

スターリングエンジンの可能性

東京電機大学 未来科学部 ロボット・メカトロニクス学科 3年
賀来雄太・金子茉莉奈・鴨下忠尚・黒沼邦彦・国立彩織

概要

本実験では、独自のスターリングエンジンを完成させ、性能評価を行うことを目指す。性能評価の結果より、設計仕様と実際性能の相違を発見し改良を行うことで、スターリングエンジン設計において何が重要であるかを明らかにすることが目的である。第3回の八光熱の実験コンテストでは、再生器の設計・製作およびエンジンの出力計測装置の開発を中心に活動を行った。

タイミングベルトを用いて2機のスターリングエンジンを連結した2気筒エンジンを試作した。再生器は予定していた体積よりも約50%大きくなってしまったが、タイミングベルトを用いて2気筒を連結したスターリングエンジンができあがった(図1)。第一段階として製作したスターリングエンジンの動作確認を電熱ヒータを用いて行ったが、実験の結果、現状のエンジンは再生器の空気漏れやクランクシャフトの軸の位置ずれなどが原因で動作しないことがわかった(クランク機構など全体の動きがわかる動画を添付(手動))。一次試作機の改良すべき点は明らかとなったが、実験の終了期限となり、残念ではあるが、今回は、その時点までの結果を最終報告書としてまとめた。また、エンジンに小型の発電機を取り付けて出力を計測するデバイスも製作した。性能計測の準備はできていただけにエンジンを動作させられなかったことは大変残念であり、コンテスト終了後も改良、実験を行えればと考えている。

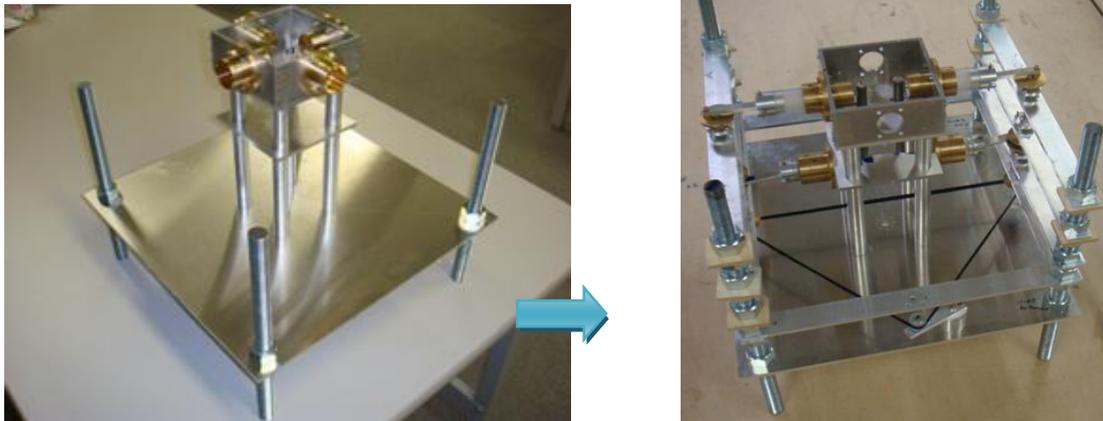


図1 製作した2気筒のスターリングエンジン(右)、左は前年度の状態

1 これまでの研究実績

前回、第2回の熱の実験コンテストでは、既存のスターリングエンジン(α 、 β 、 γ 型)の試作を行い、スターリングエンジンの特徴や性能を理解した。また、気密の重要性やクランクの位相差によって出力が違うことなど、スターリングエンジンを設計するに当たり注意する点を学んだ。試作したスターリングエンジンのなかでは、 α 型のみ運転に成功し(後出の図5に今回の2気筒エンジンとあわせて α 型も示した)、調整を重ねていく過程で独自のノウハウを見つけることができた。この結果を踏まえて独自のスターリングエンジンには α 型を採用した(図1)。

