

エントロピー弾性を利用したラバーヒートエンジンの試作と解析

古川 睦久*・江頭 満*
 赤城 哲郎**・本山 健次郎***
 平岡 教子*・横山 哲夫*

Trial Construction and Analysis of Rubber Heat Engines based on Entropy Elasticity

by

Mutsuhisa FURUKAWA*, Mitsuru EGASHIRA*, Tetsuro AKAGI**,
 Kenjiro MOTOYAMA***, Kyoko HIRAOKA*, and Tetsuo YOKOYAMA*

This study is about rubber heat engines which have rubbery solid as the "Working fluid". The rubber heat engines of three types were built and were studied on rotating behavior (relation between the number of revolutions and the number of rubber sporks; effect of heat source; relation between the number of revolutions and torque, power, and work; thermal efficiency). The rubber heat engines built are a) one which holds the crank fixed and rotates the rim, b) one which holds the rim fixed and rotates the crank, c) one which has vertical wheels rotated by eccentricity. The conclusions of this study are as follows; a) the potential use of rubbers as the "Working fluid" was confirmed. b) Sunlight is possible as heat source for rubber heat engines. c) Since small temperature differences are available for heat engines, the engines can use low-grade and waste heat as the heat source.

1. 緒言

省資源・省エネルギーが叫ばれている現在、低品位の熱や廃熱を利用した機関の出現が望まれ、風力発電、太陽熱発電、温泉熱発電、地熱発電、波浪発電、海流発電、海洋温度差発電などが検討されて、一部実用化されてきている。しかしこれらの機関では作業物質として専ら流体が用いられている。これらの熱機関の作業物質としてゴムを用いることも可能である。気体とゴムの理想的な等温ヒートエンジンサイクルをFig.1 a,bに示す。ヒートエンジン或いはヒートポンプは通常作業物質として流体（気体）を用いてFig.1 aに示すようなサイクルまたは逆サイクルを行わせている。ゴムの弾性はエントロピー弾性であり、気体の示す圧

力と原理的に同じであるため、気体の圧力-体積関係とゴムの収縮力-長さ関係は熱力学的に同等である。ゴムのサイクルはFig.1 bで示される。

Fig.1 bにおいて、ゴムが温度 T_L に保たれながら歪

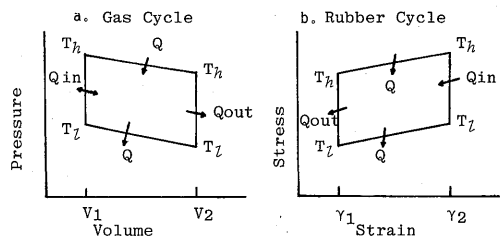


Fig.1 Comparison of idealized isothermal heat engine cycles for a gas and rubber²⁾.

昭和61年9月30日受理

* 材料工学科 (Department of Materials Science and Engineering)

** 現在 小松電子金属(株), 平塚市四之宮町 (Komatsu Electronic Metal Co., Ltd., Sinomiyamachi, Hiratsuka)

*** 現在 長崎県立鹿町工業高等学校, 長崎県北松浦郡鹿町町 (Shikamachi High School, Sikamachi-chou, Kitamatsuura, Nagasaki)

γ_1 から γ_2 に伸長されるとゴムは外に Q の熱を放出する。次に、 γ_2 で熱 Q_{in} が加えられ温度が T_h に上昇する。さらに、等温的に γ_1 まで戻されると外から熱 Q を吸収する。このゴムを温度 T_h から T_l に冷却すると熱 Q_{out} を放出する。同様に逆サイクルも可能である。従って、このようにヒートエンジン及びヒートポンプの作業物質としてゴムを用いることが出来る。流体の代わりにゴムを用いようとする概念は Wiegand¹⁾ により古くから示され、また最近 Farris²⁾ により、ラバーヒートエンジンについての理論と若干の解析とが与えられている。しかしながら、それらを具体化した装置は Wiegand¹⁾、Wiegand と Snyder³⁾、Hayward⁴⁾ により発表されたもの以外は見当たらない。

