

第4章 潤滑油とグリース

潤滑剤の種類

(1) 潤滑油：液状

最も一般的に使用されている

(2) グリース：半固体状

流動しにくいので密封性が要求される部位に使用される

(3) 固体潤滑剤：固体

潤滑油やグリースが使用できない

条件で使用：高温・極低温・真空等

潤滑油とグリースの特性比較

表 12-1 グリース潤滑と油潤滑の比較

項目	グリース	油
密封装置	簡易	やや複雑 保守に注意が必要
潤滑性能	良い	非常に良い
回転速度	低・中速	高速にも使用できる
潤滑剤の交換	やや複雑	簡易
潤滑剤の寿命	比較的短い	長い
冷却効果	なし	良い（循環が必要）
ごみのろ過	困難	容易

潤滑油の作用(役割)

- (1) **摩擦低減**: 固体間に油膜を形成し, 摩擦を下げる.
- (2) **摩耗抑制**: 固体間の直接接触を緩和し, 摩耗の発生を抑える.
- (3) **冷却**: 潤滑油の出入により, 摩擦によって発生した熱を系外に持ち去る.
- (4) **焼付き抑制**: (1) ~ (3)の複合効果により, 機械の焼付きを抑え, 寿命を延ばす.
- (5) **異物の除去**: 系に侵入した異物, 摩擦の過程で生成されたコンタミネーションや摩耗粉を系外に排出する.
- (6) **密封**: 固体間に油膜を形成し, 内部の気体の漏れを抑制する.
- (7) その他: **さび止め**, コンタミネーションの**清浄分散**, **絶縁**等

ただし、(1) については、**摩擦力を増加**させるために使われる場合もある。 例: **トラクションドライブ用油・グリース**

潤滑油の組成とその種類

基油 (Base oil) : 潤滑油の主成分で巨視的な荷重分担性能を支配する

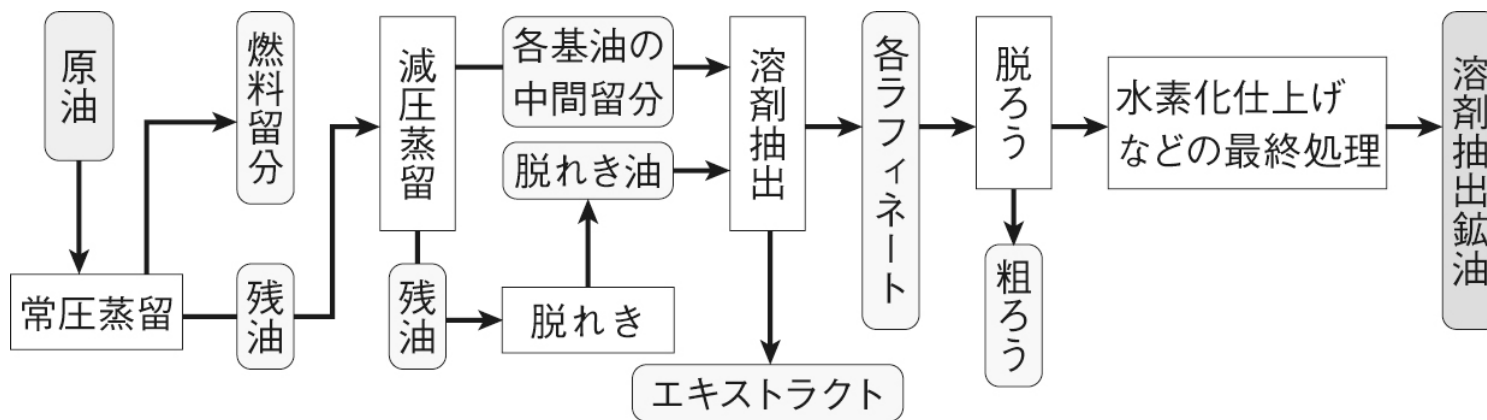
基油に求められる機能

- (1) 使用条件に見合った適切な**粘度**を持つ。
- (2) **粘度指数**が高く、温度変化に対する粘度変化が小さい。
- (3) **熱・酸化安定性**が高い。
- (4) **蒸発しにくい**。
- (5) **引火点**が高く、**流動点**が低い。
- (6) **添加剤の溶解性**が高く、その**添加効果**を妨げない。

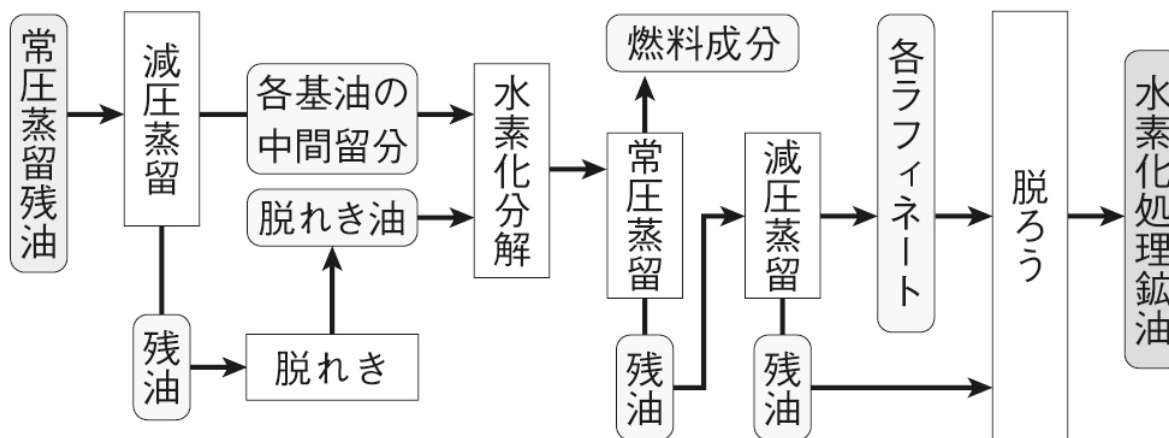
基油の種類(分類)

- 基油
- ・**鉱油系** : 石油から作られるので、燃料との相性がよい
 - ・**動植物油** : CO₂増加にならない
 - ・**合成油系** : 化学合成で生成(鉱油の弱点を補う)

鉱油系基油の製造工程(1)

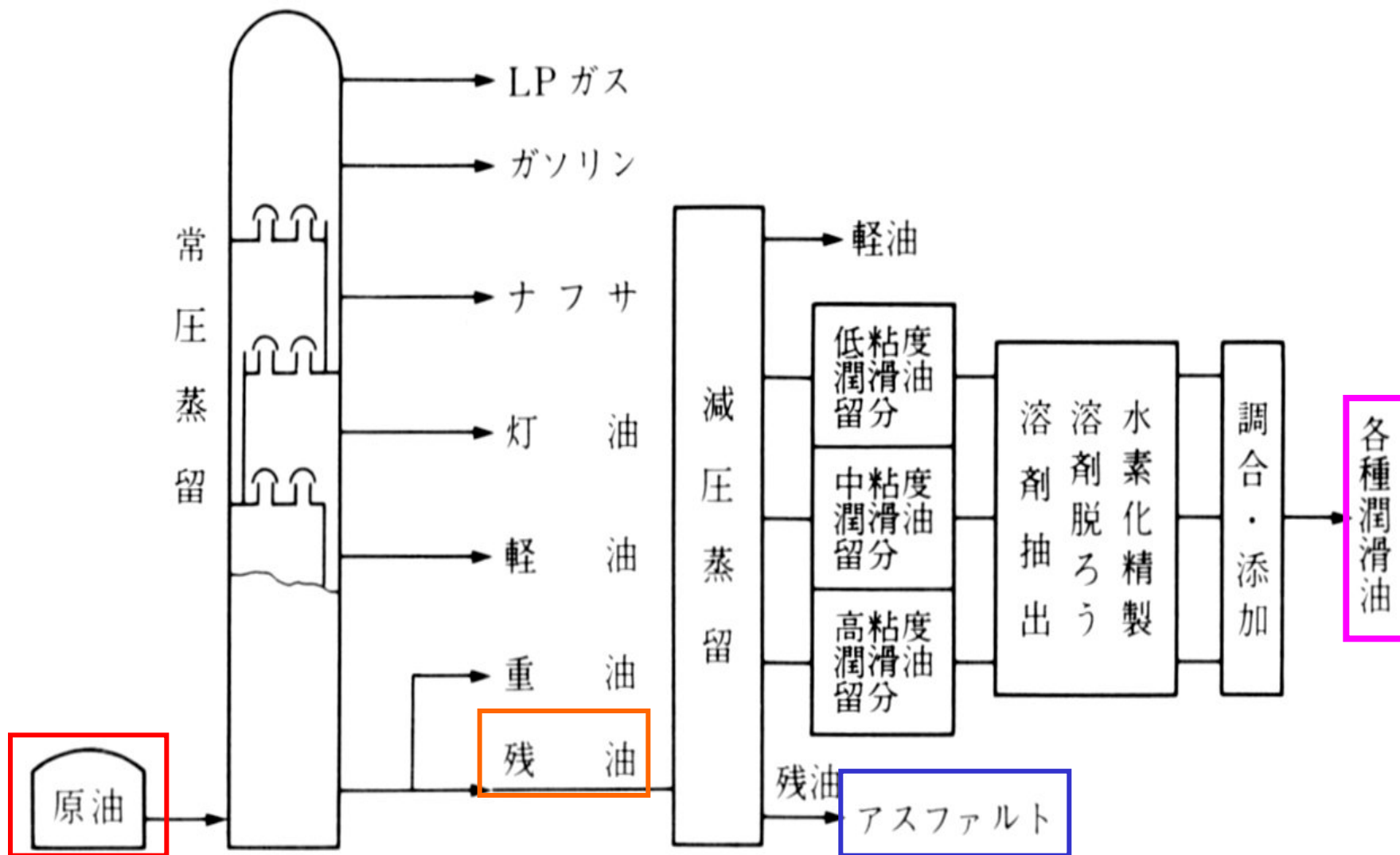


(a)



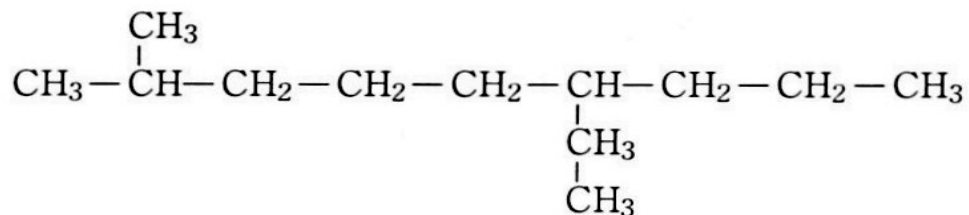
(b)

鉱油系基油の製造工程(2)

