

表1 単結晶ダイヤモンドの諸性質

性質	実測値など	備考
密度	$3.52 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$	
押込硬さ	$6000 \sim 10000 \text{ kgf/mm}^2$	方位依存, 温度依存
ヤング率	$10.5 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$	かなり等方的
引張り強さ	$3 \sim 20 \times 10^9 \text{ N/m}^2$	顕著な寸法効果, 異方性
酸化開始温度	900~1000 K	
黒鉛化開始温度	1800 K (不活性雰囲気中)	900 K (鉄粉中)
比熱	$0.516 \times 10^3 \text{ J/kgK}$ (常温)	
熱伝導率	600~1000 W/mK (タイプI, 常温)	300 W/mK (1000 K 外挿)
	2000~2100 W/mK (タイプII, 常温)	500 W/mK (1000 K 外挿)
線膨張係数	$0.8 \times 10^{-6}$ (常温)	
	$1.5 \sim 4.8 \times 10^{-6}$ (400~1200 K)	
表面エネルギー	$5.5 \text{ J/m}^2$ , (111)面	
化学的活性物質	$\text{KHO}_3$ (約700 K) 各種酸化物 (1300 K 以下) W, Ta, Ti, Zr, Fe, Co, Mn, Ni, Cr 等	

般にかなりめんどろである。また、仮に計算できたとしても、それが実用的に生かされるにはまだ解明不十分な面も残されている。しかし、その基本事項を理解しておくことは、データの解析、基本方針の決定という面でたいへん重要なことである。

(5) 熱化学物性

精密切削工具における漸進的摩耗に強く関係する性質として、工具材料の各種の熱化学物性がある。内容的には、熱分解性、酸化性、被削材との間の溶解性、拡散性、化学反応性などであろう。欠損現象と同様に、これらの要因分析を定量的に行うことはまだ困難ではあるが、これらを意識することによって、少なくとも摩耗抑制の基本的方針は見つけることができるのである。

[2] ダイヤモンド工具

超精密工具材料としてほとんどすべての応用に実用されているものは、単結晶ダイヤモンドである。ダイヤモンドの並外れた加工能力は、経験的によく知られているように、群を抜く硬さ、強さ、化学的安定性によっている。表1は基本的な諸性質をまとめたものである。天然材も合成材もほぼ同様の性質を示す。押込み硬さは常温で約  $10000 \text{ kgf/mm}^2$ 、また、引張り強さは(111)面への垂直成分をとる  $300 \sim 2000 \text{ kgf/mm}^2$  で、破壊の規模が小さいほど強いという寸法効果がみられる。ヤング率は約  $100000 \text{ kgf/mm}^2$  で、鉄鋼材料の5倍である。そのうえ、熱伝導率は銅の数倍も高く、多くの材料との間の摩擦係数は0.1以下である。また、600 K 程度以下の低温では、化学的に安定である。

しかし、欠点がないわけではない。まず、もろさが増えられる。900 K 程度以上になると酸化などで損耗する

ことも、工具材料としては困る問題である。また、工業材料として最も重要な鉄系材料の加工には、特別な場合を除いて不向きである。

ダイヤモンド工具は、このような欠点を補う工夫をしたり、欠点の現れない条件で用いながら、卓抜した諸性質を上手に引き出すのが合理的な使い方といえる。

[3] 工具損耗

(1) 欠損

鏡面加工用工具にとって致命的な損傷はチップングである。その例を図7に示す。多くの場合、ダイヤモンド工具の寿命—この判定基準はかなりあいまいであるが—は、切れ刃のチップング(特に、仕上げ刃の部分における)に基づく仕上げ面の劣化によって決定されるからである。この観点からの寿命は、かなりバラツキがあるとされている。それはダイヤモンドの強度における本来的な不均質、寸法効果、異方性が切削現象の確率的変動と複雑にからみ合っているからであろう。

耐チップング性は、原理的には次のように考えられる<sup>19)</sup>。ダイヤモンドの破壊は、その(111)面に垂直な引張応力  $\sigma_{(111)}$  成分がある値  $\sigma_{(111)crit}$  に達すると発生する。 $\sigma_{(111)crit}$  は一般に素材に固有の値と考えてよい(もちろん統計的変動はあるが)。一方、工具の結晶方位が決まると、ある切削条件下での切削力をもとに、たとえば有限要素法などを利用して刃先の各位置での応力、さらにその位置での  $\sigma_{(111)}$  が求められる。この両者— $\sigma_{(111)crit}$  と  $\sigma_{(111)}$ —を対比すると、その位置での欠損発生を知ることができる。

