

転がり軸受の基礎(4)

- 内容
- ・潤滑と潤滑寿命
 - ・潤滑法
 - ・密封装置(シール・シールド)

東京理科大学
野口 昭治

潤滑剤

潤滑剤の役割

- (1) 摩擦面間の摩擦・摩耗の低減
- (2) 焼付き、摩耗、転がり疲れ等の表面損傷防止
- (3) 摩擦面の冷却
- (4) 異物の混入防止
- (5) 腐食・錆の発生防止
- (6) 異物の除去

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

潤滑剤の分類

(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

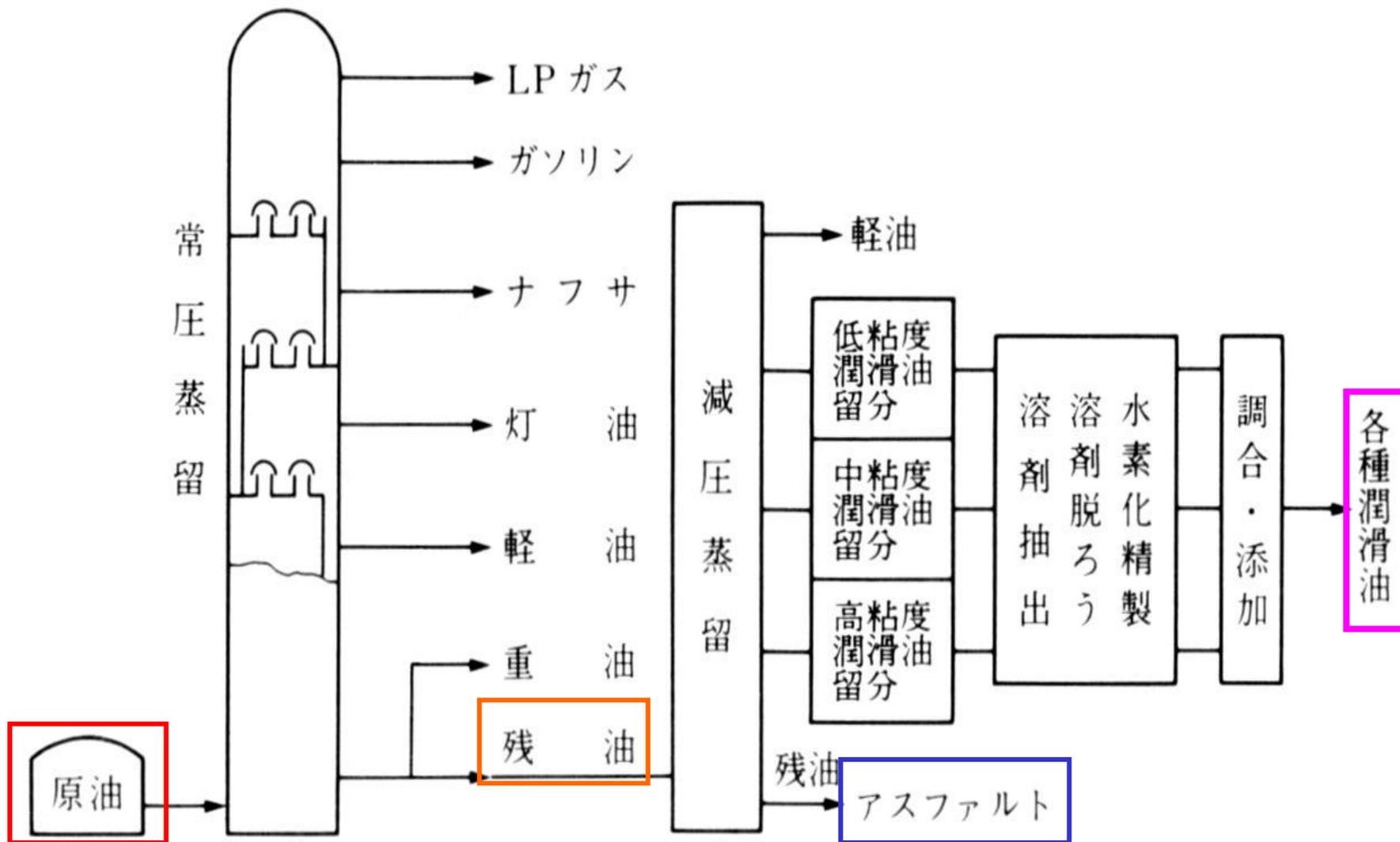
(3) 固体潤滑剤：固体

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

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

鉱油系潤滑油の製造工程



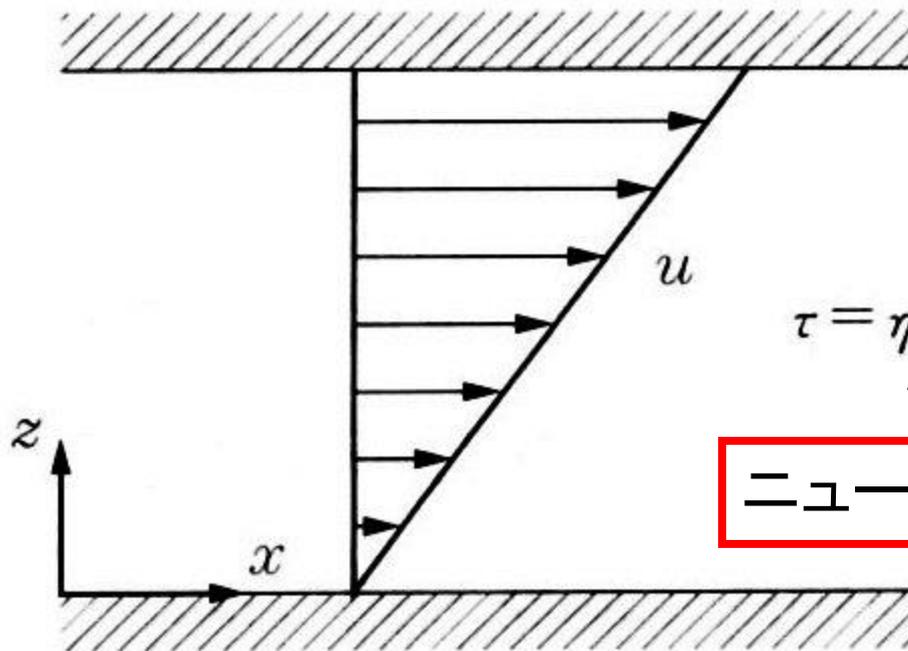
添加剤

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
種類	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			
高温	効果なし	効果あり	効果あり (腐食注意)
荷重	効果あり (低～中荷重, 低温)	効果あり (低～中荷重)	効果あり (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

潤滑油の流動特性

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



$$\tau = \eta \, du/dz$$



ニュートン流体

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

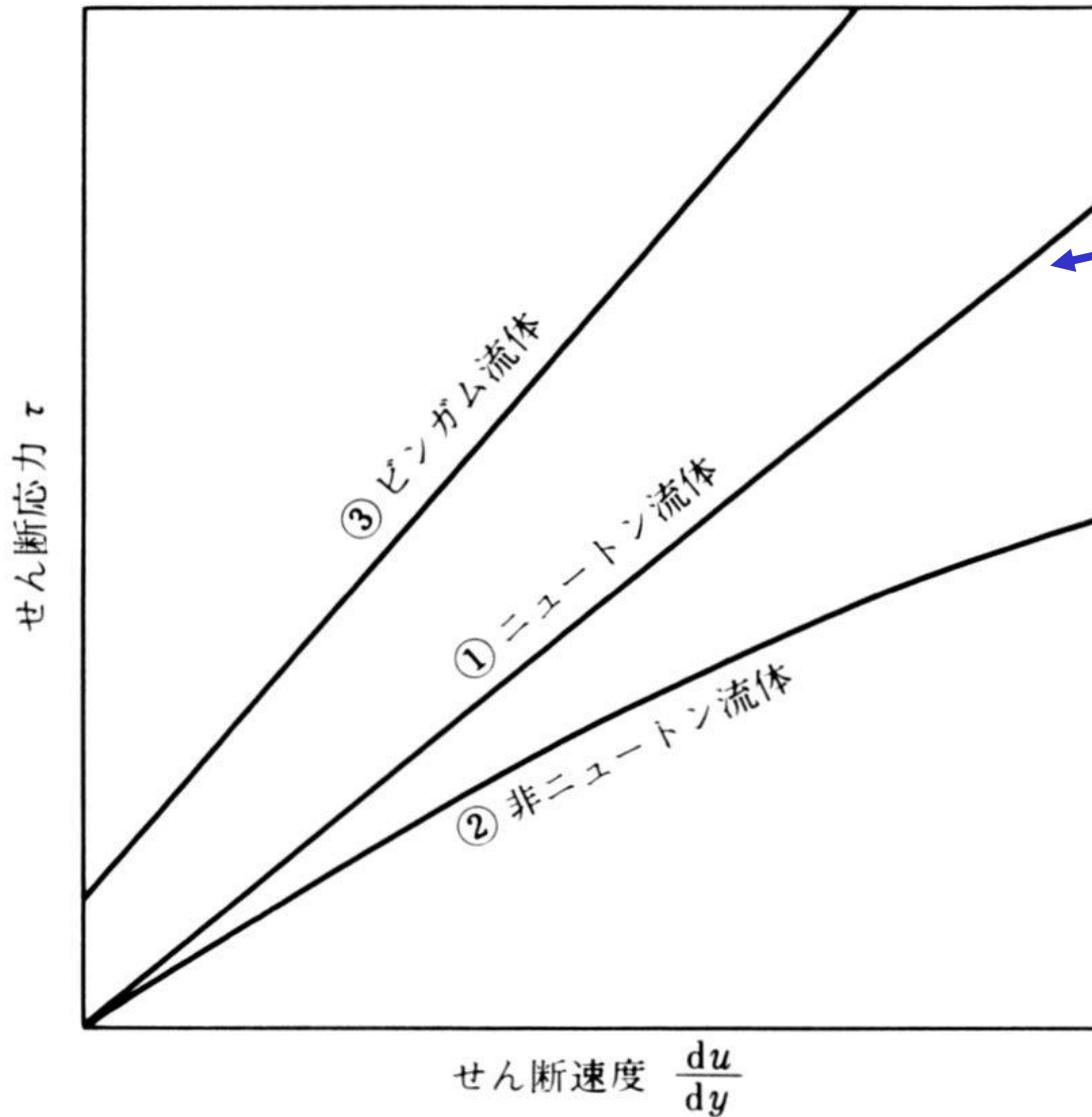
$$\nu = \eta / \rho$$

慣例的に単位は St、cSt を使う

代表的な流体の粘度

流 体	絶対粘度 η (mPa·s)
空 気 (20°C)	0.0181
水 素 (20°C)	0.0088
水 (20°C)	1.002
ガソリン (20°C)	0.31
軽 油 (20°C)	2.0
潤 滑 油 (40°C)	2~1 500

