

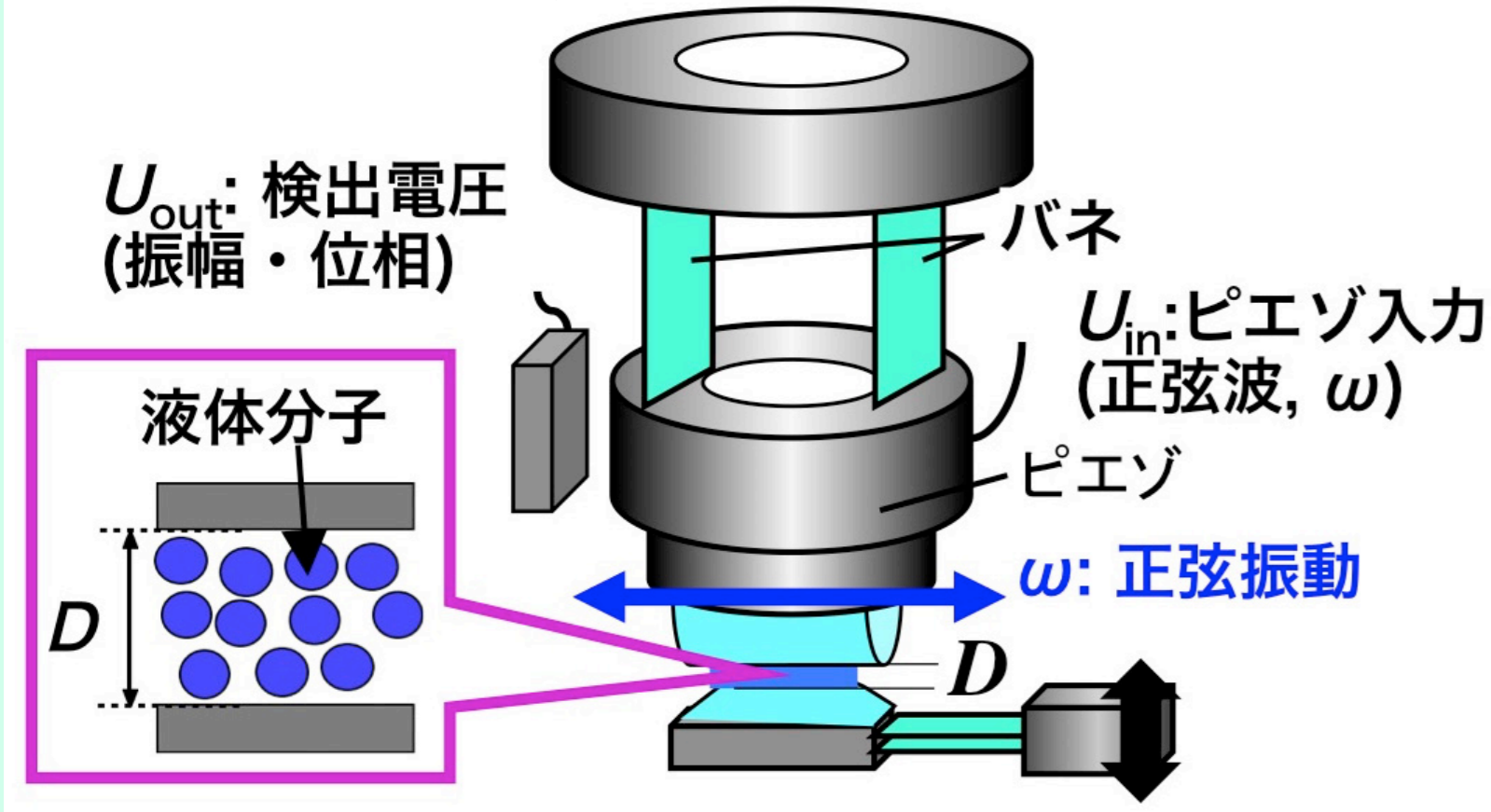
テーマ名 (タイトル)	排気エネルギーの有効利用と機械摩擦損失の低減に関する研究開発
SIPチーム	損失低減チーム リーダー大学: 早稲田大学 大聖 泰弘
AICE分科会	排気エネルギー活用分科会 摩擦損失低減分科会
目的	ターボ過給機の性能向上、燃料改質による排熱回収技術の開発を通じて排気エネルギーを低減する。従来は経験則に基づいていた摩擦損失メカニズムを解明し、大幅低減を狙う。

