

転がり軸受の基礎(1)

内容 ・ 滑り摩擦と転がり摩擦の基礎

東京理科大学
野口 昭治

1. 滑り摩擦と転がり摩擦の基礎

(1) 摩擦について

摩擦の分類

- ・滑り摩擦：摩擦面が直接滑り運動をする際の摩擦
- ・転がり摩擦：摩擦面間に**転動体が存在**し、転動体が転がることによって摩擦面が移動する

摩擦力 (F) = 摩擦係数 (μ) × 垂直抗力

摩擦係数：摩擦の大小を表す尺度

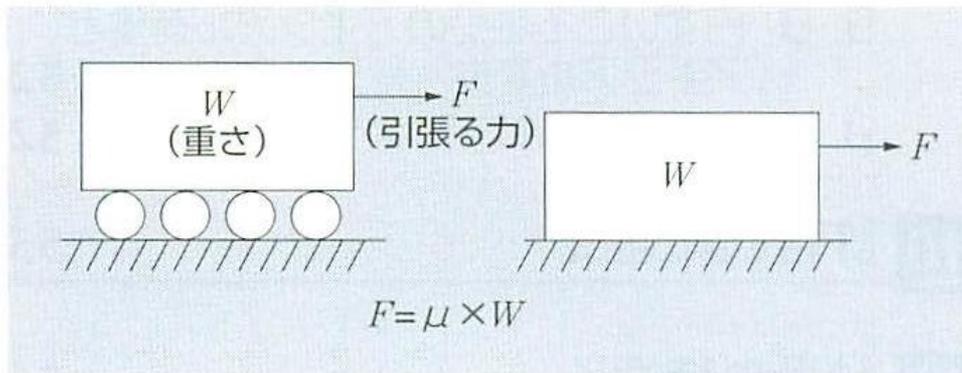


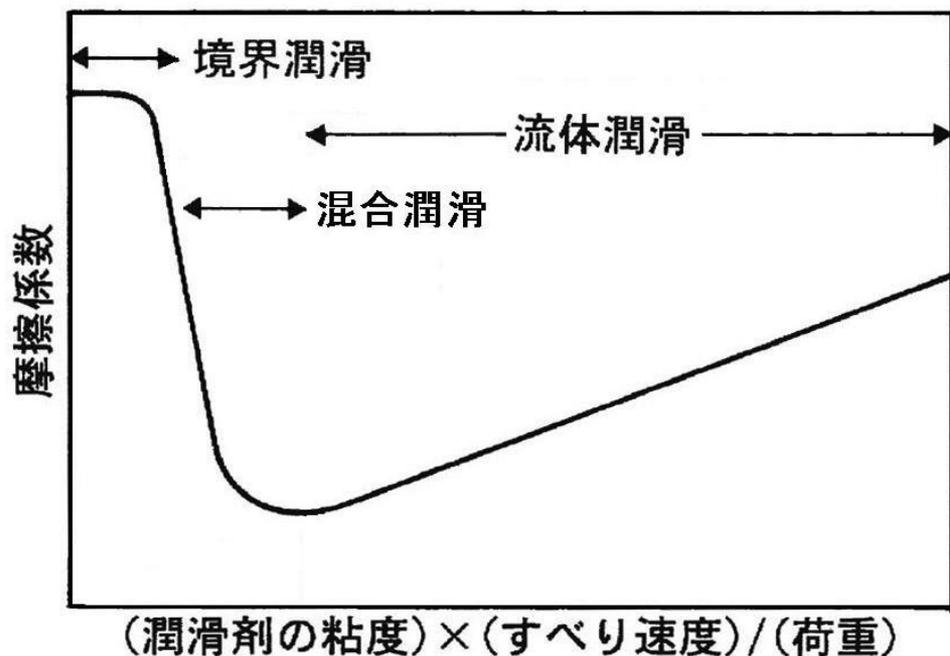
図1.1 摩擦力の比較

一般的に

滑り摩擦 > 転がり摩擦

(2) 摩擦形態について(分類)

ストライベック線図 による分類



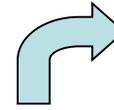
横軸：軸受定数
形成される流体膜厚
(潤滑油膜)と等価
縦軸：摩擦係数

境界潤滑：固体／固体接触領域が大きい

混合潤滑：流体膜の厚さの増加によって荷重の分担が摩擦の大きな固体接触部から摩擦の小さな流体膜部に遷移する。

流体潤滑：流体膜によって固体表面は完全に離れる

流体潤滑領域

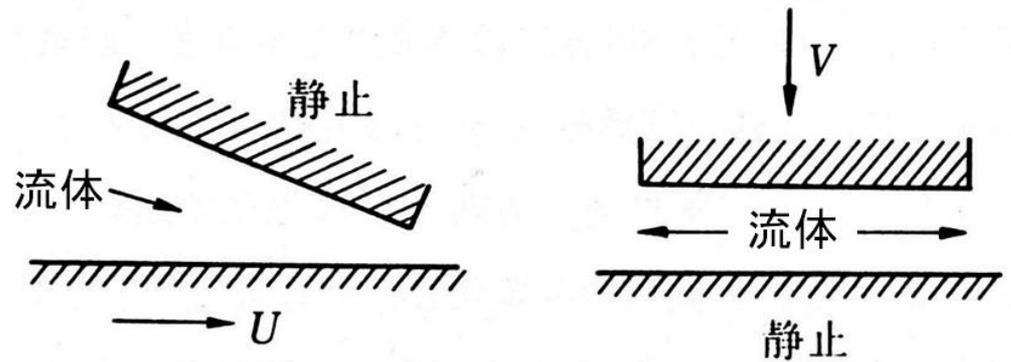
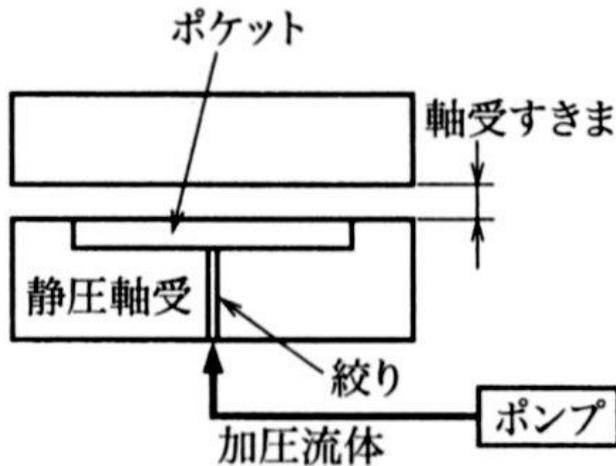


摩擦は、ほとんど無い

流体潤滑：流体膜によって固体表面は完全に離れる



流体膜で荷重を支持するためには、
摩擦面間での**圧力の発生**が不可欠



動圧：動くことによって自己供給

静圧：外部から圧縮流体を供給

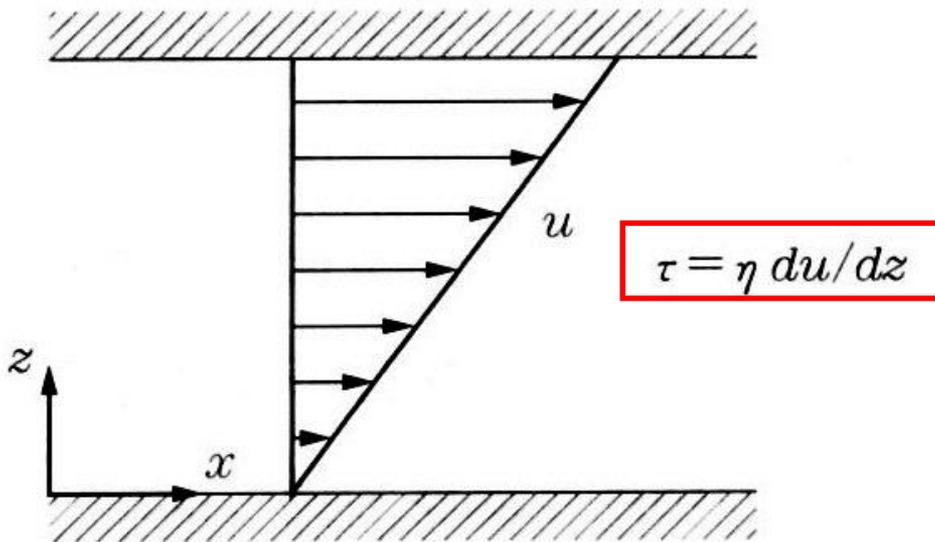
実用的方法 ①くさび作用
②絞り作用

流体潤滑になると、なぜ摩擦係数が大きくなるか？



膜を形成する流体の物理的性質に起因する

潤滑油の多くは、**ニュートン流体**



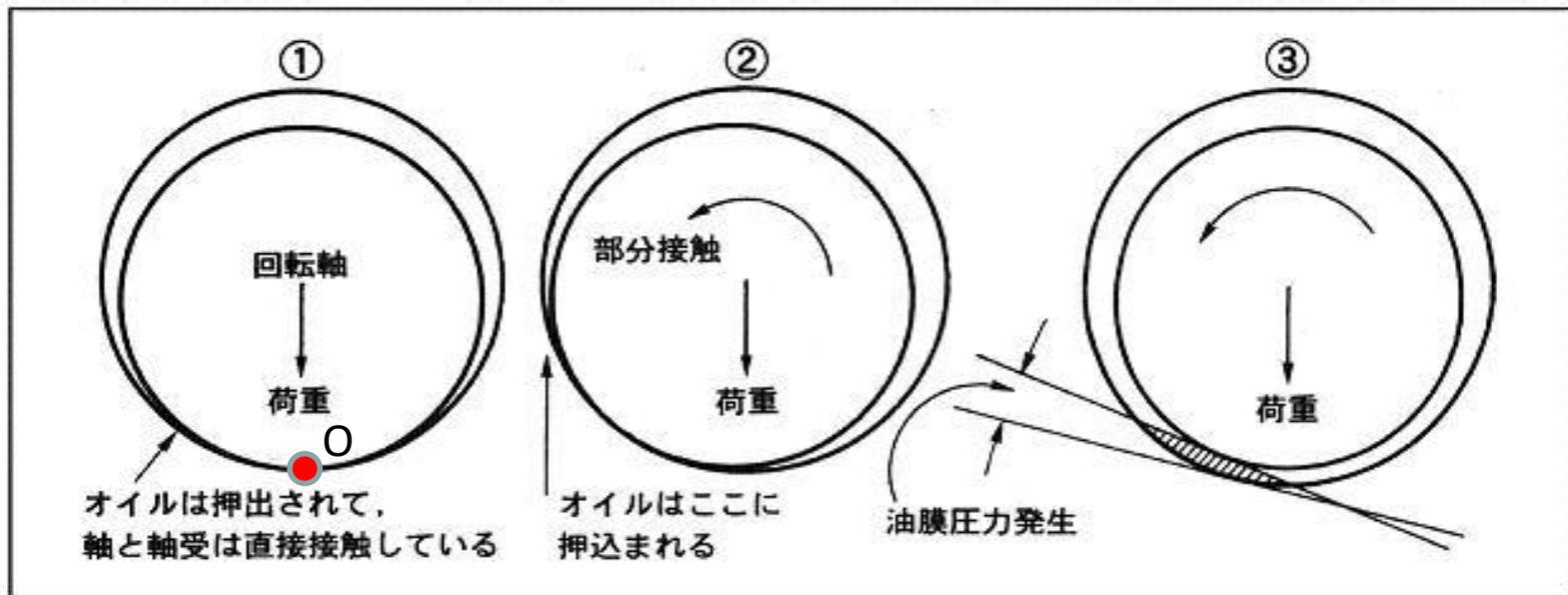
軸受では、回転速度が高くなると油膜が厚くなるので、ストライベック線図では、右側へ移動する



回転速度が高くなるので、流体膜のせん断速度が高くなり、せん断抵抗も大きくなり、回転トルク(摩擦係数)も大きくなる

ニュートン流体: **せん断抵抗はせん断速度に比例する**の性質

ジャーナル軸受における流体膜形成メカニズム



- ① 穴と軸の空間(すきま)に流体が存在している。穴と軸の接触点を0とすると、円周方向の空間は0に向かって自然にくさび形状となっている。
- ② 軸が左方向に回転を始めると、軸表面の流体はくさびに引き込まれる。
- ③ 0の左側に圧力が発生して、軸は浮上する。



すきまのある穴と軸は、回転によって自然に流体膜が形成され、軸が浮上する

弾性流体潤滑について

摩擦面の弾性変形の窪みによって
潤滑膜の領域が広がり、
接触面圧が下がる潤滑領域

油膜厚さは、定性的には**軸受定数**
で表されるが、油膜厚さにおける影響
度は同じではない。

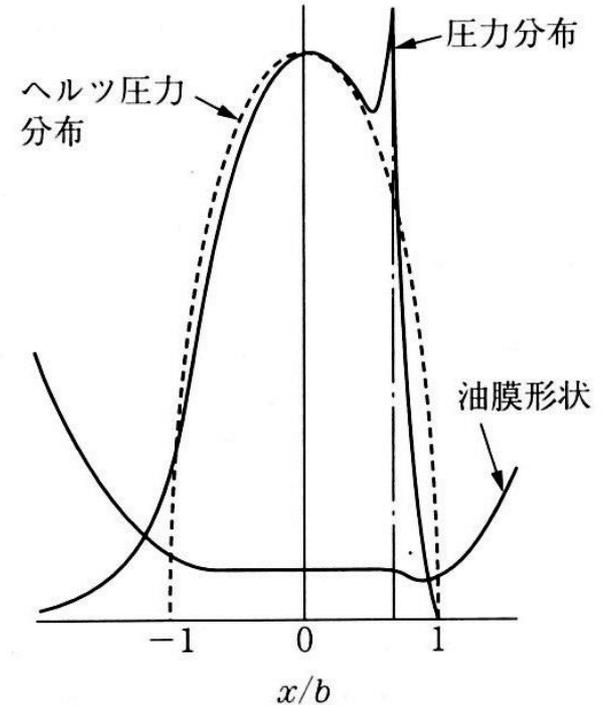
→ **括弧の指数**が影響度を示す

線接触の式 (Dowson-Higginsonの式)

$$\frac{h_{\min}}{R} = 2.65 \left(\frac{\eta_0 \bar{u}}{ER} \right)^{0.7} (\alpha E)^{0.54} \left(\frac{W}{ERL} \right)^{-0.13}$$

点接触の式 (Chittendenの式)

$$\frac{h_{\min}}{R_x} = 3.68 \left(\frac{\eta_0 \bar{u}}{ER_x} \right)^{0.68} (\alpha E)^{0.49} \left(\frac{W}{ER_x^2} \right)^{-0.073} [1 - \exp \{ -0.67 (R_y/R_x)^{2/3} \}]$$



弾性流体潤滑のイメージ

流体潤滑領域となるためには?