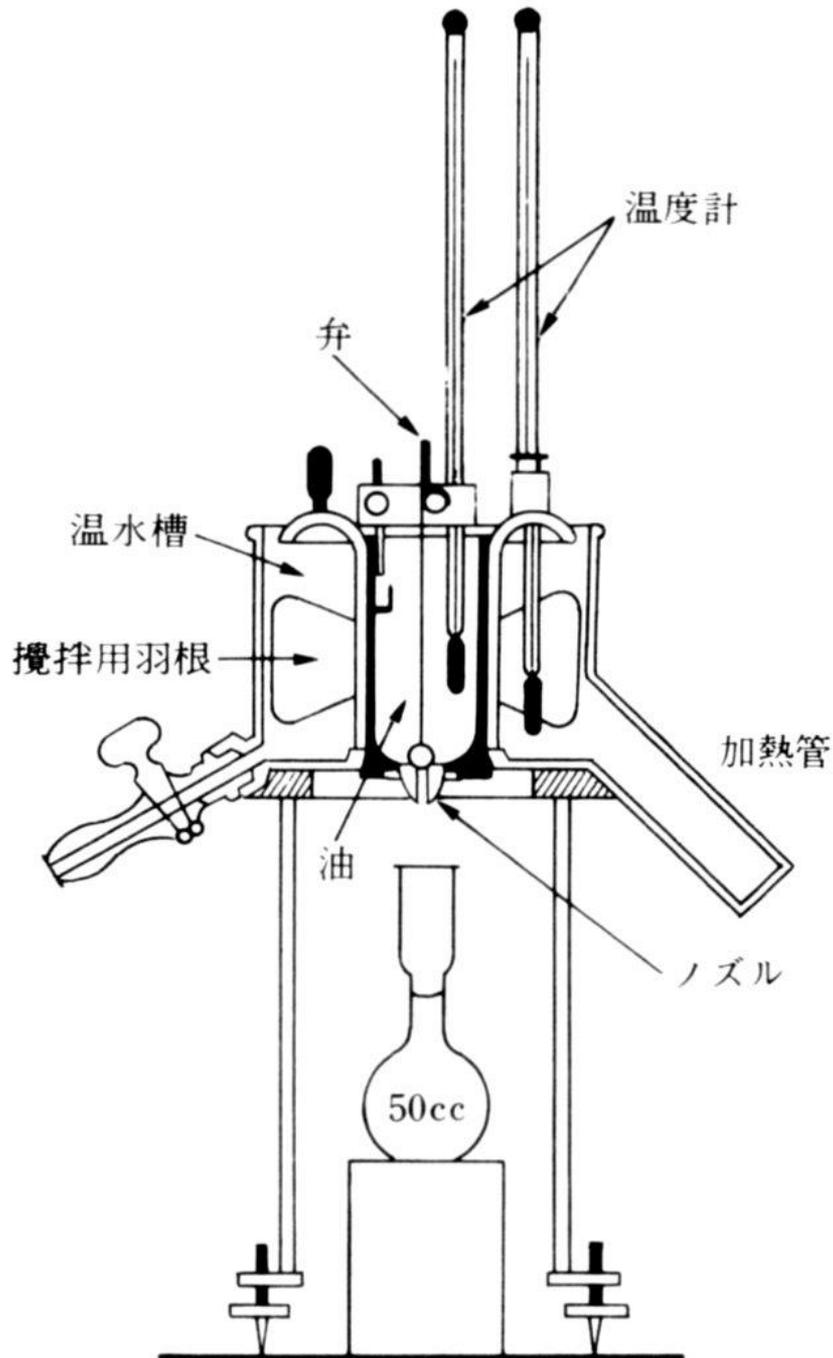
流動特性による分類



多くの潤滑油が示す挙動

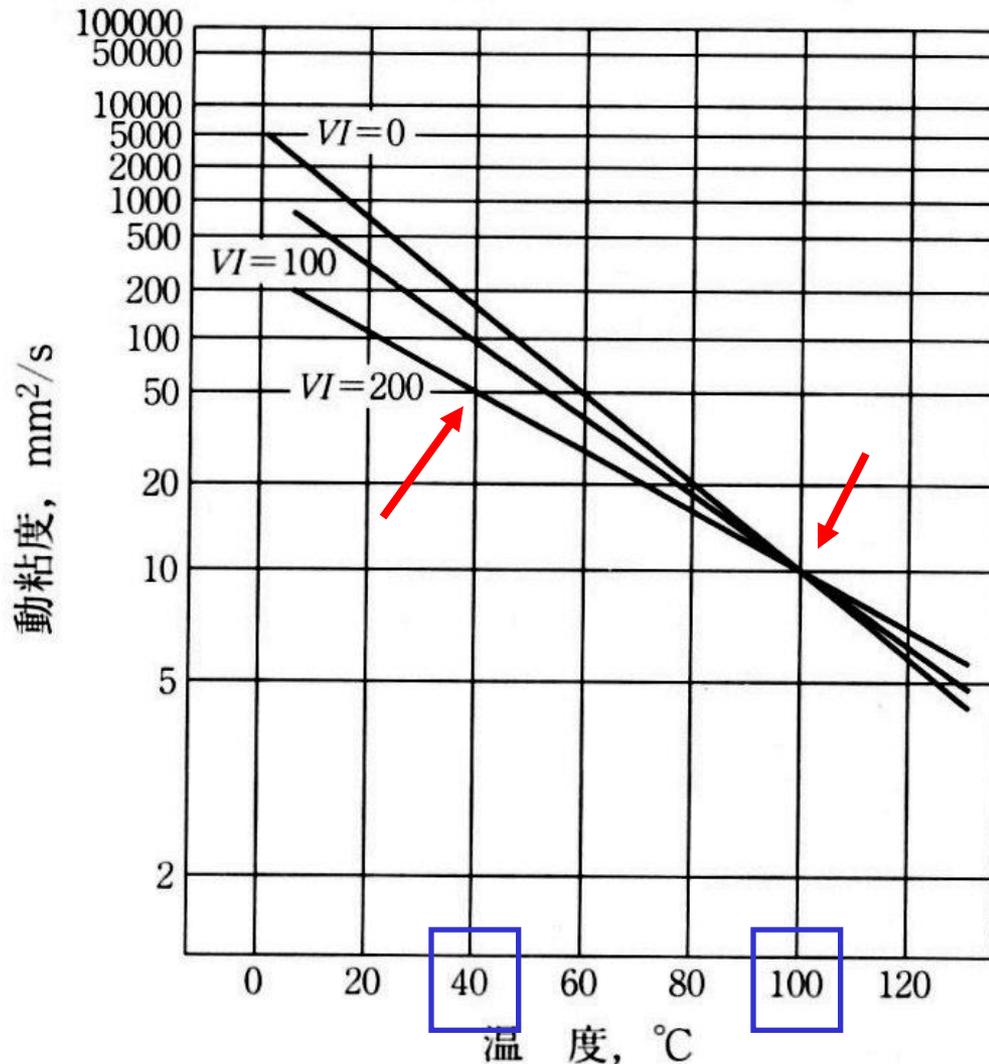
粘度測定法

レッドウッドNo.1粘度計



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

粘度と温度の関係



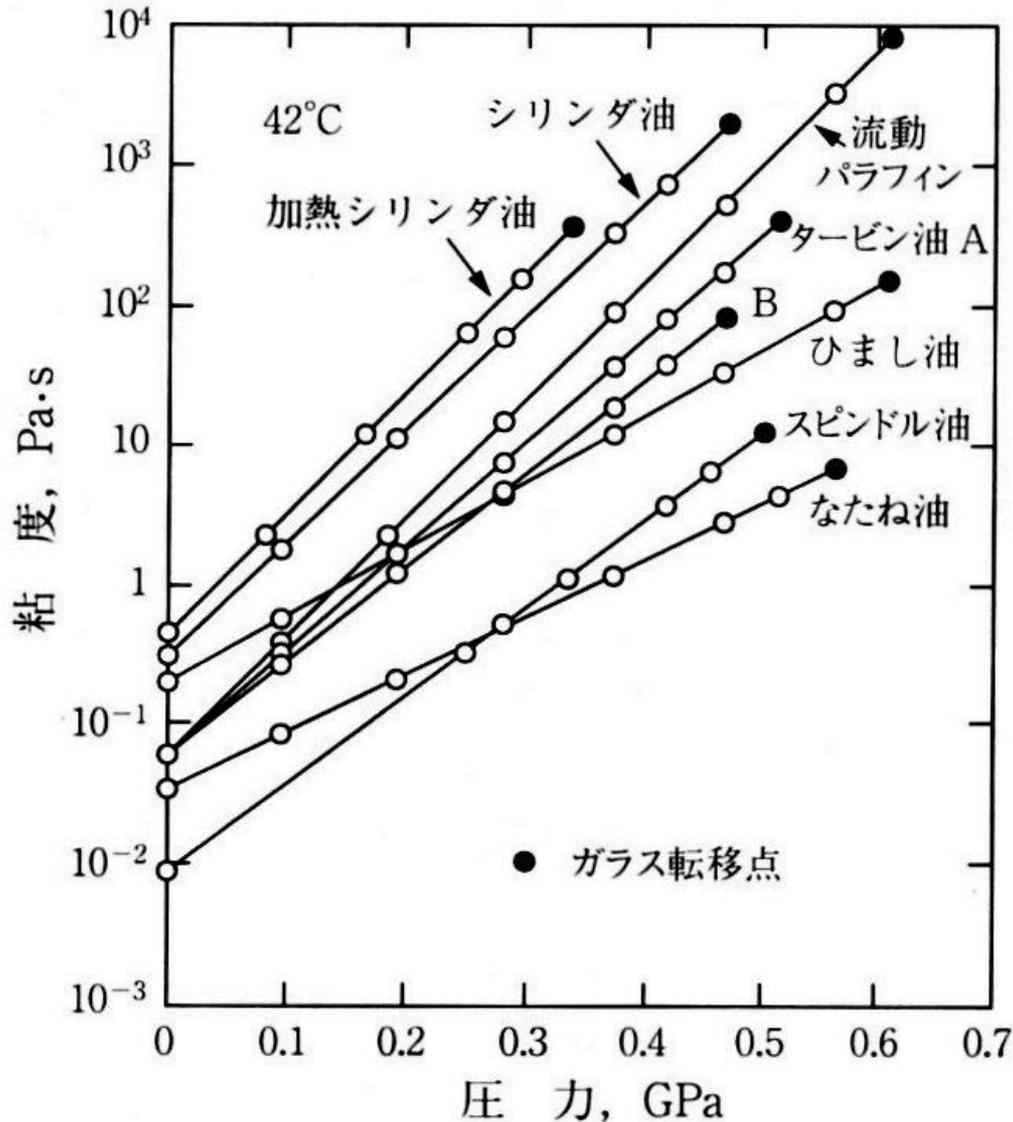
粘度指数 (VI)

温度による粘度の変化
しやすさの尺度

片対数グラフに40、100
 $^{\circ}\text{C}$ 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

1930年代に考えられた
評価指数. 特定の油を
基準に決めたので、100
以上や0以下も存在する

粘度と圧力の関係



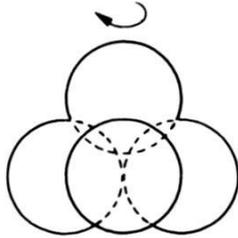
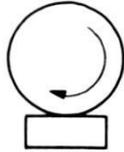
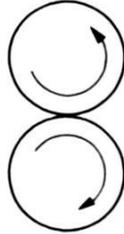
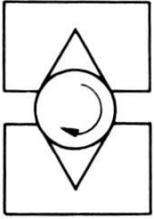
粘度は圧力とともに増加する