いま、工具のすくい面で垂直応力  $\sigma_c$  とせん断応力  $\tau_c$  が分布して働く場合を考える。これらの応力は切りくず接

触面積(幅  $b$ , 長さ  $l$ )内に分布している。このような応力状態では、ぜい性体の破壊に危険な引張応力の最大値は、一般にすくい面上に発生する。この引張応力の(111)面への垂直成分がある値  $\sigma_{(111)crit}$  に達した点では、破壊が起こることになる。

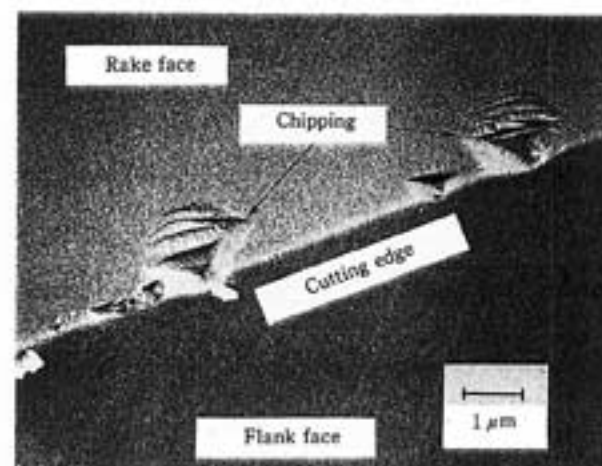


図7 ダイヤモンド工具上のチップングの一例

一般に、ダイヤモンド内の1点を通る(111)面は4個あり、4個の  $\sigma_{(111)}$  が存在するが、そのうちの最大値  $\sigma_{(111)max}$  のすくい面での分布を、各種の結晶方位の工具について示したのが図8である。応力値は垂直応力の最大値  $\sigma_c$  に対する比で示されており、また、位置は切りくず接触幅  $b$ , 同長さ  $l$  に対する比で与えられる。図8(a)は、切りくず流れが正常(横切れ刃に垂直で内部に向かいせん断応力は右方を向く。この向きを正とする)で  $\tau_c/\sigma_c=0.3$  の場合、同図(b)はなんらかの原因(振動、切りくず滞留、切れ刃の離脱など)で、せん断力が横切れ刃へ向かう( $\tau_c$ が負)  $\tau_c/\sigma_c=-0.3$  の場合についてのものである。

図8に示されるように、ダイヤモンド工具の結晶方位のとり方によって、危険な応力の最大値は大幅に変化し、通常よく使われる方位(たとえば(110)すくい面)が必ずしも好ましいとはいえないことがわかる。 $\sigma_c$  は、被削材の押込み硬さ値(ただし  $\text{kgf/mm}^2$  の単位をつける)とほぼ等しいか、たかだかその数倍とみてよいから、軟質材の切削においては  $\sigma_{(111)max}$  はダイヤモンドの強度に比べてかなり低く、通常の定常切削では刃先欠損はまず生じないといえる—事実、問題なく実用されている。しかし、