油膜厚さと表面粗さの関係が重要

$\Lambda = \text{最小油膜厚さ}(h_{\min}) / \text{合成表面粗さ}(\sigma)$

合成表面粗さ: $\sigma = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{1/2}$

σ_1 , σ_2 : 各摩擦面の自乗平均平方根粗さ

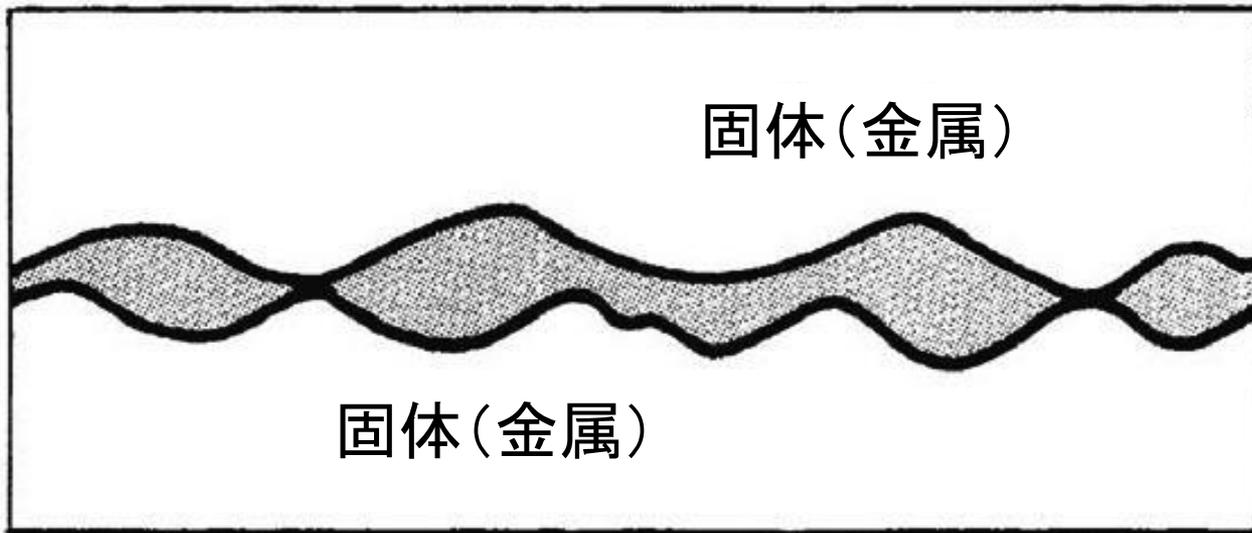


$\Lambda > 3$: 流体潤滑領域

転がり軸受においても、性能的には流体潤滑領域が望ましい

境界潤滑領域

固体／固体接触領域が大きい潤滑領域
(ただし、潤滑剤は存在する)



固体接触が
主体のため、
摩耗も多い

流体の物性よりも摩擦面に形成された**吸着膜**の影響が大きい

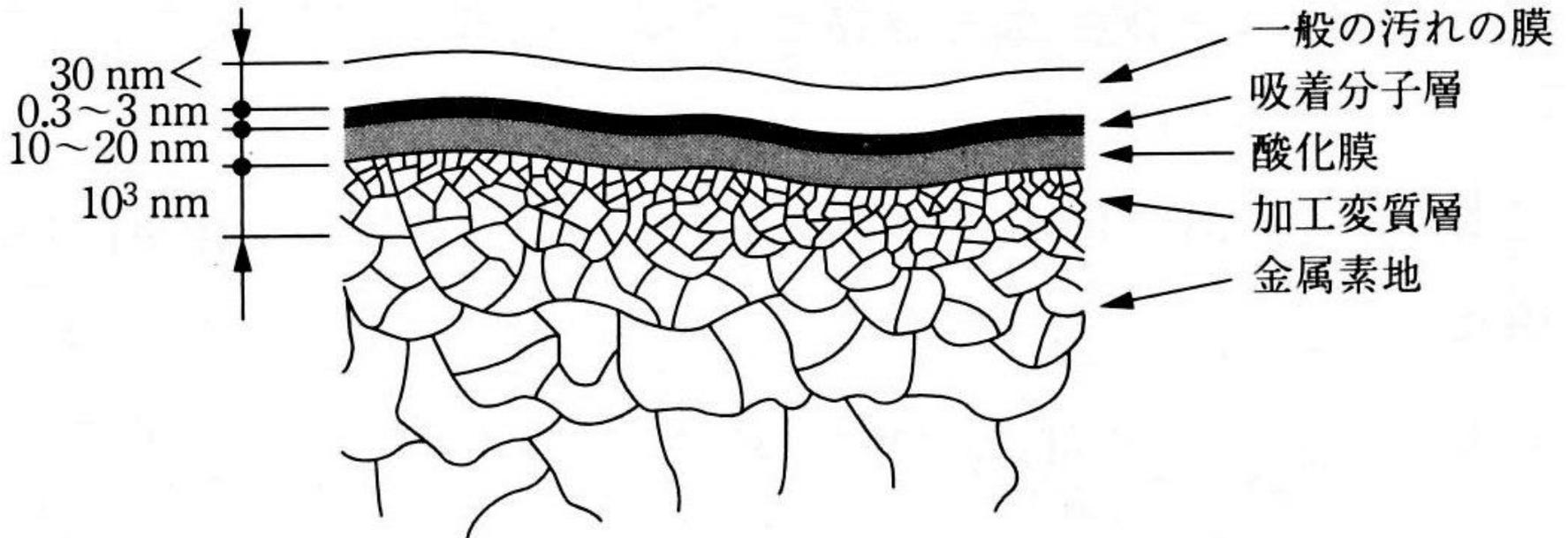
- ・油性(摩擦軽減)、極圧性(焼付き性向上)、耐摩耗性
- ・添加剤の影響も大きい

一般的な金属表面の構造

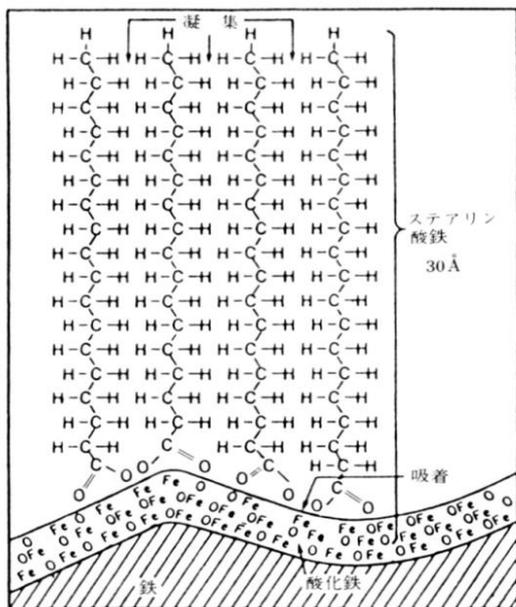
摩擦・摩耗は表面同士が擦れることが原因



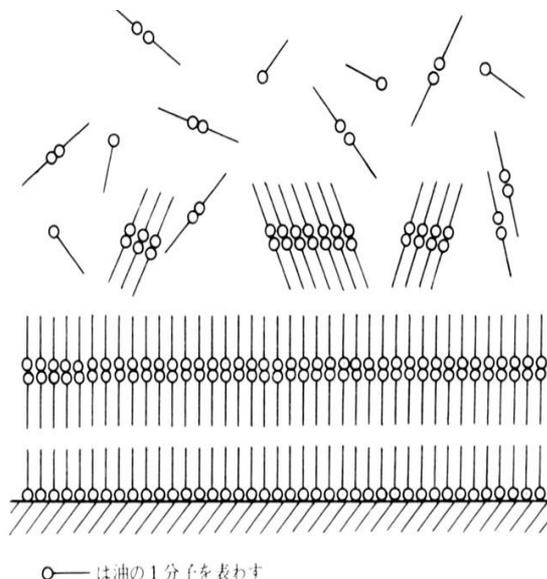
表面特性を知ることは非常に重要



吸着膜

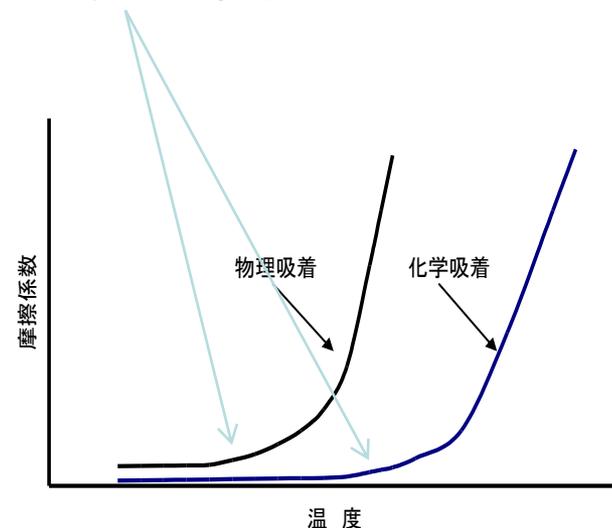


化学吸着



物理吸着

転移温度(吸着膜の融点)



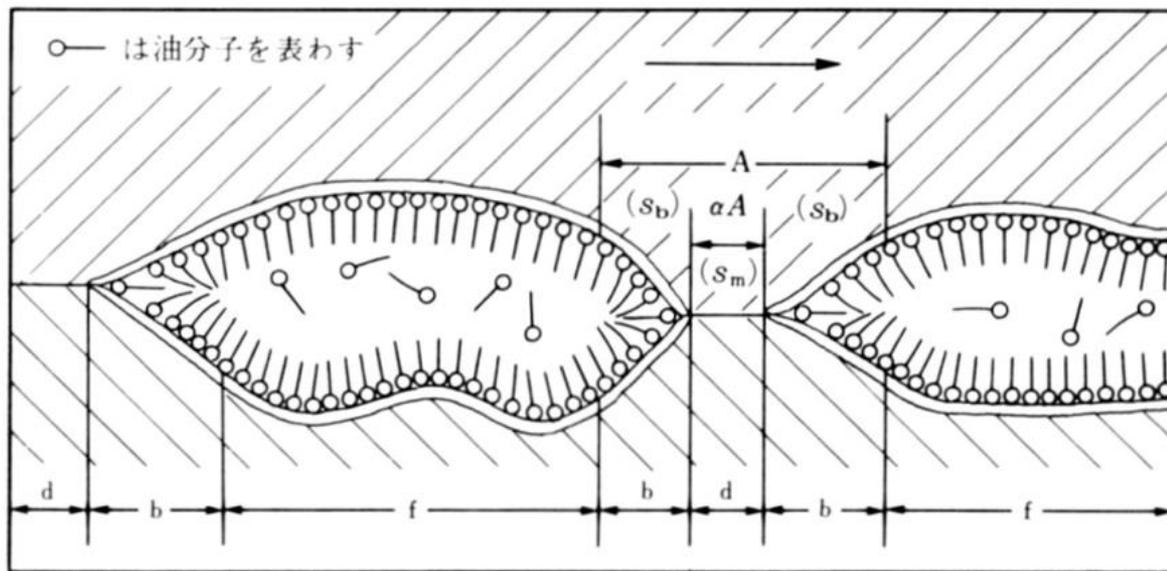
吸着膜の温度特性

化学吸着: 化学反応を起こして、化学的に吸着している
物理吸着: ファンデルワールス力(分子間力)で吸着している

結合力: 化学吸着 > 物理吸着

混合潤滑領域

流体膜の厚さの増加によって荷重の分担が摩擦の大きな固体接触部から摩擦の小さな流体膜部に遷移する潤滑領域（摩擦係数は減少する）



d: 乾燥摩擦, b: 境界摩擦, f: 流体摩擦

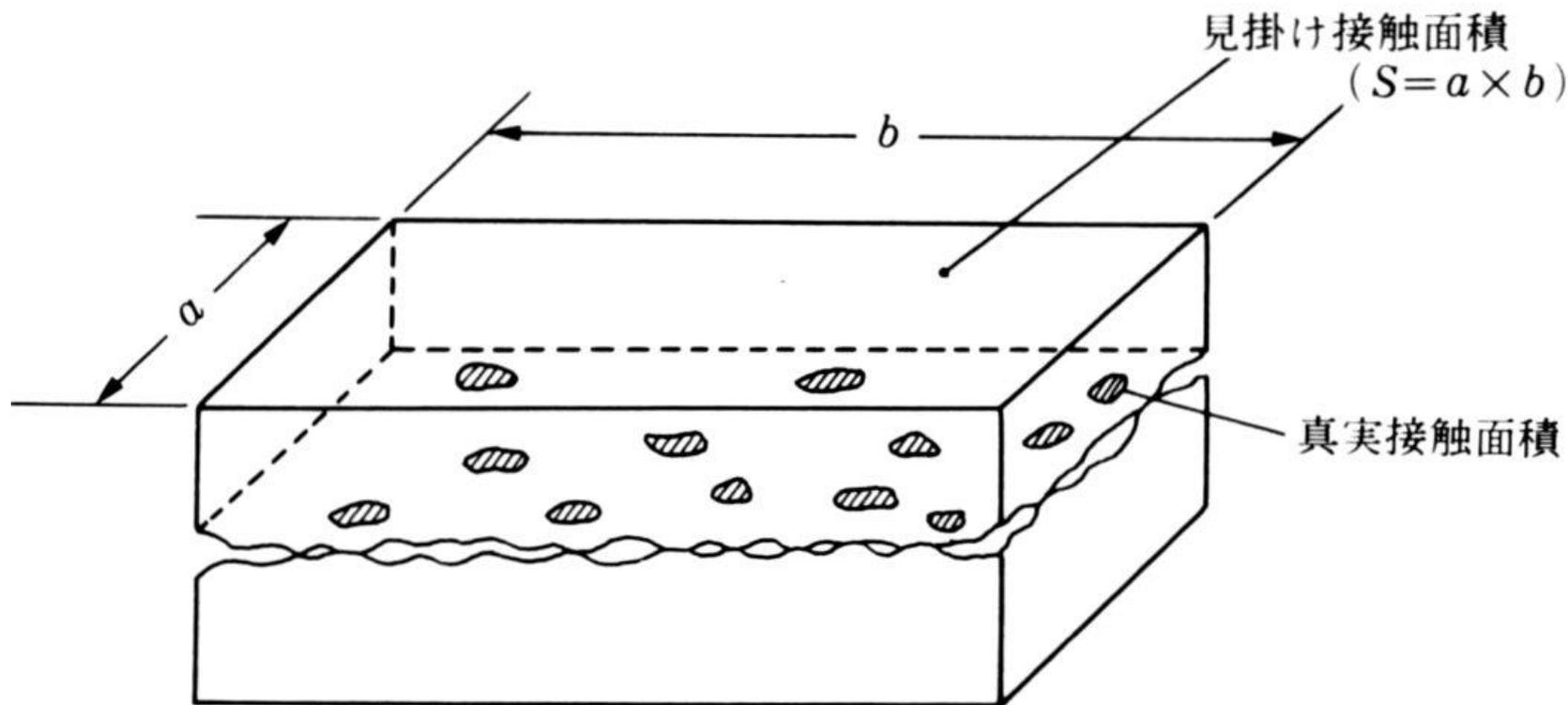
固体接触が減少するため、
摩擦も減少する

固体、境界、流体潤滑が混在 → 流体潤滑が増加する

(3) 滑りにおける摩擦のメカニズム (摩擦係数の成り立ち)