テーマ名 (タイトル)	共振ずり測定による境界膜のナノ計測と摩擦現象解明・低摩擦最適化
クラスター大学	東北大多元研 栗原和枝
50%への貢献	低粘度潤滑油の利用には、境界潤滑域での摩擦・摩耗低減、焼き付き防止が必須である。独自開発した共振ずり測定法は、境界潤滑の理解に重要なナノメートル空間に閉じ込められた液体の実効粘度、潤滑性を評価できる。本手法を用いた潤滑油の特性評価を行い、境界摩擦低減のための基礎的知見を取得し、摩擦損失低減50%に貢献する。
目的達成のための構想	● 共振ずり測定法を用いてSIP基準油などを評価し、境界摩擦低減のための知見を取得し、さらに実機の使用条件に合わせた高温、高圧測定装置を開発、評価を実施する。
アピールポイント	● バルク (流体潤滑) からナノ厚み (境界潤滑) まで連続して特性 (実効粘度、潤滑性) を評価できるのは、世界的にも栗原グループで開発した共振ずり測定法のみである。

## 共振ずり測定法 (Resonance Shear Measurement, RSM)

表面力装置を基本とした測定法。2つの表面間に液体を挟み、マイクロメートルから接触 (距離ゼロ) までナノメートルレベルで表面間距離を変えながら、上部ユニットを横方向にずらすことで液体の構造化、粘性、ナノオロジー・ナノトライボロジー特性を評価できる。

### 共振ずり測定装置



- 上部ユニットの共振ピークの強度と周波数から、表面間の液体の構造化、摩擦・潤滑特性を、高感度に評価可能
- 表面間距離を  $\mu\text{m}$  からゼロまで連続的に制御可能
- 荷重による油膜厚さの変化を評価可能

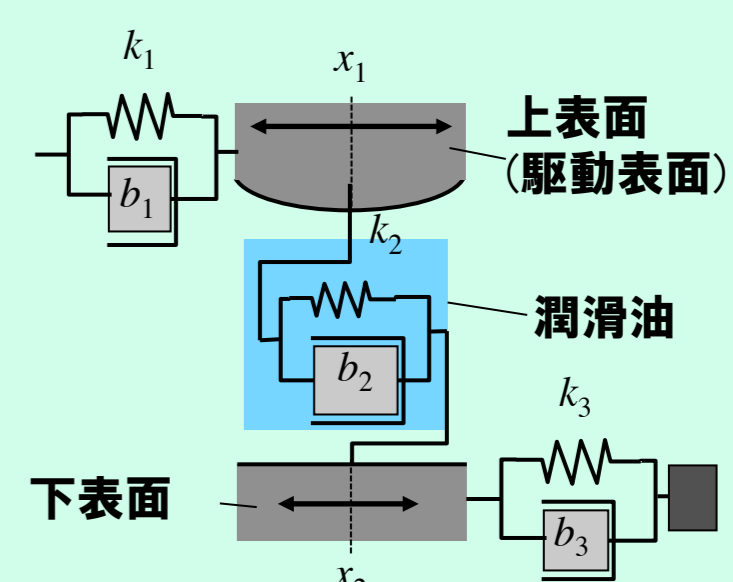
(1) C. D. Dushkin and K. Kurihara, *Rev. Sci. Instrum.*, **69**, 2095 (1998). (2) C. D. Dushkin and K. Kurihara, *Colloid and Surf. A*, **129-130**, 131 (1997) (3) H. Sakuma, Kenshiro Otsuki, and K. Kurihara, *Phys. Rev. Lett.*, **96**, 046104 (2006). (4) H. Sakuma and K. Kurihara, *Rev. Sci. Instrum.*, **80**, 013701 (2009). (5) M. Mizukami and K. Kurihara, *Rev. Sci. Instrum.*, **79**, 113705 (2008). (6) H. Kawai, H. Sakuma, M. Mizukami, T. Abe, Y. Fukao, H. Tajima and K. Kurihara, *Rev. Sci. Instrum.*, **79**, 043701 (2008)

### 物理モデル解析

(運動方程式) M. Mizukami and K. Kurihara, *Rev. Sci. Instrum.*, **79**, 113705 (2008).

