

10章 機械要素

転がり軸受の前に・・・転がり摩擦の詳細を

転がり摩擦

- ・ 滑り摩擦と比較して、摩擦係数が1 ~ 3桁小さい(低エネルギー損失)
- ・ 円滑な運動が可能

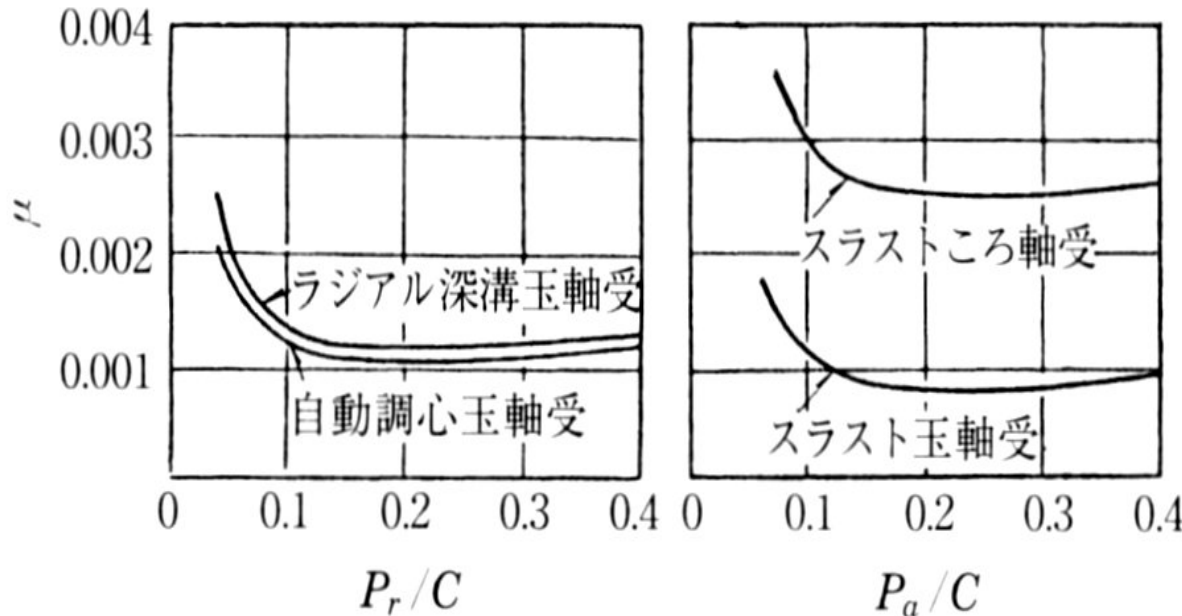


転がり摩擦の正確な測定、摩擦機構の厳密・定量的な説明を困難にしている

定性的(経験的)には,

- 静止摩擦係数 (1) 表面粗さの影響が大きい
(2) 潤滑油の影響をあまり受けない

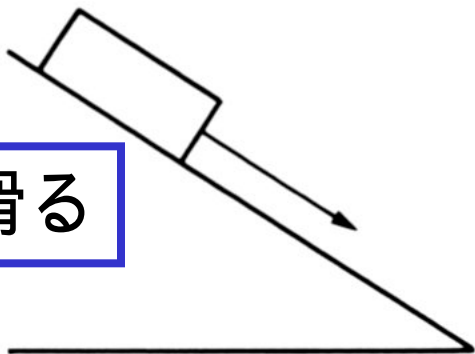
- 動摩擦係数 (1) 転がり速度が高いほど大
(2) 表面粗さが大きいほど大
(3) 硬さが小さいほど大



摩擦係数の荷重
依存性も低い

転がり運等とすべり運動

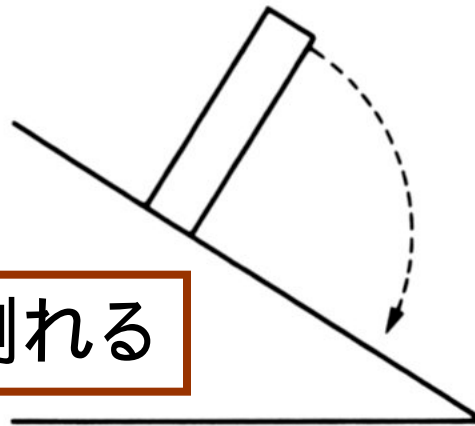
滑る



(a)

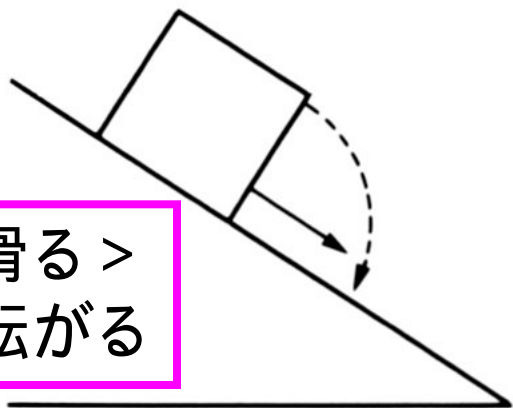
でも転がらない

倒れる



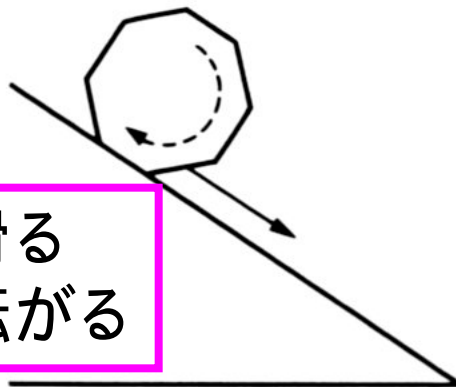
(b)

滑る >
転がる



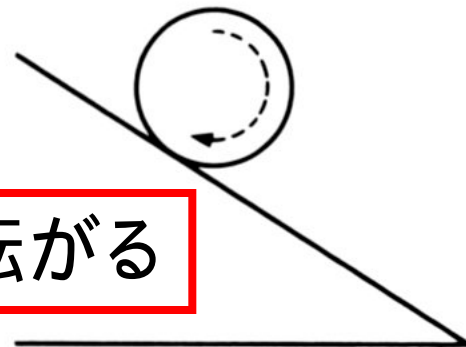
(c)

滑る
転がる



(d)

