

摩耗 (表面損傷)

機械的作用により摩擦面に発生する損傷

種類

摩耗

塑性流動

転がり疲れ

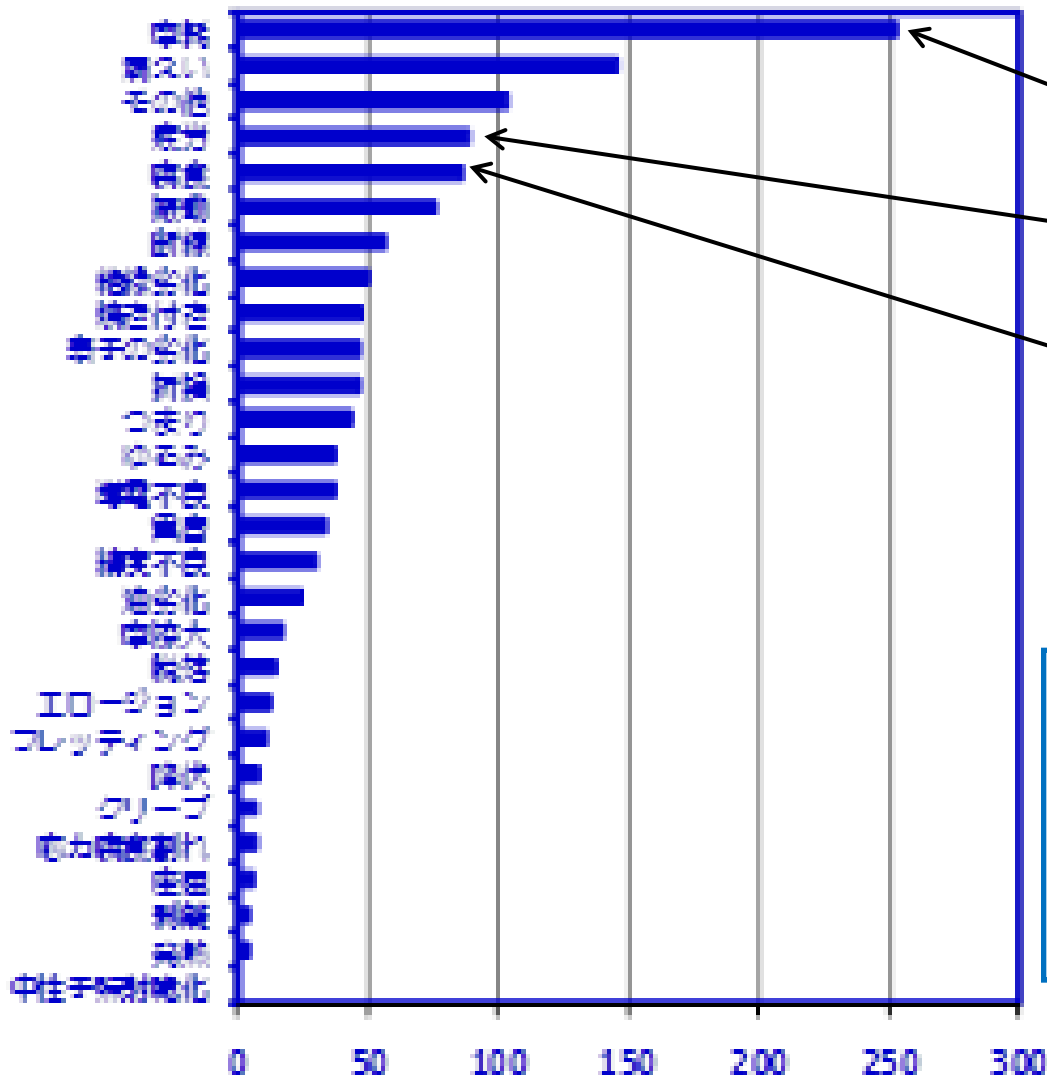
焼付き

その他 (熱割れ等)

通常でも発生する

潤滑不良, 過大負荷等

表面損傷の防止には, トライボロジー的な設計が必要



1位 摩耗
4位 疲労
5位 腐食



機械の損傷には
摩耗が大きく関与
している

機械システムに発生する故障モードの例

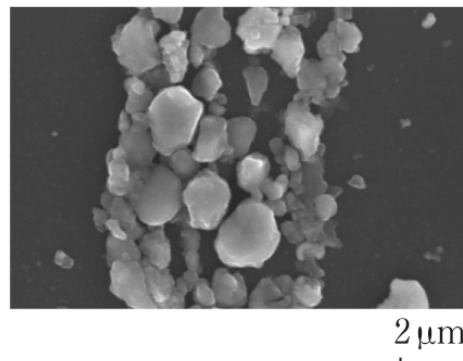
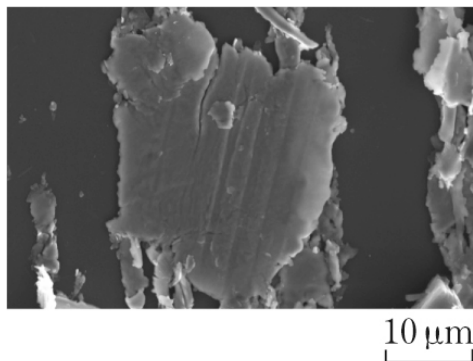
摩耗の基礎用語

摩耗面：固体表面に摩擦が付与された面

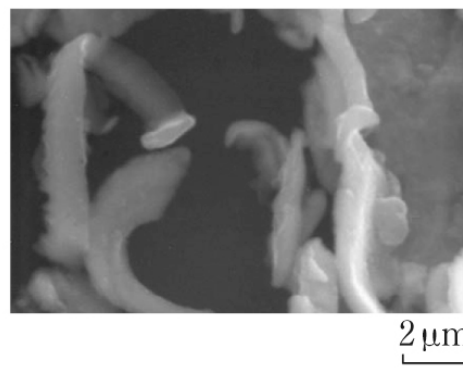
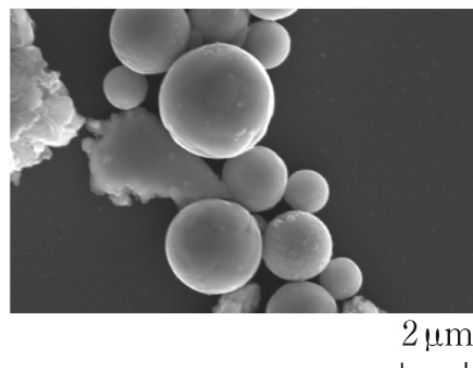
摩耗量：摩耗面において固体表面部分が減量した
体積(質量)

摩耗粒子：固体表面から脱落する小片

大きな片状
摩耗粉



球状摩耗粉



カール状摩耗粉

フェログラフィーで観察された摩耗粒子

摩耗に関する用語

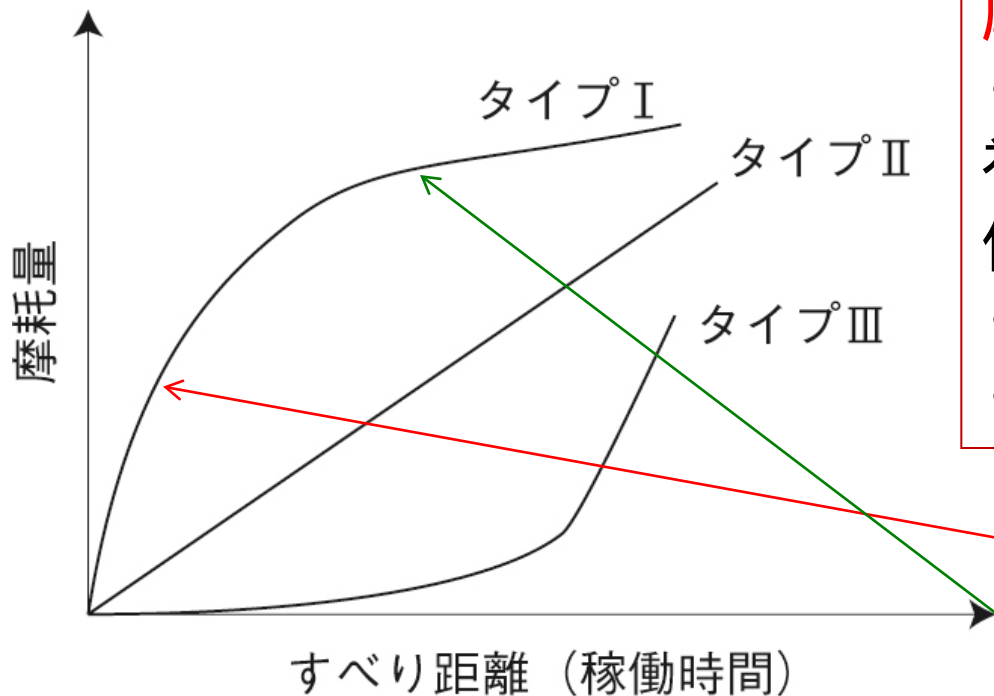
損傷形態	スカuffing	歯車歯面などのすべり接触面に生じる固相凝着による局部的表面損傷。 日本ではスコーリングと呼ばれていたが、ISOでスカuffingに統一された。
	フレーキング	転がり軸受が荷重を受けて運転されたとき、転がり疲れによって軌道面や転動体の表面がうろこ状にはがれる現象。
	ピッチング	歯車を運転しているうちに歯車に生じる小孔。すべりを伴いながら転がり接触を繰り返す表面に生じる損傷形態の代表的なもの。生じる穴の大きいものをスポーリング、小さいものをピッチングという分け方もなされているが、最近では表面からき裂がはいり穴に成長するものをピッチング、内部に生じる高いせん断応力により内部にき裂が発生し穴に成長するものをスポーリングと呼ぶ場合が多い。
	スポーリング	転がり接触面において高い応力の繰り返しにより表面下内部で疲れが起こり、大きな金属片が表面から脱落して生じる損傷。ピッチングがひどく連なったものもスポーリングということがある。
	スクラッチング	すべり方向につく深くて明瞭な線状傷。
接触状態	すべり摩耗	すべり接触時に接触面から物質が脱落していく現象。
	転がり摩耗	転がり接触時に接触面から物質が脱落していく現象。主として転がり接触間のすべりおよび垂直荷重の繰り返し負荷による疲れにより生じる。
	衝撃摩耗	固体表面間での繰り返し衝突によって材料表面に生じる損傷。
	フレッチング摩耗	接触する2固体間に生じる外的な振動に伴う接線方向の、一般的には100 μm以下の微小な往復すべりに起因した表面損傷。
	スラリー摩耗	土砂が混入した水のように固体と液体が混合した環境下で接触面から物質が脱落していく現象。
摩耗の程度	マイルド摩耗	表面損傷の少ないなめらかな表面や数 μm以下の微細な摩耗粒子の発生を特徴とする摩耗。凝着摩耗の一形態として用いられることもある。表面からの脱落が少ない。
	シビア摩耗	摩擦面間で激しい凝着を伴い、著しい移着と粒径の大きい摩耗粒子を発生する凝着摩耗の一形態。表面からの脱落が多い。
摩耗時期	初期摩耗	同一箇所を繰り返して摩擦する場合、摩擦の初期において生じる摩耗率の高い摩耗。
	定常摩耗	繰り返し摩擦において初期摩耗が終わった後に現れる摩耗率が激減した摩耗状態。
摩耗状態	酸化摩耗	酸素または酸化性雰囲気物質との摩擦面での化学反応と、表面に生成した酸化物が摩耗現象を支配している状態の摩耗。
	熔融摩耗	過酷な摩擦条件、あるいは2面間に電流が流れる場合など、摩擦面が高温になる条件下で固体表面の一部が熔融するために起こる摩耗。

同じような現象でも、業界によって呼び方が異なる場合もある

摩耗量の評価

摩耗率：単位滑り距離当たりの摩耗量 (dV / dL)

比摩耗量：単位滑り距離，単位荷重当たりの摩耗量
 V / WL ， M / WL (単位は mm^2 / N)