接触面の実際

平面 (摩擦面) どうしは、見かけ上の面積すべてで接触しているわけではない



真実接触面積はかなり小さい

真実接触面積の実例

軟鋼平面における真実接触面積³⁾

(見掛け接触面積 $S = 2\,000\text{ mm}^2$)

荷重 W (kgf)	真実接触面積 A (mm ²)	$\frac{A}{S}$	真実接触点 の数
500	5	$\frac{1}{400}$	35
100	1	$\frac{1}{2\,000}$	22
20	0.2	$\frac{1}{10\,000}$	9
5	0.05	$\frac{1}{40\,000}$	5
2	0.02	$\frac{1}{100\,000}$	3

$$A = W / p_t$$

p_t : 材料の塑性流動圧力

乾燥摩擦：清浄な面間の摩擦

摩擦の原因

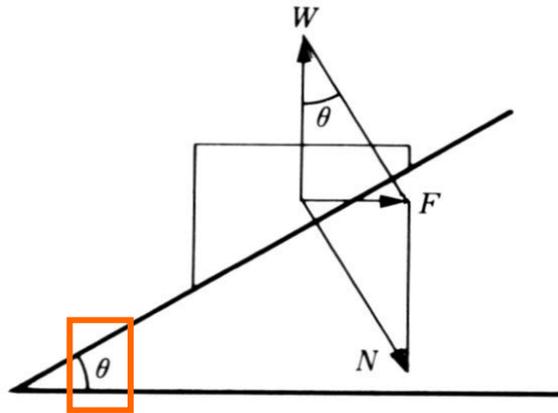
摩擦の法則（クーロンの法則）

- (1) 摩擦力は接触面に加わる垂直荷重に比例
- (2) 見かけの接触面積には無関係
- (3) 摩擦力は相対的なすべり速度に無関係
- (4) 静止摩擦は動摩擦よりも大きい

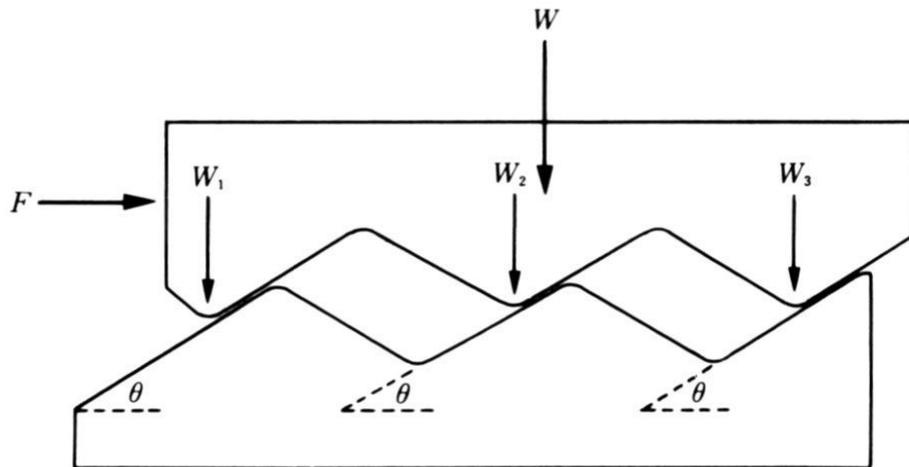


摩擦は表面凹凸の乗り越えに起因する
(凹凸説)

凹凸説：表面の凹凸を乗り越える際の力が 摩擦力



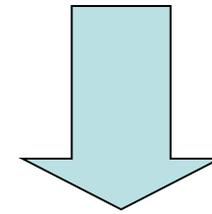
(a)



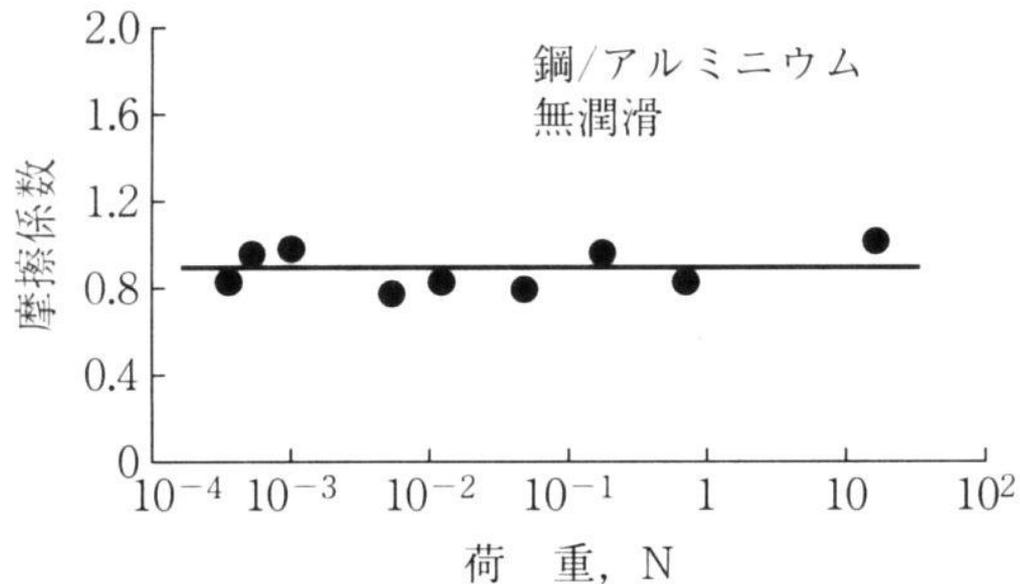
$$F = W \tan \theta$$

(b)

