

境界潤滑と混合潤滑

乾燥摩擦：摩擦面に流体潤滑材がない

→ 摩擦係数は高い

境界潤滑：摩擦面に若干の流体潤滑剤

(ただし、荷重の負荷分担割合は

非常に小さい) → 摩擦係数は高いまま

混合潤滑：摩擦面に流体潤滑剤が多くなってきた

荷重の負荷分担割合が増加

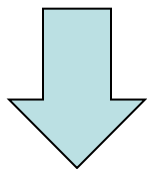
→ 摩擦係数は減少する

流体潤滑：摩擦面が流体潤滑剤で満たされ、

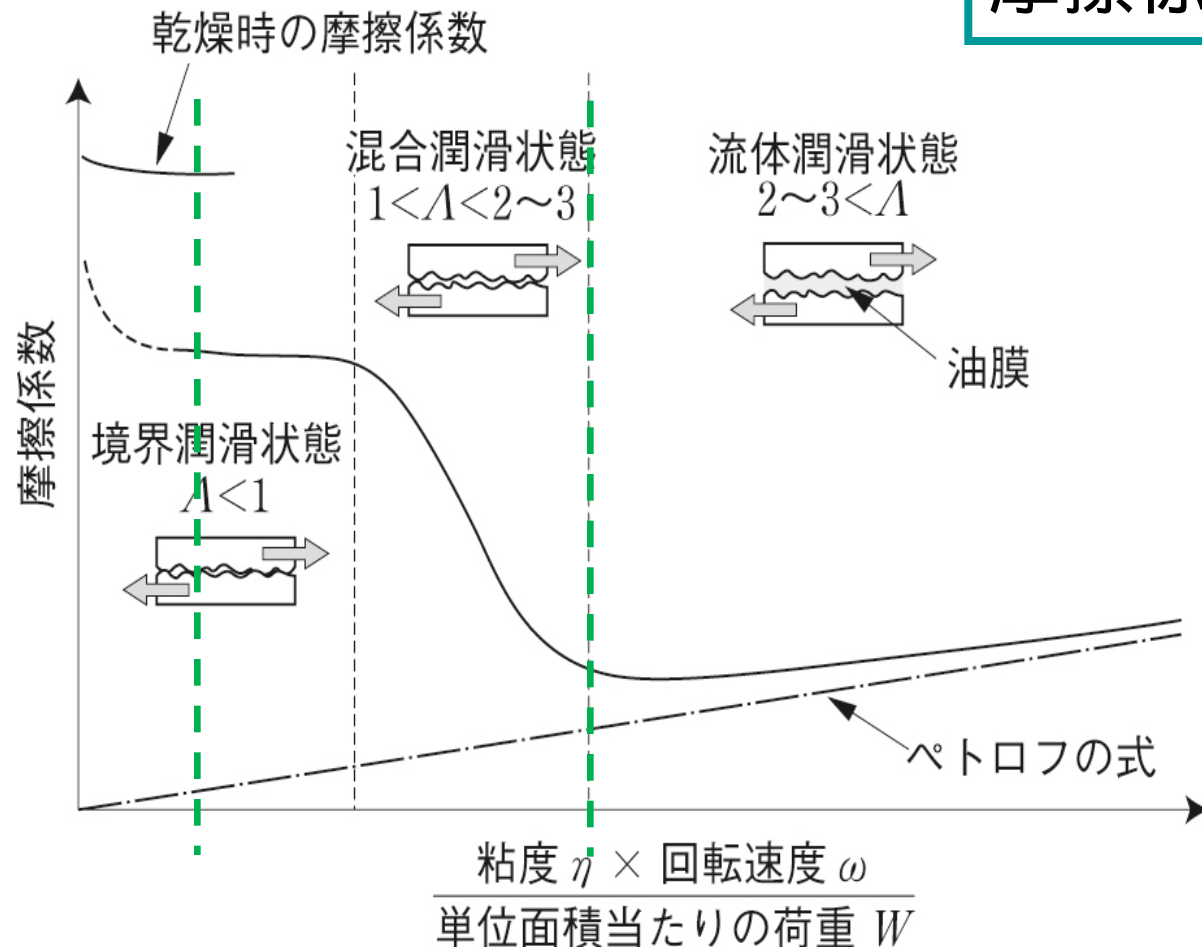
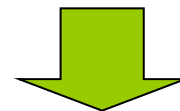
固体接触が無くなる

