

厚生科学研究補助金（長寿科学総合研究所）

分担研究報告書

機構の設計と強度計算に関する研究

研究者 桑原 利彦 東京農工大学工学部助教授

研究要旨

摩擦力を利用して駆動力を得るアクチュエータである。このような駆動原理により、ステータとロータの接触面での摩擦状態は、モータの性能に大きな影響を及ぼす。そのためロータ材の検討は極めて重要である。超音波モータのロータ材の最適条件は熱膨張率が小さく、表面に適度な弾性を有し、さらに摩擦係数が高く対摩耗性にも優れているといった条件が挙げられる。そこで、一般に自動車のクラッチに使用されているペーパー摩擦材に着目した。このペーパー摩擦材は耐摩耗性に優れ、摩擦材に含有するフェノール樹脂の充填率や摩擦材の厚さ方向の分布より硬度変化できる特長を持つ。本研究ではこのペーパー摩擦材の特長を生かし、ペーパー摩擦材使用時と未使用時との時間経過によるトルク変動を測定し、変動を小さくすることを目指す。更にペーパー摩擦材の硬さを変化させることでトルクを高める条件について検討する。結果として本研究ではロータの表面にペーパー摩擦材を貼り付けることで時間経過によるトルクの変動を小さくすることと、ペーパー摩擦材に含有するフェノール樹脂の特長を生かし硬さを変化することでトルクを高めることができた。

A. 研究目的

進行波型超音波モータは、圧電素子の電歪現象を利用して微小振幅運動をおこし、弾性体である金属製のステータに進行波を発生させる。これによって発生するステータ表面上の波の先端での楕円運動にロータを接触させ、その摩擦力を利用して駆動力を得るアクチュエータである。このような駆動原理により、ステータとロータの接触面での摩擦状態は、モータの性能に大きな影響を及ぼす。そのためロータ材の検討は極めて重要である。超音波モータのロータ材の最適条件は熱膨張率が小さく、表面に適度な弾性を有し、さらに摩擦係数が高く対摩耗性にも優れているといった条件が挙げられる。本研究室ではこれまで超音波モータの出力トルクを増大させるために、ロータの硬度と弾性率のバランスを調整したり、ロータ表面に摩擦係数の大きい金属メッキを施すことによりトルクを倍増することができた。しかし、トルクを向上させるために、摩擦力を大きくすると、摩耗により摺動面の接触面積が不均一となり摩擦係数に変化してしまう。つまりトルクを一定に保つことが困難であり、ステータとロータ間に摩擦材を介することで摩耗を防ぐことが必要不可欠である。

そこで、一般に自動車のクラッチに使用されているペーパー摩擦材に着目した。このペーパー摩擦材は耐摩耗性に優れ、摩擦材に含有するフェノール樹脂の充填率や摩擦材の厚さ方向の分布より硬度変化できる特長を持つ。

本研究ではこのペーパー摩擦材の特長を生かし、ペーパー摩擦材使用時

と未使用時との時間経過によるトルク変動を測定し,変動を小さくすることを旨とする.更にペーパー摩擦材の硬さを変化させることでトルクを高める条件について検討する.

B. 研究方法

2 摩擦材

現在までにステータの表面に発生する振動エネルギーを有効にロータに伝える方法としてロータとステータの間に薄いリングを（摩擦材）を介在させるのがよいとされてる。そこで、本研究室では市販されている CFRP でできたシートをリング状に切り取りロータ表面に貼り付けることで、接触面積を限定し、高トルクを目指した。しかし、実用化に至るまでのトルクの向上は得られなかった、そこで、摩擦材の材質がトルクに及ぼす影響とトルクの安定を目指したため、自動車のクラッチに使用されているペーパー摩擦材に着目し、超音波モータの摩擦材として使用することを考えた。しかも、一般にクラッチ用のペーパー摩擦材は湿式使用であるため寿命を長くすることが可能と考えられる。

2.1 CFRP(カーボン繊維強化プラスチック)

プリプレグ材という強化繊維の織物にあらかじめ規定量の樹脂（一般的にはエポキシ）を材料メーカーで含浸させたものを使用する。そしてこれを成形する製法をプリプレグ製法といい、プリプレグ製法では、触るとペタペタするような半生の状態で冷凍保存されているプリプレグをカットし、完成品形状の型に押しつけた状態（この作業をレイアップという）で真空のバックに入れ、炉で焼きかため、CFRP 部品を完成させる。軽量化（ステンレスの約 1/4）と耐久性（アルミの比強度 7 倍以上）を兼ね備えたリアルカーボンである。

2.2 ペーパー摩擦材

ペーパー摩擦材は繊維や粘性を変化させる充填材、摩擦係数を変化させる摩擦調整剤などをレジンでペーパー状に固めたものである。多孔性と柔軟性を持つことが特徴であり、生成されたペーパー自体は多孔質なため非常に脆いので、この孔に熱硬化性のあるフェノール樹脂を充填して硬度を高めることによりはじめて摩擦材として機能する。フェノール樹脂は、基本的に熱の影響を受けにくい。そのため焼きつきや熱による変形の心配はない。しかもこのフェノール樹脂の充填率を分布させることで、表面は硬く、内部は柔らかいといったような摩擦材を生成することもできる。