摩擦係数は、左図のように
幾何学的に求められる



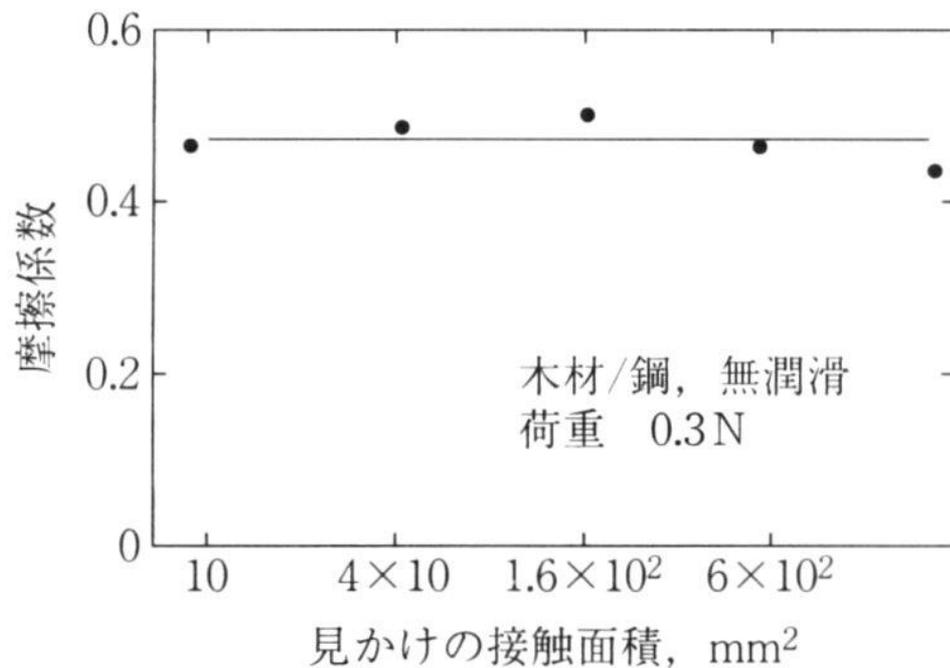
$$\mu = \tan \theta$$



(1)の検証

摩擦力を摩擦係数に
置き換えると,

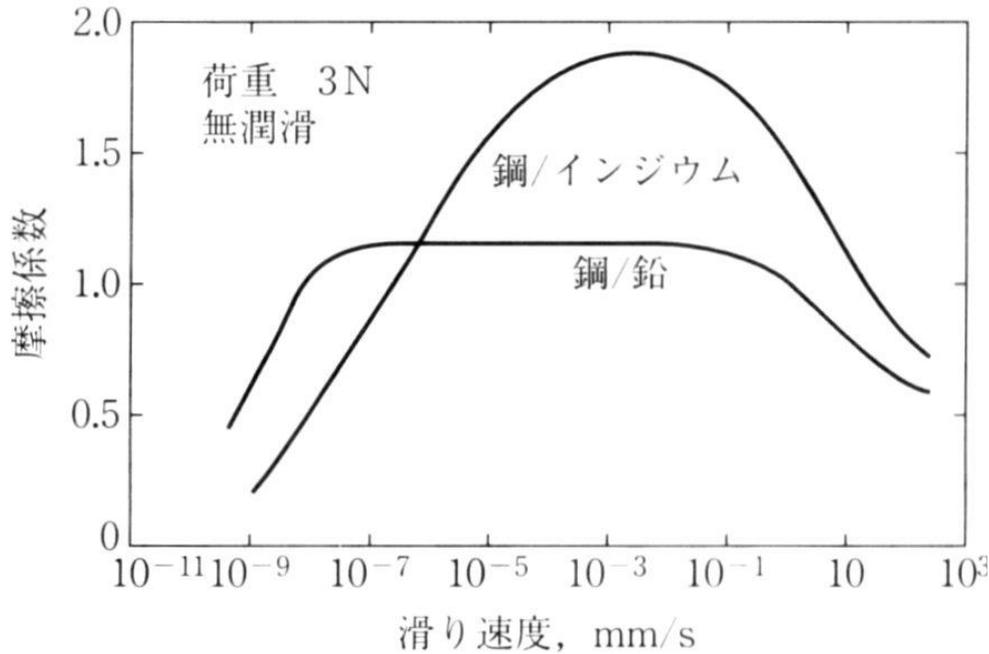
**摩擦係数は一定
となる**



(2)の検証

荷重を一定として,
接触面積を変化させ
ても

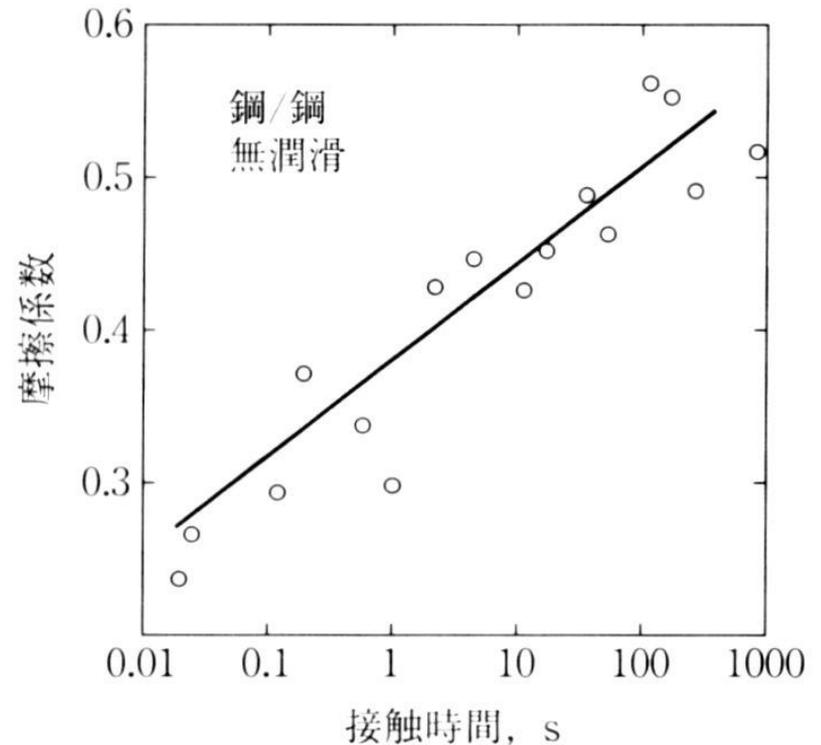
**摩擦係数は一定
となる**



← (3)は**低速**や**高速**で成立しないことが多い

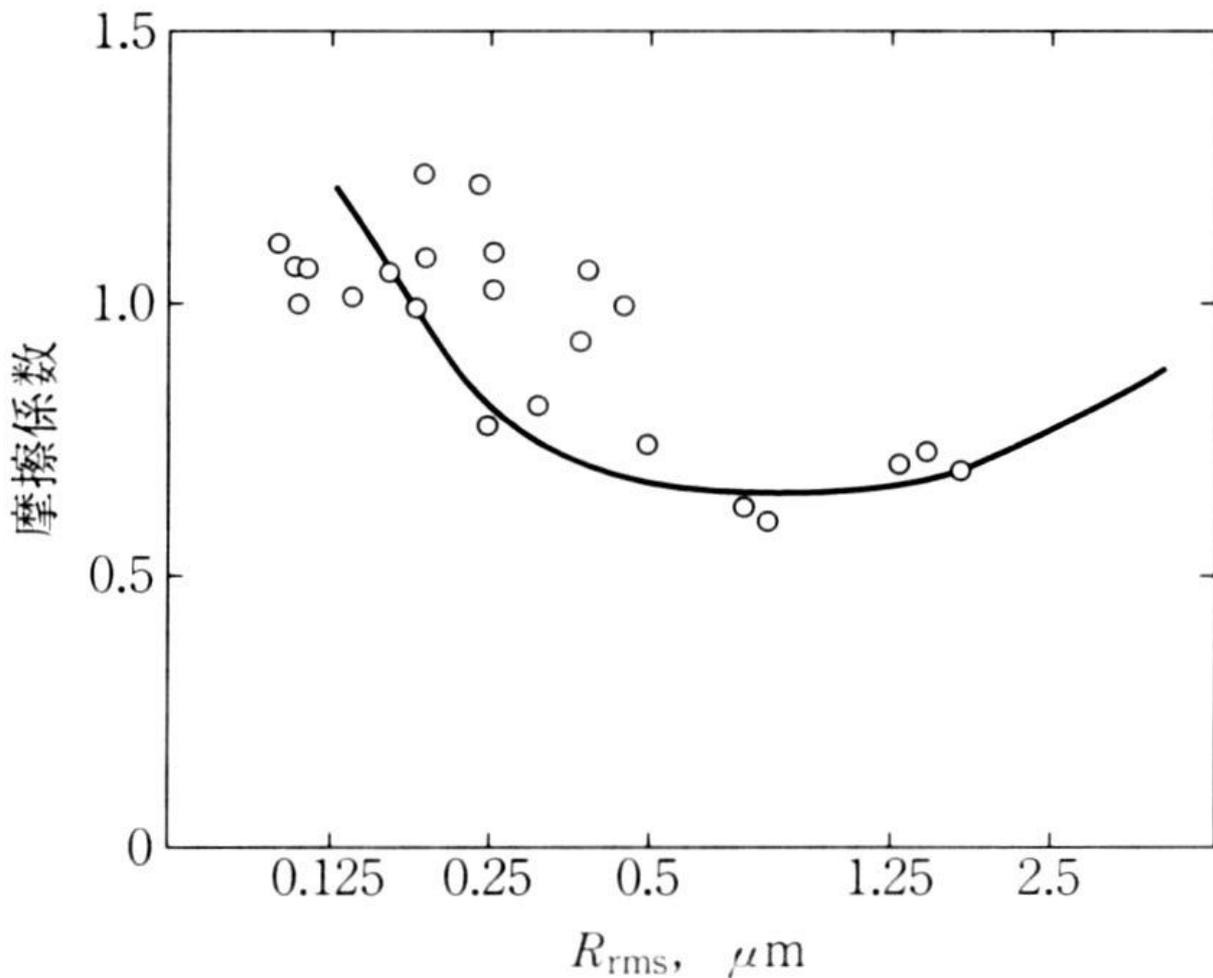
(4)は高分子等の**粘弾性体**では成立しないことがある

静止摩擦係数は接触時間に依存する結果もある



20世紀に入って →

凝着説



凹凸説であれば、摩擦係数は単調増加のはず



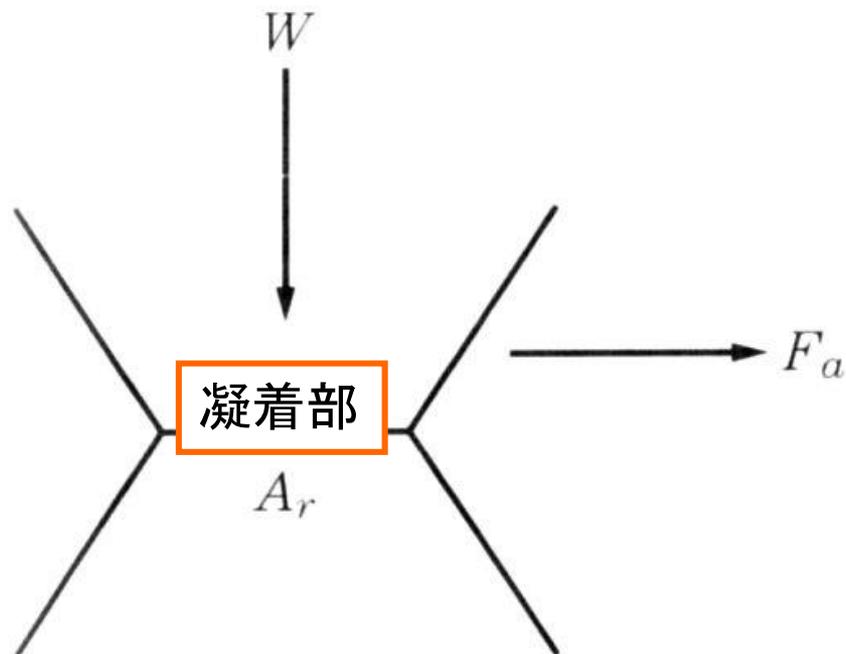
凹凸説では説明できない現象が多くなってきた

摩擦は表面で起こる凝着と凝着部のせん断抵抗

凝着による摩擦の発生

凝着：固体2面が融着して結合する現象

- ① 真実接触部では、接触面圧が非常に高いので、接触部では凝着が起こっている。
- ② 凝着が起こると、その部分は繋がり、一体化する。
- ③ 2物体をすべらせるためには、一体化した部分を切断する必要がある。

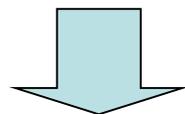


凝着部をせん断する力が
摩擦力となる

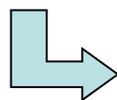
凝着説

掘り起こしによる摩擦の発生

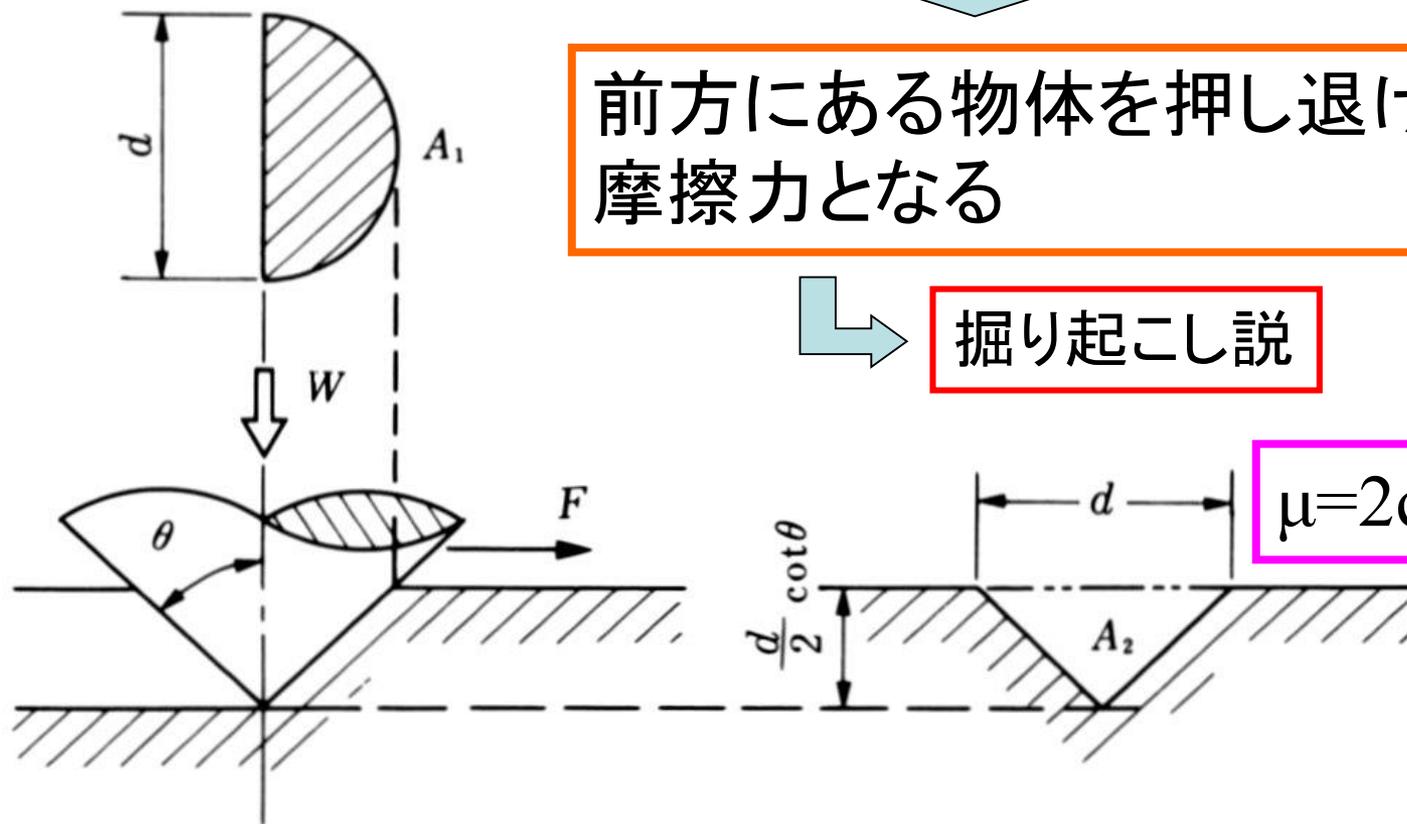
- ① 接触2表面の硬さの差が大きいと硬い表面が柔らかい表面に食い込む。
- ② その状態で2物体をすべらせると移動する前方にある物体を押し退ける必要がある。



前方にある物体を押し退ける力が摩擦力となる



掘り起こし説



$$\mu = 2 \cot \theta / \pi$$

$$F = \text{凝着} F_a + \text{掘り起こし} F_p$$

一般の機械加工面では、表面粗さが小さく、 $F_p \ll F_a$ のため、 F_p は無視できる



$$F_a = A_r s = (W / p_m) s = (s / p_m) W$$



μ : 摩擦係数

$$\mu = \frac{F}{W} = \frac{s}{p_m} = \frac{\text{凝着部のせん断強さ}}{\text{軟らかい物体の塑性流動圧力}}$$
$$\dot{=} \frac{\text{軟らかい物体のせん断強さ}}{\text{軟らかい物体の塑性流動圧力}}$$

sおよび p_m は材料の特性によって規定される



材料の種類(組合せ)によって大きく変わらない

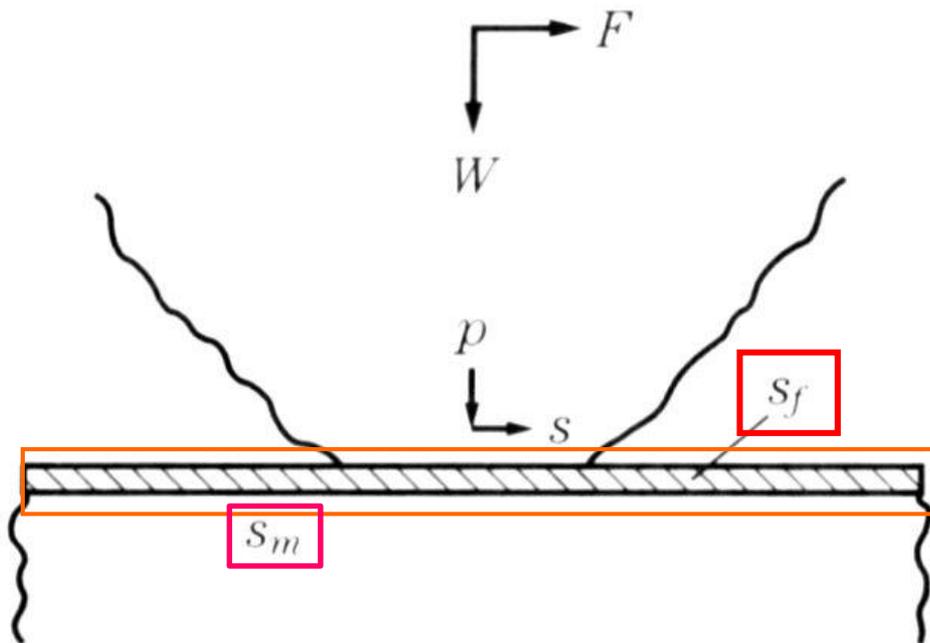
一般の金属: $p_m = (3 \sim 5)s \rightarrow \mu = 0.2 \sim 0.3$

表面膜(吸着膜)の影響

摩擦係数の分子は、凝着部のせん断強さ



摩擦係数を小さくするには、固体自身よりも弱いせん断強さの**表面膜(吸着膜)**を形成すればよい

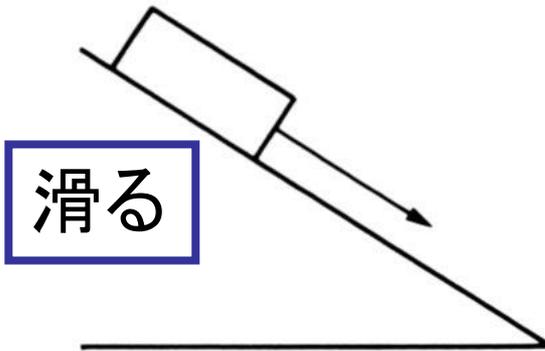


$$S_f < S_m$$

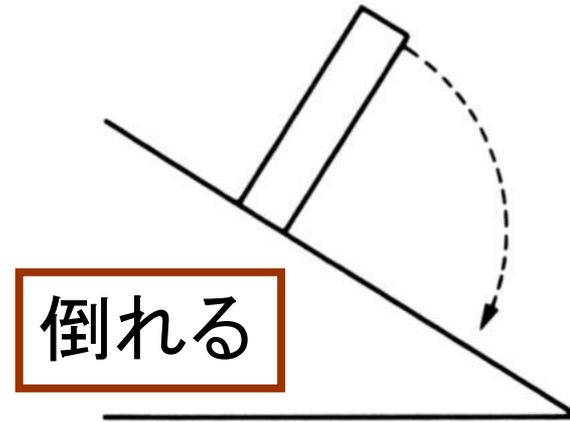
であれば、摩擦係数は減少する

(4) 転がりのメカニズム (どうすれば、転がるか)

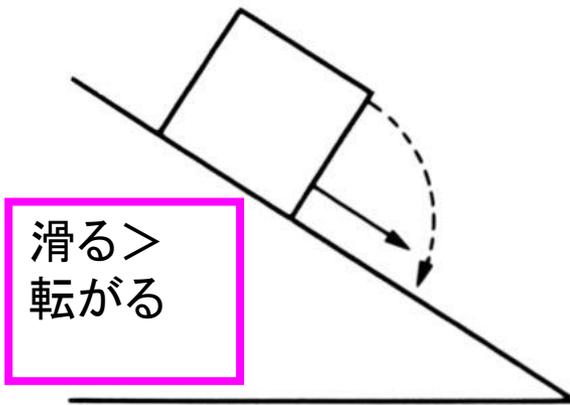
でも転がらない



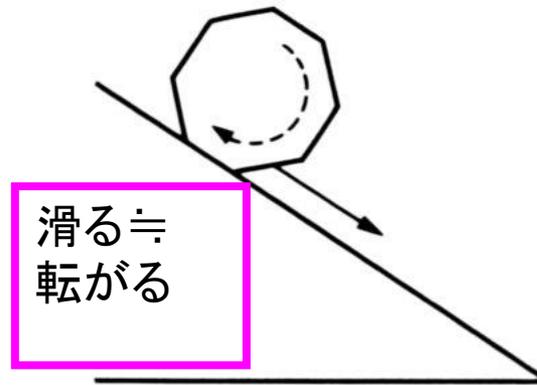
(a)



