

分子オーダの弾性流体潤滑膜厚さ に関する研究

1B16

(第3報 流体構造力を考慮した EHL 理論)

東大・院 (学) * 松岡広成
東大・工 (正) 加藤孝久

1. はじめに

本報では、流体潤滑理論に構造力を組み込み、第1報で述べた実験結果と比較する。第2報で見たとおり、固体は構造力により弾性変形を起こすと考えられるため、流体潤滑理論として EHL 理論を用いる。また、分子オーダの膜厚においてはファンデルワールス力も作用すると考えられるため、ファンデルワールス力による圧力も考慮する。

2. 薄い液体膜で隔てられた 2面に働く圧力

従来の EHL 理論では、弾性方程式とレイノルズ方程式とを連立して膜厚分布および圧力分布を求めている。しかし、第1報において、膜厚が非常になくなると実験値がこの理論からずれることを示した。これは構造力の影響であると考えられるため、上で述べたように、構造力による圧力を考慮した EHL 理論が必要となる。また、非常に小さな膜厚(数 nm 程度)の場合、固体表面間のファンデルワールス力による圧力(ファンデルワールス圧力と呼ぶ)も考慮しなければならない。そこで、本研究では、圧力 p が構造圧力 p_s とファンデルワールス圧力 p_{vdW} および粘性圧力 p_h から成り立っていると考える。つまり、

$$p = p_s + p_{vdW} + p_h \quad (1)$$

として圧力 p を計算し、弾性方程式と連立させる。構造圧力については第2報で述べた3つのモデルを用いて計算し、結果を比較する。

3. ファンデルワールス圧力

Fig.1のように、物質1が媒体3を隔てて相互作用している場合のファンデルワールス圧力 p_{vdW} には次式を用いた^[1-5]。

$$p_{vdW} = -\frac{dW_{vdW}}{dh}, \quad W_{vdW} = -\frac{A_{131}}{12\pi h^2} \quad (2)$$

ここで、

$$A_{131} = -\frac{3}{2}k_B T \sum_{n=0}^{\infty} \int_{r_n}^{\infty} x \left\{ \ln(1 - \Delta_{13}^2 e^{-x}) + \ln(1 - \bar{\Delta}_{13}^2 e^{-x}) \right\} dx$$

$$\Delta_{jk} = \frac{\epsilon_j s_k - \epsilon_k s_j}{\epsilon_j s_k + \epsilon_k s_j}, \quad \bar{\Delta}_{jk} = \frac{s_k - s_j}{s_k + s_j}, \quad s^2 = x^2 + \left(\frac{2\xi_n h}{c} \right)^2 (\epsilon_k - \epsilon_3)$$

$$r_n = \frac{2h\xi_n \sqrt{\epsilon_3}}{c}, \quad \xi_n = \frac{2\pi n k_B T}{\hbar}, \quad \epsilon_k = \epsilon_k(i\xi_n), \quad \hbar = \frac{h_p}{2\pi}$$

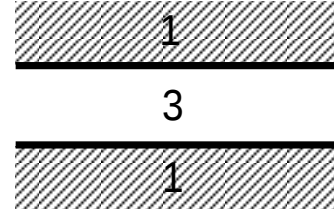


Fig.1 Surface interaction between planes

$$\epsilon_k(i\xi_n) = \begin{cases} 1 + \frac{n_k^2 - 1}{1 + \xi_n^2/\omega_k^2} & (\text{for } \xi_n > 0) \\ \epsilon_{k0} & (\text{for } \xi_n = 0) \end{cases}$$