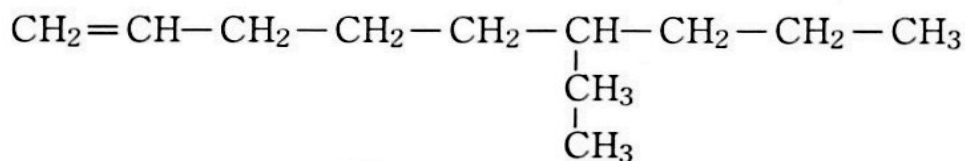


鉱油系基油の構造

パラフィン
(paraffin)
炭化水素

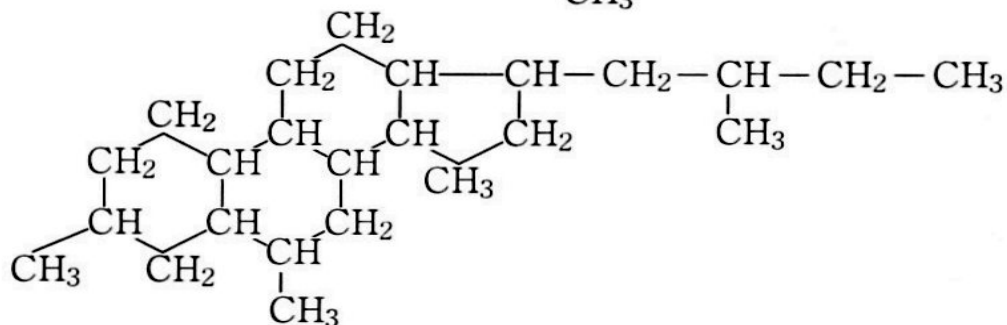


オレフィン
(olefin)
炭化水素

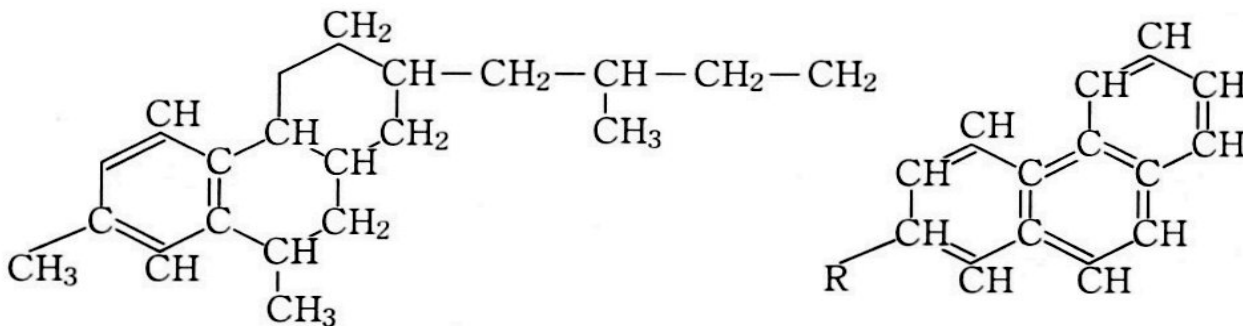


長鎖系

ナフテン
(naphthene)
炭化水素



芳香族
(aroma)
炭化水素



合成油製造方法

人工的に化学合成


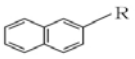
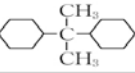
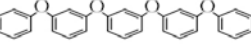
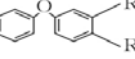


- ・有機系：炭化水素油、ポリエーテル、エステル等
- ・無機系：リン化合物、ケイ素化合物、ハロゲン化合物等



- ・鉱油系と比較して、高性能であるが、高価
- ・ポリ- α -オレフィン (PAO) は優れた特性をもつ (高粘度指数、せん断安定性、低温流動性等)

合成油系基油の種類と特徴

種類	一般名		化学構造の代表例	特徴	用途
炭化水素油	ポリオレフィン	ポリブテン	$\left(\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{C}-\text{CH}_2 \\ \\ \text{CH}_3 \end{array} \right)_n$	○スラッジが析出しにくい ×低 VI	2サイクルエンジン油 圧延油
		ポリ- α -オレフィン	$\left(\begin{array}{c} \text{C}_8\text{H}_{17} \\ \\ \text{CH}-\text{CH}_2 \end{array} \right)_n$	○高 VI ○低温流動性 ×ゴム適合性 △溶解性	エンジン油 航空機用油
		オレフィン共重合体	$\left(\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{CHCH}_2 \end{array} \right)_n \left(\text{CH}_2\text{CH}_2 \right)_m$	○高 VI ○低温流動性 ×ゴム適合性 △溶解性	エンジン油
	アルキル芳香族	アルキルベンゼン		○添加剤溶解性 ○スラッジが析出しにくい	冷凍機油 絶縁油
		アルキルナフタレン		○添加剤溶解性 ○スラッジが析出しにくい ○極めて高い酸化安定性	空気圧縮機油 真空ポンプ油 熱媒体油
	脂環式化合物			○高トラクション係数	トラクション油
ポリエーテル	ポリグリコール		$\left(\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{CHCH}_2\text{O} \end{array} \right)_n$	○高 VI ○スラッジが析出しにくい ○冷媒との相溶性 ○水溶性もある ×酸化安定性	冷凍機油 水系作動液 ギヤ油 ブレーキ液
	フェニルエーテル	ポリフェニルエーテル		○酸化安定性 ○対放射線安定性 ×低 VI	耐放射線用油
		アルキルジフェニルエーテル		○酸化安定性 ○低蒸気圧	真空ポンプ油 グリース
エステル	ジエステル		$\text{C}_8\text{H}_{17}\text{OOC}(\text{CH}_2)_2\text{COOC}_8\text{H}_{17}$	○低温流動性 ○高 VI ×加水分解安定性 ×高粘度品が得られない	エンジン油
	ポリオールエステル		$\text{H}_{17}\text{C}_8\text{OOCH}_2-\text{C}(\text{CH}_2\text{OCOC}_8\text{H}_{17})_2-\text{CH}_2\text{OCOC}_8\text{H}_{17}$	○酸化安定性 ○低引火点 ○冷媒との相溶性 ○生分解性 ×加水分解安定性	ジェットエンジン油 エンジン油 冷凍機油 難燃性作動油 生分解性作動油
	天然油脂		$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{OCOR}_1 \\ \\ \text{C} \\ \\ \text{CH}_2\text{OCOR}_2 \end{array}$	○生分解性 ×加水分解安定性	生分解性作動油 生分解性グリース
リン化合物	リン酸エステル		$\begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{R}_1\text{O}-\text{P}-\text{OR}_3 \\ \\ \text{OR}_2 \end{array}$	○難燃性 ○耐摩耗性あり ×加水分解安定性 ×腐食性 ×廃油処理	難燃性作動油
ケイ素化合物	シリコーン		$\left(\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{Si}-\text{O} \\ \\ \text{CH}_3 \end{array} \right)_n$	○高 VI ○低温流動性 ○熱・酸化安定性 ×しゅう動特性 ×溶解性	ビスカスカップリング油 ダンパ油 ブレーキ液
ハロゲン化合物	フッ素化ポリエーテル		$\left(\begin{array}{c} \text{CF}_3 \\ \\ \text{CFCF}_2\text{O} \end{array} \right)_n$	○熱・酸化安定性 ○低蒸気圧 ○不燃性 ×溶解性 ×廃油処理	コンピュータハードディスク用 宇宙機器用 半導体製造用真空ポンプ油

添加剤

ベースオイル(基油)に添加され、トライボロジータ的な性能を向上させる薬品・物質

添加剤のタイプ	油性剤		耐摩耗剤		極圧剤	
	脂肪酸 (オレイン酸など), 脂肪族アルコール (オレイルアルコールなど), エステル, 油脂など	リン酸エステル, 金属ジチオホスフェート塩など	有機硫黄化合物, 有機ハロゲン化合物, 有機モリブデン化合物など			
潤滑条件	効果なし	効果あり	効果あり (腐食注意)			
高温	効果あり	効果あり	効果あり			
荷重	(低～中荷重, 低温)	(低～中荷重)	(中～高荷重, 摩耗注意)			
空気中	効果あり (酸化膜必要)	効果あり	効果あり			
衝撃	効果なし	効果なし	効果あり			
減圧	効果なし	効果あり	やや効果あり (摩耗注意)			
特徴	摩擦の軽減	摩耗の軽減 焼付き防止	焼付き防止 耐荷重能の向上			

種類	使用目的と機能	代表的な化合物
清浄分散剤		
清浄剤	エンジンなどの高温運転で生成する有害な堆積物を金属表面から取り除き、堆積前駆物質を化学的に中和し、エンジン内部を清浄にする。	有機金属化合物 ・中性、塩基性金属 (Ba, Ca, Mg) スルホネート ・塩基性金属 (Ba, Ca, Mg) フェネート ・塩基性金属 (Ca, Mg) サリシレート
分散剤	低温時でのスラッジ、カーボンを油中に分散させる。	コハク酸イミド コハク酸エステル ベンジルアミン (マンニッヒ化合物)
粘度指数向上剤	温度変化に伴う潤滑油の粘度変化を低減する。エンジン油では、省燃費性の向上、オイル消費の低減、低温始動性の向上が得られる。	ポリメタクリレート オレフィンコポリマー スチレンオレフィンコポリマー ポリイソブチレン
流動点降下剤	低温における潤滑油中のろう分の結晶化を防止し、流動点を低下させる。	ポリメタクリレート アルキル化芳香族化合物 フマレート・錯ビ化合物 エチレン・錯ビ化合物
極圧剤	極圧潤滑状態における焼付きや、スカuffingを防止する。	有機硫黄、リン化合物 有機ハロゲン化合物
油性向上剤 (油性剤)	低荷重下における摩擦面に油膜を形成し、摩擦および摩耗を減少させる。	長鎖脂肪酸、脂肪酸エステル、高級アルコール、アルキルアミン
酸化防止剤	遊離基、過酸化物と反応して安定な物質に変えることにより、油の酸化を防止し、油の酸化に起因するワニス、スラッジの生成を抑制する。	・ジチオリン酸亜鉛、有機硫黄化合物 ・ヒンダードフェノール、芳香族アミン ・N,N'-ジサリシリデン-1-2-ジアミノプロパン
防錆剤	金属表面に保護膜を形成する。あるいは酸類を中和してさびの発生を防止する。	カルボン酸、スルホネート、リン酸塩、アルコール、エステル
腐食防止剤	潤滑油の劣化により生じた腐食性酸化生成物を中和する。また、金属表面に腐食防止被膜を形成する。	含窒素化合物 (ベンゾトリアゾールおよびその誘導体、2,5-ジアルキルメルカプト-1,3,4-チアジアゾール)、ジチオリン酸亜鉛
消泡剤	潤滑油の泡立ちを抑制し、生成した泡を破壊する。	ポリメチルシロキサン、シリケート 有機フッ素化合物、金属セッケン、脂肪酸エステル、リン酸エステル、高級アルコール、ポリアルキレングリコール

