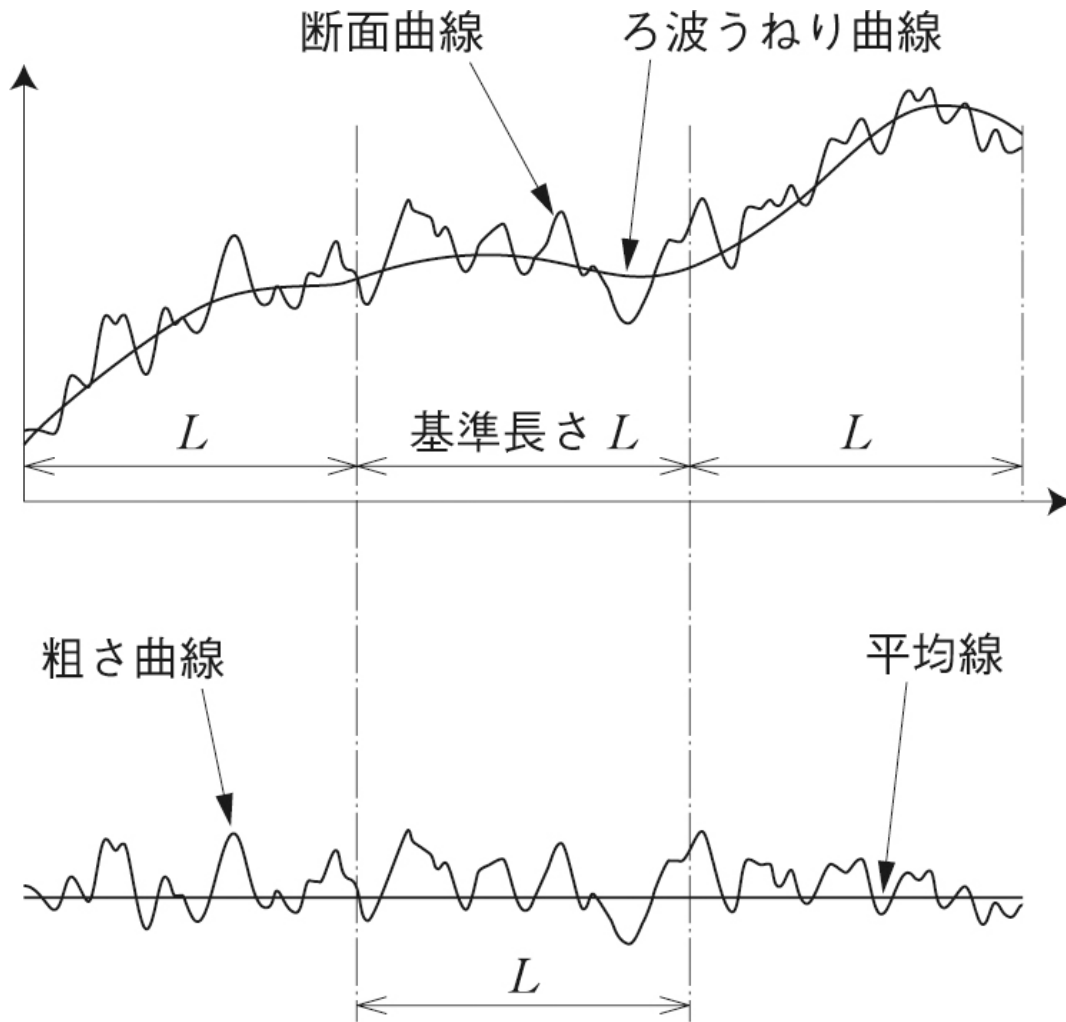


# 表面形状 (表面トポグラフィ)

表面を寸法 (波長、周波数) 的に分類すると  
大きな順に次の4つに分類される

- (1) 物体の輪郭すなわち形状 (shape)
- (2) うねり (surface waviness)
- (3) 表面粗さ (surface roughness)
- (4) 格子構造 (lattice structure)

# 表面形状の分類



形状 → 断面曲線

断面曲線 =  
うねり曲線  
+ 粗さ曲線

表面形状の詳細

# うねりと粗さの分類の尺度

表面凹凸の波長で分類する → **カットオフ値**

表1  $R_a$ を求めるときのカットオフ値及び評価長さの標準値

$R_a$ の範囲 ( $\mu\text{m}$ )		カットオフ値 $\lambda_c$	評価長さ $l_n$
を越え	以下	(mm)	(mm)
(0.006)	0.02	0.08	0.4
0.02	0.1	0.25	1.25
0.1	2.0	0.8	4
2.0	10.0	2.5	12.5
10.0	80.0	8	40

( )内は、参考値である。

# 表面形状測定方法

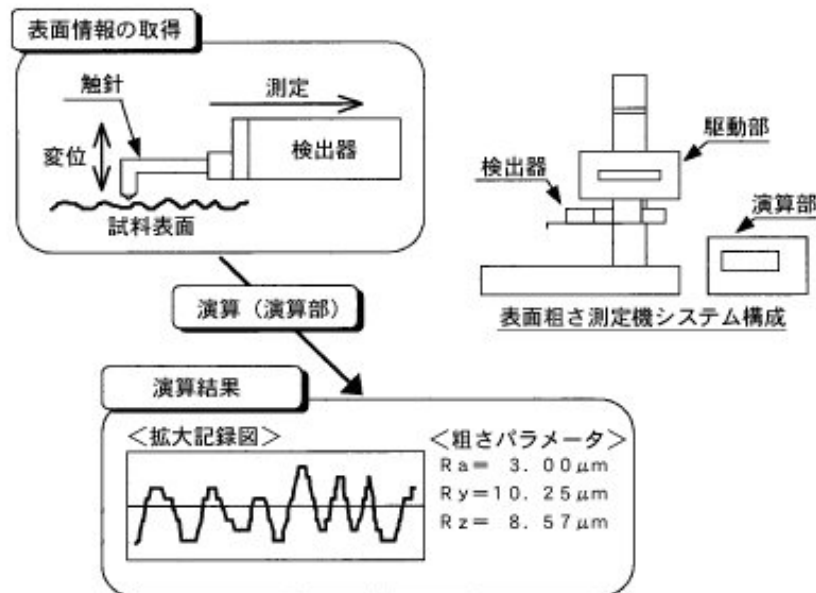
## 表面粗さ測定機

(1) 接触式 触針が表面に直接触れる形式

長所: 表面に接触しているので信頼性が高い

短所: 表面に傷を残す(軟質材料)

測定時間が長い(触針の追従性)



## (2) 非接触式：光の反射等を利用

長所：表面に傷を残さない  
軟質材でも測定可能

短所：信頼性が？

(ただし、接触式との比較において)  
表面反射率の影響を受けやすい



# 表面粗さパラメータ (1)

1994年のJIS B0601には次の6つが定義されている

## (1) 凹凸の高さ方向パラメータ

Ra : 算術平均粗さ

Ry : 最大高さ

Rz : 十点平均粗さ

## (2) 凹凸の横方向パラメータ

Sm : 凹凸の平均間隔

S : 局部的山頂の平均間隔

## (3) 凹凸の複雑さを表すパラメータ

負荷長さ率

# 表面粗さのJISは, 2001年に改訂 (ISOの改訂に準拠)

規格番号	JIS B0601 : '82 JIS B0031 : '82	JIS B0601 : '94 JIS B0031 : '94	JIS B0601 : '01 ISO4287 : '97/ISO1302 : '02
比較仕様			
断面曲線	フィルタ無・アナログ信号	フィルタ無・デジタル信号	$\lambda_s$ フィルタ・デジタル信号
評価する範囲	1 基準長さ	—	形体の長さ
最大高さ	Rmax	—	Pt
十点平均粗さ	Rz	—	—
粗さ曲線	2RC・短波長カットオフ $\lambda_c$	位相補償・短波長 $\lambda_c$	位相補償・帯域 $\lambda_s - \lambda_c$
評価する範囲	1 測定長さ $\geq 3\lambda_c$	基準長さ $\lambda_c$ 毎、 $\ell_n$ で平均	基準長さ $\lambda_c$ 毎、個々に
最大高さ	—	最大高さ Ry	最大高さ Rz
十点平均粗さ	—	Rz	Rz <sub>JIS</sub>
中心線平均粗さ	Ra	Ra75	Ra <sub>75</sub>
算術平均粗さ	—	算術平均粗さ Ra	算術平均粗さ Ra
山谷平均間隔	—	凹凸の平均間隔 Sm	粗さ曲線要素の平均長さ RSm
局部山頂間隔	—	局部山頂平均間隔 S	—
負荷長さ率	—	負荷長さ率 tp (基準長さ毎)	負荷長さ率 Rmr (評価長さ全体で)
他の高さパラメータ	—	—	Rp, Rv, Rt, Rc, Rq
高さ特徴パラメータ	—	—	Rsk, Rku
複合パラメータ他	—	—	RΔq, Rδc, Rmr

# 改訂の概要

パラメータを断面，うねり，粗さ毎に規定した

P? : 断面曲線パラメータ

W? : うねりパラメータ

R? : 粗さパラメータ

パラメータ記号の意味が変わった

Rz : 十点平均粗さから最大高さになった

Ry : 使われなくなった

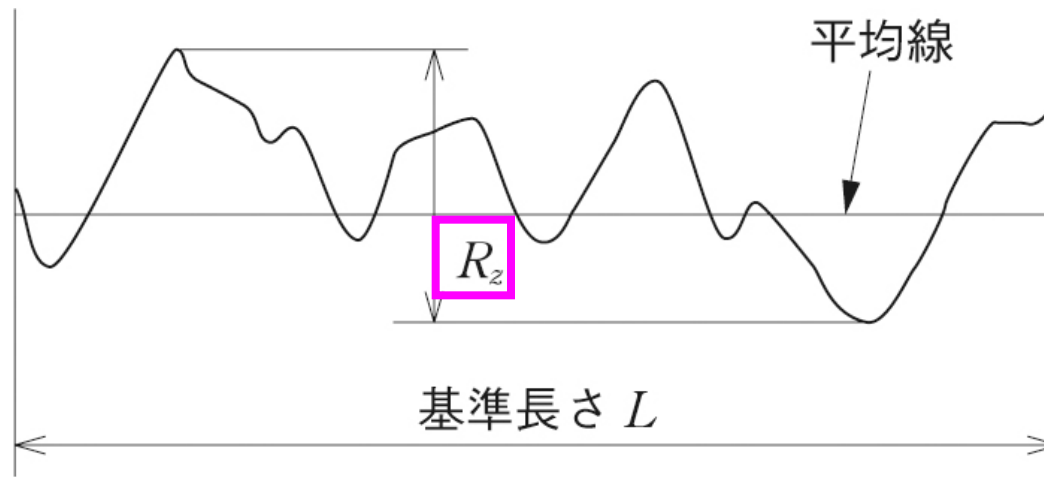
(十点平均粗さ: ISOからはなくなった)