→ 摩擦係数は流体のせん断抵抗

ストライベック線図：潤滑状態を表す模式図



ストライベック線図上では、
摩擦係数が減少する領域



潤滑膜が厚く
なり、金属 /
金属接触部
(摩擦が大きい)
が減少している

油膜パラメータ

$$\Lambda = h / \sqrt{s_1^2 + s_2^2}$$

境界潤滑に関する研究の歴史

1886 **レイノルズ**: 流体潤滑理論の完成

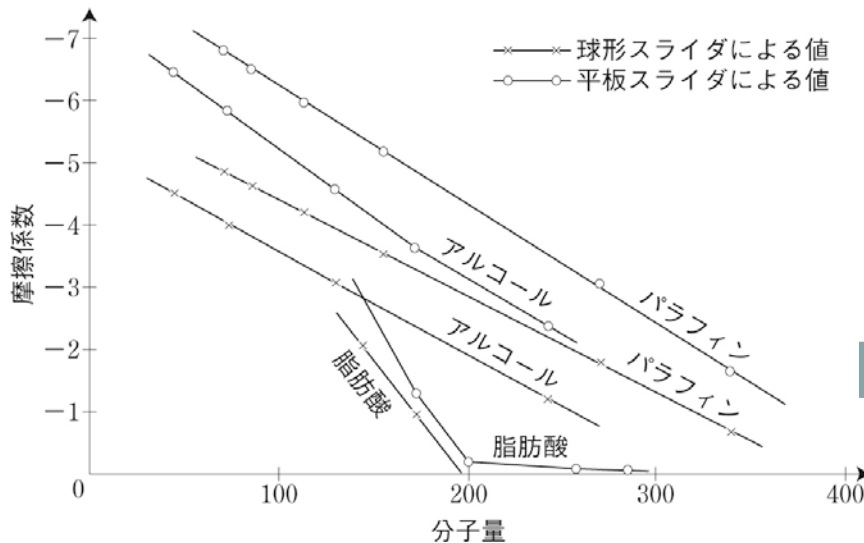


1900代 **油性**の研究

油の粘度に依存しない性質が摩擦を支配



1920代 油性効果の高い膜によって潤滑される状態を“**境界潤滑**”状態と呼ぶようになった



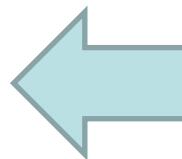
油性剤

境界潤滑領域で低い摩擦係数を発現する炭化水素

分子量の大きな炭化水素ほど、摩擦係数は小さい

油性(向上)剤

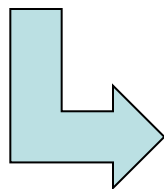
吸着エネルギーが大きい
吸着量が多い
分子鎖が規則的に配向する



分子鎖が
長い方が
効果的

レビンダー効果

界面活性物質が吸着すると固体の
機械的強度が低下する

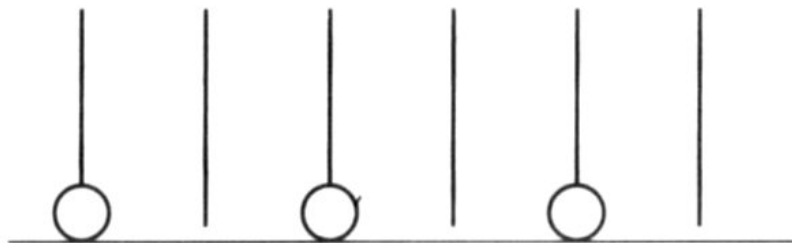


摩擦は小さくなるが、
強度は低下することになる

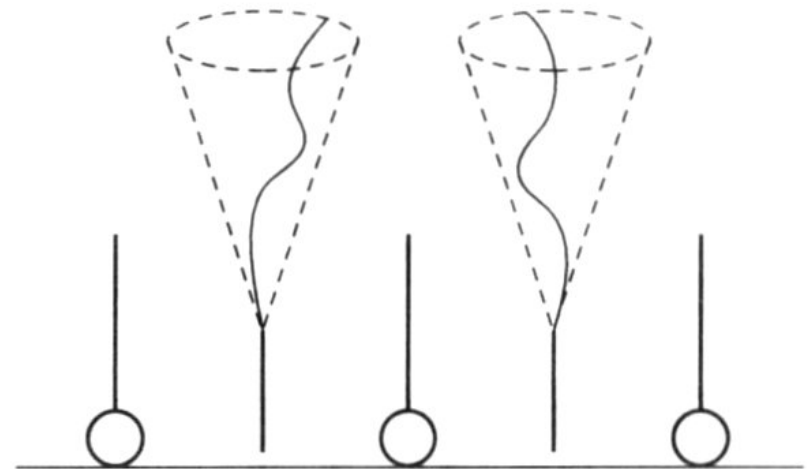
また、分子鎖の長さが揃っていると
最密な配向状態となり、吸着分子
のみより分子間力が強まる