Schmidtモデルを用いて熱効率を求めた結果、計算上は45%の熱効率が得られるエンジンが設計できた(4気筒)。また、前年度は、この設計したスターリングエンジンの部品の約7割を製作した。未製作部品の中には、スターリングエンジンの重要な要素である再生器やクランクシャフトが含まれており、その製作や各部品の組み付け・修整、そしてエンジンの完成を目指すことを決意し、第2回の八光熱の実験コンテスト活動は終了した。

2 実験目的

本実験（第3回八光熱の実験コンテスト）では、上述の設計に基づき独自のスターリングエンジンを完成させ、性能評価を行うことを目的とする。性能評価を行うことにより、設計仕様と実際性能の相違を発見し改良を行うことで、スターリングエンジンの設計において何が重要であるかを明らかにする。

3 実験内容

3.1 再生器

3.1.1 実験内容

計算により求めた再生器の体積 735mm^3 となるように再生器の設計を行う。再生器の組立図の図面は付録 A に記載し、再生器に使用する部品を表 1 に、製作した再生器の写真を図 2 示す。図 2 の再生器のスチールパイプと全ネジの固定の際に、ニトフロンパイプテープという水道管のシールとして使われているテープを用いて密栓をする。また、再生器をスターリングエンジンに取り付ける際も同様に、ニトフロンパイプテープを用いて密栓を行う。

表 1 使用部品一覧

部品名	型番	個数
スチールパイプ($\phi 6$)	PISS6-3-100	1
スチールパイプ($\phi 12$)	PISS12-3-133	1
貫通穴付全ネジ(M3)	MCBAS3-15	1
貫通穴付全ネジ(M4)	MCBAS4-15	2

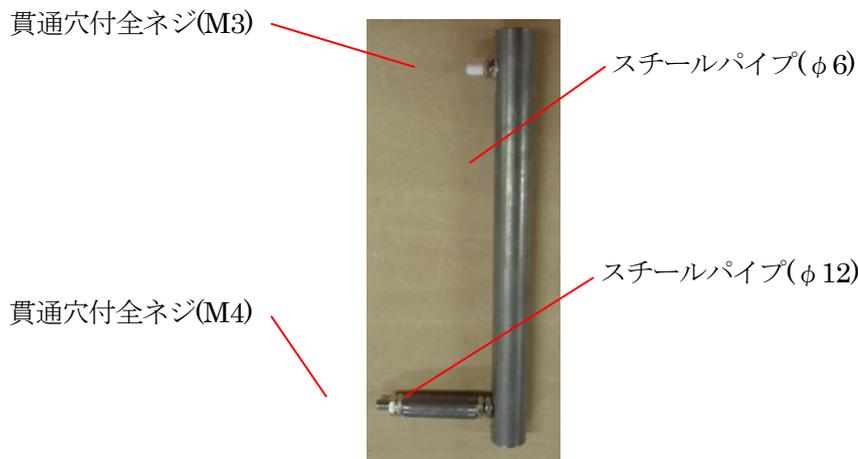


図 2 再生器

3.1.2 実験結果

実際に製作した再生器の体積 V を計算したところ、

$$\begin{aligned}
 V &= \pi \times \left(\frac{2.5}{2}\right)^2 \times (30 - 4.5) + \pi \times \left(\frac{1.2}{2}\right)^2 \times 15 + \pi \times \left(\frac{3}{2}\right)^2 \times 110 + \pi \times \left(\frac{1.5}{2}\right)^2 \times (15 \times 2) + \pi \times \left(\frac{3}{2}\right)^2 \times (24 - 9) \\
 &= 1078.7247 \dots \\
 &\approx 1079[\text{mm}^3]
 \end{aligned}$$

となった。手計算により求めた再生器の体積は $735[\text{mm}^3]$ であり誤差率 ΔV は、

$$\Delta V = \frac{1079 - 735}{735} = 46.802721 \dots [\%]$$

となり、約 $50[\%]$ ($344[\text{mm}^3]$) 設計体積より大きくなってしまった。

3.2 タイミングベルト

3.2.1 実験内容

図3のように製作した2つのスターリングエンジンの加熱部と冷却部のピストンを繋げるクランク部の一番下のクランクシャフトヘッドにタイミングプーリをつけ、タイミングベルトを用いて2気筒を連結したエンジン構成にする。

