AUG. 1980

RIIS-RR-28-6

UDC 621.924

産業安全研究所研究報告

RESEARCH REPORT OF
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

RR-28-6

電気粘性流体制御形多関節人工指のバイラテラル制御

——制御要素としてのウインズロクラッチの動特性——

杉本　旭
近藤太二
深谷　潔

労働省産業安全研究所
MINISTRY OF LABOUR
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

電気粘性流体制御形多関節人工指のバイラテラル制御

——制御要素としてのウインズロクラッチの動特性——

機械研究部　杉　本　　旭
近　藤　太　二
深　谷　　潔

Bilateral control of Artificial Fingers system drived by the electroviscous fluid

—Dynamic properties of Electro-Viscous-Fluid clutch (the Winslow clutch) as on element of the control—

Noboru SUGIMOTO*
Taiji KONDO*
Kiyoshi FUKAYA*

In order to control functionally so many degrees of freedom of the Artificial multi-fingers system, Electro-Viscous-Fluids Clutches were developed and used in our study, which are different from any existing control method.

The general properties of the clutch were measured and investigated from the points of view of induced torque, response time of the torgue and stanility through the cylindrical type of the clutch.

As the result, the clutch were controlable with as wide the range as 0～8.7 kg·cm and with satisfactory rapidity of response. As for the stability of the clutch, though some kinds of electrodes such as S 45 C, brass, A 2017 (aruminium), Copper gilted, through analysis, were ionized and soluted into the medium and then make the stability of the clutch worse, in case of plutinum gilded electrode, which has small ionization tendency, the stability of the clutch has been improved extremely.

The Winslow clutches, though could be said to be superior to other type of clutching with respeet to rapid response and stability, have as simple a structure as cylinder disc, which makes driving element of the hardware system smaller and then capable of giving the system more degrees of freedom. Besides, in this study, the control system of induced force using the Winslow clutches of the cyclindical type were developed and investigated. As the result, it was comfirmed that the force was controlable with satisfactory response and small error.

* Mechanical Engineering Reseach Division

1. 緒　論

前報[1]で論じたように，危険・有害作業の安全化の手段として，マニピュレータに期待することが大である。

マニュピレータを操作する場合，その操作方式は，**Fig. 1** に示すように，オープンループ方式，サーボ方式（ユニラテラルサーボ方式），感覚方式（バイラテラルサーボ方式），状況遠応方式の4つに大別される。

これらのうち感覚方式（バイラテラルサーボ式）は，オープン方式またはサーボ方式に力の感覚を操作者にフィードバックする機構を付加したものである。この方式によれば，操作者は視覚のほかに力感覚によっても作業の状況を感知することができ，サーボ方式によりさらに多自由度系の並列操作が可能となる。装着用や遠隔離作業用マニピュレータにはこの方式が適している。

感覚方式マニピュレータに更により有効な作業性を確保するには，多自由度の人工指が必要となる。またそれは，人間による操作性を考慮し，出来るだけ人間の手指に近い形状であることが望ましい。また，感覚方式を達成するためには，各関節角の制御だけでなく，にぎりの圧力が制御できなければならない。

そのため，本研究では，従来の制御方式でなく，より小型でかつ力の制御も容易に行ないうる電気粘性流体駆動方式を採用している。ここで報告するのは，この方式を利用して，外部電界により出力のトルクや力を制御できるウインズロクラッチに関するものである。

2. ウインズロクラッチ

ウインズロ効果とは，ある種の粉体と液体からなる懸濁液の粘度が外部電界によって著しく増大する現象である。またこの効果を生ずる懸濁液を一般に電気粘性流体と呼ぶ。ウインズロクラッチは，このウインズロ効果を利用して，電気信号により制御しうるトルクを取り出すクラッチであり，基本的には多重円筒型と多重円板形に分けることが出来る。

多重円筒型ウインズロクラッチでは，電気粘性流体に一様のずり速度が得られるため，特性の解析が比較的容易であり，クラッチとしての一般的評価としてはこれを用いた。

2.1 多重円筒型ウインズロクラッチの特性

本研究ではウインズロクラッチの一般的特性を明らかにし，また，すでに開発されている他の方式によるクラッチと比較できるようにするため **Fig. 2** に示す多重円筒型ウインズロクラッチを試作した。これはモータとプーリ結合されて外部より回転駆動される1次側の2重電極円筒と，それに1 mm の間隙を介して同軸上で回転自在の2次側電極円筒とその出力軸とからなり，両電極円筒間に電気粘性流体が満たされる構造となっている。

（a） トルク特性

Fig. 3 は，それぞれ外部電圧に対して，トルクと

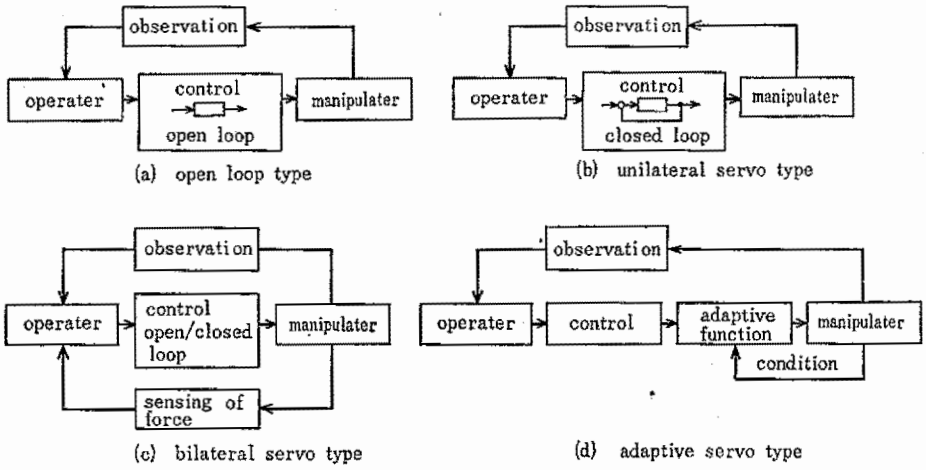
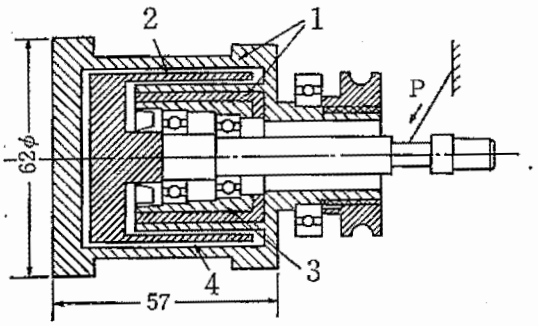


Fig. 1 Classification of types of Manipulater.