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + k_1 x_1 + k_2 (x_1 - x_2) + b_1 \frac{dx_1}{dt} + b_2 \frac{d(x_1 - x_2)}{dt} = F \exp(i\omega t)$$

$$m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + k_2 (x_2 - x_1) + k_3 x_2 + b_2 \frac{d(x_2 - x_1)}{dt} + b_3 \frac{dx_2}{dt} = 0$$



(解)

$$X_1 = |G_1(i\omega)| F \rightarrow \frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{C}{\alpha} |G_1(i\omega)| \quad \text{: 上表面振幅} \rightarrow \text{共振カーブをフィッティング}$$

$$\tan \phi_1 = -\frac{\text{Im}[G_1(i\omega)]}{\text{Re}[G_1(i\omega)]} \quad \text{: 上表面位相}$$

$$X_2 = |G_2(i\omega)| F \rightarrow (X_2)_{normalized} = \frac{|G_2(i\omega)|}{|G_1(i\omega)|} \left( \frac{U_{out}}{U_{in}} \right) \quad \text{: 下表面振幅}$$

$$\tan \phi_2 = -\frac{\text{Im}[G_2(i\omega)]}{\text{Re}[G_2(i\omega)]} \quad \text{: 下表面位相}$$

$U_{in}$ : 入力電圧  
 $U_{out}$ : 出力電圧  
 $C = C_{in}/C_{out}$  (装置定数)

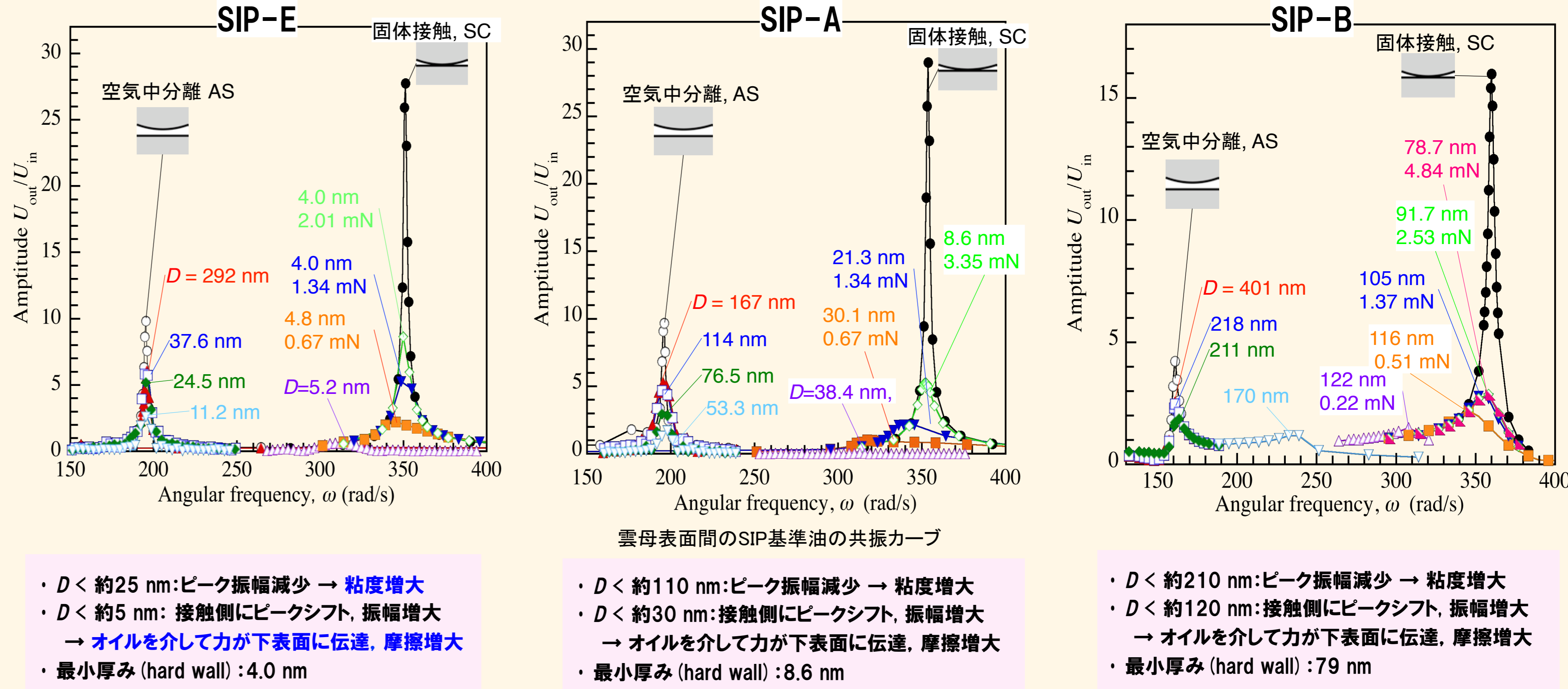
- (1) 閉じ込め液体の粘性  $b_2$  (Ns/m)、弾性  $k_2$  (N/m) の定量評価
- (2) 上下の相対滑り振幅  $|x_1 - x_2|$ 、相対滑り速度  $dx_1/dt - dx_2/dt$  の見積
- (3) 摩擦係数  $F_{friction}$  の評価:  $F_{friction} = \max[-k_2(x_1 - x_2) - b_2(V_1 - V_2)]$