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

α : 粘度の圧力係数

潤滑油の潤滑性能試験法（摩擦試験法）

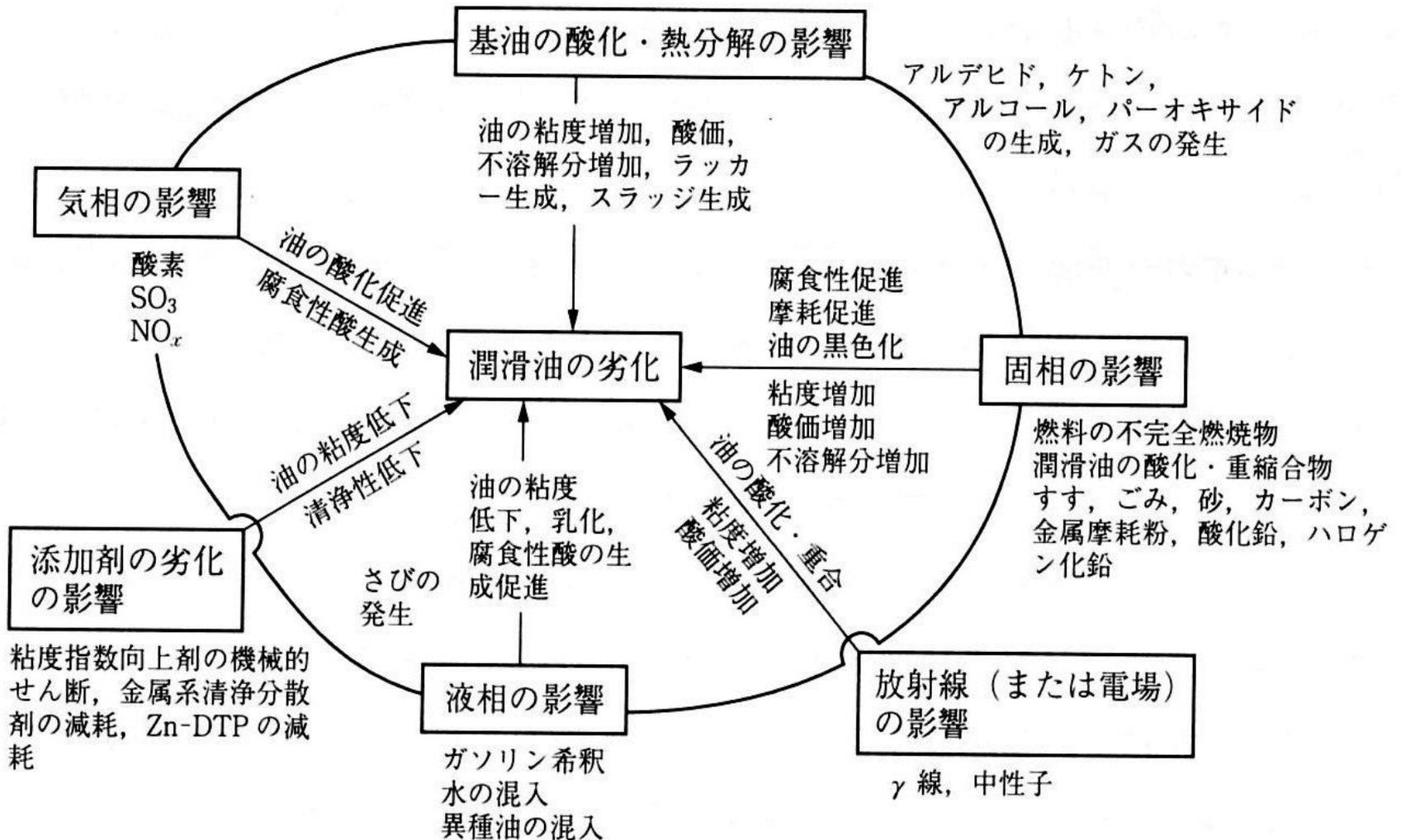
試験機名称	四球試験機			チムケン試験機	SAE 試験機	アルメン試験機	ファレックス試験機
	曾田式	JIS 式	シェル式				
試験片の形状							
接触様式	3/4" 鋼球点接触		1/2" 鋼球点接触	鋼環-鋼片線接触	鋼環線接触	鋼軸-鋼片面接触	鋼軸-鋼片線接触
試験片の材質	Cr 鋼 (JIS, SUJ-2)		Cr 鋼 (S, K, F)	NiMo 鋼 (SAE 4620)	NiMo 鋼 (SAE 4620)	SAE 2315	SAE 2315 と SAE 2320
回転速度 (rpm)	200	750	1500	800	1000	600	300
すべり速度 (cm/s)	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

潤滑剤以外の条件を同じにして実験する

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



潤滑油の寿命

潤滑油の使用限界と
性能劣化による寿命が存在する

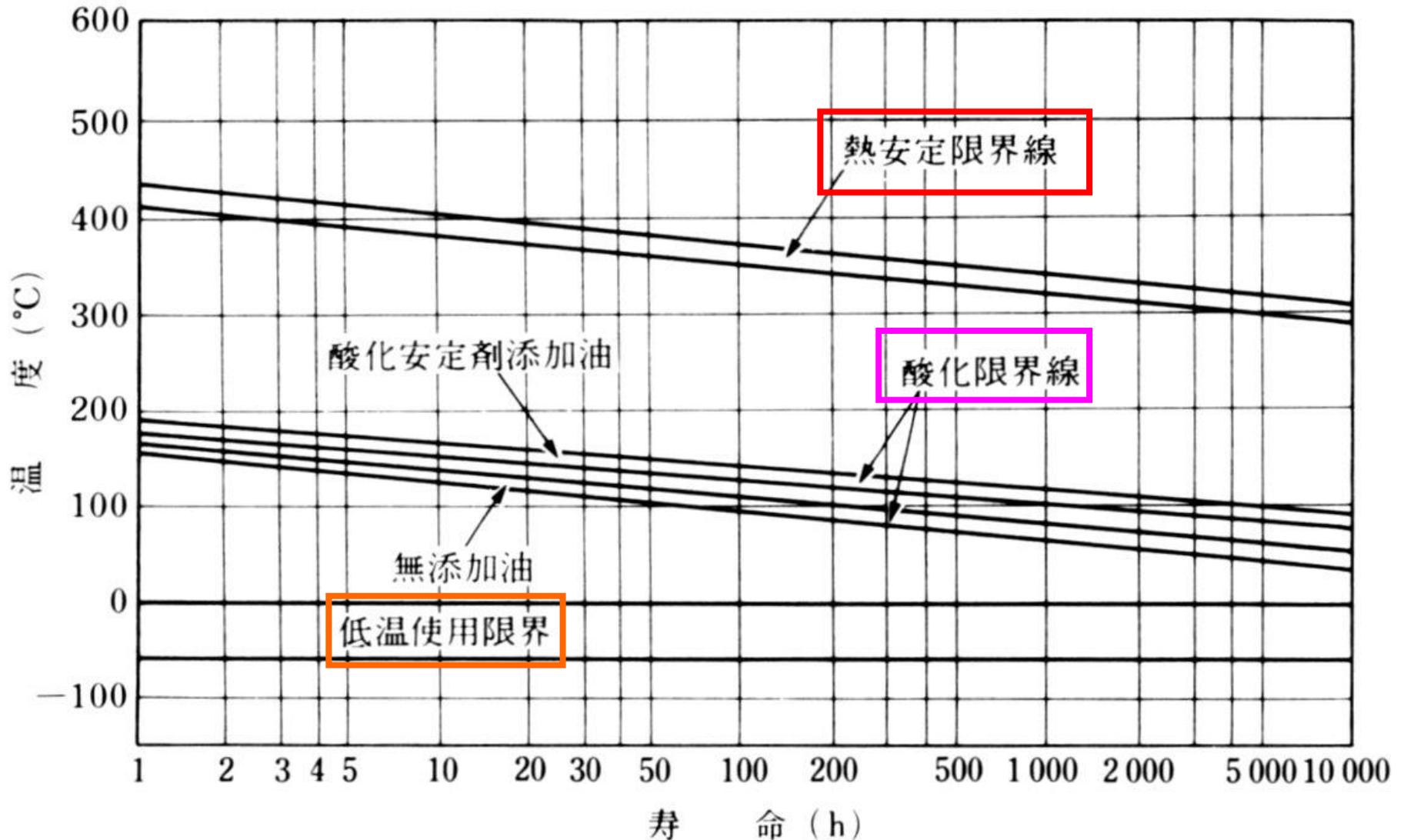
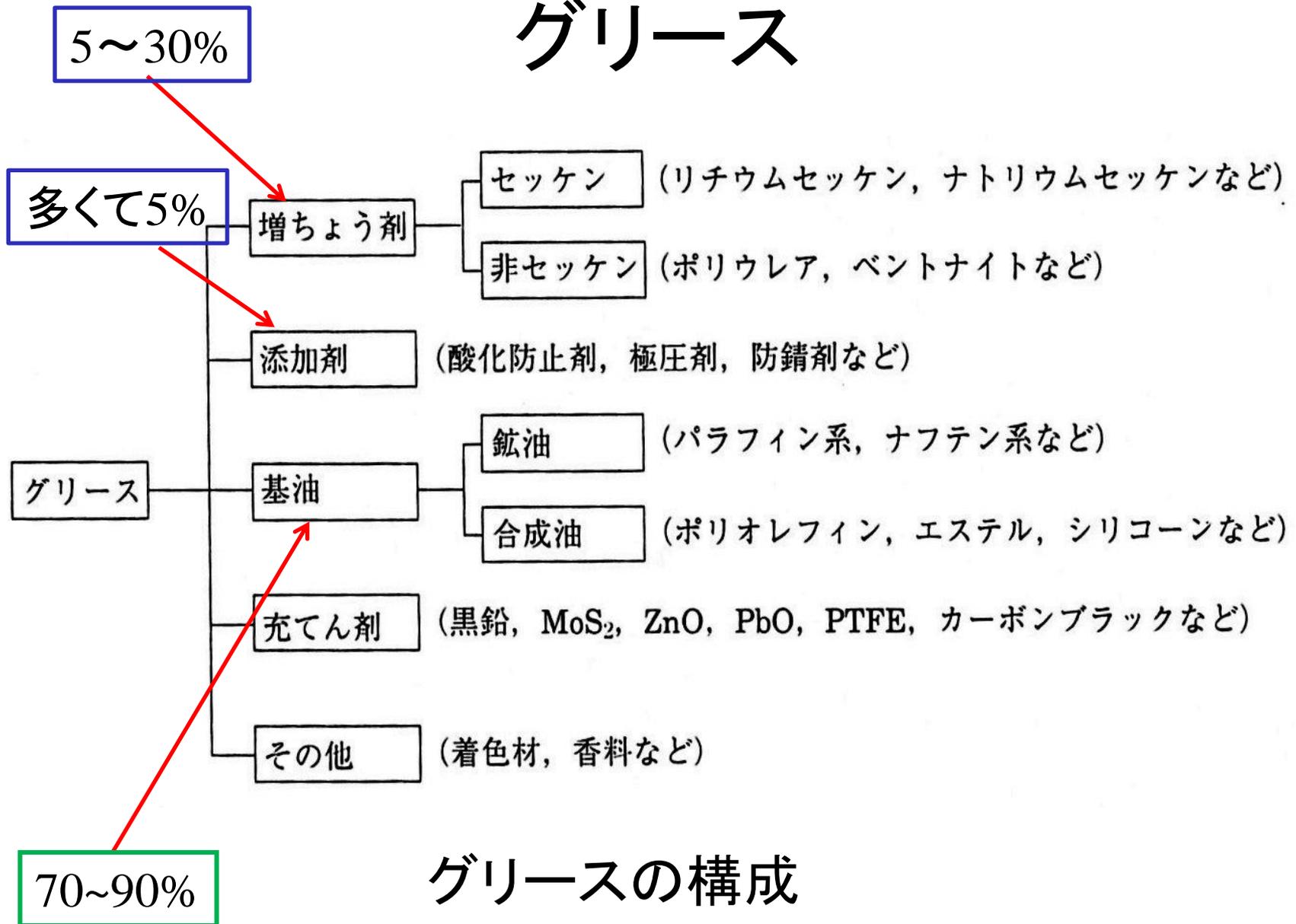