1 : electrode (Input), 2 : electrode (Output)
3 : isolating material, 4 : electro-viscous fluid

Fig. 2 Winslow clutch of multi-cylindrical type.
多重円筒型ウインズロクラッチ

回転数の影響を示したものである。ただし，ここで用いている電気粘性流体の分散相としては強酸性陽イオン交換樹脂 SA 10 AS，及び分散媒としてはトリメックス T 08（分散相濃度 15%）である。

これによると，回転数の増加に従って，トルクは増加する傾向にある。また，高電圧になるに従ってその傾向が大きくなっているが，いずれの電圧の場合でも回転数を大きくするに従って定トルク特性に落ちつくようである。回転数によるトルク変化率を，同じアナログ制御用の他の方式であるパウダクラッチやヒステリシスクラッチと比較した場合，ウインズロクラッチではその値が大きく，アナログ制御クラッチとしては，この点ではむしろ劣っていると言える。

また，空転トルクについても，相対回転数 230 rpm 時に，無電界トルクは 0.3 kg·cm であり，これは 4200 V のトルク 1.7 kg·cm に対し約 16%，また，6000 V でも約 9% となっている。一般にマイクロパウダークラッチが定格の 3% 以下と言われており，この点でも改良の余地を残している。

本クラッチによって，制御しうるトルクは回転数 270 rpm では 0.3～3.3 kg·cm の範囲で可能となっているが，**Fig. 4** に示すように，用いる電気粘性流体の重量比を増加させることによって最大 8 kg·cm のトルクを得ることは可能である。しかし重量比を増すことによって空転トルクも増加するため，この場合は空転トルクを下げるため温度を上げるとか，バランストルクを外部よりかけるいった方策を検討する必要があろう。

（b） 応　答　性

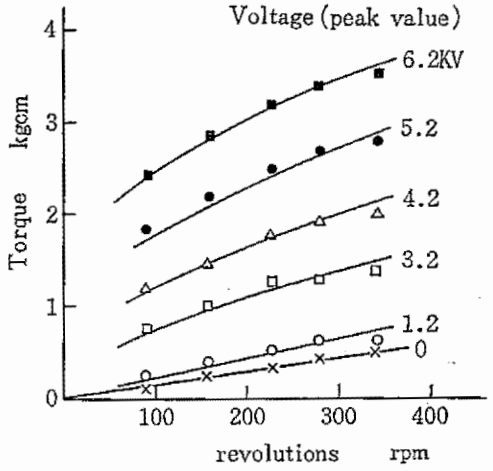


Fig. 3 Effect of revolutions and volage on torque
多重円筒型ウインズロクラッチの回転数-トルク特性

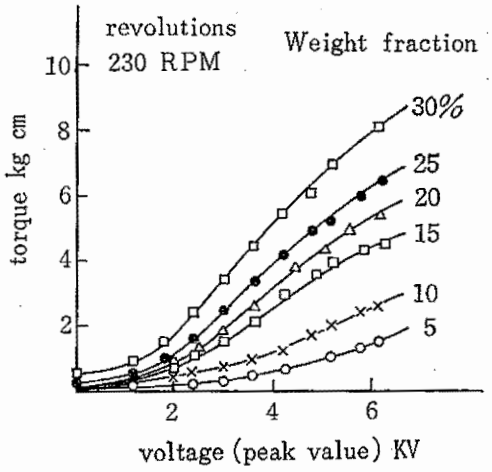


Fig. 4 Effect of weight fraction on torque
多重円筒型ウインズロクラッチの重量比トルク特性

ウインズロクラッチの応答性については，入力側に一定回転を与えておき，両電極間にステップ状電圧を印加したときのトルクの立上りを記録して分析するといった方法をとった。トルクは，トルクメータによって測定するため，ほとんど変位を要しないので，ウインズロクラッチの出力側の慣性モーメントの影響を無視することが可能である。したがって，この応答性とは，いわゆるウインズロ効果自体の応答性であると解される。

ウインズロ効果の応答性については，電気粘性流体の分散相粒径，濃度，含水および，電圧，電極間ギャ

Table 1 Step response (time constant ms)
ステップ応答による時定数

Voltage (v)	Material (Reference) Weight fraction 42%	Material with higher humidity	Material with higher Weight fraction 58%	Material with smaller particle 80 μ
2700	6.4 ms	4.4 ms	7.6 ms	5.2 ms
3300	5.3	4.3	6.1	5.0
4000	5.0	5.0	5.1	4.0

ップ等の因子が考えられそれぞれのパラメータについての測定を行なった。その結果を **Table 1** に示す。ここで言うトルクの立ち上がり時間というのは，ステップ状電圧を印加して，トルクが定常値の 63% に達するまでの時間であり，ウインズロ効果がほぼ一次遅れ系と近似できるため，これはその時定数に一致するものである。

測定結果によると，それほど大きな影響を与える因子はないと言えるが，電圧が高い程，含水率が高い程濃度が低い程，粒径が小さい程，ウインズロ効果の応答性は若干改良されるように見える。いずれにせよ，この現象は 4～8 ms の時定数を持っており，これまで期待されていた 1 ms のオーダを得るにはさらに一層検討を要す。