パラメータの数が大幅に増えた

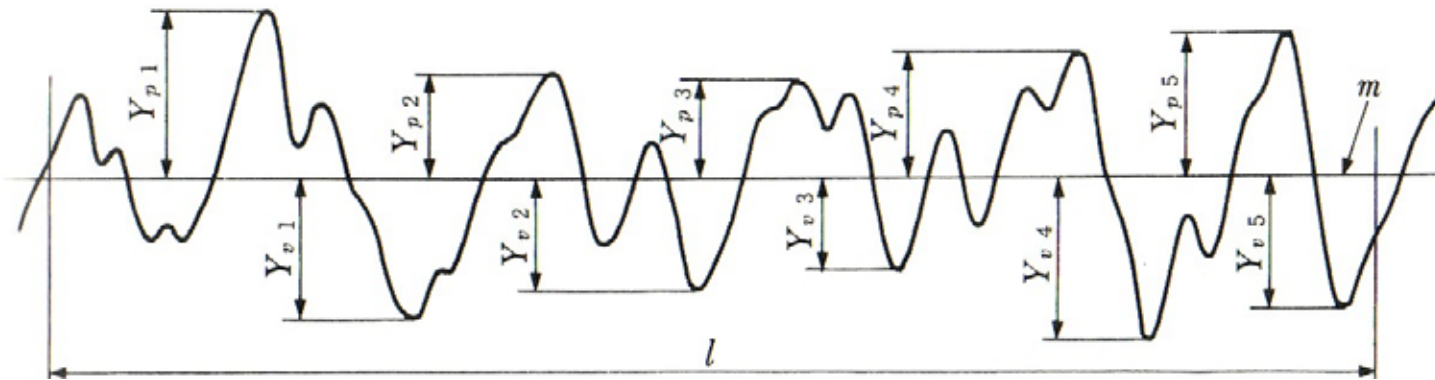
トライボロジータ的な評価パラメータが加わった

プラトー構造表面の特性評価 (JIS B 0671)





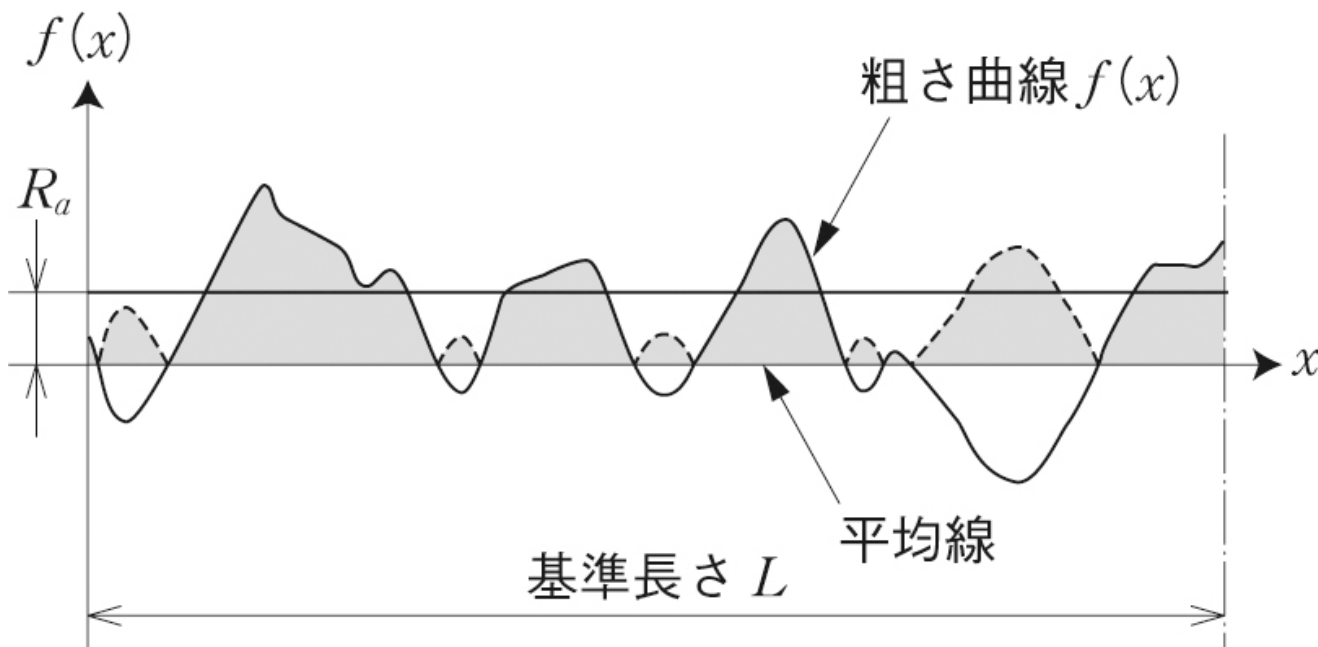
## 最大高さの定義



$$Rz = (Y_{p1} + \dots + Y_{p5}) + (Y_{v1} + \dots + Y_{v5}) / 5$$

十点平均粗さの定義(日本独自)

# 算術平均粗さ $R_a$ (中心線平均粗さ)



谷部を山部側へ折り返して  
高さの平均を求めたもの

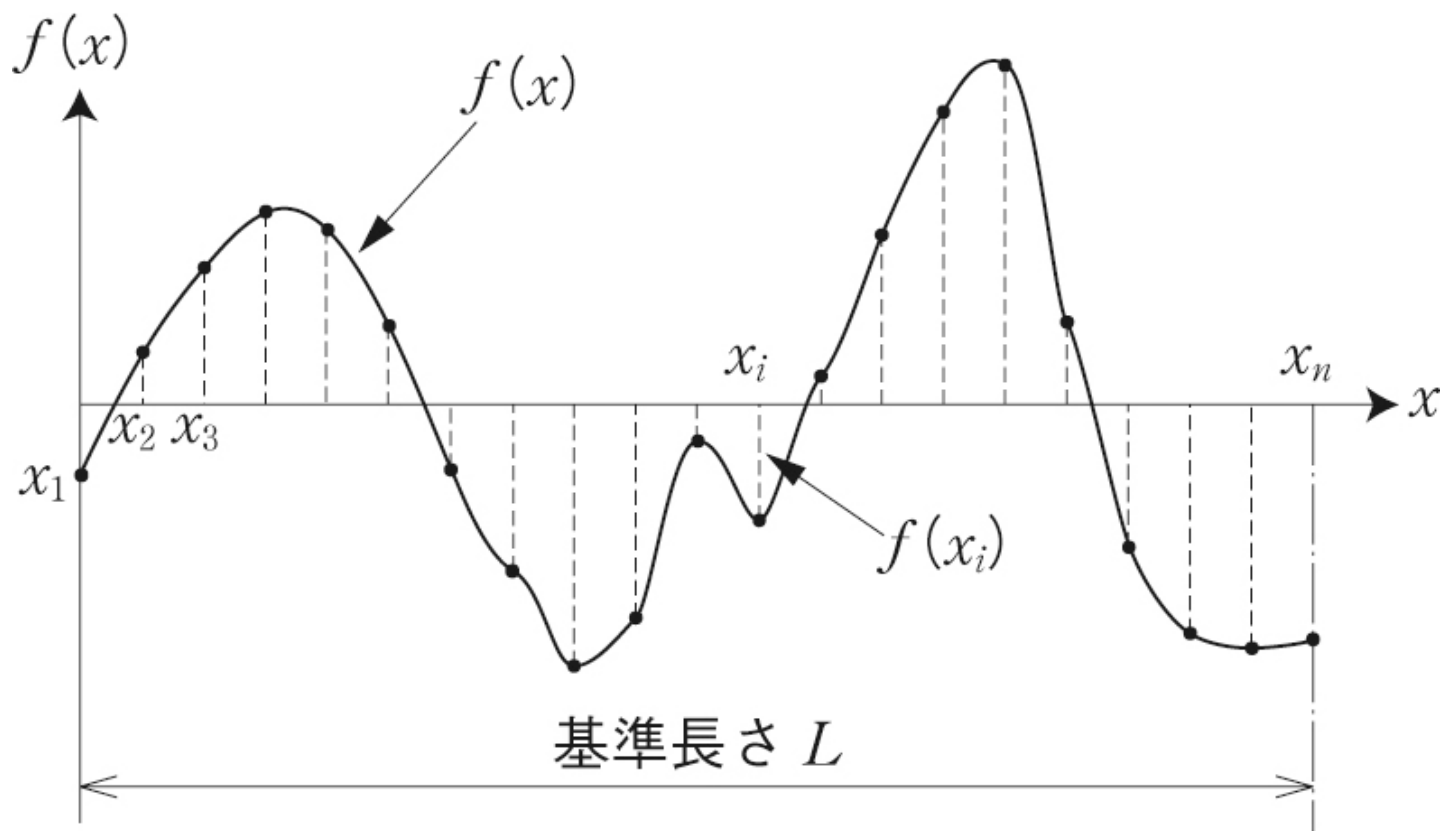


$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |f(x)| dx$$

ここに、 $l$  : 基準長さ

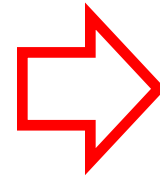
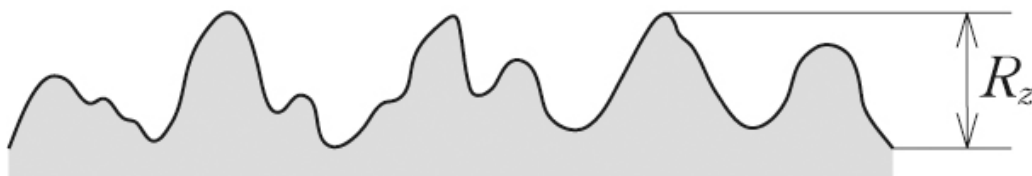
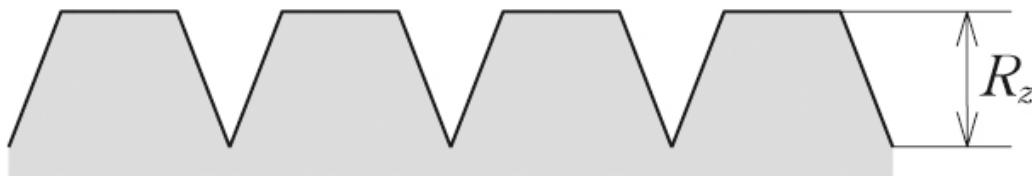
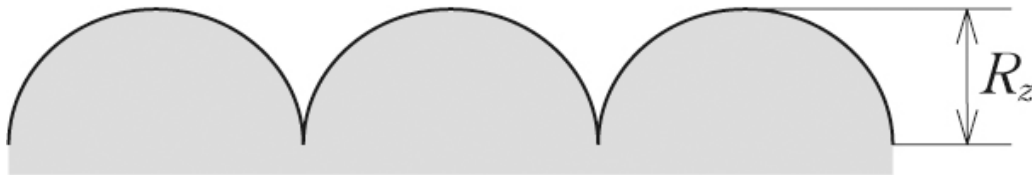
(アナログ的表現<sub>0</sub>)

現在の測定データは離散化されている



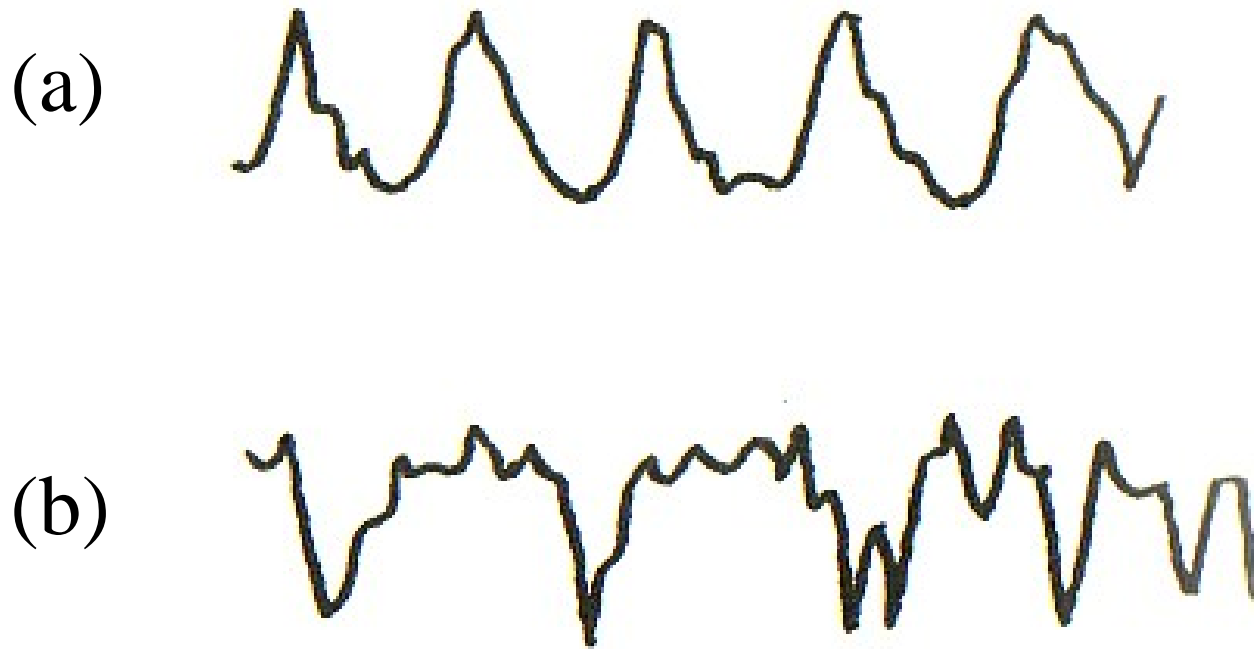
$$Ra = \frac{1}{n} \mathring{\mathbf{a}} \left| f(x_i) \right|$$