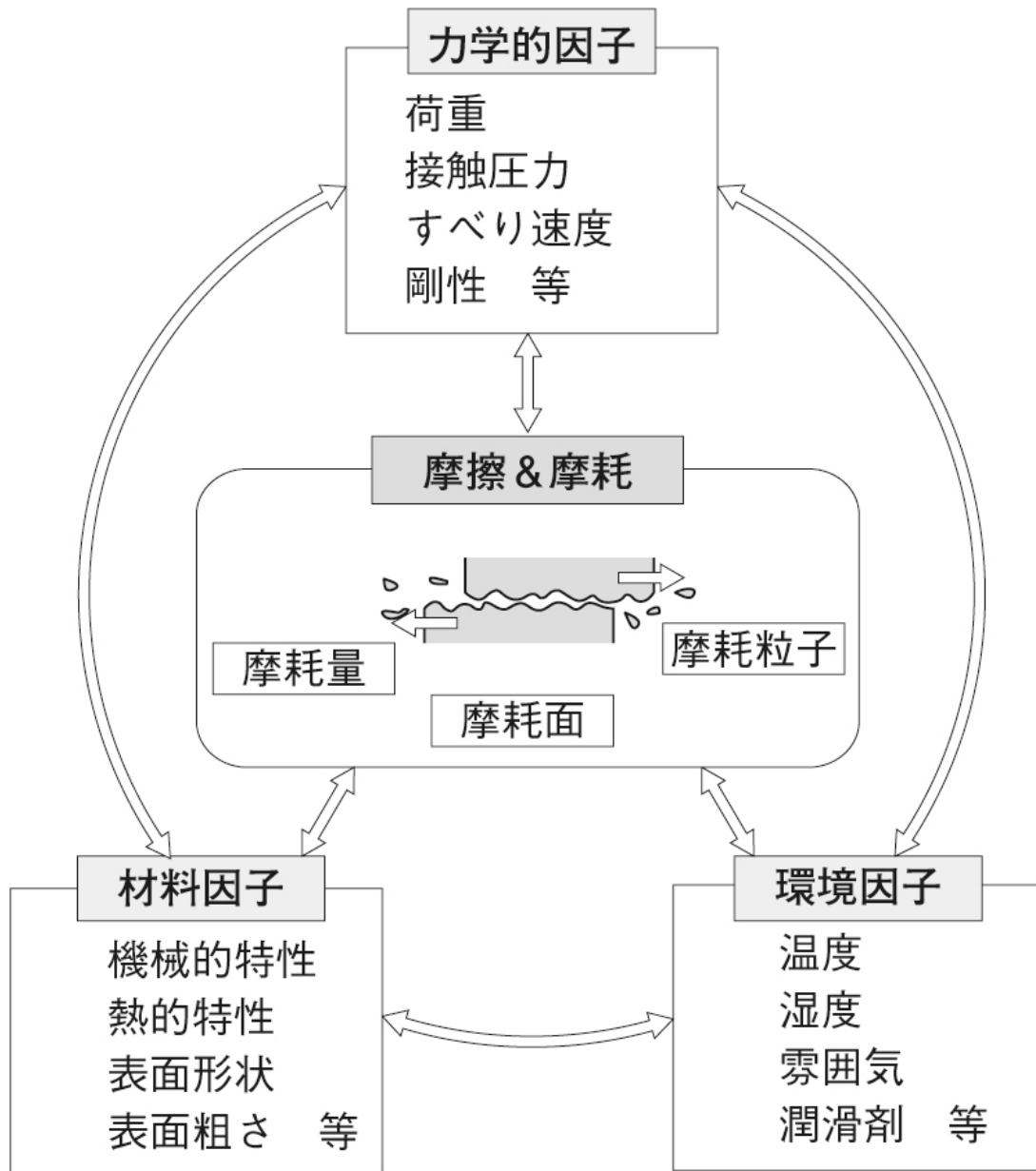


摩耗進行曲線

- ・一般的には**タイプ** であり、初期に摩耗が多く、**なじんで** 低摩耗になる
- ・**タイプ** は、アブレシブ摩耗
- ・**タイプ** は焼付き

初期摩耗：初期の高い摩耗率
定常摩耗：低い摩耗率

摩耗に及ぼす影響因子

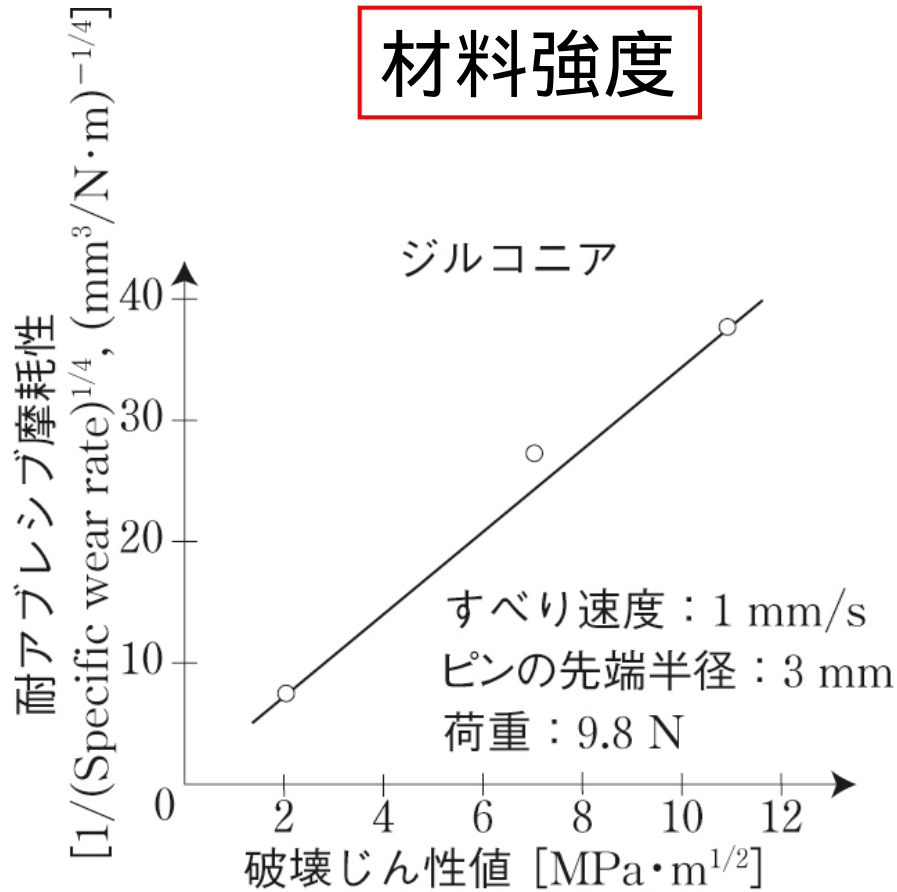


3大因子
力学的因子
材料因子
環境因子



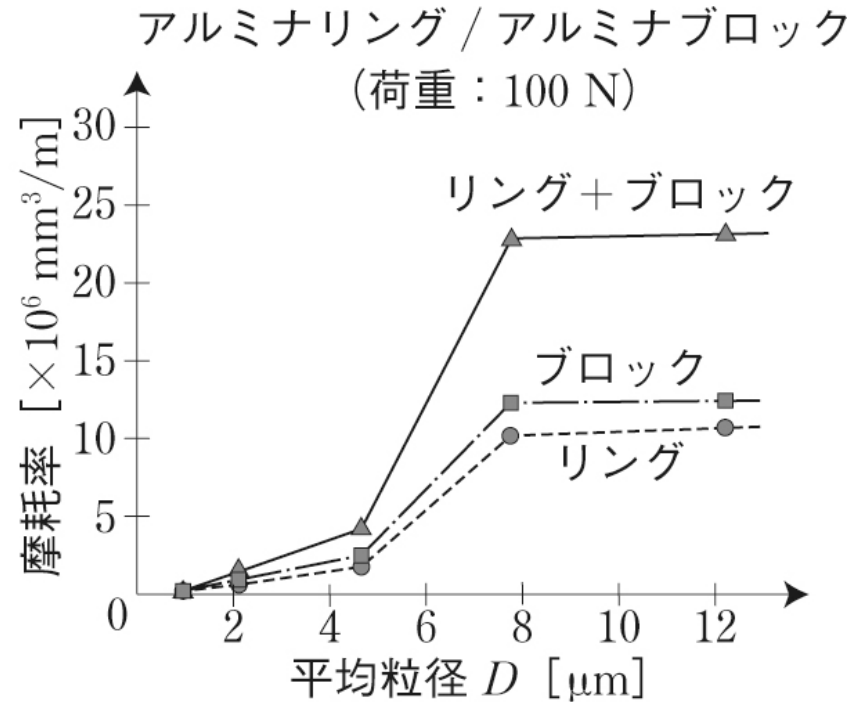
荷重、すべり速度、
温度、粗さ等はこの
中に含まれる

材料強度



(a) 破壊じん性値

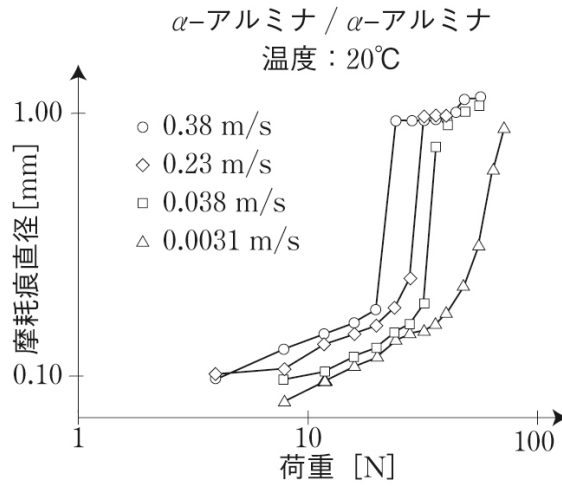
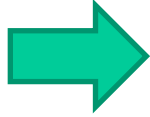
材料組成



