円筒研削盤におけるクラッシングの研究*

鈴木 憲二** 鈴木 弘** 高橋 邦夫**

Study of the Crush-Driessing on Cylindrical Grinding Machine

Kenji SUZUKI, Hiroshi SUZUKI, Kunio TAKAHASHI

The advantages of the crush-dressing has been already highly evaluated, but the example of it's adoption on the cylindrical grinding machine for common use has been little seen.

In this report, the authors made the nomogram which enables to select the best condition in crush-dressing on the cylindrical grinding machine, for common use, for the rigidity of machine, grinding wheel, grinding width, and so on, by which the operator can understand easily such a condition. At the same time the native crushing pressure, which is the basis of crush-dressing, of every grinding wheel is researched fully, and the crush-dressing mechanism is also surveyed. It was proved in these studies that there are in the crush-dressing the following three domains; the initial crushing, normal crushing, crushing-out.

The result of the above mentioned studies led to know how to reduce the wears of roll and grinding wheel and, furthermore, to know that there is really the limit in grinding by means of crush-dressing.

These studies were performed with the expect that their results should put the crush-dressing to the practical use.

1. 緒 言

クラッシング研削法の利点は既に高く評価されているが、汎用の円筒研削盤において実施されている例は比較的少ない。この理由は機械的な問題としてはクラッシング力が非常に大きく機械各部に変形を与えたり、能力の不足をきたす場合があり、また砥石の問題としては硬度むらによる成形不良のためのびびり、粒硬度、組織の差による工作物の形状誤差、クラッシュロールの摩耗、工作物の表面あらさの限界、などに対する不安があるためである。換言すれば使用する機械の能力に応じたクラッシング条件が明瞭でないこと、加工物に対する各種砥石の加工限界が不明であるためと考えられる。

従来このクラッシング法の詳細な報告はE. C. Helfrich¹⁾佐々木、岡村²⁾らによって発表されているが前者はクラッシングの理論と組織密の砥石についての2~3のクラッシング圧についての報告であり、後者はロールの摩耗からその機構についての検討を進められたものである。筆者らは一般に使用される汎用の円筒研削盤で、また組織中の砥石について、それぞれの機械の能力に応じて最良なクラッシング条件を求めるためのノモグラフを作

成した。またこれらの砥石における砥石の摩耗、ロールの摩耗、表面あらさなどの加工の限界と、これらの問題に対する解析を試み、クラッシングの実用化に直接役立たせることを期待したものである。

2. クラッシング圧力

2.1 クラッシング圧力算定のための実験

クラッシングの基礎は砥石にロールを押付けながら回転することによって、その押付圧と砥石固有のクラッシュ圧との平衡が破れ、砥粒が結合剤の部品から脱落しロールの形状を砥石に転写することにある。したがって砥石またはロールの一方を回転しながら押付けることによって、その他方をつれ回らせる必要がある。一般には砥石を駆動し、ロールを従動する方法が採用されているが、要は従動側の回転に対する摩擦抵抗が少なく、砥石ロール間の滑りが少ない必要があるだけである。

本実験で使用した研削盤には砥石軸に静圧軸受(hydro-STAT. BEARING)が装備してあるために低速における回転摩擦抵抗が小さいので、砥石を従動させることとし、ロールはワークヘッド、フートストック間にセンター保持しワークヘッドモータで駆動することにした。したがって一般に砥石を駆動、ロールを従動する場合のように砥石低速駆動装置、ロール保持装置がまったく不要であり、クラッシング研削の段取りが非常に容易である。

*昭和41年4月 精機学会春季大会学術講演会にて講演、C I R P 第16回総会 (Paris 1966.9) に論文提出。

**正会員 豊田工作機株式会社

砥石固有のクラッシング圧力（砥石単位面積当りの被クラッシング圧力 $=P\text{kg/mm}^2$ ）は次のようにして求める。すなわち、砥石にロールを押付けた場合、図1に示すように、任意の接触点（中心線より θ° の位置）にはロールの中心に向かって砥石のクラッシング圧力 P に等しい圧力が作用する。したがってこの圧力 P はそれぞれ水平方向 P_H 、垂直方向 P_V の各成分に分離できる。

$$\left. \begin{aligned} P_H &= P \cos \theta \\ P_V &= P \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