# 同じ大きさの $R_z$ をもつ表面



1つのパラ  
メータ  
では形状  
を特定  
できない

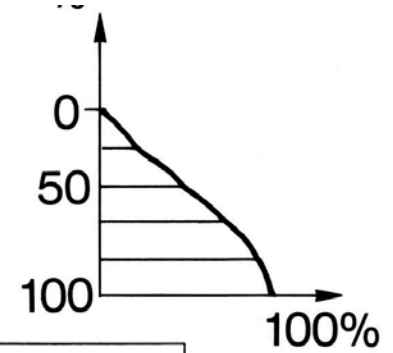
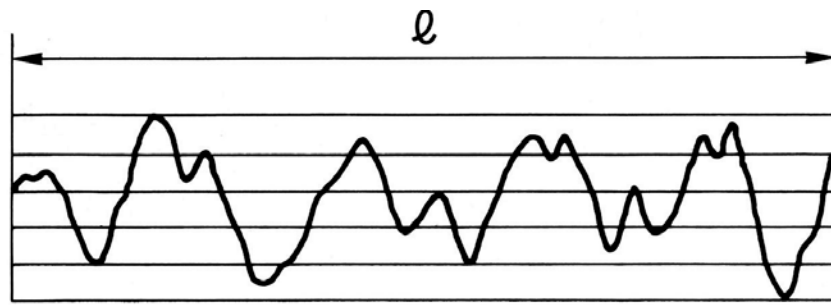
# 同じ大きさのRz, Raをもつ表面



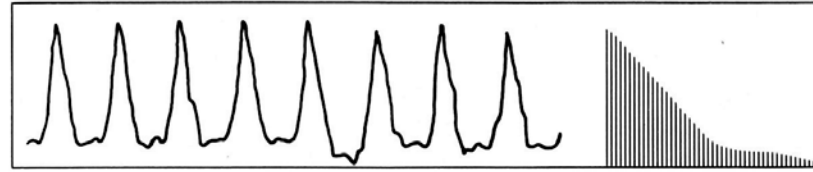
摺動面として好ましいのは(b)

高さ方向のパラメータ値は同じでも、表面性状は全く異なる表面となる場合がある

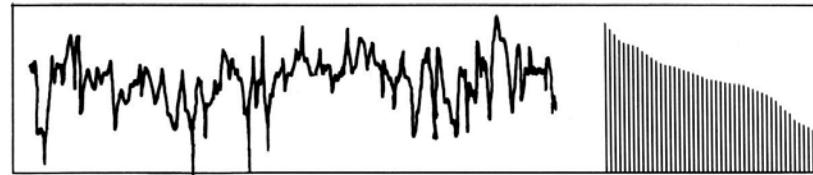
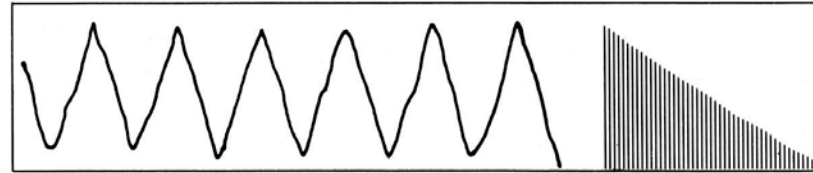
# 横方向の パラメータ



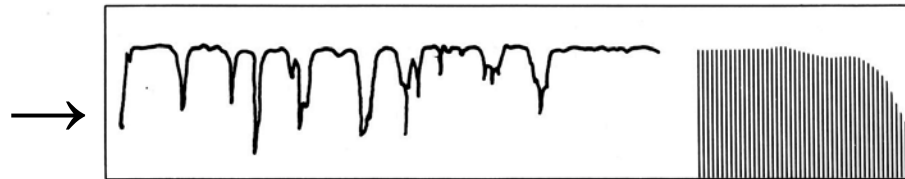
## 負荷長さ率 (アボットの負荷曲線)



測定長さに対する  
実体部長さの比率  
を高さ順にプロット



摩耗面は山部が  
平坦になる



0 20 40 60 100%

# 表面粗さパラメータ

## トライボロジーと関係が深いパラメータ

- ・自乗平均平方根粗さ: 表面粗さの標準偏差

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L [f(x)]^2 dx} \quad Rq = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [f(x_i)]^2}$$

\* 油膜パラメータ $\Lambda$ を求める際に使用

- ・スキューネス ひずみ度

山部と谷部の対象性

正規分布なら0

摩耗面ならマイナス

- ・クルトシス とがり度

確率密度関数の集中度

正規分布なら3

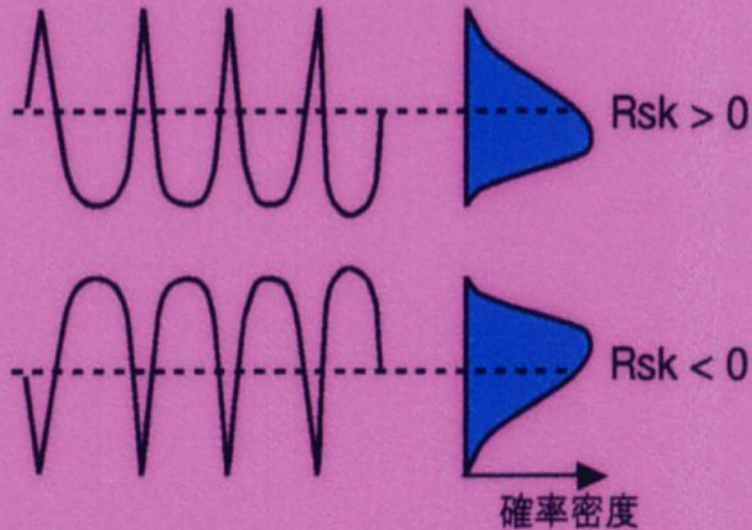
**Rsk** 粗さ曲線のスキューネス(ゆがみ **Sk**)

**Psk** 断面曲線のスキューネス

**Wsk** うねり曲線のスキューネス

基準長さにおける $Z(x)$ の三乗平均を二乗平均平方根の三乗で割ったもの

$$Rsk = \frac{1}{Rq^3} \left( \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} Z^3(x) dx \right)$$



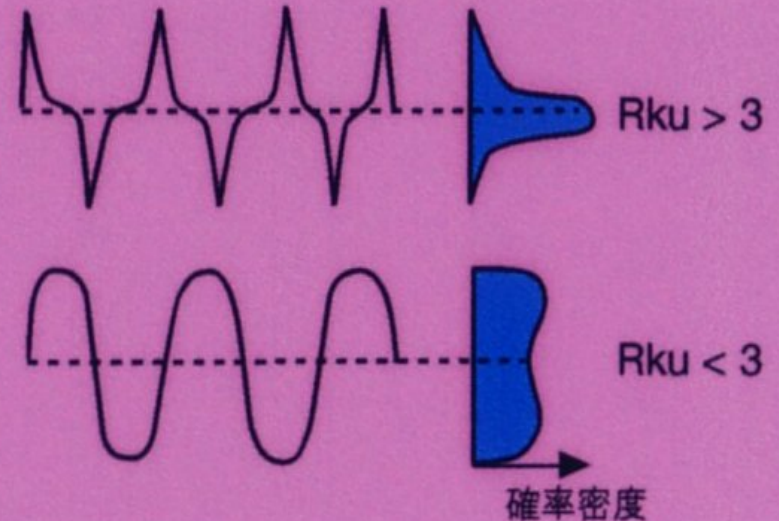
**Rku** 粗さ曲線のクルトシス(とがり **ku**)

**Pku** 断面曲線のクルトシス

**Wku** うねり曲線のクルトシス

基準長さにおける $Z(x)$ の四乗平均を二乗平均平方根の四乗で割ったもの

$$Rku = \frac{1}{Rq^4} \left( \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} Z^4(x) dx \right)$$