その他、着色剤・シール膨潤剤などがある。

添加剤の種類と機能

摩耗粉の凝集防止

粘度指数向上剤はポリマー

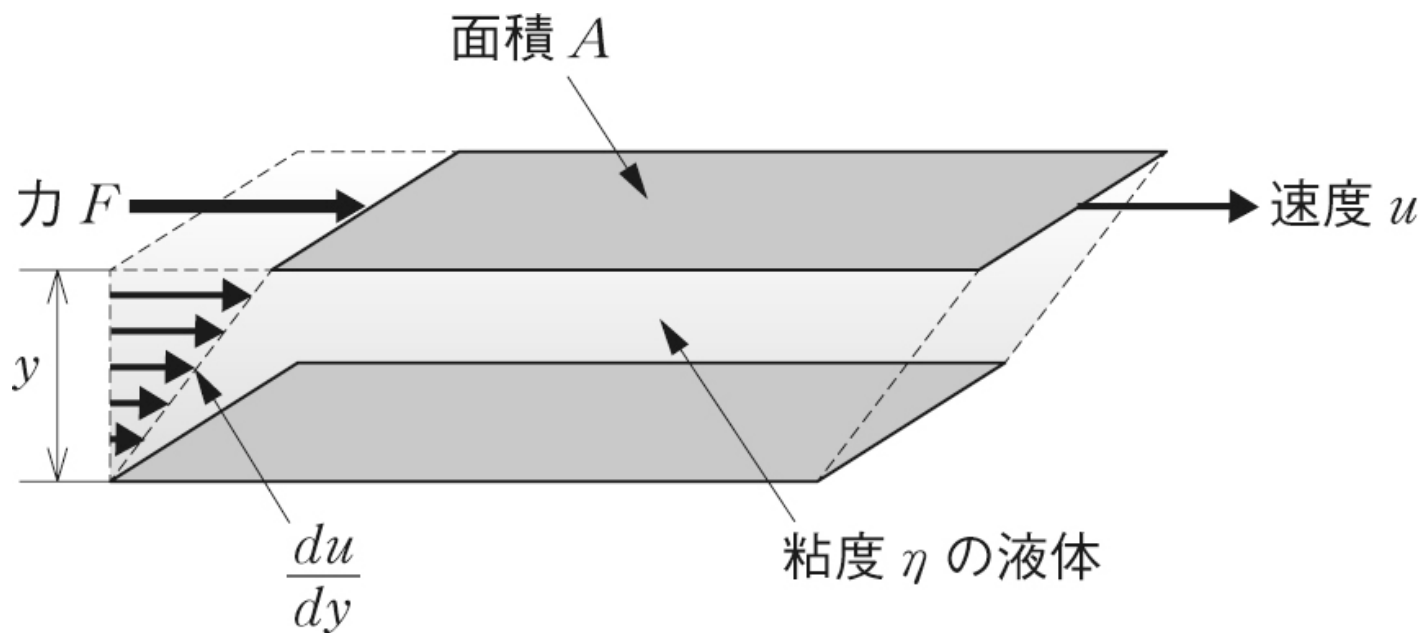
焼き付き防止

摩擦の低減

酸化劣化は潤滑油の宿命

潤滑油の性状

粘度(粘性係数): 正式な定義は別にして、
流体が流動しやすいかの尺度



せん断抵抗は

$$t = h \frac{du}{dy}$$

代表的な流体の粘度 (cP)

物質名	0 °C	20 °C	50 °C	100 °C	200 °C
水	1.79	1.31	1.01	0.65	0.36
メチルアルコール	0.86	0.72	0.62	—	—
ベンゼン	0.91	0.76	0.65	0.49	0.32
トルエン	0.77	0.67	0.59	0.47	0.32
テレピン油	2.10	1.76	1.56	1.10	0.62
灯油	3.52	3.00	2.42	1.66	0.82
水銀	1.69	1.62	1.55	1.45	1.30

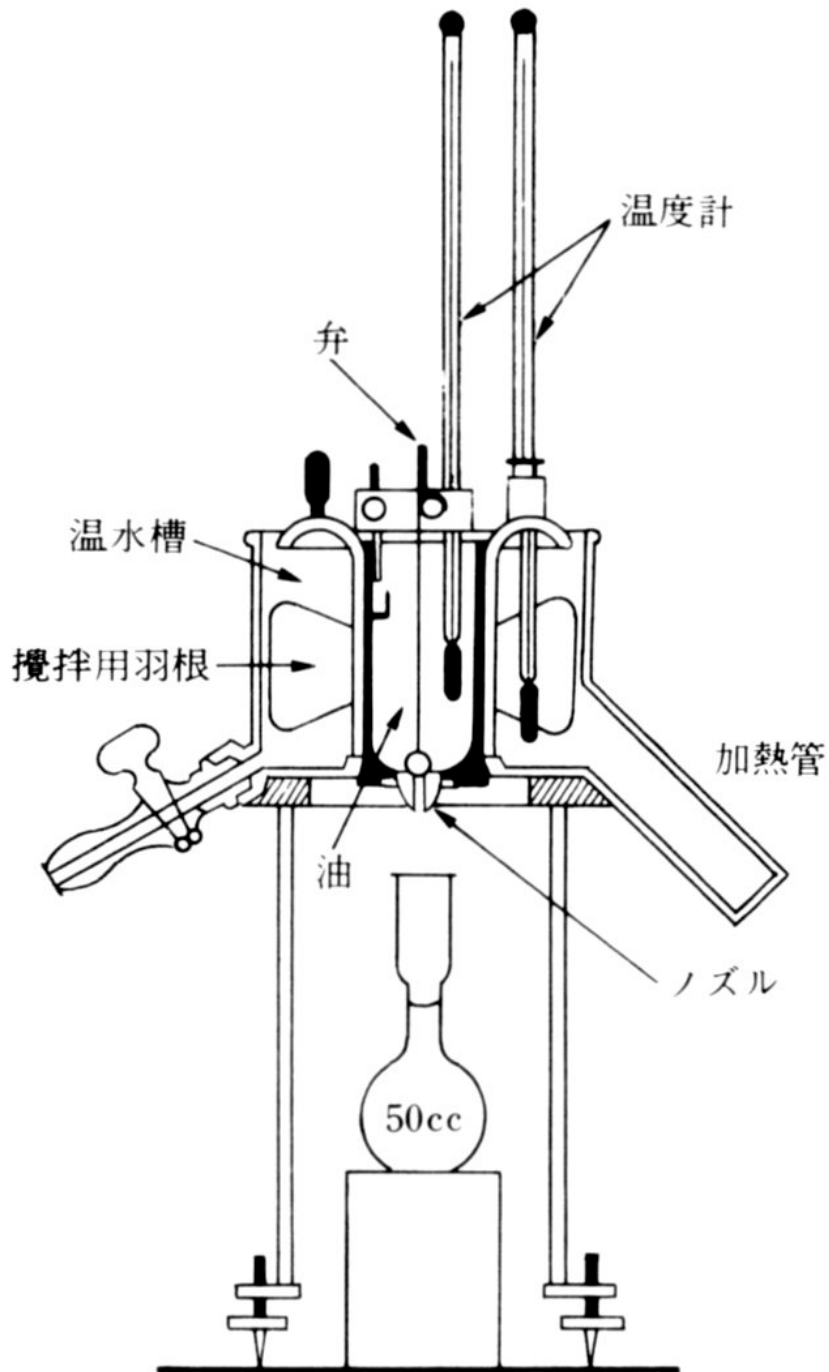
絶対粘度 η を流体
の密度 ρ で割った
値 $\nu \rightarrow$ 動粘度

$$\nu = \eta / \rho$$

慣例的に
cSt、St
を使うことが多い

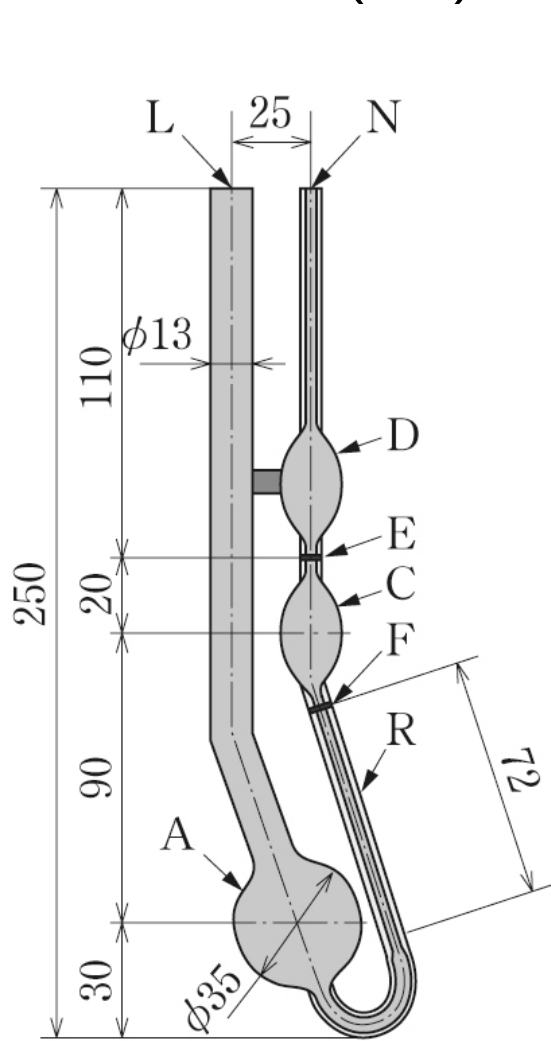
粘度測定法(1)

レッドウッドNo.1粘度計

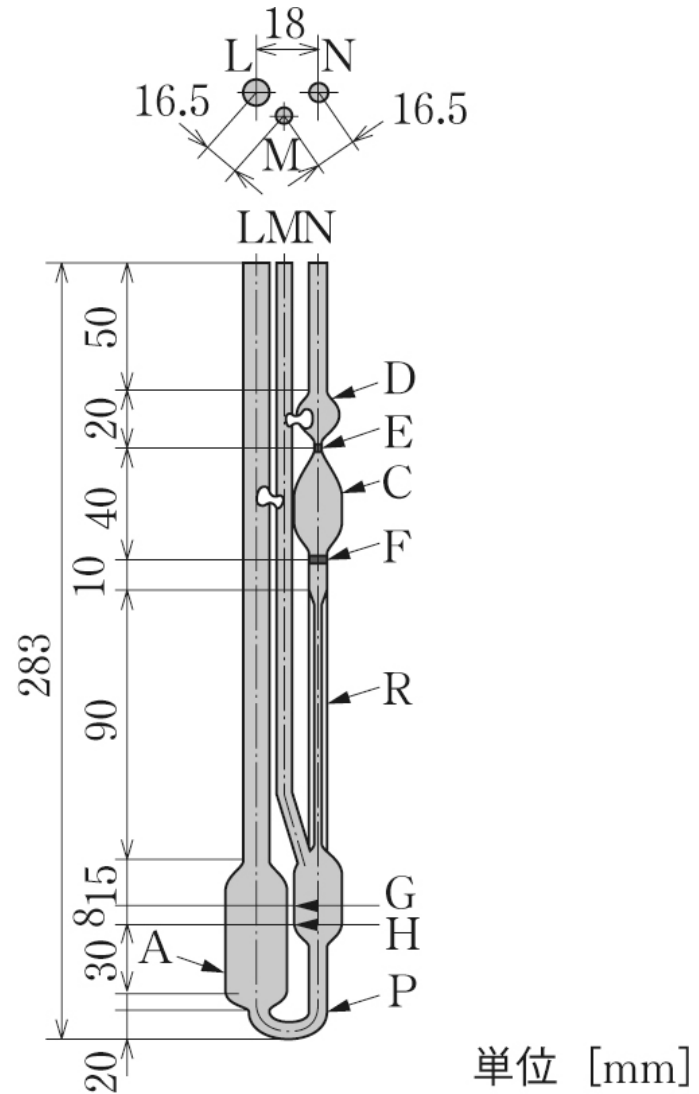


基本的に、
所定の温度に保たれた
状態から、流体を放出
させ、フラスコに**所定量**
溜まるまでの時間を
測定する

粘度測定法(2)