表 9・2 工業用潤滑油 ISO 粘度グレード

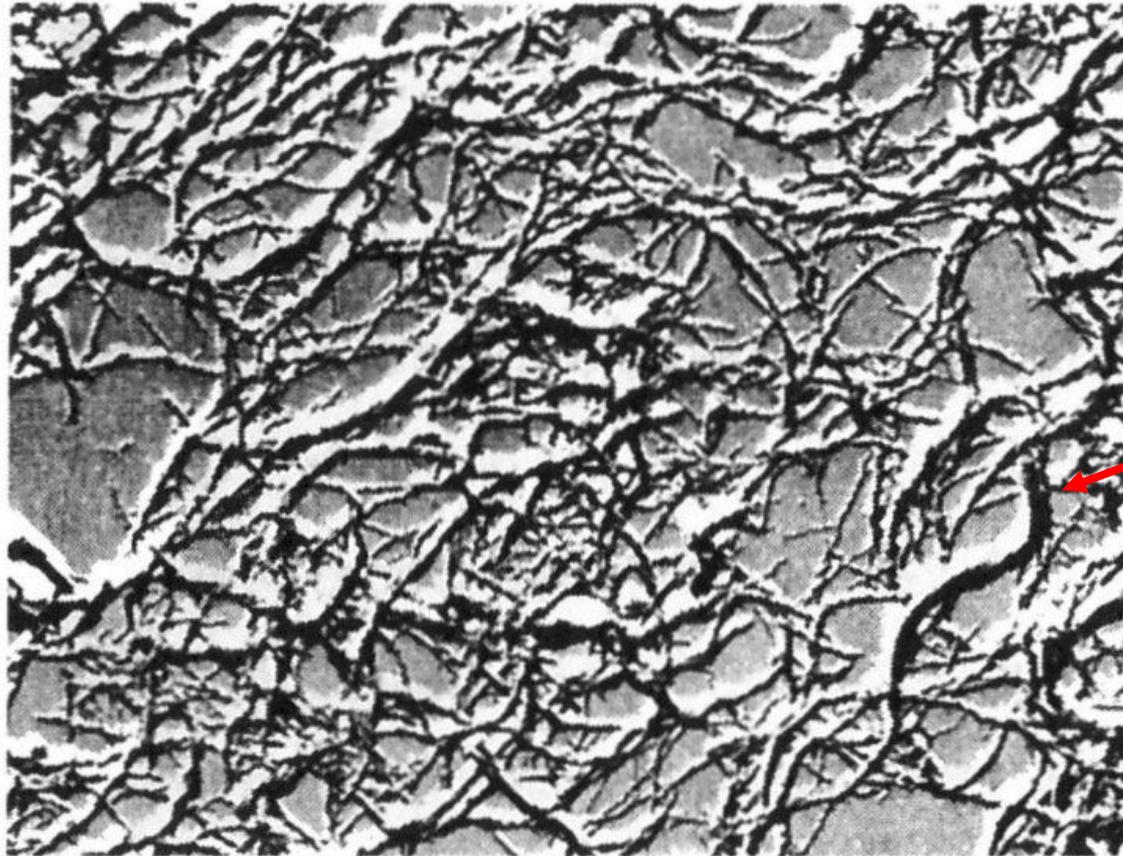
ISO 粘度グレード	中心値の動粘度 mm ² /s (40°C)	動粘度範囲 mm ² /s (40°C)	
ISO VG 2	2.2	1.98 以上	2.42 以下
ISO VG 3	3.2	2.88 以上	3.52 以下
ISO VG 5	4.6	4.14 以上	5.06 以下
ISO VG 7	6.8	6.12 以上	7.48 以下
ISO VG 10	10	9.00 以上	11.0 以下
ISO VG 15	15	13.5 以上	16.5 以下
ISO VG 22	22	19.8 以上	24.2 以下
ISO VG 32	32	28.8 以上	35.2 以下
ISO VG 46	46	41.4 以上	50.6 以下
ISO VG 68	68	61.2 以上	74.8 以下
ISO VG 100	100	90.0 以上	110 以下
ISO VG 150	150	135 以上	165 以下
ISO VG 220	220	198 以上	242 以下
ISO VG 320	320	288 以上	352 以下
ISO VG 460	460	414 以上	506 以下
ISO VG 680	680	612 以上	748 以下
ISO VG 1000	1000	900 以上	1100 以下
ISO VG 1500	1500	1350 以上	1650 以下

一般的な
機械に使用
される粘度

グリース



グリースの組成



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)

表 2.1.2 各種増ちょう剤に対するグリースの特徴

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
セツケン系	カルシウム セツケン	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	○	○	
	カルシウム複合セツケン		>260	○	120~150	○	×~△	経時または高温硬化 の傾向がある。
	ナトリウムセツケン		130~180	○	120~150	×~△	△~○	
	アルミニウムセツケン		50~90	△	80	○	×~○	粘着性良好。
	アルミニウム複合 セツケン		>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 セツケン	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	○	◎	
リチウム複合セツケン		>260	◎	130~180	△~○	◎	耐水性がやや劣る。	
非セツケン系(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(無セツケン系)	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。

◎：優れる ○：良い △：やや劣る ×：悪い

グリースの物性

ちょう度

グリースの硬さの尺度

滴点

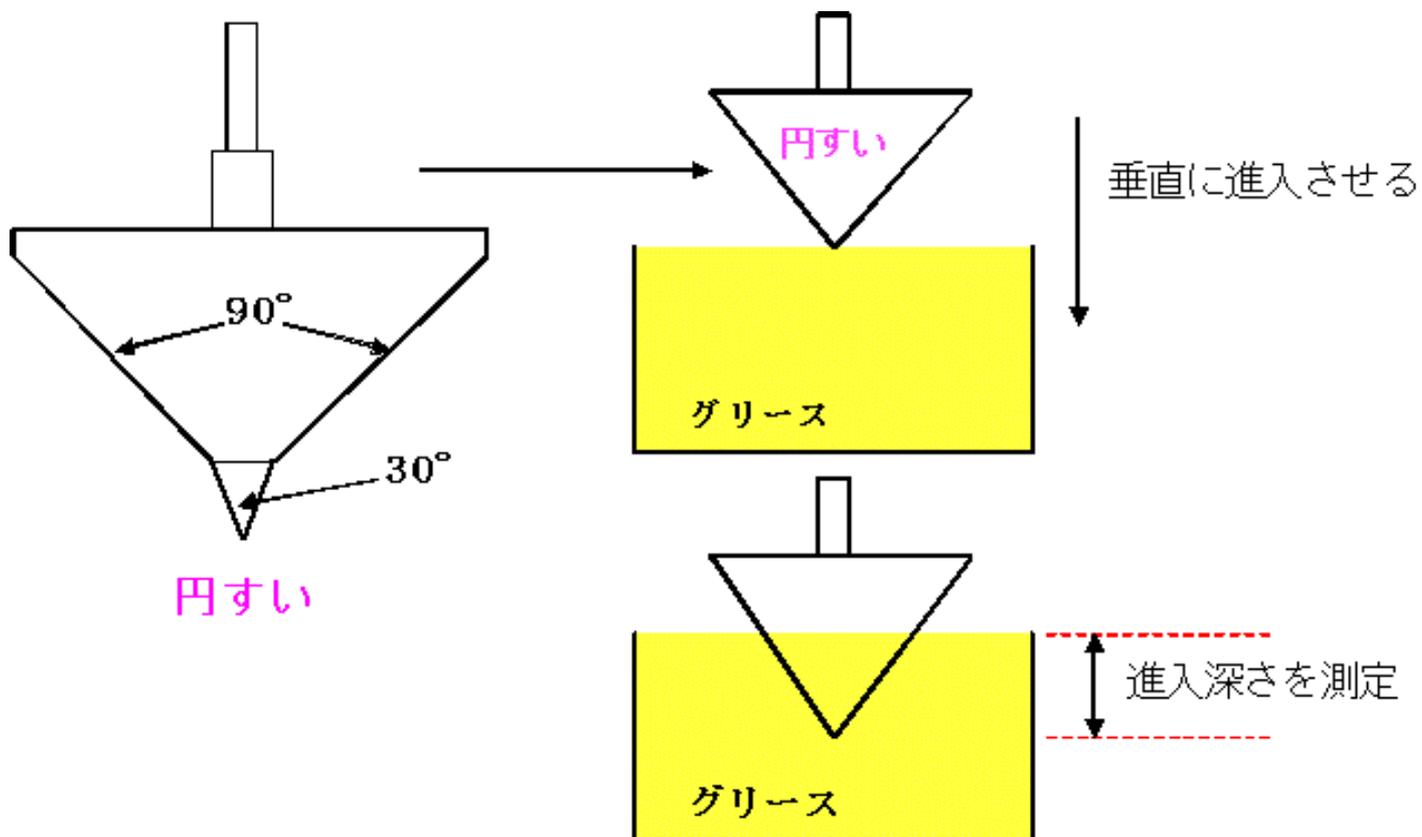
油が滴下はじめる
温度

離油度

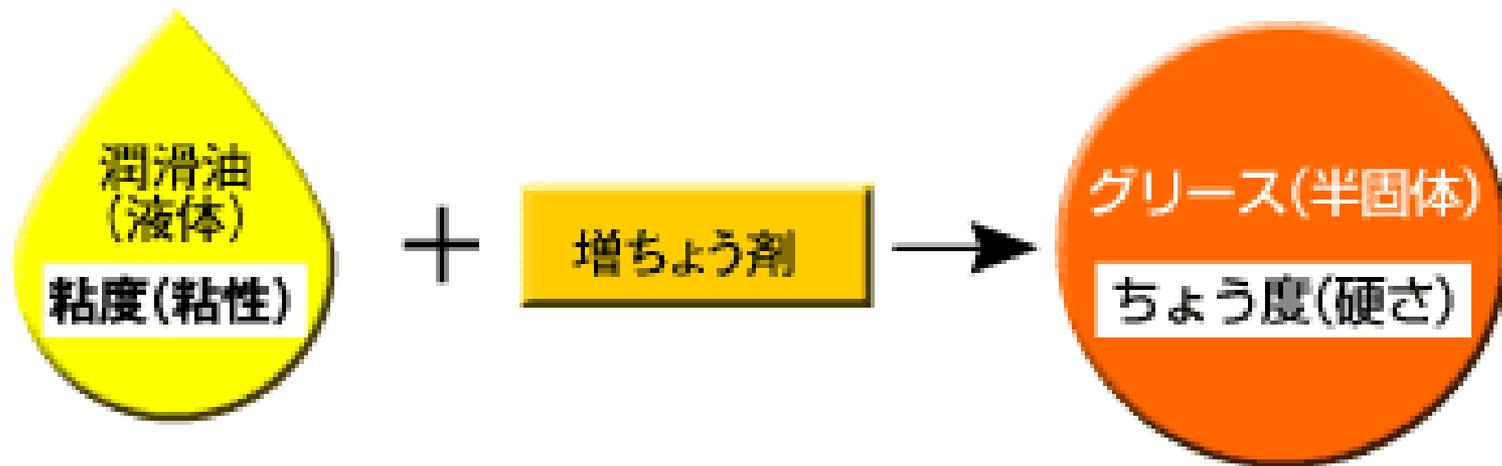
油分離の尺度

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



グリースの成分と硬さ(ちょう度)



