

# 摩擦 (friction)

## (1) すべり摩擦

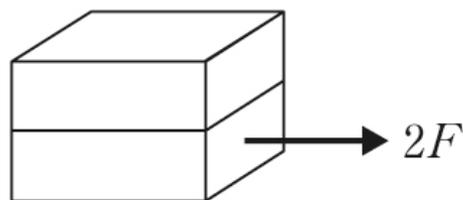
基本法則: **アモンタークローンの法則**

摩擦力は垂直荷重に比例する ((a)(b))

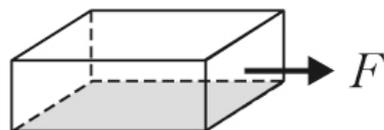
摩擦は見かけの接触面積には関係しない ((b)(c))

動摩擦力はすべり速度に関係しない ((d))

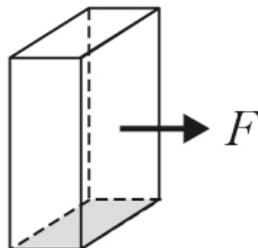
静摩擦力は動摩擦力よりも大きい ((d))



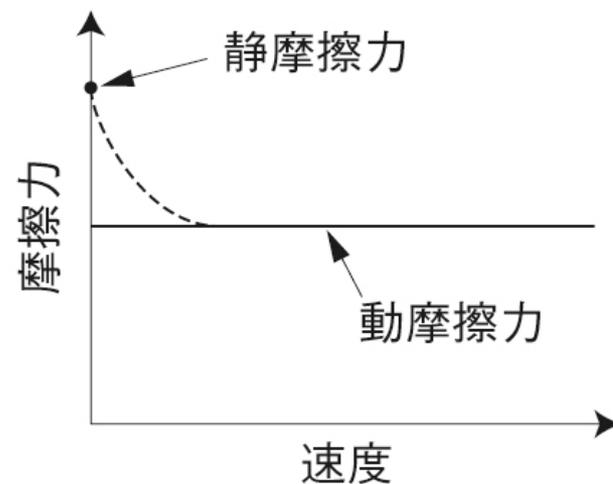
(a)



(b)



(c)



(d)

# 摩擦係数

基本法則(1)より、摩擦力を $F$ 、垂直荷重を $W$ とすると、

$$F \propto W$$

これより、比例定数を $\mu$ とすると、

$$F = \mu W$$

となる。この比例定数 $\mu$ が摩擦係数と定義される。

$$\mu = F / W$$

# 摩擦力

摩擦力 $F$ と真実接触面積 $A$ との関係は、

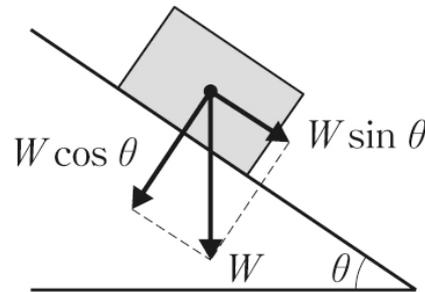
$$F = As \quad (s \text{ は単位面積当たりのせん断強さ})$$

- ・球面 / 平面 :  $A \propto W^{2/3}$
- ・接触が塑性接触の場合 :  $A \propto W$
- ・突起の高さがガウス分布の場合 :  $A \propto W$

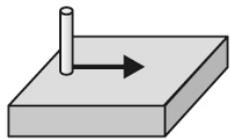
# 摩擦力の測定

(a)の場合： $\mu = F / P = \sin\theta / \cos\theta = \tan\theta$

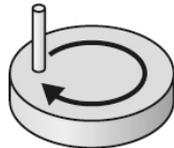
(b)の場合：基本的に  $\mu = F / W$  (F、Wは実測)