（c） 耐 久 性

ウインズロクラッチの耐久性はほとんどそれに含まれる電気粘性流体の耐久性を意味している。**Fig. 5** は電気粘性流体として SA 10 AS（対立イオン Na^+）-トリメックス T-08 系を用い，クラッチの材質を鋼鉄（S 45 C）とした場合の耐久試験結果の一例である。これに示されるように，耐久性はトルクよりむしろ電流の安全限界で示される。他の金属材質（Al, 真ちゅう，クロムメッキ）の場合にも共通して見られるパターンであるが，時間とともにほんのわずかずつ電流が増加してゆき，そしてある温度に過すると急激に電流が増加して電源の能力を越えて実験を停止するといった現象である。この現象は，電気粘性流体の分散相に含まれる水分が多い程顕著であり，こういった液体では電気粘性流体の比抵抗劣化の現象が徐々に進行するためその特性の再現性は極めて悪い。

ウインズロ効果は温度に大きく影響される。**Fig. 6** はウインズロクラッチを強制空冷・加熱を加なうことによって得た効果の温度特性であり，ここでは電極核として鋼鉄（S 45 C）を用いている。温度を上げると，トルクも電流も増加するが，電流が受ける影響の方が著しいことがわかる。

この現象は次のように説明できる。ウインズロ効果のメカニズムで論じたように[2)3)]温度上昇にともない，

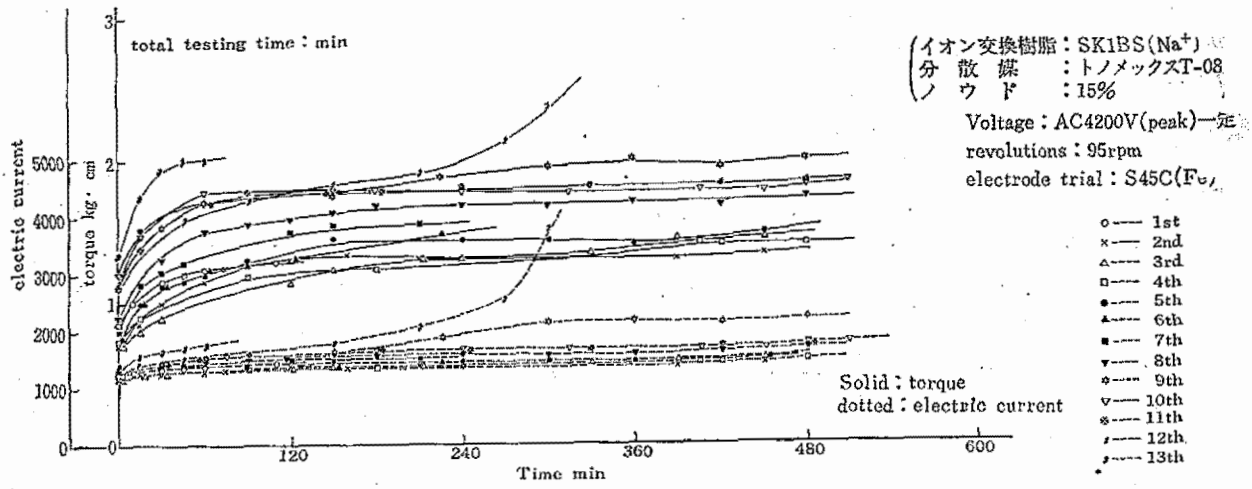
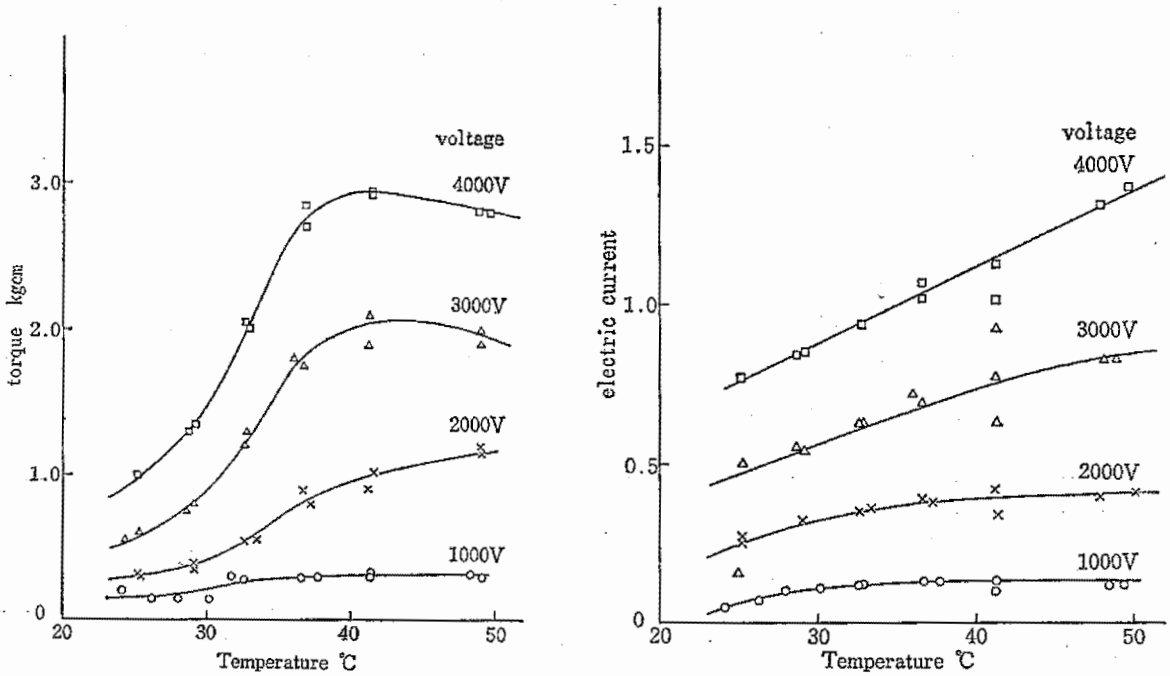