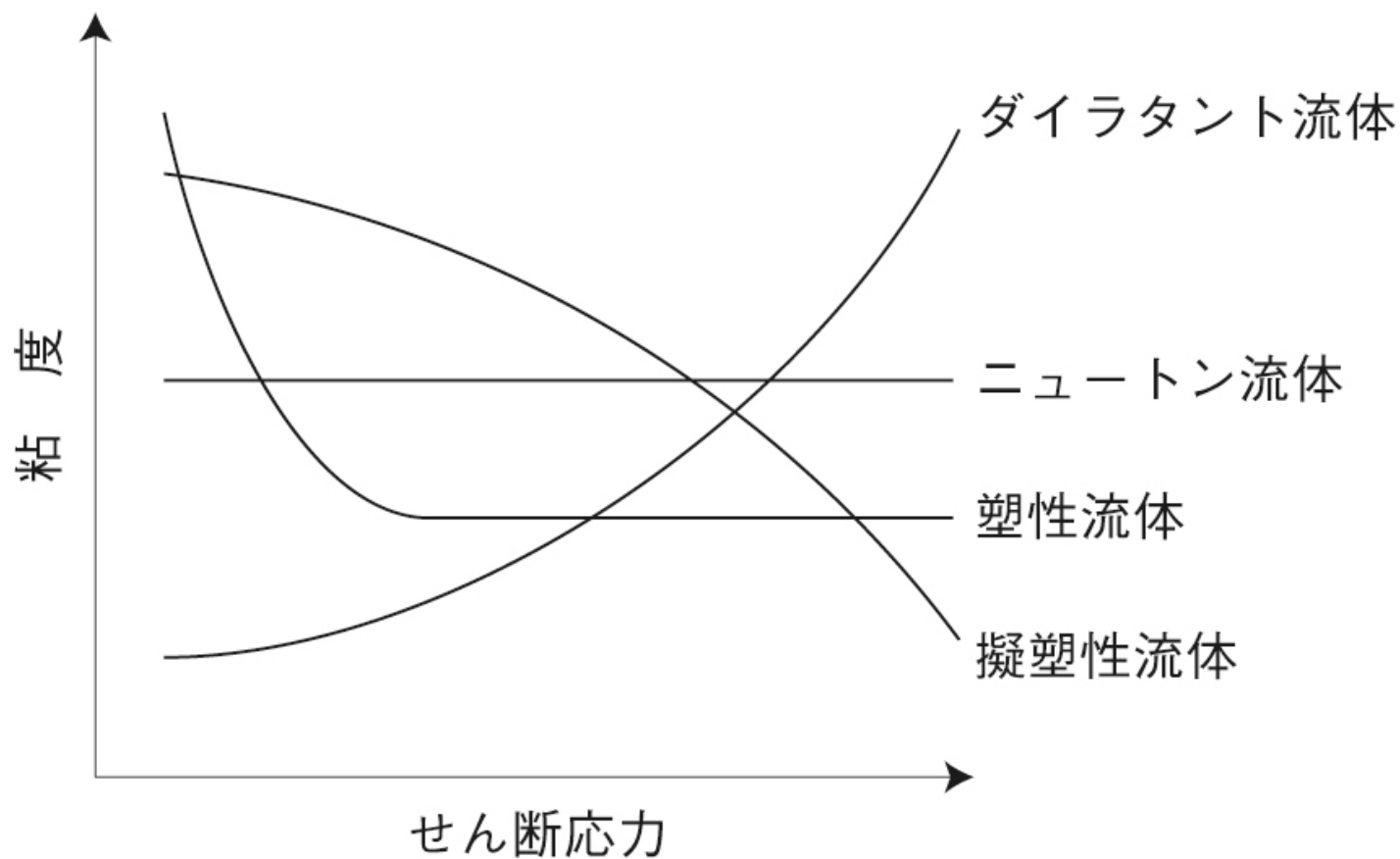


(a) キャノン-フェンスケ粘度計



(b) ウベローデ粘度計

粘度変化による流体の分類

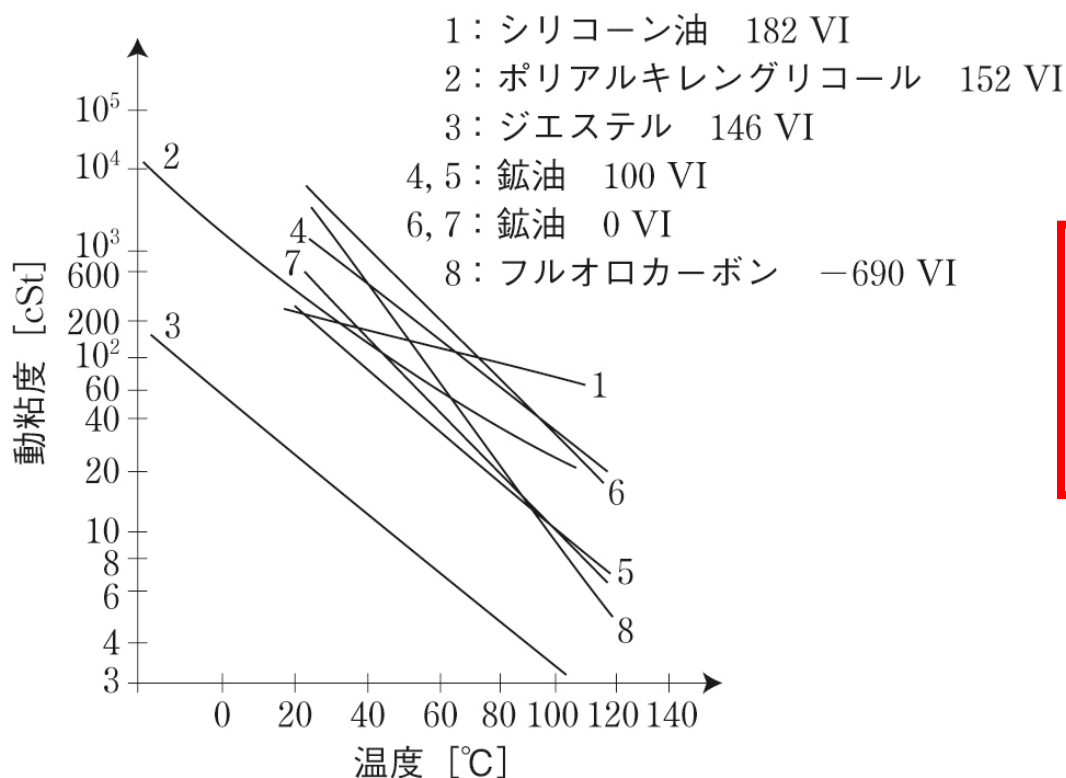


ニュートン流体：定温・定圧下において、粘度が一定

動粘度と温度の関係

Walther-ASTMと呼ばれる式

$$\log \log(n + 0.7) = A - B \log T$$



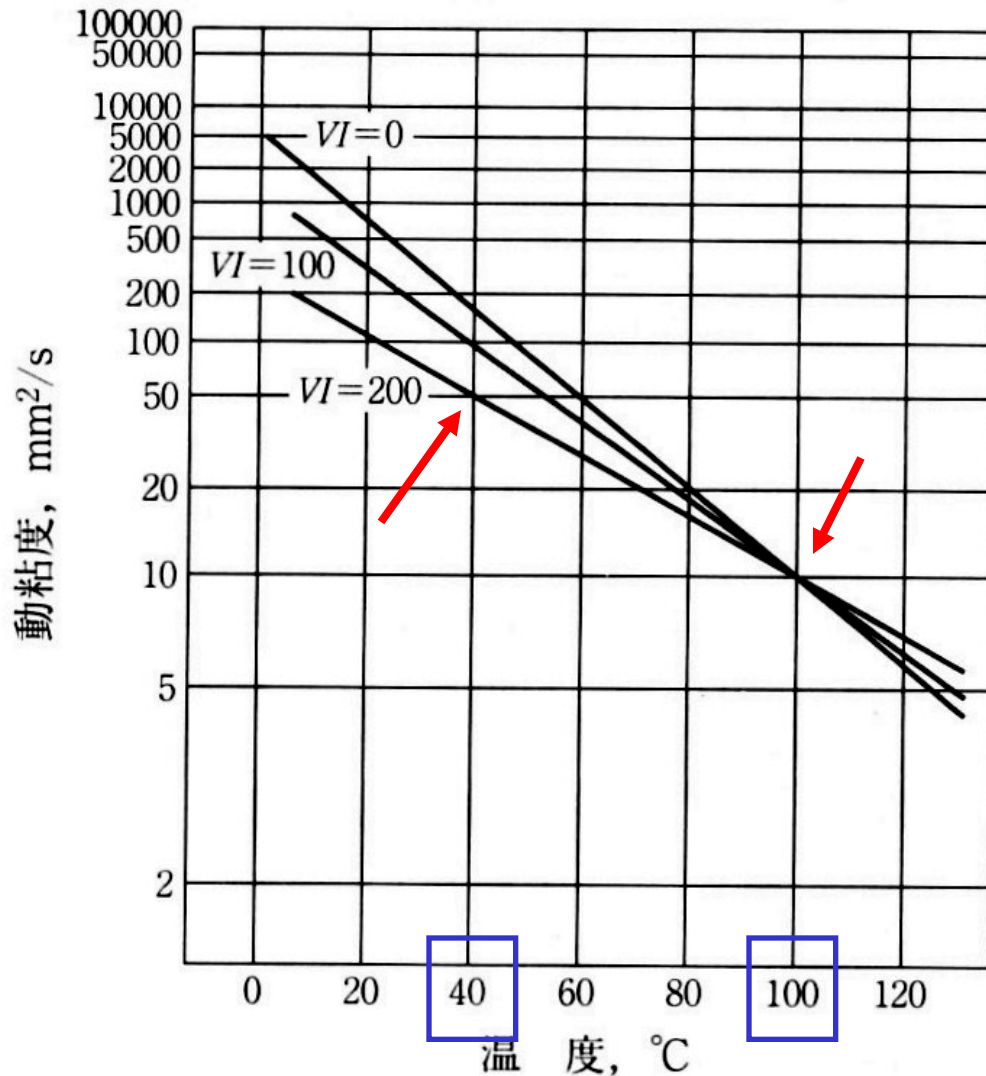
ν : 動粘度 (mm^2 / s)
 T : 温度 (K)

