戦略的国際科学技術協力推進事業（日本－中国研究交流）

１．研究課題名：「バイオ燃料と太陽熱のハイブリッド加熱のスターリンエンジンによる熱電併給システム」
２．研究期間：平成２３年９月～平成２７年３月
３．支援額：　総額　14,960,000　円
４．主な参加研究者名：

日本側（研究代表者を含め６名までを記載）

	氏名	所属	役職
研究代表者	原村　嘉彦	神奈川大学	教授
研究者	関谷　弘志	早稲田大学大学院	教授
研究者	竹内　誠	サクション瓦斯製作所	社長
研究者	李　志剛	中国科学院	研究員
研究者	小清水　孝夫	北九州高専	准教授
研究者	加藤　洋平	神奈川大学大学院	学生
研究期間中の全参加研究者数　10　名			

相手側（研究代表者を含め６名までを記載）

	氏名	所属	役職
研究代表者	DaWei Tang	Institute of Engineering Thermophysics, China Academy of Sciences	Professor
研究者	ZhiGang Li	Institute of Engineering Thermophysics, China Academy of Sciences	Research Associate
研究者	DaZhong Yuan	Institute of Engineering Thermophysics, China Academy of Sciences	Research Associate
研究者	YuHua Li	Institute of Engineering Thermophysics, China Academy of Sciences	Research Associate
研究者	JingLong Du	Institute of Engineering Thermophysics, China Academy of Sciences	PhD Candidate
研究者	Tie Li	Institute of Engineering Thermophysics, China Academy of Sciences	PhD Candidate
研究期間中の全参加研究者数　7　名			

５．研究・交流の目的

実用的なスターリングエンジンを開発することを本研究の目的として，共同研究を行った．目的は，研究題目にあるとおり，加熱源をも含めたエンジンのシステムを構築することである．スターリングエンジンは，外燃機関であり，その特性から太陽熱を利用する上で最適な熱機関である．しかし，乾燥地域であっても太陽熱は日中の一定時間しか利用できないので，燃料を併用したエンジンシステムの構築を目指している．燃料として，再生可能エネルギの１つであるバイオガスに着目している．

スターリングエンジンは，理論上は熱効率が高いが，作動ガスと熱源との間の熱伝達を上げないと理論に近づかないのに対して，熱伝達を上げることは通常流動抵抗の増加をも

たらすというジレンマを抱えている．エンジン規模としても，相対的に表面積が大きい 10kW のオーダーの比較的小さなエンジンが向いているが，この規模のエンジンとしては，ディーゼルエンジンと同程度の効率が実績として開発されている．しかし，このような高い効率のエンジンは高価で加工が難しい耐熱合金を使って実現されていて，スターリングエンジンの普及を考えると，もう少し低い高温熱源温度で動作するエンジンが望ましく，その開発を研究の中に組み入れた．

研究者の交流としては，以下の２つを目指した．第１は，共同で研究する機関における人的交流と情報交換である．第２は，わが国におけるスターリングエンジンの技術動向を中国側に紹介することである．スターリングエンジンの開発は，ドイツ，米国，スウェーデンに並んで，わが国の研究レベルは世界に伍するものがある．その情報交換の場が毎年行われるスターリングサイクルシンポジウムであり，この学会へ相手側のメンバーを招き，わが国の研究者と広く交流を促すことを目指した．

６．研究・交流の成果

６－１　研究の成果

初年度の活動は２点である．第１点は，既存の 5kW ならびに 1kW エンジンを薪燃焼器に据え付けて実証実験を行ことである．実験の結果，所定の出力が得られることを明らかにした．第２点は，高性能な模型エンジンの改良版複製を製作することである．この模型エンジンは，再生器の材料に従来からよく用いられている金網蓄熱材ではなく，流動損失が小さいと期待できる平滑な微細流路を持つ蓄熱材を使用しているという特徴がある．流動抵抗を測定するために，ピストンの位相差を 180° に設定できるように変更し，予定どおり完成させた．