chain matching



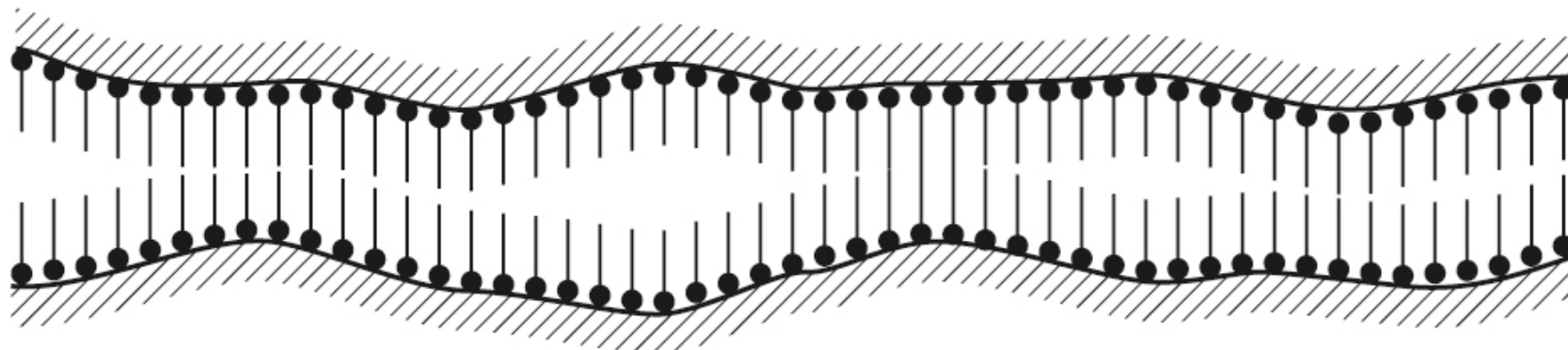
(a) matching



(b) non-matching

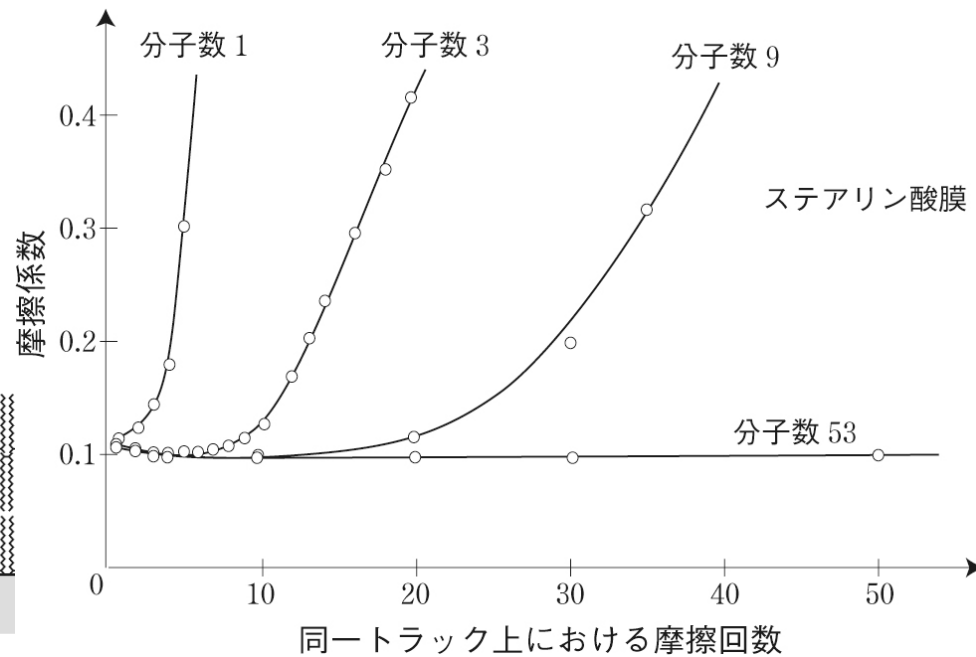
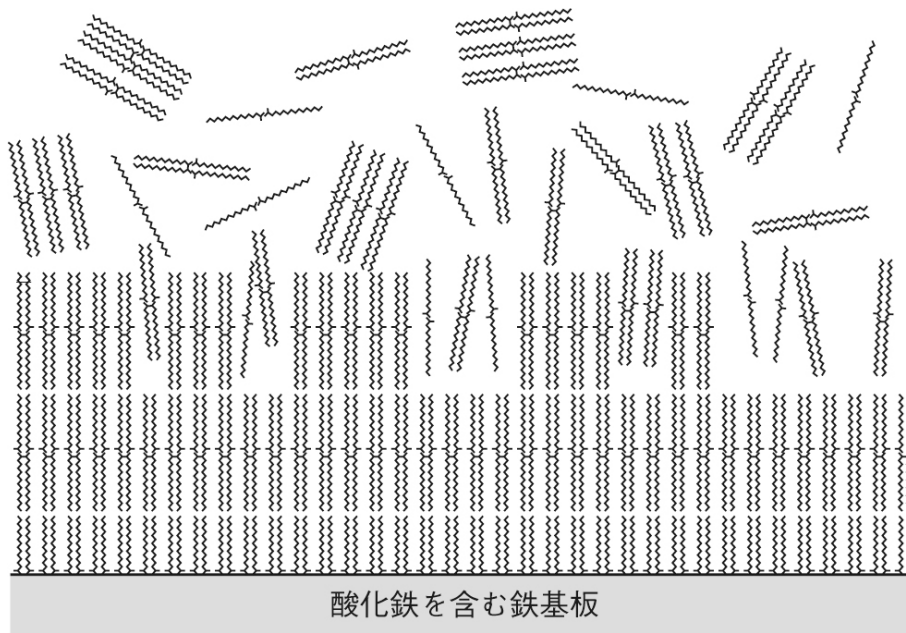
境界潤滑のモデル

金属表面に形成された**吸着分子膜(単分子膜)**をへだてて摩擦が行われる状態



ハーディの表面吸着モデル

ただし、単分子吸着膜は、荷重を支えることができないのではないか？……という疑問



多分子膜モデル(アレン)

多分子膜における摩擦繰り返し実験

摩擦係数自体は、単分子膜と同じ

余剰な分子は、**破れた膜の補修**をしているに過ぎない 7

化学吸着による境界膜の形成

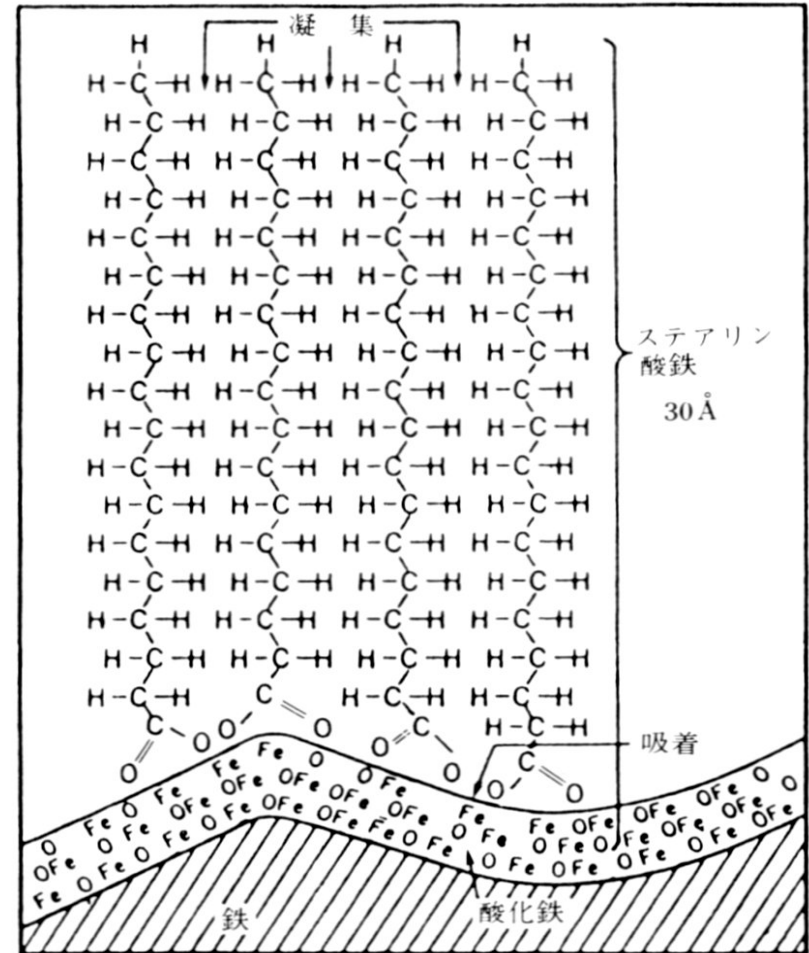
	パラフィン油	パラフィン油 +1 %ドデカン酸
ニッケル	0.3	0.28
クロム	0.3	0.3
白金	0.28	0.25
銀	0.8	0.7
銅	0.3	0.08
カドミウム	0.45	0.05
亜鉛	0.2	0.04
マグネシウム	0.5	0.08