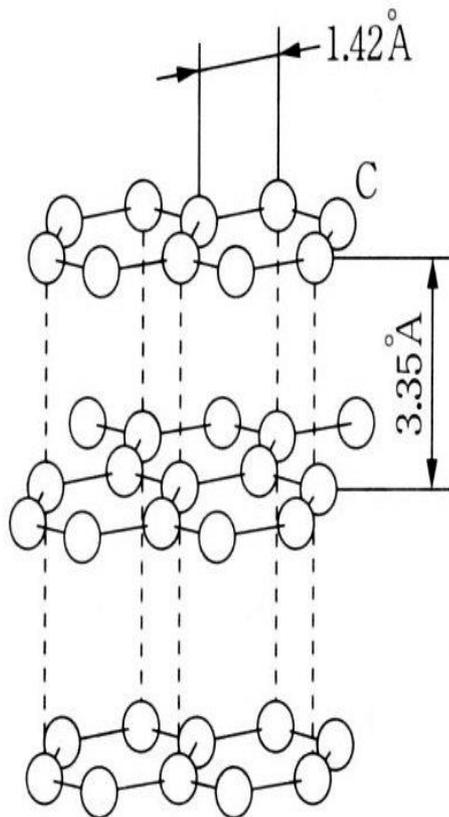
固体潤滑剤

用途

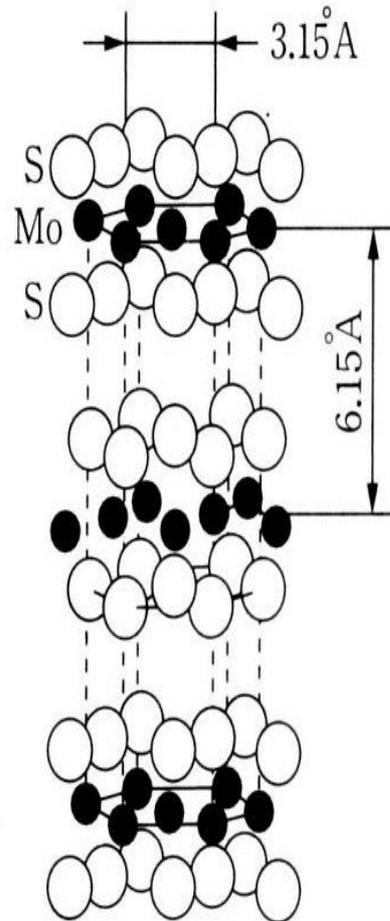
- ・ 高温・極低温
- ・ 高真空状態
- ・ X線環境下
- ・ 腐食環境中
- ・ 油汚染を嫌う環境

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

固体潤滑剤の特性

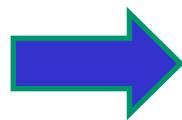
種類	名称	融点または昇華点, °C	摩擦係数		使用温度範囲, °C*		使用形態		
			大気中	真空または不活性ガス	大気中	真空または不活性ガス	粉体	皮膜	複合体
層状固体潤滑剤	MoS ₂	>1800	0.05~0.25	0.02~0.10	-200~350	~800	○	○	○
	グラファイト	>3500	0.10~0.30	潤滑性悪い	~450	—	○	○	○
高分子潤滑剤	PTFE	327	0.02~0.15	0.02~0.15	-250~280	-250~200	○	○	○
	ポリイミド		0.02~0.10	0.02~0.10	50~350	50~300		○	○
軟金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

しかし、潤滑性能は、潤滑油、グリースには及ばないので、積極的に使うものではない。

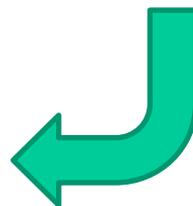
転がり軸受に密封されたグリースの寿命

グリースは劣化する



潤滑性能が劣化し、
面荒れを起こす

音・振動が大きくなり、使用できない
(音響寿命)



疲労はくりより先に、グリースの劣化によって
寿命を迎えることになる(小径・ミニアチュア
玉軸受では、こちらが圧倒的に多い)

グリース寿命の実験式

(1)はん用グリース

$$\log t = 6.54 - 2.6 \frac{n}{N_{max}} - \left(0.025 - 0.012 \frac{n}{N_{max}} \right) T$$

(2)ワイドレンジグリース

$$\log t = 6.12 - 1.4 \frac{n}{N_{max}} - \left(0.018 - 0.006 \frac{n}{N_{max}} \right) T$$

ここで、 t : 平均グリース寿命[h]

n : 軸受の回転速度[min^{-1}]

N_{max} : グリース潤滑の許容回転速度[min^{-1}]

(非接触シールド、非接触シールの数値)

T : 軸受の運転温度[$^{\circ}\text{C}$]

はん用グリース: 鉱油が基油の一般的なグリース

ワイドレンジ: 合成油が基油で使用温度範囲が広いグリース

寿命式の条件

① 軸受の回転速度

$$0.25 \leq n / N_{max} \leq 1$$

$n / N_{max} < 0.25$ の場合は、 $n / N_{max} = 0.25$ とする

② 軸受の運転温度

はん用グリース $70^{\circ}\text{C} \leq T \leq 110^{\circ}\text{C}$

ワイドレンジグリース $70^{\circ}\text{C} \leq T \leq 130^{\circ}\text{C}$

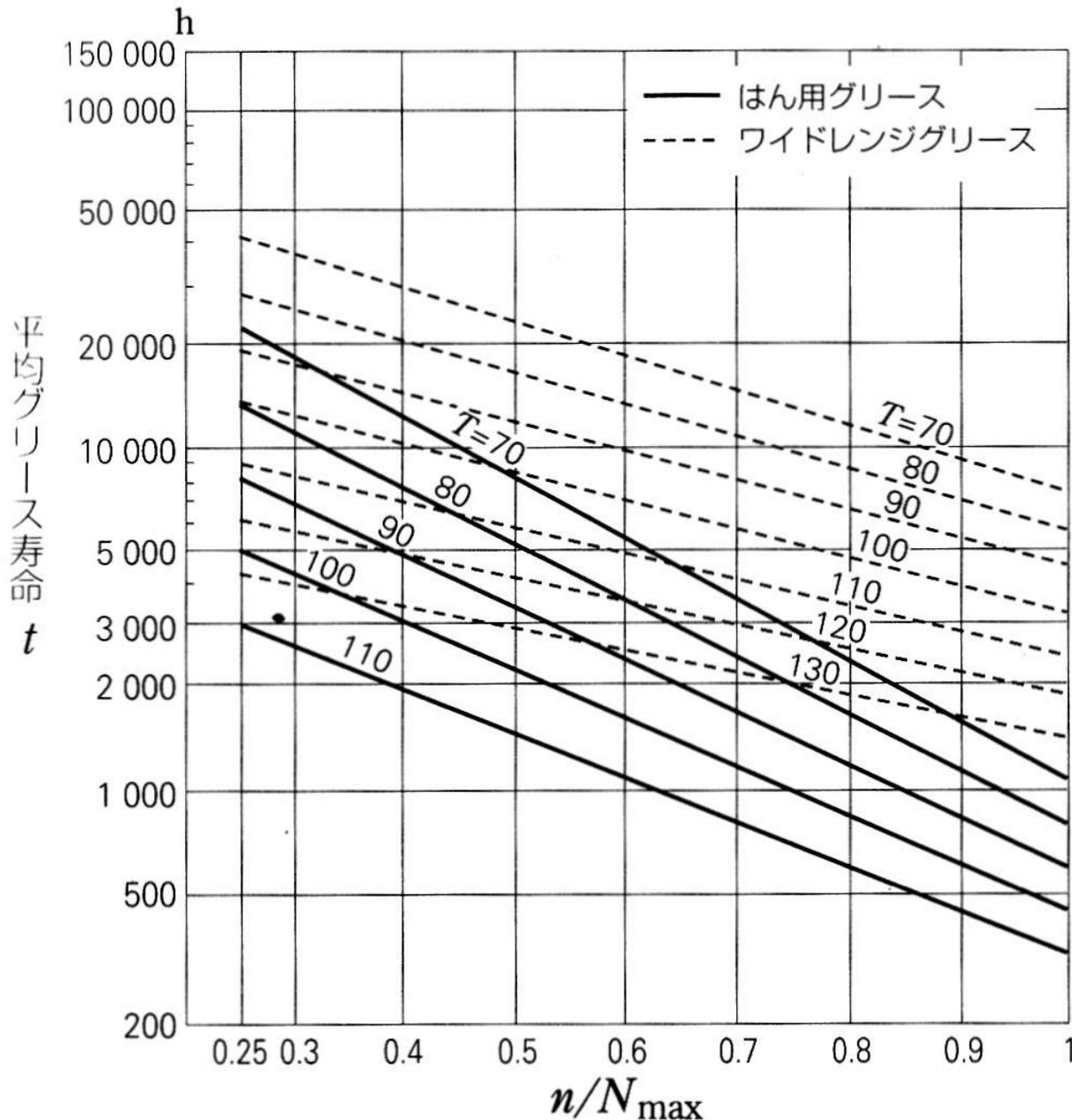
$T < 70^{\circ}\text{C}$ の場合は、 $T = 70^{\circ}\text{C}$ とする