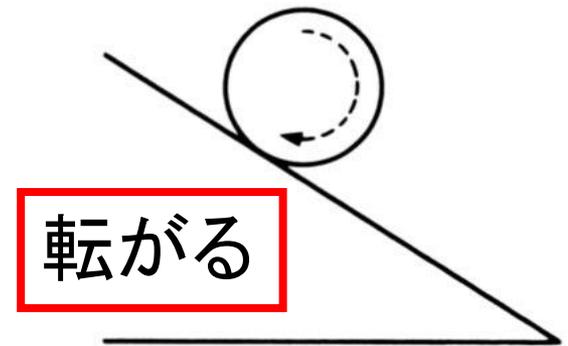
(b)



(c)



(d)

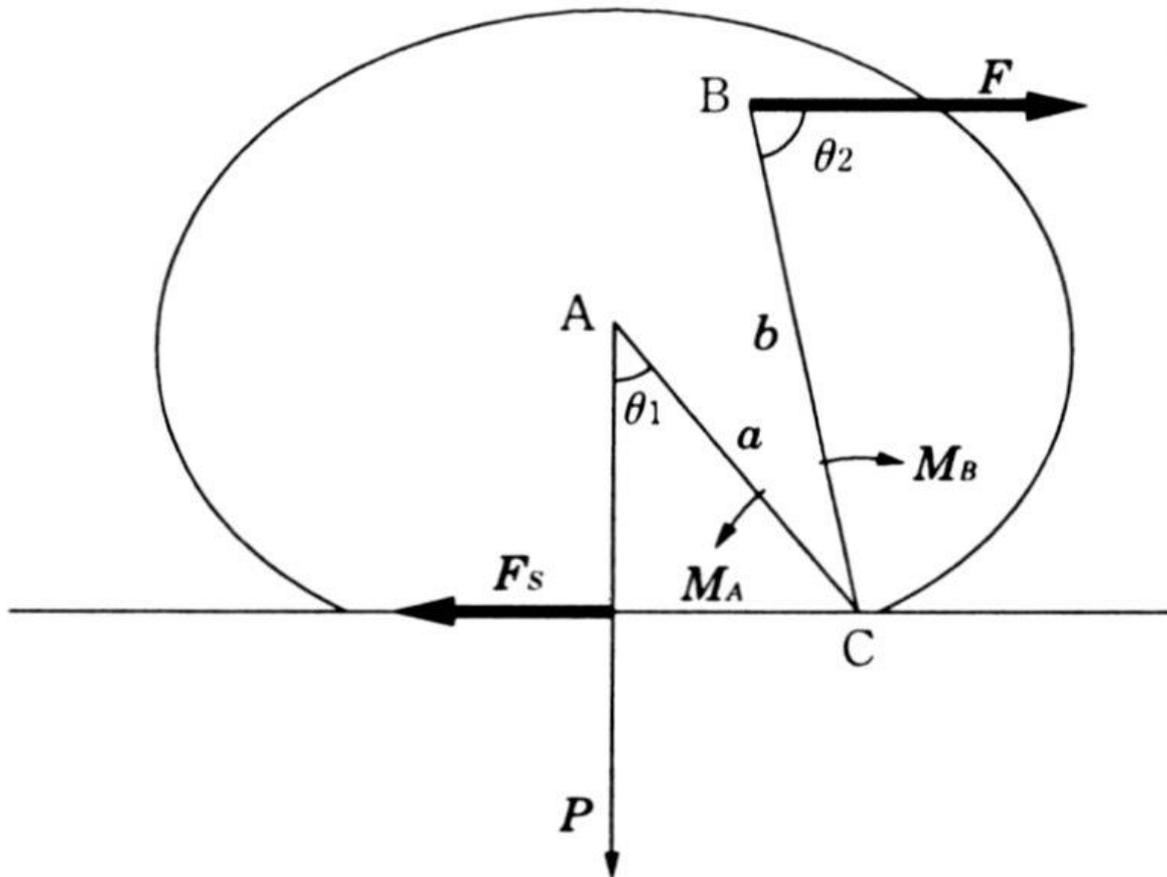


(e)

滑りから転がるために必要なモノは？

転がる ← 倒れるが連続的に起こる現象

モーメントと摩擦力との関係で決まる



- (1) $F < F_s$, $M_A > M_B$
静止している
- (2) $F > F_s$, $M_A > M_B$
すべり運動をする
- (3) $F < F_s$, $M_A < M_B$
転がり運動をする
- (4) $F > F_s$, $M_A < M_B$
初期にすべり,
徐々に転がり,
最後は転がり運動

(4)の場合の速度関係

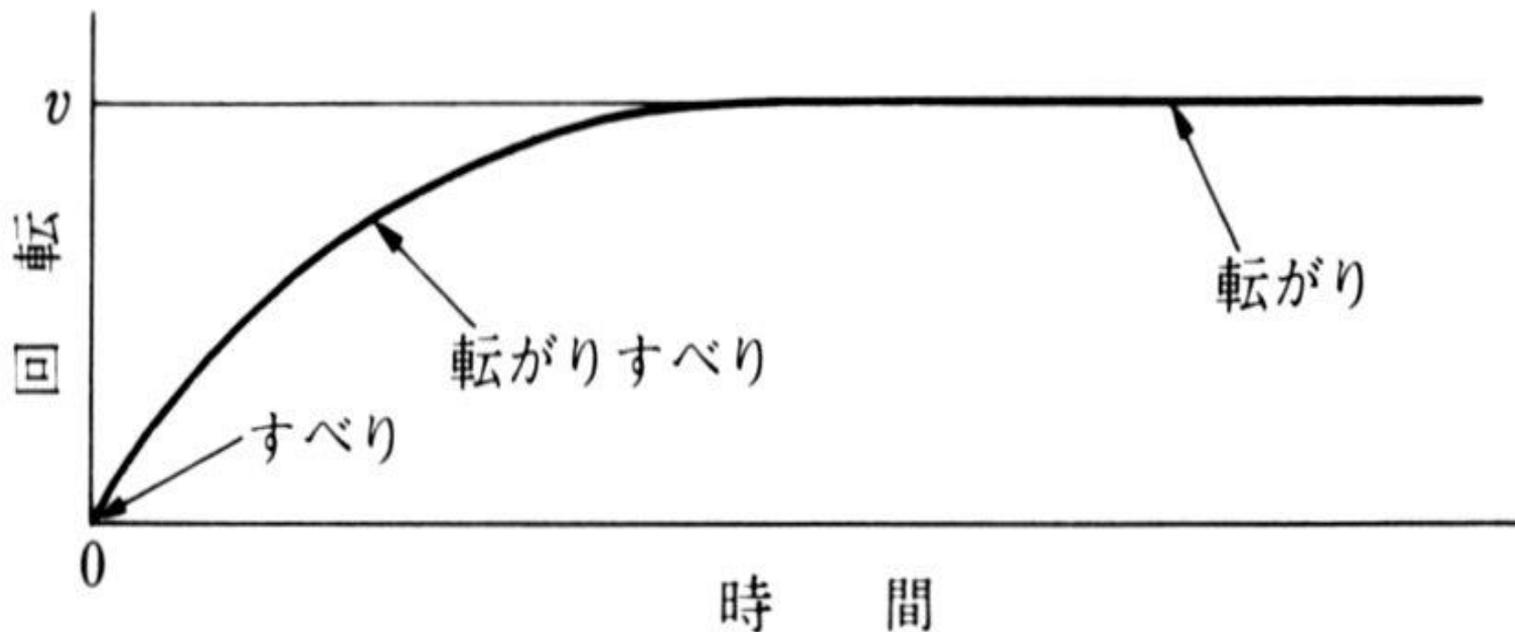
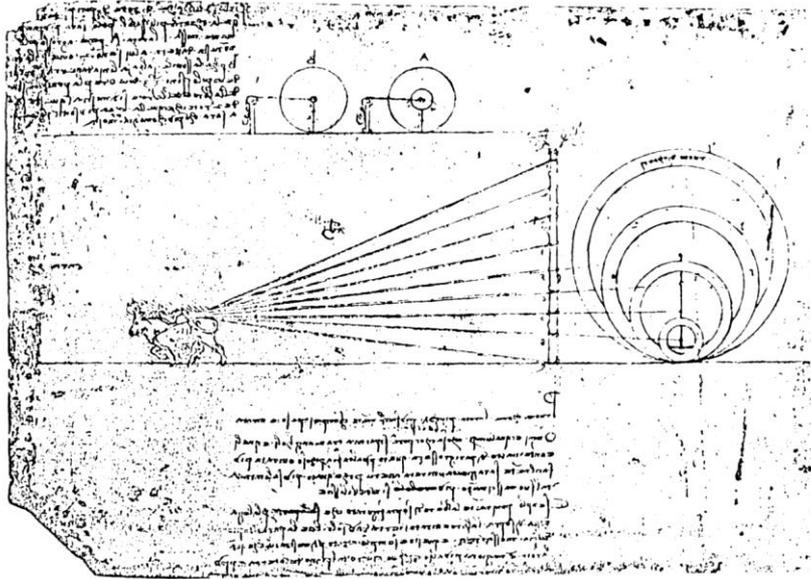
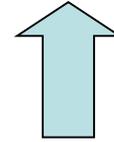


図9.3 すべり→転がりの条件
(v は力 F の移動速度)

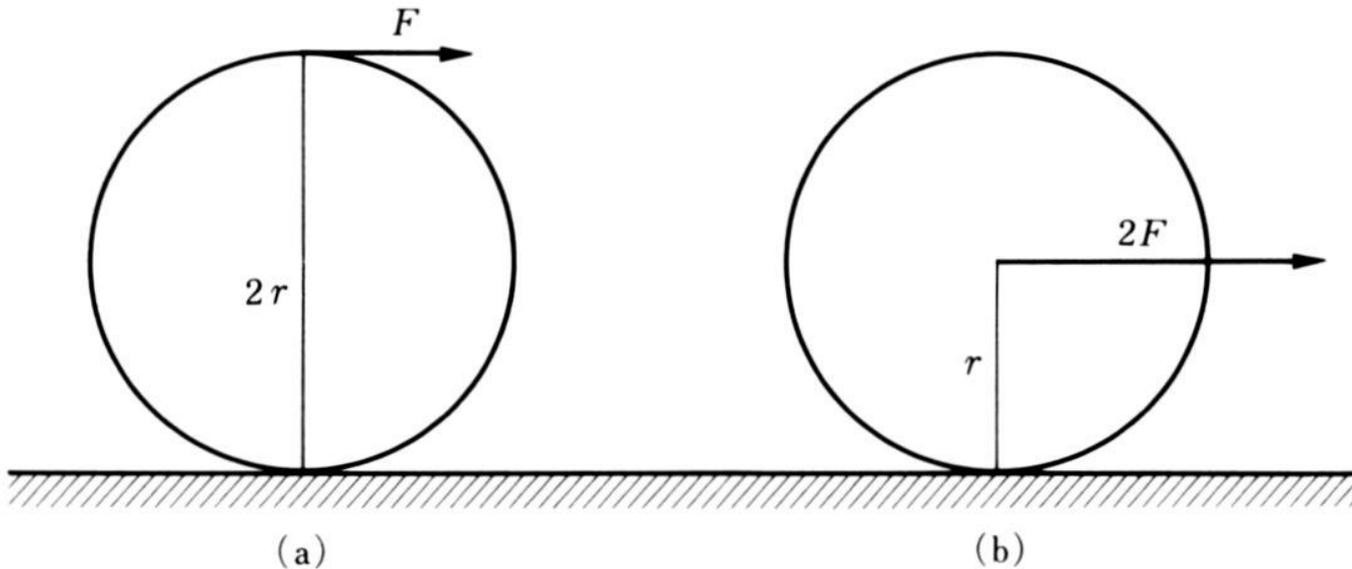
転がり摩擦の性質



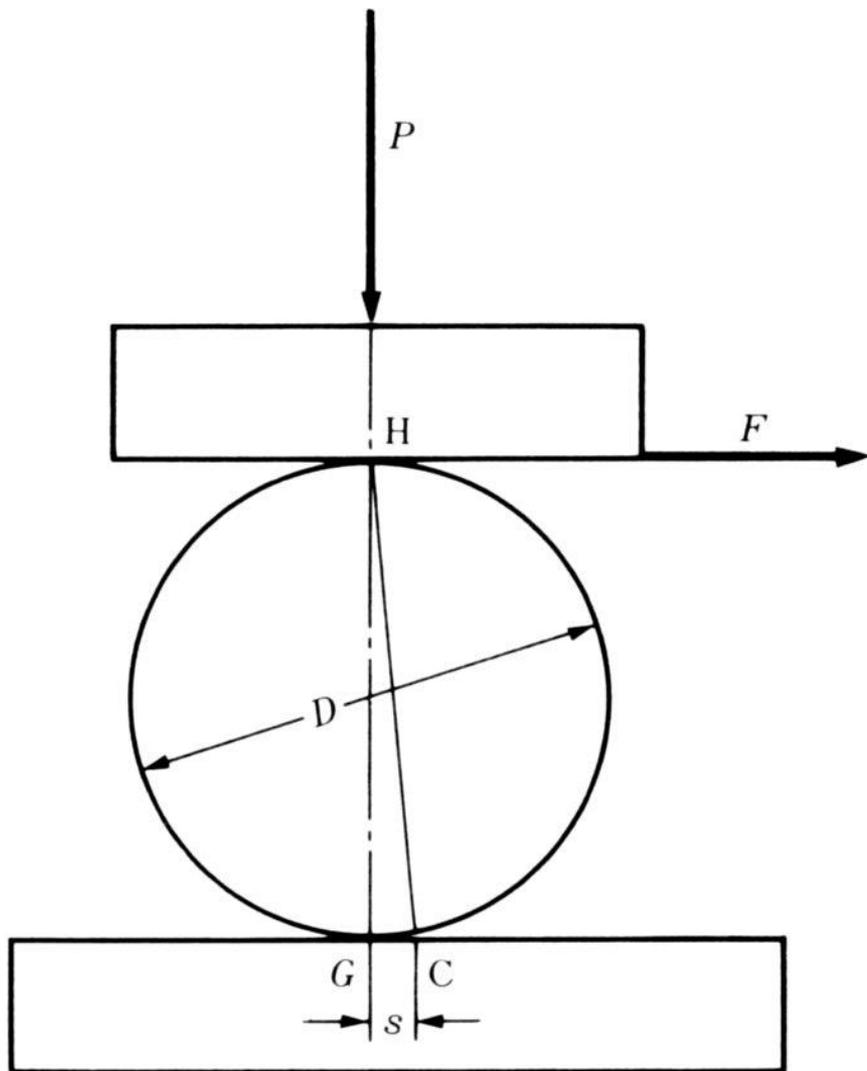
$$M_R = F \times 2r = 2F \times r$$



上側(rが大きい箇所)を
押した方が楽に回る



転がりの摩擦係数



$$F \times CH \doteq P \times CG$$
$$CH \doteq D, \quad CG = s$$

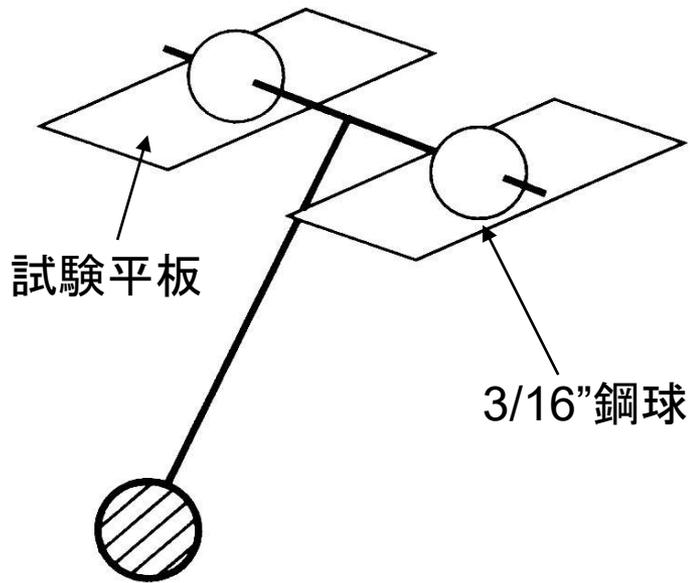
↓

$$\mu = F / P = s / D$$

硬い材料では、
 μ は 10^{-5} 程度

純粋な転がり摩擦(無潤滑)では、

摩擦係数は非常に小さい

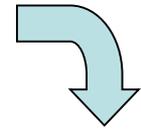


曾田式振り子型転がり摩擦
試験装置

平板の材料	ころがり摩擦係数
硬鋼	0.00002
軟鋼	0.00004 ~ 0.00010
真鍮	0.000045
銅	0.00012
アルミニウム	0.001
錫	0.0012
鉛	0.0014
ガラス	0.000014