粘度指数 (VI)
温度による粘度の変化
しやすさの尺度



グラフにおける直線の
傾きが小さいほどよい

動粘度と温度の関係から任意の温度における動粘度を求めることができる

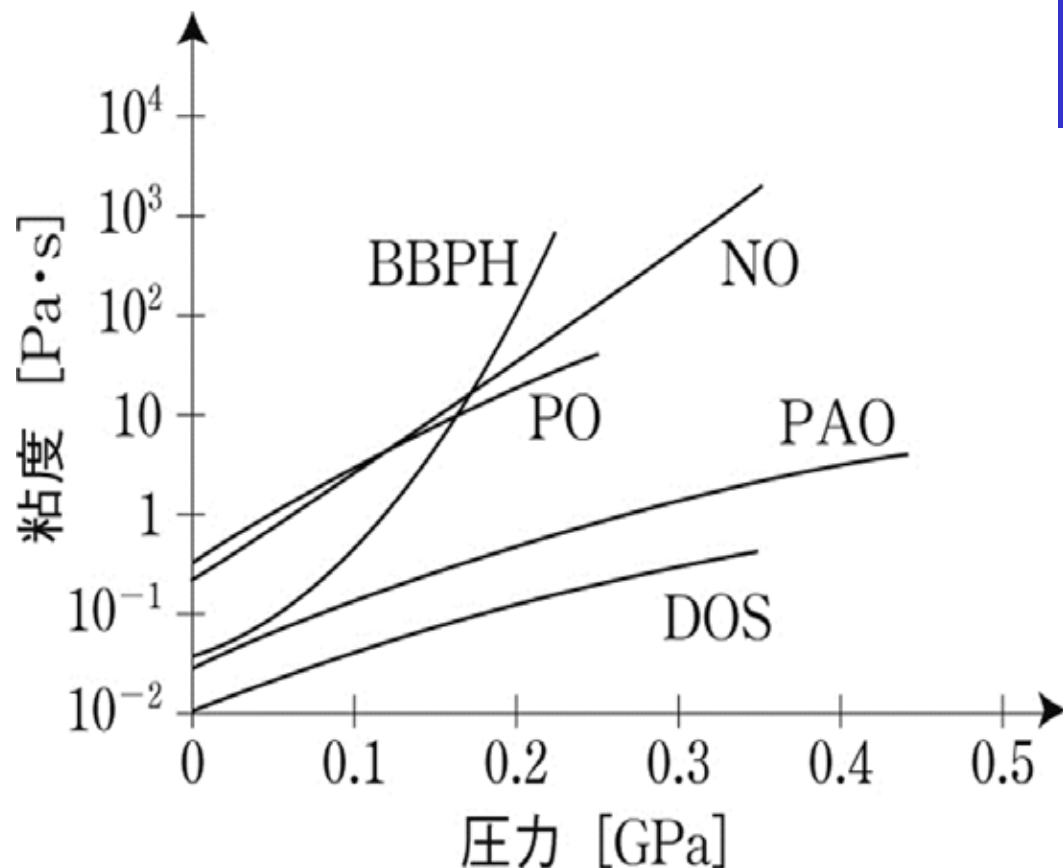


潤滑油の性能表示には、
2つの異なる温度におけ
る動粘度が表示されて
いる



片対数グラフに40、100
の動粘度をプロットし、
直線で結べば、各温度
における動粘度がわかる

粘度と圧力の関係



粘度は圧力とともに増加する



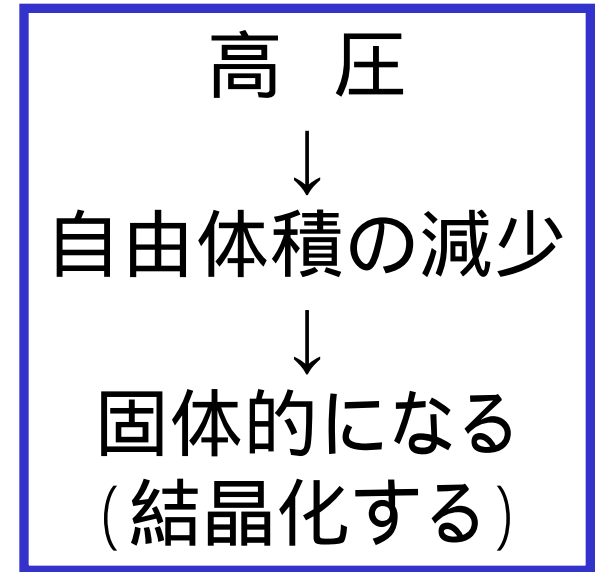
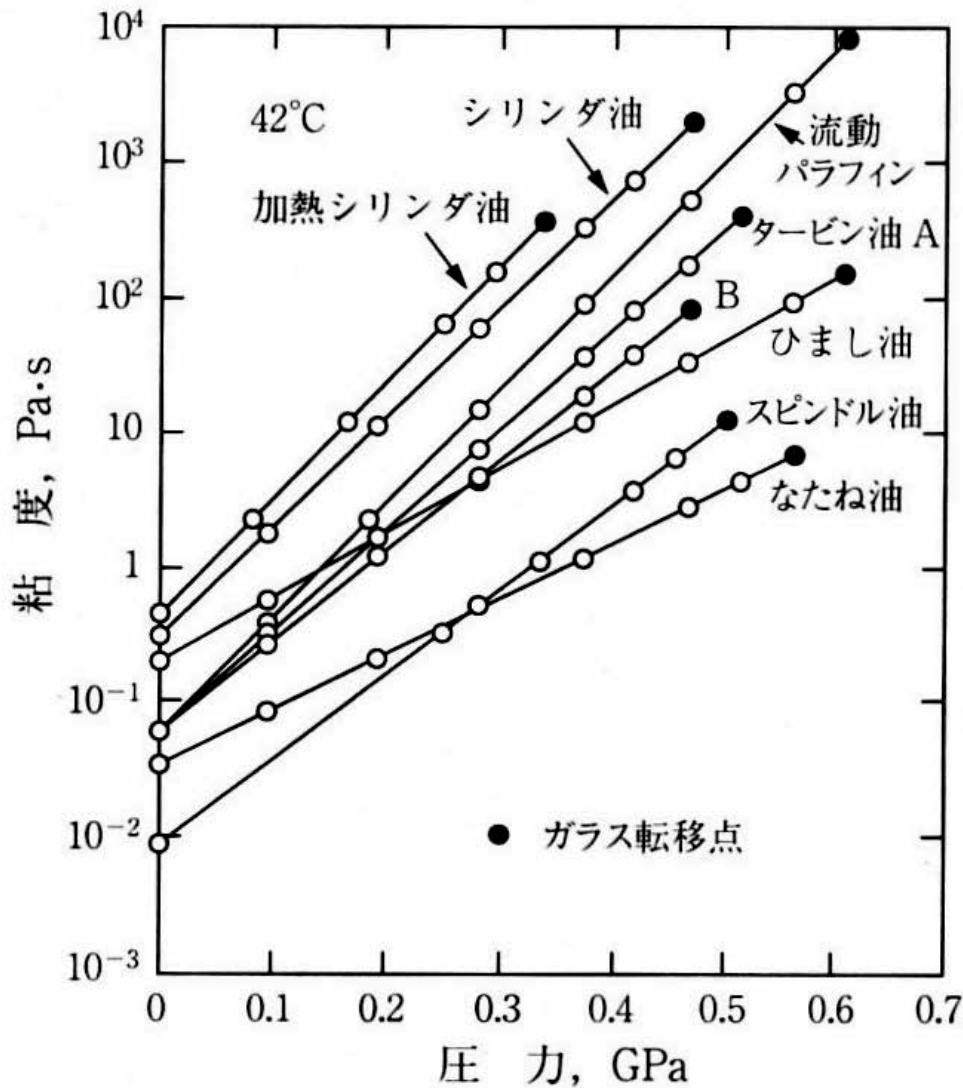
バラスの式

$$\eta_p = \eta_0 \cdot \exp(\alpha p)$$

α : 粘度の圧力係数

パラフィン系 < 混合系 < ナフテン系

圧力を上げすぎると固体になる？

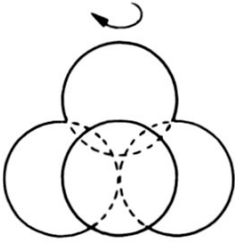
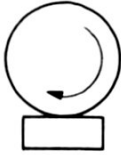
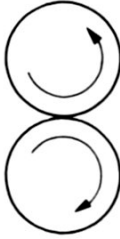

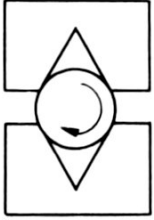


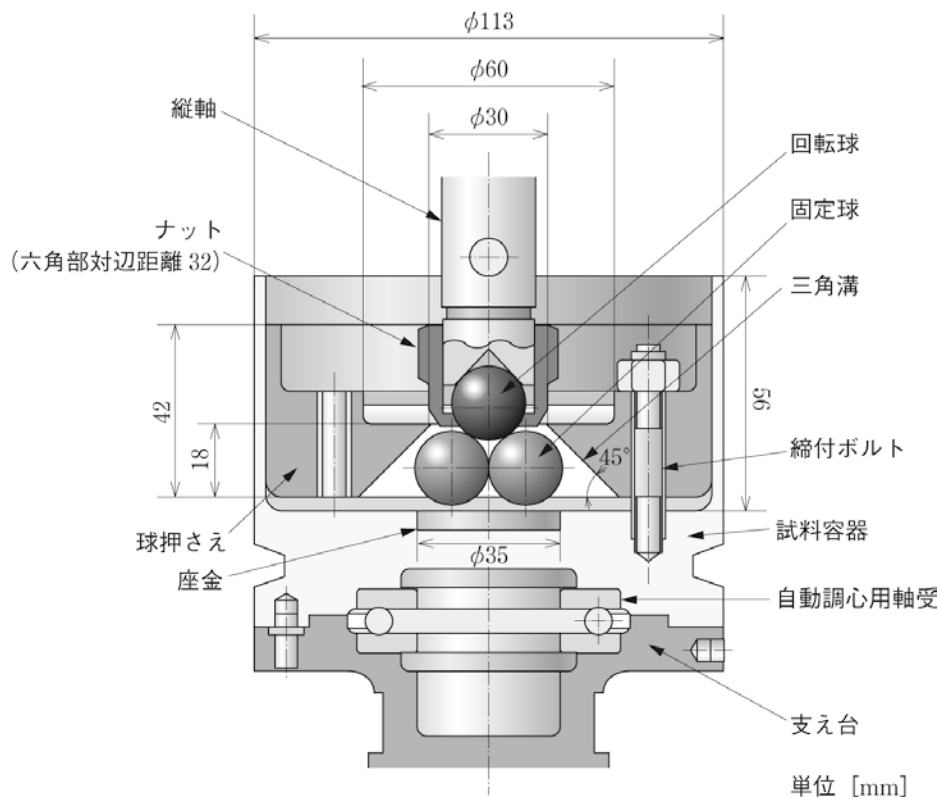
固体となるが、摩擦面の直接接触を防ぐため、摩耗防止や高せん断抵抗となる



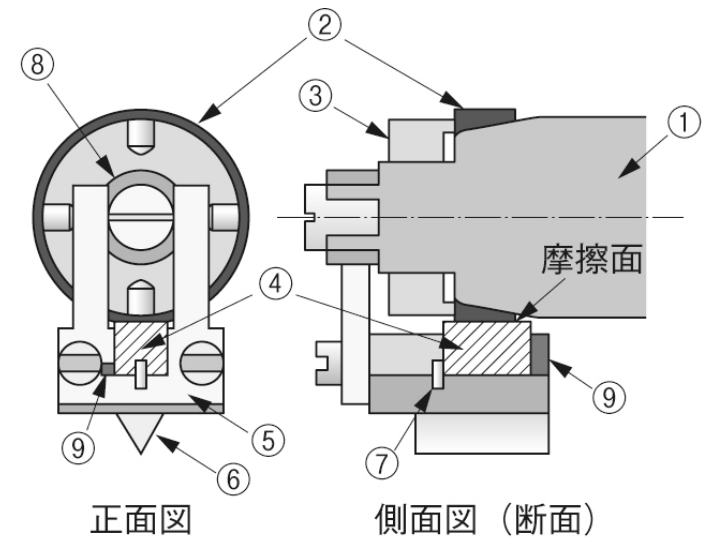
トラクションオイル

耐荷重試験方法 (摩擦試験法)

試験機名称	四球試験機			チムケン試験機	SAE 試験機	アルメン試験機	ファレックス試験機
	曾田式	JIS式	シェル式				
試験片の形状							
接触様式	3/4" 鋼球点接触		1/2" 鋼球点接触	鋼環-鋼片線接触	鋼環線接触	鋼軸-鋼片面接触	鋼軸-鋼片線接触
試験片の材質	Cr 鋼 (JIS, SUJ-2)		Cr 鋼 (S, K, F)	NiMo 鋼 (SAE 4620)	NiMo 鋼 (SAE 4620)	SAE 2315	SAE 2315 と SAE 2320
回転速度 (rpm)	200	750	1500	800	1000	600	300
すべり速度 (cm/s)	11.8	43.2	59	200	232	20	9.8
負荷方法	油 圧 0.5kg/cm ² /min	油 圧 各荷重で 1 分	てこ荷重 各荷重で 10~60秒	てこ荷重 各荷重で 10 分	てこ荷重 各荷重で 1 分	てこ荷重と油圧 0.9kg/10 秒	油 圧 各荷重で 3~10分
接触圧力 (kg/mm ²) (平均ヘルツ圧)	150~600	150~600	150~550	5~59.5	~200	10.5	3.1~140
給油法	浸 漬	浸 漬	浸 漬	流 下	スプレー	浸 漬	浸 漬
主な試験項目	耐荷重性能 摩 耗 摩擦係数	耐荷重性能 摩 耗 摩擦係数	耐荷重性能 摩 耗 摩擦係数	耐荷重性能 摩 耗 摩擦係数	耐荷重性能 摩 耗	耐荷重性能 摩 耗	耐荷重性能 摩 耗