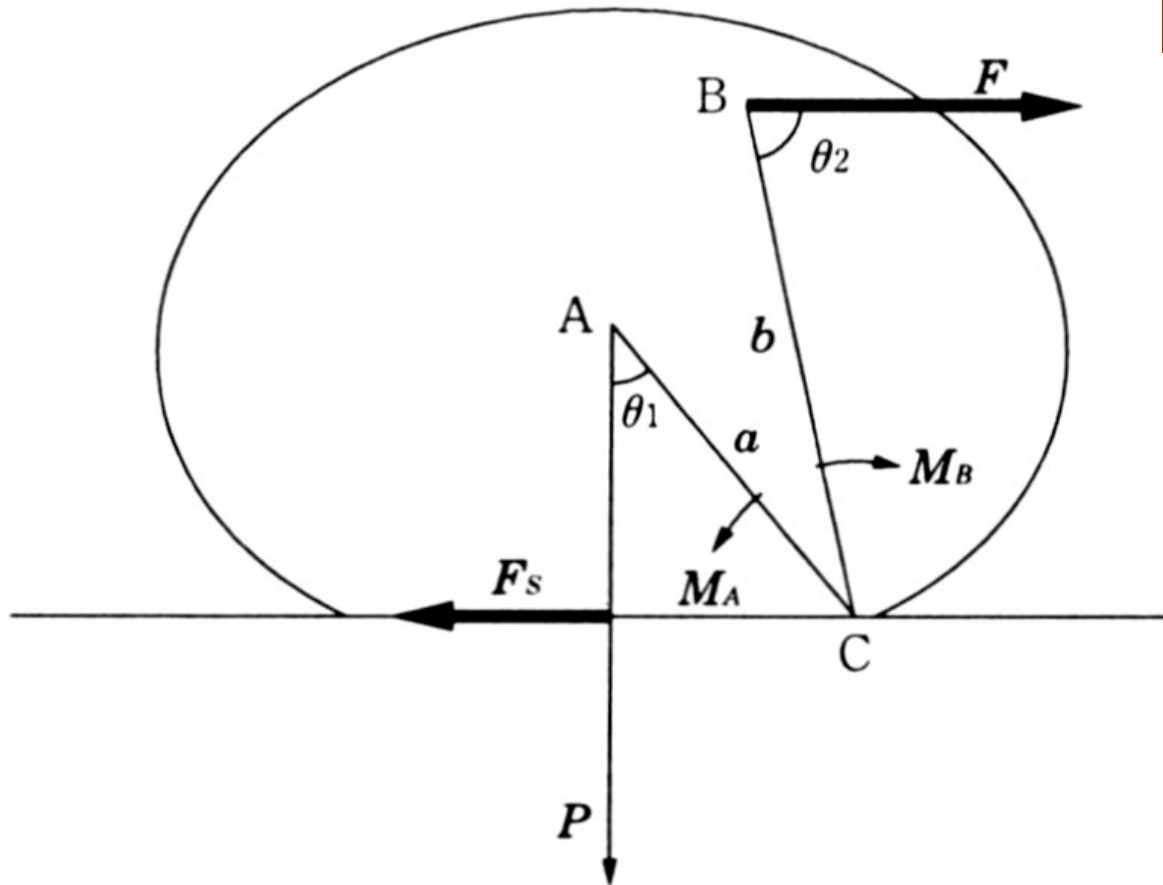
転がる



(e)

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

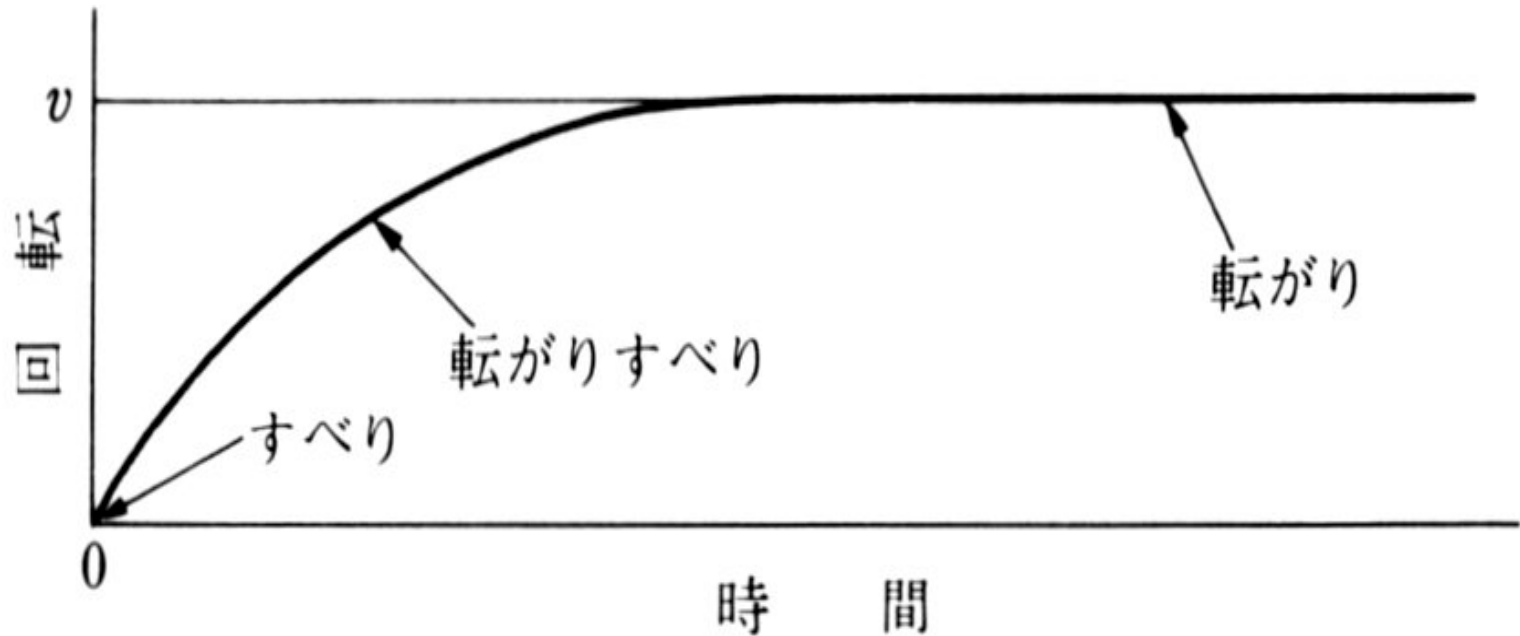
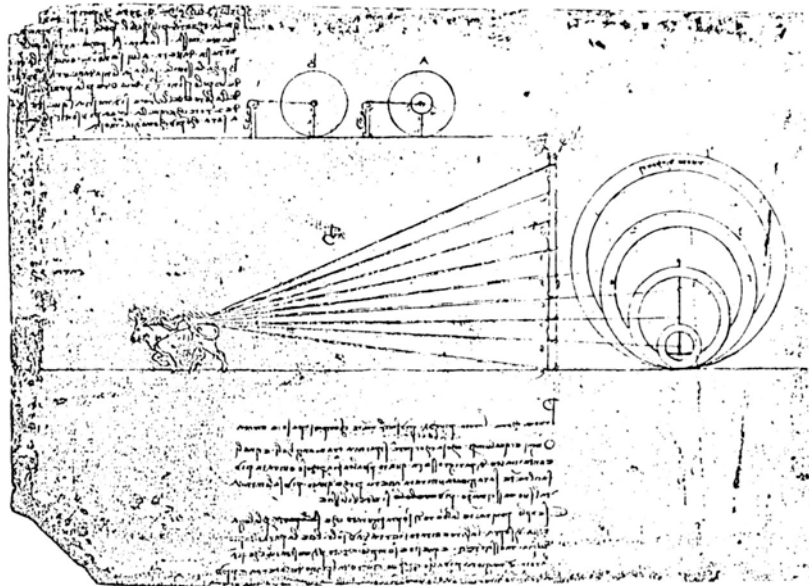


図9.3 すべり→転がりの条件
(v は力 F の移動速度)

