKATA HIROTAKA)

秋田大学・大学院工学資源学研究科・技術
部技術職員

作田 光 (SAKUDA HIKARI)

秋田大学・大学院工学資源学研究科・当時
博士前期課程学生

森田 智士 (MORITA SATOSHI)

秋田大学・大学院工学資源学研究科・当時
博士前期課程学生

金子 伸大 (KANEKO NOBUHIRO)

秋田大学・大学院工学資源学研究科・当時
博士前期課程学生

鎌田 秀将 (KAMADA SHUUSUKE)

秋田大学・大学院工学資源学研究科・当時
博士前期課程学生

千葉 大輔 (CHIBA TAISUKE)

秋田大学・大学院工学資源学研究科・当時
博士前期課程学生

伊勢 仙 (ISE TAKASHI)

秋田大学・大学院工学資源学研究科・当時
博士前期課程学生