である。ただし、 h :2面間距離、 c :光速、 h_p :プランク定数、 n_k :屈折率、 ω_k :吸収振動数、 ϵ_{k0} :誘電率である。

4. EHL 計算

本研究では、球面と平面の点接触 EHL 計算を行う。通常の EHL では、レイノルズ方程式と弾性方程式を連立して解く。この解法としては様々なものが提案されている^[6-9]が、本研究では Hamrock and Dowson による ϕ -solution により数値計算を行うことにした^[6]。これによるレイノルズ方程式の差分化および境界条件、初期条件については、文献[6]に詳しいので本報では省略する。また、ヘルツの接触円半径で無次元化した単位長さあたりの格子点数は X, Y 方向とも10とし^[10]、緩和法による収束条件は Jang ら^[11]のそれに準じた。また、著者らが第1報で行った実験と比較するには、R-I 領域における計算をもカバーしなくてはならないため、 X 方向の流入領域および Y 方向について計算領域を大きくした(X, Y とも50以上)。密度 - 圧力関係および粘度 - 圧力関係は Hamrock ら^[6]のそれに従った。以上で式(1)における圧力 p の要素全てを求める準備が整った。なお、ファンデルワールス圧力と構造圧力については、計算にかなりの時間を要するので、2面間距離 h に対する各圧力をあらかじめ求めてデータファイルに保存しておき、このデータを読み込んで線形補間により計算することにした。

式(1)における圧力が求まると、固体の弾性変形が弾性方程式から求まる。弾性方程式の離散化につい

ても文献 [6] に詳しいのでここでは省略する。また、弾性変形計算は非常に計算時間を必要とするので、圧力が高いと考えられるヘルツ接触円近傍に限った ($X = \pm 3, Y = \pm 3$ の範囲)。

プログラミングに使用した言語は UNIX マシン上の C 言語で、計算に使用したマシンは HP apollo Series 735 である。本研究で製作したプログラムを用いて構造圧力とファンデルワールス圧力をそれぞれ 0 とおいて粘性圧力のみで計算したところ、過去の計算結果とほぼ一致する結果が得られることが確認されている。なお、プログラムのフローチャートについては、文献 [6-10] に詳しいので本報では省略する。また、本研究で用いた固体および液体試料の物性値は、文献 [2], [12-14] に詳しい。

5. 計算結果

まず、OMCTS についての計算結果を示す。Fig.2 は、膜厚と圧力分布の計算結果の例である。用いた構造力モデルは著者らの提案したものである(第2報参照)。レイノルズ方程式を解いたときに現れる通常の粘性圧力に構造力が重畳しているのがわかる。

Fig.3 は Jang and Tichy のモデルを組み込んだときの流体力 (負荷荷重) F と膜厚 h の関係を表したものである。黒い点は実験値 (第1報参照)、細い実線は R-I 領域における従来の理論値、破線および一点鎖線はそれぞれ E-I 領域における最小油膜厚さおよび中心油膜厚さ、太い実線は計算結果である。これより、Jang and Tichy モデルで求めた膜厚は、膜厚が小さくなると従来の潤滑理論からずれはじめ、階段状の変化を示すことがわかる。また、その間隔は約 1 nm である。これらのことは定性的に実験結果と一致するが、実験による膜厚変化とは位相がずれていることがわかる。また、非常に小さな膜厚において流体力が非常に大きくなる。これは、Chan and Horn らの C_s の求め方に起因する部分が大いと考えられる。というのも、彼等の計算では剛体球が相互作用していると考えているが、実際には第2報で述べたように固体表面は弾性変形しており、この影響を考慮していないため、 C_s を過大評価していると考えられる。また、Jang and Tichy の原論文^[11]では Fig.3 のような階段状の膜厚変化は報告されていない。これは、彼等の計算条件では粘性圧力が非常に大きく構造力の影響が小さいこと、さらに、階段状の結果を得るには流体力を小さく変化させて計算を多く行わなければならないが、彼等の計算ではまばらなデータ点しかとっていないことが原因であると考えられる。

次に、Chan and Horn モデルについて計算を行った結果が Fig.4 である。この場合、位相はずれていない

が、やはり膜厚の小さい部分で流体力が非常に大きくなるのがわかる。

これらのことから考えて、Jang and Tichy モデルおよび Chan and Horn モデルは、本研究で扱うような分子オーダの流体潤滑膜厚さに関して定性的にはある程度の予測をたてることができるが、定量的な評価はできないことがわかる。さらに、定数 C_s の測定が困難であるため、このモデルを計算に用いるのは非常に難しい。