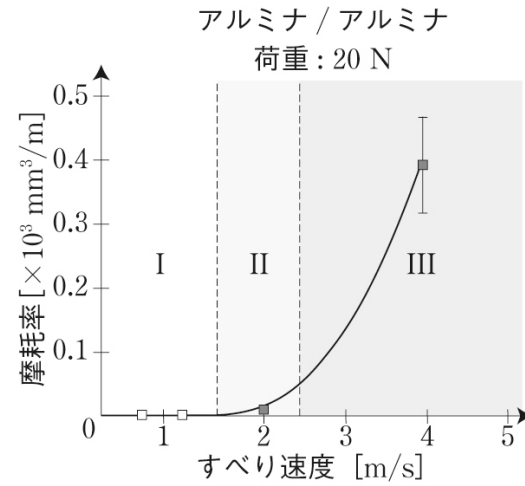
(b) 粒子サイズ

セラミック同士の摩耗における破壊じん性と粒子サイズの影響

荷重

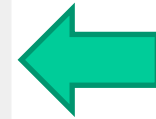


(a) 荷重

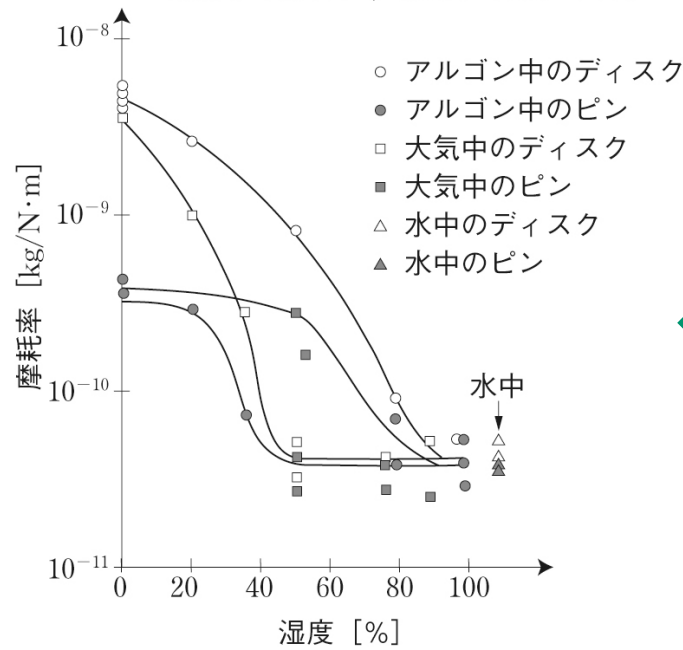


(b) すべり速度

すべり速度

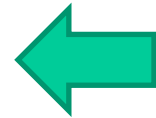


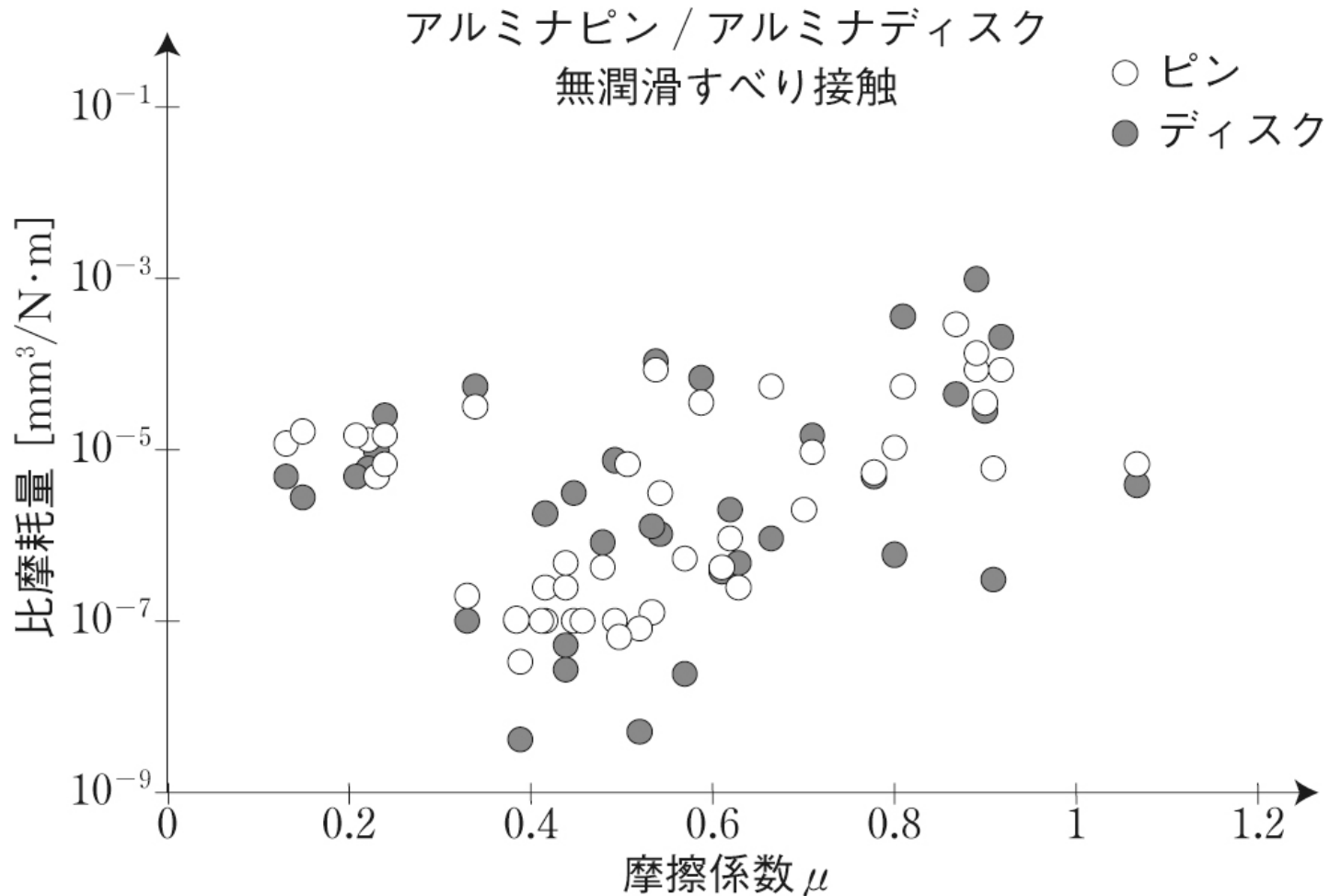
窒化ケイ素ピン / 窒化ケイ素ディスク



(c) 環境湿度

湿度



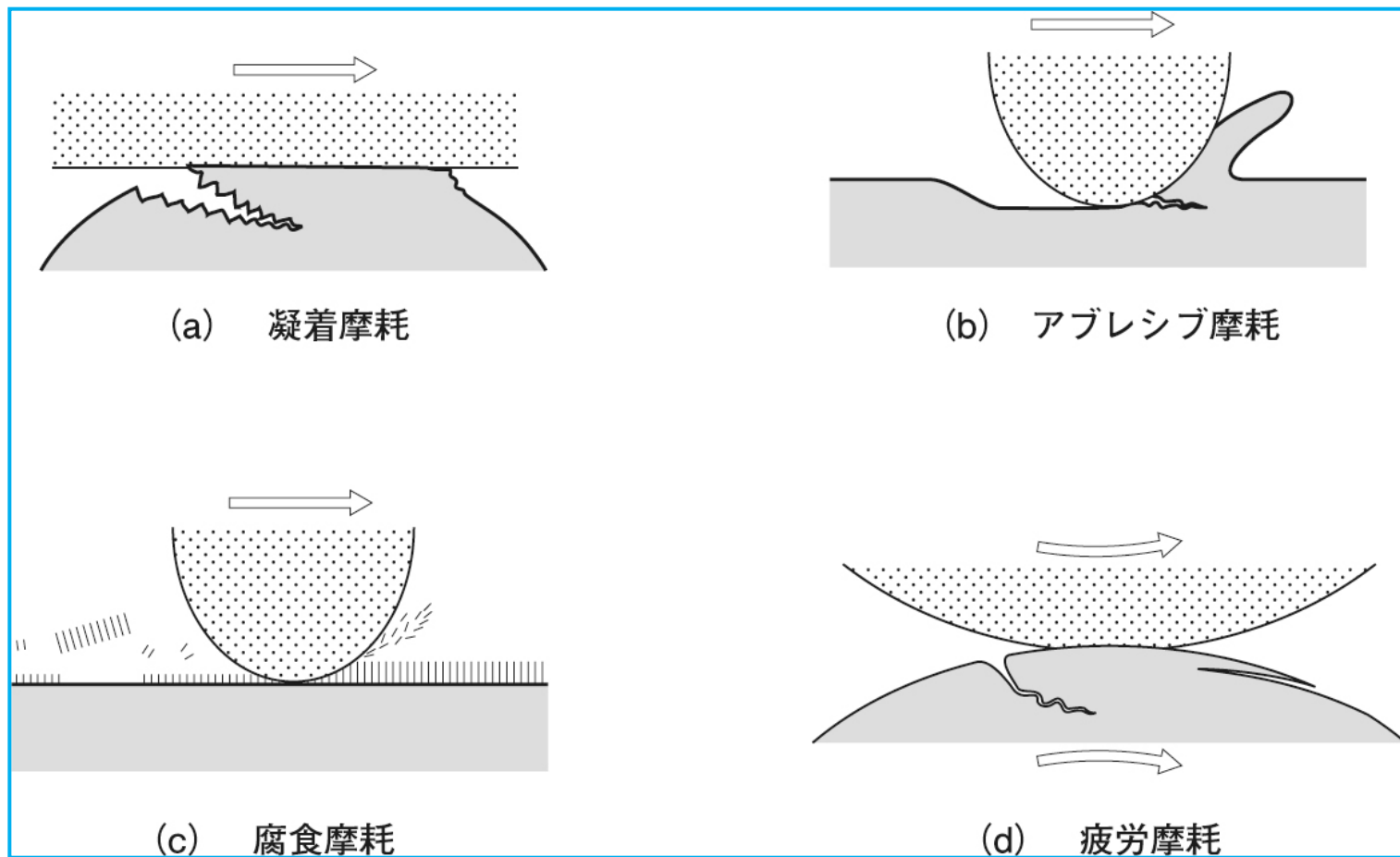


摩擦係数と比摩耗量の関係

摩耗量は条件によって6桁ばらつく
セラミックでは摩擦係数と摩耗量にあまり相関は見られない

耐摩耗設計 ← トライボ設計の一環

摩耗形態は、大きく4つに分類される

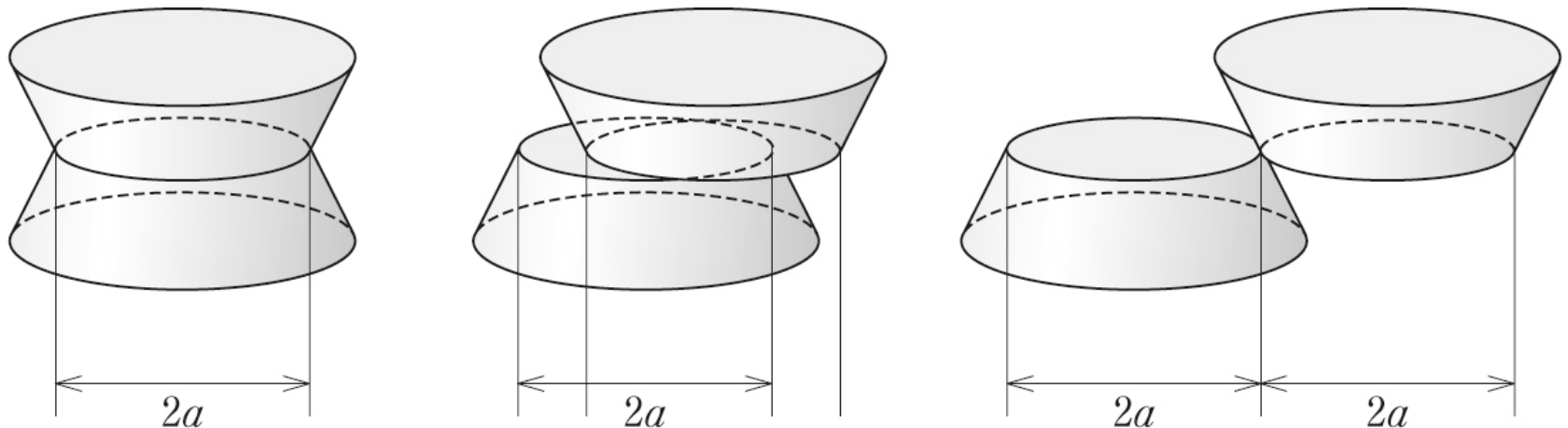


(1)凝着摩耗

滑り距離Lの場合の摩耗量 $\rightarrow V = k \times n \times \frac{2}{3} \rho a^3 \times \frac{L}{2a}$

変形して $V = \frac{k}{3} \times \frac{WL}{H}$ (W:荷重、H:軟らかい材料の硬度)

