

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：17601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05680

研究課題名(和文) ビームダウン式太陽集光装置のための固体顕熱蓄熱システムの研究開発

研究課題名(英文) Study and development of solid sensible heat storage system for a beam down solar concentrator

研究代表者

河村 隆介 (Kawamura, Ryuusuke)

宮崎大学・工学部・教授

研究者番号：70234135

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではタワー型太陽熱発電プラントのための低コスト固体顕熱蓄熱システムの研究開発に取り組んだ。フェロニッケルスラグを細骨材とするモルタル円筒ブロック及び高炉スラグを細骨材としたジオポリマーコンクリート円筒ブロックを開発した。円筒蓄熱ブロックの蓄熱量に及ぼすフェロニッケルスラグ配合の効果を実験及び理論的に解明した。スラグを再利用した円筒蓄熱ブロックを用いる固体顕熱蓄熱槽の解析方法と最適設計方法を確立した。

研究成果の概要(英文)：This study attempts to deal with research and development on a low cost solid sensible heat storage system for a central solar power tower plant. Mortar hollow circular cylinder blocks for heat storage using ferronickel slag as a fine aggregate are fabricated. Geopolymer concrete hollow circular cylinder blocks using blast furnace slag as a fine aggregate are also fabricated. The effect of mix of ferronickel slag on the amount of heat storage in the mortar hollow circular cylinder block using the slag as a fine aggregate is evaluated by both heat storage test of the block and numerical calculation of the amount of heat storage based on the unsteady heat conduction analysis. Methods of analysis and optimum design for the solid sensible heat storage using hollow circular cylinder block fabricated reusing slags are established.

研究分野：工学

キーワード：固体顕熱蓄熱特性 熱応力 モルタル円筒蓄熱ブロック フェロニッケルスラグ ジオポリマーコンクリート 蓄熱

1. 研究開始当初の背景

(1) 温室効果ガスの排出削減につながる再生可能エネルギーとして、太陽エネルギーが世界的に有望視されている。太陽エネルギーの有効利用技術として、集光型太陽熱発電 (Concentrating Solar Power, CSP) が挙げられる。CSP は太陽光を集光して熱へ転換して発電するものである。CSP は集光方式の種類により 4 種類に分類される。この内、トラフ型 CSP は多数の商用運転の実績があり、発電効率、設備費や運転コストが実証された技術である。しかし、トラフ型 CSP で使用される熱伝達媒体の温度は 400 程度に制限されるため、エネルギー効率の向上のため、トラフ型 CSP よりも集光度が高いタワー型 CSP の研究開発が注目を浴びようになってきた。

(2) CSP では曇りや夜間等日射のない時間帯の電力供給を可能とするため、蓄熱システムの導入が必要である。現在、CSP で用いられる蓄熱システムは、蓄熱媒体として熔融塩を使用し、高温と低温の二つの蓄熱タンクを用いるものが多い。蓄熱システムを導入すると、運転時間が延び、設備の稼働率は向上し、発電量が増加する一方、設備費は増加する。そこで、トラフ型 CSP を対象にして、発電コストの低下のために、熔融塩よりも安価なコンクリート やガラス化アスベスト を蓄熱媒体として使用する低コストの固体顕熱蓄熱システムが検討されている。しかし、エネルギー効率上優位であるタワー型 CSP のための低コストの固体顕熱蓄熱システムは未だ開発されていない。

2. 研究の目的

(1) 鉄鋼スラグや火砕流堆積物を蓄熱材料として用いる 900 での蓄熱が可能である固体顕熱蓄熱槽の蓄熱特性と高温下での力学的強度を理論的および実験的に調査し、タワー型太陽集光発電プラントのための固体顕熱蓄熱槽の解析方法と最適設計方法の確立を図る。

(2) 宮崎大学に設置されたビームダウン式太陽集光装置を用いたフィールド実験を行って、材料の高温強度の検討により 900 の高温下で安定的に使用できる固体顕熱蓄熱槽を開発するとともに、本研究で確立した固体顕熱蓄熱槽の設計方法の有効性ならびにタワー型 CSP の発電容量の増加に及ぼす蓄熱システムの導入の有効を検討する。