## SIP基準油の共振ずり測定による評価

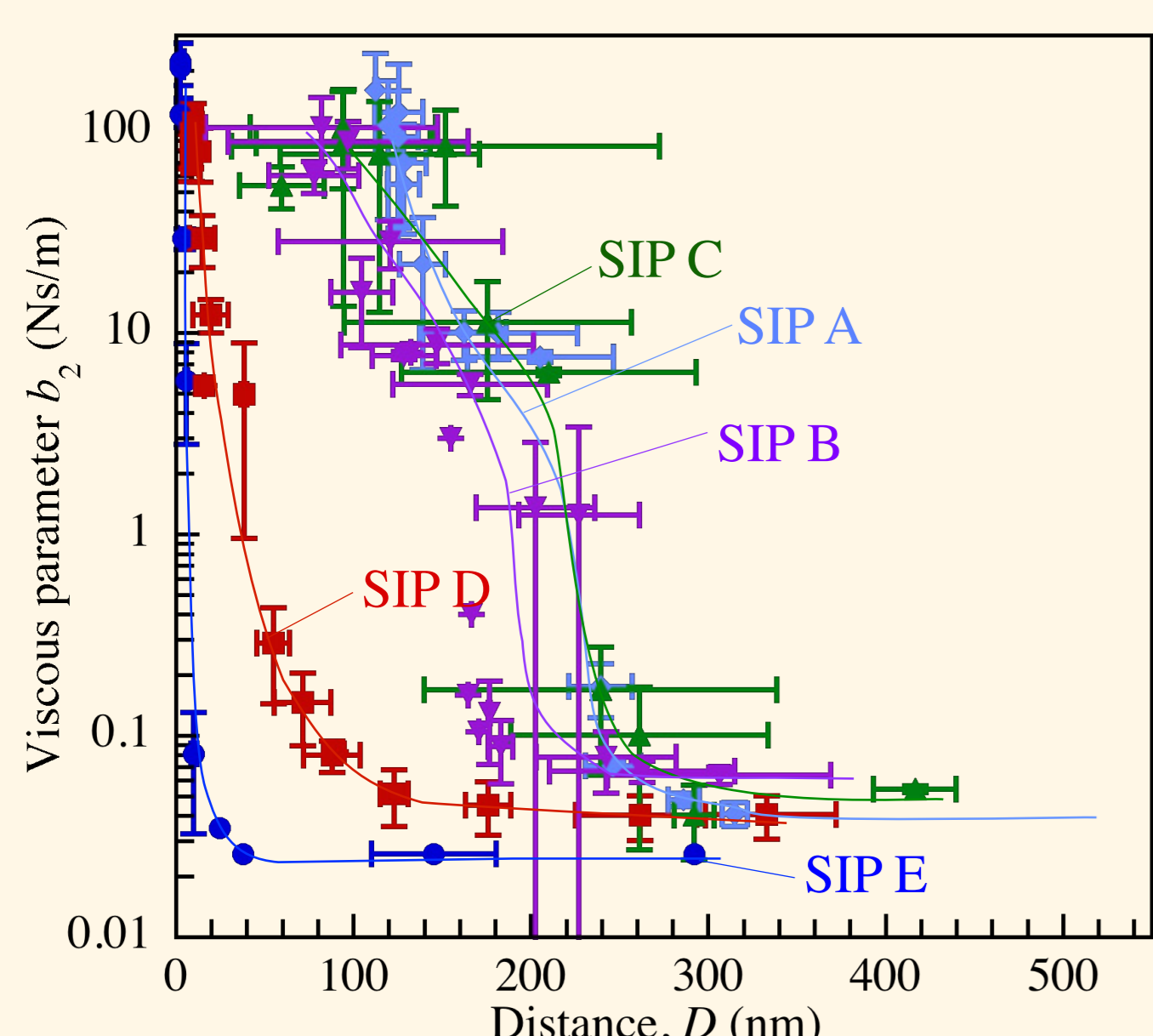
### 共振ずり測定法により評価したSIP基準油

オイル名	SIP-A	SIP-B	SIP-C	SIP-D	SIP-E	SIP-B2	SIP-B3
SAE粘度グレード	OW-8	OW-8	OW-8			OW-8	OW-8
備考	Full Formulation		基油+VM	基油	Full Formulation		
基油	鉱油 KV100=3.5 mm <sup>2</sup> /s	○	○	○	○	○	○
粘度指数向上剤VM	ポリメタクリレート系VM	○	○	○	○	○	○
耐摩耗剤	ZnDTP (セカンダリタイプ)	○	○	○	○	○	○
金属系清浄剤	過塩基性Caサリチレート	○	○	○	○	○	○
無灰系分散剤	高分子ビスイミド	○	○	○	○	○	○
酸化防止剤	アミン系A0、及びフェノール系A0	○	○	○	○	○	○
摩擦調整剤	MoDTC	○	○	○	○	○	○
	グリセロールモノオレート (GMO)						
消泡剤	シリコン	○	○	○	○	○	○