比摩耗量は $w_s = \frac{V}{WL} = \frac{k}{3H}$



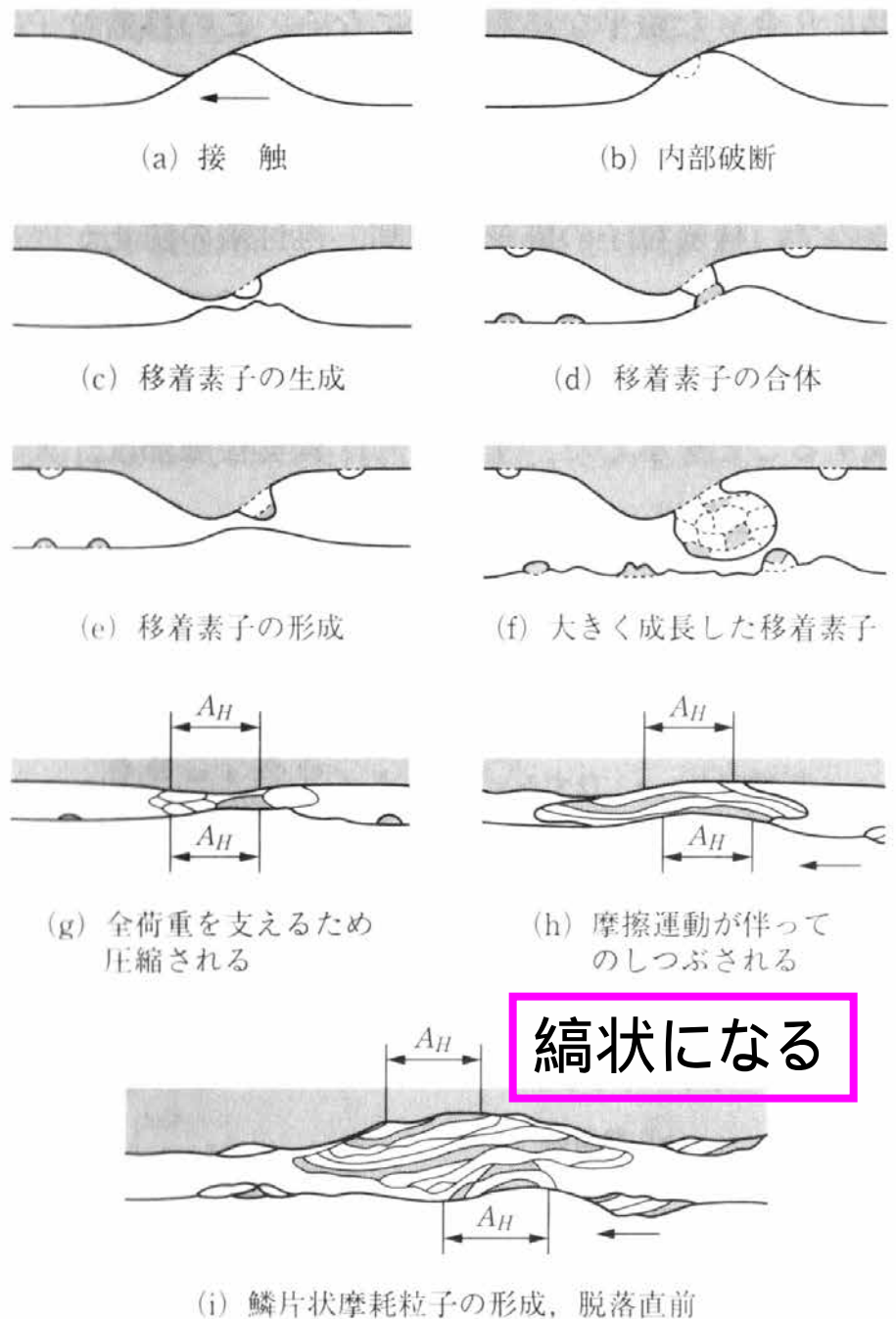
アーチャードの凝着摩耗モデル

摩耗粉生成機構

先のモデルでは、発生確率的な説明はできるが、**摩耗粉の生成機構** (脱落過程) は説明できない→**移着**のみで摩耗粉は生成されない

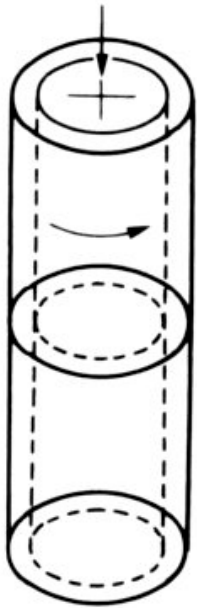
笹田の移着粒子成長モデル

微小粒が移着・成長し、大きな摩耗粉として脱落する

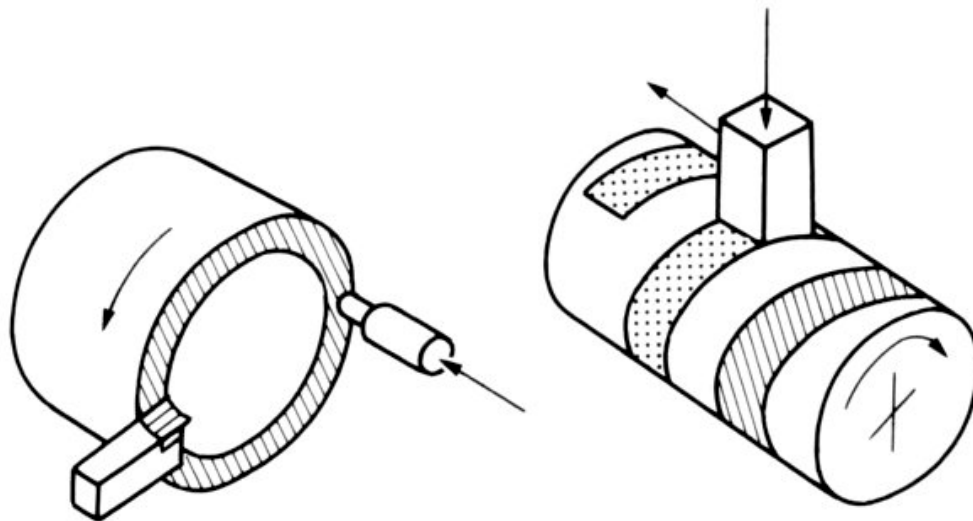
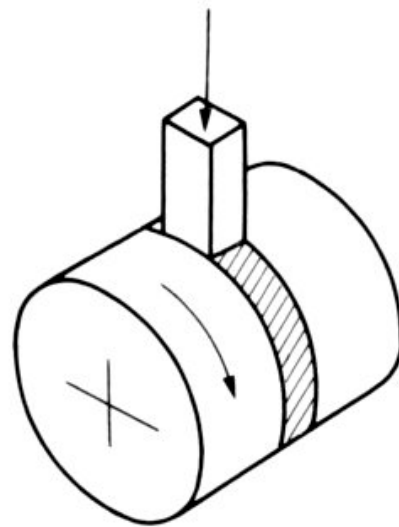


摩擦の形態

- (1) 繰返しのある摩擦
初期には摩耗は多いが、時間とともに摩耗は減少する

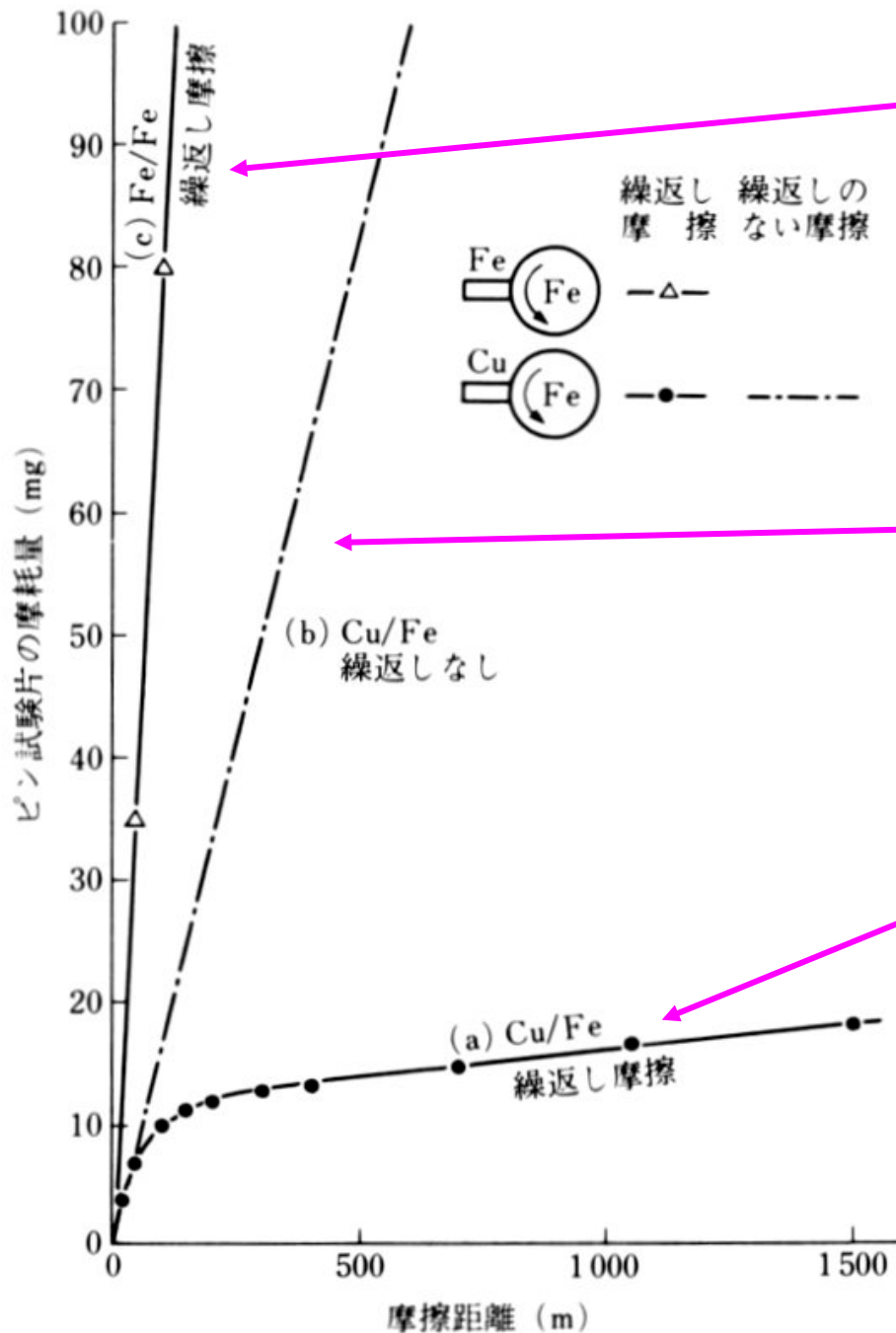


(a) 繰返しのある摩擦



(b) 繰返しのない摩擦

- (2) 繰返しのない摩擦
常に新しい面どうしの摩擦となり、摩耗量は大きいままである

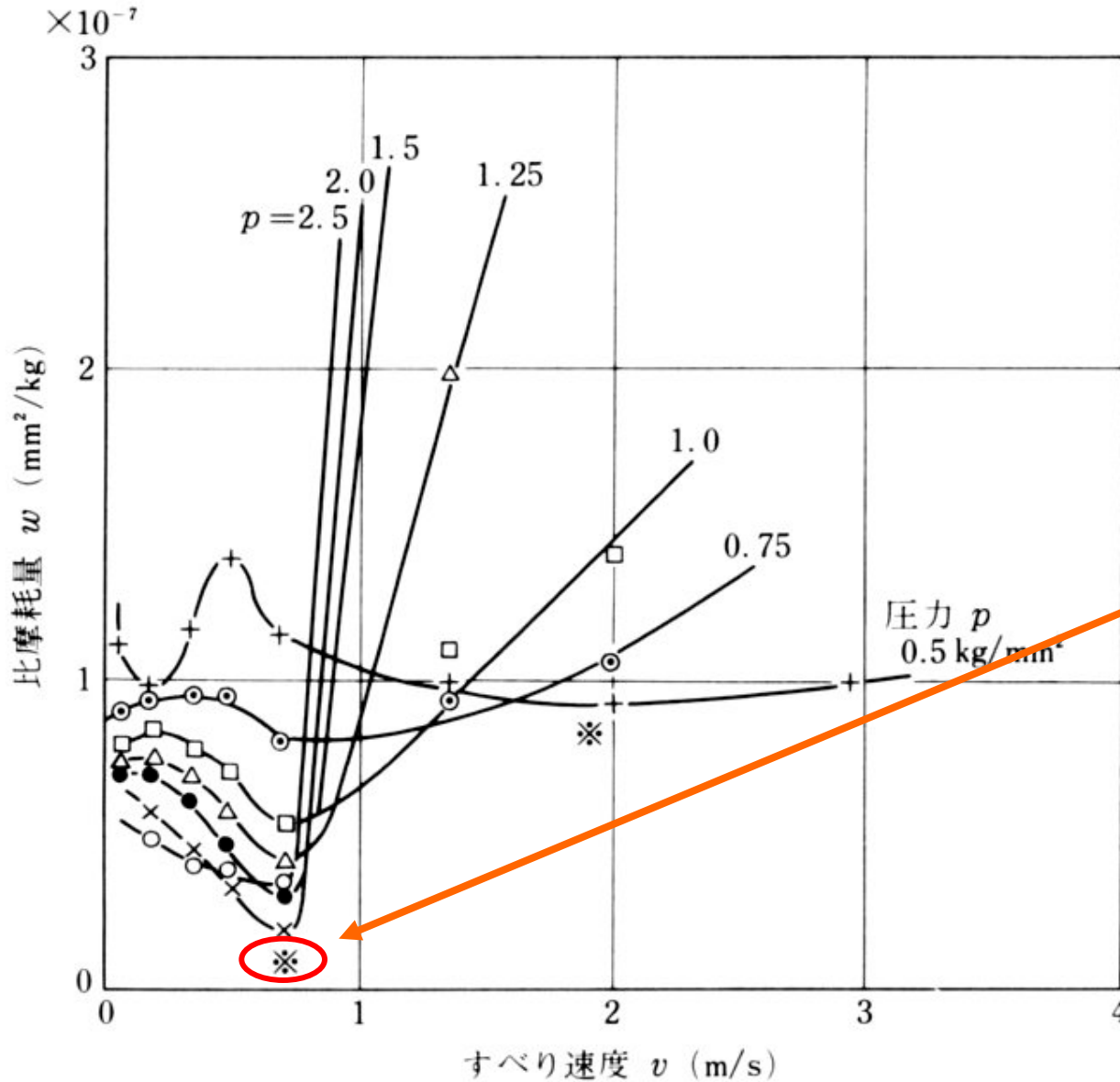


同じ金属を摩擦させると摩耗は非常に多くなる

新しい表面の摩擦が繰り返されるので、摩耗は減少しない

“なじみ”により時間が経過すると摩耗は収束してくる

比摩耗量の速度依存特性



マイルド摩耗の
限界値
(極小値)

どちらになるかは雰囲気，条件次第

凝着摩耗には、(1) シビア摩耗
(2) マイルド摩耗

の形態が存在する

表2 乾燥摩耗のシビア摩耗とマイルド摩耗の比較

	比摩耗量 (mm ² /N)	摩擦面，摩耗粉の特徴
シビア摩耗 (severe wear)	10 ⁻⁵ ~10 ⁻⁷	摩擦面は大きく荒れ，移着粒子が大量に付着する．数十μm以上の大型の摩耗粉が生成し，大きいものは1mmに達する．
マイルド摩耗 (mild wear)	10 ⁻⁸ ~10 ⁻¹⁰	摩擦面はなめらかであり，大きい着粒子は存在しない．摩耗粉は数十μm以下と微細である．金属の繰り返し摩擦では，初期シビア摩耗からある摩擦距離からマイルド摩耗へと遷移する．