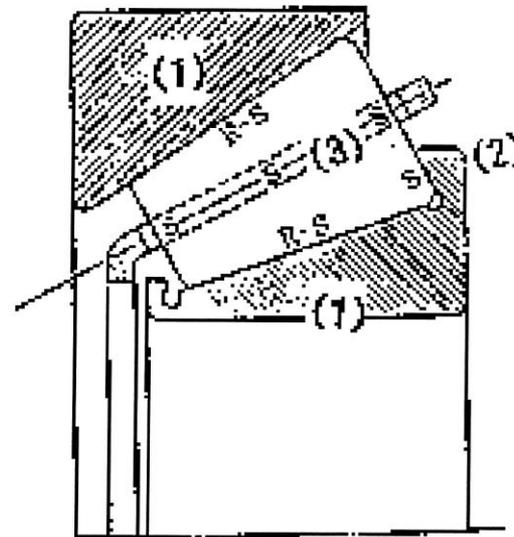
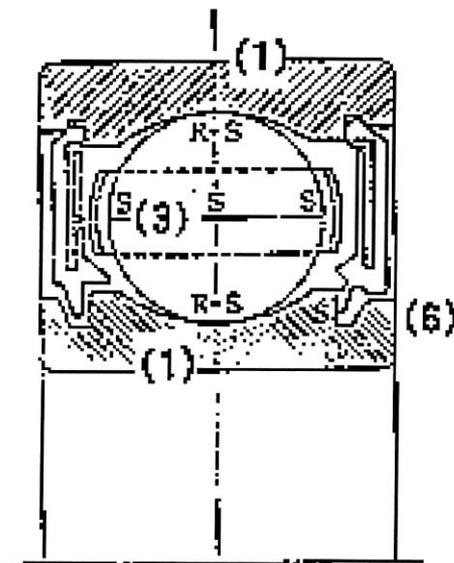
転がり軸受では・・・

純粋な転がり摩擦よりも、大きい



- (1) 転動体と軌道との間の転がり—滑り
- (2) ころ頭部とつば間の滑り
- (3) 転動体と保持器ポケット面の滑り
- (4) 保持器と軌道案内面の滑り
- (5) 潤滑剤, 空気を攪拌する抵抗
- (6) シールの滑り

軸受内部で多くの摩擦箇所があり、合計が転がり軸受の摩擦係数となる



各種転がり軸受の摩擦係数概略値

軸受形式	μ の概略値
深溝玉軸受	0.0013
アンギュラ玉軸受	0.0015
自動調心玉軸受	0.0010
スラスト玉軸受	0.0011
円筒ころ軸受	0.0010
円すいころ軸受	0.0022
自動調心ころ軸受	0.0028
保持器付き針状ころ軸受	0.0015
総ころ形針状ころ軸受	0.0025
スラスト自動調心ころ軸受	0.0028

純粋な転がり摩擦係数(0.00002)よりも大きくなっている

(5) 転がり摩擦のメカニズム(原因)

(a) 塑性変形説

接触においては、ミクロ的に見ると表面は塑性変形している(真実接触面積は、非常に小さい)



塑性変形に必要な仕事^が転がり摩擦の原因

接触圧力が材料の降伏応力よりも高い場合に顕著

しかし、材料の加工硬化、形状なじみによる接触圧力低下によって、塑性変形は減少する



塑性変形による摩擦は低下し、一定値に漸近する

表面粗さレベル の塑性変形

円すいころ軸受軌道面の
同じ場所を繰り返し
測定した結果



初期からは大きく
変形しているが、
それ以降は殆ど
変形していない

力が釣り合うまで
の変形

初期形状



2,000回転後

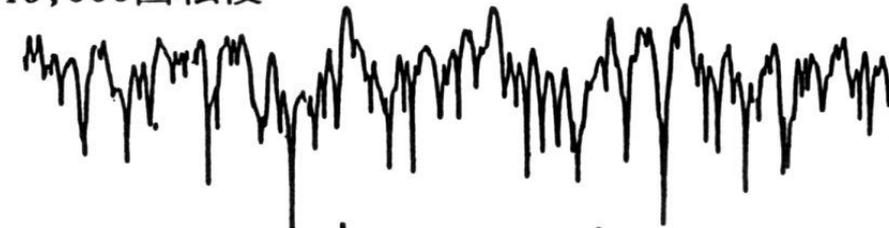


10,000回転後



1 μm

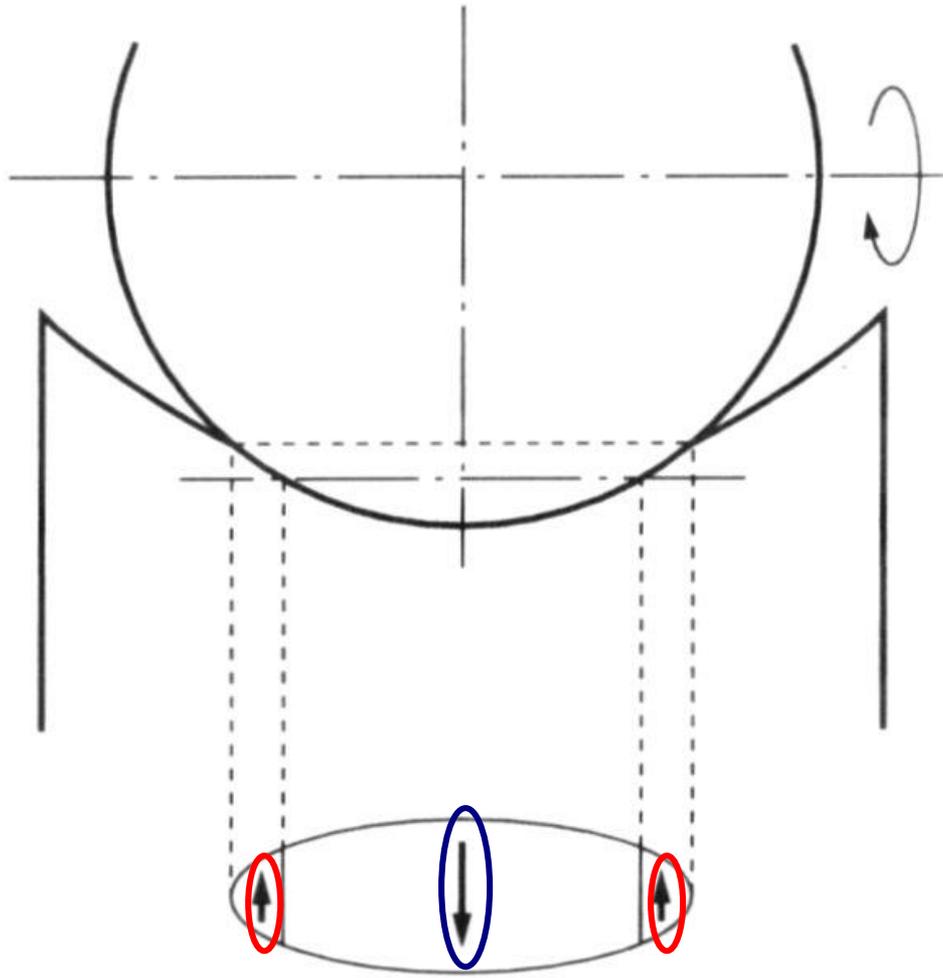
40,000回転後



500 μm

500 μm

(b) 差動滑り説



接触部の両端に中央部とは逆方向のすべり域が存在する



ヒスコート滑り

弾性係数の異なる材料では、接触部材の弾性変形量が異なるので、微小滑りが生じる



レイノルズ滑り

(c) 凝着説

凝着している真実接触部を引き離すために
必要な仕事量



転がり摩擦となる

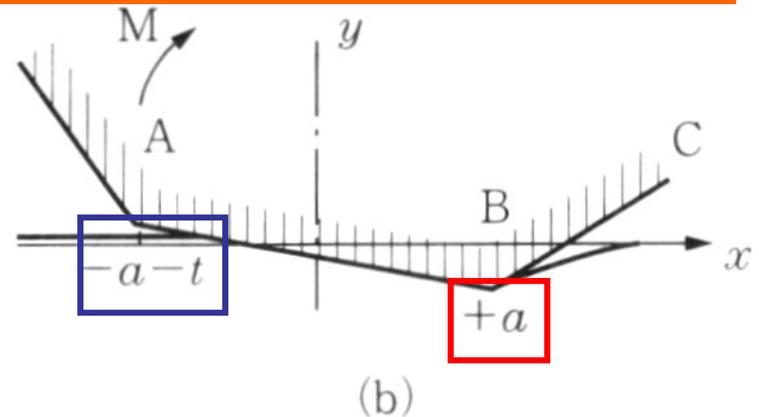
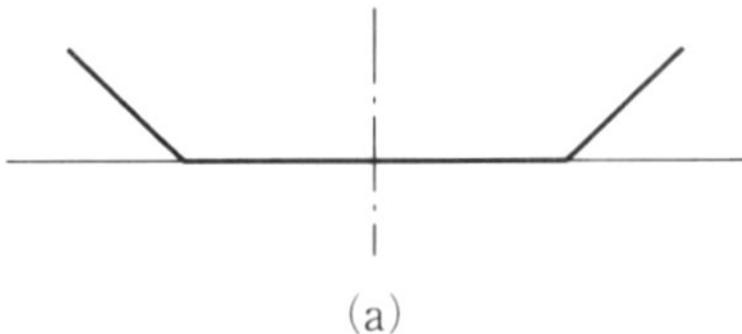
- 表面粗さが小さい場合
(真実接触面積が大きい),
- 真空中の場合
(表面膜が形成されない)に問題となる