このペーパー摩擦材は乾式で使用した場合、すぐに摩耗してしまい寿命が短い。よって、使用する場合は油中で湿式使用しなければならない。また、ATF（自動変速機油）による潤滑下で使用されているにもかかわらず、広い速度範囲で 0.1~0.2 の高い摩擦係数、いわゆる境界摩擦のオーダを示すことから、そのしゅう動面に境界摩擦成分と流体摩擦成分とが同時に存在することが一般的に考えられている。図 2.1 にペーパー摩擦材の写真を示す。

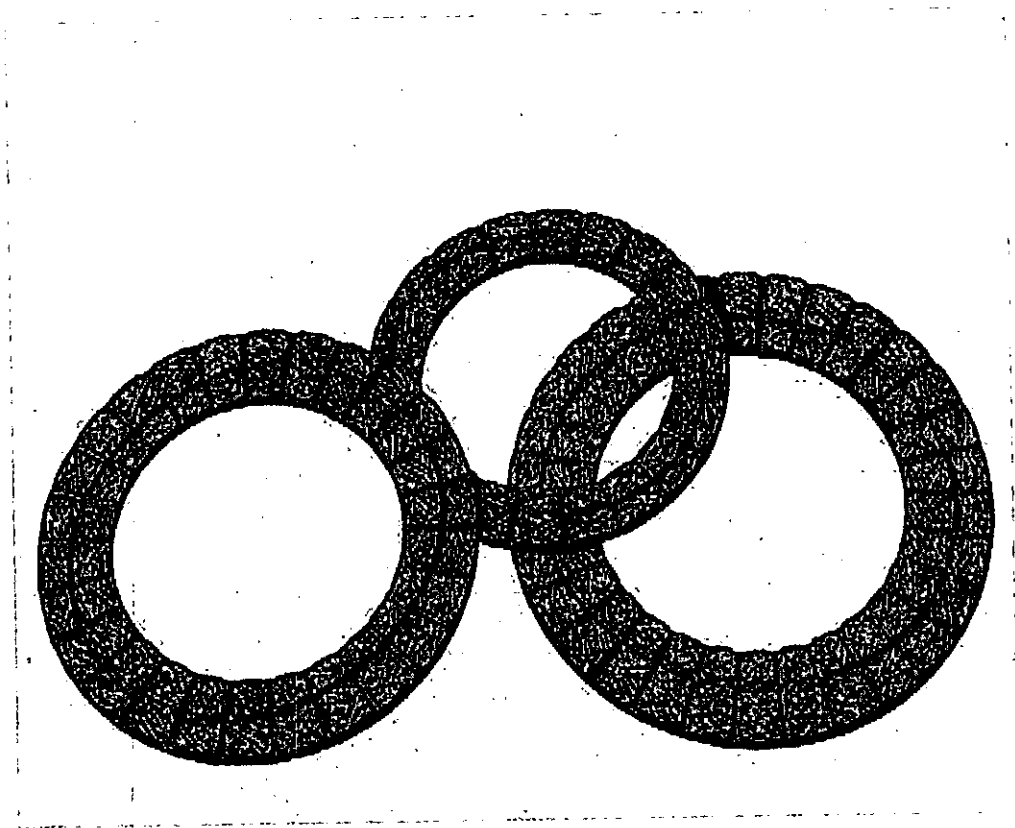


図 2.1 ペーパー摩擦材

3 実験装置

3.1.1 ステータ

ステータの材質は SUS420J で、設計図を図 3.1 に示す。ステータの裏に貼り付ける圧電素子を図 3.2 に示す。圧電素子は PZT (ジルコン酸チタン鉛 $\text{Pb}(\text{Zn-ti})\text{O}_3$) を使用し、図 3.2 に示すように、隣り合う部分の分極方向が逆になるようにポーリングが施してある。圧電体表面には電極として、片面にはポーリング区分と同じ区分けで、もう一方の片面には相ごとに銀を蒸着してある。配線は、電極面に半田付けにより行う。圧電素子はステータの櫛歯の裏にある部分に、エポキシ系の接着剤を塗り高温で接着剤を硬化させ、加圧することで接着している。ステータの表、裏の写真を図 3.3 に示す。

3.1.2 ロータ

ロータはポリエーテルエーテルケトンにガラス繊維 30% 充填した PEEK/CF30, AL (YH75), 炭素鋼 (S45C) の 3 種類を用いる。PEEK/CF30 は今までに本研究室で高トルクを示したロータであり、AL は軽量かつ熱伝導性に優れている点で選択した。炭素鋼はペーパー摩擦材をロータに貼り付ける際にロータが磁性体である必要があるため汎用性のある炭素鋼を選択した。PEEK/CF30, YH75, S45C のロータ設計図を図 3.4 に示し、各々のロータ写真を図 3.5 に示す。

3.1.3 摩擦材

摩擦材としてカーボンシート (CFRP) とペーパー摩擦材 (10 種類) を使用する。接着後の写真を図 3.7 に示す。この 10 種類のペーパー摩擦材

の特性を表 3.1 に、その説明を下記の①～⑤に示す。また、ロータの厚さの測定位置、ペーパー摩擦材の樹脂分布をそれぞれ図 3.8, 図 3.9 に示す。

尚、図 3.7 の CFRP の波模様は綾織によるものである。

表 3.1 各ペーパー摩擦材の性質

No.	含有率	樹脂分布	表面研磨	ロータ厚さ [mm]	総厚さ [mm]	摩擦材厚さ [mm]
5	中	A	無	3.017	3.328	0.311
3	中	A	有	3.002	3.283	0.281
9	中	B	無	3.022	3.327	0.305
4	中	B	有	3.002	3.277	0.275
2	高	A	無	3.023	3.347	0.324
7	高	A	有	3.008	3.277	0.269
8	高	B	無	3.030	3.342	0.312
10	高	B	有	3.013	3.286	0.273
1	中	B	無	3.036	3.296	0.260
6	中	B	有	3.047	3.286	0.239