エントロピー弾性を利用したゴムエンジンと一般のガスエンジンを比較すると次のような利点が考えられる²⁾。ゴムの収縮力の温度依存性は絶対温度に比例するため、低温度差での作動が可能である。また、流体と異なり特定の作業温度を必要とせず、ゴム状弾性を保つ広い範囲にわたっての作動が可能である。出力カーブが平坦であり始動トルク・失速トルクが高くエンジンの操作性がよい。実際のエンジンの製作において、流体エンジンであれば作業流体を密閉容器の中に閉じこめる必要があり機器の設計・装置建設などのコストがかかるが、ゴムエンジンでは圧力容器などを必要とせず、構造も簡単のためコストの低減化が計れる。また稼動後の装置の維持、管理が非常に単純化される。このような利点を持つゴムエンジンの開発及び実用化が成されるならば、低品位廃熱の利用が可能となり、無公害型エンジンとして利用されるであろう。本研究では、エントロピー弾性を利用する低温度差作動型省資源・省エネルギーゴムエンジンを試作し、回転挙動、運動特性を調べることで実用化の可能性を探ることを目的とした。

2. 実 験

3種の型式のゴムエンジンを組み立てた。これらは Wiegand¹⁾ や Farris²⁾ や Hayward⁴⁾ の製作したものと同じであるが、各部の構造や二連型とすること等で改良型となっている。構造の詳細は結果の項に記す。なお、ゴム振子型も製作したが本報ではふれない。

エンジンの組立においては、次の材料を用いた。外輪には自転車のリム（直径584mm）を転用し、これに等間隔に直径4mmの穴を72箇所あけ、ゴム糸保持穴とした。内輪、主軸、副軸、及びアームにはアクリル棒とアクリル板より切り出したものを用いた。外輪固定用外枠には木製の板を用いた。回転摺動部には深みぞ

玉軸受け（開放型）ベアリング（NTN製：呼び番号6004, 626, 及びナガベア製）を用いた。

ゴムには、市販の天然ゴム製輪ゴム（共和糊製 No. 16）を主に用い、一部のエンジンではポリエーテル系セグメントイドポリウレタン（旭化成製ロイカ C タイプ, 840デニール）を用いた。

組み立てたゴムエンジンの力学特性の測定は次のように行った。最大トルクは可動輪の回転力と回転半径との積により求めた。回転力は、伸びと荷重の関係を予め求めたバネの一端を可動輪に固定し、バネの収縮力とエンジンの回転力が釣り合ったときのバネの長さから求めた。仕事量 W 、仕事率 P 、トルク T は、可動輪（或いは中心軸）に一端を取り付けた糸で重りを持ち上げるときの仕事から、次式(1)~(3)により求めた。

$$W = Fx + (1/2)mr^2\omega^2 + M \quad (1)$$

$$P = W/t \quad (2)$$

$$T = Fd \quad (3)$$

ここで、 W : 仕事量 (J), F : 可動輪にかかる力 (N), x : 重りを引き上げた距離 (m), m : 回転体の重量 (kg), ω : 角速度 (rad/s), r : 回転半径, M : 摩擦モーメント, P : 仕事率 (W), t : 重りを持ち上げるに要した時間 (s), d : 回転軸の半径 (m) である。(1)式の右辺の第二項は、車輪を動かすために必要な仕事量を示す。また、第三項の摩擦モーメントは式(4)で与えられる⁵⁾。

$$M = \mu Z d_1 / 2 \quad (4)$$

ここで μ は摩擦係数（ここでは0.0020⁵⁾を使用）、 d_1 はベアリングの軸受け内径 (m)、 Z は軸受けにかかる荷重であり Farris²⁾ の算出した Total Bearing Load に等しいとして(5)式により求めた。