3. 研究の方法

(1) 蓄熱材料の熱物性値の測定
固体顕熱蓄熱槽の伝熱特性、熱応答性の設計、解析に必要な蓄熱材料の熱物性値を測定する。蓄熱材料として、鉄鋼スラグをとりあげる。蓄熱材料の熱物性値として、比熱、熱拡散率、熱伝導率のデータを測定する。

(2) フェロニッケルスラグを細骨材とするモルタル円筒蓄熱ブロックの作製
集光型太陽熱発電のための低コスト固体顕熱蓄熱システムにおける蓄熱媒体として、フェロニッケルスラグを細骨材としたモルタル円筒蓄熱ブロックの開発を行う。フェロニッケルスラグ、モルタル及び水の配合比率を、モルタルフロー試験により検討し、フェロニッケルスラグの配合の異なる数種類のモルタル円筒蓄熱ブロックを作製する。

(3) 加熱・冷却のサイクルを受ける円筒蓄熱ブロックの伝熱特性及び熱応力の理論的考察
蓄熱と放熱の繰り返しによる加熱・冷却のサイクルを受ける円筒蓄熱ブロックの伝熱特性及び熱応力を解析的に検討するため、周期的加熱を受ける不均質材料の非定常熱伝導及び熱弾性問題の数理解析を取り扱う。材料物性値の不均質性が温度変化及び熱弾性挙動に及ぼす影響、ならびに加熱条件による温度変化及び熱弾性挙動の違いについて考察する。

(4) 固体顕熱蓄熱槽の熱伝導・熱応力数理解析モデルの構築
太陽光を熱に転換する平板型レシーバとして、異種材料層を組合せた円板型レシーバの伝熱特性及び高温強度の数理解析を取り扱う。この数値シミュレーション結果に基づき、固体顕熱蓄熱槽を設計、製作する。

(5) 固体顕熱蓄熱槽の製作
固体顕熱蓄熱槽におけるフェロニッケルスラグを細骨材としたモルタル円筒蓄熱ブロックの蓄熱特性の評価を目指し、モルタル円筒蓄熱ブロックを充填した蓄熱槽を製作する。

(6) モルタル円筒蓄熱ブロックの蓄熱量に及ぼすフェロニッケルスラグ配合の実験及び理論的考察
蓄熱試験及び非定常熱伝導解析に基づく蓄熱量の数値計算によってブロックの蓄熱量に及ぼすフェロニッケルスラグの配合の効果を評価し、蓄熱量を最大化するモルタル円筒蓄熱ブロックにおけるフェロニッケルスラグの配合について検討する。

(7) 加熱温度の高温化及び蓄熱時間の長時間化による円筒蓄熱ブロックの蓄熱性能の向上
モルタル円筒ブロックの蓄熱量の増加を図るため、ガスバーナー式熱風発生機を製作による加熱空気温度の高温化、蓄熱時間の長時間化を検討する。

(8) ジオポリマーコンクリート円筒ブロックの作製とその蓄熱特性の実験的考察
円筒蓄熱ブロックの耐熱温度向上を目指し、

高炉スラグを細骨材としたジオポリマーコンクリート円筒ブロックを製作し、固体顕熱蓄熱槽を用いた蓄熱実験によりジオポリマーコンクリート円筒蓄熱ブロックの蓄熱特性を検討する。

4. 研究成果

(1) フェロニッケルスラグの熱伝導率測定
 フェロニッケルスラグの熱伝導率を測定することを目的とし、熱伝導率測定装置の設計と製作を行った。定常法の一つである比較法に基づき、熱伝導率測定装置を製作した。試験体の内部に生じる空隙を考慮して金型で圧縮、電気炉を用いて焼結させることによって、直径 30mm、厚さ 30mm の円柱状の試験体を作製した。試験体の内部に生じる空隙を考慮して熱伝導率を求めた結果、フェロニッケルスラグの熱伝導率は 1.54 ~ 1.68W/(mK)であることを明らかにした。