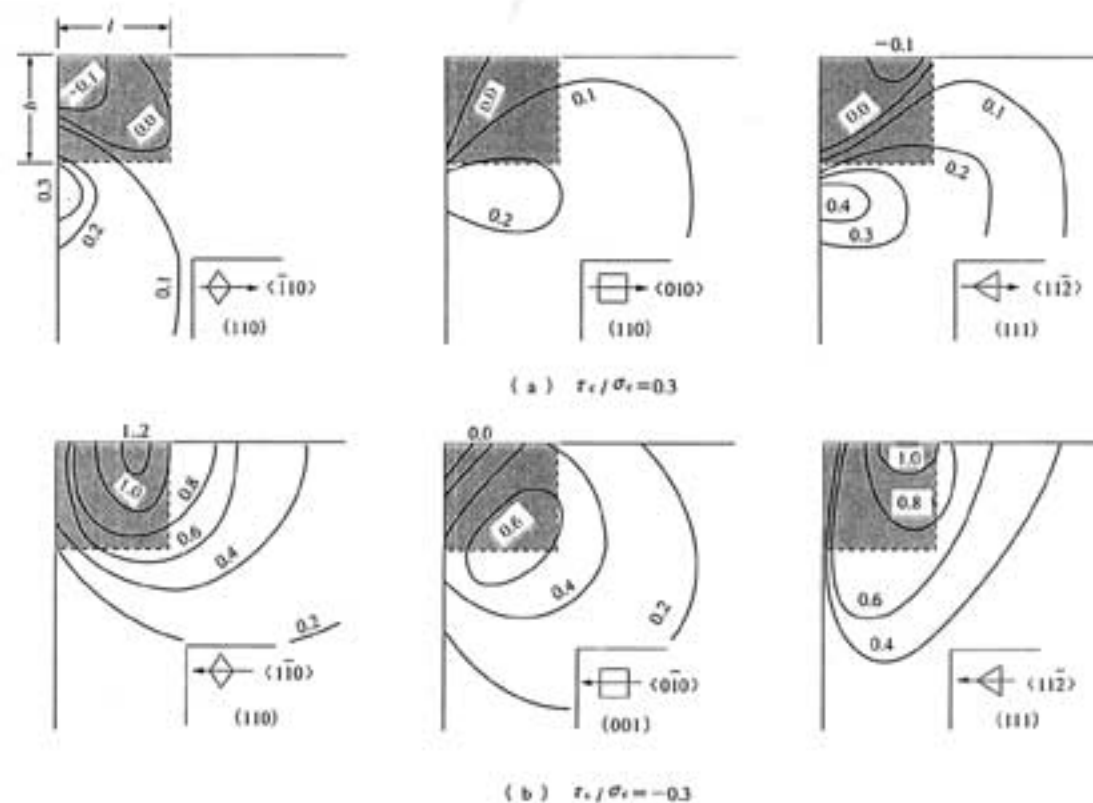


図8 各種結晶方位をもったダイヤモンド工具すくい面上に発生する危険応力 ( $\sigma_{(111)max}/\sigma_c$ ) の分布 (矢印は切りくず流れ方向)

### 2.3 プラスチック成形とバリ

プラスチックは、熱硬化性と熱可塑性の二つに分類され、一般に後者の成形品のバリは除去されにくいとされている。そのバリ除去法の原理は、衝撃法(バリの根元にエネルギーを集中して与えるのが難しい)、切削法(根元まで除去できる)および、丸め法(熱可塑性を利用して、バリを除去でなく丸める溶融法)の三つがある(表3)。

**Q1** プラスチック成形の場合に、バリ以外に多くのトラブルがあり、これを抑えることを考えながらバリ対策を進めなければならないことについて説明してください。

**A1** プラスチックといっても、いろいろな種類があり、製品への応用もさまざまである。まず、設計者は部品材質を金属にするか、プラスチックにするかについて検討する。それには、それぞれのプラスチックの性質をよく把握し、要求される部品性能への適合性について追求したうえで決定されなければならない。しかし、このようにプラスチックの種類を決めて現実製品化すると、その種類に応じた種々の成形トラブルが生じるので、この問題を解決する必要がある。その成形トラブルの一つがバリであるが、このほかに「ひけ」、「気泡」、「変形」、「充てん不足」、「ウエルドライン」(キャビティ内を流動

する溶融プラスチックの流れの出会い部分が生じる細い境界線)、「銀条」(成形品表面にできる流れ方向に沿って白っぽい糸状のすじ)、「強度不足」、「寸法不良」、「ジェットニング」(成形品の表面にできる折り畳まれた針金のような模様)、「色むら」、「クラック」、「クレーズ」(離型時あるいは溶剤に触れて生じる細かいひび割れ)、「白化」(突出しピンあと周辺にみられる白濁現象)、「焼け」、「フローマーク」などがある。

したがって、プラスチック成形は、これらの不良項目の発生を抑える条件を前提にバリの抑制を検討すべきである。表4は、これらの不良項目と金型側の原因を説明している。

**Q2** プラスチック成形バリは、なぜ発生するのか、その生成機構について説明してください。

**A2** 図11に示すように、成形トラブルはバリに限らず、成形品設計、成形材料、工場環境、金型、射出成形機、成形条件のいずれに原因があるのかわからないほど複雑である。要するに、バリが発生するのは金型にすきまがあるためである。すきまにできるバリをFlash Burrという。そのすきまは、金型自体にある場合と、成形時の金型の型締力、射出圧力や温度上昇による変形に原因する。しかし、キャビティ内のガスを排出するためのエアイベントを積極的に設計する必要があり、ここにはバリ