$$\text{Total Bearing Load} = G_0 d' V_r / l_0^2 \quad (5)$$

ここで G_0 はゴムの弾性率、 d' は主軸と副軸との距離、 V_r はゴムの体積、 l_0 はゴムの初期長 (m) である。

また、熱効率 η は仕事量 W とゴムが得た熱 Q_{in} から(6)式により求めた。

$$\eta = W / Q_{in} \quad (6)$$

ただし、 Q_{in} は(7)式により求めた。

$$Q_{in} = C_\lambda \rho V_r \Delta T \quad (7)$$

ここで C_λ はゴムの伸張比 λ における比熱、 ρ はゴムの密度、 V_r はゴムの体積、 ΔT はゴムのヒートサイクルの温度差である。

3. 結果と考察

3.1 水平クランク固定・外輪回転型ゴムエンジン

Fig.2 にクランク固定・外輪回転型ゴムエンジン (RHE-III) の完成写真を示す。RHE-III はクランクアームを固定し、主軸を中心に外輪が回転するエンジ

ンである。このエンジンの作動原理を Fig.3 に示すような 2 本のゴム糸を張った簡単な RHE-Ⅲ について考える²⁾。張られたゴム l_1, l_2 の収縮力 F_1 と F_2 はそれぞれ分力 $F_{1y}, F_{1x}; F_{2y}, F_{2x}$ に分けることができる。ゴム l_1, l_2 の温度 T_1 と T_2 が等しいとき点 p, q にかかる y 方向の力 F_{1y} と F_{2y} は等しくなり、外輪は回転しない。いまゴム l_1 が加熱されると $T_1 > T_2$ となり収縮力 $F_1 (F_{1x}, F_{1y})$ は増加し $F'_1 (F'_{1x}, F'_{1y})$ となる。従ってゴム l_1, l_2 に温度差がない時静止していた外輪はゴムの温度差に基づく力 (p, q の接線方向に生じた力) の差 $F'_{1y} - F_{1y}$ により廻りに回転することになる。

Table 1 に主軸から副軸の距離 (偏心距離) の回転挙動への影響を示す。測定条件は、ゴムの本数:70本, 熱源:ゴムの下方18cmの位置に置いた600 W 赤外線ヒーター, 室温30~31℃, 無風状態であった。Table 1 において、 $\lambda_{max}, \lambda_{min}$ は各々ゴムの初期長に対する最大長及び最小長の伸長比である。また回転数は無負荷状態での回転数である。偏心位置が大きくなると、すなわち最大伸長度 λ_{max} が大きくなると回転数は減少したが、最大トルクは増加した。これは作動原理から偏心距離が大きくなる程 Fig.3 における p, q にかかる収縮力が大きくなり、分力 $F'_{1y} - F_{1y}$ が大きくなると考えると説明できる。また、無負荷時の熱効率 η は偏心距離が大きくなるとともに減少する傾向を示した。これは λ_{max} が大きくなり回転数が小さくなるためゴムの得る熱量は大きくなるが、 λ_{max} の

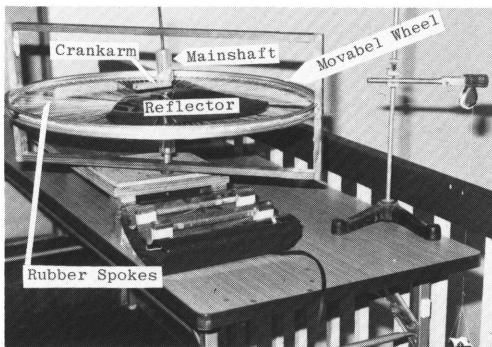


Fig.2 Rubber heat engine (RHE-Ⅲ) which holds the crank fixed and rotates the rim.