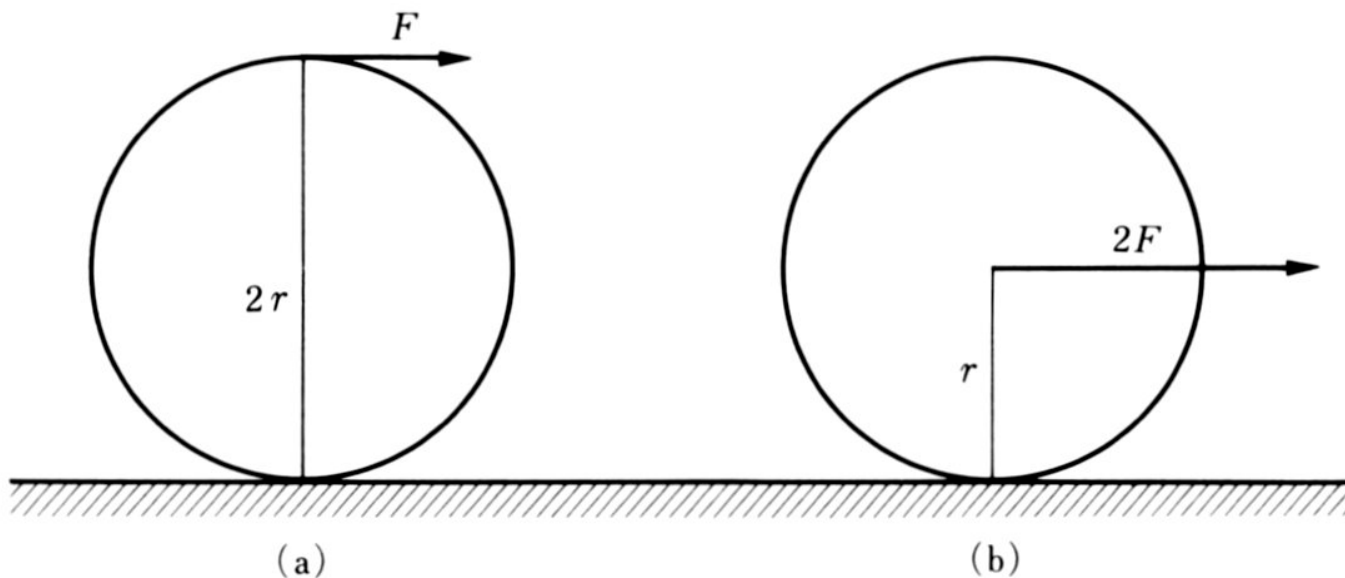
転がり摩擦の性質



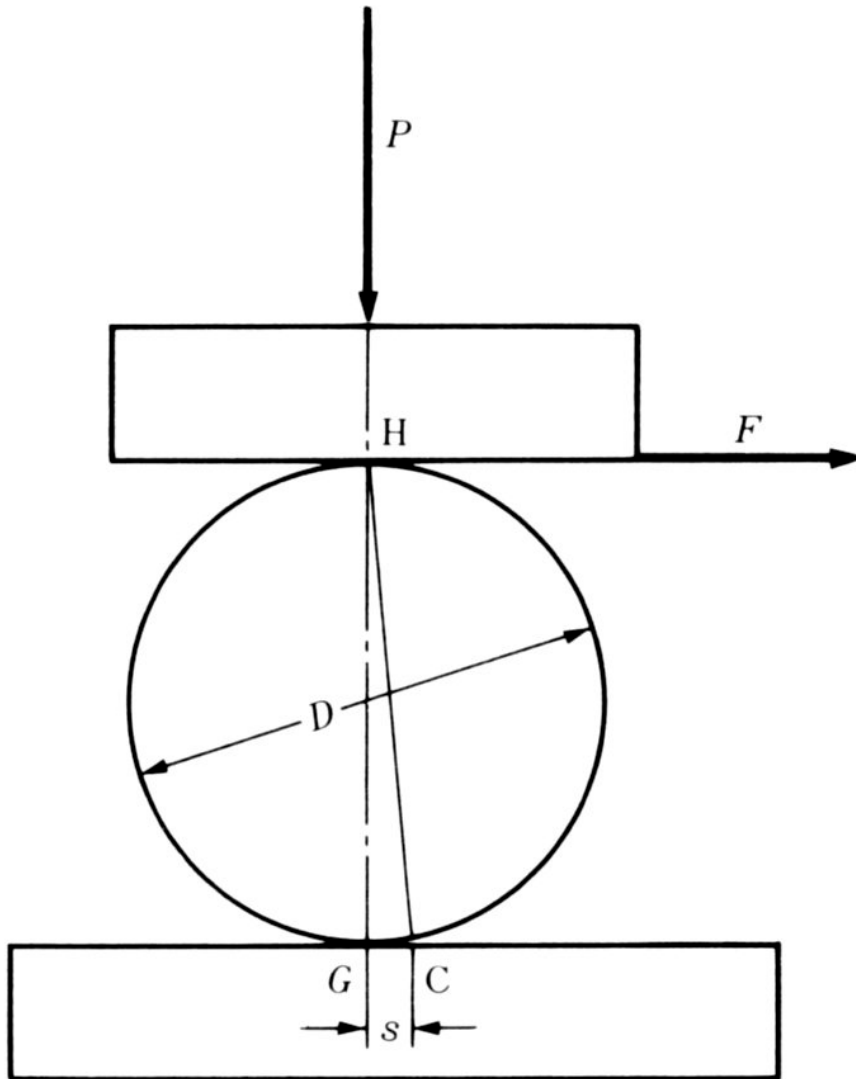
$$M_R = F \times 2r = 2F \times r$$



上側 (rが大きい箇所) を
押した方が楽に回る



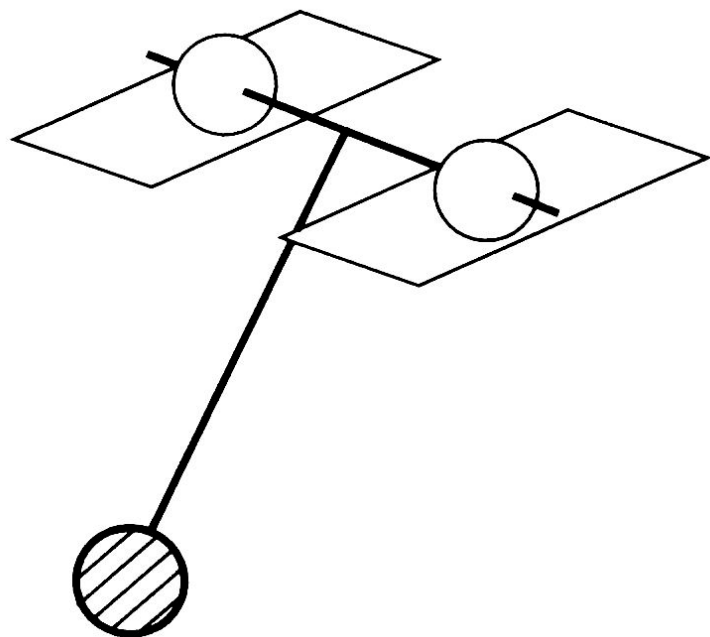
転がりの摩擦係数



$$\begin{aligned} F \times CH &= P \times CG \\ CH &= D, CG = s \\ &\downarrow \\ \lambda = F / P &= s / D \end{aligned}$$

硬い材料では、
 λ は 10^{-5} 程度

純粋な転がり摩擦の測定



1/16“鋼球串団子を使った
振り子の減衰実験

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

かなり小さく、理論値に
近い値となる

転がり摩擦機構

転がり摩擦の原因と考えられる摩擦機構は、複数ある



実際の転がり摩擦においては、
これらが複雑に絡み合っている

対処においては、主な原因が何かを
見極めることが大切。さらに転がり以
外の摩擦原因を考慮することも必要

転がり軸受の摩擦係数

軸受形式	摩擦係数
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

転がり要素の摩擦

転がり摩擦

滑り摩擦

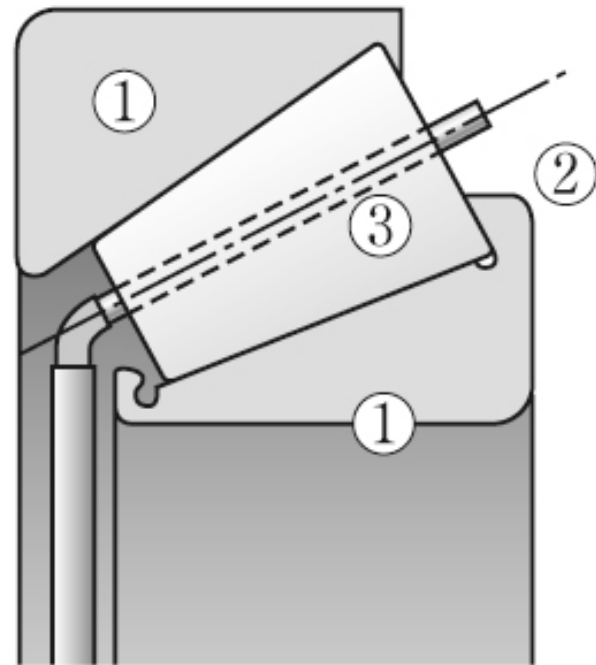
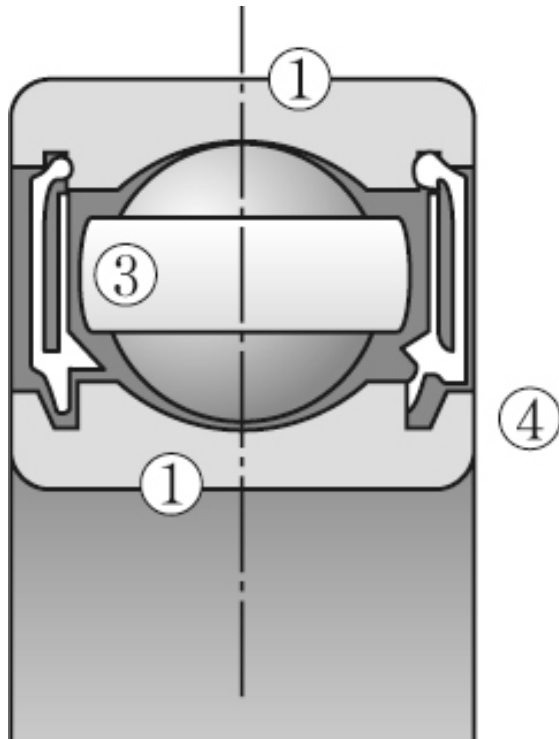
粘性抵抗