表3 プラスチック成形バリを除去する方法

方法	特徴
I 衝撃法	<ul style="list-style-type: none"> <li>比較的簡単であるが、仕上げ面品質、精度がよくないので、公差の厳しい部品には向かない。</li> <li>熱硬化性に対しては、バレル研磨法で、乾式では木釘、くるみ殻、湿式ではおがくずと油のメデアを用いる。噴射加工法では、くるみ殻、ガラスビーズ、熱可塑性ペレットを用いる。打抜き法も用いるが、部品の形に合わせるのが難しい。</li> <li>熱可塑性の場合は、バリに衝突してもエネルギーを吸収できず弾性変形に使われ、有効に除去されないため、噴射剤の質量や衝撃速度を上げる必要がある。さらに、加工品を冷却してもらくすると効果的である。噴射剤として、ガラスビーズ、重曹粉末を用いる。</li> </ul>
II 切削法	<ul style="list-style-type: none"> <li>刃物の使い方が難しい。仕上げ面品質、精度やコストの幅は大きい。自動化の問題は、部品輪郭のセンサの選択と、そのフィードバックの制御と刃物の位置決めである。複合材では、振動切削を用いるとガラス繊維がカットされる。</li> <li>熱硬化性に対しては、手やすり、ブローチ、研磨ベルト、ナイフ、カッタなどを用いる。</li> <li>熱可塑性に対しては、ナイフ、カッタを利用した手加工が多い。打抜きを用いる場合もある。</li> </ul>
III (溶融法) 丸め法	<ul style="list-style-type: none"> <li>バーナを用いるとよく取れるが、エッジが焼けやすい。ヘアドライヤーでは、熱量不足なので、熱風装置が工夫されている。複合材では、ガラス繊維が残りやすい。</li> </ul>

表2 成形品のトラブルと金型側の起因

金型側起因	成形品の外観											強度不足	ポイント		
	寸法・精度	充てん不足	バリ	ひけ	ジェットニング	ウエルドライン	フローマーク	銀条・気泡	風糸・焼け	表面のくもり	変形			クラッキング	
成形品設計不適切	○														肉厚の均一化、適性抜勾配、複雑化を避けるひけ防止策
収縮率設定の不適切	○														適当樹脂・成形条件・成形品肉厚の関係による
金型強度の不足・重心位置不適切	○	○													成形条件により金型にかかる力が変化する
ランナー、ゲート方案(断面形状)	○	○	○	○										○	無理のない樹脂流動圧力の伝達を考慮する
(配置・位置)	○	○	○	○	○									○	樹脂の流動化
(点数)	○	○	○	○	○									○	ジェットニング、ウエルドマーク、フローマーク、銀条は出やすい樹脂傾向がある
(サイズ)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
(コールドスラッグ)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
ガスベントの不足	○	○												○	過冷却層を排除する
アンダーカット処理機構の不良	○													○	樹脂の合流層
突出機構の不良	○													○	位置精度の再現性と確保しやすい構造と耐摩耗性対策
金型温度不十分(型温)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	突出力が有効に働く突出位置検討と樹脂の剛性配慮
金型加工精度の不良	○	○												○	過冷却層に応じた温度・水穴の平均配置(熱分布に応じて)、水穴径の適性化
組立精度の不良	○	○												○	
表面状態の不良	○	○												○	突出時の摩擦力に配慮

○:関係がある / \:成形条件・金型修正で向上はよくなる、下向きは悪くなる



図11 成形品の品質に及ぼす特性要因図

を生じる。ゲートでのカット残りも、一種のバリといえる。型のずれも、除去しにくいバリを発生させる。

図12は、プラスチックの種類に応じた金型すきま(静的状態)とバリ高さとの関係を示している。金型は、こんにやくのように変形するものであり、コンピュータ・シミュレーションによりある程度の解析も可能である。このようなシミュレーションや材料力学に基づく変形計算

の結果を利用し、剛性のある金型の構造設計を行うことが大切である。

プラスチック成形品といっても、熱硬化性と熱可塑性プラスチックの種類の違い、洗濯機槽、扇風機、電話、カメラなどの精密部品、半導体のモールドなど、製品の違いにより、バリの生成状況も対策も異なる。