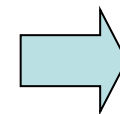
同じ油性剤であっても、表面材料
によって、摩擦係数は異なる



油性剤と表面が**化学反応**
をして、取れにくくなっている
のではないか



化学吸着



強い

極性基：- OH, - COOH, - NH₂等

+

親水基：炭化水素基 (R)



ROH (アルコール), RCOOH (脂肪酸)
RNH₂ (アミン)



良好な境界膜を形成する

吸着性の大きな：油性 (向上) 剤として
極性物質 基油 (ベースオイル) に添加

化学吸着による境界潤滑膜とトライボフィルム

油性剤は化学吸着



物理吸着よりは強いが、**転移温度**を超えると表面から離脱する



転移温度は、
物理吸着：吸着分子の**融点**
化学吸着：反応生成物の**融点**

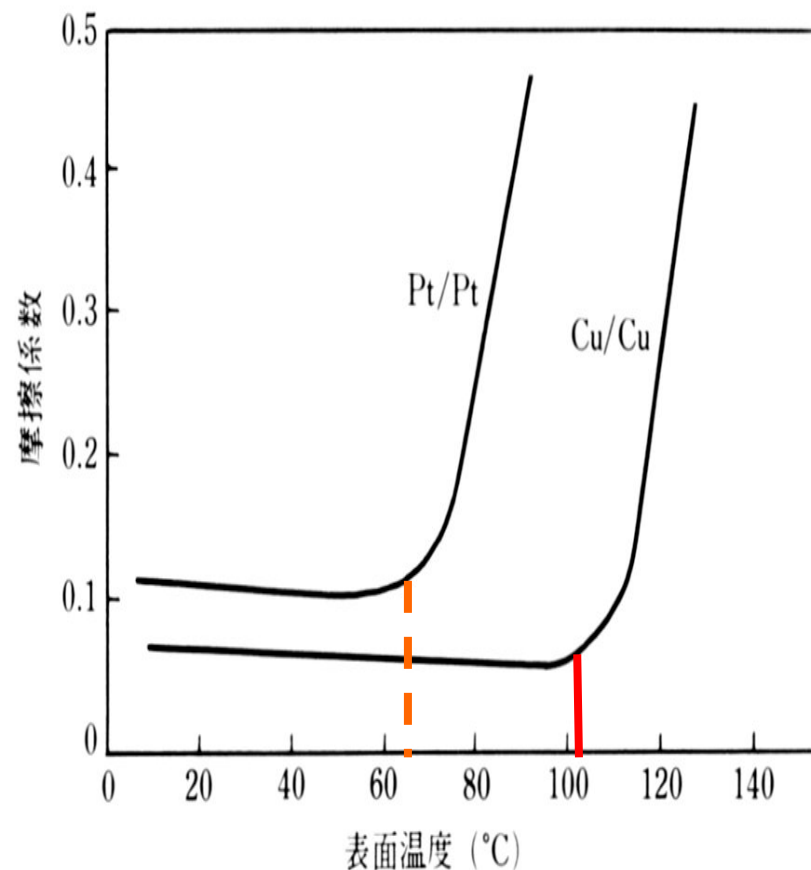
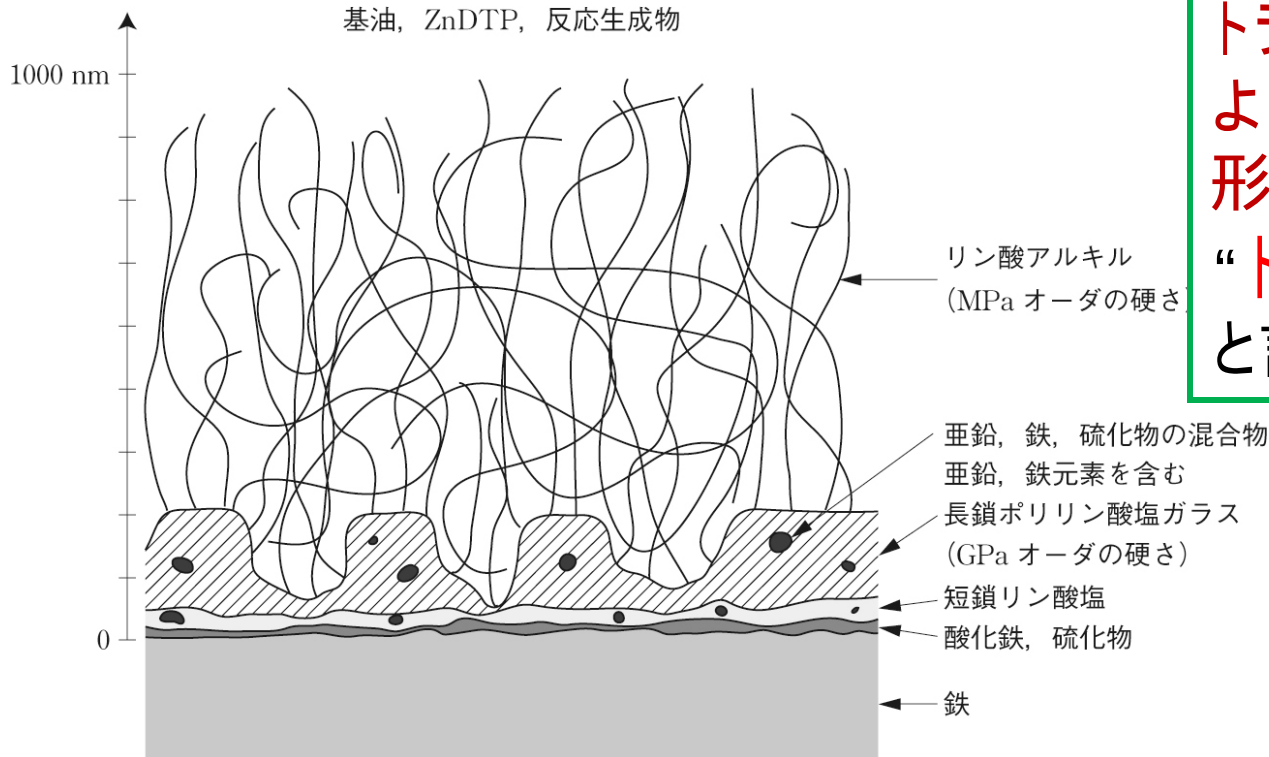