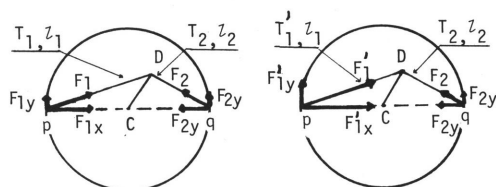


Fig.3 The scheme of working principle on RHE-Ⅲ.

増加ともない摺動低抗も強くなり仕事量の増加が熱量の増加量に対応しなかったためと考えられる。

トルク, 仕事量, 仕事率と回転数の関係を Fig.4 に示す。回転数の増加とともにトルク, 仕事量は減少する傾向を示したが、これは持ち上げる荷重が重くなる程、トルクは大きくなり回転は遅くなるという相反する効果のためである。また、この減少傾向は偏心距離が大きくなる程、大きくなった。仕事率は回転数の増加に対してある回転数をピークに山なりの曲線を描いた。また、偏心距離が大きくなる程、このピーク位置は低回転数側へ移動する傾向を示した。

使用熱源を、600 W ヒーターの他に、水蒸気、及び日光として RHE-Ⅲ の回転性を検討した結果を Table 2 に示す。

日光での実験では RHE-Ⅲ を完全に箱でおおい、箱の一部を切り抜くことにより小窓をあけ直射日光をゴムにあてた。(ゴムスポークの 2/3 以上の長さ に直射日光があたっているのは 22 本であった。)

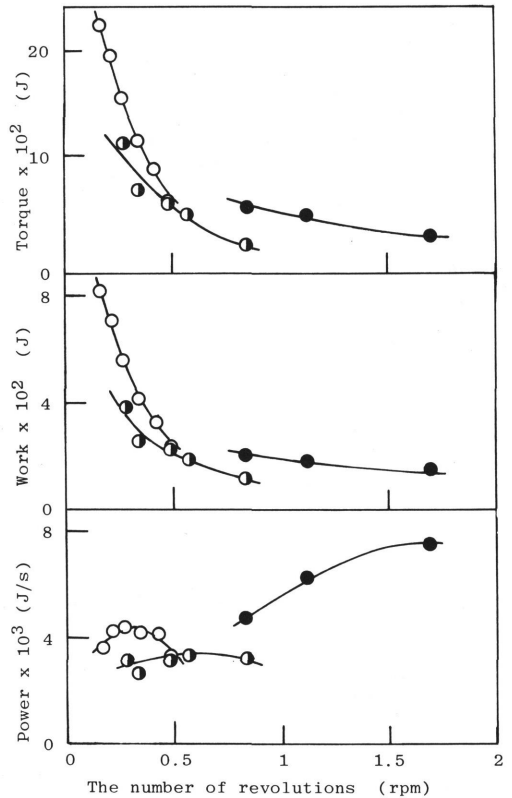


Fig.4 Relation of torque, work, and power with the number of revolutions on RHE-Ⅲ.

- $\lambda_{max} = 4.51$, ◐ $\lambda_{max} = 4.66$,
- $\lambda_{max} = 4.82$

Table 2 の温度差 ΔT は熱源のゴム近接部の空気温度と室温の差である。このようにわずかな温度差でも回転が可能であり、日向と日影の温度差でも作動が可能なのは特筆すべき点であると考える。

熱効率は無負荷時0.017~0.09, 負荷時0.018~0.013であった。また RHE-III の性能の向上をはかるため、外輪1個であった RHE-III にさらに外輪1個を並列に組み込んだ Fig.5 に示す二連の水平クランク固定・外輪回転型ゴムエンジン (RHE-IV) を作製した。このとき、クランクアームの方向は上下同一方向にしているの、加熱部分は上下のゴムスポークとも同一部分でよいが、クランクアームの方向を変化させた場合は上下のゴムスポークのゴム加熱部を変える必

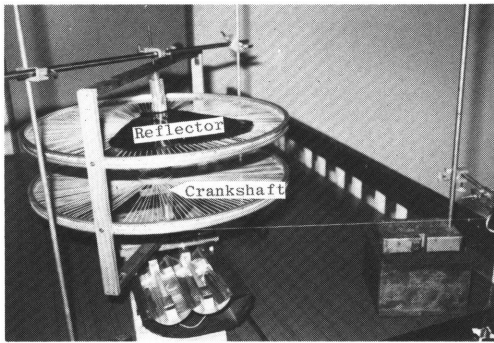


Fig.5 Twin type rubber heat engine (RHE-IV) which holds the cranks fixed and rotates the rims.