(a) 最も単純な方法



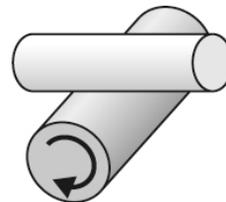
①固定ピン / プレート



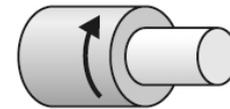
②固定ピン / 回転ディスク



③固定ピン / 回転円筒



④固定棒 / 回転円筒

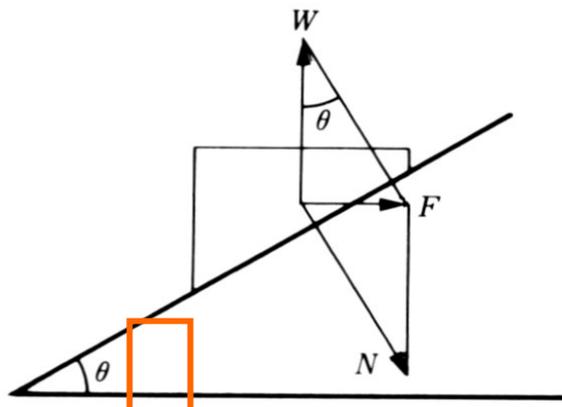


⑤固定棒 / 回転円筒

(b) 実用的方法 (固定側には摩擦力センサを設ける)

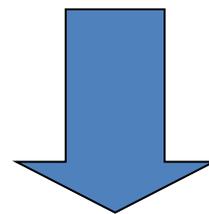
# 摩擦の理論

## (1) 凹凸説：表面の凹凸を乗り越える際の力



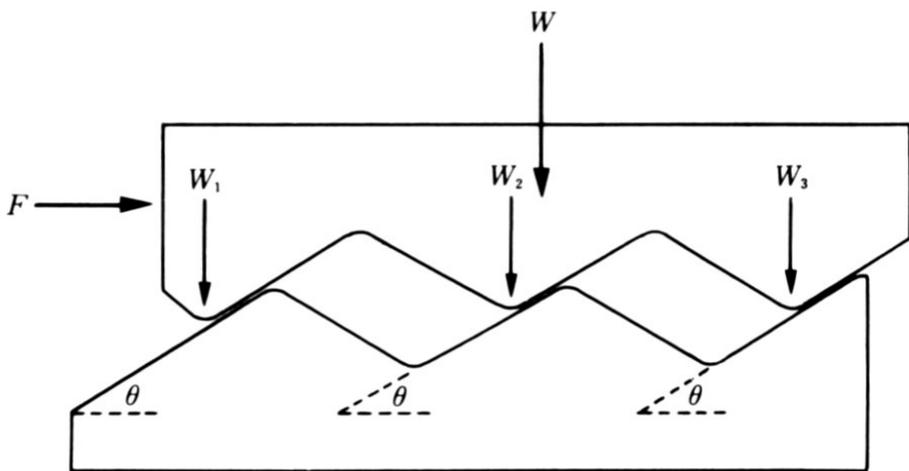
(a)