(2) フェロニッケルスラグを細骨材とするモルタル円筒蓄熱ブロックの作製
 モルタルフロー試験により、フェロニッケルスラグ、モルタル及び水の配合比率を検討し、モルタルのフロー値を求めた。フェロニッケルスラグの配合比率が異なる 3 種類のモルタル円筒蓄熱ブロックを作製した。

(3) 加熱・冷却のサイクルを受ける円筒蓄熱ブロックの伝熱特性及び熱応力の数理解析
 材料物性値が半径座標のべき乗の形で表される不均質中空円柱が内表面で周期的加熱を受け、外表面で温度変化が零度に保たれる場合、及び断熱される場合について理論解析を行った。導出した解析解を用いて、比熱容量の不均質性を持つ中空円柱について数値計算を行った。外表面で温度変化が零度に保たれる場合では、内表面、外表面における温度変化が与えられるため、温度変化、変位及び熱応力に及ぼす比熱容量の不均質性の影響は小さい。一方、外表面で断熱される場合では、温度変化、変位及び熱応力に及ぼす比熱容量の不均質性による影響が顕著に現われる。比熱容量が半径座標の増加と共に減少する不均質性を持たせると、熱応力は緩和されることを明らかにした。

(4) 異種材料層を組合せた円板型レシーバの伝熱特性及び熱応力の数理解析
 太陽光を熱に転換する平板型レシーバの伝熱特性や高温強度を理論的な観点から調査するため、異種材料層を組合せた円板をとりあげた。平面軸対称な部分加熱を受ける 2 層の異種材料層からなる円板の非定常平面軸対称熱伝導問題の理論解析を取り扱い、組合せ円板の温度変化の解析解を導出した。さらに、平面軸対称加熱を受ける組合せ円板の変位、たわみおよび熱応力の解析解を全周自由の力学的境界条件の下で導出した。導出した解析解に基づき、数値計算を行い、軟鋼層と

銅層からなる組合せ円板の温度、半径方向変位、たわみおよび熱応力成分の半径方向変化の時間発展に及ぼす銅層の厚さの影響について検討した。その結果、円板の高温領域を広げることが可能な銅層の厚さが存在することを明らかにした。さらに、熱応力を減少させることが可能な銅層の厚さが存在することを明らかにした。

(5) 固体顕熱蓄熱槽の製作
 蓄熱槽は鉛直に設置された外径 510mm、長さ 1400mm のガルバリウム製缶体、円筒蓄熱ブロックを充填する直径 128mm、長さ 1000mm のステンレス製ダクト管、ダクト管の上下端に取り付けるステンレス製片落管、ダクト管の外周を巻く高温用耐火繊維製ブランケット断熱材、缶体両端のフランジに取り付けるガルバリウム製中空円板の蓋からなる。ダクト管両端には、熱風発生機や排気用フレキシブルパイプが取り付けられる。

(6) モルタル円筒蓄熱ブロックの蓄熱量に及ぼすフェロニッケルスラグの効果についての実験及び理論的考察
 集光型太陽熱発電のための低コスト固体顕熱蓄熱システムにおける蓄熱媒体として、フェロニッケルスラグを細骨材としたモルタル円筒蓄熱ブロックの開発を目指し、蓄熱試験及び非定常熱伝導解析に基づく蓄熱量の数値計算によってブロックの蓄熱量に及ぼすフェロニッケルスラグの配合の効果の評価した。その結果、図 1 に示すように、蓄熱試験においては、フェロニッケルスラグの体積分率の増大とともにブロックの無次元蓄熱量は増大する一方、モルタルのフロー値は減少する。蓄熱量の理論解析においては、定常状態と非定常状態ではブロックの蓄熱量のフェロニッケルスラグの体積分率による変化が異なる。

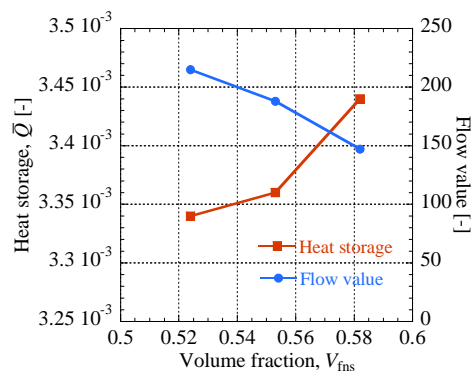


図 1

図 2 に示すように、定常状態ではフェロニッケルスラグの体積分率が大きいほどブロックの蓄熱量は小さいが、図 3 に示すように、非定常状態ではフェロニッケルスラグの体積分率が大きいほどブロックの蓄熱量は大きい。その結果、定常状態と非定常状態ではフェロニッケルスラグの体積分率による蓄熱量の変化が異なることを明らかにした。