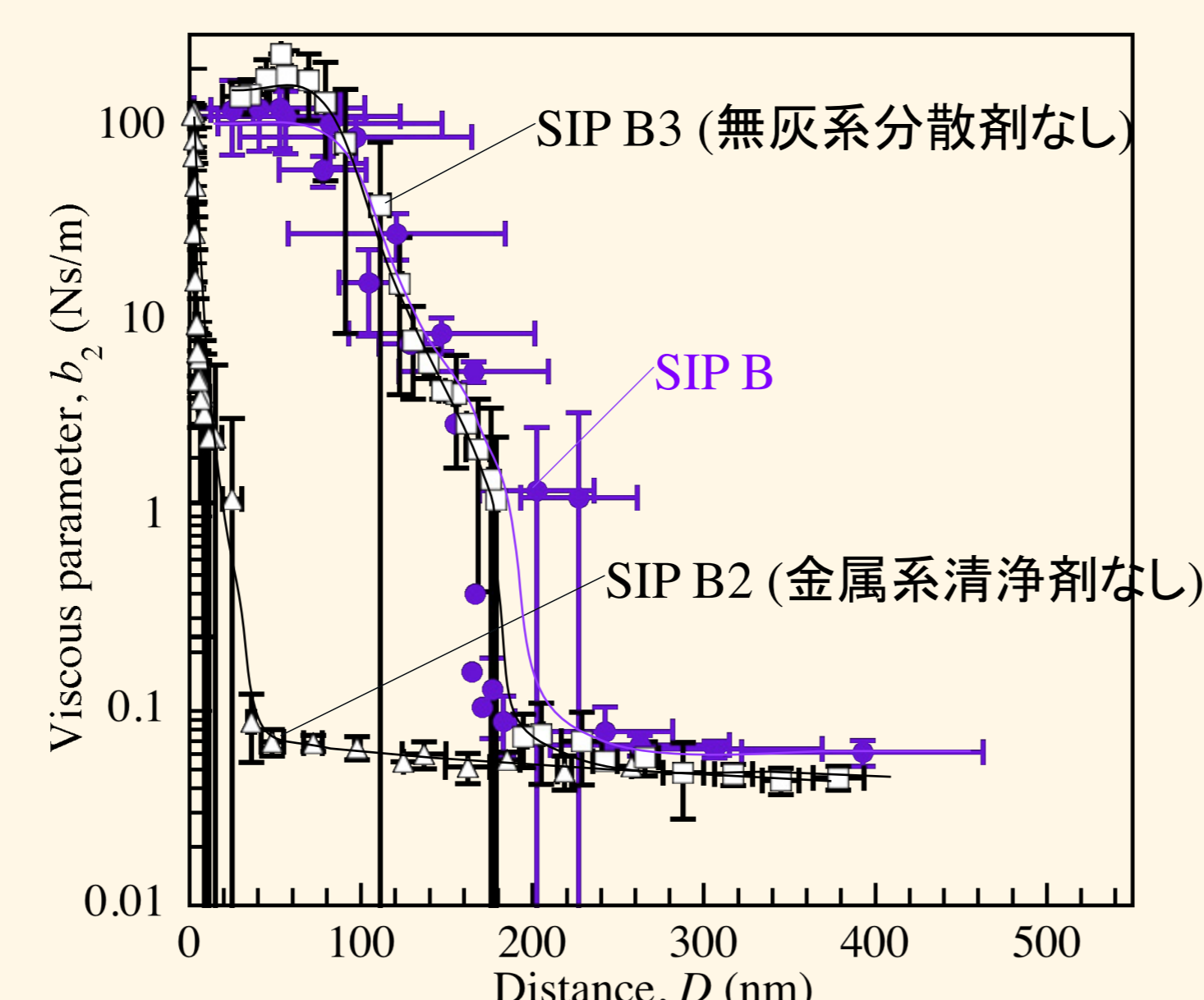
### SIP基準油の共振カーブ: SIP E, A, B



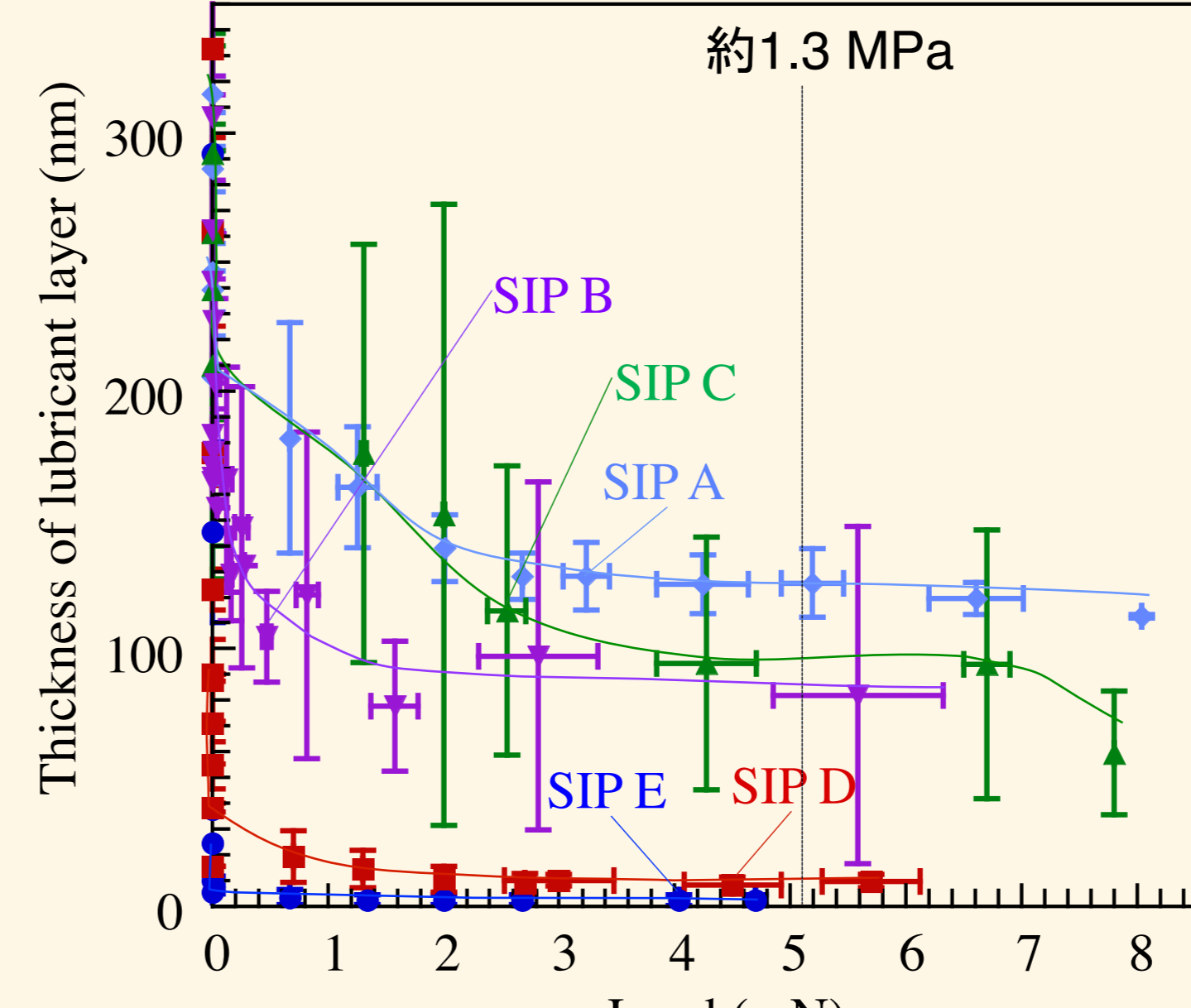
### 粘性 vs 表面間距離 (油膜厚さ): SIP A-E



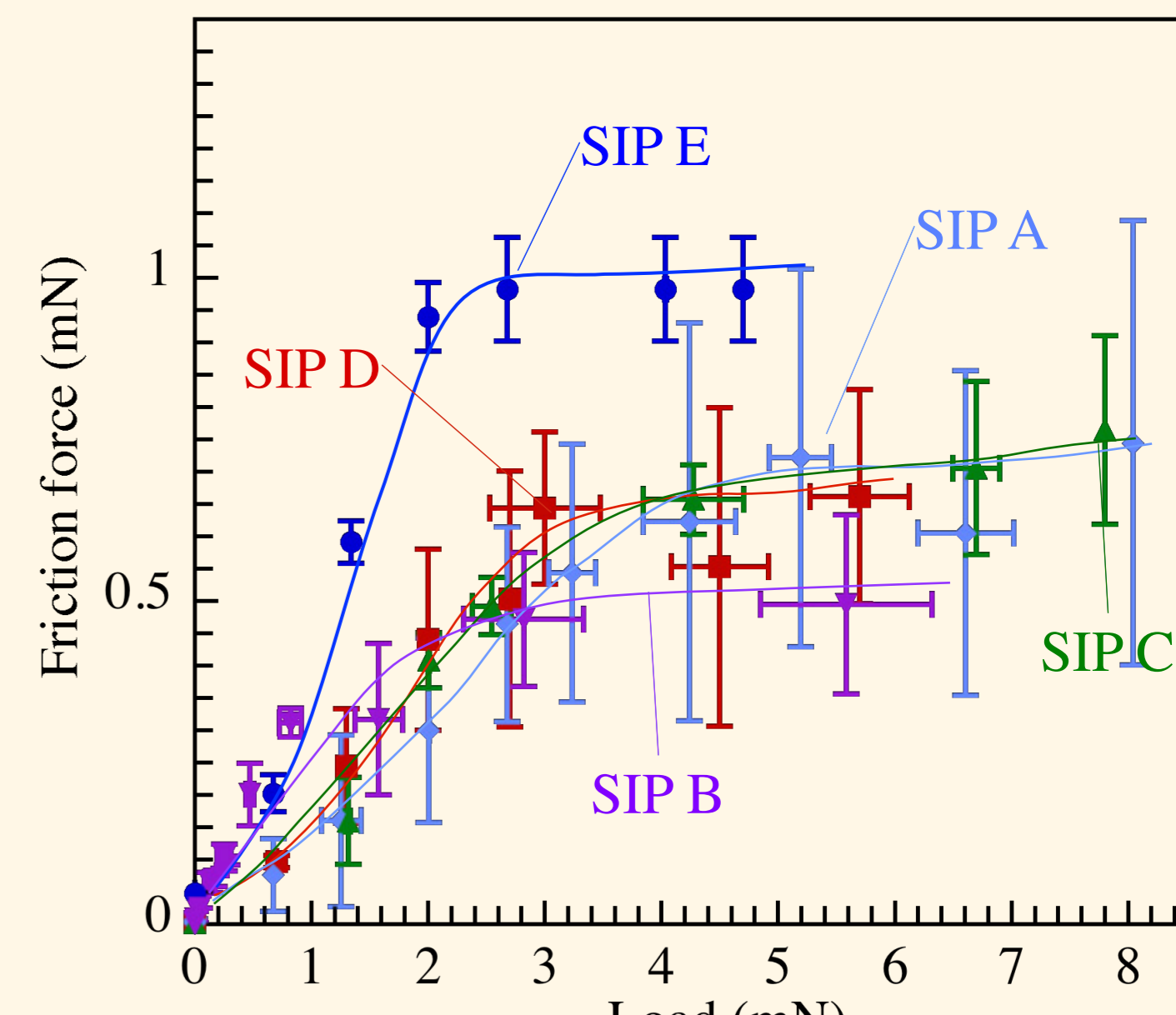
### 粘性 vs 表面間距離 (油膜厚さ): SIP B, B2, B3



### 表面間距離 (油膜厚さ) vs 荷重: SIP A-E



### 摩擦力 vs 荷重: SIP A-E



粘性係数  $b_2$  の表面間距離 (油膜厚さ) 依存性