要がある。

ゴムスポークの本数の回転挙動への影響を測定条件：室温(20℃), 無風状態で $\lambda_{max} = 4.51$, $\lambda_{min} = 3.74$, 熱源; 下部ゴムスポークから18cm, 上部ゴムスポークから30cmの距離にある600 W ヒーターで求めた。Fig.6 に示すようにゴムスポークの本数の増加とともに回転挙動は滑らかになり回転数は増すが、本数が増加するとレベルオフしてくる傾向を示した。また

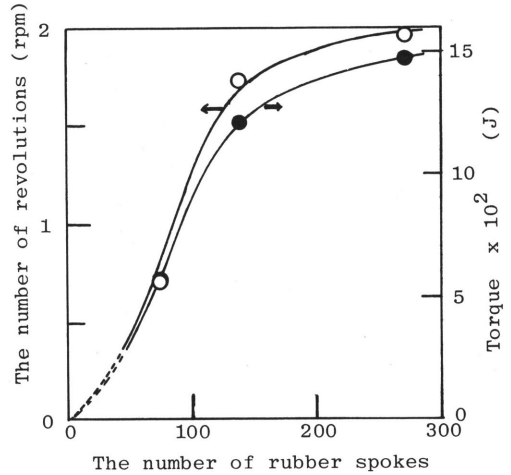


Fig.6 Relation of the number of revolutions and torque with the number of rubber spokes on RHE-IV.

- the number of revolutions,
- torque

Table 1 Effect of the distance from mainshaft to subshaft on revolution of RHE-III

| distance (mm) | λ_{max} | λ_{min} | number of revolutions (rpm) | $T_{max}^{a)}$ (N) | $\eta^{b)}$ |
|---------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|--------------------|-------------|
| 25 | 4.51 | 3.74 | 2.10 | 0.093 | 0.017 |
| 35 | 4.66 | 3.57 | 1.85 | 0.105 | 0.013 |
| 45 | 4.82 | 3.42 | 1.54 | 0.178 | 0.009 |
| 55 | 4.98 | 3.27 | 0.64 | — | — |

- a) T_{max} : Maximum torque
- b) η : Thermal efficiency

Table 2 Effect of heat source on the revolution of RHE-III*

| Heat Source | number of rubber strands | ΔT (°C) | number of revolutions (rpm) |
|-------------|--------------------------|-----------------|-----------------------------|
| 600W heater | 66 | 32.0 | 1.80 |
| vapor | 68 | 10.0 | 0.60 |
| sunlight | 70 | 3.4 | 0.09 |

* $\lambda_{max} = 4.51$, $\lambda_{min} = 3.74$

最大トルクも Fig.6 に示すように回転数の増加とともに増加した. これらの値を RHE-Ⅲ のゴムスポーク数70本の時0.101 J と比較すると, RHE-Ⅳの最大ト