空気抵抗

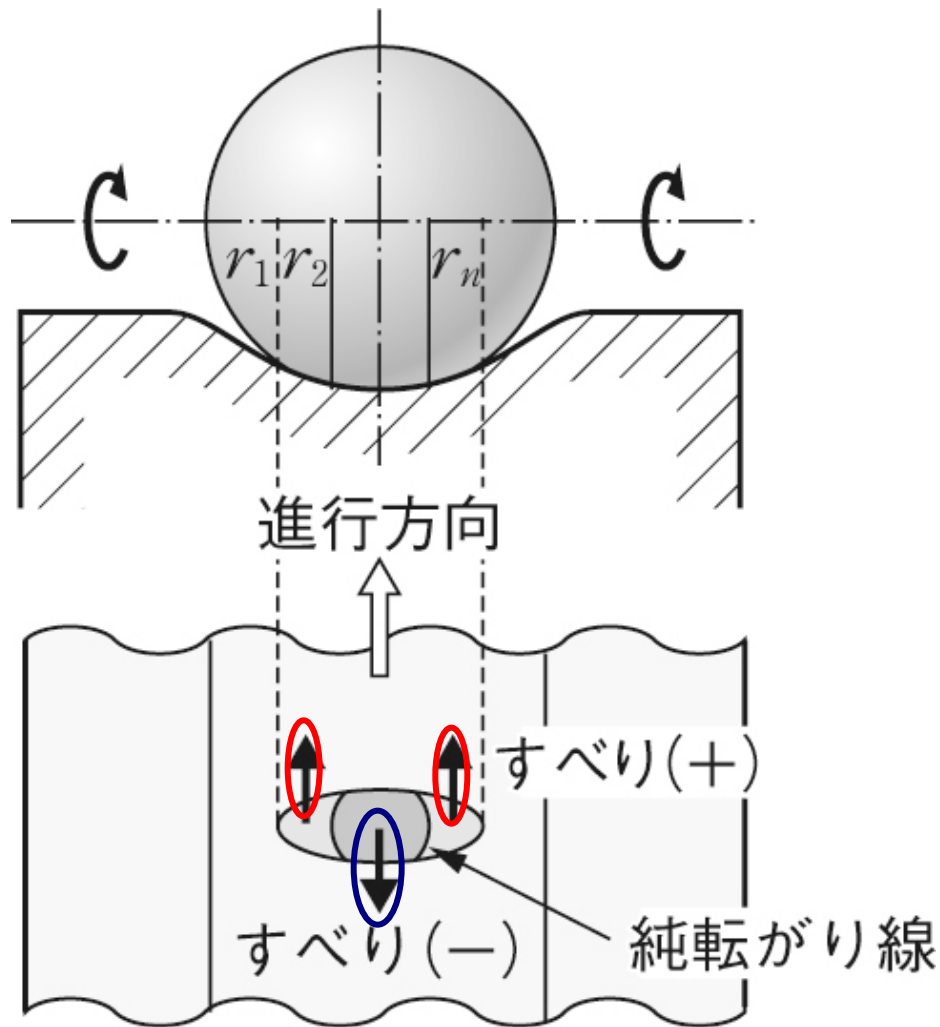
攪拌抵抗

転がり軸受内部の摩擦と発生場所

- (1) 転動体 / 軌道輪の転がり摩擦
- (2) 転動体 / 保持器の滑り摩擦
- (3) 潤滑剤による粘性抵抗
- (4) 転動体公転、保持器回転における空気抵抗
- (5) つば面 / ころ端面の滑り摩擦
- (6) 接触式シール / 内輪の滑り摩擦



(1) 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



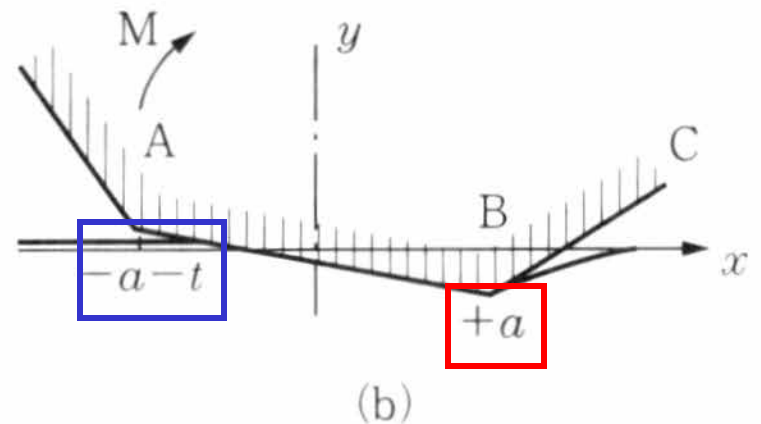
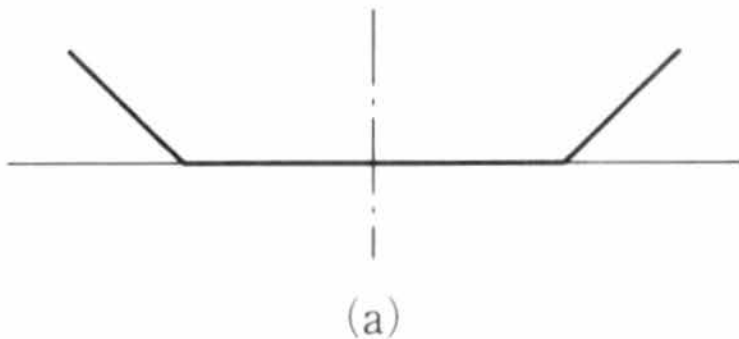
レイノルズ滑り