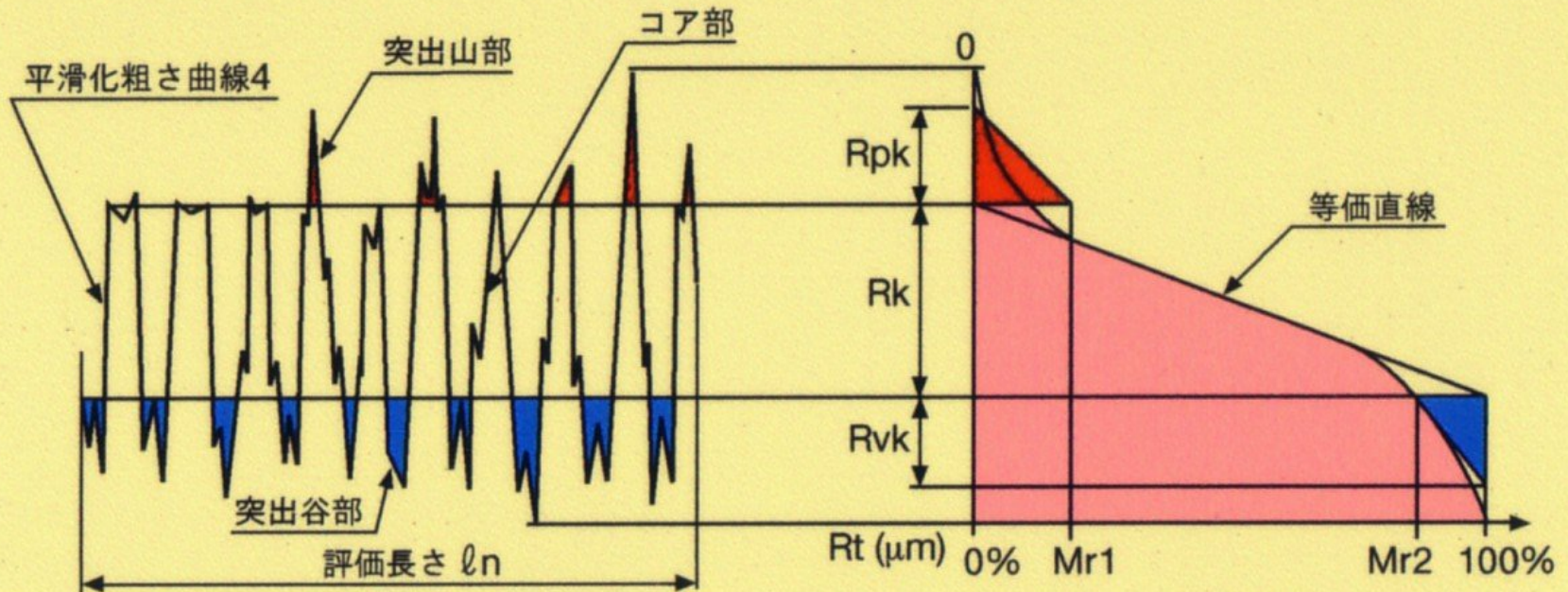




# プラトー構造表面の特性評価

線形負荷曲線による高さ特性 JIS B0671-2 : '02/ ISO13565-2 : '96

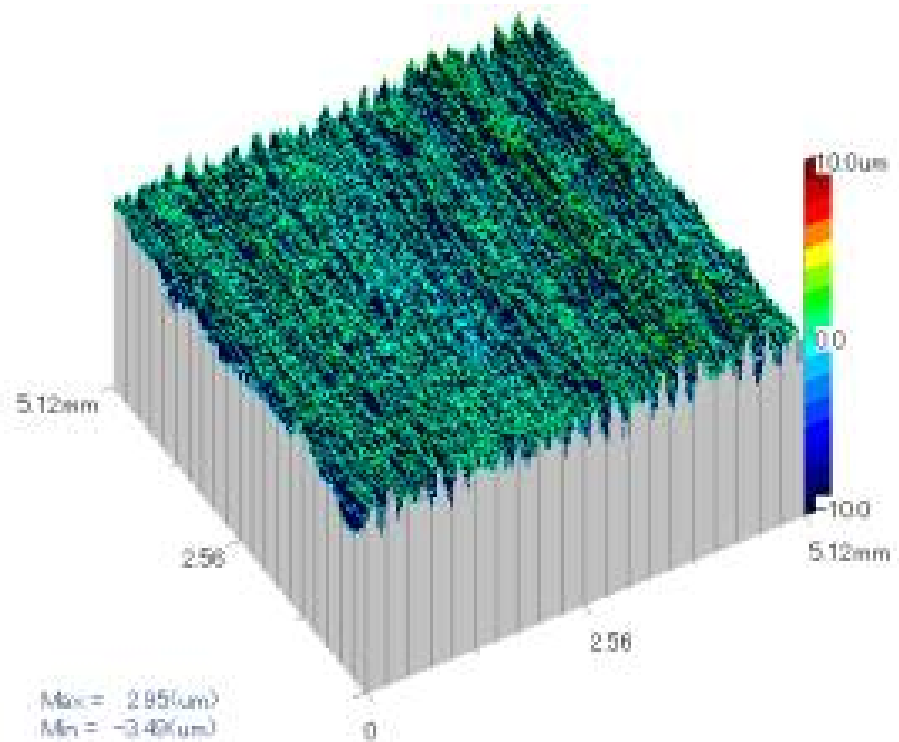
- Rk コア部のレベル差 : コア部の上側レベルと下側レベルの差  
Rpk 突出山部高さ : コア部の上にある突出山部の平均高さ  
Rvk 突出谷部深さ : コア部の下にある突出谷部の平均深さ  
Mr1 コア部の負荷長さ率 : 突出山部とコア部の分離線と負荷曲線の交点の負荷長さ率  
Mr2 コア部の負荷長さ率 : 突出谷部とコア部の分離線と負荷曲線の交点の負荷長さ率



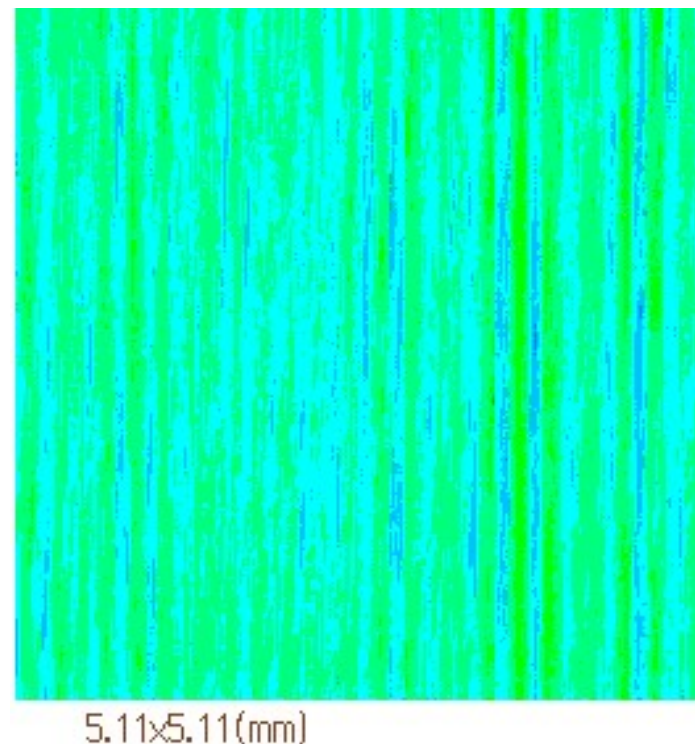
## 粗さ関係JIS原案作成委員会 構成表

	氏名	所属
(委員長)	◎ 塚 田 忠 夫	明治大学理工学部
(幹事)	* 谷 村 吉 久	通商産業省工業技術院計量研究所
(委員)	* 荒 井 正 敏	株式会社東京精密
	* 加 納 孝 文	株式会社ミットヨ
	* 桑 田 浩 志	トヨタ自動車株式会社
	* 坂 野 憲 幾	通商産業省工業技術院計量研究所
	* 笹 島 和 幸	東京工業大学情報理工学研究科
	佐 藤 隆	株式会社東芝
	野 口 昭 治	日本精工株式会社
	橋 本 進	財団法人日本規格協会技術部
	八 田 勲	通商産業省工業技術院標準部
	太 箸 孝 善	石川島播磨重工業株式会社
	* 宮 下 勤	テーラーホブソン株式会社
	* 宮 本 紘 三	株式会社小坂研究所
	* 柳 和 久	長岡技術科学大学

# 表面の測定も2次元から3次元へ

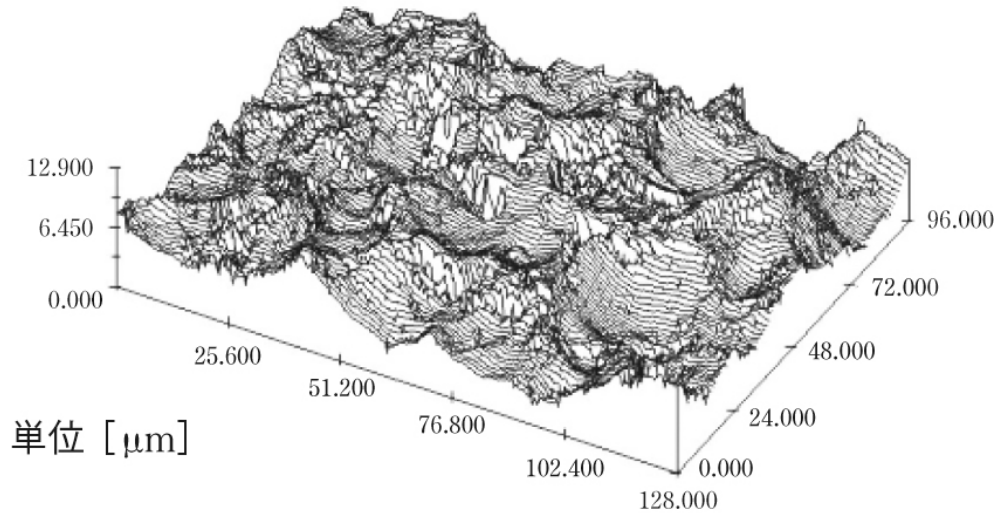


鳥瞰図

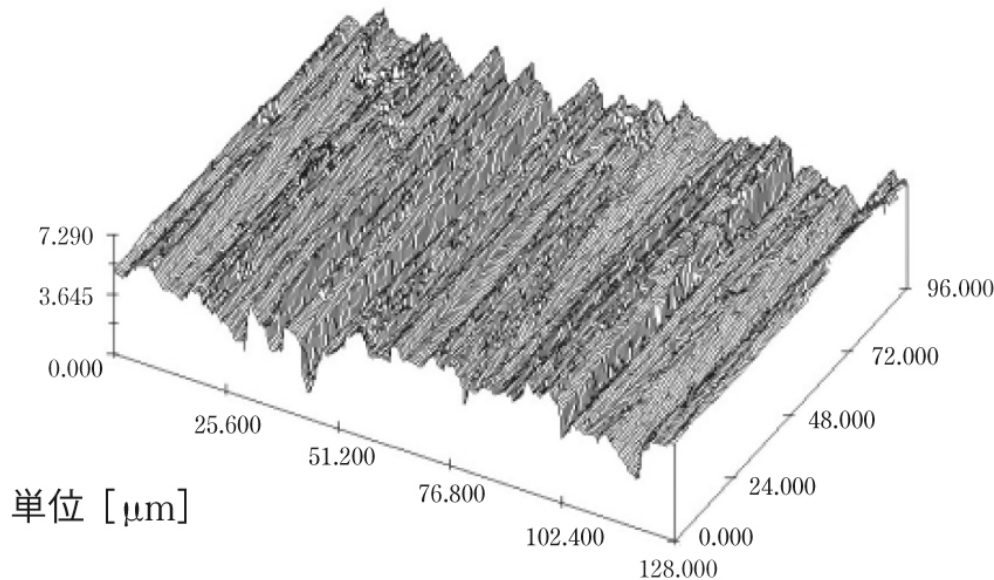


等高線表示

# 機械加工表面の 鳥瞰図例



(a) ショットブラスト (50 $\mu\text{m}$  粒子)



(b) 研磨紙仕上 (#400 番)