③ 軸受荷重

基本動定格荷重の1/10程度、あるいはそれ以下



寿命を決めるパラメータは、**回転速度**と**温度**



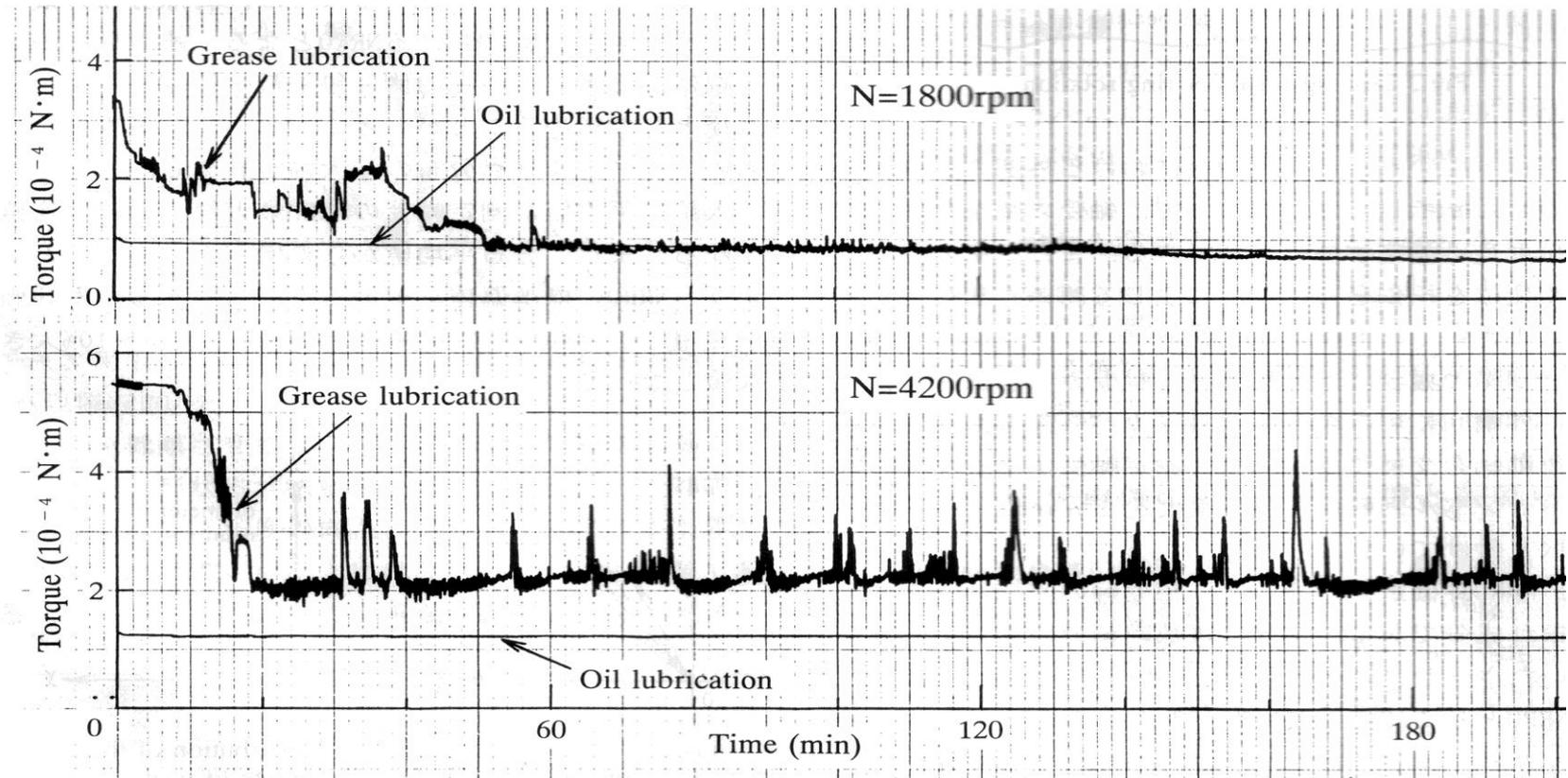
特徴

- ・温度が 10°C 上昇すると寿命は $1/2$ になる
- ・ワイドレンジグリースが長寿命
- ・高速回転になると短寿命

608の N_{\max}
 34000min^{-1}
 0.25を掛けても
 8500min^{-1}
 とかなり高速。

軸受内のグリース充填量

潤滑は転がり軸受にとって不可欠であるが、多すぎると
トルク増大、**トルク変動**、**温度上昇**の原因となる。



グリース潤滑におけるトルク変動の例

グリース封入量の一般的な目安としては、軸受内部の**空間容積**（外輪と内輪の間にできる空間から転動体と保持器の体積を引いた容積）に対して、

- ・許容回転速度の**50%以下**で使用する場合：**1/2～2/3**
- ・許容回転速度の**50%以上**で使用する場合：**1/3～1/2**

を充填する。トルクや発熱の低減が必要な用途では、1/3より封入量を少なくする。

極低速回転で使う場合や防塵・防水を目的にした場合には、空間容積すべてにグリースを封入する場合もある。

円筒ころ軸受、円すいころ軸受等つば面をもつ軸受では、つば面とところ端面の間にグリースを塗布する。

軸受の空間容積概略値

$$V=K \cdot W$$

V:空間容積 (cm³)

K:軸受空間係数

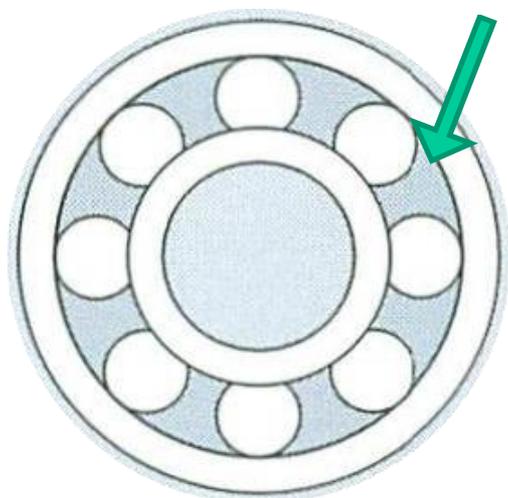
W:軸受質量 (kg)



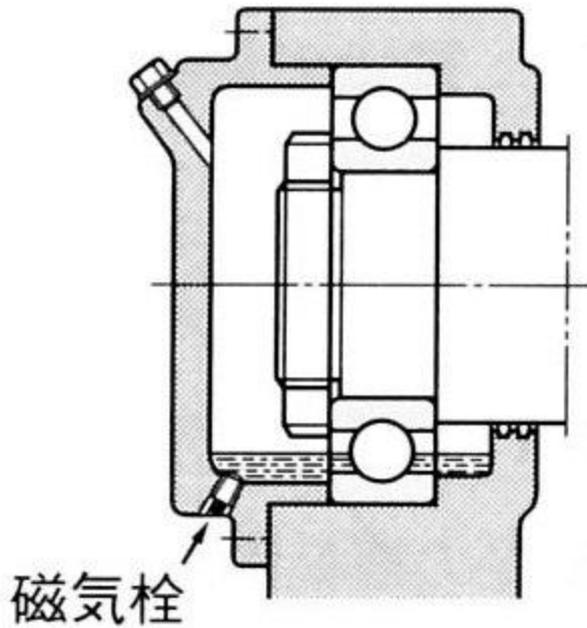
軸受形式	保持器形式	K
深溝玉軸受 ^①	打抜き保持器	61
NU形円筒ころ軸受 ^②	打抜き保持器 もみ抜き保持器	50 36
N形円筒ころ軸受 ^③	打抜き保持器 もみ抜き保持器	55 37
円すいころ軸受	打抜き保持器	46
自動調心ころ軸受	打抜き保持器 もみ抜き保持器	35 28