一般に砥石とロールの接触弧の長さが小さいので、 $\theta \approx 0$ となり、砥石のクラッシング圧力 P は $P \approx P_H$ と表わすことができる。同様に接触面全体に作用するクラッシング力 $(F\text{kg})$ は水平方向に作用する力 F_H で代表することができると考えられる。

$$F \approx F_H = \int_0^\theta P_H \cdot b \cdot r \cdot d\theta = P \cdot b \cdot r \cdot \sin \theta \quad (2)$$

また押込量 h はロール、および砥石の半径 r 、 R に比してきわめて小さいので(2)式は

$$F = P \cdot b \sqrt{\frac{2h}{\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{R}\right)}} = P \cdot b \sqrt{\left(\frac{f}{n}\right) \frac{2}{\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{R}\right)}} \quad (3)$$

ただし b は砥石幅(mm)、 f は砥石押込速度(mm/min)、 n は砥石回転数(rpm)、 h は砥石1回転あたりの押込量(mm/rev)を示す。

したがってある一定条件下(b, f, n, r, R —一定)におけるクラッシング力 $F(\text{kg})$ を測定することによって、砥石固有のクラッシング圧力 $P(\text{kg/mm}^2)$ を算出することができる。また逆に機械の剛性が定まっている場合、換言すれば使用機械の許容剛性（最大押込力の能力）が定まっている場合には、その最大押込力を F と考えて、使用する砥石のそれぞれの条件も計算できることになる（使用砥石のクラッシング圧 P が既知と考えると）。したがって(3)式は砥石のそれぞれのクラッシング圧 P がわかれば、クラッシング条件、クラッシング力 F の関係は図示表示が可能となるはずである。

実験方法は図2に示すようにワークヘッド、フートストックの両センター間にロールを装備し、ロールを回転し砥石を従動するようにした。クラッシング力の測定はフートストックセンターに貼布したストレンゲージよりの出力をペン書きオシロに記録させることにした。実験に使用した砥石および実験条件は表1のとおりであ

表1 実験に使用したクラッシュ・ドレッシング条件

Grinding Wheel Structure 9. Vitrified. (made in Noritake China) (Co. in Japan)	Grain Size Grade	60	100	150	200
	F	○	○	○	—
	H	○	○	○	○
	J	○	○	○	○
	K	○	○	○	—
	M	○	○	—	—
Penetration Speed of Wheel (f)		0.2 0.4 (mm/min)			
Numbers of Wheel Revolution (rpm)		25, 40, 70, 120 (rpm)			
Radius of Wheel (R)		200mm			
Radius of Crushing Roll (r)		50mm			
Grinding Fluid		Jonson Wax (x50) 21 (1/min)

図1 クラッシュ・ドレッシングの機構

図2 実験方法

る。

図3はその記録の一例であり(a)はクラッシング力 F_H 、(b)はこの場合の砥石台の理論押込量および実質押込量、

図3 クラッシュ・ドレッシング力および砥石送り量の記録例

砥石の被クラッシング量を示したもので、砥石台の剛性、砥石の弾性、ロール支持装置の剛性によって実質クラッシング量と理論押込量との間に差異が生ずる。(a)(b)図を対応してクラッシングの経過を考えると、クラッシングには3つの領域が存在する。すなわちクラッシング力が急激に上昇する初期クラッシング、押込力と砥石のクラッシング圧力とが平衡する定常クラッシング状態、押込を停止した後で砥石とロールが弾性回復するクラッシングアウトの状態である(クラッシングアウトとは押込終了後砥石の押込を停止し、そのままの状態でもロールと砥石をつれ回らせ弾性回復する状態をクラッシングアウトと呼ぶことにした)。したがってこれらの状態における実質クラッシング量は初期クラッシングでは押込力がクラッシング圧力に達していないので砥粒の脱落は少なく(微少破碎はある)、定常クラッシング状態では実質押込量と同一割合でクラッシングが進行し、クラッシングアウトにおいては砥粒は微少破碎のみが行なわれるものと考えられる。本実験におけるクラッシング力はこの定常状態における力 F_H を測定することにある。この F_H の値から(3)式によりクラッシング圧力 P を算定するのが目的であり、この場合の垂直方向成分 F_V は水平方向の1%以下にすぎない。