図 3.6 ステアリン酸による物理吸着膜 (Pt/Pt) と化学吸着膜 (Cu/Cu) の潤滑特性

ステアリン酸の融点：69°C.

ステアリン酸銅の融点：約120°C.

極圧添加剤は、化学吸着ではなく、熱によって表面と化学反応を起こして**強固な化学反応膜**（を形成する



摩擦熱によって反応が始まる、言い換えると**トライボロジー現象**によって反応が起こって形成される膜なので、“**トライボフィルム**”とされている

極圧(添加)剤[EP剤]

吸着膜の転移温度以上で良好な潤滑効果を維持させるための添加剤



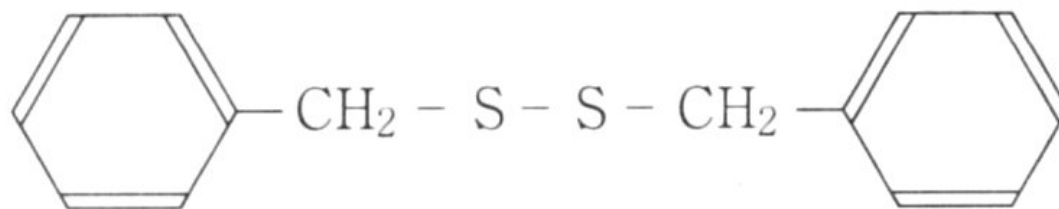
金属接触が起こった際の熱で金属表面と反応し、表面膜を形成する

代表的な極圧剤

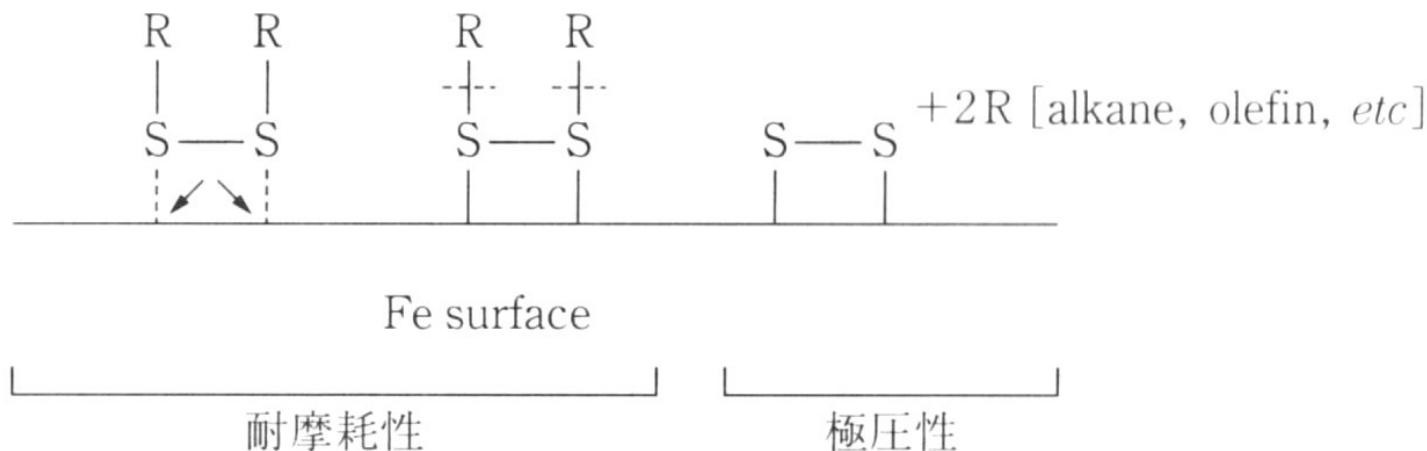
硫化物	: 二硫化ジベンジル
リン酸塩	: リン酸トリクレシル
塩化物	: 塩素化パラフィン

二硫化ジベンジルの極圧作用

分子構造 :