摩擦係数は、左図のように幾何学的に求められる



$$\mu = \tan\theta$$

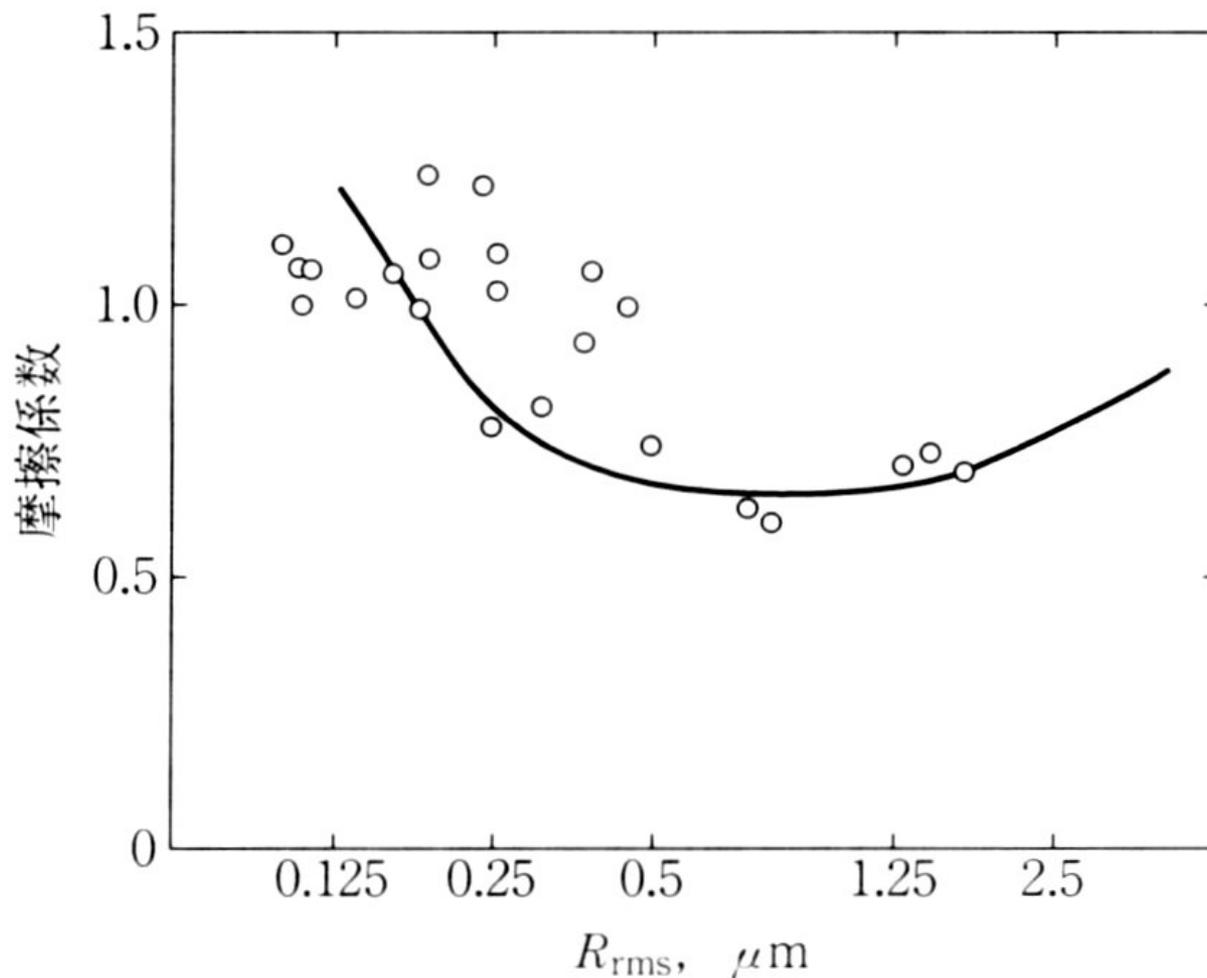
アモントン - クーロンの法則はこの凹凸説に基づく



$$F = W \tan\theta$$

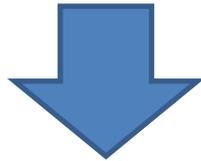
(b)

しかし、凹凸説では説明できない事象が出てきた……



凹凸説であれば、摩擦係数は単調増加のはず

20世紀に入って、新たな摩擦理論が提唱



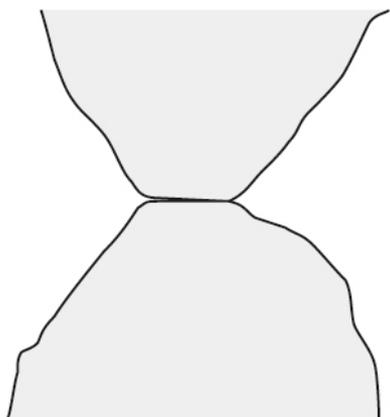
## 凝着説

- ・ 個体の表面に付着した外界の物質に依存する現象
- ・ 摩擦は固体表面で起こる凝着と凝着部のせん断抵抗
- ・ 表面の吸着相の存在によって摩擦は下がる

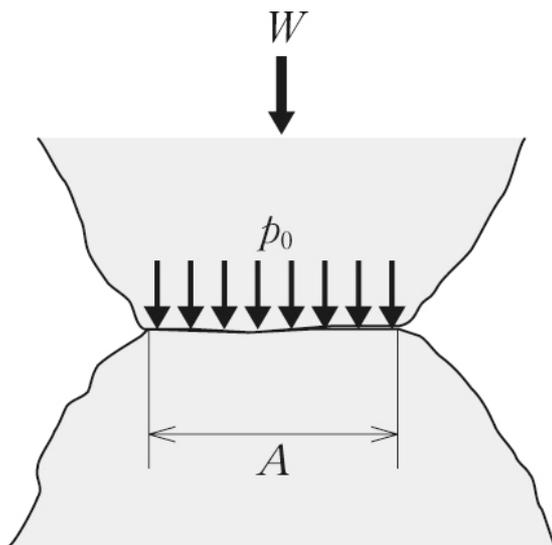
真実接触部では、接触圧力が高いため、塑性変形が生じると、2面間は原子、分子間距離まで近づき、**擬似的に一体化した状態**と見なすことができる