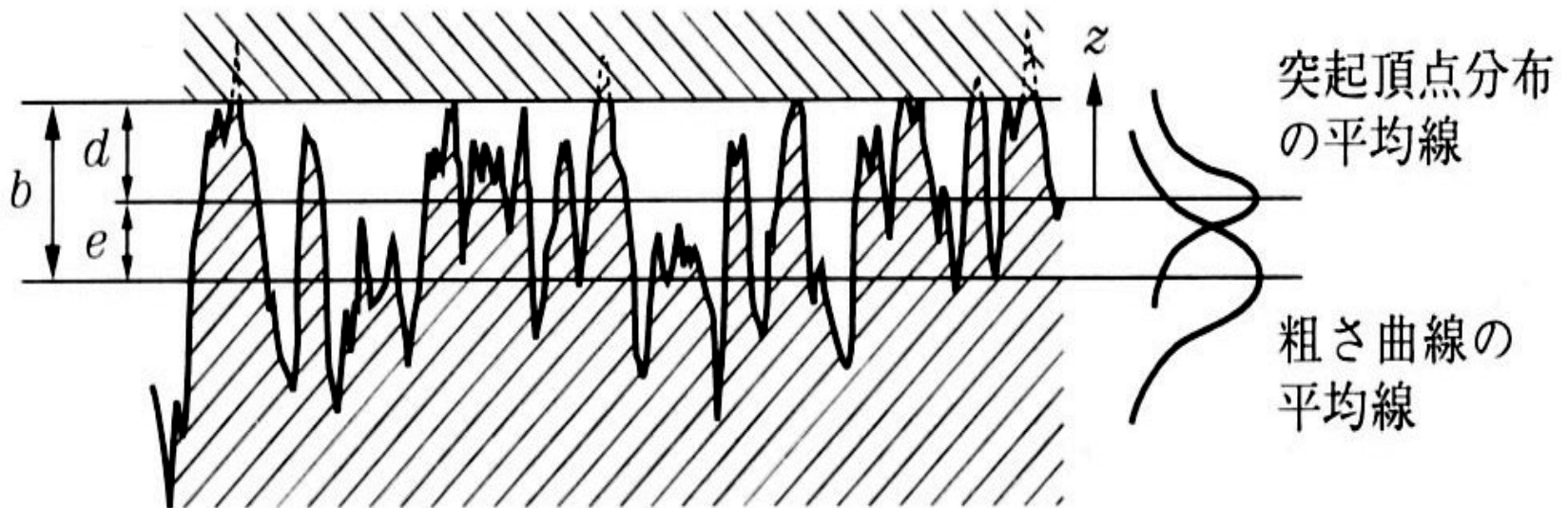
## 三次元測定の問題点

- ・接触式では測定時間が長く、環境が変化しやすい
- ・データ処理量が膨大
- ・ISOで審議中であり、JISはまだ制定されていない

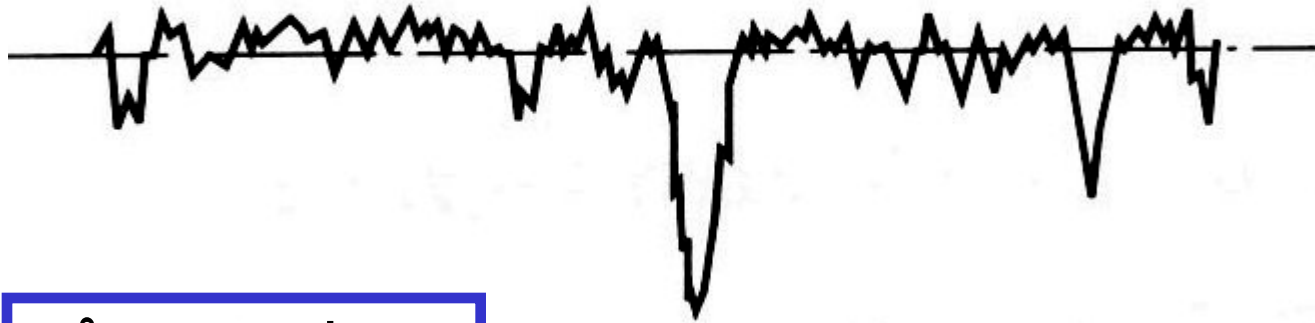
# 表面の接触

粗い表面と滑らかな表面の接触では、  
高い山から順に接触していく

中心線から上の山の分布が支配的になる



# トライボロジー的に好ましい表面形状は？



## プラトー表面

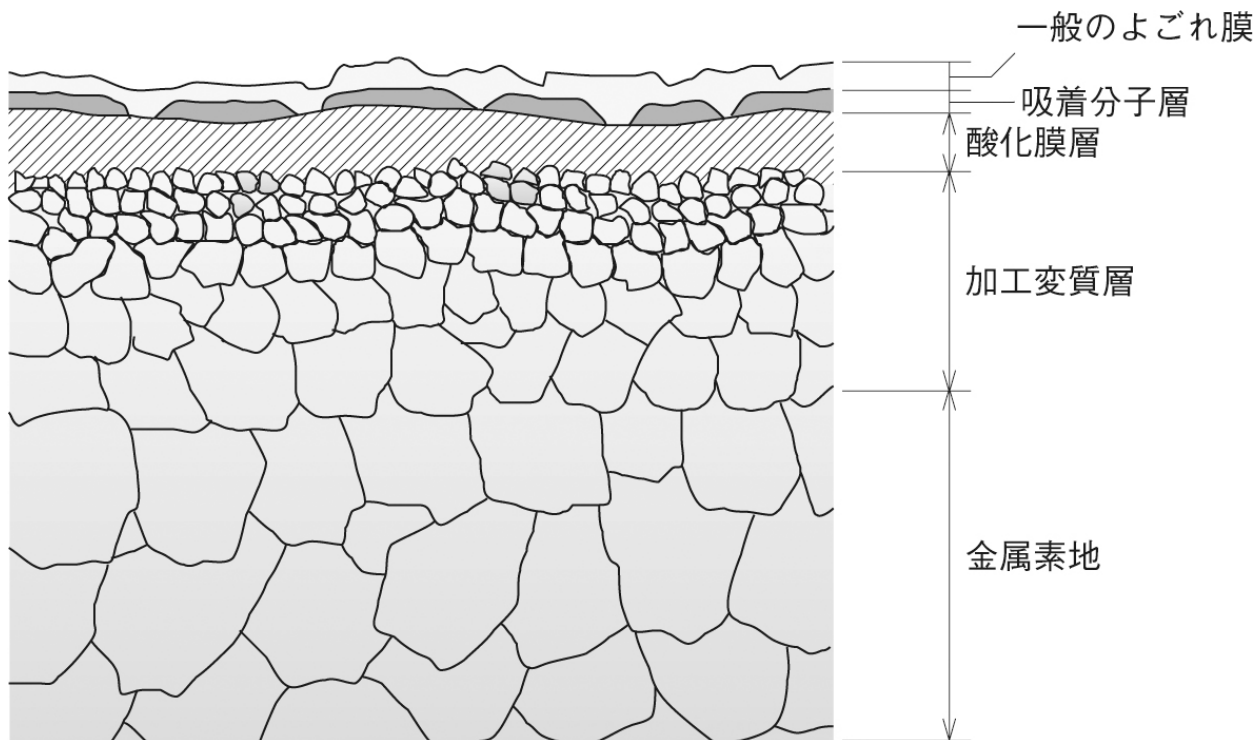
- ・山部が平坦になっている  
(微視的接触圧力の緩和)
- ・深い谷部がある(油溜まり効果)

# 表面、表層の構造

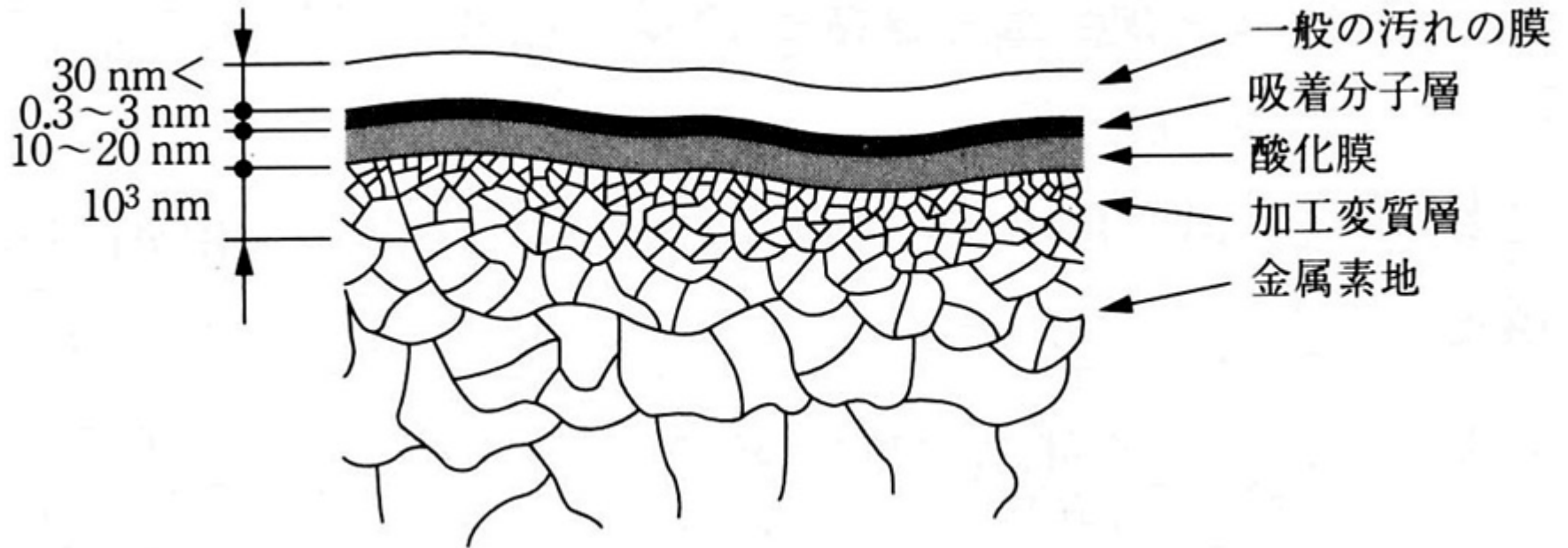
摩擦・摩耗は表面同士が擦れることが原因



表面を知ることは非常に重要



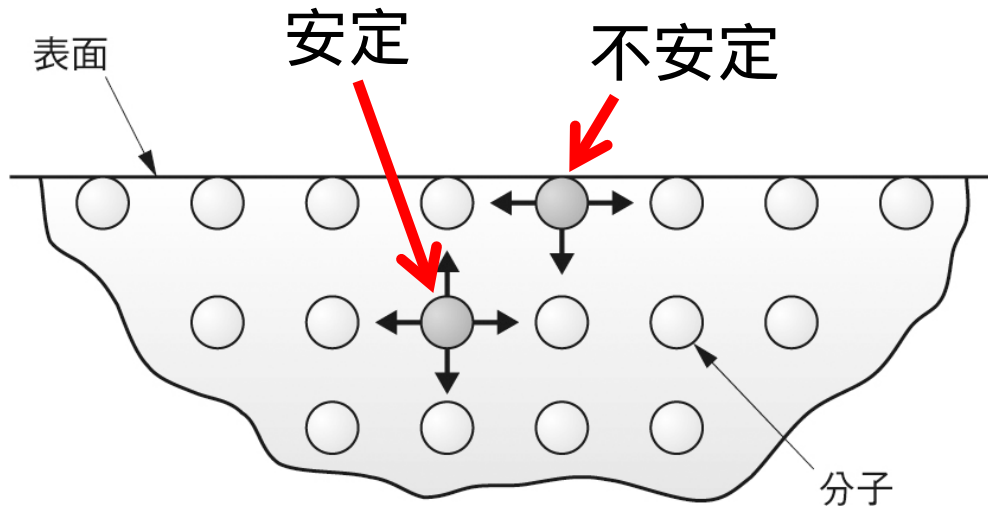
# 厚さのオーダーは？



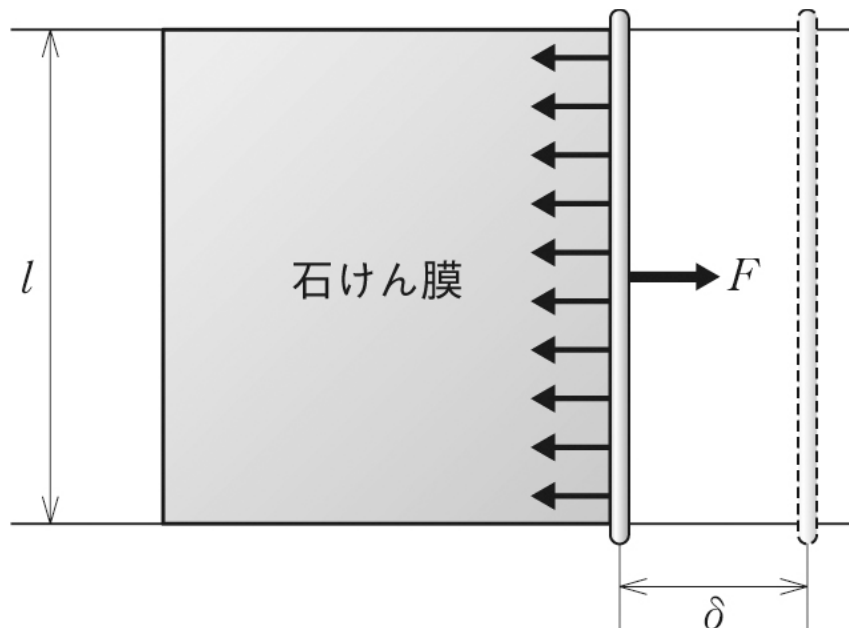
表面の性質は、数ミクロンの表面層で決まる



# 表面エネルギーとぬれ現象



表面にある分子と内部の分子では、受ける力が異なる



表面張力  
(表面エネルギー)