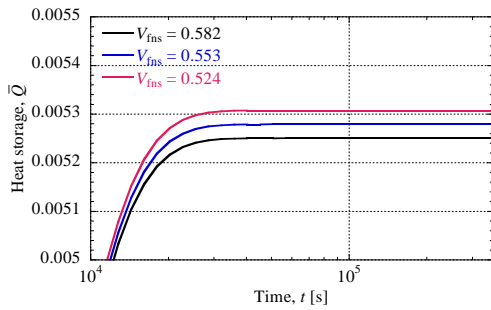


図 2

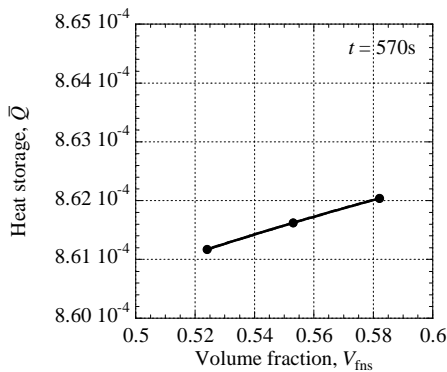


図 3

(7) 熱風発生機の製作と空気温度の高温化及び蓄熱時間の長時間化によるモルタル円筒ブロックの蓄熱量の実験的考察
 モルタル円筒蓄熱ブロックの蓄熱量の実験で用いた電気ヒーター式熱風発生機による空気最高温度は 550 であった。そこで、より高温条件下のブロックの蓄熱特性を調べるため、図 4 に示すように、550 以上の空気発生を可能とするガスバーナー式熱風発生機を製作した。



図 4

この熱風発生機では、蓄熱槽入口で温度 600 ，風量 330 l/min の空気発生が可能であることを確認した。モルタル円筒ブロックの蓄熱量の増加を図るため、空気温度の高温化、蓄熱時間の長時間化を検討した。
 電気ヒーター式熱風発生機を用いた蓄熱試験条件は、条件 1：空気温度 400 ，加熱時間 60 分、条件 2：空気温度 500 ，加熱時間 60 分、条件 3：空気温度 500 ，加熱時間 600

分の 3 通りである。また、ガスバーナー式熱風発生機を用いた蓄熱試験条件は、空気温度 600 ，加熱時間 60 分である。図 5 に示すように、空気温度の上昇、蓄熱時間の増加により、ブロックの蓄熱量はそれぞれ、最大で約 4%、72% 増加することを明らかにした。

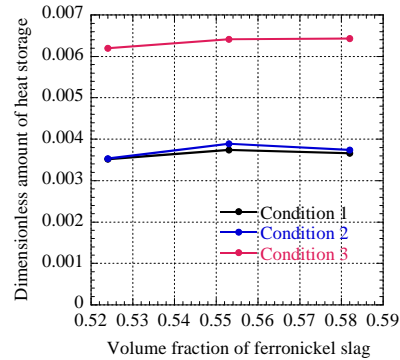


図 5

(8) ジオポリマーコンクリート (GPC) 円筒ブロックの作製とその蓄熱特性の調査
 通常ポルトランドセメントコンクリートと比較して、耐熱性が高く、1000 程度での使用が期待できるが、その蓄熱特性は未解明である GPC の利用可能性を検討した。高炉スラグを細骨材とする GPC 円筒ブロックを作製し、蓄熱試験を上述の 3 つの条件の下で行った。

表 1

Kinds of block	Dimensionless amount of heat storage [-]			
	Condition 1	Condition 2	Condition 3	
Mortar block using ferronickel slag as a fine aggregate	Mix 1	3.66×10^{-3}	3.74×10^{-3}	6.43×10^{-3}
	Mix 2	3.74×10^{-3}	3.89×10^{-3}	6.41×10^{-3}
	Mix 3	3.52×10^{-3}	3.53×10^{-3}	6.20×10^{-3}
Geopolymer concrete block	2.42×10^{-3}	2.20×10^{-3}	4.18×10^{-3}	