Fig. 5 Electric Stability of the winslow clutch (electiode S 45 C)
多重円筒型ウインズロクラッチの耐久試験（電極板 S 45 C）



(a) torque　　(b) electric current

Fig. 6 Effects of Temperature on the clutch
多重円筒型ウインズロクラッチの温度特性
(電極板 S 45 C)

分散相粒子をとりまくイオン解離基は解離しやすくなり，高濃度の対立イオン雰囲気をつくりだす。このことは，クラッチのトルクを増加させることに役立つがさらに温度を上げるとこの対立イオンは分散相表面の拘束を離れて自由イオン化し，液体の比抵抗を低下させる現象を生む，また，このようにして電流が増加すると発生する熱量も増加し，さらに自ら温度を上げて自由イオンを増大させ比抵抗を低下させるといった悪循環を繰り返えす。しかし，放熱をよくしたり，強制冷却すると，この発散系を落ち着かせることができる。そのため，この現象は液体の劣化というよりむしろクラッチの温度特性と理解すべきである。これにより，ある温度以上に達すると，比較的急激に不安定を開始することは説明できるが，液体の性状が徐々に変化してゆく，こいわゆる液体の劣化については次の3つの観点に着目して検討した。それらは，(イ) 分散相の劣化，(ロ) 分散媒の劣化，(ハ) 金属イオンの溶け出しについてである。

Table 2 は，SK 11 BS-Trimex T-08 対立イオン Na^+ とする電気粘性流体を用いたウインズロクラッチを100時間の耐久試験後に行なった分散相性状変化の有無をまとめたものである。これによるといずれの電極板材質によっても分散相の性状に劣化が見られない。この場合はイオン交換樹脂のイオン交換容量の変化としてとらえているが，これは，イオン交換樹脂表面の対立イオン容量の指標と解されるので，分散相の劣化はないと結論してもよいであろう。

分散媒については，同様に試験前後の試料について赤外線吸収スペクトル分析及びガスクロマトグラフィー分析を行なったが，いづれもほとんど変化はなく，劣化は認められなかった。

Table 3 は，分散媒より検出されたイオンの分析結果である。これによると Pt 以外のいずれの電極板材質においても，金属イオンと不純物と思われるイオンが検出されている。いずれも極く微量ではあるが，高い比抵抗を持つとされる電気粘性流体としては，無視出来ない電流増加を持たらすものと思われる。この金属イオン溶融過程は非可逆なため，液体中に蓄積されてゆき，液体の比抗抵劣化をきたすと解され，クラッチの電極板としては，イオン傾向の低い，Pt や Au などをメッキして用いるのがよいと思われる。**Fig. 7** に示すように，Pt を電極板に用いると，トルクは非

Table 2. Comparison of the disperse phase between befor and after testing
分散相の試験前後の性状

Ionic exchange resin (condition)	exchange capasity (neutral salts) meq/ml-R	moisture capasity %	degree of swelling ml/g	exchange capasity (weekly acidic cation) meq/ml-R
SK 11 B (befor test)	2.05	46.8	2.20	0.04
SK 11 B after dry (120℃)	2.06	46.8	2.20	0.02
SK 11 B after test (100 hr)	2.06	46.7	2.19	0.04

Table 3 detected ions as result of analysis
溶解イオン分析結果

Material of electrode	detected ions (indication of amount)	
Fe (S 45 C)	Si^{+}, Mn^{++}, Mg^{++}, Fe^{++} (extremely small amount)	
brass (BS)	Cu^{++}, Zn^{++} (small amount) Mg^{++} (extremely small amount)	Na^{+} (least detectable amount)
Al (A 2017)	Al^{3+} (extremely small amount)	
Cu giling	Cu^{++} (small amount)	Na^{+} (least detectable amount)
Pt coating		Na^{+} (ibid.)

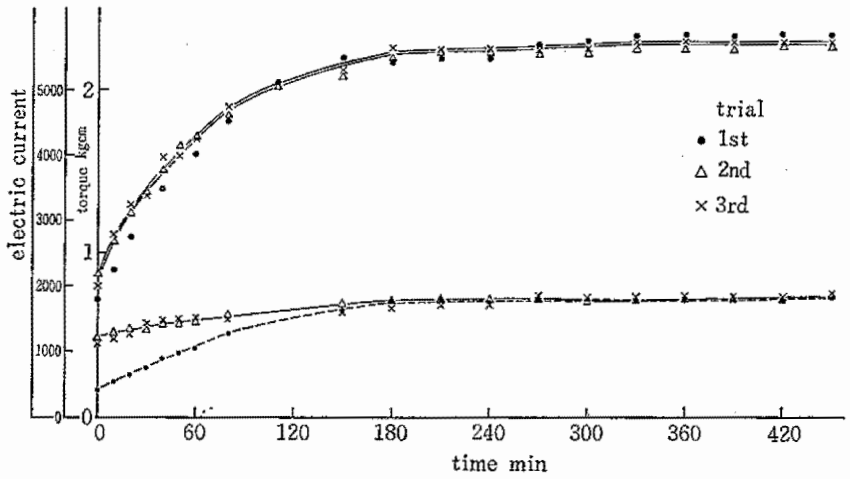


Fig. 7 Electric stability of the clutch (Pt Coating)
電極板を Pt とした時の経時特性

常に安定する。

2.2 多重円板型ウインズロクラッチの理論特性

前節では多重円筒型を用いて，ウインズロクラッチの一般的特性を評価した。これらの結果を受け，本研究の当初の目的である多自由度のバイラテラルマニピュレータを駆動するためのウインズロクラッチの設計製作と特性実験を行こなった。ここでは，1自由度当りの容積を最小にしてかつ有効なトルク，ひいては力を得るため，**Fig. 8** および **Photo 1** に示す多重円板圧のウインズロクラッチを，本研究の駆動装置として採用することにした。