(2) アブレシブ摩耗

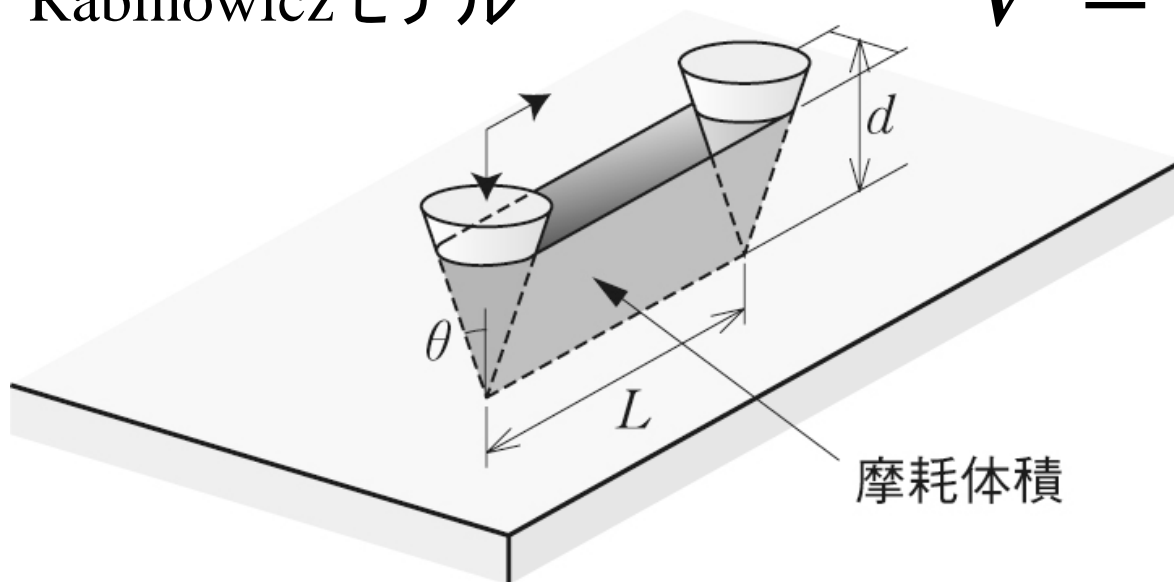
硬い突起や粒子によって、**切削**されることにより発生する摩耗

摩耗体積の考え方

$$V = k \times n \times d^2 \times \tan \theta \times L$$

Rabinowiczモデル

$$V = \frac{2k}{\rho \times \tan \theta} \times \frac{WL}{H}$$

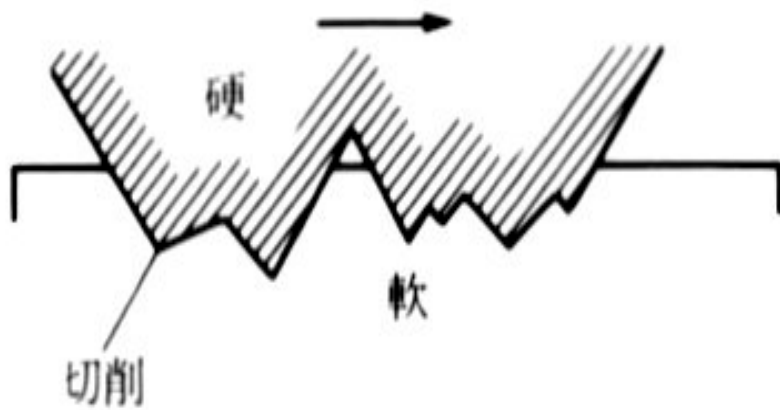


W: 荷重

H: 軟らかい材料の硬度

$$\text{比摩耗量: } w_s = \frac{V}{WL} = \frac{2k}{\rho H \times \tan \phi}$$

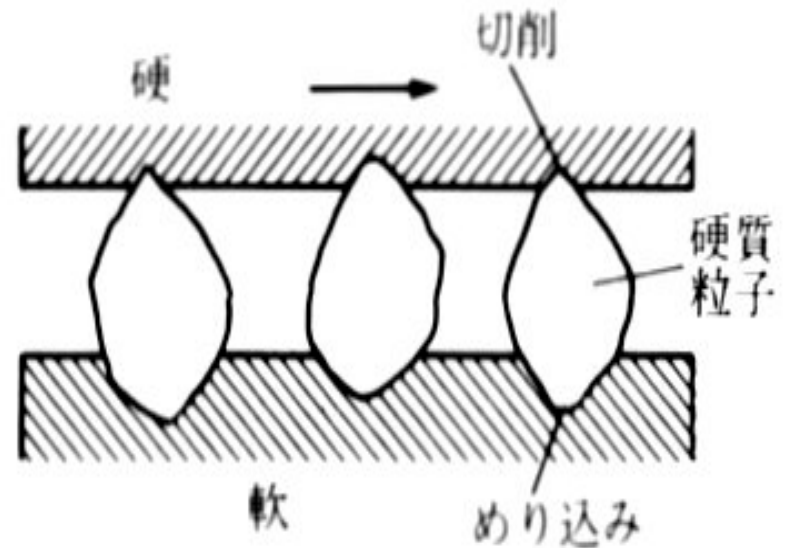
アブレシブ摩耗の分類(形態)



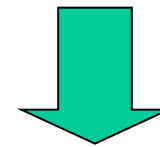
二元摩耗



切削加工の原理



三元摩耗



ラップ加工の原理

機械加工の原理

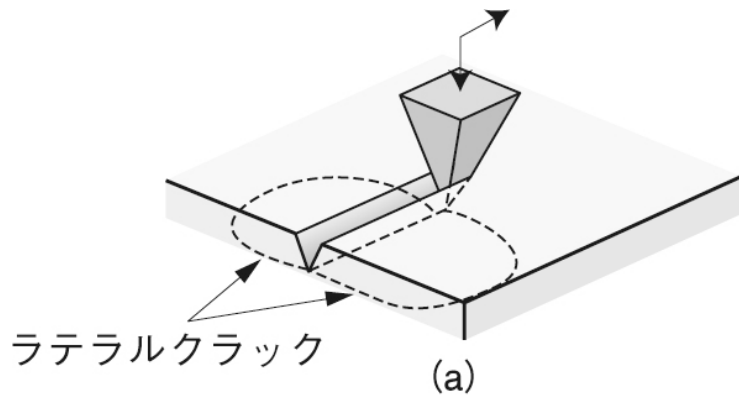
ぜい性材料では、アブレシブ
摩耗に起因するクラック(割れ)
が発生する可能性がある



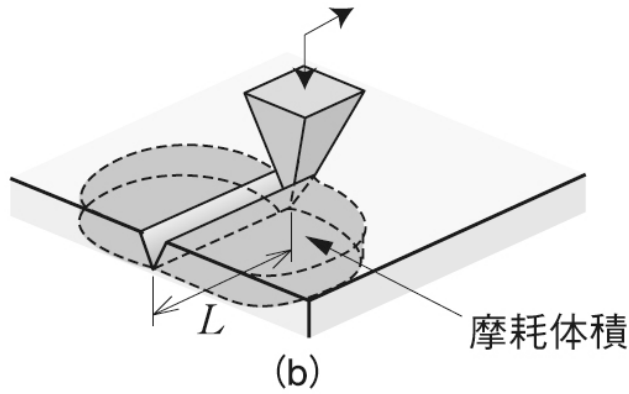
ぜい性破壊に起因した摩耗

近似式が提案

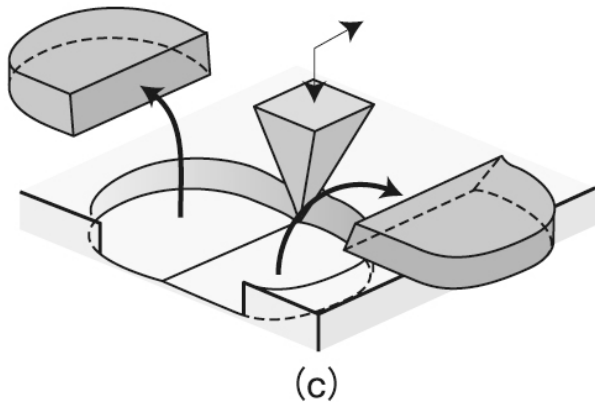
$$V \mu = \frac{WL}{H^{0.5} K_{ic}^{0.5}}$$



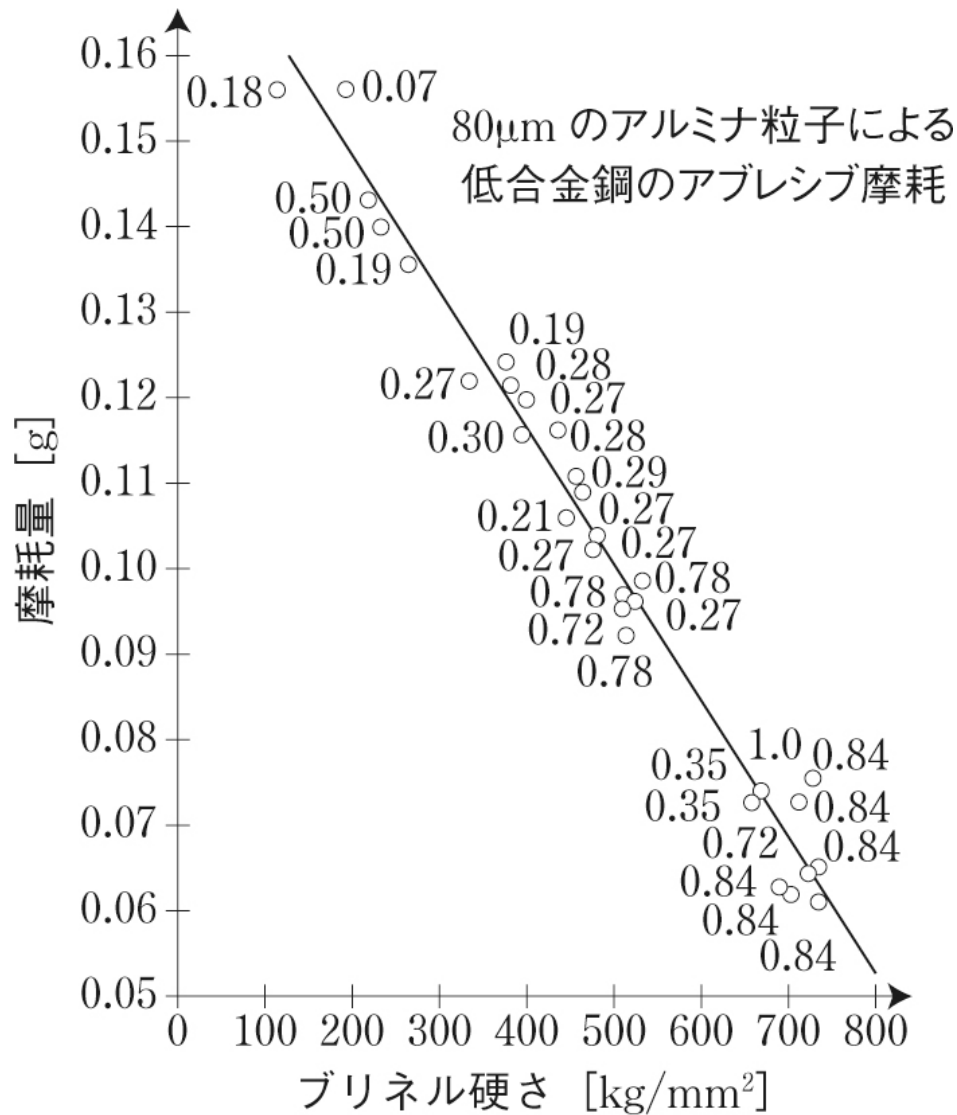
(a)



(b)



(c)



近似式から、摩耗を
低減させるには、
硬い材料を用いる



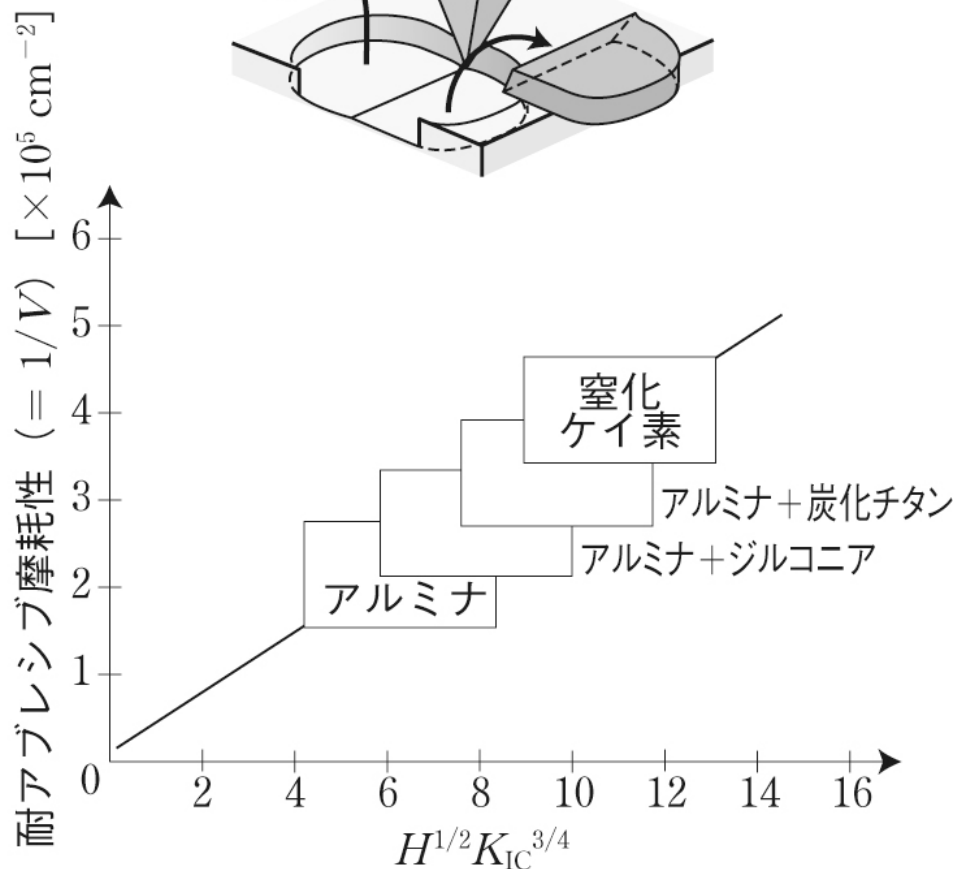
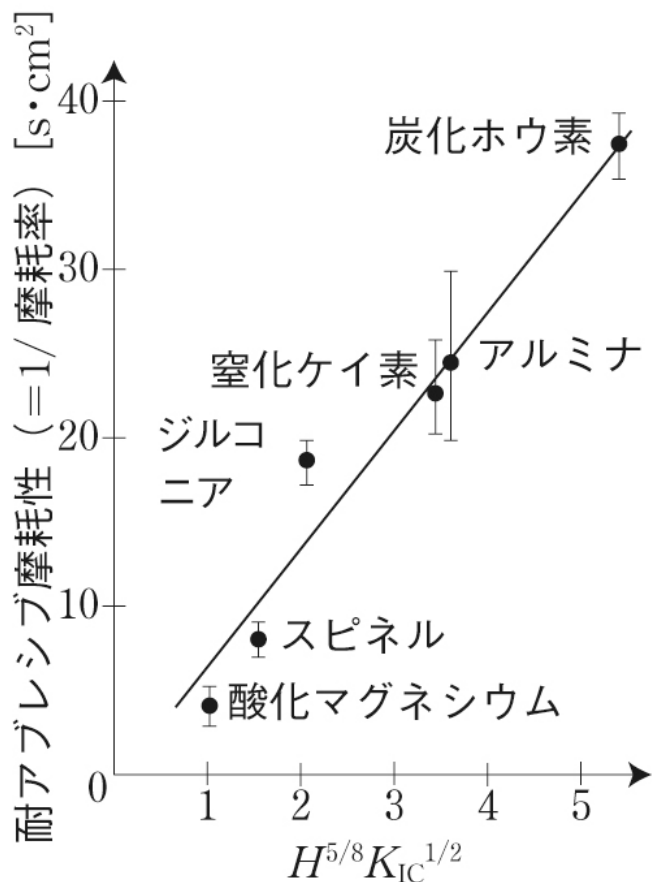
突起の食い込み量
を低減する