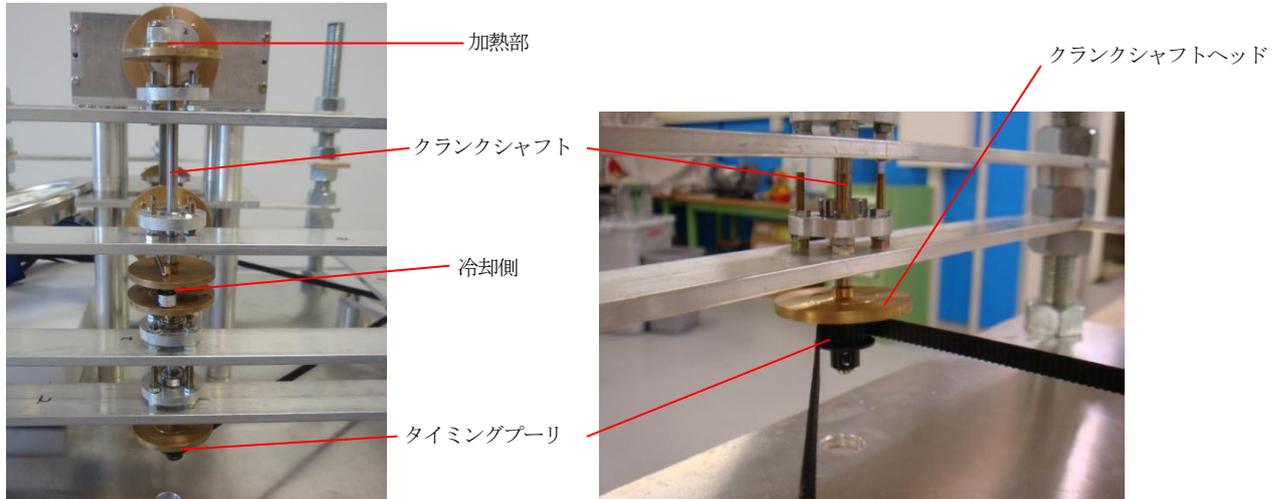


図3 スターリングエンジン（1気筒部）とタイミングベルト部の拡大図

3.2.2 実験結果

2つのスターリングエンジンと3点を結ぶ位置に、ベアリングの入ったタイミングプーリを片持ちピンで固定し、タイミングベルトにテンションをかけることによって、片方のスターリングエンジンの回転をもう一方のエンジンへ伝えることが可能となった。以上より、図4のような2気筒のスターリングエンジンを作ることができた。