表面化学反応

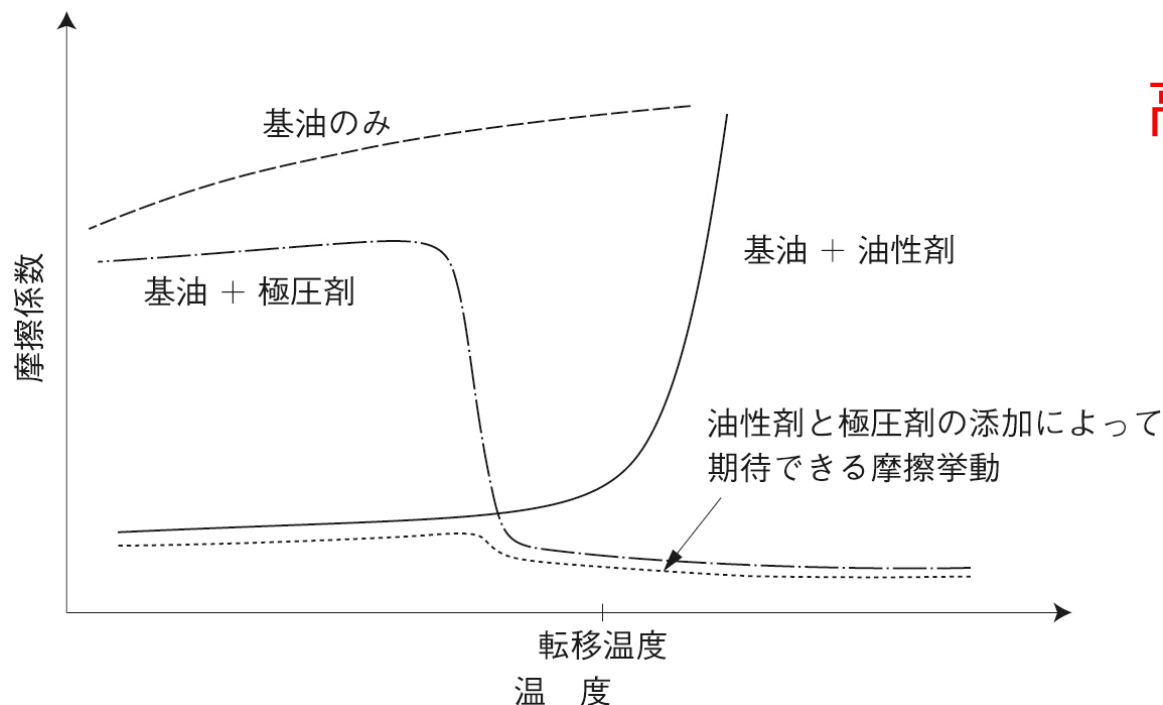


境界潤滑膜の性質

境界潤滑膜の大別

油性剤の化学吸着によるけん化有機被膜
摺動に伴う極圧剤と表面金属の化学反応被膜
(トライボフィルム)

反応には、**温度依存性**がある



低温時：**油性剤**の効果で
低摩擦

高温時：**極圧剤**の効果で
低摩擦



添加剤の組合せで、
低温から高温まで
低摩擦

境界潤滑膜の分析

境界潤滑膜の構造を理解することは、その**摩擦メカニズム**を理解し、より高機能な添加剤、あるいは表面の創成に繋がる。

代表的な分析手法

分析手法	英語名称	分析対象	得られる情報
赤外分光法	infrared spectroscopy	有機物	特定官能基の存在の有無，配向状態
偏光反射解析法	ellipsometry	有機物，薄膜	膜厚，垂直方向の構造
エネルギー分散型 X 線分光法	Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy	B より重い元素	存在する元素の種類
X 線光電子分光法	X-ray Photoelectron Spectroscopy	Li より重い元素	存在する元素の種類，量およびその結合状態
二次イオン質量分析法	Secondary Ion Mass Spectroscopy	Li より重い元素	存在する元素の種類，量