(2) 表面粗さ説

幾何学的に完全な球や円筒は存在しない

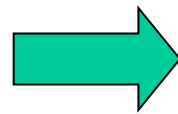


弾性変形による位置エネルギーの減少が
静摩擦
表面粗さレベルの微小突起における衝突
損失が転がり抵抗



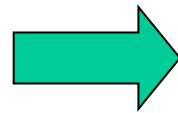
多角形を転がすためのモーメント

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

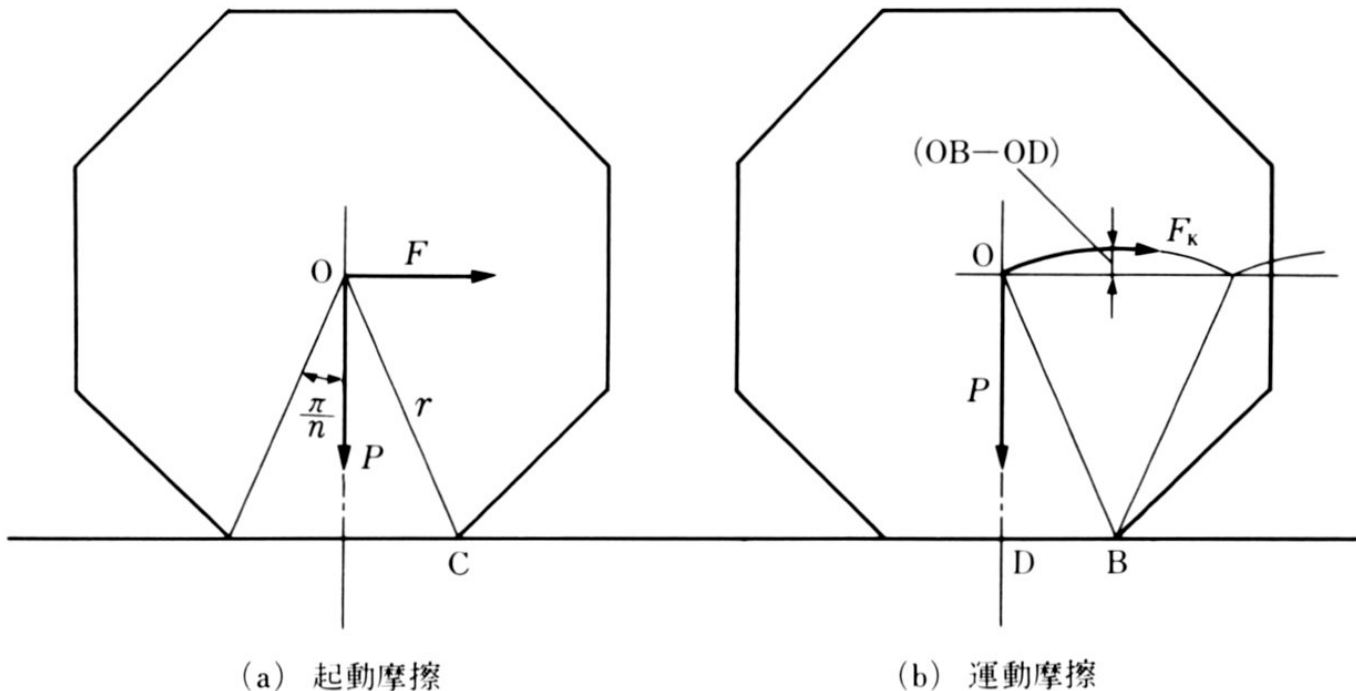


静止摩擦
モーメント

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

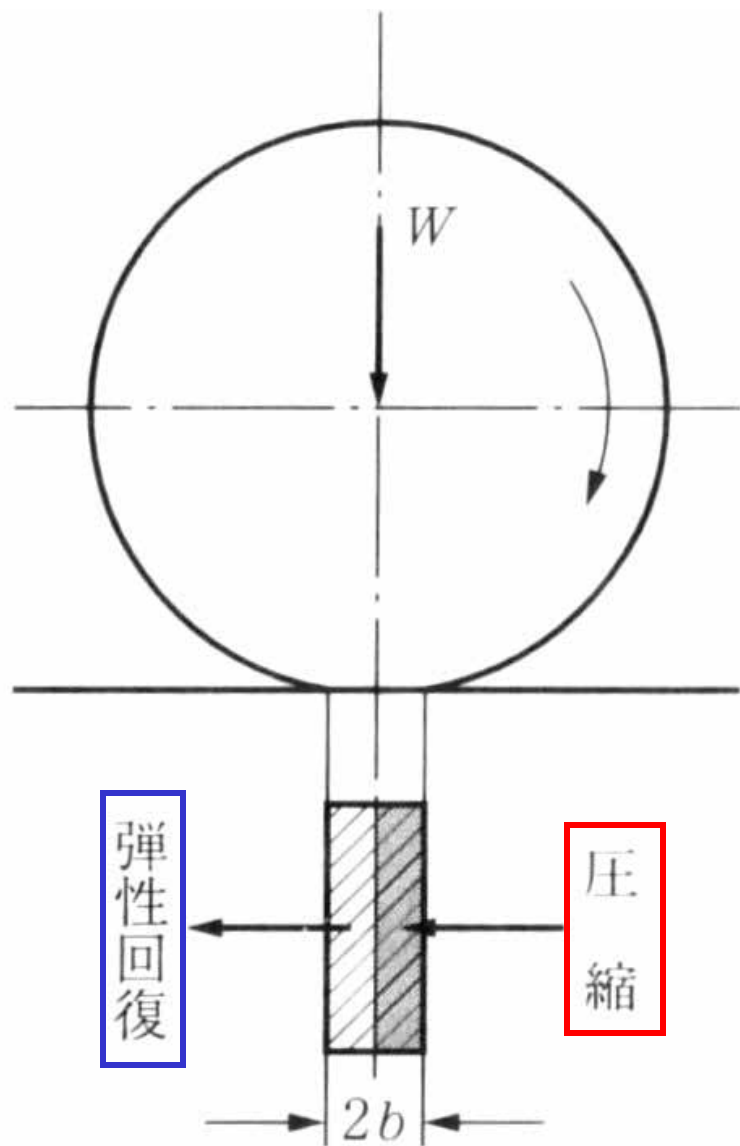


運動摩擦
モーメント



(3) 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

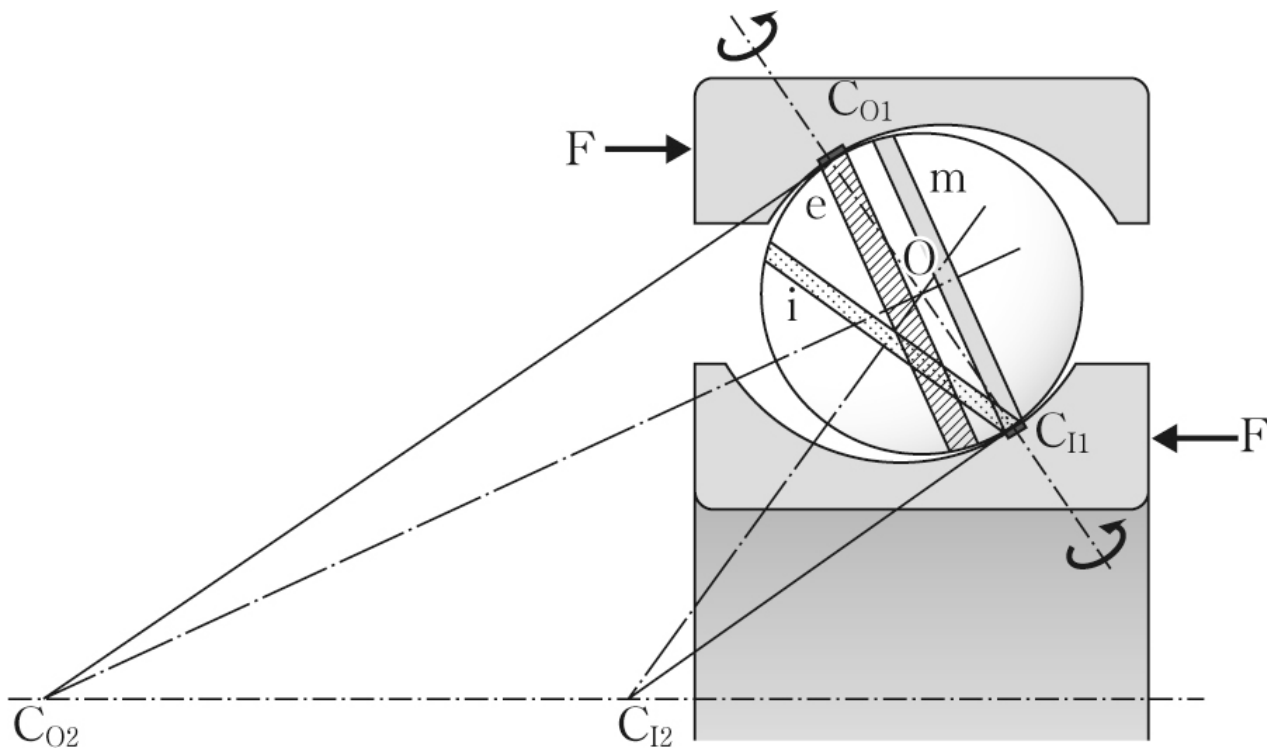
転がり摩擦の原因

高分子材料（ゴム，ポリマ等）で顕著

(4) スピン滑り

転がり軸受における
スピンすべり

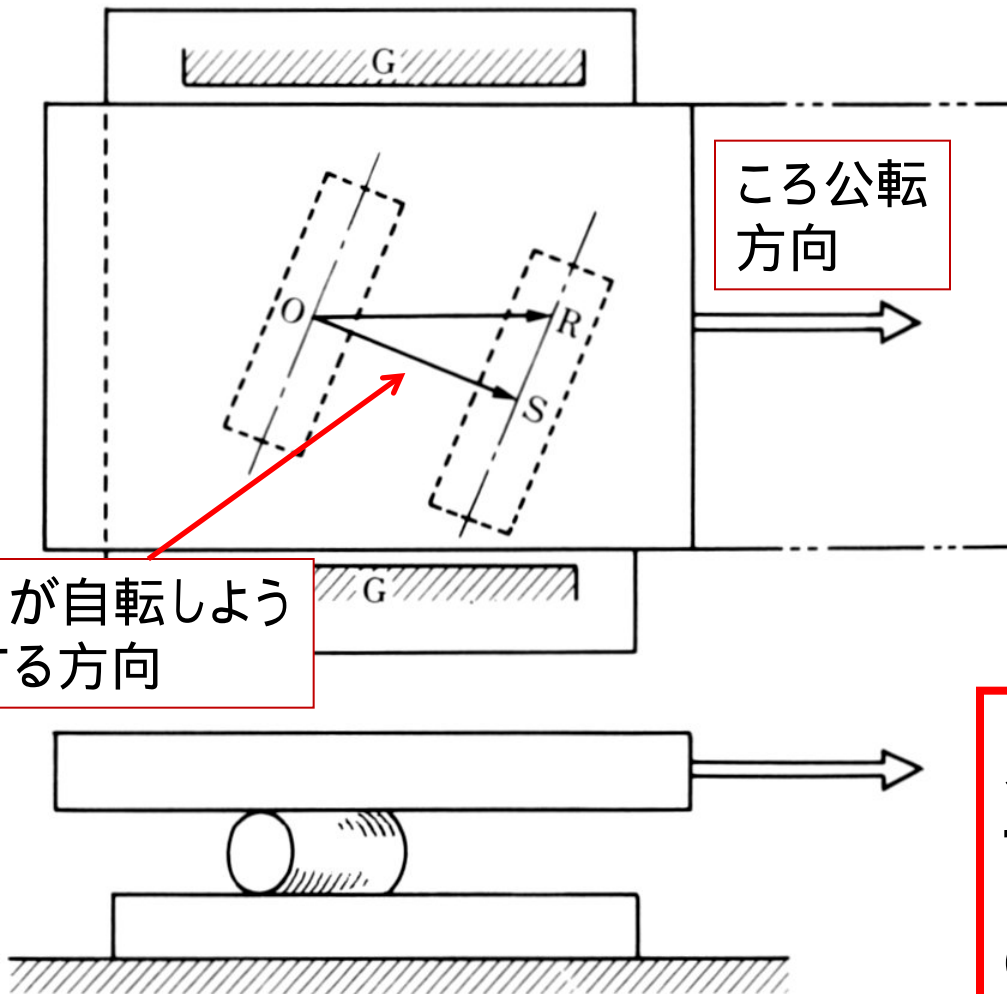
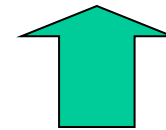
自転方向について
考えると、自転軸
から、各接触点まで
の距離が異なる



$v = r\omega$ であり、
周辺ほど滑り
速度が高くなる

(5)ころの傾き (スキュー)