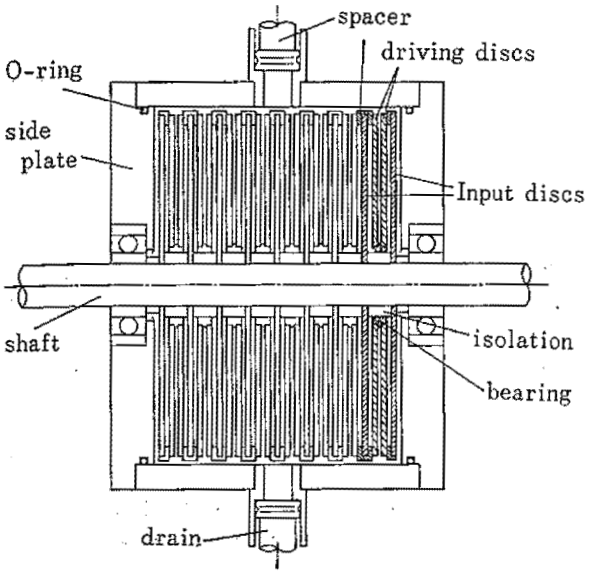


Fig. 8 A Winslow clutch of multi-disc type
多重円板型ウインズロクラッチ

本クラッチは基本的には対向する入出力の電極板であり，特性に出力側の円板は1 mm を介して一体となっているもので，この間隙を利用して駆動用ワイヤを巻きとる。Fig. 8 はそれらの1パッケージであり，8自由度が内蔵されている。ただし，1自由度当たり幅8.7 mm，外径 96 mm である。

2.2.1 多重円板型ウインズロクラッチの静特性

電気粘性流体の特性は一般に，

$$\tau=-\eta\frac{\partial v}{\partial r}+\tau_E(E) \qquad (1)$$

で表わされる。ここで，τ はせん断応力，η は無電界時の液体の粘度，$\partial v/\partial r$ はずり速度，τ_E は電界 E の影響で誘越するせん断力である。本研究では測定により $\eta=1.012\times10^{-6}$ kg·s/cm^2 を得ており，また，τ_E は **Fig. 9** に対応するものである。

本研究で製作した平行平板形電気粘性流体クラッチのトルク特性は，それに使用する電気粘性流体の特性を用いて理論的に推測することができる。

クラッチ板の形状を **Fig. 10** に示す。クラッチ板のすき間を Δt とし，円板の中心から半径 r の距離と $r+\Delta r$ で囲まれた面積において生ずるトルク dT は，式（1）を用い

$$dT=\tau\, 2\pi r dr\cdot r$$

$$=\eta\frac{v_r}{\Delta t}r\cdot 2\pi r dr+\tau_E r\cdot 2\pi\cdot r\cdot dr$$

ここで，v_r は半径 r での接線方向相対速度であるから，$v_r=r\omega=r\cdot 2\pi N/60$（$\omega$ は角速度，N は回転数

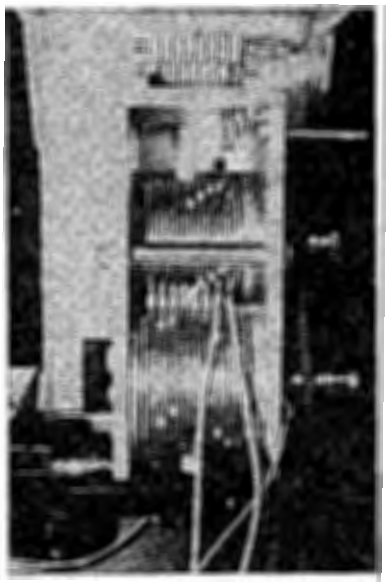


Photo 1 Packages of the clutch for driving multi-fingers system.
クラッチの外観

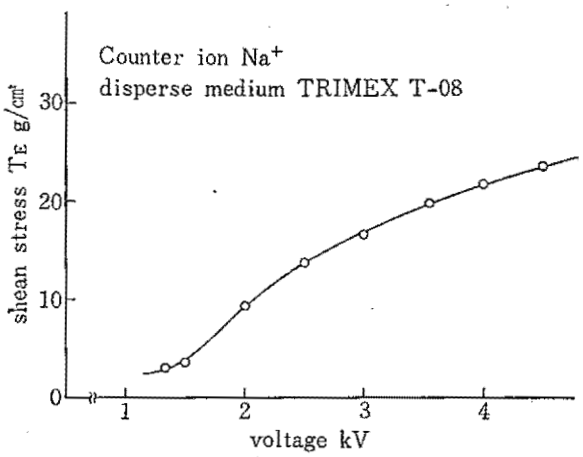


Fig. 9 Charcteristics of the electroviscous fluid
電気粘性流体の特性

rpm）を代入して積分すると，

$$T=\eta\frac{4\pi^2N}{60\,\Delta t}\int_{R_1}^{R_2}r^3dr+\tau_E\cdot 2\pi\int_{R_1}^{R_2}r^2dr$$

$$=\eta\frac{\pi^2N}{60\,\Delta t}(R_2{}^4-R_1{}^4)+\frac{2}{3}\pi\tau_E(R_2{}^3-R_1{}^3)$$

ここで，$R_1=1.1$ cm，$R_2=4.8$ cm，$N=300$ rpm，$\Delta t=0.12$ cm，$\eta=1.012\times10^{-6}$ kg·s/cm^2 を代入し，また，平行平板が2枚であることを考慮すれば，理論トルク特性を得ることが出来る。