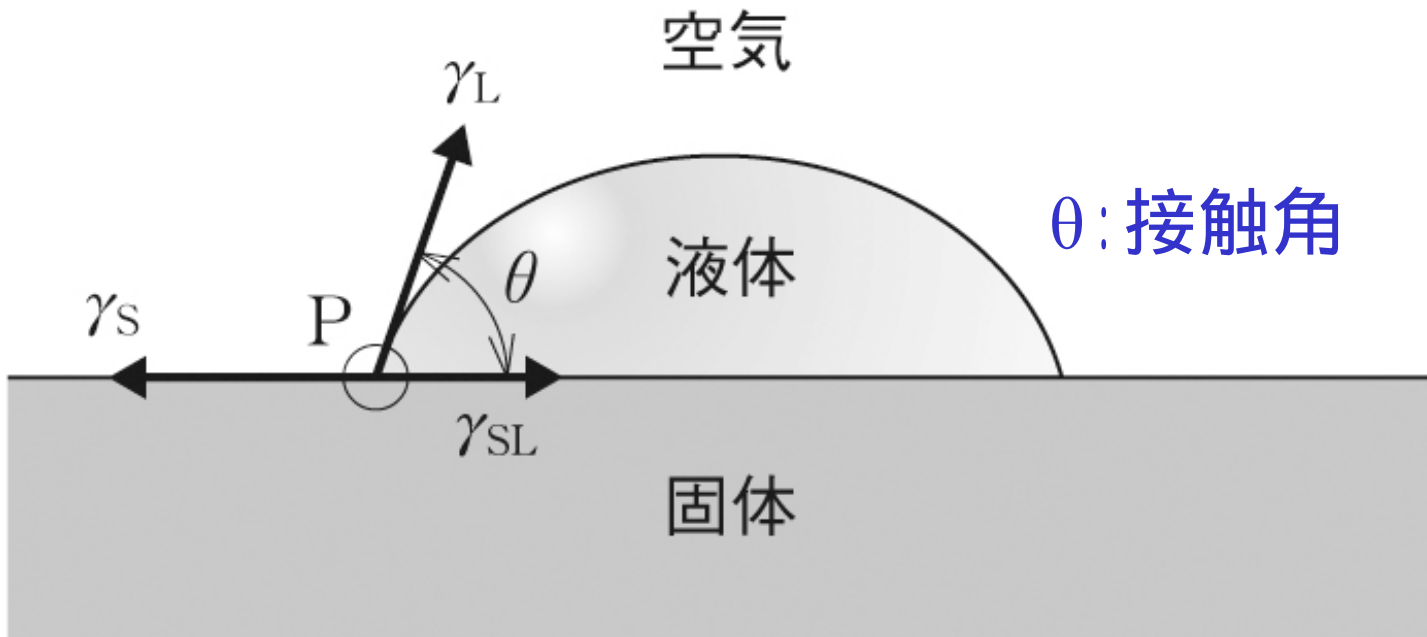
$$g = \frac{F d}{2 l d} = \frac{N m}{m^2} = \frac{N}{m}$$

# 液体が表面上を広がるか？

$$\gamma_S = \gamma_L \cos\theta + \gamma_{SL} \quad (\text{ヤングの式})$$

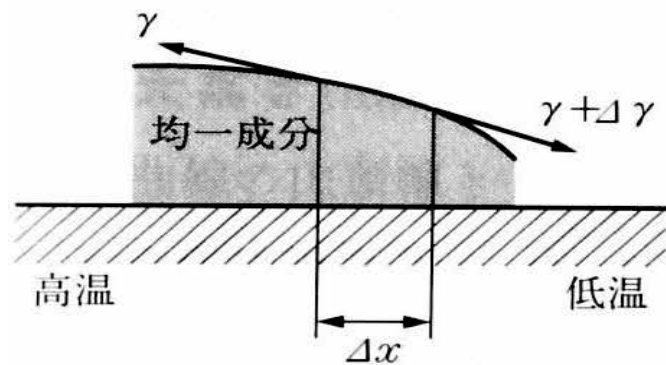
$\gamma_S > 0$  : 液体は表面上を広がる

↳ 潤滑油の**拡散性**・**浸透性**  
において重要

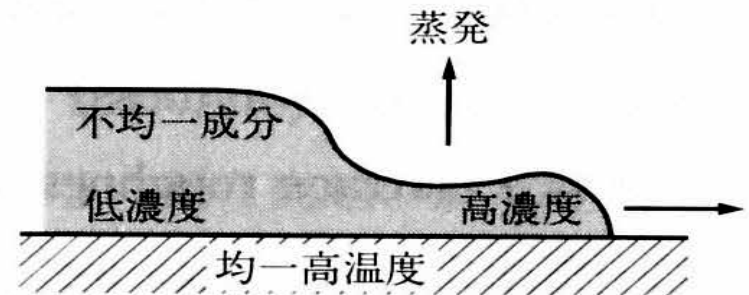


# マランゴニ効果

温度変化や濃度変化等によって、表面張力  
や界面張力に局所的変動に起因する  
**液体内部の流動**



(a) 温度こう配による液滴の拡がり

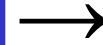


(b) 濃度こう配による液滴の拡がり

潤滑油分布の不均一を招き、潤滑不良を引き起こす

# 固体同士の接触

トライボロジーでは、2物体が接触し、  
相対運動した場合の現象を扱う



接触は  
重要

分散接触 (真実接触部は小さい)



ミクロ的視点

接触

面接触 (平面 / 平面)

マクロ的視点

集中接触

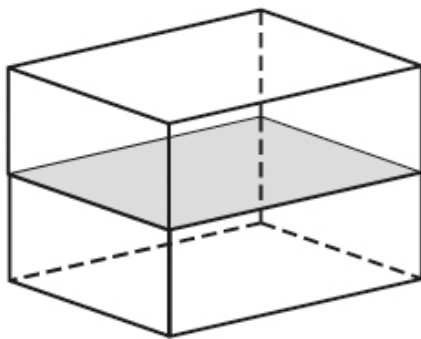
点接触 (曲面 / ?)

線接触 (円筒 / ?)

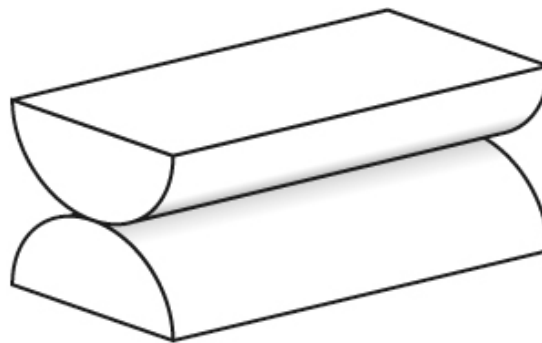
# Hertzの弾性接触理論

## 前提条件

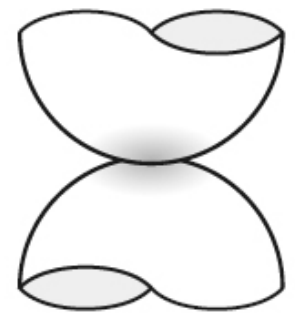
- (1) 接触する固体は等質等方性弾性体である
- (2) 接触面には摩擦がなく、滑らかな2次曲面である
- (3) 接触域は固体の表面積と比較して十分小さい
- (4) 荷重は接触域に垂直に作用する



(a) 面接触

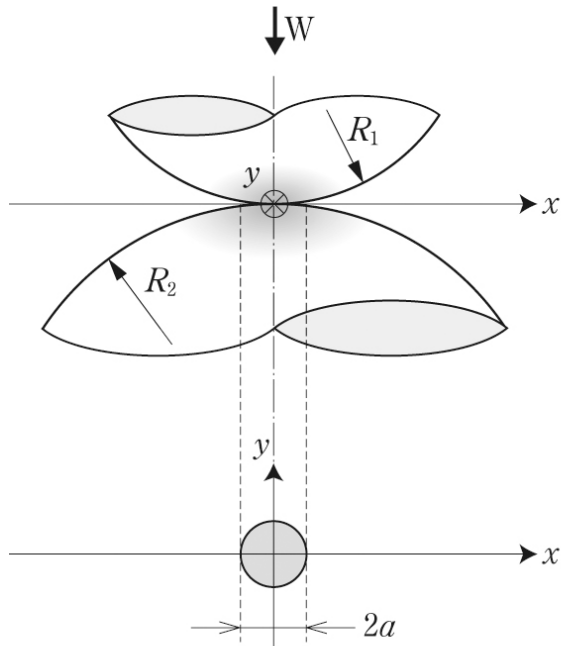


(b) 線接触

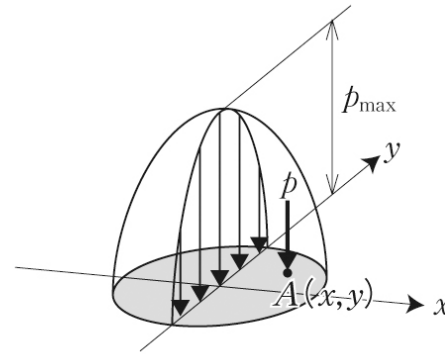


(c) 点接触

# (1) 球面同士の接触



(a) 接触域の形状



(b) 接触圧力分布

## 最大接触圧力

$$p_{\max} = \frac{3W}{2\pi a^2} = \frac{3}{2} p_{\text{mean}}$$

$p_{\text{mean}}$  : 平均接触圧力  $\frac{3}{2} = \frac{W}{\pi a^2}$

## 接触圧力

$$p = p_{\max} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{a^2}}$$

## 接触円半径

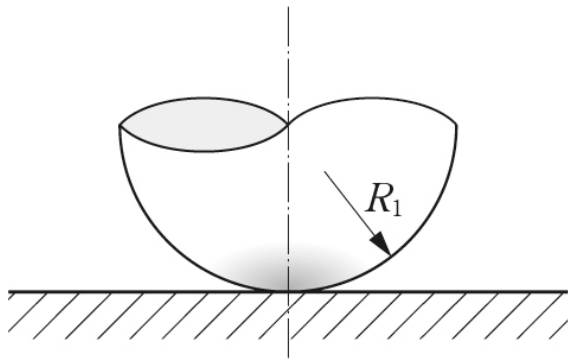
$$a = \sqrt[3]{\frac{3WR}{2E\phi}}$$

## 等価ヤング率

$$\frac{1}{E\phi} = \frac{1 - \nu_1^2}{2E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}$$