2.2 クラッシング条件選定のためのノモグラフの作成

図4、図5は砥石の硬度別、粒度別のクラッシング力の実測値を記録したもので、砥石1回転あたりの押込量(図1の h)を横軸にとってある。この結果によれば押込量の増加に伴いクラッシング力 F_H は増加する。図中の実線はそれぞれの F_H より P を求めその平均値を(3)式に代入した場合の理論式を示したものであり、結合度が高くなるほど、粒度が細かくなるほどクラッシング力は増大する。

図6、図7は上記の結果を押込速度 $f=0.2, 0.4$ mm/minのおのおの場合について、砥石の回転数をかえながらクラッシング力 F_H を測定し(3)式によりクラッ

図4 砥石押込み量とクラッシング力

図5 砥石押込み量とクラッシング圧力

図6 砥石回転数とクラッシング圧力(結合度)

ング圧 P を算出した結果をプロットしたものであるが、この結果によれば押込量 f/n 、 f のいかんにかかわらずほぼ一定の値を示す。すなわちクラッシング圧力は砥石固有の値であって砥石の結合度、粒度による影響を強く受けることが判明した。表2は実験したすべての砥石の

図7 砥石回転数とクラッシング圧力 (粒度)

図8 粒度とクラッシング圧力の関係
(実線は本実験によるもの点数はHelfrichの結果)

図9 クラッシング条件のノモグラフ

クラッシング圧を表に整理したもので、図8は粒度について整理したもので、同時に E. C. Herfrich の結果も対比させたものである。これらの結果クラッシング圧は粒度にほぼ比例し、結合度、組織により大きく変化することがわかった。Helfrich の測定結果との差異は砥石メーカ、組織の違いによるものである。

以上の結果を使用して図9のノモグラフを作成することが可能となった。すなわち(3)式より明らかなごとく、 F_H , b , P , $\sqrt{2f/n \cdot 1/\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{R}\right)}$ の4つがそれぞれ相関関係にあることを利用したものである。この図、および表を併用することによって機械の剛性および砥石の種類から最適な押込速度を選定することもできるし、クラッシングロールの半径を求めることもできる。また逆に砥石径、ロール径、押込速度、クラッシング幅などのクラ

ッシング条件から機械の所要剛性を求めることができるので新しくクラッシング専用研削盤を設計する場合の参考となる。図中の例は砥石、ロール径 $1/R + 1/r = 0.025$, $f/n = 8\mu/\text{rev}$, $b = 17\text{mm}$ の場合 WA100M9V の砥石では研削盤に加わる力 F_H は325kgとなり、また汎用研削盤の許容剛性を150kgと仮定したとき WA100K9V で30mm幅クラッシングするときの押込速度、ロール径を図式表示できることの例を示したものである。

3. クラッシングロールの摩耗

クラッシングの問題点はロールの摩耗による研削精度の低下である。特に形状研削の場合、ロールの摩耗は直接工作物形状に影響する。

そこで2.1でのべた実験方法により、その摩耗の機構

を調べることにした。図10はSNCM 9, Rc 57のロール(100φ) 砥石 WA100K9V, 100H9V, 押込速度 $f=0.2$, 0.4mm/min , 押込み回数14回とした場合の砥石回転数とロール摩耗量についての関係を調べたもので、摩耗量は砥石回転数にほぼ比例しており押込速度による影響は比較的小さい。しかし一般に押込速度が低いほど摩耗は大きい。このことは後述するように定常クラッシング状態に達するまでの時間が押込速度が低いほど長くなり、砥石とロールの滑りが多いことに基因する。この傾向は他の砥石 100F, 100H, 100M, 60H, 150H, 200Hなど粒度、結合度を変更しても同様の結果が得られているが、結合度、粒度を変化した場合の半径摩耗量に及ぼす影響を図11, 図12に示す。すなわち非常に軟らかい 100Fの場合を除いて摩耗量はほぼ一定の値を示しており、結局ロールの摩耗は砥石回転数と押込速度に強く影響されると考えられる。

そこでさらに摩耗の進行状態を知るために押込回数1回あたりの平均摩耗量をロールのころがり距離について詳細に検討した結果が図13となった。すなわちロールが接触し始めてからある距離に達したとき砥石台を後退させるようにし、そのおのおの場合のロール摩耗を測定したもので図13はその累積摩耗量を示している。すなわち摩耗はクラッシング初期にのみ進行し、ころがり距離がある値に達すると摩耗は全く進行しない。このことは図3(a)と対比して見るとロール摩耗は定常クラッシング状態に達するまでの間にのみ進行し、押付力不足によるロールと砥石の滑り、鋭利砥粒による切削が原因として考えられる。