四球試験機の詳細



極圧試験機の詳細

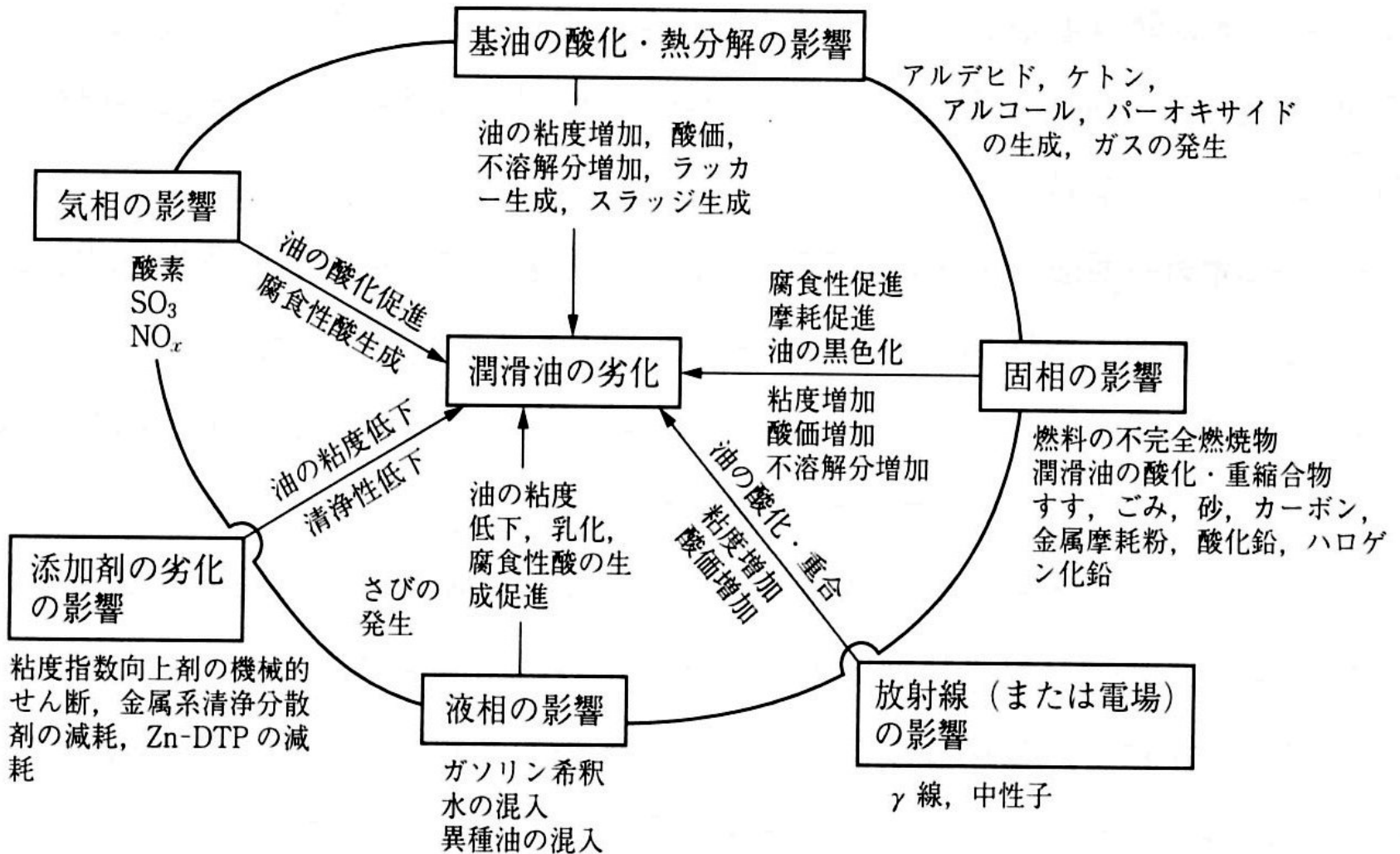
潤滑油の化学的性質

- (1)酸化安定性：酸価の変化
- (2)あわ立ち：泡が消える時間
- (3)抗乳化性：水との分離性
- (4)中和価：全酸価
全塩基価
- (5)銅板腐食：腐食性の判定基準
- (6)熱安定性：沈殿・析出物の量
- (7)引火点：蒸気に引火する最低温度
- (8)流動点：油が流動する最低温度
- (9)曇り点：ワックスの析出する温度

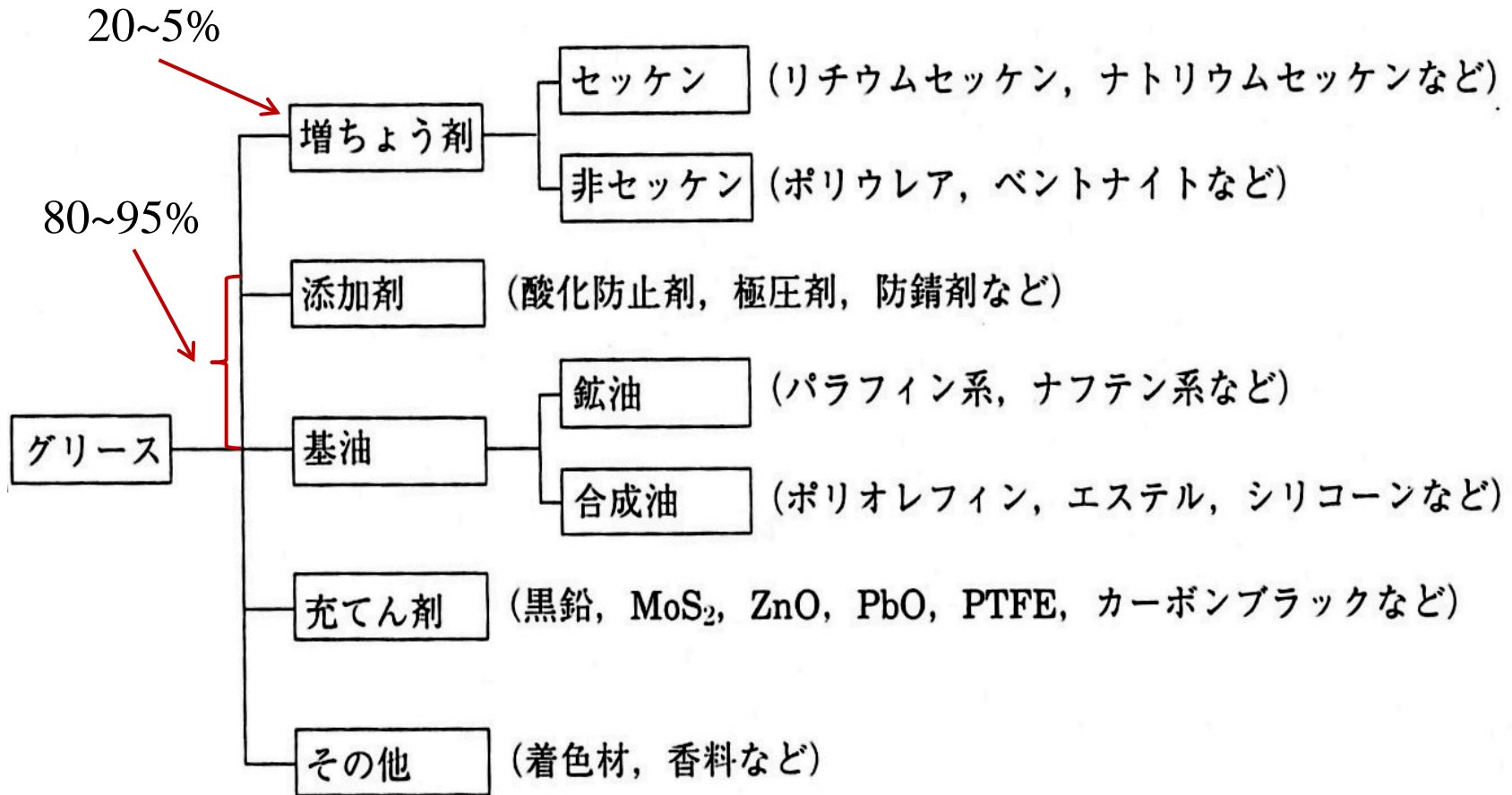
潤滑油劣化の影響因子



潤滑油の劣化は不可避

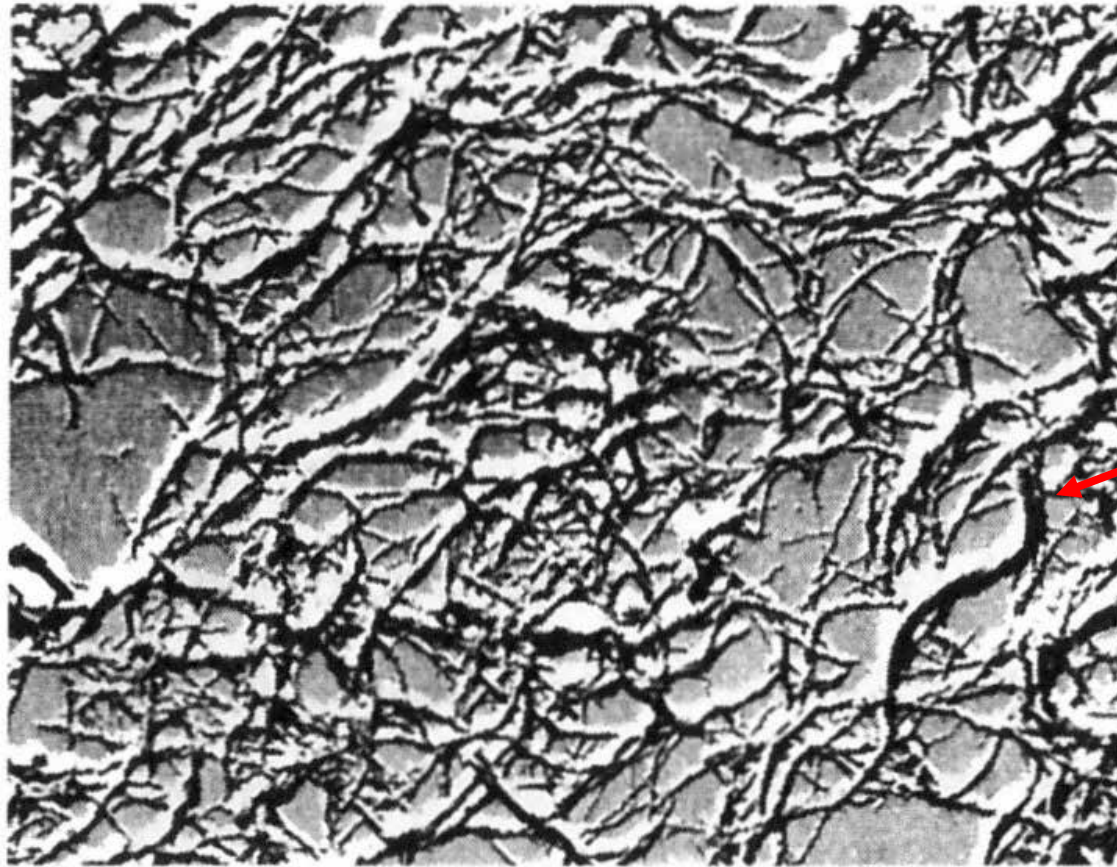


グリース



グリースの構成

グリースの組成



網目が
増ちょう剤成分

2.5 μm

図 9・8 グリースの石けん繊維構造
(12-ヒドロキシステアリン酸リチウム)