- ①樹脂量により硬さを変えたもの(含浸率 中高).
- ②樹脂分布により厚さ方向の硬さを変えたもの, 図 3.9.
- ③表面研削の有無による平滑性を変えたもの, 図 3.10.
- ④圧縮により摩擦材厚さを変えたもの, (No.1,6).
- ⑤ロータの厚さは図 3.8 の 4 点の平均値.

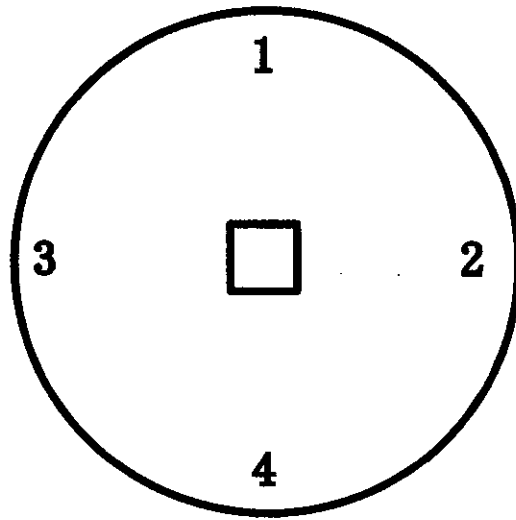


図 3.8 ロータの厚さの測定位置

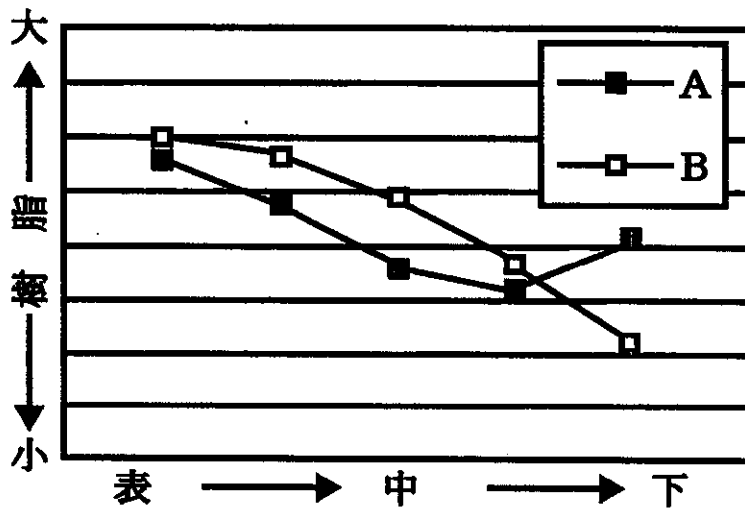


図 3.9 ペーパー摩擦材の樹脂分布

3.1.4 電力系

ステータに印可する電圧は、波形発生装置から出力される 2 つの波形を、それぞれアンプにより増幅させて得られる。波形発生器は、ファンクションモードで周波数が最高 12.8MHz の任意の波形を出力できる。図 3.11 に実験装置システム概略図を示す。以下に各機材の仕様を示す。

表 3.2 波形発生器の仕様

任意波形発生器	製造元	東亜電波工業
	形式	FS-2222
	チャンネル数	2CH
	周波数範囲	0.01[Hz]~3.2[MHz] (sin波)
	出力電圧	~10[Vpp]
	位相オフセット	±360[deg] (0.1[deg]分解能)

表 3.3 アンプの仕様

アンプ	製造元	エヌエフ回路設計ブロック
	名称	高速電力増幅器
	形式	4020
	許容入力電圧	±10[V]
	最大出力電圧	300[Vpp]
	周波数範囲	DC~500[KHz]
	利得	×20, ×40, ×100, ×200

表 3.4 温度測定器の仕様

放射温度ハイテスタ	製造元	日置電機
	形式	3444・3445 放射温度ハイテスタ (ラボタイプ)
	検出素子 /光学レンズ	サーモパイル/シリコン
	測定波長	8~16 μ m
	測定温度範囲	-50.0℃~500.0℃
	放射率補正	0.10~1.00

3.1.5 押し付け圧調節機構

押し付け力の調節はねじによってスライダを動かすことにより,皿バネ,ベアリング,押し付け台を介すことによりロータをステータに押し付ける方法である.押し付け力の測定は,小型荷重変換器(ロードセル)で測定し,センサ インターフェース ボードによりコンピュータに取り込む.表 3.5 に押し付け圧調節機器を示す.