本研究では人工指制御の目的であるので半径 1.1

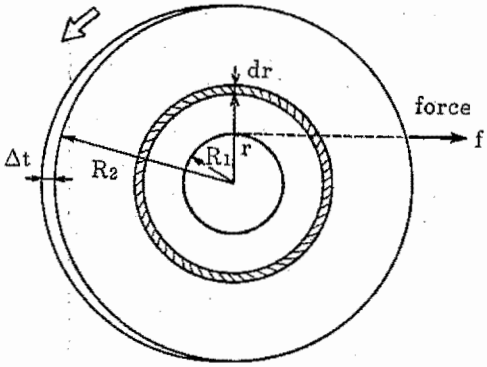


Fig. 10　A Coordinate system of driving disc
クラッチ板の形状

cm のプーリを用いて出力トルクを引張力に変換している。**Fig. 11** は，この場合の理論値と実験値を比較したものである。これによると十分な精度でよく両者は一致していると考えられる。これにより，比較的簡便な粘度特性実験により，任意の形状の電気粘性流体のトルク特性を十分な精度をもって推定することが出来ると結論できる。

2.2.2　電気粘性流体クラッチの動特性

本節では，ウインズロ効果によって生ずる電気粘性流体クラッチの出力トルクから，ワイヤにかかる力に至る伝達関係を示すことにする。

クラッチとワイヤにかかる力の関係は **Fig. 12** のようになる。

この系から，トルクは次の微分方程式で表わされる。

$$T=J\frac{d^2\theta}{dt^2}+B\frac{d\theta}{dt}+f\cdot r$$

$$=\frac{J}{kr}\frac{d^2f}{dt^2}+\frac{B}{kr}\frac{df}{dt}+fr$$

両辺をラプラス変換すると，変換子 s を用いて，

$$T(s)=\frac{J}{kr}s^2F(s)+\frac{B}{kr}sF(s)+rF(s)$$

したがって伝過関数は，

$$\frac{F(s)}{T(s)}=\frac{1}{\frac{J}{kr}s^2+\frac{B}{kr}s+r}$$

ここで，出力円板の慣性モーメント $J=\frac{1}{32}\pi\gamma t\left\{(R_2{}^4-R_1{}^4)-\left(\frac{\pi}{4}d_0{}^2t\gamma r_0{}^2\right)2\right\}\times 2=2.091\times 10^{-3}\mathrm{kg\cdot cm\cdot s^2}$，

粘性抵抗係数 $B=\pi\eta\frac{1}{\Delta t}(R_2{}^4-R_1{}^4)=1.40\times 10^{-2}\mathrm{kg\cdot cm/s}$ および $k=3.33\ \mathrm{kg/cm}$ を代入すると

$$\frac{F(s)}{T(s)}=\frac{A}{s^2+3.35\,s+1927}$$

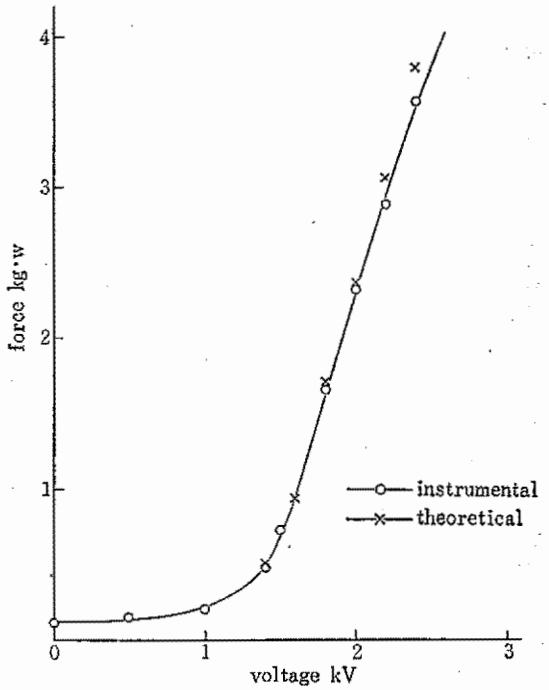


Fig. 11　Effect of voltage on induced force
クラッチの電圧特性

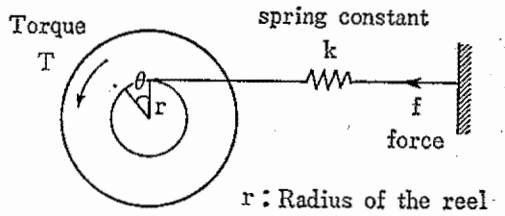


Fig. 12　Definition of induced force system
クラッチによる発生する力

となり，ここで $A=1752$ である。さらに，ウインズロ効果の動特性は，時定数 6 ms の一次遅れ系とみなせば

$$\frac{J(s)}{V(s)}=\frac{2}{1+0.006\,s}\quad\left[\frac{\mathrm{kg\cdot cm}}{\mathrm{kV}}\right]$$

従って，

$$\frac{F(s)}{V(s)}\fallingdotseq\frac{B}{s^2+14.62\,s+1927}$$

ここで $B=3435\,[\mathrm{kg/kV}]$ であり，これが本クラッチの動特性の理論式である。

理論式を検討するため，実際のウインズロクラッチを用いた過渡応答実験を行なった。ただし本実験で用いた電気粘性流体は，Fig. 9 に示すものである。その実験装置を **Fig. 13** に示す。

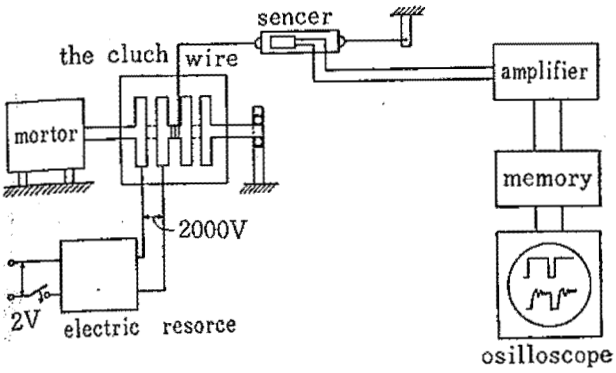
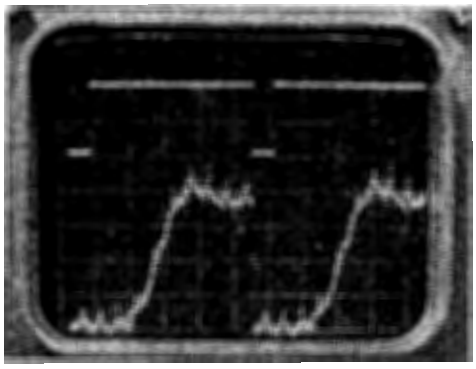