増ちょう剤		性質	滴点 [°C]	耐熱性	最高使用 可能温度 [°C]	耐水性	機械的 安定性	備考
石けん系	カルシウム石けん	牛脂系脂肪酸	80~100	×	70	○	△~○	構造安定剤として約1%の水分を含む。
		ひまし油系脂肪酸	80~100	△	100	○	○	
	カルシウム複合石けん		>260	○	120~150	○	×~△	経時または高温硬化の傾向がある。
	ナトリウム石けん		130~180	○	120~150	×~△	△~○	
	アルミニウム石けん		50~90	△	80	○	×~○	粘着性良好。
	アルミニウム複合石けん		>260	○	120~180	◎	◎	長時間高温にさらされると構造が破壊して軟化する。
	リチウム石けん	牛脂系脂肪酸	170~200	○	130~150	○	○	最も欠点が少ないバランスのとれた性能を有す。
		ひまし油系脂肪酸		○	130~150	○	◎	
リチウム複合石けん		>260	◎	130~180	△~○	◎	耐水性がやや劣る。	
非石けん系 (有機系)	ポリウレア		>260	◎	150~200	◎	○	高温で硬化する傾向がある。高温で増ちょう剤が重合するものもある。
	ナトリウムテレフタラメート		>260	◎	150~200	○	○	油分離が大きい。
	PTFE		なし	◎	150~250	◎	◎	極めて高価。
非石けん系 (無機系)	有機ベントナイト		なし	◎	150~200	△~○	○	水存在下で発生しやすい。
	シリカゲル		なし	◎	150~200	×~△	×~△	水存在下で発生しやすい。

各種増ちょう剤とグリースの性質

全使用量の
約70%

アルカリ土類水酸化物
で石けん化

全使用量の
約30%

◎：優れる ○：良い △：やや劣る ×：悪い

グリースの性状物性(1)

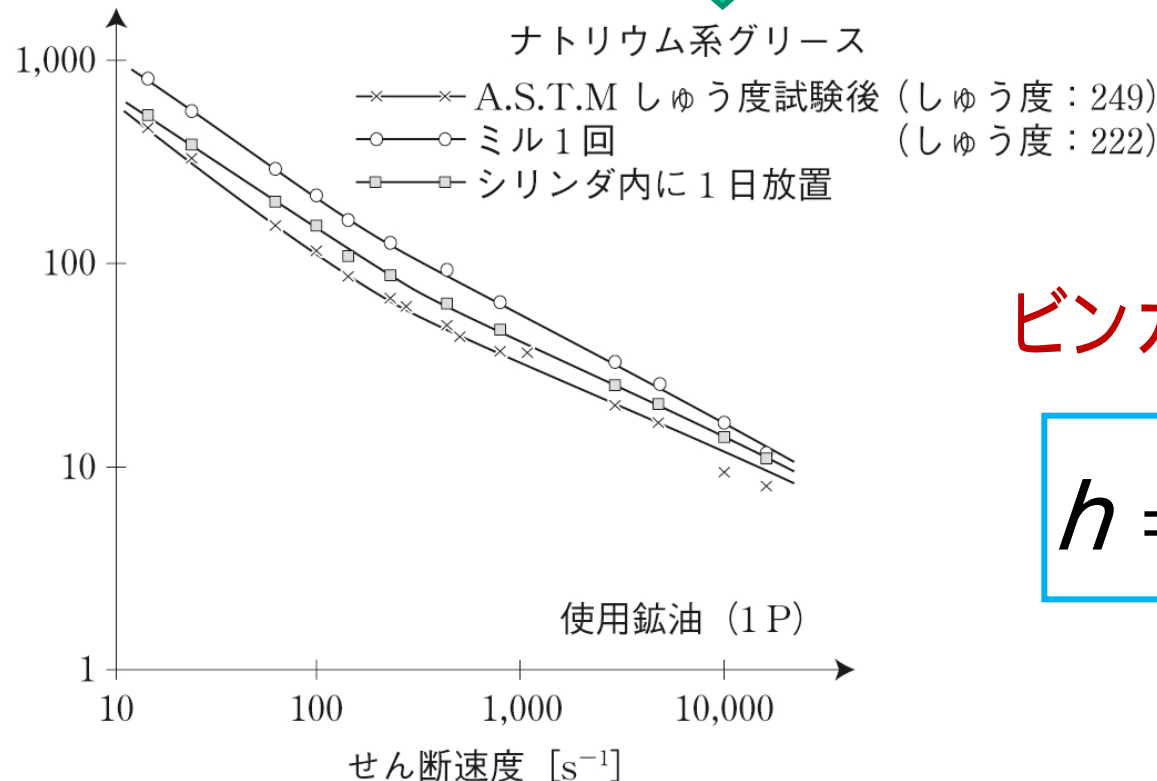
レオロジー特性

- ・チキソトロピー性
- ・非ニュートン流体



せん断されると粘度が低下するが、静止すれば粘度が回復する

見かけ粘度はせん断速度によって変化する



ビンガム塑性体

$$h = a + bg^{n-1}$$

グリースの性状物性(2)

ちょう度

グリースの硬さの尺度

滴点

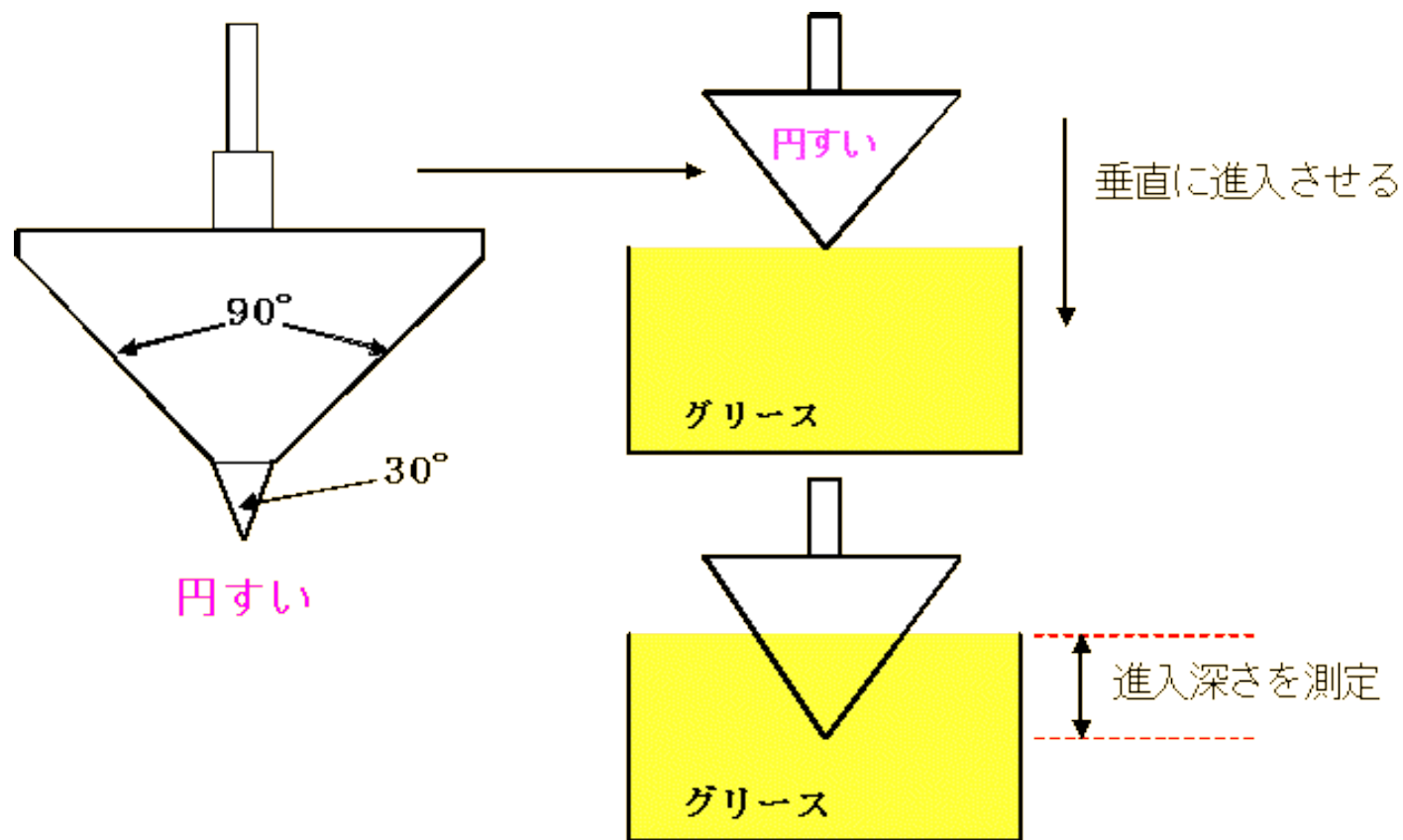
油が滴下はじめる
温度

離油度

油分離の尺度

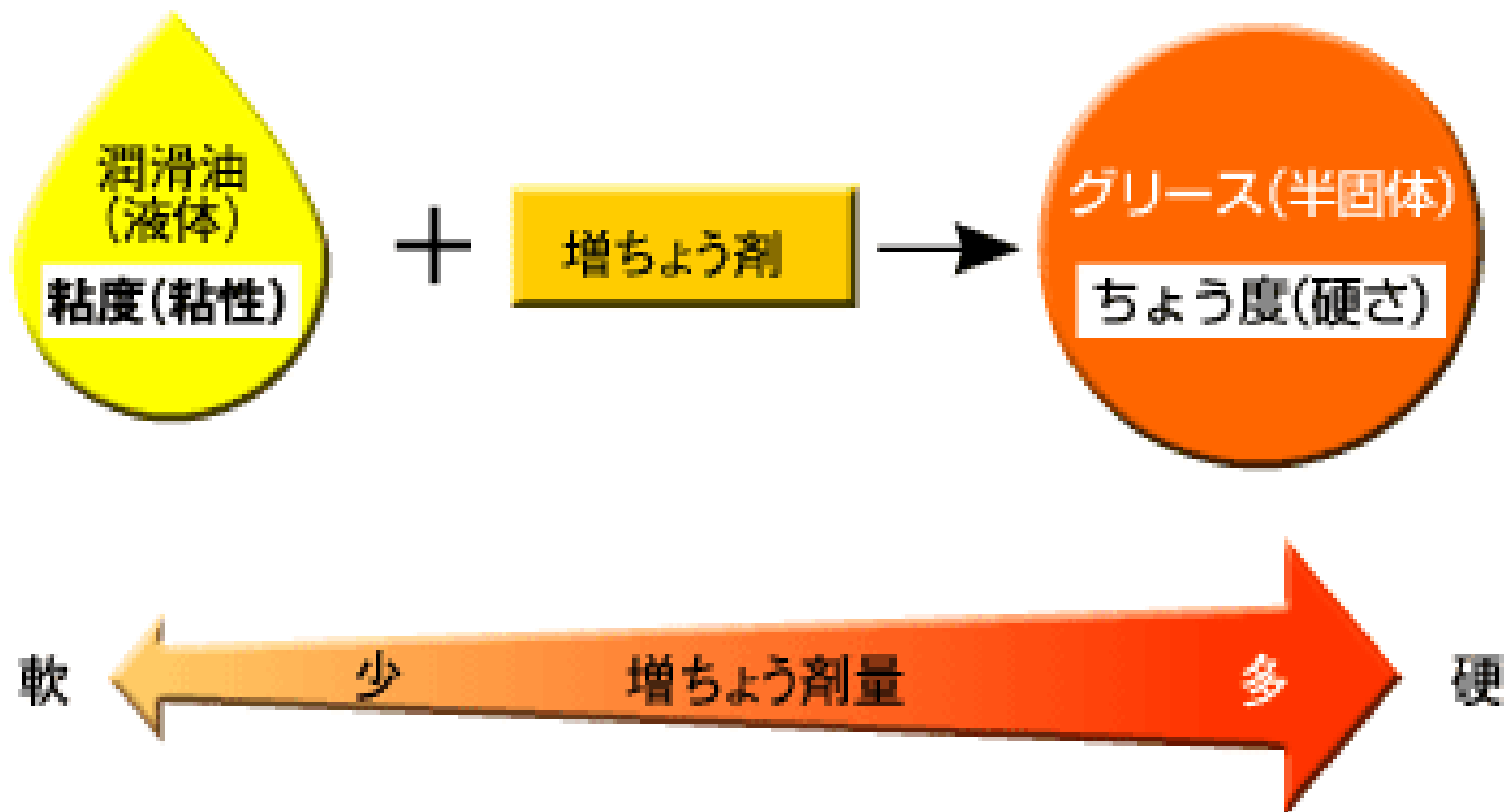
NLGI Number	JIS分類	ASTM (JIS) 混和ちょう度	硬さ
No.000	000号	445~475 (Mg円すい使用)	軟 ↑ ↓ 硬
00	00	400~430 (Mg円すい使用)	
0	0	355~385	
1	1	310~340	
2	2	265~295	
3	3	220~250	
4	4	175~205	
5	5	130~160	
6	6	85~115	