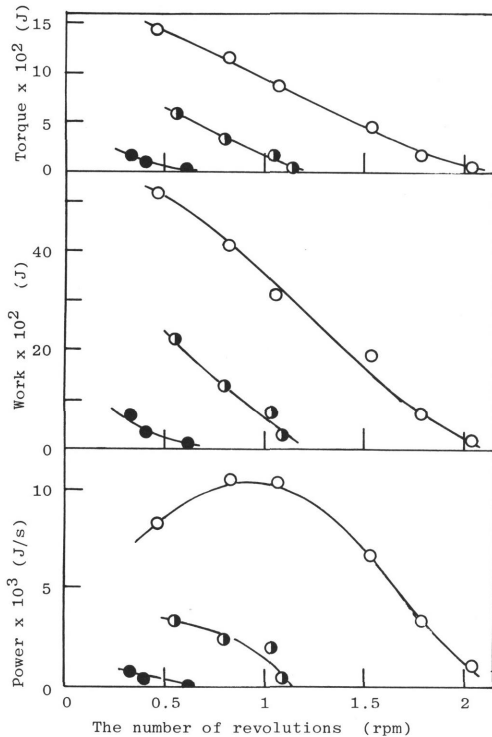


Fig.7 Relation of torque, work, and power with the number of revolutions on RHE-Ⅳ.

the number of rubber sporks :

○ 276, ◐ 140, ● 72

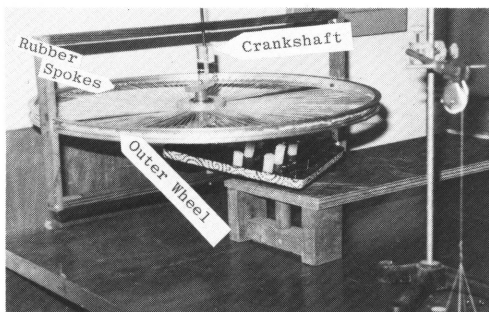


Fig.8 Rubber heat engine (RHE-Ⅵ) which holds the rim fixed and rotates the crank.

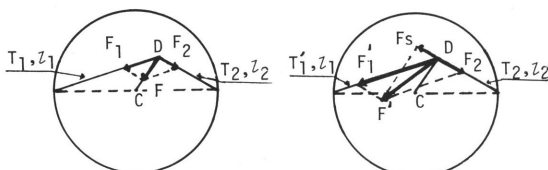


Fig.9 The scheme of working principle on RHE-Ⅵ.

ルクはゴムの総数の約2分の1のRHE-Ⅲの最大トルクとほぼ同じ値を示し, 最大トルクは可動輪1個当たりのゴムスポーク本数に依存した.

負荷を与えたときのRHE-Ⅳのトルク, 仕事量, 仕事率との回転数の関係を Fig.7 に示す. トルク, 仕事量とも, ゴムスポークの本数が多い程高い値を示し, RHE-Ⅲの場合と比較すると回転数への依存性が大きいことがわかる. また, ゴムの本数の増加とともに仕事率もトルク, 仕事量と同様に大きくなり, 極大を示すカーブを与え, そのピークは高回転数側に移動する傾向を示した. ゴムスポークの本数を増加すること, 多連化をはかることは性能の向上にはつながるが, クランクにかかる力が大きくなり, 軸の変形が生じるため, 組立部品の機械的な補強を行い, 回転運動を滑らかにする必要がある. またこれらのRHE-Ⅳの熱効率率は最小で無負荷時0.006~0.001, 負荷時0.060~0.018であった.

3. 2 水平外輪固定・クランク回転型ゴムエンジン

Fig.8 に水平外輪固定・クランク回転型ゴムエンジン (RHE-Ⅵ) の完成写真を示す. RHE-Ⅵは外輪を固定し, 主軸を中心にクランク軸 (副軸, クランクアーム) を回転させるエンジンである. このエンジンの作動原理を Fig.9 に示すような2本のゴムスポークのRHE-Ⅵについて考える²⁾. ゴム l_1, l_2 の温度 T_1, T_2 が等しいとき, 副軸には分力 F_1, F_2 が生じており, その合力 F は主軸の方向を向きクランク軸は回転しない. しかしゴム l_1 が加熱され $T_1 > T_2$ となると, 副軸にかかる分力 F_1 が大きくなり F_1' となる. 従って副軸にかかる分力 F_1' と F_2 の合力 F は主軸方向からずれ, 合力 F のクランクアームに対する垂直成分 F_s によりクランクは回転する.