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) 塑性変形説

接触においては、ミクロ的にみ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

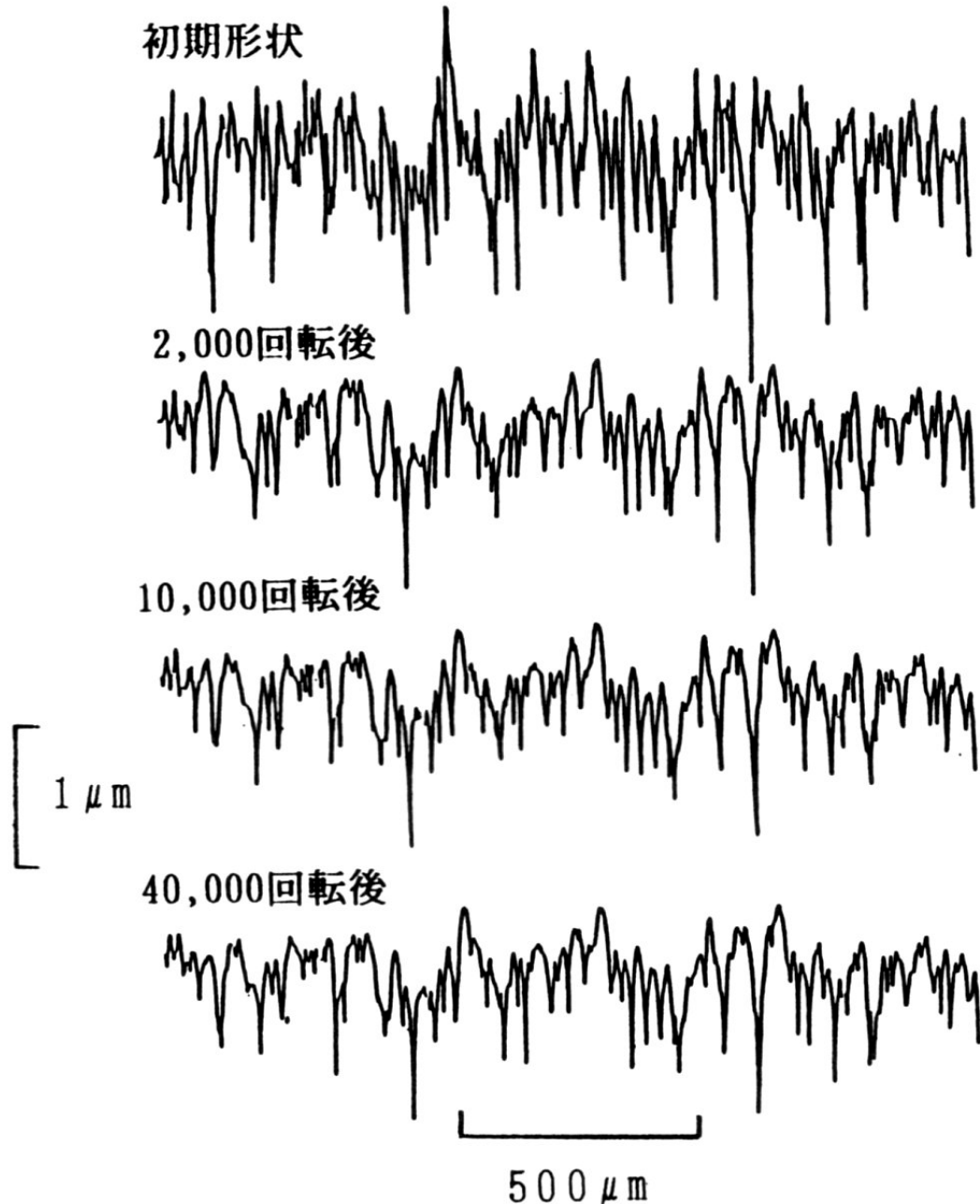
表面粗さレベル の塑性変形

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