表 1 に示すように、GPC 円筒ブロックの蓄熱量は、同じ蓄熱条件下の FNS を細骨材に用いたブロックの高々 65% であることを明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

長瀬 慶紀, 森 暢彦, 友松 重樹, 河村 隆介, 金子 宏, 松原 幸治, ビームダウン式太陽集光装置のための機械攪拌式蓄熱装置の開発, 日本機械学会論文集, 査読有, 83, 2017, 16-00370
<http://doi.org/10.1299/transjsme.16-00370>

〔学会発表〕(計 7 件)

福井 雄大, 友松 重樹, 長瀬 慶紀, 河村 隆介 他, ビームダウン太陽熱集熱装置による太陽熱エンジン駆動に関する研究, 第 10 回日本機械学会九州支部宮崎地区学生研究発表会 (2018.3.8, 都城), 2018

周 志雲, 尾上 幸造, 長瀬 慶紀, 友松 重樹, 河村 隆介 他, モルタル円筒蓄熱プロッ

クの蓄熱量の実験及び理論的考察, 日本機械学会 M&M2017 材料力学カンファレンス (2017.10.7-9, 札幌), 2017

N. Maeda, Y. Nagase, S. Tomomatsu, R. Kawamura, et al., Improvement of a Particle Receiver for a Beam-down Solar Concentrator, 4th International Conference on Applied Electrical and Mechanical Engineering 2017 (2017.8.31-9.2, Nongkhai, Thailand), 2017

R. Kawamura, K. Onoue, Y. Nagase, S. Tomomatsu et al., Storage Performance Analysis of Solid Sensible Cylindrical Heat Storage Block consisted of Ferronickel Slag, 3rd International Workshop on Advanced Dynamics and Model Based Control of Structures and Machines (2017.9.18-22, Perm, Russia), 2017

金丸 大夢, 河村 隆介 他, 内表面で周期的加熱を受ける不均質中空円柱の平面軸対称非定常熱応力 (外表面の温度変化が零度に保たれる場合), 第 28 回新構造・機能制御と傾斜機能材料シンポジウム FGMs 2017 (2017.8.7-8, 名古屋), 2017

R. Kawamura, Y. Nagase, S. Tomomatsu, K. Onoue et al., Fabrication and Performance of Thermal Storage of a Mortar Hollow Circular Block for Solar Thermal Energy Storage using Green Sand, The 5th Asian Conference on Mechanics of Functional Materials and Structures (2016.10.14-17, Shanghai, China), 2016

R. Kawamura, Effect of Material Layers in a Compound Circular Receiver Design for Concentrating Solar Power, 2nd International Workshop on Advanced Dynamics and Model Based Control of a Structures and Machines (2015.9.20-24, Vienna, Austria), 2015

〔図書〕(計 1 件)

R. Kawamura, Y. Nagase, S. Tomomatsu, Springer International Publishing Switzerland, Effect of material layers in a compound circular receiver design for concentrating solar power, In: H. Irschik, etc. (eds.), Dynamics and Control of Advanced Structures and Machines, 2017, 234(125-136)

〔その他〕

宮崎大学工学部機械設計システム工学科ホームページ
<http://www.miyazaki-u.ac.jp/mech/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河村 隆介 (KAWAMURA, Ryuusuke)
宮崎大学・工学部・教授
研究者番号: 7 0 2 3 4 1 3 5

(2) 研究分担者

尾上 幸造 (ONOUE, Kozo)
熊本大学・大学院先端科学研究部(工)・准教授
研究者番号: 5 0 4 3 5 1 1 1

長瀬 慶紀 (NAGASE, Yoshinori)
宮崎大学・工学部・教授
研究者番号: 9 0 1 8 0 4 8 9

友松 重樹 (TOMOMATSU, Shigeki)
宮崎大学・工学部・助教
研究者番号: 3 0 3 1 5 3 5 3