* 図中の数字はカーボンの含有量を示す.

近似式から、摩耗を低減させるには、
破壊じん性の高い材料を用いる

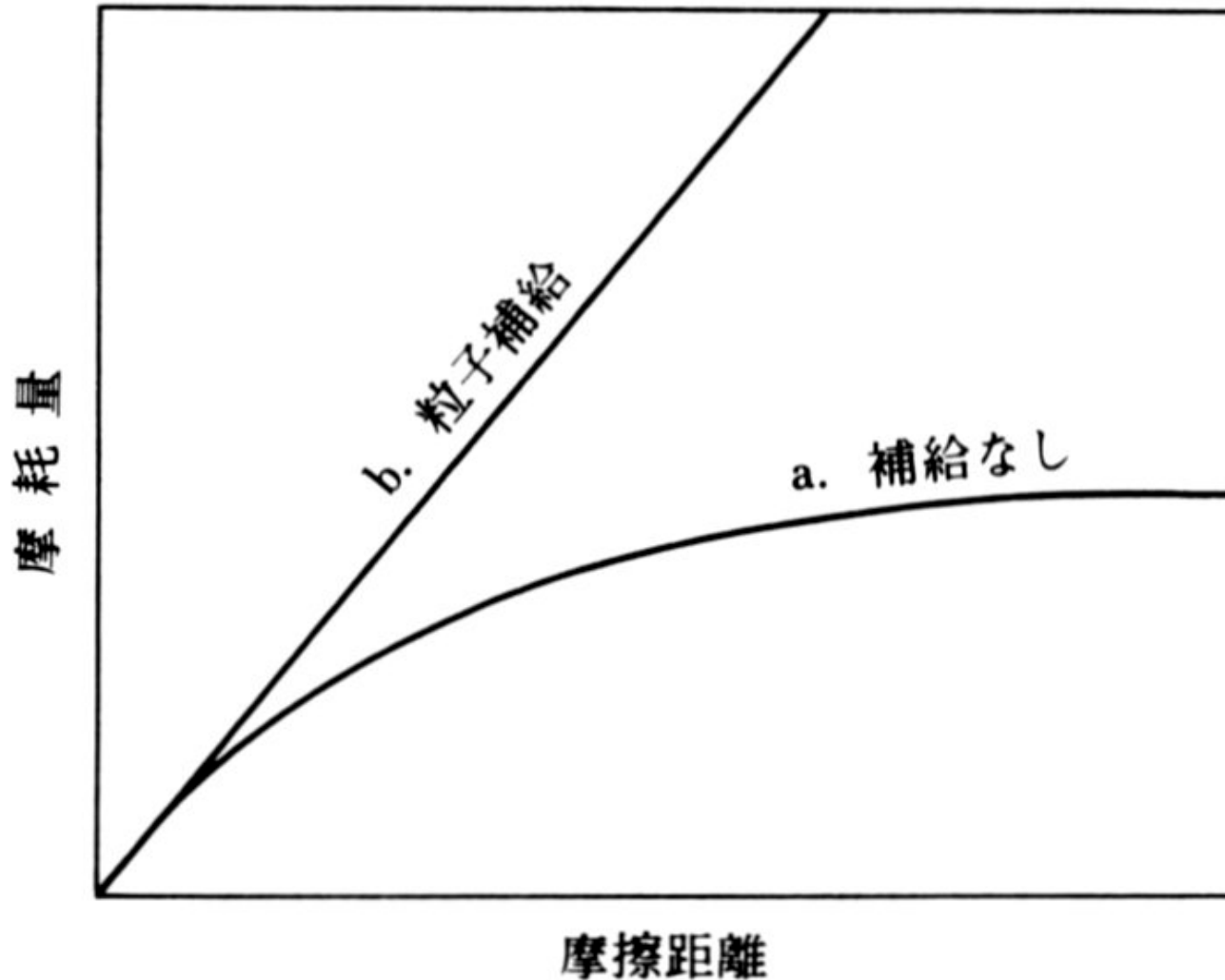


クラック進展
の抑制



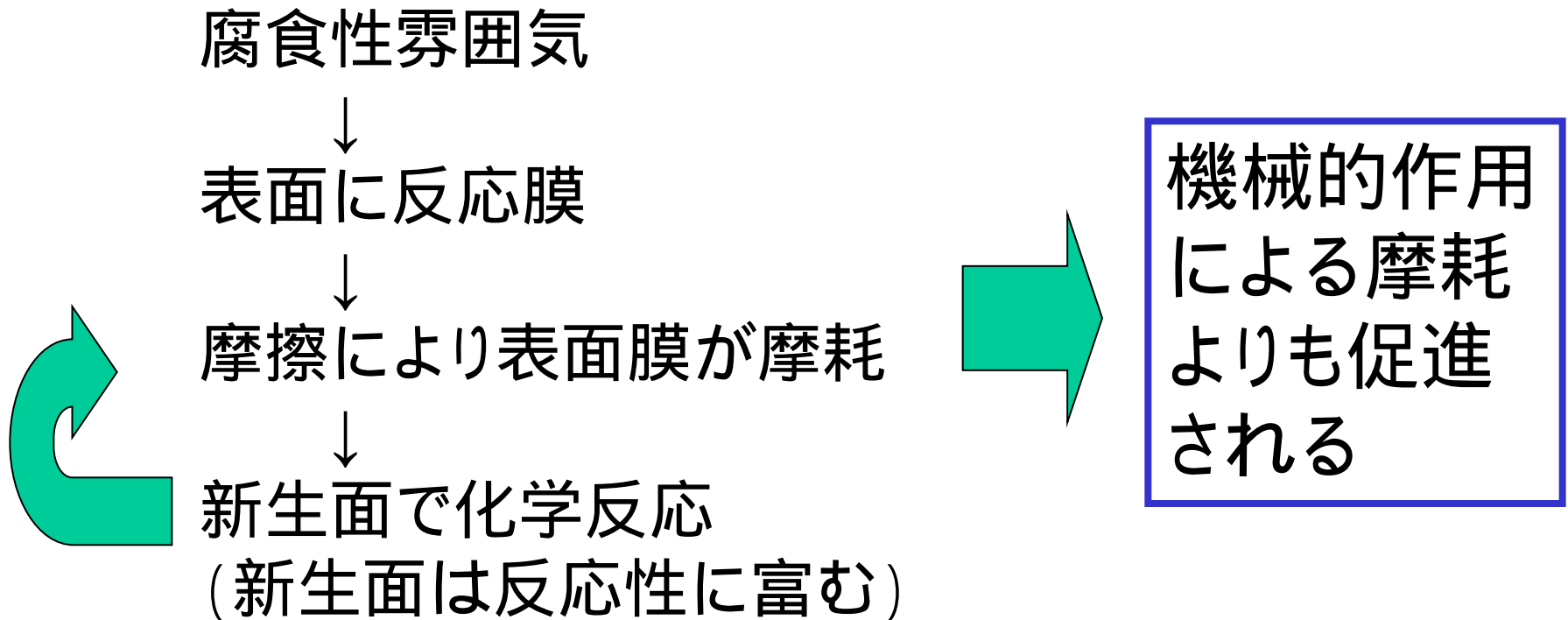
三元摩耗における摩耗特性

浮遊粒子を補給しないと摩耗は減少する
(粒子減少とともに切削量も減少)