2面を滑らせるためには、部分的に一体化した接触部を**せん断する力**が必要になる



接触のみの状態



垂直荷重 W が付加された状態

$$F = A \cdot s_0 = W / p_0 \cdot s_0$$
$$\mu = F / W = s_0 / p_0$$

$s_0$ : せん断強さ

$p_0$ : 塑性流動圧力



どの金属を組合わせても**0.2程度**

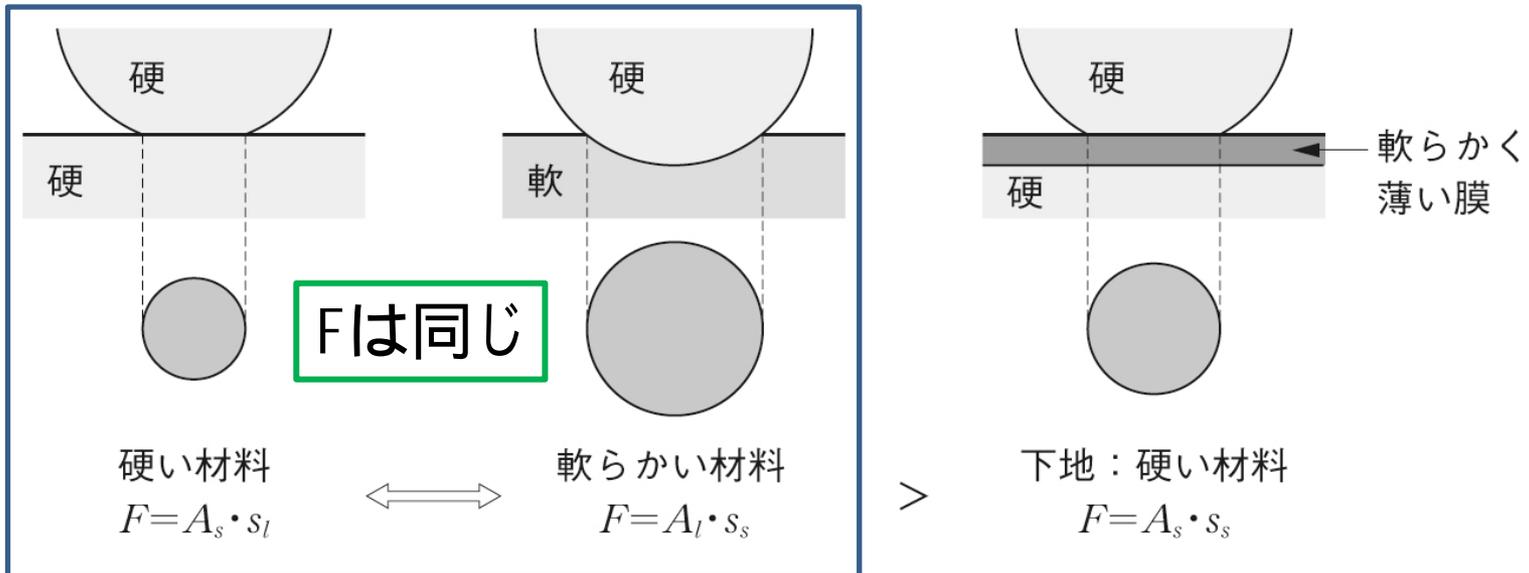
摩擦係数が、 $\mu = F / W = s_0 / p_0$



摩擦力を小さくするには、分子である  
2面間のせん断強さを小さくすればよい



2面間に軟らかく薄い膜を介せばよい



# 修正凝着理論

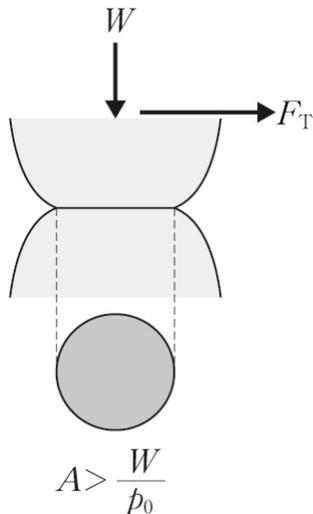
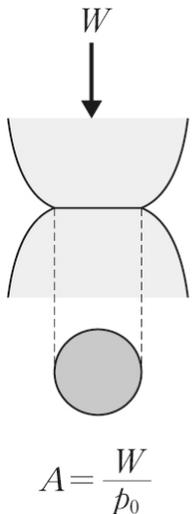
先の式では、どの金属を組み合わせても、  
摩擦係数は0.2程度