これら摩耗量の測定には表面あらさ計 (Taly-surf) を使用しており、その摩耗状態を記録した例が図14である。この図からわかるようにロール摩耗の初期に盛り上がり現象が見られ、滑りによって削り取られることを示して

図10 ロール摩耗量

図11 ロール磨耗と砥石の結合度

図12 ロールの摩耗と砥石粒度

図13 ロール摩耗と砥石ロールころがり接触距離

図14 ロール摩耗状態

いる。したがってロール摩耗はクラッシングの初期の短時間に集中的に発生することがわかった。したがってロール摩耗を少なくするためには砥粒による掘起こしの少ない材料を選ぶか、初期の滑りを少なくするためにロール、砥石間の摩擦抵抗を大きくする手段を考えるべきである。図15は図10と同一条件でロールの材質をかえた場合の摩耗量の変化を示したもので硬度による差異が明瞭に現われている。しかし単に硬度のみが左右するものではなく、たとえばS10CとPBC-2Bのようにその結果が逆になる場合があり、硬度の他に摩擦抵抗の大小を常に考慮する必要がある。このことを確認する意味で図16に示すようにロールにゴムを巻きゴムの面がロール面より1mm位出るようにしておき、この状態でクラッシングを行なうと砥石はゴムによって駆動され、ロールと砥石が接触するときにはロールと砥石の周速はほぼ同一となっているので滑りによって削られる量が半減できることを確認した。このときのロールの表面はSNCM9の場合図17(a)に見られるようにきれいな梨地状となり、引っかき痕は全く見られない。これに対しゴムを巻かないときのロール表面は(b)図のように相対的滑りによる引っかき痕が多く、当然摩耗も多い。

また同じような結果を得る手段として、砥石の回転の摩擦抵抗を少なくする目的で、砥石軸用のベルトを外したり、砥石をあらかじめ回転しておいたり、ロールを砥石に押し込みその後でロールを回転させたり、またはロールの回転速度を順次増加させる方式を採用することも摩耗量を少なくすることができ少なくとも1/2~1/3程度減少することが可能であった。これらの考え方はクラッシングアウトの期間においても同様のことがいえる。

4. クラッシングされた砥石による研削

4.1 表面あらさ

研削面の表面あらさを左右する要因は砥石表面の切れ刃の分布状態にある。すなわち砥石表面に細い砥粒が多く存在していること（砥粒分布密度が大）や、切れ刃の逃げ面が多いということがあらさを良くするものと考えられている。

一般にクラッシングした砥石は切れ味が良く、砥石寿命は長い面あらさが悪いといわれていた。これは砥粒が結合剤の部分から脱落することによって、新しい砥粒の切れ刃が砥石面に出現しているためと考えられていた。しかし実際には砥粒の脱落にはダイヤモンドドレッシングによる目直しと同様に種々の形態が考えられる。すなわち砥粒が結合剤の部分から原形のまま脱落する場合や、砥粒自身が細かく破碎される場合が考えられる。し

図15 ロール材質と摩耗

図16 滑り防止のためにゴムを巻いたロール

(a) ゴムを巻いたロール（梨地状）

(b) ゴムなしのロール（スクラッチ状）

図17 ロール表面の摩耗状態

たがってこの脱落のいかんにより砥粒切れ刃形状が異なり、仕上面にも影響するものと想定される。そこで、ここではクラッシング条件をかえることによって砥粒脱落

の機構形体が変化するものと考えて、仕上面を良くするためのクラッシングの条件および手段を調査することとした。

図18は粒度に対するあらさの影響を調べたもので、一般に粒度が細くなるほど面あらさは向上する。この場合のクラッシング条件は砥石 120rpm 押込み速度 $f=0.4$ mm/min, クラッシングアウト 30 s でプランジカット条件 砥石周速1800m/min, 切込速度0.2mm/min, スパークアウト 90 s の研削を行なった結果である。