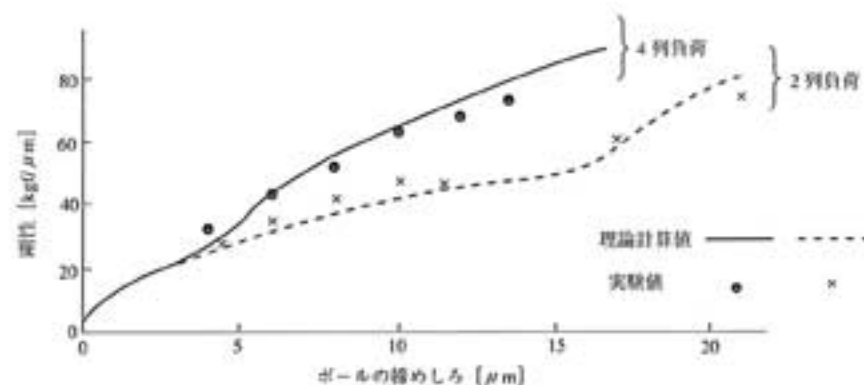


図14 4列負荷と2列負荷の剛性比較

ール列は、たとえば図12のようにアンギュラな配置をなしている。したがって、上からの荷重はこの例では上側のボール列で支えることになり、 $i=2$ である。

しかし、LYシリーズではオフセット $e_1$ が小さいので、重予圧時には図13のように4点接触となっているため、たとえば上からの荷重は下側のボール列で受けるだけでなく、上側の列でも受けている。いま、上からの外部荷重が働くとベアリングが下方に沈み、上・下のボールは下方に押し付けられるので、下側 $S_2$ の接触面積が増加するが、上側の $S_1$ の面積はそれ以上の割合で増加していき、剛性がより重要となる重荷重が作用するときには、両者の面積がほとんど同じになってくる。こうなった状態では、ボール列数は4と考えるとよい。列数が常に2のタイプのリニアガイドと、4になるLYとを比較すると、後者は前者の $2^3$ 乗、すなわち約1.6倍の剛性をもつことになる。

4列負荷と2列負荷で計算どおりの差が出ているかどうかを実験したので示す。

- ① 4列負荷のテストピース…LY25、レール幅：23  
 動定格荷重  $C=1740$  kgf  
 初期すきませロ、精度等級 P5
- ② 2列負荷のテストピース…上記LY25のボール溝の一部を削除して、重負荷時にも4点接触しないようにしたもの

これらにおいて、数種類の締めしろとなるボールを逐次ボール溝に圧入していったときの剛性を測定した結果を図14に示す。5~15 $\mu$ mの締めしろの範囲では、計算値1.6倍に近い比の値となっている。

### 3.5.2 耐衝撃性

永久変形量 $\delta$ と衝撃荷重との関係は次のようである。

$$\delta = g \left( \frac{F}{H_0 \sin \alpha} \right)^2 \frac{1}{D_w} \quad (2)$$

永久変形量は負荷するボール列数 $i$ の2乗に反比例しているから、オフセットゴシックアーク溝形状のものは大きな衝撃荷重下では4列負荷となり、サーキュラアーク溝形状の2列負荷の $(2/4)^2$ 、すなわち0.25倍の永久変形しか生じないはずである。図15はオフセットゴシックアーク溝の基本番号LH45レール幅45、動定格荷重(=5260 kgf)とサーキュラアーク溝の前者相当の基本番号45の同一荷重での圧痕の比較である。衝撃荷重を与える代わりにLH45の動定格荷重 $C_0$ に等しい値12.1トンの重荷重を加えたときの、ボール接触楕円の中心部を通る溝の長手方向への表面形状をタリサーフで走査したものである。理論値の0.25倍よりもやや大きい、4列負荷は2列負荷のもの0.3~0.4倍の圧痕深さとなっている。

### 3.5.3 摩擦特性

#### [1] 4点接触形での摩擦特性

オフセットゴシックアーク溝のリニアガイドには、予圧時の動摩擦が外部負荷に対して一定という特性がある。図16は、LY45のベアリングの長手方向の長さを長くした超重荷重形において、予圧をZ0(すきま)からZ4(重予圧)まで変化させたときのラジアル荷重と動摩擦力の関係を示したものである。