グリースちょう度測定法



進入深さを10倍した値

グリースの成分と硬さ(ちょう度)



しかし、ちょう度と基油粘度には関係はなく、

- ・硬いグリースで低粘度基油
- ・柔らかいグリースで高粘度基油

のグリースは存在する

グリースの劣化要因

(1) 高温による酸化劣化

基油の酸化劣化によってグリースが硬化し、潤滑不良を招く。

(2) せん断による網目構造の破壊

急激なせん断が加わると増ちょう剤の網目構造が壊れ、グリースが軟化する。

(3) 油分の分離

油分の分離によってグリースが硬化し、潤滑不良を招く。

(4) 摩耗粉の噛み込み

網目構造が摩耗粉を噛み込むと、それを基点として次の摩耗を招きやすくなる。

(5) 水分の混入による網目構造の破壊

水分の混入によって網目構造が壊れ、グリースが軟化する。

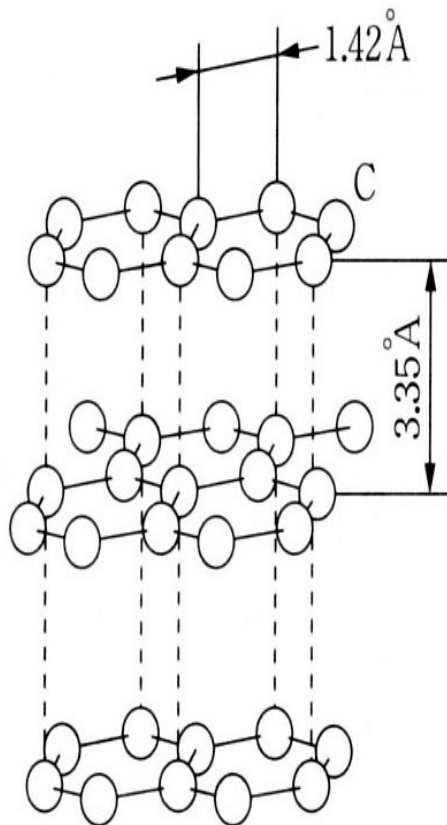
固体潤滑剤

用途

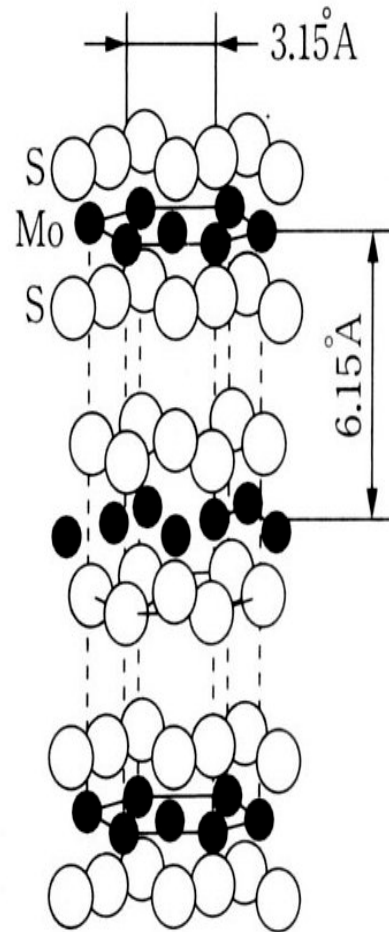
- ・ 高温・極低温
- ・ 高真空状態
- ・ X線環境下
- ・ 腐食環境中
- ・ 油汚染を嫌う環境

原理

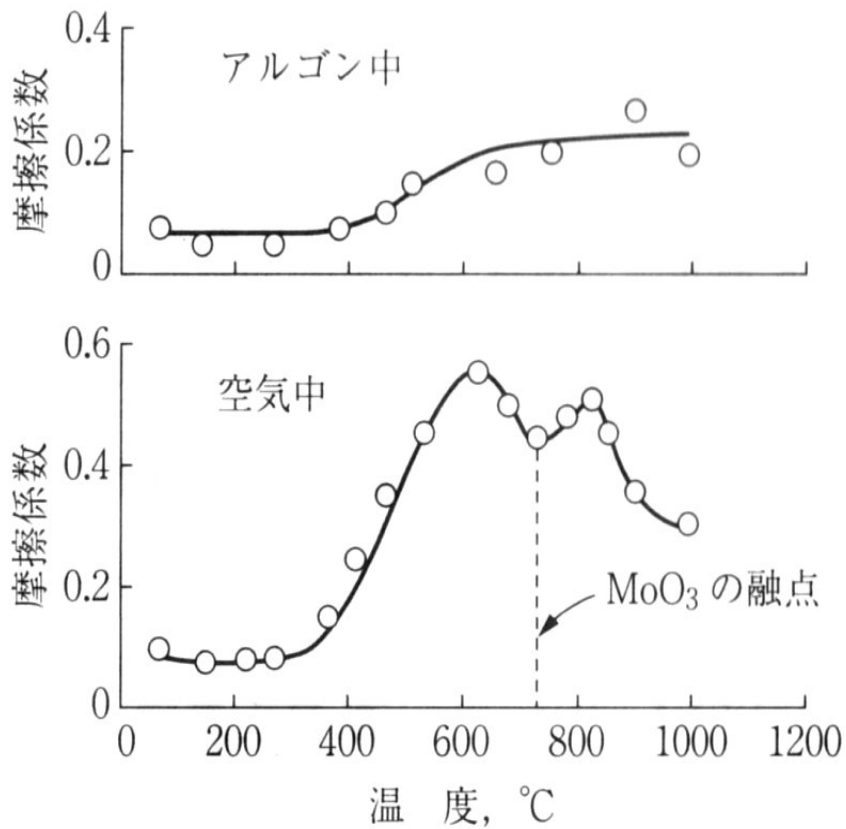
- ・ 層状結晶構造物質の層間すべり(左図)
- ・ 軟質金属の低せん断
- ・ 表面の低摩擦



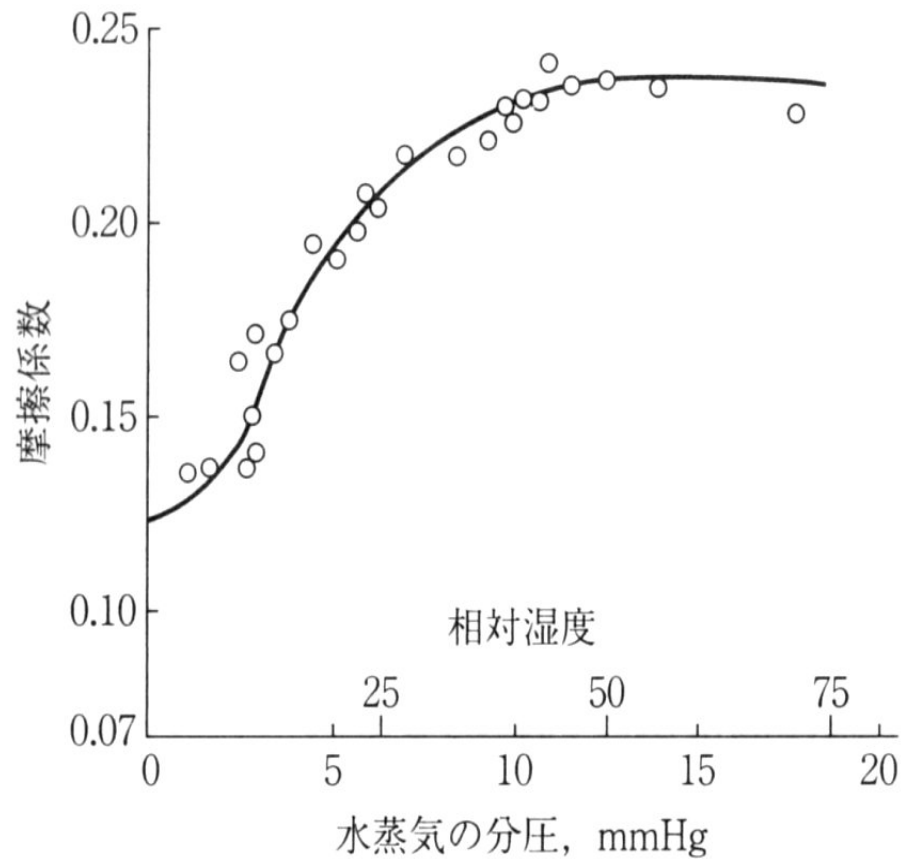
(a) 黒鉛



(b) 二硫化モリブデン



(a) 温度特性⁽¹⁴⁾



(b) 湿度の影響⁽¹⁵⁾

二硫化モリブデンの摩擦特性

固体潤滑剤の特性

種類	名称	融点または昇華点, °C	摩擦係数		使用温度範囲, °C*		使用形態		
			大気中	真空または不活性ガス	大気中	真空または不活性ガス	粉体	皮膜	複合体
層状固体潤滑剤	MoS ₂	>1800	0.05~0.25	0.02~0.10	-200~350	~800	○	○	○
	グラファイト	>3500	0.10~0.30	潤滑性悪い	~450	—	○	○	○
高分子潤滑剤	PTFE	327	0.02~0.15	0.02~0.15	-250~280	-250~200	○	○	○
	ポリイミド		0.02~0.10	0.02~0.10	50~350	50~300		○	○
軟金属潤滑剤	銀	960	潤滑性悪い	0.10~0.30	—	~450		○	○
	鉛	326	0.10~0.30	0.05~0.30	-250~200	-250~150		○	○
その他	CaF ₂		0.10~0.25	0.10~0.25	250~900	250~900		○	

* 単体として使用する場合、複合材の場合には温度範囲は拡大する。