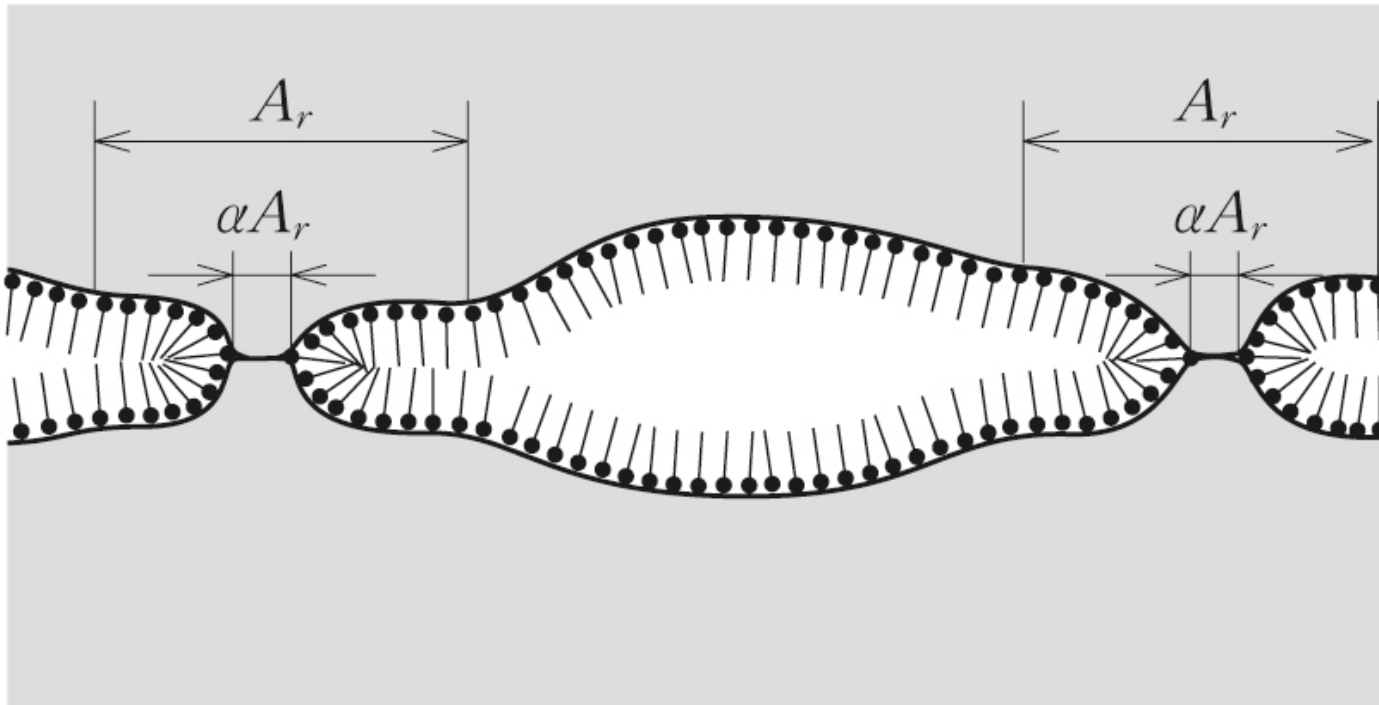
境界潤滑のモデル

バウデンの境界潤滑モデル

$$F = A \{ \alpha S_m + (1 - \alpha) S_b \}$$

A : 真実接触面積, α : 金属間が直接接触している割合,

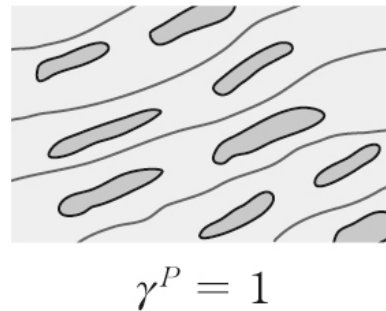
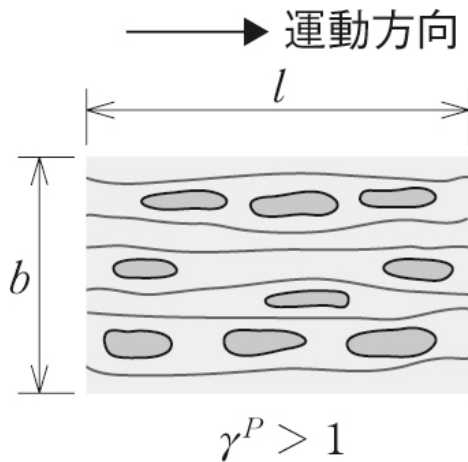
S_m : 金属接触部のせん断強さ, S_b : 境界膜のせん断強さ



曾田の修正式 ← 流体潤滑膜のせん断強さ s_l も考慮

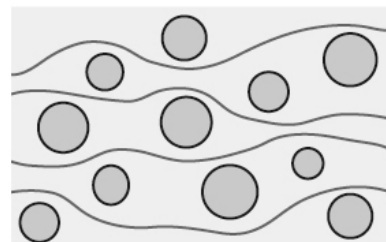
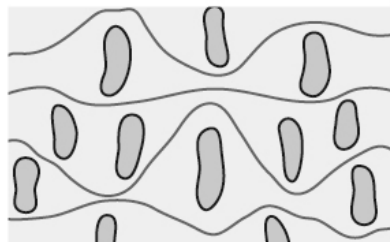
$$F = (A - A_r) \times s_l + A_r \{ a s_m + (1 - a) s_b \}$$

Patirの混合潤滑モデル ← 圧力発生の影響が無視できないモデルを提案



混合潤滑

ストライベック線図において流体潤滑領域に近い潤滑領域



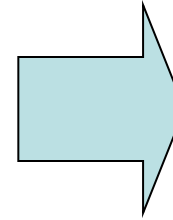
モデル的に非常に複雑

混合潤滑の接触面模式図

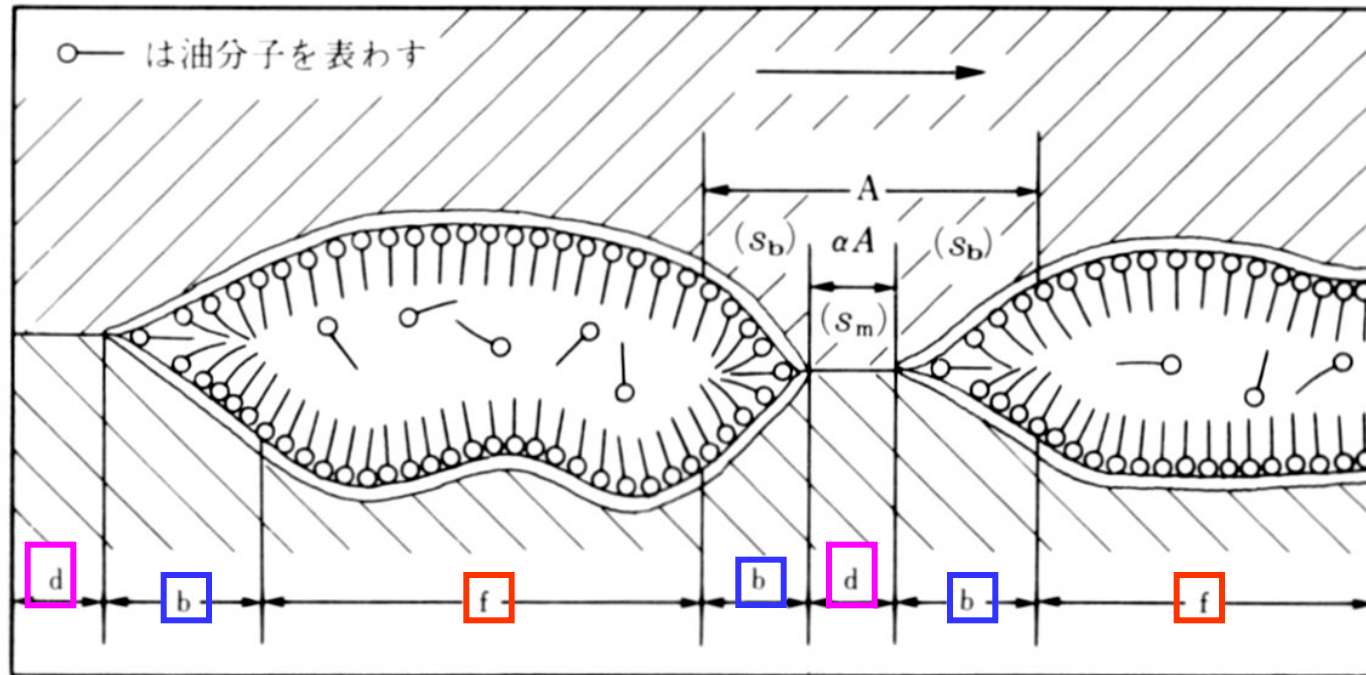
乾燥摩擦領域: **d** (dry)