事実と矛盾する (実際には摩擦係数の範囲は広い)



**接線力**が付加された場合として、**修正凝着理論**が提唱された



接線力が加わると塑性接触領域が増加

$$p^2 + s^2 = p_0^2$$

$$\frac{\alpha p_0^2}{e s_0^2}$$

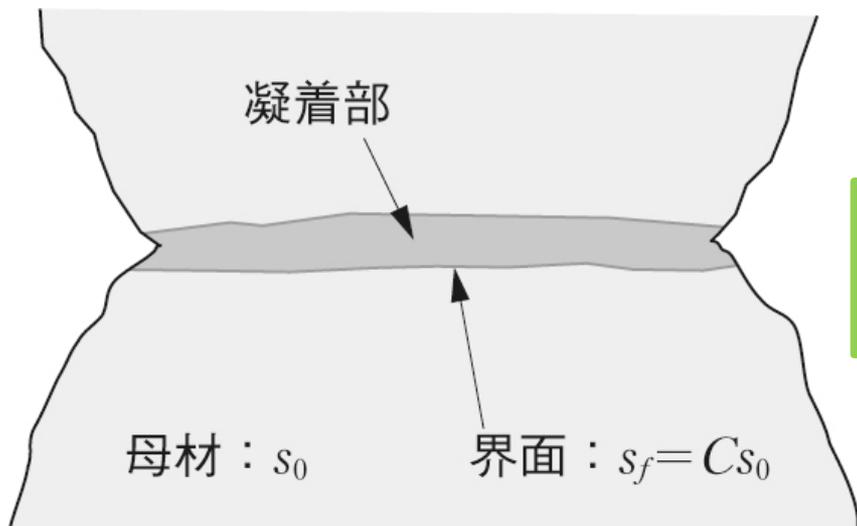
$\alpha$ は約25となるが、バウデンらは9とした

修正凝着理論における真実接触面積Aは、

$$A = A_0 \sqrt{1 + \frac{F_T^2}{W}}, \quad A_0 = \frac{W}{p_0} \quad (\text{垂直荷重だけの接触面積})$$



接触面積がせん断の程度 ( $F_T$ ) によって変化する  
るので、摩擦係数も条件によって変化する



2面間に介在物がある場合には、

$$\mu = \frac{Cs_0}{p_0} = \frac{S_f}{p_0} = \frac{\text{界面の臨界せん断応力}}{\text{母材の流動圧力}}$$