図19は結合度に対する影響を調べたもので、ほとんど変化はみとめられない。ただクラッシング中の砥石回転数を 25rpm とすると面あらさが悪くなり、回転数を上げると良くなる。これは押込み量 $f/n=h$ の値が小さくなるためダイヤモンドドレサの切込量に相当するものであって当然の結果である。また表面あらさはクラッシングのかけ方によって大きく変化する。すなわちクラッシングを定常クラッシングの状態を終了するか、クラッシングアウトを行なうかによって異なる。図20(a)はクラッシングアウト 60 s のときの脱落した砥粒で、(b)図は定常クラッシング中のものである。このように脱落した砥粒の大きさが異なるのは砥粒分布密度にも影響を与えるものであってクラッシングアウト中では砥粒は小破碎をしていることを示している。したがってこの小破碎の程度によって表面あらさは影響されることが考えられる。図21はクラッシングアウト 0 s, 120 s にてクラッシングされた砥石によって研削した場合の表面あらさの差異を調べたもので、あきらかにクラッシングアウトの効果が

プランジカット条件

工作物: SNCM9, 30m/min
砥石: 1800m/min (WA)
送込み速度: 0.2mm/min
スパークアウト: 90 s

図18 表面あらさと粒度の関係

現われており、砥石回転数による効果も見受けられる。図22は砥石回転数を 25rpm, 120rpm と一定にした場合のクラッシングアウト時間の影響を調べたもので 2μ H_{max} 以下のあらさを得ることも容易に可能である。

クラッシング条件:

押込み速度: 0.2mm/min クラッシングアウト: 30 s

プランジカット条件:

工作物SNCM9, 30m/min 砥石: 1800m/min
送込み速度: 0.2mm/min スパークアウト: 90s

図19 表面あらさと結合度

(a) クラッシングアウト 60~90 s 間の脱落砥粒

(b) 定常クラッシング中の脱落砥粒

図20 クラッシングにより脱落した砥粒

図21 表面あらさとクラッシングアウト時間の関係

(従来クラッシングによる場合は $5 \sim 7 \mu H_{\max}$ 程度といわれていて、ダイヤモンドドレッサには劣るとされていた)

これらの結果クラッシングアウトについて要約すると、

- (1) 砥粒の微少破碎に役立つ。
- (2) 定常クラッシング中に生じた不安定砥粒の除去。
- (3) クラッシング中に乱された砥石真円度の補正効果。

などが相まって研削精度向上のために重大な意義をもつことが判明した。

研削面あらさについて要約すると砥石粒度、クラッシング押込量 f/n 、クラッシングアウト時間に直接影響し、結合度による差異はほとんどみとめられず、クラッシング条件を適当に選択することによって $2\mu H_{\max}$ 以下の面を得ることも可能である。

4.2 砥石の摩耗

研削精度に影響するもう一つの要素の中に砥石摩耗の問題がある。すなわち一般にクラッシング法は形状研削に多く使用されるために、クラッシングにより成形された砥石の形状誤差が、そのまま製品精度に転写される。したがっていかに正確に成形されたとしても、研削中に砥石の摩耗によって砥石形状が変化すれば、生産性に影響し、クラッシングの特長である切れ味の向上という利点が半減する結果となる。

図23はダイヤモンド・ドレッシングの場合とクラッシングとを比較したもので、ダイヤモンドによる場合よりも摩耗はがけしい、またクラッシングアウト時間の長短によってもその差異が明瞭に現われている。この理由は既にのべたように定常クラッシング中での砥粒の脱落

図22 表面あらさとクラッシングアウト時間

図23 砥石の摩耗

は結合剤の部分よりの脱落が多く、砥石表面で研削に参与する有効な砥粒数が減少し、砥粒1個あたりの研削にあずかる負担が多くなる。しかし一方鋭利な切れ刃の出現によって見掛け上の研削抵抗は減少する。この二つの効果が相殺し合って砥石の摩耗が進行するものと考えられ、同時に定常クラッシング中に生じた不安定砥粒(脱落寸前の状態にある砥粒)が研削初期に脱落するために見掛け上の摩耗が多く現われるものとする。

一方クラッシングアウト時間を長くすると、砥石の摩耗量が減少するのは、この不安定砥粒がクラッシング・アウト中に脱落してしまうために研削初期での摩耗の割合が減少すること、クラッシング・アウト中に砥粒自体の微細破碎のために有効切れ刃数が増加し、1個の砥粒にかかる研削抵抗の負担が減少するためと考えられる。しかしこの場合においてもダイヤモンドによる目直しの場合に比して砥石の摩耗は多い、しかしダイヤモンド