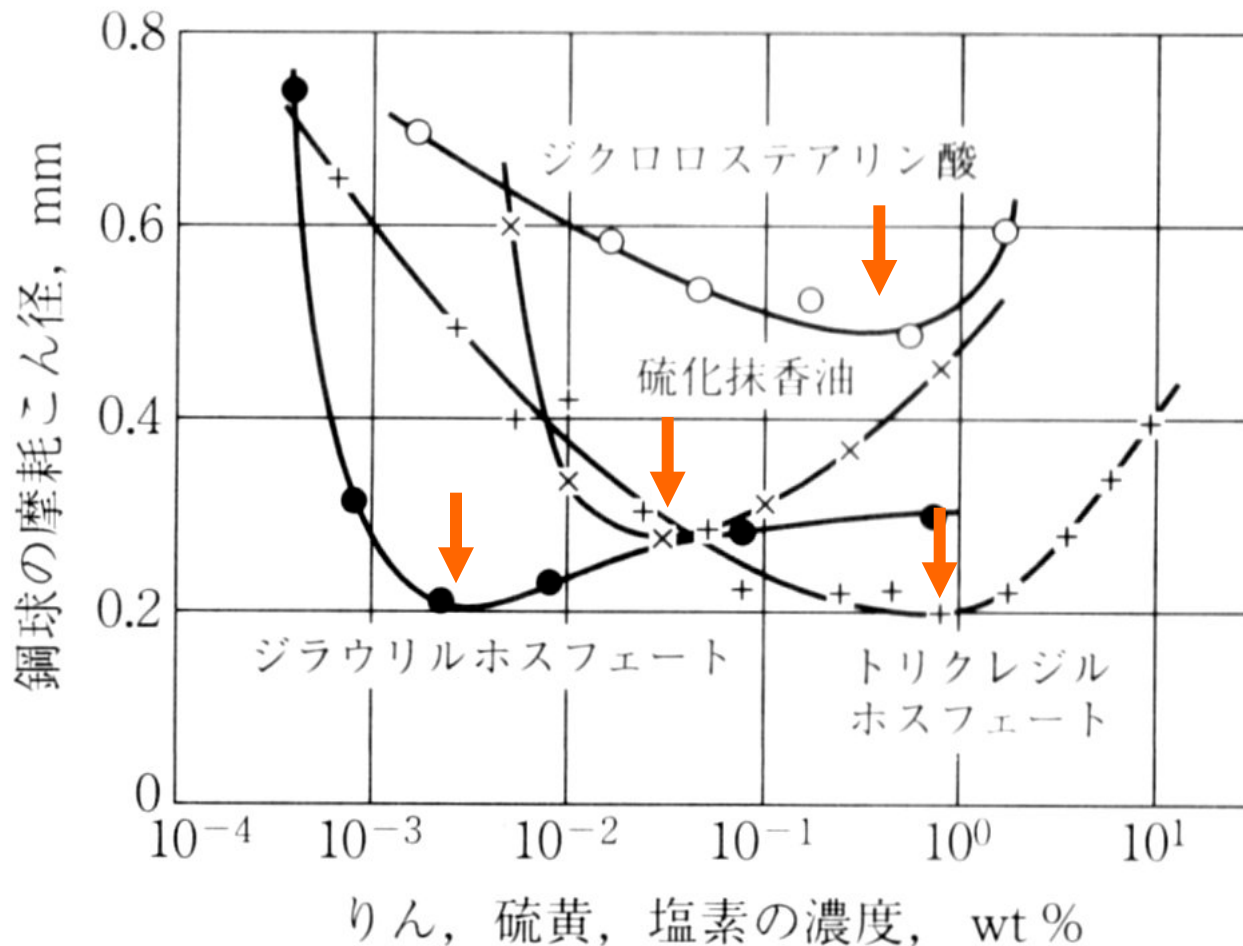
(3) 腐食摩耗・酸化摩耗

機械的作用 + 化学的作用が複合したメカノケミカルな機構によって進行する摩耗



添加剤濃度と摩耗の関係

摩擦面間の作動条件により、最適な添加剤濃度がある



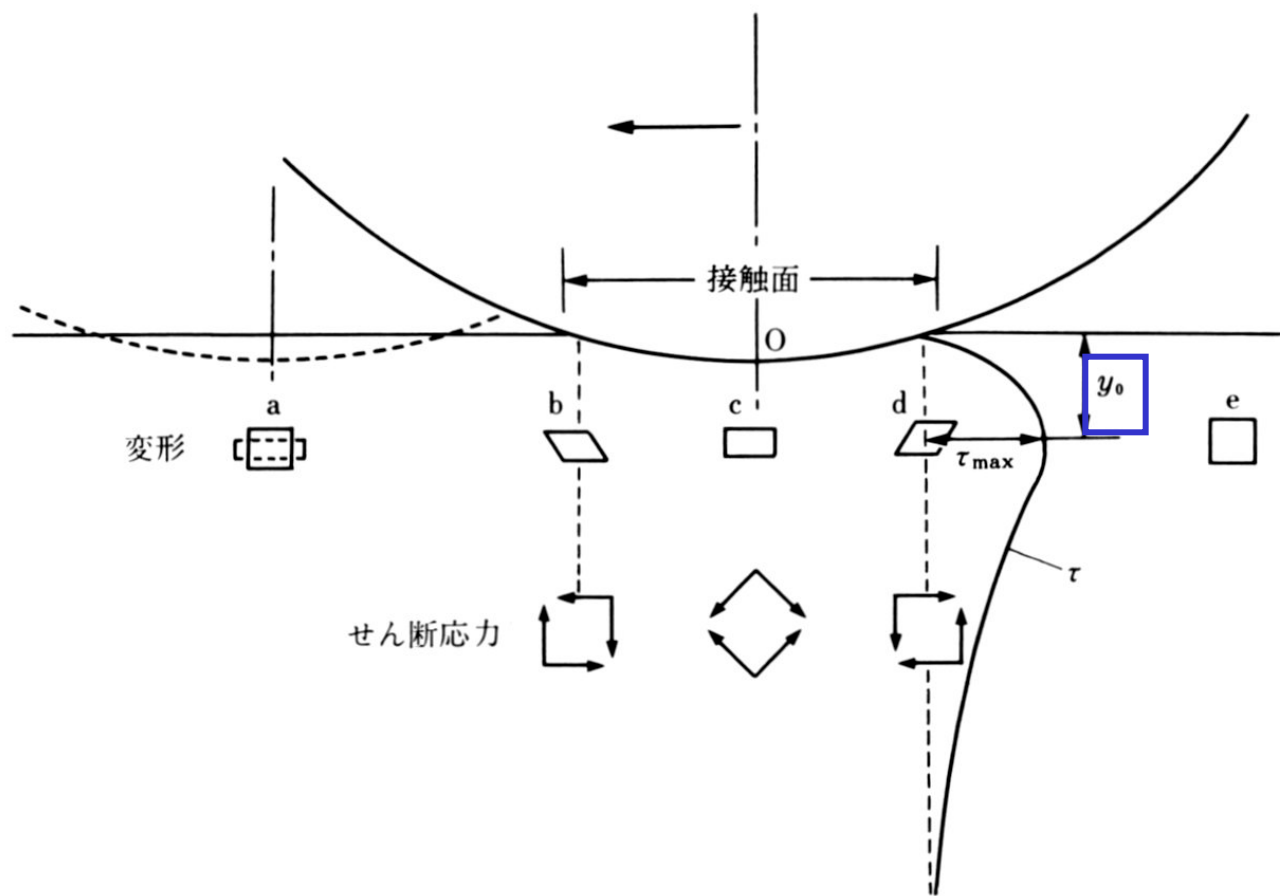
濃度が高すぎると逆に、摩耗が増加する

さらに摩擦面に残留応力があれば、優先的に腐食されやすい

↓
応力腐食

(4) 疲労摩耗 (= 繰り返し応力による材料疲れ)

Hertz接触で説明したように、接触部では表面ではなくある深さで最大せん断応力が発生する



介在物が存在すると亀裂が生じて、成長して表面まで達すると、“はくり”が生じる

フレーキング、ピッチング、スポーリング(表7.1)など呼ばれている損傷形態として、現れる

疲労摩耗を低減させるには、
応力(荷重)を軽減する
(機械設計 の転がり軸受疲労寿命式)
内部欠陥の少ない清浄な材料を用いる

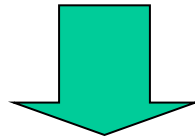
耐摩耗性材料に求められる特性

- ・凝着摩耗: 低表面エネルギー、高剛性、高温強度
- ・アブレシブ摩耗: 高硬度、高じん性
- ・腐食摩耗: 化学的安定性
- ・疲労摩耗: 均質性(高清浄度)

(5) フレッチング摩耗

微小振幅(振動)下で発生する表面損傷

- ・通常は相対滑りを許容しないように設計した箇所
- ・電気接点
- ・(微小)揺動運動箇所



機械システム設計の段階で、予知できない原因で発生する場合もある(多い)。

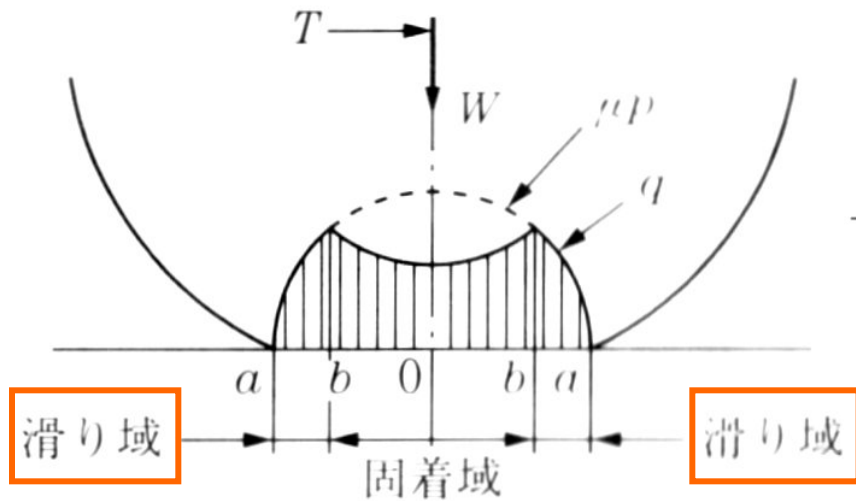
フレッチングの発生原因

せん断による接触2表面の微小滑り

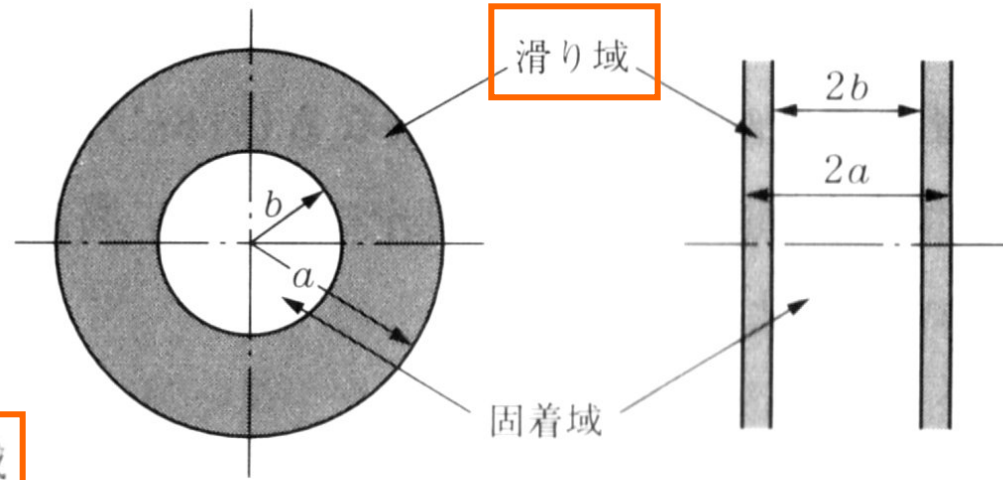
せん断力より摩擦力が小さければ滑りを生じる

摩擦力は
 $F = \mu p$

Hertz接触では接触域周辺部が圧力が小さいので、周辺部は滑り易い



せん断応力分布



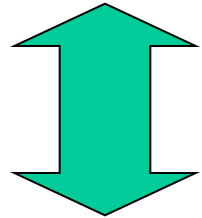
(a) 点接触

(b) 線接触

フレッチングの防止策

微小滑りを無くす対策

- ・接触面圧を高める（接触面積を小さく）
- ・非接触にする
- ・被膜や潤滑を施す



相反する対処法もあり，対策が逆影響する場合もある

亀裂伝播を防止する対策

- ・接触面圧を小さくする
- ・応力集中をさける
- ・表面層に圧縮残留応力を残す

(6) エロージョン

固体粒子によるエロージョン

微粒子を含む流体(液体、気体)が表面に衝突することによって生じる損傷



微粒子 + 気体
液体 + 微粒子

ショットピーニング加工
スラリージェット加工

加工法として工業的に利用されるが、
予期せぬところで
起こると摩耗(損傷)
になる

液体エロージョン:液体の衝突

キャビテーションエロージョン

液中の気泡 圧力の変化で収縮・膨張する



高圧の接触面から出た瞬間に低圧になった瞬間に
膨張・破裂



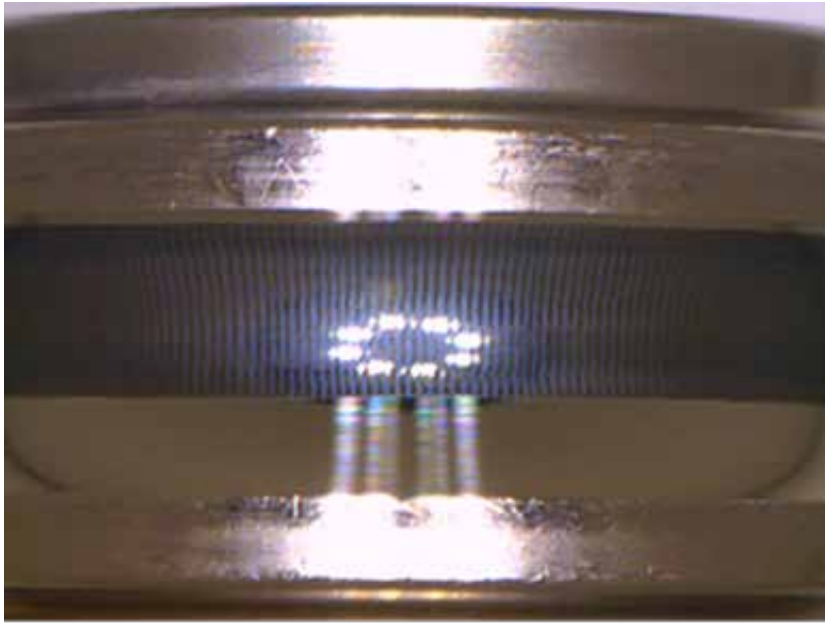
破裂による圧力で、表面損傷

スパークエロージョン

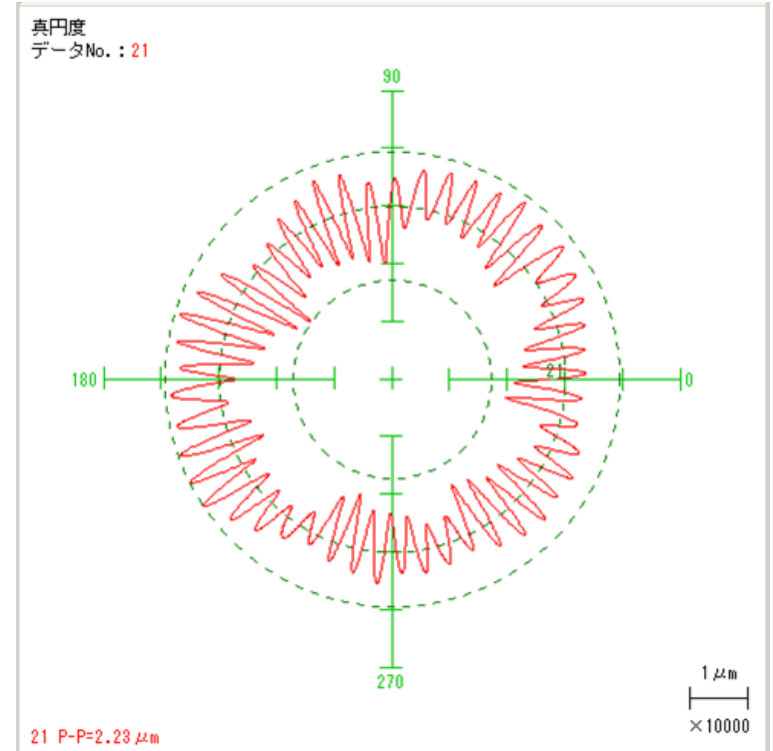
電氣的スパーク 放電加工と同じ原理で表面損傷

転がり軸受では、**電食**として知られている
(野口研で研究中)