# 掘り起こし効果

硬い表面が軟らかい表面に突き刺さり、その状態ですべりが生じた・・・



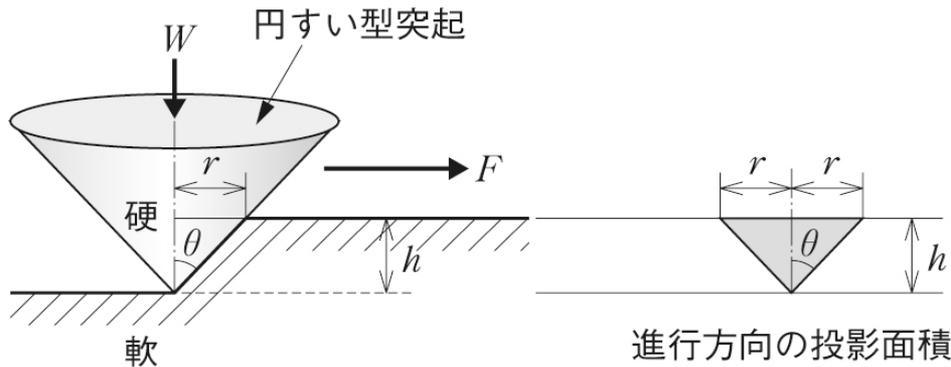
突起が相手表面を掘り起こすための抵抗が摩擦力

$$\mu = \frac{F}{W} = \frac{2h}{r}$$

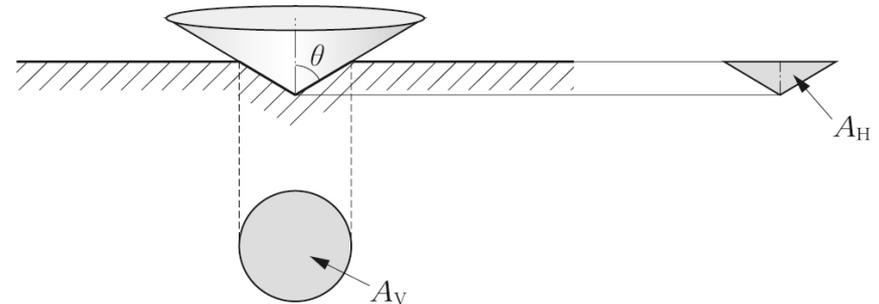


$$\mu = \frac{2}{\cot \theta}$$

形状が決まれば  
摩擦係数も決まる



円すい突起による掘り起こしモデル



実際の突起形状における掘り起こし

摩擦力は、凝着  
掘り起こし の和となり、

$$F = A_v s_0 + A_H p_0$$

↑  
凝着項

↑  
掘り起こし項

実際の表面においては、突起曲率半径 $\theta$ が大きいため、 $A_H / A_v$ は非常に小さくので、掘り起こし項は無視できる。

ただし、剣山のような表面突起では、無視できなくなる

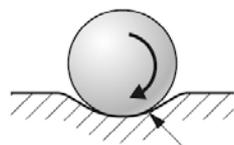
# 転がり摩擦

- (a) 微小滑り(レイノルズの説)
- (b) 弾性ヒステリシス損失(テイバーの説)
- (c) 多角柱の転がり
- (d) 差動滑り(ヒースコートスリップ)
- (e) その他(玉のスピンのやころのスキュー)



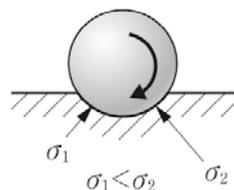
一般的に  
すべり摩擦  
より小さい

(詳細は第11章で)

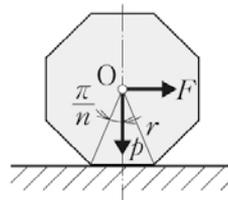
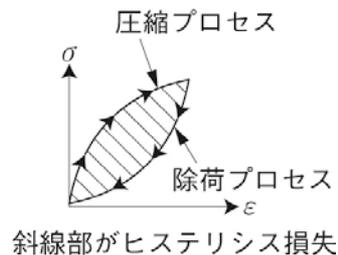


微小なすべり

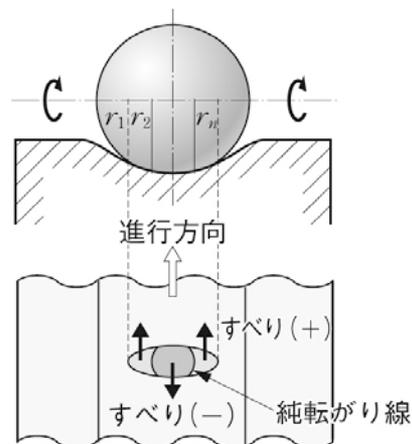
(a) 微小なすべり (レイノルズの説)



(b) 弾性ヒステリシス (テイバーの説)