Fig. 13 Measurement system for transient response
過渡応答実験装置



holizontal　0.125 sec/cm
vertical　1 V/cm

Photo 2 Transient response
角度応答特性

Photo 2 は，過渡応答を示している。ステップ状の入力電圧に対して，ほぼ2次遅れ系の特性を持つ出力が得られた。この波形は，固有振動数 $w_n=143.2$ 1/s，および減衰比 $\zeta=0.683$ であり，従って伝達関数は

$$G_1=\frac{36553}{s^2+195.6\,s+20506}\quad\left[\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{kV}}\right]$$

となる。

これを理論式と比較すると，分母の係数が著しく大きいことがわかる。しかしこの分母の2つの係数の比はほぼ近い値を示していることもわかる。このことは理論では静的な機械摩擦を無視していることによるもので，実際には2次側電極にいくつかの静摩擦の存在が認められる。まず，両電極間の絶縁性を確保するためのスペーサはすべりを伴う。これは出力カトルクにリプルを発生させる原因ともなっている。また，2次側電極を支える軸受は真ちゅうであり，これはジュラコン軸の間に機械摩擦を伴うものでやはり，遅れ要素となりうる。この機械摩擦は自動制御システムを複雑にするだけでなく，制御応答性を低下させたり，誤差を大きくさせる大きな要因であり，出来る限り小さくする必要があるが，次に示すようにある程度制御システムによってその欠点を補うことが可能である。

3. ウインズロクラッチによる力の制御

ウインズロクラッチに入力する電圧を，クラッチの特性に応じて適当に調節すれば，力の制御が出来るわけであるが，それぞれのクラッチについての正確な伝達関数が得られる訳でもなく，また，温度などによってもその特性は変化してくる。そこで，力のフィードバック信号を用いて力の制御を行なう必要がある。また，その信号や設定値を与えるための信号は，TTLレベルの電圧が適当であるので，電圧増幅器が必要となる。本研究で開発した電圧増幅器はゲイン1[kV/V]の非常に応答性にすぐれたものであるため，信号電圧に対する力の伝達関数は

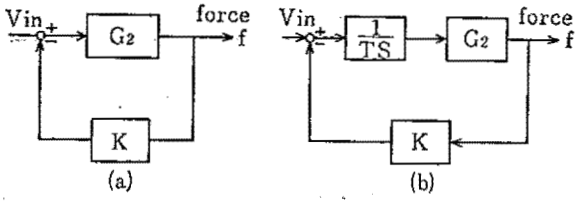


Fig. 14 Feed back control system for extention force
力のフィードバックシステム

$$G_2=\frac{4000}{s^2+200\,s+20000}\quad\left[\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{V}}\right]$$