このエンジンにおいては, ゴムスポークを張った外輪は固定されているので, 熱源は回転し順次ゴムスポークを加熱する必要がある. この熱源・加熱方法には種々考えられるが, 本実験では熱源のろうそくを立てる架台を下部の主軸に取り付けて主軸とともに回転させた. 偏心距離を25mm ($\lambda_{max} = 4.51, \lambda_{min} = 3.74$), ゴムスポークの数70本, 室温30℃, ゴムの下5cmから加熱した場合, RHE-Ⅵは約2.4 rpmで回転した. このとき, RHE-Ⅵの主軸 (半径1.5cm) にかかる最大の力, 及び最大トルクは各々0.715 N, 0.0107 Jであった. RHE-Ⅵの最大トルクはRHE-Ⅲの約10分の1であった. RHE-Ⅵでは力は大きい, 回転半径がRHE-Ⅲに比べて非常に小さいので, 回転半径と力との積である最大トルクは小さくなった

と考える。Fig.10 にトルク曲線，仕事量および仕事率と回転数との関係を示す。回転数の増加とともにトルク，仕事量，仕事率とも減少する傾向を示した。

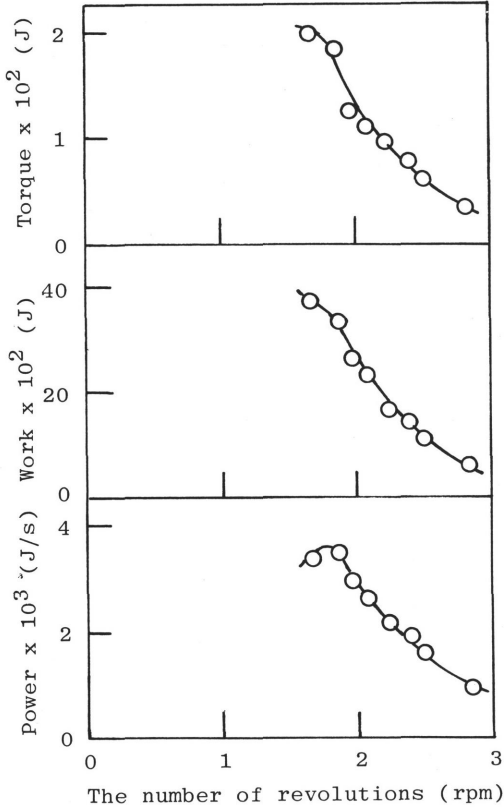


Fig.10 Relation of torque, work, and power with the number of revolutions on RHE - VI .

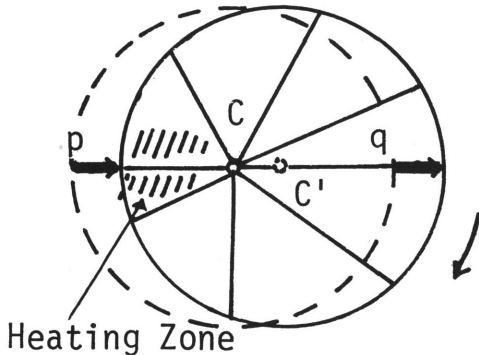


Fig.11 The scheme of working principle on rubber heat engine (RHE - I) which has a vertical wheel rotated by eccentricity.