表 3.5 押し付け圧調節機器

小型荷重変換機 (ロードセル)	製造元	共和電業
	形式	LM-100KA
	定格負荷	100kgf
	定格出力	0.892mV/V
センサ インターフェース ボード	製造元	共和電業
	形式	PCD-100A

3.1.6 トルク測定装置

本実験では、バネばかりを用いて中心からある距離の力を測定し、その距離と力を掛けてトルクを求める。図 3.12, 図 3.13 にトルク測定装置の概略図, トルク測定装置を示す。

4 実験方法

4.1 起動トルクの測定

4.1.1 実験試料

摩擦材なしと摩擦材として CFRP を使用する場合はロータに炭素鋼 (S45), AL, PEEK/CF30 の 3 種類を使用し、摩擦材としてペーパー摩擦材を使用する場合にはロータに炭素鋼 (S45C) を使用する。

4.1.2 入力するパラメータ

進行波を励起してモータを駆動するために調節可能なパラメータは押し付け力, 印加電圧, 周波数と 3 つある。本研究では高トルクを目指すことを目的としているため, フィードバック電圧が最も高くなる共振点近郊に合わせ実験を行う。それぞれの印加電圧 100[V], 120[V], 140[V], 160[V], 180[V] ごとに押し付け力をモータが静止するまで増加していき, その時のトルク [kgf・cm] を測定する。

4.1.3 温度

高トルク時の温度状態を確認するために, 各電圧で, 最も高いトル

クを示した時のステータとロータの接触面温度を測定する。

4.1.4 ペーパー摩擦材の浸漬

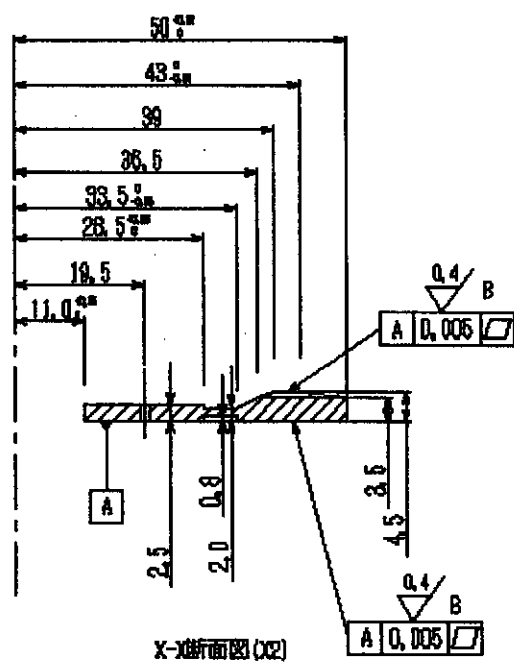
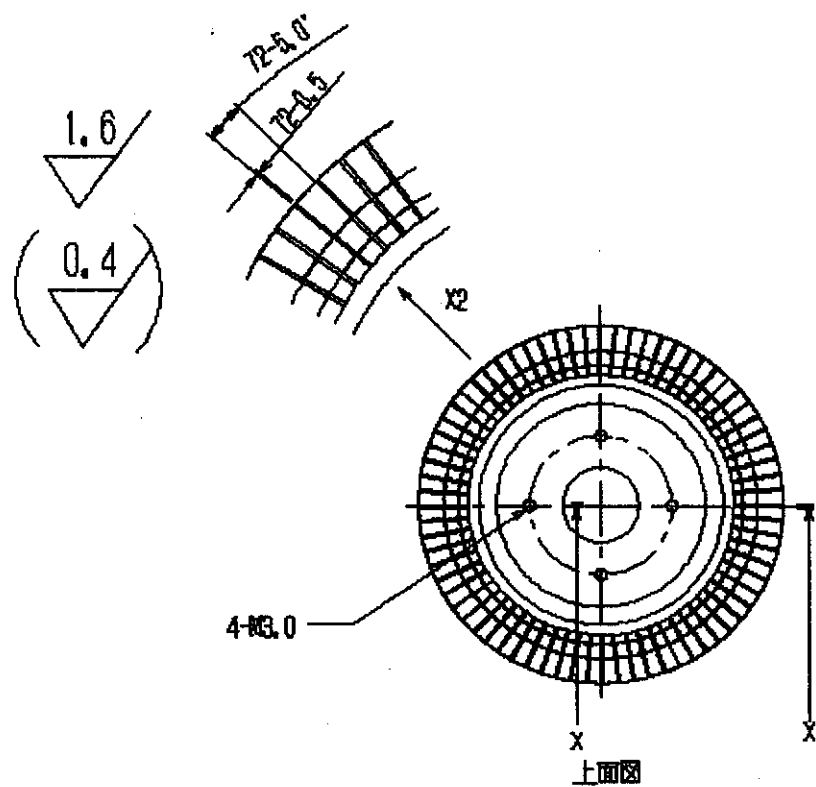
ペーパー摩擦材は繊維でできており乾式で使用するとすぐに摩耗してしまう。そのため湿式での使用を必要とする。しかし超音波モータを潤滑油中で使用すると漏電するので大変危険である。そのため下記の条件で実験することにする。

