

# 液体薄膜の濡れ広がり測定と分子相互作用圧力測定による ナノすきま潤滑油のすきま方向粘度分布の推定

Estimation of Viscosity distribution in Gap Direction at Nano-gaps  
by Measuring Spreading of Liquid Thin Films and Molecular Interaction Pressure

名大・工（学）\*芝 翔大 名大・工（正）福澤 健二 名大・工（正）SONG YUXI

名大・工（学）東 直輝 名大・工（正）伊藤 伸太郎 名大・工（正）張 賀東

Shota Shiba, Kenji Fukuzawa, Song Yuxi, Naoki Azuma, Shintaro Itoh, Hedong Zhang

Nagoya University

## 1. はじめに

加工技術の進歩によりしゅう動すきま微小化が可能となり機械性能の革新が期待されている。流体潤滑が機能しないナノすきまの潤滑技術として、しゅう動面上の添加剤吸着膜と潤滑油の潤滑作用により摩擦力を低減させる混合潤滑技術の確立が望まれているが、添加剤・潤滑油・しゅう動面の相互作用の複雑さとナノすきまの計測の困難さから、技術の体系化は十分でない。とくに吸着膜を含む潤滑系では、しゅう動すきま内部の潤滑剤の粘度は様でなく、しゅう動面からの高さ  $z$  の関数  $\eta(z)$  となる。これに対して、高さ（すきま）方向の粘度関数  $\eta(z)$  を仮定して動圧や粘性摩擦力の計算がなされており、粘度関数  $\eta(z)$  により大きく異なることが理論的に示されている<sup>1), 2)</sup>。

しかし、粘度関数  $\eta(z)$  は、しゅう動すきま内部の粘度の高さ方向の分布であり、かつすきま（油膜厚さ）はナノオーダーであることからその測定は容易ではない。従来の粘度測定では、潤滑液体をしゅう動し発生する粘性摩擦力を測定するため、しゅう動面からの高さ方向に平均した粘度しか得られない。このように、ナノしゅう動すきま内部の潤滑剤の粘度関数  $\eta(z)$  を定量化する方法は確立していない。

本研究では、混合潤滑の学術体系の基盤構築に向けて、固体面上を流動するナノ厚さ潤滑剤薄膜の膜厚測定と分子相互作用圧力（分離圧）測定によりすきま内部の粘度関数  $\eta(z)$  を求める方法を提案することを目的とした。

## 2. ナノ厚さ潤滑剤膜のすきま内部の粘度 $\eta(z)$ の定量化法

添加剤を含む潤滑剤のしゅう動すきま内部の粘度関数  $\eta(z)$  は、添加剤が吸着したしゅう動面近傍で高く、しゅう動面から離れると吸着膜の影響のない基油の粘度となる。そこで Fig. 1 のように上下のしゅう動固体面上のナノ厚さ潤滑剤膜の粘度  $\eta_U(z)$ ,  $\eta_L(z)$  を求め、潤滑油の粘度  $\eta_0$  となる高さでこれらを接続し、しゅう動すきま内部の粘度関数  $\eta(z)$  を求める。

Figure 2 のように、固体面上の一部だけにナノ厚さ潤滑剤膜を形成する。ナノ厚さ潤滑剤膜の端部は固体面が露出した部分へ濡れ広がっていく。この流動していく潤滑剤膜の膜厚  $h(x, t)$  を測定して、ナノ厚さ潤滑剤膜の内部の高さ方向の粘度関数  $\eta(z)$  を得る。流量  $q$  と圧力勾配  $\partial P / \partial x$  の関係は、

$$q(h) = \varphi(h) \frac{\partial P}{\partial x} \quad (1)$$

ここで

$$\varphi(h) = \int_0^h f_1(z) dz - h \int_0^h f_0(z) dz. \quad (2)$$

関数  $f_0(z), f_1(z)$  は、粘度関数  $\eta(z)$  を  $z$  で積分した以下の関数である。

$$f_0(z) = \int_0^z \frac{1}{\eta(z')} dz', \quad f_1(z) = \int_0^z \frac{z'}{\eta(z')} dz'. \quad (3)$$

式(2)の  $\varphi(h)$  を  $h$  について3階微分すると、 $h$  を変数とした粘度  $\eta(h)$  が得られる。

$$\eta(h) = -\frac{2}{\left(\frac{\partial^3 \varphi(h)}{\partial h^3}\right)}. \quad (4)$$

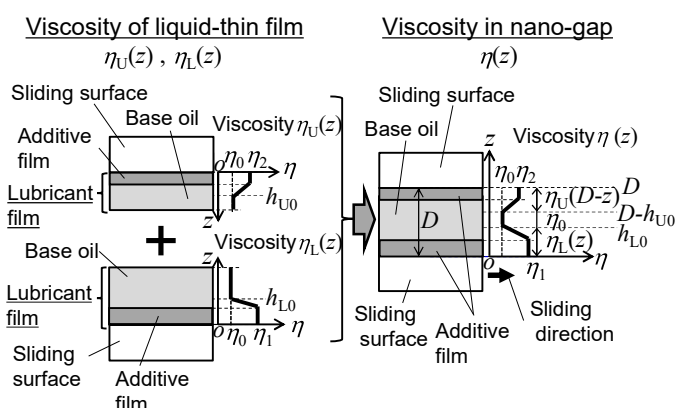


Fig. 1. Evaluation of viscosity inside sliding gap  $\eta(z)$  by using viscosities of nano-thick lubricant film of  $\eta_U(z)$ ,  $\eta_L(z)$ .