ドの場合は研削量 $22\text{cm}^3/\text{cm}$ にて焼けを発生した。したがってクラッシングの場合は砥石寿命という点でははるかに有利である。図23の例は WA120H9V, $f=0.2\text{mm}/\text{min}$, $n=120\text{rpm}$ でクラッシングを行ない。ダイヤモンドによる目直しは、切込み 10μ , テーブル送り速度 $200\text{mm}/\text{min}$, ドレッシングアウト 2 往復で、研削条件はプランジ研削で砥石送り速度 $0.2\text{mm}/\text{min}$, 砥石周速 $1800\text{m}/\text{min}$, スパークアウト 5s の各条件で研削を行なった場合の研削量に対する砥石の摩耗量を示したものである。なお砥石粒硬度による摩耗の傾向はダイヤモンドによる場合の傾向とほぼ同一で、本報告では割愛した。

5. 結 論

以上の結果次のことが結論される。

- (1) クラッシング圧力は各砥石により固有の値を有していて、粒度にほぼ比例する。またこの他結合度、組織により強く影響される。
- (2) 各種砥石のクラッシング圧力を実験により求めることができたので、クラッシング条件算定のためのノモグラフを作ることができた。
- (3) クラッシングの機構には初期クラッシング、定常クラッシング、クラッシングアウトの3つの領域がある。初期クラッシング (Initial Crushing) とはロールと砥石が接触し、クラッシング力が急激に増加し、定常状態に達するまでの期間をいい、砥粒は微少破碎が主となる。また定常クラッシング (Normal Crushing) とは砥石の固有のクラッシング圧と押込力が平衡を保つ状態でクラッシング力は一定となる。この間における砥粒の脱落は結合剤の部分から連続的に脱落する。またクラッシングアウト (Crushing-out) とは押込を停止し砥石の弾性回復、その他機械の剛性による弾性回復の期間まで砥石がロールにつれ回る期間をいい、砥粒は微少破碎を行なう。
- (4) ロールの摩耗はロール接触直後の初期クラッシング中におこり、定常クラッシング状態での摩耗はほとんどない。すなわち砥石が押付力不足のためにロール周速と一致するまでの相対的な滑りによるものであるから、できるだけ砥石周速がロール周速と一

致するまでの時間を短縮するように、砥石、ロールの接触抵抗を高めるとか、砥石軸の回転摩擦抵抗を小さくするような工夫が必要である。

- (5) ロールにゴムを巻き砥石をゴムであらかじめ回転させるような方式にするとロール摩耗を極度に減少することができる。
- (6) ロール摩耗は砥粒による、掘起こし、滑りが直接原因であることが判明したので、ロール材質として硬度の高い材質、たとえば超硬合金を使用することは最も有効であった。
- (7) クラッシュアウトを行なうと砥粒分布密度が変化すると考えられるので、この砥石による加工表面あらさは向上し $2\mu H_{\max}$ 以下にすることも容易に可能である。
- (8) また砥石摩耗に関してもクラッシングアウトの効果も明瞭に認められる。しかしダイヤモンドによる場合には及ばないが切れ味はダイヤモンド・ドレッシングの場合に比較して向上していることが認められた。したがってクラッシングアウトを行なうことは研削能率向上の上に非常に役立つ。

この他、砥石、ロールの回転方向クーラントの種類などの実験も行なったが、クラッシング圧力、ロール摩耗研削面あらさについての影響はほとんど変化がなかったので本文では省略した。本実験は能率向上のため各ユーザよりの希望もあって始めたものである。したがって今後クラッシングを汎用の研削盤で使用しようとする方々に少しでも役立てば幸いである。

(1966, 7月8日受付)

謝辞 本実験の遂行にあたり直接御指導を戴き、またこの機会を与えて戴いた、当社杉本正司取締役、および日下部猛研究部長に心より感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) E.C. Helfrich, Transactions of ASME Nov. 1948 P.885~891.
- 2) 佐々木, 岡村, 豊島: 日本機械学会論文集 Vol. 22, No.114 (昭和31年2月) P.79~84.