(7) 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

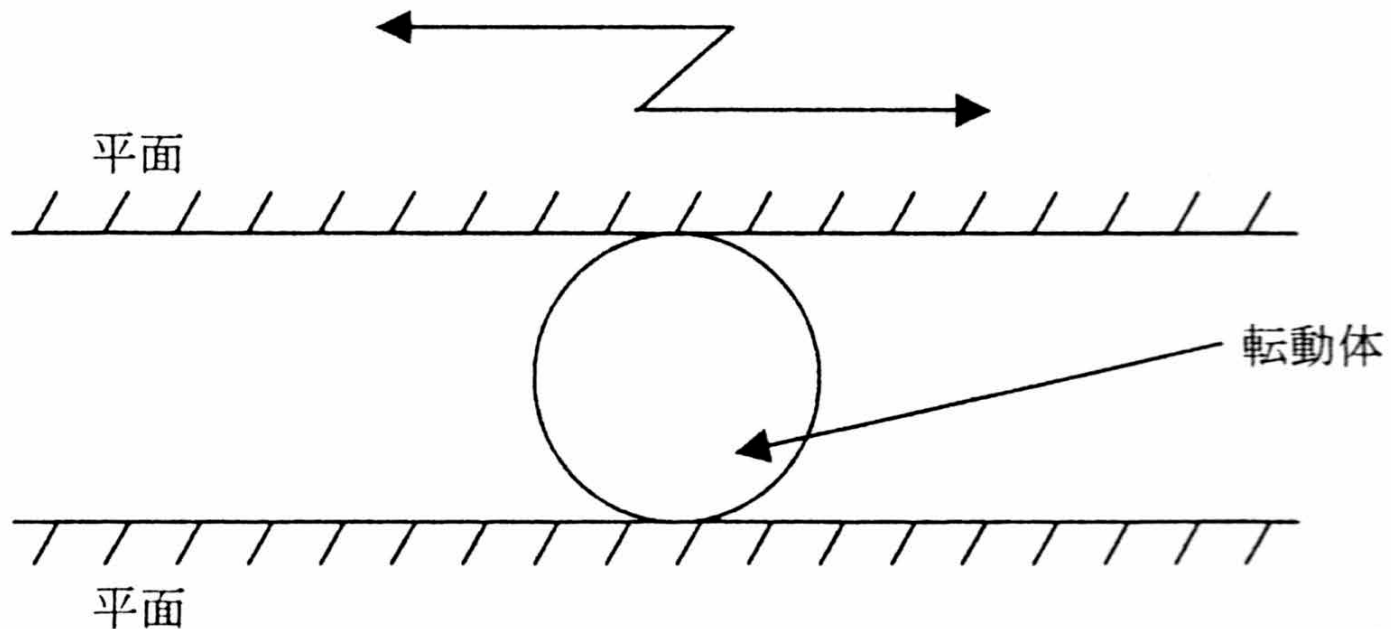


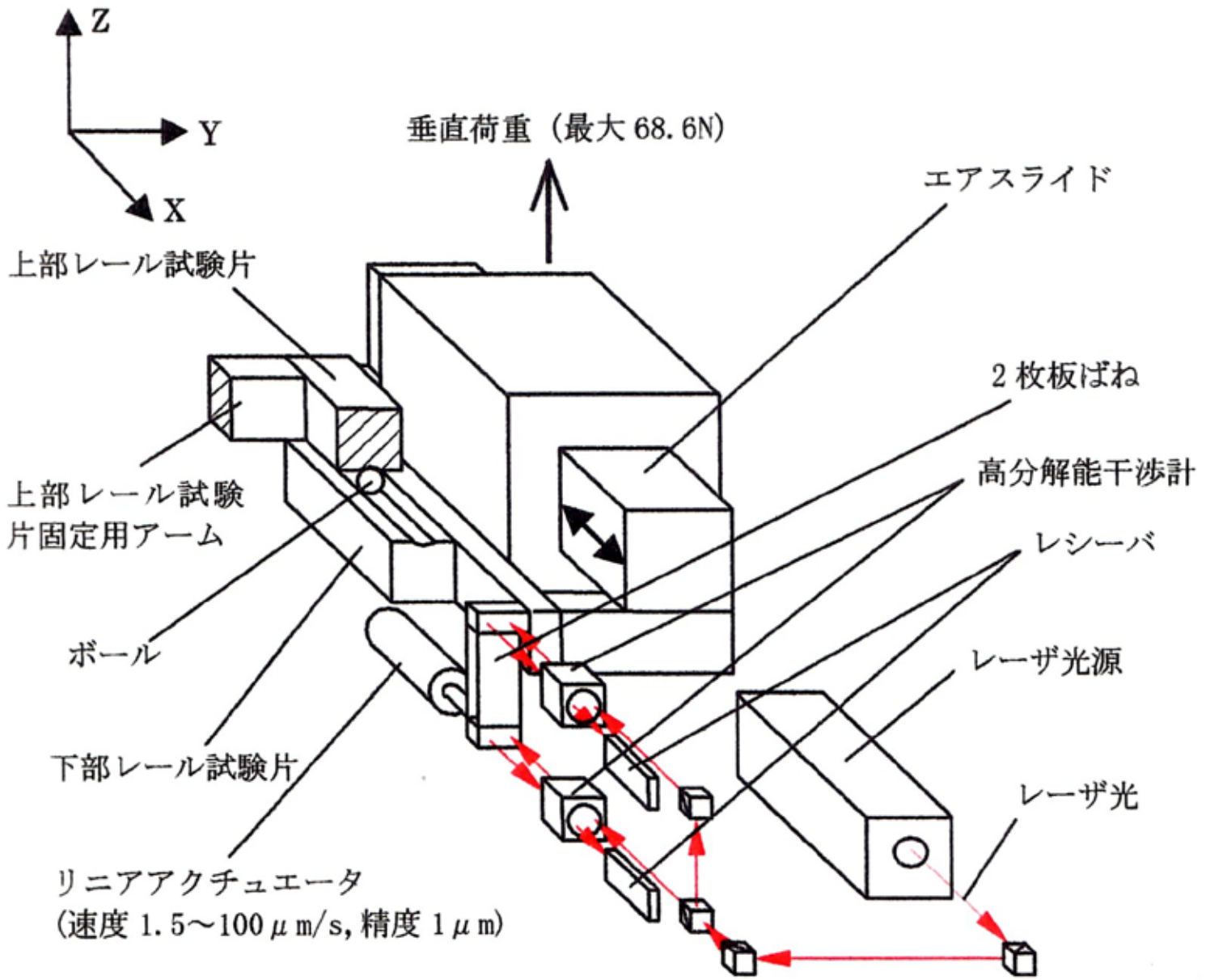
転がり摩擦となる

- ・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