Fig.5 は Ornstein-Zernike 方程式を組み込んだ本理論 (第2報参照) から求めた流体力と膜厚の関係である。この場合、1~2 nm の膜厚でやはり大きな膜厚を示すが、全体的に定性的のみならず、定量的にも十分に実験結果と一致していることがわかる。

さらに、本計算は他の構造力の強い液体に対しても有効であると考えられるため、シクロヘキサンに対する計算も行った。これを Fig.6 に示す。これからわかるとおり、本計算はシクロヘキサンの場合にも実験結果とよく一致することがわかる。

これらのことから、本計算は、OMCTS やシクロヘキサンのように構造力の強い液体を用いた場合の分子オーダの流体潤滑膜厚さを計算するのに有効であることがわかる。(ちなみに、ノルマルヘキサデカンについては本計算結果は実験値と一致しない。) なお、Fig.3~6 を得るために要した計算時間はそれぞれ 10~15 日である。

6. おわりに

本報では、構造力を EHL 理論に組み込み、実験結果と比較した。その結果、著者らが提案した構造圧力モデルによる計算結果は実験値とよく一致することがわかった。

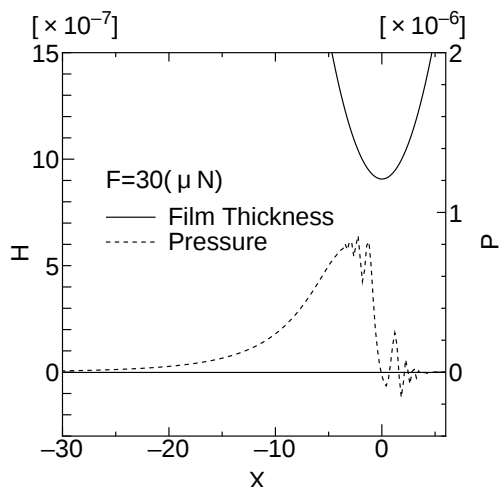


Fig.2 Film thickness and pressure distribution

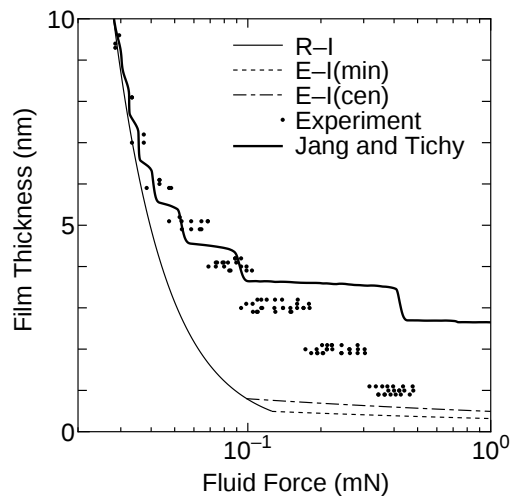


Fig.3 Calculation result (OMCTS, Jang and Tichy)

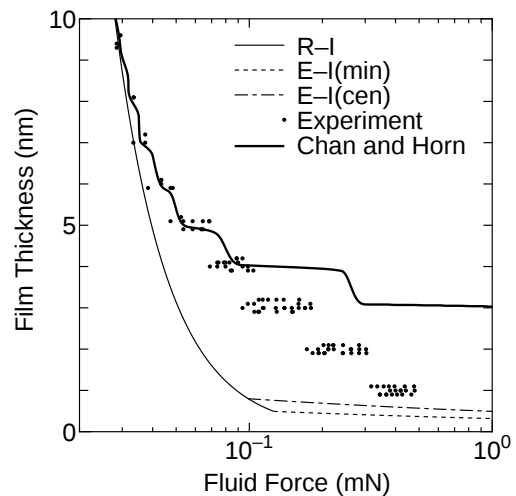


Fig.4 Calculation result (OMCTS, Chan and Horn)