- ① 160系列の軸受は除く。
- ② NU4系列の軸受は除く。
- ③ N4系列の軸受は除く。

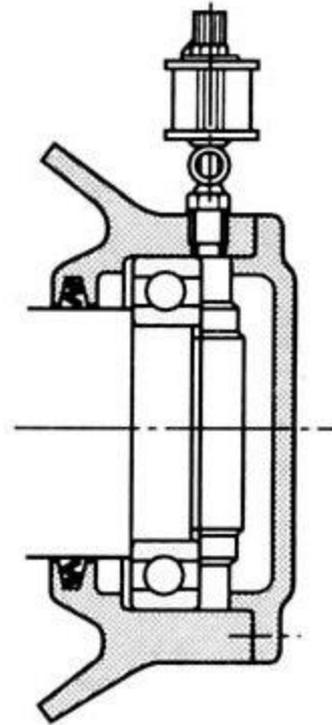
軸受の空間容積



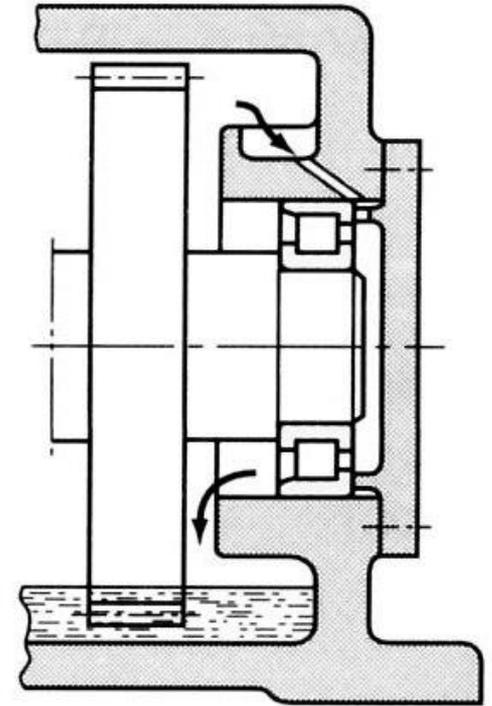
潤滑法（給油法）



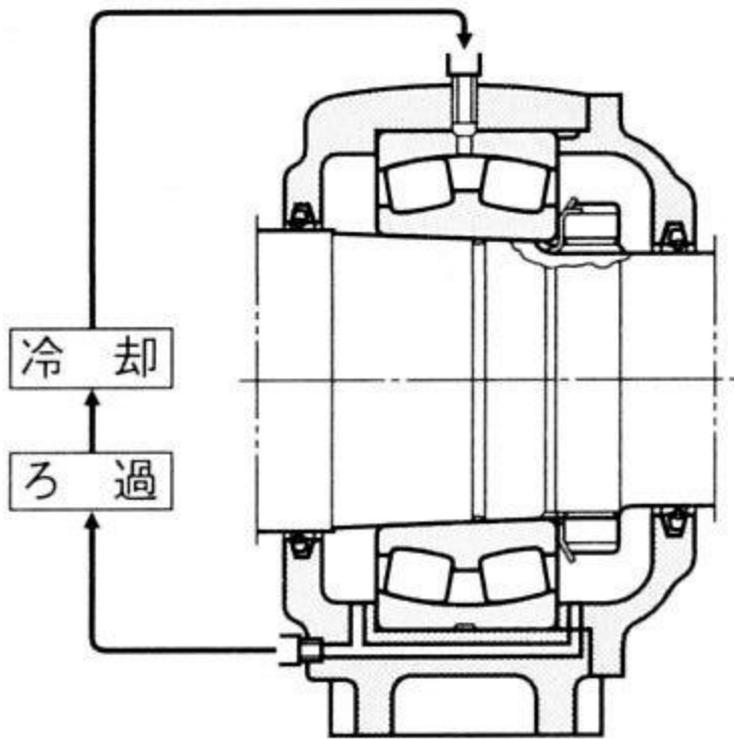
(1) 油浴潤滑



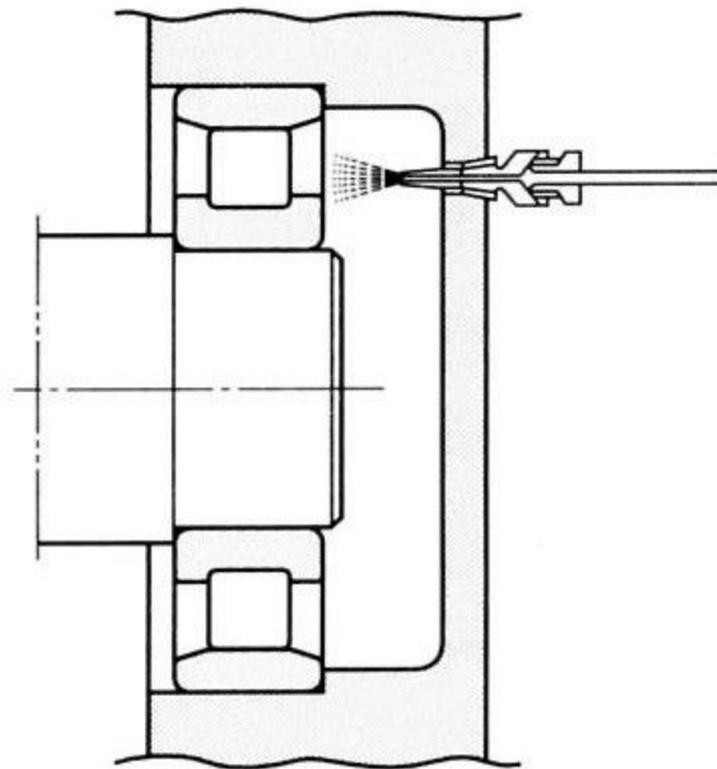
(2) 滴下給油



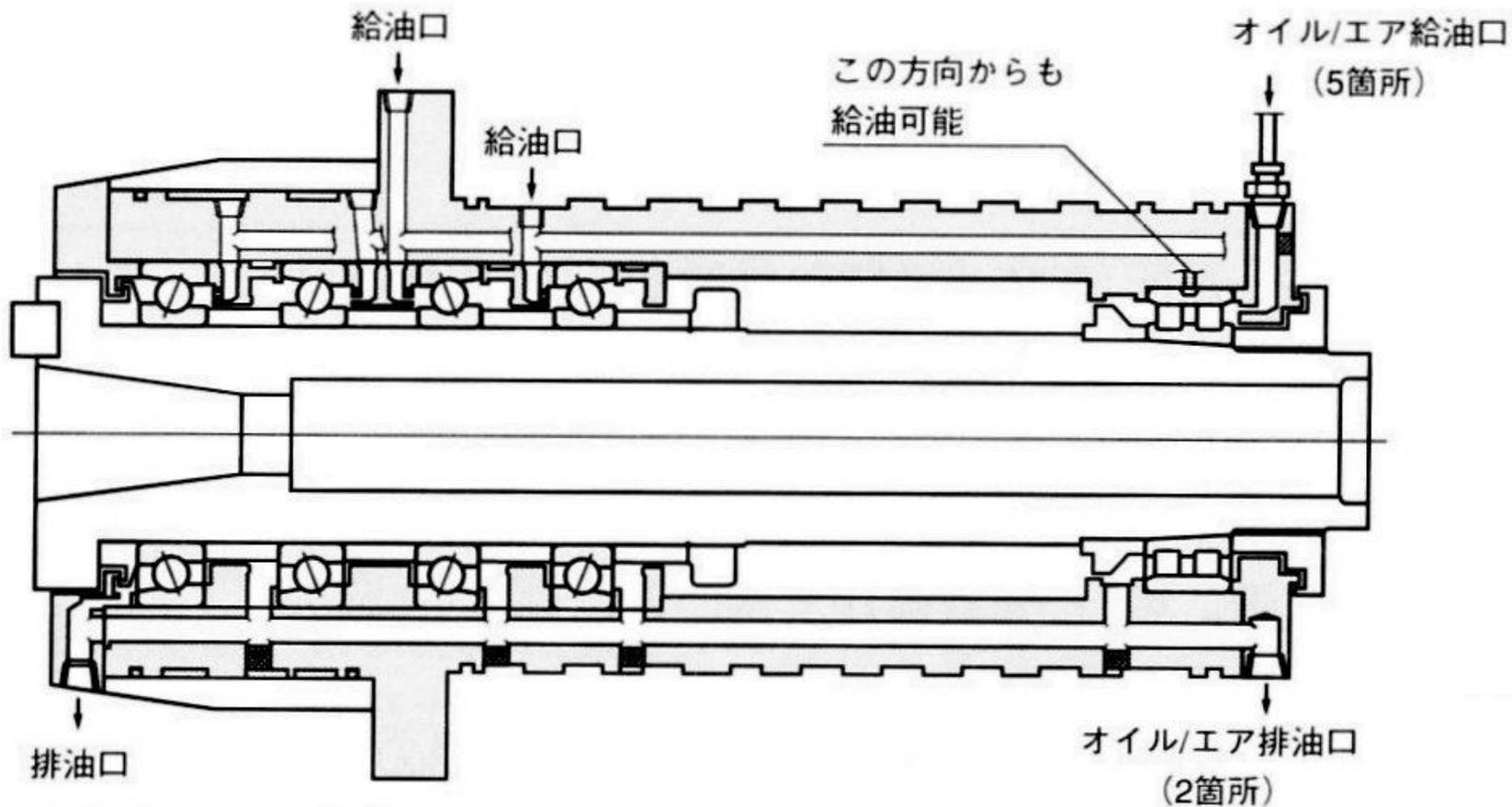
(3) 飛沫給油



(4) 強制循環給油



(5) ジェット給油



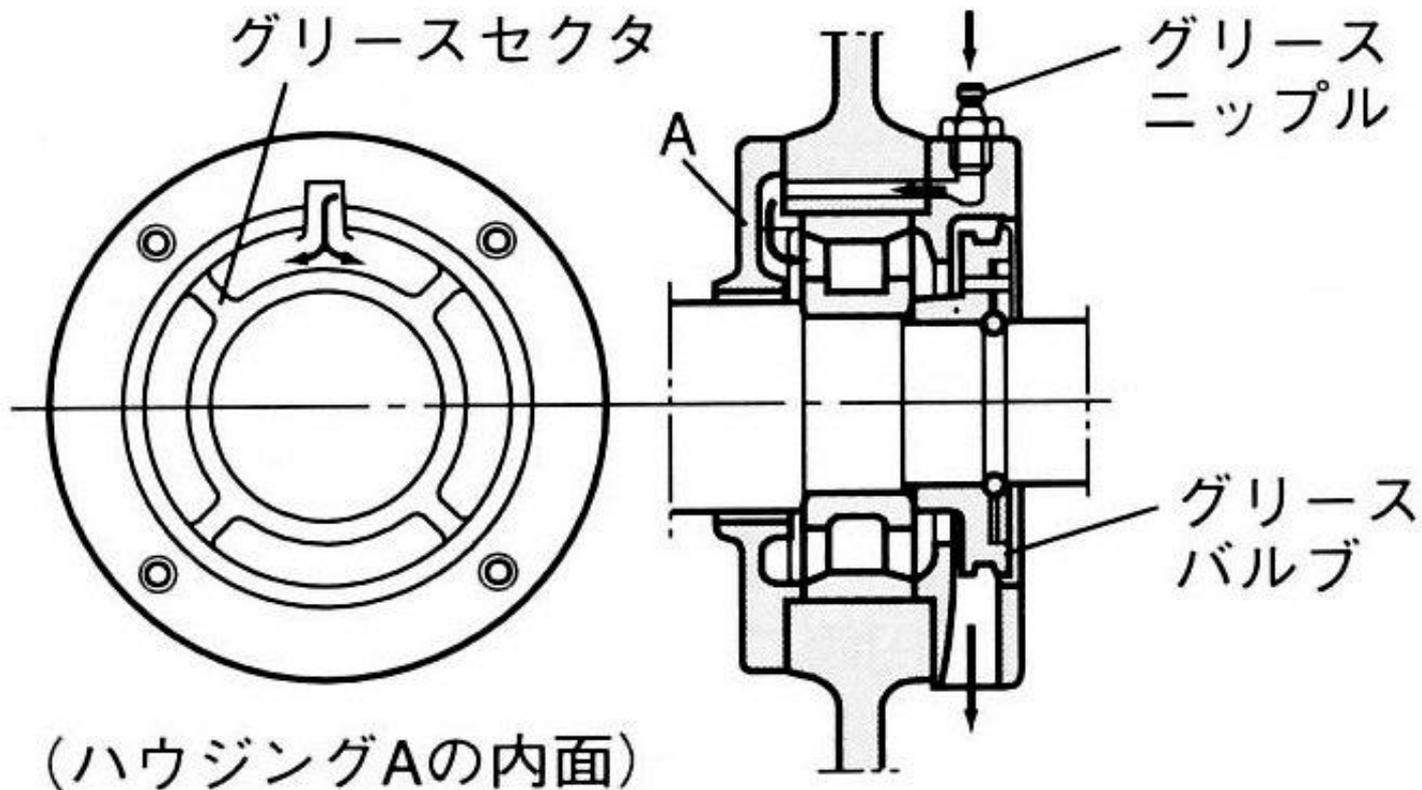
(オイル/エア潤滑システム付きスピンドルユニットの例)