(d) 表面粗さ説

幾何学的に完全な球や円筒は存在しない

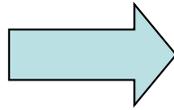


- ① 弾性変形による位置エネルギーの減少が静摩擦
- ② 表面粗さレベルの微小突起における衝突損失が転がり抵抗



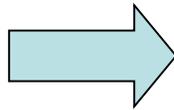
多角形を転がすためのモーメント

$$M_s = Fr = Pr\pi / n$$

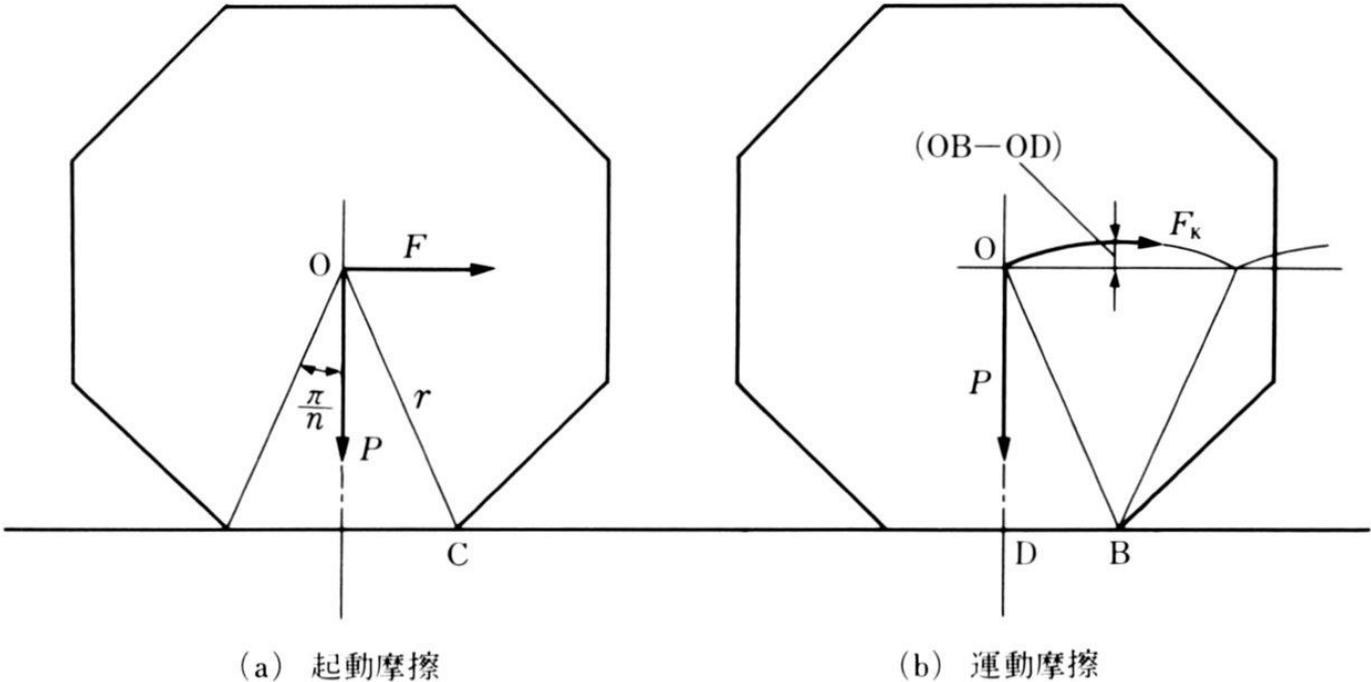


静止摩擦
モーメント

$$M_k = Pr\pi / 4n$$

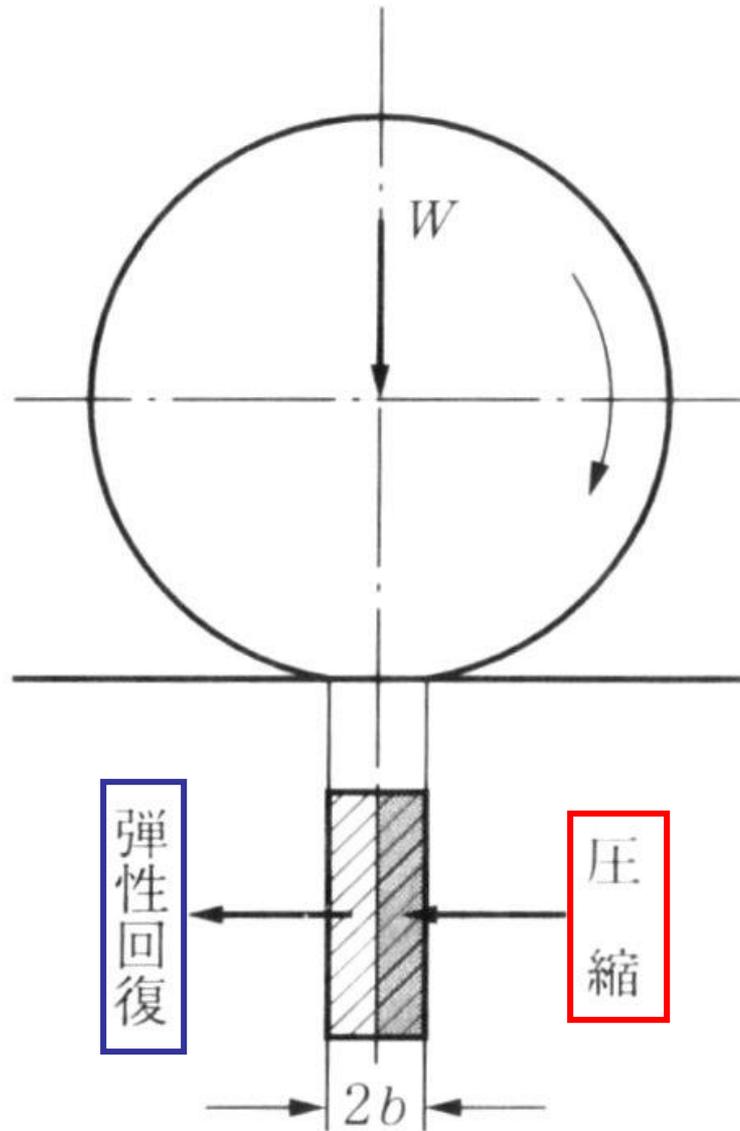


運動摩擦
モーメント



多角形になるほどnが大きくなるので、モーメントは小さくなる

(e) 内部摩擦説



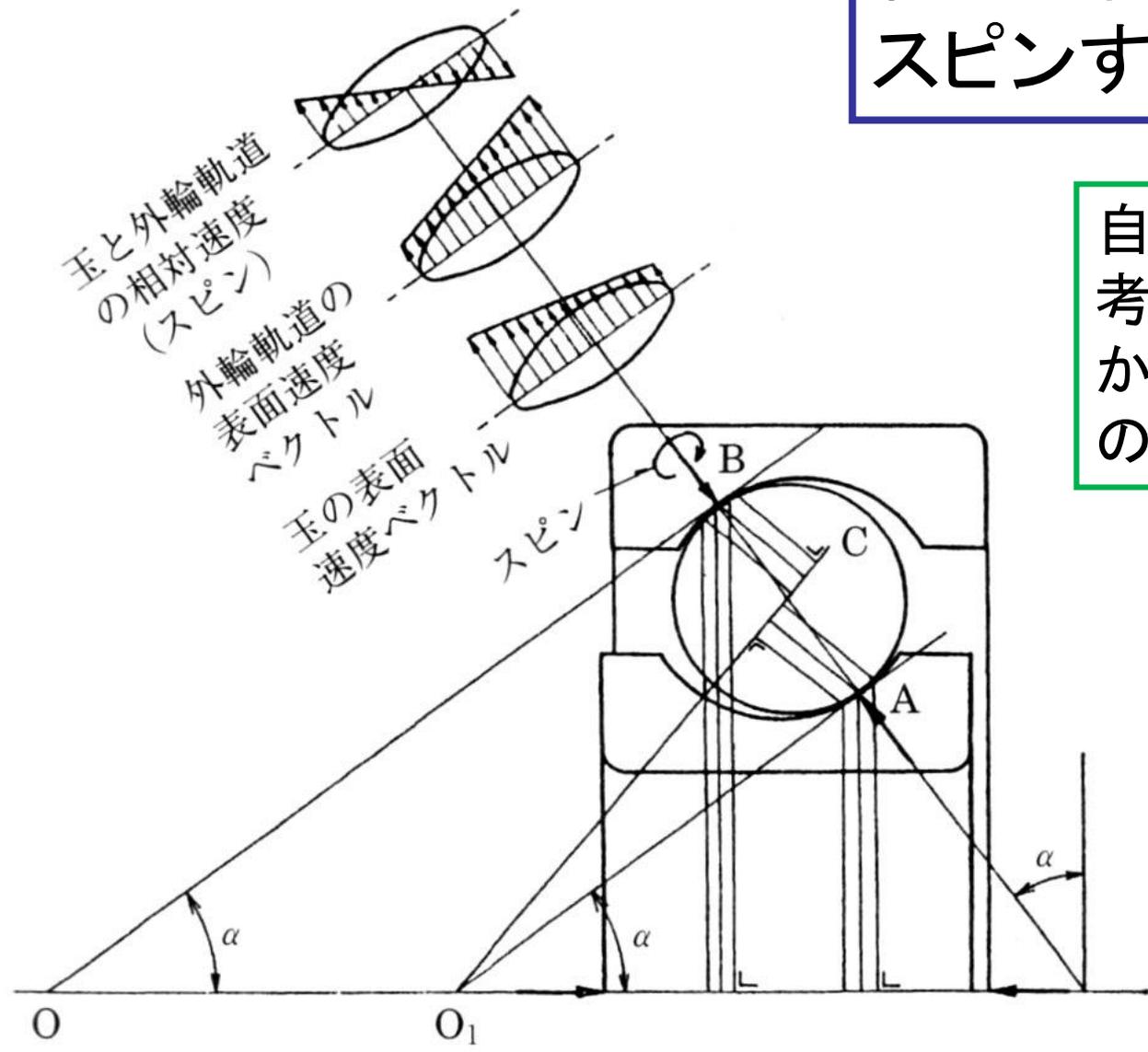
転がり方向前面は圧縮,
反対側は圧縮が解放される

この際、一部がヒステリシス(内部摩擦)によって熱として放出される

転がり摩擦の原因

高分子材料(ゴム, ポリマ等)で顕著

転がり軸受における スピンすべり



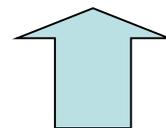
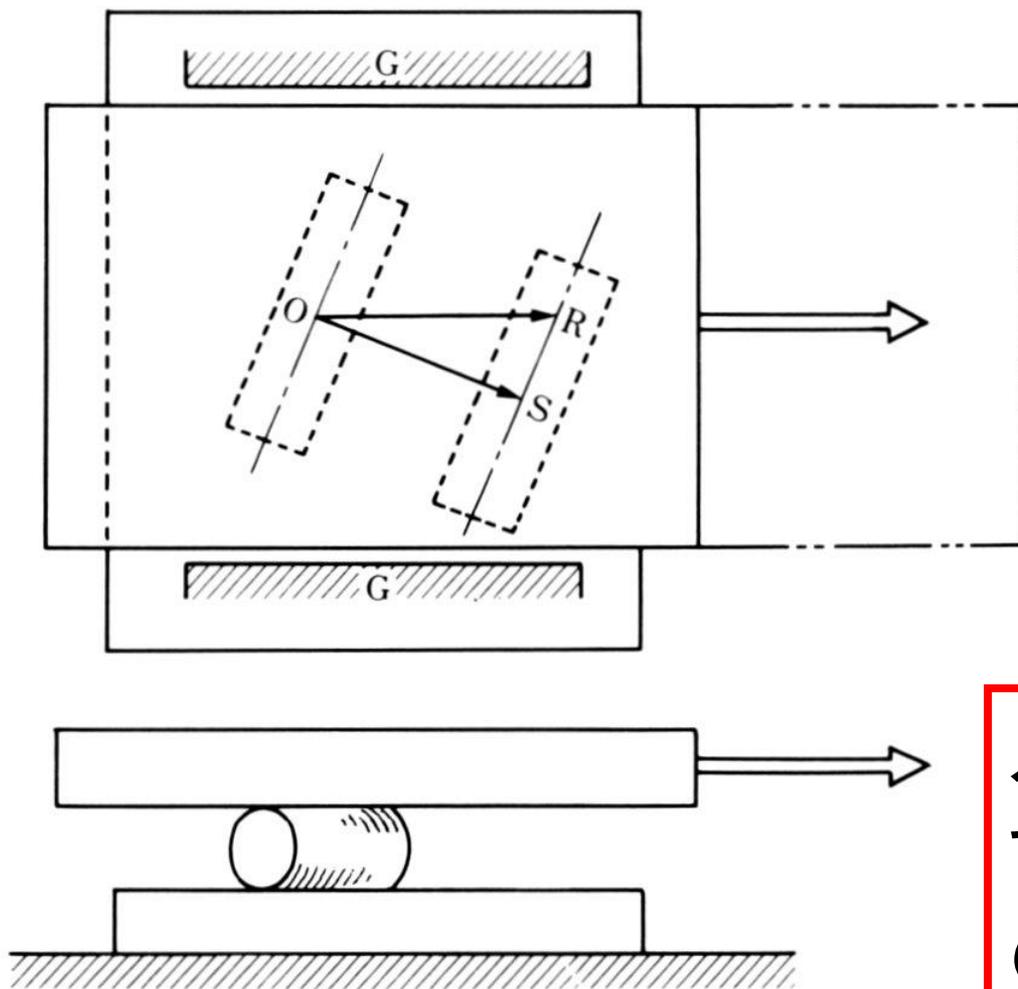
自転方向について考えると、自転軸から、各接触点までの距離が異なる



$v=r\omega$ であり、
周辺ほど滑り速度が高くなる

(f)ころのスキュー (転がり時の傾き)