境界潤滑領域: **b** (boundary)

流体潤滑領域: **f** (fluid)



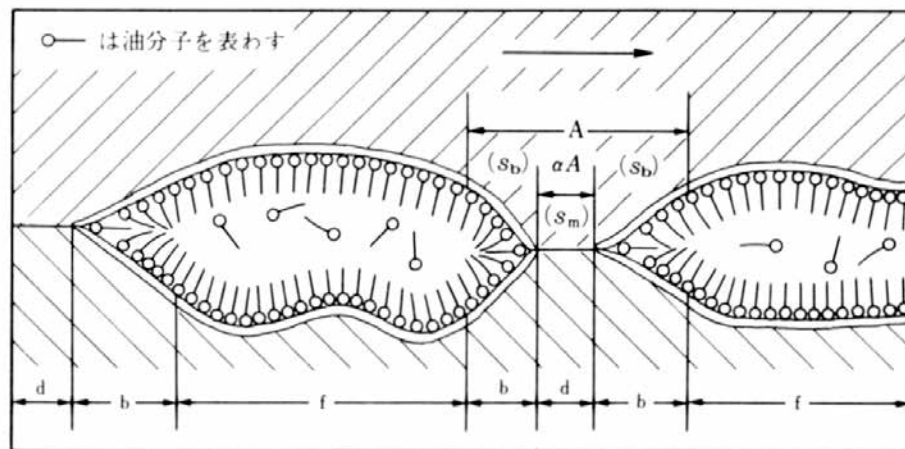
混在
している



d: 乾燥摩擦, **b**: 境界摩擦, **f**: 流体摩擦

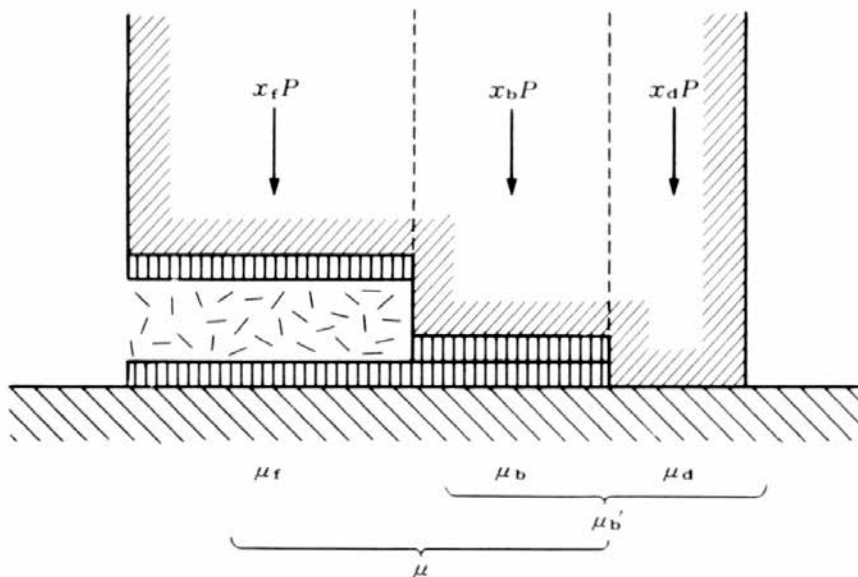
吸着分子膜 (境界膜) が荷重を負荷を分担するようになるので、摩擦係数は減少する。

混合潤滑における摩擦力の求め方



d: 乾燥摩擦, b: 境界摩擦, f: 流体摩擦

(摩擦状態毎に整理)



$$x_d + x_b + x_f = 1$$

$$P x_d \mu_d + P x_b \mu_b + P x_f \mu_f = P \mu$$

$$P x_d \mu_d + P x_b \mu_b = (P x_d + P x_b) \mu_b'$$

各摩擦状態の
荷重分担割合
を求める

$$x_d = \frac{(\mu - \mu_f)(\mu_b' - \mu_b)}{(\mu_b' - \mu_f)(\mu_d - \mu_b)}$$

$$x_b = \frac{(\mu - \mu_f)(\mu_d - \mu_b')}{(\mu_b' - \mu_f)(\mu_d - \mu_b)}$$

$$x_f = \frac{\mu_b' - \mu}{\mu_b' - \mu_f}$$

各摩擦状態の摩擦係数がわかっている(仮定すれば),
荷重分担が計算できる

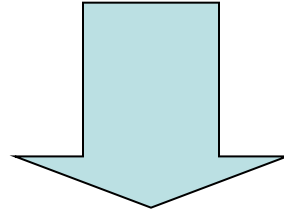


表 3.1 荷重分担と発熱割合の計算例

($\mu_d = 1$, $\mu_b = 0.08$, $\mu_t = 0.003$, $\mu_b' = 0.2$ とする)

	荷重分担 (%)			発熱割合 (%)		
	x_d	x_b	x_t	H_d/H	H_b/H	H_t/H
$\mu = 0.01$	0.5	3.1	96.4	48	24	28
$\mu = 0.05$	3.0	21.0	76.0	62	33	5