3. 3 垂直回転車輪型ゴムエンジン

垂直回転車輪型ゴムエンジン (RHE-I) は Fig.11 に示すように中心軸 C を中心に偏心回転するゴムエンジンである。等温状態ではゴムスポーク pc, qc は同じ長さで釣り合っている。ここでゴムスポーク pc を加熱すると、pc は縮み、軸の位置が固定されているので可動輪が右へずれて重心が移動し、可動輪にトルクが生じる。

輪ゴム72本を使用し、600 W ヒーターで加熱すると無負荷時 7 rpm であった。またセグメンティドポリウレタン繊維 (スパンデックス) の方が輪ゴムを用いた場合より良く回転し、ゴムの伸張比 λ_{max} が 0.20 で 18.5 rpm, 0.28 で 24.50 rpm であった。これは、輪ゴムより細いセグメンティドポリウレタン繊維をゴムスポークに用いたため、表面積が広がり熱交換が改善されたことが主な原因であろう。セグメンティドポリウレタン繊維を用いた場合のトルク，仕事量と回転数の関係も既述した他のヒートエンジンと同様な結果を示した。

RHE-I を並列につないだ Fig.12 に示す二連式の垂直回転車輪型 (RHE-V) を作製した。この場合、可動輪の縦ぶれ横ぶれを調整しどの位置でも止まるように可動輪の相互のバランスを調整する必要があった。無負荷時 256 本 (128/輪) の回転数は 4.3 rpm であり、一個の RHE-I のゴム本数 144 本にしたときの回転数

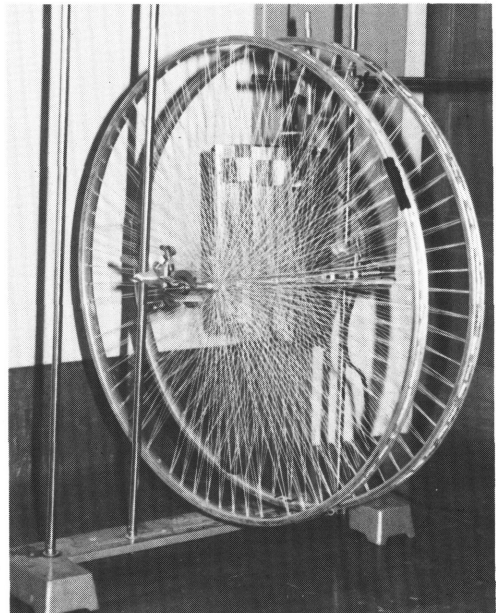


Fig.12 The twin type rubber heat engine (RHE - V) which has two vertical wheels rotated by eccentricity.

6.9 rpm より小さかった。

RHE-V の最大トルクは0.037 J であり、RHE-I の0.020 J に比して2倍の値を示した。負荷時のトルク、仕事量、仕事率の回転数依存性は既述した他のヒートエンジンのそれと同様にトルク、仕事量は回転数の増加とともに減少し、仕事率は極大を持つ傾向を示した。

4. 結 言

Wiegand の概念に基づいて、ゴムを作業物質とする4種のラバーヒートエンジンを試作し、その回転挙動、運動特性を調べた結果、ゴムが熱機関の作業物質になり得ること、及びそのエンジンの出力を簡単に取り出せることを確認した。また太陽熱の日向と日影のような低温度差でも装置を改良すれば十分に熱源となり得ることを確かめた。

低温度差で高性能なゴムエンジンを製作するには、ゴムの材料の選択、装置設計（構造と大きさ、ゴムスポークの本数、ゴムの伸張度、ゴムの熱交換の迅速性）

が重要であることがわかった。これらの点及び作業物質としてのゴムの耐久性について更に検討する事により実用性を持たせること、また新しい型式のゴムエンジンを開発する事が今後の課題である。

謝辞：スパンデックスを提供していただいた旭化成ロイカ工場ならびに佐谷満州夫工場長に感謝します。

参考文献

1. W.B.Wiegand, *Trans. Inst. Rubber Ind.*, **1**, 141 (1925).
2. R.J.Farris, *Rubber Chem. Tech.*, **52**, 159 (1979).
3. W.B.Wiegand and J.W.Snyder, *Trans. Inst. Rubber Ind.*, **10**, 234 (1934).
4. R.Hayward, *Scientific American*, **194**, 154 (1956).
5. NTN 総合カタログ 軸受編 (CAT. No. 1150 - III).