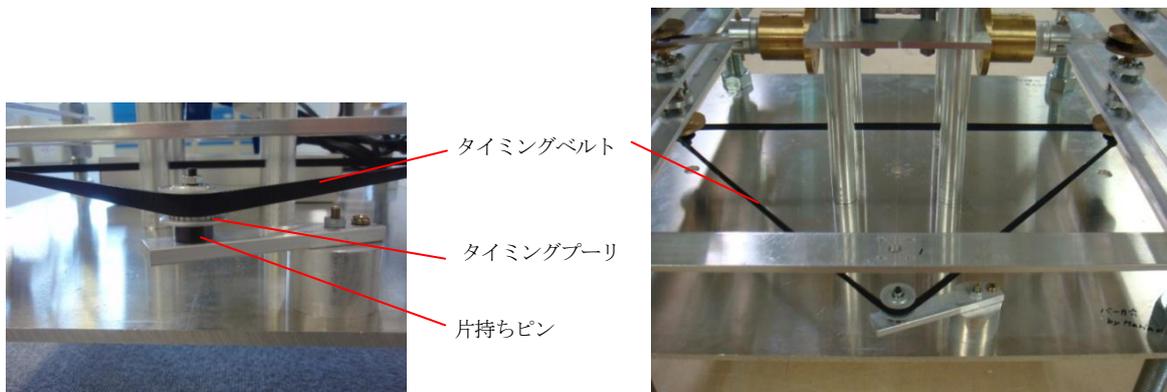


図4 片持ちピンの拡大図と2気筒のスターリングエンジン

3.3 独自のスターリングエンジンの動作確認

3.3.1 実験内容

独自のスターリングエンジンに再生器、タイミングベルトを取り付け、動作確認を行う。

3.3.2 実験結果

図5に完成した2気筒の独自のスターリングエンジンを示す。

電熱ヒータ（ホットガン）を用いてエンジンを加熱した。エンジンを動作させるべく、部材修整、タイミング調整など行ったが、結果として再生器の空気漏れやクランクシャフトの軸の位置ずれによる摩擦損失などの原因により動作させることができなかった。

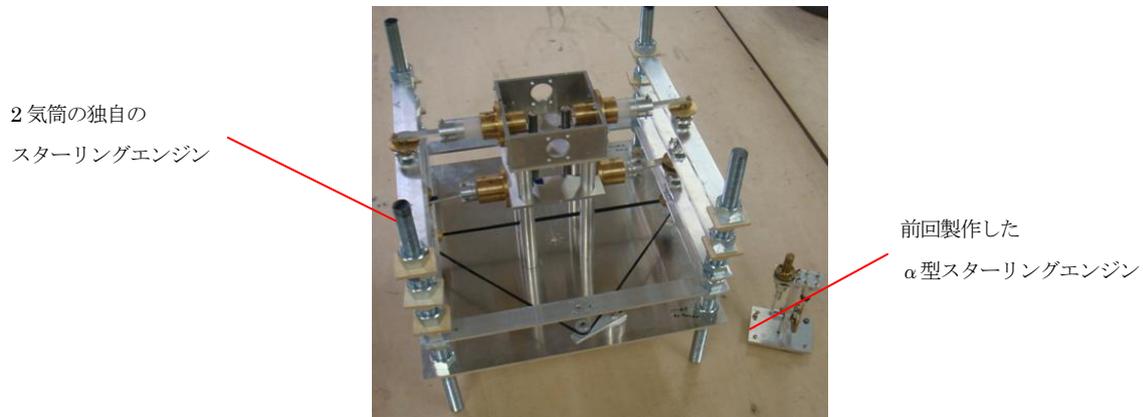


図5 α型スターリングエンジンとの比較

4 エンジン性能の測定デバイスについて

今回の実験では、エンジン性能を計測するための測定デバイスも製作した。図6に測定デバイスの概観を示し、また、付録Bとしてその回路図を記した。

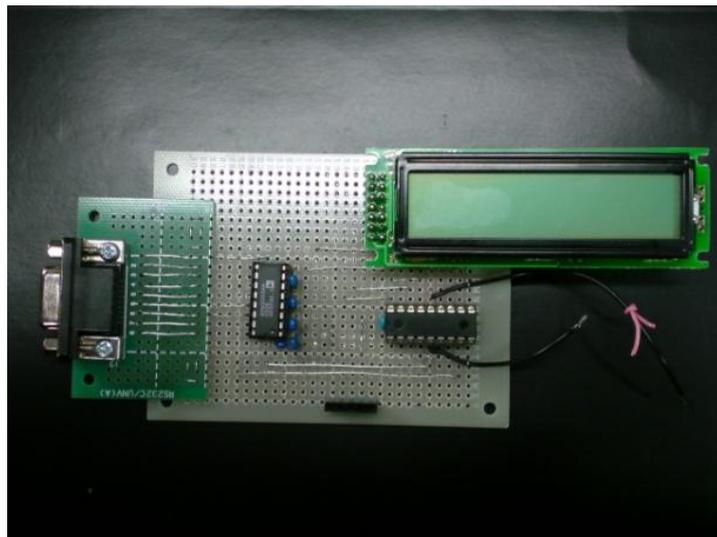


図6 測定デバイス

4.1 計測デバイスの有する機能

この計測デバイスは、 $0.00\sim 4.99[V]$ $\pm 0.02[V]$ (ADコンバータの分解能が8bitのため)の電圧測定、 $0.00\sim 2.00[A]$ $\pm 0.008[A]$ の電流測定、 $30\sim 300[rpm]$ の回転数測定が可能。