## 等価曲率半径

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$



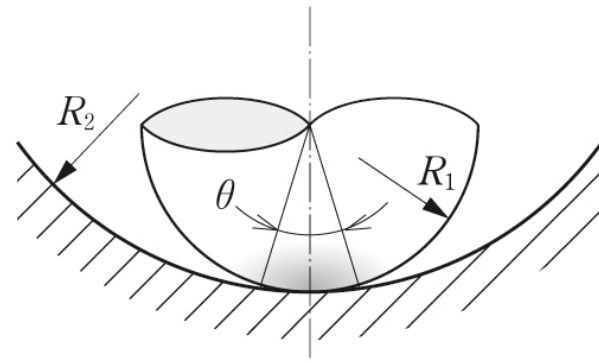
$$R_2 = \infty$$

(a) 球面／平面の接触



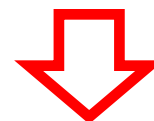
等価曲率半径を求める  
際に、 $R_2 = \infty$  とする

$$R = R_1$$



$$R_2 < 0$$

(b) 球凹面と球凸面の接触

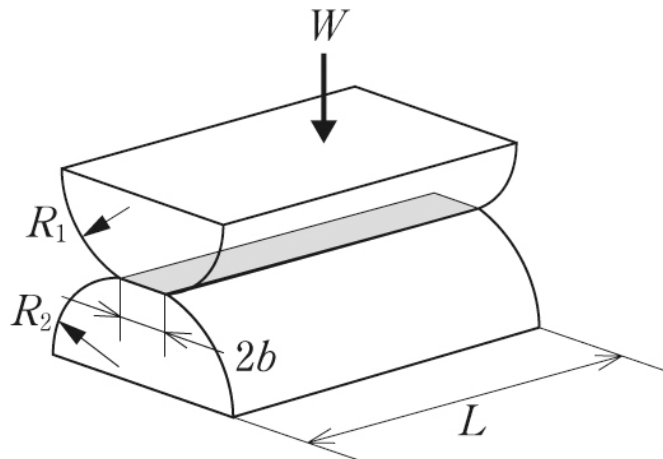


等価曲率半径を求める  
際に、 $R_2$ の符号をマイナス  
にする  
分母が小さくなるのでRは  
大きくなる

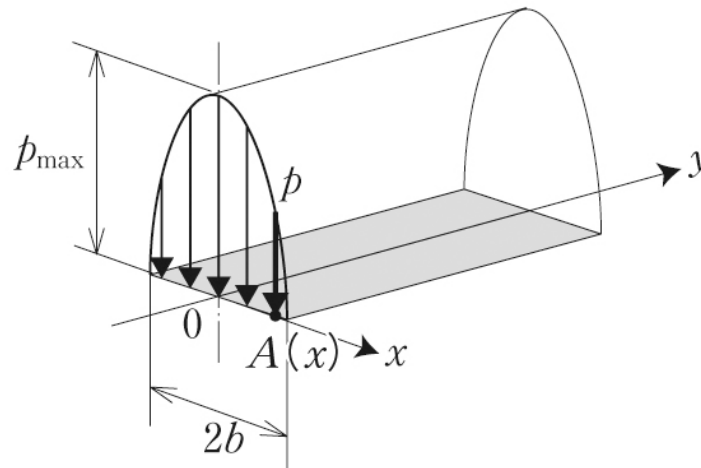
相対接近量：

$$d = \frac{\sqrt[3]{9W^2 \frac{1}{\rho}}}{\sqrt[3]{4E \rho R}}$$

## (2) 円筒同士の接触



(a) 接触域の形状



(b) 接触圧力分布

### 接触幅

$$b = \sqrt{\frac{8R W}{\rho E \phi L}}$$

### 最大接触圧力

$$p_{\max} = \frac{2W}{\rho bL} = \frac{4}{\rho} p_{\text{mean}}$$

### 接触圧力

$$p = p_{\max} \sqrt{1 - \frac{x^2}{b^2}}$$

$$p_{\text{mean}} : \text{平均接触圧力} = \frac{W}{2bL}$$

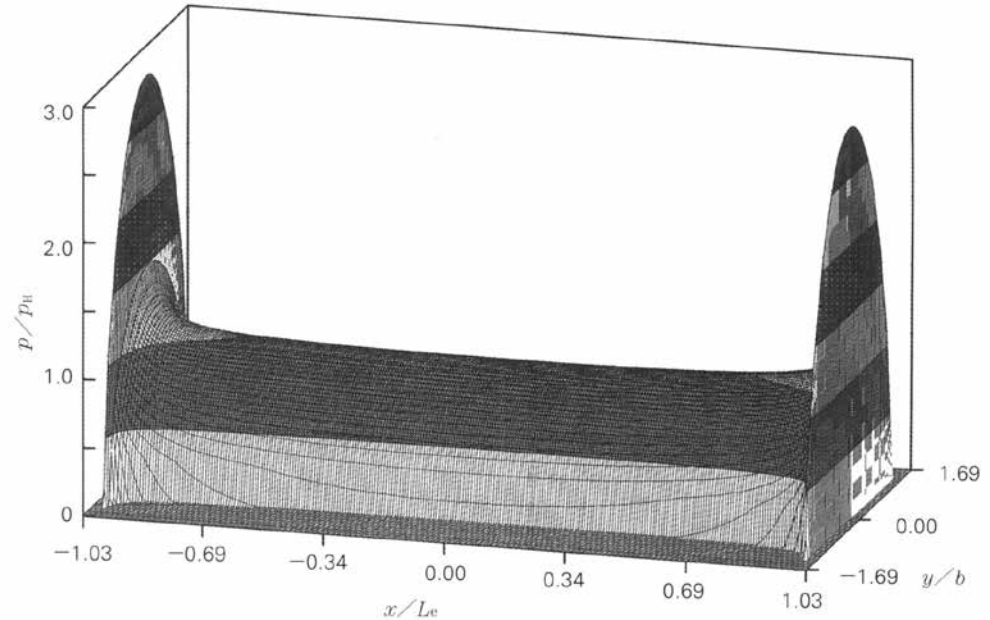
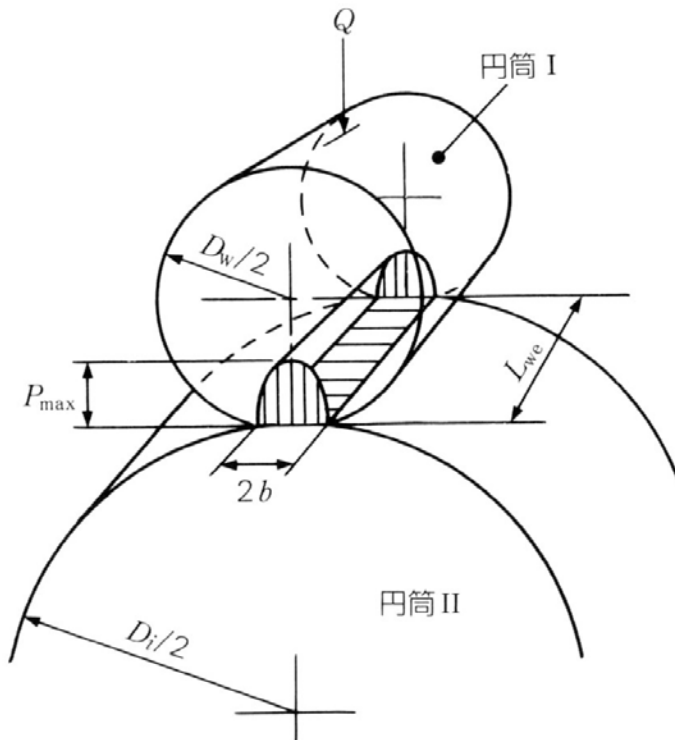


# しかし、実際の接触においては・・・

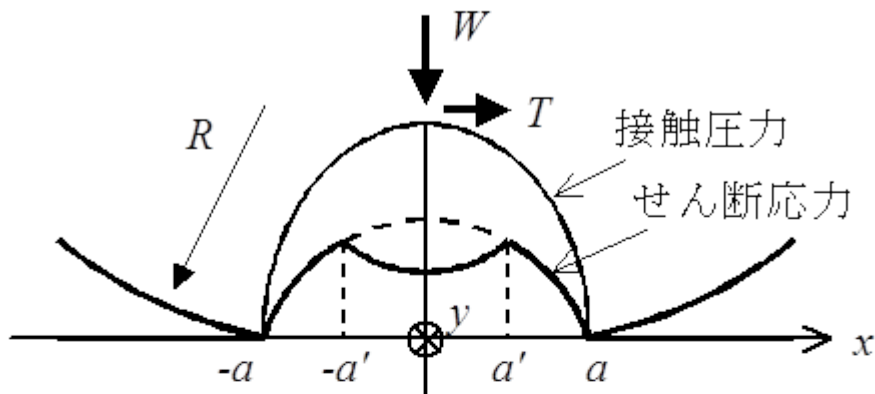
軸方向に直線のころでは、両端部で**エッジロード**が発生する



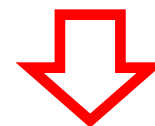
ころの両端を丸める(だらす) **クラウニング**加工を行う



# 接線力とミンドリンスリップ



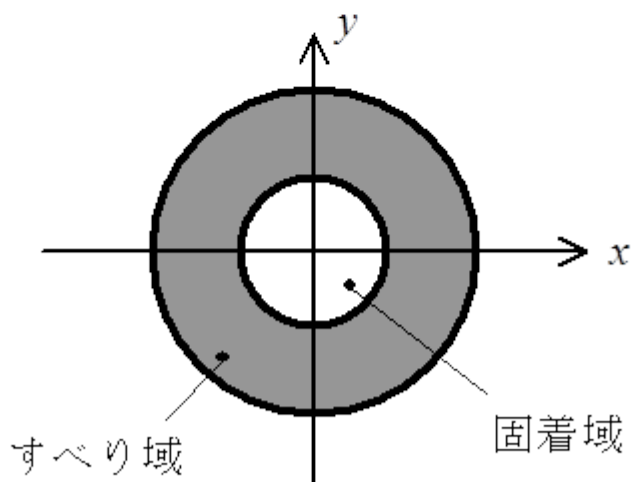
垂直荷重 + 水平荷重  
(接線力)



固着域とすべり域  
が混在する

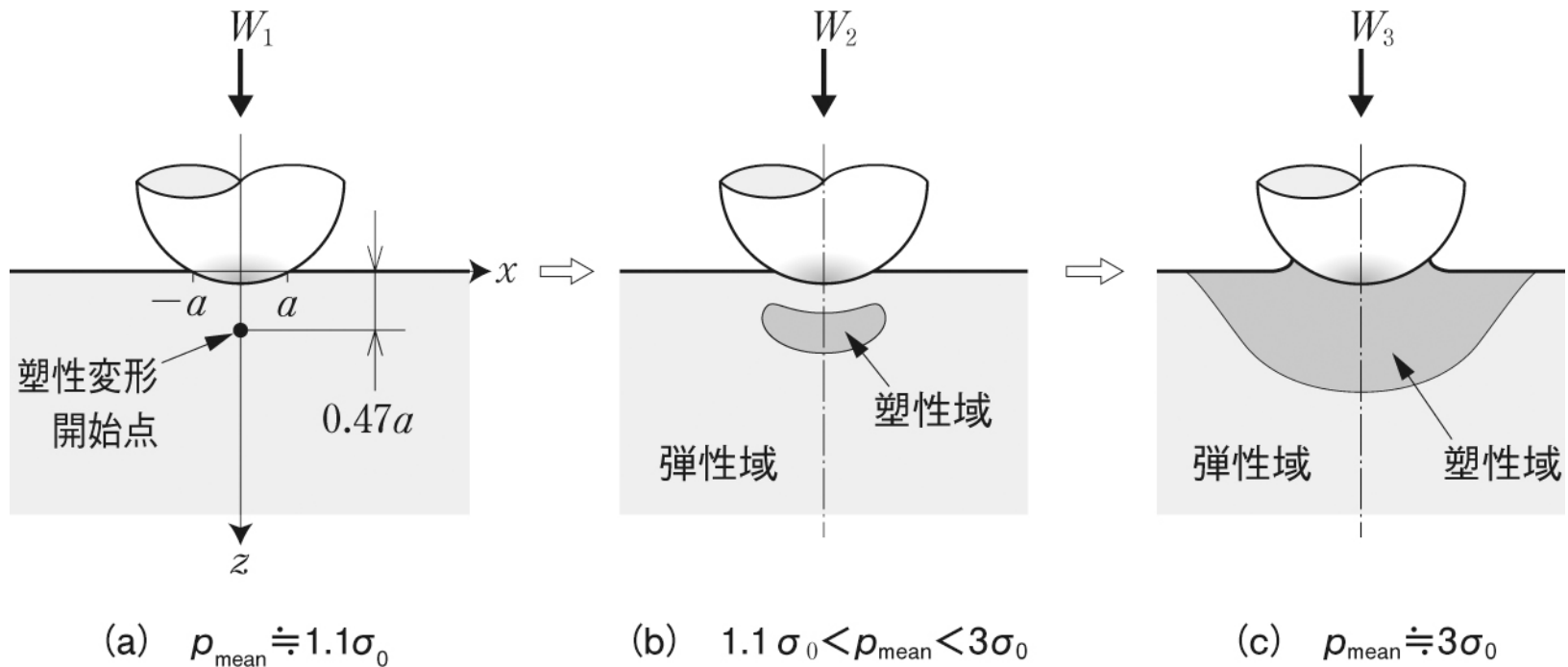
ミンドリンの理論

$$a\phi = a(1 - F)^{1/3}$$



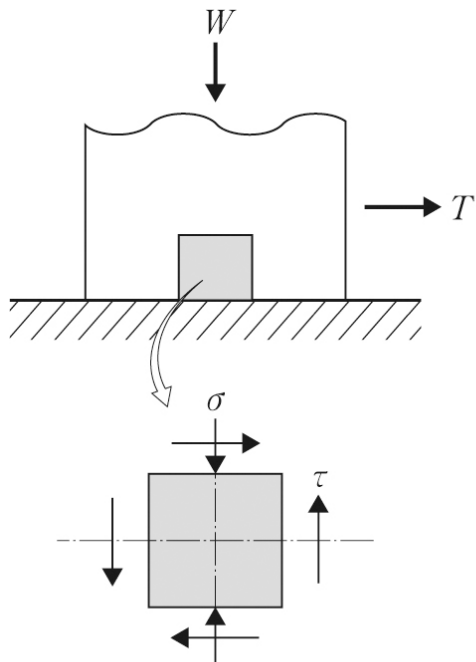
接触力係数  $\Phi = T/(\mu W)$   
( $T < \mu W$ )