(6) オイルエア潤滑

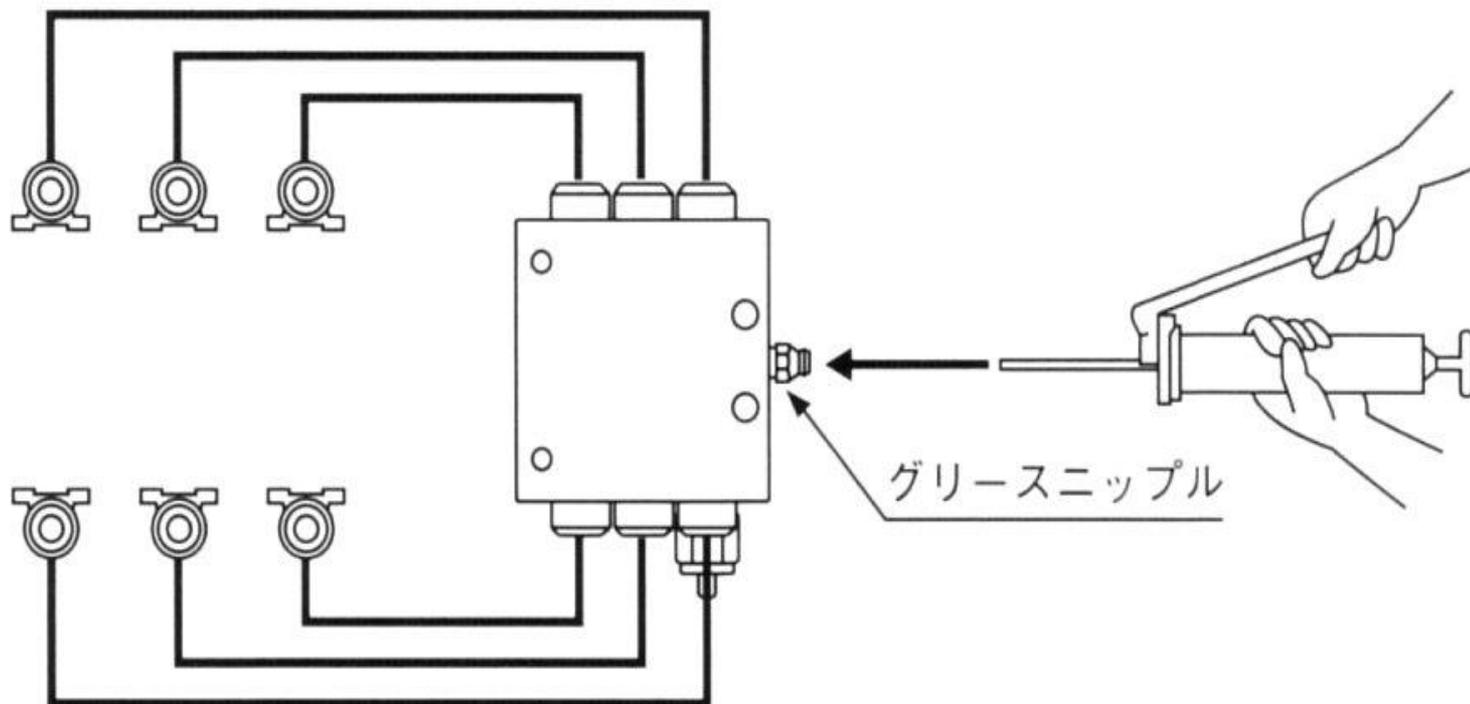
極微量の油を圧縮空気に混入させて
潤滑と冷却を行う

グリース給脂方法

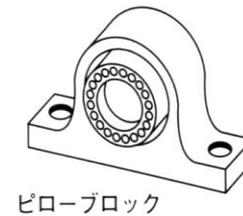
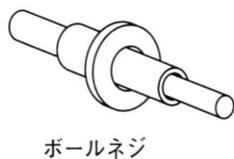
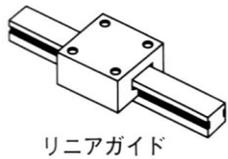
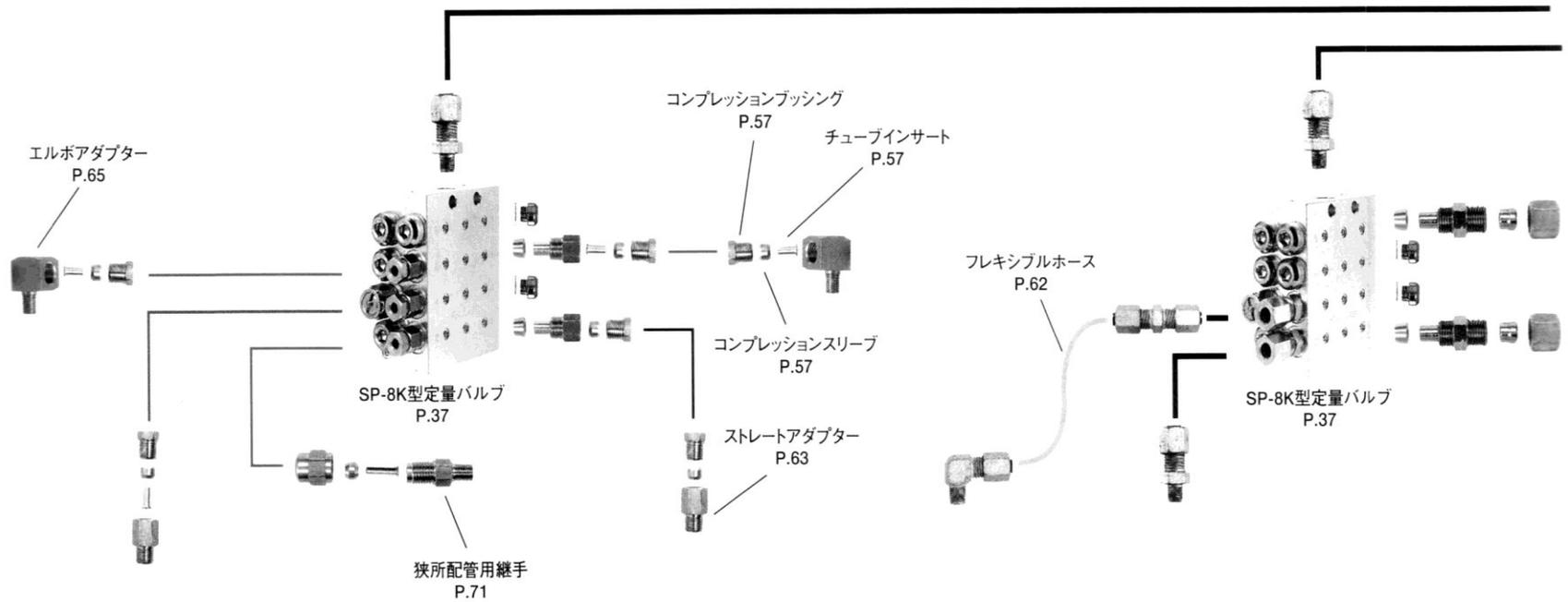
密封で使われることが多いが、給脂される
使い方もある → 鉄鋼圧延設備, 工作機械



<システムレイアウト>



グリースの手動給脂(システム)

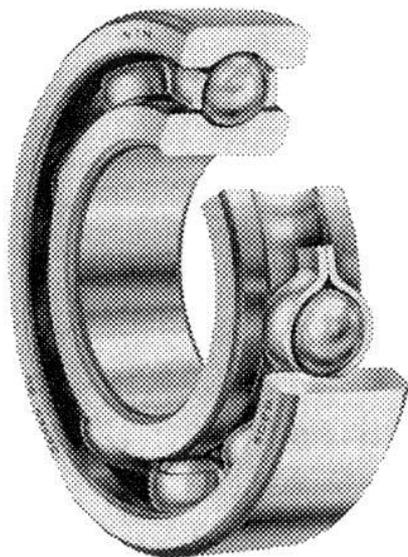


自動給脂システム

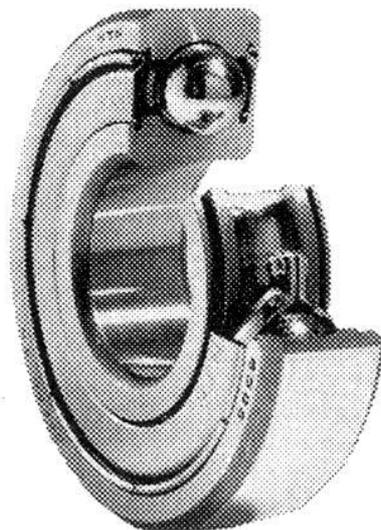
転がり軸受のシール(単体)

目的

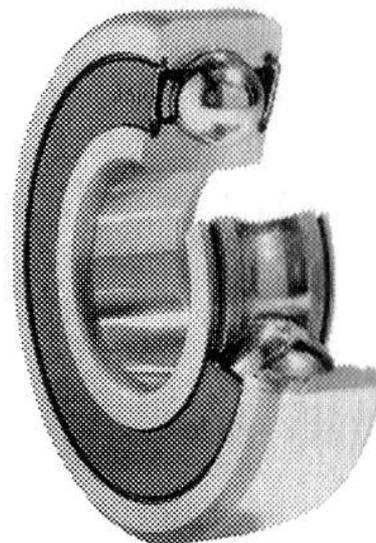
- ・内部に封入されたグリースの飛散防止
- ・外部からの異物侵入防止



開放形



シールド形



シール形 (非接触)

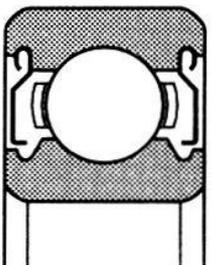
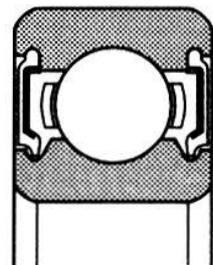
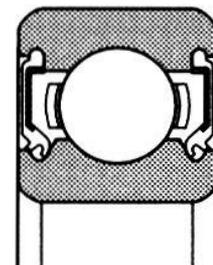
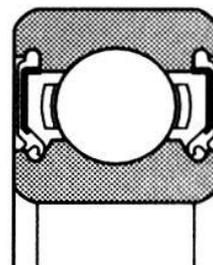
材質：シール(樹脂、ゴム) & シールド(鋼板)
状態：接触式 & 非接触

金属シールド：安価であるが、外輪変形の懸念

接触ゴムシール：密封性はよいが、トルク高い

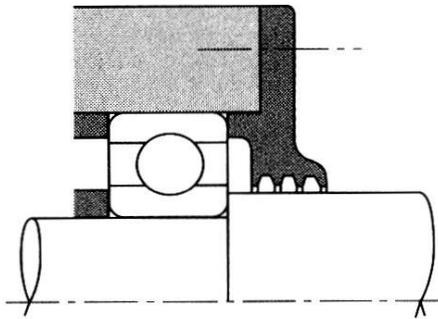
非接触式：防水性は低いが、低トルク

等、長所短所を併せ持つ

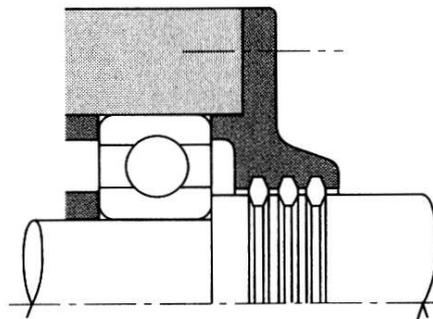
シールド形	シール形		
非接触形 ZZ	非接触形 LLB	接触形 LLU	低トルク形 LLH
			

転がり軸受のシール(外部)

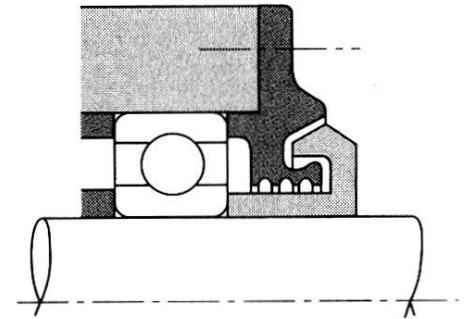
開放型だけでなく、シール付きタイプでも使用される



(a)

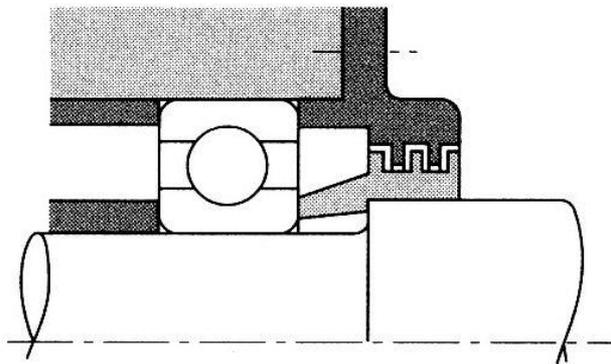


(b)

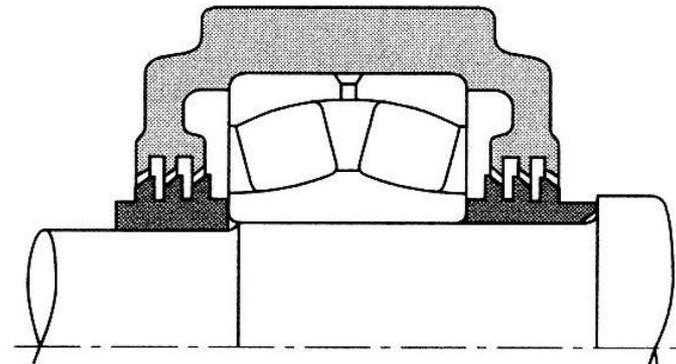


(c)

油溝の例



ラジアル ラビリンス



調心軸のラビリンス