4.2 エンジン性能の計測原理

エンジンに取り付けた小型の発電機（ダイナモ等）に適度な負荷を付け、発電機から発生する電圧と電流をデバイスで読みとる。

電力 $P[W]$ は電流 $I[A]$ と電圧 $V[V]$ の積で求められるので、それによりエンジンの動力の計測が出来る。また、回転数を測定することにより、回転数の単位時間変化からトルクを算出できる。

4.3 製作したデバイスに関する考察

今回このデバイスを作るにあたり、発電機の選定と電流測定が難しかった。そのため以下の様な測定法により測定する方が誤差の影響が少なくなると考えた。

エンジンに厚さ t [m]、質量[m]の円柱を取りつける。その円柱の回転の変化を精密に測定することにより、動力 P [PS]を求める

トルク N [N・m]は慣性モーメント I [kg・m²]、各加速度 $\dot{\omega}$ [rad/s]より $N = I\dot{\omega}$ である。

このときの慣性モーメント I は円柱の半径を r [m]とすると $I = \frac{1}{2}mr^2$ 従って動力 P は回転数 n [rpm]とする
と

$$P = \frac{\pi n m r^2}{4500} \text{ より算出することが出来る。}$$

5 結論

独自のスターリングエンジンは最初4気筒で設計していたが、時間の関係上2気筒に変更してスターリングエンジンを製作し、動作確認を行った。時間の許す限りの修整や調整を行ったが、スターリングエンジンは動かなかった。結果として、予定の性能評価を実施することができなかった。

エンジンが動かなかった原因として、再生器の空気漏れ、シャフトカラムの中心からクランクシャフトヘッドがずれておりピストンが上死点まであがらないこと、クランクシャフトの軸の位置ずれ、タイミングベルトを張る3点の距離が長かったことなどが考えられる。これらを改善するために、空気漏れを起こしている部分をシリコンなどでシールをすること、シャフトカラム4本分を1枚の板にしてその板に穴加工することで板が斜めにならないようにすること、タイミングベルトを張る3点の距離を短くすることが必要であると考える。

6 謝辞

最後に、本実験を実施する機会を与えてくださった株式会社八光および株式会社八光電機製作所の実験コンテスト担当者の皆様に感謝の意を表します。

本実験に関してお忙しい中、エンジンの設計、プロジェクトの方針に対しご指導を賜りました石川 潤先生はじめ、釜道 紀浩先生、貞弘 晃宜先生、鈴木 聡先生、中村 明生に謝意を表します。

また、特にエンジン部品の加工についてご指導を賜った金竹 隆志先生、エンジン部品の加工を引き受けてくださった樫村 幸辰先生、小川 俊夫先生、深澤 克也先生、大学院生の方々に深謝します。

さらに、本実験の加工作業に協力を申し出てくれた佐々井君、伊藤君、山崎君に感謝します。

7 会計報告

本実験を行うために提供していただいた10万円は、非接触回転センサ、マイコンPIC12F675、スチールパイプ、タイミングベルト、ヒータなどの購入に使わせていただきました。