２年目の活動は３点である．第１は，初年度に製作したエンジンを用いて，流動抵抗を測定することである．平滑な流路の蓄熱材と金網蓄熱材両方に対して，流動抵抗を測定した．この結果を無次元量でまとめ，３年目の当初に学会発表を行うとともに，数値解析の結果との比較にも用いた．第２は，相手側研究者を招き，当方において流動抵抗と熱伝達に関する数値解析を始めることである．解析には，数値熱流体力学（ＣＦＤ）ソフトウェアを用いた．第３は，新しくエンジンを製作することである．

３年目の活動は３点である．第１は，初年度に作成したエンジンを用いてエンジン動作時の出力特性を測定し，２種類の蓄熱材形状の優劣を判断することである．流動抵抗が同じになる条件を含め，往復流動周波数，金網のメッシュサイズを変えた実験から，平滑流路を持つ蓄熱材の方がいくぶんエンジンとしての性能が高いことを見出した．その成果は，４年目の当初に国際学会で発表した．第２は，数値解析を完結させることである．流動抵抗に関しては解析解と一致すること，熱伝達は水力直径を代表寸法にしたヌセルト数が 5.3 で一定であることを新たに見出した．その成果は，論文誌に投稿し掲載された．これを発展させた研究は，来日した研究者が帰国後も続け，その成果を国際学会で発表した．第３は，新しいエンジンを完成させることである．３年目の中盤で，若干自立運転には至らなかったものの，概ね新しいエンジンを完成させた．

３年目後半から４年目（半年）には，新しいエンジンを目標どおり動作させることを目指して改良を行った．改良作業中の分解・組み立てにおいて，機構の摩擦が大幅に増加したため，結局自立運転には至らなかった．

相手側の成果は，エンジンも目標の性能に大きく及ばず，太陽熱とバイオガス燃焼熱を利用するためのヒートパイプも実用化には至らなかった．

６－２　人的交流の成果

当方から相手側への訪問は，複数回を予定していたが，１回のみに終わった．そこでは，その主な目的であった，先方で開発中のエンジンに関する経過報告と構造等に関する議論は行えたが，もう１つの目的であったわが国におけるスターリングエンジンの開発状況に関する講演は，コンピュータの急な不調が発生したため中止し，予定した成果を上げることができなかった．

相手側から当方への訪問は，客員研究員としての１年間の研究（研究者１名）が行えた．その成果は，学術誌に掲載されたほか，権威ある国際学会において発表することもできた．

相手側から当方への訪問は，前記以外に，相手側研究代表者が２回，その他の研究者が１回，わが国でスターリングエンジンに関する唯一の学術講演会「スターリングサイクルシンポジウム」に合わせて行われ，わが国の研究の視察と研究者との情報交換・人的交流をしてもらった．

さらに，2013 年 11 月には，わが国の研究者が参加する形で本研究についての方向性と進捗報告のワークショップを開催し，意見交換を行った．

７．本研究交流による主な論文発表・主要学会での発表・特許出願

論文 or 特許	・論文の場合：　著者名、タイトル、掲載誌名、巻、号、ページ、発行年、DOI ・特許の場合：　知的財産権の種類、発明等の名称、出願国、出願日、出願番号、出願人、発明者等	特記 事項
論文	Zhigang Li, Yoshihiko Haramura, Yohei Kato and Dawei Tang, "Analysis of a high performance model Stirling engine with compact porous-sheets heat exchangers", Energy, Vol. 64, pp. 31-43, 2014.	
論文（国際学会発表）	Zhigang Li, Dawei Tang (Chinese Academy of Sciences), Yoshihiko Haramura (Kanagawa Univ.), Miao Zeng (Chinese Academy of Sciences), Yohei Kato (Kanagawa Univ.), An Analytical Study of the Heat Transfer in a Regular-shaped Micro-Channel Type Stirling Regenerator, 15th International Heat Transfer Conference, Kyoto, 2014.8.7.	
論文（国際学会発表）	Yohei Kato and Yoshihiko Haramura, Which is better for regenerator matrix, metal gauze or smooth channel? International Stirling Engine Conference 2014, Bilbao, Spain, 2014.9.24.	
論文（国際学会発表）	Makoto TAKEUCHI, Shinji SUZUKI and Yutaka ABE (Suction Gas Engine MFG Co. Ltd), The passive generation system combined wood chip boiler and Stirling engine,　International Stirling Engine Conference 2014, Bilbao, Spain, 2014.9.24	