転がり軸受に電食が発生すると……



軌道面にリッジマークが形成

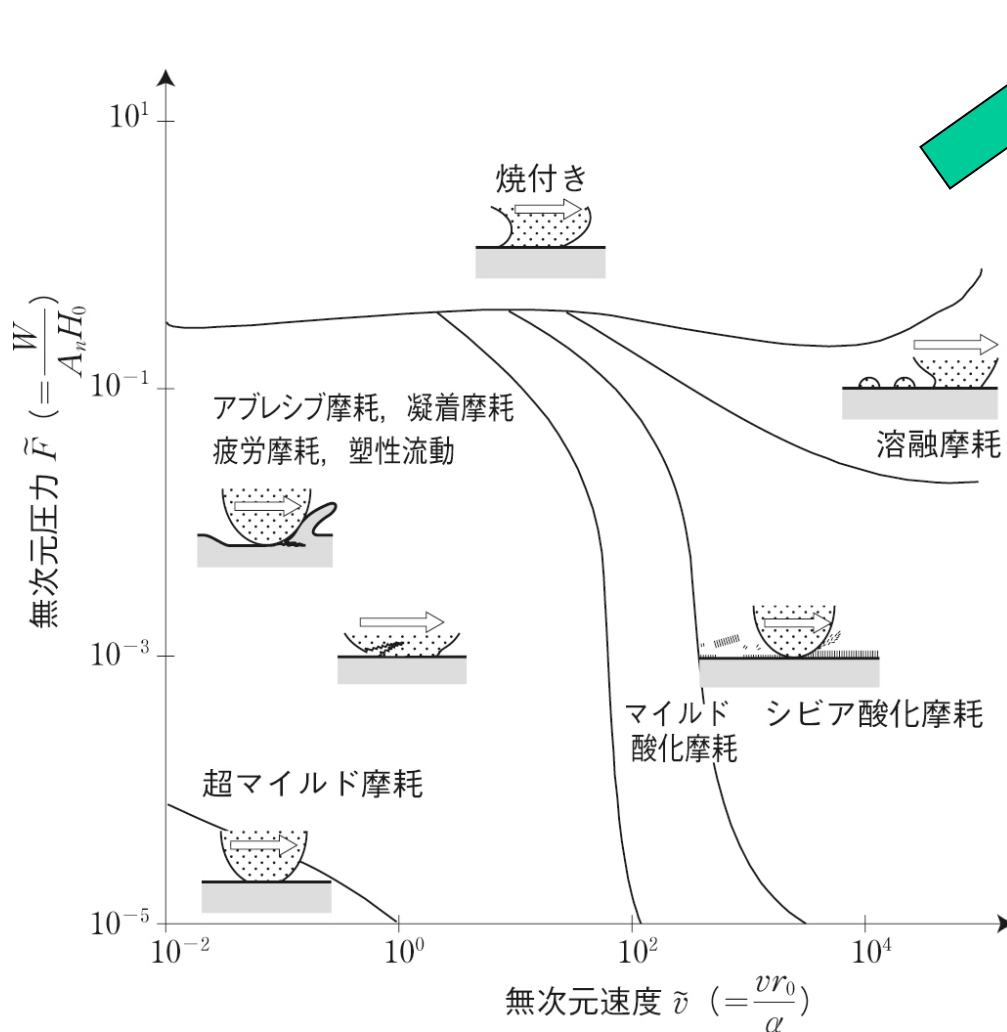


回転中の音・振動が上昇

3ME学生実験で始めた振動測定に使っている608では、直流電圧1.5V、電流10mAが印加されると数百時間後には電食による音・振動上昇が起こる

摩耗形態図

摩擦材料，作動条件，使用環境，接触圧力，温度等を組合せた無次元パラメータから摩耗形態の発生する領域を表示



厳しい摩擦条件

鋼，大気中，無潤滑の
摩耗形態図

r_0 : ピンの接触面半径

W : 荷重

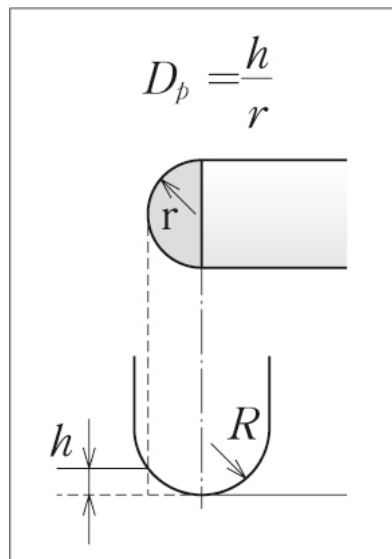
v : 滑り速度

A_a : 見かけの接触面積

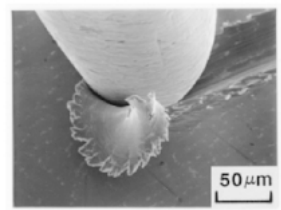
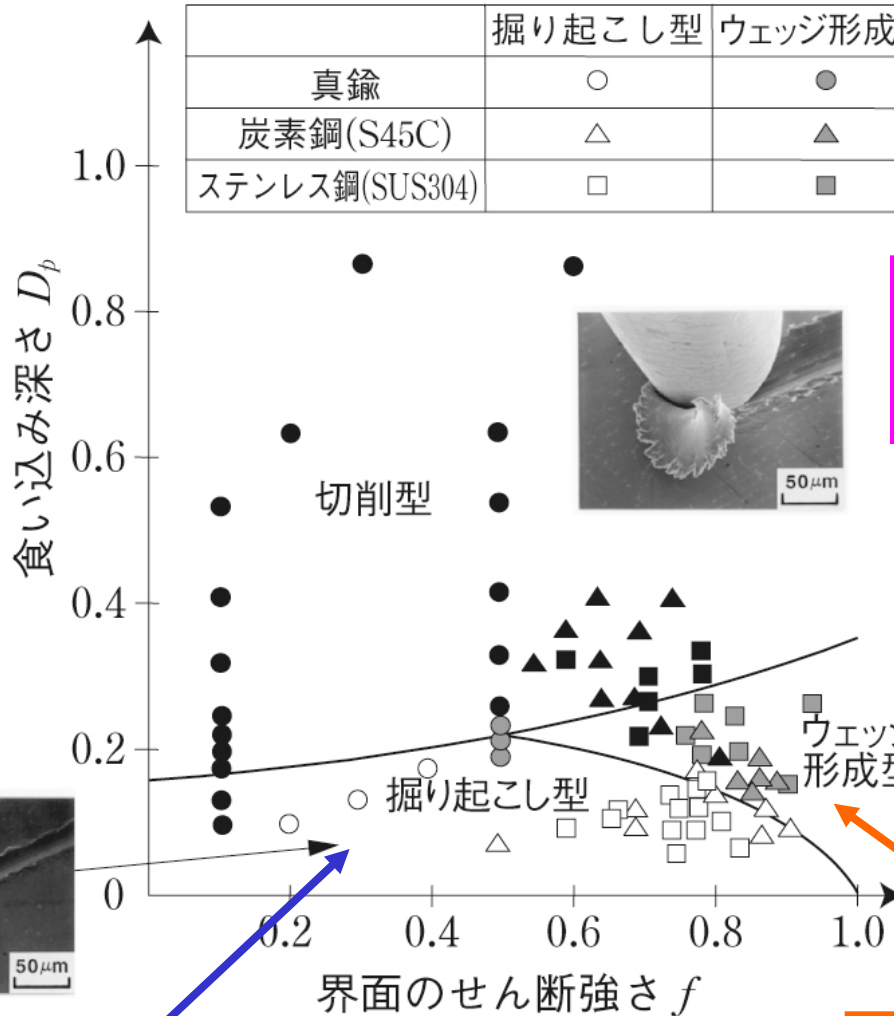
κ : 熱拡散率

H : 柔らかい方の硬さ

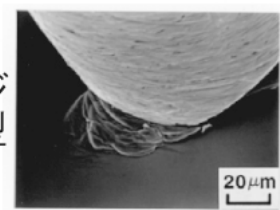
アブレシブ摩耗形態図



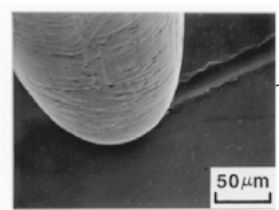
	掘り起こし型	ウェッジ形成型	切削型
真鍮	○	●	●
炭素鋼(S45C)	△	▲	▲
ステンレス鋼(SUS304)	□	■	■



連続摩耗片の生成



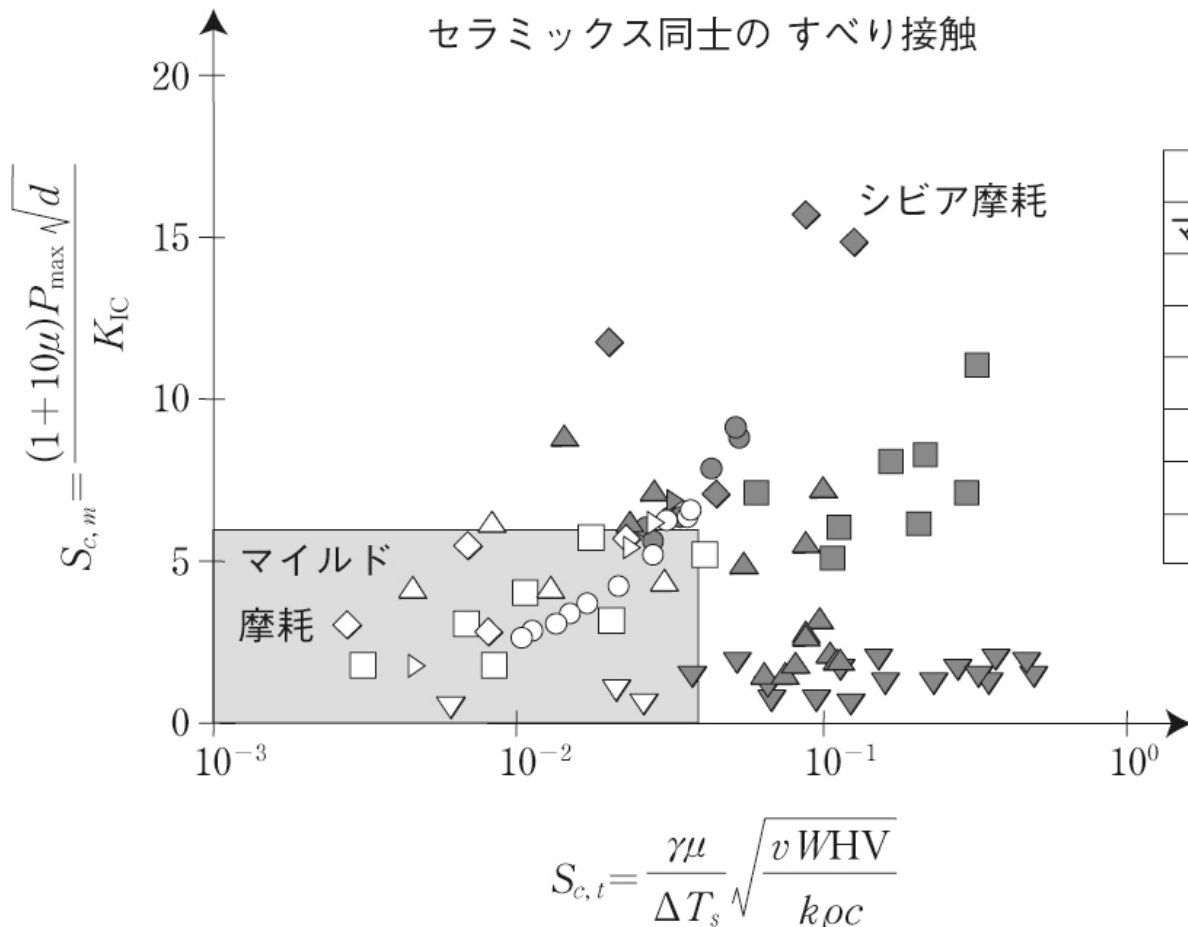
ウェッジの形成と脱落



塑性変形だけで
摩耗は生じない

セラミック同士のすべり摩擦における摩耗形態図

セラミックス同士の すべり接触



摩耗形態		材料	実験番号
マイルド	シビア		
○	●	アルミナ	1
△	▲		2
▷	▶		3
□	■		4
▽	▼	ジルコニア	5
◇	◆	炭化ケイ素	6

反応しにくいセラミックにおいても、環境によって摩耗状態は異なる

耐摩耗設計的には、

$$S_{c,m} = \frac{(1 + 10m)P_{\max} \sqrt{d}}{K_{IC}} \quad \text{£ 6}$$

$$S_{c,t} = \frac{gm}{DT_s} \sqrt{\frac{vWH_v}{krc}} \quad \text{£ 0.04}$$

を満たすことがマイルド摩耗となるために必要