# 押し込みによる塑性変形

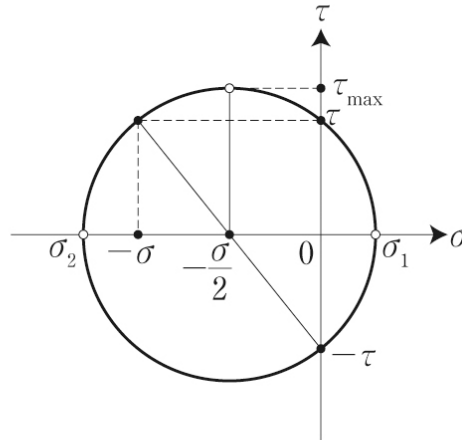


荷重が増加すると塑性域が増加するが、表面からではなく、 $z=0.47a$  となる深さで最大せん断応力となり、平均圧力が降伏強度の3倍になると塑性域が表面まで達する

# 圧縮とせん断が同時に作用する場合



(a) 応力状態

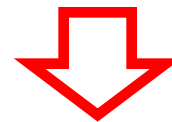


(b) モールの応力円

$$s_1 = -\frac{s}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{s^2 + 4t^2}$$

$$s_2 = -\frac{s}{2} - \frac{1}{2}\sqrt{s^2 + 4t^2}$$

$$t_{\max} = \frac{1}{2}(s_1 - s_2) = \frac{1}{2}\sqrt{s^2 + 4t^2}$$



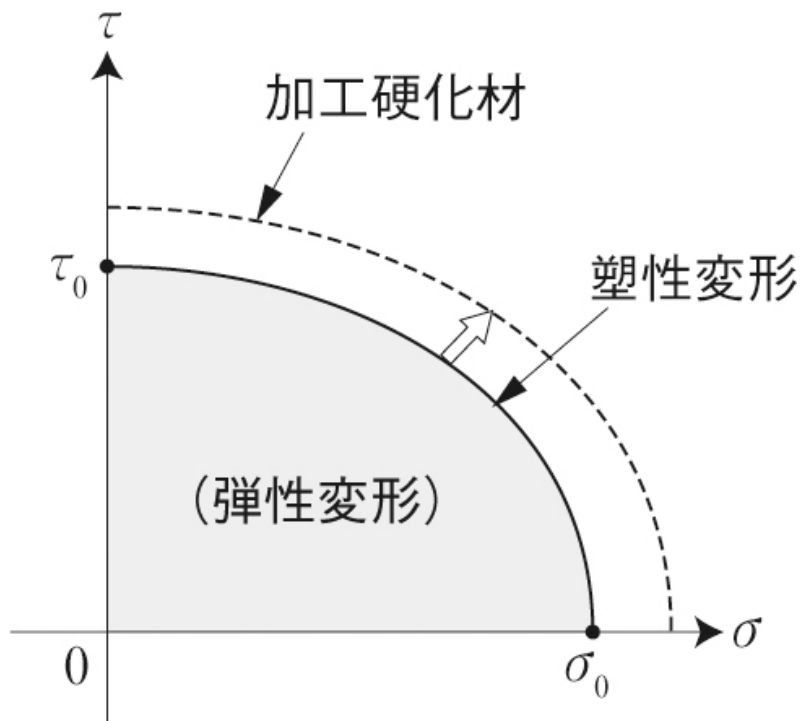
最大せん断応力説

$$s_0^2 = s^2 + 4t^2$$

ひずみエネルギー説

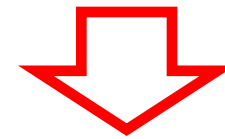
$$s_0^2 = s^2 + 3t^2$$

## 圧縮 - せん断モデル



組合せ応力状態における  
材料の降伏条件

2次元モデルでは、  
τ-σ平面上のだ円



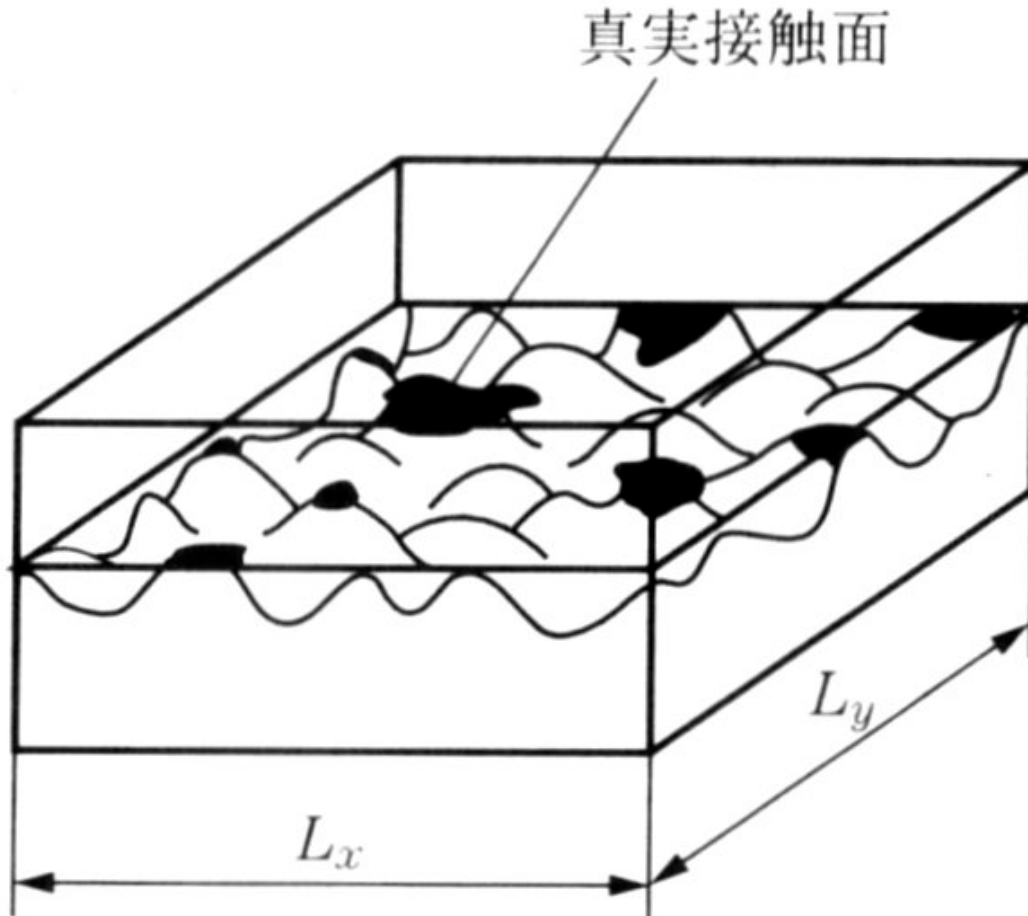
摩擦面では3次元

$$p_0^2 = p^2 + \alpha t^2$$

$p$ : 接触圧力、 $\alpha$ : 定数  
 $p_0$ : 塑性流動圧力

# 粗さをもつ面の接触

分散接触：見かけの接触面において，実際に接触している面積は非常に小さく，接触部は分散している



実際に接触している部分



真実接触面積

(見かけの接触面積の数 ~ 10% しかない)

見かけの接触面積  $A_a = L_x L_y$

真実接触面積Aは、

$$A = \sum_{i=1}^n A_i = \sum_{i=1}^n \frac{W_i}{p_0} = \frac{W}{p_0}$$

W: 荷重

$p_0$ : 塑性流動圧力

真実接触面積の実例 軟鋼平面における真実接触面積<sup>3)</sup>  
(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 <sup>2</sup> )	$\frac{A}{S}$	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

# 真実接触部は塑性変形?

**塑性指数 $\Psi$** : 弾性 / 塑性の平均的状态を表す指標

$$\Psi = \frac{E\phi}{2H} \sqrt{\frac{s}{b}}$$

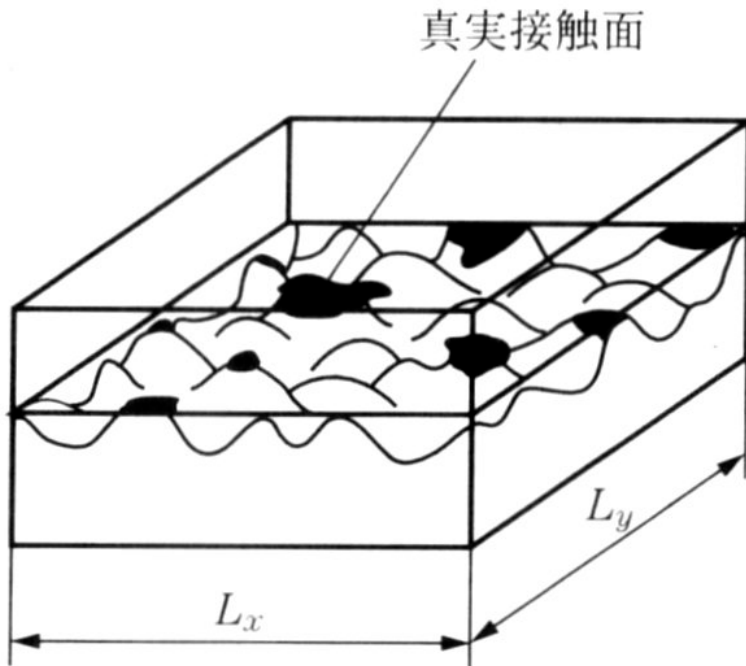
すべての突起が曲率半径 $\beta$ をもち、  
等価ヤング率を $E'$ 、  
接触体の軟らかい方の硬さを $H$ 、  
合成粗さを $\sigma (= [(Rq_1)^2 + (Rq_2)^2]^{1/2}$ 、  
 $Rq_1, Rq_2$ : 接触対1および2の二乗  
平均平方根粗さ)

$\Psi < 0.6$ : ほとんどの真実接触点は弾性接触、  
 $\Psi > 1$ : 小さな荷重であっても塑性接触  
 $\Psi = 0.6 \sim 1$ : 弾性接触と塑性接触が混在



# 今週の演習問題

真実接触面積の実例を示したが、実際にはどのようにして測定したかを考察せよ。



見かけの接触面積  $A_a = L_x L_y$

軟鋼平面における真実接触面積<sup>3)</sup>  
(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 <sup>2</sup> )	$\frac{A}{S}$	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