円筒を真っ直ぐ転がすことは、非常に難しい



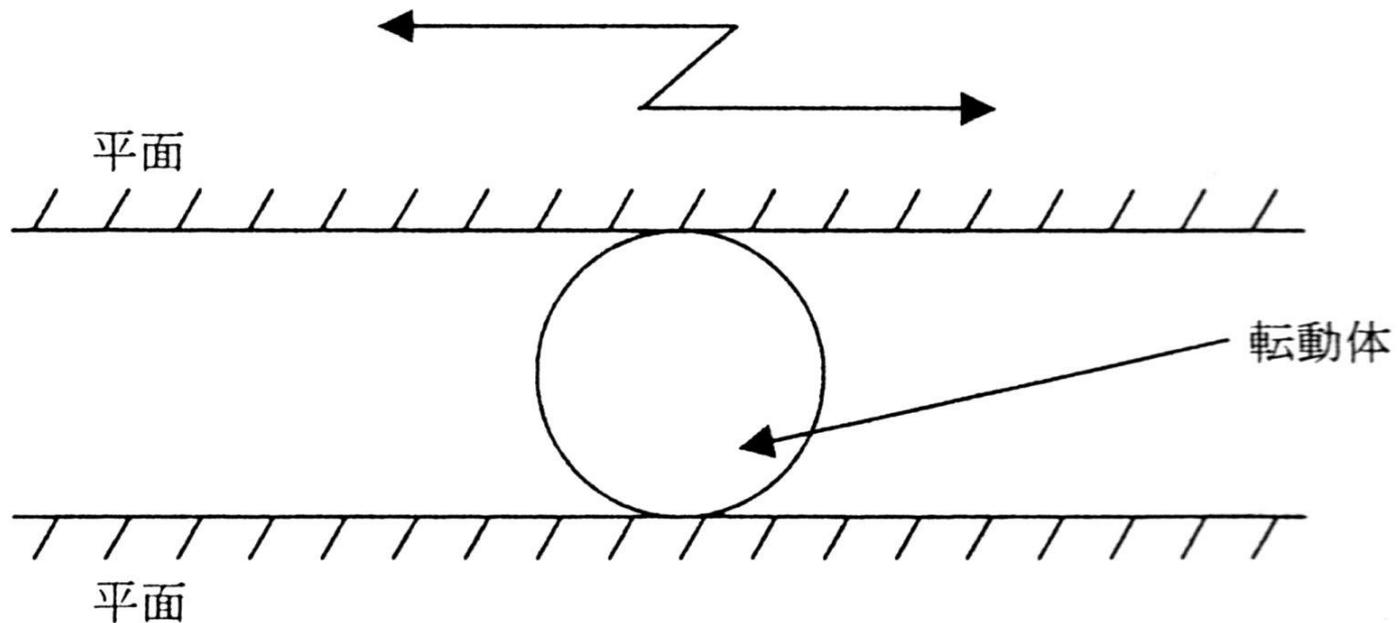
- ・円筒度, 真円度等の形状誤差
- ・表面性状による部分的摩擦変動

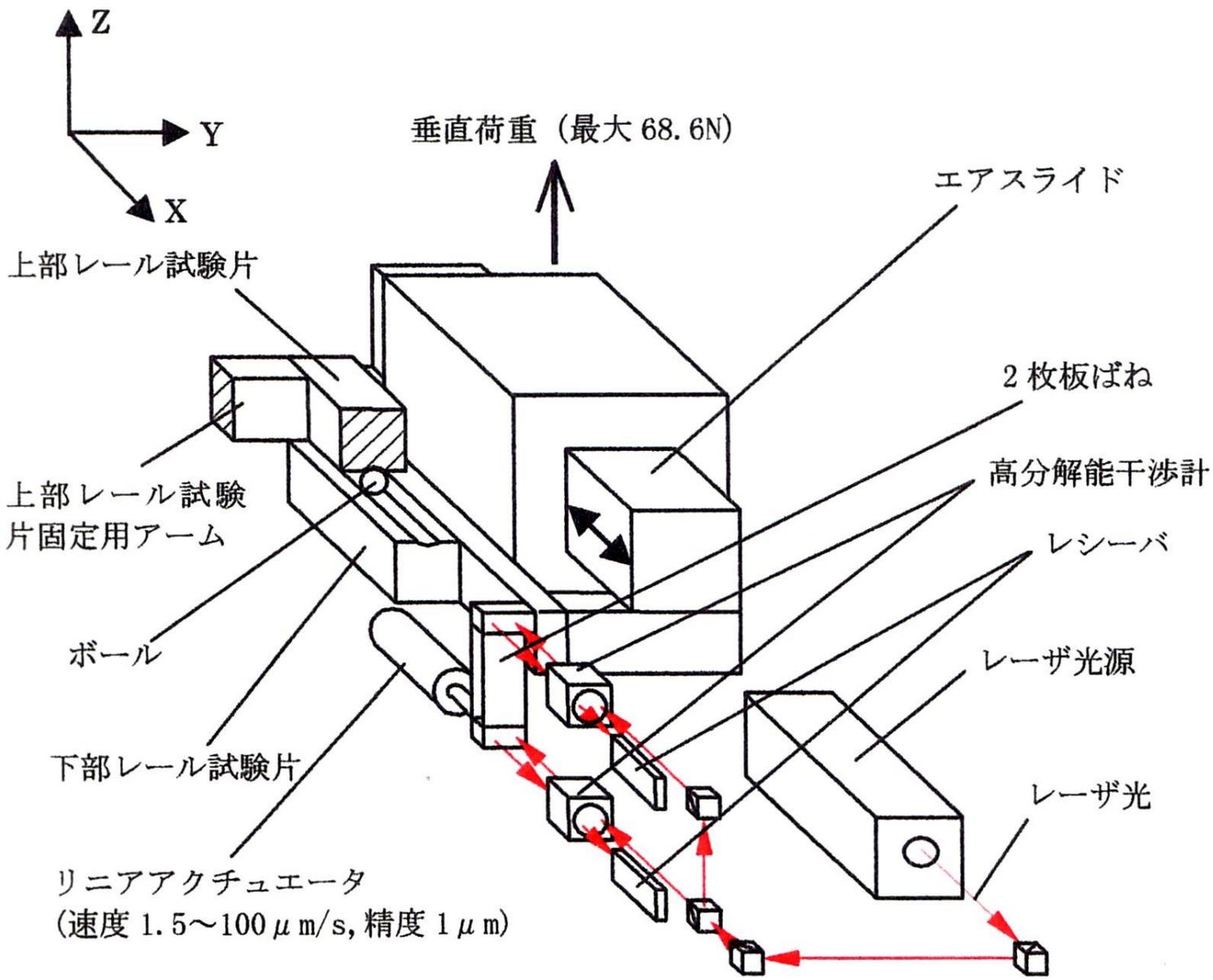
・
・

スキューが起こると、すべり摩擦も加わるので、高摩擦となる

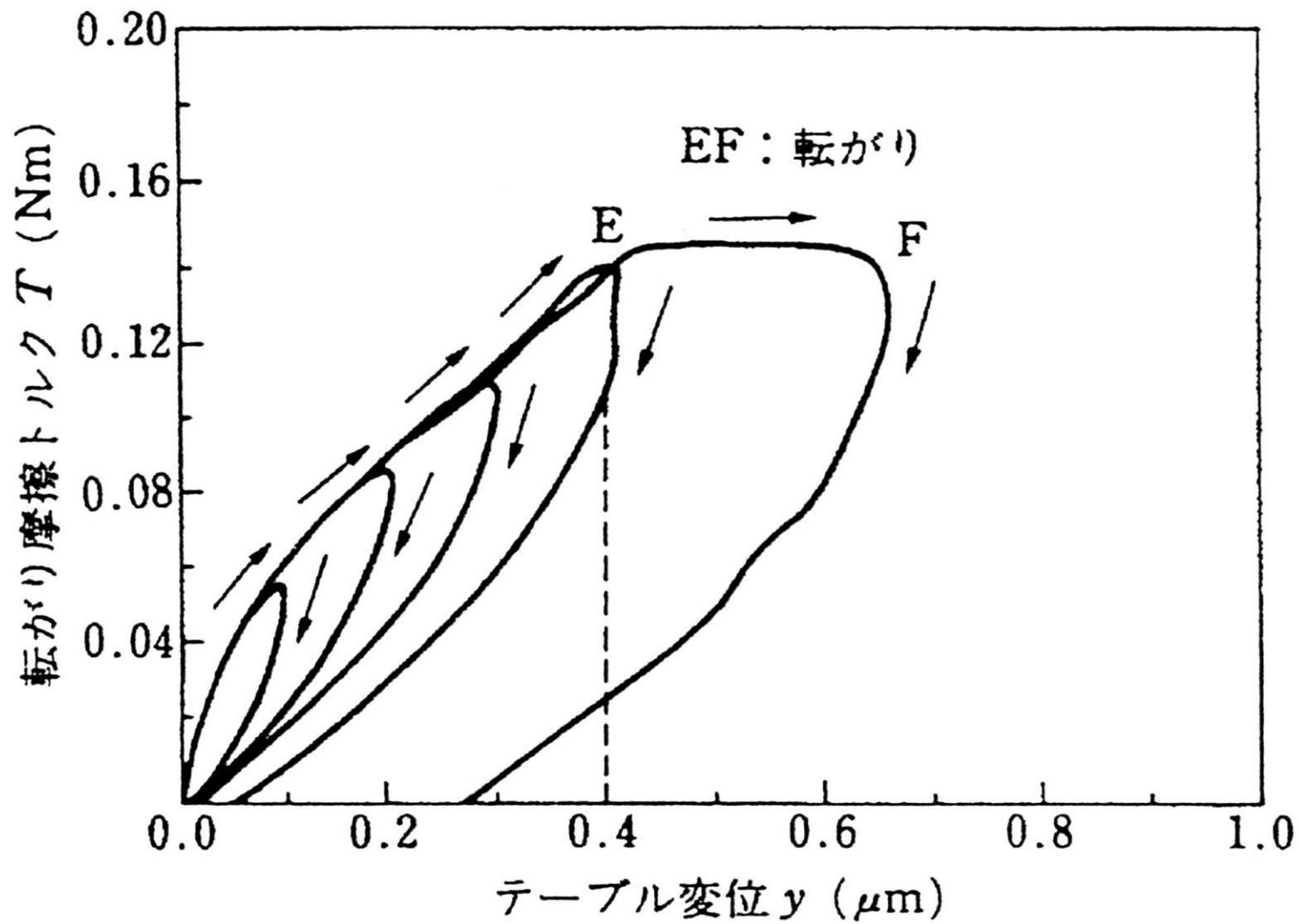
(6) 球の転がり出しにおける現象観察

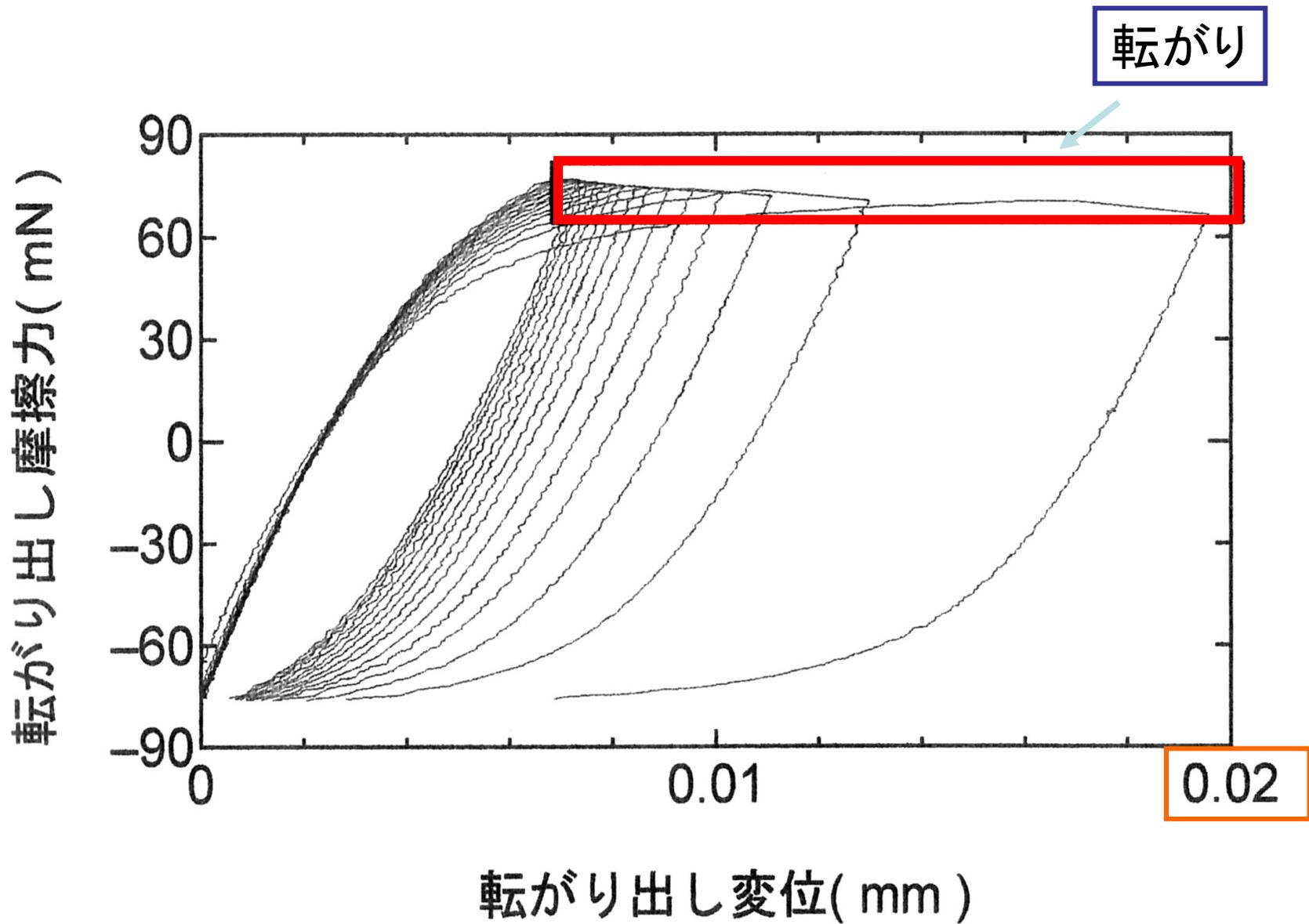
接触部は点ではなく面積を持つので、
転がり開始時を精密に観察するとおもしろい現象が確認された

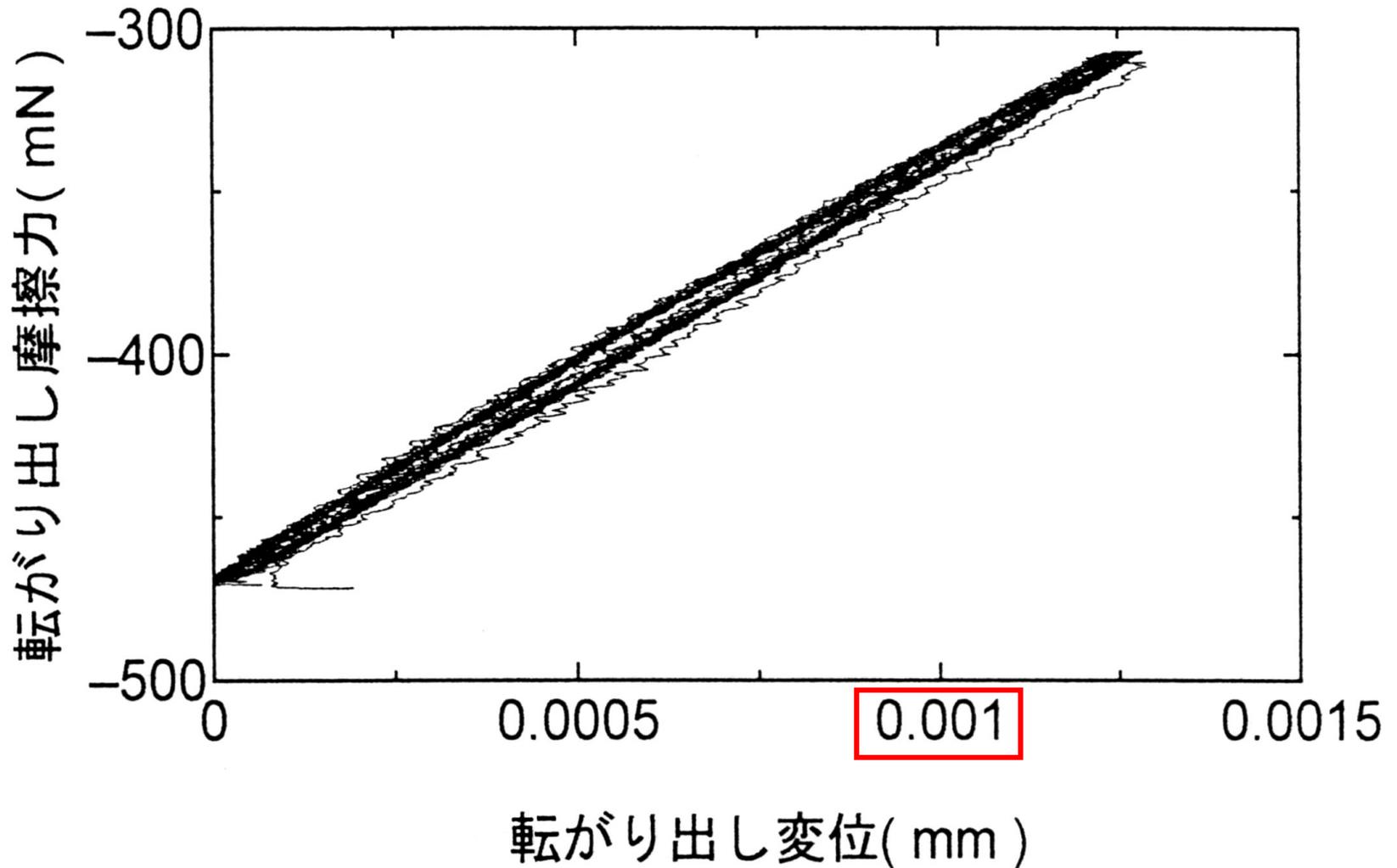




実験装置概略







1ミクロン程度では, リニアに弾性変形

超精密位置決めにご利用可能