Z0では完全2点接触であるから、荷重に比例して動摩擦力が増加している。

Z4では予圧が大きいためオフセットの影響が小さ

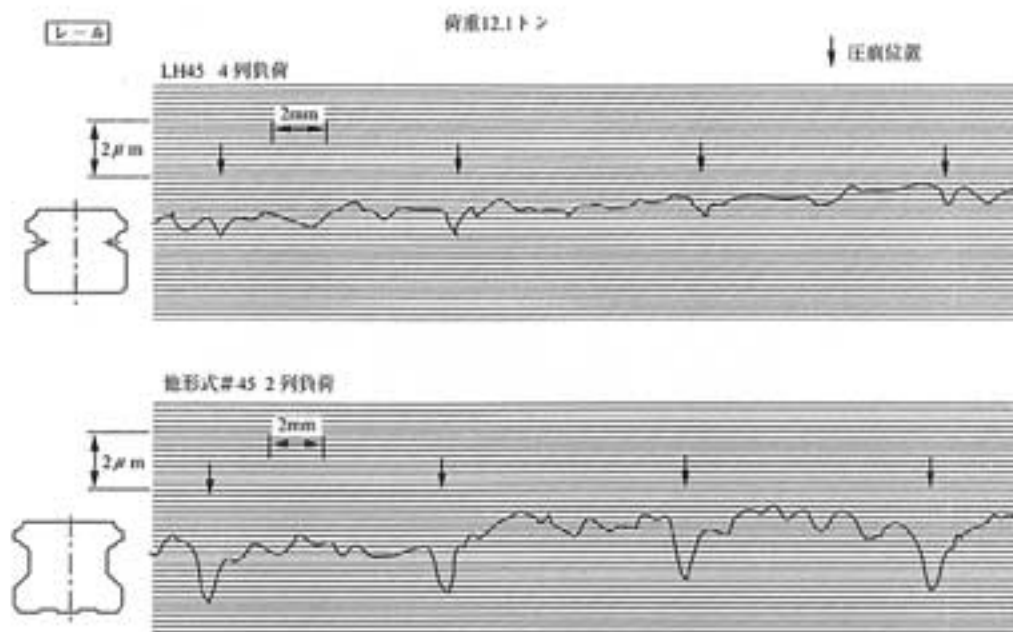


図15 荷重のときの圧痕の比較

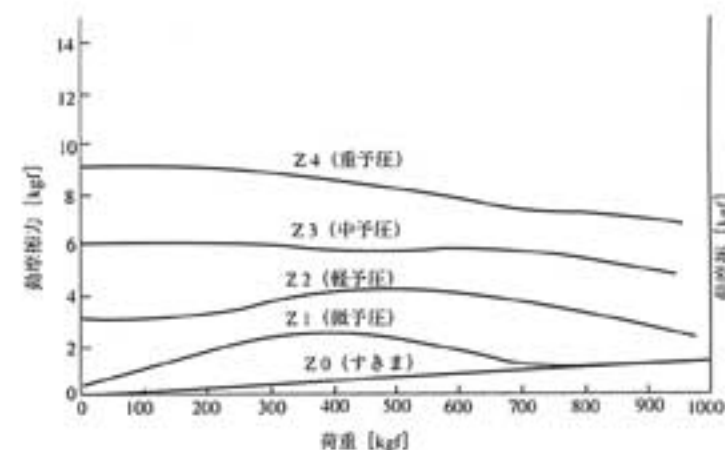


図16 予圧、外部荷重と動摩擦

く、荷重ゼロでは完全4点接触に近い状態であるが、荷重が増加して接触面積が増すことによる摩擦の増大と、2点接触的な接触状態に近づくこと、すなわち主荷重線に直角方向の小接触楕円が小さくなることによる摩擦の減少とが相殺されるために、0~200 kgfの領域では、およそ一定の摩擦を保つ、さらに荷重が増すと、より2点接触に近づくので摩擦は逆に漸減を始める。

このように総じてZ2~Z4ではラジアル荷重に無関係に一定値を保つから、ロストモーションに対する制御系の補正を一定値とすればよいこと、吸振性が設定値において一定であること、などにより切削系工作機械に適合した特性をLYシリーズが有することがわかる。

#### [2] 2点接触形での摩擦特性

近年、パンチングプレス、レーザ加工機など、非切削