- ① 摩擦材を 12 時間程度潤滑油中に浸す。
- ② 摩擦材を潤滑油から取り出して表面の潤滑油を拭き取る。

この状態で、摩擦材内部に潤滑油を含み、外には漏れてこない状態にする。

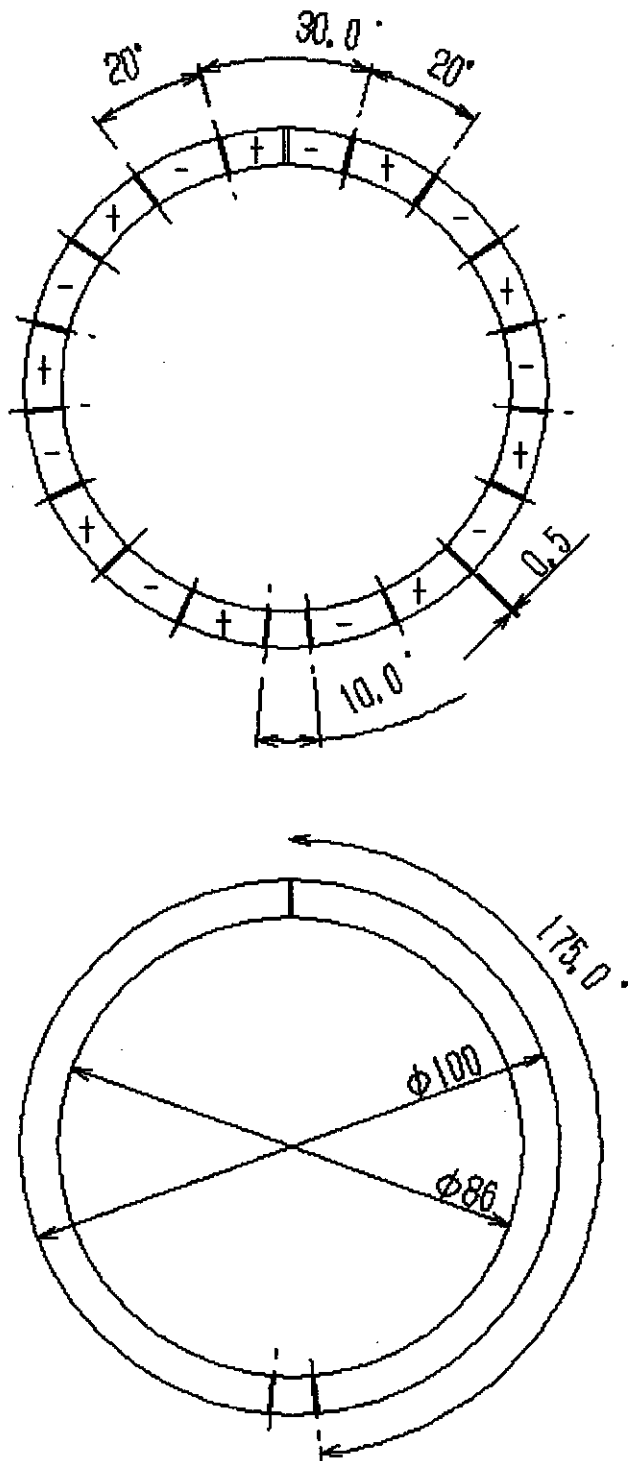
4.2 最大静止摩擦係数の測定

図 4.1 にトルク測定装置の概略図を示す。起動トルクの測定と同じ条件で印加電圧 0 の場合で押し付け力を変化させて保持トルクを測定する。押し付け力で割る事によって各ロータ（摩擦材付き）ごとに最大静止摩擦係数を求める。



- 注1) B面ニ ハリ・切削痕ノナキコト
- 注2) 指示無キ直角コーナハ イト面取りノコト

図 4.1 ステータ設計図



注：厚さ0.3[mm]