すなわち、流動するナノ厚さ潤滑剤膜について、式(1)の  $\varphi(h)$  を測定すれば、式(4)を用いて粘度  $\eta(h)$  が得られる。Figure 2 から  $\eta(h)$  は高さ  $z=h$  の粘度なので、求める  $\eta(z)$  は、 $\eta(h)$  の変数を  $z$  にしたものである。

式(1)の  $\varphi(h)$  は、Fig. 3 に示した手順で流動膜厚  $h(x, t)$  から求める。流量  $q$  は  $\partial h / \partial t$  から得る。連続の式  $\partial h / \partial t = -\partial q / \partial x$  (出入りした流量に対応して膜厚が変化する) から、以下で与えられる。

$$q(h) = -\int_x^{x_0} \frac{\partial h}{\partial t} dx \quad (5)$$

ここで  $x_0$  は  $\partial h / \partial t \approx 0$  となる点 (Fig. 2) で、式 (5) より  $\partial h / \partial t$  から式(1)の  $q$  が得られる。

式(1)の圧力勾配  $\partial P / \partial x$  について、ナノ厚さの潤滑剤膜の流動について支配的な圧力は、固体面との分子間相互作用 (ファンデルワールス) 圧力 (分離圧)  $P$  で、 $P = A / (6\pi h^3)$  ( $A$  はハマカー定数) で与えられるため<sup>3)</sup>、 $P$  は  $h$  の関数で勾配  $dP/dh$  が得られる。 $\partial P / \partial x = (dP/dh) \times (\partial h / \partial x)$  により、 $dP/dh$  を用いると、 $\partial h / \partial x$  から  $\partial P / \partial x$  が得られる。なお、ハマカー定数  $A$  は、分離圧  $P$  と外部から印加した静水圧のつり合いを用いた方法で実測し<sup>4)</sup>、事前に  $dP/dh$  を求める。

以上、Fig. 3 のように、まず流動膜厚  $h(x, t)$  を測定し、 $\partial h / \partial t$  から  $q$  を、事前に取得した  $dP/dh$  を使って  $\partial h / \partial x$  から  $\partial P / \partial x$  を得る。そして、これらから式(1)の  $\varphi(h)$  を求め、式(4)を用いて粘度  $\eta(h)$  すなわち  $\eta(z)$  を得る。

### 3. 試料と実験方法

#### ・試料

本研究では、提案する測定法の原理検証として、基油のみの試料とした。基油はシリコンオイルを用いた。ディップ法により nm 厚さの液体薄膜を成膜した。シリコンオイルをヘキサンで希釈した溶液に、基板となるシリコンウェハ断片の一部を浸漬した。その後、調整した速度で引き上げることで、ナノ厚さ液体薄膜を形成した。

#### ・実験方法

ナノ厚さのシリコンオイル膜端部周辺において、試料各点の流動膜厚  $h(x, t)$  を走査型エリプソメータを用いて測定した。そして、Fig. 3 の手順で、事前に求めた  $dP/dh$  を用い、シリコンオイル薄膜内部の粘度関数  $\eta(z)$  を定量化した。

### 4. 実験結果

シリコンオイル薄膜を用いて、提案した粘度関数  $\eta(z)$  の定量化法を検証した。 $\eta(z)$  の測定が原理的に可能であることを確認できた。しかし、精度向上にはナノ厚さ液体薄膜の作製法などに改良の必要があることが明らかになった。

### 5. おわりに

ナノ厚さ潤滑剤膜の流動膜厚測定によりすきま内部の粘度関数  $\eta(z)$  を求める方法を提案し、原理的可能性を確認できた。

### 謝辞

この研究の一部は JSPS KAKENHI 24K00787 の支援の下実施された。ここに謝意を表する。

### 文献

- 1) Q. Qingwen, W. Mei, C. Shan, Y. Fusheng: Velocity analysis for layered viscosity model under thin fillubrication, *Tribology International*, 34, (2001) 517.
- 2) K Ono: Modified Reynolds equations for thin film lubrication analysis with high viscosity surface layers on both solid surfaces and analysis of micro-tapered bearing, *Tribology International*, 151 (2020) 106515.
- 3) J. N. イスラエルアチヴィリ (大島広行訳): 分子間力と表面力 第3版, 朝倉書店 (2012) 212.
- 4) T. Matsukawa, Y. Saitoh, K. Fukuzawa, S. Itoh, N. Azuma, H. Zhang: Thickness control method for nm-thick liquid with micro fluidic device using balance between intermolecular interaction force and applied pressure, *JSME-IIP/ASME-ISPS Joint MIPE2022* (2022).

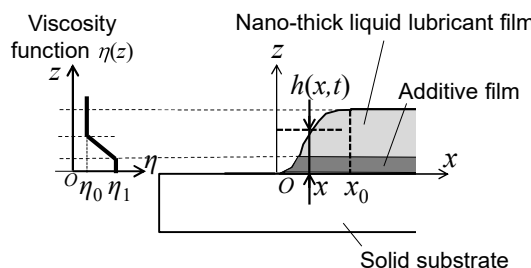


Fig. 2. Spreading of nano-thick liquid lubricant film.

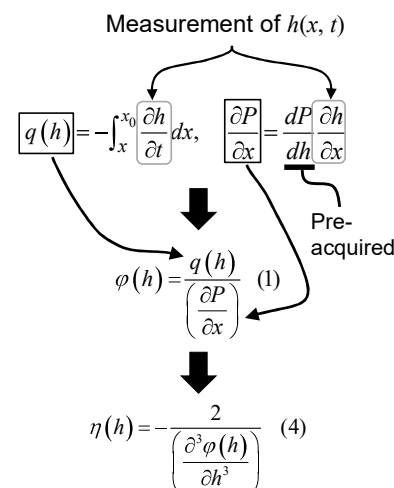


Fig. 3. Evaluation procedure of viscosity function  $\eta(z)$ .