粘度が増大し始める距離

SIP-E < SIP-D < SIP-A < SIP-B < SIP-C

約25.0 nm 約110 nm 220~270 nm

高分子由来 SIP-A, B, Cの共通成分由来

粘性係数  $b_2$  の表面間距離 (油膜厚さ) 依存性

粘度が増大し始める距離

SIP-B2 < SIP-B3

約50 nm 220~270 nm

金属系清浄剤に由来する

荷重 5 mN, (平均面圧 1.3 MPa) での油膜厚さ

- SIP-E: 3.6 ± 0.6 nm
- SIP-D: 9.9 ± 2.5 nm
- 高分子が表面間に残るため
- SIP-A, B, C: 80 ~ 110 nm でほぼ一致
- 共通の添加剤成分が表面に残る

摩擦力への添加剤成分の効果

- 粘度指数向上剤のみ添加した SIP-D で、基油のみの SIP-E と比べて摩擦力が半減
- 摩擦調整剤など、他の成分による潤滑効果はほとんどみられず

## まとめ

- 粘度指数向上剤のみ添加の SIP-D で、摩擦が半減 → 高分子による摩擦低減効果
  - 他の添加剤による摩擦低減効果はみられず
  - 200 nm 以上の距離からの粘度上昇は金属系清浄剤に由来
- ナノ計測により得られた知見を元にして効果を検討することで、添加剤の量、種類を減らせる可能性が示された。

	SIP E	SIP D	SIP A	SIP C	SIP B
粘性係数 ( $b_2$ ) 増大距離 (nm)	ca. 40	ca. 120		220~280	
油膜厚さ (nm) @ 1.3 MPa	ca. 4	ca. 10	ca. 120	ca. 90	ca. 90
摩擦係数, $\mu$ (荷重範囲)	0.45 ( $\leq 2$ mN)	0.20 ( $\leq 3.4$ mN)	0.17 ( $\leq 3.7$ mN)	0.19 ( $\leq 3.7$ mN)	0.18 ( $\leq 0.8$ mN)