とする。ただし，特性の若干の変化はカバーできることを考慮してシステム設計を行なったので，近似の伝達関数として上式を採用した。

Fig. 14 は力の制御系を示しているが，（a）ではオーバオール伝達関数 G_a は，

$$G_a=\frac{G_2}{1+G_2K}$$

となり，G_2 の変化の G_a への影響は非常に大きい。これに対し，（b）では，

$$G_b=\frac{G_2K\frac{1}{TS}}{1+G_2K\frac{1}{TS}}$$

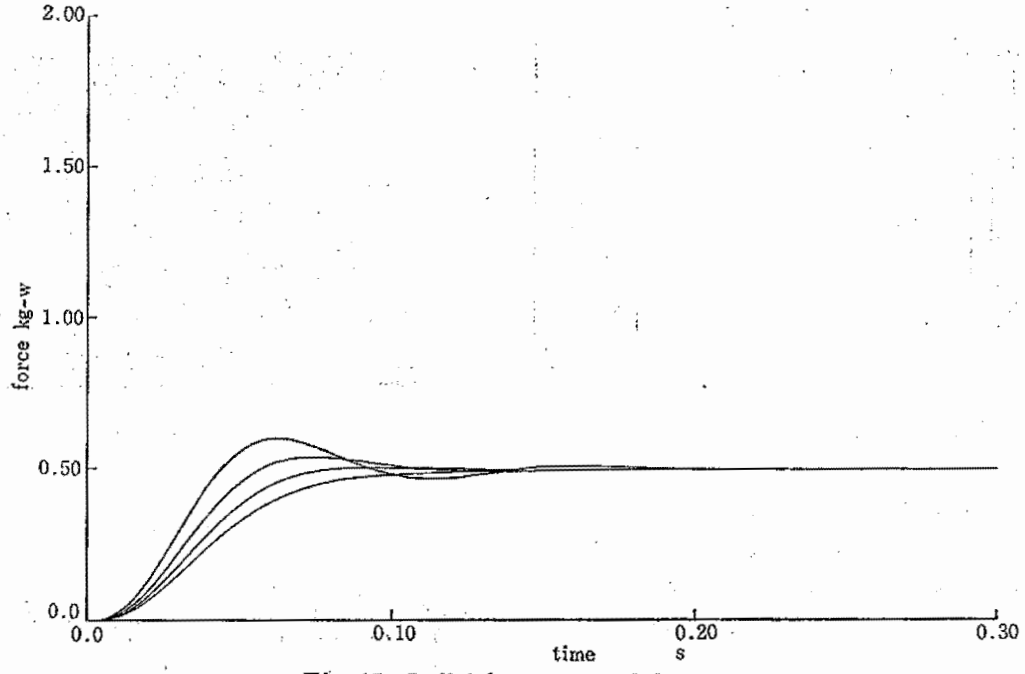


Fig. 15　Indicial response of force
力の制御のインデイシャル応答

となり，T を十分小さくすれば，G_2 が多少変化しても G_b にほとんど影響を与えない。こういった思想から G_2 を求めると，

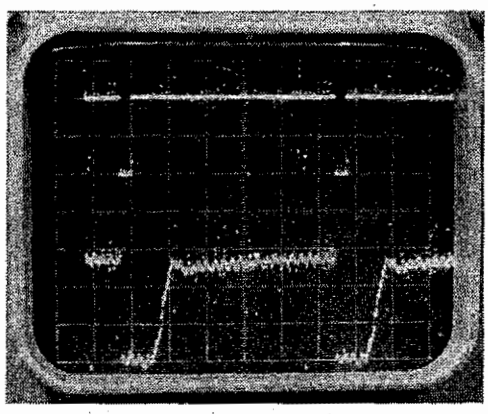
$$G_2=\frac{40000}{TS^3+200\,TS^2+20000\,TS+80000}$$

が得られる。ただしここでは力のセンサーにより $K=2$[V/kg] としている。

このシステムは，ラウスの安定判別法により，$T>0.02\,s$ の範囲で安定であり，**Fig. 15** に示すコンピュータシミュレーション結果によれば，いずれの場合でも 0.1 秒以下の応答性を有しており，応答性は非常に改良されている。

Photo 3 は $T=0.1$ s とした場合の力の制御特性を示している。これは目標値を 4 kg とした場合のワイヤに係る力を示している。この実験とシミュレーション結果と比較すると，やや立ち上でりがゆるいこと，定常値に近づくにつれ力の上昇度がにぶることなどがあげられるが，クラッチの特性変化や，クラッチ内の静摩擦はある程度補償され，ほぼ当初の予想した結果に近い特性を示している。

しかし，繰返して行なった力制御実験の中には，クラッチの動きが引っかかるなど，非線形が現われる場合もみられた。また，大きな力を制御するとクラッチ内の摩擦力が増加するため応答性が低くなるといったこと等が判明したので，今後これらの改良をすすめるつもりである。



holigontal　0.125 sec/cm
vertical　1 V/cm

Photo 3　Time respouse of controled force
力の制御特性

4. 結　言

バイラテラル制御を行なうための駆動方法としてはトルクないしは力の制御が可能であることがまず必須の条件である。また人間のもつ特に手の動作を有効利

用するには，人間の手に類似した多自由度の人工指が必要であるため，これを動かす駆動方式は軽量かつ小型である必要がある。

ウインズロクラッチは，一般特性で述べたように個々の特性については他の方式のクラッチよりすぐれているとは言いがたいが制御システムの構成いかんで改善が可能である。しかも，形状が簡単なため，1自由度当りの容積が非常に小さくてすむ。また，磁場を用いる他の方式と較べ軽量化が可能である。本実験電極板として SS 41 を用いたがプラスティック円板に金属をメッキするといった方法により，さらに一層軽量化が可能となる。これらについては，すでに2,3の実験を行なっているので紙面を改めて報告することにする。

(… 55. 3. 31 ……)

参考文献

1) 杉本・近藤・深谷，産業安全研究所研究報告，RIIS-RR-27-4，(1979)，8.
2) 近藤・杉本，産業安全研究所研究報告 RIIS-RR-22-3，(1973)，4.
3) 近藤・杉本，産業安全研究所研究報告 RIIS-RR-24-8，(1976)，6.

産業安全研究所研究報告　RIIS-RR-28-6

昭和 55 年 7 月 10 日　発行

発行所　労働省産業安全研究所

〒 108　東京都港区芝5丁目35番1号

電話 (03) 453—8441(代)

印刷所　新日本印刷株式会社

UDC 536.46：614.839

消炎容積に関する研究

—管中の初期火炎の伝播限界について—

林　年宏

産業安全研究所研究報告

RIIS-RR-28-1，1～10(1980)

放電火花により爆発性混合ガスに点火したとき火炎伝播が生ずるか否かは，最初に形成された火炎核がある一定の大きさ以上に成長できるかどうかによって決まる。この限界値は消炎容積と呼ばれ，点火源の安全化に利用できる現象であるが，従来あまりデータが得られていない。この報告では，主としてガラス管（内径 6～20mm）を用い，管端での点火により火炎核は生ずるがそれ以上は火炎が伝播しない限界圧力をメタン－空気混合ガスについて求め，この結果から，大気圧下の初期火炎が伝播しない限界の管径を推定し，この限界径と消炎容積の関係を論じた。また，放電エネルギー，管の長さと材質，混合ガス濃度などの影響についてしらべたほか，燃焼速度の大きい水素-空気混合ガスについても実験しメタンの場合と比較した。

（図 9，表 1，参 6）

UDC 536.46：614.839

Quenching Limits of Initial Flames in Narrow Tubes

-An Approaɔh to the Study of Quenching Volume-

by T. Hayashi

Researh Report of the Research Institute of Industrial Safety

RIIS-RR-28-1，1～10(1980)

Flame quenching behaviors are studied for methane-air and hydrogen-air mixtures in narrow tubes of glass and of metals. A mixture is ignited by an electric spark at the closed end of a tube, and a Limiting Pressure, below which no flame passes through the tube even if a flame kernel has been formed, is determined for each tube. By extrapolating a relation between tube diameter and Limiting Pressure, a critical diameter of tube, in which no flame propagates in spite of a flame kernel, is obtained for atmospheric pressure. This critical diametr is related to the Quenching Volume of the flame spherically expanding in a frees pace.

(9 figures, 1 table, 6 references)