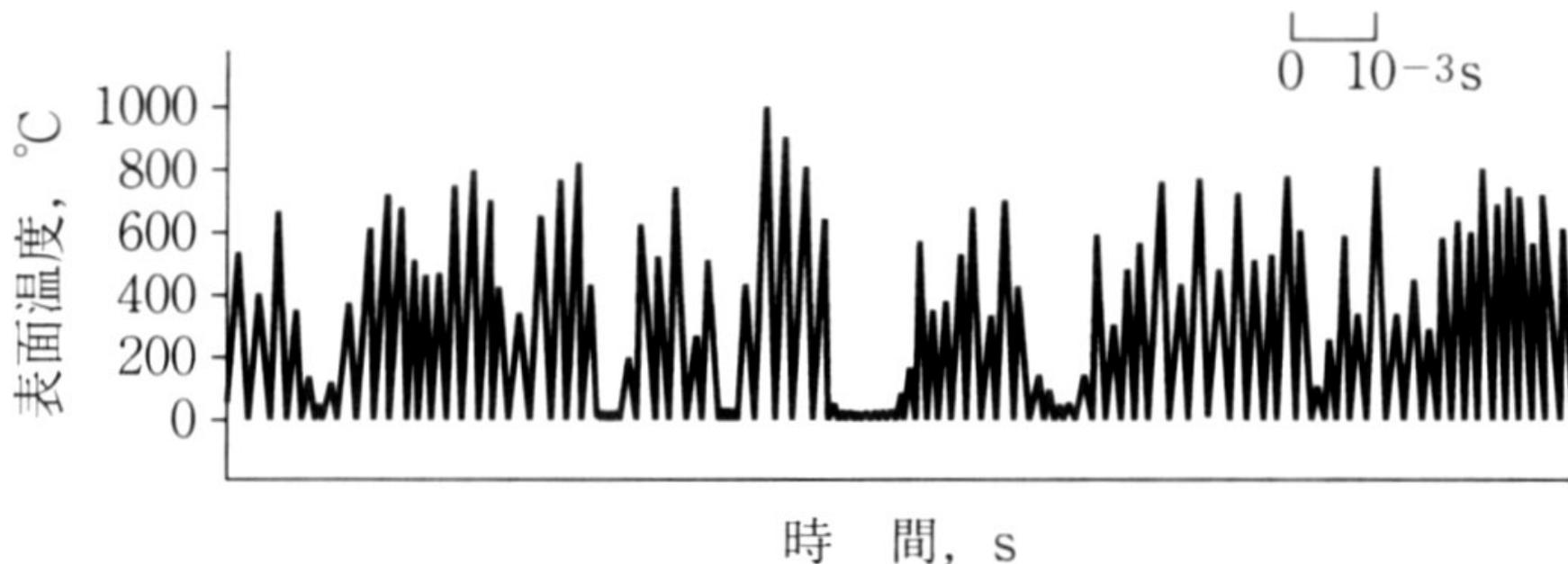
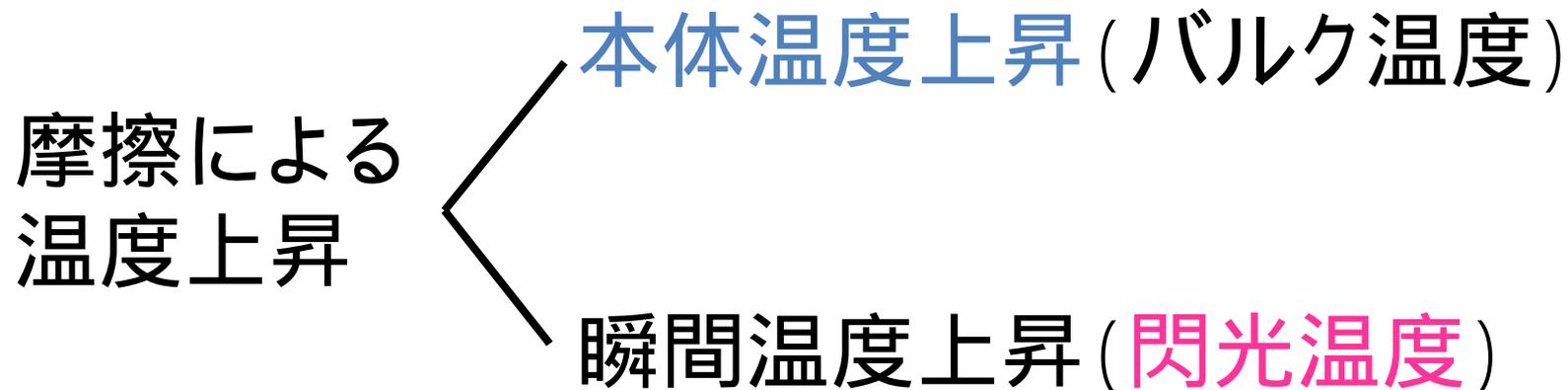