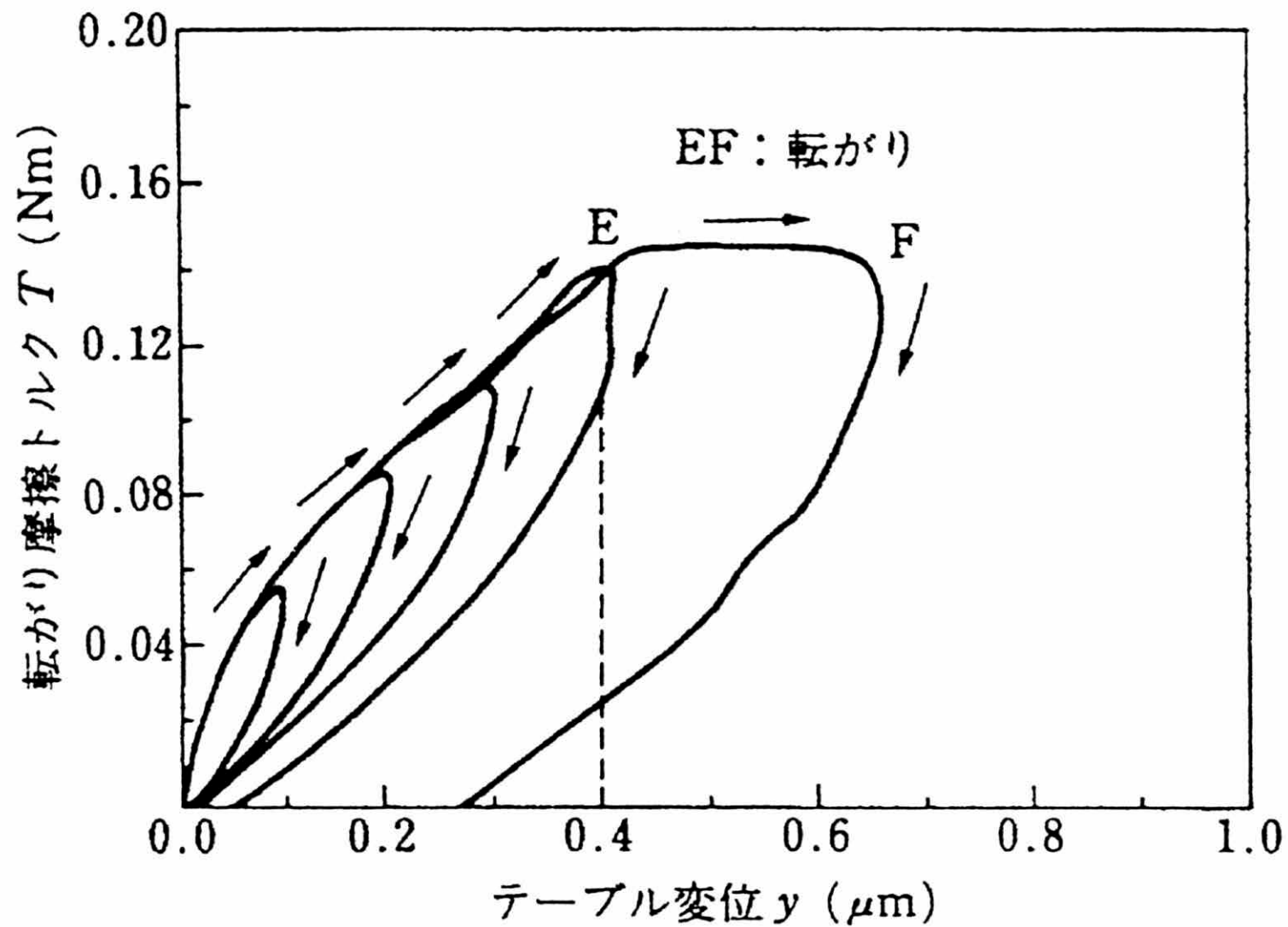
球の転がり出しにおける現象観察

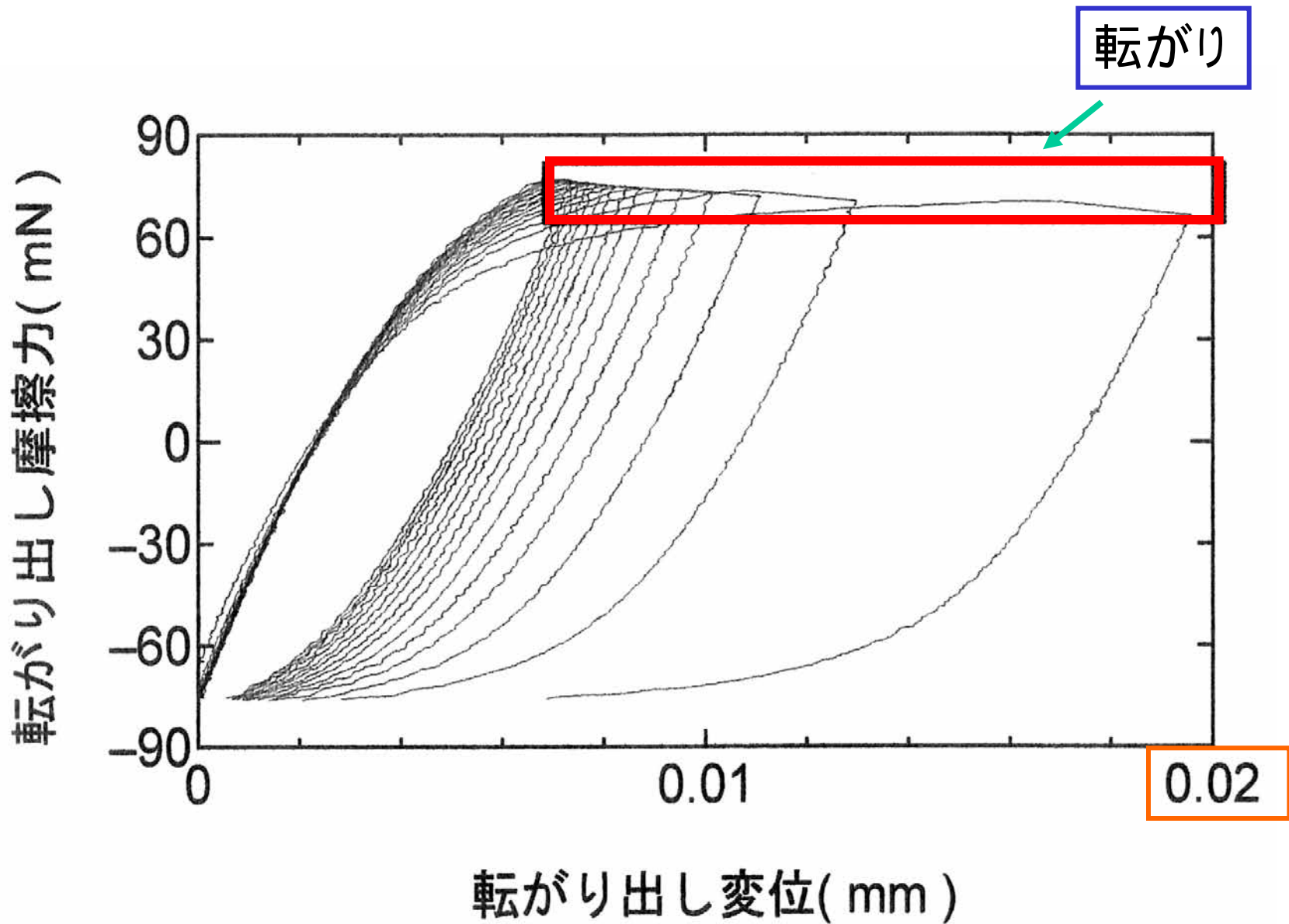
接触部は点ではなく面積を持つので、
転がり開始時を精密に観察するとおもしろい現象が確認された

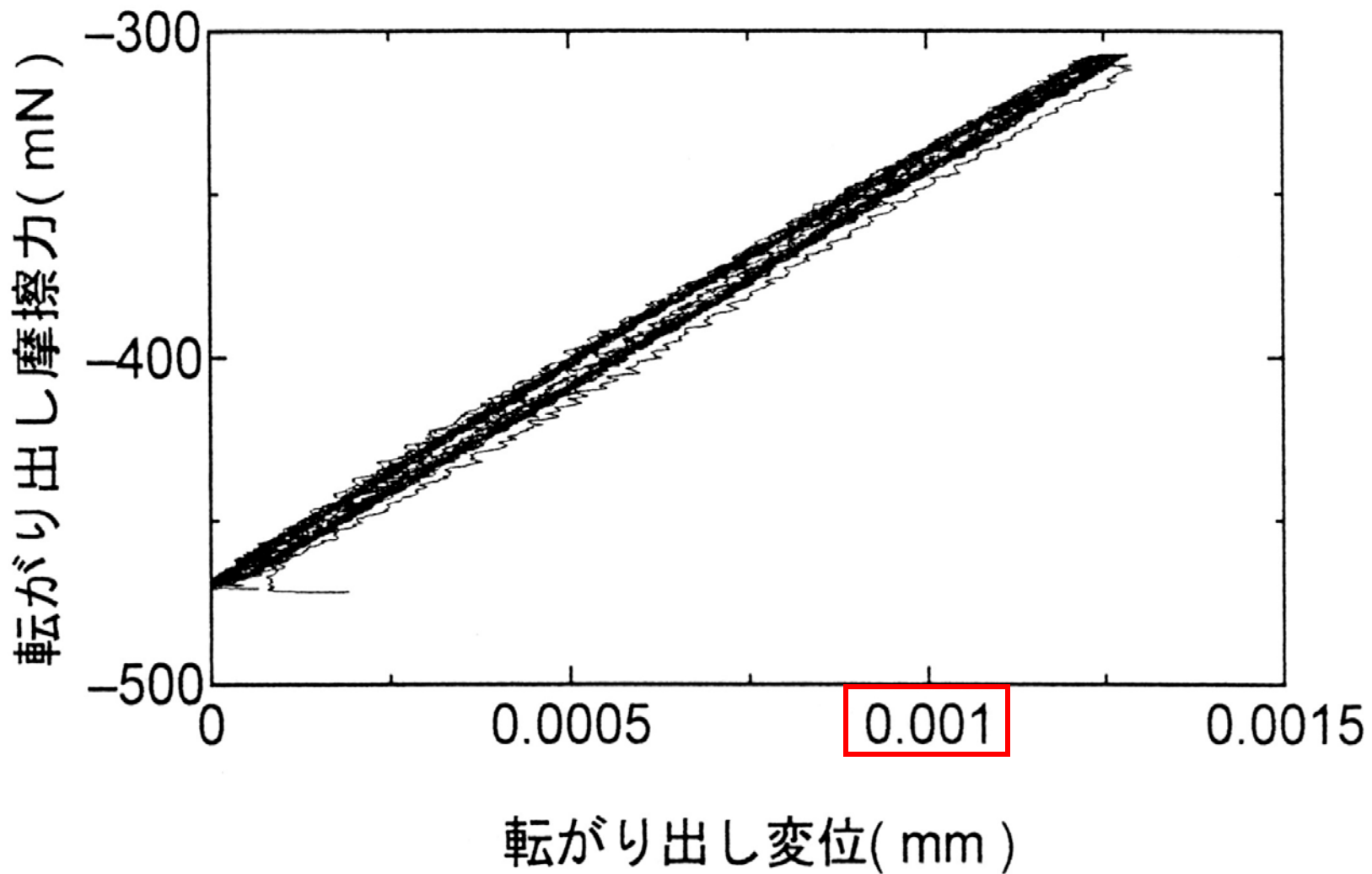




実験装置概略







1ミクロン程度では, リニアに弾性変形