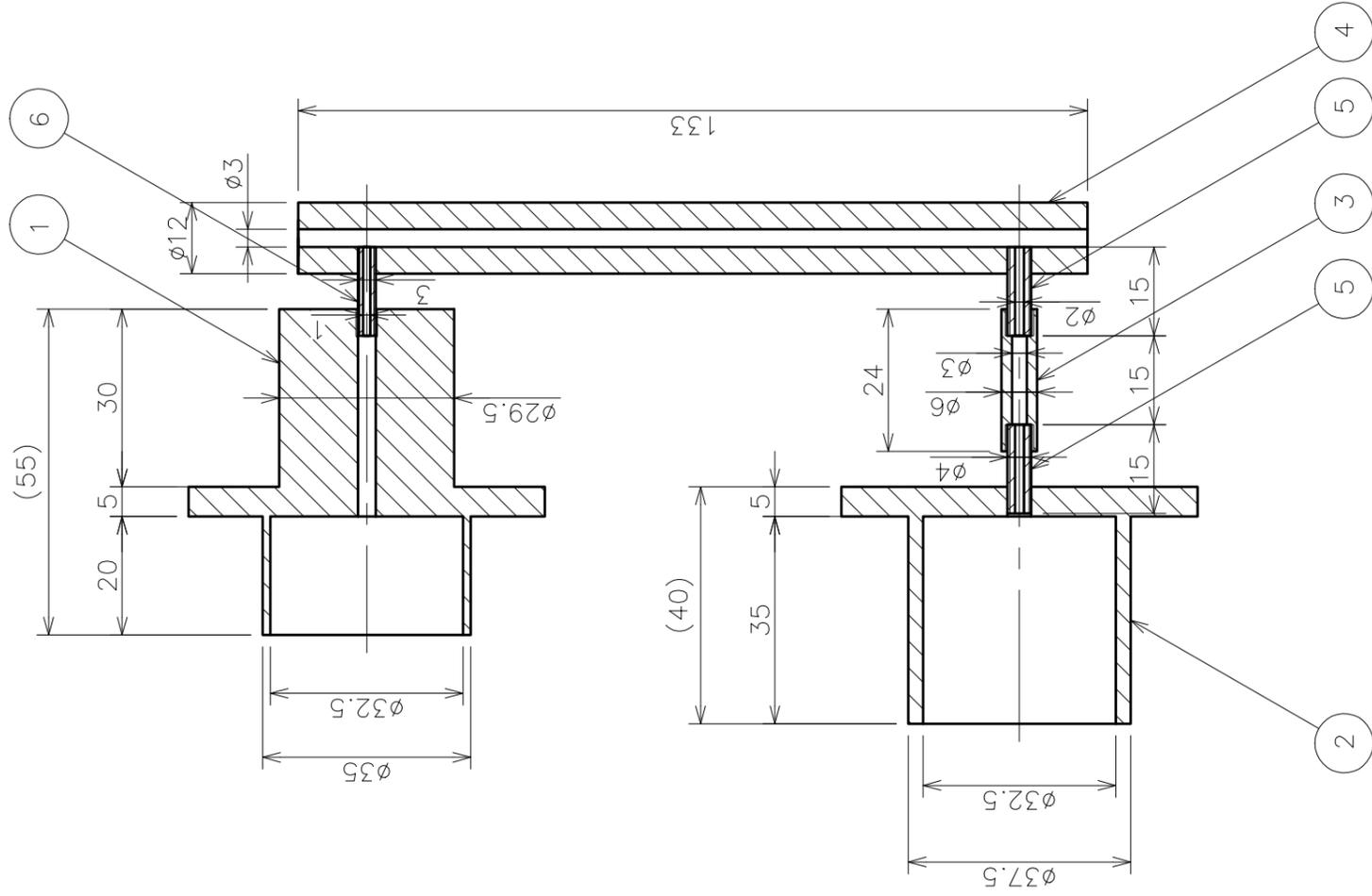
使用合計金額は¥46,102となり残金は¥53,898となりました。残金は、今後この活動を継続する際の費用に使用させていただきます。

8 付録 A

再生器の組立図の図面を別紙1に示す。

9 付録 B

エンジン性能の測定デバイスの回路図を別紙2に示す。



PART No.	CHECKED	APPROVED	PART NAME	SCALE	PROJECTION	MATERIAL	QUANTITY	MASS	NOTE	
										TITLE
6			貫通穴付全ネジ				1		M3×15	
5			貫通穴付全ネジ					2		M4×15
4			内径選択スチールパイプ				steel	1		
3			内径選択スチールパイプ				steel	1		
2			Comp Cylinder Holder				brass	1		
1			Extend Cylinder Holder				brass	1		
TITLE						再生器(組図)				
DRAWING No.						000001				
DATE										

Tokyo Denki University
 Dept. of Robotics & Mechatronics

No. エコスタ