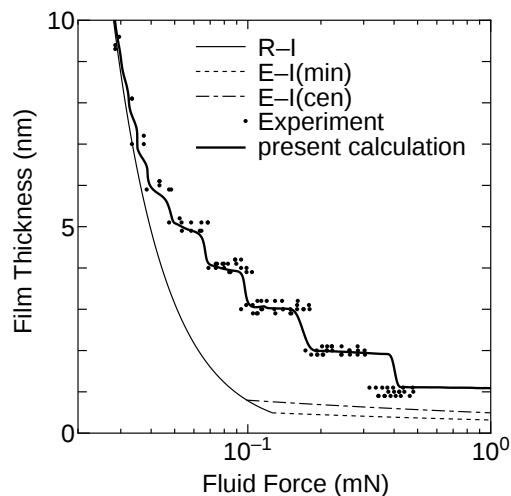


Fig.5 Calculation result (OMCTS, present model)

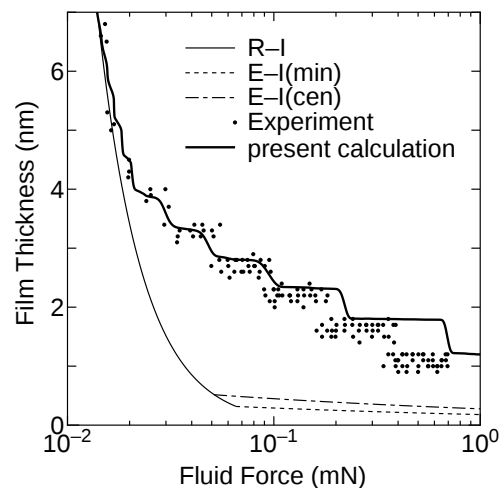


Fig.6 Calculation result
(cyclohexane, present model)

参考文献

- [1] 松岡広成、加藤孝久, トライボロジー会議予稿集, 1995-5, pp. 445.
- [2] 松岡広成、加藤孝久, トライボロジストに掲載予定 (1996年5月号).
- [3] J. N. Israelachvili, Intermolecular and Surface Forces, 2nd edition, Academic Press, 1992.
- [4] D. C. Prieve and W. B. Russel, J. Colloid Interface Sci., Vol. 125, 1988, pp. 1.
- [5] J. N. Israelachvili, Proc. Roy. Soc., A, Vol. 331, 1972, pp. 39.
- [6] B. J. Hamrock and D. Dowson, Trans. ASME, J. Lub. Tech., Vol. 98, 1976, pp. 223.
- [7] H. P. Evans and R. W. Snidle, Trans. ASME, J. Lub. Tech., Vol. 103, 1981, pp. 547.
- [8] J. F. Lin and H. Y. Chu, Trans. ASME, J. Trib., Vol. 113, 1991, pp. 12.

- [9] C. H. Venner and W. E. ten Napel, Wear, Vol. 152, 1992, pp. 351.
- [10] R. J. Chittenden, D. Dowson, J. F. Dunn and C. M. Taylor, Proc. Roy. Soc. London, A, Vol. 397, 1985, pp. 245.
- [11] S. Jang and J. A. Tichy, Trans. ASME, J. Trib., Vol. 117, 1995, pp. 22.
- [12] H. Matsuoka and T. Kato, "Discrete Nature of Ultrathin Lubrication Film Between Mica Surfaces," Trans. ASME, J. Trib., to be published.
- [13] H. Matsuoka and T. Kato, "An Ultrathin Liquid Film Lubrication Theory - Part 1. Calculation Method of Solvation Pressure and Its Application to the EHL Problem," submitted to Trans. ASME, J. Trib.
- [14] H. Matsuoka and T. Kato, "An Ultrathin Liquid Film Lubrication Theory - Part 2. Comparison of Solvation Pressure Models," submitted to Trans. ASME, J. Trib.