(c) 多角形の転がりモーメント



(d) 差動すべり (ヒースコートスリップ)

# 摩擦面温度と閃光温度

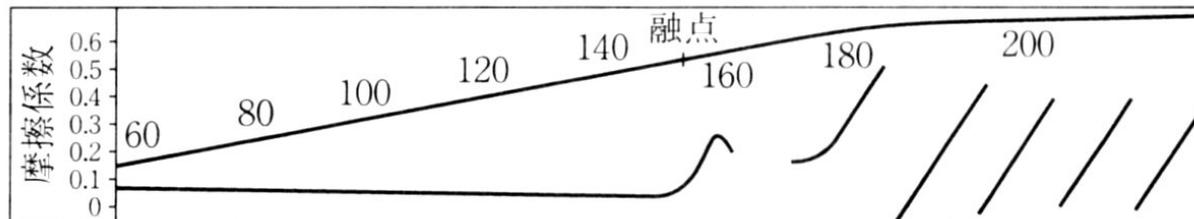


# 摩擦振動とスティック・スリップ現象

(極)低速の滑り試験等においては、摩擦材は連続的に滑らず、**滑り - 付着(停止)**を繰り返すことがある

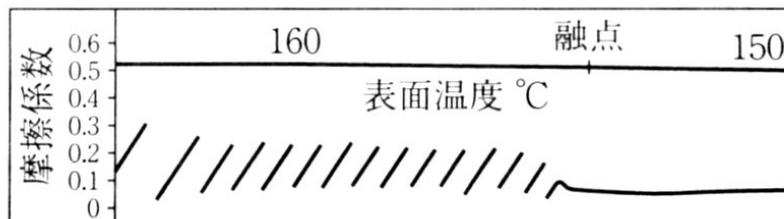


摩擦係数の速度依存性、静止摩擦係数と動摩擦係数の差、試験装置剛性等が原因



(a)

鋼 / インジウム  
の摩擦挙動  
(温度依存性)



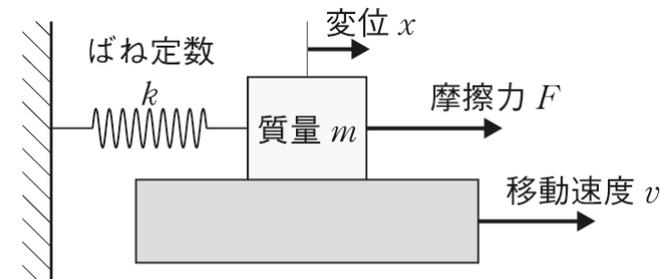
(b)

摩擦面温度が融点を越えると摩擦係数が増加、冷却によって固化すると摩擦係数は減少

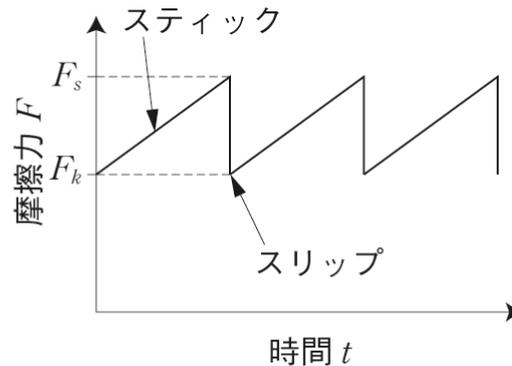
スティック - スリップは，自励振動であり，  
機械で発生すると不具合を起こす



極力，発生を防止する必要がある



(a) 摩擦振動のモデル



(b) スティック・スリップ現象の挙動

1自由度の  
振動モデル  
に置き換え  
られる

$$m\ddot{x} + \mu(v)m\dot{x} + kx = 0$$

## スティック - スリップ対策

滑り速度とともに摩擦係数が上昇する系  
システムの剛性を高めること

摩擦振動  空気の振動によって摩擦音

積極的利用: 弦楽器 (心地よい音色)



大半は、心地悪い周波数となり、問題となることが多い

例: ブレーキ、タイヤの鳴き音

# 本日の演習

直径10mmの硬い鋼球を降伏応力300MPa、直径50mmの軟らかい鋼球に押しつけた。塑性変形が始まる臨界荷重を求めよ。

ただし、各種材料物性値は、テキストP27、例題2.2と同じとする。