図 4.2 圧電素子の設計図

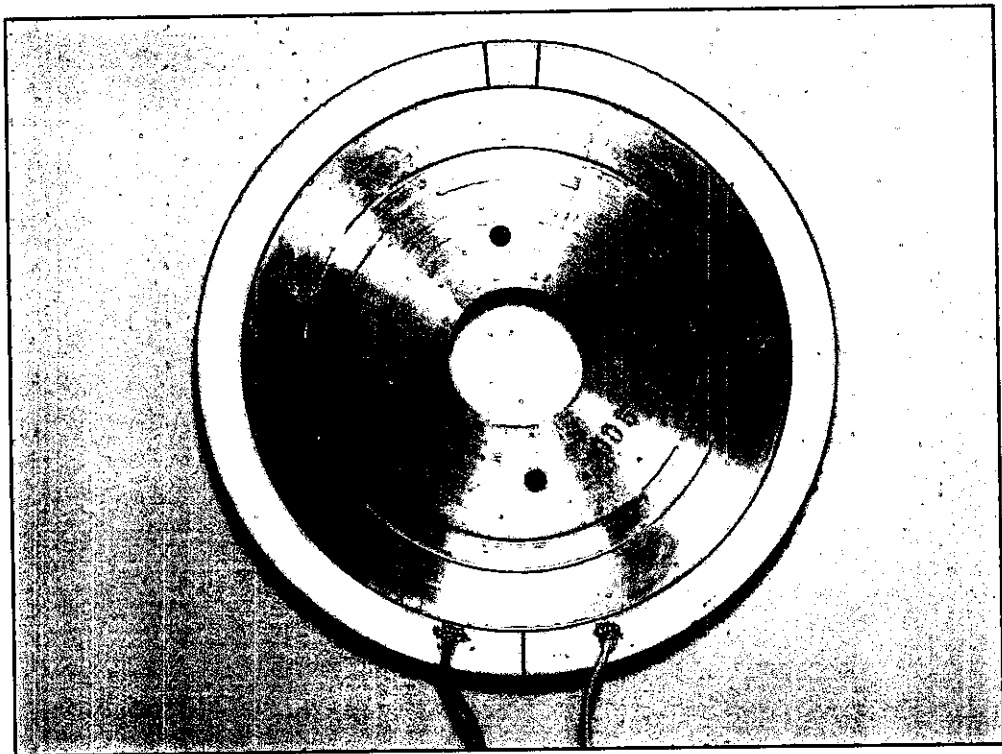
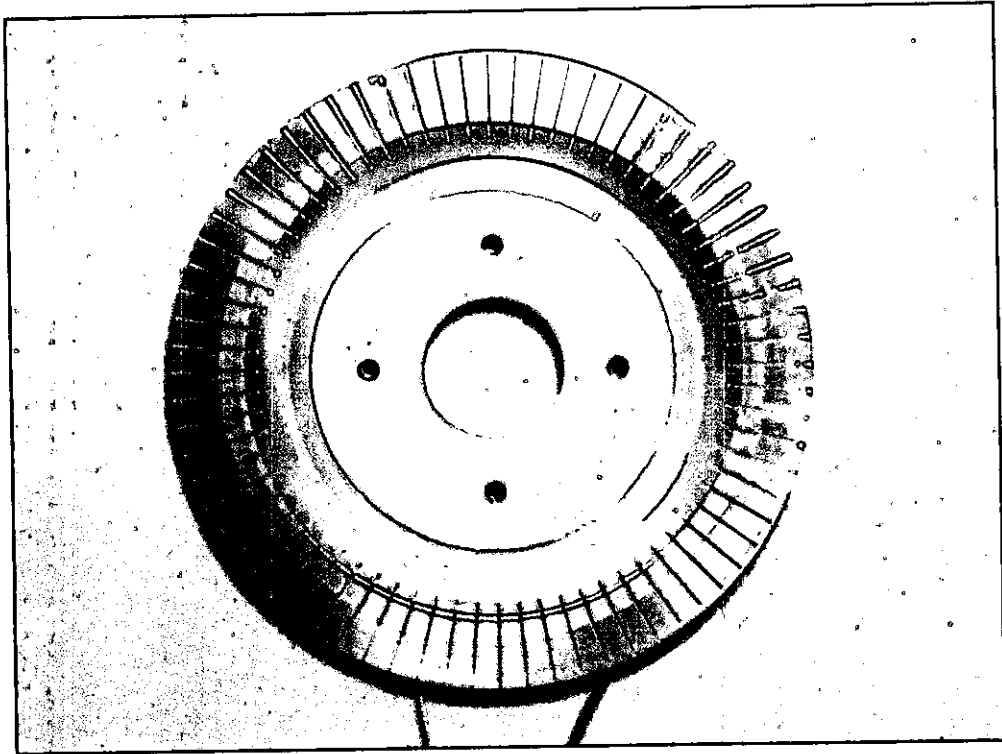


図 4.3 スタータの表（上図），裏（下図）

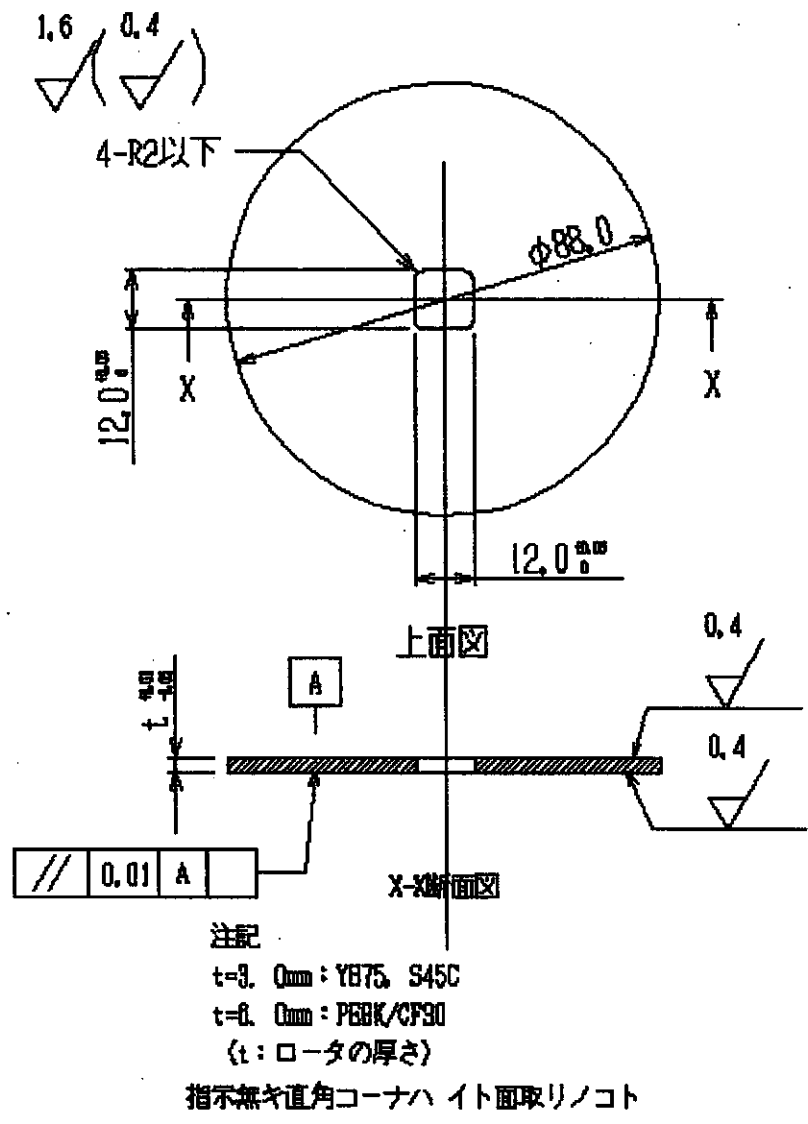


図 4.4 ロータの設計図

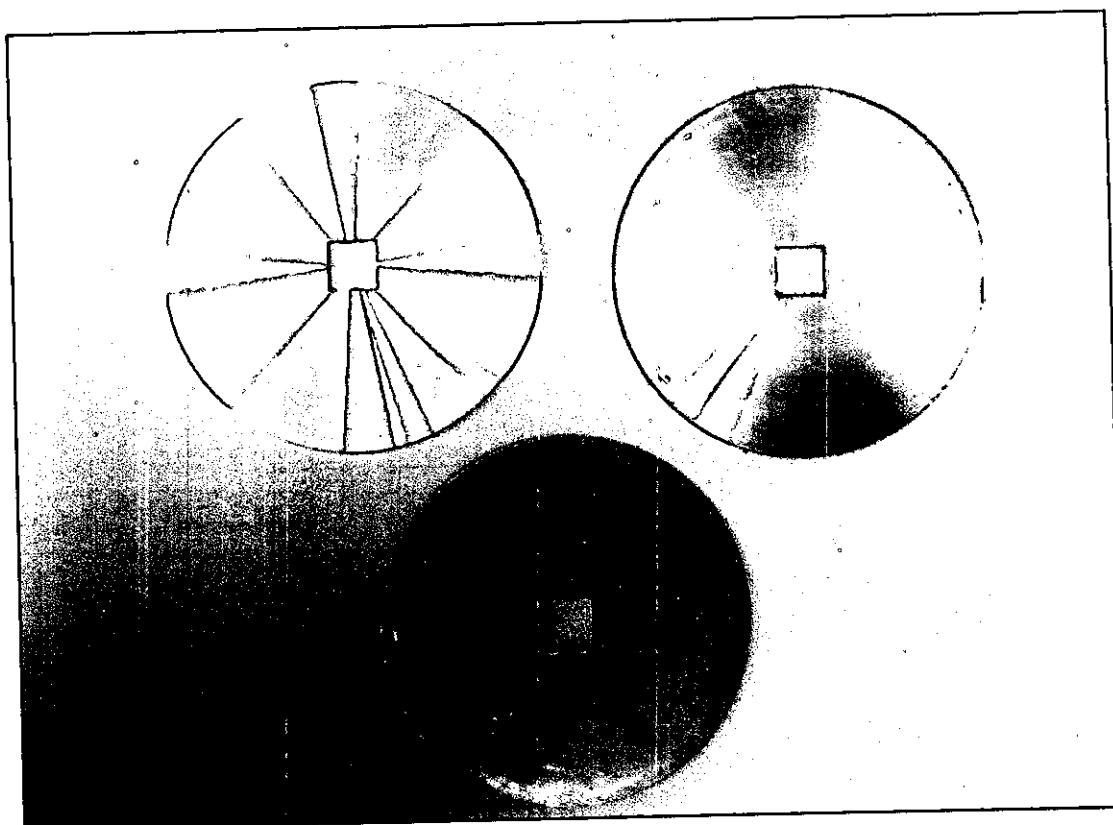
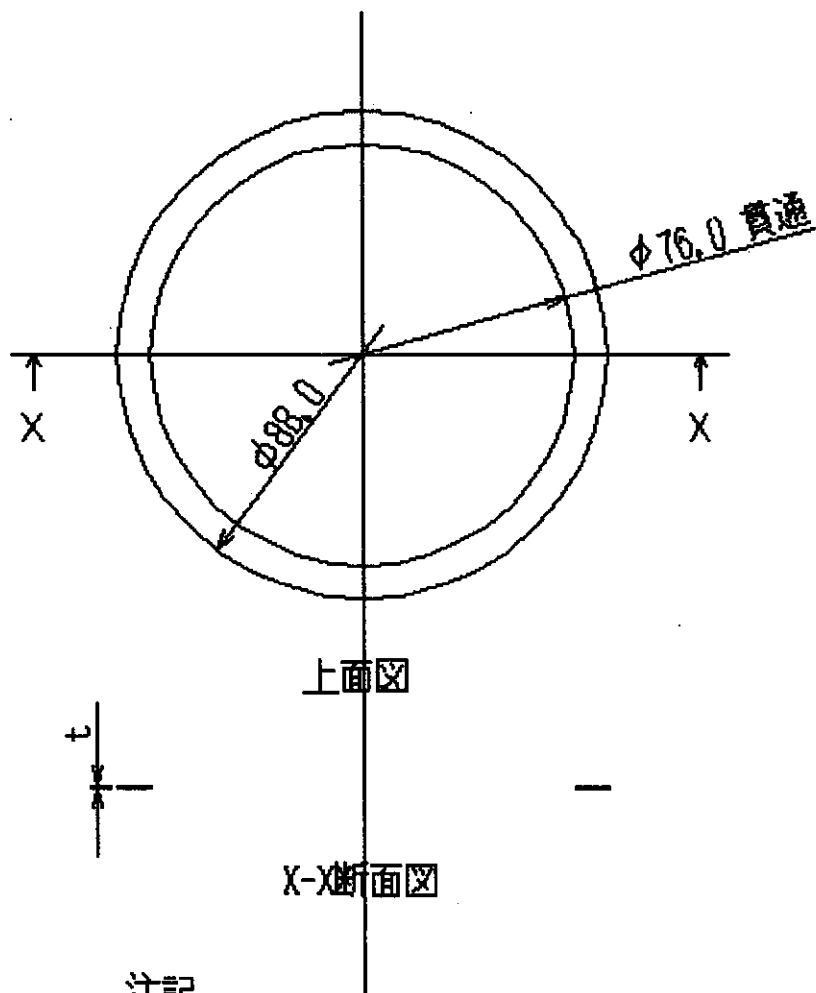


図 4.5 ロータの写真,
AL(左上), PEEK/CF30(中央), S45C(右上)



注記

$t = 0.2\text{mm}$: カーボン

$t = 0.3\text{mm}$: ペーパー摩擦材

(t : 摩擦材ノ厚サ)

図 4.6 摩擦材の設計図

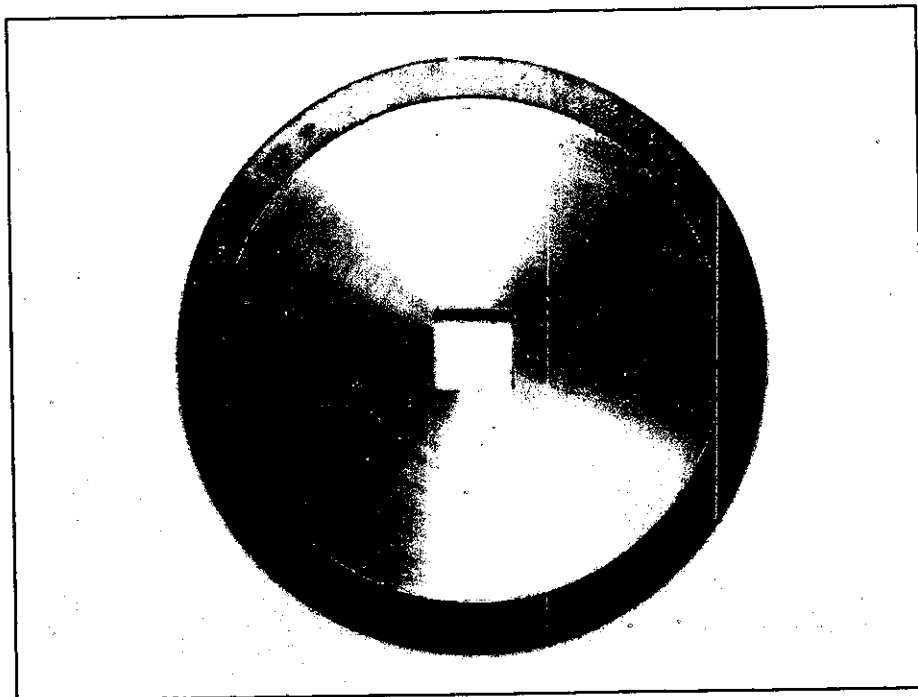
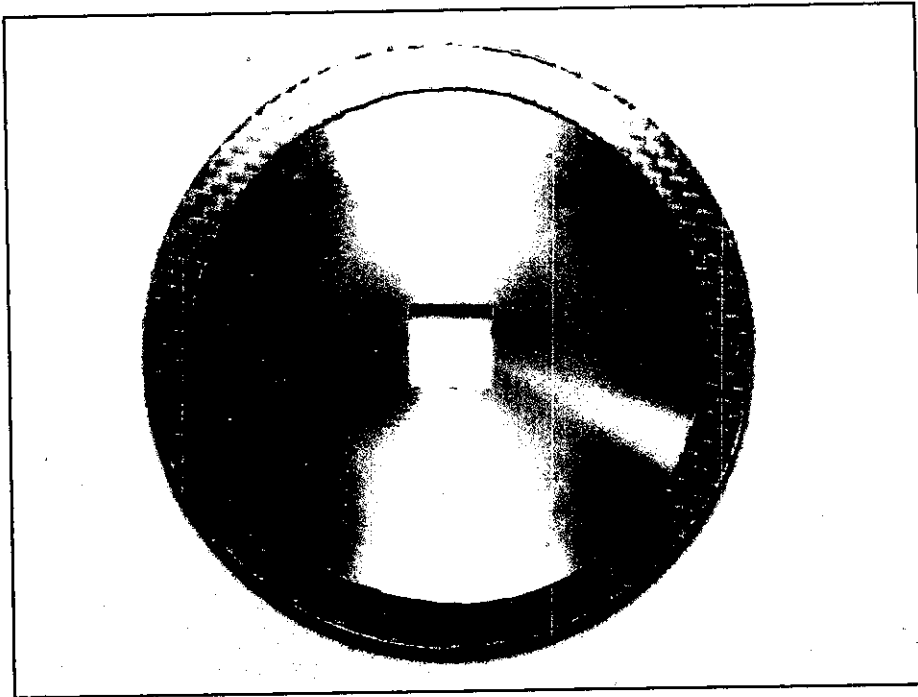


図 4.7 CFRP（上図），ペーパー摩擦材（下図）を接着後